

衛星データ・シミュレータ

1. はじめに

衛星データ・シミュレータとは、雲解像モデル (CRM) や大循環モデル (GCM) などで生成される雲・降水や気温・湿度場に放射伝達計算を適用し、輝度温度やレーダ反射因子といった衛星計測値を計算機上で再現するコンピュータ・プログラムの総称である。いわば、数値モデルにより作られた仮想世界において、バーチャルな衛星観測を行うツールと考えることもできる。応用例は、数値モデルの性能評価や衛星アルゴリズム開発をはじめ潜在的なニーズは幅広い。本稿では、近年少しずつ関心の高まりを見せる衛星データ・シミュレータについて、現状と展望を簡単に紹介したい。

2. 衛星観測データは「真値」か？

芥川龍之介は短編『藪の中』で、盗賊と若い夫婦のあいだに起こった事件をめぐる証言者ごとに食い違う顛末を淡々と描き、黒澤 明はその物語にさらに一捻りを加えて映画『羅生門』を撮った。語り手の数だけ異なる「真実」の重層性は、文学上の寓話に留まらず科学の世界にも相通ずる深い含意に満ちている。

1997年末以降観測を続ける熱帯降雨観測衛星 (TRMM) はマイクロ波放射計 TMI と降雨レーダ PR を含む 5 台のセンサを搭載し、全球降水観測の充実化に多大な貢献を果たした。しかし、TMI と PR それぞれから推定される降水量に、観測装置固有の測定誤差だけでは説明できない系統的なズレが見つかった (Kummerow *et al.* 2000)。衛星降水プロダクトは、GCM や CRM の性能評価を行う際に基準値 (真値) として利用されることも多いだけに、降水量の不一致は悩ましい問題である。そもそもなぜ、同じ衛星による観測データが 2 つの「真値」を吐き出すことがあり得るのだろうか？

この疑問に答えるためには、少しばかり衛星観測の技術論に立ち入らなくてはならない。衛星観測装置が

直接計測する物理量は、気温や降水量といった気象学パラメータそのものではなく、放射輝度やレーダ反射因子といった放射 (電磁波) 強度である。気体分子や雲・降水粒子は、電磁波の射出・吸収・散乱を繰り返すことで大気中の放射場に揺らぎを生みだす。衛星観測ではこの過程を逆にたどり、観測装置が捉えた放射場の揺らぎから気象場の痕跡を読み取る。探偵が指紋や足跡から犯人を言い当てるように、手掛かりから原因を遡るこの作業のことを、数学の言葉を借りて「逆問題を解く」と呼ぶ。逆問題を解いて気温や降水量等を推定する方法論のことを、一般にリトリーバル・アルゴリズムと呼ぶ (第 1 図 A)。

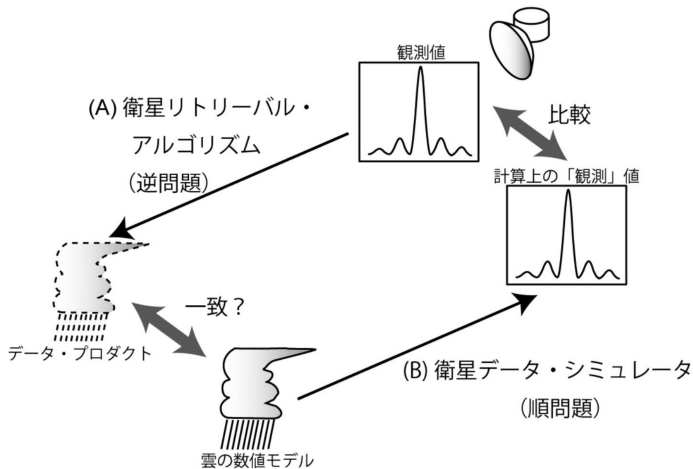
しかし、逆問題は一般に不良設定 (解が一意に定まらない) 問題であり、適切な拘束条件を与えないと解が決まらない。例えば、衛星観測値から降水量を推定するためには、雲微物理の詳細 (雨滴粒径分布の関数形など) をリトリーバル・アルゴリズム内で適切に仮定しておく必要がある。当然ながら、仮定が違えば解も異なる。前述した TRMM 降水量の不一致は、アルゴリズムに内在する諸仮定が PR と TMI 間で物理的整合性を欠いていたことが要因の一つだと考えられている。

極論すれば、衛星観測の「真値」はリトリーバル・アルゴリズムの数だけ存在する。まさに『藪の中』の世界である。

3. 衛星データ・シミュレータが拓く可能性

リトリーバル・アルゴリズムを介さず、衛星計測値を数値モデルと直接比較できないだろうか。そのためのツールが、衛星データ・シミュレータである。

衛星データ・シミュレータは、気温や降水量を入力値として衛星計測放射強度を出力するソフトウェアである。実質的には、放射伝達式を数値積分する「順問題」解決プログラムである (第 1 図 B)。放射伝達の順問題は良設定問題であり、リトリーバル・アルゴリズムに見られる『藪の中』的問題は存在しない。しかも、ユーザがアルゴリズムを加工できない既成のリト



第1図 衛星リトリーバル・アルゴリズム (A) と衛星データ・シミュレータ (B) の概念図。Masunaga *et al.* (2010) をもとに一部改変。

リトリーバル・プロダクトと違い、衛星データ・シミュレータでは（原理的には）雨滴粒径分布のような内部拘束条件をユーザが自由に設定することができる。この利点を利用して、例えば衛星データ・シミュレータを用いた雲微物理スキームの感度実験を試みることができる。Masunaga *et al.* (2008) は、全球雲解像モデル NICAM の数値実験結果を衛星搭載レーダ計測値と比較し、衛星データ・シミュレーションに基づき雪水量のみならず雪粒径分布のバイアスをも検出できる可能性を示した。

放射伝達プログラムそのものは何ら新しいツールではない。しかし、TRMM 衛星のように複数の観測装置を同時搭載する衛星や、A-Train のように多数の衛星を編隊飛行させるプロジェクトが実現した今日、複数の観測装置を横断的に活用することで新たな数値モデル検証の方法論を探る研究が始まりつつある。雲頂温度の計測に向く赤外放射、雨滴や雲粒からの熱放射を直接検出する低周波マイクロ波、そして雪片や霰粒子の散乱シグナルに敏感な高周波マイクロ波。雲・降水システムの水平構造を広く俯瞰するイメージャ（放射計）と、鉛直断面図を鋭く切り出すレーダやライダー。このように観測波長や観測原理の違いにより一長一短を持つ多様な衛星センサを相補的に駆逐することで、衛星観測がもたらす情報は質・量ともに飛躍的に拡大し得る（例えば Matsui *et al.* 2009）。その恩恵を最大限に活用する研究手法はまだ探求が始まったばかり

であり、今後の新たな研究展開が期待される。

4. さまざまな衛星データ・シミュレータ

最後に、既存および開発中の衛星データ・シミュレータをいくつか紹介したい。一般ユーザにソースコードが配布されているパッケージの例としては、気候モデル比較検証プロジェクト CFMIP と協働して開発された COSP (<http://cfmip.metoffice.com/COSP.html>) がある。COSP の特色として、GCM の雲パラメタリゼー

ションに対応したサブグリッド・スケールの雲場生成モジュールが含まれる。いわゆる ISCCP シミュレータも COSP パッケージに含まれているが、ISCCP シミュレータは放射伝達コードではなくモデル出力値を ISCCP 仕様のリトリーバル変数に変換するソフトであり、狭義の衛星データ・シミュレータとはやや特徴が異なっている。他の一例として、筆者が開発・公開を行っている SDSU (<http://precip.hyarc.nagoya-u.ac.jp/sdsu/>) がある。SDSU は CRM ユーザの利便性を視野に、微物理スキームの柔軟なカスタマイズが可能なユーザ・インターフェース (PSD ライブラリ) を備えている。

NASA Goddard 宇宙飛行センターでは、TRMM や GPM など NASA 衛星プロジェクトの応用研究拡大を狙い、上記 SDSU の機能拡張版である Goddard SDSU を開発している（ただし外部ユーザにはソースコード非公開）。また日欧合同衛星計画 EarthCARE に向けた開発研究の一部として、日本の研究者が中心となり J-Simulator という独自のシミュレータの準備も進んでいる。過去数年の米国地球物理学連合 (AGU) 秋季大会では衛星データ・シミュレータ関連セッションが設けられ盛況を見せており、シミュレータ研究の裾野が世界的な広がりを見せてつつあることを実感する。

本稿では誌面の都合により、応用研究の具体例や数値モデル検証以外の活用法など、触れられなかった内

容も多い。より詳しい衛星データ・シミュレータ紹介記事としては, Masunaga *et al.* (2010) がある。

略語一覧

AGU : American Geophysical Union
 CFMIP : Cloud Feedback Model Intercomparison Project
 COSP : CFMIP Observation Simulator Package
 CRM : Cloud Resolving Model
 EarthCARE : Earth Clouds, Aerosols, and Radiation Explorer
 GCM : General Circulation Model
 GPM : Global Precipitation Measurement
 ISCCP : International Satellite Cloud Climatology Project
 NASA : National Aeronautics and Space Administration
 NICAM : Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model
 PR : Precipitation Radar
 PSD : Particle Size Distribution
 SDSU : Satellite Data Simulator Unit
 TMI : TRMM Microwave Imager
 TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

参考文献

- Kummerow C. *et al.*, 2000 : The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1965–1982.
- Masunaga, H., M. Satoh and H. Miura, 2008 : A joint satellite and global cloud-resolving model analysis of a Madden-Julian Oscillation event : Model diagnosis. *J. Geophys. Res.*, **113**, D17210, doi : 10.1029/2008JD009986.
- Masunaga, H., T. Matsui, W.-K. Tao, A. Y. Hou, C. D. Kummerow, T. Nakajima, P. Bauer, W. S. Olson, M. Sekiguchi and T. Y. Nakajima, 2010 : Satellite Data Simulator Unit : A multisensor, multispectral satellite simulator package. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1625–1632.
- Matsui, T., X. Zeng, W.-K. Tao, H. Masunaga, W. S. Olson and S. Lang, 2009 : Evaluation of long-term cloud-resolving model simulations using satellite radiance observations and multifrequency satellite simulators. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1261–1274.

(名古屋大学地球水循環研究センター 増永浩彦)