東北日本弧，青麻火山の形成史と主成分化学組成

Volcanic history and major element bulk chemistry of the Aoso volcano, Northeast Japan arc

戸谷 成寿 (Naruhisa TOYA)*

伴 雅雄 (Masao BAN)**

The Aoso volcano is one of the representative stratovolcanoes of the Aoso-Osore volcanic zone in the northeast Japan arc. The volcanic activity of the Aoso volcano can be classified into two stages; the stages are separated by a caldera collapse event. The volumes of the products are 3.6 km³ (earlier stage) and 0.8 km³ (later stage). During the initial part of the earlier stage, thin lava flows (olivine orthopyroxene clinopyroxene basaltic andesite, SiO₂=54.7-55.3%), block and ash flows (olivine bearing orthopyroxene clinopyroxene andesite, SiO₂=57.9-58.5%), and thick lava (orthopyroxene clinopyroxene andesite, SiO₂=59.0-59.9%) were extruded. The products construct either a conical shaped stratovolcano or series of stratovolcano. After that, scoria flows (orthopyroxene clinopyroxene andesite, SiO₂=60.2%) and pumice flows (quartz orthopyroxene clinopyroxene hornblende andesite, SiO₂=62.1-62.3%) spewed out, which might have caused the caldera at the top of this volcano. All the rocks during this stage can be plotted as linear lines on the co-variant diagrams. During the initial part of the later stage, pyroclastic rocks (olivine bearing hornblende orthopyroxene quartz dacite, SiO₂=68.2-69.8%) were erupted, and lava domes grew. The lava domes can be separated into two types. One consists of clinopyroxene bearing orthopyroxene quartz dacite (SiO₂=66.6-67.0%), whilst the other is clinopyroxene orthopyroxene dacite (SiO₂=64.4-66.8%). All the eruptive rocks of this stage characteristically include mafic inclusions (quartz olivine bearing basaltic andesite and andesite, SiO₂=53.8-57.5%). Each type of lava dome displays a distinct chemical trend in the covariant diagrams. All of the later stage products have higher SiO₂ contents than the earlier stage products. Some of the later stage products, especially the pyroclastic rocks, were not plotted on the extrapolated lines of the trend drawn by the earlier stage products.

Keywords: Aoso volcano, Aoso-Osore volcanic zone, Mafic inclusion, Calc-alkaline andesite, Northeast Japan arc, Quaternary volcano, Volcanic stratigraphy, Volcanic history, Bulk chemistry

I. はじめに

青麻火山は東北日本の最も海溝側の青麻-恐火山列 (中川ら, 1986) を代表する第四紀の小規模な成層火山で、蔵王火山の東方約 12 km に位置している (Fig. 1)。活動年代は 0.40 Ma 前後 (K-Ar 法) で、10 万年以内の比較的短期間の活動で形成されたと考えられている (伴ら, 1992)。山体は東西約 6 km, 南北約 8 km, 比高約 700 m であり、開析が進んでいる (Fig. 2)。山体のほぼ中央に青麻山 (800 m) および、最高峰あけら山 (820 m) が位置し、^{なこくらやま} 鳳倉山 (666 m)

と、461 m 峰を始めとする外輪山がこれらを囲むように分布する。山体の南部および南東部には流れ山地形が見られる。また、山体の南部および北部は、板橋沢、タイコ沢、オナシ沢、堂沢、赤松沢によって、深く侵食を受けている。

青麻-恐火山列は、中川ら (1986) によって提唱されたものである。多くの島弧では火山フロント付近で噴出量が最大であるのに対し、東北日本弧において噴出量最大の脊梁火山列よりも更に海溝側に噴出量が比較的小さなこの火山列が存在することは、火山フロントをマグマの発生境界と考える上で重要な意味を持つのではないかと指摘され

(平成 12 年 10 月 18 日受付, 平成 13 年 5 月 17 日受理)

*山形大学大学院理学研究科地球共生圏科学専攻, 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12

**山形大学理学部地球環境学科, 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12

*Division of Interactive Symbiosphere Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University., 1-4-12, Kojirakawa-machi, Yamagata 990-8560, Japan E-mail: aosovolcano@nifty.com

**Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University., 1-4-12, Kojirakawa-machi, Yamagata 990-8560, Japan E-mail: ban@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

Fig. 1. Map showing the localities of the Aoso volcano. Open triangles represent volcanoes belonging to the Aoso-Osore volcanic zone. Open circles represent Quaternary volcanoes except for volcanoes belonging to the Aoso-Osore volcanic zone. Location of volcanoes and the boundary line between the zone of the Aoso-Osore and the other volcanoes are from Nakagawa *et al.* (1986).

た。中川ら (1988) はさらに、東北日本第四紀玄武岩質マグマ組成の水平変化の成因を検討した中で、青麻—恐火山列の玄武岩質マグマは脊梁火山列のものよりも、K, Rbの汚染の程度が弱いマントル物質に由来していると議論している。また、玄武岩とその他の岩石については成因が別である可能性も指摘されている (中川ら, 1986)。マグマの成因をさらに詳しく考えるためには、まず、岩型毎の特徴を明らかにする必要がある。従って、個別の火山について、岩型毎にその特徴や産出層序を明らかにすることは、青麻—恐火山列のマグマ成因を検討するために基本的に重要である。

青麻—恐火山列に属する火山のうち、恵山、陸奥燧岳、恐山、七ッ森、安達の各火山については、それぞれ安藤 (1974)、富樫 (1977)、梅田 (1992)、長谷中・青木 (1995)、蟹澤 (1985) によってその地質および岩石学的特徴が明らかにされた。七時雨火山については、石川ら (1985) によって岩石と化学組成の概要が報告されている。しかし、近年多くの火山で行われている (例えば、石塚・中川, 1999) ように、時間空間分解能を上げ、また、層序に対応した噴出物の特徴を明らかにした例は少ない。青麻火山については、Ichimura (1952) 以来、現在まで詳しい層序が公表されていない。また、霜鳥ら (1983) によって噴出物の地球化学的性質が明らかにされたが、岩石の詳しい特徴や、その層序と

Fig. 2. Topographic map of the Aoso volcano. Contour interval is 50 m.

の対応については明らかにされていない。

本研究では青麻火山の層序と岩石を全般的に見直した。その結果、噴出物の種類や山体の形態の変遷と、それに伴う岩石、およびその全岩化学組成の変化が明らかになったので報告する。

II. 地質概説および各論

1. 地質概説

青麻火山の基盤は第三系の堆積岩類であり、大網層と円田層および松川層からなる (北村, 1985)。

青麻火山は、その中心部にカルデラが存在することがこれまでも指摘されてきた (Ichimura, 1952)。カルデラ (以下、青麻カルデラと呼ぶ) は直径が約 2.5 km で、急崖に囲まれている。後に述べるように、青麻カルデラの形成を境に岩質が大きく変化し、また噴火様式も変化している。本研究ではこのカルデラの形成を境に青麻火山の活動を前期と後期に分ける。

青麻火山の地質図を Figure 3 に、層序関係図を Figure 4 に示す。前期は主に玄武岩質安山岩から安山岩の活動で、噴出物は主に薄い溶岩流と同質の火砕岩、ブロック・アンド・アッシュフロー堆積物、厚い溶岩流、スコリア流堆積物および軽石流堆積物である。噴出物は山体の中央を囲むようにおおそ環状に分布している。外輪山は主に溶岩からなり、スコリア流および軽石流堆積物は外輪山のやや外側に離れて分布している。

後期は主にデイサイトの活動である。噴出物は主にブ

Fig. 3. Geological map and cross section of the Aoso volcano.

ロック・アンド・アッシュフロー堆積物と少なくとも3つの円頂丘溶岩からなる。噴出物の大半は、青麻カルデラの内側に分布している。後期噴出物中のデイサイトは全て苦鉄質包有物を特徴的に含んでいる。また、山体の中央部のごく狭い範囲に降下火砕岩が分布しており、苦鉄質包有物

の濃集層が見られる。

岩屑なだれ堆積物が山体南東部と南部に分布しており、流れ山地形を形成している。山体南東部に分布するものは主に前期噴出物の溶岩によって構成されており、その形成時期は不明である。山体南部に分布するものは様々な前期

Fig. 4. Volcanic sequence of the Aoso volcano.

噴出物によって構成されており、青麻カルデラの形成に前後して形成されたと考えられる。

2. 基盤岩類

青麻火山の基盤は第三系の大網層と松川層からなる。大網層は、礫岩、粗粒砂岩、凝灰質シルト岩からなり、松川層は、薄層理の発達した青灰色凝灰岩シルト、凝灰質砂岩、凝灰岩の互層から成り、珪藻土を挟む（北村，1985）。大網層は山体南部の採石場で良い露出が得られ、凝灰質シルト岩中にしばしば炭化木片がみられる。松川層は山体の北東部の採石場で良い露出が見られる。

3. 前期噴出物

現存している噴出物の体積は、約 3.6 km³ と見積もられる。分布および岩相から、赤松沢溶岩、461 m 峰溶岩類、八山火砕流堆積物、松川火砕流堆積物、風倉山溶岩、オナシ沢溶岩、曲竹スコリア流堆積物、曲竹軽石流堆積物に分けられる。

(1) 赤松沢溶岩

山体の北東部、赤松沢周辺に分布する、灰黒色緻密の主に厚さ数 m 以下の玄武岩質安山岩質溶岩である。赤松沢上流付近で厚さ 1m 前後の薄い溶岩の重なりからなる露出が見られる。本溶岩について、 0.38 ± 0.05 Ma の K-Ar 年代が得られている（伴ら，1992 の Table 1-No. 8）。

(2) 461 m 峰溶岩類

遠森山の山麓と山体東部の外輪山を形成している。Ichimura (1952) の遠森山溶岩の一部に相当する。主に灰黒色の玄武岩質安山岩質溶岩と火砕岩からなる。461 m 峰の山頂付近および山腹の林道では、溶岩とスコリア質集塊岩からなる良い露出が見られる。遠森山の西麓ではスコリア質の凝灰岩と溶岩餅からなる露出（露頭高約 5 m）が見られる。本溶岩について、 0.38 ± 0.03 , 0.38 ± 0.04 Ma の K-Ar 年代が得られている（伴ら，1992 の Table 1-No. 6, 7）。

(3) 八山火砕流堆積物

山体の北部、八山付近に分布する安山岩質火砕流堆積物である。八山の林道において露出が見られる。最大約 2 m の青灰色緻密な本質岩片と赤色酸化した類質岩片、および火山灰の基質からなるブロック・アンド・アッシュフロー堆積物で、岩片は弱い級化構造を示す。中部に赤色酸化した火山シルト質のサージ堆積物（最大層厚約 2 m）を挟在する（Fig. 5a）。サージ堆積物には主に平行ラミナが見られ、一部で斜交ラミナが見られる。また本層の上部には下部と同じ岩質で発泡度の高い岩片（10 cm 前後）と火山灰の基質からなる火砕流堆積物が認められる。

(4) 松川火砕流堆積物

山体の北東を通る林道および曲竹、松川沿いに分布する火砕流堆積物である。最大長径約 2 m の灰色から暗灰色の安山岩質岩片、および火山灰の基質からなるブロック・アンド・アッシュフロー堆積物で、岩片は不淘汰である。山体の北東部の林道では後期噴出物の板橋沢火砕岩類に覆われる。曲竹においては、その基底部に、平行ラミナのある灰黒色のサージ堆積物（最大層厚 50 cm）が見られる。本層は曲竹の採石場において基盤の松川層を不整合に覆う。また、山体の北東部の外輪山（461 m 峰溶岩類の一部）が開析して生じたと考えられる凹地を埋めて松川火砕流堆積物が分布することから、本層は 461 m 峰溶岩類より上位であると考えられる。

(5) 風倉山溶岩

主に風倉山（666 m）を形成している、灰黒色の新鮮な安山岩質溶岩である。風倉山東麓の林道から山腹にかけて、ブロック状の溶岩（最大長径約 2 m）が認められる。溶岩には縞状構造が見られる。Ichimura (1952) の遠森山溶岩の一部に相当する。

(6) オナシ沢溶岩

山体の北東部の外輪山を形成している。Ichimura (1952) のオナシ沢溶岩にほぼ相当する。灰黒色から灰白色の安山岩質溶岩で、山体北東部の松川沿いで良い露出（露頭高約 30 m）が見られる。この露頭では厚さ約 8 m のブロック状溶岩の層が少なくとも 3 層認められる。オナシ沢上流付近では風化変質が著しく、赤褐色を示す。松川沿いの露頭において、松川火砕流堆積物を覆う。

(7) 曲竹スコリア流堆積物

山体の北東部、曲竹に分布する。曲竹の採石場で良い露出が見られるほか、山体南部の板橋沢下流で深谷岩屑なだれ堆積物の巨大な岩塊（最大径約 8 m）として取り込まれている。安山岩質のスコリア（最大長径 45 cm）と、火山灰の基質からなる。顕著な成層構造が認められ、それぞれ級化構造を示す。しばしばスコリア質の黒色部に白色の縞が入った縞状軽石が見られる（Fig. 5b）。白色の縞は連続的でなく、半固形物が引き延ばされたような形態を示す。層厚は約 10 m と推定され、曲竹の採石場において松川火砕流堆積物を覆う。本堆積物について、 0.38 ± 0.04 Ma の K-Ar 年代値が得られている（伴ら，1992 の Table 1-No. 4）。

Fig. 5. a: Yatsuyama Pyroclastic flow deposit.
 b: Banded pumice of the Magatake scoria flow deposit.
 c: Fall deposit of the Itahashizawa pyroclastic rocks. Label B and D respectively show the representative volcanic bombs and dacitic lava blocks.
 d: Aosoyama lava dome and Akerayama lava dome from the north.
 e: Fukaya debris avalanche deposit.

(8) 曲竹軽石流堆積物

山体の北東部，曲竹に分布する。曲竹スコリア流堆積物同様，曲竹の採石場で良い露出が見られるほか，板橋沢下流および大網の採石場で深谷岩屑なだれ堆積物中の巨大な岩塊（最大径約 8 m）として見られる。安山岩質の軽石（最大長径 15 cm）と火山灰の基質からなる。顕著な成層構造が認められ，それぞれ級化構造を示す。しばしば黒色の縞模様に入った縞状軽石が見られ，大網の採石場においては曲竹スコリア流堆積物で見られたような，黒色部に白色の縞模様の入った縞状軽石も混在している。基質は，少量の炭化木片を含む。また異質岩片として最大 5 cm 程度の花

崗岩が見られる。層厚は約 7 m 以上と推定され，曲竹において曲竹スコリア流堆積物を覆う。

4. 後期噴出物

現存する噴出物の体積は約 0.8 km³ と見積もられる。分布および岩相から，板橋沢火砕岩類，あけら山頂丘溶岩，遠森山頂丘溶岩，青麻山頂丘溶岩に分けられる。

(1) 板橋沢火砕岩類

板橋沢流域を始め，山体全域に広く分布している。Ichimura (1952) の板橋沢アグロメレートおよび大森山溶岩の一部に相当する。主にデイサイト質の火砕流堆積物と少量の溶岩からなる。火砕流堆積物は板橋沢中流で良い露

出が見られ、一部岩屑なだれに漸移している。溶岩はあけら山西方の 756 m 峰において見られる。また山体の中央部付近でのみ降下火砕岩 (Fig. 5c) が若干認められる。これら火砕岩に見られるデイサイトは、全て苦鉄質包有物を顕著に含む。

火砕流堆積物は、灰白色のデイサイト質本質岩片 (最大長径 50 cm) と火山灰の基質からなるブロック・アンド・アッシュフロー堆積物である。また、ブロック・アンド・アッシュフロー堆積物は含まれるデイサイト質岩片の発泡度の違いによって下部と上部に細分でき、下部はやや発泡したデイサイト質本質岩片を含み、上部は発泡度の低い比較的緻密なデイサイト質岩片を含む。ブロック・アンド・アッシュフロー堆積物の上部には、デイサイト質岩片の他に、周縁部に厚さ数 cm のデイサイトの皮を断片的に持つ、デイサイトから分離した苦鉄質包有物が顕著に見られる。苦鉄質包有物は結晶度の高い玄武岩質安山岩で、最大長径 40 cm の楕円形を呈している。

山体の中央付近、板橋沢最上流部の露頭 (露頭高約 15 m) で見られる降下火砕岩 (Fig. 5c) は、溶結したデイサイト質の基質と、苦鉄質包有物を含むデイサイト質岩片 (最大長径約 2 m) と、苦鉄質包有物 (最大長径 40 cm) からなる。苦鉄質包有物は、周縁に厚さ 5 cm 前後のデイサイトの皮を断片的に持つ。降下火砕岩の露頭には成層構造が見られ、また苦鉄質包有物が濃集する部分が認められる。これは石崎 (1994) が報告したトムラウシ火山における玄武岩質火山弾濃集層と同様の岩相を示す。

山体中西部、標高 756 m 峰付近で局所的に見られる灰白色のデイサイト質溶岩は、楕円形の苦鉄質包有物 (最大長径 40 cm) を顕著に含む。溶岩は板橋沢最上流部の降下火砕岩を覆うが、その分布は山体中央部に限られ、火砕流堆積物との層序関係は不明である。板橋沢火砕岩類は山体の北東部の林道において松川火砕流堆積物を覆う。

(2) あけら山円頂丘溶岩

標高 820 m のあけら山を形成するデイサイト質円頂丘溶岩である (Fig. 5d)。Ichimura (1952) の大森山溶岩の一部に相当する。溶岩は灰色で、最大長径 25 cm で楕円形の苦鉄質包有物を顕著に含む。円頂丘溶岩はその基底で板橋沢火砕岩類を覆う。

(3) 青麻山円頂丘溶岩類

標高 800 m の青麻山 (Fig. 5d) をはじめ、複数の峰を形成するデイサイト質円頂丘溶岩である。Ichimura (1952) の大森山溶岩の一部に相当する。溶岩は灰色から暗灰色で、最大長径 50 cm で楕円形の苦鉄質包有物を顕著に含む。タイコ沢上流において、円頂丘溶岩の基底部に同質の火砕岩が若干見られる。青麻山の西側の尾根で板橋沢火砕岩類を覆う。本溶岩類について、 0.40 ± 0.02 Ma の K-Ar 年代値が得られている (伴ら, 1992 の Table 1-No. 5)。

(4) 遠森山円頂丘溶岩

標高 560 m の遠森山と、隣接する 570 m 峰を形成するデイサイト質円頂丘溶岩である。溶岩は灰色から暗灰色で、

しばしば楕円形の苦鉄質包有物を含む。Ichimura (1952) の遠森山溶岩の一部に相当する。遠森山山腹で 461 m 峰溶岩類を覆う。

5. 岩屑なだれ堆積物

山体南部および南東部に、岩屑なだれ堆積物が分布する。それぞれ、構成される岩石の種類と分布から、深谷岩屑なだれ堆積物、沢北岩屑なだれ堆積物に分けられる。

(1) 深谷岩屑なだれ堆積物

山体南部の深谷周辺に広く分布しており、明瞭な流れ山地形が見られる。主に前期噴出物を構成する淘汰の悪い安山岩の岩塊と基質からなる露出が見られる。基質は褐色の火山灰からなる。安山岩の岩塊はやや円磨されており、しばしばジグソークラックが見られる。白石牧場周辺の道路沿いの露出においては明瞭なパッチワーク構造が見られる (Fig. 5e)。大網の採石場と板橋沢下流沿いの林道においては、岩相の変化が非常に激しく、元の山体の一部の構造が破壊されずに残った、巨大な塊 (ブロック) が認められる。大網の採石場では、下位の太網層を構成するシルト岩、および曲竹軽石流堆積物をブロックとして取り込んでおり、板橋沢下流沿いの林道では、曲竹スコリア流堆積物、曲竹軽石流堆積物、白色のデイサイト質溶岩をブロックとして取り込んでいる。これらのブロックは最大 8 m 前後で、小規模な正断層が卓越する。本層は大網の採石場において基盤の大網層を不整合に覆う。

(2) 沢北岩屑なだれ堆積物

山体の南東部の沢北周辺に分布する。沢北周辺で明瞭な流れ山地形が見られる。沢北の南方で、淘汰の悪い岩塊と基質からなる露出が見られる。岩塊は 461 m 峰溶岩類を構成する玄武岩質安山岩と、基盤のシルト岩 (最大長径 2 m) からなる。玄武岩質安山岩の岩塊はやや円磨されており、しばしばジグソークラックおよびパッチワーク構造が見られる。基質は褐色の火山灰からなる。沢北の北方では、最大 9 m 程のデイサイト質の岩塊も認められる。沢北岩屑なだれ堆積物に見られる岩塊が、基盤のシルト岩と 461 m 峰溶岩であることから、本層は 461 m 峰溶岩類より上位であると考えられる。

6. 青麻火山の山体発達過程

守屋 (1983) は日本の第四紀火山のうち、161 個の火山について、主に火山地形に基づいて発達史の観点から類型化し、各々の型についてその成長史を一般化した。しかし、青麻火山はこの 161 個に入っていない。守屋 (1983) に従って青麻火山を分類すると、A 型火山 (円錐火山) に相当すると考えられる。A 型火山は次のような 4 つの活動期を経ると考えられている。第 1 期には薄い溶岩流の積み重なりからなる円錐成層火山体が形成される。第 2 期には厚い溶岩流の流出によって鐘状火山体が形成され、馬蹄形カルデラを形成する大規模な山体崩壊が起こる。第 3 期には火砕丘が形成され、火砕流も生じる。第 4 期に小カルデラと溶岩円頂丘が形成される。また、A 型火山は発達段階によってさらに分けられ、第 1 期あるいは第 2 期の段階まで発達

した火山は A₁ 型、第 3 期あるいは第 4 期まで発達した火山は A₂ 型に分類される。

本研究で明らかになった青麻火山噴出物の種類の推移を簡潔にまとめて Figure 6 に示した。前期には始めに、赤松沢溶岩と 461 m 峰溶岩類のような主に薄い溶岩流からなる噴出物、八山火砕流堆積物と松川火砕流堆積物のようなブロック・アンド・アッシュフロー堆積物、鳳倉山溶岩とオナシ沢溶岩のような比較的厚い安山岩質溶岩を噴出した。その後、曲竹スコリア流と曲竹軽石流が噴出した。また、前期噴出物のほとんどが青麻カルデラの外側に分布していることなどから、前期の終わり頃の噴出物で、且つ、爆発的な噴火によるものと推測される曲竹スコリア流堆積物および曲竹軽石流堆積物の噴出に前後して、青麻カルデラの原形が形成されたと考えられる。深谷岩屑なだれ堆積物はそのほとんどが前期噴出物で構成されており、また、その分布が青麻カルデラの南側の開口方向に限られることなどから、青麻カルデラの原形が形成されたことによって不安定になった山体の崩壊によって形成された可能性が最も高い。一方、沢北岩屑なだれ堆積物に含まれる岩塊は、461 m 峰溶岩類、デイサイト質の岩塊（遠森山円頂丘溶岩と同質）及び基盤岩類のシルト岩からなっている。また遠森山の南東の山麓には小規模の崩壊地形が認められる。以上から、沢北岩屑なだれ堆積物は遠森山の南東の山麓部が崩壊して形成されたものと推測される。基盤岩類のシルト岩の岩塊は、流走中に取り込まれたものと思われる。崩壊の時期は 461 m 峰溶岩類よりは新しいことは確かであるが、その正確な時期は不明である。後期には始めに、板橋沢火砕岩類が噴出し、その後、あけら山円頂丘溶岩、青麻山円頂丘溶岩、遠森山円頂丘溶岩が噴出して、少なくとも 3 つの溶岩円頂丘を形成した。青麻火山の発達過程を守屋 (1983) の円錐火山の一般的なそれと比較すると、初期に薄い溶岩流が噴出し、その後厚い溶岩流が流出、馬蹄形カルデラを経て最後に溶岩円頂丘が形成されるという点で、類似性が認められる。スコリア流や軽石流が、山体崩壊以前に生じ

ていたことや、火砕丘が認められないことなどの相違点も認められるが、大きく見ると、青麻火山の発達経路は、守屋 (1983) による A₂ 型火山の発達経路に対応されると考えられる。

一方、現存する青麻火山噴出物の体積は約 4.4 km³ であり、守屋 (1983) の示す A₂ 型火山の噴出物量の平均値 62.4 km³ と比較して圧倒的に少ない。近年活発な火山活動を示す有珠火山に代表されるような a₂ 型火山（大カルデラに伴う円錐火山で、発達経路は A₂ 型火山と同じ）は、噴出物量の平均値が 6.3 km³（守屋, 1983）であり、青麻火山のそれと近い。推測の域を出ないが、青麻火山の下位に大カルデラ火山が伏在している可能性が指摘できる。大カルデラ火山には一般に、カルデラ中に堆積した湖成層が見られるが、青麻火山の場合、その基盤岩の一部は湖成層と考えられるものである（大網層および松川層）。また、同じ青麻一恐火山列に属する七ツ森火山について、最近、長谷中・青木 (1995) は、現在の山体が形成される以前に、従来知られていなかった大カルデラが存在していたことを明らかにした。青麻火山の下位に大カルデラが存在していたかどうかを検討するためには、さらなる調査が必要である。

III. 岩石記載

1. 岩石記載概要

Table 1 に、各ユニットを構成する岩石の顕微鏡記載の結果を示す。青麻一恐火山列の特徴の一つは、普通角閃石安山岩を産することである（中川ら, 1986）。青麻火山における安山岩の活動は前期に限られ、普通角閃石安山岩は前期の終わり頃の噴出物においてのみ見出される。また前期噴

Table 1. Modal composition of representative rocks from the Aoso volcano

Stage	Geological unit	Pl	Qtz	Hbl	Opx	Cpx	Ol	Opq
Later	Mafic inclusion	±	-	-	-	-	-	-
	Mafic inclusion	6.7	±	-	-	-	±	-
	Tohmoriyama LD	27.6	-	-	1.0	0.4	-	1.1
	Aosoyama LD	26.1	-	-	1.5	0.5	-	0.9
	Akerayama LD	24.9	2.5	-	0.7	±	-	1.5
	Itahashizawa P	24.8	7.0	1.1	2.4	-	±	0.8
	Magatake PmF	6.9	0.5	5.3	0.8	1.1	-	1.5
	Magatake ScF	22.5	-	-	4.0	4.7	-	1.4
	Onashizawa L	32.5	-	-	4.2	8.1	-	1.5
	Takokurayama L	28.9	-	-	4.1	9.1	-	1.8
Earlier	Matsukawa PF	32.7	-	-	3.3	5.3	±	1.4
	Yatsuyama PF	27.0	-	-	4.0	5.9	±	1.0
	461m peak L.P	24.9	-	-	3.4	4.9	0.7	0.7
	Akamatsuzawa L	23.3	-	-	3.3	4.9	0.9	0.7
	±: < 0.3 vol%							

Values are volumetric percentages of constituent minerals. Abbreviations of the geological units are the same as in Figure 4. Pl, plagioclase; Qtz, quartz; Hbl, hornblende; Opx, orthopyroxene; Cpx, clinopyroxene; Ol, olivine; Opq, opaque minerals.

	Erupted rocks	Phenocrystic assemblage	SiO ₂ (wt%)
Later stage (Post caldera)	Lava domes	Pl, Opx, Cpx, Opq Pl, Qtz, Opx, Cpx, Opq	64.4-67.0
	Pyroclastic rocks	Pl, Qtz, Hb, Opx, Ol, Opq	67.9-69.5
Earlier stage	Pumice flow dep.	Pl, Qtz, Hb, Opx, Cpx, Opq	62.1-62.3
	Scoria flow dep.		60.2
	Thick lava flow	Pl, Opx, Cpx, Opq	59.0-59.9
	Block and ash flow		57.9
	Thin lava flow	Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	54.7-55.3

Fig. 6. Temporal variation of mode of emplacements, phenocrystic assemblages, and SiO₂ compositions of the rocks from the Aoso volcano.

出物は石基に斜方輝石を含み、すべてハイパーシン質系列 (Kuno, 1950) である。さらに、前章で述べた地質ユニット毎に詳しく岩石記載を行ったところ、多くのユニットで特有の岩型が見られることが判明した。

前期噴出物の赤松沢溶岩と 461 m 峰溶岩類は、かんらん石斜方輝石単斜輝石玄武岩質安山岩である。八山火砕流堆積物と松川火砕流堆積物は、かんらん石含有斜方輝石単斜輝石安山岩である。風倉山溶岩とオナシ沢溶岩、および曲竹スコリア流堆積物は、斜方輝石単斜輝石安山岩である。曲竹軽石流堆積物は、石英斜方輝石単斜輝石普通角閃石安山岩である。

後期噴出物の板橋沢火砕岩類は、かんらん石含有普通角閃石斜方輝石石英デイサイトである。あけら山頂丘溶岩は単斜輝石含有斜方輝石石英デイサイトである。青麻山頂丘溶岩と遠森山頂丘溶岩は、単斜輝石斜方輝石デイサイトである。苦鉄質包有物は、石英かんらん石含有玄武岩質安山岩および安山岩であり、斑晶量が他の岩型に比べて少ない。

2. 前期噴出物

前期噴出物は玄武岩質安山岩から安山岩よりなる。前期噴出物に見られる斜長石は全般的に清澄なものと蜂の巣状構造を持つものが共存しており、いずれも顕著な累帯構造を持つ。普通角閃石、斜方輝石、単斜輝石は自形から半自形で、かんらん石は自形のものが少ない。以下に岩型ごとにその特徴を記す。

(1) 赤松沢溶岩・461 m 峰溶岩類

赤松沢溶岩と 461 m 峰溶岩類は斑晶として、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石、不透明鉱物を含む。斜長石 (最大 2.6 mm) は自形から半自形で累帯構造が見られ、清澄なものと蜂の巣状構造を持つものが見られる。赤松沢溶岩では斜長石の累帯構造と調和的な汚濁帯を持つものもよく見られる。斜方輝石 (最大 2.7 mm) と単斜輝石 (最大 2.7 mm) はそれぞれ自形から半自形を示す。かんらん石 (最大 1 mm) は自形から半自形を示し、周縁はイデイングサイト化している。赤松沢溶岩のかんらん石にはまれに斜方輝石の反応縁が見られる。斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物からなる集斑晶がよく見られる。石基は填間状組織を示し、針状から短冊状の斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物が認められる。

(2) 八山火砕流堆積物・松川火砕流堆積物

八山火砕流堆積物と松川火砕流堆積物は斑晶として、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物を含む。また八山火砕流堆積物と松川火砕流堆積物はかんらん石斑晶を僅かに含む。斜長石 (最大 4.7 mm) は自形から半自形で累帯構造が見られ、清澄なものと蜂の巣状構造をもつものが見られる。斜方輝石 (最大 2.8 mm) と単斜輝石 (最大 2.6 mm) は自形から半自形を示す。かんらん石 (最大 1 mm) は半自形を示し、周縁部はイデイングサイト化している。石基は填間状組織を示し、針状から短冊状の斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物が認められる。

(3) 風倉山溶岩・オナシ沢溶岩・曲竹スコリア流堆積物

風倉山溶岩とオナシ沢溶岩、および曲竹スコリア流堆積物は斑晶として、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物を含む。斜長石 (最大 3.1 mm) は自形から半自形で累帯構造が見られ、清澄なものと蜂の巣状構造を示すものが見られる。斜方輝石 (最大 3 mm) と単斜輝石 (最大 2.6 mm) は自形から半自形を示す。斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物からなる集斑晶がよく見られる。石基は風倉山溶岩とオナシ沢溶岩が填間状組織を示し、針状から短冊状の斜長石、斜方輝石、単斜輝石、粒状の不透明鉱物が認められる。曲竹スコリア流堆積物はハイロオフィティック組織を示す。

(4) 曲竹軽石流堆積物

曲竹軽石流堆積物は斑晶として、斜長石、石英、普通角閃石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物を含む。清澄なものと蜂の巣状構造を持つものが見られる斜長石 (最大 1.2 mm) は、多くのものが破片状を示している。石英 (最大 2.2 mm) は融食形を示し、しばしば斜長石の微斑晶を包有する。普通角閃石 (最大 4 mm) は自形から半自形で、まれに斜長石の微斑晶を包有する。斜方輝石 (最大 1.5 mm) と単斜輝石 (最大 2 mm) は自形から半自形を示す。斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物からなる集斑晶がよく見られる。石基はハイロオフィティック組織を示す。

また、本堆積物中にしばしば見られる縞状軽石の黒色部の斑晶および組織は、下位のスコリア堆積物と同様である。

3. 後期噴出物

後期噴出物はデイサイトよりなる。斜長石は前期のものと同様に清澄なものと蜂の巣状構造を持つものが共存している。しかし、前期に比べて清澄な斜長石により富む傾向がある。斜方輝石、単斜輝石は周縁部が細粒の不透明鉱物に囲まれている場合が多い。普通角閃石は後期の始め頃の噴出物でのみ見られ、周縁部に顕著なオパサイト縁を持つ。石英は、半自形から融食形を示す。苦鉄質包有物にはしばしば輝石の反応縁をもつ石英斑晶が見られる。

(1) 板橋沢火砕岩類

板橋沢火砕岩類は、斑晶として主に、斜長石、石英、普通角閃石、斜方輝石、不透明鉱物を含む。かんらん石は輝石の反応縁を伴っており、斑晶はごく希である。斜長石 (最大 3 mm) は自形から半自形で累帯構造を示す。清澄なものが卓越するが、蜂の巣状構造を持つものと、まれに累帯構造と調和的な汚濁帯を持つものも見られる。石英 (最大 2.1 mm) は半自形から融食形を示す。普通角閃石 (最大 1.2 mm) は自形から半自形を示し、オパサイト縁を持つ。斜方輝石 (最大 2 mm) は自形から半自形を示し、周縁部が変質を受けている。しばしば見られる集斑晶は、斜長石、普通角閃石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物からなる。石基はハイロオフィティック組織を示す。

(2) あけら山頂丘溶岩

あけら山頂丘溶岩は斑晶として、斜長石、石英、斜方

輝石、不透明鉱物を含む。単斜輝石の斑晶は希である。斜長石 (最大 6 mm) は自形から半自形で累帯構造を示す。清澄なものが卓越し、しばしば蜂の巣状構造を示すものが見られる。石英 (最大 1.5 mm) は融食形を示す。まれに輝石の反応縁を持つものが見られる。斜方輝石 (最大 0.9 mm) は自形から半自形を示し、周縁部は変質を受けている。しばしば、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物からなる集斑晶が見られる。石基はハイアロオフィティック組織

を示す。

(3) 青麻山門頂丘溶岩・遠森山門頂丘溶岩

青麻山門頂丘溶岩と遠森山門頂丘溶岩は斑晶として、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、不透明鉱物を含む。斜長石 (最大 3 mm) は自形から半自形で累帯構造を示し、清澄なものと蜂の巣状構造を示すものが見られる。斜方輝石 (最大 2.5 mm) と単斜輝石 (最大 3 mm) は自形から半自形を示し、周縁部は変質を受けている。しばしば、斜長石、斜方

Table 2. Major element chemical composition of the rocks from Aoso volcano

Geological unit	Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
M.I. (Aosoyama LD)	991106-4	57.28	1.21	17.54	9.81	0.20	3.18	7.28	2.89	0.46	0.14
M.I. (Aosoyama LD)	991106-6	54.53	1.36	16.37	11.90	0.22	3.99	7.99	3.07	0.55	0.02
M.I. (Aosoyama LD)	000730-9	57.48	1.10	16.94	10.13	0.20	3.01	7.53	3.19	0.27	0.16
M.I. (Akerayama LD)	991106-11	53.75	1.13	18.51	10.18	0.18	5.12	7.78	2.62	0.54	0.18
M.I. (Itahashizawa P)	990528-6	54.14	0.95	18.05	10.03	0.17	4.61	8.86	2.64	0.42	0.13
M.I. (Itahashizawa P)	990609-10	54.46	1.01	18.71	10.15	0.18	4.33	8.15	2.63	0.27	0.12
M.I. (Itahashizawa P)	990609-12	54.01	1.03	18.90	10.23	0.18	4.50	8.13	2.54	0.36	0.11
Tohmoriyama LD	000730-8	64.89	0.72	17.69	5.31	0.12	1.49	5.20	3.71	0.73	0.12
Aosoyama LD	990520-1	66.83	0.71	16.59	4.54	0.13	1.29	4.68	4.07	1.02	0.15
Aosoyama LD	991106-3	65.65	0.70	16.89	4.75	0.12	1.24	5.61	3.96	0.95	0.14
Aosoyama LD	000730-10	64.40	0.71	17.26	5.70	0.13	1.49	5.75	3.74	0.67	0.15
Akerayama LD	991106-10	66.63	0.64	15.31	5.25	0.12	1.84	5.04	3.97	1.07	0.12
Akerayama LD	991106-12	67.04	0.65	15.72	5.10	0.12	1.78	4.62	3.87	0.99	0.11
Itahashizawa P	990609-8	68.88	0.64	16.54	4.57	0.12	1.55	3.16	3.61	0.85	0.08
Itahashizawa P	990609-11	68.24	0.58	15.60	4.57	0.12	1.63	4.14	4.07	0.94	0.11
Itahashizawa P	990609-7	69.21	0.59	15.55	4.75	0.12	1.52	3.30	3.82	1.05	0.09
Itahashizawa P	990609-14	69.36	0.57	15.42	4.29	0.12	1.42	3.70	4.03	0.99	0.10
Itahashizawa P	990702-4	69.72	0.53	15.40	3.92	0.11	1.17	3.80	4.14	1.12	0.09
Itahashizawa P	990602-3	69.45	0.55	15.35	4.04	0.11	1.41	3.93	4.01	1.07	0.08
Itahashizawa P	990926-6	68.65	0.61	15.77	4.80	0.12	1.37	3.69	3.83	1.05	0.10
Magatake PmF	000502-2	62.29	0.69	16.89	6.62	0.14	2.64	6.73	3.12	0.75	0.12
Magatake PmF	000506-3	62.12	0.72	16.71	6.89	0.17	2.61	6.61	3.26	0.78	0.13
Magatake-ScF	991114-3	60.22	0.75	16.59	7.34	0.15	3.36	7.62	3.17	0.68	0.12
Onashizawa L	991114-4	59.85	0.75	16.51	7.60	0.16	3.60	7.62	3.17	0.63	0.12
Onashizawa L	991103-9	59.83	0.77	16.74	7.73	0.15	3.60	7.32	3.14	0.61	0.12
Onashizawa L	991002-8	59.20	0.76	16.74	7.85	0.16	3.58	7.89	3.09	0.60	0.12
Takokurayama L	990926-3	58.97	0.86	16.75	8.38	0.17	4.19	7.04	2.81	0.72	0.11
Takokurayama L	990926-2	59.14	0.78	17.17	7.87	0.16	3.63	7.49	2.94	0.71	0.11
Matsukawa PF	991204-1	58.45	0.77	16.86	8.72	0.15	3.68	7.82	2.81	0.62	0.12
Yatsuyama-PF	990702-3	57.87	0.80	18.18	7.86	0.16	3.74	8.16	2.89	0.23	0.11
461m peak L.P	990622-9	55.34	0.85	17.55	9.22	0.17	4.91	8.86	2.56	0.43	0.11
461m peak L.P	991114-5	54.66	0.93	18.24	9.68	0.17	5.22	8.46	2.35	0.20	0.08
461m peak L.P	991114-6	54.88	0.87	17.58	9.40	0.17	5.18	8.87	2.55	0.38	0.11
Akamatsuzawa L	990706-7	54.85	0.99	18.51	9.92	0.19	5.32	7.56	2.34	0.23	0.10
Fukaya DA	991030-9	60.86	0.71	16.66	7.20	0.16	3.05	7.27	3.30	0.66	0.12
Fukaya DA	990622-1	60.31	0.78	16.87	7.58	0.15	3.47	7.34	2.83	0.55	0.12
Fukaya DA	990609-21	57.11	0.85	17.80	8.57	0.16	4.35	7.82	2.82	0.41	0.12
Fukaya DA	991001-4	57.99	0.88	18.27	8.60	0.17	4.06	6.59	2.84	0.46	0.12
Fukaya DA	990622-7	56.35	0.87	17.28	8.80	0.16	4.75	8.59	2.76	0.35	0.10
Fukaya DA	000506-1	64.78	0.64	16.83	5.97	0.14	1.67	5.55	3.45	0.84	0.11

(wt%)

The totals of the compositions are normalized values (total=100 wt%). Abbreviations of the geological units are the same as in Figure 4.

輝石, 単斜輝石, 不透明鉱物からなる集斑晶が見られる。石基はガラス基流晶質からハイロオフィティック組織を示す。

(4) 苦鉄質包有物

苦鉄質包有物は斑晶として, 斜長石, かんらん石, 不透明鉱物を含むものと, 斜長石と不透明鉱物を含むものがあり, 前者では, まれに輝石の反応縁を持つ石英斑晶が見られる。斜長石 (最大 2 mm) は自形から半自形で累帯構造を示し, 累帯構造と調和的な汚濁帯を持つものが顕著に認められる。また清澄なものや蜂の巣状構造を持つものが少量認められる。かんらん石 (最大 1 mm) は自形から半自形で, 周縁部はイディングサイト化している。また包有物は空隙が非常に多く, その中に二次鉱物としてトリディマイトとクリストバライトが見られる。苦鉄質包有物の石基は填間状組織を示し, ガラスの他に短冊状の斜長石, 針状の斜方輝石および単斜輝石, 粒状の不透明鉱物が認められる。また, 青麻山円頂丘溶岩に含まれる苦鉄質包有物の石基中には, 普通角閃石やアノソクレイスを含むものも認められた。普通角閃石 (最大 1.1 mm) は自形から半自形でオパサイト縁は見られない。

IV. 主成分化学組成

1. 分析方法

青麻火山噴出物の各ユニットのうち代表的な 40 試料の全岩主成分化学組成を山形大学理学部の理学電機工業社製 RIX2000 を用いて測定した (Table 2)。X 線管は端窓型 Rh 管球で, 印加電圧と印加電流は 50 kV, 50 mA である。

2. 主成分化学組成の特徴

Gill (1981) の定義に従えば, 苦鉄質包有物を除く青麻火山噴出物は, 低アルカリ・カルクアルカリ系列に属す (Fig. 7a, b)。ハーカー図 (Fig. 8) において, 噴出物の MnO , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , FeO^* , MgO は SiO_2 の増加に伴って減少し, Na_2O と K_2O は SiO_2 の増加と共に増加する。 P_2O_5 は SiO_2 の増加に対して, あまり変化を示さない。以上のような変化は, 青麻-恐火山列の他火山における特徴 (富樫, 1977; 長谷中・青木, 1995) と類似している。

各地質ユニット毎の組成の特徴を詳しく見るため, $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 図を代表例として Figure 9 に示した。この図において, 前期噴出物 ($\text{SiO}_2 = 54.9-62.3\%$) の組成は一連の組成変化経路を示す。前期の各ユニットの SiO_2 組成幅は, 赤松沢溶岩と 461 m 峰溶岩類が $\text{SiO}_2 = 54.7-55.3\%$, 八山火砕流堆積物と松川火砕流堆積物が $\text{SiO}_2 = 57.9-58.5\%$, オナシ沢溶岩と鳳倉山溶岩が $\text{SiO}_2 = 59.0-59.9\%$, 曲竹スコリア流堆積物が $\text{SiO}_2 = \text{約 } 60.2\%$, 曲竹軽石流堆積物が $\text{SiO}_2 = 62.1-62.3\%$ である。後期噴出物 ($\text{SiO}_2 = 64.4-69.7\%$) は板橋沢火砕岩類のデイサイトと, あけら山円頂丘溶岩, 青麻山円頂丘溶岩および遠森山円頂丘溶岩の各組成が, それぞれ別の分布領域を示し, いずれも前期噴出物に比べて高い SiO_2 量を示す。後期噴出物の SiO_2 組成幅は, 板橋沢火砕岩類が $\text{SiO}_2 = 68.2-69.7\%$, あけら山円頂丘溶岩が $\text{SiO}_2 = 66.6-$

Fig. 7. a: $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram. The boundary line between the field of the medium K and low K zones is from Gill (1981).

b: $\text{SiO}_2-\text{FeO}^*/\text{MgO}$ diagram (FeO^* : total iron calculated as FeO). The boundary line between the field of the CA and TH is from Miyashiro (1974).

67.0%, 青麻山円頂丘溶岩が $\text{SiO}_2 = 64.4-66.8\%$, 遠森山円頂丘溶岩が $\text{SiO}_2 = \text{約 } 64.9\%$ である。円頂丘溶岩の組成は板橋沢火砕岩類のデイサイトよりもやや SiO_2 に乏しい。苦鉄質包有物 ($\text{SiO}_2 = 53.8-57.5\%$) は本火山噴出物中, 最も SiO_2 に乏しい岩石を含み, ハーカー図において特有の分布領域を示す。また, 前期噴出物の示す組成変化経路からも外れる。

3. 山体の発達に伴う主成分化学組成の変化

守屋 (1983) は A 型火山の化学組成の変化について SiO_2 量を指標に述べている。A 型火山における SiO_2 量の平均値の変化は, 第 1 期から第 3 期に向かって SiO_2 量が増加し, 第 3 期から第 4 期に向かって減少している。青麻火山における山体の発達に伴う SiO_2 量の平均値の変化は, 58% (前期) - 69% (後期の初め) - 66% (後期の終わり) であり, 守屋 (1983) の示す A 型火山の平均的傾向と調和的である (Fig. 6)。

VI. ま と め

青麻火山の地質と岩石について詳しく調べ, また, その主成分化学組成を層序に従って詳しく検討したところ以下の事が明らかになった。

青麻火山噴出物は, 青麻カルデラの形成期を境に顕著な岩相変化を示す。また, 青麻火山の形成と噴出形態の変化に伴って, 各地質ユニット毎に斑晶組み合わせ, および主成分化学組成が顕著に変化することがわかった。

Fig. 8. Variation diagrams of the rocks from the Aoso volcano. The symbols are the same as in Figure 7.

1. 形成史

前期は始めに、玄武岩質安山岩の薄い溶岩によって山体が形成され、その後、安山岩質の火砕流、厚い溶岩流、スコリア流、軽石流が噴出し、これと前後して青麻カルデラが形成された。また、この時期に岩屑なだれも生じた。後期は始めにデイサイト質火砕岩が噴出し、その後、少なくとも3つのデイサイト質円頂丘溶岩が形成された。また後期のデイサイトは全て、前期では見られなかった苦鉄質包有物を顕著に含む。

青麻火山は、おおよそ A_2 型火山 (守屋, 1983) の発達史をたどることがわかった。

2. 岩型および主成分化学組成

前期の始めの噴出物は、斜方輝石単斜輝石かんらん石玄武岩質安山岩、かんらん石含有斜方輝石単斜輝石安山岩で、その後の噴出物は、斜方輝石単斜輝石安山岩、石英角閃石斜方輝石単斜輝石安山岩である。前期噴出物の SiO_2 組成幅は $SiO_2 = 54.9-62.3\%$ で、主成分化学組成はハーカー図においてほぼ一連の組成変化経路を示す。後期の始めの噴出物は、石英普通角閃石斜方輝石単斜輝石デイサイトで、その後の噴出物は、石英斜方輝石デイサイト、斜方輝石単斜輝石デイサイトである。苦鉄質包有物は斑晶の少ない、石英かんらん石含有玄武岩質安山岩である。後期噴出物の SiO_2 組成幅は、始め頃に噴出した火砕岩が $SiO_2 = 68.2-$

Fig. 9. MgO-SiO₂ diagram of the rocks from the Aoso volcano. Abbreviations of the geological units are the same as in Figure 4.

69.7%で、その後噴出した円頂丘溶岩が SiO₂=64.4-67.0%である。主成分化学組成はハーカー図において、火砕岩類と円頂丘溶岩がそれぞれ特有の分布領域を示す。苦鉄質包有物を除く後期噴出物は、いずれも前期噴出物に比べて高い SiO₂ 量を示す。苦鉄質包有物は SiO₂=53.8-57.5%である。主成分化学組成は特有の組成幅を示し、前期噴出物の組成変化経路からも外れる。

謝 辞 研究を進めるにあたり山形大学理学部の蟹澤聰史教授と田中久雄教授には有益なご助言を頂き、R.W. Jordan 助教授には英文要旨の不備を指摘して頂きました。山形大学理学部の斉藤靖之氏（現：大成基礎設計株式会社）には、岩石薄片の一部を提供して頂きました。また、金沢大学の酒寄淳史博士、弘前大学の佐々木実博士には丁寧な査読をしていただき、原稿を改善する上で非常に有益なご意見を頂きました。以上の方々に深く御礼を申し上げます。

引用文献

- 安藤重幸 (1974): 恵山火山の地質と岩石. 岩鉱, **69**, 302-312.
- 伴 雅雄, 大場與志男, 石川賢一, 高岡宣雄 (1992): 青麻一恐火山列・陸奥燧ヶ岳・恐山・七時雨および青麻火山の K-Ar 年代 東北日本弧第四紀火山の帯状配列の成立時期. 岩鉱, **87**, 39-49.
- Gill, J.B. (1981): *Orogenic andesites and plate tectonics*. pp. 390, Springer-Verlag, Berlin.
- 長谷中利昭, 青木 亮 (1995): セツ森カルデラの提唱とカルデラ形成モデル. 平成 6 年度深田研究助成研究報告, 155-173.
- Ichimura, T. (1952): Geological Investigations on the Zao Volcanoes, Aoso Volcanoes. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **31**, 129-150.
- 石川賢一, 吉田武義, 北川嘉彦, 青木謙一郎, 大上和良 (1985): 東北本州弧 岩手県七時雨火山の地球化学的研究. 核理研研究報告, **18**, 2, 366-378.
- 石崎泰男 (1994): 北海道中央部, トムラウシ火山オコジョ沢グループにおける岩質の変化と玄武岩質火山弾濃集層の生成機構. 地球惑星科学関連学会 1994 年合同大会予稿集, 369.
- 石塚吉浩, 中川光弘 (1999): 北海道北部 利尻火山噴出物の岩石学的進化. 岩鉱, **94**, 279-294.
- 蟹澤聰史 (1985): 仙台市およびその周辺に分布する愛島軽石とその中の深成岩質岩片について一噴出源の推定と極端に K₂O に乏しいトータル岩の存在一. 岩鉱, **80**, 352-362.
- 北村 信 (1985): 土地分類基本調査「白石」, II. 表層地質. 宮城県, 25-36.
- Kuno H. (1950): Petrology of Hakone volcano and adjacent areas. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **61**, 957-1020.
- Miyashiro A. (1974): Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Amer. J. Sci.*, **274**, 321-355.
- 守屋以智雄 (1983): 日本の火山地形. pp. 135, 東京大学出版.
- 中川光弘, 霜鳥 洋, 吉田武義 (1986): 青麻一恐火山列: 東北日本弧火山フロント. 岩鉱, **81**, 471-478.
- 中川光弘, 霜鳥 洋, 吉田武義 (1988): 東北日本弧, 第四紀玄武岩組成の水平変化. 岩鉱, **83**, 9-25.
- 霜鳥 洋, 吉田武義, 青木謙一郎 (1983): 那須北帯・青麻火山の地球化学的研究. 核理研研究報告, **16**, 301-308.
- 富樫茂子 (1977): 恐火山の岩石学的研究. 岩鉱, **72**, 45-60.
- 梅田浩司 (1992): 下北半島 むつ燧ヶ岳火山の地質と岩石記載. 岩鉱, **87**, 420-429.