

熱帯性積乱雲の気象調節に関するセミナー報告*

小 元 敬 男**

1. はしがき

表題*** の日米科学協力セミナーは、1970年2月15日から4日間、マイアミで開かれた。日本からは寺田（団長・防災センター）、北岡、藤原、小野（気象研）、孫野（北大）、武田（九大）と筆者の7名、米国側からは国立ハリケーン研究所（NHRL）の Gentry 所長のほか13名の参加者、それに9名のオブザーバーが出席した。

会場にはマイアミ市内のコロンブスホテルがあてられた。この会議の目的はハリケーンや台風の人工制御に関する研究の基礎となる熱帯性積乱雲のモディフィケーションに関する研究成果の報告をおこない、更にこの問題について日米協力研究の可能性を検討することであった。

米国が1972年に Project Stormfury の実験を北太平洋西部で行ないたいと提案し、最近話題を呼んでいるが、この問題はマイアミの会議でもすでに取り上げられていたので、セミナー後の経過も含めて述べてみたい。

2. セミナー成立のいきさつ¹⁾

一昨年暮れ、わが国の気象調節研究の実情を調べる目的で、Denver 大学の福田教授が来日した（Fukuta,

1971）。このとき防災センターを訪れ、われわれと我が国の気象調節研究の進め方について話しあった。帰米後、彼は寺田所長にハリケーンおよび台風の人工制御についての日米協力セミナーの開催を提案してきた。防災センターでは早速、気象調節専門委員会²⁾をひらき、この提案を検討した。その結果、「日本の研究者層の現状と過去における関連問題の研究実績からいって、台風制御を掲げたセミナーを開催するのは無理である。」との結論に達した。

そこで、「積乱雲の人工制御」あるいは「気象調節」というテーマではどうであろうかと返答した。これに対して米国側は「このセミナーは将来ハリケーンや台風の人工制御の足がかりになるべきであるから、何らかの形でそれを明示したい。」と主張し、結局、「熱帯性積乱雲のモディフィケーション」という案が採択された。

正式にセミナー開催の提案が出されたのが昨秋、承認されたのが12月半ばすぎであった。参加者が決まったのは1月に入ってからである。

このセミナーに何を期待するかという点で、関係者のあいだには幾分ちがいがあった。日本側は台風に関する基礎研究の強化と、将来に備えて航空機による台風観測

* Report on the Seminar on Cumulonimbus Modification of Tropical Nature.

** Y. Omoto 国立防災科学技術センター

*** 日米科学協力セミナーは日本側は日本学術振興会が、米国側は NSF が費用を出して開催するものである。表題の会議の名称は、米国側が提案した“cumulonimbus modification of tropical nature”に対して日本側がつけた正式の名である。英語の modification にたいし気象調節という訳語が使われているが、modificationには本来「変える」という意味あいがあり、調節とか制御と訳してしまうのはちょっと問題がある。

1) この項は小元（1971）をほぼそのまま引用した。

2) 防災センターでは気象調節研究のために、大学および気象研究所の関連分野の専門家からなる専門委員会を年に1度、開いている。

—1971年11月1日受理—

技術習得のために、日米協力研究を発足させる機会を作
ることを期待した。米国側の NHRL にはこの機会に、
かねてから希望していた北太平洋西部における台風実験
に対する日本の気象関係者の考えを知り、できれば協力を
求めようという意図があったようだ。いっぽう NSF
は、セミナーは学術的研究の発表と総合報告の場であっ
て、今後の日米協力といった問題の協議は一応セミナー
とは別にやるべきであるとした。日本代表団は「今後の
日米協力についての提案」を用意し、これにも十分に時
間をとってくれるように申し入れた。メンバーが決定し
てから出発までの期間があまりにも短かく、持参した英
文の提案は北岡、寺田両所長ほか少数の人達によって大
いそぎで作成されたものであった。そこでマイアミにつ
いた翌朝、全員が集まって提案を再検討した。会議2日
目の夕方、ホテルのロビーで藤田 (Chicago 大学)、大
山 (New York 大学)、福田の在米3教授と筆者の4人
が雑談していたところ、日本側の用意した提案に話が進
み、考えかたや表現の点でこの案に問題があることが明
らかになった。そこで、すでに部屋に引きとっていた寺
田、北岡、藤原、小野の4氏にも集まってもらい、深夜
までかかって提案を再修正した。米国で研究プロジェク
トを運営してきた3教授の助言は非常に有益であった。

3. プログラム

2月15日 a) 日本代表の挨拶。米国代表の Gentry
所長が急病のため、Hawkins 氏が代わって歓迎の挨拶
を述べた。つづいてこのセミナーの開催を推進してきた
福田教授と寺田所長が挨拶した。

b) 積雲および他の小スケールの現象のモデル研究
(講演者 Orville, Cotton, Lilly, 孫野)

c) 熱帯性暴風雨および他の大スケール現象のモデル
研究 (講演者 Rosenthal, Anthes, 寺田, Ooyama)

2月16日 a) 積雲の野外実験 (講演者 Berry,
Woodley, Weinstein, 武田)

b) 熱帯性暴風雨の野外実験 (講演者 Gentry, Fujita,
北岡)

2月17日 国立海洋研究所、水族館、国立ハリケーン
研究所 (NHRL)、ハリケーンセンター (NHC)、実験
気象研究所 (EML) 訪問

2月18日 a) 測器および観測技術 (講演者 藤原,
小元)

b) 雲の微物理と雲力学の相互作用 (講演者 Fukuta,
小野, Koenig, Fukuta)

c) ハリケーンモディフィケーション実験の将来計画

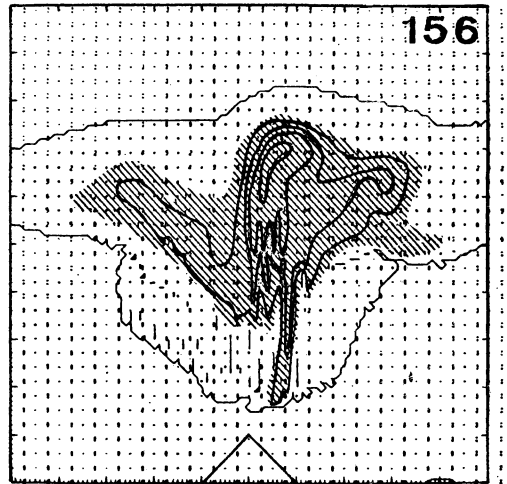
(講演者 Gentry)

d) 日米協力の将来計画

4. 研究報告

第1日 Modelling

最初の講演者 Orville (IAS*) は、雲粒、降水粒子を
とり入れた積乱雲の二次元数値モデル計算の out put と
して得られた雲の発達の様相をフィルムに収め、これを
会場で映写して見せた。画面に雲が発生、成長しカナト
コができる。雲の内部には雨域が形成し、ひろがりなが
ら落下し、雨足が雲底からのびて地上に達する様子が動
画的に写しだされる。これを積雲の駒どり写真と対比さ
せて示していたが、実に realistic であった。映画で示
された計算はすでに学会誌に発表されたものであったけ
れども (第1図)、誌上と映画とでは迫力はもとより理
解しやすさといった点でも大差があった。彼はさらに、
氷晶およびびょう形成過程を考慮した二次元モデルの計
算結果にも言及した。水の液相から固相への変換は単純
化されてはいるものの、種まき効果をこのようなモデル
で調べられるようになったことは大きな進歩である。こ
れで、雲のどの部分に種まきをするのがもっとも効果的



第1図 山の影響で発生する積雲のシミュレーション。中央の雲は発生してから36分後の姿である。斜線の部分は雨滴の存在するところで、 0.5kg^{-1} ごとに含水量の等値線がひかれていて、計算領域は水平、垂直方向とも10km、左から右へ一般流があり、雲は同方向に移動している (Orville and Sloan, 1970)。

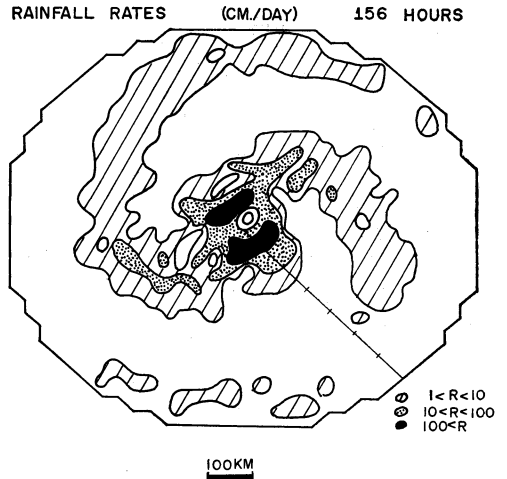
* Institute of Atmospheric Sciences, South Dakota
School of Mines and Technology

であるかということについて、一次元モデルよりさらに詳しく調べることができるようになるであろう。もちろん、このための計算は大変なもので、積雲が発生してからカナトコを持つ積乱雲になるまでの30分～1時間の過程を計算するのに、CDC-6600で十数時間かかるという。

次に、Cotton (EML) は氷晶の成長について、各種の結晶形の構成を温度の函数として入れるなど詳しく雲の微物理的プロセスを取り入れ、一次元モデルの計算をおこなった。ここで彼は AgI の量やまく場所、あるいは周囲の大気の状態の違いが、あるときは雲を急速に発達させ、またある時は逆に雲の発達を抑制する効果を持つことを示した。Lilly は NCAR でやられている対流の数値シミュレーション研究を紹介した。3グループがこの問題をとりあげてそれぞれ独自に研究をすすめているそうで、彼はそのなかの一つ、接地気層内の乱流効果をとりにれた研究についてとくに詳しく述べた。地表面の温度にランダムな変動を与えた結果おこる対流を三次元的に取りあつかい、地上1,000～1,500mに逆転層がある場合について計算した。その結果、種々の大きさのセルが発生した。平均サイズの2～3個分のセルの集合体もでき、このうち強いものは逆転層を突き破って上昇することが示された。

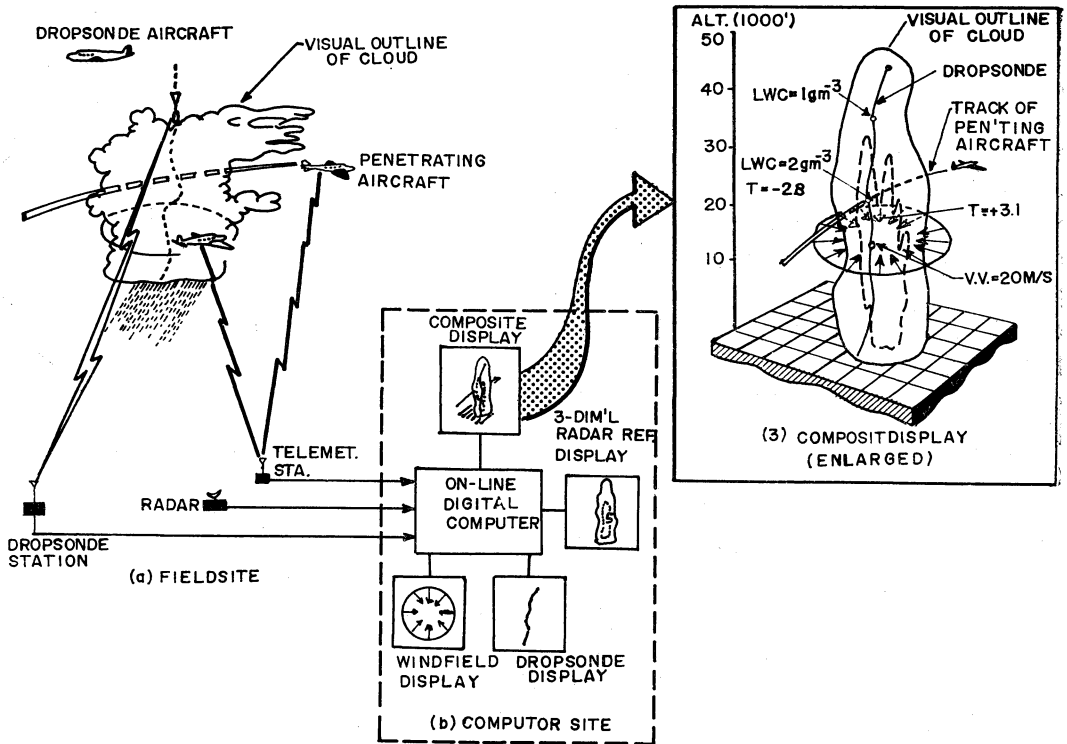
次の孫野の発表は、むしろ最終日の小野の発表と同じセッションでやられたほうがよかったかも知れない。観測機のない日本で雲の微物理的構造を調べるには、高山における観測か snow crystal ゾンデ (Magono and Tazawa, 1966) による観測ということになる。孫野・李の研究は雪雲の構造について、この両方の観測方法による結果をまとめたものである。ここで注目されるのは、手稲山頂における観測で雪の結晶数が氷晶核数より多いという結果が得られた点である。これは、積雲中において氷晶の数が氷晶核よりはるかに多いという、Mossop and Ono (1969) 等の観測と関連がありそうだ。孫野は雪の結晶にはかならず核があると信じられているので、氷晶核の観測の方法にも問題があるのではないかと述べた。

大スケール現象の理論的研究の分野では、まず Rosenthal (NHRL) がハリケーンの7層モデルの計算結果を示した。今回の発表ではとくに境界層における顕熱と水蒸気の輸送、抵抗係数の変化がハリケーン発達にあたる影響を調べることに重点をおいた。彼は抵抗係数のある値を境に、それ以上では摩擦による水蒸気の収束



第2図 ハリケーンの非対称モデル計算であらわれた rainband. 雨量 ($\text{cm}\cdot\text{day}^{-1}$) は潜熱の放出量から計算した (Anthes et al, 1971).

の効果が摩擦によるエネルギー消費を上回るようになることを示した。また、潜熱の輸送にくらべて水蒸気輸送がハリケーン発達にあたる影響ははるかに大きいことも示された。Anthes (NHRL) はグリッドの取りかたや時間積分のやり方など計算法にいろいろと工夫を凝らして、三次元3層の非対称ハリケーンモデルの計算をおこなった。格子点の取りかたで境界はほぼ正八角形となっているが、うず状の rainband があらわれた (第2図)。彼はこの結果を使って rainband experiment (後出、第6図) の数値シミュレーションもやるつもりであるが、それには中小スケール現象の力学とハリケーン力学の相互作用がもっと理解されなければならないだろうと述べた。ここで Cotton のような雲の微物理と雲力学の相互作用の研究も必要であるとのコメントがあった。寺田 (防災センター) は台風域内の海面付近の風速、気温、湿度を中心からの函数として初期値を与えた場合について、移動する台風域内の凝結高度の分布を求めた。気塊の trajectory を運動学的にもとめたところ、移動速度が増すにつれ、雲の分布が中心対称から進行方向にむかって右前方に延びるという結果が得られた。また、水温のわずかな変化が台風に対するエネルギー補給にかなり大きな影響を与えることも示された。Ooyama (New York 大) は積雲対流が種々のスケールの熱帯性じょう乱にあたる影響を調べるために、垂直シアーを変えた場合についての線型理論を展開した。Zonal flow の垂直分布および対流による熱放出の垂直分布により、



第3図 積乱雲研究プロジェクト(米国)で計画されているひょう雲の三次元構造表示のための観測と計算システム(Nevada大, Dr. Berryの講演より)。

いろいろな形のじょう乱ができることを示した。

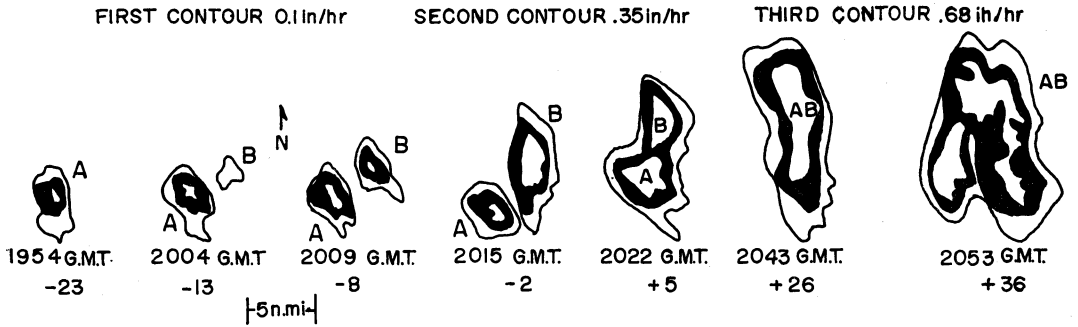
第2日 野外実験

積雲の野外実験の最初の講演者 Berry (Nevada大, DRI³⁾)は、カナダのアルバータ州におけるひょう雲観測の結果について述べた。上昇気流が非常につよいところに雲がない空間があることを航空機観測で確かめたといって、恐怖を感じさせるような暗い口をあけたひょう雲の写真のみせた。局所あらしには echo-free vaultがあり、そこでは上昇気流が非常に強いと考えられている。しかし echo-free と cloudless とは意味が違うのではないかという発言があった。Berryは雲底における上昇流の観測などから、スライドのみせた雲の穴が上昇流のきわめて強いところであることは明白だったと述べ、自分はあそこを突っ切るほど命知らずではなかったといって皆を笑わせた。続けて彼はC-130をプラットフォームにした航空機による熱帯性暴風雨の観測システムを紹介した。更に、1972年からコロラド北東部で始められる

降ひょう実験で計画されているひょう観測システムを紹介した。第3図に示したように、この計画ではひょう雲の内部構造がプロジェクト計算センターですぐに分かるようになっている。この計画の実現を期して、すでにレーダーの三次元表示方式の開発がはじめられている。この話のあと、ひょう雲1個を観測するのにいったい何百万ドル使うのかと、冗談まじりの発言があった。

Woodley (EML)は、Simpson等が1968年と1970年に行なったフロリダ南部での「力学的種まき実験」の結果を報告した。この実験は航空機を使った AgI-pyrotechnic による種まきである。一次元対流雲モデルを使用して種まき効果を予想することができるようになったことから、効率は良くなり、種まきを実施した雲は平均して種をまかない雲より7,000 ft 高くなり、降水量も種まきをした雲のほうが平均270 acre-ft 多くなった。詳しくは Simpson et al. (1971) を読んでいただきたい。統計的な結果とは別に、種まきがじょう乱の融合 (merge) を促進したと考えられるケースが示された(第4図)。二つの中くらいの積乱雲が融合すると、1個の巨大な積

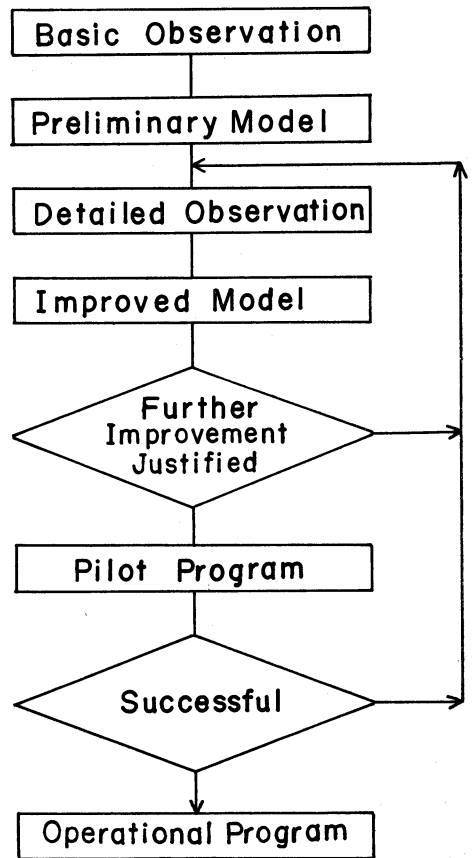
3) Desert Research Institute の略



第4図 マイアミ大学のレーダー（波長10cm）でもとらえられた、AgIを撒いた雲（A）と撒かなかった雲（B）の融合の様子（Simpson and Wiggert, 1971）。

乱雲となり、その雨量は別々の状態で二つの雲が降らせる雨の量の和の何十倍にもなるといふ。乾燥地域あるいは干ばつのときに有効量の雨を降らせる方法として注目される。つづく Weinstein (MRI⁴⁾ は、アリゾナにおける対流雲の modification 実験プログラムを紹介した。Modification 研究を思いついてから実用化に至るまでの進め方について、彼の示した図を掲げておく（第5図）。現在は、積雲の seeding については pilot project まで来ているが、大型の系については preliminary model の段階であると彼は述べた。実験の結果として、自然の雲と種まきをした雲の差が述べられた。前者では暖かい雨の過程が -10°C くらいのところでも起こっており、氷晶化は雲の消滅期に起こる。いっぽう、種まきをした雲では氷晶化は雲の発達中におこり、降水粒子が主にあらわれの riming によって成長することがわかった。武田（九大）は1961～1966年に九州でおこなった、暖かい雲への散水法による種まき実験を紹介した。散水法は雲からの降水を早めるいっぽう、積雲の消滅をも早める可能性をもっている。対流雲を発達させることによる増雨の研究がさかんな時ではあるが、散水法によって生ずる雲中の雲物学的変化についてもまだ研究の余地はあろう。

熱帯性暴風雨のセッションで、Gentry (NHRL) はハリケーンの modification 実験プログラムと題して講演した。彼はハリケーン実験の歴史を述べたあと、1969年8月18日、20日の2日間に行なった Hurricane Debbie の実験結果を詳しく報告した。この実験についてはすでに彼自身が書いているし（Gentry, 1970）、他に土屋（1970）、藤原（1971）による一般むきの紹介もある。種



第5図 気象調節研究の出発点から実用化まで、アリゾナ州における人工増雨のプログラムから（Dr. Weinstein の講演より）。

まきの結果、中心付近の風速が弱まったというこの実験の最大の成果について、このハリケーンの眼が楕円形でしかも眼形の時間変化が複雑であったことから、風速の

4) Meteorology Research Institute の略

減少を人工変化に帰することに対して疑問がだされた。Gentry は2日とも同じような結果が得られたという事実から、種まきが最大風速を弱めたと断言してよいとおもうと答えた。なお続けて、眼の雲の壁に種まきをする影響があまりにも早く消失してしまうので、やや外側に種まきをおこない、自然収束を利用して効果を永続させようという考えがあると述べた。

次の Fujita (Chicago 大) は、被害の程度から風速を評価する方法について発表した。対象は主としてトルネードであるが、Hurricane Camille の被害状況を見ると中心の通過地域では幅十数軒にわたって家屋が徹底的に破壊されており、この方法は風害一般にも適用しうるものといえよう。彼は F-scale という新しい風力階級を提案した。この下限はビューフォート階級の12に、上限はマッハ1に対応する。被害程度から気象状態を推定するアプローチは防災センターに適した研究法と思われる。

北岡(気象研)は Stormfury 実験の太平洋移転と関連して、太平洋における強い台風の気候学的調査結果を発表した。実験後、この台風が上陸して社会的な問題が起こっては困るということで、実験にはグアム島の北東象限にあらわれ、本土にあまり接近しない台風をえらんでほしいと述べた。渡辺、北岡の統計はわずか5年間(1965~1969)のものであり、期間の延長が望まれた。それにしても、提案どおりにやるとすれば、実験対象になる台風は9月中旬10月の45日間に1~3個と発生頻度は大西洋なみになってしまう。これでは太平洋まで出かける意味がなくなると NHRL の関係者は失望していた。

第3日 研究所見学

17日の午前中は NOAA の海洋研究所と水族館を見学した。海洋研究所はいまは仮り住まいで、水族館のむかひに建築中の新庁舎に NHRL と共に移ることになっているそうである。このあと NHRL、NHC⁵⁾、EML を見学した。これらはみな大学の気象教室のあるマイアミ大学の計算センターの建物のなかにあり、あたかも気象研究所の感がある。見学時間のほとんどをセミナー室でスタッフの研究紹介を聴いて過ごした。NHRL はマイアミに本部のある Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratories の一つ、EML はボルダー(コロラド州)に本部のある Meteorological Research Laboratories の一つであるが、それぞれに幾人もの勝れた

スタッフがおり、米国の研究者層の厚さを見せつけられる思いがした。

第4日 観測・実験技術、雲物理

まず藤原(気象研)が柳沢・青柳らと1966年の冬に北陸で実施した雪雲の観測結果から、氷晶化の程度と雪雲の力学の関係について発表した。観測された雪雲の雲頂気温は -18°C で、RHI とドブラーレーダーの連続観測によって雪雲の三次元的構造を調べ、地上における降雪の観測結果と比較した。その結果、雲中の上昇速度と氷晶化の程度から、降ってくる降水粒子の種類(雪の結晶、雲粒付雪片、あられなど)が決まることがわかった。小元は防災センターの降ひょう抑制用沃化銀散布ロケットの性能、およびこれを使った層雲の種まき実験の結果を紹介した。海外の降ひょう抑制ロケットの機体は火薬を使って爆砕するようになっているが、日本のものは燃焼消滅型である点が注目された。1970年10月の実験では、このロケットによる種まきの際、人工的と思われるエコーが形成し落下する模様がレーダーで観測された。

微物理と雲物理の相互作用のセッションでは、福田(Denver 大)がハリケーン制御の新しい手段として、雲中の相変化によって生ずる浮力と温度の変化を利用する方法を提案した。彼は降水強度を大きくすることにより、ハリケーン領域の雲中における垂直方向の熱輸送の向きを変えられるのではないかと述べた。小野(気象研)はタスマニア島でおこなった海洋性の過冷却雲の航空機による観測結果について報告した。調査の対象になった雲の温度は -10°C より暖かかったにもかかわらず、自然氷晶核から育ったとは考えられない非常に小さな氷晶が多数観測された。氷晶の数は大気中に存在する氷晶核より2桁ないし3桁も大きいものであった。この氷晶増殖のプロセスの説明として、過冷却水滴が氷晶に付着する際に微小な氷片が放出され、それが氷晶に成長するという考えが妥当であろうと述べた。

雲のモデル研究において氷晶の成長速度のパラメーター化が問題になっている。Koenig (RAND) はこれまで文献に発表されている氷晶の軸比と密度の実測値を入れて、 -1°C から -35°C の温度範囲での氷晶の成長速度を理論的に求めた。その結果、 -5°C と -15°C に極大をもつ成長速度が氷晶の軸比から説明できることを示した。福田は有機氷晶核発生装置や航空機用に開発されたいくつかの氷晶発生装置について、それらの性能を報告した。さらに、航空機用メタルデヒド発煙炉による

5) National Hurricane Center の略

積雲への種まき実験の結果について報告したが、4例のうち2例ではっきりしたレーダーエコーを観測し、そのうち1回は -2°C の level での種まきの結果、エコーの急速な発達が見られた。

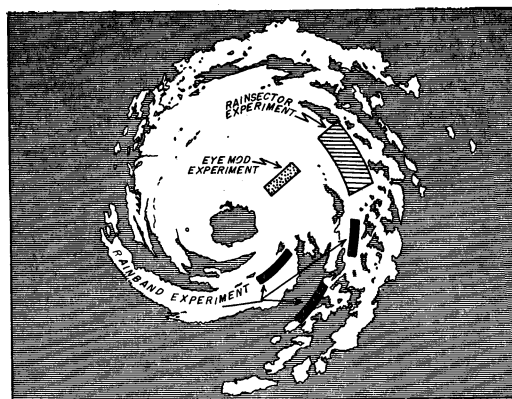
ハリケーン実験の将来計画

最後に Gentry が Project Stormfury の将来計画と題する講演をおこなった。彼によればハリケーン制御研究で早急に解決しなければならない疑問は次のとおりである。(1)ハリケーン制御は可能であろうか。もし可能ならいかなる条件下でやれるのか。(2)人工氷晶核がはたして理想的な場所に行きついて効果を発揮するだろうか。(3)どのようにしたら実験の影響と自然変化を区別しようか。(4) i)ハリケーン(風)による被害, ii)高潮 iii)移動、に制御実験がどんな効果をもたらすか。

以上の疑問に答えるために1971年には以下の努力をするという。(1)理論的モデルの改良、(2)種まきをしたものとならないものについてハリケーン内に起こる自然変化と人工変化を識別するための研究、(3)雲物理学的研究、(4)ハリケーンモディフィケーション実験の実施⁶⁾、(5)あらたな実験法と新しい人工氷晶核のテスト。ところでハリケーンに対するこれまでの安全基準は、種まき後24時間以内に、中心が居住者のいる陸地から50マイル以内に接近する確率が10%以下と予報されたものを対象とするというものである。しかしこれでは機会がなかなか訪れないので、1971年には24時間以内というのを18時間以内に改めることになっている。それでも機会がそれほど多くなるとは考えられない。そこで、実験地域を1972年に、熱帯性暴風雨の発生回数がずっとおおい北太平洋西部に移す計画があると述べた。

今までにやられた実験はハリケーンの中心付近の風速を弱めるというものである。風速と被害の関係については余り調べられていないが、Stanford 研究所の最近の調査によると、風速の6乗に比例して被害が増すという結果がでている。したがって、ハリケーン自体を弱めなくとも、中心付近の最大風速を10%弱めるだけで、被害額を数百万ドル減らすことができると推定される。

Gentry は更に、これまでの eyewall experiment では種まき後、影響の消失が早すぎるから、(1)眼のや



第6図 Project Stormfury で計画されている諸実験 (NOAA の資料より)。

や外側に種まきを実施して効果があらわれるまでの時間を長びかせる (multiple seeding experiment, eyemod experiment), (2)熱帯性暴風雨の北東象限にひろがる傾向がある雨域に種まきをおこなう (rainsector experiment), (3)うず状の降雨帯に種まきを行なう rainband experiment が計画されていると述べた(第6図)。

5 感想

この会議の名称は非常に限られた問題についてのセミナーといった印象を与える。しかしながら今まで述べてきたように、発表された22編の報告は気象学の広い専門分野におよぶものであった。これは、対象のある特殊な現象に限った場合でも、気象調節に関する研究は広範囲の基礎知識を必要とするということを物語っている。

各報告には十分な時間があたえられ、講演中にも質問がでるなど、会議は informal な雰囲気のうちに進められた。いろいろな分野の専門家が一堂に会して、このような会議が持たれたことは非常に意義深いことと思われる。また、学術的な報告の場であったにもかかわらず行政レベルの人達、すなわち日本から寺田、北岡、米国から O'Connell (NSF), Wyckoff (NSF) らが出席して、熱心に講演にきき入り、時には討論にも参加したということはこのセミナーの一つの特徴であった。この事実が科学行政の面にプラスの効果をもたらすことを期待する。

積雲のモディフィケーション実験には、種まきによって生ずる微物理学的過程の人工変化だけを注目する型と、さらにすすんでこの変化がひき起こす雲の力学的過程の人工変化に重点をおく型とがある。今回のセミナー

6) 1971年中には9月26日、Hurricane Ginger に対する種まき実験が Debbie の時とほぼ同じ規模で行なわれた。なおこのハリケーンは9月30日、ノースカロライナ州に上陸した。

の報告では、後者のタイプの研究が多かった。

雲の力学的モディフィケーションは1960年代の半ばから、さかんに研究されるようになった。積雲系において単に降水形成の効率を良くするだけでは、期待できる増雨量のたかは知れている。相当量の増雨をもたらすには、系を発達させ、収束する水蒸気量を増さなければならない。雲物理過程のモディフィケーションによる増雨量の予報が困難なのにくらべ、雲力学過程のモディフィケーションの場合は、一次元積雲モデルを使ってかなりうまく種まきによる人工変化を予報できる (Sax, 1969; Weinstein and Mac Cready, 1968) ということから、積雲のモデル研究は今やブームになっている。米国における積雲のモディフィケーションのプロジェクトでは、一次元積雲モデルによる予報はルーティン化している。この度のセミナーでは大して問題にならなかったが、なぜ一次元積雲モデルで降水量あるいはその他の雲の特性をあらわす量の分布がうまく予報できるのかという点になると、すっきりした解答が与えられていない⁷⁾。物理的により勝れたモデルが必ずしも予報用としてまさるとは限らない。とはいえ、積雲内における微物理過程と力学的過程の相互関係についての理解を深めることが、究極において積雲の力学的モディフィケーションの分野の進歩につながることは明白である。

二次元積雲モデルの分野の発展もめざましく、種まきの影響を入れることも可能になってきた。Orville and Sloan (1970) や Takeda (1970) のモデルは複雑で、計算時間と費用の点からいって、一次元モデルのように野外実験で使うまでにはなかなかならないであろうが、実験の計画およびモディフィケーションの物理的な解釈に関しては、一次モデルより明らかに勝れている。

なお Woodley によって指摘された、種まきによる積乱雲の融合とそれともなう巨大化の問題では、メソスケールの降水系の構造と力学の人工変化と自然変化を区別しなければならなくなり、あらたな難しい課題にぶつかる。積乱雲群やハリケーンの人工制御の問題では、これまで気象調節とあまり縁のなかった総観気象学的考察が、実験計画に必要な予報および効果判定の重要な手段となるであろう。

このセミナーに出席して、気象調節研究の分野におけ

る日米の差を痛感した。研究費、研究施設、研究者層の厚さにみられる両国の差は知れわたっていることで、今さらいうまでもない。ここにも、わが国における基礎研究と応用研究の遊離現象の一因がある。たとえば、日本は積乱雲制御用の種まきロケットを開発し、これを使って種まき実験を実施した。これは米国がやろうとしてまだ出来ずにいることであって、これだけを見ると、わが国はあたかも降ひょう抑制の分野では米国に先んじているかに見える。ところがわが国はこうした実験を行なうまえに当然やっておかなければならない基礎的な諸研究面で、米国よりはるかに遅れている現状にある。

もう一つ例をあげよう。今回のセミナーで孫野と藤原は雪雲の観測結果について報告した。かれらの発表はともに「熱帯性積乱雲のモディフィケーションの研究」につながる基礎研究である。ところが両者のあいだを埋める報告として、日本側からは小野の1篇があっただけで、他はすべて米国の研究者によるものであった。このことからもうかがわれるように、わが国で“雪の観測”を“熱帯性”どころかふつうの積乱雲のモディフィケーションに結びつけることすら容易なことではないのである。

実用性を強調した研究(たとえば気象調節)と基礎研究の間にあるギャップが、わで国ではあまりにも大きい。そのため基礎研究は役に立たないと思われ、野外実験が科学の進歩と遊離したものと見なされてしまう。米国においても、気象調節のプロジェクトは実用化を期待されすぎて困るという声をときどき耳にする。しかし筆者の知るかぎり、米国の気象調節研究プロジェクトではたいいてい、当然のこととして基礎研究にも多額の費用が使われており、まことに羨ましい。

6. 日米協力の今後のありかたをめぐって

今回のセミナーは日米協力によるハリケーン・台風制御研究の出発点ということで、今後の協力研究のすずめ方についての協議は一応セミナーのあとでということになったが、重要な課題であった。日本側から寺田・北岡両所長が出席し、米国側からも Gentry 所長だけでなく NSF から O'Connell 博士、Wyckoff 博士が出席したのも、これを重要視してのことだろうと考えられる。協議は18日午後4時から始められ、日本側参加者全員と NHRL の Gentry, Hawkins, Mallinger の3氏とのあいだで行なわれる形となったが、NSF の O'Connell, Wyckoff の両氏と福田・大山両教授がオブザーバーとして出席した。

7) この問題に関しては Journal of Atmospheric Sciences で、はなはなしく論戦が展開されている (Cotton, 1971; Simpson, 1970; Warner, 1970, 1971; Weinstein, 1971)。

話し合いは日本側の用意した提案に沿って進められた。まず日米協力で基礎研究をはじめようという案が検討された。これについてはたいして問題なく、今回のテーマを少し拡大して“熱帯性低気圧をふくむ積雲および積乱雲の modification”に関する協力研究を発足させようという点で意見が一致した。

次に、Project Stormfury の太平洋への移動問題が取り上げられた。北岡所長の発表にもあるように、日本側ははじめ、極東諸国に上陸する可能性のある台風に種まきをやってもらっては困るという案を用意していた。しかし、そういいながら一方で Project Stormfury の実験に参加させてほしいというのは虫がよすぎるのではないかという忠告もあって種まきの影響が極東諸国におよばないような条件下でやって欲しい、というふうに改められた。そうすると実験地域、日時、および対象となる台風をどのように決めるかということが問題になってくる。今回の会議では、この点については日本側出席者が帰国してから関係者などと相談して決めたいと返答した。

いっぽう米国側は、台風とハリケーンの季節が一致するため、ハリケーンの季節に NHRL 関係者および観測機が米国を離れてしまうことになる。実験地域が非常に遠くなるうえ新たに基地を設ける必要性が生ずる、したがってこのまま大西洋で実験を続けるよりはるかに費用がかかるなど、実験地域を太平洋に移すことによって生ずる不利な点をいくつかあげた。それでも太平洋で実験をやりたいというのは、米国が考えている安全基準にあてはまる実験対象となる熱帯性暴風雨の数が、北太平洋西部では年平均6個と大西洋⁸⁾の年平均2個よりずっと多いからである(第1表)。基準に合っているからといって必ずしも実験ができるわけではなく、1964年から1970年までの7年間に、モディフィケーション実験が実施されたハリケーンはわずかに Debbie だけであった。米国側は、太平洋でならば2ヶ月の滞在で2~3個はほぼまちがいなくできると考えていると述べた。続けて、極東諸国に影響を与えないという条件のため安全基準が非常にきびしくなり、実験対象となりうる熱帯性暴風雨の数があまり減るようでは、実験海域を太平洋へ移すことはあきらめざるを得なくなると述べた。米軍基地を使って公海上でやるのだから、米国の考える安全基準でやっても差しつかえないのではないかといった人もいたが、NHRL の人達は国際的なトラブルに発展するようなことはしたくないと強調し、いずれ外交ルートを通し

第1表 米国の安全基準を適用した場合の、実験対象となりうる熱帯性暴風雨の数(8, 9, 10月)

年	太平洋, カリブ海 メキシコ湾の合計	北太平洋西部	
		グアム島のみ	グアムと沖縄
1961	3 (1)*	2	6
1962	2	3	7
1963	4 (1)	2	6
1964	5	1	2
1965	2	3	7
1966	1	1	3
1967	0	3	4
1968	0	5	8
1969	3 (1)	2	2
1970	0	2	3

* カッコ内は実際に種まきがおこなわれたハリケーン数

て交渉がおこなわれるであろうと述べた。なお米国側は、グアム島と沖縄の両方を基地として使用したいと希望し、日本側は沖縄には微妙な政治問題がからむので、了承を得るのはむずかしいかもしれないと答えた。

日本側の提案の第3は、Stormfury 実験の結果の解析を共同でやりたい、とくに気象衛星資料の利用に便宜を与えてほしいというものであった。これに対し米国側は、大西洋上における実験資料を国外に持ちだすことは好ましくないが、もしこちらに来て一緒に研究するというなら便宜をはかってよいと述べた。

この協議は夜まで続いたにもかかわらず痛みあがりの身をおして出席し、終始、誠意を示してくれた Gentry 所長のすがたが印象的であった。

7. 台風実験の提案をめぐる

10月上旬に東京で開かれた国連の第4回 ECAFE/WMO 台風委員会において、Project Stormfury が1972年に北太平洋で台風の人工調節実験を実施したいので、加盟国の支持を得たいという提案が討議された。この会議後、新聞やテレビは「来年、いよいよ台風の人工制御実験が行なわれることになった。」と報道した。しかしながら会議ではそのような決議はなされていない。誤解があってはこまるので、以下にこの問題をめぐっての今までのいきさつを記してみたい。

米国はかなりまえから、北太平洋西部で台風に対する種まき実験をやりたいという気持があった。すでに1965年のマニラでの第1回の台風委員会に、この問題を提出

8) カリブ海およびメキシコ湾をふくむ。

している。しかし当時は、台風の人工制御は不可能であろうという考えが強く、また提案に無理な点もあったようで、日本側はつよく反対した。その後しばらく、この問題はなりをひそめていた。われわれが1972年の台風シーズンに実験をやるという計画があることを知らされたのは、マイアミのセミナーの話がもちあがったときであった。マイアミでの日米協議の席上でわれわれは、前節で述べたように、帰国後できるだけ早く日本の望む安全基準を定め、Gentry 所長に知らせる努力をするとして約束してきたのであるが、協議を重ねながらも結論がでないまま、10月になってしまった。この間、7月上旬に、竜巻きの研究で来日した藤田博士が防災センター、気象庁、気象研究所で関係者と話し合い、日本側がこの実験によって生ずる社会的問題を懸念して結論を出しかねている事情を、Gentry 所長に伝えられた。また8月下旬には、福田教授がカンペラでの気象調節会議に出席の途中に日本に立ち寄り、寺田、北岡両所長、高橋気象庁長官から日本側の様子を聞いていかれた。

9月に入って、来たるべき台風委員会に日本がどんな態度でのぞむかについて、関係各省庁の協議がおこなわれた。その際に一番問題になったのは、もし実験対象となった台風が本土に上陸あるいは接近して災害が発生した場合、世論がそれを実験の影響であるとして騒ぎが大きくなる恐れがあるが、関係者はこれに対処できるだろうか、ということであった。そのほか i) 台風の人工制御が日本の水資源にマイナスの面をもたらすのではないか⁹⁾、ii) いまごろになって1972年に実験をやるといわれて、果たして日本の研究者が間にあうように参加の準備をすることができるだろうか、iii) いきなり人工制御実験を問題にするまえに、もっと基礎的な研究をしておくべきではないか、などの意見があった。

しかしながらフィリピン、韓国、中華民国(台湾)が

すでに賛成し、太平洋移転をむしろ望んでいるという情報があり、そんなときに、南方洋上の台風観測について過去二十数年のあいだ全面的に米国に負ぶさっている日本が、簡単に反対するわけにもいかないという事情もある。こういったわけで、関係者は本会議で取りあげられる日の前日の夕刻まで何度も集まり、問題の円満解決のために慎重な協議を重ねたのである。

10月7日は台風委員会でもっとも注目された日であった。米国代表(Bollay 氏, NOAA, Weather modification program director) は、i) これまでに実施された実験の結果、ii) ハリケーン制御に関する現在の知識、iii) 太平洋に移転しなければならない理由、iv) 実験の計画および規模、などについて詳しく説明した。彼はさらに続けて、米国は関係諸国の実験への協力を歓迎し、資料はすべて公開すると述べた。次に日本代表が立ちあがり、米国の計画は台風に関する知識の向上に役だつもので、科学的にみれば歓迎される試みであるが、この実験が日本の世論におよぼす影響が憂慮されると述べた。更に、各国の協議による安全基準を設け、諸国が同意した台風についてのみ実験をやるということにしてほしいと提言した。日本に続いて立った各国の代表者の発言はいずれも、日本とほぼ同じ内容のものであった。オブザーバーとして出席した、台風襲来地域外の3ヶ国の代表者達も発言を求め、台風実験の計画は台風の構造と力学の理解に著しい進歩をもたらす科学的に有意義なところみであると思うと述べた。

この度の台風委員会では、台風のモディフィケーション実験が科学的に有意義なものであることが、ほぼ全員によって認められた。これは、マニラ会議以後、6年間のハリケーン分野の進歩と、ハリケーンの人工制御をめざした Project Stormfury 関係者のたゆまぬ努力の結果であろう。

しかし、こんどの会議でも、安全基準の設定などについての結論は得られなかった。1972年の実験は、米国が正式の外交ルートをとおして各国の了承が得られたら実施する、というように決定した。

8. あとがき

マイアミでのセミナーの報告¹⁰⁾ということで書きはじめたところ、できればその後の経過にも触れてほしいという依頼を受けた。そうなると、Project Stormfury の太平洋移動という大問題に深入りせざるを得なくなり、

9) 台風の人工制御について、風水害対策という面だけが強調されてきたために、この様な誤解が生まれる(例えば、朝日新聞46年8月30日投書欄)。これに関連して筆者はかつて次のように述べた(小元, 1968)。「本格的な台風制御としては、台風をまったく弱めてしまうか、その進路を変えるのか2通りの方法が考えられる。後者には、暴風雨による被害を軽減するために、本土からそらす場合の外に、故意に本土に接近させて早天を解消させる場合も含まれる。しかし、台風に関するわれわれの現在の知識では、台風の勢力や進路を著しく変える可能性を持つ野外実験を、いま行なう事は許されない。」

10) このセミナーの米国側出席者の報告が近着の米気象学会誌に載っている(Black, 1971)。

苦心した。原稿をかきおえた時点では、1972年に実験が実施されるか、中止されるか、あるいは延期されるか、まったく見当がつかない。本誌が読者の手もとに届けられる頃には、結論がでていいる筈である。新聞にはこの件に関するいきさつが省略されて報道されたため、ほうぼうで誤解をまねいているようで、遺憾におもう。米国の提案に対してわが国がどのような態度で臨むかを決めるにあたり、台風委員会に代表をおくった建設・外務・気象・科学技術の各省庁の関係者の心労はなみたいていではなかった。結論は決して簡単に導かれたのではない。

災害の発生を未然に防ぐために天気を人工的に制御することは、むかしから人類の夢であった。人工制御を推進する人達は、当然のこととはいえ、それがもたらすであろう明るい面だけを強調した。しかしながら、科学技術が進歩し、台風のような大スケールの大気現象にまで人為的な変化を与えることができる見通しがたった今、片手落ちの判断による行為はできなくなった。

気象調節研究にはかならず野外実験がともなう。野外実験は、たとえ目的が科学的基礎知識を得ることにあっても、社会的な問題としてとりあげられる。実験を提案する場合、慎重な計画の立案が必要である。世間の注目をあつめるとか、予算の獲得だけをねらった野外実験は、その研究分野の進歩にかならずしも貢献するとは言いがたい。

気象調節には、現在の科学技術の水準や社会機構からいって、いまは不可能であるが、将来は可能であろうとおもわれる問題が幾つもある。気象学研究の究極の目的は気象調節であるときえ言われている。それゆえ、この問題は大切に取りあつて欲しい。

謝辞 このセミナーを成立させるにあたり、学術振興会との折衝、連絡に奔走され、準備に力を尽くされた国立防災科学技術センターの小沢行雄計測研究室長に深く感謝の意を表したい。またこの報告を書くにあたり、気象研究所の藤原美幸・小野晃両室長が作成した会議の報告、および渡辺和夫室長による台風に関する統計資料などを参考にさせていただいた。厚く御礼申しあげる。

引用文献

- 1) Anthes, R.A., S.L. Rosenthal and J.W. Trout. 1971: Summary of preliminary result for an asymmetric model of the tropical cyclone, Appendix D, Project Stormfury Annual Rept. 1970, Dept. of Navy and Dept. Commerce, Miami, Fla.
- 2) Black, P.B., 1971: Conference summary,

- cumulonimbus modification of tropical nature, Bull. Amer. Meteor. Soc., **57**: 562-565.
- 3) Cotton, W.R., 1971: Comments on "steady state one-dimensional models of cumulus convection, J. Atmos. Sci., **28**: 647-648.
- 4) 藤原美幸, 1971: 台風の人工制御, 自然, 1971年11月号, 57-63.
- 5) Fukuta, N.,: Weather modification activities in Japan, Bull. Amer. Meteor. Soc., **52**: 4-14.
- 6) Gentry, R.C., 1970: Hurricane Debbie modification experiments, August 1969, Science, **168**: 473-475.
- 7) Magono, C. and S. Tazawa, 1966: Design of "snow crystal sondes." J. Atmos. Sci., **23**: 618-625.
- 8) Mossop, S.C., and A. Ono, 1969: Measurements of ice crystal concentration in clouds, J. Atmos. Sci., **26**: 130-137.
- 9) 小元敬男, 1968: 気象および気候の人工変換, 農業気象, **23**: 195-204.
- 10) 小元敬男, 1971: 熱帯性積乱雲の気象調節, 防災科学技術, No. 19, 1-5.
- 11) Orville, H.D. and L. J. Sloan, 1970: A numerical simulation of the life history of a rainstorm, J. Atmos. Sci., **27**: 1148-1159.
- 12) Sax, R.I., 1969: The importance of natural glaciation on the modification of tropical maritime cumuli by silver iodide seeding, J. Appl. Meteor., **8**: 92-104.
- 13) Simpson, J., 1971: On cumulus entrainment and one-dimensional models, J. Atmos. Sci., **28**: 449-455.
- 14) Simpson, J., and W.L. Woodley, 1971: Seeding cumulus in Florida: new 1970 results, Science, **172**: 117-126.
- 15) Simpson, J., and W.L. Woodley, A.H. Miller and G.F. Cotton, 1971: Precipitation results of two randomized pyrotechnic cumulus seeding experiments, J. Appl. Meteor., **10**: 526-544.
- 16) Takeda, T., 1971: Numerical simulation of a precipitating convective clouds—The formation of a "long lasting" cloud, J. Atmos. Sci., **28**: 350-376.
- 17) 土屋巖, 1970: 台風コントロール物語, 科学朝日, **30**: 65-69.
- 18) Warner, J., 1970: On steady-state one-dimensional models of cumulus convection. J. Atmos. Sci., **27**: 1035-1040.
- 19) Warner, J., 1970: Reply, J. Atmos. Sci., **28**: 647-648.
- 20) Weinstein, A.I., 1971: Comments on "steady

state one-dimensional models of cumulus convection, *J. Atmos. Sci.*, **28**: 651-652.

1969: An isolated cumulus cloud modification project. *J. Appl. Meteor.*, **8**: 936-947.

21) Weinstein, A.I., and P.B. MacCready, Jr.

日本気象学会誌

気象集誌

第II輯 第49巻 第4号 1971年8月

- J. チャーパ・佐々木嘉和：レーダーと地上のメソ観測網のデータ解析より解明
 された1964年4月3日の雷雨の構造と運動について……………191—214
- 山下 晃：降雪実験で得られた外見が六角対称でない雪の骸晶……………215—231
- A.H. アウアー：角板状雪結晶の基底面表面積の測定結果について……………232—235
- 山下 晃・藤木陽一・高橋忠司：厳寒の日に旭川市を中心に生ずる濃い過
 冷却霧，氷晶霧，および降雪……………236—248
- 木村竜治・津 宏治・八木橋章子：鉛直シアのある流れの中の対流の形……………249—260
- 遠藤昌宏・新田 尚：非定常な海洋エクマン層の理論……………261—266
- 松本誠一・二宮洸三・吉住禎夫：豪雨をともなつた梅雨前線の特徴的構造……………267—281
- 股野宏志・関岡 満：熱帯低気圧と温帯低気圧との重合系としての台風
 Cora (1969年) の構造の総観的研究……………282—295
- 田中正三：混濁大気中の放射伝達 I. 散乱反射・透過の問題に関する行列解析……………296—312

要報と質疑

- 倭井兼市：氷晶核の周りのエッチピットについて……………313—315
- 林 良一：Radiation condition の下での赤道大規模波動の不安定性……………316—319
- 気象学文献集発行のお知らせ……………320