

雲エアロゾル放射ミッション 「EarthCARE/CPR」の開発状況について

2024年2月26日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
第一宇宙技術部門

理事 寺田 弘慈

プロジェクトマネージャ 富田 英一

はじめに

はじめに

- EarthCAREは、日本と欧州宇宙機関(ESA)で初めて1つの地球観測衛星を開発するプロジェクトであり、国際水星探査計画「BepiColombo」に続く、ESAとの大型協力である。
- 日・ESA行政官会合での合意に基づき、日本とESAの共同で開発してきたEarthCAREの開発を終え、JAXA及びESA共に2024年1月までに開発の完了を審査会により確認した。
- 本資料では、EarthCAREの開発状況を説明し、打上げ及び打上げ後の予定を報告する。

報告内容

1. EarthCAREの概要
 - 1.1. 雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE)
 - 1.2. EarthCARE衛星と開発分担
 - 1.3. 雲プロファイリングレーダCPR
2. 開発状況
 - 2.1. CPRの開発状況
 - 2.2. EarthCAREの開発状況
 - 2.3. EarthCAREに向けて日欧のサイエンスの取り組み
3. 今後の予定
 - 3.1. EarthCAREの打上げ
 - 3.2. 打上げ後の主なスケジュール
 - 3.3. プロダクトの利用にむけて
 - 3.4. EarthCAREの打上・運用状況の公表

1.1. 雲エアロゾル放射ミッション(EarthCARE)

雲エアロゾル放射ミッションEarthCARE

(Earth Cloud Aerosol and Radiation Explorer)

- 地球全球の雲とエアロゾルの3次元分布を観測し、気候変動予測の最大の誤差要因である雲とエアロゾルの気候モデル内での再現性を高め、気候モデルの予測精度を向上させることが目的。
- 欧州宇宙機関(European Space Agency)と日本が共同開発する地球観測衛星ミッション。



経緯

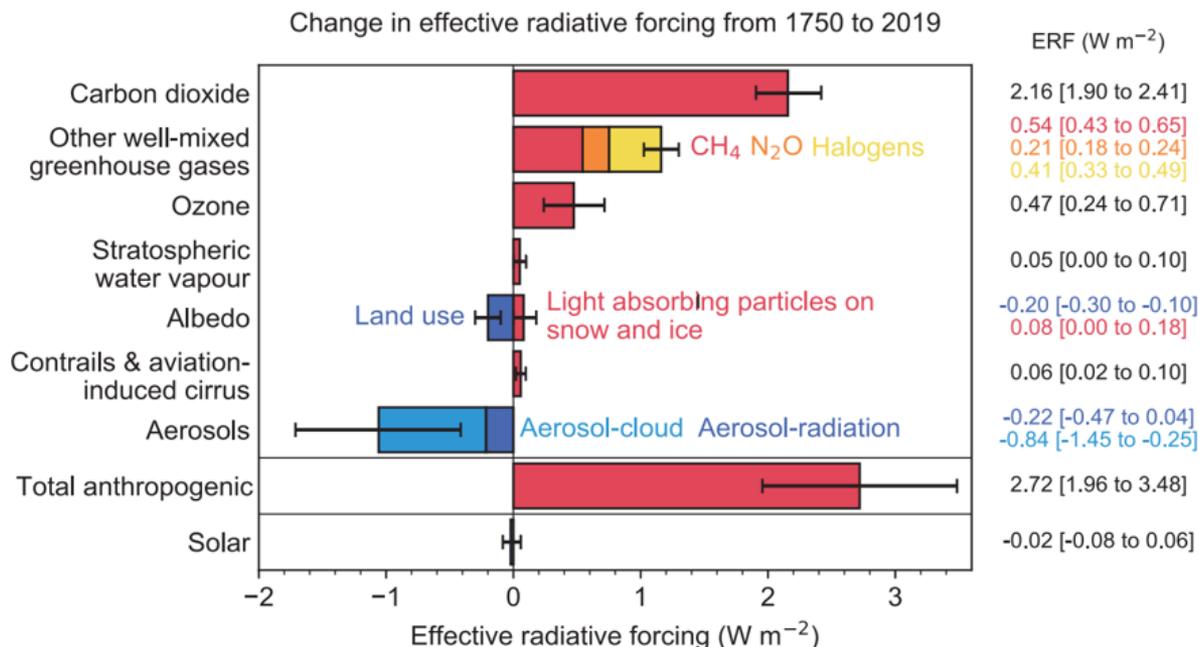
- 1996年(平成8年): ESA内で、EARTH RADIATION MISSION が提案された。
- 1999年(平成11年): Earth Explore選定会合に向けて、“ESAの EARTH RADIATION MISSION”と“JAXAのATMOS-B1構想”との類似性から、協力の議論が進んだ。
- 2000年(平成12年): 第25回日ESA行政官会合にて、国際共同研究を開始。
- 2001年(平成13年): GranadaでEarthExplorer計画の第1次選考で最終ミッション候補(選定ならず)。
- 2004年(平成16年): 第6次EarthExplorerミッションとして最終選定。
- 2005年(平成17年): JAXA-NICT間で3年間の共同研究契約を締結、概念検討を開始。
- 2007年(平成19年): NICTと合同でミッション定義審査(MDR)/システム要求審査(SRR)を実施。
- 2008年(平成20年): 宇宙開発委員会本委員会で、雲エアロゾル放射ミッション/雲プロファイリングレーダの開発が承認され、EarthCARE/CPRプロジェクトチームを発足。

1.1. 雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE)

雲とエアロゾルは、気候変動予測の最大の誤差要因である。

- **二酸化炭素 (Carbon dioxide) などプラスの値 (赤側)** は **温暖化** へ寄与する。二酸化炭素など温室効果ガスの温暖化効果の **不確実性※は比較的低い**。
- **エアロゾル (Aerosols) などマイナスの値 (青側)** は **冷却化** に寄与する。一方、エアロゾルの効果による冷却効果は無視できない大きさであるだけでなく、とりわけ雲との相互作用効果 (Aerosol-cloud) に関しては、科学的理解度が低く、**大きな不確実性※を含んでいる**。

※ 黒いエラーバーは誤差の大きさを表している。

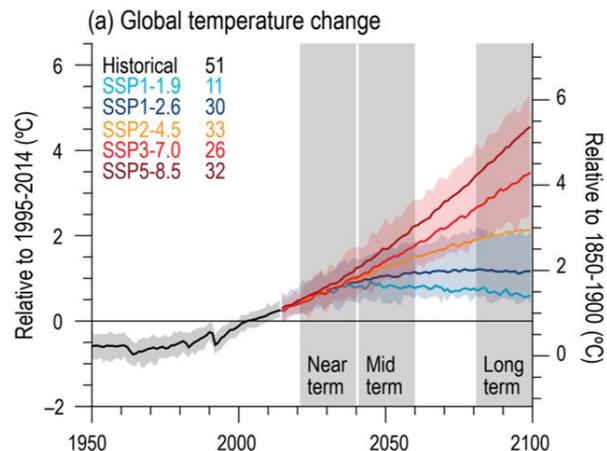


出典: IPCC-AR6/WG1, 図Chapter 7 Figure 7.6)

1.1. 雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE)

EarthCAREの目指すところ

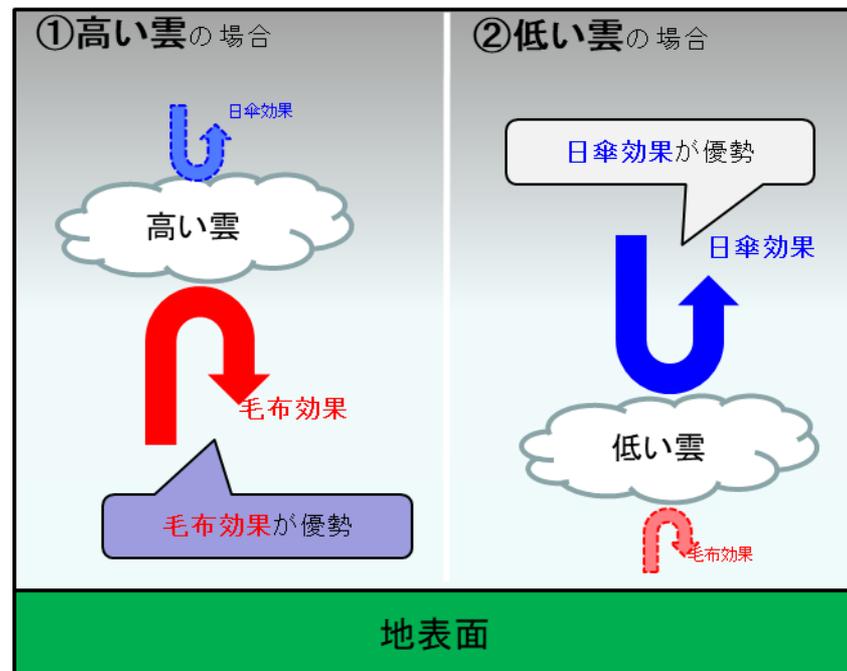
- “国連の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)“報告書は「人間の影響が大気、海洋、及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」とし、また、地球温暖化がもたらす影響として「南極の氷が速く解けるなどして海面が今世紀末までに最大1.1メートル上昇する」等予測。被害を抑えるため沿岸部のインフラ整備などに年間数千億ドルの投資が必要とし、具体的な政策が問われている。
- パリ協定(2015年)は、工業化前と比較して温度上昇を2°Cより低く抑え1.5°Cを目的とした。1.5度に抑えるには、2050年に脱炭素化が必要であり、我が国も、菅首相が2050年までのカーボンニュートラルを宣言。IPCC「1.5°C特別報告書」(2018年)は、「世界の平均気温上昇が1.5°Cと2°Cの0.5°Cの差でも、世界が大きく異なり、地球温暖化を2°Cではなく1.5°Cに抑制することには、明らかな便益がある」と報告。
- しかし、最も温室効果ガスを抑制したシナリオでも、2050年の全球平均の温度予測は、世界の研究機関の気候モデルのシミュレーション結果に工業化前に比して1°C~2°Cと幅が有る。この予測誤差は取るべき具体的な政策に違いをもたらす。



1.1. 雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE)

○この予測誤差の最大要因は気候モデル内での雲の取り扱いが異なることにある。

- 雲には、“日傘効果(冷却要因)”と、“毛布効果(加熱要因)”があり、どちらの効果が勝るかは、雲の高度及び種類(含まれる水と氷の量)により異なる。
- 雲の鉛直速度及び種類(含まれる水と氷の量)は、水蒸気凝結や衝突・併合を通じて「雲が雨粒へ成長するプロセス」に深く関わるが、その実態が判らないため、雲の鉛直速度・種類及び雲が雨粒へ成長するプロセスは気候モデル内で再現できていない。



○能動型センサーであるEarthCARE/CPRは、雲の鉛直分布を計測し、また、世界で初めて衛星による雲の鉛直速度を計測、これらと雲による反射強度により雲の種類を識別するものである。これにより現行の気候モデルを大幅に改善でき、IPCC温暖化実験の国内モデルを有する東京大学、気象研究所等との共同研究、国際コミュニティへの展開を通じて、より精度の高い気候変動予測の提供が可能となる。

○2029年後半には第7次IPCC報告書の発行が見込まれており、当該報告書へEarthCARE/CPRの成果を反映し、もって、2030年代における各国の具体的政策(温暖化対策)に貢献することは、極めて意義・価値の高いものである

1.1. 雲エアロゾル放射ミッション (EarthCARE)

この他、以下の様な貢献を目指している。

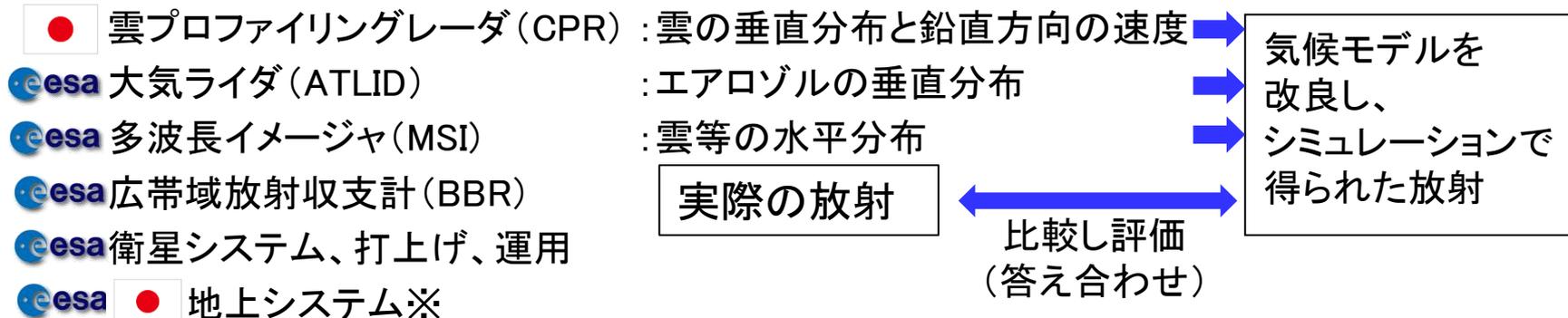
- 気候変動問題以外でも、雲の直接観測は(気候予測よりも)短期的な気象モデルの評価にも利用され、気象庁や東京大学等の気象モデルの改良を通じて、昨今頻発する豪雨等のより適切な予測に貢献する。
- CPRの成果は、国内の気候/気象モデルの研究機関との連携により、世界の気候/気象モデル開発へ活用を広め、更にIPCCを介して各国政府の政策にも貢献する等、国際的にも貢献する。
- 獲得する「衛星からのドップラー計測技術」は、将来の降水・雲等観測ミッションに資する。
- 得られる「雲の鉛直速度」は、雲・降水等に関する学術的理解を深化させる。また、日本が取り組むべき科学的課題にて、水循環観測を行う他衛星と連携することで成果を創出することも期待。

1.2. EarthCARE衛星と開発分担

EarthCARE衛星

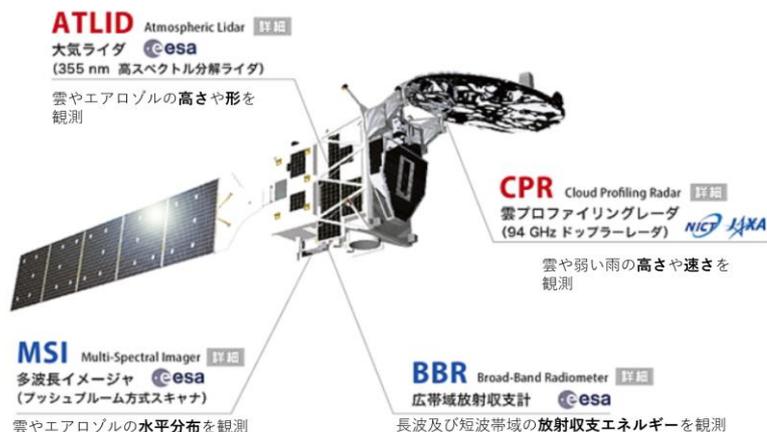
○ 4つのセンサを1つの衛星に搭載し、太陽同期軌道により地球全球を観測。

☆ コンステレーションでなく、1つの衛星に同時搭載することで時間・空間の揃った高精度の観測を実現。



※観測データは、一旦、イタリアにあるESA ESRINに集約。

日本で処理するデータは日本(JAXA)へ伝送され、JAXAで処理後、日本のユーザーへプロダクトを提供。



寸法	3.5 m x 2.5 m x 4.2 m (打上げ時) 3.5 m x 2.5 m x 17.2 m (軌道上)	
質量	2350kg	
平均消費電力	約1.6kW (EOL)	
姿勢制御	三軸、ヨーステアリング制御	
衛星軌道	軌道種別	太陽同期準回帰軌道
	降交点通過地方時	14:00
	軌道高度	約400 km
	回帰日数	25日
設計寿命	3年	

1.3. 雲プロファイリングレーダCPR

雲プロファイリングレーダCPR (Cloud Profiling Radar)

W-band(94GHz)の衛星搭載レーダ(主契約者:日本電気株式会社)

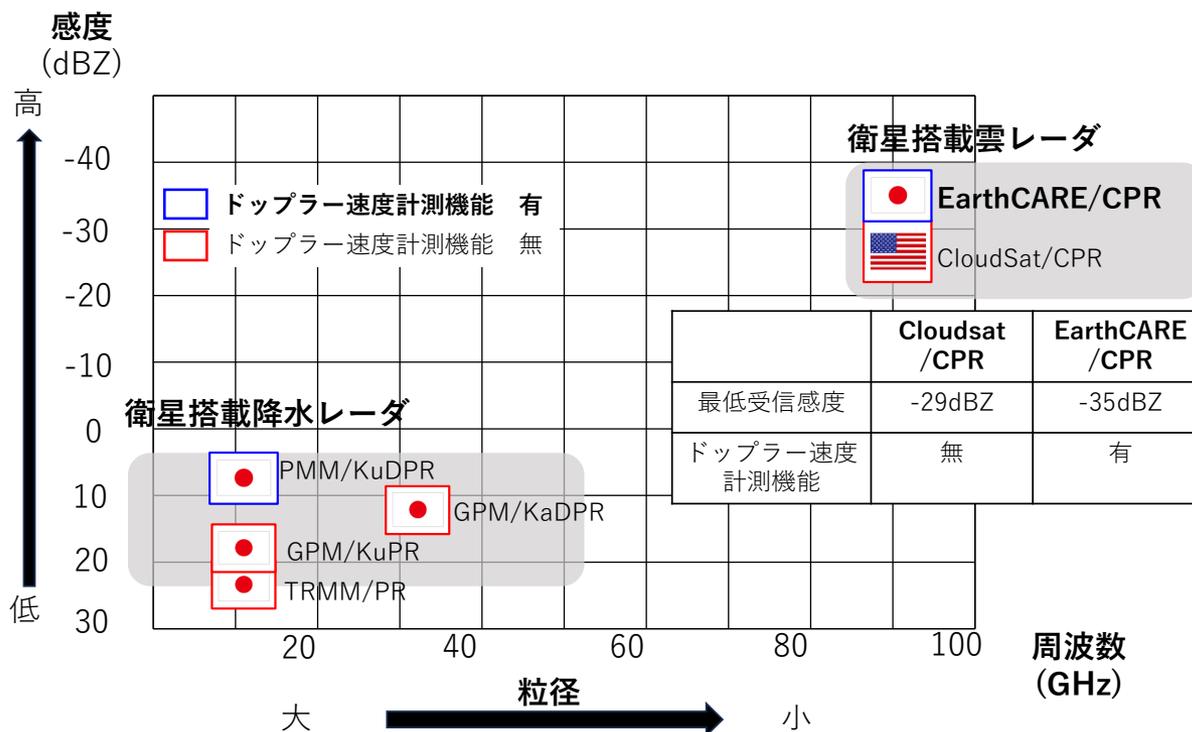
○日本は、これまで多くの衛星搭載レーダの開発実績(TRMM、GPM)を有している。

○JAXAと国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)は共同で、この日本が得意とする衛星搭載レーダ技術を用いて、CPRを開発した。

○どの高度に、どれだけの量の雲粒が存在するかを観測出来る。

☆ ドップラー速度計測機能を有し、世界で初めて全球の雲の上下方向の速度を計測可能。

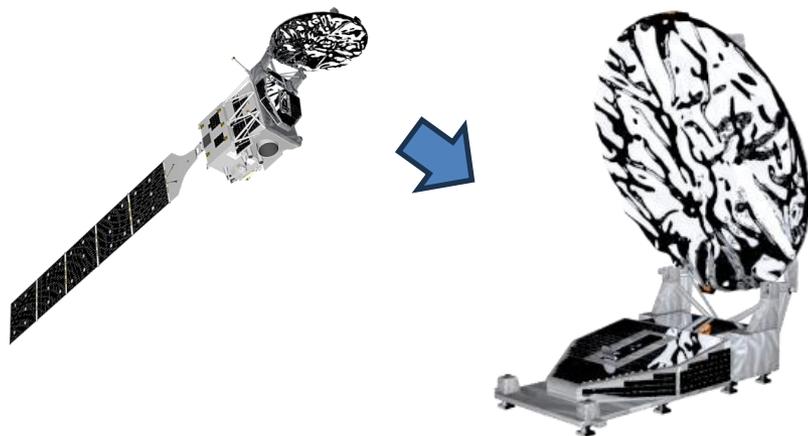
☆ これまでの衛星搭載雲レーダよりも高感度で、より薄い雲まで観測可能。



1.3. 雲プロファイリングレーダ CPR

技術課題

- 雲の上下方向の速度は、雲粒が降雪や降雨へ成長するメカニズムに関係するが、よく判っておらず、気候モデルでも良く再現されていない。このため、全球での観測が望まれている(補足1,2参照)。
- しかし、7700m/sという高速で移動する衛星上から、一般に2~8m/sという速度で鉛直方向に移動する雲の速度を計測するため、レーダの指向精度が不十分だと、衛星の移動速度が、レーダによる雲の移動速度に混入してしまう問題がある。
- ☆ この高い指向精度を実現するために、直径2.5 mで低熱歪の大型アンテナを新規に開発した。
- ☆ 更に、下記表に示すドップラー計測精度を実現するために、パルス繰返し周期6100-7500Hz(これはドップラー計測機能を有しない米国Cloudsatの約2倍の高周波数)でスイッチングできる高出力送信機を開発した。



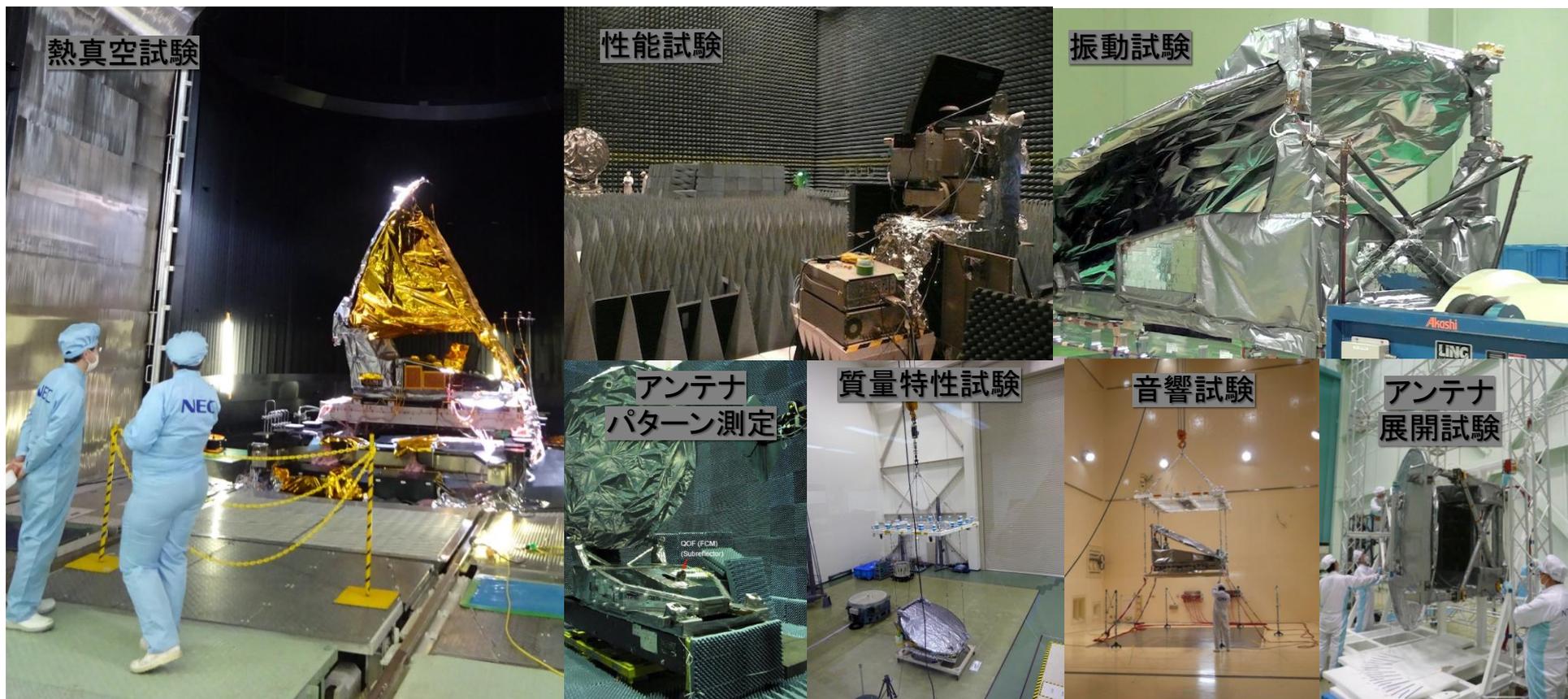
アンテナ開口径	2.5mφ
送信電力	1.5 kW 以上
パルス幅	3.3μs
アンテナビーム幅	0.095 度
最小受信感度	-35 dBZ以下 (10 km 積分時)
ドップラー計測範囲	±10 m/s
ドップラー計測精度	1.3 m/s (-19 dBZの雲に対して、10 km 積分時)
パルス繰返し周波数 (PRF)	可変 6100 Hz ~ 7500 Hz

- ☆また、ESAは、高い技術課題に対して、まず、Aelous(2018年打上げ)のライダを開発し、得られた技術を基にEarthCAREの大気ライダ(ATLID)を開発した。

2.1. CPRの開発状況

CPR開発試験

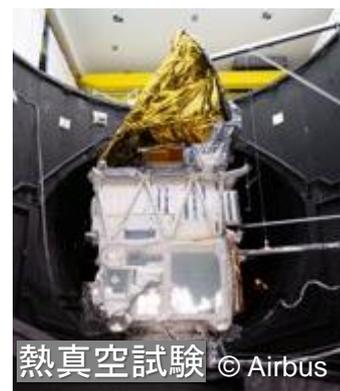
- 2021年までに、日本電気(株)及びJAXA筑波宇宙センターでのCPRの全ての試験を完了し、欧州に最終的に輸送した。
- 2022年8月にESAに最終引渡しを完了。



2.2. EarthCAREの開発状況

EarthCARE衛星システム試験

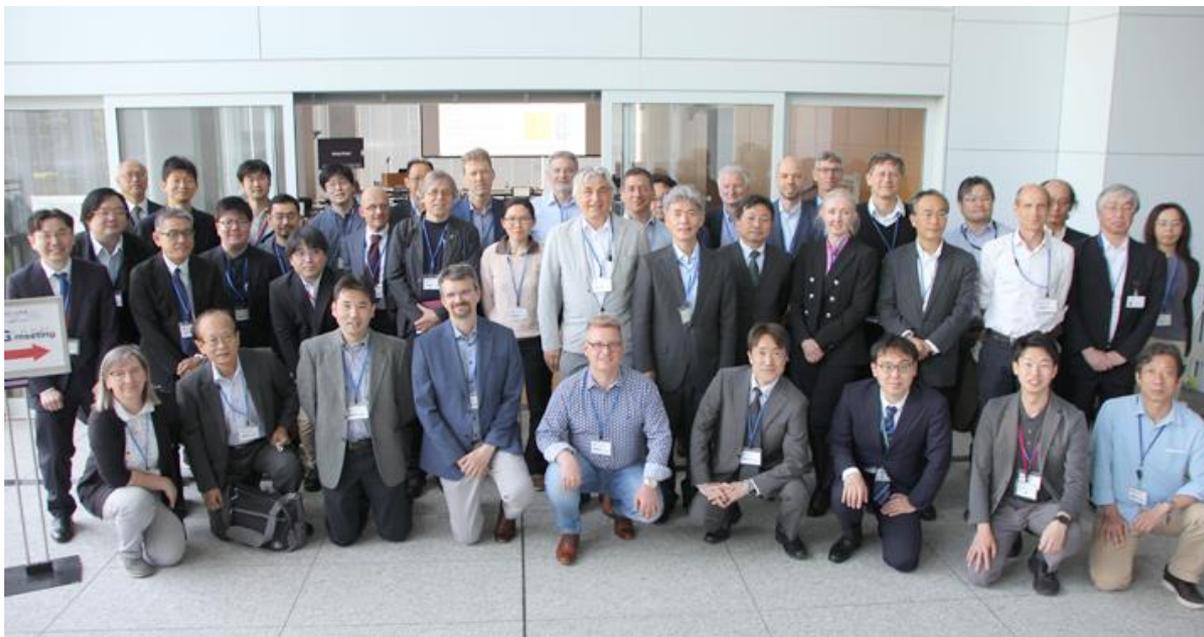
- ESAは、2021年からEarthCAREの衛星システム組立試験をエアバス社(独)で実施。
- 2022年6月ESA衛星技術研究センタ(オランダ)に輸送、2023年6月までに衛星システム試験を完了。



2.3. EarthCAREに向けて日欧のサイエンスの取り組み

The EarthCARE Joint Mission Advisory Group (JMAG) & Workshop

- 日本と欧州の科学者により、EarthCAREデータの利用技術の開発を積み重ねてきた。
- 原則、年2回、日本と欧州で交互に開催。2023年11月に第41回のJMAGが開催された。
- この他、日欧科学コミュニティ間の交流やEarthCARE関連のサイエンス促進を目的に、2002年以降、数年に1度の頻度でワークショップを、8回開催してきた。



JMAG@NICT(東京)(2023.4)



ESA JAXA Pre-Launch workshop@ESRIN(イタリア)(2023.11)

3.1. EarthCAREの打上げ

打上げロケットの選定経緯

- 当初、ESAは、仏領ギアナの射場からソユーズでの打上げを計画。
- 2022年2月、ロシアのウクライナ侵攻により、ソユーズが使用できない見通しとなり、ESAは代替打上げの検討を開始。
- 2022年12月、ESAは代替打上げとして、Vega-C (Falcon-9をバックアップ)を選定。
- 2023年6月、ESAは、2022年12月のVega-C2号機事故を踏まえて、バックアップのFalcon-9での打上げを決定。

打上げ準備状況

- 2024年1月までに、ESA、JAXAとも審査会により開発の完了を確認した。
- EarthCAREは、現在、エアバス社(独)で射場への輸送準備中。

今後の予定

- 2024年3月、EarthCAREを射場(米国 ヴァンデンバーグ)に輸送予定。
- 2024年5月、SpaceX社のFalcon-9にて打上げ予定。



EarthCARE熱真空試験終了@ESTEC(オランダ)(2023.3)



EarthCARE機体公開@エアバス(ドイツ)(2024.2)

3.2. 打上げ後の主なスケジュール

打上げ EarthCAREは、ヴァンデンバーグ空軍基地からFalcon-9で打上げ予定。

クリチカル期間 衛星分離後、姿勢の確立、太陽電池パドルの展開に引き続き、打上げ後、最大5日間 CPRの主反射鏡を展開。

初期機能確認運用 ESAにより、衛星システムが所定の機能・性能を有していることの確認、打上げ後、3カ月まで ミッション機器の機能確認が実施される。
CPRは、ESAとJAXAが協力して機能確認を実施する。

初期校正検証運用 NICTによりCPRの取得データが正確になる様に校正される。また、ESAのセンサはESAで校正される。打上げ後、6カ月まで 更に、日欧の研究者により取得データが正しいか検証作業が実施される。

定常観測運用 ESA及びJAXAの双方からプロダクトが配布される。6カ月以降

3.3. プロダクトの利用にむけて

プロダクトの利用

JAXAのGポータル及びESAのwebサイトから、EarthCAREのプロダクトを入手・利用可能。
 更に、JAXAでは、大学や他機関の研究者とともにアウトカムの創出を目指す。



<https://gportal.jaxa.jp/gpr/?lang=ja>

「雲・エアロゾルに関する気候変動メカニズム」の科学的根拠の追究に貢献
 (補足1参照)

「雲・エアロゾルに関する気候変動メカニズム」を気候モデルに反映し、適応策の検討へ貢献
 (補足2参照)

気象予報分野や大気環境分野における現業機関の数値モデルやシステムでの利用を実現
 (補足3参照)

3.4. EarthCAREの打上・運用状況の公表

打上げ・運用状況の公表

- ESAと協力して、EarthCAREの打上げ・運用状況をタイムリーに公表出来る様に準備中。
- JAXAでは、Webの特設サイトで状況をお知らせすると共に、米国ヴァンデンバーグ射場や欧州からの情報提供を計画中。

EarthCARE/CPR

雲エアロゾル放射ミッション/雲プロファイリングレーダ

特設サイト 打ち上げまで

残り 日



Scroll



Solving the mystery of clouds: a cooling or heating effect?

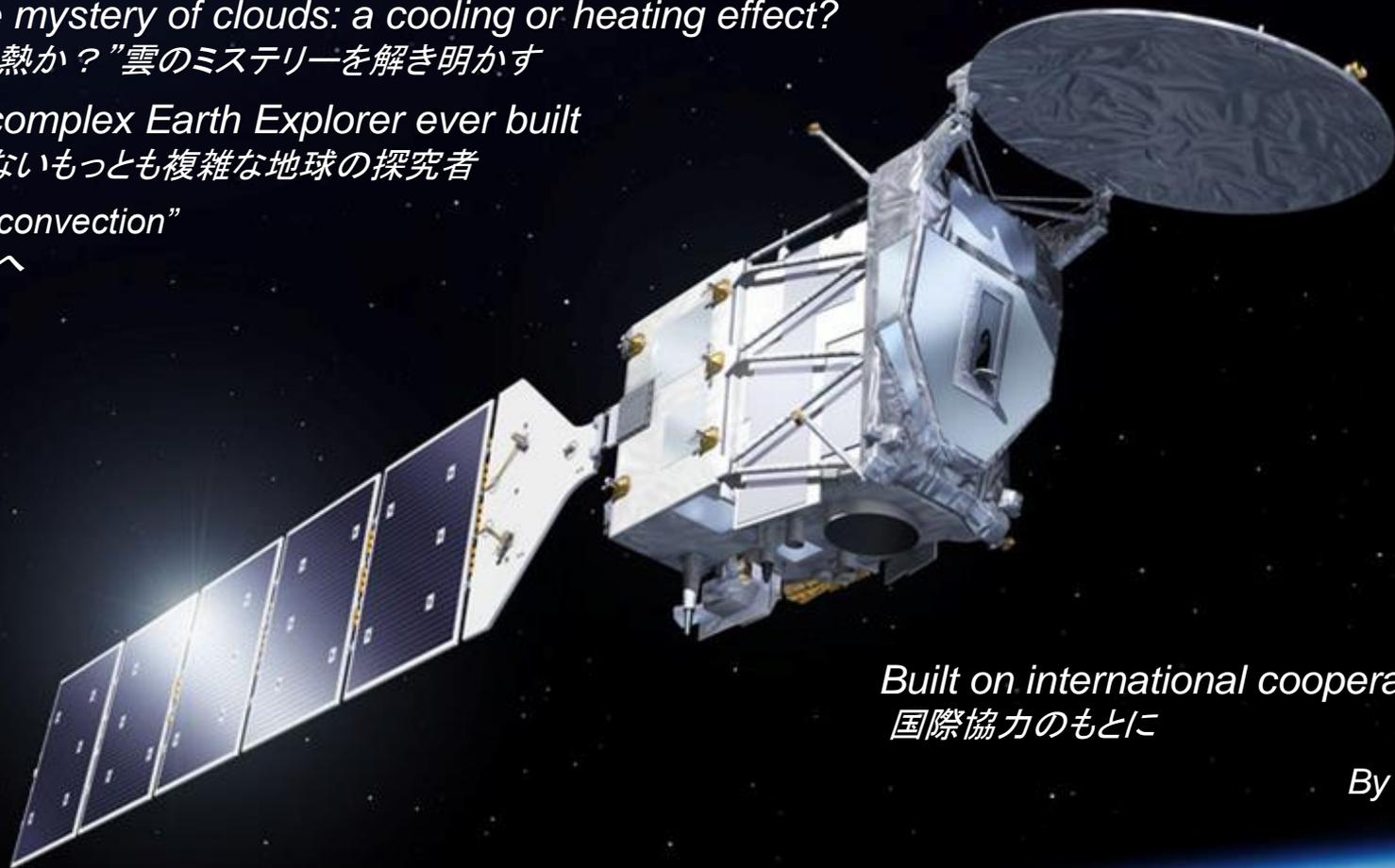
“冷却か、過熱か？”雲のミステリーを解き明かす

The most complex Earth Explorer ever built

未だかつてないもっとも複雑な地球の探究者

The “Age of convection”

対流の時代へ



Built on international cooperation

国際協力のもとに

By ESA

補足1. 科学的根拠の追究に貢献

「雲・エアロゾルに関する気候変動メカニズム」の科学的根拠の追究に貢献

現在の状況 (Before)

- 雲とエアロゾルは、気候変動予測の最大の誤差要因である。地球の放射収支に影響を与える「雲/エアロゾルに関する気候変動メカニズムの理解」には、**全球の観測データが必要**。
- NASAのCloudSat衛星（2006年打上げ、2023年末頃に運用終了予定）搭載CPRはドップラ計測機能がなく、雲粒子の落下速度や鉛直風速度を計測できない。
- CloudSat衛星では、ライダー/イメージャ/放射収支計は、別の衛星を利用するため、観測同時性が劣る。

EarthCARE打上げ後 (After)

- 世界初の衛星からの雲の鉛直速度観測やより精緻な観測データにより、エアロゾルや雲に関する気候変動メカニズムの科学的根拠を追究できる。
- EarthCARE衛星搭載CPRは世界初のドップラ速度計測機能を有し、雲の発達や消滅と関連するが全球的な観測が不足している「**雲粒の落下速度や鉛直風速度**」を観測することにより、「**雲粒が降雪や降雨へ成長するメカニズムの理解**」が進む。更に従来より高感度であり、薄い雲や下層雲の検知性能が向上し、雲に関わる放射効果をより高精度で定量化できる。
- EarthCAREでは4つのセンサが同一プラットフォームに搭載され、**観測同時性が高い**。



→ **国内外の研究者との連携による研究活動を実施中。**

ESA-JAXA Pre-Launch EarthCARE Science and Validation Workshop

(日時：2023年11月13日～17日、場所：イタリアESA/ESRIN)

日欧科学コミュニティ間の交流やEarthCARE関連のサイエンス促進を目的に、2002年以降、数年に1度の頻度でワークショップを、8回開催してきた。

2023年11月には、打上げ前最後のワークショップとして、本WorkshopをESA/ESRINで開催し、参加者約220名、発表198件（内口頭134件、ポスター6418件）により、国際的な科学的連携を深めた。

「雲・エアロゾルに関する気候変動メカニズム」を気候モデルに反映し、適応策の検討へ貢献

現在の状況 (Before)

- 雲・エアロゾルは気候変動予測に最大の不確実性をもたらしているが、特に、雲内の鉛直運動（雲粒子の落下速度等）は、科学的知見がいまだ不足している。

→既存の観測データに見られる範囲で気候モデルMIROCの雲氷落下速度を変化させると、雲の分布が変化し、地表気温は年平均の平衡応答で **1-2℃程度、変化することを確認**（国立環境研究所 小倉 知夫 室長）

EarthCARE打上げ後 (After)

- EarthCARE観測データにより、現状の気候を再現出来ているか確認し、**気候モデルの性能を評価**する。
- 更に、雲粒子の落下速度を含む**気候変動メカニズムの理解に基づき、気候モデルを改良**する。その改良後の性能を評価することで、気候モデルの改良が一層促進される。

・気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 評価報告書に参加する国内の気候モデル

- ✓ MIROC：東京大学/国立環境研究所/海洋研究開発機構を中心に開発されている気候モデル
 - ✓ MRI-ESM：気象庁気象研究所で開発されている気候モデル
 - ✓ NICAM：東京大学/海洋研究開発機構/理化学研究所を中心に開発されている高解像度気候モデル
- 東京大学大気海洋研究所に「EarthCARE気候モデル連携Office」を設置し、文部科学省受託事業「気候変動予測先端研究プログラム (SENTAN)」領域課題1とも連携して、MIROC, MRI-ESM, NICAMのような気候モデルの検証・改良に関する研究活動の実施中



EarthCARE モデリングワークショップ

モデルコミュニティとの連携を深めるため、これまで2回開催（第1回：2022年2月、第2回：2023年3月）。
第2回モデリングワークショップ（左写真）には、日・米・欧からモデル関係者約110人参加（うち現地参加約60名）。

補足3. 現業機関での利用を実現

気象予報分野や大気環境分野における現業機関の数値モデルやシステムでの利用を実現

現在の状況 (Before)

- **【気象予報】** CPRのデータ同化手法は欧州中期予報センター (ECMWF) にて近年、技術が確立。しかし、CloudSat衛星の故障により定常的には利用できず、現業化に至っていない。
- **【黄砂・大気汚染予測や火山灰監視】** 以下に示すとおり、**現状は観測データが不足している。**
 - 気象衛星ひまわりの黄砂予測は、鉛直分布は観測できず、黄砂発生源である砂漠で観測精度が落ちる等、**観測が不足する。**火山灰がどの高度で拡がるか等の**火山灰の鉛直分布も観測できない。**
 - 既存ライダー衛星であるNASAの**CALIPSO**では、エアロゾル種の分類において**不確かさがある。**

EarthCARE打上げ後 (After)

- **【気象予報】** 雲・降水過程を評価・改良し予測システムへ**EarthCAREデータを同化する技術を研究開発**することにより、現業機関の数値気象モデルでの実利用を実現する。
- **【黄砂・大気汚染予測や火山灰監視】** 鉛直分布の観測が可能で、**エアロゾル種の分類に長けた高スペクトル分解ライダーであるATLIDのエアロゾルの観測情報**を、黄砂予測、火山灰監視、健康への影響が懸念されるPM2.5等の大気汚染予測に使用されている現業機関のシステムでの実利用を実現する。

気象予報について、

- JAXAは、気象庁気象研究所との共同研究を進めている。
- ESAは欧州中期予報センター (ECMWF) との共同研究を進めている。

黄砂・大気汚染予測や火山灰監視について、

- JAXAは、国立環境研究所、気象庁気象研究所、九州大学との共同研究を進めている。

雲の鉛直分布に関する観測とモデルの比較

