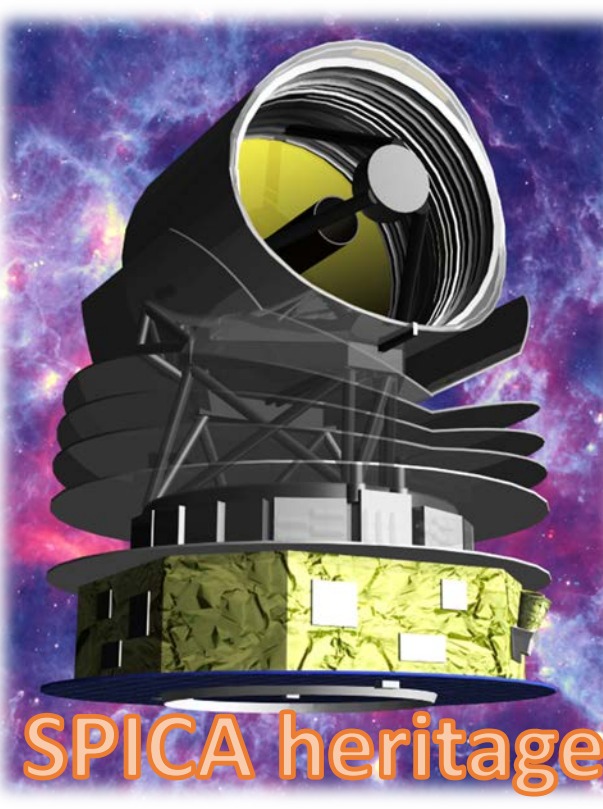


# 将来ミッションに向けた中間赤外線観測装置関連技術



和田武彦(ISAS/JAXA), 金田英宏(名古屋大, ISAS/JAXA), 平原靖大, 國生拓摩, 森鼻久美子, 土川拓朗, 黒田幸, 石川大智(名古屋大), 石原大助, 鈴木仁研, 長勢晃一, 内山瑞穂, 伊藤哲司, 大坪貴文, Ryan Lau, 中川貴雄, 松原英雄, 磯部直樹, 山岸光義(ISAS/JAXA), 前嶋宏志, 大西崇介, 松本光生(東京大, ISAS/JAXA), Huang Ting-Chi, 榎木谷海(総研大, ISAS/JAXA), 海老原大路(東工大, ISAS/JAXA), 笠羽康正, 坂野井健, 秋山正幸, 板由房(東北大学), 大藪進喜(徳島大), 川端弘治, 稲見華恵(広島大), 宮田隆志, 上塚貴史, 左近樹(東京大), 津村耕司(都市大), 成瀬雅人(埼玉大), 芝井広(大阪大), Shiang-Yu Wang, 大山陽一(ASIAA), 他SMIコンソーシアム

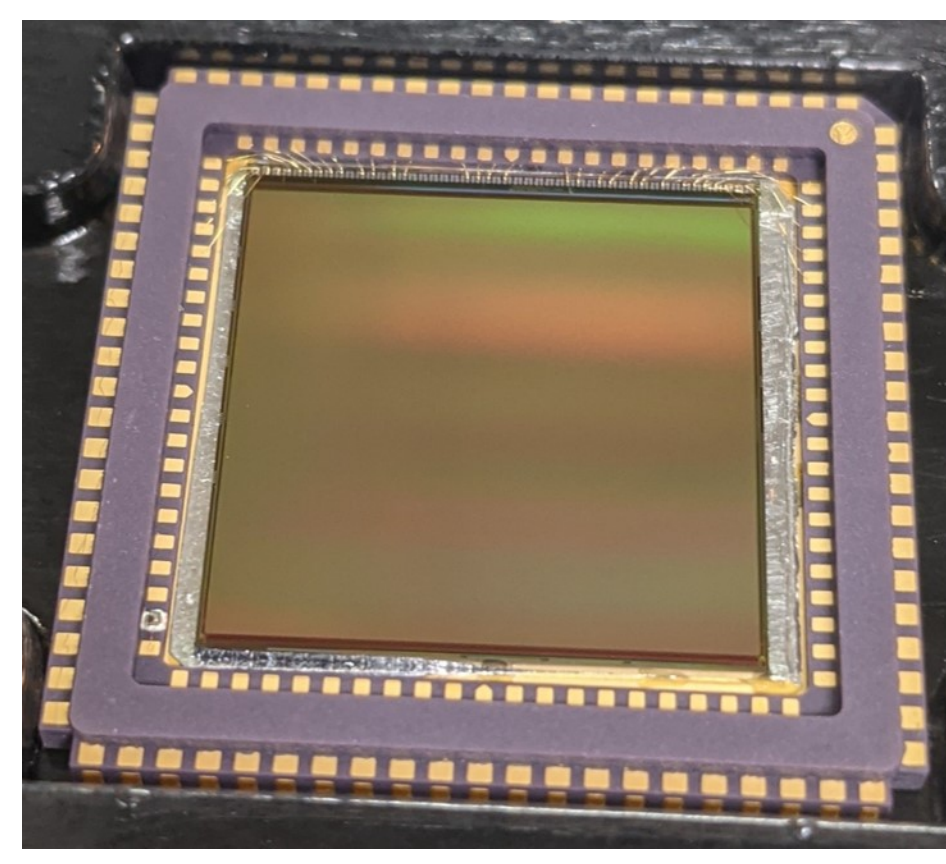
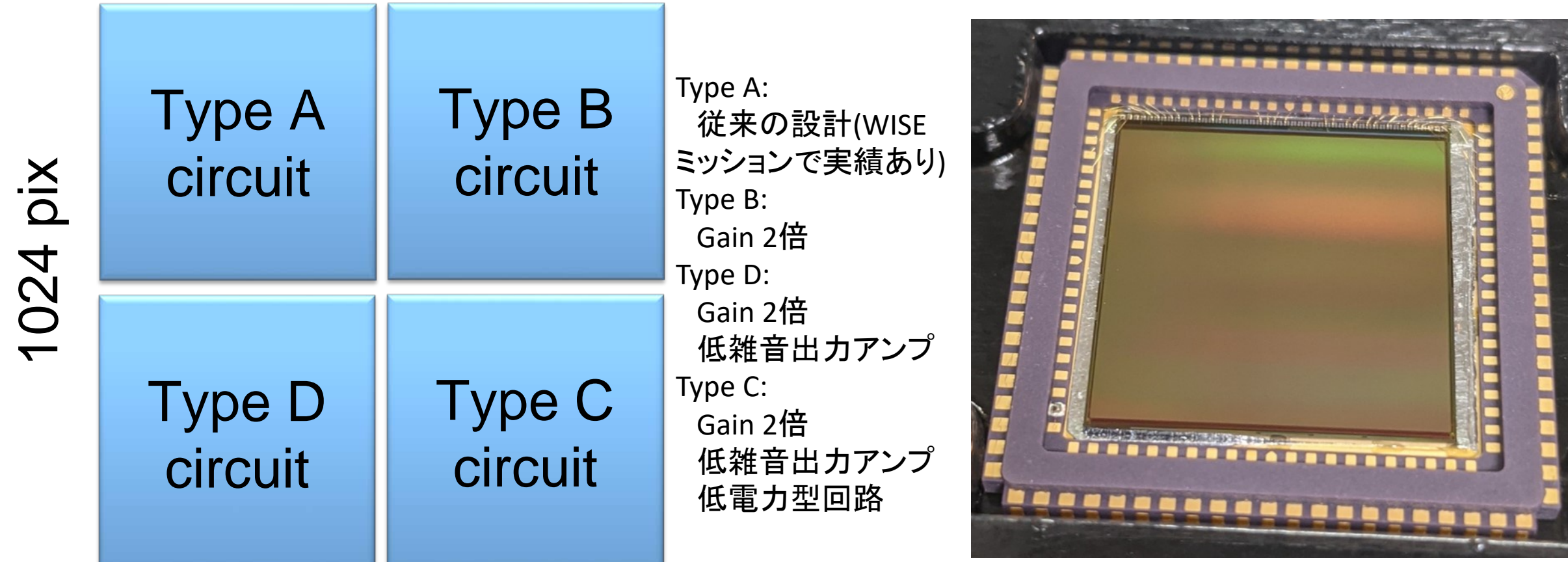
## 概要

宇宙からの赤外線天文観測では、地上からの観測では得られない低背景放射環境により、飛躍的な感度向上が見込めるが、低雑音かつ小型軽量の観測装置の開発が必要となる。また、今後主流になる無冷媒冷却系によるミッションでは低発熱であることが必須となる。我々は、SPICA搭載中間赤外線観測装置SMIの実現のために、低発熱・低雑音な検出器技術、小型軽量な分光素子技術等の開発を進めてきた。その成果を紹介する。これらの技術は、今後の赤外線天文ミッションに広く応用可能である。

## 検出器系

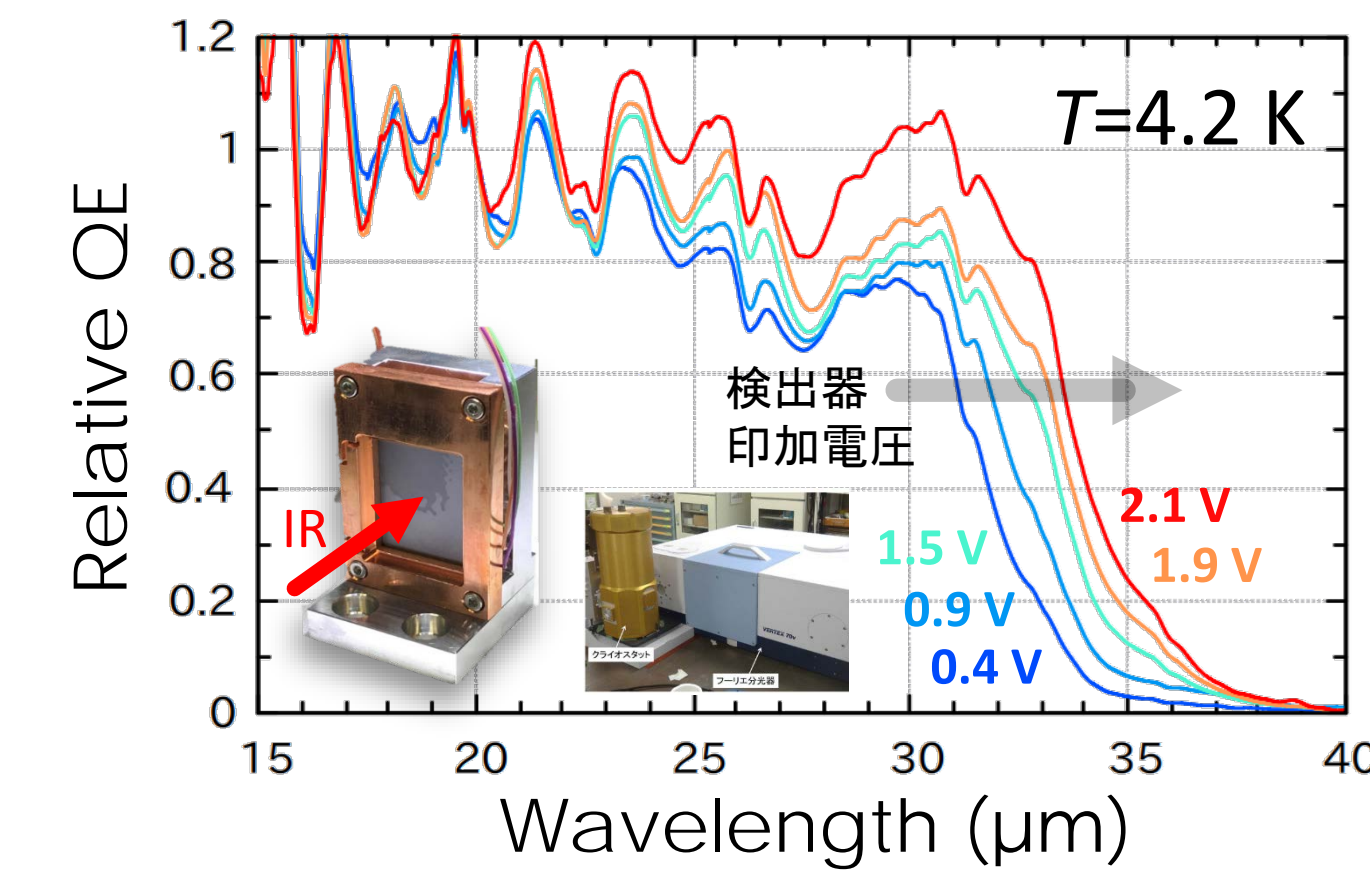
### ■ 極低温低雑音読出集積回路 (low-noise ROIC)

極低温で動作させる必要のある、中間赤外線イメージセンサー (Si:Sb製, Si:As製) のための低発熱・低雑音な読み出し集積回路を米国DRS社と共に開発した。5Kでの発熱と雑音はそれぞれ1 mW (Type-C)、50 e<sup>-</sup> (Type-D, Fowler-1 sampling) と目標(WISEミッションでの値の1/2)を達成した。

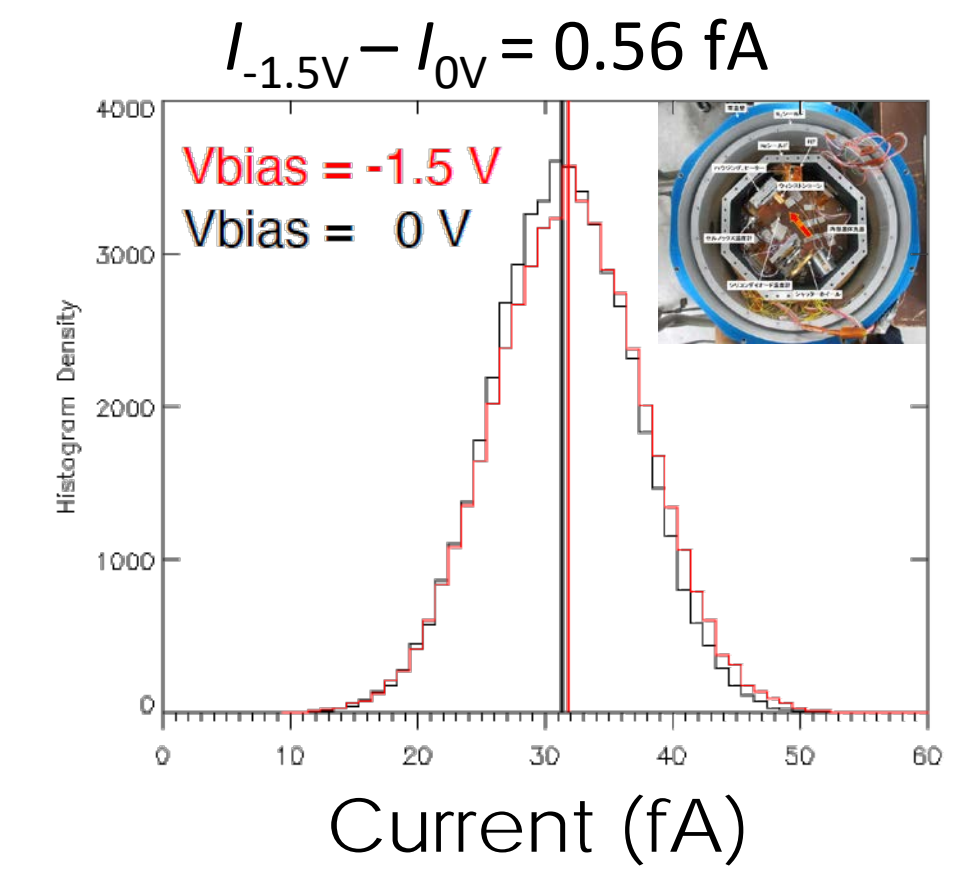


### ■ 高感度中間赤外線検出素子 (Si:Sb 波長17-37 μm)

#### 1) 量子効率(相対)の波長依存性



#### 2) 暗電流量 @4.2 K

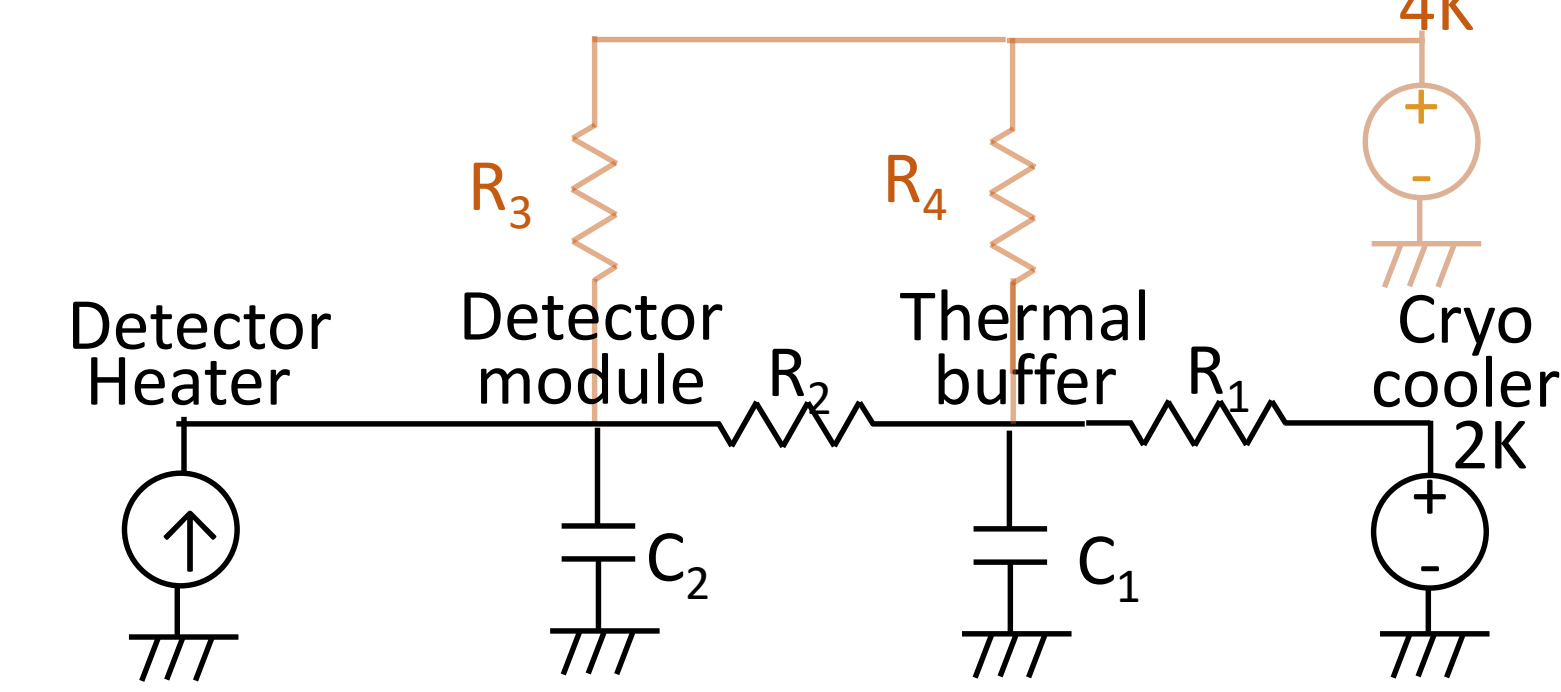


中間赤外線波長帯に高感度な赤外線検出器\*をDRS社と開発。検出器に印加する電圧を上げることで、期待通りに長波長側の量子効率の上昇を実証した。また、暗電流量は0.6 fAと要求(<8 fA)を満たした。  
\* Si半導体にSbを添加した Blocked Impurity Band (BIB)-type Si:Sb 検出器

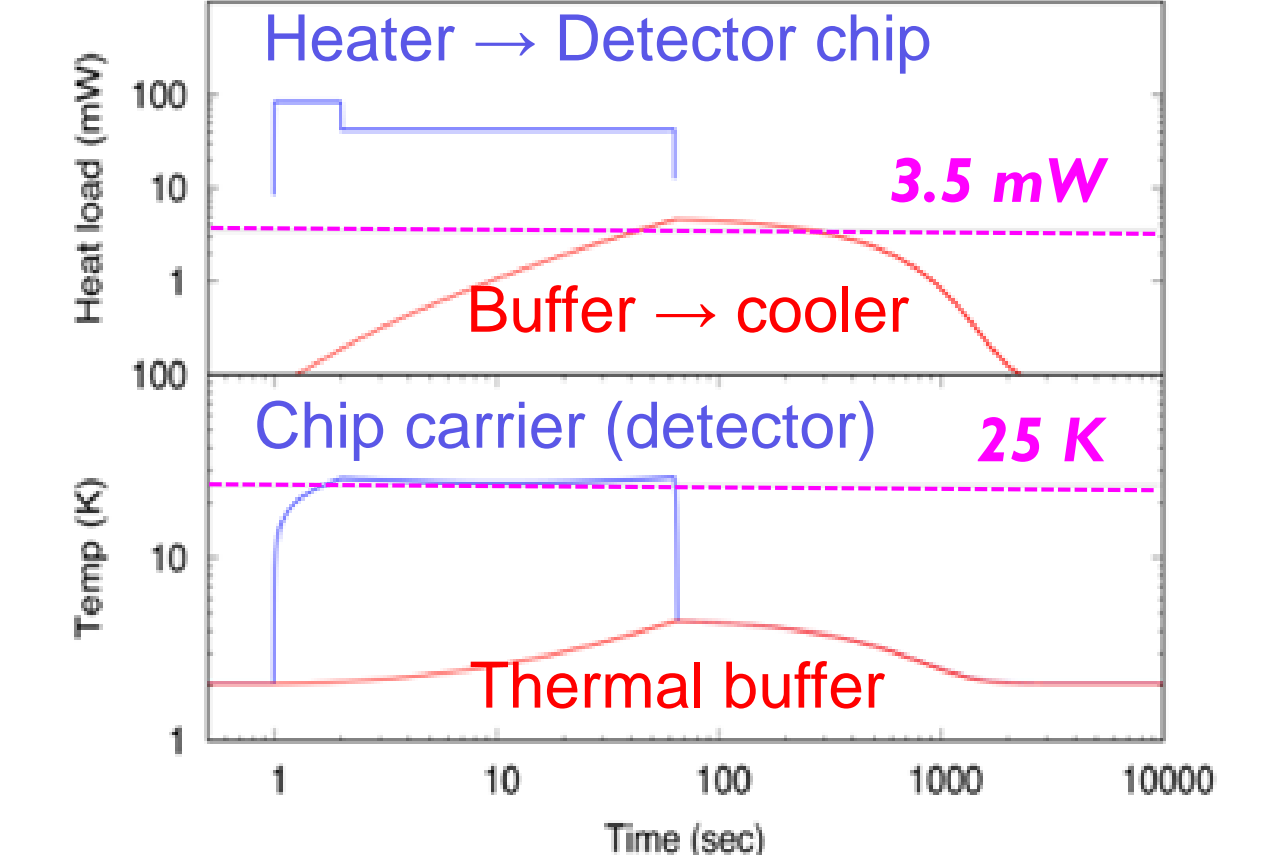
### ■ 宇宙放射線損傷を回復可能とする検出器モジュール

宇宙放射線損傷により暗電流が増加した画素は、運用温度の5Kから20 Kまで昇温することで回復できる。検出器だけを局所的に20Kに昇温しつつ、冷凍機への最大熱負荷を3.5 mWまで抑えるために、極低温で比熱の高い磁性蓄冷材 (ErNi) を熱バッファとして熱回路に導入し、検出器モジュールの構造体として実装する。

検出器モジュールの熱回路

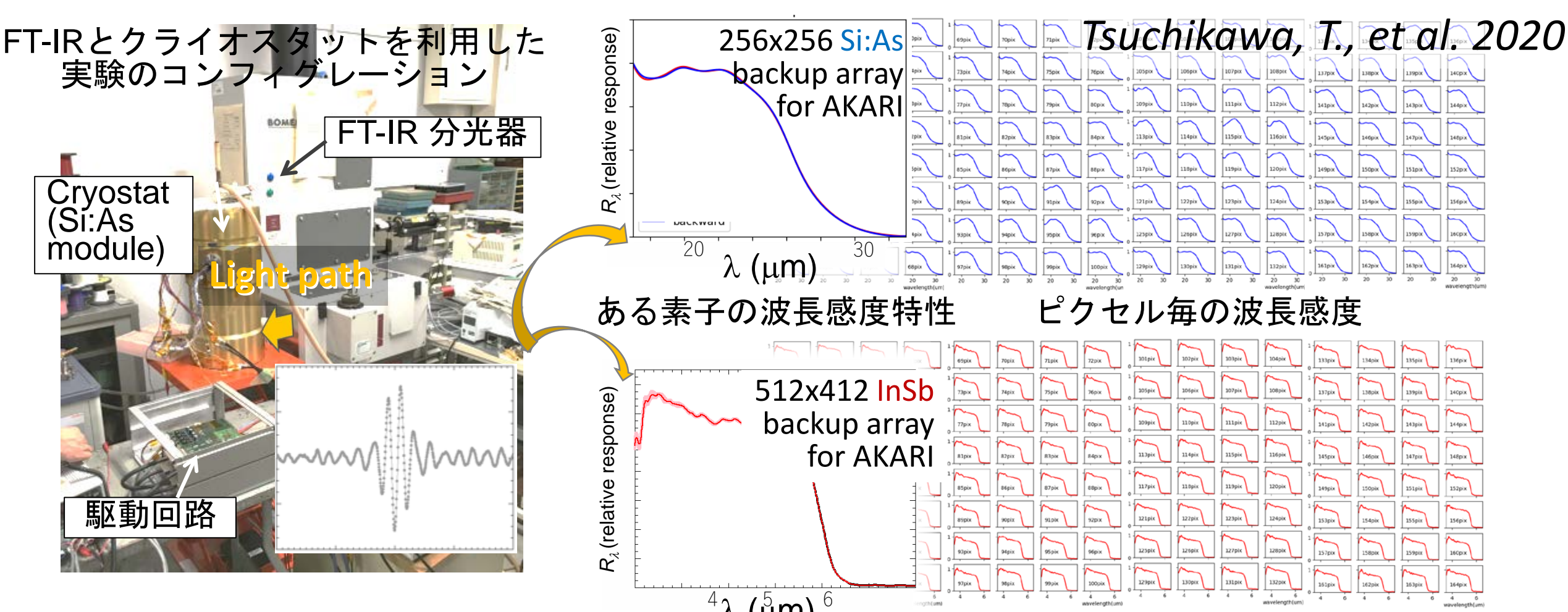


アノリング時の温度プロファイル



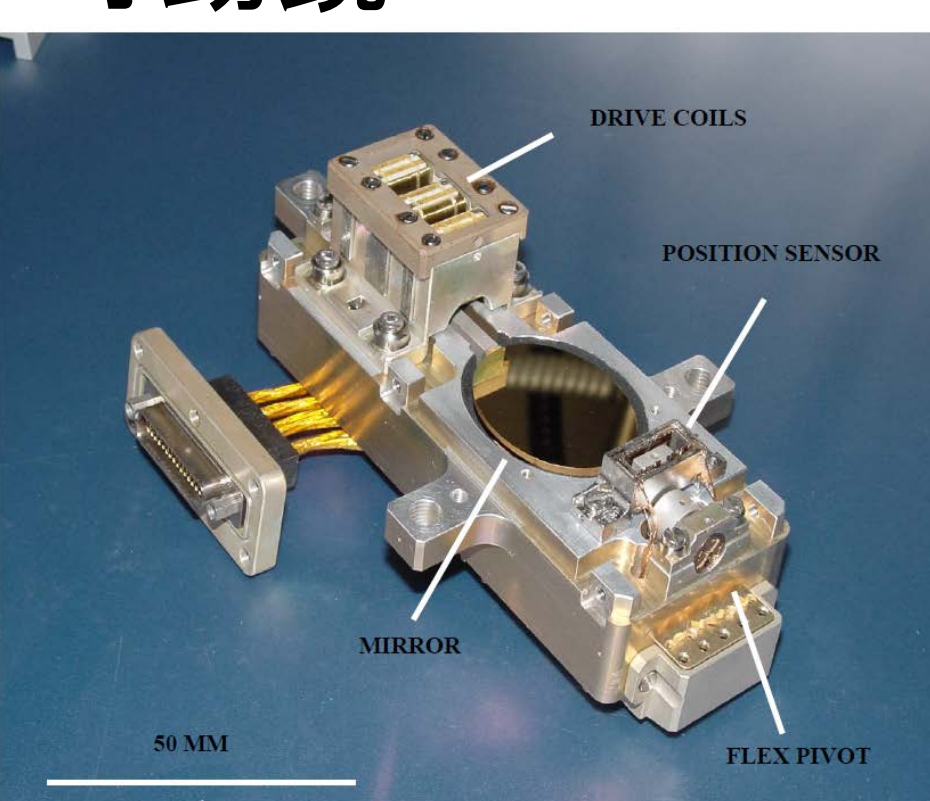
### ■ イメージセンサー全画素の波長感度把握

SMIでは広視野高分散分光を効率よく行うためイメージセンサーを用いる。従来ミッションでは全画素共通の波長感度特性を仮定していたが、全画素それぞれの波長感度特性を測定する方法を確立し、高精度校正を実現した。



## 可動鏡

## メカトロニクス

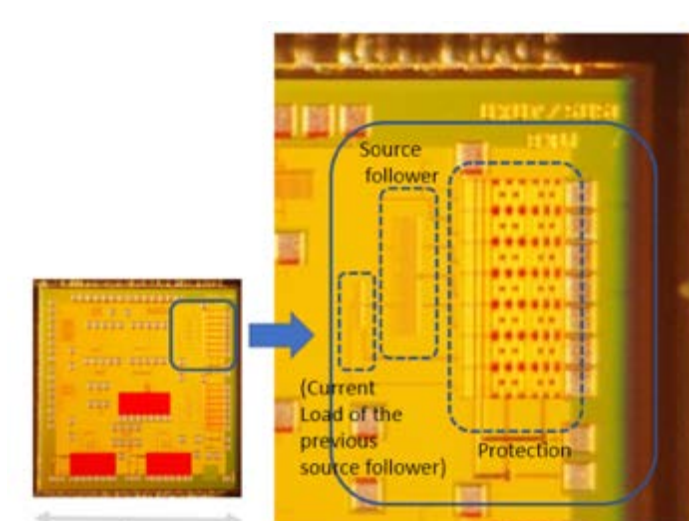


Herschel PACS用に開発された chopper\* をベースに概念検討を行い、SMIのφ50mmの可動鏡が所定の発熱 (1mW) で実現可能であることを検証した。また、同じコンセプトがSAFARI可動鏡のBBMで実証されていることを確認した。

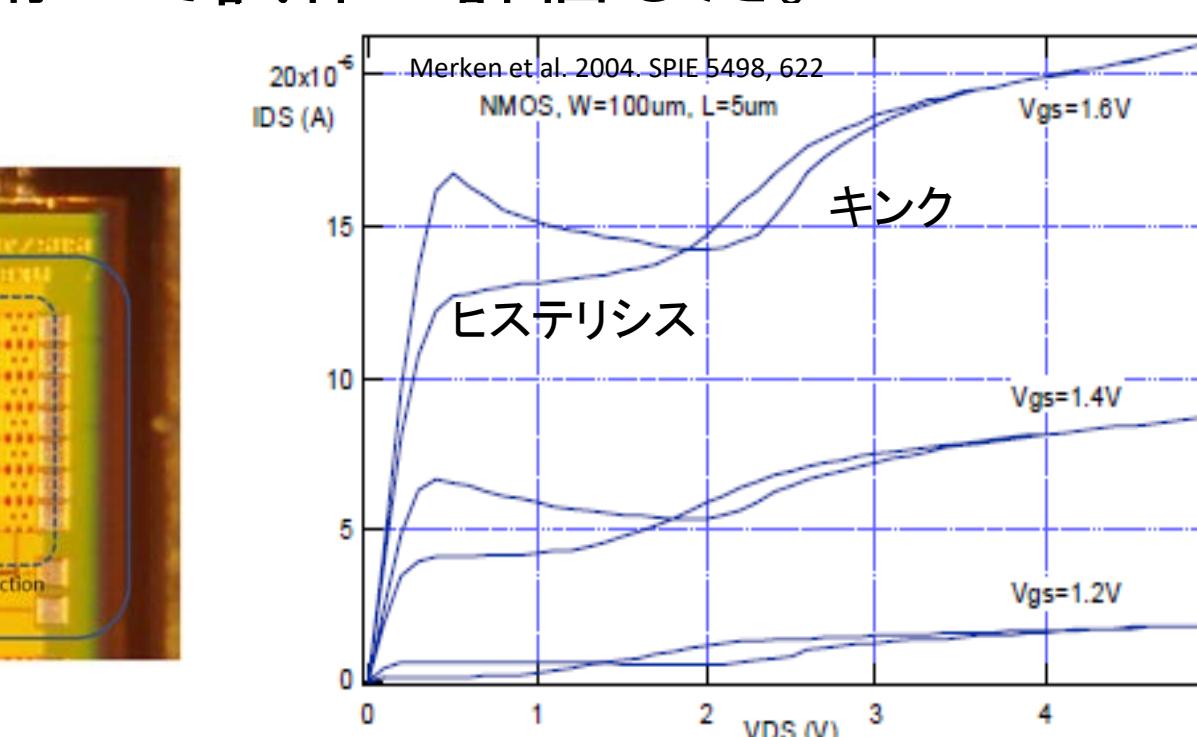
(\* Krause et al., 2006, SPIE, 6273, 627325)

### ■ 極低温用アンプ

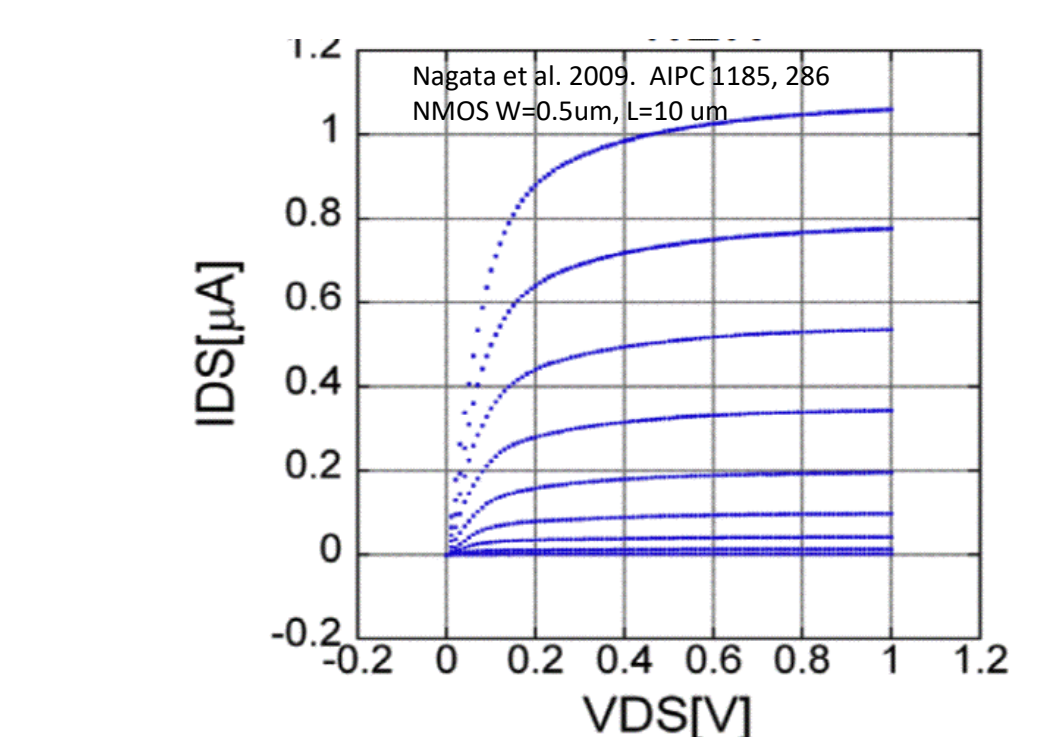
極低温でも動作するアンプをFully Depleted Silicon On Insulator (FD-SOI) 技術を用いて試作・評価した。



試作チップの写真とアンプ部分の拡大図



従来のMOSFETのI-V特性(温度 4K)。ヒステリシスやキンクが見られるため、アンプ回路が複雑となり低発熱性の実現が困難。

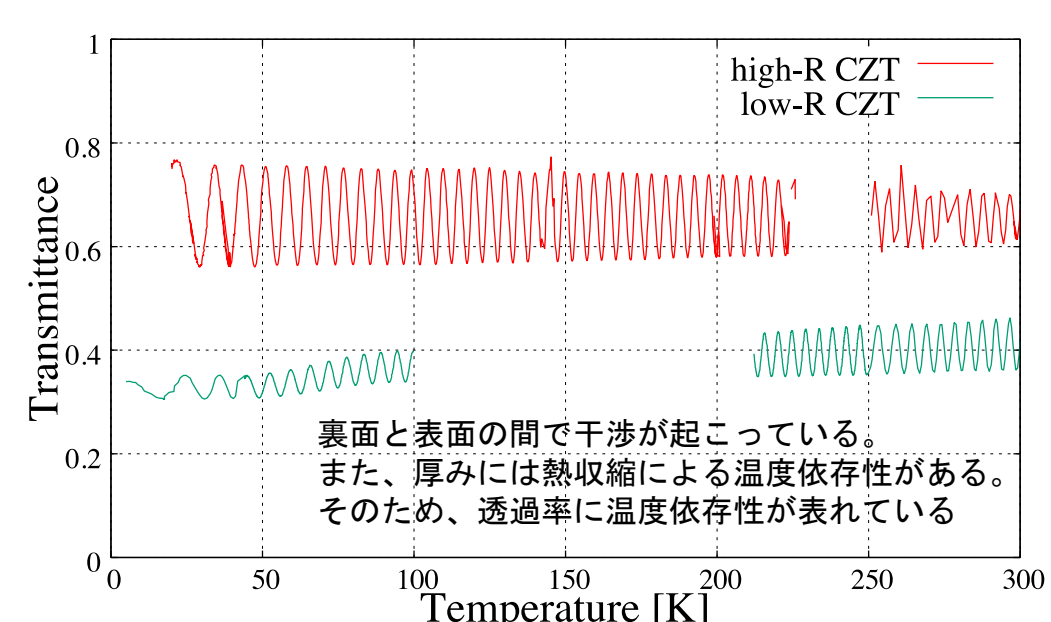
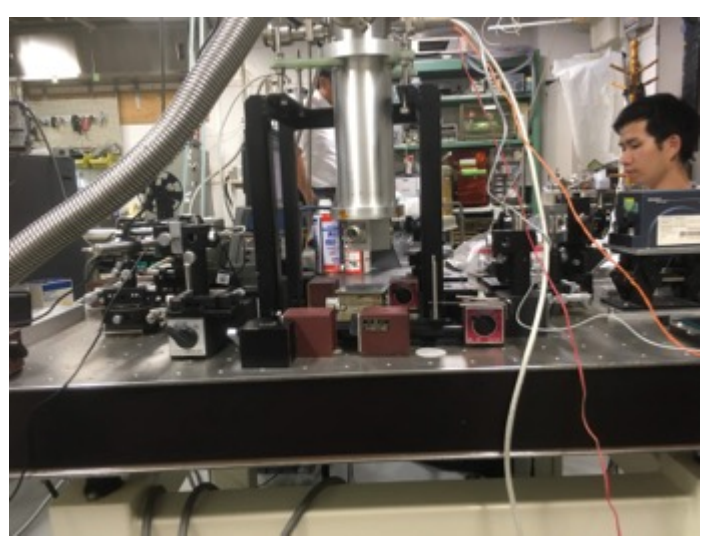
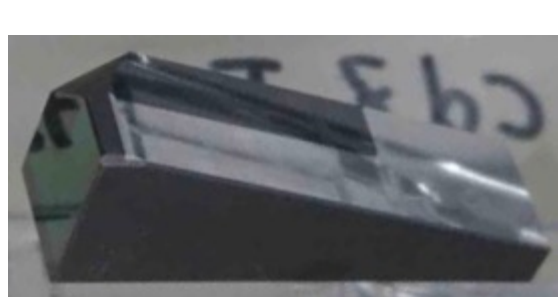


FD-SOI MOSFETのI-V特性(温度 4K)。極低温でもヒステリシスやキンクが少なく、シンプルな回路低発熱なアンプが実現できる。

## 光学系

### ■ 宇宙機搭載用のコンパクトな高分散分光素子 (CdZnTe immersion grating)

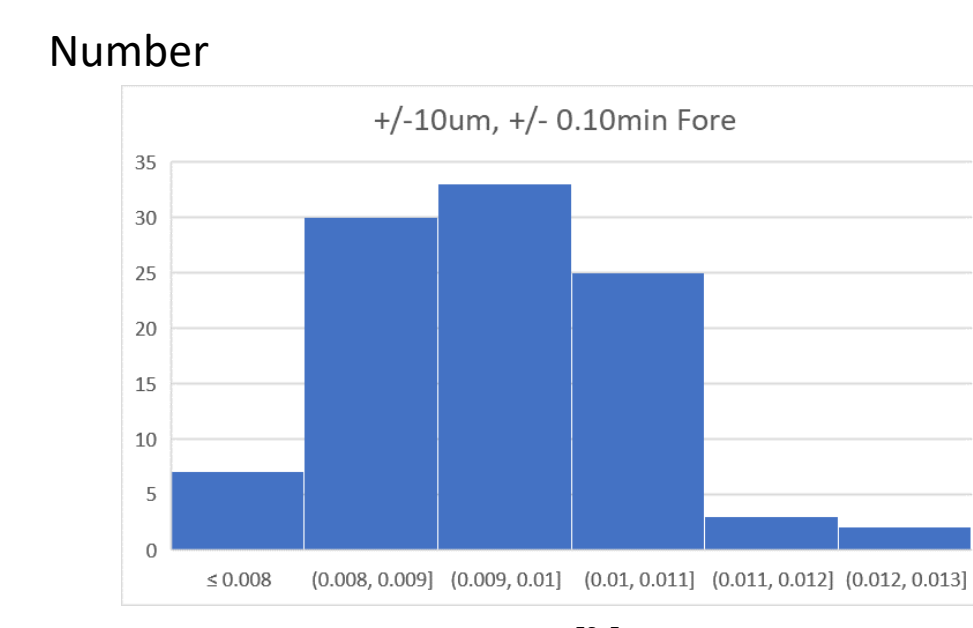
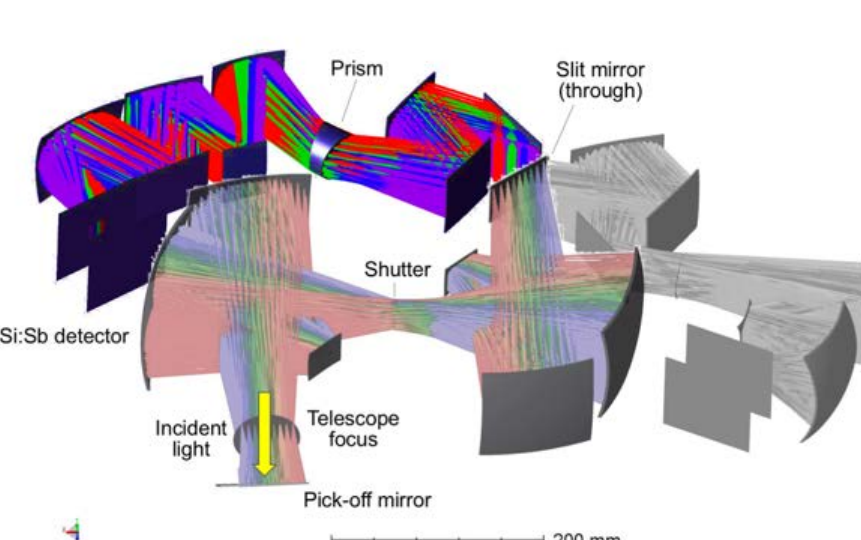
波長10.42 μmでの平板の透過率(厚み10 mm)



回折格子高屈折率 (n) の材料で満たすことで、従来の回折格子の 1/n のサイズで、同じ波長分解能を得ることが可能である。高屈折率材料である、CdZnTe の吸収係数を極低温で測定し、高い抵抗率 (high-R) を持つ CdZnTe が低温赤外光学系で用いる材料として有望であることを実証した。

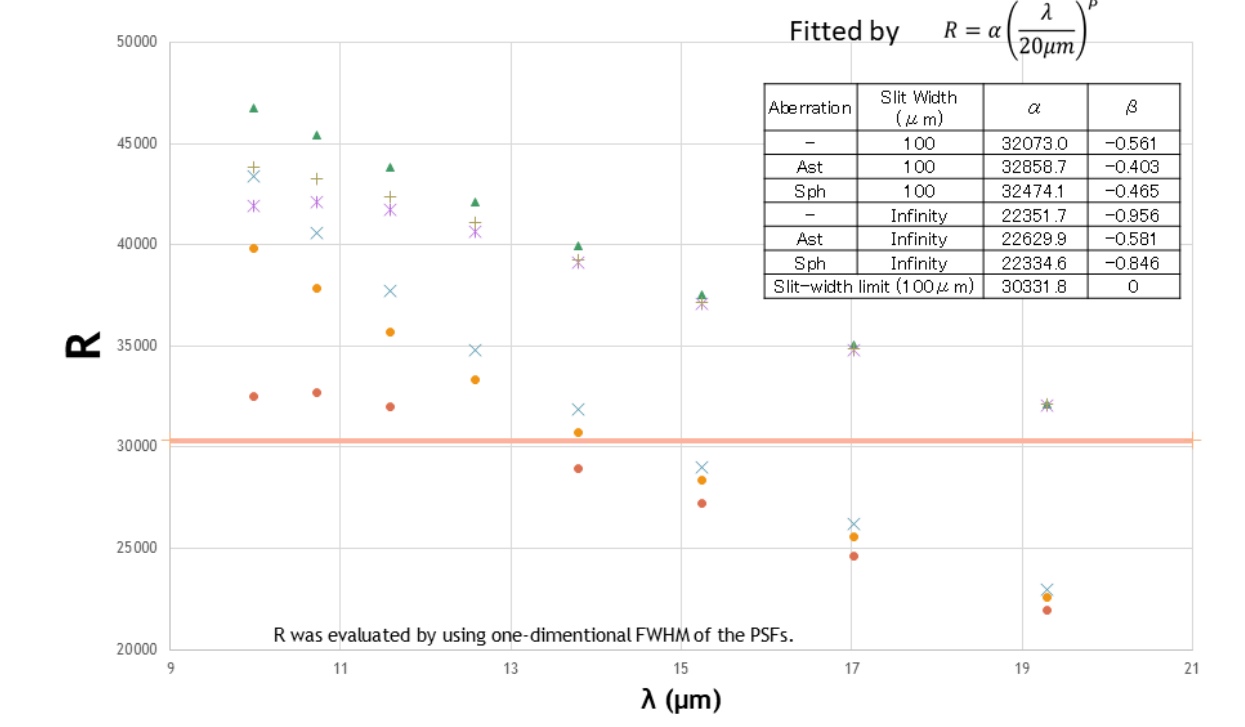
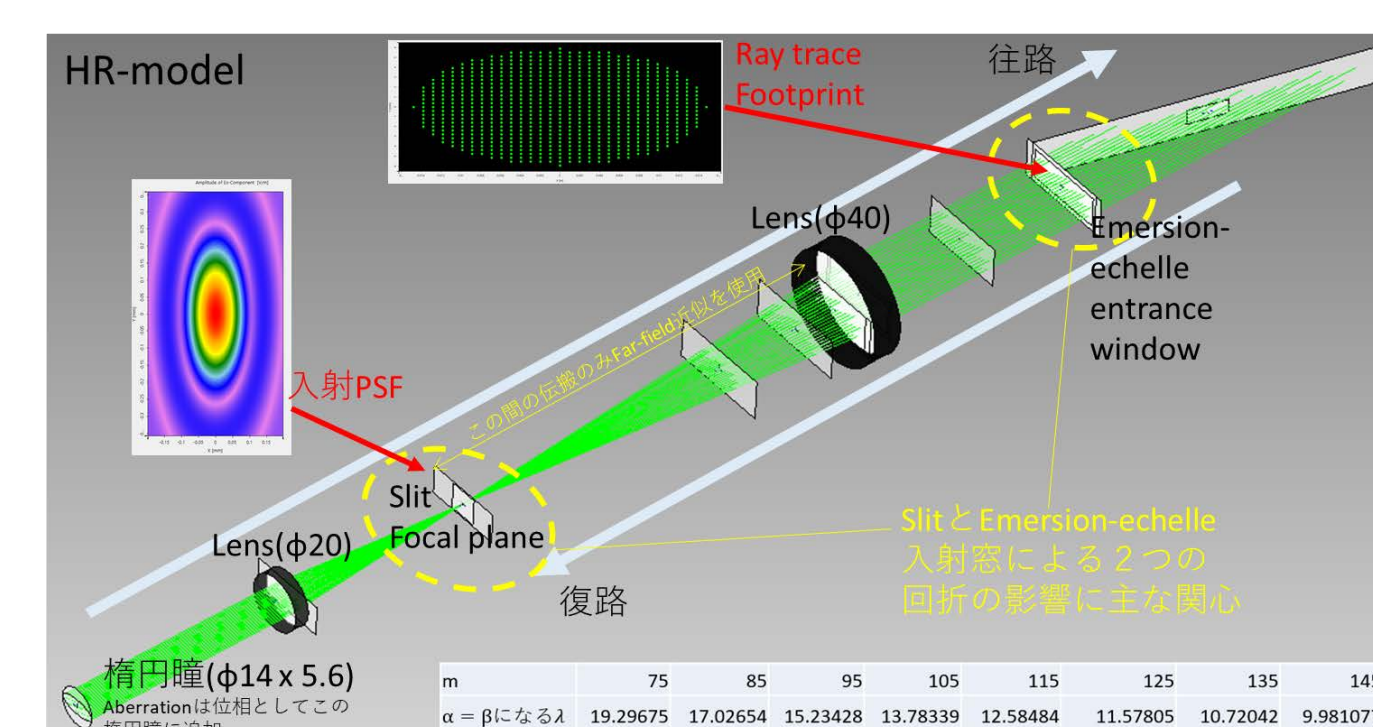
### ■ 光学素子のアラインメント

SMIは自由曲面鏡反射光学系を用いており、要求光学性能の達成には精密なアラインメント (~10 μm, ~0.1分角) が必須である。最も要求精度の厳しい広視野低分散分光系 (LR) において、具体的な組み立て手順を確立するために各鏡の設置誤差に対する公差解析シミュレーションを実施し、要求設置精度を推定した。今後、常温での設置試験を予定している。



### ■ 実際の波長分解能の推定

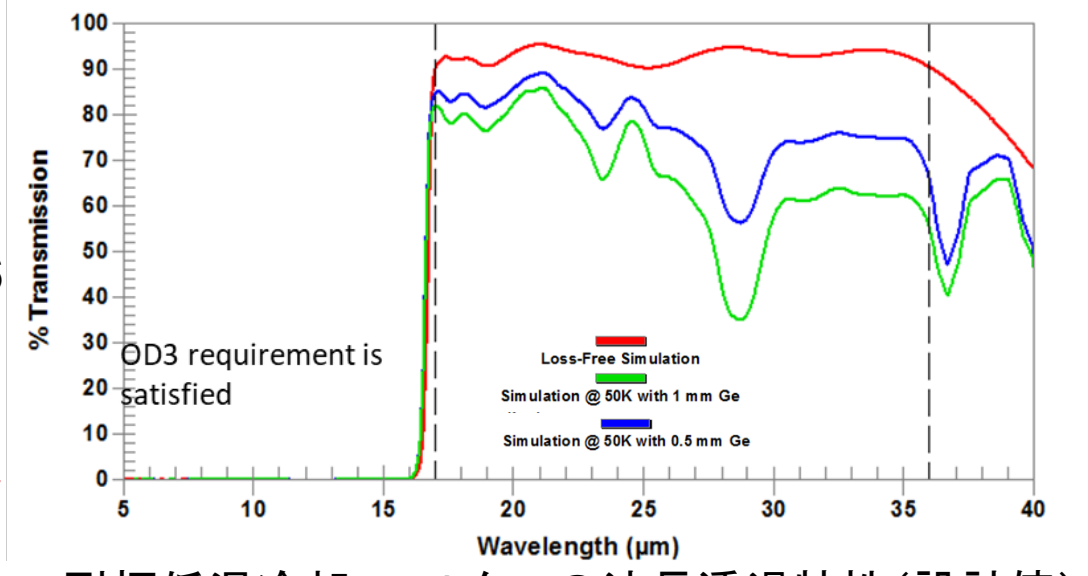
宇宙機搭載用のコンパクトな回折格子を用いる場合、点像の波長分散方向への広がりへの評価には、望遠鏡や分光スリットによる回折、光学系の波面収差だけでなく、回折格子の有限な大きさによる回折効果も含めた、これら全ての影響の複合を考慮しなければならない。そこで、コンパクトな高分散分光器モデルに関して、波動光学に基づくシミュレーションを実施し、回折を考慮した点像サイズと、それに基づく波長分解能を導出に成功した。



### ■ 中間赤外線帯の光学フィルタ

30 μm帯の干渉フィルタは、材料の制限と冷却時の熱膨張率の差による破壊のため、実現が困難であった。基板材料として従来のSi (CTE~3 x 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>) でなく、より薄膜材料 (PbTe, CdSe) に近いCTEを持つGeを用いることで、極低温冷却に耐えるフィルタを設計試作し、実際に複数の冷却サイクルに耐えることを確かめた\*。

\* 森脇裕貴 卒業研究 広島大学 2020



耐極低温冷却フィルタの波長透過特性(設計値)

PbTe (n~5.5, CTE~ 9 x 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)  
CdSe (n~3.3, CTE~ 6 x 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)  
Ge (n~4.0, CTE~ 6 x 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)

耐極低温冷却フィルタの層構成

## まとめ

SPICA/SMI概念検討フェーズでの活動で得られた成果のうち、将来の赤外線観測ミッションにつながる技術について紹介した。将来の高感度赤外線観測ミッションでは、日本が世界に先駆けて実証した機械式冷凍機を用いた無冷媒冷却ミッションが主流となる。無冷媒冷却ミッションでは、低発熱、低雑音であることが必須である。SMIでは世界初の無冷媒冷却赤外線望遠鏡"SPICA"の搭載条件を満足すべく、低発熱・低雑音の検出器、低発熱の可動鏡技術を開発した。また、大口径冷却望遠鏡実現の障害となるのはコストである。今後の低コスト化に向け、観測装置は、冷却可能であるだけでなくコンパクトである必要がある。さらに、口径に頼らずサイエンスに必要な感度を達成するには、高効率化が必要がある。SMIでは冷却化での性能達成が容易で、コンパクトかつ高効率な光学系、光学素子の開発を行った。これらの技術を用いて、新たな赤外線観測ミッションを創出したい。