

豪雨に関する Workshop について*

住 明 正**

“集中豪雨”については、社会的関心も高く、又、気象学的興味も尽きない。それ故に、数多くの研究がなされて來たし、又、現在もなされつつある。しかしながら観測手段も、データ処理手段も飛躍的に増えた今でも、龙大なデータ（観測事実）と、龙大なプリント用紙（モデルの結果あるいはドットプリンターによる図など）を前にして、未だそれらを綜合し、将来を見通した“集中豪雨——メソ・スケールの現象”についての概念を確立し得ているとはいひ難い。

そこで、このような概念と研究の将来を考える意図の下に、今までに得られた知識を整理し、「豪雨の予測」という点で、「何をなすべきか」を議論する目的で、東大洋研浅井富雄教授の主催（昭和61年6月2～4日於海洋研）で、標記のワークショップを行った。本来ならば、各参加者に、要約を書いていただく事が望ましいのだが、時間・紙数の制約もあり、各 session の座長によりまとめをお願いした。心良く引き受けいただいた各氏に心からお礼申し上げる。なお、参考のためにプログラムを付録に掲載するので convenor としての筆者の意図を読みとっていただきたい。

付録

プログラム

I. Review—我々は何を知っており、何を知らないか？ 梅雨末期特別観測で分かった事、やり残した事

座長：二宮洸三

I-1. 梅雨前線帶豪雨のメソスケール的様相

二宮洸三・秋山孝子

I-2. 中間規模擾乱に関連したこれまでの理論的研究

時岡達志

II. その後の観測的研究からわかったこと

座長：武田喬男

II-1. 自然災害特別研究の計画研究（レーダー観測

* On “the Workshop on Severe Rainfall”

** Akimasa. Sumi, 東京大学理学部。

を中心とした集中豪雨の研究） 武田喬男

補足：瀬古勝基

II-2. 発達した対流雲のレーダー・エコーの挙動 早川誠而

II-3. 降雪用レーダーの豪雨観測への活用 遠藤辰雄

II-4. 気研のドップラー・レーダーを用いた観測 植原 均

II-5. 北海道胆振地方オロフレ山系南東斜面の局地的大雨 菊地勝弘

II-6. Discussion

（観測的研究から少なくとも事実として豪雨のメカニズム及び予測に関して必要な Process を listup すること、即ち豪雨の予測をするためには、最低限何が必要かを明確にすることを主目標とする）

III. Predictability—豪雨は予測できるのか？

座長：浅井富雄

III-1. 長崎豪雨等の数値予報—長崎豪雨等の数値予報 二宮洸三・栗原和夫

III-2. 長崎豪雨の実態 浅井富雄

III-3. 熱を入れたダイナミック・イニシャリゼーションによる短時間雨量予想 上野 充・工藤達也

III-4. Discussion 長崎豪雨は予測できたのであるか？

Informal Planning Meeting

—今後4年間の研究計画について—

IV. 予測のためのモデルには何が必要か？

座長：松野太郎

IV-1. 気象研究所のメソ・モデルからの教訓 吉住禎夫

IV-2. パラメタリゼーションを用いた台風モデル 山岬正紀

IV-3. Water Accumulation Processes and Mech-

anisms of Long-lasting Rainfall in Warm
Clouds
—Its Implication to Torrential Rain—
高橋 効

- IV-4. 湿潤対流の自発的組織化に関する数値実験
中島健介
IV-5. 積乱雲群の振舞いに関する数値モデリングの
雲物理学のパラメタリゼーション 武田喬男

I. 梅雨前線豪雨について何が分かったか？

I. 1 梅雨前線豪雨の解析的研究の review

二宮洸三（気象庁・数値予報課）
秋山孝子（気象研・予報研究部）

梅雨末期豪雨研究観測等に基づく1970年代の成果は気象研究ノート138号(Ninomiya *et al.*, 1980)に要約されているが、その後の解析(Ninomiya, Ikawa and Akiyama, 1981; Ninomiya, 1983; Akiyama, 1984 a and b; Ninomiya, 1984; Ninomiya and Muraki, 1986), 数値実験(Ninomiya, 1980; Ninomiya and Tatsumi, 1980 and 1981; Ninomiya, Koga, Yamagishi and Tatsumi, 1984)等の成果を加えて報告された。下記の事象が特に強調された；

(1) 多種スケールの複合現象としての梅雨前線豪雨
大規模循環(アジアモンスーン, 太平洋亜熱帯高気圧, 大陸～海洋分布, アリューシャン低気圧～梅雨トラフなど), 総観規模現象, meso- α , β , γ スケール現象の interaction.

(2) Large-scale 的梅雨前線の特徴.

5日平均場でみた梅雨前線の構造, frontogenesis, 特に下層ジェット.

(3) 梅雨前線の meso- α -scale 構造

meso- α -scale 低気圧(中間規模低気圧)の構造と発達過程, 前線の構造と発達の関係

(4) meso- α -scale 低気圧と降水

低気圧の降水の meso- β , $-\gamma$ scale 的微細構造

(5) Synoptic- 又は meso- α -scale 摘乱と対流不安定.

3次元的移流の differential advection による対流不安定の生成, 豪雨発生と不安定の解消

(6) 対流現象.

豪雨(対流集団)の周囲への作用, 対流性降水強度の統計的事実など

また解析的研究を発展させるためには新しい観測機器の展開が不可欠であるが, 一面では新しいアイデアで既存のデータを活用する必要があること, 理論や数値実験の仮定(初期条件)や結果を観測・解析事実に基づいて評価することの重要性も主張された。

下層ジェットの機構, 多スケール現象間の相互作用と豪雨との因果関係, meso- α , $-\beta$, $-\gamma$ 間の相互作用, などについては参加者から多くの見解が出された。

I. 2 梅雨前線上での meso- α -scale 低気圧の機構

時岡達志(気象研・予報研究部)

この問題に関する不安定理論については, 時岡(1974; 気象庁技術報告86号, 第7章)の総合報告があるが, それ以後の研究, 数値実験の結果の紹介を加えた review がなされた。

これまでのいくつかの不安定理論の内容が系統的に review された。梅雨前線帶の低気圧は, 湿潤中立成層中, または潜熱放出による加熱の影響を受けた傾圧不安定で説明される可能性のあることが示された。

これについては, 現象の南北スケールは何によって決定されるか? 各スケール間の相互作用が重要と思われる現象に, これまでの不安定理論の方法論がどの程度有効か? などの議論が出された。

meso- α -scale 低気圧の数値シミュレーションとしては, その先駆となった Nitta and Ogura(1972)の数値実験の結果を考察し, また Ninomiya and Tatsumi(1980)の予報実験の結果がかなり詳しく紹介された。これは6層 77 km 格子(30°N)モデルによる梅雨前線 meso- α -scale cloud cluster が低気圧に発達する過程の予報実験であり, 発達の各ステージにおける実験結果のちがいに対して, 発達機構に関しての見解が述べられた。

II. レーダー観測を中心とした研究*

武田喬男(名大水圏科学研究所)

このセッションは, 主にレーダー観測による集中豪雨の研究の成果および問題点が話題の中心であった。豪雨のメカニズムと予測を考える際, 豪雨をもたらす大気じょう乱の研究の立場から考える場合と, 豪雨が狭い地域に集中することを研究する立場から考える場合とで, 考え方はやや異なる。豪雨災害の予測, 短時間の降雨予測などには当然後者の立場の研究が必要であり, レーダー観測を中心とする集中豪雨の研究もまた後者の立場の研究であることが多い。58, 59, 60年度の3年間に, 文部

省科研費自然災害科学特別研究の計画研究として北大、名大、九大が協力して行った『降雨災害をもたらす豪雨の集中度に関する研究』もまた、そうである。ここでは、レーダー観測に関する6つの話題について、詳細を述べることはせず、発表および討論を通じて印象づけられたことを、セッションの座長としてまとめることにする。

日本の典型的な豪雨は meso- β の空間スケール (20~200 km) の現象として起こることが多いが、その基本的要素は meso- γ スケール (2~20 km) の積乱雲である。降雨をもたらす積乱雲の3次元的構造はレーダー、ドップラーレーダーなどにより観測可能であり、3次元数値モデルリングによりそのふるまいのメカニズムを調べることも可能である。それらの結果は、明らかに meso- γ スケールとしての積乱雲に “dynamics” があることを示している。一方、積乱雲群はより大きな大気じょう乱の中の一部分としてしばしば起こることが指摘されている。セッション I で述べられた梅雨前線の中間規模じょう乱はそのようなじょう乱の代表的なものである。その空間スケールは meso- α (200~2000 km) に対応し、3次元的構造は通常のゾンデ観測網によりある程度観測され、一方、降雨現象を単純化した数値モデルリングによるふるまいを調べることも可能である。それらの研究成果によると、中間規模じょう乱もまたそれ自身の “dynamics” をもっていると考えても良さそうである。

meso- α の中間規模じょう乱、meso- γ の積乱雲と比べて、meso- β スケールとしての積乱雲群についてはそれが積乱雲の単なる集まりなのか、それとも群全体としての “dynamics” をもっているのかはよく分かっていない。積乱雲群は、いつどこで形成されるか予測できず、また寿命も数時間と短いため、その3次元的構造を観測することはかなり難しい。一方、降雨をもたらす積乱雲の群のふるまいを数値モデルリングで調べることは、その中で個々の積乱雲のふるまいもある程度表現しなくてはならないため、現在の計算機の容量では不可能に近い。現状では、降雨が始まってからレーダーおよび地上雨量計により観測する研究がほとんどで、雲あるいは空気の流れを観測しているわけではない。降雨として現れる現象を、現象論的に調べているに過ぎないともいえる。従って、その形成、維持、動きのメカニズム、あるいは “dynamics” という眼でみると、現状はもの足らないものであろう。

先述の『降雨災害をもたらす豪雨の集中度に関する研究』の目的の1つは、豪雨が狭い地域に集中する過程と

レーダーエコーの3次元的構造との関係を調べ、豪雨の検知と豪雨災害予測へのレーダーの有効な利用法を研究することであった。そして、目的の他の1つは、発達した積乱雲とその群の形成、維持過程をレーダーエコーの構造の変化としてできるだけ詳しく観測することであった。

meso- β スケールの現象ではないが、3年間のこの計画研究において印象に残ることは、10 km 以内のごく狭い地域に多量の雨が集中し災害がもたらされた例が意外にあったことである。愛知県春日井市に3時間に183ミリの雨が降った例、北海道登別市に6時間に509ミリの雨が降った例などはその典型的なものである。この他にも、1時間に60ミリ以上の雨が集中し、浸水、冠水が起こった例も少なくない。しかし、このような降雨は最近ふえているわけではなく、都市活動の変遷に伴い災害が起こるようになり、そのために目立つようになったものと考えられる。興味深いことは、春日井市の多量の雨が1つの積乱雲によりもたらされたことである。その3次元的レーダーエコー構造を少なくとも5時間ほど定常状態に維持し、3時間は春日井市の上に停滞していた。エコー頂はせいぜい 6 km であるにもかかわらず、構造はいわゆるスーパーセル型のものと考えられる。おそらく、3次元的レーダーエコー構造を定量的に詳細に観測した上で、スーパーセル型の構造を長時間維持した積乱雲が日本にも存在したことを示した初めての例であろう。

現在のところ、春日井市の例が特殊例なのか、しばしば起こっているものなのかは分からぬが、注目すべきことは、同じスーパーセル型でも、そして規模は小さくとも、日本のものが多量の雨をもたらしたことである。勿論、雷、ひょう、竜巻など激しい現象をもたらす積乱雲も日本にはあるが、日本の積乱雲は、severe convective storm をもたらす積乱雲とは、多量の雨をもたらすものとして性質がやや異なるのではないかと考えられる。

豪雨が狭い地域に集中して起きるためには、現象論的にいくつかの条件が必要である。上述のように1つの積乱雲により多量の雨が降ることもあるが、発達した積乱雲の群が形成されること、および、積乱雲が次々と入れ替わりながら群が維持され、群全体としてある領域に停滞することが必要である。そして、さらに、それぞれの積乱雲がその中に貯めてきた水を、集中攻撃するように、同じ地域に降雨として落すことが必要となる。海上で発達した積乱雲が、上陸する際、海岸付近に一挙に雨を落すことはよくあり、このような現象には地形が影響

していることはまず確かである。

“豪雨の集中度の研究”では、meso- β スケールの積乱雲群が形成される過程、維持されている過程を、レーダーエコーの3次元構造の変化として定量的に観測した。一般に、移動する積乱雲群についてこのような観測を行うことは、1台のレーダーでは無理で、この研究では3次元構造の定量的観測が可能な北大、名大、九大のレーダーを九州北西部に特別に設置して観測を行った。発達した積乱雲の群はライン状になることが多い。興味深い観測結果は、ライン状積乱雲を構成した個々の積乱雲が、通常のものと違い、組織化された多重セル型の構造をもち、長続きしていたことである。そのような積乱雲が次々とできることに対応して、ライン状の群が形成され、また維持されていたわけである。個々の積乱雲はラインの走向よりやや南にずれて動いていたため、ライン状の群が全体として停滞することはなかった。もしも積乱雲がラインの走向に動き群全体が停滞していたならば、おそらく積乱雲の上陸地点付近に豪雨が集中していたものと考えられる。

このラインにおける積乱雲は組織化された多重セル型の構造をしており、南側に新しいセルができるに対応して南よりの動きを示していた。この過程はレーダーにより観測されたことである。meso- β スケールの対流性エコーの群の動きはしばしば群に相対的にあるきまった位置に新しい対流性エコーが形成されることと既存のエコーの動きの和として説明される。そして、既存のエコーの近くで、新しいエコーは、降水に伴う冷い下降気流から発散する風とまわりの風との相対的な関係としてつくられる強い収束場の生成されると説明される。現象的には確かにそのように説明できことが多い。しかし、レーダー観測の最大の欠点は、レーダーで検出される降水のみが観測されることである。実際には、積乱雲あるいはその群のまわりの風は、一般風からはかなり変えられている。また、新しいセルあるいは雲がいくつかできたなかで、降水をもたらすまで発達したもののみが、レーダーでエコーとして観測されたとも考えられる。積乱雲群の維持および動きの機構は、単に上述のような過程による新しい積乱雲の生成によるのではなく、大きな場と群との相互作用も含めた群としての“dynamics”によるのかも知れない。

豪雨が狭い地域に集中する過程の研究として、meso- β スケールの積乱雲群が維持され、停滞する過程、および積乱雲による雨の集中移出の過程は、これからもレーダー

一観測により調べられていくであろうが、観測されるものはレーダーエコーの構造、ふるまいである。勿論、実態としての事実をつみ重ねていくことは必要なことである。しかし、群としての“dynamics”があったとしても、それはおそらくレーダー観測のみでは分からぬであろう。群の周辺の気流の詳細な観測もあって解明されいくものと考えられる。

ドップラーレーダーによる気流の観測は有望なものであるが、これまでのところ、ドップラーレーダーにより3次元的気流構造が明らかにされているのは、主にmeso- γ スケールのものである。日本でも、気象研究所および北大低温研究所にすぐれたドップラーレーダーが設置されているが、それらにしても、meso- β スケールの現象を対象とした時は、気流の部分像を描くにすぎない。何台ものドップラーレーダーを用いてmeso- β の積乱雲群の気流の全体像をつかむには、まだまだ時間が必要である。また、ゾンデ特別観測、航空機観測などで積乱雲群のまわりの風を調べることは不可能ではないが、積乱雲群はいつどこで形成されるか分からぬため、相当膨大な経費が必要となり、すぐに行うというわけにはいかない。一方、積乱雲群のふるまいを3次元数値モデルリングで調べることができるのはだいぶ先の話である。このように、meso- β スケールの積乱雲群の研究は、レーダー観測により実態を地道に調べていくことを除いて、現在のところ良い方法はなく、その“dynamics”を解明することは非常に難しい。

先にも述べたように、積乱雲群は、しばしばmeso- α スケールのじゅう乱の一部として形成される。梅雨前線の中間規模じゅう乱もそうであるが、meso- α スケールのじゅう乱は、衛星雲画像において背の高い雲の集団、クラウド・クラスターとしてよく観測される。熱帯のクラウド・クラスターと違い、日本周辺のものは研究がまだ始まったばかりであり、case study その他により興味ある事実が見出されているものの、発生頻度、ふるまい、構造など一般的な特徴はまだよく分かっていない。meso- α の現象は、空間スケールおよび時間スケールからいって衛星データの効的な利用が可能であり、ゾンデ観測により構造を調べることもでき、また、数値モデルリングによる研究も可能である。今後、meso- β の積乱雲群の観測による研究は、meso- β のシステムのみを対象とすることなく、meso- α のシステムも調べ、その中でmeso- β システムの形成、動きなどを位置づけていくことにより、一段と飛躍することが期待できるのではない

であろうか。

III. Predictability—豪雨は予測できるか？

浅井富雄（東大海洋研）

「長崎豪雨等の数値予報」（二宮洋三・栗原和夫）、「熱を入れたダイナミック・イニシエーションによる短時間雨量予想」（上野充・工藤達也）、「長崎豪雨の実態」（浅井富雄）の三篇が報告された。それらは、数値予報モデルを用いた豪雨予測の試みとその初期条件の改善、豪雨の実態解析から予測上の問題点を論ずるものであった。いずれも論文として別に発表されるので、それらの内容の紹介は割愛し、ここでは豪雨予測についての私見を簡単に記しておく。

豪雨に限らず、およそ気象現象には predictability, すなわち、予測可能性あるいは予測の限界は程度の差はあっても常につきまとう問題である。したがって、豪雨は予測できるか？ という標記の問い合わせには、予測可能性やその限界をもたらす要因を明らかにするという大気現象に共通なレールに乗っての議論と豪雨に特有の具体的問題の考察という両面からのアプローチが必要であろう。

ところで、predictability というと、通常、予測期間に关心が向けられ、しばしば日々の天気の予測可能性というとき、幾日先まで有意義な天気予報ができるかという予測期間の延長が問題にされる。しかし、どの程度、現象の振舞いを表現できるかという空間的・時間的正確さについての予測可能性もなおざりにするわけにはいかない。集中豪雨の予測は（1）いつ、（2）どこで、（3）どれくらいの雨が降るかという 3 要素の正確さにかかっているからである。予測可能性に関するこれら両者は橋の両面のようなもので、何をもって予測が有意義であるとするか、その判定基準によって結びつけられている。

さて、大気現象の決定論的な予測に限界をもたらす物理的要因としては大気運動の本性に由来する（1）力学的不安定と（2）非線型相互作用が挙げられる。岩石破壊に伴う地震の発生に似て、集中豪雨は大気中における一種の破壊現象とみることができよう。対流不安定の解消という破壊がいつ、どこで発現するかの決定論的予測は極めて困難である。一方、大気擾乱の表現における不正確さや解像できない小さなスケールの擾乱を無視することなどにより入り込む避け難い誤差が時間と共に増大し、より大きなスケールの擾乱に拡がりやがて全てのスケールの擾乱を歪め、誤差を大きくして予測を無意味なもの

にする。

上述のように、観測や予測モデルが高い水準に達したとしても豪雨予測の困難さが完全にとり除かれるわけではないが、現実には、（1）日常の観測や解析は不満足で、実況（初期条件）を正確に把握していない。更に（2）大気擾乱の変動過程を表現するモデルも、大気の境界条件も、それらを計算する技術も不十分である。極端な言い方をすれば、豪雨予測の現状はザルで水をくすっているようなものである。このような状況のもとで豪雨予測の限界に挑戦するために今日どのような戦術をとればよいのであろうか。次の 2 段階の体系化が考えられる。

（1）低気圧や前線帯の内部構造の予測モデルを開発し、1000 km スケールの領域内 24 時間内で豪雨ポテンシャルの高い地域と時間帯をしづる。

（2）発現した豪雨域（或はレーダーエコー群）の移動・消長の実況を正確に把握する。（1）の領域内で発現した豪雨の動態を予測することを目指すが、当面は（1）の低気圧や前線帯の内部構造や地形などの外部条件に豪雨域を関連づけてモデル化することに重点をおく。

すなわち、（1）により、豪雨ポテンシャル高低の時間・空間分布を求め、（2）により豪雨実況の客観的・定量的解析を迅速化し、これらの結果を整理して敏速に伝達するシステムを構築する。同時に、これらの資料を蓄積し、利用の便をはかり、観測・解析法、モデル化を推進することである。

IV. 予測のためのモデルには何が必要か？

住 明正（東大理学部）

この session の意図は、meso スケールのモデリングに対し、どの程度までの微物理過程（microphysics）が必要かということを明確にすることであった。しかしながら、結果的には、残念ながら、何も結論的なものは出てこなかった様に思われる。しかし、この事は考えてみれば当然のことかもしれない。現時点では、各個人としては見解を持ち得ても、万人を納得させる結論とはなり得まい。唯“各人の存念を語り合う”ということが余り出来なかつたのは残念であった。現状は、武田（名大）のいう如く、「雲物理過程は、パラメタライズをする気ならば、どの level でも、したいように parameterize 可能」という状況であろう。

雲物理過程を簡単にパラメタライズした、気研や中島（東大）のモデルの結果にしても、それなりに現実を simulate しているともいえるし、2 次元と 3 次元の frame

から、現実に対する有効性を疑うことも出来る。最も、2次元すら理解出来なくて、何が3次元かという反論もあり得よう。勿も、何が理解出来れば理解したことになるのか、という点も不明確であるが。

このような中で、山岬（気研）が、雲を表現するモデルの結果を踏まえて、パラメタリゼーションを追求していたのは印象的であった。彼の開発したパラメタリゼーションが全能とはいえないにしろ、その方向でいろいろと試みてみるとことは必要なことであろう。

高橋（ハワイ大）は、「勿論、雲物理が大切」という。しかし、どんな意味で大切なのであろうか？ 雲物理過程の導入による積雲の正しい表現が、大きなスケールの予想にはね返って来ることがあり得るのだろうか？ これらの large-scale の modeller の疑問に対し、正しく答えてくれているとは思われない。いずれも今後の課題なのであろう。

これに対し、武田（名大）は、こういう。

「meso- α 程度の現象には、parameterize 可能であろう。雲物理過程を導入することは、降水量の増加等の変化はもたらすであろうが、それによって、meso- α そのものが、別のところに行ってしまうというようなことはない……」。筆者も、このような見解に賛成であるが、問題は、meso- β といわれるものである。

雨の集中が、meso- β 系で起きているとすれば、その振舞いの予測は重要であるが、もし、この予測が、詳細な雲物理過程の表現なしには実現され得ないものならば、現実には、予測不可能といって良いだろう。

それについても、高橋（ハワイ大）の日本の気象学の現状への批判には、耳が痛い。彼曰く、「日本には、たくさんのメソモデル（雲のモデルも含めて）がある。だ

が、計算し終わってから次に進むことが出来ない。その計算が合っているか、否かが分からないからだ。これでは、どこが悪いかを見つけることも出来ない。アメリカでは、飛行機で対象とした雲のデータをとってきて、それを simulate しようとしている。だから、モデルの結果をすぐ比較することが出来る」と……。

8月4日から気象庁で開かれていた NWP シンポジウムの final session で、廣田（京大）が力説していたように、「モデルはあくまで真似る対象があつてこそそのモデル」であろう。いわばそれは、我々の得た論理を証明する道具なのである。その意味で、気象学の歴史をみてみると、やはり、観測の拡充のなかから、新しい事実は見つかっている。meso スケールに対する研究も、当面は、meso- α の予測を主眼におきつつ、meso- β 、meso- γ の観測事実の集積に努力すべきであろう。

何はともあれ、地球科学は難しい。物事を先見的に予測し、それを純粹に実験してとり出すことは出来ない。ありとあらゆる現象が入った観測を根気よく続けてゆかねばならない。しかし、ただやっていても、データを整理する枠組がないと、膨大なデータの山になってしまう。だが、その整理する枠組は、外から降って来るものではなくデータの山の中からやはり帰納的に見出すものであろう。かくして、乱雑で不透明なデータの中で、走りまわることになる。しかし、そこには“生きた自然の手ごたえ”がある。かっての予報官は、プロットされた天気図を前に、色鉛筆を手にし喜色満面であったという。時として、混沌のなかに、秩序を見ることが出来る。だからこそ地球科学はおもしろい、ともいえる。