



三 崎 方 郎*

1. はじめに

エアロゾルが気象学で今ほど注目されるようになったのは、たかだかこの10年ほどのことではなからうか。エアロゾルが気象に与える効果としては、日射の散乱効果であるとか、雲核としての働きなどがあるが、それらは昔から言い古されてきたことであり、今ここで大気環境と気候変化の問題で、エアロゾルが急にクローズアップされたことの動機とは受け取れない。それだけのことなら、ロンドン・スモッグで象徴されるように、大粒子の直接生成が顕著であったかつての石炭時代の方が問題が大きかった筈である。

「気体分子からの粒子生成」の問題は、最近10年間のエアロゾル研究界を風靡し、それが現実のものとして確立されるに至った課題である。近年のエアロゾル重視の傾向は、この現象の空間スケールの大きさに由来しているのではないか。

ここで一つ問題がある。気体分子の粒子化の議論が発展したといっても、エアロゾル粒子が生まれるということだけであって、それが気候に仕掛ける効果については何も新しい考えが導入されたわけではない。しかも、その発生の空間スケールは大きいといっても、粒子化の初期段階で生成された粒子（臨界エンブリオ）の大きさは1nm程度にすぎないから、粒径が数100倍になるまで成長しなければ、放射に対する効果も、雲物理に対する効果も起らない。エアロゾルが気象に与える効果を考える時、大気中で起こるこの成長過程の実際を知ることが、エアロゾル研究の次段階ではないかと思う。

「エアロゾルの気象学」とは編集部から与えられた標題であるが、この意味を「エアロゾルが気象に与える影響」と限定するならば、ここで述べねばならぬことは多くはない。研究者の多くの方は、エアロゾルと気象・気候との組合せ方は未知であると考えておられよう。「エアロゾルの気象学」の意味については、もっと一般的

に、「大気物理学と関連する大気エアロゾルの特性」と解することにしたい。

2. 教科書

エアロゾルの教科書として筆者が初めて読んだのは、**Junge: Air Chemistry and Radioactivity** (1963)の第2章 Aerosols (111~208)である。よく知られている粒径別分類図をはじめとして、粒径分布特性、沈降・凝集現象、放射特性、電気特性、化学組成等、エアロゾルの基本概念はすべて書かれてある。否むしろ、現在に至るまでのエアロゾル研究は、ここに書かれてあるような、Jungeが敷いた軌道上を走ってきたと言った方が適切である。

Fuchs: The Mechanics of Aerosols (1964)は、表題の示す通り、エアロゾル粒子の運動学が400頁にわたって徹底的に書かれてある。たとえば粒子の形にしても、球形はもとより、非球形の場合の運動も詳しい。現象としても単なるブラウン拡散から熱泳動、光泳動の理論も取り扱っている。研究の途上で、エアロゾル粒子の基本的な力学に立ち返らなくてはならなくなった時は、ぜひとも拡げて見る必要のある教科書であろう。

エアロゾルの基本にもっとも詳しいのは、上述のFuchsの本であるが、大気物理の研究者にとっては、**Twomey: Atmospheric Aerosols** (1977)の方が有難い。この本では、Fuchs ばりの運動学は約100頁に圧縮されているが、エアロゾルの生成から除去に至るまでの過程、放射に対する効果、電気的特性等について、実験室内のエアロゾル学ではなく、大気中のエアロゾルの記述には色彩感すら感ぜられる。著者は雲物理学者であるので、特に雲物理の立場からみたエアロゾルの章に最大の特長が見られよう。

Davies ed.: Aerosol Science (1966)は、Fuchs, Zebel, Whitby, Bricard, Preining, Waldmann, Goldsmith, Dorman, Pich, Hodkinson, Corn, Davies等がそれぞれ専門を分担して書いた本である。したがって、特

* Masao Misaki, 気象研究所

定の項目について、より深く勉強されようという向きには都合のよい本であろう。しかし全体の構成は、エアロゾル運動学の他に、フィルタリング、パイプ壁への沈着等の章に約半数頁をあてているので、エアロゾル工学の本であるといった方がよい。

高橋：基礎エアロゾル工学 (1972) は、唯一の邦書である。この本も、エアロゾル粒子の運動学から放射特性、電気特性が述べられているが、特に拡散輸送中の沈着現象に詳しい。その応用例として、エアロゾルの一つの重要課題である肺力学の問題（呼吸器官への沈着機構）も述べられている。

さて、最近10年間の話題をさらった「気体分子の粒子化現象」については、高橋と Twomey の著書で多少触れられている程度で、その他の教科書には全く記述がない。最近刊行された、磯野編：大気汚染物質の動態 (1979) の第4章「エアロゾル」(小野 晃著) には、かなり詳しく説明されている。より詳細な解説は、三崎：エアロゾルの挙動（「気象研究ノート」, 近刊予定）を参照されたい。

3. 定期刊行学術雑誌

エアロゾルの気象学を研究する者にとって、常に注視しなければならぬ定期刊行の学術雑誌を挙げておこう。同じエアロゾル論文といってもさまざまな分野があり、それぞれの雑誌はおのずから特有の分野をもつ傾向があるようである。

大気物理学の観点から見たエアロゾルの論文はまず、**J. Atmospheric Science, J. Applied Meteorology, J. Geophysical Research, Tellus** を注目すべきである。日射放射や雲物理とエアロゾルとの関連を説いた論文は、特に *J. Atmos. Sci.* と *J. Appl. Met.* に多い。気象への影響を取り扱うものとしては、*Tellus* も同様に見逃すことができない。一方、対流圏エアロゾル、成層圏エアロゾル、海洋性エアロゾル、火山噴火のエアロゾル等、大気エアロゾルの特性そのものを論じたものは、*J. Geophys. Res.* に多いようである。

この他にも昔からある学術雑誌では、**Pure and Applied Geophysics, J. Atmospheric and Terrestrial Geophysics** や **Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A** も注視する必要がある。また、気象関係者には縁の薄い雑誌だが、**J. Colloid and Interface Science** などにもエアロゾル関係の重要な論文が載る。

環境汚染の問題がやかましくなってきた以来、エアロゾル関係の雑誌がいくつか近年創刊されている。このうち **Atmospheric Environment** (1967年創刊) は、*J. Atmos. Sci.* 等に近い傾向であるが、*J. Atmos. Sci.* がどちらかという地球規模の問題が主対象であるのに対して、特に都市汚染エアロゾル、その粒径分布あるいは局地的拡散や沈降沈着を論じた論文が多い。**J. Aerosol Science** (1970年創刊) は、エアロゾルの物理一般といったところであろう。測定法、気体分子の粒子化過程などからフィルタリング等、工学関係にまでわたっている。この他にも、**Environmental Science and Technology** (1967年創刊) などもある。

4. 論文

4.1. 粒径分布

エアロゾル研究の出発点は粒径分布である。古典的ではあるが、第1に **Junge** (1955) を挙げておきたい。ここでは、いわゆる Junge 分布と後に称されるようになった分布関数を提示しているし、また、エアロゾル粒子の帯電平衡も論じている。

Junge分布は半径 $0.1 \mu\text{m}$ 以上の領域に対する表示式であるが、それ以下の粒径領域をも含めての単一表示式としては、対数正規分布あるいはその変型がたびたび用いられる。これについては、**Espenscheid, Kerker · Matijevic** (1964) を参照されたい。

以上はいずれも粒子数密度の粒径分布であるが、表面積あるいは体積（または重量）濃度の粒径分布表示もある。実験結果から体積分布が二つの極大を持つ特性があることを示した **Whitby · Husar · Liu** (1972) も、たびたび引用されるので目を通しておく必要がある。

4.2. 粒子の生成

エアロゾル粒子の生成には、固体または液体の塊りの破碎により生ずるものと、気体分子の自己凝結により生ずるものとある。自然状態での固体塊破碎の代表は風による砂塵の巻上げだが、この機構についての近年の研究発表はない。まず、前述の Twomey の教科書 (1977) を見られたい。液体塊破碎の代表は海面から発生するので、これについては、Woodcock や Blanchard の研究が著名であるが特に **Blanchard: From raindrops to volcano** (1976) をおすすめする。内容は高校生向きに書かれてあるが、これほどおもしろい読物は滅多にない。ついでながら、海洋性エアロゾルについては、**Toba** (1965)、**Junge** (1972) は必読論文であろう。

気体分子の粒子化過程は、さきに述べたようにこの10年間の最大のトピックで、論文の数も限りなく多い。まず読まねばならぬのは **Kiang・Stauffer** (1973) である。この論文は粒子化の理論を述べたものであるが、初めてこの分野を勉強するものにとっては相当に難解であろう。著者たちの一連の論文、たとえば、**Kiang・Stauffer・Mohnen・Bricard・Vigla** (1973) や **Hamil** (1975) を併せて読み比べられるとよい。特に **Hamil** の論文は明快である。総合報告としては、**Mohnen・Lodge** (1969) がある。内容は豊富な実験例証を列挙してあるが、分類整理が乱れているので、読後に頭に残るものが少ない。**Walther** (1972) も、同じ点を指摘し分類法を提示している。**Mohnen** の論文は、それを考えながら辞書として活用すればよかるう。

気体分子の粒子化についての実験の論文も極めて多い。この代表として、化学面を主にした論文では **Friend・Leifer・Trichon** (1973) を、物理面を主にした論文では **Husar・Whitby** (1973) を挙げておこう。**Friend** 等の実験は、成層圏エーロゾルの生成を考えるための模擬実験で、 SO_2 その他の成分を含む空気を入れた実験槽に知れた波長の紫外線照射を行ない、エーロゾルの生成条件を調べている。**Husar** 等の実験では、大容量の実験槽に自然の天空散乱光を当て、エーロゾルの発生と成長の時間経過を追っている。ともに、粒子化の実験的研究としては基本的なもので、その手法は大いに参考となるう。

4.3. 粒子の成長

非活性化領域にある粒子への水蒸気や硫酸分子の凝結による成長については、前記の **Hamil** (1975) と、**Stauffer・Mohnen・Kiang** (1973) を見られるとよい。活性化領域にある粒子の成長は、雲物理学の領域であるので省略する。

凝集に関しては、どの教科書にも書いてあるが、詳細でありながらよく整理されている **高橋：基礎エアロゾル工学** (1972) すずめる。

4.4. エーロゾルの大気中からの除去

エーロゾル粒子の重力による沈降速度については、**Kasten** (1968) が、中間圏、成層圏、対流圏について計算している。これによって、重力沈降による大気からの除去作用は微小粒子に対していかに緩慢であるかが知れる。

より効果的な除去作用は、雲の内部における雲粒への取り込み(レイン・アウト)と、雲底下の降水粒子への

取り込み(ウォッシュ・アウト)とである。この効率を理論的に求めたものに、**Chamberlain** (1953) や **Greenfield** (1957) がある。**Chamberlain** の論文は、横山長之により邦訳されて地球物理学文献抄第8巻に集録されている。レイン・アウトの過程には、雲粒が成長しつつある時には水蒸気の流れによるエーロゾルの取り込みが含まれる。**Facy** 効果と呼ばれている (**Facy**, 1955; 1960)。

4.5. 成層圏エーロゾル

後にユング層と呼ばれることになった成層圏エーロゾルの発見は、**Junge・Chagnon・Manson** (1961) によるものである。ユング層の世界的分布と季節変化については、**Rosen** 等の長大な観測結果がある (**Hofmann・Rosen・Pepin・Pinnick** (1975), **Rosen・Hofmann・Laby** (1975), **Pinnick・Rosen・Hofmann** (1976), **Hofmann・Rosen・Kiernan** (1976))。

ユング層を形成するエーロゾルは、**Mie** 散乱を生ずるに充分な大きさの粒子よりなっているが、その組成については、**Mossop** (1963; 1964), **Friend** (1966), **Bigg・Ono・Thompson** (1970) があり、粒子中の水と硫酸の比率については、実験的に **Rosen** (1971), 理論的には **Hamil・Kiang・Cadle** (1977) がある。

ユング層エーロゾルの放射に与える影響については、**Toon・Pollack** (1976) など数多く、また総合報告では、**Cadle・Grams** (1975) がある。

ユング層形成のモデルでは、**Junge** (1974) と **Rosen・Hofmann・Singh** (1978) がおもしろい。

成層圏エートケン粒子については、実測では **Podzimek・Sedlacek・Haberl** (1977) があり、総合報告としては **Cadle・Kiang** (1977) が貴重な文献となるう。

成層圏エーロゾルの探測には、レーザレーダが有力な手段となったが、**広野・藤原・長沢・内野・前田** (1979)、また、**岩坂・小林** (1979) の解説をまず読みたい。

成層圏エーロゾルの全体的解説には、**小野** (1977)、**三崎** (1979) もある。

4.6. エーロゾルが気象に与える影響

日射に及ぼす影響について論じた論文は数多くあるが、**Elterman** (1964) と **Yamamoto・Tanaka** (1972) を挙げる。雲物理との関係では、**Junge・McLaren** (1971) が啓蒙的である。また、大気中における化学反応へのエーロゾルの介入という新しい観点を述べた、**Cadle・Crutzen・Ehhalt** (1975) も注目したい。

文献

(1) 教科書 (紹介順)

- Junge, C.E., 1963: Air Chemistry and Radioactivity (International Geophysics Series Vol. 4), Academic Press, 382 pp.
- Fuchs, N.A., 1964: The Mechanics of Aerosols, Revised and enlarged edition, Pergamon Press, 408 pp.
- Twomey, S., 1977: Atmospheric Aerosols (Development in Atmospheric Science, 7) Elsevier Scientific Publishing Co., 302 pp.
- Devis, C.N. (ed.), 1966: Aerosol Science, Academic Press, 468 pp.
- 高橋幹二, 1972: 基礎エロゾル工学, 養賢堂, 252頁.
- 磯野謙治(編), 1979: 大気汚染物質の動態 (大気環境の科学 2), 第4章, エロゾル (小野晃), 85~141.
- 三崎方郎, エロゾルの挙動, 気象研究ノート, (近刊予定).

(2) 論文

- Bigg, E.K., A. Ono and W.J. Thompson, 1970: Aerosols at altitudes between 20 and 37 km, *Tellus*, 22, 550-563.
- Blanchard, D.C., 1967: From Raindrop to Volcanoes, *Adventures with Sea Surface Meteorology*, Doubleday & Co. Garden City, New York, 180 pp.
- Cadle, R.D., P. Crutzen and D. Ehhalt, 1975: Heterogeneous chemical reactions in the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 80, 3381-3385.
- Cadle, R.D. and G.W. Grams, 1975: Stratospheric aerosol particles and their optical Properties, *Reviews Geophys. Space Phys.*, 13, 475-501.
- Cadle, R.D. and C.S. Kiang, 1977: Stratospheric Aitken particles, *Reviews Geophys. Space Phys.*, 15, 195-202.
- Chamberlain, A.C., 1953: Aspects of travel and deposition of aerosol and vapour clouds, *British Report AERE-HP/R-1261*.
- Eltermann, L., 1964: Rayleigh and extinction coefficients to 50 km for the region 0.27 μ to 0.55 μ , *Appl. Optics*, 3, 1139-1146.
- Espenscheid, W.F., M. Kerker and E. Matijevic, 1964: Logarithmic distribution functions for colloidal particles, *J. Phys. Chem.*, 68, 3093-3097.
- Facy, L., 1955: La capture des noyaux de condensation par chocs moléculaires au cours des processus de condensation, *Arch. Met. Geophys. Bioklim. Serie A*, 3, 229-236.
- Facy, L., 1960: Les mécanismes naturels de lessivage de l'atmosphère, *Geofis. Pur. Appl.*, 46, 201-215.
- Friend, J.P., 1966: Properties of the stratospheric aerosol, *Tellus*, 18, 465-473.
- Friend, J.P., R. Leifer and M. Trichon, 1973: On the formation of stratospheric aerosols, *J. Atmos. Sci.*, 30, 465-479.
- Greenfield, S.M., 1957: Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere, *J. Met.*, 14, 115-125.
- Hamil, P., 1975: The time dependent growth of H₂O-H₂SO₄ aerosols by heteromolecular condensation, *J. Aerosol Sci.*, 6, 475-482.
- Hamil, P., C.S. Kiang and R.D. Cadle, 1977: The nucleation of H₂SO₄-H₂O solution aerosol particles in the stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 34, 150-162.
- 広野求和, 藤原玄夫, 長沢親生, 内野修, 前田三郎, 1979: レーザーレーダーによる中層大気観測, レーザー研究, 7, 3-18.
- Hofmann, D.J., J.M. Rosen, T.J. Pepin and R.G. Pinnick, 1975: Stratospheric aerosol measurements, I: Time variation at northern mid-latitudes, *J. Atmos. Sci.*, 32, 1446-1456.
- Hofmann, D.J., J.M. Rosen and J.M. Kiernan, 1976: Stratospheric aerosol measurements, IV: Global time variations of the aerosol burden and source considerations, *J. Atmos. Sci.*, 33, 1782-1788.
- Husar, R.B. and K.T. Whitby, 1973: Growth mechanism and size spectra of photochemical aerosols, *Environmental Sci. Tech.*, 7, 241-247.
- 岩坂泰信, 小林愛樹智, 1979: 成層圏エロゾルとレーザーレーダー観測, 応用物理, 48, 681-685.
- Junge, C., 1955: The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical data on the atmosphere, *J. Met.*, 12, 13-25.
- Junge, C.E., C.W. Chagnon and J.E. Manson, 1961: Stratospheric aerosols, *J. Met.*, 18, 81-108.
- Junge, C. and E. McLaren, 1971: Relationship of cloud nuclei spectra to aerosol size distribution and composition, *J. Atmos. Sci.*, 28, 382-390.
- Junge, C.E., 1972: Our knowledge of the physico-chemistry of aerosols in the undisturbed marine environment, *J. Geophys. Res.*, 77, 5183-5200.
- Junge, C., 1974: Sulfur budget of the stratospheric aerosol layer, *Proceedings of the International Conference on Structure, Composition and General Circulation of the Upper and Lower Atmosphere and Possible Anthropogenic Perturbations, IAMAP/IAPSO Combined First Special Assem-*

- blies, Melbourne, 85-100.
- Kasten, F., 1968: Falling speed of aerosol particles, *J. Appl. Met.*, **7**, 944-947.
- Kiang, C.S. and D. Stauffer, 1973: Chemical nucleation theory for various humidities and pollutants, *Disc. Farad. Soc.*, **7**, 26-33.
- Kiang, C.S., D. Stauffer, V.A. Mohnen, J. Bricard and D. Vigla, 1973: Heteromolecular nucleation theory applied to gas-to-particle conversion, *Atmos. Environment*, **7**, 1279-1283.
- 三崎方郎, 1979: 中層大気の組成とエーロゾル, *天気*, **26**, 509-519.
- Mohnen, V.A. and J.P. Lodge, Jr., 1969: General review and survey of gas-to-particle conversions, *Proceeding of 7th ICCN Conference, Prague/Vienna*, Sept. 1969, 69-91.
- Mossop, S.C., 1963: Stratospheric particles at 20 km, *Nature*, **199**, 325-326.
- Mossop, S.C., 1964: Volcanic dust collected at an altitude of 20 km, *Nature*, **203**, 824-827.
- 小野晃, 1977: 成層圏エーロゾル粒子, *科学*, **47**, 18-26.
- Pinnick, R.G., J.M. Rosen and D.J. Hofmann, 1976: Stratospheric aerosol measurements, III: Optical calculations, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 304-314.
- Podzimek, J., W.A. Sedlacek and J.B. Haberl, 1977: Aitken nuclei measurements in the lower stratosphere, *Tellus*, **29**, 116-127.
- Rosen, J.M., 1971: The boiling point of stratospheric aerosols, *J. Appl. Met.*, **10**, 1044-1046.
- Rosen, J.M., D.J. Hofmann and J. Laby, 1975: Stratospheric aerosol measurements, II: The worldwide distribution, *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1457-1462.
- Rosen, J.M., D.J. Hofmann and S.P. Singh, 1978: A steady-state stratospheric aerosol model, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1304-1313.
- Stauffer, D., V.A. Mohnen and C.S. Kiang, 1973: Heteromolecular condensation theory applied to particle growth, *Aerosol Sci.*, **4**, 461-471.
- Toba, Y., 1965: On the giant sea-salt particles in the atmosphere, 1, General features of the distribution, *Tellus*, **17**, 131-145.
- Toba, Y., 1965: On the giant sea-salt particles in the atmosphere, 2, Theory of the vertical distribution in the 10 m layer over the ocean, *Tellus*, **17**, 365-382.
- Toon, O.B. and J.B. Pollack, 1976: A global average model of atmospheric aerosols for radiative transfer calculations, *J. Appl. Met.*, **15**, 225-246.
- Walther, E.G., 1972: A classification for gas to aerosol conversions, *J. Aerosol Sci.*, **3**, 149-152.
- Whitby, K.T., R.B. Husar and B.Y.H. Liu, 1972: The aerosol size distribution of Los Angeles smog, *J. Colloid and Interface Sci.*, **39**, 177-204.
- Yamamoto, G. and M. Tanaka, 1972: Increase of global albedo due to air pollution, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1405-1412.