

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22510011

研究課題名(和文) 熱帯降雨観測衛星 R が示す降水特性の変動

研究課題名(英文) Variations of precipitation characteristics revealed by Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM

研究代表者

古澤 文江 (Furuzawa, Fumie)

名古屋大学・地球水循環研究センター・研究員

研究者番号：70456705

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：熱帯降雨観測衛星TRMMにはマイクロ波帯を使う降雨レーダPRが初めて搭載され、直接降水を観測することにより、精度の高い24時間毎の降水特性の空間分布を導出することが可能となった。1997年11月に打ち上げられ2015年4月に観測を終えるまでの長期データが蓄積されたので、降水特性と地表面特性の長期変動(トレンド)のTRMM観測領域全域の分布を捉えることができた。

地方時刻毎に月毎に長期グリッドデータを作成し、降水量、強度、頻度、強い降水、対流性降水と層状性降水の割合、降雨頂高度、雪が雨に変わる融解層高度、晴天時の地表面射出率などの変動を調べ、地表面状態の変化と降水特性の変動の相関を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Precipitation Radar PR, which can observe precipitation directly, was equipped with Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM satellite at first and archived long term observation data during 1997 and 2015. The 15 years trend analysis had been done and regional characteristics of trends of precipitation system and non-rainy land surface condition had been clarified with 0.2 deg grid. And the relationship of their trends had been studied, too.

For the precipitation system, not only rain amount but also rain intensity, rain amounts of strong rain, convective and stratiform frequencies, height of storm top, and bright band height, etc. are studied. For the non-rainy land surface condition, emissivities were calculated from brightness temperature from TRMM Microwave Imager TMI and JRA25/JCDAS atmospheric data. From Global Precipitation Measurement GPM Microwave Imager GMI and JRA55, emissivities were also calculated. These are used for an improvement of rain retrieval algorithm.

研究分野：衛星気象学

キーワード：人工衛星 地球観測 環境変動 水循環 地表面射出率 気象学 熱帯降雨観測衛星TRMM マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

(1) 二酸化炭素や亜酸化窒素などの大気中の温室効果ガス濃度の人間活動による増加に伴うと考えられている地球温暖化は、地球環境に深刻な修復不可能な影響を及ぼすと予測されており、世界中の各研究機関でコンピュータによる将来の気候変化予測計算が行われ、熱帯域や高緯度地域に特に大きな影響が現れるとされていた。しかし、それらの地域だけではなく中緯度帯の日本においても、気候・生態系・都市機能など幅広く既に地球温暖化が原因と思われる影響が顕在化しており、今後地球温暖化が進むにつれその影響の及ぶ範囲や強度が増すと予測されていた。江守ら(2004)によると、大気 100 km、海洋 20 km 程度の解像度でのモデル予測を行うと、日本の夏の降雨量は増加する(2071~2100年平均で 1971~2000年平均に比べシナリオ B1 で 17%、シナリオ A1B で 19%増加)と予測されていた。使用されたシナリオは、将来の世界が経済重視で国際化が進むと仮定したシナリオ A1B(2100年の CO₂濃度が 720 ppm)と環境重視で国際化が進むと仮定したシナリオ B1(550 ppm)である。また、日本の夏の豪雨頻度も、降雨量よりも大きな割合で増加すると予測されていた。これは、温暖化により大気中の水蒸気量が増加する効果と大気循環が変化する効果により、一雨当りの降雨量(強度)が平均的に増加するためである。世界的に見ても降水量より豪雨強度がより広範な地域で顕著に増加すると予測されていた(江守ら 2005)。逆にかんばつが増加すると予測される地域も存在し、広い領域の積分量でトレンドを追うのではなく、全球で地域毎にトレンドを調べることが必要となることが予想された。調べるパラメータも降水量だけでなく、降水の観測率・強度や豪雨の頻度などの降水の特性のトレンドを調べる必要があると考えられた。Adler(2003)や Gu et al. (2007)など広範囲で積分した降水量の変動についての研究は多数存在していたが、各地域での降水特性の変動を追った研究はほとんどなかった。熱帯降雨観測衛星(Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM)を用いたその様な研究もなかった。

(2) TRMM 衛星搭載降雨レーダ(Precipitation Radar: PR)は南緯 37 度から北緯 37 度までの地球温暖化の影響が強く現れるとされる熱帯地域に加え、亜熱帯、さらに、新潟・福島より南の日本を含む中緯度帯を観測し、マイクロ波を使って直接降水を観測することにより精度の高い降水量の 4 次元分布を導出することが可能であった。また、この衛星は太陽非同期軌道で、様々な地方時刻に各領域を観測するため、統計的には 24 時間毎の降水特性の分布を得ることができた。静止気象衛星搭載の可視・赤外放射計によっても 24 時間毎の降水分布が作成されているが、直接降水を測定したものではないため誤差が大きく、また、立体構造を捉えることができない

ため、TRMM 衛星によって初めて直接降水を捕らえた高精度の 24 時間毎の降水特性の分布が測定できるようになったといえる。この衛星は 1997 年 11 月に打ち上げられて以来、研究計画最終年度 2014 年の初めには、16 年分のデータが蓄積されることが期待され、実際蓄積された。この長期 TRMM 衛星データを使えば、降水システムの特性やそれらのトレンドを一樣に詳細に捉えることができると期待されていた。先ほども述べたがこの衛星についても大きな領域での総降水量のトレンドしか議論されていなかった。そこで、単に広い領域の降水量のトレンドを追うのではないところを本研究の新しいところとした。これは、データ量が膨大で手付かずになっているが、誰かがやらなければならない課題であると思われた。

(3) TRMM 衛星は、2014 年 2 月に打上げられた全球降水観測計画(Global Precipitation Mission: GPM)のコア衛星へ引き継がれる予定となっていて、実際 TRMM 衛星は観測を終了し GPM に引き継がれた。GPM は TRMM 衛星の直接の後継機となるコア衛星とマイクロ波放射計を搭載した複数の衛星からなるシステムとなっており、全球の降水分布を時間分解能 3 時間で観測することを主な目的としている。コア衛星にはマイクロ波放射計(GMI)に加え 2 周波降水レーダ(DPR)が搭載され、さらに高精度のデータが得られつつある。本研究を継続する研究として、GPM 衛星データとの比較研究; TRMM 衛星が示す変動の先に滑らかに続けて GPM 衛星の観測値が来るかどうかというアルゴリズム検証研究が続く。その際、降雨量だけでなく特性の比較がアルゴリズムの改良には重要であると思ったので、本研究結果が重要となると考えた。

2. 研究の目的

TRMM 衛星の長期データから TRMM 観測領域全域における降水システムの気象学的特性の長期変動(トレンド)の地域特性を詳細に捉えることを目的とした。また水文学的に重要な支流毎の降水特性のトレンドや地表面射出率からわかる地表面変化と降水の関係を調査することとした。単に広い領域の積分値として降水量のトレンドを追うのではないところがこの研究の特徴である。

3. 研究の方法

(1) 計算機などのシステム構築を行い、TRMM 衛星 V6、V7 の全データを蓄積した。この 15 年を超えるデータにプログラムを流し、各パラメータの 0.05 度×0.05 度のグリッド化した PR データファイルを陸上・海上・海岸上に別けて各地方時刻毎に月毎に作成した。基本パラメータとして、観測回数、地表面付近の観測回数とその降水量、X mm/hr 以上の降水を観測した回数とその降水量(X=3, 20)を調べた。これらから、降水量、降水強度、強い降水の変動を調べた。また、PR によって分

類された対流性降水 C と層状性降水 S のフラグを使用し、C/S タイプそれぞれの同様なパラメータについても解析し、それらの対流性降水と層状性降水の割合の変動を調べた。さらに、降雨頂高度と層状性降水の融解層高度も重要であり、それらのグリッドデータも作成し高度パラメータの変動を調べた。

(2) 地方時刻毎のグリッドデータを 24 時間積算し、月平均値の長期変動を探った。また、各月毎での長期変動も調べた。地域毎に詳細に変動を検討した。また、GPCP の降水量や雲水量 CLWC のトレンドなどの文献との比較を行った。

(3) エルニーニョ/ラニーニャの影響評価を行った。世界中で異常気象を起こすエルニーニョとラニーニャは、降水システムにも大きな影響があるとされており、実際にそれぞれの期間の降水量マップは大きく異なっている。そこで、様々なパラメータの変化を調べた。また、軌道高度変更や PR の冗長系システムの変更の影響については、それに伴い各センサのアルゴリズム改修が行われたが、様々な所に違いが現れている。例えば、軌道高度変更に伴い PR では、ビーム幅増加に伴い入射角毎の最低観測高度が変化したため背の低い降水システムの見落としが増加し、また、感度低下(1.2 dB の受信電力低下により SN 低下)により弱い雨の見落としが増加した(Hirose et al. 2007)。このため、長期変動を捉える上で、自然の変化と軌道高度変更や冗長系システム変更による影響を分離する必要がある。軌道変更前、1997 年 12 月～2001 年 7 月までの 3 年 8 ヶ月分のデータと、冗長系システム変更後 2009 年 6 月～現在までで分けて違いを確認すべきところであるが、自然のトレンドもその間に大きく変化することから切り分けを行わなかった。

(4) 地表面変化と降水特性のトレンドの関係を調査した。地表面状態と降水の相互作用はモデルによりある程度示されるが極端な条件を入れないと現れない。本研究により得られる長期データでこれを明らかにするという試みは非常に独創的であり、災害対策の面からも重要である。

具体的には、TRMM 衛星搭載マイクロ波放射計(TMI)の輝度温度を使用し、気象庁長期再解析 JRA25 データの大気情報、地表面高度・温度を用い、5 周波での地表面射出率を衛星観測時刻毎に計算したものを作成した。そこで、地表面射出率の変化している場所を探し、降水特性の変動との相関を調べた。

4. 研究成果

(1) データセット

①2017 年 12 月から 2015 年春に観測終了を迎えるまでの TRMM 衛星データ(v6, v7)を全て取得した。また、PR データを中心に幾つかのパラメータについて、扱いやすいグリッド化したデータを作成した。この際、地形や地表面状態の細かい空間的変化に対応した地域

特性のトレンドを捉えるため、0.05 度×0.05 度のグリッドで地方時間毎の 16 年分の月平均のデータを蓄積した。

②地表面射出率を導出する上で必要な長期再解析データ JRA25/JCDAS、JRA55、ERA-Interim を TRMM 観測期間に合わせて取得し、扱いやすいデータに変換した。

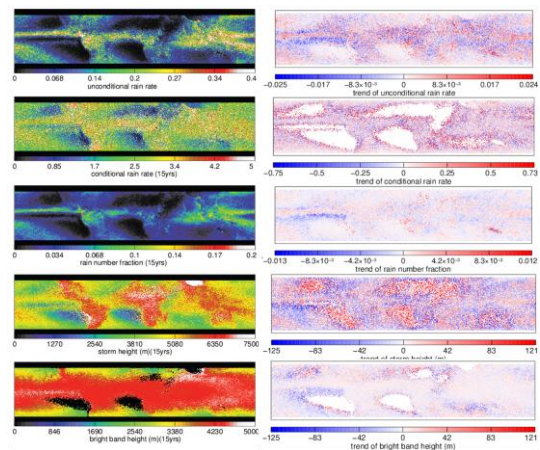
③TRMM 衛星 TMI (v7) の放射計輝度温度を衛星パス毎に 0.2 度グリッドでデータセット化し、これと長期再解析データ(JRA25/JCDAS)から求めた地表面マイクロ波射出率を計算し、15 年間のデータセットを作成し、さらに月平均のデータセットも作成した。地表面状態の変化が降水に与える影響を調べる上で、この地表面射出率データセットは強力な武器となる。(JRA25/JCDAS の代わりに ERA-Interim を使って計算した射出率のデータセットを現在作成中。)

(2) 降水特性の研究(国際学会発表で発表)

この研究の特色は、降水量だけではなく、降水システムの特性のトレンドを明らかにすることであり、雨の降り方の変化などを定量的に明らかにした。

①15 年トレンド

下図は 15 年間の平均降水特性(左)とそのトレンド(右、年当りの変化量)である。陸海コントラストで位置は把握できると思われるが、左側の 180W からアメリカ大陸、アフリカ大陸、アジア、180E の右側となっている。上から、降水量、降水強度、降水頻度、降雨頂高度(エコー最高高度)、ブライトバンド高度(融解層高度)の順である。



100W-80W のアメリカ合衆国に注目すると、雨の回数はそれほどでもなく、降水強度が強いため、降水量が多いことがわかる。その周辺の降雨頂高度が高いため、発達した降水システムが多いことがわかる。しかし、ブライトバンド高度は高くはなく、地表面温度は高くないことが予想される。図は示さないが、降水回数のうち 3mm/hr 以上の雨の数の占める割合が高く、また、対流性降水だけの降水強度が特に強い。従って、対流性降水が発達した際、強い降水が降ることによって降水量が多いことが分かった。

トレンド分布については、例えば、熱帯収束帯 Intertropical Convergence Zone (ITCZ) は降水量が多い細い帯として観測されるが、これは降水回数が多いために降水量が多いことがわかる。その南北でも回数は少ないが、雨が降り、その降水強度、降雨の高さ等の降水特性は同じであることがわかる。ただし、ITCZ からの距離が離れて行くと、降水強度は弱く、高さも低くなって、小規模の降水システムが多くなることがわかる。

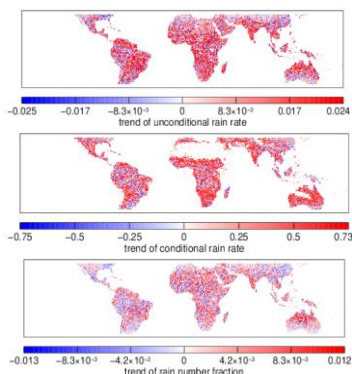
また、降水強度に着目すると、中国から東シナ海にかけて、降水が強まっていることがわかる。中国から東シナ海を通り、日本に汚染物質が飛来していることは知られているので、汚染物質により、雨は降りにくくなり、降ったら強い雨が降るような仕組みになっている可能性が考えられる。

GPCP の降水量の 1979 年～2012 年のトレンドの分布 (Gu et al. 2015) と比較すると、GPCP の方が空間分解能が低いので細かい分布は追えないが、大まかな傾向はよく似ている。例えば、ITCZ の近傍の特徴、南アメリカ大陸のペルー北部のアマゾン川流域の増加、ナミビアの増加、バングラデシュの減少などは同様に捉えられている。

これらのトレンド分布は温暖化の影響を表していると考えられる。

②6 年短期トレンド

エルニーニョ/ラニーニャの影響評価として、2002 年～2008 年の短期トレンドを調べた。前半 2002 年～2004 年にエルニーニョがあり、後半 2005 年～2008 年にラニーニャがあったため、この短期トレンドが増加しているとき、エルニーニョでは小さく、ラニーニャで大きい傾向があることを示す。下図に上から降水量、降水強度、降水頻度の陸面の結果を示す。



アメリカ東部や中国などを除き、それぞれ、ラニーニャで大きくなる傾向が強く表れている場所が多いことがわかる。最近になってラニーニャ傾向が続き、豪雨が増えているという報告と一致するように思う。

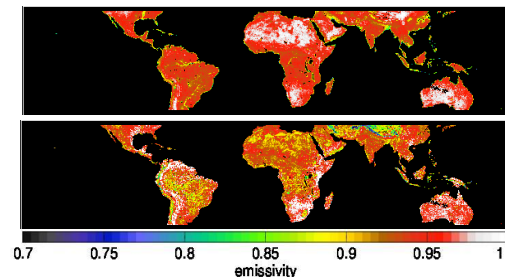
(3) 地表面特性のトレンドの研究 (現在リバイズ中の論文に掲載)

①15 年トレンド

0.2 度グリッドの各周波数におけるマイクロ波の地表面射出率の 15 年平均の分布、また、そのトレンド分布を導出した。penetration

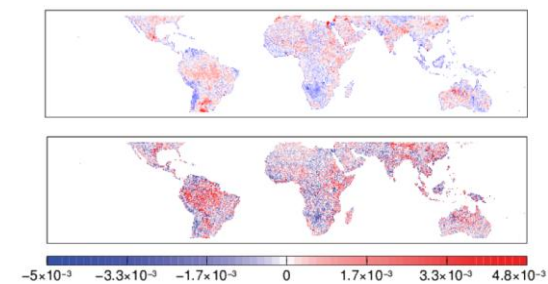
depth(侵入深度)と視野 (FOV) の大きさが周波数によって異なるため、地表面情報の微妙な違いを反映していると考えられる。具体的には、侵入深度の違いから、地下どの辺りまでの情報を反映しているかが異なり、高周波程、より表面の情報を表している。また、視野の違いから高周波程、より細かい領域の情報が検出でき、一方、低周波では広い範囲の情報が混在する。

下図は 15 年平均の 10GHz(上)と 85GHz(下)の垂直偏波の 1 月射出率である(他の月、他の周波数は略)。



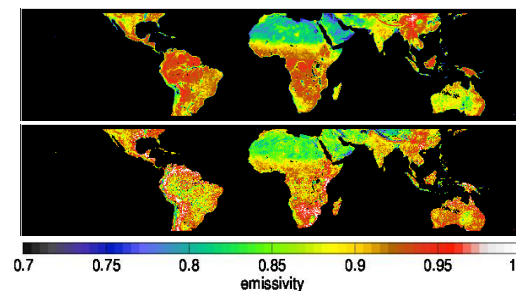
砂漠などの乾燥地帯で高く、熱帯雨林や河川近隣の湿地などの湿った地域で低いことがわかる。

下図は 10GHz(上)と 85GHz(下)の垂直偏波の 15 年のトレンド分布(年当りの変化量)である。トレンドは月平均の値を正弦曲線と線形でフィッティングして求めた。



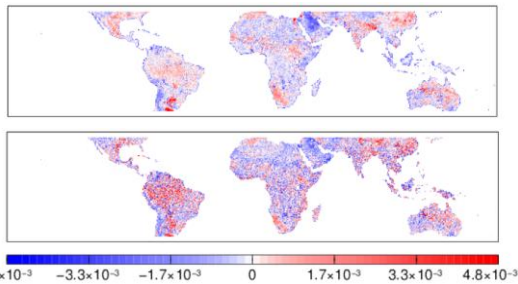
ナミビア共和国(緑化によると思われる)やアンデス山脈など射出率の高い所で減少している。また、アルゼンチン、バングラデシュ(水面減少によると思われる)、中国(北部は水面減少,南端は緑化によると思われる)などで増加している。

下図は 15 年平均の 10GHz(上)と 85GHz(下)の水平偏波の 1 月射出率である。

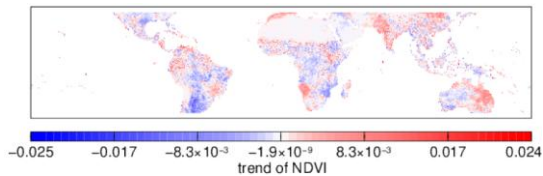


垂直偏波と逆に砂漠などの乾燥地帯で低いが、河川の近くなどの湿地でも低い。熱帯雨林などの湿った場所では高い。

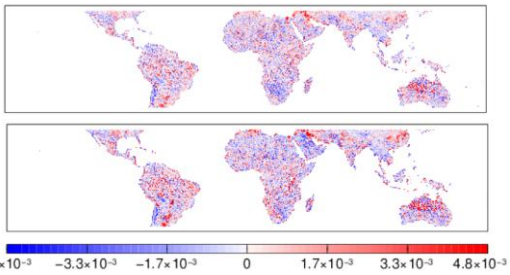
下図は、10GHz(上)と 85GHz(下)の水平偏波の 15 年のトレンド分布である。



アラビア半島北東部やアンデス山脈など射出率の低い所で更に減少している。また、ナミビア共和国(緑化によると思われる)、アルゼンチン、バングラデシュ(水面減少によると思われる)、中国(北部は水面減少, 南端は緑化によると思われる)で増加している。植生の指標として最もよく使われている Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) のトレンドも調べて比較を行った。下図は 2000 年 2 月から 2012 年 12 月までの MODIS の NDVI のトレンド分布である。

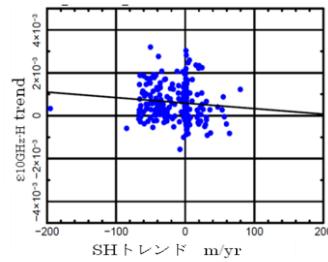


比較の結果、特に水平偏波の射出率とアルゼンチンでは負の相関が、北アフリカやサウジアラビア、中国では正の相関があり、場所毎に異なっているが、射出率のトレンドと似たような場所でトレンドが表現されていることがわかる。可視域を使用する NDVI は雲の下の陸面の場合観測できないが、マイクロ波は雲の下も観測できるという利点がある。下図は 10GHz の垂直(上)と水平(下)の 1 月における 15 年のトレンド分布である。線形でフィッティングして求めた。(他の月は略)



月毎に特徴があり、全ての月データを使用した時よりも変動は大きくなる。1 月はチグリス・ユーフラテス川周辺の増加が大きい。

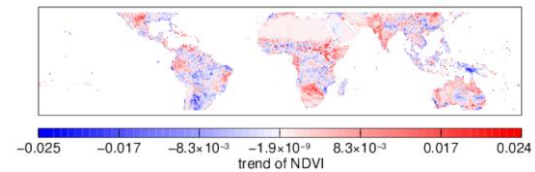
(4) 降水特性と地表面特性のトレンド間相関
地表面特性のトレンドと比較をするため、降水特性のトレンドも同じ 0.2 度グリッドにしてトレンド分布を出した。(2) で示したように、この分布は、広い領域での総降水量のトレンドでは見えなかった降水量の地域毎のトレンドを明らかにすることができた。中国東部(117.1-118.1E, 24.3-34.3N)における相関の結果を例として示す(降雨頂高度と 10GHz の水平偏波の相関のみ。他は略)。



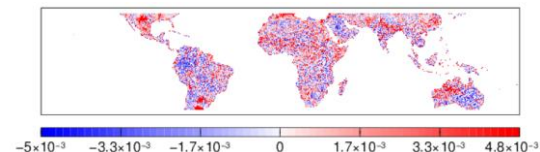
射出率増加箇所に着目すると、降雨頂高度が低下していることから弱い対流となっていることが考えられる。この領域の南側ではブライトバンド高度が低下していたことから、0 度高度の低下、つまり、地表面温度が減少していることから、cooling 効果があると予想される。これにより、顕熱の減少が起こり、低い対流しか成長しなかったと予想される。逆に北側では、ブライトバンド高度が増加しており、全体として微増していたので、全体的には温度は増加していたと考えられる。また、対流の数、対流の降水量の割合は増加し、降水頻度が北側は減少(南側は増加)していた。降水量が北側は微減(南側は微増)し、降水強度が強化された所が多数あった(人為的起源によるダストの増加も起因していると予想される)。まとめると北側は水面減少により水蒸気の放出が減少し降水頻度が減少し、南側は緑化により水蒸気の放出が増加し降水の増加となったと予想される。

②6 年短期トレンド

エルニーニョ/ラニーニャの影響評価として、2002 年~2008 年の短期トレンドを調べた。前半 2002~2004 年にエルニーニョが、後半 2005~2008 年にラニーニャがあったため、この短期トレンドが増加している時、エルニーニョでは小さく、ラニーニャで大きい傾向があることを示す。下図に NDVI の結果を示す。



先程示した 15 年長期変動との違いはアメリカ、アフリカ大陸の南部、オーストラリアなどで顕著に違いが表れている。逆に、南アメリカ大陸などは似た分布となっていることから、その領域では長期変動が最近のラニーニャ傾向を如実に表している事を示唆しているのかもしれない。下図に 10GHz の水平偏波の短期トレンドを示す。



この分布と NDVI の分布を比較すると、アメリカ、北アフリカ大陸、サウジアラビア、オーストラリアは正の相関が、アルゼンチンは負の相関があることがわかる。アメリカとオ

ーオトラリアは長期トレンドのときに比べ、相関が強くなったことが分かった。

(5) 結果のまとめ

TRMM 衛星データから 15 年の降水特性と地表面特性のトレンド分布を詳細に把握することができた。植生指標 NDVI のトレンドも調べ、それらの相関を調べることで、地域毎の降水と地表面との関連を考察することができた。エルニーニョ/ラニーニャの影響評価も行った。これらの結果は、1つの新たな地球温暖化影響のモニタリングの結果となりうると期待される。得られた結果を予測計算にフィードバックすることにより、降水量の短期的予測精度向上と気候変化予測、地球温暖化予測精度向上に繋がると期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

①Norouzi, H., M. TemimI, C. Prigent, J. Turk, R. Khanbilvardi, Y. Tian, F. A. Furuzawa, H. Masunaga, "Assessment of the consistency among Global Microwave Land Surface Emissivity Products", Atmospheric Measurement Techniques, 査読有, **8**, 2015, 1197-1205, DOI:10.5194/amt-8-1197-2015

② Tian, Y., Christa D. Peters-Lidard, Kenneth W. Harrison, C. Prigent, H. Norouzi, F. Aires, S.-A. Boukabara, F. A. Furuzawa, H. Masunaga, "Quantifying Uncertainties in Land-Surface Microwave Emissivity Retrievals", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 査読有, **52**, 2, 2014, 829-840, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6484222>

③Ferraro, R. R., Peters-Lidard, C. D., Hernandez, C., Turk, F. J., Aires, F., Prigent, C., Lin, X., Boukabara, S.-A., Furuzawa, F. A., 他 11 名, "An evaluation of microwave land surface emissivities over the continental united states to benefit GPM-era precipitation algorithms", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 査読有, **51**, 1, 2013, 378-398, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6228527>

[学会発表] (計 39 件) 国際 12+国内 27

①古澤(秋元)文江、増永浩彦、TRMM 衛星の降水特性と陸面マイクロ波射出率のトレンド分布、2015.5、日本気象学会 2015 年度春季大会「つくば国際会議場(茨城・つくば)」, B468

②古澤(秋元)文江、増永浩彦、TRMM 衛星による降水と陸面射出率のトレンド分布、2015.3、衛星による陸上の高精度降水推定技術の開発とその水文学への利用の研究企画のため

の集会と衛星シミュレータの合同集会「名古屋大学(愛知・名古屋)」87-89.

③Fumie A. F., H. Masunaga, Study on the trends of microwave land surface emissivity and precipitation characteristics derived from TRMM, 2014 年 11 月, 7th IPWG (The International Precipitation Working Group), 「Tsukuba (Japan)」.

④Fumie A. F., H. Masunaga, Microwave Surface Emissivity Derived from TRMM TMI and Rainfall, 2014 年 7 月, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, 「Sapporo (Japan)」.

⑤Fumie A. F., H. Masunaga, K. Nakamura, FOF analysis of a microwave land surface emissivity using TRMM TMI and NOAA AMSU to improve emissivity estimation for rain retrieval algorithms, 2013 年 6 月, 29th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2013-n-56, 「Kyoto (Japan)」.

⑥Fumie A. F., H. Masunaga, K. Nakamura, Development of a land surface emissivity algorithm for use by microwave rain retrieval algorithm, 2012 年 10-11 月, SPIE, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation IV, 「Kyoto (Japan)」.

⑦ Furuzawa, A. F., H. Masunaga, K. Nakamura, Experiment of Rain Retrieval over Land Using Surface Emissivity Map Derived from TRMM TMI and JRA25 (II), 2011 年 4 月, European Geosciences Union General Assembly, 「Vienna (Austria)」, EGU2011-168

[その他] ホームページ

<http://www.satellite.hyarc.nagoya-u.ac.jp/~akimoto/index.html> (結果は未掲載。リバイズ中の論文が発表された時に掲載予定)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古澤(秋元)文江 (FURUZAWA, A., Fumie)

名古屋大学・地球水循環研究

センター・研究員

研究者番号 : 70456705

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

中村 健治 (NAKAMURA, Kenji)

獨協大学・経済学部国際環境経済

学科・教授 (2013 年 4 月から移動)

研究者番号 : 20262917

田中 広樹 (TANAKA, Hiroki)

退職 (2012 年 3 月)

研究者番号 : 30437074