全球降水観測（GPM）計画の現状

Status of global precipitation measurement (GPM) mission

五十嵐 保*・遠藤 貴宏*

Tamotsu IGARASHI and Takahiro ENDO

Abstract : GPM (global precipitation measurement) core observatory was launched by H-IIA・F23 rocket on 28 February, 2014 successfully. The first light images by mission instruments; DPR (dual-frequency precipitation radar) and GMI (GPM microwave imager) were released on 25 March, 2014 by JAXA/NASA, which are verifying qualitative precipitation intensity in vertical and horizontal distribution. This review is describing overview of GPM core observatory with DPR, GMI, status of GPM constellation satellites, and GSMaP (global satellite mapping of precipitation).

1. はじめに

日米協力により，宇宙航空研究開発機構(JAXA)及び米国航空宇宙局(NASA)の共同運用中の熱帯降雨観測衛星¹⁾(TRMM: tropical rainfall measurement mission)は，衛星からのレーダによる世界初の降雨観測衛星であり，1997年11月の打上げ以来，2014年現在まで，当初の設計寿命を大幅に超え観測を継続している。

2014年2月28日，第二世代の全球降水観測(GPM: global precipitation measurement)計画²⁾の中心となるGPM主衛星がH-IIA ロケット23号機により打上げに成功した。3月25日には初画像が公開され，その後初期の運用が進みつつあるが，降水観測領域を広げ，観測頻度，降水量観測精度の向上などが検証され，本格的な運用に移行する計画である。

GPM計画は，主衛星を中心に複数の副衛星群によって構成されるコンステレーション(星座)を編成し観測する計画であり，主衛星の開発・打上げ・運用を日米で分担し，更に複数の国々の宇宙機関により打ち上げられる衛星が参加し，全球観測データの相互利用協力の進展が進みつつある。

その結果，気候変動，地球環境，生態系の安定的な

保全に不可欠な水，集中豪雨による洪水や日照りによる旱魃などの気象災害の要因となる，水の時間空間分布の変動に関する情報利用が期待される。

2. GPM のシステム構成

GPM主衛星は，図1の外観図に示すように，アクティブ・フェイズド・アレイ方式の二周波降水レーダ(DPR: dual-frequency precipitation radar)及び多周波マイクロ波放射計(GMI: GPM microwave imager)をミッション機器として搭載している。DPRを地球指向面(衛星下部)に搭載する一方，GMIを深宇宙指向面に搭載し，主反射鏡の回転により地球大気を走査し，降水強度の3次元分布を観測する。

観測ミッションを支える衛星バス部は，太陽電池アレイ，推進モジュール，リアクションホイール，アビオニクス，スター・トラッカー，追跡・データ中継衛星を介して地上局と観測データや衛星のハウスキーピングのためのテレメトリ，コマンドを送受信する高利得アンテナから構成されている。

GPM主衛星の軌道(表1)は，軌道傾斜角65°で，TRMMの軌道傾斜角35°よりも高緯度まで観測が可能となり，熱帯，中緯度地域を越え，北は北極圏に近いグリーンランド南端，南は南極半島の先端まで観測範囲が拡大する。また，太陽非同期軌道をとることで，降水の日変化を捉える。

*一般財団法人リモート・センシング技術センター
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 53, NO. 3, 2014

図1 全球降水観測（GPM）主衛星（GPM Core Observatory） 出典：NASA
<http://pmm.nasa.gov/image-gallery/gpm-core-observatory-diagram-0>

DPR は TRMM 搭載の降雨レーダ（PR：precipitation radar）と同じ周波数13.6GHz のレーダに、周波数35.5GHz のレーダを新たに追加したものである。GMI も TRMM 搭載マイクロ波観測装置（TMI）と同じ9つの周波数帯に加えて、4つの高周波チャンネル（166及び183GHz帯）を追加した（表2）。

DPR の走査幅は、13.6GHz レーダでは約245km、

35.5GHz レーダでは約120kmである（図2）。両者の走査幅が重なる部分で同時観測し高精度化する。一方、GMI は円錐面に沿って地表面を走査することにより、広い走査幅約800km が得られる。

GPM 主衛星の役割は、レーダとマイクロ波放射計の同時観測により精度向上を図り、GPM 副衛星群を含めたコンステレーションの降水観測精度を向上させることにある。

GPM の DPR では TRMM の PR と同じ KuPR（13.6GHz）帯で高感度化し、KaPR（35.5GHz）帯レーダを加え、観測される降雨強度の限界値は、PR が 0.7 mm/h であるのに対し、DPR は、KuPR が 0.5 mm/h 、KaPR が 0.2 mm/h と高感度化し、弱い雨の観測も可能となる（表3）。

表1 全球降水観測（GPM）計画主衛星の軌道

パラメータ	数値
軌道傾斜角	65°
平均軌道長半径	6776.14km
高度制御ボックス	± 1 km
離心率	0.00010

表2 全球降水観測（GPM）計画主衛星の搭載センサの主要諸元

搭載センサ	観測周波数帯	機関
二周波降水レーダ Dual-frequency precipitation radar (DPR)	Ku 帯 (13.6GHz)	宇宙航空研究開発機構
	Ka 帯 (35.5GHz)	宇宙航空研究開発機構
GPM マイクロ波イメージャ GPM microwave imager (GMI)	TRMM マイクロ波イメージャ（TMI）の観測波長チャンネルに高周波数4チャンネル（166及び183GHz帯）追加	米国

図2 GPM 搭載 DPR (KuPR, KaPR) 及び GMI の地表面観測ジオメトリ及び分解能 出典：JAXA³⁾

表3 二周波降水レーダ (DPR) の主要諸元

パラメータ	Ku 帯降水レーダ	Ka 帯降水レーダ
観測幅	245km	120km
レンジ (鉛直) 分解能	250m	250/500m
水平分解能 (直下点)	5.2km (軌道高度407km)	5.2km (軌道高度407km)
ビーム幅	0.71° (中心ビーム)	0.71° (中心ビーム)
送信機	128固体増幅器	128固体増幅器
送信電力 (ピーク)	1012.0W	146.5W
パルス繰返し周波数	4000～4500Hz	4000～4500Hz
パルス幅	1.6μsec 幅 2 パルス	1.6μsec 幅 2 パルス (マッチド・ビーム走査) 3.2μsec 幅 2 パルス (飛び越し走査)
ビーム数	49	49 (25 (マッチド・ビーム) 及び24 (飛び越し走査))
観測降雨強度 (限界)	0.5mm/h	0.2mm/h
ビームマッチング・エラー	1000m 未満	
観測高度範囲	地表から19km (衛星直下点近傍では－5 km から)	
ダイナミック・レンジ	システム雑音レベル以下－5 dB から最大表面エコーレベル公称値以上＋5 dB	
受信電力精度	＋/－ 1 dB	
走査角 (観測モード)	±17° 軌道直交方向	±8.5° 軌道直交方向
送信周波数	13.597及び13.603GHz	35.547及び35.553GHz
帯域幅	14MHz	
最大重量	472kg	336kg
電力 (最大値)	446W (軌道平均)	344W (軌道平均)
科学データレート (最大値)	109kbps (KuPR 及び KaPR の合計190kbps)	81kbps (KuPR 及び KaPR の合計190kbps)
ハウスキーピング データレート (公称値)	1 kbps	

表4 二周波降水レーダ (DPR) のレベル1 プロダクトレベルの定義

プロダクト	定義	運用モード	備考
KuPR レベル1	受信電力に次の処理を施したプロダクトレベル： ラジオメトリック補正； ミッシングデータ処理； 走査時間補正；時間、緯度経度、各レンジビン内の各走査データピースの高度による幾何学計算	通常観測モード 外部校正モード 固体電力増幅器 (SSPA: solid state power amplifier) 運用解析モード 低雑音増幅器 (LNA: low noise amplifier) 運用解析モード	受信電力プロファイル 走査及びレンジビンの位置情報 品質情報 校正データ
KaPR レベル1		内部校正モード	科学テレメトリの受信カウント値 走査及びレンジビンの位置情報 校正データ
		スタンバイ・モード ヘルスチェック・モード	ミッシングデータ情報

表5 二周波降水レーダ (DPR) のレベル2, レベル3 プロダクトレベルの定義

プロダクト	定義	備考
KuPR レベル2	レベル1プロダクトを入力としレベル2 アルゴリズムにより計算された降水に関する様々な物理量を含むプロダクト (地表面のレーダ断面積、降水タイプ、ブライトバンド高度、減衰補正済レーダ反射因子、降水強度等)。	KuPR (Ku バンド降水レーダ) レベル2 プロダクト 周波数13.6GHz
KaPR レベル2		KaPR (Ka バンド降水レーダ) レベル2 プロダクト 周波数35.5GHz
DPR レベル2		DPR (二周波降水レーダ) プロダクト
二周波降水レーダ レベル3 (日平均)	レベル1 又はレベル2 プロダクトをインプットデータとし時空間統計処理により生成されるプロダクト (緯度 5°×経度 5°又は緯度0.25°×経度0.25°格子の平均降水強度)	日平均降水強度値
二周波降水レーダ レベル3 (月平均)		月平均降水強度値

3. プロダクトレベルの定義

二周波降水レーダ (DPR) のレベル1 プロダクトレベルの定義を表4に、レベル2, レベル3 プロダクトレベルの定義を表5に示す。

4. 初画像公開

全球降水観測 (GPM) 計画は、GPM 主衛星と副衛星群によって、一日に複数回、地球全体の降水 (降雨及び降雪) を観測する。GPM 計画の要となる GPM 主衛星は、JAXA が情報通信研究機構 (NICT) と共同で開発した二周波降水レーダ (DPR) と、NASA が開発した GPM マイクロ波放射計 (GMI) の二つのミッション機器を搭載している。DPR (図3, 4) は3月9日より、GMI (図5) は3月5日より、それぞれ初期チェック・アウトを開始し、本期間中に取得したデータから試験的に処理を行い初画像として一般公開している。

初期チェック・アウト終了後、ミッション機器の校正、観測データの定量的な精度検証・評価確認を行った後、打上げ約半年後から、GPM 主衛星が観測するデータの一般利用者による入手を可能とする計画である。

5. GPM コンステレーションの現状

GPM 主衛星を中心に GPM 副衛星群により構成される、GPM コンステレーション³⁾の現状 (2014年1月13日現在) を図6に示す。GPM 副衛星群の搭載センサ及び開発・打上げを実施した宇宙機関を表6に示す。

JAXA は、NASA と共同開発し打上げ、初期運用を開始した GPM 主衛星及び1997年打上げ以降継続運用中の TRMM の他、2012年5月に打上げた第一期水循環変動観測衛星「しずく」(GCOM-W1) の3機がコンステレーションに参加している。この他、図6, 表6に示す通り、米国航空宇宙局 (NASA)、米国海洋大気

図3 二周波降水レーダ(DPR)による降水の3次元分布図
画像クレジット: JAXA/NASA
http://www.jaxa.jp/press/2014/03/20140325_gpm_j.html

地表面近の降水の強さ / Surface Precipitation Rate

KuPRによるレーダ反射因子 / Radar Reflectivity by KuPR

KaPRによるレーダ反射因子 / Radar Reflectivity by KaPR

図4 二周波降水レーダ(DPR)のKuPR(周波数: 13.6GHz)のレーダ反射因子及びKaPR(周波数: 35.5GHz)のレーダ反射因子の違い 画像クレジット: JAXA/NASA
http://www.satnavi.jaxa.jp/gpmdpr_special/movie/movie11.html

図5 GPM マイクロ波放射計(GMI)による降水強度平面分布 画像クレジット: NASA/JAXA
http://www.jaxa.jp/press/2014/03/20140325_gpm_j.html

庁(NOAA), 米国防総省(DOD), 欧州気象衛星機関(EUMETSAT), フランス国立宇宙研究所(CNES)及びインド宇宙研究機関(ISRO)が共同開発した衛星が参加している。

6. 世界の雨分布速報(GSMaP)

世界の雨分布速報(GSMaP: global satellite mapping of precipitation)は, 世界の雨分布を準リアルタイム(観測から約4時間遅れ)で1時間ごとに複数の衛星(TRMM TMI, Aqua AMSR-E, GCOM-W1 AMSR2, DMSP SSM/I, DMSP SSMIS, NOAA-19

図6 GPM コンステレーションの状況(2014年1月13日現在) 出典: NASA
<http://pmm.nasa.gov/image-gallery/gpm-constellation>

表 6 GPM 副衛星群のセンサ及び宇宙機関

センサ	衛星	機関
Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS)	Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)	U.S. Defense
Advanced Microwave Scanning Radiometer-2 (AMSR-2)	Global Change Observation Mission -Water 1 (GCOM-W1)	JAXA
Multi-Frequency Microwave Scanning Radiometer (MADRAS) and the multi-channel microwave humidity sounder (SAPHIR)	Megha-Tropiques	Centre National D'Etudes Spatiales (CNES) of France and the Indian Space Research Organization (ISRO)
Microwave Humidity Sounder (MHS)	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)-19	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
MHS	MetOp series	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)
Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS)	National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) Preparatory Project (NPP)	US
ATMS	Joint Polar Satellite System (JPSS)	NOAA-NASA
Microwave imager	Defense Weather Satellite System (DWSS)	Defense

GSMaP: Global Satellite Mapping of Precipitation

図 7 世界の雨分布速報 (GSMaP: global satellite mapping of precipitation) の観測から全球降雨分布図出力までの流れ図 出典 JAXA³⁾

AMSU, MetOp-A AMSU, GEO IR) を実質的にコンステレーションとして利用している (図 7)。

物理量は降雨強度 (mm/h), 領域は全球 (南緯・北

緯60°以内), 空間分解能緯度経度0.1度格子, 時間分解能は1時間, 表示時刻は世界標準時 (UTC) である。

GSMaP 全球降雨分布図 (2014年 5月16日01:00-

図8 GSMaP 全球降雨分布図（観測時間：2014年5月16日01：00－01：59（UTC））
準リアルタイムデータ利用ユーザ登録：http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm

01：59（UTC）観測）を図8に示す。分布図下のカラーバーが降雨強度（mm/h）を表している。

背景の雲画像には、NOAA 気候予測センター（CPC）の作成による全球雲データを利用している。このデータは、気象庁の静止気象衛星ひまわり（MTSAT）、NOAA の静止気象衛星 GOES、EUMETSAT の静止気象衛星 Meteosat の赤外（IR）情報を利用している。アルゴリズムの開発・改良は、JAXA、気象庁気象研究所、京都大学大学院理学研究科、大阪大学電気電子情報工学科、東京大学大気海洋研究所が進め、国際降水ワーキンググループが検証している。

7. おわりに

降水観測は気象観測の一部であるが、従来から気象観測の主流である可視光から熱赤外までの光学画像センサ、赤外サウンダ、マイクロ波放射計、マイクロ波サウンダなどの受動型センサに、能動型センサであるレーダを加えたセンサ群による、高精度の降水観測の時代が到来したといえる。

GPM 計画により、GPM コンステレーションによる高頻度かつ高精度の全球観測が3時間ごとに可能となる。これによって長期及び短期の気象予報精度の向上、

河川管理及び農業用水などの水資源管理、気候変動データの利用がさらに進み、災害の早期警報・減災や水・エネルギー・物質循環と生態系の地域規模の過程^{2),3)}を解明し、知識ベースの適応・緩和策に役立つことが期待される。

（受付日2014.5.20，受理日2014.5.30）

参考文献

- 1) 岡本謙一，川田剛之，熊谷 博，五十嵐保，浦塚清峰，宇宙工学シリーズ9，宇宙からのリモートセンシング，コロナ社，pp.109-240，2009年10月。
- 2) HarvestChoice, 2010. “Rainfall Variability and Crop Yield Potential.” International Food Policy Research Institute, Washington, DC., and University of Minnesota, St. Paul, MN.
<http://harvestchoice.org/node/2240>
- 3) Tamotsu IGARASHI: Japanese Programs on Space and Water Applications, COPUOS 2006, Vienna International Centre, June 2006.
<http://www.oosa.unvienna.org/pdf/pres/copuos2006/19.pdf>