

CONSEO

衛星地球観測コンソーシアム
Consortium for Satellite Earth Observation



CONSEO 気候変動レポート



2025年1月

目次

【本編】

1. はじめに	1
2. 要旨 (Executive Summary)	3
3. 気候変動の実態について	5
3.1 今起きている異常気象	5
3.2 気候変動への予測と対応	9
3.3 IPCC の最新研究について	12
コラム (その 1) クライメート・フレスク：気候変動を理解するための共同学習の力	15
4. 気候変動の謎を解明するための科学的手段	17
4.1 気候変動理解における課題	17
4.2 気候予測における観測の役割	19
4.3 気候・気象モデルにおける衛星データの利用	22
コラム (その 2) 宇宙から感じる気候変動 (油井亀美也宇宙飛行士)	30
5. 気候変動における宇宙機関の役割とは	31
5.1 宇宙機関が気候変動問題に取り組むべき理由	31
5.2 宇宙機関の取組	31
コラム (その 3) 気候変動と国際協力 (角南篤 CONSEO 会長)	44
6. 気候変動のこれから	45
6.1 気候変動に人類がどう向き合うのか	45
6.2 持続可能な社会実現のための社会システムの変革とファイナンスの役割	47
6.3 ネイチャーポジティブ経済移行戦略	52
6.4 民間における取組	56
6.5 科学の視点	59
6.6 地球デジタルツイン	64
コラム (その 4) 若者の視点から考える気候変動 (CGO ドットコム)	70
コラム (その 5) 気候変動におけるメディアの役割～気象予報士が伝えられること～ (井田寛子気象予報士)	71

【Appendix】

I. 気候変動の把握に必要な物理量・情報	i
II. 衛星一覧	iii
III. 主たる参考文献	xxxix
IV. 気候変動シリーズ発表者・執筆者一覧 (五十音順)	xxxiii

1. はじめに

衛星地球観測コンソーシアム（Consortium for Satellite Earth Observation : CONSEO）は、産学官の様々なステークホルダーが集まり、衛星地球観測の力で地球規模課題、社会的課題の解決に貢献し、より良い未来を作ることを目標としたコンソーシアムで、2022年9月に設立されました。そのミッションは次のとおりです。

- ① 衛星地球観測の戦略について幅広く議論し、国へ提言する。
- ② 衛星地球観測の成果を社会に還元し、産学官のエコシステム¹を形成し、連携を推進する。
- ③ 衛星地球観測を推進する機運を醸成するため、その価値を広く社会に発信する。

現在、世界は気候変動をはじめ、感染症や世界情勢の危機など様々な地球規模課題に直面しており、将来を見据えた持続可能な社会を実現することが急務となっています。気候変動に限っても世界各地で異常気象やそれに伴う激甚災害が頻発し、さらに生物多様性の危機や食糧危機の拡大など、取り組むべき課題は非常に複雑化しています。

2024年の夏は昨年が続いて異常に暑い夏でした。年平均気温を見ても2023年は日本でも世界でも観測史上最高の値を記録し、2024年もそれを超える勢いです。近年は地球全体でも異常に暑い日が続き、国連のグテーレス事務総長が、「もはやGlobal Warmingではなく、Global Boilingである」とコメントした²ことを覚えておられる方も多いと思います。また、気候変動は単に気温の問題だけでなく、雨や雪、海洋、極域の雪氷など地球表層の様々な現象を含み、さらに生態系や人間社会にも大きな影響を及ぼします。そして、近年の気候変動に係る最も大きな問題は、いわゆる地球温

暖化問題であり、化石燃料の消費による温室効果ガス（Greenhouse Gas : GHG）の排出など人間活動が気候に影響し、気候の変化が人間社会に影響を及ぼしていることです。すなわち、我々は加害者でもあり被害者でもあります。そこに関係するステークホルダーは多岐にわたり、また、その構造は国や地域、それぞれの社会経済の状況、歴史や文化、宗教などが重層的に関係するために、地球温暖化問題の原因を単純に特定して対策を講ずることが極めて困難であると言わざるを得ません。

地球温暖化問題のような複雑な地球環境問題に立ち向かうためには、地球環境の変化を正確に把握し、地球のシステムや気候変動について科学的理解を深めることが極めて重要です。特に気候変動のメカニズムは、いまだその全容が解明できていないうえ、気候変動の将来予測についてもその不確実性の大きさが課題となっています。地球環境の変化を正確に把握するためには衛星地球観測は不可欠であり、地上や船舶からの観測なども合わせて解析することにより、様々な情報を得ることができます。さらに数値モデルを用いたシミュレーションなどと連携することにより気候変動のメカニズムを解明し、予測することができます。このような科学的知見を基に、地球環境問題の解決に向けたアイデアを創出し、産学官のパートナーシップを通じて具体的なアクションにつなげていくことが重要です。

このような時代において CONSEO は、産学官が連携して日本の衛星地球観測に係る戦略について総合的に議論し国に提言するとともに、ステークホルダーとの具体的な連携活動を推進しています。その一環として「CONSEO 気候変動シリーズ」は、地球環境や気候変動について多様な観点

¹ 衛星地球観測に関わる環境とステークホルダーとのつながり

² 2023年7月27日、国際連合広報センター、記者会見におけるアントニオ・グテーレス国連事務総長発言（ニューヨーク、2023年7月27日）、https://www.unic.or.jp/news_press/messages_speeches/sg/49287/

から学び、議論する場として 2024 年に 6 回のイベントを開催してきました。国際連携のあり方や気候変動に関する多様な学び方、あるいは気候変動を自分のこととしてどのように捉えるのかということについて様々なステークホルダーの方々、参加者の方々と考えてきました。イベントでは、日本の第一線で活躍する研究者の方々にもお集まりいただきました。皆様には気候変動によって地球でいま何が起きていて、将来どうなると予測されているのか、さらに気候変動の課題に衛星地球観測はどのように貢献できるのかということについて、最新の研究成果をご紹介いただき、参加者と一緒に考える機会もありました。また、気候変動と水資源、水害との関係、あるいは生物多様性との関係、さらにはビジネスとの関係についても専門家を交えて議論する場を設けることもできました。

本報告書は、「CONSEO 気候変動シリーズ」の活動を通して得られた知見を広く紹介し、今後の衛星地球観測が気候変動問題に貢献するための方策を産学官のステークホルダーはもとより、さらには社会全体で考えることに資するべく取りまとめたものです。これにより、少しでも今後の我が国における衛星地球観測の発展につながることを期待します。お忙しい中、イベントにご登壇いただいた皆様、また、ご参加いただいた皆様にこの場を借りて改めて御礼申し上げます。

2. 要旨 (Executive Summary)

気候変動は、世界各地で異常気象を引き起こし、私たちの生活に大きな影響を与えています。一番身近な異常気象は、2023年、2024年の日本の暑さではないでしょうか。気象庁が「異常気象」であると明言した前例のない猛暑は、熱中症患者の急増や、大雨、土砂災害などの大きな被害をもたらしました。こうした被害を予防・軽減するためには、気候変動の実態把握が必要です。

近年の日本の猛暑を研究すると、人間活動により引き起こされた「地球温暖化」だけでなく、大規模な大気の状態の変化や海水温の上昇といった「自然変動」の影響も関与して気温が上昇したことがわかりました。元々の自然変動への人間活動の影響についてはまだ不明点が多く、継続的なモニタリングにより、その仕組みを科学的に明らかにすることが必要です。世界では、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」によって、気候変動に関する国際的な評価が行われています。IPCCでは、気候変動に対して複数の証拠を組み合わせ、自然変動と人間活動の影響の評価を行うことを重視しています。最新の評価報告書では、気候モデルによるシミュレーションの結果、「地球温暖化が人間活動によって引き起こされたことは疑う余地がない」と断言するに至りました。現在、気候変動対策を強力に進めていかない限り、パリ協定で定められた「産業革命前を基準として、世界の平均気温の上昇を21世紀末までに1.5°C以下に抑える努力をする」という目標を達成することは非常に困難な状況にあります。

実態を踏まえた気候変動対策としては、温室効果ガス (GHG) の排出を抑制する「緩和」と気候変動による被害を回避・軽減する「適応」が検討・実施されています。将来予測としては、気候モデルを用いた研究や様々な現象のプロセス研究、将来の極端気象や、様々なシナリオに基づくCO₂排出量に関する研究などが進んでいます。一方、気

候要素の変化がある閾値を超えると非可逆的な変化となる **Tipping point** や、大気海洋の相互作用、また大気・海洋・陸域の炭素循環などに見られるサブシステム間のフィードバックなど、気候変動に関する謎はまだ多く残っており、解明に向けて引き続き研究を進めていかなければなりません。

そこで、地球表層で起きている現象を全球的な観測で把握するために、有効な手段となるのが衛星地球観測です。衛星地球観測の強みは、地球環境を「全球規模」で「均質的」「定量的」に把握できることです。これらの強みを活かして、衛星地球観測は過去・現在・未来の観点から気候変動の謎の解明に貢献します。既に数十年にわたる過去の地球環境の観測データが衛星地球観測により蓄積されています。現在の観点からは、準リアルタイムで地球環境を監視することで、気候変動の理解に必要な情報を提供しています。未来の観点からは、データ同化・初期値改良による数値予報の精度向上、シナジー観測等を活用した気候プロセスの解明、モデル検証による気候モデルの改良などを通して、将来予測の精度を向上させていくことができます。

このように、衛星地球観測は気候変動の解明に向けた科学的手段として活用されており、衛星を開発・運用している関係省庁・宇宙機関も気候変動対策に貢献しています。これらの機関は、「透明性」の高い衛星データや、データを活用した様々なプロダクト・サービスを提供しています。これにより、多くのステークホルダー間で、科学的根拠に基づいたコミュニケーションや意思決定ができるようになり、より効果的な気候変動対策の実施が期待されます。特に宇宙機関は、国内では産学官の結節点になり、民間企業や非宇宙産業との共創を進めることができます。さらに、自身が有する世界的なネットワークを通じて他国の宇宙機関との協力による地球観測ミッションの実施、合

意形成を通じた国際的な政策決定の後押しもできます。このような取組は、世界規模での気候変動問題の理解や解決に寄与します。

衛星地球観測や宇宙機関の貢献もあって、気候変動問題解決に向けた研究や取組は拡大していますが、変化に適応し、緩和を進め、脱炭素社会を実現するためには、まだ十分ではありません。

気候変動問題を解決するためには GHG 排出の削減が不可欠ですが、現在の削減ペースは目標に対して極めて不十分であると言わざるを得ません。削減ペースを改善するためには、化石燃料に依存しないエネルギー文明へ移行しなければなりません。そのためには、多様な分野からアプローチすることで社会システムそのものを変革し、社会が丸となって脱炭素に取り組む必要があります。

社会システムを変革し、持続可能な発展の実現可能性を高めるために強化すべき条件の一つとして、ファイナンスが示されています。気候変動問題の解決に向けた資金の流れは不足しており、気候状態の目標と資金フローの整合性を加速させるためには、世界的に協調した取組が必要です。また、IPCC の第 6 次評価報告書 (AR6) 公表後、社会システム変革、環境ガバナンス・ファイナンスの研究や政策策定に加えて、気候変動を含むサステナブルファイナンスに関わる政策・制度的議論も進んでいます。

近年は、生物多様性の損失も重大なグローバルリスクであるとして注目が高まっています。気候変動と生物多様性は、その現象・対応策の観点から正負両面で相互に影響し合う関係にあり、一体的に取り組む必要があると考えられています。生物多様性保全の重要性は官民双方で理解されつつあり、社会経済はネイチャーポジティブ経営への移行が求められています。関係省庁は、ネイチャーポジティブ移行戦略を策定し、民間企業は、気候関連財務情報開示タスクフォース (TCFD) と同様の枠組みで構築された自然関連財務情報開示タスクフォース (TNFD) による情報開示などを進め

ています。また、多くの産業は自然資本に依存しており、持続的な経済発展のためには自然資本の保全が必要です。さらに、生物多様性が高まると炭素吸収量が増加し、気候変動を緩和させることも明らかになっており、生物多様性の保全はますます重要になると考えられます。ただし、生物多様性を判断する指標やセクターはローカルに根付いており、一律の解決策はないため、生物多様性独自のアプローチが必要です。

同じくローカル性が重要となるものが、気候変動による影響評価です。影響評価モデルを使用することで、自然災害の種類ごとの発生確率や人的経済的被害といった、意思決定に資するデータを得ることができ、地域ごとの具体的な対策を立てることが可能となります。

また、気候変動に対応する新たな手段として、衛星地球観測を活用した地球デジタルツインの構想検討・開発が注目されています。地球デジタルツインが提供するデータは、様々な分野において観測事実・客観的事実に基づいた行動や意思決定を可能にし、気候変動や地球環境問題などの地球規模の課題解決に役立ちます。

持続可能な社会の実現に向けて、今後 10 年の人類の選択・行動が未来を決める大きな分岐点であると考えられています。衛星地球観測によって得られた、気候変動の実態に関する科学的知見を基に、多様なステークホルダーが脱炭素化に向けて社会システムの変革を行い、社会の「調整スピード」を加速させることが重要です。

3. 気候変動の実態について

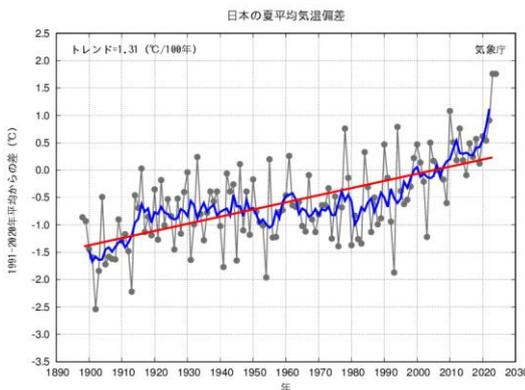
気候変動は、異常気象や地球の環境変化を引き起こし、私たちの生活に大きな影響を与えています。その科学的解明と、それに基づく予測と対策の確立に向けて、世界中で様々な取組がなされていますが、気候変動を引き起こすプロセスにはいまだ謎が多く残っています。

3.1 今起きている異常気象

1) 今起きている異常気象

一番身近な異常気象は、ここ数年の日本の暑さではないでしょうか。日本の夏期（6～8月）の平均気温は100年あたり1.3℃の割合で上昇しており、特に2023年、2024年は前例のない猛暑を記録しました（図表1,2）。これは単純な暑さではなく「異常気象」であったと気象庁異常気象分析検討会会長として記者会見で明言しました。また、この記録的な猛暑は日本だけでなく世界中で発生しており、国連事務総長が「地球温暖化の時代は終わり、地球沸騰化の時代が到来した」と述べました。

図表1 日本の夏平均気温偏差の経年変化



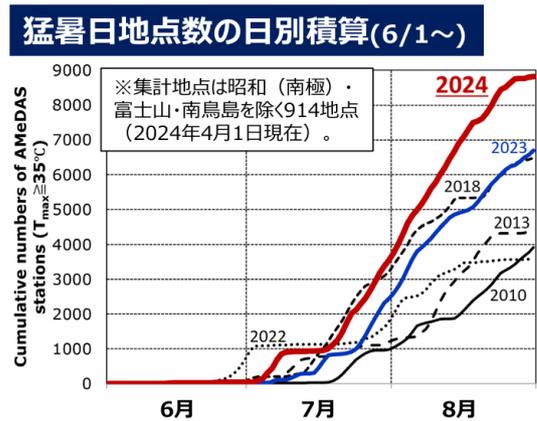
出所：気象庁

2024年は、2023年同様に全国的に記録的な高温でしたが、9月に入っても記録的な高温が継続したこと、平年でも気温の高い東海以西の各地域においても記録的な高温を観測したことから、猛暑日の観測地点数が2023年を上回り過去最多と

なり、熱中症による救急搬送者数は観測以来過去最多の約10万人となりました。

また、東北地方や能登半島では高い気温や海水温が積乱雲の発達を促して大雨を降らせ、浸水や土砂災害が発生するなど、異常気象の発生は私たちの生活に大きな被害をもたらしています。

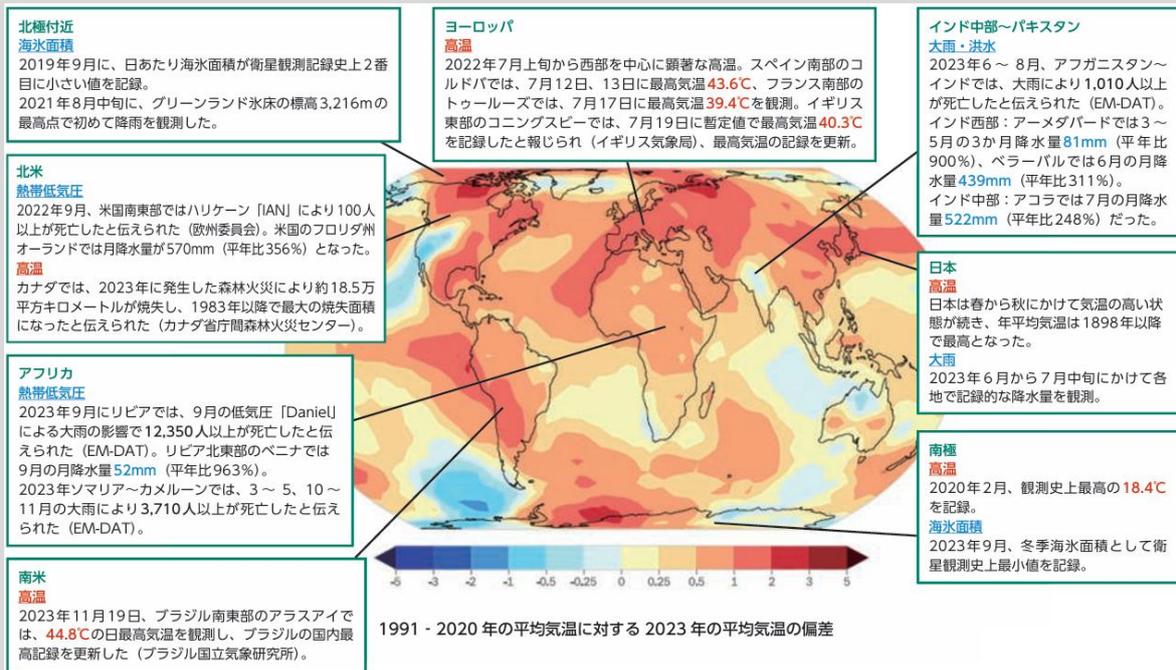
図表2 猛暑日地点数の日別積算



出所：気象庁異常気象分析検討会資料

世界各地でも同様に、猛暑や豪雨などが発生し、森林火災や干ばつ、洪水の発生といった被害が出ています（図表3）。

図表 3 近年の世界各地の異常気象



出所：令和6年版 環境・循環型社会・生物多様性白書

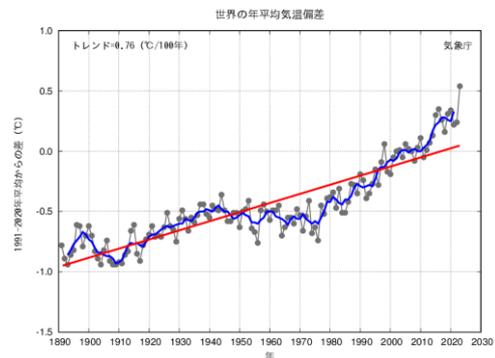
2) 異常気象を引き起こす要因

2023年、2024年の日本の猛暑に対し、グローバルな大気循環を示す再解析データを基に分析したところ、「地球温暖化」と「自然変動」という二つの要因によって引き起こされたことが分かりました。

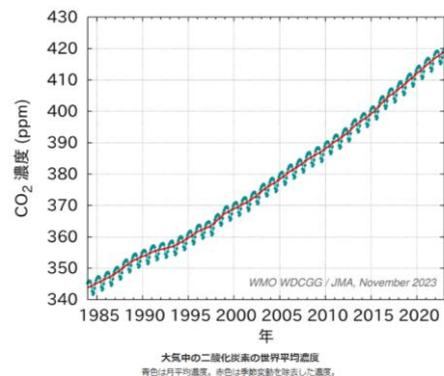
A) 地球温暖化の影響

直近40～50年間の地球全体の平均気温は上昇し続けており、この上昇ペースは地球が明瞭な温暖化傾向にあることを示しています（図表4）。地球の平均気温は、産業革命以降のCO₂排出量の増加に伴い上昇しており、地球温暖化は人間活動によって引き起こされたということが明らかになっています（図表5）。

図表 4 世界の平均気温偏差



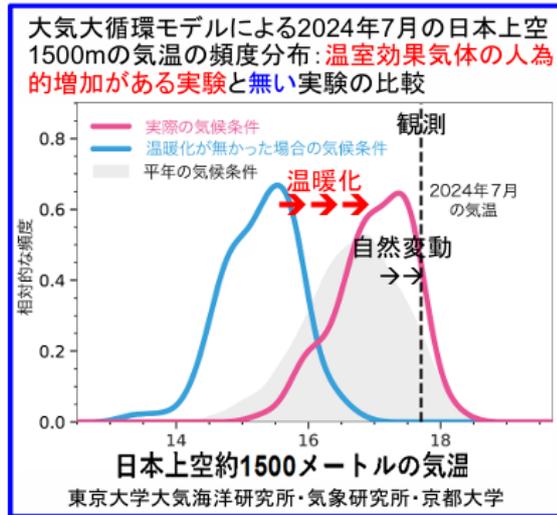
図表 5 大気中のCO₂の世界平均濃度の経年変化



2024年7月と、2023年盛夏期の異常な高温について、東京大学大気海洋研究所や気象庁気象研究所、京都大学などが地球温暖化の寄与を調べるため、Event attribution (EA) 法を用いて実験を行いました。EA法では、全球大気循環モデルを用いた大規模アンサンブル実験にて再現される日本上空1500mの気温の頻度分布について、産業革命以降の温室効果気体の人為的増加がある場合とない場合を比較します。

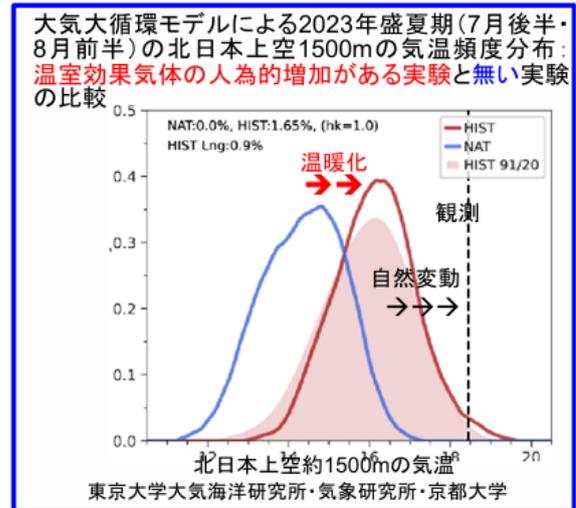
実験の結果、図表6及び図表7の青線(温暖化が無かった場合の気候条件)の山と赤線(実際の気候条件)の山の差が発生しました。この差こそが、地球温暖化の影響であり、両年の猛暑は、地球温暖化の寄与がなければ起こり得なかったという結論に至りました。

図表6 記録的高温への地球温暖化の寄与(2024年)



出所：気象庁異常気象分析検討会資料を基に筆者が加筆

図表7 記録的高温への地球温暖化の寄与(2023年)



出所：気象庁異常気象分析検討会資料を基に筆者が加筆

また、地球温暖化がある場合の予測気温よりも実際に観測された気温がさらに高いことから、高温化には自然変動の影響もあったと考えられます。

B) 自然変動の影響

日本の高温化をもたらした自然変動としては、大規模な大気の状態の変化や、海面水温の上昇が関係しています。

■ 亜熱帯ジェット気流のはたらき

北半球中緯度の上空は偏西風帯となっており、上空では西よりの風が南北に蛇行しながら西から東に吹いていて、その流れが最も強いところをジェット気流と言います。ジェット気流は1年を通じて流れていますが、北半球では夏に北上して、冬には南下します。その中でも一番南にあるジェット気流を「亜熱帯ジェット気流」と呼び、亜熱帯ジェット気流が日本列島より北上すると日本は真夏となります(図表8)。

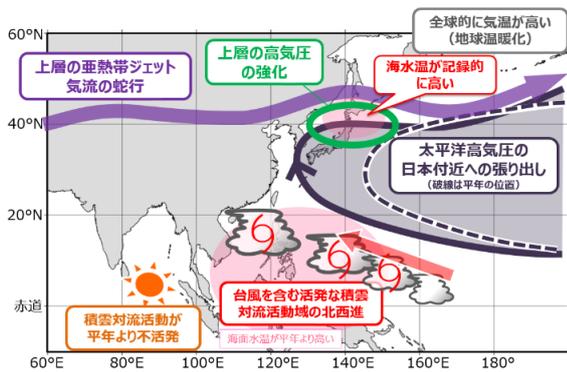
図表 8 偏西風帯とジェット気流



出所：BIOWEATHER SERVICE

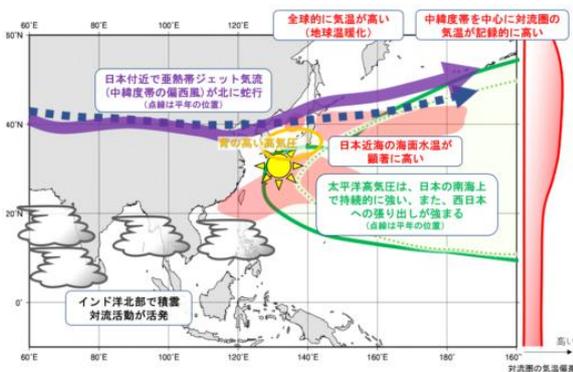
近年の日本の高温の一因として、亜熱帯ジェット気流が平年よりも大きく北に蛇行したことが挙げられます(図表 9,10)。

図表 9 大気の流れの模式図 (2023.7 後半)



出所：気象庁異常気象分析検討会資料

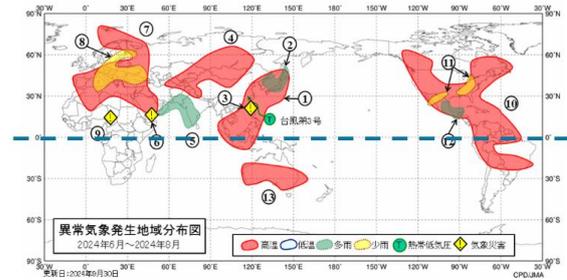
図表 10 大気の流れの模式図 (2024.7)



出所：気象庁異常気象分析検討会資料

この影響は日本だけでなく、北半球の各地にも及びました。北半球中緯度で対流圏の気温が高かったこと、地球温暖化の影響を受けて、日本などジェット気流が北に蛇行した北半球の複数の地域で極端な高温が発生しました(図表 11)。

図表 11 2024年夏期の異常気象発生分布図



出所：気象庁資料を基に作成

■ 高気圧のはたらき

2023年、2024年の夏、日本付近で亜熱帯ジェット気流が持続的に北に蛇行したため、下層では太平洋高気圧の張り出しが強まり、広い範囲で背の高い暖かな高気圧に覆われました。高気圧に覆われた場所では、日射が強まるだけでなく、下降気流が発生しており、雲ができにくく晴れやすい状態になります。さらに高気圧の背が高いと、下降気流に伴って空気が圧縮され、地上付近の気温が上昇します(図表 9,10)。

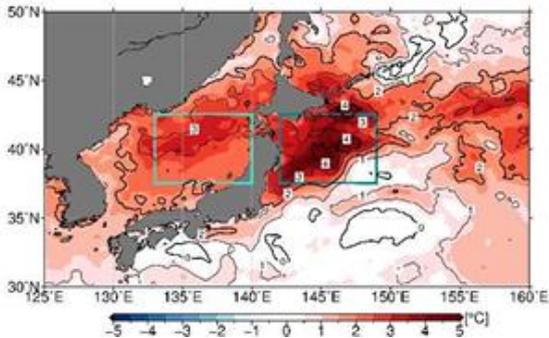
■ 海洋熱波のはたらき

「海洋熱波」とは海水温が顕著に高い状態が一定期間続くことで、2023年、2024年の日本の猛暑に寄与したと考えられています。

2023年夏の海面水温に注目すると、三陸沖では平年から4~5℃高くなっており、2023年の日本近海の海面水温偏差は統計を開始して以来、最も高い値となりました(図表 12)。また、海面付近よりも海中の方が大きい海水温偏差を記録しており、最大偏差は水深50m付近でした。これは黒潮続流が北上し、平年では冷たい親潮が流れている海域に黒潮の暖かい水が流れ込んだことにより、海面から海洋内部まで水温が上昇したためです(図表

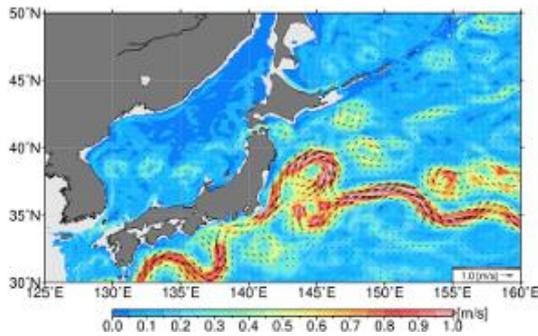
13)。水温の高い海洋が大気を直接温めるため、沿岸域は海風による冷却効果を得られず、高温状態が維持されることとなりました。

図表 12 海面水温偏差 (2023 年夏)



出所：気象庁

図表 13 深度 100m の海流 (2023 年夏)



出所：気象庁

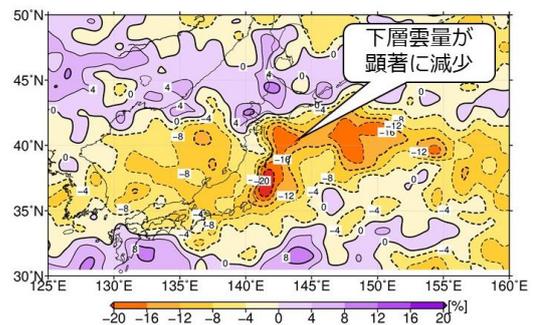
海洋熱波は水温、気温の上昇のみならず、雲の形成にも影響を及ぼします。海洋熱波状態が続いた三陸沖では、海洋からの加熱により海面付近の大気安定度が著しく低下しました。その結果、下層雲量が大きく減少し、地表に届く日射量が増加しました。日射量の増加により、海面の温度はさらに上昇し、下層雲がより一層減少するといったフィードバックが起きていたことが観測されています (図表 14)。

3.2 気候変動への予測と対応

1) IPCC と評価報告書 (AR) の概要

異常気象による被害を予防・軽減するためには、地球環境を適切に観測し、その結果を踏まえ正しく理解し、将来の気候を予測し、その対応につい

図表 14 MODIS による 2023 年夏 (6~8 月) 平均の下層雲量平年差 (%)



出所：気象庁異常気象分析検討委員会

■ ラニーニャ・エルニーニョ現象

また、上記に加え、2023 年には、冬に終息したラニーニャ現象の影響で、熱帯インド洋において積雲対流活動が平年より弱く、フィリピン付近で台風を含む積雲対流活動が活発となり、日本付近で上層のジェット気流が北偏したことに影響した可能性があります。

2024 年には、春まで続いたエルニーニョ現象等の影響で、北半球中緯度の気温が顕著に高い値となりました。

3) 要因の究明に向けて

このように異常気象には、地球温暖化の影響だけでなく、自然変動の影響も関与していることが分かります。異常気象の要因と想定される熱帯・中緯度域の積雲対流活動や下層雲、水蒸気量、海面水温などを継続的にモニタリングし、その結果を踏まえ、その仕組みを科学的明らかにすることが重要と言えます。

て実施することが大切です。そのためには、気候変動に関する様々な項目を評価する必要があり、その評価について、国際的な基準となっているのが「気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change :

IPCC)」が公表する評価報告書（Assessment Report：AR）です。

IPCC は 1988 年に世界気象機関（World Meteorological Organization：WMO）と国連環境計画（United Nations Environment Programme：UNEP）によって設立された政府間組織であり、2025 年 1 月現在、195 の国と地域が参加しています³。その目的は、各国政府の気候変動に関する政策に科学的な情報を与えることであり、世界中の科学者の協力の下、気候変動に関する最新の科学的知見による包括的な評価を提供します。また、IPCC には「政策を規定しない」という原則があり、政策判断の前提となる科学的な知識を示しているに過ぎません。どのような政策を採用するかは政府関係者、民間企業、または個人に委ねられます。

IPCC は総会、ビューロー（議長団）、執行委員会が設置され、その下に、三つの作業部会（WG）と一つのインベントリータスクフォース（TFI）が設置されています。WG はそれぞれ評価対象が異なり、WG1 は気候変動の自然科学的根拠について、WG2 は気候変動の影響、適応、脆弱性について、WG3 は気候変動の緩和について評価します。TFI は各国における GHG 排出量・吸収量の目録（インベントリー）策定のための方法論の開発、改善を行います（図表 15）。

図表 15 IPCC の組織図



出所：気象庁

IPCC は 5～7 年毎に AR を公表しています。第 1 次評価報告書（FAR）が 1990 年に公表され、最

新版である第 6 次評価報告書（AR6）は 2021 年から 2023 年にかけて公表されました。また、2023 年 7 月からは第 7 次評価報告書（AR7）の作成プロセスが開始されています。報告書は各 WG と TFI により作成され、最後に統合報告書が作成されます。AR6 には、気候変動問題に対する現時点の最新評価がまとめられているものの、AR6 では解明に至らなかった謎もあり、今後研究が進むことが期待されています。

2) 気候変動の予測

気候予測については、WG1 において取り扱われています。将来の気候システムの変化を予測するためには、気候モデルが使用されます。気候モデルとは、物理学の法則を基にコンピュータで地球の気候を再現するプログラムのことです。気候モデルは世界に多数存在しますが、以下では IPCC の AR6 で用いられている気候モデルを使用した気候予測プロセスを示します。

① シナリオの設定

AR6 WG1 では将来に対する気候の応答を評価するため、五つの例示的な排出シナリオが設定されており、このセットを一貫して考慮しています。これにより気候モデルによる気候システムの変化に関する予測を行います（図表 16）。

シナリオには、緩和策が十分に進んだ持続可能な社会や、化石燃料に依存した社会など、将来あり得る複数の社会経済パターンを想定したものがあり、各シナリオを表す「SSP x-y」とは、社会経済的傾向を表す共通社会経済経路（Shared Socio-Economic Pathways：SSP）の分類（x=1～5）と、AR5 で使用されたシナリオである代表的濃度経路（Representative Concentration Pathways：RCP）で示していた 2100 年頃のおよその放射強制力（W/m²）（=y）とを組み合わせたものです。

³ IPCC、List of IPCC Member Countries、https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/02/ipcc_members.pdf

図表 16 AR6 WG1 の 5 種類のシナリオの概要

シナリオ	シナリオの概要 [近いRCPシナリオ]
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない。2050年までにCO ₂ 排出量が現在の2倍に。[RCP8.5]
SSP3-7.0	地域対立的な発展の下で気候政策を導入しない。エアロゾルなどCO ₂ 以外の排出が多い。2100年までにCO ₂ 排出量が現在の2倍に。[RCP6.0 とRCP8.5 の間]
SSP2-4.5	中道的な発展の下で気候政策を導入。2030年までの各国の「国が決定する貢献(NDC)」を集計した排出量の上限にほぼ位置する。CO ₂ 排出は今世紀半ばまで現在の水準で推移。[RCP4.5(2050年までRCP6.0にも近い)]
SSP1-2.6	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする昇温(中央値)を2°C未満に抑える気候政策を導入。2050年以降にCO ₂ 排出正味ゼロ。[RCP2.6]
SSP1-1.9	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする21世紀末までの昇温(中央値)を概ね(わずかに超えることはあるものの)約1.5°C以下に抑える気候政策を導入。2050年頃にCO ₂ 排出正味ゼロ。[該当なし]

出所：環境省作成 IPCC 第6次評価報告書の概要 - 第1作業部会(自然科学的根拠)-

② 気候モデルの選択

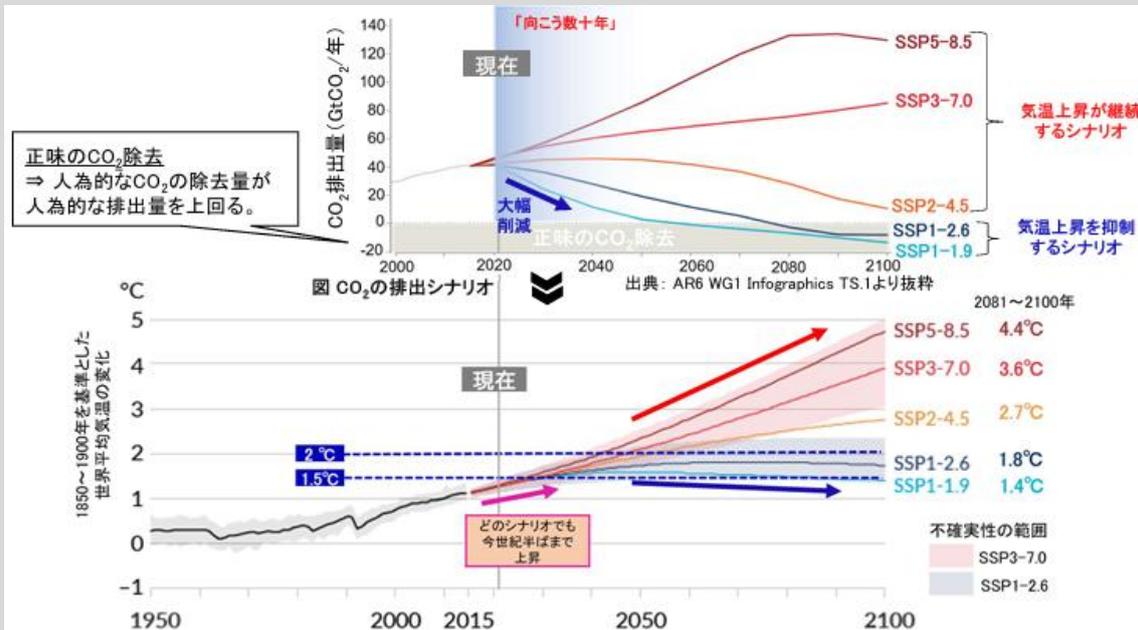
続いて、気候モデルを選択しますが、気候モデルは世界中で40種類以上存在します。モデルによって気候の再現方法が少しずつ異なるため、同じシナリオを選んでも予測結果に差異が生じます。そのため、AR6の気候変動予測では、世界気候研

究計画 (World Climate Research Programme : WCRP) による、モデル毎に異なる予測結果を相互に比較することで、予測の不確実性を把握する第6期結合モデル相互比較プロジェクト (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 : CMIP6) に参加している気候モデルから得られた結果を評価しています。

③ 気候変動の予測

図表 17 の下段は、CMIP6 を用いたシナリオセットにおける 1850~1900 年を基準とした世界平均気温の変化の予測結果です。五つのシナリオはどれも今世紀半ばまで気温が上昇しますが、その後気温上昇が継続するシナリオ (SSP5-8.5、SSP3-7.0、SSP2-4.5) と、気温上昇が抑制されるシナリオ (SSP1-2.6、SSP1-1.9) の2種類に分類することができます。

図表 17 1850~1900 年を基準とした世界平均気温の変化



出所：環境省作成 IPCC 第6次評価報告書の概要 -第1作業部会(自然科学的根拠)-

3) 「緩和」と「適応」による気候変動への対応

気候変動問題においては、大きく分けて2種類の対策が実施されており、それぞれ、「緩和」と「適応」です。緩和はWG3で、適応はWG2で取り扱われています (図表 15)。

緩和とは、GHGの排出を抑制することで、気候変動の原因そのものを減少します。緩和策の具体例としては、太陽光等の再生可能エネルギーの活用、エコカーの普及、節電・省エネ、森林の増加などが挙げられます。緩和は非常に重要で最優先す

べき対策ですが、その効果が発現するには長い時間がかかるため、仮に、GHGの排出量を直ちにゼロにしたとしても、気候変動の影響はしばらく続くと予想されます。

そこで、気候変動による被害を回避・軽減し、より良い生活を送るための対策である適応も不可欠となります。適応策の具体例としては、ハザードマップを活用したリスクの少ない土地の選択、事業継続計画（Business Continuity Plan：BCP）の策定、熱中症の予防などが挙げられます。

緩和と適応は、気候変動対策における車の両輪であり、上手に組み合わせて実施することで相乗効果を生み出します（図表 18）。

図表 18 緩和と適応



出所：環境省

3.3 IPCC の最新研究について

1) AR6 WG1 のポイント

AR6を構成するWG1～WG3の中でも、気候変動への自然科学的理解を示すWG1の重要性が再認識されています。これは、気候を物理的にモデル化し、地球温暖化の予測精度向上に貢献した真鍋博士のノーベル物理学賞受賞や、AR6公表時のメディアにおけるWG1のヒット数の多さからも推測できます。

図表 19 Multiple lines of evidence について



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 渡部氏発表資料

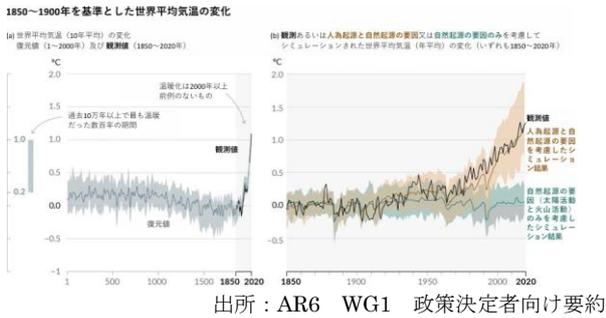
A) 複数の証拠による理解・評価

AR6では「Multiple lines of evidence」と呼ばれる、複数の証拠を組み合わせて物理的理解と評価を行うことの重要性が強調されました。複数の証拠とは、衛星地球観測データを含む20世紀以降の観測データ、過去気候の代理指標、理論、数値モデルによるシミュレーションデータのことであり、この方針は次回の報告書でも受け継がれると予想されています（図表 19）。

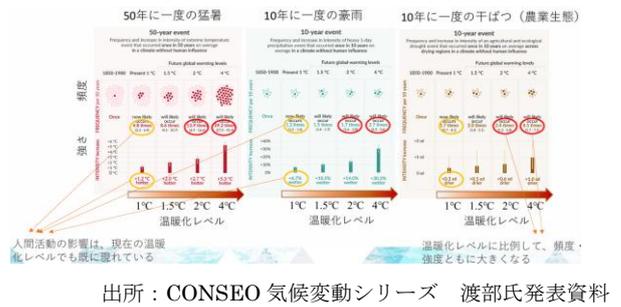
B) 気候モデルについて

現在の全球気候モデル（Global Climate Model：GCM）は、地球の表層（大気、陸地、海水等）を物理学の法則に基づき、仮想的な地球のシミュレーションを行います。気候モデルを用いた過去2000年間の気温変化のシミュレーションの結果、「人間活動が気候システムの温暖化及び広範で急速な気候変化をもたらしてきたことは疑う余地がない」と断言されました。人間活動が地球温暖化に与える影響について、断言調な表現が使用されたのはAR6が初めてのことです（図表 20）。

図表 20 世界平均気温の変化シミュレーション



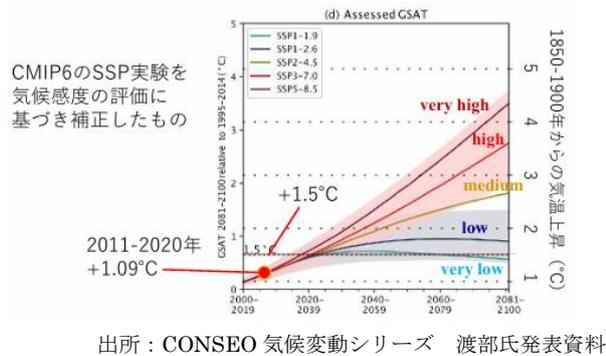
図表 22 地球温暖化と極端気象の相関関係



C) 気候モデルによる将来予測

AR6 では、五つの社会経済シナリオを用いて、気候モデルによる将来予測が行われています。CO2 排出量は、シナリオ毎に現時点から大きく枝分かれしていますが、気温上昇はすべてのシナリオで当面は上昇します。しかし、今世紀末の気温上昇度合いは社会シナリオに応じて大きな差が生まれます。今後数十年の間に GHG 排出削減を強力に進め、カーボンニュートラルのシナリオ (very low) を実現しない限り、今世紀末までに温暖化レベルは +1.5°C 又は +2°C を越えると予想されています (図表 21)。

図表 21 各シナリオの気温上昇



また、世界的な極端気象は今後、強さ・頻度の両方で増加するという結論が得られており、極端気象の変化に地球温暖化レベルとの相関関係があることが判明しました。さらに、現時点で地球の平均気温は 1.1～1.2°C 上昇しており、人間活動による温暖化の影響はすでに表れていると考えられています (図表 22)。

D) 剰余炭素予算

WG1 の自然科学的観点による研究は、WG2、WG3 の分野にも貢献しています。WG1 の研究結果によると、累積した CO2 排出量と気温上昇は比例関係である累積炭素排出に対する過渡気候応答 (Transient Climate Response to Cumulative Carbon Emissions : TCRE) の状態にあり、温暖化レベルごとに許容される排出量 (剰余炭素予算) はシナリオに依らないことが判明しています。つまり、将来にわたって CO2 の排出を続けた場合、どの社会シナリオを選択しても、地球の平均気温は CO2 排出量に比例して上昇します。また、現時点で人類が排出している CO2 量は推定されていることから、目標とする温暖化レベルに対して、人類が今後排出できる CO2 量を求めることができます。この剰余炭素予算は、気候変動の緩和策のコスト推定など社会科学、経済学分野に役立ちます (図表 23)。

図表 23 TCRE と温暖化レベルに応じた剰余炭素予算



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 渡部氏発表資料

2) 今後解明が期待される謎

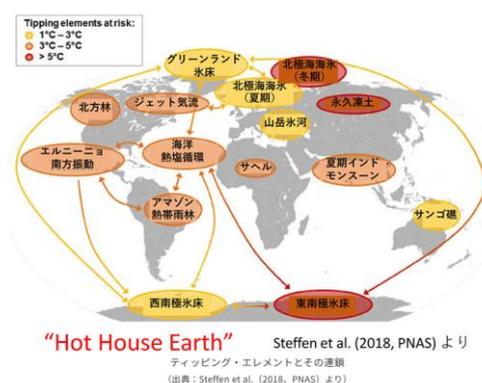
これからの気候変動の研究や、2028年頃に公開が予定されているAR7に向けて、科学的理解の進展が期待されている分野があります。

A) Tipping Point に関する科学的理解と予測

「Tipping Point」とは、少しずつの変化が急激な変化になってしまう転換点を意味します。気候変動についても、人為起源の変化があるレベルを超えると、気候システムにしばしば不可逆性を伴うような大規模な変化が生じる可能性があることが指摘されています⁴。例えば、温暖化自体の進行が緩やかでも、永久凍土が崩壊してCH₄やCO₂が放出されると、地球環境へのインパクトは大きく、それ以前の状態にすぐに戻すことはできません。

このような、地球環境の激変をもたらす事象は「Tipping Element」と呼ばれており、今世紀末までに起こるかどうかは不確定と言われています(図表 24)。AR6で最も大きな不明点の一つだったこの事象について、AR7ではどれだけ研究が進むかが注目されています。

図表 24 Tipping Element とその連鎖



出所：A-PLAT

B) 海水温の長期的な変化

昨今、国際的に注目されている不明点が、海水温の長期的な変化です。地球温暖化に伴い多くの海域が温暖化する一方、太平洋東部の海水温は低温化しています。しかし、その原因は解明されておらず、現在の気候モデルによるシミュレーションでも再現できていません。

海水温パターン変化の理解は、台風や地域気候の将来予測にも重要であるため、AR7に向けて、過去の気候への科学的理解が進むことが期待されています。

⁴ 環境省、令和2年版 環境・循環型社会・生物多様性白書、https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r02/pdf/1_1_02.pdf

コラム（その1）クライメート・フレスク：気候変動を理解するための共同学習の力

気候変動は複雑な問題であり、しばしば圧倒されそうになるトピックです。2024年8月、CONSEOではサステナビリティ教育団体「いちごブルーム」と共同で、CONSEOコンソーシアムのメンバーを対象とした「クライメート・フレスク」を開催しました。このワークショップは、2015年パリ協定を受けて、気候変動に対する一人一人の理解と周囲との会話、そして行動を促すためにフランスでデザインされました。

CONSEO 気候変動シリーズでのクライメート・フレスクの開催



気候学習への実践的アプローチ

クライメート・フレスクは、複雑な気候科学を視覚的に面白く、インタラクティブなフォーマットに落とし込んだ3時間のワークショップです。参加者はチームに分かれ、IPCCの報告書に基づく42枚のカードを使い、気候システムの因果関係を表現するワークを行います。中には専門的な単語も出てきますが、4名以上のチームで一緒に考えることで、初めて気候変動について学ぶ方から専門家まで一緒に楽しむことができます。それぞれの理解と経験、興味関心が多様であればあるほどそのチームの共有知 (collective intelligence) は豊かになっていき、包括的な理解を深めます。

ワークショップの様子



気候変動対策への合意形成

気候変動対策の難しさの一つに合意形成がありますが、このワークショップでは、脱炭素の必要性について科学的根拠と周囲との会話を持って合意形成をすることができるため、従業員とその組織の持続可能性に関する目標を擦り合わせることに役に立ちます。

グローバルな動き

クライメート・フレスクは、世界で200万人、日本でも4,500人（2025年1月現在）が参加しているグローバルムーブメントで、様々な組織で広く採用されています。フランス最大のエネルギー会社 EDF は、15万人の従業員を対象にワークショップを展開

しており、英国では昨年、政策立案者、公務員、銀行関係者がウェストミンスター宮殿に集まり、大規模なセッションが開催されました。欧州宇宙機関（ESA）もワークショップの価値を認め、職員向けにクライメート・フレスクのセッションを開催しています。

アジア圏では中国とシンガポールはそれぞれ 10,000 人以上の参加者がいます。日本でもムーブメントは拡大中であり、2024 年 11 月、東京大学で開催されたクライメート・フレスクの大規模なセッションは、同時参加者数で国内新記録を樹立するという重要なマイルストーンを達成しました。COP29 の開催に合わせていちごブルームとパートナーがコーディネートしたこのイベントは、日本におけるクライメート・フレスクをめぐる機運と熱意の高まりを実証しました。

多様な参加者に合わせたアプローチ

このワークショップは、日本を含む多様な文化的背景をもった人や気候変動に関する知識レベルが様々な人にも適応します。気候変動という複雑な問題を、大きな視点で捉えることとその因果関係をカードという形で視覚的に分かりやすく整理することは、どんな人でも思考の整理に繋がります。また、ワークショップの内容を特定の文化的ニュアンスや地域の課題に合わせることで、様々な背景や考え方を持つ参加者を効果的に巻き込むことができます。

個人と組織に力を与える

今回のワークショップは、CONSEO メンバーと JAXA スタッフが意見を交換し、課題について議論し、参加者は、気候変動の相互関連性と、気候関連問題に取り組む上での宇宙技術の役割について理解を深めました。

ある参加者は、「このワークショップは、点と線を結ぶための基本的な理解への第一歩になる」とコメントし、またすでに気候科学に精通している参加者は、「クライメート・フレスクは、普段の専門から一歩引いてマクロなレベルで考える機会を提供してくれた。」と述べました。

個人や組織が複雑な環境問題を理解し、自分ごととして捉えることは、気候変動対策の重要な第一歩です。気候危機が深刻化し続ける中、気候リテラシーを高め、集団行動を促し、持続可能な変化を推進するためにクライメート・フレスクを受けてみてはいかがでしょうか？

詳細情報：[クライメート・フレスク](#)

ワークショップの様子



Ichigo Bloom 篠原美奈巳ファシリテーター監修

4. 気候変動の謎を解明するための科学的手段

全球を均質的・定量的に把握可能な衛星地球観測は、観測データの蓄積・準リアルタイムでの監視・気候変動予測に必要なデータ同化・初期値改良・プロセス解明・モデル検証の点から気候変動の謎の解明に貢献します。

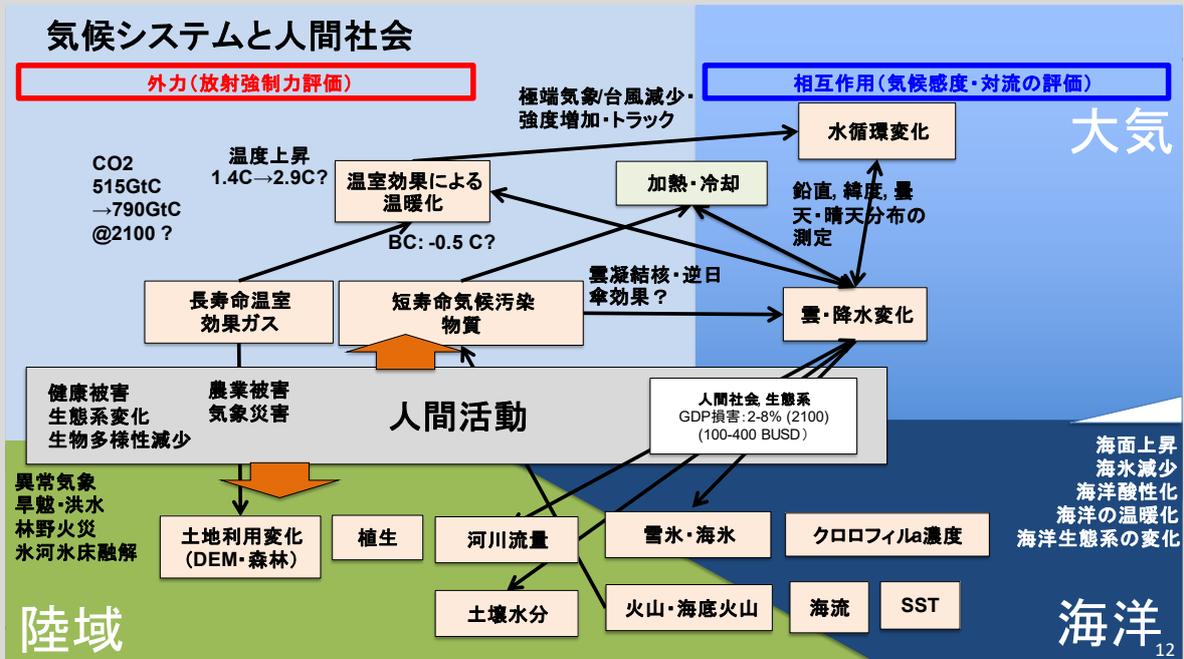
4.1 気候変動理解における課題

1) 現在の気候変動

現在の気候変動の問題は、人間活動による気候への影響とそのフィードバックの問題です。図表25に示すように気候システムを構成する各要素は複雑に絡み合っており、また、個々の要素の理解においても様々な課題があることは言うまでもありません。例えば、雲の形成・維持・消滅のメカニズムや人為起源エアロゾルが雲を変質させるメカニズム、集中豪雨のメカニズム、あるいは海洋循環における大気と海洋の相互作用など多々あり

ます。近年は衛星観測も含めた観測技術の進展や数値モデルの精緻化により、以前と比べて気候変動メカニズム、特に個々のプロセスの理解が進んできました。しかしながら、気候の将来予測を正確に行うためには解決すべき課題も依然としてあり、特に気候システムの非線形性の特徴や複雑に絡みあうサブシステム間の関係性の解明が重要です。前者の一つとしては Tipping Point と Overshoot の問題、後者の問題としては様々なサブシステム間におけるフィードバックがあげられます。

図表 25 気候システムと人間社会



出所: JAXA

2) Tipping Point と Overshoot

Tipping Point とは、いくつかの気候要素の変化がある閾値をこえると元に戻れなくなり、非可逆的な変化になってしまうことです。地球の気候システムは極めて複雑で、その変化も多様な時空間スケールで起こり、かつ極めて非線形的な特徴を持ちます。その結果、気候システムのある平衡状態から別の平衡状態に移行することが起こり得ます。たとえば雪氷面は、そのアルベド（太陽放射の波長全域に対する反射率）が大きいのにに対して雪氷がない陸面や海面のアルベドは小さいため、温暖化により雪氷が融けると地球はより太陽放射エネルギーを吸収しやすくなります。そうすると地球の温度がさらに上昇し、より雪氷が融けるので地球のアルベドは減少し続け、温度が上昇するということになります。したがって温暖化が進むようなフィードバックがかかることになります。気温を現在の気候値に戻すだけでは地球は元に戻らないのです。これをアイスアルベド・フィードバックと呼びます。このようにある状態がある閾値を超えると元に戻らなくなるのです。

このような **Tipping Point** の問題は、現在議論されているもう一つの大きな問題である **Overshoot** の問題にも密接に関係します。**Overshoot** の問題とは、次のようなことです。2015年に合意されたパリ協定、すなわち地球の平均気温を産業革命以前と比べて 1.5°C の上昇に留めるという目標において、一時的に 1.5°C を超えても最終的に目標を達成できれば良いのではないかという考え方があります。これは GHG 排出の抑制に時間がかかり、様々なシナリオがあり得るからです。ところが、全球平均気温が上昇する過程で 1.5°C 高い気温になったときの地球の様々な地域の気候の状況が **Overshoot** によるピークの気温から下降する過程で 1.5°C 高い気温になったときと同じになるとは限らないということです。気候モデルの予測結果は不確定を含んでいる上に、**Tipping Point** のような変化が起きたりすると、産

業革命以前から 1.5°C の気温上昇という条件でも **Overshoot** のピークの前後では降水や雪氷など地球の気候は同じではない可能性があります。そもそも、想定していない **Tipping Point** の変化が起こると、現在の気候モデルで **Overshoot** の後に全球平均気温が落ち着いて 1.5°C 以内に収まると予想されていても実際になそうはならず気候が暴走してしまう可能性も否めません。

3) 様々なフィードバック

気候の様々なサブシステム間のフィードバックとしては、上で述べたアイスアルベド・フィードバックもありますが、その他、大気海洋の相互作用や炭素循環など多岐にわたります。そこでは単に物理過程による変化のみならず化学・生物学的な変化も関係することもあります。

例えば、炭素循環について考えてみましょう。人間活動によって排出された CO_2 はすべてが大気中に残るわけではなく、海洋や植物によって吸収されます。また、植物も光合成で CO_2 を吸収するだけでなく、呼吸により CO_2 を放出もしています。そのバランスの結果、植物の成長においては大気中の CO_2 は吸収されることになります。海洋も細かく見れば CO_2 を吸収している海域と放出している海域がありますが、全体では吸収しています。ここで、気候変動により植生や海洋の状況が変わると、植物や海洋による CO_2 の吸収が変化します。その結果、大気中の CO_2 濃度に影響を及ぼし、再度気候変動にも影響するというフィードバックが生じるようになります。フィードバックは正であれば気候要素の変化が増大し、気候システムは不安定になります。一方で、負のフィードバックが働けばシステムは安定化します。このようなメカニズムを正確に把握し、気候の将来予測に取り入れることが重要です。

4) 衛星観測と数値モデル

現在の気候変動研究においては、一つの衛星による観測のみ、あるいは数値モデルのみで新たな知見を得たり将来予測を改善したりすることは難しくなっています。複数の衛星データを合わせた解析や、衛星観測と数値モデルを連携させることにより、モデルの検証、改良、またプロセス研究におけるメカニズム解明が進み、気候変動研究が大きく展開されるようになってきています。衛星観測は物理、化学、生物、さらに社会経済的な面も含めて多様なデータを提供することができます。一方で、

数値モデルも地球システムモデルなど地球表層の多様な要素を組み込んだモデルも開発されています。また、気候変動に伴って異常気象の頻発化が心配されていますが、日々の天気予報においても、数値モデルによる予報業務に用いられる初期値はその90%以上が衛星観測によるものであり、衛星観測と数値モデルの連携協力は切り離せないものになっています。今後は、地球デジタルツインなど、観測と数値モデルの連携がより重要になるものと思われます。

4.2 気候予測における観測の役割

気候予測において衛星地球観測データが果たし、期待されている役割や貢献について、「過去」「現在」「未来」の観点から確認します。

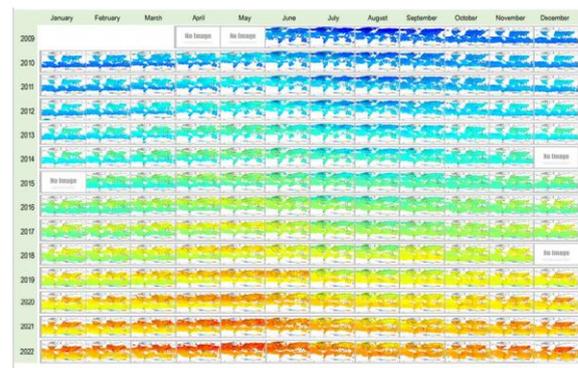
1) 「過去」の観点から見る衛星の貢献

「過去」の観点からは、全球の均一な観測データの蓄積に衛星が貢献します。GHGや森林のような様々な観測対象を、10年～20年にわたり観測できる衛星地球観測の「継続性」は、気候変動の理解にとって重要です。

■ 温室効果ガス (GHG)

GHGは、GOSAT(温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」)シリーズにて、2009年から現在にかけて、全球のデータが観測されています(Kuze et al. 2009)。観測結果から、全球のCO₂濃度が増加していることが確認できます。2025年度には温室効果ガス観測センサ(TANSO-3)を搭載したGOSAT-GW(温室効果ガス・水循環観測技術衛星)が打ち上げられる予定であり、今後も継続的に観測データが蓄積される予定です(図表26)。

図表 26 GOSAT が観測した全球の CO₂ 濃度

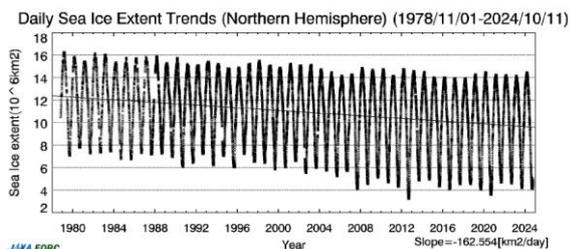


出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は MOE/NIES/JAXA 提供

■ 海水

極域の海水面積の変化は、地球温暖化の影響を顕著に表します。地球温暖化に伴い、極域では海水域面積の減少等の様々な変化が起こっていますが、このような海水の変化は GCOM-W(水循環変動観測衛星「しずく」)や GOSAT-GW に搭載されている高性能マイクロ波放射計(AMSR)シリーズなどのマイクロ波放射計により継続的に観測されています(図表27)(Seki et al. 2024)。

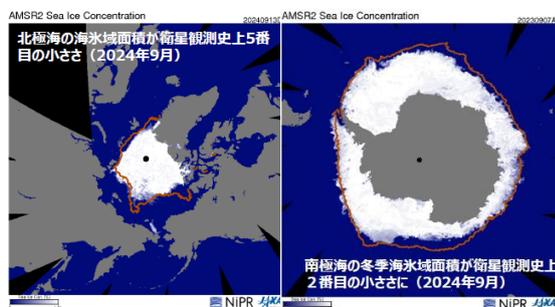
図表 27 北極海における海水面積変化 (1978 年以降)



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は JAXA/EORC 提供

マイクロ波放射計の継続的な観測により、極域の海氷域面積が近年、減少傾向にあることがわかります (図表 28)。

図表 28 極域における海氷域面積



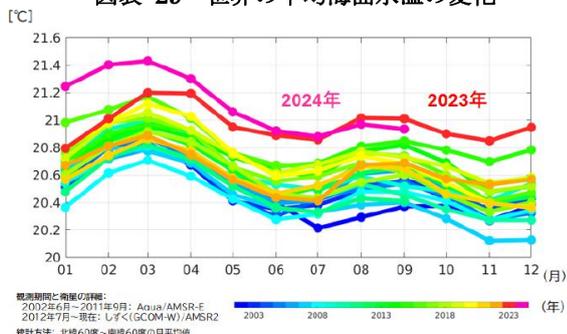
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は NiPR/JAXA 提供

■ 海面水温

海面水温の変化について、GCOM-W や GOSAT-GW に搭載されている AMSR シリーズなどのマイクロ波放射計により継続的に観測されています (Shibata 2004)。

AMSR シリーズの観測により、平年と比べ、2023 年、2024 年の世界の平均海面水温は明らかに高いことが確認されます (図表 29)。

図表 29 世界の平均海面水温の変化



観測期間と衛星の名称：
2002年6月～2011年9月：Aqua/AMSR-E
2012年7月～現在：しずく(GCOM-W)/AMSR2
統計方法：北緯60度～南緯60度の月平均値

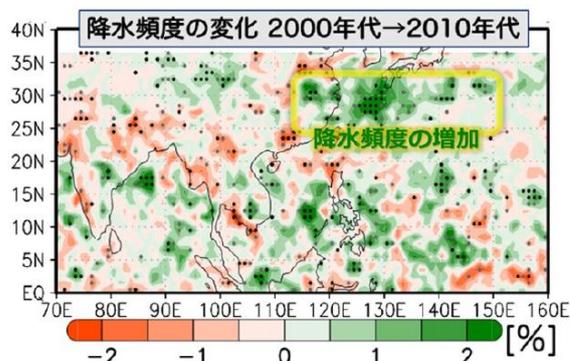
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は JAXA 提供

■ 降水

JAXA では、20 年以上の長期にわたり、TRMM (熱帯降雨観測衛星) と GPM (全球降水観測) 計画を通して、衛星搭載降水レーダを開発、運用し、宇宙から世界の雨を観測しています (岡本謙一 2019)。

東京都立大学高橋洋助教のグループは、TRMM・GPM データによる梅雨前線に関する長期の観測データを通じて、直近 10 年間における梅雨前線が非常に活発であることや、梅雨期の気象災害の頻発への強い関連性を示唆しました (図表 30) (Takahashi and Fujinami 2021)。

図表 30 降水頻度の変化 (2000 年代→2010 年代)



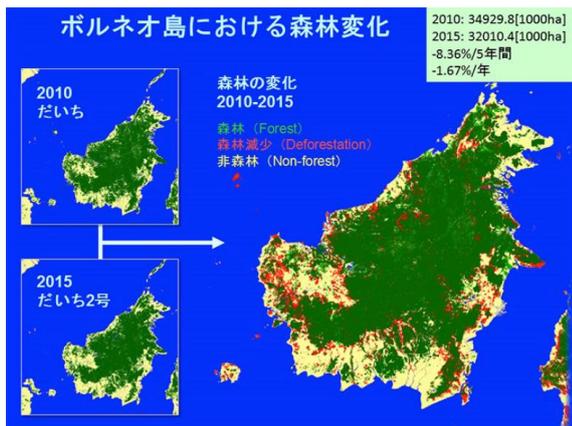
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は東京都立大学資料に JAXA が加筆

■ 森林 (陸域)

森林面積の把握や保全は、温暖化対策の政策決定のための重要な取組となります。JAXA では、JERS-1 (地球資源衛星「ふよう 1 号」)、ALOS (陸域観測技術衛星「だいち」)、ALOS-2 (陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」)、ALOS-4 (先進レーダ衛星「だいち 4 号」) による L バンド合成開口レーダ (SAR) の 25 年以上の観測データを蓄積し、森林・非森林データを提供しています (Shimada et al. 2014)。

SAR 観測データにより、近年の熱帯域等にて進行している森林伐採等による森林減少が確認できます (図表 31)。

図表 31 ボルネオ島における森林変化



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は JAXA 提供

2) 「現在」の観点から見る衛星の貢献

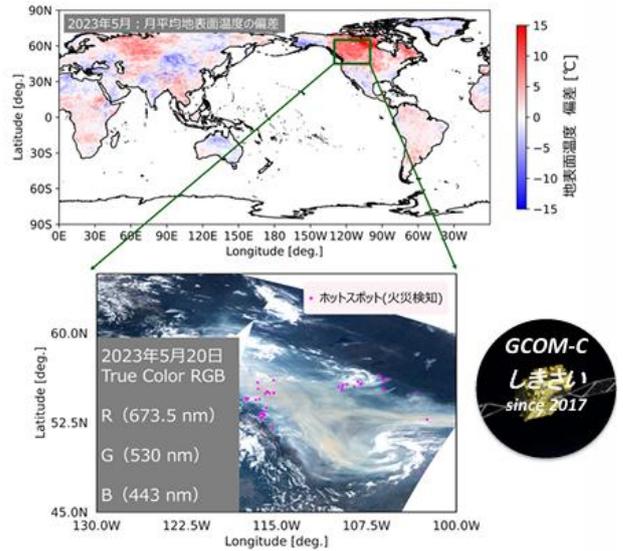
「現在」の観点からは、衛星がほぼリアルタイムに地球環境を監視することで貢献しています。

■ 森林火災、地表面温度

2023 年はこれまでと比較して明らかに「暑い」年であり、この異例の暑さは森林火災に対しても影響を及ぼしていると考えられます。

JAXA の運用する GCOM-C (気候変動観測衛星「しきさい」) は、非常に広い観測幅を有する人工衛星で、広範囲で地表面温度を観測します (Imaoka et al. 2010)。2023 年 5 月のカナダでは平年よりも 10℃程度高い地表面温度が観測され、同時期に大規模な森林火災が発生していることも GCOM-C で観測されています(図表 32)。

図表 32 2023 年 5 月の月平均地表面温度の偏差と同時期に観測された火災による煙の様子



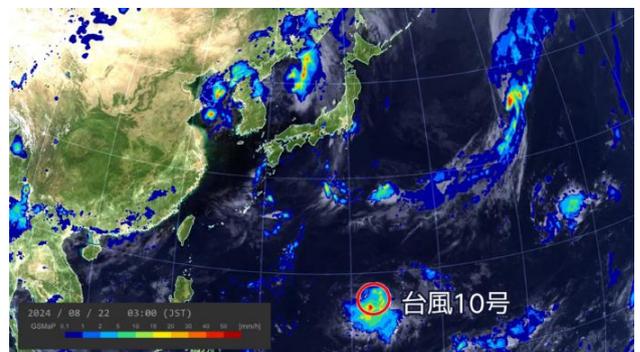
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は JAXA 提供

■ 降水

JAXA では GPM 主衛星や GCOM-W 等の国内外の衛星のデータを統合し、「衛星全球降水マップ (GSMaP)」を無償で提供しています (Kubota et al. 2020) (図表 33)。

GSMaP は、地上観測が不足する海上に台風が発生しているときも観測可能である点が強みです。降水データが不足する海外での降水監視、洪水予測や農業等の実利用分野での利用が進んでいます。また、IPCC AR6 WG1 報告書では、GSMaP は気候モデルとの比較・検証に利用されています。

図表 33 GSMaP による令和 6 年台風 10 号の観測



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 久保田氏資料
図は JAXA 提供

3) 「未来」に向けて衛星に期待すること

「未来」の観点からは、より正確な気候変動予測のために必要なプロセス解明、モデル検証が期待されています。

■ エアロゾル・雲・対流・降水のプロセス

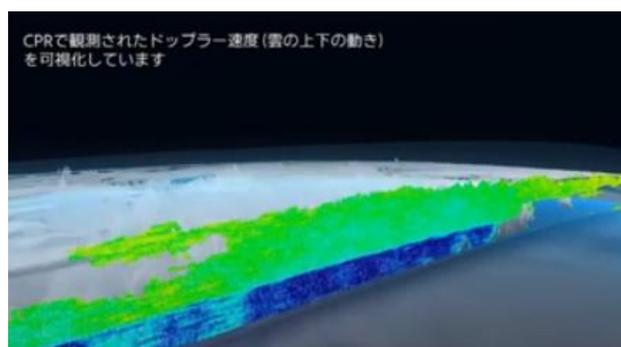
雲とエアロゾルは、気候変動予測に最も大きな不確実性をもたらしていることから、気候モデル開発における大きな課題であり、世界の研究者が技術開発を進めています。特に、雲とエアロゾルの相互作用は気候変動予測において科学的な難問であり、その理解には雲やエアロゾルに関する精緻な全球観測が必要となります。

2024年5月に打ち上げられた雲エアロゾル放射ミッション EarthCARE (はくりゅう) は、ESA と JAXA・NICT の協力による世界最先端の技術で、雲やエアロゾルの理解に挑戦するミッションです (Illingworth et al. 2015)。JAXA と NICT により開発された雲プロファイリングレーダ (CPR) は、雲の高さ分布だけでなく、雲の動きを計測します。CPR のドップラー計測機能により、世界で初めて、宇宙から雲の上下の動きを観測しました。この観測により、雲粒が雪や雨に成長し、地上へ降水粒子が落下するプロセスの理解に役立ちます。雲粒が雨になると落下速度が速まるため、ドップラー計測により雨と他の状態の境目を捉えることが可能です。これにより、雲粒が降雨へ成長するメカニズムの理解や、気象モデルや気候モデルの雲降水過程の改良が期待されます (図表 34)。

4.3 気候・気象モデルにおける衛星データの利用

衛星観測データが気候研究に果たす役割は、地球環境に係る4次元のプロセス理解であり、「過去」「現在」「未来」の観点に分けて考えることができます。

図表 34 EarthCARE による雲の上下の動きの観測



出所：サテナビ
図は JAXA/NICT/ESA 提供

■ 将来計画

米国航空宇宙局 (NASA) が主導して国際的に計画を進めている AOS (Atmosphere Observing System) ミッションでは、JAXA は降水レーダ衛星 (Precipitation Measuring Mission : PMM) を担当し、世界初となるドップラー計測機能を有する衛星搭載降水レーダを開発します。PMM と AOS の衛星群を複合的にデータ解析することで、エアロゾル・雲・対流・降水のプロセスを明らかにします。

これらの成果は気候モデルの中での雲の成長を科学的に解明し、気候モデルの改良・評価に役立つと考えられており、気候モデルの改良を通して、PMM では豪雨の予測精度向上へ貢献します。日本による先進的な観測で新たな科学的知見が蓄積して科学が進展することも重要であり、PMM のような衛星観測の「先進性」は気候予測に大きく貢献します。

このうち、「未来」の観点において衛星データが果たす役割は、気候・気象モデルにおける数値モデルへの貢献であり、「データ同化・初期値改良」「プロセス解明」「モデル検証」に分けられます (図表 35)。

図表 35 衛星データが気候研究に果たす役割



出所：JAXA 資料

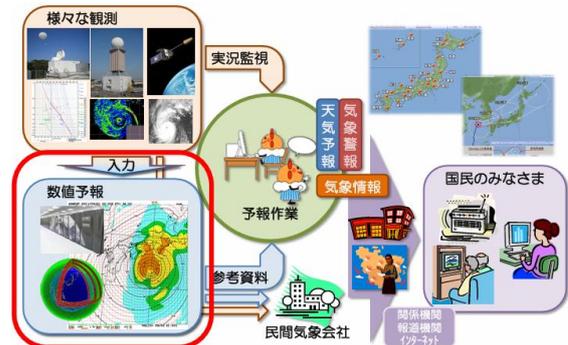
1) データ同化・初期値改良

A) 気象業務における数値予報の位置づけ

私たちが普段目にする天気予報や気象警報等の気象情報は、気象庁が実施する気象業務によって作成されます。これらは、衛星も含む様々な機器等による観測結果や、観測結果を用いて作成する数値予報の予測結果を基にして、予報官が知識と経験を反映させて予報作業を行い、その結果が各種メディアを通じて国民に発信されるものです。

これら天気予報等を作成するにあたり基盤となる技術が数値予報です。数値予報技術の向上により、天気予報等の精度や効率、スピードが格段に向上し、日々の暮らしに欠かせないものとなりました(図表 36)。

図表 36 気象業務における数値予報の位置づけ



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

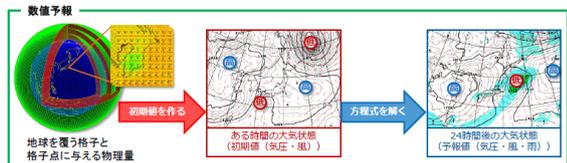
B) 数値予報の概要

数値予報とは、現在の大気状態を初期値として計算式に入力し、大気現象を支配する方程式をコンピュータで解いて、未来の大気状態を予測することです。数値予報で得られた予測結果を基に予報作業を行い、天気予報や気象警報などを発表します(図表 37)。

まず、初期値の作成においては、全球で、大気を格子(メッシュ)状に区切り、マス目ごとに気温、水蒸気量、気圧などの物理量を付与し、初期値を作ります。この初期値に観測結果を反映させる作業を、データ同化と呼びます。初期値は予測精度

に大きく影響するため、多くの観測データを使い、より正確な値を作成することが必要です。衛星からは、広範囲で大量の観測データが得ることができ、数値予報にとって重要な役割を果たします。

図表 37 数値予報のプロセス

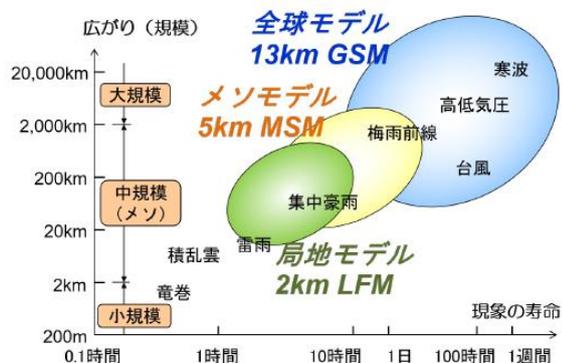


出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

C) 気象庁の主な数値予報モデルと利用観測データ

気象庁が使用する主な数値予報モデルには、全球モデル、メソモデル、局地モデルの3種類があり、気象現象の水平及び時間スケールにより使い分けます。例えば、高低気圧などの大きな現象は規模が大きく時間も長いため、全球モデルを使用して予報を行います (図表 38)。

図表 38 気象庁の数値予報モデルが対象とする気象現象の水平及び時間スケール



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

また、利用観測データは「直接観測」「地上リモートセンシング」「衛星観測」「その他」の4種類によるもので、それぞれ使用する数値予報モデルも異なります (図表 39)。

図表 39 数値予報モデルに使用するデータ一覧

データの種別	解析に使用する観測要素	使用先		
		全地球	メソ	局地
直接観測	固定観測点の地上観測 (アメダスを除く)	○	○	○
	船舶・ブイ	○	○	○
	ラジオゾンデ・レーウィン	○	○	○
	航空機	○	○	○
	アメダス	○	○	○
地上リモートセンシング	ウィンドプロファイラ	○	○	○
	気象レーダー	○	○	○
	地上 GNSS 観測	○	○	○
	船舶 GNSS 観測	○	○	○
	地上設置型マイクロ波放射計	○	○	○
	可視・赤外線イメージャ	○	○	○
	マイクロ波イメージャ	○	○	○
	赤外放射計	○	○	○
	マイクロ波サウンダ	○	○	○
	マイクロ波散乱計	○	○	○
二周波降水レーダー	○	○	○	
GNSS 掩蔽観測	○	○	○	
他	気象庁台風解析データ	○	○	○

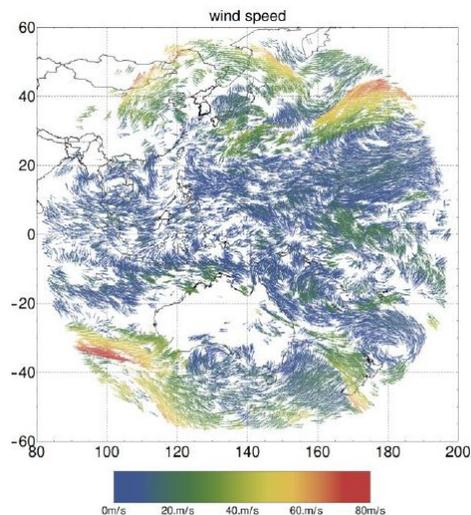
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

数値予報モデルに使用する具体的な衛星観測による要素は以下の通りです。

■ 大気追跡風 (Atmospheric Motion Vector : AMV)

AMV の観測では、気象衛星「ひまわり」を用います。観測した連続画像から雲や水蒸気の動きを捉え、AMV として風向や風速を 1 時間毎に算出します。「ひまわり」は、海洋上の風の向きや速さを把握できることが強みであり、この観測値は、数値予報の初期値作成においても利用されます (図表 40)。

図表 40 「ひまわり」による風観測



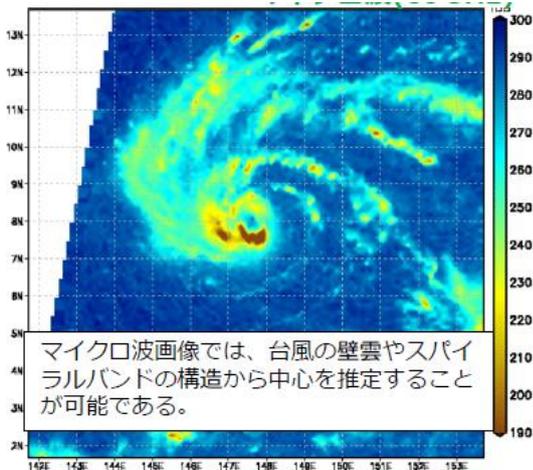
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

■ 輝度温度（放射輝度）

「ひまわり」や GCOM-W、AMSR2 を用いて、地球から射出された放射について、大気の影響の程度から大気の状態（気温、水蒸気量、雲水量、降水量等）を観測します。しかしこれらの物理量を直接観測しているわけではなく、観測した輝度温度から物理量を推測します（図表 41）。

数値予報における輝度温度データの同化利用では、主に気温、水蒸気量の情報を使用します。

図表 41 GCOM-W によるマイクロ波観測

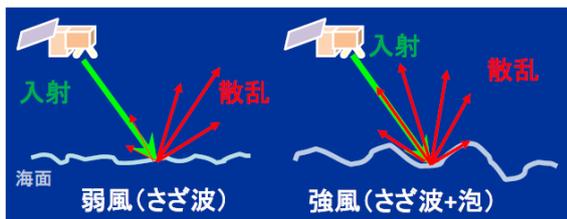


出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

■ マイクロ波散乱計による観測

マイクロ波散乱計は、人工衛星が海面にマイクロ波を放射し、海面からの反射の違いを観測するアクティブなセンサです。例えば、マイクロ波が後方にも散乱するときは、強風で波が高いことが分かります。このような衛星通過時の海上風の分布は、台風観測に役立ちます（図表 42、43）。

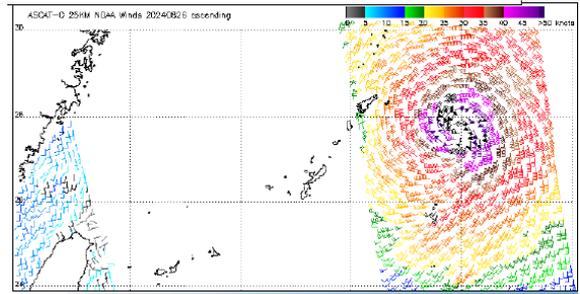
図表 42 マイクロ波散乱計による海上風ベクトル算出



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

数値予報におけるデータ同化利用では、下層の風や温度場の改善、下層の収束の情報から水蒸気場の改善が期待されます。

図表 43 マイクロ波散乱計 ASCAT の観測データ



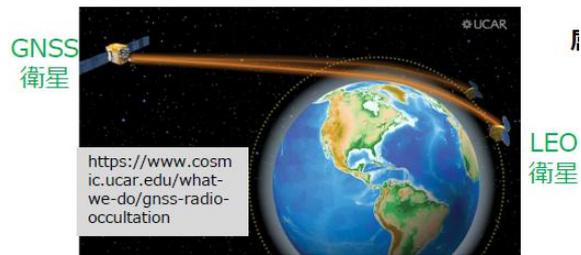
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

■ GNSS 掩蔽法による観測

地球の周りを囲む大気を電波が通過する際、電波が屈折することを利用し、GNSS（Global Navigation Satellite System）衛星からの電波の屈折角から気温、水蒸気量の情報が得られます。この観測データは精度が高く、初期値作成の基準となります。

数値予報では、観測された屈折角と数値予報モデルが表現する大気状態から計算した屈折角を比較することで、大気状態（Grid Point Value：GPV）を修正しており、特に対流圏上部・成層圏の解析・予測に大きな影響を与えます（図表 44）。

図表 44 GNSS 掩蔽の仕組み



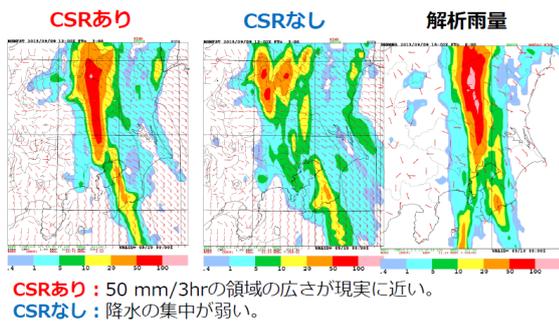
出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

D) 衛星観測データ利用による数値予報への影響

衛星地球観測により入手したデータを利用して数値予報の改善・向上を図ります。

実際に、「ひまわり」の晴天輝度温度（Clear Sky Radiance：CSR）データをメソモデル初期値作成に利用することで、乾燥域と湿潤域のコントラストが現実の状態に近づき、降水予測の改善につながりました（図表 45）。

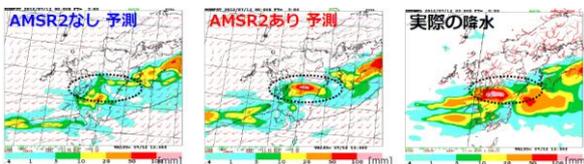
図表 45 CSR による降水予測の改善



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

また、AMSR2 データをメソモデル初期値解析に利用することで、降水強度・予測位置の改善につながりました（図表 46）。

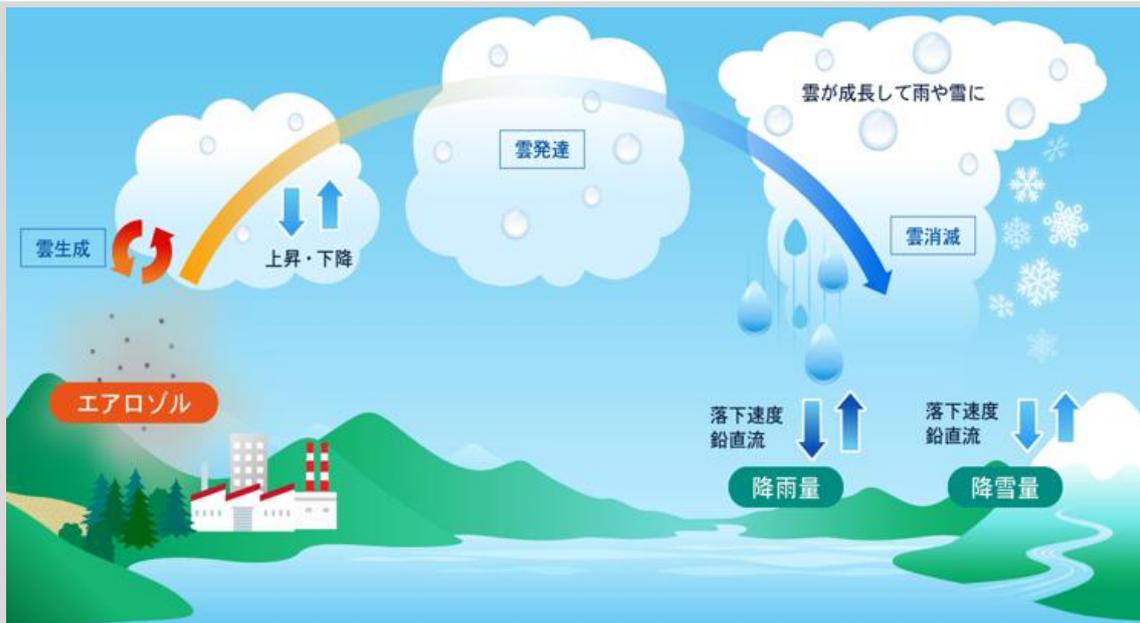
図表 46 AMSR2 データによる降水予測の改善



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 計盛氏資料

元々、雲や降水の影響を受けているデータは利用するのが困難でしたが、技術開発により利用可能なデータが増加しています。例えば、台風に含まれる水蒸気量の分布を正しく初期値に反映できるようになったことで、台風の進路・強度予測の

図表 47 エアロゾル・雲・対流・降水のプロセス



出所：JAXA

改善につながりました。このように、様々な衛星地球観測データが、数値予報の改善・精度向上に寄与しています。

E) 気象予報における衛星の役割

気象予報においては、数値予報が大きな役割を果たします。数値予報の予報精度向上のためには、数値計算の初期値の精度向上が必要であり、衛星から得られる地球の大気や地表面の観測情報は、初期値作成において非常に重要です。衛星の役割は、「現在を観測して予測（未来）に使う」と言えるでしょう。

数値予報の更なる精度向上のためには、新規衛星の観測データ利用と共に、既存の衛星観測データの利用高度化を進める必要があります。

2) プロセス解明

A) プロセス解明における衛星地球観測の役割

気象・気候現象は様々なプロセスによって引き起こされますが、その中でも雲が作られ、地上に雨が降るまでには、エアロゾル・雲・対流・降水による図表 47 のようなプロセスがあります。

このプロセスは複雑で、長年解明されておらず、気候モデルによる気候変動予測に不確実性をもたらしています。例えば水蒸気が大気に大量に供給された際、純粋な空気では水蒸気はその状態を保ったまま飽和状態に近づきますが、エアロゾルが大気中にあると、エアロゾルを核にして雲粒、雨粒が形成されます。プロセスを解明して気候モデルの予測精度を向上させるためには、プロセスを定量的に把握する必要があります。そのためには、衛星観測による、大気の物理量の把握が重要です。プロセス解明に貢献する衛星地球観測の強みは主に二つあります。

一つ目は、全球的で均質なデータを得られることです。これにより地球全体のエアロゾルや雲を同じ基準で観測でき、グローバルなモデルの作成に貢献します。

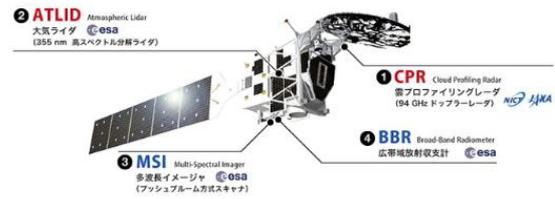
二つ目は、一つの衛星で複数の要素を観測できることです。異なる種類のセンサを使うことで、エアロゾル、雲だけでなく放射収支も同時に観測でき、雲の内部状況を把握することができます。

B) 衛星地球観測による最新研究

衛星地球観測の技術は日々進化しており、多くの新たな知見が得られています。日本と欧州が協力して開発を行った EarthCARE は、2024年5月に打ち上げられ、順調に観測を続けています。

EarthCARE には「CPR」「大気ライダ(ATLID)」「多波長イメージャ (MSI)」及び「広域放射収支計 (BBR)」という観測対象・方式の異なる4種類のセンサが搭載されています(図表 48)。これらを使って雲、エアロゾルの全球的な観測を行うことで、雲とエアロゾルが地球の気候へ影響を及ぼす仕組みの解明に貢献します。

図表 48 Earth CARE の搭載センサ



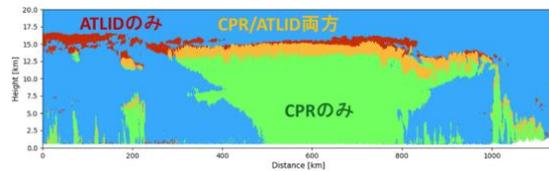
出所：サテナビ

また、これらの4センサによって一つの対象地点を同時刻に観測することを「シナジー観測」と言います。シナジー観測による精緻な雲観測データは、気候変動メカニズムの理解促進に貢献します。

■ EarthCARE によるシナジー観測

Earth CARE に搭載されている CPR と ATLID は、それぞれの周波数や観測方法が異なります。図表 49 の雲について、赤色は ATLID のみ、オレンジ色は CPR と ATLID の両方、緑色は CPR のみで観測できる部分です。

図表 49 CPR と ATLID が観測する雲の高さ分布の違い



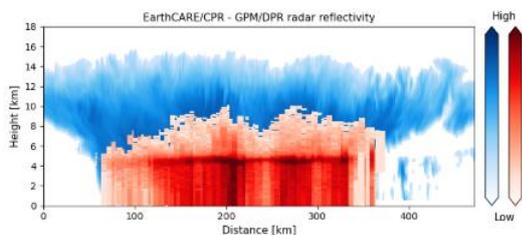
出所：サテナビ

ATLID を使うことで、CPR では捉えられない、上層の小さな粒子の雲を見ることができます。上層の雲は地球を加熱する作用が強く、地球温暖化や放射収支に大きく影響するため、CPR と ATLID による同時観測は、雲の科学的メカニズムへの理解増進と、気候変動予測の精度向上に貢献します。

■ GPM 主衛星との連携による雲から雨までの包括的な観測

図表 50 は、GPM 主衛星と Earth CARE が同じ場所の雨雲を観測したものです。GPM 主衛星には JAXA と NICT が開発した世界初の二周波降水レーダ (DPR) が搭載されています。

図表 50 CPR と DPR のレーダ反射強度の高さ分布の比較



出所：サテナビ

DPR と CPR は電波の周波数が異なっており、赤色箇所の DPR は大きい雨粒を測るのに適した周波数で観測しているのに対して、青色箇所の CPR はそれよりもずっと小さい雲粒を測るのに適した周波数で観測をしています。そのため二種類のセンサを用いることで、すでに降っている雨粒だけでなく、上層の雲粒も把握でき、雨雲の全

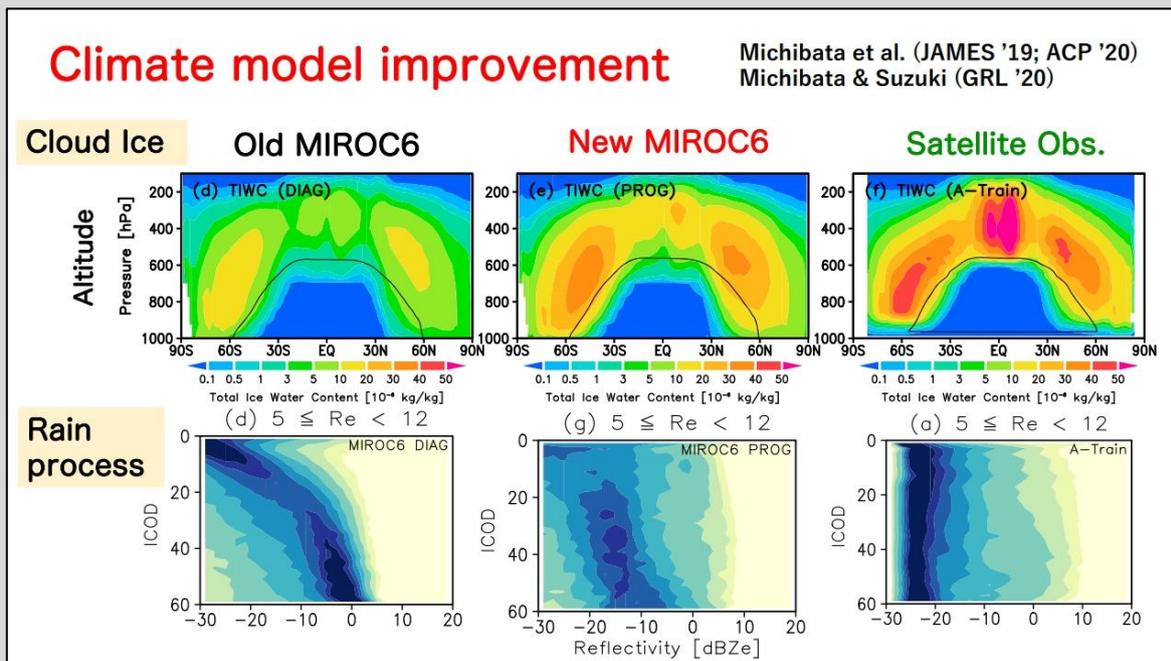
貌が見えてきました。

このように、衛星地球観測により雨雲の内部を雲から雨まで可視化することは、雨雲の広がりや量のプロセスを解明し、気候モデルに反映させることができます。同様の衛星データを全球的に集めることで、全球規模の気候モデルの精度向上に貢献します。

3) モデル検証

気候変動の将来予測を行う気候モデルですが、時には現実と離れた、架空の世界を作ってしまう場合もあります。そのため、実際の観測データを利用して、モデルの予測結果と現実との整合性を評価する必要があります。

図表 51 衛星観測を用いた気候モデル (MIROC6) の雲微物理のプロセスの評価



出所：JAXA

図表 51 の左側にある「Old MIROC6」は海洋研究開発機構・東京大学・国立環境研究所により開発された全球気候モデルであり、IPCC の CMIP6 でも利用されています。右端の Satellite Obs. は衛星観測データであり、実際の状況を示します。

ここで、Cloud Ice を観測した図表に注目します。

Cloud Ice とは雲粒の中の氷の部分のことで、図表の縦軸は高さ、横軸は緯度（中心が赤道、左が南半球、右が北半球）をとっています。Satellite Obs. と Old MIROC6 を比べた際、Satellite Obs. では Cloud Ice が赤道付近に集中していますが、Old MIROC6 では、高緯度域に Cloud Ice が多くなっており、モデルの再現結果が実際の観測データと

大きく異なっています。Rain process は雨の強さを表しています。こちらも、雨の強さの分布が衛星データと気候モデルとで大きく異なることが分かりました。

このように実際の衛星データとモデルの再現結果を比較・評価することで、モデルと現実との乖離を改善した「New MIROC6」が誕生しました。New MIROC6 の再現結果は衛星データと完全には一致しないものの、Old MIROC6 よりも大きく衛星データに近づいており、より現実に近い予測が行われています。

全球を定量的に把握できる衛星データは、数値モデルの様々な場面で貢献し、短期的・長期的な予測結果の精度向上に役立ちます。今後、衛星観測技術のさらなる向上により、観測できる物理量の種類が増加して、地球環境に係る気候プロセスの理解が進んでいくと考えられます。

コラム（その2） 宇宙から感じる気候変動（油井亀美也宇宙飛行士）

JAXA 宇宙飛行士で、CONSEO 広報アンバサダーの油井亀美也です。2015年7月から12月までの約5か月間、国際宇宙ステーション（International Space Station：ISS）に長期滞在をしました。現在は、私にとって2回目となる2025年頃のISS長期滞在に向けて訓練を行っています。

2015年のISS長期滞在では、心を揺さぶられた宇宙や地球の光景を皆さんにもぜひ見てほしいという想いから、142日間で数万枚の写真を撮影しました。

日本を宇宙から眺めると、小さい国土ながら本当にいろいろな自然災害が発生する国であることが分かりました。台風、地震、噴火等々。自然と共生しながらどうしたら被害を最小限に食い止められるのか。日本はもちろん、アジアや世界各地で起こる自然災害の予報や、防災、減災のために、宇宙の技術を活用できることがあるのではないかと。そのために少しでも貢献できることはないのだろうか。そのことをいつも私は考えています。

東京の夜景「それぞれの光に人生がある……」
そう想いながら撮影した1枚



2015/10/24 撮影 ©JAXA/NASA

インドネシアの森林火災の様子



2015/10/23 撮影 ©JAXA/NASA

その課題の解決のために衛星地球観測やISSの技術を活用していけたらと強く願っています。

油井亀美也宇宙飛行士



宇宙から地球を見て、美しさとともに、地球があまりにも小さいことにも驚きました。小さな地球の表面を薄い大気層がごく薄く覆っています。その薄い大気層の下の方に雲があり、雲より下でしか人は生きることができない。小さく感じてからは、とても壊れやすい存在に思い始め、私の地球観は「母なる地球」から「守るべき地球」に変わりました。

人間はより豊かで、より良い生活を求め続ける本能があると思います。その欲求に際限がなく、全人類が物欲を求める方向に進めば、地球環境はその欲求を満たす前に破壊されてしまうでしょう。人間がすごいのは、問題意識を感じたり夢を見つけたりしたとき、共有する人が多ければ多いほど、課題を解決する時間が早まっていくことです。問題に気づき、多くの人と共有すれば解決できるのです。

私は宇宙から見た課題を皆さんと共有するために、2025年頃の2回目のISS長期滞在においても、地球

5. 気候変動における宇宙機関の役割とは

宇宙機関は、多様なステークホルダーへの衛星地球観測に基づいた透明性の高いデータの提供による科学的根拠に基づいたコミュニケーションの推進支援、産学官の結節点となるとともに、非宇宙産業も含めた共創の推進貢献、国際協力によるミッション実施・合意形成を通じた政策決定の後押し等により、気候変動問題の解決に寄与します。

5.1 宇宙機関が気候変動問題に取り組むべき理由

ここまでに、気候変動の実態と、気候変動の解明に向けた科学的手段としての衛星について見てきました。では、衛星を保有する宇宙機関が気候変動問題に取り組むべき理由とはどのようなものがあるのでしょうか。

理由は大きく二つあります。一つ目は4章で見てきましたように、宇宙機関が開発・運用する衛星は、多様な環境要因を「全球規模で」「面的に」「定期的に」「長期に」わたって観測可能な有効な手段であるためです。衛星地球観測のデータは、気候変動の正しい評価と理解・将来予測・対策の検討において重要な役割を担っています。また、地球観測衛星と従来の地上観測や航空機観測などを組み合わせることで、気候変動モニタリングの精度向上が期待されています。

二つ目は、宇宙機関が、それ自身が有する世界的なネットワークを通じて産学官の結節点（ハブ）となるためです。気候変動は地球規模の複雑な課題であり、その対応には多くの国、人々の協力が

不可欠です。既に各国の宇宙機関では活発な国際協力を実施しており、GHG 排出量の観測や削減、気候変動による自然災害の被害軽減など様々な成果が上がりつつあります。今後は、このような国際協力の更なる強化とそれによる課題解決に向けた推進が期待されています。

また、気候変動に関わる非宇宙産業も含めた人々へのアプローチも積極的に行わなければなりません。気候変動に関する科学的知見を持つ宇宙機関が、政界や産業界のステークホルダーと科学的根拠に基づいたコミュニケーションを実施することで、気候変動への対応を加速させることに貢献が可能です。また、そのためには、より多くの人々が素早く簡単に衛星データを活用できるように、データアクセス性の改善が必要とされています。

このように、世界各国の宇宙機関が中心となり気候変動問題に取り組むことで、気候変動問題の解決に向けたより一層の前進が見込まれます。

5.2 宇宙機関の取組

1) JAXA の取組

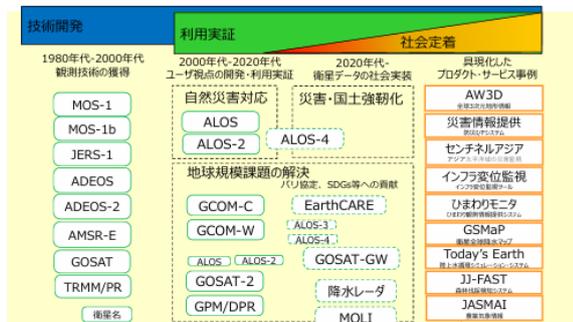
A) これまでの活動

JAXA 初の独自の地球観測衛星は、1987年にJAXAの前身である宇宙開発事業団（NASDA）が打ち上げたMOS-1（もも1号）です。それから

2000年代までは、観測技術の獲得が課題でしたが、観測技術が確立されてくると、衛星データをどのように利用していくかについて議論されるようになりました。そのため、2000年代以降は衛星データの利用実証が進み、自然災害対応や地球規模課題の解決に衛星データが使われるようになりまし

た。そして利用実証がある程度進んだ現在では、地球観測衛星及び衛星データを社会実装させる取組が行われており、以下に具体例を示すような衛星データを活用した様々なプロダクト・サービスが具現化されています（図表 52）。

図表 52 JAXA の衛星データ利用における取組

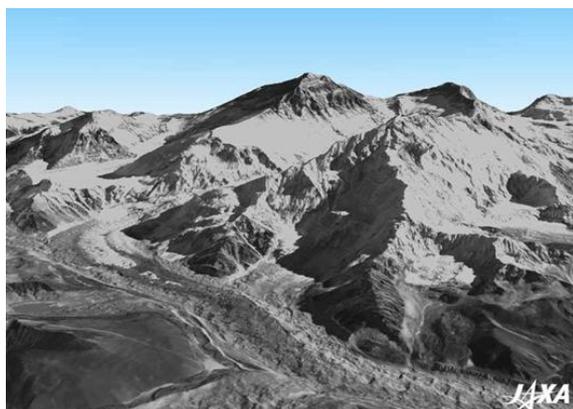


出所：JAXA

■ 全球高精度デジタル 3D 地図：ALOS World 3D

陸域を観測する ALOS が撮影した 300 万枚の衛星画像を用いて、高精度のデジタル 3D 地図を整備しています（図表 53）。この地図は全球規模で、衛星の軌道上の三方向から同じ場所を撮影できるという衛星の強みを利用して作成されており、世界で初めて、全世界の陸地の標高データを 5m 解像度で表現することに成功しました。陸地の起伏を正確に把握できることから、地図の整備や自然災害の被害予測、資源調査など、幅広い分野で利用されています。

図表 53 デジタル 3D 地図のイメージ例：エベレスト



出所：JAXA

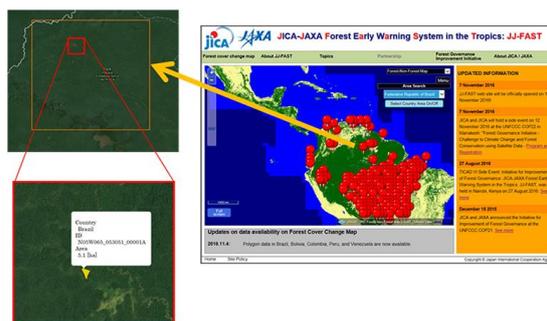
■ JICA-JAXA 熱帯林早期警戒システム：JJ-FAST

JJ-FAST は ALOS-2 の観測データを用いた、森

林伐採の準リアルタイムモニタリングシステムです（図表 54）。ALOS-2 に搭載している L バンド合成開口レーダ（PALSAR-2）は、人工衛星から地表に向けて電波を照射して、その反射された電波を受信して観測を行うため、昼夜・天候を問わず観測が可能です。この強みを活かして、2016 年の運用開始から 2024 年 3 月まで、アマゾン地域、中央・南部アフリカ地域などの 78 か国の森林変化をモニタリングし、違法な森林伐採を検知してきました。

2024 年 4 月以降は地球観測衛星を取り巻く環境の変化や使用機器の老朽化に伴い、対象国をブラジルに絞って検出精度の更なる向上、活用の促進を図る形で運用を継続しています。

図表 54 JICA-JAXA 熱帯林早期警戒システム (JJ-FAST)



出所：JAXA

B) 今後の衛星地球観測の方向性

近年、社会の DX 化、民間企業による宇宙活動の活発化、GX・気候変動への関心の高まりといった外部環境の変化が起きています。また、2022 年には「JAXA 科学アドバイザー委員会/将来ミッション検討タスクチーム」から衛星データの 4 次元情報の強化、地球観測衛星計画のプログラム化についての提言がありました。

このような状況を踏まえ、出口を見据えた衛星開発・利用推進と持続的なエコシステム構築に向けた JAXA の課題とそれに対する必要な取組が整理されました。

■ 挑戦的な研究開発・実証

気象災害や気候変動を予測し、具体的な対策に繋げるためには、衛星の3次元データに時間変化を加えた4次元データが重要です。JAXAは研究機関として、新たな価値を創造する技術の研究開発・実証に取り組みます。

■ 民間との共創

衛星データを広く社会に活かすためには、将来のニーズや開発成果の活用（出口）を強く意識した、新たな衛星開発・利用の仕組みが不可欠であり、民間企業との共創が求められます。

■ 社会基盤としての地球観測衛星システムの構築と維持発展

個々の地球観測ミッションを有機的に連携させることで、総合的なシステム（System of systems）として、社会インフラ、気候変動監視、防災・減災、安全保障、産業振興、サイエンス等の日本が取り組むべき最重要事項への貢献を目指します。

■ 政府外交のツールとしての衛星地球観測活用

近年、衛星地球観測に係る取組・プロダクトが政府外交のツールとして想定・期待される場面が増加しています。衛星地球観測を通じたハイレベルな外交や、多国間協議の場におけるポジション確保、国際市場の便益獲得に向けた戦略的な国際展開を強化していきます。

以上のような課題及び取組方針を具体的な計画に落とし込んだものが「第5期（2025～2031年度）におけるJAXAの役割」となります（図表55）。

図表 55 JAXAによる衛星地球観測の方向性（案）

● 第5期（2025～2031年度）における衛星地球観測分野でのJAXAの役割を、概念上以上のように分類する。

第5期におけるJAXAの役割

A) 地球規模課題解決や外交政策への貢献等、衛星データの国際展開強化に向けた地球観測衛星の開発・利用に取り組む。

B) 民間主体の事業との連携や、官民共創により、衛星データのさらなる社会実装に取り組む。

C) 新種の地球観測衛星の開発・利用につながるイノベーション創出に取り組む。

● 第5期では、引き続きBやCの取組を推進するとともに、特にAの取組については、関係機関との連携によって達成を狙うリターンを明確にする等、従来よりも具体的かつ高い水準の目標・アウトプットを設定した上で、**地球観測衛星の開発・利用をより一層戦略的に進めていく。**

● 具体的には、「戦略性」、「総合性」、「継続性」の観点より、**従来の衛星毎のプロジェクトベースでのシーズ発想から、ソリューションも含めた各課題への戦略的・複合的なアプローチに立脚したプログラム形成・体制整備へと転換していく**方向性での検討を進める。

リターンの想定 (外交・防衛・産業等に係る具体的な価値)
民間主体
地球観測衛星の開発・利用
どのようなデータ・プロダクトが必要か
どのようなツールが必要か
どのような衛星・研究開発が必要か

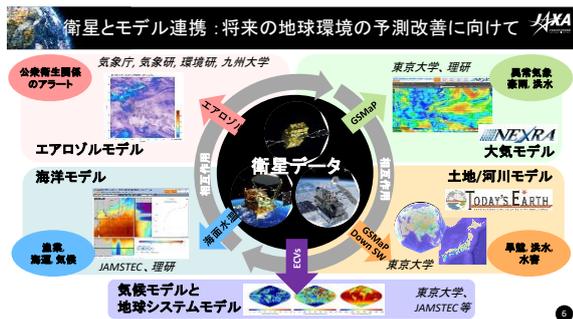
出所：文部科学省

C) 気候変動問題に対する取組

図表55に示す次期方向性（案）を見据えて、地球観測研究センター（Earth Observation Research Center：EORC）では、地球観測衛星のデータ取得から処理・利用研究を行っており、衛星データを活用した気候変動問題への対応にも取り組んでいます。EORCの役割は、長期データセットの作成と、地球の現況モニタリングから地球環境の変化という観測事実を提供することです。気候変動の研究には長期的なデータが必要で、歴代の各衛星の観測データをつなぎ合わせ、地球の時々刻々を記録した30～40年の長期データセットを作成しています。また、現在の地球のモニタリングは地球デジタルツインも使って総合的に行っています。

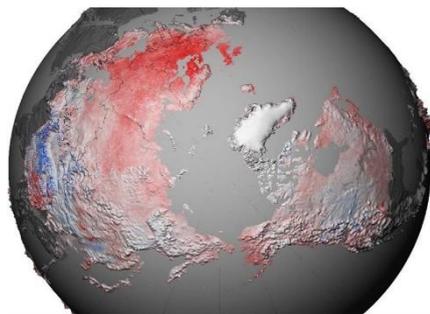
EORCでは防災・災害対策や気候変動対策、安全保障対策において、成果を最大化するために、複数のプロジェクトや部門統轄を行っています。また、複数の衛星データ及び地上データ、並びに数値モデル・AI等の情報技術を複合的に活用することによる、新たな衛星データの利用を目指しています。こうした活動の中には各種モデルと連携したものもあります（図表56、57）。

図表 56 衛星とモデル連携



出所：JAXA

図表 58 積雪期間の傾向



出所：富山大学・JAXA

図表 57 モデル連携による地球システムモデルの改良



出所：JAXA

EORC が行っている防災・災害対策や気候変動対策、各種モデル連携には、異なる特徴を持つ複数の地球観測衛星が利用されています。

■ GCOM-C

GCOM-C に搭載されている観測装置の「多波長光学放射計 (SGLI)」は、非常に広い観測幅を有しており、目的に応じて、陸域から大気、海洋、雪氷まで様々な対象を観測できます。GCOM-C による雪氷圏の観測データの蓄積は、継続的な影響評価に際し、長期データセットの構築による長期変動監視・解析・モデル高度化に貢献します。SGLI の観測データを基に作成された図表 58 からは、赤色の地域で積雪期間が減少していることが示されており、欧州において積雪期間が大幅に減少していることが分かります。

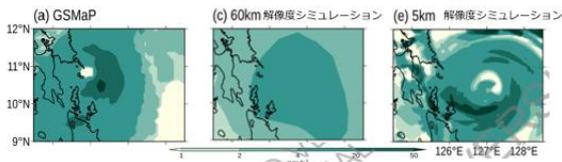
■ GCOM-W

GCOM-W に搭載されている AMSR2 は海面や海氷、大気から放射される微弱な電波を捉え、水に関する様々な物理量を観測します。具体的には、海氷・氷床・積雪などの雪氷圏変動、エルニーニョに代表される大気・海洋相互作用に伴う海面水温・降水量・水蒸気量などの変動などです。また、これらの変動を理解するうえで不可欠な大気・海洋・陸面間の水・エネルギー交換を定量的に把握するため、海上風や土壌水分などの物理量を観測し、その利用実証を行います。

■ GPM

図表 59 は、Typhoon Haiyan の事例における GSMaP の成果を示したものであり、この図表は IPCC AR6 に用いられました。そもそも熱帯低気圧を精確にシミュレーションするためには、対流を許容する解像度が必要です。GSMaP のデータと、全球モデルによる 60km 解像度シミュレーションを比較すると、GSMaP ではある程度対流活動が再現されており、全球モデルにはなかった熱帯低気圧を確認することが可能です。GSMaP はまだ 5km 解像度シミュレーションには及ばないものの、これまでよりも現実に近いデータ提供を可能にしています。

図表 59 Typhoon Haiyan の事例での GSMAp



出所：IPCC AR6/WG1 報告書

現在 JAXA では、様々な種類の地球観測衛星を運用しており、多くの分野で衛星データの社会実装が進んでいます。また、より高度な衛星地球観測を実現するために、新たな衛星の開発にも取り組んでいます。今後も、研究開発・実証や民間企業等との連携を強化しながら、社会基盤としての地球観測衛星システムを構築し、社会の持続的発展に貢献します。

2) NASA の取組

A) 行動戦略

NASA は 2024 年に、地球科学における新しい行動戦略として「Earth Science to Action Strategy 2024-2034」を発表しました。この戦略は、急速に変化する地球環境に対応するためのものです。政府、社会、経済がより一層環境情報に依存するようになったことを背景に、より高度で正確な、信頼でき、かつ行動に結び付く情報を提供することで、様々な関係者や意思決定者が効果的な取組が実施できるよう支援します。

この戦略の達成に向けて NASA は「10 年以内に、地球科学の知識を進展させ統合し、人類がよりレジリエントな世界を創造できるよう支援する」ことを戦略目標とし、以下の二つの主要な目標に焦点を当てます。

- ① 科学的知識の統合と進展
 - ② その知識に基づいた信頼できる情報の提供
- そして、これら目標の達成に向けては、複数の主要な結果に基づき進捗を評価します。

また、NASA は以下の五つの原則に基づき、衛星技術、科学的知識、データインフラを活用して

戦略を実施します。

- ① 強化されたパートナーシップを通じて、影響力を拡大し、能力を増強する。
- ② 多様な労働力と広範な地球科学コミュニティを巻き込む。
- ③ 競合する要因に直面した時はバランスの取れたアプローチを用いる。
- ④ 最先端の能力を維持するためにイノベーションを奨励する。
- ⑤ プロセスの堅牢性とレジリエンスを確保する。

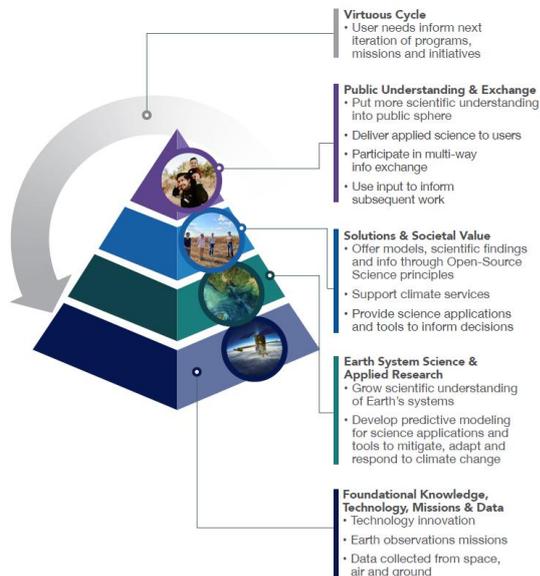
この戦略に対する NASA のアプローチは、以下の通りです。戦略実施の基盤となる NASA が有するアセット（知識、技術、ミッション、データ）の実施、長期的な維持、開発、展開を行います。次に、それを通じて、地球システムに対する科学的理解の深化や、応用研究として気候変動への対応のための予測モデリングの開発などを実施します。ここで得られた成果を基に、有用なソリューションが開発され、広く提供され、社会的価値へとつながります。このソリューションにより、公衆の理解が進み、意思決定を支援し、科学コミュニティと公衆との間で双方向の情報交換と知識共有が進みます。そして、ユーザーニーズやフィードバックが、NASA のミッションやプログラムの次のバージョンを形作り、継続的に改善されていきます。

このように、NASA の地球科学コミュニティが持つエンドツーエンドの能力を、オープンな企業体として活用し、革新、科学的発見、そして新たに浮かび上がるユーザーニーズを取り入れることで、地球科学の活用を加速し、プログラム、ミッション、そしてイニシアティブの次の段階を情報提供することを目指します。

衛星地球観測によるデータから生まれた価値を必要な人に、必要な時に、必要な場所で提供するためには、衛星地球観測についての人々の理解と信頼が必要となります。この一連のアプローチに

において最もカギとなる要素は、衛星地球観測の「透明性」と言えます。

図表 60 NASA のアプローチ



出所：NASA Earth Science to Action Strategy 2024-2034

B) 地球観測ミッション

NASA のアプローチの基盤となる、地球観測ミッション、技術、データにおいて、NASA では図表 61 に示すような多くの地球観測衛星を運用・開発し、宇宙からしか得られない貴重なデータを提供しています。観測ミッションは継続性と持続性、革新性のバランスが重要であり、その多くは強力な国際パートナーシップによって実現しています。

図表 61 NASA の地球観測衛星ミッション



出所：CONSEO 気候変動シリーズ カレン氏資料

気候変動について考える際、私たち人間の生息域である陸域に注目する人が多いですが、NASA

では、海洋に焦点を当てて、衛星による地球観測を実施しています。

地球の表面の 7 割を占める海洋は、大気の余分な熱を吸収するはたらきが陸域よりもはるかに大きく、海流により地球上を移動しています。また、赤道付近の海上では雲や雨が形成されます。さらに、海洋は CO2 をよく吸収しますが、このはたらきは植物プランクトンをはじめとする海洋生態系と密接に関係しています。このように、気候変動を理解するためには、気候変動における海洋の役割を解明することが不可欠となります。

NASA では海洋研究を推進するため、「Surface Water and Ocean Topography : SWOT」と「Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem : PACE」という二つの海洋衛星を打ち上げました。

■ SWOT

2022 年 12 月、NASA とフランス国立宇宙研究センター (CNES) が主導し、カナダ宇宙庁 (CSA) と英国宇宙庁 (UKSA) が参画する SWOT 衛星が打ち上げられました。SWOT に搭載された最先端のレーダ干渉計により、地球の表面水位をこれまで以上の解像度で測定します。また、SWOT が観測した詳細な水位データを用いて、海洋や淡水の地球規模の水循環を理解し、将来の気候予測を改善することが可能です。

■ PACE

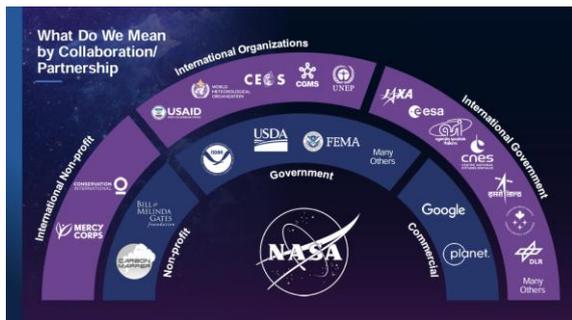
2024 年 2 月、NASA は PACE 衛星を打ち上げました。PACE には紫外線から短波赤外線までの海洋の色を測定する分光計と、太陽光の振動である偏光が、雲、エアロゾル及び海を通過することによる変化を測定する二つの偏光計が搭載されています。これらセンサによって植物プランクトン、エアロゾル、雲の形成、大気中の粒子や汚染物質に関連する主要な変数を測定することで、海洋と大気を理解を深めることが可能です。

これら衛星による海洋観測への貢献によって、地球全体のシステムについての理解を加速していきます。

C) 実現に向けた国際協力

気候変動という課題は地球規模であり、それぞれの要素が相互に関連しているため、行動戦略やそのためのアプローチの実現に向けては、米国内のNPO、政府機関、民間企業との協力だけでなく、国際的なNPO、地球観測委員会（Committee on Earth Observation Satellites：CEOS）等の国際組織、JAXAやESA等の宇宙機関等との国際協力が必須であり、それにより最も効果的に対処することが可能です（図表62）。

図表 62 NASA の国際協力



出所：NASA ES2A_Rollout_Roadshow

例えば、NASAはEARTHDATASEARCHを通じて、世界中の様々な衛星地球観測データをオープンフリーにて提供しています。これにより、政府機関、民間企業、研究機関、一般市民を問わず、衛星データが活用可能であり、国際協力を推進します。また、JAXAとNASAの共同ミッションであるGPMは、2024年7月に10周年を迎えましたが、JAXAは主要センサの一つであるDPRを提供し、降水の三次元観測と降水量予測の精度向上に貢献しています。これにより、降水や気象に関する科学研究を発展させただけでなく、水道インフラや気象予報、農業など様々な分野の人々の意思決定を支援します。

人類にとって気候変動は困難な課題ですが、国際協力を通じて、衛星地球観測による科学的知見

に基づき、可能な限り最善の結果を得られるように支援することを目指しています。

3) ESA（欧州）の取組

A) 欧州の地球観測ミッション

欧州の衛星地球観測は気候変動の理解に広く利用されており、そのミッションは主に3種類に分類されます（図表63）。

図表 63 欧州の地球観測ミッション



出所：CONSEO 気候変動シリーズ アッシュバッハー氏資料

■ Science（ESA）

ESAが主導するScienceミッションは、衛星観測による宇宙・地球への全般的な理解を深め、緊急性が高い課題、いまだ答えが見つからない課題に対して、宇宙から解決策を見つけ出すことを目的としています。JAXAやNASAといった他国の宇宙機関とも協力して、宇宙業界をリードする最先端技術の開発にも取り組んでいます。

■ Copernicus（EU）

EUが主導するCopernicusプログラムは、地球環境や気候変動を監視し、災害管理や持続可能な開発に貢献するための取り組みです。Copernicusでは、大気、海洋、陸域、気候変動、安全保障、災害の6分野のテーマでサービスを提供しており、日々観測した350TBのデータを、世界に向けて無料で公開していて、サイエンスコミュニティや気候変動分野など多くのユーザーに貢献しています。

■ Meteorology (EUMETSAT)

欧州気象衛星機構 (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites : EUMETSAT) は、宇宙から気象、気候、環境を監視する欧州の衛星運用機関です。30 カ国が加盟しており、グローバルな観測ネットワークを構築しています。EUMETSAT では静止衛星と極軌道衛星の2種類の衛星を運用しています。静止衛星はヨーロッパ及びアフリカ地域の観測に使用され、極軌道衛星は地球全体の詳細な観測を行います。2種類の衛星観測により、リアルタイムな気象データを提供すること、長期的なデータを蓄積して気候変動の解明に貢献することが可能です。

B) ESA が主導する気候変動への取組

ESA の衛星地球観測ミッションには、気候変動問題に力を入れているものもあります。

地球の環境や気候、物理的プロセスに関する理解から社会が現在直面している、もしくは今後直面すると予想される社会問題に対処するための科学的発見を目指すミッションが「Earth Explorers」です。Earth Explorers は現在、10 個のミッションで構成されており、これまでに海洋や雪氷圏、磁気や大気などを観測・研究してきました (図表 64)。

図表 64 Earth Explores



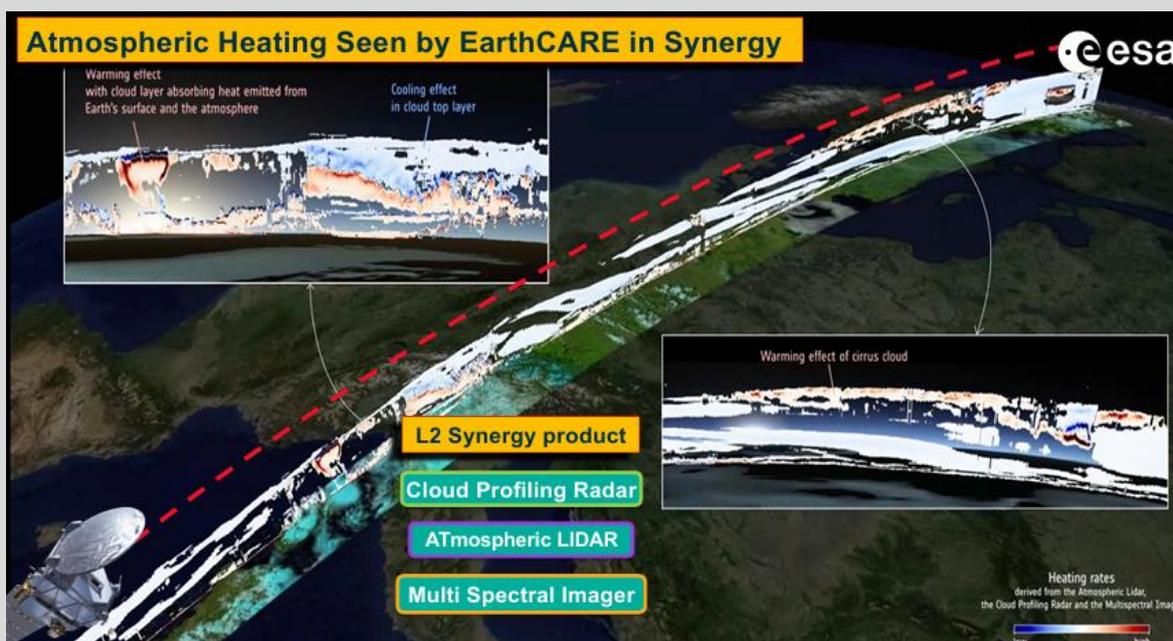
出所：ESA

その中でも雲、エアロゾルの相互作用を観測するための EarthCARE ミッションは、JAXA との密な協力のもと実施しています。EarthCARE には CPR、ATLID、MSI、BBR の4種類のセンサ

が搭載されています。これらを組み合わせて使うことで、雲とエアロゾルが地球の気候へ影響を及ぼす仕組みの解明に貢献しています。

例えば、CPR、ATLID、MSI のシナジー観測では、雲が大気温度にどのような影響を及ぼすかを見ることができます。図表 65 の左上のオレンジ色の部分は、雲が地球表面から放出される熱を吸収することによる温暖化効果、青色の部分は雲表層の寒冷効果を観測したものです。これは雲による地球温暖化、寒冷化効果の把握をするもので、気候変動メカニズムの理解を深めるために重要なデータです。

図表 65 Earth CARE が捉えた大気加熱



出所：CONSEO 気候変動シリーズ アッシュバッパー氏資料

また、ESAの中で、気候関連の取組を統括・推進するのが ESA Climate Office です。ESA Climate Office は、気候変動に関わる意思決定のためのグローバルな衛星地球観測データの利用を推進することを目指しています。

ESA Climate Office の中心的な役割を果たすのが、Climate Change Initiative (CCI) です。CCI は気候システムを理解するために、数十年にわたる地球規模の衛星データセットを作成しています。蓄積されたデータは、GHG 排出量、氷床面積、海面上昇に関わるものなど多岐にわたり、国際的な気候変動の理解を促進していると言えるでしょう。これらのデータは、科学機関や他国の宇宙機関とも共有され、気候モデルの改善や、政策決定の基礎としても利用されます。実際に、IPCC AR6 でも科学的な証拠として用いられています。

C) 国際協力による合意形成

気候変動問題をはじめとした地球規模課題の解決に向けて、宇宙産業の国際協力はますます盛んになっています。欧州では ESA を中心として国際協力が行われています。宇宙産業の国際協力には

様々な側面がありますが、その中の一つが、合意形成の推進です。ヨーロッパ全体の宇宙産業の方向性を議論する場としては、ESA と EU が共同主催する Space Summit や Space Council 等があります。

ESA 加盟国の政府関係や宇宙機関、EU、有識者等が参加する Space Summit では、長期的なビジョンを見据えた新たな宇宙プログラムや技術開発に関する提案、国際協力や民間企業との連携の促進に関する議論が行われます。2023 年に開催された Space Summit では、環境共生社会の実現に向けて、衛星地球観測を含む宇宙技術の利用を加速することを決定しました。

Space Council では、欧州の競争力強化に向けた宇宙政策に関する協力を議論・決定します。2024 年に開催された Space Council では、加盟国の宇宙技術は、気候変動対策、環境保護、環境共生社会への移行を支援すること等に対して、政策や戦略的アクションの定義・実施・監視において重要な役割を果たしていることが強調されました。

また、JAXA と ESA の協力として、2024 年 11 月に「JAXA-ESA 将来大型協力に関する共同声明」

が発表されました。この共同声明では、ESA と JAXA との協力ミッションが両機関、社会及び国際科学界に大きな利益をもたらしていることを確認するとともに、協力の継続と拡大の重要性を認識し、さらなる社会貢献をもたらす大型ミッションを模索することの必要性について認識を共有しました。JAXA と ESA は、国際的な議論の場で、気候変動対策に宇宙技術を用いることの合意形成を共同で促進し、気候変動問題解決に向けた政治的な決定に宇宙技術がより一層貢献することを目指します。

気候変動は今後数世紀にわたる地球規模課題であるからこそ、長期的な対応が必要です。宇宙機関が共同で気候変動問題の重要性を政策決定者に伝えることで、長期的な気候変動対策に必要な意思決定に貢献します。また、国際協力による共同ミッションを通じて新たな科学的知見を獲得し、気候変動メカニズムに係る理解増進に貢献します。

4) 国際協力

宇宙機関等による気候変動に対する国際協力は、既に様々な形で実施されています。ここでは複数の観点から、国際協力の事例について説明します。

国際協力の枠組構築の観点からは、科学的根拠に基づき世界中の国々が協力して実施すべき取組の枠組を定める国連気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change : UNFCCC）について記載します。

また、科学的根拠に基づいた多様なステークホルダーとのコミュニケーションの推進の観点からは、サイエンスコミュニティ拡大に向けた取組である Earth Observing Dashboard（EO Dashboard）について記載します。

最後に、自然災害が頻発するアジアにおいて、日本が主要な役割を果たす国際的な取組の観点として、日本からの開催提案を契機として設立されアジア太平洋地域の宇宙分野での国際協力推進のプラットフォームである APRSAF（Asia-Pacific

Regional Space Agency Forum）について記載します。

A) 国際協力の礎となる取組（UNFCCC）

UNFCCC とは、1992 年の国連総会で採択され、1994 年に発効した、大気中の GHG 濃度を安定化させることを目的とした条約です。

本条約では、「共通ではあるが差異のある責任」「途上国の特別な状況への配慮」といった五つの原則を定めました。また、締約国には、「GHG の排出及び吸収についての目録作成」「気候変動対策に向けた国別の計画策定」「締約国会議への目録と措置に関する情報の報告」という義務を、締約国の内、特定の先進国については、途上国への資金援助や途上国・経済移行国への技術移転を実施する義務を定めました。さらに、本条約に基づき、1995 年から締約国会議（Conference of the Parties : COP）が開催されています。この COP は気候変動枠組条約締約国会議または UNFCCC COP と呼ばれ、京都議定書などの締約国の具体的な義務は、UNFCCC COP で締結される条約で定められます。なお、IPCC と UNFCCC は異なる母体をもつ別組織ではありますが、UNFCCC の扱う事項について科学的根拠が必要な際に、IPCC からの情報を踏まえ、検討されるなど密接な協力関係にあります。

このように世界中の国々は、UNFCCC という協力枠組に基づき、科学的根拠に基づいた検討・議論を実施して、先進国、途上国などの国家の状況を勘案した協力体制を構築・実施し、気候変動という大きな課題に対して、世界で協力しながら取り組んでいます。

B) サイエンスコミュニティ拡大の取組（EO Dashboard）

世界で猛威を振るった新型コロナウイルス感染症（COVID-19）が地球環境や経済に及ぼしている

影響を把握するため、JAXA、NASA、ESA（欧州宇宙機関）の3機関が、運用する地球観測衛星の観測データを使って地球環境や社会経済活動の変化を可視化し、2020年6月、三機関の共同解析結果をWebサイト「Earth Observing Dashboard（以下、「ダッシュボード」とする。）」で公開しました（図表66）。

地球観測データは、地球環境・システムの理解に極めて有用ですが、データの取り扱いには一定のスキルが必要なため、地球観測データへのアクセス性の改善が課題です。そのため、3機関はCOVID-19後も地球観測データの有用性の拡大への貢献の観点から、ダッシュボードの運営を継続することを決定しました。2022年からは地球環境の変化をより包括的に理解するため、観測対象に「大気」、「農業」、「バイオマス」、「水と海洋」、「雪氷」、「経済」の6分野に加え、さらにその後「異常事象（extremes）」も追加されました。

ダッシュボードでは、地球観測衛星データを専門家以外の人たちが、Web環境があれば、インタラクティブに関心のある国や地域など特定の場所の環境が時間とともにどのように変化していくかを確認することができ、解説もストーリーとして発信されています。

図表 66 Earth Observing Dashboard



出所：Earth Observing Dashboard

■ 大気

各機関それぞれの衛星で大気汚染やGHG濃度を観測しています。観測データは、大気汚染やGHG排出量の増加が気候変動に与える影響の理解や評価、主要都市の大気汚染軽減への貢献が期待されます。

■ 農業

農業生産、作物の生育状況、農業気象状況など、食料食糧供給に関するデータを提供し、世界の人々の食料安全保障に貢献します。紛争、悪天候、異常気象などは農業生産に脅威をもたらすため、特に有事の際は透明性が高く、リアルタイムかつグローバルな観測データが必要です。

■ バイオマス

陸上の樹木や森林の量を示すバイオマスは、大気中のCO₂をどの程度吸収するかを理解する上で重要な役割を持ちます。また、バイオマス量の変化は、パリ協定の目標達成に向けた進捗状況の評価にも使われます。

■ 水と海洋

海洋および淡水の水温、水位、面積、水質、植物プランクトンの発生状況などを観測します。海洋は地球プロセスの第一次生産者であり、海洋環境、水環境における気候変動の影響を理解することは、それらの資源の持続可能な利用を管理するために不可欠です。

■ 海氷

海氷の融解期間、面積、厚さを観測しています。現在極地の氷は急速に減少しており、凍結した海面が融解すると、太陽放射の吸収量が増加し、さらなる海氷の融解と温暖化が広範囲で進むと考えられています。

■ 経済

人口密度や夜間照明、車両や飛行機について観測することで、地球の社会・経済システムが環境とどのように結びついているかを示します。

■ 異常事象

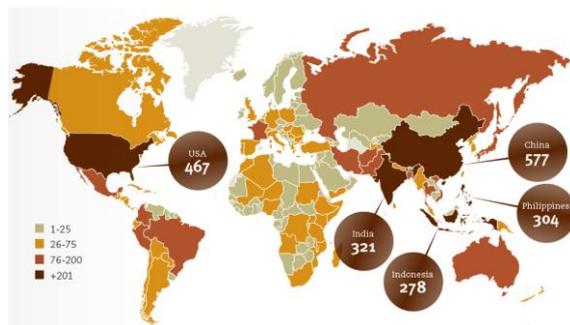
進行中の火災、一酸化炭素、地表面温度、海面水温、大気再解析データ、不確実性の伝搬のデータを提供し、気候変動に関わるこれら項目について、世界中で異常事象が発生していないかを可視化します。

ダッシュボードで公開されている観測データは、地球環境の変化や気候変動と、それによって引き起こされる社会・経済への影響を理解するための科学的・客観的な視点をタイムリーに提供しています。また、これらデータはオープンフリーであり、一般市民も含む世界中のコミュニティがその意思決定に科学的根拠を活用可能であり、サイエンスコミュニティの拡大が期待されています。

C) 日本を中心としたアジアにおける取組 (APRSAF)

アジアは自然災害が頻発する地域であり、死者数、被災者数、経済損失などにおいて多大な損失を被っています。そのようなアジアにおいて、世界有数の宇宙機関を持つ日本の役割は非常に重要です (図表 67)。日本が中心となり主導するアジア太平洋地域最大の宇宙機関会合である APRSAF では、各国の宇宙活動や将来計画に関する情報共有を行うとともに、災害や環境など地域共有の課題解決に向けた国際協力プロジェクトを推進しています。

図表 67 2000-2019年に国・地域で報告された災害数



出所：Human cost of disasters An overview of the last 20 years 2000-2019

■ Sentinel Asia

APRSAF における災害対応の取組である Sentinel Asia は、宇宙技術によるアジア太平洋地域の災害管理への貢献を目的とした国際協力プロジェクトです。地球観測衛星画像などの災害関連情報をインターネット上で共有し、自然災害による被害を軽減することを目指しています。

大規模災害発生時には、速やかに衛星地球観測を実施して被災状況を把握し、復旧・復興に向けた情報を入手する必要がありますが、自国の衛星のみでは適時に観測できない場合や、被害の全容が見えないほど広範囲な災害の場合もあります。これに対して加盟機関の保有する衛星を用いて緊急観測を行うことで情報を補い、迅速な被災状況の全容把握が可能となります。2024年12月現在、緊急観測が要請された場合に、その状況に応じて図表 68 の衛星が観測し、衛星データの取得・提供を行います。

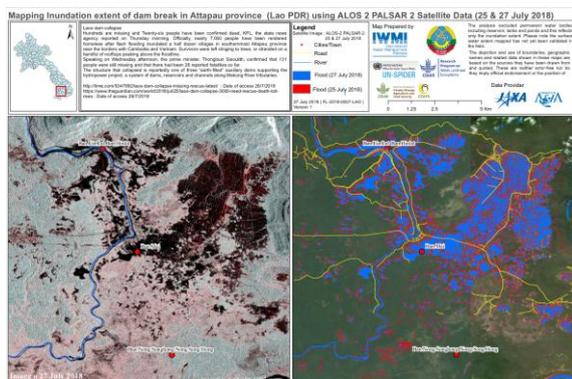
図表 68 緊急観測に貢献する衛星



出所：Sentinel Asia

緊急観測の事例として、2018年7月にラオスにて発生した水力発電所ダムの決壊では、Sentinel Asia に緊急観測支援要請がなされ、JAXA のALOS-2 による緊急観測を実施、画像提供を行いました（図表 69）。また、その画像を基に、解析支援機関が解析を行い、浸水域地図などの情報が提供されました。これらの情報により、現地での避難場所設置先決定や、緊急支援物資の展開先決定の意思決定がなされています。

図表 69 解析プロダクト例



出所：Sentinel Asia

■ SAFE

APRSAFにおける環境把握の取組であるSAFEは、気候変動のもたらす影響把握と状況監視、実践的なソリューション提供の検討を行う国際協力プロジェクトです。特に水資源や農業に関する取組が行われており、その一つが「SAFE CH4Rice Project」です。

GHGの一つであるCH4の地球温暖化係数はCO2の約30倍あり、主に化石燃料と農業から排出されています。特に水田からの排出量は、世界の人為的CH4排出量の8%を占めると推定されており、持続可能な稲作を実現するためには、CH4の排出量を正確に評価し、削減していかなければなりません。

水田からのCH4排出量を評価するため、CH4排出係数に栽培期間と収穫面積（稲穂がある面積）を掛け合わせて排出量を推定します。アジアを中心に広範囲に及ぶ収穫面積を正確に把握するためには、衛星地球観測が適しています。

また、CH4削減に向けては、一定期間排水して土壌を乾燥させ、再び水を張ることを繰り返す方法である間断灌漑法（Alternative Wetting and Drying : AWD）を用いて、土壌内部の嫌気的な環境を減少し、CH4の発生を抑制する方法があります。AWDを実施するためには、水田の湛水状況をモニタリングする必要があり、ALOS-2をはじめとした衛星地球観測の活用に向けて実証が行われています。さらに、衛星データや現地データを用いたCH4の測定・報告・検証（Measurement, Reporting and Verification : MRV）の実施によるカーボンクレジット創出も実証されており、経済活動とも結び付けたGHG削減の取組が推進されています。

コラム（その3） 気候変動と国際協力（角南篤 CONSEO 会長）

私たちの住む地球は、気候変動の影響が如実に感じられる事象が世界中で多発しているだけでなく、最近では生物多様性や感染症の課題など、問題が複雑化しています。気候変動の理解は、一国の科学技術ではなし得ず、その対応も然りです。

そこで CONSEO では、気候変動の理解と対応は世界の協力で成り立っている点について今一度焦点を当てることとしました。気候変動シリーズで第1回（7月19日）・第5回（11月20日）と二回にわたり【気候変動の理解は、世界の協力で成り立っている！】を開催し、特に NASA・ESA をはじめ、世界がどのように気候変動を理解しようとしていて、そして産業界含め国際社会がどのように対応すべきかについても考えました。

第1回では、NASA のカレン・サンジェルマン地球科学部長、中村 仁威外務大臣官房審議官もお迎えし、対話を行いました。サンジェルマン局長より「NASA が宇宙技術を使って最も多く観測している天体は月や火星ではなく、私たちの地球である」こと、そして中村審議官が直近東京で開催された第10回 太平洋・島サミット（PALM10）でも気候変動が切実な課題として国際社会で認識されていることについて言及されました。

カレン・サンジェルマン氏による講演



アッシュバッター氏による講演



第5回では、アッシュバッター-ESA 長官、2023年に気候変動と宇宙技術に関する国際会議を主催したノルウェーのイグルム駐日大使、IPCC の議論にも精通された慶應義塾大学経済学部森田准教授もお迎えし、北極域での国際協力、経済発展に伴う森林減少や生物多様性の低下などの環境の悪化といった具体的事例も交え、気候変動の正確な理解のために、衛星の強みである継続してデータを取ることの重要性がハイライトされました。

この二回の対話を通じて、衛星観測によるデータが気候変動の正確な理解に必須であること、さらに、今回の対話のように政策決定関係者、宇宙機関、社会科学の研究者などグローバル且つ幅広いステークホルダーを巻き込んだ議論がますます重要になることについて認識を新たにしました。

CONSEO 気候変動シリーズにおける対話



6. 気候変動のこれから

気候変動問題を解決し、新しい社会を実現するためには、様々な立場から衛星地球観測や地球デジタルツインなどによる科学的根拠に基づいた行動や意思決定を行い、全体的な視点を持って社会システムそのものを変革していくことが重要です。

6.1 気候変動に人類がどう向き合うのか

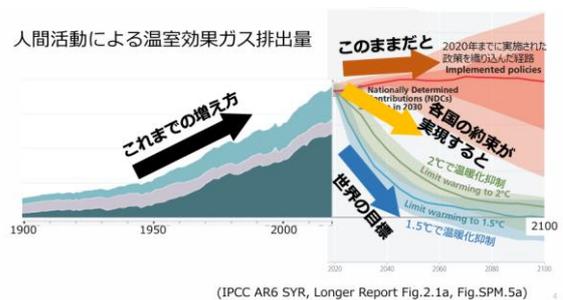
1) 気候変動対策の現状

気候変動への人類の向き合い方として、一般的に二つの対策が挙げられます。一つ目は「緩和」で、再生可能エネルギーの普及などにより GHG の排出を抑制する対策です。二つ目は「適応」で、気候変動に合わせて自然や人間社会のあり方を調整する対策です。どちらも大切な対策ですが、温暖化そのものを止めるためには、温室効果ガス排出量そのものを減らす緩和策の実行が不可欠です。

世界全体の GHG 排出削減目標として、2015 年にパリ協定の長期目標「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2°C より十分低く保ち、1.5°C に抑える努力を追求する」が合意され、この目標を達成するため「今世紀後半に、人為的な GHG 排出と吸収源による除去の均衡達成」が定められています。

しかし、現在の GHG 排出削減ペースは、その目標に対して大きく不足しています。IPCC の AR6 によると世界的な平均気温は 1.1°C、欧州の気候情報機関によると直近 1 年間で 1.6°C 上昇しており、非常に危機的な状況だと考えられています（図表 70）。また、ここから削減ペースが改善し、目標達成に向かう目途はたっていません。

図表 70 人間活動による GHG 排出量

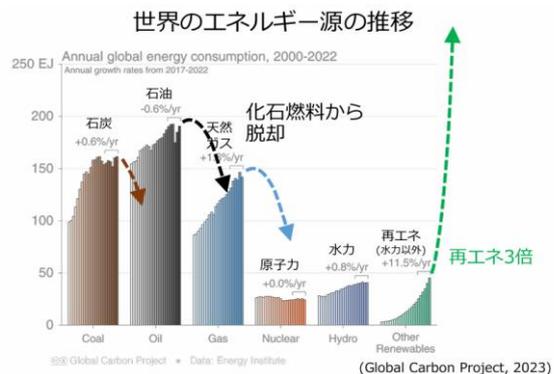


出所：CONSEO 気候変動シリーズ 江守氏資料

2) なぜ削減目標に届かないのか

世界全体で GHG の排出削減に取り組むという方向性が定まっているにも関わらず、削減目標に届かない主な理由は、化石燃料に依存した社会構造にあります。現在、世界のエネルギーの 8 割は化石燃料由来であり、途上国や新興国でのエネルギー需要の増加から、化石燃料の使用量は依然として増え続けています（図表 71）。

図表 71 世界のエネルギー源の推移



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 江守氏資料

太陽光発電、風力発電といった再生可能エネルギーの消費量は加速的に増加していますが、まだまだ不十分です。削減目標を達成するためには、UNFCCC COP28 で合意された、再生可能エネルギー発電容量を3倍にすることに加え、社会の化石燃料依存からの脱却が必要です。

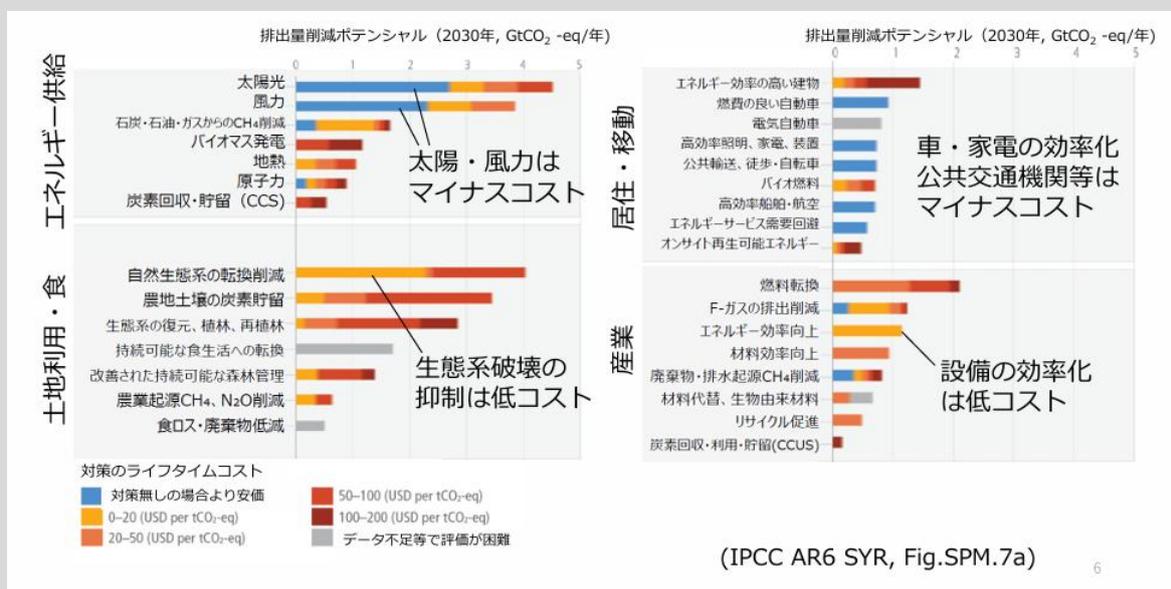
3) 削減目標達成に向けて

世界規模で、化石燃料に依存しないエネルギー文明への移行を目指すためには、社会の変化に対

して、皆が賛成する気持ちを持つことが大切です。具体的には、再生可能エネルギーの導入や電気自動車（EV）の増加といった、エネルギーシステムの転換を受け入れる姿勢が求められます。

実際に、気候変動対策が社会に与えるプラスの影響については、AR6にも記載されています。AR6によると、多数ある GHG 排出削減の手段の内、その多くは安価で、排出削減のための行動をとった方がコスト低下につながる（マイナスコストとなる）活動も存在します（図表 72）。

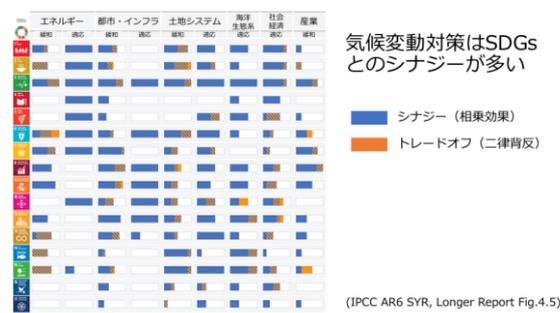
図表 72 GHG 排出削減がコストに与える影響



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 江守氏資料

さらに気候変動対策は持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals : SDGs) とのシナジーが多く、気候変動対策の実施は、より良い社会づくりに貢献します。例えば、化石燃料の使用量の減少は大気汚染の改善につながり、途上国の死亡率が下がる傾向にあります。日本は世界の中でも SDGs に対する意識が高いため、このようなポジティブな面を発信し、シナジーを起こすアクションを標準化、制度化することで、気候変動対策が効率的に進むと考えられます(図表 73)。

図表 73 気候変動対策と SDGs とのシナジー

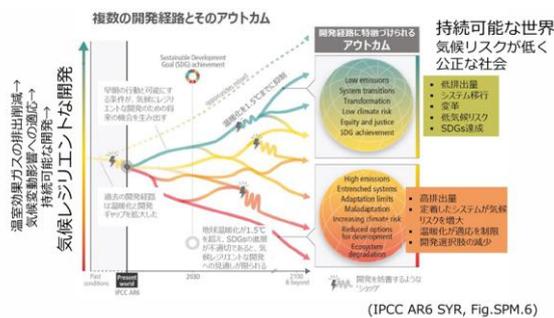


出所：CONSEO 気候変動シリーズ 江守氏資料

4) 現在の気候変動対策が将来に与える影響と必要な対応

気候変動対策において、現在から 2030 年までは勝負の 10 年と言われており、この 10 年間の人類の選択・行動が未来を決める大きな分岐点であると考えられています。地球温暖化を 1.5°C までに抑制するシナリオを選べた場合、気候リスクが低く公正な社会を迎えられますが、GHG の排出を削減できないシナリオを辿ってしまった場合、持続可能な世界が実現できなくなる可能性があります (図表 74)。

図表 74 複数の開発経路とその結果



出所: CONSEO 気候変動シリーズ第 4 回 江守教授資料

人類全体として見れば、気候変動対策は早期に実施することが絶対的に好ましく、人類はすでに、気候変動対策実施のための十分な資金と大部分の技術を保有しています。一方で、インフラや社会システムが化石燃料依存のパターンから抜け出せておらず、社会の転換スピードや投資が不足しているのが現状です。

社会が脱炭素化を目指すために必要なステークホルダーは多岐にわたり、各所の利害関係の調整、合意形成の難しさは、脱炭素化が進まない理由の一つでもあります。再生可能エネルギーの利用推進によって減少してしまう職業への社会的支援を行うなど、脱炭素化を目指す社会の中で敗者となる人が生まれないように配慮しなければなりません。また、研究機関等は気候変動に関する科学的知見を広く共有することが求められます。確かな科学的知見は、人々がアクションを変化させる判断基準となるからです。

気候変動対策を進めるには、社会が一丸となって脱炭素化に取り組むための仕組み作りを行い、社会の「調整スピード」を加速させることが重要です。

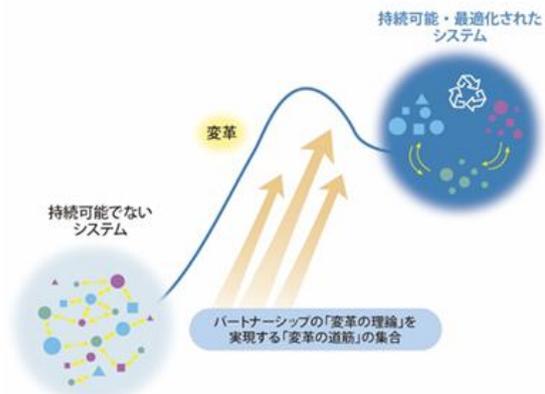
6.2 持続可能な社会実現のための社会システムの変革とファイナンスの役割

1) 社会システム (Societal System) の変革

A) 高まる社会システムの変革の必要性

2015 年に国連総会で SDGs を含む「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」の採択、そして UNFCCC COP21 で 1.5°C 目標を掲げた国際枠組である「パリ協定」が採択されました。これらの採択により 1.5°C 目標達成も含めて、持続可能な社会を実現するための社会システムの変革の議論が高まり、多くの国、民間企業、金融機関、地方自治体などが持続可能な発展、ネットゼロ目標を宣言するなど多様な行為主体の取組が加速しています (図表 75)。

図表 75 社会システムの変革



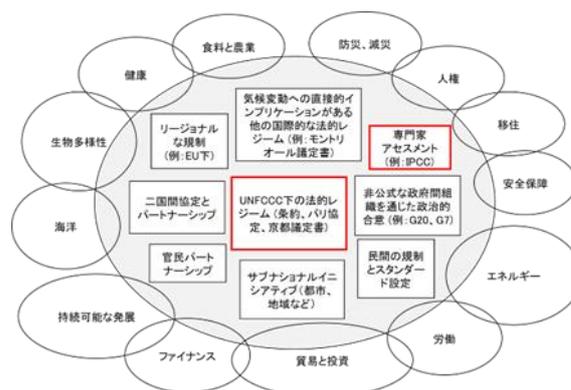
出所: Stibbe, D. and Prescott, D., The Partnering Initiative and UN DESA (2020). The SDG Partnership Guidebook: A practical guide to building high impact multi-stakeholder partnerships for the Sustainable Development Goals. を基に筆者が作成

システムとは様々な方法で相互に関連する諸要素/主体の集合であって、社会システムは、政治、経済、ナレッジ、文化システムを含む幅広い社会システムを指しています (IPCC AR6 WG2 18 章他)。そのため、社会を構成する様々な要素や主体間のつながりを変えることなどで、私たちの社会システムを変革していくことが求められています。

B) 気候ガバナンス

その社会システムの変革を考える上で重要な点の一つが、昔と比べて今は気候ガバナンスのスコープが広がっているということです。これまでは UNFCCC (1992 年採択) の下で、各国の気候変動対策の目標や行動も含めた気候変動の政策的議論が行われ、国際的な科学的アセスメント組織である IPCC (1998 年設立) が政策策定に利用できる科学的情報を提供してきました。これらを軸としつつも、気候ガバナンスのスコープは広がっており、G20、G7 などの国際的枠組、他の国際環境条約、官民パートナーシップ、民間セクターの取組を加速させる民間の規制とスタンダード設定、国をまたいだ都市間のイニシアティブなど多様な場で気候変動の対策について議論されるようになってきています。さらに、図表 76 に示すように、気候変動対策について、持続可能な発展、他の環境問題である海洋や生物多様性の問題、食料、防災、人権、安全保障、労働、貿易、ファイナンスなど、幅広い社会・経済の問題との関わりから議論されるようになってきているのです。

図表 76 グローバルな気候ガバナンス



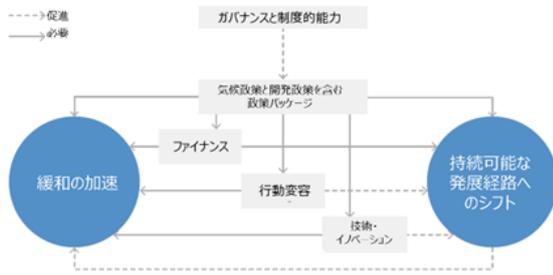
出所 : David Coen et al. 2020. Global Climate Governance
DOI: 10.1017/9781108973250 を基に森田作成

C) 可能にする条件

IPCC AR6 は、A) で記したような社会システムの変革や多様な行為主体の取り組みが加速するという国際社会の背景の中で、これらに関連する科学的知見(社会科学を含む)をまとめました。IPCC AR6 では WG2 (影響・適応・脆弱性)、WG3 (気候変動の緩和) で多くの社会科学分野の論文も引用されています。

IPCC AR6 WG3 (気候変動の緩和) に焦点を置きながら説明しますと、すでに近々大規模に展開することが可能な気候変動の緩和策がある中で、緩和策の大規模展開、さらには持続可能な発展の実現可能性を高めるためには、その障壁を取り除くとともに、「可能にする条件 (Enabling Conditions)」の強化が必要であることが示されています。図表 77 に示されるように、「可能にする条件」にはファイナンス、技術イノベーション、政策手段の強化 (排出削減効果が示されている多くの規制的手段や経済的手段など)、制度的能力、マルチレベルのガバナンス (複数の政策領域を統合、相乗効果の実現とトレードオフの最小化、国と地方の政策決定レベルを結び付ける必要性)、人間の行動やライフスタイルの変化が挙げられます。

図表 77 緩和策の加速と持続可能な発展経路へのシフトと「可能にする条件」との関係



出所：IPCC AR6 WG3 Chapter 4 Figure4.8
を基に森田が和訳

2) 気候ファイナンス

A) 気候ファイナンスの論点

この可能にする条件の一つである「ファイナンス」についても IPCC AR6 WG3 では「投資とファイナンス」という一つの章が設けられ、森田はこの主執筆者を務めました。この章では、パリ協定の目的の一つである、2.1(c)条「温室効果ガスについて低排出型であり、気候に対してレジリエントな発展に向けた方針に資金の流れを適合させること」に関連した、幅広い気候ファイナンスに関する科学的知見がまとめられました。

気候変動を含め環境分野のファイナンスのスコープは広がっており、IPCC の投資とファイナンス章でも、(1) これまで UNFCCC を含め国際環境条約の下で議論されてきた、開発途上国の対策を推進するための、主に先進国から開発途上国への資金支援に関する観点と、(2) UNFCCC の下での議論を超えて、気候目標に向けた転換が求められる金融システムを軸とした観点（金融システムと実体経済の両方をグリーン化、つまり気候変動・環境に対応したものに転換する視点）の両方が含まれています。

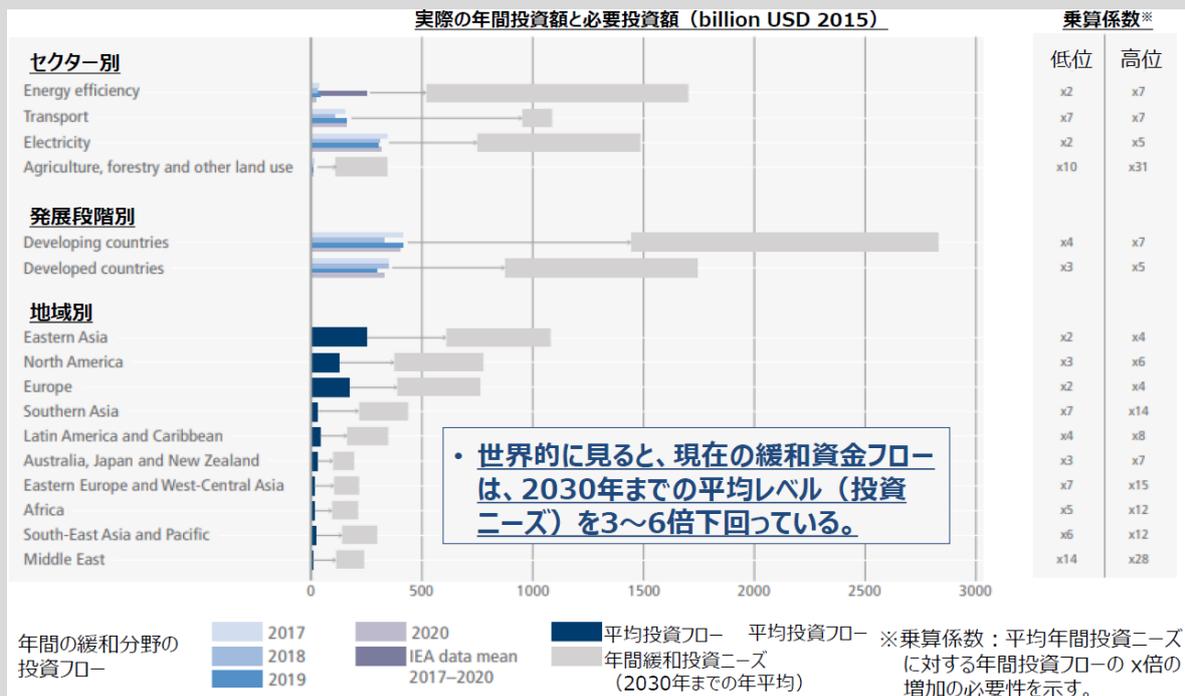
B) 気候目標と資金フローの整合性を加速させるためのアプローチ

IPCC の投資とファイナンス章に書かれている内容を以下に記します。

資金のフローをパリ協定の目標へ整合させていくことは、依然として進展が遅れており、図表 78 の通り、気候目標達成に必要な資金額と実際の資金フローは、気候変動の緩和の全てのセクターや地域において、気候変動の緩和目標の達成に必要な水準に達しておらず、資金の配分も地域・セクターで不均等になっています。

世界的に見ると、図表 78 のように資金ギャップは大きく、気温上昇を 2°C もしくは 1.5°C に抑えるために 2030 年までに必要な平均年間投資額は、現行水準の 3 倍から 6 倍となっています。資金ギャップを埋めるという課題というのは、先進国に比べて開発途上国が全体として大きいのが現状です。

図表 78 気候目標達成に必要な投資額と実際の資金フローとのギャップ



出所：IPCC AR6 WG3 Chapter 15, Figure 15.4
を基に森田が和訳

さらに、資金フローは、気候変動対策よりも化石燃料に対するものの方が依然大きい状況です。このグローバルな投資ギャップの解消に向けて、資本や流動性は十分にあるものの、それらを気候変動対策に向けるところに障壁があることも示されました。

また、資金フローをグローバルな気候目標を整合させる上での重要な点を、以下のように示しています。脱炭素に向けた明確な政策の選択肢と政府や国際社会からのシグナル（公的資金や政策の整合性の強化を含む明確な方針を設けること）は、資金フローの拡大につながり、民間セクターの不確実性や移行リスクを低減します。また、国際的な資金協力の加速は、脱炭素と公正な移行（持続可能な社会への移行の中で誰一人取り残さないこと）を可能にする重要な推進要因であり、資金へのアクセスなどにおける不均衡に対処しようということなのです。

今後 10 年間に金融システムを転換させるための短期的で迅速な行動が重要であり、世界的に協調した取組がそれを可能にします。

気候目標と資金フローの整合性を加速させるためのアプローチとしては、気候・非気候政策の整合性、カーボンプライシングの段階的導入、化石燃料補助金の段階的廃止、などの政策オプション、都市などサブナショナルレベルのファイナンスの強化、市場における気候リスクの過小評価の是正に貢献する革新的な金融のアプローチ（ディリスキング投資、強固なグリーンラベルや開示スキームなど）、新しいビジネスモデル（エネルギーや運輸セクター、自然を基盤とした解決策など）の開発の促進など幅広いアプローチがあります。

3) 今後求められる社会システムの変革とファイナンスの研究・議論

A) 社会システムの変革に関する研究・議論

IPCC AR6 の公表後も社会システム変革、環境ガバナンス・ファイナンスの研究も増えており、また、世界で政策策定も含めた実務的な議論も進んでいます。

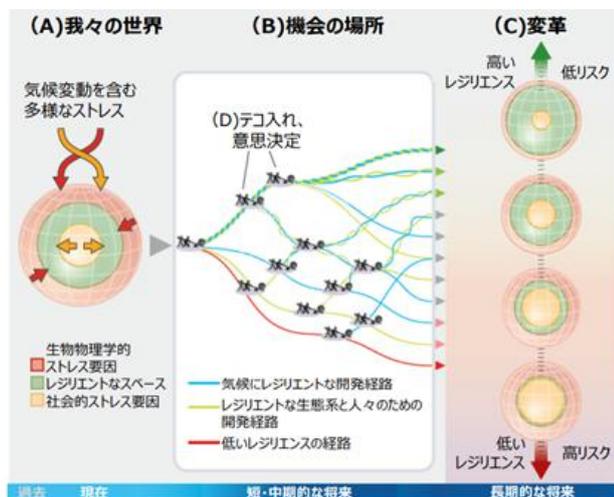
社会システムの変革の関連では、2023 年には

SDGs に関する持続可能な発展に向けた変革を加速させるための科学的知見をまとめたレポート

「The 2023 Global Sustainable Development Report, Times of Crisis, Times of Change: Science for Accelerating Transformations to Sustainable Development」が公表されました。

また、2024年の12月には生物多様性版 IPCC と言われる生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学・政策プラットフォーム (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services : IPBES) の社会変革アセスメントの政策決定者向け要約が採択されました。この報告書にも主執筆者として関わる中で、気候変動と生物多様性分野両方において社会システムの変革、ガバナンスやファイナンスに関わる研究や論文が増えていること、日本と異なり、これらの分野においても欧米の社会科学の研究者の層が厚いことや学際、超学際の研究も進んでいることを痛感しました。例えば、図表 79 のように社会科学、さらには学際、超学際の研究を強化し、日本でも気候変動や生物多様性などの環境目標達成を達成させる包括的な社会システムの変革がどう実現できるかを研究・議論していく必要があります。

図表 79 変革のための政策アジェンダ



出所：国立環境研究所解説資料 (IPBES-IPCC Section7.5.3 Figure.7.4)

B) サステナブルファイナンスに関する研究・議論

IPCC AR6 公表後も気候変動を含むサステナブルファイナンスに関わる政策・制度的議論も進んでおり、それに関連した研究や調査も増えています。

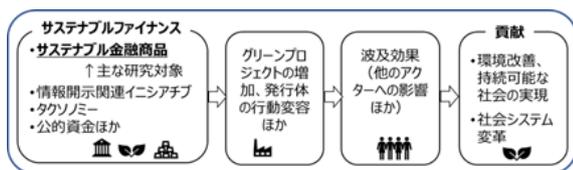
国際環境条約で大きな課題となってきた開発途上国の対策推進のための資金支援についても、2024年11月のUNFCCC COP29で、気候資金に関する新規合意数値目標 (New Collective Quantified Goal : NCQG) に関する決定、「先進国がリードして、2035年までに開発途上国の気候行動のための資金を少なくとも年間3000億ドル動員する資金目標を決定 (多国間開発銀行による支援、開発途上国による支援も含む)」、「全ての行為主体に対して、2035年までに開発途上国の気候行動のための資金を、全ての公的・民間の資金源から少なくとも年間1.3兆ドルに拡大できるよう、共に行動することを求める決定」が採択されました。気候変動分野などの資金ギャップを埋める上でも、公的・民間両方の資金動員の方法などの研究も以前にも増して重要になってきています。

また、環境目標達成のための民間資金動員やそのシフトに貢献しうる、国連の枠組を超えた多くの金融機関主導や官民協働のサステナブルファイナンス関連イニシアティブが立ち上がっており、現在数多くのイニシアティブの下で金融システムと実体経済両方をグリーン化していくためのルール作りが行われています。金融関係を見ても、例えば、国連環境計画・金融イニシアティブ (The United Nations Environment Programme Finance Initiative : UNEP FI)、責任投資原則 (Principles for Responsible Investment : PRI)、グラスゴー金融同盟 (Glasgow Financial Alliance for Net Zero : GFANZ)、気候/自然関連財務情報開示タスクフォース (Task force on Climate-related Financial Disclosures : TCFD、Taskforce on Nature-related Financial Disclosures : TNFD)、国際資本市場協会 (The International

Capital Market Association : ICMA) などのサステナブル金融商品に関するイニシアティブなどがあります。各イニシアティブやアプローチの効果についての分析は一部行われているものの、気候変動分野を含めた幅広いサステナブルファイナンスが実際に様々な効果をもたらしているのか、つまり社会システムの変革、環境目標達成に貢献できているのかについての分析が不足しています。

今年度より、森田は地球環境戦略研究機関、東洋大学、埼玉大学、関西大学と共に「サステナブルファイナンスの拡大とインパクトに関する研究：気候変動と生物多様性に焦点をあてて」という研究プロジェクト（環境研究総合推進費）を実施しています。

図表 80 実施中の研究プロジェクトに関連する図表
 <サステナブルファイナンスの拡大とインパクトに関する研究の範囲>



<サステナブルファイナンスにも求められる超学際研究>



出所：筆者他

図表 80 の通り、サステナブルファイナンスの資金動員・資金供給から環境目標達成や社会システム変革に影響を与えるまでの一連の流れを分析して、気候変動と生物多様性問題の解決に貢献するサステナブルファイナンスの資金動員拡大と資金供給の要件、それらを実現する上でのガバナンスの課題やあり方を示すことを目指しています。また、サステナブルファイナンスにおいても超学際的な研究が求められており、経済学、国際政治学/ガバナンス論、環境科学などの多様な学問分野と実務的知見を融合させ、サステナブルファイナンスの超学際的な研究分野の確立すること、IPCCやIPBES の次の報告書に貢献することも目指しています。

6.3 ネイチャーポジティブ経済移行戦略

1) 生物多様性と気候変動

地球の持続可能性の実現は、人類の生存にとって最優先の課題となります。世界的な目標であるSDGs や昆明・モントリオール生物多様性枠組に掲げられた 2050 年生物多様性ビジョン「自然と共生する世界」の達成には、安定した社会資本とそれに支えられた人的資本の確保が不可欠であり、

それらは自然資本を土台として成立しています。

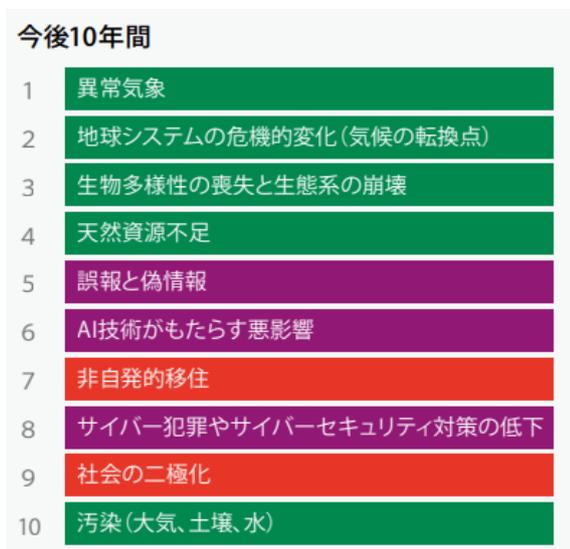
しかし、この自然資本の安定性は、生物多様性⁵の損失と気候変動という二つのリスクにより、損なわれようとしております。また、世界経済フォーラム（World Economic Forum : WEF）のグローバルリスク報告書においても、「異常気象」「地球システムの危機的変化（気候の転換点）」「生物

⁵ 生物多様性条約において、生物多様性とは「すべての生物（陸上生態系、海洋その他の水界生態系、これらが複合した生態系その他生息又は生育の場のいかなるを問わない。）の間の変異性をいうものとし、種内の多様性、種間の多様性及び生態系の多様性を含む」ものとして定義されています。

多様性の喪失と生態系の崩壊」「天然資源不足」「汚染（大気、土壌、水）」といった気候変動のみならず生物多様性も含む環境分野の事象が、今後10年間の重大なグローバルリスクとして認識されています（図表81）。

生物多様性と気候変動への世界的取組は、生物の多様性に関する条約（Convention on Biological Diversity : CBD）とUNFCCCの下で進められています。この二つの大きなリスクは、その現象の観点からも、対応策の観点からも、正負両面で相互に影響し合う関係にあることから、一体的に取り組む必要があるとされています。

図表 81 グローバルリスクの重要度ランキング



出所：グローバルリスク報告書 2024年版

2) 生物多様性の状況と社会経済への影響

現在、地球上の脊椎動物の種の絶滅速度は、過去1000万年間の平均値の少なくとも数十倍から数百倍で、さらに加速している状況であり、第6の大量絶滅期とも言われています。また、植物、動物、土壌、水、大気、鉱物などといった自然によって形成される資本である自然資本は、継続的に劣化しています。IPBESによる地球規模評価報告書（2019）において、この変化の直接要因は、影響が大きい順に、「土地と海の利用の変化」「生物の直接採取」「気候変動」「汚染」「外来種の侵入」とされています。このような生物多様性の状況は、

社会経済にも影響を与えます。世界の総付加価値額のうち、世界の国内総生産（Gross Domestic Product : GDP）の半分にあたる44兆米ドル以上が、自然に依存した産業から生み出されており、多くの経済活動が自然資本に依存しています。このように企業等の事業活動は生物多様性の安定なしには成立しえない一方で、技術開発や製品・サービス供給等を通じて、市場の変革や生物多様性保全・回復への貢献も可能です。

3) ネイチャーポジティブ経済移行戦略

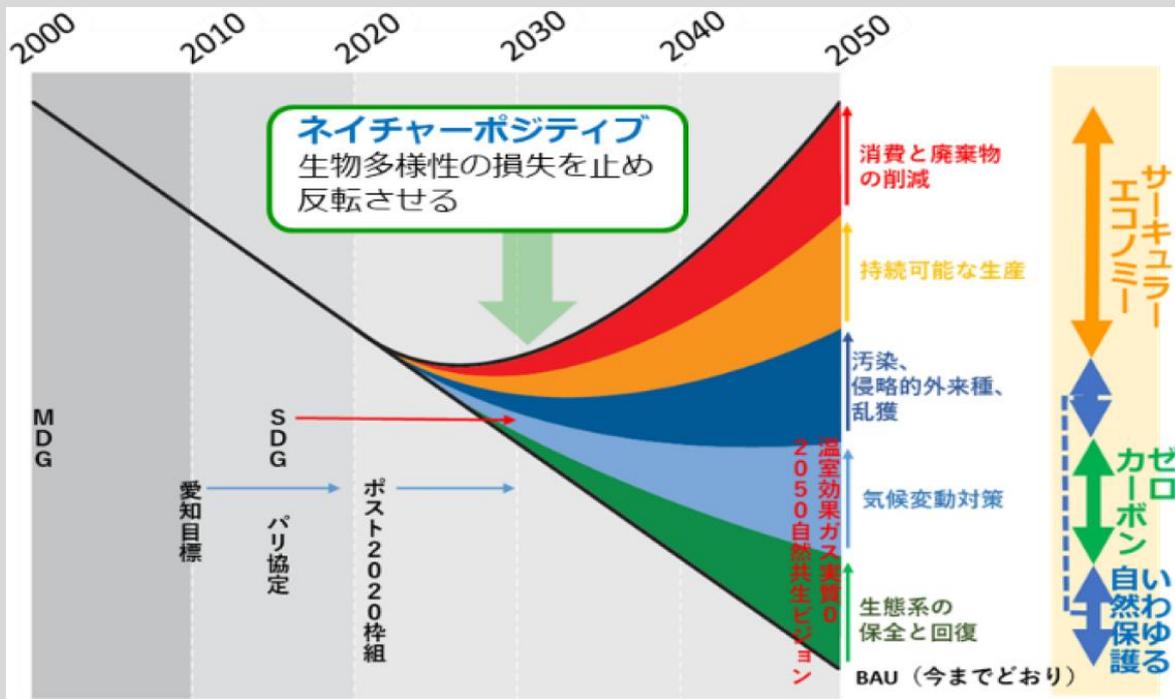
多くの経済活動が自然資本に依存し、自然資本が継続的に劣化する状況は、社会経済の持続可能性にとって明確なリスクです。自然との不適切な関わりにより財務的損失を被った事例として、3M社では、2016年以降、同社の米国施設による有毒な過フッ素化合物及びポリフッ素化合物（永久化学物質）の水路への放出により、少なくとも105億米ドルの法的責任を負い、株価が高値から66%下落しました。

このような状況下において、社会経済活動を持続可能とするためには、自然の保全の概念をマテリアリティとして位置づけたネイチャーポジティブ（Nature Positive : NP）経営への移行が必要です。2024年3月、環境省をはじめとする関係省庁は、個々の企業によるNP経営への移行と、行政や市民も含めた多様な主体によるNPの取組、その総体としての資金の流れの変革を通じた、NP経済の実現に向けて「ネイチャーポジティブ経済移行戦略～自然資本に立脚した企業価値の創造～（以下、「NP経済移行戦略」とする。）」を策定しました（図表82）。

まず、「今までどおり」のシナリオでは生物多様性は損失し続けます。これに対し、これまでの自然環境保全の取組に加え、様々な分野との連携を行い、横断的な「社会変革（transformative change）」を行うことで、2030年以降には生物多様性の純増加につながる可能性があります。この

自然を回復軌道に乗せるため、生物多様性の損失を止め、反転させることを「ネイチャーポジティブ (NP)」と言います。

図表 82 生物多様性の損失を減らし、回復させる行動の内訳

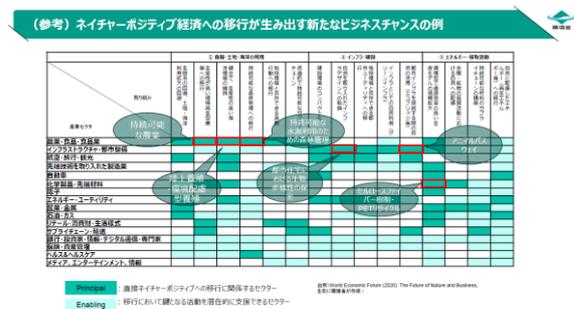


出所：気候変動シリーズ第6回 永田氏発表資料

NP 経済移行戦略では、NP 経営が企業にとって難易度の高い情報開示や単なるコストアップではなく、ビジネス機会ともなり得るのを示すことを狙いとして、三つのポイントを整理しています。

一つ目は、企業の価値創造プロセスとビジネス機会の具体例です。企業は自らの経営を持続可能なものとするために、価値創造（企業価値向上）プロセスを実施していますが、気候変動に引き続き、TNFD 等の情報開示を通じて自然資本も組み込むことを推奨します。また、図表 83 に示すように、ビジネス機会の具体例をセクター毎に整理しています。デジタル通信等も、移行において支援可能なセクターであり、自然モニタリングの工数を飛躍的に圧縮可能な衛星技術も NP に向けた新たなビジネスとして期待されています。

図表 83 NP 経済への移行が生み出す新たなビジネスチャンスの例



出所：NP 経済移行戦略参考資料集

二つ目は、NP 経営への移行に当たって企業が押えるべき要素です。国が行動指針を定めることにより NP 経営への移行に向けた活動が実施しやすくなるという企業からの要望に基づき、具体の五つの要素として作成しました（図表 84）。

図表 84 NP 経営への移行に当たって

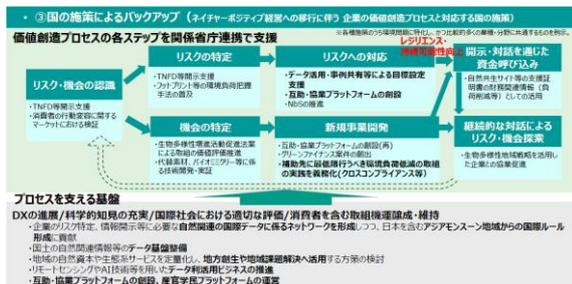
企業が押さえるべき五つの要素



出所：NP 経済移行戦略参考資料集

三つ目は、国の施策によるバックアップです(図表 85)。企業の価値創造プロセスの各ステップを関係省庁連携で支援します。また、そのプロセスを支える基盤の中でも「DX の進展」は必要不可欠となります。例えば、リスク・機会の認識や特定においては、場所に紐づいた分析が求められており、それには位置情報データベースが必要となるためです。

図表 85 国の施策によるバックアップ



出所：NP 経済移行戦略参考資料集

このような移行に向けた取組を実施することで、「自然資本に立脚した、GDP を超えた豊かな社会の礎が築かれている」ことを、目指す社会像としています。また、その具体的な目安としては、2030 年度までに、①取締役会や経営会議で生物多様性に関する報告や決定がある企業会員の割合:50%、②NP 宣言の宣言・賛同団体数:1,000 団体、としています。

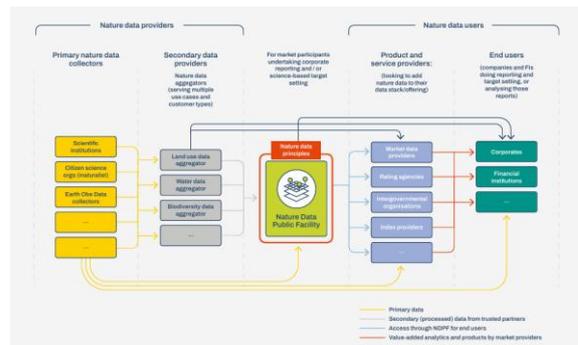
4) 今後の取組

NP 経済移行戦略策定後も、NP 経済への移行に向けて、様々な取組が進んでいます。

2024 年 10 月、環境省は、TNFD に対し拠出することを決定しました。この拠出を通じて、TNFD との共同研究を実施し、TNFD データファシリティ (Nature Data Public Facility) の立ち上げに参画しつつ、TNFD との連携を進めます。

この TNFD データファシリティとは、企業や金融機関等が報告、目標設定、移行計画活動に活用できるように自然関連データへの市場アクセスを改善することを目的としたものです(図表 86)。自然関連の多様なデータへのオープンアクセスが可能となることで、ユーザーと自然データバリューチェーン全体の高付加価値化、コンプライアンス対応や、目標設定手法、自主的報告基準等の採用に向けたコストの低減と、それによる各種手法・基準採用の加速化などの効果が期待されています。また、提供するデータについては、透明性を重視し、データの出所、品質、更新頻度などの情報も提供します。TNFD データファシリティの試験フェーズを 2025 年に進めることを含め、新たなロードマップ案が生物多様性条約第 16 回締約国会議 (CBD COP16) の機会に公表されています。

図表 86 TNFD データファシリティ概念図



出所：A roadmap for upgrading market access to decision-useful nature-related data

また、NP 経済移行戦略を具現化し、新たに生まれるビジネスチャンスの促進とともに NP 経済への移行と企業の成長を支援する「ネイチャーポジティブ経営推進プラットフォーム (仮称)」が立ち上げられる予定です(図表 87)。このプラットフォームでは、衛星産業をはじめ NP 経済に資するソリューションを有する企業と、NP 経済への移

行に課題を有する企業とのマッチングを進め、ビジネス機会の創出と互助・協業の推進を行い、NP経済への移行を推進します。

図表 87 ネイチャーポジティブ経営推進プラットフォーム（仮称）の立ち上げ



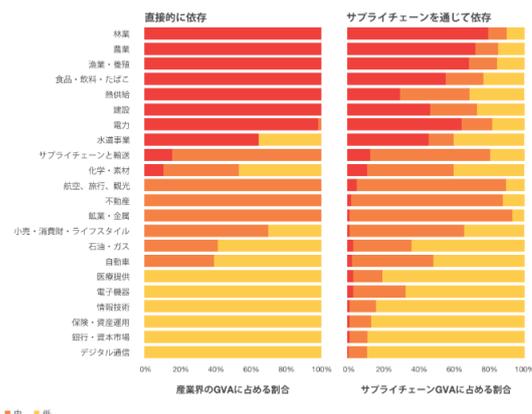
出所：気候変動シリーズ第6回 永田氏発表資料

6.4 民間における取組

1) 自然資本と産業界との関係性

図表 88 に示す多様な産業のうち、上部に記載されている林業、農業、漁業・養殖、建設などといった毎日の暮らしを支えている衣食住の分野は、自然への依存度が高く、気候変動等による自然資本の劣化がダイレクトに影響します。一方で、下部に記載される、自動車、電子機器、情報技術、デジタル通信などの最近のビジネスとして盛り上がりがある分野も含む多くの産業では、土地利用・エネルギー利用・水の利用・廃棄物などで環境に影響を与え、自然資本を劣化させています。結果として、自然資本の劣化は、自然への依存度が高い毎日の暮らしを支えている分野に対して、負のサイクルが働き、ますます影響を与え続けています。

図表 88 産業別、直接及びサプライチェーンを通じてGVAの自然への依存度が高・中・低程度の割合



出所：自然関連リスクの増大：自然を取り巻く危機がビジネスや経済にとって重要である理由

このような影響は、オレンジジュースの品薄やカカオ豆などの不作や高値として、既に現れ始めています。気候変動は生物多様性に影響を与え、その生物多様性は、自然資本に脆弱な商品の高騰といった形で人類の生活・暮らしに影響を与えています。

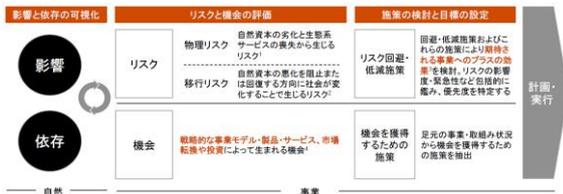
また、人類は経済成長で繁栄すればするほど、ますます都市の人口や人工物、それを支える家畜が、野生動物は住处を追われて減少します。現在では、野生動物は地上の哺乳類の重量のわずか6%に過ぎず、生物多様性は失われつつあるとされています。

2) 産業界における自然関連対応の動向

産業革命以降、世界経済は右肩上がり成長を続けており、この先も経済成長が続きますが、産業活動は自然資本に依存していることから、経済成長の継続のためには、経済活動による自然資本への影響を確認し、自然資本を維持していかなければなりません。そのための対応が始まりつつあります。

一つ目は、TNFD フレームワークです。2023年9月にTNFDがフレームワークの最終提言を公開しました。これは、企業や金融機関が自身の経済活動による自然資本や生物多様性に関するリスクや機会を適切に評価・開示することを支援します(図表89)。「ガバナンス」「戦略」「リスクとインパクト管理」「指標と目標」の四つの柱からなる開示推奨項目は、TCFDとの整合性が図られています。例えるならば、企業と自然資本の相互作用、影響を診る健康診断のようなものであり、企業の事業が気候変動や自然関連の影響を受けながらも健康で事業を継続できるかを評価します。

図表 89 TNFD フレームワークによる評価・開示概念図



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 服部氏発表資料

二つ目は、SBTs for Nature (Science Based Targets for Nature、自然に関する科学に基づく目標設定)です。気候変動においては、TCFDの後に、SBTs という形で定量的な目標設定をしていますが、自然資本においても同様に目標設定しようという動きがあり、2023年5月にSBTネットワーク(SBTN)がSBTs for Nature ガイダンス v1.0 をリリースしました。SBTs for Nature は、「分析・評価 (Assess)」「理解・優先順位づけ (Interpret & Prioritize)」「計測・設定・開示 (Measure, Set & Disclose)」「行動 (Act)」「追跡 (Track)」の五

つのステップから構成されており、各ステップの中で「淡水」「土地」「生物多様性」「海洋」「気候」の五つのトピックに分かれています。

CBD COP16にて、SBTs for Nature 初の承認企業3社が、淡水について目標設定を行ったことが公表されました。今後、このような定量的な目標設定企業数は急速に増加することが見込まれます。

なお、TNFD フレームワークは、影響と依存、リスク・機会を評価・開示するための支援ですが、SBTs for Nature は、企業の目標設定のための支援となり、その観点は異なります。しかし、TNFD フレームワークにて評価を進める中で、特に目標設定についてはSBTs for Nature ガイダンスを参照することを推奨するなど、その方向性としては整合するものとなります。

三つ目は、自然や生物多様性評価の共通化です。TNFDが社会へ広がるにつれて、自然の状態や生物多様性の評価を共通化しようという動きが進んでいます。

2024年10月にビジネス関連のNGOであるNature Positive Initiativeは、自然の状態を評価し、進捗を測定するための統一された指標セットである「State of Nature Metrics」のドラフトをリリースしました(図表90)。今後、正式版を2025年1月にリリース予定としています。また、2025年に開催されるUNFCCC COP30では、持続可能な開発のための経済人会議(World Business Council for Sustainable Development : WBCSD)が「Nature Metrics Portal」をリリース予定としています。これは、企業が自然関連のリスクと機会を評価し、持続可能な方法で事業を運営するためのツールとデータを提供するオンラインプラットフォームです。これにより企業が進捗を測定し、目標を設定し、重要な影響と依存関係を開示できるようになります。

図表 90 State of Nature Metrics の一例

識別ID	メトリック
T2	自然生態系の範囲 (haおよび%)、タイプ別
T7	森林構造状態指数
T8	森林景観完全性指数
T20	農地における自然/半自然生息地 (NSH) (%/km2)
T21	コアエリアにおける自然/半自然生息地 (NSH) の割合 (%)
T22	生息地の構成 (接続性)
T30	乱されていない生息地における在来種の豊富さに対する現在の在来種の豊富さの比率。
T32	種の脅威の軽減と回復 (STAR) スコア
T38	LIFE (土地被覆の変化が将来の純減に与える影響) 指標
T52	森林の地上バイオマス蓄積量 (トン/ヘクタール)
T62	生物多様性生息地指数 (BHI)
T66a	生物多様性保全指数 - メトリック
T68	生物多様性指標 4.0
T89	ダイナミックワールド土地被覆と土地利用データベース
T91	生態地域保全指数
T93	生態系エリア指数
T94	生態系健全性指数
T101	ESAワールドカバー-2020
T102	Esri 2020 土地被覆 10m (IO)
T114	森林健全性プロジェクト: 森林構造健全性指数 (FSII)
T132	世界の森林の変化
T144	グローバル PALSAR-2/PALSAR 森林/非森林マップ 2015-2023
T211a	平均種数 (MSA) /メトリック、フィールドデータ使用
T222	NatureMap - 世界の生息地
T268	レッドリスト生態系インデックス
T277	世界の陸上生態地域
T302	世界の生態系
T311	自然会計 第二
T312	地球純減率 (GEP)
T313	生物多様性影響クレジット (BIC)
T316	エッジ加重生息地指数 (EHI)
T317	グローバル配布単位
T369	シャノン指数
T370	シンプソンの多様性指数
T449	種生健全性指数
T450	種の豊富さ
T451	種の相対的存在量

出所: Nature Positive Initiative の HP より PwC が作成

このように評価指標を共通化させるためには、流通可能で、正しい科学的根拠に基づいたデータが必要です。データを提供できる科学機関の役割やリモートセンシングによる観測データは、産業界でも高まっていると言えます。

3) 環境再生型のバイオエコノミー

NP へと向かうためには、TNFD による評価を踏まえ、事業者が今後どのような取組を計画、実行するかを検討し、産業そのものが変わっていく必要があります。

その具体例として、環境再生型農業があります。例えば、コーヒー栽培が盛んなコロンビアでは、コーヒー農園の拡大による、森林破壊と環境、周辺地域への影響が問題になっています。そこで政府・NGO・農協・農家が共同事業として、畑に複数の植生を用いたり、周辺地域に在来種の自然を回復したりしながら、豊かな土壌と地域の植生を維持する取り組みを行っています。また、この取組により認証が得られ、コーヒー豆の価格向上にも寄与し、農家にもメリットがあります。

気候変動では自身の脱炭素に関する取組を中心に検討すれば良かったのですが、NP に向けた環境

再生型農業などの取組では、農家だけでなく、地域の多様なステークホルダーが、共通のデータを用いて地域の自然やランドスケープに関して議論し、協力することが重要になります。

現在、気候変動を抑制し持続可能な開発や発展を目指す経済のあり方として、グリーンエコノミーが推進されています。しかし多くの資源、土地を利用することから生物多様性が損なわれるなどの課題も見えてきました。そこで新たに注目されているのが、環境再生型のバイオエコノミーです。環境再生型のバイオエコノミーでは、バイオテクノロジーやバイオマスの活用に加えて、再生可能な生物資源の利用や、生物多様性を維持・回復するためのアプローチも含めて、持続可能な経済発展を目指します。今後は、グリーンエコノミーと環境再生型のバイオエコノミーの二つを活用し、地球環境問題に対処していくことが求められます。

また、2024年11月のG20会議では「バイオエコノミーに関するハイレベル原則」が議長国であるブラジルの主導の下、合意され、今後のUNFCCC COP30では、気候変動×生物多様性の経済の主流化への動きが感じられるなど、世界における環境再生型のバイオエコノミーの推進が想定されます(図表 91)。

図表 91 グリーンエコノミーとバイオエコノミー

	グリーンエコノミーの限界	環境再生型バイオエコノミーの強み
生物資源の持続可能な利用	エネルギー効率の向上や再生可能エネルギーの利用に焦点を当てているが、これらの資源は必ずしも再生可能ではない。	再生可能な生物資源を基盤としており、持続可能な方法で管理し、利用することを重視。生物資源は再生可能であり持続可能な供給が可能。
環境保護と生物多様性の保全	温室効果ガスと環境負荷の削減に重点があり、生物多様性の喪失はエコシステムの機能を低下させ、持続可能な開発を妨げる。	バイオエコノミーは、バイオベースの製品により、生物多様性の保全とエコシステムサービス(空気や水の質の調整など)の維持を重視。
廃棄物の削減と資源効率の向上	化石燃料や非再生可能資源への依存と環境へのダメージを前提しており、廃棄物の削減に対する、実際の自然の回復に向けては課題が多い。	バイオベースの材料が再生可能な自然資源から派生し、生分解性または堆肥化可能であり、廃棄物の蓄積と汚染を減少させる。
経済的レジリエンスと多様化	再生可能エネルギーは、エネルギー供給の多様化には限界があり、経済的レジリエンスの強化に対して不足する。	原材料の供給源を多様化しレジリエンスを強化し、脆弱性を低減。農村地域の経済発展を促進し、農家や地域コミュニティに新たな機会を提供。
社会的公平と包摂	社会的公平と包摂に対する具体的なアプローチが不足。	自然の管理者、特に先住民や地域コミュニティに報酬を与え、バイオエコノミーが依存する自然資源の保護と回復を奨励する。アクセスと機会の提供、包摂、公平な利益分配、環境および社会的正義が含まれる。

出所：CONSEO 気候変動シリーズ 服部氏発表資料

4) 自然資本観測の重要性

「再生可能な生物資源の利用」「商品、サービス、エネルギーの生産」「持続可能な開発の促進」といった特徴を持つバイオエコノミーが広まることで、さらに自然資本の価値が高まり、また、自然資本の使い方が重要になります。多様なステークホルダーで協力し、検討していくためには、自然の状態を把握することが可能な自然資本に関するデー

タが必要です。今後、暮らしを支える自然資本を観測する衛星地球観測をはじめとしたリモートセンシングの価値はますます高まることとなります。

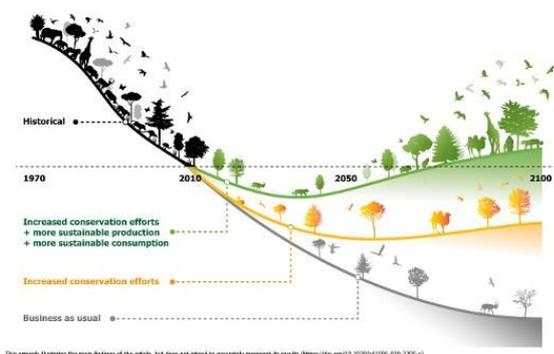
各地域における自然資本の観測データと、その自然資本を利用する商流とが連携することで、NPを取り入れた未来の産業の計画が立てられることとなります。

6.5 科学の視点

1) 気候変動と生物多様性の相互関係

A) 気候変動と生物多様性との相違

図表 92 Bending the curve of biodiversity loss



出所：Adam Islaam | IIASA

私たちの暮らしを支える自然資本を維持するためには、気候変動の緩和と生物多様性の保全の両

方が必要です。生物多様性は複雑な自然の生態系の上に成り立っており、この生態系は一度壊してしまうと、相当な費用と労力をかけても元の環境に戻ることはほぼありません。そのため、そもそも破壊しないことが最も重要です。

近年、気候変動に続いて生物多様性の危機への関心がビジネスやファイナンス分野など様々な分野で高まっており、気候変動に追従する形でアクションが取られています。しかし、生物多様性の複雑さは、生物多様性保全の取組みに、気候変動対策とは異なる課題をもたらしています。気候変動はグローバルな問題であり、GHGの排出量などの定量的な指標を定めることで、皆が同じ指標を使って対応できました。しかし、生物多様性を判断する指標やセクターは非常にローカルに根付い

た問題であり、唯一無二の指標や共通の解決策はありません。画一的な指標を定めることは、ローカルな生物多様性に悪影響をもたらす可能性さえあります。

このように、現時点で生物多様性保全について定量的な指標を定めるのは難しいものの、生物多様性は気候変動と相互作用があることは明らかになっています。自然資本を維持していくためにも、生物多様性の役割について科学的に理解することは重要です。

B) 気候変動解決策としての生物多様性

植物の生物多様性が持つ役割は二つあります。一つ目は「一次生産」です。一次生産とは、生物がCO₂から有機物を生産することです。この一次生産により、炭素吸収、食糧生産が行われますし、多くの生物はそこで合成されるエネルギーに依存しています。一般的に、生物多様性が高いと、炭素隔離などの生態系の機能性も高くなりますが、一次生産でも同様に、生物多様性が高いほど、有機物の生産性は高くなります。また、豪雨や干ばつが起きた際の抵抗性も高くなります。例えば、施肥により一次生産性は向上し、干ばつにより低下しますが、この向上と低下と植物の種数との関係を確認すると、種数の減少に伴う一次生産性の低下は非常に大きく、生物多様性の損失が干ばつに匹敵することが分かりました。

二つ目は「分解」です。有機物は分解されると土に還り、その土は次世代の植物の成長に使われます。落ち葉の分解速度で比較したところ、一種のみの均質化した林と自然林とでは、気候変動による温暖化で分解速度が向上するにも関わらず、生物多様性が高い自然林ほど、有機物の分解速度が速いことが確認されました。生物多様性による分解速度を加速させる効果は、今後50年間で予測される地球温暖化による効果に相当します。

このように、生物多様性が高いほど炭素隔離の機能性も高まる傾向にあります。実際に、1種のみ

の森林と多様な樹種による森林とでは、炭素隔離量が約2~42倍になるという結果もあります。また、動物の生物多様性でも同様の傾向が確認されます。森林分断化による果実植生の大型鳥類の移動制限は、森林バイオマス回復を損ないます。大型のヒゲクジラはオキアミを食べることにより体内に炭素を固定するため、クジラ群の個体数の回復は海の炭素吸収量増加につながります。

ここで、気候変動問題の視点から生物多様性のはたらきに注目すると、生物多様性の保全は炭素吸収量を増加させ、気候変動を緩和させるという望ましいフィードバックを見つけることができます。さらに、気候変動が緩和すると生物多様性は高まるため、そのフィードバックは加速していきます。気候変動緩和のために生物多様性を保全・回復・活用する行動は、自然に根差した社会課題の解決策(Nature-based Solutions: NbS)となります。

C) 人為的活動が与える影響

自然の生態系による炭素吸収は、人為的な炭素排出の免罪符とはならないものの、パリ協定で約束された「ネットゼロ」に向けて、排出削減後の残余分を相殺する役割があり、自然生態系の保全は将来的にも重要です。しかし、人類活動が排出する炭素量と、それらが生態系に及ぼす影響は、自然の許容量を大きく超えているのが現状です。経済成長が進むほど、人類の土地利用は増加し、生物多様性は失われていきます。2030年までに森林破壊ゼロを目指す「グラスゴー首脳宣言」に日本をはじめとした多くの国が合意しているものの、目標達成は見込まれていません。GHG排出と生物多様性消失の双方を引き起こす森林破壊と生態系劣化が深刻に増加中であることが、衛星地球観測などにより確認されています。

「30by30」は、2030年までに地球の陸・海それぞれの30%の面積を保全する、という目標です。30by30を達成したとしても、気候変動の緩和に失

敗することで、生態系の機能が低下し、生物多様性保全による炭素吸収効果が無くなってしまふことが研究により分かりました。

D) 科学的視点による解決策の高度化

最近では、森林破壊よりも森林劣化の方が、炭素吸収量がより減少する、という研究結果も出てきています。現在は、森林面積を基に炭素吸収量を算出していますが、将来的には、その森林の生物多様性＝「質」についても着目していく必要があると想定されます。

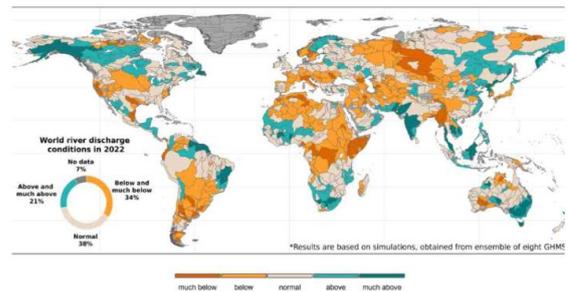
地球の持続可能性の実現に向けては、科学的視点に基づき、気候変動と生物多様性の関係性をより一層明らかにして、気候変動緩和と生物多様性保全の両方を実践していく必要があると考えます。

2) 影響評価モデルによる気候変動リスクの可視化/定量化

A) 気候変動による地球水循環への影響

IPCC AR6 WG1 によると、人類起源の気候変動は、世界中で熱波、大雨、干ばつ、熱帯低気圧などの多くの極端な気象と気候に対して既に影響を及ぼしています。例えば、地球水循環に関しては、世界各地で豪雨が増加し洪水リスクを高めているだけでなく、渇水リスクも上昇しているため水資源不足も発生しています。特に 2023 年は地球の平均気温が過去最高を記録したことも影響し、世界各地で河川流量が少なかったことが報告されています (図表 93)。

図表 93 2022 年の平均河川流量と 1991 年から 2020 年までの過去の平均との比較



出所：WMO, State of global water resources 2023

このような気候変動による地球水循環の変化は日本の洪水災害にも起きています。2019年に発生し東日本に甚大な被害をもたらした台風19号は、地球温暖化の影響により総降水量が10%上昇したと言われています。

気候変動による影響は、今後さらに大きくなると予想されています。どのように気候変動対策を進めていくかを検討するためにも、今起きつつある気候変動のリスクを把握し、将来のリスクを評価することが課題となっています。

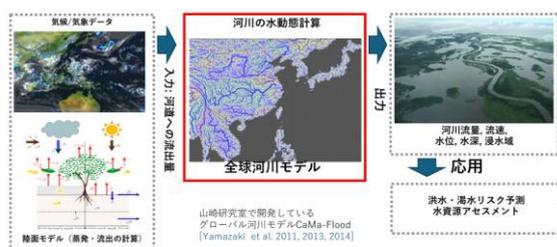
B) 「影響評価モデル」を用いた気候変動リスク分析と分析情報の高度化

気候変動のリスクを把握するためには、気候変動影響の評価が必要です。気候予測モデルでは、気候モデルの100km程度という計算格子スケールで気温・降水量・風速などの将来予測が可能ですが、洪水や熱波の発生頻度、生態系への影響などの具体的に把握すべきリスク情報との間には大きなギャップがあります。

そこで、「影響評価モデル」を用いたリスク評価が行われています。影響評価モデルは、気候モデルから得られた気温、降水量、海水温などの予測データを用いて、様々なプロセスを考慮して計算を行います。その結果として、自然災害の種類ごとの発生確率や人的経済的被害といった、詳細で意思決定に資する影響評価データを得ることができ、具体的な対策を立てることが可能となります。

CO2の排出量などの気候変動への影響については、地球上のどこで排出しても変わりませんが、生物多様性評価もローカルな特性を考慮する必要があるのと同様に、気候変動による影響も地域性が関与します。このようなローカルなリスク評価が可能なことも影響評価モデルの強みです。例えば、気候変動により全球的に水災害が極端化するという予測がありますが、地域によって、洪水が起きやすくなるのか、渇水が起きやすくなるのか、どのくらいの規模や頻度で災害が起きるのかなど、影響の現れ方は異なります。こうして得られた影響評価データは、対象地域の洪水・渇水リスク予測、水資源アセスメント、生態系への影響評価などに応用可能です（図表 94）。

図表 94 全球河川モデルを用いた影響評価とその応用

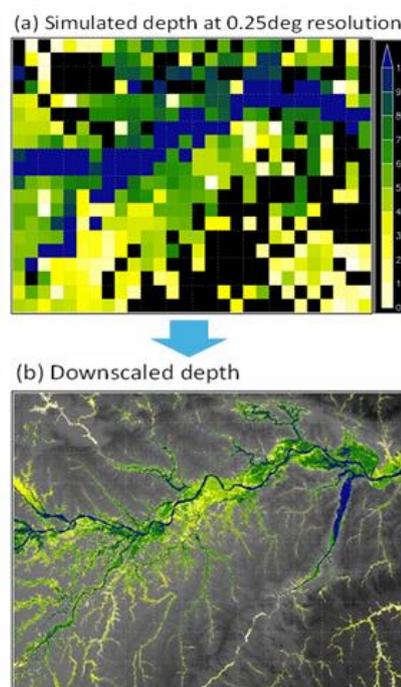


出所：CONSEO 気候変動シリーズ 山崎氏資料

影響評価モデルの性能は日々向上しており、具体的な気候変動対策につながる、より高度なリスク情報が創出されています。

近年の影響評価モデルの高度化として挙げられる要素の一つ目は、リアリティ性です。影響評価モデルの精緻化が進み、よりリアリティのあるデータを得られるようになりました。地球規模で河川の流れをシミュレーションする全球河川モデルでは、影響予測モデルの計算結果に、衛星観測データである標高データなどを合わせることで、洪水の発生規模、場所、時期を予測、可視化できるようになりました。精緻でリアリティのあるデータは人々の意思決定に役立ちます（図表 95）。

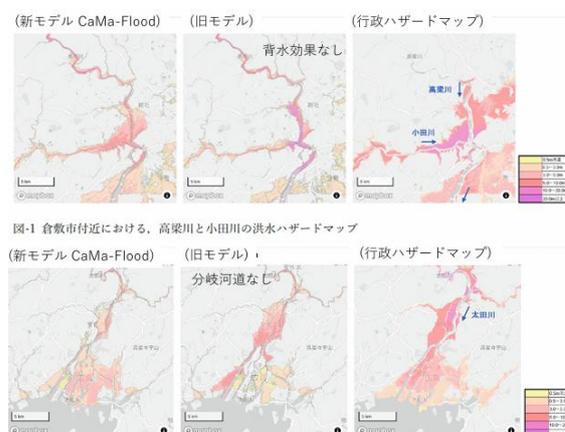
図表 95 高精度地形データを活用したダウンスケール



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 山崎氏資料

二つ目は、予測結果の正確性です。全球河川モデルが出力した浸水域の計算結果は、行政が発表するハザードマップと近いものになっており、グローバルな影響評価モデルによる予測結果が、ローカルな予測の精度に近づいてきたことが分かります。予測精度が向上することは、気候変動対策における影響評価モデルの信頼性の向上となり、そのモデルの活用の推進に繋がります（図表 96）。

図表 96 新旧影響評価モデルとハザードマップの比較

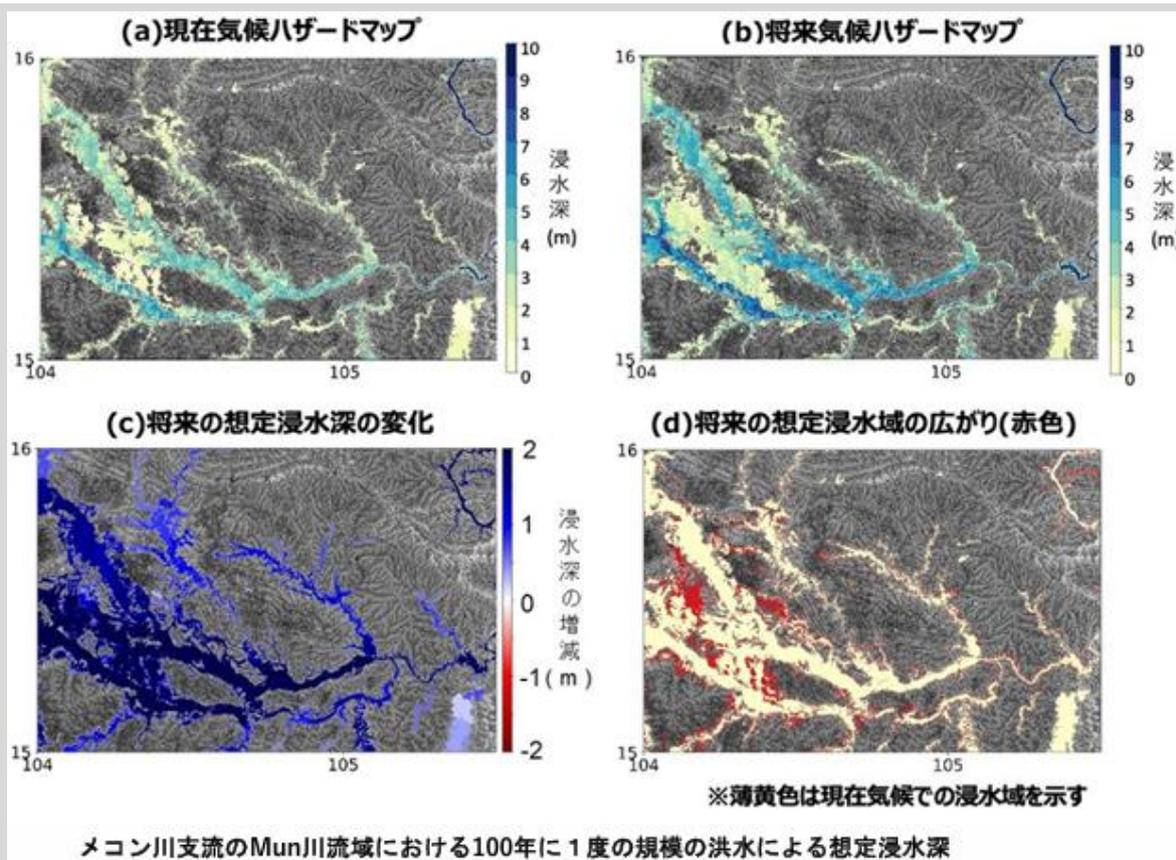


出所：CONSEO 気候変動シリーズ 山崎氏資料

三つ目は、長期予測による将来リスク情報の整備です。気候予測データ、全球河川モデル、高精度地形データを組み合わせることで長期的な影響予測が可能となり、実際に100年後の洪水ハザードマップの変化が計算されています。これにより、現在のハザードマップでは安全でも、100年後は浸水する可能性がある場所が可視化され、事業計画や新しく建築する際の判断材料となります。い

つ・どこで・どの程度リスクが上昇するかを定量的に示すことで、どのような対策を検討・実施すべきかが明確になると考えられます。もちろん、予測精度は完璧であるとは言えませんが、影響評価モデルの高度化により、将来リスク情報を活用できる機会は増えていると感じています（図表97）。

図表 97 現在と将来気候におけるハザードマップ



出所：CONSEO 気候変動シリーズ 山崎氏資料

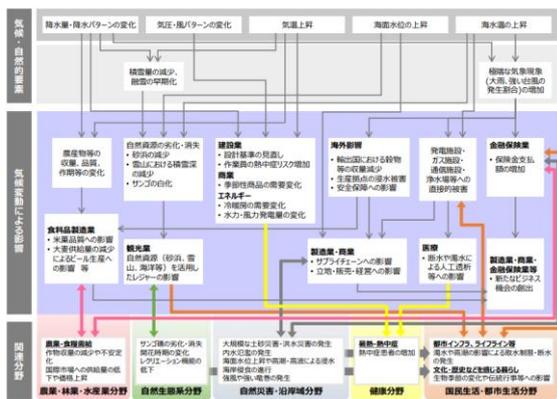
C) 気候変動リスク情報の活用に向けて

日々の生活に影響を与える気候変動問題に対して、高度化した「影響評価モデル」という科学的手法を用いることで、リアリティを伴い正確で長期に渡ったリスク評価が可能となります。これにより「気候変動リスクが増えるから何かしなければならない」という曖昧な懸念から、具体的な被害を想定し、どのような対策を講じれば効果的かを議論できるようになります。

また、具体的な被害想定は、TCFD や国際サス

テナビリティ基準審議会（International Sustainability Standards Board : ISSB）にも貢献します。企業はTCFD、ISSBで定められた情報開示に留まらず、影響評価モデルの予測データを活用して、結果に応じたハード対策の選定、事業継続が困難になる自然災害の発生確率など、事業の継続性を担保するための具体的な検討が可能となります。

図表 98 気候変動により想定される影響の概略図



出所：環境省 気候変動影響評価報告書 概要版

具体的な対策に向けての情報やガイドラインは整備され揃いつつあります。各企業が気候変動リスク情報を活用して、レジリエンスの高い、持続可能な事業を行うことが期待されます(図表 98)。

6.6 地球デジタルツイン

1) 地球デジタルツインの概要

地球デジタルツインとは、現実世界で収集したデータを基に、デジタル空間上に「ツイン」としての地球を再現し、最終的にはある仮定についてのシミュレーションや最適化を行う機能を具備したツールを指します。これにより、過去から未来に至る地球環境の変化を把握し、社会経済に関する政策・産業活動に必須となる水、食料、エネルギー、公衆衛生などの情報を提供することが期待されます。これからの変動激しい社会において、観測データや客観的事実に基づいた行動や意思決定が可能となります。

A) 地球デジタルツインの構成

地球デジタルツインを実現するためには、「地球デジタルツインエンジン」「データレイク」「ユーザーインターフェース」の3つの要素が必要です。「地球デジタルツインエンジン」は、地球デジタルツインの中核部分かつ、地球デジタルツイン上のデータを統合・再構成させるための技術であり、各種観測データの処理や解析、シミュレーション・予測を行います。「データレイク」は、地球の「ツイン」を再現するデータそのもの、また解析・シミュレーション等を実施するために必要なデータが

ストレージされるものであり、衛星地球観測データなどの様々なデータが含まれます。「ユーザーインターフェース」は、ユーザーニーズに応じて、地球デジタルツインを用いた解析・予測情報へのアクセスや抽出を行う機能であり、これによりユーザーは意思決定に資する情報を容易かつ効率的に取得することができます。ユーザーインターフェースにAIを融合(AI on top)させることにより、AIとの対話を通じてユーザーニーズに応じたデータアクセスや解析を容易に行うことができるようになります。使いやすいシステムとするために、このような新しい技術を取り込んだ開発が求められます。

地球デジタルツインでは、全球の3次元情報にそれらの時間変化を加えた4次元情報を用います。過去のRecord(記録)と、現在のMonitoring(観測)を基に、未来をPrediction(予測)します。「過去」では、記録されたデータを基にして地球を再構成し、過去に発生した事象を適切に解析します。「現在」では、衛星や各種現地観測等によりモニタリングしたデータを統合し、地球システムを再現し、時々刻々と起きている現象を反映することによりシームレスかつリアルな地球を再現します。「未来」では、数十年先の気候や地球環境の状態だけでなく、「現在」の地球のデータを各種予

測モデルと融合させることにより近い将来の予測を行います。(図表 99)

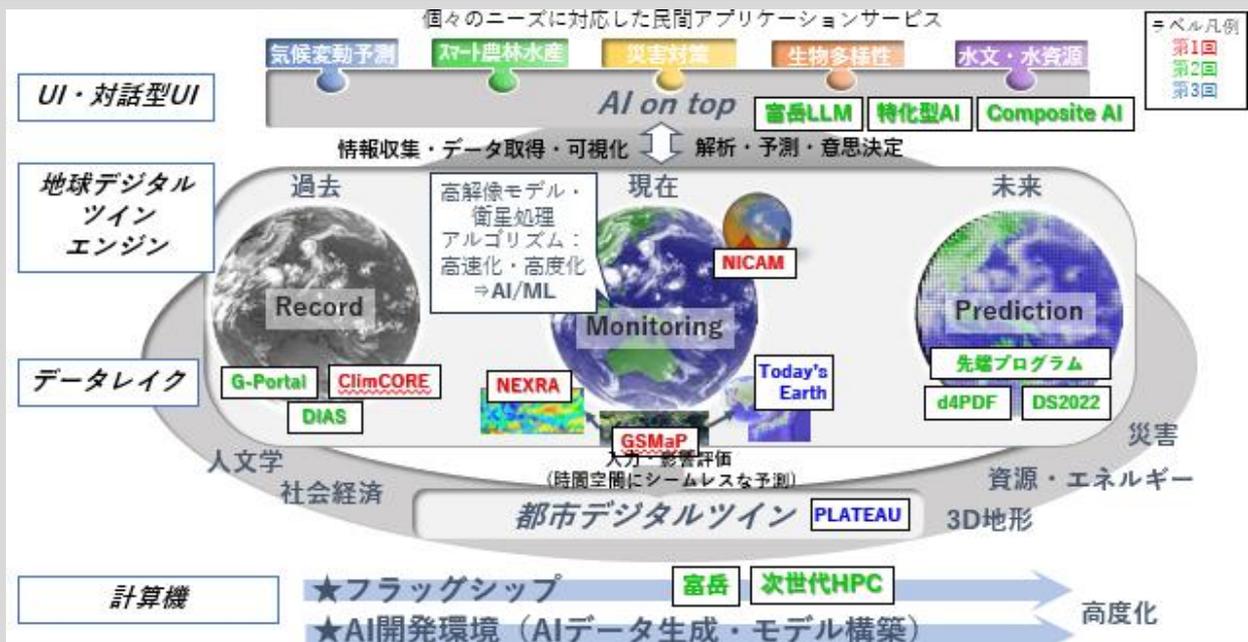
B) 都市デジタルツインとの連携

地球デジタルツインはグローバルスケールの地球を再現しますが、ローカルな都市などを再現するデジタルツインとして都市デジタルツインも存在します。都市デジタルツインでは、人文学、社会経済、建築構造物、資源・エネルギー、災害など、人の動きに関わるさらに詳細なデータもモデルの中に取り込み作成されます。地球デジタルツインと都市デジタルツインとを接続することで、全球スケールから都市スケールまで、時空間的にシームレスな情報の取得が可能となります。

C) 衛星地球観測データの貢献

「過去」「現在」「未来」のすべてにおいて重要な要素が、地球を観測したデータ・情報です。衛星地球観測は、全球を均質かつ定期的にモニタリングし、リアルタイム性のある多様なデータ収集が可能な点が強みです。過去 30 年にわたる衛星地球観測を通じて、衛星システム・センサ技術の高度化による多様なデータ取得が可能となり、また同時にデータとモデルの融合による新たな物理量推定等の技術が進展しました。アーカイブデータの蓄積により気候値や長期変動の理解が進むことも期待されます。地球観測衛星による観測データは現実的な地球環境の再現の基本であり、地球デジタルツインの実現を先導します。

図表 99 地球デジタルツイン 全体イメージ



出所：CONSEO 資料

2) 地球デジタルツインの想定ユースケース

地球デジタルツインは、気候変動や地球環境問題などの地球規模の課題解決に向けた評価分析、予測に利用されることが想定されます(図表 100)。利用分野は気候変動対策のみならず、スマート農林業、漁業、災害対策、生物多様性、水文・水資源

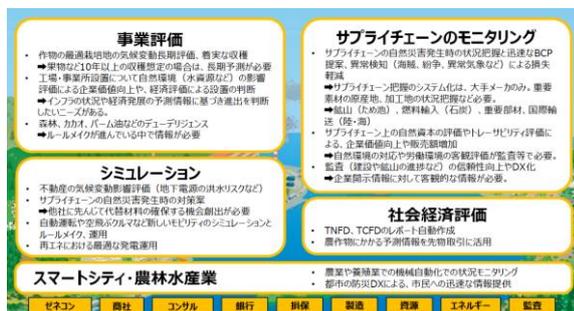
管理などの様々な場面に活用できます。例えば、「サプライチェーンのモニタリング」といったユースケースでは、原産地、加工地、輸送などのサプライチェーン把握が地球デジタルツインを活用することでシステム化しやすくなり、サプライチェーンの状況把握を簡便に行うことが可能となります。昨今頻発する異常気象等はサプライチェーン

上の大きなリスクであり、地球デジタルツインを活用した自然災害発生時の迅速な状況把握とBCP提案、各種異常検知に基づく損失軽減策を講じることができれば、事業継続や社会経済の安定化につながります。自然環境への対応や労働環境の把握、サプライチェーン上の自然資本やトレーサビリティの客観的評価は、企業価値向上や販売額増加へと繋げることも可能です。さらに、これら客観的情報を企業開示情報として活用することで、建設や鉱山採掘などの進捗に対する監査の信頼性向上やDX化による効率化を図ることも可能となります。

他のユースケースとしては、民間企業における将来ビジネスモデルを考える際に気候変動などの長期予測による作物の最適栽培地の評価や不動産の気候変動影響評価を実施するためのシミュレーションで利用することや、TCFD・TNFDレポートの自動作成による社会経済評価で利用することなどが想定されます。政府・行政では、気候変動予測と水資源とを統合し、水資源に関するリスクの特定とリスク対応計画を立案するなどのユースケースも想定されます。

このように、官民・業種を問わず様々なユースケースにおいて、地球デジタルツインが利用されることが想定されます。

図表 100 ヒアリング等により抽出したユースケース



出所：CONSEO 資料

3) 世界における取組状況

現在、政府・宇宙機関のみならず民間企業も含め、世界中で地球デジタルツインの研究開発が進められています。

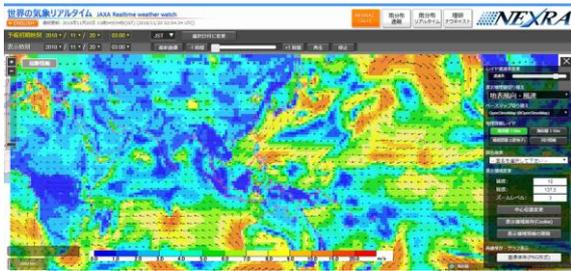
A) 日本における取組み

日本においては、これまでに獲得した技術、蓄積データや情報を統合することにより、前述のような地球デジタルツインが実現可能な段階にきています。

地球を再現するデータや情報は、衛星観測データをはじめとした各種観測データ、研究機関等が有する再解析データや気候予測データが国内で整備されています。例えば、ClimCOREは観測データと数値モデルの融合による過去から現在までの日本域気象再解析データの整備を進めています。地球シミュレータを活用した将来予測データ「d4PDF」は将来地球の再現に利用できます。

地球デジタルツインエンジンでは大気・海洋・陸域のモデル、データ同化システムを用いた高精度予測モデルも開発されています。例えば、気象庁の数値予報モデルは、地上観測および衛星観測データをデータ同化し、リアルタイムで全球スケールから局地スケールまでの現在地球の気象を再現します。また、気候変動に関する先進的な研究プログラムであるSENTAN（気候変動予測先端研究プログラム）ではIPCCの報告書に活用されるモデル研究開発が進められており、MIROC（東大/環境研/JAMSTEC）、MRI-ESM（気象研）、NICAM（東大/環境研/理研）などの気候モデル、大気・海洋および炭素等の物質循環も含めた地球システムモデルも開発され地球システム全体の再現と将来予測を行うことができます。JAXAでは、衛星観測を活用したリアルタイム性のあるデータやモデルの開発を行っています。例えば、NEXRA(図表 101)は、数値気象予測モデルNICAMに衛星全球降水マップGSMaPをデータ同化することにより観測データと気象モデルを融合し、準リアルタイムで気象情報を提供できるほか予測実験を行うことも可能です。

図表 101 世界の気象リアルタイム (NEXRA)



出所：JAXA

また、水循環シミュレーションシステムである Today's Earth も、GSMAp を観測データとして同化した陸域水文モデルであり、河川水量や洪水リスクなどの水文パラメータを全球および領域スケールで提供します (図表 102)。

図表 102 水循環シミュレーションシステム (Today's Earth)



出所：JAXA

JAXA は、衛星地球観測データの取得・品質維持・提供、関係機関と連携した観測データとモデルの連携・開発を通して「日本版地球デジタルツイン」の構築に貢献します (図表 103)。

図表 103 JAXA の取組



出所：JAXA

日本版地球デジタルツインの実現に向けては、分野横断的な協力が必要です。例えば、地球デジタルツイン上で行う膨大なデータ処理とモデル駆動には計算基盤が不可欠です。デジタルツインの特徴であるリアルタイム性、解析・予測の高精度化にあたっては、ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) 分野との連携も想定されます。また、情報の可視化や、AI を活用した効率的な情報抽出、さらには高精度モデルのエミュレータの役割としての AI 技術活用など、IT 企業等の民間技術も積極的に取りこむことでユーザビリティ向上につながります。

B) Destination Earth (DestinE)

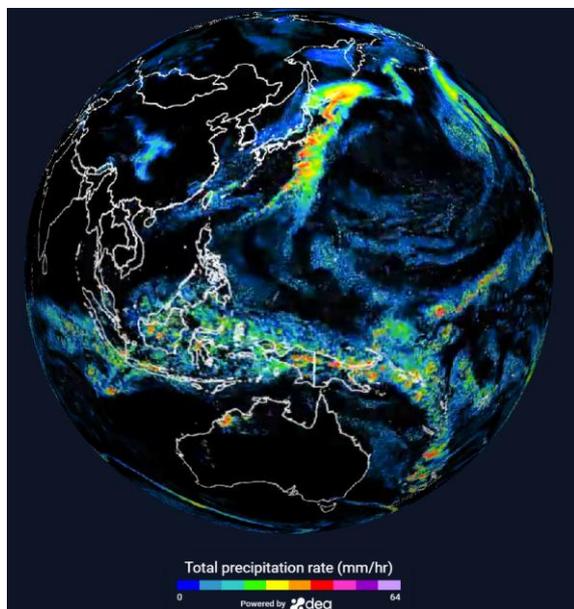
欧州では、政府機関を中心として、DestinE と呼ばれる地球デジタルツインの取組が行われています。欧州委員会 (European Commission : EC) が 2022 年に公式に開始した気候変動対策のためのイニシアティブである DestinE は、ESA、欧州中期予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts : ECMWF)、EUMETSAT の 3 機関によって共同で開発・運営されています。

ESA が運営する「DestinE Platform」(図表 104) は、ユーザー向けのクラウドベースのコアサービスプラットフォームであり、より良い意思決定に資するアプリケーション、モデル、シミュレーションを提供します。EUMETSAT が運営する「Destination Earth Data Lake」は、3 機関が保有するデジタルツインデータに加え、IoT や社会経済データなどを含む様々な外部データスペースを参照し、シームレスなアクセス、ビッグデータ処理サービスを提供します。ECMWF が開発する「Digital Twins and Digital Twin Engine」は、スーパーコンピューターの機能を用いて、リアルタイムの観測とシミュレーションからのデータを組み合わせ、気候変動に関する高品質なシミュレーションを提供します。

DestinE では、まず始めに、二つの優先度の高いデジタルツインとして、気象に起因する地球物理学的ハザードに関するデジタルツイン (Weather-Induced Extremes Digital Twin) と気候変動への適応に関するデジタルツイン (Climate Change Adaptation Digital Twin) とが開発されます。他にも、海洋、生物多様性などの分野を含む地球システムをモデル化する予定であり、最終的にはテーマ別のデジタルツインを徐々に統合し、地球の包括的なデジタルツインを形成することを目的とします。

2024年6月、第1フェーズが完了し、最初の二つの地球システムデジタルツインを含む DestinE システムのすべての主要な構成要素が実装されました。2030年までには、地球のフルデジタルレプリカを作成する予定です。また、現在は、気象・気候関連のサービスを中心に提供していますが、今後は都市デジタルツインなどのサービスも展開される予定です。

図表 104 DestinE Platform



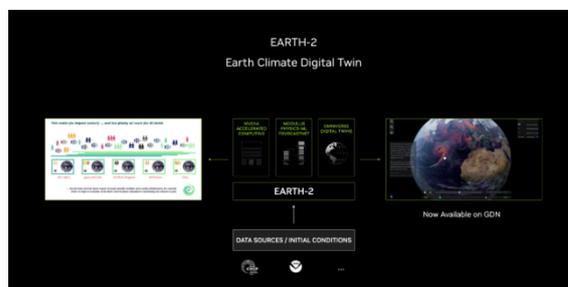
出所：DestinE Platform

C) Earth-2

2024年3月、米国の民間企業で半導体メーカーの NVIDIA は、Earth-2 と呼ばれる地球気候デジタルツインのクラウドプラットフォームを発表し

ました。NVIDIA が提供するサービスに含まれる Earth-2 のクラウド API を活用することにより、ユーザーが地球規模の大気や局地的な雲量から台風や乱気流に至るまで、インタラクティブな高解像度シミュレーションを迅速に提供可能です。Earth-2 の API は、NVIDIA の生成 AI モデルを採用しています。現在は、気候技術に関するユーザーが自身のソリューションに統合できるように、この Earth-2 の AI サービスが公開されています (図表 105)。今後、大規模な気象と気候のデータに関する視覚化サービスと、シミュレーションサービスが提供される予定です。

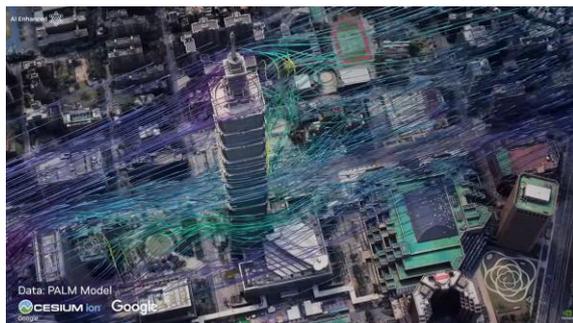
図表 105 Earth-2 モデル図



出所：NVIDIA

Earth-2 は既に行政機関や民間企業にて活用され始めており、台湾の中央気象局 (Central Weather Administration : CWA) や米国の天気予報・情報技術サービス企業 The Weather Company などは、Earth-2 を採用して台風の上陸位置のより正確な予測や、自社サービスの高度化を計画しています。また、米国の衛星運用・解析会社である Spire Global 社は、同社の GNSS-RO データと独自のデータ同化技術を Earth-2 クラウド API と統合することで、AI を活用して気候・気象予測の加速・高度化することを発表しました (図表 106)。また、都市スケールのシミュレーションデータも組み込まれており、気候変動による異常気象の都市環境への影響評価やその課題解決にも活用が可能です。

図表 106 Earth-2 による都市スケールでの解析



出所：NVIDIA

4) 地球デジタルツインが拓く未来

地球デジタルツインは、政府機関や学術、民間企業で研究開発が進められ、すでに気象や気候変動分野においては活用されつつあります。今後、世界中で地球デジタルツインの活用が進むことで、気象・気候以外の分野での利用進展、各種デジタルツインとの接続やアプリケーション開発、新たなサービス・ビジネスモデルの創出も期待できます。

地球規模の喫緊の課題である気候変動課題においては、地球デジタルツインによる影響評価・予測を様々な分野に展開することができると、科学的根拠を基に気候変動対策の検討と実施を効果的に進めることが可能となります。さらには、生物多様性なども含む他分野にもその影響が広がっていくことが予想されます。地球デジタルツインは、科学と技術の集合知として、より良い未来、見通せる社会の実現に貢献します。

近年、衛星地球観測データの活用が進んだことで、気候変動の現状理解と将来予測ができるようになりました。しかし、地球環境の大きな変化を示す将来予測に直面すると、ネガティブな視点にとらわれてしまう人は多いのではないのでしょうか。

そこで CONSEO では、気候変動シリーズ第3回として合同会社 CGO ドットコムの協力のもと【気候変動をギャル式で考えるワークショップ】を開催しました。このワークショップでは、自分軸！直観性！ポジティブ思考！から構成されるギャルマインドをもって、自分らしくポジティブな視点から気候変動の未来について考えました。

ギャル式プレスト参加者 集合写真



衛星地球観測コンソーシアム様
ギャル式プレスト実施レポート
2024/09/20

グラフィックレコード（背景）



ワークショップでは、まず「衣食住」の観点から気候変動の現状と未来を考え、衛星地球観測の重要性を理解するとともに、当事者意識を高めました。次に「ワクワクする未来の生活をつくるには〜？」というテーマで、未来でどんな生活を送りたいか、自分軸のアイデアをチームでプレストしました。最後に、ワクワクする未来の生活に、気候変動対策の手段を掛け合わせた将来像を考え、ワークシートを作成しました。「人類スーパー恒温動物化スーツ（インナースーツ一枚で、どんな外気温にも適応できる）」「おいでよ！なんちゅ

うの森（街全体をツリーハウスやアスレチックにし、楽しみながら植物中心の街にする）」など、たくさんの独創的なアイデアが飛び出しました。

気候変動は世界規模の複雑な事象という印象が強いですが、誰もが当事者である身近な問題です。一人ひとりが自分の視点で気候変動問題について考え、アクションを起こすことが社会全体のアクションに繋がります。

また、気候変動の影響を受ける社会でポジティブに生きようとする姿勢は、気候変動の適応策にも繋がります。みなさんもぜひ「ギャルマインド」を胸に、気候変動問題に対して、自分ならではのアクションを起こしてみたいはいかがでしょうか。

グラフィックレコード（参加者のアイデア）



コラム（その5） 気候変動におけるメディアの役割～気象予報士が伝えられること～ （井田寛子気象予報士）

記録的猛暑、大雨、干ばつなど激甚化する気象災害。気象予報士は災害から人の命を守ることが一番の責務であり、災害報道に最も重きを置くことは言うまでもありません。一方で、極端な異常気象が相次ぐ今、その要因となっている地球温暖化に言及することはこれまで多くありませんでした。その理由はなぜなのか、課題は何なのか。気候変動問題が解決すべき社会の重要課題の一つであることは間違いなく、気象予報士として行動したいと立ち上がりました。

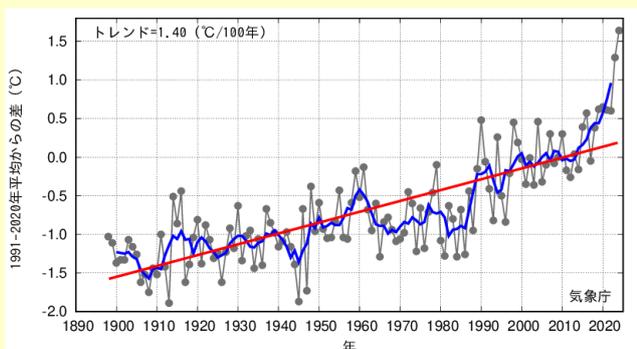
2024年6月5日の環境デーに気象予報士・気象キャスター有志が集まり、共同声明を発表。テレビやラジオ等の気象情報やニュースの中で気候変動や気候危機に関しての言及を強め、発信を加速化することを宣言しました。私は声掛け人となり、全国から44人が賛同し声を上げてくれました。

共同声明の賛同者



私が気象の垣根を越えて気候変動問題について関心を高めたのは2014年9月にニューヨークで開かれた国連気候サミットに参加したことがきっかけです。私と同じ立場にある気象予報士や気象キャスターがアジア、アメリカ、ヨーロッパ、アフリカ、オセアニア各地域から集まり、ワークショップが開かれました。皆共通して述べていたのは、予想を上回る極端な現象が増えているということ、その要因は地球温暖化であるという認識はあるものの、伝える時間がない、放送局に理解されないといったもどかしい思いでした。ワークショップには気候科学者も同席し、市民に身近な存在である気象予報士こそが、科学的根拠を踏まえて気候変動について言及して欲しいと語られたことを鮮明に覚えています。使命感を持って日本に帰りませんが、当時は日々の業務に追われ、放送のなかで気候変動に言及することは思うようにできませんでした。あれから10年の年月が経ってしまいましたが、今声を上げなければ放送は変わらない、という衝動が強く掻き立てられたのが、2023年から2024年にかけての記録的な高温です。

日本の年平均気温偏差



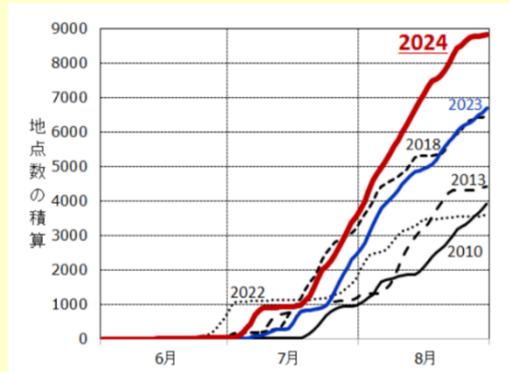
出所：気象庁 2024年（令和6年）の天候のまとめ（速報）

2024年の日本の年平均気温偏差は+1.64°C（1～11月の期間から算出した速報値）で、統計を開始した1898年以降、これまで最も高い値だった2023年の+1.29°Cを大きく上回り、最も高い値となる見込みとなりました。

全国で観測された猛暑日（最高気温 35℃以上）の地点数の積算は、2010 年以降の主な高温の年と比較してもひと際多かったことが見て取れます。

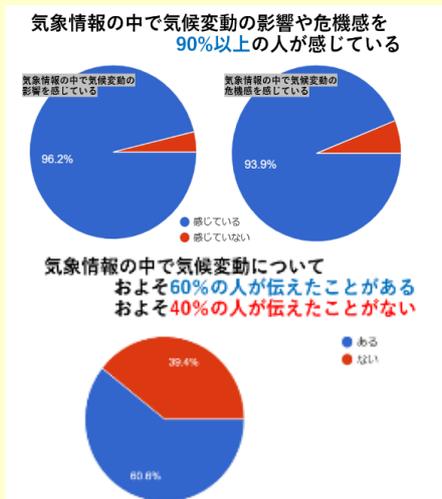
近年では、ある個別の現象にどの程度地球温暖化が影響したかを科学的に示すことができるようになりました。EA 法と呼ばれる解析手法で、地球温暖化が進んでいない地球と温暖化が進んだ現実の地球とをシミュレーションした上で比較し、猛暑や大雨等の個別の現象にどの程度温暖化が影響したかを評価することができます。EA 法による解析では、2024 年夏の記録的な暑さは地球温暖化の影響がないと過程した場合、「ほぼ発生しない」という結果になりました。また、2024 年 7 月下旬に発生した東北日本海側の大雨についても、温暖化が寄与することによって 48 時間の積算雨量が 20%以上多くなったことを示しており、近年の極端な高温や豪雨は地球温暖化が寄与していることが科学的に明らかとなっています。気温が高くなると大気中の水蒸気も多くなるため、極端な豪雨や強大な台風も発生しやすくなることが、科学的根拠と共に証明されています。

日本の猛暑日地点数の積算



出典：気象庁 2024 年夏（6月～8月）の天候

アンケート結果（一部抜粋）



EA 法のような科学的根拠は、気象予報士が気候変動を言及する上でも背中を押してくれる大きな要素となります。今回、声明を出すにあたり、全国の気象予報士と気象キャスターに独自のアンケートを実施しました。130人の回答が得られ、「気象情報の中で気候変動の影響や危機感を感じている」は 90%以上である一方、「気象情報の中で気候変動について伝えたことがある」は 60%程度に留まりました。

課題として最も多くあげられたのが、「放送時間が足りない」次に、「気候変動に対する知見不足」でした。一つの気象現象に対してどの程度地球温暖化の影響があるのかについての検証は、私たち気象予報士にはできません。しかし近年は、現象が発生した後すみやかに検証が行われ、公表されるようになり、放送でも科学的根拠を基に伝えられるようになりました。確かな証拠があるということは、発信する上で非常に重要なことです。

気候変動対策のアクションを加速化しなければいけない今、気象予報士や放送ができることはまだまだあると感じています。災害と紐づけるだけではなく、健康リスクやスポーツ、食やファッションなど身近な事象と結びつけながら、少しでも多くの人に気づきがあるよう、細やかな発信をしていきたい。そこには、ポジティブに生きていける未来が想像できるようなメッセージを込めなければいけない。簡単ではありませんが、未来の希望を発信できるプラットフォームを作るのが今後の目標です。

Appendix

I. 気候変動の把握に必要な物理量・情報

■ 必須気候変数

気候変動に伴う地球環境の変化を具体的かつ正確に把握・予測することを目的として、2004年に全球気候監視システム（Global Climate Observing System：GCOS）によって、必須気候変数（Essential Climate Variable：ECV）が制定されました。ECVとは、地球の気候を特徴づける因子である物理学的・化学的・生物学的変数、あるいはそれらを組み合わせた変数のことで、図表107に示すように現時点で54の変数が特定されています。地球観測衛星等によりECVを観測して得られた気候データレコード（Climate Data Record：CDR）は、気候変動の理解・予測、気候変動の影響を緩和し、適応するための手段の指針、気候変動リスクの評価・異常天候の潜在的な原因の解明に必要な実証的証拠となります。

図表 107 必須気候変数（ECV）一覧

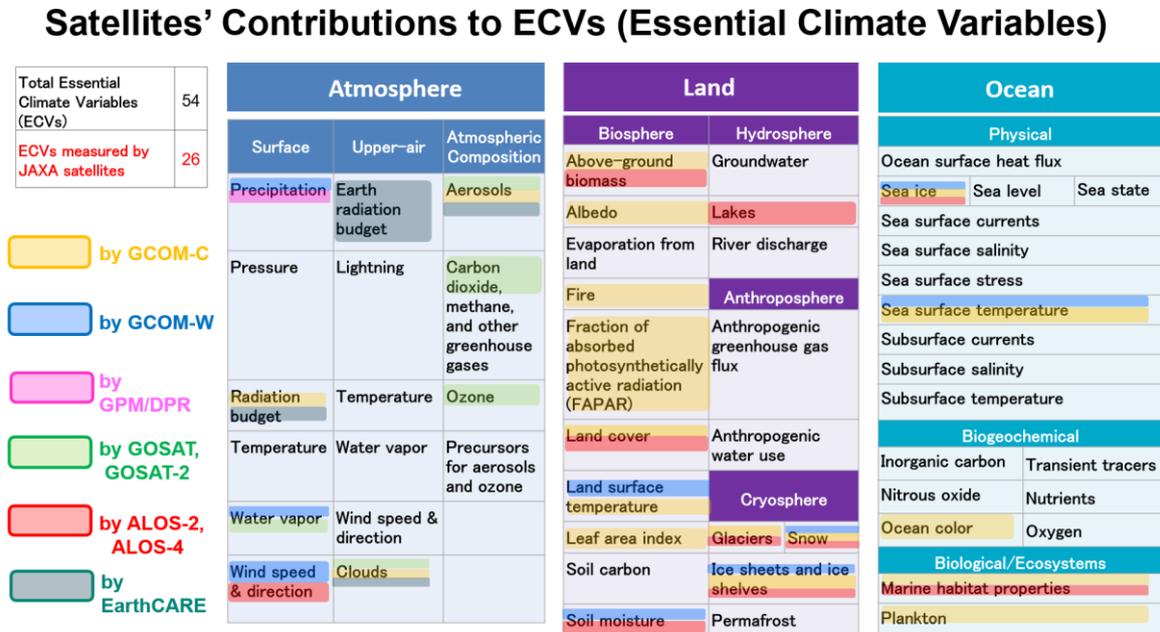
大気		陸		海洋	
地表	<ul style="list-style-type: none"> ・降水量 ・気圧 ・放射収支 ・気温 ・水蒸気 ・風速、風向 	水圏	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水 ・湖沼 ・河川流量 	物理量	
上層	<ul style="list-style-type: none"> ・地球放射収支 ・雷 ・気温 ・水蒸気 ・風速、風向 	雪氷圏	<ul style="list-style-type: none"> ・氷河 ・氷床、氷圏 ・永久凍土 ・雪 	<ul style="list-style-type: none"> ・海面応力 ・海面水温 ・海中の海流 ・海中塩分濃度 ・海中水温 	<ul style="list-style-type: none"> ・海洋熱フラックス ・海氷 ・海面温度 ・海況 ・海面の海流 ・海面の塩分濃度
大気組成	<ul style="list-style-type: none"> ・エアロゾル特性 ・CO₂,CH₄のほかGHG ・雲特性 ・オゾン ・エアロゾル、オゾン前駆物質 	生物圏	<ul style="list-style-type: none"> ・土地被覆 ・地表面温度 ・葉面積指数 ・土壌炭素 ・土壌水分 	<ul style="list-style-type: none"> ・地表バイオマス ・アルベド ・地表面蒸散量 ・林野火災 ・植生の光合成有効放射吸収率 	生物地球科学量
		人類圏	<ul style="list-style-type: none"> ・人為起源のGHG、フラックス ・水利用 		<ul style="list-style-type: none"> ・無機炭素 ・亜酸化窒素 ・栄養素 ・海色 ・酸素 ・短期トレーサー
					生物/生態系量
					<ul style="list-style-type: none"> ・海洋生息環境特性 ・プランクトン

出所：全球気候観測システム（GCOS）の資料を基に作成

■ 衛星による観測

地球の環境変動を長期にわたってグローバルに観測可能な衛星地球観測は、その観測データにより ECV への貢献が期待されています。現在 JAXA が運用する衛星により、54 個の ECV のうち 26 個の ECV を観測しています。

図表 108 JAXA が運用する衛星により観測可能な必須気候変数 (ECV) 一覧



出所：JAXA

II. 衛星一覽

本レポートにて採り上げた衛星について、以下に概要を記載します⁶。

■ ALOS (陸域観測技術衛星「だいち」)

図表 109 ALOS 概要

項目		内容
目的		・ 地図作製、地域観測、災害監視、資源調査への応用を目的とした高解像度のマイクロ波画像を取得すること。
実施体制	開発・製造	・ JAXA、日本電気株式会社、株式会社東芝、三菱電機株式会社
	打上げ	・ H-II A ロケット 8 号機
	打上げ日	・ 2006 年 1 月 24 日 (GMT)
	地上局	・ JAXA
	運用	・ JAXA
	データ取扱	・ 株式会社パスコ (有償販売)
	主要ユーザー	・ 官公庁、地方自治体、民間企業
仕様	サイズ	・ 4000kg
	軌道	・ 太陽同期準回帰軌道 ・ 軌道傾斜角：98.16 度
	高度	・ 691.65km
	運用期間	・ 5 年
	回帰日数	・ 46 日
	センサ概要	・ L バンド合成開口レーダ (PALSAR) ・ 高分解能光学イメージャ (AVNIR-2) ・ 高分解能光学イメージャ (PRISM)
	センサ詳細	・ PALSAR ・ 分解能：高分解モード 10m、広域モード 100m ・ 観測幅：高分解モード 70km、広域モード 250～350km ・ 周波数：1.270GHz (L バンド)
		・ AVNIR-2 ・ 分解能：10m ・ 観測幅：70km ・ 波長帯：VIS：0.42～0.50 μm, 0.52～0.60 μm, 0.61～0.69 μm ・ NIR: 0.76～0.89 μm
		・ PRISM ・ 分解能：2.5m ・ 観測幅：3 方向視モード 35km、直下視のみ 70km ・ 周波数：VIS-NIR: 0.52～0.77 μm (パナクロ)
	データスループット	・ 240Mbps (データ中継衛星経由) ・ 120Mbps (直接送信モード)

⁶ 主に衛星運用機関等 HP、eoPortal、WMO OSCAR、RESTEC 衛星情報データベースを中心に参照し作成

図表 110 ALOS イメージ図



出所：JAXA

■ ALOS-2（陸域観測技術衛星 2号「だいち 2号」）

図表 111 ALOS-2 概要

項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> ・ 地図作成、地域観測、災害監視、環境監視に利用できるデータを提供すること。 ・ 陸域観測技術衛星 ALOS で実証された技術や利用成果を発展させ、国内外の大規模自然災害に対して、高分解能かつ広域の観測データを迅速に取得・処理・配信するシステムを構築し、関係機関の防災活動、災害対応において利用実証を行うこと。 ・ 災害状況の把握に加え、国土管理や資源管理など衛星の運用の過半を占める平常時のニーズにも対応した、多様な分野における衛星データの利用拡大を図ること。
実施体制	開発・製造	・ 三菱電機株式会社
	打上げ	・ H-IIA ロケット
	打上げ日	・ 2014年5月24日 (GMT)
	地上局	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地上ネットワークシステム (GN) : 増田局、沖縄局、勝浦局 ・ 高緯度局: スバルバード局 ・ 拡張型ネットワーク局 (EN局) : 勝浦 S/X局、鳩山 X局 ・ スペースネットワーク局 (SN局) : 筑波局、鳩山局
	運用	・ JAXA
	データ取扱	・ 株式会社パスコ (有償販売)
	主要ユーザー	・ 官公庁、地方自治体、民間企業
仕様	サイズ	・ 2120kg
	軌道	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽同期準回帰軌道 ・ 軌道傾斜角: 97.9度
	高度	・ 628km
	運用期間	・ 5年
	回帰日数	・ 14日
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ SAR センサ (PALSAR-2) ・ 赤外カメラ (CIRC)
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> ・ PALSAR-2 観測周波数 <ul style="list-style-type: none"> ・ スポットライト: 1257.5 MHz ・ 高分解能 (3m): 1257.5 MHz ・ 高分解能 (6m): 1257.5 MHz, 1236.5 / 1278.5 MHz, selectable ・ 高分解能 (10m): 1257.5 MHz, 1236.5 / 1278.5 MHz, selectable ・ 広域観測: 1257.5 MHz, 1236.5 / 1278.5 MHz, selectable ・ PALSAR-2 観測幅 <ul style="list-style-type: none"> ・ スポットライト: 25 x 25km ・ 高分解能 (3m): 50km ・ 高分解能 (6m): 50km (FP: 30km) ・ 高分解能 (10m): 70km (FP: 30 km) ・ 広域観測: 350km (5 ルック) ・ PALSAR-2 空間分解能 <ul style="list-style-type: none"> ・ スポットライト: 3 x 1m ・ 高分解能 (3m): 3m ・ 高分解能 (6m): 6m ・ 高分解能 (10m): 10m ・ 広域観測: 100m
		<ul style="list-style-type: none"> ・ CIRC 観測波長帯: 8-12μm ・ CIRC 観測幅: 128km x 96km ・ CIRC 空間分解能: 200m
		データスループット

図表 112 ALOS-2 イメージ図



出所：JAXA

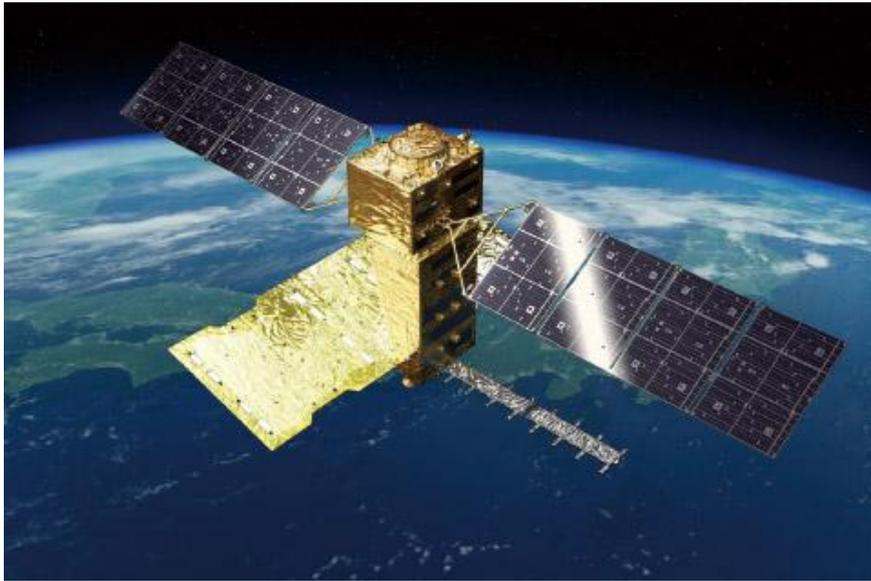


■ ALOS-4（先進レーダ衛星「だいち4号」）

図表 113 ALOS-4 概要

項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> 陸域観測衛星 ALOS、ALOS-2 の SAR 観測ミッションを引き継ぐこと。 地殻・地盤変動の監視、森林観測、海氷監視を行うと共に、インフラ変位モニタリング等の新分野への実用化を行うこと。
実施体制	開発・製造	<ul style="list-style-type: none"> 三菱電機株式会社 AIS 受信機である「SPAISE3」は、日本電気株式会社
	打上げ	<ul style="list-style-type: none"> H3 ロケット
	打上げ日	<ul style="list-style-type: none"> 2024 年 7 月 1 日 (GMT)
	地上局	<ul style="list-style-type: none"> JAXA (筑波局、鳩山局)
	運用	<ul style="list-style-type: none"> JAXA
	データ取扱	<ul style="list-style-type: none"> 株式会社天地人 (有償販売)
	主要ユーザー	<ul style="list-style-type: none"> 官公庁、地方自治体、民間企業
仕様	サイズ	<ul style="list-style-type: none"> 3000kg
	軌道	<ul style="list-style-type: none"> 太陽同期準回帰軌道 軌道傾斜角：97.9 度
	高度	<ul style="list-style-type: none"> 628km
	運用期間	<ul style="list-style-type: none"> 設計寿命：7 年
	回帰日数	<ul style="list-style-type: none"> 14 日
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PALSAR-3) 衛星搭載船舶自動識別システム実験 3 (SPAISE3)
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> PALSAR-3 高分解能モード (Stripmap) 観測幅：100-200km 分解能：3/6/10m スポットライトモード (Spotlight) 観測幅：35km×35km 分解能：1m×3m 広域観測モード (ScanSAR) 観測幅：700km 分解能：25m
データスループット	<ul style="list-style-type: none"> 直接伝送：1.8/3.6 Gbps (Ka-band) 光衛星間通信：1.8 Gbps 	

図表 114 ALOS-4 イメージ図



出所：JAXA

■ EarthCARE (「はくりゅう」)

図表 115 EarthCARE 概要

項目		内容																												
目的		<ul style="list-style-type: none"> 気候変動予測の主要誤差要因である、雲・エアロゾルについて 3 次元分布を観測し、相互作用を含めたその地球放射収支に関するプロセスを明らかにすること。 気候数値予測精度を向上させること。 																												
実施体制	開発・製造	CPR は JAXA/NICT が共同で、他のセンサー (ATLID, MSI, BBR) は ESA が開発を担当。																												
	打上げ	Falcon9																												
	打上げ日	2024 年 5 月 28 日 (GMT)																												
	地上局	JAXA, ESA																												
	運用	JAXA, ESA																												
	データ取扱	JAXA, ESA, NICT																												
	主要ユーザー	官公庁、地方自治体、民間企業																												
仕様	サイズ	2200kg																												
	軌道	<ul style="list-style-type: none"> 太陽同期準回帰軌道 軌道傾斜角: 97.05 度 																												
	高度	393km																												
	運用期間	設計寿命: 3 年																												
	回帰日数	25 日																												
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> 雲プロファイリングレーダ (CPR) 大気ライダ (ATLID) 多波長イメージャ (MSI) 広帯域放射収支計 (BBR) 																												
	センサ詳細	CPR (Cloud Profiling Radar)	<ul style="list-style-type: none"> センサー種類: 94GHz (W バンド) ドップラー速度計測機能つきパルスレーダ 開発担当: JAXA/NICT 観測項目: 雲粒および弱い降水粒子の鉛直分布および鉛直移動 観測幅: 直下 1 ピクセルのみ (約 750m) 分解能: 1km (水平) / 100m (垂直) 周波数: 94.05 GHz ±3.5 MHz 																											
		ATLID (Atmospheric Lidar)	<ul style="list-style-type: none"> センサー種類: 高スペクトル分解ライダ (HSRL) 開発担当: ESA 観測項目: 雲・エアロゾルの鉛直分布と形状情報 観測幅: 1 ピクセルのみ (30m 以下) 分解能: 10km (水平) / 100km (垂直) 波長帯: 355nm 																											
		MSI (Multi-Spectral Imager)	<ul style="list-style-type: none"> センサー種類: プッシュブルーム方式スキャナ 開発担当: ESA 観測項目: 雲やエアロゾルの水平分布 観測幅: 150km (-35~115km) 分解能: 500m×500m バンド: 波長帯 (μm) SNR/NEDT <table border="0"> <tr> <td>1</td> <td>0.660-0.680</td> <td>500 @ ρ = 1.0</td> <td>VIS</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.855-0.875</td> <td>500 @ ρ = 1.0</td> <td>VNIR</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1.625-1.675</td> <td>250 @ ρ = 1.0</td> <td>SWIR 1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2.160-2.260</td> <td>250 @ ρ = 1.0</td> <td>SWIR 2</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>8.35-9.25</td> <td>0.25 K @ T = 293 K</td> <td>TIR 1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>10.35-11.25</td> <td>0.25 K @ T = 293 K</td> <td>TIR 2</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>11.55-12.45</td> <td>0.25 K @ T = 293 K</td> <td>TIR 3</td> </tr> </table>	1	0.660-0.680	500 @ ρ = 1.0	VIS	2	0.855-0.875	500 @ ρ = 1.0	VNIR	3	1.625-1.675	250 @ ρ = 1.0	SWIR 1	4	2.160-2.260	250 @ ρ = 1.0	SWIR 2	5	8.35-9.25	0.25 K @ T = 293 K	TIR 1	6	10.35-11.25	0.25 K @ T = 293 K	TIR 2	7	11.55-12.45	0.25 K @ T = 293 K
	1	0.660-0.680	500 @ ρ = 1.0	VIS																										
2	0.855-0.875	500 @ ρ = 1.0	VNIR																											
3	1.625-1.675	250 @ ρ = 1.0	SWIR 1																											
4	2.160-2.260	250 @ ρ = 1.0	SWIR 2																											
5	8.35-9.25	0.25 K @ T = 293 K	TIR 1																											
6	10.35-11.25	0.25 K @ T = 293 K	TIR 2																											
7	11.55-12.45	0.25 K @ T = 293 K	TIR 3																											

	<ul style="list-style-type: none"> ・ BBR (Broadband Radiometer) <ul style="list-style-type: none"> ・ センサー種類：放射収支計 ・ 開発担当：ESA ・ 観測項目：大気上端における短波および長波放射フラックス ・ 観測幅：直下/前方/後方の各々1ピクセルのみ ・ 分解能：10km×10km ・ 波長帯：SW channel, 0.25-4 μm、LW channel, 0.25-50 μm
データスループット	<ul style="list-style-type: none"> ・ Xバンドダウンリンク 150 Mbit/s (ペイロード) ・ Sバンド (ハウスキーピング) アップリンク 64 kbit/s、ダウンリンク 128 kbps/2 Mbps (レンジングあり/なし) データ取得リードタイム・リビジット性能：25日

図表 116 EarthCARE イメージ図



出所：JAXA

■ GCOM-C（気候変動観測衛星「しきさい」）

図表 117 GCOM-C 概要

項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> ADEOS シリーズに搭載された光学センサ OCTS や GLI で観測してきた、地球の気候形成に影響を及ぼす様々な物理量の観測を継承すること。 雲・エアロゾル特性、反射率、積雪面特性、緒表面温度、陸域植物生産、海域植物生産、土地被覆、沿岸環境変化などを観測すること。
実施体制	開発・製造	日本電気株式会社がプライムメーカーとして設計・製造を担当。
	打上げ	H-IIA ロケット
	打上げ日	2017年12月23日 (GMT)
	地上局	リアルタイム可視域：勝浦局、鳩山局、筑波局 全球観測データ：KSAT（スバルバード局）
	運用	JAXA
	データ取扱	JAXA
	主要ユーザー	気象庁 漁業情報サービスセンター
仕様	サイズ	2020kg
	軌道	太陽同期準回帰軌道 軌道傾斜角：98.6度
	高度	798km
	運用期間	設計寿命：5年
	回帰日数	34日
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> 多波長光学放射計 (SGLI) 可視・近赤外放射計部 (VNR) 非偏光観測 (11ch)、分解能 250m、走査幅 1150km 偏光・多方向観測 (2ch)、分解能 1km、走査幅 1150km 赤外走査放射計部 (IRS) 短波長赤外観測 (SWI: 4ch)、分解能 250m/1km、走査幅 1400km 熱赤外観測 (TIR: 2ch)、分解能 500m、走査幅 1400km
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> SGLI (Second-generation Global Imager) / 多波長光学放射計 SGLI-VNI : チャンネル 中心波長 (nm) バンド幅 (nm) 解像度 (m) 観測幅 (km) VNIR1 380 10 250 1150 VNIR2 412 10 250 " VNIR3 443 10 250 " VNIR4 490 10 250 " VNIR5 530 20 250 " VNIR6 565 20 250 " VNIR7 673.5 10 250 " VNIR8 673.5 20 250 " VNIR9 763 8 1000 " VNIR10 868.5 20 250 " VNIR11 868.5 20 250 " 偏光チャンネル : P1 673.5 20 1000 1150 P2 868.5 20 " " SGLI-IRS : チャンネル 中心波長 (μm) バンド幅 (μm) 解像度 (m) 観測幅 (km) SWIR1 1.05 0.02 1000 1400 SWIR2 1.38 0.02 " " SWIR3 1.63 0.2 250 " SWIR4 2.21 0.05 1000 " TIR1 10.8 0.74 500 " TIR 12.0 0.74 " "
	データスループット	<ul style="list-style-type: none"> TT&C データ @S バンド：29.4 kbit/s (USB)、1 Mbit/s (QPSK)、1.6 kbit/s (SSA)、コマンドデータ 4 kbit/s (USB)、125 kbit/s (SSA) ペイロードデータダウンリンク @X バンド：138.76Mbit/s (OQPSK)

図表 118 GCOM-C イメージ図



出所：JAXA

■ GCOM-W（水循環変動観測衛星「しずく」）

図表 119 GCOM-W 概要

項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> 気候や水循環の変動メカニズムを解明するために必要となる観測データを、全球規模で長期継続して観測するシステムの構築とその利用実証を行うこと。 水蒸気量（可降水量）、積算雲水量、降水量、海面水温、海上風速、海氷密接度、積雪水量、土壌水分量を観測すること。
実施体制	開発・製造	・ 日本電気株式会社がプライムメーカーとして設計・製造を担当
	打上げ	・ H-IIA ロケット 21 号機
	打上げ日	・ 2012 年 5 月 17 日（GMT）
	地上局	・ 勝浦局、筑波局、KSAT（スバルバード局、トロール局）
	運用	・ JAXA
	データ取扱	・ JAXA
	主要ユーザー	・ 官公庁、地方自治体、民間企業
仕様	サイズ	・ 1991kg
	軌道	<ul style="list-style-type: none"> 太陽同期準回帰軌道 軌道傾斜角：98.186 度
	高度	・ 699.6km
	運用期間	・ 設計寿命：5 年
	回帰日数	・ 16 日
	センサ概要	・ 高性能マイクロ波放射計 2（AMSR2）
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> AMSR2 観測幅 1450km 分解能 5-50km 波長帯 6.925、7.3、10.65、18.7、23.8、36.5、89.0（GHz）
データスループット	<ul style="list-style-type: none"> TT&C データ@S バンド：29.4 kbit/s（USB）、1 Mbit/s（QPSK）、1.6 kbit/s（SSA）、コマンドデータ 4 kbit/s（USB）、125 kbit/s（SSA） ペイロードデータダウンリンク@X バンド：20Mbit/s（畳み込み符号化なし、QPSK） 	

図表 120 GCOM-W イメージ図



出所：JAXA

■ GOSAT (温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」)

図表 121 GOSAT 概要

項目		内容
目的		・ 主要な GHG である CO ₂ と CH ₄ の濃度を宇宙から観測すること。
実施体制	開発・製造	・ 三菱電機株式会社 (プライムメーカー)
	打上げ	・ H-IIA ロケット
	打上げ日	・ 2009 年 1 月 23 日 (GMT)
	地上局	・ JAXA 施設 (筑波局、鳩山局、増田局、勝浦局、沖縄局、パース局、サンチャゴ局、マスパロマス局、キルナ局)、海外施設 (KSAT・スバルバード局)
	運用	・ JAXA (宇宙航空研究開発機構) と国立環境研究所 (NIES) の共同プロジェクトで、環境省 (環境省) の機器開発・助成を受けている。 ・ この取り決めでは、JAXA が衛星・機器の開発、打ち上げ、運用 (データ取得を含む) を担当し、NIES がデータ解析 (アルゴリズム開発) と活用を担当している。
	データ取扱	・ 環境省、国立環境研究所
	主要ユーザー	・ 官公庁、地方自治体
仕様	サイズ	・ 1750kg
	軌道	・ 太陽同期準回帰軌道 ・ 軌道傾斜角：98 度
	高度	・ 666km
	運用期間	・ 設計寿命：5 年
	回帰日数	・ 3 日
	センサ概要	・ 温度・湿度・大気化学サウンダ (TANSO-FTS) ・ イメージングマルチスペクトル放射計 (TANSO-CAI)
	センサ詳細	・ TANSO-FTS ・ 観測幅：160km ・ 分解能：10.5km ・ 波長帯：0.785-0.775、1.56-1.72、1.92-2.08、5.56-14.3μm
		・ TANSO-CA ・ 観測幅：1000 km (0.380, 0.678, 0.870 μm)、750 km (1.62 μm) ・ 波長帯：0.380、0.678、0.870、1.62 μm
データスループット	・ TT&C@S バンド：アップリンク 2 kbit/s、ダウンリンク 30 kbit/s ・ ミッションデータ@X バンド：120 Mbit/s (ダウンリンク、DRTS 経由)	

図表 122 GOSAT イメージ図



出所：JAXA

■ GOSAT-2（温室効果ガス観測技術衛星 2号「いぶき 2号」）

図表 123 GOSAT-2 概要

項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> 地球環境の監視を行うこと。 GHG である CO₂ と CH₄ および CO の濃度分布を観測すること。
実施体制	開発・製造	三菱電機株式会社
	打上げ	H-IIA ロケット
	打上げ日	2018 年 10 月 29 日 (GMT)
	地上局	JAXA
	運用	JAXA
	データ取扱	JAXA、環境省、国立環境研究所
	主要ユーザー	官公庁、地方自治体
仕様	サイズ	1750kg
	軌道	<ul style="list-style-type: none"> 太陽同期準回帰軌道 軌道傾斜角：97.8 度
	高度	613km
	運用期間	設計寿命：5 年
	回帰日数	6 日
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> 温度・湿度・大気化学サウンダ 2 (TANSO-FTS-2) イメージングマルチスペクトル放射計 2 (TANSO-CAI-2)
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> 観測波長帯： 0.753-0.772μm、1.56-1.69μm、1.92-2.38μm、5.6-8.4μm、8.4-14.3μm (波長分解能 0.2cm⁻¹) 0.343μm、0.38μm、0.443μm、0.55μm、0.674μm、0.869μm、1.63μm (計 7 バンド) 観測幅： 790km、1000km 空間分解能： 10.5km、0.5/1.5km
	データスループット	通信リンク (ダウンリンク) : ダウンリンク帯域 : 8GHz

図表 124 GOSAT-2 イメージ図



出所：JAXA

■ GOSAT-GW（温室効果ガス・水循環観測技術衛星）

図表 125 GOSAT-GW 概要

項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> ・ 全大気 GHG の濃度の監視、排出量の検証・モニタリングを行うこと。 ・ 水循環変動の把握と予測を行うこと。
実施体制	開発・製造	・ 三菱電機株式会社
	打上げ	・ H-II A
	打上げ日	・ 2025 年
	地上局	・ JAXA
	運用	・ JAXA（環境省と NIES、JAXA が共同で実施）
	データ取扱	・ 国立環境研研究所、JAXA
	主要ユーザー	<ul style="list-style-type: none"> ・ 官公庁 ・ 地方自治体
仕様	サイズ	・ 2900 kg
	軌道	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽同期準回帰軌道 ・ 軌道傾斜角：98.1 度
	高度	・ 666 km
	運用期間	・ 設計寿命：7 年以上
	回帰日数	・ 3 日
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高性能マイクロ波放射計 3（AMSR3） ・ 温室効果ガス観測センサ 3 型（TANSO-3）
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> ・ 観測波長帯： 6.9-183GHz（21 バンド） 0.45μm、0.76μm、1.6μm ・ 観測幅： 1530km、90/911km ・ 空間分解能： 3-58km、1-3/10km
	データスループット	<ul style="list-style-type: none"> ・ ダウンリンク帯域：8GHz（X バンド） ・ データレート：400 Mbps

図表 126 GOSAT-GW イメージ図



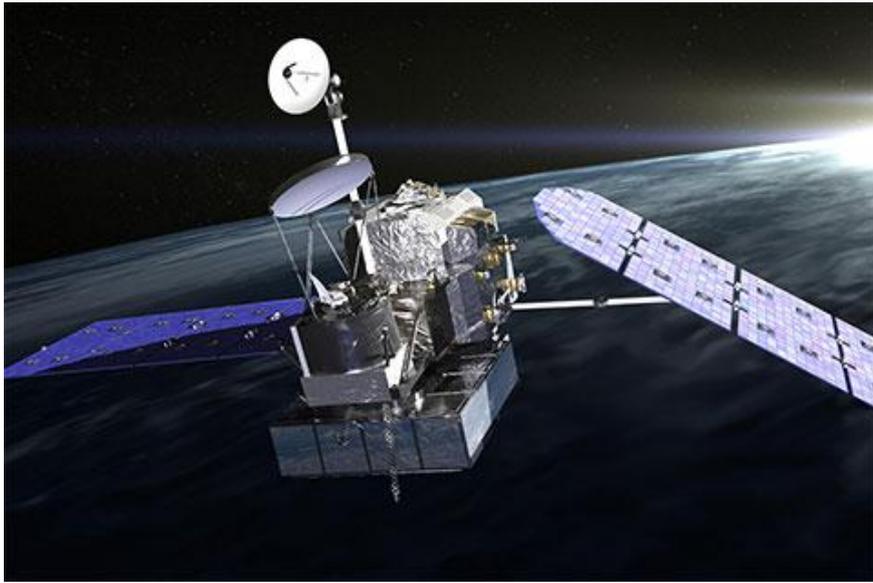
出所：国立環境研究所

■ GPM 主衛星

図表 127 GPM 主衛星概要

項目		内容
	目的	・ 気候変動・水循環変動の解明に向けて全球降水の高精度・高頻度観測を行うこと。
実施体制	開発・製造	・ JAXA、NASA、NICT、日本電気株式会社
	打上げ	・ H-IIA ロケット 23 号機
	打上げ日	・ 2914 年 2 月 27 日 (GMT)
	地上局	・ JAXA、NASA
	運用	・ JAXA、NASA
	データ取扱	・ JAXA、NASA
	主要ユーザー	・ 官公庁、地方自治体、気象期間
仕様	サイズ	・ 3850kg
	軌道	・ 太陽非同期軌道 ・ 軌道傾斜角：65 度
	高度	・ 40km
	運用期間	・ 設計寿命：3 年 2 か月
	回帰日数	・ —
	センサ概要	・ 二周波降水レーダ (DPR)、マイクロ波放射計 (GMI)
	センサ詳細	・ 二周波降水レーダ (DPR) ・ Ku 帯レーダ (KuPR) 観測幅：約 245km 以上 周波数：13.597GHz ・ Ka 帯レーダ (KaPR) 観測幅：約 125km 以上 (～2018 年 5 月)、約 245km 以上 (2018 年 5 月～) 周波数：35.547GHz
		・ マイクロ波放射計 (GMI) 周波数：10.65GHz(V/H), 18.7GHz(V/H), 23.8GHz(V), 36.5GHz(V/H), 89.0GHz(V/H), 165.5GHz(V/H), 183.31±3GHz(V), 183.31±8GHz(V)
データスループット	・ MA (多重アクセス) モード：230 kbit/s ・ SA (単一アクセス) モード：約 2300 kbit/s	

図表 128 GPM 主衛星イメージ図



出所：JAXA

■ 気象衛星「ひまわり」

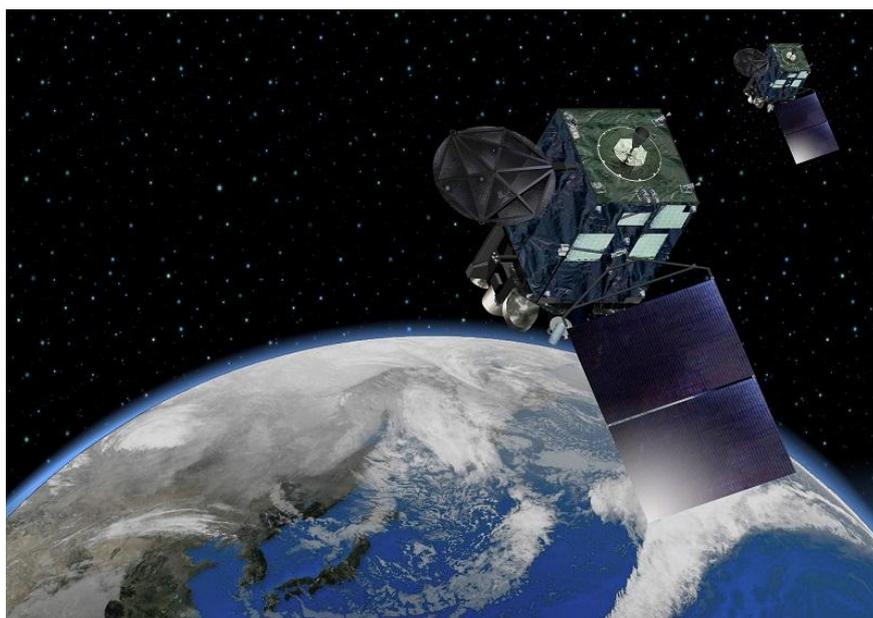
図表 129 ひまわり 8号概要

項目		内容
目的		・ 大気・海洋・雪氷など地球全体の気象や気候の監視を行うこと。
実施体制	開発・製造	・ 三菱電機株式会社
	打上げ	・ H-II A F25
	打上げ日	・ 2014年10月7日 (GMT)
	地上局	・ 主局/埼玉県比企郡 ・ 副局/北海道江別市
	運用	・ JMA (気象庁)
	データ取扱	・ 気象衛星ひまわり運用事業株式会社が受信し、気象衛星センターへ送る。
	主要ユーザー	・ 気象庁、アジア・太平洋の 30 以上の国や地域
仕様	サイズ	・ 3500kg
	軌道	・ 静止軌道 (東経 140 度) ・ 軌道傾斜角: ±0.1 度以内
	高度	・ 35786km
	運用期間	・ 設計寿命: 衛星バス 15 年、観測ミッション 8 年(並行観測を含む)
	回帰日数	・ 1 日
	センサ概要	・ 可視赤外放射計 (AHI)
	センサ詳細	・ 波長帯: 16 チャンネル (可視・近赤外: 6、赤外: 10) 詳細は以下参照 ・ データスループット: Ku バンド 500bit/s (アップリンク) 15.36 kbit/s (ダウンリンク)、Ka バンド 66 Mbit/s (AHI) 100 bit/s/300 bit/s (DCS)、UHF 100 bit/s/300 bit/s ・ 通信方式: 画像観測データ Ka バンド (ダウンリンク)、通報局データの中継 UHF (アップリンク)、Ka バンド (ダウンリンク)、テレメトリ/コマンド Ku バンド
データスループット	・ Ku バンド 500bit/s (アップリンク) 15.36 kbit/s (ダウンリンク)、Ka バンド 66 Mbit/s (AHI) 100 bit/s/300 bit/s (DCS)、UHF 100 bit/s/300 bit/s	

図表 130 ひまわり 9号概要

項目		内容
目的		・ 大気・海洋・雪氷など地球全体の気象や気候の監視を行うこと。
実施体制	開発・製造	・ 三菱電機株式会社
	打上げ	・ H-II A F25
	打上げ日	・ 2016年11月2日 (GMT)
	地上局	・ 主局/埼玉県比企郡 ・ 副局/北海道江別市
	運用	・ JMA (気象庁)
	データ取扱	・ 気象衛星ひまわり運用事業株式会社が受信し、気象衛星センターへ送る。
	主要ユーザー	・ 気象庁、アジア・太平洋の 30 以上の国や地域
仕様	サイズ	・ 3500kg
	軌道	・ 静止軌道 (東経 140 度) ・ 軌道傾斜角: ±0.1 度以内
	高度	・ 35786km
	運用期間	・ 設計寿命: 衛星バス 15 年、観測ミッション 8 年(並行観測を含む)
	回帰日数	・ 1 日
	センサ概要	・ 可視赤外放射計 (AHI)
	センサ詳細	・ 波長帯: 16 チャンネル (可視・近赤外: 6、赤外: 10) 詳細は以下参照 ・ データスループット: Ku バンド 500bit/s (アップリンク) 15.36 kbit/s (ダウンリンク)、Ka バンド 66 Mbit/s (AHI) 100 bit/s/300 bit/s (DCS)、UHF 100 bit/s/300 bit/s ・ 通信方式: 画像観測データ Ka バンド (ダウンリンク)、通報局データの中継 UHF (アップリンク)、Ka バンド (ダウンリンク)、テレメトリ/コマンド Ku バンド
データスループット	・ Ku バンド 500bit/s (アップリンク) 15.36 kbit/s (ダウンリンク)、Ka バンド 66 Mbit/s (AHI) 100 bit/s/300 bit/s (DCS)、UHF 100 bit/s/300 bit/s	

図表 131 ひまわり 8,9 号イメージ図



出所：気象庁

■ JERS-1 (地球資源衛星「ふよう1号」) ※運用終了

図表 132 JERS-1 概要

項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> 全陸域のデータを取得し、天然資源の所在の把握を行うこと。 国土調査、農林漁業、環境保全、防災、沿岸監視等を行うこと。
実施体制	開発・製造	<ul style="list-style-type: none"> NASDA, MITI, STA
	打上げ	<ul style="list-style-type: none"> H-I ロケット 9 号機
	打上げ日	<ul style="list-style-type: none"> 1992 年 2 月 11 日 (GMT)
	地上局	<ul style="list-style-type: none"> NASDA/EOC (鳩山、日本) 東海大学 (熊本、日本) 国立極地研究所 (南極、昭和基地) アラスカ SAR 施設 (ASF、アラスカ州フェアバンクス) カナダ、CCRS (ガティノー、プリンスアルバート) ESA (キルナ、トロムソ) タイ国立研究会議 (バンコク、タイ) ACRES (オーストラリア) DLR/DFD ステーション (オヒギンス、南極) など。
	運用	<ul style="list-style-type: none"> NASDA
	データ取扱	<ul style="list-style-type: none"> NASDA
	主要ユーザー	<ul style="list-style-type: none"> 官公庁、地方自治体、国際機関
	サイズ	<ul style="list-style-type: none"> 1340kg
仕様	軌道	<ul style="list-style-type: none"> 太陽同期準回帰軌道 軌道傾斜角：97.67 度
	高度	<ul style="list-style-type: none"> 570km
	運用期間	<ul style="list-style-type: none"> 6 年半
	回帰日数	<ul style="list-style-type: none"> 44 日
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> L バンド合成開口レーダ (SAR) 高分解能光学イメージャ (OPS)
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> SAR <ul style="list-style-type: none"> 観測幅：75km 分解能：18m 周波数：1275MHz OPS <ul style="list-style-type: none"> 観測幅：75km 分解能：18.3m (レンジ) × 24.2m (アジマス) 波長帯： <ul style="list-style-type: none"> VNIR：0.52–0.60μm, 0.63–0.69μm, 0.76–0.86μm, 0.76–0.86μm (15.3 度前 方視) SWIR：1.60–1.71μm, 2.01–2.12μm, 2.13–2.25μm, 2.27–2.40μm
	データスループット	<ul style="list-style-type: none"> 60Mbit/s、QPSK (Quadra-Phase Shift Keying) 変調を採用

図表 133 JERS-1 イメージ図



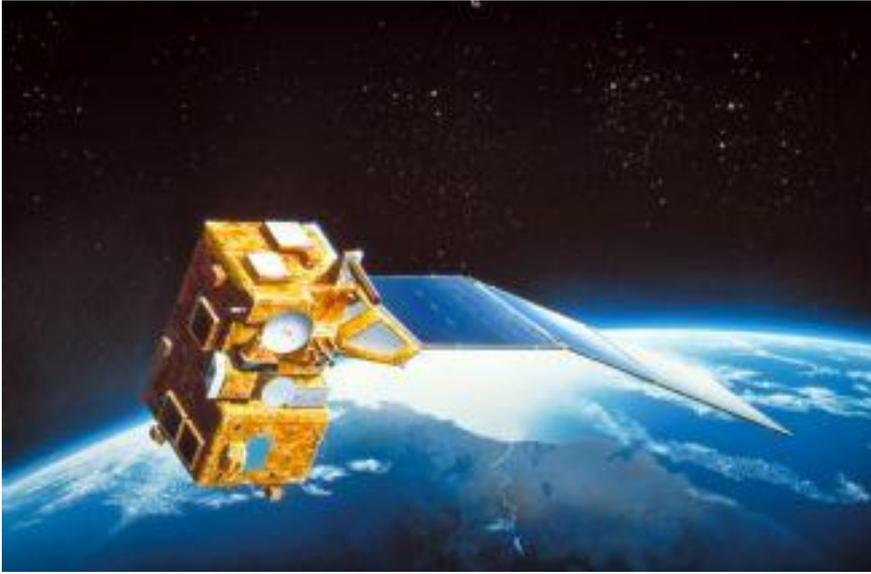
出所：JAXA

■ MOS-1（海洋観測衛星「もも1号」）※運用終了

図表 134 MOS-1 概要

項目		内容	
目的		<ul style="list-style-type: none"> 地球観測衛星の共通の技術を確立すること。 海洋現象を観測すること。 	
実施体制	開発・製造	<ul style="list-style-type: none"> NASDA、日本電気株式会社 	
	打上げ	<ul style="list-style-type: none"> N-II ロケット 7 号機 	
	打上げ日	<ul style="list-style-type: none"> 1987 年 2 月 19 日 (GMT) 	
	地上局	<ul style="list-style-type: none"> NASDA 	
	運用	<ul style="list-style-type: none"> 中央追跡管制所 (埼玉県比企郡、茨城県つくば市) 勝浦追跡管制所 (千葉県勝浦市) 沖縄追跡管制所 (沖縄県恩納村) 増田追跡管制所 (鹿児島県中種子町) 	
	データ取扱	<ul style="list-style-type: none"> NASDA 	
	主要ユーザー	<ul style="list-style-type: none"> 官公庁、国内外研究機関 	
仕様	サイズ	<ul style="list-style-type: none"> 740kg 	
	軌道	<ul style="list-style-type: none"> 太陽同期準回帰軌道 軌道傾斜角：99.1 度 	
	高度	<ul style="list-style-type: none"> 909km 	
	運用期間	<ul style="list-style-type: none"> 8 年 	
	回帰日数	<ul style="list-style-type: none"> 17 日 	
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> 可視近赤外放射計(MESSR) 可視熱赤外放射計(VTIR) マイクロ波放射計(MSR) 	
	センサ詳細	MESSR	<ul style="list-style-type: none"> 観測幅：100km (2 台同時観測で 185 km) 分解能：50m 波長帯：0.51–0.59 μm 0.61–0.69μm 0.72–0.80μm 0.80–1.10μm
		VTIR	<ul style="list-style-type: none"> 観測幅：1500 km 分解能：900m (可視) ・2700m (熱赤外) 波長帯：0.5–0.7μm 6.0–7.0μm 10.5–11.5μm 11.5–12.5μm
		MSR	<ul style="list-style-type: none"> 観測幅：370km (コニカル走査) 分解能：32km (23.8GHz)、23km (31.4GHz) 周波数：23.8GHz、31.4GHz 測定範囲：30–300K 測定精度：1K
	データスループット	<ul style="list-style-type: none"> MESSR：6.78Mbps VTIR：0.8Mbps MSR：2Kbps 	

図表 135 MOS-1 イメージ図



出所：JAXA

■ PACE

図表 136 PACE 概要

項目		内容
目的		・ プラントクton、エアロゾル、雲、海洋生態系観測ミッションを通して、NASA のこれまでの海洋観測の継続と新たな科学的課題へ貢献すること。
実施体制	開発・製造	・ NASA ゴダード宇宙飛行センター (GSFC)
	打上げ	・ Falcon 9
	打上げ日	・ 2024 年 2 月 8 日 (UTC)
	地上局	・ フェアバンクス (米国アラスカ州)、 ・ プンタアリーナス (チリ) ・ スパールバル諸島 (ノルウェー) ・ ホワイトサンズ (米国ニューメキシコ州) ・ GSFC (米国メリーランド州)
	運用	・ NASA ゴダード宇宙飛行センター (GSFC)
	データ取扱	・ NASA
	主要ユーザー	・ 研究者、政府機関、一般
仕様	サイズ	・ 1694kg
	軌道	・ 太陽同期軌道 (SSO) ・ 軌道傾斜角：98 度
	高度	・ 676.5km
	運用期間	・ 設計寿命：3 年
	回帰日数	・ -
	センサ概要	・ Hyper Angular Research Polarimeter 2 (HARP2) ・ Ocean Color Instrument (OCI) ・ SPEXone Polarimeter (SPEXone)
	センサ詳細	・ HARP2 ・ 観測波長帯：440nm、550nm、670nm、870nm ・ 観測幅：2400km ・ 空間分解能：2.6km
		・ OCI ・ 観測波長帯：紫外域 (340 nm) から SWIR (2260 nm) まで、帯域幅は 5 nm SWIR：940nm、1038nm、1250nm、1378nm、1615nm、2130nm、2260nm ・ 観測幅：2700km ・ 空間分解能：1.2km
		・ SPEXone ・ 観測波長帯：385 から 770nm まで、帯域幅は 2-5 nm ・ 観測幅：100km ・ 空間分解能：2.5km ²
	データスループット	・ T&C S バンド ・ 科学データ Ka バンド

図表 137 PACE イメージ図



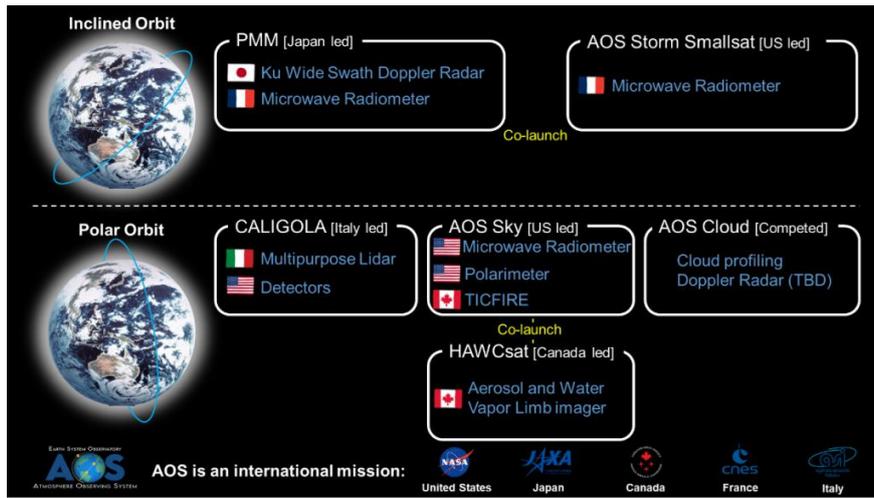
出所 : NASA

■ PMM (降水レーダ衛星)

図表 138 PMM 概要

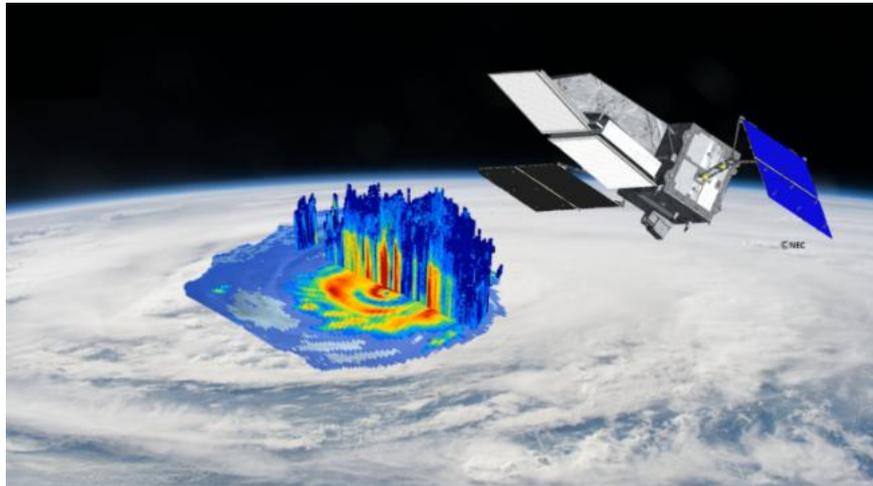
項目		内容
目的		<ul style="list-style-type: none"> 本衛星は NASA の AOS コンステレーションを構成する複数の衛星のうちの一つ。 エアロゾルや雲粒子に関して、降水分布を立体的に観測したり、降雨強度の測定を行ったり、それらが極端な気象条件に与える影響を理解することで、全球水循環諸量の精緻化とそれによる雲降水プロセスの解明、気象・防災情報の高度化へ貢献、地球規模気候・水課題に資する長期の水資源基盤情報を提供すること。
実施体制	開発・製造	<ul style="list-style-type: none"> JAXA、日本電気株式会社 (KuDPR、衛星本体) CNES (マイクロ波放射計)
	打上げ	<ul style="list-style-type: none"> NASA が対応
	打上げ日	<ul style="list-style-type: none"> 2029 年
	地上局	<ul style="list-style-type: none"> フェアバンクス (米国アラスカ州) プンタアリーナス (チリ) スパールバル諸島 (ノルウェー) ワロップス (米国バージニア州) ホワイトサンズ (米国ニューメキシコ州) GSFC (米国メリーランド州)
	運用	<ul style="list-style-type: none"> NASA、JAXA、CNES
	データ取扱	<ul style="list-style-type: none"> 不明
	主要ユーザー	<ul style="list-style-type: none"> 官公庁、地方自治体
	サイズ	<ul style="list-style-type: none"> 2700kg
仕様	軌道	<ul style="list-style-type: none"> 非太陽同期軌道 軌道傾斜角：55 度
	高度	<ul style="list-style-type: none"> 407km (暫定)
	運用期間	<ul style="list-style-type: none"> 設計寿命：5 年
	回帰日数	<ul style="list-style-type: none"> —
	センサ概要	<ul style="list-style-type: none"> Ku 帯ドップラー降水レーダ (KuDPR) CNES マイクロ波放射計 (SAPHIR-NG)
	センサ詳細	<ul style="list-style-type: none"> Ku 帯ドップラー降水レーダ (KuDPR) 観測波長帯：13.6GHz 観測幅：255km 空間分解能：垂直 500m、水平 5km
		<ul style="list-style-type: none"> CNES マイクロ波放射計 (SAPHIR-NG) 観測波長帯：89GHz (1 チャンネル) 183GHz (6 チャンネル) 325GHz (3 チャンネル) 観測幅：750km 空間分解能：10km (89GHz) 5km (183GHz) 3km (325GHz)
	データスループット	<ul style="list-style-type: none"> T&C Ka バンド 4.8Gbps スターリンク 1Gbps 使用する可能性あり。

図表 139 AOS ミッションアーキテクチャ



出所：サテナビ

図表 140 PMM イメージ図



出所：JAXA

■ SWOT

図表 141 SWOT 概要

項目		内容
目的		・ 海洋だけではなく、河川・湖・貯水池等陸域における水循環も観測し、水資源の調査・管理の改善や気候変動などの国際的な課題へ貢献すること。
実施体制	開発・製造	・ NASA、CNES ・ Thales Alenia Space
	打上げ	・ Space X (Falcon-9)
	打上げ日	・ 2022年12月16日 (GMT)
	地上局	・ NASA、CNES
	運用	・ NASA、CNES (CSA, UK Space Agency)
	データ取扱	・ NASA、CNES
	主要ユーザー	・ 官公庁、地方自治体、一般
仕様	サイズ	・ 2000kg
	軌道	・ 非太陽同期軌道 ・ 軌道傾斜角：約 78 度
	高度	・ 890km
	運用期間	・ 設計寿命：3 年
	回帰日数	・ 21 日
	センサ概要	・ Ka バンドレーダー干渉計 (KaRIn) ・ 直下型高度計 (Poseidon-3C Ku-/C-band altimeter) ・ マイクロ波放射計 (Microwave Radiometer)
	センサ詳細	・ 観測波長帯： Ka-band 5.3GHz, 13.58 GHz 18.7GHz, 23.8GHz, 34 GHz ・ 観測幅： 120km、70 km ・ 空間分解能： 陸：Horizontal 50m、Vertical：10 cm 海：Horizontal 1 km、Vertical：1 cm
	データスループット	・ 科学および工学データ用ダウンリンク (X バンド)：620Mbps

図表 142 SWOT イメージ図



出所：CNES

■ TRMM（熱帯降雨観測衛星）※運用終了

図表 143 TRMM 概要

項目		内容
目的		・ 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であり、地球全体の降雨量のうち約 3 分の 2 を占める熱帯の降雨状況を観測すること。
実施体制	開発・製造	・ NASA（降雨レーダ以外すべて）、JAXA（降雨レーダ：PR）
	打上げ	・ H-II ロケット 6 号機
	打上げ日	・ 1997/11/27（GMT）
	地上局	・ NASA/GSFC、JAXA/EORC
	運用	・ NASA
	データ取扱	・ JAXA、NASA
	主要ユーザー	・ 官公庁、気象機関
仕様	サイズ	・ 3620kg
	軌道	・ 非太陽同期円軌道（低傾斜軌道）軌道傾斜角：約 35 度
	高度	・ 350km（当初）、402.5km（2001 年以降）
	運用期間	・ 17 年
	回帰日数	・ 48.5 日
	センサ概要	・ 雲及び地球放射エネルギー観測装置（CERES） ・ 雷観測装置（LIS） ・ 降雨レーダ（PR） ・ TRMM マイクロ波観測装置（TMI） ・ 可視赤外観測装置（VIRS）
	センサ詳細	・ CERES ・ 観測波長帯：0.3 – 5.0 μm、8.0 - 12.0 μm、0.3 - 100 μm ・ スキャン角度：±78° ・ 空間分解能：30km（直下 10km）
		・ LIS ・ 観測波長帯：0.7774μm ・ 観測幅：600km×600km ・ 空間分解能：4km
		・ PR ・ 観測波長帯：13.8GHz ・ 観測幅：215km ・ 空間分解能：水平 4.3km、垂直 250m
		・ TMI ・ 観測波長帯：10.7、19.4、21.3、37、85.5 GHz ・ 観測幅：760km ・ 空間分解能：5 – 45km
		・ VIRS ・ 観測波長帯：0.63、1.6、3.75、10.7、および 12μm ・ 観測幅：720km ・ 空間分解能：2km
データスループット	・ TT&C データ @S バンド：170kbit/s（平均）、2 Mbit/s（再生）	

図表 144 TRMM イメージ図



出所：NASA Spaceflight

III. 主たる参考文献

3. 気候変動の実態について

3.1 今起きている異常気象

- 令和6年7月以降の顕著な高温と7月下旬の北日本の大雨の特徴と要因について、気象庁異常気象分析検討会、2024年、<https://www.jma.go.jp/jma/press/2409/02a/kentoukai20240902.html>
- 令和5年梅雨期の大雨事例と7月後半以降の顕著な高温の特徴と要因について、気象庁異常気象分析検討会、2023年、<https://www.jma.go.jp/jma/press/2308/28a/kentoukai20230828.html>
- Takemura, K., H. Sato, A. Ito, T. Umeda, S. Maeda, M. Hirai, Y. Tamaki, H. Murai, H. Nakamigawa, Y. N. Takayabu, H. Ueda, R. Kawamura, Y. Tanimoto, H. Naoe, M. Nonaka, T. Hirooka, H. Mukougawa, M. Watanabe, and H. Nakamura (2024): Preliminary diagnosis of primary factors for an unprecedented heatwave over Japan in 2023 summer. SOLA, 20, 69-78, doi: 10.2151/sola.2024-010.
- Sato, H., K. Takemura, A. Ito, T. Umeda, S. Maeda, Y. Tanimoto, M. Nonaka, and H. Nakamura (2024), Impact of an unprecedented marine heatwave on extremely hot summer over northern Japan in 2023. Sci. Rep., 14, 16100, doi: 10.1038/s41598-024-65291-y.

3.2 気候変動への予測と対応

- AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, IPCC, 2021
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, IPCC, 2022
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, IPCC, 2022
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023, IPCC, 2023
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

4. 気候変動の謎を解明するための科学的手段

4.2 気候変動における観測の役割

- 岡本 謙一, 衛星搭載降雨レーダ, 日本リモートセンシング学会誌, 2019, 39 巻, 3 号, p. 171-180,
<https://doi.org/10.11440/rssj.39.171>
- Illingworth, A.J., Barker, H.W., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., Clerbaux, N., Cole, J., Delanoe, J., Domenech, C., Donovan, D.P., Fukuda, S., Hiraoka, M., Hogan, R.J., Huenerbein, A., Kollias, P., Kubota, T., Nakajima, T., Nakajima, T.Y., Nishizawa, T., Ohno, Y., Okamoto, H., Oki, R., Sato, K., Satoh, M., Shephard, M.W., Velazquez-Blazquez, A., Wandinger, U., Wehr, T., Van Zadelhoff, G.-J., 2015 : The earthcare satellite : The next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation. Bulletin of the American Meteorological Society, 96(8), pp.1311-1332.4
- Imaoka, K., M. Kachi, H. Fujii, H. Murakami, M. Hori, A. Ono, T. Igarashi, K. Nakagawa, T. Oki, Y. Honda, and H. Shimoda, 2010. Global Change Observation Mission (GCOM) for Monitoring Carbon, Water Cycles, and Climate Change, Proceedings of the IEEE, Vol. 98, 717-73

- Kubota, T., K. Aonashi, T. Ushio, S. Shige, Y. N. Takayabu, M. Kachi, Y. Arai, T. Tashima, T. Masaki, N. Kawamoto, T. Mega, M. K. Yamamoto, A. Hamada, M. Yamaji, G. Liu and R. Oki 2020: Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era, Satellite precipitation measurement, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20.
- Kuze, A., H. Suto, M. Nakajima, and T. Hamazaki, 2009: Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. Appl. Opt., 48, 6716–6733.
- Seki M, Hori M, Naoki K, Kachi M, Imaoka K. Intersensor Calibration of Spaceborne Passive Microwave Radiometers and Algorithm Tuning for Long-Term Sea Ice Trend Analysis Based on AMSR-E Observations. Remote Sensing. 2024; 16(19):3549. <https://doi.org/10.3390/rs16193549>
- Shibata, A., 2004: AMSR/AMSR-E SST algorithm developments: removal of ocean wind effect, Italian J. Remote Sensing, 30/31: 131-142.
- Shimada, M., T. Itoh, T. Motooka, M. Watanabe, S. Tomohiro, R. Thapa, and R. Lucas, 2014: New Global Forest/Non-forest Maps from ALOS PALSAR Data (2007-2010), Remote Sensing of Environment, 155, pp. 13-31, December 2014. DOI=10.1016/j.rse.2014.04.014.
- Takahashi, H.G., Fujinami, H., 2021: Recent decadal enhancement of Meiyu–Baiu heavy rainfall over East Asia. Sci Rep 11, 13665. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93006-0>
- Earth Science to Action Strategy 2024-2034, National Aeronautics and Space Administration, February 2024.

概要 : https://assets.science.nasa.gov/content/dam/science/esd/earth-science-division/earth-science-to-action/ES2A_2-Page_web.pdf

本編 : https://assets.science.nasa.gov/content/dam/science/esd/earth-science-division/earth-science-to-action/ES2A_Booklet_web.pdf

4.3 気候・気象モデルにおける衛星データの役割

- 数値予報解説資料集, 気象庁, ISSN 2758-1330
(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/nwpkaisetu.html>)

6. 気候変動のこれから

6.2 持続可能な社会実現のための社会システムの変革とファイナンスの役割

- 国立環境研究所, 「IPCC 第6次報告書第3作業部会 (IPCCAR6WG3) 解説サイト」
(<https://www-iam.nies.go.jp/aim/ipcc/index.html>)
- 森田香菜子, 2022, 「1.5°C目標達成に向けた社会システム変革の必要性」, 経済産業省主催 IPCC シンポジウム「IPCC 第6次評価報告書から気候変動緩和策の最新知見を学ぶ」
<https://www.rite.or.jp/news/events/2022/05/ipcc.html>
- 森田香菜子, 2023, IPCC 報告書と環境ファイナンス ー求められる社会システムの変革ー, 野村サステナビリティクォーターリー 1 野村資本市場研究所
- 森田香菜子, 2024, 社会システムの変革, 三田評論
<https://www.mita-hyoron.keio.ac.jp/researchers-eye/202412-2.html>
- 森田香菜子監修, 2024, 「わたしたちの地球と気候変動」, 偕成社

IV. 気候変動シリーズ発表者・執筆者一覧（五十音順）

江守 正多（東京大学 未来ビジョン研究センター 教授）

6.1 気候変動に人類がどう向き合うのか

沖 理子（宇宙航空研究開発機構（JAXA）地球観測研究センター（EORC）センター長）

4.3 気候・気象モデルにおける衛星データの利用（2）、3）

6.6 地球デジタルツイン

計盛 正博（気象庁 情報基盤部 数値予報課 数値予報モデル基盤技術開発室 室長）

4.3 気候・気象モデルにおける衛星データの利用（1）

久保田 拓志（宇宙航空研究開発機構（JAXA）地球観測研究センター（EORC）研究領域主幹）

4.2 気候予測における観測の役割

永田 綾（環境省 自然環境局 自然環境計画課 生物多様性主流化室 室長）

6.3 ネイチャーポジティブ経済移行戦略

中村 尚（東京大学 先端科学技術研究センター 教授）

3.1 今起きている異常気象

服部 徹（PwC コンサルティング合同会社 シニアマネージャー）

6.4 民間における取組

早坂 忠裕（東北大学大学院 理学研究科 教授）

1. はじめに

4.1 気候変動理解における課題

森 章（東京大学 先端科学技術研究センター 教授）

6.5 科学の視点

森田 香菜子（慶應義塾大学 経済学部 准教授、国連大学サステイナビリティ高等研究所 客員准教授）

6.2 持続可能な社会実現のための社会システムの変革とファイナンスの役割

山崎 大（東京大学 生産技術研究所 准教授）

6.5 科学の視点

渡部 雅浩（東京大学 大気海洋研究所 教授）

3.3 IPCC の最新研究について

CONSEO

2. Executive Summary

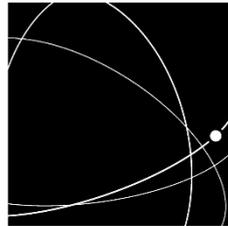
JAXA

3.2 気候変動への予測と対応

5. 気候変動における宇宙機関の役割とは

CONSEO

衛星地球観測コンソーシアム
Consortium for Satellite Earth Observation



引用する場合は、出典（「CONSEO 気候変動 REPORT」、ページ数等）を記載してください。
また、原著作物を引用する場合には、当該原著作物の著作権を確認の上、適切な出所表示をお願いします。