

気候観測におけるフォトニクスの革新： ヨーロッパからの視点

ジェレミー・ピコット・クレメンテ

ヨーロッパのフォトニクス企業や組織は、環境科学に貴重な洞察をもたらすテクノロジーの進化に貢献している。本稿ではその概要を紹介する。

2025年に打ち上げが予定されている欧州宇宙機関(ESA)の二酸化炭素モニタリングミッション(CO2M)は、人間の活動によって大気中に放出される二酸化炭素の量を測定する。そのペイロード(観測機器)には、以下に示すさまざまなフォトニクス技術が取り入れられている。

- ・偏光スクランブラと入射スリット・ホモジナイザを備えた望遠鏡
- ・全帯域共通の反射型コリメータ
- ・ガラス[VIS(可視) / NIR(近赤外)] およびシリコン[SWIR(短波赤外)-1/SWIR-2]イメージセンサ
- ・SWIR用水銀・カドミウム・テルルCMOS(相補型金属酸化膜半導体)検出器
- ・VIS・NIR用シリコンCMOS検出器

このCO2Mへの取り組みは、長年にわたり、環境変化に関する貴重な洞察を収集・提供してきたヨーロッパのフォトニクス企業や組織の実績の中でも、最新のものに位置付けられる。こ

れらの企業や組織は、地球の気候変動を正確にかつ深く理解し、将来の気候観測と環境保全戦略を形成する上で、極めて重要な役割を果たしている。本稿では、そのような数多くの事例を紹介する。

これらの企業や組織は、気候変動の世界的な影響に対する懸念の高まりに対処する複雑な課題の解決を目指している。このような現状により、必須気候変動変数(ECV:「気候変動の測定」を参照)に関する高品質かつ正確なデータの需要が高まっている。最近の市場レポート⁽¹⁾によると、環境モニタリング市場は、2023年の124億米ドルから、2032年までに189億米ドルへと成長し、これは年平均成長率(Compound Annual Growth Rate: CAGR) 5.40%に相当すると予測している。

気候変動の測定

グローバル気候観測システム(GCOS)には現在、以下の3つの主要

なカテゴリーとサブカテゴリー⁽²⁾に分類され、55の必須気候変動変数(ECV)が規定されている。

1. 大気

- a. 地表・上空:降水量、気圧、気温、高度ごとの風速と風向など
- b. 上層大気:エアロゾル、二酸化炭素、メタンなどの温室効果ガス、オゾンなど

2. 陸域

- a. 水圏:地下水や湖沼など
- b. 雪氷圏:氷河や氷床など
- c. 生物圏:地上バイオマス、アルベド(地表面で反射される光の割合)、表面温度など
- d. 人間圏:地球システムのうち、人間の活動や人間の居住に使用するために人間によって作成・変更された部分(温室効果ガスフラックスや水利用など)

3. 海洋

- a. 物理的要素:海洋表面の熱流束、海水と海面、表層流、塩分、水温など
- b. 生物地球化学的要素:無機炭素、亜酸化窒素、酸素など
- c. 生物・生態系:海洋生息地、プランクトンなど

衛星を活用するシステム

ECVデータを取得する効果的な方法は、航空システムや衛星に搭載されたライダー(LiDAR)やハイパースペクトル



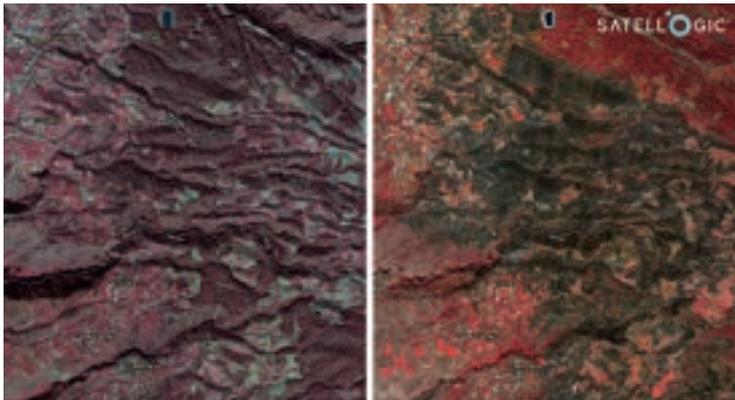


図1 2023年7月のラ・パルマ島の山火事。左:2021年2月(出典:PNOA)。右:2023年7月(出典:サテルロジック社)。赤い色調は健全な植生を、暗い色調は焼失地域を示す

現在、軌道上に34機の衛星を運用し、0.70～0.99mの空間分解能で地球のマルチスペクトルイメージングを提供している。

重要なのは、サテルロジック社独自のマルチスペクトル・カメラを使用すると、選択した関心のある地点を毎週モニタリングでき、さまざまな波長帯域を使用することにより、特に生物圏の環境破壊レベルについて詳細な洞察が得られる点だ(図1)。

ハイパースペクトルカメラ

伊ニレオス社(NIREOS)は、干渉計、ハイパースペクトルカメラ、光検出器を設計・製造している。同社のハイパースペクトルカメラ「HERA」シリーズは、幅広い分光範囲(400～2200nm)のハイパースペクトル画像を高い波長分解能と空間分解能で撮影できるため、気候モニタリング用の高性能なツールとなっている(図2)。現在、HERAハイパースペクトルカメラは、植生の健全性を評価するために広く使用されており、気候パターンの追跡と理解、生態系に潜在的影響を及ぼす重大な環境課題であるマイクロプラスチックの特性評価といった科学研究に活用されている。HERAカメラはまた、材料科学に

イメージング技術を利用することだ。このような技術では、広範な範囲をカバーするほど、気温、海面水位、大気ガス、水面被覆や森林被覆の減少など、地球環境の変化を詳細に把握できる。

今日、衛星打ち上げコストの低減と打ち上げ機会の増加に伴い、衛星は地上からわずか500～1000km程度の低軌道(LEO)に衛星群として配備されることが一般的だ。このため、高軌道や中軌道の衛星に比べ、さらに狭い範囲を詳細に撮影できる。

欧州宇宙機関(ESA)は、1999年に全球風プロファイル観測を実行した初の衛星「アイオロス・ミッション」を打ち上げて以来、衛星を活用する気候監視プログラムの最先端を走ってきた。アイオロスのペイロードは、ALADIN装置(大気レーザードップラー測定装置)と呼ばれる直接検出型の紫外線レーザーライダーであった。同装置は、送信機、エアロゾルや雲の後方散乱から風を測定するミー受信機、大気分子の後方散乱から風を測定するレイリー受信機(ファブリ・ペローエタロン)、口径1.5mのカセグレン望遠鏡で構成されていた。

2012年、ESAはコペルニクス・プログラムを設立し、7機のセンチネル・ミッションを運用した。同ミッションは、陸域・海洋業務用の全天候型・昼夜両用レーザイメージング、植生・土壌被

覆・水面被覆・内陸水路・沿岸域の高解像度光学イメージング、陸域・海洋のECVに関するデータを提供した。将来のセンチネル・ミッションは、二酸化窒素、オゾン、二酸化硫黄、ホルムアルデヒド、グリオキサール、エアロゾルの大気組成モニタリングに関するデータを提供する。モニタリングは、8kmの空間分解能と60分の繰り返し周期で、紫外・可視分光分析および近赤外分光分析を用いて実行される。

これと並行して、2012年に設立され、スペインのバルセロナに本社を置く、サテルロジック社(Satellogic)のような企業は、宇宙から手頃な価格で高品質なデータを提供し、企業や組織が地表の日々の変化をサブメーター解像度で追跡できるようにしている。同社は



図2 ニレオス社製ハイパースペクトルカメラ「HERA eSWIR(1100-2200 nm)」(画像提供:ニレオス社)



図3 imecが開発した、薄膜イメージセンサに集積したピン留めフォトダイオード構造(画像提供:imec)

においても不可欠なツールとして位置づけられ、エネルギー生産と貯蔵の向上が期待されるタンデム型ペロブスカイト太陽電池のような、革新的な技術や材料の特性評価にも活用されている。

赤外線カメラ

インド洋のレユニオン島に本社を置く、仏Reuniwatt社は、雲の観測と予測を専門としている。同社は、雲量を継続的に追跡・予測できる赤外線全天画像装置「Sky InSight」の特許を取得している。同装置では、赤外線カメラで半球ミラーを撮影し、半径2kmに相当する180度の角度で雲の天井を捉える。そして、空の温度マップを処理することで、さまざまな雲量パラメータを取得できる。

2022年、Sky InSightは、フランス、ドイツ、ガボンの研究機関の共同研究であるDYVALOCCAプロジェクト(図3)において、シーロメータ、ディスクロメータ、ソーダ、マイクロ波サウンダ、テザーゾンデ、ラジオゾンデとともに使用された。その目的は、中央アフリカの大西洋岸の密生常緑樹林において、雲の変化をモニタリングし、雲が水と光の利用可能性に与える影響を評価することだった。このような森林は気候変

動に対して非常に脆弱であり、低層雲が減少すれば、森林の被覆と機能に深刻な影響を及ぼす可能性がある。

光学フィルタとコンポーネント

気候変動モニタリングでは、光学フィルタとコンポーネントが重要な役割を果たす。これらの技術は、光の波長の操作に優れており、衛星を利用した観測の精度を高めるために不可欠だ。特定の波長をフィルタリングし、イメージングを正確に行うことにより、光学フィルタとコンポーネントは、前例にないほど詳細に地球の気候をモニタリングできる。光学フィルタを活用すると、センシング機器が特定の波長範囲の光を選択して検出可能になる。地

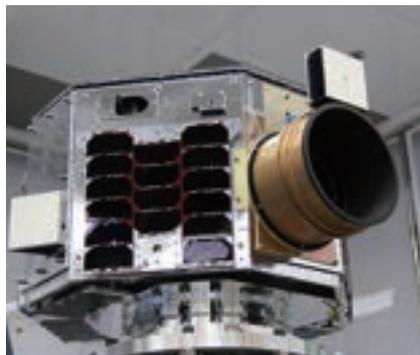


図4 地球モニタリング・観測用超小型衛星「NEMO-ND」(画像提供:スロベニア宇宙科学技術卓越センター・トロント大)

球観測(EO)システムでは、光学フィルタは、単一の波長領域を観測するシングルバンドパスフィルタ(BPF)として機能したり、1台の検出器をマルチスペクトル装置に変換し、さまざまな波長範囲を分析可能にするマルチゾーンフィルタ(MZF)アレイとして機能したりする。

日本に本社を置き、欧州、アジア、米国に生産拠点を持つHOYA(ホヤ)は、宇宙用途の光学フィルタを幅広く製造している。例えば、1550nmのライダセンシング用途のフィルタや、さまざまな波長範囲にわたって一様に光を減衰できるAR(反射防止)コーティングされた中性密度フィルタなどが挙げられる。

カナダに本社を置くイリディアン・スペクトラル・テクノロジーズ社(Iridian Spectral Technologies)は、カスタムEO光学フィルタやフィルタアレイを設計・製造している。同社の製品は、センシング機器が特定の信号波長を競合する信号や背景から識別できるようにするものだ。同社のフィルタは衛星を活用するEO機器に使用される。例えば、ESAのメテオサット第3世代ライトニングイメージャ(MTG-LI)では、気象パターン、汚染、自然災害(例:2021年のトンガ海底火山の噴火)などの観測を可能にしている。

伊ミラノに本社を置き、1957年に設立されたテクノティカ・コンソニ社(Tecnottica Consonni)は、産業用、自動車用、生物医学用、航空宇宙用のレンズ、光学システム、光学部品、フィルタ、ミラーの設計・製造を専門としている。2020年、同社はスロベニア宇宙科学技術卓越センター(Slovenian Centre of Excellence for Space Sciences and Technologies)と加トロント大航空宇宙研究所

(Technologies and the University of Toronto Institute for Aerospace Studies)が共同開発した72kgの超小型衛星「NEMO-ND」のサブコンポーネントを製造した。このプロジェクトは、宇宙からのリアルタイムのマルチスペクトルイメージングとビデオイメージングを組み合わせることにより、地球観測の画期的な概念を提供することを目的としている(図4)。

テクノティカ社は、UV(紫外)光とSWIR光から信号の一部を除去する吸収フィルタと、気候変動、自然災害、天然資源の持続可能な利用を精密にモニタリングするために望遠鏡へ組み込まれたあらゆるレンズの製造で貢献した。

2008年に設立された英ボルテックス・オプティカル・コーティング社(Vortex Optical Coatings)は、二酸化炭素、冷媒ガス、炭化水素、六フッ化硫黄などの温室効果ガスモニタリング用のIRフィルタの製造を専門としている。同社のIRフィルタは直径25mm、厚さ0.5mmであり、システムの検出器の前方に設置し、候補ガスを測定するためにシステムへ感光性を与える。同社のフィルタは極めて厳しい公差で製造でき、スパッタリング技術を用いることで、10～20年前の蒸発技術によるものに比べ安定性と耐久性が大幅に向上している。

センサ

フォトリニクススペースのセンサは、気候変動のモニタリングにおいて重要な役割を果たし、重要な気候変数について正確かつ包括的なデータを提供している。人工衛星からUAV(無人航空機)に至るまで、このようなセンサを使用すると、気温の変化、海面の上昇、温室効果ガスの濃度、生態系の動態に関して詳細な洞察を得ることができる。



図5 マプシ社の長波長赤外線(LWIR)狭帯域フィルタ(画像提供:マプシ・フォトリニクス社)

地球気候の根本的な要因は、ヘルツベルク連続体(Herzberg continuum: 200～242nm)の太陽の紫外線と、上層大気酸素/オゾンとの相互作用である。しかし、地球のオゾン層がヘルツベルク連続体の透過を妨げているため、紫外線の太陽放射照度を、地上からは連続的かつ正確に測定できない。この問題を克服するため、2023年4月、仏ヴェルサイユ・サン・カンタン・アン・イヴリーヌ大(Versailles Saint-Quentin-Yvelines University)は、小型衛星(UVSQ-SAT)を打ち上げた。同衛星は、地球放射収支(ERB)の広帯域測定技術とヘルツベルク連続体の太陽放射照度スペクトル(SSI)の測定技術を実証することを目的としている。

このプログラムのパートナーであるフランスの中小企業、ナノベション社(Nanovation)は、250nm未満の波長を測定できる、画期的な酸化ガリウム(III)(Ga₂O₃)UVCセンサの開発に成功した。同社のコンパクトな固体センサは、その本質的なソーラーブラインド特性と最先端のゲインにより、高い動作電圧を必要とせず、信頼性が高く、熱・寒冷、振動、放射線に対して

優れた耐久性を有している。後続プロジェクトとして、ESAは、低軌道からの山火事発火の早期警報と位置特定を目的としたGa₂O₃イメージングアレイの開発をナノベション社に委託している。

気候変動と大気汚染は密接に関連している。二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などの大気汚染物質は、早期死亡の原因となるだけでなく、オゾン層を破壊し、酸性雨の原因にもなる。同様に、ディーゼルエンジンから排出される粒子状物質は、極地に到達すると氷雪を黒く汚染し、地球温暖化に拍車をかける。

スペインのマドリッドに本社を置くニュー・インフラレッド・テクノロジーズ社(New Infrared Technologies: NIT)は、産業用および防衛用の非冷却中波長赤外線(MWIR)および長波長赤外線(LWIR)検出器、カメラ、システム、ソリューションのメーカーであり、EUのFLAIRプロジェクトのパートナーである。同プロジェクトは、2～5μm(メタン、二酸化炭素、一酸化炭素、窒素酸化物)および8～12μm(亜酸化窒素、アンモニア、オゾン)の赤外大気窓内のガスを検出する空気質サンプリングセンサを開発するために設立された。NIT社は、1.0μmから5.0μmの分光範囲に対応する高速(4000fps超)非冷却MWIRカメラ「TACHYON 16K+」の製造で同プロジェクトに貢献した。同製品は、軽量かつ小型形状であり、データ処理アルゴリズムをはじめとするシステム全体をUAVに搭載しているため、多種類の大气ガスについてリスク評価が可能となる。

バルセロナに本社を置き、2021年に設立されたマプシ・フォトリニクス社(Mapsi Photonics)は、ガス識別やプロセス監視に関連する産業用途向けの

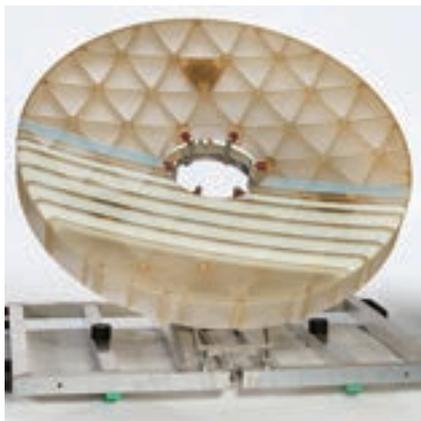


図6 直径1.2mのミラー「ZERODUR」(画像提供:ショット社)

赤外光学コンポーネント(フィルタとウィンドウ)の製造および商品化に注力している(図5)。

マブシ社のフィルタとウィンドウは100%シリコン製であり、非常に低コストの製造プロセスでナノメートルサイズの細孔をシリコンに穿孔して作られているため、多層構造ではない。このように、シリコンの優れた光学的・機械的特性を最大限に活用している。このフィルタは、環境負荷の高いガス(メタン、SF6)やアンモニアが基本的な光吸収特性を示す長波長域において、特に高い効果を発揮する。

基板材料

基板材料は、気候変動モニタリングの分野において、精密かつ信頼性の高い衛星イメージングシステムの基盤となる重要な要素だ。このような特殊材料は、宇宙空間の過酷さに耐えるように設計されており、地球観測ミッションの安定かつ高精度な運用を実現する上で、極めて重要な役割を果たしている。基板材料は、環境変化のモニタリングに不可欠な高解像度カメラやミラーを製造する際に鍵となる。

衛星には、正確な画像と測定値を取得するため、高解像度カメラが必要不

可欠だ。このようなカメラには、低軌道や静止軌道の温度変動の激しい環境下においても、安定した光学性能を発揮できるミラー基板材料が求められる。独マインツに本社を置くショット社(SCHOTT)は、熱膨張がほぼゼロのガラスセラミック「ZERODUR」(図6)をはじめとし、特殊ガラス、ガラスセラミックスなどの先端材料を製造している。同ミラー基板材料は、無機質・無孔リチウムアルミニウム酸化ガラスセラミックスであり、熱膨張率が極めて低く、体積全体で均一であることが特徴だ。さらに、他のガラスセラミックスと比較した場合、強度が高く、欠陥の発生率が低く、可視光域において透明である。

ZERODURは現在、欧州気象衛星開発機構(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites:EUMETSAT)の革新的なメテオサット第3世代(MTG)衛星システムのフレキシブル複合イメージャのミラー基板として使用されている。同衛星は16種類のスペクトルチャンネルを備えており、10分ごとに地球全体の画像を撮影する。それにより、大気中の水循環の変化を追跡し、気象報告や自然災害の予測を的確に行っている。

気候観測の将来性

欧州宇宙機関は、新世代の量子センサを使用してさまざまな量子ミッション(2023~2031年)を計画している。同計画では、ECVの測定技術を向上

させるとともに、科学と産業の研究開発規模を拡大し、量子技術において活気あふれる革新的な欧州のエコシステムを構築することを目指している。

その目的の1つは、重力の測定を改善することだ。地球重力場の強度における微小な変動が、淡水資源の減少、氷床や氷河からの氷塊の減少、海面の変化、ひいては気候変動に影響を及ぼすことが判明しているためである。

将来の量子センサのアイデアは、現在の重力計測の原理と冷原子干渉法を組み合わせることだ。具体的には、レーザーを使用して装置内の原子を絶対零度(-273.15°C)近くまで凍結する技術を指す。その後、レーザーを停止すると、冷却された原子が重力場の強度に応じて自由に運動できるようになる。その際、重力の引力に従って「落下」する原子の運動について、その位相変化を干渉計で測定できる。その結果、衛星が地球を周回する際の重力場の強度を測定可能になる。

宇宙空間で量子重力センサを使用して重力を測定する理論自体は比較的シンプルだ。これまでの課題は、要求されるミッション寿命と高解像度の観測範囲を実現できる、堅牢な衛星技術を開発することだった。この目的を達成するため、ESAはNASAと共同で、MAGIC重力衛星群の開発を進めている。同衛星群の目的は、地球の重力場変動を、短い時間間隔(3日ごと)で、100kmの空間分解能で精密に測定することだ。

参考文献

- (1) See <https://tinyurl.com/5n78fusy>.
- (2) See <https://tinyurl.com/5n7w8ct9>.

著者紹介

ジェレミー・ピコット-クレメンテは、欧州フォトニクス産業コンソーシアム(European Photonics Industry Consortium:EPIC)のフォトニクス技術マネージャー。
e-mail:jeremy.picot-clemente@epic-assoc.com URL:<https://epic-photonics.com>