

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：32406

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340110

研究課題名(和文) 衛星データの指標化による山岳地の降雨特性の研究

研究課題名(英文) Study of the precipitation characteristics over mountainous region by indexing satellite data

研究代表者

中村 健治 (NAKAMURA, Kenji)

獨協大学・経済学部・教授

研究者番号：20262917

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載のレーダデータ、また客観解析データを用いてヒマラヤ域、インド西ガーツ山脈、ミャンマーの西の山脈域の降雨特性を調べた。総降水量には降水頻度と降水時降雨強度が寄与するがヒマラヤ南縁域ではこの割合は大気不安定度と大気下層に流入する水蒸気量にコントロールされていることが示され、これはインド西ガーツ山脈域やミャンマーの西の山脈域でも確認された。比較として熱帯海上の降水システムの特徴をレーダデータや静止気象衛星のデータから調べ、典型的な雲降水システムの発達過程の知見と整合性のある明瞭な時間変化を統計的に確かめることができた。またそれによる大気加熱の鉛直構造も得られた。

研究成果の概要(英文)：The precipitation characteristics were studied using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite data around Himalayas, Western Ghats mountain range, and west coast of Myanmar. Reanalysis data were used to identify the atmospheric conditions, particularly, water vapor transport in the lower atmosphere. The precipitation is characterized into two types: frequent but weak one and rather rare but strong one. Different characteristics appear depending on areas and seasons, which are understood to be caused by different atmospheric conditions. The precipitation characteristics over the tropical Western Pacific Ocean were also investigated using TRMM data along with geostationary meteorological satellite data. The precipitation systems were tracked using the cloud movements from the geostationary satellite data. The evolution of precipitation systems was clarified. The vertical structure of latent heat release was also obtained.

研究分野：衛星気象学

キーワード：降水特性 衛星観測 全球観測 熱帯降雨観測衛星

## 1. 研究開始当初の背景

降雨は大規模場、総観規模場の影響とともに局地的な影響を大きく受けることは良く知られている。広い海上では局地的影響は少ないが、陸上では降雨は大規模場などとともに地形、土地被覆状態、などに大きな影響を受ける。特に大規模地形は大きな影響を持つ。南アジアにはチベットヒマラヤ域に大きな山塊があり、特徴的な降水がある。まずアジアモンスーンの影響を強く受けており、冬季は降水は極く少ないが、5月頃から降水は始まり、夏のモンスーン季節には多量の降水が特にヒマラヤ南斜面に生じる。それはモンスーン雨季の終了とともに収束する。5月頃のモンスーン前の時期は降水量は多くはないが、一旦降水が始まると降水強度は強い。それに対してモンスーン時期は降水量は多いが強い降水は比較的少ない。モンスーン前の時期では降水量は減少するが降雨強度は若干強まる (Bhatt and Nakamura 2005)。このような傾向はヒマラヤ域の東西の差にも現れている。これらの現象はモンスーンに伴う大規模場と地形の効果として理解されている。東西の差異については西側では下層にはモンスーン循環により南西から湿った暖かい空気が入る一方、上空にも大陸側から暖かい乾燥した空気が入る。このため convective inhibition (CIN) が大きく降水の発生は抑えられる。しかし擾乱により CIN を突破すると下層は湿っており大きな潜在不安定を持っているため強い降水システムが立ち上がる。一方東側では大気全層がかなり湿っており、CIN は小さい。このため降水システムは比較的簡単に発生し多量の雨をもたらすが降水システムそのものは強くない。( Houze et al., 2007; Romatschke et al., 2010; Medina et al., 2010 )。このような降水システムの特徴は日周変化にも現れる。モンスーン前の時期、またモンスーン時期の中でも中断期には強い日周変化が現れるが、湿潤期には弱い日周変化が現れる。また特にヒマラヤ南縁域では特徴的な明け方の降水が見られる (Bhatt and Nakamura, 2005, 2006)。類似した傾向はインド平野部でも見られる。モンスーンの活発な時期で大気が湿潤な場合は降水の日周変化は比較的小さいが、不活発な時期は日周変化は大きい (Singh and Nakamura 2010)。近年はまた地面状態の影響も指摘されてきている。このような降水形態の特徴の把握は衛星データ、特に 1997 年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星 ( Tropical Rainfall Measurement Mission : TRMM ) によるところが大きい。

## 2. 研究の目的

上のような降水システムの形態がどのような時にどのように現れるかは明確ではない。モンスーン時期のヒマラヤ南縁での明け方の降水は山脈に沿っており、東は一部ベトナムの西側までも達するが、必ずしも明瞭で

はない。チベット域の盆地や湖では明け方の降雨が見られるが (Singh and Nakamura 2009)、湖の広さの影響も見られるように、どこでも、というわけではない。気候的値にしても、なぜある場合には地形による特徴が顕著に現れ、ある場合には全く隠されてしまうのであろうか。この個々のケースではなく、気候値としての現れ方に関する疑問に十分な一般性を持って答えることが本研究の目的であり、その始めとして、これまでの我々の研究結果を基礎としてアジアの山地の降雨の特性を調べる。現在の衛星データの蓄積はそれを可能にしている。

次に地形データ、客観解析データを併用して大規模、総観規模の大気状態と地形などとの関係を、各地域の比較をもとに検討し、適当な指標を作成する。この指標をもとに山岳地の降水の特徴とそれぞれの原因因子との関係を定量化する。さらに衛星データによる降水量推定精度の地域チューニングを試みる。

## 3. 研究の方法

陸上の降水システムは地形や地面状態に大きく影響されるため、小さい空間スケールで大きな変動があり複雑である。陸上の降水システムについては地上観測による膨大な事例研究があるが、広域にわたっての特徴の把握は地上観測からは困難である。衛星は広域にわたり長期に観測できるという大きな利点がある。そこで地形の影響が顕著に現れる山地の降雨に着目し、地形が広域にわたる降水の特徴に与える影響について、1997 年から現在まで運用されている熱帯降雨観測衛星 ( Tropical Rainfall Measuring Mission : TRMM ) のデータ、特にレーダのデータを主に用いて調べた。

レーダからは降水域の広さ、高さなどの 3 次元的な形状データが得られる。山岳域では地形データと客観解析データからの時空間分解は不十分であるものの大気状態のデータも得られる。これらを使い、降水特性の気候値とその時の大気状態との関係を調べた。また静止気象衛星のデータからは雲の動きと雲頂高度が得られるので、海上の降水システムの時間的変動特性について調べた。

## 4. 研究成果

### (1) 衛星データによる降雨特性

顕著な地形の影響が見られるヒマラヤ山脈の南縁領域の降雨の特性を、TRMM に搭載されている降雨レーダの 1998 年から 2008 年までの 11 年間のデータを中心として地形特に地面高度に着目して調べた。この領域の降雨はアジアモンスーンに大きく影響されるためモンスーン前の期間 (3-5 月 : MAM) とモンスーン期 (6-8 月 : JJA) に分けた。MAM では地面高度の高い領域で多量の降雨があった。その一方 JJA では東西に延びる二つの降雨帯があるが、ヒマラヤ山脈南縁に東

西に延びる高度 500-700m の低い山脈に対応した降雨帯では強い降雨が総降雨量に寄与していたが、ヒマラヤ山脈本体の南斜面に対応した降雨帯では降雨頻度が総降雨量に寄与していた。前者（南側の降雨帯）は下層に湿潤な空気が南から流れ込み前面にある低い山脈がトリガーとなって強い対流が引き起こされるためと解釈された。また後者（北側の降雨帯）は南側の降雨帯により中層まで湿潤になりまた大気鉛直不安定性がある程度緩和された空気がヒマラヤ山脈の南斜面の南東風により強制上昇したことによると解釈された。MAM と JJA での降雨量と標高との関係がモンスーン季の中での降雨活発期と不活発期でも認められた。

ヒマラヤ域での降水システムの傾向の一般性を調べるため、同様の解析をインド亜大陸西岸、またミャンマー西岸で行った。それぞれの領域で地形の影響は明瞭に見られたが、ミャンマー西岸ではより広くかつ背の高い降水システムが認められた。これはミャンマー西岸では下層の水蒸気の流入が多量であることが原因と推測された。またアンデス山脈の高地の降雨ピークはアンデス中央部では降雨頻度に依っているが南部では降雨強度の寄与が比較的多かった。これらも下層の水蒸気流入と大気鉛直不安定性が第一原因と推測された。つまり、中層まで湿潤な場合は降雨頻度は多いが降雨強度は必ずしも強くない一方、大気が比較的乾いている場合にはいったん対流が起こると強い対流となるが頻度は少ない。これは降水システムの背の高さとして、また下層での降雨強度の減少としても表れた。

本研究の目標域は山岳域であるが、その対照として海上の降水システムについても調査した。ここでは、熱帯域の雲降水システムの発達過程について、海洋大陸および熱帯西太平洋域を対象として、静止軌道上の運輸多目的衛星 (MTSAT-1R) と、低軌道から降水関連の観測を行う熱帯降雨観測衛星 (TRMM) の 4 年間のデータを用いて統計的に調べた。雲降水システムの典型的な発達過程を明らかにするため、MTSAT-1R の赤外データにおいて雲頂温度が 235K 以下で、かつ融合・分裂過程を伴わない孤立した雲システムを対象とした。赤外データに雲追跡法を適用して雲システムを特定した後、時空間的に同期した TRMM 搭載の降雨レーダ (PR)、マイクロ波観測装置 (TMI)、および雷観測装置 (LIS) の観測データの統計解析を行った。

海域については、レーダ反射因子鉛直プロファイルの解析から典型的な雲降水システムの発達過程の知見と整合性のある明瞭な時間変化を統計的に確かめることができた。持続時間 5 時間のシステムの特徴は、典型的なメソ対流系システムのそれと類似していた。つまり、降水強度とレーダエコー頂高度は初期に最大値をとり経過時間とともに減少するが、雲面積、降水面積は中盤に最大値

となった。また層状性降水の割合は徐々に増加していた。一方、持続時間 2 時間のシステムは、初期の降水強度やレーダエコー頂高度はより弱い対流の性質を示し、雲降水面積の拡大を伴わなかった。TMI と PR の平均降水強度には発達段階に依存する差が確認された。PR の降水強度に対し、TMI の降水強度は成熟期に高い値を示し、発達期と減衰期には低い値を示した。海域と陸域におけるレーダ反射因子の平均プロファイルの特徴の違いは、主に対流性プロファイルの違いに起因していた。陸域の対流性プロファイルは、より大きなレーダエコー頂高度とその時間変動を示した。

PR データから推定された潜熱加熱鉛直プロファイルについても、特に対流性プロファイルに対して発達段階に伴う明瞭な変化が確認された。対流性プロファイルは持続時間を通じて全層加熱であり、4.5km 高度付近に加熱率の最大値を持ち、経過時間とともに加熱率は減少した。一方、層状性プロファイルは対流圏上層で加熱、対流圏下層で冷却の特徴を示したが、その時間変化は小さかった。全体の平均プロファイルは持続時間を通じて全層で加熱を示したが、対流圏上層で加熱の傾向を示す層状性降水域の拡大に伴い、加熱率が最大値をとる高度は 5km から 8km 程度へと変化した。層状性降水は、加熱プロファイルの変化は小さい一方で、全体に占める面積は大きく時間変化も顕著であるため、個々の降水システムが解放する潜熱の総量の発達段階に伴う変化は、対流性プロファイルの形状変化よりも、主に総降水面積と層状性降水域の割合の時間変化で決まっていた。

同様の解析は熱帯域の陸上でも行ったが降水システムの変化が激しく海上のような明瞭な傾向は得られなかった。

## (2) データベース作成作業

熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載の降雨レーダデータを用いてインドシナ半島からチベット域にかけての夏期の降雨特性の気候値を得た。降雨量、日周変化、陸海、地面標高、対流性降雨と層状性降雨の比率等を基に降雨のクラス分けを地域毎に行った。これにより例えばチベット、パキスタン、またインドの西ガーツ山脈の内陸側は陸上 / 小降雨量 / 強い日周変化 (午後の雨が多い) として特徴づけられた。水平のグリッドは 0.1 度でありこれにより陸上地形の細かい差異を含めて地域特性が現れた。海上と陸上での日周変化の差異は既によく知られているがそれを再度確認するとともに、日周変化と降雨量との相関、標高と降水量の相関、などを調べた。地面標高と降雨量では全体としては標高が高くなると降雨量がきれいに減少するが、標高が低いところではその相関は不明瞭となった。陸上での降雨の日周変化の強さは降雨量が少ないほど強いことが確認された。これは小さい降水システムは太陽日射による地面加熱の効果をより直接に受けているた

めと考えられた。同様の事は海上でも見られたが陸上ほどは顕著ではなかった。これはもともと海上の降雨の日周変化は弱いことも理由の一つとなる。降雨域の水平の大きさと降雨頂高度との関係も調べた。降雨域が小さい時は降雨頂高度は 5km 程度であるが、降雨域が 5000 平方 km を越えると 7km 程度まで大きくなるように、平均として降雨域が広がると降雨頂高度は上がる。この傾向はクラス分けされた多くの地域で見られたが、陸上/少雨/弱い日周変化で特徴づけられる領域では明瞭ではなかった。これらの特徴の解釈は今後の課題である。また空間のグリッドの大きさの検討も必要である。グリッドサイズを大きくすると結果は安定するが地形の効果が不明瞭になる。これまでの結果から細かい地形が降雨分布に現れることは分かっていたが、適当なグリッドの大きさも検討しなければならない。なおこれらの結果は未だ論文化はされていない。

衛星データは降水推定アルゴリズムが改訂されており、最新のデータセットによる再解析を行うため、解析システムの再構築を行った。また 2014 年 2 月末に全球の降水観測を目標とした新たな衛星が打ちあがった。この衛星には我が国が開発した 2 周波数のレーダが搭載されているとともに、高緯度域のデータが入ってくる。そのデータの取り出し用ソフトウェアのインストール等、解析の準備を行った。またこれまで道具として作成してきた個人用描画ソフトウェアを論文化した。

### (3) 今後

これまで陸上の山岳域の降水システムの特性、また熱帯海上の降水システムの気候値的特性が明らかとなった。これらは熱帯亜熱帯域の山岳地また海上の降水システムについて新しい知見を与えている。しかし、解析は不十分であり、データベース作成まではお行ったが、降水システムの指標化は初期解析のレベルにとどまっており、今後の解析が必要である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

中村健治, 2015: データ描画用小型ソフトウェアの開発、獨協大学情報研究所紀要「情報学研究」、第4号、19-26.

Shrestha, Dibas, Rashila Deshar, and Kenji Nakamura, 2015: Characteristics of summer precipitation around the Western Ghats and the Myanmar West Coast. *Int'l J. Atmos. Sci.*, Vol. 2015, Article ID 206016, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/206016>.

Imaoka, Keiji, and Kenji Nakamura, 2013:

Statistical analysis of temporal variation of heating profiles associated with isolated tropical cold cloud systems by using satellite observations. *SOLA*, Vol. 9, 51-55, doi:10.2151/sola.2013-012.

Shrestha, D., Prasamsa Singh, and Kenji Nakamura, 2012: Spatio-temporal variation of rainfall over the central Himalayan region revealed by TRMM precipitation radar. *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, doi:10.1029/2012JD018140.

Imaoka, Keiji, and Kenji Nakamura, 2012: Statistical analysis of the life cycle of isolated tropical cold cloud systems using MTSAT-1R and TRMM data. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 3552-3572, DOI: 10.1175/MWR-D-11-00364.1.

Nakamura, Kenji, Fumie Akimoto Furuzawa, Masanori Nishikawa, Fumiya Shiratsu, and Dibas Shrestha, 2012: Precipitation characteristics around Bangladesh revealed by TRMM data. *Proc. SPIE (The International Society for Optical Engineering) 8th Asia-Pacific Remote Sensing*, Oct 29-Nov. 1, 2012, Kyoto, Japan. 8529-02, doi:10.1117/12.976822.

[学会発表](計 9 件)

Dibas Shrestha, and Kenji Nakamura, Characteristics of summer precipitation around the Western Ghats and the Myanmar west coast. *International Conference on Climate Change Innovation and Resilience for Sustainable Livelihood*, 2015.01.14, Hotel Soaltee Crown Plaza, Kathmandu, Nepal.

Kenji Nakamura, Fumie Akimoto Furuzawa, and Masanori Nishikawa, Precipitation characteristics around Bangladesh revealed by TRMM data. *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, Nov. 1, 2012, Kyoto International Conference Center, Kyoto.

Dibas Shrestha, Prasamsa Singh, and Kenji Nakamura, Spatio-temporal variation of rainfall over the central Himalayan region revealed form TRMM precipitation radar. *AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly 2012*, Aug. 16, 2012, Resort World Convention Centre, Singapore.

Kenji Nakamura, Fumie Akimoto Furuzawa, Masanori Nishikawa, Fumiya Shiratsu, and Dibas Shrestha, Precipitation characteristics around Nepal and Bangladesh revealed by TRMM data. *European Geosciences Union General Assembly 2012*, April 23, 2012, Vienna, Austria.

[図書](計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 健治 (NAKAMURA, Kenji)

獨協大学・経済学部・教授

研究者番号：20262917

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し