

降水機構に関するシンポジウム

主題：力学と雲物理の間の問題について

日時 1958年5月16日 会場 気象研究所

昨年11月、日本気象学会75周年記念式典の行われた東京都江東区の清澄公園で雲物理関係をやっている数人の集りをもち本年の降水機構シンポジウムの内容をどうすべきかを相談した。そのときむづかしい問題であるが雲物理と力学との境界領域の問題を望む発言が多く、しかしあまりかけはなれた問題なので技術的に困難な点も多く具体的に話がまとまらず結局在京関係者に委されることになった。其後若干の推敲を経て、結局今年の3月末頃、降水研究会の集りで下記のようにきまった。

力学と雲物理の間の問題を掘りおこし検当することを主目的として、次の話題提供者（敬称略）：

力学からみた降水機構 岸保勘三郎
 雲物理からみた降水機構 高橋 喜彦
 司 会 者 伊東 彊自

このような企画は司会者伊東彊自氏の挨拶にもあったように「冒険の可能性」の大きいものかも知れないが、次の概要に見られるように非常に活発な討論が交され、内容の精密さはとも角初めての試みとして一応成功と云えるであろう。

内容については話題提供者の講演の部とそれに関する討論の部に分けてのせてある。何れも速記にもとづいて編集したもので紙数の関係上かなり極端な圧縮をせざるを得なかつた。速記は駒林誠、小野晃、其他（東大）をわづらわし、編集は藤原美幸、丸山晴久（気研）が当たった。

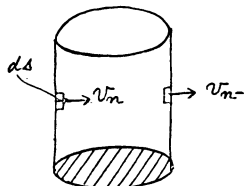
最後に紙面を借りて感想をのべさせてもらえば、今回のシンポジウムの内容そのものは或る意味で両方の分野からの啓蒙の範囲をでていないと思う。したがって今後さらに問題を深める討論が必要であろう。この種の企画は外国でも珍しに違いない。併し重要な問題であるから見捨てるわけには行かない。先づ第1に浮び上ってきた問題点について各分野に持ち帰ってもう一度討論し、更に適当な問題で協力し合う研究活動がのぞましいのではないだろうか？ このようなことにより問題が深まり研究の方向がより実際的になって行くだろうと思う（藤原美幸）。

I 雲物理からみた降水機構

高橋 喜彦*

(1) 雨量推定の問題

綜観気象における降水予報の根本理念は第1図に示すように空間への水蒸気の収支 $\sigma \rho v_n ds$ であると思う。



第1図

凝結高度以上ではこれは $\sigma_{sat} \rho v_n ds$ となるが実際はこれらの差が降水量となるのではなく、雲水量の収支も考えなければならない。雲水量を飽和混合比に比してネグれる

かどうか、この割合を第1表に示した。（雲水量は $1g/m^3$ と仮定）これから 900mb では比は小さいが 200mb では6~7倍で上空に行くくと無視できない。雲水量は測り難い量であるが Diem の data を第2表に示す。

第1表 雲水量 $1g/m^3$ を g/kg に直した値と飽和混合比 (g/kg) との比較

温度 気圧	30°	20°	10°	0°	-10°	-20°	-30°	-40°C
900 mb	0.96 (31)	0.93 (17)	0.90 (8.6)	0.88 (4.2)	0.84 (2.0)	0.81 (1.8)	0.78 (0.7)	
700		1.2 (22)	1.2 (11)	1.1 (5.5)	1.1 (2.6)	1.0 (2.3)	1.0 (0.9)	0.96 (0.36)
500			1.6 (16)	1.6 (7.7)	1.5 (3.6)	1.5 (3.3)	1.4 (1.2)	1.3 (0.50)
300					2.5 (6.1)	2.4 (5.4)	2.3 (2.1)	2.2 (0.83)
200						3.6 (8.2)	3.5 (3.1)	3.3 (1.2)
100								6.7 (2.5)

(2) 高層観測の精度の問題

雲物理では $0.1g/m^3$ (700mb で $0.1g/kg$ に相当) の精度がほしいが、これに必要な気圧、気温、湿度の精度は第3表のように厳しいものになる。

* 気象研究所

第 2 表

雲形	雲粒の直径 (μ)			雲水量 (g/m ³)	個数 (cm ⁻³)
	最小	平均	最大		
Sc	2	7.9	24	0.09	350
Cu	2	8.5	20	0.32	1000
As	2	10.6	30	0.28	450
St	2	12.9	42	0.29	260
Ns	2	13.2	42	0.40	330
Cu	3	14.5	40	0.87	545

第 3 表 断然図の精度

ただし、雲水量の精度を 0.1g/m³ (700ub) の高さで約 0.1g/kg, 視程約 300m に相当) 以下とする。

	10°C	0°C	-10°C
気圧	7	12	15mb
温度	0.15	0.24	0.5°C
湿度	1	2	4%

第 4 表 風速 10m/sec で雨滴が吹き流される距離 (km)

	球直径, 落下速度 (mm) (m/sec)	落下の高さ			
		1 km	2 km	3 km	5 km
細雨	0.5 2	5	10	15	25
並雨	弱 1 4	2.5	5	7.5	12.5
	強 2 6.5	1.7	3.3	5	8.3
雷雨	3 8	1.25	2.5	3.8	6.3

(3) 雨滴の吹流れの問題

雷雨では 5 km から落下するとすると 10m/s の風で 6.3km, 細雨は 1~2 km 高度から 5~10km 流される (第 4 表)。雨滴は上層では小さいからもっと流されるであろう。地形性の雨が山の風下に降るのもこのためである。

(4) 雨滴の蒸発の問題

大粒では影響は小さいが粒が小さいと大きい。普通の細雨は高度が低いので重要でないが雲から吹出された粒には重要となる。

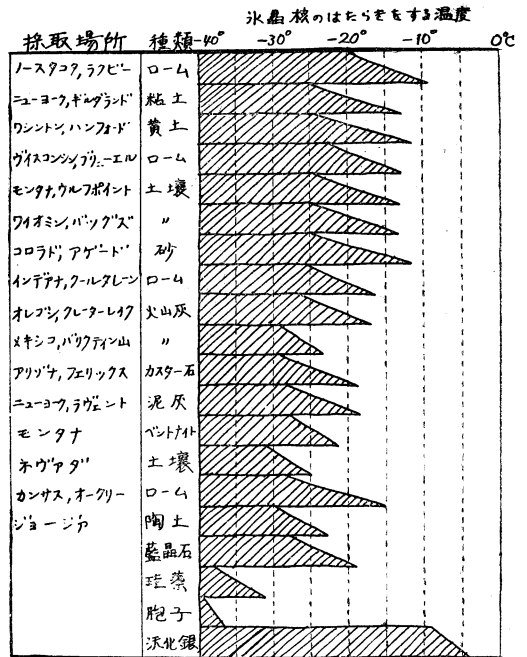
(5) 雲の発生の問題

0°C 以上では核が十分存在している大気中では 0.5% 以上の過飽和にならない。しかし 0°C~-15°C では大きな過飽和を生じ易い。(塩沢で測定した結果 10% 位のこともあった) 併し凝結高度になおすと 5% に対して -10°C で 0.7°C, 20°C で 1.1°C 位しか変わらないので、雲の発生高度にはそれほどきかない。

(6) 氷晶核の問題

降雨に関する Bergeron の理論は戦後実験的に確かめ

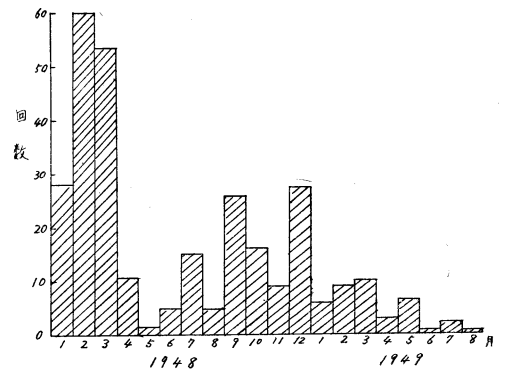
1958年 9 月



V. Schaefer による

第 2 図

られた。シェーファアの地表物質の氷晶核としての作用温度を測った図を第 2 図に示す。太い所からは全部核となる意味である。自然大気中では普通 -15~-20°C で氷晶ができるといわれている。氷晶が多すぎると雨がかわって降りにくい。核の数については Mt. Washington で行った測定結果を第 3 図に示す。これは -10°C~-20°C で 500~10000/l になった回数をプロットしてある。これは月によっても年によっても異なっている。彼は核は地上から立ち昇ると称している。Bowen は宇宙塵説を唱



第 3 図 Washington 山上で氷晶を特に多く観測した回数 (500~10,000/l) cold box の温度 = 10~-20°C (V. Schaefer による)

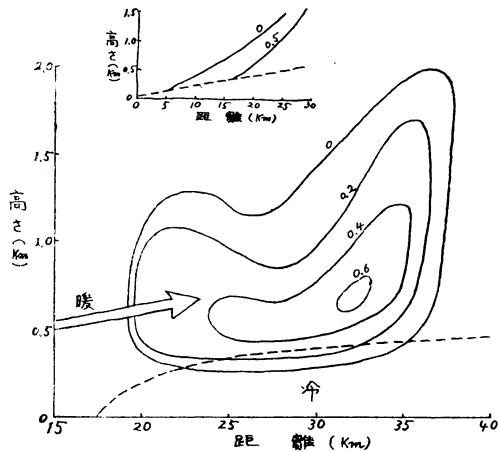
え、また磯野ほかの火山灰説もあり、混傾としている。今回の磯野他の中国の黄砂が原因であるという説もある。

(7) 日射の問題

雲物理では雲の面が日射をうけたり、夜間放射する効果を見逃すことができない。ラングミュアの人工降雨実験では氷晶化の潜熱のため 0.8°C 上昇する計算になるが、これではかなりの対流がおこるので、雨滴による熱の移動なども無視できないことである。昭和10年頃、羽田で雲が二重の時に細雨が降って一重のときは止むという話をきいたことがあるが、これなども力学的な条件の変化にむすびつけるよりは、日射にむすびつけた方がよさそうである。

(8) 乱流による混合の問題

自然大気が実験室と根本的にちがう一つは乱流にある。昭和10年4月の学会で、雲厚、傾斜と断熱上昇から計算した雨量が実測の 1/2 になるので水平に運ばれるときも乱流で冷却すると考えて議論の種となったことがあるが、とくに角乱流混合は重要である。第4図に簡単な



第4図 不連続面にできる雲の雲水量 (ただし乾燥空気 1 kg 中の水量を g で表わす) の分布の計算例。下が乱流混合を考えた計算したもの、上は考えずに計算したもの。

混合係数を仮定して計算した滑界面にできた雲の雲水量分布の1例を示す。同図に断熱過程とした雲水量分布図も示した。乱流を考えた方がより自然な形をしており、寒気側にも雲が入っている。実際にも上層と下層の向きが反対のことがよくみられる。雲水量自身もより尤もらしい値になっている。シノプティック関係者も乱流混合を取り入れる必要があろう。

討 論

真鍋 (東大) : Warner によると気塊をあげて水をおとさないとしたときに貯えられる筈の雲水量にくらべると実際のものはその 3~4 割になっているし、雲低で雲量10でも上方では雲は所々に立っているから空間で積分すると雲水量は減り、水蒸気との比はもっと小さいのではないかと。またある領域から出て行く水分の flux を考えると水蒸気が出るものと液体水分が出るものとの割合は?

高橋 (喜) : 広く平均すれば小さくなるが、個々の雲に着目すると大きい。雲水量は測りにくく、実際にはもっと大きいと思われる。

高橋 (浩)(気研) : 積乱雲では 500~300mbまで上昇させたときの混合比の変化と雲水量の変化をみると混合比の変化の方が大きいので雨量にたいしては雲水量は余りきかないことになる。

荒川 (気研) : 高橋氏が第1と第3にあげたことは水の形となったものの連続の式をもっと厳密に取扱ってこれということだが、現在のところでは、重々承知の上で目をつむって予報をしている。天気予報では第一近似が当らなくて困っており、第二近似まで手がでない。

磯野 (東大) : 第5図の計算はどうやったのか? entrainment の扱い、また乱流混合の雲水量と断熱的に気塊を上げた時の雲水量の比は?

高橋 (喜) : 簡単な計算である。横からの entrainment は入っていない。断熱上昇の方が雲水量はずっと大きい。

都田 (東大) : 長年の平均をとると全世界で雨量の多い日と宇宙塵のあった日とが一致するという Bowen の研究にわれわれはショックを受けたが? また宇宙塵以外に雨量を決定的に支配する雲物理的因子は何か。雲の中の液体水分は「ところ天式」に次々降ってくるので、結局降水量は前後の混合比の差でまわり雲水量の影響は小さいのではないかと。また二層の雲からの降水は氷晶などが上の雲から落下したのではないかと。

高橋 (喜) : 二重構造にも色々あるが、この場合は上の雲は低く氷晶の落下は考えられない。

神山 (気研) : シノプティックに考えて当然降る筈なのに実際は降らないことのあるのはなぜかという問題もある。

真鍋 (東大) : どの種の雲の雲低がどの位の高さの時雲水量はどの位になるか、断熱的に水分を保存させて上

- 昇させた場合との比の表など作ってくれると有難い。
- 荒井 (研修所) : 地面附近で 0°C をいくらも下らないとき霜ができる。この霜の形成の氷晶核は何か。
- 磯野 (東大) : 凝結でも凍結でも大気中ではできにくいので核が必要である。物体の上ではいわゆる氷晶核がなくても時間が経てば霜ができる。凹凸や熱の伝導もあり事情は異ってくる。
- 孫野 (北大) : 氷晶核はどの位あればよいのか、降水に関係があるのか。
- 高橋 (喜) : Schaefer の場合は降雨との関係はでない。
- 孫野 (北大) : 関係がなければ、核があれば氷晶核ができるという話だけでシノプティックには役立つない。
- 磯野 (東大) : 氷晶核の数と降水との密接な関係はあると思うが、まだ大気中の核数の変動の測定が殆どない。W. M. O で核の委員会がつくれ、全世界にわたり氷晶核の観測をする方法を決定することになっている。私もそのメンバーであるので、意見があったら知らせて頂きたい。
- 岸保 (気研) : 世界的スケールとは？
- 磯野 : 1000 マイルに1つ程の観測点が考えられているが、今後検討して決める。
- 岸保 (気研) : 降雨の大勢をきめるのは上昇気流の大小でなく宇宙塵の如き氷晶核の多少なのか？ 取束は宇宙塵に関係なくきまるのに、Bowen の研究では雨量とよく対応しているのはなぜか。
- 高橋 (喜) : 宇宙塵は雨の降るか降らないかをきめるのでなく、雨量をきめるのだ。
- 孫野 (北大) : 宇宙塵はこちらでは問題にしていない。
- 荒川 (気研) : Bowen は私の「江戸の雪」という論文が Bowen の日とよく一致しているといっている。私は Bowen の結果を信用していない。
- 磯野 (東大) : Bowen から雪の中から宇宙塵を出すよう頼まれたが仲々困難だ。Schaefer は cold box の実験で否定的な結果を出しているが、これは磁石で集められたものであり、他に石質隕石がありこの方が核になる可能性がある。雨の降るには力学的な条件が必要だが、降雨はそれのみでなく核の数によっても支配されるものと思う。また凝結昇華によって出た熱がフィードバックして一部が大規模なパターンにきく可能性がある。
- 丸山 (気研) : Bowen の宇宙塵が氷晶核になるかどうかはわかっていないが、Bigg がオーストラリアでは巻雲の出現頻度が宇宙塵の予想される日に多いといっ

- ている。人工降雨の実験の結果や火山活動が雨量に影響するという磯野氏らの研究などから氷晶核の存在が降水に影響することはわかっている。ただこの間の量的な関係を求めることが今後の雲物理の大きな問題だ。
- 高橋 (浩) : 前に宇宙塵と天候との関係を調べたことがある。宇宙塵は核の働き以外に放射などを通して大循環に影響をあたえるのではないかと思う。
- 矢野 (気研) : 南半球のように陸地の少いところでは宇宙塵が核として重要であるが、北半球では大陸に補給源があるから余り重要でないだろう。
- 駒林 (東大) : 上昇気流、水蒸気、核はすべて等しく重要である。液体含水量は水蒸気量に比し確かに小さいが降る水分は必ず一度液体含水量として貯えられてから落ちる。したがって重要である。羽田のデータで数 mm/hr の雨は、2000~3000m の厚さの層状雲から降ることが多い。この厚さの雲からこの程度の雨が降るには氷晶核が必要である。雲も厚くないし液体含水量も余り大きくないから雨滴の数は氷晶核の数に比例するから、核が充分でないうちは雨量は核の数に比例する。現在の雨量予報の方式ではうまくいって雲域予報どまりである。一方積乱雲では含水量 4 g/m^3 程度をこえ上昇距離の長い場合は混合比の変化だけ考えて十分であり、核がなくとも雨滴は多数生産される。
- 高橋 (喜) : 雲粒は衝突併合により成長するが乱流があれば落下速度に差がなくとも大きくなりうる。氷晶核にばかり固執する必要はない。
- 藤原 (美) (気研) : Warner の測定は沪紙法を用いており誤差も捕捉率も問題である。雲水量はもっと大きいかも知れないし、乱流については East のネガティブの結果の計算があるので討論は核に絞られる。
- 高橋 (喜) : 根室の霧観測の際、氷晶核の考えられない細雨が降った。
- 駒林 (東大) : 高度から氷晶のない過程は確かだが塩素量、エアゾル、風向分布からみて乱流か海塩核かの断定はできない。
- 荒川 (秀) (気研) : 宇宙塵論争はこの位にしたい。ところで isotope などを流して保存量を探求したらよい。

II 力学からみた降水機構

岸保 勘三郎*

日本の N. P. 雨量予報のねらいと、核の問題以前の力学の予報の困難性について述べる。特に数値予報の立場

* 気象研究所