

論文

アジアの氷河上の鉱物粒子と有機物（クリオコナイト）の Sr, Nd 同位体比

永塚尚子^{1)*}, 竹内 望¹⁾, 中野孝教²⁾, 古角恵美²⁾

要 旨

様々な物質の中に広く含まれているストロンチウム (Sr) とネオジム (Nd) の安定同位体比は、その物質の地質起源によって大きく異なり、大気輸送や堆積過程の物理的、化学的条件にも左右されにくいことから、生物地球化学的プロセスを介した物質循環をトレースする有効な方法として広く利用されている。本研究では、アジア高山域の4つの氷河（アルタイ・天山・祁連山・ヒマラヤ）の表面に堆積している物質（クリオコナイト）を化学的に5つの成分（4つの鉱物と有機物）に分離し、それぞれに含まれる Sr, Nd 同位体比の特徴を明らかにすることを目的とした。クリオコナイト中のケイ酸塩鉱物の同位体比は、各成分の中で最も高い値を示し、緯度が高い氷河ほど Sr 比が低くて Nd 比が高いという傾向を示した。その値は、それぞれの氷河周辺のレスや砂漠の砂や河川堆積物の値に近くなった。このことは、各氷河のケイ酸塩鉱物（風送ダストの主成分）の供給源は異なり、それぞれの氷河周辺であることを示している。塩類、炭酸塩、リン酸塩鉱物成分の各同位体比も、それぞれの鉱物の起源となる砂漠や地域の値を反映しており、有機物成分の同位体比は、氷河上の微生物が利用した栄養塩源の鉱物の値を反映していると考えられる。

キーワード：Sr, Nd 安定同位体, 氷河, クリオコナイト, 鉱物粒子, 供給源

Key words: Sr, Nd stable isotopes, glacier, cryoconite, mineral dust, provenance

1. 研究背景・目的

氷河上には雪や氷以外にも様々な物質が存在する。例えば砂漠から風によって運ばれてきたダストなどの鉱物粒子、土壌から運ばれてきた有機物、樹木や草の花粉、氷河上で繁殖している雪氷生物、氷河周辺のモレーンや岩盤からの岩屑、エアロゾルに由来する水溶性の化学物質などである。このような氷河上の物質は、氷河表面に堆積すると、表面のアルベド（光の反射率）を低下させて日射の吸収を増やし、氷河の融解を促進する効果がある (Takeuchi *et al.*, 2001)。また、氷河の涵養域に毎年保存される風送ダストなどの鉱物粒子は、ア

イスコア研究において過去の環境を知るための重要な指標となる (Grousset *et al.*, 1992; Biscaye *et al.*, 1997)。したがって、このような氷河上の物質がどこからどれくらい飛んでくるのかを理解することは、氷河、および周囲の環境を理解するために大きな意味を持っている。その中でも、風送ダストのような鉱物粒子の供給源を特定することは、その特性を理解するうえで非常に重要である。鉱物粒子の供給源特定を行うことができれば、過去の大気循環の変動や、供給源となる場所の環境変動を明らかにすることができるからである。

少量のサンプルでも分析可能なストロンチウム (Sr)、ネオジム (Nd) などの安定同位体を用いた方法は、アイスコア研究に応用可能な供給源特定法の1つである。Sr や Nd はもともと地殻に含まれる元素で、風化によって陸水や海水に溶け出し、さらに生物内にも取り込まれ、地上のさまざ

1) 千葉大学大学院理学研究科

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

* 連絡先

2) 総合地球環境学研究所

〒603-8047 京都市北区上賀茂本山 457-4

まな物体の中に微量に含まれている。Sr の安定同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), また Nd の安定同位体比 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) は, その起源となる地質によって大きく異なっており, また, 物理的, 化学的条件に左右されにくいので, 大気輸送, 堆積の過程において変化することがほとんどない。したがって, その同位体比からこの元素がもともと含まれていた起源を特定することができるのである。この方法は, 今まで主に海底コアやレスなどの研究に利用されてきた。たとえば, Nakano *et al.* (2004) は, 近年, 北京に飛ばされてきているダストの主な供給源は, これまでの研究で主張されてきたタクラマカン砂漠やゴビ砂漠ではなく, 中国北部や北京西部からのものであることを明らかにした。また, アイスコア研究においても, 極域の氷床において利用されている。例えばグリーンランド氷床で掘られた GISP2 のアイスコア中のダストの Sr, Nd 同位体比の分析により, その供給源は大気循環モデルによって予測されていたサハラ砂漠, あるいはアメリカ大陸ではなく, アジアであるということが明らかとなった (Biscaye *et al.*, 1997)。また, 南極では Dome C のアイスコア中のダストの Sr, Nd 同位体比の分析から, その供給源が主にパタゴニアである, ということが明らかになった (Grousset *et al.*, 1992)。

近年, 極域以外の低緯度地域でもアイスコアが掘削されるようになった。山岳アイスコアには極域に比べて多量のダストが含まれており, その供給源を明らかにすることができれば, さまざまな古環境情報を復元できると考えられる。たとえば, アジアの高山域からも, 各地でアイスコアが掘削されているが, アジアの氷河においてダストの供給源が特定できれば, そのダストを運んだ風の輸送経路がわかり, 過去のモンスーンの変動などを明らかにできる可能性がある。また, ダストの量が多いアジアの氷河では, 極域などに比べ, Sr, Nd 同位体比の分析を比較的容易に行える可能性がある。Wu *et al.* (2010) は, 中国, 祁連山脈に位置するドンデ氷帽のアイスコア中ダストの Sr, Nd 同位体比を分析し, その供給源が氷河に隣接するツァイダム砂漠や, それよりもさらに西方に位置するタクラマカン砂漠であることを明らかにしている。

ダストの中でも, 鉱物の種類によって同位体比が異なることが明らかになっている。たとえば, Yokoo (2000) では, 中国の乾燥域の砂漠の砂やレスを化学的に 4 つの成分 (①塩類鉱物, ②炭酸塩鉱物, ③リン酸塩鉱物, ④ケイ酸塩鉱物) に分離したところ, 各成分で同位体比が異なることが報告されている。さらに, 中国天山山脈の氷河表面に堆積する鉱物粒子の Sr, Nd 同位体比を分析した結果, 各成分で同位体比が実際に異なることが明らかになっている (Nagatsuka *et al.*, 2010)。したがって, 鉱物粒子中に含まれる成分ごとの同位体比の特徴をまず把握することが非常に重要である。

Sr, Nd 同位体比は, 氷河上の鉱物粒子だけではなく, 氷河上に生息する雪氷生物の生態の理解にも役立つと考えられる。アジアの山岳氷河には雪氷生物と呼ばれる, 雪や氷の上で生活する特殊な生物が多く生息しており (e.g. Takeuchi *et al.*, 2001; Takeuchi, 2002), 氷河上にはこの雪氷微生物に由来する有機物が多く堆積していることがわかっている (e.g. Takeuchi *et al.*, 2001; Takeuchi, 2002)。Sr は同じアルカリ土類金属であるカルシウム (Ca) とよく似た地球化学的挙動を持つため, Sr 同位体はしばしば Ca の起源トレーサーとして使用される。Ca は生物にとって栄養塩として摂取する必須元素なので, 生物中には摂取した Ca が存在し, その一部は Sr に置換されている。よって, 有機物中の Sr 同位体比を測定すれば生物が利用している Ca の起源を特定することができる (Capo *et al.*, 1998; Yokoo and Nakano, 2001)。氷河上の生物は, 鉱物粒子やその他の大気降下物を栄養塩として使って繁殖すると考えられているが, 詳しいことはまだよくわかっていない。特にアジアの氷河には他の地域の氷河に比べ, 雪氷生物が大量に生息していることが明らかになっている。その考えられる条件の 1 つに栄養塩条件がある。これらの有機物の同位体比を分析すれば, 雪氷生物を介した氷河上の物質循環を明らかにすると同時に, 雪氷生物の生態を解明する手がかりが得られる可能性がある。

氷河上の鉱物粒子や有機物に含まれる Sr, Nd 同位体比に関する情報, とくに鉱物成分や物質ごとの情報はまだほとんどない。氷河に堆積する鉱

物粒子の起源は、アジアの中でも氷河の地理的な位置によって異なる可能性があり、それは鉱物粒子の同位体比に反映されるはずである。氷河による生物活動の違いも、有機物中の同位体比に反映されるかもしれない。氷河上に堆積した鉱物粒子や有機物などの物質は、総称してクリオコナイトと呼ばれており、アジアの氷河にはこのクリオコナイトが特に多く堆積していることが明らかになっている (e.g. Takeuchi *et al.*, 2005)。そこで本研究では、Nagatsuka *et al.* (2010) で分析した天山山脈の氷河に加え、アルタイ山脈、祁連山脈、ヒマラヤ山脈のクリオコナイトについても成分ごとの Sr, Nd 同位体比を分析して比較し、これらアジア高山域の氷河のクリオコナイト中の鉱物粒子と有機物の Sr, Nd 同位体比の特徴を明らかにすることを目的とした。各氷河と物質の同位体比

を決める要因を、鉱物の種類、供給源の違い、および、氷河上の生物活動に注目して考察した。

2. 調査地

分析を行ったのは、ロシア、アルタイ山脈のアッケム氷河 (北緯 $49^{\circ}50'366$, 東経 $86^{\circ}33'443$)、中国、祁連山脈のチーイー氷河 (北緯 $39^{\circ}14'663$, 東経 $97^{\circ}45'309$)、ネパール、ヒマラヤ山脈のヤラ氷河 (北緯 $28^{\circ}14$, 東経 $85^{\circ}36$) の3つのアジアの氷河の消耗域の氷表面で採取したクリオコナイトである。さらに、中国、天山山脈のウルムチ No. 1 氷河 (北緯 $43^{\circ}06$, 東経 $86^{\circ}48$) の値も Nagatsuka *et al.* (2010) より引用し比較した。サンプルを採取した場所の詳細はそれぞれ、Takeuchi *et al.* (2001, 2005, 2006), Takeuchi and Li (2008) に記載されているとおりである。消耗域の氷表面は毎年夏

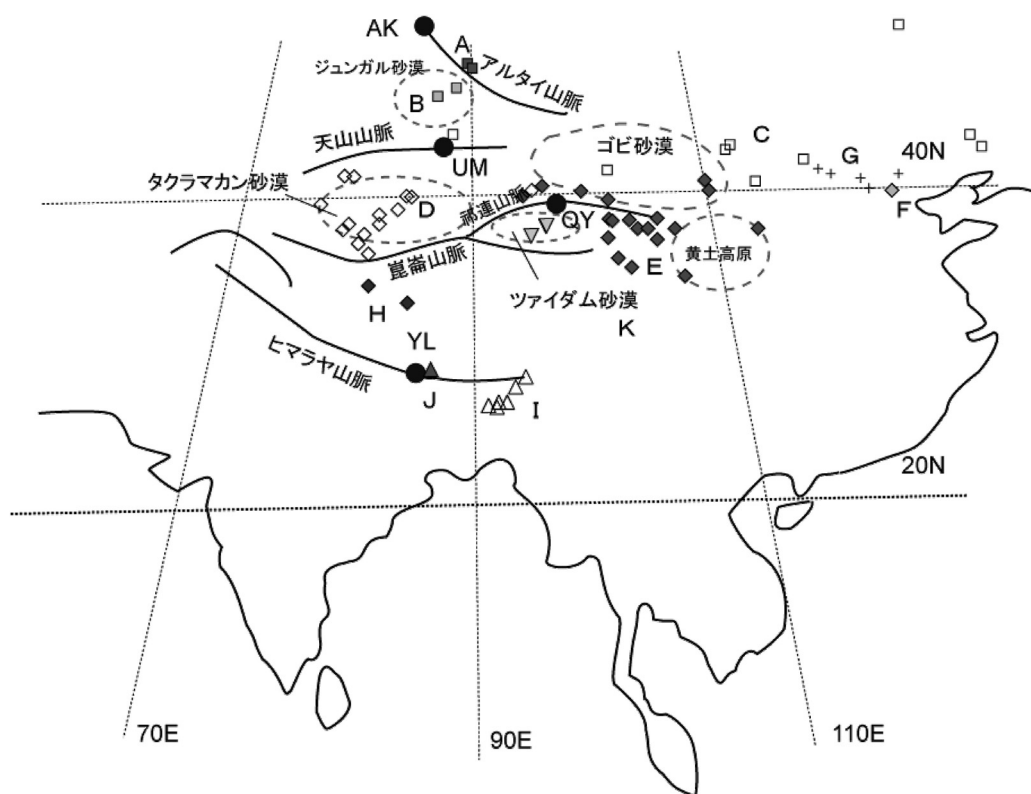


図 1 クリオコナイトの分析を行ったアジアの4つの氷河と、同位体比の比較に用いた氷河周辺の砂漠の砂やレス、堆積物の採取場所 (AK: アッケム氷河, UM: ウルムチ No. 1 氷河, QY: チーイー氷河, YL: ヤラ氷河, A: アルタイ (リン灰石), B: ジュンガル砂漠 (レス), C: 中国北部 (レス & 砂), D: タクラマカン砂漠 (レス & 砂), E: ゴビ砂漠南部-黄土高原 (レス & 砂), F: 北京周辺 (レス), G: 北京西部 (レス & 砂), H: チベット (土壌), I: ヒマラヤ (河川堆積物), J: ヒマラヤ東ロンブク氷河 (アイスコア中ダスト), K: ツァイダム砂漠)。

表 1 アジアの水河のクリオコナイトサンプルの採取場所, 緯度・経度, 採取年月日, 標高.

サンプル採取場所	緯度・経度	採取年月日	標高
アッケム氷河 (AK) (ロシア、アルタイ山脈)	N49°50 E86°33	2002, 7/11	2600m
ウルムチ No.1 氷河 (UM) (中国、天山山脈)	N43°06 E86°48	2006, 8/4	3900m
チーイー氷河 (QY) (中国、祁連山脈)	N39°14 E97°45	2002, 9/4	4400m
ヤラ氷河 (YL) (ネパール、ヒマラヤ山脈)	N28°14 E85°36	1997, 9/10	5200m

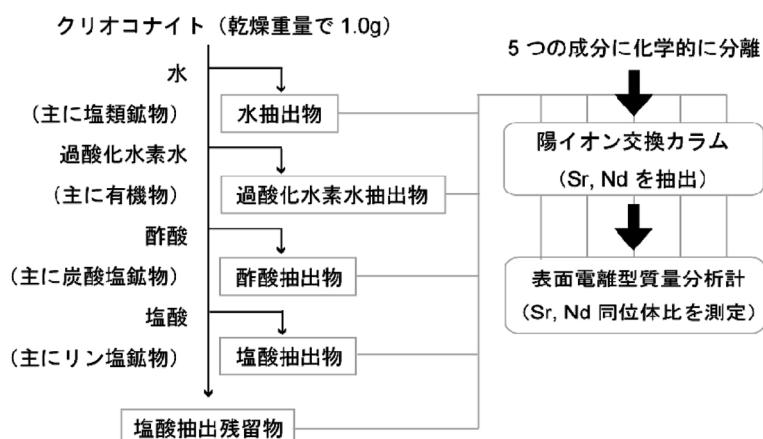


図 2 クリオコナイトの成分分離（連続抽出）の手順.

に露出して融解が進むため、この表面のクリオコナイトサンプルは過去数年から数百年間で蓄積されたものであると考えられる。サンプルの詳しい採取方法は、Takeuchi (2002) に記載されているとおりである。サンプルが採取された地点の地図を図1に、また、サンプル採取地点の緯度・経度、採取年月日、標高を表1に示した。

3. 分析手法

3.1 XRD (粉末 X 線回折) 分析

氷河上のクリオコナイトサンプルの鉱物組成を明らかにするため、XRD (粉末 X 線回折) による鉱物の同定を行った。サンプルは 60℃ の乾燥機で乾燥させ、めのう乳鉢で細かくすりつぶし、電圧 40 kv, 電流 25 mA の条件下で (RIGAKU 製 Geigerflex RAD 11-B) 分析した。鉱物の同定には XRD 解析ソフトの MacDiff を用いた。

3.2 クリオコナイトの成分分離（連続抽出）

3.2.1 連続抽出手順

クリオコナイト中の物質の種類による Sr, Nd の同位体比を測定するため、本研究ではクリオコナイトを、酸性度の異なる 4 つの溶液を使って化学的に分離した。抽出の詳細は Yokoo (2000) および Nagatsuka *et al.* (2010) の通りである。用いた溶液は、水 (超純水), 10% の過酸化水素水, 5% の酢酸, 20% の塩酸であり、これによって、それぞれ、①水抽出物, ②過酸化水素水抽出物, ③酢酸抽出物, ④塩酸抽出物, ⑤塩酸抽出残留物が得られた。各抽出物はクリオコナイトに含まれる ①塩類鉱物, ②有機物, ③炭酸塩鉱物, ④リン酸塩鉱物, ⑤ケイ酸塩鉱物に対応することがわかっている (Yokoo, 2000)。抽出の流れを図2に示す。

同位体比の測定には、サーモフィッシャーサイエンティフィック社製表面電離型質量分析装置

TRITON を用いた。各実験室で測定される Sr, Nd 同位体比の分析誤差を補正するために、分析の際には国際標準試料 (スタンダード) が用いられる。Sr 同位体比の標準試料として NBS987 を、また、Nd 同位体比には Jndi-1 をそれぞれ使用した。今回の分析で測定された標準試料の値は、NBS987 の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の値は $0.710256 \sim 0.710270$ 、Jndi-1 の $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ の値は $0.512098 \sim 0.512101$ であった。一般的な NBS987 の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の値は $0.71014 \sim 0.71033$ 程度と報告されており、本研究のスタンダードの値はこの範囲内であった。なお、Nd 同位体比は、標準物質の Nd 同位体比からの差を表す $\epsilon\text{Nd}(0)$ として表記する (下式(1))。

$$\epsilon\text{Nd}(0) = \left(\frac{Nd_{\text{sample}}}{Nd_{\text{CHUR}}} - 1 \right) \times 10^4 \quad (1)$$

この式(1)で使用する CHUR (コンドライト隕石) の Nd 比は、Faure (1986) で与えられている $\epsilon\text{Nd}(0) = 0.512638$ を用いる。

4. 結 果

4.1 XRD

各氷河のクリオコナイトに含まれている鉱物粒子の XRD 分析を行った結果を図3に示す。この図は XRD 分析によって得られた鉱物の回折線を表している。ウルムチ No. 1 氷河の回折線は Nagatsuka *et al.* (2010) の結果である。分析の結果、鉱物粒子の回折線は、基本的には各氷河で比較的良く似た位置にピークを示した。しかし、ヤラ氷河では、その他の3つの氷河では見られない位置にピークを示した。

回折線のピークの位置から、クリオコナイトに含まれる鉱物を同定した結果、すべての氷河のクリオコナイトに、石英 (26.7°)、斜長石 (28.2°)、および、粘土鉱物である緑泥石 (6.2° , 12.5°)、イライト (8.9°)、カオリナイト (12.5° , 25.2°) が含まれていることがわかった。また、ヤラ氷河のクリオコナイトには、それらの鉱物に加えてカリ長石 (27.2°) が含まれていることがわかった。

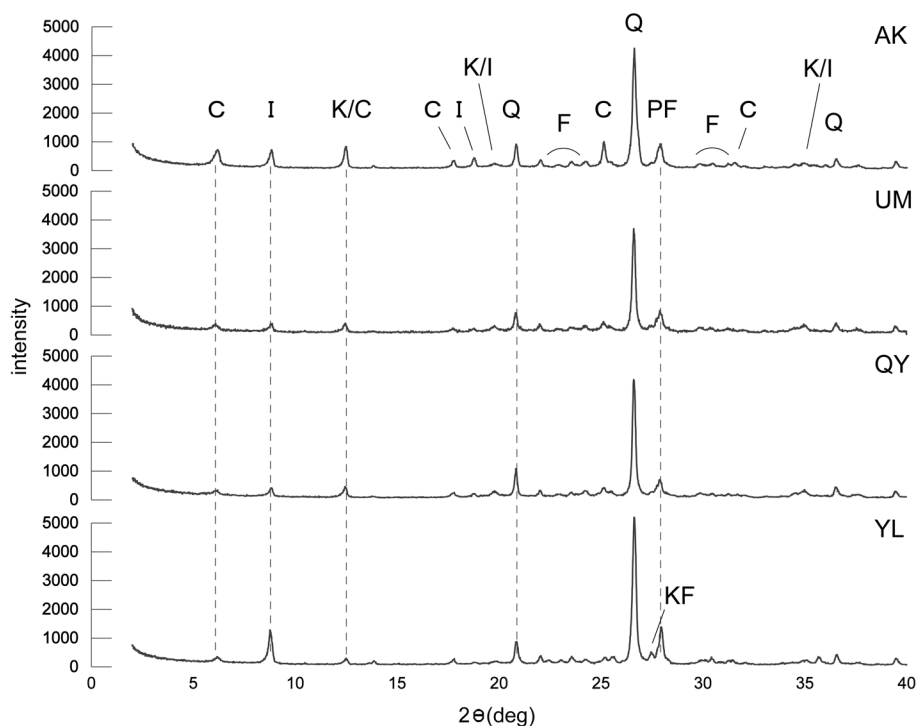


図3 アジアの氷河のクリオコナイトに含まれる鉱物粒子の XRD 分析による回折線 (C: 緑泥石, I: イライト, K: カオリナイト, Q: 石英, F: 長石, PF: 斜長石, KF: カリ長石, AK: アッケム氷河, UM: ウルムチ No. 1 氷河, QY: チーイー氷河, YL: ヤラ氷河)。

表 2 アジアのクリオコナイトの分析に用いたサンプルの量（乾燥重量）と連続抽出によって抽出された、各成分の抽出量（乾燥固化重量）および、分析重量に対する抽出物の蒸発残渣重量の割合。ウルムチ No. 1 氷河（UM）は Nagatsuka *et al.* (2010) の結果の平均値。

	サンプル量	水 抽出物	過酸化水素水 抽出物	酢酸 抽出物	塩酸 抽出物	塩酸抽出 残留物
	(g)	(g) (%)	(g) (%)	(g) (%)	(g) (%)	(g) (%)
アッケム氷河 (AK)	1.007	0.002 0.2	0.012 1.2	0.001 0.1	0.063 6.3	0.925 92.2
ウルムチ No.1 氷河 (UM)	0.999	0.004 0.4	0.018 1.8	0.017 1.6	0.244 22.8	0.788 73.6
チーイー氷河 (QY)	1.012	0.027 2.7	0.024 2.4	0.015 1.5	0.125 12.5	0.812 81.0
ヤラ氷河 (YL)	1.008	0.005 0.5	0.014 1.4	0.006 0.6	0.137 13.7	0.836 83.8

表 3 アジアのクリオコナイトの各抽出物の Sr 同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)。ウルムチ No. 1 氷河は Nagatsuka *et al.* (2010) の結果の平均値。測定値の下段の値は、有効数字 6 桁で表される測定誤差のうちの下の 2 桁を示す。

	過酸化水素水 抽出物	水抽出物	酢酸抽出物	塩酸抽出物	塩酸抽出 残留物
アッケム氷河 (AK)	0.723070 ± 03	0.710925 ± 04	0.711405 ± 04	0.733020 ± 03	0.714788 ± 03
ウルムチ No.1 氷河 (UM)	0.711184 ± 04	0.710404 ± 03	0.710777 ± 04	0.719115 ± 03	0.721312 ± 03
チーイー氷河 (QY)	0.712891 ± 04	0.711908 ± 04	0.712328 ± 03	0.718170 ± 03	0.725745 ± 03
ヤラ氷河 (YL)	0.727612 ± 04	0.720772 ± 04	0.722424 ± 04	0.735661 ± 03	0.742088 ± 03

4.2 各成分の抽出量

アジアの 4 つの氷河上で採取したクリオコナイトを、連続抽出によって 5 つの成分に化学的に分離した各成分の抽出量とその分析重量に対する割合を表 2 に示す。ウルムチ No. 1 氷河の抽出量は Nagatsuka *et al.* (2010) の結果の平均値である。分析重量に対する抽出物の蒸発残渣重量の割合は、水抽出物で 0.2~2.7%，過酸化水素水抽出物で 1.2~2.4%，酢酸抽出物で 0.1~1.6%，塩酸抽出物で 6.3~22.8%，塩酸抽出残留物で 73.6~92.2%

であった。塩酸抽出残留物の割合は、どの氷河サンプルにおいても、5 つの成分中最も高かった。氷河ごとの各成分の割合の特徴を見ると、チーイー氷河は水抽出物が多く、また、アッケム氷河は塩酸抽出残留物が多く、塩酸抽出物が少なかった。

4.3 Sr 同位体比

クリオコナイトの各抽出物の Sr 同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) を分析した結果を表 3、図 4 に示す。ウルムチ No. 1 氷河の Sr 同位体比は Nagatsuka *et al.* (2010) の結果の平均値である。Sr 同位体比

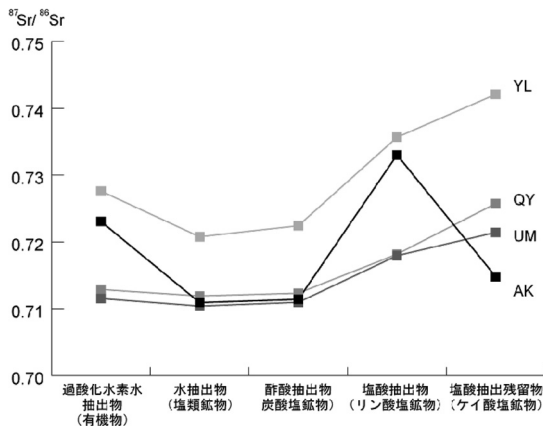


図 4 クリオコナイトの Sr 同位体比のアジアの氷河間での成分ごとの比較 (AK: アッケム氷河, UM: ウルムチ No. 1 氷河, QY: チーイー氷河, YL: ヤラ氷河). ウルムチ No. 1 氷河は Nagatsuka *et al.* (2010) の結果の平均値.

はサンプル全体では 0.710404~0.742088 の値を示した。抽出物ごとの結果を見ると、比較的值が高いのが、塩酸抽出物 (0.718170~0.735661) と塩酸抽出残留物 (0.714788~0.742088) で、反対に値が低いのが、過酸化水素水抽出物 (0.711184~0.727612) と水抽出物 (0.710404~0.720772) と酢酸抽出物 (0.710777~0.722424) であった。また、塩酸抽出残留物では他の抽出物に比べて、氷河による値の差が大きかった。

各抽出物の Sr 同位体比を氷河ごとに比較してみると (表 3, 図 4), ヤラ氷河はどの抽出物においても最も高い値を示すこと, ウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河はどの抽出物でも近い同位体比を示すこと, アッケム氷河は過酸化水素水抽出物, および塩酸抽出物の値が高く, 塩酸抽出残留物の値が低いという, 他の 3 つの氷河とは異なる同位体比の特徴を持つことがわかった。

抽出物ごとに各氷河の Sr 同位体比を比較すると, 過酸化水素水抽出物では, ヤラ氷河が最も高かった (0.727612)。また, アッケム氷河とヤラ氷河は比較的近い値を示した (0.723070, 0.727612)。一方でウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河は比較的低く, 近い値を示した (0.711184, 0.712891)。水抽出物および酢酸抽出物は互いに似た傾向を示し, ヤラ氷河が最も高く (0.720772, 0.722424), 他の 3 つの氷河は比較的低く, 近い値を示した (0.710404~0.711908, 0.710777~0.712328)。塩酸抽出物では, ヤラ氷河が最も高く (0.735661), また, アッケム氷河とヤラ氷河は比較的近い値を示した (0.733020, 0.735661)。一方でウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河は比較的低く, 近い値を示した (0.718170, 0.719115)。塩酸抽出残留物では, ヤラ氷河が最も高く (0.742088), ウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河は比較的低く, 近い値を示した (0.721312, 0.725745)。また, 緯度が高くなるほど

表 4 アジアのクリオコナイトの各抽出物の Nd 同位体比 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) と $\epsilon\text{Nd}(0)$ 値。ウルムチ No. 1 氷河の値は Nagatsuka *et al.* (2010) の結果の平均値。測定値の下段の値は, 有効数字 6 桁で表される測定誤差のうちの下 2 桁を示す。

	塩酸抽出物		塩酸抽出残留物	
	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(0)$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(0)$
アッケム氷河 (AK)	0.512351 ± 01	-5.6	0.512312 ± 02	-6.4
ウルムチ No.1 氷河 (UM)	0.512186 ± 03	-8.8	0.512104 ± 03	-10.4
チーイー氷河 (QY)	0.512165 ± 02	-9.2	0.512055 ± 02	-11.4
ヤラ氷河 (YL)	0.511953 ± 02	-13.4	0.511822 ± 02	-15.9

同位体比が低くなるという傾向を示した。

4.4 Nd 同位体比

4つの氷河のクリオコナイトで分析された Nd 同位体比 ($\epsilon\text{Nd}(0)$) を表 4 に示す。分析の結果、サンプル全体では $-15.9 \sim -5.6$ の値を示した。抽出物ごとの結果を見ると、塩酸抽出物では $-13.4 \sim -5.6$ 、塩酸抽出残留物では $-15.9 \sim -6.4$ の値を示し、どの氷河でも、塩酸抽出物が塩酸抽出残留物よりもわずかに大きい値を示した。

抽出物ごとに各氷河の Nd 同位体比を比較すると、塩酸抽出物、塩酸抽出残留物の両方で、アッケム氷河が最も高く (-5.6 , -6.4)、ヤラ氷河が最も低かった (-13.4 , -15.9)。また、ウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河はどちらの抽出物でも比較的近い値を示した (-8.8 , -10.4 : ウルムチ No. 1 氷河), (-9.2 , -11.4 : チーイー氷河)。

5. 考 察

5.1 クリオコナイトの鉱物組成

XRD 分析から明らかになったクリオコナイトの鉱物組成は、どの氷河でも比較的良好な組成を示した。XRD 分析の結果、クリオコナイトには、どの氷河にも石英や粘土鉱物など 5 つのケイ酸塩鉱物が含まれていることがわかった。このクリオコナイトのケイ酸塩鉱物組成は、Svensson *et al.* (2000) による XRD 分析で報告されている、グリーンランド氷床のアイスコア中の風送ダスト (東アジア起源) の鉱物組成とほぼ一致し、また、Yokoo *et al.* (2004) の XRD 分析によって明らかにされている中国の砂漠の砂の鉱物組成ともよく似ていた。このことから、氷河上にもこれらの砂漠を起源とするケイ酸塩鉱物が供給されている可能性が考えられる。しかし、これらの鉱物に加えて、ヤラ氷河にはカリ長石が含まれていた。ヤラ氷河のクリオコナイトに他の 3 つの氷河には検出されなかった鉱物が含まれていたことは、このヒマラヤの氷河には異なる別の鉱物粒子の起源があることを示している。

5.2 クリオコナイト中のケイ酸塩鉱物の Sr, Nd 同位体比とその供給源

クリオコナイト中のケイ酸塩鉱物 (塩酸抽出残留物) は、XRD 分析では似たような組成を示す一方、その Sr, Nd 同位体比は 4 つの氷河で大き

く異なっていた。このことは、各氷河に蓄積した風送ダストの供給源が異なることを示している。これまでに行われた多くの先行研究の結果から、Sr, Nd 同位体比を組み合わせると、より詳細な供給源の特定が可能になることが明らかになっている (Biscaye *et al.*, 1997; Chang *et al.*, 2000; Singh and France, 2002; Honda *et al.*, 2004; Nakano *et al.*, 2004; Yokoo *et al.*, 2004)。4 つの氷河のケイ酸塩鉱物の Sr, Nd 同位体比を合わせてプロットすると、各氷河の同位体比は氷河の地理的な位置によって大きく異なる場所にプロットされた (図 5)。北に位置する氷河 (アッケム氷河) ほど、Sr 同位体比が低くて Nd 同位体比が高く、南に位置する氷河 (ヤラ氷河) ほど、Sr 同位体比が高く Nd 同位体比が低いという傾向が見られた。この傾向は、中国の砂漠の砂やモレーンの Nd 同位体比が、高緯度ほど高いという先行研究の結果 (Honda *et al.*, 2004) に一致する。

各氷河の Sr, Nd 同位体比を、これまでに先行研究で報告されている氷河周辺のレスや砂漠の砂、河川堆積物などの値 (アルタイ: Zhu *et al.*, 2006,

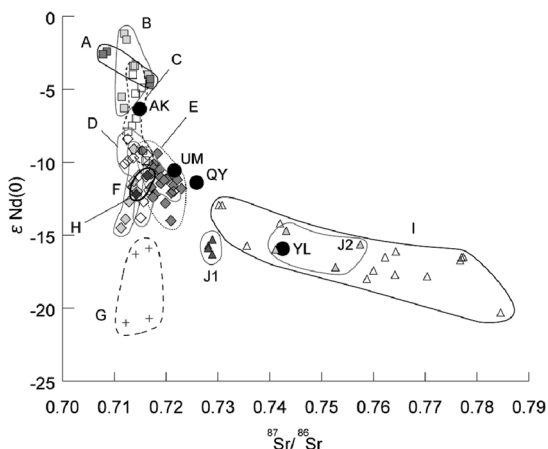


図 5 各氷河のクリオコナイトの塩酸抽出残留物 (ケイ酸塩鉱物) の Sr-Nd 同位体比と各地域で報告されているレス、砂漠の砂、リン灰石、河川堆積物の値との比較 (AK: アッケム氷河, UM: ウルムチ No. 1 氷河, QY: チーイー氷河, YL: ヤラ氷河, A~I は図 1 に記載, J1: ヒマラヤ (東ロンブク氷河アイスコア中ダスト, 氷河周辺堆積物に近い値), J2: ヒマラヤ (東ロンブク氷河アイスコア中ダスト, インド北西部のタール砂漠の砂に近い値), 各値の引用元については本文を参照)。

ジュンガル: Honda *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2007, タクラマカン砂漠: Honda *et al.*, 2004; Nakano *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2007, 中国北部, ゴビ砂漠南部 & 黄土高原, 北京, 北京西部: Nakano *et al.*, 2004, ツァイダム砂漠: Chen *et al.*, 2007, チベット高原: Chang *et al.*, 2000, ヒマラヤ: Singh and France, 2002, ヒマラヤ・東ロンブク氷河アイスコア: Xu *et al.*, 2009) と比較したところ, 各氷河の同位体比は, それぞれの氷河周辺のレスや砂漠の砂や河川堆積物の値に近い値であることが明らかとなった (図 5). アッケム氷河はアルタイのリン灰石, 中国北部のレスや砂漠の砂, 中国北西部に位置するジュンガル砂漠のレスの値に, ウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河はゴビ砂漠南部と黄土高原, タクラマカン砂漠の砂やレスの値にそれぞれ近くなっていた. また, ヤラ氷河は主にケイ酸塩鉱物からなるヒマラヤの河川堆積物と, ヒマラヤ山脈のエベレストの麓に位置する東ロンブク氷河で掘削されたアイスコア中のダストに近くなっていた. Xu *et al.* (2009) は, Sr, Nd 同位体比から, 東ロンブク氷河のアイスコア中のダストは主に 2 つの起源から供給されており, 1 つは氷河周辺の堆積物, もう 1 つはインド北西部に位置するタール砂漠であるということを報告している. 本研究で分析したヤラ氷河の同位体比は, このアイスコアで示された 2 つの供給源のうち, 氷河周辺の堆積物ではなく, タール砂漠に近い値を示した. しかし, ヤラ氷河のクリオコナイトには長距離輸送されるには大きすぎる粒径 (平均 137 μm , Takeuchi, 2002) の鉱物粒子も含まれており, これらの結果を合わせると, ヤラ氷河には氷河周辺と遠方の砂漠からの両方の風送ダストが堆積しているものと考えられる. また, ヤラ氷河の Sr 同位体比が, チベット (Chang *et al.*, 2000) とは差があったことから, アジアの砂漠やレスがヒマラヤの氷河上に供給されている可能性は低いと考えられる.

以上のことから, 今回分析を行った 4 つの氷河に蓄積した風送ダストは, 共通の供給源に由来するものではなく, 各氷河周辺の地域に由来するものであること, またその供給源は南北に大きく 3 つの地域 (アルタイ, 中国, ヒマラヤ) に分けられることがわかった.

比較的近い値を示した中国の 2 つの氷河の同位体比の差は, このような供給源の違いだけを反映しているわけではないのかもしれない. ウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河の同位体比は, Nd 同位体比では互いに近い値を示していたのに対し, Sr 同位体比ではチーイー氷河がウルムチ No. 1 氷河よりもわずかに高い値を示していた. Sr 同位体比は, 鉱物粒子の粒径が減少するにつれて, 値が増加する傾向があり, このことは, Kanayama *et al.* (2005) や Biscaye *et al.* (1997) などの先行研究でも報告されている. これは, 土壌粒子や砂漠の砂の鉱物組成が粒径に依存しているためで, 粒径の減少とともに, K, Rb が多く含まれる雲母や粘土鉱物の割合が増加するためと考えられる. 一方で, Nd 同位体比は, Sr 同位体比とは異なり, 粒径による値の変化は小さく, 供給源となる地質の値を純粋に反映していると言われている. 中国の 2 つ氷河の同位体比を, Chen *et al.* (2007) で報告されている中国内陸部のツァイダム砂漠とタクラマカン砂漠のサイズを分けていない砂と 5 μm 以下の砂の値と比較してみると, ウルムチ No. 1 氷河の Sr 比がサイズを分けていない砂に近い値を示したのに対し, それよりも東に位置するチー

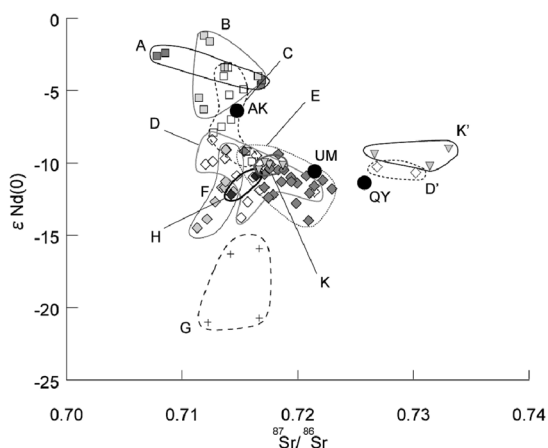


図 6 ヒマラヤを除くアジアの各氷河のクリオコナイトの塩酸抽出残留物 (ケイ酸塩鉱物) の Sr-Nd 同位体比と各地域で報告されているレス, 砂漠の砂, リン灰石の値との比較 (AK: アッケム氷河, UM: ウルムチ No. 1 氷河, QY: チーイー氷河, YL: ヤラ氷河, A~K は図 1 に記載, D': タクラマカン砂漠 (レス & 砂, 5 μm 以下), K': ツァイダム砂漠 (砂漠の砂, 5 μm 以下), 各値の引用元については本文を参照).

イー氷河の Sr 比は $5\mu\text{m}$ 以下の砂に近い値を示した (図 6). このことは, チーイー氷河には, ウルムチ No. 1 氷河に比べて, 比較的細粒の鉱物粒子が堆積しており, それが Sr 同位体比に影響している可能性を示唆している. クリオコナイト中の鉱物粒子の供給源を, より詳細に特定するためには, 今後このような粒径分別を行ったうえで, 鉱物粒子の同位体比を測定する必要がある.

5.3 クリオコナイト中の塩類, 炭酸塩, リン酸塩鉱物の同位体比

水抽出物, 酢酸抽出物および塩酸抽出物の氷河による Sr 同位体比の違いは, それぞれの氷河に供給されている塩類鉱物, 炭酸塩鉱物, リン酸塩鉱物の起源となる物質の性質の違いを反映していると考えられる. これまでの研究によって, アジアの砂漠の砂に含まれる塩類鉱物と炭酸塩鉱物は, 内陸域の乾燥地帯において, 土壤に含まれる水分が蒸発する間に二次的に生成された蒸発岩に由来するものであり, リン酸塩鉱物は乾燥地で生成されたリン灰石に由来するものであることが明らかになっている (Yokoo *et al.*, 2004). 地殻を起源とするケイ酸塩鉱物の同位体比は, 各地域の地質の値を反映しているため, その供給源となる場所の違いを表すことが可能である (e.g. Chen *et al.*, 2007). 本研究でも, クリオコナイト中のケイ酸塩鉱物の同位体比から, 4 つの氷河を南北の地域に分けて, 氷河の場所による供給源の違いを示すことができた. 一方, 塩類鉱物, 炭酸塩鉱物, リン酸塩鉱物は, 先ほど述べたように地殻だけを起源としているわけではない. そのため, その同位体比は地域ごとの値を表しているわけではなく, 起源となる蒸発岩やリン灰石に含まれている Ca や Sr, また K などの元素の量の違いを反映していると考えられる.

各氷河の水抽出物, 酢酸抽出物, 塩酸抽出物の Sr 同位体比をそれぞれ比較すると, 水抽出物と酢酸抽出物では, 同位体比はアッケム氷河, ウルムチ No. 1 氷河, チーイー氷河の 3 つの氷河で互いに低くて近い値 ($0.710404 \sim 0.712328$) を示した. また, ヤラ氷河はそれらよりも顕著に高い値を示した. ヤラ氷河以外の 3 つの氷河の Sr 同位体比が, アジア内陸域の塩類鉱物や炭酸塩鉱物 (Yokoo *et al.*, 2004) に近い値であったことから,

これらの氷河の塩類鉱物や炭酸塩鉱物は, おもにアジア内陸域の乾燥地帯でできた蒸発岩の塩類鉱物や炭酸塩鉱物が, 氷河上に運ばれてきたものであると考えられる. ヤラ氷河の高い Sr 同位体比は, アジア内陸域の蒸発岩だけが起源ではなく, それ以外の全く別の供給源があることを示している. 塩酸抽出物の値は, ウルムチ No. 1 氷河, チーイー氷河では水抽出物・酢酸抽出物よりも大きく, 塩酸抽出残留物よりも小さかった. これは, Yokoo *et al.* (2004) による, 中国乾燥域に存在するリン灰石の Sr 同位体比の分析結果と同様の傾向を示しており, これらの氷河でも周辺のリン灰石に由来するリン酸塩鉱物が含まれているものと考えられる. アッケム氷河の塩酸抽出物は, 塩酸抽出残留物の値より大きく, この報告と一致しない. これは, 中国以外の塩酸抽出物の Sr 同位体比が, 各地域の地殻中に含まれる Sr の値を示しているためと考えられ, アッケム氷河のリン酸塩鉱物の起源となる岩石が, ウルムチ No. 1 氷河, チーイー氷河のリン酸塩鉱物の起源の岩石とは異なる性質をもつためなのかもしれないが, その詳細はまだよく分からない. ICP-MASS などを用いた分析によって各抽出物の各元素組成を定量すれば, さらに詳しい鉱物組成や供給源が明らかになるかもしれない.

5.4 有機物中の Sr 同位体比と雪氷生物

過酸化水素水抽出物の Sr 同位体比の氷河による違いは, 鉱物粒子のように単に有機物の供給源を示しているわけではないと考えられる. Takeuchi *et al.* (2001) による有機物分析の結果などから, クリオコナイト中の有機物のほとんどは氷河上の藻類によって生産されたものであると考えられる. したがって, 有機物の Sr 同位体比は, 藻類が繁殖のために Ca と同時に取り込んだ Sr の同位体比を示すはずであり, 藻類が栄養塩源として利用した鉱物粒子の同位体比に近い値になるはずである.

各氷河で, 有機物の Sr 同位体比と鉱物成分の値とを比較すると, ウルムチ No. 1 氷河とチーイー氷河の値は塩類鉱物・炭酸塩鉱物 (水・酢酸抽出物) の値にほぼ等しかった. 一方, アッケム氷河, ヤラ氷河の値は塩類鉱物・炭酸塩鉱物の値とリン酸塩鉱物 (塩酸抽出物) の値のほぼ中間の

値を示した (表 3, 図 4). これは, 中国の 2 つの水河 (ウルムチ No. 1 水河, チーイー水河) の藻類が栄養塩として主に塩類鉱物・炭酸塩鉱物に由来する Ca を吸収するのに対し, アッケム水河, ヤラ水河では, 藻類は単に塩類鉱物・炭酸塩鉱物だけでなく, リン酸塩鉱物に含まれている Ca も利用していることを示唆している. また, 各水河の有機物とケイ酸塩鉱物の Sr 同位体比が全く異なる値となった (表 3, 図 4) ことは, 藻類が水に溶けにくいケイ酸塩鉱物に由来する Ca を利用することはほとんどないことを示している. このように, 有機物の Sr 同位体比は, 水河上の微生物が栄養塩として利用する鉱物粒子の値を反映していると考えられる. リン酸塩鉱物は藻類の繁殖を制限する栄養塩であるリンを含んでいる. したがって, アッケム水河, ヤラ水河の藻類はリン酸塩鉱物に由来するリンを利用している可能性がある. 微生物が塩類・炭酸塩鉱物以外の鉱物を栄養塩として利用しているということが, 何を意味しているのか, 具体的なことはまだ明らかにすることができていないが, このような利用する栄養塩源の違いが水河上の微生物の群集構造やバイオマスに関係しているかもしれない. このように, 有機物の Sr 同位体比によって, 水河上の微生物が栄養塩として利用している鉱物を特定できる可能性があり, その結果は, 水河上の微生物の生態を理解する有効な手がかりになると考えられる.

6. 結 論

アジア高山域の 4 つの水河のクリオコナイトの Sr, Nd 同位体比を分析した結果, その中のケイ酸塩鉱物 (塩酸抽出残留物) は, 緯度が高い水河ほど Sr 同位体比が低くて Nd 同位体比が高く, 緯度が低い水河ほど Sr 同位体比が高くて Nd 同位体比が低いという傾向を示した. また, その同位体比は, それぞれの水河周辺のレスや砂漠の砂や河川堆積物の同位体比に近い値を示した. したがって, 各水河の塩酸抽出残留物は, 各水河周辺から供給された風送ダストに由来するケイ酸塩鉱物であり, その Sr, Nd 同位体比はその供給源の同位体比を示していると考えられる.

クリオコナイト中の塩類鉱物 (水抽出物) と炭酸塩鉱物 (酢酸抽出物) の Sr 同位体比は, 4 つの

どの水河においても, 両者は互いに近く, ケイ酸塩鉱物よりも明らかに低い値を示した. また, リン酸塩鉱物 (塩酸抽出物) の Sr 同位体比は, 天山山脈, 祁連山脈, ヒマラヤ山脈の水河では, 塩類鉱物と炭酸塩鉱物よりも大きく, ケイ酸塩鉱物よりも小さい値を示した. したがって, これらの鉱物成分 (塩類, 炭酸塩, リン酸塩鉱物) は, 周辺の地殻だけに由来するものではなく, 周辺砂漠の蒸発岩やリン灰石に由来するものであると考えられる.

クリオコナイトの有機物成分 (過酸化水素水抽出物) の Sr 同位体比は, 中国の 2 つの水河では塩類・炭酸塩鉱物にほぼ等しく, ヒマラヤ, アルタイの水河では塩類・炭酸塩鉱物とリン酸塩鉱物の中間の値をとった. 水河上の有機物は雪氷微生物の生産物と考えられることから, この同位体比の違いは, 藻類が塩類・炭酸塩鉱物以外の鉱物を, 栄養塩として利用しているのかどうかを示していると考えられる.

以上の結果から, アジア高山域の水河のクリオコナイトの Sr, Nd 同位体比は, 水河の地理的位置や抽出物で大きく異なり, 鉱物粒子についてはその水河周辺の供給源の同位体比, 有機物については水河上の微生物が利用した栄養塩源の鉱物の同位体比を反映した値を示しているものと考えられる. したがって, クリオコナイトの Sr, Nd 同位体比は, 水河上に堆積した鉱物粒子の供給源特定や水河上の雪氷生物の生態の理解に有用であるということがわかった.

謝 辞

総合地球環境学研究所の小林俊則氏, 齊藤 有氏には, 同位体比測定に関する様々なアドバイスを頂いた. また, 千葉大学の古川 登氏には, XRD 分析の手法を指導していただいた. また, 匿名の 2 名の査読者, および担当編集委員の倉元隆之氏には, 多くの有益なご指摘やコメントをいただいた. 本研究は, 日本学術振興会科学研究費補助金 (若手研究 A, No. 21681003), および総合地球環境学研究所イリプロジェクトの支援により実施された. ここに, 感謝の意を表する.

文 献

- Biscaye, P.E., Grousset, F.E., Revel, M., Van der Gaast, S., Zielinski, G.A., Vaars, A. and Kukla, G., 1997: Asian provenance of glacial dust (stage2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland. *J. Geophys. Res.*, **102**, C12, 26765-26781.
- Capo, R.C., Stewart, B.W. and Chadwick, O.A., 1998: Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, **82**, 197-225.
- Chang, Q., Mishima, T., Yabuki, S., Takahashi, Y. and Shimizu, H., 2000: Sr and Nd isotope ratios and REE abundances of moraines in the mountain areas surrounding the Taklimakan Desert, NW China. *Geochem. J.*, **34**, 407-427.
- Chen, J., Li, G., Yang, J., Rao, W., Lu, H., Balsam, W., Sun, Y. and Ji, J., 2007: Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **71**, 3904-3914.
- Faure, G., 1986: Principles of isotope geology (2nd edition). New York, John Wiley and Sons. 608pp.
- Grousset, F.E., Biscaye, P.E., Revel, M., Petit, J.-R., Pye, K., Joussaume, S. and Jouzel, J., 1992: Antarctic (DomeC) ice-core dust at 18k.y. B.P.: Isotopic constraints on origins. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **111**, 175-182.
- Honda, M., Yabuki, S. and Shimizu, H., 2004: Geochemical and isotopic studies of aeolian sediments in China. *Sedimentology*, **51**, 211-230.
- Kanayama, S., Yabuki, S., Liu, M., Shen, Z., Liu, L., Yanagisawa, F. and Abe, O., 2005: Size - dependent geochemical characteristics of Asian dust - Sr and Nd isotope compositions as tracers for source identification. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **83A**, 107-120.
- Nagatsuka, N., Takeuchi, N., Nakano, T., Kokado, E. and Li, Z., 2010: Sr, Nd and Pb stable isotopes of surface dust on Ürümqi glacier No. 1 in western China. *Ann. Glaciol.*, **51** (56), 95-105.
- Nakano, T., Yokoo, Y., Nishikawa, M. and Koyanagi, H., 2004: Regional Sr-Nd isotopic ratio of soil minerals in northern China as Asian dust fingerprints. *Atmos. Environ.*, **38**, 3061-3067.
- Singh, S.K. and France-Lanord, C., 2002: Tracing the distribution of erosion in the Brahmaputra watershed from isotopic compositions of stream sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **202**, 645-662.
- Svensson, A., Biscaye, P.E. and Grousset, F.E., 2000: Characterization of late glacial continental dust in the Greenland ice core project ice core. *J. Geophys. Res.*, **105** (D4), 4637-4656.
- Takeuchi, N., 2002: Optical characteristics of cryoconite (surface dust) on glaciers: the relationship between light absorbency and the property of organic matter contained in the cryoconite. *Ann. Glaciol.*, **34**, 409-414.
- Takeuchi, N., and Li, Z., 2008: Characteristics of surface dust on Ürümqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **40** (4), 744-750.
- Takeuchi, N., Kohshima, S. and Seko, K., 2001: Structure, formation, and darkening process of albedo - reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: a granular algal mat growing on the glacier. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **33**, No. 2, 115-122.
- Takeuchi, N., Matsuda, Y., Sakai, A. and Fujita, K., 2005: A large amount of biogenic surface dust (cryoconite) on a glacier in the Qilian Mountains, China. *Bull. Glaciol. Res.*, **22**, 1-8.
- Takeuchi, N., Uetake, J., Fujita, K., Aizen, V.B. and Nikitin, S.D., 2006: A snow community on Akkem glacier in the Russian Altai Mountains. *Ann. Glaciol.*, **43**, 378-384.
- Wu, G., Zhang, C., Zhang, X., Tian, L. and Yao, T., 2010: Sr and Nd isotopic composition of dust in Dunde ice core, Northern China: Implications for source tracing and use as an analogue of long-range transported Asian dust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **299**, 409-416.
- Xu, J.Z., Hou, S.G., Chen, F., R., J.W. and Qin, D., 2009: Tracing the sources of particles in the east rongbuk ice core from mt. qomolangma. *Chin. Sci. Bull.*, **54** (10), 1781-1785.
- Yokoo, Y., 2000: Geochemical Study of Desert Sand and Loess in China: Implications for the Provenance and Formation of Japanese Soil. A Dissertation Submitted to the Doctoral Program in Geoscience. The University of Tsukuba in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Science.
- Yokoo, Y. and Nakano, T., 2001: Sequential leaching of volcanic soil to determine plant - available cations and the provenance of soil minerals using Sr isotopes. *Water. Air. Soil. Pollut.*, **130**, 1583-1588.
- Yokoo, Y., Nakano, T., Nishikawa, M. and Quan, H., 2004: Mineralogical variation of Sr-Nd isotopic and elemental compositions in loess and desert sand from the central Loess Plateau in China as a provenance tracer of wet and dry deposition in the northwestern Pacific. *Chem. Geol.*, **89**, 189-199.

Zhu, Y.-F., Zeng, Y. and Gu, L., 2006: Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay

Mountains, northwest China. J. Asian Earth Sci., **27** issue1, 61–77.

Sr and Nd stable isotopes of mineral dust and organic matter (cryoconite) on Asian glaciers

Naoko NAGATSUKA^{1)*}, Nozomu TAKEUCHI¹⁾, Takanori NAKANO²⁾ and Emi KOKADO²⁾

1) Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University

1-33 Yayoi-cyo, Inage-ku, Chiba, 263-8522

2) Research Institute for Humanity and Nature

457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto, 603-8047

**Corresponding author*

Abstract: Strontium (Sr) and neodymium (Nd) are commonly contained in natural substances and their stable isotopic ratios can be used as tracers of the elements in biological and geochemical processes. We analyzed these isotopic ratios mineral dust and organic matter (cryoconite) collected on four glaciers from different locations in Asia (Altay, Tien Shan, Qilian Shan, and Himalaya). The cryoconite was chemically separated into 5 fractions (4 minerals and organic matter) and the isotopic ratios of each fraction were measured. The isotopic ratios of silicate minerals showed highest values in all fractions and significantly varied according to geographical location of the glaciers: Sr and Nd ratios were higher and lower, respectively on the glacier located north. The isotopic ratios were close to those of desert sand, loess, and river sediment around each glacier. This indicates that the provenance of the silicate minerals (eolian dusts) differed among the glaciers and was the area around the respective glacier. The isotopic ratios in saline, carbonate, and phosphate mineral fractions are also likely to reflect those of their original source. The Sr isotopic ratios in the organic matter may reflect those of the mineral sources used as nutrients by living microbes on the glacier.

(2011 年 4 月 15 日受付, 2011 年 6 月 13 日改稿受付, 2011 年 6 月 15 日受理,
討論期限 2012 年 3 月 15 日)