

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540250

研究課題名 (和文) 赤外線天文衛星あかりで探る宇宙初期の構造形成

研究課題名 (英文) Research into structure formation in the early universe with AKARI, the infrared astronomical satellite

研究代表者

松浦 周二 (MATSUURA SHUJI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：10321572

研究成果の概要：個別には分解できないほど遠くにある宇宙初期の天体の光は、おり重なって、全天からやってくる等方的な宇宙背景放射として観測される。本研究では、「あかり」衛星により赤外線のほぼ全波長域にわたる宇宙背景放射の観測を実施し、データを解析した。その結果、宇宙赤外線背景放射の存在を検証するとともに、そのわずかな強度むらには宇宙で最初にできた星や銀河の痕跡が残されている可能性があることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：宇宙物理, 赤外線天文学, 宇宙背景放射, 観測的研究, あかり衛星, 第一世代の星, 銀河形成, 構造形成

## 1. 研究開始当初の背景

IRTS (日本, 1995) や COBE (米国, 1990) などの衛星観測により、近赤外波長 ( $1\text{--}5\mu\text{m}$ ) での宇宙赤外線背景放射が、既知の天体では説明できない、大きな強度と波長  $1\mu\text{m}$  付近に強いピークをもつ特殊なスペクトルをもつことがわかった。その起源は、宇宙初期の天体からの紫外線が宇宙膨張により大きく赤方偏移したものであることが示唆された。

遠赤外波長 ( $30\text{--}300\mu\text{m}$ ) においても、COBE の観測により近赤外域と同等の放射

エネルギーをもつ宇宙背景放射の存在が示された。その起源は、銀河が形成される段階で爆発的に生成・消滅する星が放出した重元素の固体微粒子 (ダスト) による熱放射と考えられている。

以上のように、赤外域の宇宙背景放射は、宇宙初期の天体構造の形成段階を示すと考えられるため、その高精度な観測が期待されていた。我々が中心となって開発した観測装置を搭載し JAXA が 2006 年に打上げた「あかり」衛星は、この研究について重要な成果をあげることが期待された。

## 2. 研究の目的

### (1) 第一世代の星の観測的研究

宇宙最初の星（第一世代の星）は、銀河形成以前の宇宙年齢1億年ごろに生まれ、その紫外線で宇宙全体を電離したとされる大質量星である。それらの放射スペクトルは強い水素ライマン $\alpha$ 線のピークを持つとともに、それらの空間分布は当時のダークマター密度分布に従うことが予想される。紫外域にあるライマン $\alpha$ 放射は、宇宙膨張による赤方偏移のため、現在はちょうど波長 $1\mu\text{m}$ 付近で観測されることが期待される。これが宇宙背景放射に見られる特異なスペクトルの原因かもしれない。つまり、近赤外域の宇宙背景放射のスペクトルや空間的ゆらぎ（強度むら）を精度良く観測して、宇宙最初の星の痕跡を見いだすことはたいへん重要な課題である。

### (2) ダストに埋もれた原始銀河の研究

宇宙最初の星の時代と前後して（どちらが先かそのものが研究課題でもある）、星の集団である銀河が形成されるようになると、すでに述べたように、爆発的な星の生成と消滅に伴ってダストが生成される。そして、星やダストの熱放射が遠赤外域の背景放射をつくりだす。そのような原始銀河が形成される領域では、特にダークマターが集中していたと考えられ、近赤外域と同様に、背景放射に特徴的な角度スケールのゆらぎを生じさせる。また、宇宙最初の星の紫外線は、自身が生成したダストにより吸収されるかもしれない。そのような宇宙最初のダストの存在を熱放射の検出により検証できるであろう。以上のように、遠赤外域の宇宙背景放射観測は、本研究の主要な目的である。

### (3) 構造形成の観測的研究

上述のように、宇宙紫外線背景放射の幅広い波長にわたる観測により、天体の構造がどのように形成され、現在のような銀河宇宙となったかの歴史を総合的にたどることができる。これが、本研究の最終的な目標である。

## 3. 研究の方法

### (1) 前景放射の差引き精度向上

研究目的に見合う宇宙紫外線背景放射の観測を行なうには、前景にある太陽系や銀河系の放射を観測される全体の明るさから精度良く差し引く必要がある。近赤外では、太陽系内ダストによる太陽光散乱である黄道光が最も強い前景放射であり、その推定が成功の鍵を握る。遠赤外域においては、太陽系内ダストと銀河系内ダストの熱放射が強い

前景成分である。また、いずれの波長においても、観測されるゆらぎに最も強い寄与をする前景成分は、点状天体（点源）である星や銀河である。

これまでの衛星観測は、広い天域をカバーすることに重点が置かれ、明るさの黄緯や銀緯への依存性を調べることによって、太陽系や銀河系の前景成分を分離することができた。しかし、これらは小口径の望遠鏡による低い角分解能で行なわれたため、星や銀河などの点源の検出感度が良くなかった。特に背景放射のゆらぎ観測の最終的な精度は、どれだけ暗い点源まで検出して取り除くことができるかに大きく依存するため、より大きな口径の望遠鏡を用いることが望ましい。

### (2) 「あかり」衛星による観測

「あかり」は、赤外衛星としては最大級の口径を有するため、点源の検出能力に優れる。それと同時に、「あかり」は空間的に広がった放射をも良い感度で測定できる仕様となっており、宇宙背景放射をこれまでにない高精度で観測することができる。さらに、「あかり」は赤外線波長のほぼ全域をカバーすることもスペクトルにより前景成分を分離するために重要な特長である。

我々は、「あかり」を用いて、南北の黄極方向の空を重点的に観測した。この天域は、極軌道衛星である「あかり」にとって観測機会が最も多く長時間露出が可能なことや、そのため季節変動する黄道光を精度良く差引くことができることを考慮して選んだ。また、南黄極方向の観測領域は、全天で最も銀河系内物質が少ないため銀河系外宇宙への「窓」として知られている。

## 4. 研究成果

「あかり」による北黄極および南黄極近傍での大規模なマッピング観測の結果、近赤外域（波長 $2\text{-}5\mu\text{m}$ ）および遠赤外域（波長 $50\text{-}180\mu\text{m}$ ）の宇宙背景放射の明るさとゆらぎを検出することに成功した。方法でも述べたように、「あかり」では、前景成分である銀河をこれまでになく暗いものまで分別できるため、それらを除去することでさらに遠方から来る真の宇宙背景放射を検出できた。

### (1) 近赤外観測

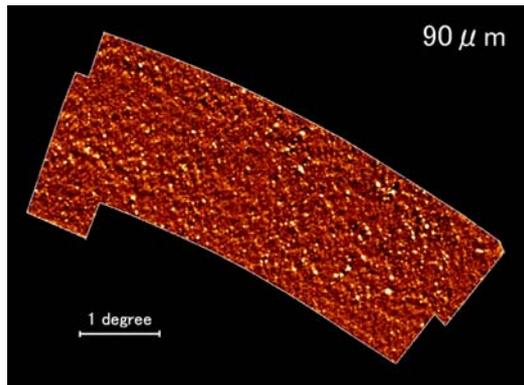
近赤外域での観測の結果、北黄極を中心にした約6平方度の領域において、K $\sim$ 18等級までの点源（主に系外銀河）を検出および除去した宇宙背景放射の観測画像を波長 $2.4, 3.5, 4.5\mu\text{m}$ の3バンドで得ることができた。それらのデータを解析した結果、宇宙背景放射のゆらぎは10分角以上の大角度スケール

で卓越している兆候がみられた。これは宇宙最初の星による背景放射ゆらぎから期待される角度スケールと似ている。

その詳しい検討は今後の課題であるが、宇宙初期の構造形成に関わる貴重な情報が得られたことは疑いない。観測結果についての論文を研究期間中に出版することができなかったが、現在、論文を投稿準備中である。

## (2) 遠赤外観測 -- 赤外銀河探査

遠赤外域での観測の結果、約 10 平方度の領域において波長 90  $\mu\text{m}$  で 2000 個におよぶ銀河の検出に成功した。下図はその画像データであり、小さな個々の輝点が銀河である。



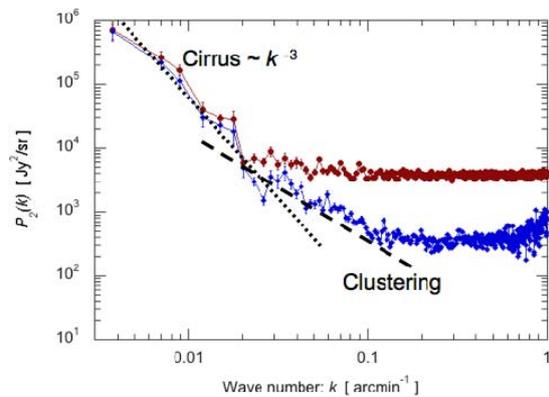
それらの銀河の面密度（銀河カウント）を調べた結果を下図に示す。これは、銀河の明るさについて面密度を表したもので、図の左にゆくほど暗い銀河を示す。本研究で得られた結果（黒丸データ点）は、従来の観測（黒丸以外のデータ点）では知り得なかったほど暗い（遠方の）銀河にまで及んでいることがわかる。また、図中の実線は遠方宇宙でも近傍の銀河と同じ空間密度と明るさを持っているとしたとき（無進化モデル）の計算値である。観測データは暗い銀河ほど（遠方にゆくほど）銀河そのものの明るさが大きくなっていること（銀河進化）を示している。さらに、この観測データから進化モデルに対する制限を与えることが可能になった。

QuickTime<sup>®</sup> C<sup>2</sup>  
 èLiÉvÉcEOEàÉÁ  
 Ç™Ç±ÇÀÈsÉNÉ·ÉÉÇ³%â©ÇÉÇZÇ½Ç...ÇÖiKóvÇ-ÇIÀÈ

この観測データにより銀河の光度進化やクラスタリングに関する新たな知見も得られつつある。さらに、この観測領域において紫外線から電波にわたる多波長での観測を、国際共同研究チームを率いて推進している

## (3) 遠赤外観測 -- 宇宙背景放射

(2)のような暗い銀河までの検出および除去とともに、太陽系および銀河系ダスト放射からなる前景成分の差し引いた結果、遠赤外域での宇宙背景放射の強度とゆらぎの測定に成功した。前景成分として系外銀河までも分解・除去して背景放射の強度を測定したのは、この波長域では世界で初めてである。また、下図に示すように、背景放射のゆらぎの角度スペクトルに 10 分角より大きな角度スケールでのゆらぎを発見した（図中の”clustering”）。赤いデータ点は系外銀河を除去前のゆらぎであり、青いデータ点は除去後のゆらぎである。



今後、大角度のゆらぎ成分が宇宙初期に起源をもつことの検証が必要であるが、すでに、可視波長では決してなしえないダストに埋もれた宇宙の大規模構造をとらえたことは、宇宙の構造形成の解明にたいへん重要な一歩をしるしたと言える。宇宙最初の星のダスト検出には、近赤外域の背景放射をはじめ様々な多波長データを組み合わせた詳細な解析が必要であり、今後の進展に期待がかかる。観測例がない波長域の情報ゆえに、新しい切り口の研究成果が得られることを確信している。

## 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 13 件）

① S. Matsuura, M. Shirahata, M. Kawada, T.T. Takeuchi, and AKARI / MP-FBSEP team, "Far-infrared Cosmological Survey in AKARI Deep Field South – The Cosmic

Far-infrared Background -", "AKARI, a light to illuminate the misty Universe", ASP conference series, 査読有, 2009, 印刷中.

② M. Shirahata, S. Matsuura, M. Kawada, T.T. Takeuchi, and AKARI / MP-FBSEP team, "Far-infrared Cosmological Survey in AKARI Deep Field South - Galaxy Number Counts -", "AKARI, a light to illuminate the misty Universe", ASP conference series, 査読有, 2009, 印刷中.

③ K. Malek, A. Pollo, M. Shirahata, S. Matsuura, 他 2 名, "Identifications and SEDs of the detected sources from the AKARI Deep Field South", "AKARI, a light to illuminate the misty Universe", ASP conference series, 査読有, 2009, 印刷中, 2009arXiv0903.3987M.

④ M. Shirahata, S. Matsuura, S. Hasegawa, 他 11 名, "Calibration and Performance of the AKARI Far-Infrared Surveyor (FIS) - Slow-Scan Observation Mode for Point Sources", Publications of Astronomical Society of Japan, 査読有, 2009, 印刷中, 2009arXiv0904.3788S.

⑤ M. Kawada, H. Takahashi, N. Murakami, 他 10 名, S. Matsuura (7 番目), "Performance of an Imaging Fourier Transform Spectrometer with Photoconductive Detector Arrays: An Application for the AKARI Far-Infrared Instrument", Publications of Astronomical Society of Japan, 査読有, 60 (2008) S389-S397.

⑥ L. Wang, M. Rowan-Robinson, I. Yamamura, 他 17 名, S. Matsuura (14 番目), "Timeline analysis and wavelet multiscale analysis of the AKARI All-Sky Survey at  $90 \mu\text{m}$ ", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 387 (2008) 601-615.

⑦ 松浦周二, 「天文衛星搭載用遠赤外線検出器の開発 -あかりから SPICA へ-」, 信学技報, 査読無, IEICE Technical Report SANE2008-36 (2008) 129-134.

⑧ S. Matsuura, M. Shirahata, M. Kawada, 他 8 名, "AKARI Far-Infrared Source Counts in the Lockman Hole", Publications of Astronomical Society of Japan, 査読有, 59 (2007) S503-S513.

⑨ C.P. Pearson, W.-S. Jeong, S. Matsuura, 他 7 名, "Extragalactic Population Colour Segregation in the AKARI Deep SEP Survey", Advances in Space Research, 査読有, 40 (2007) 605-611.

⑩ W.-S. Jeong, C.P. Pearson, H.M. Lee, S. Matsuura, 他 8 名, "Detection of CFIRB

with AKARI/FIS Deep Observations", Advances in Space Research, 査読有, 40 (2007) 600-604.

⑪ W.-S. Jeong, T. Nakagawa, I. Yamamura, 他 27 名, S. Matsuura (20 番目), "The Far-Infrared Properties of Spatially Resolved AKARI Observations", Publications of Astronomical Society of Japan, 査読有, 59 (2007) S429-S435.

⑫ M. Kawada, M. Cohen, Y. Doi, 他 27 名, S. Matsuura (18 番目), "The Far-Infrared Surveyor (FIS) for AKARI", Publications of Astronomical Society of Japan, 査読有, 59 (2007) S389-S400.

⑬ H. Murakami, H. Baba, P. Barthel, 他 73 名, S. Matsuura (34 番目), "The Infrared Astronomical Mission AKARI", Publications of Astronomical Society of Japan, 査読有, 59 (2007) S369-S376.

[学会発表] (計 11 件)

① J.J. Bock, 他 14 名, S. Matsuura (9 番目), "The Cosmic Infrared Background Experiment", American Astronomical Society, AAS meeting #213, #475.17, Jan 7, 2009, Long Beach, California, USA; Bulletin of the American Astronomical Society, 41 (2009) p.438.

② 白旗麻衣, 「AKARI Deep Field South で検出された遠赤外線銀河の特徴」, 日本天文学会, 2009年3月26日, 大阪

③ 松浦周二, 「AKARI Deep Field South における遠赤外線宇宙背景放射の検出」, 日本天文学会, 2008年9月12日, 岡山

④ S. Matsuura, "AKARI extragalactic surveys probing into the cosmic infrared background", Challenges in IR Extragalactic Astrophysics. Sep 14 - 18, 2008, in Crete, Greece.

⑤ 白旗麻衣, 「「あかり」衛星搭載遠赤外線サーベイヤーのスロースキャンモードにおけるフラックス校正」, 日本天文学会, 2008年9月13日, 岡山

⑥ 松浦周二, 「Multi-wavelength follow-up observations in the AKARI Deep Field South」, 日本天文学会, 2008年3月24日, 東京

⑦ 白旗麻衣, 「AKARI Far-infrared Deep Galaxy Survey」, 日本天文学会, 2008年3月24日, 東京

⑧ S. Matsuura, "Far-infrared cosmological survey in AKARI Deep Field South", 37th COSPAR Scientific Assembly, July 13 - 20, 2008, in Montreal, Canada, E16-006-08.

⑨ 松浦周二, 「近赤外宇宙背景放射のロケット観測実験:CIBER - 搭載機器開発の現状」,

日本天文学会, 2007年9月27日, 岐阜  
⑩ 白旗麻衣, 「あかり」衛星による南黄極  
近傍の遠赤外ディープサーベイ, 日本天文  
学会, 2007年9月26日, 岐阜  
⑪ 松浦周二, 「あかり」によるロックマン  
ホールの遠赤外ディープサーベイ(2), 日  
本天文学会, 2007年9月26日, 岐阜

[図書] (計0件)  
なし

[産業財産権]  
○出願状況 (計0件)  
なし

○取得状況 (計0件)  
なし

[その他]

① 松浦周二ほか, 報道発表「あかり」、遠  
赤外線で宇宙の果てに迫る”, 於名古屋大学  
[http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Out  
reach/results/pr20070905/pr070905\\_2.html](http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Outreach/results/pr20070905/pr070905_2.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松浦 周二 (MATSUURA SHUJI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
・宇宙科学研究本部・助教  
研究者番号: 10321572

### (2) 研究分担者

松本 敏雄 (MATSUMOTO TOSHIO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
・宇宙科学研究本部・名誉教授  
研究者番号: 60022696  
和田 武彦 (WADA TAKEHIKO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
・宇宙科学研究本部・助教  
研究者番号: 50312202  
白旗 麻衣 (SHIRAHATA MAI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
・宇宙科学研究本部・博士研究員  
研究者番号: 50450713  
(以上3名, 2007年度のみ研究分担者)

### (3) 連携研究者

松本 敏雄 (MATSUMOTO TOSHIO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
・宇宙科学研究本部・名誉教授  
研究者番号: 60022696  
和田 武彦 (WADA TAKEHIKO)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号: 50312202  
白旗 麻衣 (SHIRAHATA MAI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構  
・宇宙科学研究本部・博士研究員  
研究者番号: 50450713  
(以上3名, 2008年度のみ連携研究者)