栃木県茂木町北方地域に産する第三紀 高 TiO_2 ソレライト

Tertiary TiO_2 -rich tholeiite from northern part of Motegi district
of Tochigi Prefecture, Northeast Japan

周 藤 賢 治 (Kenji Shuto)*
伊 崎 利 夫 (Toshio Izaki)**
八 島 隆 一 (Ryūichi Yashima)***

Tholeiitic basalts characterized by very high TiO_2 contents have been found in the northeast Japan arc. These basalts (the Motokozawa basalts) occur as lavas and minor dikes in the lower Miocene Motokozawa Formation which is distributed in the eastern part of Tochigi Prefecture, Northeast Japan.

The Motokozawa basalts are uniform, non-porphyritic and subophitic in texture. The essential constituent minerals are plagioclase, clinopyroxenes (augite, ferroaugite, subcalcic augite and pigeonite) and Fe-Ti oxides. Fe-Ti oxides occur sporadically as euhedral crystals (3.8-6.4 modal %) and also as very fine grained crystals in the mesostasis. The Motokozawa basalts are high alkali tholeiite or quartz tholeiite according to the classification of Kuno (1968b) and Yoder and Tilley (1962), respectively.

The quartz-normative tholeiites having high TiO_2 , FeO^* ($\text{FeO} + 0.9 \text{Fe}_2\text{O}_3$) and low K_2O contents are predominantly found in the east Pacific Ocean floor, though less abundantly in other ocean floors.

Discussions and considerations on the genesis of ocean floor tholeiites with high TiO_2 and FeO^* contents suggest that the Motokozawa basalts may not be produced by the fractional crystallization from the primary magma having low TiO_2 and K_2O contents. One of the reasonable explanations for the genesis of the Motokozawa basalts is the fractional crystallization from the primary TiO_2 -rich, K_2O -poor magma generated in the upper mantle which had been previously enriched in Ti and depleted in K through a preceded partial melting under hydrous conditions.

I. はじめに

筆者らは、この数年来、東北日本の主として太平洋側に産する第三紀火山岩類の時空分布と岩石学的特徴について検討している(周藤ら, 1983b, 1984, 1985; 伊崎ら, 1985)。

この研究の一貫として、栃木県茂木町周辺地域に産出する中新世火山岩類(Fig. 1)の調査を行ってきたが、この地域の中新統の火山層序と火山岩の鏡下における記載および全岩化学組成の一部についてはすでに報告した(伊崎ら, 1985)。さらに、これらの火山岩類について岩石学的検討を加えた結果、本地域の中新統

の下部層を構成している玄武岩が、日本列島をはじめとする島弧にはこれまでにほとんど見出されていない高い TiO_2 、かつ低い K_2O で特徴づけられるソレライト質玄武岩であることが明らかとなった。この玄武岩は海洋底に産出する高 TiO_2 ・高 FeO^* ($\text{FeO} + 0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$)・低 K_2O のソレライト質玄武岩に類似している。

そこで、本論文では、この玄武岩の岩石記載を行い、構成鉱物の化学組成および全岩化学組成の特徴を記述し、さらにその成因について考察を行った。

なお、最近、白水ら(1983)によって本調査地域に産するビジョン輝石石英安山岩についての詳しい記載

* 新潟大学理学部地質鉱物学教室

** 栃木県那須町立黒田原小学校

*** 福島大学教育学部地学教室

(昭和60年3月27日受付)

昭和60年4月10日受理)

Fig. 1. Location of the Motegi district, eastern part of Tochigi Prefecture, Northeast Japan.

が行なわれ、石英安山岩質マグマの成因について議論されている。

II. 地質概説

茂木周辺地域の中新統は、基盤の八溝層群 (Kawada, 1953) と益子層群 (笠井, 1978) を不整合におおって分布している。基盤岩は北部では八溝山系の鷲ノ子山塊を、南部では鶏足山塊を構成している (Fig. 1)。この付近の中新統は下部中新統に対比されていて、下位より市場層、元古沢層、山内層、茂木層に細分されている (Kawada, 1953)。伊崎ら (1985) はこれらの下部中新統中に多量に挟在されている玄武岩質岩石 (その大部分は溶岩として産する) に注目して、この付近の下部中新統の再調査を行い、火山岩の産状・岩相などを記述した (Fig. 2)。各層の概要は次の通りである。

市場層: 本層は主として礫岩層より構成されていて火山性物質を伴わない。礫岩は基盤岩に由来する砂岩・頁岩・チャートであって、一般に 10~30 cm の亜角礫か亜円礫よりなるが、場所によっては 50~60 cm 大の礫を多数含む露頭もある。層厚は薄いところで 20 m、厚いところで 200 m をこえる。基盤岩 (八溝層群) とは断層かアバット不整合の関係で接している。

元古沢層: 茂木町元古沢付近に観察されるものをタイプとして、市場・川南東方・川辺・松倉川などの各

地域に断続的に分布するが、それぞれ岩相や層厚を多少異にしている。元古沢周辺では、下部は凝灰質砂岩、凝灰質頁岩、礫質凝灰岩、亜炭層よりなり、約 10 m の厚さの玄武岩溶岩を 2 枚はさむ。上部は凝灰質礫岩、凝灰角礫岩、凝灰質砂岩で約 30 m の厚い安山岩質玄武岩溶岩を 1 枚はさむ。全層厚は約 400 m である。市場西方川戸付近では、溶岩を欠き主として頁岩をはさむシルト層と亜炭層の互層よりなり層厚は 25 m。川南東方では、下部は主として 2 枚の玄武岩の溶岩よりなり、上部は凝灰質砂岩または頁岩をはさむシルト層と亜炭層の互層よりなり、全層厚は 130~140 m である。松倉山西方では市場層の上位に整合に重なり、下部は灰白色凝灰質頁岩と玄武岩の溶岩 (厚さ 10 m)、上部はシルト層と亜炭層の互層よりなり層厚は約 60 m である。

これらの元古沢層中にみられる玄武岩のうち、川南東方のものは斜長石斑晶が顕著な黒色緻密な玄武岩であるのに対して、元古沢周辺、松倉山西方、新屋敷西方、市場周辺に分布する玄武岩は無斑晶質の黒色緻密な岩石で後で詳しく述べるように、高い TiO₂ および低い K₂O で特徴づけられる。これらの無斑晶質で高 TiO₂・低 K₂O の玄武岩を元古沢玄武岩とよぶことにする。元古沢玄武岩は、溶岩だけでなく小規模な岩脈としても産する。

山内層: 本層は下位の元古沢層とは異なり、厚い火山性物質を主体とし、斑晶の目立つ多量の玄武岩質の溶岩を挟在することで特徴づけられる。タイプになっている山内付近の山内層は、主として凝灰角礫岩・凝灰質砂岩・凝灰質礫岩よりなり 5 枚の玄武岩および安山岩質玄武岩の溶岩を挟在し、層厚は約 400 m である。市場西方 1.2 km の川戸から木須川沿いに分布する山内層は、下部が主として凝灰質礫岩、凝灰質砂岩で、中部は凝灰角礫岩と玄武岩の溶岩の互層より構成され、上部は大部分が厚い溶岩によって占められていて、全層厚は約 800 m である。黒田から山根にかけて分布する山内層は、主として凝灰角礫岩と玄武岩または安山岩質玄武岩の溶岩の互層からなっていて、溶岩は少なくとも 10 枚数えられる。層厚は約 700 m である。

山内層中の溶岩は、カンラン石玄武岩、普通輝石カンラン石玄武岩、シソ輝石カンラン石玄武岩、シソ輝石安山岩質玄武岩、カンラン石含有普通輝石シソ輝石安山岩質玄武岩、角閃石普通輝石シソ輝石安山岩質玄武岩などから構成されている。

茂木層: 茂木層は他の各層にくらべて最も広く分布し、南端では鶏足山塊を構成する基盤岩と断層またはアバットの関係で接している。本層は凝灰質砂岩・凝

Fig. 2. Geological map of the Motegi district, Tochigi Prefecture, Northeast Japan (after Izaki *et al.*, 1985).

灰質礫岩・凝灰質泥岩・凝灰岩よりなり，下部から上部にかけて多数の安山岩質玄武岩および玄武岩の溶岩をはさんでいる。層厚は約 600～700 m。なお，石英安山岩が鳥山南々東 10 km の鎌倉山に貫入岩体として，茂木北東 4 km の八幡山一帯にも平頂溶岩円頂丘として分布しているが，これらの石英安山岩は茂木層形成時の産物であると考えられる。茂木層中には安山岩の溶岩および岩脈が小規模ながら産する。

これらの茂木層中の火山岩は，カンラン石普通輝石安山岩質玄武岩，普通輝石安山岩質玄武岩，カンラン石玄武岩，普通輝石安山岩，ピジョン輝石普通輝石安山岩，ピジョン輝石普通輝石カンラン石石英安山岩などからなる。

III. 元古沢玄武岩の岩石記載

上述のように，元古沢層中に挾在されている玄武岩溶岩のうち，元古沢付近，松倉山西方，新屋敷西方，市場付近に産するものを元古沢玄武岩とよぶ。元古沢玄武岩はこれらの地域の元古沢層中に小岩脈としても産する。

元古沢玄武岩は，黒色緻密の無斑晶質な岩石で，元古沢層中に挾在されている他の玄武岩や上位の山内層と茂木層中に挾在される斑晶にとむ玄武岩とは明瞭に区別される。

本玄武岩は鏡下ではサブオフィティック組織 (Fig. 3) を呈し，斜長石，単斜輝石，不透明鉱物，粘土鉱物，メソスタシスからなる。斜長石は柱状～板状の自形結

Fig. 3. Photographs of subophitic texture of the Motokozawa basalts.
A, sample K41; B, sample K58; These basalts contain plagioclase, clinopyroxenes, Fe-Ti oxides, mesostasis and altered minerals.

晶できわめて新鮮であり累帯構造はほとんどみられない。斜長石の長辺の平均径は $0.5 \sim 0.7 \text{ mm}$ であるが、大きなものは最大 1.2 mm に達する。斜長石は $51 \sim 58\%$ (体積) 含まれる (Table 1)。単斜輝石は主に普通輝石、サブカルシック普通輝石、ピジョン輝石からなるが、鉄質普通輝石も少量含まれる。これらは半自形～他形で多くは新鮮であり斜長石の間を埋めて産する。単斜輝

石は $29 \sim 38\%$ 含まれている。不透明鉱物はイルメナイトとチタン磁鉄鉱からなり、四角形ないし不規則な多角形を呈するものの他に針状、樹脂状、骸骨状を呈するものなどが認められる。不透明鉱物は $4.1 \sim 6.4\%$ 含まれている。粘土鉱物はガラスを交代して生じているものと単斜輝石の一部を交代して生じるものがあり、新鮮な岩石では 1% 程度しか含まれないが、変質の進

Table 1. Modal composition of the Motokozawa basalts

	M06	M38	M40	M41	M43	M44	M57	M58	M59
Plagioclase	57.9	51.2	50.3	50.5	52.2	54.1	52.6	51.2	53.4
Clinopyroxene	28.7	33.7	29.7	37.5	34.5	31.5	33.2	36.4	30.0
Fe-Ti oxides	5.7	4.9	5.0	4.1	6.0	5.2	4.9	6.4	6.1
Mesostasis	3.3	8.9	6.2	2.4	4.2	3.3	5.7	3.4	7.1
Clay minerals	4.4	1.3	8.8	5.6	3.1	5.9	3.6	2.6	3.4

んでいる岩石では最大 8.8% まで含まれる。メソスタシスは斜長石や単斜輝石の間に認められ、ガラスおよび微細な不透明鉱物、マイクロライトからなる。ガラスには屈折率の異なる 2 種類のものがある。一方は無色～淡褐色で屈折率が低く、他方は屈折率が高く前者のガラス中に茶～黒褐色の微小な球体として散在もしくは集中してみられる。斜長石や単斜輝石の間には多数の微細な不透明鉱物が生じている場合があり、そのような箇所は黒色を呈する。メソスタシスは少ないもので 2～3% 含まれ、多いものでは約 9% 含まれている。

IV. 構成鉱物の化学組成

鉱物の分析は新潟大学の日本電子 X 線プロブマイクロアナライザー JXA-5A を用いて行った。

斜長石：斜長石の化学組成を Table 2 に示す。斜長石の中心部の組成は $An_{67.7}Ab_{32.0}Or_{0.3}$ から $An_{48.0}Ab_{50.6}Or_{1.4}$ までの変異がある。中心部よりも周縁部の方が Ca にやや乏しい傾向にある。たとえば 1 つの斜長石では、中心部が $An_{67.7}Ab_{32.0}Or_{0.3}$ で周縁部では $An_{63.9}Ab_{35.7}Or_{0.4}$ である。中心部の Or 成分は Ab 成分の増加に伴って 0.2 から 1.4 まで増加している (Fig. 4)。

単斜輝石：Fig. 5 に 2 枚の薄片中の単斜輝石の中心部の分析値を点示した。単斜輝石は普通輝石から鉄質

Table 2. Chemical composition of plagioclases

	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	52.03	53.66	53.82	53.51	52.73	56.75
TiO ₂	0.09	0.09	0.09	0.07	0.15	0.08
Al ₂ O ₃	29.57	28.37	28.79	28.51	28.75	25.94
Cr ₂ O ₃	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00
FeO	0.60	0.71	0.58	0.77	0.50	0.86
MnO	0.05	0.00	0.06	0.07	0.01	0.00
MgO	0.10	0.05	0.13	0.00	0.10	0.61
CaO	13.64	12.44	13.08	12.16	12.68	10.30
Na ₂ O	3.94	4.51	4.24	4.45	4.45	5.99
K ₂ O	0.05	0.09	0.11	0.12	0.15	0.24
Total	100.11	99.94	100.90	99.96	99.54	100.77
Ca	65.5	60.1	62.6	59.7	60.6	48.0
Na	34.2	39.4	36.8	39.5	38.5	50.6
K	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	1.4

普通輝石、サブカルシック普通輝石、ビジョン輝石の組成範囲に及んでいる (Table 3, Fig. 5)。普通輝石は Ca に乏しく、Ca:Mg:Fe (原子比) は 38.5:35.5:26.0 から 25.6:43.6:30.8 まで変異する。鉄質普通輝石も Ca に乏しく、Ca:Mg:Fe は 30.2:31.4:38.4 から 27.8:35.4:36.8 まで変異する。サブカルシック普通輝石とビジョン輝石は Ca:Mg:Fe が 21.2:48.3:30.5 と 8.5:59.3:32.2 の間で連続的な組成変異を示している (Fig. 5)。

不透明鉱物：イルメナイトとチタン磁鉄鉱の化学組成を Table 4 に示す。イルメナイト中のヘマタイト成分およびチタン磁鉄鉱中のウルボスピネル成分の計算

Table 3. Chemical composition of clinopyroxenes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	50.36	49.54	51.16	50.83	50.04	52.17	51.46	50.83	51.49	52.84
TiO ₂	1.04	1.18	0.92	0.94	1.04	0.70	1.09	0.86	0.73	0.44
Al ₂ O ₃	1.33	1.63	1.45	1.01	1.49	1.30	1.44	1.16	0.70	1.14
Cr ₂ O ₃	0.03	0.04	0.00	0.00	0.06	0.11	0.02	0.01	0.00	0.26
FeO	16.02	17.75	18.96	22.91	20.06	19.21	21.70	21.66	22.81	20.11
MnO	0.34	0.35	0.45	0.48	0.29	0.43	0.36	0.49	0.47	0.38
MgO	12.29	14.04	15.03	10.47	17.49	18.07	17.04	18.63	18.84	20.77
CaO	18.54	14.69	12.30	14.03	8.90	7.47	6.21	5.53	4.59	4.15
Na ₂ O	0.31	0.41	0.15	0.30	0.16	0.30	0.07	0.07	0.13	0.07
Total	100.26	99.63	100.42	100.97	99.53	99.76	99.39	99.24	99.76	100.16
Mg	35.5	40.6	43.6	31.3	49.8	52.8	50.6	53.6	54.0	59.3
Fe	26.0	28.8	30.8	38.5	32.0	31.5	36.1	35.0	36.6	32.2
Ca	38.5	30.6	25.6	30.2	18.2	15.7	13.3	11.4	9.4	8.5

Fig. 4. An-Ab-Or diagram showing compositions of plagioclases in the Motokozawa basalts.

Fig. 5. Ca-Mg-Fe diagram showing compositions of clinopyroxenes in the Motokozawa basalts.

Table 4. Chemical composition of Fe-Ti oxides

	Ilmenite					Titanomagnetite				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TiO ₂	50.67	50.16	49.60	49.39	48.73	27.81	27.08	26.23	25.82	25.32
Al ₂ O ₃	0.04	0.14	0.21	0.26	0.29	1.40	1.76	1.68	1.88	1.89
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.07	0.01	0.00	0.08	0.06	0.24	0.24	0.12
FeO*	47.37	47.77	48.72	49.08	48.61	66.66	68.52	67.63	69.20	70.39
MnO	0.49	0.53	0.37	0.39	0.41	0.40	0.30	1.17	0.45	0.52
MgO	0.94	0.79	0.77	0.83	0.83	0.83	0.89	0.94	0.66	1.08
Total	99.53	99.40	99.74	99.96	98.87	97.18	98.61	97.89	98.25	99.32
Recalculated analyses**										
Fe ₂ O ₃	4.42	5.10	6.51	7.24	7.42	15.45	15.13	16.31	17.00	19.13
FeO	43.38	43.16	42.85	42.54	41.92	52.60	54.87	52.93	53.88	53.09
Total	99.96	99.89	100.38	100.66	99.60	98.57	100.09	99.50	99.93	101.15
Hem(Mol%)	4.2	5.0	6.5	7.2	9.5					
Usp(Mol%)						75.9	75.1	73.2	71.9	69.4

*Total iron is given as FeO.

**Recalculation is based on the method by Carmichael(1967).

Fig. 6. Fe-Ti oxide analyses from the Motokozawa basalts plotted as mole percents of FeO-Fe₂O₃-TiO₂.

は Carmichael (1967) の方法に従った。イルメナイトはかなり均一な組成でヘマタイト成分を最も少なくして 4.2% (モル%) 固溶し、多くて 9.5% まで固溶している (Fig. 6)。チタン磁鉄鉱も組成的なばらつきが少なく、ウルボスピネル成分を 69.5~75.1% 固溶している。相接するイルメナイトとチタン磁鉄鉱の化学組成から、Buddington and Lindsley (1964) の方法によって温度と酸素フィガシティー ($\log f_{O_2}$) を求めると温度は約 970°C で $\log f_{O_2}$ は -12.1 である。

V. 全岩化学組成

FeO は過マンガン酸カリ滴定法で、その他の成分はケイ光 X 線法で分析した。

元古沢玄武岩 9 個の分析値およびノルム組成を Table 5 に示した。

伊崎ら (1985) は、川南東方に産する元古沢層中の玄武岩 1 個、山内層中の玄武岩と安山岩質玄武岩 12 個、茂木層中の玄武岩と石英安山岩各 1 個の全岩化学組成を報告している。本論文ではこれらの玄武岩と安山岩質玄武岩を上部玄武岩とよび元古沢玄武岩とは区別した。

Table 5 に示されるように、元古沢玄武岩は SiO₂ が 49.02~51.51% の比較的せまい範囲にあり、分析値か

らノルム石英が 3~9% 算出される。Yoder and Tilley (1962) によるノルム鉱物に基づく玄武岩の分類によれば、元古沢玄武岩は石英ソレライトに相当する。

元古沢玄武岩と上部玄武岩の化学組成を比較すると (Fig. 7)、両者は岩石学的性質を異にしていることがわかる。すなわち、同じ FeO*/MgO 比で両者を比較すると、Na₂O と CaO は両者の間でちがいは認められないが、元古沢玄武岩は上部玄武岩よりも TiO₂ と FeO* に著しくとんでいて MgO もわずかにとんでいるといえる。これに対して、Al₂O₃、K₂O、P₂O₅ は元古沢玄武岩よりも上部玄武岩の方がとんでいる。主化学組成からみて、元古沢玄武岩は高い TiO₂ (2.5~2.7%)・高い FeO* (11~13%)・低い K₂O (0.09~0.20%) で特徴づけられる。

AFM 図 (Fig. 8) においては、元古沢玄武岩は上部玄武岩よりも FeO* にとむ領域に点示され、SiO₂-(Na₂O+K₂O) 図 (Fig. 9) で検討すると、両玄武岩とも久野 (1968b) による高アルカリソレライトに相当する。

以上述べてきたことから、元古沢玄武岩は上部玄武岩とは岩石化学的性質を異にし、高 TiO₂・高 FeO*、低 K₂O で特徴づけられるソレライト質玄武岩であるといえよう。

Table 5. Representative bulk chemical and normative compositions of the Motokozawa basalts

	M06	M38	M40	M41	M43	M44	M57	M58	M59
SiO ₂	50.92	50.99	49.99	50.66	49.02	50.82	51.51	50.73	50.75
TiO ₂	2.69	2.70	2.67	2.59	2.61	2.66	2.58	2.70	2.62
Al ₂ O ₃	15.67	15.41	15.88	15.32	15.46	16.61	15.93	15.53	15.87
Fe ₂ O ₃	4.49	3.07	4.86	3.62	4.49	6.23	4.47	3.82	5.61
FeO	7.92	9.77	7.50	9.52	7.70	5.36	7.89	8.75	6.94
MnO	0.16	0.15	0.16	0.18	0.30	0.16	0.16	0.15	0.14
MgO	5.73	4.55	5.53	6.03	4.98	4.39	5.72	5.48	4.60
CaO	8.20	9.17	8.54	9.00	10.15	8.81	8.28	8.57	9.07
Na ₂ O	3.05	3.06	2.97	2.82	3.04	3.20	3.00	3.03	2.95
K ₂ O	0.19	0.18	0.12	0.10	0.11	0.09	0.15	0.14	0.09
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.15	0.13	0.14	0.17	0.13	0.13	0.14
H ₂ O ⁺	0.54	0.47	1.04	0.31	1.60	1.10	0.32	0.61	0.95
H ₂ O ⁻	0.32	0.20	0.40	0.16	0.68	0.49	0.17	0.25	0.40
Total	100.02	99.86	99.81	100.44	100.28	100.09	100.31	99.89	100.13
Q	6.12	4.98	6.10	4.39	3.68	9.22	6.78	5.30	8.59
Or	1.12	1.06	0.71	0.59	0.65	0.53	0.89	0.83	0.53
Ab	25.81	25.89	25.13	23.86	25.72	27.08	25.39	25.64	24.96
An	28.51	27.78	29.64	28.85	28.21	30.69	29.56	28.36	29.80
Di	9.10	13.89	9.45	12.23	17.21	9.32	8.63	10.86	11.46
Hy	16.57	15.68	14.86	19.58	10.72	7.18	16.91	17.09	10.00
Mt	6.51	4.45	7.05	5.25	6.51	9.03	6.48	5.54	8.13
Il	5.11	5.13	5.07	4.92	4.96	5.05	4.90	5.13	4.98
Ap	0.32	0.32	0.35	0.30	0.32	0.39	0.30	0.30	0.32
FeO*/MgO	2.08	2.75	2.14	2.11	2.35	2.49	2.08	2.22	2.60
Mg/(Mg+Fe)	0.49	0.42	0.48	0.49	0.46	0.44	0.49	0.47	0.44

次に元古沢玄武岩と東北日本の太平洋側に産する第三紀のソレライト岩系の玄武岩～玄武岩質安山岩および第四紀の那須火山帯のソレライト岩系の玄武岩～安山岩の TiO₂ と K₂O を比較してみる (Fig. 10, Fig. 11)。ここで用いた分析値は、著者によってビジョン輝石質岩系 (Kuno, 1950) またはソレライト岩系に属するとされている玄武岩～安山岩のものである。

Fig. 10 に示されているように、東北日本の太平洋側に産する第三紀と第四紀のソレライト岩系の玄武岩～安山岩の K₂O は、元古沢玄武岩を除くと、0.15～1.5% の範囲にある。一方、元古沢玄武岩の K₂O は 0.09～0.18% であり、東北日本の太平洋側に産するソレライト岩系の玄武岩、玄武岩質安山岩、安山岩の中で最も低い値であるといえる。元古沢玄武岩の K₂O は、日本列島以外の他の島弧にもみられる島弧性ソレライト (たとえば Gill, 1981 など) と比較しても、それらの最も低い K₂O に相当している。

次に TiO₂ を比較してみる。Fig. 11 から、上述の東北日本の第三紀と第四紀の大部分のソレライト岩系の玄武岩～安山岩は 0.5～1.2% の範囲内の TiO₂ を有しているのに対して、元古沢玄武岩はこれらよりも著しく高い TiO₂ をもっていることがわかる。島弧に産す

るソレライト岩系の火山岩の TiO₂ は 1.5% 以下とされているので (Gill, 1981; Lofgren *et al.*, 1981 など)、島弧のソレライト岩系の火山岩全体の中でも、元古沢玄武岩は最も高い TiO₂ をもつソレライト質玄武岩であるといえよう。

これまでのところ、筆者の知る限りにおいては、元古沢玄武岩に類似の高い TiO₂ をもつソレライト質玄武岩は阿部隈山地東縁中部の磐城市遠野町付近に小規模に露出する中新世前期～中期の枕状溶岩だけである。一色 (1974) は、この枕状溶岩の詳しい記載を行い全岩化学組成についても報告している。ガラス質外殻部の化学組成は、SiO₂=50.36%, TiO₂=2.29%, K₂O=0.17%, FeO*/MgO=2.03 で、TiO₂ は元古沢玄武岩のそれよりもわずかに低い値であるものの、全体的には元古沢玄武岩の化学組成にきわめて類似しているといえよう (Fig. 11)。一色 (1974) は、この枕状溶岩の化学組成がハワイ諸島のソレライト質玄武岩のそれに類似していることを指摘している。

VI. 元古沢玄武岩に類似の玄武岩

上述のように、元古沢玄武岩と同程度の高い TiO₂ をもつソレライト質玄武岩は島弧からはほとんどみい

Fig. 7. Major oxides- FeO^*/MgO variation diagram.

1, Motokozawa basalts; 2, basalts and andesitic basalts of upper formations in the Motegi district (Izaki *et al.*, 1985).

だされていない。元古沢玄武岩に類似の高い TiO_2 をもつソレライト質玄武岩はハワイ諸島や天皇海山群などの海洋島や海山、アイスランドおよび海洋底などに産する (Fig. 11)。この図に示されているように、海洋島と海山のソレライト質玄武岩の中には元古沢玄武岩と同程度の TiO_2 をもつものから 4% に近い TiO_2 をもつものまでである。しかし、元古沢玄武岩と同程度の TiO_2 (2.5~2.7%) をもつ海洋島と海山のソレライト質玄武岩は元古沢玄武岩よりも FeO^*/MgO 比が低い傾向にある (Fig. 11)。

次に海洋底およびアイスランドに産するソレライト質玄武岩と比較してみる。

海洋底玄武岩の初期の研究によって、大西洋、太平洋、インド洋の中央海嶺 (海膨) や隣接する海底からドレッチされたソレライト質玄武岩は比較的均一な化学組成をもっていることが強調された (たとえば Engel *et al.*, 1965; Kay *et al.*, 1970 など)。しかし、最近までにドレッチまたは深部掘削によって海洋底から採取された大量の玄武岩と玄武岩ガラスの研究結果に基づくと、海洋底のソレライト質玄武岩はかなり幅広い化学組成をもっていることが明らかにされている (Lofgren *et al.*, 1981 など)。 TiO_2 に関してみれば、海洋底のソレライト質玄武岩は、0.5% 前後から 3% 程度までの幅広い値をもっていることがわかる (Fig. 11)。

Fig. 8. $\text{MgO}-\text{FeO}^*$ ($\text{FeO} + 0.9 \text{Fe}_2\text{O}_3$)-($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) diagram.

Symbols are the same as those in Fig. 7.

PS, pigeonitic rock series of Izu-Hakone region, central Japan; HS, hypersthenic rock series of Izu-Hakone region (Kuno, 1968a).

Fig. 9. SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) diagram.

Symbols are the same as those in Fig. 7.

General boundaries between the fields of four types of basalts (low-alkali tholeiite, high-alkali tholeiite, so-called high-alumina basalt and alkali basalt) and their fractionation products are shown by curves A and B (after Kuno, 1968b).

Fig. 10. Relationship between K_2O and FeO^*/MgO of the Cenozoic mafic to intermediate volcanic rocks from Northeast Japan.

- 1, Quaternary tholeiitic rock series from Nasu volcanic zone.
- 2, Tertiary tholeiitic rock series from the Pacific side of Northeast Japan.
- 3, Motokozawa basalts.

Data: Togashi (1977), Taniguchi (1972), Kawano *et al.* (1961), Kawano and Aoki (1960), Onuma (1962), Wada (1981), Fujinawa (1980, 1982), Chiba (1961), Nakamura (1978), Shuto *et al.* (1983a, 1984, 1985), Kato (1964), Shuto and Yashima (1974), Yashima (1962), Aoki (1967), Abe *et al.* (1976), Izaki *et al.* (1985), Takimoto (1984), Isshiki (1974), Ichinose *et al.* (unpublished data), Shuto *et al.* (unpublished data).

Fig. 11 に示されているが、このうち TiO_2 が 2% をこえるソレライト質玄武岩は太平洋底に最も多く産する。これらの多くは東太平洋底からドレッジまたは掘削されたものである。

大西洋の海底から得られているソレライト質玄武岩の中で TiO_2 の高いもの (2% 以上) は、限られた地域に産するにすぎない。このような玄武岩は、北緯 $33^{\circ}45'$ にある Hayes 断裂帯より南側の中央大西洋海嶺から産出している (Dmitriev *et al.*, 1979; Melson and O'Hearn, 1979; Schilling *et al.*, 1983)。

アイランドのソレライト質玄武岩はハワイ諸島のソレライト質玄武岩と同様に TiO_2 は 0.5% 前後から 4% に近いものまでである。

また、量的には少ないが、2% をこえる高い TiO_2 を

有するソレライト質玄武岩はインド洋の海底からも産出している (Fig. 11)。

以上みてきたように、元古沢玄武岩と同程度の高い TiO_2 をもつソレライト質玄武岩は、ハワイ諸島、アイスランド、海洋底などに産する。このうち、元古沢玄武岩と同程度の低い K_2O (0.2% 以下) をもつ玄武岩は限られていて、その大部分は東太平洋底に産している。元古沢玄武岩の化学組成が海洋底のソレライト質玄武岩のそれに類似していることは P_2O_5 - TiO_2 - K_2O 図 (Fig. 12) から支持される。元古沢玄武岩に類似する玄武岩の化学組成を Table 6 に示した。

VII. 元古沢玄武岩の成因

高い TiO_2 をもつ海洋底のソレライト質玄武岩は一

Fig. 11. Relationship between TiO_2 and FeO^*/MgO of tholeiitic basalts and andesites.

- 1, tholeiitic basalts from the Pacific Ocean.
- 2, tholeiitic basalts from the Atlantic Ocean.
- 3, tholeiitic basalts from Iceland.
- 4, tholeiitic basalts from the Indian Ocean.
- 5, Motokozawa basalts.
- 6, field of the tholeiitic basalts from oceanic islands and seamounts.
- 7, field of Quaternary tholeiitic rock series from Nasu volcanic zone and Tertiary tholeiitic rock series from the Pacific side of Northeast Japan.
- 8, Miocene tholeiitic basalt from the Iwaki district, Northeast Japan.

Data : MacDonald and Katsura (1964), MacDonald (1968), Moore (1965), Bonhoment *et al.* (1977), Tilley (1960), Wright and Fiske (1971), Wright *et al.* (1975), Dalrymple *et al.* (1974), Cambon *et al.* (1980), Gunn and Abranson (1971), Muir and Tilley (1963), Tilley and Scoon (1961), Melson *et al.* (1976), Schilling *et al.* (1983), Bryan and Moore (1977), Blanchard *et al.* (1976), Neumann and Schilling (1984), Mazzullo and Bence (1976), Kempe (1974, 1976), Bunch and LaBorde (1976), Anderson *et al.* (1975), Kay *et al.* (1970), Hekinian (1974), MacLeod (1973), Yeates *et al.* (1973), Carmichael (1964), Bailey and Nygaard (1976), Heier *et al.* (1966), Sigvaldason (1974), Isshiki (1974).

Fig. 12. TiO_2 - K_2O - P_2O_5 diagram.A, oceanic field; B, non-oceanic field (Pearce *et al.*, 1975).

1, Motokozawa basalts; 2, basalts and andesitic basalts of upper formations in the Motegi district.

Table 6. Bulk chemical compositions of tholeiites and tholeiitic glasses having high TiO_2 and low K_2O contents

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2	49.48	48.76	49.96	49.80	48.16	47.71	48.31	49.70	48.62	50.60
TiO_2	2.52	2.55	2.59	2.94	2.34	2.25	2.70	2.48	2.53	2.65
Al_2O_3	14.09	12.93	13.45	13.20	13.75	13.47	13.03	14.83	15.23	15.74
FeO^*	13.20	13.02	13.91	13.90	12.78	12.60	15.05	11.54	13.55	11.97
MnO	0.19	0.17			0.20		0.25	0.17	0.14	0.17
MgO	5.91	6.02	5.79	5.86	6.40	5.87	5.75	6.17	7.00	5.22
CaO	10.34	9.71	10.54	9.55	11.52	9.98	9.37	10.34	9.63	8.86
Na_2O	2.69	2.67	2.76	2.90	2.46	2.60	2.45	2.13	2.90	3.01
K_2O	0.16	0.24	0.17	0.22	0.38	0.18	0.36	0.25	0.22	0.13
P_2O_5		0.22	0.21		0.25	0.18	0.32	0.27		0.14
H_2O^+		0.90			0.36	4.31	1.56	1.01	1.13	0.77
H_2O^-		1.37			0.61		0.36	0.47		0.34
Total	98.58	98.56	99.38	98.37	99.21	99.15	99.51	99.36	100.95	99.60
FeO^*/MgO	2.23	2.16	2.40	2.37	1.99	2.14	2.61	1.87	1.93	2.29
$\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$	0.44	0.45	0.43	0.43	0.47	0.45	0.40	0.49	0.48	0.45

1: average of twelve basalts from the East Pacific Ocean at site 321 of DSDP leg 34 (Mazzullo & Bence, 1976)

2: basalt from the East Pacific Ocean at site 256 of DSDP leg 26 (Kempe, 1974)

3: basaltic glass from the Pacific Ocean (Melson *et al.*, 1976)4: basalt from the East Pacific Ocean Juan de Fuca Ridge (Kay *et al.*, 1970)5: basalt from the Mid-Atlantic Ridge (Schilling *et al.*, 1983)

6: basalt from the Indian Ocean at site 214 of DSDP leg 22 (Hekinian, 1974)

7: basalt from northwest Iceland (Bailey & Nygaard, 1976)

8: basalt of the lower member of the Waianae volcano, Oahu (MacDonald & Katsura, 1964)

9: basalt from Suiko Seamount of the Emperor Seamount chain (Cambon *et al.*, 1980)

10: average of the Motokozawa basalts (This study)

般に高い FeO^*/MgO 比をもっている (Fig. 11)。したがって、元古沢玄武岩の成因を考える上で、高 TiO_2 ・高 FeO^*/MgO 比をもつ海洋底のソレライト質玄武岩の成因を考慮にいれる必要がある。Melson *et al.* (1976) は、海洋底のより分化の進んだ高 TiO_2 ・高 FeO^*/MgO 比のソレライト質玄武岩を FETI 玄武岩とよんでいるが、FETI 玄武岩がより初生的なソレライト質マグマからの結晶分化作用によって形成されるかどうかということに関していくつかの議論がある。

海洋底の初生ソレライト質マグマ (たとえば Rhodes *et al.*, (1979)によれば Mg 値が 0.70~0.72 で TiO_2 は 0.5~0.9% 含まれるとされている) からのカンラン石、斜長石、輝石の分別結晶作用によって極端に分化した FETI 玄武岩 (TiO_2 を 2.5% 以上含む) を生じるには、これらの鉱物が多量に (マグマ中の 60~80% にあたる量) 分別する必要があるとされている (Rhodes *et al.*, 1979; Rhodes and Dungan, 1979; Lofgren *et al.*, 1981)。また、上記の各鉱物の分別結晶作用モデルから計算される分化した玄武岩中の TiO_2 よりも、海洋底のソレライト質玄武岩の方が高い TiO_2 をもっていることが指摘されている (Bryan *et al.*, 1976; Bryan and Moor, 1977; Bryan, 1979; Dungan and Rhodes, 1978; Rhodes *et al.*, 1979 など)。したがって、初生ソレライト質マグマからの分別結晶作用モデルでは高い TiO_2 をもつ海洋底のソレライト質玄武岩は形成されそうにない。

海洋底の FETI 玄武岩は一般に K_2O にもとんでいるが、元古沢玄武岩は、 K_2O に乏しく海洋底の未分化なソレライト質玄武岩と同程度の K_2O を有している。初生ソレライト質マグマからのカンラン石、斜長石、輝石の分別結晶作用の進行にともなって、残液の組成は TiO_2 だけでなく K_2O も増大するはずである (たとえば Irving, 1978) から、低 K_2O ・低 TiO_2 の初生ソレライト質マグマからの分別結晶作用による元古沢玄武岩の形成は海洋底の FETI 玄武岩の形成よりも一層困難であると考えられる。

そこで筆者は、元古沢玄武岩が高 TiO_2 ・低 K_2O のマントル物質から形成される可能性を検討してみた。

海洋底の玄武岩にくらべ低 TiO_2 で特徴づけられるオフィオライトや島弧のソレライトは、これらが形成される以前に部分熔融をうけ TiO_2 に乏しくなったマントル物質の再熔融によって生成されたものであるという考えがある (たとえば Sun and Nesbitt, 1978 など)。この議論は、 Ti は K , Cs , Rb , Ba などの元素と同様に incompatible 元素であるため、マントル物質の

熔融過程で残留固相に残りにくく液相中に濃集しやすいということを大前提としている。

しかし、 Ti にとむ副成分鉱物であるスフェーンとルチルの高温高压下での安定領域を決定する最近の実験結果によれば、スフェーンは、含水条件下では 15 kb の圧力下で 1000°C まで、60% 熔融したソレライト組成の液と安定に共存でき、さらに高压下ではルチルが少なくとも 1000°C まで、50% 熔融したソレライト組成の液と安定に共存できることが示されている (Hellman and Green, 1979; Green, 1981)。この事実は、マントル物質が含水条件下で部分熔融する場合に、スフェーンやルチルが残留固相としてマントル中に存在する可能性があることを示唆している (Green, 1980, 1981; Morris and Hart, 1983)。

以上の議論からすると、マントル物質が含水条件下で部分熔融し、ソレライトマグマが形成される場合に、 Ti にとみ K に乏しい残留固相が形成される可能性がある。

そのような残留固相からなるマントル物質が次に無水条件下で部分熔融すれば、 TiO_2 にとみ K_2O に乏しいマグマが生成され得る。したがって、高 TiO_2 ・高 FeO^* ・低 K_2O で特徴づけられる元古沢玄武岩は、そのような TiO_2 にとみ K_2O に乏しい初生ソレライト質マグマを起源にしている可能性がある。このように、含水条件下で部分熔融したマントル物質が無水条件下で再び部分熔融することは、かなり限定された条件でしかおこらないことである可能性がある。このような玄武岩の産出が島弧にはきわめてまれであることは、このことと関係しているのかもしれない。

このような考えが妥当であるかどうかは他の方法によって検討する必要があるだろう。その 1 つは希土類元素による検討である。スフェーンは希土類元素、特に軽い希土類元素にとんでいるので、スフェーンが残留固相として存在するかあるいは液相中に入るかによって、マグマ中の希土類元素含有量およびその存在度パターンは大きな影響をうけるものと考えられている (Hellman and Green, 1979; Green, 1981)。したがって、希土類元素の研究を通して、上述の考えの妥当性を検討することが可能と考えられる。

謝 辞 新潟大学理学部地鉱教室の小松正幸氏には元古沢玄武岩の成因に関して討論していただいた。また、原稿を読んでいただき有益な批判をしていただいた。その御厚意に対して深謝する。

引用文献

- 阿部智彦, 青木謙一郎, 舟山裕士 (1976), 仙台周縁地域の第三紀火山岩類の化学組成について, 岩鉱, 71, 137-146.
- Anderson, R.N., Clague, D.A., Klitgord, K., Marshall, M. and Nishimori, R.K. (1975), Magnetic and petrologic variations along the Galapagos spreading center and their relation to the Galapagos melting anomaly. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 86, 683-694.
- 青木謙一郎 (1967), 東北日本の第三紀塩基性火山岩類の岩石学 1, 三滝ソレライト. 岩鉱, 58, 180-187.
- Bailey, J.C. and Nygaard, N. (1976), Chemistry of Miocene plume tholeiites from northwest Iceland. *Lithos*, 9, 185-201.
- Blanchard, D.P., Rhodes, J.M., Dungan, M.A., Rodgers, K.V., Donaldson, C.H., Brannon, J.C., Jacobs, J.W. and Gibson, E.K. (1976), The chemistry and petrology of basalts from Leg 37 of the Deep Sea Drilling Project. *J. Geophys. Res.*, 81, 4231-4246.
- Bonhommet, N., Beeson, M.H. and Dalrymple, G.B. (1977), A contribution to the geochronology and petrology of the island of Lanai, Hawaii. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 88, 1282-1286.
- Bryan, W.B. (1979), Regional variation and petrogenesis of basalt glasses from the FAMOUS area, Mid-Atlantic Ridge. *J. Petrol.*, 20, 293-325.
- Bryan, W.B., Thompson, G., Frey, F.A. and Dickey, S. (1976), Inferred geologic settings and differentiation in basalts from the Deep-Sea Drilling Project. *J. Geophys. Res.*, 81, 4285-4304.
- Bryan, W.B. and Moore, J.G. (1977), Compositional variations of young basalts in the Mid-Atlantic Ridge rift valley near lat 36°49'N. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 88, 556-570.
- Buddington, A.F. and Lindsley, D.H. (1964), Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *J. Petrol.*, 5, 310-357.
- Bunch, T.E. and LaBorde, R. (1976), Mineralogy and compositions of selected basalts from DSDP Leg 34. In Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 34, 263-275. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Cambon, P., Joron, J.L., Bougault, H. and Treuil, M. (1980), Leg 55, Emperor Seamounts: trace elements in transitional tholeiites, alkali basalts, and hawaiiites-mantle homogeneity or heterogeneity and magmatic processes. In Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 55, 585-597. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Carmichael, I.S.E. (1964), The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in eastern Iceland. *J. Petrol.*, 5, 435-460.
- Carmichael, I.S.E. (1967), The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 14, 36-64.
- 千葉とき子 (1961), 蔵王火山の岩石学的研究. 岩鉱, 46, 73-83.
- Dalrymple, G.B., Lanphere, M.A. and Jackson, E.D. (1974), Contributions to the petrography and geochronology of volcanic rocks from the leeward Hawaiian islands. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 85, 727-738.
- Dmitriev, L.V., Sobolev, A.V. and Suschevskaja, N. M. (1979), The primary melt of the oceanic tholeiite and the upper mantle composition. In Deep Sea Drilling Results in the Atlantic Ocean: Ocean Crust. *Amer. Geophys. Union, Maurice Ewing Ser. 2*, 302-313.
- Dungan, M.A. and Rhodes, J.M. (1978), Residual glasses and melt inclusions in basalts from DSDP Legs 45 and 46: evidence for magma mixing. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 67, 417-431.
- Engel, A.E.J., Engel, C.G. and Havens, R.G. (1965), Chemical characteristics of oceanic basalts and the upper mantle. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 76, 719-734.
- 藤縄明彦 (1980), 安達太良火山の地質と岩石. 岩鉱, 75, 385-395.
- 藤縄明彦 (1982), 那須火山帯, 島弧型ソレライト質マグマの早期結晶分化作用—船形火山ビジョン輝石玄武岩類の岩石学的研究—. 岩鉱, 77, 419-437.
- Gill, J. (1981), Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, pp. 390.
- Green, T.H. (1980), Island arc and continental-building magmatism—a review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 63, 367-385.
- Green, T.H. (1981), Experimental evidence for the role of accessory phases in magma genesis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 10, 405-422.
- Gunn, B.M. and Abranson, C.E. (1971), Amsterdam Island, an isolated volcano in the southern Indian Ocean. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 32, 79-92.
- Heier, K.S., Chappell, B.W., Arriens, P.A. and Morgan, J.W. (1966), The geochemistry of four Icelandic basalts. *Norsk. Geol. Tidsskrift*, 46, 427-437.
- Hekinian, R. (1974), Petrology of the Ninety East

- Ridge (Indian Ocean) compared to other aseismic ridge. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **43**, 125-147.
- Hellman, P.L. and Green, T.H. (1979), The role of sphene as an accessory phase in the high-pressure partial melting of hydrous mafic compositions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **42**, 191-201.
- 一色直記(1974), 阿武隈山地太平洋側の中新世枕状溶岩. 地質雑, **80**, 323-328.
- Irving, J.R. (1978), A review of experimental studies of crystal liquid trace element partitioning. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 743-770.
- 伊崎利夫, 周藤賢治, 八島隆一 (1985), 栃木県茂木町周辺の新世火山岩類. 福島大教育学部理科報告, 35号, 29-38.
- 笠井勝美 (1978), 八溝山系の地質構造に関する新知見. 地質雑, **84**, 215-218.
- 加藤祐三 (1964), 那須火山の岩石学的研究. 岩鉱, **51**, 233-243.
- Kawada, K. (1953), Geological studies on the Yami-zo, Torinoko and Toriashi Mountain blocks and their neighbourhood in the northeastern Kwanto district. *Sci. Rep. of The Tokyo Bunrika Daigaku, Sec. C*, **2**, 120-219.
- Kawano, Y. and Aoki, K. (1960), Petrology of Hachimantai and surrounding volcanoes, north-eastern Japan. *Sci. Rep., Tohoku Univ. Ser. III*, **6**, 409-428.
- Kawano, Y., Yagi, K. and Aoki, K. (1961), Petrography and petrochemistry of the volcanic rocks of Quaternary volcanoes of northeastern Japan. *Sci. Rep., Tohoku Univ. Ser. III*, **7**, 1-46.
- Kay, R., Hubbard, N. and Gast, P.W. (1970), Chemical characteristics and origin of oceanic ridge volcanic rocks. *J. Geophys. Res.*, **75**, 1585-1613.
- Kempe, D.R.C. (1974), The petrology of the basalts, leg 26. In Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 26, 465-503. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Kempe, D.R.C. (1976), Petrological studies on DSDP leg 34 basalts: Nazca Plate, eastern Pacific Ocean. In Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 34, 189-213. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Kuno, H. (1950), Petrology of Hakone volcano and adjacent area, Japan. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **61**, 957-1020.
- Kuno, H. (1968a), Differentiation of basaltic magma: in Basalt: the Poldervaart treatise on rocks of the basaltic composition. 2 (H.H. Hess, ed.), 623-688, Interscience, New York.
- 久野 久 (1968b), 青木・伊東著 "海洋地域の岩石—I. 高アルミナ玄武岩" の論文に対する討論. 地球科学, **22**, 195-197.
- Lofgren, G.E., Bence, A.E., Duke, M.B., Dungan, M. A., Green, J.C., Haggerty, S.E., Haskin, L.A., Irving, A.J., Lipman, P.W., Naldrett, A. J., Papike, J.J., Reid, A.M., Rhodes, J.M., Taylor, S.R. and Vaniman, D.T. (1981), Petrology and chemistry of terrestrial, lunar and meteoritic basalts. In Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets. Pergamon Press, Inc., New York. pp. 1286.
- MacDonald, G.A. (1968), Composition and origin of Hawaiian lavas. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **116**, 477-522.
- MacDonald, G.A. and Katsura, T. (1964), Chemical composition of Hawaiian lavas. *J. Petrol.*, **5**, 82-133.
- MacLeod, N.S. (1973), Petrology of volcanic rocks recovered on Leg 18. In Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 18, 935-945. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Mazzullo, L.J. and Bence, A.E. (1976), Abyssal tholeiites from DSDP leg 34: The Nazca Plate. *J. Geophys. Res.*, **81**, 4327-4351.
- Melson, W.G., Vallier, T.L., Wright, T.L., Byerly, G. and Nelen, J. (1976), Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic, and Indian Ocean sea-floor spreading centers. In the Geophysics of the Pacific Ocean Basin and its Margin, 351-367. Am. Geophys. Union, Washington, D.C.
- Melson, W.G. and O'Hearn, T. (1979), Basaltic glass erupted along the Mid-Atlantic Ridge between 0-37°N: relationship between composition and latitude. Deep Sea Drilling Results in the Atlantic Ocean: Ocean Crust, *Am. Geophys. Union, Maurice Ewing Ser.* **2**, 273-284.
- Moore, J.G. (1965), Petrology of deep-sea basalt near Hawaii. *Amer. J. Sci.*, **263**, 40-52.
- Worris, J.D. and Hart, S.R. (1983), Isotopic and incompatible element constraints on the genesis of island arc volcanics from Cold Bay and Amak Island, Aleutians, and implications for mantle structure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 2015-2030.
- Muir, I.D. and Tilley, C.E. (1963), Contributions to the petrology of Hawaiian basalts II. Tholeiitic basalts of Mauna Loa and Kilauea. *Amer. J. Sci.*, **261**, 111-128.
- Nakamura, Y. (1978), Geology and petrology of Bandai and Nekoma volcanoes. *Sci. Rep., Tohoku Univ. Ser. III*, **14**, 67-119.

- Neumann, E.R. and Schilling, J.G. (1984), Petrology of basalts from the Mohns-Knipovich Reige: the Norwegian-Greenland Sea. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **85**, 209-223.
- Onuma, K. (1962), Petrography and petrochemistry of the rocks from Iwate volcano, northeastern Japan. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.* **47**, 192-204.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C. (1975), The TiO_2 - K_2O - P_2O_5 diagram: a method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **24**, 419-426.
- Rhodes, J.M. and Dungan, M.A. (1979), The evolution of ocean-floor basaltic magmas. Deep Sea Drilling Results in the Atlantic Ocean: Ocean Crust, *Am. Geophys. Union, Maurice Ewing Ser.* **2**, 262-272.
- Rhodes, J.M., Dungan, M.A., Blanchard, D.P. and Long, P.E. (1979), Magma mixing at mid-ocean ridges: evidence from basalts drilled near 22°N on the Mid-Atlantic Ridge. *Tectonophysics*, **55**, 35-61.
- Schilling, J.G., Zajac, M., Johnston, R.E., White, W., Devine, J.D. and Kingsley, R. (1983), Petrologic and geochemical variations along the mid-Atlantic ridge from 29°N to 73°N. *Amer. J. Sci.*, **283**, 510-586.
- 白水 明, 高橋正樹, 池田幸雄 (1983), 栃木県茂木地域に産するビジョン輝石デイサイト, 岩鉱, **78**, 255-266.
- 周藤賢治, 八島隆一 (1974), 福島県東北部の霊山火山岩類のSr同位体比, 岩鉱, **69**, 373-380.
- 周藤賢治, 八島隆一, 千葉茂樹, 中馬教允 (1983a), 磐梯山安山岩類の輝石, *MAGMA*, No. 68, 9-20.
- 周藤賢治, 八島隆一, 茅原一也 (1983b), 東北日本第三紀火山岩の時空分布と岩石学的特徴, 地団研第37回総会資料集, 40-51.
- 周藤賢治, 滝本俊明, 一ノ瀬丁己, 八島隆一 (1984), 東北表日本における新第三紀末分化ソレライト, *MAGMA*, No. 71, 1-6.
- 周藤賢治, 八島隆一, 滝本俊明 (1985), 福島県東北部・霊山地域の未分化カンラン石ソレライト, 岩鉱, **80**, 55-72.
- Sigvaldason, G. (1974), Basalts from the centre of the assumed Icelandic mantle plume. *J. Petrol.*, **15**, 497-524.
- Sun, S.S. and Nesbitt, R.W. (1978), Geochemical regularities and genetic significance of ophiolitic basalts. *Geology*, **6**, 689-693.
- 滝本俊明 (1984), 青森県下北半島, 泊地域の地質と岩石, 新潟大理学部卒業論文(手記)
- 谷口宏充 (1972), 十和田火山の岩石学的研究, 岩鉱, **67**, 128-138.
- Tilley, C.E. (1960), Differentiation of Hawaiian basalts: some variants in lava suites of dated Kilauean Eruptions. *J. Petrol.*, **1**, 47-55.
- Tilley, C.E. and Scoon, J.H. (1961), Differentiation of Hawaiian basalts: trends of Mauna Loa and Kilauea historic magma. *Amer. J. Sci.*, **259**, 60-68.
- 富樫茂子 (1977), 恐山火山の岩石学的研究, 岩鉱, **72**, 45-60.
- Wada, K. (1981), Contrasted petrological relations between tholeiitic and calc-alkalic series from Funagata volcano, northeast Japan. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **76**, 215-232.
- Wright, T.L. and Fiske, R.S. (1971), Origin of the differentiated and hybrid lavas of Kilauea volcano, Hawaii. *J. Petrol.*, **12**, 1-65.
- Wright, T.L., Swanson, D.A. and Duffield, W.A. (1975), Chemical compositions of Kilauea east-rift lava, 1968-1971. *J. Petrol.*, **16**, 110-133.
- 八島隆一 (1962), 霊山層中の火山岩類(その2), 福島大学学芸学部理科報告, No. 11, 31-68.
- Yeats, R.S., Forbes, W.C., Heath, G.R. and Scheidegger, F. (1973), Petrology and geochemistry of DSDP leg 16 basalts, eastern equatorial Pacific. In Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, **16**, 617-640. U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Yoder, H.S., Jr. and Tilley, C.E. (1962), Origin of basalt magma: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *J. Petrol.*, **3**, 342-352.