

# Observation of three-dimensional structure of the zodiacal light with EXZIT onboard the Solar Power Sail spacecraft

(ソーラー電力セイル探査機搭載 EXZIT による黄道光立体構造観測)

Kohji Tsumura<sup>1</sup>, Shuji Matsuura<sup>2</sup>, Mai Shirahata<sup>3</sup>, Toshiaki Arai<sup>1</sup>, Yosuke Onishi<sup>4,5</sup>, Kei Sano<sup>5,6</sup>, Fumihiko Usui<sup>6</sup>, Takafumi Ootsubo<sup>6</sup>, Ryosuke Nakamura<sup>7</sup>, Osamu Mori<sup>5</sup>, Hajime Yano<sup>5</sup>, Takahiro Iwata<sup>5</sup>, Mitsunobu Kawada<sup>5</sup>, Takehiko Wada<sup>5</sup>, and EXZIT team, Solar Power Sail WG

<sup>1</sup>Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University  
6-3 Aramaki Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan

<sup>2</sup>School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University  
2-1 Gakuen, Sanda, Hyogo, 669-1337, Japan

<sup>3</sup>National Astronomical Observatory of Japan  
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan

<sup>4</sup>Department of Physics, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 O-Okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8551, Japan

<sup>5</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency  
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210, Japan

<sup>6</sup>Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan

<sup>7</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568 Japan

## ABSTRACT

We are developing the Exo-Zodiacal Infrared Telescope (EXZIT) onboard the Solar Power Sail (SPS) spacecraft to a Jovian Trojan asteroid. We will observe three-dimensional structure of the zodiacal light with EXZIT during the cruising phase to Jupiter. By this EXZIT observation, we can investigate radial profiles of number density, composition, albedo of interplanetary dusts. In deep space beyond the main belt, minor interplanetary dust components, such as dust influx from outer solar system and interstellar dust, might be detected.

## 1. 太陽系の立体構造の観測

黄道光とは惑星間ダストによる太陽光の散乱光および熱放射のことである[1]。赤外線天文衛星 IRAS や COBE による観測から惑星間ダストの 3 次元分布モデルが構築されたが[1,2,3]、視線方向のダストを積分して見るという黄道光観測の原理的な不定性により、黄道面外や外惑星領域 (>3AU) のような密度が低い場所でのダスト分布は明らかになっていない。地球近傍の惑星間ダストの主な起源は小惑星の衝突破砕と彗星活動と考えられており、前者は黄道面に集積し小惑星帯以遠で消滅するが、後者は黄道面外にも一様に分布することが予測される[4]。外惑星領域では星間ダストの寄与も予想される[5]。この他、小惑星族に付随するダストバンド[2,6,7]や地球とのレゾナンスによるダストリング[8]などの構造が黄道光において知られているが、最近は系外惑星においてもこのような構造が観測されつつある[9]。このように、惑星間ダストの 3 次元分布を軌道成分ごとの起源を明らかにする事は、惑星系形成の過程を理解する上で重要である。特にシリケートや含水鉱物に特有の波長 1  $\mu\text{m}$  や 3  $\mu\text{m}$  付近の近赤外線吸収を、ダスト成分ごとに黄道光スペクトルとして測定すれば、ダスト組成とその起源に関する極めて重要な情報となる[10]。

## 2. ソーラー電力セイル搭載小型赤外線望遠鏡 EXZIT

現在、JAXA 宇宙科学研究所において次世代の惑星探査機として検討が進められているソーラー電力セイルでは、木星トロヤ群小惑星の探査を目指している。ソーラー電力セイルは、太陽光圧と電気推進とを組み合わせたハイブリッド推進システムによる外惑星探査の工学実証ミッションである。Fig.1 のように、打上げ後約 2 年におよぶ地球スイングバイを経て木星に向かい、木星スイングバイにより木星トロヤ群小惑星へ到達する。

地球から木星への約 3 年のクルージング期間中に黄道光観測すれば、その微分値として惑星間ダストの 3 次元分布を測定できる。これまでに Pioneer10/11 により、黄道面内のダスト分布が測定された例がある[11]。本研究では、ダストの組成を調べるために重要な近赤外線波長域で高精度の観測を行うことで、惑星間塵の組成や起源を切り分けながらその立体構造を明らかにする。また、外惑星領域からの黄道光に邪魔されない宇宙赤外線背景放射[12,13]の直接観測も行

う。我々は現在、その実現に向けて、ソーラー電力セイルに搭載する赤外線分光計 EXZIT (Exo-Zodiacal Infrared Telescope)を開発している[14]。

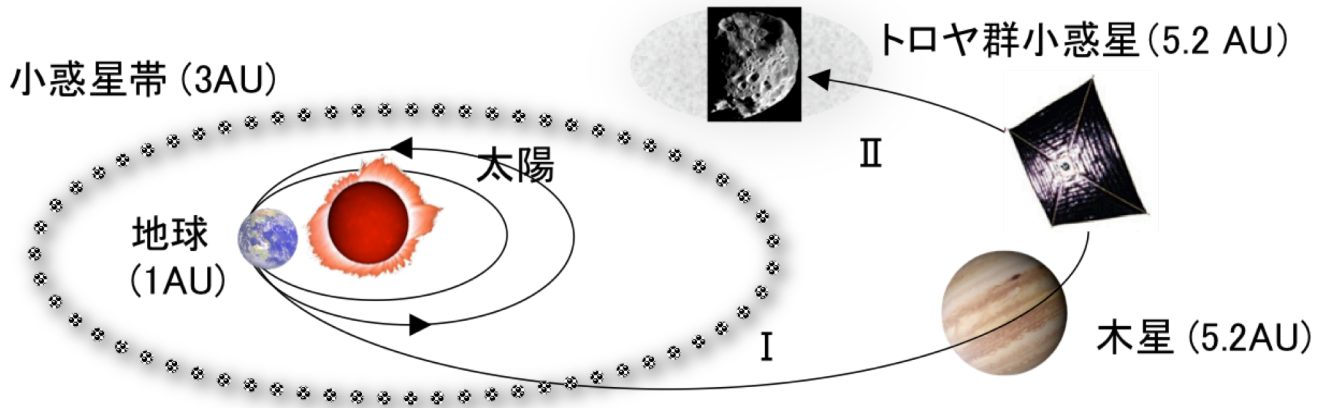


Fig. 1 Mission sequence of the Solar Power Sail mission

### 3. EXZIT の仕様

様々な科学計測機器を備える惑星探査機において、個々の観測装置は可能な限り小型でなければならない。また、外惑星領域への到達までの長期間、継続的に稼働しうる信頼性と耐久性が必要になる。さらに、観測対象である黄道光は暗い拡散光であるため、その観測には高い感度が必要である。例えば、地球近傍の黄道光の表面輝度は、典型的な近地球小惑星の表面輝度より 6-7 桁も暗いため、小惑星観測用の赤外観測機器では検出できず、極低温への冷却による装置自身の熱放射や検出器の暗電流の低減が必須である。一方で我々は今までに、淡い赤外線拡散光を観測できる小型の観測装置を、CIBER[15,16]や CIBER-2[17]等により開発してきた。この技術的蓄積のもと、すでに下記のような概念設計が完成している。

Table 1 に現在想定している EXZIT の仕様を示す。黄道光スペクトルから惑星間ダストの鉱物組成を同定するため、および、宇宙赤外線背景放射スペクトルの全体像を観測するため、波長  $0.6\text{-}2.5\ \mu\text{m}$  での分光観測を行う。必要な比波長分解能は  $\lambda/\Delta\lambda\sim 10\text{-}20$  であり、透過波長が 1 次元的に連続変化するリニアバリアブルフィルター (Linear Variable Filter, LVF)にてそのような分光を実現させる。

Table 1 Specifications of EXZIT

	可視光カメラ	可視近赤外カメラ	中間赤外線カメラ (オプション)
光学系	オフセットグレゴリアン 10 cm 望遠鏡+補正レンズ系		
波長	0.4 – 0.6 $\mu\text{m}$	0.6 – 2.5 $\mu\text{m}$	5 – 10 $\mu\text{m}$
分光方式	焦点面 リニアバリアブルフィルター(LVF)		
波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda$	3 バンド測光	15 LVF 分光	3 バンド測光
FoV	1 deg * 4 deg	0.2 deg * 4 deg	1 deg* 1 deg
視野	HgCdTe 128*128		HgCdTe 単素子
pixel 視野	2 arcmin * 2 arcmin		単ビーム
読出し方式	CMOS マルチプレクサ		CTIA ディスクリート
冷却方式	放射冷却のみ		
検出器温度	< 100 K		<40 K
望遠鏡温度	< 150 K		<70 K
検出限界	拡散光： $\lambda I_{\lambda} \sim 6 \text{ nW/m}^2/\text{sr per field}$ (40 scan, $3\sigma$ ) 点源： $J < 10 \text{ mag}$ (1 scan, $5\sigma$ )		
体積	< 300 $\text{mm}^3$		
質量	光学系 5 kg, 構体 2 kg, 断熱材 1 kg, 計装・電気系 4 kg 合計 12 kg (含 20%マージン)		
データ量	4 kB/data unit $\times$ 16 units / day = 64 kB / day キャリブレーションとダーク測定を含む		

EXZIT はソーラー電力セイル探査機の反太陽面側に取り付けられる予定である。探査機は姿勢安定のため 0.1 rpm で回転している。そこで EXZIT では Fig.2 のように、スピンごとに同じ天域を繰り返し掃くように観測し、そのデータを足し合わせる。したがって EXZIT の観測天域はドーナツ形状となる。探査機の軌道に沿ってこのドーナツ形状の観測天域が移動していくことで広い空の観測が可能となる (クルージング期で $\sim 0.1 \text{ deg/day}$ )。

星の影響がない拡散光観測のためには、10 等より明るい星を除去する必要がある。CIBER では 5cm  $\phi$  の望遠鏡を用いた 1 分間のポインティング観測により近赤外で約 12 等級の星まで検出・除去している[10,18]。EXZIT では、探査機のスピンに伴い望遠鏡視野が天空上を動くスキャン観測を前提とするため、ほぼ同一の天空座標での露

出時間は短く制限される。したがって 10 等級程度までの明るい星を除去するためには 10cm  $\phi$  程度の望遠鏡口径が必要となる。

EXZIT の中間赤外線カメラは、探査機のリソースの観点から、現時点ではオプションとしている。しかしこの波長帯での観測は、10  $\mu\text{m}$  帯には黄道光のシリケートフィーチャーが存在し、さらに黄道光輝度が最大となる波長帯であるため黄道光外からの史上初の拡散光観測が実現できることから、EXZIT による観測のメリットは大きい。

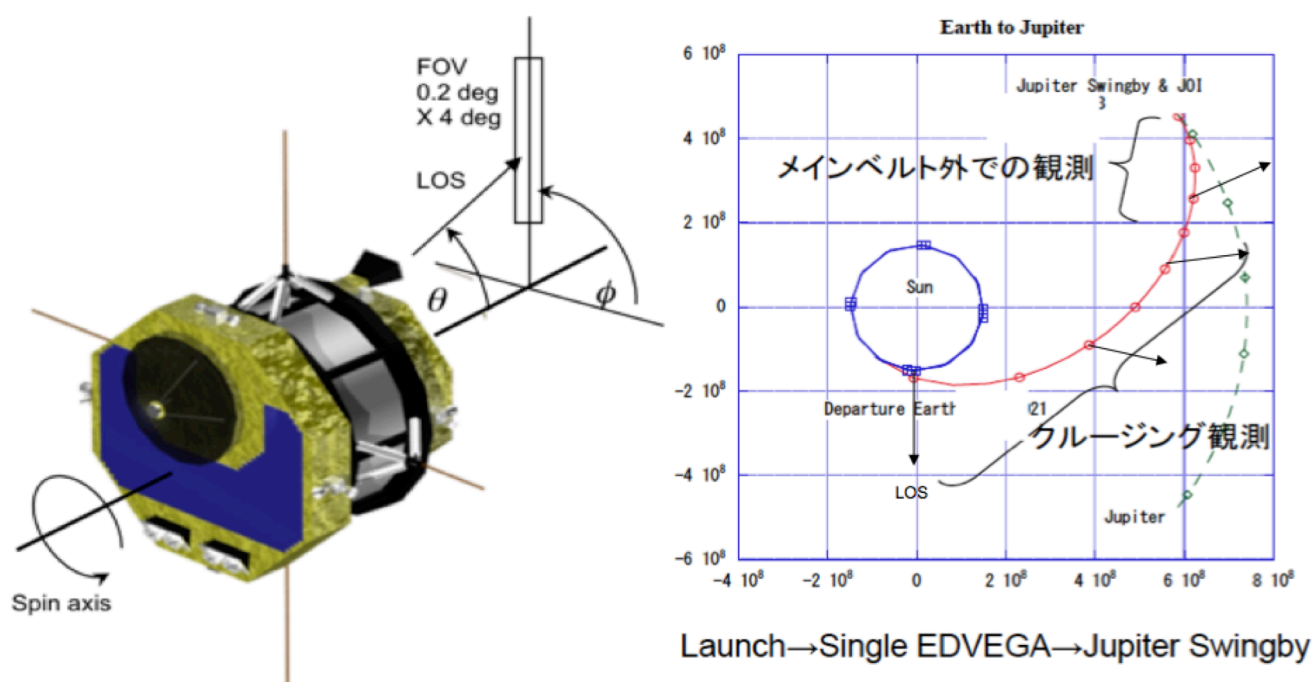


Fig. 2 Observation strategy of EXZIT

## 4. EXZIT の装置構成

### 4.1 EXZIT 光学系

望遠鏡には、拡散光観測に必要な高バツフル性能が期待できる軸はずしグレゴリアン式を採用する。Fig.3 に示すように、10 cm のアルミニウム主鏡からの光は、一旦焦点を結び、副鏡によりコリメートされた後、カメラレンズ系により検出器上で結像する。この新奇な構成により、4 度以上の広視野の設計解が確認されている。アルミニウム主鏡は支持構造と同材料とし低温への冷却時にも歪みが小さ

いことを期待し採用する。このような性能を満たす望遠鏡の設計解は既に得られており、検出器内のあらゆる位置において像サイズが1/4ピクセル内に収まっている (Fig.3)。また、より大口径の30cmアルミニウム主鏡を用いた望遠鏡システムは、現在我々が進めているCIBER-2[17]でも採用しており、その技術蓄積がEXZITでも活用できる。

この主鏡の焦点面にLVFを設置すれば、極めて単純で可動物のないメンテナンス・フリーの分光撮像装置が構成できる。本研究目的に必要な比波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda\sim 10-20$ は、LVFによる実現が可能な範囲である。通常の分光計では回折格子等の分散素子を用いるが、光導入の部品点数が多くなるとともに、広波長範囲で高効率を得ることや広視野を確保することが難しい。LVF方式の場合、特定の方向に望遠鏡を固定して向ける定点観測では波長ごとに視野方向が異なってしまうが、視野が時間的に波長変化方向に移動するサーベイ観測では、スペクトルと空間情報を同時に高効率に取得することが可能である。特に、ソーラー電力セイル探査機はスピン安定の姿勢制

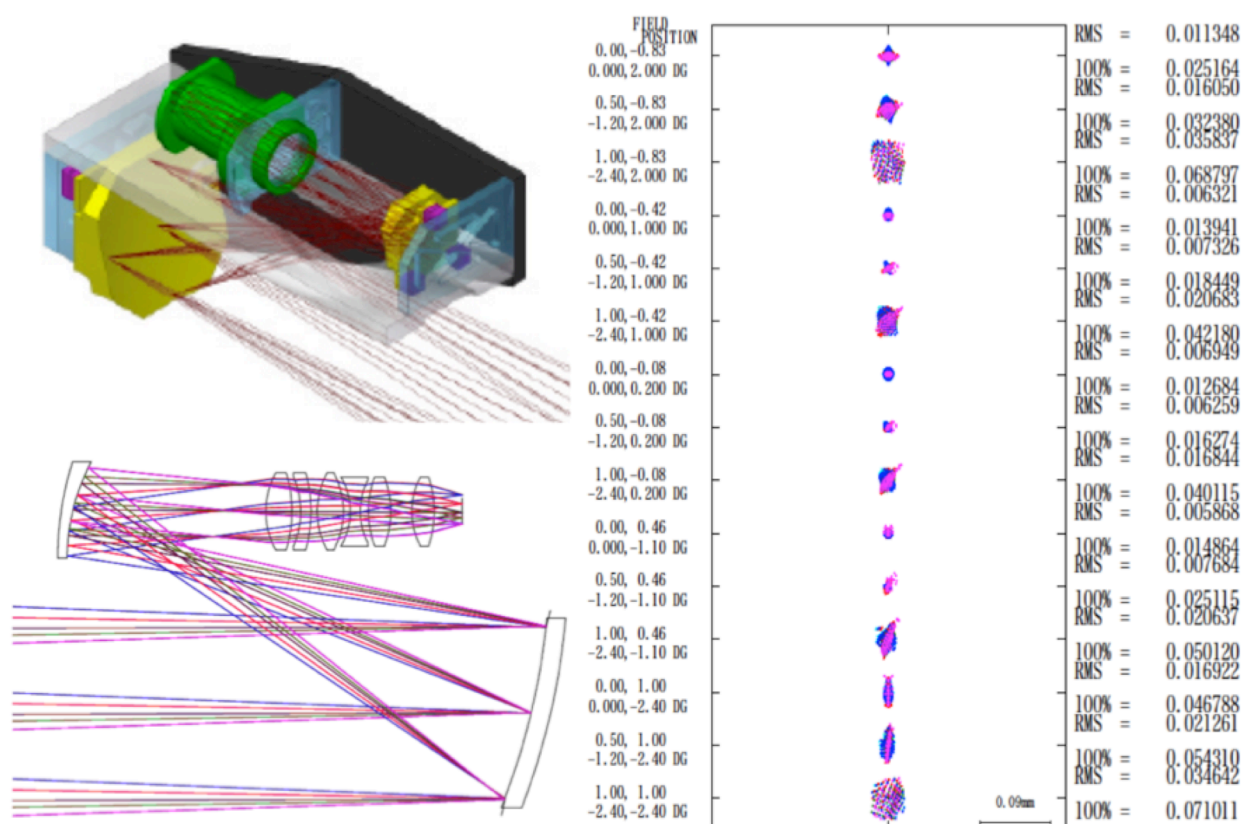


Fig. 3 Conceptual design (left) and optical performance (right) of EXZIT

御方式をとるため、LVF方式の応用に適している。LVFを用いた分光観測装置もCIBER-2にて採用されており[17]、その技術蓄積が活用できる。

## 4.2 EXZIT 構造系

観測装置が単純な構造を持つことは、そのぶん冷却系へリソースを割くことができる点においても探査機搭載への優位性がある。2.5  $\mu\text{m}$  より短い波長での観測に対しては、光学系を140 K以下に、検出器は暗電流が無視できる100 K以下への冷却が要求される。深宇宙探査機では太陽や地球からの熱入力が小さいため、放射冷却のみでこの温度要求を満たすことが可能である。簡易モデルを用いた検討から、探査機構体とのインターフェイス温度が250Kの場合、要求温度以下(80K以下)に放射冷却のみで到達可能であることが確認されている(Fig.4)。

探査機本体からの熱入力は、探査機本体への取付け部を断熱用のMLIで覆うとともに、支持構造にはGFRPなどの断熱構造材を用いることで低減させる。その構造は、はやぶさ2/NIRS3[19]や韓国STSAT-3/MIRIS[20]で実績がある。熱検討を行なった簡易モデルに対して20Gの静加重を印可した場合、材料の強さに対して約3倍の安全余裕をもって耐えることが確認されている (Fig.4)。

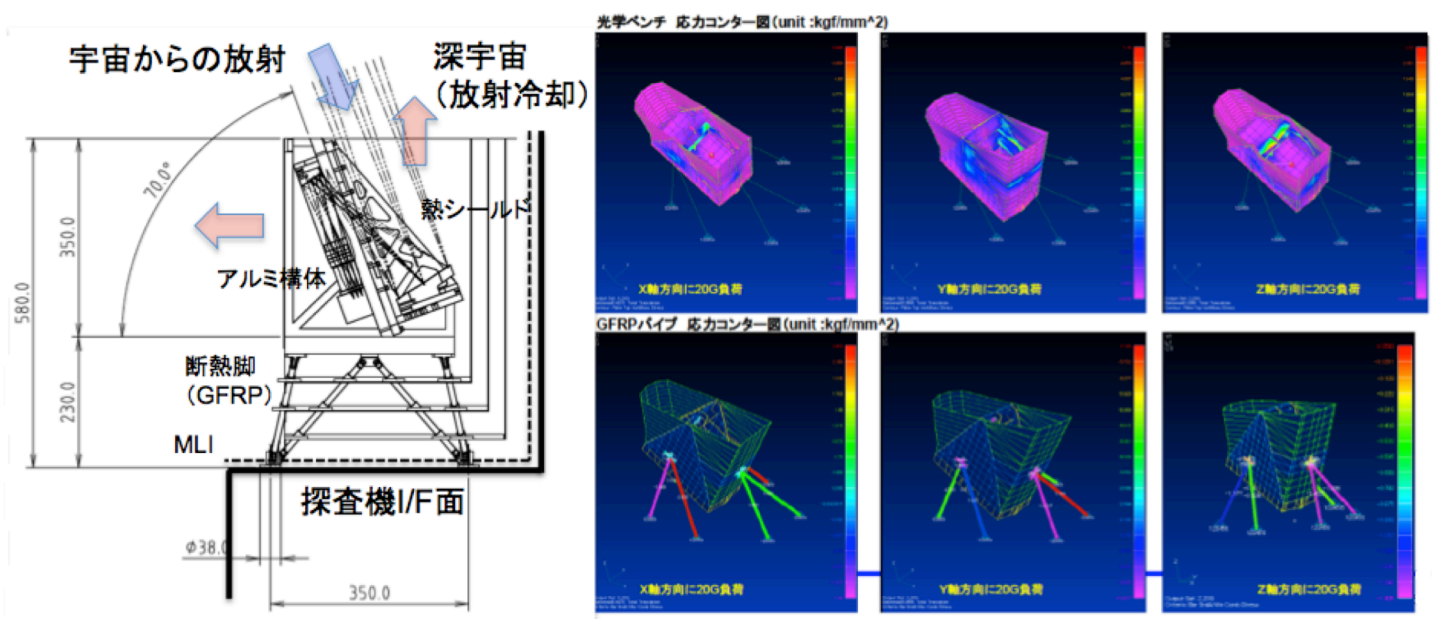


Fig. 4 Thermal (left) and structure (right) design of EXZIT

## 5. 最後に

現在 JAXA 宇宙科学研究所において検討中の次世代の木星トロヤ群小惑星探査のためのソーラー電力セイル探査機に搭載する小型赤外線望遠鏡 EXZIT の開発状況について紹介した。EXZIT は今までの IRTS、AKARI/IRC、CIBER、CIBER-2、はやぶさ 2/NIRS3 などの技術蓄積に基づいており、その実現に技術的な困難は少ない。また、EXZIT は、光赤外線天文学コミュニティにおいて、将来の分野融合型プロジェクトとして工程表[21]などに記載されており、コミュニティからの期待も高い。

## 参考文献

- [1] Leinert et al. (1998) A&AS, 127, 1
- [2] Low et al. (1984), ApJ, 278, L19
- [3] Kelsall et al. (1998), ApJ, 508, 44
- [4] Divine (1993), JGR, 98, 17029
- [5] Grün et al. (1993), Nature, 362, 428
- [6] Dermott et al. (1984), Nature, 312, 505
- [7] Nesvorný, et al. (2003), ApJ, 591, 486
- [8] Reach et al. (1995), Nature, 374, 521
- [9] Su et al. (2013), ApJ, 763, 118
- [10] Tsumura et al. (2010), ApJ, 719, 394
- [11] Hanner et al. (1976), JGR, 79, 4671
- [12] Tsumura et al. (2013), PASJ, 65, 121
- [13] Matsumoto et al. (2015), ApJ, 807, 57
- [14] Matsuura et al. (2014), Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 12, ists29, Tr\_1
- [15] Zemcov et al. (2013), ApJS, 207, 31
- [16] Tsumura et al. (2013), ApJS, 207, 33
- [17] Lanz et al. (2014), Proc.SPIE, 9143, 91433N
- [18] Arai et al. (2015), ApJ, 806, 69
- [19] Iwata et al. (2015), Space Science Review, submitted
- [20] Lee et al. (2012), JASS, 29, 305
- [21] 光学赤外線天文連絡会 (2015) 研究領域の目標・戦略・工程表  
[http://gopira.jp/space\\_combine.pdf](http://gopira.jp/space_combine.pdf)