

気候変動指標としての風成塵

九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 柳 哮*・浜本礼子・窪田正和**

1. はじめに

タクラマカン砂漠や黄河流域の黄土地帯などの砂塵が西風に乗ってわが国へ飛来する黄砂現象は、春をつよく感じさせる風物詩である。しかし、時には黄砂が余りにも濃いために、航空機の運航障害ともなり、発着の遅れや欠航をよぎなくし、市民生活に直接影響を与えることもある。最近、その風送塵の発生場所が移動している、あるいは、飛来する量が増加しているとの見解も報じられている。

生活の感覚からすると風送塵とは大気に僅かに含まれるもので、地球科学的にも、環境という視点からもさほど重要なものとは思われないかもしれない。しかし、日本で所によっては風成塵が数mの厚さに達する堆積層として観察されることがある。日本海溝の海側の太平洋の海底ではここで述べるように厚さ200mにも達し、それはプレートとともにマントルへ沈み込み、大陸とマントルを結ぶ大規模物質循環の一翼を担うことになる。風送塵は、また、大気中で雲粒の凝結核あるいは氷晶核として降雨・降雪に関係し、われわれの生活環境に大きくかかわっていると見られる。その風成塵の放射性起源の同位体組成に関する観測から得た知見について紹介する。紹介に当たって、大気中を浮遊し風に運ばれる状態の砂塵を風送塵、それが堆積したものを風成塵あるいは風成層とここでは呼んで表現す

ることにする。

2. 遠洋堆積物と風成塵

われわれが風送塵を調査しようとするようになった動機は、春先の黄砂現象にあるわけではない。日本海溝にまさに沈み込もうとしている太平洋プレートの直上の堆積物を調査しているとき、どう考えても日本列島から運び込まれたものとは考えられない堆積物に遭遇し、その起源を確かめたいと考えたからである。その様な堆積物はプレートとともにマントルに沈み込み地球全体を巻き込む物質循環の一端を担うわけで、地球科学的には極めて重要な研究対象である。

まず、その堆積物について紹介する。堆積物を採取した位置は図1に示してある。試料は深海掘削DSDP Site 436の堆積物である。図2、図3にストロンチウム同位体組成が深さ方向に、また堆積年代とともにどの様に変化するかを示している。なぜストロンチウム同位体組成を調べるか、その理由を次に示す。

細粒の堆積物を構成する鉱物は、もともと風化した岩石に由来するものである。20~30億年前にできた大陸でも、数億年前にできた大陸でも岩石は基本的には同じで、できた時代に関わりなく大陸の表面は同じ様な岩石で構成されているから、堆積する場所によって堆積物の鉱物の種類が変化することはない。

* (財)九州環境管理協会 評議員 ** 近畿農政局農村計画部 (現職)

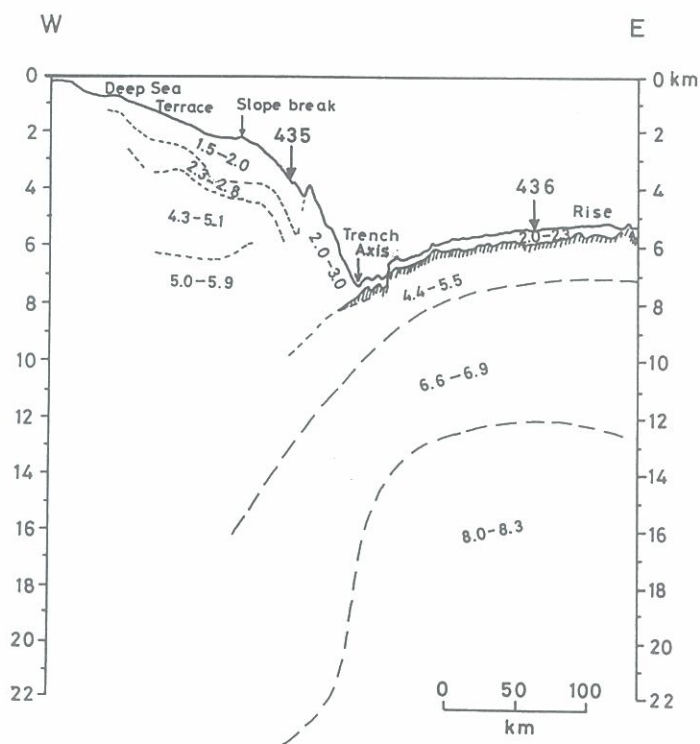
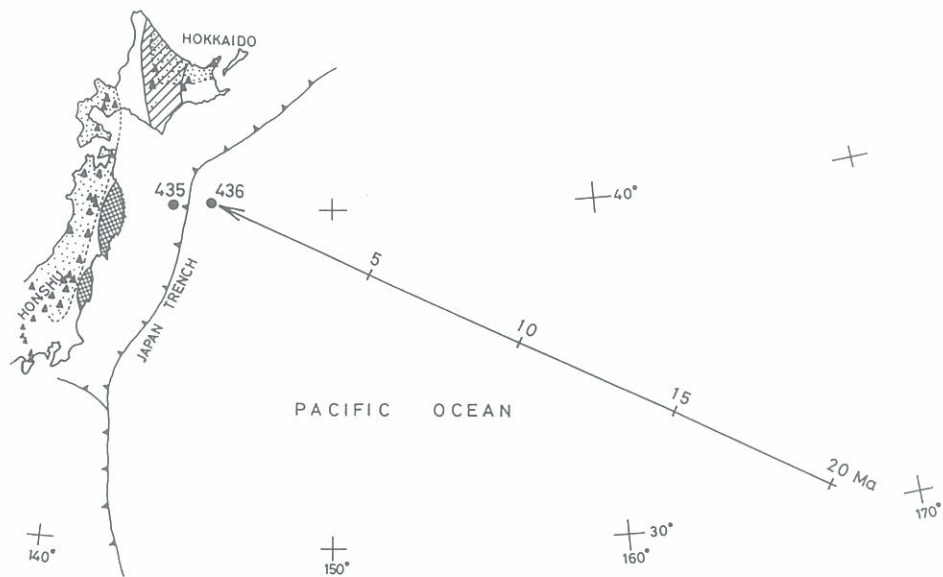


図1 深海掘削 DSDP Site 435 と 436 の位置

上図は Site 435 が日本海溝の陸側、Site 436 が日本海溝の海側であることを示す。下図は Site 435 と Site 436 を通る地殻断面図 (Murasuchi and Ludwig, 1980) にそれぞれの掘削位置を示す。図中の数字は P 波速度 (km/s)。

鉱物の種類は一般に石英、長石、粘土鉱物、その他の副成分鉱物である。そのため、堆積物の鉱物組成から堆積物を供給した源を特定しようとしても、それは容易ではない。

ところが大陸を構成する岩石の生成年代は場所によって異なる。ルビジウムには85と87の同位体があって、ルビジウム87は半減期480億年でストロンチウム87に崩壊する天然放射性同位元素である。このため岩石中のストロンチウム87の量には、岩石の生成年代やルビジウムの含有量によって違いが生じる。ストロンチウム87の大小は一般に安定同位体86で基準化して、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比で表される。日本列島の岩石は若いためにこの値は低い。中国には10~30億年の古い岩石があり、

これらの岩石の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比は非常に高い。このような違いがあるから、堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比を測れば、古い岩石に由来するものか、若い岩石に由来するものか知ることができる。これがストロンチウム同位体組成を調べる理由である。

図2、図3は、Site 436の堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の変化を海底からの深さと、試料の堆積年代で示している。まず、深さ方向の変化について見てみると、Site 436の堆積物は2つの部分からなっていることがわかる。180m付近を境にしてそれより深い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の高い部分と、それより浅い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比が比較的低い部分である。東北日本の側の海溝斜面のSite 435の堆積物と比較し

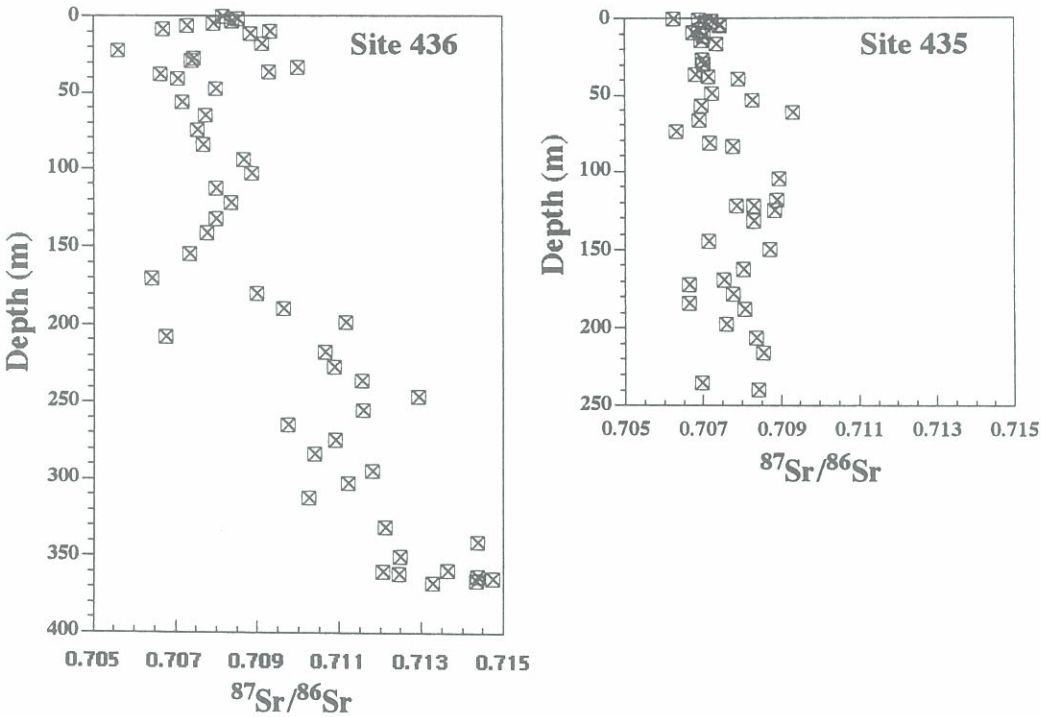


図2 深海掘削 DSDP Site 435 と 436 の堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の深さ方向の変化

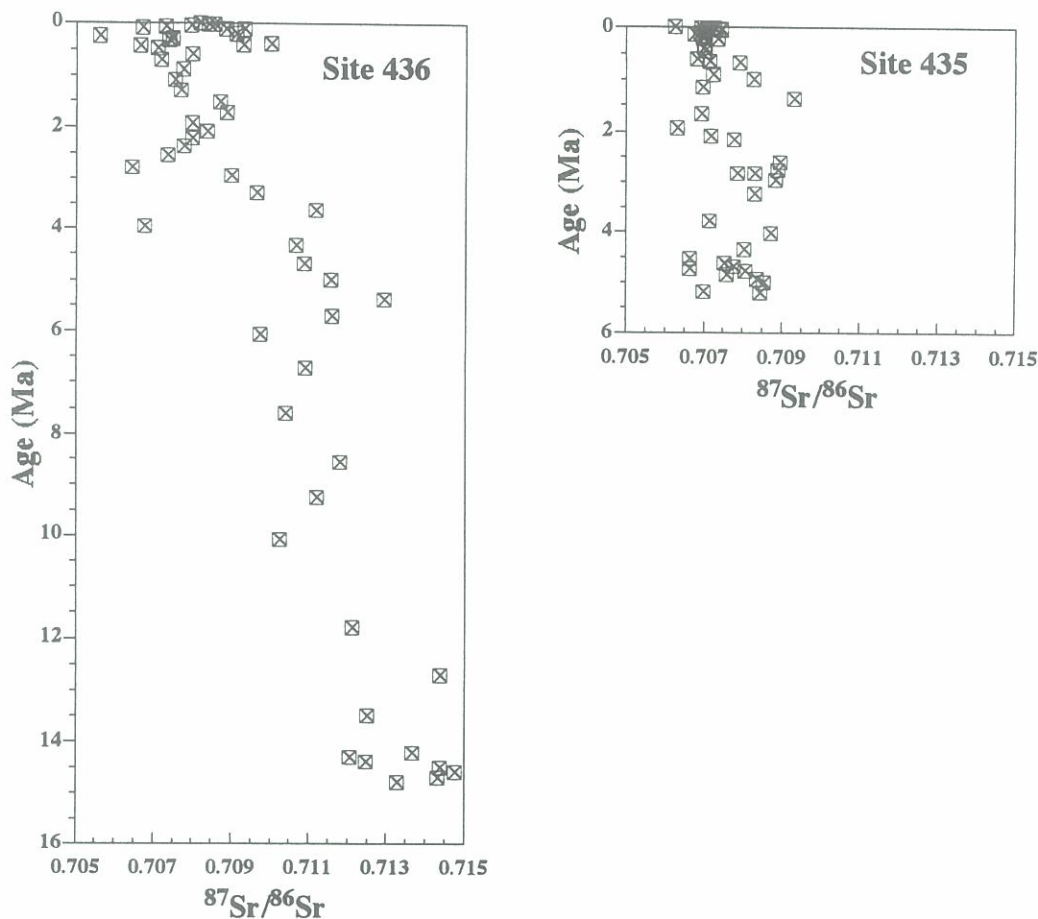


図3 深海掘削DSDP Site 435と436の堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の年代変化

てみると、Site 436の浅い部分の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比はSite 435の堆積物のものと変わらないことが分かる。Site 435は東北日本の側の海溝斜面にあるわけであるからその堆積物の圧倒的部分は東北日本の河川から供給されたと見るのが自然である。Site 436の浅い部分の堆積物も、その様な物質でできているものと考えることができる。問題はSite 436の深い部分である。厚さにして200mもあり、その同位体比はあまりにも高く、その起源を東北日本に求めることはできない。

同位体比の年代変化をみると、この高い同位体比の堆積は、約15Maから4Maにかけて

約1100万年もの長い間継続していたことが分かる。太平洋プレートは約10cmの速度で日本列島に向かって移動し、日本海溝からマントルへ沈み込んでいるわけであるから、この運動を逆にたどれば、このSite 436のたどってきた軌跡(図1)を求めることができる。復元してみると、堆積は東北日本から2600kmも離れた太平洋で始まり、東北日本まで500~600kmに近づくまで継続したことがわかる。その間の堆積速度は、1000年で約15cm程度である。他方、同位体比が低い浅い部分の堆積物は4Maから現在にかけて堆積したもので、堆積速度は1000年で約50cmもある。供

給地である東北日本に近いことを反映している。

同位体比が高く、陸から遙かに遠い太平洋で沈殿した堆積物は、恐らく風によって運ばれた黄砂相当のものであろうと推定されるが、それにしても、厚さが200mもあるわけで、果たしてそうであろうかと疑問が残る。また、黄砂は15Maも以前からあったのだろうかとも思う。このことを理解するために、現在、上空を飛んでいる砂塵を調べ、その同位体比がSite 436の“風成”堆積物と同一であるか調べてみようと考えたわけである。

堆積物についても一つ重要な点を指摘しておく必要がある。Site 436の海底から180m以深の堆積物の同位体比は高いわけで、高いと言うことは堆積物を供給した物質が古いことを意味するから、どれくらい古い物質であるかを調べてみる必要がある。

堆積物を供給した物質の年代値を示す前にまず、年代を推定する仕組みを説明しておく。ある均一な物質、例えばマグマから結晶した色々な鉱物について考えてみる。縦軸に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比を、横軸に $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比をとって図示すると、できたばかりの色々な鉱物は、マグマを含めて横軸に平行な直線上に全て配列する。それは、結晶作用によって鉱物のRb/Sr比には大小が生じるが、同位体比の分別は起こらないため、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比は全ての鉱物で等しいためである。しかし、時間が経つと、その間に ^{87}Rb が崩壊して ^{87}Sr になるため、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は増加する。このため鉱物が配列する直線は、時間とともに、縦軸の切片を軸にして半時計方向に回転する。このことを利用すると結晶作用からその後経過した時間を算出することができる。

堆積物は供給源を異にする色々な物質の集

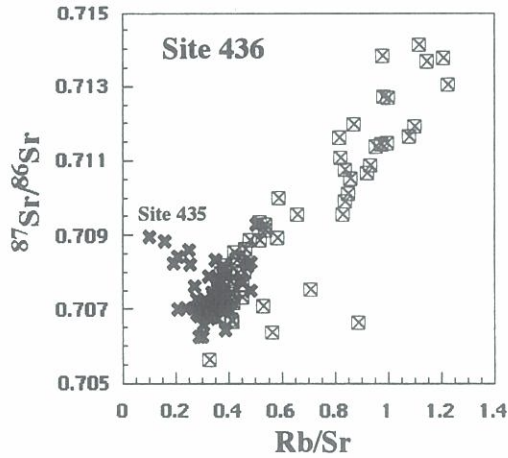


図4 Site 435と436の堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Rb/Sr図
十字印がSite 435の堆積物を、柝印がSite 436の堆積物を表す。

合物であるから、ここで示したような仮定に基づいて年代を算定することはできないが、しかし、この図に図示してみると、Site 436の堆積物は図4に示すように幅はあるが右上がりの直線的配列を示す。即ち、ほぼ等しい年代の物質から供給されたもののようである。そうだとするとこの配列の勾配から年代を求めることができる。その値は、約2億年である。つまり、これらを供給した物質には色々なものがあるかもしれないが、平均して2億年の古さのものと推定される。Dymond et al.(1974)はハワイの玄武岩の上に堆積している風成塵由来の土壌の構成鉱物の年代をK-Ar法で測定して2億年であることを報告している。年代の一致は見事である。この様な風成塵起源の堆積物が北半球の太平洋に広く分布していると想像される。

3. 降水に含まれる鉱物塵

さてその様に広い範囲に拡散して堆積している物質が風送塵であるかどうかを調べるとしても、つまり上空を飛行している風送塵を

調べるとしても、地上数千mを飛んでいるわけであるから、捕捉は容易ではない。普段に空中から沈殿してくるものを補足して調べることも考えたが、付近から舞い上がる風塵の混入はどうしても避けられない。もし雨滴が十分な量の風送塵を含んでいれば、雨水を集めることによって上空を飛行する風送塵の調査が可能であると考えられる。

気流の上昇に伴って雲粒が生じるが、その時エアロゾルは水蒸気の凝結核の役割を果たすと見られる。雲粒の衝突・集積によってついには雨滴が生じ降水に至るとすれば、雨水には上空の風送塵が含まれているはずである。この風送塵を分離し、分析すればわれわれの上空を飛行し、太平洋に運ばれる風送塵の同位体組成、鉍物組成を直接調べることができると考え、雨水に含まれる風送塵の観測を始めた。

図5は1989年2月から9月末まで九州大学理学部1号館の屋上で雨水を集めて観測した降雨毎の測定結果である。バケツを並べての雨水の採取は、周辺から巻きあがる塵の混入を

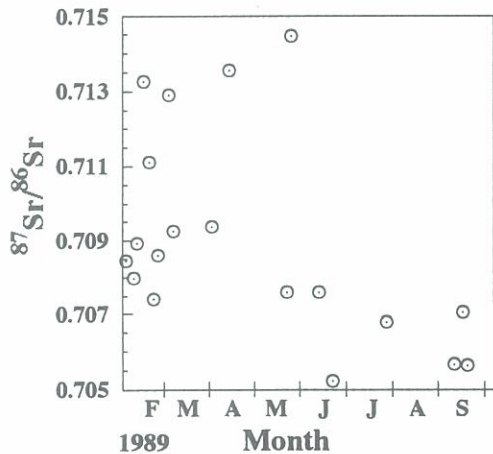


図5 1989年2月から同年9月までの降雨に含まれる風送塵の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比
降雨毎の観測結果を示す。

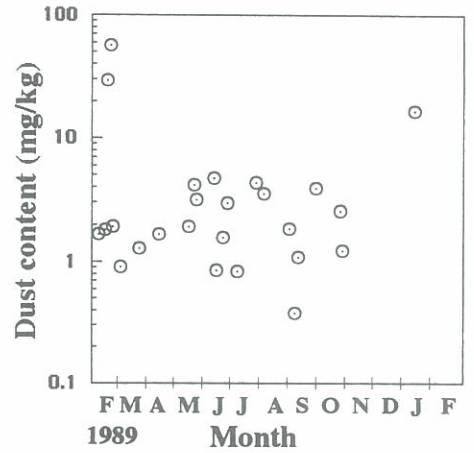


図6 1989年2月から同年9月までの降雨に含まれる風送塵の含有量

避けるため、降水が始まって、屋上の屋根が十分に雨水で濡れた後に、バケツを屋上に並べて行った。測定は雨水から鉍物を分離した後鉍物成分についての $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比を測定した。

観測結果を見ると雨水に含まれるものには3種類あることが分かる。3種類とは $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比は0.709以上のもの、0.709~0.707のもの、0.707以下のものである。0.707以下のものは6月から9月にかけての南風が卓越する夏場に観測されている。この間は雨水に含まれる鉍物塵の含有量は、1~2月の黄砂現象が現れたときに比較すると、図6に示すように約1/20程度で少ないが、他の時期に比較して特段に少ないわけではない。0.709以上のものは2月から5月にかけてしばしば観測されるもので、その同位体比はSite 436の海底下180m以深で観測されたものの値と一致する。また、濃い黄砂現象が観測されたときの黄砂を採取し測定した値0.713~0.715とも一致する。つまり0.709以上のものは黄砂に由来すると判断される。最も普通に雨水に含まれるも

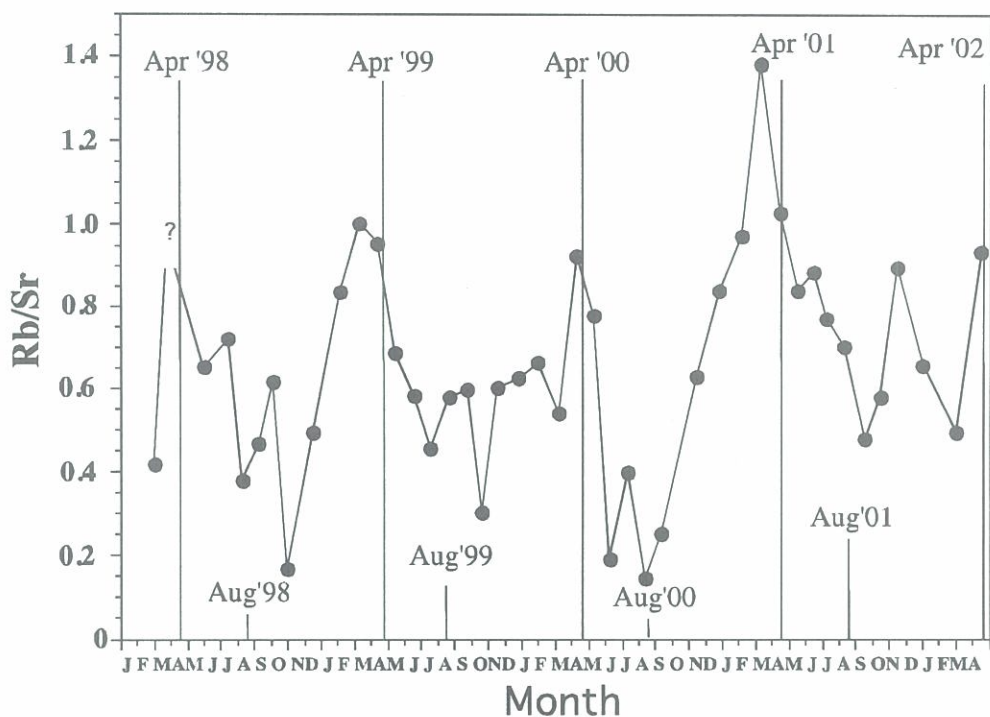


図8 1998年1月から2002年4月までの降雨に含まれる風送塵 Rb/Sr 比
背振山気象用レーダーサイトで集水し、およそ月毎の測定結果を示す。

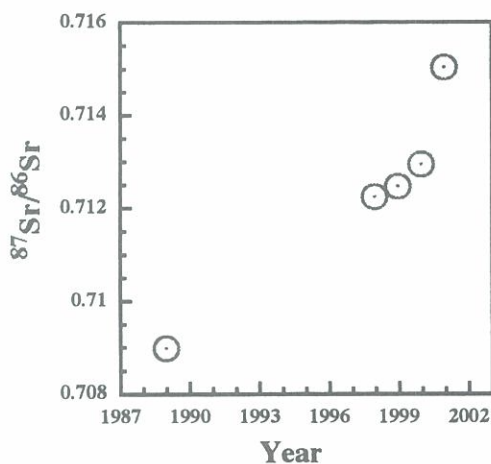


図9 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の経年変化

このことを確認するために1989年の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の観測結果と比較して見ると、年変化のピーク値も、最低値も、バックグラウン

ドの中央値も全般に年々高くなっていることが分かる。このことを明確にするために、図9に同位体比の年平均を示した。これを見ると、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が1989年から現在にかけて次第に増加してきていることが伺える。

ここで見た鉱物塵の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の長期に渡る経年変化が、気流の経年変化による供給地の変化なのか、あるいは砂漠化の拡大を反映しているのか、温暖化を含め最近の気候変化を考えると、興味あることである。詳細は今後の観測を待たなければならない。また九州大学と背振山頂との観測点の違いによる効果も検討を要する。ただ、このことについては、最近数年間の背振山頂での観測結果と1989年以降の変化傾向とが一致していることを考えると、観測点の違いによるというよ

りは、むしろ風送塵の供給地に経時変化が進行していることを伺わせるものであると考えられる。

次に風成塵の鉱物種にどのような変化が進行しつつあると推定できるか検討してみよう。図8は雨水に含まれる鉱物塵のRb/Sr比の変化を示したもので、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比と同様に周期的年変化を繰り返している。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比とRb/Sr比との間には正の相関があり、同位体比の高いものはRb/Sr比も高い。つまりRb/Sr比は2月、3月で高く、8月を中心とする夏場で低い。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比とRb/Sr比が共に高い物質は雲母類で、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比やRb/Sr比が共に低い物質は斜長石であることを考えると、ここで見た経年変化は、塵の鉱物構成に変化が起りつつあることを示唆するものである。

この節を終るに際し、この4年間に観測された風送塵の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の変動範囲が、Site 436の遠洋堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の変動範囲と見事に重複していることを指摘したい。実はこれが風送塵を観測する本来の目的であった。

4. 遠洋堆積物の過去数百万年の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比変化

先の遠洋堆積物が風成塵であると見た場合、Site 436の堆積物は更に興味ある事実を提供している。Site 436と435の堆積物について過去200万年の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比変化を図10に示すと、最近50万年間の変化に両者で明瞭な違いがあることが見て取れる。Site 435は東北日本の側の海溝斜面にあるため、堆積物は圧倒的に東北日本から供給されたもので

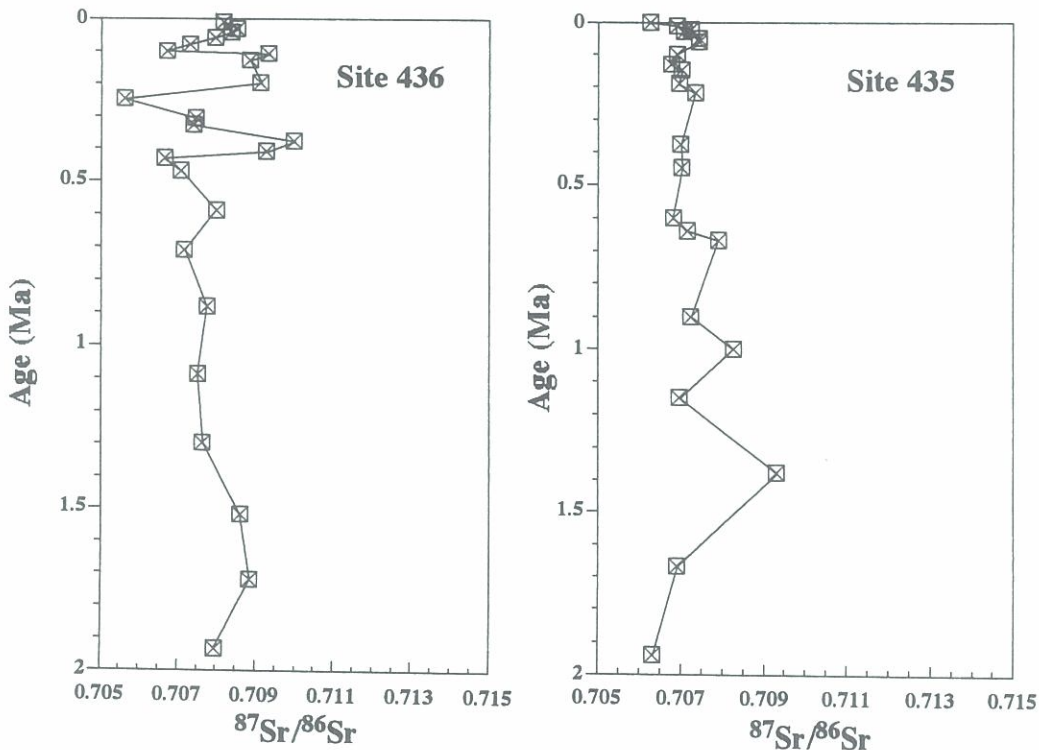


図10 最近200万年間の堆積物の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の変化

ある。Site 436の堆積物は、海溝の海側の背斜軸部(図1)に位置している。東北日本に近くそこからかなり供給されたと判断されるが、しかしそれは全て海溝を渡って運ばれたものである。そのため、風成塵が両sitesに同じような速度で堆積したとすると、Site 435の堆積物よりはSite 436の堆積物への風成塵の寄与が相対的に大きいと判断される。そうだとすると、最近50万年間に見られる周期約10数万年の周期的同位体比の変化は第4紀の気候変化との関わりで興味深い現象である。そう考えると、Site 436で4Ma~1Maの間で同位体比が低かったのは、この間では、風成塵の寄与が相対的に低かったことを示すのかも知れない。更に、15Maから現在までの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比変化を見てみると、Site 436がプレートの運動に伴って東北日本に近づくに伴って東北日本の河川からの物質が増加することによって単純に減少するわけではなく、同位体比が微妙に脈動していることに気づく。

5. さいごに

太平洋の遠洋堆積物が黄砂と同じ風送塵起源であること、その堆積は1500万年以来今日まで継続していること、最近10年間に風成塵の供給地にある定まった方向の変化が継続しているらしいことを報告した。同時に風成塵

の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比を測定することによって、長期に渡る気候変動を検出できることを示した。風送塵の観測の継続と共に、遠洋堆積物についての高分解能の経時変化の測定が望まれる。

参考文献

- Dymond, J., Biscaye, P. R., and Rex, R. W. (1974) Eolian origin mica in Hawaiian soils. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 85, 37 - 40.
- Langseth M. et al. (1980) Site 436: Japan trench outer rise, Leg 56. In: Langseth M. et al., *Init. Repts. DSDP56*, 57. 399 - 458.
- Langseth M. et al. (1980) Site 436: Japan trench outer rise, Leg 56. In: Langseth M. et al., *Init. Repts. DSDP56*, 57. 193 - 223.
- Murauchi, S. and Ludwig, W. J. (1980) Crustal structure of the Japan trench: the effect of the subduction of ocean crust. In: Langseth M. et al., *Init. Repts. DSDP56*, 57. 463 - 469
- 名古屋大学水圏化学研究所編 (1991) 大気水圏の科学: 黄砂. 古今書院, 328頁.