

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400220

研究課題名(和文)「あかり」全天サーベイデータに基づく最詳細黄道光・惑星間塵雲モデルの構築

研究課題名(英文) The most detailed model of the zodiacal emission based on the AKARI all-sky survey data

研究代表者

大坪 貴文(OOTSUBO, Takafumi)

東京大学・総合文化研究科・特任研究員

研究者番号：50377925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：日本の赤外線天文衛星「あかり」は、2006年5月から2007年8月の1年以上をかけて 9、18 $\mu\text{m}$  (中間赤外線)、65、90、140、160 $\mu\text{m}$  (遠赤外線)の6つの波長バンドで全天のサーベイ観測をおこなった。我々はこの全天画像データを用いて、過去の赤外線衛星データに基づいた黄道光表面輝度分布、および惑星間塵三次元空間分布モデルの検証をおこなった。これまでのモデルでは再現できていない小惑星ダストバンド構造を正確に再現し、また、スムーズな大局構造の分布が、現実にはよりコンパクトであることをとらえた。

研究成果の概要(英文)：Zodiacal emission is thermal emission from interplanetary dust in our solar system. We analyzed zodiacal emission observed by the AKARI mid- and far-infrared all-sky survey, which covers 97% of the entire sky during the period 2006 April to 2007 August in six photometric bands, with central wavelengths of 9, 18 (mid-infrared), 65, 90, 140, and 160  $\mu\text{m}$  (far-infrared). For the far-infrared survey data, we investigate the distribution of the small-scale dust-band structures in the AKARI all-sky maps and construct template maps of the asteroidal dust bands and the circumsolar ring components. Mid-infrared data suggests that the size of the smooth cloud, a dominant component in the zodiacal dust cloud model, is about 10% more compact than previously thought, and we detect a significant isotropically distributed dust cloud component.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：黄道光 黄道放射 惑星間塵 赤外線衛星 あかり 小惑星 彗星

## 1. 研究開始当初の背景

我々太陽系の惑星間空間には、惑星・衛星・小惑星・彗星以外にも、粒径数 $\mu\text{m}$ ~ $\text{cm}$ 程度の固体微粒子が広く分布している。この固体微粒子(惑星間塵)は、太陽光を散乱、あるいは吸収・熱再放射し、黄道光・黄道放射として空全体で明るく光っている。1983年打ち上げの赤外線衛星IRASや1989年のCOBE/DIRBEの観測は、それまでぼんやりとした構造しか知られていなかった黄道光・惑星間塵の分布に様々な空間的微小構造があることを発見した。現在までに、これらの微小構造は、小惑星・彗星などから放出された固体微粒子の軌道運動に対応していることが明らかになってきている。

赤外線波長域における黄道光・黄道放射(以下、中間~遠赤外線波長域の熱放射の場合は、黄道放射と呼ぶ)の表面輝度は極めて大きく、特に波長10-100 $\mu\text{m}$ 付近の赤外線観測では、惑星間塵からの黄道放射が大部分の拡散光に寄与している。拡散光の観測では視線方向にあるすべての光源の重ね合わせを見ることになるため、最も地球に近い前景光である黄道放射をいかに正確に見積もるかが重要になる場合が多い。Kelsall et al. (1998)は、DIRBEの観測データを基に黄道光・黄道放射輝度から惑星間塵の三次元分布を推定したモデルを構築した。惑星間塵の空間分布が分かれば観測日時(地球の位置)を基に視線方向の黄道光・黄道放射輝度を推定できるため、現在ではこれが標準モデルとして広く用いられている。

しかし、IRASやDIRBEの観測期間は十ヶ月程度で地球軌道を一周していないために特に地球軌道近傍の観測には欠けている部分がある。また1990年代の計算機環境の限界もあり、三次元分布モデルの構築には、実際にはDIRBEデータのごく一部しか用いられていない。こうした背景もあり、IRAS、DIRBEのデータに基づく黄道光・黄道放射モデルにはまだ不十分な部分がある。また、DIRBEの空間分解能は0.7度角であり、大型望遠鏡による観測の高空間分解能が進む現在では、より高精細な黄道放射モデルが求められるようになってきている。

## 2. 研究の目的

日本の赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイ観測を用いれば、より詳細な黄道放射モデルを構築することが可能である。

本研究の最終ゴールは、赤外線天文衛星「あかり」の全天サーベイ観測データを基に、微小な空間構造まで再現したこれまでで最も詳細な太陽系内惑星間塵雲モデル・黄道放射モデルを構築することを目指すものである。これは現在の標準テンプレートである米国のCOBE/DIRBEのデータを基にした黄道放射モデルを15年ぶりに改訂するもので、モデルの精

度を上げDIRBEでは再現できていなかった微小構造まで再現することに取り組むものである。この黄道放射モデルが完成すれば、太陽系研究だけでなく、天文・宇宙論の幅広い分野にとって非常に有益であると期待される。

全天の観測データに基づき多数のパラメータを考慮する惑星間塵雲の三次元空間分布モデルの構築は簡単ではないが、これまでの「あかり」全天画像作成の経験の蓄積を活かし、本研究では3年間でまず「大局的な構造」に関して第一段階の成果をあげ、より微小な構造を順次とらえていくことを目指した。

## 3. 研究の方法

赤外線天文衛星「あかり」は、2006年5月から2007年8月の1年以上をかけて9、18 $\mu\text{m}$ (中間赤外線)、65、90、140、160 $\mu\text{m}$ (遠赤外線)の6つの波長バンドで全天のサーベイ観測をおこなった。地球軌道を一周全てをカバーしているだけでなく、地球が同じ位置にある1年後の観測データとの比較ができるなど、モデルの正確性の検証などの面でも大きく有利な点がある。「あかり」のより高い空間解像度(中間赤外線~6秒角、遠赤外線~1-1.5分角)のデータを用いることで、これまでのDIRBEモデルを大幅に改定する黄道放射モデル・惑星間塵三次元分布モデルの構築をおこなう。

「あかり」は地球周回軌道を回る衛星であり、地球の公転とともに太陽系内での位置が変わることになる。そのため、天球座標上では同じ位置にある天体を観測した場合でも、異なる観測時期(つまり異なる地球の位置)には太陽系内の異なる場所を通して観測を行うことになり、黄道放射の輝度は変化することになる。そこで本研究では、以下の段階を踏むことで、黄道放射の全天での輝度分布を調べた。ただし、「あかり」の中間赤外線・遠赤外線の全天画像データはそれぞれ異なる装置で観測されたもので、装置とデータの特異性や校正手法も異なるため、今回はそれぞれの波長域で別々に解析作業を並列して進めた。

(1) 観測データを半年ごと(あるいは地球の公転方向の前方側/後方側)の2つに分け、それぞれで、まず精度の高い「あかり」全天輝度マップを作成する。

(2) この全天輝度マップをスムーズな大局構造と微小構造に分け、それぞれの空間構造をとらえる。更に惑星間塵雲の3次元空間分布を考慮した黄道光モデルを構築する。

(3) その結果を過去IRASやCOBE/DIRBEの結果と比較し、新たな空間的微小構造を検出する。

## 4. 研究成果

(1) 遠赤外線全天画像に基づく成果

① 平成26年度に、「あかり」遠赤外線全天

画像データを広く一般に公開した。遠赤外線波長域においても特に 65、90  $\mu\text{m}$  では黄道放射の寄与は無視出来ず、正確な差し引きが必要となる。まずは本研究を通して空間構造の検証をおこなったスムーズな大局成分のみ黄道放射を差し引いたデータを公開版遠赤外線画像として公開した ([雑誌論文]③、④)。この段階で有意に小惑星族起源の塵による構造を確認した。また地球軌道上に重力的に捕獲されている塵 (周太陽リング) からの熱放射も確認することができた。この時点では、これらの微細構造の寄与は、公開版全天画像の 65、90  $\mu\text{m}$  の 2 バンドには残っているのが確認出来る (図 1 上)。90  $\mu\text{m}$  で、初めて全天に渡ってこれら微細構造を明確にとらえることができた。

- ② 公開版画像データにおいて絶対値校正なども一旦確定したため ([雑誌論文]③、④)、それをもとに半年ごとの全天画像を作成し、微細構造の抽出解析をおこなった。黄道放射の寄与がある 90  $\mu\text{m}$  と寄与がほとんどない 140  $\mu\text{m}$  の、2 つの異なる波長バンド間の画像を差し引くことで銀河系内ダスト放射の成分を相殺し、黄道放射中の小惑星ダストバンド成分と周太陽リング成分の位置と表面輝度を抽出することに成功した。この半年マップを基に、「あかり」遠赤外線全天画像用の黄道放射テンプレートを作成した (図 1 下)。この結果を論文として出版した ([雑誌論文]①)。本研究の成果により、「あかり」遠赤外線全天画像からの黄道放射成分の差し引き精度が改善し、ほぼ全天に渡って黄道放射の寄与の残差を 1 MJy/sr 以下にすることができ、同じ精度で背景の赤外線放射の定量的解析が可能になった (図 1 中)。

- (2) 中間赤外線全天画像に基づく成果
- ① 遠赤外線波長域は太陽からより遠方にある塵の検出に適しているのに対し、中間赤外線波長域では地球近傍の塵の空間構造をとらえるのに適している。そこで、中間赤外線全天画像をもとに、まずはスムーズな大局構造についての詳細解析をおこなった。惑星間塵の三次元空間分布モデルとして、COBE/DIRBE モデルと同じ関数系を用いてパラメータサーチをおこなうことで DIRBE モデルの妥当性を検証した。「あかり」の全天データに対してこの三次元空間分布モデルのフィッティングをおこなったところ、スムーズな大局構造は DIRBE モデルで予想されたよりも 10%程度コンパクトであることが分かった。更に、「あかり」観測から示唆される新たな発見として、惑星間塵の空間構造には一定・等方的な成分が存在する可能性があると、周太陽リング中の地球後

方に存在する trailing blob 成分の位置が地球軌道面よりもわずかに北にずれている可能性があることが分かった ([雑誌論文]②)。

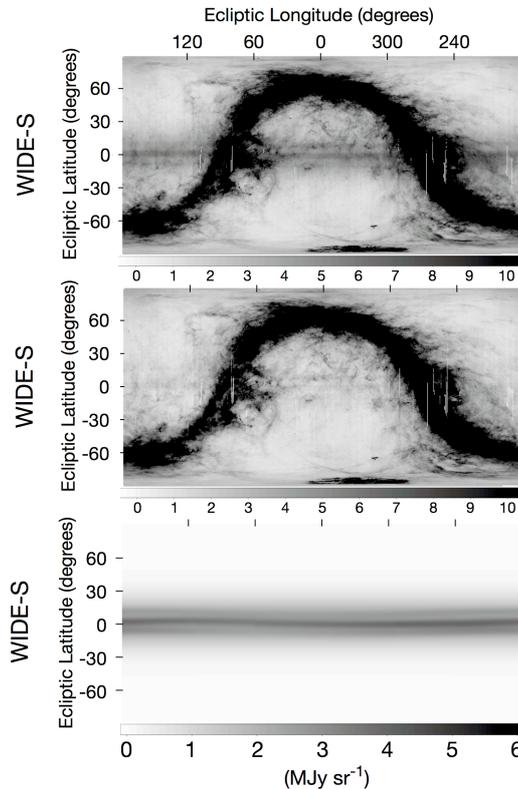


図 1 : 上) 「あかり」遠赤外線公開版データの 90  $\mu\text{m}$  バンドでの全天画像。中) 本研究で求めた黄道光ダストバンドモデル差し引き後の 90  $\mu\text{m}$  バンドでの全天画像。下) 黄道光ダストバンドモデル。いずれも黄道座標系で描かれている ([雑誌論文]①より)。

### (3) 今後への展望

本研究の過程では、これまでには明確に見えていなかった微細な構造も見つかってきた。これまで可視・中間赤外線では可能性が指摘されていたダストバンド構造の中で、「あかり」で初めて遠赤外線画像にその存在が検出されてきているものがある。また、中間赤外線画像では、IRAS や DIRBE では検出されていない、ごく最近に形成されたと考えられる空間構造も見つかっている。これらは「あかり」のデータが十分な観測精度を達成しており、空間的にも微細構造を検出する能力を十分に持っていることの証である。本研究で、今後もデータを詳細に見ることで更にデータの精度を向上させることで、最も詳細な惑星間塵の三次元空間分布モデル構築へはずみをつけることができた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 7 件)

- ① T. Ootsubo, Y. Doi, S. Takita, T. Nakagawa, M. Kawada, Y. Kitamura, S. Matsuura, F. Usui, K. Arimatsu, “AKARI far-infrared maps of the zodiacal dust bands”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, id. 35, 15pp. (2016). 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psw024
- ② T. Kondo, D. Ishihara, H. Kaneda, K. Nakamichi, S. Takaba, H. Kobayashi, T. Ootsubo, J. Pyo, T. Onaka, “Modeling of the Zodiacal Emission for the AKARI/IRC Mid-infrared All-sky Diffuse Maps”, The Astronomical Journal, 151, id. 71, 11pp. (2016). 査読有  
DOI: 10.3847/0004-6256/151/3/71
- ③ Y. Doi, S. Takita, T. Ootsubo, K. Arimatsu, M. Tanaka, Y. Kitamura, M. Kawada, S. Matsuura, T. Nakagawa, T. Morishima, M. Hattori, S. Komugi, G. J. White, N. Ikeda, D. Kato, Y. Chinone, M. Etxaluze, E. Figueredo, “The AKARI far-infrared all-sky survey maps”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, id. 50, 22pp. (2015). 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psv022
- ④ S. Takita, Y. Doi, T. Ootsubo, K. Arimatsu, N. Ikeda, M. Kawada, Y. Kitamura, S. Matsuura, T. Nakagawa, M. Hattori, T. Morishima, M. Tanaka, S. Komugi, “Calibration of the AKARI far-infrared all-sky survey maps”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 67, id. 51, 8pp. (2015). 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psv033
- ⑤ T. Kasuga, F. Usui, M. Shirahata, D. Kuroda, T. Ootsubo, N. Okamura, S. Hasegawa, “Near-infrared Spectra of high-albedo outer main-belt asteroids”, The Astronomical Journal, 149, id. 37, 8pp. (2015). 査読有  
DOI: 10.1088/0004-6256/149/2/37
- ⑥ F. Usui, S. Hasegawa, M. Ishiguro, T.G. Müller, T. Ootsubo, “A comprehensive study of infrared asteroid surveys: IRAS, AKARI, and WISE”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, id. 56, 11pp. (2015). 査読有  
DOI: 10.1093/pasj/psu037

〔学会発表〕 (計 22 件)

- ① 大坪貴文、「あかり」遠赤外全天画像に基

づく黄道光ダストバンド構造の抽出、日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京南大沢キャンパス (東京都八王子市)、2016 年 3 月 14 日～17 日

- ② 大坪貴文、「あかり」遠赤外・中間赤外線観測に基づく黄道光ダストバンド構造の検出、日本惑星科学会 2015 年度秋期講演会、東京工業大学・地球生命研究所 (東京都目黒区)、2015 年 10 月 14 日～16 日
- ③ 大坪貴文、「あかり」遠赤外・中間赤外線観測に基づく黄道光ダストバンド構造の検出と小惑星起源ダストの性質の解明、日本天文学会 2015 年秋季年会、甲南大学 (兵庫県神戸市)、2015 年 9 月 9 日～11 日
- ④ 大坪貴文、Zodiacal dust bands observed in far-infrared with AKARI、The 8<sup>th</sup> meeting on Cosmic Dust、千葉工業大学スカイツリータウンキャンパス (東京都墨田区)、2015 年 8 月 17 日～21 日
- ⑤ 大坪貴文、赤外線衛星「あかり」による黄道光微細構造の観測、日本地球惑星科学連合大会 2015 年大会、幕張メッセ国際会議場 (千葉県千葉市)、2015 年 5 月 27 日
- ⑥ 大坪貴文、「あかり」遠赤外線拡散光全天マップに見られる黄道光微細構造 IV、日本天文学会 2015 年春季年会、大阪大学 (大阪府豊中市)、2015 年 3 月 18 日～21 日
- ⑦ 大坪貴文、「あかり」遠赤外線拡散光全天マップに見られる黄道光微細構造、日本惑星科学会 2014 年度秋期講演会、東北大学 (宮城県仙台市)、2014 年 9 月 24 日～25 日
- ⑧ 大坪貴文、「あかり」遠赤外線拡散光全天マップ中の小惑星ダストバンドの構造、日本天文学会 2014 年秋季年会、山形大学 (山形県山形市)、2014 年 9 月 11 日～13 日
- ⑨ 大坪貴文、Small-scale structure of the zodiacal dust cloud observed in far-infrared with AKARI、The Universe in the Light of AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes、Oxford University (Oxford, UK)、2014 年 7 月 9 日～11 日
- ⑩ 大坪貴文、「あかり」遠赤外線拡散光全天マップに見られる黄道光微細構造 III、日本天文学会 2014 年春季年会、国際基督教大学 (東京都三鷹市)、2014 年 3 月 19 日～22 日
- ⑪ 大坪貴文、「あかり」遠赤外線拡散光全天マップに見られる黄道光微細構造 II、日

本天文学会 2014 年秋季年会、東北大学(宮  
城県仙台市)、2013 年 9 月 10 日～12 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大坪 貴文 (OOTSUBO, Takafumi)  
東京大学・総合文化研究科・特任研究員  
研究者番号：50377925

### (2) 研究分担者

石原 大助 (ISHIHARA, Daisuke)  
名古屋大学・理学研究科・特任講師  
研究者番号：30507835

### (3) 連携研究者

土井 靖生 (DOI, Yasuo)  
東京大学・総合文化研究科・助教  
研究者番号：70292844