

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19204020

研究課題名（和文） あかり遠赤外線広域マップの作成とそれを用いた分子雲形成過程の研究

研究課題名（英文） Creating AKARI Far-Infrared Diffuse Emission Maps in the All Sky Survey and a Study of the Formation Processes of Molecular Clouds

研究代表者

北村 良実 (KITAMURA YOSHIMI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：30183792

研究成果の概要（和文）：「あかり」衛星で取得した遠赤外線データを処理するプログラムを完成させ、全天の遠赤外線画像の作成を始めた。射手座方向の銀河系中心領域については、「あかり」チーム内に公開した。さらに、南天カメレオン座にある、星が生まれている暗黒星雲についての高感度な「あかり」画像を作成し、詳細に解析した。その結果、暗黒星雲中に存在する乱流運動が、その中で誕生する星の質量を決める際に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：We have completed the pipeline programs to process the AKARI far-infrared data, and have just started making AKARI All-Sky images. The AKARI images toward the Galactic center region in Sagittarius are now available to AKARI team members. In addition, we have finished calibrating the sensitive AKARI images of the Chamaeleon dark nebula. The statistical analysis of the images leads us to the conclusion that the turbulence in the nebula plays a key role in determining the mass of a star newly forming there.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2008年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2009年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2010年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
総計	31,700,000	9,510,000	41,210,000

研究分野：赤外線・電波天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：赤外線天文学、あかり、遠赤外線マップ、電波天文学、分子雲、星形成、乱流

1. 研究開始当初の背景

宇宙の基本的構成要素である星は、低温 ($T \approx 10$ K) で高密度 ($n \geq 10^2 \text{ cm}^{-3}$) な星間物質である分子雲で誕生することが分かってきた。しかし、なぜ銀河系に分子雲が存在するのか、なぜ銀河系で星が生まれるのか、という基本的な問いに対しては未だに明確な答えが得られていない。

2. 研究の目的

本研究では、「あかり」による遠赤外線4バンド (65, 90, 140, 160 μm) 広域マップを作成し、ユニークなデータを天文学コミュニティに提供する。さらに、「あかり」マップから星間ダストの原子雲成分と分子雲成分の広域分布を導出し比較することにより、分子雲形成を担っている物理過程に迫る。

3. 研究の方法

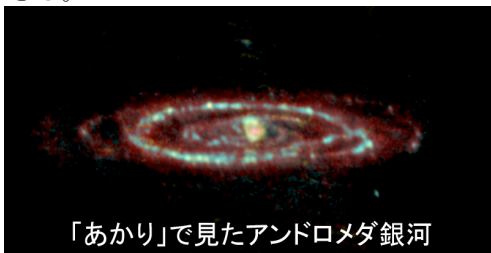
本研究は次の二つの柱からなる。

(1)「あかり」プロジェクトの主目的である点源カタログ作成とは別に、空間的に広がった放射成分に主眼をおいたデータ処理パイプラインプログラムを開発し、ユニークな「あかり」遠赤外線全天マップを作成する。データ処理では、スパイクノイズの除去、検出器過渡応答特性の補正、補正残差であるスキャンパターンの除去、拡散光絶対強度キャリブレーションを重点的に行う。

(2)「あかり」が特に深く観測する南天のカメレオン座星形成領域について、高感度な遠赤外線マップを作成し、星間ダストの原子雲成分と分子雲成分の柱密度マップに分離する。両成分のマップについて詳細な統計的解析を行い、電波マップから得られる速度情報も加え、原子雲と分子雲の物理的関係を明らかにする。特に、星間乱流と星の初期質量関数の観点から、分子雲形成過程に切り込む。

4. 研究成果

(1)「あかり」遠赤外線広域マップの作成
「あかり」遠赤外線広域マップは、次のような顕著な特徴を持ち、他の観測装置では取得不可能であるため、マップ自体の観点からも独創性の高さは自明である。1)「あかり」が提供できる65, 90, 140, 160 μm という広帯域4波長にわたる全天マップは現在、世の中に存在しない。2)160 μm 全天マップの作成は世界初の試みである。3)既存のIRAS遠赤外線マップよりも十倍以上、高感度、高分解能である。4)NASA Spitzer 宇宙望遠鏡で見えない星形成領域のような明るい領域に対しても、「あかり」広域マップはカバーできる。



「あかり」で見たアンドロメダ銀河

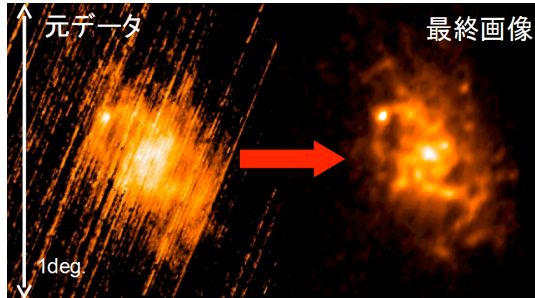
①スパイクノイズと真の天体の信号を区別し、ノイズを効率良く取り除くツールを作成した。時系列データ上でのみスパイクノイズの同定を行うと、真の点源天体とノイズとの識別が困難であるため、同一天域を観測した複数チャンネル、複数掃天観測時のデータを参照し、ここから統計処理により外れ値の除去を行う事が必要である。一方、検出器特性の長時間変動によって、特に未補正データについては各観測データがまとまってオフセットを持ち、観測データの統計的分布が単純なノイズ分布と著しく異なることから、真の

値の推測が難しい。従って統計処理を行う際、同一天域のデータをその強度に従ってソーティングし、さらにその分布の差分を取る事により、分布内の相対的に大きなジャンプを探し出し、その外側のデータをまとめて落とすという方法を採用した。これにより、長時間変動の補正不良に起因するオフセットを持ったデータと、スパイクノイズに起因する外れ値とをまとめて効率良く除去する事が可能となった。

②過渡応答特性を評価し、これを補正するアルゴリズム/ツールを作成した。過渡応答とは、入射光量の変化に対し、検出器出力が数秒(未満)~数分の複数の時定数をもってゆっくりと追従する非線形応答現象を言う。その応答は入射光子数の関数として変化するが、検出器中の各ピクセル毎の違いが大きく、かつ入射光子数が増大する際と減少する際で係数が大きく異なり、補正は容易ではない。さらに反応時定数が長いことから、当該天体を観測する以前に観測した天域の明るさの履歴を引きずってしまうため、「あかり」の様に掃天型の観測を行う際にはさらに影響が大きく、かつ補正の困難さが増す。この現状に対し、我々は下記の実践的アプローチにより、実用上十分な精度の補正を得る事に成功した。1)明るさが既知の較正光源の点灯/消灯時の検出器信号変化データを機上にて取得し、これを各検出器素子のステップ応答関数とする。2)ステップ応答関数の差分からインパルス応答関数を求め、それをフーリエ変換することで各検出器素子の周波数応答特性を得る。3)得られた周波数応答特性の逆数の透過特性を持つ数値フィルターを各検出器信号に作用させる事により、当該観測時刻の真の明るさを得る。この時、スパイクノイズが残ったままのデータについて過渡応答補正を行うと、データの高周波数成分が強調され、ノイズが選択的に増幅されてしまうという困難を生じる。このためスパイクノイズについては、過渡応答補正を行う前に効率良く取り除いておく必要がある。この処理を一回のみ行って高い精度を達成する事は困難であるが、スパイクノイズ除去、過渡応答補正、および下記デストライブから成る処理ループを繰り返すことにより補正精度を上げることができた。

③検出器特性の長時間変動の定期キャリブレーションによる補正、および補正残差除去のための画像クリーニング(デストライブ)ツールを作成した。長時間変動の補正不良に起因するオフセットにより、作成した画像には掃天方向に沿った縞状の構造が目立ち、これがノイズレベルを支配する。このストライブを取り除く事により、画像の質が大きく改

善される。「あかり」の場合スキャン方向はほぼ黄道座標の経線に沿うため、黄道直交座標系で画像を作成すると、ストライプはほぼ一方向に並ぶ事になる。この画像に二次元フーリエ変換を施すと、ストライプ成分は空間周波数成分の決まった領域に対応するため、その成分をマスクする方法によって、真の天体の周波数成分をほとんど失わずに、ストライプ成分を効率良く取り除く事に成功した(下図)。



④以上の拡散光広域画像作成のための基本的技術を確認し、全天の画像作成ツールを完成させた。得られた天体画像の拡散光強度の精度について、「あかり」スロースキャン画像、同一波長帯の他の観測装置によるデータと比較し、評価を行った。その結果、10 [MJy/sr]を下回る高銀緯の低輝度領域から10 [GJy/sr]を上回る銀河中心付近の高輝度領域に至る観測データの全体について、線形性の良い画像が得られている事を確認できた。「あかり」画像の精度(分散)を輝度下限値の関数として見積もり、全バンド、全輝度範囲について概ね 20%を下回る良好な精度を得た(下表)。

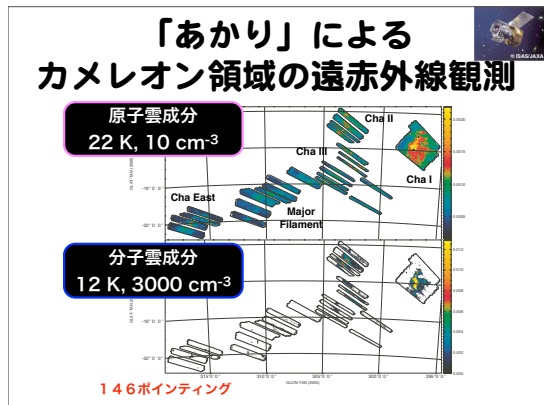
Flux cut	N60	WideS	WideL	N160
MJy str ⁻¹	65μm	90μm	140μm	160μm
IM mode				
0	47.4%	26.5%	25.8%	36.2%
10	24.0%	15.1%	20.4%	29.8%
20	18.2%	5.7%	16.2%	18.6%
30	27.5%	4.7%	10.0%	15.1%
40	30.5%	4.5%	6.8%	10.3%
50	29.9%	10.2%	6.3%	8.9%
60	27.0%	17.1%	6.0%	8.1%
70	26.1%	17.9%	6.0%	8.0%
80	23.9%	18.6%	5.8%	8.0%
90	23.8%	19.2%	5.8%	7.9%
100	19.1%	18.4%	5.8%	7.8%
CDS mode				
all	19.5%	11.5%	17.0%	21.2%

(2) 南天カメレオン座における分子雲形成過程の研究

ユニークな 65, 90, 140, 160 μm 「あかり」全天マップからは、星の母体である分子雲コアを分解できる高い空間分解能で、かつ、分子雲とその周囲の原子雲をカバーできる、星間ダストの広域・詳細マップが得られる。従って、「あかり」マップに基づく分子雲(コア)形成過程についての研究は、なぜ銀河系で星が生まれるのか、という基本的な問いへの答えに、他の研究グループに先駆けて、近づくことを可能にする。

①検出器感度と暗電流の時間変動をより高精度で補正する目的で、「あかり」遠赤外線全天データを自動処理するパイプラインプログラムの各処理段階に GUI を用いた手動による微調整機能を付加した、スロースキャン用データ処理プログラムを完成させた。この処理プログラムによって、中間赤外線マップとの比較による遠赤外線マップの位置補正(10 秒角以下を達成)、手動による細やかなスキャンパターンの除去、COBE_DIRBE マップとの比較による拡散光強度較正が効率よく実行でき、高感度遠赤外線マップを容易に作成することができるようになった。

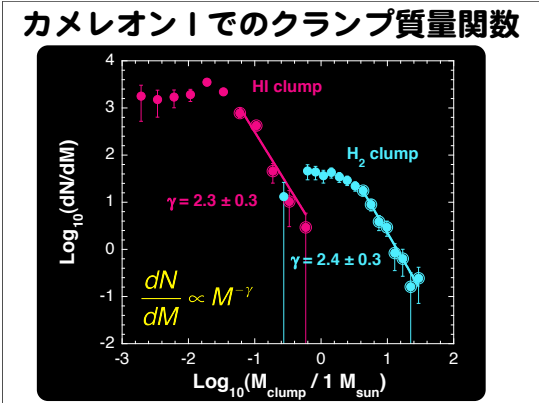
②スロースキャン用データ処理プログラムを用いて、カメレオン領域の高感度な遠赤外線広域マップを完成させた(下図)。これら



のマップは、星形成が起きているカメレオン分子雲 I、II と星形成の兆候が見られないカメレオン分子雲 III や東側の希薄なフィラメントを含む約 30 平方度の広域マップである。COBE_DIRBE マップとの比較による強度較正時に、星間ダストからの遠赤外線放射を、原子雲成分(温度 22 K、数密度 10 cm⁻³)と分子雲成分(温度 12 K、数密度 3000 cm⁻³)に分離した。これらのマップの分解能は 0.04 pc であり、星形成コアを十分分解することができる。2 成分のマップを精査し比較した結果、原子雲は、理論が予言している 100 pc スケールでの超新星爆発による衝撃波圧縮によって形成可能であることが分かった。しかし、

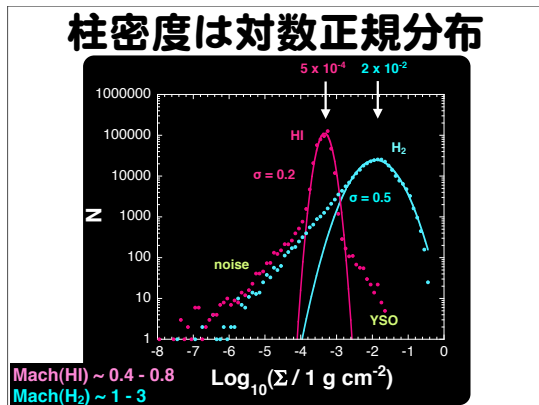
その原子雲から 10 pc スケールの構造を持つ分子雲を形成する過程については、重力不安定性による分裂や原子から分子への相転移、高速度雲との衝突等を考慮した、より詳細な理論モデルが要求されることが分かった。

③カメレオン I 領域における原子雲と分子雲についての柱密度マップに対して、clumpfind (Williams et al. 1994)による構造抽出を行った。その結果、原子雲と分子雲それぞれで 153 個と 165 個のクランプ（微細構造）が同定できた。さらにクランプ質量関数を導出した結果、 $0.06 M_{\odot}$ 、 $4 M_{\odot}$ 以上にベキ乗則が存在することが分かった（下図）。



ベキ指数 γ の値は 2.3 ± 0.3 、 2.4 ± 0.3 であり、カメレオン I 領域における星の初期質量関数 IMF での値 2.35 (Luhman 2007) とよく一致する。この事実から、 γ 値は原子雲から分子雲、さらには星に至る星間物質の進化段階全てにおいて一定であることが示唆された。

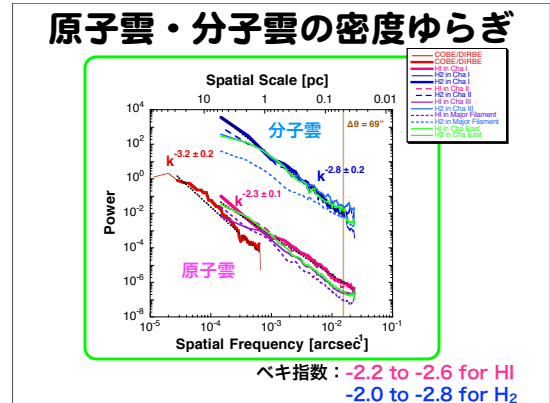
④カメレオン全領域について、原子雲と分子雲の柱密度マップのヒストグラムを作成した（下図）。これらのヒストグラムは（柱）



密度構造を統計的に記述する確率密度関数 PDF と考えることができ、全領域において PDF は対数正規分布でよく近似できることが分かった。この事実は、柱密度さらには密度のゆらぎは主に星間乱流によって生じていることを強く示唆する。なお、低柱密度側でズレが生じるのはノイズが原因であり、原子雲成分の高柱密度側でのズレは、原始星によつ

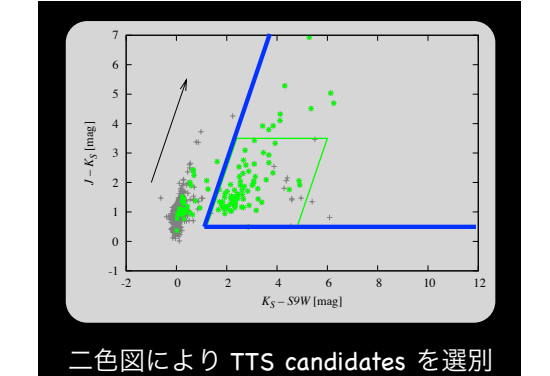
て暖められたダスト成分が完全に分離できなかったことによる。さらに、対数正規分布の幅は乱流の速度分散と関係していることが理論計算から知られており、その経験式を使うと、原子雲と分子雲それぞれにマッハ数が 0.4-0.8, 1-3 の遷音速乱流が存在する可能性が高いことが分かった。カメレオン分子雲 I については、 $C^{18}O(1-0)$ データ (Haikala et al. 2005) から独立にマッハ数 2 が導かれ、上述した推定値とよく一致する。

⑤原子雲と分子雲の（柱）密度ゆらぎのパワースペクトルを導出した（下図）。その結果、



カメレオン全領域において、パワースペクトルはベキ乗則でよく記述でき、そのベキ指数は原子雲で -2.2 から -2.6、分子雲で -2.0 から -2.8 の範囲であることが分かった。さらに、星間乱流による密度ゆらぎから IMF を導出する理論 (Hennebelle and Audit 2007) を適用すると、 γ の予言値として 2.0 - 2.3 が得られ、カメレオン I 領域での IMF の γ ($= 2.35$) やクランプ質量関数の γ ($= 2.0-2.7$) と一致し、これらの質量関数の形は密度ゆらぎで説明可能であることが分かった。即ち、IMF の起源は希薄な原子雲に普遍的に存在する乱流にまで遡れることが示唆された。

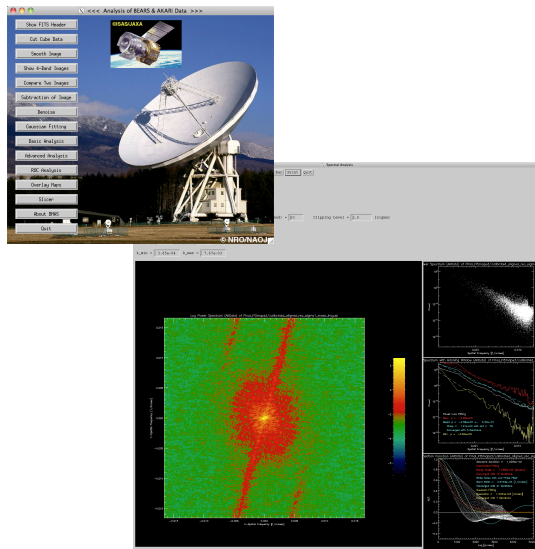
⑥カメレオン I 領域の中間赤外線高感度マップに対して、原始惑星系円盤を伴う若い星 (YSO) のサーベイを行った。その結果、131 の赤外線点源天体を検出した。さらに、これらの天体から円盤を持つ YSO 12 天体を抽出することに成功した（下図）。そのうち 4 天体



二色図により TTS candidates を選別

は「あかり」によって初めて検出された天体である。YSO のサーベイにおいては同時に、中間赤外線(IRC)スロースキャン用のデータ処理パイプラインも作成した。さらに、カメレオン領域に広く分布する進化した円盤天体 31 天体に対して、高感度な遠赤外線観測を行った。個々の天体からの赤外超過は検出できなかったが、平均的な円盤質量の上限値として約 1 地球質量を得た。

⑦本研究では、スロースキャン用データ処理パイプラインプログラムの開発に加えて、「あかり」遠赤外線マップの科学的解析ツール(下図参照)も開発した。本研究終了後も、「あかり」遠赤外線全天マップの作成と並行して、これらのツールを用いて他の星形成領域について同様な解析を進め、論文化を行っていく予定である。



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 4 5 件)

- ①Takita, S., Kataza, H., Kitamura, Y., Ishihara, D., Ita, Y., Oyabu, S., and Ueno, M., A survey of T Tauri stars with AKARI towards the Taurus -Auriga region, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, Vol. 519, 2010, A83(1-7)
- ②Ikeda, N., and Kitamura, Y., A $C^{18}O$ Study of the Origin of the Power-Law Nature in the Initial Mass Function, *Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Vol. 705, 2009, L95-L98
- ③Shirahata, M., Matsuura, S., Hasegawa, S., Ootsubo, T., Makiuti, S., Yamamura, I., Nakagawa, T., Kawada, M., Kaneda,

H., Shibai, H., Doi, Y., Suzuki, T., Müller, T., and Cohen, M., Calibration and Performance of the AKARI Far-Infrared Surveyor (FIS) -- Slow-Scan Observation Mode for Point-Sources, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, Vol. 61, 2009, 737-750

④Takita, S., Kitamura, Y., Kataza, H., Ishihara, D., Ueno, M., Fujiwara, H., Ikeda, N., Kawamura, A., Murakami, H., Okamoto, Y. K., Onaka, T., Oyabu, S., Sakon, I., and Takahashi, H., Diffuse $18\mu m$ Emission around TYC 3159-6-1 Discovered by the AKARI MIR All-Sky Survey, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, Vol. 61, 2009, 291-299

⑤Kaneda, H., Koo, B. C., Onaka, T., and Takahashi, H., AKARI observations of the ISM in our Galaxy and nearby galaxies, *Advances in Space Research*, 査読有, Vol. 44, 2009, 1038-1046

⑥Nakagawa, T., and Murakami, H., Akari - A Light to Illuminate the Dusty Universe, *Space Research Today*, 査読有, Vol. 176, 2009, 13-25

⑦Ikeda, N., Kitamura, Y., and Sunada, K., A Survey of Dense Cores in the Orion B Cloud, *Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 691, 2009, 1560-1582

⑧Suzuki, T., Kaneda, H., Nakagawa, T., Makiuti, S., and Okada, Y., Spatial Distributions of Cold and Warm Interstellar Dust in M101 Resolved with AKARI/Far-Infrared Surveyor (FIS), *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, Vol. 59, 2007, S473-S481

⑨Kawada, M., Baba, H., Barthel, P. D., Clements, D., Cohen, M., Doi, Y., and 54 coauthors(15, 17, 25, 29, 58 番目), The Far-Infrared Surveyor (FIS) for AKARI, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 査読有, Vol. 59, 2007, S389-S400

[学会発表] (計 8 7 件)

- ①田中昌宏、「あかり」による遠赤外線拡散光全天マッピングVI (チーム内公開とデストライプ処理による画像の質の向上)、日本天文学会、2011年3月19日、筑波大学
- ②北村良実、「あかり」によるカメレオン領域の広域サーベイIV: 原子雲と分子雲の密度構造、日本天文学会、2011年3月17日、筑波大学
- ③池田紀夫、「あかり」によるカメレオン領域の広域サーベイIII: FISによる原子雲/分子雲クランプの質量関数、日本天文学会、2011年3月17日、筑波大学
- ④小麥真也、「あかり」による遠赤外線拡散

光全天マッピングV、日本天文学会、2010年9月24日、金沢大学

⑤瀧田 怜、「あかり」によるカメレオン領域の広域サーベイII、中間赤外線でみるYSO、日本天文学会、2010年9月23日、金沢大学

⑥池田 紀夫、「あかり」によるカメレオン領域の広域サーベイI：FISによる広域、高分解能原子雲／分子雲柱密度マップの作成、日本天文学会、2010年9月23日、金沢大学

⑦土井 靖生、「あかり」による遠赤外線拡散光全天マッピングIV、日本天文学会、2010年3月26日、広島大学

⑧土井 靖生、「あかり」による遠赤外線拡散光全天マッピングIII、日本天文学会、2009年9月16日、山口大学

⑨土井 靖生、「あかり」による遠赤外線拡散光全天マッピングII、日本天文学会、2008年9月12日、岡山理科大学

⑩土井 靖生、「あかり」による遠赤外線拡散光全天マッピング、日本天文学会、2008年3月25日、国立オリンピック記念青少年総合センター

〔その他〕

解析ソフト公開ホームページ

<http://hibari.isas.jaxa.jp/nikeda/fazz/fazz.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北村 良実 (KITAMURA YOSHIMI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：30183792

(2) 研究分担者

中川 貴雄 (NAKAGAWA TAKAO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：20202210

山村 一誠 (YAMAMURA ISSEI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：40322630

上野 宗孝 (UENO MUNETAKA)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・グループ長

研究者番号：30242019

川田 光伸 (KAWADA MITSUNOBU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：50280558

片坐 宏一 (KATAZA HIROKAZU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：70242097

(H20→H22：連携研究者)

松浦 周二 (MATSUURA SHUJI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：10321572

(H20→H22：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

金田 英宏 (KANEDA HIDEHIRO)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30301724

(H20：連携研究者)

河村 晶子 (KAWAMURA AKIKO)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：30377931

岡本 美子 (OKAMOTO YOSHIKO)

茨城大学・理学部・准教授

研究者番号：10343469

(3) 研究協力者

池田 紀夫 (IKEDA NORIO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘研究員 (H19→H21)

研究者番号：90570862

加藤 大輔 (KATO DAISUKE)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘研究員 (H22)

研究者番号：80377910