

# Development of fiber link with pupil slicer for high dispersion spectrograph of the 8.2m Subaru Telescope

## すばる望遠鏡高分散分光器用瞳分割ファイバリンクの開発

Wataru FUJI and Moriaki WAKAKI

*Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292, Japan*

*TEL: +81-463-1211 (EX.4435), FAX: +81-463-59-2594,*

*e-mail:3aaom019@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp*

Noboru EBIZUKA

*Integrated V-CAD System Research Program, RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research) Wako, Saitama 351-0198 Japan*

*TEL: +81-48-467-4992, Fax: +81-48-467-5407, e-mail:ebizuka@riken.jp*

Naotaka SUZUKI

*University of California, San Diego, Center for Astrophysics & Space Sciences, 9500 Gilman Dr. CASS 0424, La Jolla, CA92093*

*TEL: +1(858)534-8575, e-mail:suzuki@ucsd.edu*

Takayuki KOTANI

*Tokyo University and LESIA Observatoire de Paris 5, Place Jules Janssen 92195 Meudon Cedex, TEL: +33-1-4507-7962, e-mail:takayuki.kotani@nao.ac.jp,*

Masanori IYE

*Subaru Telescope Scientist, Optical & Infrared Astronomy Division, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588*

*TEL: +81-422-34-3520 (direct), FAX: +81-422-34-3527, e-mail:iye@optik.mtk.nao.ac.jp*

A fiber link with pupil slicer (FPS) consists of a lens array and 7 fibers, and an optics transforming output focal ratio. The FPS opens up possibility for opening the entrance aperture of the HDS of Subaru Telescope from 0.8 to 0.27 arcsecond to attain resolving power three times as high as 150,000 in comparison with entrance slit width. We present two concrete examples for applying the fiber, method for measuring the degree of FRD of an optical fiber and spectroscopy observation of spectral type stars.

**Keyword:** fiber, pupil slicer, fiber ratio degradation, FMOS

## I. INTRODUCTION

2002年8月の時点で、日本のすばる望遠鏡をはじめ、世界中で口径8m以上の望遠鏡が9台稼働し、さらに6台が建設中である。人類が宇宙を見る「目」は、この10年で格段に向上してきている<sup>1)2)</sup>。

近年、各地の天文台は、観測効率向上を目的とし、天体分光観測装置とファイバを組み合わせて同時に複数の天体スペクトルを得ることを可能とするさまざまなファイバ分光観測装置を開発している。

ヨーロッパ南天文台(ESO)は、チリ山頂に建設した Very Large Telescope(VLT)用多天体ファイバ分光観測装置として「FLAMES」を開発している。また、日本の国立天文台では1998年、ハワイ島マウナケア山頂(4,205m)に完成したすばる望遠鏡用<sup>3)</sup>として、30分角の広い視野を持つすばる主焦点を有効活用するため、第二期観測装置として2005年運用開始を目標に、ファイバ多天体分光器「FMOS」<sup>3)</sup>の開発が行われている。FMOSは専用分光器を用いた場合、同時に数

百個の天体をスペクトル分解能  $R < 10,000$  まで分光観測を行うことが可能である。

現在は天体観測数に主眼が置かれているが、将来、地球外生命探査や宇宙誕生起源などの分野の「分光」並びに「撮像」観測において、超高分解能観測が要求されてくると考えられる。分解能を上げるためには、分光器スリット径を小さくし、同時にスリットに入射する光量を増加させる必要がある。必然的にファイバ径を大きくせざるを得ず、分解能が低下してしまう。また、地上にある望遠鏡は、大気揺らぎによって星像の直径が定まり、しばしば分光器のスリット幅を上回ってしまう問題がある。

そこで、Fig.1、Fig.2、Fig.3に示すような瞳分割ファイバリンク (fiber link with pupil slicer: FPS) を用いることで、同時に10個程度の空間的に広がりを持つ天体(銀河やクエーサ等)に対して  $R < 30,000$  までの高分散分光観測を効率よく行うことが可能となり、スペクトル観測の効率向上が期待される<sup>1)</sup>。

## II. PRINCIPLE OF FIBER PUPIL SLICER

FPSは、望遠鏡の瞳像をコリメートレンズにより平行光束とし、その光束をレンズアレイ (Fig.2a) で分割する。分割された光束は、各々レンズアレイによりファイバアレイ上に結像され、ファイバ内を透過し、F変換射出レンズに入射する。

Fig.1 の FPS 原理図上の数値は、ハワイ島マウナケア山頂 (4,200m) での平均的な星の視直径 (Seeing Size) と、すばる望遠鏡ナスマス焦点 F/12.6 の仕様を考慮した値である。

FPS を用いて望遠鏡焦点の口径比 F/12.6 をコリメートレンズとレンズアレイで F/4.7 と F 変換し 50  $\mu\text{m}$  径のファイバに入射する。ファイバからの射出光を、再びレンズを用いた元の F/12.6 に還元している。観測対象のサイズにより、瞳分割用レンズアレイ、ファイバのコア径、および射出側ファイバの配置を選択することで、任意の天体に対応が可能である。

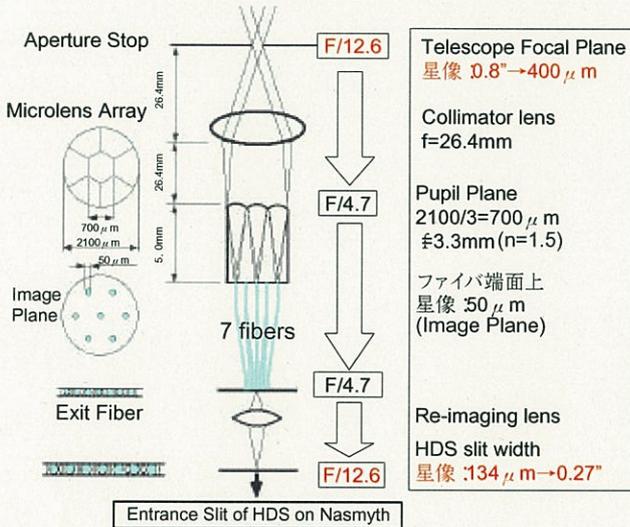


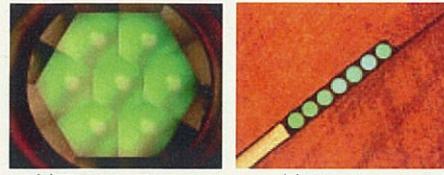
Fig.1 Principle of fiber pupil slicer (FPS)

つまり、分光器スリットの前方に FPS を配置することで、ファイバ入射側 (Fig.1 の Image Plane) に比べ、ファイバ射出側 (Fig.1 の exit fiber) でファイバを並べ替えることにより、スリット幅を 1/3 にした場合と等価となり、光量を損失することなく所望の分解能を得ることが可能である (Fig. 1、Fig.2、Fig.3 参照)。



Fig.2 Prototype Fiber Pupil Slicer Unit  
Seven optical fibers, the surrounding clad layer thickness of 12.5  $\mu\text{m}$ .

HDS において  $R < 100,000$  が得られる 0.27 秒角の入射スリットの代わりに、0.8 秒角の開口径を持つ FPS 用いることにより、3 倍の分解能  $R < 150,000$  を達成することが可能となる。



(a) Entrance lens array (b) Exit fiber  
Fig.3 Fiber Pupil Slicer (Microphotograph)

## III. EXPERIMENTAL SET-UP FOR FRD MEASUREMENT

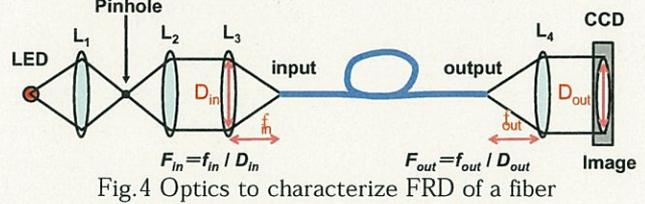


Fig.4 Optics to characterize FRD of a fiber

光ファイバ伝送損失要因の中でも、外因性散乱の一つとして、ファイバ分光器において入射 F 値に対して射出 F 値が小さくなってしまふ現象がある。これは、Focal Ratio Degradation (FRD)<sup>4)</sup> と呼ばれ、ファイバ分光観測を行う際には、ファイバ射出側で光束が広がるため分解能が下がり、同時に透過率が低下してしまふ問題になる。

今回の測定では、ファイバ両端のフェルールとファイバ (フジノン製) を固定する樹脂系接着剤に着目し、OF-20、2057 および 353 を用いた 3 本のファイバについて、FRD 測定を行った。測定光学系は Fig.4 に示すように、ファイバ前方のレンズ L<sub>3</sub> により任意の口径比  $F_{in}$  値の光束をファイバへ入射させ、レンズ L<sub>4</sub> により平行光束にし、CCD に投影、射出画像を取得した。射出画像直径  $D_{out}$  と L<sub>4</sub> の焦点距離  $f_{out}$  から、射出  $F_{out}$  値を算出し、入射  $F_{in}$  値と比較し FRD を評価することを目的とした。

## IV. RESULTS & ANALYSIS FOR FRD OF FIBER

Fig.4 光学系の冷却 CCD により得られた画像 (Fig.5) を天体画像処理ソフト IRAF を用い、点像の中心 (非対称の点像の場合は重心) からの半径の円内に含まれる光量に関して、最大値を 1 として正規化を行い、ファイバ射出側  $F_{out}$  を算出しグラフ化したものをそれぞれ Fig.6(a)、Fig.6(b)、Fig.6(c) に示す。射出画像 (Fig.5) の直径から得た射出光束の  $F_{out}$  値をもとめたものを Table1 および Fig.7 に示す。入射  $F_{in}$  値が  $F_{in}/1.3 \sim F_{in}/2.8$  まで、ほぼ射出  $F_{out}$  値はほぼ一定の値を示

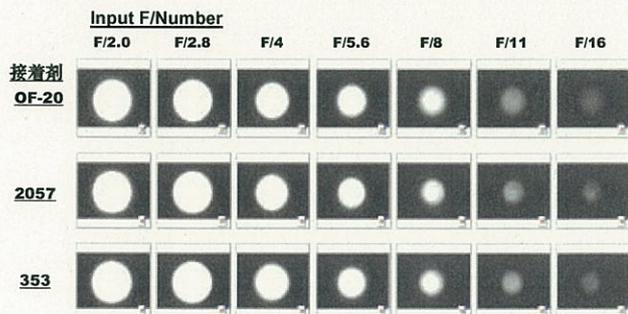
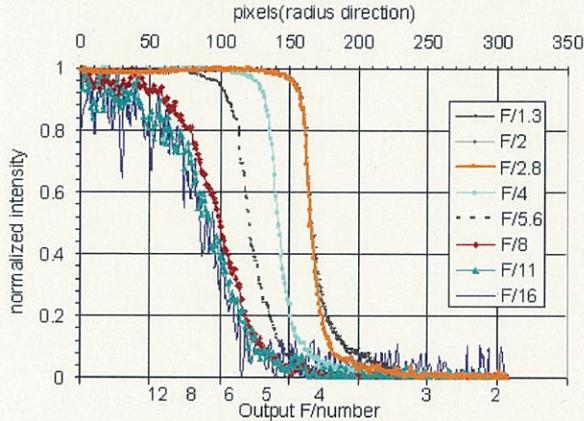


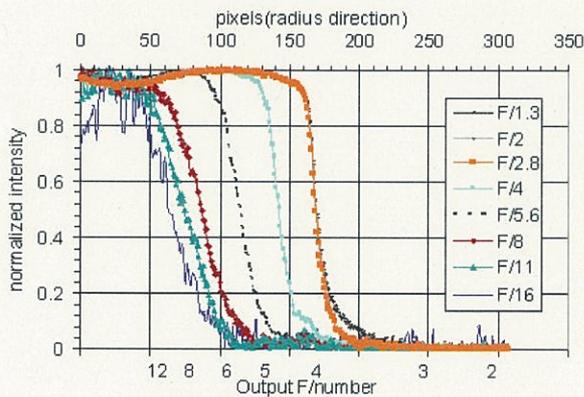
Fig.5 Input F/Number vs. output image

しており、ファイバ自身の NA に対応していると考えられる。入射  $F_{in}$  値が  $F_{in}/8.0 \sim F_{in}/16.0$  の範囲では、射出  $F_{out}$  値は全てのファイバにおいて、理想値より低くなっており、接着剤の違いにより各々大きく異なっている。入射光のファイバ内での伝搬において、歪み等によりより高次の伝搬モードが発生するために、 $F_{out}$  値が  $F_{in}$  値に比べ小さくなると考えられる。

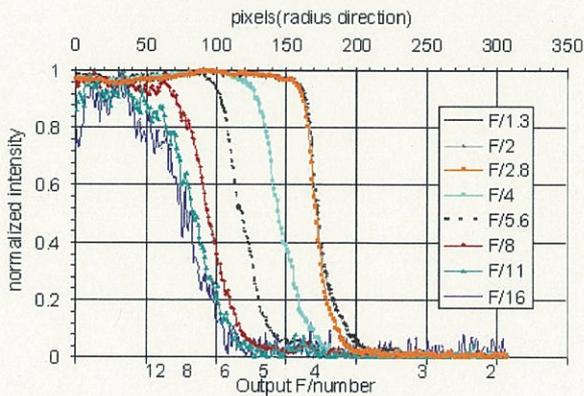
また、3種類の接着剤それぞれの射出  $F_{out}$  値に関して、入射光  $F_{in}/4 \sim F_{in}/5.6$  においては、入射  $F_{in}$  値と同等な値を示していることが Table 1 より分かる。以上より、Ideal Fiber と最も類似する樹脂系接着剤は、「2057」であることが分かる。



(a) OF20 focal ratio degradation



(b) 2057 focal ratio degradation



(c) 353 focal ratio degradation

Fig.6 FRD of fiber

The vertical axis is the normalized peak intensity, the horizontal axis is Output F/number

Table 1 Input versus output F/number derived using FWHM of the image intensity

Input F/number	Output F/number		
	OF-20	2057	353
1.3	3.8	3.7	3.7
2.0	3.8	3.7	3.7
2.8	3.8	3.7	3.7
4.0	4.4	4.4	4.3
5.6	5.2	5.4	5.3
8.0	6.3	7.2	6.6
11.0	6.7	8.3	7.4
16.0	7.3	9.9	8.2

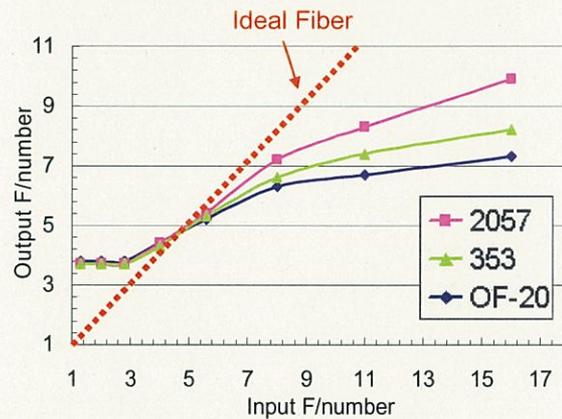


Fig.7 Input versus output F/number derived using FWHM of the image intensity

## V. FPS SPECTROSCOPY

FRD の良好な 2057 を用いた Fiber Pupil Slicer (FPS) による恒星スペクトル試験観測を行った。Fig. 8 は口径 25cm,  $F/4$  の反射望遠鏡に取り付けて天体による試験観測を行うため、プロトタイプ FPS とグリズム (直視透過型回折格子) を用いた分光装置を開発し、FPS を用いた分光観測装置について有効性の検証を行った。分光光学系の仕様については、Table 2 に示す。

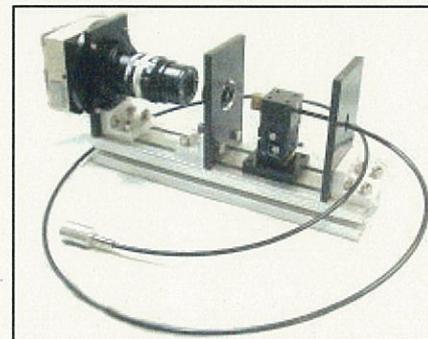


Fig.8 Prototype Spectrometer to test the performance of FPS

Table 2 Specification of the prototype spectrometer with FPS

Prototype fiber pupil slicer unit, each of fiber diameter is $100\ \mu\text{m}$ Collimator lens : $f=38\text{mm}$ , F/2.8 Grism :150grooves/mm Camera lens $f=28\text{mm}$ , F/2.8 CCD : MUTOH CV-04L(768×512)
--

## VI. TEST OBSERVATION WITH FPS

2003年11月24日東京都三鷹市国立天文台開発実験センター3Fに設置されている望遠鏡にFPS Spectrometer (Fig.8)を取り付け、試験スペクトル観測を行った。

恒星、および参考としてある程度面積をもった人工光源LED (520nm)と蛍光灯を観測した。それぞれのスペクトル観測結果をFig.10に示す。今回の観測では、7本すべてのファイバから一様に、光線が射出していないことがみてとれる。これは、望遠鏡の焦点位置でファイバに恒星の光を入射させる部分(Fig.10の拡大図)において、y軸方向の振り調整機構が不足していた事が原因として挙げられる。ここで、望遠鏡

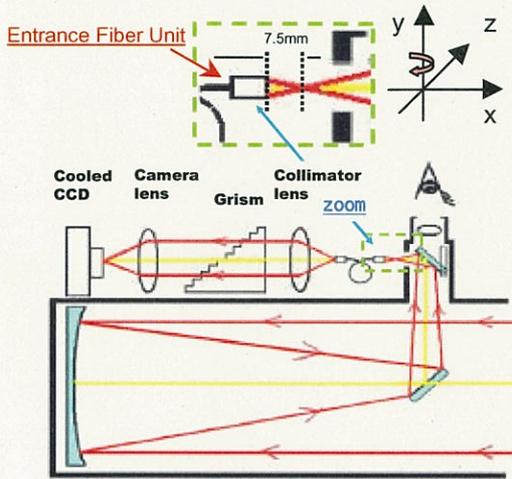


Fig.9 10 inches F/4 Newtonian telescope with FPS

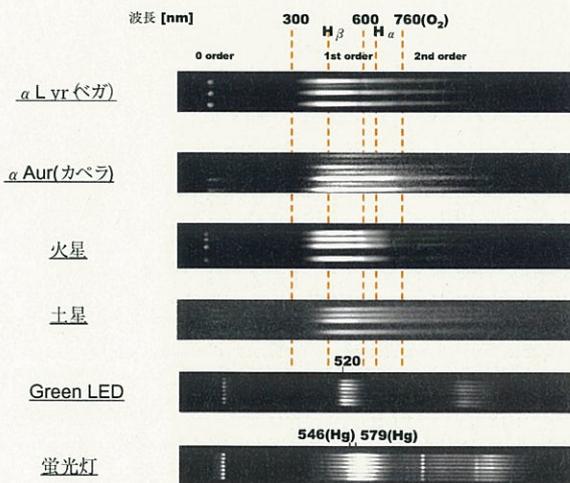


Fig.10 Spectra of light source, stars and planets

の光軸方向をx軸、ファイバ入射ユニットの中心を3軸の原点、高さ方向をy軸、奥行き方向をz軸としている。

## VII. SUMMARY

接着剤を3種類換えたFiberについてのFRD測定実験では、2057が最も良好な値を示した(Fig.8, Fig.9を参照)。分光器の分解能と透過効率低下を引き起こすFRDの主要因は、ファイバとフェルールの接着剤の硬化時の収縮と、ファイバ自身の曲げ等による歪み(microbend)であると考えられる。FRDの発生が小さい組み合わせを選択することによって高効率のFPSを実現することが可能である。

FPS Spectrometer (Fig.8)による恒星スペクトル試験観測では、すべてのファイバで光量を一樣に射出させることが必要である。ニュートン反射式F/4望遠鏡で集光した光をFPSに入射させる箇所において、望遠鏡光軸に対する、ファイバ光軸の振り方向調整軸を追加する必要がある。

また今後、FPSと透過型分光素子(Volume Phase Holographic Grating :VPHG)を組み合わせることにより、安価で省スペースな分光装置の開発を検討している。

## REFERENCE

- 1) Masanori IYE, Noboru EBIZUKA, and Hideki TAKAMI, Fiber pupil slicer, A versatile light feed for spectrograph, Proc. SPIE 3355, 417-423, 1998
- 2) 家正則, すばる望遠鏡, 株式会社岩波書店, pp.29-63, 2003.
- 3) Masahiko KIMURAY, Toshinori MAILHARA, Kouji OHTA, Fumihide IWAMURO, Shigeru ETO, Masafumi IINO, Daisaku MOSHIDA, Takanori SHIMA, Hiroshi KAROJI, Junishi NOUMARU, Masayuki AKIYAMA, Jurek BREZESKI, Peter GILLINGHAN, Anna MOORE, Greg SMITH, Gavin B. DALTON, Ian TOSH, Graham MURRAY, David ROBERTSON, and Naoyuki TAMURA, Fibre-Multi-Object Spectrograph (FMOS) for Subaru Telescope, Proc. SPIE 4841, 974-984, 2003.
- 4) Lawrence W.RAMSEY, FOCAL RATIO DEGRADATION IN OPTICAL FIBERS OF ASTRONOMICAL INTREST, Astronomical Society of the Pacific, Provided by NASA Astrophysics Data System, 1988.
- 5) Jean GUERIN and Paul FELENBOK, OPTICAL FIBER FOR ASTRONOMIC APPLICATIONS, Astronomical Society of the Pacific, Provided by NASA Astrophysics Data System, 1988
- 6) Ian R. PARRY and Esperanza CARRASCO, Deep Fiber Spectroscopy, SPIE Vol.1235 Instrumentation in Astronomy VII, pp702-703, 1990
- 7) Peter GRAY and Keith TAYLOR, Fiber Optic Instrumentation for the Wide-Field AAT Prime focus: the 2dF, SPIE Vol.1235 Instrumentation in Astronomy VII, pp709-712, 1990
- 8) C. Vanderriest, Integral field spectroscopy with optical fibers, 3D Optical Spectroscopy Methods in Astronomy ASP Conference Series Vol.71, pp209-218, 1995
- 9) Samuel C. BARDEN, The Use and Benefits of Optical Fiber in Spectroscopy, Optical Astronomy from the Earth and Moon ASP Conference Series Vol.55, pp130-133, 1994