



雲 物 理 学

武 田 喬 男*

1. 雲物理学とは

前回の気象学入門講座の“雲物理学を理解するために”のなかで、樋口氏は『雲物理学はもう過去の研究分野に属するのだとする極論がある一方、雲物理学は未来の分野であり発展段階にあるという考え方もあり、いずれにせよ雲物理学入門を書くのは難しい……、逆説的にいうと、雲物理学とは、そんなふうに見方が両極端に分かれる分野だということを知るのが入門の第一歩かも知れない』と書いている。この事は今でもある意味ではあてはまるであろう。過去の研究分野だとするのは当たらないにしても、この10年間に雲物理学はますます多様に発展し、どこまでを雲物理学の範囲とするかは、見方によってかなり異なってくるようである。1971年の日本気象学会においては、雲物理学というセッションは1日半設けられていたのに対し、1978年の学会ではわずか半日のセッションになっている。雲物理学が学問として下火になってきたことを意味するのではなく、現在、従来の雲物理学が気象学のいろいろの分野のものと密接に関連しながら発展しており、学会においても、いくつかのセッションで雲物理学に関連したことが発表され、討論されているのである。

大気現象を研究していく上に、その素過程を調べていく立場とそれら素過程が複合した過程を調べていく立場とがある。雲物理学においても同様であり、近年は、素過程の研究と複合過程の研究が多様に発展していったため、気象学のなかに雲物理学の範囲を明確に定義することが難しくなったようである。雲物理学がどんな事象を研究する分野であり、現在どのような傾向にあるかは、**磯野：気象学の展望**（1976）、**孫野：ロンドン国際雲物理学会議おぼえがき**（1972）、**駒林：ロンドンで開催された国際雲物理学学会**（1972）、**Proc. Int. Conf. on Cloud Physics in Boulder**（1976）を読むことによ

り知ることができるであろう。

雲物理学のうち素過程を調べる分野は、主に、雲・降水現象において微小な分子程度の大きさの現象が重要な役割をしている微物理学的過程をその研究対象とし、室内実験、野外測定等を通じて研究を行ってきた。日本の雲物理学は、これまで、どちらかというこの方面で発展をしてきている。研究対象は、水蒸気の凝結による水滴（雲粒）の形成・成長、水蒸気の昇華による氷晶の形成・成長等の水の相変化過程、衝突・併合による水滴および水粒子の巨大化（雨滴、あられ、ひょう、雪片の形成）等である。大気中の水の相変化には、凝結核、氷晶核といった水とは異なる物質の存在が重要な役割を果たしていることが、問題を非常に複雑にしている。これらの素過程の起こり方は、当然、まわりの空気の状態（温度、湿度、運動）が影響を与えるわけであるが、素過程の学問としての雲物理学では、まわりの空気場の効果を明らかにするため、時間的にあまり変わらないものとして、空気の状態が微物理学的過程に与える効果をまず調べてきた。

しかし、実際の雲・降水の現象は時間的・空間的に変化の激しいものであり、降水粒子のまわりの空気の状態も激しく変わるものである。また、水滴・氷晶の成長に伴う潜熱の放出および落下する降水粒子が空気をひきずる力は、雲の中の空気の振舞いに大きな影響を与えることになる。そして、降水粒子は空気とは異なる運動をすることが雲の中の力学的過程と微物理学的過程の相互作用をいっそう複雑なものにしている。すなわち、素過程の複合したものとして、実際の雲・降水の現象、主に、降雨・降雪の機構を理解しようとした時、非常に複雑な過程を研究することになる。素過程がある程度定量的に解明され、大型コンピュータの進歩により、数値実験を通じて素過程の複雑な組み合わせの効果を研究することが可能になり、また、レーダ、飛行機等の観測技術が進歩したことにより、雲・降水の現象を全体として調べる

* T. Takeda, 名古屋大学水圏科学研究所。

ことが可能になり、この分野の雲物理学は急速に発展してきたわけである。この分野の研究のおもしろさの一つは、微物理学的過程がいくつかのフィードバック機構を通して、雲のスケールの現象に影響を与えていく仕組みを解き明かすことである。

現在、雲・降水現象の中で起こっている微物理学的過程を基礎的の学問としてより精密に研究していく分野と複合過程として、雲・降水現象を研究していく分野がそれぞれ多様に発展していているのである。前者においては、水滴・氷粒子の成長機構（雪結晶の習性・成長、雪片の形成等）を精密な室内実験等により研究する一方、大気中の相変化過程——気体から微粒子が形成される過程——を、水蒸気以外の大気中の各種微量成分についても扱うようになっており、大気中の各種物質の化学反応、光化学反応と密接な関連を持つようになってきている。したがって、そこでは、成層圏あるいはそれより高い大気中で微粒子が形成される過程も、また、惑星大気中で水以外の物質が相変化を起こす過程も重要な研究対象となってきた。それだけに、また他の研究分野の重要な基礎にもなっているわけである。たとえば、大気中の微粒子が水蒸気を吸収して成長する過程は、雲をつくらなくても、日射の吸収・散乱を通して大気中の放射過程に重要な役割を果たしており、その過程にも微粒子の物質の種類が大きな影響を持つのである。おそらく、水滴・氷晶の成長機構と共に大気中の微量成分の相変化、粒子形成を基礎的に扱う立場として、雲物理学はこれからも研究対象を広げながら発展していくのであろう。これら微物理学的過程が雲のスケールの現象ばかりでなく、さらに大きなスケールの現象にも重要な役割を果たしていることがだんだん明らかにされてきており、現在、気象の人工調節、人間活動の大気環境への影響、気候変動等の研究の基礎としても重要性が増してきているといえる。

一方、複合過程としての雲・降水現象を研究する立場の雲物理学は、大型コンピュータによる雲のモデリング、レーダ・飛行機を駆使する大規模な総合的観測をバックにしながら、世界的に発展しており、国際的雲物理学会でも主流の一つとなっている。研究対象も、一個の積雲から 1,000 km オーダの低気圧スケールまで広がられてきており、現象的には豪雨・豪雪も扱い、大気中の水循環の機構を解明するため、他の分野の研究との協力が非常に重要となってきた。この分野でも、微物理学的過程そのものが重要な役割を果たしており、雲物理学の立場からの研究が多くの研究成果をあげてきた一

方、全体としての降水現象に直接効いてこない微物理学的過程、あるいは因子が雲物理学としても重要でないような議論がしばしばなされることがあるのは残念であり、それは誤解であらう。

2. 雲物理学の教科書、解説書

現在、このように多様に発展をしている雲物理学のとらえ方が、人によって異なるのは当然であるかもしれない。それだけに、雲物理学の入門講座として教科書、解説書等を紹介するのはかなり難しいといえる。

上に述べてきた二つの立場の雲物理学をこみにして、雲物理学のおもしろさ、多様性を十二分に味わわせてくれるのは、駒林：気象の科学(1973)であらう。雲・降水現象に関連する素過程および複合過程を物理学を基礎にして理解していく楽しさ、あるいは、その大事さが分かり易く書かれている。孫野：雲と雷の科学(1969)、小林：雪の結晶(1970)、ブランチャード：海と大気——雨滴から火山まで(1971)もまた類似の図書として紹介できるものである。

総合報告、解説

雲物理学を理解するには、きちんとした教科書を読み、原論文を読むことが良いのであろうが、雲物理学に関連する事柄の総合報告・解説は、前回の入門講座以後、日本語でもいくつか書かれており、現在まで解明されたこと、現在の研究の傾向など知る上に参考になるものと思われる。なかでも、気象研究ノート第121~123号雲物理特集(1974)は、雲物理学の素過程の殆んどがそれぞれの専門家によってまとめられているものである。各章の書き方は、その項目の全般的な報告を行なっているもの、著者の研究成果を中心に問題点をさぐっているもの等差はあるものの、現在、日本語で書かれた雲物理学の教科書が少ない段階で参考になるものである。その内容を列記しておく、前：氷の物性、武田：凝結核と雲および降水の形成、内田：雲核の研究、田中：雲の氷晶化過程と氷晶核、石坂：大気中の氷晶核の濃度と物質および起源、菊地：天然雪、山下：大型低温箱を使った氷晶の研究、権田：雪結晶の成長に関する実験的研究、駒林：雪結晶の形を表現する微分方程式、佐粧：雪片の形成、播磨屋：あられ・ひょうである。同じ系列の総合報告として、梶川：降水粒子の落下速度について(1974)も挙げておこう。

また、大気中の相変化過程を中心とした雲物理学のこれからの一つの発展を示すものとして、小野：成層圏エアロゾル粒子(1977)、駒林：地球大気と惑星大気——

特に分子状窒素 N_2 を中心に (1976) がある。後者は、地球、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星の大気の気体組成、凝結物について総合的に報告し、雲の形成という問題を地球大気にとらわれず広い立場で述べたものである。

これら素過程を中心とした雲物理学の解説と異なり、複合過程としての雲・降水現象を総合的に解説することは、現象が多様なため難しい。むしろ、ケーススタディーを述べている個々の論文を読むのが良いかも知れない。以下に挙げる総合報告も、それぞれ、ある立場から雲・降水の現象の一つの面を述べているものである。

斉藤：レーダ気象学研究所の最近の動向 (1973) については、各種レーダおよび航空機により低気圧付近の降水系を観測した研究例をまとめたものであり、武田：雨 (1977) もまたレーダにより低気圧スケールの降水系を観測した例をいくつかまとめたものである。降水現象はしばしばメソスケールの現象として起こるが、気象研究ノート 第120号メソ気象 (1974) は、力学、レーダ気象学、雲物理学等の立場からメソ気象を討論したシンポジウムの内容をまとめたものである。なお、降水現象のうち最も顕著な現象の一つである豪雨については、二宮：集中豪雨の話 (1975)、武田・二宮：日本の豪雨・豪雪 (1977)、気象学会シンポジウム「地形と豪雨」の報告 (1977) 等が参考になるであろう。降水現象を総合的に観測する際、飛行機と共に最も有力な観測手段であるレーダについては、気象研究ノート 第112号 気象レーダ特集号 (1972) に、レーダの説明、観測例、レーダ観測の問題点が詳しく述べられている。

先に述べた雲力学は、力学的過程と微物理学的過程の相互作用が著しく起こる対流性の降水雲を中心にこれまで研究されてきたが、武田：降水セルの力学と数値実験 (1971)、武田：長続きする降水セルの数値実験による研究 (1973)、吉崎：アメリカの雷雲 (1977) 等により、その一端が述べられている。気象研究ノート 第109号 対流に関する研究の現状と問題点 (1971) もまた対流雲を総合的に理解するのに役立つであろう。

なお、駒林：雲物理と雨量予報 (1975) は、雲物理学が実際の雨量予報にどのように貢献できるかを議論しているものとして、小元：熱帯性積乱雲の気象調節に関するセミナー報告 (1971) は、人工氷晶核の seeding によるものも含めて熱帯性積乱雲のモディフィケーションの研究成果、問題点をまとめたものとして、それぞれ、雲物理学が複合過程を通して実用的問題とどのようなかか

わり合いを持っているかを述べているものである。seeding による気象の人工調節については、Hess: **Weather and Climate Modification** (1974) が参考になるであろう。

シノプティックスケール以上での visible な雲の分布をもとに、雲・降水現象の複合的物理過程を調べることも広い意味での雲物理学といっても良いであろう。中山：総観的立場から見た雲 (1968)、および 気象研究ノート 第113号 気象衛星特集号 (II) (1972) をぜひ挙げておきたい。特に、前者は、実際に地上、航空機から眼で見る雲の種類・形態を総観的立場 (低気圧、前線との位置関係) から“ほんやく”する問題点を述べたもので、書かれてからすでに10年以上経っているが、これに変わる総合報告はなく貴重なものである。

教科書

雲物理学の教科書については、前回の入門講座で挙げられている、Mason: **Clouds, Rain and Rainmaking** (1975)、Mason: **The Physics of Clouds** (1971)、Byers: **Elements of Cloud Physics** (1965)、Fletcher: **The Physics of Rainclouds** (1962) は、現在でも代表的なものである。その内容についてはすでに前回の講座で述べられている。ただし、*The Physics of Clouds* は 2nd ed. であり、レーダ気象の新しい知識がつけ加えられていることが注目される。その他、水の相変化の熱力学、あるいは水、氷の物性をより基礎的に勉強しようとするには、Dufour・Defay: **Thermodynamics of clouds** (1963)、Fletcher: **The Chemical Physics of Ice** (1970)、Hobbs: **Ice Physics** (1974) がある。また、Battan: **Radar Observations of the Atmosphere** (1973) および Atlas: **Advances in Radar Meteorology** (1964) は、レーダ気象学の基礎的な教科書として依然として代表的なものである。大気中の各種物質の相変化、あるいは雲物理学において重要な役割を果たしているエアロゾルについては、入門講座の他の章で述べられるであろうが、Twomey: **Atmospheric Aerosols** (1977) を挙げておこう。雲力学については、まとまった教科書が書かれるほどには、まだ十分発展していないため、論文集のかたちでまとめられているものを挙げざるを得ない。たとえば、Pruppacher: **Cloud Dynamics** (1975) である。一般的に、日本人による雲物理学の教科書が少ないのは残念である。磯野 (英文) および駒林 (和文) がそれぞれ現在執筆中であるということで、期待することにした

い。なお、雲の写真集については、前回詳しく紹介されているので省略するが、その後出たものとして、**Scorer: Cloud of the World** (1972) を挙げておきたい。

文献

- 磯野謙治, 1976: 気象研究ノート, 128, 1-7.
 孫野長治, 1972: 天気, 19, 529-532.
 駒林 誠, 1972: 天気, 19, 533-545.
 Proc. Int. Conf. on Cloud Physics in Boulder, 1976: Amer. Met. Soc.
 駒林 誠, 1973: NHK ブックス, pp. 250.
 孫野長治, 1969: NHK ブックス, pp. 212.
 小林禎作, 1970: プルーパーボックス, 講談社, pp. 304.
 D.C. ブランチャード, 1971: 河出書房, pp. 216.
 気象研究ノート, 121-123, 1974.
 梶川正弘, 1974: 天気, 21, 317-332.
 小野 晃, 1977: 科学, 47, 18-26.
 駒林 誠, 1976: 気象研究ノート, 128, 164-185.
 齊藤 実, 1973: 天気, 20, 457-475,
 武田喬男, 1977: サイエンス, 特集大気科学, 29-37.
 気象研究ノート, 120, 1974.
 二宮洸三, 1975: 出光書店, pp. 205.
 武田喬男, 二宮洸三, 1977: 科学, 47, 138-148.
 気象学会シンポジウム「地形と豪雨」報告, 1977: 天気, 24, 27-53.
 気象研究ノート, 112, 1972.
 武田喬男, 1971: 天気, 18, 9-19.
 ———, 1973: 天気, 20, 405-410.
 吉崎正憲, 1977: 天気, 24, 351-373.
 気象研究ノート, 109, 1971.
 駒林 誠, 1975: 天気, 22, 113-118.
 小元敬男, 1971: 天気, 18, 605-616.
 Hess, W.N., ed., 1974: Wiley-Interscience Publ. pp. 842.
 中山 章, 1968: 気象研究ノート, 96.
 気象研究ノート, 113, 1972.
 Mason, B.J., 1975: 2nd ed. Cambridge Univ. Press, pp. 181.
 ———, 1971: 2nd ed. Clarendon Press Oxford, pp. 671.
 Byers, H.R., 1965: Univ. of Chicago Press, pp. 191.
 Fletcher, N.H., 1962: Cambridge Univ. Press, pp. 386.
 Dufour, L., and R. Defay, 1963: Academic Press, pp. 254.
 Fletcher, N.H., 1970: Cambridge Univ. Press, pp. 271.
 Hobbs, P., 1974: Clarendon Press, Oxford, pp. 837.
 Battan, L.J., 1973: Univ. of Chicago Press, pp. 324.
 Atlas, D., 1964: Advances in Geophys., 10, 318-478.
 Twomey, S., 1977: Elsevier, Amsterdam.
 Pruppacher, H.R., ed., 1975: Pure and Appl. Geophys., Special Issue.
 Scorer, R., 1972: Lothian Publ. Co. Ltd.