

黄土および黄砂中の粘土鉱物

田崎和江*, 森川真理子**, 中尾 允***, 富田克利****

Clay Mineralogy on Loess and the Airborne Dust over Japan

Kazue TAZAKI, Mariko MORIKAWA, Makoto NAKAO and Katsutoshi TOMITA

Abstract

Fine particulates, $2\mu\text{m}$ or less, settle very slowly from the atmosphere unless they are rained out. Given that Japan is situated near China, which burns more coal than any other nation, there is an need to characterize the types of dust that are transported to the West of Japan. Airbone dusts were collected in Shimane, on 21-22 April, 1988 and 1989, and on 12-13 April, 1990, when abnormally high concentration of loess aerosol was observed. Two loess samples studied also, to compare these materials with collections from chenjiawo and Southern Lanchow in China.

The fine particulates, less $2\mu\text{m}$, were analyzed by using X-ray powder diffraction and scanning electron microscopy. Both loess and airbone dust samples composed of Al-chlorite, mica group minerals, and kaoline minerals with feldspars and quartz. The traces of calcite, crystobalite, ilmenite and ankerite were also found in the airbone dusts. SEM study of the airbone dusts revealed to find not only clays but also coal fly ash, a perfect adsorber, aggregated with loess from China. Chemistry of the airbone dusts showed high concentrations of SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Mn and Fe were noted in association with loess aerosol. Research in atmospheric chemistry and clay mineralogy, and the relationship to climate, global warming and acid rain is one of the most urgent problems facing man.

1. ま え が き

黄土高原は、西に賀蘭山、北に陰山、東に太行山、南に秦嶺と四方から山脈に取り囲まれ、総面積は、 27.3万km^2 に及び、その黄土の厚さは、数十mから200m以上にも達する。黄土の表面は土壌化し、100万年の間にできたものだけでも14層の古土壌が堆積している(康峪梅, 1990)。中国黄土の研究は、ここ20年間、第四紀、古気候、古地磁気、地理、古土壌、土壌、化石、土木建設などの専門家により中欧・アメリカのレ

ス研究成果や深海コアなどの古気候研究成果と対比されつつ急速に進歩してきた(菅野, 1989; 刘東生等, 1985; 王永焱・笹島, 1985)。黄土-古土壌系列で、黄土層はL, 古土壌はS, 現代土壌(最上部)はMSであらわされ、上部より下部に向かう風化過程で、イライトと加水雲母が増すと報告されている(王永焱・笹島, 1985)。中国黄土の層序および分布は、張等(1989)によって詳細に調査されており、黄土の地球化学的研究も、主要および微量成分について報告されている(文启忠等, 1989)。黄土の微細構造については、Sasajima and Yongyan (1984)が、粒子間隙および結合状態を分類している他、電子顕微鏡観察から、黄土中の微砂状石英粒子は、機械的に破砕されることによって生じた貝殻状断口、鋭角稜状および破裂紋などの表面構造をもつことが報告されており(刘東生

* 島根大学理学部地質学教室 Department of Geology, Shimane University, Matsue, Shimane, 690 Japan

** 応用地質株式会社 (1989年3月島根大学を卒業)

*** 島根県立衛生公害研究所, 大気科

**** 鹿児島大学理学部地学教室 Institute of Earth sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kagoshima, 890 Japan

等, 1985), 黄土物質が主に, 砂漠・石漠砂漠地域あるいは, 第四紀氷河地域から来たことを示している. 黄土の成因については, 1870年~1930年代, 大気粉塵堆積(風成)説が主導的地位を占め, 中国地方の黄土は砂漠黄土(熱黄土)で成因上砂漠と関係し, 西欧と中欧地区の黄土は氷河黄土(冷黄土)で成因上氷河作用と関係しているという(菅野, 1988, 1989).

一方, ゴビ砂漠やタクラマカン砂漠の砂嵐によって巻き上げられた砂は, 偏西風に乗って東に移動し, 北アメリカ大陸にまで届く. 春先の黄砂は, 中国の砂漠から吹き上げられ, 西風に乗って運ばれてきた砂ぼこりが原因で, 日本上空にきた黄砂は, 重いものからしだいに, 地上に落下し, また, 雨や雪の核となって地上に落ちてくる. 日本に達する黄砂は, 数ミクロンから数十ミクロン程度であるが, 長い年月降り積ると, 九州地方では, 3 mに達する所もある(中井, 1990). 黄砂の輸送実態は, 人工衛星画像, 航空機観測などにより調べられており, 黄砂の移動速度は, 高度4 km付近の風速と対応し, 位相速度は, 850 mbで20 ktくらいである. また, 静止気象衛星「ひまわり」から見た黄砂は, 実にみごとな“まが玉”状の雲がみられ, この雲パターンから, ゴビ砂漠地帯に低気圧が発達していることがわかる. 2000 km離れたゴビ砂漠で起った砂塵あらしの風は, 日本上空に達する時間は, 約70 km/hで, 30時間弱で達する計算である(市沢, 1979; 石坂, 1979; 岩坂他, 1982; 長谷川, 1980; 笹野, 1988; 麻生, 1989).

地球規模の大気環境に関する関心の高まりとともに, 地球化学的な観点から, 物質の収支について正確な情報が必要となり, 黄砂についても成分が報告されている. 黄砂を構成する主な鉱物は, 石英, 緑泥石類, 斜長石類, 雲母類, 方解石, アンケライトの他, 少量の磁鉄鉱, 角閃石を含む(石井, 1979, 1980). 直径1~30ミクロンの砂塵中には, これらの鉱物の他, カオリナイト, 石こうおよびX線回折では組成の決定できない物質が含まれている(石坂他, 1981). また黄砂の化学成分は, その濃度に季節変化がみられ, 春に鉱物起源と考えられる Al 等の濃度が極めて高く, 海洋起源と考えられる Na 等は, 季節的な濃度変化を示さない(村山, 1987). さらに, 4~5月にかけては, 土壌起源である Al, Sc, Fe の大気中濃度は, 年平均値の2~6倍の値を示すのに対し, Ni, Zn, Pb, Br, As, Sb 等の人工起源元素の大気中濃度は, 季節変動を示さない(溝畑・真室, 1978; 田中他, 1983).

近年, 北欧諸国やカナダにおいて酸性雨による針葉樹林の枯死や河川・湖沼の酸性化による生態系の変化, 環境汚染が問題となっている. 松江, 隠岐島における大気粉じん成分は, 冬期には, 夏期よりVに対し相対的に SO_4^{2-} の濃度が高くなっている他, ここ4年半でCのみが相対的に増加傾向にあった(向井他, 1989). 黄砂粒子は, エアロゾル粒子であると同時に, 氷晶核としての属性をもっており, 気温の変化に応じて, 過冷却雲の氷晶化と降雪の形成に重要な働きをする(Isoro *et al.*, 1971). また, カーボンは微細粒物質や加水有機物質を表面に付着させ(TAZAKI *et al.*, 1989), 地球規模で輸送される. 日本における種々の土壌から分離した1~10 μm 画分の石英の酸素同位対比を測定すると, 中国の黄土中の微細石英の $\delta^{18}\text{O}$ に近似しており, わが国の土壌は, 少なからず, タクラマカン・ゴビ砂漠の風成塵の影響を裏付けている(井上・溝田, 1988). 化石燃料を使用することによる大気汚染とそれともなう地球の温暖化と酸性雨の問題解明のために, 大気汚染物質を吸着した黄砂, とくに2 μm 以下の微粒子の性質を詳細に調らべる必要がある. アジア大陸およびヨーロッパからの風を正面から受ける方向に位置している日本, とくに山陰地方は, これらの研究を行なうのに最も適している. 本研究においては, 1988年と1990年の黄砂と, 蘭州および西安の黄土について環境地質学的考察を行なう.

2. 試料および実験

黄土試料は, 中国内陸部の西安(Chenjiawo)と蘭州の南部の2ヶ所で採集を行なった. 西安における黄土の柱状図の上部を Fig. 1 にしめたが, 全体では, 19枚の古土壌が黄土と交互に堆積しており, 約50mの層厚をもつ. 古土壌 S_2 と S_3 には含まれた黄土(色; 10 YR 7/3)を実験に用いた.

黄砂試料は, 紀本電子工業, MODEL 120, シェルター付 High Volume エアサンプラー(空気吸引量 1500 ℓ/min)を用いて採集を行ない, 黄砂現象が著しかった1988年4月21日~22日にかけて, 江津市で採集したもの, 1989年4月20日~21日にかけて, 松江市で採集したものについて実験を行なった. なお, 採集時間は, いづれも24時間で, 石英繊維ろ紙(パールフレックス2500 QAST)を使用した. 試料重量は約100~300mgである. さらに, 1990年4月12日~13日にかけて, 黄砂現象時の雨水を, 島根大学理学部の屋上で採集した. その雨水の pH は5.3であり, 水分を

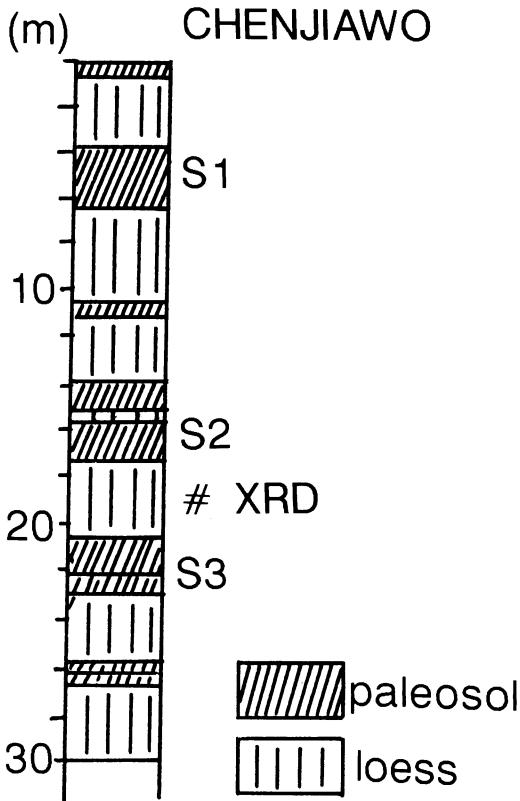


Figure 1. Columnar section of loess and paleosol sequences at Chenjiawo in China.

蒸発させた後の残留物について、走査型電子顕微鏡で観察を行なった。

浮遊粉じんの化学分析方法は次のとおりである。浮遊粉じん濃度は、ろ紙を温度20℃、湿度50%の秤量室に、採取前は24時間、採取後は48時間放置後に秤量し、ろ紙の粉じん採取前後の重量差より求める。水溶性物質は、採取した試料ろ紙の4/23を250 ml 広口ポリエチレンビンに入れ、蒸留水100 ml を加え、水平振とう機で一時間抽出する。この抽出液をメンブランフィルター（ニュークポリア、孔径0.45 μm）でろ過する。この試験溶液をイオンクロマトグラフ法（本体：横河 IC 500, 分離カラム：東ソーIC-Anion PW, 溶離液：1.6mM Na₂CO₃/2mM NaHCO₃ 1.2 ml/min, 除去液：15 mM H₂SO₄ 2 ml/min）により分析する。金属成分については、採取した試料ろ紙の8/23を300 ml トールビーカーに入れ、HNO₃（1→2）30 ml, H₂O₂（30%）5ml を入れ、時計皿でおおい、ホットプレート

上で1時間加熱抽出する。時計皿を温水で洗い、洗液はビーカーに入れ、ビーカーの上澄液をろ過（No. 5B）する。ビーカー内の残留物は、HNO₃（1→2）20ml を加えて、ホットプレートの上で10分間加熱する。冷却後、さきのろ紙でろ過した後、ビーカー内の残留物は温水でよく洗い、洗液はさきのろ紙でろ過し、すべてのろ液を合せる。これをホットプレート上で蒸発乾固しない程度まで濃縮した後、HNO₃（1→50）10ml を加え、ホットプレート上で加熱して溶かし、冷却後、HNO₃（1→50）を加えて正確に25 ml とし、これを試験溶液とする。試験溶液は、バナジウムについては、亜酸化窒素-アセチレン炎を用い、マンガン、鉄、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛、カドミウム、鉛については、空気-アセチレン炎を用い、直接噴霧原子吸光法（日立、偏光ゼーマン原子吸光光度計180-50）により分析した。

X線粉末回折は、理学電機ゴニオメーターを用い、加速電圧30 kV, 加速電流15mA で測定を行なった。採集試料は、全試料および2 μm以下を水篩により集めた試料の両方について回折を行ない、必要に応じて加熱処理（200~600℃）とエチレングリコール処理をし、粘土鉱物の同定を行なった。

走査型電子顕微鏡は、日本電子KK製 JEOL JSM-T220A を用い、加速電圧25 kV で観察を行なった。乾燥試料は、両面テープを用いて固定し、金蒸着を5分間行なった。

3. 実験結果

X線粉末回折

西安および蘭州におけるX線粉末回折は、いずれもよく似た回折パターンをしめた。黄土の組成は、石英、方解石、長石類を主とし、少量のα-クリストバル石および鉄酸化物（2.5 Å付近）を含有する。一方、水篩した2 μm以下の粘土分については、強い10 Åと7 Åのピークその他、弱い14 Åのピークが両試料中に認められた（Fig. 2 and 3）。西安の試料中には、11~12 Åに加水雲母または混合層粘土と考えられる不明瞭なピークが存在する。10 Åの反射は、エチレングリコール処理により変化せず、600℃の加熱処理後も存在することから、雲母粘土鉱物と同定される。7 Åの反射は、500℃の加熱処理後、その反射強度が弱くなり、600℃の加熱処理後に消失することから、カオリン鉱物と同定される。14 Åの反射は、エチレングリコール処理により変化せず、600℃の加熱処理で強度を増す

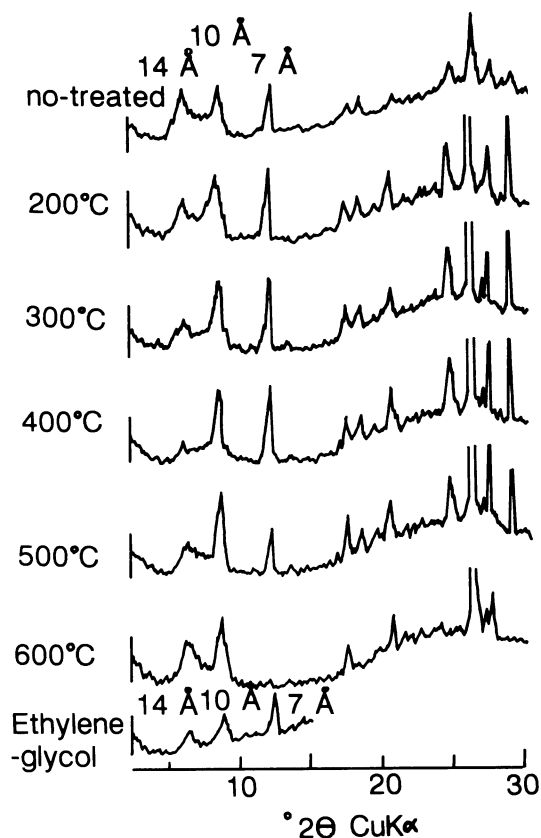


Figure 2. X-ray powder diffraction patterns of loess sample, less $2\mu\text{m}$, from Chenjiawo in China. 14\AA ; Al-chlorite, 10\AA ; mica group minerals, 7\AA ; kaoline minerals, 200–600°C; heating treatment at these temperatures.

ことから、Al-緑泥石と同定される。 10\AA 雲母粘土鉱物は、電子顕微鏡観察で、不定形のフレック状を呈することから、イライト様鉱物と分類される。

一方、江津市と松江市で採集した黄砂は、石英と長石類を主とし、前者には、少量の方解石も認められた。水篩により集めた $2\mu\text{m}$ 以下の試料中には、強い 10\AA と 7\AA の反射および 14\AA の弱い反射が認められる。 $11\sim 12\text{\AA}$ 付近には、加水雲母または混合層鉱物と考えられる反射が認められる。エチレングリコール処理、加熱処理により、 14 , 10 , 7\AA の反射は、各々Al-緑泥石、雲母粘土鉱物、カオリン鉱物と、同定された (Fig. 4)。また、 $< 2\mu\text{m}$ 中には、微量の方解石

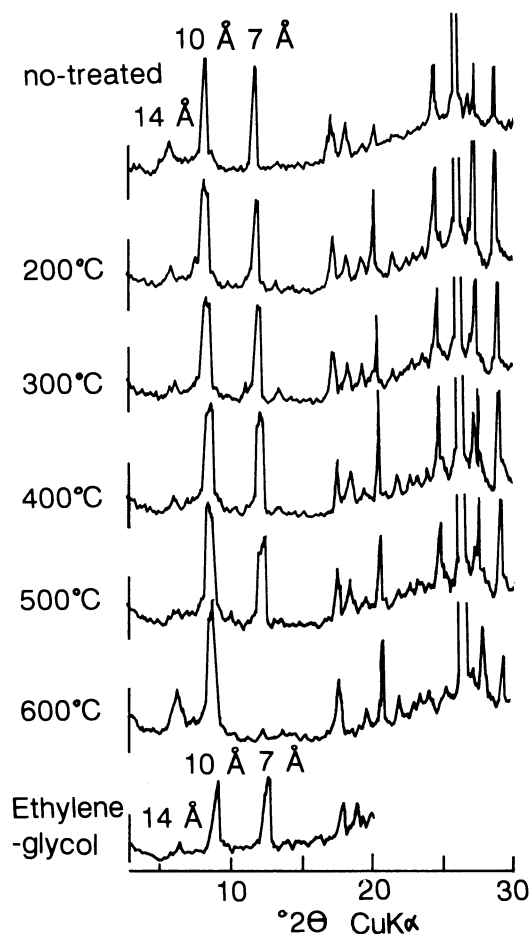


Figure 3. X-ray powder diffraction patterns of loess sample, less $2\mu\text{m}$, from Lanchow in China. Other simboles are the same as in Figure 2.

(3.04\AA)、アンケライト (2.866\AA)、イルメナイト (FeTiO_3 , 2.81\AA)も、江津市の黄砂中に認められた。

黄土の二試料と黄砂の一試料を Fig. 4 で比較した。三者は、よく似たX線回折パターンを示し、いずれも、雲母粘土鉱物とカオリン鉱物を主成分とし、少量のAl-緑泥石を含有する。黄砂には、 $11\sim 23\text{\AA}$ に加水雲母または混合層鉱物が存在する。また、三者とも $3.3\sim 3.0\text{\AA}$ 付近のバックグランドが高いことから、非晶質物質の存在が暗示される。電子顕微鏡観察によれば、この非晶質物質は、水酸化鉄、有機物、火山ガラスまたはアロフェン等と推定できる。さらに、黄砂における 10\AA と 7\AA のピークの形が、黄土のそれと比

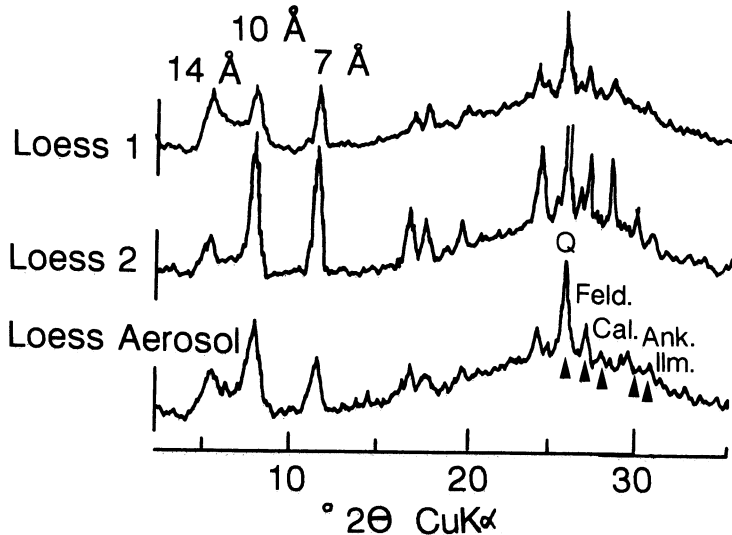


Figure 4. X-ray powder diffraction patterns of loess 1 (Chenjiawo in China), loess 2 (Lanchow in China) and loess aerosol collected from Gotsu, Shimane in Japan, on 21–22 April, 1988.

Q; quartz, Feld.; feldspars, Cal.; calcite, Ank.; ankelite, Ilm.; ilmenite.

較し、幅広くなっているが、低結晶性、微細な粒径に原因するのみならず、結晶物の周囲に存在する付着物によると考えられる。

走査型電子顕微鏡観察

X線粉末回折ではその確認がむづかしい数%以下の微量成分や非晶質物質を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。1990年4月12~13日に島根大学理学部の屋上で採集した雨水中の微細粒のSEM写真をFig. 5と6に示した。黄土中の粒子の表面は平滑であり、付着物が少ないのに対し、その砂塵—黄砂は、粘土鉱物粒子が相互に凝集したり、あるいは粒度の粗い石英や長石などの表面に付着した塊状物質であるのが特徴である。Fig. 5は、数ミクロンの直径をもつ鱗片状の結晶が集合している部分を示した。この鱗片状結晶は、ヘマタイト、ゲータイトなどの酸化鉄鉱物であると考えられる。鋭角稜状および破裂紋などの表面構造をもった石英粒子の表面には、微粒子が付着している (Fig. 5B, C)。Fig. 5Cに示した粒子の表面は、イライトと考えられるフレーク状結晶におおわれている。Fig. 6

は、石炭のすす (炭化物) が黄砂の粒子と互に凝集している状態を示した。炭化物は、直径0.5~3 μmの球状を呈し、表面は平滑である。凝集した炭化物は、浸食を受けた石英粒子 (Fig. 6B 右側) としっかりと密着している。

浮遊粉じん測定結果

江津市における1988年の浮遊粉じん測定結果を第1表に、松江市における1989年の測定結果を第2表に各々示した。また、江津市における浮遊粉じん中の各成分の濃度について、1980年から1988年までの年平均値の経年変化を Fig. 7に示した。江津市および松江市とも、黄砂の飛来時には、浮遊粉じん濃度、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- をはじめ金属成分が非常に高くなった。特にFe含有量は、他の月に比較して、一桁高い。浮遊粉じん中の

SO_4^{2-} および NO_3^- 量は、冬に少なく、春先に多くなる傾向がある。松江市および江津市における、黄砂飛来時のV, Co, Cdは、微量存在する。また、各々の元素の最高値と最低値に、大きな差がみとめられるのは、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、Fe、Znである。江津市における黄砂成分の経年変化をみると、10年間で NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、Cuが漸次、増加している。Zn量は、年ごとに大きく変化したのに対して、Mn、Ni、Pb量は、ほぼ一定である。また、Fe含有量は、ここ数年、一定であったのが、1988年で急増している。Feの急増は、Mnおよび NO_3^- の急増とも一致している。

4. 討 論

大気汚染の発生源のまったくない北極上空の煙霧は、地球規模で汚染物質が移流していることを示している。北極上空や黄砂中の汚染物質を解明することは、国境を越え地球規模で広がる大気汚染の実態と輸送のメカニズムを知ることである。カナダでは、五大湖周辺の酸性雨とともに、化石燃料を燃やすことによって生じるすすや煙霧の研究が1980年の始めから行

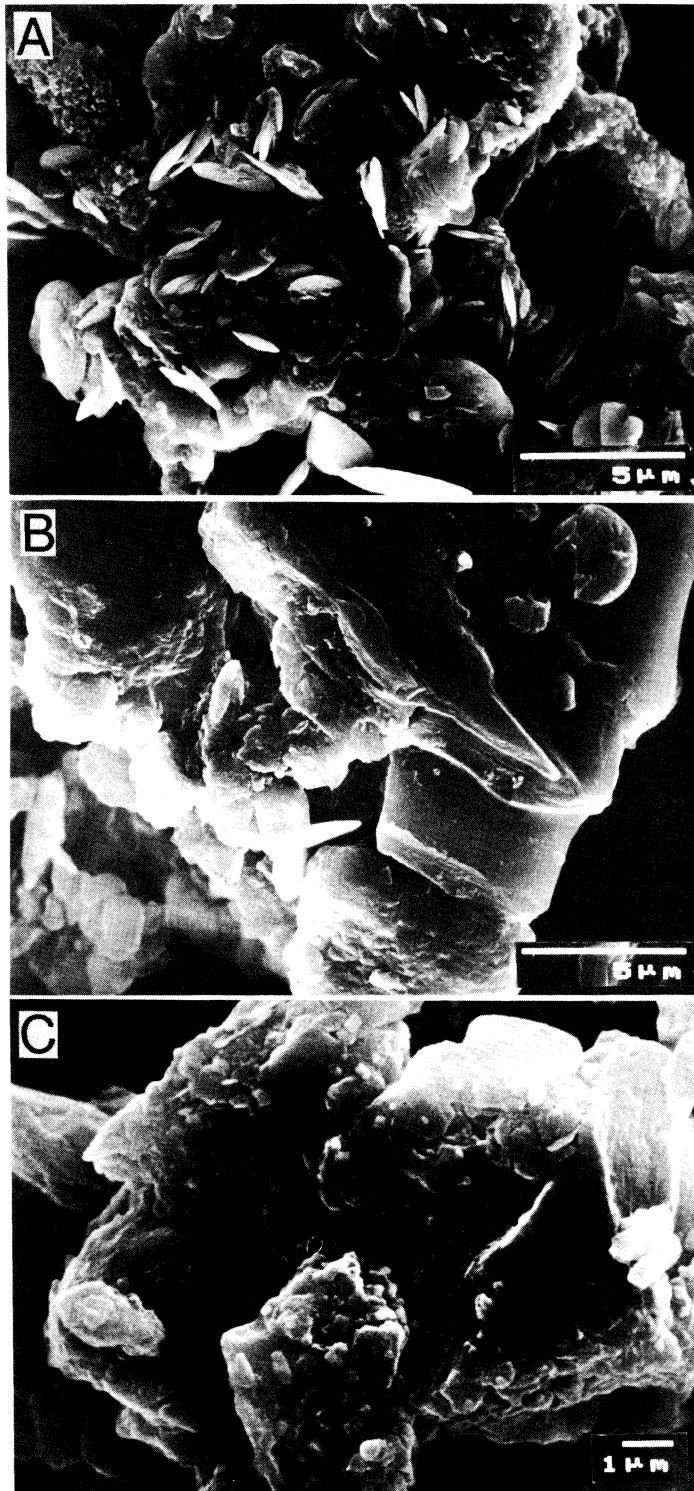


Figure 5. Scanning electron micrographs of airborne dusts collected at Shimane University, on 12–13 April, 1990, showing aggregates of loess with fine particulates.

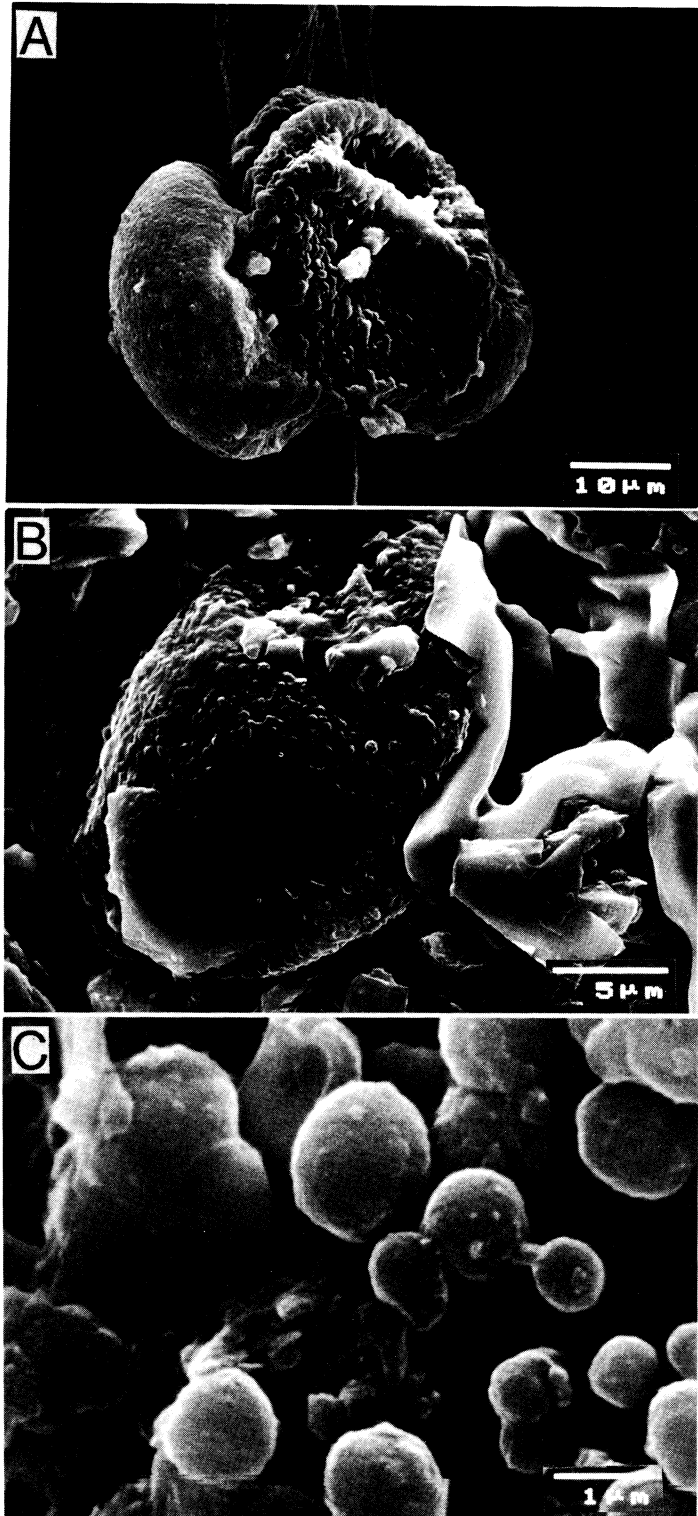


Figure 6. Scanning electron micrographs of airborne dusts collected at Shimane University, on 12–13 April, 1990, showing coal fly ash associated with loess.

Table 1. Atmospheric chemistry of airborne dusts at Gotsu, Shimane, in 1988.

1988年度 浮遊粉じん測定結果 (測定場所: 江津市役所)

単位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

測定期間	浮遊粉じん濃度	水溶性物質			金属成分										気象													
		SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	天候	風向	風速												
88	4.21 ~ 4.22	259	12.4	7.8	8.8	0.00	0.19	7.2	0.000	0.011	0.05	0.09	0.001	0.06	曇り	N	0.6											
	曇り														W	0.7												
	曇り														NW	1.2												
	8:45 ~ 8:45	27	5.1	1.5	0.1	0.00	0.01	0.2	0.000	0.002	0.12	0.04	0.000	0.03	曇り	N	0.4											
	曇り														W	0.4												
	雨														NW	0.8												
	曇り														E	3.3												
	8:25 ~ 8:26	35	5.6	1.2	4.2	0.00	0.01	0.3	0.000	0.002	0.04	0.02	0.000	0.01	曇り	NE	1.3											
	曇り														NE	0.6												
	8:40 ~ 8:40	46	6.3	2.9	0.1	0.00	0.02	0.5	0.000	0.003	0.10	0.06	0.001	0.04	晴れ	NE	0.4											
曇り	E														0.4													
曇り	E														0.5													
10:20 ~ 10:21	46	4.5	0.9	12.7	0.00	0.01	0.2	0.000	0.003	0.01	0.03	0.000	0.01	曇り	W	4.0												
曇り														W	3.3													
雪														W	5.0													
8:50 ~ 8:50	32	3.7	0.6	1.9	0.00	0.01	0.4	0.000	0.002	0.02	0.03	0.000	0.01	曇り	E	1.6												
曇り														NE	4.0													
曇り														E	0.4													
12:15 ~ 12:16	74	6.3	2.5	4.6	0.00	0.04	1.5	0.000	0.004	0.06	0.05	0.000	0.03															
最高値														259	12.7	7.9	12.7	0.00	0.19	7.2	0.000	0.011	0.12	0.09	0.001	0.06		
最低値														27	3.7	0.6	0.1	0.00	0.01	0.2	0.000	0.002	0.01	0.02	0.000	0.01		
平均値	74	6.3	2.5	4.6	0.00	0.04	1.5	0.000	0.004	0.06	0.05	0.000	0.03															

注) 風向・風速は上段:測定開始時,中段:中間,下段:測定終了時
 4月は黄砂の飛来時に浮遊粉じん補集
 ▶: X線粉末回折をした試料

Table 2. Atmospheric chemistry of airborne dusts at Matsue, Shimane, in April, 1989 when abnormally high concentration of loess aerosol.

1989年度 浮遊粉じん測定結果 (測定場所: 衛生公害研究所, 松江市)

単位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

測定期間	浮遊粉じん濃度	水溶性物質			金属成分									
		SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	
89	4.3 ~ 4.4	98	8.1	4.2	10.0	0.00	0.04	1.4	0.000	0.004	0.02	0.05	0.001	0.03
	4.4 ~ 4.5	49	4.9	1.3	4.2	0.00	0.02	0.7	0.000	0.002	0.01	0.02	0.000	0.01
	4.5 ~ 4.6	41	5.5	1.7	2.0	0.00	0.03	0.5	0.000	0.009	0.04	0.05	0.000	0.02
	4.18 ~ 4.19	106	11.5	5.5	2.2	0.00	0.06	2.0	0.001	0.005	0.06	0.09	0.001	0.04
	4.19 ~ 4.20	113	16.8	6.8	1.8	0.00	0.06	2.1	0.001	0.006	0.06	0.15	0.001	0.06
	▶4.20 ~ 4.21	108	11.7	4.7	1.3	0.00	0.09	2.5	0.001	0.007	0.04	0.14	0.001	0.05
	4.27 ~ 4.28	70	4.5	1.2	9.0	0.00	0.03	0.8	0.000	0.002	0.02	0.03	0.001	0.01
最高値	113	16.8	6.8	10.0	0.00	0.09	2.5	0.001	0.009	0.06	0.15	0.001	0.06	
最低値	41	4.5	1.2	1.3	0.00	0.02	0.5	0.000	0.002	0.01	0.02	0.000	0.01	
平均値	84	9.0	3.6	4.4	0.00	0.05	1.4	0.000	0.005	0.04	0.08	0.001	0.03	

注) ▶: X線粉末回折をした試料

なわれている (FYFE, 1981, 1985, POWELL *et al.*, 1989, TAZAKI *et al.*, 1989). 日本についても, 大気汚染の発生源のない山陰地域において, pH 4~5の雨*が降っている. これらの汚染の発生源は, 偏西風の風上にある中国や韓国であると考えられてきたが, その実態や空輸のメカニズムについては不明な点が多い.

本研究において, 黄土の粘土鉱物組成と黄砂の粘土鉱物組成がよく似ていること, 黄砂にすすが付着・凝

集して pH 5.3の雨*となって松江市に降下することが判明した. 松江, 隠岐島における大気粉じん成分のうち, ここ4年半で, 炭素含有量のみが相対的に増加傾向にある (向井他, 1989) ことと一致した.

従来, Al, Fe, Ti, Ca, Scなどの成分は, 黄砂が主に寄与していると言われている (向井他, 1989). 今回これらの成分のうち, Feのみしか分析していないが,

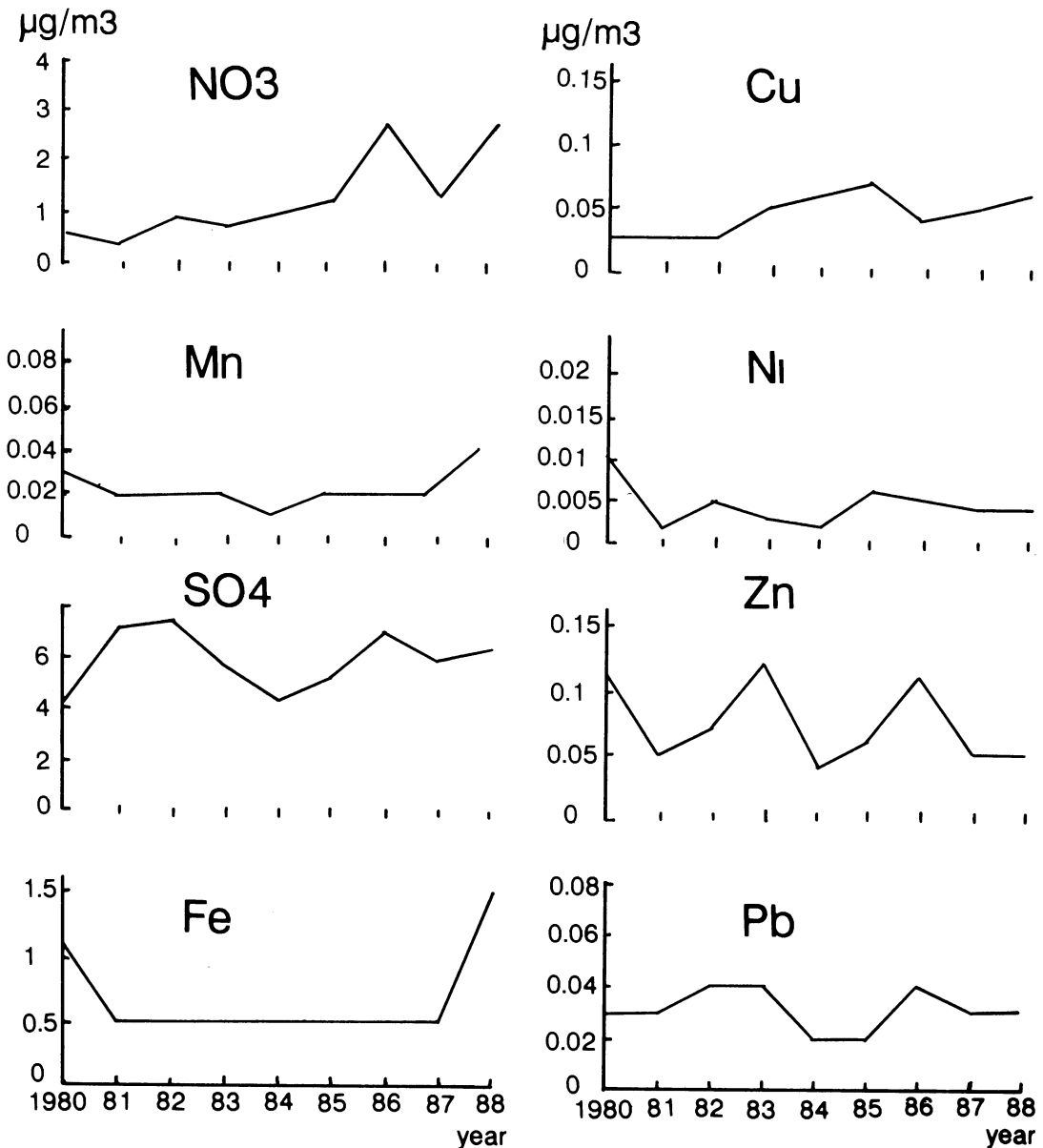


Figure 7. Trend of chemical concentrations of airborne dust at Gotsu, Shimane. Annual means from 1980 to 1988 are indicated.

他の微量成分が、ほぼ横ばい状態にあるのに対して、浮遊粉じん中の SO_4^{2-} および NO_3^- 量は、冬には少なく、春先が多くなるという漸増傾向を示した。1988年4月における浮遊粉じん中の Fe の含有量は、出雲市で2.81%、江津市で2.78%であった。なお、黄土中の Fe 含有量は、文后忠 (1989) によれば、2.82~3.90% であり、島根県で観察された黄砂中の Fe 含有量は、この範囲内に入る。黄砂および黄土の X線粉末回折結果から考えられる Fe 成分の由来は、アンケライト、イルメナイト、ゲーサイト、ヘマタイトなどである。しかし、江津市における Fe の経年変化 (Fig. 7) をみると、1988年で、 NO_3^- とともに急増していることから、Fe 成分の由来は、中国の黄土のみならず、他の発生源の影響もあると推定される。

島根県内の3ヶ所で測定した Fe の年平均値は、安来市が最も高く、次に出雲市、そして最後が江津市であった。安来市は、近距離の所に立地する製鋼工場の影響を受けていることが示唆される。さらに、黄砂中の Fe 成分の由来として、酸化鉄鉱物、製鋼工場のみならず、今回の研究で明らかとなった含有粘土鉱物、緑泥石、雲母、カオリン鉱物の化学成分にも由来すると考えられる。

5. ま と め

中国内陸部の西安と蘭州における黄土および1988~1990年春先に島根県に飛来した黄砂の鉱物、粘土鉱物、浮遊粉じん化学組成をしらべ、次のようなことが、明らかになった。

- ① 黄土の鉱物組成は、西安および蘭州においてよく似ており、石英、方解石、長石類を主とし、少量の α -クリストバライト、鉄鉱物 (2.5Å) である。
- ② 黄土の粘土鉱物組成 (< 2 μm) は、島根県に飛来した黄砂の粘土鉱物組成とよく似ており、A1-緑泥石、雲母粘土鉱物、カオリン鉱物を主とし、少量の加水雲母または、混合層鉱物 (11~12Å) をともなっている。また、< 2 μm フラクシオンには、微量の方解石、アンケライト、イルメナイトも認められる。
- ③ 黄砂の電子顕微鏡観察によって、石英や長石などの粒子の表面に微粒子が附着し互いに凝集していることがわかった。さらに、石炭のすすが多く認められ、黄砂の粒子と凝集している。

- ④ 浮遊粉じんの化学分析結果は、黄砂の飛来時には、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- をはじめ金属成分が非常に高くなることを示した。特に、Fe の含有量は、他の月にくらべ、一桁高い値を示した。黄砂飛来時には、微量の Mn, Ni, Cu, Zn, Pb も検出された。
- ⑤ 島根県江津市における、浮遊粉じん成分について1980年以來の年平均値の経年変化をみると、10年間で、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、Cu が漸次、増加している。Fe 含有量は、ここ数年一定であったが、1988年で急増している。
- ⑥ 以上の分析結果は、毎年春先に、偏西風に乗って、日本に飛来する黄砂の粘土鉱物成分は、中国内陸部の黄土の粘土鉱物成分とよく似ている上、石炭のすすと凝集して日本の上空に降下することを示した。その化学分析結果は、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- などの石炭のすすの成分が高いことを示し、山陰地方に降る雨が酸性である要因の一つであることを裏づけた。

謝 辞

島根大学理学部地質学教室の高安克巳博士には、蘭州の黄土試料を提供していただいた。中国科学院西安黄土・第四紀地質研究室の安芷生教授には、西安の黄土試料採集の便宜をはかっていただいた。また、浜田周作氏には、気象についての文献やご助言をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。この研究の一部に、文部省科学研究費補助金 (一般研究A, 01430010) をあてた。

文 献

- 麻生 正, 1989: 春, 東方への旅立ち. 気象, 33, 4-9.
- 文后忠, 1989: 中国黄土地球化学. 科学出版社, 北京, 293P.
- 張宗祜, 張之一, 王芸生, 1989: 中国黄土, 地質出版社, 北京, 357P.
- FYFE, W. S. 1981: The environmental crisis—Quantifying geosphere interactions. *Science*, 213, 105-110.
- FYFE, W. S. 1985: Global change—What should Canada do? *Trans. Royal Soc. Canada*, 23, 193-199.
- 長谷川隆司, 1980: 「ひまわり」から見た黄砂. 気象, 24, 20-22.
- 市沢成介, 1979: 黄砂の流れ. 気象, 23, 26-27.

* CO_2 がきれいな水に最大限にとけた時、水は弱酸性の pH 5.65 を示す。pH 5.65 の雨を中性雨と呼び、それ以下の pH を示す雨や雪を国際的に酸性雨と呼ぶ。

- 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.
- 石井英二, 1979: 「ひまわり」と電子顕微鏡で見た黄砂. 気象, 23, 22-26.
- 石井英二, 1980: 黄砂-大陸の砂-. 気象, 24, 24-27.
- 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.
- 石坂重次, 1979: 1979年4月中旬の黄砂. 天気, 26, 69-73.
- ISONO, K., KOMABAYASHI, K., TAKEDA, T., IWAI, K. and FUJIWARA, M., 1971: Concentration and nature of ice nuclei in the rim of the North Pacific Ocean. *Tellus*, 23, 40-59.
- 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観測-. 天気, 29, 35-39.
- 康峪梅, 1990: 黄土高原と黄河. 土の世界-大地からのメッセージ. 「土の世界」編集グループ編, 朝倉書店, 50P.
- 菅野一郎, 1988: 黄土の概念と研究略史. ペドロジスト, 32, 219-226.
- 菅野一郎, 1989: 黄土の概念と研究略史. ペドロジスト, 33, 59-66.
- 菅野一郎, 1989: 中国黄土に関する新刊紹介. ペドロジスト, 33, 220-225.
- 溝畑 朗・真室哲雄, 1978: 黄砂エアロゾルに関する二, 三の知見. 大気汚染学会誌, 13, 31-39.
- 向井人史・安部喜也・椋 達則・竹下和男・福岡常夫・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. 国立公害研究所研究報告, 123, 7-42.
- 村山信彦, 1987: 黄砂の発生と輸送. 天気, 34, 44-53.
- 中井 信, 1990: 砂漠からの訪問者-黄砂. 土の100不思議, 日本林業技術協会編, 東京書籍, 20-21.
- 王永焱・笹島貞雄, 1985: 中国黄土研究の新進展. 陝西人民出版社, 西安, 208P.
- POWELL, M. A., FYFE, W. S. and TAZAKI, K., 1989: Study of fine particulates. *Abstracts of 28th Inter. Geol. Cong., Washington, D. C. USA, 2-3*, 630.
- 刘東生等, 1985: 黄土与环境. 科学出版社, 北京, 481P.
- SASAJIMA, S. and YONGYAN, W., 1984: The recent research of loess in China. *Report, Kyoto Inst. of Nat. His.*, 15-31.
- 笹野泰弘, 1988: 黄砂粒子の輸送-レーザーレーダによる観測. エアロゾル研究, 3, 30-35.
- 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. 大気汚染学会誌, 18, 263-269.
- TAZAKI, K., FYFE, W. S., SAHU, K. C. and POWELL, M., 1989: Observations on the nature of fly ash particles. *Fuel*, 68, 727-734.