

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15096

研究課題名（和文）衛星観測による瞬時値情報を用いた時間積算降水量推定手法の開発

研究課題名（英文）Estimation of short-time accumulation of surface precipitation utilizing satellite-based vertical profile information

研究代表者

内海 信幸（Utsumi, Nobuyuki）

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：60594752

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：降水の鉛直分布と地上降水量の時間分布の関係を明らかにし、さらに降水の鉛直構造の情報を用いて地上での積算降水量の推定精度を向上させる手法を提案した。これはレーダ観測を用いて、上空の降水の鉛直分布情報から地上の時間積算降水量を推定する手法である。また、マイクロ波放射計観測を用いて降水鉛直構造の推定を現実的に行うことが可能であることを示した。従来、マイクロ波放射計観測では平面的な降水量の推定は行えるものの、立体的な情報を得ることを難しいと考えられており、本研究の成果はマイクロ波放射計観測の新しい可能性を示すものである。加えて機械学習手法を用いた新しい降水量推定手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

降水の瞬間的な観測しかできない人工衛星搭載センサの情報を用いて、降水の時間積算量を推定する手法を提案した。これは、降水の鉛直構造についての情報を活用する手法である。降水の時間積算量は瞬間値と比較して防災等の観点で重要であり、本研究の成果は防災等に用いられる衛星降水マップの精度向上に資するものである。また、従来はレーダ以外では難しいと考えられていた降水鉛直構造の推定を、マイクロ波放射計でも行うことができることを示した。これは人工衛星搭載のマイクロ波放射計の新しい可能性を示したものである。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the relationship between the vertical distribution of precipitation and the temporal distribution of surface precipitation. Also, based on the satellite precipitation radar, a method to improve the accumulated surface precipitation estimation using information about the vertical structure of precipitation was proposed. Furthermore, a new retrieval algorithm to estimate the precipitation vertical profiles was developed based on microwave radiometer observations. It was demonstrated that it is feasible to realistically estimate the vertical structure of precipitation using microwave radiometer observations. The findings of this study indicate a new potential for microwave radiometer observations. Additionally, a novel precipitation estimation method using machine learning techniques was proposed.

研究分野：水文気象学

キーワード：衛星リモートセンシング 降水量

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人工衛星搭載のレーダおよびマイクロ波放射計(以下、放射計)による観測は、静止衛星からの赤外観測等と比較して高精度の降水強度推定が可能である。しかしレーダや放射計は地球を周回する人工衛星(低軌道衛星)に搭載されているため、各地点で得られる観測は数時間~数日に一度衛星が上空を通過する一瞬の「瞬時値」のみである。

人工衛星観測に基づく全球降水プロダクトが日本や米国を中心に開発され、多くの応用分野で利用されている。全球降水プロダクトは実用上有用な30分~1時間程度の時間分解能で作製されており、その入力値として同程度の時間代表性を持つ降水観測が求められる。地球を周回する人工衛星(低軌道衛星)からの高精度降水観測は、全球降水プロダクトの重要な入力情報であるが、上述のようにその観測情報は一瞬の「瞬時値」である。30分~1時間の間に同一地点で複数の低軌道衛星観測が得られることは稀であるため、現在の全球降水マップでは「瞬時値」を30分~1時間程度の時間ステップの代表値として用いるという時間スケールのギャップが生じている。移動・発達・衰退する降水は時間変化が大きく、瞬時値で時間積算値(平均値)を代表することは大きな誤差・不確実性の原因になる。こうした問題は、水害の原因になるような急速に発達・衰退する積乱雲の降水で特に大きいと考えられる。低軌道衛星による瞬間的な観測から30分~1時間程度の時間スケールの積算降水量を推定することができれば、全球降水プロダクトの大きな精度向上が期待できる。

過去の研究において、衛星観測による降水強度推定値と地上観測の降水強度には数分の時間差があることがわかっている。これは、衛星から観測される降水が実際は地上から数百m~2km程度上空のもので、上空で観測された降水粒子が地上に到達するまでの落下時間が存在するためである。本研究ではこの時間差に着目する。降水粒子の蒸発・分裂・併合や移流の影響が小さければ、上空の降水強度の鉛直分布情報を用いて数分~数十分後の地上での降水強度を推定できるはずである。これは瞬間的な観測情報から、より長い時間スケールの降水情報を推定できることを意味する。

なお、以下のような問いも本研究の背景となっている。地面から数百m~2km程度の高度の降水強度が数分後の地上観測降水量と相関を持つことは過去の研究で確認されているが、こうした関係がより高い高度でもみられるか、大気状態や降水プロセスの違いがどのように影響するかといった点は明らかになっていなかった。様々な大気状態や降水プロセスの下で、上空の降水の鉛直分布と地上降水強度の時間分布の間にどのような関係があるかという問いが、本研究の背景の一つである。

また、降水の鉛直情報から数分~数十分後の地上降水強度を推定できるならば、瞬時値から時間平均値を推定することが可能になる。しかし実際には降水のタイプや大気の状態によって降水粒子の落下の様子は異なる。こうした影響をどのように考慮すれば、降水の鉛直分布情報から高精度で時間積算降水量を推定できるかという問いも、背景の一つとなっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、降水の鉛直分布と地上降水量の時間分布の関係を明らかにするとともに、低軌道衛星による瞬間的な降水観測情報から、実用上有用な時間スケール(30分程度)の地上降水積算値を推定する手法を開発することである。これにより全球降水プロダクトの時間代表性の向上と、それを用いる様々な応用分野への貢献が期待できる。また、様々な衛星による降水量推定値を組み合わせて作られる衛星降水マップの不確実性を評価することも、目的の一つである。

3. 研究の方法

降水の鉛直分布情報は、レーダ観測により推定可能である。そこで本研究ではまず衛星搭載レーダでの観測を用いて、ア)降水鉛直分布と地上降水量の時間分布の関係の解明、イ)鉛直分布情報を用いた降水時間積算量の推定手法の開発を行った。推定値の検証には、高い時間分解能が得られる雨量計1分値データを用いた。さらに、従来はレーダ以外では推定が難しいと考えられてきた降水鉛直プロファイルを、衛星搭載マイクロ放射計(GPM/GMI)で推定する手法を開発し、降水レーダ観測と比較することで精度検証を行った。

また、衛星降水マップの不確実性評価では、米国NASAによる衛星降水マップ Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)の研究グループ(NASAゴダード宇宙飛行センター)が開発したIMERG-Tstepedを用いた。これは衛星降水マップの作製プロセスの各ステップで設定やデータの切り替えが行えるシステムである。

4. 研究成果

<降水鉛直分布の特徴分析>

熱帯降雨観測衛星TRMMに搭載された降水レーダ観測(TRMM/PR)を用いて、降水鉛直分布の特徴の分析を行った。2005年から2014年の北アメリカとクェゼリン環礁の暖候期を対象とした。

PR で観測された降水量瞬時値の鉛直分布と地上雨量計(1分間隔データ)の比較を行った。その結果、上空の降水量と地上での降水量の間には時間差を伴った相関関係があることがわかった。地上降水量は上空の降水量に対して数分~30分程度の時間遅れで最も相関が高くなり、その時間遅れは相関を考える上空降水量の高度が上がるほど(6km程度まで)長い傾向があった。これは上空の降水粒子が地上に到達するまでに時間を要することに由来する。

次にこの特徴を利用し、TRMM/PRによる降水量鉛直プロファイルの瞬時値観測から地上降水量の時間平均値を推定することを試みた。地上から4.5km程度までの鉛直平均降水量は、TRMM/PRプロダクトによる地上降水量推定値(瞬時値)よりも、地上の降水量時間平均値(~30分程度)を良く表していることが示された。この結果は、降水鉛直プロファイルの情報を活用することで、地上降水量の時間平均値(30分程度まで)をより精度よく推定できることを示している。加えて、提案した手法の精度に様々な降水条件(大気相対湿度や降水の種類)が与える影響についても分析を行った。

<マイクロ波放射計による降水鉛直プロファイル推定>

米国ジェット推進研究所と共同で、マイクロ波放射計観測から降水の鉛直分布を推定する手法の開発を行った。提案手法は、JPLで研究が行われている降水量推定アルゴリズム(EPCアルゴリズム)を基にして開発した。EPCアルゴリズムは地表のマイクロ波放射率を推定する手法を降水量の推定に応用したものである。従来のEPCアルゴリズムは地上降水量のみを推定するものであった。本研究ではEPCアルゴリズムが用いるデータベースに降水プロファイルの情報を組み込むことで、地上降水量に加えて降水鉛直プロファイルも同時に推定するように改良を行った。

開発した手法で推定した降水鉛直プロファイルを、GPM主衛星搭載の二周波降水レーダ(GPM/DPR)による推定値と比較した。その結果、降水量(凝結水量)の鉛直プロファイルの形状については新手法で良く表現できることが分かった。ただし各高度の降水量(凝結水量)の絶対値に関しては、過小評価傾向がみられた。このバイアス傾向をさらに詳しく分析したところ、降水のタイプ(対流性・層状性)によってバイアスの大きさが異なることが分かった。これは降水タイプの情報を追加的に用いることで、降水量のプロファイルをより精度良く推定できる可能性を示している。本研究の結果は、レーダ以外では推定が難しいと考えられていた降水量鉛直プロファイルについて、マイクロ波放射計でも推定が可能であることを示したものである。

<機械学習手法を用いた降水量推定>

Multi-task learningと呼ばれる機械学習手法応用し、マイクロ波放射計による新しい降水量推定手法を提案した。これまで個別に行われてきた降水有無の判定と降水強度の推定を同時に行うことによって、それぞれを個別に行う場合より推定精度が向上することがわかり、機械学習手法を用いた降水リトリバルの改良の新しい方向性を示した。

<全球降水マップの不確実性分析>

米国ジェット推進研究所およびNASAゴダード宇宙飛行センターと共同で、低軌道衛星搭載のマイクロ波放射計で推定した降水量推定値から降水量マップを作製する際の不確実性の評価を行った。

降水量マップの作製では地球を周回する人工衛星の軌道に沿った降水量推定を行い、さらに衛星センサ間で特性が異なる場合は整合性を確保するための補正を行う。その後、雲移動ベクトルなどを利用して時空間的に移動させてマップ化する。最終的な降水量マップにはこうした各ステップの不確実性が積算される。

本研究では米国NASAによる衛星降水量マップIntegrated Multi-satellite Retrievals for GPM(IMERG)の研究グループ(NASAゴダード宇宙飛行センター)の協力を得て、降水量マップの不確実性を作製プロセスのステップ別に評価した。これにはIMERG-Testbedを用いた。IMERG-Testbedは、降水量マップ作製プロセスの各ステップで用いる手法やデータを任意に入れ替えることができるシステムである。手法やデータの様々な組み合わせで降水量マップアンサンブルを作製することで、各ステップ由来の不確実性を評価した。

各ステップ由来の不確実性を評価・比較した結果、マイクロ波放射計による降水量推定の不確実性が最も大きかったが、センサ間の整合性確保のための補正がそれと同程度の不確実性を生む場合があることも示された。研究成果は世界気候研究計画(WCRP)の報告書で発表された。

<成果発表(査読付き論文)>

Bannai, T., H. Xu, N. Utsumi, E. Koo, K. Lu, and H. Kim, 2023: Multi-Task Learning for Simultaneous Retrievals of Passive Microwave Precipitation Estimates and Rain/No-Rain Classification. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102283, <https://doi.org/10.1029/2022GL102283>.

Turk, F. J., and Coauthors, 2021: Adapting Passive Microwave-Based Precipitation Algorithms to Variable Microwave Land Surface Emissivity to Improve Precipitation Estimation from the GPM Constellation. *Journal of Hydrometeorology*, 22, 1755-

1781, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0296.1>.

Utsumi, N., F. J. Turk, Z. S. Haddad, P.-E. Kirstetter, and H. Kim, 2021: Evaluation of Precipitation Vertical Profiles Estimated by GPM-Era Satellite-Based Passive Microwave Retrievals. *Journal of Hydrometeorology*, 22, 95-112, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0160.1>.

内海信幸, 金炯俊, and 瀬戸心太, 2021: フィンランドにおける降雪事例を対象とした衛星リモートセンシング降雪推定の検証. *土木学会論文集 b1 (水工学)*, 77, I_1201-I_1206, https://doi.org/10.2208/jscejhe.77.2_I_1201.

< 成果発表 (査読なし論文) >

Haddad, Z. S., F. J. Turk, N. Utsumi, and P.-E. Kirstetter, 2021: Intrinsic uncertainty in the sub-daily satellite products at their native resolutions. *World Climate Research Programme*.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Bannai Takumi, Xu Haoyang, Utsumi Nobuyuki, Koo Eunho, Lu Keming, Kim Hyungjun	4. 巻 50
2. 論文標題 Multi Task Learning for Simultaneous Retrievals of Passive Microwave Precipitation Estimates and Rain/No Rain Classification	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 eadh4195
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022GL102283	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 内海 信幸、Guosheng Liu、渡部 哲史	4. 巻 78
2. 論文標題 グリーンランド南部の積雪面マイクロ波特性とGSMaP降雪量への影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集b1（水工学）	6. 最初と最後の頁 I_523 ~ I_528
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejhe.78.2_I_523	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Haddad, Z. S., F. J. Turk, N. Utsumi, and P.-E. Kirstetter	4. 巻 Chapter 1
2. 論文標題 Intrinsic uncertainty in the sub-daily satellite products at their native resolutions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 WCRP Report	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.13021/gewex.precip.1.1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Turk F. Joseph, Ringerud Sarah E., You Yalei, Camplani Andrea, Casella Daniele, Panegrossi Giulia, Sano Paolo, Ebtehaj Ardeshir, Guilloteau Clement, Utsumi Nobuyuki, Prigent Catherine, Peters-Lidard Christa	4. 巻 22
2. 論文標題 Adapting Passive Microwave-Based Precipitation Algorithms to Variable Microwave Land Surface Emissivity to Improve Precipitation Estimation from the GPM Constellation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Hydrometeorology	6. 最初と最後の頁 1755-1781
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JHM-D-20-0296.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 内海 信幸, 金 炯俊, 瀬戸 心太	4. 巻 77
2. 論文標題 フィンランドにおける降雪事例を対象とした衛星リモートセンシング降雪推定の検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1201 ~ I_1206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_1201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Utsumi Nobuyuki, Turk F. Joseph, Haddad Ziad S., Kirstetter Pierre-Emmanuel, Kim Hyungjun	4. 巻 22
2. 論文標題 Evaluation of Precipitation Vertical Profiles Estimated by GPM-Era Satellite-Based Passive Microwave Retrievals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Hydrometeorology	6. 最初と最後の頁 95 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JHM-D-20-0160.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Utsumi, N., Turk, F. J., Haddad, Z. S., Kirstetter, P. E., & Kim, H.
2. 発表標題 Precipitation Vertical Profiles Estimated by GPM-era Satellite-based Passive Microwave Retrievals
3. 学会等名 Earth Observation for Water Cycle Science 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Utsumi, N. and F. J. Turk
2. 発表標題 How well do passive microwave algorithms estimate vertical profiles of precipitation?
3. 学会等名 AGU Fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Turk, F. J. and N. Utsumi
2. 発表標題 Investigating Vertical Precipitation Profiles Estimated from a Passive Microwave Algorithm, Separated by Land Surface Conditions
3. 学会等名 2019 NASA PMM Science Team Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Utsumi, N., H. Kim, F. J. Turk, and Z. S. Haddad
2. 発表標題 Using vertical rain profile information to improve satellite-based sub-hourly surface rain estimates, in 12th International Precipitation Conference
3. 学会等名 12th International Precipitation Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Turk, F. J., N. Utsumi, Z. S. Haddad, P. Kirstetter
2. 発表標題 Towards Consistency between the Near-Surface and Vertical Precipitation Structure in the GPM Precipitation Constellation Data Record, in 12th International Precipitation Conference
3. 学会等名 12th International Precipitation Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Jet Propulsion Laboratory	University of Oklahoma	NOAA	他1機関