衛星降水観測とデータの利用

JAXA
第一宇宙技術部門　地球観測研究センター
沖 理子 氏

はじめに

本日は、人工衛星で降水（雨・雪）を計測する技術とその観測データの利用の最新動向についてお話しします。地球環境の観測を目的とした人工衛星と観測機器にはいろいろな種類のものがありますが、とりわけ日本が世界最先端を切り拓いた約20年前のエポックメイキングな衛星降水観測プロジェクトがありました。その技術と知見はその後、二世代目の人工衛星に引き継がれて、現在は全球降水観測（GPM）衛星が観測を継続しています。衛星降水観測のデータは、やはりこの20年間で非常に発展したモデルや計算機の技術（シミュレーション）との組み合わせもあって、研究や利用の広がりを見せています。このような状況をご紹介できればと思います。

1　20年前：熱帯降雨観測衛星（TRMM）登場まで

1.1　2019年10月11日7:30の日本付近の降水実況

本日台風19号が接近しつつあります。図1-1左は、気象庁ホームページで公開されている解析雨量データ（10月11日午前7:30）をJAXAで図化したものです。地上の観測測器で観測可能な領域の雨はわかりますが、日本のすぐ南の海上にまで迫っている台風の雨はこの時点で観測範囲に入っていないため、図上に現れてきていません。しかし一方右側の、後で詳しく紹介しますJAXAで作成している衛星による降水マップ（GSMaP）では、台風がすぐ近くまで接近してきているのがわかります。地上の詳細な、解像度が非常に良くて市町村レベルで見るようなものはやはり左の解析雨量図がいいのですが、それだけでは広域の観測情報はわかりませんので、両方を合わせて見る必要があるということです。衛星というものが最初に出たとき、「衛星は精度が悪いのでは」と随分と言われました。地上のレーダ画像を見慣れている人にとって、解像度が粗い衛星データは違和感のあるものかもしれませんが、見えている情報が違うことを認識しつつ見ていただきたいのと、広域を見ることができるという利点を活かして、お互いの良さを引き出して情報を活用すべきではないか思います。

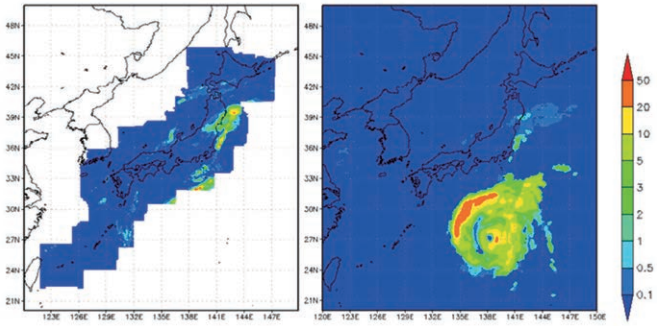


図1-1 2019年10月11日7:30の日本付近の降水

1.2　雨の観測と私達の生活

雨は我々の生活に直接・間接的に密接に関係しています。今自分の頭上で雨が降っているかどうかだけではなく、地球全体で降水の量と分布を知ることは、天気や気候の状態を把握してそれらを予測するためにも重要なので、観測の必要があります。ところが地球上の降水を遍く正確に計測するということは、皆さんが思っておられるよりも難しいということをお伝えしたいと思います。それは、雨は時間的・空間的な変化が大きいことや、地上での観測は陸上の都市部に偏りやすく、人口の少ない砂漠や山岳地帯では観測が殆どないからです。宇宙からの衛星観測の利点が大きいということになります。宇宙からであれば、広域で、過疎域も海上も観測できるからです。衛星軌道にもよりますが、例えば、これはまだ衛星で降水の観測が行われていない頃にスペースシャトルから撮影された台風の写真（写真1-1）で、この雲の中はどうなっていて、どこで雨が降っているのか、上から雲を見ていただけでは分かりません。気象衛星のひまわりでも同じ状況です。

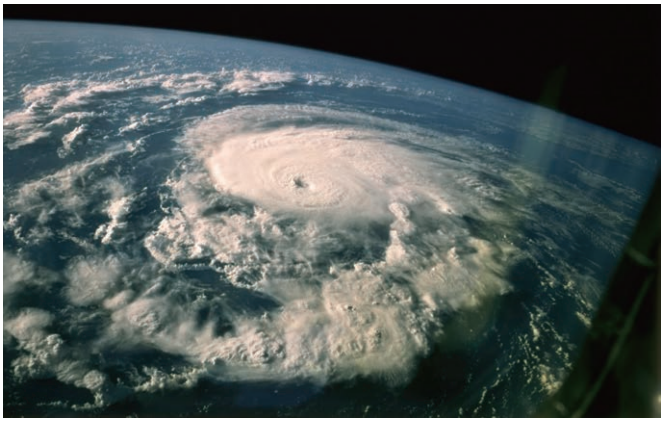


写真 1-1　スペースシャトルから見た台風（©JAXA）

1.3　地上からの雨の観測

雨の観測は地上の雨量計でなされる場合が多く、近年では世界的にも地上の降水レーダの観測も増えています。特に日本では、アメダス観測地点の雨量計が密に配置され、またレーダも気象庁、国土交通省のレーダネットワークが日本全域をカバーするように配置されており、大変素晴らしいものとなっています。それでも雨量計の場合、その代表する面積の範囲は時間積算にもよりますが狭域であり、地上レーダの場合は 100km ～ 200km スケールの降水を観測していますが、いずれにせよ観測は陸上付近に限られます。

世界中の地上の雨量計の分布を見ると、当然のことながら海上にはほとんど観測点がありません。（Kidd et al., 2017）それから、観測点が密な地域は先進国にしかありません。雨が降らないからということもあるのでしょうけれども、砂漠にも観測点は殆どありません。これでは世界の雨がどれだけ分かるだろうかということになってきます。やはり気候の問題を考えるときには、どうしても全球のデータが必要になってくるのです。

1.4　衛星降水観測の歴史

衛星のデータから降水を推定する方法の主要なものは 3 つほどあります。人工衛星の観測から降水を推定する試みの最初は静止気象衛星の雲のデータから間接的・経験的に推定する方法でした（図 1-2 の上段）。可視・赤外イメージャという種類の観測センサで、気象衛星ひまわりの観測機器も同種になります。撮影すると、私達がひまわりで見るような雲の画像を撮ることが出来るというものです。この種の観測センサでは雲や地表面あるいは海面の温度の高低が分かります。概ね高く発達した雲の雲頂は温度が低くて、低い雲の雲頂は温度が高い。かつ、積乱雲のような非常に発達した雲があるとこの下で大雨が降っているという経験則から、関係式を作って雨の推定値を出していました。雨ではなく雲からの間接的かつ定性的な推定ですので、雨の推定精度は低くなります。

1980 年代にマイクロ波放射計が実現された頃から、衛星による降水の推定は本格化し始めたと言えるでしょう。この観測センサは、雨粒や氷粒から出てくるマイクロ波を計測します。その際の原理は海上と陸上とで異なります（図 1-2 の中段）。海上では、雨から出てくる放射がある場合、ある波長のマイクロ波観測データでは雨のない場合よりも高い温度が観測されます。一方の陸上では、別の波長帯のマイクロ波で、上空まで発達して雪や氷粒を伴うような高い雲で固体降水粒子でマイクロ波が散乱されて観測データとしては低い温度が観測される場合に、雨が降っているということで、雨の放射を測る波長と氷の散乱を測る波長を搭載して多波長で雨を推定しています。赤外放射計が、雲頂の温度情報だけを測定しているのに比して、マイクロ波放射計の場合はカラム全体からの放射を測定しているので、鉛直積算したような降水の総量のデータを得る形になります。しかし、総量なので、実際地上付近にどれだけの雨が降っているのか、上空だけに雨滴が存在するのかが分かりません。地上雨量を推定するには、仮定を設けないといけないのです。とはいえ雲からの間接推定よりは降水量の測定に迫った形になるわけです。

それでも、これらの情報を用いた 1990 年代の全球的な降水データは、解像度が 2.5 度× 2.5 度の緯度経度格子で、月平均のデータしかありませんでした。

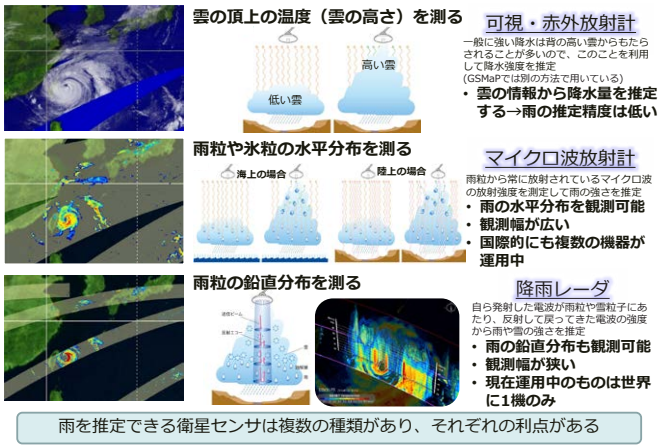


図 1-2　衛星による雨の観測

図 1-2 の 3 つ目（下段）が、本日の話の中心となる、衛星搭載降水レーダです。1997 年に打上げられた熱帯降雨観測衛星（TRMM）搭載の日本が開発した降雨レーダ（PR）は、世界で初の衛星搭載の降水レーダでした。

その観測ですが、地上の気象レーダと同様で、上空から電波を発射して雨粒からの反射を受け、その信号で雨の強さの情報を得ます。上空のどこに雨粒などの降水粒子が存在しているかは、信号をうける時間情報から得ることができます。下段右のような、降水の鉛直方向の分布が綺麗に撮れるという点が非常に良い特徴となっています。

1.5　TRMM が計画された頃の問題意識

ここまで、地球全体の正しい雨のデータが必要なのだけれども、1990 年代の半ばまではそのようなデータがなかったというお話しをしてきました。

もう 1 つ、1980 年代の初めに、規模の大きなエル・ニーニョ現象が発生し、遠く離れた日本でも異常天候・気象が起こりました。はるか彼方東太平洋のエル･ニーニョ、ラ･ニーニャという現象がどうも日本の気候・天候に影響しているらしいというような研究が進み出したのが 1980 年代になります。

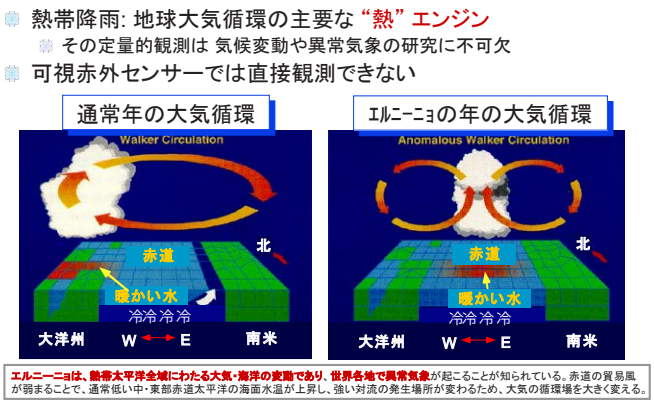


図 1-3　熱帯降雨と大気の循環

図 1-3 は、エル・ニーニョ現象とラ・ニーニャ現象の模式図です。通常の年（左）は、インドネシアやフィリピン周辺に非常に強く背が高く発達するような雲が偏って分布しています。その理由は、海水温の高い領域が西太平洋に偏っているからです。そこで高い雨雲が発達して、その上昇流と下降流という形で大気の大循環が起こっています。ところがエル・ニーニョの年（図 1-3 の右）になると、風が弱まって、相対的に海水温の暖かい領域が西太平洋から、中央および東太平洋へ移っていきます。すると雨雲の発生する場所が変わるので大気の大循環にも変化があって、結果として日本にも異常気象が発生することがわかりました。そうすると、定量的に雨がどれぐらい降っているかということを知る必要があります。というのは、雨が生成されるときに放出される潜熱が、大気大循環の駆動源になっているからです。潜熱がどこで放出されて、次にどういう循環が起こるか、どのぐらい起こるか、ということが分からないと気象の予測は出来ません。ところが熱帯の観測は、はじめにお話ししたように、殆ど観測がないという事情がありました。そこで、人工衛星で熱帯の降水を定量的に測定しようという目的で提案されたのが、熱帯降雨観測衛星のプロジェクトです。

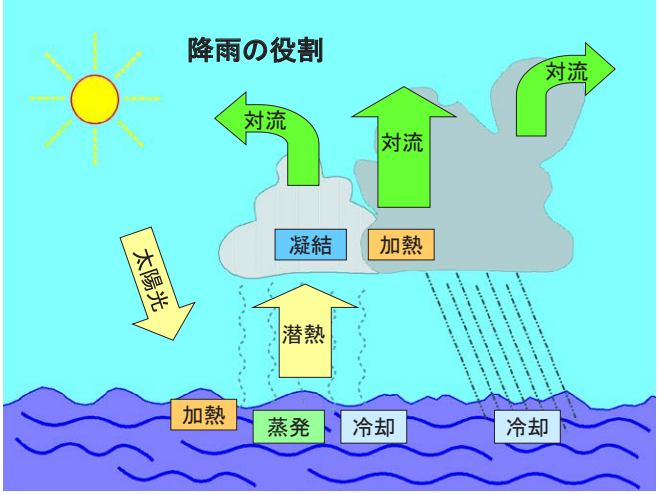


図 1-4　降雨の役割

2　熱帯降雨観測衛星 (TRMM) の登場

2.1　熱帯降雨観測衛星（TRMM）

熱帯降雨観測衛星は、日米共同（アメリカ航空宇宙局（NASA）と宇宙航空研究開発機構JAXA（当時はNASDA））の衛星観測計画です。当時、衛星搭載のセンサからいかに正確に降水を推定するかという問題意識があったこと、熱帯の降水を定量的に測定したいということから、この衛星には先に説明した3種類の観測機器が同時に搭載されました。そのうちの2つ、マイクロ波放射計と可視・赤外イメージャは米国が、そして観測機器の中で非常に重要で最も先進的な降雨レーダ（PR）と衛星の打上げを日本が担当しました。その他、衛星バスは米国が担当し、日米対等のミッションとなりました。1997年の11月28日に打上げられて、当初の設計寿命は3年2ヶ月でしたが結果的に17年間運用して、2014年10月に降雨レーダの電源はオフされ、衛星は6月中旬に大気圏再突入してミッションは終了しました。この長期17年間のTRMMの観測、特に最先端のPRの観測によって、新しい衛星降水観測の時代が拓かれ、多くの成果を産み出したのです。

図 2-1 は、3 つのセンサの観測範囲の関係を図示したものです。マイクロ波放射計の走査範囲は幅 760km です。赤外・可視イメージャの走査幅も 700km 以上あります。降雨レーダ（PR）は直下の幅 200km 程度を観測します。3 つのセンサ間では観測する領域に若干のずれはありますが、1 つの衛星に降水観測センサを同時搭載していてわずか数秒も変わらないタイムラグで同じところを見ているという観測システムになります。

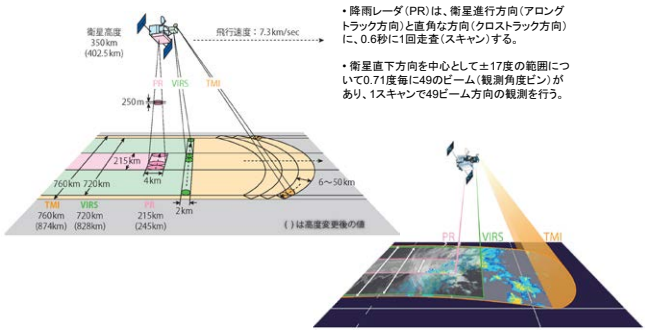


図 2-1　TRMM による降雨観測の概念

2.2　TRMM 観測軌道の特徴

TRMM の特徴は、前述のように降水を観測する 3 種類の観測機器を同時搭載して降水の観測にターゲットを絞ったことですが、それに関連して、衛星軌道にも特徴があります。皆さんがよくご存知の静止気象衛星ひまわりは、36000km という遠い位置から、常に日本の上空を観測しています。日本周辺が常時観測されるという良さがある反面、極域や、日本の裏側は観測できません。反対側は別の国の静止気象衛星が観測していて、国際協力でデータをやりとりしています。それに対して極軌道衛星と呼ばれている衛星の多くが太陽同期準回帰軌道で、凡そ同じ時刻に同じ地域が観測されるように設定されています。ところが TRMM では、太陽非同期準回帰軌道を採用しました。TRMM の軌道傾斜角は 35 度となっています。北緯南緯 35 度というのは熱帯地域プラス日本だと東京より南ぐらいが観測範囲に入ります。九州や四国の梅雨の雨などは観測できます。太陽非同期軌道は、同じ地域が観測される現地時刻が少しずつずれていきます。例えば東京なら、東京に飛来してくる時刻が少しずつずれていきますから、長期間観測している間にはほぼ全てのローカルタイムが観測されて、統計的に降水の日周期が分かるようになります。というのも、熱帯の雨は特に熱帯のスコールがイメージにあるように、日周期が大きいと考えられていました。例えばいつも夕方の 4 時に夕立で大雨が降るような地域があった場合に、同じ時刻に観測するタイプの衛星だと、毎日 4 時に観測していたらもの凄く大雨の降る地点になってしまいますし、逆に毎回その時間帯を外して観測していたら、全く雨の降らない場所になってしまいます。それでは困るので、特殊な軌道が採用されたのです。

図 2-2 は、TRMM の軌道です。上図の細い黒い帯が、TRMM /PR の一周回、90 分間の観測範囲です。北緯 35 度から南緯 35 度の範囲にあることがおわかりいただけると思います。1 日で 15 ～ 16 ほど周回しますから、1 日で観測される範囲というのは図 2-2 の下段で青い帯で覆われた部分になります。先程のマイクロ波放射計や赤外のイメージャは PR の 3 ～ 4 倍の観測幅になりますから、下段の図でもっと地球全体が埋まってくる感じになりますので、観測機器によって観測頻度も大きく違ってきます。

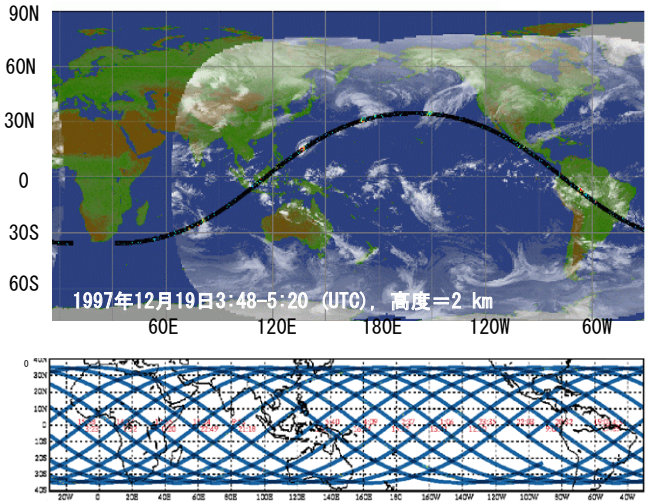


図 2-2　TRMM の軌道、観測範囲

3　熱帯降雨観測衛星（TRMM）の成果

TRMM の成果として 1 つ目に、日本が開発した降雨レーダをはじめとする降水観測用の観測機器を同時に搭載して、それまでの知見を格段に良くすることができ、「衛星による降水の観測推定精度が著しく向上した」ことがあげられます。

2 つ目は気象気候学的な研究成果ですが、「レーダで世界中の雨を三次元観測することにより、降水システムの気候学的な理解が進んだ」ことです。それは熱帯域の「降水の日周期が明らかになった」り、「台風観測の事例が増えた」り、「地域ごとに異なる地形の降水への影響が明らかになった」りということに相当します。当初の目的であった「エル・ニーニョ、ラ・ニーニャ時の雨の降り方が詳細に分かるようになった」り、「雨の分布から潜熱を算出する試みもなされた」り、多くの科学的な研究成果があがりました。

ところが興味深いことに、TRMM では実利用の成果も上がったのです。もともと研究用の衛星なので実利用に供する計画は全くなかったのですが、データ中継衛星を使って素早くデータを地上に送ることが出来ていたので、配信をもっと早くすれば利用が増えるのではということで、試験と称して打上げ後に、NASA による観測データの準リアルタイム配信（TRMM では観測して 3 ～ 4 時間後には利用者がデータを入手できる）が始まりました。当時としてはこの NASA の試みは先進的だったと思います。そうすると、気象機関の現業システムなどで使えることになりますから、日本の気象庁でも使うという話になってきました。

データの準リアルタイム配信に加えて実利用が進んだ背景に、17 年に及ぶ長期観測があげられます。現業利用のユーザは、衛星観測が計画の 3 年で終わってしまうとなると、利用するシステムを整備したがりません。一度整備したシステムが長期間活用できるという状況が想定されないと、初期投資し

ないわけです。これについて、予想に反して観測は 3 年どころか 17 年も続きました。安定してデータを利用できることから、計画当初は視野になかった利用の拡大という成果を生みました。

17 年の長期観測についてもう 1 つ加えるなら、気候値や統計値がより確かになったことの価値があげられます。続いて、実際の観測成果をご紹介したいと思います。

3.1　TRMM の観測成果

(1) 降雨レーダ（PR）による降水の三次元情報の取得

図 3-1 は台風を TRMM の降雨レーダ（PR）が観測したデータを図化したものです。左上図で広く白く雲が見えているのが、可視・赤外のイメージャの観測です。PR で観測した降水の範囲を示すために重ねて描画しています。PR は走査幅が狭いので、イメージャの中央部分しか観測できません。それに対してマイクロ波放射計（左下）は、台風の降水域全体像を捉えることができます。しかし鉛直積算した雨の総量の情報はわかるものの、それが三次元的にどう分布しているかはわからず、それは降雨レーダ（PR）（右側）でのみ観測されます。

ここで強調したいのは、PR の観測体積が高度約 400km ほどの衛星からみて大気下層の 10km ほどの範囲をみているので、ほぼ均一であるためにデータとして取り扱いやすいということがあります。地上レーダではレーダからの距離に応じた補正が必要ですが、TRMM ではその必要がなく非常に綺麗に見えるというのは大きな利点だと思います。ちなみに 400km というのは衛星高度としては低い部類です。

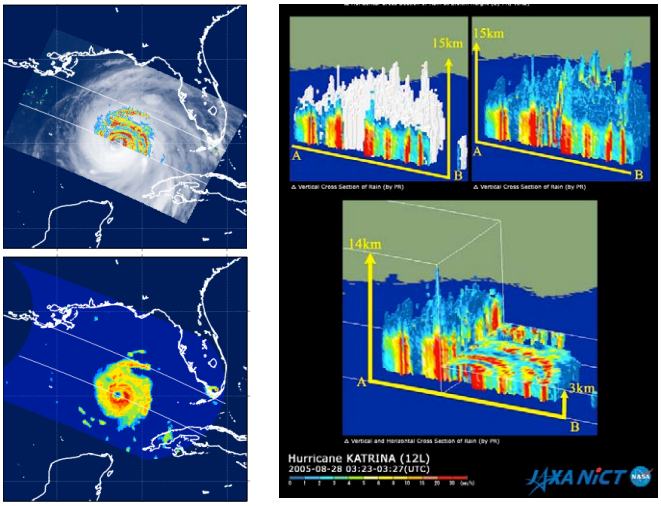
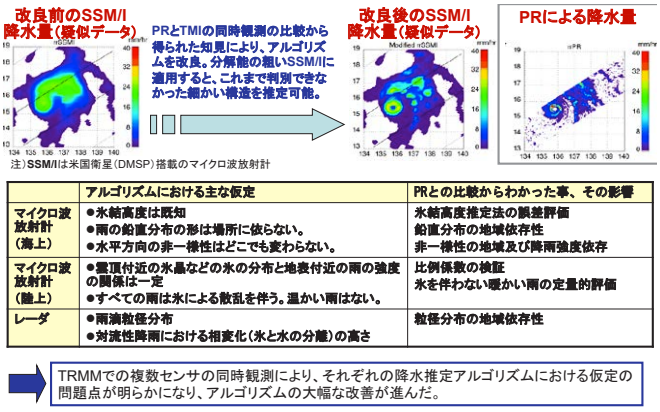


図 3-1　台風の観測

(2) 降雨レーダ観測によるマイクロ波放射計推定の改善

2 つ目の重要な成果として、マイクロ波放射計による降水推定が、降雨レーダの情報によって著しく改善されたことがあげられます。マイクロ波放射計の方が汎用的なセンサで、すでにいくつかの国の衛星に搭載されていました。ところが、鉛直積算量の情報から、地上付近の降水量を推定するときに、仮定を置かなければなりません。そこでマイクロ波放射計の方に、レーダの観測データでデータベースを作っておいて学ばせるわけです。これによって著しくマイクロ波放射計の降水推定精度が向上しました。PR との比較で改善された点を図 3-2 にまとめてあります。



	アルゴリズムにおける主な仮定	PRとの比較からわかった事、その影響
マイクロ波放射計（海上）	●氷結高度は既知 ●雨の鉛直分布の形は場所に依らない。 ●水平方向の非一様性はどこでも変わらない。	氷結高度推定法の誤差評価 鉛直分布の地域依存性 非一様性の地域及び降雨強度依存
マイクロ波放射計（陸上）	●雲頂付近の氷晶などの水の分布と地表付近の雨の強度の関係は一定 ●すべての雨は氷による散乱を伴う。温かい雨はない。	比例係数の検証 氷を伴わない暖かい雨の定量的評価
レーダ	●雨滴粒径分布 ●対流性降雨における相変化（氷と水の分離）の高さ	粒径分布の地域依存性

図 3-2　降水推定精度の向上（1）

もう少し具体的なイメージを図 3-3 の模式図で説明しますと、左右のケースでマイクロ波放射計で観測した値（斜線部分の面積）が同じだったとします。しかし左右では、その鉛直分布には違いがあって、地上付近では左のケースでより強い雨となっているわけです。それと比べると右の図はそこまで強くない。ところがこの斜線部分、マイクロ波では放射量が同じに見えてしまいます。TRMM で同時搭載された鉛直のプロファイルを観測できるレーダがあってデータの蓄積ができたので、地上の降水量の推定精度が良くなったのです。

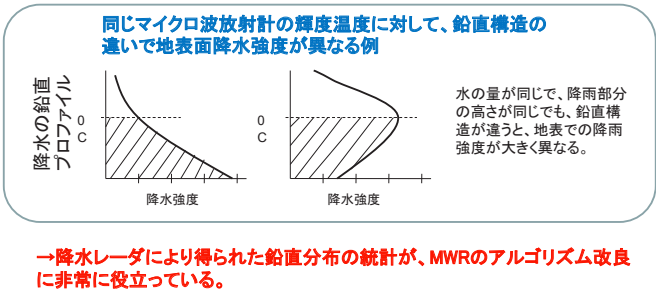


図 3-3　降水推定精度の向上（2）

具体的には、赤道より 5 度ほど北の、世界で最も雨が多い緯度帯で、ある人の推定では月平均で 200 ～ 250 ミリ降っているのに、ある人の推定では 100 ミリも降っていないという結果を出していて、このような推定は数多くなされていたのですが、正解がわかりませんでした。TRMM の観測でこうした数多くあった推定のばらつきは大幅に減り、TRMM による推定では月平均で 170mm ～ 180mm 程度なのではないかというところまできました。

TRMM では、毎日各所で違う時刻に観測される降水データ

を蓄積していくことで、雨の降り方の傾向を浮き彫りにします。エル・ニーニョのときの降水域は太平洋の中央から東側に寄っていて、ラ・ニーニャのときには西方に寄っています（図3-4）。TRMM ではマイクロ波放射計で海面水温も同時に測定することが出来るのですが、海面水温もエル・ニーニョのときとラ・ニーニャのときでは大きく変わり、雨の降り方と対応しています。このような詳細なデータが月々モニター出来る時代になったということです。

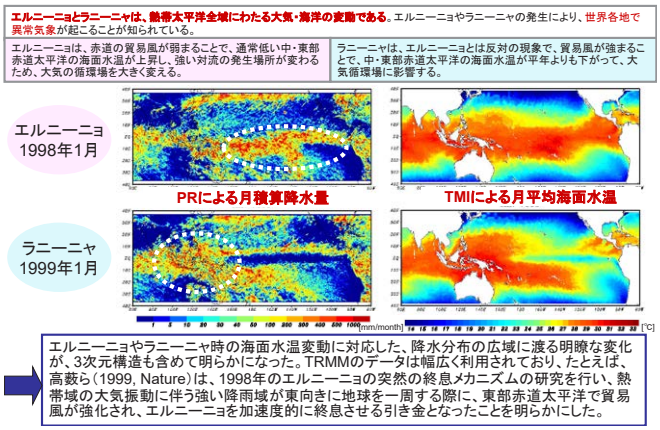


図 3-4　エル・ニーニョとラ・ニーニャ

降水の日変化については、TRMM 以前は、雨量計データで地点ごとの日変化は研究されていました。しかし雨量計のない場所の情報はありません。図 3-5 は TRMM の観測です。観測データを蓄積していくと、地域ごとに午前に雨が降りやすいか午後に雨が降りやすいか、ということが浮き彫りになってきます。図では大きな陸地で暖色系、海洋で寒色系に分類されていて、それは即ち、陸上では午後に雨が降りやすく、海上では深夜から明け方に降りやすい傾向があるということです。もし仮にこの図で海岸線を取り払って、皆さんに「ここはどこでしょう」と質問しても当てていただけるくらい、日変化というのは海陸の分布に依存していることが分かります。例えばインドネシアのボルネオ島などでは、島の海岸部と中央部で雨の降りやすい時刻が違うことまでわかります。島の中央が紫で外側が黄色いということは、沿岸付近では午後の早い時間に雨が降りやすく、島の中央部は夜にかけて降るということです。

さらにデータを蓄積していくと、世界中でどういうタイプの雨がよく降るかということも分かります。図 3-6 は東大の高薮先生の研究成果です、世界の雨の降り方を、降水システムの高さ情報や日変化情報を活かして分類すると、一言で雨と言っても、背の高さや広がりなどを考えると実は雨の降り方にも色々あり、夕立型が多いか、浅い / 深い雨が多いか、温帯低気圧型の雨が多いか、熱帯タイプの雨かなど特徴で分類が出来ることがわかりました。

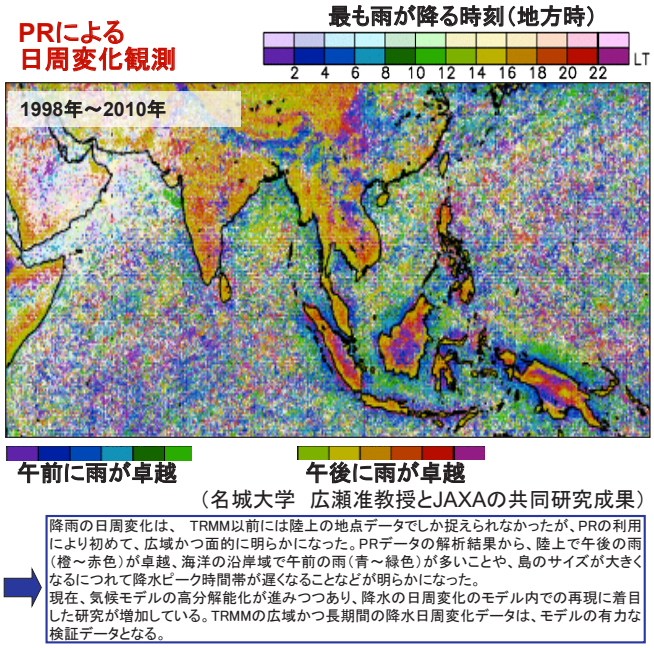


図 3-5　PR 観測から得られた雨の日周変化

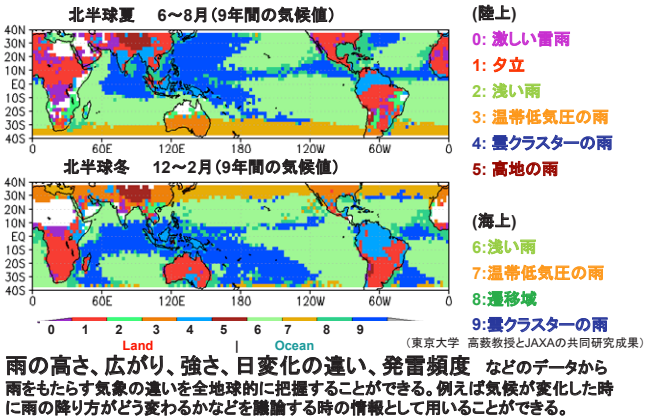


図 3-6　雨を降らせる気象の特定（東大　高薮教授提供）

我々には、背の高い大きな入道雲だと大雨が降るという先入観があると思います。だからこそ、はじめにお話しした推定手法でも、 その仮定の話が出てきました。 ところが、 TRMM で 2.5 度の格子状に統計をとって、上位 0.1%を非常に強い雨の上位を取って、次に非常に背の高い雨の上位 0.1% を取って、降水の鉛直構造を調べると、強い雨のパターンのときは、実はそこまで背が高くないということが分かりました。（Hamada et al., 2015）高さと強さの関係に明らかな差がある、いわば常識を覆すような結果が得られたわけです。どこでどういう雨が降るかを正しく知る、豪雨の特性を知って天気予測や予報の精度を高めて防災に繋げていくという意味で、基本的かつ非常に重要な情報なのではないでしょうか。

3.2　TRMM/PR による長期間平均の降水量分布

最終的に降水量の観測結果はどうなったのかというと、図 3-7 は TRMM の 17 年間の観測による年平均雨量の月換算雨量になります。

レーダが登場しない TRMM 以前のマップと比較すると、まず解像度が格段に上がりました。例えば図 3-7 で黒丸で囲ったインドの西ガーツ山脈沿い、ヒマラヤ山脈付近、インドネシア島嶼部といった両機は、地形の起伏が大きい特性があるのですが、これに関係する降水の特徴は以前の資料だと全く現れていません。こうしたことが非常によく分かるようになりました。海上も含めてこの精度のデータが入手可能になったのは、1990 年代の最後半、即ち今から約 20 年前からです。

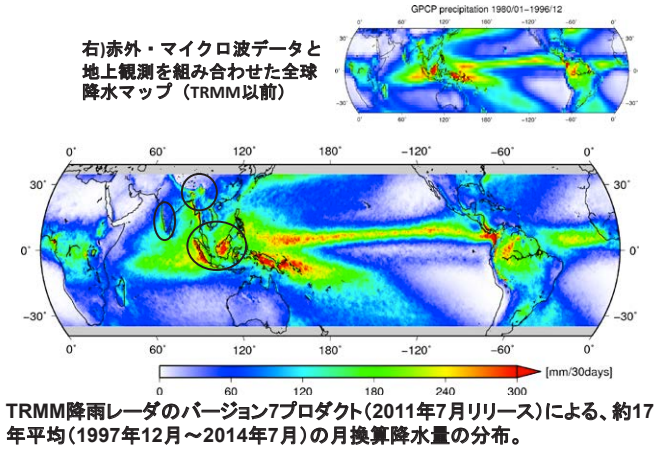


図 3-7　TRMM/PR による降水量分布（約 17 年平均）

4　全球降水観測計画 (GPM) へ発展

4.1　GPM 計画とは

TRMM 計画が非常に成功を収めたので、熱帯だけではなく、地球全体の降水のデータを取得するために考えられたのが GPM です。TRMM と同様の衛星を、熱帯だけではなく中高緯度の降水を観測できるように、65 度の傾斜角にすることでした。更に TRMM に無かったものの 1 つが「高頻度の観測」でした。TRMM は衛星 1 機なので、1 ヶ月ほど観測を蓄積してようやく月平均値を得ることができます。別の言い方をすると、TRMM の 10 日平均値は観測が疎であることから生じる誤差が大きく、確からしさが減じてしまうということになります。それに対して頻度よくデータをとることが降水観測では重要なので、アメリカやヨーロッパの衛星で降水を推定できるマイクロ波放射計を搭載しているものがあるので、それらを組み合わせて、国際協力でデータを共有し合い、頻度の高い降水データを作ることが考えられました。レーダとマイクロ波が同時観測をすることが降水推定精度の向上につながりますから、レーダを校正器にして複数衛星のデータの精度も向上させ、高頻度・高精度の全球降水データを取得しようという目的で始まったのが GPM 計画です（図 4-1）。

GPM も日米共同開発の衛星計画です。日本はレーダを性能向上させて、二周波のレーダにしました。具体的には TRMM で採用した 14GHz 帯の Ku レーダに、35GHz 帯の Ka レーダを追加し二周波としました。その理由は、熱帯は強い雨が多いのですが、中高緯度の弱い雨や雪まで測ろうとするとレーダの感度を上げたり、使う周波数を変える必要があったのです。

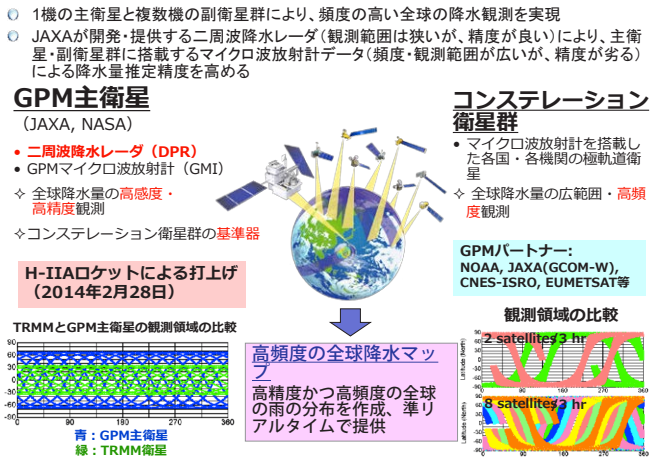


図 4-1　全球降水観測（GPM）計画とは

アメリカの開発したマイクロ波放射計も、高周波で雨や雪に感度がある周波数を追加することで高緯度対応にしました。

GPM 主衛星が一機で観測する場合、120 分で図 4-2 の範囲しか観測できません。次に、世界中のデータ入手可能な複数の衛星で観測すると図 4-3 ようになります。世界で協力して観測することで、観測範囲を広げることができるのです。

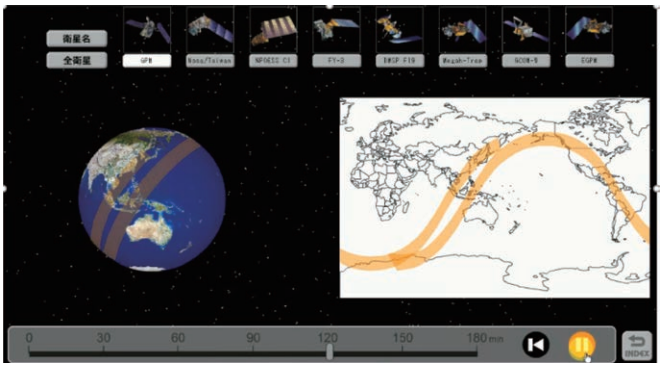


図 4-2　GPM 主衛星の軌道と観測範囲

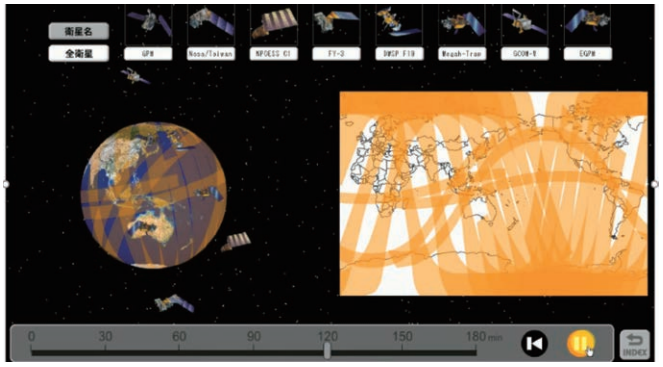


図 4-3　複数衛星による軌道と観測範囲

4.2　GPM に搭載されたセンサ

GPM では降水観測で一番の核となるレーダとマイクロ波放射計だけが搭載されることになりました。その代わり、前述のようにどちらもパワーアップされています。図 4-5 の左が日

本の JAXA と NICT とで開発した二周波レーダです。Ku レーダは 2 ～ 2.5 mほどの大きな筐体になります。もう 1 つの Ka レーダは図の奥側の小さい方の筐体です。

TRMM/PR から GPM/DPR に技術と知見を引き継いで、中高緯度の降水情報を入手するとともに、長期継続データも入手したい。更に TRMM で試験的に実施された準リアルタイムのデータ配信で実利用成果の芽が出始めたので、GPM では試験以上に実用に橋渡しができるぐらいのことをやりたい。このような目標でプロジェクトは始まりました。

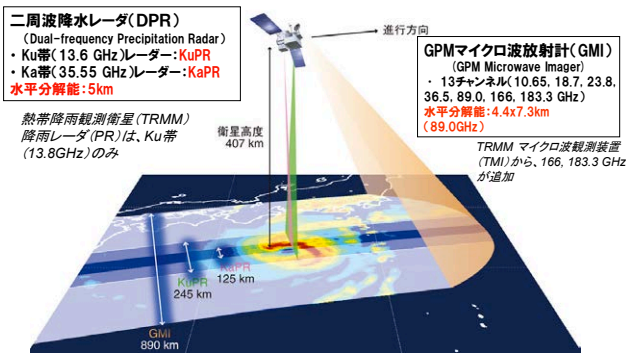


図 4-4　GPM 主衛星に搭載されたセンサ（1）

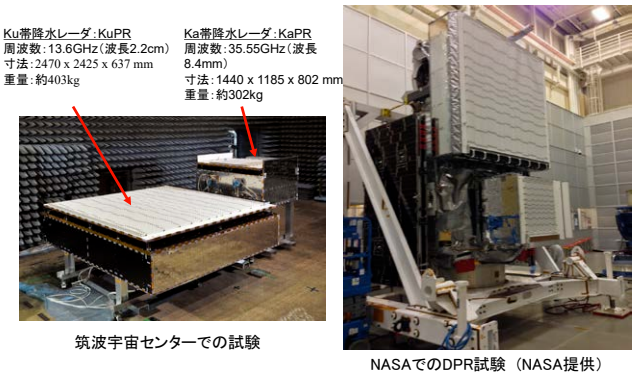


図 4-5　GPM 主衛星に搭載されるセンサ（2）

写真 4-1 は GPM 衛星の打上げです。当時、米国の駐日大使だったケネディ大使がいらして、VIP 用の展望室から打上げをご覧になり、 記者会見でコメントもいただき、 印象的でした。衛星の打上げをぜひ種子島に行かれてご覧いただくと面白いのではないかと思います。リアルで見るとものすごい轟音と光で迫力があります。

写真 4-1　GPM の打ち上げ

4.3　GPM の画像

(1) GPM の初画像

図 4-6 は GPM の初画像です。我々が初画像として選んだのは、TRMM では観測できなかった 35 度よりも北の範囲の、雪をもたらしていたような海上の温帯低気圧です。

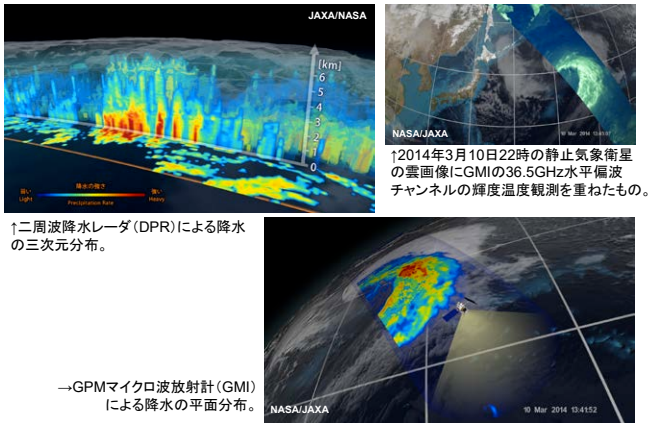


図 4-6　GPM 主衛星の初画像（2014 年 3 月 10 日 22 時頃）

(2) 日本海海上の筋状の降雪

図 4-7 は、日本海のいわゆる筋状の雲の降雪の観測で、高さが約 4km で、先ほどの台風の 14 ～ 15km とは違って背が低く、1 つ 1 つの降水システムが小さい様子がわかります。こういうものは恐らく地上のレーダからはこれだけきれいには見えないと思います。二周波レーダの特長として、二周波の情報を使って雨と雪を判別できることがあり、それを色で分けたのが図 4-7 の左下です。白が雪で、一番青いのが雨、薄い青は雪と雨まじりという 3 相に分けています。日本に近い領域ではかなり低空まで雪ですが、一番下の部分では液相が混じっているということが解り、実際の地上観測では霙でした。

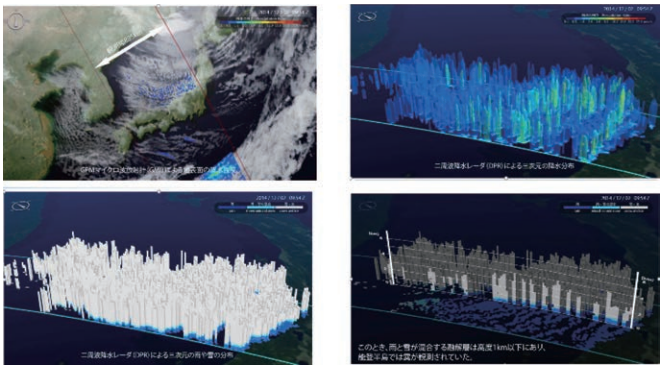


図 4-7　日本海海上の筋状の降雪

図4-8は、DPRによる世界の雨・雪の観測成果です。TRMMの観測範囲ではヒマラヤ山脈付近を除き降雪はほぼありませんでしたが、GPMで拡張された緯度帯では殆どの地域で降雪が観測されていることがわかります。このように、降水が雨（液相）か雪など（固相）かと情報が世界中の降水についてデータが蓄積されれば、温暖化を含む気候変動の問題に対する基本的なデータになると考えられます。

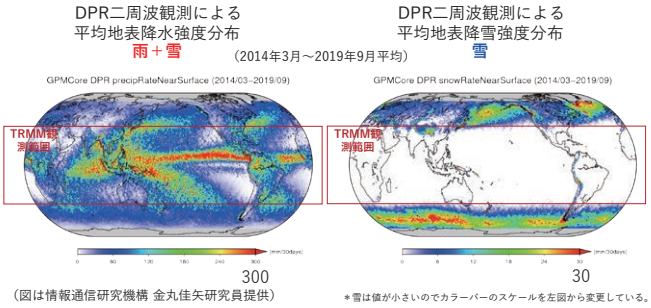


図 4-8　GPM/DPR による中高緯度の雨・雪の分布

(3) 降水鉛直分布の緯度による違い

図 4-9 は、横軸に緯度をとって、同じ緯度帯の降水データを平均して描画したものです。TRMM の観測（下図）では熱帯の情報しか得られませんでしたが、GPM では北緯～南緯 65 度までの範囲の降水情報がわかります。熱帯での雨は背が高く、中高緯度では低くなっている様子が明瞭にわかります。降水量の多い（赤）緯度帯は、熱帯の他に中緯度にもあります。

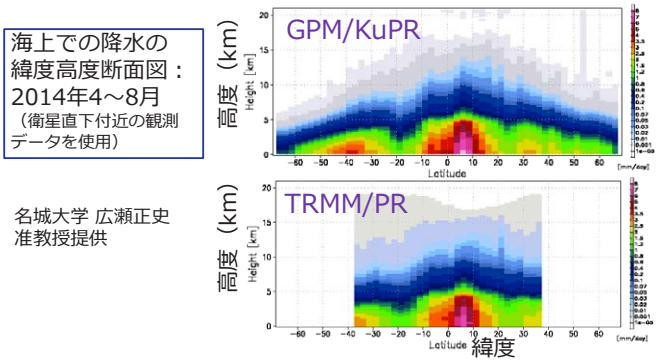


図 4-9　降水鉛直分布の緯度による違い

二周波観測の情報を使うと、降水粒子の情報が得られます。二周波の降雨減衰の違いを利用して、強い固体降水、つまり雹や霰を検出したという結果が得られています。(Iguchi et al., 20) また雨の鉛直構造の解析も行われています。それによると、中緯度の海上では降水量は地表に向かって増加するのに対し、熱帯海上では地表に向かって減少するという明瞭な違いが得られています。(Kobayashi et al., 2017) このような情報が、先にお話ししたマイクロ波放射計による降水推定精度の向上に役立っていくわけです。図 4-10 に、二周波降水レーダによる観測成果の意義をまとめました。

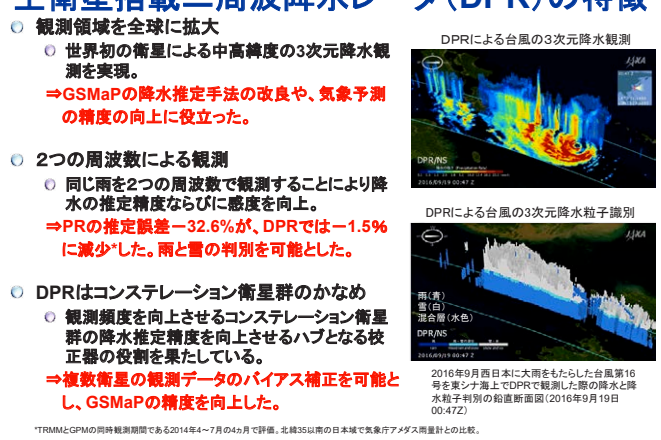


図 4-10　GPM 主衛星搭載二周波降水レーダ (DPR) の観測成果のまとめ

5　全球降水マップ (GSMaP)

5.1　GSMaP の開発

衛星観測から降水データを作ろうとする場合、観測頻度が問題になります。例えば東京で大雨が降ったとして、その時間帯に衛星が通過しておらず観測しそこなうことが起こります。その問題を克服するために、できうる限り多くの衛星を使って降水を常にモニターするシステムを、GPM に向けて GSMaP として日本で開発してきました。1 時間ごとの 0.1 度緯度経度格子点のデータで（図 5-1 の下図）、 画像やデータは、JAXA のウェブページ「世界の雨分布速報」やデータ配布システム「JAXA G-portal」で無償で公開しています。データ形式もユーザの利便性を考慮して何通りか用意しています。(https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm)

マイクロ波放射計を使っても埋まらない観測域は、静止気象衛星から算出する雲移動ベクトルで降水域を移動させて補間して、シームレスなマップとしています。

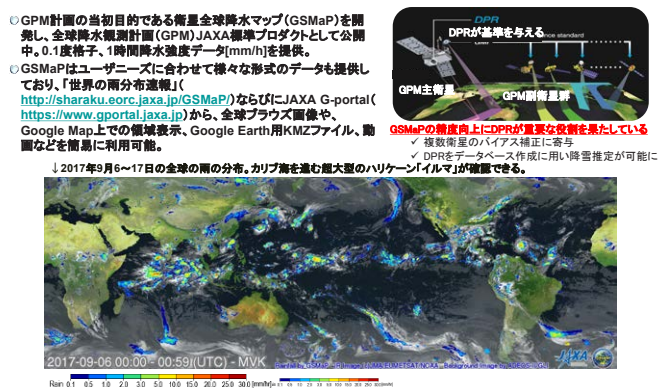


図 5-1　GSMaP の開発

5.2　GSMaP ユーザーの広がり

GSMaP のユーザは増え続けています。約 1 年前の統計では 4000 ～ 5000 人が登録しており、地域別では海外からの利用が多くて全体の 2/3 になります。その中でもアジアからの利用が多くなっています。日本ではレーダ観測網が充実していて、スマホで様々なプロバイダが出しているレーダ雨量を見ることができたりしますが、雨のデータが一切無いような地域では他に頼るものがなく、大事な情報になっているのではと推察されます。日本でも、雨量計が 2 個しかない小笠原諸島では、村役場のトップページにリンクがあります。世界の気象機関でも自前の観測データが無いような地域で降水のモニターに使っているところが多いようです。

水文分野の方ともプロジェクト当初から協力させていただいています。土木研究所 /ICHARM の IFAS（図 5-2）は、GSMaP の降水を入力にして、水文モデルを通して洪水の予測をするシステムで、パキスタンでの実利用成果があります。国際建設技術研究所（IDI）の IFNeT/GFAS は、GSMaP のデータから過去にないような大雨を検知したら現地に警報を届けるシステムです（図 5-3）。その他、農業分野でも農業インデックス保険の客観データとして使われたり、農水省の海外食糧受給レポートに掲載されたり、教育分野での利用もあり、様々に利用されています。

図 5-2　GSMaP の利用事例（水文分野）

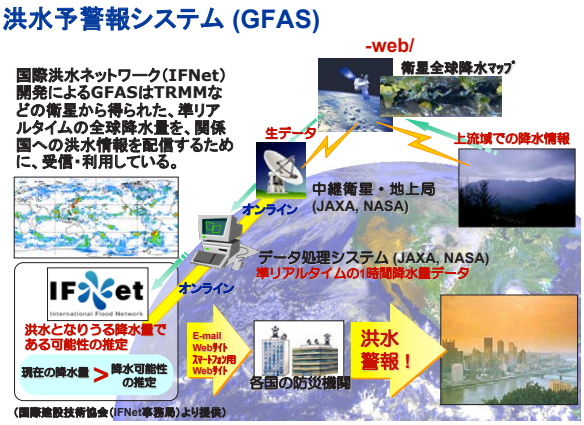


図 5-3　全球洪水予報システム（GFAS）
（国際建設技術研究所より提供）

GSMaP は、前述の URL の当センターの Web サイトでユーザー登録をしていただければ、様々な形式のデータが利用可能です。ユーザー登録をしなくても画像はご覧いただけます。

6　衛星観測データとモデルの利用による応用

6.1　DPR による気象予報精度の向上

応用利用についてご紹介します。気象庁の気象予報のシステムで GPM のデータが使われています。DPR など衛星観測のデータを同化することで予測の精度が向上していると伺っています。

図 6-1 は常総豪雨の事例です。GPM のレーダを同化しない場合（左図）、常総豪雨の線状降水帯が弱めに 2 つに別れたり位置がずれたりして、予測が上手くいっていません。右図がいわば正解で、地上観測結果です。中図がレーダを同化した場合で、左図に比較してかなり正解に近くなっています。このような予測の改善があると、防災という面で意味が出てくるはずです。実際に西日本豪雨では、雨があれだけ降るという予測は出ていました。「もっと細かく正確に予測してほしい」と厳しく言われる向きもあるかもしれませんが、この中央の例と同程度には西日本豪雨の時点でも予測できるようになっていたということで、もし西日本豪雨のときに衛星観測データが入っていなかったら、予報はもっと悪かったということです。皆さんにぜひ知っておいていただきたいのは、今の気象庁の予測はとても良いということです。ひまわりや地上レーダだけではなく、JAXA や NASA が実施している地球観測のデータが気象業務で使われているからです。もし、そういうデータがなかったら予測の精度は今より悪くなってしまいます。

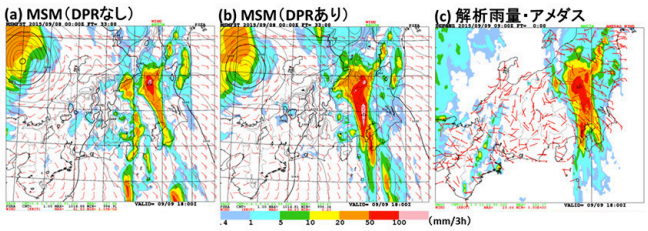


図 6-1　DPR による気象予報精度の向上（気象庁提供）

6.2　「Today's Earth」

最後に、東大の芳村先生と我々のセンターで共同研究を実施している、「Today' s Earth」という陸面水文量シミュレーションシステムをご紹介します。

気象データセット、陸面過程モデルと河道追跡モデルを組み合わせて、陸面水文量、最終的にはリスク指標まで出すことを目標にシステムを開発しています（図 6-2）。現在は、グローバルには 0.5 度解像度、河川は 0.25 度で、日本域に関しては約 1km の解像度のシステムです。

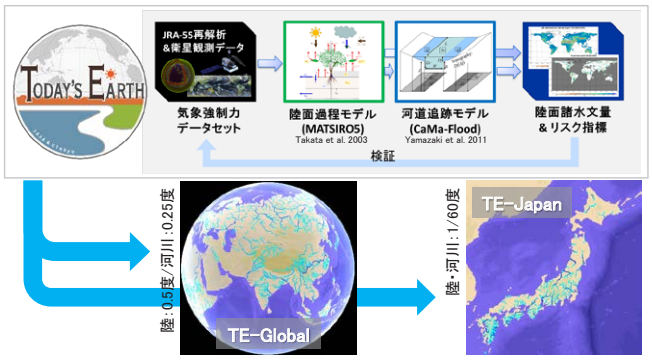


図 6-2　陸面水文量シミュレーションシステム「Today' s Earth」

日本域で1km解像度というと、図6-3の左図のようになり、主要な河川を解像できるようになります。現在の全球システムの解像度で同じ日本域を見ると右になります。今は日本域のみが1 km ですが、2021 年に 10km、10 年後ぐらいには全球 1km のシステムを目指しています。

TE – Japan
　2019年　3月末画像公開予定（データ公開は今年11月中旬を想定）
TE – Global
　2020年　バージョンアップ（予定）
　2021年　全球10km解像度公開（予定）

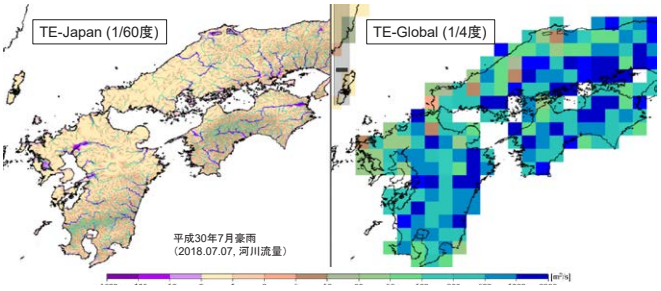


図 6-3　「Today' s Earth」の解像度と今後の予定

「Today' s Earth」の出力しているプロダクトはたくさんありますが、ご関心のところでは、河川流量、河川貯留量、河川水深、河川流速、氾濫流量、氾濫水量、氾濫水深、氾濫面積、氾濫面積割合、河川水位などでしょうか。

恐らく今までは、水文の河川予測などをする場合、流域単位で行うことが多かったと思います。しかし、気候変動の立場で水文量を扱う場合は全球が対象です。衛星データはグローバルなので、全球の気候変動のような大きなテーマと親和性があるので、衛星観測データを検証用や入力用に使うことをいろいろ試していきたいと考えているところです。

6.3　2015 年鬼怒川氾

近年豪雨による洪水災害が増えている印象があり、2015 年の鬼怒川の氾濫も記憶にあるところです。芳村教授の調査によると、100 年に一度というような豪雨の、3 日雨量と 1 日雨量の 1920 年代から最近までの長期変動を調べたところ、3 日間降水量はむしろ減っているのに、1 日降水量が増えているそうです。そうなると鬼怒川をはじめ多くの河川では 3 日間等長期の降雨を対象に治水計画をたてていて、現状に即していないのではという問題提起をされています。昔の基準で作ったものが、気候変動に伴って変わっていくような事例が他にもあるのではないでしょうか。

TE と同様のシステムで、入力を観測データから予測データに替えると、再現ではなく予測に用いることができます。これは現在戦略的イノベーション創造プログラム第 2 期（SIP2）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」で芳村教授を中心に開発中で、最終的には社会実装を目指しています（図 6-4）。鬼怒川豪雨の事例で、事後になりますがこのシステムで予測実験をしたところ、概ね 39 時間から 1 日以上前から洪水発生をかなり確実に予測出来ていたことがわかりました。最近の洪水被害の分析で、洪水警報が真夜中に出ても現実的には避難は難しいから、昼間の時間に警報や避難勧告などが出されるべきだという話があり、「どれぐらい前から情報を出せるか」ということを非常に気にして開発が行われていますが、このシステムだと、鬼怒川の場合は 39 時間前に洪水発生を示唆して、その 15 後時間後には高い確度で洪水を予測したという結果が得られています。

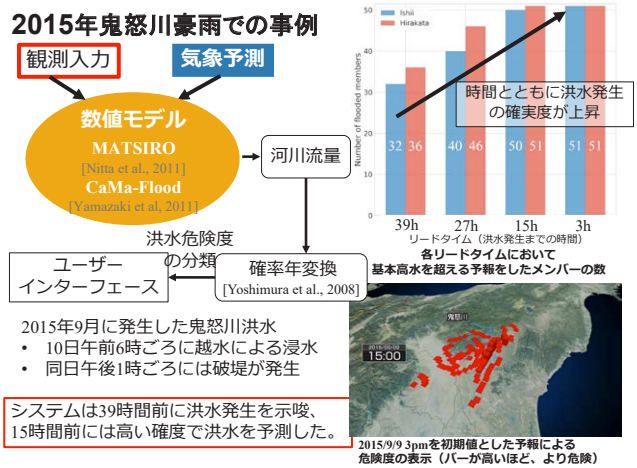


図 6-4　鬼怒川豪雨での事例（東大　芳村教授提供）

7　まとめ

20 年前は全球の雨データは月ごとで、解像度も 200kmスケールのものでした。しかし今は 1 時間かそれ以下の単位、空間的にはkm単位での世界の降水データが、しかもリアルタイムで簡単に手に入ります。20 年前には考えられなかったスマホなどの普及で、誰でも簡単にこのようなデータを閲覧できる時代です。しかし実は、こういう状態をどうやって維持するかということが、問われています。

TRMM で切り拓かれた衛星による定量的な全球の降水観測の技術と知見が GPM へと引き継がれました。今ではその成果として全球の降水マップ（GSMaP）が出来て、リアルタイムで閲覧できます。モデルとの併用で更に応用分野も広がっています。防災に関しては、雨のデータというのは非常に有力であ

ることは間違いないのですが、単に観測している以上のデータが得られる時代になっている、という例として TE を紹介いたしました。

私はもともと、気候の変動に興味があって気象学を選んだという経緯があります。温暖化に関して、実際、次々と気温や降水量の記録が塗り替えられたりして、一般の方でも「なんか最近の雨の降り方おかしいんじゃないか」ということが会話になる時代になっています。私自身、まさかそんなことになるとは思っていませんでした。

100 年の予測ということを、気候のモデルの専門家はやっています。だから IPCC で何度に抑えるというような話は、数十年から 100 年スケールになっています。一方で、防災や気象予報などを考えると、我々に今確実に出来ることというのは、短い時間の予測です。もっと言うと、今まさに観測したことを少し先へ延長することの確度があがってきています。今起きていることをモニター（観測）して、少し先の予報を良くして警報を出して、なんとか身を守るようなことをやっているわけで、やはりそういうシステムはきちんと維持していかないと命は守れないのではないかと思います。

一方で長期的にもモニターすることが大事です。気候の予測モデルを良くしていくような研究というものが出てきます。私達の分野でいうと、エアロゾルが雲の性質を変えて、雲の生成効率などが変わると当然雨の降り方が変わると考えられています。従って現在、エアロゾルと雲と雨を一連のプロセスとして理解するために雲の中を微細に観測しましょうというような観測計画の話が出ています。それを行えば、今度は日々の天気予報のモデルでの雲や雨の取り扱いも良くすることが出来るので、実は気象のモデルを良くすることと気候のモデルを良くすることは順繰りに回っていて、予測モデルが全般に良くなることが期待されます。長期的視点を持ちつつ、今起きていることをモニターする。それらを両立させながら行うことが大切だと思います。

例えば最近の 9 月に IPCC から出た「海洋・雪氷圏特別報告書」では、温暖化で 2100 年くらいには海面が 1 m 程度も上がってしまうとのことです。（https://www.spf.org/global-data/opri/news_191015_IPCC_Rec.pdf）そうなると海岸の堤防をどうするのかという問題があります。土地利用もそうですし、先日の台風 15 号で千葉県で電柱が強風で多く倒れた件も、電柱の設置の強度をどうするべきかということも考えないといけないわけです。温暖化によって対策すべきことが次々と出てきているのではないかという印象です。想定外のことが起きる可能性もあるのですから、モニターしつづけないといけないのだと思います。

実は現在、将来の地球環境の観測衛星計画は極端に少なくなっています。その理由の 1 つとして、これまで JAXA の地球観測衛星に予算を充ててきたのは文部科学省ですが、文部科学省は、新規研究や開発ものに予算をつけるので、地球環境をモニターして、既にインフラの一部になりつつある衛星計画に予算をつけにくくなっているのではないかと考えられます。環境問題は環境省の所掌ですが、人工衛星としては、温暖化ガスを測る「いぶき」シリーズを実施しているので、それ以上の衛星計画にはなかなか予算をつけられません。気象庁は静止気象衛星ひまわりしか持てないような状況にあります。海外、例えばアメリカは航空宇宙局（NASA）と海洋大気庁（NOAA）の分業ということになっています。NASA で研究開発して、技術が成熟して現業に使えるレベルのものは NOAA のシステムになっています。欧州は一体となって、政策として積極的に衛星計画を進めている現状があります。それに対して日本はどうも計画の立て方や体制の構築に手薄なところがあるように思います。

温暖化については温暖化ガスを測る目的が分かりやすいですし GOSAT シリーズとして国の計画になっています。人間の目と同様な写真のような観測も受け入れられやすいのではと思います。例えば陸域を撮像して、ブラジルの森林伐採を監視するというようなもので、ALOS シリーズは継続しています。問題は、レーダを含むマイクロ波センサなどです。日本のマイクロ波放射計観測は実績があって継続が望まれていました。今年度やっと後継計画が立ち上がりつつあるところです。

現在、20 年ほど前に立てた地球観測衛星計画が今一番花開いていて、運用中の衛星の数が多くなっていますが、対照的に将来のシナリオと計画がない状況になっています。どの観測をどのように計画していくのか。例えば、国交省が気象庁と一緒に、防災にもっと力を入れる、となってレーダを含むマイクロ波センサに予算を出すようなことがあってもおかしくはないはずです。そうでないと、このまま世界をリードしてきた降水観測の衛星をはじめ、日本の地球観測衛星がなくなってしまい、技術や人が失われ、独自の情報も失い、世界での発信力も失いかねないという心配をしています。ご紹介したように、既に気象予報のインフラになっているものを新しい技術と組わせてどう実施するか、その辺のバランス、政策を国として真剣に考えないといけないと思います。

＜参考文献＞

Kidd, C., A. Becker, G. J. Huffman, C. L. Muller, P. Joe, G. S.-Jackson, and D. B. Kirschbaum, 2017: So, How mucc of the Earth’s surface is covered by rain gauges? Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, 69-78, doi:10.1175/BAMS-86-8-1069.

Hamada, A., Y. N. Takayabu, C. Liu and E. J. Zipser, 2015: Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms. Nat. Commun., Vol. 6 (6213), doi: 10.1038/ncomms7213.

Iguchi, T., N. Kawamoto, and R. Oki, 2018: Detection of intense ice precipitation with GPM/DPR. J. Atmos. Ocean. Tech., 35, 491-502, doi: 10.1175/JTECH-D-17-0120.1.

Kidd, C., A. Becker, G. J. Huffman, C. L. Muller, P. Joe, G. S.-Jackson, and D. B. Kirschbaum, 2017: So, How much of the Earth’s surface is covered by rain gauges? Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, 69-78, doi:10.1175/BAMS-86-8-1069.

Kobayashi. K., S. Shige, and M. K. Yamamoto, 2018: Vertical gradient of stratiform radar reflectivity below the bright band from the tropics to the extratropical latitudes seen by GPM. Q. J. R. Meteorol. Soc. 144 (Suppl. 1) 165-175. Doi: 10.1002/qj.3271.

本内容は2019年10月11日に開催した、国土政策研究所講演会における講演によるものです。