

2波長赤外線センサの研究及び

衛星搭載型2波長赤外線センサの研究の紹介

防衛装備庁

電子装備研究所センサ研究部光波センサ研究室

先進技術推進センター研究管理官（M&S・先進技術担当）付

宇宙技術計画室（併任）

防衛技官 小山 正敏

1. はじめに

本稿では、まず2波長赤外線センサの研究を実施した防衛装備庁（旧防衛省技術研究本部）電子装備研究所及び、現在、衛星搭載型2波長赤外線センサの研究を実施している先進技術推進センターの紹介をさせていただきます。続いて、2波長赤外線センサの研究の概要について、防衛用途における赤外線の使われ方、赤外線センサの種類及び2波長融合処理の有用性を紹介した後、最後に文部科学省・国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）が計画している先進光学衛星に、2波長赤外線センサを搭載する予定の衛星搭載型2波長赤外線センサの研究の事業概要を紹介いたします。

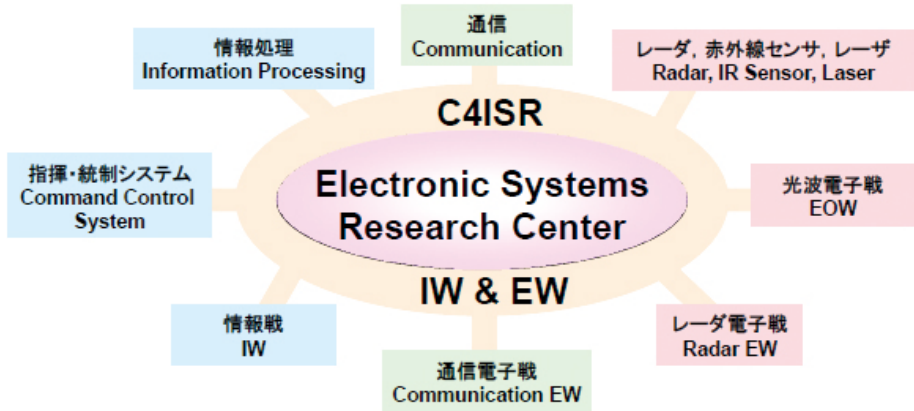
2. 電子装備研究所及び先進技術推進センターの紹介

電子装備研究所は、もともとは昭和27年8月に保安庁附属機関である保安庁技術研究所の通信・レーダ等の研究部門として設置されたのがはじまりです。その後、昭和49年の電波・光波部門の新設などの組織改編を経て、昭和62年には情報・通信・電波・光波技術を中心としたハイテク装備品の実現を目指して

防衛庁技術研究本部第2研究所に組織替えを行い、平成18年には電子装備研究所に改編しました。平成19年には省への移行に伴い防衛省技術研究本部電子装備研究所へと移行、さらに平成26年には目標の早期探知、情報処理、電子戦まで連携した研究開発体制への移行及びサイバー戦対処を強化するための組織改編を実施しました¹⁾。

平成27年10月には、防衛装備庁が発足しました。防衛装備庁の詳細については防衛装備庁ホームページ（<http://www.mod.go.jp/atla/>）を御覧いただければ幸いです。

現在、防衛装備庁電子装備研究所は、東京都世田谷区にある、陸上自衛隊三宿駐屯地内の三宿地区、目黒区にある目黒地区及び千葉県旭市にある飯岡支所に分かれて所在しており、旧技術研究本部体制から引き続き、情報・通信（サイバー関連技術を含む）、レーダ、光波などに関する防衛エレクトロニクス部門を担当し、統合幕僚監部と陸・海・空三自衛隊が使用する装備のハイテク化を支える研究所として、先進的な要素技術及びこれらを組み合わせたシステム化技術の研究を行っています。図1に、電子装備研究所の所掌技術分野を示します¹⁾。



IW: Information Warfare, EW: Electronic Warfare, EOW: Electronic-Optical Warfare
 C4ISR: Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance

図1 電子装備研究所の所掌技術分野¹⁾

電子装備研究所の研究部門は、3つの研究部（情報通信研究部、センサ研究部、電子対処研究部）と、飯岡支所で構成されています。飯岡支所においては広大な敷地を活かして、電波及び光波の伝搬、反射、放射等に関する研究及び試験評価を行っています。

私が所属する光波センサ研究室はセンサ研究部に属し、光波探知、光波識別技術及び光波計測技術に係る研究を行っており、現在は、主に赤外線センサについての研究を実施

しています。

次に、先進技術推進センターについて紹介します。先進技術推進センターは、防衛省が重視する基盤的技術を含む先進技術の装備品への適用研究を効率的かつ集中的に実施・実証することに重きを置いた研究組織です。先進技術推進センターは、平成18年7月の組織改編において新設された新しい研究所で、特徴ある3つの研究管理官から構成されており、電子装備研究所と同じく陸上自衛隊三宿駐屯



M&S: Modeling & Simulation, CBRN: Chemical, Biological, Radiological, Nuclear

図2 先進技術推進センターの所掌技術分野²⁾

図3 防衛用途への赤外線センサの適用例³⁾

地内と、目黒地区の2つの地区に分かれて所在しています。先進技術推進センターの研究部門を図2に示します。私が併任する宇宙技術計画室は、研究管理官（M&S・先進技術担当）に属しており、先進技術を適用した宇宙装備等に関連する考案、調査研究に関する業務を所掌しております。次に、防衛用途における赤外線の使用方について紹介します。

3. 防衛用途における赤外線について

赤外線センサは、絶対零度以上の全ての目標が放射する赤外線を検知するため、①昼夜関係なく使用が可能 ②車両、艦艇等のエンジン、航空機、ミサイルの排気ガスなど、背景よりも高温な熱源の探知に有利 ③照明が必要なく、自分の存在を秘匿しやすいなど、防衛用途においては多くの利点があるため、偵察・状況監視、視察・照準及び精密誘導などの各種装備品へ応用されています。（図3）

特に、情報化が進んだ現代の戦いは、戦いの優越が情報収集能力に大きく依存していま

す。すなわち、如何に有益な情報を多く集め、「情報優越」を確保するかが鍵であり、そのなかでも赤外線センサ技術は、情報収集能力を担う眼として、我が国の防衛に大きな役割を果たしていると言えます。

これまでの赤外線センサの開発は、とりわけその解像力が重要な指標とされ、解像力の向上に向けた多くの努力がなされてきました。その研究開発のおかげで、今日では640×480画素を超える赤外線センサが比較的簡単に入手できるようになっています。逆に考えると、解像力の高いセンサが既に商業ベースになっている現状においては、情報優越を確保することが困難になってきています。このような状況の中で、情報優越の確保を図るためには、高精細化等の従来のアプローチに加え、これまででない新たな機能を付加した赤外線センサが求められます。

また、防衛用途の赤外線センサは、より早期に遠方の目標を発見するために、検知波長帯としては、大気の透過率の高い所謂「大気

の窓」の波長帯を使用します。「大気の窓」は、 $10\ \mu\text{m}$ 帯（遠赤外域）と、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 帯（中赤外域）の2つの波長帯があります。一般に、Planckの黒体放射則により物体からの赤外線放射は、常温程度の物体で $10\ \mu\text{m}$ 付近がピーク波長となり、温度が高くなるにつれ、短波長側へシフトします。そのため、人間の肌や車両のボンネットなどの比較的低温物体には $10\ \mu\text{m}$ 帯の遠赤外域が、ジェットエンジンの排気ガスなどの高温物体の検知には $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 帯の中赤外域が適していると言われていています。しかしながら、システムの目的、想定される目標、運用場面、環境条件等によって適した波長が異なるため、どちらを選択するかについては悩みの種となることも多く、システムによってはわざわざ中赤外、遠赤外用の2つの赤外線センサを具備するものもあります。

そのような状況の中で、赤外線センサの解像力による識別に加え、1つのセンサで複数の波長帯を検知可能な多波長化技術が登場しました。これを防衛用赤外線センサに適用することで、運用場面に応じて見えやすい波長帯に切り替えたり、画像処理により2つの波長帯の放射スペクトルの違いを利用した目標識別が可能となるなど、従来の単波長の防衛用赤外線センサに比べ性能向上が期待されます。つぎに、赤外線センサの種類について紹介します。

4. 赤外線センサの種類について

赤外線センサには大きく分けて、熱型（非冷却型）と量子型（冷却型）の2種類があります。熱型は赤外線吸収による検知材料の温度上昇を電気信号としてとらえるもので、装置の大型化と寿命低下の大きな要因となる冷却器が必要なく、低コスト、小型軽量化に優位といった特徴があります。熱型赤外線センサは、民生用途のサーモグラフィや監視用カ

メラとして盛んに用いられており、最近では、スマートフォンに装着できるものが発売されて話題となりました⁴⁾。ただし、量子型に比べ、応答速度、感度ともにやや劣るため、近距離用途のシステムに適用されています。

一方、量子型は感度が高く、応答速度も速いのが特徴であり、航空機、艦艇及び誘導弾などの遠距離目標の視認が必要な装備品に適用されています。量子型は半導体のエネルギー準位間の遷移を利用したものであり、赤外線のようにエネルギーの低い光子を検知するためには、従来からHgCdTe（水銀カドミウムテルル）やInSb（インジウムアンチモン）といった狭ギャップ半導体を用いられています。我が国では90年代に長波長帯の 256×256 素子開発の事例があるものの⁵⁾、それ以降は後述するGaAs（ガリウムヒ素）系半導体の冷却型赤外線センサデバイスの研究開発にシフトしています。

QWIP（Quantum Well Infrared Photodetector, 量子井戸型赤外線センサ）に代表されるGaAs系半導体の赤外線センサデバイスは、90年代以降急速に発達しました。

これは、我が国においてSi（シリコン）の次に成熟したGaAsを中心とするIII-V族の化合物半導体の基盤技術をベースに、バンドギャップの異なる2つの半導体をナノメートルスケールで積層することで人工準位を作りだし、その準位間の遷移で赤外線を検知するものです。

QDIP（Quantum Dot Infrared Photodetector, 量子ドット型赤外線センサ）は、QWIPの発展型として登場しました。QWIPが2次元面内に生成した量子準位を利用するのに対し、QDIPは数十nmサイズの量子ドットを多数形成し、その量子ドット内に電子を3次的に閉じ込めることにより形成される人工準位間の遷移を利用するものです。

QDIPは、QWIPに比べ熱による電子の散逸が小さく、ノイズの原因となる暗電流を小さくできることが特徴で、暗電流を抑えるために大型の冷却器を用いて、低い温度で動作させる必要があるQWIPの弱点を克服するものであります。

当研究室では、この新規のデバイスであるQDIPの優れた特性に着目し、QDIPを2波長化し、目標の探知・識別能力の向上を目指した研究を平成17年から開始しました。

5. 2波長赤外線センサの研究

2波長を検知する赤外線センサを実現するにあたり、QDIPはHgCdTeに比べ量子効率の面では一歩譲るものの、①安定した材料であり、既存の製造設備が流用でき、歩留まりが良好であることから低コスト化に有利 ②高品質な結晶成長が可能で画素均一性良好 ③大型のGaAs基板上に結晶成長できるため多画素化に有利 ④検知波長帯の制御が容易で多波長化に有利 ⑤HgCdTeと同等の動作温度であり、HgCdTeと同じ冷却器が使用可能

⑥HgCdTeと違い水銀フリーであり、近年の水銀使用抑制傾向に対応、という特徴があります。これらのことから、我が国が保有する半導体技術を活用することで国産が可能で、高い性能が期待されます。

この研究では、まず研究着手当時に、世界

でも実用化例のなかった10 μ m帯でのQDIPの実現に向けた研究からスタートし、平成19年に世界に先駆けて動作温度80 Kの256 \times 256画素の単波長遠赤外QDIP画像センサを実現することができました⁶⁾⁷⁾。2波長化に向けた研究は10 μ m帯QDIPが実現した後の平成20年から開始し、平成22年には動作温度80 Kの480 \times 480画素の中赤外、遠赤外の2波長QDIPを実現しました。その後、2波長QDIPの多画素・高精細化を図り、平成26年には1024 \times 1024画素の2波長QDIPを実現しました。図4に2波長QDIPの模式図を示します。各画素は、受光面に対して垂直方向に、異なる波長の検知層を2段階に積層した構造となっています。2つの波長帯の赤外線は、相互に屈折率等が大きく異なることに起因する色収差等を考慮した、特殊な2波長光学系を用いて同一焦点面に結像され、それぞれの検知層で光電流に変換されます。その後、検知層に配置された柔金属（インジウム）による接合電極（バンプ）を通じ、下部の読み出し回路基板で光電流により生じた電荷を時系列的に転送することにより、2波長帯の映像を1つのセンサで取得することが可能となっています。また、多画素化による画素縮小（画素ピッチ:35 μ m \Rightarrow 18.5 μ m）に対応するため、それぞれの量子ドット層に印可するバイアスをフレームごとに切り替え、2波長帯の信号

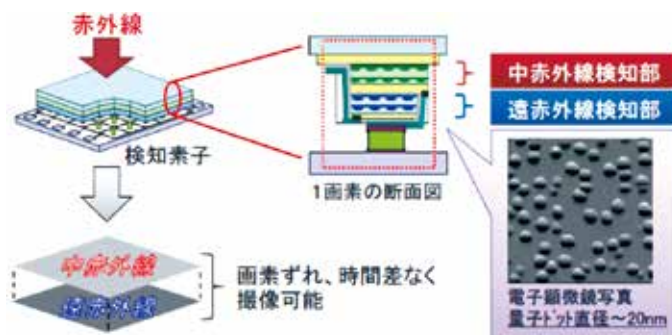


図4 1024 \times 1024画素2波長QDIP⁸⁾

を交互に読み出す方式を採用しました。これにより、1画素あたりの接合バンプ数を3つから1つまで減らし、縮小した画素ピッチに対応することができました。

次項では、この赤外線センサを用いた野外試験における撮像例及び2波長融合処理について紹介します。

6. 2波長融合処理

2つの赤外線の波長帯の放射率・反射率の違いを利用することで、これまで見つけにくかった目標を見つけ出すなど、識別能力向上が見込まれます。特に火炎などのガス体の多くは、特定の波長の放射率が高い選択放射体であるため2波長帯による識別が有効です。図5にライターの火炎画像を示します。

燃焼により発生する高温の炭酸ガス（CO、CO₂）は中赤外域に特有の放射をもつため、2つの画像で火炎の形が大きく異なっているのがよく分かります。このため、航空機やミサイルなどの高温の排気ガス（プルーム）探知には、中赤外線域が多く用いられます。

図6は冬季の夜間に撮影した富士山の画像です。撮影時の富士山の頂上部の気温は零度以下の低温であり、中赤外域はその放射特性から赤外線の量が極端に少なく、見えづらくなっているものの、遠赤外域では麓から山頂に至る山肌の温度差がはっきり視認できます。一般に冬季など、目標が低温となる環境

下では、放射強度のピークが長波長側にあるため遠赤外帯域の使用が有利と言えます。

ここで示した例だけでなく、一般に中赤外域と遠赤外域はその特性が大きく異なります。これまでその運用場面に応じて適した波長帯の選択がされてきましたが、2つの波長帯をカバーできれば、運用場面の拡大に伴い、従来の単一波長のセンサと比べ、より高い情報収集能力を獲得することが可能となると考えられます。

この特性を利用して、2つの波長帯の融合処理を実施した例が図7です。これは火力発電所の煙突から放出される高温のガスを2つの波長の輝度比により抽出し、その部分を赤く着色したものです。中赤外域、遠赤外域は、その放射特性が大きく異なるため、この特性を用いれば、例えばミサイルのプルームと本体、あるいは航空機の排気ガスとその本体など、目標の放射特性による判別も可能と考えられます。

また、赤外線センサで目標を搜索する場合、たびたび太陽光による反射が問題となり、目標と背景等との判別が難しくなる場面があります。これは太陽光クラッタとも呼ばれ、海上であれば波面、空であれば雲による反射が相当します。このような場面において、太陽は6000 K程度の高温の放射体であり、太陽光の反射成分がそれぞれの波長帯で異なることを利用して太陽光クラッタの低減像処理を



図5 ライターの火炎の画像⁸⁾

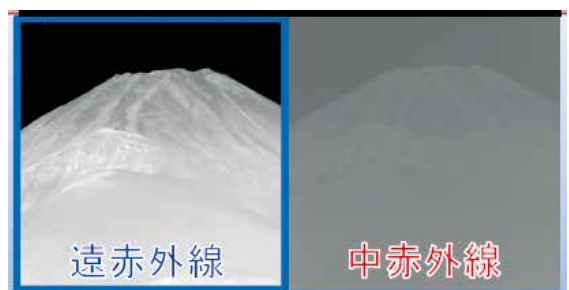


図6 夜間の富士山の画像⁸⁾



(a) 遠赤外画像 (b) 中赤外画像 (c) 融合処理後の画像
 図7 煙突の排気ガスを2融合処理により抽出した画像⁹⁾

行った例が図8です。

このように、2波長帯を用いることにより、従来の単一波長センサでは得られない目標識別・抽出能力を持つことが可能となり、この例では、それぞれの単一波長の画像では認識しづらかった図中赤枠内の小型船舶の認識が容易となり、小型船舶の細部の視認が可能になります。

さらに、目標が比較的温度の高い市街地等の背景に埋もれた場合、赤外線画像では目標の存在を認識し難い状況が生じます。このよ

うな場面において、2波長帯における目標の放射スペクトルの違いにより、その存在を認識する可能性を向上できる見込みが得られています。図9は港湾近くで作業しているクレーン台船を撮影した例です。

図9の単一波長の画像の場合、船体が市街地とほぼ同じ輝度レベルであるため背景に埋もれ、予めその存在を知っていなければ探知・認識が難しいと言えます。一方、図9の下の画像は、中赤外画像から遠赤外画像を差し引いた差分画像を示したものです。差分を

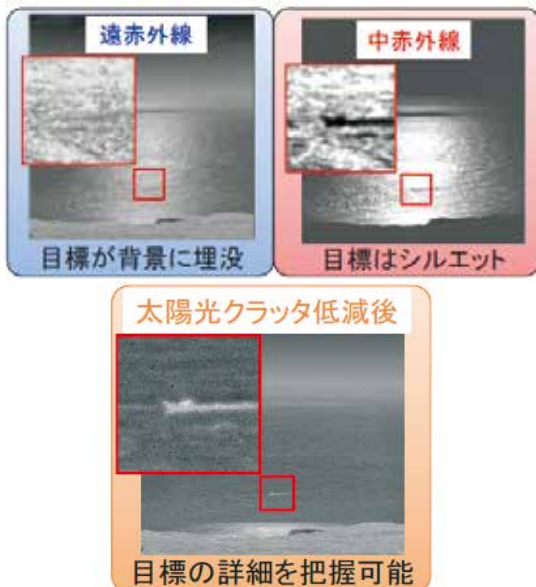


図8 太陽光クラッタ低減処理⁸⁾

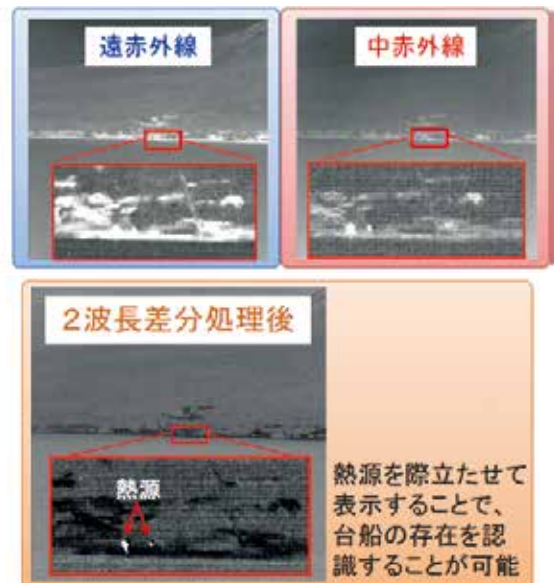


図9 2波長融合処理による複雑背景の中からの目標の探知・識別例⁸⁾

取ることにより背景ノイズが抑制されるとともに、中赤外域の放射の多いクレーン台船上の発動機と思われる熱源部のみが白く表示されています。このことから、一見、目標の存在を感知・認識しにくい場面であっても、2波長帯を用いることにより、数多くの熱源の中から、スペクトルの異常物として目標の候補を絞り込める可能性があります。さらに、目標候補をある程度絞り込むことができれば、それぞれの目標候補に対して注目することで、従来の単一波長のセンサと比べ、目標の感知・識別能力の向上が見込まれます。

以上、2波長画像による目標の感知・識別能力の向上例について紹介しました。本稿で紹介したものはあくまで想定される一場面に過ぎませんが、2波長センサを用いることで、従来の単一波長センサと比べ、目標の感知・識別能力を向上が見込まれることが確認できました。

次項では、この2波長赤外線センサを先進光学衛星に搭載する、衛星搭載型2波長赤外線センサ事業の概要について紹介します。

7. 衛星搭載型2波長赤外線センサの研究

人類初の宇宙空間への人工衛星打上げから約60年が経過し、近年、宇宙空間を利用した技術は、様々な分野に活用されています。宇宙空間は、国家による領有が禁止されていることに加え、全ての国が自由に利用できることから、各国は宇宙利用を積極的に進めています。たとえば、気象や陸・海域の観測に気象衛星や観測衛星、インターネットや放送に通信・放送衛星、また航空機や船舶の航法利用に測位衛星などがあり、社会、経済、科学分野など官民双方の重要インフラとして深く浸透しています。各国とも画像収集衛星を始め、測位、通信衛星等の能力向上に努めています¹⁰⁾。

我が国においてもJAXAにおいて各種衛星の開発、上げが行われてきました。光学衛星については、昭和62年に最初の光学センサを搭載した海洋観測衛星もも1号(MOS-1)を打上げて以来、地球資源衛星ふよう1号(JERS-1)、地球観測プラットフォーム技術衛星みどり(ADEOS)と高性能化を進め、平成18年上げの陸域観測技術衛星だいち(ALOS)では、2.5mの分解能を達成しました。ALOSは、東日本大震災を含む災害状況等監視に加え、国内外の地図作成、海水監視、森林違法伐採・不法投棄の監視などの分野に幅広く活用され、諸外国及び海上保安庁等から感謝状を受領するなどの成果をあげました¹¹⁾。

また、我が国の宇宙空間における取組として、平成20年に宇宙基本法(平成20年法律第43号)が施行され、我が国の宇宙開発利用において安全保障用途への道が開かれたのをきっかけとして、平成24年にはJAXA法が改正され、JAXAにおける我が国の安全保障目的の研究開発が可能となりました。それを受け、平成25年には、赤外線センサの衛星への搭載関連技術分野等における情報交換を目的とした研究協力協定を、当時の防衛省技術研究本部とJAXA間で締結しました¹²⁾。

一方JAXAは、平成23年にALOSの運用終了後、衛星からの光学観測は途切れており、国土保全・災害状況把握等に必要な観測の継続を確保することが重要であるとの認識のもと、ALOSで獲得した広域・高分解能観測機能を発展させ、分解能1m以内で日本全域を高頻度に観測し、防災・災害対策等を含む広義の安全保障、地図・地理空間情報の作成・更新等、様々なニーズに対応するとともに、民間事業者と協力し、更なる運用の効率化と利用の促進を図るべく計画されたのが先進光学衛星です。期待される成果として、被災状況の詳細把握とともに、ハザードマップの詳

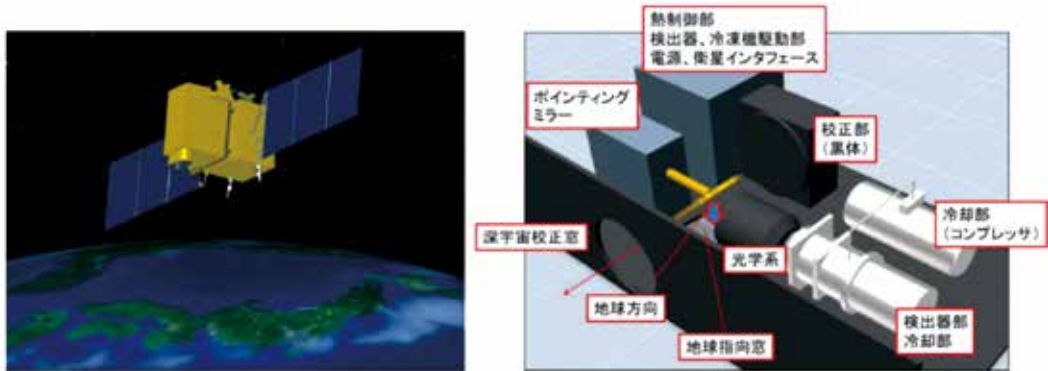


図10 左) 先進光学衛星の軌道上外観イメージ¹¹⁾
右) 先進光学衛星への搭載イメージ¹²⁾

細化及びタイムリーな更新に加え、広域観測能力を活用して、陸域や港湾等の監視の効率化・強化を図ることが可能となります。さらに、昼夜・天候を問わず合成開口レーダで観測できる陸域観測衛星だいち2号 (ALOS-2) を補完的に組み合わせることで、災害観測等における相乗効果が期待されています¹¹⁾。

そのような状況の中、電子装備研究所の2波長赤外線センサの研究で実現した高精細な2波長赤外線イメージセンサを、文部科学省・JAXAが計画する先進光学衛星に搭載し、宇宙から赤外線画像のデータ取得を行って、衛星搭載に関して2波長赤外線センサの実証を行うと共に、赤外線センサの宇宙空間における運用技術等について技術的知見を得る研究経費を防衛省が計上し¹²⁾、平成27年度から先進技術推進センターが事業化する運びとなりました。本事業は、先進技術推進センター研究管理官 (M&S・先進技術担当) 付宇宙技術計画室が担当して実施しています。電子装備研究所で実施した「2波長赤外線センサの研究」の成果を先進技術推進センターが活用し、効率的な研究開発としています¹³⁾。先進光学衛星の軌道上外観イメージ及び先進光学衛星への2波長赤外線センサの搭載イメージを図10に示します。

本事業は、平成27年度から平成31年度まで研究を実施して、衛星搭載用赤外線センサを設計・製造及び先進光学衛星に搭載します。平成31年度に衛星の打上げが実施された後に、平成32年度から平成36年度まで所内試験を実施する予定です¹³⁾。本事業は、防衛省で実施する初めての衛星搭載型の赤外線センサの研究であり、宇宙から鮮明な2波長赤外線画像データが送られてくることを心待ちにしつつ、研究を実施しています。

なお、本事業は、私の併任先である先進技術推進センター 研究管理官 (M&S・先進技術担当) 付宇宙技術計画室において実施されており、2波長赤外線センサの研究事業で得られた成果を円滑に反映すべく、両研究室の室員の立場を活かして業務を実施しています。

8. まとめ

電子装備研究所で実施した研究において実現した2波長赤外線センサは、これまでの単一波長の赤外線センサと比べて、目標に対する探知・識別能力の向上が見込まれることについて紹介しました。

また、2波長赤外線センサの応用例のひとつとして、先進技術推進センターで実施している、衛星搭載型2波長赤外線センサの研究

の事業概要について紹介しました。今後も引き続き、2波長赤外線センサの研究の成果を様々な装備品等へ反映し、我が国の安全保障に貢献するために、鋭意、研究業務に邁進していく所存です。

謝 辞

2波長赤外線センサの研究の契約相手方である富士通株式会社、衛星搭載型2波長赤外線センサの研究の契約相手方であるJAXAの皆様、この場をお借りして深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 電子装備研究所パンフレット http://www.mod.go.jp/trdi/saiyou/images/pamphlet/pamphlet_densouken.pdf (平成28年4月アクセス)
- 2) 先進技術推進センターパンフレット http://www.mod.go.jp/trdi/research/kenkyu_denshi.html (平成28年4月アクセス)
- 3) 土志田 実：防衛技術シンポジウム2012 R5-3, ~より確実に、より精細に、暗いところでも見えるように~, 防衛省技術研究本部 (2012) 11月。
<http://www.mod.go.jp/trdi/research/dts2012/R5-3p.pdf>, (平成28年4月アクセス)
- 4) FLIR社ホームページ <http://www.flir.jp/flirone/content/> (平成28年4月アクセス)
- 5) T. Kanno, H. Wada, M. Nagashima, H. Wakayama, K. Awamoto, N. Kajihara, Y. Ito, and M. Nakamura, "A 256 × 256 Element HgCdTe Hybrid IRFPA for 8-10 μm Band", Proc. SPIE, 2552, 384-391 (1995) .
- 6) M. Nagashima, M. Kibe, M. Doshida, H. Yamashita, R. Suzuki, Y. Uchiyama, Y. Yamashita, H. Nishino, T. Fujii, and S. Miyazaki : High-performance 256 x 256 pixel LWIR QDIP, Proc. of SPIE 7298 (2009) 72980D-1
- 7) M. Nagashima, M. Kibe, M. Doshida, Y. Uchiyama, Y. Matsukura, and H. Nishino : Photodetection around 10 μm wavelength using s-p transitions in InAs/AlAs/AlGaAs self-assembled quantum dots J. Appl. Phys. 107 (2010) 054504.
- 8) 小山 正敏 他：防衛装備庁技術シンポジウム2015, 2波長赤外線センサを用いた2波長融合処理について, 防衛装備庁 (2015) 11月 . <http://www.mod.go.jp/atla/ats2015/image/pdf/o1-12.pdf>, (平成28年4月アクセス)
- 9) 木部 道也 防衛技術ジャーナル (2013) 5月号, 見つけにくいものも見つけ出す~2波長赤外線センサ~
- 10) 平成27年版防衛白書
- 11) 先進光学衛星の検討状況について, 宇宙開発利用部会第17回資料 (平成26年9月) 文部科学省ホームページ http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/059/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2014/10/01/1351678_4.pdf, (平成28年4月アクセス)
- 12) 防衛省における宇宙開発利用の取り組みについて, 宇宙開発利用部会 国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会 第8回資料 (平成26年10月) 文部科学省ホームページ http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/071/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2014/10/22/1352273_1.pdf, (平成28年4月アクセス)
- 13) 平成26年度政策評価書 (事前の事業評価) 要旨 防衛省ホームページ http://www.mod.go.jp/j/approach/hyouka/seisaku/results/26/pdf/jizen_16_youshi.pdf, (平成28年4月アクセス)