Feature Article

ひまわり8号の高頻度観測による雲のライフサイクルの研究

岩渕 弘信^{1*}·所 悠香¹·齊藤 雅典¹·Nurfiena Sagita Putri¹·関口 美保²

Cloud Life Cycle Studied by Using Frequent Observations by the Himawari-8

Hironobu IWABUCHI ^{1*}, Yuka TOKORO ¹, Masanori SAITO ¹, Nurfiena Sagita PUTRI ¹ and Miho SEKIGUCHI ²

> Received 1 February 2017 Accepted 12 April 2017

Abstract The geostationary satellite Himawari-8 provides us significantly improved observational capabilities with multiple spectral bands and higher spatial and temporal resolutions, which enable us to estimate macroscopic and microphysical properties of cloud with high accuracy. The frequent observations by Himawari-8 are useful to study life cycle of cloud-precipitation system. This paper introduces the features of the methods for estimating various cloud properties from the Himawari-8 observation data and analyzing cloud evolution by tracking cloud clusters of interest, with an example of application to a large-scale tropical mesoscale convective system.

Keywords : Himawari-8, Cloud Evolution, Cloud Life Cycle, Remote Sensing.

1. 緒 言

雲は放射過程と水循環過程を通じて地球の気候に影響するため重要である。気候モデルによる氷晶雲の再 現はモデル間の違いが大きく,観測から得られる氷晶 雲の特性も手法とデータによって大きな違いがあるこ とが指摘されている(Waliser et al., 2009)。モデルにお いて雲降水過程をより現実的に表現することは重要な 課題となっており、そのため雲量や雲の光学的厚さ、 雲粒子有効半径などの雲の巨視的および微物理的特性 の時空間変動を明らかにすることが求められている。

2014年10月7日に静止気象衛星ひまわり8号が打ち上げられ,2015年7月7日より正式運用が開始され

- 1 東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測センター (〒 980-857 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3)
- ¹ Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Graduate School of Science, Tohoku University

6-3 Aoba, Aramakiaza, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan
 ² 東京海洋大学 大学院海洋科学技術研究科

- (〒135-853 東京都江東区越中島 2-1-6) ² The Graduate School of Marine Science and Te
- ² The Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533, Japan
- * Corresponding Author. E-mail: hiroiwa@m.tohoku.ac.jp (H. Iwabuchi)

た。この衛星には可視赤外放射計 Advanced Himawari Imager (AHI) が搭載されており,従来よりも多バンド かつ高解像度の観測が高頻度に行われるようになった (Bessho et al., 2016)。観測バンドは可視域3,近赤外域 3,熱赤外域10,合計16バンドである。観測域全体 (フルディスクと呼ぶ)を10分間隔,日本付近を2.5 分間隔で観測している。この特長を活かすと,雲降水 系の生成から維持,消滅までのライフサイクルや日変 化をほぼ連続的に捉えることができ,静止気象衛星を 用いた雲降水過程の新たな研究が開始されている。

著者らのグループでは、ひまわり8号搭載AHIの観 測データを用いて雲の時間発展を解析する統合雲解析 システム(Integrated Cloud Analysis System; ICAS)を開 発している(Fig.1)。ICASでは、AHIの熱赤外域の8 個のバンドを用いて、雲特性を推定する(Iwabuchi *et al.*, 2016)。その結果を用いて同一の雲群を追跡し、雲 特性の時間変化を解析することができる。本稿では、 この ICAS の機能を解析例とともに紹介し、今後の展 望について述べる。

2. 雲特性の推定

AHI のような受動型測器による観測から雲特性を推定する手法として,可視・近赤外域を用いる手法と熱赤外域を用いる手法がある。前者は光学的に厚い雲(雲



Fig. 1 Overview of the integrated cloud analysis system (ICAS).

の光学的厚さ1以上)、後者は光学的に薄い雲(雲の光 学的厚さ 0.1~8) に適している (Iwabuchi et al., 2014)。 また、可視・近赤外域の反射率は氷雲を構成する氷晶 の形や表面粗度に強く依存するが、熱赤外域の輝度温 度はほとんど依存しないという特徴がある。AHI の熱 赤外域には、3.7~13 μm の波長域に 10 個のバンドがあ る。3つの水蒸気吸収帯(6.2~7.4 um)は対流圏上・ 中層の水蒸気に感度があり、オゾンの吸収帯(9.6 µm) は成層圏のオゾンに感度がある。AHI には二酸化炭素 の吸収帯(13.3 µm)が1つあり、雲高度の情報が得ら れる。大気の窓と呼ばれる帯域には8.6, 10.4, 11.2, 12.4 µm に 4 つのバンドがあり, 雲高度, 雲の光学的厚 さ、雲粒子有効半径などの雲特性に感度がある。ICAS では、これらのうち強い水蒸気吸収帯を除く8個のバ ンドを同時に用いて、雲頂気圧・気温・高度、雲の光学 的厚さ, 雲粒子有効半径, 鉛直積算雲水・氷量, および 地表面温度を推定し、多層雲や雲相(水または氷)を判 別することが可能となっている(Iwabuchi *et al.*, 2016)。

雲特性の推定には、近年雲やエアロゾルのリモート センシングにおいて応用が盛んな最適推定法 (Rodgers. 2000)を用いている。この方法は先験情報を拘束条件 として観測データにフォワードモデルによる計算結果 をフィッティングするものである。地表面温度と射出 率はほかの衛星による観測値やデータベースを利用し, 気温と湿度などの大気鉛直分布は大気再解析データか ら時空間内挿してフォワードモデルの入力データとし て与える。フォワードモデルの内部では、与えられた 雲および大気と地表面の状態について、散乱を考慮し た多層大気の放射伝達計算を2流法によって解いてい る。水雲の場合、水滴は球形とし、ミー散乱理論に よって光学特性を計算する。氷雲の場合,六角柱,平 板、バラ状などのさまざまな晶癖モデルや表面粗度に ついてあらかじめ光学特性をデータベース化し,解析 の際には晶癖モデルや表面粗度を選択できるようになっ ている。雲特性の推定誤差の主な原因は、大気データ、

雲底気圧, 地表面温度の誤差, 放射伝達の近似による 誤差である。あらかじめさまざまな条件下でテストし た結果、熱赤外を用いた現状の手法では、雲の光学的 厚さが0.3以上のときは全体的に推定精度が高いこと がわかった。雲粒子有効半径については、雲の光学的 厚さが0.5~6のときに推定精度が高い。検証のために、 従来から用いられている NASA の Aqua 衛星に搭載さ れている MODIS(中分解能撮像分光放射計 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), CloudSat 衛星搭 載雲レーダーと CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 衛星搭載ライダー による雲プロダクトとの比較を行った。その結果, MODIS プロダクトと比べると、ICAS では赤外波長を 用いているために光学的に薄い雲までその雲頂高度を よく捉えられていることが確かめられた(Iwabuchi et al., 2016).

Fig.2はフルディスクの解析例である。北半球の太 平洋上に目のはっきりした2つの台風があり、雲頂高 度の高い氷雲で覆われている。台風の中心付近は雲頂 高度が特に高く、光学的に厚い雲が分布している。南 半球の中高緯度の洋上に下層の水雲が多く分布してい る。雲粒子有効半径は、氷雲では20~40 µm 程度、水 雲では10~20 µm 程度となっており、これまで知られ ている気候値に近い値となっている。フルディスクで はこのような雲特性が変化している様子が10分ごとに 得られており、雲降水過程の理解向上が期待される。

3. 雲追跡法

特定の雲群を追跡してその時間変化を捉えるため、 パターンマッチング手法を利用して各タイムステップ における雲群の移動量を推定する。連続した2つのタ イムステップの雲の空間パターンの類似度を数値化し、 雲の移動方向と移動距離を算出する。一般に高度に よって風の場が異なるため、 雲の高度によって移動方 向も距離も異なる。そこで、上述の手法で推定された 雲頂高度が特定の範囲内にある雲群を追跡対象雲オブ ジェクトと定義し、その雲オブジェクトについて鉛直 積算雲水量と雲頂高度の空間分布を2タイムステップ 分についてそれぞれ比較して、対象雲の重なり率およ び鉛直積算雲水量と雲頂高度それぞれの相関係数など から適合度関数を算出する。適合度関数が最大となる 位置に雲群が移動すると考えられるため、適合度関数 の空間分布に2次元正規分布をフィッティングし、画 素より小さいスケールの移動量を推定する(サブピク セル移動推定)。

追跡は時間に対して前方と後方,双方向に雲群を追 跡する仕組みとなっており,はじめに基準となる時刻 を決めて,多数の雲オブジェクトを双方向に追跡する。 基準時刻においては,雲オブジェクトを緯度経度につ いて等間隔に,雲頂高度については3~4 個程度の高度



Fig. 2 Full-disk cloud analysis example at 9:00 UTC on August 19, 2015.
(a) Pseudo color image by infrared band composite, (b) cloud type, (c) cloud thermodynamic phase, (d) cloud-top height, (e) cloud optical thickness, (f) cloud particle effective radius. The cloud types are classified to cumulus (Cu), stratocumulus (Sc), stratus (St), altocumulus (Ac), altostratus (As), nimbostratus (Ns), cirrus (Ci), cirrostratus (Cs), deep convection (DC), and deep convection with very high cloud top (SDC).



Fig. 3 Cloud motions in a mesoscale convective system in the tropics on August 27, 2015. The shade of gray scaling denotes the brightness temperature at AHI band 13 (10.3 μm). The arrows denote the cloud motions with colors representing the cloud top height (CTH).

帯について配置する。その後,時間とともに雲頂高度 は変化するので,平均的な雲頂高度変化に応じて雲オ ブジェクトを定義する雲頂高度範囲を動的に変化させ る。1つの雲オブジェクトは10km程度の小領域にある と仮定しており,この小領域内に対象の雲が占める割 合(雲量)が閾値を下回ったときをその雲オブジェク トの生成または消滅と定めて,追跡を終了させている。

4. 解析事例

ICAS を用いて,熱帯の大規模なメソ対流系の生成から消滅までの解析を行った事例を示す。2015年8月26

日21時(UTC)から28日21時(UTC)にかけて東経 177度,北緯13度付近にメソ対流系が捉えられた。 Fig.3は27日18時(UTC)を基準として雲群を追跡 した例を示す。追跡した各雲オブジェクトの位置の変 化から,各タイムステップにおいて移動ベクトルを推 定した。図には、27日の(a)8:20,(b)14:10,およ び(c)21:20 UTCにおける雲移動ベクトルが赤外画像 の上に矢印で重ねて示されており、矢印の色は雲頂高 度を表している。メソ対流系初期(Fig.3a)には南か らの暖気と北からの寒気のぶつかった場所で対流雲が 発生し、東西に伸びるバンド状に雲が分布している。



Fig. 4 Temporal evolution of cloud optical thickness (COT) for the cloud clusters in the mesoscale convective system that appeared during a period from 23:00 UTC on August 26, 2015 to 21:00 UTC on August 28, 2015 over the central Pacific. The results are shown for a composite of cloud clusters that transported into northward directions after deep convection. Color shades denote the occurrence frequencies. The black line in each panel denotes the median, and two pink lines denote percentile values for 5% and 95%. The time is relative to the beginning of each cloud object tracked.

その後,対流が組織化して大規模になり,27日の14:10 (UTC)には中心付近に雲頂高度16km以上の非常に雲 頂の高い部分が現れており(Fig.3b),このころに対流 系は最盛であったと考えられる。その後,メソ対流系 の中心付近から周辺部に放射状に巻雲が広がり,中心 付近は衰退して雲頂高度が11~12kmに下がっている 様子が捉えられている(Fig.3c)。この事例ではメソ対 流系全体の寿命は約40時間であり,対流の最盛期から 約25時間かけて巻雲が周辺約800kmに広がり,消散 していった。

このメソ対流系のおのおのの部分は、それぞれ異な る時間変化を示しており、ここでは特に積乱雲を経た 後で巻雲となって北側に輸送された雲群に着目した。 具体的には、追跡された雲オブジェクトの一生の中で、 雲頂高度7km以上かつ鉛直積算雲氷量100gm⁻²以上 となった時刻があること、消滅した際に緯度14度以上 にあったことを条件として雲オプジェクトを選択し、 雲特性の時間的な変化を合成解析した。各雲オブジェ クト開始(生成)時刻を基準としたときの雲の光学的 厚さの時間変化をFig.4に示す。最長で約40時間雲が 持続したことがわかる。15時間までは光学的に厚い雲 が多いことから、深い対流雲が持続していた。その後、 雲の光学的厚さは急激に減少して巻雲となり、約20時 間かけて消散していった。

5. まとめと今後の展望

ひまわり8号により高精度,高解像度かつ多バンドの

観測が可能となったことで、さまざまな雲特性を高い 精度で推定可能となった。高頻度観測にパターンマッ チングによる雲群追跡を適用することで、同一の雲群 の時間変化を捉えることができる。従来は断続的に得 られていた雲系の空間構造だけでなく、雲系の時間発 展とそれに伴う雲特性の時間変化がほぼ連続的に捉え られるようになったため、雲系の時間発展や日変化の 研究が現在活発に進められている。今後は、熱帯のメ ソ対流系、台風、中緯度の巻雲などさまざまな事例に ついて、そのライフサイクルと日変化にともなう雲特 性の時間発展を定量的に明らかにするとともに、時空 間規模を広げた統計的な解析により雲降水過程の季節 変化や経年変動を明らかにすることが期待される。ま た、エアロゾルによる雲の調節効果についても今後の 研究の進展が期待される。

辞

本論文の研究は情報通信研究機構の NICT サイエンスクラ ウドを用いて行われました。

謝

References

- Bessho, K., Date, K., Hayashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., Kumagai, Y., Miyakawa, T., Murata, H., Ohno, T., Okuyama, A., Oyama, R., Sasaki, Y., Shimazu, Y., Shimoji, K., Sumida, Y., Suzuki, M., Taniguchi, H., Tsuchiyama, H., Uesawa, D., Yokota, H. and Yoshida, R.: An Introduction to Himawari-8/9—Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites, *J. Meteor. Soc. Japan*, 94, 151–183 (2016) doi:10.2151/jmsj.2016-009.
- Iwabuchi, H., Yamada, S., Katagiri, S., Yang, P. and Okamoto, H.: Radiative and Microphysical Properties of Cirrus Cloud Inferred from the Infrared Measurements Made by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Part I: Retrieval Method, J. Appl. Meteorol. Climatol., 53, 1297–1316 (2014) doi:10.1175/JAMC-D-13-0215.1
- Iwabuchi, H., Saito, M., Tokoro, Y., Putri, N. S. and Sekiguchi M.: Retrieval of Radiative and Microphysical Properties of Cloud from Multispectral Infrared Measurements, *Progress in Earth* and Planetary Science, 3:32 (2016) doi:10.1186/s40645-016-0108-3
- Rodgers, C. D.: Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice, 238 pp, World Scientific, Singapore (2000) ISBN 981-02-2740-X.
- Waliser, D. E., *et al.*, Cloud Ice: A Climate Model Challenge with Signs and Expectations of Progress, *J. Geophys. Res.*, **114**, D00A21 (2009) doi:10.1029/2008JD010015