

2002 年武田賞 選考理由書

—環境系応用分野における テクノアントレプレナーシップに富む工学知の創造と活用—

授賞業績:地球環境モニタリングのための人工衛星搭載マイクロ波レーダの開発

受賞者: Elachi, Charles (ジェット推進研究所 兼 カリフォルニア工科大学)

「人工衛星搭載マイクロ波レーダによる地球環境モニタリング技術の開拓」

畚野 信義 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所)

岡本 謙一 (大阪府立大学大学院)

「人工衛星搭載マイクロ波降雨レーダの開発」

〈アルファベット順に記載〉

賞金の2分の1を Elachi に、2分の1を等分して畚野、岡本に贈る。

<選考理由>

この業績は、地球規模での環境問題や水資源問題に取り組むために、地表面や大気、海洋における様々な物理、化学、生物学的な変数(パラメータ)の空間分布を、地球的規模で昼夜の別なく、天候に左右されず、高精度で計測するための人工衛星に搭載する能動型マイクロ波センサ、すなわちレーダを開発したことである。

Elachi、および畚野と岡本は、人工衛星を利用したレーダによるリモートセンシング技術に着目し、植生分布、海上風分布や降雨分布など、地球環境問題や水資源問題の対応に不可欠な変数を全地球規模で計測する技術を確立した。この技術は熱帯域や極域など雲に覆われることの多い地域の定常的な計測を実現し、降雨、風、土壌水分、地表面起伏など、可視光領域、熱赤外領域の電磁波では計測できない変数を得ることを可能とした。これらの業績には、いち早く環境や水資源問題の重要性を認識し、問題解決に向けて地球規模でのモニタリングシステムを開発した先見性において特筆すべきものがある。

Elachiは米国ジェット推進研究所において、1978年3種類のレーダ(合成開口レーダ、海面散乱計および海面高度計)を搭載した人工衛星 SEASAT からの高解像度地球環境観測で中心的な役割を果たし、世界で初めての成功に導いた。また1981年から1994年にわたる一連のスペースシャトル搭載映像レーダの開発に指導的役割を果たした。このプロジェクトでマイクロ波と対象物の相互作用に関する研究を幅広く進め、地球表面の多種類の環境データを観

測する技術を確立した。さらに、Elachi は、レーダに関する基礎科学と技術的基盤を確立し、衛星搭載に適したレーダの設計を先導した。また、プロジェクトの提案およびその推進において卓越したリーダーシップを発揮し、衛星搭載レーダによる地球環境観測プロジェクトの成功に不可欠な役割を担った。

畚野と岡本は、通信総合研究所において、衛星通信における電波の減衰の研究から着想し、大気大循環のエネルギー源および水資源としての雨を正確に観測すべく研究に着手した。1980 年、航空機搭載二周波レーダによる降雨観測に世界で初めて成功し、引き続き 1986 年、日米共同の熱帯降雨観測衛星 (TRMM) プロジェクトを発足させた。そこで、彼らは TRMM 衛星の中核となる世界初の衛星搭載用の降雨レーダを開発し、TRMM 衛星は 1997 年に打ち上げられた。降雨レーダはそれまで情報がきわめて少なかった熱帯地方の降雨のデータを、均質かつ正確に観測し、また台風の三次元降雨強度分布や、エルニーニョ発生時の異常な降雨現象も、初めて正確に観測した。

Elachi、および畚野と岡本の、卓越した工学的創造性とリーダーシップによって構築された、レーダによる地球環境観測システムは、均質かつ精密な地球環境データを提供している。このデータの活用により、将来にわたって人類の生存と生活の豊かさを確かなものとする大きな一歩を踏み出したといつてよい。工学的創造性に富むこの業績に武田賞を贈る。

＜業績とその創造性＞

1. はじめに

地球環境の変化を観測し予測することは、正確で詳細な気象予測などのように、人々の生活に大きな価値をもたらす。また、大気や水循環などを通して相互に複雑に結びついている地球規模の環境変化機構を正しく理解することは、環境問題に対する対策を立てるためにも大切である。

能動型マイクロ波センサ(レーダ)を用いた人工衛星からのリモートセンシング技術は、地球環境を取り巻く諸現象のように、現象自身の規模が大きい場合や、熱帯雨林や外洋などのように観測点が非常に少ない場合に有効な計測手段であり、短時間で広い範囲を、天候、昼夜に関係なく同じ精度で精密に観測できる¹⁾。現在、地球環境観測に活躍している人工衛星搭載レーダには、次の4種類がある。

(i) 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar, SAR)

(ii) 海面散乱計 (Ocean Scatterometer, SCAT)

(iii) 海面高度計 (Altimeter, ALT)

(iv) 降雨レーダ (Precipitation Radar, PR)

(i)～(iii)の三つは米国ジェット推進研究所グループで Charles Elachi が中心となり、(iv)は通信総合研究所で畚野信義と岡本謙一が中心となって開発した。

2. Charles Elachi による人工衛星からのレーダによる地球環境観測分野の開拓

Elachi は、人工衛星搭載レーダによる地球表面を精密に観測する技術の開拓者である。彼の業績は、衛星からの地球観測にレーダシステムのデザインを最適化したこと、および、レーダのデータをもとに地質学、環境科学、海洋学、考古学などを発展させたことにある。レーダの要素技術と地球科学の両方に精通することで、初の衛星搭載映像レーダおよびその後継センサの設計を指導することができた。

レーダで高分解能(解像度)を得るためには、大型アンテナと短いパルス波を用いる必要がある。例えば、9.5GHz の電波で 12,000m の高度から地上にある 1.5m 四方程度の大きさの物体を識別するためには、直径 250m 以上の大型アンテナを必要とする。しかし、合成開口レーダでは、航空機や衛星などの進行を利用し、また、高度な信号処理技術を用いることにより、小型のアンテナでも大型アンテナを用いた場合と同様に、非常に高い分解能を実現し、きわめて鮮明な画像を得ることができる¹⁾。Elachi は上記の合成開口レーダに、マイクロ波の波長や入射角により対象物の反射特性が異なる特性や、垂直偏波と水平偏波で得られる情報が異なる現象を利用するポラリメトリ(偏波分析法)、干渉現象を利用して立体画像を採取する方法などの機能を加えて、精密かつ正確に地球環境データを引き出すレーダシステムを実現した。

1978年6月には、人工衛星SEASATに合成開口レーダを搭載し、レーダによる地球環境観測を世界で初めて実現した²⁾。これは100日間の観測であったが、海洋に関するデータは、それ以前の100年間の船によるデータの量を凌ぐものであった。また、可視光線では捕えられない砂漠に埋もれた灌漑遺跡も発見した³⁾。SEASATには合成開口レーダのほかに、海面散乱計、海面高度計も搭載されており、全球規模の海洋風の風向と風速の情報や、海流、海洋渦、海底構造などの情報をもたらした。この成功により人工衛星搭載レーダによる地球環境観測が大きく前進した。

1981年11月に、スペースシャトル・コロンビアに合成開口レーダであるシャトル映像レーダ-A (SIR-A)が搭載された⁴⁾。Elachiは、複雑な地勢をより正確に観測するために入射角を大きくした。入射角を大きくすると、マイクロ波の後方散乱エネルギーが非常に弱くなるので、技術的に難しい挑戦であった。

1984年10月、スペースシャトル・チャレンジャにシャトル映像レーダ-B(SIR-B)を搭載した。地表への入射角度を可変とし、干渉現象を利用して立体映像を得ることに成功した⁵⁾。

1994年には、4月と10月の2度にわたって、Elachiの最も重要な貢献であるシャトル映像レーダC/XバンドSAR (SIR C/X SAR)が打ち上げられた。3種類の周波数のマイクロ波機器を搭載し、うち二つの機器にはポラリメトリとフェーズドアレイ方式を採用した。これにより地球表面(地表面、海面および極域)付近の広範な観測が可能になった^{6, 7, 8)}(図1)⁹⁾。

Elachiの主導によりこれまでに開発された技術は、これ以降の地球環境観測システムに受け継がれている。

1995年11月に地球環境変化および天然資源観測を目的に打ち上げられた人工衛星RADARSATにも合成開口レーダが搭載されており、降雪量マップ、穀物成長モニタ、石油流出モニタ、森林管理、洪水モニタ、海氷タイプ分類、氷河の動き観測などに活躍している。

1996年8月には、ADEOS(H-IIロケット使用)に搭載されているレーダの一つNSCATは、特に海洋上の風速と風向を測定できるように設計された。氷のない海洋90%以上の領域を空間分解能50kmで、2日毎に測定できるため、船を使って得られる海洋の風に関する情報の100倍の情報が得られた。これにより得られたデータは、地球規模の天気予報と天候に関するモデリングの改善に有効で、エルニーニョ現象の原因解明にも寄与している。

2000年2月には、インタフェロメトリ観測を使った地表面の立体観測を行ない、地球表面の80%におよぶ立体映像を得た。

このように、Elachiの主導によって開発された衛星搭載レーダシステムは研究者たちに新しい手段を提供した。これにより、陸域エコシステム(植生分布、穀物栽培モニタリング、バイオマス評価、沿岸および湿地帯モニタリングなど)、水分(土壌水分、積雪含水量など)、海洋(波浪、海流、海氷分布および分類など)、大陸氷(氷河の流れと消長、氷床変動など)、固体地表面(地震による地殻変動、火山活動、風化、地質図など)、災害監視、古環境など広範囲の環境情報が天候に左右されず昼夜を問わず得られるようになった。

Elachiは、レーダ機器の設計に秀でていただけではなく、科学的な応用についても理解が

深く、衛星搭載レーダの重要性を科学者や政策関係者に強く印象づけ、支持を取り付けることができた。また、彼は多くの科学者や技術者から成るチームを率いてプロジェクトを推進した優れたリーダーであり、多くの宇宙探査プロジェクトを成功させていることが、彼のこの面での卓越した能力を証明している。

3. 畚野と岡本による人工衛星からのレーダによる降雨観測システムの確立

太陽から降り注ぐ膨大な熱を海から水蒸気として吸い上げ、上空で雲や雨滴になった熱帯の雨は大気に熱を与える。この熱が大気を地球全体に循環させ、地球規模の気候に大きな影響を与える。世界の雨の3分の2は熱帯地方に降るといわれているが、熱帯地方のほとんどは海洋や密林で占められており、正確な降雨のデータを得ることはできなかった。気候変動の原因解明や予測には、熱帯域の降雨を正確に測ることが必要である。

気象衛星は可視および赤外センサにより雲の二次元分布を測定し雨量を推定するもので、直接降雨を観測することはできない。受動型マイクロ波センサ SSM/I(Special Sensor Microwave Imager)を搭載した衛星が米国で打ち上げられ、海上の降雨についてある程度定量的な測定が可能になってきたが、分解能が数十 km と粗く、また降雨の高度分布や陸上での定量的な観測ができなかった¹⁰⁾。

畚野と岡本は 1970 年代中頃、衛星放送および衛星通信に対する雨の影響、いわゆる電波障害の研究から着想を得て、衛星搭載用降雨観測レーダの開発に着手した。1979 年、航空機搭載用二周波雨域散乱計／放射計システムを開発した。当時熱帯降雨観測を考えていた NASA は、この成果に注目し、1980 年に共同実験を提案し、1983 年からの 2 度の実験を経て、1986 年日米共同の熱帯降雨観測衛星 (TRMM) プロジェクトが始まった。その中核となる降雨レーダを担当した日本側では、畚野がプロジェクトの推進を、岡本が技術開発を担当した。プロジェクトには中断などの紆余曲折はあったが、1989 年パリサミットで地球環境問題が議論されたことで日米の空気が一変し、開発に拍車がかかった。1997 年世界初の衛星搭載降雨レーダとして、H II ロケットによる種子島からの打ち上げに成功した¹¹⁾。

降雨レーダ開発の主要な技術的ブレークスルーは以下のようであった¹²⁾。

- (i) 通常の地表面および海面からの散乱に比べて極めて弱い降雨散乱を 350km 上空から観測するために、アンテナの送受信信号の低サイドローブ化を実現して、降雨散乱による信号のみを効率よく取り出せるようにし、また、レーダ周波数は通常の 3 倍、14GHz を採用した。
- (ii) 秒速 7km のきわめて高速で飛行する衛星から、地上 215km の幅を隙間なく観測し、かつノイズを減らすために、128 組のエレメントから成るアクティブフェーズドアレイアンテナを採用し、S/N 比をあげるために 13.796GHz および 13.802GHz を利用したアジリティ法を用いた。14GHz という高周波数でアクティブフェーズドアレイアンテナを達成したのはいまだに世界でこの降雨レーダだけである。
- (iii) アクティブフェーズドアレイアンテナを実現するために固体マイクロ波素子を採用し、128 のアンテナエレメントの振幅と位相の安定性を確保した。固体素子 1 台では所要の電力を得る

ことができなかつたが、アンテナを 128 のエレメントで構成するアレイアンテナとし、各エレメントに1台ずつの固体電力増幅器を接続して所要の電力を得た。このように各アンテナエレメントに能動素子が接続された構成のアクティブフェーズドアレイアンテナではきわめて高速かつ複雑なアンテナ走査を達成できる。

この衛星により豪雨、台風などの降雨の精密な三次元構造が数多く観測でき(図 2)、データの精度や均質性は世界の研究者の予想を大きく上回るものであった。データは世界中に公開され、多種多様な研究の進展に役立っている。

降雨レーダの重要な成果の一つは、陸上の降雨も海上と同じように高精度で均一に測定できるようにしたことである。正確なデータが得られたために、熱帯、亜熱帯地域の降雨分布や、降雨の日、年、および長期の変化を記録できるようになった。1998 年 1 月から 2001 年 12 月にわたって熱帯、亜熱帯地域を観測した結果から、一ヶ月毎の雨量分布で整理したデータは、1998 年 5 月頃まで続いていたエルニーニョ発生時と正常時の降雨分布の違いを初めて克明に捕らえた¹³⁾(図 3)。通常年には、東南アジア域に最も多くの雨が降るが、エルニーニョ年には雨の強い領域が東に移動していることがはっきりと捕えられている。また、1 年を通して午前と午後の雨の降りかたが地域によってどう違うかを捉えることもできた¹⁴⁾。また最近、気象庁では降雨データを気象予報に使う検討を始めた¹⁵⁾。

降雨レーダが降雨観測に費やす時間は、飛行時間の 10%程度で、残りの時間は地上を観測している。この利用されていなかった 90%の観測情報から、地球全体の土壌水分分布および地表面が何に覆われているかを解析できる手法を沖 大幹が開発した^{16, 17)}。モザンビークの大水害の状況や、揚子江流域周辺の土壌水分量が水害に先だって増加していたことも捕らえていた。

D. Rosenfeld は、森林火災により発生する煙や砂漠の粉塵といった多くの微細粒子が空中に存在する場合には、通説に反して雨が少なくなるという説を発表していたが、この説が降雨レーダのデータで裏付けられている^{18, 19)}。これは旱魃地域に対する有効な対策につながる。

最近、地球環境の変化を予測する地球シミュレータの分解能が 5km に向上し、降雨レーダの地上分解能 4km と同程度になってきた。正確な降雨レーダのデータが地球シミュレータに使われることで地球温暖化や気候変化の予測モデルの改良や予測の精度向上に役立つ環境も整ってきている²⁰⁾。

衛星搭載降雨レーダを中心とした熱帯降雨観測ミッション (TRMM) が大きな成果をあげたことを受けて、日本、米国を中心に欧州も加わり、後継ミッションとして全球降水観測計画 GPM (Global Precipitation Measurement)が 2007 年打ち上げを目指して計画されている。畚野と岡本らが最初に開発した二周波降雨レーダを中心に据えたコア衛星と 8 基のマイクロ波放射計搭載衛星が連携し、一段と精度の高い観測が期待できるとともに、全球の降雨を 3 時間刻みで観測する計画である²¹⁾。

4. 生活者にとっての価値の創造

Elachi および畚野と岡本の功績によって実現した、レーダを用いた衛星からの地球環境観測システムにより、地球環境の現状とその変化を定量的かつ客観的に知ることができるようになった。また、従来の光学センサや受動型マイクロ波センサによるデータとともに、得られる膨大な観測データはインターネット上で全世界の人々がアクセスできる貴重なデータベースとなっている。多くの科学者や技術者が相互に関係している地球環境変化の機構を解明し、地球環境問題の複雑に関連している原因を着実に明らかにしつつある。また、この膨大な観測データは、気候、水循環、生態系などの変動や地球温暖化を予測する地球シミュレータなどに利用され、シミュレーション技術の進歩にも着実に寄与し始めた。科学的知見の蓄積やシミュレーション技術の進歩は地球環境の保全の実現だけではなく、局地的な災害予測や水資源管理、農業、林業、漁業、工業など種々の応用分野で、実生活に具体的に役立つ可能性を持っている。この業績は将来にわたって人類の生存と生活の豊かさを保障する大きな一歩を踏み出した工学的創造性に富むものである。

参考文献

- 1) 岡本謙一、“地球環境計測、” オーム社(1999).
- 2) Elachi, C., “Spaceborne Imaging Radar: Geologic and Oceanographic Applications,” *Science* **209**, 1073-1082 (1980).
- 3) Engheta, N., and Elachi, C., “Radar Scattering from a Diffuse Vegetation Layer over a Smooth Surface,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **20**, 212-216 (1982).
- 4) Elachi, C., *et al.*, “Spaceborne Radar Subsurface Imaging in Hyperarid Regions,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **22**, 383-388 (1984).
- 5) Elachi, C., *et al.*, “Overview of the Shuttle Imaging Radar-B Preliminary Scientific Results,” *Science* **232**, 1511-1516 (1986).
- 6) <http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/>
- 7) <http://www.jpl.nasa.gov/radar/sircxsar/sirc-pkt.html>
- 8) Evans, D. L., *et al.*, “The Shuttle Imaging Radar-C and X-SAR Mission,” *EOS, Transactions, American Geophysical Union* **74**, 145, 157-158 (1993).
- 9) Evans, D. L., “Space borne Synthetic Aperture Radar: Current Status and Future Directions”, *NASA Technical Memorandum 4679* (NASA, 1995).
- 10) http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/rain_gauge.html
- 11) 畚野信義、“日本リモートセンシング学会誌、” **18**, 1-4(1998).
- 12) Kozu T., *et al.*, “Development of Precipitation Radar Onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **39**, 102-116 (2001).
- 13) http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/gallery/tev2/tev2_high_j/tev2_high_14j.pdf
- 14) <http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/channel/PR-earth/nettai.htm>
- 15) 井口俊夫他、“宇宙から見た雨—熱帯降雨観測衛星 4 年間の軌跡—、” (Japan Advance Plan Co., Inc. 2002).
- 16) <http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/channel/PR-earth/hifuku.htm>
- 17) <http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/channel/PR-earth/moisture.htm>
- 18) Rosenfeld, D., *et al.*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **98**, 5975-5985 (2001).
- 19) Rosenfeld, D., *et al.*, *Geophysical Research Letters* **26**, 3105-3108 (1999).
- 20) http://www.es.jamstec.go.jp/esrdc/jp/plan/G7_6.html
- 21) <http://www.eorc.nasda.go.jp/TRMM/gpm/index.htm>

2002年武田賞
環境系応用分野
受賞者の略歴

Charles Elachi

1968年 グルノーブル大学物理学科卒業
1968年 グルノーブル工科大学工学部卒業
1969年 カリフォルニア工科大学で電気学の理学修士号取得
1971年 カリフォルニア工科大学で電気学の博士号取得
1978年 南カリフォルニア大学で経営管理学修士号取得
1983年 カリフォルニア大学ロサンゼルス校で地質学の修士号取得
1971年 ジェット推進研究所勤務
1994年 ジェット推進研究所宇宙・地球科学プログラム部長
2001年～現在 ジェット推進研究所所長

主な表彰

1968年 グルノーブル工科大学において"Houille Blanche"受賞
1995年 中国科学院 名誉教授
1995年 Nevada Medal
1996年 COSPAR Nordberg Medal
2000年 Dryden Lectureship in Research Award
2002年 Wernher Von Braun Award
その他にも NASA における数多くのメダル、IEEE の各賞などをはじめ、多数の賞に輝いている。

畚野 信義

1959年 京都大学工学部電子工学科卒業
1961年 京都大学大学院修士課程終了(工学研究科電子工学専攻)
1971年 京都大学より博士号取得
1961年 郵政省電波研究所(現 独立行政法人通信総合研究所)入所
1989～1993年 郵政省(現 総務省)通信総合研究所 所長
1993年～現在 東海大学教授、総合科学技術研究所教授
1993～1995年 テキサス A&M 大学 シニアリサーチサイエンティスト 及び NASA/GSFC 客員研究員
1994～1996年 メリーランド大学 客員教授
1995～1996年 東京大学気候システム研究センター 客員教授

1997～2001年 財団法人テレコム先端技術支援センター 専務理事
2001年 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 代表取締役副社長
2001年～現在 同 代表取締役社長

主な表彰

1983年 科学技術庁長官賞(研究功績賞)
1990年 NASA Group Achievement Medal
1998年 NASA Distinguished Public Service Medal
2000年 紫綬褒章

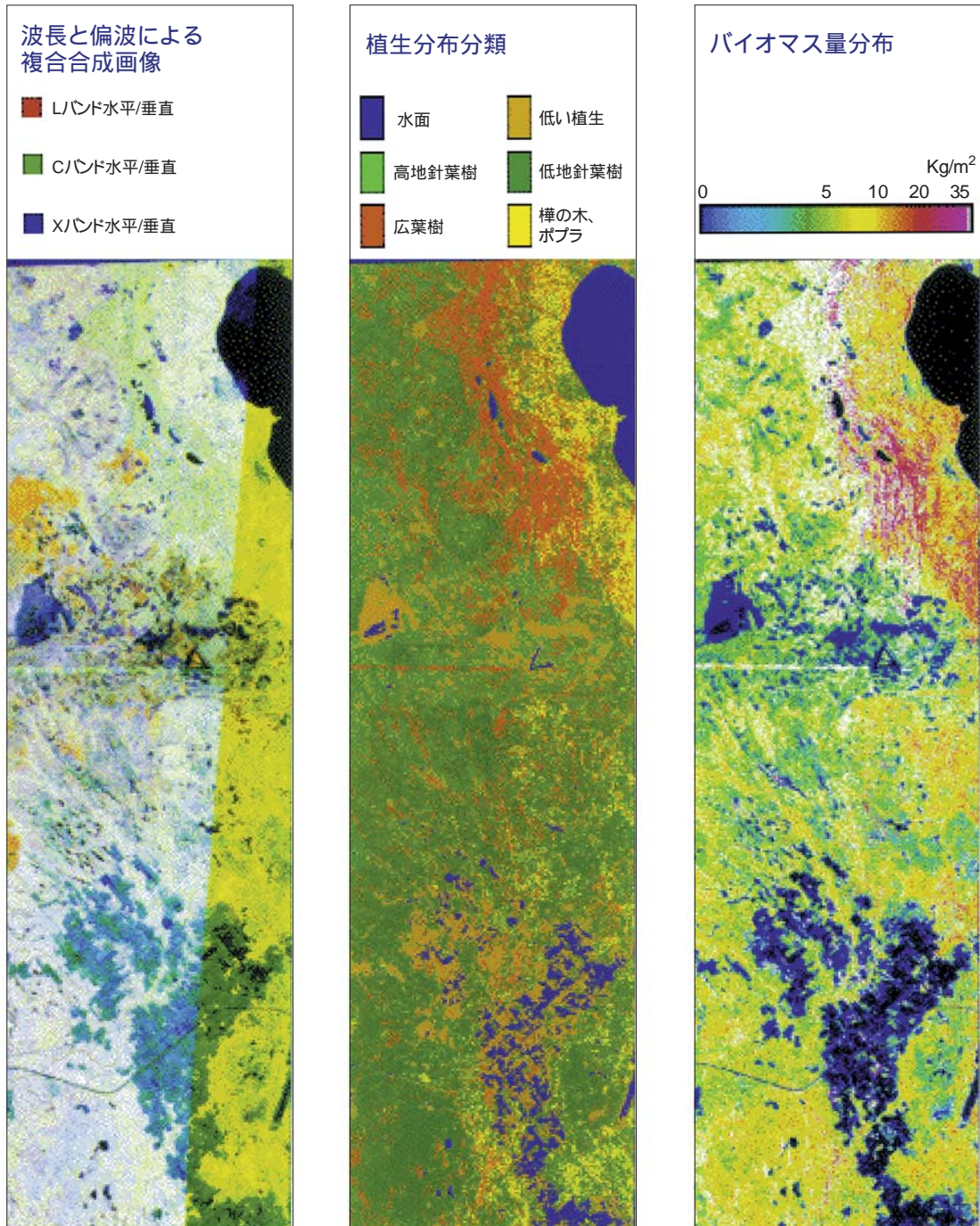
岡本 謙一

1968年 東京大学教養学部基礎科学科卒業
1973年 東京大学大学院理学系研究科相関理化学専攻博士課程卒業
1973年 郵政省電波研究所(現 独立行政法人通信総合研究所)入所
1993年 郵政省通信総合研究所(現 独立行政法人通信総合研究所)地球環境計測部 部長
1997年 同研究所 標準計測部 部長
1999年 同研究所 総合研究官
2000年～現在 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 教授

主な表彰

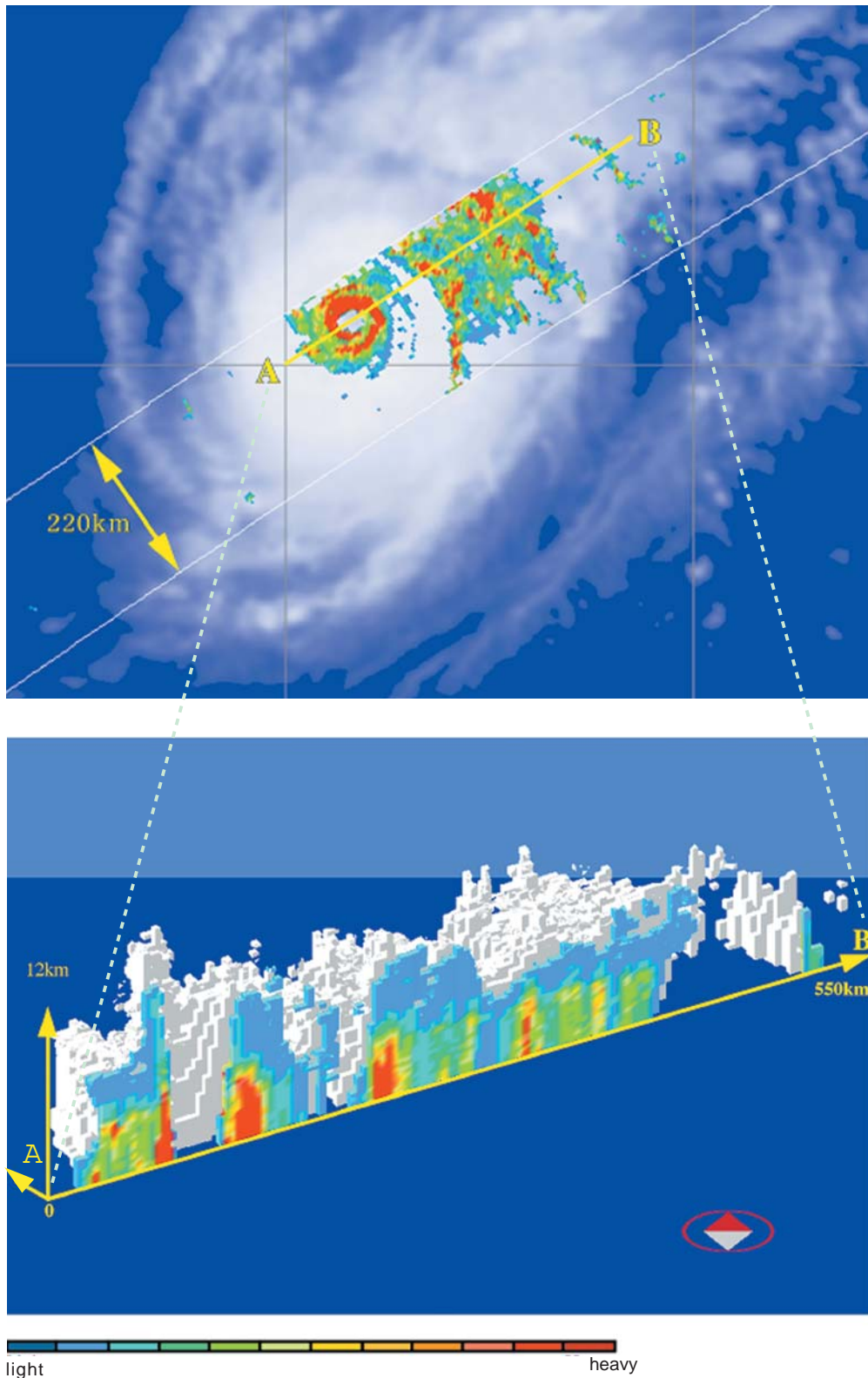
1991年 社団法人日本リモートセンシング学会論文賞
1993年 社団法人日本気象学会堀内基金奨励賞
1995年 郵政大臣表彰
1995年 社団法人日本リモートセンシング学会優秀論文発表賞
1998年 前島賞

図1 ミシガン州北部森林の天然植生分類とバイオマス量分布



出所 : Evans,D.L.,"Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Current Status and Future Directions,"
 NASA Technical Memorandum 4679(NASA.1995)
 「米航空宇宙局ジェット推進研究所(NASA/JPL)提供」

図2 1997年台風28号最盛期の降雨の水平断面（上）と立体構造（下）



「宇宙開発事業団 (NASDA) 提供」 但し、破線については財団側で補った。

図3 TRMM PRによる2年間の月積算降雨量分布

