

## チベット高原における3次元ドップラレーダ試験運用・観測報告\*

小池俊雄<sup>\*1</sup>・清水収司<sup>\*2</sup>・城岡竜一<sup>\*3</sup>・山田広幸<sup>\*4</sup>  
 上野健一<sup>\*5</sup>・藤井秀幸<sup>\*6</sup>・刘黎平<sup>\*7</sup>・安成哲三<sup>\*8</sup>  
 住明正<sup>\*9</sup>・上田博<sup>\*10</sup>・上野精一<sup>\*11</sup>・山崎孝<sup>\*12</sup>

### 1. 目的と経緯

チベット高原上の顕熱・潜熱輸送のアジアモンスーン変動に果たす役割を解明するために、高原独特の非一様な地表面状態とその上での降水環境を、地上観測と衛星により定量的に把握しモデル化する研究が始まっている。このような高原スケールの乾湿分布が、どのように形成され維持されているのかを把握するには、高原スケールの降水分布観測が必要となる。高原スケールでの降水量の把握には、衛星の利用が不可欠で、特に1997年11月に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星 (TRMM) による降水の3次元観測に期待が寄せられている。一方、高原上の雲物理過程を含む降水系のメカニズムと降水量の時空間分布には不明な点が多い。これらの降水系の動態を解明するためには、地表面でのエネルギー・水フラックス観測および雲水・水

蒸気を含む大気観測と合わせて、メソスケールでの降水系 (降水量とそれに伴う風系) の観測が必要となる。そこで、TRMM による降水量算定アルゴリズムの開発・検証と雲物理過程を含むチベット高原での降水系の動態の解明の目的で、チベット高原での3次元ドップラレーダ観測計画が1994年に立案された。これは、宇宙開発事業団 (NASDA) の TRMM 検証実験とアジアモンスーンエネルギー・水循環観測研究計画 (GAME) のチベット高原観測プロジェクト (GAME-Tibet) との共同観測研究である。高地・寒冷条件を考慮したレーダのハード・ソフトの検討、NASDA によるレーダ製作、長岡技術科学大学での試験運用、レーダの中国への輸入及びチベット高原でのレーダ運用に関する中国政府との交渉などを経て、1997年8月16日未明、高原中央部に近い那曲 (ナチュ) にレーダが到着した。NASDA 及び日本無線 (JRC) の支援を得て、早速設置作業に取り掛かり、1997年8月31日～9月9日に、GAME-Tibet Pre-phase Observation Period 2 (POP2) の一環として、チベット高原上で試験運用・観測が実施されるに至った。

\* 3D Doppler Radar Test Operation on the Tibetan Plateau.

\*<sup>1</sup> Toshio Koike, 長岡技術科学大学環境・建設系.

\*<sup>2</sup> Shuji Shimizu, 宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター.

\*<sup>3</sup> Ryuichi Shirooka, 北海道農業試験場.

\*<sup>4</sup> Hiroyuki Yamada, 北海道大学大学院理学研究科.

\*<sup>5</sup> Ken'ichi Ueno, 滋賀県立大学環境科学部.

\*<sup>6</sup> Hideyuki Fujii, 長岡技術科学大学環境・建設系.

\*<sup>7</sup> Liu Liping, 中国科学院蘭州高原大気物理研究所.

\*<sup>8</sup> Tetsuzo Yasunari, 筑波大学地球科学系.

\*<sup>9</sup> Akimasa Sumi, 東京大学気候システム研究センター.

\*<sup>10</sup> Hiroshi Uyeda, 北海道大学大学院理学研究科.

\*<sup>11</sup> Seiichi Ueno, 宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター.

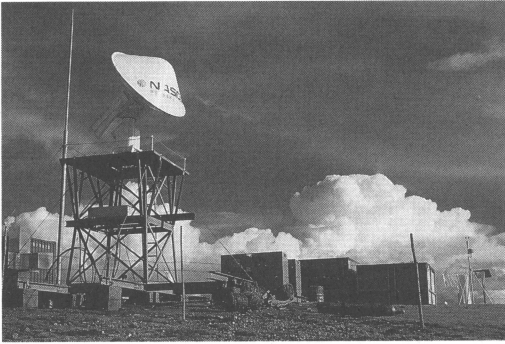
\*<sup>12</sup> Takashi Yamazaki, 宇宙開発事業団地球観測センター.

### 2. 観測体制

使用したレーダは宇宙開発事業団の所有する TRMM 検証用可搬型気象ドップラレーダで、周波数 9.410 GHz、観測半径が128 km の強度観測モードと64 km のドップラ観測モードを有しており、それぞれ PPI (一定仰角で方位角方向に走査した断面) 観測、RHI (一定方位角で仰角方向に走査した断面) 観測が可能である。これらを組み合わせ、次の5つのパターンを基本として10分毎の連続観測を10日間実施した。

1) 64 km モードでの3次元ボリュームスキャン (9 仰角): 5 分間

2) 128 km モードでの2 仰角での PPI 観測: 1 分



第1図 TRMM 検証用可搬型気象ドップラ・レーダ

間

- 3) 64 km モードでの鉛直一次元上向き観測：1分間
- 4) 64 km モードでの雨量計方向の RHI 観測：1.5分間
- 5) 64 km モードでの降水系追跡のための RHI 観測（オプション）：1.5分間

また、レーダ観測範囲内の7か所に雨量計が設置され、レーダ設置地点にはビデオカメラによる降雪粒子観測装置（粒径分布、落下速度等）が設置された。レーダ運用にあわせて12回のGPSゾンデ観測も実施された。

### 3. チベット高原での降水系の特徴と定量観測

#### 3.1 背の高い対流セル

今回の観測では、日変化に伴い、昼過ぎから夕方にかけて非常に背の高い対流雲が多数観測された。第2図はその一例で、エコー頂が高度12 km、海拔高度にすると約17 km にまで及んでいる。このエコーは、ドップラ速度から推定すると、レーダサイトから40 km 付近に強い収束があると考えられ、さらに、その下層には約1.5 km の厚さで、10 m/s 以上のドップラ速度を示すガストフロントが見られる。このようなエコーの通過時には地上で霰や雹が観測されることが多く、また、発達した対流雲の周辺には、4 km～5 km にも及ぶ厚さのアンビル層が0℃レベルよりも上の高度で見られることもあった。

#### 3.2 渦状擾乱

第3図は対流雲内で渦が観測された事例である。渦はドップラ速度の極大（+7.8 m/s）・極小（-7.5 m/s）のペアとして出現し、強い反射強度の部分と一致した。

水平スケールは約10 km であった。今回の観測では、中・下層での一般風が弱いことが多かったが、このような渦のパターンが多数観測され、竜巻の漏斗雲のビデオ撮影にも成功した。

#### 3.3 層状性降水

対流性降水ばかりではなく、層状性の降水も観測された（第4図）。地表から0.5 km 付近の高度に0℃レベルに相当するブライトバンドが広がっている。エコー頂はドップラ速度では海拔高度13 km 以上にまで及び、雪・氷晶が高いところまで存在しているのがわかる。また、広い範囲にエコーが広がり、層状の構造をしているのがわかる。このような降水ではVAD法を用いて観測点上空での風のプロファイルを求めることが可能である。

#### 3.4 日周変化

今回の観測では午前中には晴れ、午後には対流雲が発生、夕方に激しい降水となった後、層状になるという日周変化が典型的パターンであった。第5図は3次元データセットから作成したエコー面積の時間変化である。夕方の対流性降水に対応する大きな反射強度のピークが9-11UTC（15-17LT）に存在している。これに対応して、地上風速の日変化からも、夕方から夜半にかけて風速が顕著に増大することが観測された。

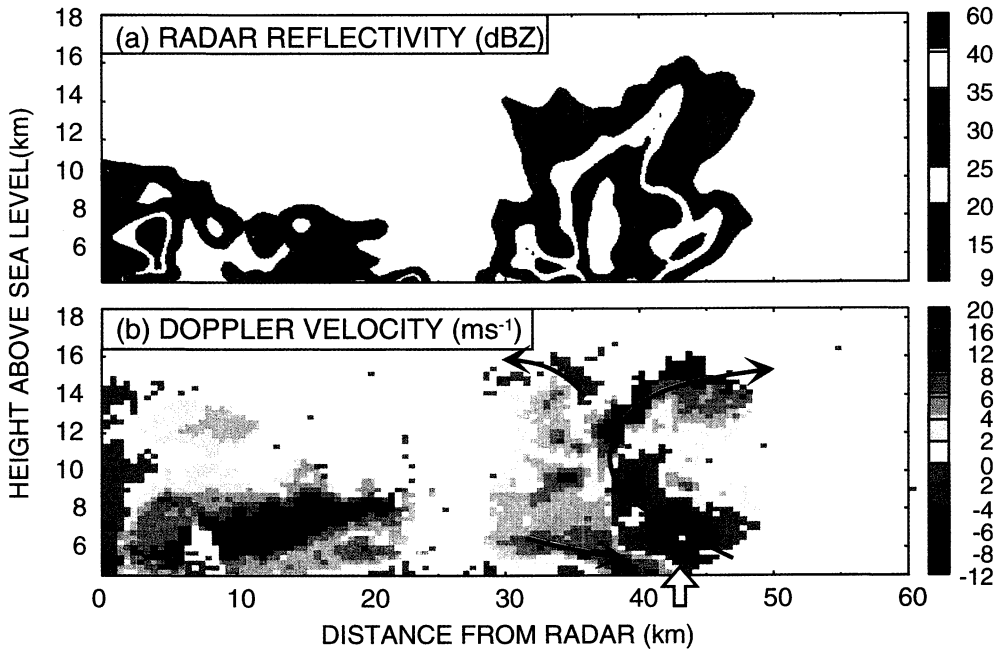
#### 3.5 地上雨量計

那曲流域内の7か所に雨量計を設置し、約2週間にわたり10分間降水量を測定した。高原上ではモンスーン期も標高や気温の状態により降雪がもたらされるため、内4地点には重量式降水量計を初めて導入した（第6図）。当初の目的である観測地点の確保、動作試験を終え、レーダデータとの比較解析を進めている。レーダサイトでは8月21日から9月10日の20日間に27 mm の降水量が観測され（平均気温7.5℃、風速2.3 m/s）、標高4500 m 地点では19%、4800 m 地点では28%の降水の捕捉率が低下することが試算された。現地では雨足が地上に届かない降水雲が数多くみられ、反射強度と地上降水量の比較の大きな課題となることが示唆される。

#### 3.6 降水の空間分布の算定

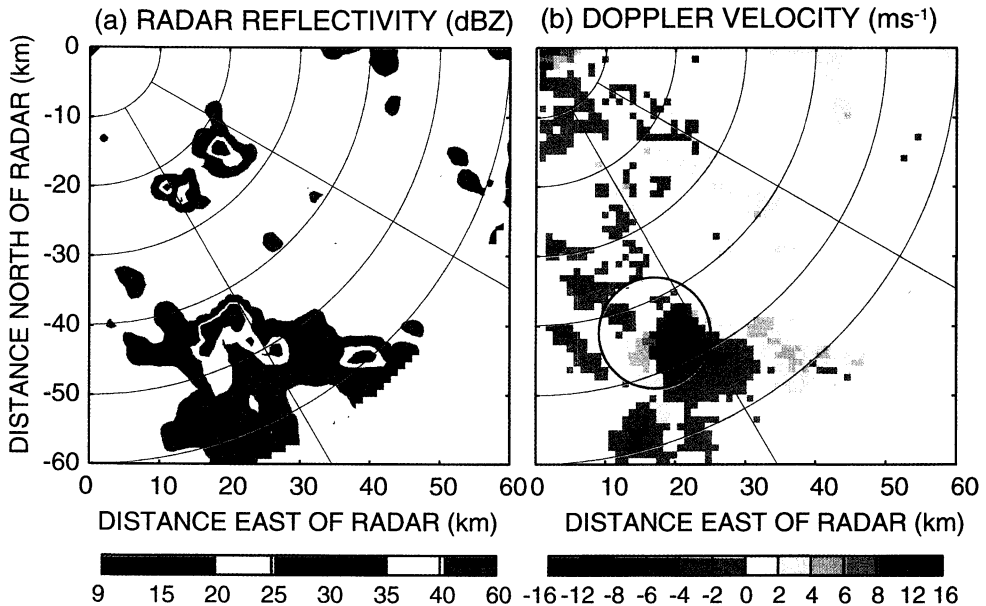
TRMM で提供される高原スケールのデータは月単位の降雨量のプロダクトであり、高原上の降水変動を把握するには不十分である。そのため、TRMM の検証を行なうと同時に、3次元ドップラレーダとTRMM を組み合わせるアルゴリズムの開発を行なう必要がある。第7図は、レーダで観測した反射強度とドップラ

## RHI ( 1028 UTC 01 SEP. 1997 ) Az.= 52.0

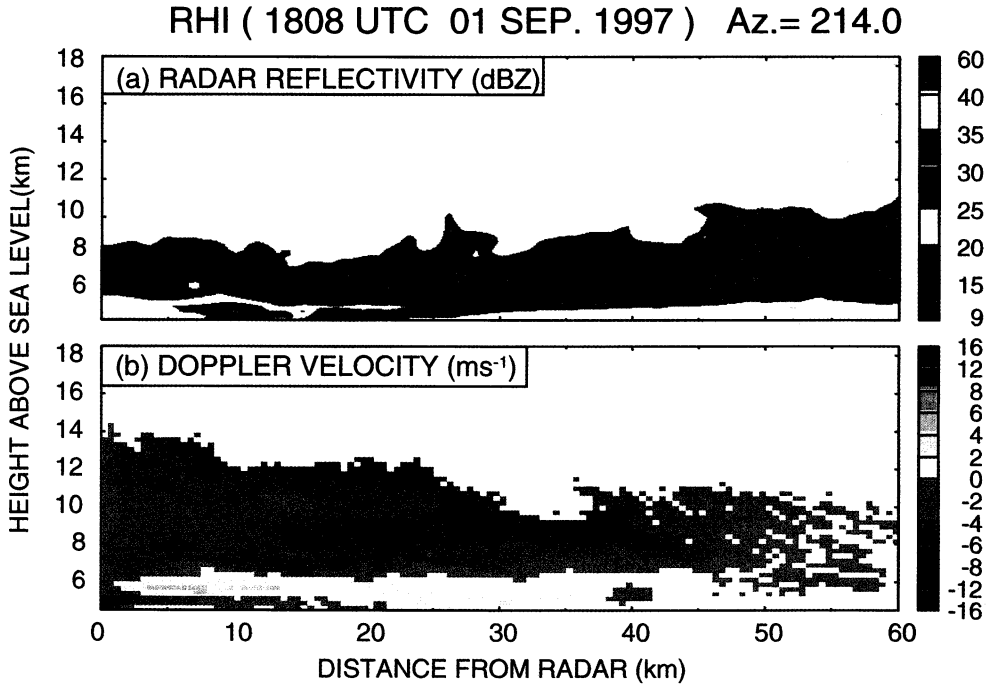


第2図 1997年9月1日1028 UTC (LT=UTC+0600) の方位角52.0度におけるレーダエコーのRHI. (a) が反射強度, (b) がドップラ速度 (正が遠ざかる成分) を示す. 矢印は速度分布から推測される風の流れを示す. また, 白い矢印はガストフロント先端の位置を示す.

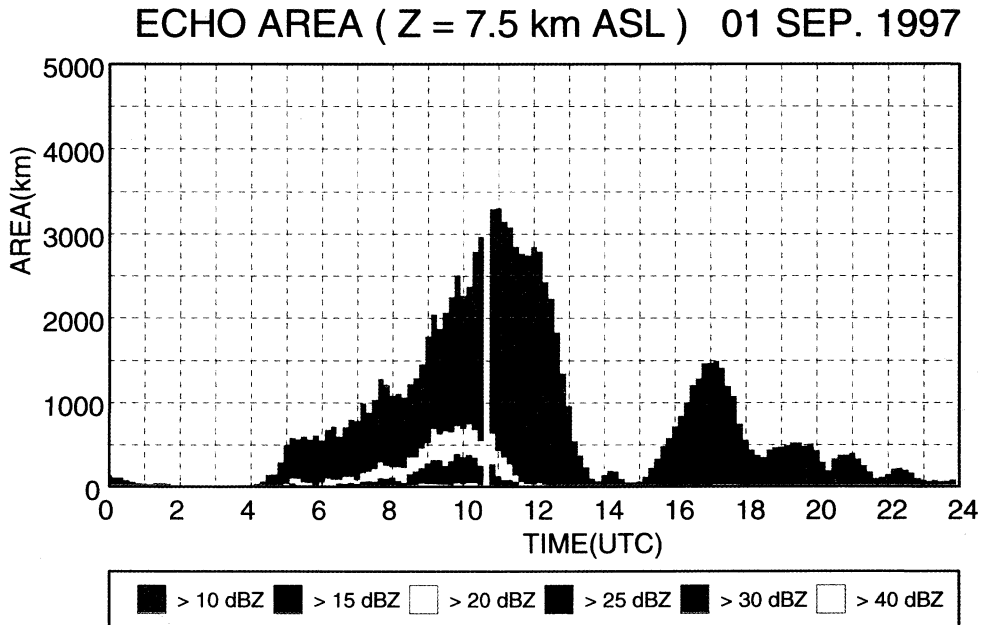
## PPI ( 0810 UTC 01 SEP. 1997 ) El. = 2.5 (deg.)



第3図 1997年9月1日0810 UTC の仰角2.5度のPPI. 円は渦の位置を示す.



第4図 1997年9月1日1808 UTC の方位角214.0度におけるレーダエコーのRHI. (a) 反射強度, (b) ドップラ速度.



第5図 1997年9月1日0000-2400 UTC のエコー面積の時間変化. 海拔高度7.5 km(レーダから3 kmの高度)の水平断面内における, 反射強度10 dBZ以上の領域の面積を示す.

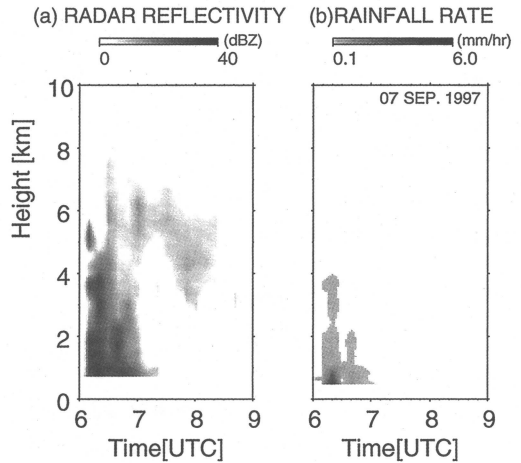


第6図 重量式降水量計 (アメリカ・ETI社製)

速度分散から降水量を求めた結果である。このような解析から、エコーパターンと降水量の関係を把握し、TRMMによる高原スケールの降水算定アルゴリズムへ適用させることが今後の課題である。

#### 4. 1998年 IOP 計画

1998年はGAME全体の集中観測期間 (IOP) である。GAME-Tibetでは自動気象観測機、境界層タワー、乱流観測装置、GPSゾンデ、エアロゾンデ (無線操縦の小型航空機による大気観測機器)、マイクロ波放射計、土壌水分計、雨量計、水位計等とともに、3次元ドップラレーダを用いた集中観測を予定している。



第7図 レーダサイト上空の鉛直プロファイル。  
(a) レーダサイトにおける反射強度の鉛直プロファイルと (b) ドップラ速度分散から推定した粒径分布を用いて算出した降水強度 (落下速度分布を仮定)。

レーダはモンスーン期開始前の5月下旬より、モンスーン期終了までの9月中旬まで約4か月間連続運転される予定である。種子島宇宙センターより打ち上げられたTRMMは順調に大変興味深いデータを取りつけており、TRMMとチベットレーダを組み合わせたチベット高原でのエネルギー・水循環の動態の解明に期待が寄せられている。1998年はレーダの運用だけで日中から延べ18名の研究者がチベット高原を訪れ、GAME-Tibet全体では、豪、韓、米、独も加え、観測に参加する研究者の数は約100名に達する予定である。過酷な自然環境下での観測ゆえに、完全かつ確実なデータ取得が望まれている。世界初の高原上での3次元ドップラレーダデータが、メソ降水系からアジアモンスーン変動解明に至る研究の飛躍的進展につながることを期待したい。

なお、GAME-Tibetの観測速報は、<http://monsoon.nagaokaut.ac.jp/tibet/>にて公開中である。