足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類*

その 3. 形成機構と成因的考察

THE LATE MESOZOIC ACIDIC IGNEOUS ROCKS OF THE NORTHERN ASHIO MOUNTAINS

PART 3. PETROGENESIS

矢 内 桂 三 (Keizo Yanai)**

The acidic rocks in northern Ashio mountains area are classified into following groups, based on their structural state and chemical composition of feldspars, and scale of the rock bodies. Matsuki and Sori granitic rocks are larger bodies, the lowest temperature type (430–480°C apparent temperature after Barth), the lowest content of Ab (9–14 wt%) in K-feldspars and low temperature plagioclase. Adamellites and granodiorite in Chuzenji acidic rocks are of intermediate scale, containing high temperature type (530–580°C) and high Ab content (17–24%), and low-intermediate plagioclase. Porphyries and welded tuffs contain the highest type (530–730°C) and highest Ab content (18–33%), and structurally high state plagioclase. Then, it is expected that adamellites and granodiorite are not related in origin to Matsuki and Sori granitic rocks, but porphyries and welded tuffs. This opinion agrees with field occurrences, ages of emplacement and others (Yanai, 1972, 1973).

Igneous activities of Chuzenji acidic rocks was taken place as follows (Fig. 2), formation of the magma reservoir, eruption of rhyolite lava, consolidation of vents and increasing vapor pressure in magma reservoir, eruption of voluminous acidic pyroclastic flows, caldera collapse, intrusion of several porphyries, and intrusion of granitic rocks at the latest stage.

Formation of caldera coincides well with the negative Bouguer anomaly.

1. はじめに

足尾山地には白亜紀後期から第三紀にかけて、一群の酸性火成岩類が形成された。矢内 (1972, 1973) は当地域の酸性岩類を細分し、岩石学的記載を行った。その中で、この一群の酸性岩類を古い方から順に、松木型花崗岩類、沢入型花崗岩類、中禪寺型酸性岩類、片品川—鬼怒川—尾足流紋岩類、三境山—地藏岳流紋岩類に区分し、それらの岩石学的特徴を記述した。そして、前三者は後期中生代酸性火成岩類の代表的な濃飛流紋岩類や広島花崗岩類に対比されることを示し、さらに、これら酸性岩類の間には形成の時期、形成の場の共通性や化学組成上の類似性から、同じような形成史と形成機構がある

可能性を示した。

松木型花崗岩類、沢入型花崗岩類、中禪寺型酸性岩類の化学組成には、互いに類縁性が認められる (矢内 1973) が、これらの形成時期 (K-Ar 年代) には約 3,000 万年に及ぶ年代のへだたりがある (河野, 植田 1964, 1966, 矢内 1972)。このため、これらは各々別個の源と形成史をもつと考えられる。一方、これの酸性岩類の中で、中禪寺型酸性岩類はほぼ同じ K-Ar 年代を示す火山碎屑岩類、斑岩類、花崗岩類から成る火山—深成岩体を形成している。そしてこれらの野外における産状が密接に関連すること、さらに、化学組成と造岩鉱物の諸性質の類縁性等から、この岩体は同一 (あるいは一連) のマグマ起源で

* 昭和 47 年 2 月岩鉱学会にて講演

** 東北大学理学部岩石鉱物地質学教室

(昭和 47 年 7 月 22 日受理)

Table 1. Relation between apparent temperature (after Barth, 1962; Christie, 1962; Tuttle and Bowen, 1958), Ab wt%, structural state and 2V(-) of K-feldspars in several rock types.

Type	Rock Facies	Christie*	Tuttle and Bowen**	Barth***	Ab wt% in K-feldspar	Structural state of K-feldspar						Plagioclase temperature type
						microcline	microcline-perthite	perthite	homogeneous	zoning	2V(-)	
Matsuki	Main	300°C		480°C	9-12%	○	○	○			52-62°	low type
Sori	Main	330-400		425-480	12-14		○	○			56-66	
	Marginal	350	730°C	480	14		(○)	○			50-57	
	Aplite	300		380	11		○	○			60	
Ashikaga	Main	400	680	470	15		○	○			48-56	low type
Kanoiri	Main (Kanoiri)	300		430	10		○	○			52-62	
	Main (Ohara)	450	720	420	12	○	○	○			59-65	
Chuzenji	Main	360-480	690	530-560	20-22		○	○			52-57	low-intermediate type
	Aplite	300		370	10		(○)	○				
Sukai	Main	390-400	680	540-580	21-24		○	○			50	
Kobugahara	Main	300-400		540-550	17			(○)	○		45	
	Aplitic	400	700	520	17			(○)	○		45-51	high-intermediate type
	Pegmatic	300		470	13			(○)	○		50	
Hosoo	Granite	470	740	670	33				○	○	53-56	
Granite porphyry	Phynocryst	400-480	730	590	22-23				○	○	47-55	high type
Fukazawa	Granodiorite porphyry	300							○	○		
Rhyolite lava		500							○	○	55-60	
Irohazaka	Welded tuff	470			18				○	○	36-64	
Hangetsuyama	Welded tuff	300-420	780	600-730	23-35				○	○	56-60	

* Apparent temperature (Christie, 1962, Fig. 2)

** Apparent temperature (Barth, 1962, Fig. 4)

*** Temperature (Tuttle and Bowen, 1958)

あることが推論される。そして中禪寺型酸性岩類の形成機構として Smith and Bailey (1968) の valles 型カルデラのモデルが最も良くあてはまるように思われ、現在この地域にはカルデラの比較的下部が露出していると判断される。

本報では矢内 (1972, 1973) のデータをもとに、足尾山地北部に分布する後期中生代酸性岩類の形成機構と成因的考察を行ない。さらに、上記のモデルと重力異常の関係についても考察する。

2. 成因的考察

Tuttle and Bowen (1958) は Q-Or-Ab-H₂O 系を用いることにより、結晶作用においてマグマと斑晶鉱物とが平衡に共存していると仮定すれば、その時のマグマの温度と H₂O の圧力を近似的に求める方法を示した。Barth (1962) の 2 長石温度計は共存する斜長石とカリ長石の組成が分れば、斑晶鉱物と平衡に共存していた時期のマグマの温度が求められることを示した。一方、Christie (1962) の斜長石温度計は上記のいずれの方法とも独立に、斜長石の組成とその面間隔を用いることにより、斑晶鉱物と平衡に共存するマグマの温度を求める方法を示した。これらの方法により推定されるマグマの温度を第 1 表に示した。ただし、Christie の方法はいろいろな条件に影響されて、マグマの真の温度を示すかどうか疑問視されている。

さらに、カリ長石の Ab 成分、光軸角と成分とから求められるカリ長石の秩序度、X 線回折によって決定される斜長石の温度型等からも、相対的な生成温度を推定することが可能である。

Tuttle and Bowen (1958) の方法で、温度を推定するために用いたノルム Q-Or-Ab 比は各岩体について行った化学分析値の平均値である。

第 1 表から判断して、カリ長石の秩序度、斜長石の温度型、カリ長石の Ab 成分と最も良く対応するのは Barth (1962) の 2 長石温度計 (Two-feldspar thermometer) である。Tuttle and Bowen (1958) や Christie (1962) の方法によって求めた温度との間には相関関係は全く認められない。第 1 表から本地域の酸性岩類は次の 2 つに大別される。

a: 松木型花崗岩類と沢入型花崗岩類

b: 中禪寺型酸性岩類

これらの 2 長石温度計はそれぞれ 420~490°C, 530~730°C を示し、カリ長石の Ab 成分もそれぞれ 9~15%, 17~33% と温度に対応して増加している。また、前者のカリ長石は微斜長石構造—ペルト石構造を示すのに対

して、後者は光学的に均質なものが多くその中には累帯構造を示すものも多く含まれる。このように前者と後者の間には明らかな相違が認められる。このような相違が岩体の規模や産状とどのような関係にあるかを考察するため、岩体の相対的大きさと 2 長石温度並びにカリ長石の Ab 成分との関係を第 1 図に示した。本地域の各岩体を大型、中型、小型、火山岩の 4 つに区別して述べる。

Fig. 1. Relation between of the rock bodies and apparent temperature according to the two-feldspar thermometer method (after Barth, 1962). $l < 16\%$, $h > 16\%$. Symbols used as in Fig. 6 and 8 of Yanai (1973).

松木岩体、沢入岩体は大型に属する。鹿ノ入岩体 (矢内 1972) はさらに東方に広がっているため中型ないし大型に含まれる。中型岩体としては中禪寺岩体、古峯ヶ原岩体、皇海岩体など中禪寺型酸性岩類の花崗岩類と沢入型の足利岩体である。小型岩体は斑岩類や細尾岩体である。

2 長石温度から 500°C を境に大型岩体とそれ以外の岩体とが明らかに区別される。そして、中型岩体、小型岩体、火山岩に順次高温を示すことが一般的傾向として認められる。ただし、足利岩体は中型岩体ながら 470°C と低温で、温度からすると沢入岩体等に最も近い。これは K-Ar 年代や貫入の地理的位置からも違いが明らかのように (矢内 1972, 第 2 図, 第 1 表), 中禪寺型酸性岩類とは成因的に関連性がなかったためであろう。

矢内 (1973, 第 10 図) に示した l と h はカリ長石の Ab 成分を示したもので、 $l < 16\%$, $h > 16\%$ の関係にある。これを第 1 図に挿入すると、 l と h の境界は約 500°C に対応していることが分かる。この対応は 2 長石温度から区別された大型岩体とそれ以外の岩体とのグループがカリ長石の Ab 成分の違いからも区別されることを意味し、さらにこのような相異は K-Ar 年代、産状、造岩鉱物の特徴からも区分される。(矢内 1972, 1973)。

このように松木型・沢入型花崗岩類と中禪寺型酸性岩類との間の明白な相違と各々の中に於ける類似性は単に

Fig. 2. A model explaining the formation of the Chuzenji acidic igneous rocks.

Stage 1. 1: Matsuki type granitic rocks, 2: Sōri type granitic rocks. Stage 2-7. 1: Porphyries, 2: Chuzenji adamellite, 3: Skai adamellite, 4: Kobugahara granodiorite, 5: Acidic plutonic rocks, 6: Increasing vapor pressure, 7: Flow of magma.

年代に違いがあることだけではなく、これらの間にはマグマの発生機構やその後の形成機構に本質的な相違があったものと考えられる。このことは、松本型・沢入型花崗岩類が花崗岩類のみの活動であるのに対して、中禅寺型酸性岩類は火山砕屑岩～斑岩～花崗岩にわたる火山一深成岩体を形成した火成活動となって表われている。

3. 中禅寺酸性岩類の形成機構

中禅寺型酸性岩類を構成する各岩体のK-Ar年代はほ

ゞ等しく、それらの産状や分布は地質構造と密接に関係する(矢内 1972)。さらに、化学組成の類縁性、造岩鉱物の諸性質の類縁性や特徴等(本文や矢内 1973)から、これらは同一(あるいは一連)のマグマから連続的に形成された可能性が推論される。それゆえ、Smith and Bailey (1968)のvalles型カルデラや荒牧(1965)の熊野酸性岩の噴出様式をモデルにして、中禅寺型酸性岩類の形成機構を7つのステージに分け考察した(第2図)。ステージ 1. マグマ溜りの形成

2. 流紋岩溶岩の噴出
3. 火道の固化とマグマ溜りの水蒸気圧の増加
4. 火砕流の噴出
5. カルデラの形成
6. 斑岩類の貫入
7. 花崗岩類の進入

本地域には秩父古生層を基盤として、白亜紀中期にすでに松木型花崗岩類 (116 m. y) や沢入型花崗岩類 (85~90 m. y) が形成された。しかし、当時この地域に陸上の火山活動や堆積作用は全く知られておらず、もっぱら、隆起運動と侵食作用が行われていたと考えられる。当時の地形を推定する資料は全くない。

ステージ 1: 白亜紀の後半に皇海岩体の北方、中禅寺岩体の西方を中心とする地域の地下にマグマ溜りが形成された。このマグマがいかなる機構で発生したかは触れない。マグマ溜りの形成によって、マグマ溜りの上方は盛り上げられ、このため、マグマ溜りの上方には大小様々な割目が発生し、その一部は地表にまで達していたことが予想される。このステージに陸上で火山活動を示す証拠はないが、この割目に沿って、多少の噴出が行なわれたかも知れない。一方、マグマ溜りの中では温度の降下に伴ない、結晶作用が進行し、水蒸気圧が徐々に上昇していったことが考えられる。

図のマグマ溜りは全部マグマによって満されている様に描かれてはいるが、実際には基盤の岩石を多量に取込んでいる様な状態、あるいは、マグマがネットワーク状にこの空間を占領している状態等が考えられる。それはマグマ溜りの位置は元々空間ではなく基盤岩によって占められていたことから理解されよう。

マグマから最初に晶出した鉱物は輝石 (カンラン石は知られていない) で、輝石はステージ 4 の火砕流堆積物の中に見られることから、晶出した後、結晶分化作用が行われたことを示している。この結果、結晶作用が進行していくにつれ、マグマ溜りの最上部は斑晶に乏しい流紋岩質マグマに変化していくことが予想される。

ステージ 2: 水蒸気圧が上昇した結果、すでに形成されていた割目に沿って、マグマ溜りの最上部を占めていた斑晶の少ない流紋岩質マグマの一部が地表に噴出した。これが流紋岩溶岩に相当する。このことは流紋岩溶岩が本地域で最も初期の活動であり、大部分がガラスから成り、斑晶に乏しいことと調和する。この溶岩は現在、松木川の一部にしか分布していないことから、もともと、その規模はあまり大きくなかったと推定される。この溶岩は熊野酸性岩類の神ノ木流紋岩 (最も初期の活動) に相当するであろう (荒牧, 1965, 荒牧, 羽田

1965)。

ステージ 3: 流紋岩を噴出した火道は同質の岩石によって堅く固化され、そのため、マグマ溜りでは温度の降下に伴ない、結晶作用が進行し、水蒸気圧が著しく上昇した。

ステージ 4: 極度に上昇した圧力はマグマ溜りの屋根を破り、この裂目やすでに形成されていた割目を通して、マグマが火砕流となって地表にあふれ出した。恐らく、その量は本地域に限っても 200 km^3 を下らないものと見積られる。さらに、同じ噴出単位と考えられる同質の火砕流堆積物が足尾山地から帝釈山地にかけてかなり広く分布していることから、全体の量は 10^3 km^3 のオーダーであったと推定される (河田 1966, 矢内 1972)。

火砕流の活動は、まず、相対的に斑晶の少ないマグマ溜りの上部が噴出し、順次斑晶に富む下方部が噴出したものと考えられる。このことはほぼ坂火砕流堆積物→半月山火砕流堆積物に上部層程斑晶に富む事実と一致する。この時期に形成された air fall の堆積物もわずかではあるが松木川の一部に認められる。

ステージ 5: 本地域の火砕流堆積物は大きなベーズン構造 (溶結構造から推定) を示し、あまり破壊されていない。このことは火砕流の噴出の後、マグマ溜りの尾根が『全体的』に陥没 (あるいは沈下) したことを物語っている。

一方、マグマ溜りの中では、残りのマグマから結晶作用が行われ、水蒸気圧も再び上昇していったであろう。

ステージ 6: 斑岩類は火砕流堆積物を貫き、また、基盤岩と火砕流堆積物の境界 (その一部はカルデラ壁に相当) に貫入していることから、陥没の後に活動したことは明らかである。すでに矢内 (1972) が溶結凝灰岩の構造や断層と破碎帯の項でも述べたが、松木岩体は中禅寺酸性岩類の中に突出した地塊であり、さらに、松木岩体に接するものは坂火砕流堆積物の中に見られる溶結構造の傾斜から判断して、この地域は隆起したカルデラ中央部 (ないし、それに近い所) と考えられる。このようにカルデラ中央部の隆起と斑岩類の貫入がこのステージに相前後して行なわれた。

ステージ 7: 中禅寺岩体と皇海岩体はカルデラ中央部に、そして、古峯ヶ原岩体はカルデラ縁に相ついで進入した。各々の岩体は岩質と進入場所から判断して、中禅寺、皇海の両岩体はマグマ溜りの上部から、また、古峯ヶ原岩体はマグマ溜りの比較的下部からもたらされたものと推定される。各々の岩体はいずれも溶結凝灰岩のベーズン構造の中心付近ないし、それよりあまり離れない

場所に位置している。これらと同源と考えられる花崗岩類で、基盤古生層に侵入するものは知られていない。このことは、花崗岩類が推定されるマグマ溜りの位置から比較的近い場所にしか侵入しないことを示しているのかも知れない。

花崗斑岩や火砕流堆積物に含まれるカリ長石はしばしば累帯構造を示す。特に花崗斑岩にこの傾向が著しい(矢内 1973, Fig. 4)。荒牧 (1967) が述べているように、カリ長石の累帯構造がマグマ溜りの水蒸気圧の変化を示しているとすれば、テスジ 1 から 7 に示したマグマ溜りの中で水蒸気圧の上昇→急減→再上昇のくり返しモデルを強く支持している。

本地域には Smith and Bailey (1968) の「ステージ VII」に相当する硫気孔や温泉作用は現在知られていないが、この地域に認められる変質や鉱汚はこのステージに相当するものであったかも知れない。

以上に述べたステージ 1 から 7 までの期間に、深部よりマグマが逐次マグマ溜りに供給されなかったと言う根拠は全くない。しかし、仮に供給されたとしても、上記のモデルを全く否定するものでないであろう。また、各ステージの長さを算定する資料に乏しいが、ステージ 2 と 4 はかなり短かったと推定される。さらに全過程の時間の長さは、岩石の K-Ar 年代と野外における前後関係が逆になることなどから判断して、K-Ar 年代決定の精度内であることは疑いない。

4. ブーゲー異常と地下構造の関係

Hagiwara (1967) が求めた本邦の重力異常(ブーゲー異常)をもとに、後期中生代に酸性火成活動が活発に行なわれた地域を対象に、ブーゲー異常と火砕流堆積物分布地域の地下構造の関係について考察した。

第 3 図 (a) に Hagiwara (1967) のブーゲー異常を 50 mgal 間隔のコンターで示し、これと同スケールで後期中生代酸性火成岩類の分布を第 3 図 (b) に示した。詳細に検討するため、第 4 図に地域のくわしいブーゲー異常を示した。この中で、鹿児島湾地域の阿多・合良両カルデラは第四紀の中でもごく新しい時期に火砕流を噴出して形成されたカルデラで、カルデラと重力異常の関係がかなり良く知られているので、他地域のモデルとして使用した(荒牧・宇井, 1966)。また、第 5 図はこれら地域のブーゲー異常と地下構造との関係を示したものである。なお、A-A'...F-F' は第 3・4 図の断面線の位置である。

1) 足尾地域 (A-A') : 中央部に顕著な負の異常がある。これは基盤地域(足尾山地と帝釈山地)が著しい正の異常を示すことと全の対称的である。負の中心は中禅

Fig. 3. (a): Bouguer anomaly map in Japan (contour interval 50 mgal).

(b): Distribution of the Late Mesozoic acidic igneous rocks in Japanese islands. 1. Pyroclastic rocks, 2. Granitic rocks.

(1) : Asahi, (2) : Aizu, (3) : Ashio, (4) : Nohi, (5) : Biwako, (6) : Hiroshima, (7) : Kagoshimawan. A-A'...F-F' : Position of the cross section in Fig. 5 and 6.

寺岩体の西方、皇海岩体の北方に位置する。この地域は堆積盆ではないことが明らかなので、この顕著な負異常は火砕流の噴出の結果生じた大規模な陥没によるものと推定される。なお西方の負異常は新第三紀の構造性堆積盆を示すものである。

2) 濃飛地域 (B-B') : 市の広い負異常地域は濃飛流紋岩類の分布とほぼ一致する。濃飛流紋岩類の全容量は 10,000 km³ 以上と見積られ(山田ほか, 1971), このき

Fig. 4. Bouguer anomaly map of several areas in Japan (contour interval 10 mgal). Dotted areas : Basements.

わて大きい負の異常は火山構造的な陥没を示すことは疑いない。

3) 琵琶湖地域 (C-C'): 当地域には河田ほか (1969) により、後期中生代酸性岩類、主として溶結凝灰岩類 (湖東流紋岩類) が、約 1,000km² にわたり分布してい

ることが報告されている。ブーゲー異常は両翼の基盤地域とは対照的に、酸性岩類の分布地域は著しく低い。この負異常は琵琶湖 (一つの堆積盆) の影響がかなり大きいと考えられるが、酸性岩類の存在を全く無視することはできないであろう。おそらく、この地域にも、火砕流

Fig. 5. Bouguer anomaly and geological profiles of several areas in Japan.
1. Tertiary and Quaternary rocks, 2. Late Mesozoic acidic igneous rocks, 3 and 4. Basement rocks.

の噴出の結果かなり大きな陥没が生じたと考えられる。

4) 広島地域 (D-D') : この地域に見られる負異常の原因は広島花崗岩の低密度によるだけではなく、この地域に広く分布する火山砕屑岩類の存在が大きく影響していると考えられる。当地域にも火山砕屑岩類の形成に伴う大規模な陥没が推定される。

5) 鹿兒島湾地域 (E-E', F-F') : 第4図の E-E', F-F' はそれぞれ、合良カルデラ、阿多カルデラを横断する断面である。両地域には明瞭なV字型の異常が認められる。荒牧、宇井 (1966) が述べているように、両カルデラを含め鹿兒島湾全体が一つの大きな火山構造の陥没であろう。両地域の異常の型 (V字型) が後期中生代に大量の火砕流を噴出した地域のもので、きわめてよく似ていることが注目される。

以上に述べたことを総合すると、大量の火砕流を噴出した地域が、周囲の基盤地域に対して、著しい負異常を有する共通性は、火砕流の噴出に引き続いて大規模な陥没が行なわれたことを強く支持するものである。このようにして生じた火山性 (あるいは火山構造性) の大陥没 (カルデラ) は、第2図のステージ7に示すような地下構造を有するのであろう。この図で縦長のマグマ溜りは低密度の酸性深成岩類によって占められ、このためブーゲー異常が一層強調されるものと考えられる。

Fig. 6. Presumable belt of acidic igneous activities in Late Mesozoic in Japanese Islands.

第6図はブーゲー異常と後期中生代酸性岩類の分布をもとに、火山構造性の陥没地帯を推定したものである。図中1の朝日山地では70~85 my. の間に形成された大量の火砕流堆積物が知られている (高浜・吉村 1969, 矢内ほか, 1973)。また、2の会津地方にも足尾山地北部に見られる酸性岩類に類似の岩石が分布しているが、くわしいことはまだわかっていない。ここに示した地域はけして一つづきの陥没を示すものではなく、各々の地域で、しかも、その地域固有の火成活動とそれに伴う陥没が行なわれたものと考えられる。そして、全体としては、後期中生代に一つの火山帯 (活動帯) を形成してい

たであろう。

5. まとめ

1. 足尾山地北部には濃飛流紋岩類や広島花崗岩類に対比される後期中生代酸性火成岩類、すなわち、松木型花崗岩類・沢入型花崗岩類・中禅寺型酸成岩類が相ついで形成された。しかし、これらの酸性岩類の間には約3,000万年に及ぶ形成時代の隔があることから、各々別の magma から形成されたものと判断される。

2. 中禅寺型酸性岩類は火砕流堆積物—斑岩類—花崗岩類にわたる一大酸性複合岩体を形成し、これらは同一（あるいは一連）のマグマから連続的に形成されたと考えられる。そして、これらの形成機構として Smith and Bailey (1968) の valles 型カルデラのモデルや荒牧 (1965) の熊野酸性岩類の噴出様式が当てはまる。

3. 大量の火砕流堆積物を噴出した結果、陥没（カルデラ）が生じたことはブーゲー異常からも強く支持される。

4. 後期中生代酸性火成岩類は火砕流堆積物—半深成岩—深成岩の成因的関連を解明する有用な火山—深成複合岩体であり、今後 Sr 同位体比の測定等が是非必要である。

引用文献

- 荒牧重雄 (1965), 熊野酸性火成岩類の噴出様式, 地質雑, **71**, 525-540.
- (1967), 熊野酸性岩の花崗斑岩のマグマと斑晶長石の成分, 地質雑, **73**, 181-191.
- ・羽田 忍 (1965), 熊野酸性火成岩類の中部および南部の地質, 地質雑, **71**, 490-512.
- ・宇井忠英 (1966), 阿多火砕流と阿多カルデラ, 地質雑, **72**, 337-349.
- Barth, T. F. W (1962), The feldspar geologic thermometers, Norsk. Geol. Tids, **42**, Feldspar vol, 330-339.
- Christie, O. H. J (1962), Observation on natural Feldspars, Randomly disordered structure and Preliminary suggestion to a plagioclase thermometer, This vol, 383-388.
- Hagiwara, Y (1967), Analyses of Gravity Vales in Japan, Bull. Earthq. Res. Inst, **45**, 1091-1288.
- 河田清雄 (1966), 奥日光流紋岩類—足尾山地北方における白亜紀火成活動—, 地球科学, **84**, 6-13.
- ・三村弘二・須藤定久 (1969), 琵琶湖東部の白亜紀火成活動, MAGMA, **16**, 11-13.
- 河野義礼・植田良夫 (1964), 本邦火成岩の K-A dating (I), 岩鉱, **51**, 127-148.
- ・——— (1966), 本邦火成岩の K-A dating (IV), 東化日本の花崗岩類, 岩鉱, **56**, 41-55.
- Smith, R. L and Bailey, R. A (1968), Resurgent cauldron, Studies in volcanology, Geol. Soc. Amer. Memoir **116**, 613-662.
- 高浜信行・吉村尚久 (1969), 新潟県北部のグリーンアプ (予報), 地質学会 76 年会計論資料, グリーンアプに関する諸問題, 105-115.
- Tuttle, O. F and Bowen, N. L (1958), Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O , Geol. Soc. Amer. Memoir **74**.
- 矢内桂三 (1972), 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類, その 1. 地質, 岩鉱, **67**, 193-207.
- (1973), 足尾山地北部の後期中生代酸性火成岩類, その 2. 岩石並びに造岩鉱物の記載とその考察, 岩鉱, **68**, 6-29.
- ・井上 武・大口健志 (1973), 朝日山地の白亜紀田川酸性岩類—グリーンアプ層基盤の再検討—, 地質雑, **79**, 11-22.
- 山田直利・河田清雄・諸橋 毅 (1971), 火砕流堆積物としての濃飛流紋岩, 地球科学, **25**, 52-68.