

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82109

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2022

課題番号：19K23532

研究課題名（和文）高時空間解像度かつ高精度な陸域雲データの創出

研究課題名（英文）Generating high-spatiotemporal-resolution and high-precision cloud data over land

研究代表者

瀬戸 里枝（Seto, Rie）

気象庁気象研究所・気象観測研究部・研究官

研究者番号：70799436

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：陸域雲水量の推定とデータ創出を行うことを目的とした大気陸面結合データ同化システムを開発し、高度化・適用範囲の拡張を行った。高度化と適用範囲の拡張においては、システムの妥当性および陸面表現精度の条件の検討を、地上マイクロ波放射計を用いた観測実験によって行った。具体的には、雲水量を適切に推定するために必要なマイクロ波の陸面輝度温度の再現精度と、その許容誤差が土壌水分にしてどの程度となるかを、異なるマイクロ波の波長（36と89GHz）に対して明らかにした。更に、複数周波数の活用によって固相雲水量の影響による誤差を低減して、雲水量のより詳細な推定を行う手法を開発し、雲データの質を向上することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された雲水量推定手法は、陸域の雲水量の妥当な推定を可能にし、これまで世界的にも限られていた陸域の雲データを創出可能とするものである。これにより得られた陸域の雲データは、降水予測や洪水予測の初期値および予測精度の改善に寄与する。

また、地上観測により、高周波マイクロ波衛星観測を用いた場合は、厚い雲が存在すると、陸域の射出率のばらつきの影響が下向き放射の反射により相殺されることが明らかとなった。この知見は、本システムの広域適用のための基礎情報となるだけでなく、他の衛星マイクロ波による雲水量推定手法を陸域に用いるためにも、広く活用され得るものである。

研究成果の概要（英文）：We developed and improved a coupled atmosphere-land data assimilation system with the purpose of estimating and creating cloud water data over land. For the system's improvement and applicability extension, we examined the validity of the system and the accuracy of land surface representation through observation experiments using ground-based microwave radiometers. Specifically, we clarified the reproduction accuracy of microwave radiance temperature from the land surface and the allowable error in soil moisture for accurate cloud water estimation, for different microwave wavelengths (36 and 89 GHz). Furthermore, we developed a method for more detailed cloud water estimation using multiple frequencies to reduce errors caused by solid-phase cloud water, resulting in an improvement in the quality of cloud data.

研究分野：水文気象学

キーワード：衛星マイクロ波リモートセンシング 雲水量推定手法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

雲は、地球規模の気候システムやエネルギー・水循環と相互に作用する個々の過程を具現化したものである。ゆえに、雲の形成過程の理解や分布特性の詳細な把握は、エネルギー・水循環を高精度にシミュレーションし、空前の速度で進行する気候変動が、近い将来我々にもたらす脅威を、的確に、すなわち定量的かつ様々なスケールで理解する上で不可欠である。しかし、ここ数十年、気候モデルにおける雲の再現精度の低さ、気候へのフィードバックの不確実性の高さが指摘され続け、状況は大きく変わっていない。その本質的な理由の一つは、雲が微視的なレベルから巨視的なレベルまで非常に複雑なプロセスを経て形成され、時空間的に極めて不均一に分布していることである。それゆえ、リアルな雲分布の全体像を高解像度に捉えるデータ(観測やシミュレーションによるデータ)は非常に希薄である。そして、実際の雲を正確に表現するデータが少ないことと、雲プロセスの理解や再現精度・観測精度が向上しないことは、鶏と卵の関係であり、雲の気候への影響理解を妨げる負のスパイラルとなっている。

2. 研究の目的

これまで衛星による観測が困難とされてきた陸域の雲を複数の衛星観測から最適に推定し、更にモデルに取り込む手法を確立することを通して、陸域を含む広範囲を対象に、時々刻々と変わる雲分布を(高い時間解像度で)数kmごとに(高い空間解像度で)現実的に(高精度に)表現する、これまでにない雲データを創出することを目的とする。

3. 研究の方法

大気-陸面結合系において、衛星マイクロ波データ同化する手法を構築し、大陸・海洋を含む低中緯度帯を中心とした広範囲を対象に、数kmの空間解像度で、衛星観測から雲水量および雲域内の大気を高精度に推定する。更に、推定値をモデルに適切に取り込むことで、雲の時間変化を追うことが可能な、時間的にも高解像度な雲データを創出する。

4. 研究成果

複数周波数のマイクロ波を利用した大気-陸面の同時同化手法によって、衛星マイクロ波観測から、陸上の雲水量を数kmの解像度で観測し、予測モデルに取り込むことを可能とした。本手法では、マイクロ波の波長特性・偏波特性と、複数波長に適用できる土壌の放射伝達モデルを利用することで、衛星による雲観測の背景(ノイズ)となる陸面放射の時空間分布を表現し、その影響を適切に取り除くことで、これまで難しいとされていた陸域の大気と雲を推定することを可能とした。海陸で均質な雲水量を推定するために、海陸の境界付近の観測の取り扱いや、マイクロ波の偏波特性の海陸での違いの詳細な検討を行った。

日本の複数地域を対象に、CloudSat 衛星搭載雲プロファイリングレーダ(CPR)による鉛直二次元の雲水量プロダクトを利用して評価を行ったところ、本システムにより、海陸問わず連続的、かつ既往の研究と比較しても高解像度に雲水量が推定・同化できることが示された。(図1左)

更に、輝度温度や雲頂高度を変化させた感度解析から本手法の不確実性を検証した結果、雲水量の推定は雲頂高度に対する感度が高く、可視・赤外衛星観測等からの雲頂情報を最適化の拘束条件とすることで、雲水量の鉛直分布の大幅な改善が図れることがわかった。(図1右)

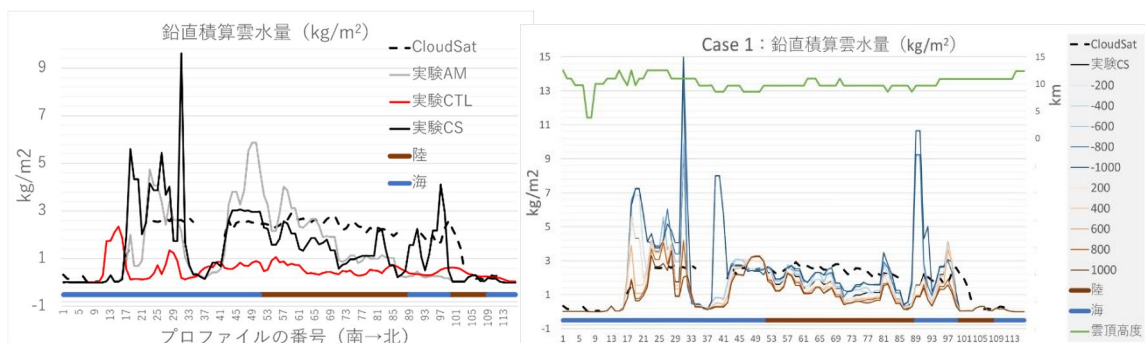


図1 鉛直積算雲水量のCloudSatプロダクトと本手法の比較(左:同化実験, 右:雲頂高度の感度実験)
(実験 AM、実験 CS (CloudSatの雲頂高度を利用)と大気モデルの予測(実験 CTL))

また、その過程において、システムの妥当性および陸面表現精度の条件の検討のための地上マイクロ波放射計を用いた観測実験を行い、大気-陸面間のマイクロ波放射伝達特性についてのより基礎的な知見が明らかとなった。具体的には、雲水量を適切に推定するために必要なマイク

口波の陸面輝度温度の再現精度と、その許容誤差が土壤水分にしてどの程度となるかが、異なるマイクロ波の波長（36 と 89GHz）に対して明らかになった。

マイクロ波の放射伝達方程式を変形して得られる以下の式 (T_{Bl} : 陸面放射、 T_{Bsoil} : 陸面射出、 ϵ_p : 射出率、 T_{Bsky} : 大気下向き放射)

$$\Delta T_{Bl}(0) = \Delta \epsilon_p T_{Bsoil} - \Delta \epsilon_p T_{Bsky} = \Delta \epsilon_p (T_{Bsoil} - T_{Bsky})$$

と観測結果（図2）により、「雲が厚くなってLWPが増加し、下向き放射が増えると、土壤内部からの放射に近づくと、両者が十分近くなる。このとき、上式右辺は微量量の積となる。そのため、一定の雲水量以上の存在下では、射出率が変化しても、陸面射出と下向き放射の反射の変化が相殺され、正味の陸面放射があまり変わらない」ということが分かり、シミュレーションでも確認された。

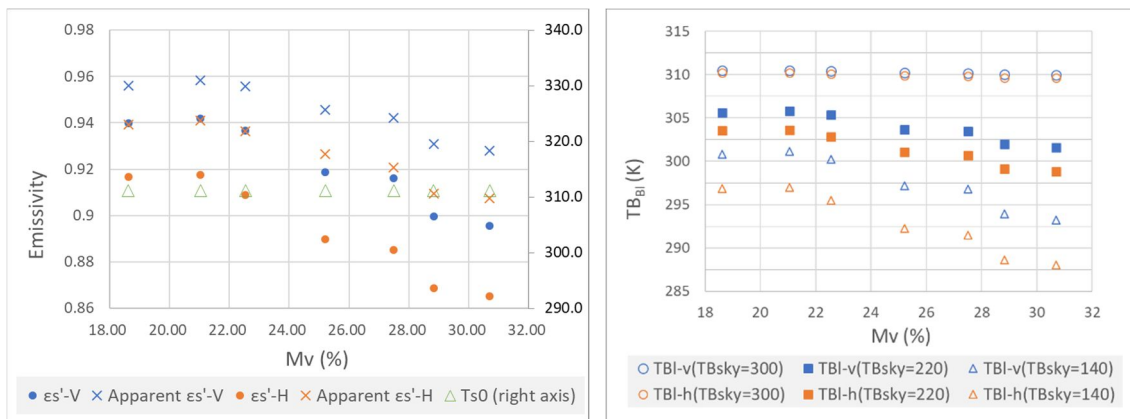


図2 地上マイクロ波放射計の観測から算出した陸面射出率（左）と陸面放射（= 射出 + 反射、右）

更に、射出率の変化を妥当に無視できるLWPの閾値について検討した結果、雲水量がおよそ 2 kg/m^2 以上では、射出率の不均一性が無視できることがわかった（図3）。そして、それ以下の雲水量の場合は、射出率にして少なくとも0.04程度、体積含水率にして少なくとも10%程度の精度が必要ということが明らかになった。

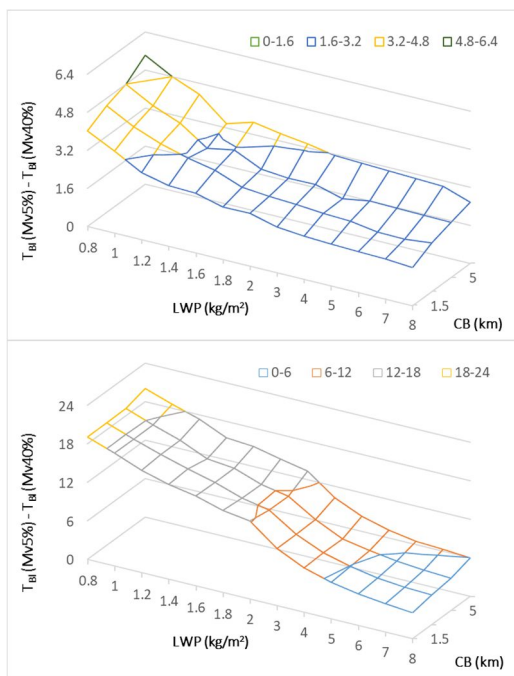


図3 異なるLWP（鉛直積算雲水量）と雲底高度に対する、Mv（土壤水分の体積含水率）が10%と40%の場合の陸面射出の差の等高線図（LWP値が 1.6 kg/m^2 より大きい場合、89GHzのTB1の差は約3K未満となる。）

固相の影響の少ないKa-bandのマイクロ波の活用によって固相雲水量の影響による誤差を低減して、雲水量のより詳細な推定を行う手法を開発した。Ka-bandは固相の散乱の影響が小さい一方、雲シグナル自体も小さくなるため、陸域での利用は困難であった。しかし、本研究では、上述の大気陸面結合データ同化システムによって、陸域の表現精度が向上したことで、比較的小さい雲シグナルを活用できるようになった。この手法は、液相のみの陸域雲水量を36.5GHzマイクロ波観測を用いて（Wバンドなどのより高周波のマイクロ波は用いずに）推定することを可能とし、W-band帯を用いた推定値より、高精度な結果が得られた（図4）。これにより、高周

波のマイクロ波の情報を液相と固相のより分けに使うことを可能とすることが期待できる。

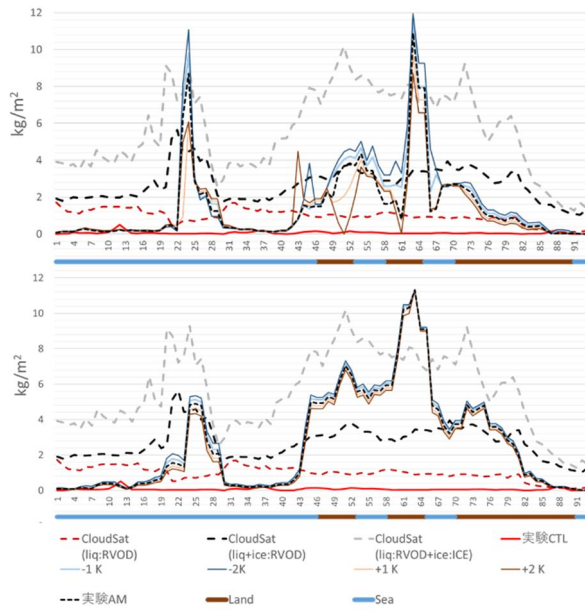


図4 Ka-band(上)とW-band(下)を用いた陸域の液相の雲水量の推定結果。Ka-bandを用いたものの方がCloudSatの黒破線の値に一致している。

上記の一連の手法では、推定した雲水量および、潜熱に相当する気温変化と水蒸気量を大気モデルに適切に同化し、陸域を含めて、数km解像度の雲データを創出することを可能としており、計画していた雲データの向上を達成することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 SETO Rie	4. 巻 77
2. 論文標題 DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A COUPLED ATMOSPHERE AND LAND DATA ASSIMILATION USING SATELLITE KA-BAND MICROWAVE OBSERVATION	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1345 ~ I_1350
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_1345	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 SETO Rie, KANAE Shinjiro	4. 巻 34
2. 論文標題 Examining Possibility of Cloud-rain-ice Partitioning Using Satellite-based Cloud Water Estimation Over Land at 36 and 89 GHz	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF JAPAN SOCIETY OF HYDROLOGY AND WATER RESOURCES	6. 最初と最後の頁 161 ~ 180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3178/jjshwr.34.161	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 -

1. 著者名 SETO Rie	4. 巻 77
2. 論文標題 DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A COUPLED ATMOSPHERE AND LAND DATA ASSIMILATION USING SATELLITE KA-BAND MICROWAVE OBSERVATION	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1345 ~ I_1350
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_1345	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 -

1. 著者名 Seto Rie	4. 巻 2022
2. 論文標題 Development of a innovative estimation algorithm for cloud and precipitation particles over land utilising satellite observation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 12 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21820/23987073.2022.1.12	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 -

1. 著者名 Seto Rie, Aida Kentaro, Koike Toshio, Kanae Shinjiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Radiative Characteristics at 89 and 36 GHz for Satellite-Based Cloud Water Estimation Over Land	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 1355 ~ 1368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TGRS.2020.2996239	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 瀬戸里枝, 鼎信次郎	4. 巻 34
2. 論文標題 36と89GHzの衛星マイクロ波観測による陸域雲水量の雲降水粒子より分け推定の可能性の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 水文・水資源学会誌	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) なし	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 -

1. 著者名 瀬戸里枝, 会田健太郎, 鼎信次郎	4. 巻 75巻
2. 論文標題 雲存在下での大気陸面間の高周波マイクロ波放射伝達特性に関する検討	5. 発行年 2019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_1-I_6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 瀬戸 里枝, 牛山 朋来, 小池 俊雄
2. 発表標題 AMSR-E/AMSR2 を用いた陸域雲降水粒子の観測とその同化による短期降水予測手法の開発
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Rie Seto and Shinjiro Kanae
2. 発表標題 Examining possibility of cloud/rain/ice water path partitioning over land using passive microwave observations
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rie SETO
2. 発表標題 Ensemble rainfall prediction with cloud system assimilation over land using satellite passive microwave measurements
3. 学会等名 2021 CFMIP virtual conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rie Seto, Toshio Koike and Shinjiro Kanae
2. 発表標題 Cloud water content estimation over land and its validation using A-train satellites
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬戸里枝, 小池俊雄, 鼎信次郎
2. 発表標題 衛星マイクロ波放射計を用いた陸域雲水量の推定
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Rie Seto and Shinjiro Kanae
2 . 発表標題 Examining possibility of cloud/rain/ice water path partitioning over land using passive microwave observations
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Rie Seto, Kentaro Aida, Toshio Koike and Shinjiro Kanae
2 . 発表標題 How much is the accuracy of land emissivity representation necessary for adequate cloud water content estimation over land using satellite-based passive microwave remote sensing?
3 . 学会等名 JpGU - AGU Joint Meeting 2020: Virtual (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Rie Seto and Shinjiro Kanae
2 . 発表標題 Estimation of cloud water content over land using satellite-based passive microwave observations with a coupled land and atmosphere assimilation method
3 . 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Rie Seto, Toshio KOIKE, and Shinjiro Kanae
2 . 発表標題 Estimation and assimilation of cloud water content over land and its verification using satellite-based passive and active microwave observations
3 . 学会等名 8th International EarthCARE science workshop (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬戸里枝, 小池俊雄, 鼎信次郎
2. 発表標題 衛星搭載マイクロ波放射計を用いた陸域雲水量の推定手法の提案
3. 学会等名 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会
4. 発表年 2020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
---------	---------