

風送ダストプロジェクトの概要と 地質・地球化学におけるエアロゾル研究

金井 豊¹⁾

1. はじめに

地球全体における物質循環を考えると、私達は地圏-水圏-大気圏と大きく3分割しそれぞれの圏内における物質移動と同時にそれぞれの間における物質移動を考える。この中で、大気圏というのは空気のような気体状態のものを想像するためか、地質専門分野ではあまり馴染みがないかも知れない。しかし、水圏が液体状の水だけでなく懸濁物質やコロイドもあるのと同じように、大気というのも気体ばかりではなく様々な浮遊物質がある。日本でも春になると空が霞んで見えることが多いが、これはいわゆる中国からの「黄砂」であり、紛れもなく鉱物質の固体なのである。

今年の春は黄砂が例年よりも多く、一時新聞でも話題にもなった。中国でも新春のお年玉として1月早々からダスト・ストームの話題が駆けめぐった。中国の人民日報に記載された記事を引用すると、

『(2001年1月3日 人民日報 記事) <内モンゴル地域でダスト・ストーム現象が発生した> 新世紀最初の日、我々に意外な贈り物が届いた。北京、蘭州、武威等北部の地域はダスト・ストーム及び浮遊塵に襲われた。この意外な贈り物は愛されるものではないけれども、我々にちょうどよい時期に新世紀への環境保護に警鐘を鳴らした。ちょうど人々が新世紀を迎えた時、内モンゴルの中部地域ではダスト・ストーム現象が発生した。巴盟、包頭、伊盟、鳥盟、錫盟北部及び赤峰市の地域がダスト・ストームに襲われた。調べられた内容では、モンゴル国にある低気圧の影響で、2000年12月31日14時から、巴盟北部で5~6級の大風が吹き、風速は14m/sになった。烏拉特後旗では風速が20m/sに達して、ダスト・ストーム現象が発生した。

17時に包頭北部の満都拉で風速は16m/sになり、ダスト・ストーム天気が現れた。20時に包頭北部の百靈廟等地域で風速は12m/sに、伊盟東勝市で10m/sになり、浮遊塵現象が発生した。今年1月1日8時ごろ、錫盟二連浩特地域で風速は16m/sに達し、ダスト・ストーム現象が発生した。鳥盟北部の朱日河地域でも風速が16m/sに達して、ダスト・ストームが発生した。右旗、阿巴ガ旗、錫林浩特市等地域で風速は16m/sに達し、雪を吹く現象が発生した。14時ごろ錫盟正シャン旗で風速は16m/sに達し、ダスト・ストームが発生した。資料によると、1月1日10時ごろ、赤峰地域で風速が18m/sに達し、7~8級の大風が吹き、舞い上がったダストの現象が夜まで続いた。赤峰地域は昨年から雪がほとんど降らず、乾燥しており、乾燥気候が舞い上がるダストの発生と発展を促進させた。大面積の地面に現れた砂地は舞い上がりダストにきりのない砂源を提供した。内モンゴル地域で発生したダスト・ストーム現象が再び生態警鐘を鳴らした。(訳: 国土環境(株)デリバル・トルデ(Dilber Turdi)さん)

21世紀への変わり目の日に、中国ではこのような大変な目に遭遇していたとは、テレビでお祭り騒ぎを見ていた私にはとうてい想像がつかうものではない。しかし、こうした記事を読むとダスト・ストームがいかにもすごいものであるかがわかるし、また、実際に中国へ調査に行った人の話でも大変なことのようである。このようなダスト・ストームによって発生する風送ダストは、社会生活や気象面で大きな影響を与え、さらに地球全体の気象環境にも複雑な影響を与えているにもかかわらず、それでは対策は?といわれると、その実態把握ならびに予測・評価のためのダストモデルの開発・研究が未だ不十分なため、今後の課題となっていた。そこで、平成

1) 産総研 深部地質環境研究センター/地球科学情報研究部門併任

キーワード: 風送ダスト, エアロゾル, 地球化学, ダスト・ストーム

12年度から科学技術庁（現在：文部科学省）振興調整費の1テーマ「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」において、気候変動・地球温暖化に関わる重要な因子である風送ダスト（鉱物質エアロゾル）の実態把握と、それに基づく全球的気候システムへの影響評価を目指して、自然科学から社会科学にわたる総合的研究を開始した。旧地質調査所（現：地質調査総合センター）も風送ダストの実態把握のため本研究に参加しており、本小論においては、この「風送ダストプロジェクト」についての研究概要の紹介ならびに関連話題を提供しようと思う。

2. なぜ今、風送ダストか？

地球温暖化とその危険性の指摘について1980年代に防止対策の必要性が国際的に認められるようになり、88年11月に初めての政府間の公式な検討の場として国連環境計画（UNEP）と世界気象機関（WMO）の共催による気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が設置された。ここでの地球温暖化に関する科学的検討のなかで、気候モデルを用いる温室効果ガスによる地球温暖化予測では、温暖化に関わる気候変動要因の一つとしてエアロゾルの影響が考えられている。エアロゾルには人

為起源・自然起源が考えられるが、人為起源エアロゾルによる気候影響についてはより確実性を増した定量的評価がなされつつあるが、自然起源の鉱物質エアロゾルの放射強制力（地球・大気系のエネルギーバランスに対する擾乱、または地表面・対流圏システムのエネルギー収支の変化を意味する）については、地球温暖化に対し正・負いずれの効果も及ぼしているのかについて結論が出せない状況にある。すでに欧米諸国では、サハラ砂漠やオーストラリア、北アメリカの乾燥・半乾燥地帯からの風送ダストの実態研究、数値実験的研究が進められているが、最大の風送ダスト供給源の一つであるユーラシア大陸からの風送ダストの研究はそれと比べ不十分であり、全地球規模での風送ダストの実態把握や気候への影響評価を行うためには、ユーラシア地域における実態把握を行うことが必要不可欠となっていた。

このため、中国との風送ダストに関する国際共同研究を実施し、アジア内陸部の乾燥・半乾燥地域における風送ダストの舞い上がり過程およびその大気中での長距離輸送過程に関する総合的観測調査により風送ダストの供給量評価のためのモデル化を行い、過去半世紀にわたる風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響を明らかにしようと考え、プロジェクト研究を開始したところで

「黄砂」日中共同研究へ

地上レーダーや衛星で

<p>中国内陸部の乾燥地帯で吹き上げられたダスト（砂）が日本までやってくる「風送ダスト」現象の研究に日中共同で取り組むことになり、16日、加藤廣宏・科学技術事務次官と陳雄・駐日中国大使が、東京都内で研究実施の取り決めを固めた。</p> <p>日本側は気象庁気象研究所など関係機関になり、塵に乗って大気中を運ばれる粒子密度を精密観測する地上レーダー観や、衛星を使った</p>	<p>解析システムの整備に着手し、科学技術振興調整費から5年間、約1億円が研究費として充てられた。</p> <p>タウマンヤン、砂漠やゴビ砂漠を比較する風送ダストは、日本では黄砂として知られるが、中国内陸地帯では、毎年春から夏にかけて、畑や道路に大塵に降り注いで農作物や交通に多大な被害を与える。（そのため、中国側は長年、予報や事前対策に努むつたダストの発生規模説明を怠ってきた。</p> <p>一方で、日本海や太平洋</p>	<p>に落ちたダストは植物プランクトンの栄養となり、大気中二酸化炭素の削減に投資しているほか、日照を返る効果もあり、気象や気候に大きな影響を及ぼすと見られている。</p> <p>この研究成果をもとに、アフリカのサハラ砂漠など地球全体で応用できるダスト輸送のモデルを作ることができ、地球規模の気候変動の予測にも役立てられるという。</p>
--	---	--

第1図 プロジェクトを伝える新聞記事（平成12年10月19日付け読売新聞夕刊から）。

ある(第1図)。当プロジェクトでは、気象研究所(代表:三上正男氏)が中心となり、8機関の研究所が協力・分担して中国側との共同研究を進めている。テーマは大きく次の3つに分かれており、

1. 風送ダストの発生メカニズムに関する研究
2. 風送ダストの長距離輸送過程の実態解明に関する研究
3. 風送ダストの大気・海洋への供給量評価と気候

への影響に関する研究

第1表に示される機関が中心となりそれぞれ分担している。旧地調グループは、理研グループと共に(3)風送ダスト粒子の物性に関する研究を分担し、特に当グループは中国東部から日本国内における風送ダストのサンプリングと物性解析を行っている。

第1表 共同研究の研究項目と担当機関。

研究項目	担当機関
1. 風送ダストの発生メカニズムに関する研究	
(1)タリム盆地内の風送ダスト発生および境界層内輸送メカニズム解明に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所
(2)境界層内風送ダスト輸送と三次元地形の関係解明に関する研究	独立行政法人・防災科学技術研究所
(3)地表面条件と風送ダスト発生の関係解明に関する研究	独立行政法人・農業環境技術研究所
(4)風送ダスト発生量の測定に関する研究	特殊法人・理化学研究所
2. 風送ダストの長距離輸送過程の実態解明に関する研究	
(1)長距離輸送途上の風送ダスト鉛直分布に関する研究	
a. 大気下層における風送ダストの舞い上がり、沈降沈着過程に関する研究	独立行政法人・通信総合研究所
b. 風送ダスト輸送途上における鉛直分布に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所
(2)放射計によるダスト光学特性と分布情報に関する研究	
a. 長距離輸送途上の風送ダスト光学特性と分布情報に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所
b. 日本上空での風送ダスト光学特性と分布情報に関する研究	国土交通省気象庁観測部環境気象課
(3)風送ダスト粒子の物性に関する研究	
① 風送ダスト粒子の物性に関する研究	
ア. 発生域周辺における降下ダスト粒子の物性に関する研究	特殊法人・理化学研究所
イ. 長距離輸送途上における降下ダスト粒子の物性に関する研究	独立行政法人・産業技術総合研究所
② 大気中風送ダスト粒子の物性に関する研究	福岡大学
(4)衛星情報を用いた広域ダスト分布の解明に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所
3. 風送ダストの大気・海洋への供給量評価と気候への影響に関する研究	
(1)風送ダスト発生量評価に関わる地表面情報に関する研究	(株)国土環境
(2)風送ダストの数値モデル化に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所
(3)風送ダストの放射収支への影響評価に関する研究	国土交通省気象庁気象研究所

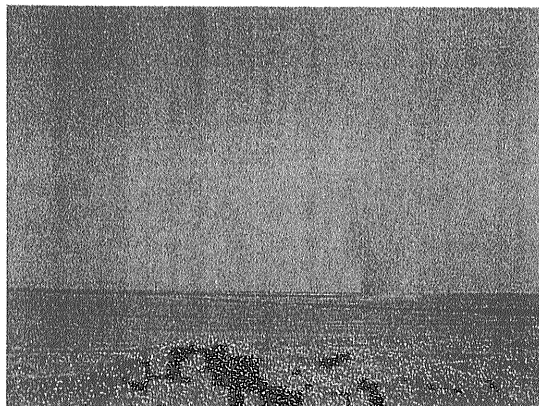
3. 風送ダストが社会生活などに与える影響

我が国における風送ダストの典型的な例は、春先に見られる「黄砂」である。黄砂が飛来した日は大空が黄褐色となり、太陽がぼんやりと霞んだようになる。黄色の砂が、車のボンネットやフロントガラスに積もったりもする。このような黄砂は、乾燥気候、砂漠化とも大いに関係しており、中国大陸の乾燥地域、草や木の生えていない大陸の黄河流域、モンゴルの砂漠地帯などの黄土や砂が、強い風によって砂塵や砂嵐となって上空に舞い上がり、偏西風で日本に運ばれてきたものである。発生地から日本まで数千キロの距離をおおよそ3～4日で到達しているといわれている。

中国は新聞報道でもわかるように、アジア地域の中で最も風送ダストの発生が顕著に起こる国で、とりわけダスト・ストームによる農作物などの被害や人的被害が深刻な問題となっている。このため、1950年代から風送ダストの研究・黄砂現象の研究が進められてきており、この間の研究によって、発生件数は増加傾向にあること、頻度は甘粛省が一番高く、和田地区、吐魯番地区の順になっていること、発生時期は3～6月に多く、発生時間は午後から夜間にかけて集中していること、などがわかってきた。

このようなアジア大陸の乾燥・半乾燥地域から風によって大気中に舞い上がる風送ダストは大量の砂塵を移動させるので、中国においては家屋、農耕地、道路の埋没など、地域住民の生活、農業、交通、経済などに重大な損害を与えてきている。たとえば、強風と浮遊砂塵による視界制限のため交通機関にも被害がおよび、砂漠周縁域にある空港が閉鎖されるなど国際航空システムにも甚大な悪影響が現れている。実際、今年の6月-7月にかけて調査団が航空機で敦煌に向けてウルムチを飛びたったところ、河西回廊は不気味なダスト雲に覆われたため目的地の敦煌空港に降りることができず、その230km東にある嘉峪関空港に一時着陸する羽目になったという。また、空の便だけでなく鉄道が長期間にわたって運休になることも稀ではない。ゴビでは竜巻(sand devil)が頻繁に発生していたという(第2図参照)。

この他にも、全地球的な規模で様々な影響を与



第2図 ゴビで頻繁に発生する竜巻(sand devil)。2001年3月。写真提供：矢吹貞代氏(理研)。

えている。風送ダストは海洋へも大量に供給される。リンや窒素、マグネシウム、カルシウムなどを含んでいるため、栄養源がほとんどない海域や海洋表層において植物プランクトンの栄養源として重要な役割を持っている。このような海洋の一次生産過程は、地球規模の物質循環において重要な因子となっており、数十～数百年という長いタイムスケールで地球環境に影響を与えていると考えられる。また、気象環境への影響も大きく、詳細は後で述べるが、太陽光を吸収して熱を蓄える働きと光を遮蔽する働きの両方を有するため、現時点ではどちらともいえないが地球温暖化の作用についても何らかの影響を与えている。

さらに、風送ダストは鉱物質エアロゾルの他に環境汚染物質も同時に運んでくる。環境汚染物質は人為起源物質ではあるが、粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子は人体への影響が大きいため、浮遊粒子状物質(SPM: Suspended Particulate Matter)として近年特に重要視されている。人体に対するエアロゾルによる主な影響の一つに呼吸器疾患があり、とくに硫酸ミストが大気中共存していると悪化するといわれている。さらに発ガン性・変異原性を持つと言われるベンゾ(a)ピレンなどの多環芳香族炭化水素(PAH)を多く含むディーゼル排気粒子は最近重大な問題となっており、トラックなどの排ガス規制も検討されるほどである。こうしたことから、「1時間値の1日平均値が $0.10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であり、かつ1時間値が $0.20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であること」というSPMの環境基準が定められている。SPMの主な発生源

は、燃焼処理を行うばい煙排出施設(煤塵)、物の機械的処理を行う粉じん発生施設(粉塵)などの固定発生源や、自動車、船舶などの移動発生源などで、それらは人為発生源である。一方、海塩、火山の噴煙などの自然発生源もあり、総じて見ると多種多様な発生源を有している。

また、微生物やウイルスもダストによって運ばれてくるのではないかとされている。ダスト輸送中の乾燥状態、紫外線暴露など通常の生命体には非常に厳しい条件下ではあるが、それでも耐性生物がいるらしく、トウモロコシのサビ病菌、タバコのベト病菌、ジャガイモの疫病菌などが空気を介して広まった例として報告されている(染谷, 1991)。最近では家畜の口蹄疫ウイルスもダストを介しているのではないかと疑われており、そうした面からの検討も今後必要となるであろう。

4. 風送ダストと気象との関係

大陸の乾燥・半乾燥地域から風によって大気中に舞い上がる風送ダストは、発生域から移動先まで広範囲にわたって生活環境に大きな影響を与えるばかりでなく、気象の面からも重要である。自由大気に鉱物質ダストとして浮遊するために太陽光の散乱・吸収および赤外放射の吸収過程による放射強制力効果や雲・降水過程を通じてグローバルな気象・気候にまで影響を及ぼしている。地質関係者がよく知っている顕著な影響例は、噴火による大気中への火山灰の寄与であろう。1991年6月に噴火したピナツポ火山の影響は、地球平均表面温度を0.5度ほど低下させたという。

ここで放射強制力というのは、正であれば地球大気を暖め、負であれば冷やすことを意味する。したがって、正の放射強制力を持てばそれは温室効果となるが、前述したようにエアロゾルの放射強制力は、種類によって正になったり負になったりするので、一概にはいえない。具体的には、硫酸塩粒子や海塩粒子は透明なので太陽放射を反射して負となるが、風送ダストのような土壌粒子や炭素粒子は有色なため太陽放射を吸収して正となることもあるからだ。さらに難しいことに、エアロゾルが増減すると雲の粒径に変化が生じ、雲の反射率や雲の量が変わるといふ(間接効果の放射強制力)。

このように大気中に存在する微粒子であるエアロゾルは、地球大気の放射収支に様々に影響を及ぼすため気候変動解析の鍵を握っているともいえる。このため、その実態を把握しエアロゾルによる気候影響を評価することは、初めに述べたように将来の気候変動予測の観点から非常に重要となっている。それと同時に、エアロゾルの大きさは $0.001\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ と幅が広く、このため化学組成や光学特性に多様性を生じ、時間的にも空間的にも分布が不均一であることから、気候変動評価に必要なモデルの開発が遅れている。このため、これらを包括的に組み込んだモデルの開発が望まれている。

このように複雑なエアロゾルの粒径、個数、そして構成物質が、これらの強制力の大きさを左右する直接的要因となるため、それらの早急な実態把握が望まれている。今回、当グループが分担するエアロゾルの物性の解明は、まさにその部分でもある。また、鉱物質ではないが、硫酸エアロゾル、ブラックカーボンなどのエアロゾルは、放射強制力に強い影響を及ぼすため、それらにも注意を払う必要があると考えている。特に、ブラックカーボンについては、全球的人為起源のブラックカーボンの4分の1の量が中国から放出されているという見積もりもあり(Streets *et al.*, 2001)、注目に値する。炭素に関しては、イタリアにおけるエアロゾルの全炭素は夏低く冬高い傾向を示し、有機態炭素は全炭素の90-97%、水溶性有機化合物は38-50%を占めていたという研究例がある(Decesari *et al.*, 2001)。

5. 風送ダストと土壌

ところで、目を天空から大地に向けてみよう。そこには私達がよく目にする土壌がある。土壌は、第四系最上位の地表面にあって、黒色～赤茶色の色をしている。農業や林業には欠くことのできないので、また、様々な昆虫、微生物の生活の場でもある。その土壌に注目してみよう。

土壌の定義としては、土木工学的に見るか、農学的に見るかで大きな違いがあるが、次のようなものがある。

(1) 地殻の最上部に位置し、主として空気圏の影

響の下にできた岩石の崩壊分解生成物が主体で、ここに生育した、また生育しつつある動植物または微生物の遺体またはその分解産物が混入して、その理学的性は粗しょう多孔性で粒と粒との間隙には水や空気や微生物が存在し、植物が存在する場合にはこれに対し理学的にも化学的にも好適でかつ温度、光線のような植生に必要な条件も都合よく享受し得る、少なくとも人工を施せば左様になし得るものでなければならない。(大杉, 1942)

(2) 土壌は地球の表面にある自然体の集合であり、所によっては人間によって土状の物質で修飾されたりつくられたりしているが、それは生物を含んでいて、野外で現に生物を支えているか支える能力をもっている。(アメリカ農務省: Soil Taxonomy, 1975)

いずれにせよ、地球表面を覆っている非固結の粉体(岩田, 1997)といえる。

こうした土壌は幾つかの特異的性質を有し、岩石・鉱物の風化、粘土鉱物の生成によって養分供給能・養分保持能がもたらされ、さらに有機成分、土壌生物の活動によって保水能・通気能が保たれている。土壌は鉛直分布の異方性があるため、土壌断面・土壌層位などで検討がなされている。この深度方向に様々な様相を呈して変化する土壌層位は、上位からO層、A層、B層、C層と以下のように分類されている。

- O層：地表面より上方に堆積した有機質層位。
- A層：最上部にある無機質層位で、生物の影響を強く受けているため有機物によって暗-黒色を呈する。
- B層：A層とB層の間にあって漸移的な部分。
- C層：土壌生成反応をほとんど受けていない母材。

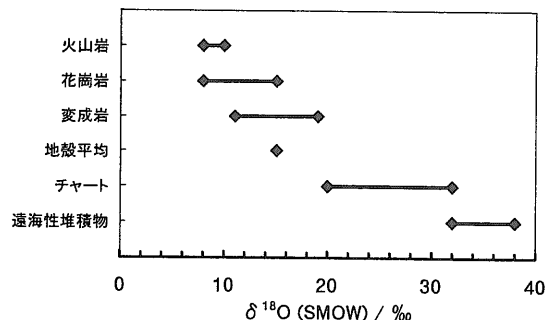
岩石の細くなった碎屑物表面に生物が定着するようになり、その生物の遺体は有機物として残存し、有機物と無機物とが反応しながら両者が混じって土壌化が進行する。このような土壌の成因論としては、表層の堆積物が風化を受けて変質したものという考え方が今まで主流のようであった。しかし、近年土壌は堆積性起源ではないかという考え方が出て、ホットな議論をかきたてている(たとえば、井上・溝田, 1988; 山野井, 1996)。

土壌は、一般にローム層の上部に載っている。

ローム層(火山灰土)が風化を受け、多量の腐植物質などの有機物が混じったものというのが従来の考え方であった。これに対して、下位から上位に無機物質が堆積し、上位で有機物が混じったというのが堆積説である。この両者の成因説を検討するため多くの土壌研究がなされ、化学組成や粒子の検討も行われた。その結果、土壌中、特に土壌区分A₁の粘土鉱物中に多くの風成塵粒子が混入していることが判明したのである(井上, 1981; 井上・溝田, 1988)。ローム層は日本各地に分布し、火山からの噴出物が堆積したものと考えられ、特に広域軽石層は年代判定のキー層とまでになっている。しかし、ローム層がすべてこうした一次的火山性物質だけではないことが示された意義は大きいと考えられる。このような風成塵は、東北や北海道(伊藤ほか, 2000)、岐阜県(Chowdhury *et al.*, 2001)、北九州(溝田ほか, 1992)、南西諸島(井上ほか, 1993)におけるローム層でも確認されている。風送ダストが、日本全土にわたって土壌形成に重要な役割を演じているのである。

井上(1981)によると、土壌中に含まれる14 Åの粘土鉱物のほとんどが、大陸起源の風成塵と推定されている。また、その中には微細石英を伴っており、石英の酸素同位体は大陸のレスや日本に飛来する黄砂のそれと近い値にあり、火山岩や火山灰の値とは大きく異なることを示し(第3図参照)、微細石英粒子も風成塵起源としている(溝田・井上, 1988; 井上・溝田, 1988; 井上・成瀬, 1990)。

ところで、広域に分布する風成塵の粒径分布を知ることは、風成塵の同定に関係して有用である。たとえば、井上・成瀬(1990)によると日本まで飛来



第3図 各種岩石における石英の酸素同位体比(溝田・井上, 1988を一部改変)。

する風成塵の粒径は3-20 μ mの範囲にあるとされているが、北海道では4 μ m以下が多く4-5 μ mにピークを持つものがあること(伊藤ほか, 2000)、西南北海道・北部東北日本では4 μ mを中央粒径値としていること(鷹澤ほか, 1994)、東北日本では約5 μ mであること(成瀬ほか, 1985)といった報告がなされている。また、供給源からの運搬距離によって、粒径の中央値が減少していることが報告されている。さらに、風成塵の粒径分布は後で述べるように東アジアモンスーン気候の風速や運搬経路といった風系の変動を反映しているとも考えられ、古環境変動の解析にも有用である。

このように風成塵は、私たちの生活に身近な土壌の形成において重要な働きをしているといえよう。また、風成塵の詳細な検討は、第四紀地質学の面だけでなく地球上での物質循環・移動を考える上で欠くことのできないものとなっている。

6. 風送ダストの地球化学

風送ダスト研究はこれまで述べてきたように気象学的に重要であり、そのモデル化には欠くことのできないものとなっているが、一方、地質学・地球化学的な視点から眺めてみると、前節の土壌起源問題の他にも様々な課題が浮かび上がってくる。一つには初めに述べたように地球上における物質循環の一経路・一形態であるので、物質の起源、移動、フラックスなど解明すべき点が多い。過去の堆積物による古環境の復元や変遷、物質の輸送過程における滞留時間や変質メカニズムなど、何れをとっても奥が深く興味深いものばかりである。しかし、私にはこれらのすべてについて触れる能力もないので、単にその一部分を紹介するにとどめる。

従来、日本においても黄砂現象が注目されて、ライダーや気球などの手段を用いた観測解析手法が数多く試みられ、黄砂の起源・輸送過程・変質過程について多くの研究蓄積がある(たとえば、名古屋大学水圏科学研究所編(1991)大気水圏の科学-黄砂)。従って、黄砂のような風送ダストの発生・移動・沈着の各過程におけるそれぞれのプロセスに関する研究ポテンシャルは高いといえよう。

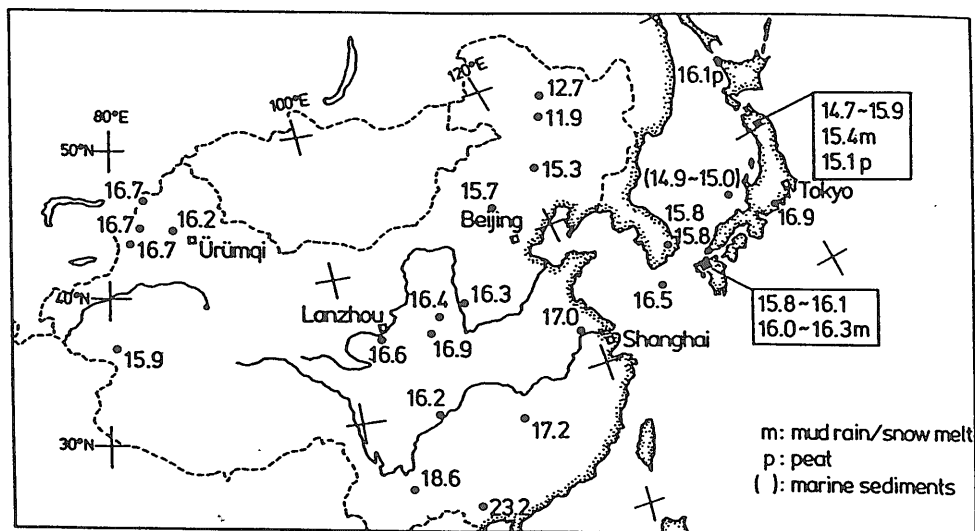
また、黄砂のみならず大気中浮遊物質などについても、物質移動の観点から地球化学的な研究が

数多くなされてきている。たとえば、鉄を含有するエアロゾルであれば、メスバウアー分光法によって鉄化合物の種類が同定が可能で、ポーランドでは冬季に鉄水酸化物・鉄酸化物の他に石炭燃焼に起因する硫化物(FeS₂, FeS, Fe_{1-x}Sなど)が見いだされたことが報告されている(Kopcewicz and Kopcewicz, 2001)。また、大気中浮遊物質は風によって運搬されるために気団の影響を受けるので、このことから逆に物性を解明して気団や起源を探る研究がなされている。特に、同位体を使用すると同じ化学的挙動をする元素を色分けすることになるので、起源や混合プロセスを解明する上で強力な解析手法となる。こうした指標として、酸素同位体、イオウ同位体、ストロンチウム同位体、希土類元素、鉛同位体などが有効と考えられている(たとえば、Yabuki *et al.*, 2000)。

一つの元素の同位体組成に差が出る原因には、a) 元素の存在度の地域差や年代に伴う放射性核種壊変、b) 蒸発などの過程における質量分別効果、c) 生物活動に伴う同位体分別、などが一般に知られている。それぞれの効果の程度が地域・環境によって異なるため、同位体組成によって起源を区別することができるのである。それぞれの詳細はここでは省略するが、酸素同位体、鉛同位体について少し触れておく。

酸素同位体比については土壌の項でも触れたが、石英中の酸素同位体は岩石ができたときの同位体比を保持しており、その値は種類によって異なっている(第3図参照)。中国大陸の砂漠砂試料や東アジア地域の土壌試料中の細粒石英の酸素同位体比がMatsuhisa *et al.* (1993)によって測定されており、第4図にその結果が示されている。この同位体結果からも日本の土壌を構成する風送ダストがアジア地域から飛来していることが推定される。

鉛同位体比も同様である。鉛には4つの安定同位体があり(質量数: 204, 206, 207, 208)、質量数208の鉛はTh-232を、207はU-235を、206はU-238を起源としている(たとえば、金井, 2000)。地殻の鉛同位体比は、マントル起源の鉛と地殻でのU, Thの壊変起源の鉛による混合同位体比と考えられるので、両元素の分布の相違や、年代の相違によって、地殻の鉛同位体比に地域差が生じるわけである。したがって、鉛の同位体比で起源の推定が可



第4図 アジア地域における地質試料中の石英の酸素同位体比分布 (Matsuhisa *et al.*, 1993による)。

能となる(たとえば, Mukai *et al.*, 1993; 2001). Bollhofer and Rosman (2001)は, 北半球の80ヵ所で1994-1999の6年間にわたってエアロゾルの鉛同位体比を測定し, 地球規模での汚染源や大気の流れを追跡した研究を行っている。また, 標高の違いによる地衣類植物中の鉛同位体比から大気中の同位体比組成の相違を論じる報告もある (Doucet and Carignan, 2001)。

7. 風送ダスト中の放射性核種

現在飛散している風送ダスト中には様々な放射性核種も含まれており, 大気の流れを解明する指標となりうる。大気中の人工放射性核種は, 大気圏内核実験や不幸にして起こった原子力発電所事故などによって放出される。人工放射性核種は常時存在するものでないだけに, 大気のトレーサーとしての利用度は高い。1986年に起こったロシアのチェルノブイリ原発事故の際には, そこから放出された核種の観測によって地球大気がおおよそ2週間程度で一回りしていることが判明したという例もある (広瀬, 1995)。また, 2000年4月9日に北アフリカのサハラ砂漠から発した微細な淡黄色のダストが降雨と共に観測されたが, その中の放射性核種にセシウム-137が未だに認められたという (Papastefanou *et al.*, 2001)。これは, 14年前のチェルノブイリ事故を起源としている。現在の濃

度は26.6Bq/kgであるが1988年の時点では1000.6Bq/kgであったので, 降雨によるウォッシュアウト除去効果を反映して, 生態学的半減期は2.3年(セシウム-137の物理学的半減期は30年であるが)と見積もられている。

これに対して, 大気中にある主な自然放射性核種にはBe-7やRn-222, Pb-210がある。Be-7は大気上層において宇宙線による核反応で生成する誘導天然放射性核種 (induced natural radioactive nuclide)の一つで, この他にトリチウム, 炭素-14などがある。Be-7は半減期53.3日で, 成層圏から対流圏に降下してくる。一方, Rn-222は大地に含まれるラジウム(Ra-226)から生じた希ガスで, Pb-210はさらにこれが大気中で数回壊変を繰り返してできた核種で, 起源としては大地である。Rn-222は半減期が3.8日であるが, その後短半減期の核種を挟んで半減期22.3年の鉛-210となる。Be-7とPb-210とは起源が異なるが, 大気中に浮遊するエアロゾルに共存し測定も同時に行えるため, 大気の流れのトレーサー的な利用がなされている。

大気中の鉛-210濃度については, 既に金井 (2000)で一部紹介した。海洋上では陸上と比べラドンの供給がほとんどないため外洋ほど少なく, また, 南極でも土壌が氷雪に覆われているため少ない (多田ほか, 1986)。鉛-210の鉛直方向の分布は, 高度とともに指数関数的に大きく減少し成層圏下部で再度極大となった後, 成層圏内では高度とと

もに減少する(土井・佐藤, 1992)。さらに, Pb-210 に関しては, その短寿命の前駆核種や娘核種の Po-210 などとの放射平衡・非平衡関係を利用して, 大気中におけるエアロゾルの挙動解明や平均寿命の推定がなされている(Graustein and Turekian, 1986)。また, エアロゾルとして木々の葉に付着してからの沈着・脱着挙動を知るトレーサーとしての研究例(百島, 1995)がある。

また, 火山活動によって火山ガス・火山灰が放出されるが, それとともに多くの放射性核種も放出され, 大気浮遊塵として採取される。特に特徴的な核種は Po-210 で, 大気中に存在する Po-210 のおおよそ 60% が火山起源といわれている(Lambert *et al.*, 1982)。小村(1995)の調査によると, 鹿児島島の桜島火山周辺では大気中のラドン起源の Po-210 はわずか 5% にすぎず, 95% が火山活動による Po-210 と見積もっている。

8. 風送ダストと古気候変動

第四紀層上部に広く堆積するローム層には, テフラ起源の物質と共に種々の風成塵が含まれることは既に述べた。それらの中に含まれる微細石英粒は, 広域風成塵として偏西風に乗って中国内陸部から運搬され, 日本各地に堆積したものであろう。したがって, 風成塵の供給パターンの変動, すなわちフラックスの変動は供給域である中国内陸部の乾燥度の変動を, 風成塵の粒度分布は運搬する季節風の風速や運搬経路といった風系の変動を反映すると考えられている(たとえば, Prospero *et al.*, 1983; Janecek and Rea, 1985; Rea, 1994 など)。石英は風化に対して安定な鉱物の一つであるから, 石英を調べることによって, こうした過去の大気の流動, 気候変動が復元・推定できるわけである。

また, 風成塵は日本海や遠く太平洋・ハワイ方面まで飛来するであろうから, 堆積速度の遅い海洋底堆積物に含まれる風成塵は, 大陸気候の長期変動に関する指標として広く用いることができよう。特に, 太平洋域に供給される風成塵の組成やフラックスには, 日本と関係の深い, 中央アジアから東アジア地域における冬のモンスーンに伴う大気循環変動が過去数千年以上にわたり如実に記録され

ている可能性があり, 詳細な研究がなされている(たとえば, Kawahata *et al.*, 2000)。

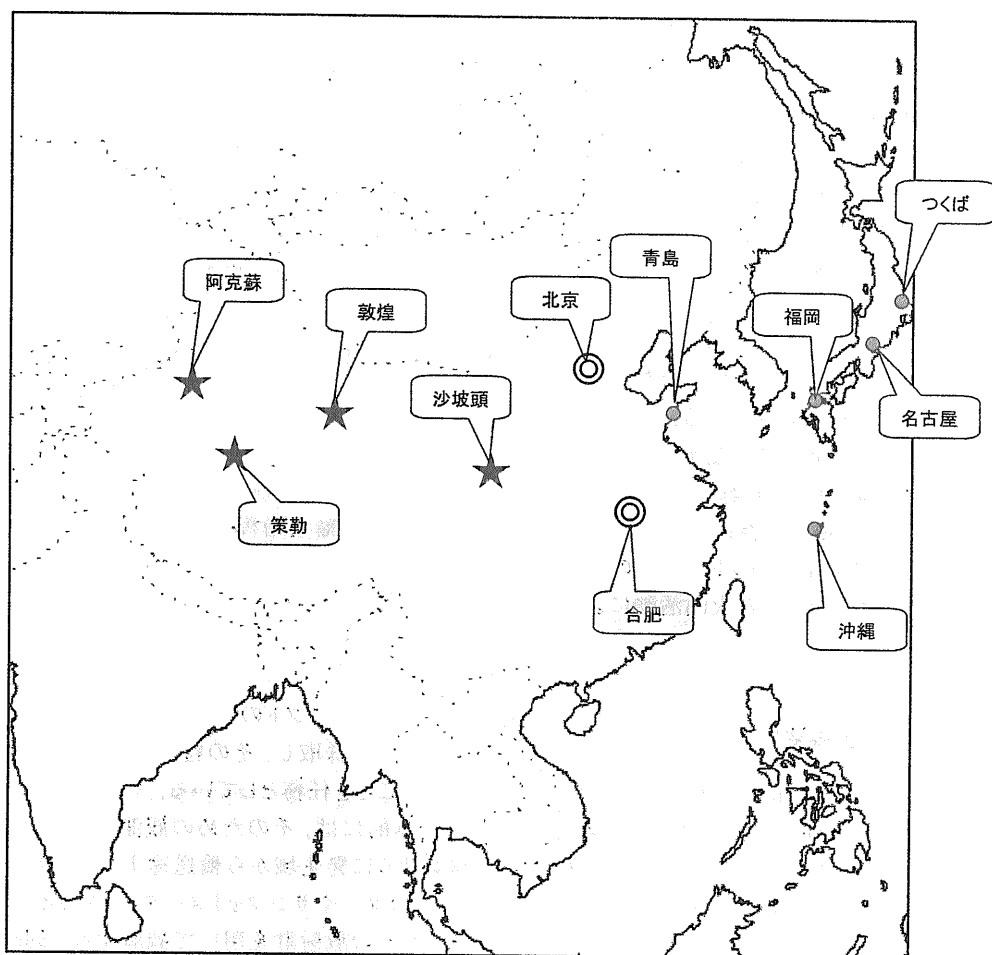
一方で, これらの研究が進むにつれ, 風成塵中の石英にも地域差や時代による変化が認められ, その起源の変化が論じ始められている。このことは酸素同位体だけでなく, いろいろな化学組成, 同位体分析が重要であることを示唆している。

9. 風送プロジェクトの概要

当プロジェクトの最終目的は, 中国との研究協力体制の下にアジア内陸部の乾燥・半乾燥域における風送ダストの舞い上がり過程およびその大気中での長距離輸送過程に関する総合的観測調査を行い, 風送ダストの供給量評価のためのモデル化, 並びに過去半世紀にわたる風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響を明らかにすることである。そして, 旧地調グループはそのサブグループとして風送ダストの実態把握を目標に, 実際にダスト試料を採取し, その粒径分布と化学組成を解明することを任務としている。

具体的には, そのための観測ネットワークを第5図のように発生域から輸送途上, 国内にまで配置し, ライダーやサンフォトメーター・スカイラジオメーターなどの放射計を用いて観測すると同時に衛生観測なども併用して連続観測を行い, さらに我々は実際のダスト試料を採取するのである。ライダーや放射計では地上からの連続観測が可能であるが, そのデータ解析は様々な光学特性を仮定して理論計算されているのが実状である。実態に即した, より精密なデータ解析を行うためには, ダストの粒径分布やダストの屈折率などのデータが不可欠であり, そのために実際のダスト試料の物性値が必要なのである。

プロジェクトでは, 理研グループが中国国内の発生域であるタクラマカン砂漠周辺域でのサンプリングのためにサンプラーを設置し, そして当グループはタクラマカン砂漠からの風送ダストの輸送途上にあたる中国東部, 日本国内の沖縄, 福岡, 名古屋, つくばの各地点にサンプル採取装置を設置することになっており, 既に機器の設置も終わり観測を開始した。地調グループが設置した採取装置は, ハイボリュームエアサンプラーとローボリュームエア



第5図 風送ダストの観測ネットワーク。●と◎(予定)は当グループの試料採取地点。

サンプラー(アンダーセンタイプ)で、つくばにはさらに自動降下塵採取装置も設置した(第6図参照)。また、中国東部の観測地点には青島(チンタオ)が選定された(第7図)。写真に写っている研究者は、カウンターパートになっている中国科学院大気物理研究所の張仁健氏である。さらに、平成13年度には中国側にもう2カ所に採取装置を設置することになっている(第5図参照)。

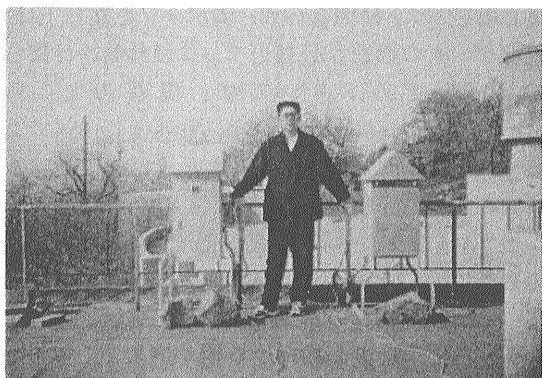
ダストのサンプリングというのは今までに経験のないことで、私にとって戸惑うところも多かった。慣れない手つきでフィルターの変換や測定をしているが、データが出てくると結構おもしろいものである。第8図には、アンダーセンサンプラーやハイボリュウムエアサンプラーで採取したフィルターの様子

を示した。第9図には旧地質調査所の屋上において採取したエアロゾルの粒径分布を示した。まだ予察的な段階であるが、径の小さなエアロゾルのピークと、風送ダストと考えられる径が4-5 μm に中心をもつピークとの2山が観察されている。今後継続して観測することで、いろいろなことがわかってくるものと期待される。

プロジェクトでは、平成13年度末から14年度初めにかけてのダスト・ストームの活発な時期を狙って、第1回目の短期集中観測(IOP)が予定されている。IOPでは、すべての観測点において連続的に密にデータを採取することを目的としており、これが一番の正念場でもある。そのための準備をそれまでに着々と進めていく予定である。



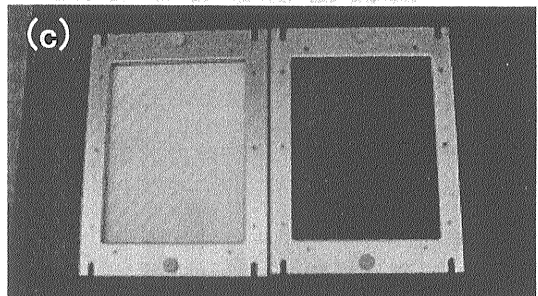
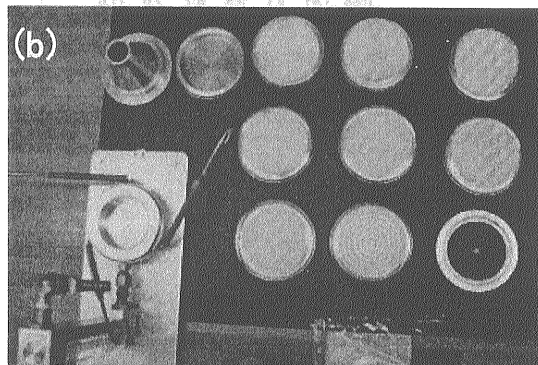
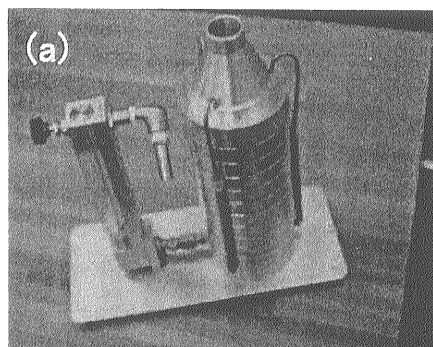
第6図 つくば(旧地質調査所)に設置されたダスト採取装置。うしろに見える山はつくばを代表する筑波山。



サンプラーの設置してある場所



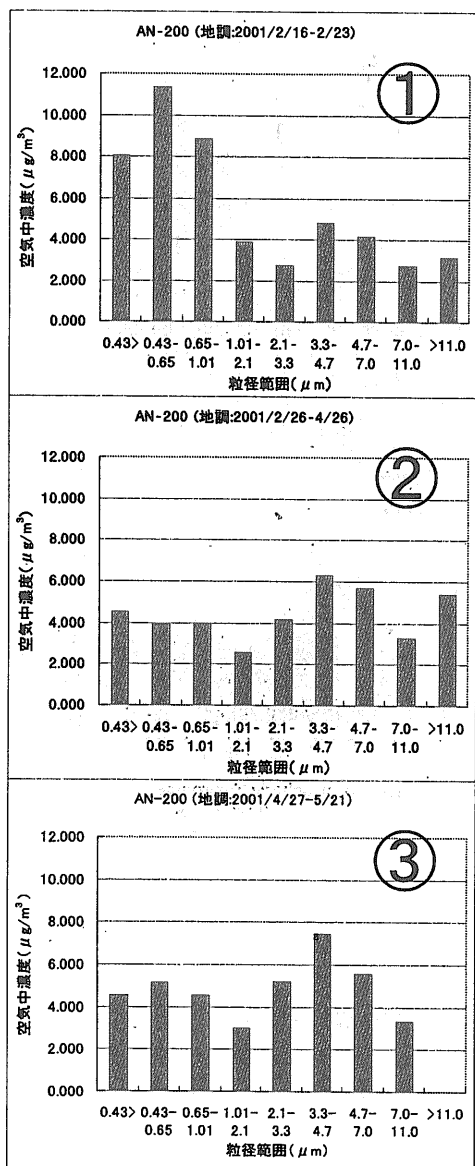
第7図 青島(中国)に設置されたダスト採取装置と、共同研究者の張 仁健氏。



第8図 (a)アンダーセンサンプラーの心臓部に当たる分級採取部。(b)アンダーセンサンプラーで採取したダスト試料。各ステージに分解し、左上から右下にかけて粗粒から細粒の順に並べた。20日間連続吸引。(c)ハイボリュームエアサンプラーで採取したダスト試料。左が採取前、右が採取後のフィルターの様子。10日間連続吸引。

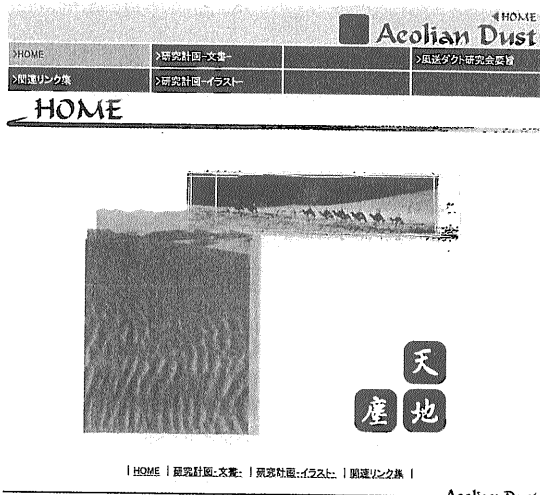
10. 終わりに

本小論では、科学技術庁(現在:文部科学省)振興調整費の「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」の内容紹介と、関連する幾つかの話題を紹介した。広範な分野にわたるため、個人的な理解不足や誤解している部分があるかも知れないが、ご指摘・ご教示いただける



第9図 つくばにおいて採取されたエアロゾルの粒径分布の一例。0.5 μmと4 μm付近をピークとする二山分布となっている。
 ①：2001年2/16-2/23
 ②：2001年2/26-4/26
 ③：2001年4/27-5/21

と幸いである。風送ダストの話題は地球環境・地球温暖化に絡んだテーマであり、重要性は言うまでもないが、地球温暖化の対策は一朝一夕に解決できるものではない。まずは精度・密度の高いデータが不可欠である。一方、こうしたエアロゾルの観



第10図 風送ダスト研究会のホームページ

測や研究は、日本各地の大学や研究機関でも既に延々と行われている。その中で、こうした観測ネットワークを構築したのは、全地球的な研究としてネットワークを組み、データの共有と成果の迅速な公表を通して、地球温暖化に対して早急な対策指針を与えようとするものである。我々のプロジェクトでも風送ダスト研究会のホームページを立ち上げ、観測データの迅速な公表とデータの共有を目指している。そのアドレスは、現在のところ <http://www.aeoliandust.com/index-j.html> である(第10図参照)。画面の「天地塵」は、エアロゾル研究の重要性を示唆するような言葉でもあろう。

当プロジェクトと時期を前後して、中国の科学院でもダスト・ストームに関連するプロジェクトが立案・開始され、アジア地域でもアジア地域でのエアロゾルの化学組成と物理的特性を明らかにするための国際協同研究計画(ACE-Asiaと呼ばれている: Aerosol Characterization Experiment in Asian Region, ホームページ: <http://saga.pmel.noaa.gov/aceasia/>)が大学研究者を中心に進められつつある。今後、そうしたプロジェクトともタイアップして、より良い成果を上げていきたいと考えている。

謝辞: 本プロジェクトに関与する研究機関のメンバーや当グループ員、並びに観測・サンプリング業務にご協力いただいている関係者に深く感謝する。

参 考 文 献

- Bollhofer, A. and Rosman, K.J. (2001) : Isotopic source signatures for atmospheric lead: The Northern Hemisphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65, 1727-1740.
- Chowdhury, M.E.K., Naruse, T., Yoshikawa, S. and Toyoda, S. (2001) : Eolian dust deposition in the last glacial stage (43-12ka) in Tanigumi Moor, Gifu prefecture, central Japan. *The Quaternary Research*, 40 (3), 211-218.
- Decesari, S., Facchini, M.C., Matta, E., Lettini, F., Miccea, M., Fuzzi, S., Tagliavini, E. and Putaud, J.-P. (2001) : Chemical features and seasonal variation of fine aerosol water-soluble organic compounds in the Po Valley, Italy. *Atmospheric Environment*, 35, 3691-3699.
- 土井妙子・佐藤 純 (1992) : 成層圏下部の²¹⁰Pb濃度. *Radioisotopes*, 41, 59-60.
- Doucet, F.J. and Carignan, J. (2001) : Atmospheric Pb isotopic composition and trace metal concentration as revealed by epiphytic lichens: an investigation related to two altitudinal sections in Eastern France. *Atmospheric Environment*, 35, 3681-3690.
- 鷹澤好博・柳井清治・八幡正弘・溝田智俊 (1994) : 西南北海道-東北日本北部に広がる後期更新世の広域風成塵の分布. *地質学雑誌*, 100, 951-965.
- Graustein, W.C. and Turekian, K.K. (1986) : ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in air and soils measure the rate and vertical profile of aerosol scavenging. *J. Geophys. Res.*, 91, 14355-14366.
- 広瀬勝己 (1995) : 大気エアロゾルの長距離輸送の指標としての人工放射性核種. *エアロゾル研究*, 10, 289-294.
- 井上克弘 (1981) : 火山灰土壌中の14A鉱物の起源, 風成塵の意義. *ペドロジスト*, 25, 97-118.
- 井上克弘・溝田智俊 (1988) : 黒ボク土および石灰岩・玄武岩台地上の赤黄色土の2 : 1型鉱物と微細石英の風成塵起源. *粘土科学*, 28, 30-47.
- 井上克弘・成瀬敏郎 (1990) : 日本海沿岸の土壌および古土壌中に堆積したアジア大陸起源の広域風成塵. *第四紀研究*, 29, 209-222.
- 井上克弘・佐竹英樹・若松善彦・溝田智俊・日下部実 (1993) : 西南諸島における赤黄色土壌群母材の広域風成塵起源. *第四紀研究*, 32, 139-155.
- 伊藤友彦・伴かおり・両角 拓・富真陽子・柳井清治・鷹澤好博 (2000) : 北海道北部における後期更新世, 広域風成塵起源粘土層の層序と分布. *第四紀研究*, 39, 199-214.
- 岩田進午 (1997) : 土の環境圏. 3, *フジテクノシステム*, 東京.
- Janecek, T.R. and Rea, D.K. (1985) : Quaternary fluctuations in the northern hemisphere trade winds and westerlies. *Quaternary Research*, 24, 150-163.
- 金井 豊 (2000) : 鉛の地球化学-ウラン系列核種²¹⁰Pbの堆積学的応用法を中心として-. *地質ニュース*, no. 556, 20-34.
- Kawahata, H., Okamoto, T., Matsumoto, E. and Ujiie, H. (2000) : Fluctuations of eolian flux and ocean productivity in the mid-latitude North Pacific during the last 200 kyr. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1279-1291.
- 小村和久 (1995) : 火山から放出される放射性エアロゾル-櫻島を中心として-. *エアロゾル研究*, 10, 276-282.
- Kopcewicz, B. and Kopcewicz, M. (2001) : Long-term measurements of iron-containing aerosols by Mossbauer spectroscopy in Poland. *Atmospheric Environment*, 35, 3739-3747.
- Lambert, G., Ardouin, B. and Polian, G. (1982) : Volcanic output of long-lived radon daughters. *J. Geophys. Res.*, 87, C13, 11103-11108.
- 大杉 繁 (1942) : 一般土壌学. 朝倉書店, 東京, 566p.
- Prospero, J.M., Charlson, R.J., Mohnen, V., Jaenicke, R., Delany, A.C., Moyers, J., Zoller, W. and Rahn, K. (1983) : The atmospheric aerosol system: An overview. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 21: 1607-1629.
- Rea, D.K. (1994) : The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: the Geologic history of wind. *Reviews of Geophysics*, 32: 159-195.
- Matsuhisa, Y., Mizota, T. and Qian, Y. (1993) : Homogenization processes of fine particles in the Taklimakan Desert, inferred from oxygen isotope composition of quartz. *Proceedings of the Japan-China International Symposium on the Study of the Mechanism of Desertification*, 236-240.
- 溝田智俊・井上克弘 (1988) : 風成石英粒子の酸素同位体組成-そのトレーサーとしての意義-. *粘土科学*, 28, 38-54.
- 溝田智俊・下山正一・窪田正和・竹村恵二・磯 望・小林 茂 (1992) : 北部九州の緩斜面に発達する風成塵起源の細粒質土層. *第四紀研究*, 31, 101-111.
- 百島則幸 (1995) : 植物葉に沈着した粒子状物質の滞留時間-²¹⁰Pb-²¹⁰Bi-²¹⁰Poの放射平衡の利用-. *エアロゾル研究*, 10, 271-275.
- Mukai, H., Furuta, N., Fujii, T., Ambe, Y., Sakamoto, K. and Hashimoto, Y. (1993) : Characterization of sources of lead in the urban air of Asia using ratios of stable lead isotopes. *Environment Science and Technology*, 27, 1347-1356.
- Mukai, H., Machida, T., Tanaka, A., Yelptievskiy, P.V. and Uematsu, M. (2001) : Lead isotope ratios in the urban air of eastern and central Russia. *Atmospheric Environment*, 35, 2783-2793.
- 名古屋大学水圏科学研究所編 (1991) : 大気水圏の科学-黄砂, 古今書院, 東京, 328p.
- 成瀬敏郎・井上克弘・金 萬亨 (1985) : 韓国の低位段丘に堆積するレス土壌. *ペドロジスト*, 29, 189-197.
- Papastefanou, C., Manolopoulou, M., Stoulos, S., Ioannidou, A. and Genasopoulos, E. (2001) : Coloured rain dust from Sahara Desert is still radioactive. *J. Environ. Radioactivity*, 55, 109-112.
- 染谷 孝 (1991) : ダストによる地球規模の微生物移動. *大気水圏の科学-黄砂*, 古今書院, 東京, 280-289.
- Streets, D.G., Gupta, S., Waldhoff, S.T., Wang, M.Q., Bond, T.C. and Yiyun, B. (2001) : Black carbon emissions in China. *Atmospheric Environment*, 35, 4281-4296.
- 多田哲郎・趙 蘭才・小林和久・坂上正信 (1986) : 大気中の放射性核種濃度の変動に関する研究. *地球化学*, 20, 98-102.
- Yabuki, S., Okada, A., Honda, M., Kanai, Y., Matsuhisa, Y., Kamioka, H., Yanagisawa, F., Nakawo, M., Shimizu, H., Fukusawa, H., Ueda, A. and Suzuki, J. (2000) : Physical and chemical characterizations of aeolian dust particles from source region to Japan. *J. Arid Land Studies*, 10, 246-252.
- 山野井徹 (1996) : 黒土の成因に関する地質学的検討. *地質学雑誌*, 102, 526-544.

KANAI Yutaka (2001) : Outline of the project "Studies on origin and transport of aeolian dust and its impact on climate", and quaternary and geochemical studies on aerosol.

< 受付 : 2001年8月15日 >