

# 3次元面分光観測のための近赤外線波長走査型ファブリ・ペロー分光器の開発

## 高橋英則（東京大学）、NESUC-IIDA（南信州・飯田産業センター）分光器開発プロジェクトチーム

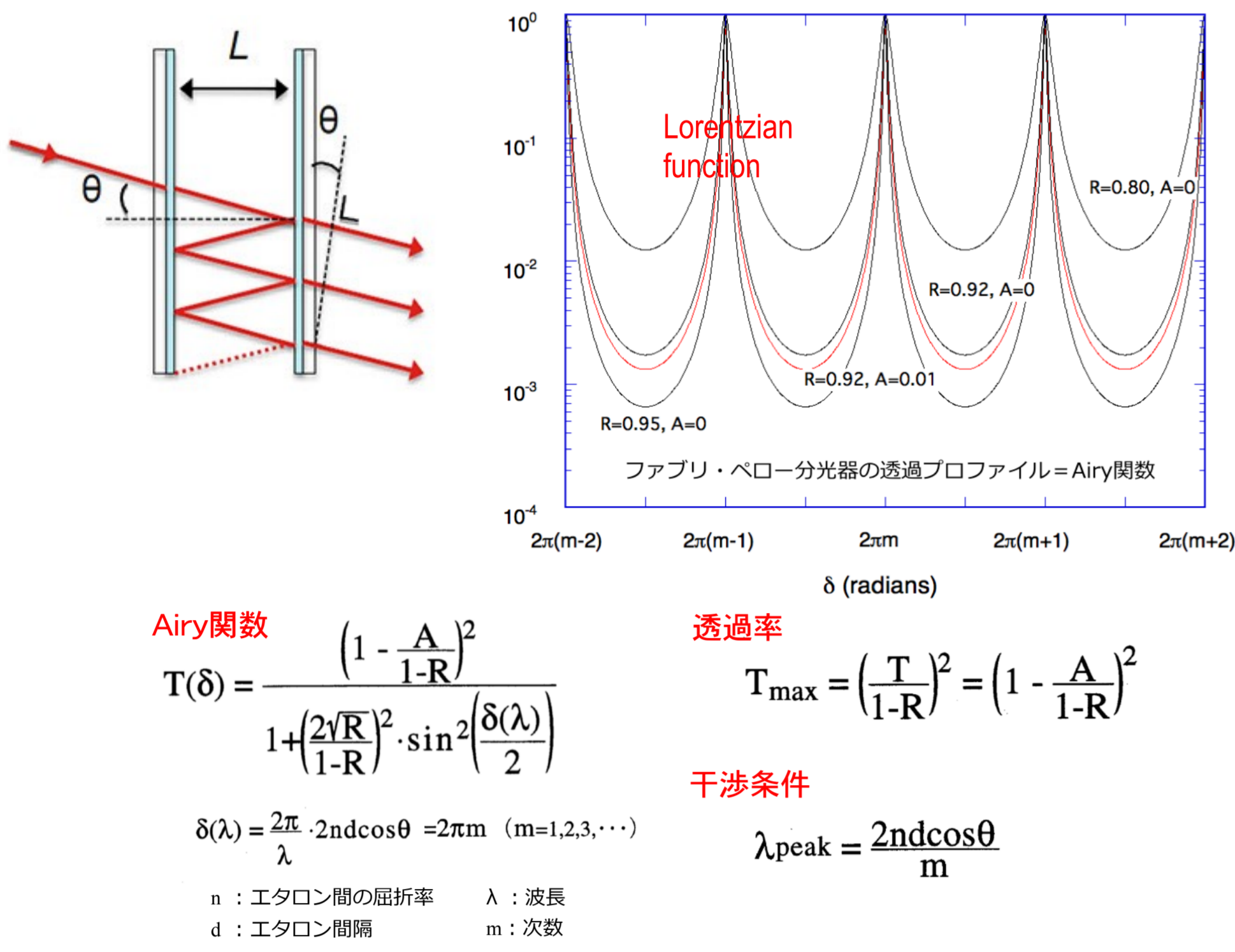
この装置開発の第一の目的は、様々な天文学の研究分野から強い要請がある**赤外線波長走査型フィルター（チューナブルフィルター：ファブリ・ペロー面(FP)分光器)**を開発し、大口径望遠鏡の観測装置の前置光学モジュールとして搭載、その実用可能性を示すことである。さらに天文学的にはこの分光モジュールを用いることで、大規模星形成領域の物理状態を銀河系内の星団レベルから近傍・遠方銀河まで広い空間ダイナミックレンジで近赤外線波長全域に渡って連続的に高空間分解能の面分光観測を行い、**星形成活動の物理過程を調査、大質量星や銀河の進化を解明**することを目指す。

分光モジュールの開発要素として、近赤外線波長域に最適化された**光学素子（エタロン）**の設計・製作と波長走査のための駆動および測距機構、さらには制御系の開発が必須となる。これまでに微小距離を変位させるための**駆動素子（ピエゾ素子）**と変位量測距のための**静電容量センサー**を組み合わせた試作モデルの製作が進められ、これを用いた1軸での制御試験を行った。制御は、センサー値をアクチュエータ制御にフィードバックする新規開発の「**リアルタイムアクティブコントロールシステム**」を用いた。測定は温度変動による筐体の熱変形・変化を防ぐために温度管理された飯田工業技術試験研究所の恒温室で行われた。分光器の制御（光学素子の駆動）方法としてはセンサーの信号を基にしてアクチュエータを変位させるが、試験は駆動最適化のための制御パラメータサーチを中心に進められた。繰り返しの試験・調整の結果、分光器としての光学性能を達成するための駆動距離と精度（**走査距離 ~ 1000nm=1um、繰り返し精度 ~10nm**）を達成した。上記結果を基に3次元制御へと拡張を進め、コリメートレーザー光での光学試験では、想定通りの駆動（変位）を確認した。

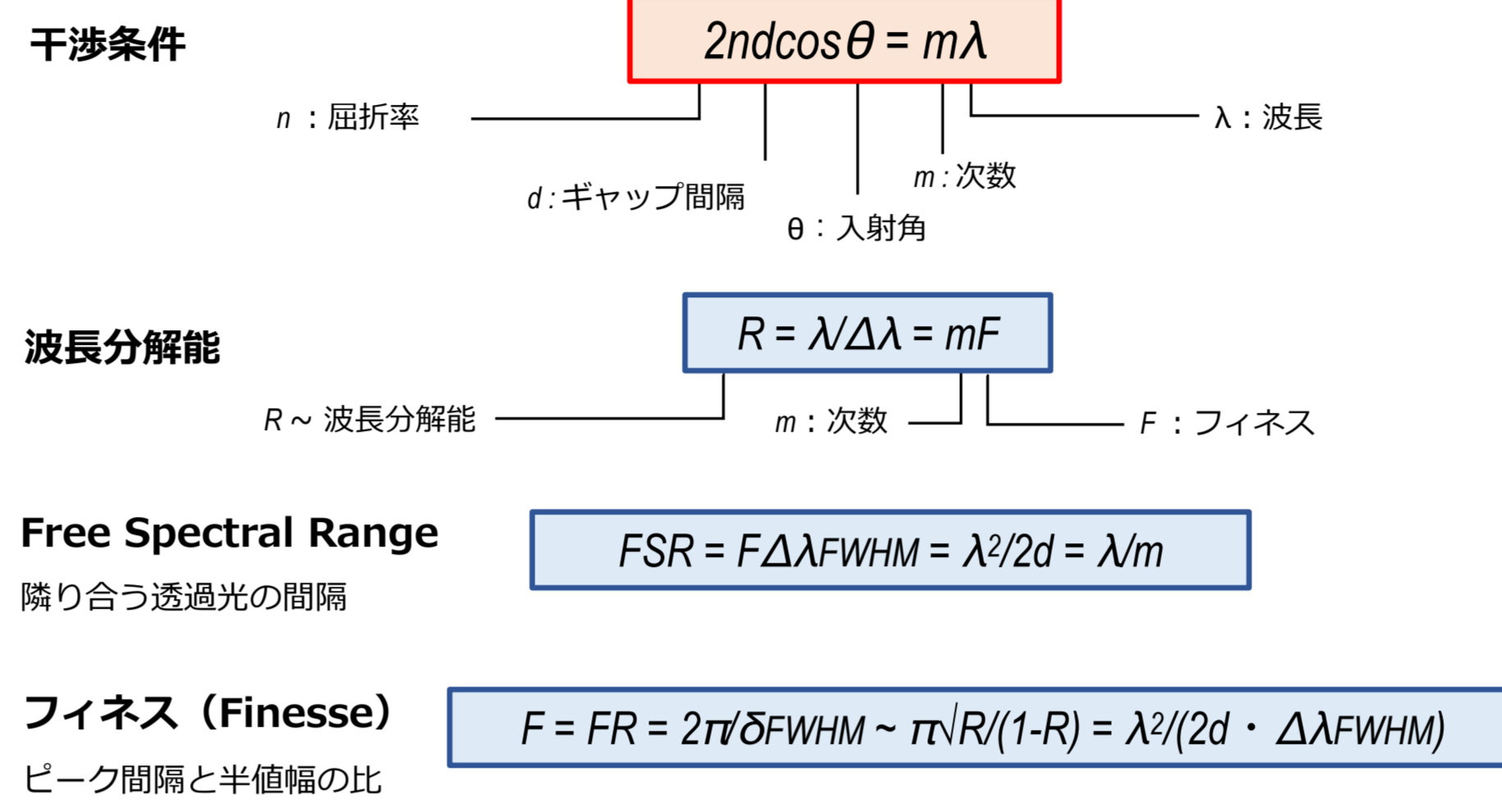
### ファブリ・ペロー分光（器）について

反射率の高い平行平面基板を向かい合わせた干渉型分光器（狭帯域フィルター）で、干渉条件を満たした波長のみ透過する。光学素子の間隔を変えることで波長スキャンすることができる。

#### ファブリ・ペローの原理

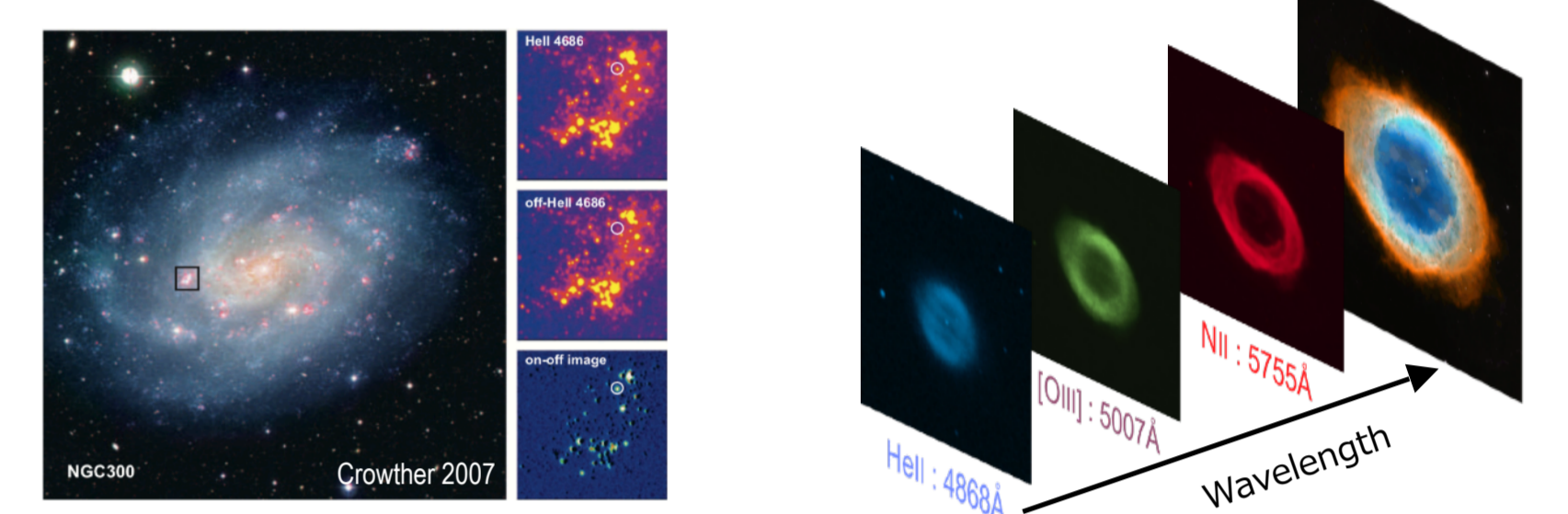


#### 分光性能を決めるパラメータ



#### 波長走査型ファブリ・ペロー分光器のメリットとデメリット

- メリット**
- 面分光（分光イメージング）ができる
  - 高波長分解能が達成できる
  - コンパクトな光学系
  - 任意の波長を選べる
  - オフバンドの取得が簡単
  - 広波長帯の観測が可能（光学素子に依存）
  - 波長を絞ることでバックグラウンドを小さくできる
  - etc...
- デメリット**
- 次数選択機構が必要
  - 波長走査のための機構が必要
  - （広波長帯をカバーする高効率には）光学素子への要求がキツイ
  - 制御系への要求がキツイ
  - 検出器部分との相性がある（大きさ、low/high BG制限）



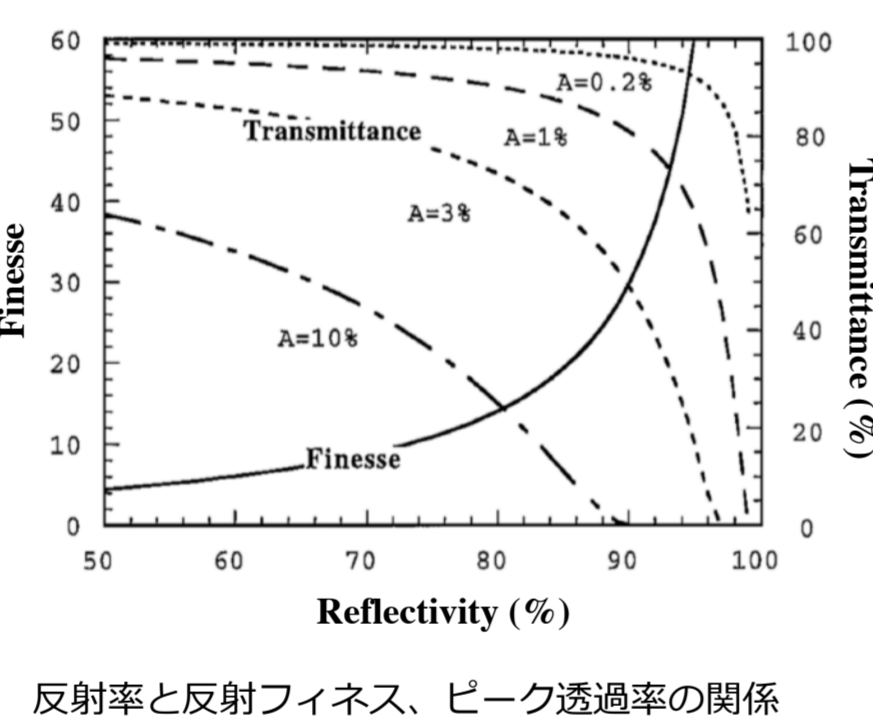
- 波長スキャンすることで、任意の波長のイメージが取れる。
- 前後のcontinuum画像での差引きが容易→輝線だけの画像。

### 概念設計・製作

開発のポイントは5つ：(1) 光学素子・波長走査駆動機構・測距機構の選定、(2) 最適機械設計+精密加工、(3) フィードバックコントロール制御系、(4) 冷却試験容器の設計・製作、(5) 国立天文台、地元企業（コンソーシアム）との協力

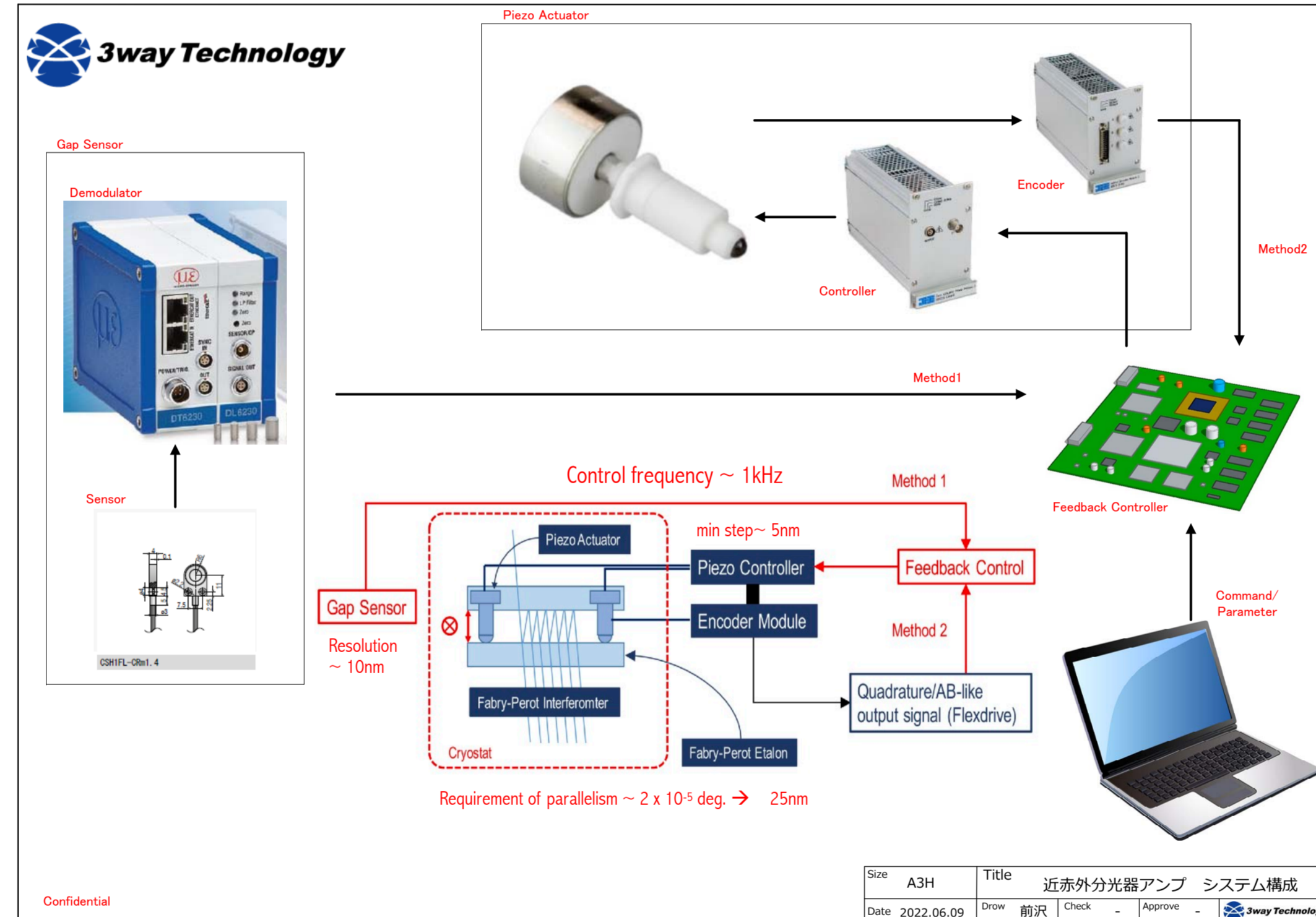
#### 分光器の仕様

- (1) 使用条件
- 使用波長域 ..... 1.1 ~ 2.5 um
  - 使用環境 ..... ~77K
- (2) 光学素子仕様
- 素材 ..... 無水石英
  - 形状 ..... 70mmφ, t=10mm
  - 反射膜 ..... 誘電体多層膜
  - コート有効径 ..... 60mmφ
  - ウェッジ ..... 有り
  - 裏面処理 ..... 反射防止膜
  - 反射率 ..... R ~ 96 +/- 1% (1.1~2.5um)
  - 吸収率 ..... A < 0.5% (1.1~2.5um)
  - 面精度 ..... λ/150 @2um (λ/47 @633nm)
- (3) FP分光器としての性能
- 波長 ..... 2um
  - 次数 ..... m = 100
  - エタロン間隔 ..... d = 100um
  - FSR = 0.02um
  - 反射フィネス ..... FR = 78 (R = 96%)
  - 粗面フィネス ..... Fs = 90
  - 有効フィネス ..... Feff\_0 = 59
  - 実効フィネス ..... Feff\_A = 50
  - 波長分解能 ..... R = 5000



#### 制御系

アクチュエータ ←→ ギャップセンサーをフィードバック制御した「リアルタイムアクティブコントロールシステム」



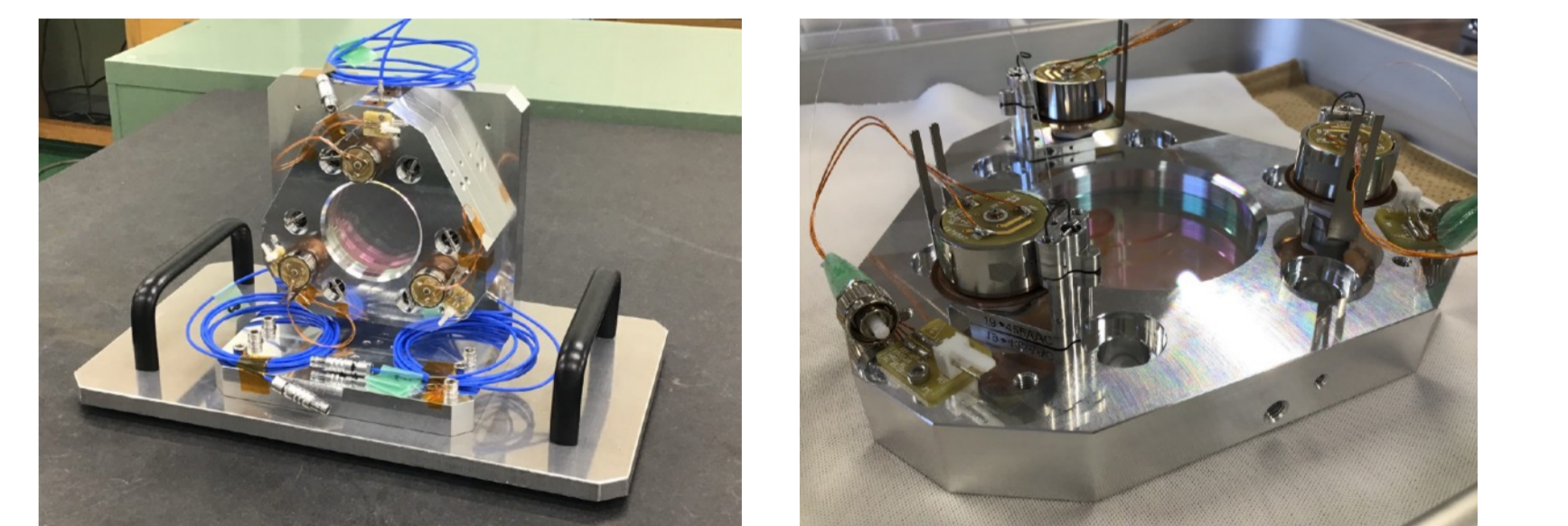
#### 機械系

- 高精度機械加工
- コンパクト・軽量化
- 低温使用可能な設計

#### Component selection



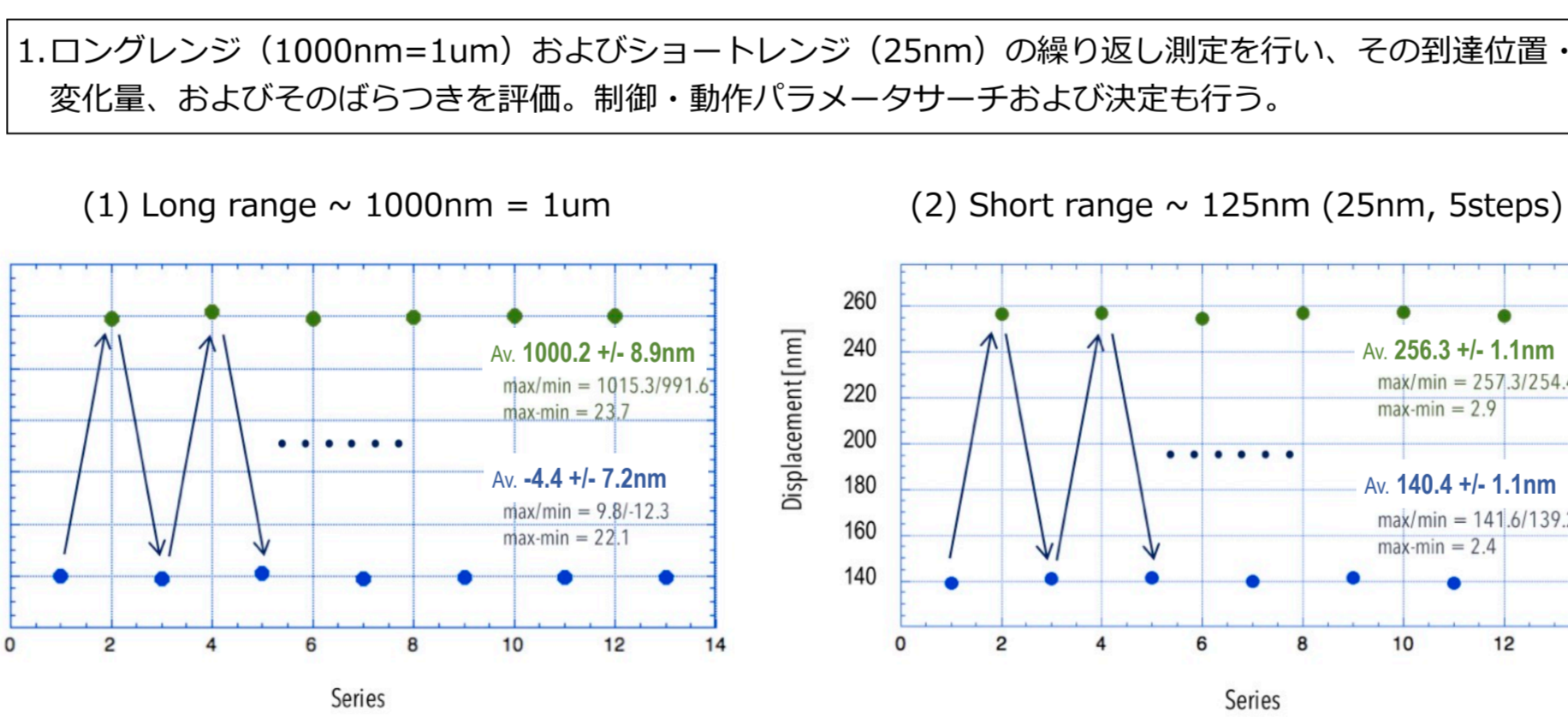
#### Prototype MrkII



### 性能評価

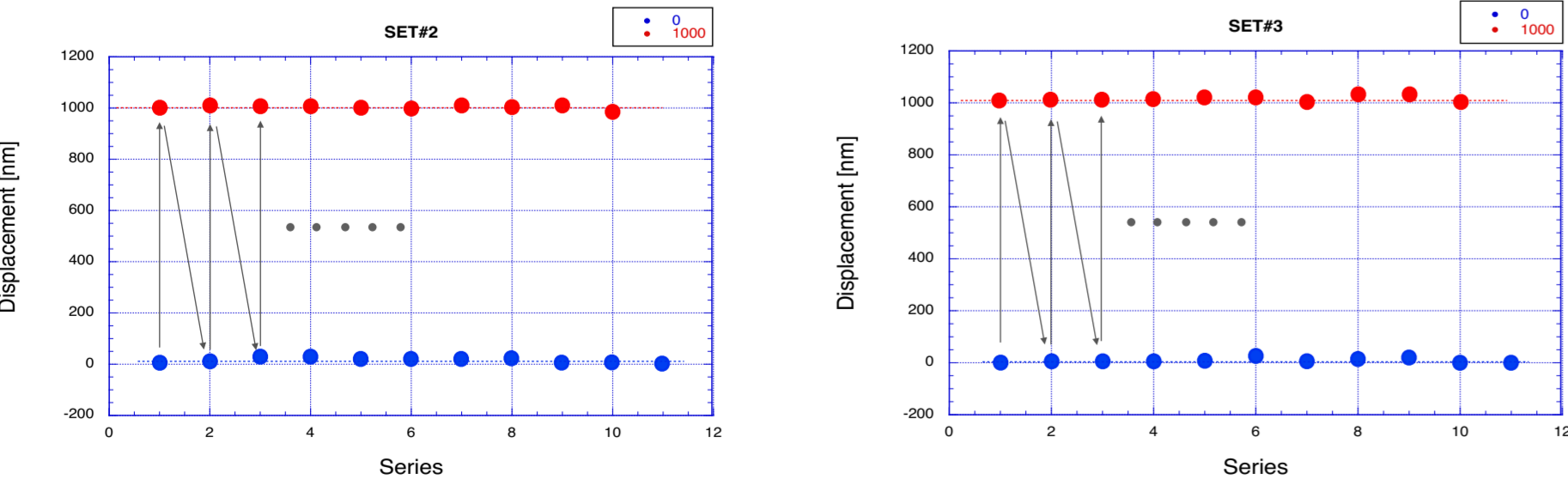
測距センサー+アクチュエータの1軸試験を行い、センサー出力とピエゾアクチュエータの制御電圧の関係を導出する。絶対距離（変位）測定にはレーザー変位計を用いた。

#### 駆動・制御試験



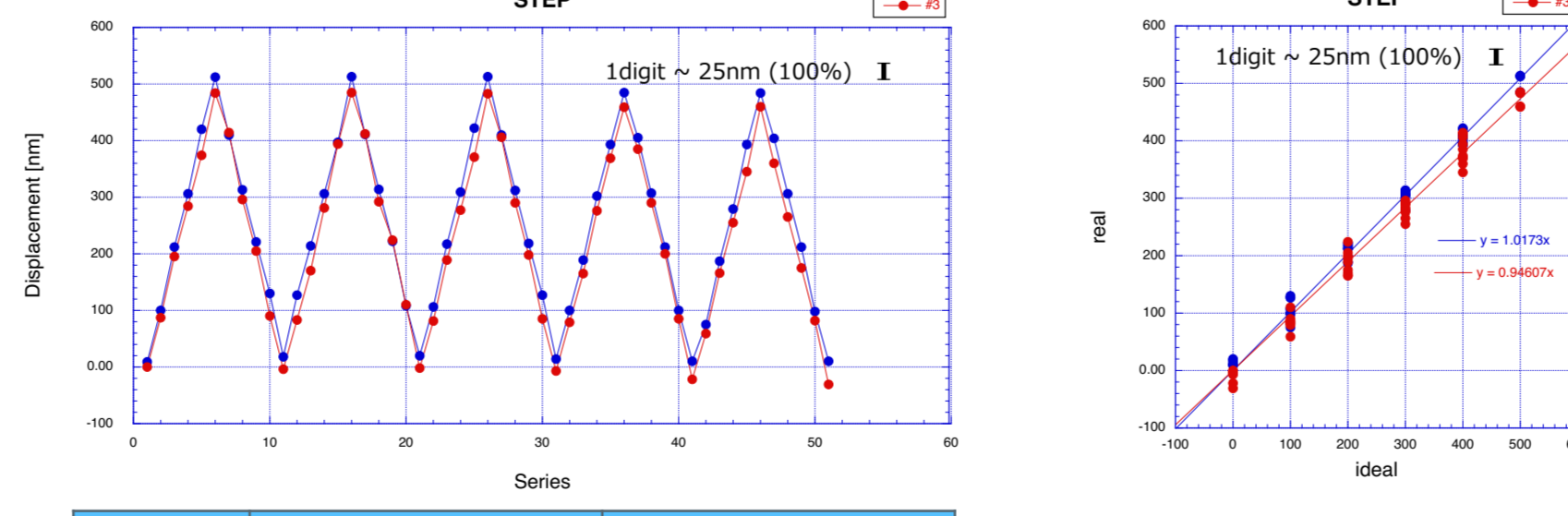
2. 上記試験で最適化されたパラメータを用いて、他の2セットについても同等の試験を行う。

#### 【試験1】 1000nm=1umの繰り返し試験



	Set #2		Set #3	
	Average	error (stdv)	Average	error (stdv)
0 nm	16.4	10.5	6.7	10.0
1000 nm	1001.8	7.1	1017.8	9.6

#### 【試験2】 0 → 100 → 200 → 300 → 400 → 500 → 400 → ... → 0nmの階段試験

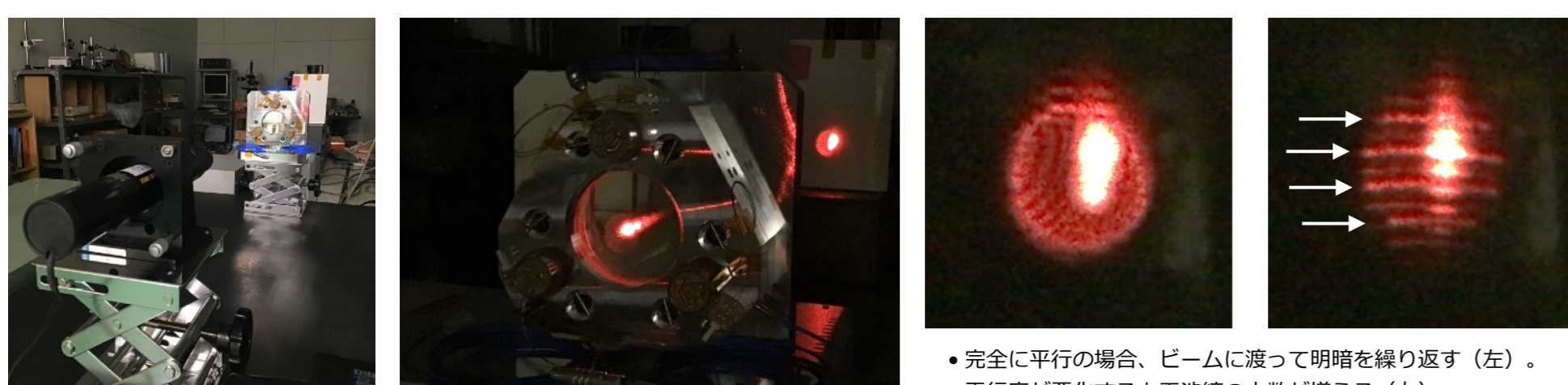


[nm]	Average	error (stdv)	Average	error (stdv)
0	13.5	13.5	-11.0	12.6
100	107.1	16.9	84.1	12.4
400	210.4	12.4	188.7	19.4
300	305.4	10.0	280.6	12.9
400	406.4	10.2	383.0	23.2
500	501.4	15.4	474.2	13.4

- 1digit以内のバラつきで位置は決まっている。
- set2とset3の差は1digit程度。（今回の測定最小分解能）
- 同じ目標値に対しupwardとdownwardで値がやや異なる。
- upwardの方がdownwardより小さい。
- Downwardでは下がりきらない感じが？

#### 光学試験

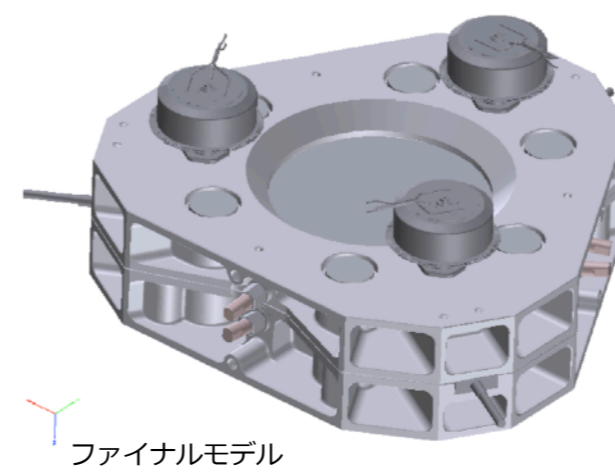
コリメートされたレーザー光を通し、エタロン間の干渉（縞）を観測する。



- 完全に平行の場合、ビームに渡って明確な縞が繰り返す(左)。
- 平行度が悪化すると干渉縞の本数が増える(右)。

#### 今後

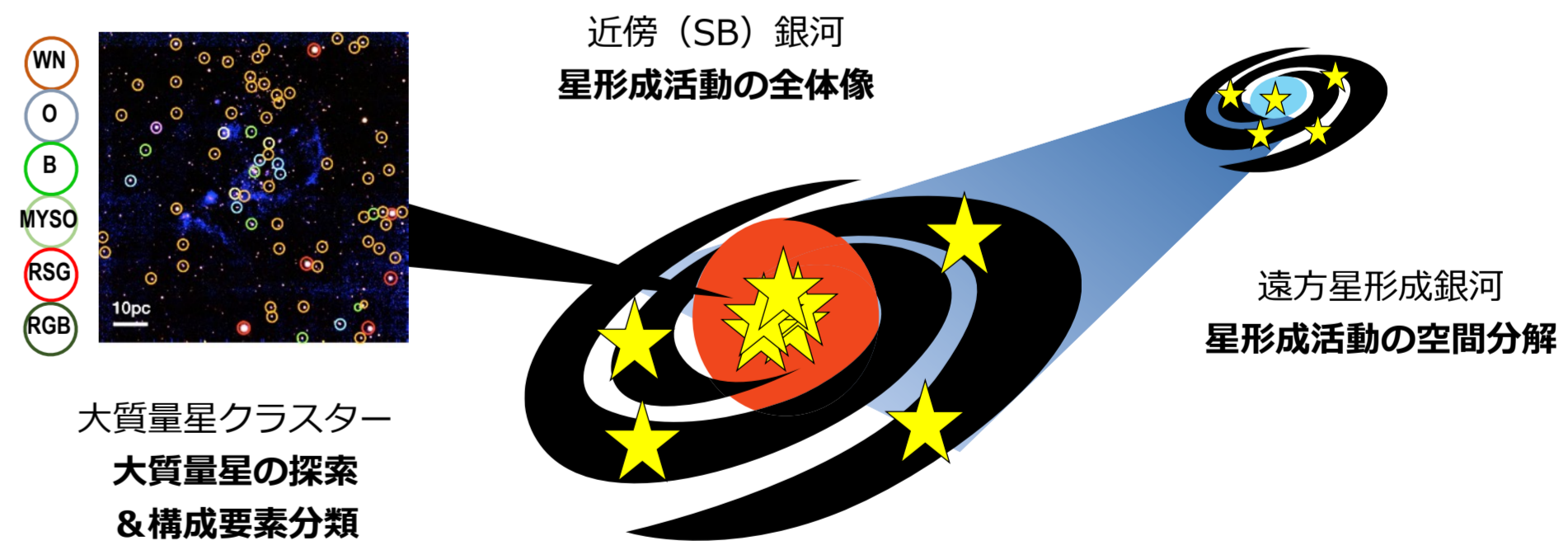
- さらなる軽量化・コンパクト化
- 3軸独立制御による動作試験
- 光学特性試験
- 真空冷却試験
- 次数選択機構（オーダーソーター）の開発
- 分光モジュールの設計・製作・試験
- センサーモジュールとの組み合わせ
- 実運用試験（望遠鏡搭載）
- 観測計画立案



### 目指すサイエンス

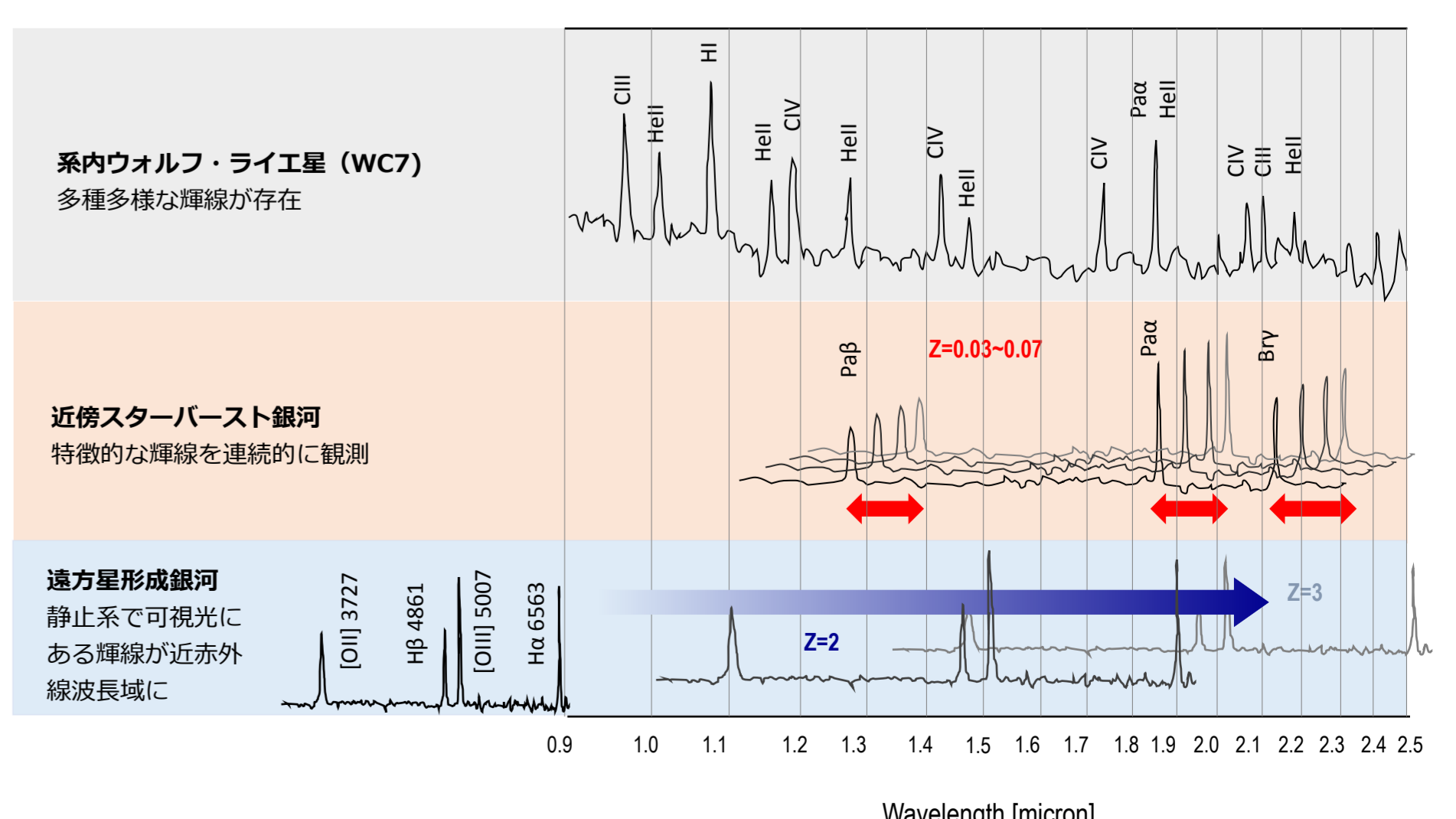
#### ターゲット

チューナブルフィルターによる様々な空間スケールの分光撮像観測。各々明らかにすべき事象は異なるが、**大規模星形成活動を探る**という意味ではその解明に対してリンクしている。



#### スペクトル

近赤外線全域を網羅することで、**多種多様な輝線**を取得できる。また、**異なる距離(z)、空間スケール**の星形成活動を調査できる。



Contact : nori@ioa.s.u-tokyo.ac.jp