

# 3次元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）

国立天文台・先端技術センター、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

## 概要

近赤外線波長に最適化された光学素子（エタロン）、極微小変位を低温環境下で実現する駆動素子（ピエゾ）、それを測定するセンサー（静電容量素子）などを用いた近赤外線波長走査型ファブリ・ペロー分光器の開発を進めている。将来的には中口径・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し、近赤外線波長全域に渡って連続的に高空間分解能の分光観測を行い、星形成活動度を通して大質量星や銀河進化の解明を目指す。これまでに低温での可動実績のあるアクチュエータおよび測距センサーを組み合わせたプロトタイプ機を製作し、さらに新規開発した3次元独立駆動を行うことができる制御系による動作試験を行い、当初の仕様であるナノオーダーの駆動および制御が可能であることを確認した。

## Introduction

ファブリペロー干渉計は、エタロンと呼ばれる2枚の高反射面の光学素子の間で入射光を多重反射・干渉させることによって特定の波長の光だけを取り出すことができる。鏡面を向い合わせに置かれたエタロン間での多重反射によって、反射面間で光干渉を生じさせ、干渉条件を満たす波長の光だけが透過する。干渉条件を満たさない波長の光は透過しない。干渉条件は、光の半波長の整数倍が2枚の反射面での光反射による光路差と等しくなることから求められる。反射面間の間隔を $d$ 、反射面間に封入される物質（通常は空気もしくは真空）の屈折率を $n$ 、反射面の法線方向に対する光の入射角度を $\theta$ とすれば、干渉条件は次のように書ける。

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2nd\cos\theta}{m}$$

ここで $m$ は整数（次数）である。反射面間の間隔 $d$ を変えることで、透過する光の波長を変えることができる。この性質から、透過波長可変型の干渉フィルター（チューナブルフィルター）として用いられる。この干渉条件を見てもわかるとおり、ファブリ・ペロー干渉計の透過プロファイルは、次数に応じて周期的になる（図1）。これはAiry関数で表され、透過プロファイルはLorentzianになる。

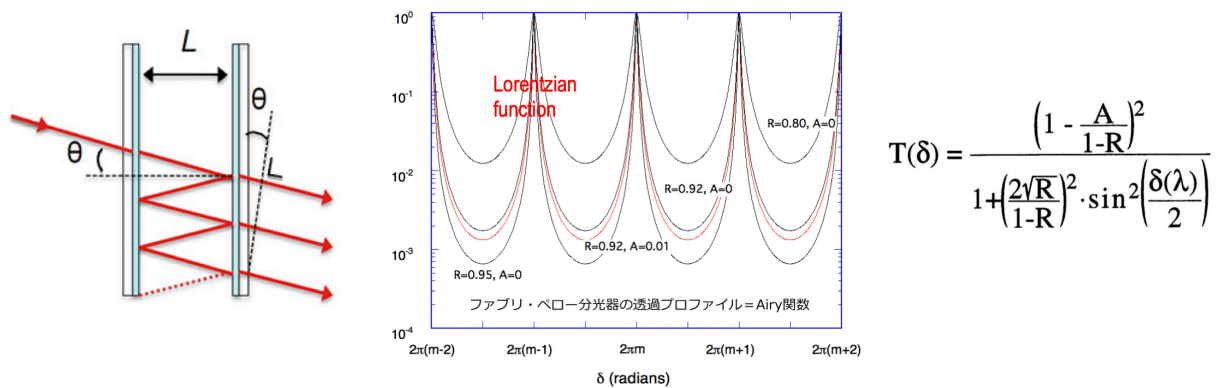


図1：[左] ファブリ・ペロー分光（干渉）の原理、[右] ファブリ・ペロー分光器の透過プロファイルとAiry関数。

## ファブリ・ペロー分光器の特徴

FP分光器は、望遠鏡からの光束を同一波面光源として扱うことができるため、明るい光学系を構成でき、コリメート部分に光学素子を挿入するだけで分光撮像観測が可能になる。つまりコンパクトな分光モジュールを構築することができる。また、エタロン間隔を変えることで波長走査を行うことができる（任意の波長を選択することができる）、また原理的には波長分解能も任意に高くすることができる。観測的には、特定の波長のオフバンドを取得することができるため、on-lineバンドか差し引きすることで輝線強度の見積もりが容易にできる。さらに、透過波長を狭めることで、バックグラウンドを小さくすることも可能であり、FP分光器は比較的バックグラウンドが大きな地上からの観測にも対応することができる。

一方、デメリットもいくつかある。各次数に応じた透過光が周期的に現れるため、monochromaticな観測を行うには次数選択が必要になる。メカニカルには、波長走査を行うための光学素子の駆動機構や間隔を測距する機構が必要である。さらに広い波長範囲をカバーするには光学素子への要求が厳しくなる他、検出器とのマッチングも必要となる。

## 開発要素

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機構および測距機構の開発が必須となる。本開発研究でのポイントは以下の通りである。(1) ほぼ近赤外線波長全域に渡ってフラットな反射特性を低温で実現する多層膜を有した大口径光学素子の製作、(2) 平行におかれた2枚のエタロンの平行度を保持しつつ、微小距離の走査するための駆動素子（ピエゾアクチュエータ）の選定と入手、(3) 光学素子のギャップ間を測定、光学素子間隔調整フィードバックするための静電容量型測距センサーの選定と入手、(4) これらを取り付けるためのアルミニウム製の試作モデル筐体の製作である。さらに(5) ピエゾ素子駆動と静電容量センサーによる測距をクローズドループ制御することで、常にエタロンの間隔・平行性を維持しながら波長走査を行うリアルタイム制御系の設計・製作も必須である。

## 分光器の仕様

分光器の仕様を表1に示す。特筆すべきところは、近赤外線1~2.5umまでカバーすること、真空・冷却下で使用されることである。光学素子は、反射フィネスを高く保つために高い反射率となっている。また多重反射の効率を高くするためにエタロンの面精度を高くしておく必要がある。一方効率を考えると、吸収率を出来るだけ低く抑えることが重要になる。光学素子の基板は石英（Fused Silica）を用い、最適な多層膜コートを施すことで、反射率および面精度を実現した。反射フィネスが $R=78$ の場合、有効フィネスが $F_{eff}=59$ となり、吸収率を考慮した実効フィネスは $F_{eff\_A}=50$ となる。波長2umで、次数として $m=100$ 次を選択すると、波長分解能は $R\sim 5000$ が実現できる。

- (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**  
 ウエッジ ..... 有り  
 裏面処理 ..... 反射防止膜  
 反射率 .....  **$R \sim 96 \pm 1\%$  (1.1~2.5um)**  
 吸収率 .....  **$A < 0.5\%$  (1.1~2.5um)**  
 面精度 .....  **$\lambda/150$  @2μm ( $\lambda/47$  @633nm)**
- (3) FP分光器としての性能  
 波長 ..... 2μm  
 次数 .....  $m = 100$   
 エタロン間隔 .....  $d = 100\mu\text{m}$   
 FSR .....  $\text{FSR} = 0.02\mu\text{m}$   
 反射フィネス .....  $R = 78$  ( $R = 96\%$ )  
 粗面フィネス .....  $F_s = 90$   
 有効フィネス .....  $F_{eff,0} = 59$   
 実効フィネス .....  **$F_{eff\_A} = 50$**   
 波長分解能 .....  **$R = 5000$**

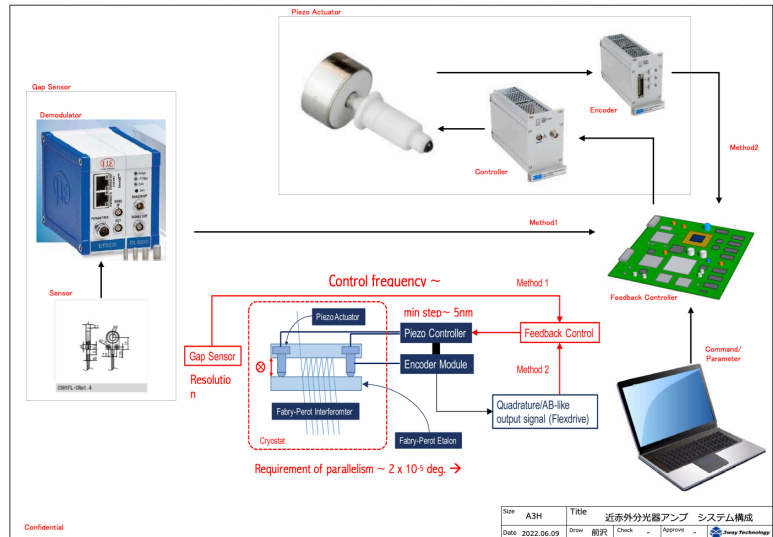


表1：ファブリ・ペロー分光器の仕様。

図2：駆動・測距システムの概念図。

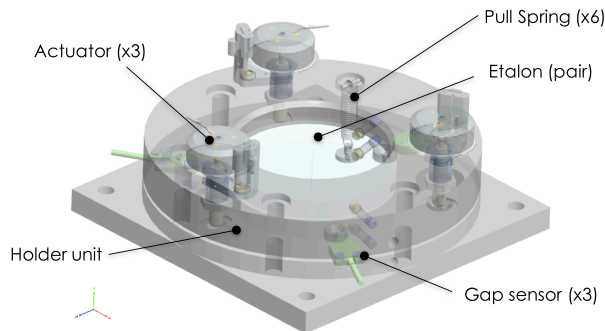


図3：ファブリ・ペロー分光器の概念図。

## 分光器の設計

この分光性能を維持するためには、2枚のエタロンの平行度が $2 \times 10^{-5}$  degree以下であることが要求される（口径 $\Phi 70\text{mm}$ の場合）。これを達成・維持するためのメカニカルな機構として、3組のアクチュエータと測距センサーを組み合わせたシステムを構築した。3箇所のギャップセンサーでエタロン間隔を測距し、その値が同じ値になるようにア

クチュエータをフィードバック制御する機構、つまりリアルタイムアクティブコントロールシステム（RTAC）である。その概念図を図2に示す。フィードバック制御は~100Hz程度で行えば十分である。

メカニカルな概念設計を図3に示す。2枚のエタロンのうち、1枚のエタロンは固定され、もう一方のエタロンを保持したホルダーを可変にすることで、2枚のエタロンの間隔を任意に変えることができ、前述のRACSで制御することで、平行度も維持することができる。アクチュエータと測距センサーは3セットを等配対称に配置することで、任意の面制御が可能になる。つまり2枚のエタロンの間隔を平行度を保ったまま変化させることが可能になる。

### 分光器の製作

駆動素子には、いくつかの選択肢がある（リニアモータや電磁石、微細ネジ、 piezoアクチュエータ、他）。この分光器は真空冷却で使用されることや、精度、発熱、リニアリティ、ヒステリシス、耐久性などの項目を考慮して駆動素子を選定した結果、本目的に適した低温での微小駆動が可能なpiezoアクチュエータを採用した。今回選定した駆動素子は、JPE社製のpiezoアクチュエータ（CLA2201-COE）で、これは従来のpiezo素子では低温での稼働で問題とされていた熱サイクルによる素子の破損や、低温では高い駆動電圧が必要になるなどの問題をクリアした製品となっている。また、今回完成を目指す分光器の仕様を満たすための駆動距離および精度を有している。

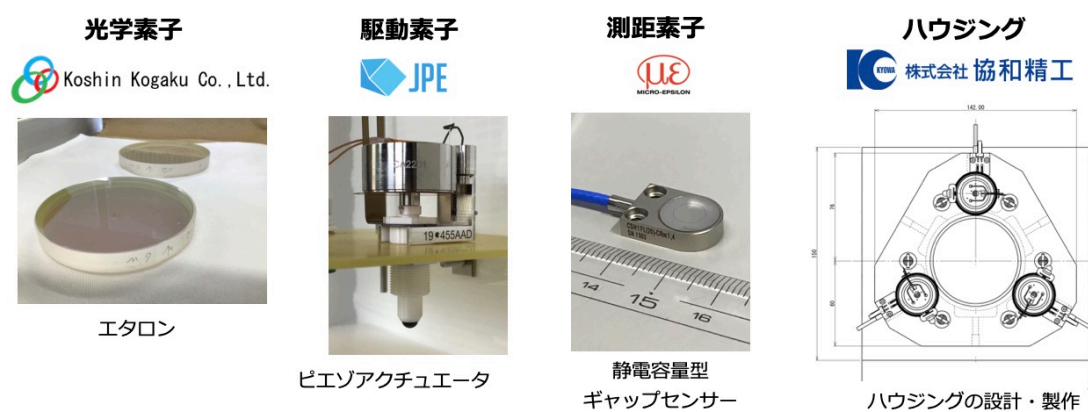


図4：ファブリ・ペロー分光器の主要コンポーネント。

このアクチュエータの制御のためには、光学素子間の距離を測定する必要がある。測距センサーとしては非接触・低温で測距可能な、静電容量型変位センサーを選択した。（マイクロプシロン社製CSH1FL(20)-CRm1.4）。実際運用では、このセンサーの値を基に、3箇所の測定点のエタロン間の距離が等しくなるようにアクチュエータをフィードバック制御することになる。これらをアルミニウム製のホルダーに取り付け、分光器評価モデルを完成させた（図5）。開口の有効径は60mmあり、比較的大きな口径の望遠鏡での使用を想定している。

前述の通り、分光器としての性能を実現するためには、2枚のエタロンの平行度を維持することが必須である。また任意の波長の選択する（波長走査する）ためには、エタロン間隔を変位させる必要がある。このための制御系を独自に開発した。これは3対の駆動素子+測距センサーを独立に制御、さらに各々の測距値を取得し、これらが同一値になるようにフィードバックをかけることで、エタロンの平行度を維持しつつ、駆動させる、つまり波長走査を行うことができる（図2）。

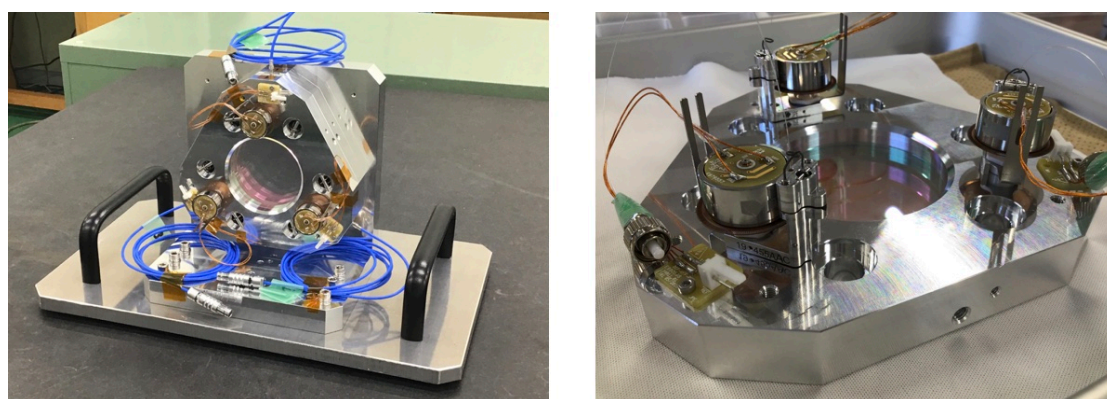


図5：ファブリ・ペロー分光器性能評価モデル外観。

## 性能評価試験

分光器としての性能評価の前に、アクチュエータと測距センサーを組み合わせた駆動機構単体試験を行った。ほぼ最終的な分光器と同等の筐体にアクチュエータと測距センサーを取り付け、1軸のみ駆動させ、変位量とその精度や再現性を測定した。測距センサーは素子間の距離に応じて電圧が出力されるが、これと実際の距離を比較し、この結果をアクチュエータの制御パラメータに反映させることで、任意の距離の制御が可能になる。絶対的距離の測定には、ナノレベルでの測距が可能なキーエンス社製のレーザ測距計CL-S150も併用した。実験は環境や分光器の温度変化による構造体の熱変形を防ぐために、温度管理ができる恒温室で行った。また振動による測定値の変動を防ぐために防振定盤上で行われた。

任意の間隔（1000nm~1μm）の繰り返し駆動試験の結果を図6（左図）に示す。アクチュエータの最小駆動距離（1 digit）は25nmであり、繰り返し駆動でのバラツキはその範囲内に収まっている。図6（右図）は、最小変位駆動試験の結果である。1 digit毎の変位は不定性が大きいため、一旦数digit（@~100nm）変位させた後に、ターゲットの位置へと2段階駆動させている。この結果、最小変位においてもターゲットポイントへの到達精度を達成していることが確認された。

この試験で得られた基本動作パラメータを用いて、他の2組のアクチュエータ+ギャップセンサーの動作試験を行い、同様の性能を有していることも確認した（図7）。また変位のリニアリティも測定した。数往復の変位を測定したところ、往復でのヒステリシスもなく、コントロールの範囲内でリニアに駆動することを確認した。

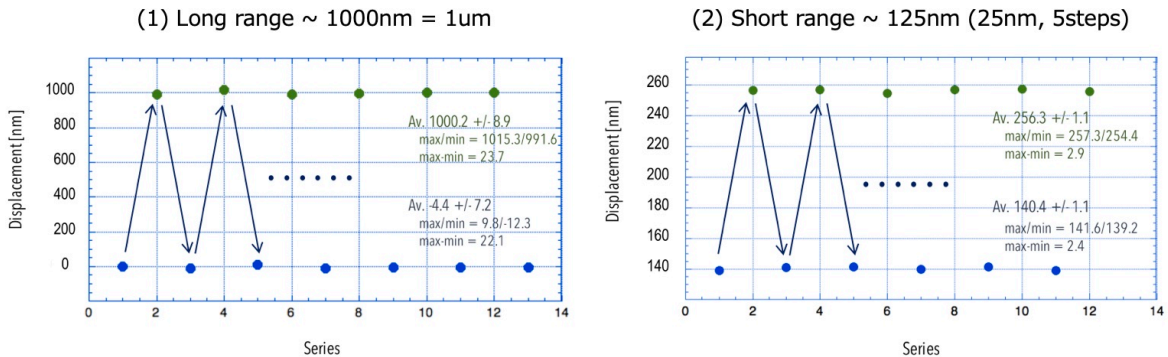


図6：駆動試験。左図はロングレンジ、右図はショートレンジで繰り返し変位させた結果。

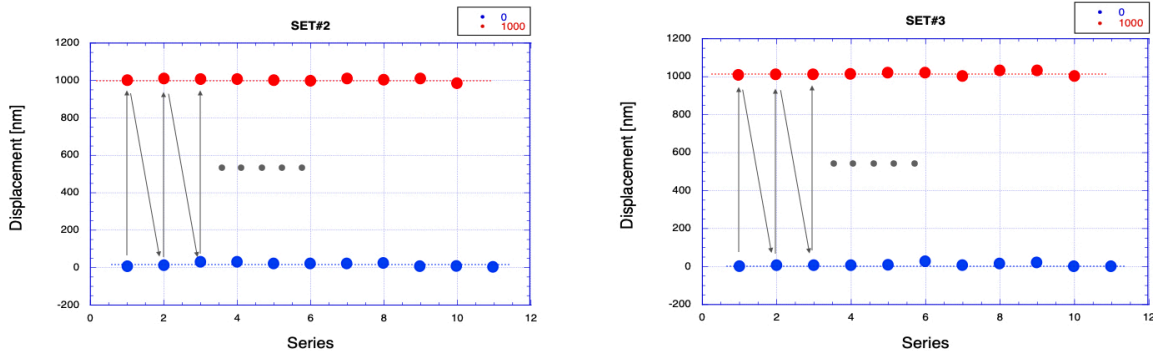


図7：SET1で得られた駆動パラメータを用いて、他の2セットを駆動させた結果。同様のパラメータで駆動することができることを確認した。実際の3次元駆動は各々のパラメータをさらに詳細にチューニングして高い平行度を実現する。

さらに、コリメートされたレーザー光（He-Ne:633nm）を用いて、干渉光の様子を観察した（図8左）。前述のパラメータを用い、大凡の平行度で調整したのち（図8中央）、独立した3軸（3セット）の微細調整を行うことで、ビーム径範囲で平行性が実現できることを確認した（図8右）。

## 今後の展開

本分光器は実運用では冷却環境下で行われる。クライオスタット、低温用ハウジング治具、温度計や測距計セットアップなど低温での動作試験のための準備を進めている。制御系として、ギャップセンサーの測定値を反映させたフィードバック制御を実現するための専用アプリケーションの開発も進められている。将来的な観測を見据えて、検出器モジュールと組み合わせた分光器としての性能評価、さらに望遠鏡に搭載した状態での動作試験も視野に入れつつ、新分光モジュールの開発を計画中である。

