

- 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  $0^{\circ}\text{C}$  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。
- 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はなく、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  $4\text{ g/m}^3$  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

から試みている雨の予報方式を述べる。まず気塊の水蒸気は飽和に達すれば凝結し、それが直ちに雨となる。また上昇気流があれば断熱図上で気塊は湿潤断熱線に沿って上昇すると仮定する。すなわち、

$$dq^*/dt = -m = -F\omega.$$

ただし  $m$ : 単位時間の水蒸気の凝結量,  $F$ : 断熱図上で定まる常数,  $q^*$ =飽和混合比,  $\omega = dp/dt \simeq -\rho gw$ . 凝結のないときは  $dq^*/dt = 0$  で,  $\omega$  を求めるには渦度方程式と熱エネルギーの方程式から  $\omega$  だけの方程式を作り, 計算機にかけて3次元的に解く.  $\omega$  を桁数によって分類してみると,

- (1)  $\omega \sim 1 \text{ mb/hr}$  ( $w \sim 1 \text{ cm/s}$ )

このときは地衡風近似が使え, 静力学の式

$$\rho g = -\partial p / \partial z \text{ が成立つ.}$$

- (2)  $\omega \sim 10 \text{ mb/hr}$  ( $w \sim 10 \text{ cm/s}$ )

これ位になると非地衡風が問題となるが,

$$\rho g = -\partial p / \partial z \text{ は使える.}$$

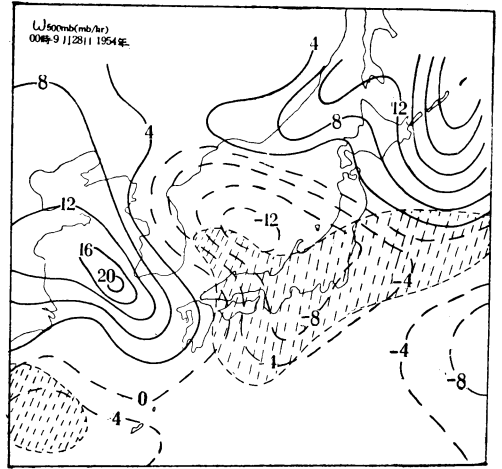
- (3)  $\omega \sim 100 \text{ mb/hr}$  ( $w \sim 100 \text{ cm/s}$ )

非地衡風が重要となり, 垂直加速度を考えなければならない,  $dw/dt + \rho g = -\partial p / \partial z$ .

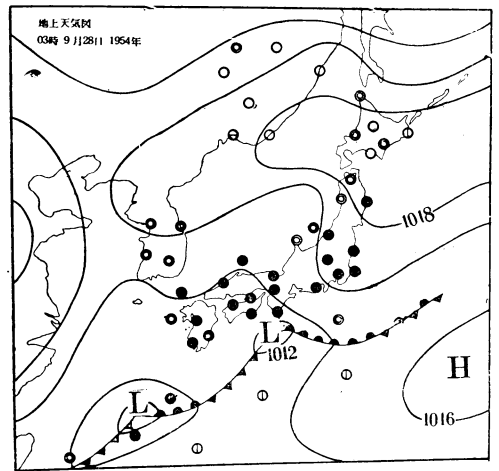
(1) の場合は, 大規模なトラフ, リッジの現象に対応する. 即ち波長  $L \sim 10^3 \text{ km}$ , 風速  $\sim U \sim 10 \text{ m/s}$   $\therefore$  渦度  $\zeta \sim U/L \sim 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ ,  $\text{div} \mathbf{V} \sim 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$  位で風の場合から直接求めることは極めて困難である. 従って渦度の式, 熱力学の式\*1 を用いて地衡風近似として  $\omega$  を求めている.  $w \sim \text{div} \mathbf{V} dz$  から対流圏の高さを  $10 \text{ km}$  とすれば  $w \sim 1 \text{ cm/s}$ . これは  $1 \text{ mm/hr}$  位の雨に相当する.  $10 \text{ mm/hr}$  の強さになると  $\text{div} \mathbf{V} \sim 10^{-5} \text{ s}$  位になり地衡風近似が使えなくなる. 対流例えば積乱雲中の上昇速度は  $10^3 \sim 10^2 \text{ cm/sec}$  の桁で静力学の式は使えない. 従ってこの場合には現在用いている力学的方法には限界がある.

日本ではじめて数値予報方式による雨の予報が駒林・都田・真鍋・相原によって試みられ, 斎藤・他によって改良されている. これから  $700 \text{ mb}$ ,  $500 \text{ mb}$  の  $\omega$  の計算例を引用する (第1図). 斜線で示した凝結域 ( $\Delta t$  時間後に飽和混合比に達した領域) と実際の雲の分布はよく一致している.

ところで, 大規模な長波による降雨を普通力学的原因による雨とっている. この他に——地形性降水, 前線性降水, 摩擦による降水——がある. 地表摩擦層では  $w \sim \zeta DF(\psi)$  ( $D$ : 摩擦高度,  $F(\psi)$  は吹込み角  $\psi$  の函数) で桁は小さい. 地形性降雨はすでに或る程度予報方式に組み入れられている. 前線性降水 (本質的には摩擦



第1図 500mb 面上での  $\omega = -\frac{dp}{dt} \simeq -\rho gw$  ( $\omega < 0$  は上昇域  $\omega > 0$  は下降域) の分布. 単位は  $\text{mb/hr}$ , 斜線域は3時間内に飽和する範囲. (Saito による)



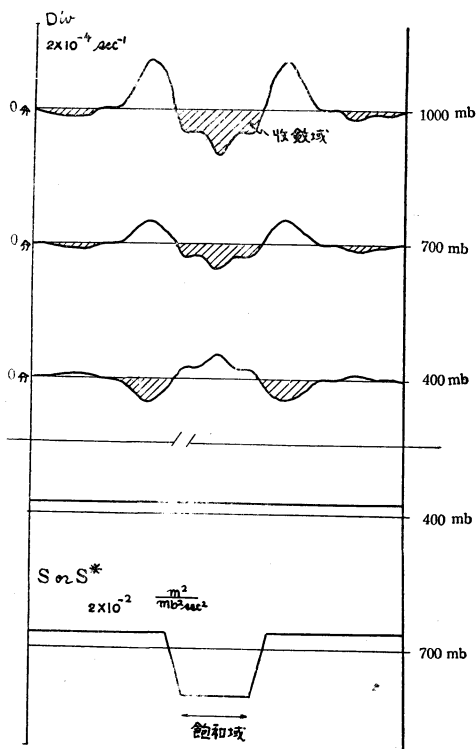
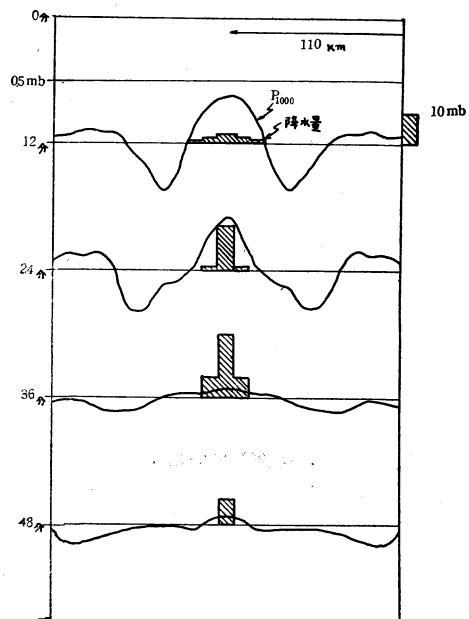
第2図 1954年9月28日03時の地上天気図. 黒丸は降雨, 二重丸は曇を示す.

による降水) は主としてソ連で研究されている\*2.

今回, (2) の段階 (静力学の式が使え  $\text{div} \mathbf{V} \sim 10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  の程度) の現象について計算したのでその結

\*1 凝結が初まると  $\frac{\Delta \theta_e}{\theta_e} = \frac{\Delta \theta}{\theta} + \frac{L}{c_p T} \Delta q^* = 0$  したがって  $q^*$  は変化するが  $1 \text{ mm/hr}$  位の雨ではこれを無視し  $\Delta \theta / \theta = 0$  としている.  $10 \text{ mm/h}$  位になると無視できない.

\*2 これらの分類は便宜的なもので, いずれは統一したよび方がつくられるべきだと思う.



第 3 図

果をのべる。この現象は内部重力波に対応し、1 hour 位の life time をもつ。また12時間位の週期をもつ転向力が省略できるので運動方程式\*3は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial y}$$

$$\text{div} \mathbf{V} = -\frac{\partial \omega}{\partial p}, \quad \frac{d\theta_e}{dt} = 0 \quad \text{及び} \quad q^*, \quad q \quad \text{に関する式.}$$

初期条件として上昇域、下降域のモデルを与え、地上気圧を flat に、計算は1000, 700, 400, 100mb で4層に分けて行ったところ図示するような雨域が現われ 1 hr 位で解消している。これには適当な拡散の項  $A \Delta^2 u$  を加えた。これを入れないと中心気圧がどんどん下り切ってしまう。A は仮に  $10^6 \text{CGS}$  を与えたが乱流に関する information がほしい。

### 討 論

高橋 (喜)(気研) : 雲物理では簡単なモデルを仮定しているが力学関係者に力学に基いた場の研究を望む。講演会場が別れているため交流が望ましい。

岸保 (気研) : 高橋氏の前線モデルはア priori ではなく必然的に導かれたのか? 水平垂直の拡散度は?

高橋 (喜) : 平均流の輸送と乱流の拡散を加えたものを適当に仮定した。天気予報のスケールでは水平の方が大きくその比は  $1/10$  位ではないか?

われわれには熱力学的状態を入れた状態がほしい。たとえば対流の中では大粒は早く落ち、小粒は吹き上げられてしまうものもできる。レーダーでは何か手掛りがかめないか?

今井 (気研) : レーダーでみえるのは塊で個々の粒ではないから空気の運動をだすのはむずかしい。

樋口 (北大) : 金属箔を撒いて上昇流をレーダーで調べることはできないか?

今井 : オーストラリアで実験例がある。可能であろう。

岸保 : 力学関係では雲物理を軽視するつもりはないがその前に力学としての足場を作らなければならない。現在かなりギャップがあるので誰かに埋めて欲しい。

藤原 (美) : 力学、雲物理間には中間のスケールのモデルの問題がある。たとえば積雲の模型を描いて雨量予報を論ずることはできない。レーダー観測によると数 10km 位の降雨域も小さいセルの特殊な配列と移動か

\*3 計算機の能力の関係で移流の項を省略した。

なる。個々のセルは対流不安定の解消で発生し、セルの配列は周囲の安定度に影響しているに違いない。また中には飛び離れて強いセル（数 10 mm/hr 以上の雨）がの突然現われる。降水による cold wake が self-triggering して氷晶化高度に達したのか？ 上層に発散の場が加熱したためか？ また氷晶核の存否などわからない。要するに熱の feed back する構造と垂直安定度が問題である。岸保方式で初期条件と安定度のとり方は？

岸保：安定度は最初

$$s = \frac{\partial^2 \phi}{\partial p^2} + \frac{1}{\Gamma p} \frac{\partial \phi}{\partial p} + \frac{L\alpha}{C_p T} \cdot q^*$$

で与えたが途中で変化した。空気塊を上昇させると  $q^*$  が減少し、等圧面を上下する。この辺のところから物理的な意味を考えてゆきたい。従来の対流不安定は particle dynamics 的な考えなので不適当と思う。

高橋（浩）（気研）：雷雨のような場合ではやはり parcel 法でよい。

藤原（美）：雨量自記紙でも対流性降雨のときは10分位の雨が集合しているのがわかる。

岸保：Buble は数分、内部重力波は1時間位、慣性波は更に長い周期をもつ。ここでは重力波を取扱った。熱の feed back の仕方や保存量について information がほしい。

磯野（東大）：今までの降雨の数値予報では潜在不安定式は対流不安定の効果が入っていない。また地形を考慮した場合も、これによる直接の上昇気流のみを取扱っているが、この際実際に重要なのは上述の不安定に原因する降雨である。さきほどのお話のように降雨量を力学的、地形性、不安定による降雨とに取扱うことはできないのではないか。

斎藤（東管）：N.P. の雨量予報はまだ未だ不完全で対流不安定は入っていない。実際に  $q^*$  が当てはまるかは疑問である。レーダーを手掛りに雲物理との接触を深めたい。

増田（気研）：降雨に核が必要ならば 1 mm/hr に何個位の核が必要か？ また日本附近の平均濃度は？

駒林：高橋（喜）氏、東大の測定例では 0.1~数個/ℓ で変化は大きい。上層まで海洋性気団のときは極めて少く、黄河、蒙古、特に風塵を経験した空気がきたときは最も多い。必要濃度を計算してみると 1~10/ℓ 位で損失を考えれば不足勝ちといえる。雨量 1 mm 位に対して 2.5km 厚の層状雲では 1個/ℓ 見当の核が必要である。

増田：特殊な例であるが、核の不足する筈の関東の乙字型気圧配置で雨が降るのは何故か？

駒林：不足しているとは potential maximum に対してで、不足分濃度が60%であれば凝結量の40%が降ることになる。

磯野（東大）：氷晶核数の測定は出発したばかりで確実な数は今後の問題である。

高橋（喜）：人工降雨でも 1個/ℓ を目標とした。しかしこれは雨の開始に対してで、降り出した後は一般条件の方が大切となろう。

藤原（美）：温暖前面の持続性降雪でも発生層には小さい対流セルがみられる。核数と雨量との関係は複雑で蒸発 entrainment を考慮に入れなければ答が出ないのではないか。

松野（東大）：N.P. でだしている  $\omega$  だけで降っているとは思っていない。（斎藤氏と同意見）

鍋島（予報）：予報者には核の分布図がほしい。

大内（秋田大）：力学、雲物理はもっと低い要求で接触した方がよい。核の移動については流跡線の引き方が問題である。

内海（仙台管）：強い雨のふる旺盛な上昇気流では自然に氷晶ができる。この数とこれと雨量との関係が知りたい。

新田（大阪管）：飛行機を借りて移動観測班を編成し核を含めた総合観測をするとうい。

内海：未知のデータが多いのであるから研究グループが立案して降雨機構プロジェクトを持ったらよい。

大喜多（北学大）：米英の如くもっと雲の観測をやるべきである。

小林（頌）（北大）：核直ちに雪雨の討論がなされているが、途中の過程が大切である。力学的条件が熟して核がトリガーとなるならば、その過程をもっと研究すべきである。

武田（九大）：力学にも雲物理にも仮定がある。実際の状態を知るためレーダーの活用を望む。

今井：レーダーは雨滴がみえるだけで解釈にはモデルがいる。small scale の解析も進めてほしい。

藤原（滋）（予報）：PPI では立体構造がわからないので RHI の活用をのぞむ。

清水（測器）：レーダー関係者としてレーダーへの期待の大きいことがわかった。

孫野（北大）：今度、共同のシンポジウムには更にスケールの小さいサブシノプティックの辺でやってほしい。

本稿は主して駒林誠、小野晃（東大）及び藤原美幸・丸山晴久（気研）が記録と編集を担当いたしました。紙面の都合でかなりの圧縮を余儀なされましたことをお断り致します。