

九州南部豪雨観測実験報告*

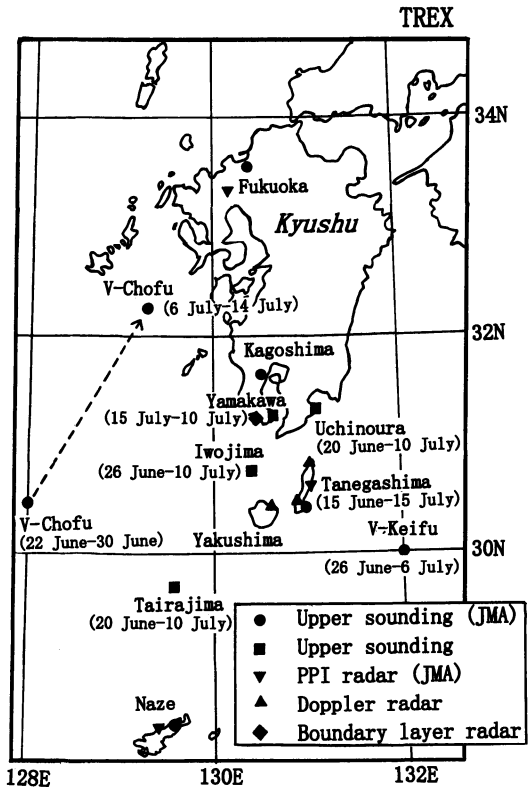
TREX 観測グループ**

1. はしがき

高橋 劭 (九州大学, 現: 桜美林大学)

日本の台風・梅雨前線に伴う豪雨は日降水量が 800 mm を超えることもあり, 洪水などによりこれまで多くの尊い人命が失われてきた。特に九州においては梅雨前線に伴う豪雨で毎年のように大きな災害が報じられている。近年では1957年に死者1000名以上を出した諫早豪雨, 1982年に3時間で 315 mm もの豪雨をもたらして死者292名と行方不明 7名を出した長崎豪雨, 1993年7月21日から8月2日にかけて 600 mm もの豪雨で85名の死者と行方不明 1名を出した鹿児島豪雨などがある。被害軽減のためは豪雨予報の改良が必要であり, そのためには豪雨機構の解明が急務である。今まで気象庁・気象研究所及び多くの大学機関がこの問題に真剣に取り組んできた。その結果, 豪雨をもたらす雲システムの総観場についての多くの知見, 例えば, 梅雨前線上でのメソ α スケール波動の形成, 下層ジェットが存在, メソ対流系の雲群の出現等, が得られた(気象庁, 1973, 1984)。さらに, 1988年7月の集中豪雨観測(浅井, 1990)では初めてドップラーレーダーによる観測が行われ, 雲内の流れがわかってきた。さらに, 飛行機によるドロップゾンデ, 境界層レーダー, ビデオゾンデ等の観測が行われるようになった。

今回の南九州の豪雨観測 (TREX: Torrential Rainfall Experiment) は平成7年春の学会時に研究者間で行おうということから始まった。本実験のための特別な予算はなかったが, 多くの研究機関が持っていた観測計画を調整して参加することにより今までにない総合的な特別観測となった(第1図)。種子島では2台のドップラーレーダー(名古屋大学), ビデオゾンデ



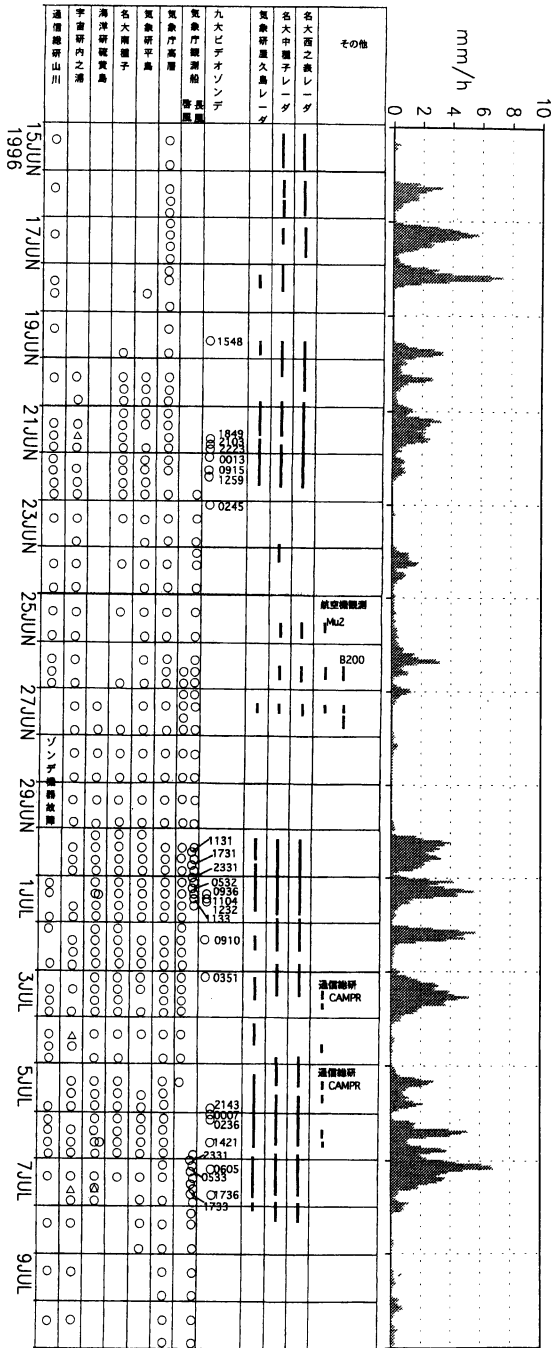
第1図 TREX 参加機関の主な観測装置と位置。

(九州大学), 地上雨滴粒度計(北海道大学), 屋久島ではドップラーレーダー(気象研究所), 山川では境界層レーダー(通信総合研究所, 京都大学)の観測が行われ, また高層ゾンデの特別観測が種子島(名古屋大学), 平島(気象研究所), 硫黄島(東京大学海洋研究所), 山川(通信総合研究所), 内之浦(宇宙科学研究所), 長風丸, 啓風丸, 福岡, 鹿児島, 名瀬で行われた(第2図)。さらに, 飛行機によるドロップゾンデ, 航空機搭載レーダーの観測も行われた。観測期間は1996年6

* A report on TREX (Torrential Rainfall Experiment).

** TREX Group.

© 1998 日本気象学会



第2図 南九州(東経129度~132度, 北緯30度~33度)におけるアメダス・レーダー解析雨量から求めた1時間降水量の時系列と, 高層ゾンデ, ビデオゾンデ, レーダーの観測の頻度.

月20日から7月10日までであった。観測は南九州を中心として行われたが, 全体として梅雨前線は九州中部で活発であった。それでも6月23日に前線の急速な南下に伴う豪雨があり, また7月7日には豪雨が種子島-硫黄島間を襲った。現在各グループとも解析中であるが, 今回はこの観測での概要を紹介したい。なおより詳しく知りたい人は高橋まで問い合わせしてほしい。

この豪雨観測を行うにあたって, 福岡管区气象台, 鹿児島地方气象台, 種子島測候所, 屋久島測候所, 三島村, 十島村, 上屋久町, 南種子町役場, 南種子島社会福祉協議会, 宇宙開発事業団, (財)リモート・センシング技術センター, 中日本航空(株), ダイアモンドエアサービス(株), 宇宙科学研究所, 同鹿児島宇宙空間観測所には協力していただいた。また, この報告をまとめるにあたって吉崎氏(気象研究所)に協力をいただいた。心からの謝意を表したい。

2. 九州における豪雨の観測的・数値的研究

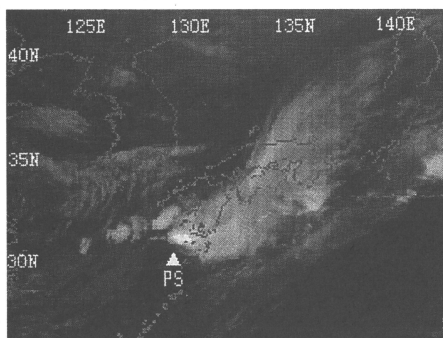
吉崎正憲・榊原 均・気象研究所豪雨観測グループ
(気象研究所)

GANAL(全球解析)データを用いてTREX期間の時間平均構造を眺めてみると, アジア大陸と太平洋の海陸のコントラストによるチベット高原の周りの熱的低気圧と太平洋高気圧が顕著であって, 梅雨期の総観スケールの特徴である梅雨前線北側の700 hPaより高いレベルの西風ジェットや湿舌などがよく見られた。

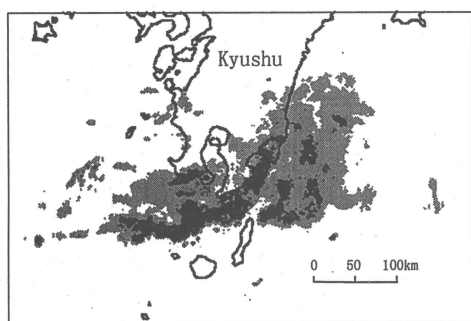
総観スケールの時間変動を眺めると, 大規模低気圧が九州の北を通過してその後には停滞前線(梅雨前線)が九州付近に持続するという繰り返しが見られた。6月18日午前には, 寒冷前線に伴って約20 kmの間隔の2つのライン状の強いエコーが屋久島を通過した。2つのエコーは一見同じように見えたが, ドップラーレーダーの解析から風の収束, 収束域の高度は両エコーの間に違いがあった。

停滞前線上ではより細かいスケールのクラウドクラスターがしばしば発生した。7月7日のクラウドクラスターについて, 気象衛星, ドップラーレーダーや高層観測データを用いてその内部の降水系を解析した(第3図)。降水系は梅雨前線上に東西に延びていて, 西部分は線状, 東部分はコンマ型の降水域を持っていた。この降水系の構造や西側に対流が発生するメカニズムなどを調べるために, 格子間隔の10 kmの気象研究所非静力学メソスケールモデル(NHM)を用いて数

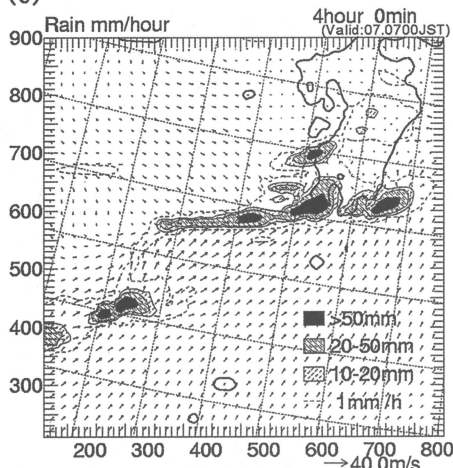
(a)



(b)



(c)



第3図 1996年7月7日の (a) GMS赤外 (09時) と (b) 種子島レーダー (12時) で観測された降水系 (PS). (c) NHMでシミュレートした降水系.

値実験を行った. 再現された降水系は, 東部分はコンマ型で西部は東西に延びる線状の形状で, (時刻は必ずしも一致しないが) 観測されたものとよく対応した. さらに, 感度実験から, 大規模な収束による下層の高相当温位の気塊の蓄積が, 対流の発生・発達にとって重要であることが示唆された.

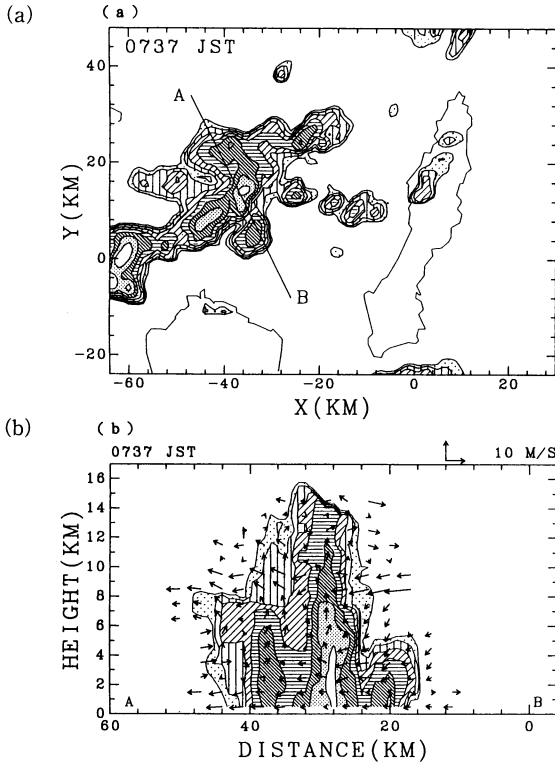
また, 九州周辺の降雨活動 (降水量の領域最大値やある降水量以上の降水面積など) に顕著な日変化が見られた (栗原・加藤, 1997). 朝6~9時に最大, 夜21~24時に最小, 昼12~15時に弱い2次的極大があった.

梅雨の降水系を数値モデルがどの程度再現するかは, 今回の特別観測の大きなテーマであった. そこで, NHMと気象庁現業用狭領域モデル (RSM) の10 km水平分解能バージョンをTRES期間通して走らせて, 予報降雨精度の検証を行った. その結果, 20 mm/h以上の強雨について, RSMは少数しか予報できなかったが, 空振りは多くなるもののNHMはかなりのケースで予報できた. 特に, NHMは20 mm/h程度の豪雨の半数近くを予報できた. 一方, 降水の有無に利用できる情報 (数 mm/hの降水) では, NHMの成績はRSMに比べ良くなかった. NHMの成績の良いケースは梅雨前線が九州南部に停滞している期間の降水で, 成績の悪いケースは梅雨前線が北上した期間や低気圧通過後の寒冷前線に伴う降水であった. RSMとNHMでこうした違いができるのは, もっぱら降水過程を扱うスキームの違いのためである.

3. 種子島のドップラーレーダー観測

武田喬男 (名古屋大学大気水圏科学研究所)

6月16日から7月15日にかけて, 名古屋大学大気水圏科学研究所は屋久島・種子島周辺の海上の降水システムのドップラーレーダー観測を行なった. この観測は文部省科学研究費補助金「豪雨の形成過程の研究と予測法の開発」の研究の一環として行なわれた. 研究は, 主に九州南西部のメソ β スケールの带状積乱雲群を対象に, 豪雨形成に関係するマルチスケールの現象の対応関係を調べ, 豪雨の形成過程を明らかにすると共に, 予測の可能性を検討することを目的としているが, 特に下記の5つの課題を中心に研究が進められている: (1) 散在している時の積乱雲と带状群を構成している積乱雲の構造の違い, (2) 带状積乱雲群全体の形成, 発達と積乱雲群周辺の大気構造の変化との対応, (3) メソ α スケール大気擾乱の構造, 形成, 発達と带状積乱雲群の形成, 発達の対応, (4) 地形効果による



第4図 種子島に設置した名古屋大学デュアルドップラーレーダーにより観測された積乱雲の構造。(a) 水平断面、(b) 鉛直断面。約5時間の寿命をもつメソスケールの雲群の中で、この積乱雲のみが非常に発達した。レーダーエコー強度の等値線は5 dBZ から5 dBZ 毎に描かれている。

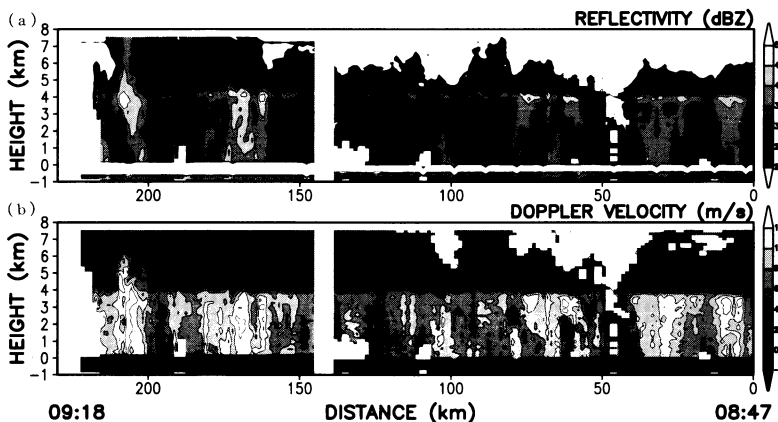
積乱雲の降雨の強化、集中化の過程、(5) 带状積乱雲群による豪雨の形成過程のモデル化。

今回の観測では、長時間停滞したメソβスケール带状積乱雲群、メソβスケール雲群内で非常に発達した積乱雲、長時間停滞したメソαスケール雲群とその内部で発達したメソβ带状積乱雲群など、興味深い現象について貴重な観測データを得ることができた(第4図)。これらの観測結果は現在解析中であるが、ある雲システムの中でなぜ特定の積乱雲、あるいは積乱雲群のみが発達し、時には組織化されるのか、その過程に特に注目し、気象庁数値予報の出力データと気象研究所のメソ大気モデルの出力データをも有効に利用しながら調べている。

4. 航空機搭載マルチパラメータレーダーによる梅雨前線の観測

佐藤晋介・花土 弘・熊谷 博・堀江宏昭・井口俊夫・古津年章 (通信総合研究所)

通信総合研究所では、宇宙開発事業団との共同実験として、航空機搭載マルチパラメータレーダー(CAMPR: Kumagai *et al.*, 1996) による観測飛行を種子島空港を基地にして7月3日から6日の間に計8回(約20時間)行った。観測の目的は、TRMM 降雨レーダーのアルゴリズム開発に役立てるデータを取得すると同時に、梅雨前線に伴うメソ降水系の構造を解明することである。航空機搭載レーダーは、自由に場所を移動して詳細な降雨の鉛直構造を観測することができるので、地上レーダーでの観測が困難な海上や山岳



第5図 航空機搭載レーダーによるクラウドクラスターの横断観測(四国沖〜九州南東海上)で得られた、アンテナを真下に向けた時の反射強度(a)とドップラー速度(b)の鉛直断面図。(7月3日、8時47分〜9時18分)。

域における観測に特に威力を発揮する。

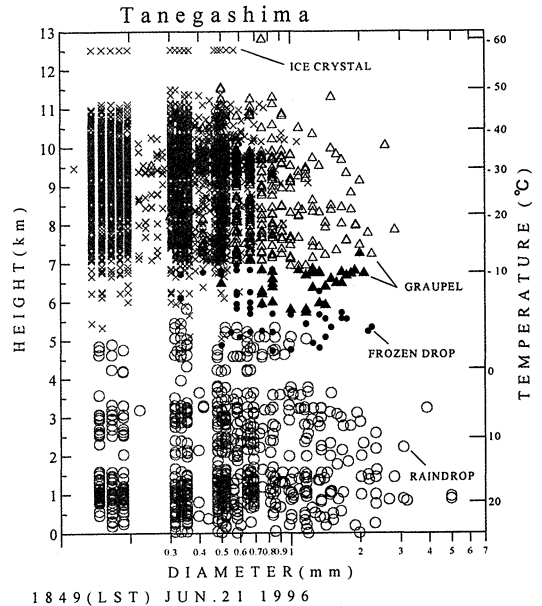
主な観測飛行方法は、直線飛行による3次元マッピング(アンテナ走査)、2次元マッピング(アンテナ固定)、矩形飛行による疑似デュアルドップラー観測などであり、反射強度とドップラー速度に加え、すべての偏波データが取得された。第5図はクラウドクラスターの横断観測で得られた鉛直断面で、ブライトバンドを伴った層状性エコーが約200 kmの範囲に広がる様子や、対流性エコー内部(距離210 km付近)で平均落下速度6~8 m/sの降水粒子が高度約6 kmまで存在する様子が観測された。また、疑似デュアルドップラー観測データからは、約20 km四方の3次元風速場を求めることができ、ゾンデで観測された風のプロファイルとの比較によりその精度も確認された。現在は、偏波観測データやドップラーспекトル解析などから、降水粒子の分類や粒径分布の推定に関する研究を行っている。

5. 雪・霰降水と暖かい雨・凍結氷降水の共存—九州大学グループ—

高橋 勲(九州大学理学部, 現:桜美林大学)

九州大学グループの研究の目的は、梅雨末期の豪雨雲はなぜ10 km×10 kmの狭い領域に毎時100 mmもの強い雨を数時間も降らしうるのか、その機構を雲物理の立場からさぐることである。鹿児島市に大雨をもたらした1993年8月6日のレーダーエコーは豪雨時鹿児島市上空での親降雨セルの停滞とそれへの風上からの娘降雨セルの合流で特徴づけられた(Takahashi, 1995)。アメダス及び高層観測の解析からは中層の北起源乾燥空気の雨域への流入が知られ、雨滴蒸発により下層に冷気塊が形成され、そのためこの冷気塊前面で雲が活発に発達して見かけ上降雨域が停滞したと考えられる。風上での娘雲の発達親雲上昇流の補償流として形成される下層の風上への流れによる冷気が原因と考えられる。詳細な雲物理過程を導入した雲モデルから、ラインバンドの前面で発達した娘雲からの比較的大きな過冷却霧粒を親雲上空から降る霰・雹が捕捉して強い降雨をもたらすことが知られた。従って強い降雨形成には娘雲内での急速な霧粒形成と親雲内での霰・雹形成が活発であることが豪雨形成にはまず必要であろう。即ち豪雨をもたらす雲は暖かい雨型と冷たい雨型が共存することが必要ということである。

九州大学グループでは雲内に直接ビデオゾンデを南種子島町中之上で飛揚して、降水粒子の空間分布の測



18 49 (LST) JUN. 21 1996

第6図 6月21日18時49分ビデオゾンデ飛揚時における降水粒子高度分布。

定を行った。改良型ビデオゾンデは雲粒及び氷晶測定も可能である。ビデオゾンデは中種子の名古屋大学ドップラーレーダーと屋久島の気象研究所ドップラーレーダーと密接に連携をとりながら、6月19日より7月7日までに19台を飛揚した。驚いたことは、雲の電氣的活動が著しく活発であることであった。6月21日、梅雨前線は東西に走り、南西から北東に長く線状に発達したラインバンドはゆっくりと南下して夕方には種子島に達した。ラインエコーの先端が観測地点に達した頃のビデオゾンデの結果を第6図に示す。降水粒子分布では、下方で直径5 mm程度の雨滴が観測され、上方に行くにつれ雨滴の粒径が減少する傾向が見られた。0°C高度より少し上方で凍結氷が観測され、-5°C層上方では過冷却雨滴は観測されなくなった。代わって凍結雨滴から成長した霰が観測され、-10°C層以上で氷晶・雪霰が多く観測された。霰の大きさは最大で約3 mmで、上方に行くにつれて粒径が減少する傾向が見られた。降水粒子電荷は-15°C層から-40°C層にかけて下層ほど強く帯電していた。霰は主に負にまた氷晶は正に帯電していて、-20°C層で-100 pC以上と強く帯電した霰が多く観測された。この雲では凍結氷形成から知られるように暖かい雨型降水機構が活発であるばかりでなく-10°C層以上で活発な氷晶・霰形成が行われており、梅雨期の積雲は高い豪雨ポテンシャ

ルを保持していたことがわかった。

6. 梅雨降水系による降雨の雨滴粒径分布

播磨屋敏生 (北海道大学大学院理学研究科)

地上で観測される雨滴粒径分布は雲内での降水形成過程と密接に関係していると思われる。また雨滴粒径分布は気象レーダーの反射強度から降水強度を見積もる際に重要な要素である。そこで雨滴粒径分布の特徴を調べるために6月19日から7月7日にかけて南種子町で雨滴粒径分布の測定を行った。

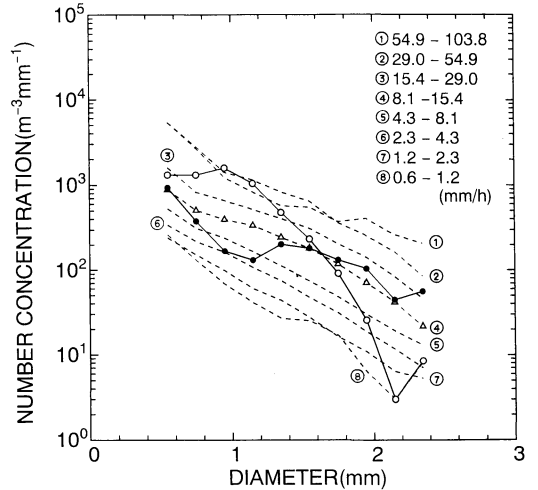
測定された粒径分布データのうち、0.45~2.45 mm (0.2 mm 間隔) の比較的小さい粒径範囲の平均数濃度を変量として主成分分析を行った。主成分分析は、ある現象が多数の変量によって変化している場合、その現象をできるだけ少数の変量に要約して説明するための方法である。主成分分析の結果、第一主成分と第二主成分の寄与率がそれぞれ67.6%と13.6%であることがわかった。これらを合計した累積寄与率は81.2%となり、粒径分布の変動の大部分は第一と第二の主成分によると言える。第一主成分は、固有ベクトル成分が全ての粒径で正の値をとっており、これは第一主成分のスコアが増加すると全ての粒径で数濃度が増加する変動を表すと言える。また第一主成分のスコアは降水強度と良い相関を持つことがわかった。第二主成分は、固有ベクトル成分が小さな(大きな)粒径で負(正)の値をとっていた。これは第二主成分のスコアが増加すると小さな(大きな)粒径で数濃度が減少(増加)する変動を表すと言える。

以上をまとめると、第7図ようになる。この図から雨滴粒径分布の一般的な特徴として、平均値でみると降水強度の増加にともなって数濃度が増加する方向へ平行移動することがわかる。これはMarshall and Palmer(1948)が述べた特徴とは異なっている。また、個別にみるとその他に傾きの変化も含まれていることがわかる。

7. ドロップゾンデの試験運用

中村健治 (名古屋大学大気水圏科学研究所)

航空機からのドロップゾンデの運用試験を行った。ゾンデ本体はヴァイサラ社のGPS(Global Positioning System: 衛星からの高安定電波を利用した全世界測位システム)ゾンデであり、気圧、気温、湿度、及び風を測定する。風はGPSゾンデの名のとおり、GPSからの電波のドップラシフトを利用して測定し



第7図 雨滴粒径分布。第1主成分のスコアの区間を降水強度になおし、降水強度の区間ごとに平均した粒径分布を点線で示す。また降水強度が8.1~15.4 mm/hの粒径分布データの中から第2主成分のスコアが最大のもの(黒丸)と最小のもの(白丸)を抜き出したものもプロットしている。

ている。なお、受信装置は地上でも通常の飛揚ゾンデのデータ受信ができる。航空機はダイヤモンドエアサービスの三菱MU-2型双発ターボプロップ機を用いた。本航空機のドア部分を改造し、投下機を取り付けてドロップゾンデを投下した。受信は地上の2か所(南種子町と中種子町)で行った。将来は受信も航空機上で行えるようにする予定であるが、今回は航空機上に搭載することが間に合わなかったこと、最初の試験としてより確実なやり方を採りたかったこと、データを地上で受信する方が風の精度が良いこと、また地上からの打ち上げゾンデも運用していたために地上施設をそのまま使用できたこと、からこのようにした。精度が地上受信の方が良いのはGPS電波の参照信号として受信機側でのGPS電波を使用するためであり、受信機側が移動すると参照信号としての確度が落ちるためである。(ゾンデの位置をGPSにより精度良く測定しているのではない。)

地上及び航空機の準備を無線で確認した後、ドロップゾンデを投下器に手ではめ込み打ち出した。打ち出しは機内の与圧を利用した。順調に打ち出された場合には地上では2か所ともすぐに受信された。高度4.5 kmからの投下で受信時間は約10分であり、落下速度は平均して約8 m/sであった。

投下自体にはまだ問題がある。打ち出し時にスムーズに打ち出されないと、ゾンデに大きな力がかかり、ゾンデ自体が壊れてしまう。今回も細かい修正を施しながら行ったが、十分な打ち出し成功率とはならなかった。問題は、内外の気圧差により投下器の打ち出し孔が十分に開かないことにあり、今後改良していく予定である。

8. 通信総合研究所山川電波観測所における TREX 期間中の集中観測

西牟田一三（通信総合研究所・山川電波観測所）増田悦久（通信総合研究所・沖縄電波観測所）大野裕一（通信総合研究所・地球環境計測部）津田敏隆（京都大学超高層電波研究センター）林理三雄（鹿児島大学工学部）

通信総合研究所の山川電波観測所において、6月中旬から8月下旬までの期間に、梅雨期の気象擾乱およびそれに関連した現象を解明することを目的とした集中観測を実施した。この計画には通信総合研究所、京都大学および鹿児島大学から大学院生を含めて総勢約30名が参加し、観測とデータ解析を分担している。

観測点は薩摩半島の南東部にあり、コニーデ型の孤立峰である開聞岳（標高約1000 m）の東方約10 kmに位置する。使用した測定機器は多種類あるが、まず通信総合研究所小金井の境界層レーダー（BLR）を山川観測所に移設し、6月14日から8月22日まで、時間分解能5分で観測を継続した（ただし7月18日～31日は欠測）。晴天時には、BLRは高度300 mから75 m毎に約2 kmまで乱流エコーを検出し、風速の3成分および乱流強度を測定した。また、降雨時には雨滴からのエコーを用いて約5 kmまでの水平風を測定した。同じ期間にシーロメータ（VAISALA CT-12 K：最高高度3840 m）により雲底高度を12秒毎に連続測定した。さらに、6月15日～26日および7月1日～10日にラジオゾンデを総数で60個放球した。

京都大学防災研究所より借用したGPS受信機3台を、山川観測所を中心に東西に数100 m離れた3か所に設置し、6月13日～25日に可降水量を測定した。これから水蒸気の水平分布やその移流をBLRおよびラジオゾンデ観測結果と比較して解析しつつある。なお、周辺に分布する国土地理院の定常GPS観測データも参照している。

山川観測所では長期間にわたって放送衛星（BS・CS）からの電波が定常受信されており、降雨減衰およ

びシンチレーションが観測されている。TREX 期間中にBLR等の測定結果をもとに比較研究したところ、高度約1 km以下に水蒸気が多くなり、かつ大気乱流が活発な場合にシンチレーションが起りやすいということが相関解析から明らかになった。

今後これらのデータを総合解析することで、開聞岳による山岳波、およびそれに伴う大気乱流の微細構造などを明らかにしたい。

9. 硫黄島における観測

木村龍治・新野 宏・坪木和久*・石川浩治・伊賀賢太**・中田 隆・鈴木真一（東京大学海洋研究所）

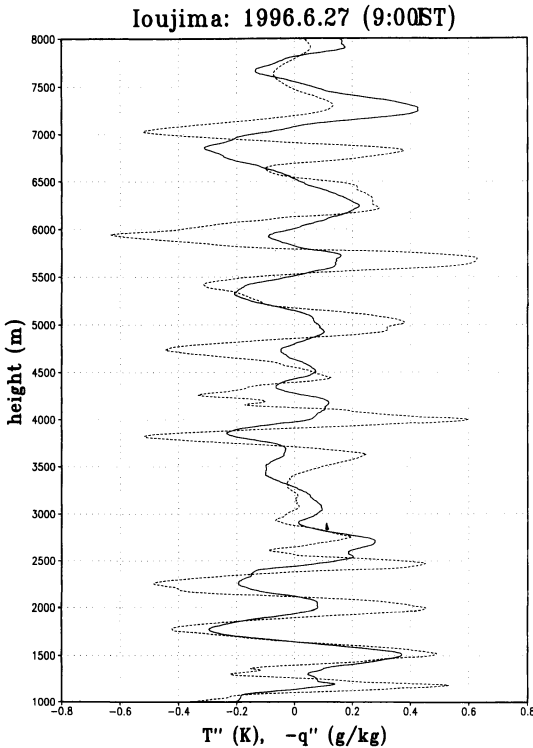
東京大学海洋研究所は3グループに分かれてTREXに参加したが、ここでは屋久島の北西約40 kmにある鹿児島県三島村硫黄島の硫黄島空港（北緯30度46.8分、東経130度16.4分、標高95 m）で行ったゾンデ観測と地上気象要素の観測について報告する。

硫黄島は水没したカルデラの外輪山の一部が残ったもので、島の東半分には現在も噴煙を上げる標高704 mの硫黄岳がそびえている。三島村のご好意により、西半分の比較的平坦な台地上の硫黄島空港の待合室を借用し、ゾンデ受信機やアンテナ、地上気象要素の観測装置を設置した。観測は6月27日から7月12日まで行った。

最初の3日間は梅雨明けを思わせる晴天が続いたが、6月30日から梅雨空が戻り、多くの興味深い降水系が観測サイトを通過した。圧巻は7月7日早朝から発達したクラウドクラスターに伴う降水である。明け方4時くらいから今まで聞いたこともないような連続的な雷鳴が聞こえ始めた。雷鳴は次第に大きくなり、6時25分、強い降水と風の始まりと共に気温が3度低下し、6%の湿度の急激な低下（humidity dip）が観測された。風向も南から北西に変化した。6時50分には大音響と共に窓の外が真っ白に光ったかと思うと電気が途絶えた。これは、宿の真上を通る電線のアース線に落雷したもので、我々のファックス電話のヒューズが焼き切れてしまった。この日、硫黄島の総雨量は6時の降り始めから16時までで177 mmに達し、7時46分の前1時間雨量は56.5 mm、9時38分の前3時間雨量は120 mmであった。硫黄島におけるゾンデ観測の詳細と気象概況の記録は木村（1997）にあるので参照いただきたい。

* 現：名古屋大学大気水圏科学研究所。

** 現：北海道大学大学院地球環境科学研究科。



第8図 高層観測から得られた温度(実線)と比湿(破線)の微細構造。硫黄島で6月27日8時30分放球のオメガゾンデの2秒ごとのデータ(上昇速度約5 m/s)から高度700 mにわたる移動平均を引いて求めた偏差に対して更に高度200 mの移動平均をかけたものを示す。比湿の偏差は符号を逆にしてある。

現在、これらの降水系の事例解析に加えて、メソ対流系の周囲の水蒸気場の水平・鉛直構造について調べるために各サイトのゾンデ・データを詳しく解析している。観測された微細な鉛直構造の興味深い例を第8図に示しておく。図は6月27日09時の硫黄島における

ゾンデ観測の温度と比湿の2秒ごと生データから高度700 mにわたる移動平均を引いたものを偏差と定義し、更に高度200 mの移動平均をかけたものの鉛直分布である。比湿の偏差は符号を逆にして示してある。これを見ると高度1 kmから8 kmにわたって、鉛直スケールにして約300 mの微細構造があり、温度と比湿の偏差には明瞭な逆相関がある。このような構造は、別の季節や場所の観測でも見つかっており、大気を持つ普遍的な構造である可能性がある。微細構造と周辺の降水系の有無との関係についても解析を進めている。

参考文献

- 浅井富雄, 1990: 集中豪雨のメカニズムと予測に関する研究, 文部省科学研究費補助金重点領域研究「自然災害の予測と防災」研究成果報告集, 485 pp.
- 木村龍治, 1997: 集中豪雨をもたらすメソ降水系の降雨機構と組織化に関する研究, 文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 224 pp.
- 気象庁, 1973: 昭和47年7月豪雨調査報告, 気象庁技術報告, (84), 269 pp.
- 気象庁, 1984: 昭和57年7月豪雨調査報告, 気象庁技術報告, (105), 167 pp.
- Kumagai, H., K. Nakamura, H. Hanado, K. Okamoto, N. Hosaka, N. Miyano, T. Kozu, N. Takahashi, T. Iguchi and H. Miyauchi, 1996: CRL airborne multiparameter precipitation radar (CAMPR): System description and preliminary results, IEICE Trans. Commun., E79-B, 770-778.
- 栗原和夫, 加藤輝之, 1997: 九州の梅雨期における降雨の日変化の特徴, 天気, 44, 631-636.
- Marshall, J. S. and W. M. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size, J. Meteor., 5, 165-166.
- 高橋 劭, 1995: メソ降水系のメカニズムと豪雨予想, 「大学と科学」自然災害と地域社会の防災, 9, 164-177.