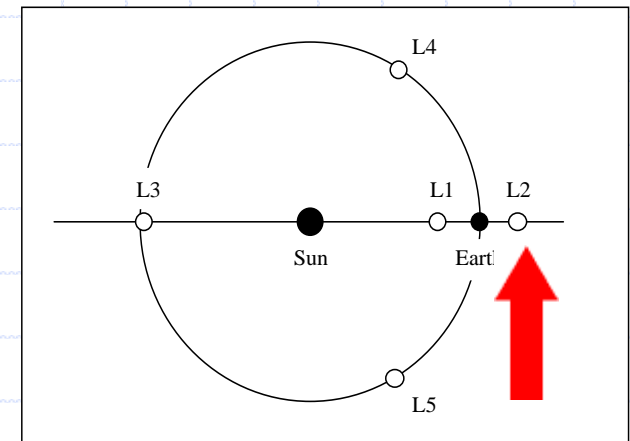
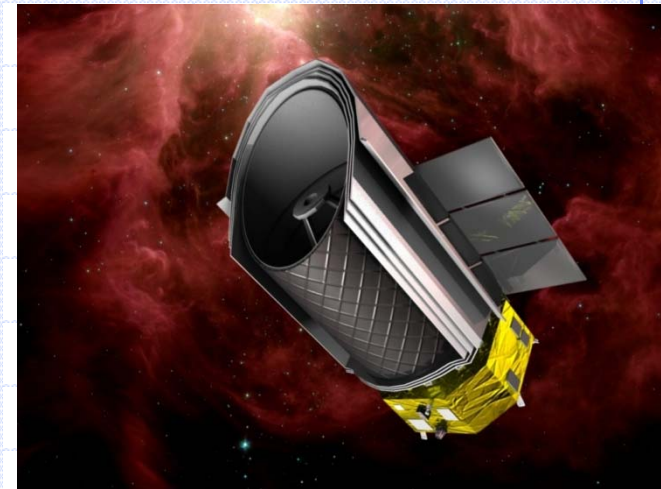


宇宙科学研究所赤外での 観測装置開発

片坐 宏一 ISAS/JAXA

SPICA Mission Overview

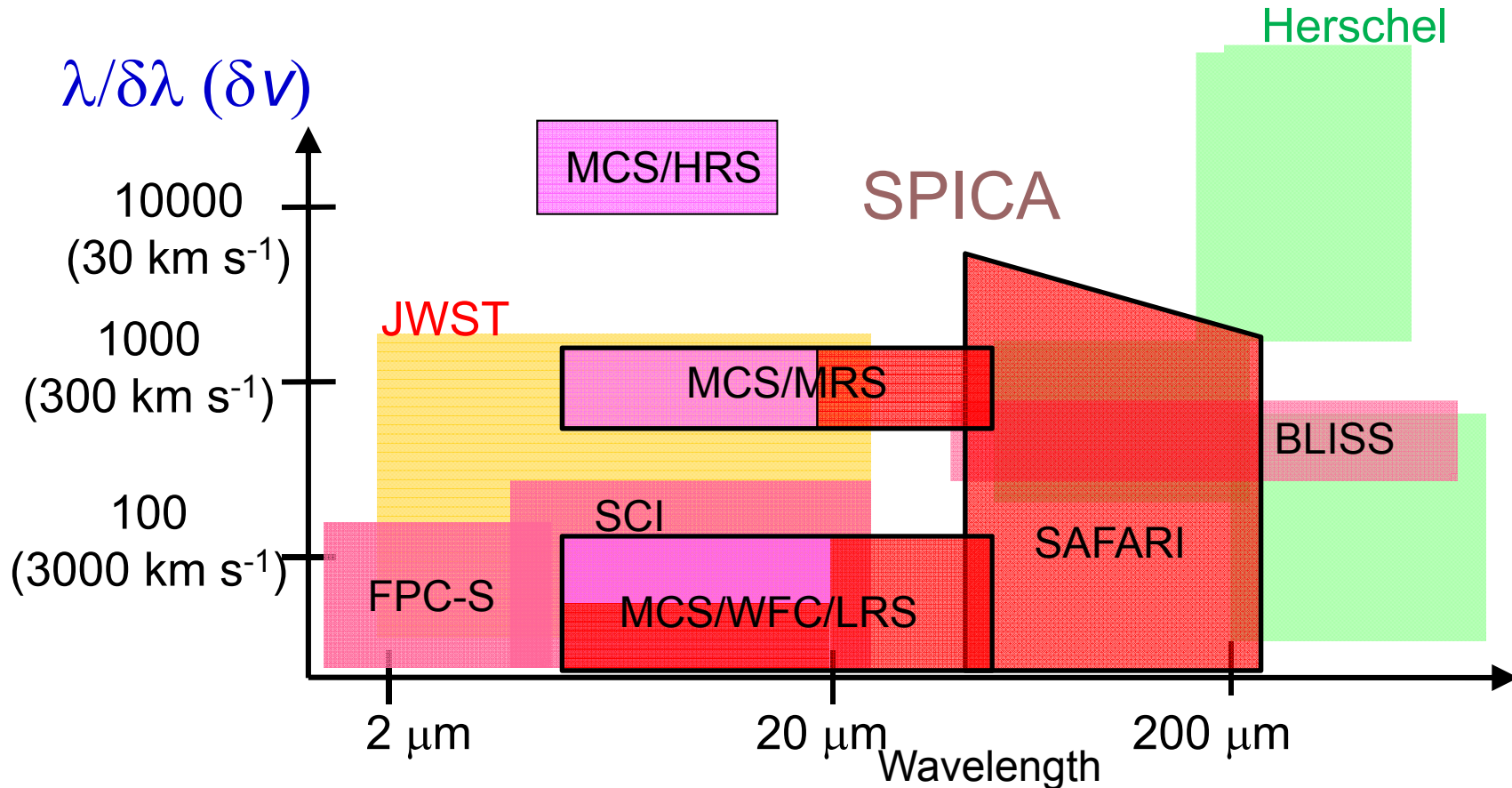
- ◆ Telescope: 3.2m (EPD 3.0m), 6 K
 - Superior Sensitivity
 - Good spatial resolution
- ◆ Core wavelength: 5-210 μm
 - MIR Instrument
 - Far-Infrared Instrument (SAFARI)
- ◆ Orbit: Sun-Earth L2 Halo
- ◆ Mission Life
 - 3 years (nominal)
 - 5 years (goal)
- ◆ Weight: 3.7 t
- ◆ Launch: FY2018 (original plan)
-> early 2020s (2022)
- ◆ International mission
 - Japan, Europe, USA, Korea, Taiwan





Focal Plane Instruments

- Mid-IR Camera and Spectrometer (MCS)
- SPiCA Coronagraph Instrument (SCI)
- SPiCA Far-IR Instrument (SAFARI) European Consortium
- Focal Plane Camera (Guider, Science) FPC Korea



Wavelength coverage vs Resolving Power



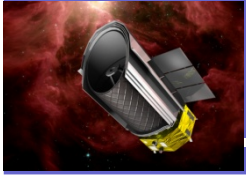
Mid Infrared Instruments on board SPICA

- **MCS : Mid Infrared Camera and Spectrometer**

- Wide field Imaging, mid and high res. spectroscopy
- wavelength coverage : 5-38 μm
- General purpose instrument for all SPICA scientific objectives.

- **SCI : SPICA Coronagraph Instrument**

- Coronagraphic imaging and spectroscopy
- wavelength coverage : 3.5-27 μm
- Dedicated instrument for exoplanets study



Mid-Infrared Camera and Spectrometer

5 -- 38 μ m(--50 μ m) Camera and Spectrometer

- Wide Field Camera

広視野

- 5 arcminutes square FOV x 2, $\lambda\lambda$ 5--25 and 20--38 μ m

- High Resolution Spectrograph

高分解能

- $R \sim 30,000$ $\lambda\lambda$ 12--18 μ m

- Mid Resolution Spectrograph

コア波長域/正確な測定

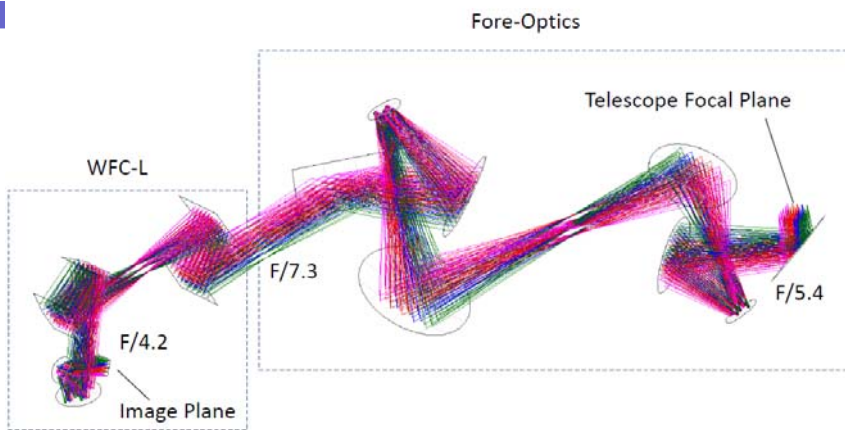
- IFU by image slicer
- $R \sim 1500$ --700 $\lambda\lambda$ (10--20)+(20--36) μ m at once

- Low Resolution Grism Spectrograph in WFC **多天体**

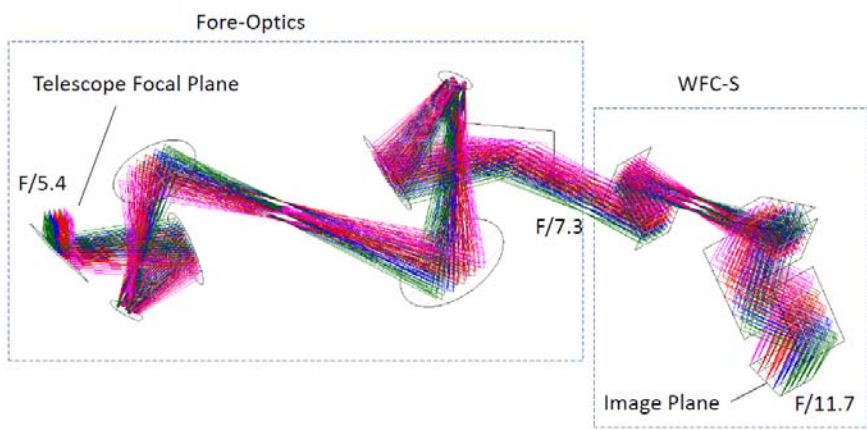
- $R \sim 50$ --100 $\lambda\lambda$ 5-26 μ m and (20-38 or 25-48) μ m

SPICA Telescope

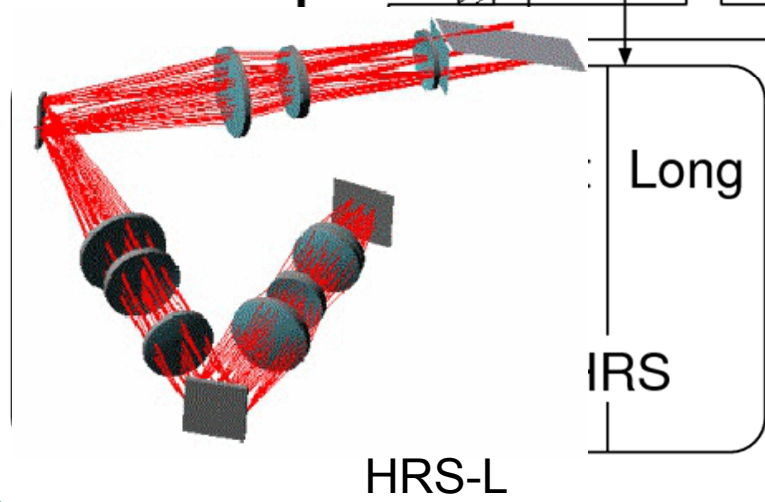
WFC-L 3D View



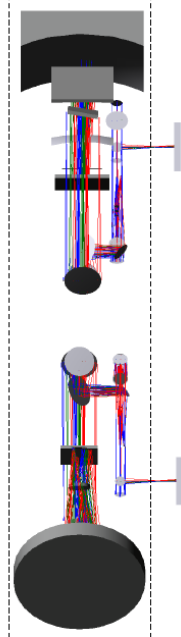
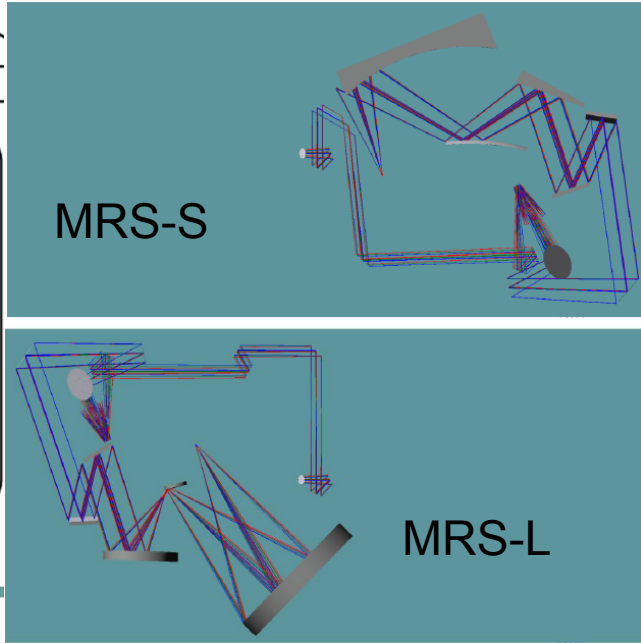
WFC-S 3D View



Fore optics



Fore optics



SCI

Basic optical design was finished

Simplification for a robust design

Deformable mirror is omitted

Focal-plane mask without moving mechanism

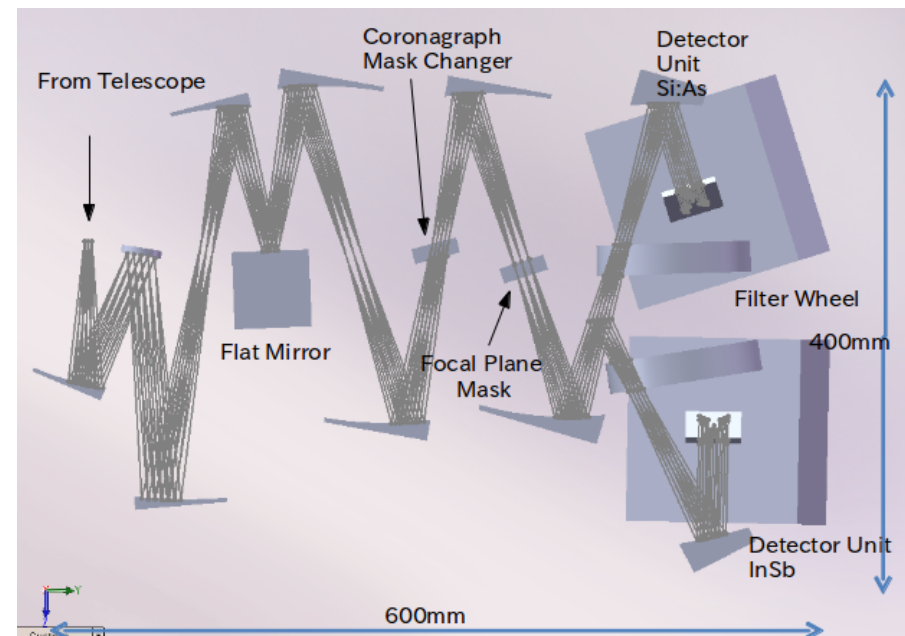
Key technology development

Binary pupil mask

Cryogenic testbed

Diamond turning metallic mirror

SCI simulation software





技術開発

派生・発展

SPICAに直結

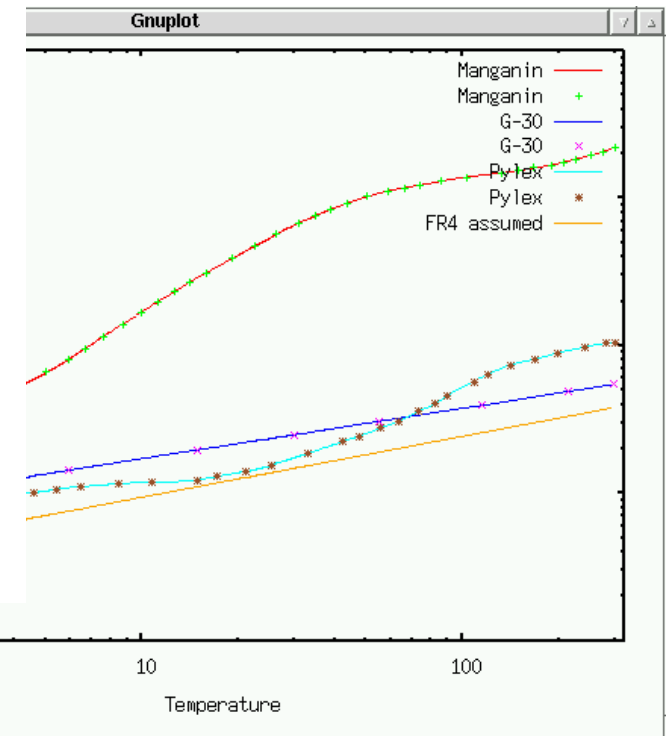
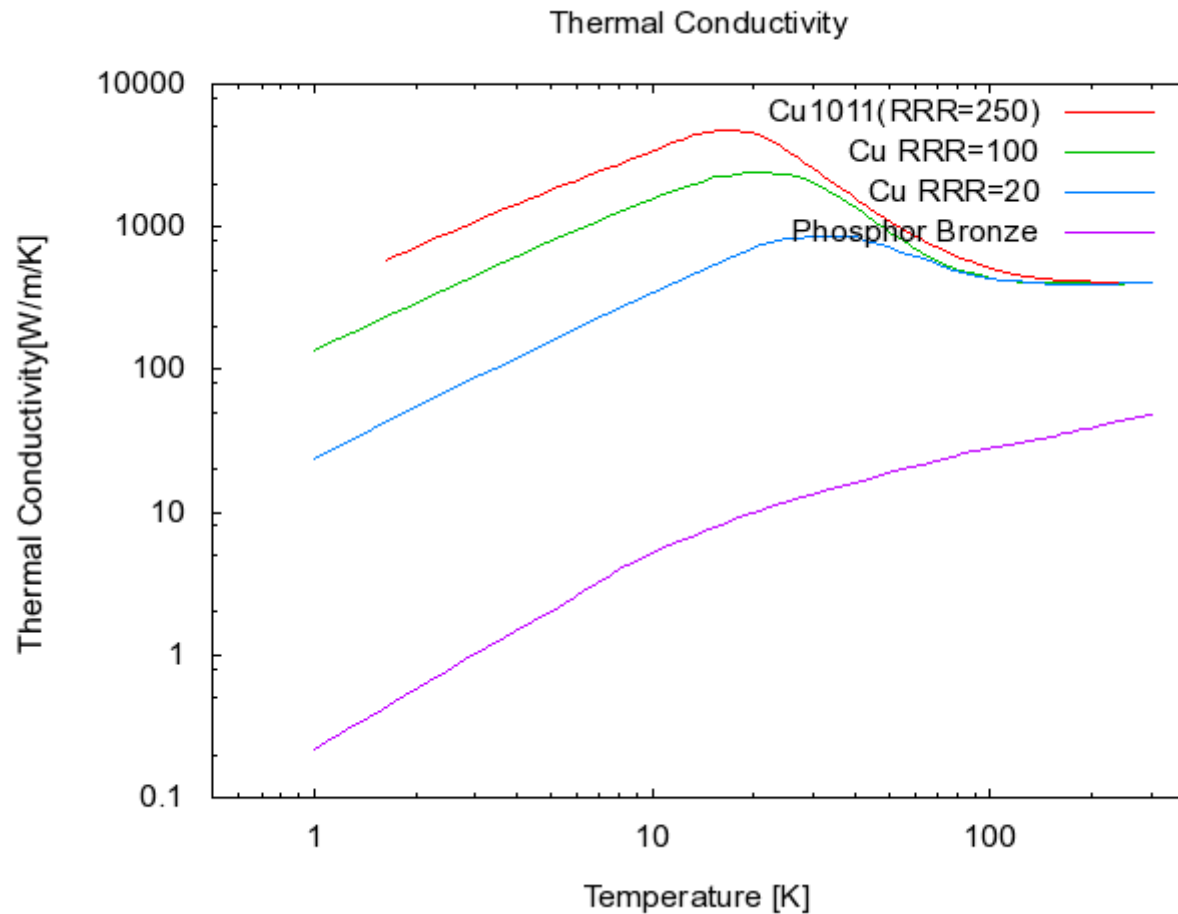
基礎・一般化

SPICAに直結する開発

- ◆ 最も労力がかかるのはシステムとしての全体
 - サイエンス/実現可能性と仕様決定
 - 初期開発・製作・検証・ユーザG・解析・運用
- ◆ 光学系 軸外し反射系 光学設計・製造性の追及
- ◆ 検出器 (セミ)オーダーメイドの2次元検出器
- ◆ エマルジョン回折格子
- ◆ イメージスライサー
- ◆ 光学フィルター
- ◆ 極低温アクチュエータ

冷却のために

- 配線の開発:配線熱流入が許容しがたい



0.01
1
10
100
Temperature
794.449 0.404991



■ フレキケーブル

□ マンガンフレキケーブル

出来たが、切れやすい

□ 極薄の銅フレキケーブル 塩谷

出来たが、長尺が難しい

フレキは短い部分には有用だがケーブル代わりは無理

■ 普通のケーブル

□ りん青銅 0.05mmΦx3本より線 いい感じ

SPICAの熱要求に答えるにはさらに開発要

□ 本年度、さらに 0.05mmΦx2本より線、1本線を

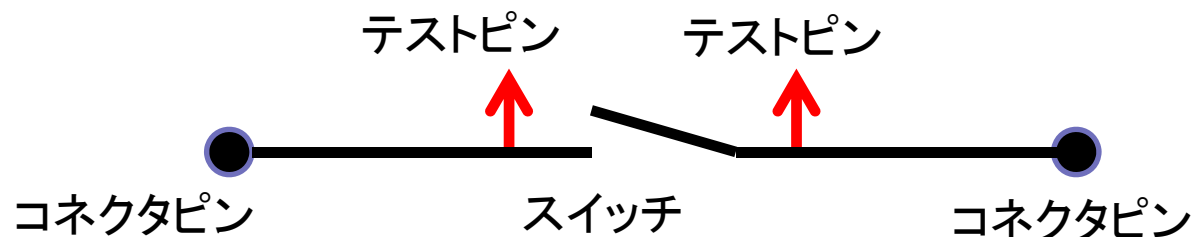
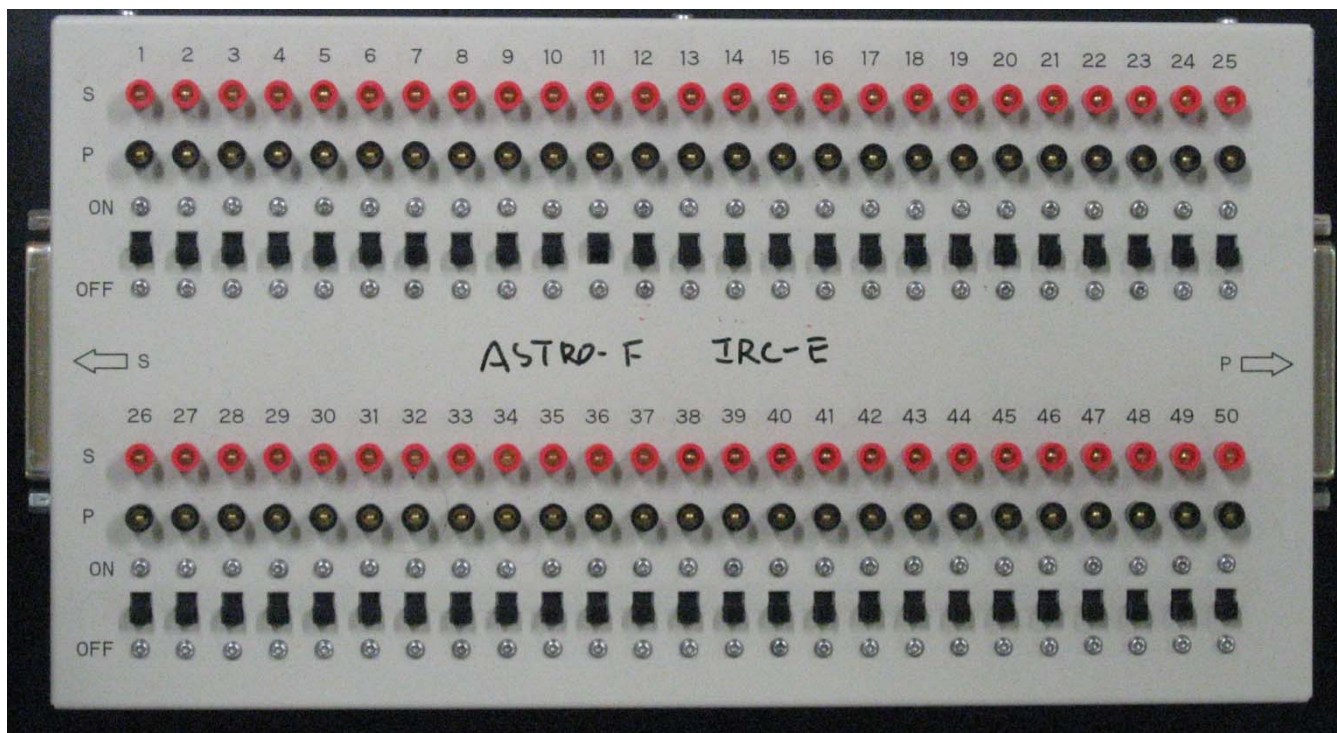


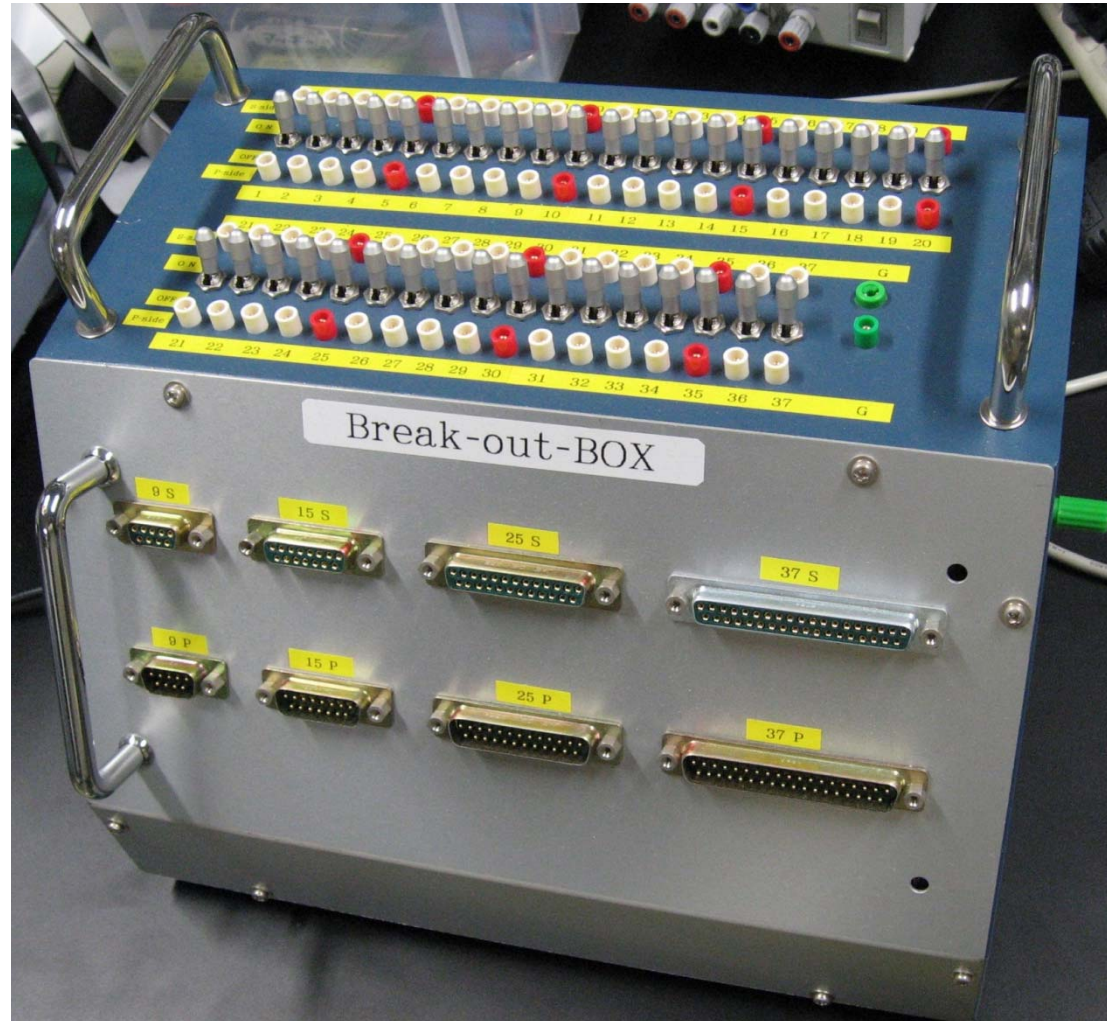
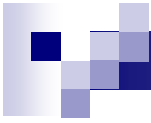
ケーブル問題は常に頭痛の種

- 全数end-to-end試験が基本
- 全数抵抗値管理が基本

BOB Break-out-Box

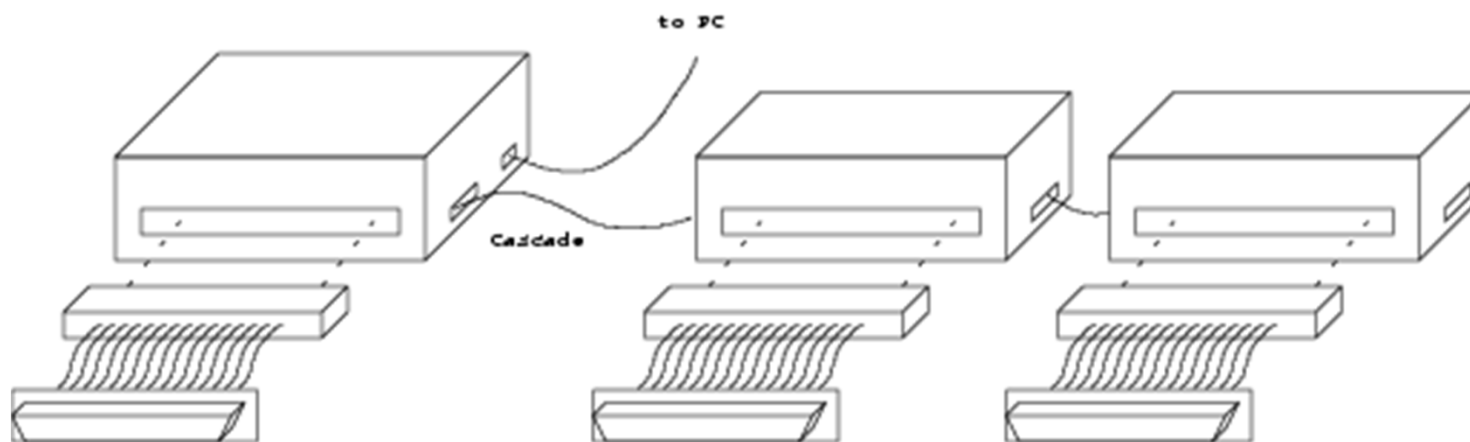
■ あかりBOB





配線チェッカー

■ 配線チェッカー (2005より)

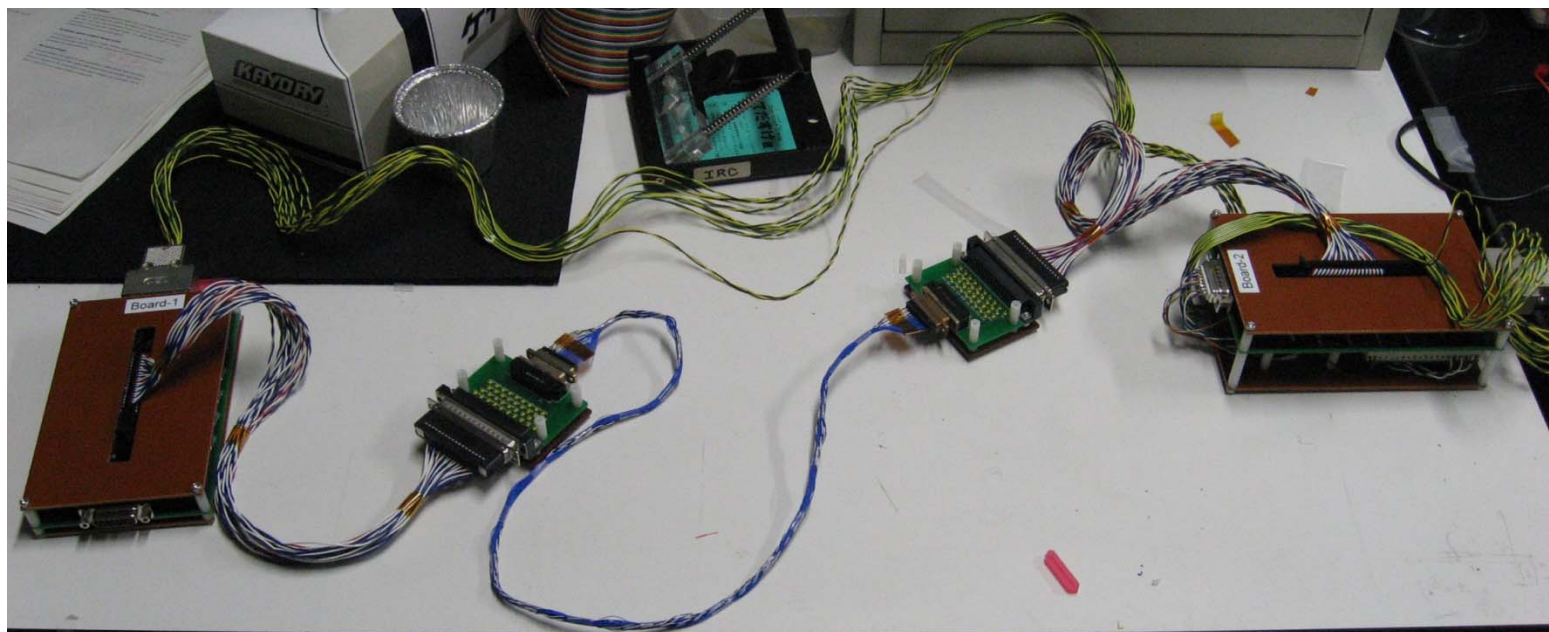


4線式抵抗測定を任意のピン間で
カスケード接続が可。モジュール間の距離もある程度
モジュールから短距離で他のコネクタに変換

2012に完成


USB電源供給、USBのDIO/AD器を内臓

100ch x 4 のMUXで任意のピン間を4線式抵抗測定





ねじ式



可変形鏡の開発

- SPICAでは非搭載でも、将来のある技術
- 極端な条件
 - 極低温で使用
 - 超低発熱 $\ll 1\text{mW}$
 - 数ヶ月に1度の設定、あるいは生涯に1度の設定
- この条件にあう可変形鏡が「ねじ式」

DMへの主要な要求

項目	要求
アクチュエーター数	~100 acceptable ~1000 goal
駆動ストローク	1.5 micron acceptable 5 micron goal
駆動分解能	10nm (TBD)
駆動安定性	1nm (TBD)
制御速度	遅くて良い 1. DC的補正を数回 iterationしたら保持 2. 1を時々やり直す(~1回/週が可能なように)
鏡面サイズ	直径数cm acceptable 1cm goal
常温部・低温部間のケーブル本数	~10 以下 goal ~100 SPICA プロジェクトと要交渉 ~1000 望ましくない。技術的成立性について要検討かつ SPICA プロジェクトと要交渉
駆動電圧	~10 V 以下 goal ~数10 V acceptable ~200V 望ましくない。技術的成立性について要検討かつ SPICA プロジェクトと要交渉
DMユニットサイズ	~10cm acceptable (DM ユニットとは、コロナグラフ装置内鏡面) ~5cm goal
DMユニット重量	TBD
鏡面粗さ	数 nm RA 以下
使用環境温度	~4.5 K (ただし常温でも試験できることが望ましい)
打ち上げ環境	H IIA ロケットにて常温打ち上げ、軌道上で冷却
軌道	S-E L2
運用期間	5年の使用が可能なように

DM方式比較

- ピエゾ効果を利用する方式
 - 地上望遠鏡などで実績あり
 - 極低温域での使用に深刻な問題点あり(ピエゾ効果の低減、異種材料接合における CTE ミスマッチ)
 - 高電圧が必要
 - 保持のため安定した電圧をかけ続ける必要あり
 - 極低温高速マルチプレクサは現段階では期待できないので、チャンネルの数だけケーブルが必要
- MEMS方式
 - 現在の設計におけるベースライン
 - 軽量、コンパクト(32x32 素子で 1cm x 1cm)
 - クーロン力で駆動するので、極低温でも原理的に動作可能
 - 高電圧(～200V)が必要
 - 保持のため安定した電圧をかけ続ける必要あり
 - 極低温高速マルチプレクサは現段階では期待できないので、チャンネルの数だけケーブルが必要
 - 脆弱性が懸念されている(振動、衝撃、風圧)
- 機械式
 - MEMS式の短所、懸念事項(上記赤字)を補う解にできないか、検討したい。
 - MEMS式にくらべてDMユニットがやや大きく、重くなることは承知の上。

SPICAコロナグラフにおける波面補償

- 補正の対象となる波面誤差が生じる主要因は、望遠鏡の形状誤差
- そのため高速補正は不要
- 波面センサーは設けない
- サイエンス用検出器で取得した像にもとづいてDMを駆動することを数回 iteration する

基本アイデア

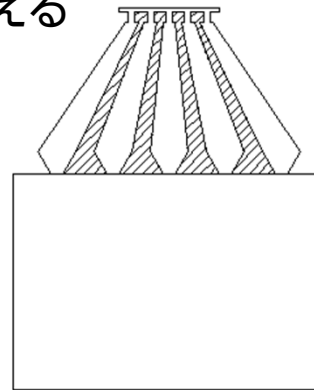
自由に変形できるミラーを、ミラーの裏側に適当な構造と変形アクチュエータを入れて実現しよう



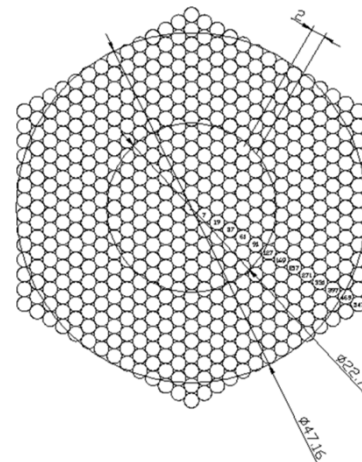
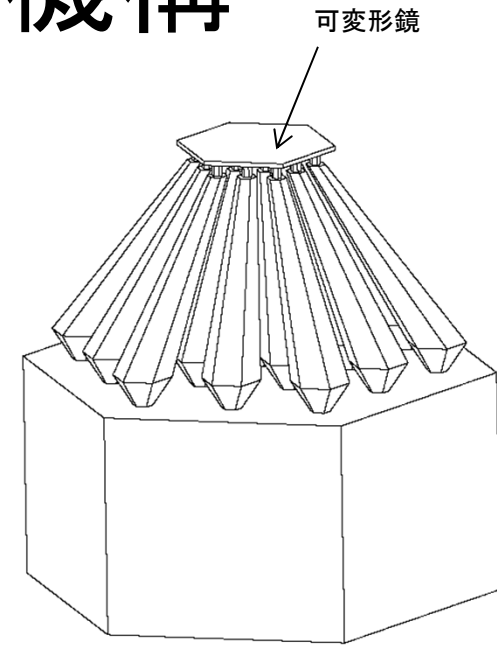
- $\pm Z$ の伸縮変位が可能なものを並べた格子があればいい
- 伸縮変位格子から鏡の変形には、適当な構造を用いる
 - 変位格子の間隔が大きくても、小さな鏡を変形させる
 - 削りだし加工でも作成可能な構造でこれを実現
- ネジでバネを押し、バネの先で構造物を変形
 - 大きな変位を力を介して小さな変位に
 - 適当な中心から伸縮が可能な変位をつくる
 - 格子状に伸縮する変位点を並べる
- ネジを回すには、小さなモータを各々に用意
- モータへの配線はリレーでマルチプレックス

変形ミラーと変形伝達機構

- 格子点での伸縮変形を面形状の変形に伝える
- 架橋構造が必須
- ワイヤ放電加工機等で製作可能な構造
 - 接着は避ける
- 変形伝達と同時に全体の直径を絞る
- 格子点は蜂の巣状にならべて詰め込む
 - コロナグラフマスクとの相性が検討課題
- 素子数と単位胞サイズ、全体サイズ
 - $3n(n+1)+1$ 個の単位胞が六角の中に
 - 単位胞直径 d の $(\sqrt{3}n+1)$ 倍が有効半径 D
 - $n=6$ に対し、六角形の角部分の有効でないものを除くと $127-6=121$ 素子、 $d=2$ なら $D=22.8$
 - $n=13$ に対し、六角形の角部分の有効でないものを除くと $547-36=511$ 素子、 $d=1$ なら $D=23.5$
 - 伸縮変形部のサイズはアクチュエータに依存

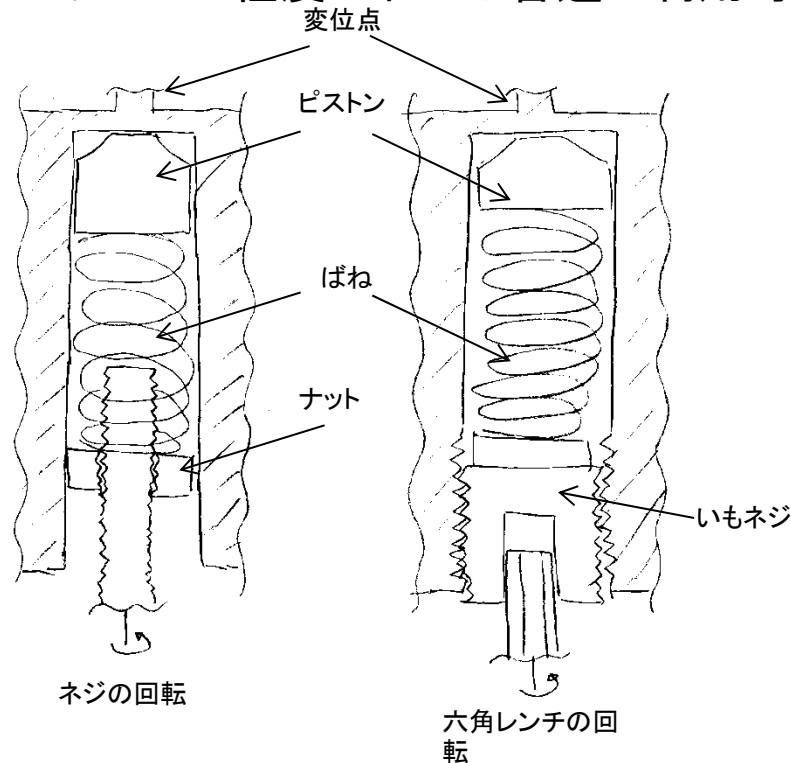


ハッチ領域を3方向から
抜けば作成できる



ねじとバネによる微小変位生成

- 変形量の保持:ねじが最適
 - 室温でも極低温でも有効
- 力と変形量の比を用いた変位量の変換機構
 - ばねがピストンを押す力と、変位点まわりの変形応力のつりあい
- 遊びによる押し引き応答のがたは許容
- $\Phi 0.5\text{mm}$ 程度のねじは普通に利用可、ばねも極小のもの多数あり



アクチュエータ候補1

- ステッピングモータ – 径がちょっと大きいのが問題
 - ミネベア

- http://www.eminebea.com/content/html/jp/micro-actuator_list/index.shtml
- http://www.minebea.co.jp/press/2009/1184417_3757.html

製品名	トルク範囲 [$\times 10^{-4}$ Nm]	外径 [mm]	ステップ数	長さ [mm]
SM3.3-20	0.4 - 0.2	3.3	20	5.75
SM3.4-20	0.4 - 0.2	3.4	20	4.95
SM4.3-20	0.9 - 0.4	4.3	20	5.65
SM5-20	1.4 - 0.5	5	20	5.95
SMSSH5-20	1.3 - 0.5	5	20	4.35
SMH6-20	4 - 0.8	6	20	7.85
SMS6-20	2 - 0.8	6	20	5.35
SMS6-40	2 - 0.8	6	40	5.35
SMSH6-20	2.5 - 0.6	6	20	5.35
SMSSH6-20	1.5 - 0.6	6	20	4.35
SM8-20	8.5 - 2	8	20	9.3
SMSH8-20	7.5 - 2	8	20	7.1
SMC10-20	20 - 5	10	20	10.7



製品カットモデル(左Φ3mm、右Φ6mm)

- キヤノン

- <http://www.canon-elec.co.jp/products/compo/motor/index.html>
- $\phi 6$ mm

アクチュエータ候補2

- DCブラシレスモータ＋変速ギア
 - 直径の小さいものあり 1.5mmφ
 - YKK: http://www.ykk.com/japanese/corporate/g_news/2004/20041227.html
 - DCモータの1/n回転を単位にステップ的駆動も可能(だろう)
 - 大きな減速比によって十分な分解能を期待できる
 - 減速ギアのみなら別メーカーも 1.5mmφ
 - <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/HONSHI/20070129/127060/>

ニュースリリース・最新情報

2004年12月27日 世界最小ギヤードモータ(直径1.5mm)を開発
— YKK開発の金属ガラス製超小型歯車使用 —

東北大学金属材料研究所
(財)次世代金属・複合材料研究開発協会
並木精密宝石(株)
YKK(株)

<開発した世界最小ギヤードモータの概要>

- 直径1.5 mm、長さ9.4 mmの世界最小サイズで、遊星歯車減速機とモータで構成。無負荷回転数3500 rpm、起動トルク0.1 mNm。(図1)
- 遊星歯車減速機(図2)は、太陽キャリア(図3)、遊星歯車(図4)、出力軸キャリア(図5)などからなり、2段減速で減速比は約40:1、ギヤのモジュールは25 mm。最大減速比1600:1まで作製でき、これによって2 mNm以上の起動トルクを実現することも可能。
- モータ部は直径1.5 mmのブラシレスモータで、駆動電圧DC3V。

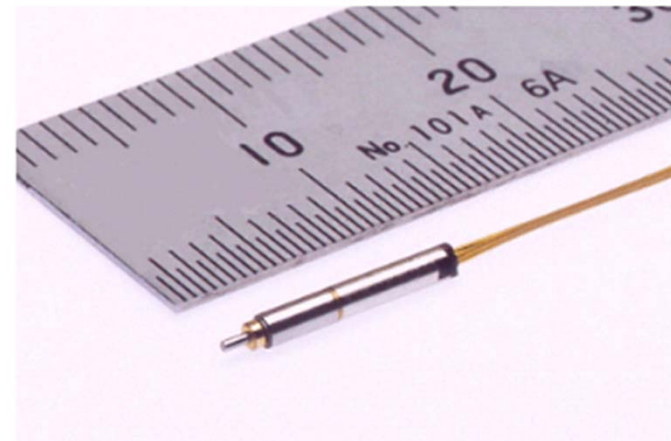
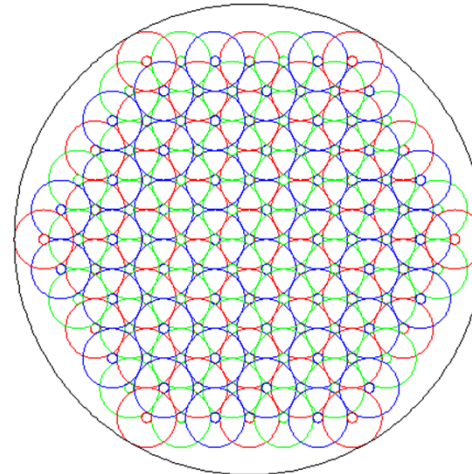


図1 直径1.5 mm世界最小ギヤードモータ

アクチュエータ

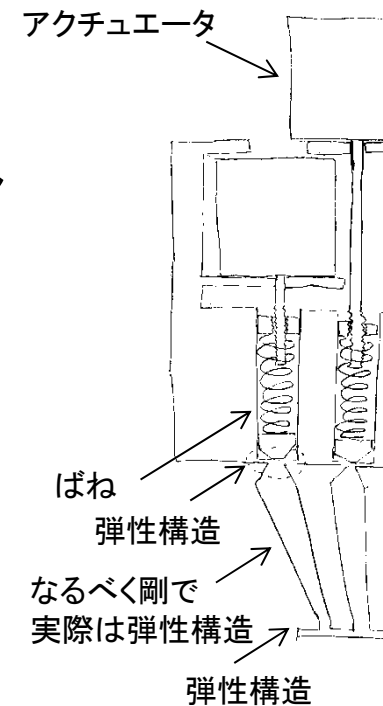
- モータ、ギアは固体潤滑に変更すればたいていは極低温も大丈夫
- 高密度に詰め込むには
 - 三層に六方最密格子状にモータを並べると密度三倍
 - 3mmφの単位占有面積でも1mmφ相当の密度
 - 変位伝達部分で直径を絞る+高密度に詰め込む:両方をバランスよく行う
- 駆動電線のマルチプレックス
 - 低温部に入れる電線を削減し、熱の伝導流入を避ける
 - メカニカルリレーによるモータ選択
 - 選択信号線数は素子数Nの $\log_2 N$ なので128に対し7本、512素子でも9本
 - モータ駆動電線はモータに依存するが凡そ4本程度
 - 全部で10数本ですむ



赤・青・緑の三層

実現のための鍵

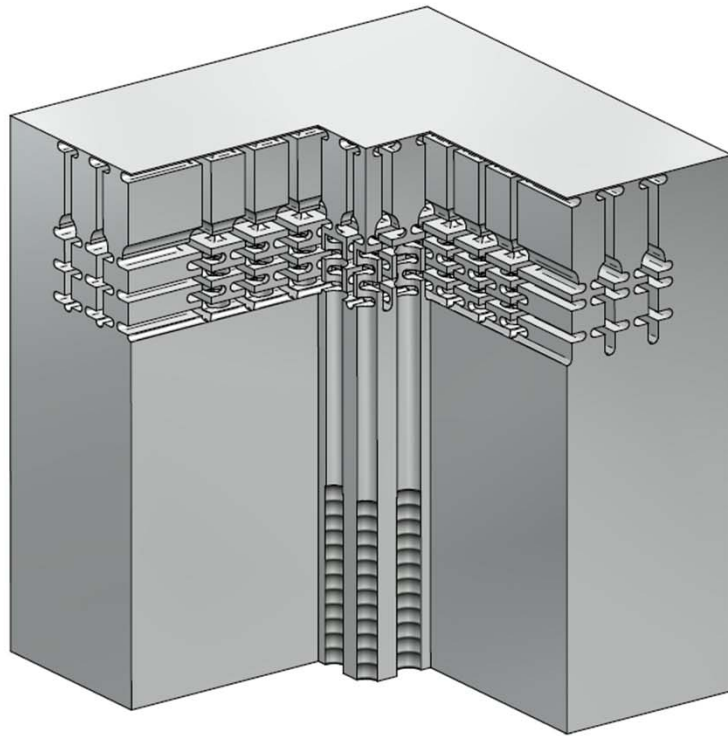
- 弾性構造系の設計
 - $\pm z$ の伸縮変位部付近、アクチュエータが押すばね、変位伝達部分の歪み、鏡自身の弾性
 - 変形鏡の構造も鏡面に高周波歪みが出にくい構造を工夫
- アクチュエータの選定
 - 大量の素子数に対応できる製造方法がある必要
 - 極低温対応は検証も必要
- 設計最適化のためのコロナグラフシミュレーション
 - 本当に必要な仕様、要求度の厳しさを洗い出す
- ミラーとその裏の構造部分の製造性
 - 日本の得意とする加工だろう
- その他、極低温の注意
 - 材料選定で少し気をつける
 - 各要素の実証試験は必要



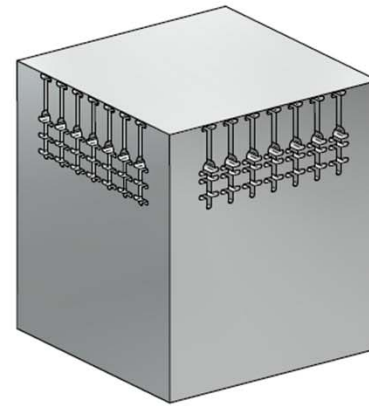
全体の模式図

ねじ式の開発

- 変形構造部分
国立天文台ATCと共同で光明
- アクチュエータ部分
手つかず・アイデア不足

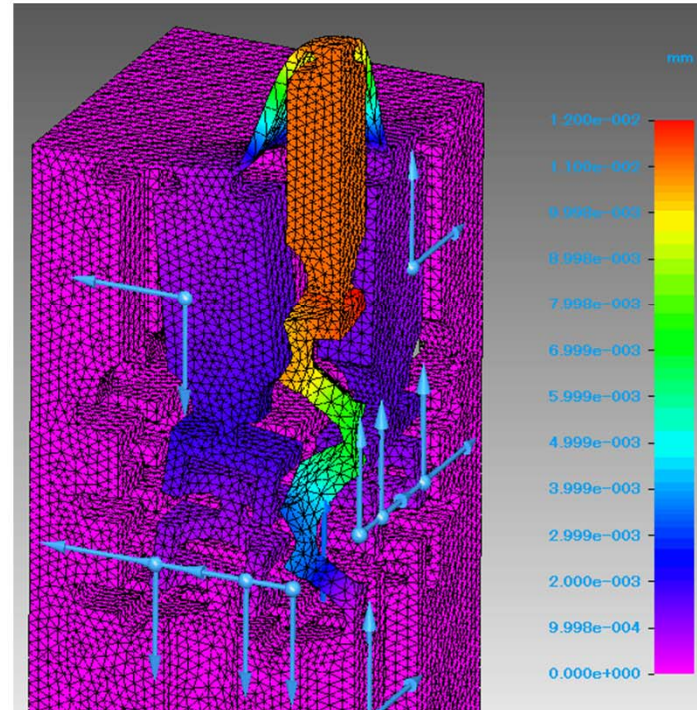


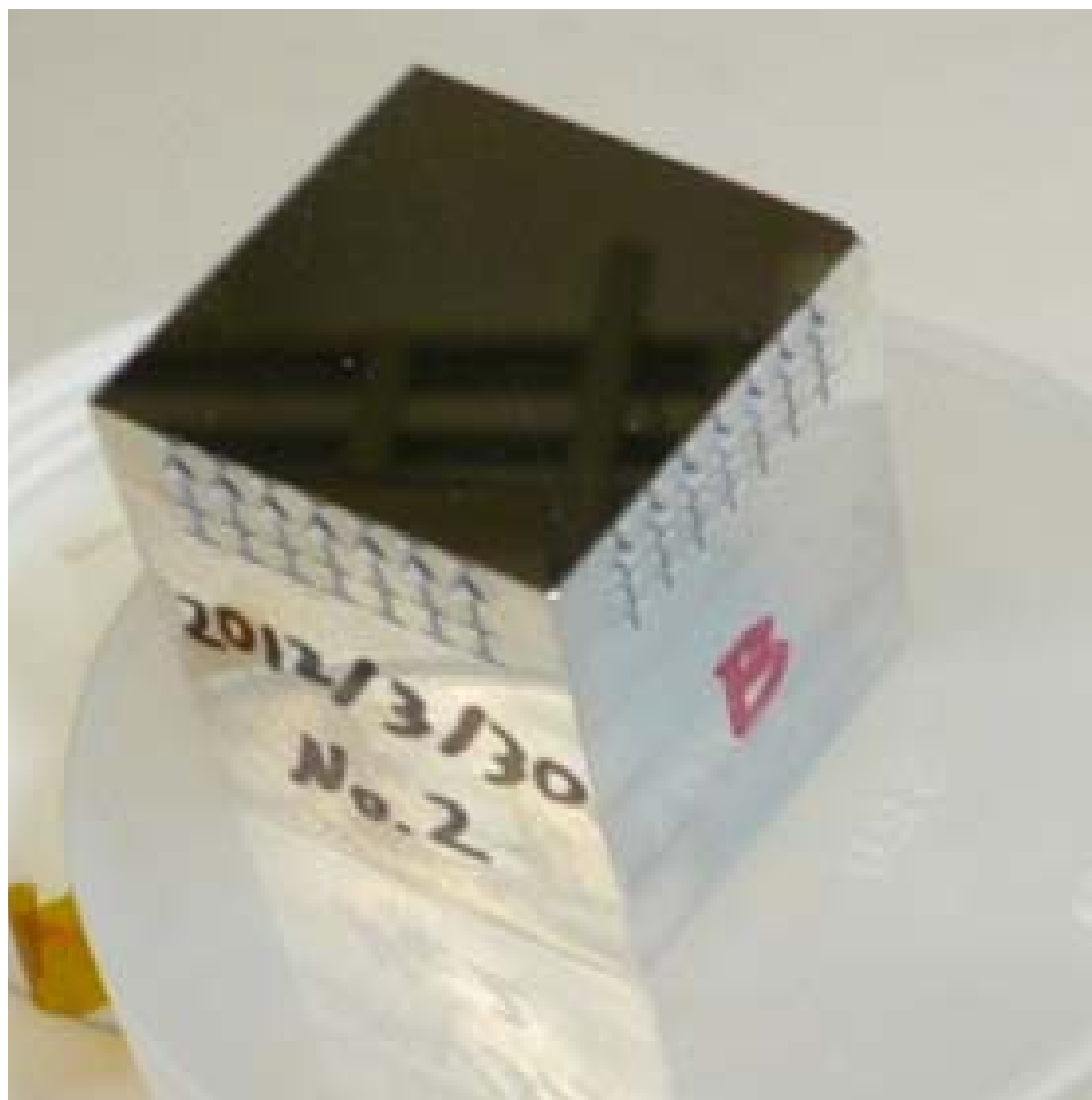
内部構造図



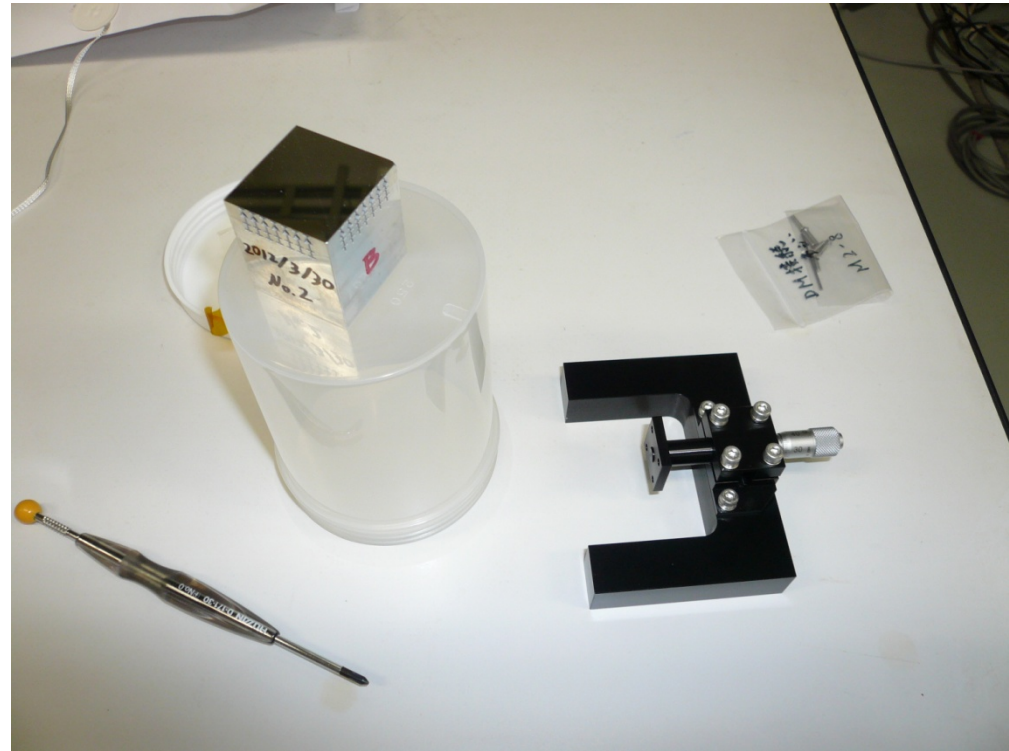
外観図

ワイヤー加工によるミラー構造





実験



- ATC製 6x6 機械式 DM を使用。
- マイクロメーター式の手動駆動。
- マイクロメーターから、バネを介してピストンを押して鏡面に微小変位を与える。
- 常温、大気中で実験。
- 干渉計で鏡面を計測した。

Sm Aperture

MEASURE

Analyze

Mask Data

Save Data

Load Data

Calibrate

Reset

Measure Cntrl

Analyze Cntrl

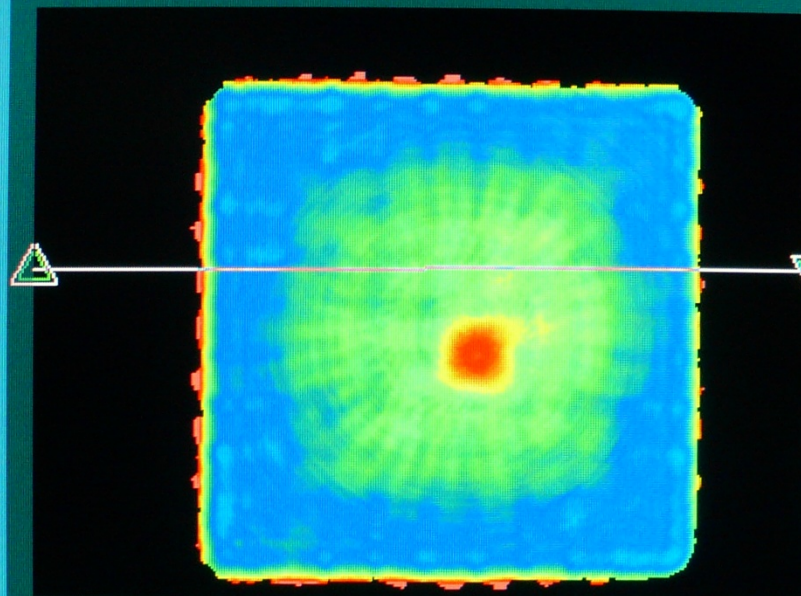
S/W Profile

Slope Mag

Slope X

Slope Y

zygo



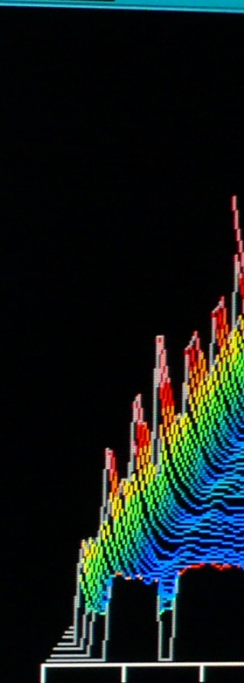
+0.42191

-0.08003

wave

PV	0.502	wave
rms	0.049	wave
Power	-0.076	wave
Size X		cm
Size Y		cm

zygo



64

Removed: PST T
Aperture OD (%)

zygo

Surface/Wavefront Profile

+0.60000

zygo

GPI Appl

Aperture

zygo

Surfa

ASURE

alyze

ck Data

re Data

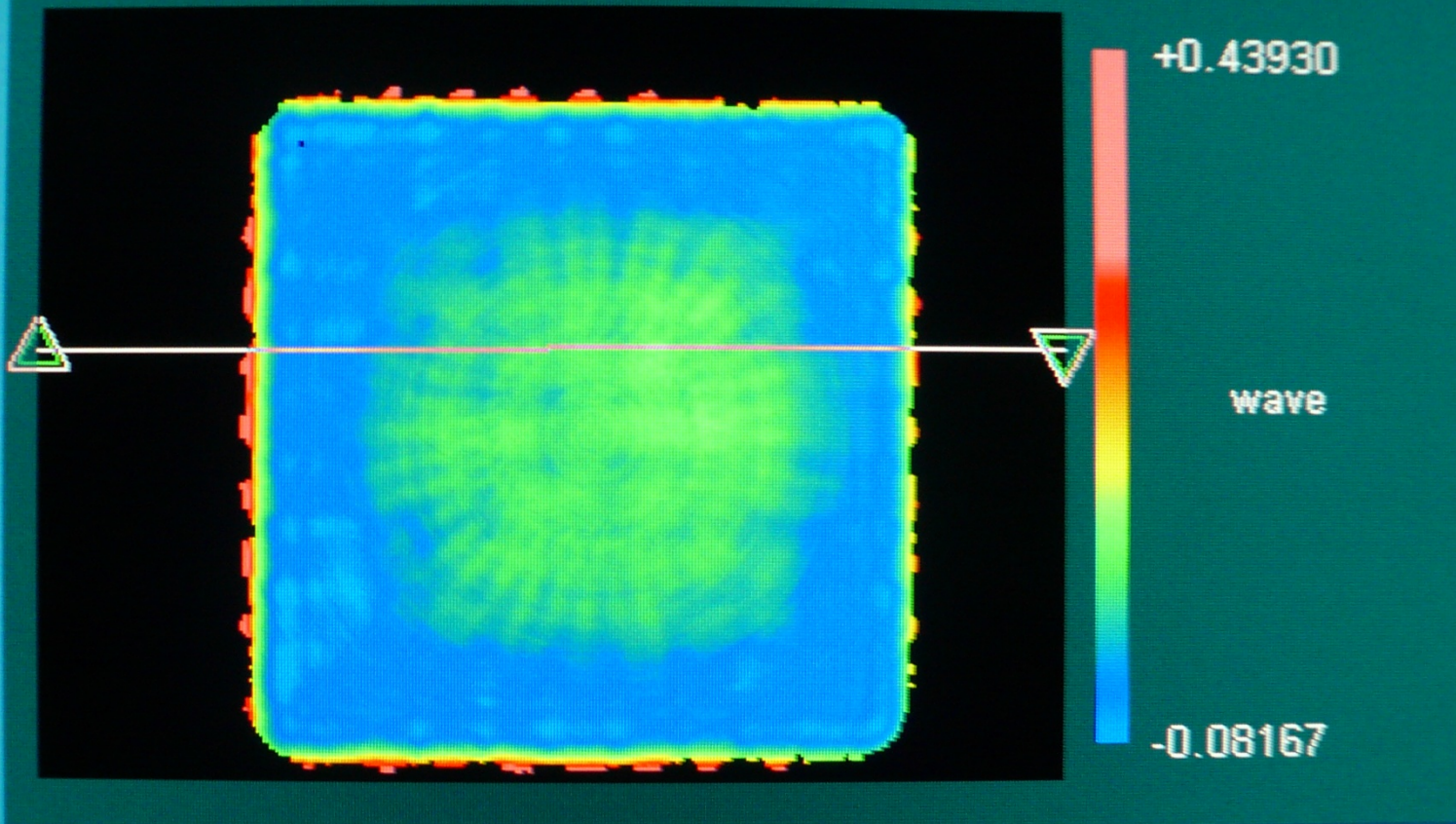
d Data

ibrate

reset

ure Cntrl

alyze Cntrl



PV 0.521 wave

rms 0.054 wave

Power -0.039 wave

Size X cm

Profile

Remo

結果

- 鏡面に変位を与えることに初めて成功した。
- マイクロメーターのストロークの制約のため、
~ 0.5λ くらいの変位しか与えられなかった。
- 今後の課題
 - ストロークと変位の関係は計算どおりか？
計算とずれ -- 放電加工による変質の影響？
 - 多素子駆動を実験

