

黄砂*

長 田 和 雄**

1. はじめに

大気エアロゾル粒子について例示する際に、私は「黄砂」を持ち出すことが多い。2006年や2007年の春にも日本のかなり広い範囲で顕著な黄砂現象が観測されており、ニュースの話題や体験に基づいて「あ〜！」となることが多い。

「黄砂」には、大気塵象としての意味と黄砂粒子としての意味とがある。本稿のタイトルのようにどちらもひっくるめたようなニュアンスを表す場合もあるが、本文中では現象を表す場合に「黄砂現象」、物質として議論する場合に「黄砂粒子」と記述する。

黄砂粒子は、アジア大陸の砂漠乾燥地帯に由来するダスト粒子（機械的に破碎されて生じた固体粒子¹⁾）を指し、サハラ砂漠に由来する場合にはサハラダストと呼ばれる。

本誌を遡ること20年前の1987年3月号には、昭和61年度日本気象学会秋季大会のシンポジウム「黄砂」の報告²⁾が掲載されている。そのシンポジウムに引き続き、黄砂を扱った教科書³⁾が1991年に出版されている。その頃の私は黄砂の研究と直接関係はなかったが、「雪の汚れ」を接点としてこの分野に関わることとなった。

1991年の教科書出版の後も地道な観測が継続されていたが、地球温暖化や広域大気汚染などに関連した地球環境問題としての視点で、2000年代に入ってから黄砂に関連する大規模な国際的研究プロジェクト（例えば ACE-Asia⁴⁾や ADEC^{5,6)}など）が展開された。そのため特にこの10年ほどの間に、黄砂に関する我々の知見はかなり増えた。現在では、黄砂について調べよう

と思えば、ネット検索を通して数多くの解説を読むことができ（例えば気象庁や環境省の黄砂関連サイト^{7,8)}）、一般向けの啓蒙書^{9,10)}も出版されているので、黄砂の概要は誰の手にも届きやすくなった。これこそが20年間の進展そのものであるだろう。しかし、意外に進展の少ない事柄もまだ残っている。

ここでは、黄砂粒子が空へ舞い上がるところから大気中での輸送や変質、そして沈着に至るまで、この20年間の進展を振り返りつつ、現状を紹介したい。なお、黄砂関連プロジェクトの総説論文や論文特集号からオリジナル論文にたどり着ける場合には、個別に引用していないことを予めお断りしておきたい。

2. 黄砂粒子の発生と輸送、変質そして沈着

IPCC 2001¹¹⁾にも触れられているように、砂漠乾燥地帯からのダスト粒子発生量を見積もることは、ダスト粒子が果たす気候への影響を評価する上で重要な課題である。しかし、ダスト飛散過程のモデル化に必要な飛散粒子に関する情報は乏しく、飛散粒子の個数粒径分布を高時間分解能で直接測定した例はこれまでなかった。そこで ADEC プロジェクト^{5,6,12)}では、新規に開発したダスト飛散量観測システムを、黄砂の主要な発生地である中国内陸部に持ち込み、ダストストーム条件下の現地観測を行った。砂や砂礫と言った地表構成粒子の粒径分布の違いに応じて、ダスト粒子の発生量が異なる（粒径の大きい砂礫の方が桁違いに多い）ことや、地面の湿り気に応じてダスト飛散の始まる臨界風速が異なることなどが明らかとなった。地上気象データの解析によれば、実際に風速が閾値以上に強く、積雪の影響が少ない場合には、広域にわたってダストストームが起きやすいことも示されている。東アジア内陸部で強風が生じる原因としては、これまで総観規模の擾乱によると考えられてきたが、近年の研

* Kosa (Asian dust).

** Kazuo OSADA, 名古屋大学大学院環境学研究所。

© 2007 日本気象学会

究によれば、強風をもたらす仕組みが場所によって異なるのではないかと考えられている。ゴビ砂漠周辺では総観規模の擾乱による強風でダストストームが発生するのに対し、タクラマカン砂漠でのダストストームは周囲を山脈に囲まれている地形の影響で、擾乱以外の要因による強風で引き起こされるようだ^{12,13)}。

人工衛星に搭載された測器（例えば MODIS や SeaWiFS など）で上空から観測することにより、ダストストームの発生地域や移動状況についても“見える”ようになったが^{14,15)}、舞い上がったダスト粒子の高度分布についてはわからない。そこで、舞い上がった黄砂粒子の高度分布について知るために、発生域でのライダー観測や気球搭載計測器を用いた観測も行われ、偏西風による長距離輸送の出発地域での状況について理解が深まった^{5,6,12)}。黄砂粒子が舞い上がったから日本上空に至る長距離輸送過程についても、計算機能力の向上に伴って飛躍的に理解が進んだ。既に1980年代の後半には、日本上空で観測された黄砂粒子の起源や高度分布を明らかにするために、後方流跡線解析や3次元粒子拡散モデルによる解析は行われていたが、2000年代に入ってから、より精緻な化学輸送モデルによる数値実験が行われるようになった。地上での粒子濃度やライダー観測による高度分布と比較して、値的にも事象としてもかなり良く再現している^{16など)}。

黄砂現象の立体的な広がりについては、上記の衛星観測に加えて複数ライダーでの連続自動観測が2001年から始まり、東アジア域における高度分布の地理的なようすが捉えられている¹⁷⁾。この連続観測データは、クイックルック画像を www サイトでリアルタイムに閲覧できる¹⁸⁾。また、日本の地表大気における直径10 μm 以下のエアロゾル粒子質量濃度についても、都道府県などがテレメータシステム等で収集している各測定局の1時間値データを速報値として「そらまめ君ホームページ」¹⁹⁾で公開しており、地表に降りてきた顕著な黄砂現象を濃度の変化として知ることができる。

化学輸送モデルによる数値実験は、黄砂粒子や人為的汚染物質の観測値の時系列変化と分布を良く再現している。そうすると、天気予報のように黄砂の襲来についても予報できるようになる。例えば、九州大学の化学天気予報システム (RIAM-CFORS)²⁰⁾や、気象庁の全球黄砂予測モデル²¹⁾、NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System) Global Aerosol Model¹⁵⁾など、現在では種々の予測結果が www

上で入手可能である。これら複数の予測結果を見比べながら観測の予定を立てられるようになったことは、大きな進展である。さらに、ライダーデータや地上エアロゾル濃度などを取り込んで予報を高精度化することも研究されている²²⁾。

ところで、黄砂粒子が舞い上がってから日本へたどり着くにはたいてい数日かかっている。その浮遊の間に、黄砂粒子の表面には二酸化硫黄や窒素酸化物が蓄積し、もとの黄砂粒子から変質していることがある。日本上空での航空機観測で採取された黄砂粒子の表面に、硫酸イオンが検出されたことや²³⁾、地上で粒径別に採取した黄砂粒子を化学解析した結果、粒径区分毎の粒子総表面積に応じて硫酸イオンと硝酸イオンの濃度が増加していたこと²⁴⁾、模擬黄砂粒子を用いた室内実験^{25,26)}の結果などから考えて、黄砂粒子は大気中でガス状酸化物の沈着先となり、大気を介した物質循環では酸性物質を中和しながら運ぶ機能をもっていると考えられる。黄砂粒子発生源の風下に大規模な人為的汚染地帯を有する東アジア地域では、ガス態の酸性物質が黄砂粒子の変質により粒子態として多くが輸送されることになる²⁷⁾。

黄砂粒子の表面がこのような化学反応で変質することにより、黄砂粒子の吸湿特性が変化する。例えば、黄砂粒子には炭酸カルシウムも含まれており、硝酸と反応して硝酸カルシウムとなる場合がある。炭酸カルシウムは吸湿性に乏しいが、硝酸カルシウムは相対湿度10%程度でも潮解し、非常に強い吸湿性を示す。従って、人為的な汚染の影響を受けるなどして黄砂粒子が硝酸による変質を受けると、低湿度でも潮解することが予想される。実際に、潮解したためと思われる球形の粒子が北京の大気中などで観測されている²⁸⁾。また、黄砂粒子が中国大陸を離れて日本に到達する間の洋上で、海塩粒子と内部混合したと考えられるような事例も観測されている。輸送途中で雲過程を経て内部混合に至った²⁹⁾との報告がある一方で、雲過程を経ていない場合に見つかることもあり^{12,30)}、海塩粒子と内部混合するプロセスには謎が残る。

黄砂粒子の主成分は珪酸塩鉱物であるが、珪素やアルミニウムの他に鉄も含まれている。鉄は、海洋の植物プランクトンが生育するために微量ながら必須の元素である。陸から離れた遠隔海洋域、特に北太平洋域のように他の栄養塩が豊富な海域では、植物プランクトンの生育条件を左右する要因の1つとして、黄砂に含まれる鉄分が注目されている。大規模な黄砂現象が

突発的で観測が難しいために、黄砂粒子の海洋への沈着と、植物プランクトンのブルームとは、直接的には関係づけられていない。しかし、海洋に鉄分を人工的に散布する実験³¹⁾や、海水中に設置したセジメントトラップに捕捉された沈降粒子フラックスの時系列変化と中国でのダストイベント数とで有意な相関があること³²⁾など、黄砂粒子の長距離輸送が北太平洋域の一次生産にとって重要な役割を果たしていることを示唆する報告が増えている。

ところで、ダスト粒子に含まれる鉄分は、もともと海水には溶け出しにくい。しかし、エアロゾルとして飛んでいるうちに溶け出しやすい化学形態の鉄分が増える傾向にあるという³³⁾。黄砂粒子に含まれる鉄の化学形態がエイジングでどのように変化するか、サハラダストに関する研究例は若干あるが、黄砂粒子については研究が進んでいない。先にも述べたように、ダスト粒子発生源の風下に大規模汚染地帯を有する東アジア地域では、酸性ガス成分による黄砂粒子の変質が生じているので、その際に鉄の化学形態がどのように変わるのか、今後の研究が注目される場所である。

黄砂粒子の沈着についても、大規模な黄砂現象が突発的であることと、手間のかかる観測が継続されにくいこともあり、乾性沈着と湿性沈着の割合がどのような季節変化となりどのような地理的分布となるのか、未だに良くわかっていない。乾性沈着の観測については、観測地近傍からの再飛散の影響を除くにも工夫が必要である。このようなわけで輸送モデルによる検討はいくつかあるが、実測との比較は進んでいない。総沈着フラックスに占める割合として、およその傾向としては、ダストストームの発生源に近いところでは乾性沈着の割合が高く、遠くなれば低下すると予想されるが、その割合はモデルによって大きく異なる^{34,12)}。

中部山岳域・立山の積雪は、周囲が雪で覆われているためにローカルな土埃の再飛散の影響も少なく、雪融け以前の積雪であれば時系列情報として約4か月分(12～3月)の黄砂粒子沈着量を記録している。ここ10年間における水不溶性粒子沈着量の平均は6.6g/m²で、沈着量のほとんどは「厚い汚れ層」、つまり湿性沈着が主で、乾性沈着を思わせるような厚さ数ミリでダスト粒子に富む汚れ層の頻度は希だった³⁵⁾。3月までの積雪中ダスト濃度の結果だけではその後の季節変化がわからないし、名古屋でいえば2006年4月8日や2007年4月2日のように、黄砂粒子が乾性沈着として降ってくるような大規模イベントの頻度は4～5月

の方が多いのかもしれない。どのような沈着量の季節変化となるのか、通年での実測データが待ち望まれる。また、輸送モデルに関して言えば、降水量と降水分布がどれだけ再現されるかが、黄砂粒子の沈着量を再現する鍵となるだろう。

3. 黄砂粒子の形状と黄砂現象の年々変化

黄砂粒子の形状は不規則で非球形であり、光散乱特性や沈着過程を考える際には適切な形状パラメーターを得ることが重要である。中国内陸部の発生源域での黄砂粒子を電子顕微鏡で観測した結果によると、針状比(長軸の短軸に対する比)は粒径に依らずほぼ1.4だった³⁶⁾。先に述べた立山の積雪で採取された黄砂粒子や、富山と名古屋での湿性・乾性沈着による黄砂粒子を調べた結果では、針状比が1.2～1.3程度で、発生源からの輸送距離が長い場合には、若干丸みを帯びる傾向にあった³⁷⁾。頻度や量にどれだけの寄与があるのかわからないが、中東やサハラ砂漠のように遥か西方の地を起源とするダスト粒子も日本に影響を及ぼしているようだ^{12,37,39,40)}。

最後に、黄砂現象の年々変化についても触れておきたい。近年、特に2001年と2002年、あるいは2006年の春のように、黄砂現象が日本各地で頻りに観測されて年々増えているように感じてしまう。長崎海洋気象台での観測記録は1914年から継続しており、地理的にも恵まれているため、おそらく日本最長の記録と思われる。その88年分の記録をみると、近年顕著な増加傾向にあるようには見えない。しかし、月別に年代毎の傾向を見ていくと、3・4月には増加傾向のようにも見える⁴¹⁾。領域ダスト輸送モデルによる年々変動のシミュレーションによれば、黄砂の多発年と非多発年とでは、発生源域の強風発生頻度や積雪被覆率、輸送経路が異なっていた。黄砂多発年では発生源の北域で低気圧活動が活発だったために強風となり、ダスト発生量が増加することなど、年々変動のメカニズムについても研究が進みつつある⁴²⁾。

4. おわりに

紙面の都合に加えて執筆者の力及ばず、黄砂粒子の光学的特徴や放射強制力の見積りに関わる事柄、化学組成や同位体にまつわる進展など、重要なことが漏れている。これらは、ADECやACE-Asiaの総説と、近刊予定の新・黄砂の総説(岩坂泰信編)には詳しいので、そちらを参照していただきたい。なお、原稿を

まとめるに当たって、気象研究所の三上正男博士と田中泰宙博士からとても建設的な助言を頂いた。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Hinds, W. C., 1999 : Aerosol Technology, 2nd ed., John Wiley & Sons, 3-8.
- 2) シンポジウム「黄砂」の報告, 1987 : 天気, **34**, 175-194.
- 3) 名古屋大学水研科学研究所編, 1991 : 大気水圏の科学黄砂, 古今書院, 328pp.
- 4) Huebert, B. *et al.*, 2003 : J. Geophys. Res., **108**, doi : 10.1029/2003JD003550.
- 5) Mikami, M. *et al.*, 2006 : Global Planet. Change, **52**, 142-172.
- 6) 三上正男, 2007 : 天気, **54**, 142-150.
- 7) <http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/aerosolhp/index.html>
- 8) <http://www.env.go.jp/earth/dss/>
- 9) 岩坂泰信, 2006 : 黄砂 その謎を追う, 紀伊國屋書店, 228pp.
- 10) 三上正男, 2007 : ここまでわかった「黄砂」の正体, 五月書房, 250pp.
- 11) IPCC (2001), Climate Change 2001 : Houghton, J. T. ほか編, Cambridge University Press, 289-416.
- 12) Yamazaki, K. *et al.*, 2005 : J. Meteor. Soc. Japan, **83A**, 1-346.
- 13) Aoki, I., *et al.* 2005 : Geophys. Res. Lett., **32**, doi : 10.1029/2004GL021776.
- 14) 早崎将光ほか, 2006 : 天気, **53**, 843-844.
- 15) <http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/>
- 16) 鶴野伊津志ほか, 2003 : 天気, **50**, 17-29.
- 17) 杉本伸夫ほか, 2005 : 天気, **52**, 3-4.
- 18) <http://www-lidar.nies.go.jp/>
- 19) <http://w-soramame.nies.go.jp/>
- 20) <http://cfors.riam.kyushu-u.ac.jp/%7Ecfors/index.html>
- 21) <http://www.jma.go.jp/jp/kosa/index.html>
- 22) Yumimoto, K., *et al.*, 2007 : Geophys. Res. Lett., **34**, doi : 10.1029/2006GL028551.
- 23) Iwasaka, Y. *et al.*, 1988 : Tellus, **40B**, 494-503.
- 24) Nishikawa, M. *et al.*, 1991 : The Sci. Tot. Environ., **107**, 13-27.
- 25) Sakamoto, K., *et al.*, 2004 : Atmos. Environ., **38**, 6961-6967.
- 26) Ooki, A. and M. Uematsu, 2005 : J. Geophys. Res., **110**, doi : 10.1029/2004JD004737.
- 27) Dentener, F. *et al.*, 1996 : J. Geophys. Res., **101**, 22869-22889.
- 28) Matsuki, A. *et al.*, 2005 : Geophys. Res. Lett., **32**, doi : 10.1029/2005GL024176.
- 29) Niimura, N. *et al.* 1998 : J. Meteor. Soc. Japan, **76**, 275-288.
- 30) Zhang, D. *et al.*, 2003 : J. Geophys. Res., **108**, doi : 10.1029/2003JD003869.
- 31) Tsuda, A. *et al.* 2003 : Science, **300**, 958-961.
- 32) Yuan W. and Zhang, J., 2006 : Geophys. Res. Lett., **33**, doi : 10.1029/2005GL025174.
- 33) Jickells, T. D., 2005 : Science, **308**, 67-71.
- 34) Uematsu, M. *et al.*, 2003 : Geophys. Res. Lett., **30**, doi : 10.1029/2002GL016645.
- 35) Osada, K., 2004 : Tellus, **56B**, 382-392.
- 36) Okada, K. *et al.*, 2001 : Geophys. Res. Lett., **28**, 3123-3126.
- 37) Li, J. and K. Osada, 2007 : J. Meteor. Soc. Japan, **85**, 137-149.
- 38) Park, C. B. *et al.*, 2005 : SOLA, **1**, 121-124.
- 39) Tanaka, T. Y. *et al.*, 2005 : Atmos. Environ., **39**, 3901-3909.
- 40) Lee, H. N. *et al.*, 2006 : Water Air Soil Poll., **169**, 137-166.
- 41) 荒生公雄ほか, 2003 : 長崎大学総合環境研究, **5**, 1-10.
- 42) 原 由香里ほか, 2004 : 天気, **51**, 719-728.