

神奈川県立博物館
研究報告
自然科学27号

神奈川県立 生命の星・地球博物館

平成10年 3 月

目 次

総説

小出良幸：生命の起源—宇宙生物学へのアプローチ—	1
山下浩之・小出良幸：マントル内での炭素の相平衡	31
中村一恵：ニホンオオカミの分類に関する生物地理学的視点	49
広谷浩子：霊長類におけるメスの親和関係—社会構造とのかかわりを中心に—	61

論説

勝山輝男・鈴木智明：生命の星・地球博物館情報システムについて	67
荻部治紀：北東インドからのサラサヤンマ属の1新種	81
新井田秀一：リモートセンシングによる土地被覆分類—ランドサット/TMによる神奈川県の場合—	85

短報

田中徳久：横浜市保土ヶ谷区のカザグルマ群落について	93
---------------------------	----

資料

奥野花代子：全国の博物館園における視覚障害者の対応に関するアンケート調査結果報告	95
神奈川県立博物館研究報告投稿規定	107

CONTENTS

Review

Yoshiyuki KOIDE, Origin of Lives-Approach to the Cosmic Biology-	1
Hiroyuki YAMASHITA & Yoshiyuki KOIDE, Stability of Carbon Phase in the Mantle	31
Kazue NAKAMURA, A Biogeographic Look on the Taxonomy of the Japanese Wolves, Canis lupus hodophilax Temminck, 1839	49
Hiroko KUDO-HIROTANI, Affiliative relationships among female primates in relation to the social structure	61

Original article

Teruo KATSUYAMA & Tomoaki SUZUKI, Museum Information System in Kanagawa Prefectural Museum of Natural History	67
Haruki KARUBE, A New Species of the Genus <i>Oligoaeschna</i> (Odonata, Aeshnidae) from Northeast India	81
Shuichi NIIDA, Land Cover Map by Remote Sensing : In the case of Kanagawa area by LANDSAT/TM	85

Short article

Norihisa TANAKA, A note on <i>Clematis patens</i> community in Hodogaya-ku, Yokohama	93
--	----

Note

Kayoko OKUNO, A Preliminary Study on Museum Management for People with disabilities in Japan	95
--	----

Instructions to authors	107
-------------------------	-----

総説

生命の起源—宇宙生物学へのアプローチ—

Origin of Lives - Approach to the Cosmic Biology -

小出良幸

神奈川県立生命の星・地球博物館

Yoshiyuki Koide

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract. Recently, some new scientific attainments on the origin of the life are reported. They led to an important discussion on the nature of life. The life, in this paper, means the whole living existence which indicates both terrestrial organisms and extra-terrestrial organisms, and both present organisms and fossil organisms. The origin of life should be revealed by the wide scientific fields such as astronomy, planetary science, meteorite science, geology (paleontology), organic synthetic science, terrestrial biology. I extracted the achievement on the life's origin from these fields, and reviewed them.

Key Words : Origin of lives, Terrestrial organisms, Cosmic biology

I はじめに

「生命が地球固有である」ということを論理的に証明することは非常に難しい。否定するには一つの反例があればよい。生命は「地球固有」でなく、「宇宙生命の多様性の一つ」であるという考えの研究者も多い。「宇宙における生命の多様性」を発見する試みがことごとく失敗していく中で、「地球固有」というあきらめに似た定説ができつつあった。

1996年8月、その定説を覆すような発見があった。火星起源隕石から生命の痕跡（化石）らしきものが発見されたのである（McKay et al., 1996）。その報告の真偽は、今も研究者の間で議論が続いている。「いる」か「いないか」のどちらかに決着するとしても、非常に大切な議論を起こす起爆剤となった。

一方、地球生命に関してもいくつかの重要な発見があった。今まで地球最古の生物化石とされていた35億年前の生物化石より3億年も古い生命の痕跡が発見のである（Mojzsis et al., 1996）。生命をいかに定義するか、いかに検出するかなど重要な議論を起こした。

McKey らの論文も Mojzsis らの論文も、最新の分析装置の発達に負うことが大きい。微小部分における高精度の同位体組成測定による新知見に基づいたものである。技術の進歩によって、より古い生命の発見や、今まで全く知られなかった生命を発見できる可能性を示したのである。2つの報告で、より生命の根源に迫る議論が起ってきた。

このような論文によって、「生命とは何か」、「生命を

いかに定義するか」、「生命の認定法」などが再検討されるようになってきた。しかし、基礎としているのは、地球生物学である。地球生物学をより一般化して宇宙生物学へと変換するには、生命の根源を知る必要がある。本論文では、エポック・メイキングな論文とその周辺の議論をまとめ、あわせて生命の起源に関する各分野の研究の方法と、最近の動向をまとめる。

II アプローチの方法

生命が、地球外からもたらされたという考えもある。しかし、その生命はどこで発生したかという、「鶏と卵とどちらが先か」のような堂々めぐりの議論が始まりかねない。地球で生命が発生し得ないということが証明されてから、議論すべきテーマであろう。一般には、ある天体の生命は、その天体で独自に発生、発達したという考え方にに基づき、研究が進められるべきであろう。

アプローチの方法として、天文学的アプローチ、惑星科学的アプローチ、隕石学的アプローチ、地質学的アプローチ、合成実験的アプローチ、地球生物学的アプローチに大分される。

天文学的アプローチとは、太陽系外の天体に生命の有無を調べることである。しかし、現状では生命の有無よりも、生命が存在しうる環境（材料物質の有無や惑星の有無）を探索したり、知的生命の存在の有無を調べている。

惑星科学的アプローチは、太陽系内で生命の有無を調べるものである。遠くの天体では望遠鏡や探査機による

表 1 有機物の一覧

地球**核酸塩基**

アデニン、クアニン、シトシン、チミン、ウラシル

アミノ酸

グリシン、アラニン、バリン、ロイシン、イソロイシン、メチオニン、プロリン、フェニルアラニン、リプトファン、セリン、トレオニン、システイン、チロシン、アスパラギン、グルタミン、アスパラギン酸、グルタミン酸、リジン、アルギニン、ヒスチジン

糖質

グリセルアルデヒド、ジヒドロキシアセトン、キシロース、グルコース、フルクトース、マンノース、ガラクトース、フコース、グルクロン酸、イズロン酸、グルコサミン、ガラクトサミン、N-アセチルグルコサミン、N-アセチルガラクトサミン、N-アセチルムラミン酸、N-アセチルノイラミン酸、グリセロール、イノシトール、ショ糖、麦芽糖、乳糖、セロビオース、トレハロース、アミロース、セルロース、キチン、ヒアルロン酸、コンドロイチン 6 硫酸、ケラタン硫酸、ヘパリン

脂肪酸

ラウリン酸、ミリスチン酸、パルミチン酸、ステアリン酸、オレイン酸、リノール酸、リノレン酸、アラキドン酸

隕石**核酸塩基**

アデニン、クアニン、ピボキサンチン、ウラニル、チミン

核酸塩基誘導体

4-ヒドロキシピリミジン、4-ピロキシミチルピリミジン、4-ピロキシ 2-メチルピリミジン、キサンチン

核酸塩基様化合物

メウミン、シアヌル酸、クアニル尿素

アミノ酸

グロシン、アラニン、バリン、プロリン、イソロイシン、ロイシン、β-アラニン、N-メチルグリシン、N-エチルグリシン、N-メチルアラニン、イソバリン、ノルバリン、セリン、アスパラギン酸、グルタミン酸、α-アミノ-n-酪酸、α-アミノ-i-酪酸、β-アミノ-n-酪酸、β-アミノ-i-酪酸、γ-アミノ酪酸、ピペコリン酸、α-アミノアジピン酸、スレオニン、サルコシン、スレオニン、プロリン

カルボン酸

酢酸、シュウ酸、グリコース酸、プロピオン酸、マロン酸、乳酸、酪酸、2-メチルプロピオン酸、イソ酪酸、コハク酸、α-ビドロキシ酸、α-ヒドロキソ酸、吉草酸、2-メチル酪酸、3-メチル酪酸、2,2-ジメチルプロピオン酸、クルタル酸、メチルコハク酸、α-ヒドロキシ吉草酸、α-ヒドロキシイソ吉草酸、α-ヒドロキシ-α-メチル酪酸、ヘキサン酸、2-メチル吉草酸、3-メチル吉草酸、4-メチル吉草酸、2,2-ジメチル酪酸、2,3-ジメチル酪酸、3,3-ジメチル酪酸、2-エチル酪酸、アジピン酸、2,2-ジメチルコハク酸、2,3-ジメチルコハク酸、3-メチルグルタル酸、ヘプタン酸、ヘキサン酸、アクトン酸、オルト-,メタ-,パラ-メチル安息香酸、フェノール、ノナン酸、デカン酸、ウンデカン酸、安息香酸、ドデカン酸、フェニル酢酸

芳香族炭化水素

ナフタレン、ジメチルナフタレン、1-メチルナフタレン、2-メチルナフタレン、2,6-ジメチルナフタレン、1,3-ジメチルナフタレン、ビフェニル、ジフェニルメタン、c-3ナフタレン、アセナフテン、フルオレン、c-4ナフタレン、フェナントレン、アントラレン、メチルフェナントレン、1-メチルフェナントレン、フルオランセン、ピレン

宇宙空間**簡単な水酸化物、酸化物、ハロゲン化合物など**

H₂、HCl、H₂O、N₂O、CO、SiO₂、SO₂、OCS、NH₃、SiH₄、C₂、CH₄、CS、SiS、H₂S、PN、NaCl、AlCl₃、KCl、AlF₃

ニトリル、アセチレン誘導体など

C₃、C₅、C₃O、C₅O、C₄Si、HCN、HC₃N、HC₅N、HC₇N、HC₉N、HC₁₁N、HC₁₃CHO、CH₃CN、CH₃C₃N、CH₃C₅N、CH₃C₇N、CH₃C₉N、CH₃CH₂CN、CH₂CHCN、HNC、HNCO、HNCS、HNCCC、CH₃NC、HCCNC、C₂H₄、C₂H₂

アルデヒド、アルコール、エーテル、ケトン、アミドなど

H₂CO、H₂CS、CH₃CHO、NH₂CHO、CH₃OH、CH₃CH₂OH、CH₃SH、(CH₃)₂CO、HCOOH、HCOOCH₃、(CH₃)₂O、H₂CCO、CH₂NH、CH₃NH₂、NH₂CN、CH₂CC、CH₂CCC、CH₃COOH、H₂C₃、H₂C₄、H₂C₆

環状分子

c-C₃H₂、SiC₂、c-C₃H、c-C₂H₄O

分子イオン

CH⁺、HCS⁺、CO⁺、HCO⁺、HOCO⁺、H₂COH⁺、HCNH⁺、HC₃CH⁺、SO⁺、H₃O⁺、HOC⁺、HN₂⁺、H₃⁺

ラジカル

OH、CH、CH₂、NH、NH₂、HNO、C₂H、C₃H、C₄H、C₅H、C₇H、C₈H、C₆H、CN、C₃N、HCCN、CH₂CN、CH₂N、NaCN、C₂O、NO、SO、HCO、MgNC、MgCN、C₂S、NS、SiC、SiN、CP

地球生命の生体物質は代表的なものだけを示した。隕石中の有機物は、各種の炭素質コンドライトで発見されたものを示した。宇宙空間の有機物は1997年6月までに観測されたものを示した。データは国立天文台(1997)、下山(1987)による。

リーモットセンシングで生命の痕跡を探し、近くの天体では探査機を着陸させ、カメラや検証実験によって生命の有無を確認することが可能である。天文学と惑星科学的アプローチは距離が離れるに従って、情報量が減り、より高度の情報を発信する生命しか捕らえることができない。

隕石学的アプローチは、地球外物質で分析可能な試料あるいは惑星材料物質として隕石の中から生命の材料や痕跡を探すものである。炭素質コンドライトや火星起源隕石はその重要な試料となっている。

地質学的アプローチは、地球生命の起源や進化を過去の地層から探るものである。過去になるほど生命は単純

で硬質部が少なくなるため、保存されにくい。また、初期の生命は単純で有機物の複合も少なく分解されやすい。生命であるという認定は時代が古くなるほど議論を呼ぶ。

合成実験的アプローチは、生命の誕生を再現しようというもので、古くから取り組まれている。その結果、生命の合成まではいっていないが、生命の起源に関してかなり重要な情報が得られている。

地球生物学的アプローチは、いわゆる現在ある生物学からのアプローチである。生物学は現世の生物のメカニズムをある程度明らかにした。しかし、その起源については解明されていない。

Ⅲ 天文学的アプローチ

天文学的に生命の起源を探る試みはいくつかなされている。宇宙空間に生命の材料となるような分子があるかどうかを調べたり、直接地球外の知的生命を探したり、理論的あるいは哲学的なアプローチの仕方がある。

1 宇宙空間の有機物

宇宙空間の主成分は H_2 と He である。しかし、その他の成分も量は少ないながら含まれている。O、C、N など有機物合成に不可欠な成分もある。宇宙線によって分子合成がおこなわれている（西，1984）。多くは低分子量の成分であるが、生命の材料として重要な成分もたくさん発見されてきた（表1）。このような成分から直接生命が合成されることはないであろう。しかし、このような分子の存在は、宇宙空間のような真真空に近い低密度、極低温、低エネルギー状態であっても分子合成が可能であることを示している。生命の材料物質は、特別な元素や特別な物理化学的条件を必要とするものではない。ごくありふれた存在であることを示している。宇宙は生命の材料合成の場として不適ではない。まして、天体上の恵まれた環境では、生命の合成はより有効におこなわれるであろう。

2 地球外生命の探査

1959年9月19日のイギリスの *Nature* 誌に Cocconi & Morrison による「星間通信への模索」という論文が掲載された。この論文で、始めて地球外知的生命について科学的議論がされた。そして1960年春、Ozma 計画で地球外知的生命の探査が実施された。1960年11月1日から2日、Greenbank 天文台で「地球外知的生命体に関する Greenbank 会議」が開催され、研究者が地球外生命に関して真剣な取り組みを始めた。

地球外生命の探査は困難である。遠い天体上での生命活動の有無の探査である。このような探査は、地球上の生命を宇宙から検出できるかどうかという問題に変換できる。酸素の多い大気が生命活動に由来しているのであれば、地球を太陽系内から生命の星として検出することは可能である。しかし、他の恒星の惑星系の大気状態は、今の技術では知ることができない。他の恒星の惑星系の存在がやっと検出できるようになったにすぎない（井田，1997）。

地球外の生命よりも、文明を持つ知的生命を探すこと

が現在の主要な探査のテーマとなっている。地球外文明は、太陽系にはないので、太陽系外の天体での探査となる。地球外文明の探査は、地球外生命よりもっと少ない数の探査になる。しかし、探査は比較的効率が良いはずである。それは、電波による人工の信号を検知すればよいからである。

地球外知的生命を ET または ETI (Extra-Terrestrial Intelligence) と呼んでいる。このような ET を探査する研究分野を SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) という。UFO (Unidentified Flying Object) や SETI はかつては空想のエセ科学のようなとらえ方をされていたが、今ではれっきとした科学の一分野として確立されている（大島，1984；平林・寿岳，1984）。表2に今までおこなわれた地球外生命の探査の歴史をまとめた（横尾，1991）。

調べる対象の星は、地球から25光年あるいは50光年の距離が一つの目安になる。その理由は、TV 電波（電離層を突き抜ける）が利用されてほぼ50年たつためである。50光年の距離の星は、最初の TV 放送を今見ていることになる。また、25光年の距離は、最初の TV 放送を見て、地球に文明があること知り、折り返し返事を送ったとしたら、メッセージが着く距離である。このような意味で、25光年と50光年は重要な区切りとなる。

地球外文明の存在する確率を推定する式が、Drake (1961) によって提案されている。これは Drake の式あるいは Drake-Sagan の式、Greenbank 方程式とも呼ばれている。

$$N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

ここで N (個) は求めるべき銀河系内の文明の数である。銀河系内としたのは、我々にとって意味を持つ文明とは、銀河系内に限られるはずである。現実的にコンタクト可能な星の母集団を銀河とするのは、ごく普通的前提である。銀河系内の恒星の数 R (個/年)、誕生した恒星が惑星を持つ確率 f_p (個/個)、その惑星の中で生命生存に適した惑星が存在する確率 n_e (個/個)、その惑星上で生命が発生・進化した確率 f_i (個/個)、生命から知性が発生する確率 f_c (個/個)、その知性が文明をつくる確率 f_e (個/個)、その文明の継続する長さ L (年)、である。ここでいう文明とは、宇宙空間へ向けて電波による通信能力を持ち、そして実行能力のある技術文明をいう。

このような方程式の変数に数値を代入する場合、「メディアオクリティの仮定」という一般哲学の仮定を導入する (Rood & Trefil, 1981)。この仮定は、「太陽系あるいは地球は、宇宙で何ら特別な存在ではない」というものである。

地球は天体として普遍性と特異性をもつ。地球は主系列星の G 2 型星の惑星系に属するごくありふれた天体である（小出，1994；1995b；1997；小出・山下，1995；1996b）。地球は大きな衛星系（月）や強い磁場（小出，1997；小出ほか，1997a）を持ち、才差運動による周期的変動によって気候変動がおこる。ただし、その気候変動は生命を滅ぼすには至らない程度のものである。

この式の変数のうち正確にその数あるいは値が解っているのは少ない。いくつかの推定値があるにすぎない。

表 2 地球外文明の探査

期間	研究者	場所	アンテナ (m)	周波数 (MHz)	分解能 (Hz)	対象	限界感度 (Wm ⁻²)	観測時間 (H)
1960	Drake (Ozma)	NRAO, U.S.A.	26	1,420-1,420.4 (H)	100	2 S	4*10 ⁻³³	400
1968-69	Troitsky et al.	Chimenki, USSR	15	926-928	13	12 S	2*10 ⁻³¹	11
				1,421-1,423				
1970-	Troitsky et al.	USSR	Dipole	1,863		AS, Pulse	10 ⁻³³ Hz ⁻¹	700
				927				
				600				
1971-72	Felshell (Ozma)	NRAO, U.S.A.	91	1,419.8-1,421	490	9 S	5*10 ⁻³⁴	13
			43	1,410-1,430	6,900		2*10 ⁻²³	
1972-76	Palmer et al. (Ozma II)	NRAO, U.S.A.	91	1,415-1,425	64,000	600 S	1*10 ⁻³³	500
				1,420.1-1,420.7	4,000		3*10 ⁻²⁴	
1972-	Kardashev	Eurasia, USSR	Dipole	1,337-1,863		AS, Pulse	10 ⁻³² Hz ⁻¹	
1973-	Dixon & Cole	Ohio Univ., U.S.A.	Dipole	1,420.40	20,000-100,000	AS, Beacon	1.5*10 ⁻³¹	Allways
1974-	Bridle & Feldman	Argonquin, Canada	46	22,200 (H ₂ O)	30,000	500 S		
1975-76	Drake & Sagan	Arecibo, U.S.A.	305	1,420	1,000	4 G	3*10 ⁻³⁵	100
				1,653				
				2,380				
1976-	Serendip	Barkeley, U.S.A.	26	1,410-1,430	2,500	AS	5*10 ⁻³⁴	
				1,853-1,873				
				917-937				
1976	Clark et al.	NRAO, U.S.A.	43	8,522-8,523	5	4 S	2*10 ⁻³⁴	7
1977	Black et al.	NRAO, U.S.A.	91	1,665-1,667 (OH)	5	200 S	4*10 ⁻²⁵	100
1977	Drake & Stale	Arecibo, U.S.A.	305	1,664-1,668	2.5	6 S	8*10 ⁻³⁴	10

AS: all sky (全天), S: stars (星), G: Galaxies (銀河)。データは横尾 (1991) のコンパイルによる。

銀河系内の星の数は10¹¹個である。恒星の寿命はその質量に依存する (小出, 1997)。質量が大きいほど寿命は短くなる。多くの主系列星の質量は太陽質量程度である。太陽質量程度の星の寿命は100億年 (10¹⁰年) である。従って星の生成率は年間数十〜数個となる。この数は正確性を欠き、数桁の変化も起こりうる。

恒星が惑星を持つ確率は、最近では、比較的是っきりしてきた。それは、最近主系列星の周りで惑星が発見されたからである。従来、恒星の動きの揺れから、随伴する惑星 (不可視伴星) の存在を推定していた。Mayor & Queloz (1995) がペガサス座51番星の周りに木星程度の質量の星を発見して以来、今では10個の太陽系外惑星が発見された (井田, 1997)。これによって惑星の存在の確率は0から1に近づいた。また、太陽系形成のシュミレーションや標準モデルを見ると、惑星の形成は必然性がありそうである。このようなことから、恒星が惑星系を持つ確率は1に近いと考えられる。

惑星の中で生命生存に適した惑星の存在確率 n_e や生命から知性が発生する確率 f_i、その知性が文明をつくる確率 f_c、その文明の継続年 L は正確にはわからない。従って、銀河系内の文明の数 N は不明である。

Drake の式を強引に試みた結果、楽観的なシナリオでは N が 5 × 10⁶ 個、悲観的なシナリオでは限りなく 0 に近い値、中立的なシナリオでは 1.25 個となる (表 3)。

このような各種の計算結果がどの程度信じれるのか現在評価できない。だが、もしメディアオクリティの仮定を導入すれば、導ける結論は、我々は銀河系内で最初の高度文明であるか、ほかにも高度文明があるがまだ我々のところに届いてないということになる。中立的な計算結果の 1.25 個という値は、非常に意味深長である。1.25 個のうち一個が地球だとすると、残りの 0.25 個は地球外文明の数である。

もし文明の数が決まれば、現在のテクノロジーでの通信が可能かどうか分かる。文明を持つ天体同士の平均距離 (文明間平均距離) d は、

d = (R/N)^{1/3}

という式で求められる。N は上で求めた値である。R は銀河系の半径である。d / 2 を電磁波の速度 (光速) で割った値が、文明の継続年 L より短ければ、通信は不能となる。

3 テクノロジー文明の分類

Kardashev は、文明をいくつかに分けた (表 4)。I 型文明、II 型文明、そして III 型文明の 3 つである。

I 型文明は、一つの惑星上で利用できるエネルギーを使っている文明をいう。地球文明はこのレベルで、今後しばらくは I 型文明の状態が続く。地球の知的生命・人類は、地球生命の特性を持ち好奇心が旺盛で、ニッチがあればそこを目指すという習性を持つ。そのため、長く文明が継続すれば、人類は宇宙空間へ進出するはずである。今は、地球軌道付近がターゲットになっているが、月面にも人類の足跡が刻まれている。今後も地球外への進

表 3 銀河系内の地球外生命存在率

記号	内容	楽観論的	中立	悲観論的
R	星の形成速度	100	10	0.005
f _p	惑星形成率	0.3	0.1	~ 0
n _e	生活可能惑星存在率	0.2	0.05	~ 0
f _i	生命発生率	0.5	0.01	~ 0
f _i	知的生命発生率	1.0	0.5	~ 0
f _c	通信文明発生率	1.0	0.5	~ 0
L	文明時代の長さ	10 ⁶	10 ⁴	10 ²
N	通信可能知的生命数	3 × 10 ⁶	1.25	~ 0

表 4 テクノロジー文明の分類

文明	利用量	エネルギー (erg/sec)	空間領域
I 型	地球人類程度	10^{19}	1 つの惑星表面
II 型	恒星の全出力	10^{33}	恒星を囲む空間
III 型	銀河の全出力	10^{44}	銀河系全体

データは横尾 (1984) による。

出は続くであろう。ただ、宇宙への進出は非常にコストがかかる。そのため、商業的にメリットがあるか、コストに関わらず進出しなければならないような非常事態が起こった時などが、宇宙への進出の動機となるであろう。

その前に、現在直面している危機を乗り越えなければならない。現在、地球において人類を襲いそうな危機として、エネルギー危機、食糧危機、資源の枯渇、人口増加などが考えられる。過去にも、何度も危機があったが、人類は知恵で克服してきた。次回も大丈夫という保証はない。このような危機を乗り越えた時、次への飛躍ができる。それが地球外進出である。地球外へ進出した人類は、太陽エネルギーを最大のエネルギー源として、地球軌道から、周りの惑星軌道へと進出するはずである。

ここで一つの選択として、人類は進歩を諦めるということもあり得る。惑星内での「鎖国」である。人類の歴史において鎖国を選択したこともあった。「鎖国」の終了は、外部からの圧力と内部からの圧力の二つがある。外部からの圧力とは ET から「開国」要求である。しかし、今のところ、この可能性は不明である。Drake の式の N や d の値が決定すれば推測も可能であろう。「鎖国」が続くのはせいぜい数100年程度である。人類の歴史を見る限り、すべての「鎖国」には終わりがある。内在する人類自身の外への圧力が、「鎖国」終了の原因である。

II 型文明は、惑星が属している恒星が出しているエネルギーを使うタイプである。I 型文明でも恒星のエネルギーを使っているが、II 型文明では恒星のほとんどのエネルギーを利用してしまふものである。ダイソン文明と呼ばれる。黄道面上にリング状の構造物で構成の放射エネルギーを利用したり、恒星をすべて包むものだったりする。II 型文明は外からは、恒星の光あるいは電磁波がもれず、探知できないかもしれない。しかし、エネルギーとはいえ劣化がおこり、その劣化したエネルギーは赤外線として宇宙に放出されると考えられる。発展したII 型文明は、恒星クラスの赤外線源を探せばよいことになる (Dyson, 1960)。この仮定が正しければ、II 型文明はI 型文明より発見しやすいかも知れない。また、II 型文明が他の知的生命と交信を希望すれば強力な人工の電波源となるであろう。

II 型文明が発展してくると、近隣への恒星系へと進出が始まるであろう。その増殖の程度は、星間を移動するスピードが上限となる。光速 (c) より当然遅い速度 (v) での増殖となる。II 型文明の増殖によってその銀河全体に広がるのにかかる時間は、(銀河直径) $\div v$ である。

この時間と銀河の年齢 10^{10} 年が比較対照される。そして、速度が充分速ければ、文明化された銀河が可能となる。

III 型文明は銀河全体のエネルギーを使いこなす文明をいう。発展したII 型文明からIII 型文明は、我々の銀河には存在しない。それは、地球にまだ、知的生命が訪問したという事実がないからである。

4 Fermi のパラドックス

人類の発達性から類推すると、知的生命はやがては生まれた天体の外へも拡散すると考えられる。そして発展した文明になると、論理的に矛盾が生じる。知的生命はIII 型文明まで発展しうのに、我々人類は、ET との接触や文明の痕跡を観測していないという事実と矛盾している。Fermi はこのような状態をかくれんぼ遊びにたとえて、"Where is everybody?" という疑問を發した。このような矛盾を Fermi のパラドックスと呼ぶ。

世間には UFO の存在を信じている人がいるが、科学的に実証されていない。「異星人が地球に飛来したことはない」という事実は" Fact A"と命名され (Hart, 1975)、これを前提に科学的議論をすべきとされている。

$N = 1$ なのか $N > 1$ なのか、それが問題である。 $N = 1$ であれば、他文明もないし、SETI はお金の無駄遣いである。 $N > 1$ であれば、Fermi のパラドックスをいかに説明するかが問題である。極論としては、我々の太陽系は、銀河文明の自然公園で、わざと放置されているという「動物園仮説」がある (Ball, 1973)。

現状では中立的な、接触できないほど d が大きいという考えが妥当であると考えられる。もしそうだとすると、我々人類はII 型やIII 型文明への発展は宇宙文明論的に難しいということになる。

5 パンスパーミア説

パンスパーミア説 (panspermia) とは、胚種広布説とも呼ばれるものである。パンスパーミア説は、古くは Arrhenius が1908年に提唱した。最近では、Hoyle & Wickramasinghe (1978) などが現在版パンスパーミア説を提唱している。パンスパーミア説は、生命は地球外から飛来したというもののだが、現在ではその内容は多様化し、生命の地球外起源説の総称としてパンスパーミア説が使われている。

パンスパーミア説の起こりは、Pasteur の長フラスコによる生命の自然発生説の否定によって、地球外に生命の由来を求めるようになったものである。

現在のパンスパーミア説は、多様である。Crick & Orgel (1973) では、他の文明生物が、地球に生命を打ち込んできたと考えた。Hoyle & Wickramasinghe (1973) では彗星で発生した生命が、地球に降ってきたという説で、生命は今も地球に降り、病原微生物にも地球外生物が含まれているという。

多くの説は、根拠が不十分であったり、実証されてなかったりで、信頼性が低い。その中で、Crick & Orgel の説は、一時重要視された。その根拠は、生体内のモリブデン (Mo) 量の濃集があげられた。生体構成元素は基本的に、惑星の生命発生環境と類似すると考えられる。

表 5 火星探査の歴史

探査機名	国名	打ち上げ日	到達日	結果
None	U.S.S.R.	1960/10/14		地球の軌道にのれず
None	U.S.S.R.	1962/10/24		地球の軌道を離脱できず
Mars1	U.S.S.R.	1962/11/1		1963年3月21日、地球から1億560万kmで通信途絶
None	U.S.S.R.	1962/11/4		地球の軌道を離脱できず
Mariner3	U.S.A.	1964/11/5		打ち上げ後に耐熱カバーがはずれず、失敗
Mariner4	U.S.A.	1964/11/28	1965/7/14	最初の探査機、9850km上空を通過、22枚の写真撮影
Zond2	U.S.S.R.	1964/11/30		途中で通信途絶
Zond3	U.S.S.R.	1965/7/18		火星の軌道を通過、通信テスト
None	U.S.S.R.	1967/3/27		打ち上げに失敗？
Mariner6	U.S.A.	1969/2/24	1969/7/31	火星を通過して75枚の写真を送信
Mariner7	U.S.A.	1969/3/27	1969/8/4	火星を通過して126枚の写真を送信
None	U.S.S.R.	1969/3/27		詳細不明
None	U.S.S.R.	1969/4/14		詳細不明
Mariner8	U.S.A.	1971/5/8		打ち上げ失敗
Cosmos419	U.S.S.R.	1971/5/10		地球の軌道を離脱できず
Mars2	U.S.S.R.	1971/5/19	1971/11/27	周回に成功、probeは墜落して故障
Mars3	U.S.S.R.	1971/5/28	1971/12/2	周回に成功、着陸船が地表に到達、110秒間作動
Mariner9	U.S.A.	1971/5/30	1971/11/13	1972年10月27日まで周回し写真7329枚を撮影
Mars4	U.S.S.R.	1973/7/21		1974年2月10日に火星を通過したが周回軌道に乗れず
Mars5	U.S.S.R.	1973/7/25	1974/2/12	周回軌道にのる
Mars6	U.S.S.R.	1973/8/5	1974/5/12	着陸失敗
Mars7	U.S.S.R.	1973/8/9		1974年3月9日行方不明
Viking1	U.S.A.	1975/8/20	1976/6/19	2450枚の写真撮影、probeはクリセ平原に着陸
Viking2	U.S.A.	1975/9/5	1976/8/7	2170枚の写真撮影、probeはユートピア平原に着陸し
Phobos1	U.S.S.R.	1988/7/7		通信途絶
Phobos2	U.S.S.R.	1988/7/12	1989/1/29	周回軌道に乗り写真撮影したが通信途絶
Marsglobalsurveyer	U.S.A.	1996/11/7	1997/9/12	火星周回軌道に入る
Mars'96	C.I.S.	1996/11/16		失敗
Marspathfinder	U.S.A	1996/12/4	1997/7/4	ローバーで火星表面を探査

小出・山下 (1996a) のコンパイルに天文年鑑編集委員会 (1997) のデータを加えた。

海水や地殻構成成分を考えると、生命は Mo に豊んでいる。したがって、地球生命は Mo の多い天体から由来しているという考えである。しかし、原始海水組成を再測定してみると、Mo の異常ではなくなったため、この議論は終結した。

バンスパーミア説は、いまのところ論理的に完全に否定されたわけではない。太陽系は、宇宙ではごくありふれた化学成分から構成されており、元素組成に特異性は見られない (小出, 1997) ことから、地球外生命も似たような元素組成でできているかもしれない。地球外知的生命が、タネが育ちやすい、化学組成の同じ天体として地球を選び、送り込まれたとしても区別できない。

IV 惑星科学的アプローチ

惑星科学的アプローチは、太陽系の惑星をターゲットにしている。地球から探査機を送り生命の有無を調べるものである。多くの探査は、生命探査を目的にしたものではなく、惑星の物理的・化学的状態を詳しく調べるものであった。その中には、惑星表面に着陸して写真を撮る探査もあった。そこに生命がたくさんいれば、どのような目的の写真であろうとも探知できる。ここでは探査の

概要と惑星科学から見た生命発生の条件をまとめる。

1 惑星探査

人類がロケットを飛ばし始めたのは1950年代にまで遡る。第二次世界大戦後、ドイツの有能なロケット学者を得た U.S.A. と U.S.S.R. は、宇宙に目を向けて激しい争いをおこなった。1970年代から1980年代は、まさに宇宙時代と呼ぶにふさわしく、他の天体への各種の探査計画が実行に移された (小出・山下, 1996a; 小出ほか, 1997b)。

水星は太陽に近い惑星で、地球からの観測も難しく、詳細が永く不明であった。しかし、Mariner10が1974年3月と9月、1975年3月の3回の接近をおこない、写真撮影をして水星の情報が格段に増した。

金星は厚い大気におおわれているため、直接地表の様子を見ることができない。金星の周回軌道上からレーダーを用いて表面地形を観測する方法と、Probe をおろして観測する2通りの探査法がとられた。1967年に U.S.S.R. の Venera 4 が初めて表面に硬着陸し、1970年に Venera 7 は表面に到達するまでデーターの伝送をおこなった。1982年に Venera13、14では表土の直接分析がおこなわ

れた。一方、レーダーによる観測は、1978年に U.S.A. の Pioneer Venus 1 や、1983年に U.S.S.R. の Venera 15、16が周回軌道上からおこなった。U.S.A. の Magellan のレーダー観測で、詳細な地図が作られた。

火星の大気は薄いため、表面の様子が比較的良く観測できた。火星は古くから天文学的観測がおこなわれた。火星探査では(表5)、1965年に U.S.A. が探査機 Mariner 4を送り、上空9,850km から22枚のクローズアップ写真を撮った。つづいて、1971年に Mariner 9も火星の周回軌道に乗り多くの写真を送ってきた。1976年には U.S.A. の Viking 1と2による生命体の探査がおこなわれた。残念ながら生命の存在も痕跡も発見されなかった。1975年(C.I.S. では1988年)以来、探査されていなかった火星が1996年から再び探査されるようになった。探査空白の時代は、政治、経済の情勢の反映である。しかし、Marspathfinder の成功によって、継続的探査が期待できる。

火星の流水活動は、大きく2つに区分される(佐々木, 1997a; 1997b)。バレーネットワーク(valley network)とアウトフローチャンネル(outflow channel)である。バレーネットワークは衝突クレーターの外縁から出た流路が集まって大きく深い谷になっていく。そして平地に到達すると地形が消える。バレーネットワークは、40億年前の火星が氷点前後の温暖な気候であったことを示している。アウトフローチャンネルは大量の水が非常に短時間に流出したもので、マリネリス峡谷及びその周辺である。水の量は、火星全体を40mの厚さでおおうほどと見積られる。アウトフローチャンネルはバレーネットワークより新しい時期(25億年前以降)に形成された。

太陽光度が過去ほど低い(40億年前は現在の70%)という状態の時に水の存在する温暖な気候であったのに、後の光度の大きい時期ほど寒いというパラドックスが生じる。温室効果も大気量も過去に多く現在は少ないため有効ではない。火星の表面温度のパラドックスはまだ未解決である。

外惑星の探査は、U.S.A. の Pioneer 10, 11そして Voyager 1、2が外惑星に接近した。木星、土星、天王星そして海王星の鮮明な画像を得た。そして、木星で3つの衛星を土星で8個の衛星、天王星で10個の衛星、海王星で6個の衛星を発見した。

ハレー彗星が太陽に接近した時、世界各国が合計6機の探査機をハレー彗星に向かわせた。その結果、彗星の実体が汚れた雪だるまであることを明らかにした。

2 生命探査

生命の存在について正面切っておこなわれた惑星探査は、U.S.A. の Viking 計画である。

1976年 Viking 1の着陸船はクリセ平原に、Viking 2の着陸船はユートピア平原にそれぞれ着陸した。「火星生命」を検出するための実験をおこなった。Viking での生物実験は、3つの実験装置とガスクロマトグラフ質量分析計を結びつけておこなわれた。呼吸実験、新陳代謝実験、光合成実験、有機物検出実験であった(河島・小池, 1997)。

・呼吸実験(ラベル放出実験)は、 ^{14}C でラベルした栄養液を砂に与え、二酸化炭素ガスなどになってでてくる代謝ガスを検出する。

・新陳代謝実験(ガス交換実験)は、砂に栄養物を少量加え、出てきたガスの成分を調べる。

・光合成実験(炭酸同化実験)は、砂に ^{14}CO 、 $^{14}\text{CO}_2$ と H_2O をいれ、数日間光を当てる。砂を熱し有機物を追い出し、その有機物を分解して質量分析する。

・有機物検出実験は、ガスクロマトグラフ質量分析計で極微量の有機物を検出する。

このガスクロマトグラフ質量分析計は生体有機分子なら ppb レベルの分解能を持っており、メタン程度の簡単な分子でも ppm レベルあれば分析可能な装置である。地球なら南極の土からでも有機物が検出できる精度である。

4つの実験すべてにおいて、生物の存在に対して否定的結果がでた。そのため、火星には生命の痕跡すらないものとあきらめられていた。

楽観的あるいはより厳密な意味では、Viking による実験は、直径数十メートルの2地点の火星表面に、当時は生命活動が存在しなかったということになる。従って、生命現象に関して、Viking 計画が否定したものはあまりなかったという見解にも立ちうる。

生命が存在しないということを証明することは非常に難しく、存在するということは1つの実例がえられれば証明できる。その証明になり得るのが、火星起源隕石からの生命の痕跡発見の報告(McKey et al., 1996)であった。決着は、現在進行している Marspathfinder や次期火星探査の結果を待たなければならない。

3 生命発生の条件

生命が天体上で発生・発展するいくつかの条件が必要となる。その一つは、安定した環境の継続である。このような条件は生命の発生は規制しないが、進化を規制する。水の存在は生命の発生・進化の両者を制約する。ここでは、両条件について検討する。

母恒星の条件

恒星からの距離が適当であることが生命発生の必要条件である。恒星が熱ければ遠くの惑星が、冷たければ近くが、生命の発生しやすい条件を持つ適当な天体となる。熱い星ほど生命発生の条件を満たす軌道範囲が広がる。公転半径の2乗(公転面として考える)もしくは3乗(恒星から3次元的位置)の割合で範囲は広がる。ただ、熱い星は寿命が短く、太陽質量の10倍の恒星では数千万年の寿命となるので、生命が発生して進化するには時間が足りない。逆に冷たい星は十分に進化をする時間が得られる。太陽質量の半分の恒星で、寿命は1,000億年ほどあるため、十分な時間が保証されている。しかし、適当な温度範囲は、太陽系の10分の1しかない。そこに適当な惑星がある確率は小さくなる。

恒星の寿命と適当な温度範囲の両方を満たさなければ、恒常的な生命は存在し得ない。適当な温度を水の存在範囲と考えると、質量は太陽の0.7倍から1.4倍程度となる

(小尾・森, 1985)。質量が太陽の0.7倍の恒星は表面温度約4,400度、寿命数百億年となり、質量が1.4倍の恒星は表面温度約6,500度、寿命30億年となる。

水の存在範囲

惑星の重要なエネルギー源は恒星の放射である。惑星が受ける放射は太陽からの距離の2乗に逆比例して減る。惑星の太陽からの距離によってその温度 (T : K) が決定できる (小尾・森, 1985)。我々の太陽系では、

$$T = 395 \cdot a^{-1/2}$$

という式で決定される。ここで a は天文単位である。

地球では、395K (122℃) となる。この温度は太陽からのエネルギーをそのまますべて利用できたときの値である。軌道上で取りうる最高の温度といえる。実際には、惑星は太陽のエネルギーを反射している。惑星の反射能 (アルベド) を A とすると、惑星表面に吸収され惑星を暖めるのに使われるエネルギーは $(1-A)$ 倍となり、温度は下がる。また、惑星の自転が速いと太陽放射を吸収するのは太陽側だが惑星全体から熱の放射がおこなわれるので、温度はさらに下がる。以上のような冷却効果を考慮すると、平衡温度の下限は、

$$T = 277 \cdot a^{-1/2}$$

となる。この値から、液体の水が存在しうるのは、太陽から0.55AU から2.09AUの範囲が最大である。この範囲が水の存在可能領域となる。金星から火星の範囲が水の存在可能域となる。

水の存在範囲は、着目点により、見積りには誤差が生じる。気候変動モデルでは、0.9~1.3AU (水谷, 1984) という見積りもある。正確な値は、決着が付いてない。

V 隕石学のアプローチ

隕石学のアプローチは、McKay et al. (1996) によって注目を浴びている。McKay らが検討したのは、石質隕石のエイコンドライト SNC に分類されるものである。SNC の中でも今までにないタイプの隕石であった。ここでは、隕石の分類、隕石中から発見された有機物について概要をまとめ、火星起源隕石と火星生物化石に関連した議論について詳しく述べる。

1 隕石の分類

隕石は、その岩質や鉱物組み合わせ、化学組成、組織などの違いにより、いくつかに区分される。隕石は、カンラン石 (olivine)、輝石 (pyroxene)、斜長石 (plagioclase) からなる珪酸塩鉱物と、Ni-Fe 合金からできている。珪酸塩鉱物と金属の量比から、珪酸塩鉱物を主とする石質隕石 (stony meteorite)、珪酸塩鉱物と金属からなる石鉄隕石 (stony-iron meteorite) および金属からなる鉄隕石 (iron meteorite) に大別される。

鉄隕石は、Fe-Ni 合金と、少量のトロイライト (troilite, FeS) を伴う。鉄隕石は、Fe-Ni 相の組織によって、ヘキサヘドライト (hexahedrite)、オクタヘドライト (octahedrite)、アタキサイト (ataxite) の3つに区分される。また、鉄隕石は、Ni、Ga、Ge および Ir の含有量によって13の化学グループに区分される (IAB、IC、IIAB、IIC、IID、IIE、IIF、IIIAB、IIICD、IIIE、IIIF、IVA、IVB)。

石鉄隕石は、基本的には Fe-Ni 合金の基質部に珪酸塩鉱物を含むボリミクト角礫岩である。石鉄隕石は、珪酸塩鉱物の組み合わせによって、メソシデライト (mesosiderite)、パラサイト (pallasite)、ロドラナイト (lodranite)、シデロファイア (siderophyre) の4つに区分される。これらは非常に稀なタイプの隕石で、Catalogue of Meteorites (Graham et al., 1985) では、73個しか記載されていない。

石質隕石は、コンドリュール (chondrule、顆粒) を含むコンドライト (chondrite) と、含まないエイコンドライト (achondrite) の大きく2種に分かれる。

コンドライトは、隕石の中ではもっとも多く見られるものである。コンドライトの構成は、一般にはコンドリュールと岩片 (fragment: コンドリュールの破片、結晶片を含む)、インクルージョン (inclusion) からなり、その間をマトリックス (matrix、基質) が充填している。コンドライトは、炭素質コンドライト (carbonaceous chondrite、C と略される)、アンフォテライト (amphotelite、LL)、カンラン石-ハイパーシン・コンドライト (olivine-hypersthene chondrite、L)、カンラン石-ブロンザイト・コンドライト (olivine-bronzite chondrite、H) およびエンスタタイト・コンドライト (enstatite chondrite、E) の5つのグループに区分される。Van Schmus & Wood (1967) は、同じタイプのコンドライトでも、岩石学的な組織が連続的に変化していくことに着目して、1から6に区分した。タイプ1から6になるにしたがって、熱変成の程度は強くなる。

エイコンドライトは、地球上の岩石と区別しにくい。エイコンドライトの不透明鉱物は、トロイライトやクロム鉄鉱 (chromite)、チタン鉄鉱 (ilmenite) で、Fe-Ni 合金を含まない。エイコンドライトは、オーブライト (aubrite)、ユレイライト (ureilite)、ダイオジュナイト (diogenite)、シャッシナイト (chassignite)、ホワルダイト (howardite)、ユークライト (eucrite)、ナクライト (nakhilite)、アングライト (angrite)、および月起源の隕石 (anorthositic regolith breccia) がある。成因関係を重視して、ホワルダイトとユークライト、ユレイライトは3種の頭文字をとって HED と呼ばれ、シャーゴッタイトとナクライト、シャッシナイトは SNC と呼ばれる。このうち SNC が火星起源隕石である。

2 隕石中の有機物

隕石の精密分析から、有機物が検出されている。発表当初地球の有機物の汚染が指摘された。汚染のない南極隕石の分析や1969年にオーストラリアに落下した汚染のない Murchison 隕石の分析などの、各種の検証によって、隕石に有機物が含まれていることが確実になった。有機物は、炭素質コンドライトからたくさん発見された (西, 1984)。隕石には、地球生命の生体物質あるいはその前駆体、材料物質となるものが多数発見されている (表1)。

隕石から発見される有機物は、アミノ酸も糖も D-体と L-体が1:1に混合しているラセミ体である (下山, 1987)。隕石中では、D-体と L-体の分別は見つっていない。D-体と L-体を分別するには、何らかのエ

表 6 火星起源隕石の産状

Name	Location	Year	Classification	Rock Type, Texture	Mass	Curatorial Location
ALH84001	Allan Hills, Antarctica	Find 1984, D 1993	orthopyroxenite	orthopyroxenite, monomict breccia, cataclastic	1.93 kg	MWG, SI
Shergotty	Bihar, India	Fall 1865/8/25	shergottite	gabbro, gabbroic, coarse-grained	5.00 kg	Calcutta, SI, Vienna
Zagami	Katsina, Nigeria	Fall 1962/10/3	shergottite	gabbro, gabbroic, preferred pyroxene	18.00 kg	dealers, New Mexico, Berlin,London, Paris
EETA79001	Elephant Moraine, Antarctica	Find 1979, D 1980	shergottite	dolerite & basalt doleriteic, interstitial	7.94 kg	MWG, SI
QUE94201	Queen Alexandra Range,Antarctica	Find 1994, D 1995	shergottite	dolerite, doleritic	12 g	MWG
ALH77005	Allan Hills, Antarctica	Find 1977, D 1978	shergottite	olivine websterite, crystalline, preferred clinopyroxene	482.5 g	MWG NIPR
LEW88516	Lewis Cliffs, Antarctica	Find 1988, D 1991	shergottite	olivine websterite, poikilitic	13 g	MWG
Y793605	Yamato, Antarctica	Find 1979, D 1995	shergottite	lherzolite, poikilitic	16 g	NIPR
Nakhla	Alexandria, Egypt	Fall 1911/1/29	nakhlite	werlite, cumulate, preferred clinopyroxne	40 kg	Cairo, London, SI, Berlin, Vienna, Paris, dealers
Lafayette	Indiana, USA	Find 1931	nakhlite	wehrlite, granular, preferred clinopyroxene	800 g	SI, Chicago
Governador Valadares	Minas Gerais, Brazil	Find 1958	nakhlite	wehrlite, granular, preferred clinopyroxene	0.158 kg	Rome, London
Chassigny	Haute-Marne, France	Fall 1815/10/3	chassignite	dunite, cumulate	4.00 kg	Paris, Vienna, London

Year は落下 (Fall) と発見 (Find) と火星起源隕石と確定された (D) を示した。MWG (JSC) と SI は アメリカ合衆国の隕石採集プログラム で NIPR (Tokyo) は日本の隕石採集プログラムである。略号: ALH: Allan Hills, EETA: Elephant Moraine, LEW: Lewis Cliff, QUE: Queen Alexandra Range, Y: Yamato, opxnite: orthopyroxenite, SI: Smithsonian .

エネルギーを注入しなければならない。エネルギーを使った D-体や L-体の分別が認められないため、隕石には生命活動の痕跡はない。

3 火星起源隕石の岩石記載

火星起源隕石は、現時点で12個ある (表6)。すべて火成岩である。総重量は約78kg である。

12個の火星起源隕石のうち Shergotty、Zagami、Nakhla、Chassigny の4 個は、落下が目撃され、すぐに回収されたため、風化や変質はない。また、南極に落下した隕石は一部風化を受けているが、地球生物の汚染も比較的軽微である。特に南極で発見された隕石は、回収後の保存は注意深くなされている。

火星起源隕石の特徴的な付随鉱物として、角閃石 (ケルースト閃石) や黒雲母を含む。両鉱物はいずれも火成鉱物 (マグマからできた鉱物) で、結晶構造内に H₂O を含んでいる含水鉱物である。つまり、マグマの形成場 (一般的にはマントル) には、水が存在していた証拠となる。風化鉱物のイデイングサイト (iddingsite) やイライト (illite) が発見されている。火星表層には水が存在し、風化作用が進行していたことを示す。二次鉱物として産する炭酸塩鉱物や炭化水素は、表層部の環境を示す指標となり、間接的ではあるが水や有機物の存在を示唆する。

火星起源隕石には、ピジョン輝石が含まれている。ピジョン輝石は地表近くで急冷された岩石に特徴的に産出する鉱物であるため、orthopyroxenite グループ以外の火星起源隕石は、深成岩の組織を持つが、浅所で急冷固結したと考えられる (池田, 1997)。

従来、火星起源隕石は、shergottite、nakhlite、chassignite の3つのグループが知られていた。各隕石の頭文字をとって SNC 隕石とよばれていた。しかし、新たに orthopyroxenite (斜方輝石岩: ALH84001) が発見された。現在、火星起源隕石は、shergottite、orthopyroxenite、nakhlite、chassignite の4つに分類される。shergottite の QUE94201 だけが玄武岩質火山岩で、あとの11個はドレライト・斑れい岩から超苦鉄質岩の深成岩類である (矢内, 1996)。

以下では、shergottite、orthopyroxenite、nakhlite、chassignite の4つグループ毎に特徴をまとめる。表7に火星起源隕石の岩石記載をまとめた。

shergottite

shergottite グループの隕石は、7 個が発見されている。shergottite は、さらに basalt タイプと lherzolite タイプの2 種に細分されている。

basalt タイプは Shergotty、Zagami、QUE94201 の3 個で、地球の岩石と比較すると玄武岩からドレライトに似ている。3 個の隕石は互いに良く似ている。輝石が8 割、マスケリナイトが2 割程度含まれる。組成も鉱物組成も類似したものである。lherzolite タイプは ALH77005、Y 793605、LEW88516 の3 個で、地球のレルゾライトに似ている。ポイキリティック組織の部分とノン・ポイキリティック組織の層が数 mm の厚さで互層する層状構造を持つ。lherzolite タイプはカンラン石 (40%) と輝石 (50%; 斜方輝石、ピジョン輝石、オーラセイト) と少量のマスケイリナイト (10%) とクロム鉄鉱を含んでいる。3 個の隕石は互いに良く似ている。

表 7 火星起源隕石の岩石記載

	AHL84001	Shergotty	Zagami	EETA79001 Lith-A	EETA79001 Lith-B	ALH77005	Nakhla	Lafayette	Governador Valadares	Chassigny
olivine	+			7-10		52	15.5	minor	minor	91.6
orthopyroxene	95			3-6		+	+			+
pigeonite		36.3	36.5	60-63	32	26	+			+
augite	+	33.5	36.5	3-7	24	11	78.6	major	major	5.0
pyroferroite					+					
maskelynite	1	19-25		16-18	29-30					
pl-glass						10				
plagioclase			21.7				3.7	trace	trace	1.7
K-feldspar							1.1	trace	trace	+
mesostasis		1.7-5.2		+	+		+			+
silica minerals		+			+		+			
fayalite		+								
kersutite		+								+
biotite										+
phosphate	+	+	2.1	+	+	+	+	trace	trace	+
chromite	2			+	+	1				1.4
magnetite	+	2-2.5	2.1	+	+		1.9	trace	trace	
spinel		+								
ilmenite		+		+	+	+	+			+
rutile										+
baddeleyite		+								+
troilite						+	+			+
pyrrhotite	+	+		+	+					
pentlandite						+				+
pyrite	+						+			
marcasite										+
chalcopyrite							+			
spalerite	+									
greigite	+									
iddingsite						+				
illite				+	+					
carbonate	1			+	+		+			+
Ca-sulfate				+	+		+			+
Fe-sulfate	+									
halide							+			
hydrocarbons	+			+	+		+			

データは池田 (1997) のコンパイルと Banin *et al.* (1992) による。

basalt タイプの 3 つの隕石と lherzolite タイプの 3 つは岩石学的に似ている。岩石種は異なるのだが、岩相が非常に似ている。EETA97001 が南極で発見されて、両岩石の関係が明らかになった。EETA79001 には、両方の岩相が接して産したのである (McSween & Jarosewich, 1983)。B 相が basalt タイプで A 相が lherzolite タイプにあたる。A 相は、火星のマントル物質が B 相のマagma に捕獲されたものであると考えられている。以下に各岩石の記載を示す。

ALH77005：輝石がカンラン石を包有するポイキリチック組織を示す。少量の斜長石（マスケリナイト化）を含む。鉱物組成は、 Fa_{25-31} 、 $\text{En}_{47-78}\text{Fs}_{13-26}\text{Wo}_{2-23}$ 、 An_{49-56} である。

Y793605：輝石がカンラン石を包有するポイキリチック組織を示す。マスケリナイト化した斜長石を含む。鉱物組成は、 Fa_{26-34} 、 $\text{En}_{50-77}\text{Fs}_{14-29}\text{Wo}_{2-36}$ 、 An_{49-61} である。diogenite に類似するが、酸素同位体組成と斜長石組成が異なる。

EETA79001：A 相と B 相があり、A 相は粗粒で B 相は細粒である。明瞭な岩相変化があり貫入関係を示している。A 相は均質な斑れい岩質岩で、B 相はカンラン石や輝石の巨晶を含むドレライトである。A 相は、輝石とマスケリナイトの体積比で 4 : 1 ほどで、Mg-rich カン

ラン石や斜方輝石、クロム鉄鉱を外來結晶として含む。このような外來結晶は lherzolite タイプの Shergotty と類似している。B 相は輝石とマスケリナイトの体積比が 1 : 1 である。輝石はノーマル・ゾーニングをしている。**LEW88516**：カンラン石 (Fo_{67}) と輝石 ($\text{En}_{67}\text{Fs}_{28}\text{Wo}_5$)、斜長石 (An_{53}) からなり、少量のクロマイトやガラスを含む。ALH77005 に類似する。

QUE94201：組成範囲の広い輝石 ($\text{En}_{1.0-60.5}\text{Fs}_{21.2-83.3}\text{Wo}_{9.6-34.7}$) とマスケリナイト化した斜長石 ($\text{An}_{51.9-57.8}\text{Ab}_{32.9-46.0}\text{Or}_{0.0-2.3}$) を主とする。試料は 13g と小さく、80 % が fusion crust で被われおり、ドレライトの組織をもつ。

Shergotty：ピジョン輝石 ($\text{En}_{58}\text{Fs}_{30}\text{Wo}_{12} \sim \text{En}_{22}\text{Fs}_{58}\text{Wo}_{20}$)、普通輝石 ($\text{En}_{48}\text{Fs}_{20}\text{Wo}_{32} \sim \text{En}_{32}\text{Fs}_{38}\text{Wo}_{30}$)、マスケリナイト化した斜長石 (An_{43-57}) を主とする。当初は eucrite に分類されていたが、火星起源隕石を代表するものである。

Zagami：ピジョン輝石 ($\text{En}_{58}\text{Fs}_{30}\text{Wo}_{12} \sim \text{En}_{39}\text{Fs}_{48}\text{Wo}_{13}$)、普通輝石 ($\text{En}_{48}\text{Fs}_{20}\text{Wo}_{32} \sim \text{En}_{32}\text{Fs}_{38}\text{Wo}_{30}$)、マスケリナイト化した斜長石 (An_{43-57}) を主とする。少量のガラスとチタン鉄鉱、イルメナイト、ピロータイト、ごく少量のカンラン石 (Fo_{10}) を含む。

shergottite の成因は、岩石学的検討から比較的よくわ

表 8 火星起源隕石の化学組成

Name	ALH 84001	Shergotty	Shergotty	Zagami	Zagami	EETA79001	EETA79001	EETA79001	EETA79001	QUE 94201	ALH77005
Type	S-opx	S-b	S-b	S-b	S-b	Lith- A	Lith-A	Lith-B	Lith-B	S-b	S-l
SiO ₂	52.84	50.5	49.50	51.1	50.52	48.5	48.5	49.0	49.0	46.5	43.2
TiO ₂	0.20	0.85	0.87	0.78	0.84	0.63	0.70	1.17	1.23	1.87	0.41
Al ₂ O ₃	1.21	6.78	7.59	6.1	6.27	5.69	5.68	10.7	9.93	9.93	2.83
Cr ₂ O ₃	1.07	0.19	0.200	0.32	0.15	0.61	0.58	0.17	0.14	0.15	1.00
Fe ₂ O ₃					0		0.70		0.22		
FeO	17.24	19.5	19.8	18.4	18.03	18.6	17.9	17.4	16.9	19.4	20.1
MnO	0.47	0.52	0.518	0.52	0.44	0.48	0.52	0.43	0.47	0.49	0.46
MgO	24.71	9.39	8.95	11	12.14	16.4	16.6	7.12	7.32	6.25	27.7
CaO	1.82	10	9.63	11	9.57	7.22	7.10	11.2	11.0	11.1	3.46
Na ₂ O	0.14	1.31	1.47	1.17	0.13	0.84	0.84	1.61	1.68	1.44	0.47
K ₂ O	0.015	0.17	0.189	0.14	0.08	0.04	0.05	0.08	0.09	0.04	0.03
P ₂ O ₅		0.67	0.72	0.53	0.46	0.6	0.65	1.28	1.25	2.04	0.37
S		0.11	0.157	0.19		0.2		0.2			0.05
H ₂ O+					0		<0.1		<0.01		
H ₂ O-					0		0.09		0.09		
FeS					1.58		0.49		0.60		
Ni							0.03		<0.01		
Co							<0.01		<0.01		
C							0.02		0.01		
Total	99.715	99.99	99.594	101.25	100.21	99.81	100.45	100.36	99.93	99.21	100.08
Ni (ppm)	44.6				26						
Co (ppm)	<12				<30						
C (ppm)			430								
Cl (ppm)			108								

Name	ALH77005	LEW 88516	LEW 88516	Y793605	Governador Valadares	Governador Valadares	Lafayette	Nakhla	Nakhla	Chassigny	Chassigny
Type	S-l	S-l	S-l	S-l	N-w	N-w	N-w	N-w	N-w	C-d	C-d
SiO ₂	43.03	48.2	46.21	42.51	49.5	49.52	46.8	48.6	48.24	37.2	37.22
TiO ₂	0.36	0.35	0.32	0.60	0.35	0.35	0.33	0.33	0.29	0.11	0.10
Al ₂ O ₃	2.54	2.38	2.93	4.01	1.74	1.74	1.55	1.6	1.45	0.49	0.80
Cr ₂ O ₃	1.00	0.91	0.85	0.82	0.25	0.21	0.27	0.28	0.42	0.69	0.83
Fe ₂ O ₃	0.38			0.22		1.14					
FeO	18.97	19.3	18.91	20.52	19.6	18.62	22.5	21.3	20.64	27.2	27.07
MnO	0.45	0.47	0.48	0.44	0.67	0.67	0.5	0.5	0.54	0.53	0.48
MgO	29.69	24.7	25.54	25.98	10.9	10.92	12.9	12	12.47	31.9	32.31
CaO	2.84	4.41	4.11	3.76	13.9	15.82	14.1	15.3	15.08	1.37	0.91
Na ₂ O	0.37	0.47	0.52	0.24	0.65	0.82	0.46	0.45	0.42	0.12	0.15
K ₂ O	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14	0.43	0.11	0.13	0.10	0.04	0.05
P ₂ O ₅	0.39	0.39		0.51				0.11	0.12	0.04	0.08
S		0.1		0.56			0.04	0.04		0.04	
H ₂ O+	0.28			0.3							
H ₂ O-	0			0							
FeS	0.25					0.0					
Ni	0.024										
Total	100.604	101.71	99.9	100.5	97.7	100.25	99.56	100.64	99.77	99.73	100
Ni (ppm)				193							
Co (ppm)				<30							

データは URL: [http:// www-curator.jsc.nasa.gov/curator/antmet/marsnets/SampleSummary.htm](http://www-curator.jsc.nasa.gov/curator/antmet/marsnets/SampleSummary.htm) と Yanai (1997) による。

かっている。それは、各隕石がすべて類縁関係のある火成岩であることが明らかになってきたからである。まず、すべてが同源のマグマから形成されたという立場で起源を考える（三河内・宮本，1997）。マグマから最初に晶出したのはクロム鉄鉱とカンラン石である。このようなクロム鉄鉱やカンラン石は EETA79001 の岩相 A に含まれる外来結晶として産する。次いで輝石（斜方輝石あるいはピジョン輝石）が晶出する。カンラン石を輝石が取り囲んだポリキリティックな組織を持つ ALH77005、LEW8856、Y793605 の lherzolite タイプが形成される。カンラン石の晶出が終わり、ピジョン輝石と普通輝石の2種の輝石が晶出し、Shergotty、Zagami、EETA79001 の岩相 A を形成する。最後に斜長石が晶出して、輝石と斜長石のインターステイシャル組織を持つ QUE94201、EETA79001 の岩相 B を形成される。

このような一連の形成過程で説明できるのは、shergottite が一つの火成岩体として形成され、一つのインパクトで火星からはじき飛ばされたものであることを強く示唆する。

orthopyroxenite

orthopyroxenite グループは、ALH84001のみである。orthopyroxenite グループは、地球の斜方輝石岩に類似する。

ALH84001：ほとんど角礫状の斜方輝石（En₇₀Fs₂₇Wo₃）から成る（90%以上）超苦鉄質岩である。少量のマスクリナイト化した斜長石と鉄にとむ炭酸塩鉱物（Fe₂₉Mn₆₀Ca₁₁）、クロマイトを含む。炭酸塩鉱物は体積で1%ほど含み、隕石の中でも非常に特異である。当初は diogenite に分類されていた。しかし、斜長石の組成が An₃₅₋₃₉と他の SNC と同じであることから、diogenite とは区別で

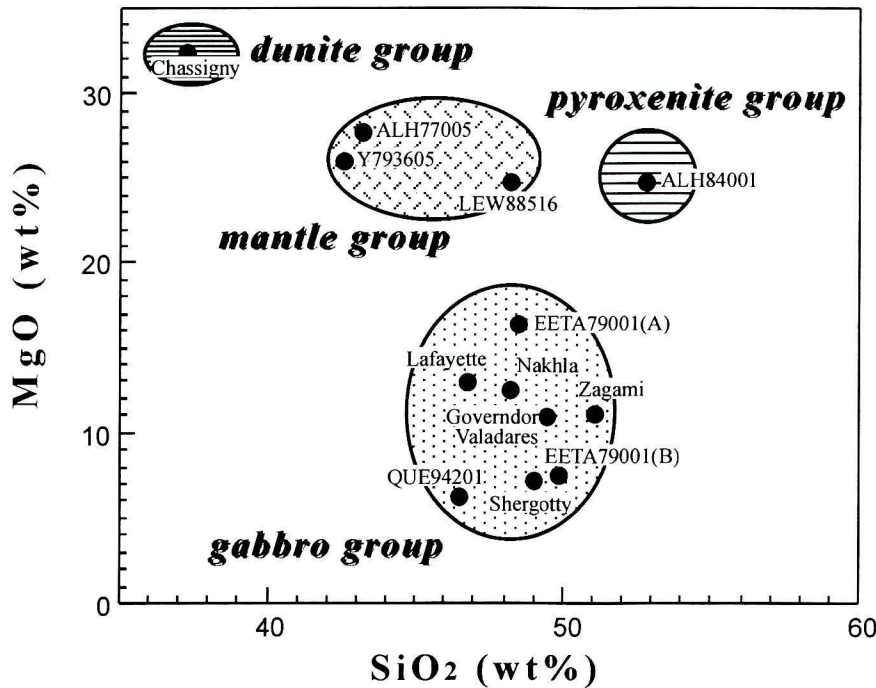


図1 火星起源隕石の SiO_2 - MgO
データは、表8のものを使用した。

きる。

nakhlite

nakhlite グループは、Nakhla、Lafayette、Governador Valadares の3個である。nakhlite は8割以上の普通輝石からできており、1割強のカンラン石と少量の斜長石を含む。普通輝石は弱い累帯構造を示すが、カンラン石は均質な化学組成を持つ。nakhlite は典型的な集積岩の組織を持つ。nakhlite グループは、地球のカンラン石単斜輝石岩 (olivine-clinopyroxenite) に類似している。

Nakhla: 普通輝石 ($\text{En}_{38}\text{Fs}_{23}\text{Wo}_{39}$) とカンラン石 (Fo_{23-33}) からなり、少量の斜長石 ($\text{An}_{30}\text{Ab}_{65}\text{Or}_5$)、カリ長石 ($\text{An}_5\text{Ab}_{30}\text{Or}_{65}$) とマグネタイトを含む。

Lafayette: 普通輝石 ($\text{En}_{38}\text{Fs}_{23}\text{Wo}_{39}$)、カンラン石 (Fo_{23-33}) そしてマスケリナイト化した斜長石 (An_{53}) からなる。

Governador Valadares: ピジョン輝石の離葉組織を持つ普通輝石 ($\text{En}_{39}\text{Fs}_{23}\text{Wo}_{38}$) を主とし、カンラン石 (Fo_{33}) からなる。少量のマグネタイト、斜長石、ガラスを伴う。

nakhlite は、普通輝石と少量のカンラン石が晶出し、粒間に残った液から斜長石が晶出した。元素の拡散により、カンラン石は Fe に富む均質な結晶へと組成を変化させ、普通輝石には累帯構造が残されたと考えられる (Harvey & McSween, 1992)。このような成因は nakhlite が溶岩ではなく、やや深部でゆっくりと結晶化し再結晶化したことを示している (McSween, 1994)。

chassignite

chassignite グループは、Chassigny の1個のみである。chassignite グループは、地球のダナイト (dunite) に相

当する。

Chassigny: ほとんどカンラン石 (Fo_{67}) からなり、少量の普通輝石 ($\text{En}_{69}\text{Fs}_{28}\text{Wo}_3 \sim \text{En}_{45}\text{Fs}_{12}\text{Wo}_{43}$)、斜長石 (An_{16-37})、クロム鉄鉱を伴う超苦鉄質岩のダナイト (dunite) である。カンラン石の液体包有物中から含水珪酸塩鉱物のケルスート閃石と黒雲母が見つかった。

chassignit はほとんどカンラン石からできており組織も集積岩である。形成過程はより集積岩的であるが、カンラン石と輝石の量の違いがあるだけで、nakhlite と似た起源であると考えられる (三河内・宮本, 1997)。

4 火星起源隕石の化学組成

火星起源隕石12個の主要化学組成はすべて求められている。その化学組成を表8にまとめた。

図1より、火星起源隕石は、4つのグループに分かれることがわかる。矢内 (1996) は pyroxenite グループ、dunite グループ、mantle グループそして gabbro グループと呼んだ。pyroxenite グループは ALH84001 からなり、dunite グループは Chassigny からなり、mantle グループは ALH77005、Y793605、LEW88516 からなり、そして gabbro グループは Zagami、Shergotty、EETA79001、QUE94201、Nakhla、Governador Valadares、Lafayette からなる。矢内 (1996) は化学組成から、ALH77005 が推定される火星マントル組成 (Wanke & Dreibus, 1988) に類似することから、mantle グループは火星マントルを代表していると考えた。このようなマントルを起源としてマグマができ、その沈積相が dunite グループになり、残りのマグマが gabbro グループとして固結したと考えた。pyroxenite グループはマグマオーシャンが固まったときの地殻に相当すると考えた。

Yanai (1997) は、火星起源隕石を化学組成から、さ

らに chassignite (dunite) グループ、Yamato (lherzolite ~ ol-webstelite) グループ、nakhlite (wehrlite) グループ、shergottite (gabbro) グループ、ALH84 (orthopyroxenite) グループの 5 つのグループに区分した。

インコンパティブル元素 (immcompatible elements) のうち揮発性の違うものを比べると、天体固有の値を持つことがわかってきた (Dreibus & Wanke, 1985)。インコンパティブル元素は、一般に化学的に正の相関を持つ。同じ天体では、起源の全く違う岩石も同じ直線状の相関を持つ。このような相関を分化線と呼ぶ。分化線は平行であるが、天体毎に違ったものとなる。図 2 の K-La の相関を見ると、同じ La 濃度で比べると、K の濃度が、月、玄武質エイコンドライト、地球、火星起源隕石の順に富んでいる。一般的には、火星起源隕石は、中程度の揮発性のアルカリ元素 (K、Na、Rb など) に富んだ天体である。

親銅元素 (Co、Ni、Ca、In、Tl など) は地球に比べて著しく乏しい。このような傾向は火星の核に FeS が多いことを反映していると考えられる。FeS の核への移動に伴って親銅元素が核に多く分配され、地殻やマントルから枯渇したと考えられる。

shergottite グループの basalt タイプは、地球や月の玄武岩とは違っている。火星の玄武岩は、地球のものと比べて、Al₂O₃ やアルカリ元素に乏しく、FeO が多い。

月の玄武岩と比べると、TiO₂ に乏しく、Fe₂O₃ やアルカリ元素、H₂O に富むという特徴がある (池田, 1997)。

火山岩は、マグマの組成を反映しているため、マグマが由来した起源物質やマントルを推定することができる。一方、shergottite グループや orthopyroxenite グループの沈積岩の場合は、直接マグマの組成を反映していないため、マグマの由来を調べることは難しい。しかし、nakhlite グループや chassignite グループは、沈積岩の隙間を埋めていた物質の組成や結晶中のマグマ包有物から、もとの玄武岩マグマの組成を推定することができる (池田, 1997)。

chassignite を枕積岩相として晶出させたマグマは、地球のボニナイト・マグマに似ている。nakhlite を枕積岩相として落としたマグマは、地球の岩石と比べるとピクライト質玄武岩マグマあるいはコマチアイト・マグマに類似したものである (池田, 1997)。

nakhlite の希土類元素 (rare earth elements: REE と略す) は、軽 REE に富み重 REE に乏しい分化したパターンを示す。このようなパターンは、沈積岩相という岩石学的特徴と矛盾するものである。このような矛盾は、nakhlite のメソスタシス中に液相濃集元素が分布するためによることがわかった。見かけは沈積岩相の様相を呈するが、鉱物粒間には、分化した残液が固化したものが

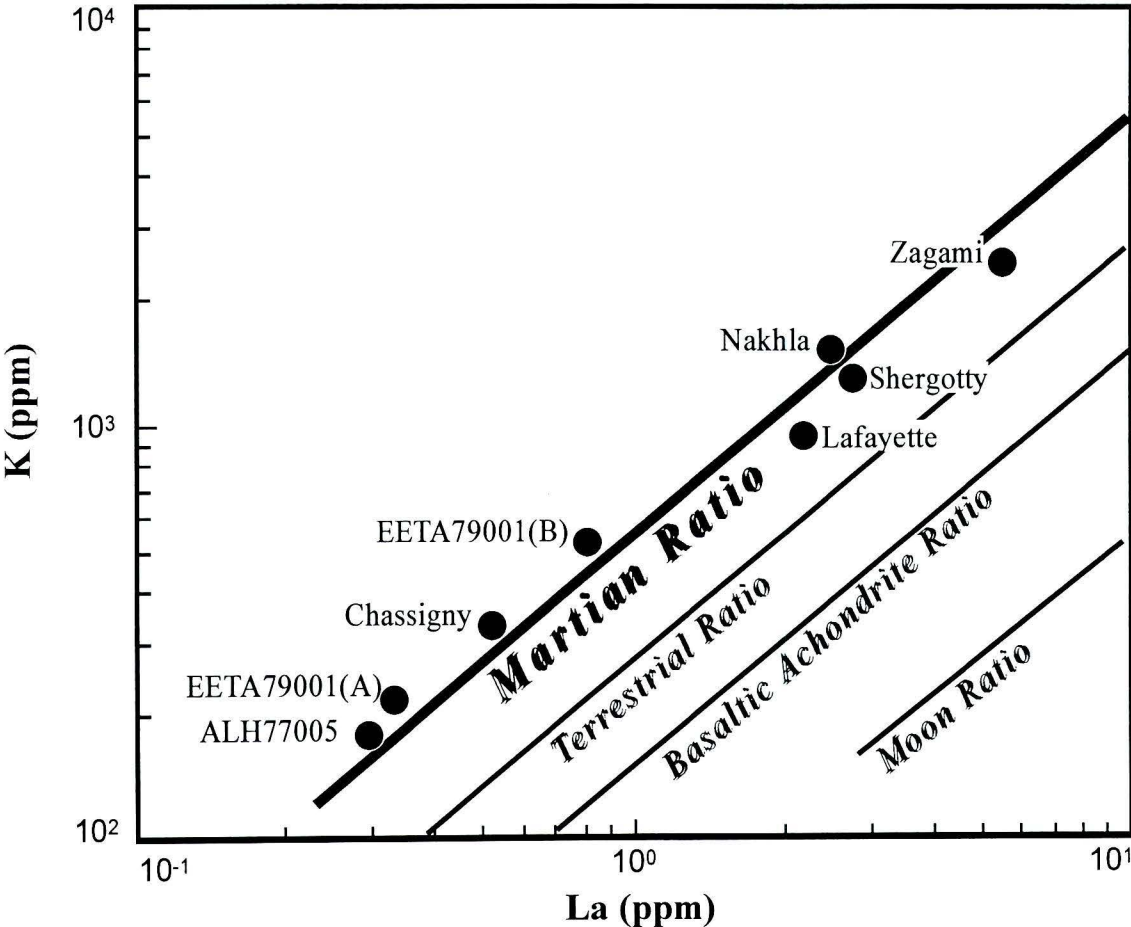


図 2 火星起源隕石の K-La

たくさん埋めている。

shergottite は軽 REE が乏しく、重 REE は Dy 付近で凸のパターンを持つ。basalt タイプの shergottite は lherzolite タイプの shergottite に比べて REE の濃度が高く、軽 REE に富み、重 REE に乏しい。このような特徴は basalt タイプの shergottite が液の成分が多いという岩石学的特徴と一致する (中村, 1997)。

火星起源の隕石中の磁鉄鉱やイルメナイトから、マグマ固結時の酸素分圧を推定することができる。火星のマグマの酸素分圧は QFM (石英-ファヤライト-磁鉄鉱) バッファ付近である (池田, 1997)。この酸素分圧は、地球のマグマより還元的で、月のマグマより酸化である。

含水鉱物から水蒸気分圧が推定できる。もし角閃石がマグマと平衡に晶出したとすると、角閃石は斜長石より先に晶出したことになる。火星のマグマの水蒸気分圧は 100MPa 以上でなければならない。このような圧力は、火星では地下 7.5km 以深で達成される。

shergottite タイプと orthopyroxenite タイプは、マスケリナイト化した斜長石を含んでいる。マスケリナイト化とは斜長石が激しい衝突によってガラス状になったものである。カンラン石や輝石も激しい衝撃を受けて、結晶構造が変化している。その衝撃の圧力は、30~45GPa であると見積もられている。shergottite タイプの ALH77005 では、衝撃溶融でできたガラスのポケット (shock melt pocket) や脈 (shock melt vein) ができ、衝撃はさらに強く 60GPa に達していると考えられている (池田, 1997)。

nakhilite グループや chassignite グループにも、斜長石があるが、マスケリナイト化はしていない。しかし、カンラン石や輝石は衝撃を受けているため、25GPa 以下の衝撃圧であったと考えられる。

5 火星起源隕石の年代

物体に含有されている放射性核種を精度良く測定すると、その物体に刻まれたいろいろな時間の情報が読み取れる。

物体は宇宙空間では高エネルギーの宇宙線 (陽子) による核反応によって、物質内部に宇宙線生成核種ができる。宇宙線生成核種のうち、 ^3He や ^{21}Ne 、 ^{38}Ar などの安定核種は物質内部に蓄積され、その量を測定すれば、宇宙空間に存在した期間 (宇宙線照射年代) がわかる。宇宙線には、太陽フレアによるもの (10~100MeV) ともっと高エネルギーの銀河系からくる宇宙線 (1~10 GeV) がある。太陽起源の宇宙線は物体内に 1~3 cm 程度しか進入できない。隕石が大気圏に突入するときに表層部はほとんど消失してしまうため、太陽宇宙線で形成された核種は、検出しにくい。銀河宇宙線はメートル・オーダーで物体内に進入する。宇宙線照射年代は銀河宇宙線によるものである。

宇宙線生成核種のうち ^{10}Be や ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{53}Mn などの放射性核種を用いると、比較的短い照射の期間や照射の条件 (シールドの大きさ、太陽宇宙線の影響)、大気圏突入時の表面溶融量の見積もりなどを求めることができる (長尾, 1997)。

火成年代と固結年代は、似た意味で使われる。火成年

代とは火成作用が起こった時期を示し、固結年代はマグマが固まった時期を示す。

宇宙線生成放射性核種のうち半減期の比較的短いものは崩壊と生成の量が平衡に達する。平衡に達した放射性核種が宇宙線の当たらない天体 (地球など) に落下すると、放射性核種の崩壊が起こる。その放射性核種と娘核種を測定すれば、天体に落下した年代 (落下年代) がわかる。

放出年代は、隕石が属していた天体 (母天体) から放出され、天体 (地球) に落下するまでの期間を意味する。放出年代は、宇宙線照射年代と落下年代を足したものである。宇宙線照射年代は普通 100 万年より長く、落下年代は 30 万年より短いため、放出年代は宇宙線照射年代にほぼ等しい (長尾, 1997)。

火星起源隕石の火成年代は、orthopyroxenite の 45.0 億年前が一番古い。nakhilite の固結年代は 13 億年前で、shergottite は 1.5~1.8 億年前である (表 9)。

nakhilite の 13 億年前の年代については、様々な議論が起こった。しかし、Nd-Sm 系での鉱物アイソクロンによる年代決定により火成年代であると決着が付いた (Nakamura et al., 1977)。

chassignite も 13~12 億年前の年代が出されている。風化作用や衝撃による変形を受けているが、この年代は火成年代であると考えられている。

shergottite は、斜長石がマスケリナイト化していることから強い衝撃を受けていることがわかる。shergottite は鉱物粒間にメルト成分が多く含まれている。年代決定に使われる元素 (K、Rb、Sr、Sm、Nd、U、Th) は液相に濃集しやすいため、メルトの効果を考慮しなければならない。shergottite の年代の解釈をめぐって様々な議論がなされた。大きく分けて、36 億年前、25 億年前、18 億年前、13 億年前の 4 つの年代がある。36 億年前は Rb-Sr や Nd-Sm のアイソクロン年代 (Jagoutz & Wanke, 1986) で、25 億年前は Ar-Ar 年代 (Bogard et al., 1979)、18 億年前は Rb-Sr のアイソクロン年代 (Shih et al., 1982)、13 億年前は Nd-Sm の全岩アイソクロン年代である (Shih et al., 1982)。一般には 36 億年前は、メルトのミキシングによる見かけによるアイソクロン年代で、18 億年前が火成年代、25 億年前は Ar の不完全脱ガスの効果と考えられる (中村, 1997) が、決着は付いてない。

orthopyroxenite は、Rb-Sr 法と Nd-Sm 法による 45.6 億年前 (Jagoutz et al., 1994) と 45.0 億年前 (Nyquist et al., 1995) がある。Ar-Ar 法による 40 億年前 (Ash et al., 1996) は、衝突年代である。炭酸塩鉱物の年代は K-Ar 法では 36 億年前 (Knott et al., 1995) と、炭酸塩鉱物とマスケリナイトを結んだ Rb-Sr アイソクロン年代は 13.9 億年前 (Wadhwa & Lugmair, 1996) の 2 つの年代が発表されている。

宇宙線照射年代は、orthopyroxenite、nakhilite と chassignite の宇宙線照射年代は 1200 万~1500 万年、shergottite は 250 万~280 万年である。EETA79001 は 60 万年という一番短い年代を示す。

同じ岩石タイプの火星起源隕石は、似た放出年代を持つ。一番古い ALH84001 の 1440 万年から一番若い EETA

表 9 火星起源隕石の放射性年代

Name	Crystallization Age				Ejection Age	Exposure Age	Terrestrial Age
	Ar-Ar	Rb-Sr	Sm-Nd	U-Th-Pb			
ALH84001 (whole rock)	3840 ± 50	4500 ± 130	~ 4560	-	14.4 ± 0.7	14.3 ± 0.7	0.0065
" carbonate	~ 3600						
" maskelynite	4010 ± 14						
" maskelynite	3940 ± 70						
" maskelynite	4110 ± 90						
" carbonate+maskelynite		1390 ± 1000					
Shergotty	245 ± 10	165 ± 11 360 ± 12	(360) 360 ± 16 (1220)	170 ± 30 200 ± 4 205 ± 8	2.71 ± 0.45	2.71 ± 0.42	-
Zagami	250 ~ 260 186 ± 5	180 ± 4 186 ± 37	116 ± 47	170 ± 30 230 ± 5	2.76 ± 0.50	2.76 ± 0.50	-
					229 ± 8		
EETA79001	176 ± 26	-	-	170 ± 30	0.82 ± 0.25	0.65 ± 0.20	0.17
QUE94201	144	327 ± 12	327 ± 19		2.91 ± 0.60	2.62 ± 0.58	0.29
ALHA77005	(1050)	187 ± 12 156 ± 6 185 ± 25 173 ± 10 15 ± 15	135 ± 40 240 ± 150	150 ± 15 170 ± 29	3.52 ± 0.60	3.32 ± 0.53	0.21 ± 0.08
LEW88516					4.00 ± 0.60	3.98 ± 0.58	0.0215
Y793605					-	5.4 ± 0.3	0.035 ± 0.035
Nakhla	1300 ± 30	1310 ± 20 1224 ± 12	1260 ± 70	1280 ± 50	11.6 ± 2.00	11.6 ± 2.0	-
Lafayette	1330 ± 30	-	-	-	11.4 ± 2.10	11.4 ± 2.1	-
Governador Valadares	1332 ± 40	1330 ± 10	-	-	10.0 ± 2.0	10.0 ± 2.0	-
Chassigny	-	1223 ± 14	1360 ± 60	-	11.6 ± 3.6	11.6 ± 3.6	-

年代はすべて 100 万年 (Ma) の単位で示した。() 内のデータは精度が良くないものである。データは中村 (1997)、池田 (1997)、長尾 (1997)、Yanai (1997) のコンパイルによる。

79001の80万年までに、5 から 6 回の隕石を放出した事件があったことが推定される。basalt タイプの shergottite (Shergotty, Zagami, QUE94201) が約280万年、lherzolite タイプの shergottite (ALH77005, LEW88516) が約380万年、ただし Y793605の照射年代は540万年である (Nagao et al., 1997)、nakhlite (Nakhla, Lafayette, Governador Valadares) は約1100万年、chassigny は1160万年である。

6 火星起源隕石の起源

火星起源隕石は、他の隕石には見られない角閃石や磁鉄鉱を含むため、地球の火成岩に似た「特殊な隕石」と考えられていた。

1970年代末には、多くの研究者は「特殊な隕石」が火星起源ではないかと考えるようになった。1980年頃からその起源について論争が起り、1984年頃には「火星起源隕石」であることが決着した。その証拠は、火星起源隕石が以下のような特徴をもつことである。

・特異な酸素同位体を持つ

火星起源隕石の酸素同位体組成は、地球と月起源の岩石固有の値とは違うため、区別できる。地球や月とは別天体の起源でなければならない (Clayton & Mayeda, 1996)。これは、地球や月とは別の軌道上で別の材料から

形成されたことを意味する。

・希ガスの同位体組成が火星大気と一致する

1976年に Viking 1 と 2 が相次いで着陸し、火星大気の希ガス同位体組成が求められた。火星起源隕石は、他の隕石や月隕石、地球大気とは全く違い、火星大気の希ガス組成と一致した。

・火成岩の沈積岩の組織を持つ

沈積岩 (cumulate) とは、マグマから晶出した結晶が沈み、マグマ溜まりの底にたまったものである。このような火成岩組織は大きな重力を持つ天体でできたことを示す。

・含水鉱物が存在する

含水鉱物は水の存在下で形成される。水の存在した証拠がある天体は火星だけである。

・強い衝撃を受けた

強い衝撃を受けた証拠は、結晶が一部溶けだしたり、斜長石が非晶質化したマスケリナイトという鉱物になっていることからわかる。このような衝撃は、火星表面に小天体が衝突して火星の岩石を砕き飛ばしたものと考えると説明できる。

・形成年代が若い

多くの隕石が約45億年を示すのに対し (小出, 1995a)、

火星起源隕石は ALH84001 を除くと 13 億年から 1.8 億年前の若い年代がでている。惑星形成 (45.6 億年前) から最近 (1.8 億年前) まで火成作用が続いた天体は、天体内部に保存された熱エネルギーが多かったことを意味する。大量の熱エネルギーを蓄えるには天体のサイズが大きくなければならない。金星、地球、火星のような大きさでなければならない。水星や月では小さすぎる。

・大きな天体で形成される REE パターンを持つ

nakhlite の REE パターンは軽 REE に富み、重 REE に乏しい。このような REE パターンは、ガーネットからなるマントルの部分溶融とガーネットの分別結晶作用によって作られる。ガーネットは高圧鉱物で、小天体内部では存在できない。月より大きな天体内部でないとガーネットは形成されない。このようなことから、火星以上の大きさの天体でなければならない。

7 火星起源隕石からの「生命化石」発見

McKay et al. (1996) の報告が掲載される前に、NASA の長官がプレス発表し、マスコミがセンセーショナルに取り上げた。新聞各紙は 1996 年 8 月 7 日の朝刊から、火星生物 (?) の写真を載せた。8 月 7 日、大統領再選中のクリントン大統領が、この件について発言したため、マスコミの扱いは大きくなった (例えば、Newsweek 日本語版 1996 年 8 月 28 日号, 14-23)。当然、天文や地質関連の雑誌でも大きな話題として取り上げた (例えば、Nature, 1996, August 15, 575-577; GSA Today, 1997, July, 1-7; Astromy, 1996, November, 46-53)。

McKay らの論文はアメリカの科学雑誌 Science に掲載された。科学界での反響が大きく、Science 誌上で、McKay らの論文に関する公開の議論がおこなわれた。公開の議論とは、誌上で McKay らの論文に関する問題点や疑問点を指摘し、著者がそれに対して回答するというものである。

Science 誌以外の場でも、McKay らの論文に関しては、さまざまな議論がなされている。このような議論を積み重ねて、今回の報告に関する各種の問題点や課題が明らかにされてきた。以下では、主要な議論をまとめて示す。

McKay et al. (1996) 論文

ALH84001 の形成年代 (固結年代、結晶化年代) は 45.6 億年前である。おそらく 40 億年前頃に亀裂ができ、36 億年前にその亀裂に炭酸塩鉱物が形成された。1500 万年前に小天体の衝突によってはじき飛ばされ、宇宙空間を漂い続けた。多数の破片のうち、発見されたときに約 1.9 kg となる破片が、地球軌道に入り、1 万 3000 年前に南極に落下し、1984 年に発見された。1993 年に火星起源隕石とされ、1996 年に生命化石の痕跡が発見されたとの報があった。これが ALH84001 の略歴である。

ALH84001 には割れ目があり、炭酸塩鉱物の小球体 (globule) が特徴的に存在する。その炭酸塩鉱物やその周りに発見される物質の組成、状態、組織などが生物の特徴を示すとしている。

生命化石の根拠をまとめると、以下の 4 点に要約される。

(i) 炭酸塩鉱物は無機的には形成しにくい化学組成である

炭酸塩鉱物の小球体 (1~250 μm) は、36 億年前の年代を示す。これは 36 億年前には、火星に水と CO₂ が存在していたことを示し、その頃火星には水や大気があったことと対応している。δ¹³C (-17~+42‰) は無機的に形成するには幅が広く軽い。δ¹³C の値を広く軽くするメカニズムは生命活動が主要な要因である。また、炭酸塩鉱物の化学組成 (Ca, Mn, Fe, Mg など) や同位体組成 (¹⁶O) のデータは、生物起源と考えてもよい。

(ii) 炭酸塩鉱物には数種類の PAH が存在する

多環式芳香族炭化水素は、polycyclic aromatic hydrocarbons の和名で、PAHs と略される。発見された PAHs は、三環式のフェナントレン (C₁₄H₁₀)、四環式のピレン (C₁₆H₁₀)、三環式のクリセン (C₁₈H₁₂)、五環式のピリレン (C₂₀H₁₂) あるいはベンゾピレン (C₂₀H₁₂)、六環式のアンケンスレン (C₂₂H₁₂) などである。PAHs は単純な分子だが、複雑な有機物が続成作用で分解したと考えられる。PAHs は炭酸塩物質の多いところに多く分布し、1 ppm ほどの含有量がある。PAHs の濃度分布を見ると地球での汚染と考えられない。

(iii) 炭酸塩鉱物の微粒子の周りに化学的に共存できない鉱物の共存する

化学的に共存できないはずの磁鉄鉱 (magnetite) や磁硫鉄鉱 (pyrrhotite) が共存している。両鉱物は単粒の小球体 (spherule) で、10~100 nm のサイズである。両鉱物の形成の酸化還元条件は著しく違う。酸化的環境で形成される磁鉄鉱と炭酸塩溶解痕が、還元的環境で形成される磁硫鉄鉱と共存している。固溶体を形成するはずの鉄炭酸塩とマグネシウム炭酸塩が共存している。磁鉄鉱や磁硫鉄鉱は、2 次的に生成されたもので、地球の走磁性細菌が作り出す鉱物と形態が似ている。

(iv) 炭酸塩鉱物の表面に特異な形態の微粒子が存在する

20~100 nm の微粒子は、卵型でウーボイド (ovoid) とよばれ、特異な形態を持つ炭酸塩である。微粒子は、サイズは非常に小さく、ナノバクテリアのサイズである。形態は地球生物のバクテリアに類似し、火星のナノバクテリアの化石痕ではないかと考えられる。

McKay et al. (1996) は、以上の特徴の一つ一つは無機的にも形成可能だが、総合的に判断して生物が関与してものとするのが良いとしている。

Anders (1996) の議論

・PAHs は無機的に生成可能であるし、その種類が少なすぎる。そして、炭酸塩粒子と同時に形成されたとしているが、PAHs は吸着しやすい性質を持っているために、成因が異なっても吸着したかも知れない。

・化学的に共存できない鉱物とされているが、無機的に共存可能である。

・形態だけからでは形成機構を特定できない。各種の非生物起源のものと比較検討が不充分である。

回答: McKay et al. (1996)

100 μm の非常に小さい領域で鉱物は共存している。このような領域での変質鉱物の組合せはない。炭素粒子

は炭素質コンドライトの低温変質で生成されるが、異なる生成環境の非平衡なものである。無機生成の可能性を認めるが、複雑な過程を想定しなければならない。また、このような形態を持つ構造は他の隕石では認められない。

Sheater & Papike (1996) の議論

- ・ALH84001の黄鉄鉱のイオウ同位体分析から、+5～+8‰という $\delta^{34}\text{S}$ を得た。嫌気性細菌による同位体分別や酸化環境での無機形成の可能性はある。しかし、月では、micro-impactで無機的に同位体分別した例があり、火星でも同じことが起こったかも知れない。
- ・地球最古の還元的硫黄細菌の出現は27億年前で、進化の時間を考えると38億年前の火星では出現できなかった可能性がある。

回答：Gibson, Jr. et al. (1996)

Sheater & Papike (1996)らの分析した黄鉄鉱は15～40 μm より小さく、熱水などの別の起源が考えられるので黄鉄鉱を議論の対象として使えない。細粒の硫化鉄鉱はCs+のビームが8 μm までしか絞れないので、分析できない。Sの同位体組成のデータは議論に使えない。

Bell (1996) の議論

PAHsが、無機的にできた他の隕石から供給された可能性がある。PAHsは隕石中には普遍的にあり、月面にも1～2%存在する。火星表面では有機物が紫外線によって分解されるため、存在しないかも知れないが、深部には存在可能である。有機物に富むクラスDの小天体が低角度で衝突し、火星深部に有機物が供給されれば長く存在できる。PAHsの質量頻度分布がCMコンドライトと同じであることは、このような起源を示唆している。

回答：Clemett & Zare (1996)

PAHsの構造からは生物起源か否かは判定できない。この隕石は火成岩で、炭素は含まず、PAHsは系外から来た成分である。炭酸塩粒子とPAHsの分布に相関が見られたことから、成因関係があると考えられる。

赤井 (1996, 1997a, 1997b) の議論

- ・南極での汚染
- 極寒の世界に住む細菌もある。有機物の増加は1.2mmまでの内部までしか示されていない。溶融皮膜(fusion crust)から分析をしているが、溶融皮膜はもとも有機物の含有量は少ない。
- ・火星生命を地球型生命と比べて判断してよいのか
- ・走磁性細菌は36億年前に誕生できない
- 地球の走磁性細菌は20億年前に出現したもので、細菌の中でもかなり進化したものである。そのため火星でも36億年前では走磁性細菌まで進化していないのではないかと考えられる。
- ・火星に磁気があったのか
- 現在では火星にはほとんど磁気がない。磁鉄鉱がもっている性質を有効に利用するのは、方向センサーとしてである。このような性質を利用しているのは、走磁性細菌である。走磁性は磁気がある環境で有効な機能

だが、現在磁気のない火星で有効に利用したのであろうか。火星には過去に磁気があったのか。

- ・地球での磁鉄鉱のバイオミネラリゼーションは主要なタイプでない

- ・地球の走磁性細菌は微好気性で水環境を好む
- 水があるなら風化過程があり、粘土鉱物が産出するはずだが報告されていない。

このような疑問点があり、解決されていないのに総合的に判断して生命活動があったとは考えられない。

小島 (1997) の議論

1996年11月22日、国立極地研究所でおこなわれたシンポジウム「火星隕石と生命」における議論を総括している。シンポジウムでは、慎重派あるいは懐疑派が議論の主流となった。議論の概要を要約すると、以下のようになる。

- ・形態の類似だけで、生体の証拠はない
- ・生命体にしては小さすぎる
- ・細菌と鉱物のサイズ分布が異なる
- ・PAHは4種で、無機的なPAHは30種以上ある

以上の点から、現時点では、生物の痕跡とするには不十分である。

Mikouchi et al. (1997) の議論

炭酸塩粒子に対する鉱物学的特徴について検討した。その結果、炭酸塩粒子に見られる各種の現象は、無機起源よりも、生物起源の可能性が高いように見えるが、生物起源での説明もかなり困難である。現在のデータでは、生物源か無機起源かは判断できない。ALH84001や火星起源の隕石をもっと調べる必要がある。現状では、否定とも肯定ともつかないのが結論である。

池田 (1997) の議論

- ・炭酸塩鉱物の形成年代
- 形成年代は従来36億年前と考えられていたが、Wadhwa & Lugmair (1996)は約14億年前という結果を報告した。もしこの14億年前という年代が正しければ、火星は現在と同じように、液体の H_2O は存在せず、生命発生や生存には不適な環境となっていた可能性が高い。
- ・炭酸塩グロビュールの起源
- 酸素同位体のデータからは、炭酸塩鉱物は低温(0～80℃)で析出した可能性がある。一方、炭酸塩グロビュールの熱水(650℃以上)起源説(Harvey & McSween, 1996)もある。ALH84001には含水鉱物がない。以上の主張がすべて正しければ、以下の形成条件となる。熱水が短時間のみ進入し、高温から低温にわたって、含水鉱物を作らずに、炭酸塩物質のみを析出したことになる。このような条件は、生命生存には不適である。
- ・炭酸塩ウーボイドのサイズ
- 炭酸塩ウーボイドのサイズは、20～100nmしかなく、非常に小さい。地球の細菌では10 μm 以上ある。ALH84001の化石は酸素イオン(0.27nm)100個分のサイズしかない。生物としては小さすぎる。
- ・磁鉄鉱と硫化物の起源

磁鉄鉱や硫化物が生物起源のものがあることは知られている。しかし、他の火星起源隕石にもこれらの鉱物は普通に産し、無機的に形成されたと考えられる。したがって、ALH84001だけが生物起源とは考えられない。

・炭化水素の起源

炭化水素は、他の火星起源隕石でも発見されているが、地球での汚染と考えられる。他の隕石でも各種の有機物が発見されているが、すべて無機的に形成されたとされている。ALH84001の炭化水素が、生命の有機物起源であれば、窒素やリンなどを含む有機物が存在しても良いのだが、発見されていない。

・総合的判断

総合的に判断して無機起源より、生物によって形成されたと考えたほうがよいとしているが、「彗星衝突説」のほうが、総合的によいと考える。「彗星衝突説」とは、氷と岩石片、各種の炭化水素を含む彗星が火星に衝突し、炭酸塩鉱物や磁鉄鉱、硫化物が析出したという説である。

下山 (1997) の議論

・PAHs の検出法

質量数だけで有機物を同定しているが、同じ質量数だが異なった化合物や異性体も一つのピークとして検出してしまう。有機物を同定するときは質量数だけでは不十分である。

・PAHs の種類と存在度

検出された質量数のピークは178、202、252、278である種のPAHsに相当するとしている。しかし、異性体は区別されていない。

・PAHs の分布と起源

ALH84001から検出されたPAHsは、同じ方法で分析された別の南極隕石 (EETA79001) から発見されたものと類似している。しかし、ALH84001から検出されたPAHsは生物起源で、EETA79001から発見されたものは南極の氷からの汚染 (McDonald & Bada, 1995) というのは変である。溶融皮膜に比べて炭酸塩類は有機物を付着しやすいので、汚染の反映かもしれない。

秋山 (1997) の議論

・サイズ

火星隕石の構造体のサイズは20~100nmで、生命活動を営むには小さすぎる。

・母岩の種類

地球の微化石はチャートであるのに対し、火星隕石では石灰岩である。

・ナノバクテリアへの疑問

地球では30~50nmのナノバクテリアが化石や現世種として発見の報告があるが、まだ生命であると立証されていない。だから、火星隕石中の構造体をナノバクテリアとの類似性を根拠に生命とするのは問題がある。

・PAHs は生命の根拠たりえない

PAHsは炭素質コンドライトからも発見されており、太陽系初期には極普通に存在し得た化学物質である。PAHsの存在から生命の根拠とできない。

Gleason et al. (1997) の議論

隕石のREEパターンは、不均質で分化している。炭酸塩鉱物の複雑な累帯構造から、さまざまな組成を持ったCO₂に富む流体から非平衡に形成されたことを示している。以上の根拠から、炭酸塩は無機的にできた。

McKay らの論文の意義

どの反論や議論でもいくつかの問題点が指摘されている。この発見の重要性は多くの研究者が認めている (土山, 1997; 田崎, 1996)。現状のデータでは、結論は出せず、より詳しい調査が必要であるとしている。事実、マスコミがこれだけ騒ぎ、関連の学会誌も特集を組んでいるという点を見ても非常に衝撃的な論文であった。本稿も、McKay らの論文は大きな動機の一つとなっている。そして、研究者や一般市民の関心のもとMarspathfinderが発射され、成果を上げた。否が応でも、Viking 以来の火星への生命探査の要望が高まる。火星起源隕石からの生命化石の真偽のほどは不明である。決着はさらなる火星探査によってのみつくのであろう。

VI 地質学的アプローチ

生命の起源への地質学的アプローチは、地球の岩石から生命の化石を捜してその特徴を記載することである。古い生命の化石が発見されると、その判定をめぐる常に議論を生じる。その議論は、生命の本質に迫る内容が含まれている。ここでは化石の認定法と最古の化石についてまとめる。

1 化石の認定

古い時代の岩石から検出された微少な構造体を、化石であると認定するためには、以下のような根拠が必要である (秋山, 1997)。

- ・形態の類似
- ・構造体の生物学的特徴を持つサイズ分布
- ・細胞分裂の証拠
- ・有機物の存在
- ・炭素同位体組成の証拠

このような条件を満たしている時、生命の化石であると判定される。判定基準を満たしていないものは生命化石でないというわけではない。現在の基準では生命と判定できないのである。発生初期の生物は化石になりにくく、このような判定基準を超えた部分でおこなわなければならない。そのような基準として有効な手がかりは、有機物の化学的性質である。

有機化合物が非生物的過程によって形成される場合、熱力学的反応に従った組合せを持った一連の構造異性体を作る。一方、生物由来の有機化合物は熱力学的にエントロピーの小さな化合物を含む。

地球生物を構成している基本的な有機化合物は炭水化物、アミノ酸、糖類、脂肪酸、脂質 (脂肪酸以外)、核酸塩基である。地球生物内で、炭水化物は組織表面の保護の機能を持つ。アミノ酸はタンパク質として生体内の反応の触媒作用をしたり膜の物質となる。糖類は、炭水化物としてエネルギー貯蔵や細胞壁の形成をする。脂肪

酸は細胞膜の形成に使われる。脂質は細胞膜の機能維持を担う。核酸塩基は遺伝や複製をおこなう。

有機化合物は、堆積環境下でケロジェンと呼ばれる高分子化合物を経て、グラファイトへと変換されていく。このような有機化合物の構造が特異であったり選択的であった場合、生物起源の可能性は高くなる。従って生物が直接作った化合物でなくても、分解された痕跡であっても、生物の存在を推定することが可能となる。

以下では、有機物の時間的变化と生物の材料の認定基準をまとめる。

炭化水素

炭化水素は有機化合物の中では最も安定である。また、分析も比較的容易であることから、生命活動の根拠にされることが多い。炭化水素が直鎖状に連なった脂肪族化合物とベンゼン環を持つ芳香族化合物がある。生物起源の脂肪酸化合物は、炭素数が奇数のものの方が偶数のものより多くなる。芳香族化合物は、脂肪族化合物に比べて、水素結合量が少なく、二重結合の環状構造を持つため安定である。芳香族化合物は、隕石からも多数発見されている（下山, 1987）。また、生物が形成したものも知られているが、有機物の燃焼や二次的過程によって形成されることが多い。そのため、芳香族化合物の生物起源を検討する場合、充分注意する必要がある。

アミノ酸

違った構造を持つアミノ酸が無数といえるほど存在する。地球生命はその内、20種のアミノ酸だけを利用している。地球生命を作るアミノ酸は光学活性体(L-体)として存在している（グリシンは除く）。無機起源のアミノ酸はラセミ体と呼ばれる光学的に不活なものとなり、20種以外のアミノ酸も形成される。アミノ酸を生物の根拠とするには、その種類数あるいは組み合わせと、光学活性の有無が重要な点となる。

糖類

一番簡単な糖類であるホルムアルデヒドは、星間分子として宇宙空間に存在する。ホルムアルデヒドは無機的に形成されるが、隕石から糖類の発見はない。生体で糖類は、二酸化炭素から光合成によって形成され、光学活性をもつ。糖類は不斉中心（光学異性体を形成する分子の構造的因子）となる炭素原子を同一分子内に多く含んでいるため、もし糖類が検出された場合、その光学活性が重要な決め手となる。

脂肪酸

細胞膜を構成している脂肪酸は、炭素数が10~30の鎖が直鎖に連なったものである。炭素数は偶数が優勢である。隕石から検出された脂肪酸は10以下の炭素数で、構造的な特異性は認められない。そのため隕石の脂肪酸は無機起源であると見なされている。

脂質（脂肪酸以外）

脂質には、熱力学的にエントロピーの低い化合物が含

まれる。このような低エントロピー脂質は生物の関与が考えられる。脂質は、堆積物中で続成作用が進むと、芳香族炭化水素へと変化していく。ある程度以上に安定化が進むと、生物活動の特異な特性が失われていく。

核酸塩基

核酸塩基は、構造的には多くの類似体が存在するが、生物によって形成された核酸塩基は、4種類（厳密には5種）しかない。類似の分子は宇宙空間にたくさん存在するシアン化水素から、無機的に形成される。生命の痕跡として考えた場合、ある限られた数種の核酸のみで、類似の化合物が検出されない場合には、生命体の可能性が高いことになる（村江, 1997）。

2 最古の生命化石

古い生命は、古い岩石に含まれる。図3に太古代の地塊（craton）の中で一番古い岩石の産地と特徴をまとめた。岩石は時代が遡るほど、その分布や多様性は減っていく。それは地球表層が常に更新されているからである。

最古の碎屑性 zircon 粒子は西オーストラリアの42.76億年前で、最古の岩石は約40億年前のカナダ北西準州のアカスタ片麻岩で、最古の堆積岩はグリーンランド Isua 地方の38億年前のものである。

初期の生命は海洋で発生したと考えられる。海洋で生成された岩石は堆積岩である。生命の化石は堆積岩中に含まれているはずである。生命は有機物を材料としているため、高温高圧条件にさらされ変成岩になっていけば、生命の痕跡を発見するのは困難である。このような古い岩石のうち、生命の起源の探るのに重要なのは、変成作用を受けていない堆積岩である。

38億年前の化石

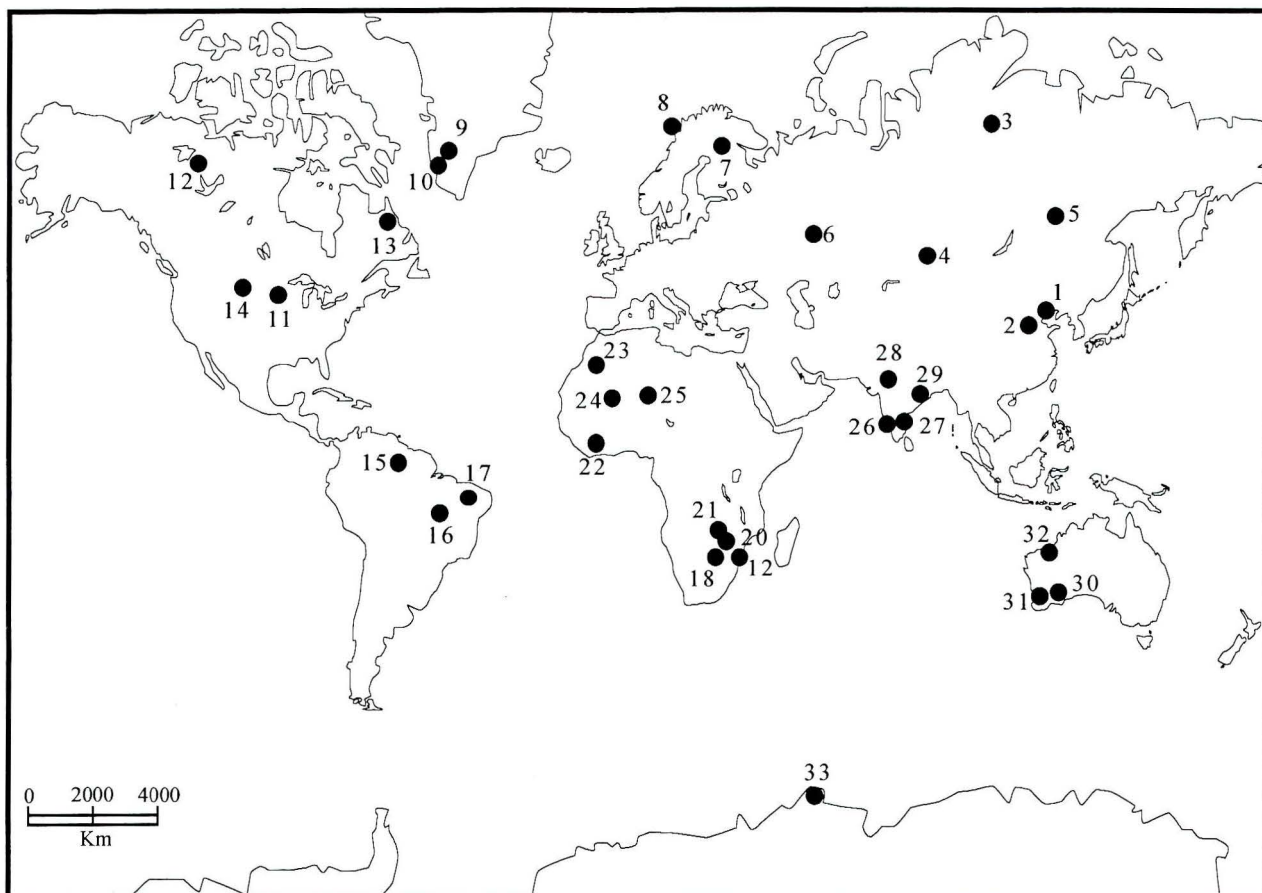
最古の生命は、最古の堆積岩から発見されるはずという考えでいくつかの試みがなされている（下山, 1995）。

地球最古の堆積岩はグリーンランド Isua 地方の38億年前のものである。そのため Isua の堆積岩から化石を出そうという試みが何度もなされた。1979年に Isuasphaera というイースト菌状の微化石が記載された（Pflug & Jaeschke-Boyer, 1979）。しかし、後に液体包有物であることが判明した（Bridgwater et al., 1981）。また、グラファイトの炭素同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) が、 -21% より軽いものがあることから、生物起源であるとされた（Schidolowski et al., 1979）が、決着はつかなかった。

グリーンランド Isua 地方の38億年前の縞状鉄鉱層（banded iron formation ; BIF と略される）と近くの Akikia 島にある38.5億年前の BIF に含まれるリン灰石（apatite）中の炭素質包有物の炭素同位体比を測定した結果、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比が低かった Mojzsis et al. (1996)。この値は無機的に形成される既知のものより低いことから生物活動があったことを示している。

このような報告に対して、疑問の声も上がっている（Holland, 1997）が、その決着はついていない。

BIF は海水中の Fe を酸化させ沈殿したものである。遊離酸素がまだない時代であるから、BIF は鉄細菌によ



Locality of the oldest rocks in cratons

- 1: sheared gneiss, Anshan area; 3.804 Ga (Liu *et al.*, 1992).
- 2: amphibolite, Tsazhuang; 3.470 Ga (Jahn *et al.*, 1987).
- 3: protolith, Anabar Shield; 3.2 Ga (Bibikova *et al.*, 1987).
- 4: East Sayan Fold Belt, Krasnogorsk; 3.2 Ga (Bibikova, 1984).
- 5: gneiss, Aldan Shield; 3.4 Ga (Bibikova *et al.*, 1986).
- 6: metavolcanic rocks, Ukrainian Shield; - 3.2 Ga (Shcherbak *et al.*, 1984).
- 7: metamorphic complex with gneiss, Karelian Province; 3.14 Ga (Lobach-Zhuchenko *et al.*, 1993).
- 8: Vikan gneiss, Lofoten Island, Baltic Shield; 3.460 Ga (Taylor, 1975).
- 9: Isua-Akilia supracrustal rocks, Greenland Shield; > 3.82 Ga (Goodwin, 1996).
- 10: Amitsoq tonalitic gneiss, Greenland Shield; 3.822 Ga (Kinny, 1986).
- 11: gneiss protolith, Minnesota River Valley, Superior Province; 3.8 - 3.5 Ga (McCulloch and Wasserburg, 1980).
- 12: Acasta gneiss, Slave Province; 3.962 Ga (Bowring *et al.*, 1989).
- 13: Uivak protolith, Nain Province; 3.9 Ga (Nutman *et al.*, 1989).
- 14: Wind River protolith, Wyoming; 3.96 - 3.46 Ga (Mueller *et al.*, 1992).
- 15: Imataca protolith, Guiana Shield; > 3.4 Ga (Hurley *et al.*, 1976).
- 16: Rio Porto gneiss-migmatite, Goias Massif, Central Brazil Shield; 3.2 Ga (Danni *et al.*, 1982).
- 17: Boa Vista basement gneiss, Sao Francisco Craton; 3.403 Ga (Cordani *et al.*, 1985).
- 18: tonalitic intrusion, Kaapvaal Craton; 3.683 Ga (Kroner and Tegtmeier, 1994).
- 19: detrital zircon in metaquartzite, Barberton greenstone belt; 3.456 Ga (Kroner *et al.*, 1987).
- 20: high grade metamorphosed greenstone enclaves, Limpopo Belt; 3.450 Ga (Goodwin, 1996).
- 21: Tokwe-Shabani gneiss, Zimbabwe Craton; 3.476 Ga (Goodwin, 1996).
- 22: Leonean orogeny, Man Shield; - 3.0 Ga (Macfarlane *et al.*, 1981).
- 23: granulite, Reguibat Shield; 3.480 Ga (Latouche, 1978).
- 24: In Ouzzal granulite, Western Hoggar; 3.5 - 3.1 Ga (Goodwin, 1996).
- 25: Red 'Series', Central Hoggar; - 3.5 Ga (Goodwin, 1996).
- 26: Gorun gneiss, Dharwar Craton; 3.3 Ga (Goodwin, 1996).
- 27: older metamorphic group, Singbhum Craton; 3.3 - 3.4 Ga (Moorbath and Taylor, 1988).
- 28: banded gneiss complex, Aravalli Craton; 3.5 - 3.3 Ga (Ahmad and Tarney, 1994).
- 29: quartzofeldspathic gneiss, Bhandara Craton; 3.509 Ga (Sarkar *et al.*, 1993).
- 30: detrital zircon, Mt. Narryer, West Australian Craton; 4.276 Ga (Compston and Pidgeon, 1986).
- 31: Manfired complex, West Australian Craton; 3.73 Ga (Goodwin, 1996).
- 32: Warrawoona group, Pilbara; 3.5 - 3.3 Ga (Goodwin, 1996).
- 33: Napier complex, Antarctic Craton; 3.927 Ga (Black *et al.*, 1986).

図3 太古代クラトンにおける最古の岩石

最古の岩石の分布、岩石種、形成年代と文献をまとめた。

る産物かもしれない(川上・熊沢, 1995)。鉄細菌は、水中の Fe^{2+} を酸化して炭素固定をおこないエネルギーを得る生物である。

太古代の化石

最初の細胞の出現は、35億年前までは確実に遡れる。35億年前の化石は、オーストラリアの Marble Bar に分布する Warrawoona 層群 Towers 層 Apex chert から発見された (Schopf, 1993)。地層の年代は34.70億年前より古い。産出した化石は、繊維状と球状の形態で、0.5~19.5 μm で平均5.0 μm である。形態の類似性からシアノバクテリアと同定されている。その根拠は、微化石のサイズが現世のシアノバクテリアの一種に類似することと、炭素の同位体組成が生物起源という点である。シアノバクテリアは、ストロマトライトを形成していたと考えられる。最古の化石がシアノバクテリアであれば、35億年前にすでに光合成をおこなう生物いたことになる。生命誕生は35億年前より遡るはずである。

オーストラリアの35億年前のストロマトライトの起源として磯崎ほか (1995) が中央海嶺での熱水循環堆積物の可能性を指摘した。もし、35億年前のストロマトライトが無機的なものであれば、27億年前の西オーストラリア Fortescue Group のストロマトライトが最古となる。

南アフリカの Barberton 地方で、34億年前の Greenstone belt の硫化鉄 (pyrite) のイオウの同位体測定から、生物の証拠が発見された (Ohmoto et al, 1993)。硫化鉄は、バクテリアが海水中の硫化物を還元してできるような同位体組成をもつ。そして、量は少ないが、多少の遊離酸素があったとしている。

南アフリカの Swaziland 地方で、32億年前の FigTree 累層 Swartkoppie 層のチャートから藻類の微化石が発見されている (Knoll & Barghoom, 1977)。化石は数 μm の球状で、現世のシアノバクテリアの分裂段階に相当するものが発見されている。

真核細胞の出現時期は、化石では21億年前 (Han & Runneger, 1992)、分子時計では18億年前 (Doolittle et al., 1989)、有機分子化石 (ステラン) では17億年前 (Summons et al., 1988) になる。この頃には、遊離酸素が、海水中 Fe^{2+} を消費し尽くし、大気中に蓄積される。シアノバクテリアの光合成系 (葉緑体) や、好気性細菌の酸素呼吸システム (ミトコンドリア) が共生して真核細胞が誕生した。やがて、多細胞動物が出現し、陸上への進出、人類の誕生まで進化していく。

VII 合成実験的アプローチ

合成実験的アプローチとは、生命を実験室で作ることを最終目的とする。生命を合成することはまだ達成されていない。合成にいたるステップは着実に進んでいる。ここでは、その現状を概観する。

1 材料の合成

生命の誕生には、アミノ酸20種類、ヌクレオチド5種類、グルコース、脂肪酸、リン酸、リボース、デオキシリボ核酸の合計30種類の部品があればよい (小尾・森,

1985)。そして、このような部品は、ある種の条件を持つ気体あるいは液体中で合成できることがわかってきた。

有機物は、生命のみが作り出す化合物であった。無機的には簡単に合成できないと考えられていた。地球がおこなったように、長い時間と無数の試行錯誤を繰り返さなければならないものとされていた。

Urey と Miller によって、生命の化学進化の時代が再現 (実験) できることがわかった (Miller, 1953)。Urey-Miller の実験は、原始大気を想定したメタン、アンモニア、水素ガスの混合気体と、原始海洋を想定した沸騰した水を入れた容器で、雷を想定した放電を起こした。放電によって化学反応が起こり、下の原始の海に合成物質がたまる。グルシンやグルタミン酸などのアミノ酸、尿素や有機酸を合成するのに成功した。その後、各種のエネルギー源によってタンパク質を構成するアミノ酸、核酸を構成する塩基や糖 (リボース)、各種の有機酸、炭化水素、ポリフィリンなど生命を合成するのに必要な材料は無機的にすべてそろえることが実証された。

Urey-Miller の実験に用いたメタン・アンモニア・水素ガスの混合気体は「還元的」なもので、木星や土星の大気と同じである。しかし、地球の原始大気は、「還元的」でなく、二酸化炭素・水蒸気・窒素を主とする「酸化的」のものあるいは、一酸化炭素を共存する「弱還元的」大気と考えられている。

酸化的大気あるいは弱還元的大気では、水素がないと有機物の合成は著しく低下し、生命の発生は難しくなる (Bar-Nun & Chang, 1983)。この難点を克服するために、代案がいくつか提案された (川上・熊澤, 1995)。微惑星中の金属鉄が水と反応して還元的大気が形成された。海水中の Fe^{2+} の光化学反応で水素が発生して局所的に還元的环境が出現した。有機物は彗星がもたらした。微惑星の衝突で還元的大気化合物が合成された。いずれもあまり説得力のあるモデルではない。最近、海底火山活動による熱水活動によって有機物の合成が可能であるというモデルが提示された。このモデルにより、大気の状態や組成に左右されることなく、海洋さえあれば生命の発生が可能であることになる。

実験的研究の次の興味は、このような低分子の有機化合物の材料がどのように連なって、タンパク質などの高分子ができたということである。

高分子化のエネルギーは、低分子の有機物合成と同様に紫外線・放電・熱などである。Urey-Miller の実験と同じ材料に、熱 (1000℃) を加えてたり、白陶土にアミノ酸を吸着させたりして、高分子化やタンパク質が合成された。その後も、各種の材料や方法でタンパク質合成がおこなわれた。

何らかのエネルギーは必要とするが、原始惑星でごく普通に存在するものを利用して、高分子の合成ができる。生命の発生に必要な有機材料から高分子までは、比較的短時間に形成されることがわかってきた。

2 細胞膜の形成

生命機能を持つ材料の入れ物としてミク罗斯フェアやコアセルベートが考えられる。

コアセルベートは Oparin が提唱した生命の入れ物である。タンパク質の濃縮したコアセルベートには、周りの溶液からいろいろな成分を吸収できることがわかった。酵素のはいったコアセルベートに外から有機物を与えると、酵素活性をもち、産物を外に出すこともできた。

何種かのアミノ酸を数百度の高温で水も加えず熱するとタンパク質もどき（プロテノイド）ができる。プロテノイドが海水に入ってゆっくり冷えると小球（ミクロスフェア）ができた。このミクロスフェアは外部から成分を取り込んだり排出したりできる。ミクロスフェアがコアセルベートより優れている点は、膜の構造がしっかりしていて壊れないことと、ミクロスフェアが増えたり、小さなミクロスフェアを取り込んだり、その小さなミクロスフェアを隣のミクロスフェアに移したりできることである。

このようなミクロスフェアの機能があれば、細胞を作成することは可能である。

3 自己増殖

自己増殖のものは核酸である。核酸を細胞膜の中に取り込まねばならない。生命の誕生まで何度も試行錯誤ができる時間はあったであろう。したがって、生命は、たった一度のチャンスを使って生命が発生したと考える必要はなく、何度もやり直しをしながら地球にもっとも適切な生命が作られたと考えられる。

生物の起源を分子レベルで見た場合、情報が先か機能が先かわかっていない。情報は DNA が担い、機能はタンパク質が担っている。まるで卵が先かニワトリが先かという議論と同じである。

原始の海洋では、有機物のスープが形成される。アミノ酸と核酸塩基が生命の材料として貯まる。アミノ酸は、タンパク質となり、代謝能力を持つようになる。ある種のタンパク質は自己複製能力を持つようになり、生命の前駆体（リボヌクレオロブプロテイン）といえる世界が出現する。このようなタンパク質の前生命を「タンパク質ワールド」と呼ぶ。一方、核酸塩基は RNA となり自己複製機能を持つようになる。そこに触媒反応を持つ RNA が出現し、代謝機能が発生する。RNA も自己複製と代謝によって「RNA ワールド」を持つ。

タンパク質ワールドと RNA ワールドは共生をし、発達していったと考えられる。

RNA は当初一本鎖であったのが安定化をするために二本鎖の RNA となり、DNA と発展していく。DNA は遺伝情報を蓄積する場となり、RNA はその遺伝情報を読みタンパク質を生成する機能を充実させていく。タンパク質は、代謝機能を充実させていく。共生によって DNA、RNA そしてタンパク質がそれぞれの機能を分業化し、高度化できるようになった。そして、DNA、RNA、タンパク質が一つの入れ物にはいることによって今の生物の原型が誕生したと考えられる。

VIII 地球生物学的アプローチ

地球生物学的アプローチとは、現世の生物から、その仕組みを解明していき、生命の起源を知るものである。

いわゆる生物学における生命の起源追求である。研究の歴史はそれほど古くなく、分子生物学や遺伝子レベルによる系統解析などによって、生命の起源に言及できるようになってきた。ここでは、現代生物学の成果をまとめる。

1 生命とは

我々は地球型生命しか知らない。逆に地球型生命については、ある程度の知識はある。

生命の本質は、オーゲルの定義によると「複雑な情報伝達と再生産可能な自然選択によって進化した対象体」と呼んだ。非常に哲学的で抽象的な表現である。具体的に見ていく。

生命を機能という視点でとらえると遺伝・代謝・適応の3つ機能を持つ物体である（清水，1985）。遺伝は、核酸が担っており、自己複製に関わっている。自己複製は、地球生命の場合 DNA がその根源となっている。DNA が分裂して自己複製がおこなう。DNA は有機塩基、糖、リン酸から構成されている。代謝は、タンパク質が担っており、個体の維持をおこなう。代謝とは、外界からエネルギーの基となる養分を取り入れ、不要になった物質を外界に廃棄することをいう。内部では、触媒としてのタンパク質とエネルギー源としての ATP による化学反応が、成長や生殖のエネルギーを生み出す。遺伝と代謝は生命系の自己複製を支える内因となるものである。適応は、外界と生命自身の相互作用の結果である。生命は外界と個体を区別するための境界をもつ。その実態を、地球生命では細胞と呼ぶ。細胞は細胞膜というリン脂質で包まれている。細胞膜を通じて代謝が営まれる。

遺伝には進化というもう一つの重要な機能を含んでいる。進化とは、自己複製過程におこる変化が種のレベルあるいはもっと上位の分類群に発展、固定したものである。当然進化を担っている物質は自己複製と同じ DNA である。進化のメカニズムはダーウィン以来盛んに研究や議論がおこなわれているが、決着がつかないほど難問である。

進化とは、地球生命に固有のものなのかそれとも普遍的なものなのかは不明である。進化と呼べるものは、可変性のある体勢をもつ多様な生命を前提としている。もし多様性がなく1種の生物種であれば、その発展とは数の増減だけである。また、個体内に可変性のメカニズムが組み込まれてなければ、多様性があっても、種毎の数の変化あるいは絶滅を起こすにすぎない。生命に多様性があり、異種の生命間で強弱関係があったとしたら、そこには何らかの競争がおこり、変化してより強いものが生き残り個体数を増やすことになる。しかし、このような多様性と可変性が、生命にとって普遍的なメカニズムかどうかは不明である。

地球生命で最小の生物、あるいは一番原始的な生物は、バクテリアである。小さいがためにバクテリアであるという認定が困難である。バクテリアの存在を実証するには、5つの条件を満たす必要がある（Folk, 1993）。

- ・孤立した個体の集合
- ・同サイズの個体群

- ・似たような形態の個体群
- ・Fe を含まず Ca か Si を含んだ個体
- ・鉱物や人工物でないもの

である。

生命の定義やバクテリアの認定基準にあてはまらない生きものも、地球生命にはある。ある種のウイルスのように RNA だけをもち、他の生命体の中でのみ生命活動をおこなえる生命もある。

ウイルスは生命と非生命の中間なものである。ウイルスのサイズは20~450nmで、普通の細胞（20~30μm）と比べて2、3桁小さく、バクテリアの1~5μmとくらべても1、2桁小さい。ただし、有機物の高分子の大きさ1~10mmと比べると1桁ほど大きいといえる。ウイルスはDNAあるいはRNAの周りをタンパク質の殻が包むだけの簡単な構造である。スタンレーが1935年にダバコモザイクウイルスの結晶化したことから、生命と非生命の区別のつけづらい存在となった。現在のウイルスは、生命に寄生することによって生きている。既存の生命なくしてはあり得ない存在なのである。このような定義は地球生命に関する定義であって、宇宙生命には当てはまらないものがあるかもしれない。しかし、このような定義なくして生命を語ることは難しい。

2 生命の構成

生命を構成する基本的な化合物は、一般細胞で、水(70生体重量%)、タンパク質(16.5wt%)、脂質(6.0wt%)、炭水化物(3.5wt%)、核酸(1.3wt%)、無機塩類(0.5wt%)、その他(Mo、Fe、Co、Cu、Zn、Mn、I、Bなど:2.2wt%)となる。ヒトを元素組成でみると、O(66.1生体重量%)、C(16.9wt%)、H(9.5wt%)、N(4.5wt%)、Ca(1.2wt%)、S(0.65wt%)、P(0.55wt%)、Na(0.23wt%)、K(0.19wt%)、Cl(0.16wt%)、Mg(0.04wt%)となる。

以下で、生命を構成する基本的な化合物についてまとめる(表10)。

水

構成成分の水は、細胞では65~95wt%となる。水の機能は、酵素反応の場を提供すること、比熱の大きいため温度の急変を防止すること、CO₂とO₂のガス交換をすること、細胞内のpHを緩衝することである。

タンパク質

タンパク質は、C、HとOで構成されており、NやSを含むこともある。多数のアミノ酸がペプチド結合したものである。タンパク質の機能は、酵素の本体として代謝を推進したり、脂質と結合して生体膜を構成したり、核酸と結合して染色体を形成することである。タンパク質は、アミノ酸のみからなる単純タンパク質(アルブミン、インシュリン、リゾチーム、ヒストンなど)と、アミノ酸以外の化合物も含む複合タンパク質に区分される。複合タンパク質は、核酸と結合した核タンパク質(デオキシリボ核タンパク質)、糖と結合した糖タンパク質(ムチンなど)、リン酸と結合したリンタンパク質ペプシン(カゼインなど)、色素と結合した色素タンパク質(ヘモ

グロビン、シトクロム、カタラーゼ、ペルオキシダーゼなど)などがある。

脂質

脂質は、C、HとOから構成されており、PやNを含むこともある。炭水化物と比べよりOのモル比が少ない。脂質は、リン脂質は生体膜(細胞膜)の成分であり、エネルギー源、ビタミン、ホルモン、光合成の補助色素として働く。グリセリンと脂肪酸からなる単純脂肪と複合脂質に分類される。単純脂肪は脂肪や油脂とも呼ばれる。脂肪や油脂は、固体の脂肪と液体の油(液体)の総称である。生体の単純脂肪はオリーブ油、肝油、バター、ラードなどである。複合脂質は、脂肪酸の1つがリン酸化合物のリン脂質(生体膜の成分)、構成成分として糖を含む糖脂質(生体膜の成分)、ステロイド核をもつステロイド(ビタミンD、コレステロール、性ホルモン、副腎皮質ホルモンなど)、色素のカロテノイ(カロテン、キサントフィルなど)に区分される。

炭水化物

炭水化物は、CとH、Oで構成される。HとOは2:1の割合で結合している。生体内でエネルギー源となっている。糖の数によって、単糖類、二糖類、多糖類に分類される。単糖類(C₆H₁₂O₆)は、炭素の数によって、五糖類(デオキシリボース、リボースなど)と六糖類(ブドウ糖、果糖、ガラクトースなど)に細分される。二糖類(C₁₂H₂₂O₁₁)は、2分子の単糖類に分解される。麦芽糖は2個のブドウ糖に、ショ糖はブドウ糖と果糖に、乳糖はブドウ糖とガラクトースに分解される。多糖類((C₆H₁₀O₅)_n)は、多数の単糖類に分解される。デンプンは多数のブドウ糖に、グリコーゲンは多数のブドウ糖に、セルロースは多数のブドウ糖に分解される。

核酸

核酸は、塩基と糖とリン酸からなる。アデニン(A)、グアニン(G)、シトシン(C)、チミン(T)、ウラシル(U)の5種類のヌクレオチドからなる。機能は、自己複製や遺伝、タンパク質合成を支配している。核酸は、DNAとRNAに分類される。DNAはデオキシリボ核酸のことで、二重らせん状の二重鎖をもつ。核内に存在する分子量6,000,000~16,000,000の化合物である。DNAは、A、T、GとCからなり、遺伝子本体である。DNAは、RNAを合成する。RNAは、リボ核酸のことで、一重鎖である。分子量は、150,000~500,000で、A、U、GとCからなる。RNAはタンパク質を合成する。RNAは、機能によってmRNA、tRNAとrRNAに区分できる。mRNAは伝令(messenger)の意味で、tRNAは転移(transfer)に意味で、細胞質に存在する。rRNAはリボソーム(libosomal)の意味で、核小体と細胞質に存在する。

無機塩基など

無機塩類は、Na、K、Ca、Mg、Cl、Fe、S、P、Cu、Zn、Co、Mn、Bなどである。Naの機能は動物体液の浸透圧を調整する。PとCaはリン酸カルシウムとして

表 10 生命の構成

構成成分比	
一般細胞 (生体重量 %)	
水: 70, タンパク質: 16.5, 脂質: 6.0, 炭水化物: 3.5, 核酸: 1.3, 無機塩類: 0.5, その他 (Mo, Fe, Co, Cu, Zn, Mn, I, B): 2.2	
ヒト 元素組成 (生体重量 %)	
O: 66.1, C: 16.9, H: 9.5, N: 4.5, Ca: 1.2, S: 0.65, P: 0.55, Na: 0.23, K: 0.19, Cl: 0.16, Mg: 0.04	
構成成分	
1 水	
構成:	H ₂ O、65 ~ 95 %
機能:	酵素反応の場を提供、比熱の大きいため温度の急変防止、CO ₂ と O ₂ のガス交換、細胞内の pH を緩衝
2 タンパク質	
構成:	C, H, O (N や S を含むこともある)、多数のアミノ酸がペプチド結合
機能:	酵素の本体として代謝を推進、脂質と結合して生体膜を構成、核酸と結合して染色体を形成
分類	
単純タンパク質:	アミノ酸のみからなる; アルブミン、インシュリン、リゾチーム、ヒストン
複合タンパク質	
核タンパク質:	核酸と結合; デオキシリボタンパク質
糖タンパク質:	糖と結合; ムチン
リンタンパク質:	リン酸と結合; ペプシン、カゼイン
色素タンパク質:	色素の結合; ヘモグロビン、シトクロム、カタラーゼ、ペルオキシダーゼ
3 脂質	
構成:	C, H, O (P や N を含むこともある、炭水化物より O が少ない)
機能:	リン脂質は生体膜 (細胞膜) の成分、エネルギー源、ビタミン、ホルモン、光合成の補助色素
分類	
単純脂肪	
脂肪 (油脂):	脂肪 (固体) と油 (液体) の総称、グリセリンと脂肪酸からなる; オリーブ油、肝油、バター、ラード
複合脂質	
リン脂質:	脂肪酸の 1 つがリン酸化合物; 生体膜の成分
糖脂質:	構成成分として糖を含む; 生体膜の成分
ステロイド:	ステロイド核をもつ化合物; ビタミン D、コレステロール、性ホルモン、副腎皮質ホルモン
カロテノイド:	色素; カロテン、キサントフィル
4 炭水化物	
構成:	C, H, O (H と O は 2 : 1 の割合で結合)
機能:	エネルギー源
分類	
単糖類	C ₆ H ₁₂ O ₆ ; 五糖類: デオキシリボース、リボース。六糖類: ブドウ糖、果糖、ガラクトース
二糖類	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ (2 分子の単糖類に分解); 麦芽糖 (→ブドウ糖×2)、ショ糖 (→ブドウ糖+果糖)、乳糖 (→ブドウ糖+ガラクトース)
多糖類	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n (多数の単糖類に分解); デンプン (→多数のブドウ糖)、グリコーゲン (→多数のブドウ糖)、セルロース (→多数のブドウ糖)
5 核酸	
構成:	塩基+糖+リン酸からなる 5 種類のヌクレオチド; アデニン (A)、グアニン (G)、シトシン (C)、チミン (T)、ウラシル (U)
機能:	自己複製や遺伝、タンパク質合成を支配
分類	
DNA	デオキシリボ核酸: 二重鎖 (二重らせん)、核内、分子量 6,000,000 ~ 16,000,000、A, T, G, C、遺伝子本体、RNA を合成
RNA	リボ核酸: 一重鎖、分子量 150,000 ~ 500,000、A, U, G, C、タンパク質を合成
mRNA:	伝令 (messenger) RNA、細胞質
tRNA:	転移 (transfer) RNA、細胞質
rRNA:	リボソーム (libosomal) RNA、核小体と細胞質、全 RNA の 85 %
6 ATP アデノシン三リン酸	
構成:	塩基 (アデニン)+糖 (リボース)+リン酸×3
機能:	1、2 個目のリン酸が高エネルギーで結合、エネルギーの貯蔵と発生
7 無機塩類	
構成:	Na, K, Ca, Mg, Cl, Fe, S, P, Cu, Zn, Co, Mn, B など
機能:	Na 動物体液の浸透圧調整; P, Ca リン酸カルシウムとして骨の成分; Mg 植物のクロロフィルの成分; Fe ヘモグロビンやシトクロムの成分; Cu, Zn, Co, Mn, B 酵素の補助因子

骨の成分となる。Mg は植物のクロロフィルの成分である。Fe はヘモグロビンやシトクロムの成分である。Cu、Zn、Co、Mn と B は酵素の補助因子である。

その他に、ATP（アデノシン三リン酸）と呼ばれる重要な生体化合物がある。ATP は、塩基（アデニン）と糖（リボース）、3 個のリン酸からできている。1、2 個目のリン酸は、高エネルギーで結合しており、エネルギーの貯蔵と発生をおこなう。

3 生命の種類

地球生命は炭素を基準としている。しかし、他の元素や仕組みをもつ生物がいてもよいはずである。例えば、炭素の似た機能を持つケイ素（Si）やゲルマニウム（Ge）など 4 価の元素を基にする生命が想定できる。

ケイ素型の生命は熱に強く、マグマオーシャンのような惑星があれば発生したかもしれない。最終産物は炭素型生命は二酸化炭素だが、ケイ素型生命は二酸化ケイ素になるはずである。代謝や遺伝などのメカニズムは不明である。

木星のようなガス惑星で、メタンやアンモニアを利用した炭素型生命の材料が生成できることが実験で確認されている。Sagan et al. (1967) は、このような環境では浮遊性の生命が可能である。気球のように水素を入れたり、暖めたりして大気中に浮いている生命が考えられる。浮遊性生命は、天体内から十分なエネルギーが発生していればそのエネルギーで活動できる。例えば、木星では太陽から得ているエネルギーの 2 倍ほどのエネルギーを発生している。このようなエネルギーを活用すれば、太陽から遠く離れた惑星でも生命が発生可能である。

炭素型生命は水の中に発生すると考えられている。水は、いろいろな物質を溶かせること、物質をイオン化できること、比熱が大きいことが挙げられる。しかし、水に変わるような媒質があれば、別の形態の生命が発生していいはずである。アンモニアは、宇宙にたくさんある物質で、液体の水に比較的似た性質をもつ。アンモニアの海では、やはり有機物を中心とした炭素型生命が誕生する可能性がある。しかし、タンパク質や核酸は全く違ったものになるはずである。アンモニア型タンパク質やアンモニア型核酸と呼ぶべきもので構成されているはずである。このような生命の代謝や機能は、有機化学の知識が役立つはずである。このようなアンモニア型生命体は、窒素を吸収して最終産物としてシアンを出すと考えられる。シアンは地球生命にとって有毒だが、酸素もかつては嫌気性生命の世界では有毒な物質であった。それに、アンモニア水の中でも生きていける生物が地球から見つかっている。水から生まれた生物だが、雨傘を広げたような形のバクテリアである。20 億年前の地層から、そっくりな化石が見つかっている。

渡辺格は「沼生物」という地球生物とは全く違った生きものを考えた。一つの沼が変化しながらも永遠に生き続けるものである。Bernal たちは、このような沼生物みたいな「生きている沼」が最初の地球生命であったと考えた。小さな沼に川から有機物や栄養物質が流れ込み、各種の反応を起こす。やがて、ある限られた反応が一

定のスピードで進む。このような沼が、機能を保ちながら干上がって、小さくなり細胞膜のようなものが生じれば細胞としての機能をもつ生命となる。これを、Bernal たちは、地球生命の始まりと考えた。

このほかにも、SF 的な生命はいくつも考えられているが、まだ科学といえる段階に達していない。それは宇宙生命の存在が確定されていないことが一番の原因である。しかし、このような別タイプの生命体は、生命の合成実験的アプローチが可能である。また有機化学や無機化学、あるいは岩石・鉱物学などの学問の知識の応用で各種の生命体の可能性を探ることができる。

4 地球生命の進化

地球の生命は、古代からいくつもに分類されてきた。現生生物の記載は、150 万種を終えたに過ぎない。実際に現生生物は数千万種あるいは億に達するとされる。まして過去に生きていた古生物までの分類を考えると、生物の全てを知るには多大なる労力と時間が必要となる。

地球生物の分類には、人為分類と自然分類、系統分類がある。系統分類が一番科学的で普遍性があるものだが、まだまだ系統分類は完成していない。かつて、地球生物は、動物界と植物界の 2 界分類がされていた。しかし、菌類の発見により、全く別の菌界が増え、3 界分類になった。3 界分類では、栄養の流れを中心にみていくと、菌類が栄養の吸収、植物界が独立栄養で、動物界が摂食という大区分が可能で、菌類から植物界、動物界と栄養摂取の方法が、系統分類に適合している。

顕微鏡や電子顕微鏡の発達によって、いままで認識できなかったほど小さい生物の詳細な観察がおこなわれ、原生生物界とモネラ（原核生物）界が新たに区分された。原生生物界とモネラ界は、生物の系統を無視したもので、系統分類とはいえない。しかし、現在では仮としてはあるが、分類の体系として使われている（八杉ほか、1996）。

生命の起源を、系統関係から推定する方法として、できるだけ古い生命様式を求めて、最初の生命にたどりつこうとする方法がある。このような最初の生命を、コモノート（Commonote）と呼んでいる（大島、1995）。コモノートは日本では使われているがあまり国際的には普及していない。生命の起源が一種の生物から誕生したという保証はない。いくつもの生命が共生して、進化してきたとも考えてもよいので、あくまでもコモノートとは架空の生物である。

このような状態であるから、系統分類からの生命の起源は完成されていない。以下では、現時点での、系統分類からみた生物の進化を概観する。

一番古いタイプの生命は、古細菌と考えられている。古細菌は、生育環境が温泉中や海底火山、塩湖などの特殊な環境で発見される。古細菌は、嫌気性生物、生育環境の異常性、生化学的独自性、系統樹状での位置などから、非常に原始的であると考えられている。

古細菌から、やがて光合成のできるシアノバクテリアが誕生する。シアノバクテリアはラン藻として C3 光合成生物へと進化する。酸素を利用できる環境ができると好気性細菌が誕生する。その後、古いタイプの核を持つ

古核生物が出現する。ラン藻と好気性細菌が、古核生物と共生をして植物的真核生物となる。この植物的真核生物が、現在の植物の祖先である。古核生物と好気性細菌そしてべん毛細菌が共生して原始べん毛生物として、菌類と動物の祖先となった。

このようなシナリオが、現生生物からみた地球生物の進化過程である。

5 セントラル・ドグマ

セントラル・ドグマ (central dogma) とは、中心教義と訳され、遺伝情報は DNA→RNA→タンパク質へと一方向に流れていくことをいう。Crick が提唱した考え方であるが、現在ではセントラル・ドグマはかなり詳しくわかってきた。概略は図4のようになる。

DNA には遺伝情報がおさめられている。遺伝情報とはタンパク質合成に必要な塩基配列のことである。その遺伝情報は原核細胞にはぎっしりと書き込まれているが、真核細胞には、意味ない配列部が含まれている。タンパク質を作るための塩基配列部をエクソンといい、意味ない (発現しない) 塩基配列部をイントロンと呼ぶ。長い DNA はイントロンの占める割合は多くなる。ヒトの DNA は30億対の塩基があるが、エクソンはそのうち5~10%にすぎない。エクソンがイントロンに分断されているのである。

DNA から RNA への転写がおこなわれるが、イントロンも一緒にコピーされる。そのような RNA を hnRNA (前駆体 mRNA) と呼ぶ。イントロン部を切断してエクソンだけにするためのプロセッシングと呼ばれる作業を経て、成熟した mRNA となる。プロセッシングでは1割ぐらいの分子量まで小さくなる。例えば、ヒトのアルブミンの合成のための遺伝子は DNA 上では25,000塩基で表されている。プロセッシングを受けた mRNA では2,100塩基になっている。

mRNA は、細胞質に出て、配列すべきアミノ酸の種類と数や順序を指定する。tRNA は、mRNA に指定されたアミノ酸をリボソームまで運ぶ。tRNA はアミノ酸の種類に対応しているため種類が多い。61種の tRNA があると考えられている。

小胞体上にはリボソームと mRNA が一緒になって、tRNA が運んできたアミノ酸によってタンパク質が合成されていく。核小体 (仁) にある DNA で、rRNA が合成され核外に出てリボソームとなり、小胞体に付着する。

現在非常に細部にわたってセントラル・ドグマは解明されている。究極としてセントラル・ドグマはすべて化学反応式と熱力学によって記述される見通しが付いた。しかし、何故このような方法を地球生物がとっているかは不明である。

IX まとめ

我々は、自分自身について意外なほど知らない。生命の誕生は偶然が必然か、何故地球生命は分子レベルで一種しかないのか、何故炭化水素と水を基盤にしているのか、何故20種のアミノ酸を利用しているのか、何故アミノ酸はL-体で核酸を構成している糖はD-体なのか、

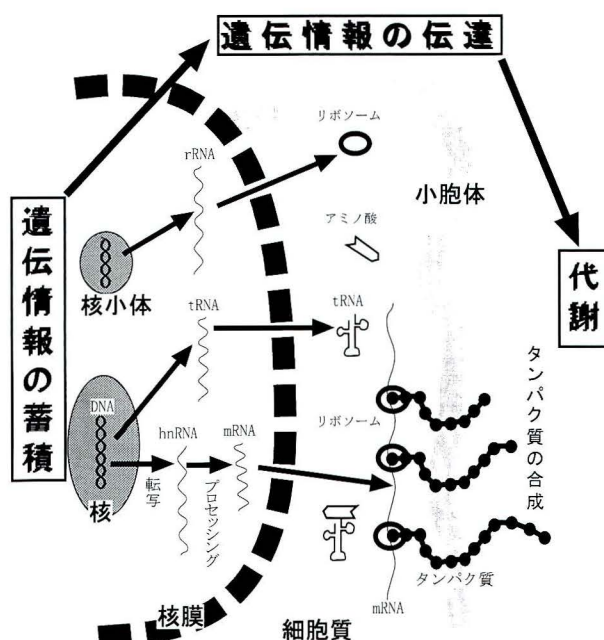


図4 セントラル・ドグマの概念

生命の根本に関わる疑問に答えを持ってない (河崎, 1997)。このような疑問に対する答えは我々の外にある。地球外生命の存在は、生命の唯一性を否定し、多様性あるいは必然性の程度を導き出せる。そして、地球外生命と地球生命の比較は、地球生命の特性と普遍性を導き出すはずである。火星生命化石の発見の真偽は、このような根本的疑問に対する答えを得る可能性を示したのである。

本論文で述べた地球生命の誕生と進化を素描としてまとめる。図5に生命の起源に関して、重要と考えられる事件をまとめた。

生命発生のための必要条件は、地表での液体の水の定常的な存在である。定常的な水とは、海を意味する。海が安定に存在し始めたときに、生命の誕生の上限であろう。海が存在は、地表の証拠から、38億年前まで遡る。

地球初期には、カタストロフィックな微惑星の衝突が何度もあったはずである。そのたびに、地表は壊滅的な状況におちいった。微惑星の衝突は、指数関数的に減っていくが、生命は、ある程度突発的な出来事から身を守る必要がある。現在、生命発生の場として、深海の熱水噴出の場が有力視されている。実験的試みによって、有機物の合成は条件さえと整えば、比較的簡単にできることがわかった。海底火山の熱水循環で有機物が合成され、一旦合成された有機物は還元的な水中では分解することなく蓄積していく。そして、原始の海洋で、タンパク質の材料となるアミノ酸や核酸の材料になるヌクレオチドに満ちた有機物のスープができる。

その後の生命の進化は、短期間には起こらない。十分な時間をかけて行われる。試行錯誤と生存競争、別の種との共同作業によってより強く成長してきた。

生命進化におけるイベントとして、以下の7つが挙げられている (川上・熊澤, 1995)。化学進化、最初の細胞の出現、シアノバクテリアの出現、真核細胞の出現、

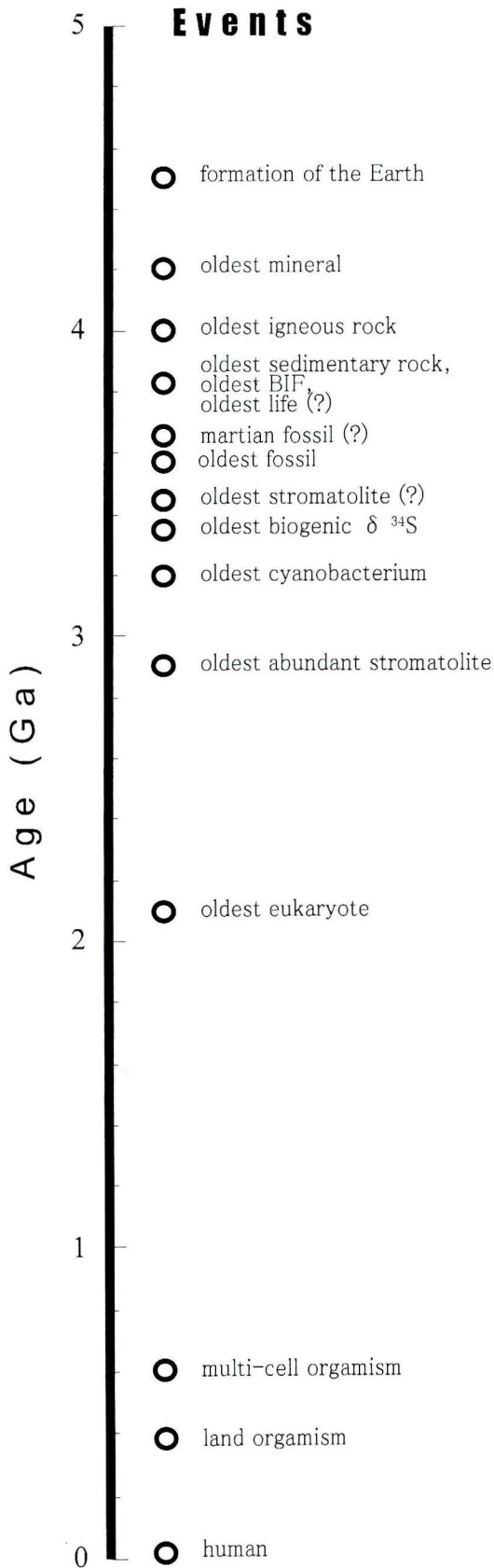


図5 生命の起源に関するベンチマーク

多細胞動物の出現、陸上への進出、人類の誕生である。

これは、地球生命に関する重大イベントであるが、宇宙生命に適用すると、化学進化は、素材から生命物質への変化を意味する。最初の細胞の出現は、最初の生命の誕生である。シアノバクテリアの出現は、生命と惑星とのグローバルな相互作用と言い換えることができる。真核細胞の出現と多細胞動物の出現は、生命の複雑化・高機能化である。陸上への進出は、惑星内の新天地への進出である。人類の誕生は、知的生命の誕生になる。さらに、もう一つ付け加えるべきことは、生命の惑星外への進出である。我々の惑星外への進出はすでに始まったが、まだ短期間の一時的な滞在である。しかし、今後の大きなステップは始まったのである。

文献

- Ahmad, T. & J. Tarney, 1994. Geochemistry and petrogenesis of late Archaean Aravalli volcanics, basement enclaves and granitoids. *Precamb. Res.*, 65:1-23.
- 赤井純治, 1996. 火星隕石 (ALH84001) とバクテリア起源の磁鉄鉱・磁硫鉄鉱, 惑星地質ニュース, 9:2-6.
- 赤井純治, 1997a. 火星隕石 (ALH84001) 産磁鉄鉱・磁硫鉄鉱はバクテリア起源か—地球でのバイオミネラライゼーションの知識からの比較検討—. 月刊地球, 19:451-459.
- 赤井純治, 1997b. 火星隕石 (ALH84001) と生体鉱物. 日本惑星科学会誌, 6:46-51.
- 秋山雅彦, 1997. 火星隕石にナンノバクテリアは検出されたか. 月刊地球, 19:447-450.
- Anders, E., 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2119-2125.
- Arrhenius, S. A., 1908. *Worlds in the making*. 100pp. Harper & Row, London.
- Ash, R. D., S. F. Knott & G. Turner, 1996. A 4 -Gyr shock age for a martian meteorite and implications for the cratering history of Mars. *Nature*, 380:57-59.
- Banin, A., B. C. Clark & H. Wanke, 1992. Surface chemistry and mineralogy. In Kieffer, H. H. et al., eds., *Mars*, pp. 594-625. Univ. of Arizona Press, Tucson.
- Bar-Num, A. & S. Chang, 1983. Photochemical reactions of water and carbon monoxide in Earth's primitive atmosphere. *J. Geophys. Res.* 88:6662-6672.
- Bell, J.F., 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2121-2122.
- Bibikova, E. V., 1984. The most ancient rocks in the USSR territory by U-Pb data on accessory zircons. In Kroner, A., G. N. Hanson & A. M. Goodwin eds., *Archean Geochemistry*, pp. 235-250. Springer-Verlag, Berlin.
- Bibikova, E. V., A. N. Belov, T. M. Gracheva, et al. 1987. On the age of the granulite metamorphic and metasomatic processes. *Transaction of the 23 rd Session on Isotope Geochron.*, pp. 71-85. Nauka, Moscow.
- Bibikova, E. V., G. M. Drugova, V. L. Duk & L. Keysky, 1986. Geochronology of the Aldan-Vitim Shield. In Shukolyukov, Y. A. ed., *Isotopic Methods in Geology and Geochronological Scale*, pp. 135-159. Nauka, Moscow.
- Black, L. P., I. S. Williams & W. Compston, 1986. Four zircon ages from one rock: the complex history of a 3930Ma old granulite from Mount Sones, Enderby Land, Antarctica. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94:427-437.
- Bogard, D. D., L. Husain & L. E. Nyquist, 1979. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of

- the Shergotty achondrite and implications for its post-shock thermal history. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43:1047-1055.
- Bowring, S. A., I. S. Williams & W. Compston, 1989. 3.96Ga gneisses from the Slave Province, Northwest Territories, Canada. *Geology*, 17:971-975.
- Bridgwater, D., J. H. Allaart, J. W. Schopf, C. Klein, M. R. Water, E. S. Barghoorn, P. Strother, A. H. Knoll & B. E. Gorman, 1981. Microfossil-like objects from the Archaean of Greenland: A cautionary note. *Nature*, 289:51-53.
- Clayton, R. N. & T. K. Mayeda, 1996. Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60:1999-2018.
- Clemett, S. J. & R. N. Zare, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2122-2123.
- Cocconi, C. & P. Morrison, 1959. Searching for interstellar communications. *Nature*, 184:844.
- Compston, W. & R. T. Pidgeon, 1986. Jack Hills, evidence of more very old detrital zircons in Western Australia. *Nature*, 321:766-769.
- Cordani, V. G., K. Sato & M. M. Marinho, 1985. The geological evolution of the ancient granite-greenstone terrane of central-southern Bahia, Brazil. *Precamb. Res.*, 27:187-213.
- Crick, F. M. C. & L. E. Orgel, 1973. *Icarus*, 19:341.
- Danni, J. C. M., R. A. Fuck & J. R. Leonardos, 1982. Archean and lower Proterozoic units in Central Brazil. *Geol. Rdsch.*, 71:291-317.
- 出村祐英, 1996. 火星生命痕跡発見の報に関する議論. 惑星地質ニュース, 9:7-8.
- Doolittle, R. F., K. L. Anderson & D. -F. Feng, 1989. Estimating the prokaryote-eukaryote divergence time from protein sequences. In Ferheim, B. et al., eds. *The hierarchy of Life*, pp. 73-85. Excerpta Medica, Amsterdam.
- Drake, F. D., 1961. Project Ozma. *Phys. Today*, 14:40.
- Dreibins, G. & Wanke, H., 1985. Mars, a volatile-rich planet. *Meteoritics*, 20:367-381.
- Dyson, T. J., 1960. Search for artificial stellar sources of infrared radiation. *Science*, 131:1667.
- Gibson Jr. E. K., D. S. McKay, K. Thomas-Keptra & C. S. Romanek, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2125.
- Goodwin, A. M., 1996. *Principles of Precambrian Geology*. 327pp. Academic Press, Toronto.
- Folk, R. L., 1993. SEM imaging of bacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks. *Jour. Sediment. Petrol.*, 63:990-999.
- Gleason, J. D., D. A. Kring, D. H. Hill & W. V. Boynton, 1997. Petrography and bulk chemistry of Martian orthopyroxenite ALH84001: Implications for the origin of secondary carbonates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61:3503-3512.
- Graham, A. L., Bevan, A. W. R. & Hutchison, R. 1985. *Catalogue of Meteorites* (4th edition). 460pp. Univ. Arizona Press, Tucson.
- Han, T. -H. & B. Runneger, 1992. Megascopic eukaryotic algae from the 2.1 billion-year-old Negaunee iron-formation, Michigan. *Science*, 257:232-235.
- Hart, M. H., 1975. *Q. Jour. Res. Astr. Soc.*, 16:128.
- Harvey, R. P. & H. Y. McSween, Jr., 1992. Petrogenesis of the Nakhilite Meteorites: Evidence from Cumulate Mineral Zoniu. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56:1655-1663.
- Harvey, R. P. & H. Y. McSween, Jr., 1996. A possible high-temperature origin for the carbonates in Martian meteorite ALH 84001. *Nature*, 382:49-51.
- 平林久・寿岳潤, 1984. 宇宙に文明をさがす—文明探査の基礎と現状-. 科学, 54:437-444.
- Holland, H. D., 1997. Evidence for life on Earth more than 3850 million year ago. *Science*, 275:38-39.
- Hoyle, F. & C. Wickramasinghe, 1978. *Life Cloud: The Origin of Life in the Universe*. J. D. Dent & Sons Ltd., New York.
- Hurley, P. M., H. W. Fairbairn & H. E. Gaudette, 1976. Progress report on early Archean rocks in Liberia, Sierra Leone and Guyana, and their general stratigraphic setting. In B. F. Windleg ed., *The Early History of the Earth*, pp. 511-521. John Wiley, New York.
- 井田茂, 1997. 惑星系の多様性と普遍性—太陽系外の惑星の発見—. 日本惑星科学会誌, 6:4-18.
- 池田幸雄, 1997. 火星隕石と火星生命. 月刊地球, 19:403-412.
- 磯崎行雄・寺林優・柁島太郎・角田地文・恒松知樹・鈴木良剛・小宮剛・丸山茂徳・加藤泰浩, 1995. "35億年前最古ストロマトライト"の正体—西オーストラリア、ビルバラ産、太古代中央海嶺の熱水性堆積物—. 月刊地球, 17:476-489.
- Jagoutz, E., A. Sorowka, J. D. Vogel & H. Wanke, 1994. ALH84001: Alien or progenitor of the SNC family? *Meteoritics*, 29:478-479.
- Jagoutz, E. & H. Wanke, 1986. Sr and Nd isotopic systematics of Shergotty meteorite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50:939-954.
- Jahn, B. -M., B. Auvray, J. Cornichet, et al. 1987. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precamb. Res.*, 34:311-346.
- 川上紳一・熊澤峰夫, 1995. 生命と地球の共進化解読へ向けて—全地球史解読—. 月刊地球, 17:433-440.
- 河崎行繁, 1997. 地球外に生命を探す—裏方にも光を—. 日本惑星科学会誌, 6:52-58.
- 河島信樹・小池惇平, 1997. 火星探検—火星人から生命探査まで—. 205pp. PHP 研究所, 東京.
- Kinny, D. D., 1986. 3820Ma zircon from a tonalitic Amitsoq gneiss in the Godthab district in southern West Greenland. *Earth Planet -Sci. Lett.*, 79:337-347.
- Knoll, A. H. & E. S. Barghoorn, 1977. Archean microfossils showing cell division from the Swaziland System of South Africa. *Science*, 198:396-398.
- Knott, S. F., R. D. Ash & G. Turner, 1995. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of ALH 84001: Evidence for the early bombardment of Mars. *Lunar Planet. Sci.*, 26:765-766.
- 小出良幸, 1994. 総説: 地球形成の場にまつわるモデルとその束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 23:51-86.
- 小出良幸, 1995a. 総説: 隕石—地球の材料物質としての隕石—. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 24:9-38.
- 小出良幸, 1995b. 地球前史—地球形成場の素描—. 月刊地球, 17:203-209.
- 小出良幸, 1997. 宇宙階層概論—宇宙の階層内における私たちの普遍性と特異性—. 神奈川県立博物館調査研究報告(自然科学), 8:131-170.
- 小出良幸・山下浩之, 1995. 地球前史—地球形成場と原料への束縛条件—. 地学雑誌, 104:167-188.
- 小出良幸・山下浩之, 1996a. 総説: 地球初期への惑星物理的束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 25:1-26.
- 小出良幸・山下浩之, 1996b. 総説: 地球初期への惑星化学的束縛条件. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 25:27-55.
- 小出良幸・山下浩之・佐藤武宏, 1997a. 惑星進化論へのアプローチ: 要因と概論. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 23:1-25.
- 小出良幸・山下浩之・佐藤武宏, 1997b. 惑星科学の現状—惑星の調べ方と調べてわかったこと—. 神奈川県立博物館研

- 究報告(自然科学), 8:13-29.
- 小島秀康, 1997. 隕石探査と火星隕石. 月刊地球, 19:395-402.
- 国立天文台編, 1997. 理科年表平成10年. 1054pp. 丸善, 東京.
- Kroner, A., R. Greiling, T. Reischmann, I. M. Hussein, R. J. Stern, S. Durr, J. Kruger & M. Zimmer, 1987. Pan-African crustal evolution in the Nubian segment of northeast Africa. In A. Kroner ed., *Proterozoic Lithospheric Evolution*. Amer. Geophys. Union Geodynamics, 17:235-258.
- Kroner, A. & A. Tegtmeier, 1994. Gneiss-greenstone relations in the Ancient Gneiss Complex of southwestern Swaziland, southern Africa, and implications for early crustal evolution. *Precamb. Res.*, 67:109-139.
- Latouche, L., 1978. Etude petrographique et structurale de Precambrien de la region des Gour Cumelalen (Nord-Est de l'Ahaggar, Algerie). These. Doct. Etat. Univ. Paris.
- Liu, D. Y., A. P. Nutman, W. Compston, J. S. Wu & Q. H. Shen, 1992. Remnants of >3800Ma crust in Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20:339-342.
- Lobach-Zhuchenko, S. B., V. P. Chekulayev, S. A. Sergeev, O. A. Levchenkov, & I. N. Krylov, 1993. Archaean rocks from south-eastern Karelia (Karelian granite-Greenstone terrain). *Precamb. Res.*, 62:375-397.
- Macfarlane, A., M. J. Crow, J. W. Arthurs & A. F. Wilkinson, 1981. The geology and mineral resources of northern Sierra Leone. Overseas Mem. Inst. Geol. Scilond., 7.
- Mayor, M. & D. Qneloz, 1995. A Jupiter-mass companion to a solar type star. *Nature*, 378:353-359.
- McCulloch, T. M. & G. J. Wasserburg, 1980. Early Archean Sm-Nd model ages from a tonalitic gneiss, northern Michigan. *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 182:135-138.
- McDonald, G. D. & J. L. Bada, 1995. A search for endogenous amino acids in the Martian meteorite EETA79001. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59:1179-1184.
- McKay, D.S., E. K. Gibson Jr., K. L. Thomas-Keptra, H. Vali, C. S. Romanek, S.J. Clemett, X. D. F. Chilliier, C. R. Maechling, & R. N. Zare, 1996. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 273: 924-930.
- McKay, D.S., K. L. Thomas-Keptra, C. S. Romanek, E. K. Gibson Jr. & H. Vali, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2123-2125.
- McSween, H. Y., Jr. & E. Jarosewich, 1983. Petrogenesis of the Elephant Moraine A79001 meteorite: Multiple magma pulses on the shergottite parent body. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 1501-1513.
- McSween, H. Y. Jr., 1994. What we have learned about Mars from SNC meteorites. *Meteoritics*, 29:757-779.
- 三河内岳・宮本正道, 1997. 火星隕石の岩石・鉱物学. 日本惑星科学会誌, 6:29-36.
- Mikouchi, T., A. Tsuchiyama, J. Akai, S. Nakashima, K. Tazaki, T. Itaya & K. Yanai, 1997. Mineralogical consideration of possible microfossils in martian meteorites ALH84001. *Mineral. Jour.*, 19:47-64.
- Miller, S. L., 1953. A production of amino acids under possible primitive earth condition. *Science*, 117:528-529.
- 水谷仁, 1984. 生命が生まれる惑星の条件. 科学, 54:401-409.
- Mojzsis, S. J., G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman & C. R. L. Friend, 1996. Evidence for life on earth before 3,800million years ago. *Nature*, 384:55-59.
- Moorbath, S. & P. N. Taylor, 1988. Early precambrian crustal evolution in Eastern India: the ages of the Singhbhum Granite and included remnants of older gneiss. *Geol. Soc. Ind.*, 31:82-84.
- Mueller, P. A., J. L. Wooden & A. P. Nutman, 1992. 3.96Ga zircons from an Archean Quartzite, Beartooth Mountains, Montana. *Geology*, 20:327-330.
- 村江達士, 1997. 隕石の有機化合物分析. 日本惑星科学会誌, 6:37-45.
- 長尾敬介, 1997. 火星隕石研究の現状—希ガス—. 月刊地球, 19:413-425.
- 中村昇, 1997. 火星隕石の化学組成と年代. 月刊地球, 19:426-438.
- Nakamura, N., D. M. Unrh, M. Tatsumoto & R. Hutchison, 1977. Nakhla: further evidence for a young crystallization age. *Meteoritics*, 12:324-325.
- 西信之, 1984. 宇宙における生命起源分子の生成—星間分子—彗星—地球の点と線—. 科学, 54:419-428.
- Nutman, A. P., B. J. Fryer & D. Bridgwater, 1989. The early Archean Nulliak (supracrustal) assemblage, northern Labrador. Canada. *J. Earth Sci.*, 126:2159-2168.
- Nyquist, L. E. & C. -Y. Shin, 1992. The isotopic record of lunar volcanism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56:2213-2234.
- 小尾信彌・森曉雄, 1985. 地球外生命の謎. 235pp. 大和書房, 東京.
- Ohmoto, H., T. Kakegawa & D. R. Lowe, 1993. 3.4-billion-year-old biogenic pyrites from Barberton, South Africa: Sulfur isotope evidence. *Nature*, 262:555-557.
- 大島泰郎, 1984. ET 探しは市民権を得たか. 科学, 54:386-387.
- 大島泰郎, 1995. 生命は熱水から始まった. 141pp. 東京化学同人, 東京.
- Pflug, H. D. & H. Jaeschke-Boyer, 1979. Combined structural and chemical analysis of 3,800-Myr-old microfossils. *Nature*, 280: 483-486.
- Rood, R. T. & J. S. Trefil, 1981. Are we alone? The possibility of extraterrestrial civilizations. Charles Scribner's Sons, New York.
- 出口威夫訳, 1983. さびしい宇宙人. 283pp. 地人書館, 東京.
- Sagan, C. E., Lippincott, E. R. & R. V. Eck, 1967. Organic molecules and the coloration of Jupiter. *Nature*, 213:273.
- Sarkar, G., F. Corfu, D. K. Paul, N. J. McNaughton, S. N. Gupta & P. K. Bishui, 1993. Early Archean crust in Bastar Craton, Central India—a geochemical and isotopic study. *Precamb. Res.*, 62:127-137.
- 佐々木晶, 1997a. 地形から見た、火星の古環境そして生命. UP, 301:32-38.
- 佐々木晶, 1997b. 火星の表層環境とその歴史. 日本惑星科学会誌, 6:70-79.
- Schidlowski, M., P. W. U. Appel, R. Eichmann & C. E. Junge, 1979. Carbon isotope geochemistry of the 3.7×10^9 -yr-old Isua sediments, West Greenland: Implications for the Archean carbon and oxygen cycles. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43:189-199.
- Schopf, J. W. 1993. Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New evidence of the antiquity of life. *Science*, 260:640-646.
- Shcherback, N. P., E. N. Barnstinsky, E. V. Bibikovo & V. L. Boiko, 1984. Age and evolution of the Early Precambrian continental crust of the Ukrainian shield. In Kroner, A., G. N. Hanson & A. M. Goodwin eds., *Archean Geochemistry*. pp.251-261. Springer-Verlag, Berlin.
- Shearer, C. K. & J. J. Papike, 1996. Evaluating the evidence for past life on Mars. *Science*, 274:2121.
- Shih, C. -Y., L. E. Nyquist, D. D. Bogard, G. A. McKay, J.L. Wooden, B. M. Bansal & H. Wiesmann, 1982. Chronology and petrogenesis of young achondrites, Shergotty, Zagami and

- ALHA77005: Late magmatism on the geologically active planet. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46:2323-2344.
- 下山晃, 1987. 南極隕石の有機化合物. 国立極地研究所編, pp. 243-275. 南極の化学 6. 南極隕石, 古今書院, 東京.
- 下山晃, 1995. 原始地球と化学進化. 月刊地球, 17:440-447.
- 下山晃, 1997. 火星隕石の有機物と化学進化. 月刊地球, 19:439-447.
- 清水幹夫, 1985. 宇宙の生命. 152pp. 共立出版, 東京.
- Summons R. E., T. G. Powell & C. J. Boreham, 1988. Petroleum geology and geochemistry of the Middle Proterozoic McArthur Basin, Northern Australia. III Composition of extractable hydrocarbon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52:1747-1763.
- Taylor, P. N., 1975. An early Precambrian age for migmatitic gneisses from Vikan IBO, Vesteralen, north Norway. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 27:35-42.
- 田崎和江, 1996. 火星の生物痕跡?—バクテリアによる生体鉱物作用の立場から—. 惑星地質ニュース, 8:37-44.
- 天文年鑑編準委員会, 1997. 天文年鑑1998年版. 286pp. 誠文堂新光社, 東京.
- 土山明, 1997. Dr. D. McKay の講演要旨の和訳と総合解説. 日本惑星科学会誌, 6:21-28.
- Van Schmus, W. R. & J. A. Wood, 1967. A chemical—petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31:747-765.
- 矢内桂三, 1996. 火星起源 SNC 隕石について. 惑星地質ニュース, 8:1-10.
- Yanai, K., 1997. General view of twelve martian meteorites. *Mineral. J.*, 19:65-74.
- 八杉龍一・小関治男・古谷雅樹・日高敏隆編, 1996. 生物学辞典 第4版. 2027pp. 岩波書店, 東京.
- 横尾広光, 1984. 文明の研究—地球外生命探査の論理構成—. 科学, 54:445-448.
- 横尾広光, 1991. 地球外文明の思想史. 174pp. 恒星社厚生閣, 東京.
- Wadhwa, M. & G. W. Lugmair, 1996. The formation age of carbonates in ALH84001. *Meteoritics and Planetary Science*, 31:145.
- Wanke, H. & G. Dreibus, 1988. Chemical composition and accretion history of terrestrial plants. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A235:545-557.

摘 要

小出良幸, 生命の起源—宇宙生物学へのアプローチ. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 27:1-30. (Y. Koide, Origin of Lives—Approach to the Cosmic Biology—. *Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.)*, 27:1-30.)

近年、生命の起源についていくつかの重要な報告があった。これらの報告によって、生命の根源にせまる議論が起こっている。本論文では、生命を広い視点でとらえ、より普遍化された存在として考察した。生命とは、地球生物だけでなく、宇宙に存在しうるすべての生物という視点でとらえた。生命の起源をたどるためには、広範な分野の研究を概観しなければならない。天文学、惑星科学、隕石学、地質学（古生物学）、有機合成学、地球生物学の分野で、生命誕生に関連のある研究成果を抽出し、その概略をまとめた。

(受付：1997年11月26日，受理：1997年12月11日)

総 説

マントル内での炭素の相平衡

Stability of Carbon Phase in the Mantle

山下浩之・小出良幸
神奈川県立生命の星・地球博物館

Hiroyuki Yamashita & Yoshiyuki Koide

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract. Carbon phase in the mantle should be as constituents of minerals or fluid studied by the petrology, mineralogy and high pressure and high temperature experiment. The information of carbon phase in the mantle derived from igneous rocks (kimberlite, carbonatite and lamproite), minerals of diamond and carbonate minerals and fluids in diamond inclusion.

The high pressure and high temperature experimental results of the simple-component systems such as C, CaO-CO₂ and CaO-MgO-SiO₂-CO₂, show that diamond, aragonite, dolomite and magnesite are stable in the mantle conditions. On the other hand, diamond and magnesite are stable in the complex system. The stable field of magnesite might expand to the lower mantle condition.

Kimberlite and carbonatite petrogenesis are closely related with carbon phase in the mantle. The magmas are considered to derived from partial melting of carbonate bearing peridotite. The geochemical character of this partial melts is similar to the diamond inclusion fluid.

key words : carbon, high pressure and high temperature experiment, carbonate minerals

I はじめに

地球に存在する炭素は、地球の材料と考えられている炭素質コンドライトからおおよその量が見積られている。その見積りによれば、地表に存在する炭素の量より、多量の炭素がマントル内に存在する可能性が指摘されている。地表に存在する炭素の一部は、海溝から沈み込むプレートによってマントルに供給される。また、マントル内の炭素は、火成活動によって再び地上にもたらされる。炭素の一部は、マントルと地表の間を絶えず循環している。

マントル内部での炭素は、ダイヤモンドや炭酸塩鉱物、そして二酸化炭素、メタンなどを含んだ流体もしくはメルトなど、様々な形で存在すると考えられている。

グラファイトは、マントル条件下でダイヤモンドへ相転移することが高温高压実験によって明らかにされている (Bundy et al., 1961など)。そのため、ダイヤモンドは、マントル起源であると考えられている。炭酸塩鉱物は、マントル起源の火成岩から産出することや、マントル条件下での高温高压実験の結果から存在が支持されている。流体は、ダイヤモンドに包有されて産出することが報告されている (Navon et al., 1988)。

炭素は、マントル内で流体として存在する場合、火成活動に多大な影響を及ぼす。このことは、マントル深部

が起源と考えられているキンバライトやカーボナタイトが二酸化炭素や水などの揮発性成分に富むことから裏付けられる。炭素は鉱物として安定に存在する一方、何らかの形で火成作用にも影響を及ぼす可能性がある。

マントル内における炭素の存在状態についての研究は、ダイヤモンドもしくは炭酸塩鉱物の物理的・化学的性質、ダイヤモンドや炭酸塩鉱物を含むマントル起源火成岩の岩石学的性質、そして、ダイヤモンドあるいは炭酸塩鉱物を含む岩石の高温高压実験が主要である。本論では、これらのデータを整理し、マントル内における炭素の存在状態を把握する。さらに、炭素が液体もしくは気体として存在するときの、まわりのマントルへの影響、特に火成活動について議論する。

II マントル内に存在する炭素および炭素化合物を含む岩石・鉱物

マントル内に存在する炭素の存在状態を解明するには、火成活動によって地表にもたらされた炭素を含むマントル起源物質を調べる方法と、推定されるマントル組成の物質をマントルの物理条件下において状態を観察する方法が有効である。前述の方法には、地表にもたらせた火山岩そのものを岩石学的に調べる方法と、火山岩に含まれている鉱物もしくは、外来結晶 (xenocryst) を調べる

方法がある。

ここでは、火成活動によって地表にもたされた炭素を含むマントル起源物質について、火山岩、鉱物、流体の3つに区分し、まとめる。

1. 火山岩

火成岩中では、炭素は炭酸塩鉱物として固定されている。マグマには、二酸化炭素ガスが含まれている。しかし、二酸化炭素ガスは噴火時に放出される。噴出時に抜け出した二酸化炭素ガスの量を見積るのは難しい。そのため、岩石学では一般に、鉱物に固定されている炭素のみを扱うことが多い。炭素を多量に含むマントル起源の火山岩には、大陸でみられるキンバライトやカーボナタイト、ランプロアイトなどがある。以下、これらの火山岩について、定義および化学的特徴、岩石学的特徴、産状、活動年代、分布などについてまとめる。

i) キンバライト

キンバライトは、小規模のパイプ・岩脈・岩床として産出する揮発成分に富んだ超塩基性アルカリ岩と定義されている (Clement et al., 1984)。揮発性成分に富むことから、噴火形態は非常に爆発的であると考えられている。

斑状組織を持ち、斑晶は、オリビンおよびフロゴパイ

表 1. キンバライトの全岩化学組成

	group I A	group I B	group II
major element (wt.%)			
SiO ₂	32.1	25.7	36.3
TiO ₂	2.0	3.0	1.0
Al ₂ O ₃	2.6	3.1	3.2
Fe ₂ O ₃	9.2	12.7	8.4
MnO	0.2	0.2	0.2
MgO	28.5	23.8	29.7
CaO	8.2	14.1	6.0
Na ₂ O	0.2	0.2	0.1
K ₂ O	1.1	0.6	3.2
P ₂ O ₅	1.1	1.1	1.1
H ₂ O ⁺	1.1	0.5	0.7
H ₂ O ⁻	8.6	7.2	5.3
CO ₂	4.3	8.6	3.6
total	99.2	100.8	99.8
trace element (ppm)			
Nb	165	210	120
Zr	200	385	290
Y	13	30	16
Sr	825	1020	1140
Rb	50	30	135
Th	18	27	30
Ni	1360	800	1400
Cr	1400	1000	1800
V	75	170	85
Ba	1000	850	3000
Sc	13	20	20
La	90	125	200
Ce	140	220	350
Nd	90	100	145
Gd	4	8	6
U	4	6	5
Pb	7	10	30

データは、Smith et al. (1985) より引用。

ト、カルサイト、サーペンティン、単斜輝石、モンチセライト、アパタイト、スピネル、ペロプスカイト、イルメナイトからなる。ドロマイトを伴うこともある。石基は細粒の斑晶と同じ鉱物やガラスからなる。また、マントル起源の外來結晶として、他形のオリビンやフロゴバイト、イルメナイト、クロムスピネル、マグネシウムザクロ石、単斜輝石、斜方輝石からなる巨大結晶 (megacryst) がある。まれにダイヤモンドを含むこともある。巨大結晶は、オリビンが他の鉱物と比べて多い。捕獲岩として、マントル起源の超苦鉄質岩や地殻起源の岩片を含む。

キンバライトは、岩石組織および鉱物学的特徴によって分類されている。岩石組織によって、巨大結晶を多量に含む斑晶質キンバライトと、巨大結晶が乏しいか又は無い無斑晶質キンバライトの2つに分類される (Mitchell, 1989)。

化学的特徴としては、玄武岩と比較して、少い SiO₂、多い MgO および K₂O、CO₂、H₂O、LIL (Large Ion Lithophile)、LREE (Light Rare Earth Elements) 含有量と高い Mg/(Mg+Fe) 比などがあげられる (表 1)。特に Rb や K、Ba などの LIL は、始原的なマントルと比較して、200~500倍も濃集している。

鉱物学的・化学的・同位体化学的に、Group I キンバライトと Group II キンバライトの2つに区分される (Smith et al., 1983; Skinner, 1989)。Group I キンバライトは特徴的に巨大結晶 (オリビンやフロゴバイト、モンチセライト、カルサイト、サーペンティン) を含む。Group II キンバライトは、斑晶と石基にフロゴバイトを多く含み、Group I キンバライトに比べ、SiO₂や K、Ba に富む。

両者の差異は同位体組成に顕著に現れ、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 図で、Group I キンバライトは OIB (Oceanic island basalt) の領域付近に、Group II キンバライトは OIB とランプロアイトの中間の領域にプロットされる (図 1)。

キンバライトの分布は、北アメリカ・南アメリカ・南

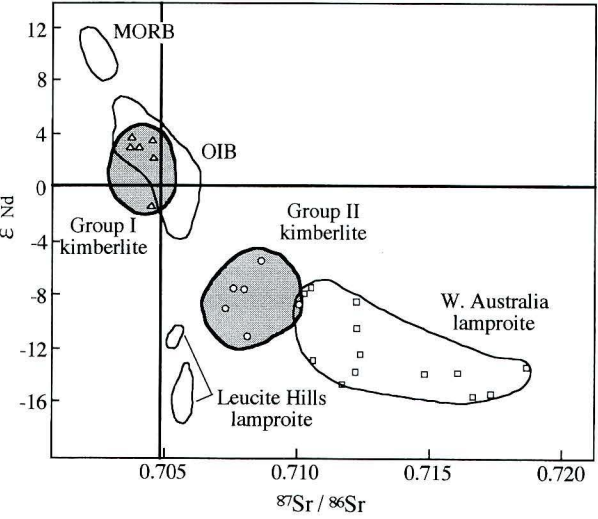


図 1. Nd および Sr の同位体比。
Group I および Group II キンバライトのデータは南アフリカのものをもちいた。ランプロアイトは、Western Australia および Leucite Hills (Wyoming, U.S.A.) のものをもちいた。Eggler, D. H. (1989) より引用した。

アフリカ・中国・インド・オーストラリアなどの大陸地塊の分布と一致する (Dawson, 1989)。

キンバライトの活動年代は、およそ1800Ma (原生代)、およそ1200Ma (原生代)、およそ800Ma (原生代)、500～50Ma (オルドビス紀から白亜紀) の、約3～4億年の周期性による4つの時期に分類され、大陸下部のリソスフェアに達する大陸プレートの断裂活動に伴うものと考えられている (Allsopp et al., 1989)。

キンバライトに含まれるダイヤモンドの包有物の輝石やザクロ石、またはカンラン岩ゼノリス中の輝石やザクロ石は、約4～6 GPa (地下120km～180km) の圧力で形成されたと推定されている (Shee et al., 1989)。このことから、キンバライトマグマは、地下120～180km以深で形成されたことになる。ダイヤモンドの包有物には、より深部で形成されたと考えられるメジャライト組成に富んだザクロ石が発見され (Moore & Gurney, 1985)、キンバライトマグマの生成深度はかなり深いとの見積りもある。

ii) カーボナタイト

カーボナタイトは、炭酸塩鉱物からできている珪酸塩鉱物に乏しい火成岩である。炭酸塩鉱物は体積比で50%以上占めている。

化学的特徴として、 SiO_2 に異常に乏しく、 CaO や Na_2O 、 K_2O 、 CO_2 などに非常に富み、特に CO_2 の含有量は30 wt% を越える (表2)。 Na_2O の含有量は岩体により大きく異なり、30wt% をこえるもの (natrocarbonatite) からほとんど含まないものまで存在する。カーボナタイトは、 BaO や SrO 、 P_2O_5 などの微量元素も多量に含む。LREE の含有量も異常に高く、キンバライトやランプロアイトよりも数倍高い含有量をもつ。岩体によって濃集する元素が異なるが、Nb や Zr、REE、Ta、Th、Ba、Sr などの鉱床を形成することもある。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 図では、OIB の領域と似る。

カーボナタイトの構成鉱物は、カルサイトやドロマイト、アンケライトなどの炭酸塩鉱物を主とし、オリビンやマグネサイト、赤鉄鉱なども含む (Hall, 1987)。まれに、モンチセライトやメリライト、アバタイト、パイロクロアを含むことがある。

ほとんどのカーボナタイトはプレカンブリア時代の盾状地に産出する。キンバライトの分布と似ているが、ニュージーランドなどの島弧や南大西洋東部の海底にも産出する点で異なる (Le Bas, 1987)。

カーボナタイトは、貫入岩として産出し、アルカリ岩やカンラン岩、輝岩と複合岩体を形成することが多いが、溶岩流と火山灰の互層を形成することもある。カーボナタイトの周辺部では、カーボナタイトによるアルカリ交代作用によって、フェナイトが形成されている。

カーボナタイトは、現在も活動している。37万年前から活動していると考えられているタンザニアの Oldoinyo Lengai では、natrocarbonatite の溶岩流と、火山灰の互層が見られ、1983年まで活動している。

カーボナタイトマグマの成因は、岩石学的に以下の3つが考えられている (Hall, 1987)。

表2. カーボナタイトの全岩化学組成

	1	2	3	4	5	6
major element (wt.%)						
SiO_2	0.05	0.88	0.16	6.12	3.24	0.83
TiO_2	0.01	0.18	0.07	0.68	trace	0.07
Al_2O_3	0.11	0.37	0.17	1.31	0.2	0.65
Fe_2O_3	0.41	2.62	4.04	7.55	11.5	11.00
MnO	0.48	0.39	0.41	0.75	5.18	5.53
MgO	0.48	0.31	0.67	12.75	10.74	0.36
CaO	14.43	53.6	51.2	39.03	25.85	43.6
Na_2O	33.89	0.09	0.25	0.14	-	0.05
K_2O	8.39	0.03	0.01	0.79	-	0.06
P_2O_5	0.93	3.18	1.52	2.66	1.27	0.42
CO_2	30.53	38.38	39.5	37.03	32.62	30.42
F	2.71	0.06	-	0.09	-	-
Cl	3.81	trace	-	-	-	-
SO_3	2.88	-	-	0.89	0.49	-
SrO	1.35	0.23	0.1	0.01	0.73	0.07
BaO	1.26	0.08	0.17	0.11	2.48	>4.0

1: Natrocarbonatite lava (Oldoinyo Lengai, Tanzania); 2: Sovite dyke (Tundulu, Malawi); 3: alvikite cone sheet (Homa Mountain, Kenya); 4: dolomite carbonatite (Alno, Sweden); 5: ferrocarnatite-high Mg (Kangankunde, Malawi); 6: ferrocarnatite-low Mg (Homa Mountain, Kenya). データは、LeBas (1987) より引用。

- ・炭酸塩鉱物を含むマントル物質の部分融解
- ・融解した炭酸塩を含むケイ酸塩メルトの分化作用の最後のメルト
- ・初生的に均質である炭酸塩を含むケイ酸塩メルトの不混和作用

しかし、最近の高温高压実験の結果からは、炭酸塩鉱物を含むマントル物質の部分融解が有力である。カーボナタイトマグマの成因については、高温高压実験が盛んになされているのでそちらで触れる。

iii) ランプロアイト

ランプロアイトとは、広義には K_2O に富んだ塩基性岩のことで、キンバライトやランプロファイアーも含む。狭義のランプロアイトは、キンバライトと同様に K_2O や MgO に富んだ過アルカリ質塩基性～超塩基性岩で、キンバライトより高い SiO_2 および K_2O 、低い Al_2O_3 含有量で特徴づけられ、キンバライトほど CO_2 を含まない (表3)。

さらに、キンバライトと同様に、Rb や Ba、LREE などの液相濃集元素が異常に高い含有量をもつ。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比および $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は、それぞれ0.5112～0.5123、0.705～0.718で、MORB～OIB～group I キンバライト～group II キンバライトを通るマントルアレーの延長上にプロットされる (図1)。

ランプロアイトの斑晶鉱物は、オリビンおよびフログパイト、アルカリ角閃石、単斜輝石、白榴石、カリ長石からなり、石基はフログパイトや単斜輝石、オリビン、スピネル、イルメナイト、K-Ba-Ti-oxide からなる (有馬, 1987)。ごくまれに含まれるダイヤモンドはマントル起源の外來結晶と考えられている。初生的な炭酸塩鉱物は見られない (Mitchell, 1989)。

ランプロアイトは、溶岩流や岩脈、岩床、碎屑丘や噴

表3. ランプロアイトの全岩化学組成

	1	2	3	4
major element (wt.%)				
SiO ₂	50.3	48.9	54.8	49.7
TiO ₂	2.3	4.9	1.4	2.8
Al ₂ O ₃	10.3	7.1	10.0	8.5
FeO*	4.9	6.8	5.1	6.4
MnO	0.9	0.1	0.1	0.1
MgO	8.0	11.2	10.0	11.7
CaO	6.4	5.7	4.7	5.8
Na ₂ O	1.2	0.5	1.9	1.3
K ₂ O	9.9	7.9	6.3	6.5
P ₂ O ₅	1.4	1.0	1.1	1.2
BaO	0.6	1.1	0.3	0.7
ZrO ₂	0.2	0.1	0.1	0.1
H ₂ O*	2.5	2.9	2.7	2.5
CO ₂	1.0	1.8	1.6	2.6
total	99.9	100	100.1	99.9

1: Leucite Hills, U.S.A.; 2: Murcia-Almeira, Spain; 3: West Kimberley, Australia; 4: 世界に産出するランプロアイトの平均値。*: FeはFeOとして計算。データは、Bergman (1987)より引用。

石丘などの玄武岩と類似の産状を示すほか、キンバライトのようなダイアトリームやパイプ型の爆発的噴火をするものもある。ランプロアイトのダイアトリームは、キンバライトのものより底が浅い。これは、H₂OとCO₂に富むキンバライトマグマの方が、より深部で揮発性成分の沸騰が起こったためと考えられている(有馬, 1987)。

ランプロアイトの分布は、キンバライトと似ており、北アメリカ・南アメリカ・南アフリカ・中国・インド・オーストラリアなどに産出する。これ以外にも、ヨーロッパ、南極大陸にも分布するが、大陸地殻上に限定される。

ランプロアイトは、原生代から第四紀まで広い範囲にわたって活動しており、キンバライトのような活動の周期性は見られない。

2. 鉱物

マントル起源の鉱物は、ダイヤモンドや炭酸塩鉱物が見つかった。いずれの鉱物も、マントル内で炭素を貯蓄する重要な役割を果たす。マントル内におけるこれらの鉱物の安定領域は、高温高压実験によって明らかにされている。

ここでは、ダイヤモンドと炭酸塩鉱物の鉱物学的特徴についてまとめる。また、ダイヤモンドについては、包有物がマントルの情報を与えてくれるので、そちらについてもふれることにする。

i) ダイヤモンド

単体の炭素は、マントル内でダイヤモンドもしくはグラファイトとして存在する。

ダイヤモンドについての詳細については、有馬(1997)でまとめられている。ここでは、マントルの物理・化学条件を反映するダイヤモンドの包有物についてまとめる。

ダイヤモンドは、比重3.56718、硬度10で地球上で最も硬く化学的に安定な鉱物である。立方晶系で、8面体もしくは12面体構造をなす。一方、グラファイトは比重2.09~2.23、硬度1~2の六方晶系で、軽く軟らかい。

現在、ダイヤモンドは、キンバライトやランプロアイトから見つかっている。また、マントルゼノリスのエクロジャイトや、まれではあるが石灰岩からも微小なものが見つかった。

ダイヤモンドは、炭素の同位体比からも、マントルを解明するための情報を与えてくれる。しかし、それ以上にダイヤモンドに含まれる包有物は、マントルの情報を与える。ダイヤモンドはマントル中で生成する際に、まわりのマントルに存在する鉱物や流体を取り込んで成長することがある。一度ダイヤモンドに取り込まれた鉱物は、ダイヤモンドが物理的・化学的に非常に安定なために、取り込まれてから周辺の物質と反応することはない。ダイヤモンドの包有物は、地表にもたらされてもマントルの情報を保存している。ダイヤモンドに含まれる鉱物からは、マントルの物理・化学条件を読みとることができ、流体からはダイヤモンド生成時の化学条件を読みとることができる。

輝石やザクロ石などのダイヤモンドの包有物から、ダイヤモンドの生成した温度圧力条件が推定されている。包有物は、約4~6 GPa(地下120km~180km)のリソスフェア起源のものが報告されている (Shee et al., 1989)。一方、Monastery Mine (南アフリカ)より産出した Group II キンバライト中のダイヤモンドの包有物からは、より高压のアセノスフェアで形成されたと考えられるメジャライト組成に富んだザクロ石が報告されている (Moore & Gurney, 1985)。近年、メジャライト組成に富んだザクロ石の報告が相次ぎ (Haggerty & Sautter, 1990; Sautter et al., 1991)、地下400km付近で生成したと思われるものも見つかっている。

ii) 炭酸塩鉱物

マントル内に存在する炭酸塩鉱物は、マントル起源の火山岩やそのノジュールなどによって調べられている。炭酸塩鉱物は含水鉱物に比べ、非常に種類が少ない。主なものとしては、CaCO₃とMgCa (CO₃)₂、MgCO₃である。まれに、CaとSrが置換したSrCO₃などもあるが、ここでは扱わない。

炭酸カルシウム (CaCO₃) は、低压側では三方晶系、硬度3、比重2.72のカルサイトとして、高压側では斜方晶系、硬度3.5~4、比重2.929のアラゴナイトとして存在する。

マグネサイト (MgCO₃) は三方晶系、硬度4、比重3.0として産出する鉱物である。

ドロマイト (MgCa (CO₃)₂) は、三方晶系、硬度3.5~4、比重2.85~3.02の鉱物である。しかし、FeやMnがMgと置換し、アンカライト (Ca (Fe²⁺, Mg, Mn) (CO₃)₂) になるため比重は若干異なる。また、MgとCaは、連続的な固溶体をもつ。

炭酸塩鉱物がマントル下でどこまで安定に存在するかは、高温高压実験のデータによって条件が明らかにされ

表 4. ボツワナ産ダイヤモンドに包有される流体の化学組成

sample points*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	70	50	92	16	27	70	42	34	34	42	12	76	36		
SiO ₂ **	23.9	25.1	25.6	28.4	29.4	36.5	41.3	44.1	45.1	47.8	50.1	50.3	52.3	58.4	13.6
TiO ₂	4.6	4.7	5.1	4.9	4.8	4.5	4.6	4.3	4.9	4.2	5.0	4.6	4.2	4.3	4.6
Al ₂ O ₃	2.5	2.5	2.0	2.2	2.9	4.2	4.9	4.6	5.4	5.5	6.2	5.3	5.6	6.8	0.8
FeO***	15.2	16.1	17.5	14.9	16.1	13.5	11.1	10.5	10.7	9.9	9.8	12.2	8.8	7.6	19.5
MgO	10.9	10.1	10.8	10.6	8.2	7.8	5.1	5.8	5.7	4.8	4.6	4.4	5.1	3.3	13.2
CaO	13.5	15.6	16.3	12.6	13.4	9.1	6.8	5.6	5.1	4.7	3.2	3.3	5.5	0.0	20.5
Na ₂ O	2.2	2.6	2.2	3.0	2.3	2.5	2.4	2.2	1.6	3.0	0.3	2.8	2.0	2.2	2.2
K ₂ O	22.2	18.3	15.4	18.4	18.1	16.9	18.7	17.8	16.4	15.3	15.9	12.1	11.5	12.3	20.7
P ₂ O ₅	2.3	2.4	1.4	2.6	1.9	1.1	2.0	1.4	1.0	1.2	0.5	0.9	0.7	0.7	2.4
Cl	1.5	1.3	1.0	1.7	0.9	0.7	1.1	1.0	0.8	0.8	1.4	1.2	0.7	0.9	1.3
Mg/ (Mg+Fe)	0.56	0.53	0.52	0.56	0.48	0.51	0.45	0.5	0.49	0.46	0.46	0.39	0.51	0.44	0.55
H ₂ O (ppm)		192	320	38	128	99	64	384	506	192	19	173	115		
CO ₂ (ppm)		910	940	75	420	250	120	135	540	285	15	130	70		
H ₂ O/ (H ₂ O+CO ₂)		0.3	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.9	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8	0.9	0.3

1: JWN108; 2: JWN90; 3: JWN87; 4: JWN106; 5: JWN89; 6: JWN112; 7: JWN110; 8: JWN99; 9: JWN91; 10: JWN92;
 11: JWN88; 12: JWN115; 13: JWN93; 14: H₂O に富む流体の端成分; 15: CO₂ に富む流体の端成分。*: 分析点数。**: 9つの酸化物
 の合計が95%になるように、揮発性成分なしで再計算してある。***: Fe は FeO で計算。データは、Schrauder & Navon (1994)
 より引用。

ている。CaCO₃ および MgCa(CO₃)₂、MgCO₃ のいずれ
 の組成も、高温高压実験によって、マントルに相当する
 圧力では安定に存在することがわかっている。高温高压
 実験の結果については後でふれる。

3. 流体包有物

マントル内には、CO₂ を多量に含むメルトもしくは
 流体が存在する可能性が高い。メルトや流体はマントル
 起源の火山岩から直接得ることはできないが、鉱物など
 に包有されればマントルに存在したときの化学組成を見
 ることができる。しかし、珪酸塩鉱物では、相転移によ
 って、鉱物と流体が反応して、流体の組成が変わるおそ
 れがある。その点、化学的、物理的に安定なダイヤモンド
 に包有される流体は、マントルの状態を保持している。

ダイヤモンドに包有される流体のデータは、coated ダ
 イアモンドおよび cubic ダイヤモンドから得られている。
 coated ダイヤモンドでは、octahedral ダイヤモンドのま
 わりに成長する針状ダイヤモンドの境界付近に流体がよく
 見られる。coated ダイヤモンドは、流体が存在する場
 で成長したことを示している。流体の大きさは、数十～
 数百 μm 程度である。

流体の化学組成を表 4 に示す。流体の化学組成の特徴
 は、H₂O および CO₂、SiO₂、K₂O、CaO、FeO に富み、
 一見キンバライトなどのアルカリ岩的な特徴を示すが、
 MgO に乏しい点で異なる。また、P₂O₅ や BaO、SrO を、
 数%も含んでいる。La₂O₃ や Ce₂O₃ などの LREE の含
 有量も非常に多い。CO₂ と H₂O の割合は、H₂O のほ
 うが多い傾向が見られる。

Schrauder & Navon (1994) は、流体に 2つの端成分が
 あることを示唆している。一つは、carbonatitic fluid で、
 CO₂ や CaO や FeO、MgO、P₂O₅ に富むものである。

もう一つは hydrous fluid で、H₂O や SiO₂、Al₂O₃ に富
 むのである。K₂O の含有量に関しては両流体とも高い。

Schrauder & Navon (1994) は、ダイヤモンドの包有物
 から固体の CO₂ を報告している。CO₂ は、5 GPa 以上
 の圧力では、酸素分圧やまわりの鉱物（化学組成）の条
 件によっては、固体として存在しうる。炭酸塩鉱物を含
 む堆積岩は、プレートとともに沈み込み、220～270km
 の深さのマントルで温められる。炭酸塩鉱物は、珪酸塩
 鉱物と反応し CO₂ を放出する。放出された CO₂ は、ダ
 イアモンド中に固体として固定されると考えられている
 (Schrauder & Navon, 1994)。

Ⅲ 炭素を含む系の高温高压実験

高温高压発生装置の開発に伴って、様々な系の実験が
 なされてきた。炭素を含んだ系の高温高压実験も、1970
 年代から盛んにおこなわれている。成果の一部を表 5 に
 まとめた。

高温高压実験は、炭素を含む系が高温高压下でどのよ
 うな相や組成で存在するかを知ることが目的である。出
 発物質には、マントル内で最も普通に見られるカルシウ
 ムやマグネシウムなどの金属元素と炭素との化合物が用
 いられる。化合物は、マントル内でまわりの物質と反応
 を起こす。1種の化合物のデータは、マントルを構成す
 る鉱物としての 1つの可能性にすぎず、むしろ物性デー
 タとして重要になる。

より現実に近い情報を得るには、マントル内に多量に
 存在するケイ素やアルミニウムなどを含めた 4、5 成分
 系の実験が必要になる。多成分系の実験は、マントルを
 構成するペリドタイトとの関係を知る上でも重要になる。
 ペリドタイトのソリダスよりも高温域で、炭素化合物が
 固相として安定に存在するのか、液として存在するのか、

表 5. 炭素を出発物質に含んだ、主な高温高压実験の論文リスト

著 者	年	出発物質	圧力 (GPa)	温度 (°C)	液
合成物					
Kennedy & Kennedy	1979	C	4.3 - 6.3	1100 - 1600	
赤石 實	1990	C	7.7	2150	
Arima et al.	1992	C+ キンバライト	7.7	2200	
Katsura et al.	1991	MgO - CO ₂	1.0 - 55	1300	
Irving & Wyllie	1973	MgO - CO ₂	2.0 - 3.6	1300 - 1700	
Irving & Wyllie	1973	CaO - CO ₂	1.0 - 3.6	800 - 1700	
Crawford et al.	1972	CaO - CO ₂	0.352 - 0.518	50 - 150	
Huang et al.	1980	CaO - SiO ₂ - CO ₂	0 - 3.0	1150 - 1750	
平山・藤井	1993	MgO - SiO ₂ - CO ₂	7.0, 9.0, 11.5	1500 - 1900	
Newton & Sharp	1975	MgO - SiO ₂ - CO ₂	2.0 - 4.0	100 - 1500	
Katsura & Ito	1990	MgO - SiO ₂ - CO ₂	8.0, 15, 26	1400 - 2100	
Martinez et al.	1996	CaO - MgO - CO ₂	0.3 - 8.17	25 - 1000	
Byrnes & Wyllie	1981	CaO - MgO - CO ₂	1.0	1350	
Brey et al.	1983	CaO - MgO - SiO ₂ - CO ₂	2.0 - 5.0	800 - 1300	
Liu & Lin	1995	CaO - MgO - SiO ₂ - CO ₂	4.0 - 26	1000	
Canil & Scarfe	1990	CaO - MgO - SiO ₂ - CO ₂	4.0 - 12	1000 - 1590	
Kushiro et al.	1975	CaO - MgO - SiO ₂ - CO ₂	2.3 - 7.7	800 - 1400	
Boettcher et al.	1980	CaO - MgO - H ₂ O - CO ₂	0.075 - 4.0	505 - 853	
Boettcher et al.	1980	CaO - MgO - SiO ₂ - H ₂ O - CO ₂	0.1 - 1.0	570 - 750	
Canil & Scarfe	1990	CaO - MgO - SiO ₂ - H ₂ O - CO ₂	5.0 - 10	1150 - 1420	
Canil & Scarfe	1990	CaO - MgO - SiO ₂ - Al ₂ O ₃ - CO ₂	4.5 - 11	1200 - 1590	
天然物					
Ringwood et al.	1992	平均的キンバライトの化学組成を合成	10, 16	1300 - 1700	未測定
山下・大谷	1995	group II キンバライト	1.0 - 8.7	1300 - 170	測定
Yamashita & Arima	1995	group II キンバライト	1.0 - 8.7	1300 - 170	未測定
Edgar et al.	1988	group I キンバライト	1.0 - 4.0	1000 - 1525	未測定
Edgar et al.	1993	group I キンバライト	5.0 - 10	1300 - 1675	未測定
Wallance & Green	1988	ペリドタイト+炭酸塩鉱物+角閃石	1.5 - 3.2	900 - 1200	測定
Sweeney, R. J.	1994	海洋性および大陸性ペリドタイト	1.8 - 4.75	985 - 1300	測定
Sweeney et al.	1995	初生的なカーボナタイト組成	5.0 - 2.7	650 - 1225	測定

また液として存在する場合は化学組成を知る必要がある。しかし、炭素を含んだ4成分系以上の高温高压実験は意外と少ない。その理由は、炭素の封入や炭酸塩鉱物の分析が困難なためである。

以下に炭素を含む系の高温高压実験の結果について、出発物質（合成物と天然物）ごとにまとめた。

1. 合成物

合成物に関しては、1成分系から4成分系まで分け、それぞれについてまとめている。4成分系と5成分系は、多成分系と見なして一括してまとめた。6成分系以上の系は、キンバライトやカーボナタイトなどの火山岩の化学組成を見立てて、出発物質を合成しているので、天然物のところでまとめる。

i) 1成分系

・C

炭素の単体は、マントルではグラファイトもしくはダイヤモンドという相として存在する。

炭素のP-T図を、図2に示す。炭素の低压相はグラファイトとして、高压相はダイヤモンドとして存在する。南アフリカ付近を構成するKaapvaal cratonでは、炭素はおおよそ4.5GPa以上の圧力でダイヤモンドとして存在

すると考えられる（Boyd & Gurney, 1986）。沈み込むプレートの場合では、地温は大陸の地殻よりも熱いため、グラファイトの安定領域が広がり、ダイヤモンドの安定

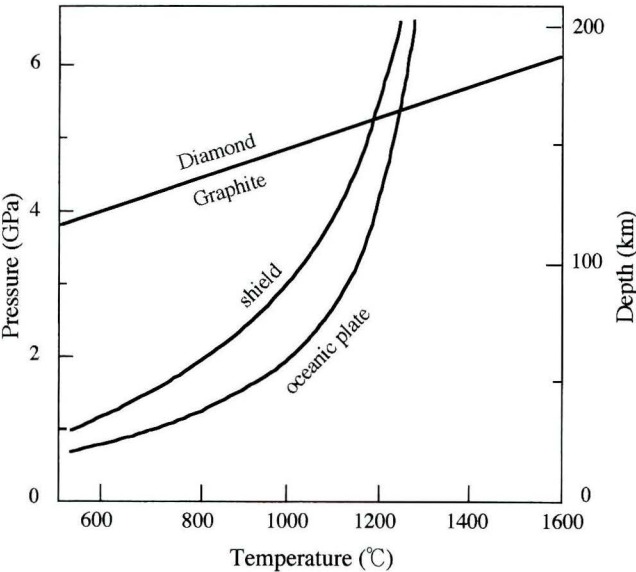


図2. 炭素 (C) の P-T 図。
グラファイト→ダイヤモンドの相転移のデータは、Kennedy & Kennedy (1979) を用いた。大陸地殻および海洋地殻の地温のデータは、Boyd & Gurney (1986) を用いた。

領域が狭くなる。ダイヤモンドに相転移した後は非常に安定で、上部マントル～下部マントルの境界にあたる670 km付近でも安定である。

20GPa、2360℃の温度圧力条件（transition zone 付近）で、珪酸塩メルトとダイヤモンドが密度逆転を起こし、ダイヤモンドが層状に存在する可能性が、実験的に指摘されている（Suzuki et al., 1995）。地球初期に多量の炭素がマントル内部にもたらされ、それが上部マントル～下部マントル境界付近に滞留しているとすれば、マントル内部の絶対的な炭素の見積もりが変わるであろう。

ダイヤモンドの合成実験は、19世紀後半から試みられている。合成実験では、触媒としてFeもしくはCo、Niなどの金属触媒を入れるために、これらの実験の成果を天然に応用できない。赤石(1990)は、触媒により天然に近い炭酸塩を用いて合成実験に成功している。さらに、Arima et al., (1993) では、キンバライト+ダイヤモンドを高温高压状態にして、キンバライトメルト中で天然の結晶と同じ八面体のダイヤモンドを成長させている。キンバライトを触媒に用いたダイヤモンドの合成は、天然のダイヤモンドの成因を解明する手がかりとなる。

ii) 2成分系

・CaO—CO₂

CaOとCO₂の化合物の炭酸カルシウムは、地表で普通に見られる鉱物である。地球形成時の大気は、CO₂に富んでいたと考えられている。CO₂は、約20億年から生物によって炭酸カルシウムとして岩石に固定された。この岩石は石灰岩として大陸に存在している。現在でも、CO₂は、海洋域でサンゴや石灰藻などによって炭酸カルシウムとして固定されている。かなりの量の石灰岩は、プレートの沈み込みによってマントル内部にもたらされる可能性がある。

図3はCaO—CO₂系のP—T図である。1.0GPa以下のデータはCrawford et al., (1972)を、1.0～3.5GPaの圧力

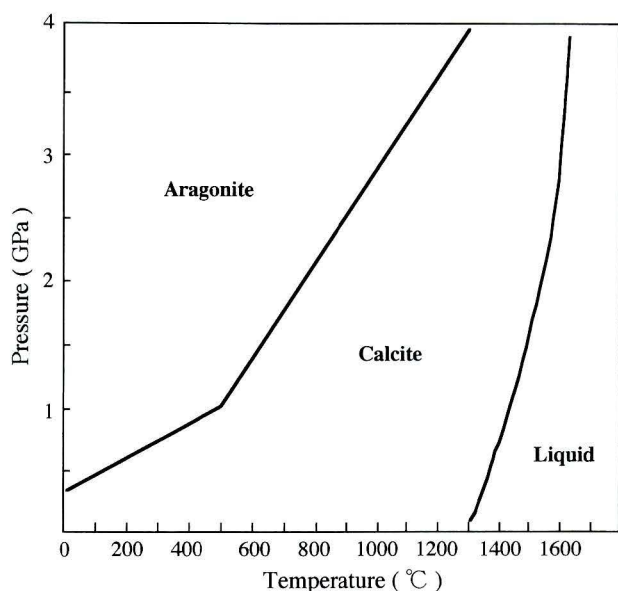


図3. CaCO₃のP-T図。

10kbar、500℃以下の条件は、Crawford et al. (1972)、10kbar、500℃以上の条件は、Irving & Wyllie (1973)を引用した。

域はIrving & Wyllie(1973)のデータを用いた。Crawford et al. (1972)は、1.0GPa以下におけるカルサイトからアラゴナイトの転移が、13.8bars/degreeでおこるという結果を得ている。Irving & Wyllie(1973)は、リキダスまで求めている。CaCO₃のリキダスは、3GPa、1600℃から2 GPa、1550℃で、温度依存性が非常に強く、圧力による影響をあまり受けない。この温度は地温勾配と比較するとかなり高い。CaCO₃はマントルの条件下でアラゴナイトとして安定に存在する可能性がある。外挿によって求めたCaCO₃の不変点は、5.5GPa、1700℃にあり、これより高温側では液として、高压側ではアラゴナイトとして、低压側ではカルサイトとして存在する。この温度圧力条件は、無水のカンラン岩のソリダスと非常に近いため、炭酸カルシウムの融解が、カンラン岩の融解に影響を与えている可能性を指摘している（Irving & Wyllie, 1973）。

・MgO—CO₂

マントル内においてマグネシウムはカルシウムよりもはるかに多く存在するため、MgOを含んだ高温高压実験がより重要になる。MgO—CO₂のP—T図を図4に示す。MgCO₃は、1GPa、1100℃から2GPa、1400℃にかけて、MgCO₃→MgO+CO₂

マグネサイト→ペリクレス+二酸化炭素

の反応が起こる（Irving & Wyllie, 1973）。不変点は2.6 GPa、1550℃にあり、これより高温高压側では液として、低温側ではマグネサイトとして、高温低压側ではペリクレス+CO₂として存在する。MgO ペリクレスは常圧では、立方晶系、硬度5.5、比重3.56の鉱物である。3 GPaにおけるマグネサイトのリキダスは1585℃で、カルサイトのリキダス（1610℃）よりも25℃低い。

Katsura et al. (1991)は、MgCO₃が55GPaの下部マントル領域までマグネサイトとして安定に存在することを確認している。Irving & Wyllie (1973)やKatsura et al. (1991)の結果から、マグネサイトはマントル内で幅広い圧力にわたり安定に存在し、炭素を固定する鉱物となりうる。

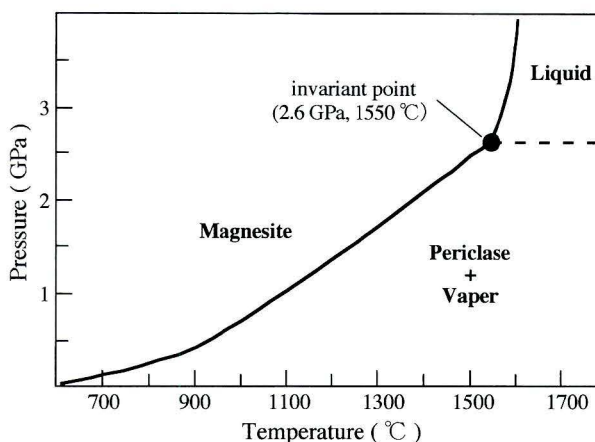


図4. MgCO₃のP-T図。

Irving & Wyllie (1973)より引用、単純化した。

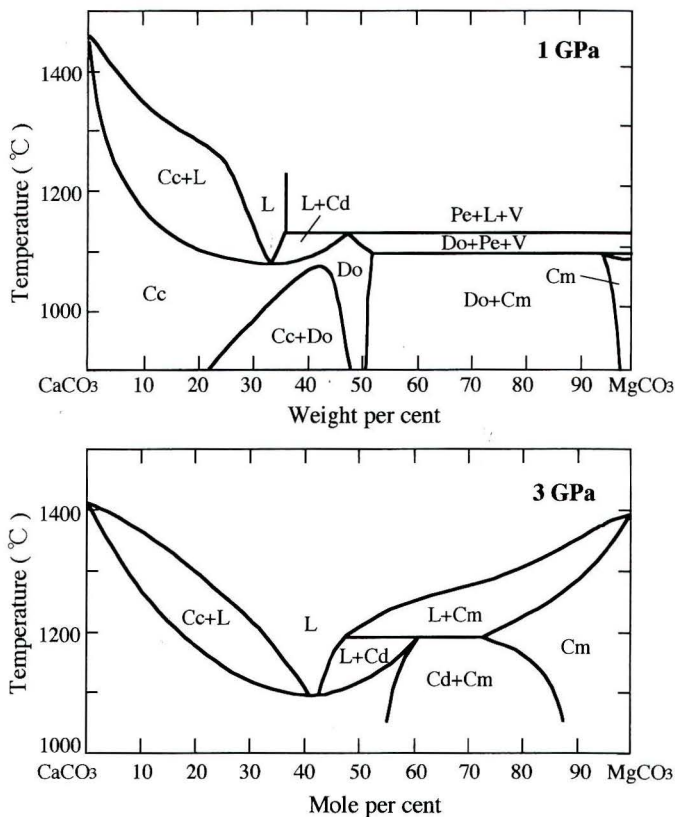
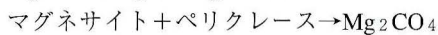
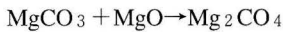


図5. MgO-CaO-CO₂系のP-T図。

1 GPaのデータは Byrnes & Wyllie (1981)、3 GPaのデータは Irving & Wyllie (1973) を引用した。Cc: calcite; Do and Cd: dolomite; Cm: magnesite; Pe: periclase; V: vapor; L: liquid。

Katsura et al. (1991)では、下部マンツルの深部でマグネサイトがMgOペリクレスと反応を起こし、Mg₂CO₄となる可能性もあると考えている。



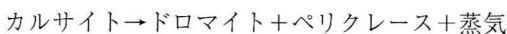
しかしながら、高温高压実験の結果からはMg₂CO₄は確認されてない。

iii) 3成分系

・CaO-MgO-CO₂

CaCO₃やMgCO₃は固溶体をつくる。より天然に近い系を考えるためには、MgO-CaO-CO₂組成を出発物質に用いた高温高压実験が必要になる。

1 GPaにおけるCaO-MgO-CO₂系の高温高压実験は Byrnes & Wyllie (1981)が、3 GPaにおける高温高压実験は Irving & Wyllie (1973)が行っている(図5)。いずれの実験も、Ca/Mg比を0~1までかえている(Byrnes & Wyllie (1981)では重量比、Irving & Wyllie (1973)ではモル比)。1 GPaのリキダスは、MgCO₃を30wt.%加えたときが最も低く、1075℃であった。この温度は、カルサイトのリキダス(1460℃)に対して、385℃も低い。Ca:Mg=1:1の組成では、およそ1100℃までドロマイトは存在しない(さらに低温では存在する可能性がある)。1100℃において、

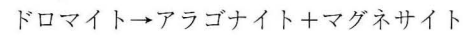
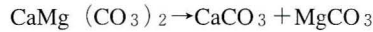


の反応が起こる。そして、1120℃で、ドロマイトは分解

し、液+蒸気になる。

3 GPaのリキダスの温度は、Mg:Ca=4:6のときが最も低く、およそ1300℃であった。

Martinez et al., (1996)は、さらに高压域での実験をX線その場観察を用いて行った。ドロマイトは、およそ600℃、5~6 GPaでマグネサイトとアラゴナイトに分解することを指摘した。



この実験は、その場観察を用いているため信頼性は高いが、温度が低いために直接天然に応用できない。圧力だけを考慮すれば、ドロマイトは、マンツル内に存在する可能性はある。しかし、Irving & Wyllie (1973)は、3 GPaの実験ではあるが、1100℃以上ではドロマイトは安定に存在せず、カルサイトとして存在するとしている。ドロマイトは通常のマンツルでは安定に存在しない可能性がある。

・CaO-SiO₂-CO₂

地殻および上部マンツルはおもに珪酸塩鉱物によって構成されている。炭酸塩と珪酸塩を出発物質に含んだ系の高温高压実験はより天然に近く、マンツル内での炭素の状態を知る上で重要である。しかしながら、CaO-SiO₂-CO₂系の実験はあまりなされておらず、特にマンツル領域での実験についてはほとんどデータがない。

Hung et al., (1980)は、3 GPaまでの実験を行いP-T図を作成した(図6)。CaSiO₃:CaCO₃=1:1における不変点は、1.85 GPa、1325℃であった。不変点よりも低压側では珪灰石+CO₂、低温高压側ではカルサイト+石英、高温側では石英+液になる。これらの反応は以下の通りである。

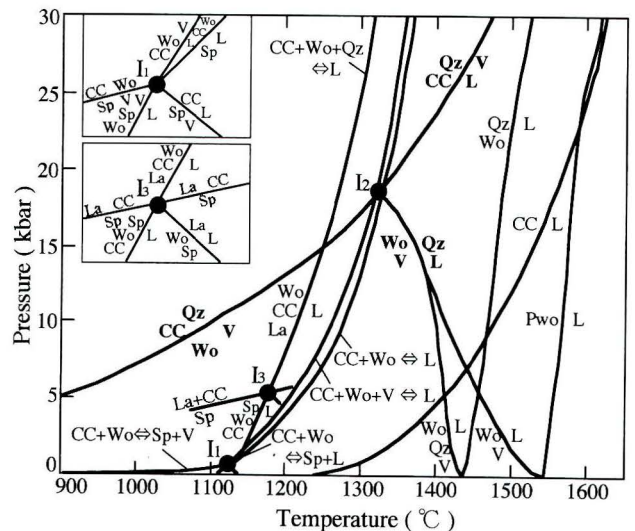
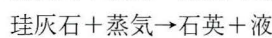
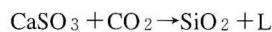
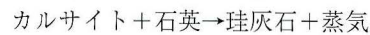
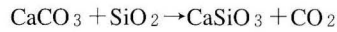
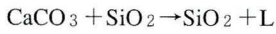


図6. CaO-SiO₂-CO₂系のP-T図。

Cc: calcite; Qz: quartz; Wo: wollastonite; La: larnite (Ca₂SiO₄);

Pwo: parawollastonite; Sp: spurrite (starting material broke down during runs); L: liquid。Huang et al. (1980)を引用した。



カルサイト+石英→石英+液

CaO-SiO₂-CO₂を出発物質に用いた実験では、不変点を含む反応線を境に、高温低圧側ではカルサイトが存在しない。不変点でのリキダスは、CaO-CO₂系のリキダス(1550℃)よりおよそ225℃低いことになる。

CaO-SiO₂-CO₂系の実験では、カルサイト以外にスパーライトやティレー石などの炭酸塩鉱物を生成する。スパーライトは、Ca₅Si₂O₆·CO₃で表され、単斜晶系、硬度5、比重3.025である。ティレー石は、Ca₅Si₂O₇(CO₃)₂で表され、単斜晶系、比重2.84である。両鉱物ともスカレン鉱床でよく見られる。スパーライトおよびティレー石組成を出発物質にした、高温高压実験の報告はない。Liu & Lin (1995) は、CaO-SiO₂-CO₂系の実験でスパーライトやティレー石がおよそ4 GPa 以下の圧力で安定に存在すると報告している。

・MgO-SiO₂-CO₂

オリビンは、マントルを構成する鉱物で、化学式はMg₂SiO₄であらわされる。MgO-SiO₂組成は、高压になるに従って、オリビン→β-スピネル→γ-スピネル→MgSiO₃-ペロプスカイトへと相転移していく(例えばIrifune & Ringwood, 1987など)。これらの鉱物と炭素との相関は、マントル内での炭素の存在状態を知る上で大変重要である。

MgO-SiO₂-CO₂系の高圧実験の出発物質では、マグネサイト(MgCO₃)+エンスタタイト(MgSiO₃)が用いられている。図7は、マグネサイト+エンスタタイトの15GPa までのP-T図である。MgO-SiO₂-CO₂組成を出発物質に用いた高温高压実験からは、2 GPa、1000℃から4 GPa、1500℃にかけて以下の反応が起こる(Newton & Sharp, 1975)。

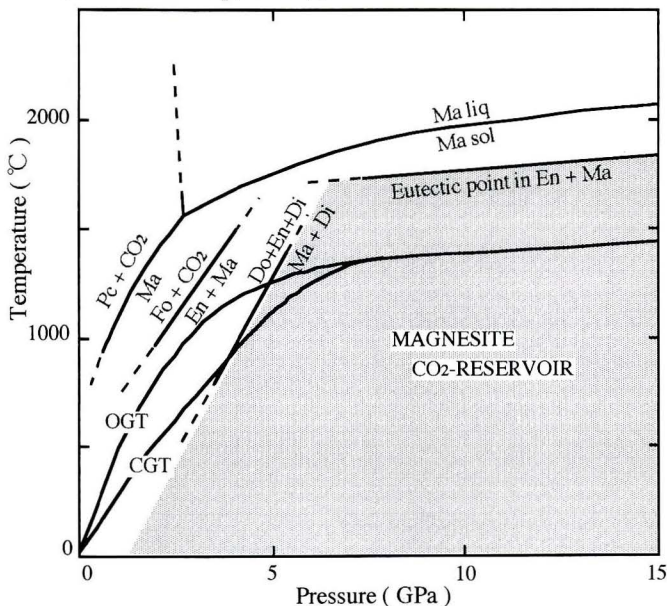
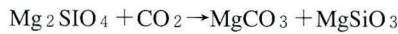


図7. CO₂を含んだマントルにおけるマグネサイトの安定。

Pc: pelicase; Ma: magnesite; Fo: forsterite; En: enstatite; Do: dolomite; Di: diopside; liq: liquidus; sol: solidus; OGT: oceanic geotherm; CGT: continental geotherm. Katsura & Ito(1990)より引用した。

フォルステライト+蒸気→マグネサイト +エンスタタイト



フォルステライト+蒸気の安定領域は、海洋の地温と比較して高温である。マグネサイトやエンスタタイトは、海洋の地温勾配で安定に存在する。

Katsura & Ito (1990) は、MgSiO₃と MgCO₃を出発物質に用いて、8 GPa および15GPa での共融点を求めている。両圧力の共融点は、正確な温度は求められてないが、マグネサイトのリキダスと、海洋および大陸の地温勾配の間であった。ケイ酸塩鉱物と共存するマグネサイトは、通常の地温勾配においてかなりの圧力まで安定に存在することを示している。Katsura & Ito (1990) は、さらに高压の下部マントルにあたる26GPa での実験を行っている。MgSiO₃-MgCO₃組成は、下部マントルにおいてマグネサイトと MgSiO₃-ペロプスカイトとして安定に存在するという結果が得られている。マグネサイトは、上部マントルから下部マントルにわたり安定で、炭素を固定する鉱物として重要である。

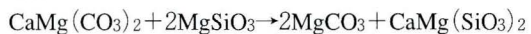
平山・藤井(1993)では、マグネサイトとエンスタタイト、フォルステライトが共存する系での高温高压実験を行っている。9GPa におけるこれらの組成の共融点温度は1600℃で、MgSiO₃-MgCO₃系の共融点温度よりも約150℃低い。共有点でのメルトの組成は、MgO-45wt%、SiO₂-20wt%、CO₂-35wt%となり、SiO₂に非常に乏しかった。

iv) 多成分系(4成分系以上)

・CaO-MgO-SiO₂-CO₂

CaO-MgO-SiO₂-CO₂系の高圧実験は、炭酸塩鉱物の物性的データを得ることが目的ではなく、マントル起源マグマの成因を解明するための実験を目的とする。

Kushiro et al., (1975) は、MgSiO₃:CaCO₃=2:1を出発物質に用いた高温高压実験を行った(図8)。4~4.5 GPa、1000℃から4.5~5 GPa、1200℃を境に、低圧側ではドロマイト+エンスタタイト+ディオプサイドが、高压側ではマグネサイト+ディオプサイドが安定に存在する。



ドロマイト+エンスタタイト→マグネサイト+ディオプサイド

この反応は、CaO-MgO-CO₂系よりも、およそ1 GPa 低い圧力で起こる。Kushiro et al., (1975)は、この反応がおこる温度圧力条件が、グラファイト→ダイヤモンドの相転移とほぼ同じであることに着目している。Ca_{0.5}Mg_{0.5}SiO₃:MgCO₃=1:1を出発物質に用いた4.5GPa 以下の実験では、すべての鉱物組み合わせが、ドロマイト+ディオプサイド+エンスタタイトとなり、MgSiO₃:CaCO₃=2:1を出発物質に用いた実験と同じ結果になった。また、Mg₂SiO₄:CaCO₃=2:3を出発物質に用いた実験では、5.5GPa~8 GPa までの圧力で、フォルステライト+アラゴナイトの鉱物組み合わせになった。Kushiro et al., (1975)の実験結果からは、いずれの組成を出発物質に用いても、マントル条件下で炭酸塩鉱物が安定に存在することを示している。

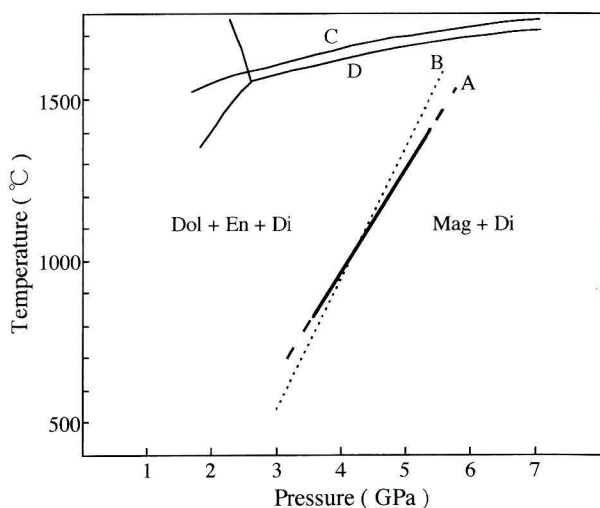


図 8. CaO-MgO-SiO₂-CO₂系の P-T 図。

Kushiro et al. (1975) より引用した。出発物質は、enstatite (En 95.3:Fs4.7):calcite=2:1 (mol ratio)。Dol: dolomite; En: enstatite; Di: diopside; Mag: magnesite。A は、Dol + En + Di ⇌ Mag + Di の反応曲線。B は、graphite-diamond の相転移曲線 (Bundy et al., 1961)。C は、CaCO₃ のリキダス (Irving & Wyllie, 1973)。D は、MgCO₃ のリキダス (Irving & Wyllie, 1973)。

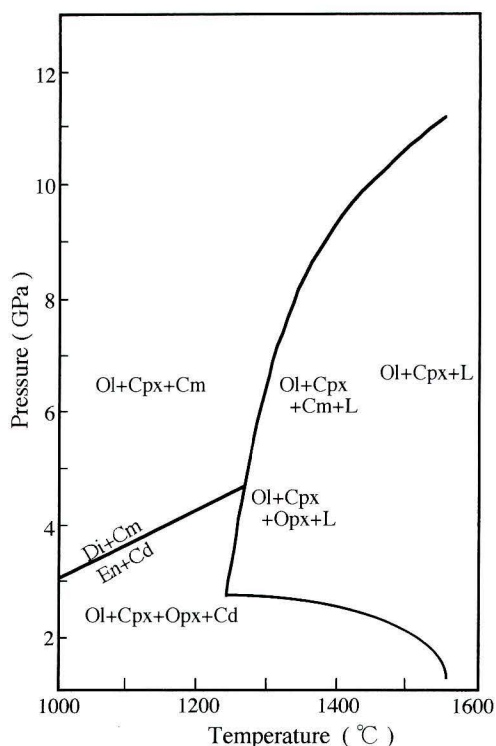


図 9. CaO-MgO-SiO₂-CO₂系の P-T 図。

Ol: olivine; Cpx: clinopyroxene; Opx: orthopyroxene; Cm: magnesite; Cd: dolomite; Liq: melt; Di: diopside; En: enstatite. Canil & Scarfe (1990) より引用、単純化した。

Brey et al., (1983) も 4 GPa までの CaO-MgO-SiO₂-CO₂系の実験を行っている。Brey et al., (1983) が用いた出発物質は、エンスタタイトおよびドロマイト、ディオプサイド、マグネサイトを 3つのパターンで混合したものである。Kushiro et al., (1975) と比べると、若干複雑な組成になっている。ドロマイト+エンスタタイト→マグネサイト+ディオプサイドの反応は、2.7~2.8GPa、

970℃から3.4~3.5GPa、1100℃で起った。Kushiro et al., (1975) の結果と比較すると、約 1 GPa 低い圧力で反応が起こった。いずれにせよ、マントル条件下で炭酸塩鉱物が安定に存在する。

Canil & Scarfe (1990) は、Mg₂SiO₄:MgSiO₃:Ca_{0.5}Mg_{0.5}SiO₃:CaCO₃=6:2:1:1 を出発物質に用いて、最大 12GPa までの高温高圧実験を行い、生成した液の化学組成について分析を行った。サブソリダスの鉱物組み合わせは、オリビン+単斜輝石+マグネサイトで、マグネサイトは常に安定であった (図 9)。ソリダスは、5 GPa、1260~1310℃から、7 GPa、1300~1360℃、9 GPa、1350~1400℃であった。ソリダスでは、オリビン+単斜輝石+マグネサイト→オリビン+単斜輝石+マグネサイト+液の反応が起こった。マグネサイトは、ソリダスを越えても安定に存在し、ソリダスよりおよそ 300℃高温側では存在しなかった。5~7 GPa におけるソリダスの近くの液の組成は、天然に産出するキンバライトの組成と似る。9 GPa 付近の液の組成は、Mg が多くなり天然に産出するキンバライトの組成と似ない。

・CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂および CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-CO₂

Canil & Scarfe (1990) は、CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ および CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-CO₂系で高温高圧実験を行っている。CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂系は Mg₂SiO₄:MgSiO₃:Ca_{0.5}Mg_{0.5}SiO₃:CaCO₃:Mg(OH)=54.5:18.2:9.1:9.1、CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-CO₂系は Mg₂Si₄:MgSiO₃:Mg₃Al₂Si₃O₁₂:CaCO₃=40:43:12:5 を出発物質に選んだ。

CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂系のソリダスは、3.1 GPa、1200℃から 8 GPa、1200℃で、温度依存性がたいへん強く、10GPa までの実験では圧力による影響をほとんど受けない (図 10)。7 GPa でのソリダスの温度は、CaO-MgO-SiO₂-CO₂系のソリダスよりも約 100℃低い。Kaapvall craton の地温勾配 (Boyd & Gurney, 1986) とは、およそ 6.5GPa でソリダスと交差する。CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂系において、含水鉱物および炭酸塩鉱物は、6.5GPa 以上のアセノスフェア領域では存在しない。

サブソリダスの鉱物組み合わせは、オリビン+単斜輝石+ブルーサイト+マグネサイトだが、ソリダスをこえるとオリビン+単斜輝石+液となった。含水鉱物および炭酸塩鉱物は、サブソリダスでは安定に存在するが、ソリダスよりも高温側では存在せず、これらはすべて液に含まれる。

CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-CO₂系でのソリダスは、4.5 GPa、1200℃から 9 GPa、1400~1450℃であった (図 11)。CaO-MgO-SiO₂-CO₂系と同様に、サブソリダスでは、低圧側ではドロマイトが、高圧側ではマグネサイトが安定に存在した。サブソリダスにおける 4 GPa 以上の鉱物組み合わせは、オリビン+斜方輝石+単斜輝石+ザクロ石+マグネサイトであった。ソリダスよりも高温では、炭酸塩鉱物は存在せず、鉱物組み合わせはザクロ石+レゾライト (オリビン+斜方輝石+単斜輝石+ザクロ石)

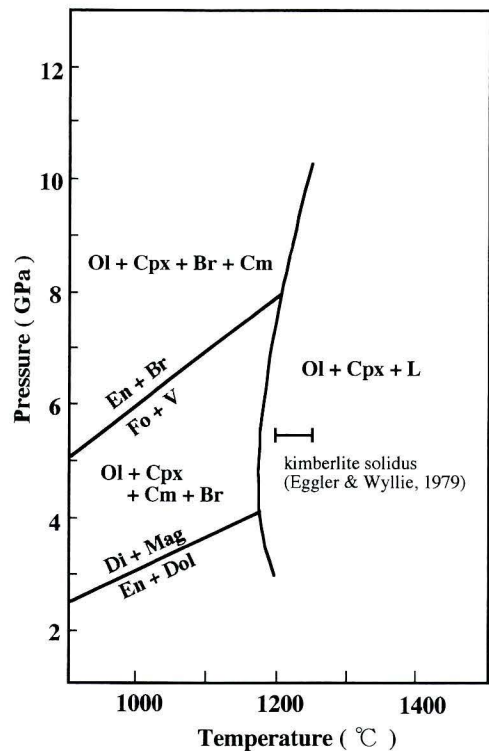


図10. CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂系の P-T 図.
Ol : olivine ; Cpx : clinopyroxene ; Br : brucite ; Cm : magnesite ;
Cd : dolomite ; Liq : melt ; Di : diopside ; En : enstatite ; Fo :
forsterite ; Dol : dolomite ; Mag : magnesite。Canil & Scarfe(1990)
より引用、単純化した。

+液となった。

2. 天然物

CO₂を含むマントル起源火山岩は、キンバライトおよびランプロアイト、カーボナタイトが有名である。特に、キンバライトおよびカーボナタイトは、成因に CO₂が関与している可能性が高く、高温高压実験の CO₂を含んだ出発物質が必要不可欠である。ランプロアイトに関しては、CO₂含有量はあまり多くない。CO₂は、ランプロアイトを出発物質に用いた高温高压実験を行う際には封入されないことが多い。

ここでは、キンバライトとカーボナタイトについて、いくつかの高温高压実験の結果をまとめる。

i) キンバライト

キンバライトは、岩体による化学組成のバリエーションが大きいことや、斑晶質キンバライトと無斑晶質キンバライトが存在すること、Group I キンバライトと Group II キンバライトが存在することなどから、出発物質の化学組成を限定するのが難しい。

Ringwood et al., (1992)は、平均的なキンバライトの化学組成を合成(CO₂=5.0wt%、H₂O=5.3wt%)し、10 GPa と16GPa で実験を行った。キンバライトマグマは、400km よりも深いところで、メジャライト+β-Mg₂SiO₄と平衡に存在する起源物資の部分融解で生成するとした。10GPa と16GPa のいずれの実験においても、炭酸塩鉱物は、ソリダスに近いところに存在するとの報告があった。

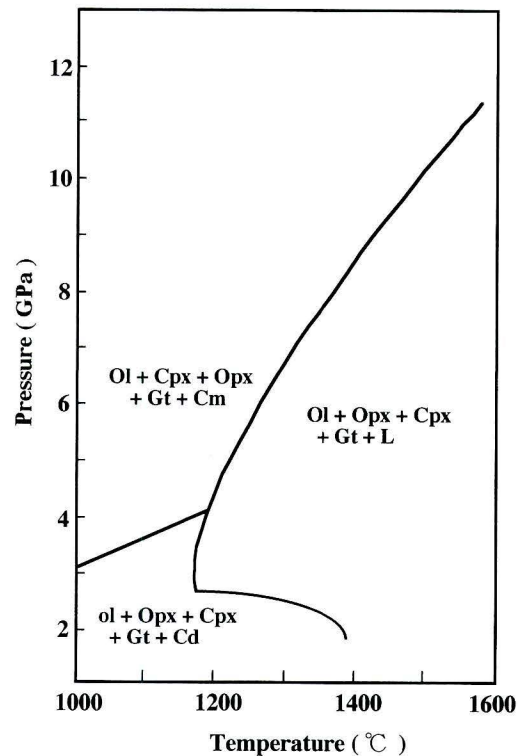


図11. CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-CO₂系の P-T 図.
Ol : olivine ; Cpx : clinopyroxene ; Opx : orthopyroxene ; Gt :
garnet ; Cm : magnesite ; Cd : dolomite ; Liq : melt。Canil & Scarfe
(1990)より引用、単純化した。

化学分析は行っていないために、この鉱物が何であるかは不明である。含水鉱物は出現しなかった。

Yamashita et al., (1992)は、南アフリカ共和国のマクガニン鉱山に産出する Group II の無斑晶質キンバライト(CO₂=6.7wt%、H₂O=1.94wt%)および、斑晶質キンバライト(CO₂=4.4wt%、H₂O=3.4wt%)を用いて、1~8.7GPa の圧力で実験を行った(図12)。無斑晶質および斑晶質キンバライトのリキダスと、7 GPa 以上の鉱物組み合わせを決定した。リキダスは、無斑晶質キンバライトが4 GPa、1300℃から7 GPa、1500℃で、斑晶質キンバライトが3 GPa、1500℃から8 GPa、1550℃であった。鉱物組み合わせは、無斑晶質キンバライトが7 GPa 以上でザクロ石+単斜輝石のエクロジャイト組成に、斑晶質キンバライトが6 GPa 以上で、ザクロ石+斜方輝石+単斜輝石+オリピンのザクロ石レルゾライト組成になった。フロゴパイトは、無斑晶質および斑晶質キンバライトの両実験ともに約6 GPa で分解した。1300~1700℃の温度範囲では、すべての実験で液と共存した。Group II キンバライトは、ソリダスよりも高温では、炭酸塩鉱物は見られずに含水鉱物(フロゴパイト)のみが見られた。

山下・大谷 (1995) は、7 GPa の圧力における無斑晶質キンバライトの部分融解による液の組成を、ダイアモンド粉末を用いて明らかにした。液の組成は、SiO₂に著しく乏しく、K₂O や CO₂、H₂O に富む。Kaaapvaal craton の地温勾配にあたる、およそ1350℃の液の組成は、Schrauder & Navon(1994)で報告されたダイアモンドに包有される流体の組成と似る。

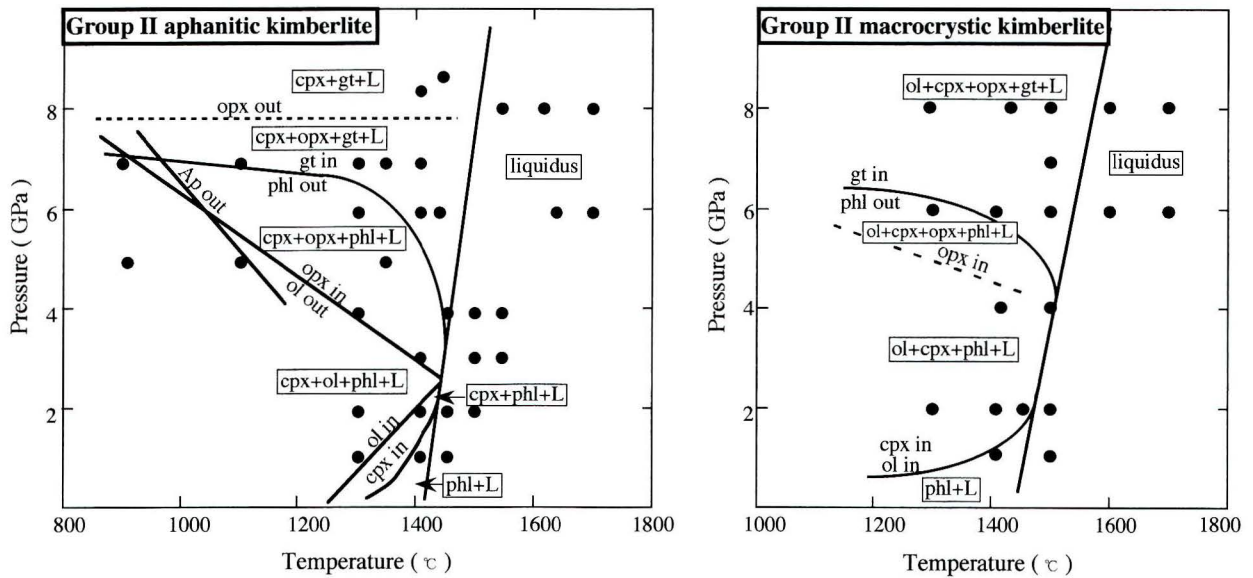


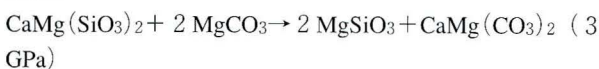
図12. Group II キンバライトのP-T図.

ol : olivine ; cpx : clinopyroxene ; opx : orthopyroxene ; gt : garnet ; phl : phlogopite ; Ap : apatite ; L : liquid。点線は推測。

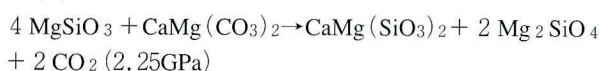
Edgar et al. は、南アフリカ共和国のウエズルトン鉱山に産出する、Group I の無斑晶キンバライト ($\text{CO}_2=4.77\text{ wt\%}$, $\text{H}_2\text{O}=6.2\text{ wt\%}$) を用いて実験を行った (Edgar et al., 1988; Edgar et al., 1993)。4 GPa までの実験 (Edgar et al., 1988) については、 CO_2 をさらに加え ($\text{CO}_2=10.34\text{ wt\%}$, $\text{H}_2\text{O}=6.2\text{ wt\%}$) CO_2 に飽和した状態でも実験を行った。 $\text{CO}_2=4.77\text{ wt\%}$, $\text{H}_2\text{O}=6.2\text{ wt\%}$ の実験のリキダスの温度は、2 GPa、1425°C から 3 GPa、1450°C であった。3 GPa、1300°C よりも低温側ではカルサイトが見られた。 CO_2 に飽和した状態の実験のリキダスの温度は、2 GPa、1450~1485°C から 3 GPa、1525°C で、飽和していない状態よりもおよそ 75°C 高かった。3 GPa、1400°C よりも低温低圧側ではカルサイトが、高圧側ではドロマイトが見られた。

5~10 GPa での実験では、低温側で炭酸塩鉱物が見られた。 CaCO_3 (多分アラゴナイト) とマグネサイトは、5~10 GPa にわたって存在が報告されている。含水鉱物は、いずれの実験でも見られなかったため、 H_2O はすべて液として存在する可能性が強い。

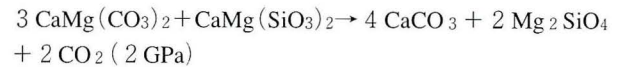
Eggler (1989) は、実験と計算によるシミュレーションからサブソリダスでのP-T図を作成した (図13)。ソリダスは、2 GPa、1000°C から 4.25 GPa、1100°C である。サブソリダスでは、含水鉱物、炭酸塩鉱物とも見られた。この研究では、炭酸塩鉱物とマントル鉱物との反応による脱ガス作用に着目している。(括弧内は反応の起こる圧力)



ディオブサイド+マグネサイト→エンスタタイト+ドロマイト



エンスタタイト+ドロマイト→ディオブサイド+フォルステライト+蒸気



ドロマイト+ディオブサイド→カルサイト+フォルステライト+蒸気

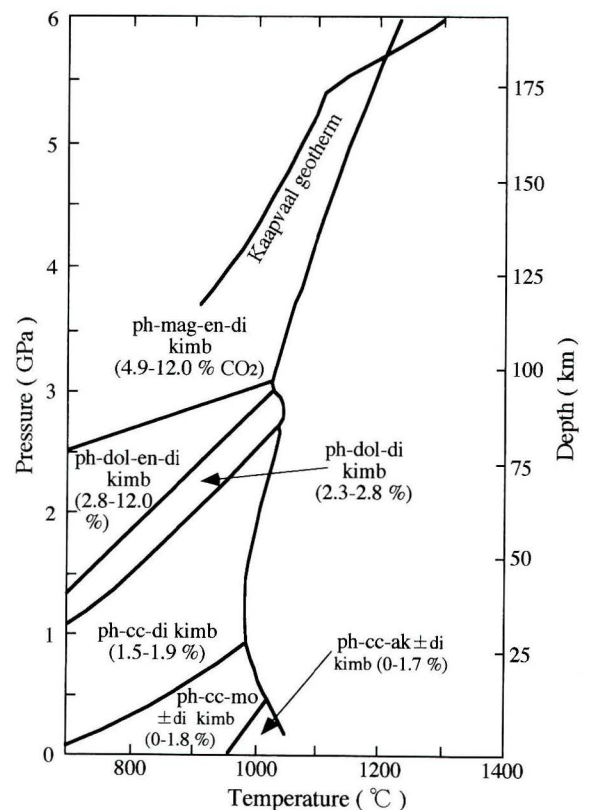


図13. キンバライトのソリダス下のP-T図.

Eggler, D. H. (1989) より引用、簡略化した。ph : phlogopite ; mag : magnesite ; en : enstatite ; di : diopside ; dol : dolomite ; cc : calcite ; mo : monticellite ; ak : akermanite。すべての条件下で、オリビンおよびザクロ石 (もしくはスピネル)、イルメナイト、ペロプスカイトを含む。鉱物組み合わせの下括弧は、計算によって求められた CO_2 の含有量。

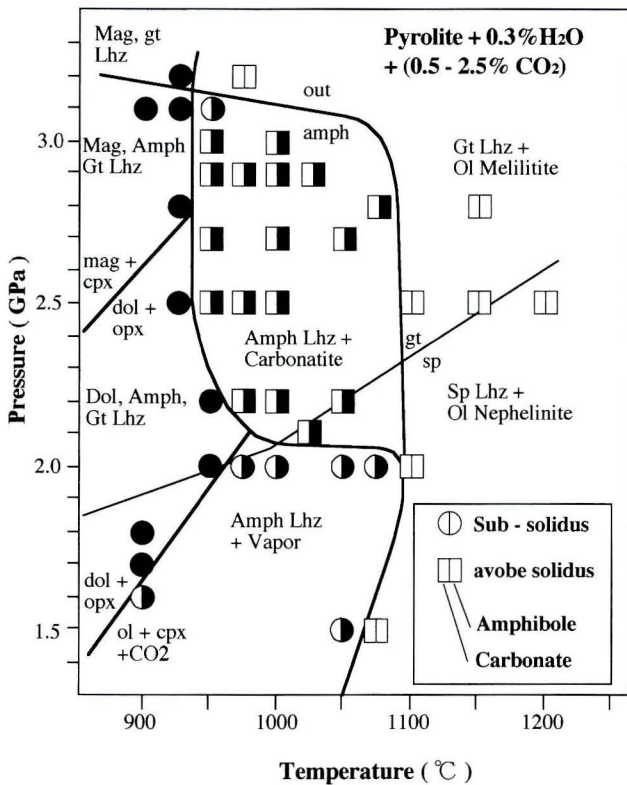
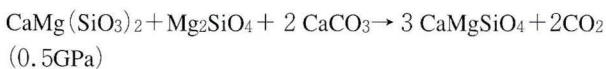


図14. Hawaiian Pyrolite (0.3% H_2O) + 5% dolomite or 1.4% magnesite の P-T 図。

Ol: olivine; Cpx: clinopyroxene; Opx: orthopyroxene; Gt: garnet; Amph: amphibole; Sp: spinel; Mag: magnesite; Dol: dolomite; Liq: melt; Lhz: lherzolite. カーボナタイトメルトの領域は、炭酸塩鉱物のソリダスより高温側と、角閃石の安定領域。Wallace & Green(1988)より引用。



ディオプサイド+フォルステライト+カルサイト→モンチセライト+蒸気

キンバライト組成のサブソリダスでは、マグネサイトおよびドロマイト、カルサイトが安定に存在する。

ii) カーボナタイト

カーボナタイトはキンバライトよりも CO_2 含有量がはるかに多く、高温高压実験を行いにくい。Wallace & Green (1988) は、ペリドタイト+炭酸塩鉱物+角閃石 ($\text{H}_2\text{O}=0.3\%$ 、 $\text{CO}_2=0.5-2.5\%$) を出発物質に用いて、圧力1.5~3.2GPa、温度900~1200℃の範囲で実験を行った。カーボナタイトのメルトは、2.1~3.0GPa、930~1080℃の範囲で、角閃石レルゾライトの鉱物組み合わせと平衡に存在した(図14)。出発物質の化学組成(wt%)は、 SiO_2 -45.56、 Al_2O_3 -6.02、 FeO -7.44、 MgO -29.49、 CaO -6.41、 Na_2O -5.51、 K_2O -0.15で、2.2GPa、1000℃におけるメルトの組成(wt%)は、 SiO_2 -2.49、 Al_2O_3 -1.95、 FeO -4.61、 MgO -14.19、 CaO -21.29、 Na_2O -4.99、 K_2O -0.35で、ナトリウムに富んだドロマイト的であった。メルトは、Na、Mg、Ca、Feに富み、Siに乏しいという化学的特徴を持つ。この特徴は、カルシウムに富むカーボナタイト(calcic carbonatite)やナトリウムに富んだ初生的と考えられているカーボナタイト(natrocarnatite)

とは異なる。Oldoinyo lengai に産出するようなカーボナタイト(natrocarnatite)は、実験によって得られた液から、結晶分化作用によってオリビン、スピネル、ドロマイトを取り除けば生成するというモデルを計算で導き出している。

これらの結果は、従来から考えられてきた、カーボナタイトの成因モデル、すなわち、

- ・融解した炭酸塩を含むケイ酸塩メルトの分化作用の最後のメルト

- ・初生的に均質である炭酸塩を含むケイ酸塩メルトの不混和作用

とは異なる結果となった。

Sweeney et. al. (1995) は、Wallace & Green(1988)の結晶分化作用による natrocarnatite の生成モデルを検証するために、2.2GPa、1000℃で得られたメルトの組成に H_2O を、2 wt%および4 wt%加えたものを出発物質に用いて、圧力0.5~2.7GPa、温度600~1200℃で実験を行った。

H_2O を4 wt%加えた実験のソリダスは、1 GPa、800℃から1.5GPa、850℃程度で、リキダスは、1 GPa、1000℃から1.5GPa、1100℃であった。 H_2O を2 wt%加えた実験のソリダスでは、1.5GPa、800℃で、4 wt%加えたときよりも30℃低く、リキダスは、0.5GPa、1000℃から1.5GPa、1100℃であった。 H_2O を2 wt%加えた実験のリキダスの温度は、低圧側では4 wt% H_2O を加えたときよりも高温であった。水の量は相間あまり影響を与えなかった。高温低圧の実験生成物を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察したときに見られる多孔質の構造は、液→液+流体(fluid)

の反応により、メルトからでた揮発性成分によるものである。蒸気(fluid)は、主に水(H_2O)および二酸化炭素(CO_2)から構成され、ナトリウムやカリウム、塩素も含む。液→液+蒸気(fluid)の反応は、0.5GPa、800℃から1 GPa、950℃(4 wt% H_2O)、0.5GPa、850℃から1 GPa、950℃(2 wt% H_2O)で起こった。サブソリダスの鉱物組み合わせは、4 wt%・2 wt% H_2O を加えた実験ともオリビンおよびドロマイト、角閃石であった。角閃石は、ソリダスーリキダス間の1.8GPa以上の圧力でのみ安定に存在する。ドロマイトは低温から高温まで広い範囲にわたって安定であった。この温度圧力条件下の実験では、ケイ酸塩メルトとの不混和作用は見られなかった。

Sweeney(1994)は、K/Na比が低い海洋性の特徴を持つペリドタイト(fertile-peridotite)と、K/Na比が高い大陸性の特徴を持つペリドタイト(refractory-peridotite)を出発物質に用いて、圧力18~47.5kbar、温度985~1300℃の範囲で実験を行った。すべての実験で、カーボナタイト質メルトが生成した(図15)。海洋性の特徴を持つペリドタイトから生成したカーボナタイトメルトは、2.5GPa、1170℃でフロゴパイトレルゾライトと平衡に存在した。鉱物の化学組成は、ハワイアンペリドタイトのような海洋性ペリドタイトのものと似ている。大陸性の特徴を持つペリドタイトから生成したカーボナタイトメルトは、3.2GPa、1120℃でフロゴパイトレルゾライトと平衡に存在した。鉱物の化学組成は、Kaapvaal リソ

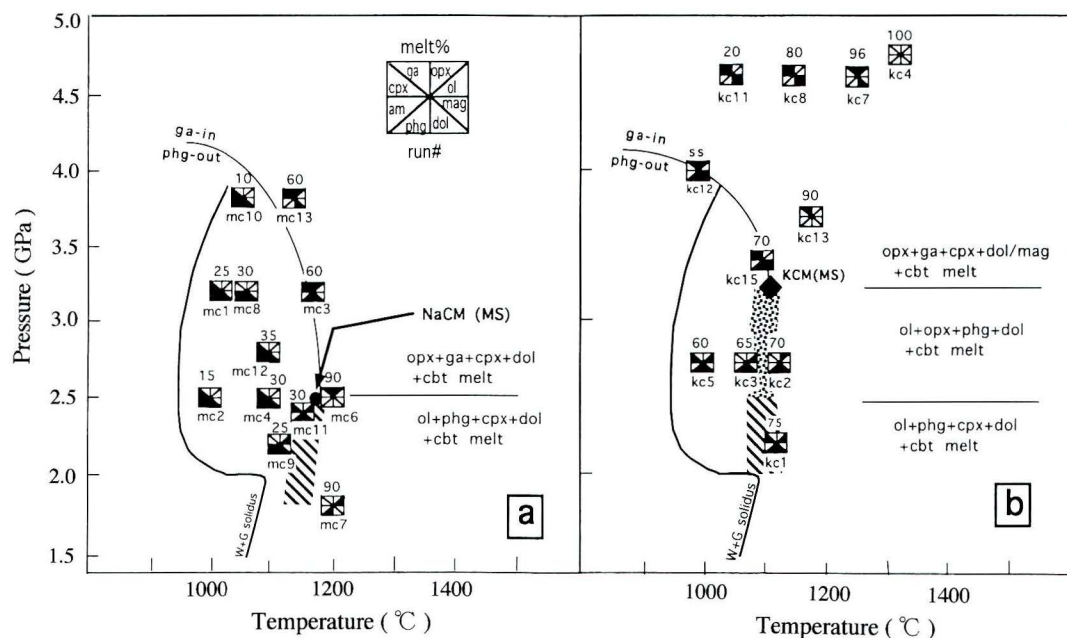


図15. Low K/Na (海洋性ペリドタイト) および High K/Na (大陸性ペリドタイト) の P-T 図。

Sweeney, R. J. (1994)より引用。Run symbol の上の数字は、メルトの割合。MS は、ol + opx + cpx + ga + phg (+dol or -dol) のペリドタイト組成と飽和している条件。ソリダスは、Wallace & Green (1988) を引用した。

スフェアーのフロゴパイトレルズライトものと似ている。カーボナタイトの K/Na 比は、マンツルの組成によってコントロールされるという結果を指摘している。

IV 議論

1. マントル内に存在する炭素を含んだ鉱物

マンツル内では、マンツル起源火山岩の岩石学的・鉱物学的研究および高温高压実験の結果から、アラゴナイトおよびドロマイト、マグネサイトなどの炭酸塩鉱物、もしくはダイヤモンドが安定に存在する。

ダイヤモンドは、マンツル条件下では安定領域が非常に広く(図2)普通に存在すると考えられる。

CaCO₃は、カルサイトもしくはアラゴナイトとして存在する。カルサイトは、低压で安定だが、13.8bars/degreeで、アラゴナイトに転移してしまうので、マンツル条件下では安定に存在しない。アラゴナイトは、圧力に関してどの程度まで安定か実験データがないために不明である。キンバライトを出発物質にした高温高压実験が示すように、カンラン石が安定に存在する、マグネシウムに飽和したマンツルでは、カルシウムがマグネシウムに置換され、マグネサイトが安定に存在する。海洋プレートなどのカルシウムに富みマグネシウムに乏しい物質が沈み込みによってマンツル深部にもたらされた場合、アラゴナイトがどこまで安定であるか興味深い。アラゴナイトのリキダスが、地温勾配と交差するまでの高温高压実験のデータが必要となる。CaCO₃組成の不変点は、5.5 GPa、1700℃で、無水のペリドタイトのソリダスと非常に近い。CaCO₃の融解は、ペリドタイトの融解のひきがねになる可能性が指摘されている (Irving & Wyllie, 1973)。この温度は、マンツルの地温と比較して非常に高いため、現実には考えにくい。

ドロマイト (MgCa(CO₃)₂) は、5～6 GPa 付近で、マグネサイトとアラゴナイトに分解する (Martinez et al.,

1996)。そのため、あまり深部まで存在しないと考えられる。ドロマイトは、キンバライトを出発物質に用いたサブソリダスの実験 (Eggler, 1989) では、約 3 GPa 以下でのみ安定であった。ドロマイトは天然のマンツルでは安定に存在しない鉱物かもしれない。

マグネサイトは、Katsura et al. (1991) によって、55 GPa の下部マンツル領域まで安定に存在することが確認されている。炭酸塩鉱物の中では、マンツルでもっとも安定な鉱物であろう。マグネサイトは、リキダスが 10 GPa で 2000℃程度なので、ホットブルーム等の高温の物質の上昇が起これば存在しない。

MgO-SiO₂-CO₂系の実験では、通常フォルステライト+マグネサイトもしくはエンスタタイト+マグネサイトを出発物質として用いる。これらの実験は、すべて MgO に飽和している。フォルステライトやエンスタタイトは、マンツルを構成する主要な鉱物のため、出発物質として適当である。

沈み込むプレートに伴ってマンツルにもたらされた堆積物のような、MgO に乏しく SiO₂ や CO₂ に富んだ物質がマンツル深部でどのような状態になるかは興味深い。MgO:SiO₂:CO₂=1:1:1 を出発物質に用いた高温高压実験が必要である。この場合、石英 (SiO₂) + マグネサイト (MgCO₃) が安定に存在するか、もしくはエンスタタイト (MgSiO₃) + ガス (CO₂) が安定に存在するか興味深い。

炭素の供給源には、沈み込むプレートによってもたらされるものと、地球誕生当時から存在するものの 2 つが考えられる。

地球誕生当時からマンツル内に存在する炭素は、ダイヤモンドとして存在する可能性がある。ダイヤモンドの包有物の研究により年代値が推定されるためである。地球誕生時にマグマオーシャンが存在していたとすれば、ダイヤモンドはマグマよりも高密度のため地球深部に向かって沈む。670 km 付近の transition zone では、珪酸塩メ

ルトとダイヤモンドの密度逆転が起こり、ダイヤモンドの層を形成する可能性がある(Suzuki et al., 1995)。

マグマオーシャンの地温は、現在よりもかなり高温であったと考えられている。炭素は、マントル浅部ではグラファイトとして安定(図2)で、より深部でないとダイヤモンドとして安定に存在しないと考えられる。マントル浅部に存在する、低密度のグラファイトは、沈み込めずに地表付近に留まった可能性もある。

カルサイトやマグネサイトの3 GPaのリキダスは、カルサイトが1610°C、マグネサイトが1585°Cである。現在のマントルの3 GPaにおける地温は、およそ1200°C程度である。この温度では、カルサイトやマグネサイトは安定に存在する。マグマオーシャン時の地温は、現在よりも200–300°C程度高かったと考えられている。この温度は、カルサイトやマグネサイトのリキダスとかなり近い。カルサイトとマグネサイトは、互いに固溶体をつくるために融点はさらに低くなる。Mg:Ca = 4:6のときの融点は、およそ1300°C(Irving & Wyllie, 1973)であった。この温度は、マグマオーシャン時の地温よりも低い。カルサイトやマグネサイトは、マグマオーシャン時には存在できなかった可能性がある。

2. ダイヤモンドから得られる情報

ダイヤモンドが地球誕生当初から存在する説はダイヤモンドの生成年代から支持される。また、マントル内で成長する説は、キンバライトを触媒に用いてダイヤモンドが成長したこと(Arima et al., 1993)や、CO₂に富んだ流体がダイヤモンドの包有物に見つかったことから支持される。

ダイヤモンドの生成深度は、ダイヤモンドに包有される鉱物から推定されている。ダイヤモンドは、浅いものでは200km程度の上部マントル、深いものでは400kmよりも深部の上部マントルで生成したと考えられている。ダイヤモンドが生成される深度は、非常に幅広い。

ダイヤモンドが400kmよりも深部からもたらされたという報告は、キンバライトやランプロアイトマグマの生成深度の議論にとっても重要である。従来の研究結果から、キンバライトマグマは、200km程度の上部マントルで形成されたと考えられていた。400kmよりも深部からもたらされたダイヤモンドの発見は、キンバライトマグマ成因に2つの可能性を示している。1つは、キンバライトマグマが400kmよりも深部で生成し、様々な深度で形成されたダイヤモンドを捕獲して上昇する説。もう一つは、ブルームやダイアピルなどの上昇に伴って、マントル深部に存在するダイヤモンドが200km程度までもたらされ、そこでキンバライトマグマが形成する説である。

ランプロアイトは、キンバライトと同様にダイヤモンドを産出するが、マグマの生成深度はキンバライトほど深くはないと考えられている。つまり、ランプロアイトマグマが、地下400kmよりも深部でできたとは考えにくい。従って、ダイヤモンドは、ブルームやダイアピルなどの上昇に伴って、様々な深度から上昇し、適当な深さでキンバライトもしくはランプロアイトマグマに取り込まれたと考えるべきである。

ダイヤモンドの包有物には、珪酸塩鉱物の他に、CO₂やK₂O、REE、LILに富んだ流体もしくはメルトが報告されている(Navon et al., 1988)。これらの流体もしくはメルトの起源は全く不明である。CO₂の起源は、マントル内に元々存在していたものと、プレートテクトニクスにより運搬されたものの2つが考えられる。

流体もしくはメルトの存在は、ダイヤモンドの成因と密接な関係がありうる。流体もしくはメルトの一番の特徴は、CO₂に富むことである。キンバライトメルトや炭酸塩を触媒にダイヤモンドが成長したことから、流体もしくはメルトを触媒にダイヤモンドが成長するかもしれない。キンバライトの部分融解のメルト(山下・大谷, 1995)は、ダイヤモンドに包有される流体もしくはメルトと化学組成が似る。キンバライトの部分融解のメルト中でダイヤモンドを成長させる実験を試みるのも面白い。

二酸化炭素(CO₂)は、マントル内で気体として存在する可能性は少ないと考えられる。CO₂は高圧下でメルトに溶解するためである。気体のCO₂は、CaO–CO₂系(図3)やMgO–CO₂系(図4)のP–T図が示すように、ごく高温低圧部でメルトから遊離し気体として存在する。

3. CO₂に富んだ火山岩の成因

CO₂に富んだマントル起源火山岩の化学的特徴は、レルゾライトやハルツパーシャイトなどのマントルを構成する岩石と比較して、揮発性元素やLIL、希土類元素特にLREEに非常に富むことである。H₂Oは必ずしも富むわけではなく、カーボナタイトのようにCO₂にだけ富むものもある。

キンバライトは、ザクロ石レルゾライトやエクロジャイトなどの、ザクロ石を含んだ岩石の、少量の部分融解(small degree of partial melting)によって生じると考えられてきた。カーボナタイトは、炭酸塩鉱物を含むマントル物質の部分融解や融解した炭酸塩を含むケイ酸塩メルトの分化作用の最後のメルト、もしくは初生的に均質である炭酸塩を含むケイ酸塩メルトの不混和作用などが考えられてきた。近年の高温高圧実験の結果からは、炭酸塩鉱物を含むマントル物質の部分融解がもっとも有力である。

キンバライトもしくはキンバライト組成を出発物質に用いた高温高圧実験の結果から、キンバライトマグマは、高温高圧下でレルゾライトやエクロジャイトの鉱物組み合わせと平衡に存在することが確認されている(Edgar et al., 1993やYamashita et al., 1992など)。少量の部分融解を成因に考えるのは、枯渇したマントル物質からLILやLREEを濃集させるためである。LILやLREEの濃集は、ザクロ石レルゾライトやエクロジャイトなどのザクロ石を含んだ岩石の少量の部分融解だけによって起こるわけではない。Group I キンバライトを出発物質に用いた高温高圧実験から、地下200km程度で、金雲母ベリリタイトの融解からもマグマが生成する可能性が指摘されている(Yamashita et al., 1992)。金雲母は、圧力依存性が高く、およそ6–7 GPaに相当する深さで分解してしまい、それ以深では安定に存在しない(Suto & Tatsumi, 1990)。金雲母は、Yamashita et al. (1992)の Group

II キンバライトを出発物質に用いた高温高压実験でもおよそ6~7 GPaで分解している。6~7 GPaの圧力は、リソスフェアとアセノスフェアの境界付近にあたり、物理的・化学的に変化のあるところである。金雲母の高温高压下における希土類元素の挙動は、キンバライトマグマの成因と密接な関係があるかもしれない。

LILやLREEの濃集は、ザクロ石を含んだペリドタイトの少量の部分融解か、金雲母を含んだ岩石の部分融解で解決できる。CO₂を濃集させるには、別の起源物質を考えなくてはならない。現在、CO₂の濃集は、炭酸塩鉱物が起源物質に存在するためと考えられている。9 GPaにおけるMgCO₃-MgSiO₃-Mg₂SiO₄系の高温高压実験から、メルトの部分融解の組成が、MgO-45wt%、SiO₂-20wt%、CO₂-35wt%と、著しくSiO₂に乏しく、CO₂に富むことという結果が得られている(平山・藤井, 1993)。SiO₂とCO₂に関して言えば、キンバライト質やカーボナタイト質のマグマは、起源物質に炭酸塩鉱物が存在すれば生成する可能性がある。このことは、Wallace & Green (1988)などが行ってきた、ペリドタイト+炭酸塩鉱物+角閃石を出発物質に用いた実験でカーボナタイト質メルトを生成したことからも支持される。

キンバライトやカーボナタイトの化学的特徴は、ダイヤモンドに包有されるメルトもしくは流体(Navon et al. 1988)にも見られる。7 GPaにおけるGroup II キンバライトの部分融解のメルトの化学組成(山下・大谷, 1995)は、Navon et al. (1988)で報告された流体の組成と比較して、Mgを除く主要元素(Si, Ti, Fe, Ca, Na, K, P)とBa, Srなどの微量元素、H₂O、CO₂などの割合が似ている。メルトと平衡に存在する鉱物組み合わせは、ザクロ石と単斜輝石であった。キンバライトマグマは、ダイヤモンドに包有されるような流体(もしくはメルト)+マントル物質(レルゾライトもしくはエクロジャイト)で生成する可能性がある。

ダイヤモンドに包有されるメルトもしくは流体の起源については全く不明であるが、ホットプルームなどの高温の物質の上昇によってマントル内に少量存在するCO₂やLILが濃集して生成したか、もしくは、炭酸塩鉱物の部分融解によって生成したと考えられる。成因の解明には、流体と温度圧力を反映する鉱物とがダイヤモンドの結晶内に存在しているような試料の分析が必要になる。また、キンバライトの部分融解の温度圧力条件ごとのメルトの組成の決定も解明の手がかりになる。

炭酸塩鉱物の融解によるキンバライトマグマの成因には若干の問題点がある。高压下における炭酸塩鉱物とケイ酸塩鉱物の間の、希土類元素もしくはLILの分配は不明である。炭酸塩鉱物への希土類元素やLILの濃集度の結果によっては、新たなマントル起源火成活動の成因論が生まれるかもしれない。

H₂Oは、CO₂よりもマグマの成因に多大な影響を与える。H₂Oについての情報は膨大で、水を含む出発物質の高温高压実験や、含水鉱物の物性的な高温高压実験の結果が多数得られている。H₂Oについてのまとめおよび議論は別の機会にする。

V まとめ

マントル内に存在する炭素は、キンバライトやカーボナタイト、ランプロアイトなどのマントル起源の火山岩によって地表にもたらされる。炭素は、ダイヤモンドやカルサイト、アラゴナイト、ドロマイト、マグネサイトなどの鉱物か、ダイヤモンドに包有されるメルトもしくは流体として存在する。高温高压実験の結果から、炭素はマントル内でダイヤモンドやアラゴナイト、ドロマイト、マグネサイト中に安定に存在する。特に、マグネサイトは下部マントルの圧力まで安定に存在し、地球内部の炭素の貯蔵に多大な影響を与えると考えられる。

キンバライトを出発物質に用いた高温高压実験の結果からは、炭酸塩鉱物は、大陸の地温勾配と比較して、かなり低温のサブソリダスでのみ安定であった。炭酸塩鉱物は、ソリダスより高温側では安定に存在しない。通常のマントルでは炭酸塩鉱物は、珪酸塩鉱物と反応して安定に存在しないかもしれない。

ダイヤモンドに包有されるメルトもしくは流体は、CO₂やH₂O、REE、LILに非常に富んでおり、キンバライトやカーボナタイトなどの化学的特徴と似る。メルトもしくは流体は、ダイヤモンドの形成やマントル内火成活動に影響を与える可能性がある。

文献

- 赤石 實, 1990. 炭酸カルシウム触媒を用いたダイヤモンドの高压合成. 石灰岩, 248: 13-16.
- Allsopp H. L., J. W. Bristow, C. B. Smith, R. Brown, A. J. W. Gleadow, J. D. Kramers & O. G. Garvie, 1989. A summary of radiometric dating methods applicable to kimberlites and related rocks. In J. Ross et al., Eds., *Kimberlites and related rocks*, vol. 1, pp. 343-357. Geological society of Australia, Carlton, Australia.
- 有馬 眞, 1987. ランプロアイト(含ダイヤモンド火山岩類)の岩石学的特徴とその成因. マグマ, 79: 1-11.
- Arima, M., M. Akaishi, M. Yamaoka & H. Kanda, 1992. Diamond synthesis in the graphite-kimberlitic melt system. 29th. IGC., Abstract vol. 2, 686. Kyoto, Japan.
- Arima, M., K. Nakayama, M. Akaishi, S. Yamaoka and H. Kanda, 1993. Crystallization of diamond from a silicate melt of kimberlite composition in high-pressure and high-temperature experiments. *Geology*, 21: 968-970.
- Arima, M. & M. Inoue, 1995. High pressure experimental study on growth and resorption of diamond in kimberlite melt. 6th. Int. kimberlite Conf., pp. 8-10. Russia.
- 有馬 眞, 1997. ダイヤモンドの起源と炭素の地殻-マントル大循環. 神奈川県立博物館調査研究報告書(自然). 8: 97-116.
- Becker, H. & R. Altherr, 1992. Evidence from ultra-high-pressure marbles for recycling of sediments into the mantle. *Nature*, 358: 745-748.
- Bell, K. & J. Keller, 1995. *Carbonatite volcanism*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Berg, G.W., 1986. Evidence for carbonate in the mantle. *Nature*, 324: 50-51.
- Bergman, S. C., 1987. Lamproites and other potassium-rich igneous rocks: a review of their occurrence, mineralogy and geochemistry. In J. G. Flitton and B. G. J. Upton, Eds., *Alkaline igneous rocks*, pp. 103-190. Blackwell.
- Biellmann, C., P. Gillet, F. Guyot, J. Peyronneau & B. Reynard, 1993.

- Experimental evidence for carbonate stability in the Earth's lower mantle. *Earth Planet Sci. Lett.*, 118:31-41.
- Boettcher, A. L., J. K. Robertson & P. J. Wyllie, 1980. Studies in synthetic carbonatite systems: Solidus relationships for $\text{CaO-MgO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ to 40 kbar and $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ to 10 kbar. *J. Geophys. Res.*, B, 85:6937-6943.
- Boyd, F. R. & J. J. Gurney, 1986. Diamonds and the African lithosphere. *Science*, 232: 471-477.
- Bray, G., W. R. Brice, D. J. Ellis, D. H. Green, K. L. Harris & I. D. Ryabchikov, 1983. Pyroxene-carbonate reactions in the upper mantle. *Earth Planet Sci. Lett.*, 62:63-74.
- Bundy, F. P., H. P. Bovenkerk, H. M. Strong & R. H. Wentorf, 1961. Diamond-graphite equilibrium line from growth and graphitization of diamond. *J. Chem. Phys.*, 35:383-391.
- Byrnes, A. P. & P. J. Wyllie, 1981. Subsolidus and melting relations for the join $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ at 10 kbar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45:321-328.
- Canil, D. & C. M. Scarfe, 1990. Phase relations in peridotite + CO_2 system to 12 GPa: Implications for the origin of kimberlite and carbonate stability in the Earth's upper mantle. *J. Geophys. Res.*, 95:15805-15816.
- Clement C. R., E. M. W. Skinner & S. Smith, 1984. Kimberlite redefined. *Jour. Geology*, 92:223-228.
- Crawford, W. A. & A. L. Hoersch, 1972. Calcite-Aragonite equilibrium from 50°C to 150°C. *Am. Mineral.*, 57:995-998.
- Dawson J. B., 1989. Geographic and time distribution of kimberlites and lamproites: relationships to tectonic processes. In J. Ross et al., Eds., *Kimberlites and related rocks*, vol. 1, pp. 323-342. Geological society of Australia, Carlton, Australia.
- Edgar, A. D., M. Arima, D. K. Baldwin, D. R. Bell, S. R. Shee, E. Michael, W. Skinner & E. C. Walker, 1988. High-pressure-high-temperature melting experiments on a SiO_2 -poor aphanitic kimberlite from the Wesselton mine, Kimberley, South Africa. *Amer. Mineral.*, 73:524-533.
- Edgar, A. D. & H. E. Charbonneau, 1993. Melting experiments on a SiO_2 -poor, CaO -rich aphanitic kimberlite from 5-10 GPa and their bearing on source of kimberlite magmas. *Amer. Mineral.*, 78:132-142.
- Eggler, D. H., 1989. Kimberlites: how do they form?. In J. Ross et al., Eds., *Kimberlites and related rocks*, vol. 1, pp. 489-504. Geological society of Australia, Carlton, Australia.
- Ellis, D. E. & P. J. Wyllie, 1980. Phase relations and their petrological implications in the system $\text{MgO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ at pressures up to 100 kbar. *Am. Mineral.*, 65:540-556.
- Fiquet, G., F. Guyot & J. P. Itie, 1994. High-pressure X-ray diffraction study of carbonates: MgCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ and CaCO_3 . *Am. Mineral.*, 79:15-23.
- Foley, S. F., 1993. An experimental study of olivine lamproite: First results from the diamond stability field. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57:483-489.
- Goldsmith, J. R. & H. C. Heard, 1961. Subsolidus phase relations in the system $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$. *J. Geol.*, 69:45-74.
- Gurney, J. J., 1989. Diamonds. In J. Ross et al., Eds., *Kimberlites and related rocks*, vol. 2, pp. 935-965. Geological society of Australia, Carlton, Australia.
- Guthrie, G. D., D. R. Veblen, D. R. Navon & G. R. Rossman, 1991. Submicrometer fluid inclusions in turbid-diamond coats. *Earth Planet Sci. Lett.* 105: 1-12.
- 平山義治・藤井敏嗣, 1993. シリケート- CO_2 系の高圧高温下での相関係. 重点領域研究「地球中心核」報告書, 3:129-137.
- Hall, A., 1987. *Igneous petrology*. Longman Scientific & Technical, England.
- Haggerty, S. E. & V. Sautter, 1990. Ultradeep (greater than 300 kilometers), ultramafic upper mantle xenoliths. *Science*, 248: 993-996.
- Hung, W. L., P. J. Wyllie & C. E. Nehru, 1980. Subsolidus and liquidus phase relationships in the system $\text{CaO-SiO}_2\text{-CO}_2$ to 30 kbar with geological applications. *Am. Mineral.*, 65:285-301.
- Irifune, T. & A. E. Ringwood, 1987. Phase transformations in primitive MORB and pyrolite compositions to 25 GPa and some geophysical implications. In M. Manghni & Y. Syono eds., : *High-pressure Research in mineral physics*, pp. 231-242, Terra Scientific Publishing, Tokyo.
- Irving, A. J., & P. J. Wyllie, 1973. Melting relationships in CaO-CO_2 and MgO-CO_2 to 36 kilobars with comments on CO_2 in the mantle. *Earth Planet Sci. Lett.* 20:220-225.
- Irving, A. J., & P. J. Wyllie, 1975. Subsolidus and melting relationships for calcite, magnesite and join $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$ to 36 kb. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39:35-53.
- Javoy, M., F. Pineau & C. J. Allegre, 1982. Carbon geodynamical cycle. *Nature*, 300:171-173.
- Katsura, I. & E. Ito, 1990. Melting and subsolidus phase relations in the $\text{MgSiO}_3\text{-MgCO}_3$ system at high pressures: implications to evolution of the Earth's atmosphere. *Earth Planet Sci. Lett.*, 99: 110-117.
- Katsura, T., Y. Tsuchida, E. Ito, T. Yagi, W. Utsumi & S. Akimoto, 1991. Stability of magnesite under lower mantle conditions. *Proc. Jpn. Acad.*, B67:57-60.
- Kennedy, C. S. & G. C. Kennedy, 1979. *J. Geophys. Res.*, 81:2467-2470.
- Kraft, S., E. Knittle, & Q. Williams, 1991. Carbonate stability in the Earth's mantle: a vibrational spectroscopic study of aragonite and dolomite at high pressure and temperature. *J. Geophys. Res.*, 96:17997-18010.
- Kushiro, I., H. Satake & S. Akimoto, 1975. Carbonate-silicate reactions at high pressure and possible presence of dolomite and magnesite in the upper mantle. *Earth Planet Sci. Lett.*, 28:116-120.
- Le Bas, M. J., 1987. Nephelinites and carbonatite. In J. G. Fitton and B. G. J. Upton, Eds., *Alkaline igneous rocks*, No. 30:53-83. Geological Society Special Publication, U.S.A.
- Liu, L. & W. A. Bassett, 1986. *Oxford monographs on geology and geophysics No. 4: Elements, Oxides, Silicates High-pressure phase with implications for the Earth's interior*. Oxford Univ. press, New York.
- Liu, L. & C. C. Lin, 1995. High pressure phase transformations of carbonates in the system $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-CO}_2$. *Earth Planet Sci. Lett.*, 134:297-305.
- Luth R. W., R. G. Tronnes & D. Canil, 1993. Volatile-bearing phases in the earth's Mantle. In R. W. Luth eds., : *Short course handbook on experiments at high pressure and applications to the Earth's Mantle*, pp. 445-485., Mineralogical association of Canada, Canada.
- Martinez, I., J. Zhang & R. J. Reeder, 1996. In situ X-ray diffraction of aragonite and dolomite at high pressure and high temperature: Evidence for dolomite breakdown to aragonite and magnesite. *Am. Mineral.*, 81:611-624.
- Mitchell R. H., 1986. *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. Plenum press, New York.
- Mitchell R. H., 1989. Aspects of the petrology of kimberlites and

- lamproites : some definitions and distinctions. In J. Ross et al., Eds., *Kimberlites and related rocks*, vol. 1, pp. 7-45. Geological society of Australia, Carlton, Australia.
- Mitchell R.H., 1995. *Kimberlites, Orangeites, and Related rock*. Plenum press, New York.
- Moore R. O. & J. J. Gurney, 1985. Pyroxene solid solution in garnets included in diamond. *Nature*, 318:553-555.
- Newton, R. C. & W. E. Sharp, 1975. Stability of forsterite + CO₂ and its bearing on the role of CO₂ in the mantle. *Earth Planet Sci. Lett.*, 26:239-244.
- Navon, O., D. Hutcheon, G. R. Rossman & G. J. Wasserburg, 1988. Mantle-derived fluids in diamond micro-inclusions. *Nature*, 335 : 784-789.
- Ringwood, A. E., S. E. Kesson, W. Hibberson & N. Ware, 1992. Origin of kimberlites and related magmas. *Earth Planet Sci. Lett.*, 113 : 521-538.
- Sautter, V., S. E. Haggerty & S. Field, 1991. Ultradeep (>300 kilometers) ultramafic xenoliths : petrological evidence from the transition zone. *Science*, 252:827-830.
- Schrauder, D. & O. Navon, 1994. Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 58:761-771.
- Sato, K. & E. Ito, 1994. A high-pressure experimental study on an olivine lamproite : Application to its petrogenesis. Technical report of ISEI, Ser. A (61) : 1 -45.
- Shee S.R., J. W. Bristow, D. R. Bell, C. B. Smith, H. L. Allsopp & P. B. Shee, 1989. The petrology of kimberlites, related rocks and associated mantle xenoliths from the Kuruman Province, South Africa. In J. Ross et al., Eds., *Kimberlites and related rocks*, vol. 1, pp. 60-82. Geological society of Australia, Carlton, Australia.
- Skinner E.M.W., 1989. Contrasting Group I and Group II kimberlite petrology : towards a genetic model for kimberlites. In J. Ross et al., Eds., *Kimberlites and related rocks*, vol. 1, pp. 528-544. Geological society of Australia, Carlton, Australia.
- Smith C.B., 1983. Pb, Sr and Nd isotopic evidence for sources of southern African Cretaceous kimberlites. *Nature*, 304:51-54.
- Suto, A. & Y. Tatsumi, 1990. Orthopyroxene and K-amphibole in the upper mantle : Implication for magma genesis in subduction zones. *Geophy. Res. Lett.*, 17:29-32.
- Sunagawa, I., 1984. Morphology of natural and synthetic diamond crystal. In I. Sunagawa, Eds., *Material science of the Earth's interior*, pp. 303-330. Terra Scientific, Tokyo.
- Suzuki, A., E. Ohtani & T. Kato, 1995. Flotation of diamond in mantle melt at high pressure. *Science*, 269 : 216-218.
- Sweeney, R. J., T. J. Falloon & D. H. Green, 1995. Experimental constraints on the possible mantle origin of Natrocarbonatite. In K. Bell and J. Keller, Eds., *Carbonatite volcanism*. pp. 191-207. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Sweeney, R.J., 1994. Carbonatite melt compositions in the Earth's mantle. *Earth Planet Sci. Lett.*, 128:259-270.
- Tajika, E. & T. Matsui, 1990. The evolution of the terrestrial environment. In Newson, H. E. & J. H. Jones, eds., *Origin of the Earth*, pp. 347-370. Oxford University Press, New York.
- Tajika, E. & T. Matsui, 1992. Evolution of terrestrial proto-CO₂ atmosphere coupled with thermal history of the Earth. *Earth Planet Sci. Lett.*, 113:251-266.
- Wallace, M. E. & D. H. Green, 1988. An experimental determination of primary carbonatite magma composition. *Nature*, 335:343-346.
- Wendlandt, R. F. & B. O. Mysen, 1980. Melting phase relations of natural peridotite + CO₂ as a function of degree of partial melting at 15 and 30 kbar. *Am. Mineral.*, 65:37-44.
- Wyllie, P. J. & W. L. Huang, 1976. Carbonation and melting reactions in the system CaO-MgO-SiO₂-CO₂ at mantle pressures with geophysical and petrological applications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 54:79-107.
- Wyllie, P. J. & W. L. Huang, 1976. Petrogenetic grid for dolomites extended to mantle peridotite compositions and to conditions for magma generation. *Am. Mineral.*, 61:691-698.
- Wood, B. J., 1993. Carbon in the core. *Earth Planet Sci. Lett.*, 117:593-607.
- Yamashita, H., M. Arima, & E. Ohtani, 1992. Melting experiments of group II kimberlite up to 10 GPa : petrogenesis of kimberlite magma. IGC Abstract, p. 538. Kyoto, Japan.
- 山下浩之・大谷栄治, 1995. キンバライトの高温高压実験 : 上部マントルにおける流体の化学組成について. 神奈川県立博物館研究報告自然科学, 24: 1 - 8.
- Yamashita, H., M. Arima & E. Ohtani, 1995. High pressure melting experiments on group II kimberlite up to 8 GPa : implications for mantle metasomatism. 6th. Int. kimberlite Conf., pp. 669-671. Russia.

摘要

山下浩之・小出良幸, マントル内での炭素の相平衡. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 27:31-48. (H. Yamashita & Y. Koide, Stability of Carbon Phase in the Mantle. Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.), 27:31-50.)

マントル内において炭素は、鉱物または流体として存在することが岩石学的、鉱物学的、高温高压実験学的な研究によって明らかになってきた。本論では、これらによって明らかにされた、マントル内の炭素を含む物質についてまとめる。

炭素は、マントル内において、キンバライトやカーボナタイトなどの火山岩、ダイヤモンドや炭酸塩鉱物などの鉱物、もしくはダイヤモンドに包有される流体として存在する。炭素を含んだ合成物を出発物質に用いた高温高压実験の結果からは、ダイヤモンドやアラゴナイト、ドロマイト、マグネサイトがマントル内で安定に存在するという結果が得られている。しかしながら、多成分系や炭素を含んだ天然の岩石を出発物質に用いた高温高压実験からは、ダイヤモンドとマグネサイトのみがマントル内で安定な鉱物であった。

キンバライトやカーボナタイトなどの火山岩の成因は、マントル内における炭素と密接な関係がある。これらは、高温高压実験によって、炭酸塩鉱物を含むペリドタイトの部分融解でマグマが生成する可能性を示している。また、この部分融解によって生成した液とダイヤモンドに包有される流体とは化学的特徴が似る。

(受付：1997年11月30日，受理：1997年12月11日)

総説

ニホンオオカミの分類に関する生物地理学的視点

A Biogeographic Look on the Taxonomy of the Japanese Wolves,
Canis lupus hodophilax Temminck, 1839

中村一恵

神奈川県立生命の星・地球博物館

Kazue Nakamura

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract. A taxonomical position of the Japanese wolf (*Canis hodophilax* Temminck, 1839) of Hondo Islands (Honshu, Sikoku and Kyushu) is discussed from a biogeographic look. The Japanese wolf is considered to be originated in Pleistocene large fossil wolves which have been known from Hondo Islands. Those large fossil wolves would immigrated to Hondo Islands in the late Pleistocene from northern territories, then isolated there. I suggest that phenotypic response to isolation by climatic change after post-glaciation may account for size reduction and morphological change of skull of the Japanese wolf. Extinct Japanese wolf is considered a distinctive subspecies (*Canis lupus hodophilax* Temminck, 1839) of wolf in the world.

Key Words: climatic change, isolation, dwarfing, the Japanese wolf (*Canis lupus hodophilax*)

I. はじめに

わが国には、本州・四国・九州の本土にニホンオオカミ (*Canis lupus hodophilax* Temminck, 1839) と、北海道にエゾオオカミ (*Canis lupus hattai* Kishida, 1931) の2亜種のオオカミが生息していた (今泉, 1960)。しかし現在までの知見では、明確に記録に留められた最後の捕獲は、本土で1905年 (明治38年)、北海道では1900年 (明治33年) ごろであり、2亜種とも絶滅したものと考えられる (小原, 1972; 阿部ほか, 1994)。

ニホンオオカミは、ライデン自然史博物館館長テミンク (C. J. Temminck) により1839年に *Canis hodophilax* と命名された (田隅, 1991)。テミンクによって記載された標本はシーボルト (Ph. F. von Siebold) によって採集されたものである。シーボルトは1826 (文政9年) 年に江戸参府の途上、大阪の天王寺で1頭の「Okame」と1頭の「Jamainu」を買い取っている (Holthuis & Sakai, 1970)。

シーボルトの標本は、毛皮が剥製にされたほか、頭骨が取り出されて、ともに同博物館に保存された。シーボルトらの『日本動物誌』で「ヤマイヌ」の詳しい記述 (テミンク著) に付けられた彩色図は、この剥製に基づくらしい。シーボルトは、この個体のほかに2体の骨格をオランダへ送った。いずれも現在ライデンにあり、そのうち1体は全身骨格、他の1体は頭骨だけであり、それぞれ「a」、「b」、上記の剥製付属の頭骨は「c」と呼ぶこと

になっている (田隅, 1991)。「Okame」は「オオカミ」、「Jamainu」は「ヤマイヌ」と読めるが、田隅 (1991) によれば、テミンクはこのうちの日本名「ヤマイヌ」に対して命名したのだという。

一方、エゾオオカミは、イギリス自然史博物館 (The Natural History Museum) のPocock (1935) が世界中から集められたオオカミの頭骨標本と比較して、同館所蔵の北海道産オオカミの頭骨標本がきわだって大型 (頭蓋骨全長274.0mm) であったことから、*Canis lupus rex* という新亜種名を与えたが、岸田 (Kishida, 1931) が北海道大学付属博物館に所蔵されていた剥製標本 (雄、札幌郡豊平村、1881年6月捕獲) について記載し、*Canis lupus hattai* と命名していたことにより、*rex* は *hattai* のシノニムとして扱われている。イギリス自然史博物館の頭骨標本はアンダーソン (J. Anderson) により1886年11月に採集されている (Abe, 1930)。

本土産のニホンオオカミは北部で北海道のエゾオオカミと、南西部で朝鮮半島のオオカミ (現地名ヌクテ, Neuktai) と隣接して生息していた。朝鮮半島のオオカミ (以下、チョウセンオオカミと呼ぶ) は、京畿道産の標本をタイプとして阿部 (1923) により新亜種 (*Canis lupus coreanus*) として記載された。記載論文が和文であったことから、その後、阿部 (Abe, 1930) は、イギリス自然史博物館所蔵の頭骨標本と比較して改めて英文で新亜

種について発表し、頭骨の大きさがニホンオオカミやインドオオカミより大きく、また、チョウセンオオカミの吻の形態が「狭長型」であり、別亜種の *C. l. laniger* など中国産オオカミとは異なるとした。しかし、Pocock (1935) によって中国の *Canis lupus laniger* のシノニムとして扱われた。これに対して阿部 (1936) は、チョウセンオオカミは朝鮮半島において亜種化した独自の個体群と主張し、Pocock の見解に反論している。

現在の分類では、*C. l. laniger*、*C. l. coreanus* とともに、チュウゴクオオカミ (*Canis lupus chanco* Gray, 1863) に統合されている (Nowak, 1995) が、本論では朝鮮半島の個体群については阿部 (Abe, 1923; 1930) の分類に準拠し、*Canis lupus coreanus* Abe, 1923 の学名を用いる。

阿部 (Abe, 1930) は、本土産オオカミについても触れ、ニホンオオカミの頭骨の大きさがチョウセンオオカミより顕著に小さいことのほかに、「頬弓部の張り出しが強く、吻が短い」という特徴が見られ、細長い吻を持つチョウセンオオカミやエゾオオカミとは明瞭に区別されたとした。さらに聴胞 (鼓骨胞) がニホンオオカミでとくに小さいことを指摘し、その後も、阿部 (1936) は「聴胞が妙に押しつぶされた様に小さい」と記述し、その形態に注目している。

種の分化、地理的変異を論ずるうえで必要なのが、移住と隔離という一見矛盾した概念である。ニホンオオカミが、頭骨の大きさやその他の諸形質においてチョウセンオオカミやエゾオオカミと明瞭に区別されるのであれば、また、チョウセンオオカミやエゾオオカミとは、それぞれ対馬海峡と津軽海峡という物理的な障害を介して地理的に分かれて本土 (本州・四国・九州) に生息したのであれば、個体群の移住と、それに続く個体群の隔離の結果が地域集団としての分布に反映され、形態の変異として表現されるだろう。生物地理学的な視点から、ニホンオオカミの分類上の位置づけについて考えてみたいと思う。

II. 資料と調査方法

わが国に残されたニホンオオカミの頭骨標本は、そのほとんどが民間信仰において使用を目的とした個人所蔵品であり、その頭骨標本がもっとも多く残された地域は丹沢山塊とその周辺地域である (斎藤, 1938; 直良, 1965; 小原, 1990)。これらの地域から発見された標本の捕獲地と計測値については、直良 (1965; 1972) と小原 (1990) の努力により詳細な記録が残され、きわめて貴重な資料である。直良 (1965; 1972) や小原 (1990) の以前に、ニホンオオカミの標本を精力的に調査したのは斎藤 (1938; 1954) である。頭骨標本だけでも20個体 (うち1体は全身骨格付) を発見、同定して、国外標本を含めて27個体を調査した。国外標本とは、1886年採集の埼玉県秩父産 (イギリス自然史博物館)、1905年にアンダーソンによって採集された奈良県大和産 (イギリス自然史博物館)、1877年にデーニッツ (Dönitz) によって採集された本州産 (ベルリン自然史博物館) と、1886年に採集された南日本産 (ベルリン自然史博物館)、それにライデン自然史博物館の2個体の6個体である。ライデ

ンの2個体の採集地は不明としている。国内産の採集地 (括弧内は個体数) として津軽 (3) 羽前 (1)、岩代 (1)、武蔵 (3)、相模 (2)、甲斐 (1)、遠江 (1)、信濃 (1)、能登 (1)、三河 (4)、伊勢 (1)、大和 (1)、伊予 (1)、不明 (6、うち国外標本4) を挙げている。標本の捕獲年代は江戸中期以後のものである。これらのうち丹沢地域産と関係するのは、相模産の2個体であるが、うち1個体は斎藤 (1938) の箱根山中産の1個体に該当すると思われる。他の1個体については明らかではないが、直良 (1965; 1972) と小原 (1990) による丹沢地域産標本と重複している可能性はほとんどない。

ここでは、とくに頭蓋骨の諸形質のうち、吻部の形態が大陸産のチョウセンオオカミ (*C. l. coreanus*) と比較して、ニホンオオカミ (*C. l. hodophilax*) では「吻が短い」という阿部 (Abe, 1930) や斎藤 (1938) の指摘に注目した。大陸産のオオカミと比較してニホンオオカミの吻長や形態に確かな相違があるのかどうか、吻部の形態や大きさが著しく相違するならば、ニホンオオカミの食性や行動とも関連してこよう。幸いにも、斎藤 (1938) により、チョウセンオオカミとニホンオオカミの吻長と吻幅長および上顎歯槽縁最大幅長の計測値が残されている。それらの計測値を使用し、ニホンオオカミとチョウセンオオカミの吻長 I と上顎歯槽縁最大幅および吻長 II と吻幅 (斎藤, 1963) の関係について RMA 法を用いて解析し、島嶼本土型 (ニホンオオカミ) と大陸半島型 (チョウセンオオカミ) の2型の頭骨形態を比較した。

ニホンオオカミは小型であることが、しばしば指摘されてきた。頭骨の大きさが実際にどの程度のものであるかを知るために、国内でとくに資料の残されている神奈川県丹沢とその付近から得られている資料をニホンオオカミの丹沢個体群として位置づけ、直良 (1965; 1972) と小原 (1990) による標本の計測値を整理して頭骨の諸計測値について統計処理を行ない、ニホンオオカミの丹沢個体群としての大きさの変異を求めた。そのうち、とくに頭蓋骨全長についてシントタイプス標本と他の地域のオオカミ個体群 (朝鮮半島産、北海道産、アラビア半島南部および東部産、北米産最大亜種の最大個体) の大きさと比較した。丹沢個体群の捕獲地および捕獲年代についても整理した。また、M₁ (下顎第1大臼歯) の歯冠長の大きさについて更新世の化石オオカミと早期縄文時代出土のオオカミの既報資料と比較した。これについては総合的考察のなかで述べる。

III. 結果

1. 丹沢産ニホンオオカミの頭骨の大きさについて

丹沢個体群の頭骨の変異を表1に示す。頭蓋骨全長は 214 ± 8.30 mm であり、個体群の99%が含まれる範囲は $193.1 \sim 235.9$ mm と推定された。これを他の地域のオオカミ個体群の頭蓋骨全長と比較すると図1のようになる。アラビアオオカミ (*C. l. arabs*) の頭蓋骨全長は 200.8 ± 10.30 mm であり、ニホンオオカミ (*C. l. hodophilax*) より平均上小さい。朝鮮半島 (北緯36度~40度) のチョウセンオオカミ (*C. l. coreanus*) の頭蓋骨全長はエゾオオカミ (*C. l. hattai*) より小さいが、日本本土 (北緯31度~41度)

表 1 ニホンオオカミ丹沢個体群の頭骨各部位の大きさの変異 (単位mm)

	N	M	S D	P = 95 %	P = 99 %
全長	14	214.5	8.30	198.2~230.8	193.1~235.9
基底全長	14	200.1	8.21	184.0~216.2	178.9~221.3
頬弓間幅長	11	121.1	8.65	104.1~138.1	98.8~143.4
口蓋長	8	100.6	4.39	92.0~109.2	89.3~111.9
P ⁴ (齧冠長)	11	20.7	0.90	18.9~ 22.5	18.4~ 23.0
M ₁ (齧冠長)	8	25.4	1.34	22.8~ 28.0	21.9~ 28.9

表 2 ライデン自然史博物館所蔵「ニホンオオカミ」の頭骨標本の計測値 (単位mm)

No.	標本名	性・令	全長	基底全長	頬弓間幅	P ⁴ (齧冠)	M ₁ (齧冠)	計測・報告者
1.	Leiden自然史博 a	♂ad.	(-)	194.0	(-)	(-)	(-)	今泉 (1970a)
2.	Leiden自然史博 b	ad.	210.0	[206.0] *	114.0	23.0	24.0	Nehring (1885)
3.	Leiden自然史博 c	♂ad.	179.5	[174.0] *	103.5	18.5	23.0	斎藤 (1938)

(-) : 記載なし. *: 今泉 (1970a) による.

のニホンオオカミよりは大きく、両者の中間的な大きさである。中国大陸のチュウゴクオオカミ (*C. l. chanco*) の頭蓋骨全長の平均値は248.0mm (n=23, ♂♂) である (Nowak, 1995)。チュウゴクオオカミはエゾオオカミより小さいが、平均上チヨウセンオオカミより大きい。北海道 (北緯42度~45度) のエゾオオカミの頭蓋骨全長の大きさはユーラシア産最大亜種 (*C. l. communis*) のオオカミ (n=20, ♂♂) の平均値270.2mm (Nowak, 1995) に匹敵する。おそらくはイギリス自然史博所蔵の北海道産の雄の頭骨 1 標本を見てのことであろうが、Nowak (1995) も、Pocock (1935) 同様、それが北米産オオカミの主要な北方群に比較しうる大型個体であることを認めている。エゾオオカミの頭蓋骨全長はニホンオオカミより明らかに大きい。

斎藤 (1954) は、ニホンオオカミの調査標本から若年令個体を除いて、頭蓋骨全長、P⁴ (上顎第 4 小臼歯) 歯冠長、M₁ (下顎第 1 大臼歯) 歯冠長などの頭骨各部位を測定し、頭蓋骨全長については203.0~236.0mm (n=15, Mixed 以下同)、平均値216.9mm、P⁴ 歯冠長については20.5~23.3mm (n=23)、平均値21.78mm、M₁ 歯冠長については24.0~28.51mm (n=22)、平均値25.61mm の測定値を残している。青森県から愛媛県まで全国にお

よぶ標本を集合した斎藤 (1938) の諸計測値は、丹沢個体群99%の変異内にほぼ収まる。したがって、丹沢個体群の頭骨の変異はニホンオオカミの標準的な大きさを示すものと考えられる。

次に、ライデン自然史博物館に所蔵されている標本の計測値 (表 2) と比較した結果について述べる。

ライデン自然史博の頭骨標本 3 個体を、ここでは、それぞれ L.a、L.b、L.c と書く。田隅 (1991) は、これらの 3 個体の頭骨と剥製 1 体 (L.c はその付属) をシントタイプ (syntypes) としているが、今泉 (1970a) は、これらのうち、L.c と L.c の付属する剥製標本をシントタイプとし、L.a、L.b についてはシントタイプとみなしていない。

L.a の基底全長と、L.b の頭蓋骨全長と基底全長は、いずれも丹沢個体群の99%の範囲内に含まれるが、L.a は、今泉 (1970a) によれば、イヌ (*Canis familiaris*) であることはほぼ確実である。L.b はニホンオオカミと同定されている (斎藤, 1938; 今泉, 1970a)。その頭蓋骨全長と基底全長は丹沢個体群の99%の範囲内に含まれる。L.c の頭蓋骨全長と基底全長の計測値は小さく、丹沢個体群の99%の範囲内に含まれないが、イヌではなく、ニホンオオカミに同定されている (斎藤, 1938; 今泉, 1970a)。

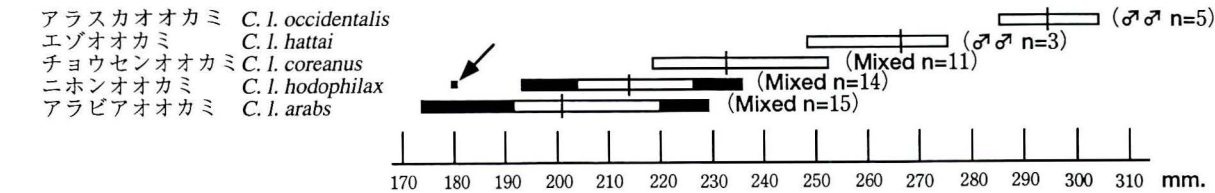


図 1. オオカミ (*Canis lupus*) 5 亜種の頭蓋骨全長の変異. 矢印はニホンオオカミのシントタイプ標本 (L.c) の位置を示す. アラビアオオカミ (*C.l.arabs*) については Harrison (1973), ニホンオオカミ (*C.l.hodophilax*) については丹沢個体群 (本報告), チョウセンオオカミ (*C.l.coreanus*) については斎藤 (1954), エゾオオカミ (*C.l.hattai*) については Pocock (1935) と小原 (1984), 北米産最大亜種アラスカオオカミ (*C.l.occidentalis*) の最大個体については Gunson & Nowak (1979) の計測値を使用した. 白の部分は測定値の範囲, 縦の垂直線は平均値の位置, 黒の範囲は個体群の99%が含まれる範囲をそれぞれ示す.

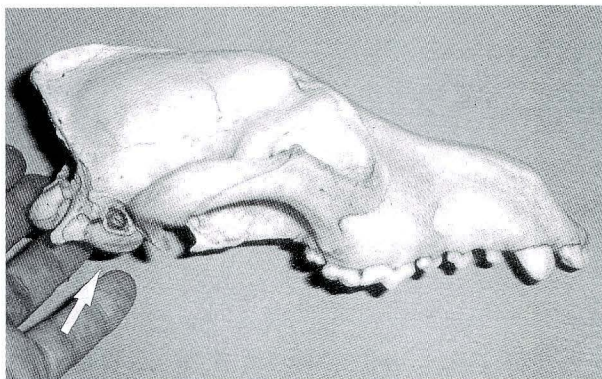


図2. ライデン自然史博物館所蔵のシントタイプ標本L.c (雄, 老獣, 頭蓋骨全長179.5mm), 矢印は聴胞の位置を示す. 荻部治紀氏撮影.

L.c の頭蓋骨全長が179.5mmであった (図2) ことから、斎藤 (1954) は論文の中で「驚くべく小型の頭骨」と書き、上記の測定値に含めなかった。確かに、L.c の頭蓋骨全長は丹沢個体群の99%の範囲に含まれないが、世界最小のオオカミと思われるアラビア半島先端部南部および東部産の個体群には、L.c より小さい頭蓋骨全長を持つ個体が含まれている。頭蓋骨の大きさは、最小のアラビアオオカミで推定された最小値170mm台から北米の最大亜種アラスカオオカミの最大個体の300mm台までにおよび、その差はおよそ130mmにも達し、オオカミの種内変異はさきわめて大きい (図1)。

2. ニホンオオカミの口蓋部の形態について

ニホンオオカミとチョウセンオオカミの吻長 I と上顎

最大幅、吻長 II と吻幅の関係を図3に示す。

ニホンオオカミとチョウセンオオカミの吻長には、高い正の相関関係があり、両対数図ではほぼ直線的に分散し、アロメトリー関係が成立している。すなわち、成長の傾向は同じである。ニホンオオカミとチョウセンオオカミの頭蓋骨全長の変異は連続的であり (図1)、頭骨の大きさでは変異に断続性は認められないが、2型の吻長と上顎最大幅および吻幅の関係には、大陸半島産 (チョウセンオオカミ) と島嶼産 (ニホンオオカミ) とでは不連続をもって明瞭な断絶がある。この図からは変異の方向は明らかではないが、日本本土の母集団は朝鮮半島個体群とは別の個体群と認識される。大陸産のチョウセンオオカミと比較して、ニホンオオカミでは吻長に対して上顎最大幅と吻幅が大きく、相対的に短吻化 (短頭化) していることが特徴と言える。

チョウセンオオカミより大型のエゾオオカミの口蓋部の形態 (図4-3) と比較して見ると、その形態にいっそう明瞭な相違が観察される。ニホンオオカミ (図4-2) では小白歯部、とくに P^1 (第1小白歯) と P^2 (第2小白歯) 間のくびれが顕著で、 P^3 (第3小白歯) の小白歯部から大臼歯部にかけての口蓋部の横幅の拡大が目立ち、「とっくり型」をしている。一方、エゾオオカミでは口蓋部の形はほぼ三角形であり (図4-3)、阿部 (Abe, 1930) の言うところのチョウセンオオカミと同じ「狭長型」である。

3. 丹沢個体群の捕獲年代と地理的分布について

ニホンオオカミの剥製標本は少ないが、頭骨標本は日

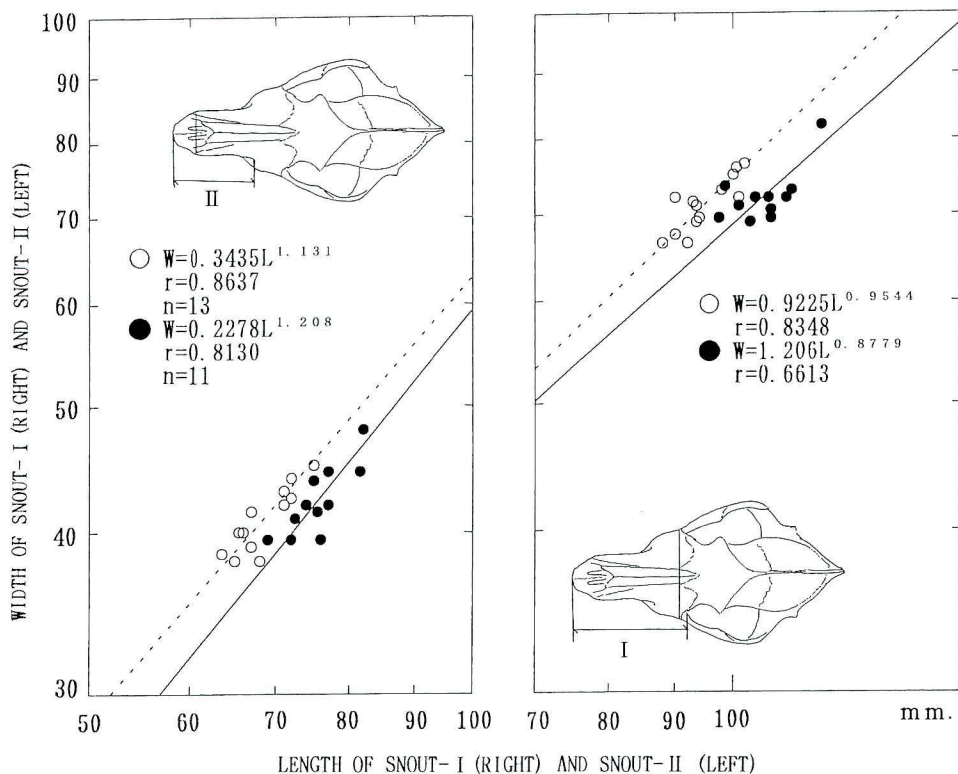


図3. ニホンオオカミ (○=*Canis lupus hodophilax*) とチョウセンオオカミ (●=*Canis lupus coreanus*) の吻長 I (右図) と上顎歯槽縁最大幅 (P^4 歯槽外縁間) および吻長 II (左図) と吻幅 (上顎犬歯歯槽外縁間) の関係。

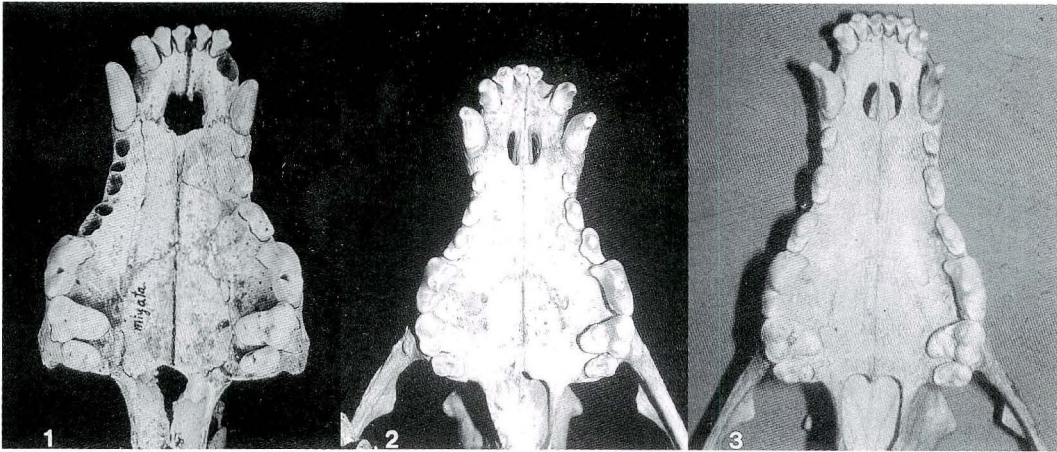


図4. 日本産オオカミの口蓋部の比較. 1：栃木県葛生産更新世化石オオカミ，松島義章博士1973年撮影. 2：丹沢産ニホンオオカミ（*Canis lupus hodophilax*）. 成獣，推定雄，表3，No. 15の個体，青木雄司氏撮影. 3：北海道産エゾオオカミ（*Canis lupus hattai*）. 北大標本，雄，成獣，小原巖氏撮影. ほぼ同一縮尺.

表3 江戸時代末期から明治期における丹沢山地とその周辺地域産ニホンオオカミと野犬の遺骸一覧

No.	所蔵者名	捕獲地	捕獲時期	標本内容	判定	報告者
1.	秋山亀吉氏所蔵	伊勢原市日向薬師付近	江戸末期	尾	狼	直良(1965)
2.	佐藤公麿氏所蔵	厚木市唐沢橋付近	天保13年(1842)頃	頭蓋骨	狼	直良(1965)
3.	大矢守三氏所蔵	清川村煤ヶ谷付近	江戸末期	頭蓋骨	狼	直良(1965)
4.	武尚一郎氏所蔵	清川村札掛	嘉永3年(1850)頃	頭蓋/下顎	狼	直良(1965)
5.	栗原弥一郎氏所蔵	秦野市水無川中流域	明治26年(1893)	頭蓋/下顎	狼	直良(1965)
6.	飯田雅義氏所蔵	秦野市水無川流域	嘉永初年頃	頭蓋/下顎	狼	直良(1965)
7.	梅沢英三氏所蔵	秦野市菩提付近	不祥	下顎骨	狼	直良(1965)
8.	梅沢英三氏所蔵	秦野市菩提	江戸末期	下顎骨	狼	直良(1965)
9.	吉岡照子氏所蔵	松田町寄木	江戸末期	頭蓋骨	狼	直良(1965)
10.	大野公麿氏所蔵	山北町大野山	江戸末期	頭蓋/下顎	狼	直良(1965)
11.	岩本藤吉郎氏所蔵	山北町清水	江戸末期	頭蓋骨	狼	直良(1965)
12.	梅沢英三氏所蔵	秦野市	不祥	上顎骨	狼	直良(1972)
13.	小島秀一氏所蔵	秦野市	天保年間(1830-43)	頭蓋/下顎	狼	直良(1972)
14.	湯山泰男氏所蔵	南足柄市関本	江戸末期*	上顎骨	狼	直良(1965)
15.	中村 昭氏所蔵	厚木市七沢	安政2年(1855)	頭蓋/下顎	狼	小原(1990)
16.	鈴木健一氏所蔵	丹沢山地	不祥	頭蓋骨	狼	小原(1990a)
17.	島崎一正氏所蔵	丹沢山地	不祥	頭蓋骨	狼	小原(1990a)
18.	小塩一三氏所蔵	丹沢山地	明治26年(1893)頃	頭蓋骨	狼	小原(1990a)
19.	加藤三郎氏所蔵	丹沢山地	不祥	頭蓋骨	狼	小原(1990a)
20.	岩沢久雄氏所蔵	丹沢山地	不祥	頭蓋骨	狼	小原(1990a)
21.	井上 勉氏所蔵	丹沢山地	不祥	頭蓋骨	狼	小原(1990a)
22.	山口 茂氏所蔵	丹沢山地	不祥	頭蓋骨	狼	小原(1990a)
23.	山田八伍郎氏所蔵	丹沢山地	江戸末期～明治初期	前肢	狼	小原(1990b)
24.	小宮 弘氏所蔵	秦野市大倉尾根	江戸末期	頭蓋/下顎	犬	直良(1965)
25.	和田唯三郎氏所蔵	山北町三保	江戸末期	頭蓋/下顎	犬	直良(1965)
26.	南足柄郷土資料館	箱根明神ヶ岳	江戸末期	頭蓋骨	犬	堀・峠(1992)

* 田代(1989)によれば明治初期の捕獲

本各地に相当数保存され（斎藤，1938）、とりわけ神奈川県丹沢山地付近には、頭骨他の多くの遺骸が残されている。とくにイヌ属の頭骨標本は現在までに26例知られている。そのうち23例がオオカミ、3例がイヌと判定されている（表3）。

丹沢山地は主な稜線によって、東西南北の四地域、東丹沢、西丹沢、南丹沢、北丹沢に区分される。北丹沢を除く三地域から遺骸記録が報告され、その分布（図5）を見ると、直良（1965）の指摘にあるように、ニホンオオカミの遺骸は深山というよりはむしろ、人里に近い山麓、もしくは丹沢山地の外周辺から得られている。直良

（1965）が調査した昭和25年（1950）当時の地名で言えば、北秦野村、煤ヶ谷村、玉川村、小鮎村にかけての丹沢の山麓帯であり、ニホンオオカミと判定された遺骸23例のうち、9例がこれらの地域に集中している。小原（1990a；1990b）の記録は清川村および厚木市からのものである。全体の半数を超える17例が東丹沢から南丹沢にかけての山麓地域から得られている。

これらの遺骸記録の分布が、ニホンオオカミの実際の地理的な分布を表しているものと見るには資料不足であるが、断片的ではあるにせよ、当時のニホンオオカミの分布の一端を示しているものと思われる。捕獲年代は

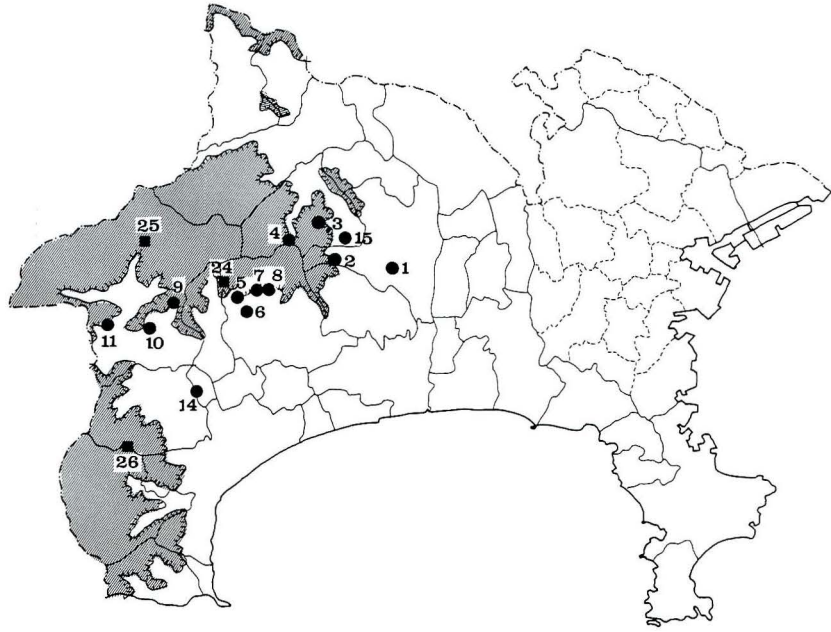


図5. 丹沢山地およびその周辺地域におけるニホンオオカミ (●= *Canis lupus hodophilax*) と野犬 (■= *Canis famirialis*) の分布. 番号は表3に対応する. 網部は標高500m以上の山地帯を示す.

江戸末期から明治初期に集中し、明治26年頃の捕獲例2例(表3, No. 5およびNo. 18)が記録に留められた最後のものである。

IV. 総合的考察

オオカミ (*Canis lupus* L.) は食肉目イヌ科イヌ属 (*Canis*) の動物であり、ヨーロッパ大陸と、日本とアラビア半島を含み、インドシナ半島とインド南部を除くアジア大陸および北緯20度までの北米大陸にかけて広く分布し (Honacki et al., 1982)、そのため多数の地理的亜種が知られている (Nowak, 1995)。

化石の証拠に基づいたオオカミの起源は、以下のように考えられている (Nowak, 1995)。おそらく、約100万年前の前期更新世には、コヨーテ (*Canis latrans*) の系列から分岐した小型の原始的なオオカミが北米大陸の南部一帯に広く分布していた。このうちの1群が旧世界へ移住し、移住先のユーラシア北部で現生の大型オオカミへと発展したと推定されている。化石資料に基づく見解によれば、オオカミ (*Canis lupus*) として分岐したのは約50万年前と考えられている (Kurtén & Anderson, 1980)。オオカミは後期更新世にはすでに西シベリアから東シベリアを経て極東南部におよぶ、ユーラシア大陸北部の広範囲な地域に生息していた (河村, 1991)。Nowak (1979; 1995) によれば、ユーラシア大陸北部で大型化したオオカミはおおよそ30万年前には北米へ移住していたと推定されているから、後期更新世には北米にも広く分布を拡大していたことになる。

ユーラシア北部で大型化したオオカミが、後期更新世にはユーラシア大陸から北米大陸にかけての広範囲な地域に生息していたのであれば、日本列島へも大型オオカミの分布の波及があったと考えるのが自然である。日本

列島はユーラシア大陸の極東南部に位置し、氷期には大陸と陸続きとなり、西側に日本海を囲みながらサハリンを経て南に伸びる「大きな半島」として形成される (図6)。現在の日本の面積は約37.8万km²であるが、海面が約100m低下すれば、およそ20万km²面積が拡大する陸塊となる (濱田, 1989)。

シベリア系オオカミの日本列島への移住がなされたことは、まずは大型のエゾオオカミの存在が、そのことを語っているが、更新世の化石オオカミの本土からの産出を、確かな証拠として挙げるができる (図6)。青森県尻矢崎から静岡県引佐町までの本州中部以北の本土から産出する化石オオカミ (図4-1) のM₁歯冠長の大きさは、最大で35mmに達する、きわめて大型のオオカミであり、頭骨も頑丈である (直良, 1965; 長谷川, 1965)。尻矢崎動物群は栃木県葛生町の上層葛生層から産出する動物群 (Shikama, 1949) と共通する種で多く占められているのが特徴である (長谷川ほか, 1988)。中部以北の本土産の化石オオカミが、現生のエゾオオカミ (後述) より大型であったのは、更新世の日本産食肉獣の一般的な特徴として現生種より一般に大きく、大型種ほどその差は際立っていた (長谷川, 1979) ことに対応する現象であろう。

本土陸塊の化石オオカミはどのような環境に生息していたのか、現在までの知見では復元することは難しいが、北米の北方系オオカミの体の大きさと生息環境との関係が参考になるだろう。

北米産オオカミを含む大型獣の体の大きさは緯度が高くなれば大型化するが、北緯53~65度の範囲で逆転し、それより低緯度と高緯度では体の大きさは小さくなる傾向にある (Geist, 1987)。つまり、ベルクマンの規則 (Bergmann's rule) は、オオカミの体の大きさに見られる

地理的変異のすべてを表現しているのではなく、北米産オオカミの最大亜種アラスカオオカミ (*C. l. occidentalis*) の最大個体 (図1) は、北緯51度30分~55度の亜寒帯林帯 (boreal-alpine forest) から得られている (Gunson & Nowak, 1979)。

カナダ北部の亜寒帯林のオオカミは南部の混交林のそれより大型であり、頭骨が頑丈で、頬骨弓が強大である。頑丈な頭骨と重い体重は、ヘラジカ (*Alces alces*)、カリブー (*Rangifer tarandus*)、ワピチ (*Cervus canadensis*) またはバイソン (*Bison bison*) など大型有蹄類の捕食と関係があるだろう。混交林の中型オオカミは主に中型のオジロジカ (*Odocoileus virginianus*) と小型哺乳類を捕食している (Kolenosky & Stanford, 1975)。アメリカバイソンを捕食しているカナダのウッド・バッファロー (Wood Buffalo) 国立公園に生息するオオカミは北米産のなかでもっとも体重は重く、雄成獣の平均体重は49.5 kg ($n=15$, 40~59kg) ある。この個体群は、バイソンより体の小さいワピチを捕食しているライディング・マウンテン (Riding Mountain) 国立公園のオオカミのそれよりも重い体重を持つ (Carbyn et al., 1993)。

北米産オオカミの体の大きさと餌動物との関係には、捕食者の体の大きさが、彼らの食べることの出来る食物

の大きさとタイプを決定する要因の1つであることが示されている。

最終氷期の最寒冷期の植生図を見ると、大きくは本州中部付近を境にして南北に亜寒帯針葉樹林と温帯性の針・広混交林が対峙する植生配置となっている (図7)。前記の北米産オオカミの緯度と体の大きさの関係から推定して、中部以北から産出している大型のオオカミは東日本の亜寒帯林を中心に生息したと考えられるが、その地理的な広がり、更新世の化石の産出記録によれば、九州まで達していた (図6)。

山口県秋吉台の洞窟から大小2型の化石オオカミが報告されている。1つはM₁歯冠長の大きさ29.5mm、1つはM₁歯冠長の大きさ27.0mmを測る標本であり、主として歯の大きさに基づいて、前者はシベリア系の大型オオカミ (*Canis lupus* subsp. indet.)、後者はニホンオオカミ (*Canis lupus hodophilax*) と分類されている (Shikama & Okafuji, 1958)。丹沢個体群のM₁歯冠長の変異は21.9~28.9mmであり、変異の幅は7mmに達している (表1)。後者の大きさは、確かにニホンオオカミの丹沢個体群の99%に含まれるが、前者の大きさも丹沢個体群で推定された最大値28.9mmに接近した大きさである。したがって、歯の大きさだけで、シベリア系と本土系という大小2型

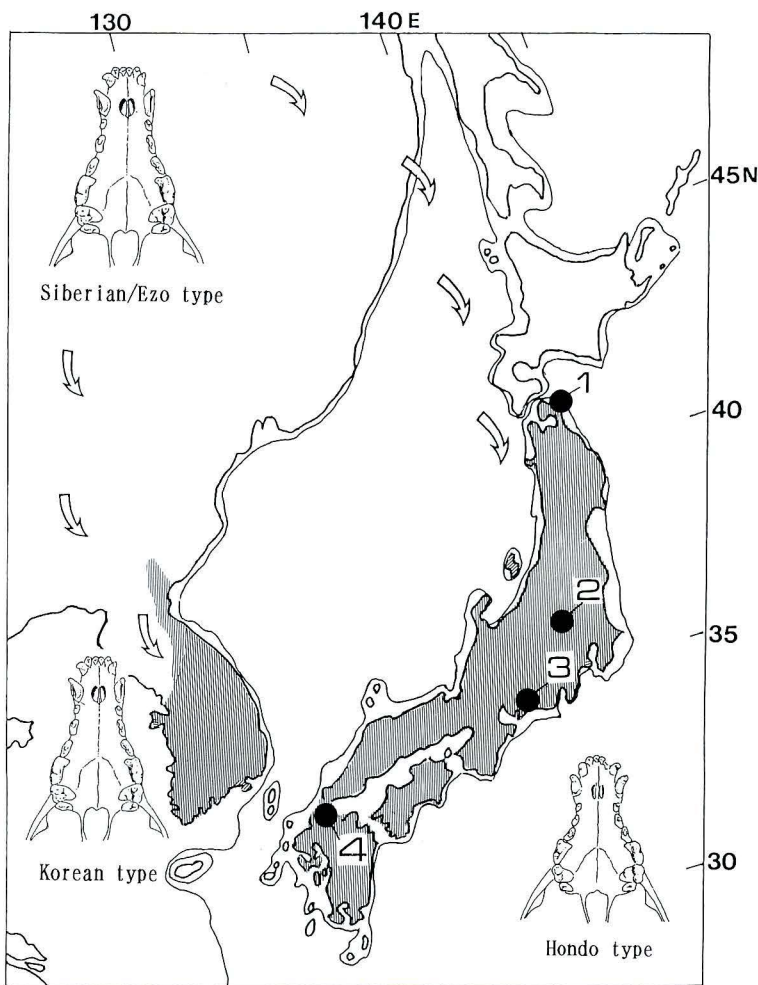


図6. 極東南部におけるオオカミ (*Canis lupus*) の移住と隔離 (概念図)。

シベリア系オオカミが本土陸塊と朝鮮半島へ移住し、個体群が隔離されたことでそれぞれ固有化したことを示す。大陸型 (Siberian/Ezo type)、半島型 (Korean type)、島嶼型 (Hondo type) の順に小型化している。黒丸は本土における更新世産化石オオカミ (*Canis lupus*) の主な産出地点 (Hasegawa, 1972による) を示す。1: 青森県尻矢崎, 2: 栃木県葛生町, 3: 静岡県三ヶ日町, 4: 福岡県北九州市松ヶ枝町。細実線は最終氷期最寒冷期の海岸線 (小野, 1990による) を示す。

のオオカミが更新世に生息したと見るには、現在のところ、地史的な根拠に乏しい。もし化石の産出時代が同時期とすると、上記分類に基づけば、2亜種が同所的に生息したことになり、生物学上の亜種の定義にそぐわない。それよりはむしろ、性的2型の存在か、あるいはカナダ産のオオカミで知られているような南北での気候の勾配に対応したクラインの形成 (Kolensky & Stanfield, 1975)、すなわち、本土陸塊の南西部には中部以北の亜寒帯針葉林の大型個体群よりはやや小型の、針・広混交林に生息したオオカミ個体群の存在を想定する必要があるのではないだろうか。

古脊椎動物学者は、オオカミはオオヤマネコ (*Lynx*) やヘラジカ (*Alces*) などと共に後期更新世に北方、すなわち沿海州以北の大陸北部から日本へ移住したと見るのがもっとも妥当と考えている (亀井, 1978; 長谷川, 1979)。本州地域では更新世末の堆積物から北方要素のヒグマ (*Ursus*)、ヘラジカ (*Alces*) の化石が知られ、また、乾燥条件を示すウマ (*Equus*)、ステップバイソン (*Bison*)、オーロックス (*Bos*) の化石が産出し、それらは最終氷期に南下してきたものとされる (亀井・樽野・河村, 1988)。ヘラジカの南限は中部日本にあり、東日本の動物相を特徴づける種である (亀井・河村・樽野, 1987)。本州へ南下したこれらのマンモス動物群要素の草食獣は、いずれも大型種に限定されているのが特徴である (河村, 1991)。

日本列島は後期更新世のリス／ヴェルム間氷期には大

陸と切り離され、最終氷期の北海道はアジア大陸の半島になっていたが、本州～九州は島として存在した (小野, 1993)。小野 (1993) によれば、対馬海峡は130～140mの水深を持ち、最終氷期の海面最低期にも陸橋は成立していなかったと推定されている (図6)。この時期には、対馬海峡がほとんど閉ざされていたことで対馬暖流が日本海に流入せず、水分の蒸発量が少ないため冬季の降雪量は現在よりずっと少なく、夏季においても寒帯気団の強い勢力が、熱帯気団との間に形成される前線の北上をおさえていたから雨量が少なく、したがって森林の生育条件は完新世よりずっと悪かったと考えられる。おそらく日本の広い地域に針葉樹、落葉樹の疎林と草原が入り混じった景観が広がっていたのであろう (今村, 1987)。そうだとすれば、オープンランドに適応したシベリア系オオカミと大型草食獣の生息にとって非常に良好な条件を提供していたと考えられる。

一方、北海道は本土とは異なり、氷期と間氷期の繰り返しの中では、アジア大陸の一部になっていた期間の方がむしろ長く、島となっていた期間の方が短い (小野, 1990)。オオカミの側に立ってこれを見れば、氷期にはいつでもシベリア系のオオカミには南下できる条件が備わっていたことになる。

北方系オオカミの移動と分散能力は大きい。道路、小道、凍結した湖や河川、深い積雪のない開けた地形を移動するオオカミ (北米産) の平均速度は8.7km/hと推定されている (Mech, 1994)。1つの群れ (pack) がおよ

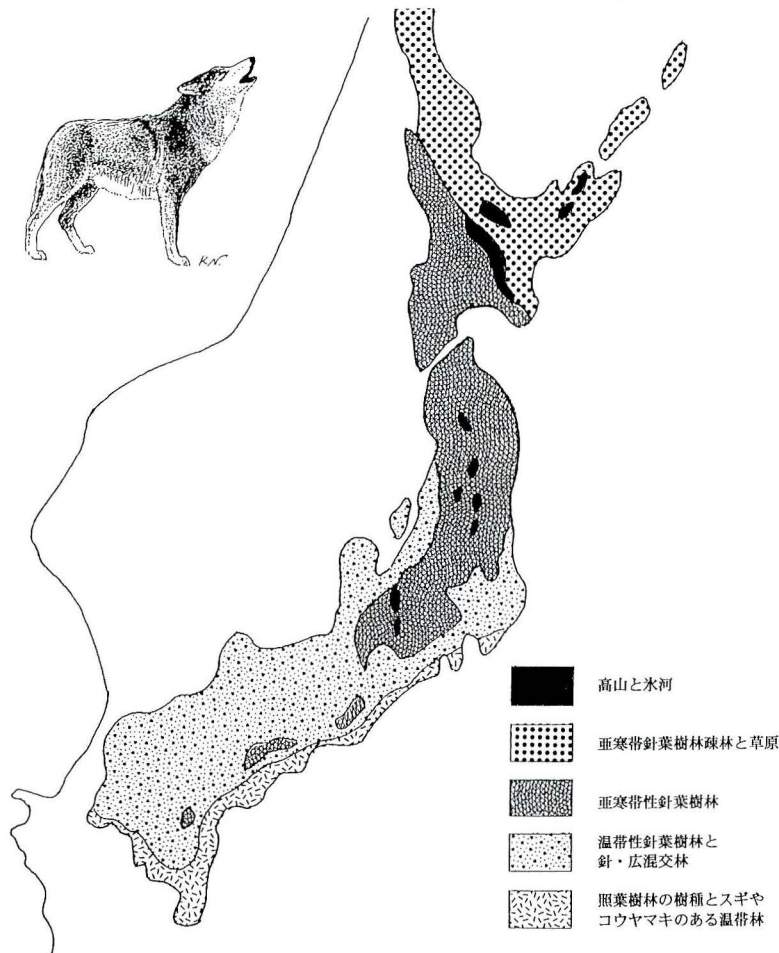


図7. 約2万年前の日本列島の植生 (辻, 1995を変写)。

そ1ヵ月で443kmを踏破し (Mech, 1966)、別の1つの群れでは1日で48km移動していることが報告されている (Mech, 1991)。単独のオオカミの分散距離は、雄雌とも直線距離で800~900kmに達している (Fritts, 1983; Ream et al., 1991)。

北海道と本州の間を隔てる津軽海峡の最短部は2ヵ所ある。1つは汐首岬と大間岬の間で、もう1つは白神岬と龍飛岬の間であり、この2ヵ所はともに直線距離で20km内外である。最終氷期にも津軽海峡は陸化しなかったが、海水準が現在のそれより100m下がったときの海峡の幅は10kmたらずになってしまう (小野・五十嵐, 1991, 図9)。海峡が狭まれば、陸棲動物にとって移動はより容易となるし、冬期間に形成される氷橋は移動を助ける通路となる。とくに、ヘラジカ (*Alces*)、オオヤマネコ (*Lynx*)、ヒグマ (*Ursus*) など移動能力の大きい動物にとっては、冬期間に形成される氷橋は移動の経路となったであろう。ヒグマは冬眠するが、春の残雪期に行動を開始する (近藤, 1982) から、氷橋を利用するか、泳いで本州へ移動することが可能であったろう。これら的大型哺乳動物同様に、オオカミも氷橋を渡るか、狭まった海峡を泳いで移住することができたにちがいない。

シベリア系オオカミも、このようにして本州へ達することができたのであろうが、北方系オオカミの移動と分散能力は大きいだけに個体群の地理的な隔離が生じやすい。とくに、後氷期に津軽海峡が大きく開いたことでシベリア系的大型個体群の本州への移住は困難となって遺伝的な交流が断たれ、後氷期以降、本土産個体群の孤立化は進行したと考えられる。個体群間の遺伝的な交流が断たれただけでなく、島嶼化による物理的な隔離は個体群にさまざまな影響を与える。とりわけ餌条件の変化は、種の存続に関わる問題である。

1.5万年前から1万年前にかけて気候は急激に温暖化し、そのため植生に顕著な変化が起こる。辻 (1995) によれば、約1万1000年前、針葉樹の優占する植生は劇的な終焉を迎える。日本の哺乳動物相におけるもっとも大きな変化がこの時期に訪れる。後期更新世末期から完新世にかけての大型哺乳類の絶滅である。大型有蹄類は比較的短期間のうちに絶滅したとみられ (河村・亀井・樽野, 1989)、そのほとんどが2万年から1万年前の間に絶滅する (Kawamura, 1991)。完新世まで生き延びた大型有蹄類はヤベオオツノジカ (*Sinomegaceros yabei*) だけであり、この大型のシカも、7000年前頃には絶滅してしまう (河村, 1985)。

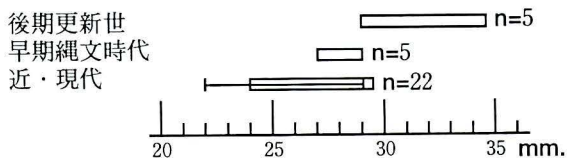


図8. 本土陸産化石オオカミ (*Canis lupus* subsp.indet.), 早期縄文時代のオオカミ (*Canis lupus* subsp.indet.), 現生オオカミ (*Canis lupus hodophilax*) の M_1 歯冠長の分散範囲。a: 後期更新世産の化石オオカミ, b: 早期縄文時代のオオカミ, c: 近・現代産のオオカミ。近・現代産ニホンオオカミの分散範囲に引いた横実線は丹沢個体群99%の範囲を示す。

後期更新世末から完新世にかけての大型哺乳類、とくに大型有蹄類の絶滅後の本州・四国・九州の草食哺乳動物群集は、基本的に森林棲のイノシシ (*Sus scrofa*) やニホンジカ (*Cervus nippon*) などの中・小型種で構成されるものとなり、後期更新世の群集と比較して著しく貧弱化した。オオオカミのような捕食者の側から見れば、食物源となる動物の種数が限られて動物相に偏りが生じ、その絶対量も限定されたことになる。このような条件下では、大型捕食者は食物供給の限界に達しやすく、その結果、栄養不良や幼獣の發育不全が起こり、個体群を維持するために必要な最低限の個体数以下に個体数を減じ、絶滅への道をたどる (宮尾, 1970) か、または餌動物の利用頻度がより小型の方へ偏る場合、捕食者は小型化の方向へ淘汰が進むであろう (宮尾ら, 1984)。

限定された採餌域での食物の絶対量の低下と、捕食者を欠くか、捕食者がいたとしても種数が少ないことが矮小化 (dwarfing) の適応的進化と解釈する点で、多くの研究者の一致を見ている (Lister, 1996)。捕食者の少ないことと関連して老齢な個体でも島では生存でき、生態寿命が延長される (宮尾, 1970)。ライデン自然史博物館蔵の L_c 標本 (表2) のような、小型で老齢な個体の存在は、捕食者の欠如や食物条件の視点で捉え直す必要がある。

後期更新世産と推定される化石オオカミ (中部以北産) の M_1 歯冠長の大きさは29.3~34.5mm (Shikama, 1949; 直良, 1965; 長谷川, 1965による測定値を統合)、早期縄文時代のオオカミの M_1 歯冠長の大きさは26.8~29.15mm (直良, 1965; 宮尾ら, 1984; 茂原, 1986による測定値を統合)、近・現代産オオカミでは24.00~28.51mm (斎藤, 1938) の範囲にそれぞれ分散している。本土産オオカミの M_1 歯冠長の大きさは、後期更新世から近・現代まで連続的であり、時系列的な小型化の傾向が認められる。早期縄文時代のオオカミは近・現代のオオカミの変異内に含まれ、全体を通しての変異にギャップを認めるとすれば、 M_1 歯冠長の大きさ29~30mmの範囲、すなわち、更新世から完新世の移行期に求められよう (図8)。

エゾオオカミの M_1 歯冠長の大きさは25.8~31.0mm (Pocock, 1935; 小原, 1984) の範囲に分散し、早期縄文時代のオオカミとほぼ同大であるが、更新世の中部以北の化石オオカミよりは小さい (図8)。更新世の本産土陸塊に生息したような大型オオカミの化石は北海道からは発見されていない (直良, 1965)。したがって、現在のところ、本土産の化石オオカミとエゾオオカミとの関係は明らかではないが、本州では絶滅したヒグマ (*Ursus arctos*) が北海道に生き残った事実を重視するならば、中部以北の本州に生息したシベリア系オオカミも北海道に生き残ったとする見方は十分に成立する。

エゾオオカミが本土産オオカミほど小型化しなかった理由はいくつか考えられる。Guist (1987) によって指摘されたように、オオカミに認められる体の大きさの地理的変異のすべてについてベルクマンの規則を当てはめることはできないが、ユーラシアや北米の現生のオオカミの体の大きさは、一般的にはベルクマンの規則に従う

地理的変異を示している (Nowak, 1995)。エゾオオカミが大型であるのも、北海道が高緯度に位置し、その環境が東シベリアから極東南部にかけての環境条件に類似した亜寒帯的な気候下にあったこと、もう1つには餌動物の体の大きさが本州のものより大きいことによると考えられる。エゾジカ (*Cervus nippon yesoensis*) はホンシュウジカ (*C. n. centralis*) やキュウシュウジカ (*C. n. nippon*) より明らかに大型である (大泰司, 1986)。大型のシカ、エゾジカがエゾオオカミの主要な餌動物であったろう。北海道の環境は主として大型のアカシカ (*Cervus elaphus*) の生息環境に相当するものであり、大型のエゾジカがそのニッチを占めている (大泰司, 1986)。さらには、北海道のオオカミが完新世以降も、以北の個体群との遺伝的な交流が恒常的になされていた可能性が考えられことである。オホーツク海は“凍る海”として北半球でもっとも南にある海である。オホーツク海は毎年冬になると流水によっておおわれる (小野・五十嵐, 1991)。流水を伝ってシベリア系オオカミが移住して来ることは、その分散能力から推定してありえないことではない。

チョウセンオオカミがエゾオオカミよりもいくぶん小型であるのも、ニホンオオカミの小型化と同様に、朝鮮半島という島嶼的な環境に個体群が移住し、隔離された結果と見ることができよう。阿部 (1936) は、チョウセンオオカミは北東アジアから南下して朝鮮半島に成立した個体群であり、亜種として分類されるものと主張したことは前記した。大陸型個体群 (エゾ)、半島型個体群 (チョウセン)、島嶼型個体群 (ニホン) の順に小型化する傾向が認められる (図1) ことから、北東アジアからの南下とする阿部の見解は的を得たものと思う。

これまで考察してきたように、本土陸塊のオオカミの起源を北方からの単一起源と見るならば、宮尾ら (1984) が示唆した、後期更新世の大型オオカミが後氷期の環境の変化と結びついて小型化 (以下、「矮小化」と表現する) した。すなわち、時系列的な変異 (chrono-cline) と見るのが妥当と考えられる。

本土産オオカミの矮小化の原因は基本的には宮尾ら (1984) の見解と同じである。後氷期の気候変動による個体群の孤立化、大型草食獣の絶滅にともなう群集構造の貧弱化に求められる。温暖化と雨量の増加による森林の繁茂はオープンランドに適応した大型草食獣には不適当な条件をもたらしたと考えられる。

本土産オオカミの矮小化については、もう1つの問題があると思う。われわれが見ることのできているニホンオオカミの頭骨の諸形質は、江戸時代末期から明治にかけての衰退期から絶滅期の個体群 (図5) に基づいている。この時期のニホンオオカミの衰退または絶滅傾向は全国におよんでいた (川合, 1990) と考えられる。したがって、島嶼化によって大型哺乳動物の個体群が孤立し、それによって起きる、一般的で急激な矮小化 (see Lister, 1989; 1996; Vartanyan et al., 1993) のほかに、ヒトとの関係において各個体群の行動圏が縮小され、個体群サイズが小さくなったことで低質個体群化が進行し、頭骨の形態に変化が生じたとも考えられる。

ニホンオオカミの頭骨形態に家犬的な特徴が見られる

ことは、早くから斎藤 (1938) が指摘しているが、直良 (1965) も同様な見解を持ち、家犬との交雑を強く示唆している。上顎の歯についても、先史時代のオオカミの歯と比較して、近世のニホンオオカミでは小型化し、家犬的であることが指摘されている。小型化の程度は、 M^1 (第1大臼歯) より P^4 (第4小臼歯)、 P^4 (第4小臼歯) より P^3 (第3小臼歯) において著しく、この現象は、イヌの家畜化にともなう顎および歯の縮小のプロセスと並行的である (宮尾ら, 1984)。短吻化したニホンオオカミの口蓋部の形態 (図4-2) は、一見、紀州犬や柴犬といった在来の現代日本犬に類似する。

ニホンオオカミの聴胞 (鼓骨胞) が「妙に押しつぶされた様に小さい」と阿部 (Abe, 1936) が述べたことは前記した。Pocock (1935) も、イギリス自然史博所蔵の秩父産ニホンオオカミの頭骨 (1886年採集, Abe (1930) による) の聴胞の位置が低く、膨隆の程度が大きいことを記述している。斎藤 (1938) は、チョウセンオオカミとニホンオオカミの聴胞の大きさと膨隆の程度を詳細に比較し、後者で顕著に縮小していることを指摘した。

ニホンオオカミが家犬的であることは、アラビアオオカミ (*C. l. arabs*) と大型パリア犬の頭骨を比較した Harrison (1973) の報告からも理解される。オオカミとイヌの両方で顕著に異なる形質は、歯の大きさよりはむしろ聴胞の最大幅長であり、聴胞が大きいことと聴胞が膨隆していることは、アラビアオオカミより大型の、アラビア半島北部・ペルシア・小アジア産の別亜種 (*C. l. pallipes*, インドオオカミ) においても同様な傾向が認められ、また、永久歯の崩出していない非常に若いアラビアオオカミにも認められるという。Iljin (1941) も、イヌと区別される形質の1つとして、聴胞の形と大きさを挙げている。オオカミの聴胞は大きく、凸面体でほとんど球状であるが、イヌでは、その大きさは中程度か非常に小さく、わずかに凸面体であり、その形は球状ではなく、扁平であるとしている。

田隅 (1991) によれば、調査した5個体のニホンオオカミのうち、洞窟内で発見された3個体で聴胞は丸く膨大した形をしていたという。洞窟産ニホンオオカミ (田隅は「化石頭骨」と表現している) がいつの時代のものが問題となる。ニホンオオカミの聴胞の形態や大きさの変異に関する調査がさらに必要である。

V. おわりに

これまで、オオカミ (*Canis lupus*) の地理的亜種は主として頭骨の大きさの変異に基づいて分類されてきたが、それらの変異の実際上の違いは、食物のタイプ、気候条件、地理的な広がりのような、それぞれの個体群の生活条件に関連したものと認識される (Wayne, Brewster and Fritts, 1995) ようになっている。現生の本土産オオカミの頭骨が顕著に小さいことや、短吻化 (短頭化) の傾向など形態上の特徴についても、更新世から完新世にいたる気候変動と、それにとともなう島嶼化によって短期間のうちに生じた、急激な矮小化による変異の表現型と捉えることもできよう。ニホンオオカミの頭骨が家犬的であるのは、それらの形質を幼形進化的な特徴と見ること

で説明できるのではあるまいか。

ニホンオオカミを独立種とする説（今泉, 1970b）もあるが、筆者の見解では、本土産のオオカミは後期更新世のシベリア系オオカミに起源し、個体群の移住と、気候変動に関連した個体群の隔離により成立した、特異な矮小化個体群と考えられ、オオカミ（*Canis lupus*）の地理的な1亜種（*Canis lupus hodophilax*）として分類するのが妥当と思われる。

VI. 謝 辞

松島義章博士、高桑正敏氏、岡田泰明氏、樽創氏、大島光春氏、佐藤武宏氏の各氏には拙文に目を通していただき、数々のご教示とご指摘をいただいた。佐藤武宏氏には資料の統計学上の処理と作図、樽創氏には作図で多大なご援助をいただいた。小原巖氏、井上百合子氏、中村昭氏、土屋定夫氏の各氏には資料の調査や文献収集でのご協力をいただいた。青木雄司氏、荻部治紀氏、松島義章博士、小原巖氏（abc 順）から貴重な写真のご提供をいただいた。また、本稿をまとめることができたのも、長年にわたってニホンオオカミの調査と研究に努められた故阿部余四男教授、今泉吉典博士、故直良信夫博士、小原巖氏、故斎藤弘（斎藤弘吉）氏（abc 順）らの先達の業績に負うところが大きい。以上の皆様すべてに対して衷心より御礼申し上げる。

VII. 引用文献

- 阿部永・石井信夫・金子之史・前田喜四雄・三浦慎悟・米田政明, 1994. 日本の哺乳類. 195pp. 東海大出版会, 東京.
- 阿部余四男, 1923. メクテーに就て. 動雑誌, 35:380-386.
- Abe, Y., 1930. On the Korean and Japanese wolves. J. Sci. Hiroshima Univ. Ser. B., Div. 1, 1:34-37, 4pls.
- 阿部余四男, 1936. 日本領内の狼に就いてポコック氏に與ふ. 動雑誌, 48:639-644.
- Carbyn, L. N., S. M. Oosenberg and D. M. Anions, 1993. Wolves, Bison and the dynamics related to the Peace-Athabasca Delta in Canadian's Wood Buffalo National Park. Circumpolar Res. Ser. (4):1-270. Canadian Circumpolar Inst. Univ. of Alberta.
- Geist, V., 1987. Bergmann's rule is invalid. Can. J. Zool., 65:1035-1038.
- Gunson, J. R. and R. M. Nowak, 1979. Larger gray wolf skulls found in Alberta. Canad. Field-Naturalist, 93:308-309.
- Fritts, S. H., 1983. Record dispersal by a wolf from Minnesota. J. Mammal., 64:166-167.
- 濱田隆士（監修）, 1989. 日本列島3億年のタイムトラベル. ニュートン, 9:64-95.
- Harrison, D. L., 1973. Some comparative features of the skulls of wolves (*Canis lupus* Linn.) and Pariah dogs (*Canis familiaris*) from the Arabian Peninsula and neighbouring lands. Bonn zool. Beitr., 3:183-191.
- 長谷川善和, 1965. 日本の化石狼. 国立科学博物館催物ニュース.
- Hasegawa, Y., 1972. The Naumann's Elephant, *Palaeoloxodon naumanni* (Makiyama) from the late Pleistocene off Shakagahana, Shodoshima Is. in Seto Inland Sea, Japan. Bull. Natn. Sci. Mus., 15:513-591, pls. 1-22.
- 長谷川善和, 1979. 日本産食肉獣の概要. 哺乳類科学, (38): 23-28.

- 長谷川善和・富田幸光・甲能直樹・小野慶一・野苺家宏・上野輝弥, 1988. 下北半島尻矢崎地域の更新世脊椎動物群集. 国立科博専報, (21):17-36, 8pls.
- Holthuis, L. B. and T. Sakai, 1970. Ph. F. Von Siebold and Fauna Japonica-A history of early Japanese zoology-. 323pp. Academic Press of Japan, Tokyo.
- Honacki, J. H., K. E. Kinman and J. W. Koepl, 1982. Mammal species of the world, a taxonomic and geographic reference. 694 pp. The Association of Systematics Collection, USA..
- 今泉吉典, 1960. 原色日本哺乳類図鑑. 169pp. 保育社, 大阪.
- 今泉吉典, 1970a. ニホンオオカミの系統地位について1. ニホンオオカミの標本. 哺乳動雑誌, 5:27-32.
- 今泉吉典, 1970b. ニホンオオカミの系統地位について2. イヌ属内での頭骨における類似関係. 哺乳動雑誌, 5:62-66.
- Ilijn, N. A., 1941. Wolf-dog genetics. J. Genet., 42:359-414, pls. 19-29.
- 今村啓爾, 1987. 狩人の系譜, 大林太良編日本の古代10, 山人の生業, pp. 73-118. 中央公論社, 東京.
- 亀井節夫, 1978. 象のきた道ー日本の第四紀哺乳動物群の変遷についてのいくつかの問題点ー. 地球科学. 60/61:23-34.
- 亀井節夫・河村善也・樽野博幸, 1987. 哺乳動物相. 日本第四紀学会編, 日本第四紀解説, pp. 86-89. 東京大学出版会.
- 川合禎次, 1990. ニホンオオカミ. 奈良県史編集委員会編, 奈良県史第二巻, 動物・植物, pp.31-36, 名著出版, 東京.
- 河村善也, 1985. 最終氷期以降の日本の哺乳動物相の変遷. 月刊地球, 7:349-353.
- 河村善也, 1991. シベリアの第四紀後半の哺乳動物相. モンゴロイド, (10):32-36.
- 河村善也・亀井節夫・樽野博幸, 1989. 日本の中・後期更新世の哺乳類相. 第四紀研究, 28:317-326.
- Kawamura, Y., 1991. Quaternary mammalian faunas in the Japanese Islands. The Quat. Res., 30:213-220.
- Kishida, K., 1931. Note on the Yesso wolf. Lansania, 3:72-75.
- 近藤憲久, 1982. 日本の哺乳類相一種の生態, 古環境および津軽海峡の影響について. 哺乳類科学, 43/44:131-144.
- Kolenosky, G. B. and R. O. S. Stanfield, 1975. Morphological and ecological variations among gray wolves (*Canis lupus*) of Ontario, Canada. In M. W. Fox (ed.), The Wild Canids, pp. 62-72. Van Nostrand Reinhold Co., New York.
- Kurtén, B. and E. Anderson, 1980. Pleistocene mammals of North America. 422pp. Columbia Univ. Press, New York.
- Lister, A. M., 1989. Rapid dwarfing of red deer on Jersey in the last interglacial. Nature, 342:539-542.
- Lister, A. M., 1996. Dwarfing in island elephants and deer: processes in relation to time of isolation. In P. J. Miller (ed.), Miniture vertebrates, the implications of small body size, pp. 277-292. Oxford Sci. Pub. London.
- Mech, L. D., 1966. The wolves of Isle Royale. National Parks Fauna Series, U.S. Govern. Printing Office, 7:1-210.
- Mech, L. D., 1991. The way of the wolf. 120 pp. Voyageur Press, Stillwater, Minnesota.
- Mech, L. D., 1994. Regular and homeward travel speeds of arctic wolves. J. Mammal., 75:741-742.
- 宮尾嶽雄, 1970. 動物生態学入門. 205pp. 地域文化研究所, 船橋.
- 宮尾嶽雄・西沢寿晃・花村肇・子安和弘, 1984. 早期縄文時代長野県榑原岩遺跡出土の哺乳動物, 第7報オオカミの骨と歯. 成長, 23:40-56.
- 直良信夫, 1965. 日本産狼の研究. 290pp. 校倉書房, 東京.
- 直良信夫, 1972. 古代遺跡発掘の脊椎動物遺体. 198pp. 校倉書房, 東京.

- Nowak, R. M., 1979. North American Quaternary *Canis*. Monog. Mus. Nat. Hist. Univ. of Kansas, (6): 1-154.
- Nowak, R. M., 1995. Another look at wolf taxonomy. In L. N. Carbyn, Fritts, S. H. and Sei, D. R. (eds), Ecology and conservation of wolves in a changing world. Canadian Circumpolar Inst. Occ. Publ., (35): 375-395.
- 小原秀雄, 1972. 日本野生動物記. 182pp. 中央公論社, 東京.
- 小原巖, 1984. 絶滅した日本のオオカミ. 動物と自然, 14(11): 2-6.
- 小原巖, 1990a. 神奈川県厚木市および愛甲郡清川村の民家に保存されているニホンオオカミの頭骨について. 神奈川自然誌資料, (11): 53-65.
- 小原巖, 1990b. 神奈川県愛甲郡清川村に保存されているニホンオオカミの前肢. 神奈川自然誌資料, (11): 67-69.
- 小原巖・中村一恵, 1992. 南足柄市郷土資料館所蔵の, いわゆるヤマユヌ頭骨について. 神奈川博研報(自然科学), (21): 105-110.
- 小野有五, 1990. 北の陸橋. 第四紀研究, 29: 183-192.
- 小野有五, 1993. 最終氷期の東アジアの古環境. 学術月報, 46: 463-467.
- 小野有五・五十嵐八枝子, 1991. 北海道の自然史. 219pp. 北海道大学図書刊行会, 札幌.
- 大泰司紀之, 1986. ニホンジカにおける分類・分布・地理的変異の概要. 哺乳類科学, (53): 13-17.
- Pocock, R. I., 1935. The races of *Canis lupus*. Proc. Zool. Soc. London, pp. 647-686, 2 pls.
- Ream, R. P., M. W. Fairchild, D. K. Boyd and D. H. Pletscher, 1991. Population dynamics and home range changes in a colonizing wolf population. pp. 439-366, In R.B. Keiter and M.S. Boyce (eds.), The Greater Yellowstone ecosystem: redefining American's wilderness heritage. Yale Univ. Press, New Haven, Conn.
- 齋藤弘, 1938. 東京科学博物館倉庫内に発見せられたるヤマユヌの全身骨格並に其他の同資料に就いて. 博物館研究, 11: 27-32.
- 齋藤弘吉(齋藤弘), 1954. 日本狼総論. 齋藤弘吉(1961), 日本の犬と狼, pp. 217-228, 雪華社, 東京.
- 齋藤弘吉(齋藤弘), 1963. 犬科動物骨格計測法. 138pp. 著者刊, 東京.
- 茂原信生, 1986. 東京大学総合研究資料館所蔵長谷部言人博士収集犬科動物資料カタログ. 東京大学総合研究資料館標本資料報告, (13): 1-187.
- Shikama, T., 1949. The Kuzu ossuaries. Geological and palaeontological studies of the limestone fissure deposits, in Kuzu, Tochigi Prefecture. Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ., Ser. 2, 23: 1-201, 32pls.
- Shikama, T. and G. Okafuji, 1958. Quaternary cave and fissure deposits and their fossils in Akiyosi district, Yamaguchi prefecture. Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ., Sec. - 2, (7): 105-112.
- 田代道彌, 1989. 動物. 南足柄市史 1, 資料編, pp. 191-242. 南足柄市.
- 田隅本生, 1991. “ニホンオオカミ”の実体を頭骨から探る. The Bone, 5(2): 119-128.
- 辻誠一郎, 1995. 日本の森の変遷, 6万年. 植物の世界, 8: 126-128.
- Vartanyan, S. L., V. E. Garutt and A. V. Sher, 1993. Holocene dwarf mammoths from Wrangel Island in the Siberian arctic. Nature, 362: 377-340.
- Wayne, R. K., B. Brewster and S. H. Fritts, 1995. Taxonomy and genetics of the gray wolf in western North America: A review. In L. N. Carbyn, S. H. Fritts and D. R. Sei (eds), Ecology and conservation of wolves in a changing world. Canadian Circumpolar Inst. Occ. Publ., (35): 353-373.

摘要

中村一恵, ニホンオオカミの分類に関する生物地理学的視点. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 27: 49-60. (K. Nakamura, A Biogeographic Look on the Taxonomy of the Japanese Wolves, *Canis lupus hodophilax* Temminck, 1839. Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.), 27: 49-60.)

本論は、個体群の移住と隔離という生物地理学的な視点からニホンオオカミ(*Canis hodophilax* Temminck, 1839)の分類について論議し、ユーラシア大陸の広範囲な地域に生息するオオカミ(*Canis lupus*)の個体群の移住と隔離がニホンオオカミという地域集団の分布に反映されているという考え方にに基づき、その系統に関する生物地理学的なアプローチを試みたものである。本土産オオカミは後期更新世のシベリア系オオカミに起源し、個体群の本土陸塊への移住と後氷期の島嶼化によって個体群が隔離されたことで成立した特異な矮小化個体群と考えられる。ニホンオオカミは亜種(*Canis lupus hodophilax* Temminck, 1839)として分類するのが妥当と考えられた。

(受付: 1997年11月30日, 受理: 1997年12月11日)

 総 説

 霊長類におけるメスの親和関係
 —社会構造とのかかわりを中心に—

 Affiliative relationships among female primates
 in relation to the social structure

広谷浩子

神奈川県立生命の星・地球博物館

Hiroko Kudo-Hirotani

Kanagawa Prefectural Museum of Natural history, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract. Affiliative relationships among female primates are reviewed from the two points of view; one is a variety of social interactions among non-related females, and the other is a pattern of grooming network. Social interactions among non-related females show a steady tendency of rank-related attractiveness. This is prominent in cases of matrilineal multi-male troop. Analysis on grooming network leads to two clear-cut features of female bond in relation to male status in the social network. Factors influencing these two main results are discussed.

Key words : female-female interaction, grooming network, clique size, network size, rank-related attractiveness

はじめに

これまで、メスの親和関係は、社会性の高い霊長類にもっとも普通に認められる関係であり、特に注目されて議論されることがなかった。

一方、1980年代より、この親和的な関係が生存および繁殖をかけたメス同士のし烈な争いを内に秘めたものであるとの議論が、主として女性の霊長類学者たちによりなされた (Hrdy, 1981; Small, 1984; Smuts, 1984)。霊長類のメス間関係を競合という観点から見直そうという議論が活発になり、これとともにメスの配偶者選択の理論にもとづくモデル化が霊長類においても整備されて、オスとの関りかたについてもメスの主体性が強調されるようになった。

しかし、自己の繁殖成功度の上昇をめぐる競合という概念で整理されたメス間関係のみが、霊長類のメスの社会関係なのか。1つのグループで共に生活し、子ども時代から一緒に慣れ親しんだ個体同士の親しい関係は、競合とは別の次元でみなければならぬのではないかと、というのが著者の主張である。メス間関係を見直し、親しさとは何かを考えるための第一歩として、ここでは進化の過程において一見有利とは考えられないような親和関係、すなわち、非血縁メス間の親和関係に着目する。メスが非血縁個体とどのような相互交渉をもつかを調べ、メスの親和的行動の進化的意義とメスが共存するためのメカニズムを社会構造と関連づけながら検討する。

分析の方法と対象

本論文では、以下の2つの観点から、メス間の関係を検討する。第1は、非血縁メス間の様々な相互交渉のパターンに何か共通性はないか、さまざまな種における研究の結果を概観することである。群れの社会構造からみると、非血縁メス同士の関係が実際に存在するのは、複雄群型の社会と単雄群型の社会の2つに限られる。また、社会の継承の様式からすると、上の関係は母系と父系の両方にあり、その対比が重要になると思われる。ここでは、複雄群型 (母系) の代表としてニホンザルを中心としたマカカ属とサバンナヒヒを、複雄群型 (父系) の代表としてチンパンジーを、単雄群型 (母系) の代表としてコロブス・グエノン類を、単雄群型 (父系) の代表としてマントヒヒを取り上げて、グルーミング、母親以外の個体による育児 (allomothering)、攻撃場面での協同 (coalition)、空間的近接、音声コミュニケーションのパターンを調べる。

第2の観点は、霊長類の多様な社会のそれぞれにおいて、ある行動がどのように発現するかという観点である。ここでは、オトナ個体を対象としたグルーミングネットワークの研究から得られた新しい知見をもとに、メス間関係のパターンをまとめる。分析の指標は以下のようなものである (図1)。

***よくグルーミングする関係:** 最低基準 = (グループで観察された総グルーミング数) / (グループ内に想定さ

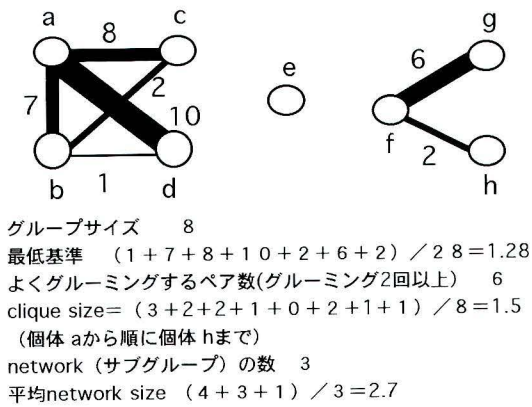


図1 グルーミングネットワークの分析手順と比較のための指数.

れるペアの総数) と定め、この基準以上にグルーミングをする関係を「よくグルーミングする関係」とする。

***Clique size** : 各個体が「よくグルーミングする関係」を結ぶ相手の頭数をグループ全体で平均した値。

***Network size** : よくグルーミングする関係をつないでできるサブグループの大きさ。

以上の指標により、メス間の親和関係の持ち方(相手選択性、グルーミングをもとにしたサブグループの大きさとパターンなど)が明らかになる。

結果と考察

1. 非血縁メス間の相互交渉の特徴

複雄群で母系の社会、父系の社会、単雄群で母系の社会、父系の社会の4つのタイプで認められるメス間の相互交渉の概略を表1にまとめた。

(1) グルーミング

メスのグルーミングは、多くの場合、血縁グループの中で行われることが多い(Koyama, 1967)。非血縁のメス間で行われるグルーミングを分析した結果、母系の複雄群を持つ種ではニホンザル、ボンネットモンキー、サバンナヒヒ、サバンナモンキーなど多くの種で、低順位个体から高順位个体に対して行われる傾向(rank-related attractiveness)が明らかになった(Fairbanks, 1980; Dunbar, 1980; Seyfarth, 1980; Silk, et al., 1981; Wasser, 1983; Kudo, 1991)。同様の傾向は、父系の単雄群を持つマントヒヒにおいても認められた(Stambach, 1978)。いっぽう、母系の単雄群では、頻繁な親和的相互交渉が認められるが、高順位指向性は報告がなく、多くは血縁集団内での相互交渉である(Hrady, 1977; Cords, 1986; Struhsaker

表1 4つの社会タイプとメス間相互交渉

		グルーミング	allomothering	攻撃場面の協同
複雄群	母系(ニホンザル、サバンナヒヒ)	血縁集団内 高順位指向	高順位指向	さかん 高順位指向
	父系(チンパンジー)	ほとんどない	ワカメス期にさかん	少ない
単雄群	母系(コロブス類、ゲエノン類)	血縁集団内	コロブス類で非常にさかん(母親が自立を促進、Infant colorの発達)	攻撃自体が少ない
	父系(マントヒヒ)	高順位指向(第1位に集中)	不明(オスの関与が強い)	高順位指向(第1位に集中)



図2 赤ん坊に強い関心をしめすニホンザルのワカメス.

& Leland, 1986; Nakagawa, 1992)。最後に父系の複雄群の代表としてチンパンジーのメス間の相互交渉を概観すると、メス間の関係は希薄でグルーミングそのものがあり認められない(Goodall, 1980)。

(2) Allomothering を中心とした母子への親和的行動

赤ん坊と一緒にいる母親に近づいて赤ん坊をさわったり、抱いたり、背中のにせて移動したりする疑似母性行動(allomothering)は、霊長類に広くみとめられる(図2)。

ここでは、母系の複雄群の例として幸島のニホンザルの観察結果を示す(森・宮藤, 1986)。ニホンザルの場合、生後約1カ月が過ぎて赤ん坊にある程度の運動能力がそなわってくると、このような行動が多くなる。この種の行動は、母親への接近やグルーミングを含む場合もあり、単に子守り行動にとらえるよりは、メス間の親和的行動と考える方が妥当である。このような母子に対する親和的行動は、未経産メス、経産メスの他、赤ん坊を持っている母親もよく行なった。子どもの誕生から1カ月から3カ月ぐらいの時期には、母子をめぐっての親和的相互交渉がさかんになり、非血縁メス間の相互交渉が非常にさかんになったが、その後少なくなった。この親和的行動の方向性をみると、グルーミングと同様に低順位个体から高順位个体へと集中する傾向があった(図3)。そして、この傾向は経産メスや赤ん坊を持つ母親において特に顕著であった。この時期に限って、2才児をもった第1位メス(図3のSTK)と1才児を持った第2位メス(同じくUME)に対しても、赤ん坊とその母親の場合に対するのと同様な親和的行動が認められた。この種の行動が高順位指向性を示すことの極端な事例と言える。

この allomothering が非常にさかんに認められるもう

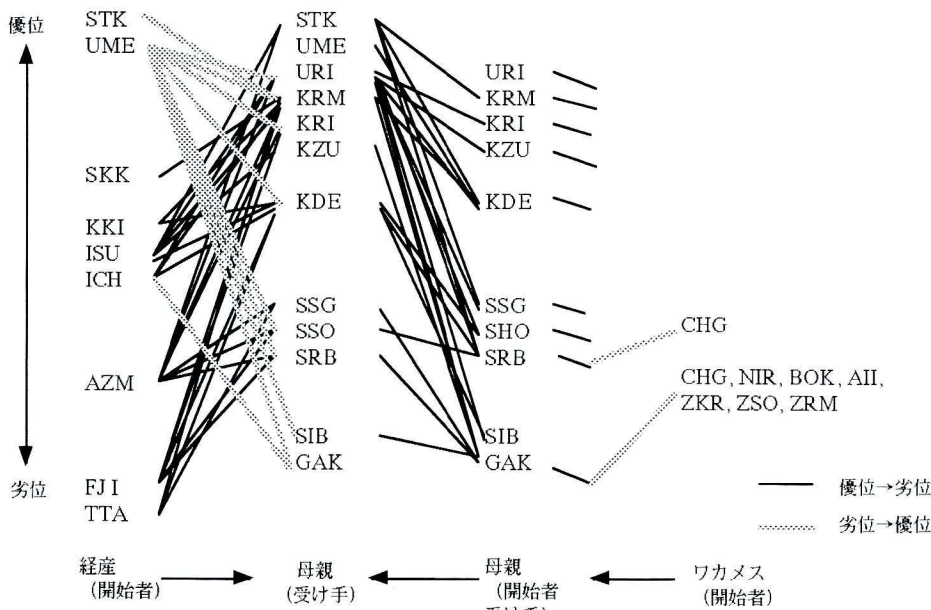


図3 赤ん坊と母親をめぐる親和的相互交渉の方向性と順位との関係。

左から経産メス、赤ん坊を持つ母親、ワカメスがそれぞれ誰にたいして相互交渉をおこなったのかを示した。個体は上から順位の高い順にならべてある。

ひとつの社会は母系の単雄群である。なかでもコロブス類におけるこの種の行動はめざましく、赤ん坊らしさを際立たせるような特別な毛色 (Infant color, 図4) の発達もこの行動と深くかかわると考えられている。また、この種のコロブス類の母親は、マカカ属などと比較してずいぶん早い時期から、子どもの独立を促す行動をおこなっており、育児を手伝おうとするメスに自分からこどもを連れて行って預けるような行動も観察されている (Hrdy, 1976; Kohda, 1985)。Allomothering は母親による育児を補う機能を持っているようだ。

(3) 攻撃場面における協同 (coalition)

誰かが起こした攻撃に荷担する行動は、荷担する者と受け手との親和関係を反映している場合が多い。母系の複雄群の場合、メス間ではやはり高順位指向性があらわれていた。また、この種の協同 (coalition) をきっかけに、グルーミング等の親和的行動を始めていくような場合もある (deWaal, et al., 1976)。攻撃の結果が順位の上昇・定着へと直接つながっていく場合もあり、非血縁メス間でもこの傾向ははっきり示されている (Datta, 1983a, 1983b; Horrocks & Hunte, 1983; Netto & van Hoof, 1986; Pereira, 1989)。幸島のニホンザルの観察でも、攻撃の協同の相手が高順位の個体に集中する傾向がはっきりと示されている (森・宮藤, 1986の第4章)。

同じような傾向は父系の単雄群を社会単位とするマントヒヒでも報告されている (Stammach, 1978)。いっぽう、同じ単雄群でも母系の社会をもつ種では、この傾向が認められず、メス間の攻撃的交渉自体が非常に少なかった (Hrdy, 1977)。

以上3種類の相互交渉を概観した結果、非血縁メス間の相互交渉に共通していたのは、高順位指向の傾向であった。この傾向は母系の複雄群および父系の単雄群で顕著であった。このような行動の進化的意義については、さまざまに議論されている (Cheney, 1977; Kummer, 1978; Fairbanks, 1980; Seyfarth, 1983; Silk, 1983; Wasser, 1983など)。高順位個体に接近することにより、食物等の資源の獲得に便宜を受けたり、攻撃場面で支持を受けたり、

捕食者からの安全を確保されたりするというような直接的なものから、接近する個体自身の順位を上昇させその結果としてさまざまな利益を得るというような間接的なものまで想定できるのである。

しかし、このような傾向には例外も多い。たとえば、コドモ時代からオトナ時代への新しい関係が形成される過渡期にあるワカメスの場合や (Kudo, 1991)、新群形成などで新しい個体関係が定着していく過程では (宮藤, 1984)、相互交渉の方向はさまざまに一定した選択性は認められにくいのである。

(4) 表面化しない親和関係：近接関係と音声コミュニケーション

多くの霊長類は1日の大半を遊動しながらの採食にあてている。上でとりあげたような親和性をあらわす行動はいずれも休憩時間など限られた場面でのみおこなわれる。より基本的なメス間の相互交渉として、特定の行動にはあらわれなくても、親和関係が反映されていると予想される近接と音声コミュニケーションを検討する。

近接関係は、行動となって現われないために、非常に



図4 新生児期のみ特別な毛色を持つコロブス類。アンゴラコロブス (*Colobus angolensis*) の赤ん坊と母親。

わかりにくいことが多い。しかし、ニホンザルにおいてある個体の何 m 以内に誰がいるか、という基本的データを蓄積した結果、特定の非血縁メス間には、グルーミングなどの親和的行動を示さなくても、大半の時間を10 m以内で共存して過ごすような関係があることがわかっている (Kudo, 1991)。

遊動生活そのもには非血縁メス間の関係がどのように反映されるのか。Mori (1977) や Furuichi (1983) は遊動において、メス間には互いに距離を置く傾向が強く認められると報告しているが、これとちょうど対となるような結果が、遊動時の音声コミュニケーションの分析結果より提出されている。Mitani (1986) は、屋久島の野生群で遊動中の個体間で頻繁に音声コミュニケーションが行われ、特に血縁集団内と家系長 (血縁集団の中で最優位なメス) 間で盛んに行われていることを明らかにした。同様に幸島のマキ群で遊動と音声コミュニケーションの関係を調べた結果、普段はグルーミングなどをまったく行わないオトナメス間で頻繁な音声のやりとりがあり、遊動の局面の転換にこのようなやりとりが重要な役割を果たすことが明らかになった (宮藤, 1987)。このように、非血縁メス間には音声という別のチャンネルによる相互交渉が盛んにおこなわれていることがわかる。

このような形の相互交渉は、母系複雄群以外の社会にも認められる。たとえば、母系単雄群については、パタスモンキーに関して Nakagawa (1992) による報告がある。

2. 霊長類社会の多様性とグルーミングネットワークのパターン

(1) ネットワークのパターンとメス間関係

著者は、霊長類33種を対象にグルーミングネットワークの発達度合いを clique size と network size という2つの指標を想定して調べ、大脳新皮質の相対的大きさを指標とした社会的認知能力との相関を検討した (Kudo-Hirotani, et al., submitted)。この過程において、以下のような結果が明らかになった。

Clique size には性差がみとめられ、種によってオスの clique size の方が大きいもの、メスの方が大きいものなどさまざまであった。また、同種のさまざまな大きさのグループにおいて clique size に対する最大の network size をプロットすると、clique size が大きくなっても network size がこれに比例して大きくなるわけではなかった。実際にネットワークを描いてみると、個体をつなぐネットワークの形は鎖のようにつながっていく場合、星形にかたまって中のネットワークが密になる場合などいろいろなパターンが認められた。種間比較に用いた33種のうち性差を分析できた30種について clique size や network size における性差をこのネットワークのパターンの違いと関連づけて調べ、以下のような結果が得られた。

分析の対象となった各種について、オスとメスそれぞれの平均 clique size と、オスが参加している場合といない場合でメスの network size がどうなっているかをまとめた。この結果、メス間の結びつきのあり方には、以下の2型あることがわかった。グルーミングネットワークからオスを取り除くと、メスのサブグループが小さく分

かれてしまう型 (split 型=S 型) と、メスのサブグループの大きさには変化がない型 (constant 型=C 型) である。そして、平均 clique size がオス>メスの種には S 型が多く、メス>オスの種には C 型が多く認められた。オスがメスに比べてより多くの相手とさかんにグルーミングをおこなう種では、オスはメス間のネットワークがつくるサブグループ同士の間をつなぐ役割を果たしているが、メスの方がオスよりも多くの個体とさかんにグルーミングをおこなう種では、メスの結びつきに対しオスが果たす役割が小さいのである。

このように対照的な2つのパターンがそれぞれどのような種でみとめられるのかを表2にまとめた。表2よりオス>メスで S 型というネットワークはニホンザル (*Macaca fuscata*) やサバンナヒビ (*Papio anubis*) など複数オスを含む大型グループ (母系の複雄群) を形成する種に多く、メス>オスで C 型というネットワークはゲエノン (*Cercopithecus* sp.)、パタスモンキー (*Erythrocebus patas*) やコロブス類 (*Colobus* sp.) および *Presbytis* sp.) など母系の単雄群をつくる種に多いことがわかった。

ニホンザルやサバンナヒビでは、オスがメスのサブグループ間をつなぐことによって、複数の血縁集団をまとめあげて大きなグループを維持している。同様の議論は、Grewal (1980) によって、嵐山のニホンザルの観察結果をもとにおこなわれている。

一方、単雄群型の種においては、安定したメス間の結びつきが存在していて、これがグループの中核となっている。オスはこのメス間の結びつきの上にのるような形で存在して、各メスとの結びつきはあまり強くない。

また、オスの関与を取り除いたメスだけの network size の大きさを比較すると、S 型では平均2.36、C 型では平均5.1であった。このことより、オトナメスの結びつきのあり方自体も S 型と C 型では異なると考えられる。

(2) 非血縁メス間の相互交渉とネットワークパターン

上で述べた2つの型の社会で、メス同士の相互交渉はどのように行われているのか、検討した。

S 型の代表的な種であるニホンザルやサバンナヒビについては、相互交渉の相手として高順位個体を選ばれること (高順位指向性) が顕著な傾向であった。これはメスの集団をまとめあげる柱として順位が強く機能していることを示す結果である。餌や繁殖相手などの資源をめぐる競争がきびしく、優位-劣位の関係を反映した利得の不均衡があるような社会では、順位の機能も明確化してくる。そして、メス間の特に親しい関係はごくわずかの個体 (おそらくは母子の単位程度のもの) とのみ結ばれ、それをこえるネットワーク形成にはオスが強く関与してくる。

これに対して、C 型の代表的な種となった単雄群におけるメス間の相互交渉においては、複雄群でみとめられたような高順位指向性は顕著ではなかった。単雄群においては、メス間の相互交渉が特にさかんで、持続的なメス間の結びつきが存在する (Cord, 1986; Struhsaker & Leland, 1986)。上で算出した平均のネットワークサイズから考えると、特に親しい関係の範囲は母子単位以上に

表2 霊長類各種のネットワークパターン

Clique size	オス>メス	メス>オス	メス=オス
S-type species	<i>Lemur catta</i> <i>Saimiri sciureus</i> <i>Callicebus torquatus</i> <i>Ateles jeffroyi</i> <i>Procolobus badius</i> <i>Macaca fuscata</i> , <i>M. arctoides</i> <i>Papio anubis</i> <i>Theropithecus gelada</i>		<i>Lemur fulvus</i> <i>Alouata caraya</i>
C-type species	<i>Propithecus</i> sp. <i>Indri indri</i> <i>Papio hamadryas</i>	<i>Cebus apella</i> <i>Colobus guereza</i> <i>Presbytis entellus</i> , <i>P. pileatus</i> <i>Cercopithecus campbelli</i> <i>Erythrocebus patas</i> <i>Macaca mulatta</i> , <i>M. sylvanus</i> , <i>M. radiata</i> <i>Pan troglodytes</i>	

広がるようだ。すなわち、非血縁のメス間にも強力な親和関係が存在する可能性が高い。相互交渉の項で述べたように、オトナメス間で allomothering がさかんにみとめられることも、この可能性の裏付けとなるだろう。Hrdy(1977)によれば、コロブスの1種ハヌマンランゲールでは複雄群の場合にくらべてメス間の攻撃的相互交渉が少ないという。このようなメス間の結びつきは、単雄群で一般的に認められる群れ外オスによる群れののつとりと深く関わっているだろう。単雄群におけるオスの群れ滞在期間は長くても数年間である。このように流れていくオスがメスたちとの間に親密な関わりを持つことはむずかしい。複雄群を持つニホンザルやサバンナヒビが特定のオスとメスとの間で何年にもわたって親密な関係を保つこと(Smuts, 1985;Takahata, 1982)とは対照的に、単雄群のメスたちはオスの関与を排除したメスだけのまとまりを発達させたのである。

のつとりの後に新しいオスは前にいたオスが残した子どもを集中的に攻撃し死に至らせることも多い。このような子殺しは、単雄群を形成するグエノン類(Struhsaker, 1977;Btynski, 1982) やコロブス類(Sugiyama, 1964; Rudran, 1973) に広く認められる。この「極端」ともいえるオスの繁殖戦略によるリスクをできるだけ小さくするために、メスたちの団結は重要となる。ここに競争の原理とは異なる原理に裏づけされた非血縁メス間の結び付きができる下地は十分にある。

このような結びつきは、複雄群で認められるような近接や音声を介した漠としたものとは異なると予想できるが、これを裏づけるためには、単雄群のメス間関係についての長期にわたる詳細な研究が必要である。

3. まとめ

メスの親和的行動のパターンは、社会構造と密接にむすびつくものであることがわかった。Allomothering、グ

ルーミング、攻撃における協同などさまざまな行動で、高順位指向性の有無に関し共通した傾向が認められた。そして、社会構造の違いとは、端的に言うとおスとメスグループとの関わり方であり、オスがメス同士の結びつきに直接関与するか否かの違いであることがわかった。

文献

Btynski, T.M., 1982. Harem-male replacement and infanticide in the blue monkey (*Cercopithecus mitis stuhlmanni*) in the Kibale Forest, Uganda. *Am. J. Primatol.*, 3:1-22.

Cheney, D.L., 1977. The acquisition of rank and the development of reciprocal alliances among free-ranging immature baboons. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 2:303-318.

Cords, M., 1986. Forest guenons and patas monkeys: Male-male competition in one-male group. In Smuts, B. B., et al., eds., *Primate Societies*, pp. 98-111. The university of Chicago Press, Chicago.

Datta, S. B., 1983a. Relative power and the acquisition of rank. In Hinde, R. A., ed., *Primate Social Relationships*, pp. 93-102. Blackwell Sci. Publ., Boston.

Datta, S. B., 1983b. Relative power and the maintenance of dominance. In Hinde, R. A., ed., *Primate Social Relationships*, pp. 103-111. Blackwell Sci. Publ., Boston.

Dunbar, R.I.M., 1980. Determinants and evolutionary consequences of dominance among female gelada baboons. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 7:253-265.

Fairbanks, L.A., 1980. Relationships among adult females in captive vervet monkeys: testing a model of rank-related attractiveness. *Anim. Behav.*, 28:853-859.

Furuichi, T., 1983. Interindividual distance and influence of dominance on feeding in a natural Japanese macaques. *Primates*, 24:445-455.

Goodall, J., 1986. *The Chimpanzees of Gombe-Patterns of Behaviors*. Harvard University Press, Cambridge, 673pp.

Grewal, B. S., 1980. Social relationships between adult central males and kinship groups of Japanese monkey at Arashiyama with

- some aspects of troop organization. *Primates*, 21:161-180.
- Horrocks, J., & W. Hunte, 1983. Maternal rank and offspring rank in vervet monkeys: an appraisal of the mechanisms of rank acquisition. *Anim. Behav.*, 31:752-782.
- Hrdy, S. B., 1976. Care and exploitation of nonhuman primate infants by conspecifics other than the mother. *Advance in the Study of Behavior*, 6:101-158.
- Hrdy, S. B., 1977. The langurs of Abu. Harvard Univ. Press, Cambridge, Massachusetts.
- Hrdy, S. B., 1981. The Woman That Never Evolved. Harvard Univ. Press, Cambridge, Massachusetts.
- Kohda, M., 1985. Allomothering behavior of New and Old World monkeys. *Primates*, 26:28-44.
- Koyama, N., 1967. On dominance rank and kinship of a wild Japanese monkey troop in Arashiyama. *Primates*, 8:189-216.
- 宮藤浩子, 1984. 幸島ニホンザル群の新群形成過程における社会関係の動態—「働きかけ」と印象づけ行動について—。人類学雑誌, 92:253-271.
- 宮藤浩子, 1987. 幸島ニホンザル小群の遊動と社会構造. 第34回日本生態学会講演要旨集, pp. 165.
- Kudo, H., 1991. Social behavior of nulliparous Japanese monkeys in Koshima. In Ehara, A. et al., eds. *Primateology today*, pp. 155-158. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Kudo-Hirotani, H., S., Lowen & R. I. M., Dunbar, submitted. Neocortex size and social network size in primates, *Behaviour*.
- Kummer, H., 1978. On the value of social relationships to non-human primates; a heuristic scheme. *Soc. Sci. Inform.*, 17:687-705.
- Mitani, M., 1986. Voiceprint identification and its application to sociological studies of wild Japanese monkeys (*Macaca fuscata yakui*). *Primates*, 26:397-412.
- Mori, A., 1977. Intra-troop spacing mechanism of the wild Japanese monkeys of the Koshima troop. *Primate*, 18:331-357.
- 森梅代・宮藤浩子, 1986. ニホンザルメスの社会的発達と社会関係. 192pp. 東海大学出版会, 東京.
- Nakagawa, N., 1992. Distribution of affiliative behaviors among adult females within a group of wild patas monkeys in a nonmating, nonbirth season. *Int. J. Primatol.*, 13:73-96.
- Netto, W. J., & J. A. R. A. M. van Hoof, 1986. Conflict interference and the development of dominance relationships in immature *Macaca fascicularis*. In Else, J. G. et al., eds., *Primate Ontogeny, Cognition and Social Behaviour*, pp. 291-300. Cambridge Univ. Press, New York.
- Pereira, M. E., 1989. Agonistic interaction of juvenile savanna baboons II. Agonistic support and rank acquisition. *Ethology*, 80:152-171.
- Rudran, R., 1973. Adult male replacement in one-male troops of purple-faced langurs (*Presbytis senex senex*) and its effect on population structure. *Folia Primatol.*, 19:166-192.
- Seyfarth, R. M., 1980. The distribution of grooming and related behaviors among adult female vervet monkeys. *Anim. Behav.* 28:798-813.
- , 1983. Grooming and social competition in primates. In Hinde, R. A., ed., *Primate Social Relationships*, pp. 182-189. Blackwell Sci. Publ., Boston.
- Silk, J. B., S. A., Samuels & P. S. Rodman, 1981. The influence of kinship, rank and sex on affiliation and aggression between adult female and immature bonnet macaques (*Macaca radiata*). *Behaviour*, 78:111-137.
- Small, M. F., ed., 1984. *Female Primates: Studies by Women Primatologists*. Alan R. Liss, New York.
- Smuts, B. B., 1985. *Sex and Friendship in Baboons*. 303pp. Aldine, New York.
- Stammbach, E., 1978. On social differentiation in groups of captive female hamadryas baboons. *Behaviour*, 67:322-338.
- Struhsaker, T. T., 1977. Infanticide and social organization in the redbellied monkey (*Cercopithecus ascanius schmidtii*) in the Kibale Forest, Uganda. *Z. Tierpsychol.*, 45:75-84.
- Struhsaker, T. T., & L. Leland, 1986. Colobines: Infanticide by adult males. In Smuts, B. B., et al., eds., *Primate Societies*, pp. 83-97. The University of Chicago Press, Chicago.
- Sugiyama, Y., 1964. Group composition, population density and some sociological observations of hanuman langurs (*Presbytis entellus*). *Primates*, 5:7-38.
- Takahata, Y., 1982. Social relations between adult males and females of Japanese monkeys in the Arashiyama B troop. *Primates*, 23:1-23.
- de Waal, F. B. M., J. A. R. A. M. van Hoof & W. J. Netto, 1976. An ethological analysis of types of agonistic interaction in a captive group of Java-monkeys (*Macaca fascicularis*). *Primates*, 17:257-290.
- Wasser, S. K., 1983. Reproductive competition and cooperation among female yellow baboons. In Wasser, S. K., ed., *Social Behavior of Female Vertebrates*, pp. 349-390. Academic Press, New York.

摘要

広谷浩子, 1998. 霊長類におけるメスの親和関係—社会構造とのかかわりを中心に—. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 27:63-66. (Hiroko KUDO-HIROTANI, 1998. Affiliative relationships among female primates in relation to the social structure.

Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.), 27:63-66.

霊長類におけるメスの親和関係を以下の2つのステップにより概観した。第1は、非血縁メス間のさまざまな相互交渉の様相を社会構造ごとに比較することである。第2は、グルーミングネットワークのパターンをさまざまな種で比較することである。第1の分析から、非血縁メス間の親和的相互交渉に共通するものとして、高順位指向性が明らかになった。この傾向は特に母系の複雄群を持つ種において顕著であった。第2の分析から、メスのネットワークのパターンにオスを仲立ちとして付き合いの輪を広げる型 (S型) とメスのみで安定したグループをつくる型 (C型) との2種類があることがわかった。S型は複雄群をつくる種に、C型は単雄群をつくる種に広くみとめられた。以上2段階の分析の結果を相互に関連づけながら、社会構造の多様性がメス間関係にどのように反映されているかについて考察した。

(受付: 1997年11月30日, 受理: 1998年1月21日)

論 説

生命の星・地球博物館情報システムについて

Museum Information System
in Kanagawa Prefectural Museum of Natural History勝山輝男・鈴木智明
神奈川県立生命の星・地球博物館

Teruo Katsuyama & Tomoaki Suzuki

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract : A museum information system in Kanagawa Prefectural Museum of Natural History started to work since 1995. In this paper we report an outline of the system and a consideration of its performance. The system is client-server system in which IMFORMIX is used as a database management system. The system consists of the collection management system and the exhibition system. The former system serves management of the museum collection, and the database is divided into 18 categories. Now, 230,000 specimens that are 58% of all collection has been registered. The latter system serves information of natural history of Kanagawa prefecture for visitor by computer. There are 5 menus consist of flowering plant, moss, butterfly, dragonfly and fish. After this we are planning to serve information stored up this system directly by Internet.

Key Words : Museum Information System, Database, Collection

はじめに

コンピュータの発達に伴い、それまでカードで行なってきた博物館の収蔵資料の管理は、コンピュータのデータベースに置き換えられつつある。データベース化することにより、より効率的に資料の受入や目録作成を行なうことができ、研究者や一般市民への情報提供にも様々な可能性が出てきた。

現在、多くの博物館で収蔵資料のデータベース化が進められ、また全国科学博物館協議会においてもデータベースの標準化を進めていると聞くが、これらの動きは博物館資料に関する情報をより有効に活用するシステムの必要性を皆が感じているからであろう。

神奈川県立博物館の再編整備にあたっても、コンピュータにより博物館のもつ様々な情報を効果的に活用するための博物館情報システムが導入された。導入後、3年がたち、それなりの成果のあった部分もあるが、いくつかの問題点も明らかになった。自然系博物館で規模の大きいシステムは兵庫県（西井, 1995）や千葉県（望月他, 1993）など、まだ数えるほどしか構築されていない。神奈川県立生命の星・地球博物館の情報システムについても開発業者側からの報告（西本 他, 1995）はあるが、今回、博物館側、特に開発から係わってきた担当者の視点から問題点を整理し、今後のシステム構築、資料管理の叩き台としたい。

なおこの博物館情報システムは、神奈川県立歴史博物館のシステムと共通のものとして開発したが、ここでは自然系の部分のみ取り扱った。

1. 何を目指したか（システム開発の目的）

(1) システム開発の背景

当館は、1967年に開館した「神奈川県立博物館」の自然系部門を独立・再編し、1995年に小田原市入生田にオープンした自然系博物館である。再編に当たり新しい博物館に求められたものは30年前に「神奈川県立博物館」が開館した時とは大きく変っている。1988年12月に出された「神奈川県立博物館整備構想懇談会」での提言の中で新しい博物館の姿が述べられているが、そこには「ネットワーク」「情報センター」「新しい形態の資料等の収集・保存と活用」といった、高度情報化時代を反映した文言が見られる。

この提言を受けて、新しい自然系博物館の整備計画、展示計画、情報計画⁽¹⁾が策定された。

また、1989年3月には、「博物館高度映像情報システ

註1：この1990年3月に策定された博物館総合情報システム整備計画では、博物館情報システムのほかに、コンピュータによるインフォメーションシステムや展示室やライブラリでの映像システム、展示場での展示解説システムなど6つのシステムより構成されていた。

ム研究報告」(神奈川県教育委員会, 1989)として、博物館におけるニューメディアの方向性についての研究成果が発表された。

そのような新しい博物館を実現するために展示などにも最新の映像機器等が使われているが、それとは別に博物館の重要な機能である、収蔵資料の収集・管理、研究、普及などを支援するために博物館情報システムが求められた。

図書に比べて博物館資料のコンピュータ利用は著しく遅れ、やっと徳島県立博物館や千葉県立中央博物館で収蔵資料管理システムが動きはじめていたにすぎない。神奈川県立博物館でも学芸員が個人的にパソコンを持ち込み、資料管理に利用する者もいた。

1988年に編纂された神奈川県植物誌ではデータ処理にパソコンが利用され、県内産の約2,800種類の植物の分布図が出力され、1,500ページに及ぶ冊子がDTPソフトを使って版下作成された(神奈川県植物誌調査会編, 1988)。1990年からは神奈川県植物誌調査会が中心になり、神奈川県産植物標本のデータベース化が始まった。まず、神奈川県立博物館に収められた神奈川県植物誌の証拠標本、約8万点のデータ入力が行われた(勝山, 1991a, b)。このデータベースは神奈川県立博物館の収蔵資料のデータベース化としては初めての本格的なものであった。既存の標本データを入れるだけでなく、新たに受入れる標本データの追加や、同定が変更されたものの訂正など、標本管理そのものがパソコン上で自作のアプリケーションを利用して運用された。入力システムでは和名から学名を、地名から国土基本メッシュの3次メッシュコードを参照する機能などがあり、現在の収蔵資料管理システムの入力系のもとになるものであった。

(2) システムに求めたもの

当館の場合、展示されている資料、約1万点に比べ、収蔵庫等に格納されている資料は40万点以上である。この膨大な資料を整理し、誰もが利用できる状態にすることは並大抵のことではない。今までは図録や目録などを作成し対応してきたが、増加分に対応することはできない。資料データをコンピュータのデータベースに入力しておけば、常に新しい資料が追加された形で目録や図録に

相当するものを提供できる。印刷物とは異なり、さまざまな条件で集めたり、並べ替えたりすることも可能である。神奈川県植物誌調査会の試みのように、標本データをもとに、ある生物の分布図を作成させることも可能である。

博物館のシステムの難しいところは、単に資料管理や目録作成のためのシステムだけではなく、一般利用者が楽しめるものまで要求されてしまうことである。

そこで、注目されるのが資料の画像データである。コンピュータの画像処理技術の進歩には目覚ましいものがある。その利用という点で、多くのコンピュータ関係者が博物館の資料の画像に期待した。資料の画像をデータベースに取り込めば、収蔵庫に保管されている資料を一般来観者に提供することも可能になる。属性データをもとに検索をすれば、見たい資料が座ったまま、さまざまな切り口で見ることが可能である。

美しい鉱物、珍しい化石、美しい昆虫の標本など、いわゆる見栄えのする資料は、誰が見てもそれなりに納得する。しかし、博物館に保管されている資料のすべてが、見栄えのする資料とは限らない。植物のさく葉標本、成分を分析するための岩石資料、小さなガやハエの標本などの画像を見て喜ぶ人がどのくらいいるだろうか?しかも、このような見栄えのしない資料の数の方がはるかに多い。

資料の属性データは、その資料のカードまたはラベルに書かれているものである。したがって、データベースから目的のものを見出すには正確な種名くらいは知っていないとほとんど検索できない。全ての資料を一覧表示し、その中から選ぶには博物館資料の数は多すぎる。したがって、見栄えのする標本の画像に行き着く一般利用者はきわめて少ないと予想される。

一般利用者が求めている情報は何なのであろうか。個々の標本のデータが見たいわけではないであろう。ヤマユリの標本は約100点収蔵されているが、それぞれの標本の採集地、採集年月日、採集者について知りたいのではなく、ヤマユリとはどのような植物で、どこに生えているのかといった、その種類に関する情報が知りたいのではないか。もちろん、標本データを丹念に見れば、いつどこで見られるかなどはわかる。しかし、それが目的ならば、もっと違ったものを提供するべきである。

博物館が自然誌資料を収集保管する目的も、その種類

表1. 博物館情報システム開発スケジュール

年度	区分	作業内容	備考
1989年度 1991年度	調査研究	・業務分析 ・システムの基本的機能検討	
1992年度	調査設計	・システムの詳細機能検討 ・LAN及びネットワークの検討 ・開発工数及び開発経費の検討 ・ハード構成、導入ソフトの検討	
1993年度	開発	・システム設計	
1994年度		・プログラミング作成 ・テスト	一部
1995年度以降	稼動		一部

表 2. 博物館を支える 4 つの機能と、それを実現するための 8 つのサブシステム

4 つの機能	8 つのサブシステム	概 要	備 考
データバンク	収蔵資料管理システム	膨大な収蔵資料に関する情報を一元管理し、有効活用するための基幹システム。	稼動
研究支援	自然環境システム	分布図の作成や地図との重ね合わせ処理・統計処理などを行い、自然環境の変遷等を明確にする。	パッケージ(MINELAS)のみ稼動
	展示(共生)支援システム	衛星画像の処理を行い、研究活動や共生展示室で活用する。	パッケージ(EX-PIA)のみ稼動
	景観情報システム	自然や都市の景観の変化を予測し、CGにより提供する。	未稼動
情報発信	展示情報システム	ミュージアムライブラリで、検索システムにより、研究に基づく博物館独自の情報を分かりやすく提供する。	稼動
	企画普及広報システム	パソコン通信等により博物館が持つ各種情報を外部へ提供し、開かれた博物館を実現する。	ホームページにより対応
運営管理	図書文献管理システム	博物館が保有する単行書や逐次刊行物、図録・目録などをデータベース化する。	未稼動
	運営管理システム	入館者数や入館料収入、備品の管理やスケジュール管理など博物館運営・管理業務を支援する。	未稼動

に関する情報が欲しいからである。個体（標本）のデータをもとに、種類に関して記述し、それを集めてその地域の生物誌を纏める。地方博物館であればその地方の生物誌を纏める。そのためにその地域の自然誌資料を収集保管する。

したがって、自然系の博物館情報システムが一般利用者に提供するものは、コンピュータによる神奈川県の実地調査の編纂ということに帰結する。神奈川県に生息する動物や植物の生態写真、分布状況が一目でわかる分布図、鳥ならば鳴き声、その種類に関する研究成果などの参考情報、神奈川の自然に関する文献情報などである。これらをさまざまな切り口で提供する。

そのためには収蔵資料をもとに生物目録を作成したり、標本の採集地データをもとに分布図を作成したり、地域の自然の状況を把握するために衛星画像を処理したりするシステムが必要になる。

このように博物館情報システムには収蔵資料に関する情報を集め、それを加工して電子版生物誌として提供するトータルなシステムが要求される。

2. 業者選定と開発のすすめ方

開発のスケジュールは、表 1 の通りである。1991年までは、調査研究として大まかな概要の検討を行った。本格的な開発が開始されたのが、1992年からである。夏に開発業者を決定し、秋からシステムの基本的な機能やハード、ソフトの検討、及び開発工数や経費等の検討が始まった。開発業者の選定は、「博物館情報システム（仮称）技術提案与件」に基づいて 8 社よりプロポーザルを受け、「博物館情報システム（仮称）設計開発委託業者選定委員会」（委員長：神奈川県教育長）により、富士通株式会社決定した。

当初、富士通からは兵庫県立人と自然の博物館のシステムをモデルとして考えられた 8 つのサブシステムが提示され、これをたたき台としてシステム設計が始まった。設計の途中で、メインフレームからクライアント・サーバーシステムへのダウンサイジングが行われ、館側からの要求が具体化するにつれて、サブシステムの個々の内容は兵庫県のものとは相当に異なるものになっていった。

1993年にシステム設計、1994年にはプログラム作成・テストを行った。ただし、1994年度の作業については厳しい財政状況のため、開発は収蔵資料管理システムと展示情報システムのみに縮小された。

システム構築に当たっては、富士通が開発したシステム開発作業手順、SDEM 90 (System Development Engineering Methodology 90) をもとに作業が進められた。

仕様の作成については、担当の事務職員 2 人と学芸員 4 人、富士通の SE からなるワーキンググループで概案をまとめ、データベースの項目など個々の分野に関わる点については、その都度、該当分野の学芸員を含めて随時検討を行った。

3. システムの概要

博物館情報システムは、収蔵資料に関する情報をはじめとして、画像情報や分布図等の地図情報、学芸員による研究の成果など、博物館に蓄積されている膨大な量の知的情報を一元管理し、提供する事により、博物館はもちろん、他の利用者や外部機関における効率的・多面的な利用を可能とし、博物館活動のプラットフォームとして博物館の活性化、生涯学習時代における学習支援、研究活動の高度化等を推進することを目的として構築された。

システムは当初、前記の機能を支援する 8 つのサブシステムより構成されていたが（表 2）、景観情報システムについては検討段階で取り下げ、事実上、以下の 7 つのサブシステムが設計された。なお、現状では財政的な理由により収蔵資料管理システムと展示情報システムのみが稼動している。

(1) 収蔵資料管理システム

博物館情報システムの中核となるサブシステムである。収蔵資料に関する属性情報や画像情報を管理する。基本的には館内の業務支援システムであるが、収蔵資料簡易検索により、一部ではあるが来観者にも開放されている。

(2) 展示情報システム

収蔵資料管理システムが目録・図録のデジタル版であるなら、展示情報システムは図鑑のデジタル版と言える。ここでは神奈川に生息する動植物について解説、画像、

分布図、鳴き声などを提供している。運用システムにより、解説文や検索のためのデータを学芸員が直に入力することもできる。

（３）自然環境情報システム

収蔵資料管理システムには、位置情報も登録されている。この位置情報を有効に活用するために、これをもとにした分布図を作成するシステムが自然環境情報システムである。分布図は年々変化する自然に関する情報を分かりやすく提供する有効な手段である。ここで作成された分布情報は、研究活動はもとより、展示情報システムなどでも活用される。予算上の制約から、研究用ワークステーション上で、地図作成ソフト MINELAS（富士通エフ・アイ・ピー株式会社）がスタンドアローンで動いている。

（４）展示（共生）支援システム

当館の常設展示室は４つのテーマに別れているが、そのうちの 하나가共生展示室である。ここでは、環境をキーワードに人類と自然との共生をテーマにした展示を行っている。なかでも自然の変遷について、衛星画像で経年変化を追うことにより、人間が自然に及ぼす影響をビジュアルに示している。この衛星画像の作成を行っているのが展示（共生）支援システムである。予算上の制約から、研究用ワークステーション上で、衛星画像処理ソフト EXPJA/S（富士通エフ・アイ・ピー株式会社）がスタンドアローンで動いている。

（５）企画普及広報システム

パソコン通信により、博物館にある様々な情報をほかの博物館や研究機関、学校、個人等に提供したり、利用者間で自然に関する情報交換の場を提供することで、自発的な学習活動を支援する。また、博物館の広報活動に伴う文書発送業務の支援や、利用者のニーズを把握するためのレファレンスやアンケートの集計支援も行う。

当初は自前のパソコンセンターを持つ予定だったが、その他の機能も含め、予算上の制約から開発を断念した。しかし、インターネットを利用したホームページ（www.city.odawara.kanagawa.jp/museum/g.html）を開設したことにより、外部への情報提供が可能となり、その一部が実現されている。

（６）運営管理システム

入館者数や入館料収入、備品の管理や職員や会議室のスケジュール管理など博物館の運営、管理業務を支援する。予算上の制約から開発を断念し、一部、市販の OA ソフトで対応している。

（７）図書文献管理システム

博物館が保有する単行書、逐次刊行物、図録・目録、ビデオや CD-ROM などの図書情報をデータベース化することにより、来観者に対して図書文献の利用と情報の提供を推進し、同時に学芸員の研究活動を支援する。予算上の制約から開発を断念したが、市販のデータベー

表 3. データベース構造

			詳細データベース	備 考
受入データベース	資料管理データベース	共通データベース	維管束(NA)	
			コケ・地衣類(NB)	
			菌類(NC)	
			海藻類(ND)	
			植物・その他(NE)	
			脊椎動物(NF)	魚類を除く
			軟体動物(NG)	
			甲殻類(NH)	
			魚類標本(NI)	
			動物・その他(NJ)	
			昆虫(NK)	
			岩石(NL)	
			鉱物(NM)	
			化石(NN)	
			地質・ボーリング資料(NO)	
			地学・その他(NP)	
			その他(NQ)	
			魚類写真(NR)	
			館外維管束(NS)	
			館外魚類標本(NT)	
			館外菌類(NU)	
			館外昆虫(NV)	

スソフトによりデータの入力を行っている。

4. 収蔵資料管理システムの機能とその評価

（１）システムの概要

収蔵資料管理システムでは、資料1点毎の属性情報と画像情報を管理すると同時に、資料の受入に関する情報—例えば、購入資料ならば購入先や金額など—も管理する。

データベースは植物分野、動物分野、地学分野と魚類写真データベース⁽²⁾がある。動物、植物、古生物などは更に細かく分け、18の分野毎に作られた（表3）。資料番号や採集地など各分野に共通する項目からなる共通データベースと、どこに格納されているかなど管理上必要な項目からなる資料管理データベース、そして分野ごとに固有な項目から構成されている詳細データベースからなる。詳細データベースは標本の形態や管理の方法で細分化したが、それでもデータ項目にあわない資料が入ることが予想される。特に展示物には標本とは異なった形態のものがある。このような資料のデータを格納するために資料番号、資料名、備考からなる「その他のデータベース」を設けた。

他館に収蔵されている資料のデータを格納するデータベースも用意した。現在、博物館資料のデータベース化は個々の館でバラバラに行われている。今後は各館で整備されたデータの共有化が課題となる。図書館情報のようにオンラインで結ぶにはデータベース項目の標準化が行われなければならない。しかし、博物館の場合、データベースの作成がさまざまな分野にまたがり、その構築

註2：魚類写真データベースとは、実物資料ではなく、ダイバーなどが保有する魚類写真を収集し、その画像情報や撮影場所などの属性情報をデータベース化し、色彩や形態などの分類学的研究、分布域などの生物地理学的研究、出現時期や行動などの生態学的研究への活用を可能とするものである。

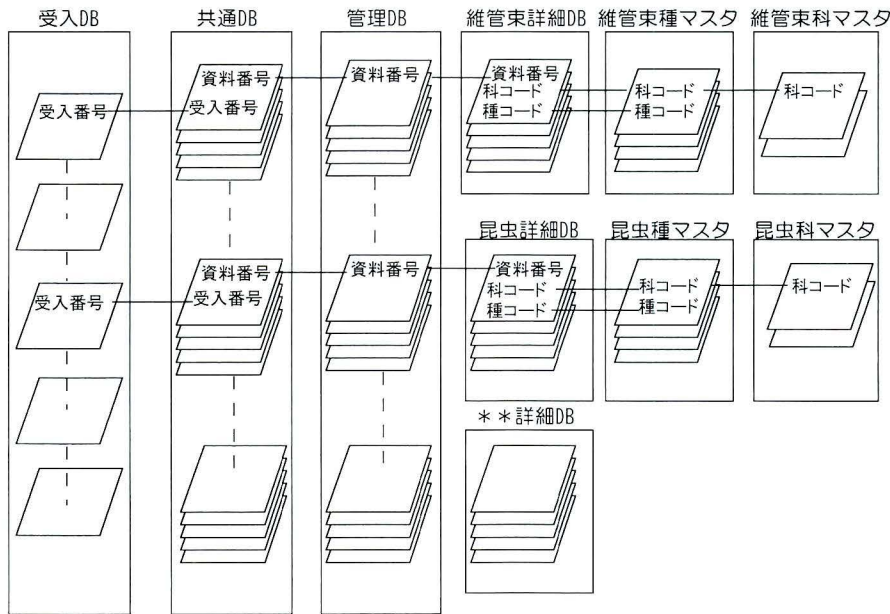


図1. データベース構造.

のコンセプトも異なることが多く、オンラインでの共有化はすぐには困難な状況である。当面は中間定義ファイルを通じて、他館のデータを自館のデータベースに取り込んで利用することになる。館外データベースの利用希望のあった4分野について、その受皿として館外データベースを用意した。すでに、維管束植物分野では神奈川県植物誌調査会の協力で、神奈川県産植物の標本データベースを当館、横須賀市自然博物館、平塚市博物館、川崎市青少年科学館、横浜こども植物園、厚木市博物館(準備室)、相模原市博物館と共同で構築し、標本にもとづく分布図を作成する計画が実行されつつある。

また、科・種に関する和名や学名などの情報は別にテーブルを作り(科マスタ、種マスタ)、詳細データベースにはそのコードのみが記される。このことにより、和名や学名等に変更があった場合、該当する資料全ての和名や学名等を訂正する必要はなく、マスタの方のみを訂正すれば良い。

資料番号は9桁の英数字から構成され、最初の2桁はDB項目を表し⁽³⁾、3桁目は英数字、4桁以降は数字のみとし、番号の付け方は自動採番ではなく、担当者が任意の番号を付与する⁽⁴⁾。

画像については1つの資料につき26点の画像を作成することが出来る。画像番号は、資料番号にAからZまでの枝番を付与した10桁の英数字からなるユニークな番号となる。

データの登録から活用までの作業手順は以下のようになる。

註3：1桁目の「N」は、Naturalの「N」である。これは、同じ神奈川県立の博物館である神奈川県立歴史博物館(Kanagawa Prefectural Museum of Cultural History)の「C」(Culture)と区別するものである。

註4：当館のacronymは「KPM」であり、資料番号は正確には「KPM-NA0000001」(例)となる。

- 受入する資料情報の鑑とも言うべき受入情報の登録。
- 資料情報の入力。同時に資料ラベルの出力も可。
- 必要とあれば画像情報の入力。
- 印刷出力、またはダウンロードによる出力。

システム利用者⁽⁵⁾にはIDとパスワードを付与する。利用者は収蔵資料管理システムを起動する際に、このIDとパスワードを入力する。この事によりシステムが利用者を判断し、利用の制限-検索は可だがデータの更新は不可などを行う。

(2) 受入情報の作成

コレクションなどの一連の資料を扱うために、各資料の属性情報(共通データベース+管理データベース+詳細データベース)の表紙にあたるものを受入情報とし、別データベースとして作成した。1個の受入情報に大量の資料が含まれる場合もあるし、1個の受入情報に1個の資料しか含まれない場合もある。受入情報と個々の資料情報は受入番号でリンクさせる(図1)。

資料情報から受入情報を参照するだけならば、資料情報側にその属す受入情報の受入番号を入れておけば良い。しかし、受入情報側から、その下にある資料情報を参照するためには、共通データベースから、その受入番号を持つレコードを検索しなければならない。レスポンスや資料点数の整合性を保つために、受入データベース側に資料番号を連番で確保することにした。そのため、受入情報に資料番号を確保しない限り、個々の属性情報は入力できないようになってしまった。

受入番号はシステムで自動採番されるが、資料番号は担当者が任意に資料数にあわせて何番～何番までのように連番で確保する。資料番号が不確定な場合を想定し、

註5：学芸員以外にも、非常勤職員やボランティア等の収蔵資料管理システムの利用者には、IDとパスワードを付与している。

図2. 受入情報詳細画面。

図3. 属性情報画面（維管束データベース）。

図4. 管理情報詳細画面（維管束データベース）。

連番を5ブロックに分けられるようにし、追加して資料番号が確保できるようにした（図2）。また、入力された受入情報から資料収集のための選定会議（資料収集会議）のレジメが出力できるようにして、受入情報の入力が無駄にならないように工夫した。

受入データベースの考え方は資料収集の流れとも一致し、良い方法であった。しかし、受入情報作成時に資料番号を確保しなければならない仕組みは不便だ。そのメリット、デメリットを検討し、改善の余地があると考えた。

（3）属性情報の入力

属性情報の入力方法は、収蔵資料管理システムの画面上から資料1点毎のデータを入力する方法と、EXCELやACCESS（共にマイクロソフト株式会社）など市販のアプリケーションソフトで作成されたデータを一括でサーバに登録する方法とがある。

収蔵資料管理システムの画面上からの入力では、データの整合性—資料番号が重複していないか、データの桁や文字種は正しいか等—をシステムが自動にチェックする。また、科や種などの情報は、種の和名を入力するだけで、それ以外の情報、科コード・種コード、科の和名や学名、種の学名などが自動で入力されるので便利である。また、入力と同時にラベルを印刷することができ、標本作成の省力化になる。

このようなデータ入力支援のための機能をいくつか用意している。例えば、システム画面は基本的に1資料1画面であり、採集日、採集者が同じで資料の名前だけが違うような場合も1件毎入力する必要がある。このような場合に入力作業の負担を減らす方法として、前の情報を「残す」「残さない」の選択を可能とした。また、入力する項目も（デフォルトでは全項目だが）選択することが出来る。よって、前記のように資料の名前だけが違うような場合は、「前の情報を残す」を選択し、入力項目を「種の和名」のみにすれば、入力の手間が簡単になり、且つ、データの整合性も自動にチェックされる。また、入力するデータが同じ物が多い場合、そのデータをデフォルトで設定することも出来る。勿論変更は随時可能である。

既にデジタル化されたデータを登録する時などのために、データの一括サーバ登録という機能がある。これはパソコンのデータベースソフト、表計算ソフト、ワープロソフトで作られたデータを「中間ファイル」と呼んでいる定義に沿ってセパレータ文字で区切って出力し、そのデータをシステム管理者がサーバへ一括登録する。登録時には画面からの入力の場合と同様に、データの整合性等をチェックし、不良データは登録されずにエラーファイルに出力される。

データの削除は資料番号単位ごとに行われる。通常の画面からは論理削除⁽⁶⁾のみで物理削除⁽⁷⁾はシステム管理者が行う。

実際、運用してみて感じたことは、入力作業をスムーズに行うにはスピードや使い勝手が非常に重要なことである。いくら画面設計がすばらしくても、登録や検索のスピードが遅かったり、使い勝手が悪ければそのシステムは使われなくなる。入力に関しても、開発準備期間での既存データの入力時に、実際に運用されるシステムと同じレイアウト、同じソフトのプロトタイプを作成し、入力の効率以外にも使い勝手等のチェックを行うべきであった。

（4）マスターの作成と管理

コード化できる項目はコード値とその翻訳値からなる

註6：データを本当に削除するのではなく、削除フラグを立てることにより、見かけ上削除したようにすること。

註7：データをデータベース上から本当に削除すること。

項目マスタを作り、データベースの簡素化と入力効率化をはかった。コード値はプルダウンメニューから選べるようになっている。コードマスタの翻訳値や初期値は項目マスタで管理し、原則としてシステム管理者が変更するものとした。国名や県名はコードを入力すると和文と英文の翻訳値を入力でき便利である。

生物種については科マスタと種マスタを作成した。科マスタは科コード、科の和名、科の学名からなる。種マスタは科コード、種コード、種の和名、種の学名からなる。種の学名は属名、種名、種以下の分類群（変種名など）を分けるか、議論があったが、学名1項目のみとした。科の配列はそれぞれの分類群で、もっともよく使われているものを選んで、コードづけをした。1つの科のなかの種の配列は学名のアルファベット順である。

標本の属性データ入力時に和名を入力すると、科コード、科の和名と学名、種コード、種の学名を表示し、データベースには科コードと種コードのみを記録する。コード化することにより、学名入力の手間をはぶくと同時に、学名スペルの入力ミスを防ぎ、和名と学名を1対1に対応させることができる。

科コード、種コードの値は出力の際の並び順にも利用されている。したがって、学名が変更されて並び順に変更が生じた場合は、学名とともにコード値も変えることになる。コード値が変更された場合は詳細データベースのコード値もあわせて変更しなければならないが、これはコード値を変更した際に自動的に行なわれる。科コードは4桁の数字、種コードは5桁の数字とした。生物種マスタの管理はその分野の学芸員にまかされている。

種マスタは和名をキーとして学名やコード値を呼び出している。そのために、和名がついているものは良いが、海外のもので和名がない場合には、カタカナ読みの和名をつけなくてはならず、ややめんどうである。和名のないものは学名をキーとして入力できるように工夫すべきであった。

維管束植物では神奈川県植物誌で用いた学名を基礎とし、その後、日本産植物全体に増補され、現在約7,600種の学名が登録されている。海藻は日本藻類学会が学名のデータベースを作成していたものの使用の許可を得た。その他の分類群は既存のリストや図鑑を参考にして作成した。

(5) 画像情報の入力

画像情報は、資料1点につき26画像登録できる。画像の入力方法は以下の4通りある。

- (a) 35mm ポジ・ネガからの入力
- (b) スキャナーによる入力（媒体：紙焼き写真等）
- (c) CCD カメラからの入力（媒体：実物資料。ただし大きさに制限あり）
- (d) パソコンからの登録（媒体：デジタルムービー、Photo-CD など）

画像データは、フル画像（640×640画素）とインデックス画像（208×208画素）の、約20分の1にJPEG圧縮された2種類が作成される。

ファイル名は、「NxxxxxxxAF.JPG」（フル画像の場合）、「NxxxxxxxAI.JPG」（インデックス画像の場合）といった「資料番号9桁+枝番1桁+フル画像かインデックス画像かを判断する記号1桁（FかI）+ .JPG」となる。

(a) から (c) については、画像入力ワークステーションからの入力となる。ここでは、資料をセットした後に、ワークステーションの画面上で必要なデータ（画像番号や画像媒体の属性など）を入力し登録を指示すると、自動的に2種類の画像データが作成される。

(d) については、あらかじめフル画像、インデックス画像2種類の画像をPhotoshop（アドビシステム株式会社）などの画像処理ソフトで作成し、そのデータをFTP等を使ってサーバへ登録する。

当初は、画像入力ワークステーションの入力のみを考えていたが、色の補正がうまく出来ないこと、博物館外で作成されたデジタルデータを取り込むことが出来ないこと、などからパソコンからの登録機能を作成した。

(6) データの出力等

データの検索は登録項目の全てから行うことが出来る。検索方法は、デフォルトでは「前方一致」で行うが、完全一致、後方一致、部分一致、範囲指定、NOT指定も可能である。

印刷は全データをカード形式で打ち出すものと、利用頻度が高いと想定される一部の項目について帳票として印刷するものを用意した。帳票印刷は採集地名や採集者名を和文で打ち出すものと、英文で打ち出すものの2通りを用意した。カード形式、帳票形式ともに資料番号順と分類順（生物種マスターのあるもの）で打ち出すことができる。

この他、標本に添付するラベルを随時印刷することが可能である。

いざ印刷してみると、その利用目的により、不要な項目が目立ったり、必要な項目がなかったりする。入力のフォーマットは1通りが良いが、出力はその利用目的により、必要な項目が異なる。したがって、ラベル印刷のような定型的な業務や、きわめて基本的な出力フォーマットのみシステムで用意し、他はダウンロードしたデータを表計算ソフトやデータベースソフトに読み込んで各自が作成することになる。

データのダウンロードは印刷の場合と同様に、全データをダウンロードするものと、一部の項目をダウンロードするものを用意した。一部のデータをダウンロードする場合は、印刷の場合と同様に、その利用目的により必要な項目が異なることが予想される。必要な項目を自由に設定してダウンロードするにはWINGZ-DataLink（株式会社アスキーサムシンググッド）やSequeLink（インターソルブ株式会社）のようなミドルウェアを利用する。

(7) 収蔵資料簡易検索

来観者向けに、ミュージアム・ライブラリにおいて、3台の端末で展示情報システムとともに「収蔵資料簡易検索」という名前で、収蔵資料データを公開している。ここでは検索項目を全てではなく代表的なものに絞り、

また希少種の採集地などの項目・データについては非公開としている。非公開の方法としては、a. 全ての資料について、任意の項目を非公開にする(例;金額欄などを全ての資料について非公開とする)、b. 任意の資料について、任意の項目を非公開にする(例;希少種についてのみ、採集地を非公開とする)、の2パターンが可能である。

収蔵資料管理システムはあくまでも博物館の業務支援システムであり、一般来観者用のものではない。たとえば、検索項目を代表的なものに限ったとしても、資料名(生物名)ぐらいは知っていないと、検索してデータを表示させることは難しい。また、データ数の多い維管束植物データベースで産地を「神奈川県」で検索すると約20万件のデータから10万件のデータを検索することになり、端末のコンピュータはしばらく止まった状態になってしまう。

オープン後の利用状況を見ると、多くの来観者が安易に収蔵資料簡易検索を選択し、途中であきらめてしまう。本当に収蔵資料情報を得たい人向けに、この収蔵資料簡易検索をメニューからなくすることはできないが、現在は次善の策として、学習支援メニューとして文献検索とともにメニューのキャラクターを小さくし、目的をもった来観者以外が選択しにくいようにしている。

(8) 既存資料のデータ整備

博物館におけるこのようなシステム構築でもっとも重要な事がデータの整備であろう。当システムの場合、約30年間に蓄積された40万点の資料データを登録する必要があった。

既存データの整備には2つのポイントがある。一つはデータ項目の円滑な移行であり、もう一つはデータの入力方法である。

再編整備前の博物館では、分野(学芸員)毎にカードや台帳、目録、パソコンなど自分達が使いやすい方法でデータを管理していた。資料番号の付け方もバラバラであり、なぜそのような番号の付け方をするのかは担当者に聞かなければ分からなかった。

当システムを構築するにあたって、まず博物館での資料番号の付与規約を作成し、統一した。しかし大量の標本に新たに資料番号を付け直すのは困難なので、それまで使っていた資料番号からでも検索できるよう「旧資料番号」欄を作り、今までの情報を無駄にせず、移行できる様工夫した。

維管束植物のデータはパソコンによって管理されており、当館の開館までの5年間で約17万件ある全標本のデータの登録が終わっていた。これらのデータはコンバートしてそのまま利用された。

カード、台帳、目録、ノートなどで管理されていた分野は、当初、システムのデータ項目に沿った入力指示票に書き写し、出来上がった指示票を業者に委託してデジタル化していた。しかし、前記の作業を開始したのが、まだシステム設計を行っている1993年であり、そのため指示票に記入している最中にも項目や項目の桁数などが随時変わっていった。また自然系の場合、似たようなデータが多いので、一々指示票に記入しデジタル化することは時間も掛かり、且つ不経済であった。そこで、数台の

パソコンを用意し、データベースソフトや表計算ソフトを使って簡単な入力システムを作成し、そこでデータ入力を行った。この方法により、桁数や項目の変更にも随時対応でき、同じ内容のデータもコピー&ペーストですばやく入力でき効率的であった。

台帳やカードを使わずに標本を管理していた分野では標本を直接見てデータを入力しなければならなかった。特に昆虫の場合、標本の下に隠れるような小さなラベルがつけられていたことから、標本箱から標本を取り出し、データを読み取らなければならなかった。昆虫標本の取り扱いに慣れているアマチュア昆虫愛好家に依頼して入力作業を行い、1年半ほどで約25,000件のデータ入力を行った。残念ながら、開館後は人件費が削られ、既存の昆虫データはその後の入力が進んでいない。数の多い昆虫データをどのように入力するかが今後の課題である。

また、開館準備中は、キノコや甲殻類は標本を取り出すことができず、開館準備期間のデータ入力はできなかった。

5. 展示情報システムの機能

(1) 神奈川の自然

収蔵資料管理システムとは別に一般利用者へ提供するシステムを、電子図鑑の機能をもつ電子版神奈川県自然誌を展示情報システムとして作成した。神奈川の植物、動物、地学などの自然誌に関して、常に最新の情報をビジュアルに提供するものである。

その種類の画像、音声、分布図、解説、その他の関連情報を提供する。雌雄の違いや夏型春型に対応するために、画像は1種類につき4点まで登録できる。鳥の鳴き声などの音声を登録することもできる。分布図は当初、収蔵資料管理システムに登録された標本の位置情報から、自然環境情報システムを使い自動作成して利用する予定になっていた。しかし、財政事情により自然環境情報システムが未完成のため、別の方法で画像データとして作成しなければならない。解説は200文字までだが、それを超えても、別の画面(参考情報画面)に続きを入力することが出来る。参考情報画面はテキストまたは画像を4画面まで登録でき、様々な要求にこたえられるようにした。

図鑑の使い勝手を残しつつ、コンピュータによる検索の良い点を取り入れたものを目指した。種類の配列は分類順とした。検索方法は種名リスト、インデックス画像、種名の入力、特徴による検索の4通りを用意した。

種名リストをスクロールさせて見たい種類を選ぶのは、目次から見たいページを探すのと同じである。インデックス画像は1画面に6画像を表示したもので、これを1ページ目からパラパラとめくって見れば、知識のない者でも一通り眺めることができる。種名リストとインデックス画像は常に切り替えることができる。

種名を入力すれば、その種の詳細画面が表示される。ここで「種名リスト」表示ボタンまたは「インデックス画像」表示ボタンを選択すれば、その種を含む一覧画面が表示される。これは図鑑で名前のわからない種類を調べる際によく行なう、似た種類で知っているものを索引で探し、その前後を調べる事と同じ手法である。

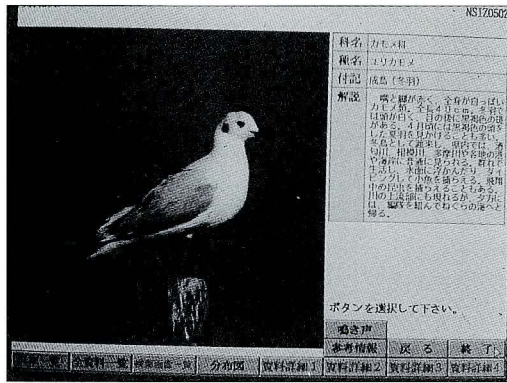


図5. 神奈川の鳥。

種名リスト、インデックス画像、種名の入力3つの機能を使えば、かなり情報量が多くても自由に検索することが可能である。しかし、種名の手がかりがまったくないときにはインデックス画像を順に見なければならぬ。このようなときのために特徴による検索を用意した。

植物であれば、葉の形、葉のつき方、花の色、花のつき方、花の大きさ、花の季節、果実のタイプなどの特徴を、メニューの中から選び、その条件にあったものを検索するものである。検索に使う特徴の項目はパスすることも、同じ検索項目の中で複数の条件を選ぶことも可能である。項目間はANDで、同一項目内で複数の条件を選んだものはORで検索する。条件にあったものが検索され、インデックス画像が表示される。必ずしも1種に絞られなくても良い。表示されたインデックス画像の中から目視により目的のものを選べばよい。

目的の種類を選んだ後は、分類順の種名リストやインデックス画像に切り替えることもできる。この機能により、特徴による検索でははじかれてしまった近縁種を見ることができる。

データ追加等も運用システムにより簡単に行うことが出来る。例えば種子植物は、これまでの調査で神奈川県に2,100種類ほどが知られている。しかし、調査が進めば増加する可能性もある。種類が増えたときには、写真、分布図、解説などは単にデータを追加することにより対応できる。特徴による検索も、検索項目や1つの検索項目中の条件を変えないでも良い場合は、その種類の特徴データを追加させるだけですむ。

増加した種類が多い場合には、特徴の検索項目中の条件を増加させたり、検索項目そのものを増加させる必要が生じることがある。この場合は単に増加した種類のデータを増やすだけでは対応ができない。特徴による検索項目、項目内の検索条件などもデータベースのテーブルとなっているので、項目データ、項目内の条件データを増加させて対応することになる。特に、項目データを増加させたときには、それに必要な検索条件のテーブルも作成しなければならない。しかし、これらもデータの変更であり、プログラムを大きく変更する必要はない。

このように検索項目や条件もデータベースのテーブルとしたため、メニュー追加もアプリケーションの大きな変更なしに行なえるようになった。開館当初に構築した

分野は種子植物、鳥類、昆虫のうちチョウとトンボの4分野だが、1年目に魚類、2年目にコケを追加することができた。今後もメニューを追加する予定である。

展示情報システムといえども蓄積性のあるものを作るべきである。主だった種類だけをとりあげ、追加・訂正のないシステムは構築されたその日から陳腐化が始まる。特に娯楽性だけを追求した内容のものにこの傾向が強い。博物館の調査研究活動による新しい知見を常に追加し、しだいに蓄積される内容の展示情報システムを目指してきた。特に分布情報については、収蔵資料管理システムに登録された標本の位置情報をもとに、常に最新の分布図を作成し提供することを計画していた。しかし、この部分は財政上の理由から開発できず、展示情報システムは当初の計画とは異なり、単独で動作するやや中途半端なものになってしまった。

各メニューの紹介を、ライブラリで提供している実メニューの解説文により紹介する。

神奈川の植物

『神奈川には約2,200種の種子植物が生息していますが、そのうちの約2,000種について画像と解説を紹介しています。神奈川県植物誌の配列順に並んでいます。一枚一枚めくってみることも、種名で検索して見ることも出来ます。また、約400種ある樹木については、葉の形や花の色などの特徴から検索することも出来ます。』

神奈川のチョウ

『この検索システムでは、数種の絶滅種などを含む神奈川のチョウ119種類の画像と解説を紹介しています。また、種名の分からないチョウの場合は、いくつかの条件を設定することにより、ある程度までの種名が分かるように工夫されています。』

神奈川のトンボ

『トンボは全国では約180種、神奈川では約80種生息しています。この検索システムでは、神奈川のトンボの解説と画像を見ることが出来ます。』

神奈川の鳥

『全国では、迷鳥も含めて約550種、神奈川では約330種の鳥の観察記録があります。この検索システムでは、その中から生息等が確認されている鳥215種の画像、解説、分布図を見ることが出来ます。また、92種の鳥については、鳴き声も聞く事が出来ます。』

相模湾の魚

『相模湾の代表的な海の魚約300種を体形や色、生息場所、生息状況などをたよりに検索することが出来ます。ある程度あいまいな記憶でもいくつかの種類に絞込むことが出来るように工夫されています。種類を特定するためには、写真と絵合わせしてください。』

神奈川のコケ

表 4：機器構成

場所	機器名	機種名 使用 OS・ソフト等	メモリ ディスク容量	数 量	備考
CPU ルーム	収蔵サーバ	富士通 S/4-1000 Solaris2.2・Informix5	128MB 25.2GB	1	収蔵資料情報の管理
	展示サーバ	富士通 S/4-1000 Solaris2.2・Informix5	64MB 4.2GB	1	展示検索情報の管理
	研究用ワークステーション	富士通 S/4-20 Solaris2.2・Informix5	96MB 18.9GB	1	衛星画像処理や分布図 の作成など
	職員用端末	富士通 FMV-590DE 他 Windows3.1・VisualBasic2	40MB 720MB	2	
ミュージアム・ライブラリ	来観者用端末	富士通 FMV-590DE Windows3.1・VisualBasic2	40MB 720MB	3	
	職員用端末	富士通 FMV-590DE Windows3.1・VisualBasic2	40MB 720MB	1	
研究室他バックヤード	職員用端末	富士通 FMV-5133DE3 他 Windows3.1・VisualBasic2	48MB 1.2GB	11	
試料分析室	画像入力用 ワークステーション	富士通 S/4-20 Solaris2.2・Informix5	96MB 3.15GB	1	画像データの入力
	職員用端末	富士通 FMV-5133DE3 Windows3.1・VisualBasic2	48MB 1.2GB	1	

『コケは、水分や養分の通路としての維管束が未発達な小さな緑色植物です。そのために、一般に乾燥に弱く、湿った環境から離れる事は出来ません。しかし、乾燥に対して適応したギンゴケ・ネジクチゴケ・ヒョウタンゴケなどは日光の射す明るいコンクリート上や土上などに生息しています。ここでは、県内に見られるコケの中で特徴のある種類について紹介します。』

(2) 神奈川の自然に関する文献

前記の検索システムのほかに、神奈川の自然に関する図書文献情報を提供するシステムを構築した。対象となる図書は、一般図書をはじめとして雑誌、新聞の記事、同好会誌、論文などであるが、データ整備においては当館で所有している同好会誌や論文のデータを優先的に入力した。

当システムも『神奈川の自然』と同様、運用系と検索系の2システムより構成される。

データ項目は著者名や出版年、タイトルなど一般の図書文献管理システムと同様の項目から構成されているが、さらに、来観者向けにキーワード項目を作り、「～に関する文献が知りたい」といったタイトルや著者名が知らない場合でも検索できるような仕組みにした。キーワードは2階層に分け、植物、動物、地名、人名といった区分キーワードと、その下に付与される詳細キーワードからなる。1タイトルにつき10のキーワードを付与するこ

とが出来る。キーワードの追加・削除は自由にでき、似たような2つ以上のキーワードを一つにまとめる機能もある。この機能により、無駄なキーワードを減らすことができ、利用者にとっても使い勝手が良くなる。

データの入力はシステム運用に先立ち1993年から市販のデータベースソフトを使用して行い、約1,200件の登録をした。しかし、システム運用開始後、入力担当者を配置することが出来ず、システムは完成したがデータ入力の遅れが目立っている。

6. ハード

機器構成を表4に示した。クライアント・サーバ・システムを採用した。サーバは、収蔵資料管理システム用と展示情報システム用の2台があり、クライアント（端末）とは、10BASE-5及びTによりTCP-IP手順で接続されている。サーバのデータベースマネジメントシステムには、アスキー社のInformixを使用した。クライアントはDOS/V機を使用して、Windows3.1上で、Visual Basicが動いている。

当初、サーバに汎用機、クライアントに専用端末を考えていた。当時はDOS/V機があまり普及しておらず、そのような構成を考えていたが、今後DOS/V機が主流になるであろうとの予測や、汎用機では運用が大変なこと、スペック的にもオーバーであると思われることから、現在の構成となった。

表 5. 運用体制

要員区分	担当者	業務内容
システム管理者	情報資料課長	情報システム運用・管理の総括
システム運用担当者	職員	システム管理者を補佐し、システムの運用管理を担当する
収蔵資料スーパーバイザー	学芸員	収蔵資料管理システムに関する調整
収蔵資料グループ管理者	学芸員	収蔵資料管理データベース毎にデータ項目の管理・調整
展示情報スーパーバイザー	学芸員	展示情報システムに関する企画・調整
技術支援要員	外部委託	システム運用・保守・計画等の支援
画像データ入力担当者	職員	画像データ及び画像管理情報の入力

7. 運用体制

(1) 運営規定

運用については、神奈川県電子計算組織運営規定（昭和52年神奈川県訓令第24号）により作成された「博物館情報システム運用管理要綱」「博物館情報システム運用基準」及び「博物館データの外部利用基準」に基づき行われている。この要綱等は、県立歴史博物館及び当館が運営する博物館情報システムの運用管理について基本的な事項を定めたもので、1995年3月15日より施行されている。

(2) 運用体制

情報システム担当の事務職員が、システム全体の企画や調整、保守などを行っている。それ以外には収蔵管理システム、展示情報システム担当としてそれぞれ学芸員が1名ずつ兼務し、画像データ入力担当としてアルバイトが1名いる。また、技術支援要員として、富士通株式会社業務委託を行い、専門的な立場からのシステム運用や保守、計画などの支援を受けている（表5）。収蔵資料管理システムも展示情報システムもデータ入力は画像データを除いて基本的には各分野の学芸員が行っている。

システムの運用管理の効率化・円滑化を図るため定期的に運用管理及び利用調整に関する会議（定例会議）を行っている。また、県立歴史博物館とは、両館が一体となった総合的な情報システムとしての整合性を維持するため、システムの運営・改善などを協議するための会議（調整会議）を必要に応じて行っている。

(3) システム管理者

システム管理者の仕事は、システムの管理、データの管理、ソフトの管理、ハードの管理などであるが、個々の業務においてもデータの整合性等を維持するため、システム管理者が行う業務がある。

①属性データの一括登録

受入情報や属性情報、科・種マスタ情報の一括登録。中間ファイルを端末のパソコンから収蔵サーバへFTPで転送してから、収蔵サーバ上の「システム運用管理者

用メニュー」で作業を行う。

②画像データのサーバ登録

画像データのサーバ登録は、画像入力ワークステーションで作成されたデータを登録する方法と、パソコンからの登録方法がある。画像入力ワークステーションで作成されたデータは、画像入力担当者がワークステーションから収蔵サーバへデータを転送した後、システム管理者が、収蔵サーバ上の「システム運用管理者用メニュー」で作業を行う。パソコンからの登録は、システム管理者がFTPを使って行う。

③画像データの印刷

印刷する画像データも選択は利用者が行うが、実際の印刷を行うには、画像入力担当者かシステム管理者が画像入力ワークステーション上で指示を行う。

④データの物理削除

論理削除されたデータ（属性・画像）の物理削除を行う。収蔵サーバ上の「システム運用管理者用メニュー」から行う。

⑤画像登録リストの出力

データベース区分または登録日を指定して、画像登録リストの出力が行える。この業務は端末よりTelnetで収蔵サーバへLoginして、コマンド入力により行う。

⑥データベース直接更新

論理削除されているデータを復活させる作業。Telnetにより収蔵サーバにLoginしてコマンド入力により行う。

8. システムの評価と考察

当館が「博物館情報システム」を導入した大きな目的は、博物館が保有する膨大な知的情報を多種多様に利用するためである。博物館が収集する情報は一形態であっても、利用者によってその活用方法（または求める情報）は異なる。そのように情報を利用者に合わせて提供するために「博物館情報システム」を用意した。

しかし、博物館情報のように、量が多く、且つ形態も利用目的も多種多様な情報のシステム化は難しい。多く

表6. 収蔵資料登録数（1997年11月5日現在）

データベース区分	97.3.31登録点数	登録点数	画像点数
維管束(NA)	169,644	172,243	23
コケ・地衣類(NB)	2,684	2,745	
菌類(NC)	2	239	
海藻類(ND)	0	0	
植物その他(NE)	0	5	
脊椎動物(NF)	1,497	1,498	
昆虫(NK)	27,656	27,656	798
甲殻類(NH)	0	0	
軟体動物(NG)	3,391	3,391	
魚類標本(NI)	1,579	4,119	
魚類写真(NR)	11,085	13,440	16,996
鉱物(NM)	181	273	92
岩石(NL)	492	751	99
化石(NN)	5,697	5,706	3,738
地質・ボーリング資料(NO)	1	1	
計	223,909	232,067	21,746

の博物館の情報システムが異なるのも、そのような理由からであろう。当館においても試行錯誤で博物館情報システムを構築し、運用してきた。今後の情報システム構築の参考となる点を整理してみた。

自然誌資料といっても、動物、植物、岩石、化石など扱う分野によって、標本の管理の方法やデータの内容などが異なる。したがって、本システムでは標本そのもののデータは無理に統一せず資料の形態や管理の方法により格納するテーブルはできる限り分け、受入や管理に関する情報のみを館内で共通ものとした。

図書館のデータベースが統一された規格になっているため、博物館でも資料データベースの規格が統一されることを望む声がある。しかし、図書館で扱っているものが書誌情報一つであるのに対し、博物館ではそれぞれ性質の異なる「もの」そのものを扱っている。また、自然誌系では維管束植物、昆虫、化石など、個々の分野の資料整理のノウハウは200年300年という長い年月をかけて蓄積されてきたものであり、これを統一することは不可能である。

むしろ、分野が同じであれば、その標本整理のノウハウに大きな違いはなく、他の館とのデータの共有化ははるかに容易である。そのような視点からの提案は（太田, 1996）、（勝山, 1997a）、（宮田, 1997）などがある。本システムに登録されている維管束植物のデータのうち、長野県産植物のデータは長野県植物誌のデータベースに利用されている。また、本システムには他館のデータを格納するデータベースも用意してある。

一つの分野の標本データベースに関しては、最近構築されたものは国内外を問わず、リレーショナル・データベースを利用し、標本の基本データ（ラベルの情報）、分類群に関するデータ（種名、科名など）、同定に関するデータ（注釈ラベルの情報）、標本の管理に関するデータがそれぞれ別テーブルで管理されている（勝山, 1997b）。本システムでも同様な構造になっている。これは、データベースの構造と資料管理の状況が一致しており、使いやすいものとなる。

データベースの構築でもっとも重要なことはデータの収集、整理、追加、訂正の流れを確立することである。どんなにすばらしいアプリケーションを作っても、これが確立されていなければ、満足のいくデータベース・システムはできない。当館をはじめ、日本の博物館の収蔵資料データベースの問題点はアプリケーション上のものよりも、それ以前の問題も大きいように思われる。

表6に収蔵資料の登録点数を示したが、当館に所蔵されている約40万点の資料の58%しかデータベース化されていない。既存資料のうち、目録やカードとして整理がされていたものは委託またはアルバイトにお願いしてデータ入力を行った。1997年3月31日と11月5日のデータを比較するとデータの著しい増加が見られるのは維管束植物と魚類に限られている。新たに受入れられた資料数が分野により異なるので、単純な数の比較は意味が無いが、資料が増えているにもかかわらず、資料点数が増加していない分野があるのも事実である。

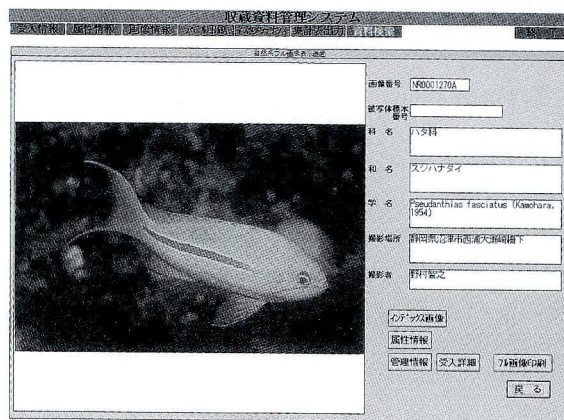


図6. 魚類写真データベース。

維管束植物、魚類、魚類写真では半年に2,000件以上のデータ増加がある。この2分野では情報システムが資料の受入や管理のツールとして利用されており、日常の資料受入と同時にデータが蓄積されている。その成果は（古瀬他, 1996）や（勝山他, 1997）のような調査や研究報告にも利用されている。

データ入力の進まない分野では、資料の受入や整理に情報システムがうまく利用されておらず、システムの導入としては失敗といえる。その原因はアプリケーション側にも、資料の受入れや整理を行う学芸員側にも問題があると思われる。いずれにせよ、博物館の資料として受入れられたものは、どんな資料がどのくらいどこに収蔵されているか、把握されてしかるべきである。そのためのツールとしては、これまでのカードや目録に比べて、コンピュータのデータベース・システムがはるかに優れていることは明らかである。今後、システムに改良を加えるとともに、データベースのノウハウに関する館内教育をはかり、データの登録を促進する必要がある。

収蔵資料管理システムはあくまでも館内の資料管理システムである。これを研究者向けに公開することは意味があることであるが、一般向けに開放するのは検索の方法、提供されるデータ内容ともに適したものではない。一般利用者にも楽しめる内容のものを別に構築する必要がある。

収蔵資料データベースとは別に一般向けのものを構築するとなると、多くは初心者向けに代表的な種類のみを取り上げた蓄積性のないものが作られる。このようなシステムはいまとなつてはCD-ROMやインターネット上に多数あり、あえて博物館情報システムの一部として構築する必要はない。

博物館情報システムとして構築するものは、博物館の調査研究や資料収集による新しい知見が、常に追加されるような蓄積性のあるデータベースシステムとして作製されるべきである。本システムの展示情報システムもそのような考え方から、地域の電子版生物誌として蓄積されるものを目指した。実際はさまざまな制約から、すぐには新しい知見を追加できないでいるが、システムの構造としては蓄積が可能なものとして設計されている。

現在、博物館情報システムの一般利用は、博物館に來

てミュージアム・ライブラリの3台の端末を利用するしかない。しかし、この端末は土日ともなれば小中学生に占拠され、他の人達は、なかなか使えない状態となる。また学校の先生からは、CD-ROMに入れて授業等にしたいといった要望もある。展示情報システムを館内の限られた数の端末で提供する時代は終わった。今後は、CD-ROMによる配布、インターネットを利用した提供などに移行する必要がある。

特にインターネットの利用については、急速な環境整備などにより、世界中の多くの人々が利用しており、今後の情報伝達の主な手段となることは明らかであろう。海外の博物館では既にデータベースをインターネットで公開しているところもある(志津田, 1997)。ただし、資料データベースをそのままインターネットにのせても、これは研究者向けのものであることには変わりがない。海外の例もその利用対象は研究者を想定して作られている。当館の情報システムは、収蔵資料データをダイレクトに公開する仕組みにはなっていない。しかし「魚類写真資料データベース(KPM-NR)」に登録された水中写真に基づく伊豆半島大瀬崎産魚類目録(瀬能他, 1997)のように収蔵資料管理システムを利用して作成された成果物等をホームページ上で公開するのなら、プロバイダや他の機関が設けたサーバ上にホームページを設けて提供することが出来る。

当館の博物館情報システムは、機器・ソフトともに5年リースで運用している。一部、準備期間より導入したのものもあるが、収蔵サーバなどメインとなる機器等は開館時(1995年3月)に導入された。そこで、サーバなどのリース更新時期となる2000年に向けて、現在、システムの見直しを検討している。

新システム移行のポイントは、使い勝手の向上と陳腐化しないシステム作りである。同時に細かい使い勝手の向上も必要だ。現在のシステムでは、データ登録は全角・半角の混在が許されていない。また、データのサーバへの一括登録や、パソコンからの画像登録、画像登録リストの出力、画像データの印刷・ダウンロード、科マスター・種マスターの一括登録などは、FTPやSQL(Structured Query Language)などのユーティリティを使って行っており、システムに組み込まれてはいない。このように通常、使用しているパソコンやOAソフトの使い勝手よりも難しかったり、使いづらいものはあまり利用されなくなる。博物館情報システムの命はデータの入力・更新であることを考えると、システムの使い勝手は、スピードともに非常に重要な要件である。

クライアントのシステム構成は、『DOS/V機+Windows3.1+VisualBasic2.0』である。リリース時には最新の構成も、5年の間には次第に旧式のものになる。当館の場合も、リリース時から現在の間に、16ビット(Windows3.1)から32ビット(Windows95)という大きな節目を経験した。

基幹システムのように、全ての業務がそのシステム内で終結する場合は良いが、情報系の場合にはOAソフトなどとの連携を重視する必要がある。特に出力系の業務

は定型化することは難しく、ダウンロードしたものをOAソフトで加工することになる。学芸員が通常使うOAソフトは、様々なプラットフォーム上で稼動している。学芸員の使用しているOAソフトとユーザーインターフェースが統一できれば、使い勝手はきわめて向上する。ユーザーインターフェイスとしては、EXCELやACCESSなどが考えられるが、インターネットとの接続を考えると汎用ブラウザの使用が望ましい。ブラウザの使用により、プラットフォームや、16ビットか32ビットか、などに依存しないシステムが構築できる。また、ブラウザはインターネットでの情報閲覧の手段でもあり、情報システムのデータがインターネット上に提供された場合にもスムーズに対応できる。展示情報システムのCD-ROM化にも有効かもしれない。

当博物館は神奈川県自然誌に関するセンターとしての機能が期待されているが、その機能を果たすためのツールとして、本システムを発展させたいと考えている。

謝辞

博物館再編整備の中で行われた博物館情報システムの開発は、1990年の「博物館情報システム整備計画策定」から数えると約7年に及ぶ。その過程で、神奈川県教育庁や博物館開設準備室、県立歴史博物館、県立生命の星・地球博物館、神奈川県企画部情報システム課の職員、そのほか多くの方々より多大なご指導とご助言をいただいた。

また、開発を担当された富士通株式会社の方々とは、開かれた博物館を実現するためのシステム構築について、繰り返し幅広い議論を行い、その結果、今日の博物館情報システムが存在する。以上のご協力をいただいた機関や方々に記して厚くお礼申し上げます。

文献

- 古瀬浩史・瀬能 宏・加藤昌一・菊池 健, 1996. 魚類写真データベース(KPM-NR)に登録された水中写真に基づく八丈島産魚類目録. 神奈川自然誌資料, (17):49-62.
- 神奈川県教育委員会, 1989. 博物館高度映像情報システム研究報告.
- 神奈川県植物誌調査会編, 1988. 神奈川県植物誌1988. 1442pp. 神奈川県博物館.
- 勝山輝男, 1991a. 神奈川県立博物館におけるコンピュータの利用. 神奈川県立博物館協会会報, (63):24-26.
- 勝山輝男, 1991b. 植物資料とそのデータベース化. 神奈川県立博物館だより, 24(4):4-5.
- 勝山輝男, 1997a. 維管束植物標本データベースの標準化. 標本資料データベースの標準化に関する調査研究報告書, pp. 7-9. 全国科学博物館協会.
- 勝山輝男, 1997b. フランスとイギリスのハーバリウムにおける植物標本資料のデータベース化. 標本資料データベースの標準化に関する調査研究報告書, pp. 50-52. 全国科学博物館協会.
- 勝山輝男・高橋秀男・城川四郎・秋山 守・田中徳久, 1997. 丹沢山地の種子植物・シダ植物. 丹沢大山自然環境総合調査報告書 丹沢山地動植物目録, pp. 331-382. 神奈川県環境部.
- 宮田昌彦, 1997. 標本資料データベースの標準化に関する一考察. 標本資料データベースの標準化に関する調査研究報告書.

- pp. 26-29. 全国科学博物館協会.
- 望月賢二・石倉亮治・小田島高之, 1993. 千葉県立博物館情報システム. 千葉県中央博自然誌研究報告, 2 (2):151-176.
- 西井正和, 1995. 兵庫県立人と自然の博物館の情報システム. 資料情報のネットワーク化に関する調査研究報告書. pp. 37-40. 全国科学博物館協議会.
- 西本 修・橋本晋二・村本一彦, 1995. マルチメディアデータベースによる電子博物館システムの構築. FUJITSU, 46(1):97-104.
- 太田道人, 1996. 学術的相互利用の可能性. 日本植物分類学会26回大会発表要旨. p. 9.
- 瀬能宏・御宿昭彦・反田健児・野村智之・松沢陽士, 1997. 魚類写真資料データベース (KPM-NR) に登録された水中写真に基づく伊豆半島大瀬崎産魚類目録. 神奈川自然誌資料, (18):83-98.
- 志津田嘉康, 1997. 欧州自然史博物館におけるデータベースの構築状況について. 標本資料データベースの標準化に関する調査研究報告書. pp. 58-63. 全国科学博物館協議会.

摘 要

勝山輝明・鈴木智明, 1998. 生命の星・地球博物館情報システムについて. 神奈川県立博物館研究報告(自然科学), 27:67-80. (T. Katsuyama & T. Suzuki, 1998. Museum Information System in Kanagawa Prefectural Museum of Natural History. Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.), 27:67-80.)

神奈川県立生命の星・地球博物館では、博物館情報システムが1995年より運用を始めた。このシステムの概要とその評価について考察した。このシステムはデータベースマネジメントシステムとして Imfomix を使用しているクライアントサーバーシステムである。収蔵資料管理システムと展示情報システムからなる。前者は収蔵資料を18分野に細分化してデータベース化して管理するもので、これまでに約40万点の収蔵資料のうち58%にあたる23万件のデータが登録された。展示情報システムは神奈川県立の電子版自然誌にあたるものを構築し、館内に設置された端末により一般来観者に情報を発信している。神奈川の植物、神奈川のコケ、神奈川のチョウ、神奈川のトンボ、相模湾の魚の5つのメニューが提供されている。今後は本システムで蓄積された情報をインターネットを通じて直接提供することを目指している。

(受付：1997年11月30日，受理：1997年12月11日)

Original Article

A New Species of the Genus *Oligoaeschna* (Odonata, Aeshnidae)
from Northeast India

Haruki Karube

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract. A new dragonfly from Northeast India is described under the name of *Oligoaeschna speciosa* sp. nov. This belongs to the member of 'section *pryeri*' by Lieftinck (1968) and is allied to the *Oligoaeschna martini* from Assam though distinguished by the structure of caudal appendage.

Keywords : *Oligoaeschna*, new species, NE India.

In last year, I could get many specimens of Odonata from Darjeering of India by the courtesy of Mr. Tetsuo Miyashita. These include some interesting species. Of these, one specimen of the genus *Oligoaeschna* specially attracted the attention of me. That specimen looks like *Oligoaeschna pryeri* of Japan at first sight, and undoubtedly belongs to the same species group.

Until now, 3 species of the genus are recorded from India and are included in 'section *pryeri*' by Lieftinck (Lieftinck, 1968). After a careful study, it is clear that the questionable specimen is surely new species belonging to the same species group.

Before going further, I wish to express my hearty thanks to Mr. Masatoshi Takakuwa of the Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, Odawara for his critical reading of the original manuscript, and to Mr. Itsuro Kawashima, Yokosuka for his splendid illustrations of thorax and abdomen inserted in this paper, and to Mr. Tetsuo Miyashita for

supplying this interesting specimens, and to Messrs. Mitsuharu Ohshima and Hiroyuki Yamashita for their kind help with the scanning electron microscopy, and to Mr. Shuichi Niida for his image processing of S. E. M. photograph.

Oligoaeschna speciosa sp. nov.

Male. Abdomen (incl. appendage) 45.8mm in length. Hind wing 37.3mm in length, with maximum width 11.6mm.

Colour black with green maculations, Slender and belonging to Lieftinck's 'section *pryeri*'.

Head reddish brown with green and black markings; labium, labrum, anteclypeus and postclypeus reddish brown; antefrons rather protruded anteriorly, black except for ventral about half, with vertical surface coarsely wrinkled; frons black with a pair of green rectangular spots behind anterior crest (so, black ground seems to broad T-spot), with fairly longitudinal median groove on dorsal surface; eyes meeting about 1.5mm; vertex strongly globularly protruded anteriorly above median ocellus; occiput black, wedge-shaped, very small and raised posteriorly, covered with long hairs.

Prothorax yellowish, blackish above. Pterothorax black, symmetrically with green marks as follows: antehumeral stripe cigar-shaped, not reaching antealar ridge; elliptical patch present along antealar ridge; mesepimeron with slightly broad stripe at middle, which is not reaching ventral border; two small maculations on metepisternum present on upper border and middle; metepimeron also largely green. Mesinfraepisternum, metinfraepisternum and coxae brown. Legs black.

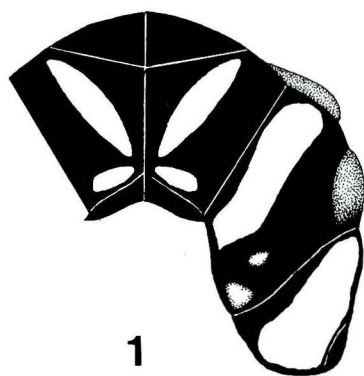


Fig. 1. thorax in dorsal view.



Fig. 2. abdomen in lateral view.

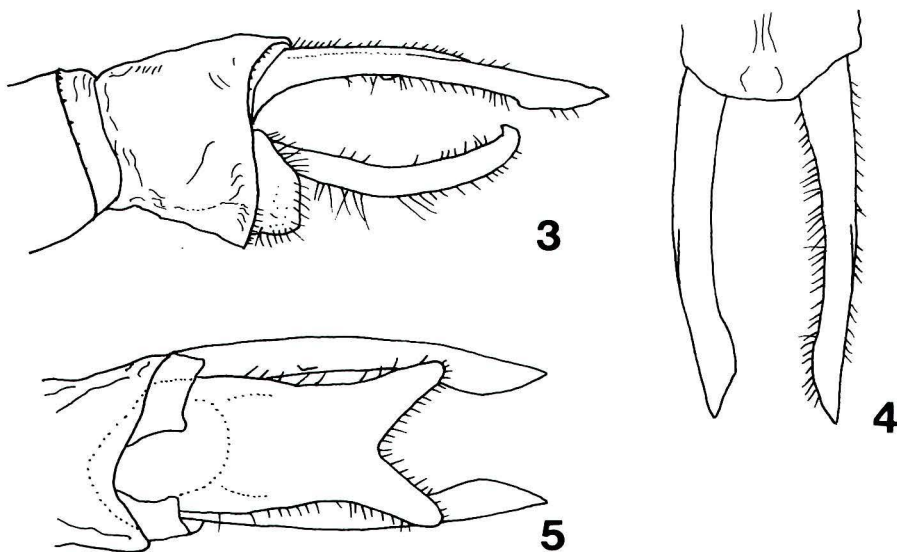


Fig. 3 . caudal appendage in lateral view.

Fig. 4 . superior appendage in dorsal view.

Fig. 5 . caudal appendage in ventral view.

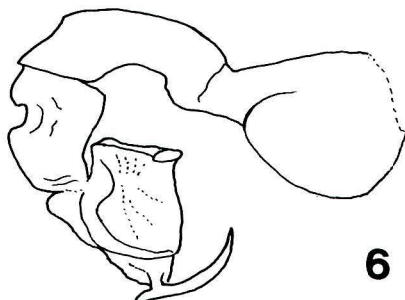


Fig. 6 . penis in lateral view.

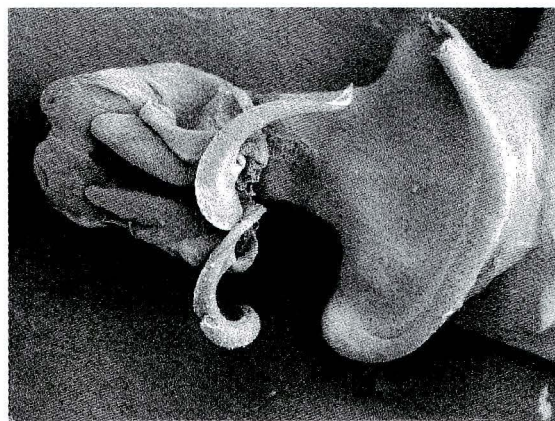


Fig. 7 . penis in oblique ventral view (by S. E. M.).

Wings hyaline, tinted with golden yellow at base; median space free; each triangle with 3 cross veins; anal loop 5-celled; two rows of cells between MA—M_{sp}l present in all wings; nodal index: 5-15:17-6/7-10:10-8; pterostigma brown, 2.9mm in length in the fore, 2.8mm in length in the hind.

Abdomen black with green markings, inflated at basal 2 segments, sharply thin from posterior 1/4 of 2nd to anterior half of 3rd, then slightly expanded at 4-6th, 7-10th thinned apicad; 1st segment with a large lateral spot at medio-posterior area; 2nd with triangular spot at dorso-anterior border, with two pairs of dorsal spots, one of which present at medio-dorsal, and the other are sited at dorso-posterior border, the latter approached each other, and also with two lateral maculations on auricle and latero-posterior; 3rd to 7th each with a pair of rectangular spots at posterior border which are gradually becoming smaller posteriad, and also with a pair of small triangular spots at middle of 3rd to 5th; 8-10th entirely black.

Caudal appendage black. Superior appendage slender, slightly curved inwards and downwards, pointed at apex, with a very small ventral spine inside basal about 2/5, and heel-

shaped at apical about 1/5 of inner edge. Inferior appendage very slender, in lateral view, gently curved upwards and shaped as small hook at apex, in dorsal view, broadly emarginate at sides of basal 2/3 and bilobed at apex which is suddenly strongly curved outwards near apex.

Penis broad; vescile cup-shaped, very widely bilobed (apex of penis fitted into the notch of vescile); 2nd curved dorsad; 3rd bell-shaped, with shallow broad notch at post-ventral part; ventral part of 4th shaped as a pair of hooks, apex warped anteriad, with dorsal part flat and bilobed.

Female. Unknown.

Holotype, ♂, Darjeeling, NE. India, 20. VI. 1993, leg. native.

Type depositary. The holotype is deposited in the Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, Odawara.

Notes. This new species resembles to *Oligoaeschna martini* (Laidlaw) from Darjeeling, though that species has some difficult problems (see in Lieftinck, 1968): the type specimen is only one female which is now lost, and moreover, though Navas described *Aeshna nigripes* (also the type is now lost) based on one male from Darjeeling, Fraser regarded that

as a junior synonym of *Oligoaeschna martini*. Thus, it is difficult to becoming clear the true identity of *Oligoaeschna martini*.

However, if we believe the figures and description of male of *Oligoaeschna martini* (= *Aeshna nigripes*) made by Navas, the present new species is easily distinguished from that by having the characters of more slender and curved inferior appendage and quite different shape of inferior appendage.

摘 要

苅部治紀, 1998. 北東インドからのサラサヤンマ属の1新種. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 27:81-83. (H. Karube, 1998. A New Species of the Genus *Oligoaeschna* (Odonata, Aeshnidae) from Northeast India. Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.), 27:81-83.)

インド北東部、ダージリンから、サラサヤンマ属の1新種 *Oligoaeschna speciosa* sp. nov. を記載した。インドからはこれまで3種のサラサヤンマ属が記録されており、この新種は他の3種と同様に、この属の中の section *pryeri* に属し、アッサムから記載された *Oligoaeschna martini* に近縁であると考えられる。前種とは尾部付属器の形状などから区別される。

References

- Fraser, F.C., 1936. Odonata III, in The Fauna of British India, including Ceylon and Burma. xi+461pp., 125figs., 2 pls. and map.
- Lieftinck, M. A., 1968. A review of the genus *Oligoaeschna* Selys in Southeast Asia. Tijdschr. Ent., 111 (5):137-186.

(Received : Nov. 30, 1997; Accepted : Dec. 11, 1997)

論 説

リモートセンシングによる土地被覆分類
—ランドサット/TMによる神奈川県の場合—Land Cover Map by Remote Sensing :
In the case of Kanagawa area by LANDSAT/TM

新井田 秀一

神奈川県立生命の星・地球博物館

Shuichi Niida

Kanagawa Prefectural Museum of Natural history, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Abstract. As for this report, the Land Cover map using LANDSAT/TM is evaluated. A typical point of the land cover was made for the Land Cover map as a training area by using the data in November, 1995 by "Supervised classification method". The first evaluation of the classification result in Tanzawa Mountains was done by the comparison with the latest vegetation map. The point of the classification method used at this time which should be improved is abundant. However, it could be confirmed that excellent accuracy could be expected. Next, I examined the change observed in the data of November, 1984 about the entire Kanagawa Pref. As a result, this map showed the expansion of the town ground etc.

Key Word : remote sensing, Land Cover, LANDSAT/TM

I はじめに

リモートセンシング (remote sensing) とは、離れた場所から対象物を調べる技術のことである。リモートセンシングという術語は、1972年にランドサット1号(当時: アーツ1号)の打ち上げ以来、利用されるようになってきた。

地球観測衛星によって、全地球表面をくまなく、しかも細かな地表パターンを繰り返し観測できるようになった。多重スペクトルによる観測は、対象物について細かく分類することを可能にした。

この技術を用いれば、土地被覆図を作成することができる。土地被覆とは、森林、草地、コンクリートなど地表面を覆っている物理的な状態のことである。土地被覆図は従来から作成されてきた土地利用図や植生図に対し、土地の利用目的までは知り得ないという欠点を持つ。しかし、人工衛星からの観測データを用いれば、更新期間を圧倒的に短縮できるという長所がある。

神奈川県域の土地被覆図について、当館で所蔵しているランドサット5号のデータを使用して作成した。分類精度について、従来作成されている植生図などと比較検討したので、ここに報告する。

II 衛星画像を用いた土地被覆分類方法

1. 地球観測衛星ランドサット

本報告で使用したデータは、1984年3月1日に打ち上げられたアメリカ合衆国の地球観測衛星ランドサット5号に搭載されているセマティックマップパー (Thematic Mapper: TM と略す) というセンサが観測したものである。

ランドサットは、公称軌道高度705kmの極軌道を取り、約99分で地球を1周する。1日に14+9/16周まわり16日間で地球全体の観測を行う。このため、定期的に継続した観測を行うことができる。TMは、初期のランドサットで使用されていた多重スペクトル走査放射計 (Multi Spectral Scanner: MSS と略す) の改良型である。MSSの空間分解能83m、観測波長帯4バンドに比べ、TMでは30m、7バンドと改良されている(表1)。TMの観測幅は185kmとなっており、関東地方を一度に観測できる。

2. 当館における衛星画像処理とデータ所有状況

当館では、「自然との共生を考える」展示室内に、CPU roomを設けている。ここには、当館の「博物館情報システム」の中核となるワークステーションが設置され、研究室や収蔵庫、ミュージアムライブラリーなどに置かれているパソコンに対して館内LANによるネットワークが形成されている。

「博物館情報システム」は、収蔵資料に関する情報だけでなく、写真・画像資料、学芸員の研究の成果など博

表1 TMの観測波長帯と応用分野

バンド	波長帯[nm]	空間分解能[m]	主 な 応 用 例
1	0.45-0.52	30	土壌と植物の区別 落葉樹と針葉樹の区別
2	0.52-0.60	30	植物の活力度
3	0.63-0.69	30	植物の種類を決定するためのクロロフィル吸収
4	0.76-0.90	30	バイオマス調査 水塊調査
5	1.55-1.75	30	植物水分測定 雪と雲の区別
6	10.4-12.5	120	温度
7	2.08-2.35	30	熱水作用

表2 分類基準

数値地図(*1)	土地利用現況図(*2)	今 回 の 分 類	
		項 目	内 容
田	田	} 耕作地	水田・畑
畑	畑		
果樹園	} 樹園地	} 果樹園	みかん畑など
桑畑・茶畑			
—	牧草地	} 草地	牧草地やススキ草原など
その他の樹木畑	野草地・裸地		
針葉樹林	針葉樹	常緑針葉樹林	スギ・ヒノキを中心とした林
広葉樹林	広葉樹	夏緑広葉樹林	ブナを中心とした林
—	—	常緑広葉樹林	クスを中心とした林
—	—	雑木林	クヌギ・コナラ群集
—	—	松林	クロマツ
その他の森林	その他の森林	—	
—	伐採跡地	—	(伐採後の被覆状況によって異なる)
荒地		} 空地・荒地	地表に植物のない地域
空地			
建物用地	中高層住宅地	高密度市街地	コンクリート建造物が密集した地域
—	一般住宅地	} 市街地	} (利用目的までは特定できないため分類不能)
—	商業用地		
—	業務用地	工場	金属光沢のある屋根の建物・タンクなど
—	工場用地		シバで覆われた地域
—	ゴルフ場遊園地等	芝地(ゴルフ場)	
—	公園用地	—	} (利用目的までは特定できないため分類不能)
—	教育文化体育施設	—	
—	防衛施設	—	
—	工事中造成地	—	
鉄道・道路	運輸流通施設用地	—	
湖沼・池	水面・河川・水路	河川・湖水	
河川敷	—	—	
海浜	—	—	
海水域	—	海	
その他	その他	雲・未分類地	

*1 数値地図ユーザーズガイド(1992)による

*2 土地分類基本調査(1990)による

物館に蓄積されている膨大な量の知的財産を一元管理し、館内外へ提供するシステムである。研究活動や学習支援活動に対する支援も目的とされている。このシステムにおいて衛星画像処理については、「展示(共生)支援システム」として整備されている。本稿でデータ解析に使用したワークステーションは、富士通 S-4/20(メモリ96MB、ディスク容量3.15GB)である。衛星画像データは磁気テープによって配布されるため、これを読み取るための磁気テープ装置 Shugart Model-9662を備えている。衛星画像処理ソフトについては、EXPIA/S(富士通 FIP製)を使用した。

当館の資料に関する基本的な考え方として、衛星画像のようなものについても、博物館資料と位置づけている。神奈川県域を中心に関東から中部地方にかけての環境の変遷をモニタリングするために当館では、ランドサット/TM データについて1984年から継続して収集している。

3. 地図投影変換

ランドサットのデータは、世界標準座標(Worldwide Reference System: WRS と略される)と呼ばれる標定システムによって、位置を特定することができる。当館の所蔵データは、関東全体をカバーすることを考え、Path 107-Row035と Path107-Row036の2種類ある。神奈川県域はちょうどその境目にあたる。

ランドサットは極軌道衛星であるため、経線に対し斜めに移動し、地表を観測する。したがって、得られた画像は画面上部が真北になっていない。そこで、衛星画像において明らかに読みとれる地形・人工構造物について二万五千分の一地形図から緯度経度を読みとり、衛星画像と対応させて位置を決定した。

本稿では、神奈川県を含むエリア(北緯35度7分~35度42分、東経138度42分~139度48分)と、植生図などと分類精度について比較検討するため丹沢山地(北緯35度25分~35分、東経139度0分~15分)を使用した。なお、観測日は1984年11月4日と1995年11月19日である。

4. 分類の仕組み

リモートセンシングにおいて、電磁波の観測から対象物の情報を調べることができるのは、「すべての物体は、種類および環境条件が異なれば、異なる電磁波の反射または放射特性を持つ」という特性に基づいている。ランドサット/TMのような、複数の波長帯を観測するセンサから得られるデータは、対象物の持つ波長ごとの特徴(分光特性)を含んでいる。

分類する手法としては、「教師付き分類法(Supervised Classification)」と「教師なし分類法(Unsupervised Classification)」の2種がある。「教師付き分類法」は分類したい対象物の存在するエリアをトレーニングエリアとして設定し、その分光特性をトレーニングデータとして与え、その特徴から分類する方法である。それに対し、「教師なし分類法」では、トレーニングデータをあらかじめ与えず、実際のデータの中で分光特性の異なる群を抽出する方法である。トレーニングエリアを設定しなくてもよい反面、抽出されたものが何を分類しているのか判断

する必要がある。

本稿では、あらかじめ分類項目を設定する「教師付き分類法」を採用し、16種に分類した。分類基準は、数値地図で採用している土地利用区分の定義を参考にしたが、植生図における凡例を考慮している(表2)。

分光特性を利用した分類法では、特に植生に関して、生活形態に基づいた区分に分けることは困難である。しかし、数値地図で採用している土地利用区分にある「針葉樹」と「広葉樹」のような単純なものでは、あまりにも分類が荒すぎる。今回使用するランドサット/TMは7バンドあるため、植物の光学的な特性を利用して細かく分類できると期待できる。したがって、植生に関しては植生図の凡例を参考にし、最上層に優占している植物種を基準とした。たとえば、「落葉広葉樹林」はブナ、「常緑針葉樹林」はスギ・ヒノキである。「水田」と「畑」の区分は、イネの収穫の終えた11月のデータを使用しているために困難であると考え、「耕作地」としてまとめている。また「雑木林」と設定したのは、相模原市教育委員会編(1988)の植生図にあるクヌギ・コナラ群集を参考にしている。

次に分類群(クラス)ごとに分光特性を抽出するためのトレーニングエリアを設定した。この設定には、市町村発行の植生図および現地調査を参考にした。例えば、「雑木林」は相模原市教育委員会編(1988)の植生図から、保存状態のよいとされるものを選んでいく。これらの一覧は、表3にまとめている。このトレーニングエリアから、7バンドそれぞれに対して分光特性を抽出してトレーニングデータを設定して、最尤法(土屋編, 1990)に基づいて分類した。最尤法は、ベイズ(Bayes)の定理に基礎を置いている。各クラスに対する未知の点の尤度を求め、尤度最大のクラスにその点を分類する方法である。尤度とは、あるデータが観測されたとき、それがクラスから得られたものであるという事後確率のことである。

Ⅲ 分類結果の評価

1. 丹沢地域の比較

丹沢大山自然環境総合調査報告書(1997)には、付図3として「丹沢山地の山地帯(ブナクラス域)の現存植生図」が付属している。これは、標高1000m以上のエリアについてまとめられた最新の植生図である。このような航空写真や現地調査を元に作成された図と比較することで、今回作成した土地被覆図(図1)を評価する。

土地被覆図は、植生図に比べ分類項目が荒いため単純に比較はできない。しかし、土地被覆図にて「夏緑広葉樹林」と分類されたエリアは、植生図で「山地夏緑広葉樹林」と分類されているエリアと同じような分布をしている。「常緑針葉樹林」として分類したスギ・ヒノキは、姫次周辺に植林されているものを正確に区分している。また、この植生図の範囲にはないが、札掛や堂平のスギの植林地帯についても正確に区分している。

五万分の一地形図「秦野」や「上野原」と比較すると、崩壊地を区別していることが分かる。崩壊地は、崩壊地植生であるフジウツギ群落やフジアザミヤマホタルブ

表3 トレーニングエリアの設定

分類区分	概 要	ト レ ー ニ ン グ エ リ ア
高密度市街地	ビルなどの密集地	横浜駅西口、横浜市庁舎周辺部
市街地	住宅地	鴨宮駅・湯河原駅周辺部
工場	工場・タンク・倉庫など	横浜市鶴見区扇島、横浜市磯子区臨海工業地域 相模原市田名工業団地、平塚市東八幡工業団地、横須賀市夏島町
耕作地	田・畑	小田原市栢山、平塚市入野・北豊田、三浦市初声町、横須賀市津久井
芝地(ゴルフ場)	シバの存在する土地	箱根湖畔GC、大箱根CC、湘南シーサイドGC
果樹園	ミカン畑など	小田原市石垣山
雑木林	クヌギ・コナラなど	横浜市緑区新治、相模原市大野台
松林	マツ	茅ヶ崎市柳島海岸
常緑針葉樹林	スギ・ヒノキなど	箱根三国山芦ノ湖側山麓部、山北町ユース・熊木沢出合・弁当沢の頭 横浜市緑区三保市民の森
夏緑広葉樹林	ブナなど	箱根三国山山頂部、大室山山頂部
常緑広葉樹林	クスなど	真鶴岬
草地	シバ以外の草地(牧草地など)	山北町大野山山頂、箱根町仙石原
空地・荒地	植物等の存在しない土地	逗子市池子
河川・湖水	河川、自然湖・人造湖・池など	芦ノ湖、丹沢湖、相模湖など
海		
雲・未分類地		

クロ群集などに覆われていれば、土地被覆図においては「草地」として分類される。また、岩石が露出している場所は、今回は「市街地」や「工場」などに分類された。土地分類基本調査(1990)に収録されている表層地質図によれば、丹沢山の東側の崩壊地は「火山れき岩を中心とした凝灰岩」とされ、これらはかなり白っぽい色をしている。これは、分類基準に岩石に相当するものがなく、コンクリートの分光特性を基準にしている「市街地」などに判断されたものと思われる。

全体的な傾向として、急峻な山地では地形の影響がそのまま土地被覆図の分類に反映しているようなところがある。特に、南北方向に走る尾根によって生じた西側の斜面は影が大きく、誤分類している可能性がある。地形図や植生図によれば、丹沢山頂北西部には崩壊地形があるが、土地被覆図ではそれが見られない。同じようなことは、蛭ヶ岳山頂北西部でも見られる。また、「夏緑広葉樹林」と「常緑針葉樹林」との区分についても、尾根をはさんで区別される部分がある。特に影の部分を「夏緑広葉樹林」と分類する傾向がある。このため焼山周辺の尾根は、北西-南東方向に走る尾根のパターンに沿って分布が変化している。調査年度が1986年と少し古いが土地分類基本調査(1990)に収録されている土地利用現況図においては、そのようなパターンは見られない。このような地域は、現地調査が必要である。

分類結果は日射の影響をかなり受けることが分かった。この手法は日射の十分にあたる斜面においては、かなりの精度で分類でき、実用的であると考えられる。

2. 95年の神奈川県のカテゴリ

以上の結果を踏まえ、神奈川県全体について分類を行った。その結果を図2に示す。ここでは丹沢山地を除いたエリアを中心に評価する。

山麓部においては「果樹園」と分類されたエリアが多

く見られる。大磯丘陵西部の曾我山の西側斜面などは正しく分類されているが、誤分類と思われるエリアも多い。特に高麗山は、宮脇他(1991)によるとスダジイ林やタブノキ林に覆われているが、そのほとんどが「果樹園」に分類された。この点は分類項目を細かくしていくなど改良が必要だろう。

「松林」については、図2では小さくて分かりにくいですが、湘南海岸沿いに植林されたクロマツについては正しく区分されている。

三浦半島については、大楠山南斜面を例にする。土地分類基本調査の土地利用現況図では、山頂から山麓までほぼ「広葉樹林」と分類されている。土地被覆図では山頂部に「夏緑広葉樹林」があり、それをとりまくように「雑木林」があり、山麓部を「果樹園」のように分類している。調査年度が1974年と古いが遠山他(1974)によると、オオシマザクラ林(落葉広葉樹)がかなり目立つが、シロダモアオキ群集(常緑広葉樹)も多く見られるとされている。この点でも、「果樹園」の分類基準について改良を要する。また「雑木林」については、「夏緑広葉樹林」との区別を11月の時点で落葉しているかを参考にしていないため、低地での夏緑広葉樹を分類に含んでいる可能性がある。

「高密度市街地」については、コンクリート構造物の密度の多いエリアを基準にしたため、道路・鉄道などもこの中に分類されてしまった。図中で細い線状に表されている部分である。これ以外については「市街地」も含め、正確に分類されている。

「工場」は、金属光沢を持つ屋根で覆われた建物を基準にしているため、大規模な工場や石油・ガスタンクを区分している。しかし、予想より反射率が高いものがあるためか、工場地帯に一部未分類のデータがあるので基準を整理したい。

海や河川・湖水は、ほぼ正確に分類できた。河川から

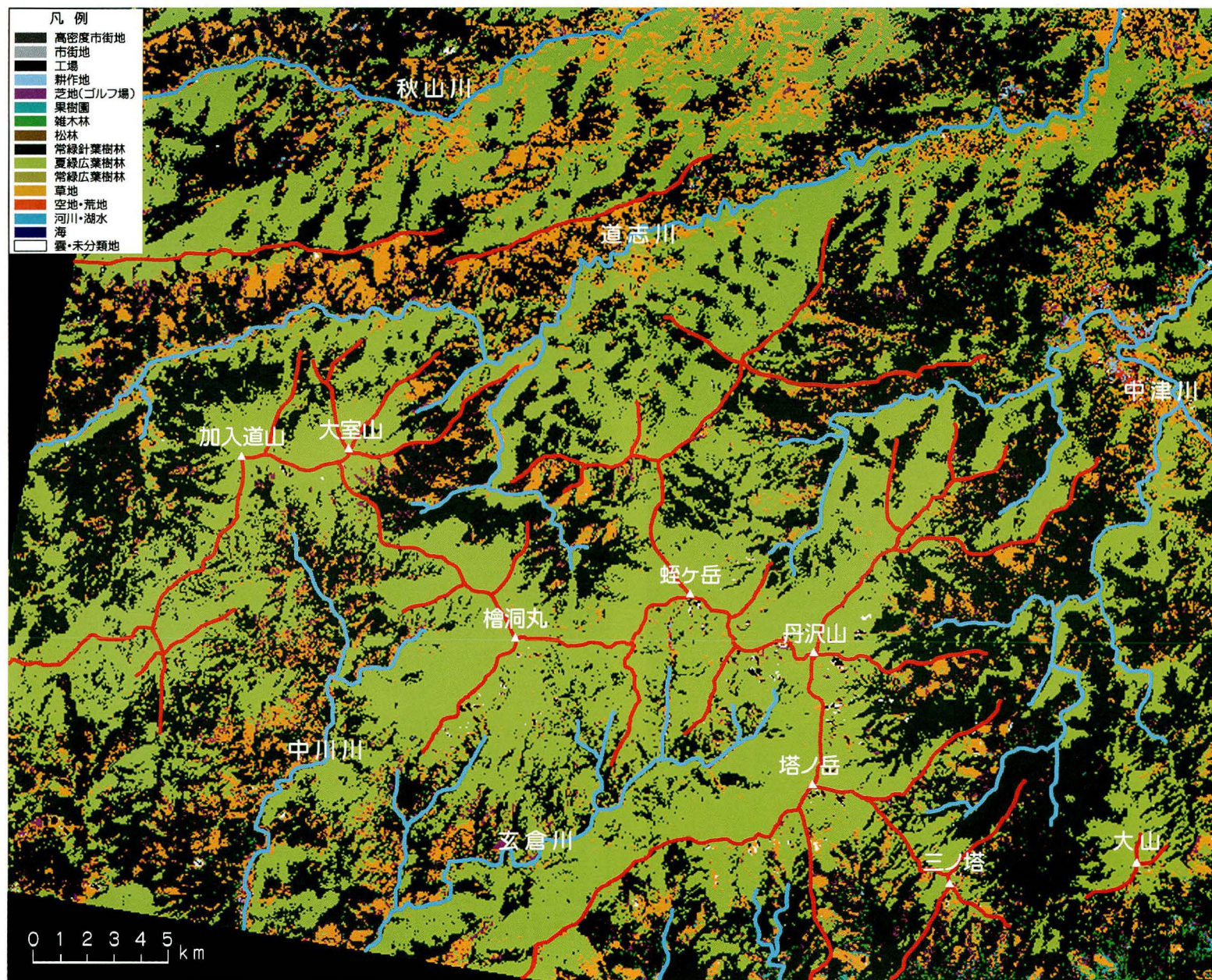


図1 丹沢山地の土地被覆図 (1995年11月19日観測)

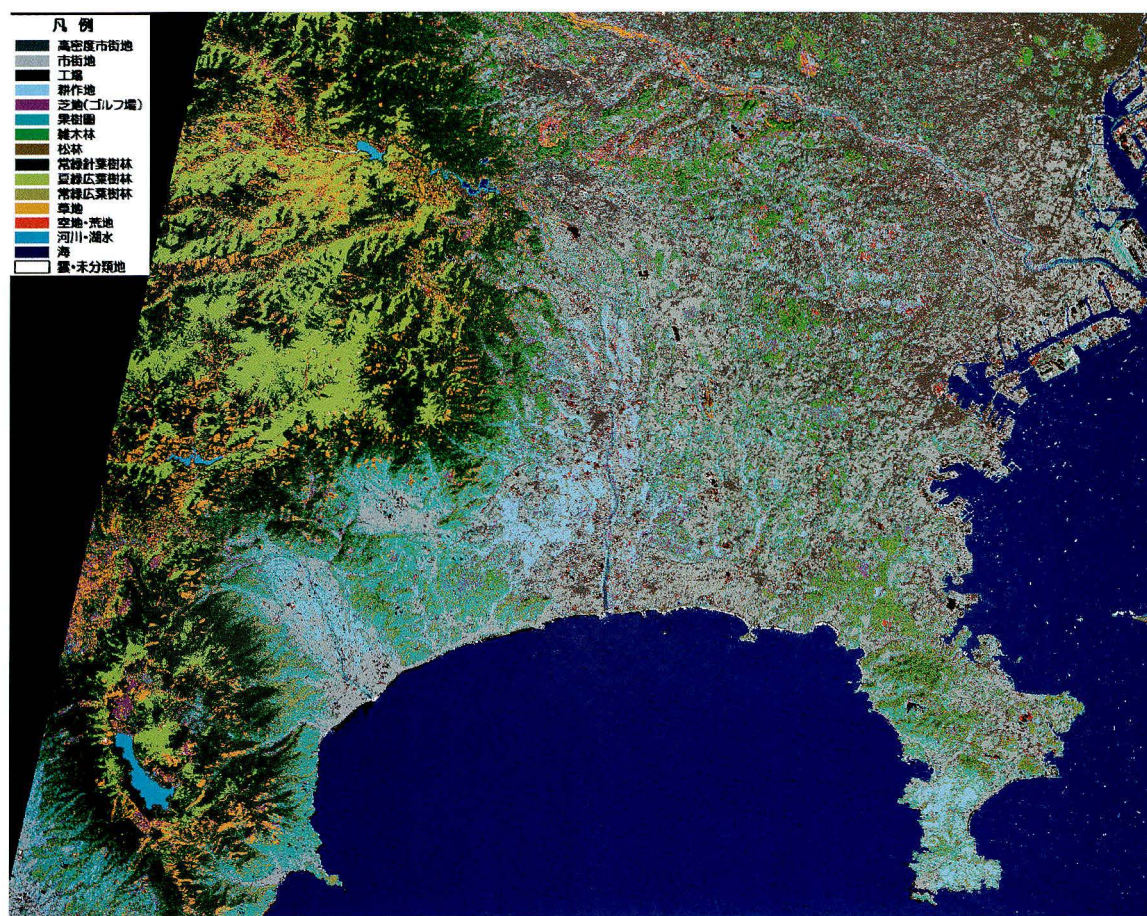


図2 神奈川県土地被覆図(1995年11月19日観測)

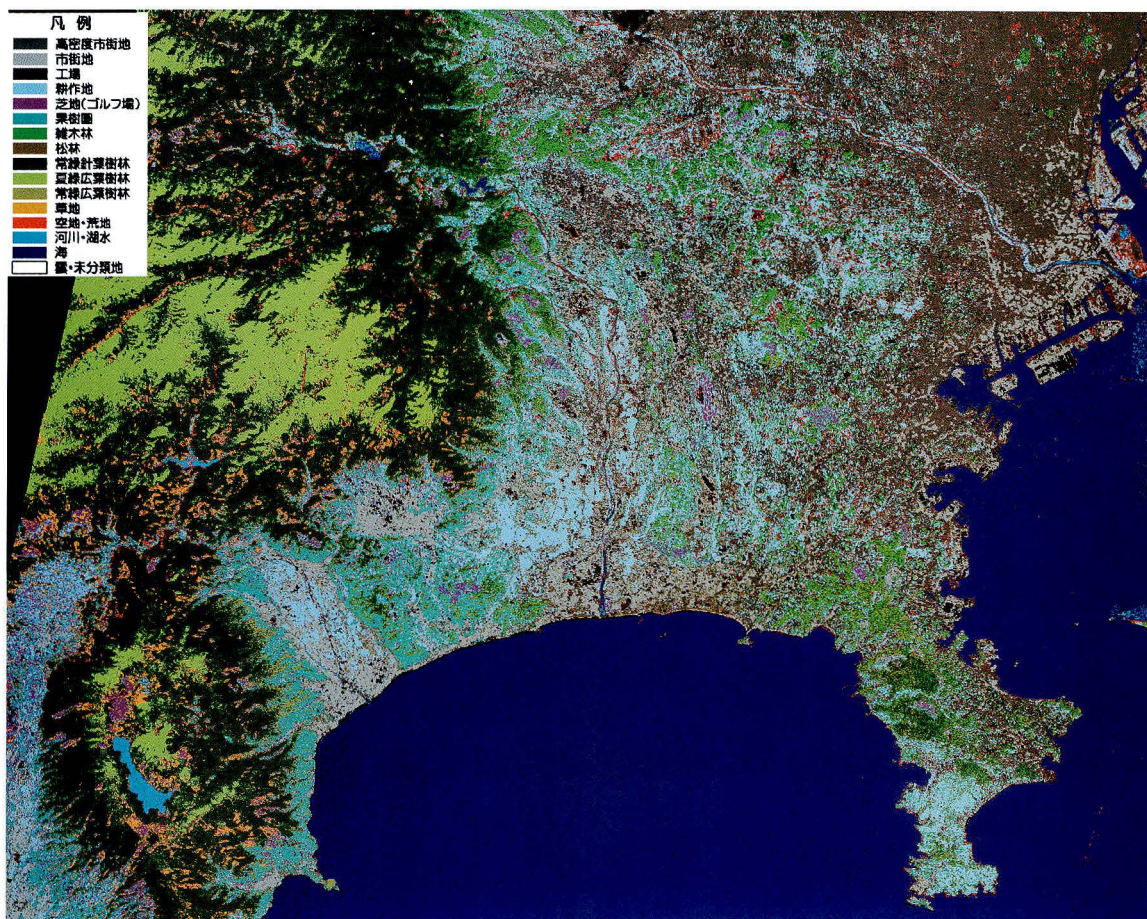


図3 神奈川県土地被覆図(1984年11月4日観測)

表 4 分類結果一覧

分類区分	概 要	結 果
高密度市街地	ビルなどの密集地	} 山地にて露出した岩石を分類に含んでしまった 未分類として残ったエリアもあるが、おおよそ実用に耐えうる
市街地	住宅地	
工場	工場・タンク・倉庫など	
耕作地	田・畑	} かなり正確に分類できた
芝地(ゴルフ場)	シバの存在する土地	
果樹園	ミカン畑など	} 予想より区分された範囲が広いので、検討が必要
雑木林	クスギ・コナラなど	
松林	マツ	クロマツについては分類できた
常緑針葉樹林	スギ・ヒノキなど	} 谷あいなどの日影の部分に、誤分類がある
夏緑広葉樹林	ブナなど	
常緑広葉樹林	クスなど	} かなり正確に分類できた
草地	シバ以外の草地(牧草地など)	
空地・荒地	植物等の存在しない土地	} かなり正確に分類できたが、ダム湖の一部を「海」と分類した かなり正確に分類できたが、沿岸部に一部未分類エリアがある
河川・湖水	河川、自然湖・人造湖・池など	
海		
雲・未分類地		

の流入部などに一部未分類なエリアが残り、津久井湖・城山湖において海と分類されてしまったエリアがあるが、実用上それほど問題はないと思われる。

3. 1984年との比較

1984年のデータは11月4日に観測されたものであるが、1995年のものに比べて影の占める面積が少ない。衛星の観測時間はどちらも9時38分ごろである。そこで、この時期の太陽高度を調べてみると1984年の33度24分に対し、1995年では29度41分となり、この高さの差が影の面積を大きく原因であった。影の存在は、分類精度に大きく影響を与えるため、山地での比較は単純にはできない。

図3は1984年の土地被覆図である。「常緑針葉樹林」や「夏緑広葉樹林」の分布は、1995年とは異なり、地形の影響をあまり受けていないように思われる。そのためか、「常緑針葉樹林」と分類されたエリアが1995年に比べて広い。「果樹園」や「雑木林」については分類基準を見直していないので、1995年と同様に誤分類を含む。

「市街地」はおおよそ10年間の間に県央部へ拡大した。特に「高密度市街地」と分類されるものは、厚木市域や相模原市域などで増加している。

「芝地」と分類されるものは、大部分がゴルフ場である。ゴルフ場は、1984年のほうが見分けやすい。1995年では、「草地」や「果樹園」と分類されるものが多く混入していて輪郭が不鮮明になっているが、この原因は不明である。

「耕作地」については、1984年では一様に塗りつぶされているのに対して、1995年では他の分類が多少虫食いのようになってきているのが見られる。おそらく、農地を転用している影響だろう。

Ⅳ まとめ

リモートセンシングによる土地被覆図は、植生や人工物などをかなり正確に分類できることが確認できた。今回の分類についての評価を、表4に示す。いくつかのト

レーニングデータによって分類できることは、広い範囲を効率よく分類していくうえで有効であるといえる。このため植生図では不可能に近い年単位での更新も可能であり、経年変化を調べることができるようにある。

本研究では特に針葉樹林と広葉樹林を明確に区別するため、11月の観測データを使用した。このことが影の影響を大きくし、分類精度を低下させた。このことを踏まえ、太陽高度の高い時期のデータについて分類評価する必要がある。また植生に関しては、頻繁には作成できない植生図の更新を補うためにも、分類項目を細分化するとともに、分類精度を向上させていきたい。

謝辞

本研究を進めるに当たり、当館学芸員の勝山輝男氏、田中徳久氏、元神奈川県立博物館学芸部長の高橋秀男氏には有益なアドバイスをいただきました。また、1995年のデータについては、元データは米国政府が所有するものであり、EOSAT/宇宙開発事業団から提供を受けました。これらのご厚意に対してお礼申し上げます。

参考文献

遠山三樹夫・持田幸良・伊藤賢一, 1974. 大楠山南斜面の植生, 30pp. 三浦植生調査会, 神奈川.
神奈川県, 1986. 土地分類基本調査 横須賀・三崎 5万分の1. 神奈川県.
神奈川県, 1990. 土地分類基本調査 上野原・五日市 5万分の1. 神奈川県.
神奈川県, 1990. 土地分類基本調査 秦野・山中湖 5万分の1. 神奈川県.
相模原市教育委員会, 1988. 相模原市の植生, 228pp. 相模原市教育委員会.
宇宙開発事業団地球観測センター編, 1990. 地球観測データ利用ハンドブッケーランドサット編・改訂版, 6+298pp. リモート・センシング技術センター, 東京.
土屋清編著, 1990. リモートセンシング概論, 322pp. 朝倉書

店，東京。

宮脇昭・藤原一繪・寺田仁志，1991．大磯町の植生，4 +116pp．大磯町役場．

日本地図センター編，1992．数値地図ユーザーズガイド，494pp．日本地図センター，東京．

日本リモートセンシング研究会編，1992．図解リモートセンシング，4 +308pp．日本測量協会，東京．

神奈川県公園協会・丹沢大山自然環境総合調査団企画委員会編，1997．丹沢大山自然環境総合調査報告書，636pp．神奈川県環境部．

摘 要

新井田秀一，1998．リモートセンシングによる土地被覆分類—ランドサット／TM による神奈川県の場合—．神奈川県立博物館研究報告(自然科学)，27:85-92．(S. Niida, 1998. Land Cover Map by Remote Sensing : In the case of Kanagawa area by LANDSAT/TM. Bull. Kanagawa prefect. Mus. (Nat. Sci.), 27:85-92.)

本報告は、地球観測衛星ランドサットに搭載されているセマティックマップパー（TM）を用いて作成した土地被覆図について評価したものである。この土地被覆図は、1995年11月のデータを用い、土地被覆の代表的な地点をトレーニングエリアとして「教師付き分類法」によって作成した。丹沢山地での分類結果を最新の植生図と比較したところ、かなりの精度が確認できた。次に、神奈川県全体について1984年11月のデータとの変化を調べた。その結果、この地図は市街地の拡大などを示すことができた。

(受付：1997年11月30日，受理：1997年12月11日)

短 報

横浜市保土ヶ谷区のカザグルマ群落について

A note on *Clematis patens* community in Hodogaya-ku, Yokohama

田中徳久

神奈川県立生命の星・地球博物館

Norihisa Tanaka

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Key Words : *Clematis patens* community, red data plant

カザグルマ (*Clematis patens* Morreu et Dence.) は、林縁や湿地縁などに生える落葉性のつる植物で、国内では、本州、四国、九州北部に分布する。全国版レッドデータブック (我が国における保護上重要な植物種および植物群落に関する検討委員会種分科会編, 1989) では、危急種として位置づけられ、神奈川県版レッドデータブック (神奈川県レッドデータ生物調査団編, 1995) では、絶滅危惧種として報告されている。

神奈川県内のカザグルマの産地は、横浜市保土ヶ谷区と相模原市が知られるほか (神奈川県植物誌調査会編, 1988; 山口, 1997ほか)、松浦 (1958) に記録があり、かつては箱根方面にも分布していた。

カザグルマの群落については、石田ほか (1996) による詳しい報告があるほか、村上 (1986) がカザグルマ群落を報告している。田中 (1994, 1996) は、神奈川県内のレッドデータ植物あるいはそれに準ずる植物であるハコネコメツツジやカワラノギクの群落について、その現状を報告してきた。ここでは、それらの報告に続いて、横浜市保土ヶ谷区で記録されたカザグルマを含む群落について報告する。しかし、その目的は、カザグルマ群落に関する植物社会学的な研究という面よりも、カザグルマというレッドデータ植物が、どのような植物群落の構成種となっているかを明らかにすることにある。

調査地は、横浜市保土ヶ谷区川島町の段丘崖斜面である (標準地域メッシュ5339-14-65; 北緯35° 28' 03" 東経139° 34' 23")。神奈川県植物誌調査会編 (1988) には、保土ヶ谷区のカザグルマは、調査期間中に工事により消失したことが記録されているが、今回の調査地は、工事後再生したものか、消失した産地とは別の産地であるかは不明である。周辺はシラカシを中心とする段丘崖斜面林やアズマネザサ群落、遊歩道が整備された園地で、カザグルマは、林縁やつづら折れの遊歩道に挟まれた緑地に生育していた。調査はカザグルマの生育する2植分において、Braun-Blanquet (1964) ほかの植物社会学的手法により1995年5月18日に行った。

カザグルマ群落 *Clematis patens* community

種組成と構造: 草本第1層では、アズマネザサやヒメコウゾ、マユミなどの低木類を、カザグルマやミツバアケビ、キツタ、カナムグラ、オニドコロなどのつる植物が被っており、草本第2層には、ドクダミやヤブニンジン、スギナ、ツユクサなどが生育している。構成種の多くは、先駆性の高い陽樹や、マント群落の主要な構成要素となるつる植物である。

今回記録された植分では、草本第1層は高さ150cm、植被率80~90%、草本第2層は高さ20~25cm、植被率10~20%で、草本第2層は、草本第1層に被圧され、植被率も小さく、出現種も少ない。

立地条件: 今回の調査で記録された植分は、比較的最近において、人為的な攪乱を受けたと考えられる、林縁やつづら折れの遊歩道に挟まれた緑地に成立していた。カザグルマ本来の自然条件下での生育立地は湿生環境であるが、2次林の林縁やソデ群落などの人為影響下にも生育していることが指摘されている (石田ほか, 1996ほか)。今回記録された植分も、生育地の観察から、人為環境下に成立したものであった。

植物社会学的な位置づけ: わずか2植分の植生調査資料で、その植物社会学的な位置づけを議論することは困難であるが、関連する既発表資料として、石田ほか (1996) の兵庫県三田市のカザグルマ群落や村上 (1986) が埼玉県長瀨より報告したカザグルマ群落の資料、および関東地方から記録されているマント群落などと比較した。

石田ほか (1996) は、そこで報告しているカザグルマ群落とミヤコイバラウメモドキ群集との関連性を指摘しつつも、その位置づけを保留している。本報の資料と、石田ほか (1996) が報告している資料を比較すると、ミツバアケビやドクダミ、スギナなどの共通種を含む。しかし、調査地の植物相の相違に起因し、本報の資料では、

表 1. 横浜市保土ヶ谷区のカザグルマ群落群落表.

通し番号	1	2	Relevé reference number
調査番号	HO	HO	Original relevé number
	1	2	
調査年月日	1995	1995	Relevé date
	5	5	
	18	18	
調査面積(m ²)	9	8	Quadrat size
海拔高(m)	38	36	Altitude
斜面方位	NE	NE	Aspect
斜面傾斜(°)	20	30	Inclination
低木層の高さ(cm)	150	150	Height of herb layer 1
低木層の植被率(%)	90	80	Cover of herb layer 1
草本層の高さ(cm)	25	20	Height of herb layer 2
草本層の植被率(%)	10	20	Cover of herb layer 2
出現種数	8	11	Number of species

群落区分種				Differential species of community
カザグルマ	H1	2・3	2・2	<i>Clematis patens</i>
ノイバラクラスの種				Character species of Rosetea multiflorae
アズマネザサ	H1	4・5	2・3	<i>Pleioblastus chino</i>
ミツバアケビ	H1	+・2	1・2	<i>Akebia trifoliata</i>
	H2	+・2	.	

随伴種 Companion species

出現 1 回の種 Additional species occurring once in relevé reference no. 1: ヒメコウゾ
Broussonetia kazinoki H1-2・2, キツタ *Hedera rhombea* H2-1・2, ドクダミ *Houttuynia cordata* H2-+・2, ヤブニンジン *Osmorhiza aristata* H2-+, タニギキョウ *Paracarpa carnosa* var. *circaeoides* H2-+; no.2: マユミ *Euonymus sieboldianus* H1-2・1, アカネ *Rubia argyi* H2-1・2, カナムグラ *Humulus japonicus* H2-+・2, オニドコロ *Dioscorea tokoro* H1-+・2, H2-+・2, ススキ *Miscanthus sinensis* H2-+, スギナ *Equisetum arvense* H2-+, ツユクサ *Commelina communis* H2-+, ヤマホトギス *Tricyrtis macropoda* H2-+.

ウメモドキやミヤコイバラなどを欠いているため、ミヤコイバラ・ウメモドキ群集との関連は遠い。さらに、本報の資料では、アオツツラフジやスイカズラなど、本調査地周辺にも生育するいくつかの種群を欠き、出現種数も少なく、より断片的な植分であることが推察される。

村上(1986)の報告したカザグルマ群落は、出現種数が11種であり、本報の資料と大きな差はない。しかし、その共通種はカザグルマのみで、類似性は低い。

関東地方からこれまで報告されているマント群落などの植生単位のうち、本報の植分と最も類似性が高いものは、村上(1986)が報告した、高さ3~5mに達するアズマネザサの密生植分であるミツバアケビ・アズマネザサ群落である。この群落は、景観や植生高は異なるが、アズマネザサやミツバアケビ、カナムグラ、アカネなど共通の種群を含み、草本第2層は被圧され、わずかに生育しているなど、類似点が多い。記録された植分は、カザグルマ1種により特徴づけられるのみで、定期的な刈り取りなどの人為的な影響により変質したミツバアケビ・アズマネザサ群落としても捉えられる。

以上のことから、今回報告したカザグルマ群落は、カザグルマが主体となるものではなく、もともと分布地、生育量ともに少ないカザグルマの生育地に、人為的な攪乱が加えられた結果生じた、断片的な植分であると言える。

なお、今後、相模原市の生育地においても資料を収集し、保土ヶ谷区の植分との比較も含め、その現状を報告する予定である。

引用文献

- Braun-Blanquet, J., 1964. *Pflanzensociologie, Grundzüge der Vegetationskunde*. 865pp. Springer-Verlag, Wien/New York.
- 石田弘明・服部保・永吉照人・鈴木武・小館誓治・菊田穰・赤松弘治・山戸美智子, 1996. 三田市のカザグルマ群落に関する報告. 人と自然, (7):97-104.
- 神奈川県レッドデータ生物調査団(編), 1995. 神奈川県レッドデータ生物調査報告書. 神奈川県調報(自然科学)(7), 8 pls. +257pp. 神奈川県立生命の星・地球博物館, 小田原.
- 松浦茂寿, 1958. 箱根植物目録. 5+90+2+25pp. 箱根博覧会, 小田原.
- 村上雄秀, 1986. 林縁生低木一つる植物群落. 宮脇昭編著, 日本植生誌7 関東, pp. 248-258. 至文堂, 東京.
- 田中徳久, 1994. 神奈川県植物群落1. ハコネコメツジ群落. 神奈川自然誌資料, (15):53-58.
- 田中徳久, 1996. 神奈川県植物群落2. カワラノギク群落. 神奈川自然誌資料, (17):1-7.
- 我が国における保護上重要な植物種および植物群落に関する検討委員会種分科会編, 1989. 我が国における保護上重要な植物種の現状. 320pp. 日本自然保護協会・世界自然保護基金日本委員会, 東京.
- 山口一郎, 1997. 市域の希少植物について. 相模原市立博物館研究報告第6集, 23-30.

(受付:1997年11月28日, 受理:1997年12月11日)

資料

全国の博物館園における視覚障害者の対応に関する
アンケート調査結果報告A preliminary Study on Museum Management
for People with Disabilities in Japan

奥野花代子

神奈川県立生命の星・地球博物館

Kayoko Okuno

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History, 499 Iryuda, Odawara, Kanagawa 250-0031, Japan

Key Words : Museum management, disabled people, universal display, questionair analyses, life-long learning.

I. はじめに

神奈川県立生命の星・地球博物館は、1995(平成7)年3月20日の開館以来、“開かれた博物館”として様々な活動を展開している。館内は広く、エレベータやエスカレータ、障害者用トイレ等が設備されていることから障害を持った方にも安心して利用していただいている。

国連決議により1981(昭和56)年を「国際障害者年」とし、「完全参加と平等」が目標に掲げられ、障害者の社会への参加、関心度が高められた。この年を契機に公共施設等では、段差をなくしてスロープにし、エレベータ、リフト、手すりを設置したり、また障害者用トイレや専用駐車スペースを確保するなどの整備を進めてきた。

博物館園の場合もハード面ではかなり改善され、最近開館した館園では少なからずその対策がとられている。現在、リニューアルを予定している館園でも、障害者用設備を併せて計画している所が多い。しかし、ハード面の整備に比べ、ソフト面では全体的にその対応が遅れている観がある。とくに視覚障害者の利用にあたっては、各々の館園で検討され、様々に試みられてはいるものの充分とは言い難い。それは、博物館の場合には、“もの”を対象とし、必然的に視覚をとおしての展示やそれを補完する映像表現が多くなるために、視覚障害者には大きな障壁が存在することに起因すると思われる。

一般に“手を触れてはいけない、写真撮影も禁止”という博物館が多いなかで、神奈川県立生命の星・地球博物館の展示は、できる限り来館者に近づけ、触れることのできる展示物もある。また、音声ガイド等も用意したことから視覚障害者の利用も多い。しかし、後述するように、いくつかの改善を要する箇所も残されている。

以上のような状況から、「目の不自由な人のための優しい博物館とは」そのありようについて、アンケート調

査や研究を進めた結果を報告する。

あわせて、アンケート調査と並行して実施した全国の博物館園への現地訪問調査の事例や、当館で開催した視覚障害者との座談会(1997.7.31)、および視覚障害者が当館を利用した際に寄せられた意見や要望等をも紹介する。

この報告が、神奈川県立生命の星・地球博物館の対策を検討するだけのものではなく、その方策を今後計画される館園の一助になれば幸いである。

なお、本調査は「博物館における視覚障害者のための展示、学習支援活動および学習教材の開発等に関する実態調査とその研究」という課題で、平成9年度笹川科学研究助成を受け、研究の一環として実施したものである。

II. 調査・研究の目的

前述のように、当館は展示の一部に触れられ、音声ガイド等も用意して視覚障害者にも理解しやすいよう努力した。しかし、一層利用しやすい博物館を目指すためには、視覚障害者への対応やその利用方法等について、博物館園の実情を把握する必要があり、全国規模でのアンケート調査を行うことにした。

なお、視覚障害者には出生時またはごく幼少の頃から目の不自由な方と途中で失明した方、また全盲の方と弱視の方が存在し、それぞれの対応には方策の違いを生ずる。が、ここでは同様に扱うこととし、個々に対策をたてなければならない時のみ対象を記載することにする。

また、本来「障害者」「健常者」というように分けて考えるべきではなく、「障害者に配慮する」ことは「すべての人に配慮されたもの」(ユニバーサル思考)である。しかし、その対策を検討していくために、ここではあえて、「視覚障害者のために」という限定的な表現や用語を使用する。

Ⅲ. 調査方法

現在、日本には多種多様な博物館があり、その数は、『平成8年度文部省社会教育調査速報』によると、登録博物館及び博物館相当施設は986館、博物館類似施設は3,522館を数え、両方を合わせると4,500館を超える。

そこで、総合博物館も含めて全国科学博物館協会加盟館園（自然系と記す）233館園と、全国の国公立の主な人文系博物館園（人文系と記す）181館園を対象に、『博物館における視覚障害者への対応について』のアンケート調査（図1）を、1997（平成9）年4月末から6月にかけて実施した。このうち自然系182館園と人文系156館園から回答が得られた（表1-1）。その館種別の内訳は、表1-2に掲げる通りである。

Ⅳ. 調査結果

1. 各館園の視覚障害者への対応の現状

(1) 誘導について

まず、アンケート調査項目の「誘導用ブロック設置状況」について、「最寄り駅から」あるいは「展示室内に」設置されている館園は全体的に少なく、「駐車場から」でも全体のわずか14%である（表2）。

誘導用ブロックには、「進め」の意味を示す線状のもの（誘導ブロック）と、「止まれ」または「何らかの意味をもった場所」すなわち“ここです”という意味を示す一例えば、案内板のある場所、階段の始めと終わり、横断歩道の入り口、エレベータの場所を知らせる、など一点状のもの（警告ブロック）の2種類がある。それは原則として黄色に着色されている。

名古屋市博物館は、駐車場から玄関にかけて黄色の誘導用ブロックが敷かれ、スロープも設置されている（図2）。四日市市立博物館の玄関マットは、弱視の方のためにも考慮された特製の濃い黄色のものが用いられており（図3）、いずれも分かりやすいよう配慮されている。

博物館施設ではないが、誘導面等において障害者をよく考慮した例として、大阪府堺市大泉緑地内のセンサリー・ガーデン「ふれあいの庭」と大阪府りんくう公園を

表1-1. アンケート実施館園数

	通知数	回答数	回答率（%）
自然系	233	182	78.1
人文系	181	156	86.2
全体	414	338	81.6

表1-2. 館種別内訳

	館種別	通知数	回答数	回答率（%）
自然系 （科博協加盟館）	総合	56	41	73.2
	自然史	55	41	74.5
	科学館	97	80	82.5
	動物園	9	7	77.8
	植物園	5	2	40.0
	水族館	11	11	100.0
人文系	複合	104	89	85.6
	郷土館	47	41	87.2
	歴史館	30	26	86.7

紹介してみよう。

「ふれあいの庭」には、誘導用ブロック及び手すりが設けられている。それを頼りに行くと触知板と音声ガイドが設置されていて、触知板には園内案内図と墨字および点字の説明が施されている。車イスからでも触れられるように花壇が高く造られ、花壇の下は車イスのタイヤが引っ掛からないように凹ませてある（図4）。花壇には、香りの良い草花や食用となる植物が植えられている。また、水の落ちる音（水琴窟）や風の音にも耳が傾けられるような場もある。

表2. 「点字ブロック設置状況」 *以下、（ ）内は割合を示す

		あ	る	な	い	検討中	その他	不	明
最寄り 駅から	自然系	13	(7.1%)	160	(87.9%)	1	2	6	
	人文系	10	(6.4%)	135	(86.5%)	2	2	7	
	全 体	23	(6.8%)	295	(87.3%)	3	4	13	
駐車 場から	自然系	24	(13.2%)	145	(79.7%)	2	5	6	
	人文系	24	(15.4%)	122	(78.2%)	2	3	5	
	全 体	48	(14.2%)	267	(79.0%)	4	8	11	
展示 室内に	自然系	13	(7.1%)	157	(86.3%)	4	3	5	
	人文系	5	(3.2%)	144	(92.3%)	4	0	3	
	全 体	18	(5.3%)	301	(89.1%)	8	3	8	

「博物館における視覚障害者への対応について」アンケート調査のお願い
神奈川県立生命の星・地球博物館

お忙しいなか誠に申し訳ございませんが、○印またはご記入いただきたくよろしくお願い申し上げます。

貴館園名 _____

連絡先の電話番号 _____ () 記入者の所属・氏名 _____ ・ _____

誘導について

I. 誘導ブロックが設置されていますか

- I-1. 最寄り駅から ア. ある イ. ない ウ. 検討中 エ. その他 ()
I-2. 駐車場から ア. ある イ. ない ウ. 検討中 エ. その他 ()
I-3. 展示室内に ア. ある イ. ない ウ. 検討中 エ. その他 ()

II-1. 館内の誘導はどのように対応されていらっしゃるでしょうか

- ア. 職員が行っている イ. 案内員等が行っている ウ. とくにしていない
エ. 誘導のためのボランティアがいる オ. 連絡があった時のみ行っている
カ. その他 ()

展示物・展示補完教材について

III-1. 基本的には展示物に触れられる

- ア. はい イ. いいえ ウ. その他 ()

III-2. 触れる展示コーナーがある

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他 ()

III-3. 利用の申し出があれば、触れられる物を用意する

- ア. はい イ. 難しい ウ. 検討中 エ. その他 ()

III-4. 展示室内に点字解説パネルが設置されている

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他 ()

III-5. 展示室内に音声ガイド用の配線がされている（機器のみの貸し出し）

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他 ()

III-6. 展示解説用の音声テープが用意されている（機器とテープの貸し出し）

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他 ()

III-7. 点字の展示解説書が用意されている

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他 ()

III-8. 点字の簡単な概要パンフレットが用意されている

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他 ()

III-9. 点字のワークシートが用意されている

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他 ()

図1. アンケート用紙

学習活動について

IV-1. 視覚障害者向けに学習活動を企画・実施している

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. 過去に実施したことがある
オ. その他（ ）

「ア. はい」「エ. 過去に実施したことがある」と答えられた館園にうかがいます

IV-1-① どのような内容ですか（複数可）

- ア. 展示解説 イ. 講座 ウ. 体験（実習）学習
エ. 野外観察会 オ. その他（ ）

IV-1-② 参加のよびかけは

- ア. 学校・団体を通じて イ. 館から直接 ウ. 新聞・広報誌等に
エ. その他（ ）

IV-1-③ 実施時期はいつ頃ですか 年 月頃 回位

IV-1-④ 実施予算は

- ア. ついている（年額およそ 千円） イ. ついていない
ウ. 特別予算を組んだ エ. その他（ ）

学習教材について

V-1. 視覚障害者向けに学習教材が用意してありますか

- ア. はい イ. いいえ ウ. 検討中 エ. その他（ ）

「ア. はい」と答えられた館園にうかがいます

V-1-① どのようなものですか

- ア. 実物標本（具体的に ）
イ. 複製標本（具体的に ）
ウ. 模型 （具体的に ）
エ. その他 （具体的に ）

その他

VI. 利用や学習活動の際に考慮されている点があれば列挙してください

.....

.....

ご協力ありがとうございました。6月10日までに同封の封筒にてご回答いただきたくよろしく
お願い申し上げます。なお、この調査は、平成9年度笹川科学研究助成を受けて行うものです。

この件に関する問い合わせは、神奈川県立生命の星・地球博物館 奥野花代子

TEL 0465-21-1515 FAX 0465-23-8846



図2. 名古屋市博物館の誘導用ブロックとスロープ



図5. りんくう公園のシンボル緑地の誘導機能

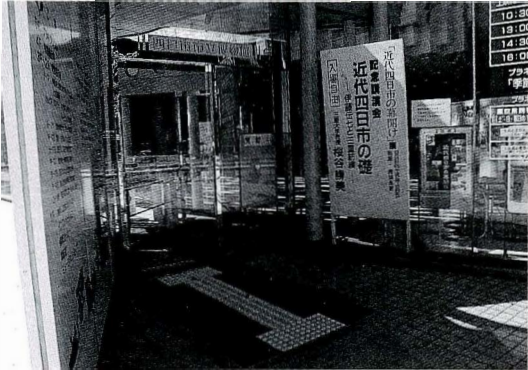


図3. 四日市市立博物館の玄関マット



図6. 点字案内のある手すり（りんくう公園）



図4. 車イスや視覚障害者に配慮された「ふれあいの庭」

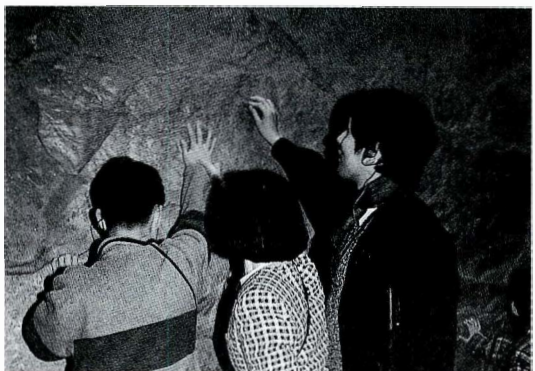


図7. 神奈川県立生命の星・地球博物館の触れる展示

りんくう公園のシンボル緑地南ゾーンには、通路に一本の細い半円のアルミ製パイプが埋め込まれ、視覚障害者の誘導機能をはたしている。三本のパイプで区切られた所には、解説板や音声ガイドなどの仕掛けがある（図5）。また、手すりの裏側、握った時にちょうど指が触れる部分に点字の案内があるなど（図6）、細かな配慮がなされている。いずれも障害者だけではなく、誰もが楽しめるように工夫され、広い範囲の五感が使えるようにできている。

次に項目Ⅱの「館内の誘導の仕方」は、全体の75%の館園で、職員をはじめ案内員が対応している（表3）。前項の誘導用ブロックの設置が全体的に少ないことを考え合わせると、各館園では“人対応”を重視していると思われる。とくに、解説員・案内員等を採用している科学館を含む自然系博物館園では、案内員とともにボランティアによる誘導もみられる。人文系博物館園では、自然系に比べて案内員等による誘導は少ないが、半数近く

の館園で連絡があれば対応できる態勢がとられている。

（2） 展示・展示物について

項目Ⅲの「触れられる展示物」については、科学館を含む自然系博物館園では、当県立生命の星・地球博物館を含む35%の館園で基本的に触れることができ（表4, Ⅲ-1, 図7）、半数以上の館園には触れる展示コーナーがある（表4, Ⅲ-2）。

資料の性格上、基本的に展示物に触れることが不可能な人文系あるいは自然系博物館園の中には、別途体験できるコーナーを設けたり、群馬県立自然史博物館のように、展示の流れのなかで触れることのできる資料を明示している例もある（図8）。北海道開拓記念館（図9）や岩手県立博物館（図10）などには体験学習室が設置され、生活用具や伝統遊具、鎧や兜などが備えられ、いろいろな対象を選択できるようになっている。

また、半数近くの館園から「申し出があれば触れられ

表 3. 館内の誘導の仕方は（複数回答あり）

	職 員	案 内 員	な し	誘 導 員	連 絡 時	その他
自然系	32 (17.6%)	26 (14.3%)	46 (25.3%)	3	82 (45.1%)	7
人文系	25 (16.0%)	12 (7.7%)	40 (25.6%)	1	74 (47.4%)	5
全 体	57 (16.9%)	38 (11.2%)	86 (25.4%)	4	156 (46.2%)	12

表 4. 展示について

Ⅲ－ 1. 基本的に展示物に触れる

	は	い	い	い	え	その他	不 明
自然系	64 (35.2%)		101 (55.5%)			16	1
人文系	13 (8.3%)		128 (82.1%)			13	2
全 体	77 (22.8%)		229 (67.8%)			29	3

Ⅲ－ 2. 触れる展示コーナーがある

	は	い	い	い	え	検討中	その他	不 明
自然系	97 (53.3%)		67 (36.8%)			4	7	7
人文系	54 (34.6%)		86 (55.1%)			5	5	6
全 体	151 (44.7%)		153 (45.3%)			9	12	13

Ⅲ－ 3. 申し出があれば、触れる物を用意する

	は	い	難	し	い	検討中	その他	不 明
自然系	72 (39.6%)		62 (33.5%)			18	10	20
人文系	72 (46.2%)		57 (36.5%)			17	7	3
全 体	144 (42.6%)		119 (35.2%)			35	17	23

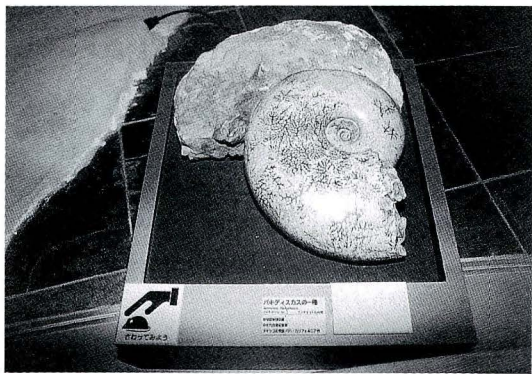


図 8. 群馬県立自然史博物館の触れる展示物

る物を用意する」との回答があり（表 4，Ⅲ－ 3）、各館園の準備体制が整いつつあるように見える。

全国の博物館園の中でも視覚障害者のための展示室を設け、テーマ展示を企画、実施している館として前出の名古屋市博物館がある。筆者が訪ねた時には「和装本のかたち」というテーマで展示が構成され、点字の小解説



図 9. 北海道開拓記念館の体験学習室

書と音声ガイドが用意されていた。それまでは「仏像」の展示が催されていたとのことである。ただ、この視覚障害者のための展示を行っている「触れてみる学習室」が、一般来館者でも気づきにくい階下に設けられていることに工夫すべき点が残ると感じた。

また、箕面昆虫館でも、視覚障害者に対応した展示を

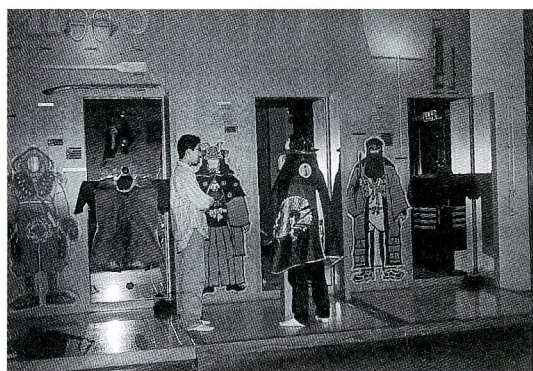


図10. 岩手県立博物館の体験学習室



図13. 福島県大熊町民俗伝承館の月別の話題の掲示

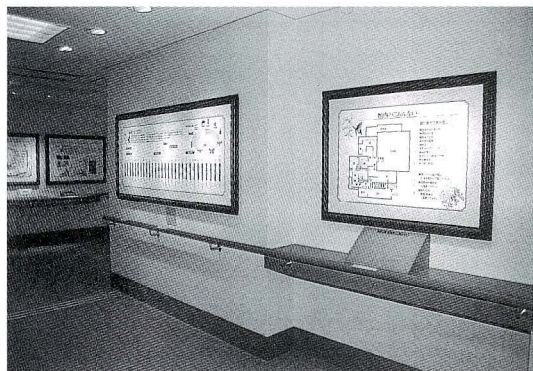


図11. 手すりや点字板が設置された箕面昆虫館の展示室

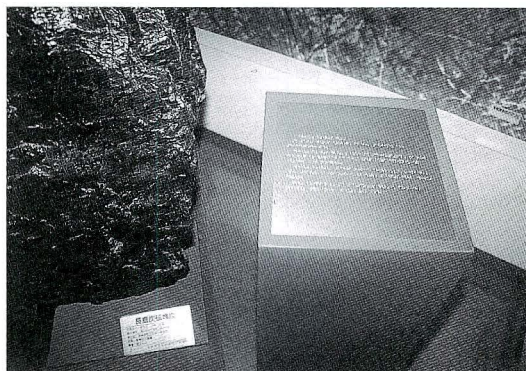


図14. いわき市石炭・化石館の点字による解説

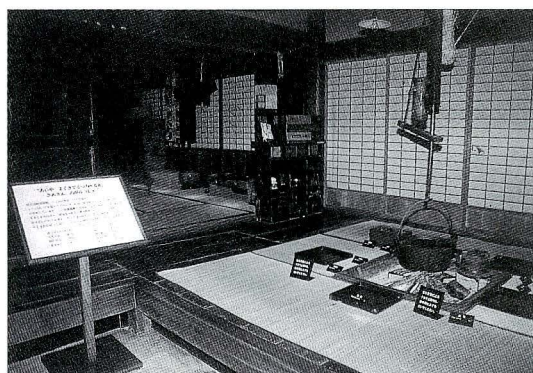


図12. 福島県大熊町民俗伝承館の民家の内部



図15. 「ふれあいの庭」で用いられている解説表示

積極的に行っている。展示室壁面には手すりや点字板が設置され（図11）、触覚、嗅覚、聴覚を使う様々な展示が工夫されている。弱視の方に配慮した例として、標本が鎖でつながり、目の近くまで持ってきて見ることができる展示もある。そして、チョウが飛び交う様が体感できる放蝶温室が隣接している。

展示効果をさらに高めるものとして、展示室における音響がある。地底の森ミュージアム・仙台市富沢遺跡保存館では、展示室の周りに木製のパイプ型スピーカーが内蔵され、環境音楽が静かに流され、太古へ吸い込まれていくような演出がなされている。

また、福島県大熊町の図書館内にある民俗伝承館は、館内に古民家が移築（図12）され、その部屋の中には生活用具のほか30数台のスピーカーが内蔵されている。1年の生活の様子が月ごとの話題別に用意され（図13）、部屋の中にと、地元の生活の中の会話が周囲の状況とともにごく自然に伝わってくる。それは、雨や風、雷

などの自然の音のほか、戸を開閉する音、下駄の音が遠くから近くへ、藁束を投げる音など巧みに表現され、いつの間にか生活の中に溶け込んでしまう感じを受ける。

“もの”中心の視覚・触覚展示に加え、上記のような音響を付加した展示はさらなる効果をあげる。

（3） 展示補完教材について

「点字解説パネルの設置」状況は、自然系では仙台市こども宇宙館、いわき市石炭・化石館（図14）、群馬県立自然史博物館、埼玉県立自然史博物館、富山市科学文化センター、きしわだ自然資料館、和歌山県立自然博物館、倉敷市立自然史博物館の8館で、人文系では千葉県立房総風土記の丘、東京都江戸東京博物館、栗東歴史民俗博物館の3館と少ない（表5、III-4）。

ところで、前記のセンサリー・ガーデン「ふれあいの庭」で用いられている解説表示は、屋根型（図15）にして、表側は墨字で、裏側に点字で解説を施し、しかも点

表 5. 展示補完教材について

Ⅲ	点 字 解 説 パ ネ ル		は	い	い	い	え	検討中	その他	不 明
Ⅲ 4	点 字 解 説 パ ネ ル	自然系	8 (4.4%)		164 (90.1%)			6	4	0
		人文系	3 (1.9%)		148 (94.9%)			3	1	1
		全 体	11 (3.3%)		312 (92.3%)			9	5	1
Ⅲ 5	音 声 ガ イ ド	自然系	9 (4.9%)		161 (88.5%)			5	5	2
		人文系	4 (2.6%)		143 (91.7%)			4	4	1
		全 体	13 (3.8%)		304 (89.9%)			9	9	3
Ⅲ 6	音 声 テ ー プ	自然系	18 (9.9%)		155 (85.2%)			2	7	0
		人文系	3 (1.9%)		142 (91.0%)			4	6	1
		全 体	21 (6.2%)		297 (87.9%)			6	13	1
Ⅲ 7	点 字 解 説 書	自然系	5 (2.7%)		175 (96.2%)			1	1	0
		人文系	2 (1.3%)		150 (96.2%)			1	1	2
		全 体	7 (2.1%)		325 (96.2%)			2	2	2
Ⅲ 8	概 要 パ ン フ	自然系	6 (3.3%)		174 (95.6%)			2	0	0
		人文系	7 (4.5%)		145 (92.9%)			1	2	1
		全 体	13 (3.8%)		319 (94.4%)			3	2	1
Ⅲ 9	点 字 シ ー ト	自然系	0 (0.0%)		179 (98.4%)			3	0	0
		人文系	0 (0.0%)		156(100.0%)			0	0	0
		全 体	0 (0.0%)		335 (99.1%)			3	0	0

字は下側から始まり、上に向かって読む形式になっている。この配置は手を無理に曲げなくてすみ、読みやすいとのことであり、目立たぬ所に視覚障害者への配慮がなされた一例である。今後、博物館園での点字による展示解説表示等の参考例になる可能性があるだろう。

次に「展示室内に音声ガイド用の配線がされている」のは、自然系では、日本金属学会附属博物館、東金文化会館の東金こども科学館、労働省産業安全研究所の附属産業安全技術館、川崎市青少年科学館、富山県立山博物館、神戸市立王子動物園の動物科学館、津山科学教育博物館、愛媛県立博物館、沖縄県立博物館の9館、人文系では、大宮市立博物館、国立歴史民俗博物館、東京都江戸東京博物館、半田市立博物館の4館である（表5、Ⅲ－5）。そして、「展示解説用テープが常備されている」館園は、自然系が18館園あるのに対し、人文系は北海道開拓記念館、東京都江戸東京博物館、諏訪市博物館の3館と少ない（表5、Ⅲ－6）。

「点字の解説書が用意されている」のは、自然系では5館で、ミュージアムパーク茨城県自然博物館『見学のしおり』、埼玉県立自然史博物館の『観覧のしおり』、千葉県立中央博物館の『見学のしおり』、神奈川県立青少年センターの『科学展示のしおり』と和歌山県立自然博

物館の『点字解説書』である。人文系では2館で、北海道開拓記念館『常設展示の解説』と東京都江戸東京博物館の『見学のしおり』である（表5、Ⅲ－7）。

「点字の簡単な概要パンフレットが準備されている」のは、自然系では、千葉県立現代産業館、きしわだ自然資料館、広島市こども文化科学館、広島市健康づくりセンター健康科学館、広島市江波山気象館、沖縄県立博物館の6館である。人文系では、北海道開拓記念館、東京都江戸東京博物館、杉並区立郷土博物館、横浜市歴史博物館、川崎市立日本民家園、舞鶴市立赤れんが博物館、国立民族学博物館の7館である（表5、Ⅲ－8）。

「点字のワークシートを用意している」館園は、今回のアンケート調査の回答中には全くなく、自然系の3館園で検討されているだけである（表5、Ⅲ－9）。今後の開発がまたれる。

（4） 学習活動と学習教材について

項目Ⅳ「視覚障害者向けに学習活動を実施している」のは、自然系では仙台市科学館、ミュージアムパーク茨城県自然博物館、東京都児童館、松本市科学館、新潟県立自然科学館と龍河洞博物館の6館である（表6、Ⅳ）。

また、「視覚障害者向けの学習活動を過去に実施した

表 6. 学習活動・学習教材について

		は	い	い	い	え	検討中	実施済	その他
IV 学習活動	自然系	6 (3.3%)	153 (84.1%)	1	1	1	1	1	1
	人文系	0 (0.0%)	144 (92.3%)	5	6				1
	全 体	6 (1.8%)	297 (87.9%)	1	6	1	7		2
V 学習教材	自然系	11 (6.0%)	165 (90.7%)	6	0				0
	人文系	6 (3.8%)	141 (90.4%)	6	2				1
	全 体	17 (5.0%)	306 (90.5%)	1	2		2		1

ことがある」のは、当館を含む11館園で、栃木県立博物館、板橋区立熱帯環境植物園、東京都高尾自然科学博物館、観音崎自然博物館、川崎市青少年科学館、岐阜県博物館、名古屋市科学館、鳥羽水族館、伊丹市昆虫館、太地町立くじら博物館である。

仙台市科学館では、ホタテガイやサメ歯の化石と現世の標本を比較教材にして視覚障害者への学習活動を行っており、茨城県自然博物館では、盲学校へ資料を持っていく移動博物館を実施している。逆に、栃木県立博物館をはじめ実施したことがある、または実施している館園のほとんどは、盲学校が博物館を利用した際に博物館資料を用意して説明を行う形をとっている。東京都児童館では、子ども向けの点字講習会なども実施している。

今回のアンケート結果の中には、視覚障害者向けの野外での自然観察会や学習活動の例は見られない。からだの不自由な人との自然観察の実際については、「ネイチャー・フィーリングーからだの不自由な人たちとの自然観察」(日本自然保護協会, 1988)や「三瓶フィールドミュージアムにおけるネイチャー・フィーリングーからだの不自由な人たちとの自然観察」(三瓶フィールドミュージアム財団, 1995)等で報告されている。今後は野外での活動事例も少しづつ報告されるであろう。

また、今回のアンケート結果には、学習活動を実施している人文系博物館園の事例はない。過去に実施したことがあると回答を得たのは、旭川市博物館、川越市立博物館、浜松市博物館、倉吉博物館、西条市立郷土博物館の5館である。盲学校が見学の際に協力して、土器や石器などの触れても構わない資料を用意したり、銅鐸を鳴らして音を楽しむなどの例が報告されている。

項目 V「視覚障害者向けに学習教材を用意している」館園(表 6, V)は、自然系ではミュージアムパーク茨城県自然博物館、国立科学博物館、たばこと塩の博物館、観音崎自然博物館、江ノ島水族館、上越市立水族博物館、のと海洋ふれあいセンター、鳥羽水族館、和歌山県立自然博物館、南方熊楠記念館、太地町立くじら博物館の11館である。

人文系では函館市立函館博物館、北海道開拓記念館、栃木県立博物館、川越市立博物館、東京都江戸東京博物館、和歌山県立紀伊風土記の丘の6館である。

自然系博物館園で用意している教材は、実物資料とし

て、アンモナイトや恐竜の化石、隕石、岩石、鉱物、貝類などの標本のほか、小動物の剥製やアシカの剥製、クジラの骨格標本、イルカの頭骨などである。また、動物や鳥の鳴き声のテープ、植物の匂いが出る装置、タッチプールなどでの生きた生物など様々な資料がある。館園によっては、恐竜のように大きなものは縮小模型を、昆虫や木の実などは拡大模型をともに揃えている。

神奈川県立生命の星・地球博物館で行った座談会で、筑波大学附属盲学校の鳥山教諭は、盲学校の学習教材としては、剥製より骨格標本の方が効果があることを指摘している。剥製はしっかり物が詰めてある感触で、生きた物と見た目は同じでも盲学校の生徒には違う感触だと話している。そしてその学習活動の実際を「モンキー」(237)の中で、「骨格標本を利用した盲学校の生物の授業」として記述している。

人文系博物館園においては、石器や土器などの考古資料、衣類や薬製品などの民俗資料のほか、複製資料として仏像や縄文時代の狩猟道具、銅鐸や銅剣などが準備されている。

この他、視覚障害者へ向けた講演会や講座を開催する際の便利な教材として、ゴム板の上でボールペンなどで図を書くと、その部分が浮き上がる特殊なシート(レーザライターとよばれている)や立体コピーなどがある。

(5) その他

アンケート項目 VIの「視覚障害者の利用や学習活動の際に考慮している点」として、利用する学校との綿密な打合せや連絡、利用上の安全性や危険防止(例として、カモシカの角の先にキャップをかぶせるなど)、入館料の免除や減免などが挙げられている。

特筆すべきこととして、「第7回指定都市科学館連絡会議」が札幌市青少年科学館で開催され(1997. 7. 10)、北九州市青少年科学館から「障害者に対する施設・設備の設置および解説等について」の提案がなされた、という話を札幌市青少年科学館への視察の際に伺った。

また、前記のミュージアムパーク茨城県自然博物館では障害者週間にちなみ、視覚障害者向けの特別展示や体験学習、盲学校での移動博物館などを実施している。一般に「障害者の日」(12月9日)や障害者週間(12月3日～9日)の認識が少ない中で、障害者に配慮している

博物館の積極的な取り組みがみえる。

千葉県博物館職員研修会(1997. 12. 18. 千葉県教育委員会主催)でも、「博物館における障害者の利用」の講演と「外国における障害者の利用」および「盲学校における博物館利用」の事例が発表されたとのことである。

熊本県立大学生生活環境学科村上研究室では、「博物館における視覚・聴覚障害者に対する配慮に関する調査」を実施した(1997. 11)。結果報告が期待される。

以上のことなどから、現在、博物館園における障害者の利用について大きな関心が向けられ、今後、博物館園としての対応が積極的に図られていくように思える。

2. 神奈川県立生命の星・地球博物館での視覚障害者への対応の現状と今後の課題

(1) 神奈川県立生命の星・地球博物館での視覚障害者への対応の現状

神奈川県立生命の星・地球博物館では、触れる展示の採用や音声ガイドの準備、また、「点字サイエンス」(vol. 176)や毎日新聞社発行の「点字毎日」(no. 3832, 1997年3月16日発行)あるいは視覚障害者団体の会報誌などへの広報活動の協力により、視覚障害者の来館も多く、全国の視覚障害者の方々にも当館の存在が知られつつある。しかし、視覚障害者が利用しやすい博物館を考えた時には、なお改善を要する部分がある。

ア. 誘導について

敷地から玄関へ用いられている誘導用ブロックは、線の短い4本のものである。地下駐車場から地下の入り口までは6本のものが、外のエレベータからレストンへは8本のものが使われている。建築デザインとの関係で、いずれも敷設タイルと同色の線の短いものが用いられているが、弱視の方には見えにくいとのことである。また、玄関の二重扉の近くからエントランスホールへかけての床には、銀色の誘導表示が設置されているが、扉内から4本線のものが5本線に代わる(図16)。

全盲の方からは誘導用ブロックは線の短いものや小判型の小さいブロックが互い違いになっているもの、弱視の方からは敷設タイルと同色または同系色のものは判りにくく、黄色の直線のものが良いとの意見がある。

障害者への誘導や案内は、できるだけ職員が対応するよう心がけているが、入口の総合案内カウンターが展示室の方を正面にしているため、来館者に背中を向けた形になり(図17)、障害者の方が来られたことに気づきにくいのが現状である。

イ. 展示や点字による展示解説等について

高齢者や弱視の方から、「展示室の照明が暗い」と、車イス利用者からは、「展示された標本の下側(裏側)しか見えないところがある」、「エントランスホールのエレベータや障害者用トイレが狭い」などの意見が寄せられている。これらは、設計の段階で考慮されることが望ましいと思われる。

点字による展示解説パネルは、各展示室の入口に設置されているが、展示概要と平面図の解説板の同面に同様

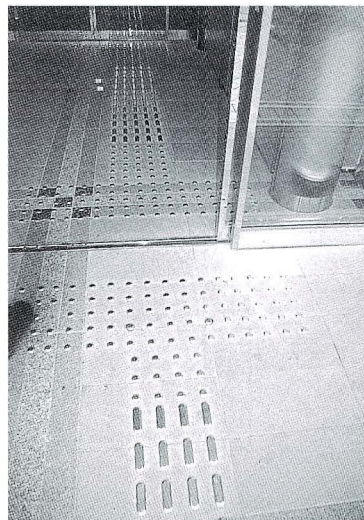


図16. 神奈川県立生命の星・地球博物館の誘導表示の例

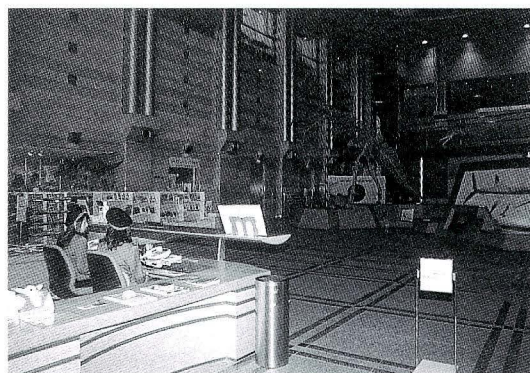


図17. 神奈川県立生命の星・地球博物館の総合案内カウンター(手前が入口である)

に仕上げられたため、エレベータなどに付けられているものに比べ点字の凹凸が薄くなっている。そのため、一字一字確かめながら読むようになってしまう。点字はある程度の早さで追わないと、意味が理解しにくいとのことであり、もっと凹凸のはっきりした読みとり易いものに改善する必要があり、解説板の高さについても再検討の余地がある(図18)。

ウ. 音声ガイドについて

当館の音声ガイド(図19)は、携帯電話を少し大きくしたイヤホン型で、開館2周年を記念して製作したものである。ガイド番号の案内板は三角型にして、表側にガイド番号を記し、裏側に点字シールを貼るようにした。開館後に計画したので、ガイド番号の位置が展示物により様々である(図20・21)。また、展示室入口で機器を貸し出す方法のため、視覚障害者だけでは扱いにくいことが難点である。誘導面も含めて検討する必要がある。

このガイドは、エントランスホールにあるシンボル展示から地球及び生命展示室にかけて、13の展示物を濱田隆士館長と女性アナウンサーとの会話型(質問形式)で、案内・解説している。一方的なガイドではなく、親しみやすく聞きやすいため一般の来館者にも好評である。このガイドは展示物の前だけではなく、館内のどこへでも移動できるため、ミュージアムライブラリーやレストラ



図18. 神奈川県立生命の星・地球博物館の展示室入口の点字による解説板

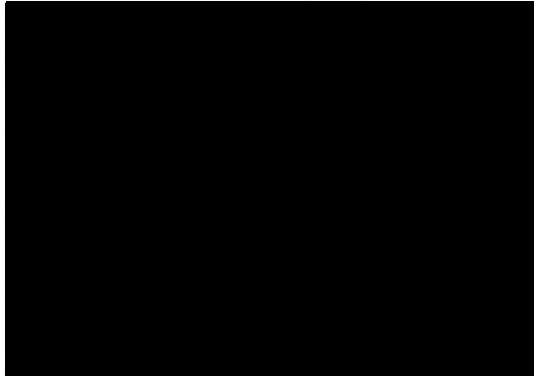


図19. 神奈川県立生命の星・地球博物館の音声ガイド



図20. 神奈川県立生命の星・地球博物館の音声ガイド番号表示（最古の岩石展示）

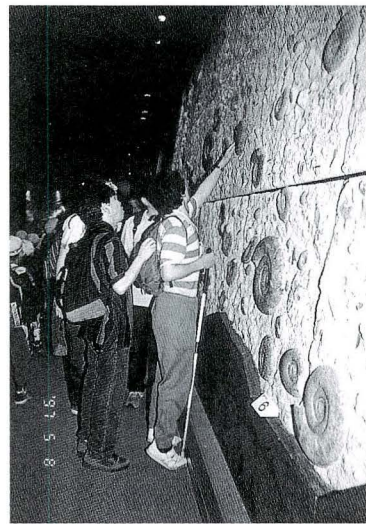


図21. 神奈川県立生命の星・地球博物館の音声ガイド番号表示（アンモナイトの壁）

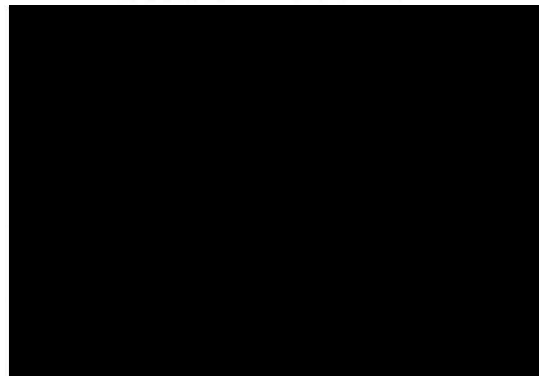


図22. 神奈川県立生命の星・地球博物館の音声ガイドを用いての学習活動

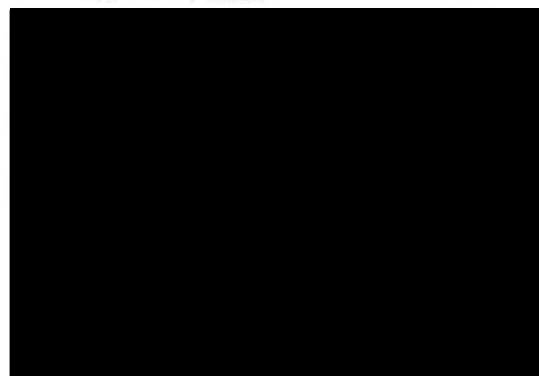


図23. 神奈川県立生命の星・地球博物館の地球展示の実物に触れる

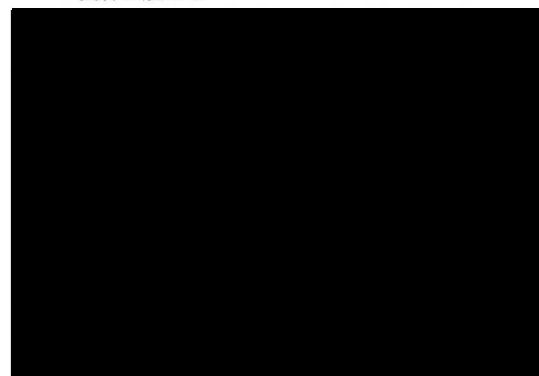


図24. 神奈川県立生命の星・地球博物館の生命展示の恐竜の骨格標本に触れる

ンでゆっくり聞いている姿も見られる。

この音声ガイドの完成に合わせて視覚障害者とその家族および盲学校の先生と生徒を対象に、音声ガイドを実際に展示室で使いながら学習活動を実施した（図22）。また、視覚障害者の対応は、音声ガイドを用いて職員が行っている。実物に触れて感動している様子（図23）、恐竜の骨格標本（複製）の関節や骨格のつくりに興味と関心を示す姿（図24）を見ると、今後もその一つ一つの学習を支援していきたいものと強く感じる。

（2） 神奈川県立生命の星・地球博物館の今後の課題と取り組み

神奈川県立生命の星・地球博物館のかかえる課題としては、最寄りの箱根登山鉄道入生田駅からの道路の安全性や誘導ブロックの改善、館内での休憩・食事場所の確保、介護や誘導のためのボランティア等の協力や養成、

点字解説パネルの設置や点字解説書の作成、学習教材の開発などがある。

一方、1998（平成10）年3月の開館三周年に向けて、「ユニバーサル・ミュージアムをめざしてー視覚障害者と博物館ー」をテーマに、シンポジウムの開催、三周年記念論集『開かれた博物館をめざしてー博物館におけるバリアフリーー』（仮題）の刊行など、いろいろな取り組みを進めている。

また、文部省生涯学習局の科学系博物館活用ネットワーク推進事業の一つとしても、「誰にもやさしい博物館活動ーバリアフリー計画ー」をテーマに3年計画の1年目として、とくに「神奈川展示室の音声ガイド」の製作や視覚障害者との交流会などを予定し、検討を重ねながら準備している。

V. おわりに

視覚障害者の方々は、博物館園の資料に触れ、点字解説書や音声ガイドなどを利用しながら、さらに多くの情報を得て、知識を深めるよう努力されている。実際に館園側で点字解説書や音声ガイド、学習教材などを用意している所は少ない。しかし、各々の館園では様々な方策を検討しながら、視覚障害者がいつでも利用できるような準備体制を整えつつある。逆に視覚障害者の方や盲学校、視覚障害者の団体等にその利用方法などの情報が伝わっているかどうか、博物館園に情報伝達の手段として具体的に何を求めているのか知りたいところでもある。

また、博物館園の多くは、職員をはじめ案内員・解説員、ボランティア等の“人対応”により、館園内を誘導できる態勢にもなっている。むしろ博物館園までのアクセスが問題であり、これは社会全体の問題になってしまうので、ここでは博物館園側の対応の一層の充実を期待したい。

今回の訪問調査では、博物館園の中にはせっかく誘導用ブロックが敷設されているにもかかわらず、その側に案内表示板やチラシの棚が置いてあり、視覚障害者や車イスの邪魔になる光景が見られた。私たち健常者が、管理する側が、指導者が、視覚障害者の方の利用について、もう一度、「誘導用ブロックが何のためにあるのか」を再確認し、万が一少しでも不都合な箇所があるとすれば、適切な対策を講じる必要がある。

博物館園全体の課題として職員の不足や体制の不備、財政的な問題、一般の方の理解不足、管理運営の意識改革など様々であり、今後、別な場での議論や検討の必要を感じる。

博物館は、生涯学習のための開かれた機関として「障害者のために」ではなく、「あらゆる人に」優しい博物館として、“さりげない配慮”に心がける必要がある。

博物館を訪れるすべての人の新たな発見・感動の場となる魅力ある博物館であることを目指して、「実物に触れることのできる博物館」、「いろいろな感覚を使うことのできる博物館」、「体験・体感できる展示が一つでも多くとり入れられた博物館」であるよう期待しながら今後、さらにこの研究を拡充していきたい。

今回のアンケート調査および現地訪問調査を実施した

際に、各地の博物館園の皆様にはお忙しいなか、ご協力いただいたうえに、いろいろな情報、貴重な資料を提供くださったことに対して厚くお礼申しあげる。

本稿をまとめるにあたり、筑波大学附属盲学校の鳥山由子教諭には多大なご教示を賜り、目の不自由な人の立場から、嘉悦女子短期大学の生井良一教授、横浜市立中央図書館の川上正信氏、東京都日野市立中央図書館の中山玲子氏より、貴重な意見・要望をいただいた。末筆ながら記して感謝の意を表したい。

当館の濱田隆士館長には、博物館学をはじめ広い範囲にわたってご指導を賜り厚くお礼申しあげる。

また、アンケートや資料の整理に、博物館ボランティアの佐渡友陽氏、永野文子氏、横溝吉香氏にも協力をいただき、改めてお礼申しあげる。

なお、1997（平成9）年7月31日に当館で開催した座談会記録「目の不自由な人のための博物館のありかたを求めて」（奥野，1998）を、ともに参考にさせていただければ幸いである。

文献

- 池田秀夫，1981. 国際障害者年にあたって. 博物館研究，16（7）：3.
- 磯田亮洋・清水古寿，1983. 視覚障害者のためのはく製展示について. 博物館研究，18（7）：14-16.
- 川上正信，1997. 神奈川県立生命の星・地球博物館の展示品に音声案内. ばね，291：13-14.
- 久住典夫・三輪克，1981. 視覚障害者と博物館. 博物館研究，16（8）：12-15.
- 三宅祥介・浅野房代，1997. 使い手の顔を見たものづくり、ホスピタリティのあるランドスケープ、りんくう公園、シンボル緑地南ゾーン. LANDSCAPE DESIGN，8：78-89.
- ミュージアムパーク茨城県自然博物館，1997. さわってみようー県立盲学校で移動博物館. ア・ミュージアム 自然博物館ニュース，10：1.
- 中島東夫，1982. 博物館における視覚障害者への対応. 博物館研究，17（11）：1-8.
- 名古屋市博物館，1982. 触れてみる学習室. 名古屋市博物館だより，24：4-5.
- 日本自然保護協会（編集・監修），1988. ネイチャー・フィーリングーからだの不自由な人たちとの自然観察. pp. 345, 思索社.
- 大橋桃之輔，1981. 視覚障害者コーナー設置の博物館活動. 博物館研究，16（7）：4-9.
- 奥野花代子，1998. 座談会「目の不自由な人のための優しい博物館のありかたを求めて」. 博物館研究，33（1）：20-23.
- 三瓶フィールドミュージアム財団，1995. 三瓶フィールドミュージアムにおけるネイチャー・フィーリングーからだの不自由な人たちとの自然観察. pp. 44, 三瓶フィールドミュージアム財団.
- 高山久美子，1997. 神奈川県立生命の星・地球博物館のバリアフリー音声ガイドを製作して. Jだより，1：2-3.
- 鳥山由子，1997. 骨格標本を活用した盲学校の生物の授業. モンキー，273：13-17.
- 山本哲也，1996. 博物館のバリアフリー計画. 國學院大學博物館學紀要，21：151-222.

（受付：1997年11月28日，受理：1998年1月21日）

神奈川県立生命の星・地球博物館編集委員会（1997年度）

委員長	濱田 隆士	（館長）
	高橋 俊雄	（副館長）
	広田 優	（管理部長）
	町田 達哉	（企画情報部長）
	中村 一恵	（学芸部長）
	高桑 正敏	（動物・植物チームリーダー）
	平田 大二	（古生物・地球環境チームリーダー）
	田中 徳久	（植物）
	樽 創	（古生物）
	山下 浩之	（編集事務担当）

神奈川県立博物館研究報告（自然科学）27号

1998年3月15日印 刷

1998年3月20日発 行

発行者 神奈川県立生命の星・地球博物館
館 長 濱田 隆士

〒250-0031 神奈川県小田原市入生田499

電話（0465）21 - 1515

FAX（0465）23 - 8846

印刷所 文化堂印刷株式会社

**BULLETIN OF
THE KANAGAWA
PREFECT. MUSEUM
Natural Science No.27**

Kanagawa Prefectural Museum of Natural History

Odawara Kanagawa JAPAN

Mar.1998