

カルデラ論の移り変わり

A Private Review of Discussion on Caldera Formation

横山 泉¹⁾

Izumi YOKOYAMA¹⁾

Abstract. This is a private sketch of various discussions on caldera formation from a standpoint of volcano physics. Formation of calderas on the earth has been a long disputed problem since the 19th century among volcanologists. The discussion began with F. Fouqué's statement in his paper of Santorin, Greece published in 1879, that simultaneous collapses with volcanic explosions can explain steep caldera walls and scarcity of lithic fragments in caldera deposits. Later in the case of the 1883 eruption of Krakatau, another hypothesis that volume of collapsed volcano was equal to that of ejected material in dens rock equivalent, was added.

First the discussions on the 1883 eruption of Krakatau made by the then great geologists are critically reviewed, and then several topics related to calderas are briefly mentioned: a hypothesis of magma reservoirs; calderas of various sizes, small to large in diameter; caldera structure determined by gravity anomalies; puzzling caldera Ries Kessel; information obtained by drillings in calderas; the basement structure of Hakone caldera revealed by drillings and gravity surveys.

Since 1950's, Hakone caldera has been a focus of discussion on caldera formation in Japan because a geological model of the caldera elaborated by the late Prof. H. Kuno was presented in 1950. The articles of the present report are related with the changes of this model directly or indirectly.

Key words: caldera formation, magma reservoirs, drillings in calderas, Hakone caldera

はじめに

ここで言う「カルデラ論」とは、カルデラに関する理論ではなく、論議、論争の論である。地球上の火山は、より広大な面積を占める他の山々とは格別に違った存在である。その火山地域では、先づ標高の高い成層火山は注目を引くが、対照的にカルデラ凹地も特異である。未だにその起源について論争がある、と筆者は思う。ある現象の解釈に際して、何か仮定をすることはよろしいが、当然、その仮定を実証するよう努力すべきである。実証できない仮定は再考すべきである。筆者から見れば、19世紀後期以来、カルデラ形成に関する議論はこの流れに乗っていないようである。

筆者は『カルデラ構造に関する火山物理学的研究の50年』を「火山」第50巻（2005）特別号に、主としてわが国のカルデラについて発表した。本報文では、それとは別の観点から、書き残したこと、個人的経験をも述べる。

項目の総ては直接、間接に箱根カルデラに関連するが、それ自体にも触れる。箱根火山は1日で横断できる程度の大きさで、浸食の進んだ箇所もあり、温泉ボーリングの結果も利用できて、地学研究者の研究意欲を引く火山である。現在まで多数の研究が発表されている。

Kuno (1950) の「箱根火山および隣接地域の地質学」の論文の中で箱根カルデラの起源についてモデルが出された。当時筆者はやっと火山物理学を始めたばかりで、怖いもの知らずで、雑知見が増えるにつれて、このモデルを批判するようになり、現在にいたっている。

1) 北海道大学名誉教授
Professor emeritus of Hokkaido University
横山 泉 ; lyokoya@aol.com

1. 1883年クラカタウ噴火

世界の平均的な地学研究者は、何を今さら、カルデラはとうの昔、地質学の大家が説明しているではないか、すなわち、火山が大量の噴出物を出して、その結果、空になったマグマ溜まりに陥没した結果である、今さらカルデラとは何が面白いのか、と言うのが現状であろう。そのマグマ溜まりとは、マグマが地下深部から地表へ噴出するに先立って、停留して分化、同化、混成する場所と定義されるが、未だに作業仮説である。その実体、すなわち、深さ、形状、作用を知らなければならぬ。カルデラを論ずることは、その解明につながる可能性がある。

古いことであるが、Fouqué (1879) が地中海のサントリン・カルデラを記述した中に、「爆発だけでは説明出来ないが、爆発と同時に陥没が起ると仮定すれば、カルデラ壁の急峻なこと、旧山体破片が少ないことを同時に説明出来る」とある。確かにサントリン島の崖の一部は急峻であるが、1888年磐梯山噴火で生じた崖(約500 m)に較べたら、はるかに低い。また、カルデラ壁は概して、阿蘇の例で判るように長期にわたる崩落、浸食の結果でもある。サントリン島における噴火堆積物については、Heiken & McCoy (1984) が詳細な調査を行なっているが、島自体が小さいうえに、BC1500年頃のカルデラ噴出物中の旧山体破片について定量的調査が出来るであろうか？

このFouquéの考えが、4年後のクラカタウ噴火についてのVerbeek (1885)の考えにつながる。1883年と言えば、日本ではこの5年前に地質調査所ができて、この8年後に濃尾地震が起きている。このように、1883年のクラカタウ噴火の前後に、当時の地質学の大家が、(当時の知識の程度で)マグマ溜まりに関連して、陥没説を提唱した。しかし、筆者に言わせれば、その根拠は誠に薄弱である。古くからあった単純な爆発説は、単純だから、と言うだけの理由で否定されるべきでない。陥没説が後発だから正しいと言う理由は特にないと思う。

噴出堆積物の調査

1883年クラカタウ噴火の2年後にVerbeek (1885)*は、先ずオランダ語で“Krakatau”を出した。Simkin & Fiske (1983)*が“Krakatau 1883”を編集して、上記論文を英語に抄訳している。その中に、英王立協会のKrakatau Committeeの報告書“The eruption of Krakatoa” (1888)の抄録も含まれている。図1にスンダ海峡の現況を示す。1883年クラカタウ噴火の調査・研究の流れ、特に噴出物の体積、および噴出物の中に石質岩片が少ない(5%)ことは、すべてVerbeekの論文が元である。彼は噴火の7週後に現地調査をした。体積の評価は、クラカタウを含む直径30 kmの範囲(図1の破線)をやや込み入った4区域に分けて、新旧の海深図を比較して堆積量を決めている。4区域での平均厚さは各々20, 20, 40, 6 mで、これらに各面積を乗じて、体積12 km³を得る(これはひどい)。そして、さらにその外側、一辺約2000 kmの三角形の範囲に0.5 cm以上の厚さの堆積物があるとして6 km³を得る。これ

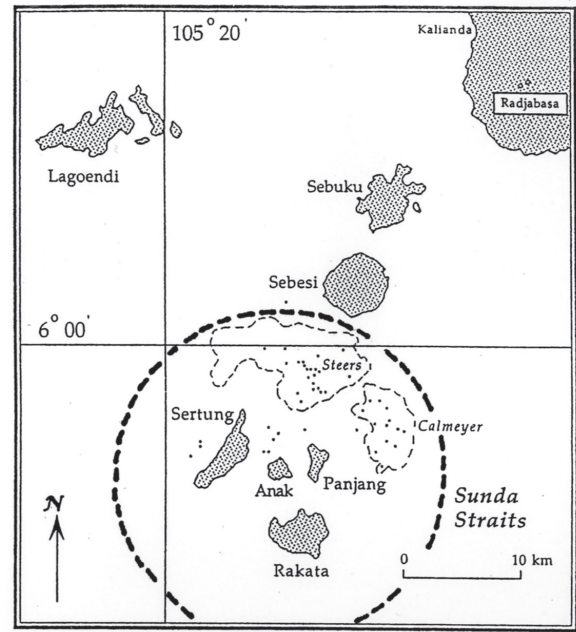


図1. スンダ海峡. 太破線はVerbeekが重点的に調べた海域。小さい点はSigurdsson他(1991)が潜水して海底からコアを採取した地点。SertungおよびPanjangの古い名称は各々VerlatenおよびLangである。

Fig. 1. Sunda straits (after Sigurdsson et al., 1991). A circle of thick broken line: the area where Verbeek (1885) measured volume of the 1883 deposits at the sea bottom. Dots: location of sediment cores collected during scuba dives by Sigurdsson et al. (1991).

らを総計すると18 km³で、Bulk volumeをDens Rock Equivalent (DRE)に換算して約9 km³となる(本報文では換算率を一率に0.5とする)。そして、そのうちの5%が旧山体の溶岩片であるとした。これらの数値に対しては誤差の見当もつかない。水深測量から堆積量を決めただけで、石質岩片が5%と評価できるであろうか？現在の常識からすれば、Verbeekが、旧山体は一体となって崩落した(崩落説)と主張するには、根拠が余りにも薄弱である。

爆発音が3500 kmの遠方までに到達したあの大爆発によって飛散した旧山体の破片を周辺海域、インド洋まで追跡するのは不可能の一語に尽きるであろう。100年を経て1980年代になって、海底堆積物の調査が繰り返されたのは、過去の堆積物の調査に対する疑念からであろうが、元来、この見積もりは桁の問題である。消えた旧山体の体積と比較することは、桁数の比較に止まる。消失した山体の体積(噴火後の海底凹みも含む)については、筆者は地形図から13 ± 4 km³と見積もっているが、その信頼度は噴火前の英国の海図測量の精度によっている。

更に、噴出物の構成で、石質岩片が少ないことを周辺の島の地表の調査だけから結論できるであろうか？消えたラカタ島の構成も、石質だけでなく、火砕物を含むことは明らかである。噴出物量の見積もりの精度は、精々桁であろう。一例を挙げると、年代は更に古い、1815年タンボラ噴火について、150, 100, 30 km³なる数字が並んでいる(IAV, 1951, 活火山カタログ)。やや遅れて、Judd (1888)は海水がマグマに

接して激しい噴火を起こし、旧山体を飛ばした（爆発説）とした。Escher (1919, 1929) は 1906 年のヴェスヴィアス噴火に例を求め、また Verbeek の説をも考慮して、explosion cylinder の coring によって生じたじょうご状の面に沿って旧山体が滑落したとした。Van Bememelen (1929) は 噴出物の体積 (DRE) と消えた山体の体積が等しいことを理由にして、山体陥没によってカルデラが形成されたとした。これが "Explosion-collapse theory" あるいは "Emptying out-breaking down theory" である。Neumann van Padang は大学を卒業して直ぐ H. Reck の助手として、地中海のサントリンの 1925 ~ 1928 年 噴火に際して同島の地質を調査して、1936 年に報文を出した。彼のカルデラ壁の横に長い地質断面図は圧巻である。まさにインドネシア火山の研究を志すオランダ派の活躍であった。

因に、筆者は 1958 年から 1960 年にかけて、イタリアに滞在したが、その間に Van Bememelen、Rittmann を訪問し、高齢の Escher からは彼の論文別刷りを送って貰った。Neumann van Padang とは、IAV 総会、テラ(サントリン) 島でのシンポジウムの際に議論を交す機会を得た。彼等の諸説に親しみをもつ由縁である。

1927 年にアナク・クラカタウの噴火開始によって、主としてオランダの研究者によって、再びクラカタウは注目された。1929 年バンドンで開かれた第 4 回太平洋学術会議では、クラカタウ諸島の地質と火山活動に関する詳しい報告があった。

わが国では、Matumoto (1937)* が九州の 4 カルデラに関する報文を発表して、各カルデラの火砕流の分布を記述した。ただし、阿多カルデラの中心は、その後、重力異常を考慮して鹿児島湾の南部に訂正された。そして、Williams (1941)* の論文が現われた。これは彼自身の Crater Lake, Krakatau の調査・研究の結果をも加えて、それまでの諸論文を集大成したものである。Williams の カルデラ形成の議論の根拠は、(1) 消えた山体の体積と噴出物の体積が等しい、(2) 周辺の堆積物の中に旧山体破片が殆どない、ことであった。彼のデータの拠りどころは、総て前述の Verbeek の挙げた数字であり、考え方は Fouqué 或は Van Bememelen に拠っている。筆者に言わせると、さかのぼれば、すべて甚だ根拠の弱いものである。

筆者は 1960 年、欧州から帰国の船がサン・フランシスコに寄った機会に、パークレーで Williams, Verhoogen 両教授と会ったが、当時の筆者には上記の疑問点を質することはできなかった。両大家が筆者ごとき若輩を相手にしてくれたのが印象的であった。とにかく、Williams (1941)* の論文は教科書のように首尾一貫して、事例研究をよくまとめているので、この論文に接した世界の火山研究者がこれを信奉したのは無理もないと思う。Kuno (1950) の論文でさえ、箱根カルデラの形成に関する部分は、Williams 流であったのは誠にやむを得ない（最後の項目、箱根カルデラ参照）。

その後のクラカタウの調査、議論について述べる：Williams 教授の説に楯突くためには、筆者もクラカタウ島に立ちたいと願っていた。1968 年、故水上武教授

から、インドネシアへ海外学術調査に同行しないかと誘われて、二つ返事で承諾した。水上教授に感謝しています。調査団と離れても、万難を排してクラカタウ島行きを実行するために、私的資金 300 \$（当時約 11 万円、その頃筆者の月給は 8 万円）を準備した。今でこそ、クラカタウ島へは観光船で行けるが、当時は漁船を雇い上げ、島に野営しなければならなかった。筆者は持ち金をインドネシア火山調査所の故 Hadikusumo 氏に渡し、設営を一任した。日本から持参した重力計によって、クラカタウ地域は低重力異常地域であることを発見した (Yokoyama & Hadikusumo, 1969)。この事実に加えて、1883 年噴火によって生じた近接地域の津波および気圧波の記録を解析して、1981 年に論文を発表して、爆発成因説を強調した。

1980 年代に入り、クラカタウ島が近づき易くなったこともあるが、前述のような 1883 年噴火直後の噴出物の調査に疑問をもったのであろうか、米欧の地質学者がクラカタウ島周辺の堆積物の調査を積極的に実施した。

Self & Rampino (1981)* は、1883 年噴火の火口に近いフェルラーテン島とラング島の 2 ケ所の堆積物、特に海へ入った火砕流を調査した。ラカタ島より北の海域 300 km² 内の堆積量を 5 ~ 8.5 km³ として、これに Verbeek の半径 15 km 以内の堆積量 12 km³ を加えて、総量を 18 ~ 21 km³ (9 ~ 10 km³ DRE) とした。

その後、1990 年代になり、幾つかの論文が出た。Sigurdsson *et al.* (1991)*、Mandeville *et al.* (1996)* はクラカタウの近海で潜水調査をした：20 m 深までのスキューバを 59 回繰り返して、長さ 130 cm、径 7 cm のコアを 50 本を採取している。しかし、図 1 に示すように、彼等の調査地点は北方の浅い海域に限られている。図中の Steers, Calmeyer は 1883 年噴出物の堆積で生じた州であるが、数年で消えた。北東部のスマトラの Radjabasa 山では火砕熱風が到達した記録がある。彼等も認めているが、フェルラーテン島の西に大量の堆積物がある。ラカタ島より南は水深が深く、海流も速いので彼等は調査していない。無理からぬことであるが、この調査結果から、量的推論をするのは、土台無理であろう。彼らは調査面積 1030 km² 内の堆積物の量を 13.6 km³ (7 km³ DRE) と見積もっている。近傍の半径 15 km 以内の Verbeek の見積もり 12.5 km³ に近いと強調しているが、それは余り意味がない。

Harjono *et al.* (1989) は 1984 年のインドネシア・フランスの協同研究で、異常 S 波からクラカタウ火山のマグマ・ボデイの検出を報告した：約 10 および 20 ~ 30 km 深付近に地震波の減衰域を決めた。

Camus *et al.* (1991)* はスンダ海峡で測量船により測深、side-scan sonar survey を行なって、1883 年噴火の堆積物を調査した。その結果、クラカタウ島から北、北西、東に向かって岩屑なだれ堆積物がハンモック状に、場所によっては 25 m に達している。このことから、彼等は噴火最盛期には M. セント・ヘレンス型の山体崩壊が起き、その後、陥没したと解釈している。この結論は、津波の発生時刻とそのメカニズムに関係する筈である。

更に、フランス・インドネシア・チーム (Deplus *et al.*, 1995) は 1990 年にクラカタウ海域で地震観測、重力測定、測深などを実施して、スンダ海峡の地下構造を議論した。

1990 年代にクラカタウ関連の論文が多数出たのは、1883 年噴火の 100 周年と言う機運があったのであろうか？ わが国の研究者が個人としても、機関としても、何ら興味を示していないのは大変残念である。今や、クラカタウは薩南諸島の火山と同じ程度の交通の便である。今後、わが国の研究者が 1883 年クラカタウ噴火に関心を持つことを切に願うものである。

クラカタウ津波

1883 年クラカタウ噴火に関する報告は上記の Verbeek (1885) およびクラカタウ委員会 (1888) の報文に尽きるが、1883 年当時、バタヴィアの検潮儀、ガス会社の気圧計が爆発を記録したのは、まさにオランダの科学水準の高さであった。当時の日本では、三重県桑名にあった検潮儀が津波を記録し、東京にあった気圧計が気圧波を記録した。和田 (1886)* はこれらのデータに基づき、海浪、空気波の伝播に関する報文を日本地震学会報告第三冊に載せている。現在でも、当時の貴重な観測結果から定量的にクラカタウ噴火の真相を攻めるのが王道であろう。この貴重な記録が一世以上、利用されなかったとは、誠に不思議である。Yokoyama (1981)* は、周辺海域の津波の記録を解析して、この噴火の主たる動きは上向きの爆発であり、陥没でないことを強調した。これには 1952 明神礁噴火の知見が役立っていると思う。この場合、津波は重力波で $\sqrt{gh}$ (h は水深) なる速さで伝播する。

さて、1883 年のクラカタウ津波の発生機構としては、幾つかの説が出されているが、大別すると、次の 3 つになる：

1) caldera collapse ; 2) emplacement of pyroclastic flow deposits; 3) submarine explosion. Nomanbhoy & Satake (1995) はこの 3 つのモデルについて、津波の発生と伝播を模擬数値計算を行ない、優劣を決めた。その場合、波源域で同じ量 (11.5 km^3 、これは噴火によって生じた凹み、すなわちカルデラの容積に近い) の水が上記 3 様に移動したとする。(1) は海底の陥没によって、(2) は噴出物が海に入ることによって、(3) で Yokoyama (1981) の言う submarine explosion とは、1883 年噴火で生じた、ラカタ島とフェルラーテン島の間の直径約 4 km の凹地を中心とする海域 (消失したラカタ島の北部も含む) の海底噴火である。つまり、マグマと海水との接触もあるが、海底の爆発によって海水を持ち上げる (1952 年の明神礁噴火を大規模にしたもの) のが主たる原因である。Nomanbhoy & Satake (1995)* は、3 モデルの各地点への到達時間、波高を比較して、(3) “submarine explosion” が最も観測結果に適合すると結論した。

空気波と海洋波

1883 年のクラカタウ噴火によって起された津波のク

ラカタウ島周辺の状況については、既に述べた。地球上の遠距離の海域で記録された津波は、海上を伝搬した重力波としては説明できなかった。長い間、未解決だったが、Harkrider & Press (1967) は、強力な空気波が海面上を長距離にわたり伝搬するときに海水と結合して、途中にある陸地は空気波として跳び超えて、そのエネルギーを海水に与え、津波を生ずると説明した。そして、クラカタウ爆発によって観測された圧力波動を生ずるには標準原爆約 100 ケ (150 megatons) を必要とするとした。従来の研究は噴出物だけを重要視してきた。クラカタウ爆発の物理的効果を見捨てるのは誠に不合理である。

爆発時の地震

1883 年のクラカタウ噴火の絶頂期は 5 月 27 日である。山体が陥没したとしたら、当然、相当規模の地震を伴ったであろうと考えられる。Judd (1888) この点に関心をもったが、その報告によれば、爆発音の中で目立つような規模の地震の報告はないと言う。地震計は当時日本で開発中で、東南アジアにはなかった (1888 年の磐梯山噴火では、まがりなりにも地震観測が行なわれた)。Yokoyama (2005)* は、当時ボゴールにあった地磁気変化計のビヴォット式磁針の振動から、この日のクラカタウ噴火に伴った最大地震の規模を M 5 と見積もった。これは火山地震の大きい方に属し、大陥没に予想される規模よりはるかに小さいもので、この点からも陥没説に疑問がもたれる。なお、1991 年のピナツボ噴火のさいの地震の最大規模は 5.7 であり、火山体の陥没があったと報告された日時はこの地震の時ではない。

2. マグマ溜まり

カルデラ陥没説では、火砕流噴出と同時にあるいは直後に旧山体はマグマへ落ち込むとされている。そのために火山体の下、浅い深さ (1 ~ 5 km) にマグマ溜まりを仮定するのであろう。もし、それが 10 km 前後の深さにあるとしたら、諸説は成り立つのであろうか？ もし、わが国の活動的火山の下、1 ~ 5 km に或程度の大きさのマグマ溜まりが存在しているなら、現在の探査技術で検知できる筈である。明確な報告がないことは、この仮定が成立していないことを意味するのではなかろうか。

そもそも、この浅いマグマ溜まりと言う概念を強く植えたのは、Rittmann (1936) が ヴェスヴィアスのマグマ溜まりの頂部を海面下約 5.5 km と描いた断面図であろう。彼の根拠は、溶岩中の白亜紀層岩が熱変成を受けていて、その白亜紀層の深さを、南方のソレントと北方の アヴェラ山の白亜紀石灰岩の露頭の傾斜を延長して決めたと言われている。白亜紀層の深さは 5 km としても、そこにマグマ溜まりがあることは、別に証明する必要がある。ヴェスヴィアスにおいては、Zollo *et al.* (1996) が走時トモグラフィーから、12 ~ 14 km 深の反射層の下に非常に剛性の低い領域の存在を指摘している。この領域こそマグマの存在する所であろう。しかし、Rittmann の影響は大きかった。J. Verhoogen によ

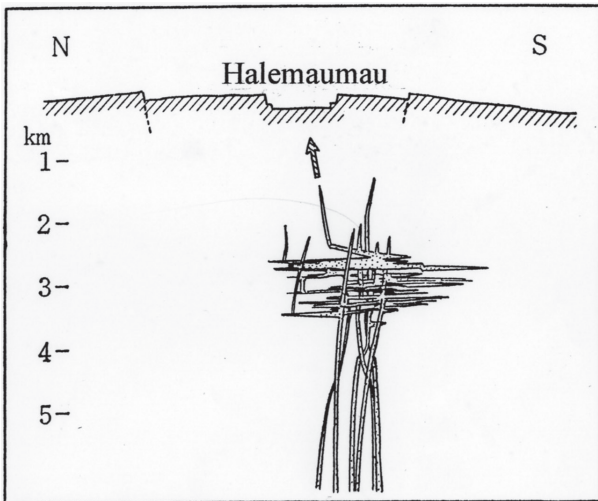


図2. マグマ溜まり（ハワイ）のモデルの一例 (Fisk & Kinoshita, 1969 による). 矢印は最終的にマグマが噴出した地点を示す.

Fig. 2. A model of Kilauean magma reservoirs (after Fisk & Kinoshita, 1969).

れば、Rittmann のテキストは火山学の進歩を遅らせたと言う。この点だけでも、確かにそうだ！

ハワイ火山は玄武岩マグマであり、比較的浅い深さにマグマ溜まり、あるいはマグマ・ポケットとも言うべきものが存在する。このことは噴火に伴った地震の解析から支持されている (Koyanagi & Endo, 1976)。Fisk & Kinoshita (1969)* は噴火に伴った地殻変動を解析して、その実体はダイク、シルの組み合わせだったものとした (図2)。もし、マグマ溜まりがこのような構造で、マグマが溜まりから抜け出たら、地殻は塑性的に沈降するであろう。筆者も 1950 年大島噴火の際の地磁気変化を熱消磁で説明するため、このような構造を仮定した。

カルデラ形成を議論するには、その地下構造に基づかねば、空理空論に終わる恐れがある。筆者は、多くの地質学者が、カルデラの形成は必ず何らかの噴出物を放出して、それを埋め合わせるように、一挙に落ち込むと信じ込んでいるのが、理解できない。地殻の変動を砂場の遊びに相似させるのであろうか。横山 (2005)* は、地殻の極限強度を 50 MPa、マグマ溜まりの深さを 10 km と仮定し、直径 2 および 6 km の空洞ができた場合、いずれも近傍は破壊されても、地表への効果は精々 10 MPa で、地表の崩壊は起り得ないと結論した。

3. 小さいカルデラと大きいカルデラ

地球上のカルデラなるものの大きさを比較するために、図3を示す。その大きさは余りにも広い範囲に分布している。直径が小さければ、一般にその起源（マグマ活動の中心）は浅いであろうから、これら大小のカルデラの総てが、単一のメカニズムで形成されたとは考え難い。小さい方では、北海道の濁川カルデラが直径約 3 km である。その周囲は新第三紀の堆積物で、カルデラ形成前の火山体は見られない。安藤 (1983)* はカルデラ内の最大 2.4 km 深に達するボーリングの結果を用いて、その構造を図4に示すように決めた。このカルデラの基盤は 1.7 ~ 1.8 km 深である。筆者が現在、特に

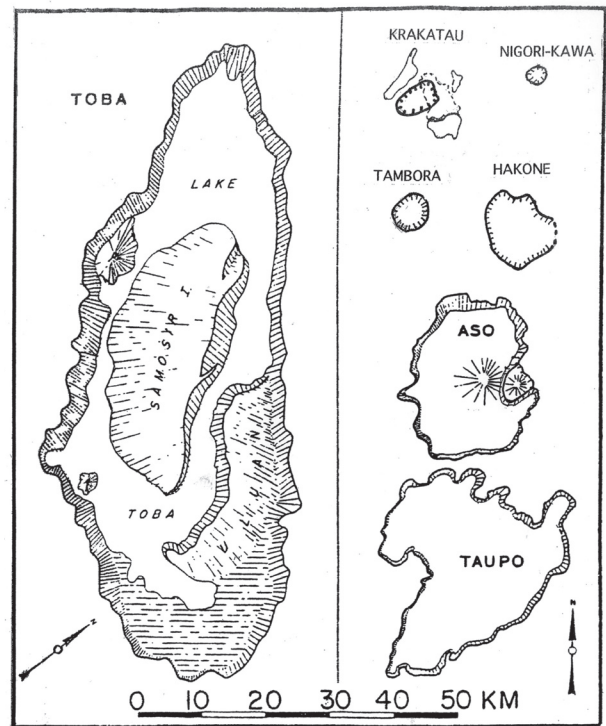


図3. カルデラの寸法の比較.

Fig. 3. Calderas, small and large.

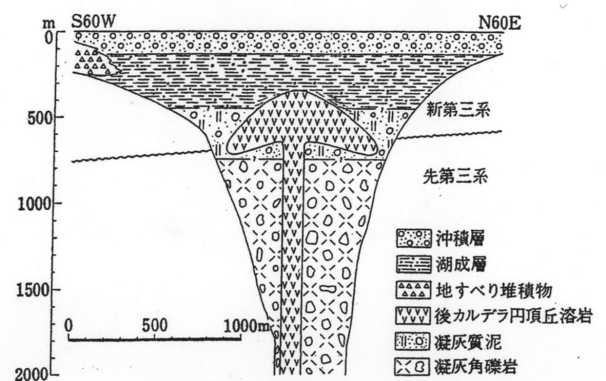


図4. 濁川カルデラ(北海道)の模式断面図(安藤, 1983 による).

Fig. 4. Nigorikawa caldera in Hokkaido. A schematic geologic cross section (after Ando, 1983).

興味をもつのは、後カルデラ円頂丘溶岩が現状では潜在であるが、その形成時には地表であったことである。カルデラ構造は深くなると狭くなるじょうご型であり、内部は基盤岩の破片や本質の火砕物からなる凝灰岩、後カルデラ噴出物、湖成堆積物によって充填されている。カルデラ形成に先立ち、激しい爆発により山体破壊、降下火砕物、そして火砕流が出る。カルデラ内に堆積するものは、これらの混合物であり、その比率は火山によって広い範囲で変る。かつて、筆者はこれを“Fallback”と称したが、Fallout（放射性降下物）とはっきり区別して、“Eruption fallback”と称するのが適当だと思う。

萬年 (2006)* は濁川カルデラの地質構造を詳細に議論して、このカルデラは基本的にはマグマ溜まりへの陥没であり、現在見られるカルデラ堆積物は崩落堆積物であろうとしている。筆者に言わせれば、図4の最下部より余り深くないところにマグマ溜まりがないと、陥没は

起きないように思われる。その崩落の原因が爆発作用であろう。

このように考えてくると、火口とカルデラとはつながるもので、違いは大きさだけになる。大きいカルデラはそれより小さい火口の複合である。莫大な量の火砕流を論ずる場合、それを遠距離まで送った爆発力を考慮すべきであろう。

インドネシアのタムボラの 1815 年の噴火は歴史時代最大のもので、直径約 6 km、最大落ち込み量 700 m のカルデラができたと言われる。衛星カラー写真を見れば、縁部は断層崖と言うよりは爆発火口壁である。筆者はこれは爆発の結果そのものと考えた。

図 3 において、阿蘇、タウポも大きい、格段に大きいのがスマトラのトバ湖である。その大きさは $100 \times 30 \text{ km}$ で、その重力異常は図 5 に示すように、最大約 40 mgal の低異常を広範囲に示す (Yokoyama & Ohkawa, 1981)*。その南東部に約 10 mgal の小低異常があり、合成カルデラであることを示唆する。スマトラ断層 (SF) に沿ったマグマ溜まりが考えられる。Ninkovich *et al.* (1978)* はトバの西北のインド洋でピストン・コアを採取した。その噴出物はカルデラの周辺 $20,000 \text{ km}^2$ 以上を覆い、深海底テフラはインド洋の北東部の $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 以上の面積に存在する。Ninkovich *et al.* (1978) は、カルデラの大きさ、テフラ層と熔結火砕流堆積物の広がり、その容積から、第四紀で最大噴火であるとした (その K-Ar 年代は 75,000 年とされている)。そしてこの噴火は 9 ~ 14 日続いて、その量は $1000 \sim 2000 \text{ km}^3$ と見積もった。このカルデラの形成を、この形状のマグマ溜まりの“ピストン・シリンダー型の陥没”で説明できるであろうか？ 複数の爆発中心をもつ複合カルデラ (Composite caldera) と考えるのが、より自然ではなかろうか。

4. 重力異常とカルデラ構造

筆者は 1950 ~ 1951 年三原山噴火に際して、噴火活動に伴う地磁気変化を観測・解析をしたが、火山体の

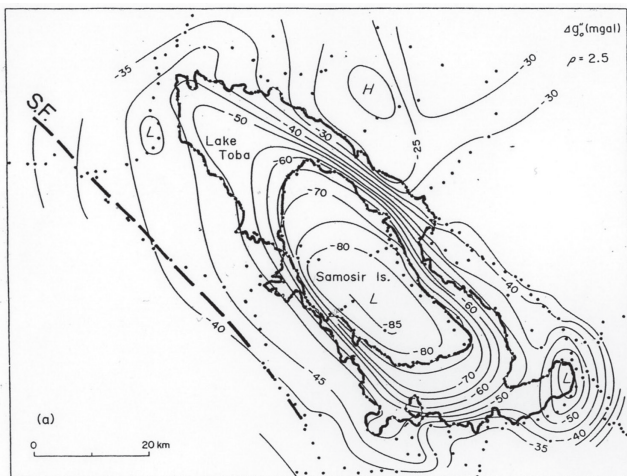


図 5. トバ湖 (スマトラ) 周辺の重力異常分布。単位は mgal。
Fig. 5. Bouguer gravity anomaly on and around Lake Toba (Sumatra).

構造が議論の基礎になる筈だと思い、その地球磁場を調べ、更に重力場を調べようと思った。1950 年頃、地震研究所は「日本全国の水準点における重力測定」なるビッグ・プロジェクトを立てて、Worden 重力計を購入して、これを大切に運ぶために Oldsmobile なる乗用車を購入した！ 現在、スプリング型可搬重力計 (主として LaCoste & Romberg 型) は多くの研究機関にごろごろしているのを見ると、隔世の感を禁じ得ない。筆者が火山の重力場を調べようと考えたころ、1954 年、上記プロジェクトは完了して、重力計はあいていた。当時、筆者は地震研究所では無給の研究員であったが、プロジェクトを推進された故坪井忠二教授に重力計の使用を願い出たら、二つ返事で応諾された。さて、Worden 重力計を手に入れた筆者は、田島広一さんと共に、先ず 1956 年に伊豆大島を調べた。その結果、大島カルデラは高重力異常を示すことが判った。

それまでに、伊豆大島では、既に当時の地質調査所の故早川正己さん等が 1950 ~ 1951 年噴火に際して、North American 型重力計によって、大島の山頂一元町地域の重力測定を繰り返して、重力変化の検出を試みていた。しかし、当時の重力計では、無理であった；現在、スプリング型可搬重力計により重力変化を検出するためには、重力計は 2 台以上、同じものを再測に用い、往復測定して、精度を確認することになっている。余談であるが、早川さんは、その生涯で幾多の先駆的試みをされている：この大島の重力変化の測定、昭和新山の地下構造調査 (1952 ~ 54 年) は、機器の性能、技術が未発達であったため未完であったが、松川地熱地帯の開発調査 (1958 ~ 1966) に大きく貢献されたのである。

その後、大島全域で安藤他 (1997) が稠密な重力測定を実施して、より精密な重力分布をもとめたが、大勢は同じである。筆者にとっては、大島カルデラは高重力異常型カルデラの最初の例であった。その後、1963 年にハワイ島の諸火山でも高重力異常が認められた。

大島火山に類似して、三宅島火山も高重力異常型のカルデラを形成する可能性がある。三宅島の 2000 年噴火の山頂火口の陥没を 1968 年のガラパゴス・カルデラ底の陥没と対比して、出来事を時間を追って記述すると；1968 年ガラパゴス・カルデラ底の陥没 (Filson *et al.*, 1973)

5 月 15 日 Ms 4.1 の地震 ($\Delta = 300 \text{ km}$) が発生。間接的に誘因となった可能性はある。

21 日 山腹噴火。溶岩流出。その被った面積は 10 km^2 と見積もられている。いま、厚さを 1m と仮定すれば、その体積は 10^7 m^3 。

6 月 11 日 爆発 Fernandina caldera 内

19 日 カルデラ底で 8 km^2 の陥没を発見、深さ 350 m、その体積は $(1 \sim 2 \text{ km}^3)$ 。地震の起り具合から、陥没は 6 月 12 日から始まり、75 の段階的に進み、21 日までに完了したと考えられる。

山腹噴火の噴出物の体積は陥没体積に較べて問題にならない。陥没の原因は、カルデラの下マグマの支持が除去されたためであるが、引き金は遠震と考えられる。

2000年三宅島山頂火口の陥没 (津久井雅志, 2003)

6月27日 西方約1.5 kmで海底噴火、
7月8日 山頂部で小噴火があり、直径1km、深さ約200m、
8月末には、直径1.6 km、深さ500 m、体積 1.0 km^3 に拡大した。

この間の噴出物の体積： $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ DRE

この陥没事件は、巨視的に見れば、ガラパゴス・カルデラ底の陥没事件と同じ現象である。引き金としては火山の下で応力変化があったのであろう。そして、三宅島火口は、今後、地質学的時間の経過のうちに、活動を繰り返して、その底に玄部岩溶岩が堆積して、次第に浅くなり、火口縁は崩落拡大して、現在の大島カルデラと同じく高重力異常型のカルデラになるではなかろうか。現状では、地形からして、カルデラとも火口とも称されるのではなかろうか。Glen Coe cauldron、ガラパゴス・カルデラ、大島カルデラ、三宅島カルデラは総て高重力異常型に属するものである。

なお、三宅島の、いわゆる“桑木平カルデラ”は筆者の定義からすれば、カルデラではない。その地形はカルデラ縁に似ているが、重力異常は認められない。すなわち、地下に構造の不連続はない。カルデラが高或は低の残差重力異常を伴うことは、現在では世界の常識と思うのだが？ 地形だけから判断するとは、数世紀の逆行ではなかろうか。

低重力異常型カルデラ

筆者が最初に重力測定をしたのが高重力異常型の大島カルデラであった。1958年冬、再び田島広一さんと凍結した北海道屈斜路湖の表面で重力測定を実施して、約40 mgalにおよぶ低異常を発見した。時に、どうして屈斜路湖を選んだのかと聞かれることがあるが、思うに、何となく成算があったのであろう。そうでなければ、当時研究費も少ないのに、無理して不便な地へ赴く筈もない。その後、多くのカルデラで低重力異常が認められ、カルデラ構造の研究に役立つ端緒となった。屈斜路カルデラについては、現在の技術で精査すれば、より詳細な異常の発見が期待される。

初期のカルデラに関する諸説は地下構造の考察なしでつくられたものである。地下構造の調査・研究が進めば、過去の諸説は変るのが当然の成り行きである。

二つのカルデラの型は本質的に別物である。すなわち、重力異常が高いか、低いかであり、それはその火山の作業物質によっている。高重力異常型は噴出物が少ない、その凹みはそこに堆積した苦鉄質な溶岩の重みで陥没するか、下部のマグマがより深所へ戻って、支持が失われて陥没するか、であろう。この形成機構については、異論は少ない。低重力異常型では、その周辺（小規模から大規模まで——濁川からトバ湖まで）に大量の珪長質な火砕噴出物が分布している。後者の形成については元来議論の多いところである。

かつては、これら二つの型を各々、“グレン・コウ型”、“クラカタウ型”と称した。これについては、箱根カルデラの項で述べる。

5. かつて謎であったリース・ケッセル

ヨーロッパでカルデラ論が右往左往した例、地球科学の先駆者も迷った例として、リース・ケッセル (Ries Kessel) が挙げられる。これは南ドイツのネルトリンゲンなる中世の小都市を含む直径約24kmの鍋状凹地で、1960年頃まではカルデラと見なされてきた (図6)。ケッセルとは鍋を意味する。地形は確かにカルデラ凹地のようにあり、熔結凝灰岩らしい堆積物もあるが、いわゆる旧山体らしいものが考えられない。昔からこの“カルデラ”の起源については議論があった。リース・ケッセルが、1950年代に高圧物質が研究される以前は“Volcano-tectonic sink” (Rittmann, 1936)、あるいは“Cryptovolcanic caldera” (Williams, 1941) と称されてきたのは、苦肉の策であり、誠に無理ないことである。

Suvite (スーヴァイト；一見、火山起源の溶結凝灰岩のように見える) の発見、その研究、及び重力偏差計による地下構造の調査など、当時の水準で最高であった。やはりドイツの実力であろう。真実に到達するには、他の科学分野 (高圧物質、隕石など) の発展を待たなければならなかった。1960年にSuviteに高圧鉱物 (Coesite) が発見されて、隕石孔であることが確定された。なお、比重3、直径250mの隕石が30 km/sで衝突すれば、直径30 kmの隕石孔ができるとされている。

挿話であるが、1967年、スイスでIUGG総会が開催されたが、それに先立って南ドイツのTübingen大学の主催で、このリース・ケッセルへの巡検が計画された。筆者は当時イタリアに滞在していたが、喜び勇んで参加した。Tübingenに着いて驚いた。世界中から参加者は二人！ しかも、もう一人が故久野教授 (1910-1969) とは！ 世にも稀な贅沢な巡検となった次第である。察するに、多くのヨーロッパ人にとっては、曾遊の地であったかも知れない。私共二人にとっては、先人を悩ませたこの偽カルデラは必見の地であった。参加者2人の巡検は、リース・ケッセル内にあるネルトリン

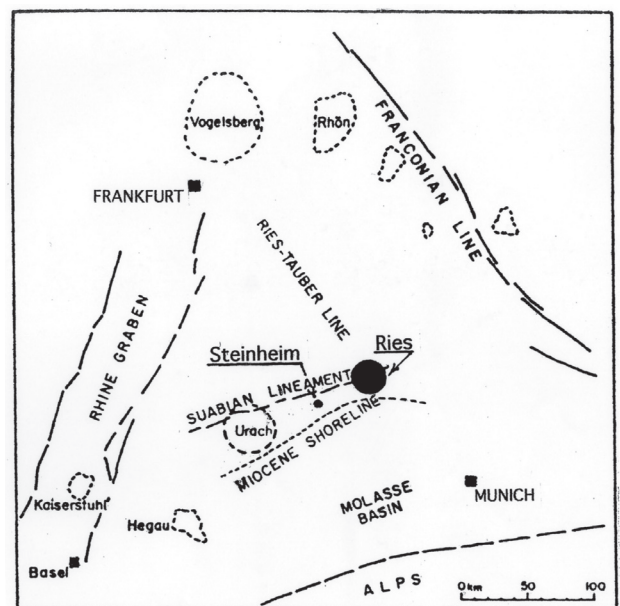


図6. リース・ケッセルの位置。
Fig. 6. Location of Ries Kessel.

ゲンを訪ね、周辺の Suvite の露頭を見学した。次いで、リースの西 30km にあるスタインハイム (Steinheim) 盆地を訪ねた。ここは直径 2.5 km、深さ 80 m の凹地で、Ries Kessel と同時にできたものである。そして、約 1 週間の巡検を終えて、スイスでの学会へ向かった。巡検中に聞かれた Tübingen 大学の研究者の不満は、彼等の高圧岩石の研究を米国の研究者が無視していることであった。

それから 2 年後、1969 年 7 月 21 日にアポロ 11 号が月面に軟着陸して月の岩石を採取してきたが、その宇宙飛行士は訓練中に、隕石孔の概念を得るために、リース・ケッセルをも訪れた。故久野教授はその月の岩石の研究者の一人として選ばれており、月面着陸の実況 TV の解説をもされたが、そのとき既に病が重く、その 2 週間後に死去されました。

なお、この巡検の際、筆者がスタインハイムで採取した石灰岩の衝撃錐 (shatter cone) 一隕石の衝突による衝撃波によって破壊されたものの一標本 (約 15 cm 大) は、神奈川県立生命の星・地球博物館に寄贈した (写真 1)。

リースの北東約 300km のボヘミアにモルダウ石 (Moldauite) と称されるテクタイトが産するが、その年代はリース・ケッセルと同じである。これらのことを考慮すると、リース・ケッセルをつくった隕石落下 (その直径は 250 m くらい) に伴って、スタインハイムの

衝撃錐やボヘミアのテクタイトが生じたと考えられる。もっとも、テクタイトそのものの起源は未解決である。

6. カルデラにおけるボーリング

元来、地下の構造を察知するのに、ボーリングとは、唯一本でも甚だ有効なこともあり、唯一本では迷いを残すこともある。カルデラにおけるボーリングは唯一本でもよいが、基盤まで達することが望ましい。

筆者は北海道屈斜路カルデラ (1958 年)、九州始良カルデラ (1960 年) において顕著な低重力異常を認め、その一般性を信じるに至った。そこで、阿蘇カルデラに注目すると、そこでは未だ地下構造探索のための重力測定は実施されていないで、全国水準点の重力測定の結果しかなかった。しかし、それらの結果だけからも、低異常が認められた (Yokoyama, 1963)。多分、これが阿蘇カルデラの構造を重力異常から論じた最初の報告であろう。その後、Kubotera *et al.* (1969) および Komazawa (1995) はカルデラ内の稠密な重力点の分布により、短波長の異常をも議論できるようになった。

阿蘇カルデラ底のボーリング結果

阿蘇カルデラ内では、既に北部、南部に掘削されたボーリングはそれらの地点で基盤が浅いことを示した。1997 年に新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が阿蘇カルデラ内の南西部において深さ 400 ~ 1700

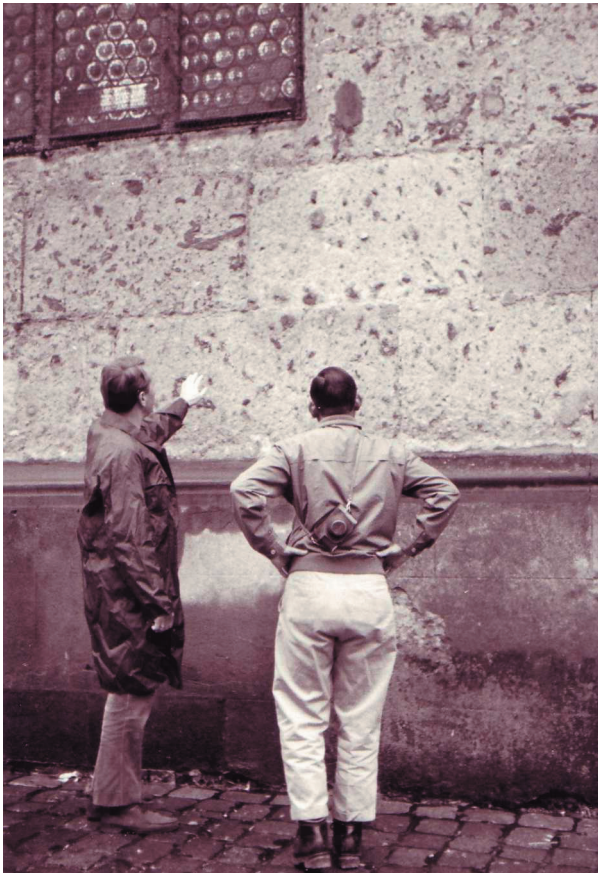


写真 1. リース・ケッセルの高圧変成岩。

左：ネルトリンゲンの聖ゲオルグ教会の壁に使われているスーヴァイトを調べる故久野久教授。

右：衝撃錐 (石灰岩) とスーヴァイト片。

Photo. 1. Suevite deposits from Ries Kessel,

Left: Wall of St. Georg Church, made of Suevite,

Right: A shatter cone and a specimen of Suevite.

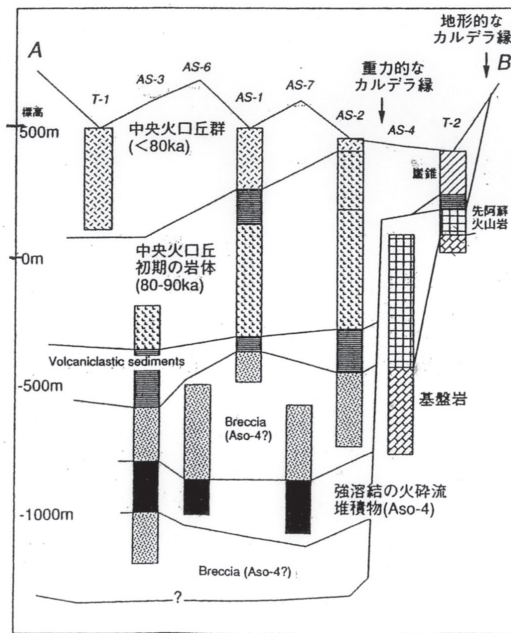
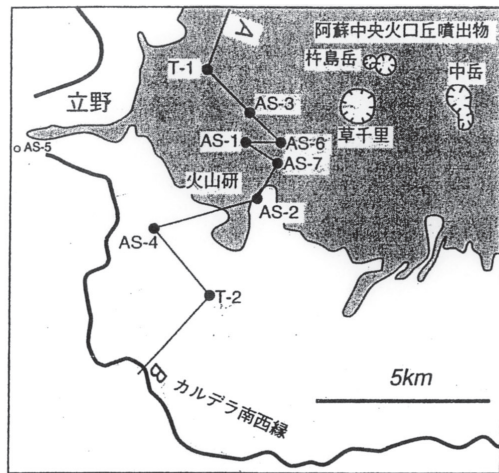


図7. 阿蘇カルデラ西部のボーリング(星住他, 1997による).
Fig. 7. Drilling wells in the western part of Aso caldera (after Hoshisumi *et al.*, 1997).

m のボーリングを実施した。その概要は星住他 (1997)^{*}により図7のように示される。彼らの講演要旨によれば、阿蘇カルデラの中央部に近い西方でなされた8本のボーリングのうち数本は地表下約1.5 km 深 (標高 -1 km) で、厚さ 200 m に及ぶ強溶結の Aso-4 火砕流堆積物の層を貫いている。現在、その広がり未知である。さらに、『(前略) 今回確認された阿蘇4火砕流堆積物は、海面下の深い位置にあることから、阿蘇4火砕流以前の凹地を堆積したものではなく、阿蘇4火砕流のカルデラ形成に伴ってカルデラを充填したと推定される。(後略)』筆者はこの論理は理解できない。さらに『カルデラ内にそのカルデラを形成した火砕流体が厚く堆積していることと、重力の急傾斜部で高さ 1000 m 以上の基盤岩のおちこみが認められることは、じょうご型カルデラのモデルでは説明できないことを示している。(後略)』この前段は、約 50 年前には、頭から否定されていたことである。カルデラ陥没説の根拠の一つは、カルデラ堆積物は旧山体の破片であるとされてきた。この事実は、従来の、大量の火砕流の噴出の後に、旧山体が一

挙に陥没すると言う説で説明可能であろうか？後段は、客観的に見て、これだけのボーリングからは、希望的なことしか言えないのではなかろうか？

須藤靖明 (2007)^{*}はこのボーリング結果について、次のように述べている：

『現在のカルデラ壁に出ている Aso-4 は標高 900 m 前後の位置にあり、その位置と較べると比高差にして 1600 m から 1700 m あることから、掘削された Aso-4 火砕流は噴出後約 1600 m 程度陥没したことになる。そして破碎されていないことから陥没の際、ほとんど破碎されずに静かに沈降したと考えられるのである。阿蘇カルデラの陥没量は火砕流の噴出量からの推定や最近行われたボーリング調査で平均 1200 m 程度である。この事実は、従来阿蘇カルデラが漏斗型のカルデラであるとする考え方では説明できないことを物語り、重力構造から最近考えられているピストン・シリンダー型カルデラ成因説が有力となってきたことを示す。』この文の最初の段で、カルデラ壁の Aso-4 とボーリング底の Aso-4 の標高を直接比較するには、これらが同時に堆積したことの裏付けが必要であろう。最後の段は、漏斗型に対するイメージの違いがあると思う。

ピストン・シリンダー型カルデラの代表はヴァイエス・カルデラであろうが、いま、Goff *et al.* (1989) の地震波 3 次元インヴァージョンによる模式断面図を図 8 (鉛直尺は水平尺の 2 倍) に示す。太数字は地震波速度 (km/s) を表す。結果論であるが、4 本のボーリングは必ずしも有効ではない。カルデラ壁の断層を急傾斜に書いているが、果たして、これでピストン・シリンダー型陥没を主張できるであろうか？

さて、先の講演要旨から 10 年を経過して、星住他 (2007)^{*}によれば、『ボーリングコア中の阿蘇-4 火砕流堆積物は、海面下の深い位置にあることから、阿蘇-4 火砕流以前の凹地を埋積したものではなく、——』とあるが、筆者は先の、1997 年の講演要旨と同じく理解できない。そして、彼等は『ピストン・シリンダー型の沈降と火砕流の堆積が同時に進行した』としている。彼等は阿蘇カルデラ基盤は“たらい型”とするが、その傾斜を幾らと見積もるのであるか？「ピストン・シリンダー」と「たらい」の違いは？前者にはほぼ垂直な断層が存在しなければならぬ。カルデラ沈降と火砕流の堆積が同じ空間で同時に進行することによって、堆積物が深い位置に強溶結で堆積できるだろうか？たらい型の沈降とは、“蟻地獄の孔”を考えるのであろうか？あるいは、Escher (1919, 1929) のモデルをとるのであろうか？

阿蘇のボーリングは、後述するメキシコ・プリマヴェーラ・カルデラでのボーリングに較べれば、中途半端であるが、現在のデータから何が言えるかを議論すべきである。これらのボーリングの内、Aso-4 の強溶結部を含むものは、いずれも基盤に達していないので、仮定の上の推論になる。筆者は試案として次のように推論する：

- 1) 標高 -800 m に堆積している Aso-4 の強溶結部の広がりが、現在ボーリングにより確認されている直径約 2 km より格段に大きい広がりで堆積している場

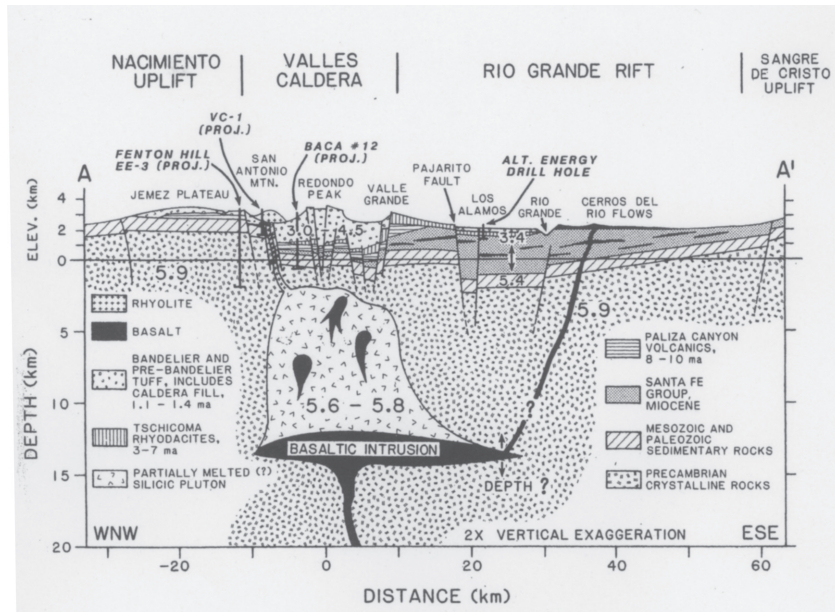


図8. ヴァイエス・カルデラ（ニューメキシコ）の地震波解析から得られた模式断面図 (Goff *et al.*, 1989 による). 太数字は地震波速度 (km/s).

Fig. 8. A schematic cross section through the Valles caldera and its vicinity based on the 3-D inversion interpretation. Velocity values (large numbers) are in km/s (after Goff *et al.*, 1989).

合：従来のカルデラ内の北部、南部のボーリング結果からは考え難い仮定である。

- 2) 上記強溶結部の広がりが、直径約 2 km くらいに限定される場合：広大な阿蘇カルデラにおいては、局地的な現象である。新発見の Aso-4 堆積の下面の深さは現地表面から約 1700 m、噴出時の地表面からの深さは 700 m 以上である。これがその時点で存在していた凹地の深さである。これは、その時までには阿蘇で起きた複数の大噴火によって生じた火口の一つの一部と考えられる。1815 年のタンボラ噴火では、直径 6 km、深さ 600 ~ 700 m の凹地が生じた。このくらいの規模の噴火が繰り返されれば、より深い凹地の出来ることも可能であろう。Aso-4 の噴出口がここから離れていたとしても、その凹地に Aso-4 が短時間で堆積したと考えられる。その火口からは、激しい降下軽石の噴出に続いて、Aso-4 火砕流が流出して、この凹地を埋めたのであろう。これは、いわゆる "Volcanic fall back" に属するものである。

近世の大噴火で生じた凹地をみると：

1815 Tambora: 6 km ϕ , 600 ~ 700 m deep

1883 Krakatau: 4 km ϕ , 250 m deep

1991 Pinatubo: 3 km ϕ , 200 m deep

ここで、カルデラの構造調査について望ましいことは基盤に達する深いボーリングであろう。参考になるのは、次に述べるメキシコの例である：

La Primavera caldera

メキシコ西部のプリマヴェーラ・カルデラにおいて、電力公社が地熱開発の目的で掘ったボーリング (PR) は 13 本あり、カルデラ中央部に集中しているが、3 km

級の 1 本は基盤に達している。図 9 はボーリング結果の概略と重力異常の分布を示す。そして、このボーリングに関連して、ここから南に約 40 km にもう 2 本のボーリング (SM) があり、その一本は深さ 2.8 km で基盤に達している。両者のボーリング結果を対照すれば (図 9c)、基盤の標高差は地域的なものであり、プリマヴェーラのカルデラ底が陥没していないことが判る。筆者はメキシコの担当当局の意向は知らないが、実績において日本よりはるかに徹底している。なお、このカルデラの構造については Yokoyama & Mena (1991)* の報文があり、地質学的調査は Mahood (1980, 1981) が行なっている。

7. 箱根カルデラに関連して

箱根火山においては、温泉探査の目的で、多くのボーリングがなされ、それらの深さは数 100 m から数 km まであり、相当数が基盤に達している。そして、それらの地点で基盤が隆起していることが明らかになった。ボーリングの目的から、カルデラ中心部では掘削されていない。温研 (横山他, 2002)* は箱根火山の中心要部においてボーリングを補足する目的で重力測定を実施して、箱根カルデラの構造の研究に資した。すなわち、ボーリングによって基盤の深さの判っている地点の重力異常値と未知の地点の異常値を比較して、未知の基盤深さを推定する方法である。その詳細議論は既に温研報告 (33 巻) にあるので、ここでは省略する。

かつて Kuno (1950)* は箱根カルデラの二重説を出して、古期カルデラは Glen Coe 型、新期カルデラは Krakatau 型とした。筆者は大島 (1957)、屈斜路 (1958)、始良 (1960) 等々諸カルデラの重力異常から、それらの地下構造を考えた。そして低異常型の構造としてじょうご型を唱え (どうしてもカルデラ縁に垂直断層は考え

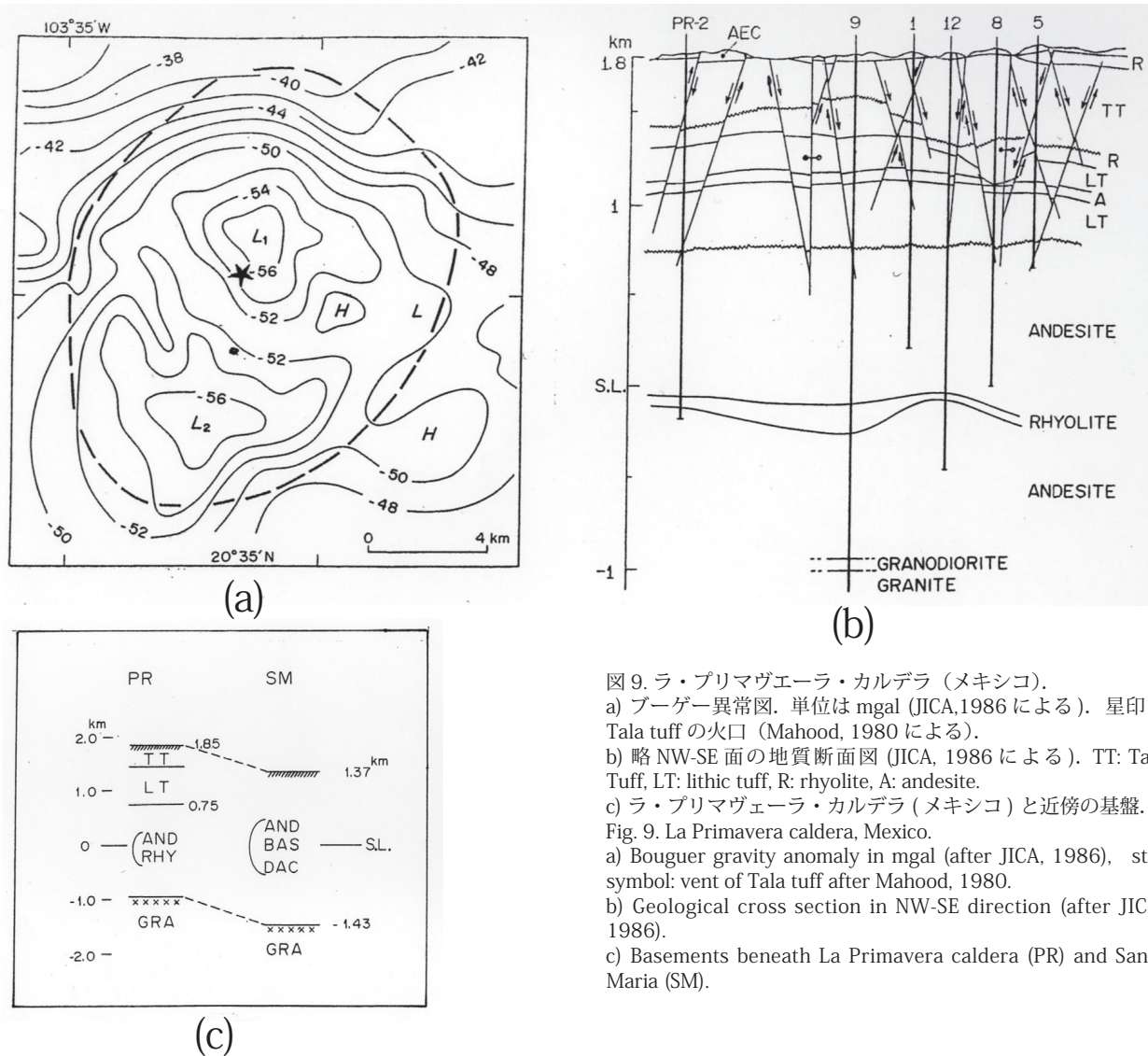


図9. ラ・プリマヴェーラ・カルデラ (メキシコ).
 a) ブーゲー異常図. 単位は mgal (JICA, 1986 による). 星印は Tala tuff の火口 (Mahood, 1980 による).
 b) 略 NW-SE 面の地質断面図 (JICA, 1986 による). TT: Tala Tuff, LT: lithic tuff, R: rhyolite, A: andesite.
 c) ラ・プリマヴェーラ・カルデラ (メキシコ) と近傍の基盤.
 Fig. 9. La Primavera caldera, Mexico.
 a) Bouguer gravity anomaly in mgal (after JICA, 1986), star symbol: vent of Tala tuff after Mahood, 1980.
 b) Geological cross section in NW-SE direction (after JICA, 1986).
 c) Basements beneath La Primavera caldera (PR) and Santa Maria (SM).

られない)、そのメカニズムとして爆発説を再生させた。当初は、1 回の大爆発で形成されるとしたが、重力異常の精査によって、複数火口を仮定するように変わった。複合カルデラ説である。これに対して、故久野教授は、Williams 流に、この種カルデラでは、旧山体は空になった浅いマグマ溜まりに落ち込むと確信していたようであった。筆者のじょうご型では、旧山体は“蟻地獄”に落ちるのか？と反論されたことを覚えている。蟻地獄とは、辞典によると、昆虫ウスバカゲロウの幼虫の総称、また、この幼虫が砂地につくるすり鉢状の巣のことである。筆者は、元来、マグマ溜まりはそんな浅いところないと信じていた。こんな状況では、議論が噛み合う筈もなかった。当時久野先生に刃向かう(?)者はいなかった。筆者には全く援軍なし——それは今日でも同じであるが——。尤も、当時の筆者は、この報文に述べた Verbeek, Williams のデータの弱点を熟知していたわけではない、何となくそれらの不合理性を感じていたのであろうか。1962 年の IAV 総会のころ、わが国の火山地質学界では総合研究として大々的に火砕流を調べていた。筆者は、噴出物だけを一生懸命調べてどうするのだろう、と思っていた。

また、Kuno の言うように、果して、Glen Coe 型の後

にクラカタウ型が落ち込めるのか、その逆ならまだ判ると疑問を投げた。その後、町田 (1977)* が古期カルデラからの火砕流堆積物をやや離れた大礫丘陵に発見して、現在では古期カルデラもクラカタウ型と考えられている。Kuno の二重説以来、筆者は現在まで、これら両カルデラに並列的に関心をもってきた。

Krakatau と Glen Coe

1963 年の Nature 誌に McCall (1963) による『Classification of calderas: 'Krakatoan' and 'Glencoe' types』なる論文がある。これは、筆者が重力異常に基づいて屈斜路 (1959, Nature) をクラカタウ型、大島 (1961, Nature) をグレン・コウ型として Nature に投稿した論文を引用して、アフリカ・ケニアのリフト・ヴァレーにも同様二種があると論じている。

クラカタウについては既に述べたので、次にグレン・コウについて述べる。箱根カルデラの議論ではもう必要なくなったかに見えるグレン・コウであるが、意外にもその調査文献が少ない (隣接するスコットランド第三紀の火山に関する文献は多いのに)。Clough *et al.* (1909)* が「グレン・コウのコールドロン (cauldron) と関連した火成活動」なる論文を出している。ここで、

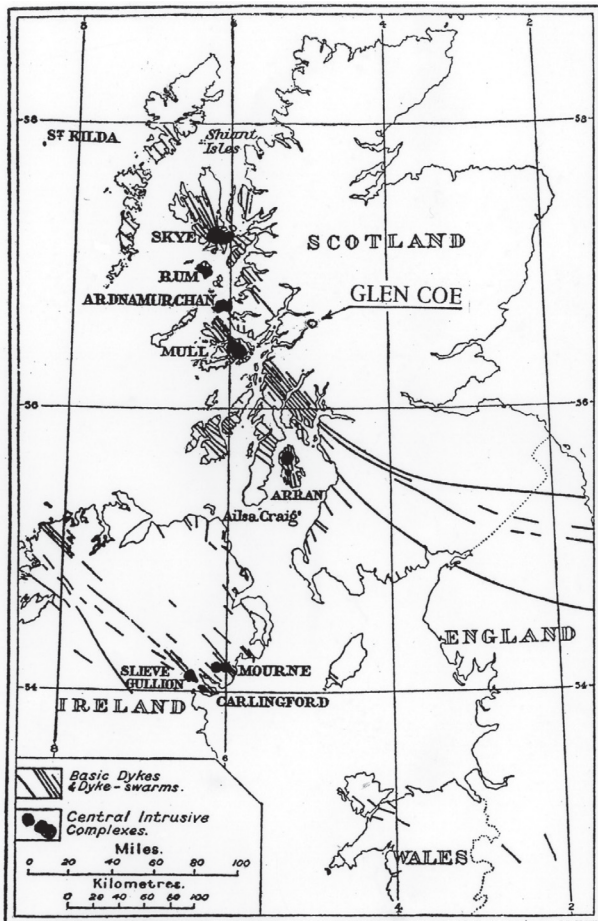


図 10. グレン・コウ（スコットランド）の位置。
Fig. 10. Location of Glen Coe in Scotland.

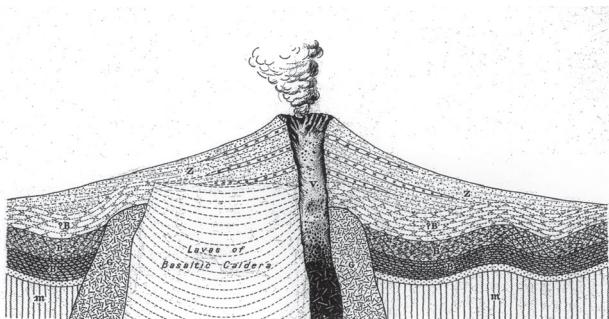


図 11. マル（スコットランド）の復元地質断面図（Richey, 1948 による）。
Fig. 11. Reconstruction of the Mull volcano, in section, during the early acid explosive phase (after Richey, 1948).

コールドロンとは、円筒形の陥没構造のことである。勿論、元来の地表地形は削られていて、陥没構造が鉛直の円筒形であるかは疑問であろう。約 100 年前の論文で、筆者は東大理学部古い書庫から借り出した。立派な皮装丁だが、ほとんど読まれた形跡はなかった。グレン・コウはスコットランドの北西部に位置して（図 10）、Devonian period に属し、18 km × 10 km の楕円形の複雑な陥没地形である。その西側にはほぼ南北に連なる諸島は初期及び中期の第三紀に属し、そこには Skye, Rum, Mull, Arran などの貫入岩体が分布している。これらは British Geological Survey の British Regional Geology "The Tertiary Volcanic Districts of Scotland" として、J. E. Richey (1935, First edition) の書がある。

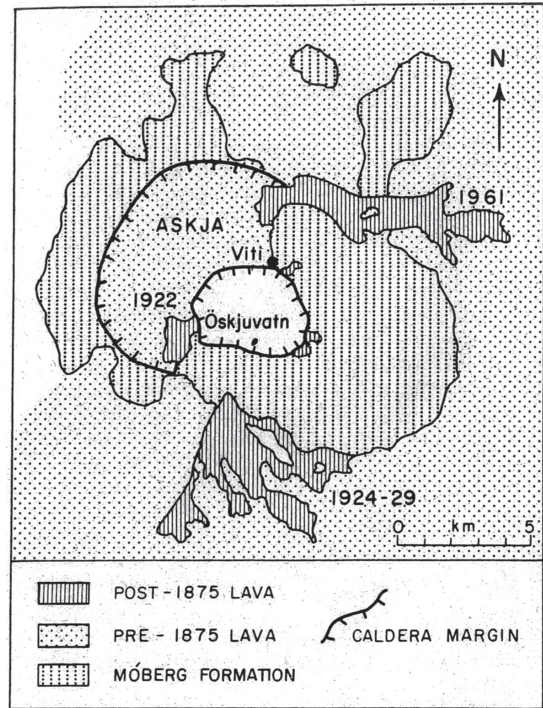


図 12. アスキア・カルデラ（アイスランド）地域の主たる地質区分（Sigurdsson and Sparks, 1981）。
Fig. 12. Principal geologic units of the Askja region (after Sigurdsson and Sparks, 1981).

Mull など、何れも重力測定がなされて、高重力型であると判っている。筆者には、図 11 に示す Mull 火山の初期酸性噴火期の復元断面図が興味深い。図中の Z で示される円錐火山の部分が削剥されたのが現状である。既に述べたように、一般にグレン・コウ型、すなわち、高重力異常型には、苦鉄質溶岩の堆積がある筈である。多分、グレン・コウも同様に考えられるのであろう。

Clough *et al.* (1909) は Glen Coe cauldron をアイスランドのアスキア・カルデラ（面積 45 km²、カルデラ壁の比高約 400 m、活動的な火山で、1961 年にカルデラ底で溶岩を噴出した）と比較して、後者を前者の現代版とした。参考までに、Sigurdsson & Sparks (1981) によるアスキア・カルデラの地質区分図を図 12 に示す。すなわち、これがグレンコウ型のカルデラの典型と考えてよいであろう。

さて、箱根カルデラは二重式カルデラで、共にクラカタウ型すなわち低重力異常型であるとされている。その古期および新期のカルデラ形成が共に“陥没”であるとしたら、筆者はそのメカニズムに疑問をもつものである。その点、複合カルデラ説（各小カルデラは爆発型である）は簡単明瞭であろう。

Kuno *et al.* (1971)* はボーリングの結果を考慮して、新期箱根カルデラの構造・形成を論じた：カルデラ形成以前に比高 2700 m に達する成層火山があり、その成層火山の下に基盤は仮定し、現在の基盤の深さの深さでない原因を、基盤の不均等な陥没であるとした。この仮定を妥当と認めるには、相当な根拠が求められる。

この議論とは別に、この地域の重力異常を見るに、熱海から湯ヶ原付近、および丹沢付近に高異常があり、これらの地域の基盤が隆起していることを示している。

わが国の火山、カルデラが地殻の隆起部に存在する例は少なくない。典型的な例は支笏カルデラで、千歳から西へ基盤が隆起して、その頂上に支笏カルデラがある(Yokoyama & Aota, 1965)*。ブーゲー異常は西へ増加、約 40mgal に達し、その頂上にカルデラがあり、残差低異常約 20 mgal を呈している。箱根カルデラの場合は(横山他, 2000, 図 8 参照)、小田原辺で 10 mgal、箱根外輪で約 50 mgal に達し、カルデラ固有の残差低異常は約 20 mgal である。量的にも支笏カルデラと同じ傾向にある。両カルデラの場合、火山体の寸法の数倍の波長の高重力異常が卓越している。一般に、成層火山は火道を通じてマグマ物質が比較的抵抗少なく噴出するので、基盤がこの範囲で隆起することはあり得ないと考えられる。すなわち、大量の火砕流を噴出して形成された箱根火山は基盤(湯ヶ島層群)の隆起しているところに生じたと考えられる。このスケールの地域異常と火山生成のメカニズムとの関係の解明は今後の問題である。

終わりに

筆者のカルデラについての考察のチェック・ポイントの一つは箱根カルデラであった。上に述べたように、グレン・コウ型、クラカタウ型のカルデラの認識はここで与えられたものである。神奈川県温泉地学研究所はその立地条件から、その設立以来、箱根火山およびその周辺の地学研究を推進し、独自の成果を発表してきた。最近、現地での観測・研究を尊重する筈の大学の火山観測所が無人化あるいは形骸化しているのに対して、稀な規範となっていると思うのは筆者だけであろうか。

謝辞

この小論を書く機会を与えて頂いた神奈川県温泉地学研究所萬年一剛氏、並びに神奈川県立生命の星・地球博物館の山下浩之氏に厚く御礼を申しあげます。なお、文中では諸先輩にたいする敬称を省きました。また、筆者の浅学による誤解があることを恐れます。御指摘頂ければ幸いです。

参考文献 (*印だけをあげる)

- 安藤重幸, 1983. ボーリング結果からみた濁川カルデラの構造. 月刊地球, 5: 116-121.
- Camus, G., M. Gloguen, A. Provost & P. M. Vincent, 1991. Emplacement of a debris avalanche during the 1883 eruption of Krakatau (Sunda Straits, Indonesia). Abstract of XVII Pacific Sci. Cong., Honolulu, 1991.
- Clough, C. T., H. B. Maufe & E. B. Bailey, 1909. The Cauldron-subsidence of Glen Coe, and the associated igneous phenomena. Quart. J. Geol. Soc. London, 65: 611-678.
- 星住英夫・渡辺一徳・坂口圭一・宇都浩三・小野晃司・中村 武, 1997. 阿蘇カルデラ内の深部ボーリングコアで確認された阿蘇一火砕流堆積物. 火山学会講演予稿集, 1997, A05.
- 星住英夫・坂口圭一・渡辺一徳・宇都浩三, 2007. 阿蘇カルデラの内部構造—イントラカルデラ火砕流の存在とその意義—, 日本地質学会講演予稿集, 2007, s-35.
- Kuno, H., 1950. Geology of Hakone Volcano and adjacent

- areas, Part 1. J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Ser.2, 7: 257-279
- Kuno, H., Y. Oki, K. Ogino & S. Hirota, 1971. Structure of Hakone caldera as revealed by drilling. Bull. Volcanol., 34, 713-725.
- 町田 洋, 1977. 火山灰は語る. 蒼樹書房, 東京, 324 pp.
- Mandeville, C. W., S. Carey, H. Sigurdsson & J. King, 1994. Paleomagnetic evidence for high-temperature emplacement of the 1883 subaqueous pyroclastic flows from Krakatau Volcano, Indonesia. J. Geophys. Res., 99: 9487-9504.
- Mandeville, C. W., S. Carey & H. Sigurdsson, 1996. Sedimentology of the Krakatau 1883 submarine pyroclastic deposits. Bull. Volcanol., 57: 512-529.
- 萬年一剛, 2006. 濁川型カルデラの地質構造. 月刊地球, 28: 257-264.
- Matumoto, T., 1943. The four gigantic caldera volcanoes of Kyusyu. Jap. J. Geol. Geogr. 19: 1-57.
- Ninkovich, D., R. S. J. Sparks & M. T. Ledbetter (1978) The exceptional magnitude and intensity of the Toba eruption, Sumatra: An example of the use of deep-sea tephra layers as a geological tool. Bull. Volcanol., 41: 286-298.
- Nomanbhoy, N. & K. Satake, 1995. Generation mechanism of tsunamis from the 1883 Krakatau eruption. Geophys. Res. Lett., 22: 509-512.
- Self, S. & M. R. Rampino, 1981. The eruption of Krakatau. Nature, 294: 699-704.
- Sigurdsson, H., S. Carey, C. Mandeville & S. Bronto, 1991. Pyroclastic flows of the 1883 Krakatau eruption. EOS, Trans. AGU, 72: 377-381.
- Simkin, T. & R. S. Fiske, 1983. Krakatau 1883, The volcanic eruption and its effects. Smithsonian Institution Press, Washington, D. C., 464 pp.
- 須藤靖明, 2007. 阿蘇に学ぶ, 権歌書房, 福岡, 319 pp.
- Verbeek, R. D. M., 1885. Krakatau. Batavia, 495 pp.
- 和田雄次, 1886. 気浪及海浪ノ説. 日本地震学会報告第三冊, p49-69.
- Williams, H., 1941. Calderas and their origin. Univ. Cali. Pub. Geol. Sci., 25: 239-346.
- Yokoyama, I., 1981. A geophysical interpretation of the 1883 Krakatau eruption. J. Volcanol. Geotherm. Res., 9: 359-378.
- Yokoyama, I., 2001. The largest magnitudes of earthquakes associated with some historical volcanic eruptions and their volcanological significance. Annals Geophys. 44: 1021-1029.
- 横山 泉, 2005. カルデラ構造に関する火山物理学的研究の 50 年. 火山, 50: S59-S76.
- Yokoyama, I. & M. Aota, 1965. Geophysical studies on Sikotu Caldera, Hokkaido, Japan. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII, 2: 103-122.
- Yokoyama, I. & S. Ohkawa, 1986. The subsurface structure of the Aira caldera and its vicinity in Southern Kyushu, Japan. J. Volcanol. Geotherm. Res., 30: 253-282.
- Yokoyama, I. & M. Mena, 1991. Structure of La Primavera caldera, Jalisco, Mexico, deduced from gravity anomalies and drilling results. J. Volcanol. Geotherm. Res., 47: 183-193.
- 横山 泉・棚田俊収・萬年一剛, 2002. 箱根火山地域における補足の重力測定(1999 年). 神奈川県温泉地学研究所報告, 33: 1-10.