

## 4. 次世代地球観測衛星を用いた気象学研究の展望

増 永 浩 彦\*

### 1. はじめに

星々が輝きを増し始める黄昏時の空を見上げると、空をゆっくり横切るかすかな光点がふと目に留まることがある。私たちが肉眼で見ることのできる人工衛星の姿は、動いていなければ名もない星の群れに紛れてしまうくらい、儚く頼りない。しかし、今や地球の周回軌道上には多種多様な人工衛星がひしめき、その無数の「目」によって世界を隅々まで見守っている。衛星から絶え間なく送られてくるデータは、TV放送・遠距離通信から気象予報・地球環境モニタリングに至るまで、私たちの社会・生活に広く活用されている。

スプートニク・ショック<sup>†</sup>から覚めやらぬ1960年春、米国は世界初の気象衛星タイロス1号の打ち上げに成功した。以後現在に至る半世紀弱のあいだに、気象衛星は質・量ともに着実な進歩を遂げた。その進化は、気象予報技術や気象・気候学研究のあり方に少なからぬ影響を及ぼしてきた。しかし、20世紀末から今世紀にかけて大きく変わる時代の波は、衛星気象観測の命運にさまざまな光と影を投げかけている。地球規模の気候変化モニタリングの意義をめぐる社会的認識はかつてない高まりを見せる一方で、(予算規模の莫大な)衛星計画の成否を握る各国の経済的・政治的状況は必ずしも順風満帆とは言えない。本稿では、気象衛星の歴史と現状を簡単に振り返るとともに、気象・気候学の今後に向けて、計画中の次世代衛星プロジェクトに期待される役割を考える。同時に、既存の枠にとられない衛星研究戦略の可能性を探る。

### 2. 各国の気象衛星ミッション

#### 2.1 歴史と現状

本稿では「気象衛星」の定義として、気温・湿度の推定または雲物理特性・降水強度の導出を主たるミッション目標に含めている衛星プロジェクトに焦点を絞る。言うまでもなく、ここで対象となる衛星は広義の気象衛星のごく一部である。広帯域地球放射観測に古い歴史を持つ米国のERBE (Earth Radiation Budget Experiment) 衛星やその後継機 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 衛星、太陽掩蔽法などで成層圏微量気体を観測する各国の衛星プロジェクト、また二酸化炭素の全球モニタリングを目指して2009年1月に打ち上げられた日本のGOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) など、数多くの重要ミッションが議論から外れることを、予め申し添えておきたい。

気象衛星は、静止衛星と低軌道衛星に大別される。前者は公転周期が地球自転周期と一致する静止軌道(赤道上空約36,000 km)に投入され、広域定点観測を行う。静止衛星は、刻一刻と変化する雲や水蒸気場を高時間分解能で観測する目的に適する。一方、低軌道衛星は通常数百 km から千 km 以内の高度を周回し、1時間半から2時間ほどで地球を一周する。低軌道衛星は、極軌道を周回する太陽同期(常に同じ地方時に上空を通過する)衛星が一般的だが、後述のTRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 衛星のような例外もある。低軌道衛星は静止衛星に比べ地点ごとの観測頻度は極端に落ちるが、観測対象との距離が近いためにセンサ設計上の制約が少なく、能動

\* 名古屋大学地球水循環研究センター。  
masunaga@hyarc.nagoya-u.ac.jp  
© 2009 日本気象学会

<sup>†</sup> 1957年の旧ソ連による人類初の人工衛星「スプートニク1号」の打ち上げ成功の報により、それまで宇宙開発のリーダーを自負してきた米国の政府や社会に走った衝撃や危機感を言う。

センサや(高空間解像度化の難しい)マイクロ波センサなど多様な検出器を搭載できる。

日米欧各国が進めてきた(または計画中の)気象衛星ミッションの年表を第1図にまとめた。静止気象衛星としては、日本のGMS(Geostationary Meteorological Satellite, 2005年打ち上げのひまわり6号よりMulti-functional Transport Satellite, MTSAT)、米国のGOES(Geostationary Operational Environmental Satellite)、欧州のMeteosatが、1970年代後半より定期的に運用され現在に至っている。これらの衛星には可視帯と熱赤外帯を観測する放射計が搭載され、主として雲の光学的厚さや雲頂温度を(さらに間接的に降水強度を)推定する目的に使われる。世代交代を重ねるにつれ、水蒸気チャンネルや近赤外チャンネルなどの観測帯域が順次追加された。なお、2009年2月現在、MTSAT-1R, MTSAT-2, Meteosat-7, Meteosat-9, GOES-11, GOES-12, GOES-13に加え、中国のFY-2(Feng Yun, 風雲の意)とインドのKalpana-1(インド出身の米国の女性科学者の名前からとられた)の各静止気象衛星が運用中である。

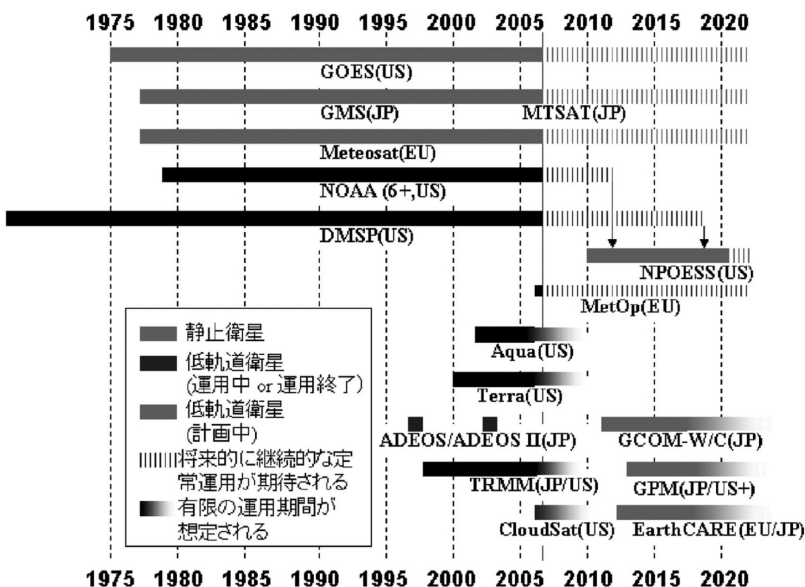
極軌道衛星による気象観測は、米国において長い歴史がある。米国防省管轄の軍事気象衛星計画DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)は、

1965年から継続運用されている長寿衛星プログラムである。当初観測データは機密扱いだったが、1987年打ち上げのDMSP-F8衛星に初めて搭載されたSSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)は、現在型のマイクロ波放射計の礎を築き、今日に至るまで降水や海上風などの観測に活躍している。なお、随所で目にする「夜の地球」の衛星写真(都市光で世界地図が浮き上がるもの)は、DMSP衛星搭載の可視赤外カメラが撮像したデータを編集したものである。

NOAA(米国大気海洋庁)の極軌道衛星計画においては、1978年に打ち上げられたNOAA-6以来、AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)やTOVS(TIROS[Television Infrared Operational Satellite]Operational Vertical Sounder)といった定番センサが脈々と受け継がれてきた。可視赤外放射計AVHRRは雲物理量推定に威力を発揮し、TOVSは赤外サウンダHIRS(High Resolution Infrared Radiation Sounder)とマイクロ波サウンダMSU(Microwave Sounding Unit,のちにAdvanced Microwave Sounding Unit:AMSU)を組み合わせて気温・湿度の鉛直プロファイルを導出する。NOAA衛星シリーズは、データ同化のような現業利用への貢献は勿論、その30年近いデータ蓄積の実績により気候学研究にとっても貴重なりソースとなっている。

欧州では、2006年10月極軌道気象衛星MetOp(Meteorological Operational Satellite Programme)初号機の打ち上げが成功し、以後次世代機の継続的な打ち上げおよび定常運用を目指している。MetOpにはAVHRRやHIRS, AMSUといったNOAA衛星でお馴染みの検出器のほか、マイクロ波散乱計(海上風速の推定に使われる)や水蒸気推定用のGPS(Global Positioning System)レーザなども搭載している。

以上挙げた衛星はどれも現業色の強いプロジェクト



第1図 日米欧(図中でそれぞれJP, US, EU)の気象衛星ミッション年表。将来計画については変更があり得る。

に関連している。日米欧の各国・地域において、開発と打ち上げを担当する宇宙開発機関(それぞれ JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency, NASA: National Aeronautics and Space Administration, ESA: European Space Agency)に対し、運用と現業利用業務を引き受ける機関(それぞれ気象庁, NOAA, EUMETSAT: European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)という役割分担が存在する。他方で、各宇宙開発機関はそれぞれ独自に研究的要素の強い気象衛星を開発し、その運用やデータ配信までを自前で賄う別系統の衛星ミッションを進めている。米国の Aqua や Terra 衛星はその一例で、30を超えるチャンネルを備えた可視赤外放射計 MODIS (MODerate Resolution Imaging/Spectroradiometer, Aqua・Terra 搭載)、鉛直分解能 1 km・気温分解能 1 K を誇る赤外サウンドアIRS (Atmospheric Infrared Sounder, Aqua 搭載)、和製マイクロ波放射計 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System, Aqua 搭載) など、新しい技術を検出器開発に果敢に取り込んだ。

JAXA (旧 NASDA: National Development Space Agency of Japan) は、2 つの ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite, 日本名「みどり」) シリーズで日本の衛星地球観測史に大きな足跡を残した。残念ながらいずれも短命に終わったが、欧米に比べ科学衛星開発経験の浅いハンディを乗り越え、Terra や Aqua に勝るとも劣らない意欲的な衛星開発を成功させた意義は大きい。

革新的な気象衛星プロジェクトを語る上で、熱帯降雨観測ミッション TRMM を避けて通ることはできない。日米合同プログラムとして1997年秋に打ち上げられた TRMM 衛星は、降水レーダ (PR: Precipitation Radar) を搭載した初の衛星として衛星降水観測の新境地を開いた。TRMM 衛星は太陽非同期軌道を周回しており、統計的に日周変化を追跡できる特色を持つ。2006年4月には米国 CloudSat 衛星が打ち上げられ、(TRMM レーダでは検出限界に届かない) 雲粒からのレーダエコーを含む雲システム全体の鉛直断面を衛星から診断できるようになった。原理的に2次元の俯瞰図が主であった従来の衛星観測データ解析は、高分解能サウンドア (AIRS)、降水レーダ (TRMM PR)、CloudSat 雲レーダなどの登場により、文字通り「奥行き」を増しつつある。

## 2.2 将来計画

気象衛星、とりわけ現業衛星は、安定的・継続的な観測・運用が重要であることは論を待たない。従って、計画の存続が国家予算編成時の経済的・政治的条件に左右される状況は、社会的利益の観点からも望ましくない。とは言え、気象衛星1機の開発・打ち上げ・運用にかかる総費用は数百億円にも及び、緊縮財政の影響と無関係ではいられない。その象徴的な例として挙げられるのは、米国の NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) 計画である。NPOESS とは米国商務省 (NOAA は商務省管轄である)、国防省、NASA の3機関が協力し、現在別々に運用されている DMSP と NOAA 衛星を将来的に統合する計画である。現業極軌道衛星の開発・運用を一本化することにより、行政・財務上の効率化を図ることが狙いである。NOAA 衛星シリーズと DMSP シリーズは2010年から2020年の間に順次終了し、NPOESS に引き継がれる。結果として手薄になりがちな観測体制は、欧州の MetOp 衛星の支援により維持される。しかし、影響を最小限に留めつつ運営を合理化できるのならそれに越したことはないが、縦割り行政の3機関を束ねて動かすプロジェクトは簡単ではない。計画立案の過程で予算の見積りが狂えば、当然当初計画の見直しもあり得る。実際2005年には、マイクロ波放射計 CMIS (Conical-Scanning Microwave Imager/Sounder) の全面的な設計見直しを含め、NPOESS の計画規模の下方修正が行われた。

JAXA は ADEOS-II の後継ミッションとして、水循環モニタリングを主目的とした GCOM-W (Global Change Observation Mission) と気候変動モニタリングに主眼を置いた GCOM-C との2本立ての衛星計画を立案している。ADEOS・ADEOS-II 以来の流れを継承しつつも、「1衛星・1ミッション」に目標を絞った GCOM シリーズの潔さは、10個を超える検出器が搭載センサ・リストに名を連ねる NPOESS とは好対照を成す。

一方、衛星計画の国際化も一層進みつつある。GPM (Global Precipitation Measurement Mission) 計画は、TRMM 後継と位置づけられる日米合作のコア衛星を中心に据え、マイクロ波放射計 (やサウンドア) を搭載する多数の「コンステレーション」衛星群を編成する。コンステレーション衛星の大部分は、各国が保有する既存の衛星インフラの共有が前提とな

り、その意味でGPMはかつてなく大掛かりな国際プロジェクトである。コンステレーション衛星群の調達が順調に実現すれば、全球降水観測が3時間程度の時間分解能で常時確保されると見込まれる。

また、雲レーダとライダ他を同時搭載するEarthCARE (Earth Cloud, Aerosol, and Radiation Explorer) プロジェクトが日欧協力プロジェクトとして構想されている。EarthCAREは、ミリ波帯と可視帯の能動センサ2台を駆使し、雲とエアロゾル物理量観測とその地球放射収支への影響評価を行う。気候変化予測において定量的評価の最も困難な雲・エアロゾル相互作用のさらなる理解を目指し、新たな研究の突破口として期待される。

### 3. 次世代の衛星気象・気候学

「次世代」と言うのと向こう10年程度のタイム・スパンが想定されると思われるが、気象衛星計画は通例、構想から実現に至るまでにそれこそ10年単位の歳月が費やされる。1つの衛星プロジェクトの沿革は、そのまま研究者人生と歩みを共にすると言っても過言ではない。若手・中堅研究者は先代の遺した衛星データで業績を上げ、中堅が大物の風格を放ち始めるころ次の一大計画を立案し、引退間近になってようやくその衛星が軌道に乗り、次の若手世代がその恩恵に与る。その意味で、衛星ミッションとは宿命的に「遅れて来た旧世代プロジェクト」である。将来のために新たな気象衛星プロジェクトを提案する努力はもちろん重要だが、前世代から託された「棚からぼた餅」を上手にさばく解析手法の考案も、次世代の衛星気象・気候学に向けた重要な研究テーマである。前世代が夢見たプロジェクト構想が次世代の学問的興味や社会的ニーズと合致しているとは限らないから、既存の衛星センサの「目的外使用」もまた真剣な研究課題となり得る。

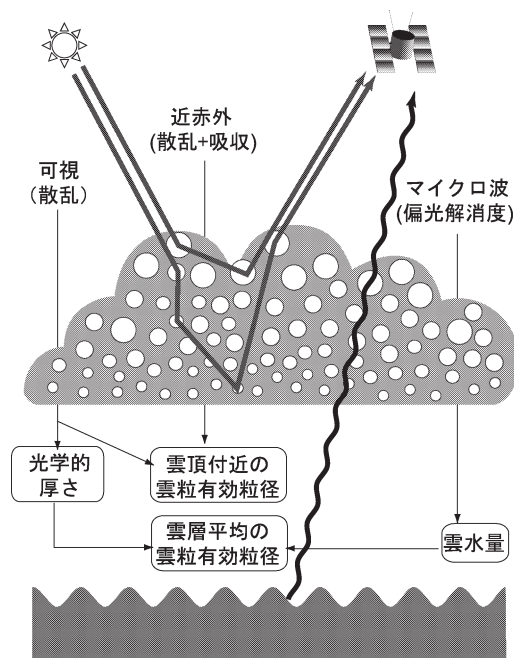
その方法論の1つとして、異種センサの複合利用について考えてみたい。前節で概観したように、前世紀末から今世紀にかけて新たな低軌道気象衛星の打ち上げが相次ぎ、観測波長帯や受動・能動を問わず多様な衛星搭載センサからのデータが利用できるようになった。そこで、観測原理の違う複数のセンサを横断的に用いて、個々のセンサを開発段階では想定されなかった用途に応用する可能性を考えてみたい。本節では、衛星センサ複合解析の実例をいくつか紹介し、今後の研究の新展開に向けた展望を探る。また、来る10年に大きな技術的進展が見込まれる全球雲解像モデルとの

連携への期待についても触れたい。

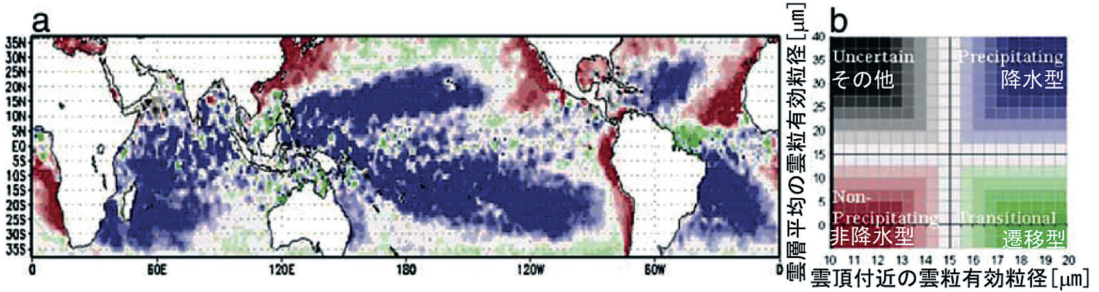
#### 3.1 TRMM 衛星搭載センサ複合解析

TRMM衛星は5台のセンサを載せて打ち上げられ、そのうち4台は現在も運用中である。ここでは、そのうちPR (降水レーダ)、TMI (TRMM Microwave Imager, マイクロ波放射計)、VIRS (Visible/Infrared Scanner, 可視赤外放射計) から2台を用いた複合解析研究例を概観する。

Masunaga *et al.* (2002) はVIRSとTMIデータを用いて、海洋上の下層雲を微物理状態に応じて無降水雲、霧雨雲、降水雲に判別するアルゴリズムを提案した。基本的なアイデアは、雲粒による放射吸収・射出率がマイクロ波と近赤外放射で大きく違う特性を利用し、雲層内の雲粒径鉛直傾度を定性的に導出して、その鉛直傾度の特性から雲の種類の判別を行うというものである(第2図)。雲粒の凝結成長が進行中の雲層では、雲粒粒径が(マイクロ波雲水量と可視光学的厚さの比から求まる)層平均値に比べ、(近赤外放射の減光量から求まる)雲頂付近の値が大きめに出る。雲頂付近の粒径が約 $15\mu\text{m}$ を超える雲では、雲粒併合成長が進行し霧雨粒子の生成が始まっているものと考えられている。霧雨粒子が雨粒に成長して雲層



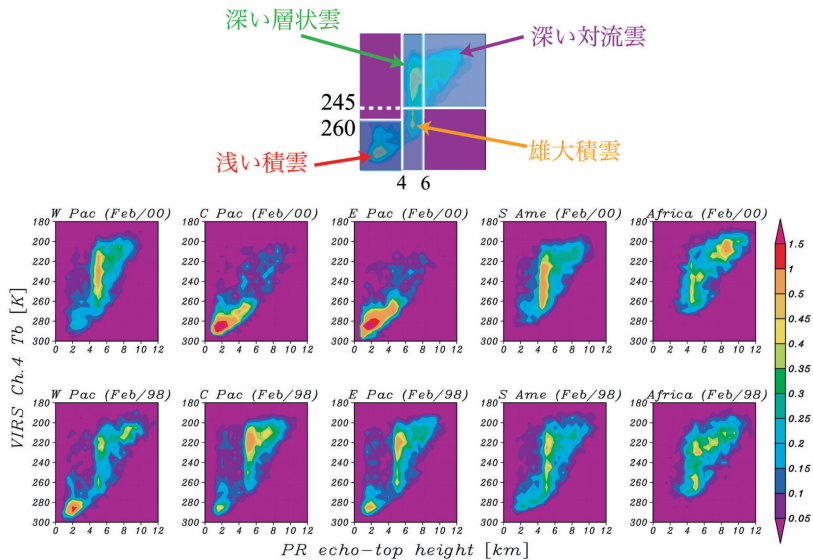
第2図 マイクロ波放射計と可視赤外放射計を用いた雲物理量推定法の概念図。



第3図 マイクロ波放射計と可視赤外放射計の複合解析に基づく下層雲物理状態の全球分布 (Matsui *et al.* 2004). 右の色パレットは横軸が雲頂付近の粒径値, 縦軸が雲層平均粒径値を表す.

内を落下するにつれ, 全層平均粒径と雲頂粒径の大小関係は逆転する. このように, 雲頂と全層平均各々の雲粒径の推定値をもとに下層雲の物理状態を判別すると, その全球分布は熱帯海洋上で降水が頻繁に見られる一方, 亜熱帯大陸西岸沖では降水が抑制されるパターンを描いて浮かび上がる (第3図). この分布の傾向は, 下層大気安定度とエアロゾル数密度の影響で説明される (Matsui *et al.* 2004).

さて, 熱帯降水システムの気候学的理解の向上は TRMM ミッション目標の中心に位置付けられ, 特に PR は世界初の衛星搭載降水レーダとしてユニークな役割を果たしてきた. しかしながら, PR の周波数 (13.6 GHz) と検出限界 (約17 dBZ) では, 凍結降水粒子に対する感度は必ずしも充分ではない. 圏界面近くまで発達した降水雲でも, 凍結粒子が急速に成長する対流セル内部を除くと, PR エコー頂は, 実際の雲頂よりもかなり低くなり融解層の直上に留まってしまう観測例も珍しくない. そこで, レーダと赤外放射の情報とを組み合わせ, 赤外輝度温度 (雲頂高度の指標) とエコー頂高度の両者を独立変数として熱帯降水システムの分類を試みた (第4図). 2000年2月の解析からは, 浅い対流システム



第4図 TRMM レーダエコー頂高度 (km, 横軸) と赤外放射輝度 (K, 縦軸) の2次元ヒストグラム. 2000年2月 (上) と1998年2月 (下) の統計を5つの熱帯地域 (左から西太平洋, 中部太平洋, 東太平洋, 南米大陸, アフリカ大陸) について示す. Masunaga *et al.* (2005) より.

ムが中部・東部太平洋で卓越する一方, より深く発達する降水雲が西部太平洋で頻繁に見られる対照的な様子が見出された. この傾向はエル・ニーニョ発生中 (1998年2月) では大きく異なり, 発達した降水システムが太平洋全域に渡って観測された. 赤外放射のみからは判別の難しい浅い対流から, PR のみからは完全には捉え切れない深い降水雲に至る幅広い降水スペクトル分布が, PR・VIRS 複合解析により浮かび上がり, エル・ニーニョ=南方振動 (ENSO) に伴うウォーカー循環の変化と連動する熱帯降水システムの変動がはっきりと現れている.

2006年のCloudSat 衛星打ち上げにより、能動・受動センサ複合利用のポテンシャルはさらに広がった。CloudSat 衛星と Aqua 衛星を含む複数の衛星群 (A-Train) は、ほぼ同一軌道を僅かな時間差で周回するフォーメーション・フライトを形成し、多センサ複合解析の可能性を秘めた宝庫と言える。例えば、MODIS と雲レーダ、及び AMSR-E と雲レーダの組み合わせは、雲物理量や降水特性の推定に新たな方法論を拓くだろう。

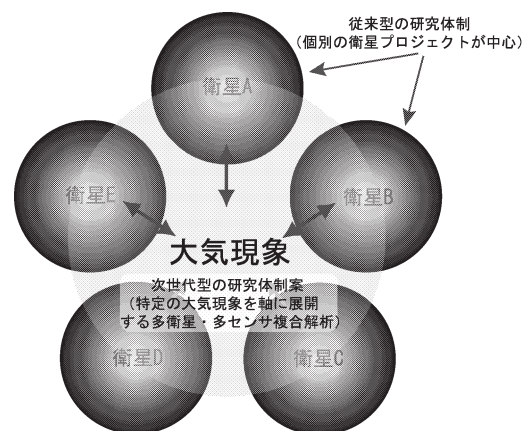
### 3.2 観測対象を軸に展開する多衛星データ複合解析

多センサ複合解析は、走査方向もサンプリングも空間解像度もまちまちのデータを整合的に処理する必要があるため、単独センサ解析に比べアルゴリズムが複雑になる。また、日平均や月平均と違い、瞬間観測値のマッチアップが不可欠であり、扱うデータ量は必然的に莫大となる。しかし、前者はあくまで技術的な問題で本質的な困難ではないし、必要なデータ容量も今では一研究室の予算で揃えられる計算機資源で対応できると言っても良い。

「衛星屋」コミュニティは、特定の衛星センサや衛星プロジェクトを軸として広がる形態が一般的である。その背後にあるのは、NASA や JAXA など宇宙開発機関の研究公募が原則としてプロジェクト単位であること、また衛星データ解析の専門家、特にアルゴリズム開発者の技術力が利用センサごとに個別に特化しているという事情である。結果として、プロの衛星屋は異種センサ複合利用には必ずしも積極的とは言えない。寧ろ、研究動機が個々の衛星プロジェクトより気象学の問題意識に直結している一般データ・ユーザの方が、自由な発想で衛星センサを使いこなしやすい立場にいる。そこで、次世代の衛星気象観測に向け、プロジェクト単位の従来型研究体制から特定の気象現象を軸とした多衛星データ複合解析体制へという発想の転換を期待したい (第5図)。ここで言う大気現象とは、降水や気温偏差といった個別的な観測対象ではなく、季節内変動や ENSO といった複合的な気象学的イベントを念頭に置いている。

一例として MJO (Madden-Julian Oscillation) を採り上げてみよう。これは、Madden and Julian (1971) により発見された赤道域の積雲対流活動に見られる周期30~60日程度の季節内変動である。MJO はその出現から発達・消滅に至るまで、浅い積雲から深い対流への積雲対流活動の構造的進化や、自由対流

圏の湿潤化と不安定化、非断熱加熱の影響などによる気温偏差の時間変化、発達期に先立つ海面水温の上昇と消滅期の水温低下、対流域西側での西風強化などの下層風の変化、といった大気海洋系全体を巻き込むサイクルを伴うことが知られている (Lau and Waliser 2005)。こうした MJO に伴う大気・海洋の熱力学的構造進化の解明には、TOGA-COARE (Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment) のような集中観測実験の成果が大きな貢献を果たしてきたが、そもそも TOGA-COARE 観測が行われた1990年代には、その代替となり得る衛星観測手段は皆無に近かった。現在でも現場観測に匹敵する時空間精度を衛星観測に求めることは困難であるが、当時と比較すると現在の気象衛星インフラははるかに充実している (第1図参照)。例えば、TRMM 搭載 PR による降水システムの鉛直プロファイリング、Aqua 搭載 AIRS/AMSU/HSB サウンディング・システムによる気温・湿度プロファイリング (Tian *et al.* 2006)、TRMM 搭載 TMI や Aqua 搭載 AMSR-E といったマイクロ波放射計による海面水温観測、QuikSCAT (Quick Scatterometer) 搭載 SeaWinds のようなマイクロ波散乱系による海上風速観測など、現在利用可能な衛星群を最大限に利用すれば、MJO の衛星観測研究は新たな広がりを見せるであろう。勿論、軌道の違いによる観測時間の隔たりや、サンプリングや空間解像度の違いの補



第5図 次世代衛星気象観測パラダイムへの期待。従来のような衛星プロジェクト単位の体制 (外側の小さな円) から特定の気象現象を軸に展開する研究体制 (中心の大きな円) へ。

正、降雨域内で推定不可能ないし精度の落ちる赤外サウンダやマイクロ波散乱計のデータ処理など、多衛星データの複合利用には技術的課題も多い。それでも、現場観測キャンペーンには求めにくい広域性・継続性に優れ、かつ再解析データのように数値予報モデルやデータ同化システムに依存しない衛星データは、MJOに留まらず幅広い気象・気候学的研究においてユニークな役割を担うと期待される。

### 3.3 全球雲解像モデルと衛星観測との連携に向けて

最後に、次世代気候モデルと衛星観測との連携に向けた展望を述べたい。サブグリッドスケールの雲と降水を積雲パラメタリゼーションで表現する従来の気象大循環モデルにおいては、モデル内での雲・降水システムの再現性を衛星データと比較することは現実味を欠いていた。しかし、「地球シミュレータ」に代表されるスーパーコンピュータの更なる技術革新に伴い、雲解像モデルの全球シミュレーションがようやく実現可能な時代に突入しつつある。全球モデルからトップダウン的に解像度を上げていくNICAM (Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model; 佐藤・富田 2008)、逆にメソスケールモデルからボトムアップ的に広域化を遂げつつあるCRESS (Cloud Resolving Storm Simulator; Tsuboki and Sakakibara 2002) など、全球雲解像モデルの実用化に向け活発な開発研究が進行している。

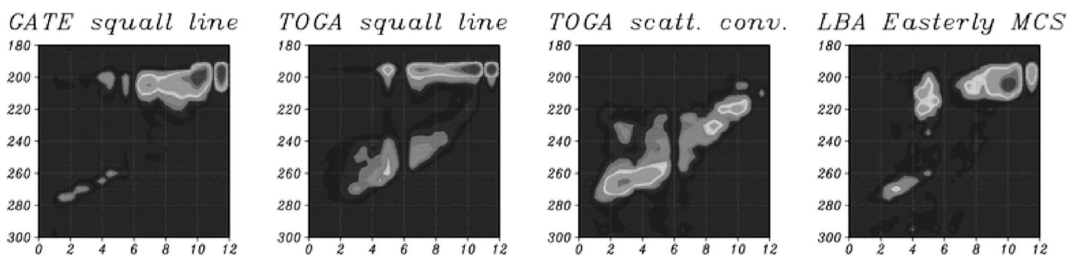
全球雲解像モデルによるシミュレーション結果について衛星データを基に検証するには、モデル出力の降水量と衛星が推定する降水量とを突き合わせる方法がまず考えられる (Satoh *et al.* 2006)。気象学的変数による比較は物理的な意味が直感的に捉えやすい反面、衛星アルゴリズムに内在するバイアスとモデルの

誤差とを分離できない厄介さがある。これに対して、モデル結果に放射伝達計算を適用して仮想的な衛星データを合成し、観測値空間で生データと比較すれば、衛星側のアルゴリズムに依存しない解析が可能となる。メソスケールの雲解像モデルを用いたそのような比較研究の一例として、第4図に示したTRMM搭載PRエコー頂高度とVIRS赤外輝度温度のヒストグラムをモデル結果から構築してみたものが第6図である。このようなヒストグラムを実際の観測データと共に解析することにより、深い対流を過剰に生成しがちだといったようなモデルの「クセ」が視覚的に現れる。同じ手法を全球雲解像モデル結果に応用すれば、例えば大規模循環場と熱帯降水システム間の相互作用の再現性を診断する一助になると期待される。そのような研究の一例として、Masunaga *et al.* (2008) は、TRMM観測およびCloudSatレーダ観測を基にNICAMシミュレーション結果を検証した。その結果、異なる周波数のレーダから得られる情報を複合的に活用することで、降水システムの空間構造だけでなく微物理モデルに由来するバイアスも検出できることが示された。

雲解像モデルと衛星観測の協同作業の目指すところは、もちろんモデル検証にとどまらない。衛星データから推定できる物理量は限られているが、モデル結果には(モデルが表現し得る範囲で)物理的に整合性のある気象学的変数が揃っている。情報量に優れた雲解像モデルと現実性に利のある観測データを組み合わせる方法論の開発は、気象・気候学研究の新しい一分野として今後発展していくことが期待される。

## 4. おわりに

生物進化の永い歴史のなかで、ある器官が機能を変



第6図 雲解像モデル (Goddard Cumulus Ensemble モデル) の結果をもとに衛星データ・シミュレーションを行って得られたPRエコー頂高度 (km, 横軸)・赤外放射輝度 (K, 縦軸) ヒストグラム。(左) 熱帯大西洋のスコールライン、(中左) 熱帯西太平洋のスコールライン、(中右) 熱帯西太平洋の孤立した積乱雲群、(右) 南米熱帯雨林のメソスケール対流系。第4図と比較のこと。

えながら環境に適応していくことがある。現在と違う機能を持った古い適応形態のことを、進化論では「前適応」と呼んでいる。中途半端に首の長いキリンの祖先や翼が未発達な鳥の先祖が当初から進化的優位に立てたのは、前適応のおかげだったと考えられている。例えば鳥の翼は、空を舞うには不十分だった時代には体温調節に役立っていたと言われている。飛べない翼の「目的外使用」で自然淘汰を生き抜いた太古の鳥たちのしたたかさが、現代の鳥類に繁栄をもたらした。

一旦動き出すと小回りの利かない衛星プロジェクトが、様々な逆風や不測の事態を乗り越え生き残ってゆく上で、本来のミッション目標にこだわらない柔軟な戦略が鍵となると私は考える。次世代気象衛星計画という雛鳥が大空に羽ばたくためには、縦割りの衛星プロジェクトに縛られない着想や、モデル・コミュニティとの開発レベルでの連携など、既存の衛星コミュニティの枠を越えた人的・知的交流が貴重な糧となるだろう。

#### 参 考 文 献

- Lau, W. K. M. and D. E. Waliser, 2005 : Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System. Springer-Praxis, 436 pp.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1971 : Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- Masunaga, H., T. Y. Nakajima, T. Nakajima, M. Kachi, R. Oki and S. Kuroda, 2002 : Physical properties of maritime low clouds as retrieved by combined use of Tropical Rainfall Measurement Mission Microwave Imager and Visible/Infrared Scanner. *Algorithm. J. Geophys. Res.*, **107**, 4083, doi : 10.1029/2001JD000743.
- Masunaga, H., T. S. L'Ecuyer and C. D. Kummerow, 2005 : Variability in the characteristics of precipitation systems in the tropical Pacific. Part I. Spatial structure. *J. Climate*, **18**, 823-840.
- 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.
- Matsui, T., H. Masunaga, R. Pielke Sr. and W.-K. Tao, 2004 : Impact of aerosols and atmospheric thermodynamics on cloud properties within the climate system. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06109, doi : 10.1029/2003GL019287
- 佐藤正樹, 富田浩文, 2008 : 準一様格子を用いた全球雲画像大気モデルの開発とそれによる熱帯対流雲集団のシミュレーション —2007年度日本気象学会賞受賞記念講演—. *天気*, **55**, 451-456.
- Satoh, M., T. Nasuno, H. Miura, H. Tomita, S. Iga and Y. Takayabu, 2006 : Precipitation statistics comparison between global cloud resolving simulation with NICAM and TRMM PR data. *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean* (K. Hamilton and W. Ohfuchi, eds.), Springer-Verlag, 99-112.
- Tian, B., D. E. Waliser, E. J. Fetzer, B. H. Lambrigtsen, Y. L. Yung and B. Wang, 2006 : Vertical moist thermodynamic structure and spatial-temporal evolution of the MJO in AIRS observations. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2462-2485.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002 : Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. *High Performance Computing* (H. P. Zima, K. Joe, M. Sato, Y. Seo and M. Shimasaki, eds.), Springer-Verlag, 243-259.