

平成 24 年度 TMT 戦略基礎開発研究経費

MICHI(Mid-Infrared Camera, High-disperser, and IFU)の要素技術開発 報告書

装置開発研究グループ名： MICHI team

研究組織：

本田充彦 (神奈川大学)

Chris Packham (University of Texas, San Antonio)

Mark Chun (University of Hawaii)

Alan Tokunaga (University of Hawaii)

岡本美子 (茨城大学)

片坐宏一 (ISAS/JAXA)

山下卓也 (国立天文台) 国立天文台における共同研究者代表

宮田隆志 (東京大学)

酒向重行 (東京大学)

中村友彦 (東京大学)

上塚貴史 (東京大学)

左近樹 (東京大学)

尾中敬 (東京大学)

藤吉拓哉 (国立天文台)

1. 予算執行内容

本研究では TMT 用の中間赤外線観測装置として提案している MICHI (Mid-Infrared Camera, High-disperser, and IFU) の実現に向けて、その要素技術の開発・検討を進めた。以下の大きく 4 つの要素技術開発を進める中で、平成 24 年度経費として以下の様に予算を執行した (総額 4899910 円)。

(1) 中間赤外昼間観測可能性の評価 (Chun, 本田, 他)

・ Materion 社製 589nm 狭帯域フィルター(MIRAO 昼間波面計測実験用) 2 枚 1,258,000 円

(2) 冷却チョップパの技術検討 (本田、中村、宮田)

・ (株) センテンシア TMT/MICHI 用冷却 chopper 要素技術検討 971,250 円

・ (株) センテンシア TMT/MICHI 用冷却 chopper 要素技術の実現性検討 670,750 円

(3) MICHI 用イメージスライサーの開発 (左近、尾中、片坐、岡本)

・ クリスタル光学 小型フォーマット一体型スライス&スリットミラー試作 997,500 円

(4) 大フォーマット中間赤外検出器駆動のための基礎開発 (酒向、上塚)

・ 電子部品 (高精度 ADC 等) 504,000 円

・ 電源装置、ネットワーク装置 443,205 円

・ 電子部品 (FPGA チップ, 受動電子部品) 55,205 円

2. 24 年度経費による成果および計画全体の進捗状況

(1) 中間赤外昼間観測可能性の評価 (Chun, 早野, 藤吉, 本田, 他)

TMT では観測時間の有効利用策として、中間赤外昼間観測の実現が検討されている。しかし実際に昼間に夜間と同等な観測が定常的に可能か、そのためにどのような工夫をすべきか、は必ずしも明らかではない。特に、TMT の高空間分解を生かした意義ある観測をするためには、中間赤外補償光学 MIRA の利用は必須である。MIRA では波面計測に可視および近赤外線を用いることを考えている。可視域での光波面の測定には上空に 589nm のレーザーを打ち上げて、ナトリウム原子を励起させて作る人工のガイド星を用いるが、非常に細い狭帯域フィルターを用いれば、昼間でも背景の大気光を十分に抑制でき、589nm のレーザーガイド星を用いての波面計測が可能であるとの原理的指摘がある(Beckers, J., 2008, Proceedings of SPIE, 6986)。そのため、一つの鍵は昼間のレーザーガイド星可視波面計測が可能であることの実証実験を行う事である。

平成 24 年度では、実証実験を行うための第一歩として、狭帯域フィルタ (中心波長 $589.16 \pm 0.08\text{nm}$, $\Delta\lambda=0.3 \pm 0.08\text{nm}$) の製作を行った。製作に 4 か月程度かかったため、納品が 2013 年 3 月中旬となり、現在納品されたフィルタの実験室での各種計測をハワイ大学ヒロ校の FT-IR 分光器等を用いて始めたところである。

平成 25 年度では、まずは実験室における各種計測・評価を継続し、フィルタが仕様を満たしているかを確認する。その後、およびマウナケア山頂での小型望遠鏡を用いた試験観測を行う予定である。また、すばるの AO チームのご協力により、AO 188 + LGS を用いた実地試験観測も計画中である。

(2) 冷却チョップの検討・設計・試作 (本田、中村、宮田)

TMT では副鏡チョッピングができないので、副鏡よりも後段でのチョッピングが必要となる (装置内冷却チョップを含む)。地上観測での装置内チョップの開発は世界的に見ても始まったばかりであり、満足できるものはまだ存在しない。本研究では既存の装置内チョップの問題点を機構・観測データの両面で精査し、TMT 用に利用できるシステム開発を進めることが目的である。

H24 年は主に問題点の整理、および既存のチョップにとらわれず、網羅的に検討を行い直すことを主眼に、株式会社センテンシアを通じて、TMT/MICHI 用冷却 chopper 要素技術検討を行った。これは、アクチュエータとして、これまで候補としてきたボイスコイルやピエゾ以外にどのような技術的選択肢があり得るか? またチョップの方式についても、ミラーを傾ける方法以外に実現可能性があるかを探った。その結果、アクチュエータやチョップ実現方式についてもいくつか多様な可能性があることが分かった (図 1)。例えば、これまで実現されてきた装置から、図 1 B) や F) のような方式を念頭に置いていたが、図 1 C, D) のようなミラースイッチ方式も、原理的にはチョッピングと同様の機能を実現できる。もちろん、これらの実現方式には制御方式やアクチュエータの選択についてトレードオフがあり、今後はそれらとの組み合わせを考えた上での優劣を評価していく予定である。既に一部の解については、(株)センテンシア TMT/MICHI 用冷却 chopper 要素技術の実現性検討を通じて検討を開始した。現在のところ最終結論には至っていないが、次年度はチョップ実現方式、駆動・制御方式についての結論を得ることが目的である。当初計画ではチョップの実現方式として図 1 B) およびアクチュエータにはボイスコイルを用いることを想定していたため、その基礎実験および 1 軸冷却チョップ試験機の設計を行うことを計画していたが、より根本からチョップに関わる技術を網羅的に再検討することで別の解

の可能性が存在することが分かってきたことが本年度の検討の大きな収穫であった。

計画全体としては、平成 25 年度においてチョッパの実現方式、駆動・制御方式についての結論を得、要素試作の設計・検討を実施する予定である。平成 26 年度において、要素試作・試験を行いたいと考えている。同時にその要素試作・試験をふまえて、最終的な試作モデルの設計を行いたいと考えている。平成 27 年度はその試作モデルの製作・試験を行う計画である。

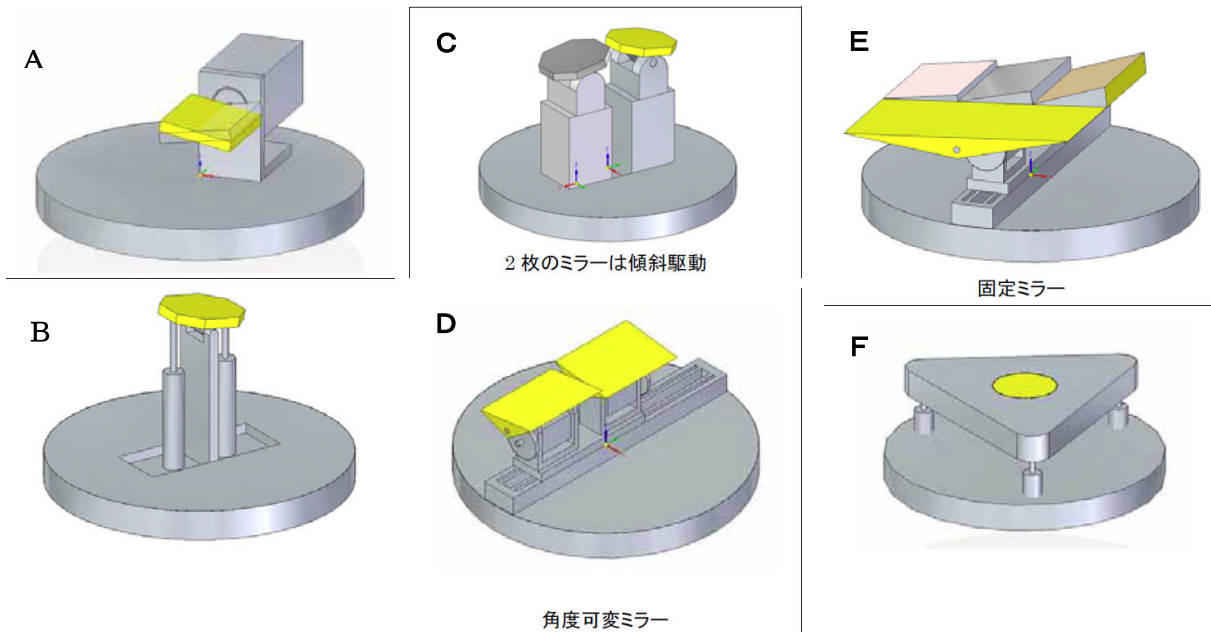


図 1 : 冷却チョッパの実現方式の概念図。A) 台座全体の回転+1つのミラーの傾斜を回転モーターで駆動。B) 台座回転+1つのミラーの傾きを直進制御アクチュエータで駆動。C) 台座回転+2つのミラーを回転で交互にスイッチする方式。D) 台座回転+2つのミラーを直進させて切り替える方式。E) Dの発展形。F) 3点指示で直進制御アクチュエータでミラーの傾きを駆動。E-ELT/METIS の方式はこれである。

(3) MICHU 用イメージスライサーの開発 (左近、尾中、片坐、岡本)

イメージスライサーは MICHU のキーコンポーネントである。MICHU チームではこれまでも中間赤外線イメージスライサーについて検討開発を進めてきているが、本研究でこれをさらに進め、最終的には MICHU に実際に利用できるような大型フォーマット一体型スライスミラーの開発を行うことが本研究の目的である。これまで茨城大学で開発が進められていたイメージスライサーでは、積層型のスライスミラーが採用されているが、その調整の困難さを克服し、より安定した疑似スリット像を得ることが、MICHU 用イメージスライサーの開発における主要な課題である。開発ステップは以下ようになる。

- (a) 一体型のスライスミラーの製作の技術実証を得る事。
- (b) 瞳ミラー及びスリットミラーを併せて製作し、イメージスライサー主要ユニットの組上げを行う事。
- (c) 組み上げたユニットを用いて、疑似スリット像の結像性能およびスリット効率の視野位置や波長への依存性を詳しく調査し、TMT/MICHU 用の大型フォーマットイメージスライサーの設計仕様や加工方法、要求精度へのフィードバックを得る事。

(d) TMT/MICHI の光学設計結果に基づき、イメージスライサー部のプロトタイプを製作し、加工精度や疑似スリット像の結像性能を評価し、MICHI 用のイメージスライサーの技術的な実証を得る事。

平成24年度は、小型フォーマット(スライス数5枚)のイメージスライサーの主要素子の設計と試作を行った(上記開発ステップの(a)と(b)に対応)。特に、今回は光学調整の上での安定性を向上させるため、スライスミラーやスリットミラーをそれぞれ一体型で作るだけでなく、スライスミラーとスリットミラーを同一ブロックで加工製作する事を試みた(予算執行項目「クリスタル光学 小型フォーマット一体型スライス&スリットミラー試作」に対応)。技術課題は、極めて細い $184\mu\text{m}$ のミラー幅でのダイヤモンドバイトを用いた超精密鏡面加工と、スライスミラーおよび各スリットミラーの加工において高い位置精度を実現する事であるが、今回の試作では、スライスミラー鏡面の平面荒さとして $Ra < 50\text{nm}$ 、スリットミラー鏡面の平面荒さとして $Ra < 20\text{nm}$ 、また光路方向の加工位置精度として $1\mu\text{m}$ 以下の精度[NewView(Zygo)によるz方向(光の進路方向)の測定値では、スライスミラーは $+0.0\mu\text{m}$ 、スリットミラーは $+0.6\mu\text{m}$ を実現]を得た。

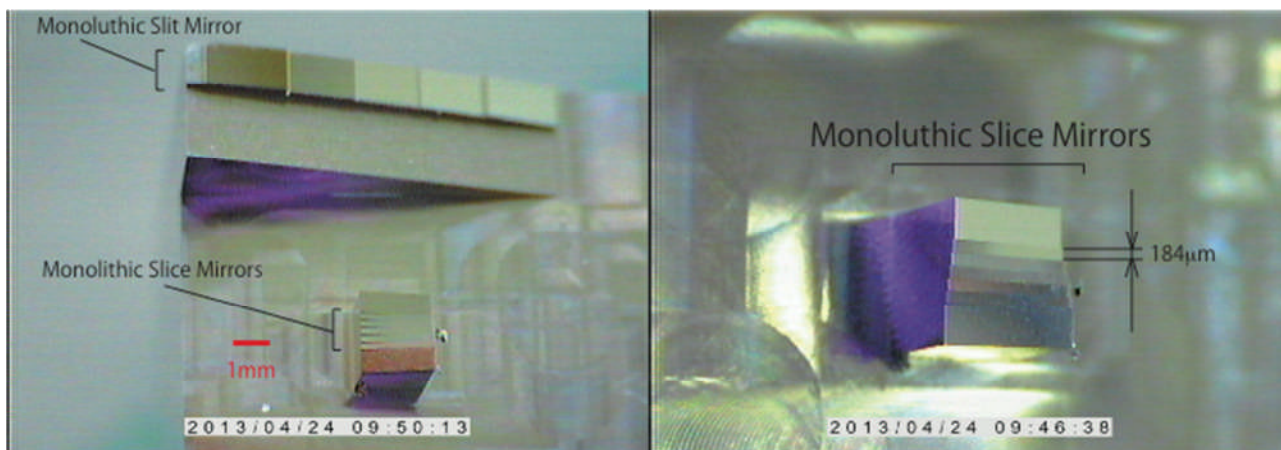


図2. (左)H24年度にナガセインテグレックスのナノセンターN2C-53-S5N5で、ダイヤモンドバイト試作したスライスミラーおよびスリットミラー。スライスミラーの製作にはミラー幅 $184\mu\text{m}$ に併せて製作したダイヤモンドバイトを用いた。光学調整での安定化をはかるために、スライスミラーとスリットミラーは同一ブロックで加工を実施した。(右)一体型スライスミラー部分の拡大図。

同時に、TMT/MICHIの仕様(スライス数22枚)に併せて、大型フォーマット化を進めるに当たって、特にスライスミラーの製作において、切削の際の刃(バイト)の潜り込み量の増大に起因する工具との干渉や加工鏡面の面荒れなどの問題を克服する事が、緊急の課題である事が判明した。

次年度以降は、平成24年度中に別途製作した瞳ミラーと併せて、小型フォーマットイメージスライサーユニットの組み上げを行い、使用波長での疑似スリット像の評価を行うとともに、TMT/MICHIの光学設計結果に沿って大型フォーマットスライスミラーの試作(開発ステップの(c)と(d)の一部に対応)に着手する。

(4) 大フォーマット中間赤外検出器駆動のための基礎開発 (酒向、上塚)

中間赤外線検出器も大型化が進んでおり、MICH I には $2k \times 2k$ または $1k \times 1k \times 4$ 台の検出器を搭載する計画である。このような大フォーマット検出器ではピクセル数が格段に多くなるため、従来より大規模な読み出しシステムを構築する必要がある。本研究では、現在入手可能な最大フォーマットの中間赤外線検出器であるアクエリアス (1k) を用いて MICH I 用の読み出しシステムの開発を行う。H24 年度は読み出しシステムのデジタル部の開発と、20K で動作する FET アンプの基礎実験を実施した。

検出器読み出しシステムのデジタル部の開発

地球大気と望遠鏡による強い背景放射による飽和を防ぐために、検出器を約 30msec/frame ($1k \times 4$ 台の場合 280MB/sec) で連続的に読み出す必要がある。本研究では、このような膨大な画像データを 1 台の PC で逐次処理するデジタルシステムを開発した。80MB/sec (20MHz, 32bit, 2ch) の入力可能な PCIe DMA I/O ボードを 4 枚用いて、データストリームを PC のメインメモリ上のリングバッファに格納する。本研究で開発した逐次処理ソフトウェアにより、これを CoAdd+Chop 処理しながら $280 \times 2 = 560$ MB/sec のレートでハードドライブに途切れなく書き込んでいく。本システムでは RAID0 で構成した 4 台の SSD (最大 250MB/sec/台) を用いることでこの書き込み速度を実現している。同じ I/O ボードを用いて 20MHz, 32bit の出力レートで検出器駆動クロックを生成できるソフトウェアの開発も行った。PC からの入出力信号は、5 セットの 32bit LVDS シリアライザ/デシリアライザリンクにより数 m 離れた場所に設置した検出器ラックの通信ボードと接続される。本研究では 10m ケーブルを用いて LVDS シリアライザ/デシリアライザリンクを含めたデータのループバック試験を実施し、構築したハード+ソフトウェアシステムが設計通りの性能を持つことを確認した。アクエリアス検出器 $1k \times 4$ 台は 1 検出器あたり 256ch の出力線を持つ。本システムでは、これを 256 台の 16bit 500ksps ADC で受ける設計である。本研究では 256 台の ADC の出力データをハンドリングして I/O ボードに送信する FPGA ボードを開発した。本システムのボード各部 (電圧設定やスイッチなど) の制御は USB 経由の I2C シリアル通信 (約 2kB/sec) で行う。USB 経由で I2C デバイスを制御できることも確認した。最後に FPGA から疑似信号を発生させることで、クロック信号の生成から疑似データ生成をへてデータ取得、FITS ファイルの生成に至るデジタル系全体の動作試験を実施し、設計通りの性能が得られることを確認した。次年度は本システムのアナログ部 (プリアンプ、ADC、バイアス電圧生成、クロックレベル生成、出力スイッチ、電圧・電流モニタ) の開発を実施する予定である。

極低温で動作する FET アンプの基礎実験

MICH I の真空冷却デュアは大型のため、検出器マウント部 (7K) から常温部にいたる信号線長は 3m 以上となり、この信号線が持つ浮遊容量は約 500pF に達する。この信号線に 30msec/frame に必要な 2MHz (=500kHz \times 4 マージン), $dV=1V$ の信号を通過させようとする、1ch あたり 1mA の駆動電流が必要になる。アクエリアス $1k \times 4$ 台は 256ch 出力のため、検出器部における発熱 (500mW - 1W) は冷却能力を大幅に超えてしまう。これを低減するには、20K の光学ベンチ上に中継アンプを置くことで、検出器に接続される信号線の浮遊容量を減らす方法が有効である。しかし、一般のシリコン系半導体は 20K 付近でキャリアが凍結するため、この温度帯では正常に機能しない。そこで本研究では、20K 付近で凍結しない Ga:As 系半導体 FET を用いることで 20K に中継アンプ回路設置する試みを行った。今年度は 20K で動作する Ga:As FET の選定と実証実験を行った。結果、Ga:As MESFET SEDI FSU01LG が 20K でも十分に良い特性 (高速性、線形成、安定性) を持つことが確かめられた。また、FSU01LG を用いたソースフォロワ (SF) バッファ回路も良い特性を得ることが確かめられた。次年度は SF 回路を 256ch 化し、20K の環境で並列駆動試験を実施する予定である。