

箱根火山のカルデラ外に掘削された深部坑井の熱水変質

Hydrothermal Alteration of Deep Borehole Samples Outside of the Caldera Rim of the Hakone Volcano

藤本光一郎¹⁾・藤原淳史¹⁾・乙幡 直¹⁾

Koichiro FUJIMOTO¹⁾, Atsushi FUJIWARA¹⁾ & Naoki OTSUHATA¹⁾

Abstract. Hydrothermal alteration mineral assemblages were determined by X-ray diffraction pattern of samples from two deep boreholes, which were drilled at Nebukawa and Miyashita, southeast flank of the Hakone volcano. Both boreholes reached the basement (Hayakawa Tuff Breccias and Yugashima Formation) through Hakone volcanic rocks. Characteristic mineral assemblages are smectite, swelling chlorite, chlorite, chlorite + epidote + wairakite in descending order in the Nebukawa borehole. In the Miyashita borehole, they are smectite, chlorite, and chlorite + epidote, in descending order. Basically, these changes in mineral assemblages are results of temperature gradient in neutral to basic hydrothermal activity. The difference between two boreholes probably comes from the difference in chemistry of hydrothermal fluid, in particular, CO₂ concentration. In the Nebukawa borehole, zonation of mineral assemblages in Yugashima formation is well preserved, since hydrothermal alterations of the younger formations are weak. In contrast, Hayakawa Tuff Breccias suffered intense alteration and younger hydrothermal activity overprinted in Yugashima Formation in the Miyashita borehole.

Key words: Hydrothermal alteration, Yugashima Formation, Hakone volcano

1. はじめに

箱根火山は典型的なカルデラ型火山として今まで多くの研究がなされてきた。近年になって詳細な地質調査や岩石学的研究、年代学的研究が進み、新たな地質図が出版されるとともにそれらを踏まえた新しい発達史が提唱され（日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007）、改めて注目を集めている。箱根火山の発達過程や、伊豆半島の衝突など重要な地質現象を考える上で、基盤岩がどのように分布しているかを把握することは重要である。箱根火山の基盤をなす地層は300万から400万年前に形成された早川凝灰角礫岩とそれより古くおよそ1000万年前に形成された湯ヶ島層群であるが、箱根地域の露出は限られている。また、湯ヶ島

層群については模式地である伊豆半島に広く分布しているが、熱水変質の影響を強く受けてその全体像はわかっていない（山下ほか, 2003）。激しく変質した海底火山性の地層があると湯ヶ島層群とされることも多いが（日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007）、詳細な熱水変質の研究も限られているのが現状である。

箱根火山およびその周辺地域では深度が1000mを超える温泉掘削がされており、採取されたコア試料は神奈川県温泉地学研究所や神奈川県立生命の星・地球博物館などに保管されている。その中には箱根起源の火山岩を貫いて基盤岩に到達している坑井もある。これらの試料についてはすでに岩石の記載的な研究は公表されているが（平田ほか, 2001；萬年ほか, 2002；山下ほか, 2006）、系統的な変質の研究はまだなされていない。

今回それらの坑井から得られた試料について主としてX線回折法によって変質鉱物の組合せや深度分布を解析した。温泉掘削コアを用いる利点は、地表では採取でき

1) 東京学芸大学教育学部
〒185-8501 東京都小金井市貫井北町4-1-1
Faculty of Education, Tokyo Gakugei University
4-1-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo 185-8501, Japan
藤本光一郎; koichiro@u-gakugei.ac.jp

ない深部の試料が入手できることと、深度方向で密なサンプリングが可能であり、熱水変質のゾーニングやその形成過程などを考える上で貴重な情報が得られることなどである。

2. 対象とした坑井の地質概要及び試料

研究対象とした試料は、小田原市根府川の根府川駅北西約 900m に位置する地点で掘削された深度 1450m の坑井（以下、根府川坑井）から採取した試料、および、神奈川県湯河原町宮下の通称“花咲分譲地”の東において温泉試掘のために掘削された坑口標高 185m、掘削深度 1200m の坑井（以下、宮下坑井）から採取した試料である。掘削地点を図 1 に示す。

根府川坑井についての地質的な記載は平田ほか (2001) および萬年ほか (2002) に、宮下坑井については、山下ほか (2006) に、それぞれ報告されている。以下、それらに基づいて両者のコアの地質概要を簡潔に述べる。

根府川坑井は、深度 225m 以浅は無斑晶質の安山岩および両輝石含有安山岩溶岩、かんらん石両輝石含有安山岩溶岩、火山碎屑層などからなり、箱根の前期単成火山群溶岩及び白銀山溶岩類とされている。また深度 225m から 555m は、凝灰角礫岩で古期外輪山系凝灰角礫岩とされている。さらに、深度 555m から 1175m は、凝灰角礫岩や両輝石含有デイサイト溶岩や軽石質のタービダイト、軽石質凝灰角礫岩などからなり、早川凝灰角礫岩層に対比されている。深度 1175m の火山砂より深い、タービダイトと玄武岩質ハイアロクラスタイトの互層および軽石質のタービダイトは湯ヶ島層群とされている。

一方、宮下坑井においては、コアのある深度 500m から 580m は、ハイアロクラスタイトなどを挟む安山岩質の溶岩であり、箱根古期外輪山溶岩に対比するとされている。また、深度 580m から 905m は、デイサ

イト質の溶岩あるいはハイアロクラスタイトを主体とし、早川凝灰角礫岩に対比されている。深度 795m から 845m にかけては玄武岩の岩脈が貫いている。さらに深度 905m から坑底までは、玄武岩、安山岩、デイサイト質の凝灰角礫岩であり、湯ヶ島層群に対比されている。

3. 研究方法

根府川坑井では、深度 1170m より浅い部分の CUTTINGS からおよそ 50m 間隔で 30 試料を採取したほか、深度 1200m より 1450m までの 53 試料を採取し、解析を行った。一方、宮下坑井は、深度 500 から 1200m がオールコアであり、それより浅い部分は CUTTINGS 及び部分コアが残されている。本研究では、深度 500m より深い部分からのコアから 83 試料を採取し、検討した。

CUTTINGS は粉碎後 X 線回折を行った。コア試料については肉眼観察し、粉末 X 線回折を行った。装置は東京学芸大学教育学部の理学 RINT-1200 を用いた。測定は Cu 管球 (40kV、20 mA) を用い、不定方位試料については、3° から 70° を毎分 4° で測定した。また、必要に応じて水ひによって粘土鉱物を濃集させて定方位試料を作成し、3° から 25° を毎分 1° で測定した。定方位試料については膨潤性のある粘土鉱物を同定するためにエチレングリコール処理も行った。

なお、薄片観察も部分的に実施したが、大局的な変質鉱物の分布をつかむのが今回の目的であったので、今回はそれには触れない。

4. 結果

以下、各坑井の粉末 X 線回折 (XRD) 解析の結果を述べる。各坑井の簡単な地質柱状図と検出された鉱物の分布を図 2、3 に、各試料ごとに検出された鉱物の一覧は表 1、2、3 に掲載している。

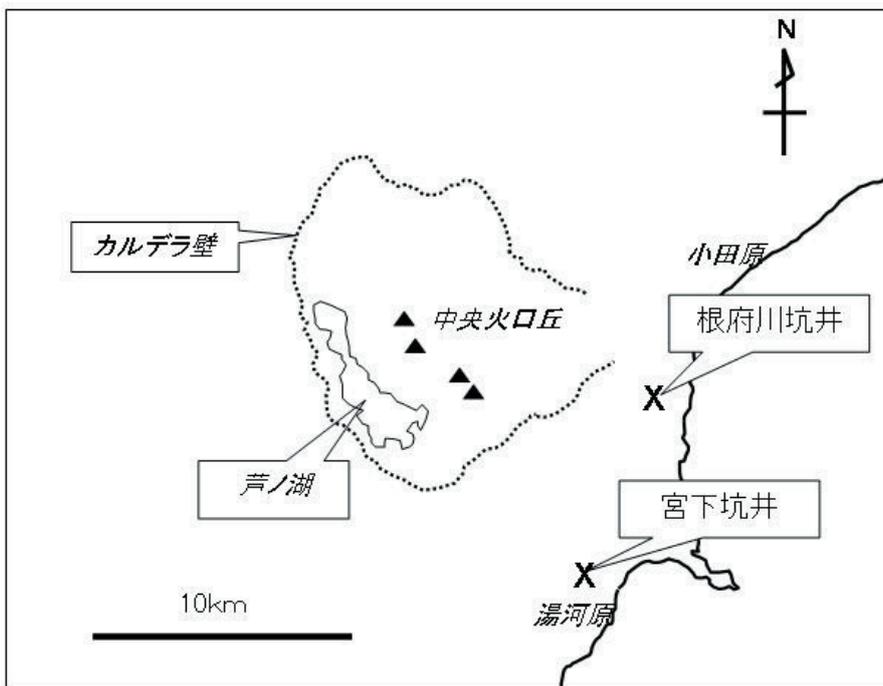


図 1. 掘削地点を示す地図。

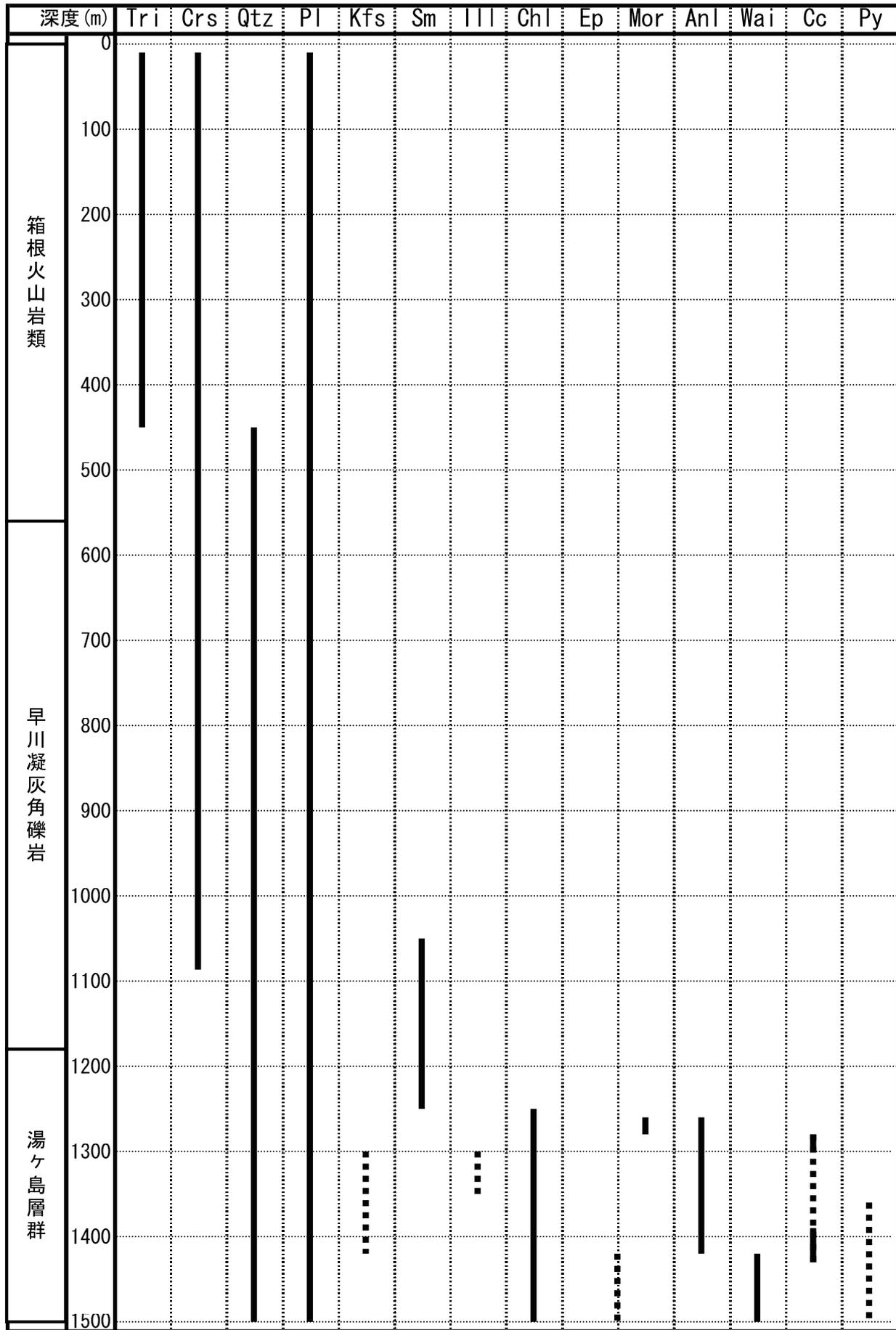


図2. 根府川坑井の簡単な地質柱状と鉱物組合せの変化。地層区分は万年ほか(2002)による。実線はその区間のほとんど全ての試料で産出することを示し、破線は一部の試料に産出することを示す。鉱物の略号は以下の通りである。
 Tri: トリディマイト Crs: クリストバライト Qtz: 石英 Pl: 斜長石 Kfs: カリ長石 Sm: スメクタイト Ill: イライト Chl: 緑泥石
 Ep: 緑簾石 Mor: モルデナイト Anl: アナルシム Wai: ワイラカイト Cc: 方解石 Py: 黄鉄鉱

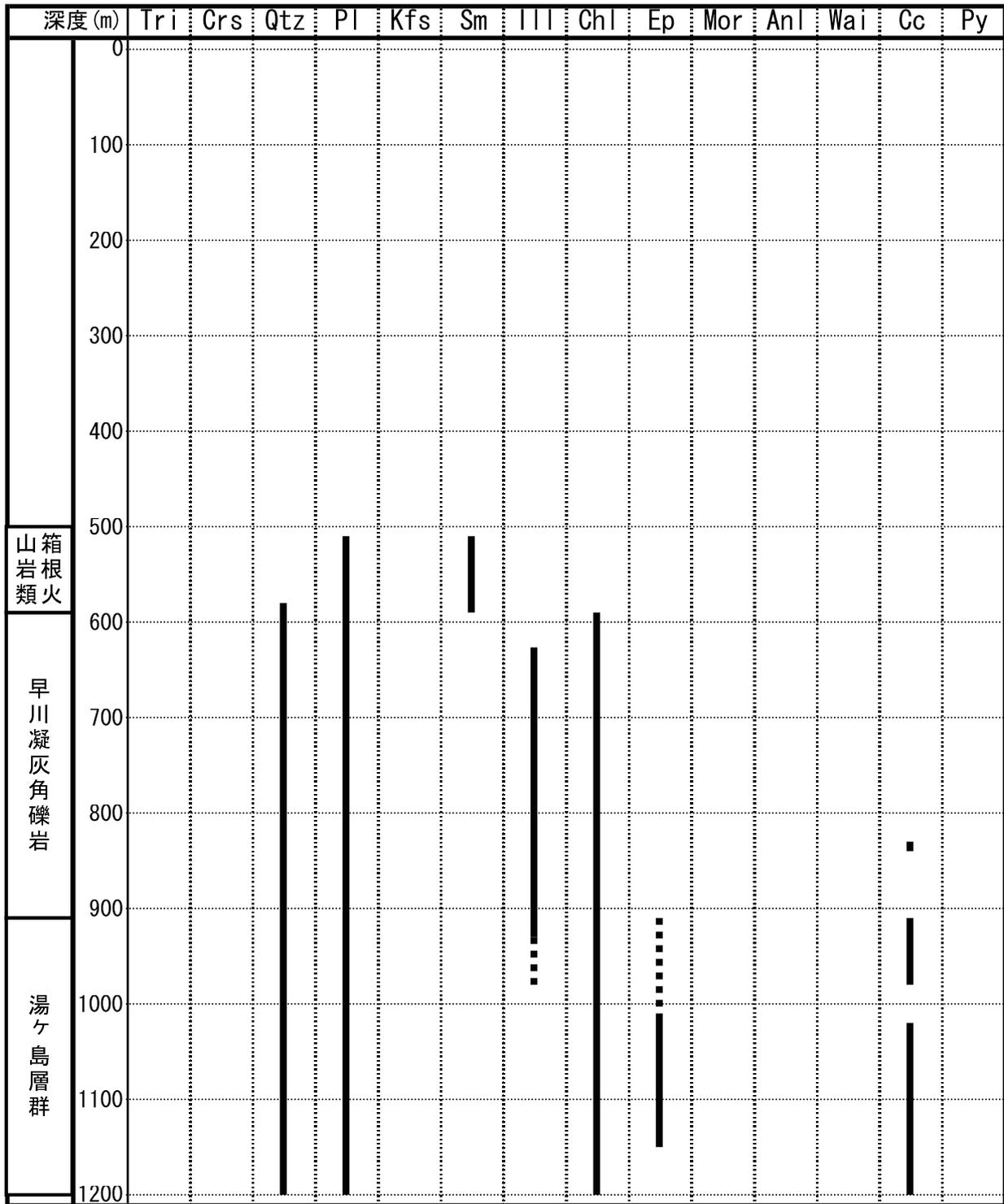


図3. 宮下坑井の簡単な地質柱状と鉱物組合せの変化。地層区分は山下ほか（2006）に基づく。500mより浅い部分はコア試料がなく分析を行っていない。実線はその区間のほとんど全ての試料で産出することを示し、破線は一部の試料に産出することを示す。鉱物の略号は以下の通りである。
 Tri: トリディマイト Crs: クリストバライト Qtz: 石英 Pl: 斜長石 Kfs: カリ長石 Sm: スメクタイト Ill: イライト
 Chl: 緑泥石 Ep: 緑簾石 Mor: モルデナイト Anl: アナルシム Wai: ワイラカイト Cc: 方解石 Py: 黄鉄鉱

根府川坑井において検出された鉱物は、斜長石、カリ長石、かんらん石、石英、スメクタイト、緑泥石、イライト、緑簾石、沸石類（モルデナイト、アナルシム、ワイラカイト）、方解石、黄鉄鉱である。

宮下坑井において検出された鉱物は、スメクタイト、緑泥石、石英、斜長石、方解石、イライト、緑簾石、黄鉄鉱である。根府川坑井ではしばしば産出する沸石類が

宮下坑井では検出できないことが最大の特徴である。

以下、各坑井について、検出された鉱物の分布と岩相との関連について述べる。

(1) 根府川坑井

カッティングス試料とコア試料を合わせて述べる。斜長石はほぼ全ての試料から検出された。斜長石は熱水変

表1. 根府川坑井のカッティングス試料の深度と鉱物.

No	深度(m)	XRDで検出された鉱物													
		Tri	Crs	Qtz	Pl	Kfs	Sm	Ill	Chl	Ep	Mor	Anl	Wai	Cc	Py
1	10	○	○		○										
2	50	○	○		○										
3	90		○		○										
4	130		○		○										
5	170		○		○										
6	210		○		○										
7	250		○		○										
8	290		○		○										
9	330	○	○		○										
10	370	○	○		○										
11	410	○	○		○										
12	450	○	○	○	○										
13	490		○		○										
14	530		○		○										
15	570		○	○	○										
16	610		○	○	○										
17	650		○	○	○										
18	690		○	○	○										
19	730		○	○	○										
20	770		○		○										
21	810														
22	850														
23	890		○		○										
24	930		○		○										
25	970		○		○										
26	1010		○		○										
27	1050		○		○		○								
28	1090		○		○		○								
29	1130			○	○		○								
30	1170			○	○		○								

810m と 850m の 2 試料は欠落。鉱物の略号は以下の通りである。

Tri: トリディマイト Crs: クリストバライト Qtz: 石英 Pl: 斜長石 Kfs: カリ長石 Sm: スメクタイト Ill: イライト
Chl: 緑泥石 Ep: 緑簾石 Mor: モルデナイト Anl: アナルシム Wai: ワイラカイト Cc: 方解石 Py: 黄鉄鉱

質で生じた曹長石の可能性もあるがほとんどが初生的ではないかと考えられる。カリ長石は深度 1295.8m より深い試料において、9 試料から検出された。このカリ長石は変質で生じたカリ長石ではないかと考えられる。また、初生的と考えられるかんらん石が 1236.7 m の試料から 1 試料のみ検出された。シリカ鉱物としてトリディマイトはカッティングス試料において、深度が 10m から 450m の試料で検出され、それより深い試料では検出されなかった。クリストバライトはカッティングスの深度 1090m より浅い深度でほぼ全ての試料から検出された。石英は、カッティングスにおいては、深度が 450m から 730m のほぼ全ての試料と 1130m より深い 2 試料から検出されたほか、コアにおいては、深度 1250.4m より深い試料のほぼ全てから検出された。

粘土鉱物としては、スメクタイトはカッティングスで

深度 1050m より深い全ての試料で、また、コアでは深度 1209.8m から 1247.2m の深度区間で全ての試料から検出された。一方、緑泥石は、コアで深度 1250.4m より深い試料において 1 試料を除く全ての試料から検出された。そのうち、深度が 1250.4m から 1284.5m の試料の緑泥石には膨潤性が認められた。イライトは深度が 1295.6m、1346.9m、1348.8m の 3 試料のみから検出された。

本坑井の特徴とも言える沸石類については、浅い方からモルデナイトが深度 1262.3m から 1282.6m まで、アナルシムが深度 1262.3m から 1409.8m まで、そしてワイラカイトが深度 1419.0 m より深い深度で検出された。方解石は、深度 1282.6m より深い試料で 16 試料から、黄鉄鉱は深度 1368.1m と 1429.5m の 2 試料のみから検出された。

表 2. 根府川坑井のコア試料の深度と鉱物.

No.	深度(m)	XRDで検出された鉱物														
		Tri	Crs	Qtz	Pl	Kfs	Sm	Ill	Chl	Ep	Mor	Anl	Wai	Cc	Py	Ol
1	1209.8				○		○									
2	1211				○		○									
3	1215.9				○		○									
4	1218.6				○		○									
5	1220.2				○		○									
6	1228.1				○		○									
7	1235.1				○		○									○
8	1236.7				○		○									
9	1247.2				○		○									
10	1250.2			○	○			○								
11	1254.3			○	○			○								
12	1262.3				○			○		○	○					
13	1269.1				○			○			○					
14	1271.3				○			○		○	○					
15	1274.3			○	○			○			○					
16	1279.6			○	○			○			○					
17	1281.6			○	○			○		○	○					
18	1282.6				○			○		○	○			○		
19	1284.5			○	○			○			○			○		
20	1291				○			○			○					
21	1295.6			○	○		○	○								
22	1295.8					○		○						○		
23	1297.3			○	○			○				○		○		
24	1303.8				○			○						○		
25	1310.9			○	○			○						○		
26	1313.5			○	○			○								
27	1319.7			○	○			○								
28	1320.2			○	○			○								
29	1322.5			○	○	○		○								
30	1331			○	○			○			○					
31	1339.6			○	○			○			○					
32	1346.9			○		○		○						○		
33	1348.8			○	○	○		○								
34	1362.6			○	○			○								
35	1368.1			○	○	○		○								○
36	1369.9			○	○	○		○						○		
37	1379.1			○	○			○						○		
38	1381.5			○	○			○			○			○		
39	1390.5			○	○	○		○			○			○		
40	1391			○	○			○			○			○		
41	1391.7			○	○			○			○			○		
42	1393.2			○	○			○			○			○		
43	1397.9			○	○	○		○			○			○		
44	1403.4			○	○			○								
45	1409.8			○	○			○			○					
46	1419			○				○				○				
47	1419.7			○				○	○			○				
48	1422.4			○	○	○		○	○					○		
49	1426.6			○				○				○				
50	1428.3			○				○	○			○				
51	1429.5			○				○				○			○	
52	1432.7			○				○	○			○				
53	1438.7			○				○				○				

鉱物の略号は以下の通りである。

Tri: トリディマイト Crs: クリスタバライト Qtz: 石英 Pl: 斜長石 Kfs: カリ長石 Sm: スメクタイト Ill: イライト Chl: 緑泥石
Ep: 緑簾石 Mor: モルデナイト Anl: アナルシム Wai: ワイラカイト Cc: 方解石 Py: 黄鉄鉱 Ol: かんらん石

表3. 宮下坑井の試料の深度と鉱物.

No.	深度(m)	XRDで検出された鉱物							
		Qtz	Pl	Sm	Ill	Chl	Ep	Cc	Py
1	511.3		○	○					
2	519.1		○	○				○	
3	535.4		○	○					
4	544.6		○	○					
5	559.6		○	○				○	
6	568.3		○	○					
7	580.5	○	○	○					
8	583.5	○	○	○					
9	596.3	○	○			○			
10	612.4	○	○			○			
11	628.9	○	○		○	○			
12	633.2	○	○			○			
13	650.1	○	○			○			
14	659.9	○	○		○	○			
15	668.5	○	○		○	○			
16	689.9	○			○	○			
17	694.7	○			○	○			○
18	710.9	○	○		○	○			
19	723.1	○	○			○			
20	739.9	○				○			
21	747.2	○	○		○	○			
22	756.5	○	○		○	○			
23	778.7	○	○		○	○			
24	794.8	○			○	○			
25	833.5	○	○			○		○	
26	836.2	○	○			○		○	
27	841	○	○		○	○			
28	847.1	○	○		○	○			
29	854.7	○	○		○	○			
30	856.3	○	○		○	○			
31	874.7	○			○	○			○
32	883.2	○	○		○	○			
33	887.9	○	○		○	○			
34	898.1	○			○	○			
35	903.2	○	○		○	○			
36	905.8	○	○		○	○			
37	910	○	○			○		○	
38	910.5	○	○			○	○	○	
39	920	○	○			○			
40	922	○	○		○	○		○	
41	926.4	○	○			○			
42	931.3	○	○		○	○		○	

No.	深度(m)	XRDで検出された鉱物							
		Qtz	Pl	Sm	Ill	Chl	Ep	Cc	Py
43	940.8	○	○			○		○	
44	945.2	○	○			○			
45	951.7	○	○			○		○	
46	955.9	○	○			○		○	
47	960.7	○	○			○	○		
48	974.1	○	○		○	○			
49	979.5	○	○			○		○	
50	986.9	○	○			○			
51	993.9	○	○			○			
52	997.4	○	○			○			
53	1008.1	○	○			○			
54	1015.1	○	○			○	○		
55	1017.5	○	○			○	○	○	
56	1023.6	○	○			○		○	
57	1031.6	○	○			○	○		
58	1039.6	○				○	○		
59	1047.9	○					○	○	
60	1052.9	○	○			○		○	
61	1063.3					○		○	
62	1063.4	○	○			○		○	
63	1067.2	○	○			○	○	○	
64	1067.8	○	○			○		○	○
65	1072.5	○	○			○	○	○	
66	1079.9	○	○			○		○	
67	1088.8	○	○			○		○	
68	1093.8	○				○		○	
69	1094.4	○						○	
70	1103.1	○	○			○	○	○	○
71	1112.6	○	○			○		○	
72	1117.7	○	○			○		○	
73	1121.6	○	○			○		○	
74	1136.3	○	○			○	○	○	
75	1147.7	○	○			○		○	
76	1153.5	○	○			○	○	○	
77	1156.4	○	○			○		○	
78	1168	○	○			○		○	
79	1173.4	○	○			○		○	
80	1177.6	○	○			○		○	
81	1187.3	○	○			○		○	
82	1191.1	○	○		○	○		○	
83	1199	○	○			○		○	

鉱物の略号は以下の通りである。

Qtz: 石英 Pl: 斜長石 Sm: スメクタイト Ill: イライト Chl: 緑泥石 Ep: 緑簾石 Cc: 方解石 Py: 黄鉄鉱

早川凝灰角礫岩と箱根火山岩類では、シリカ鉱物がトリディマイトやクリストバライトから石英に変わっていることや、スメクタイトが 1050m より深くなって表れることなどが特徴的な深度変化であるが、地層区分や岩相との明瞭な関連性は認められない。一方、湯ヶ島層群内部では、スメクタイトが検出される深度 1247.2m より浅い部分は火山砂に対応しており、それより深い緑泥石が見られる部分は、タービダイトやハイアロクラスタイトに対応する。また、沸石が、1410m 付近より浅い部分では、モルデナイトとアナルシム、それより深い部分ではワイラカイトと異なっていること、モルデナイトやアナルシムが表れる部分は、方解石やカリ長石、イライトなども見られるのに対して、ワイラカイトの部分では緑簾石が特徴的に産出するのが特徴である。

(2) 宮下坑井

スメクタイトは、深度が 511.3m から 583.5 m の全ての試料から検出されたが、それより深い試料からは検出されなかった。また、緑泥石はスメクタイトとは共存せずに深度 596.3 m より深い試料について、2 試料を除く全てから検出された。石英は深度 580.5m よりも深い試料において、1 試料を除く全てから検出された。石英については、原岩の斑晶として含まれた石英か、変質で形成された石英であるかは判別できない。斜長石は深度に関係なく採取したほとんどの試料において検出されたが初生的と考えられる。方解石は 903.2m より深い部分では、ほぼどの試料からも検出されたほか、より浅い部分でも 4 試料から検出された。イライトは、深さ 628.9m から 905.8m までは、ほぼ全ての試料から検出されたが、それより深い部分においては、4 試料からのみ検出された。緑簾石は、深度 910.5m より深い試料から 12 試料において検出された。黄鉄鉱は、694.7m

より深い試料から 4 試料のみ検出された。

これらの鉱物の分布は山下ほか (2006) による地層区分と関係しており、スメクタイトの分布深度は箱根古期外輪山溶岩とほぼ一致する。また、イライトの分布深度は早川凝灰角礫岩が中心であり、方解石や緑簾石が頻繁に産出するのは湯ヶ島層群になる。早川凝灰角礫岩中の方解石の分布は玄武岩脈中に限られる。

5. 考察

根府川と宮下の各坑井について、変質鉱物の形成をどのように考えるかを考察したのちに、二つの坑井の比較検討を行う。一般に熱水変質鉱物の組み合わせを大きく左右する要因として温度と熱水の性状があげられる。本研究ではカオリナイトやパイロフィライトのような酸性熱水に特徴的な鉱物群は出現していないので、基本的には中性に近い熱水による変質と考えられる。変質鉱物の出現温度などの生成環境は吉村 (2001) などによってまとめられており、それを簡略化したものを図 4 に示す。ここではそれに基づいて考察を進める。

(1) 根府川坑井

湯ヶ島層群においては、特徴的な変質鉱物組合せは、浅いところからスメクタイト (深度 1050m から 1247.2m)、膨潤性のある緑泥石 (深度 1250.4m から 1284.5m)、緑泥石 (深度 1291.0m から 1409.8m)、緑泥石+緑簾石+ワイラカイト (深度 1419.0m より深部) となっている。この鉱物組み合わせの変化は、吉村 (2001) でまとめられている中性の熱水変質帯における温度による変質鉱物の産出と調和的であり、それぞれ、およそ 100℃以下、100℃から 200℃程度、およそ 200℃から 250℃程度、250℃以上に対応する。膨潤性緑泥石は、吉村 (2001) の緑泥石/スメクタイト帯と

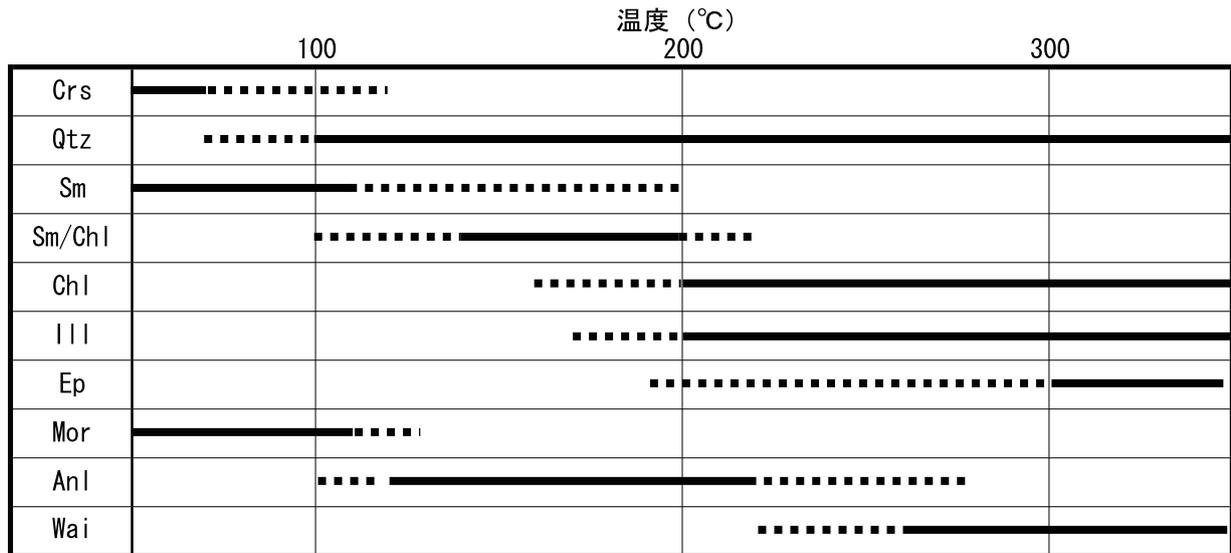


図4. 中性からアルカリ性の熱水変質帯における変質鉱物の生成温度のまとめ(吉村(2001)を簡略化). 鉱物の略号は以下の通りである. Crs: クリストバライト Qtz: 石英 Sm: スメクタイト Ill: イライト Chl: 緑泥石 Ep: 緑簾石 Mor: モルデナイト Anl: アナルシム Wai: ワイラカイト

みなすことができる。また、沸石もそれに対応して、膨潤性緑泥石が特徴的な部分ではアナルシムやモルデナイトなどが産出する。沸石類については、通常はアナルシムで特徴付けられる部分とワイラカイトで特徴付けられる部分との間にローモンタイトで特徴付けられる部分が存在するケースが多いが、本坑井では非常に狭いか、欠落している可能性もある。

また、緑泥石で特徴付けられる深度には、カリ長石や方解石もしばしば見られることも特徴であり、単純な温度の違いだけでなく、熱水の性状がより塩基性であった可能性もある。

一方、上位の早川凝灰角礫岩や箱根火山岩類中の変質で生じた鉱物は、カッティングス試料のみではあるが、箱根火山岩類中にはトリディマイトとクリストバライト、早川凝灰角礫岩においては、クリストバライトと石英、スメクタイトが検出されている。これらは石英を除いてはおよそ 100°C より低温で形成されるような変質鉱物である。石英も初生鉱物の可能性も高いことを考えると、宮下坑井のような高温の熱水変質を受けた痕跡はない。このことは根府川坑井周辺に地表で湧出するような温泉は分布していないことと調和的である。

したがって、湯ヶ島層群中に見られる変質鉱物組み合わせの深度変化は箱根火山岩類の形成後にできたものではなく、それより古い時代に湯ヶ島層群のみが受けた一連の熱水活動で形成されたものであると考えられる。分布が保存されていることも、箱根火山の活動などに関連する変質作用を強く受けていないことと対応していると考えられる。

(2) 宮下坑井

特徴的な変質鉱物が浅い部分から、スメクタイト（深度 511.3m から 583.5m）、緑泥石（深度 596.3m から 910 m）、緑泥石+緑簾石（深度 910m より深部）と変化している。これは吉村（2001）による中性の熱水変質帯で見られる鉱物の変化の温度変化によると、それぞれ、およそ 100°C（あるいは 200°C）以下、200°C から 250°C、250°C 以上に対応すると考えられる。従って、一連の熱水活動によって深度が増すほど高温で安定な組合せに変化していると解釈することができる。ただし、宮下坑井では根府川坑井で確認された膨潤性のある緑泥石が確認できず、スメクタイトの分布域と緑泥石の分布域の間で若干の温度ギャップが存在する可能性も否定できない。スメクタイトが検出されたのが箱根火山岩類中であり、下位の早川凝灰角礫岩になると変質が強くなるとともに緑泥石が分布するようになるなど変質鉱物の分布と地層区分の関連が強いことから、ステージの異なる変質を見ている可能性もある。

いずれにせよ早川凝灰角礫岩には緑泥石、箱根火山岩類にはスメクタイトと変質が明瞭に及んでおり、特に早川凝灰角礫岩はかなり強い変質を受けている。このような熱水活動は、それぞれの地層の形成以降の時代の活動である。宮下坑井は湯河原の温泉地帯に位置しているので近いので、それに関連する熱水活動の可能性もある。

一方、伊豆地域に分布する湯ヶ島層群は緑泥石など

で特徴づけられる緑色変質を強く受けていることから、宮下坑井で見られる湯ヶ島層群は、箱根火山岩類や早川凝灰角礫岩などの形成される前の時代に緑泥石や緑簾石が形成される程度の 200°C から 300°C 前後の中性の変質を受け、さらに、新しい時代にも似たような条件で再度変質を受けた可能性が高い。ただし、これらの変質活動の重複については、変質鉱物の産状の観察や組成の分析、同位体比などより詳細な解析を行わないと解析はできない。

(3) 根府川坑井と宮下坑井の変質の違い

湯ヶ島層群については、根府川坑井ではスメクタイト、膨潤性緑泥石、緑泥石、緑泥石+緑簾石+ワイラカイトと変質鉱物の組み合わせが深度増加に連れて変化するのに対して、宮下坑井では緑泥石+緑簾石という組み合わせで深度方向の変化が見られないことと、沸石類が産出しないことなどが大きな特徴である。

また、宮下坑井においては、湯ヶ島層群に限られる変質作用と、箱根火山岩類形成よりも新しい変質作用の二種類の変質が重複している可能性が高いが、根府川坑井においては湯ヶ島層群に限られる変質がよく保存され、新しい時代の変質作用の重複があまり見られないのが大きな特徴である。

これらの相違は、宮下坑井においては箱根火山の活動に関連するような新しい変質の重複を受けていることに加え、熱水の性状も影響していると考えられる。二酸化炭素分圧が高いと沸石は形成されずに緑簾石+方解石という組み合わせになることはよく知られている。宮下坑井の湯ヶ島層群中では、緑簾石と方解石は普遍的に含まれており、より二酸化炭素分圧の高い熱水が関与したと考えられる。

6. まとめと今後の課題

箱根火山のカルデラ外に掘削された根府川坑井、宮下坑井において、系統的に X 線回折を行い、変質鉱物の同定と分布を解析した。

根府川坑井において検出された鉱物は、斜長石、カリ長石、かんらん石、石英、スメクタイト、緑泥石、イライト、緑簾石、沸石類（モルデナイト、アナルシム、ワイラカイト）、方解石、黄鉄鉱である。また、宮下坑井において検出された鉱物は、スメクタイト、緑泥石、石英、斜長石、方解石、イライト、緑簾石、黄鉄鉱である。宮下坑井においては、沸石類は見られない。

根府川坑井においては、湯ヶ島層群中において特徴的な変質鉱物の組合せが深くなるにつれてスメクタイト、膨潤性緑泥石、緑泥石、緑泥石+緑簾石+ワイラカイトと変化した。また、宮下坑井においては、スメクタイト、緑泥石、緑泥石+緑簾石と変化しており、それらは地層区分とよく対応していた。

宮下坑井においては、湯ヶ島層群の変質作用と、箱根火山岩類形成よりも新しい変質作用の二種類の変質が重複している可能性が高いが、根府川坑井においては湯ヶ島層群に限られる一連の中性の変質がよく保存され、新しい時代の変質作用の重複がきわめて弱いと考えられ

る。また、宮下坑井における湯ヶ島層群に変質をもたらした熱水の性状が根府川坑井に比べて二酸化炭素分圧が高く、沸石を生じることがなかったと考えられる。

今後は、変質鉱物の産状や化学組成などを調べることにより湯ヶ島層群と早川凝灰角礫岩や箱根火山岩類の変質の特徴を区別すること、箱根火山のカルデラ内の基盤岩の変質と比較を行うこと、伊豆半島などで見られる湯ヶ島層群の変質との比較を進めることなどが課題であると考えられる。

謝辞

貴重なコア試料の使用を快く許可し、試料採取に便宜を図ってくださった、神奈川県温泉地学研究所の萬年一剛氏、神奈川県立生命の星・地球博物館の山下浩之氏ほかの方々に深く感謝する。

本研究は、東京学芸大学教育学部に提出された2編の卒業論文(乙幡, 2006ms および藤原, 2007ms)の概要をまとめたものである。研究を進めるにあたっては東京学芸大学教育学部中田正隆博士をはじめ岩石鉱物学研究室の方々に協力していただいた。

文献

- 藤原敦史, 2007ms. 湯河原町宮下で掘削されたボーリングコアの研究. 東京学芸大学教育学部平成18年度卒業論文.
- 平田大二・山下浩之・萬年一剛・谷口英嗣, 2001. 箱根火山の基盤岩に関する岩石学的研究—深層ボーリングコアを材料に. 地学雑誌, 110, 420-426.
- 萬年一剛・山下浩之・平田大二・田口公則・川手新一・谷口英嗣・蛭子貞二, 2002. 小田原市根府川で掘削された深さ1500 mの温泉井の地質. 神奈川県温泉地学研究所報告, 33, 11-24.
- 日本地質学会国立公園地質リーフレット編集委員会, 2007. 1. 箱根火山. 地質学会.
- 乙幡直, 2006ms. 箱根火山の基盤岩における変質. 東京学芸大学教育学部平成17年度卒業論文.
- 山下浩之・萬年一剛・石塚治・川手新一・平田大二・蛭子貞二・谷口英嗣, 2006. 神奈川県湯河原町宮下で掘削されたボーリングコアの岩相記載と地質学的意義. 神奈川県温泉地学研究所報告, 38, 1-10.
- 山下浩之・谷口英嗣・萬年一剛・平田大二・川手新一, 2003. 伊豆弧北部で掘削された深層ボーリングコアから得られた湯ヶ島層群の特徴. 月刊地球号外, 43, 45-52.
- 吉村尚久, 2001. 粘土鉱物と変質作用. 地学双書 32, 地学団体研究会, 293pp, 東京.