

南極セールロンダーネ山地周辺の裸氷域に存在する汚れ層

奈良岡 浩¹・矢内桂三²・藤田秀二³

Dirt Bands in the Bare Ice Area around the Sør Rondane Mountains in Queen Maud Land, Antarctica

Hiroshi NARAOKA¹, Keizo YANAI² and Shuji FUJITA³

Abstract: Dirt bands were observed on the surface of the bare ice fields around the Sør Rondane Mountains during the search for Antarctic meteorites in 1988–1989. Dirt bands were commonly distributed on the bare ice around the mountains, especially in Nansenisen. Dirt bands were collected and filtered after melting. Microscopic observation revealed that dust materials were composed mainly of volcanic glass shards. Five types of volcanic ash were preliminarily clarified with respect to the colors (black, dark gray, gray, reddish brown and pale gray) and sizes (5–50 μm) of the particles. The EPMA chemical analyses indicated that the volcanic glass shards contained 50–70% SiO_2 and belonged to the non-alkaline region considering from the SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) diagram.

要旨: 第29次南極地域観測隊のあすか越冬隊はセールロンダーネ山地周辺の裸氷域における隕石探査の際に、同じ裸氷上において汚れ層を発見採集した。汚れ層は山地周辺の裸氷域に多く存在していたが、ナンセン氷原においてその存在数が多いことが特徴であった。ろ過された試料は大部分が火山ガラスであり、粒径や色から予備的に5種類に区分することができた。EPMA化学分析によると、火山ガラスの SiO_2 は50–70%に分布し、 SiO_2 –($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)比から分析した火山ガラスの大部分は非アルカリ質であることが明らかとなった。

1. はじめに

南極大陸の氷床コアの研究によって、氷床中には過去10数万年前までの火山活動のこん跡である火山灰層が数多く見いだされている（例えば、Gow and WILLIAMSON, 1971; KYLE *et al.*, 1981; PALAIS, 1985）。これら氷床コア中の火山灰層のほか、南極氷床の山脈周辺の裸氷面上には一般に汚れ層として火山灰層が見いだされている。現在まで、これらの汚れ層は火山起源で、一部モレーン起源も含まれると報告されている（KEYS *et al.*, 1977）。最近、南極クイーンモードランド（Queen Maud Land）のやまと山脈（Yamato Mountains）地域（72°S; 35°E）およびビクトリアランド（Victoria Land）のアランヒルズ（Allan Hills）地域

¹ 日本学術振興会特別研究員（筑波大学化学系）。JSPS Fellowships for Japanese Junior Scientists (Department of Chemistry, University of Tsukuba, Tsukuba 305).

² 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, 9–10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

³ 北海道大学工学部応用物理学科。Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060.

(76°40'S; 159°40'E) の裸氷原より汚れ層が採集され、これらはいずれも火山灰と同定された。この火山灰を構成する火山ガラスの化学組成などの研究から、両者は全く起源の異なる火山灰であることが明らかにされた (KATSUSHIMA *et al.*, 1984; NISHIO *et al.*, 1985; FUKUOKA *et al.*, 1987)。また、ルイスクリフ (Lewis Cliff) 地域 (84°17'S; 161°05'E) の裸氷原における隕石探査の際にも火山灰層が発見採集された (KOEBERL *et al.*, 1988)。

氷床中および裸氷上の火山灰層は過去の火山活動を明らかにするだけでなく、過去の気候変化との関係、氷床の流動を解明する上で重要な指標となる。また、これら火山灰層が発見されたやまと山脈、アランヒルズおよびルイスクリフ地域の裸氷上においては多量の隕石が発見されており、南極隕石の落下年代に関して重要な情報を与えると考えられる。

第 29 次南極地域観測隊のあすか越冬隊はクイーンモードランドのセールロンダーネ (Sør Rondane) 山地 (71°-73°S; 21°-29°E) 周辺の裸氷域において組織的な隕石探査を実施したが、この裸氷域においても汚れ層が裸氷上に数多く発見された。今回、隕石探査と並行して汚れ層を採集したので、それらの分布と現場における状況および予備的な化学分析の結果を報告する。

2. 汚れ層の分布と採集

セールロンダーネ山地周辺には広大な裸氷域 (約 7000 km²) が発達し、山地南部の裸氷域 (ナンセン氷原 (Nansenisen)), 東部裸氷域 (バルヒェン山 (Balchenfjelle) 周辺), 西部裸氷域の一部 (ニルスラルセン山 (Nils Larsenfjellet) 西方) において約 2000 個の隕石が発見採集された (奈良岡ら, 1990)。そのうちの大部分 (約 1600 個) はナンセン氷原において発見されている。

図 1a にセールロンダーネ山地と周辺裸氷域の分布状態、隕石探査ルートおよび今回採集したナンセン氷原以外の汚れ層のおおまかな採集地点を示す。図 1b にはナンセン氷原部分の拡大図を示す。汚れ層は山地周辺の裸氷域のいたるところに分布していたが、ナンセン氷原ではその分布数が特に多く、色の濃いものが存在していた。汚れ層は数多く存在し、濃いものについては出来る限り採集したが、発見したすべてを採集することは不可能であった。

山地南部の裸氷域に対して標高の低い (<約 1500 m) 中央部のジェニングス氷河 (Jenningsbreen, 図 1a の ①) とメーフィエル氷河 (Mefjellbreen, 同 ②), 東部のアウストハーマレン (Austhamaren, 同 ③) および北部のベストハウゲン (Vesthaugen, 同 ④) の周辺裸氷域で発見採集された汚れ層がモレーン起源であったことを除くと、採集されたほとんどが火山灰層であった。一般に隕石が発見された裸氷域には火山灰層が存在していた。ニルスラルセン山およびロイサーネ (Røysane, 同 ⑤) のモレーン域において隕石が発見されたが、火山灰層もモレーンと数 m 離れて平行に存在していた、隕石の集積機構と火山灰層が裸表面上に出現する機構にはある程度関連があると考えられるが、バムセ山 (Bamsefjell) 南および A140-A180

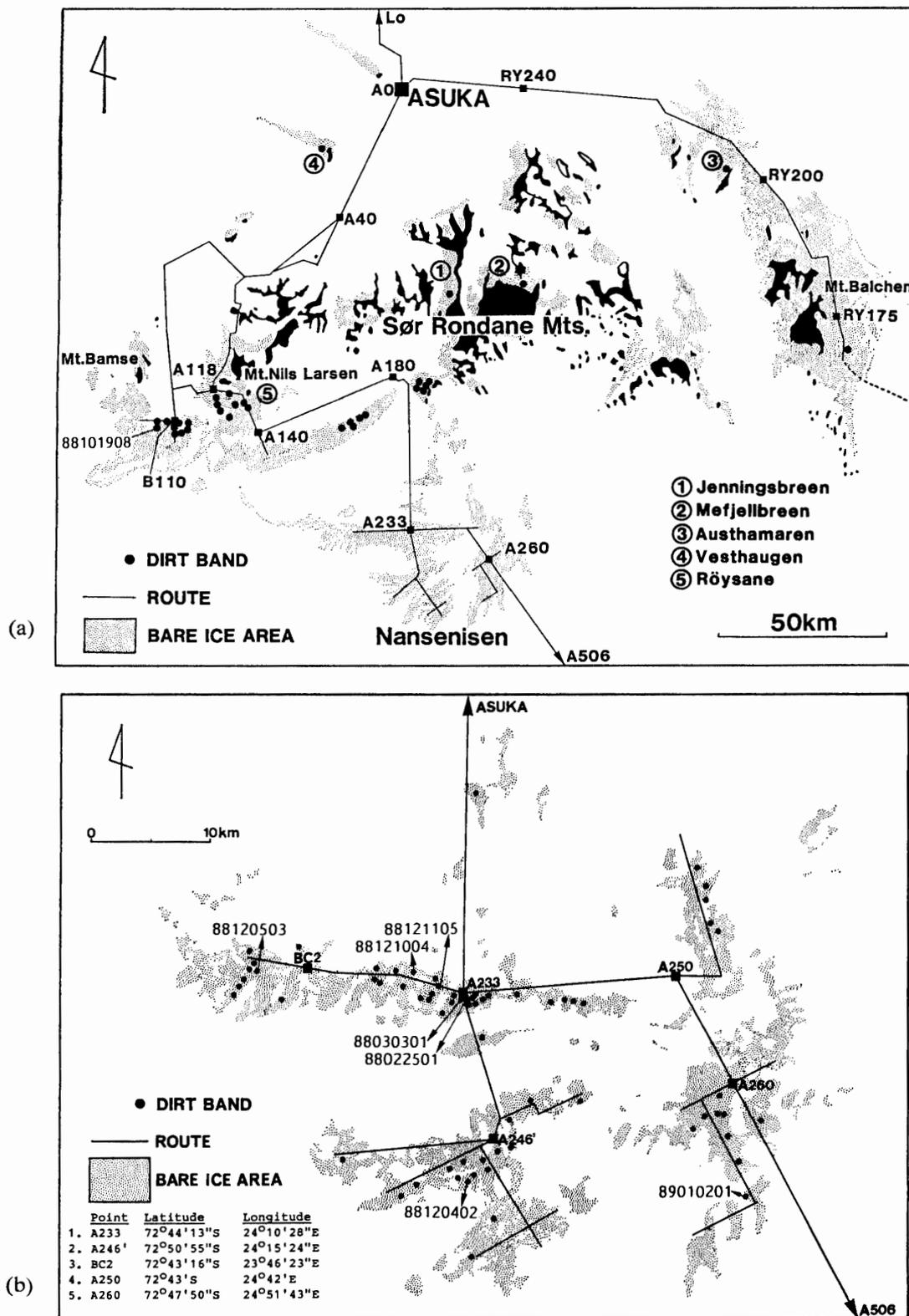


図 1 (a) セールロンダーネ山地地域における汚れ層の分布と隕石探索ルート

(b) ナンセン氷原における汚れ層の分布と隕石探索ルート

Fig. 1. (a) Location of dirt bands and meteorite search routes around the Sør Rondane Mountains.

(b) Location of dirt bands and meteorite search routes in Nansenisen.

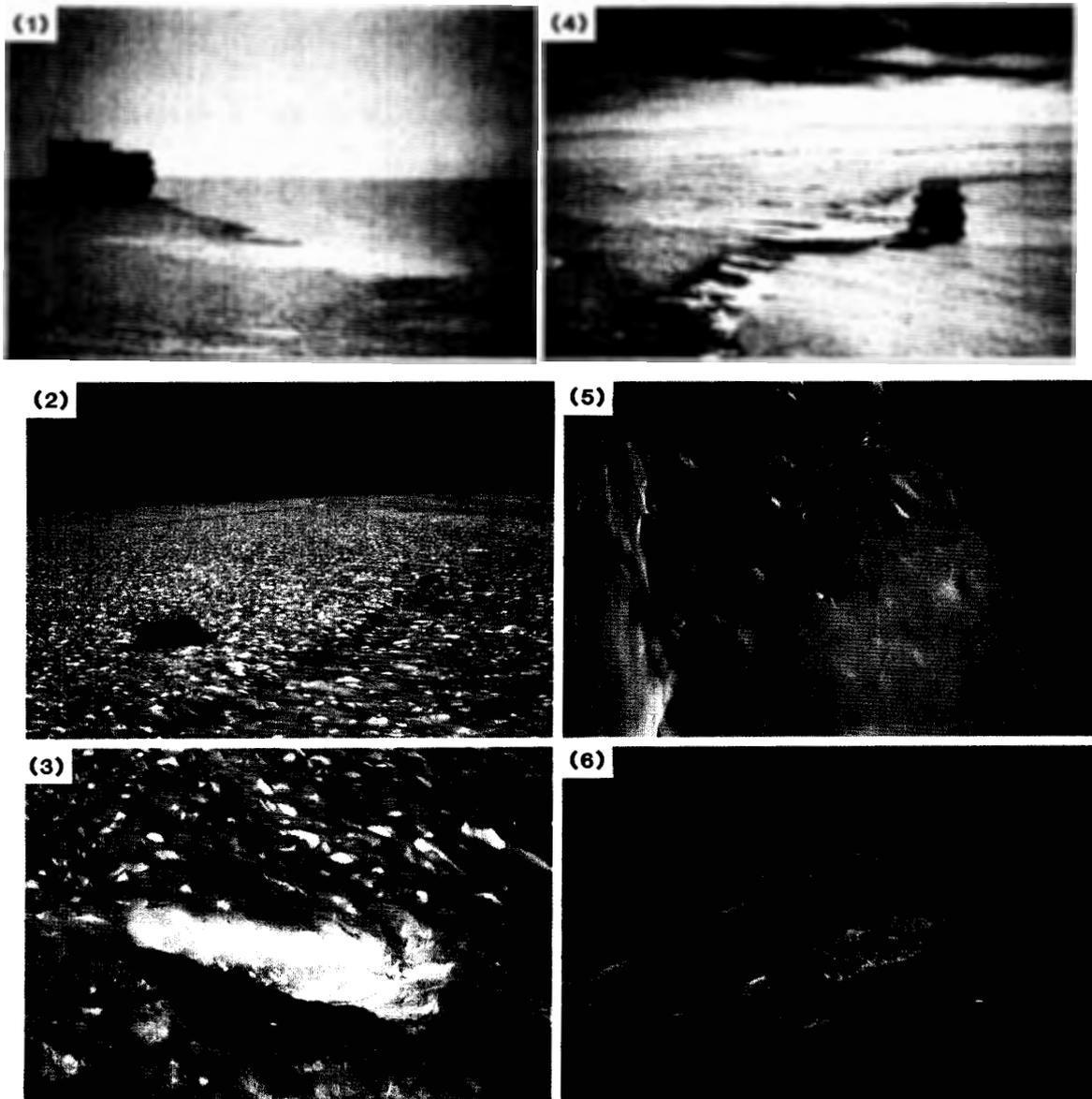


図 2 ナンセン氷原における汚れ層の産状
 (1)–(3): A233 地点 (サンプル番号, 88022501 および 88030301)
 (4)–(6): A233 より西約 3 km 地点 (サンプル番号 88121102)

Fig. 2. Field occurrence of dirt bands in Nansenisen.
 (1)–(3): A233 point (sample Nos. 88022501 and 88030301)
 (4)–(6): about 3 km west from A233 (sample No. 88121102)

南約 10 km に連なる広大な裸氷域では全く隕石は発見されなかったが、火山灰層は存在していた。

汚れ層は裸氷面で観察して幅 30–50 cm で直線または曲線状に数 km にわたって連なっているもののほかに、U字型となっているもの、およびところどころに約 3×3 m の広がりとして存在している場合もあり、氷床の流動の複雑性を反映していると考えられる。

汚れ層はハンマーなどで採取され、現場または基地内で融解後、0.45 μm または 0.8 μm の穴径をもったフィルターでろ過された。山地周辺の各地点から採集された汚れ層は合計約

100 試料であった。火山灰であるかモレーンに由来するものであるかはその色や粒子の大きさから容易に判断できた。図 2 にナンセン氷原における汚れ層の産状を示す。A233 地点 (図 2 (1)-(3)) では約 30 m 離れて 2 本の汚れ層が平行に存在していた (図 2 (2))。A233 より西約 3 km 地点 (図 2 (4)-(6)) のものと合わせて、これらの汚れ層は裸氷面上を南北方向に走向していた。また、A233 地点 (図 2 (1)) に存在していた汚れ層に関しては、火山灰を含んだ氷の物性を調べるため、チェーンソーを用いてブロック状 (約 30×30×50 cm) の氷試料を得た。

3. セールロンダーネ山地で採集された火山灰の特徴

ろ過した火山灰試料を色などの外観から分類し、代表的な数種について、光学顕微鏡による観察を行った。その結果、若干の斜長石、輝石などの鉱物片も含まれていたが、ほとんどが火山ガラスからなっていることが明らかとなった。火山ガラスは平均粒径が 5 μm 程度のもから 50 μm まで、色に関しても赤茶色からうすい灰色のものまで存在し、予備的に表 1 のように全部で 5 タイプ (タイプ A-E) に区分した。

タイプ A は 5 タイプのなかで最も多く存在し、色が非常に濃く、火山ガラスの平均粒径も最大である。タイプ B は 2 番目に多く存在し、色は dark gray である。タイプ C は色が gray で 3 番目に多い。A, B, C の 3 タイプで採集した火山灰のほとんどを占める。タイプ D は非常にまれで 1 例しか見つかっていない。色が赤茶色で他の火山灰と異なっている。タイプ E は存在数が少なく、色も白っぽく、平均粒径も非常に小さい。

A233 地点の約 30 m 離れた 2 つの火山灰ガラスは上記の区分では B と E タイプであり、非常に近接した層においても異なるタイプであることが明らかとなった。

表 1 セールロンダーネ山地周辺の裸氷域で採取された汚れ層の代表的タイプ
Table 1. Selected samples of dirt materials in the bare ice around the Sør Rondane Mountains.

Type	Sample	Symbol	Location	Color	Size (μm)
A	88101908	▲	B110 west	black	45
B	88022501	●	A233 south	dark gray	30
C	88120503	△	BC2 west	gray	30
	88121105	□	A233 west		35
	89010201	○	A260 south		15
D	88120402	■	A'246 south	reddish brown	20
E	88030301		A233 south	pale gray	5
	88121004		A233 west		5

4. 火山ガラスの化学組成

区分されたそれぞれのタイプ中の火山ガラスについて、国立極地研究所のX線マイクロアナライザー (EPMA, JCSA-733) を用いて主成分元素の化学分析を行った。その結果を表2に示す。nは分析した火山ガラスの個数を示す。タイプEについては火山ガラスの粒径が小さく、現在のところ適切な分析値は得られていない。

SiO₂ 含量は約 50% から約 70% まで幅広く分布していたが、同一試料中のばらつきは少ない。タイプCに区分した火山灰中の SiO₂ 含量が 66-68% と高く、タイプAとDのそれは約 52% と低い。タイプBのそれは両者の中間である。タイプCの3試料については採集された場所がナンセン氷原の両端と離れていた (約 40 km) にもかかわらず、ほぼ同様な化学組成を示した。また、Dタイプの TiO₂ 含量は他に比較して高い。

SiO₂ 含量に対して、アルカリ金属元素 (Na₂O+K₂O) 含量をプロットする (図3) と、大きく (1) AとDタイプ, (2) Bタイプ, (3) Cタイプの3種にグループ分けされる。しかし、グループ(1)の広がりは大い。図3にアルカリ質と非アルカリ質火山ガラスの区分の境界線 (GONZALES-FERRAN, 1982) をひくと、タイプDの一部が境界線上にプロットされるが、大部分の火山ガラスが非アルカリ質であることが明らかとなった。

また、各タイプを FeO-MgO-(Na₂O+K₂O) ダイアグラム (図4) にプロットすると、タイプA, B, Cはおおむね一つの分化曲線上に乗るような変化を示す。そして、この変化曲線は South Sandwich 諸島のものとよく似ている。しかし、DタイプとAタイプの一部は前者とは明瞭に異なり、アランヒルズの火山灰に近く、McMurdo Volcanic Group や South Shetland 諸島の領域に入る (KATSUSHIMA *et al.*, 1984; Fig. 7)。

表2 セールロンダーネ山地周辺で採取された火山ガラスの平均化学組成

Table 2. Average chemical compositions of volcanic glass shards distributed around the Sør Rondane Mountains. n; the number of glass shard analyzed. σ ; standard deviation.

Type Sample	A 88101908	B 88022501	C 88120503	C 88121105	C 89010201	D 88120402
*	n=10 (σ)	n=11 (σ)	n=7 (σ)	n=3 (σ)	n=10 (σ)	n=15 (σ)
SiO ₂	51.92(1.18)	58.42(0.96)	65.98(0.84)	66.63(1.16)	67.98(1.58)	52.35(1.42)
TiO ₂	1.36(0.41)	1.06(0.11)	0.67(0.03)	0.60(0.07)	0.60(0.09)	2.24(0.32)
Al ₂ O ₃	14.66(4.25)	14.32(0.34)	13.97(0.23)	13.98(0.29)	14.04(0.33)	16.01(1.51)
FeO	11.27(2.54)	10.06(0.43)	6.18(0.38)	6.27(1.77)	5.86(0.70)	8.46(1.35)
MnO	0.20(0.06)	0.25(0.05)	0.18(0.04)	0.14(0.03)	0.17(0.05)	0.16(0.06)
MgO	5.78(3.21)	2.49(0.25)	1.07(0.13)	1.18(0.50)	0.92(0.18)	4.01(0.94)
CaO	10.81(1.62)	6.86(0.22)	4.45(0.32)	4.33(1.05)	3.62(0.38)	7.60(1.66)
Na ₂ O	2.70(0.61)	3.03(0.27)	3.37(0.18)	3.32(0.25)	3.31(0.29)	4.68(0.73)
K ₂ O	0.52(0.17)	0.43(0.04)	0.81(0.06)	1.13(0.20)	0.89(0.08)	0.65(0.30)
Cr ₂ O ₃	0.01(0.01)	0.01(0.01)	0.01(0.01)	0.02(0.02)	0.00(0.00)	0.01(0.01)
Total	99.21(2.41)	96.98(1.14)	96.67(0.92)	97.59(2.06)	97.82(0.93)	97.16(1.37)

* n: 分析された火山ガラスの数, σ : 標準偏差.

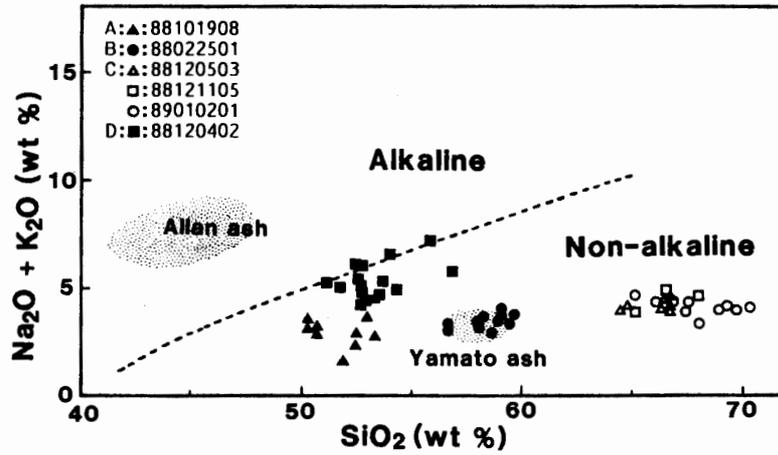


図 3 セールロンダーネ山地地域の裸氷上で採集された火山ガラスの SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ダイアグラム。アルカリ質と非アルカリ質との境界線は GONZALES-FERRAN (1982) による。

Fig. 3. SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ diagram of analyzed volcanic glass shards in the Sør Rondane Mountains. The boundary between alkaline and non-alkaline fields is shown by broken line (GONZALES-FERRAN, 1982).

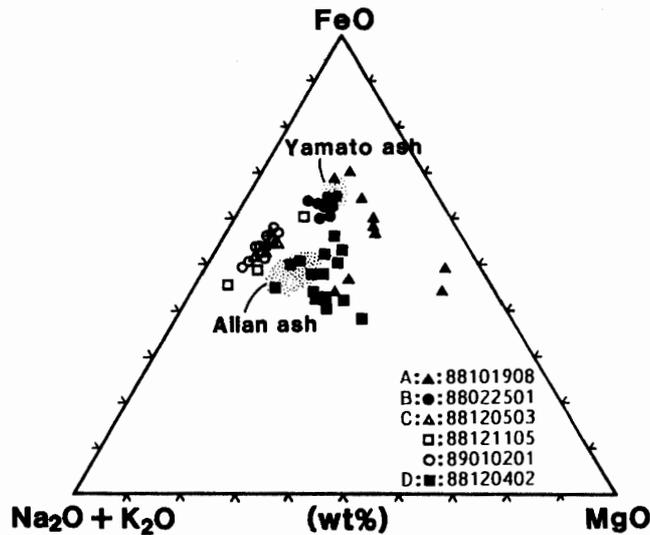


図 4 セールロンダーネ山地地域の裸氷上で採集された火山ガラスの FeO - MgO - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ダイアグラム。

Fig. 4. FeO - MgO - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ diagram of analyzed volcanic shards in the Sør Rondane Mountains.

5. 南極の他地域の火山灰との比較と起源

現在までに南極の3地域の裸氷上で採集された火山灰が報告されている (KATSUSHIMA *et al.*, 1984; KATSUSHIMA and NISHIO, 1985; KOEBERL *et al.*, 1988). これら火山灰中の火山ガラスの粒径はやまと山脈のものが $20\text{--}40\ \mu\text{m}$, アランヒルズが $30\text{--}200\ \mu\text{m}$, ルイスクリフが $10\text{--}600\ \mu\text{m}$ で、一般的にビクトリアランドのものがやまと山脈と比較して大きい。また、

火山ガラスの化学組成は、やまと山脈のものは非アルカリ質であり、アランヒルズおよびルイスクリフのものはアルカリ質である。それらを $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ダイアグラムにプロットすると、やまと山脈およびアランヒルズ地域のもは同一試料では狭い範囲にプロットされたが、ルイスクリフ地域のもは非常にばらつきが大きい。これらの火山灰の供給源として KATSUSHIMA *et al.* (1984) および KATSUSHIMA and NISHIO (1985) はやまと山脈については South Sandwich 諸島、アランヒルズについては McMurdo Volcanic Group を示唆した。また、ルイスクリフについては KOEBERL *et al.* (1988) が北ビクトリアランドの Pleiades との関連を強く示唆している。

セールロンダーネ山地の火山ガラスは 5-50 μm であり、やまと山脈のものと同様に大きい火山ガラスは見いだされていない。セールロンダーネ山地の火山ガラスは大部分が非アルカリ質であり、さらに同一試料では狭い範囲に集中する。これらの特徴はやまと山脈のものと同様によく一致している。セールロンダーネ山地とやまと山脈が約 400 km しか離れていないことも考えると、両者の火山灰の類似性が示唆される。特に B タイプの火山ガラスの平均化学組成はやまと山脈のものと同様に類似しており、 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ダイアグラムにおいても重なってプロットされる。しかし、A と D タイプのように SiO_2 が少なく、 TiO_2 に富む火山ガラスはやまと山脈地域には今のところ確認されていない。

セールロンダーネ山地とやまと山脈で採集された火山灰は、火山ガラスの粒径および化学組成の類似性などから同一起源である可能性が非常に高い。前述のようにセールロンダーネ山地のものについても South Sandwich 諸島の火山が起源として考えられるが、D タイプのものは $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ダイアグラムでは South Shetland 諸島のものの領域上にプロットされるので、South Shetland 諸島も火山灰の供給源のひとつに加えることができる。このような供給源の推定は図 4 から支持される。

6. おわりに

今後、さらに多くの火山灰試料について詳細な化学分析を行い特徴を明らかにし、やまと山脈周辺や他の火山灰試料との対比を行いたい。また、隕石の集積機構および氷床の流動メカニズムと合わせて、隕石の落下年代を探る上で、個々の火山灰試料について年代決定を行うことが必要である。

謝 辞

隕石探査のあいだに汚れ層の採集を理解し、サポートしていただいた第 29 次あすか越冬隊の各隊員に心から感謝いたします。汚れ層一般に関して国立極地研究所西尾文彦助教授（現北海道教育大学教授釧路分校）より有益な助言をいただき、また、EPMA 分析では国立極地研究所小島秀康博士にお世話になりました。深く感謝いたします。また、28次、29次、

30次観測隊各隊ならびに「しらせ」乗組員のほか、多くの関係者に多大なご協力とご支援をいただきました。記して厚くお礼申し上げます。

文 献

- FUKUOKA, T., ARAI, F. and NISHIO, F. (1987): Correlation of tephra layers in Antarctic ice by trace element abundances and refractive indices of glass shards. *Bull. Volcanol. Soc. Jpn., Ser. 2*, **32**, 103-118.
- GONZALES-FERRAN, O. (1982): The Antarctic Cenozoic volcanic provinces and their implications in plate tectonic processes. *Antarctic Geoscience*, ed. by C. CRADDOK. Madison, Univ. Wisconsin Press, 687-694.
- GOW, A. T. and WILLIAMSON, T. (1971): Volcanic ash in the Antarctic ice sheet and its possible climate implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **13**, 210-218.
- KATSUSHIMA, T. and NISHIO, F. (1985): Volcanic ash in dirt layers from the Allan Hills bare ice area in Victoria Land, Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **39**, 193-208.
- KATSUSHIMA, T., NISHIO, F., OHMAE, H., ISHIKAWA, M. and TAKAHASHI, S. (1984): Composition of dirt layers in the bare ice areas near the Yamato Mountains in Queen Maud Land and the Allan Hills in Victoria Land, Antarctica. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **34**, 174-187.
- KEYS, J. R., ANDERTON, P. W. and KYLE, P. R. (1977): Tephra and debris layers in the Skelton Neve and Kempe Glacier, South Victoria Land, Antarctica. *N. Z. J. Geol. Geophys.*, **20**, 971-1002.
- KOEBERL, C., YANAI, K., CASSIDY, W. A. and SCHUTT, J. W. (1988): Investigation of dust bands from blue ice fields in the Lewis Cliff (Beardmore) area, Antarctica: A progress report. *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites*, **1**, 291-309.
- KYLE, P. R., JEZEK, P. A., MOSLEY-THOMPSON, E. and THOMPSON, L. G. (1981): Tephra layers in the Bird Station ice core and the Dome C ice core, Antarctica, and their climatic importance. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **11**, 29-39.
- 奈良岡浩・矢内桂三・藤田秀二 (1990): 第29次南極地域観測隊セールロンダーネ山地周辺における隕石探査報告 1988-1989. *南極資料*, **34**, 216-224.
- NISHIO, F., KATSUSHIMA, T. and OHMAE, H. (1985): Volcanic ash layers in bare ice areas near the Yamato Mountains, Dronning Maud Land and the Allan Hills, Victoria Land, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, **7**, 34-41.
- PALAI, J. M. (1985): Particle morphology, composition and associated ice chemistry of tephra layers in the Bird ice core: Evidence for hydrovolcanic eruptions. *Ann. Glaciol.*, **7**, 42-48.

(1990年12月28日受付; 1991年1月12日改訂稿受理)