

ポーロニアにおける「エアロゾル粒子の輸送と除去」に関する研究集会に出席して

孫野長治*

1. まえがき

昨年(1980)8月、イタリアの Prof. Vittori が手紙をくれて、Tellus に発表した私達の雪の結晶のエアロゾル粒子の捕捉に関する論文(1979)中の Facy 効果の用語は不相当だと指摘された。返事を書くには教授の関係論文と Facy の原論文をよみかえさなければならず、それも億劫なのでそのままにしておいたところ、11月末に返事の催促をかねて12月にポーロニアで降雪のエアロゾル除去作用に関する小集会をひらくので出てこないかとの招待電報がとどいた。そこで急いで関係論文をよんで、教授の意見に同意する主旨と、よろこんで出席する旨を返信した。

出席したところ、米・日・英・独およびイスラエルから招待された9人がたっぷり3日間をかけて討論したので、専門によっては判りにくいところもあったが、私なりにたいへん面白かった。Vittori 教授の好みで招集された非公式な集会であるから、分野に偏りがあるかも知れないが、各国の進展状況を伺い知ることができたの

で、ここに集会の様態を記して、この分野の研究者の参考に資したいと思う次第である。以下の講演題目は私が仮につけた非公式なものである。

開催地のポーロニアは北イタリアの中世期の地方国家の首都で、第1図にみられる城壁はとりはらわれているが、旧市街はすべて煉瓦づくりで昔とあまり変わらないようである。

2. 発表と討論

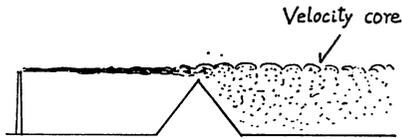
Stefan flow: O. Vittori, Laboratorio, FISBAT, Bologna, Italy

終戦直後、イタリアのペロナで開かれた国際雲物理学会議に故中谷先生は身代りに雪の結晶の成長の映画を発表され、このフィルムが会議のあと各国を巡回中に所在不明になってしまった。この時の事務をつかさどったのが Vittori 教授であった。教授は中谷の人工雪装置を使いこなした唯一の外人研究者(1967)であり、また熊井(1951)や板垣・肥沼(1962)の論文をよく引用する知



第1図 中世期のポーロニア。
FISBAT の研究所は中央の尖塔の左にある。

* Choji Magono, 北海道大学名誉教授。



第2図 山の風下側のダウンドラフトと velocity core (Hunt).

日家である。教授が最近力をいれているのは、成長中の雪結晶のエアロゾル粒子の捕捉率の高いのは Stefan flow によるのではないかと云う点である。今度の集会を招集したのも、このことを討論して欲しかったのではないかと思われるくらいである。

水滴が蒸発している場合（凝結は符号が逆）、水滴表面付近の蒸気圧は高い。しかし蒸気圧と乾燥空気（以下単に空気と称す）の分圧との総和は変わらないから、表面付近の空気の分圧は低いはずである。したがって外方から水滴表面にむかって空気の拡散流が考えられる。しかし水滴表面の付近に空気が蓄積されることはないから、今度は水滴表面から外に向かう空気の流れがなくてはならない。これが Stefan flow である。Stefan flow は空気の分圧の高い方向に流れるのであるから、拡散流ではなくて Hydrodynamic flow であるというのが教授の強調するところである。

エアロゾル粒子で充満された空間に暗視野照明をほどこすと真白に見える。水滴が蒸発している場合には、表面付近だけに粒子のない真黒な空間ができる。これは Stefan flow によりエアロゾル粒子が外側におしやられる結果生じたもので、発見者の名にちなんで Facy effect とよばれている。逆に、凝結中の水滴面付近では粒子を水表面に近づけるような Stefan flow があるはずである。前に教授が指摘したのは、私が Stefan flow と Facy effect を混同した点にある。

Prof. Vittori がとくに注目しているのは、過冷却微水滴が雪結晶の表面に近づくと水飽和と氷飽和蒸気圧の差によって急激に蒸発する際、微水滴は Stefan flow によってエアロゾル粒子を結晶表面におしやる効果が考えられ、その結果成長中の雪結晶のエアロゾル粒子の捕捉率が增大するはずであるということである。このことに後でもふれる。

Diffusion of plumes over obstacles: J.C.R. Hunt,
Dept. Appl. Mathem. and Theor. Physics, University of Cambridge, Cambridge, England

Dr. Hunt は議論好きで頭の回転も速く、若い時の

Mason を想いださせた。第2図のように、左から風が吹いている時に、障害物の風下の頂上付近の高さに収束によって風速最大の層 (velocity core) ができると考えられる。すると垂直シャーのために core の下方に乱流の発生することを計算で示し、これを支持するものとして煙突からの煙が山の風下側で急に下方にひろがって地上にまで達している写真をみせてくれた。もちろんこの現象には Froude number が関係する。

このほかに孤立峯の風下に上昇流の帯のことも示した。計算は難解でよく追従できなかったが、私達の実験結果を支持するので印象にのこった。

Trajectory of plumes under sea breeze: R.A. Pielke,
Dept. Environmental Science, University of Virginia, Charlottesville, Va., U.S.A.

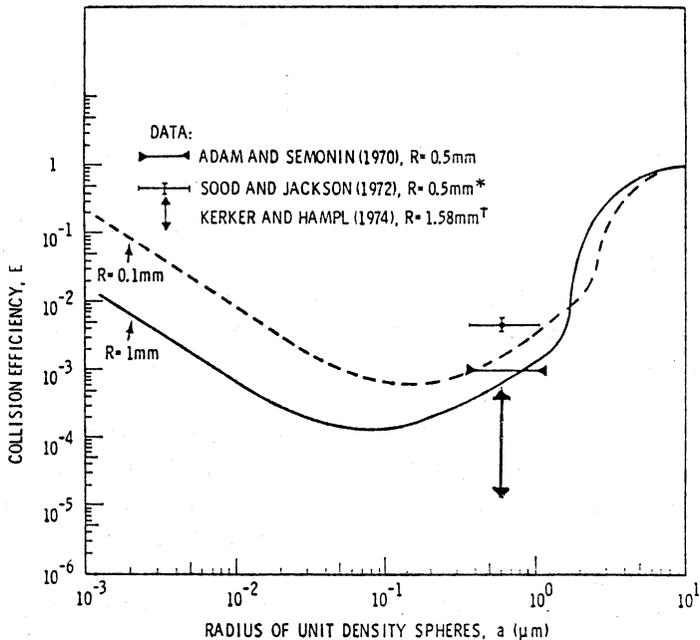
大西洋からバージニア州に海風が浸入する模様を、昼夜別に気温の垂直分布を仮定し、運動量・熱・質量および湿度が保存されるとして、厚さ10mごとに計算した結果を示した。その様子は、かつて気象庁の菊地博士のグループが関東平野を対象にして計算したものとそっくりであった。ただ煙突からのブリュームの行方を、垂直・水平成分において数時間も追跡したところが目新しく思えた。

Wet and dry removals of aerosol particles: W.G. Slinn, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, Richland, Wash., U.S.A.

Dr. Slinn は理論家であるが、扱っている内容が私達の観測に関係し、またあとで論文原稿を交換したので得るところが多かった。

博士はエアロゾル粒子の除去作用をしらべる場合、風塵・山火事および燃料ごとに粒径分布を考慮して計算した。また雨滴の捕捉率の計算には、雨滴の内部流（落下中の雨滴は周辺空気との摩擦のために外側上昇・中心下降の対流を生じる）まで考えているのに驚いた。

イ. Wet deposit: 雨滴によるサブミクロン粒子の捕捉は、両者の落下速度の差にもとづく衝突、いわゆる impaction よりも粒子の拡散などの影響が大きくなるので、捕捉率の計算が近年とくに盛んである。Dr. Slinn は粒子の拡散・interception (粒子と雨滴の半径の比に関係) および impaction (両者の落下速度の差に関係) を考慮して捕捉率 (雨滴の落下断面積に対する有効捕捉断面積の比) を計算した結果を披露した。第3図はその1例で、雨滴半径0.1と1mmについて計算したものである。いずれの場合にも粒子半径 0.1 μm 付近が最小となる。

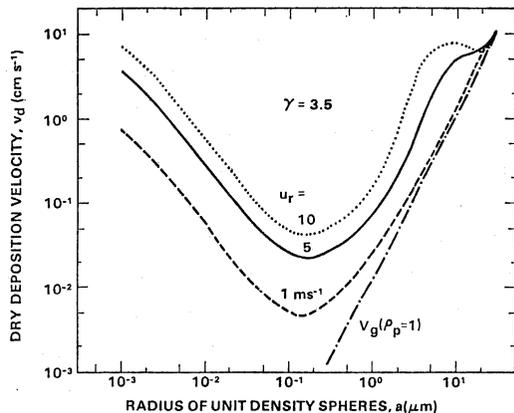


第3図 雨滴のエアロゾル粒子捕捉率 (Slinn).

過去の実験結果も比較のためにあげてあるが、よい一致を示しているといえよう。ただ Kerker & Hampl の実験値のほうが小さいのは雨滴表面のスリップによるものと解釈しているようである。

博士は理論家かと思っていたら次のような観測もおこなっている。煙突の風下の plume 中の $0.02 \sim 1 \mu\text{m}$ のサルフェイト粒子の空間濃度を航空機で測り、一方では plume を通して落下した雨滴のサルフェイト濃度を地上で測って雨滴の捕捉率を求めたところ、理論値よりも2桁大きかった。この辺の事情は米国でも共通していると面白かった。

ロ. Dry deposit: エアロゾル粒子は $1 \mu\text{m}$ 以下になると自由落下による地表面への輸送は問題にならないので、乱流と拡散輸送のほうが効いてくる。この場合、地表面の性質が問題になる。Dr. Slinn は海面のような平滑表面と、草地や森林のような群落 (canopy) への輸送速度を粒子半径の関数として計算した。その結果、海面の場合は波やしぶきは重要ではないが、水表面のスリップと、表面ちかくの薄層内におけるエアロゾル粒子の凝結が重要と指摘した。粒子が微水滴になれば落下速度が急激に増大するからである。dry deposit は風速の関数であり、また半径 $0.1 \mu\text{m}$ 付近で沈着速度が最小になり、 $100 \mu\text{m}$ のものに比べて4桁も小さい。



第4図 エアロゾル粒子の沈着速度 (Slinn).

canopy 層内の沈着速度の計算結果を、一般風の風速をパラメータとして第4図に示す。

γ は canopy 層内の風速の垂直分布に関する係数で、図の場合の3.5は代表的な状態を示すものと考えてよい。鎖線は自由落下のみの場合の沈着速度を表わす。半径 $0.1 \mu\text{m}$ 付近で最小になることは雨滴の捕捉率と共通しているが、更に微小になると霧粒に近い沈着速度になる点に注目したい。

Corrosion of marble surface by SO_2 gas: O. Vittori,
Laboratorio, FISBAT, Bologna, Italy

ポーロニヤの旧市街はすべての煉瓦作りであるが、内装に贅沢と思われるくらい大理石が使われている。近くに産地があって木材よりも安価なのが理由であろう。

Prof. Vittori は雲物理学のほかには表面腐蝕まで研究していたことは、実は今度まで気付かなかった

腐蝕した大理石の表面の垂直断面を顕微鏡でみると、直径数十ミクロンの硫化カルシウムの粒子が無数に見られる。また、この粒子が核となって針状結晶が内部に向かって発達している写真もみせてくれた。火力発電所から SO_2 ガスが排出されるようになったのは戦後であるから、上記の大理石の腐蝕は30年そこそこの間に発生したものと考えられる。 SO_2 ガスの腐蝕にはオゾンも関係しているのではないかとの意見も出たが、私にはよく判らなかつた。

Effect of fall velocity on the growth habit of snow crystals: J. Hallett, Desert Research Institute,
University of Nevada System, Reno, Nevada, U.S.A.

雪の結晶の成長習性を決める要因に気温・過飽和度・気圧・電場および Dislocation が考えられる。Dr. Hallett はこのほか結晶の落下速度が効いてくることを実験的に証明した。0°C 以下では氷と水の飽和蒸気圧の差は温度によって曲線的に変化するから、2つの水平な平行板のうち、上方を0°C で水飽和に保ち下方を一定温度の氷板にしておけば、ちょうど Squires の雲核測定装置と同様な原理で平板間の空間に氷に対し過飽和な部分を作ることができる。ここに雪の結晶をつるしておけば、よくコントロールされた気温と過飽和のもとで結晶を成長させることができる。Hallett は水平風洞内に上記の装置を作り、風速をかえて結晶習性の変化をみたところ、風速がますます中谷ダイアグラムが下方にずれることを発見した。

たとえば角板結晶を先づ作り、気温と過飽和度を同一に保ちながら風速を増加すると角板結晶の隅から樹枝状の突起のでてくるところを16ミリ映画で紹介した。これだけではエアロゾル粒子の輸送と何の関係もないが、あとで述べるように Vittori は成長中の雪の結晶の捕捉率の大きくなる機構を Hallett の風洞で解明する計画であった。

Collection efficiency of growing snow crystals: G.M. Hidy, Environmental Research & Technology Inc.,
Westlake Village, Ca., U.S.A.

天然の雪の結晶の単位質量あたりのエアロゾル粒子捕

捉率が雨滴にくらべて高い理由として次の機構をあげた。

- 1) Stefan flow を含む拡散
- 2) 雪の結晶の複雑な落下姿勢
- 3) 樹枝状雪のような多孔性
- 4) 結晶近辺における過冷却雲粒の蒸発

Dr. Hidy の注目するのは最後の要因である。前にも述べたが、暗視野で観測すると、雪の結晶に近づいた過冷却微水滴の表面近くにコロナ状のエアロゾル粒子の層 (Facy effect による) が見られた。これは微水滴の蒸発に際し Stefan flow によって粒子が結晶表面の方におしやられるからである。この結果、結晶のエアロゾル粒子の捕捉率は幾何学的な寸法で計算したよりも大きくなるはずである。微水滴が結晶とすれちがう時の時定数は 10^{-3}sec であり、蒸発の時定数は $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{sec}$ であるから、上記の考察は理論的に妥当であろう。

上のことを確かめるために前記の Hallett の装置で成長中の雪の結晶にエアロゾル粒子を捕捉させ、その際の過冷却微水滴の有無で捕捉率に差が生じるかどうかを試したいと計画を披露した。

Scavenging collection of aerosol particles and chemical impurities by snow crystals: C. Magono,
Hokkaido University, Japan

手稲山山頂と北大構内で天然雪を採取して付着しているエアロゾル粒子および不純物濃度の差を測定して雪結晶の捕捉率を見積り、これまでの計算値や実験値に近い値がえられた村上の報告を披露したところ、次の点に議論が集中した。

- 1) 雲底下の大気中の粒子や不純物濃度の見積りかたに問題がないか。
- 2) 雨滴と雪結晶とは形・比重や落下速度に大きな差があるので、両者の捕捉率を比較するにはその定義をはっきりすべきである。
- 3) 雲粒付雪結晶の捕捉率が大きいのは、雲粒蒸発の際の Stefan flow によるものではないか。

Cloud-radiation interaction: H. Grassl, Max-Planck
Institut F, Humburg, Germany

下層大気に多量のエアロゾル粒子が導入された場合の地表の Albedo の変化を、0.3~4.0 μm の短波長と 4.0 μm 以上の長波長にわけて計算した結果を発表した。専門がちがうのでよくは理解できなかったが結論は次のようであった。

- 1) 熱帯地方では粒子が核化して微水滴になって赤外

線を吸収するので水蒸気の影響が大きいが、極地方では粒子自体の光学的性質（複屈折率の imaginary part）が重要となる。

- 2) 撒乱の効果は雲の上表面付近にかぎられる。
- 3) 炭素粒子は吸収が大きいから重要である。

3. おわりに

Prof. Vittori と私を除けば、集って討論したのは中堅または新進気鋭の研究者であり、討論の結果を今後の研究に生かしてゆくことであろう。日本からはもっと若くて英語の達者な人が招待されたらよかったと思う。

討論で中谷ダイヤグラムと山本義一先生の業績がしばしば引用された。いずれも故人であるが、昔の人は偉か

ったことを外国であらためて思い知らされた感がした。

文 献

- Itagaki, K. and S. Koenuma, 1962: Altitude distribution of fallout contained in rain and snow, *J. Geophys. Res.*, **67**, 3927-3933.
- Kumai, M., 1951: Electron microscope study of snow-crystal nuclei, *J. Met.* **8**, 151-156.
- Magono, C., T. Endoh, F. Ueno, S. Kubota and M. Itasaka, 1979: Direct observations of aerosols attached to falling snow crystals, *Tellus*, **31**, 102-114.
- Vittori, O.A., 1967: Scavenging of atmospheric particles by ice crystals, *J. Atmos. Sci.*, **24**, 533-538.