

Properties of oil-derived fly ash particles from Kuwait: Observations on the nature of aerosol dusts in snow collected in Japan

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-07-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00061666

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



クウェートの油井火災によるとみられるすすの特性 —日本で採集した雪の中のちりの観察—

田崎 和江*・島根大学理学部地質学教室環境自主ゼミナール*・野田 修司**

Properties of oil-derived fly ash particles from Kuwait —Observations on the nature of aerosol dusts in snow collected in Japan—

Kazue Tazaki*, Environmental Geology Research Group* and S. Noda**

Abstract Local atmosphere reflects major or minor influences of the world environment. Fine particles of fly ash produced by combustion of fossil fuels are directly cycling in our planet by west wind. The consequences of a massive increase in the combustion of oil give the global atmospheric increase of CO₂, N₂O, acid gases etc. Since January, 1991 during the Gulf War, the acidity of rain and NO₂ contents in the atmosphere are directly increased three hundred times as other clean countries by fossil fuel burning. The fly ash from oil combustion now makes a massive contribution to global aerosols. Snow dusts which are collected in February 20-25, 1991, at Shimane University may be related to emission of sulphur and nitrogen species of oil-derived fly ash from Kuwait by west wind 5000m high. SEM and TEM observations revealed the presence of very fine particles or thin films of sulphur species in the snow with an abundance of fine fly ash.

I はじめに

1991年1月17日の米軍を中心とする多国籍軍のイラクへの大規模な空爆で湾岸戦争が勃発した。開戦から2週間もたたないうちに、イラク軍により油田施設が爆破され、クウェート領内の多数の油井が炎上し、周辺での大気汚染の心配が現実化した。その炎上により、大気中のイオウ酸化物は、日本の基準値の100倍の濃度になった。英気象庁幹部が明らかにしたところによれば、油煙の広がり半径2000kmにも及び、ブルガリア、ルーマニア、ギリシャ東部などバルカン半島までも覆い、トルコでは「黒い雨」が降った。また、イオウ酸化物や窒素酸化物が東向き偏西風に乗って、約400km離れたイランに酸性雨を降らせた。サウジアラビアのキング・ファハド石油鉱物資源研究所が2月2日発表したところによると、クウェートでの油井の炎上数は、625ヶ所であり、

二酸化イオウガスの広がりをシミュレーションした結果、日本の二酸化イオウの環境基準値(0.1ppm/hr)の100~300倍になった。炎上によって発生する二酸化炭素は、32万トンに上り、長期的には地球の温暖化への影響が心配されている上、燃える時に発生する大量のすすは日光をさえぎり、日傘効果による気温低下が、すでにクウェートで起っている。2月27日に多国籍軍がクウェートの全面解放を宣言し、またイラク軍は、クウェート領内から撤退完了を発表し湾岸戦争が事実上終結した。3月29日に財団法人リモート・センシングセンターが湾岸戦争で炎上するクウェートの油井群をとらえた衛星画像の解析結果を発表した他、米国の地球観測衛星「ランドサット」と気象衛星「ノア」が2月15日、22日に火勢を強める油井炎上の様子を撮影した。その煙の帯は、ペルシャ湾沿いにサウジアラビアからカタール

1991年6月14日受付, 1991年9月19日受理

*山陰支部島根大学理学部地質学教室, 〒690松江市西川津町1060

Department of Geology, Faculty of Science, Shimane University, Matsue, Shimane 690

環境自主ゼミナールのメンバー20名

糸井理樹° 大石牧子° 大森佳子° 岡美登子° 落合英之° 小阪優子° 酒井幸雄° 竹宮麻里子° 田中邦昌° 田中 洋° 丹後雅憲° 鳥越俊行° 道前かおり° 西中川祐一° 羽木伸幸° 畑中義人° 原口和也° 松田 恭° 水口晶郎° 渡辺弘明° °印は執筆者

**島根県立工業技術センター化学科, 島根県出雲郷

ル付近まで総延長約 1500km にも達していた。

4月23日～26日にかけて、民間の湾岸環境調査団（団長、杉山恵一・静岡大学教授・生態学）がサウジアラビアのリヤド、ダーランなどを調査した結果、クウェートで炎上する油井から約 100km 離れたサウジアラビアのカフジは油井火災によるすすで真昼でも空が真黒であり、約 500km 離れたリヤドでは、亜硫酸ガス (SO_2) 濃度が一時間値で最大 0.418ppm と日本の環境基準 (0.1ppm) の 4 倍を超えていた。

気象庁気象研究所は、4月27日、航空機による茨城県筑波市上空の大気浮遊粒子の調査を行ない、クウェートの油井火災によるとみられるすすを観測した。日本の九州とほぼ同じ緯度に、北緯 30 度線をはさんで、上方にイラク、下方にクウェートがあり、大気中に拡散された油井火災の汚染物質は、ジェット気流にのると、2日位で、日本の上空にやってくるといわれている。(村山, 1987; 倉嶋, 1989; 谷山, 1989) また、湾岸から飛んできたすすが 7日～10日後にハワイのマウナ・ロアの 4000 m の山頂で記録された (Horgan, 1991)。

化石燃料が燃焼すると、窒素酸化物 (NO_x)、イオウ酸化物 (SO_x)、二酸化炭素 (CO_2)、炭化水素などを発生するが、これらの物質は、大気中の水蒸気、ガス、塵と結びついて新しい物質を作り、地上に降下する。これらの混合物がいわゆるすすと呼ばれるが、化石燃料のうち、石炭が燃えた場合には、一般に、マグネタイト、ヘマタイト、非晶質物質の他、ムライトを含有するのが特徴である (Tazaki *et al.*, 1989)。一方、原油が燃えた場合のすすにはムライトは含まれず、一般に、炭化物やイオウの含有量が高いことが特徴である。特に、中近東の原油は、石灰岩の中にあるのでイオウの含有量が高いことが広く知られている。そのため石油化学工場では、イオウを除去(脱硫)して市販している。今回の湾岸戦争による油井火災は、原油中の多量の二酸化イオウ(亜硫酸ガス)が全く除去されずに、全て大気中に放出されている。

島根大学理学部地質学教室・環境自主ゼミナールでは、湾岸戦争終結直前の 2月20日～25日に、松江市に降った雪を採集し、その中の塵を分析・観察した。昨年度、松江市内で観察したすすの量とその特徴を本年度採集した試料と比較すると、イオウ成分の多いクウェートの原油によるすすが、日本上空にも飛来し、大気汚染を引き起こしている可能性が高い。その塵の鉱物組成、化学成分、電子顕微鏡による形態観察について報告し、当日の気象状況も併せて考察を行なった。

II 採集試料と実験方法

A. 雪の分析方法

1991年2月に島根大学理学部棟屋上で採集した雪は室温で自然融解させた。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の測定には、筑波総合化学研究所(有)製ユニメーター(スポイト式示差比色計)(天谷, 1989)を使用した。実験中零点調節を数回行い、試料が混ざらない様にユニメーターのスポイトを毎回蒸留水でよく洗浄して使用した。 $\text{NO}_2\text{-N}$ (亜硝酸性窒素)は、試料 2ml を試験管にとり、ザルツマン試薬 2ml を加え、よく振り混ぜ、10～15分放置後、発色したピンクを比色する。次に $\text{NH}_4\text{-N}$ (アンモニア性窒素)は試料 2ml を試験管にとり、フェノールニトロプルシッドナトリウム液 2ml を加えて再びよく振り混ぜ、室温 (20～25℃) に 1 時間放置後、発色した青色を比色する。 $\text{PO}_4\text{-P}$ (オルトリン酸一リン)は、試料 5ml を試験管にとり、モリブデン酸アンモニウム液 0.5ml を加え、次に塩化第一スズ液を一滴加えてよく振り混ぜ、10 分間放置後発色した青色を比色する。上述の実験の際、試薬を入れて振り混ぜた後、試験管の口をパラフィルムでおおい、外気の出入りを少なくした。pH は、堀場製作所(株)製カスタニー A CT pHメーターを使用し、採集した雪を室温で溶かした直後に測定した。

B. エアサンプラーによる大気中の浮遊粉塵の採集方法

大気中の浮遊粉塵の採集方法は以下のとおりである。柴田科学器械工業(KK)製ハイボリウム・エアサンプラー HVC-1000 型に、Toyo ろ紙のガラス繊維製・GB100R (203×254mm) をセットし、吸引流量 1000 l/min・吸引圧力 2000mmAq で、24 時間採集を行なった。エアサンプラーは島根大学理学部 1 号館屋上 (8 階) に設置し、2月4日～5日、2月12日～13日、2月20日～21日、2月25日～26日、3月4日～5日、3月11日～13日、3月13日～15日、3月18日～19日、3月26日～27日、3月29日～30日の計 10 回の採集を行なった。ただし 3月11日～13日、3月13日～15日は 2 日間、48 時間採集している。

C. X 線粉末回折法

X 線粉末回折分析は、理学電機(株)製ガイガーフレックス D-1 型 2013 X 線回折装置を使用し、カウンターモノクロメーターによる Cu K_α 線を用い、電圧 35kV、電流 20mA で測定を行なった。採集した雪は自然融解した後、沈澱した固形物をピペットでとりガラス板に塗布して分析を行なった。

D. 走査型電子顕微鏡観察

X線粉末回折分析で使用了沈澱物の一部を、両面テープで接着し、金蒸着を施した後に、観察を行なった。走査型電子顕微鏡は、日立製作所製 S-2100 型及び日本電子製 JSM-T220A を用い、加速電圧 15~25kV で観察した。エネルギー分散型分析は、走査型電子顕微鏡に取り付けられた、堀場製作所製 EMA X3000 エネルギー分散型 X線分析装置により、加速電圧 20kV で分析した。定量分析結果は、すべて酸化物として、分析装置のデータ処理機能として付加されている ZAF 補正法によった。なお、エネルギー分散法による定量分析では、すべて K-ファクターにより値が補正されている。

E. 透過型電子顕微鏡観察

融解した雪の懸濁液を、支持膜を張ったマイクログリッド上にのせ、透過型電子顕微鏡で観察した。透過型電子顕微鏡は、日本電子製の JME 2000EX を用い、加速電圧 160kV で観察した。

III 結 果

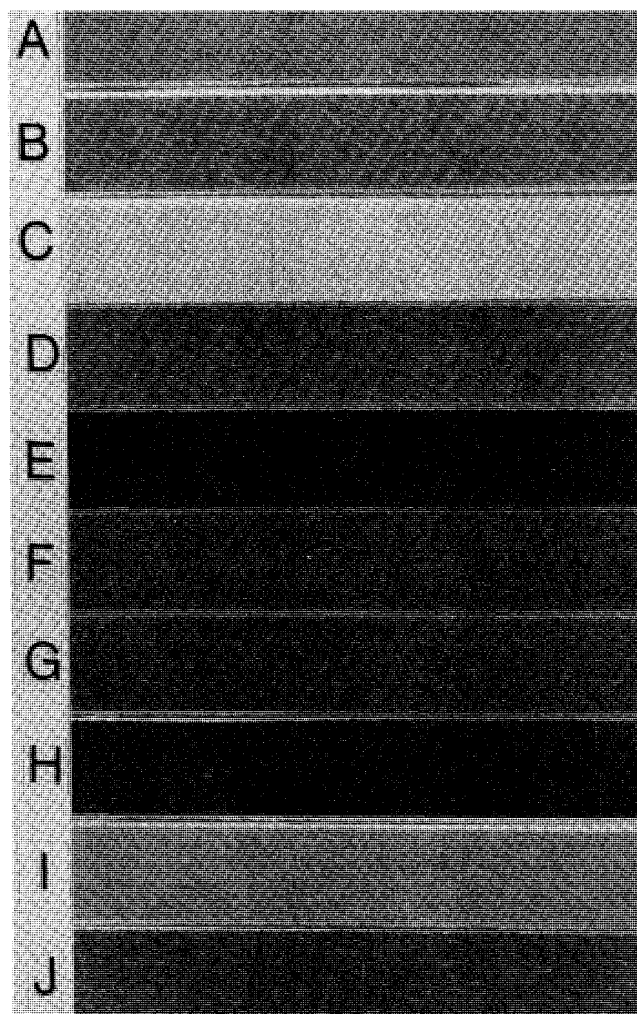
A. エアサンプラーによる大気中の浮遊塵の採集

エアサンプラーのろ紙に大気中の塵を採集し、そのろ紙の塵の濃度を比較したものが第1図である。2月20日~21日(C)は前日まで雨や雪が降っており、採集日当日も雪であった。採集された塵の量は非常に少なく、大気がきれいであったことを示す。2月25日~26日(D)は前日までずっと雪だったが採集日は曇りから晴れとなり、2月20日~21日(C)と比較すると塵の量は格段に多くなっている。3月4日~5日(E)の天気は曇りで塵の量が非常に多く、ろ紙が真黒になった。3月18日~19日(H)の天気は快晴で、3月4日(I)~5日(E)と同様に塵の量は非常に多い。3月26日~27日(I)の天気は曇りのち雨で、塵の量は比較的少ない。3月29日~30日(J)は3月26日~27日(I)と同じ曇りのち雨であり、前日の天気も同じであった。しかし、塵の量は全く違った結果を示し、3月29日~30日(J)の方が多くなっている。この違いは風向きによる黄砂の飛来量によって生じており、3月26日~27日の風向きは東北東~東、3月29日~30日の風向きは北東~西であった。この他の採集日で黄砂の影響を受けていると明確にわかるものは見当たらない。

B. 雪の分析

松江市にある島根大学理学部屋上で、2月20日~25日にかけて採集した雪の pH、亜硝酸性窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、アンモニア性窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、オルトリン酸リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) を測定した結果を第1表に示す。採集を始め

た2月20日の雪の pH は 5.3 で、酸性の値を示し、21日~25日では中~アルカリ性を示しており、特に25日は pH 8.3 と高いアルカリ性を示した。雪の pH は、6日間で酸性からアルカリ性へ推移している。溶かした雪の中の $\text{NO}_2\text{-N}$ は、20日と25日が、0.023~0.027ppm



第1図 島根大学理学部1号館屋上(8階建)に設置したエアサンプラーにより採集した大気中の塵の量。ろ紙の色の濃淡は、大気中の塵の量の多少を表わしている。

A : 1991年2月4日~5日, 曇り, B : 2月12日~13日, 晴れ~曇り, C : 2月20日~21日, 雪, D : 2月25日~26日, 曇り~晴れ, 一時雪, E : 3月4日~5日, 曇り, F : 3月11日~13日, 晴れ, G : 3月13日~15日, 晴れ, H : 3月18日~19日, 快晴, I : 3月26日~27日, 曇り~雨, J : 3月29日~30日, 曇り~雨. FとGのみ48時間測定, 他のは24時間測定.

第1表 雪の分析値

pH は雪を室温で融解した直後に測定した。
理 I : 理学部1号館, 理 II : 理学部2号館

雪の分析 1991年

採集日	2/20	2/21	2/22	2/23	2/25
採集場所	理 I	理 I	理 II	理 II	理 II
pH	5.31	7.23	7.01	7.57	8.25
NO ₂ -N(ppm)	0.027	0.016	0.018	0.017	0.023
NH ₄ -N(ppm)	0.422	0.411	0.299	0.417	0.337
PO ₄ -P(ppm)	0.312	0.179	0.147	0.169	0.102

とわずかに高く、他の日は 0.016~0.018ppm を示した。なお、湾岸戦争以前の 1990 年 12 月 4 日の晴天の日の大学内 4 カ所の大気中の NO₂量は 0.008ppm であり(田崎他, 1991) 今回の雪の中の NO₂-N 量は、いずれも平常時より高い値を示している。また NH₄-N は、相対的に 22 日と 25 日の値が、0.299 と 0.337ppm と低く、他の日は 0.411~0.422ppm と比較的高い値を示している。PO₄-P 値は、雪の降りはじめから後半にかけて減少し、20 日 (0.312ppm) と 25 日 (0.102ppm) とでは、20 日の方が約 3 倍高い値を示している。このリンの存在はエネルギー分散型分析でも確かめられた。

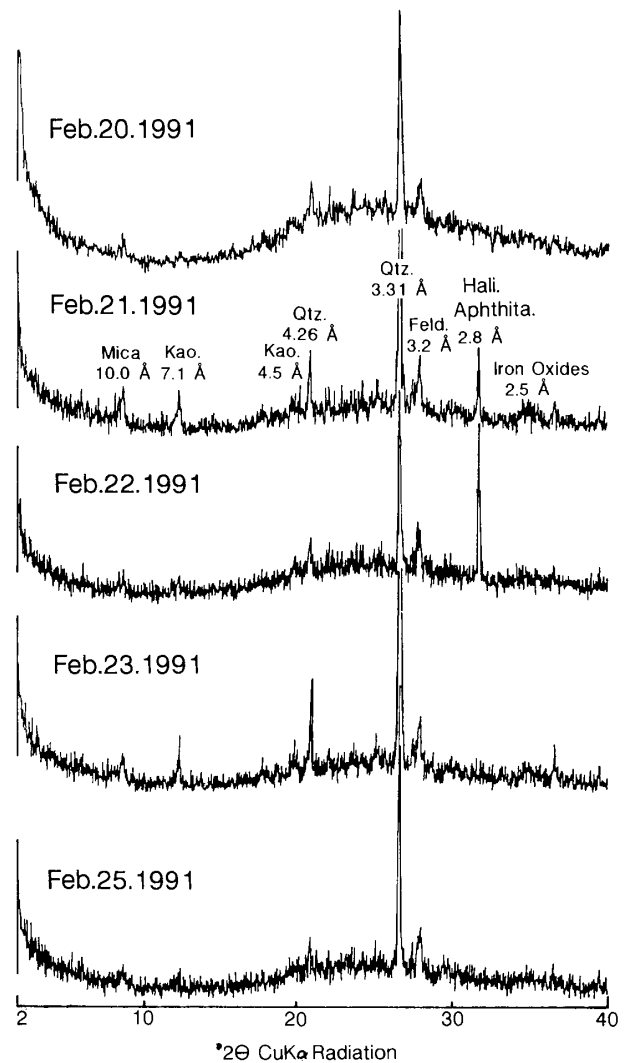
C. 雪の中の塵の鉱物組成

1991 年 2 月に採集した雪を自然融解させ、沈澱した固型物の X 線粉末回折は、5 日間とも一見すると似た様な回折パターンを示すが試料採集日毎でいくつかの差異が見られる(第2図)。雪の中の塵の組成は一般に、低~中層の砂漠の砂などに由来する石英、長石類、カオリン鉱物、雲母類粘土鉱物を主とし、2.5 Å 付近の少量の(水)酸化鉄を伴う。21 日、22 日の試料中には上述の鉱物の他に、日本周辺の海水由来と考えられる 2.8 Å のハライトの強い反射も認められる。走査型電子顕微鏡観察によっても、ハライト様の立方体の鉱物が多く認められている。又、ハライトの反射と重なっているが少量の硫酸カリ鉱物(K₃Na(SO₄)₂)を含んでいる。硫酸カリ鉱物の主要な反射は、4.09, 2.94, 2.839, 2.042 Å で、2.8 Å d₁₁₀ はハライトの d₂₀₀ 回折線とオーバーラップする。いずれのバックグラウンドも 15°-30° の間が少し高いことから、非晶質物質と有機物の存在が示唆される。とりわけ 20 日の試料は最も高いバックグラウンドを示している。さらに、5.79, 4.84, 3.87 Å の弱い反射

が認められるが、これはエネルギー分散型分析によるデータとともにイオウの存在を示している。このイオウは主に上層からもたらされたと考えられ、高分解能電子顕微鏡によってもイオウの 5.79 Å d₁₁₃ の格子像が確認されている。なお、石炭のすすと石油のすすの差異は、ムライトの有無にある(Tazaki *et al.*, 1989)が、今回の雪の中の塵にはムライト(3.4 Å)は入っておらず石油のすすのみと考えられる。

D. 雪の中の塵の走査型電子顕微鏡観察

X 線粉末回折ではその確認が難しい数%以下の微量



第2図 雪の中の塵の X 線粉末回折分析

Mica : 雲母類鉱物, Kao. : カオリン鉱物,
Qtz. : 石英, Feld. : 長石類, Hali. : ハライト,
Aphthita. : 硫酸カリ鉱物, Iron Oxides : (水)酸化鉄鉱物.

成分や非晶質物質を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。1991年2月20日～25日に島根大学理学部棟において採集した雪の中の塵のSEM像を第3図と第4図に示した。これらは、インドの炭鉱周辺の大気中のすすに多く認められた粒子 (Tazaki *et al.*, 1989) と同様の形態を示し、炭化物と考えられる。また、中国から飛来する炭化物 (田崎, 1990) とも似ている。第3図Aは20日のサンプル中の炭化物様球粒と0.1 μm 以下の微細粒子が凝集し、鉱物の表面をおおっている状態を示している。試料中には多くの炭化物と思われる0.3～40 μm の微細粒子が認められ、その表面は被膜におおわれている。第3図Bでは炭化物様球粒とその表面状態を示した。コーンフレーク状の被膜でおおわれているものや、よく球形を残しているが、薄い被膜でおおわれているものが多く認められる。第3図Cは25日の試料中の繊維状物質を示した。その表面にも粒子が付着している。第4図Aでは22日の試料中の凝集した粒子と共に、立方体～直方体の塩の結晶を示した。大きさは5～10 μm で表面は比較的平滑なものが多い。写真には示していないが、板を重ねたような10 μm 程度の直方体の結晶もみられた。第4図Bは鱗片状の表面組織をもった有機物様物質を示した。この他写真にはないが、平滑で丸味を持つ有機物様物質も多く認められた。また、試料中には多くのケイ藻が認められ、特に球状から盤状のものを多く含んでいる。第4図Cも22日のサンプルであるが微細粒子が一面をおおっている状態を示した。この0.1 μm 以下の微細粒子が凝集している様子を、透過型電子顕微鏡でも詳しく観察した。

第3図Aにみられるような微細粒子は、雪の降り初めの20日頃は少なく、特に25日に多く認められた。また、20日、21日の粒子はよく分離しているのに対して、22日～25日のものは凝集していて、塊を形成していたり、炭化物様球粒の表面に微細粒子が一面に付着しているものも認められる。また、昨年 of 黄砂中の炭化物 (田崎他, 1990) には上述の0.1 μm 以下の微細粒子やコーンフレーク状の被膜の付着はみられなかった。

SEM観察の結果は、雪の降り始めと中～後半とでは、雪の中の塵の成分や粒度が異なることを示している。即ち、20日、21日の塵は大気の上層と中～低層のすべての塵をとらえて降下しており、それ以降の雪は、ほとんど大気の上層の細かい塵のみをとらえて降下してきたものであることを示唆している。

E. 雪の中の塵の化学組成

雪の中の塵のバルク試料を、エネルギー分散型分析装置により分析した結果を第2表に示した。2月23日と

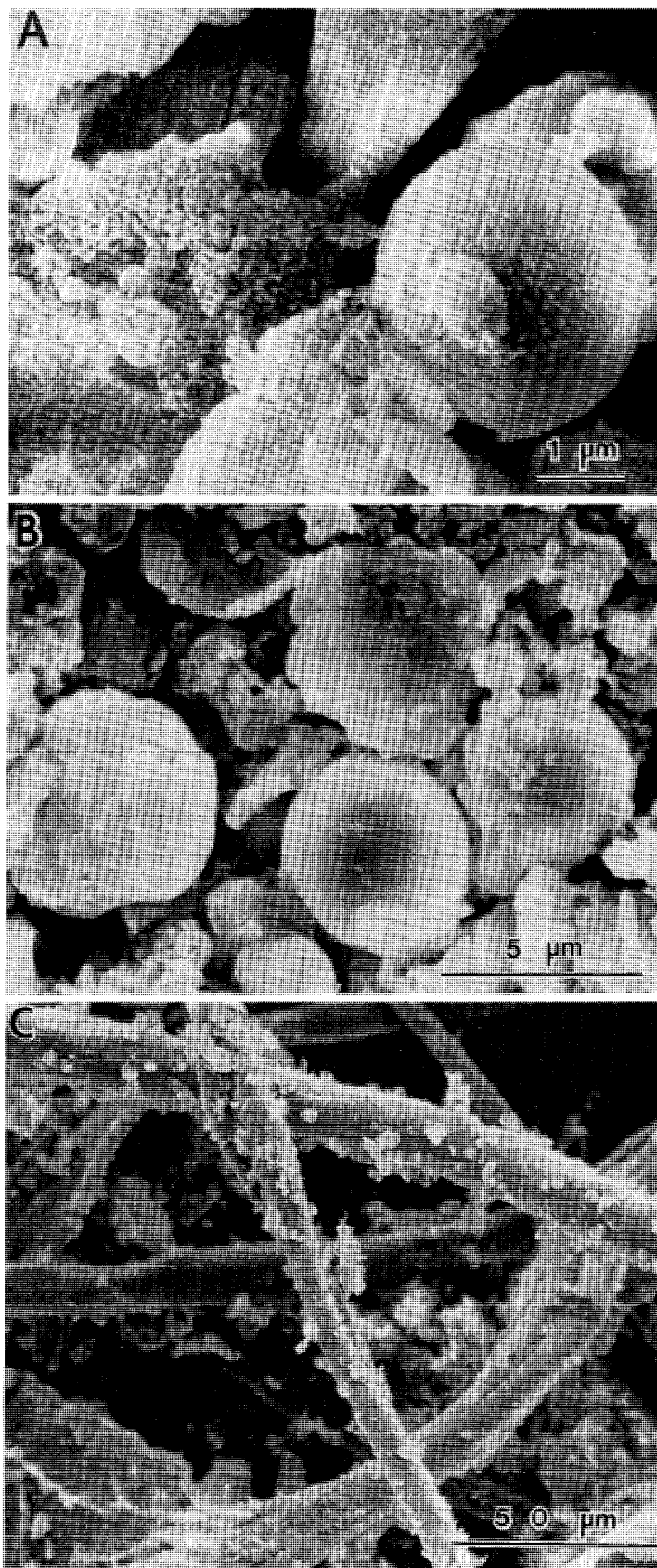
25日の塵の平均化学組成は、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 を主とし、これらで全体の80%以上をしめる。 K_2O 量は、両日で大きな変化はみられないが、 TiO_2 、 Na_2O 、 SO_3 、Cl量は、25日で減少している。一方、 CaO 、 MgO 、 SiO_2 量は、25日で増加している。バルク試料による平均値ではなく、各粒子の面または点分析をおこなったところ、この塵が炭化物様物質だけでなく、珪酸塩鉱物質のものもあり、多様な粒子の凝集であることが明らかとなった。珪酸塩鉱物質の主要なものは、AlとSiであり、通常の塵に一般に認められる砂漠の砂起源であるカオリン鉱物 (A)、カリ長石など (B) も混在している (第5図)。直径5 μm の微細粒子の周囲には、1 μm 以下の極微細粒子が付着しており、これは、Na、Cl、Sなどの化合物であろう (第5図A)。表面に多量の微細粒子や薄膜がおおっている場合も多く認められ、それらは凝集して直径50 μm に達している (第6図A)。その化学組成は、Si、Alと多量のS、Clをもつことが特徴である。また、少量のMg、P、Ti、Feも含有されている。被膜部分を点分析すると、この膜が主にイオウよりなっていることが示された (第6図B)。このイオウの被膜については、透過型電子顕微鏡でも、詳しく観察した。

F. 雪の中の塵の透過型電子顕微鏡観察

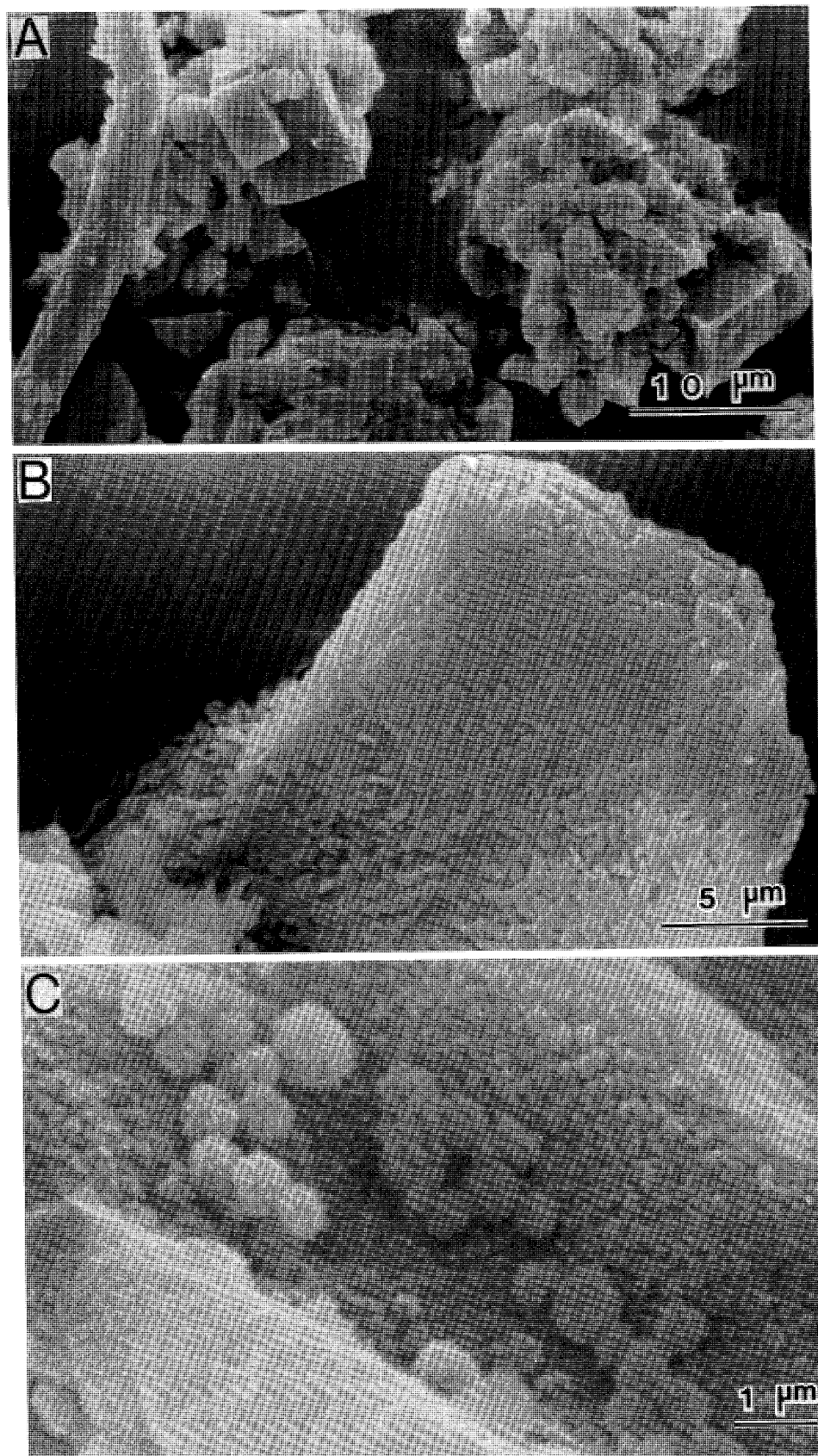
SEMでは検出できない微細なものや少量の含有物を透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察した (第7～10図)。X線粉末回折やエネルギー分散により認められた鉄鉱物は、TEM観察により、羽毛状をしたヘマタイトまた

第2表 エネルギー分散型分析による雪の中の塵の化学組成。バルク試料を使用。

Snow dusts (Bulk samples)			
	Feb. 23th		25th 1991年
	wt %		wt %
Al_2O_3	17.74	17.45	
SiO_2	54.91	56.24	
Fe_2O_3	10.38	10.67	
TiO_2	2.14	1.82	
Na_2O	3.01	1.50	
K_2O	3.43	3.59	
CaO	2.02	2.51	
MgO	1.90	3.57	
SO_3	2.24	1.25	
Cl	2.24	1.38	
Total	100.01	99.98	



第3図 雪の中の塵の走査型電子顕微鏡観察
A~C : 1991年2月20日採集試料, 微細粒子がすすの表面に付着したり, 被膜がおおって凝集している様子を
示している.



第4図 雪の中の塵の走査型電子顕微鏡観察

A~C : 1991年2月22日採集試料, A : 立方体のハライト結晶のまわりに凝集した塵の粒子, B : 有機物様物質, C : $0.1\mu\text{m}$ 以下の極微細粒子が表面をおおったり, 凝集して $1\mu\text{m}$ 前後のボールを作っている.

はマグヘマイトであることが明らかとなった。羽毛状結晶は放射状に成長し、直径 200nm であり、炭化物様球粒に付着している (第 7 図 A)。また X 線粉末回折により雲母類鉱物が認められたが、TEM 観察によれば、平滑で薄い雲母結晶の表面に、小球粒状物質が密に付着しているのが認められた (第 7 図 B)。さらに、SEM で認められた第 4 図 A の立方体は Na と Cl のピークをもち、TEM 観察によれば、 2.8\AA の格子像が認められるので、ハライトであることが確認された。このハライトの結晶は、電子線照射により、容易に、脱水、脱ガスを起し、ふちどりができ、オペークから半透明のモザイク状構造が見える。その構造の中には格子像が認められる (第 7 図 C)。SEM で観察した微細粒子よりさらに細かい粒子が TEM により観察された (第 8 図)。直径 400~500nm の球の周囲には、 \AA オーダーの極微細粒子が薄膜を作っておおっている。フランボイダルな球や、中空の球も多く、いずれも、電子線照射により脱水する。

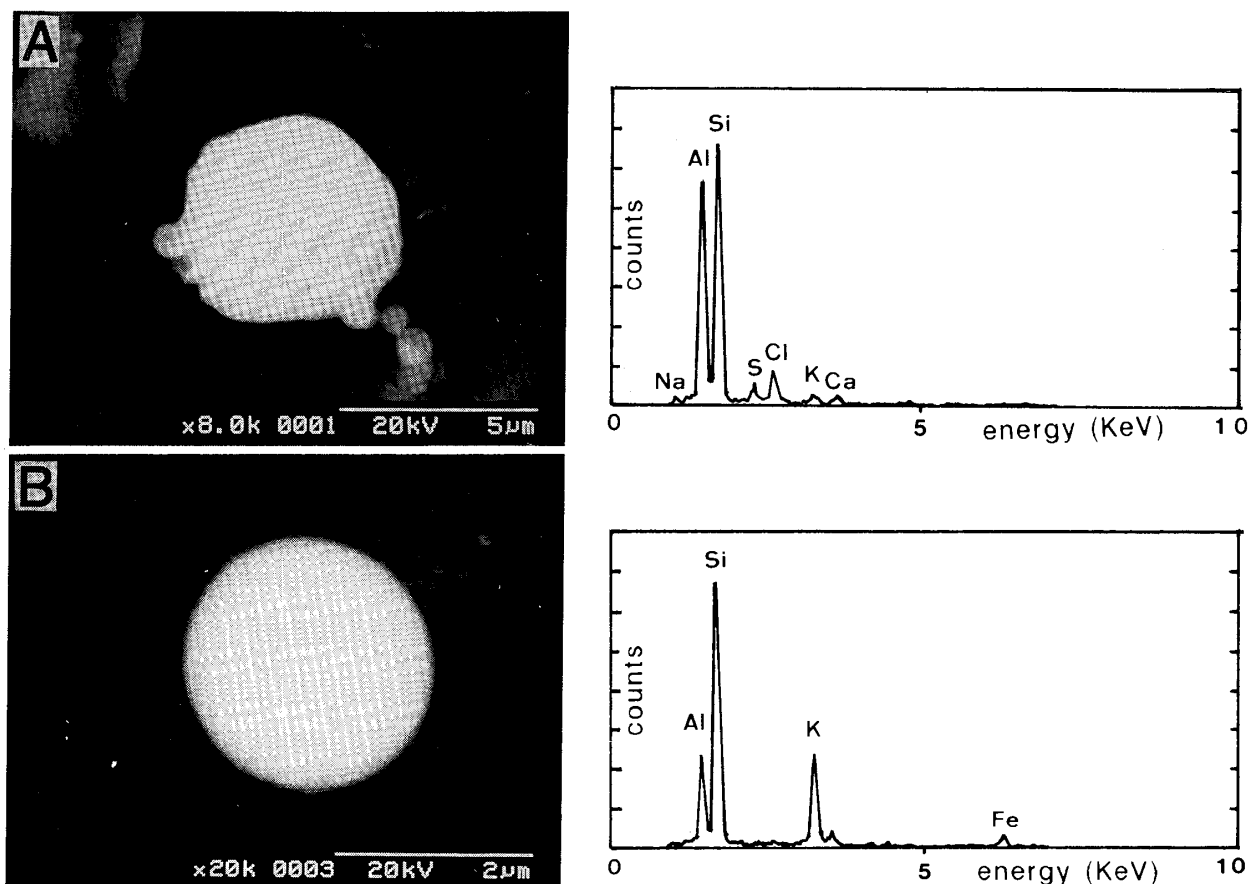
雪を融かし濃縮した水溶液を 2 ヶ月以上静置したところ、淡褐色を呈した浮遊物質が得られた。この物質を TEM で観察した (第 9 図)。10~20nm の粒子が凝集

している部分 (第 9 図 A) を高倍率で観察すると、指紋状構造を持ちながら連結している様子が明らかになった (第 9 図 B)。これは電子線回折パターンがブロードなリングを描くことから低結晶度の炭素粒子であることを示している。

SEM-EDAX で観察されたイオウの被膜 (第 6 図 B) が TEM によっても観察された。この被膜は、アマーバー状を呈し、あちこちに空隙が認められる (第 10 図 A)。この被膜を高倍率で観察すると、モザイク構造を示し、 5.7\AA の格子像があちこちに認められた (第 10 図 B)。この格子間隔は、イオウの $5.788\text{\AA} d_{113}$ に相当する。

G. 高層天気図と雪の中の塵の起源

500mb (約 5000m 上空) の高層天気図をみると、北極圏を中心として、寒気団が形成される大きな低気圧がある。その周りを高緯度偏西風が、何本かの風速の強いジェット気流を作りながら吹いている (倉嶋, 1989)。雪のできる条件は、上空 5000m における気温が -24°C ~ -30°C であり、かつ、地上の気温が 3°C 以下であることが必要である (松江気象台コメント)。雪を採集した



第 5 図 雪の中の塵のエネルギー分散型分析

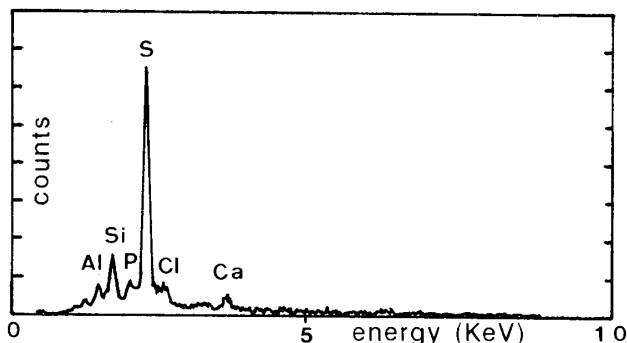
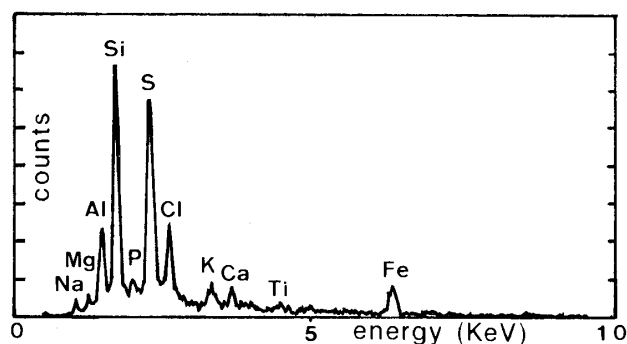
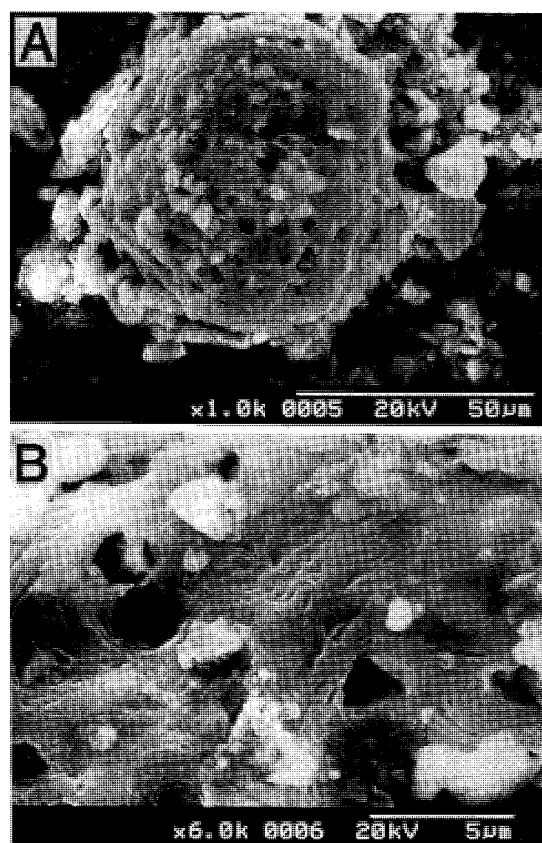
A, B : 1991 年 2 月 23 日採集試料, 球状物質は主に Al と Si からなっている。

2月20日～25日の上空約5300m以上における気温が $-26.3\sim-36.5^{\circ}\text{C}$ であったため、その高さで雪ができたと考えられる。また雪の降った2月19日～25日の地上の平均気温は、 $-3.1\sim+1.8^{\circ}\text{C}$ であった(第3表)(松江地方気象台, 1991)。雪の中に含まれている塵は、雪が結晶化する時に取り込まれるか、もしくは、降ってくる途中で包有されるかのどちらかである。エアサンプラーのろ紙の色から、初日の雪が大気を浄化したので、2日目以降の雪は、上層で塵を核として水滴をつくり、清浄な大気の中を雪となって落下してきたことを示唆している。500mbの高層天気図において、大気は、等高線に沿って風速150ノット(約 100m/s)*前後で動く(松江気象台コメント)。従って、クウェート上空にある低気圧によって上昇した塵は、地形や地球の自転による影響などを考慮しても3日から5日後に日本上空(北緯 30° 付近)に飛来してくることになる。2月20日～25日における松江市での地上風は、W～WSWの方向に吹いているため(第3表)、クウェートの油井燃焼起源のす

すを含んだ雪が降った可能性が非常に高い。500mbの高層天気図(第11図)は、クウェート上空付近で吹いている風が、日本の南方を流れ、上空5000mの高さで生成された雪を落下させることを示している。その雪は、途中で地上により近いW～WSWの風によって松江市内に運ばれたと考えられる。

IV 考 察

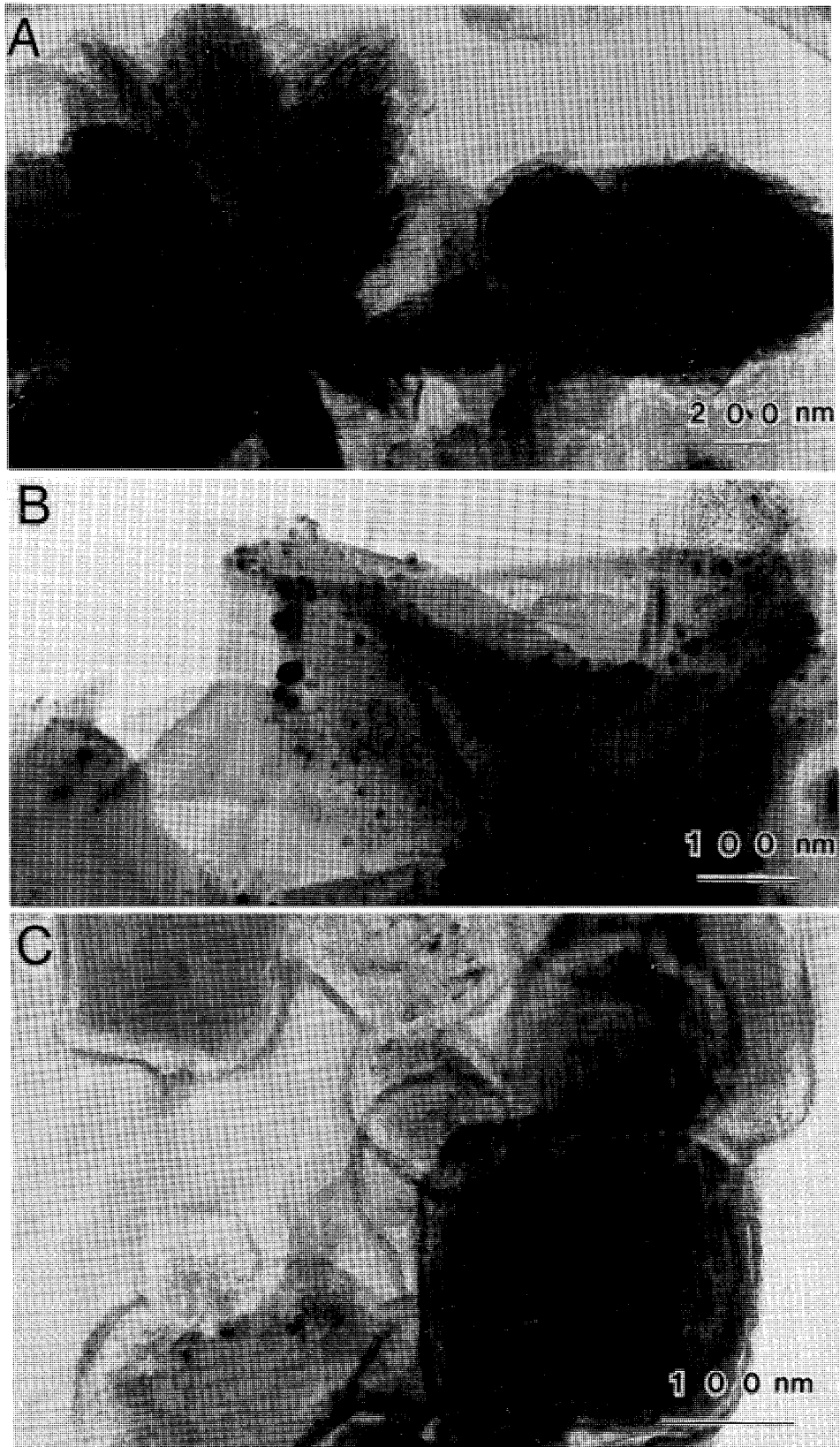
中国は、この10年間でおよそ2倍という急速な工業成長をとげており、その結果として大気汚染、特に酸性雨による環境破壊が問題となっている(石坂, 1979; 石井, 1979, 1980; 市沢, 1979; 石, 1988; 岩坂・笹野, 1989; Fyfe, 1985, 1990; Hara and Okita, 1990; 原, 1991)。重慶、貴陽など中国西南部周辺では、pH 4.1以下の強い酸性雨が降っており、酸性雨の原因は、イオウ酸化物と窒素酸化物を出す化石燃料の燃焼によって生じている(増田, 1990)。島根県は、日本海側に面し、工場も少なく、雨を酸性化するほどの汚染



第6図 雪の中の塵のエネルギー分散型分析

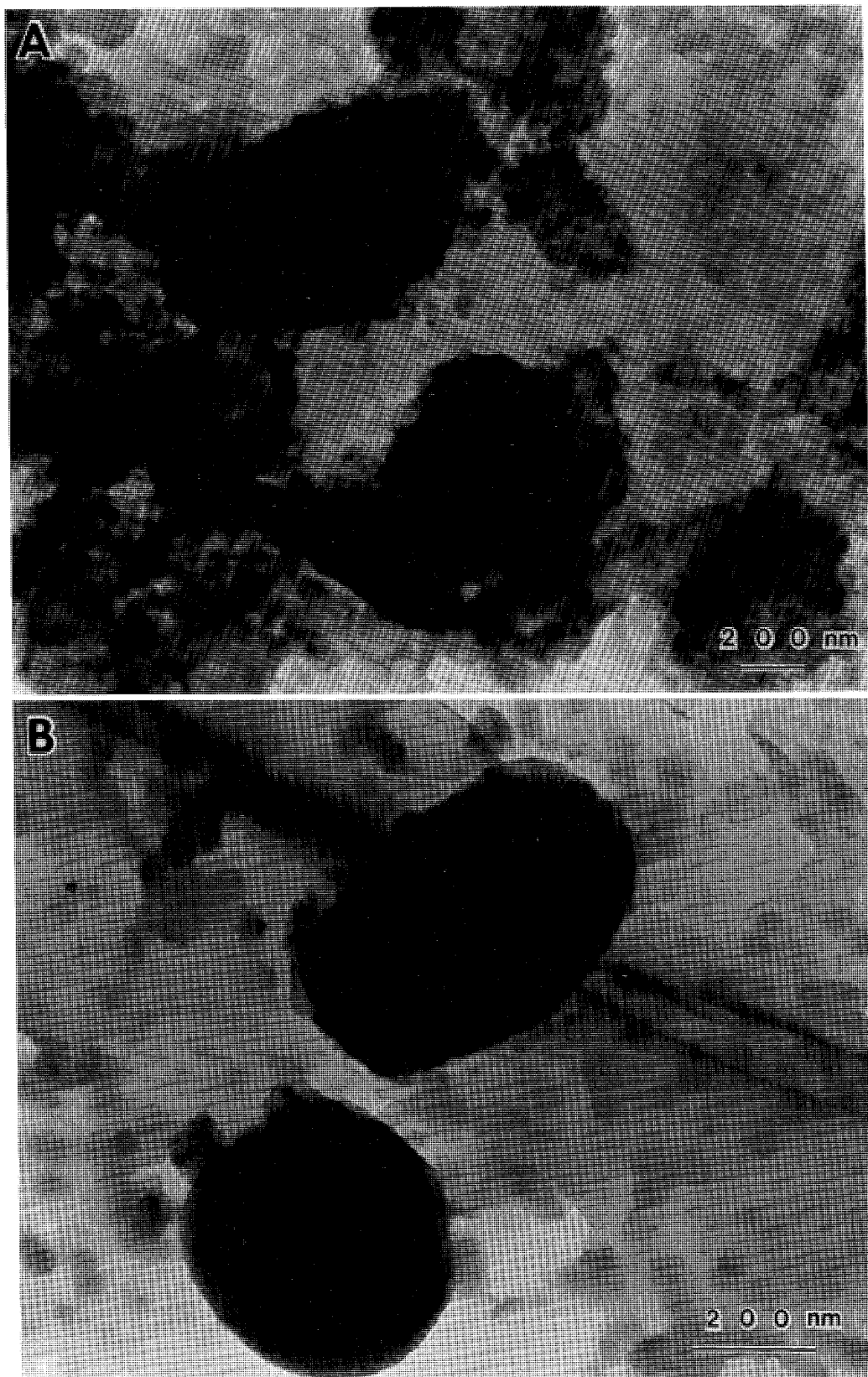
A, B: 1991年2月23日採集試料, 球状物質の表面に粒子が付着したり、イオウの被膜がおおっている。

*谷山(1989)によれば冬の北半球の亜熱帯ジェット気流は、高さ10～13kmで平均風速40～80m/sという。



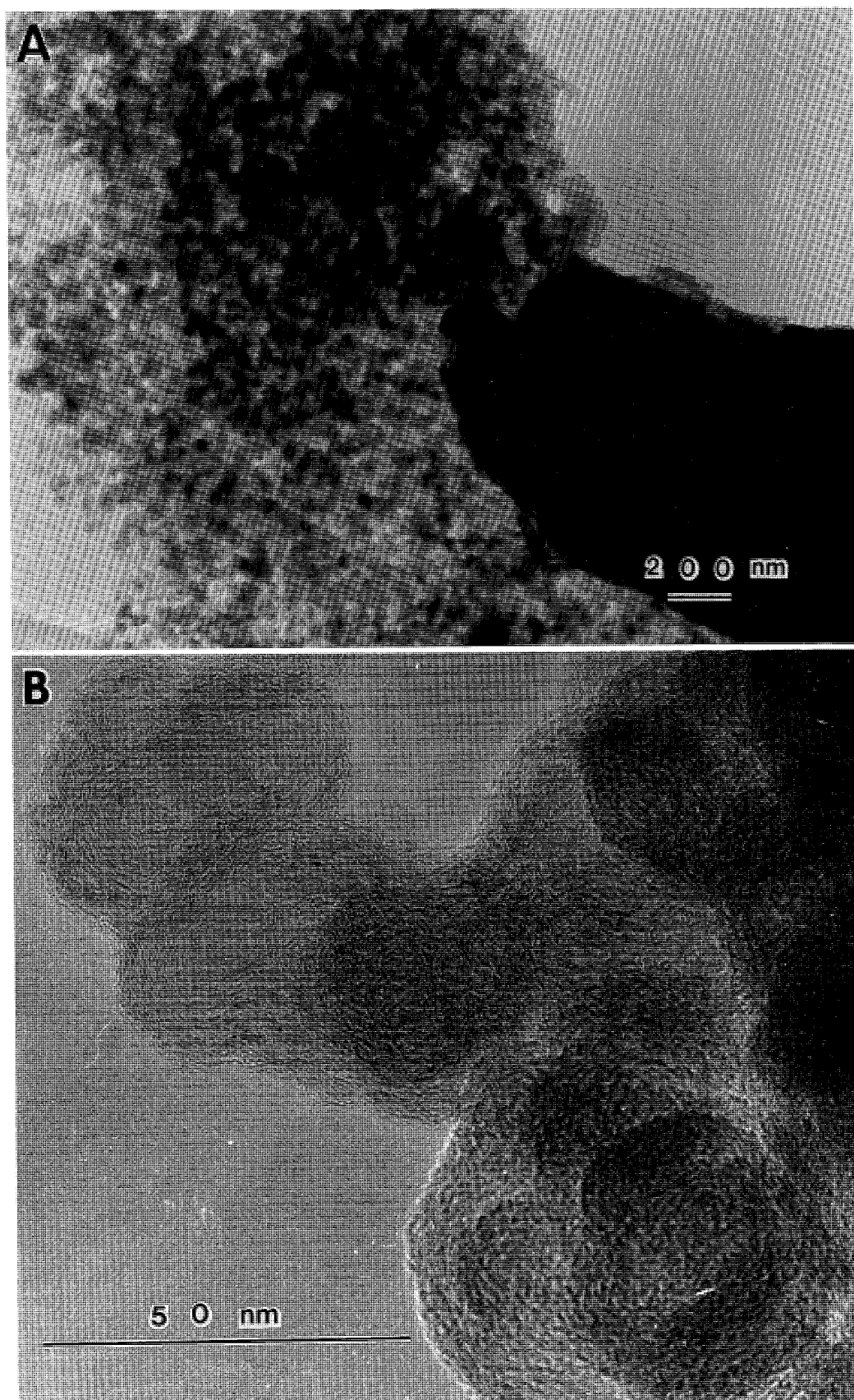
第7図 雪の中の塵の透過型電子顕微鏡観察

A : 1991年2月23日採集試料, B, C : 1991年2月20日採集試料, A : ヘマタイトまたはマグヘマイトと思われる鳥の羽毛状結晶がすずと付着している. B : 平滑で薄い雲母類鉱物の表面に, 微細な粒子が多数付着している. C : 立方体のハライトの結晶は, 電子線照射により, 不透明(下方)から, ふちどり(左上), そして半透明(上中央)になる. 半透明の状態になるとモザイク構造が明らかになる.

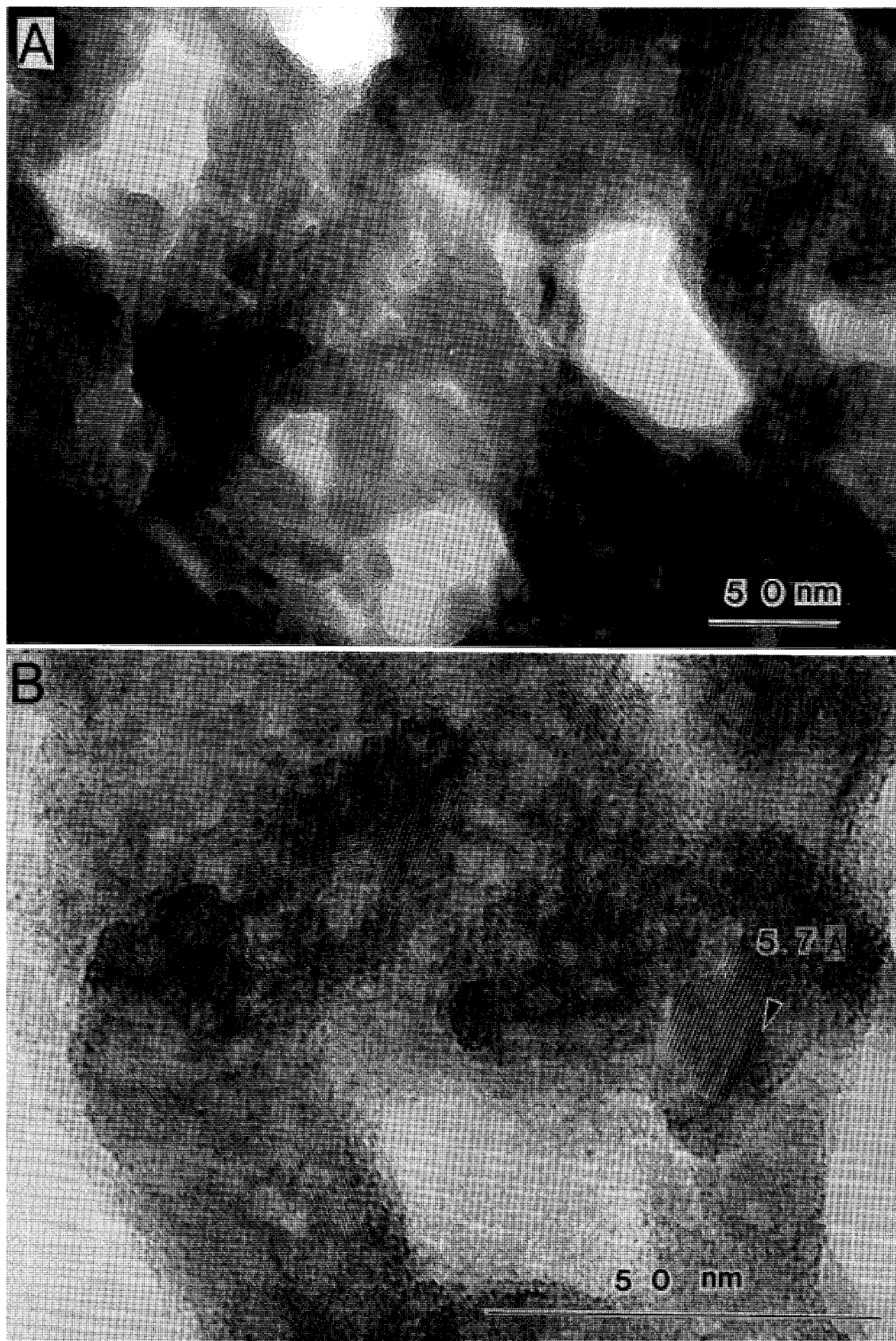


第8図 雪の中の塵の透過型電子顕微鏡観察

A : 1991年2月22日採集試料, B : 1991年2月23日採集試料, いずれも球状物質は周囲に極微細粒子を付着したり被膜におおわれている。これらの写真は第4図Cの走査型電子顕微鏡写真に相当する。



第9図 雪の中の塵の透過型電子顕微鏡観察
A, B : 1991年2月20日採集試料, BはAの高倍率写真. 10~20nmの極微細球粒子が凝集している. 各粒子は低結晶度の炭素様の指紋状構造をもちチェーン状に連結している.

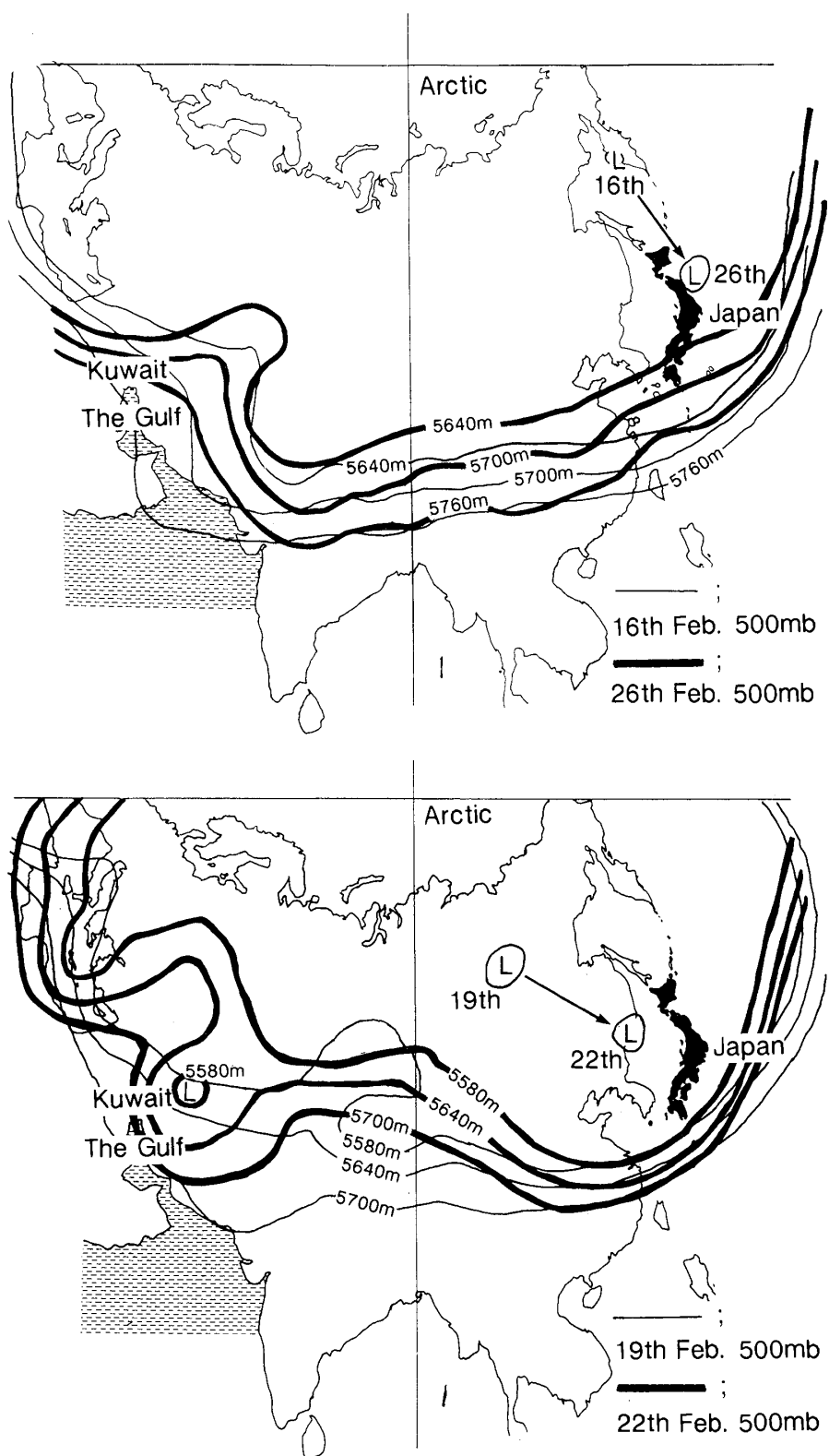


第10図 雪の中の塵の透過型電子顕微鏡写真

A, B : 1991年2月20日採集試料, BはAの高倍率写真. アメーバー状の被膜には空隙が多く認められる. その被膜はモザイク構造を持ち, イオウの 5.7\AA の格子像があちこちに認められる.

第3表 松江市における地上気象観測月統計値 松江地方気象台発表データ
 地点名 松江 (島根県) 地上気象観測月統計

日付	気 温			風			速			降 雪		天 気	概 況	高 層 気 温			
	平均	最 高	最 低	平均	最 大	最 小	起 時	起 時	起 時	深 度	深 度			9時	高さ	21時	高さ
2/10	8.5	12.8	0.22	3.3	8.5	W	1327	1330	14.3	W	1327	0	0	-30.3	5320	33.9	5310
11	7.4	10.7	0.22	2.5	6.2	WSW	1650	1650	12.2	WSW	1650	0	0	-35.9	5330	-29.7	5380
12	4.3	7.8	0.57	4.8	9.4	W	1410	1520	13.8	W	1410	0	0	-26.3	5430	-28.5	5360
13	4.3	7.8	0.57	1.7	4.3	E	1450	1450	7.3	E	1450	0	0	-26.3	5250	-29.9	5320
14	4.6	10.8	0.8	3.5	6.1	ENE	2400	2400	11.6	ENE	2400	0	0	-26.3	5330	-28.3	5330
15	9.7	15.8	1.43	4.1	12.0	NW	0600	0600	22.6	NW	0600	0	0	-30.5	5280	-27.1	5310
16	4.6	6.9	0.11	7.8	12.3	NW	0018	1000	17.8	W	0018	0	0	-30.5	5310	-28.7	5280
17	3.8	6.2	1.17	4.9	8.6	NNW	0006	2350	17.8	W	0006	0	0	-30.5	5280	-28.7	5310
18	3.2	6.3	1.245	2.8	11.0	W	0640	0630	25.5	W	0640	0	0	-36.5	5350	-32.5	5350
19	1.2	5.9	0.050	7.7	13.8	NW	2154	0630	25.5	NNW	2154	22	8	-30.5	5270	-28.1	5310
20	0.8	3.9	1.52	3.7	10.1	WSW	0551	1510	16.8	W	0551	4	4	-30.5	5310	-28.7	5310
21	0.9	3.8	1.205	10.2	16.4	W	2125	1340	26.4	W	2125	4	8	-30.5	5280	-28.7	5310
22	-0.9	1.8	1.023	8.4	13.3	W	2341	0030	24.1	W	2341	24	25	-30.5	5270	-28.7	5310
23	-3.1	-1.3	2.326	6.8	12.2	WSW	2017	0030	19.7	WSW	2017	1	3	-36.5	5370	-32.5	5350
24	-0.7	2.4	1.254	7.4	12.3	W	2017	1420	16.0	NNW	2017	1	2	-34.7	5370	-28.1	5450
25	1.8	7.3	1.223	4.4	9.2	WSW	2356	1500	14.3	WSW	2356	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
26	2.4	8.9	1.316	2.8	9.0	W	0705	1500	12.1	WSW	0705	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
27	5.4	13.1	1.222	2.0	7.9	WSW	0441	1500	12.1	WSW	0441	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
28	7.1	10.4	0.937	3.2	8.8	WSW	2400	1120	14.4	W	0959	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
3/1	4.7	9.1	2.352	3.3	6.5	NE	0945	0550	10.5	ENE	0945	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
2	3.7	11.0	1.224	1.6	5.5	NNW	1540	1540	8.4	NNW	1540	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
3	4.4	11.8	1.154	1.1	6.1	NNW	1250	1250	9.0	NNW	1250	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
4	6.5	14.0	1.207	1.7	6.8	W	1319	1320	10.6	W	1319	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
5	10.3	15.3	1.447	2.3	3.6	NNW	1740	1430	4.8	NNW	1740	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
6	10.8	18.3	1.341	1.8	8.2	WSW	1401	1100	12.6	WSW	1401	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
7	7.4	9.2	1.353	6.7	10.7	ENE	1059	1100	16.1	ENE	1059	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
8	5.2	6.9	2.400	5.3	9.2	E	0924	0930	16.5	E	0924	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
9	8.7	11.4	1.426	4.1	6.5	NNW	1402	1400	11.5	NNW	1402	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
10	7.7	11.7	1.419	2.9	7.7	E	1955	2000	14.3	E	1955	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
11	6.7	7.7	0.002	4.4	8.4	E	0625	0420	15.9	ENE	0625	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
12	7.2	14.3	1.351	1.7	4.6	NW	1523	1600	7.8	NW	1523	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
13	7.6	14.4	1.318	2.2	6.6	W	1508	1520	9.4	W	1508	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
14	3.8	6.0	0.257	2.6	6.9	N	1950	1950	13.9	NNW	1827	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
15	4.4	8.5	1.358	2.9	7.8	E	1405	1550	9.6	ESE	1405	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
16	5.9	11.6	1.253	2.9	6.0	W	1322	1330	12.6	W	1322	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
17	6.3	10.0	1.143	3.8	7.5	W	0544	0430	12.2	W	0544	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
18	5.7	14.5	1.240	1.4	4.9	W	1530	1540	8.1	W	1530	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
19	8.8	18.5	1.240	2.1	5.9	W	1418	1750	9.0	ESE	1418	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
20	11.5	14.9	1.647	2.4	7.3	NE	1812	1820	12.4	NE	1812	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
21	7.0	10.4	1.208	6.9	8.8	NE	2154	1220	15.5	E	2154	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
22	8.3	10.8	0.738	4.8	7.7	E	0024	0030	13.4	ENE	0024	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
23	11.0	14.9	1.510	2.5	5.2	NW	1700	1700	7.4	NW	1700	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
24	9.2	15.4	1.301	2.0	5.1	E	1653	1600	8.4	E	1653	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
25	9.6	15.5	1.426	2.4	4.6	E	0952	1630	7.8	E	0952	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
26	10.4	15.2	1.318	5.5	9.9	ENE	0250	1240	16.2	ENE	0250	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
27	10.6	12.2	1.327	3.6	7.1	E	0959	0250	12.9	E	0959	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
28	8.3	9.1	1.437	4.1	6.0	NE	0410	0410	9.4	NE	0410	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
29	8.5	12.5	1.417	4.5	8.4	E	1700	1140	13.4	E	1700	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450
30	7.4	9.4	1.323	1.5	4.0	W	1350	1150	6.0	NW	1350	0	0	-34.7	5370	-28.1	5450



第11図 500mb, 5600m 付近の高層天気図

1991年2月16日と26日は、5600~5700mの等高線がなめらかな平行線を描いて日本列島に近づいている(上の図)。一方、松江に雪が降った前日の2月19日と、雪の降った中日の2月22日の等高線は、大きなカーブを描いて日本列島南方に存在した(下の図)。

①は大きな低気圧の位置を示す。

物質の排出源は見当たらないが、近年、雨の年平均 pH は 4.7 と強い酸性を示している (石坂他, 1981 ; 山口他, 1991). 中国からの偏西風の風下にある島根県は、日本海を越えて広がる中国の酸性雨の影響を強く受けていると言える (岩坂他, 1982 ; Iwasaka *et al.*, 1988 ; 向井他, 1989 ; 村山, 1987). 大気中のイオウ酸化物や窒素酸化物の微細粒子 ($<1\mu\text{m}$) は、雨や雪に取り込まれなければ、長時間大気中を浮遊して、1000~2000km も遠方まで運ばれ (Mizota, 1983), 国境を越えて、酸性雨を降らせる (Dams *et al.*, 1970 ; 近藤, 1987 ; 溝畑, 1978 ; 日本環境学会, 1984 ; 大気汚染研究会, 1998). その時、雨滴の粒径が小さければ小さいほど酸性度が高い (古明地, 1976, 1983 ; 谷山, 1989). 毎年春先になると、山陰地方には、黄砂が襲来するが、この黄砂は 2000 km 以上も離れた中国大陸のゴビ砂漠やタクラマカン砂漠の砂塵が風に乗って運ばれ、その砂塵中には、石炭のすすが多数認められている (田中他, 1983 ; 笹野, 1988 ; 田中, 1987 ; Liu, 1985 ; Kenneth, 1987 ; 田崎他, 1990) が、黄砂は、地上 1500m~4500m の対流圏中・下部の高さで強い南西の風で移流し、砂塵自体が大気汚染物質を吸収する (Pye, 1987 ; 山口他, 1991).

地上に降る雪や雨が大気中で酸性化する時点は、①空を移動する雲の中で雨の元になる水滴ができる時、②雨となって降ってくる途中で、大気の中に浮かんでいる酸性物質と衝突し、酸性物質を水滴の中に取り込んでいく時点である。特に降り始めの雨の酸性度が高いのは、この二番目の酸性物質の取り込みによるものである (谷山, 1989). 今回採集した雪の中の粉塵のうち、降り始めの 2 月 20 日の分は、①と②の両方の酸性物質を含んでいる可能性があるが、21 日以降の雪は、①の時点即ち約 5000m 上空 -29°C の時点で大部分の酸性物質を取り込み、②の時点の物は少ないと考えられる。第 1 図に示した 2 月 20 日~21 日のエアサンプラーで採集された粉塵の量が非常に少なかったことも、この事実を裏づけている。さらに、第 1 表で示した雪の $\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ 量も 2 月 20 日が最高値を示し、21 日以降は下降している。エネルギー分散型分析装置による全浮遊塵の分析値のうち、特に SO_3 は、23 日が 2.24% も含有している上、25 日には、1.25% に減少しているといえども降雪 5 日後の雪の中にもまだ SO_3 が含有されている。このことは、イオウ物質が高層にただよっていたものであることを示している。また、500mb, 5600m の高層天気図 (第 11 図) と地上気象観測データ (第 3 表) とから、今回採集した雪の中の酸性物質は、地上 1500m~4500 m に浮遊している中国の砂漠起源ではなく、大量の油

煙を発生しているクウェート上空から飛来した可能性が大きい。さらに、今回の雪の中の塵にはムライトが含まれないことから石炭のすすではなく、石油のすすであることを示した。油井から排出された SO_2 は、そのままの状態で大気中に浮遊している他、無水硫酸、硫酸、亜硫酸に変化し、大気中の水滴に取り込まれていると考えられる。この SO_2 は、雨水中では、容積で 40 倍にも濃集されるという (谷山, 1989). また、採集した雪の中に塩の粒子が認められたことと、pH が 2 日目から 7~8 になったことは、海水の影響を受けていることを示す。

今回採集した 2 月 20 日~25 日の雪の中の微細粒子は、昨年まで、観察されなかった大量のイオウを含む極微細粒子 ($<10\text{nm}$) であり、薄い被膜を作って他の粒子をおおっている。高分解能透過型電子顕微鏡により、この極微細粒子は炭素粒子とイオウ粒子であることが確かめられた。4 月 27 日に、気象庁気象研究所が、筑波市上空の対流圏上部 (2.6~7.9km) から採集した大気浮遊粒子にイオウ原子が含まれており、さらに、半径 0.02 μm の炭素独特のチェーン構造をしている微粒子 (すす) を電子顕微鏡で認めたという (毎日新聞, 1991 年 5 月 8 日). このことから対流圏上部 (7km 以上) に通常は観測されないすす状の粒子が広く分布していることが確認された。なおこの高度では黄砂粒子は観察されず、対流圏中下部 (4km 付近) で黄砂粒子は観察される。以上の事実は、この雪の中のすすが、イオウ成分の多いクウェートの原油が油井火災により日本に飛来したことを裏付けている。

湾岸戦争が終結しても、3 月 1 日現在なお 500 カ所の油井が炎上しており、排煙による汚染物質の発生量は、世界の全自動車が出す排ガスの汚染物質の総量にも匹敵することが、WMO 世界気象機関の調べでわかった。こうした排煙は、気象にも影響を及ぼしており、クウェートでは気温が月平均で 3 度から 4 度下がっている (リチャード, 1991). また、黒い雨や日傘効果だけでなく、全地球的な規模で酸性雨、強酸性の雪や霧をもたらし、最終的には生態系の破局の恐れが進行しつつある。湾岸戦争開始から雪の試料採集の時期、そして、この論文原稿をまとめる直前までの環境変化の記録を、朝日新聞、毎日新聞、赤旗新聞、NHK テレビ、ロイターなどの記事により集録した。またこの論文原稿の投稿後、1991 年 7 月 19 日の Global Environmental Change Report (1991) は、湾岸戦争において 743 の油井が炎上し、そのすすが日本、ハワイ、ワイオミングに達したと報告している。

V まとめ

1990年から1991年にかけてのエアサンプラーによる浮遊粉塵、雪の中の塵の分析から、以下のことが明らかとなった。

- 1) エアサンプラーによる浮遊粉塵の量は、天候によって変動する。雪や雨のときは、大気中の粉塵の量は少なく、ろ紙の色もうすい。このことは、雪や雨が、大気中の浄化作用をしていることを示している。
- 2) 1991年2月20日から25日までに、松江市内に降った雪の分析値から、初日は、pH 5.3と酸性であったが日を追うに従って中性～アルカリ性になり、日本周辺の海水の影響を示した。雪の中のNO₂-N, NH₄-N, PO₄-Pとも、初日が高く、日を追うに従って低くなり、大気が雪により浄化されていくことを示した。また、湾岸戦争以前の晴天の日の大学内の大気中のNO₂は0.008ppmであったのに対し、湾岸戦争中の雪の中のNO₂-N量が0.027ppmと高く、油井炎上によるすすの飛来を裏づけた。
- 3) 雪の中の塵の組成は、X線粉末回折から、石英、長石、ハライト、硫酸カリ鈹、(水)酸化鉄鈹物、雲母類鈹物、カオリン鈹物であることが明らかとなった。さらに、バックグラウンドが高いことから、非晶質物質または有機物の存在を示唆している。なお、今回の雪の中の塵にはムライトが存在しないことから、石炭由来のすすではなく、石油由来のすすであることが明らかである。
- 4) 雪の中の塵のSEM観察は、鈹物粒子の表面に微細な粒子が付着したり、被膜がおおったりしていることを示した。
- 5) 雪の中の塵のEDAXによる全岩の化学組成は主に、Al₂O₃、SiO₂、Fe₂O₃であるが、海水によるNa₂OとClの他、原油燃焼によるすすの影響で、SO₃が高い。個々の粒子の面や点分析から、微細粒子の表面に、塩やイオウ酸化物が付着し、凝集していることが明らかとなった。なお中近東の原油はイオウ含有量の高いことが特徴であり、市販の脱硫された石油の燃焼によるすすではないことを分析値は示している。
- 6) 雪の中の塵のTEM観察は、極微細粒子が被膜を作っていること、その微細粒子は、直径20nmで炭素特有の指紋状構造を有し、連結している特徴を明らかにした。また、アマーバー状の被膜にはイオウのモザイク構造が認められた。
- 7) 雪が降った前後の、高層天気図(500mb, 5000m)と

松江市内における地上気象データから、この雪は、上空約5000m以上でマイナス29℃の条件ででき、日本に移流してきたクエートの原油燃焼によるすすが、核となって、降下したと考えられる。なお、黄砂は、地上1500m～4500mの強い南西の風で移流するので今回採集した雪のうち、2日目以後の試料は、大気中の塵や黄砂の影響は少ないと言える。

謝辞 島根県衛生公害研究所の中尾 允氏には、大気中の塵について有益な御助言をいただいた。さらに、松江地方気象台のスタッフからは有益な御助言と貴重なデータを提供していただいた。島根大学理学部地質学教室の鈴木徳行博士には、石油に関する有益な御助言をいただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げる。この研究の一部に、文部省科学研究費(一般A, 01430010)を使用した。

文 献

- 天谷和夫(1989) みんなでためす大気の汚れ。合同出版、35-52。
- Dams, R., Robbins, J. A., Rahn, K. A. and Winchester, J. W. (1970) Nondestructive neutron activation analysis of air pollution particulates. *Analytical Chemistry*, **42**, 861-867.
- Fyfe, W. S. (1985) The international geosphere-biosphere program : Global change. In : Global Change T. F. Malone and J. G. Roederer (eds.), ICUS Press by Cambridge University Press, Cambridge, 499-506.
- (1990) The international Geosphere Biosphere programme and global change : An anthropocentric or an ecocentric future? A personal view. *Episodes*, **13**, 100-102.
- Global Environmental Change Report (1991) Environmental effects of the Gulf War. Cutter information Corp. 3, 19 July, 1-3.
- Hara, H. and Okita, T. (1990) Oxidation of S (IV) in rain-water collected in Japan. *Atmospheric Environment*, **24A**, 1427-1432.
- 原 宏(1991) 酸性雨—第1講「酸性雨」とpH—。大気汚染学会誌, **26**, 1-8.
- Horgan, J. (1991) Burning questions ; Scientists launch studies of Kuwait's oil fires. *Scientific American*, July, 17-24.
- 市沢成介(1979) 黄砂の流れ。気象, **23**, 26.
- 石 弘之(1988) 地球環境報告。岩波新書, 258p.

- 石井英二 (1979) 黄砂. 気象, **23**, 22-25.
 ——— (1980) 黄砂—大陸の砂. 気象, **24**, 24-27.
- 石坂重次 (1979) 1979年4月中旬の黄砂. 天気, **26**, 69-73.
- 石坂 隆・小野 晃・角脇 怜 (1981) 日本上空に飛来した砂塵の性状とその発源地. 天気, **28**, 47-61.
- 岩坂泰信・箕浦宏明・長屋勝博・小野 晃 (1982) 黄砂粒子の輸送とその空間的ひろがり—1979年4月にみられた黄砂現象のレーザーレーダー観測. 天気, **29**, 35-39.
- Iwasaka, Y., Yamato, M., Imasu, R. and Ono, A. (1988) Transport of Asian dust (KOSA) particles ; Importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles. *Tellus*, **40**(13), 494-503.
- 岩坂泰信・笹野泰弘 (1989) 黄砂の輸送とそれが土壌粒子のグローバルな循環に与える影響—黄砂のライダー観測—。レーザー研究, **17**, 268-274.
- Kenneth Pye (1987) Aeolian dust and dust deposits. Academic Press, London, 334p.
- 古明地哲人・福岡三郎・中野欣嗣・朝来野国彦・大平俊男 (1976) 雨水の汚染とそのメカニズムに関する研究. 東京都公害研究所年報, **7**, 1-10.
- 古明地哲人 (1983) 酸性雨はどんなとき降るか. 現代科学, **10**, 10-25.
- 近藤純正 (1987) 身近な気象の科学—熱のエネルギーの流れ. 東京大学出版会, 189p.
- 倉嶋 厚 (1989) ウェザーマンとしての私の北極圏. 北極圏, 日本放送出版協会, 159-165.
- Liu Tungsheng (1985) Loess and the environment. China Ocean Press. Beijing, 251p.
- 増田善信 (1990) 地球環境が危ない. 新日本新書, 228p.
- 松江地方気象台 (1991) 島根県松江における地上気象観測月統計値および高層気温, 1991年2月, 3月.
- 溝畑 郎・真室哲雄 (1978) 黄砂エアロゾルに関する二, 二の知見. 大気汚染学会誌, **13**, 31-39.
- Mizota, C. (1983) Eolian origin of the micaceous minerals in an ando soil from Kitakami, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **29**, 379-382.
- 向井人史・阿部善也・椋 達則・竹下和男・福間常男・高橋順一・溝田真司 (1989) 隠岐島における大気粉じん成分の長期的変動. 国立公害研究所研報, **123**, 7-97.
- 村山信彦 (1987) 黄砂の発生と輸送. シンポジウム「黄砂」の報告, 176-185.
- 日本環境学会編集委員会 (1984) 環境科学への扉. 有斐閣双書Gシリーズ, 264p.
- リチャード・ターコ (1991) 油井火災は地球規模の気候変動をもたらすか. *Newton*, **N**, 32-35.
- 笹野泰弘 (1988) 黄砂粒子の輸送: レーザーレーダーによる観測. エアゾロ研究, **3**, 30-35.
- 大気汚染研究協会 (1998) 黄砂エアロゾルに関する調査研究. 第63年度環境庁委託業務結果報告書, 147p.
- 田中 茂・田村定義・橋本芳一・大歳恒彦 (1983) 黄砂現象によるアジア大陸からの土壌粒子の移動とわが国に及ぼす影響 (NASN データによる考察). 大気汚染学会誌, **18**, 263-269.
- 田中豊顕 (1987) 氷晶核としての黄砂. シンポジウム「黄砂」の報告, 57-62.
- 谷山鉄郎 (1989) 恐るべき酸性雨—水と緑を破壊する複合汚染. 合同出版, 143p.
- Tazaki, K., Fyfe, W. S., Sahu, K. C. and Powell M. (1989) Observations on the nature of fly ash particles. *FUEL*, **68**, 727-734.
- 田崎和江・森川真理子・中尾 允・富田克利 (1990) 黄土および黄砂中の粘土鉱物. 島根大学地質学研報, **9**, 17-27.
- 田崎和江・島根大学理学部地質学教室環境自主ゼミナール (1991) 松江市内における大気中のNO₂量. 島大研報, **10**, 35-38
- 山口幸祐・向井人史・田中文雄・多田納力・中尾 允・原 宏 (1991) 硫黄化合物の島根県への流入と降水への取り込み. 第6回全国環境公害研究所交流シンポジウム, 要旨集, 10-11.