

## チベット／ヒマラヤトランゼクトで見た降水擾乱の特性

上野健一（滋賀県立大学環境科学部）

### 1. はじめに

チベット高原周辺は、亜熱帯域（低緯度）を含みつつ寒冷圏（高標高）を有する世界でも類を見ない独特の陸面環境を有する。従来から、広域モンスーン循環に果たす高原の役割に関しては数多くの研究が実施されてきたが、メソ降水擾乱に関する観測研究事例は依然不足している。現地の気象観測地点は 20 箇所程度に留まり、研究集者層も薄い。本ワークショップでは、平野地形を代表するチベット領域と複雑山岳地形を代表するネパールヒマラヤ地域における降水擾乱の特性に関して、私が進めてきた研究方針をレビューし、近年の研究動向を紹介するとともに、ベンガル湾から高原にかけたトランゼクトで見るメソ擾乱研究の関連性に関する重要課題を提示する。

### 2. 過去の研究と衛星降水量で見る降水擾乱の特性

広大な遠隔地を有するチベット高原の擾乱を把握する上で、静止気象衛星データの存在は大きい。Ueno et al.(1995)は、従来あまり着目されなかった気象衛星ひまわり画像の縁辺部を幾何補正する事で、モンスーン期の熱的低気圧発達に伴う高原スケールの渦上の雲域や、内在するメソ擾乱の日変化を伴う発達が存在する事を指摘した。一方で、現地で観察される雲の発達は様々であり、必ずしも夕方に積乱雲を伴う夕立が発生し夜間には層状の降水が卓越するといった日変化が繰り返されるわけではない。乳房雲やロート雲といった日本ではあまり目にする事のない雲も出現する。これら各種擾乱の出現と降水量の季節内変動を統合的に説明し、高原上での水循環過程を解明していくことは、同領域での基礎研究として非常に重要である。

1998 年に実施されたGEWEX/GAMEプロジェクトでは、モンスーン期を中心とした約 4 ヶ月にわたる集中観測を実施した。特に高現上でNASDAドップラーレーダを世界で始めて連続運用しデータを公開した功績は大きい。いくつかの成果を統合すると、高原中央部平野部で発達する積雲対流は非常に背が高い割りに、空間スケールが小さく孤立しており、低緯度熱帯地域で見られるような強い降水強度を伴う組織化した発達が必ずしも卓越しないこと、降水量そのものは夜間や午前中に出現する層状降水雲からの寄与が大きい事、擾乱の種類や降水量変動はチベット高気圧の東西振動と偏西風蛇行の影響を受けて大きく季節内変動すること、さらにニンチェンタンラ山脈やタングラ山脈といった大規模山脈と平野間での局地循環が降水雲の発生や移動と関係している可能性があること、が明らかになっている（各論文の詳細は<http://www.hyarc.nagoya-u.ac.jp/game/>のPublication Listを参照の事）。高原の南縁を構成するヒマラヤでは、1970 年代から日本の雪氷気象研究者により山岳降水量分布の高度依存性に関する研究が進められてきた。これは、標高 6000mを超える氷河涵養域での降水擾乱の実態把握が必要とされていたからである。当初、U字谷の稜線と谷底で降水の日変化パターンに大きな違いがある（Ueno and Yamada, 1990）ことから、熱的対流を伴う狭域局地循環が支配的であると考えられてきた。しかし、モンスーン期の静止衛星画像を解析すると、チベット高原上では日中に顕著な背の高い対流が卓越するのに対してヒマラヤ南面上空の雲長高度は低い事（Kurosaki and Kimura, 2002）、冬季降水も、低気圧性擾乱の通過に伴い地形にブロックされた地形性降水が卓越する事（Lang et al., 2004）など、力学的上昇に伴う降水が基本場であるとの見方もある。いずれにしても、同地域は非常に地形が複雑で機材

搬入が困難であること、中国チベット自治区との国境近傍であること、必ずしも広域シミュレーション（GCM）にとっては高層気象データが必要とされない地域である事、などの理由で対流圏下層の観測（具体的にはゾンデ観測やレーダ観測など）は殆ど実施されてこなかった。現在も、ネパール国内における高層気象観測地点は一箇所も無い。今後、ヒマラヤ上空のメソ擾乱の研究を推進するためには、地上リモートセンシング機材を投入した集中観測の実施し、メソスケールで見た山体の熱力学的効果を評価する事が研究のブレークスルーへつながると考える。

高原スケールの降水量分布把握は、気象学的な水循環過程の理解と潜熱評価の他にも、現地での水資源や災害予測といった応用的視点から非常に重要な研究課題である。特に、衛星データによる降水量（衛星降水量）の推定には大きな期待がかかっている。日変化を伴う雲擾乱を検知するために、まず重要視されたのが静止気象衛星 IR 画像の活用である。Ueno(1998)は現地降水量データおよびレーダデータにより得られる面的降水量情報と IR データから抽出された雲長高度分布を経験的に結びつけることで、雨季の高原スケールでの降水量分布を推定した。その結果、ヒマラヤ南面と高原南部で分離される降水量分布や谷地形に依存して移動する昼夜の降水域の相対的な変動を再現することができた。しかし、このような手法では非モンスーンの降水を伴わない雲域の出現により降水量を過大評価してしまう問題が常に付きまとう。言い換えれば、季節進行に伴い卓越する雲構造が変化する高原で、IR データのみからでは降水量を客観的に評価しづらい。実際、GMS/IR 画像縁辺の水平分解能は高い対流雲ほど悪くなり、現地でも頻繁に積乱雲から伸びる“かなとこ雲”や積乱雲の衰退に伴う層雲の風下への拡大を多く目撃する（写真1）。IR データを利用した対流指標は地上付近の降水や水循環過程を示す指標としてはかなり過大評価であり、日変化や季節内変動を論じる上で注意が必要と考える。一方、大気中の水文量を直接検知する手法としてマイクロ波衛星データの活用が近年注目されている。マイクロ波を使った衛星降水量推定には、半経験式による散乱指標を利用したものから、理論的に地表面からの放射伝達を解くものまでさまざまであるが、Ueno et al.(2002)は前者の方法にて高原中央部での観測降水量との比較を試みた。その結果、1) 降水による散乱減衰量が高原上では通常の熱帯で得られる値に比べて大変小さいこと、2) 冬季の積雪が最も大きな減衰量として表れ、さらに3) 季節変化するバイアスが大きい事を明らかにした。1) に関しては、高い積雲対流の割に地上降水強度は小さいという従来の視点を裏付けており、3) のバイアスをフィルターしないと実際の降水量に焼きなおすことは難しい。3) に関してさらに詳しく調べた結果、散乱指標そのものが大きく日変化しており、振幅が雨季の始動とともに小さくなる事が季節変化の主な要因である事が明らかとなった。降水の有無により地表面直下での地温勾配と SSM/I 散乱指標を比較する事で、強い日射を伴う乾季の地表面そのもののもたらす散乱が従来の散乱指標に大きなバイアスをもたらししていたと解釈した。これらを考慮し、従来の散乱指標から地上付近の散乱の指標となる値を差し引きレーダ降水量との経験式を構築することで、3) のバイアスを減衰させる新たな散乱指標の構築を行った。マイクロ波衛星の観測頻度は日4回程度であり、日変化を考慮した面的降水量推定のためには現在考案されている GPM プロジェクトでの高頻度観測が切に望まれる。

### 3. 近年の研究の進展

前章で明らかのように、高原周辺でのメソ降水系を正しく理解し衛星降水量の精度を向上させるためには、単にメソ擾乱単体での雲発達を理解するだけではなく、A) 陸面状態の変化、B) 大気境界層循環の果たす役割、C) 高原をとりまく総観場の影響、といった要因を総合的に考慮していくことが非常に重要である。その意味で、CEOP プロジェクト(Koike, 2004)によるスーパーサイト観測は非常に正攻法な研究方針と言える。例えば、チベット高原における最近の研究の一例を見ると、A) に関して Yamada and

Uyeda(2004)は熱的低気圧が卓越するような総観場において、モンスーンの季節進行に伴う陸面課程の変化（土壌水分の増加と植生の成長）が対流雲の構造変化に大きな影響をもたらす可能性を示唆している。従来から雲底以下での蒸発過程が重要と考えられていたが、レーダデータを大気陸面相互作用に適用する研究事例は非常に重要と考える。B)に関しては Yang et al.(2004)が地表面過程も考慮した ARPS モデルにより局地循環をシミュレートし、複数の単一对流セルがより大きなメソ擾乱を形成しつつ山岳域から伝播する様相を再現した。本実験はプレモンスーンにおける再現であるが、従来考えられてきた局地循環の単一セル的概念を一新し、山岳域での降水発生に伴う大気下層での冷却効果が局地循環と連動しているとする視点は大変興味深い。一方、C)に関しては、中緯度偏西風蛇行の影響を受けたトラフ進入時と、チベット高気圧の西進に伴う熱的低気圧発達時で、降水の日変化パターンが異なることを上野、他（2003）は指摘している。Sugimoto et al.(2004)は、6km メッシュでの非静力学モデルにより、このような異なる総観場における広域降水域の発生がどの程度再現できるかどうかに関して研究を進めている。その結果、トラフ前面や熱的低気圧後面に出現する広域収束帯で発生する降水域は再現されたが、個々の熱的対流による高原中央部での降水は再現できておらず、陸面過程の改善とメッシュの細分化が検討されている。一方、ネパールヒマラヤに関する降水擾乱に関しては、非モンスーン期の降雪発生メカニズムが近年注目されつつある。Lang et al.(2004)の研究は前章で取り上げたが、Hara et al.(2004)は高原南西部での地形性ロスビー波による低気圧循環の活性化を指摘している。また、Ueno(2005)は冬季降水量から循環場を合成し、METEOSAT 画像等で事例解析を行うことにより、東アジアの中緯度循環場蛇行とバングラディッシュ域でのメソ擾乱の発生が春先の高原中央部に降雪をもたらす事例を提示している。この解析でもうひとつ気がついたことは、サイクロンにより 11-12 月頃に突発的にネパールヒマラヤで大雪が発生する事例が多く見られることである。本研究会でも 4 月頃にバングラディッシュで竜巻が多発する様相（山根氏）や、ENSO に伴う台風頻度の解析（筆保氏）が紹介されており、一方で梅雨期前に高原風下から日本近傍への渦度伝播も GCM で再現されることがあると言う（安永氏、私信）。非モンスーン期の南アジアにおけるメソ擾乱発達の関連性は今後着手していくべき重要な研究課題であろう。

#### 4. 今後の展望

CEOP/CAMP/Tibet プロジェクトでは、高原上の陸面過程から対流圏下層を連続した集中地上リモートセンシング観測を計画した。残念ながら 2003 年は SARS の問題で実施できなかったが、2004 年 4 月および 8 月に計 4 週間程度の観測が実施した。今研究会で取り上げなかった多くの課題も含め、今後の観測成果が公表されると期待される。一方、標高 4000m を越えるチベットへ水蒸気が輸送される過程に関しては、1) 対流圏中層から広域輸送によりもたらされる、2) ヒマラヤの深い谷に沿って対流圏下層を輸送される、3) 高原内部での再循環により水蒸気は循環している、の仮説を考えることができる。1) に関しては、低緯度熱帯での背の高い積乱雲発達によるポンプアップの可能性も指摘されている（故、沼口氏、私信）。2) に関しては、ヒマラヤの複雑実地形を利用した局地循環モデルの構築と深い谷での検証観測が不可欠となる。さらに 3) に関しては、陸水も含めた短インターバルでの同位体集中観測が栗田氏（地球フロンティア）を中心として CEOP2004 夏隊集中観測により実施され、成果が期待されている。

チベット高原からベンガル湾にかけて地上観測網のトランゼクトを図 1 に示す。ここで、WMO に登録されている既存観測地点の日データは、NOAH/GLOBALSOD データとしても公開されている。しかし、実際にデータを取得してみると多くの地点で欠測が生じており、さらに現地気象機関が後日整理す

「アジアにおけるメソスケール擾乱の多様性」研究集会（2005年1月20日，京都大学防災研）

るデータと比較すると、データそのものが大きく食い違う事もある（遠藤氏、私信）。現在、高原上では CAMP/Tibet プロジェクトにより 13 箇所で、ヒマラヤ山岳域では CAMP/Himalaya により 5 箇所で自動気象観測システムが整備された。両領域には 4 DDA 同化検証用のスーパーサイトも含まれる。今後、ベンガル湾から内陸にかけた平野部に同様の降雨観測網が整備され、国際的なデータ公開が実施されれば、トランゼクトで見た降雨域の伝播と降水擾乱発達の地域間の連動を把握する事が可能となる。同領域は世界的な多雨地域としても有名であり（本研究会、林・寺尾氏発表）、10km 領域に雨量計と地上リモートセンシング機材を集中配置したスーパーサイトの構築は観測成果の飛躍的な向上をもたらすと考えられる。新規プロジェクトの発足に期待したい。

#### 文献

- Hara M., F. Kimura and T. Yasunari, The generation mechanism of the western disturbances over the Himalayas, *Proceedings CD-ROM of the 6<sup>th</sup> International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME*, December 2004, Kyoto, Japan, GAME CD-ROM Publication No. 11, T4HM09Aug04145134, 2004.
- Kurosaki Y. and F. Kimura, 2002: Relationship between topography and daytime cloud activity around Tibetan Plateau. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 1339-1355.
- Lang, T. and A.P. Barros, Winter storm in the central Himalayas, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 829-844, 2004.
- Lang, T. and P. Barros, Winter storm in the central Himalayas, *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 829-844, 2004.
- Sugimoto S., S. Sha and K. Ueno, Numerical simulation of precipitation phenomena during the monsoon season on the Tibetan Plateau, *Proceedings CD-ROM of the 6<sup>th</sup> International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME*, December 2004, Kyoto, Japan, GAME CD-ROM Publication No. 11, T2SS30Jul04201846, 2004.
- Ueno K. and T. Yamada, 1990: Diurnal variation of precipitation in Langtang Valley, Nepal Himalayas, *Bulletin of Glacier Research*, Vol.8, 93-102.
- Ueno K., T.Ohno and T.Yasunari, 1995: Convective activities observed by GMS-IR imagery over the Tibetan Plateau. *Report of special research project on global change*. The University of Tsukuba, 3, 173-181.
- Ueno K., 1998: Characteristics of plateau-scale precipitation in Tibet estimated by satellite data during 1993 monsoon season. *J. Meteor. Soc. Japan*, 76, 533-548.
- Ueno K., H.Fujii, N.Grody, R.Feraaro and A.Gruber, 2002: Estimation of precipitation with weak intensity in the Tibetan Plateau by using SSM/I satellite data. The Second Tibetan Plateau Experiment of Atmospheric Sciences. China Meteorological Press. No.132. Beijing. 132-136.
- 上野健一、他:チベット高原の降水に影響を及ぼす中緯度循環場に関する事例解析、日本気象学会、筑波、2003年5月、p44.
- Ueno K., Synoptic conditions causing non-monsoon snowfalls in the Tibetan Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32. No. 1, L0181110.10.1029/2004GL021421.
- Koike T., 2004: The coordinated enhanced observing period, - an initial step for integrated global water cycle observation. *WMO Bulletin*, 53, No..2.

Yamada H. and H. Uyeda, Transition of the precipitation process over the central Tibetan Plateau during the summer of 1998. *Proceedings CD-ROM of the 6<sup>th</sup> International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME*, December 2004, Kyoto, Japan, GAME CD-ROM Publication No. 11, T2DYH29Jul04104738, 2004.

Yang K., T. Koike, H. Fujii, T. Tamura, X. Xu, L. Bian, and M. Zhou: The Daytime Evolution of the Atmospheric Boundary Layer and Convection over the Tibetan Plateau: Observations and Simulations, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2004, 82(6), 1777-1792.



写真1 積乱雲からのびる広域層雲（2004 年 8 月、中国チベット自治区、CAMP/Tibet、ANNI サイト、31.25N,92.17N,標高 4480m、にて撮影）

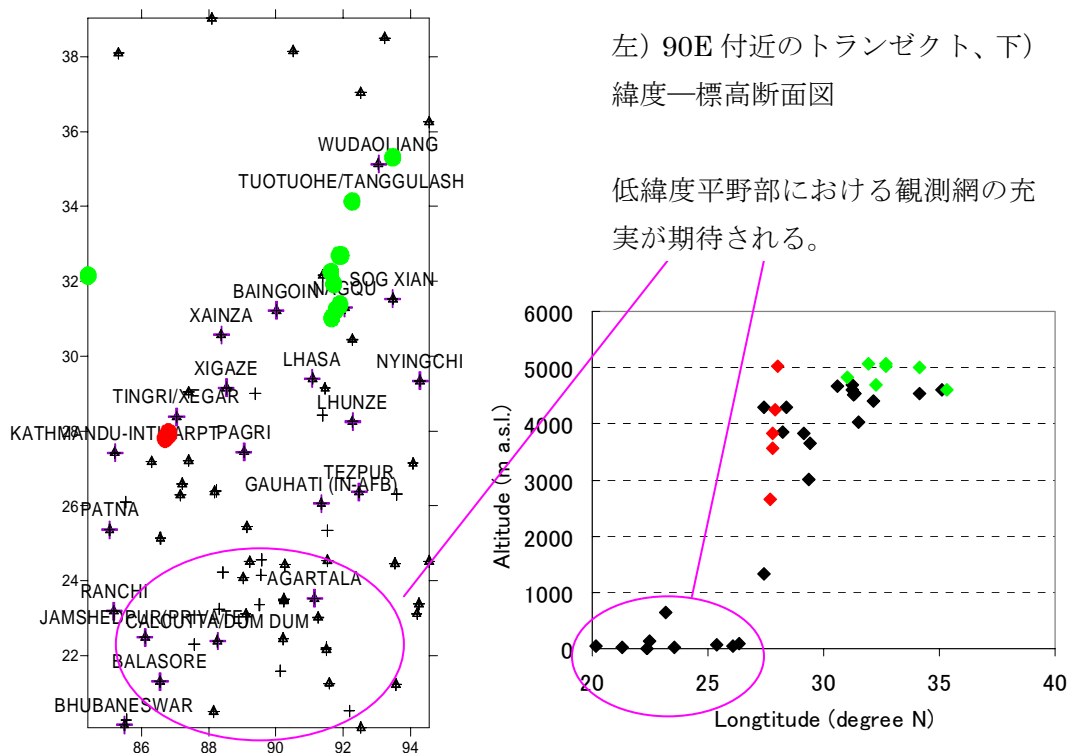


図1 チベット・ヒマラヤ、トランゼクトで見た地上観測地点の分布、黒は NOAA/GLOBALSOD 地点リストより分布させ、緑は CAMP/Tibet、赤は CAMP/Himalaya の AWS 分布。