キム　ユンソク
金　潤奭

共同研究者
金　潤信
（漢陽大学環境及び産業医学研究科・教授）
岩坂泰信
（金沢大学自然計測応用研究センター・教授）

略　歴
1993年　ソウル光云大学校工学部環境工学科卒業
1997年　名古屋大学院理学研究科博士前期課程修了
2003年　名古屋大学院理学研究科博士後期課程修了
2004年　韓国漢陽大学環境及び
　　産業医学研究所客員研究員

アジアダスト（黄砂）の環日本海域の環境へのかかわりに関する研究

Environmental Effect of Asian Dust and Dust Fall on Rim Japan Sea Area

Vertical changes of aerosol concentration and size in the free troposphere over the Asian desert area and sink area were firstly observed using a balloon-borne optical particle counter at Dunhuang (40°00' N,94°30' E), China and Anmyeon (36°32' N,126°19' E), Korea. We used Balloon-borne Optical Particle Counter (OPC) developed by atmospheric research group of Nagoya University and SIGMATEC Co. Ltd (Tsuchiya et al., 1996) to get the information of vertical Profile of Particle size and concentration.

Particle number-size distribution in this free troposphere shows possible effect of diffusion of soil particles from the lower atmosphere to the free troposphere and noticeable peak of particle concentration is found in the super micron size range of number-size distribution pattern not only in the boundary mixing layer but also in the free troposphere.

1．序　論

黄砂は昔から、春の招かざるお客として知られてきた。黄砂の辞典的な意味は”中国大陸の黄土地帯で風で吹き上げられた多量の砂塵が大気中に広がって空をおおい、徐々に下降する現象またはその砂塵”である。この黄砂エアロゾルは高度数ｋｍの自由対流圏まで吹き上げられ、北半球中緯度の特徴のひとつである偏西風に乗って遠くまで輸送されて韓国、日本に大きな影響を及ぼしているが、アラスカーなどのアメリカの西海岸まで運ばれているのが80年代からの研究によって明らかになった（Parrington et al., 1983; Parungo et al., 1994）。黄砂が研究者たちにもたらしている関心もかなり幅広い分野にかけている。健康への影響を見積もる医学分野

から地球温暖化への影響、酸性雨の中和、雲の核としての役割などを調べる大気科学分野（例えばSokolik and Toon,1996；Denterner, 1989など）農学、生態学、国際協力などの人文社会学に至るまで多くの研究者が黄砂問題に関心もって研究しているのが今時の現実である。

しかし、大気科学分野において、今までの黄砂の研究には、幾つかの問題が残されている。研究の事例が春先に集中していること、地上での観測が中心になっていることから長距離輸送の場である自由対流圏内での観測が少ないこと、黄砂の発生地での研究が殆どなかったことなどを挙げられる。そういうわけで黄砂の全体相を把握するには限界があったと思われる。特に日本の上空で行われたライダー観測などによると（Iwasaka et al., 1988; Kwon et al., 1997; Sakai et al., 2000; Murayama et al., 2001）一般的に黄砂と呼ばれる現象がない日も自由対流圏を中心にエアロゾル層がしばしば見つかっている。それをわれわれはバックグラウンドエアロゾルと名づけた。この黄砂現象の大きな特徴は、黄砂発生地と思われる地域に砂塵の報告がなされておらず、また天気図上でも低気圧活動などが見られないにもかかわらず観測されることである。また、地上での視程は低下せず、黄砂の層は自由対流圏に現れることである（Kwon et al., 1997）。

バックグラウンド黄砂の発生源とされる地域で、黄砂の分布がどのようなものになっているか解明できるということは、バックグラウンド黄砂の形成メカニズムを理解する上で、きわめて大事な意味を持っていると思われる。

また、いままでは黄砂の数 - サイズ分布や質量（体積）- サイズ分布に関する研究が少ないのも黄砂の研究から指摘せざるを得ないことである。こういうデータは最近の大きな話題である黄砂の地球温暖化への影響すなわち放射特性、反応場の面積など理解するのに大変大事な情報でもある。

本研究は、黄砂の発生源のひとつとして知られるタクラマカン沙漠上空のエアロゾル粒子の分布状態を明らかにするために実施された。それによってバックグラウンド黄砂の存在を証明することや黄砂エアロゾルが及ぼす東アジア地域の環境への影響、特に地球温暖化への影響を見積もるためのデータの提供を目的にしている。また、輸送された黄砂エアロゾルのシンク場所としての意味を持つ韓国での観測も行われた。

タクラマカン砂漠は高さ4000m以上の山々にかこまれたタリム盆地と大体領域が一致されており、その東端は比較的低い地形でタリム盆地空気壊の抜け道になっている。今回の観測場所である敦煌（40°N、94.5°E）気象局はこの東端に位置している（図１）。安眠島(36°32'N,126°19'E)は韓国の西海岸にある島で中国から海を渡った直後の大陸からの空気壊とエアロゾルを観測するには最適な場所と思われる。

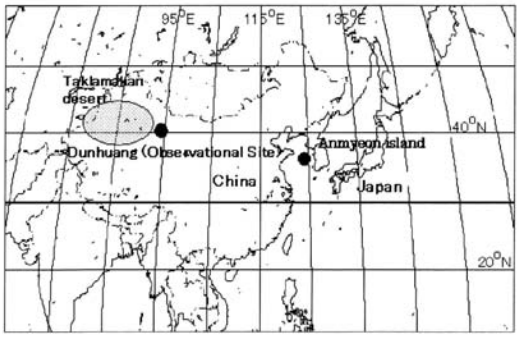

図1　観測場所である敦煌と安眠島

観測は気球搭載型光散乱式粒子計測器（Optical Particle Counter; OPC）を使用して2001年から2005年にかけて行われた。敦煌ではOPCと並行してライダー観測やエア

ロゾルの直接サンプリングも行われたがここではOPCの結果を中心に述べる。

2．気球搭載型光散乱式粒子計測器（Optical Particle Counter; OPC）

光散乱式粒子計測器（Optical Particle Counter; OPC, 以下OPC）は、大気エアロゾルの計測に広く使われている測定器でエアロゾルの光学的な特性を調べるに適合してしる。しかし、普通は地上の大気条件で使用することを想定しており、数キロメートル以上の大気条件のもとで使用することを前提としては作られていない。このため、OPCを気球に搭載するためには多くの改良が必要であった。

当初、この気球搭載型OPCは成層圏エアロゾル、とりわけ南極成層圏に冬季の間出現する‘極成層圏雲（Polar Stratospheric Clouds；PSCs）’の観測のために開発されたものであり、最も大きな特徴は、常に一定の流量の空気をOPCの光散乱チャンバーに導くためにギアポンプを使用し気圧の変化に応じてポンプの回転数を変化させるフィードバック機構を採用していることである。また、放球作業をしやすくするために極力小型軽量化を図り、小型気球としての基準（気球搭載重量6kg以下）を満たすようになっている。合わせて気球に搭載した際の震動や揺れなどによって光軸のズレが生じないよう機構的にも単純で震動や揺れに強い構造にした。例えば、前方散乱光を検出する構造にして、光源部と受光部を直線状に配置するようにしたことなどである。またOPCは地上から高い高度までのあらゆる気圧に対応するよう設計されている（Iwasaka and Morita, 1989;土屋ほか、1997; Hayashi et al.,1998）。 気球搭載型OPCの主要諸元と構造を表1と図2に示した。

Volume	35×20×35 cm
Weight	3 kg (including battery)
Wavelength of Laser	810 nm
Scattering Direction of light	forward
Velocity of Air in the Pump	50cm3 / sec
Time Interval of Sampling	20 sec
Receiving Frequency	400 MHz (connecting Vaisara Radiosonde)

表1　この研究で使われた気球搭載型OPCの諸元

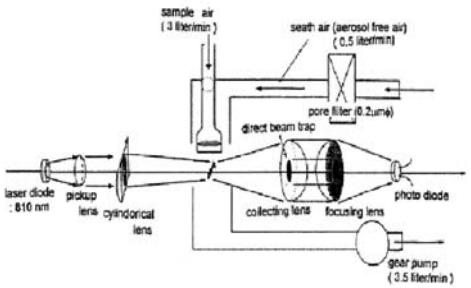

図2　今回使われたOPCの構造

3．観測結果と議論

OPC観測は2000年から2004年まで敦煌で8回、北京で3回（北京の近所を含む）行われた。韓国の安眠島では2005年3月に観測が行われた。敦煌ではあらゆる季節での観測であったが、ここではその内、2001年の8月、10月、2002年の1月、4月、8月に行われた観測の結果を中心に述べる。

図3にOPC観測から得られた結果が示されている。それぞれ直径0.3μm以上、0.5μm以上、0.8μm以上、1.2μm以上, 3.6μm以上のエアロゾルの濃度分布である。続いて図4には粒径別濃度分布から計算した各高度別の粒径分布を示している。粒径分布を決めるには5個のチャン

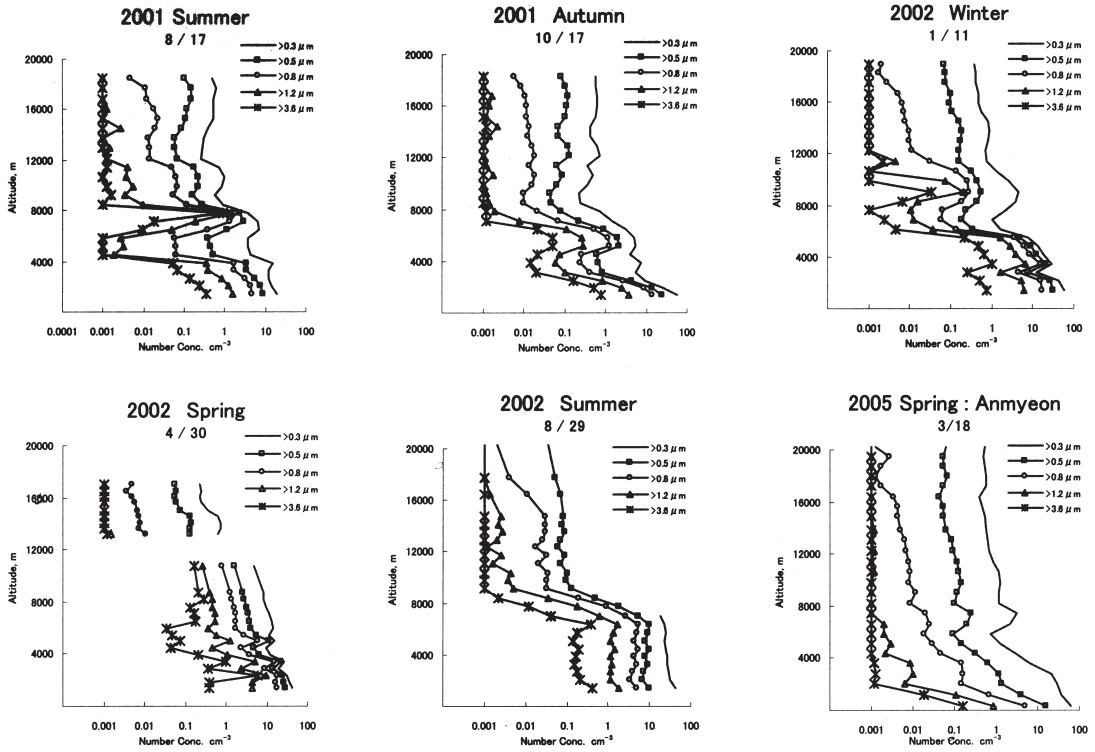

図3　敦煌と安眠島で観測されたエアロゾルの濃度分布

ネルでは不足していると思われるためもっと正確な粒径分布を求めるには今後チャンネル数を増やす必要があると思われる。

2001年8月の観測の場合、高度8ｋｍ付近に値の顕著な増加が見えるが、これは図で見える粗大粒子の増加の傾向から雲粒子と判断される。実際観測の時に薄い雲が眼で確認されている。それとは別に6.7km付近にもエアロゾル層が見えるが粒径分布図にも表すように粗大粒子が若干増えている。しかしそれより低い5km付近では粗大粒子の増加は見つからず、空気壊の性質の差があるように見える。高度5km以上の高い高度での粗大粒子の増加の傾向は他の観測ではもっとはっきり見える。この事実は観測の季節に関係なく現れた。ただ、春の観測では（2002年の4月の場合）その傾向が他の季節よりはっきり現れた。2002年の8月にはライダーの観測も同時に行われたが、この事実を促せる結果になった。5km付近あるいはそれ以上の高度で見える粗大粒子の増加は鉱物エアロゾルによるものと予想され、その高度で直接採集されたエアロゾルの観測結果がそれを説明している（Iwasaka et al.,2003, Yamada et al., 2005）。

一方、安眠島でのデータは敦煌に比べるとかなり違う分布を示している。地表付近の1μm以下の粒子に関しては敦煌とあまり差が見られなかったが、粗大粒子は敦煌に比べると顕著に少なかった。特に自由対流圏と思われる高さでは（およそ5-6ｋｍ）かなりの差が見られる。粒径分布も敦煌が顕著な二山構造を持つのに対して殆どの場合は一山構造だった。ただ、高度によっては見弱ながら壮大範囲のエアロゾルが増える傾向も見せた。濃度分布図でも見れるように

4km付近と7km付近にエアロゾルの増加が見えるが、実際この日は気象庁から弱い黄砂の予報

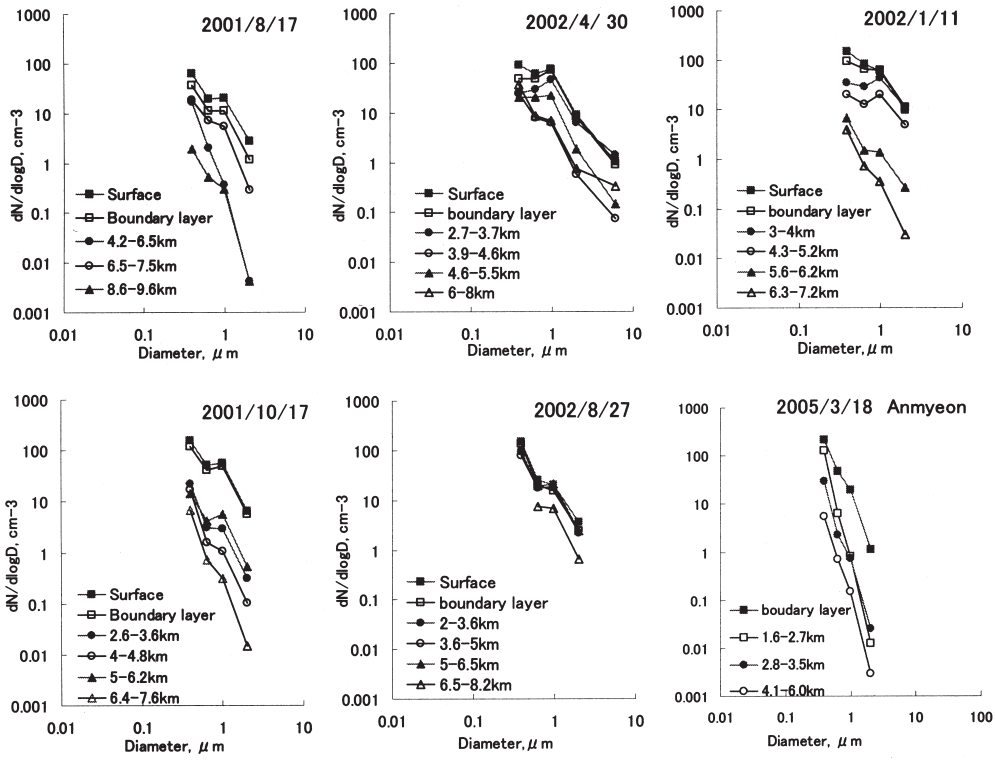

図4　粒径別濃度分布から計算した各高度に粒径分布

があった。同じ場所で観測したライダーでは黄砂と思われる層が見当たらないというのを思うとOPC観測の有効性が証明された形になった。

図5には敦煌で観測したエアロゾルの粒径分布に正規対数分布を仮定した式を代入して得られた分布図である。図は次の式で示されている。

$N(D) = A \exp\{[-\ln 2(D/Dm)] / [2\ln 2\,\sigma]\}$

ここで、Dmはひとつのモードの平均直径をσはひとつのモードの偏差値を示す。対象になった高度は5km以下の自由対流圏高度である。この図を見れば分かるようにそれぞれ性質と成因が違う二つのエアロゾルのモードに分けることができた。これは大気中には0.1μm付近と1μm付近のそれぞれの大きさを濃度のピークにするエアロゾルが混在していることを意味する。

今まで述べたように黄砂の発生源近くの自由対流圏高度では保々一年中鉱物エアロゾルと思われる粗大領域のエアロゾルが確認された。それが日本の上空まで長距離輸送によって運ばれ、影響を及ぼしているのかいないのかは偏西風などの上空の風のシステムによるものと思われる。

4. 結　語

バッググラウンド黄砂の存在を明らかにするため2001年から中国タクラマカン砂漠の東端に位

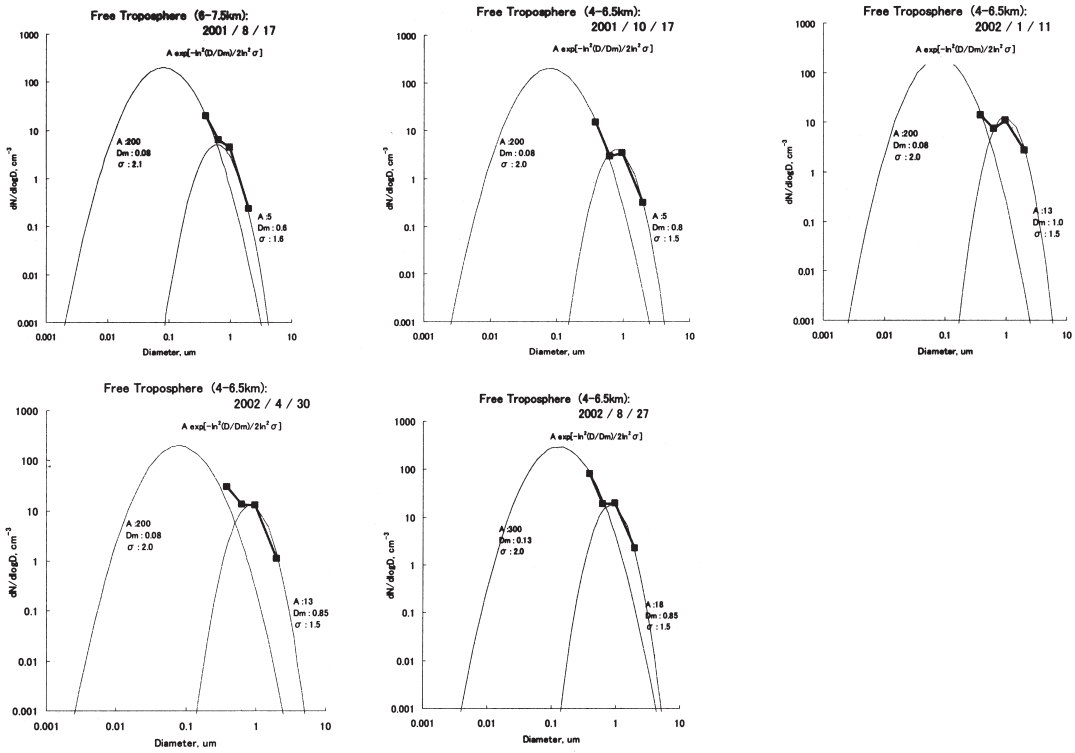

図5　敦煌で観測されたエアロゾルの粒径分布に正規対数分布を仮定した式を代入して得られた分布図

置する敦煌でOPC観測を初めとする一連の観測を行った。観測から得られた結果は自由対流圏でのバッググラウンド黄砂の存在を確認させるものと思われる。このバッググラウンド黄砂の環境への関わりは決して少なくないと思われることからこれからも更なる研究が期待される。

5．参考文献

1）Denterner, F. J., G. R. Carmichael, Y. Zhang, J. Lelieveld, and P. J. Crutzen（1996） Role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere. J. Geophys. Res., 101, 22,869-22,889

2）Hayashi, M., Y. Iwasaka, M. Watanabe, T. Shibata, M. Fujiwara,H.Adachi,T.Sakai, M. Nagatani, H. Gernandt, R. Neuber, and M. Tsuchiya, Size and number concentration of liquid PSCs: balloon-borne measurements at Ny-Alesund, Norway in winter of 1994/1995, J. Meteorol. Soc. Japan, 76, 549-560, 1998.

3）Iwasaka, Y., M. Yamato, R. Imasu, and A. Ono, Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance if weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, Tellus, 40B, 494-503, 1988.

4）Iwasaka, Y., G.-Y. Shi, M. Yamada, A. Matsuki, D. Trochkine, Y. S. Kim, D. Zhang, T.

Nagatani, T. Shibata, M. Nagatani, H. Nakata, Z. Shen, G. Li, B. Chen, Importance of dust particles in the free troposphere over the Taklamakan Desert: Electron microscopic experiments of particles collected with a balloonborne particle impactor at Dunhuang, China, J. Geophys. Res., 108, D23, 8664, doi:101029/2002JD003270, 2003.

5) Kwon, S.-A., Y. Iwakaka, T. Shibata, and T. Sakai, Vertical distribution of atmospheric particles and water vapor densities in the free troposphere: Lidar measurement in spring and summer in Nagoya, Japan, Atmos. Environ., 31, 1459-1465, 1997.

6) Murayama, T., M. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B.-J. Sohn, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka, Ground-based network observation of Asia dust events of April 1998 in East Asia, J. Geophys. Res.,106, 18,345-18,359, 2001

7) Parrington, J.R., W. H. Zoller, N.K. Aras, Asian Dust: Seasonal transport to Hawaiian Islands, Science, 220, 195-197, 1983.

8) Parungo, F., Z. Li, X. Li, D. Yang, J. Harris, Gobi storms and the great green wall, Geophys. Res. Lett., 21, 999-1002,1994.

9) Sakai, T., T. Shibata, S.-A. Kwon, Y.-S. Kim, K. Tamura, and Y. Iwasaka, Free tropospheric backscatter, depolarization ratio, and relative humidity measured with the Raman lidar at Nagoya in 1994-1997: contributions of aerosols from the Asian Continent and the Pacific Ocean, Atmos. Environ., 34, 431-442, 2000.

10) Sokolik, I. N., and O. B. Toon, Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols, Nature, 381, 681-683, 1996.

11) Yamada, M., Y. Iwasaka, A. Matsuki, D. Trochkine, Y. S. Kim, D. Zhang, T. Nagatani, G.-Y. Shi, M. Nagatani , H. Nakata, Z. Shen, B. Chen and G. Li(2005), Feature of Dust Particles in the Spring Free Troposphere over Dunhuang in Northwestern China: Electron Microscopic Experiments of Individual Particles Collected with a Balloon-borne Impactor, Water, Air and Soil Pollution(in press)

12) 土屋政義、葛西　武、林　政彦、岩坂泰信、高見勝己、観測気球搭載用エアロゾル・ゾンデの開発、計測自動制御学会論文集、32, 290-296, 1996