

# 大 気 — 海 洋 の 物 質 循 環

— 太 平 洋 上 の 黄 砂 と 海 底 堆 積 物 —

植 松 光 夫

## 1. 太平洋上での観測

日本の位置する北半球中緯度地帯では、北アメリカ大陸とアジア大陸の二つの大陸が北太平洋によって8,000km近く隔てられている。北緯20度から北緯50度までの洋上には、その名の通りほぼ中央にあるミッドウェイ島(Midway Is.)をはじめとするハワイ諸島の島々が南東方向に列をなしている。赤道付近の低緯度地帯には西部にマリアナ諸島やマーシャル諸島など珊瑚で形成された環礁の島が点在する。

こんな島の大気中には周囲の海から発生する海塩粒子がほとんどで、大陸上で育った植物や土壌から生成する粒子あるいは人間の放出した汚染物質などは存在しないものと信じられていた。近くの海域は汚染されても海流によって太平洋全体に広がる事はないだろう、大気を通してそんなに遠くまで塵は飛ばないだろうということで、太平洋上の小さな珊瑚の島々でつぎつぎと核兵器の爆発実験が行なわれていったことは周知のとおりである。

### (1) 洋上の黄砂現象

太平洋の真ん中までアジア大陸の砂塵が大気を通して運ばれているかも知れないということは、深海堆積物の鉱物の分布や組成の違いから推論されていた(Griffin 他, 1968)。その考えを確かめるべく、洋上の研究船のマストにネットを帆のように長時間広げて、そこに捕まった大気中の塵を洗い集めて重量を計ったり、鉱物組成の分析が行なわれた

(Delany, 1967; Prospero・Bonatti, 1969)。これらの初期の実験からでも海洋大気中にも陸起源の粘土鉱物粒子が浮遊しており、その鉱物組成が深海堆積物の組成と良く似ていることがわかった(Ferguson 他, 1970)。

現在では電気掃除機と同じ原理の集塵器を用い、紙、テフロン、グラスファイバーなどで出来たフィルター上に塵を集めている。海洋大気中の土壌粒子の定量はフィルター上に捕集された塵中の不溶残渣の重量で表現されることが多い。この重量値と土壌粒子(ケイ酸塩鉱物あるいはAlumino-silicates)の主成分のひとつであるアルミニウム濃度には良い相関があり、特にフィルター上の土壌粒子の量が少ない場合にアルミニウム濃度が指標として用いられている(Rahn, 1976; Uematsu 他, 1983)。

さて太平洋上の空気中の塵を採取するためには航空機で塵を集める、船に集塵器を乗せる、島に集塵器を設置するなど目的に応じていろいろの方法が考えられる。表1に太平洋上の船上で採取された大気塵中の土壌粒子濃度がどの程度かまとめてある。航海中に集塵しているので採取場所も移動しており、採取時期も一定せず、海域毎や季節的な変動の比較は困難である。しかしこの表からわかることは陸から遠く離れた外洋でも土壌粒子が大気中にあり、しかも0.04から64 mg/m<sup>3</sup>と濃度の変動幅が非常に大きいことである。特に西部北太平洋で春先の航海中、土壌粒子の濃度が高い時が多く、それが気圧配置や気象情報からでも洋上の黄砂現象であることが確認さ

れている(Tsunogai・Kondo, 1982; Hirose 他, 1983)。

## (2) シーレックス計画

1978年、米国の研究者達を中心となりシーレックス計画(Sea-Air Exchange Program: SEAREX)という研究が始まった。この計画の目的はまだ汚染の進んでいない海域での大気中化学成分、いわゆるベースライン濃度を測定し、それぞれの化学物質の発生源が何処

表1. 太平洋の船上で測定された  
大気土壌粒子濃度

海域	濃度範囲 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	採取時期	文献
太平洋赤道域 東部 8° N-17° S	0.04-1.2	2-4月	Prospero and Bonatti (1969)
北太平洋 32-45° N	0.5-1.0	4月	Fergus他 (1970)
太平洋東部	0.10-0.57	1月	Prospero (1979)
北太平洋 26-28° N	0.73-2.34	5月	Prospero (1979)
太平洋	0.45	2-4月	Miklishanskiy他 (1981)
北太平洋西部、 中央部 28-40° N	0.21-8.4	5-6月	Tsunogai and Kondo (1982)
北太平洋西部 30-35° N	1.4-64	3-5月	Hirose 他 (1983)
太平洋赤道域 東部	0.066	6月	Maenhaut他 (1983)
北太平洋 赤道域	0.1-0.6	6-8月	Raemdonck他 (1986)

か、どの程度の濃度で存在しているのか、これらの化学物質の海洋環境へ与える影響などを明らかにすることであった。陸地からもっとも遠く離れた空気のきれいなところのひとつとしてマーシャル諸島のエニウエタック島を選んだ。この島は原子爆弾の実験場のひとつとして知られたところである。

高さ20mのアルミニウム製のタワーを立て(図1)、重金属や有機化合物測定用のさまざまな装置と約20名の研究者が観測の準備を終え、1979年1月から3月までの乾季観測期間に入ろうとしていた。その直前に台風ニアリスがエニウエタック島を直撃したのである。島は少なくとも60cm以上海面下に姿を



図1. シーレックス計画によって1979年にマーシャル諸島のエニウエタック島(北緯11.3度、東経163.3度)で建てられた高さ20mのアルミニウム製の組立式タワー。

消してしまっただけであった。タワーは見事残ったが研究室用の小屋は跡形もなく、隣の島の発電機から引いてきた海底電線はズタズタとなり、観測開始まで3箇月の遅れを取ってしまった。

乾季も半ばを過ぎた4月から、引き続き予定されていた雨季の観測期間も合わせ、8月上旬まで観測が続けられた。その結果、図2に示すようにアルミニウム濃度が4月に極めて高く、雨季になると2桁も低くなっていることがわかった(Duce 他, 1980)。アジア大陸から5,000km、北米大陸からは8,000kmも離れた珊瑚だけで出来た島に、陸にしかない土壌粒子がどのように辿り着いたのか。この時の太平洋上の気圧配置、風向、風速などの気象条件を基にこの埃っぽい空気の起源を追跡する(流跡線解析法)と、アジア大陸上空ま

で辿ることが出来た。事実、この時期に中国をはじめ、日本でも黄砂現象の気象報告がなされていた。台風-アリスのために計画されていた観測の時期はすっかり狂ってしまったが、そのおかげで黄砂の何千キロメートルにわたる長距離輸送を海洋大気中で初めて直接的に観測できたわけである。

### (3) 北太平洋中央部での観測

もし黄砂が毎年エニウエタック島に運ばれてくるなら、もちろん北太平洋全体にも運ばれているのだろうし、いつごろ、何処にどのように広がっていくのか調べることは当然の成り行きであった。この目的のために太平洋の島に集塵器を設置し、長期にわたって連続観測する研究計画が日米協同の形で進められた。1981年から図3に示す北太平洋の観測点で大気塵の採取が始まった。米国側はシーレックス計画の一環として、ロードアイランド大学とマイアミ大学が中心となり北太平洋中央部、日本側は北海道大学のグループが西部北太平洋を網羅することになった。その後、米国側は南太平洋にもその観測網をひろげた。

ここでは米国側で行なった北太平洋中央部の観測について述べるが、観測機器や設置、採取方法は日米間に共通するものであった。何点かの観測点は、風向きが悪かったり、観測機器の周辺からのゴミ焼却などによる人為的な粒子の混入があったりして観測を断念せざるを得なかった。ある観測点では地元民の暴動が起こり、観測機器がゴミ捨て場で発見されたこともあった。

集塵器は一週間で一万立方メートル近くの空気から、言い換えれば一辺が約20mの立方体中の塵を毎週20x25cmの角型紙フィルターに集めていたことになる。集塵器は海岸に設置し、海側から風が吹くときだけ空気を引くように制御装置を取付けてある。しかし北太平洋中央部の大部分の観測点は、一年を通して北東貿易風が定常的に吹く範囲内であり、

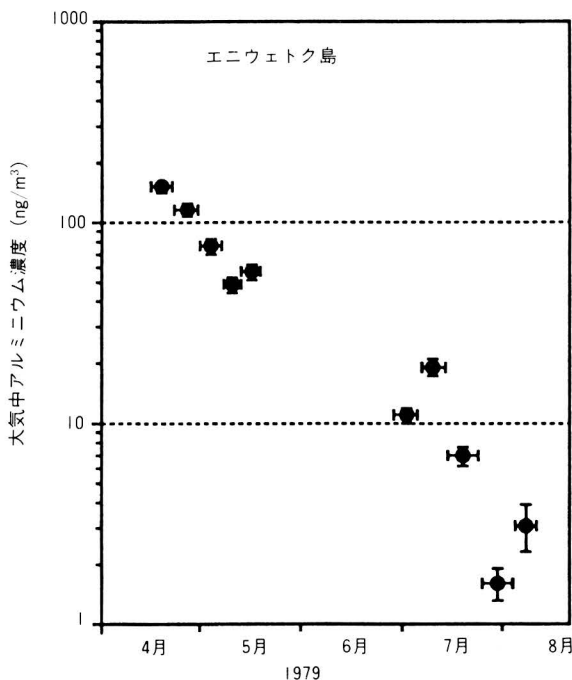


図2. 1979年にエニウエタック島で観測された陸起源粒子の指標となる大気中のアルミニウム濃度 (Duce他, 1980)。



図3. シーレックス計画の一環として設置された太平洋上の島の大気エアロソル観測点

島自体からの粒子の混入は最小限であった。

大気塵試料採取は島の人々に依頼して、フィルターを毎週一回交換して頂いた。試料の交換は全観測点で同じ日に行なった。もちろん日付変更線を境に観測点によって試料交換の曜日が異なることになる。フィルター試料の色は1週間空気を引き続けたにもかかわらず、真白なもの、薄い灰色を示すもの、時には黄土色を示すものに大別できた。日本の都市大気フィルター試料は暗黒色を示すのが常である。観測点や、季節によっては海塩の影響が大きく、湿り気を持った試料も見受けられた。

これらの試料を原子炉を用いた中性子放射分析法によって、土壌粒子の指標であるアルミニウム、海塩粒子の指標であるナトリウムを主にした十数元素の定量を行なった。この方法はフィルターの50分の1の面積(約8cm<sup>2</sup>)を切り取り、そのまま容器に入れて中

性を照射し、生じた試料中の各元素特有のガンマ線を検出器で定量する非破壊の多元素同時分析である。非常に利点の多い分析法であるが、利用できる研究用の原子炉施設に限りがあるのが致命的である。

#### (4) 太平洋での測定結果

測定結果の例として中部北太平洋のミッドウェイ島、赤道付近のファニング島の一週間毎にフィルターを交換して得られた試料中の土壌粒子濃度の時間変化を図4に示す。

ミッドウェイ島での1981年から1984年までの大気中土壌粒子は毎年4月から5月の期間に3mg/m<sup>3</sup>を越す最大濃度を示し、その前後の期間、2月中旬から6月中旬までも他の期間に比べ一桁高い濃度を示した。夏の間、9月末まで濃度は低く、秋に年によって高低はあるが明白なピークが認められた(Uematsu 他, 1983)。

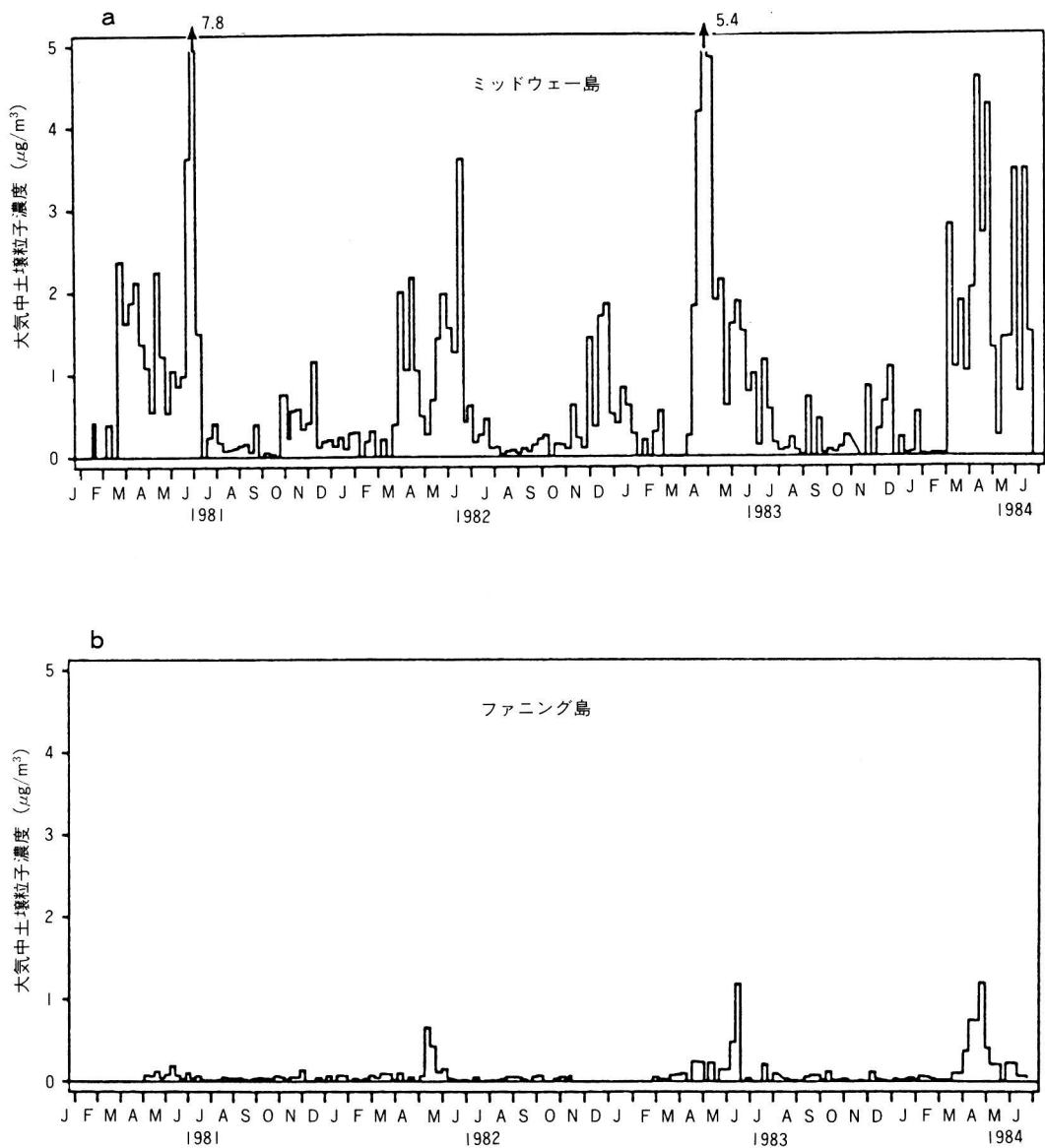


図4. 大気中土壌粒子濃度の連続週毎観測による時間的変動。  
 a)ミッドウェー島(北太平洋中央部)、b) ファニング島(赤道付近)

ミッドウェイ島と同様に2月中旬から6月中旬までの土壌粒子濃度が、他の時期に比べて1~2桁高くなるという明瞭な季節変化をシェムヤ島、オアフ島、エニウエタック島と中部北太平洋の大部分の海域で観測した。この土壌粒子高濃度期間中の幾つかの顕著な濃度ピークは、各観測点でほぼ同じ期間に見られた。ファニング島の測定結果からも、毎年数

週間の短い期間ではあるが、同様の傾向が見られた。

5年を超えるほとんどの観測期間中、一週間に一度のフィルター交換を行なったため、一週間毎の平均濃度でしか、現象を捉えることができなかった。しかし1986年3月中旬から7月中旬にかけてオアフ島とミッドウェイ島の観測点で毎日フィルターを交換し、大気

中土壌粒子濃度の日変化を見ることができた。ちょうどこの時、北太平洋中央部でハワイ大学所属の海洋調査船モアナウェイブ (Moana Wave) を使い、3月から4月にはアディオス (ADIOS: Asian Dust Input to the Oceanic System) 航海、引き続いて4月から7月にかけて第1次、2次シーレックス航海が行なわれた。ミッドウエイ島以北アリューシャン列島までの北緯30度から50度付近までの偏西風帯に、洋上定点観測の可能となる島は全く存在しない。そのために、この海域に長期にわたって船をとどめ、海洋大気を中心とした海洋観測を行なったのである。

これらの航海に対応したミッドウエイ島とオアフ島の観測点での測定結果を図5に示す。大気中の土壌粒子濃度が、春先の高濃度時期から夏の低濃度時期になる推移がよくわかる。特に中緯度に位置するミッドウエイ島では5月の後半に一週間近く続いた大規模な

黄砂現象が観測された。一週間の平均値にすると $3.8\text{mg}/\text{m}^3$ 程度になるが、毎日の変動は極めて大きいし、試料交換日によって週平均値がかなり変わることもよくわかる。数日遅れてオアフ島でもミッドウエイ島の濃度ピークの半分か三分の一程度の現象が認められた。しかし、それ以外は2,3日間の現象がどちらの島にも見られる程度で必ずしもミッドウエイ島での現象がオアフ島で観測されるわけでもなく、オアフ島の方が濃度的に高いときもある。またこれらの島に運ばれる土壌粒子は現象毎に見てみると、埃っぽい空気の中でも不均一な分布を示している。これは衛星写真からでも、大気中の放射能を使った計算からでもわかるが、埃っぽい空気は海洋大気とそれほど混じらず西から東へと運ばれていくと考えられる。いずれにしても観測点の天候は刻々と変化していくわけでそれに対応できる試料採取が理想的であろう。

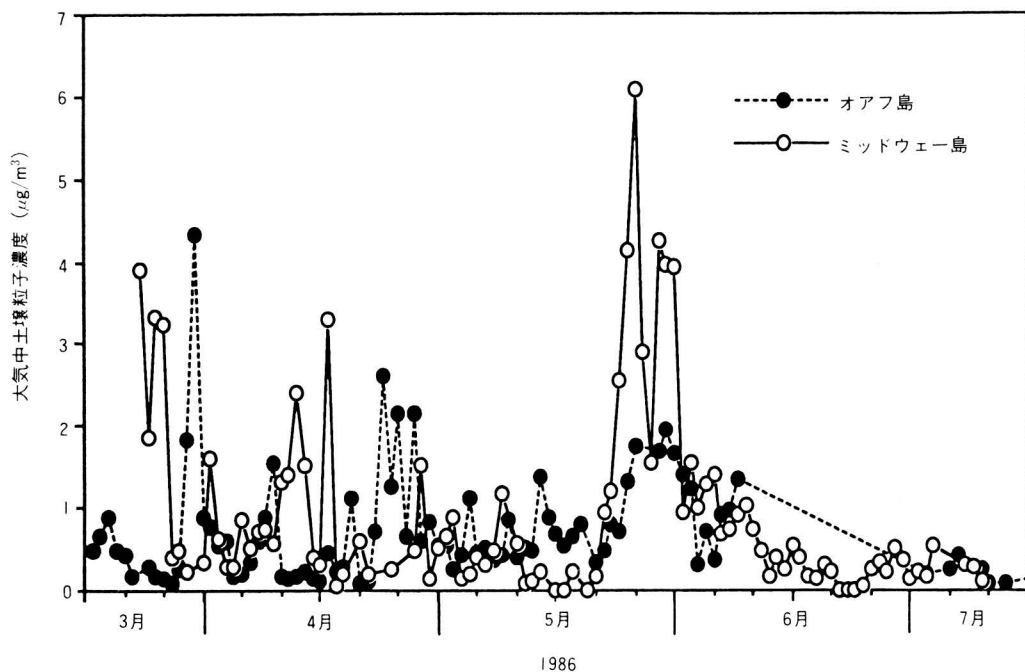


図5. オアフ島とミッドウエイ島で1986年3月から7月にかけての連続日毎観測による大気中土壌粒子濃度の変動。

(5) 洋上の土壌粒子の発生源と輸送機構

洋上の土壌粒子濃度が太平洋の広い範囲で同じように季節変動することから、土壌粒子の発生源やその輸送機構は北太平洋全域に共通したものであると考えられる。中国の砂嵐、日本で観測される黄砂、それに観測点の土壌粒子濃度ピークの時期はよい対応を示し、アジア大陸からこれらの北太平洋の観測点まで1~2週間で運ばれていることが明らか

になってきた。この黄砂の頻繁に発生する時期の流跡線の結果を図6に示す(Merrill 他, 1985)。これによるとアジア大陸内部で空気中に舞い上がった黄砂が、寒冷前線による上昇気流でさらに上空10km近くまで押し上げられ、偏西風によって北太平洋の中緯度帯まで運ばれる。その一部は下降流となり、ミッドウエイ島やオアフ島にはほぼ直線的に、海面近くでは北東貿易風として”つ”の

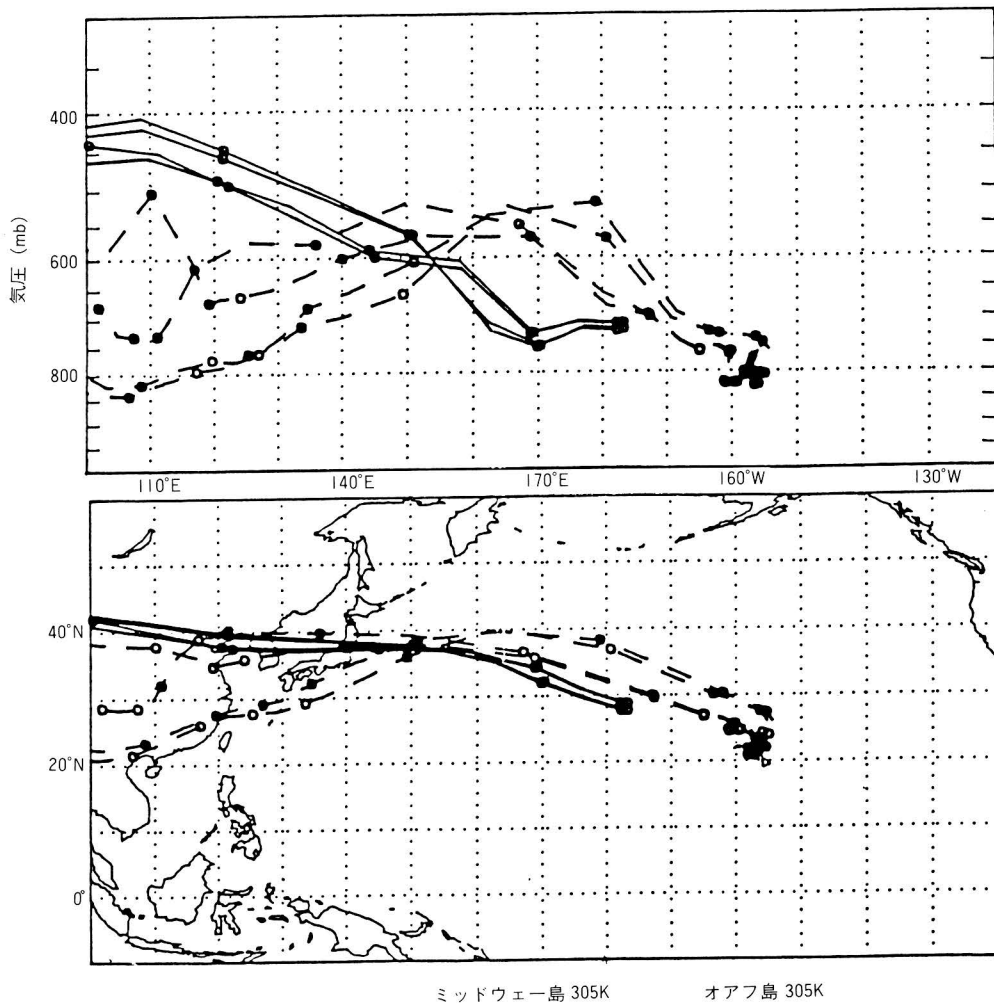


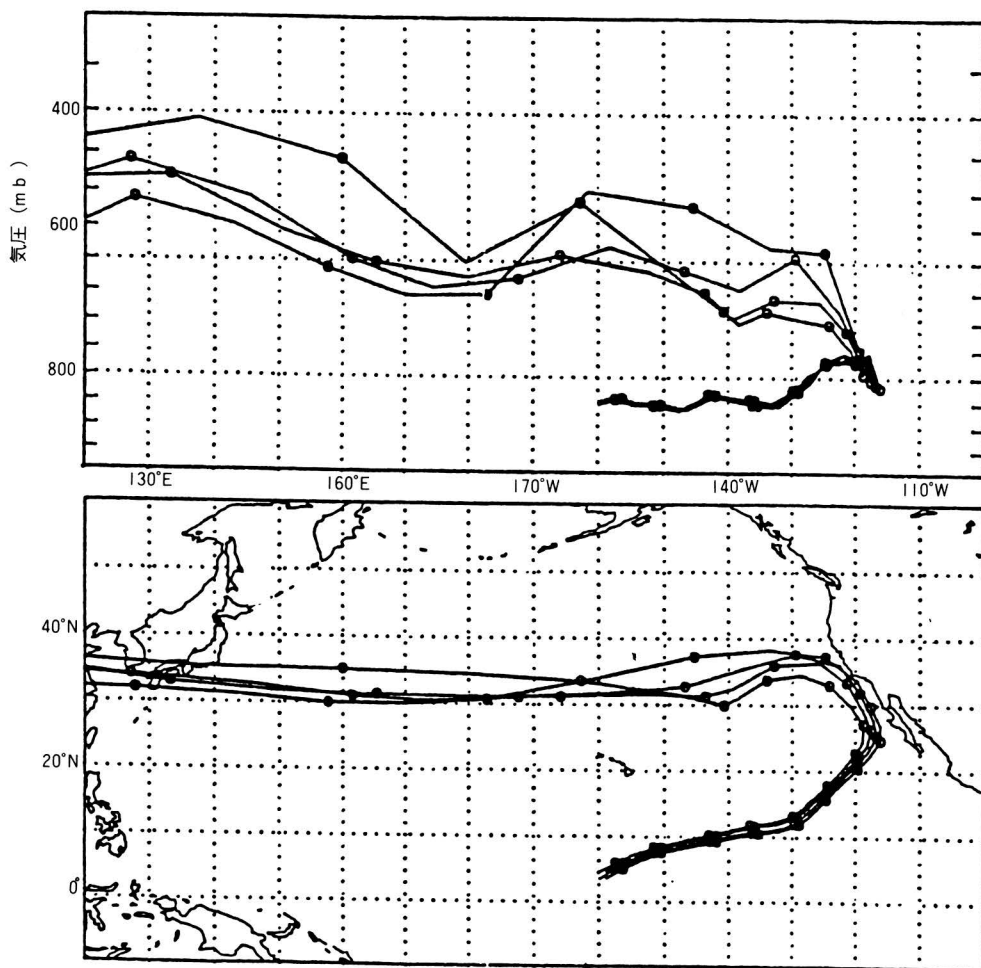
図6. 1983年3月31日にミッドウエイ島(実線)とオアフ島(破線)に到達した空気塊はどこから来たかを示した流跡線図(Merrill 他, 1989)。

線上の丸は12時間毎の位置を表わしている。上図は鉛直方向の位置、下図は平面上の位置を示している。気圧 800mb, 600mb, 400mb は高度約 1.8, 5.0, 7.0 km に対応している。

形の軌跡を描いてエニウエタック島やファンング島などの低緯度帯に辿り着くことになる。Merrill 他(1989)は、図4bのアジア、北アメリカ両大陸からもっとも離れているファンング島での顕著な土壌粒子濃度ピーク時に近くで横断していることになる。この時期には中国大陸でも砂嵐の気象報告があり、他の大気観測点でもこの黄砂現象に対応する土壌粒子濃度ピークが認められた。アジア大陸の土

壤粒子は14日間で18,000kmを旅し、赤道近くのファンング島に辿り着いたわけである。

日本から飛び立つ太平洋横断のジェット旅客機の飛行予定時間は帰りより1~3時間短いことから、上空の空気の流れが常に強いことがわかるだろう。また海上を吹く貿易風の発見が帆船の航海日数を短縮した例もあるように、目に見ることのできない空気の流れがものを運ぶという重要性が理解できよう。



ファンング島 305K

図7. 1984年3月20日にファンング島に到達した空気塊の流跡線図。  
 図3bの顕著な濃度ピークの週を選んで図6と同様の解析をした(Merrill 他, 1989)。



図8は南北の太平洋の観測網の土壌粒子濃度の年平均を緯度順に示したものである。南半球、北半球ともに中緯度で高濃度であった。これは太平洋西側のアジア大陸とオーストラリア大陸の内陸に乾燥砂漠地帯があることと、その上空を流れる偏西風による粒子の長距離輸送が重要であることを示している。1986年4月26日に起きたソ連のチェルノブイリ原子炉事故の際、放出された放射性物質がわずか1週間で日本上空を通過、その後

北太平洋中央部の主な大気観測点で検出された(Uematsu 他, 1988)。日本では予想外の放射性汚染物質の拡散も黄砂と同様にこの偏西風によることが図9に示すように明らかであった。このように砂あらし、火山噴火などの自然現象だけでなく、人間による汚染物質の大気中への直接的、間接的な放出により、その発生源の周辺部だけの汚染ではなく、地球全体に良くかき混ぜられて薄められる物質もあるだろう。その中には長い時間が過ぎても分

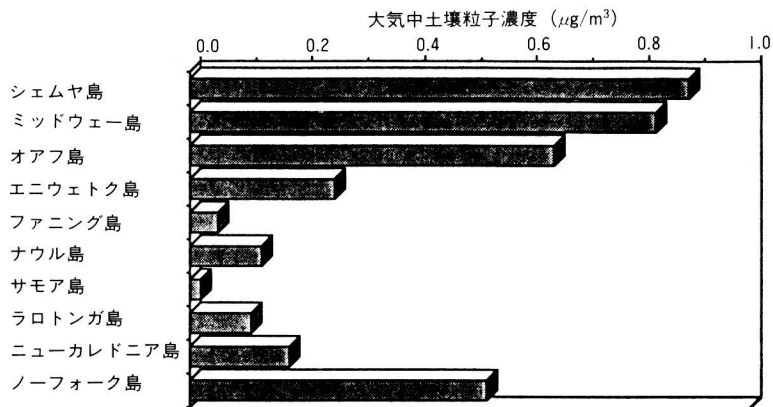


図8. 太平洋の観測網で測定された土壌粒子濃度の年平均値の緯度順。

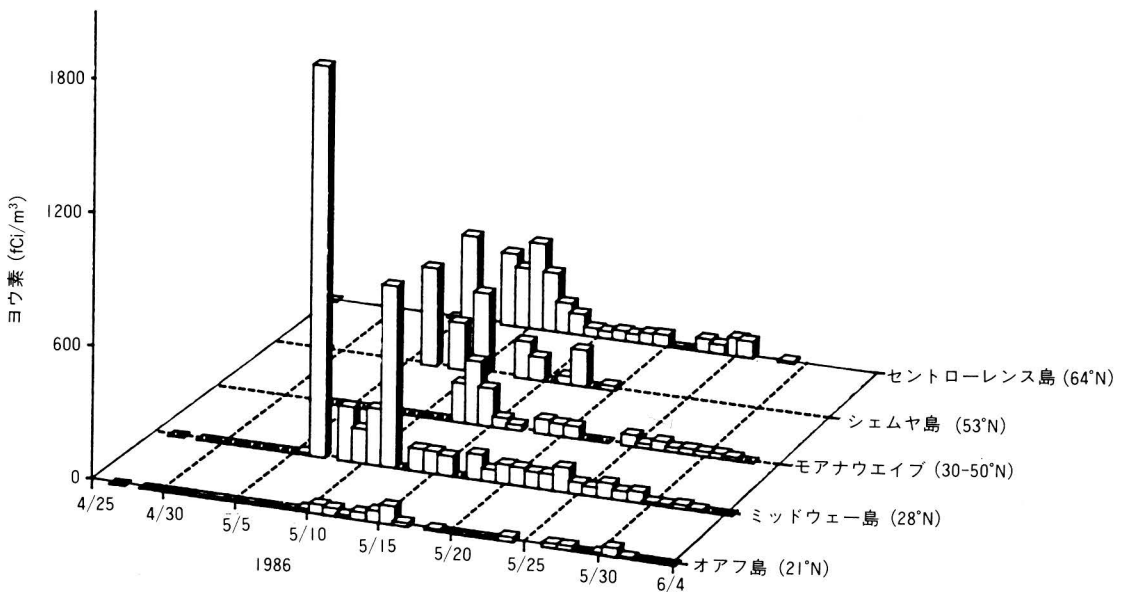


図9. 北太平洋の観測点で4月25日から6月4日まで日毎測定したチェルノブイリから放出された放射性核種のヨウ素-131 (半減期8.0日) 濃度 (Uematsu 他, 1988)。

解せず、環境中に蓄積が進んでいく物質もあって不思議ではない。

アジアの乾燥地帯にある黄砂が数千キロメートル以上大気中を飛んで北太平洋中央部まで到達するにはまとめてみると3つの条件が必要である。まず黄砂が地表から離れ、空中高く舞上げられる気象条件、そしてその黄砂を東へ運ぶ偏西風の位置と速度の変化、さらには黄砂粒子がいかにして大気中から除去されるかの3点である。これらの条件がそろった時、北太平洋中央部で顕著な黄砂現象が春先に数回見られることになる。春のワイキキの浜辺で中央アジアの埃っぽい空気を胸一杯吸うのも趣のあることではある。

## 2. 太平洋海底の堆積物と黄砂

### (1) 土壌粒子の海底への堆積速度

太平洋はその面積が $180 \times 10^6 \text{ km}^2$ と、他の二つの大洋、大西洋とインド洋を合わせた程の広さを持っている。太平洋に流れ込む河川の流域面積はわずかに $19 \times 10^6 \text{ km}^2$ と大西洋の $69 \times 10^6 \text{ km}^2$ の三分の一に満たない。しかし流域面積が小さいにもかかわらず、河川を通して太平洋へ運び込まれる浮遊堆積粒子、すなわち土砂の量は三大洋の中でもっとも多い。その大部分は雨の多い東南アジア島嶼部から年間 $3.0 \times 10^9$ トンと、中国の揚子江と黄河流域からの $2.7 \times 10^9$ トンであり、これだけで全海洋に流れ込む河川からの土砂量の三分の一を占める。

長い間、海洋堆積物を形成する物質は、海の中で生成した生物起源の物質を除けば、ほとんどが河川から運ばれてきたものだとされていた。しかし太平洋深海堆積物の鉱物分布や組成は、これらの鉱物粒子が陸から風によって運ばれてきたことを支持するものであった(Griffin 他, 1968)。図10にもっとも風化されにくい陸起源の鉱物粒子である石英の堆積物表面の濃度分布(生物起源の物質を取り除いて濃度を算出してある)を示す(Leinen 他, 1986)。北太平洋では北緯30度か

ら北緯50度の間、南太平洋ではオーストラリア大陸からニュージーランドを越えて西へ高濃度の帯が続く。この分布は両半球とも、大陸の砂漠を含む乾燥地帯が中緯度に広く存在し、中緯度帯の上空を一年中定常的に偏西風が吹いていることから、風によって乾燥地帯の土壌粒子が太平洋上に運ばれていると言える。河川の流出した石英をはじめとする鉱物粒子が、海流によって運ばれたり、海底を伝わってより深いところへ移動したのだと言うことでは、この分布図を説明することは出来ない。もし仮にそうであったとしても、アジア大陸や東南アジア島嶼部から流出する土砂は、海水中を浮遊する微小粒子を除いて、日本海溝やマリアナ海溝でほとんど捕捉されてしまって、北太平洋の中央部まで到達できないであろう。

太平洋の深海底と呼ばれるのは、大陸縁辺部や海嶺、海溝を除いた全体の43%で、そのほとんどは赤粘土で占められている。この分布域での平均堆積速度は、1000年に0.1-5 mm程度であろうと推定されている(Bostrom 他, 1973)。堆積速度は直接海底に定規をあてて計れるわけではなく、海底にパイプ状の採泥器を突き刺して堆積物を採取し、柱状試料の表層から下層にかけて半減期の異なる放射性核種の比の変化、地磁気の変動、あるいは安定同位体の比の変動などから見積る。深海底では量にすると1年間に $1 \text{ m}^2$ あたり、数グラム積もっていることになる。堆積物の試料からだと、非常に薄く試料を切り取っても数ミリの厚さとなり、数千年間の状態の平均しかわからない。

最近、西部北太平洋上の大気から採取された多量の土壌粒子(とは言っても数グラム程度)について鉱物組成を調べ、その周辺の海底堆積物の鉱物組成とほぼ同じであることが明らかにされた(Blank 他, 1985)。この海域の平均堆積速度は北太平洋中央部に比べ速く、1000年で5~10 mm程度である。分析に使用した堆積物試料の薄片の厚みを考慮すると、

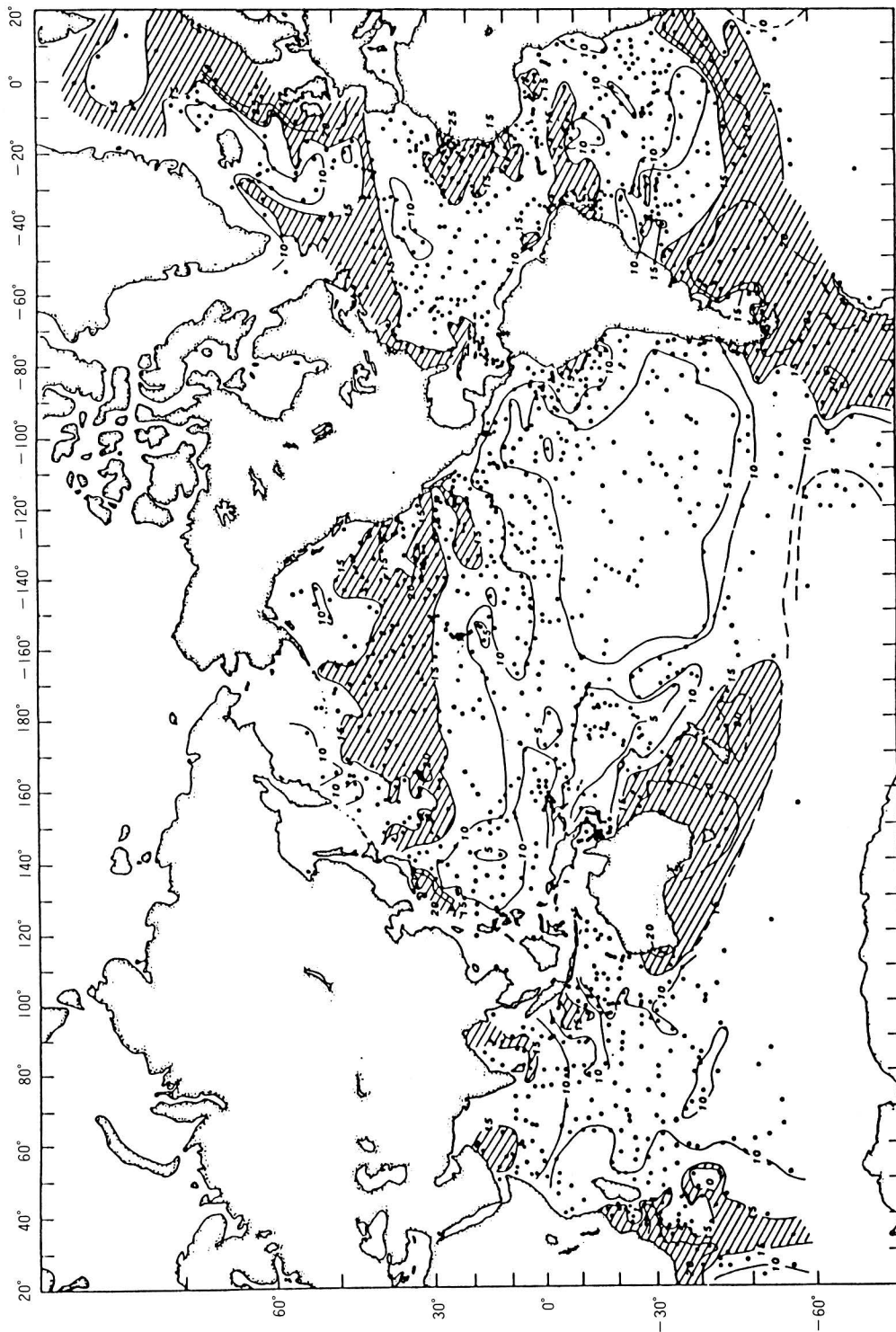


図10. 深海堆積物表面の石英の濃度分布(Leinen他, 1986)。

生物起源の炭酸カルシウムやケイ素を除いた非生物起源中の濃度を重量%で示してある。斜線の部分は濃度が15%を越える海域である。

定性的には深海堆積物の供給源は主に大気からであるということ、現在の土壌粒子の輸送パターンは少なくとも過去数千年は続いていたという仮説に矛盾はしない。このように堆積物は過去の大気や海洋環境の記録を残しているわけであるが、その記録は最高1億6千年前まででそれより古いものはない。これは大洋底が中央部から拡大していき、最終的には大陸縁辺部で地球内部に潜り込んでしまうためであり、1億6千年はそれに要する時間でもある。

## (2) 陸起源の鉱物粒子のふるまい

現在のところ、大気を通して海洋にどんな物質がどれだけの量運び込まれているか、定量的な研究がやっと始まったところである。大気の研究は河川の研究のように、古くから海への流出をあちらこちらの河口域や湾で観測していたわけでもなく、空中のほとんど目に見えない物質を、刻々と変化する天気と合わせ、観測しなければならない。

北太平洋中央部の赤粘土堆積物を形成しているほとんどの鉱物粒子の粒径は $3\mu\text{m}$ 以下であるが砕けにくい石英の粒子は $5\sim 10\mu\text{m}$ である(Rex・Goldberg, 1958)。沈降速度は陸

起源の鉱物粒子の場合、その径により変化する。直径 $100\mu\text{m}$ の砂粒子であると海面から太平洋の平均水深である約 $4000\text{m}$ 沈降するのにわずか1.8日、直径 $1\mu\text{m}$ の粘土粒子になると50年かかる計算になる(Gross, 1987)。

実際には海流の流れや湧昇流、あるいは表層の生物のお腹の中に餌と一緒に集められたり、壊されたり、また凝集したりするので計算の通りには行かないであろう。

さて、大気中では陸起源の鉱物粒子が一旦地表から舞い上がり、どの高さから落下が始まれば、偏西風によってどれ位遠くまで運ばれるか、北半球での簡単な条件を仮定して、粒径別に計算したものを図11に示す(Windom, 1975)。この場合も運ばれている途中や地表付近で雨によって除かれたり、上昇流によってふたたび高層に運ばれたりする可能性があるのも、目安にしか過ぎない。概して大きな重い粒子は発生源の近くに落ち、小さな軽い粒子は遠くに運ばれる傾向がある。しかし理論的には風速にもよるが、粒子がある程度小さくなると粒子同志の衝突の回数が増え、また沈降速度が増加する。

実際には日本上空で土壌粒子の平均粒径は、 $4\mu\text{m}$ (Kadowaki, 1979)、エニウエタッ

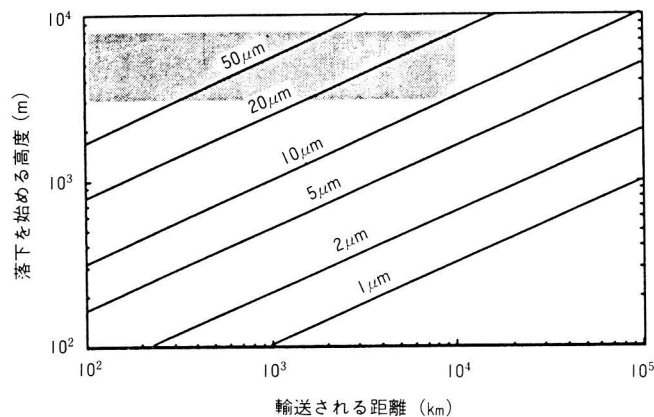


図11. 北半球の偏西風地帯で密度 $3.0\text{g/cm}^3$ のいろいろな粒径の粒子がどの高さから落下を始めると水平方向にどれくらい運ばれるかを示す模式図(Windom, 1975を基に作成)。薄い影の部分は観測されているアジア大陸での土壌粒子の舞い上げられる高度と輸送される距離

ク島では2.0~2.6 $\mu\text{m}$ (Arimoto 他, 1985)と小さくなる傾向がある。ところがエニウエタック島より、陸からの輸送距離がもっと長く、大気土壌粒子の平均濃度が一桁も低い観測点、南太平洋のアメリカンサモア島での粒径は1.9 $\mu\text{m}$ (Arimoto 他, 1987)とそれほど変化していない。このことから大気中の鉱物粒子の粒径は、ある一定値以上小さくならないことがわかる。

いずれにしろ、河川を通して海洋に流入した陸起源の鉱物粒子の大部分は沿岸近くで物理化学的に、あるいは生物によって浅海底へ除かれ、外洋域では大気からの粒子の降下が相対的に重要になってくる。最終的に陸上で侵食されて作られた鉱物粒子が、深海の堆積物を形成するまでには、平均的に見て数年から数十年の年月がかかることになる。同じような動きとして、北太平洋や北大西洋の表層水(Schaule・Patterson, 1981)、グリーンランドの雪(Murozumi 他, 1969)などから高濃度の鉛が検出されているが、これは大気を通して海洋へ物質が運ばれて汚染される一例である。米国では1930年代から有鉛ガソリンが消費されはじめ、1970年をピークに1980年にはその五分の一の消費量となった(Boyle 他, 1986)。いったん海洋に入った鉛は海水に溶けてしまうが、再び粒子化して、東部北大西洋の水深3650mの海底堆積物表層でも、すでにバックグラウンド濃度の4~5倍近く高濃度であることが報告されている(Veron 他, 1987)。

### (3) 大気から海への物質輸送量の推定

近年、どの海域にどんな物質がどれだけの量、どこから来て堆積しているのか実測するいろいろな方法が試みられている。一つは太平洋の大気観測網の島々に雨や自然に落下してくる粒子状物質を集めるバケツを置いて、その物質や量を測定する方法、各海域の海底や海水中にバケツのようなものをぶら下げて、上から落ちてくる粒子を捕捉して測定す

る方法などがある。

先で述べたシーレックス計画で筆者は北太平洋中央部の観測網のうち4箇所を選び、1981年1月から1年間、雨(降水として雪も含まれるが、これらの観測点では降雪の記録はない)とそれ以外で落下してくる粒子(ドライフォールアウト: Dry Fallout)を合わせた全降下物を採取した(Uematsu 他, 1985a)。試料の採取には多雨の観測点では口径10cm、乾季時や少雨の観測点には口径25cmのポリエチレンの捕集ロートを用い、2週間毎、大気フィルター試料交換時に捕集瓶を取り替えた。

ここで問題になると考えられたのが、大気集塵器のように風向きなど気象条件が好ましくない時に採取を止められないこと、全降下物採取器が海鳥にとって格好の留まり場になり、糞をロート内に落とすことなどであった。幸い選んだ観測点は、通年北東貿易風が吹き付けるところであり、ロートの周りにプラスチックの細い棒を張りめぐらすことで、鳥に安住の場所として採取器を選ばせなかった。ただ何度かは、観測点から数箇月かけて到着した雨水の入った試料に植物の種が入っており、すでに緑の芽を出していたことがあったり、蜂など小さな昆虫が混入していたことがあった。これらの降水試料中の粒子状と溶けているアルミニウムを中性子放射化分析で測定し、土壌粒子量を求めた。念のために蜂や細くなった葉っぱのアルミニウム含量を分析したが、試料中の土壌粒子に含まれるアルミニウムの量に比べると、無視できるほどわずかであった。また観測点の採取器周辺の海岸の土砂について分析したが、炭酸カルシウムからなる珊瑚砂で、ほとんどアルミニウムは検出されなかった。このことから観測地周辺からの土壌粒子の混入は最小限で、北太平洋のこれらの島で採取された土壌粒子は、アジア大陸から大気を通して運ばれて落下したものと考えられる。

こうして得られた1年間の土壌粒子降下量

を大気土壌粒子の高濃度期（2月～6月の5箇月間）と低濃度期（7月～1月の7箇月間）に分けて図12aに示す。大気の土壌粒子の季節変化や緯度による変化と同じように春先に降水量が多く、中緯度から低緯度へ降水量が減少する傾向があった。図12bに降水量を示したが、高濃度期は土壌粒子の供給が大きいかもかわらず降水量が少なく、雨による除去が小さい。低濃度期はその逆で土壌粒子の降水量が大気の濃度程減少しない。

その結果、降水量は大気中の土壌粒子濃度の変動幅に比べるとその幅は小さくなってい

る。1年間の大気から北太平洋中央部への土壌粒子の降水量は一平方メートルに約0.1～0.6g程度となる。この降水量は、海水中を沈降する粒子を捕集するセジメントトラップ(Sediment Trap)によって、数週間から数箇月の期間にわたり測定された北太平洋の値(0.5～4g/m<sup>2</sup>/年: Honjo 他, 1982; Noriki・Tsunogai, 1986)とも良く一致する。

このことは沿岸部を除いた外洋域では、大気を通して運ばれる土壌粒子が海水中を沈降して堆積物を形成することを定量的に支持するものである。Martin 他(1985)は北太平洋の

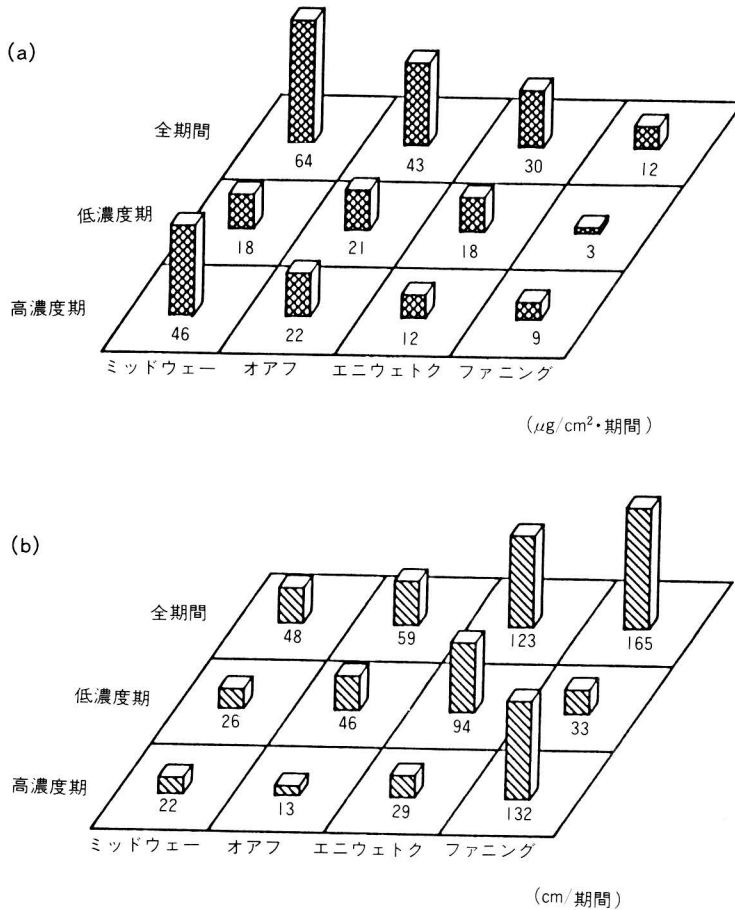


図12. 1981年に得られた1年間の土壌粒子降水量の実測値(a)と降水量(b) (Uematsu他, 1985a)。大気中土壌粒子濃度の高濃度期と低濃度期に分けて比較した

中央部と東部で異なる時期のセジメントトラップによる測定から、大気中の土壌粒子の高濃度期に低濃度期の約5倍の沈降量を水深150m層で得た。大気降水物の季節変動が海洋環境にも明白に影響していることがわかる。

図13にミッドウェイ島で得られた土壌粒子の大気中濃度、降下量、そして降水量を示してある。こうして見ると2つの顕著なピーク、2月後半の2週間と5月前半の1週間、計3週間で年間の降下量の約半分が海洋環境に運び込まれていることになる。この2つの時期は大気中濃度も比較的高く、雨も多かったことがわかる。雨による粒子の降下量はドライフォールアウトなどを含めた全降下量の75~

85%にもなる。図13の赤道付近のファニング島では1年間を通して大気中の土壌粒子濃度に大きな変動はないが、降水量の変化が土壌粒子の降下量の変化と良く一致している。このことは雨の中の土壌粒子の濃度に大きな変動がなく、降水による粒子の除去が重要であることを示している。

#### (4) 土壌粒子濃度や降下量の時間変動

土壌粒子の大気中濃度や降下量の季節変動あるいは突発的な変動は海洋表面水の土壌粒子濃度にも変化を与えている。1978年に筆者は東京からアラスカまでの研究航海の往復航路上で表面水を採取して、土壌粒子濃度を測定した(Uematsu 他, 1985b)。7月上旬のアラスカ

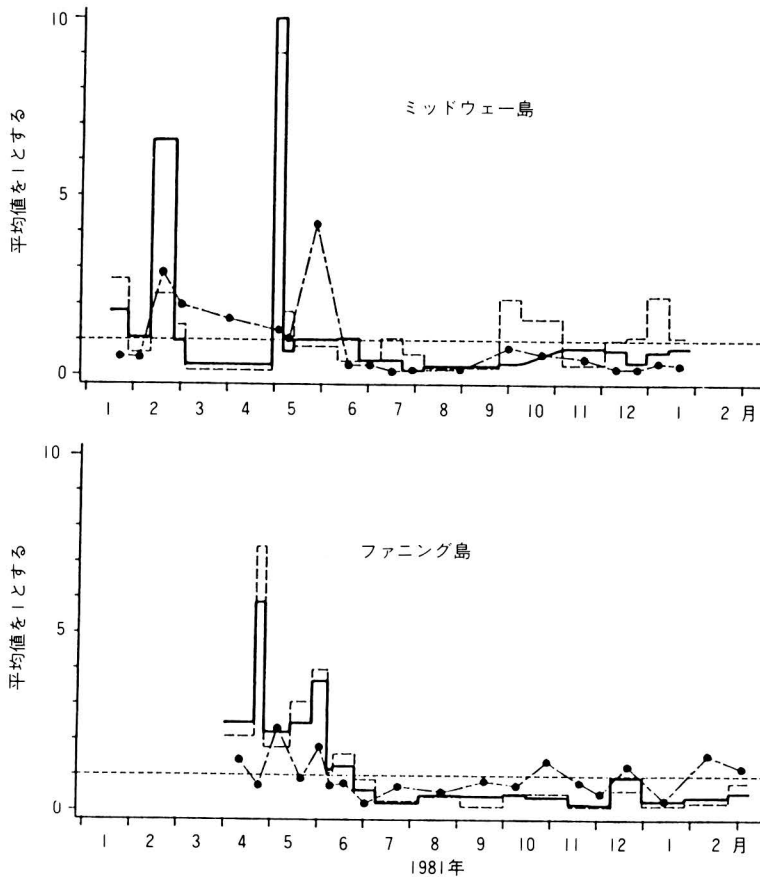


図13. 1981年に実測した土壌粒子の降下量(実線)、大気中濃度(●)、降水量(破線)(Uematsu他, 1985a)。平均値を1としたときの時間的変動

へ向けての海水中の濃度は8月中旬のほぼ8倍も高く、通常は海水中を浮遊している粒子の数%にしか満たない土壌粒子が、この時期には20%にも達した。わずか数日間で海洋へ降下した多量の土壌粒子は、1箇月の間に表面水から除かれたことになる。その量は $0.7\text{g}/\text{m}^2$ 程度と見積られ、周辺海域の海底堆積量の半分近くになってしまう。これは太平洋だけでなく、大西洋でもサハラ砂漠から運ばれる土

壤粒子についても、わずか4日間に生じた2回の現象で年間の降下量の70%の量が測定されている(Prospero 他, 1987)。

こうした一つ一つの現象を明らかにするため、1986年には土壌粒子の高濃度期である3月中旬から4月中旬にかけて南フロリダ大学、ロードアイランド大学、ハワイ大学の研究者が中心となり、大気、海洋観測をおこなうアディオス(ADIOS: Asian dust Input to the

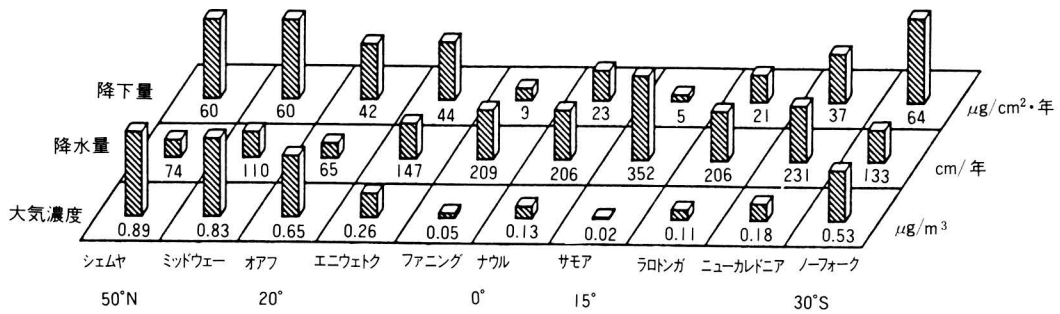


図14. 太平洋大気観測網の各測点で得られた大気中土壌粒子濃度と降水量から見積った緯度順の土壌粒子降下量(植松, 1987)。

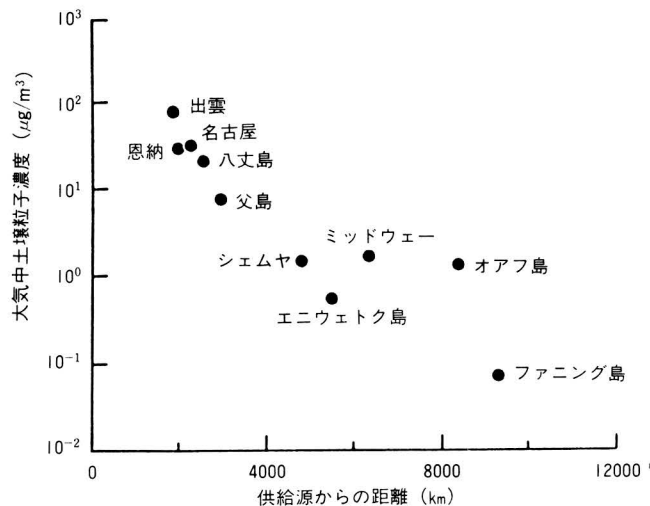


図15. アジア大陸の一地点(北緯40度、東経110度)を供給源と仮定し、各観測点までの距離を関数とした大気中土壌粒子高濃度期の平均濃度の変化(Uematsu, 1990)。



Oceanic System)航海が計画された。北太平洋中央部の一定点(北緯26度、西経155度)に約1箇月とどまり、船上で大気中の粒子や降水物、降水試料の採取、それと同時に海中の浮遊している粒子や沈降粒子を採取した。その結果、観測を開始した直後に顕著なアジア大陸からの土壌粒子の飛来があった。その中に100 $\mu$ mに近い粒径をもつ石英などの鉱物粒子が、大気降水物からも、また表層37mに吊下したセジメントトラップや現場濾過器によって採取された試料からも認められた(Betzer 他, 1988)。アジア大陸から7000kmも離れた観測点に、こんな大粒子が運ばれることを説明出来る気象の輸送機構はまだない。海鳥が運んできたのか、地球外から落下してきたのか、いろいろ思い付くことが出来るかも知れない。

大気を通して太平洋海洋底に降下する土壌粒子の全量を見積ってみる。まず先の北太平洋の4つの観測点の降下量の実測値、降水量、大気中の土壌粒子濃度の関係からスカベンジングレイシオ(Scavenging Ratio:物質の降水中濃度と空気中の濃度の比)を求めた。得られた1000という比を基に太平洋のシーレックス大気観測網で測定した大気中平均濃度と降水量から土壌粒子の降下量を推定し、図14に示した(植松, 1987)。各観測点の降下量を代表として、太平洋全域の降下量を計算するための要因は、図14のように中緯度から低緯度にかけて降下量が減少すること、そしてもう一つは図15に示すようにアジア大陸から東へ遠ざかるにつれて降下量が急激に減少し、その後減少が緩やかになることである。これらの要因を考慮して太平洋全域への土壌粒子降下量を表2に纏めた(Uematsu, 1990)。日本周辺の西部北太平洋域では北太平洋の中央部の10倍近くの土壌粒子が落ちていることになる。一方、南太平洋ではオーストラリアの砂漠地帯が土壌粒子の供給源となるが、北太平

表2. 太平洋へ大気を通して降下する土壌粒子量の見積

海 域	降 下 量	
	g / m <sup>2</sup> /年	10 <sup>6</sup> トン/年
北太平洋(0-50° N)		
西部北太平洋 (25-50° N, 150° E より西側)	~50	~300
その他の海域	0.11 - 0.62	30
南太平洋(0-50° S)		
180° より西側	0.23 - 0.64	8
180° より東側	0.05 - 0.21	10
太平洋全域 (50° N-50° S)		~350

洋の乾燥地帯に比べ、偏西風の位置など長距離輸送には適した条件が備わっていないようである。

北太平洋の年間降下量の見積った値、0.33x10<sup>9</sup>トンは、世界中で大気中土壌粒子のもっとも大きな供給源とされているサハラ砂漠から北大西洋の低緯度地域に降下する量の0.13 - 0.44x10<sup>9</sup>トン(Prospero, 1981)に匹敵するのである。一方、河川からの流入量に比べれば、その10%にも満たないが、大気を浮遊して地球上に広がるということで、太陽光の散乱や吸収、雲の生成に大きく寄与し、海洋環境に運び込まれた後も、生態系や堆積環境に与える影響は大きい。

ありえないことだが、陸地の平均標高は840m、海洋底の平均深度が3800m、毎年20x10<sup>9</sup>トン陸から海洋へ土壌が運ばれて行くと、2000万年足らずで海洋底が1000mほど浅くなって、地球上から陸地がなくなってしまうことになる。人類は、地上に誕生して400万年、はたしてそれまで生き残っているだろうか

本稿は、名古屋大学水圏科学研究所編、大気水圏の科学「黄砂」(1991年3月発行、出版:古今書院)より許可を得て、転載したものである。

## 参考文献

### 1. 太平洋上での観測

- Delany, A.C., Delany, Audrey Claire, Parkin, D.W., Griffin, J.J., Goldberg, E.D. and Reimann, B.E.F. (1967) : Airborne dust collected at Barbados. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31, 885-909.
- Duce, R.A., Unni, C.K., Ray, B.J., Prospero, J.M. and Merrill J.T. (1980) : Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific : Temporal Variability. *Science*, 209, 1522-1524.
- Ferguson, W.S., Griffin, J.J. and Goldberg, E.D. (1970) : Atmospheric dusts from the North Pacific - a short note on a long-range eolian transport. *Journal of Geophysical research*, 75, 1137-1139.
- Griffin, J.J., Windom, H. and Goldberg, E.D. (1968) : Clay mineral distribution in the world ocean. *Deep-Sea Research*, 15, 433-459.
- Hirose, K., Dokiya, Y. and Sugimura, Y. (1983) : Effect of the continental dust over the North Pacific Ocean : Time variation of chemical components in maritime aerosol particles in spring season. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 61, 670-677.
- Maenhaut, W., Raendonck, H., Selen, A., Grieken, R.V. and Winchester, J.W. (1983) : Characterization of the atmospheric aerosol over the eastern equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 88, 5353-5364.
- Merrill, J.M., Bleck, R. and Avila, L. (1985) : Modeling atmospheric transport to the Marshall islands. *Journal of Geophysical Research*. 90, 12927-12936.
- Merrill, J.M., Uematsu, M. and Bleck, R. (1989) : Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 94, 8584-8598.
- Miklishanskiy, A.Z., Yakovlev, Y.V., Savel'yev, B.V. and Atrashkevich, V.V. (1981): The entry of trace elements into the atmosphere from the oceans. *Geokhimiya*, 6, 161-169.
- Prospero, J.M. (1979) : Mineral and sea salt aerosol concentration in various ocean regions. *Journal of Geophysical Research*, 84, 725-731.
- Prospero, J.M. and Bonatti, E. (1969) : Continental dust in the atmosphere of the eastern equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 74, 3362-3371.
- Raendonck, H., Maenhaut, W. and Andreae, M.O. (1986) : Chemistry of marine aerosol over the tropical and equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 91, 8623-8636.
- Rahn, K.A. (1976) : The chemical composition of the atmospheric aerosol. Technical Report, University of Rhode Island, Kingston, 265p.
- Tsunogai, S. and Kondo, T. (1982) : Sporadic transport and deposition of continental aerosols to the Pacific ocean. *Journal of Geophysical Research*, 87, 8870-8874.
- Uematsu, M., Duce, R.A., Prospero, J.M., Chen, L.-Q., Merrill, J.T. and McDonald, R.L. (1983) : Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 88, 5343-5352.
- Uematsu, M., Merrill, J.T., Patterson, T.L., Duce, R.A. and Prospero, J.M. (1988) : Aerosol residence times and iodine gas/particle conversion over the North Pacific as determined from Chernobyl radioactivity. *Geochemical Journal*, 22, 157-163. (1986)

### 2. 太平洋海底の堆積物と黄砂

- Arimoto, R., Duce, R.A., Ray, B.J. and Unni, C.K. (1985) : Atmospheric trace elements at Enewetak Atoll: 2. Transport to the ocean by wet and dry deposition. *Journal of Geophysical Research*, 90, 2391-2408.
- Arimoto, R., Duce, R.A., Ray, B.J., Hewitt, A.D. and Williams, J. (1987) : Trace elements in the atmosphere of American Samoa: Concentrations and deposition to the Tropical South Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 92, 8465-8479.
- Betzer, P.R., Carder, K.L., Duce, R.A., Merrill, J.T., Tindale, N.W., Uematsu, M., Costello, D.K., Young, R.W., Feely, R.A., Breland, J.A., Bernstein, R.E. and Greco, A.M. (1988) : Long-range transport of giant mineral aerosol particles. *Nature*, 336, 568-571.
- Blank, M., Leinen, M. and Prospero, J.M. (1985) : Major Asian aeolian inputs indicated by the mineralogy of aerosols and sediments in the western

- North Pacific. *Nature*, 314, 84-86.
- Bostrom, K., Kraemer, T. and Gartner, S. (1973) : Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments. *Chemical Geology*, 11, 123-148.
- Boyle, E.A., Chapnick, S.D., Shen, G.T. and Bacon, M.P. (1986) : Temporal variability of lead in the western North Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 91, 8573-8593.
- Griffin, J.J., Windom, H.L. and Goldberg, E.D. (1968) : Clay mineral distribution in the world ocean. *Deep-Sea Research*, 15, 433-459.
- Gross, M. Grant (1987) : *Oceanography, a view of the earth*. 4th edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 406p.
- Honjo, S., Manganini, S.J. and Cole, J.J. (1982) : Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *Deep-Sea Research*, 29, 609-625.
- Kadowaki, S. (1979) : Silicon and aluminum in urban aerosols for characterization of atmospheric soil particles in the Nagoya area. *Environmental Science and Technology*, 13, 1130-1133.
- Leinen, M., Cwienk, D., Heath, G.R., Biscaye, P.E., Kolla, V., Thiede, J. and Dauphin, J.P. (1986) : Distribution of biogenic silica and quartz in recent deep-sea sediments. *Geology*, 14, 199-203.
- Martin, J.H., Knauer, G.A. and Broenkow, W.W. (1985) : VERTEX: The lateral transport of manganese in the northeast Pacific. *Deep-Sea Research*, 32, 1405-1427.
- Murozumi, M., Chow, T.J. and Patterson, C.C. (1969) : Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 1247-1294.
- Noriki, S. and Tsunogai, S. (1986) : Particulate fluxes and major components of settling particles from sediment trap experiments in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Research*, 33, 903-912.
- Prospero, J.M. (1981) : Eolian transport to the world ocean. *The Sea*, ed. by Emiliani, C., John Wiley, New York, 801-874.
- Prospero, J.M., Nees, R.T. and Uematsu, M. (1987) : Deposition rate of particulate and dissolved aluminum derived from Saharan dust in precipitation at Miami, Florida. *Journal of Geophysical Research*, 92, 14723-14731.
- Rex, R.W. and Goldberg, E.D. (1958) : Quartz contents of pelagic sediments of the Pacific Ocean. *Tellus*, 10, 153-159.
- Schaule, B.K. and Patterson, C.C. (1981) : Lead concentrations in the northeast Pacific: evidence for global anthropogenic perturbations. *Earth and Planetary Science Letters*, 54, 97-116.
- 植松光夫 (1987) : 大気を通して海洋へ輸送される陸起源物質に関する研究. *日本海洋学会誌*, 43, 395-401.
- Uematsu, M. (1990) : Mineral aerosol over and deposition to the Pacific Ocean. The influence of interfaces, frontal zones and anthropogenic factors upon the life of the Pacific Ocean, ed. by Anikiev, V.V., D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, in press.
- Uematsu, M., Duce, R.A. and Prospero, J.M. (1985a) : Deposition of atmospheric mineral particles in the North Pacific Ocean. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 3, 123-138.
- Uematsu, M., Duce, R.A., Nakaya, S. and Tsunogai, S. (1985b) : Short-term temporal variability of eolian particles in surface waters of the northwestern North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 90, 1167-1172.
- Verons, A., Lambert, C.E., Isley, A., Linet, P. and Grousset, F. (1987) : Evidence of recent lead pollution in deep north-east Atlantic sediments. *Nature*, 326, 278-281.
- Windom, H.L. (1975) : Eolian contributions to marine sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45, 520-529.