

静止衛星による準リアルタイム日射量解析 Estimation of Solar radiation using Geostationary satellites

○竹中栄晶・Temur KHUJANAZAROV・樋口篤志・田中賢治
○Hideaki TAKENAKA・Temur KHUJANAZAROV・Atsushi HIGUCHI・Kenji TANAKA

Earth getting warm by incoming solar radiation and emitting the thermal energy to space by outgoing terrestrial radiation. The former is a heating effect on the earth, the latter a cooling effect, that balance of heating and cooling keeps the global environment in a state where we can survive. Therefore estimation of radiation budget based on observation is important for better understanding of climate. We developed the high speed and accurate algorithm for shortwave radiation budget and it's applied to geostationary satellite for rapid analysis [Takenaka et al., 2009; 2011; 2020]. Quasi-real-time analysis using the geostationary satellite "Himawari" started on July 7, 2007 (Continuously with Himawari 6→7→8→9). Our analysis system shares the solar radiation and atmospheric parameters dataset with the research community by making the analysis results available promptly after the geostationary satellite observation.

1. 研究背景

地球は太陽放射をうけて温まる一方で、その温度に伴う地球放射（赤外放射）によってエネルギーを宇宙に射出している。これら加熱と冷却の作用によって地球は生物が生存可能な環境に保たれている。太陽放射と地球放射における放射エネルギーの収支を放射収支と呼び、潜熱と顕熱を含めた地球システムにおけるエネルギーの収支を地球のエネルギー収支と呼ぶ。地球表層の環境を現在の状態に保っているのは大気であるが、大気を持つと考えられている地球のエネルギー収支に対する効果は未だ定量的に解明されていない。雲は太陽放射を反射し地球を冷却する効果と、地球放射を吸収、再放射することで地球を保温する効果を併せ持つが、雲の発生・発達には蒸発散や降水など地球大気系の水循環をはじめとする他要素との複雑なフィードバック結合によって関係づけられるため、雲の気候に対する効果の定量的な評価は難しいものとなっている [Wetherald and Manabe, 1988]。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）においても雲の気候フィードバック効果については大きな不確実性として評価が非常に難しいものであることが示されている。IPCCをはじめとする温暖化の議論において様々な気候モデルの予測結果が用いられているが、雲のフィードバック効果については、モデルと観測に基づくフィードバック感度評価の比較が重要な要素となる。對馬らは雲のフィードバック効果が全球平均地表面温度に対してどの程度の感度を持つかを調査し、気候モデルと観測におけるその差異について議論した [Tsushima and Manabe, 2001]。これは雲の気候に対する効果の理解そのものが未だ低い状態であることを示すが、これらの問題へ取り組むためには、雲による地球のエネルギー収支に対する効果を観測に基づいて精度よく評価することが重要である。IPCCの第5次報告書では雲による気候フィードバック効果が正である可能性が高いと位置づけられた [IPCC AR5, 2013]。さらに第6次報告書では気候モデルにおける不確実性が以前として高いものの理解が進んでいることが示されている [IPCC AR6, 2021]。短波放射収支、特に日射量の推定に関して雲は最も大きな不確実性となるが、これに関しても同様の理由で観測に基づく解析が重要な要素となる。本研究は静止衛星観測データに基づく高時間分解能解析による日射量解析を取り扱う。

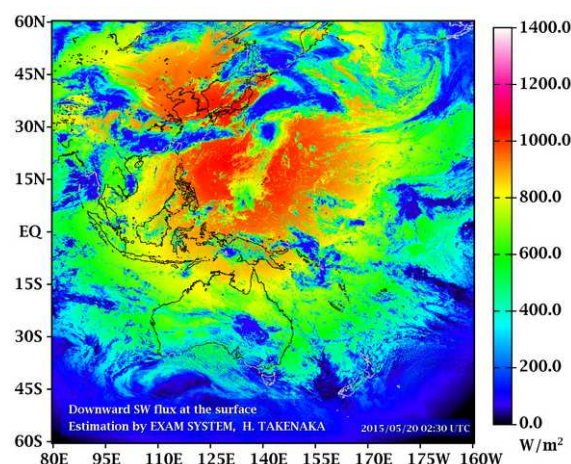


図.1: 第3世代静止衛星ひまわり8号による日射量解析結果の一例

2. アルゴリズム

日射量の推定は古くから様々なアプローチが試みられているが、大きく三つの手法に分類される。(1) 実観測値に基づく回帰分析モデル。地上に設置した日射計にて観測された日射量と気象場のパラメータを結びつけ、統計的に大気の透過率を表現することで日射量を計算する。計算量が少ないため高速に作動する点に優位性があるが、明確な物理モデルを持たないため対応条件には限界がある。また、統計と異なる場所への適用は難しい。(2) 太陽エネルギーの分配を記述したエネルギーフローモデル。太陽から降り注ぐエネルギーが大気の各要素に減衰され地上に到達するまでのエネルギーフローを1次元、もしくは0次元で記述した式を用いて日射量を計算する。エネルギーフローのみを取り扱うため大気の各要素における波長特性を考慮することはできない。(3) 大気要素の波長特性を考慮した放射伝達モデル。太陽から地球大気上端に到達した太陽放射は水蒸気やオゾンなどの吸収ガスや雲粒子など大気中の微粒子によって吸収・散乱され地表面に到達する。これを電磁波の放射伝達理論に基づいて各波長ごとに計算する。放射量の厳密解が得られるが、長い計算時間が必要となる。本研究では気候学のアプローチとして放射伝達モデルによる放射量の推定手法を用いている [Nakajima and Tanaka, 1986; 1988]。放射伝達計算による計算時間の問題は高速に作動するソルバーを開発することで解決した。

一般的な衛星解析アルゴリズムは、LUT 法による放射伝達解のデータベースに基づいて解析が実行される。しかし LUT 法は対象となるパラメータが増加する際、データベース容量が爆発的に増加するため複雑な問題を解く場合原理的に問題を抱えている。また、パラメータ数に応じてデータベースの内挿/外手法も複雑になるため、計算コストが増加するという問題も発生する。これらの問題を克服するためニューラルネットによる放射計算ソルバが開発された[Takenaka et. al.,2011]。一般的にニューラルネットによる解析手法は物理過程を持たない回帰モデルに用いられているが、ここでは放射伝達モデルを高精度に近似する学習アルゴリズムを開発することで物理過程を放射伝達モデルで保持し、実際の計算をニューラルネットで行う手法を用いる。放射伝達計算の関数近似によって作成されたソルバは高速に作動する放射計算ソルバとなる。これにより太陽放射の波長域を高速に計算することを可能とした。完成した計算ソルバは高速に作動することから、静止衛星の観測スケジュールに同期した準リアルタイム解析システムとして稼働している。解析結果はAMATERASS データセットと呼ばれ 2024 年 12 月時点で 1.9 億回ダウンロードされた (図 1)。

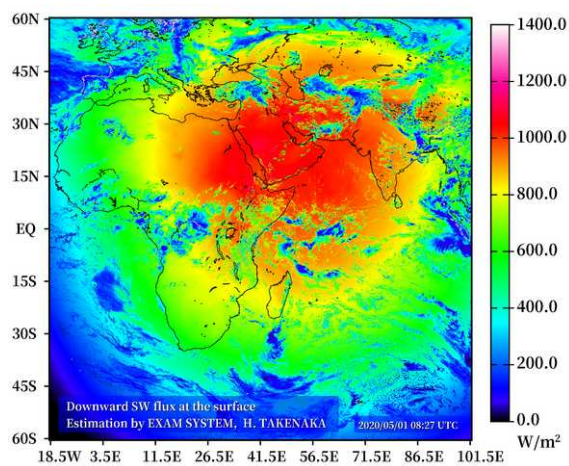


図 2. MSG-IODC による日射量解析結果の一例

3. 解析対象領域の拡張

本発表では AMATERASS データセットの導入及び JST/SATREPS 「アラル海地域における水利用効率と塩害の制御に向けた気候にレジリエントな革新的技術開発」(研究代表：田中賢治教授)において実行されている Meteosat Second Generation - Indian Ocean Data Coverage (MSG-IODC)による日射量解説について概説する(図 2)。テスト解析の結果は地上観測日射計による検証において良い相関を示し、現在は準リアルタイム解析の準備が進められている(図 3)。

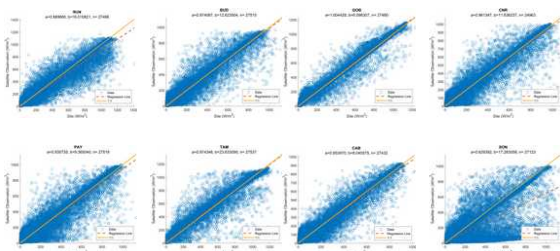


図 3. BSRN 地上観測日射計による地上検証の一例

参考文献

Wetherald, R. T. and S. Manabe, 1988: Cloud feedback processes in a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 45(8), 1397-1415. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045%3C1397:CFPIAG%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045%3C1397:CFPIAG%3E2.0.CO;2)

Tsushima, Y. and S. Manabe, 2001: Influence of cloud feedback on annual variation of global mean surface temperature, *J. Geophys. Res.*, 106(D19), 22, 635-646. <https://doi.org/10.1029/2000JD000235>

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (Eds.)]. Cambridge University Press.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Tignor, M., & Waterfield, T. (Eds.)]. Cambridge University Press.

Nakajima, T., and M. Tanaka, 1986: Matrix formulations for the transfer of solar radiation in plane-parallel scattering atmosphere, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 35, 13-21.

Nakajima, T., and M. Tanaka, 1988: Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 40, 51-69.

Takenaka, H., T. Y. Nakajima, A. Higurashi, A. Higuchi, T. Takamura, R. T. Pinker, and T. Nakajima, 2011: Estimation of Solar radiation using a Neural Network based on Radiative Transfer, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JD013337

Takenaka, H., T. Y. Nakajima, I. Okada, J. R. Dim and T. Takamura, 2009: Cloud optical thickness estimation from GMS-5/SVISSR, *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 29, 392-397. doi:10.1144/rssj.29.392

Takenaka, H., Sakashita, T., Higuchi, A., Nakajima, T., 2020: Geolocation Correction for Geostationary Satellite Observations by a Phase-Only Correlation Method Using a Visible Channel, *Remote Sens.* 2020, 12, 2472., doi.org/10.3390/rs12152472