

退任にあたって（研究生生活を振り返って）

Looking back over my research life at the retirement

岡本 謙一

OKAMOTO Ken'ichi

1 はじめに

2014年3月に停年退職することになりました。退職するのは3回目です。2000年4月に27年間勤務しました郵政省通信総合研究所（現在の総務省所管の独立行政法人情報通信研究機構）を退職し、大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野に移りました。大阪府立大学では、8年間勤務した後、2008年3月に退職しました。その後は、鳥取環境大学にお世話になり、6年間勤務した次第です。鳥取環境大学では、環境政策学科に採用され、その後、組織再編等に伴い、環境マネジメント学科、環境学科と所属が変りました。今回3回目の退職を迎えるにあたり、この機会に自分の約40年間の研究生生活を振り返ってみたいと思います。

1973年3月に東京大学大学院理学系研究科博士課程を卒業しました。大学院では、恩師の阿部龍蔵先生の下で、5年間物性基礎論を専攻しました。また、助手の波田野彰先生には、物理学のみならず、人生相談などでも大変お世話になりました。お二人に対する恩義は、生涯忘れられません。博士論文の題目は「ポーラロンに於ける経路積分法の拡張と応用」でした。固体中の電子が格子振動を量子化した粒子であるフォノンと相互作用することについて、有名なノーベル賞物理学者のファインマンの理論を拡張した論文でした。阿部先生は、統計力学、特に相転移において世界的に著名な理論物理学者でありながら、人柄は謙虚で、わかり易い教科書を書かれ、また素晴らしくわかり易い講義をされる方でした。研究室には優秀な大学院生が沢山居られましたが、私のような如何しようもない出来の悪い学生をも見捨てず親切に指導して下さいました。昨年死去されたことが残念で残念でたまらないです。私が、一生懸命読んでもなかなか理解できなかった名著『統計力学』（東大出版1966）や、院

生の身分で査読させて頂き、思い出深い類書の少ない『電気伝導』（培風館1969）が先生のお棺の中に納められていたのを見て胸が痛くなりました。2012年から、鳥取環境大学環境学科1年生のために『物理学概論』の講義を始めましたが、テキストは阿部先生の『はじめて学ぶ物理学（サイエンス社2006）』を使っています。毎回講義をする度に、阿部先生の講義には遠く及ばなかったと思うと共に、恩師の偉大さをつくづく思い知らされます。

博士課程を卒業した頃は、オーバードクター全盛の時代でした。物理が好きで好きでたまらなく、就職口がなくても何年も大学院に残っていても構わないという人が自分の周りにも沢山おられました。その様な方々に比べれば、物理で食っていくだけの自信と能力のない自分としては致し方なく、さっさと国家公務員試験を受けて転進する次第となりました。

1973年4月に郵政省の電波研究所（1988年4月から通信総合研究所と名称変更）に入所しました。入所の前年の夏に電波研究所の面接試験があったのですが、その時に、「人工衛星は好きですか」という質問がありましたので、「嫌い」というわけにいかず、思わず「はい」と肯定的な返事をしたことがその後の運命を決めるとは思いもよらなかったです。

郵政省電波研究所では、研究職公務員として生活しましたが、衛星研究部を振り出しに、宇宙からの電波リモートセンシングの研究に従事する期間が一番長かったと思います。取り分け、1978年頃から始まった宇宙からのレーダによる降雨観測の研究は、航空機実験を経て、熱帯降雨観測衛星（TRMM：Tropical Rainfall Measuring Mission、以下TRMMと略記）として結実し、私のライフワークとなりました。これについては、後で詳述したいと思います。40歳になった頃から、研究マネジメン

ト職になり、自分の研究に従事するよりは、プロジェクト管理に時間を取られることが多かったです。地球環境計測部長として、TRMM プロジェクトを初めとする地球環境のリモートセンシングに関する様々なプロジェクトの管理と研究をしている時期が一番充実していたのではないかと思います。通信総合研究所が、周波数に関する国家標準を持っていたため、その後、標準計測部長として、「周波数標準値を定め標準電波を発射し標準時を通報する」業務も担当しました。現在、皆さんがご利用の電波時計が受信する時刻信号を通報する側の業務です。最後は、総合研究官（英語で Associate Director General と言った方が内容的にはわかり易いですが）になり、研究所全体の研究管理をやることになったのですが、機会がありましたので、先輩のお勧めに従って、直ぐに退職して、大阪府立大学に移りました。

大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学分野では、航空宇宙システム講座のシステム工学の教授として、宇宙からの地球観測を研究分野に選び、大学院生の研究指導に従事しました。研究予算が豊富な国立研究所から、まったく研究費のない大学に移ってゼロから研究室の立ち上げをすることになりましたが、幸い航空宇宙工学分野の教員の皆さんは親切で、色々と便宜を計らって下さり、有能な助手も採用することができました。新任教授としては科研費を初めとする様々な外部予算を獲得することにかかなりの時間を取られたのですが、国立研究所にはないメンバーとして、ある程度の学力のある博士課程前期・後期の学生が沢山いましたので、何とか研究室を立ち上げることが出来ました。この時期には、宇宙開発事業団（2003年10月より宇宙航空研究開発機構 JAXA）の研究公募の支援を受けて、TRMM プロジェクトに引き続き関わり続けました。特に、TRMM データを解析処理する降雨レーダの標準アルゴリズムの何回かの改定作業にアルゴリズムチームのリーダーとして従事しました。また、科学技術振興機構の財政的支援を受けて、「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」のプロジェクト（GSMaP）を研究代表者として担当しました。これらについても、後で詳述したいと思います。

2008年に鳥取環境大学に移りました。大阪府立大学の停年（63歳）までまだ1年あったのですが、TRMM プロジェクトや GSaP プロジェクトに関わっているうちに、気象学や気候学の分野の方々と共同研究をする機会が増えてきました。段々と自分の興味が宇宙工学分野から地球科学分野にまで広がって来ました。もともと、理学系出身ですし、学生時代に苦労したお陰で基礎となっ

ていた物理学の知識は、地球科学分野の研究を理解するのに役に立ちました。ということで、興味が地球環境の科学にまで広がりつつありましたので、鳥取環境大学の公募に応募して、鳥取環境大学に移ることになりました。鳥取環境大学に移ってからは、学生の卒業論文のテーマとして主に、TRMM 降雨レーダのデータ解析を行って来ました。地球温暖化と降雨量の関係について TRMM 降雨レーダデータから何か言えないかと考えたからです。また、衛星データを用いて自然災害や地球環境の変化の様子を知り、その保全についての大切さについても学生と共に学んできました。

以下で、上述した私に関わって来ました主な研究対象である、TRMM 降雨レーダの研究開発、同データ解析処理用アルゴリズムの研究開発、衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成、ならびに最近研究をしています TRMM 降雨レーダで観測した全地球の降雨量の最近のトレンドなどについてお話ししたいと思います。

2 TRMM に至るプレヒストリー

既にお話しましたように、私は1973年4月に郵政省の電波研究所に入所しました。前年の1972年7月に米国航空宇宙局（NASA）は、最初の地球観測衛星アーツ（ERTS: Earth Resources Technology Satellite、後にランドサット1号と改名）を打ち上げていました。アーツ搭載の可視・赤外センサ MSS (Multi Spectral Scanner) は100海里四方（ほぼ関東地方の面積に匹敵）の画像を分解能80mで提供し、初めて見た者には驚きをもたらしました。同じく前年の1972年12月には、もう一つの米国の衛星であり、宇宙からの降雨を観測対象の一つとするマイクロ波放射計 ESMR と NEMS を搭載したニンバス5号（NIMBUS-5）が打ち上げられていました。ESMR の PI (研究代表者) である NASA ゴダード宇宙飛行センター（GSFC）のトム・ウィルハイト（Thomas Wilheit）博士は当時の私にとっては、論文でその名前を読むだけの雲の上の人でしたが、後に TRMM プロジェクトで親しく付き合うことになるとは当時は想像もできませんでした。宇宙からのリモートセンシング技術により地球を観測することの重要性の認識が世界的に高まる中で、衛星からの地球観測は電波研究所が取り組むべき次の宇宙分野の研究テーマとなって行ったのです。

1973年～1977年頃の電波研究所では、衛星通信に用いられるミリ波・準ミリ波の電波伝搬に影響を与える降雨についての理論的ならびに実験的研究が積極的に行われていました。その様な研究背景の下に、衛星から降雨を観測する技術の開発をしようとする声が電波研究所内で

上がってくるのは必然とも言えました。結果的に、電波研究所では当時の石田亨衛星研究部長の指令の下に、宇宙からのレーダによる降雨観測技術の開発をターゲットにおいて研究が開始されることになりました。

衛星からの降雨観測は、既に気象衛星の草創期である1960年4月に打ち上げられたタイロス（TIROS）1号の時代から希求されてきました。ビデオカメラと赤外線で見えた雲画像と雲頂温度や地表面温度は天気予報に必要な気象データを提供しましたが、雲の下の何処で雨が降っているのかは観測できませんでした。恐らく最初に宇宙からの降雨観測データを提供したのは、ニンバス5号搭載のマイクロ波放射計ESMRでした。但し、ESMRの降雨観測は海上では有効でしたが、陸上での降雨の観測は困難でした。また、原理的にマイクロ波放射計の観測は高度方向のデータは積分されてしまい、降雨構造の垂直分布は観測できませんでした。

その頃我が国では、宇宙開発事業団が我が国最初の地球観測衛星である海洋観測衛星1号（MOS-1）の計画を検討し始めていました。MOS-1（1987年2月打ち上げ）は、受動型センサであるマイクロ波放射計（MSR）を搭載していました。従って、当然のことながら電波研究所が狙うべきターゲットは、能動型電波センサである衛星搭載降雨レーダでありました。そして、このレーダの実現可能性について理論的に検討する仕事が、私に降りかかりました。

1973年～1977年頃の電波研究所では、衛星通信を研究してきた研究者の頭には降雨減衰ということが染み付いていたため、宇宙からレーダで降雨が測れるなどということについては誰もが眉唾物でありました。また、衛星から見れば薄い雨の層のすぐ下に地表面があるため、地面からの強い反射で雨のエコーがマスクされてしまい、何も分からないのではとの懸念もありました。例えてみれば、ミカンの薄皮（降雨層）をミカンの実（地球）から分離して観測することが果たしてできるかというようなことです。この可能性を確認するための計算を私が引き受けることになりました。衛星から雨を観測する場合、ほぼ鉛直下方を眺めることになるため、地上の降雨レーダのように水平方向に長い距離をレーダ電波が伝搬する必要がないこと、静止衛星に対する衛星通信回線の斜め伝搬とは条件が違い降雨減衰の影響が少ないこと、従って衛星搭載の小型軽量化に不可欠な10 GHz以上の高い周波数の電波をむしろ使えること、また1 μ s程度のパルス幅のパルス波と低サイドローブレベル（-25～-30 dB程度）を有するアンテナパターンを組み合わせれば、雨と地表面エコーの分離ができることが計算の結果すぐ

に明らかになりました。宇宙からの降雨レーダによる降雨観測が計算上可能であることが示されました。

途中の経過は省略しますが、1977年の6月に電波研究所から新規予算、研究課題名「衛星搭載用能動型電波リモートセンサの研究開発」を大蔵省に提出し、1977年12月の予算内示で1978～79年度の二年国債で二億円の郵政省一般会計予算が認められることになりました。といってもリスクが大きく予算もかかる衛星搭載用の降雨レーダの開発がいきなりできるわけではありません。所内でも改めて実行予算で実際何を研究するかについての議論がありましたが、結局のところ、私が責任者となり航空機搭載降雨レーダの研究開発からスタートすることになりました。1978年に航空機搭載の降雨レーダとマイクロ波放射計を組み込んだ10GHzと34.5 GHzのシステムである航空機搭載雨域散乱計／放射計システムの仕様書を一人で書き上げ、三菱電機と契約をしました。雨域散乱計とは降雨レーダのことで、放射計とはマイクロ波放射計のことです。この両方のセンサで降雨を同時観測するメリットは非常に大きいことが後の降雨観測実験でも明らかになりました。この年（1978年）に初めて外国出張しました。今は国が無くなってしまったユーゴスラビアのドブロブニク市で開催された第29回国際宇宙航行連盟（IAF）の総会で、“Remote sensing of precipitation by a satellite-borne microwave remote sensor” という題で宇宙からの降雨観測用の降雨レーダのシステム提案について、それまでの計算結果を纏めて発表したのです¹⁾。発表後、セッションの議長から、ぜひ衛星搭載降雨レーダを実現するようにと励まされたのですが、当時はまさか後年本当に TRMM という形で夢が実現するとは思っていませんでした。

1980年7月には、航空機搭載雨域散乱計／放射計システムが出来上がり、航空機実験が始まりました²⁾。航空機実験では、大阪の八尾空港に基地がある昭和航空（株）の所有しているセスナ404（タイタン）という双発プロペラ機（当時は、リモートセンシング用に利用できる我が国の航空機としては最大級でした）を借り上げて飛行条件の悪い降雨時に実施しました。余談になりますが、同機が2007年11月に岐阜県中津川市恵那山山頂付近で墜落事故を起こしたことはとても悲しいことです。1980年代に降雨観測実験に協力して下さった昭和航空（株）の皆様のことを思うと胸が痛みます。当時の実験では、1時間60万円の飛行代金だったと記憶しています。雨域の上から雨の観測を実施するのですが、夏場には高度6,000m以上も上昇します。与圧されていない飛行機で一気に高高度まで上昇するので酸素マスクが必要で

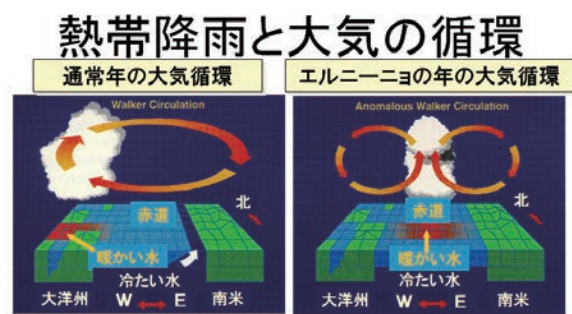
す。実験に夢中になって酸素マスクに酸素を送る管が天井から外れているのに気が付かず頭が痛くなってきて初めて気が付き、地上に戻ってから酸素吸入を受けるということもありました。小さい飛行機にレーダの機械が一杯に詰まった状態ですから、オペレータは二人一組で、殆ど身動きできない状態での実験でしたが、研究室のメンバーは交代で頑張っておデータを取得しました。国内で合計100時間くらい実験をしたのでしょうか。レーダは、送信管にマグネトロンを使っていましたが、周波数が安定せず AFC の動作が不調で、機上での機械の調整に大変苦労しました。危険なことはするな、危なくなったら何時でも下りて来るようにと当時の畚野信義研究室長からは言われていましたが、データを取らずに下りて行ったときに室長から怒られるのが怖いと思って兎に角必死でデータを取りました。この様にして苦労して観測したデータを解析して、共同研究者の猪股英行氏が1981年11月にボストンで開催された第20回気象レーダカンファレンスで発表したところ、この発表に興味を持ったのが、当時米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター (NASA/GSFC) の Laboratory for Atmospheres の Chief をしていた気象レーダの世界では神様扱いされていたアトラス博士 (Dr. D. Atlas) でした^{2)~4)}。当時、アトラス博士も将来の衛星搭載降雨レーダを実現したいと考えていたと思われます。その後の経緯は省略しますが、電波研究所の航空機搭載雨域散乱計/放射計システムを米国 NASA に運び日米共同降雨観測実験を実施することが1985年に NASA と電波研究所間で合意されました⁵⁾。NASA 側は、この頃既に TRMM 衛星の構想を持ち、宇宙からの降雨レーダによる降雨観測のフィージビリティスタディとして航空機からの降雨レーダとマイクロ波放射計による降雨観測を実施したい意向を持っていました。このために電波研究所の開発した航空機搭載雨域散乱計/放射計システムに注目したものと考えます。日米共同降雨観測実験では、「宇宙からの降雨観測の可能性の研究」というテーマの下に、電波研究所の優秀な若手研究者が次々と4人 (中村健治、古津年章、熊谷博、井口俊夫の各氏)、NASA から招聘され、1985年2月~1994年6月まで続けました。私は、当時研究室長をしていたこともあり、日米共同降雨観測実験には直接的には参加せず兵站部門を担当する立場に回りました。日米共同降雨観測実験の米国側の担当者は、NASA/GSFC のボブ・メネギーニ氏 (R. Meneghini) でした。彼とは、後日 TRMM 降雨レーダアルゴリズム開発で一緒に仕事をすることになりました。電波研究所の優秀な若手研究者は、慣れない環境条件下でも頑張り、良いデータを取

得すると共に NASA 側の信頼を勝ち取ることができました。実験は、当初は NASA のメリーランド州のワロープス実験施設を中心に行われましたが、その後 DC-8 に搭載して沖縄周辺の台風の観測実験も行われました。この様にして、宇宙からの降雨レーダによる降雨観測のフィージビリティが検証されました。

3 TRMM 降雨レーダの研究開発

1984年10月 NASA は、NASA 本部のセオン博士 (Dr. J. Theon) の指導の下に、気象と気候に関連する新しい研究ミッション候補として NASA/GSFC の3人の研究者ジェリー・ノース博士 (Gerald North)、トム・ウィルハイト博士 (Thomas Wilheit)、オットー・ティーレ氏 (Otto Thiele) の提案である TRMM を取り上げ、その実現を真剣に追求することになりました⁶⁾。TRMM 衛星は、日本語に翻訳しますと、「熱帯降雨観測衛星」のようになり、後に日米共同のミッションになりますが、最初に提案したのは米国であったのです。

TRMM は、文字通り熱帯・亜熱帯の雨を観測することを目的とした人工衛星ですが、何故、熱帯の降雨の観測が重要かについてお話しします。図1は、熱帯降雨と大気循環の関係を概念的に示しています⁷⁾。左図が異常のない通常年の大気大循環、右図がエルニーニョの年の大気大循環の様子を示しています。熱帯の大気と海洋の相互作用は、地球規模の気候変動に大きな影響を与えます。図1の青い部分は、赤道周辺の熱帯太平洋を示しています。



- ・熱帯降雨: 地球大気循環の主要な“熱”エンジン。その定量的観測は気候変動や異常気象の研究に不可欠。
- ・全世界の降雨の2/3が熱帯・亜熱帯に降る。
- ・熱帯地方は、広大な海洋に覆われている。

図1 熱帯降雨と大気循環 (JAXA 提供)⁷⁾

左側が西太平洋で日本のほぼ真南のニューギニアとかの島々のある海域、右側の緑が南北アメリカ大陸のあたりを示しています。左図の通常年には、西太平洋熱帯域の海洋表層には暖水域があり、水蒸気が盛んに蒸発して

います。水（液体）は海面から水蒸気（気体）として蒸発するとき、熱を海面から奪い、水蒸気内部に潜熱として保有します。水蒸気を大量に含んだ空気が上空に上昇すると気温が減少しますので、空気中に水蒸気を確保することが出来なくなり水蒸気は凝結し水蒸気（気体）から雲粒（液体）に変化します。この結果、凝結による潜熱が大気中に大量に放出され、暖められた大気は軽くなり益々上昇して積雲対流を生じ、これに伴う活発な降水活動が西太平洋熱帯域では生じています。熱帯・亜熱帯域では、全世界の2/3以上の降雨が降るといわれています。この大気の上昇の結果、周囲から大気が吹き込み、熱帯太平洋の赤道周辺では上層で西風、下層で東風（貿易風）の大気の大循環が引き起こされます。この下層の東風によって東から西に向かう赤道海流が駆動されます。また、東太平洋のペルー沖では、通常下方から冷たい海水が湧きあがって来ており、海面温度の低い領域ができます。貿易風によって運ばれて東太平洋から赤道海流に乗った海水は長時間太陽に暖められた後、西太平洋に達し、そこに暖水域を形成します。そして、この暖水域の活発な水蒸気の供給を受けてその上空に積雲が発達します。通常年には、熱帯太平洋における大気と海洋の相互作用の結果、このような安定した大気循環のループが形成されていると考えられています。

ところが、エルニーニョが生じたときには、このループが崩れ、暖水域とその上の活発な積雲、降水活動域が中部太平洋に移動します。この結果、貿易風が弱くなり、西太平洋の暖水域が東太平洋へ移動し、東太平洋やペルー沖の海水温度が異常に上昇します。この様に、熱帯太平洋の積雲、降水活動は、海洋との相互作用を通じて大規模な気象、海象変動に大きな役割を果たしていると考えられています。エルニーニョの時期には、世界的な規模で大気循環に異常が生じ、洪水、旱魃などの異常気象を引き起こす要因となります。降雨は、このように大気の駆動源として重要であるにも拘わらず、観測が困難な物理量です。特に、熱帯太平洋域では、広大な海洋があり、また陸上では熱帯雨林が広がっており、観測データが少ない領域です。熱帯地方の降雨観測のためには衛星観測しかないといっても過言ではありません。このために、降雨観測センサを搭載した熱帯降雨観測衛星が計画されたのです。

TRMM 計画は、1984年10月に NASA から始まりました。この後、セオン博士は NASA 部内で TRMM 計画を前に進めるための予算獲得をする努力をしますが、NASA 本部では壮大な地球観測プラットフォームである EOS (Earth Observing System) 計画が全米の科学者

を結集して強力に推進されようとし始めたこともあり、大きな困難に直面することになりました。途中の経過は省略しますが、多くの紆余曲折の末、セオン博士は、当時電波研究所の電波応用部長をしていた畚野信義氏に支援を求め、TRMM は日米共同の計画として推進されることになりました⁶⁾。1986年6月に第4回 SSLG (Senior Standing Liaison Group Meeting : 宇宙分野における日米常設幹部連絡会合) がワシントンで開催され、TRMM 計画の日米両国による提案がなされ承認されました。日米のカウンターパートは、セオン博士と畚野博士でした。日米の分担は、日本側が H-II ロケットの提供、降雨レーダの開発、米国側が TRMM 衛星バス（本体）の提供、降雨レーダ以外の降雨観測センサの提供、TRMM 衛星の運用でした。科学研究は、日米双方で対等に実施することになりました。

1987年1月～1988年3月にかけて、日米共同の TRMM フィージビリティスタディ (Feasibility Study) が実施されました。電波研究所は、このフィージビリティスタディにおいて、衛星搭載降雨レーダのシステムスタディ (概念設計) を担当しました⁸⁾⁻¹²⁾。私は、この電波研究所における降雨レーダの概念設計のリーダーを担当しました。降雨レーダのシステムパラメータの決定は、NASA の科学者によって示されたミッション要求条件に基づいて実施されました。これを表1に示します¹⁰⁾。

表1 TRMM 降雨レーダに対するミッション要求条件¹⁰⁾

周波数	13.8 GHz
衛星高度	350 km
走査幅	215 km
走査角	±17°
レンジ方向分解能	250 m 以下
水平方向分解能	約 4 km (直下点)
最小観測可能降雨強度	0.5 mm/h (雨域の頂きで)
最大観測可能距離範囲	15 km + 5 km (直下点でミラーイメージを含む)
独立サンプル数	64 以上
アンテナサイドローブレ	グラウンドクラッタの影響を除去できること

周波数については、国際電気通信連合 (ITU) による周波数割り当て原則に従って宇宙研究用に二次業務として割り当てられていた周波数のうち13.8 GHz が選ばれました。フィージビリティスタディの段階では、13.8 GHz と共に24.15 GHz の二周波レーダが研究されましたが、その後衛星搭載上の重量、消費電力等の制限上の下に一周波レーダに計画が縮小されました。降雨減衰の影響を極力減らすためにも、水平方向の分解能の約 4 km

を達成するためにも、また H-II ロケットに搭載可能なアンテナサイズ (約 3m 以下) を実現するためにも、13.8 GHz の周波数の選択は妥当なものであったと考えられます。走査角 (あるいは走査幅) は、大きいほど良いわけですが、走査角が大きくなると、アンテナビーム幅とパルス幅で決まる降雨散乱体積の鉛直分解能が急激に劣化すること、サイドローブから混入するグラウンドクラッタが増加すること、一つのアングルビン (アンテナビームが指向する方向) 方向の独立サンプル数を一定数以上確保する必要があることなどの条件から走査角はむやみには大きくすることは出来ません。独立サンプル数を確保するためにアンテナビームは、鉛直下方向を中心にして、衛星の進行方向に直交する平面内を往復走査する方式を採用することにしました。アンテナビームが走査範囲を隙間無く走査するには、衛星が水平分解能の約 4 km の距離を移動する時間の間 (衛星の地表軌跡の移動速度を 7.3 km/秒とすると、約 0.6 秒となる) に $\pm 17^\circ$ の範囲を走査する必要があります。このような高速でアンテナビームを走査するには、機械的な走査方式は困難で電子的な走査に頼る方が現実的となります。降雨レーダの概念設計において、レーダタイプを選択する主要技術課題として、(1)パルス圧縮方式か、通常非圧縮パルスレーダか、(2)パッシブアレー方式か、アクティブアレー方式か、(3)導波管スロットプラナーアレーアンテナ方式かオフセットシリンドリカルパラボラアンテナ方式か、の三点が比較検討されました。結論的には、パルス圧縮方式は採用せず、搭載性の観点から小さい占有面積を持つ導波管スロットプラナーアレーアンテナを持つアクティブフェーズドアレー方式のレーダを選びました。アクティブアレー方式とは、アレー素子のそれぞれに移相器と固体増幅器 (SSPA: Solid State Power Amplifier)、低雑音増幅器 (LNA: Low Noise Amplifier) の能動素子を組み合わせる方式をいいます。アクティブアレー方式は、素子数が多く、構成が複雑で重量が大きくなる反面、少数のアレー素子が故障しても、それがレーダシステム全体の大きな機能低下に結びつかないという利点を有します。結局のところ、素子数が多く構成が複雑で重量が重くなるという欠点を有するものの、フェールセーフ機能を持つアクティブアレー方式を採用することにしました¹²⁾。

フィージビリティスタディ終了後、通信総合研究所は、TRMM 降雨レーダの機能性能を確認するための主要部品 (クリティカルコンポーネント) の試作を国内企業の協力を得て 1988 年～1990 年に渡って実施しました。これらの主要部品は、(1)8 素子の導波管スロットアレーアン

テナ、(2)5 ビットの PIN ダイオード移相器、(3)10W 出力の固体増幅器、(4)低雑音増幅器でした。(2)～(4)の部品は組み上げられて 8 素子の送受信 RF 部が構成されました。その後 IF 部を加え、(1)のアンテナと共に 8 素子のアクティブフェーズドアレーレーダ (1/16スケールのブレッドボードモデル、BBM: Bread Board Model) を構成し、地上より降雨観測実験を実施しました。アンテナ部は東芝、それ以外の送受信部等の試作は日本電気にお問い合わせしましたが、全面的な協力を得ることができ、アクティブフェーズドアレー方式の降雨レーダが TRMM 降雨レーダとしての基本的な機能性能を満足することを確認しました。(1)の TRMM BBM 8素子の導波管スロットアレーアンテナおよび(2)～(4)の部品を組み上げられた TRMM BBM 8素子の送受信 RF 部をそれぞれ図 2、図 3 に示します¹⁰⁾。



図2 TRMM 降雨レーダ BBM8素子導波管スロットアレーアンテナ (NICT 提供)¹⁰⁾

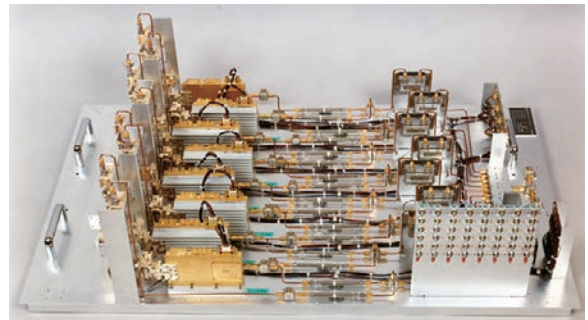


図3 TRMM 降雨レーダ BBM8素子送受信 RF 部 (NICT 提供)¹⁰⁾

通信総合研究所における BBM による機能性能確認後、1991年度以降実際の衛星搭載用の降雨レーダのエンジニアリングモデル (EM: Engineering Model)、プロトフライトモデル (PFM: Proto Flight Model) 開発のために TRMM 降雨レーダプロジェクトは宇宙開発事業団に引き継がれました。TRMM は、郵政省から宇宙開発委員会に対して 1987 年夏に「研究」要望をした後、1988 年、1989 年と「開発研究」要望をしましたが認められず、二浪したあと、1990 年夏の宇宙開発委員会の決定に従って、ようやく「開発研究」に位置づけられました。これは、H-II ロケットが TRMM のために割り当てられることを意味しています。宇宙開発委員会の文言によりますと、「熱帯降雨観測衛星 (TRMM) は、日米協力により、我が国が衛星搭載用降雨レーダ及び H-II ロケットによる打ち上げ等を担当し、米国が衛星バス等を担当

して、全地球的規模のエネルギー収支のメカニズム解明等に不可欠な熱帯降雨の観測等を目的とする衛星であり、平成7年度頃に打ち上げることを目標に、同衛星搭載用降雨レーダ等の開発研究を行う。」でした。実際のTRMMの打ち上げは、さらに2年遅れた1997年（平成9年度）になりました。

TRMMについて以下ご紹介します¹²⁾。TRMMは、1997年11月28日午前6時27分に種子島からH-II 6号機で打ち上げられた日米共同の人工衛星であり、エルニーニョ現象を初めとする地球的規模の気候変動に影響を及ぼす熱帯および亜熱帯降雨を観測することを目的とします。TRMMの軌道は、高度350 km(衛星のミッション寿命を延ばすために2001年8月から、大気密度の薄い高度402.5 kmに上昇)、軌道傾斜角35°の円軌道であり、経度0°~360°、緯度±35°の範囲を緯度経度5°×5°のセルに分けて、各セル毎の月平均降雨強度を20%の精度で観測することを目的としています。軌道傾斜角35°を取ったのは、熱帯、亜熱帯降雨（特に梅雨前線）の観測頻度を増やすためでしたが、これによって同時に、様々な地方時刻で降雨観測を行うことが出来るようになりました。通常の地球観測衛星は、極軌道に近い軌道傾斜角を有する太陽同期軌道を取り、地方時がほぼ同じ時刻において地表面を観測します。しかしながら、降雨の日周変化が顕著な熱帯・亜熱帯（特に陸上）において、特定の地方時のみ降雨を観測すれば、観測降雨強度にバイアスを持つことになるので、TRMM衛星は様々な地方時刻で降雨観測を行う必要があります。

TRMM衛星の外観を図4に示します⁷⁾。



図4 TRMM衛星外観図（JAXA提供）⁷⁾

TRMM衛星は、降雨観測用のセンサとしてマイクロ波放射計（TMI：TRMM Microwave Imager）、可視赤外放射計（VIRS：Visible Infrared Scanner）ならびにわが国が世界で初めて開発した衛星搭載用降雨レーダPR（Precipitation Radar）を搭載しています。TMIは、米国の軍用気象衛星DMSP搭載のマイクロ波放射計SSM/Iの流れを汲む機械的走査型のマイクロ波放射計です。観

測周波数は、10.65、19.35、21.3、37、85.5 GHzの5周波数を持ち、21.3GHz以外は、垂直偏波と水平偏波の受信ができる9チャンネルの全電力タイプの受信機から構成されます。入射角49°の円錐状機械的走査を行い、走査幅は760 kmです。水平距離分解能は、6~50 kmです。海上の降雨観測には、主に低い周波数帯による降雨からの放射の観測データが用いられ、陸上の降雨観測には高い周波数帯による降雨上空の雪氷の散乱の観測データが利用されます。VIRSは、観測波長が0.63、1.61、3.75、10.8、12 μmの5波長であり、走査幅720 kmのクロストラック（衛星進行方向と直角）走査を行い、水平距離分解能は2 kmです。可視から赤外までの5つの波長の放射を受信し、雲画像を取得します。降雨レーダは、雨滴によるレーダ送信電波の散乱電力を受信して、降雨強度を推定します。降雨レーダは、パルスレーダであり、レンジ方向の分解能を持ちます。これによって降雨の三次元的構造を観測することが可能であり、これまで観測が困難であった台風やハリケーンの内部構造を観測することに成功してきました。また、エルニーニョの時期と通常の時節とは、降雨の全世界的な分布が大きく異なることを明確に示すことに成功しました。また、TRMM衛星は、この他に、雲及び地球放射エネルギー観測装置（CERES：Clouds and the Earth's Radiant Energy System）と雷観測装置（LIS：Lightning Imaging Sensor）と呼ばれるセンサを搭載しています。CERESは、可視から赤外までの広いスペクトル帯の雲および地球表面からの放射を受信します。LISは、雷の放電頻度の地球規模での分布を測定します。TRMM衛星の設計は、3年でしたが、1997年11月28日の打ち上げ以来、設計寿命を遥かに超えた現在に至るまで、16年以上も降雨データを収集しつづけています。この間、CERES以外のセンサは、不具合なく動作しデータの収集を続けています。降雨レーダについては、2009年5月29日~6月18日の期間に異常が発生し運用を一時停止しましたが、周波数変換とシステム制御・データ処理を行っている装置を冗長系へと切り替えた結果、復旧しその後は正常に観測を続けています。また、衛星の本体であるバス機器も太陽電池パドルの駆動系に劣化が見られる以外は順調に動作しています。TRMM衛星は、軌道制御用の残燃料が残り僅かになって来ましたので2016年頃までの運用が期待されています¹²⁾。

4 TRMM降雨レーダデータ解析処理用アルゴリズムの研究開発

衛星搭載用の世界初の降雨レーダは、通信総合研究所におけるBBM開発と機能確認実験の後、宇宙開発事業

団のプロジェクトとなり、我が国で開発されることになりました。降雨レーダが直接観測する物理量は、降雨減衰の影響を含んだ降雨からの散乱因子です。降雨散乱因子から降雨強度を算出するには、アルゴリズムが必要不可欠になります。我が国が提供するセンサで取得するデータを処理解析して全世界のユーザに提供するの、我が国の義務です。このことは、最近の我が国の衛星搭載地球観測センサの開発では、当然のことと考えられるようになって来ました。米国においては、昔から衛星データのユーザである科学者がミッション提案をしてきたわけですから、当然提案する研究者は、取得後のデータ解析についても造詣があるのが普通の姿であったわけです。TRMMについても米国側は、そのデータ解析アルゴリズムについては衛星を打ち上げて生データが出てくる前から用意しておくべきことと考えていました。当時は、我が国では残念ながらそのための実施体制が取られていませんでした。私も、航空機搭載雨域散乱計のデータ解析において降雨減衰補正の問題が難しく、減衰が大きいときには、通常用いられるヒツチフェルド・ボルダン (Hitschfeld-Bordan) 法が発散してしまうので、何かいい方法はないかと考えていました。海面エコーの降雨減衰を一つの制限条件に加えて発散を抑えるという方法は試みていましたが、アルゴリズムを導くところまでは進んでいませんでした。TRMM 降雨レーダの周波数は13.8 GHz ですから、降雨減衰の影響は無視できません。降雨レーダの開発プロジェクトは開発予算額から考えてもいずれは宇宙開発事業団に移行することはわかっていましたので、TRMM 降雨レーダアルゴリズムについては、通信総合研究所で開発したいと密かに考えていました。この様な中で1990年6月にNASAは、TRMM サイエンスチームを組織するための研究公募 (NRA-90-OSSA-15) を発行しました。この公募の大きな目的の一つは、TRMM 搭載の降雨観測センサごとのデータ処理解析アルゴリズムを開発することでした。NASAは通常米国国内の研究者に研究費の支援をする方法としてこのような研究公募を発行します。国外の研究者には研究費は支給されません。しかし、NASAは、全世界に向かって応募を solicit (懇願) していました。誰でも意欲があれば応募できたのです。NRA (NASA Research Announcement) は明確に降雨レーダアルゴリズム開発を重要な公募の目的としていました。NRAには、NASAは降雨レーダチームを作る、このために降雨レーダチームリーダーをチームメンバーとは独立して公募すると書かれていました。NASAに一步先んじられたと思いました。彼等の衛星データを利用した科学研究の経

験とポテンシャルの差でしょうか？しかし、科学研究はTRMM計画において日米対等でしたから、この際NASAの優れた研究者を巻き込んで日米で協力してアルゴリズムを開発するのが筋道と考えて降雨レーダチームリーダーの公募に応募することにしました。プロポーザルの書き方については、畚野室長時代にスペースシャトル搭載合成開口レーダSIR-B実験に応募した経験がありましたので、ある程度は分かっていました。結局、私がTRMM降雨レーダチームのリーダーに応募し、同じ研究室の古津年章主任研究官が、チームメンバーに応募しました。1990年10月の締め切りぎりぎりまでかかってプロポーザルを書き上げてNASA本部に郵送しました。あまり英語に自信はありませんでしたが、NASAは専門家によるPeer Reviewを割りとは公平にするので可能性は少しはあるかなと思っていました。結果的には、1991年2月に選考結果が届いて、私は、TRMM降雨レーダチームのリーダーに、古津氏はTRMM降雨レーダチームのメンバーに選ばれました。他の降雨レーダチームメンバーは、NASA/GSFCのボブ・メネギーニ博士、ジェット推進研究所 (JPL) のイーストウッド・イム (E. Im) 博士、NASA/GSFCを退職したコンサルタントのアトラス博士でした。マイクロ波放射計のチームリーダーは、NASA/GSFCのトム・ウィルハイト博士が選ばれました。1991年の5月に第一回のTRMMサイエンスチーム会合が米国メリーランド大学で開催され、降雨レーダチームは活動を開始しました。その後、NASAと宇宙開発事業団の共同の研究公募 (NRA-94-MTPE-01/JRA-93-002) が1993年に発行されました。この研究公募によって、日本側の降雨レーダチームと米国側の降雨レーダチームの両方のチームリーダーを私が担当することになりました。日本側の降雨レーダチームに北海道東海大学の阿波加純氏、通信総合研究所の熊谷博氏、井口俊夫氏が加わることになり、アルゴリズムの骨格も出来始めました。降雨レーダアルゴリズムは、この後、打ち上げ後も含めて何回も改定作業を繰り返します。私は、2005年1月に発行されたVersion 6まではチームリーダーを務めたのですが、2011年6月にVersion 7を作成する最終段階で病気のためにリタイアし、情報通信研究機構 (郵政省通信総合研究所は、行政改革の結果2004年4月に独立行政法人 情報通信研究機構として発足) の井口俊夫氏が降雨レーダチームリーダーを引き受けてくれることになりました。

現在のTRMM降雨レーダアルゴリズムについて以下紹介します^{12), 13)}。

アルゴリズム及びそのプロダクトは、処理のレベルに

応じて、Level 1、2、3と分類されます。Level 1、2は、各瞬時視野方向のデータです。Level 1は、レーダ固有の工学値 (受信電力値、ノイズレベル) 及び降雨減衰を含んだレーダ反射因子を与えます。Level 2は、降雨強度、地表面の散乱係数 σ^0 、及び降雨に関する定性的な情報 (ブライトバンドの有無、降雨タイプの分類) を与えます。13.8 GHz の周波数は、降雨減衰の影響を受けるため、降雨減衰の補正を行ったレーダ反射因子および降雨強度を算出する必要があるため、このための特別のアルゴリズムが整備されています。Level 3は、Level 2のプロダクトを時間的、空間的に平均し、緯度経度 $5^\circ \times 5^\circ$ または緯度経度 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の各格子における降雨パラメータの月平均値を算出します。代表例は、月平均降雨強度です。図5に、PR アルゴリズムシステムのフローならびに相互のアルゴリズムの入出力関係を示します。また、各アルゴリズムの名称およびプロダクトを表2に示します^{12)、13)}。

1B21は、レーダエコーのデジタル値を工学値に変

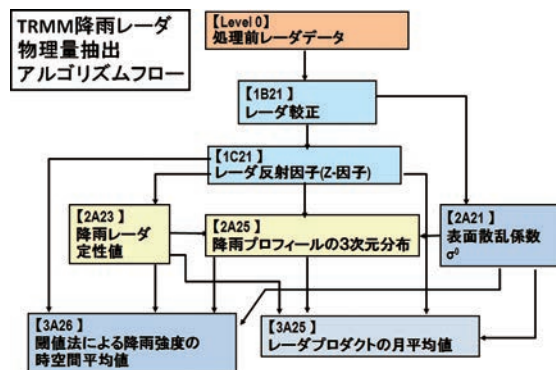


図5 TRMM 降雨レーダアルゴリズムフロー^{12)、13)}

表2 TRMM 降雨レーダ標準アルゴリズム^{12)、13)}

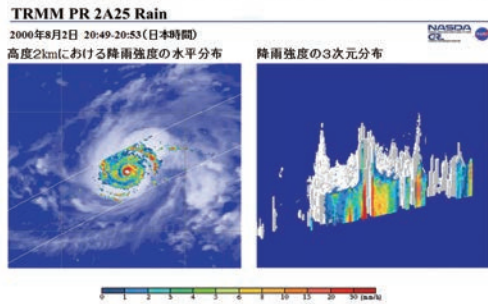
プロダクト番号	名称	プロダクト
1B21	PR calibration レーダ校正	全受信電力、雑音電力、降雨の有無の判定、クラッタ汚染フラグ
1C21	PR reflectivities レーダ反射因子	降雨減衰補正なしのレーダ反射因子 Z_m のプロフィール
2A21	Surface scattering coefficient σ^0 表面散乱係数 σ^0	σ^0 の経路積分減衰量 (PIA) (降雨時) 及びその信頼性。 σ^0 のデータベース (海陸、無降雨時)
2A23	PR qualitative 降雨レーダ定性値	ブライトバンドの検出、ブライトバンドの高さ、強さ、厚さ、背の低い孤立した雨の検出、降雨タイプ分類、降雨の有無の判定フラグの出力、雨の頂の高さの出力。
2A25	3-D PR profile 降雨プロファイルの3次元分布	降雨減衰補正したレーダ反射因子、降雨強度のレンジプロフィール、見積もられた表面降雨強度、二つの高度 (2、4 km) 間の平均降雨強度
3A25	レーダプロダクトの月平均値	1C21、2A21、2A23、2A25 プロダクトの緯度経度 $5^\circ \times 5^\circ$ または $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ セルごとの月平均値
3A26	閾値法による降雨強度の時空間平均値	閾値法を用いた降雨強度の $5^\circ \times 5^\circ \times 1$ ヶ月の時空間平均値

換し、レーダ受信電力値 (信号+雑音) および雑音値 (ノイズレベル) を与えます。また、受信電力の大きさとあらかじめ定められた閾値を比較して降雨の有無を判定します。1C21は、降雨減衰の影響を含んだレーダ反射因子のレンジプロフィールを与えます。2A21は、降雨域におけるパス積分減衰値 (PIA) 及びその信頼度の値を与えます。また、2A21は無降雨時においては、地表面の散乱係数 σ^0 の値を算出します。PIA は、2A25において表面参照法 (SRT) を用いて降雨強度を算出するとき用いられます。無降雨時の散乱係数 σ^0 は、PIA 算出の基準として用いられます。2A23は、ブライトバンドの有無を判定し、ブライトバンドがあるときはその高さ、厚さ、レーダ反射因子を求めます。降雨タイプは、レーダ反射因子 Z の鉛直分布および水平分布を考慮して、層状性降雨、対流性降雨、およびその他の降雨に分類されます。ブライトバンドのあるときは、層状性降雨と分類しています。また、孤立した背の低い雨は、対流性の降雨と分類しています。2A25は、降雨減衰補正を施したレーダ反射因子 Z を推定し、その値から妥当と考えられる $Z-R$ 関係を用いて降雨強度 R に変換するという方針を取っています。3A25は、1C21、2A21、2A23、2A25の緯度経度 $5^\circ \times 5^\circ$ または、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の領域における月毎の統計値 (度数、平均値、標準偏差、ヒストグラム、相関係数) を計算します。この中で特に重要なものは、緯度経度 $5^\circ \times 5^\circ$ の領域の月平均降雨強度です。3A26は、多重閾値法という統計的手法を用いて、降雨強度分布を対数正規分布と仮定したときの緯度経度 $5^\circ \times 5^\circ$ の領域の月平均降雨強度を3A25とは独立に算出します。

アルゴリズム 2A25を用いて、TRMM 降雨レーダによって観測された海上の台風の中の降雨強度分布の水平分布、鉛直分布が始めて得られました。図6は、この例を示します¹⁴⁾。

2000年8月2日に観測された台風8号の眼の上をTRMM衛星が丁度飛行しています。左図は、高度2 kmにおける降雨強度分布が背景のひまわりの赤外雲画像に重ね合わせて表示されています。TRMM 降雨レーダの走査幅215 kmが白い二本の線で示されています。TRMM 降雨レーダは広い範囲は走査できませんが、可視・赤外画像では得られない雲の下の降雨域を明瞭に捉えています。台風の目を囲んで降雨強度が30 mm/h以上の領域が観測されています。右図は、台風の目を含む鉛直面内の降雨強度の鉛直分布を示しています。図7は、3A25によって求められた月平均降雨強度分布図です¹⁴⁾。エルニーニョ期 (上図: 1998年1月) とラニーニャ期 (下図: 1999年1月) の高度2 kmに於ける月平均降

TRMM降雨レーダによる台風の3次元観測例



これまでは観測の少なかった、海洋上の降雨の3次元分布の定量的な観測が、降雨レーダにより可能となった。

図6 TRMM 降雨レーダで観測された台風内の降雨の3次元分布 (JAXA 提供)¹⁴⁾

雨強度の分布の比較を示します。ラニーニャ期では、図7の下図に示すように、インドネシア諸島周辺で降雨強度が強く、熱帯収束帯に沿って降雨域が延びており、その下の中部太平洋の赤道域では雨が少ないです。

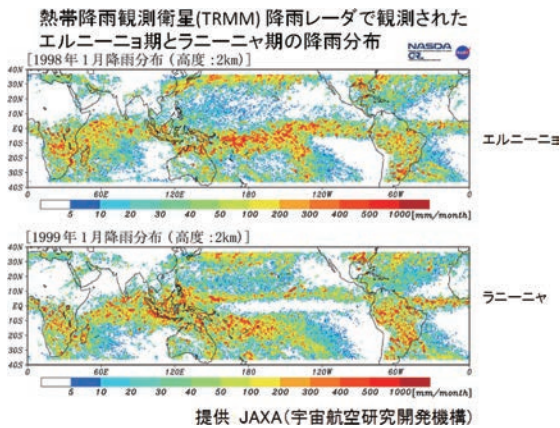


図7 TRMM 降雨レーダで観測されたエルニーニョ期(上図：1998年1月)とラニーニャ期(下図：1999年1月)の降雨強度分布 (JAXA 提供)¹⁴⁾

ラニーニャ期には、東風の貿易風が強くなり、東太平洋のペルー沖から湧きあがる冷たい海水が通常期よりもさらに西の日付変更線あたりまで運ばれて来ますが、通常期との区別がエルニーニョ期ほど明確ではありません。エルニーニョ期に於いては、図7の上図に見られるように、降雨強度の強い領域は中部から東部太平洋にかけて広がっています。この様に、エルニーニョ期に於いては、降雨強度と海水温度の分布が通常期やラニーニャ期と大きく異なります。エルニーニョ現象は、熱帯太平洋を取り巻く大気と海洋の相互作用の結果、降雨、風、海面温度のいずれもが通常期とは違った振る舞いを示すことがTRMM 観測データから明瞭に見られ、これらのデータの解析を通してエルニーニョ現象の原因解明に繋がるの

ではないかと期待されています。

5 衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成^{15), 16)}

地球的規模の降水分布とその変動は、人間活動や社会システムに重要な影響を及ぼします。信頼性のある観測データに基づく地球的規模の高精度高分解能降水マップの作成は、気候変動に伴う降水量変動のモニタリング、水循環モデルの構築、私達の生活に密接にかかわっている水資源管理および農業生産性予測等の社会基盤にとって必要不可欠なものです。地上雨量計による観測は本質的に点観測であり、全地球規模の降水量の時間空間変動を正確に測定することは困難です。このため、衛星からのリモートセンシングがほぼ唯一の手段となります。

2002年11月に、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業チーム型研究(CREST)における研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」の中の研究課題のひとつとして「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」が選ばれました。当時大阪府立大学にいました私が研究代表者を務め、2008年3月までチーム型の研究を実施しました。研究チームのニックネームとして、また開発中のアルゴリズムの名称や作成した全球降水マップの名称としてGSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation)が用いられました。

本研究は、TRMM 降雨レーダを参照しながら、今後益々多くの衛星に搭載することが期待されている数機の衛星搭載マイクロ波放射計の観測データを解析するための信頼できる降水物理モデルに基づいた降水強度推定アルゴリズムを開発し、静止衛星の可視・赤外放射計データをも総合的に利用して全地球の高精度高分解能降水マップを作成することを目的としました。本研究チームには、大阪府立大学、情報通信研究機構、宇宙航空研究開発機構、気象研究所、防災科学技術研究所、鳥根大学、北海道東海大学、東京大学、大阪大学、首都大学東京、科学技術振興機構から約30名が参加しました。

研究チームは、このために、地上レーダ観測グループ、降水物理モデル開発グループ、降水強度推定アルゴリズム開発グループ、及び全球降水マップ作成グループの4グループを組織し、相互に連絡を密にして研究を進めました。図8に研究全体の構成を示します¹⁶⁾。

地上レーダ観測グループでは、高機能・高精度な地上降雨レーダ群を用いて、定常観測と集中観測によって降雨の三次元構造を詳細に観測し、降雨情報(特に、降水粒子の鉛直プロファイル)についてのデータベースを作成し、降水物理モデル開発グループの利用に供しました。

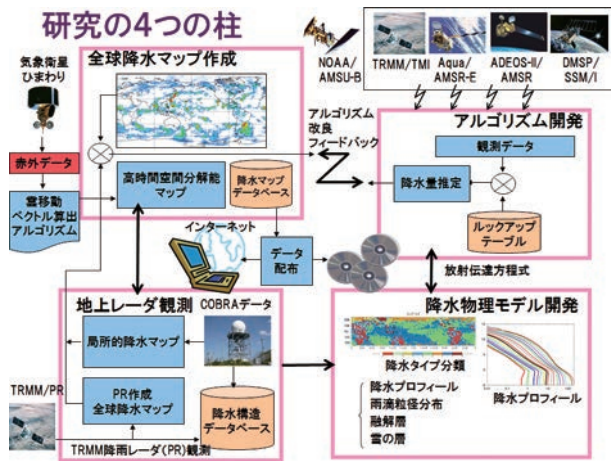


図8 GSMaP 研究全体の構成¹⁶⁾

降水物理モデル開発グループでは、TRMM 降雨レーダデータベースや地上レーダ観測データベース等を用いて、降水を特徴づける物理量である、降水タイプ分類、降水の鉛直プロファイル、雨滴粒径分布、融解層の構造、対流性降雨と層状性降雨の分類などについて、放射伝達方程式に利用可能な降水物理モデルを作成しました。降水強度推定アルゴリズム開発グループでは、降水物理モデルに基づいてマイクロ波放射計アルゴリズムの開発を行いました。同アルゴリズムは、マイクロ波放射計によって観測された各周波数における輝度温度と、降水物理モデルを取り入れた放射伝達方程式によって計算される輝度温度との差が最も小さくなるような降雨量を、最小二乗法により推定するアルゴリズムです。全球降水マップ作成グループは、開発したアルゴリズムを用いて種々の衛星データから降水強度を算出し、それらを合成して全球の降水マップを作成・評価しました。

研究チームは、世界の最先端に行く決定論的手法に基づく独創性のあるわが国初のマイクロ波放射計アルゴリズム GSMaP を開発しました。また、赤外放射計の雲画像データから計算した雲移動ベクトル情報にカルマンフィルタを加えた手法をマイクロ波放射計アルゴリズムが推定した降雨強度分布の補間に用いて、降水推定精度が良く、サンプリング誤差も少ない、マイクロ波放射計と赤外放射計データの両方の長所を融合した、高時間・高空間分解能の全球降水マップを作成するアルゴリズムをも開発しました。

図9に開発した GSMaP マイクロ波放射計アルゴリズムの概要を示します¹⁶⁾。同アルゴリズムは、フォワード計算部分で、降水物理モデルを取り入れた放射伝達方程式に基づいて輝度温度と降水強度の関係を表すルックアップテーブルを作成し、アルゴリズム本体のリトリー

バル部分において、最も良く観測輝度温度データを再現できる降水強度の値を決定します。また、リトリーバル部分では、陸上、海上、ならびに海岸における降雨有無の判定、降雨の非一様性補正などを実施しています。

GSMaPマイクロ波放射計アルゴリズムの概要

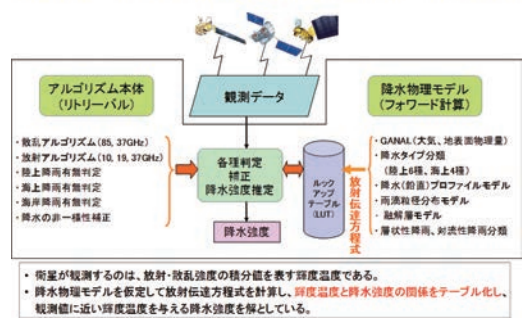


図9 GSMaP マイクロ波放射計アルゴリズムの概要¹⁶⁾

図10に示す様に、GSMaP 降水強度推定アルゴリズムを用いて、衛星搭載の様々なマイクロ波放射計データ（TRMM/TMI、Aqua/AMSR-E、ADEOS-II/AMSR、DMSP-F13、14、15/SSM/I など）を解析します。

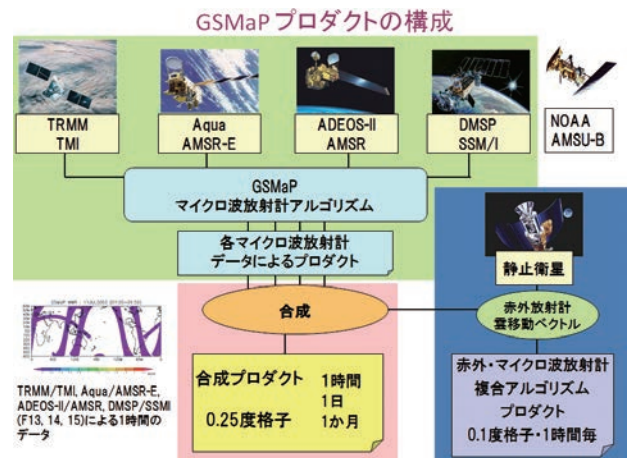


図10 GSMaP アルゴリズム製品の構成

TRMM、Aqua、ADEOS-II、DMSP-F13、14、15 が人工衛星名、スラッシュ（/）の後の TMI、AMSR-E、AMSR、SSM/I が各衛星に搭載されたマイクロ波放射計名です。数機のマイクロ波放射計データのみを用いて全球の降水観測を行う場合には、衛星軌道に基づいて集められる観測データの間に隙間が生じてしまいます。このために、静止衛星の赤外データより雲移動ベクトルを算出し、この移動ベクトルに基づいて数機のマイクロ波放射計データより算出した全球降水分布の隙間の補完を行います。この操作によって、高時間・空間分解能の全

球降水マップを作成します。現在は、緯度経度0.1°×0.1°格子点ごとに1時間分解能の全球降水マップを作成しています。

図11に、GSMaP 全球降水マップの一例として TRMM/TMI, Aqua/AMSR-E, ADEOS-II/AMSR, DMSP-F13, 14, 15/SSM/Iのマイクロ波放射計データのみを合成した1998年～2006年の9年間の月平均降雨量の降水マップを示します¹⁶⁾。緯度経度0.25°×0.25°格子点ごとのデータです。降雨強度の単位は、mm/monthです。

**GSMaP_MWR(気候値・1998-2006平均)
(TMI, AMSR-E, AMSR, SSM/I)**

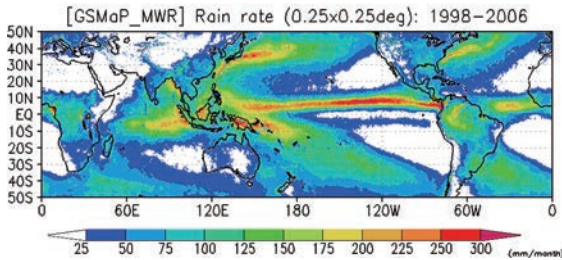


図11 GSMaP 全球降水マップの一例 (GSMaP_MWR)¹⁶⁾

GSMaP アルゴリズムは、その後、宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター (JAXA/EORC) において、準リアルタイム処理ができるように改良されて、図12に示すように、2007年11月からは、GSMaP アルゴリズムの準リアルタイム版として、地球観測衛星の観測データを用いて観測後約4時間の高分解能の世界の雨量分布図「世界の雨分布速報」を作成し、GSMaP_NRT プロダクトとして提供しています。またその画像をインターネット上で公開しています¹⁷⁾。

GSMaP の検証に関しては、CREST 時代ならびにその後の三井物産環境基金 (研究課題名: 衛星データを用いた全

世界の雨分布速報(JAXA/EORC)

世界の降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を利用して提供(2007年11月～)

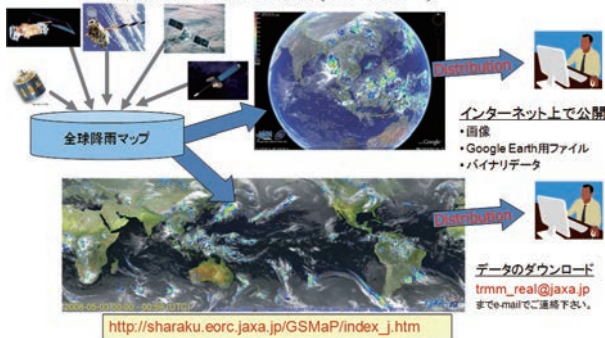


図12 世界の雨分布速報 (JAXA/EORC)(JAXA 提供)

球降水マップの作成と評価 2008年4月～2011年3月、代表者: 重尚一) による支援を受け、人工衛星搭載のマイクロ波放射計ならびに赤外放射計データを用いて高精度高分解能の全球降水マップを作成している世界の研究機関が参加している国際的な研究グループである IPWG (International Precipitation Working Group)/PEHRPP (Program to Evaluate High Resolution Precipitation Products) にわが国を代表して参加し、レーダー・アメダス解析雨量マップを用いて、日本周辺の GSMaP ならびに NASA、米国海洋大気庁 (NOAA) 等の各国研究グループ作成の高時間・高空間降水マップの検証を実施しました。この検証に関わる研究は、2011年4月以降は、JAXA/EORC の降水観測ミッション (PMM: Precipitation Measuring Mission) サイエンスチームの下に移行しています¹⁸⁾。

図13に示すのは、GSMaP の日本周辺の降雨分布図 (左図) と検証・評価用の地上レーダー・アメダス解析雨量の図 (右図) です。この例は、2005年7月8日のもので、右図の地上データを真値と考えたとき、左図の衛星データから作成された GSMaP は、相関係数0.881と比較的高い値を示しています。

**レーダー・アメダス解析雨量図による検証例2005年
7月8日: IPWG/PEHRPPへの貢献**

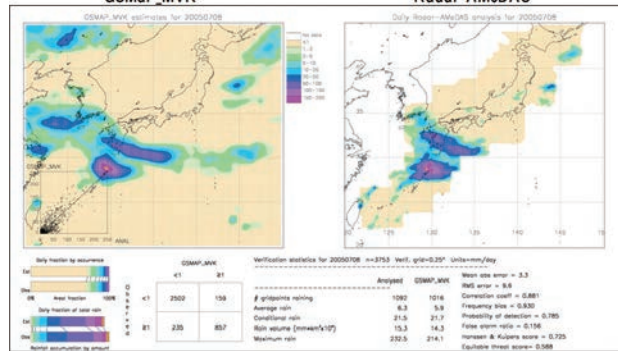


図13 日本周辺の降水マップのレーダアメダス解析雨量による検証の例 (8 July 2005)

東南アジアの開発途上国を中心とした世界の国々の洪水の予警報のために GSMaP が利用されている例として、国土交通省が提唱し JAXA が協力している、国際洪水ネットワーク (IFNet) の開発した GFAS (Global Flood Alert System: 全球洪水予警報システム) があります。GFAS は、将来の全球降水観測計画 (GPM: Global Precipitation Measurement) 衛星を念頭に入れ、人工衛星による降水データに基づき洪水が発生する可能性が高い地域を予想し、被害が及ぶ可能性があると思われる世界各国の登録機関・ユーザーに向けて情報を提供

しているシステムです。

2008年3月のCRESTの終了後は、GSMaPの活動はGPM計画におけるJAXA/EORCのPMMサイエンスチームの中で実施されています。CREST時代に開発されたGSMaPアルゴリズムの様々な観点からの改良を目的とし、GPMプロダクトとして全球降水マップを作成します。

6 TRMM 降雨レーダで観測した全地球の降雨量の最近のトレンド

2008年4月に大阪府立大学から鳥取環境大学に移りました。研究については、科学研究費基盤研究(C)2007年度～2008年度「新しい衛星搭載複合型降雨観測システムの開発に関する研究」（課題番号：19540466）、2010年度～2012年度「次世代の衛星搭載複合型マルチパラメータ降水観測システムの開発に関する研究」（課題番号：22540453）の研究課題を研究代表者として、大阪府立大学、京都大学の共同研究者と一緒に研究しました。宇宙航空研究開発機構からの受託研究「TRMM 降雨レーダ標準アルゴリズムの高度化についての検討」については、2011年度に病気をしましたので、2010年度で終了しました。

鳥取環境大学に移ってからは、学部学生の卒論を見ることになりましたので、「TRMMで観測した全世界の降雨のトレンドについての研究」を自分の研究テーマ兼学部学生の卒論のテーマとして取り上げることにしました。地球の温暖化が進む中で、全地球の降雨量の場所的、時間的変化が問題になっています。しかし、地上観測データでは、降雨量の増減トレンドは場所的な変化が大きく、温暖化との関係では全地球的な増減のトレンドは見られない様です。

全地球の平均降雨量が自然の変動を越えて上昇するのは、温度シグナルよりもゆっくり進むことが予測されます。一方では、世界の多くの地域において日降水量のみた大雨現象の増加傾向が報告されています。地球的規模の降雨量の変化は100年規模の現象であり、衛星による10年程度の観測データの変化からその傾向について述べるのは尚早ですが、TRMMは、地上観測では困難な海上の雨の観測が可能ですし、10年以上の観測データの蓄積もあることから調べてみることにしました。実際の衛星観測データに触れることは、環境政策学科、環境マネジメント学科の学生の卒業研究のテーマとしてもふさわしいのではないかと考え、TRMM搭載降雨レーダの観測データを利用することにしました。レベル3の月平均値のデータが取り付きやすいので、学部生でも使い易

いエクセルを使ってデータ処理をすることにしました。その一部をご紹介します。

TRMM 降雨レーダで観測された降雨量を元に全球（緯度±37°の範囲）の降雨量の10年程度のトレンドを調べました。使用したデータは、TRMM 3A25データの緯度×経度が0.5°×0.5°のセルの月平均降雨量です。最初に日本の30都市における地上雨量計との比較について報告します¹⁹⁾。

TRMM 降雨レーダデータと地上雨量計の比較を行うために日本の30都市（千葉・東京・横浜・静岡・名古屋・津・彦根・京都・大阪・和歌山・姫路・徳島・高松・岡山・福山・松山・呉・福井・敦賀・豊岡・鳥取・松江・境港・浜田・福岡・延岡・大分・鹿児島・那覇・与那国島）における1997年12月から2010年2月の期間の地上測定月降雨量とTRMM 降雨レーダが観測した月平均雨量の散布図を図14に示します¹⁹⁾。

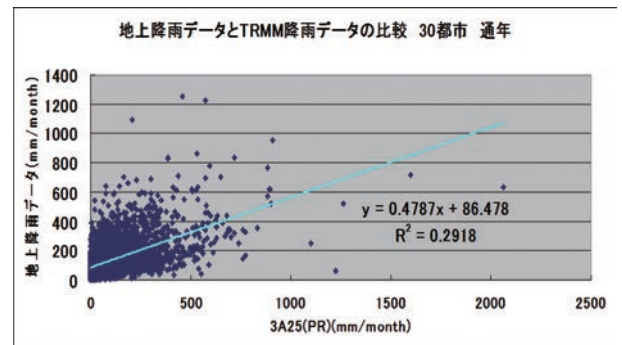


図14 日本の30都市における地上雨量計とTRMM/PRが観測した月平均降雨量の比較（1997年12月～2010年2月）¹⁹⁾

地上測定月雨量は、気象庁のHome Pageの雨量データを用います。TRMM 降雨レーダが観測した月平均雨量は、TRMM 3A25データにおいて各都市の緯度、経度が含まれる0.5°×0.5°のセルのデータを用います。両者の相関係数は、0.54であり、Bias誤差は、-20.4%であり、TRMM 降雨レーダが観測した月平均降雨量は、地上雨量計に比べて降雨強度を過小評価する傾向があることが分かります。これは、降雨が時間的、空間的に変動が大きいため、TRMM 降雨レーダ1台のみの観測によるサンプリング誤差等の影響と考えられます。表3は、1997年12月から2010年2月の期間において、日本の30都市で地上雨量計が測定した月降雨量とTRMM 降雨レーダが観測した月平均雨量の散布図を元に計算した相関係数の値とバイアス誤差（%）を示します¹⁹⁾。

高松、岡山、福山、松山等の瀬戸内側の都市が、0.65程度の概して大きな相関係数と数%程度の小さなバイアス

表3 日本の30都市で地上雨量計が測定した月降雨量と TRMM 降雨レーダが観測した月平均雨量の相関係数の値とバイアス誤差 (%)¹⁹⁾

都市名	相関係数	バイアス誤差 (%)	都市名	相関係数	バイアス誤差 (%)
千葉	0.48	-17.5	松山	0.69	-11.9
東京	0.62	-26.4	呉	0.65	-12.6
横浜	0.48	-8.0	福井	0.35	-41.8
静岡	0.58	-19.0	敦賀	0.23	-27.2
名古屋	0.70	-16.0	豊岡	0.40	-29.6
津	0.61	-15.9	鳥取	0.28	-29.5
彦根	0.58	-22.5	松江	0.48	-17.2
京都	0.54	-21.6	境港	0.42	-32.2
大阪	0.50	-9.7	浜田	0.18	-56.7
和歌山	0.57	-16.0	福岡	0.68	-18.8
姫路	0.61	-5.5	延岡	0.53	-12.6
徳島	0.66	-22.7	大分	0.66	-3.1
高松	0.65	2.0	鹿児島	0.60	-1.3
岡山	0.66	5.0	那覇	0.56	-40.5
福山	0.63	-5.6	与那国	0.40	-30.9

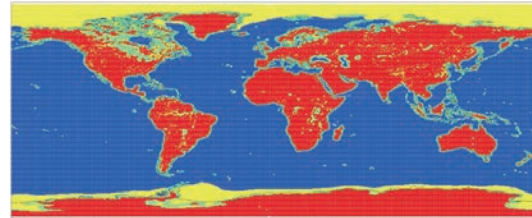
誤差を有する半面、敦賀、鳥取、浜田等の日本海側の都市は、概して小さい相関係数と大きなバイアス誤差を有することがわかります。TRMM/PR は、降雪を観測することができないための影響かもしれないと推測されます。

TRMM 衛星データを用いて地球温暖化が進む中、最近の降雨量の増減のトレンドについて調査することを試みました。TRMM 降雨レーダの感度が同一条件での月平均降雨量のトレンドを調べるために TRMM の軌道高度が350 km から402.5 km に上昇した2001年8月以降の TRMM 降雨レーダデータを用いることにします。データ処理においては、TRMM 降雨レーダが観測している緯度±37°、経度±180°の範囲を、緯度経度0.5°×0.5°のセルに区切り、TRMM 降雨レーダデータ処理アルゴリズム3A25が算出する各セルごとの月平均降雨量を基に、それらを平均して緯度±37°、経度±180°の範囲内の海上、陸上、海岸、その他の領域、ならびに全地球（海上、陸上、海岸、その他の領域のすべてを含む）の各領域の月平均降雨量を算出します。また、月ごとの変動を調べるために、1ヶ月を30日に統一する処理を行いました²⁰⁾。

図15は、全地球の領域を0.5°セルごとに海上、陸上、海岸、その他の領域に分けたものです。図15では青は海上、赤は陸上、緑は海岸、黄色はその他の領域を示します。図15をもとに、全地球、海上、陸上、海岸、その他の領域に分類し、それぞれの領域の平均値を算出します。使用した降雨データの平均個数は、全地球（105101個）、

海上（73259個 = 69.7%）、陸上（23136個 = 22.0%）、海岸（4768個 = 4.5%）、その他の領域（3938個 = 3.7%）でした。

海陸分類図



全地球の領域を0.5度格子ごとに海上、陸上、海岸、その他の領域に分類したものです。図で青は海上、赤は陸上、緑は海岸、黄色はその他の領域を示す。

図15 海陸分類図

2001年8月から2010年10月までの期間における各月の全地球の月平均降雨量を求めてそのトレンドを図16に示します。

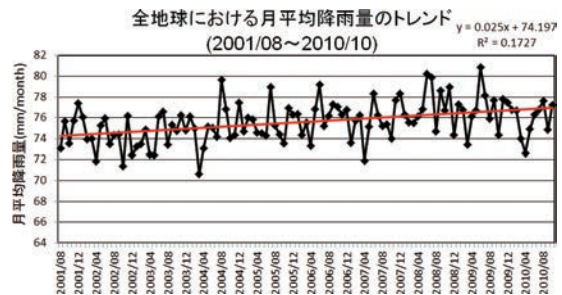


図16 全地球における月平均降雨量のトレンド²⁰⁾

図中の直線は最小二乗法で求められた回帰直線を示します。図16からは全地球の月平均降雨量は増加傾向にあるように見られます。図15において緯度±37°の範囲で、海上と分類された地域のみに対して2001年8月から2010年10月の期間における月平均降雨量を求めてそのトレンドを図17に示します。図17において月ごとの降雨量の変動は大きく、降雨量の増減のトレンドについて判断することは困難です。図15において緯度±37°の範囲で、陸上と分類された地域のみに対して2001年8月から2010年10月の期間における月平均降雨量を求めてそのトレンドを図18に示します。陸上の月平均降雨量は海上の月平均降雨量に比べて約78%程度であることがわかります。図18からは、陸上の月平均降雨量は増加傾向にあるように見られます。図15において緯度±37°の範囲で、海岸と分類された地域のみに対して2001年8月から2010年10月の期間における月平均降雨量を求めてそのトレンドを図19に示します。海岸と分類されたセル数は全体の4.5%

に過ぎないので全地球の月平均降水量に及ぼす影響は小さいですが、図19に示すように海岸地域の月平均降水量は、海上及び陸上の月平均降水量よりも大きく、また海上及び陸上よりも大きな増加傾向が見られます。2001/08～2010/10の期間において、緯度±37°、経度±180°の範囲において0.5°セルごとの TRMM 降雨レーダの観測データに基づく月平均雨量は、全球、陸上、海岸で増加傾向を示し、海上では、はっきりした増加傾向は見られませんでした。

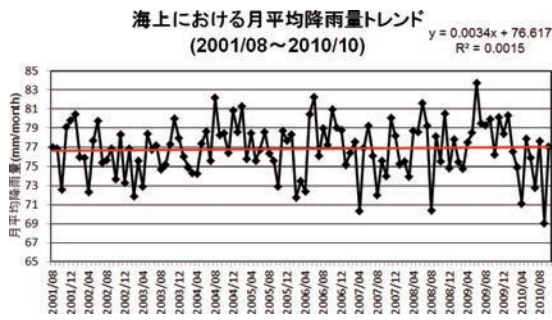


図17 海上における月平均降水量のトレンド²⁰⁾

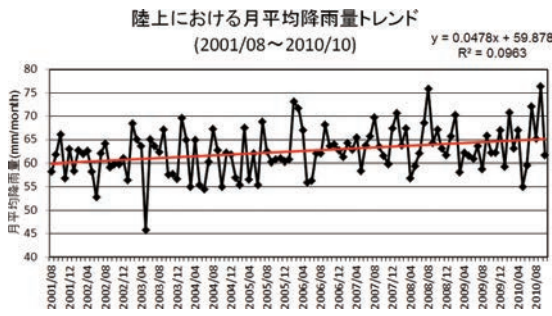


図18 陸上における月平均降雨トレンド²⁰⁾

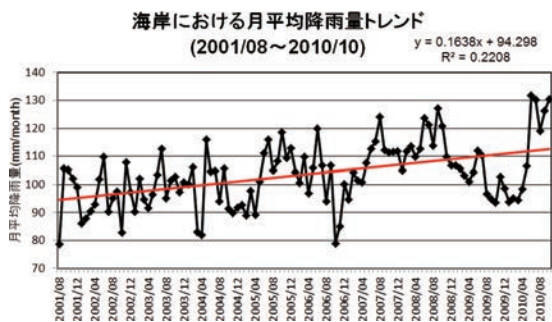


図19 海岸における月平均降水量のトレンド²⁰⁾

7 終わりに

上述したように、初めて外国に行ったのは、意外と遅く32歳のときでした。今は国が無くなってしまったユーゴスラビアのドブロブニク市で1978年に開催された第29回国際宇宙航行連盟の総会で、宇宙からの降雨観測用の降雨レーダのシステム提案について発表するために出張したのです。ドブロブニク市は、アドリア海の真珠と

いわれるとおり、美しい中世の城砦都市で、現在はクロアチアに属します。その後震災の被害を受けましたが、現在は、復興した美しい町に戻ったと聞いています。2011年9月に、ルーマニアのトランシルバニア地方のシビウ市で開催された第6回欧州レーダ気象学と水文学会議に参加しました。シビウ市もイスラム教徒との激戦の遺跡を残す中世ヨーロッパの古い町で、屋根に目がある家が特徴的な落ち着いた町並みを持った素敵な町でした。ここでも、「宇宙機搭載のレーダとマイクロ波放射計複合システムによる降雨観測」、ならびに「TRMMの現状とTRMM降雨レーダアルゴリズム」について発表しました。思うに、降雨レーダ以外のことについてもこれまで研究を続けてきたのですが、30年以上、衛星からの降雨のリモートセンシングの研究を主要な研究テーマとして選び、現在に至るまでも同分野で研究を続け、学生の卒論のテーマにもTRMMのデータ解析を今だに選んでいるというようなことになってしまいました。司馬遼太郎氏の『坂の上の雲』の主人公の一人の「秋山好古」氏は、人間は一生に一事を成せば十分と言っておられるので、なんとなく慰められますが、TRMM衛星を中心とした衛星からのレーダを用いた降雨のリモートセンシングとそのアルゴリズムならびにそれに関する全地球の降雨マップ作成の研究で一生を終わりそうです。TRMM衛星は、1997年11月28日に打ち上げられ、その後も16年以上も降雨観測を続けています。軌道制御用の燃料が尽きる2016年度頃までは寿命が続くと予測されています。2014年2月28日には、TRMMを継承するGPM衛星が打ち上げられました。GPM搭載の13.6 GHzおよび35.5 GHzの二周波降雨レーダの内の35.5 GHzは、TRMM降雨レーダでは観測できなかった弱い雨や雪の検出に有効であり、強い雨の検出が可能な13.6 GHzと同時に観測することによって、熱帯の強い雨から高緯度の弱い降雪までの降水量を高精度で観測することができるようになることが期待されています。GPMの二周波レーダについては、私の次の世代の研究者に任せておけば十分だと思っています。しかし、TRMM衛星については、そのミッションを終了するまでは、その状況を把握し続けたいと思っています。また、長い間の宿題でしたTRMMの歴史を纏める作業も宇宙航空研究開発機構や情報通信研究機構の支援を受けて続けたいと思っています。

謝辞

図面の提供を頂いた宇宙航空研究開発機構と情報通信研究機構の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K.Okamoto, S.Miyazaki, and T.Ishida, (1979) "Remote sensing of precipitation by a satellite-borne microwave remote sensor" *Acta Astronautica* Vol.6, No.9, pp. 1043-1060
- 2) 岡本謙一、尾島武之、増子治信、吉門信、猪股英行、畚野信義 (1982) 「航空機搭載用マイクロ波雨域散乱計／放射計システムによる降雨のリモートセンシング」『日本リモートセンシング学会誌』Vol. 2, No. 3, pp. 31-51
- 3) S.Yoshikado, K.Okamoto, H.Masuko, N.Fugono, K.Nakamura, J.Awaka, and H.Inomata, (1981) "Simultaneous Observation of Precipitation by the Airborne Microwave Rain-Scatterometer/Radiometer and the Ground-based Weather Radar System", Preprint Volume of the *20-th Conference on Radar Meteorology*, Boston Mass., AMS, pp. 287-294
- 4) K.Okamoto, S.Yoshikado, H.Masuko, T.Ojima and N.Fugono, K.Nakamura, J.Awaka, and H.Inomata, (1982) "Airborne microwave rain-scatterometer/radiometer" *Int. J.Remote Sensing*, Vol.3, No. 3, pp. 277-294
- 5) 岡本謙一、宮崎茂 (1990) 「通信総合研究所における宇宙からの降雨観測のための研究」『通信総合研究所季報』Vol. 36, Special Issue No. 11, pp. 11-33
- 6) J.S. Theon, (2003) "My View of the Early History of TRMM and Dr. Joanne Simpson's Key Role in Winning Mission Approval", *Meteorological Monographs*, AMS, Vol. 29, No. 51, pp. 175-179.
- 7) NASDA パンフレット (1995) 『熱帯降雨観測衛星 (TRMM)』4p. MI950810T
- 8) K.Okamoto, J.Awaka, T.Kozu, K.Nakamura, T.Ihara, and T.Manabe, (1988) "Feasibility Study of Rain Radar for the Tropical Rainfall Measuring Mission", *J. of the Communications Research Laboratory*, Vol.35, No.145, pp. 109-208
- 9) 阿波加純、岡本謙一、井原俊夫、中村健治、古津年章、真鍋武嗣、R.Meneghini, and D.Atlas, (1990) 「6.4 降雨レーダ」『通信総合研究所季報』Vol.36, Special Issue No.11, pp. 93-106
- 10) 岡本謙一 (1994) 「熱帯降雨観測衛星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 計画における降水測定システムの研究開発—1993年度堀内基金奨励賞受賞記念講演」『天気』Vol.41, No.7, pp. 361-378
- 11) 岡本謙一、阿波加純、古津年章、井原俊夫、真鍋武嗣、中村健治 (1995) 「熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載降雨レーダのシステム検討」『日本リモートセンシング学会誌』Vol. 15, No.4, pp. 66-80
- 12) 岡本謙一、重尚一 (2008) 「熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダの研究開発とその観測成果」『電子情報通信学会論文誌 B』Vol. J91-B, No 7, pp. 723-733
- 13) 岡本謙一、石戸喜夫、R.Meneghini, (1998) 「TRMM 降雨レーダアルゴリズム」『日本リモートセンシング学会誌』Vol. 18, No.5, pp. 40-51
- 14) NASDA パンフレット (2003) 『熱帯降雨観測衛星 (TRMM)』4p
- 15) K.Okamoto, T.Iguchi, N.Takahashi, K.Iwanami and T.Ushio, (2005) The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) project, *25th IGARSS Proceedings*, pp. 3414-3416
- 16) 戦略的創造研究推進事業チーム型研究 CREST 研究領域「水の循環系モデリングと利用システム」研究課題「衛星による高精度高分解能全球降水マップの作成」(平成14年度採択、平成19年度研究終了報告書 研究代表者：岡本謙一) 115p
- 17) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 地球観測研究センター (EORC)、世界の雨分布速報 (URL：2014年3月3日現在) http://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/index_j.htm
- 18) 京都大学 理学研究科 地球惑星科学専攻 地球物理学教室 物理気候学研究室 Validation/intercomparison of satellite precipitation estimates over Japan (URL：2014年3月3日現在) http://www-ipwg.kugi.kyoto-u.ac.jp/IPWG/sat_val_Japan.html
- 19) 岡本謙一、椿和也、国好美波、杉原広晃 (2012) 「TRMM 降雨レーダで観測した全球の降雨量のトレンド」『日本リモートセンシング学会 第52回学術講演会論文集』pp. 303-304
- 20) 岡本謙一、小林裕典 (2013) 「熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダで観測した全地球の降雨量の最近のトレンド」『第57回宇宙科学技術連合講演会講演集 1C16, JSASS-2013-4053』

(2014年3月3日)