



## 実 験 気 象 学

気象学の分野として、実験気象学という学問体系ができて上がっているかどうか、疑問に思われる。しかし、自然科学としての気象学を支えている大事な柱のひとつが、実験によって自然現象の本質に迫るという学向の方法であることは事実だし、近年そうした実験が盛んに行なわれていることは誰も認める所だと考える。

そこで、実験気象学というジャンルが、今後育っていくことを期待して、ここに気象学における実験的手法の案内を試みた。それらは大別して、フィールドでの実験・実験観測、実験室内での実験設備を用いた物理・化学実験、および理論式に基づきコンピュータを用いた数値実験の三つに分けられる。したがって、本講座でも、野外実験（菊地勝弘）、室内実験（瓜生道也）、数値実験（新田 尚）の三つの話題を用意した。しかし、これで気象学における実験的手法を全て網羅したわけではなく、たとえば風洞実験が欠けている。特に風洞実験に興味をもっておられる読者には申し訳のないことだが、本講座では実験気象学確立への中間段階を示すにすぎないとして御寛容を願いたい。

以下の三篇をお読みなれば気付かれることだが、気象学・大気物理学のいろいろな分野と実験の分野とは、あたかも織物のタテ糸とヨコ糸のような関係にある。実験的手法をタテ糸とすると、その糸は、回転流体現象、熱の効果、降水の物理と化学、境界層の動静等々いくつかのヨコ糸と触れ合っている。したがって、本講座の諸項目が、こうしたヨコ糸に相当する諸分野を扱うとき、必然的にタテ糸に触れ、実験的手法についても論じることになる。学問の総合的性格を考えれば当然のことであるが、読者もこうした状況を考えてタテ糸とヨコ糸が織りなす布の全体を把握するよう努められることを希望する。（編集委員会）

## 1. 野外実験

菊 地 勝 弘\*

最近、特に野外実験観測の項目が多岐にわたり、それに伴って実験観測の規模も大きくなり、それに要する人員も多くなる傾向は筆者の関係する雲物理や大気電気の実験分野にばかり限らないようである。

規模の大小にかかわらず、実験観測をするためには、それなりの大目的があり、それを構成するいくつかの小目的がある筈である。それらの目的を遂行するためには、いつ、どこで、どんな方法がよいか、また可能であるかが重大な問題となる。野外実験に限らず、室内実験でも実際に実験を始める前の段階でその実験の8割方は終わったようなもので、あとはチャンスと自分達の努力によってどうにでもなるものである。特に規模の大きな野外実験観測等になると、個人の努力でできる室内実験

と違って実施にもってゆくまでに数多くの障害がある。それらは、ある場合には実験場所の借用の問題であったり、電源をいかに入手するかの問題であったり、実験観測とは直接には一見関係のないような対人交渉が大きなウェイトを占めることがあることを忘れてはならない。これがスムーズに行かない場合には、観測時期を失したり、また以後の観測に種々障害をもたらすことになりかねないからである。

気象の野外実験観測はケースバイケースであり、これら全てを包含する入門書、専門書みたいなものがあるわけではないし、また実験観測結果の報告や論文をみても、この前段のところは論文には書かれていないのが普通であるから十分注意が必要である。特に、外国等に出かけて観測をする場合には事前の交渉が大きなウェイトを占める。しかし、いずれにしても多少の障害は実験観

\* K. Kikuchi, 北海道大学理学部地球物理学教室。

測中の本人達の実験観測に対する熱意と対人関係における毎日の誠意が解決してくれることが多い。

野外実験観測といっても、個人でできる小規模なものから、数人で数週間といった単位のものまでいろいろな規模のものがあり、一概には述べられないが、これまでに筆者に関連した分野の野外実験観測のいくつかの具体例を紹介するので、類似の実験観測をする場合には目を通されると役に立つと思われるので参照されたい。

野外実験だといっても、それぞれの分野の基礎的知識の上に成り立っており、また始めるものであるから、研究室での日頃の努力もまた大切である。雲物理関係の教科書としては、**Byers: Elements of Cloud Physics** (1965), **Eletcher: The Physics of Rainclouds** (1969), **Mason: The Physics of Clouds** (1971) や **Hobbs: Ice Physics** (1974) 等が挙げられる。また、北大低温科学研究所が主催した 低温科学国際会議論文集 (I, II) (1967) は積雪に関する実験観測の論文集である。

大気電気関係の最近出版された教科書としては、よくまとまった **Chalmers: Atmospheric Electricity** (1967) の第2版があり、ロシア語の英訳版として、**Imyanitov・Chubarina: Electricity of the Free Atmosphere** (1967) がある。また、同じロシア語の英訳版として論文集の形をとっている **Kolokolov・Lobodin: Studies in Atmospheric Electricity** (1974) もある。しかし、この分野のもっとも新しい文献もふんだんに取り入れた力作は、何と云ってもドイツ語の英訳版で手に入る **Israël: Atmospheric Electricity, Vol. 1, Fundamentals, Conductivity, Ions; Vol. 2, Fields, Charges, Currents** (1970) が全ての大気電気学の分野を網羅している。その他、ほぼ4年毎に行なわれている雲物理の国際会議の Proceedings (1970, 1972, 1976) や大気電気の国際会議の Proceedings (1969, 1977) も非常に役に立つであろう。

いずれの野外実験観測にも、最小限度の一般気象観測が必ずこれらに含まれるので、気象観測の知識が必要であることは当然である (気象庁, 1971)。

### 1. 雪に関する実験観測

雪の観測といってもその目的によっていろいろ異なるが、最も多いのは個人による雪の結晶の観測であろう。これらの観測は別に紹介するまでもないが、しかし目的は種々あって、単に雪結晶の顕微鏡写真撮影が目的のものから、一点での降雪強度を論ずるもの (梶川, 1971)、

結晶性を論ずるもの (**Kobayashi et al.**, 1976)、また多結晶雪の軸角を議論するもの (**Uyeda・Kikuchi**, 1976) などがある。これらの研究に関しては、最も新しい研究を参照するとそれに関する過去の歴史は引用文献から芋づる式に容易に把握することができる。

降雪現象を空間的にみるために垂直方向に配置した観測点を用いる観測、また、雪雲の中の情報を得ようとして S. C. Sonde と U. D. Sonde を組み合わせて放球するといった方法は、主として **Magono et al.**, (1966) によって北海道手稲山や石狩平野を中心に行なわれてきた。また、水平的な拡がり等をみるために、平野内の国鉄保線区のデータ (李等, 1972) や対象域内の学校に依頼する方法 (**Higuchi**, 1962b) がとられた。数百 km<sup>2</sup> にわたっての降雪分布が、また積雪分布がどのようになっているかは、適当な間隔で雪尺を設置し観測を依頼した小中学校の協力や、また道路沿いの電柱を雪尺として使用するという方法 (菊地等, 1972, 1975) がとられている。また、数 km<sup>2</sup> 範囲の風系と降雪域との関係も、500名の高校1年生に依頼するという方法でかなり細かな構造が報告されている (遠藤・秋山, 1970)。

降雪実験として、紙で作った多量のモデル雪を航空機から投下し、その地上での拡がり具合をみようという試みは、基盤の目状になっている都市を座標にみだてて札幌市の上空で **Higuchi** (1962a) によって遂行された。雪結晶の成長速度を実際に野外で過冷却霧への種播きによって成長させ、理論との比較を試みたものに、**Isono et al.**, (1956) の実験があり、航空機を用いて積雲内から氷晶、雪結晶を捕集し、Growth Mode (**Ono**, 1970) を論じたもの、また、極地での細氷に注目したもの (**Kikuchi・Hogan**, 1978) もある。北陸の豪雪について大規模な観測体制をしき、その結果を括めた総合報告は気象庁 (1968) から刊行されている。

石狩湾スケールの降雪としばしばよく対照される降雪現象に、アメリカの五大湖がある。Great Lakes Snowstorms と呼ばれる降雪現象の観測は、主として **Jiusto et al.**, (1970), **Jiusto** (1973) 等のグループによるところが多い。一方、ワシントン州カスケード山周辺部の冬雲に対する種播き効果をみる大規模な実験は、**Hobbs et al.**, (1975) によって精力的に行なわれた。

雪に関する観測は、規模の大小、他の目的の観測の一つの項目として取り上げるといった場合等数多くあるが、いわゆる野外実験という形での取り上げ方は主として人工降雨実験に関連したものが多いのは、その性質上

当然のことであろう。

## 2. 気象の人工変換に関する実験観測

今日気象の分野でのもっとも大規模な野外実験は、気象の人工変換すなわち人工降雨、降雹抑制とハリケーン制御等のプロジェクトであろう。人工降雨実験は主としてアメリカが、降雹抑制についてはソ連が力を入れているようである。この辺のことに關しては、小元 (1968, 1970)、土屋 (1970)、福田 (1970) の解説がある。小元によれば、アメリカにおけるプロジェクトは大きく分けて次の三つになるという。すなわち、冬期のワシントン州カスケード山脈の風下山岳地帯の降雪を増加させようという試み (Hobbs, 1975 a, b; Hobbs・Radke, 1975)、南北両ダコタ州での夏期の降水量の増加を目的としたもの (Dennis *et al.*, 1974)、それにフロリダ州での積雲の人工変換の研究であり (Simpson・Wiggert, 1969)、これらの論文の引用文献を参照すると各々の実験に關する膨大な資料が得られ、プレリナリーレポートも多いから、それらの中には細かなテクニックも書かれているので論文よりは別の面で参考になる筈である。

降雹抑制実験は、ソ連、アメリカをはじめとしてアルゼンチン、スイス、南アフリカ共和国、ケニア等で数多く行なわれている。ソ連の降雹抑制は、大田 (1970)、田中 (1970) の解説があるが、Marwitz (1973) に詳しい。アメリカでは National Hail Research Experiment (NHRE) が主として行なっているが、最近、Long (1976) によって 1972年から 1974年までの実験結果が報告されている。アルゼンチンの結果は古くは、Grandoso・Iribarne (1963) にあるが、最近の結果は Núñez・Spreafichi (1976) に詳しい。その他の国の実験方法、結果は Gokhale (1975) や Mather *et al.*, (1976) を参照されたい。

人工消霧の物理的あるいは実験的基礎は、Houghton・Radford (1938) の最初の試み以来あまり変化しているとは思われないが、最近では過冷却霧の消散に液体プロパンの撒布が新しい手段として用いられるようになった。従来までの人工消霧は主として暖かい霧の消散であって、それは、加熱法、吸湿性物質による乾燥法、霧粒の併合促進による落下法、防霧林 (Hori, 1953) 等による機械的方法や下降気流による乾燥法等に分けられる。また、過冷却霧の消散は主としてドライアイスの撒布や液体プロパンの撒布が主であるが、最近の実験で成功した例としては、加熱法のうち、ジェットエンジンを利用したものとヘリコプターを用いた下降気流による方法と

液体プロパンを利用したものであろう。日本における加熱法は、孫野等 (1971) のプロパングスの燃焼があるが、C-141 型機 4機を並べて16個のジェットエンジンを作動させた例は Appleman・Coons (1970) がある。この原理を用いたものに、Turboclair (Sauvalle, 1976) がある。ヘリコプターのローターがもたらす下降気流による消霧実験は、Lewisburg program であろう。この実験 (Plank *et al.*, 1971) では、種々のヘリコプターの消霧能力がたしかめられている。Fairchild AFB における液体プロパンを使った過冷却霧の消霧実験は、Vardiman *et al.*, (1971) に詳しいが、最近になって、液体プロパンに代る新しい氷晶生産物として Hicks・Weinstein (1976) は過冷却圧縮空気の利用を提案している。

## 3. 大気電気に関する実験観測

雷、大気電気に関する野外実験そのものは、Vonnegut (1955) の実験以来あまり見当たらないが、最近では誘雷の実験 (Newman, 1965) が注目されているようである。一方、降水を伴う雲の大気電氣的性質に注目した観測 (Kikuchi, 1975) もあるが、最近、NASA Kennedy Space Center でのロケット打ち上げに対する雷の影響を未然に防ぐ目的から大規模な大気電場の多点観測が行なわれ (Jacobson・Kridler, 1976; Livingston・Kridler, 1978)、電場測定の新たな見なおしがされてきている。また、名大空電研グループによる北陸の冬の雷 (Takeuchi *et al.*, 1977) の放電様式の相違も注目されてきた。北陸の冬の雷の総合的な観測は、名大空電研、北大理学部、ニューメキシコ鉱工科大学等によって行なわれており、その報告が待たれている。小型ロケットによる誘雷の実験は最近日本でもテスト的に行なわれているようである。

気象学における野外実験観測は、何も雲物理や大気電気の分野に限られているわけではないが、ここでは主として筆者の關係する分野の野外実験観測を紹介した。取り上げた具体例の分野が片寄ってしまったのは止むを得ない。野外実験観測はますます大規模になってゆく傾向にあり、最早、単にその専門の分野だけに限らなくなり、多方面の知識が必要になってきているのも事実である。そういう意味では、形式ばかりでなく内容の伴った共同実験観測が行なわれることが望ましいだろう。いずれにせよ、野外実験観測はたいへん金のかかる仕事である。成功するもしないも事前の入念な準備が必要である

ことはいうまでもない。

### 文 献

#### 総合報告・教科書

- American Meteorological Society, 1970: Conference on Cloud Physics, FT. Collins, Colorado, 207 pp.
- American Meteorological Society, 1976: International Conference on Cloud Physics, Boulder, Colorado, 675 pp.
- Byers, H.R., 1965: Elements of Cloud Physics, Univ. of Chicago Press. 191 pp.
- Chalmers, J. A., 1967: Atmospheric Electricity, Pergamon Press, 515 pp.
- Coroniti, S. C. and J. Hughes, 1969: Planetary Electrodynamics, I, II, Gordon and Breach Science Pub., 587 pp, 503 pp.
- Dolezalek, H, and R. Reiter, 1977: Electrical Processes in Atmospheres, Steinkopff-Darmstadt, 865 pp.
- Fletcher, N.H., 1969: The Physics of Rainclouds, Cambridge Univ. Press, 390 pp.
- Hobbs, P.V., 1974: Ice Physics, Clarendon Press, 837 pp.
- Hori, T., 1953: Studies on Fogs, In Relation to Fog-Preventing Forest, Tanne Trading Co., LTD., 399 pp.
- Imyanitov, I. M. and E. V. Chubarina, 1967: Electricity of the Free Atmosphere, Israel Program for Scientific Translations, 212 pp.
- Israël, H., 1970: Atmospheric Electricity, I, Fundamentals, Conductivity, Ions, II, Fields, Charges, Currents, Israel Program for Scientific Translations, 796 pp.
- 気象庁, 1968: 北陸豪雪調査報告, 気象庁技術報告, 66, 481 pp.
- 気象庁, 1971: 地上気象観測法, 266 pp.
- Kolokolov, V.P. and T.V. Lobodin, 1974: Studies in Atmospheric Electricity, Israel Program for Scientific Translations, 137 pp.
- Mason, B.J., 1971: The Physics of Clouds; Clarendon Press, 671 pp.
- The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ., 1967: Physics of Snow and Ice (I, II), 1414 pp.
- The Royal Society, 1972: The International Cloud Physics Conference, London, 272 pp.
- 土屋巖, 1970: 気象制御・気候改造, 気象研究ノート, 104, 122 pp.

#### 論 文

- Appleman, H.S. and F.G. Coons, 1970: The use of Jet Aircraft engines to dissipate warm fog, J. Appl. Met., 9, 464-467.

- Dennis, A. S., J. R. Miller, Jr, and D. E. Cain, 1974: Effects of cloud seeding on growing season rainfall in North Dakota, 4th Conf, Wea. Mod., Florida.
- 遠藤辰雄, 秋山敏弘, 1970: メソスケール降雪域に及ぼす地形による風の影響, 天気, 17, 429-433.
- 福田矩彦, 1970: 人工降雨の現況, 天気, 17, 573-583.
- Gokhale, N. R., 1975: Hailstorms and hailstone growth, State Univ. of New York Press, 465pp.
- Grandoso, H.N. and J.V. Iribarne, 1963: Evaluation of the first three years in a hail prevention experiment in Mendoza (Argentina), ZAMP, 14, 549-553.
- Hicks, J.R. and A.I. Weinstein, 1976: Glaciation of supercooled fog by compressed air, 2nd WMO Scientific Conference on Weather Modification, 389-396.
- Higuchi, K., 1962a: Experimental studies on drift and turbulent diffusion of paperlets emitted from aircraft as a model of snowflakes, J. Met. Soc, Japan, 40, 170-180.
- Higuchi, K., 1962b: Horizontal distribution of snow crystals during the snowfall, (III), J. Met. Soc, Japan, 40, 266-276.
- Hobbs, P.V., 1975a: The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding, Part I: Natural conditions, J. Appl. Met., 14, 783-804.
- Hobbs, P.V., 1975b: The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding, Part III: Case studies of the effect of seeding, J. Appl. Met., 14, 819-858.
- Hobbs, P.V. and L. F. Radke, 1975: The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding, Part II: Techniques for the physical evaluation of seeding, J. Appl. Met., 14, 805-818.
- Houghton, H. G. and W. H. Radford, 1938: On the local dissipation of natural fog, Pap. Phys. Oceanogr. Met., MIT and Woods Hole Oceanogr. Inst., 6, 63 pp.
- Isono, K., M. Komabayasi, Y. Yamanaka and H. Fujita. 1956: An experimental investigation of the growth of ice crystals in a supercooled fog, J. Met. Soc. Japan, 34, 158-163.
- Jacobson, E.A. and E.P. Krider, 1976: Electrostatic field changes produced by Florida lightning, J. Atmos. Sci., 33, 103-117.
- Jiusto, J.E. 1973: Studies of Great Lakes Snow-

- storms, ASRC-SUNYA, Pub., NO. 170.
- Jiusto, J. E. and E. W. Holroyd, III, 1970: Great Lakes Snowstorms, ASRC-SUNYA, 142pp.
- 梶川正弘, 1971: 驟雪雲からの降水粒子の時間変化について, 北大地球物理学研究報告, 25, 155-165.
- 菊地勝弘, 石川照高, 七沢謙, 由田建勝, 1975: 豪雪, 台風・集中豪雨雪の防災計画モデルに関する研究, 77-111.
- 菊地勝弘, 孫野長治, 播磨屋敏生, 梶川正弘, 石川照高, 1972: 石狩平野における積雪分布の観測, 北大地球物理学研究報告, 27, 1-12.
- Kikuchi, K., 1975: Atmospheric electrical properties of snow clouds with precipitation, J. Met. Soc. Japan, 53, 322-333.
- Kikuchi, K. and A. W. Hogan, 1978: Properties of diamond dust type ice crystals observed in summer season at Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica, J. Met. Soc. Japan, (投稿中).
- Kobayashi, T., Y. Furukawa, T. Takahashi and H. Uyeda, 1976: Cubic structure models at the junctions in polycrystalline snow crystals, J. Crystal Growth, 35, 262-268.
- 李柁雨, 菊地勝弘, 孫野長治, 1972: 石狩平野の降雪の水平分布(II), 北大地球物理学研究報告, 28, 1-12.
- Livingston, J. M. and E.P. Krider, 1978: Electric fields produced by Florida thunderstorms, J. Geophys. Res., 83, 385-401.
- Long, A.B., 1976: Analysis of the hailfall during 1972-74 in the National Hail Research Experiment, Preprints, 2nd WMO Scientific Conference on Weather Modification, 266-272.
- 孫野長治, 菊地勝弘, 遠藤辰雄, 李柁雨, 1971: プロパンガス加熱法による霧の人工消散試験, 北大地球物理学研究報告, 25, 181-206.
- Magono, C., K. Kikuchi, T. Kimura, S. Tazawa and T. Kasai, 1966: A study on the snowfall in the winter monsoon season in Hokkaido with special reference to low land snowfall, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII, 2, 287-308.
- Marwitz, J.D., 1973: Hailstorms and hail suppression techniques in the USSR-1972, Bull. Ame. Met. Soc., 54, 317-325.
- Mather, G.K., L.W. Cooper and D.S. Treddenick, 1976: Preprint, 2nd WMO Scientific Conference on Weather Modification, 295-302.
- Newman, M.M., 1965: Use of triggered lightning to study the discharge process in the channel and application to V.L.F. propagation studies, Problems of Atmospheric and Space Electricity, Elsevier, 482-490.
- Núñez, J. M. and M. I. Spreafichi, 1976: An outline of the national hail suppression program in Argentina, Preprints, 2nd WMO Scientific Conference on Weather Modification, 229-236.
- 大田正次, 1970: 南コーカサスのひょう抑制実験, 天気, 17, 521-525.
- 小元敬男, 1968: 気象および気候の人工変換, 農業気象, 23, 195-203.
- 小元敬男, 1970: 米国およびソ連における気象調節研究, 天気, 17, 301-309.
- Ono, A., 1970: Growth mode of ice crystals in natural clouds, J. Atmos. Sci., 27, 649-658.
- Plank, V.G., A.A. Spatola and J.R. Hicks, 1971: Summary results of Lewisburg fog clearing program, J. Appl. Met., 10, 763-779.
- Sauvalle, E., 1976: Operational fog dispersal systems at Orly and Charles de Gaulle Airports using the Turboclair process, 2nd WMO Scientific Conf. on Weather Modification, 397-404.
- Simpson, J. and V. Wiggert, 1969: Models of precipitating cumulus towers, Mon. Wea. Rev., 97, 471-489.
- Takeuchi, T., M. Nakano, H. Ishikawa and S. Israelsson, 1977: On the two types of thunderstorms deduced from cloud-to-ground discharges observed in Sweden and Japan, J. Met. Soc. Japan, 55, 613-616.
- 田中豊顕, 1970: ソ連における雲物理の研究状況, 天気, 17, 526-538.
- Uyeda, H. and K. Kikuchi, 1976: Remeasurement of the axial angle between spatial branches of natural polycrystalline snow crystals, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII, 5, 21-28.
- Vardiman, L., E.D. Figgins and H.S. Appleman, 1971: Operational dissipation of supercooled fog using liquid propane, J. Appl. Met., 10, 515-525.
- Vonnegut, B., 1955: Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity, Proc. Conf. Atmos. Elect., Portsmouth, 169-181.