

技術のフロントローディングによる 赤外線センサ(InGaAs)宇宙用化・高性能化 開発状況報告

2025年4月28日

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

自然科学研究機構 国立天文台

■ 本フロントローディングの位置づけ

- 本件は我が国の自立性の確保や国際プレゼンスの向上のため、直近の出口である赤外線位置天文観測衛星（JASMINE）を見据えつつ将来の赤外線観測に向けて、インジウム・ガリウム・ヒ素による赤外線受光素子とCMOSハイブリッド型センサの開発を技術のフロントローディングとしてFY2021-2024で実施。
- 国立天文台と国内半導体メーカが共同で地上望遠鏡用に開発した赤外線センサを宇宙用化。
- このフロントローディングにより、赤外線センサの開発に加えて、今後のセンサ開発に共通的に適用できるハイブリッド化やCMOSの活用といった要素技術を獲得。

■ 赤外線センサ技術の重要

- 観測機器の性能はミッションの価値を決めるものであり、極めて重要。今後、多波長の観測機器を搭載したミッションを計画しスムーズに実行していく上で、世界的なトレンドであるハイブリッド型センサ技術の獲得は必要不可欠。
- 特に米国1社に依存している赤外線CMOSハイブリッド型センサについて、我が国が自立的に各波長のセンサ開発に活用できるよう、センサの宇宙仕様化(耐放射線性やハイブリッド化)技術の成熟度を先行的に向上させることは、今後の魅力的な宇宙科学・探査ミッションの創出や、そのためのリスクやコスト低減に必要。

■ FY2021-2024の技術のフロントローディングによる成果

• 赤外線センサ宇宙用化の技術実証を達成。

- CMOS読み出し回路の耐放射線性の強化、低雑音化による性能向上
- 受光部の放射線の影響の低減 (InP基板除去、反射防止コーティング)
- 多画素化および画素サイズ縮小に対応したCMOSハイブリッド技術の確立
- 冷却性能評価試験を継続中、放射線照射試験および機械環境試験は2025/5に予定。

1. InGaAs赤外線センサの宇宙用化開発の流れ



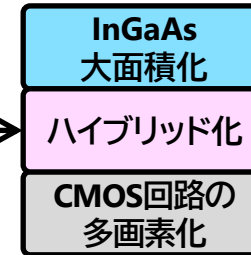
FY2014-2016

FY2017-2019

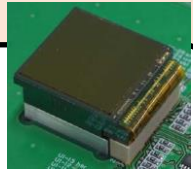
科研費による基礎研究
(国立天文台)



①



②



国内の
地上望遠鏡へ
提供・実証済

2020年にNASAの方針転換(今後は米国外のプロジェクトへの参加がきわめて限定的になった)

FY2021

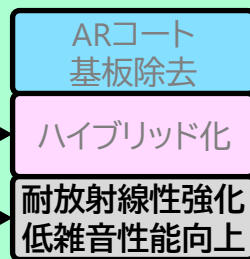
FY2022

FY2023-2024

FY2025～



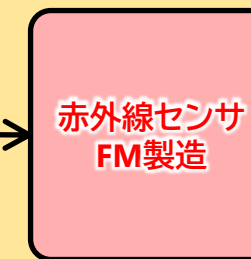
③



④



⑤



JASMINE
搭載

技術のフロントローディング

JASMINEプロジェクト経費

国産検出器の宇宙用化開発

①CMOS読み出し回路の低雑音性能向上と耐放射線性確認 済

- 国立天文台における過去6年間の研究開発によって実現している。JASMINEチームで放射線耐性について確認済(FY2020-21; 東工大コバルト照射施設、QST高崎量子応用研究所)。

②CMOSハイブリッド化技術 済

- 国立天文台における過去6年間の研究開発によって実現している。難易度はピクセル数ではなく素子サイズに依存する。本開発においても同じ素子サイズを用いるため、ハイブリッド化におけるリスクはない。

③InGaAs受光部のARコート・基板除去(量子効率向上・放射線影響低減) 済

- FY2021の試作において技術実証を行う。難易度はピクセル数・素子サイズには依存せず、FY2021の成果をもって開発の目途は立つ(大フォーマット化におけるリスクはない)。

④製造性の確認 済

⑤製造プロセス

2. 赤外線センサの開発状況



■ FY2022センサ試作結果

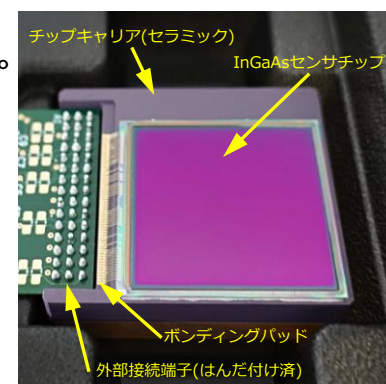
- FY2022に大フォーマット(2k×2k素子)のセンサ試作を行い、基板除去・ARコートは想定通りの成果を得た。この成功をもって、宇宙仕様化の目途は立ったものと判断する。

■ FY2023-2024チップキャリアの新規開発

- 以前のチップキャリアは地上望遠鏡用であったため、衛星搭載向けに新規開発した。
 - 宇宙用の信頼性の確保
 - チップキャリアの一端にボンディングパッドを設けて、センサチップとボンディングワイヤで接続する。ボンディングパッドから外部接続端子まではチップキャリア内部で配線する。
 - 外部接続端子にはリジッドフレキ基板をはんだ付けして信号を取り出す。リジッドフレキ基板と外部回路との接続には宇宙用途で一般的なマイクロD-subコネクタを採用する。
 - チップキャリアの金属ベースにはタッパ加工を施し、裏面からトルク管理の下でネジ締結できる構造にする。
 - 熱接触の確保
 - センサチップ搭載部分には、セラミックと合金(銅タングステン)をロウ付け加工して、熱接触を確保する。

■ FY2024センサ試作結果

- 新規開発したチップキャリアを用いて、FY2022と同様の2k×2k素子の試作を行った。
- 読出し回路ではライン欠損等の不具合はなく、またInGaAs搭載品では不良画素率を低減させることができた。
 - FY2022試作では不良画素率5%を超えるものもあったが、FY2024試作では3%もしくはそれ以下になった。JASMINE搭載用には不良画素率5%以下を仕様とする予定であるが、現時点でこの基準を満たしている。
- 冷却性能評価試験を継続中、放射線照射試験および機械環境試験を2025/5に予定。

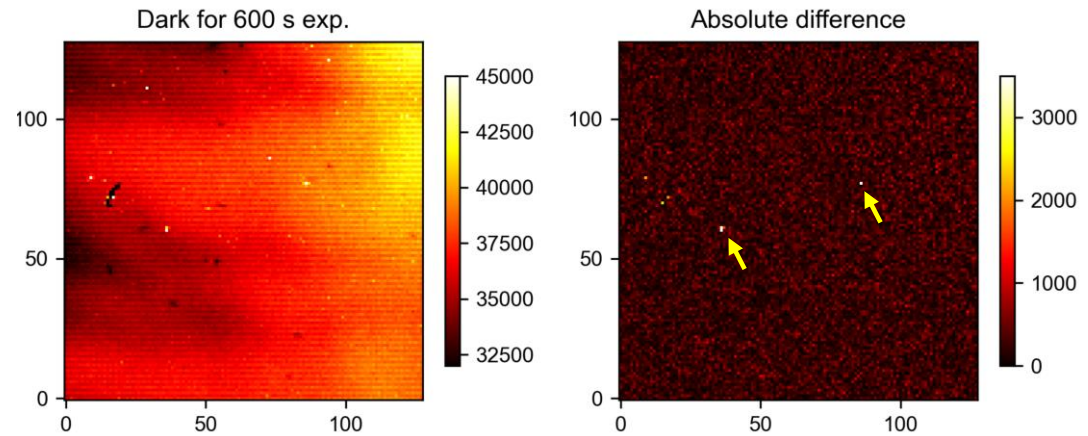
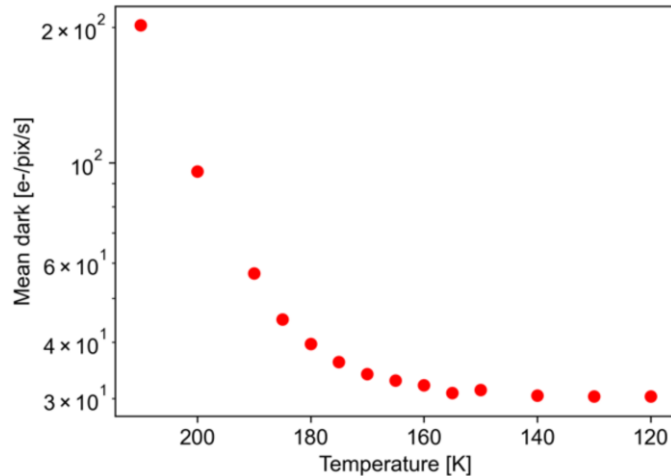


FY2024試作したセンサ
有効画素数：1952×1952ピクセル

3. 128×128センサの冷却評価試験結果 (Miyakawa+2024, SPIE)

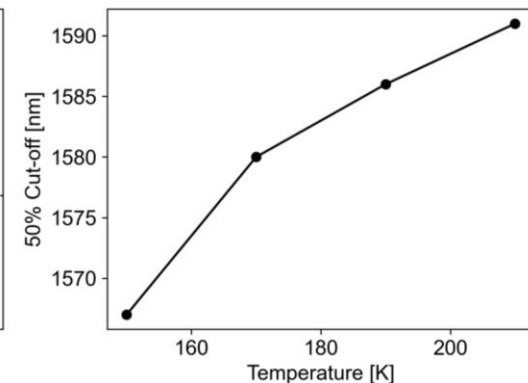
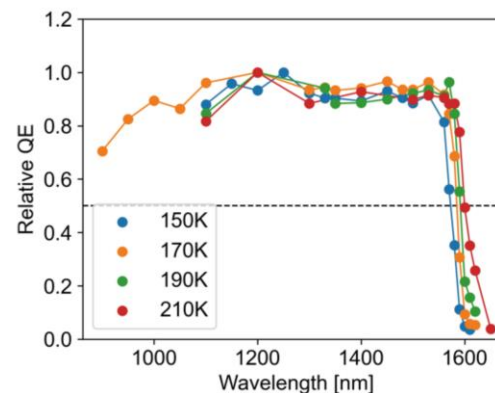
■ 暗電流測定

- 120-210Kでの暗電流の温度依存性を測定した。最小値で30e-/pix/s程度。
- 600秒積分で得られた暗電流のパターン(左)と2回の測定の差分(右)。矢印は放射線ヒットによる発光である。InP基板除去していないセンサで見られたような、広がった信号は認められない。



■ 量子効率測定

- 170Kにおける絶対量子効率は60-70%程度。
- 150-210Kでの相対量子効率は、1.5μm以下の範囲で比較的フラットな傾向が見られる。
- 長波長側のカットオフ波長の温度依存性としてはおよそ0.4nm/Kが得られた。



温度による相対量子効率(左)とカットオフ波長の温度依存性(右)

4. 赤外線センサ(InGaAs)宇宙用化 開発状況のまとめ



■ 赤外線センサ(InGaAs)宇宙用化に向けた開発を実施した。

- CMOS読み出し回路の耐放射線性を強化した回路構成を実現した。
- CMOSハイブリッド化技術によって、2k×2kピクセルのInGaAsセンサを実現した。
- 耐放射線性能を高めるためのInP基板除去に成功し、ARコートも想定通りに実現した。
この結果、宇宙用化の技術が実証されたものと判断する。
- 天文観測用途として要求される不良画素率の小さい実用的なセンサを製造できることが示された。
- 冷却性能評価試験を継続中、放射線照射試験および機械環境試験を2025/5に予定。



■ 技術のフロントローディングとしての開発はFY2024をもって完了。

- JASMINEとしては、本センサに対して固有の機能(グローバルシャッターモード、可視光ブロック機能)を検討中。



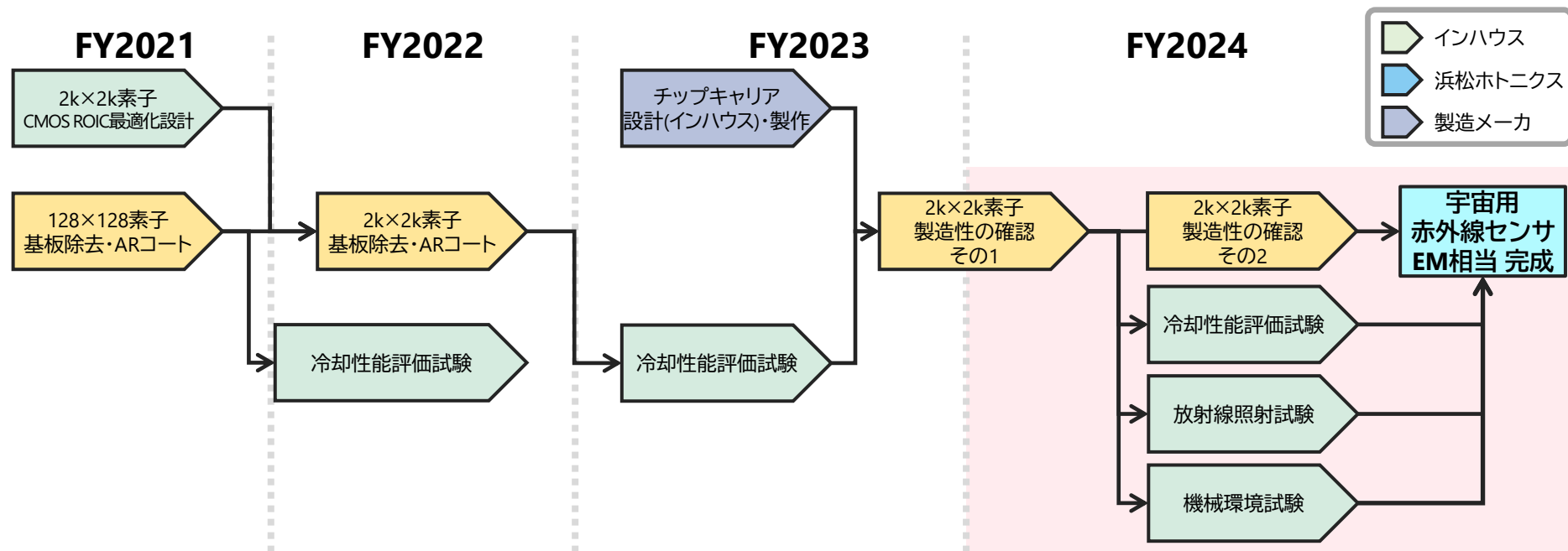
■ JASMINE計画のステータス

- 本フロントローディング活動により、JASMINE計画遂行に対し、国産センサの技術成熟度を向上させ、ミッション部の概念検討をより具体化できたなどの効果を得た。
- 他方、ミッション定義審査時点での評価では、JASMINE計画の総事業費の見積額が高騰している状況にある。これに対して、宇宙科学コミュニティからは、コストの縮減の必要性や今後の宇宙科学プログラムへの影響が指摘されている。
- コスト低減には、開発計画・検証計画を綿密に構築し、不確実性によるリスク・コストを最小化することが必須。
- 昨今の国内システムメーカーのリソース不足への対応も引き続き検討中。

■ 今後の方針

- リスク・コスト低減と見積精度の向上に注力し、公募型小型計画規模に総事業費の見積額を低減した上で、プリプロジェクト移行を図りたい。
- 確実な開発を進めるため、宇宙科学研究所・国立天文台のより一層の協力体制を強化する。

(参考) 赤外線センサ開発計画



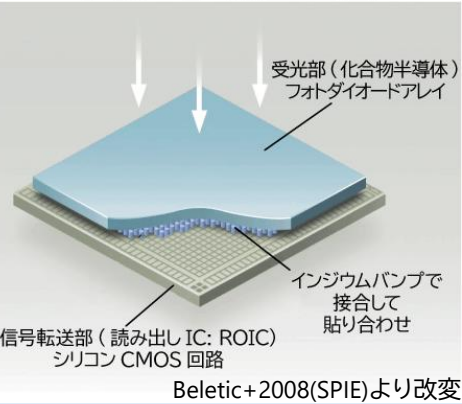
- FY2022試作品(2k×2k)によって基板除去・ARコートは想定通りの成果を得た。この成功をもって、JASMINE搭載用の赤外線センサ調達の目途は立ったものと判断する。
- FY2023-2024は不良画素数の低減を目指した製造性の確認(歩留まりの向上)を実施した。
- ただしFY2022試作品を搭載したチップキャリアは地上望遠鏡用に開発されたものであり、宇宙用途には不適と判断、FY2023-2024では新しい設計でチップキャリアを製作することとした。
- 放射線照射試験(読出し回路の機能停止感度の確認)、機械環境試験はFY2025に実施する予定。

(参考) 技術FLにおける赤外線センサ宇宙用化・高性能化 (1/3)

現状では赤外線センサは国際的に米国一社に依存している状況
⇒ コスト増(一社独占状態)、開発リスク高(詳細技術情報が得にくい)

我が国の自立性の確保や
国際プレゼンスの向上

宇宙用国産赤外線 CMOSハイブリッド型 センサの開発



赤外線
半導体
加工技術

近赤外線センサ (InGaAs)

宇宙用化・高性能化

- 技術FL(FY2021-2023)による開発
- 耐放射線性の強化、低雑音化による性能向上
 - 受光部の放射線の影響の低減
 - 多画素化(3.6メガピクセルをターゲットに)

近赤外線波長域での
多様な宇宙科学・探査
ミッションへの応用

天文観測: 赤外線位置天文観測 (小型JASMINE)、宇宙背景放射観測、ガンマ線バースト多波長同時観測、太陽観測: 太陽彩層磁場の直接観測、惑星探査: 探査機のその場計測による水氷資源探査、気象衛星・地球観測衛星: 雲相判定、大気中のCO₂濃度測定、など。

CMOS
ハイブリッド
技術の発展

CMOSハイブリッド型 センサ

受光素子を変更

- 金属バンプでROICと受光素子を接合
- 他の半導体、超格子など、さまざまな受光素子

幅広い波長帯の検出器

宇宙におけるさまざまな現象を捉えるために、可視光、近赤外線、熱赤外線、紫外線、X線といった多くの波長に対応したセンサを開発し、宇宙天文観測網の確立につなげる。

耐放射線
低雑音
CMOS
センサ技術

CMOS技術 の獲得・向上

CMOS技術の高度化

- 完全空乏型シリコン・オン・インシュレータ(FD-SOI)
- 低消費電力、極低温での動作、耐放射線性向上
- 宇宙用部品としての性能向上

汎用な宇宙用観測機器

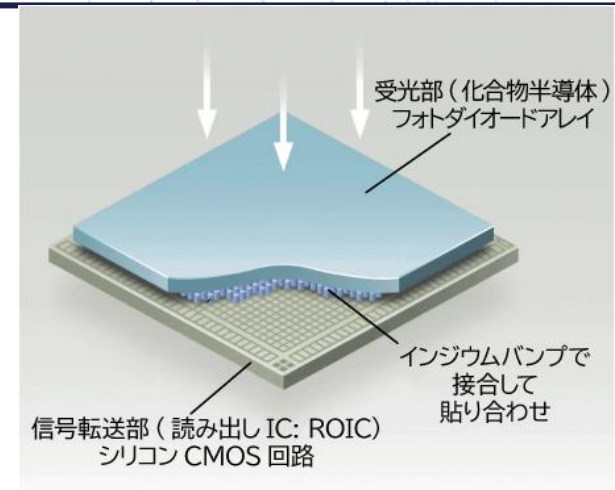
2030年代において世界最先端の技術となる我が国の強みとなる。

- 観測機器は、ミッションの価値を決めるものであり、極めて重要。今後、多波長の観測機器のミッションをボトムアップで競争し衛星計画としてスムーズに実施していく上で、**検出器開発のトレンドであるハイブリッド検出器技術の獲得は必要不可欠**。特に米国1社に依存している赤外線CMOSハイブリッド検出器について、我が国が自立的に各波長のセンサ開発に活用できるよう、センサの宇宙仕様化(耐放射線性やハイブリッド化)技術の成熟度を先行的に向上させることは、今後の魅力的な宇宙科学・探査ミッションの創出や、そのためのリスクやコスト低減に必要。
- 本件は直近の出口である小型JASMINEへ向けて、**我が国の自立性の確保や国際プレゼンスの向上のための**インジウム・ガリウム・ヒ素による赤外線受光素子と、CMOSハイブリッド型検出器のフロントローディングを行う。
- これにより、赤外線検出器の技術フロントローディングに加えて、今後のセンサ開発に共通的に適用できるハイブリッド化やCMOSの活用技術を獲得する。

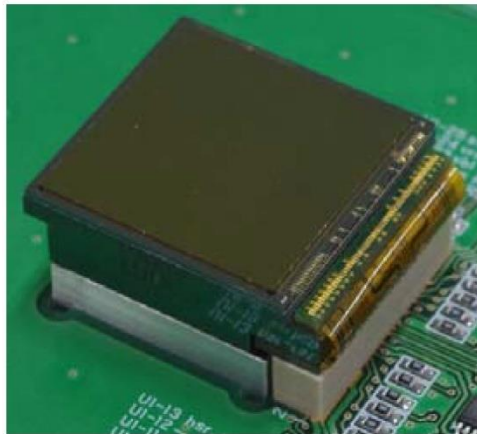
(参考) 技術FLにおける赤外線センサ宇宙用化・高性能化 (2/3)

■ 新しい国産・低ノイズ赤外線センサ

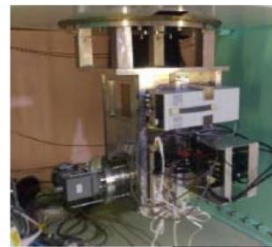
- 国立天文台と国内半導体メーカーが共同で受光部にInGaAs(インジウム・ガリウム・ヒ素)を用いた**低ノイズ・高感度のCMOSハイブリッド型赤外線センサ**の開発に成功。
 - ✓ この赤外線センサは国内の大学望遠鏡への搭載実績あり。すばる望遠鏡の次世代観測装置への搭載を検討中。
 - ✓ 感度波長域: $0.9\text{--}1.6\mu\text{m}$ 、画素数: 1280×1280 ピクセル
- CMOSハイブリッド型センサは、受光部(化合物半導体を用いたフォトダイオード)と信号転送部(ROIC)を金属バンプによって組み合わせたセンサ。受光部の半導体を変更することで異なる波長帯に感度のあるセンサを構成することが原理的に可能。



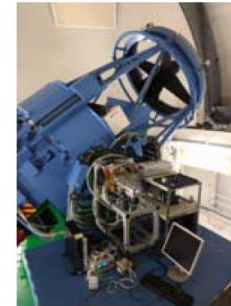
CMOSハイブリッド型センサの模式図
(Beletic+2008(SPIE)より改変)



地上用に開発された国産
赤外線センサ(InGaAs)



鹿児島大学1m望遠鏡による
オリオン星雲(Jバンド)



広島大学1.5mかなた望遠鏡による
木星(Y、J、Hバンド)

- 科研費・基盤(A) 26247029「超広視野撮像観測のための新しい低ノイズ大面積近赤外線検出器の開発」(2014-2016)、17H01117「超広視野撮像観測に用いるCCDと同じ空間分解能の低ノイズ近赤外線検出器の開発研究課題」(2017-2019)成果報告書より

(参考) 技術FLにおける赤外線センサ宇宙用化・高性能化 (3/3)

■ 新しい国産・低ノイズ赤外線センサ

- この赤外線センサの宇宙用化・高性能化によって、2020年代後期から2030年代のさまざまな宇宙科学・探査ミッションが実現される。
 - ✓ 天文観測(赤外線位置天文観測、宇宙背景放射観測、ガンマ線バースト多波長同時観測)、太陽観測(太陽彩層磁場の直接観測)、惑星探査(探査機のその場計測による水氷資源探査)、気象衛星・地球観測衛星(雲相判定、大気中のCO₂濃度測定)など。
 - ✓ ここで用いられるCMOSハイブリッド型センサの技術は、可視光・赤外線だけでなく、紫外線・X線など多波長におけるピクセル検出器への応用が見込まれる。

■ 我が国におけるセンサ開発の重要性

- 国際的な米国一社への依存から脱却、我が国として自立した宇宙開発、国際的プレゼンス確立。
- 既存のHgCdTe(水銀・カドミウム・テルル)センサと比べてカドミウムフリー、かつ低価格の検出器の必要性。
- 国内開発により詳細な技術情報が得られる(今後のミッションにおいて、検討段階初期に詳細情報を活用することでリスク低減につながる)。

■ 赤外線センサ(InGaAs)の宇宙用化・高性能化 (FY2021-2024)

- 技術FLとして、赤外線センサの宇宙用化・高性能化に取り組む
- CMOS読み出し回路の耐放射線性の強化、低雑音化による性能向上
- 受光部の放射線の影響の低減(基板除去、反射防止コーティング)
- 多画素化などの高性能化
- 画素サイズ縮小に対応したCMOSハイブリッド技術の確立

