

資料11-2

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第11回) H25. 7. 12

赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F) プロジェクトの終了について



2013年7月12日

宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所



本資料の位置付け

- ▶ 赤外線天文衛星「あかり」は、JAXA宇宙科学研究所(ISAS)が開発・運用した科学衛星である。平成9年度に開発を開始し、平成18年2月に打上げ、平成23年11月に停波し運用終了した。
- ▶ 「あかり」の運用終了を受けて、JAXA/ISASとしてプロジェクト終了審査を実施した(次ページ参照)。審査項目(*)は以下の通り。
 - ▶ プロジェクト目標、ミッション目的の達成状況とそれによる社会的・政策的・国際的貢献状況や波及効果
 - ▶ 投入した経営資源(資金・人員)、実施体制、スケジュールの実績の妥当性
 - ▶ 開発中及び軌道上で発生した諸事項の処置の妥当性
 - ▶ プロジェクト終了後に移行する事業の計画の妥当性に関する評価
 - ▶ 機構横断的に継承すべき教訓・知見等の識別状況や人材育成結果
- ▶ 審査の結果、成果と今後の作業計画などの整理状況と、今後機構横断的に継承すべき教訓・知見等の識別状況を考慮して、機構としてプロジェクト終了を妥当と判断した。
- ▶ 本資料では、「宇宙開発利用部会における研究開発課題等の評価の進め方について」(平成25年4月4日宇宙開発利用部会決定)における基本的な考え方を踏まえ、JAXA自らが評価実施主体となって実施した終了審査の結果を報告する。



本資料の位置付け

科学衛星プロジェクト終了に係る手続き

- ▶ 宇宙理学委員会における終了審査
 - ▶ 理学的成果と波及効果、プロジェクトにより得られた教訓・知見、プロジェクト終了後に行う事業計画について評価。



- ▶ 宇宙科学研究所(ISAS)における終了審査
 - ▶ 経営的な観点に重点を置いた審査を実施。



- ▶ JAXA理事会議にて終了審査結果を報告



- ▶ 文部科学省宇宙開発利用部会で報告



目次

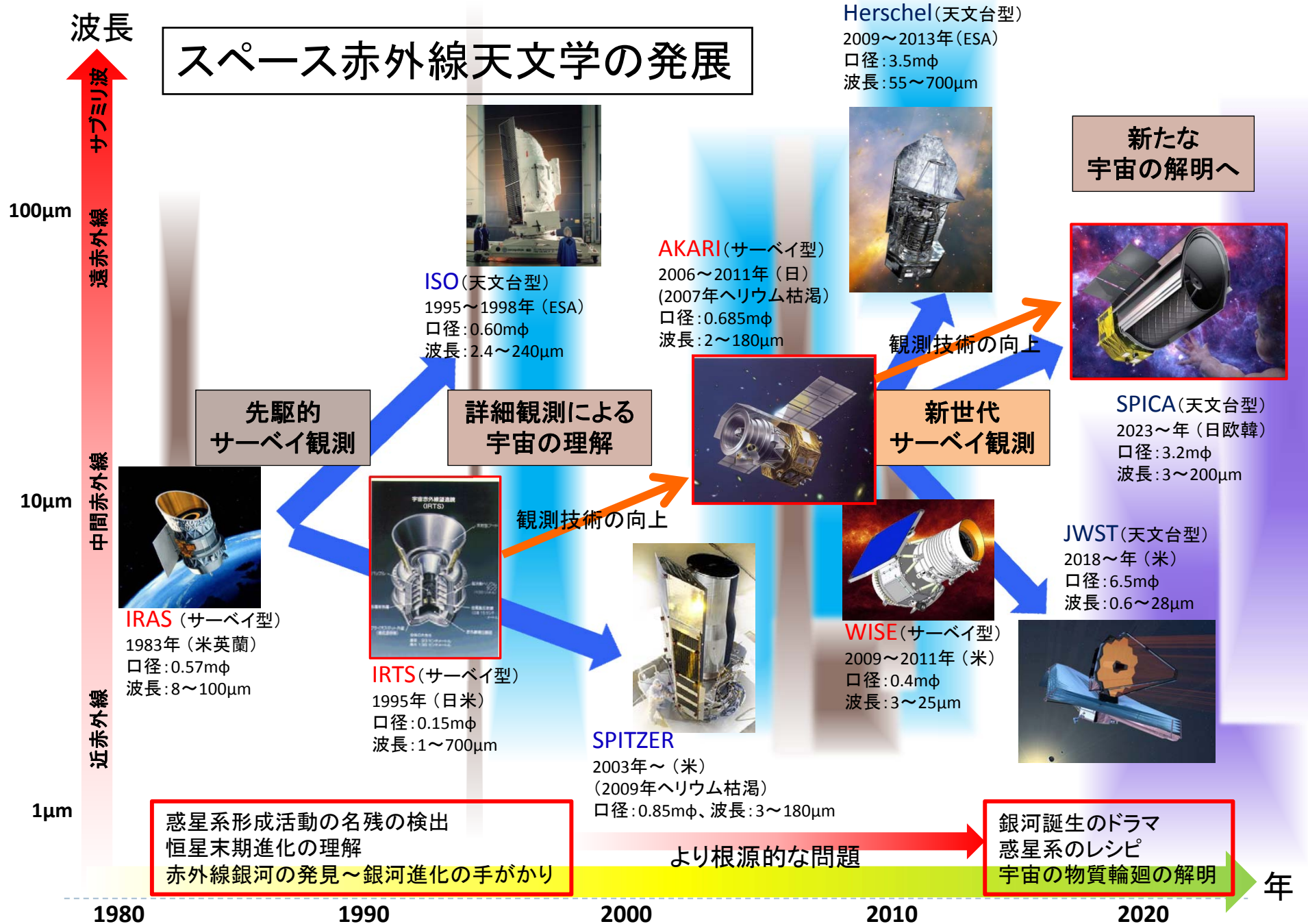
1. 「あかり」(ASTRO-F)の概要		参考	
(1) 天文学研究における「あかり」の位置づけ	5	1. 「あかり」(ASTRO-F)の概要	24
(2) 全体概要	7	2. プロジェクトの経緯	26
(3) 科学目的	8	3.1 成功基準の達成状況	32
(4) 観測装置	9	3.2 天文学研究の成果	38
2. 主な成果		3.3 波及効果	61
(1) 科学成果の例	10	4. プロジェクトにおける発生事象への対応と 今後への反映	64
(2) データ利用状況、研究成果出版状況	14	5. プロジェクトの効率性について	72
(3) 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果、 人材育成	15	6. データプロダクト作成について	76
3. 成功基準達成状況		7 将来計画	78
(1) フル成功基準	16	8 「あかり」終了審査委員会メンバー	79
(2) エクストラ成功基準	17		
4. JAXAにおけるプロジェクト終了に係る手続			
(1) 概要	18		
(2) 審査結果	19		
5. 今後の計画			
(1) データアーカイブ作成計画	20		
(2) 天文学研究の発展	21		
6. まとめ	22		

1. 「あかり」(ASTRO-F)の概要

(1) 天文学研究における「あかり」の位置づけ



- ▶ 天文学の究極の目的は、この宇宙がどのようにして生まれ、進化し、生命の誕生に至ったかを理解することである。そこには、銀河の誕生と進化、星の誕生から死、それに伴う物質の循環、惑星の形成など、重要な研究課題がある。
- ▶ これら宇宙の営みの主役となるのは、宇宙に漂う低温の塵やガスである。可視光では見えないこれらの物質の性質や活動を捉えるためには、赤外線観測が必要となる。しかし、赤外線波長の大部分は地球大気の吸収や放射の影響により地上からは観測不可能か、あるいは限定的な情報しか得られない。高感度の赤外線観測のためには、大気の吸収や放射のない、宇宙空間が理想の環境である。
- ▶ 宇宙からのみ観測可能な波長で研究を行うためには、そのターゲットとなる赤外線天体がどこに存在するかを知らなくてはならない。従ってまず全天サーベイを行って天体をリストアップし、次にそれを詳細に観測するという戦略をとることになる。
- ▶ 世界初の赤外線天文衛星「IRAS」(1983年、米英蘭)は全天サーベイを行い、約25万個の赤外線天体のカタログを作成した。「IRAS」データはそれ自身天文学研究に革命的な進歩を与えたほか、ESAの「ISO」(1995年)、米国の「Spitzer」(2003年)といった天文台型の赤外線天文衛星による詳細研究へのガイドマップとなった。しかし、作成以来既に30年を経た「IRAS」カタログは、現代～将来の天文学研究のデータとしては、感度、解像度ともに不十分であり、新しい赤外線天体カタログの作成が望まれていた。
- ▶ 赤外線天文衛星「あかり」は、解像度、感度、波長範囲のすべてにおいて「IRAS」を凌駕する全天サーベイを行い、今後数十年の天文学の基礎資料として使われる、第二世代の赤外線天体カタログを作成すべく計画された。計画が始まった1990年代半ば以降現在まで、遠赤外線での全天サーベイカタログの計画は他にはない。
- ▶ 日本のスペース赤外線天文学は、1995年に打ち上げられた宇宙実験・観測フリーフライヤ(SFU)に搭載された赤外線望遠鏡「IRTS」で培った技術と経験をもとに「あかり」を実現させた。「あかり」の天体カタログは、ESAの遠赤外線・サブミリ波天文衛星「Herschel」をはじめ、地上望遠鏡の「ALMA」や「すばる」、さらには次期赤外線天文衛星「SPICA」(計画中)によるより詳細な観測・研究へ活用されることで、宇宙の謎の解明に大きく貢献すると期待される。



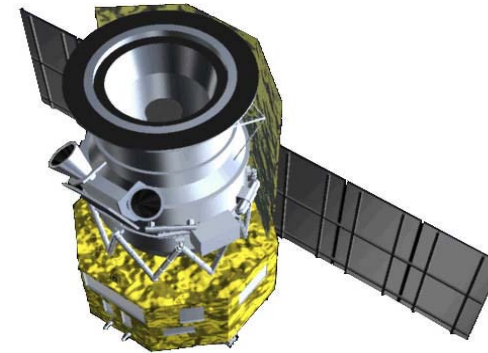
1. 「あかり」(ASTRO-F)の概要

(2) 全体概要



特長

- 日本初の赤外線天文観測専用衛星
- 高度約700 kmの太陽同期極軌道
- 高さ 3.7 m、重さ 952 kg
- 有効口径68.5 cmの反射望遠鏡
- 液体ヘリウムと冷凍機で極低温冷却
- 目的: 「全天サーベイ観測」による宇宙の赤外線地図作り。世界の天文研究者に第二世代の赤外線天体カタログを提供。さらに「指向観測」により銀河、星・惑星系の誕生と進化を追う。



開発から運用終了までの主な経過

- 平成7年1月 宇宙理学委員会にてミッション採択(当時の名称:IRIS計画)
- 平成9年度より 第21号科学衛星「ASTRO-F」として開発開始
- 平成18年2月22日 M-Vロケット8号機により打上げ。
- 平成18年4月13日 望遠鏡の蓋を開き、試験観測を開始。 5月8日 本観測を開始。
- 平成19年8月26日 液体ヘリウム全量消費。約1年4ヶ月(試験観測期間を除く)の観測によりフルサクセスを達成。
- 平成20年6月 1日 冷凍機冷却による近赤外線観測(エクストラサクセス)を開始。
- 平成22年2月14日 冷凍機性能劣化。 5月より観測中断、性能復帰をめざした運用を開始。
- 平成22年3月30日 赤外線天体カタログ初版公開。
- 平成23年5月24日 電力異常が発生。 6月 科学観測終了を決定。
- 平成23年11月24日 衛星姿勢の再確立～軌道降下運用を経て停波、運用終了。

1. 「あかり」(ASTRO-F)の概要

(3) 科学目的



- 大気に遮られて地上からは観測できない赤外線で天体観測を行う
- 全天サーベイ(ほぼ全天を覆う掃天観測)を行い、赤外線天体カタログを構築する
- 全天サーベイ、及び指向観測(特定天体／天域に望遠鏡指向方向を固定した詳細観測)により、銀河・星・惑星系の誕生と進化を追う。
 - － 1983年に米・英・蘭により打上げ・運用されたIRAS衛星に比べ、より広い波長域、高い解像度・感度の全天サーベイを行い、第二世代の赤外線天体カタログを世界の研究者に提供する。
 - － 全天サーベイに加えて指向観測を行い、より高い感度の撮像・測光、あるいは分光データを取得する。
 - － 観測対象は太陽系内天体から宇宙の果ての銀河まで多岐にわたるが、主要な研究項目は以下の通り。
 - ・ 星形成活動や原始星をとらえて、どこでどのように星が生まれるのかを探る
 - ・ 惑星系の原料となる、あるいは惑星形成の過程で作られる、星の周りの塵円盤を観測して、惑星形成過程を探る
 - ・ 生涯の終末にある星を観測して、星がガスや塵を宇宙に返す過程を探る
 - ・ 星形成活動を遠方の(過去の)宇宙まで観測して、銀河の進化、あるいは宇宙の星形成史を探る

1. 「あかり」(ASTRO-F)の概要

(4) 観測装置

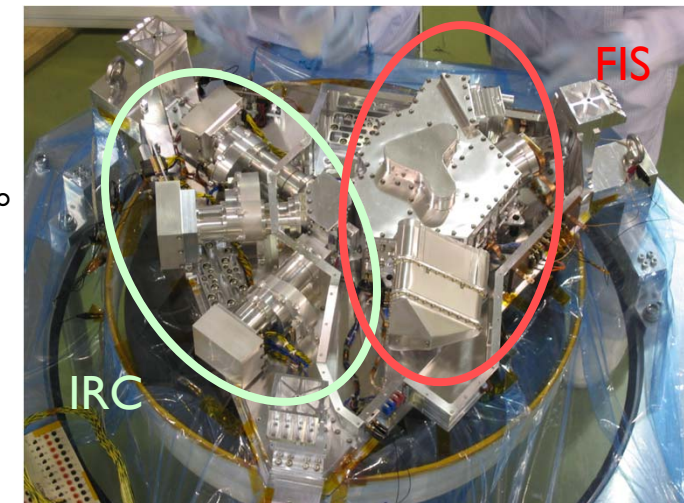


- ▶ 望遠鏡: 有効口径 68.5 cm の反射望遠鏡。炭化ケイ素製の軽量鏡。
実績は、主鏡重量11kg、望遠鏡全体で約30kgを達成。
- ▶ 冷却系: 液体ヘリウムとスターリングサイクル冷凍機を用いた高効率クライオスタット。170リットルの液体ヘリウムで1年以上の冷却寿命。
実績は、軌道上で550日間のヘリウム冷却を達成。



望遠鏡

- ▶ 焦点面観測装置: 以下の2つの観測装置で全赤外線波長域をカバー。
 - 1) 近・中間赤外線カメラ(IRC): 3台の屈折光学系によるカメラで構成。波長2~26 μm の9波長帯で撮像。InSb検出器アレイ、Si:As検出器アレイを使用。プリズム・グリズムによる分光機能。全天サーベイには9, 18 μm の2波長帯を使用。
 - 2) 遠赤外サーベイ装置(FIS): 波長50~180 μm の4波長帯で全天サーベイ、撮像。Ge:Ga検出器アレイを使用。フーリエ分光器による分光機能も有する。

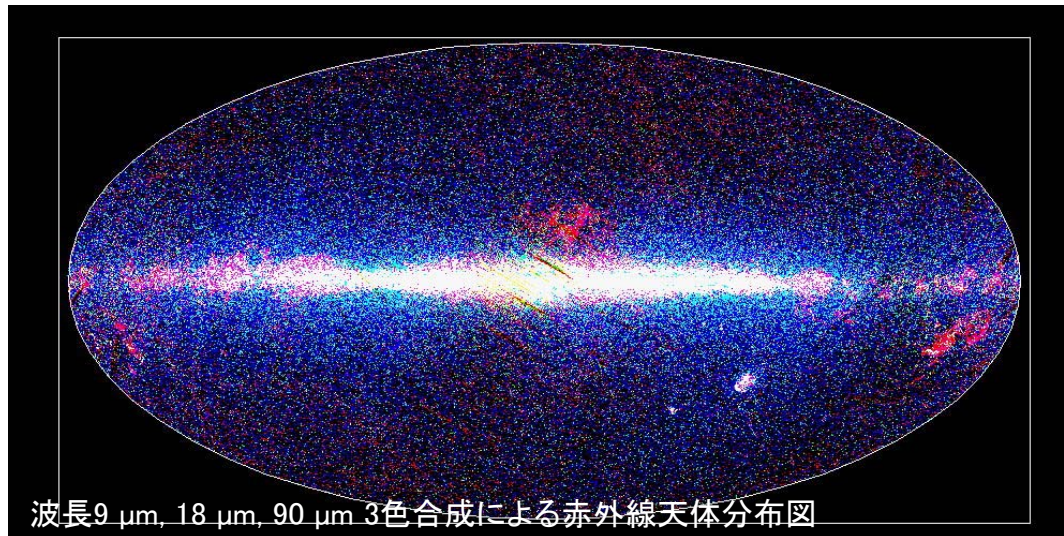


2. 主な成果

(1) 科学成果の例：大規模天体カタログの提供

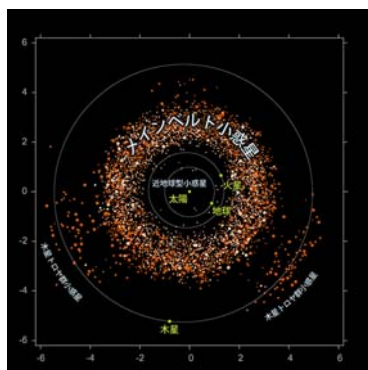


▶ 「あかり」カタログは、天文学研究における**最新のガイドマップ**



■ 「あかり」赤外線天体カタログ

- 全天サーベイ観測による、「赤外線天体カタログ」初版を2010年3月30日に公開。
- 天体数は約130万。これまでの全天サーベイ (IRAS) 点源カタログと比較して約5倍の天体数。
- 2012年度までに本データを使った査読論文は139編。天文学研究の基礎資料として、広く使われている。



■ 「あかり」小惑星カタログ

- 小惑星5120個について大きさと表面反射率のデータを集録。
- 一般に公開されているカタログとして現在世界最大。
- 2011年9月16日公開

小惑星の分布。円は、内側より地球、火星、木星の軌道を示す。

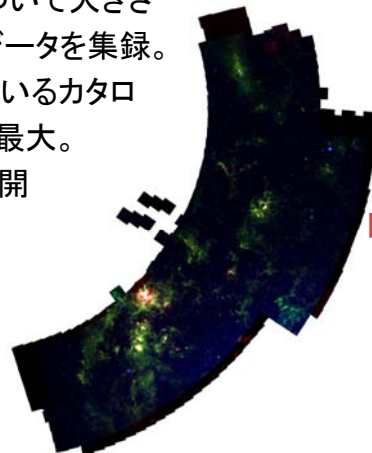
■ 北黄極天体カタログ

- 深探査領域カタログ (2013年3月15日公開): 7284天体の情報
- 広域探査領域カタログ (2013年3月15日公開): 約11万5000天体の情報



■ 大マゼラン雲天体カタログ

- 点源天体カタログ (2012年11月13日公開): 約66万天体の情報。
- 近赤外線分光カタログ (2013年1月10日公開): 1757天体について波長2-5 μm のスペクトル

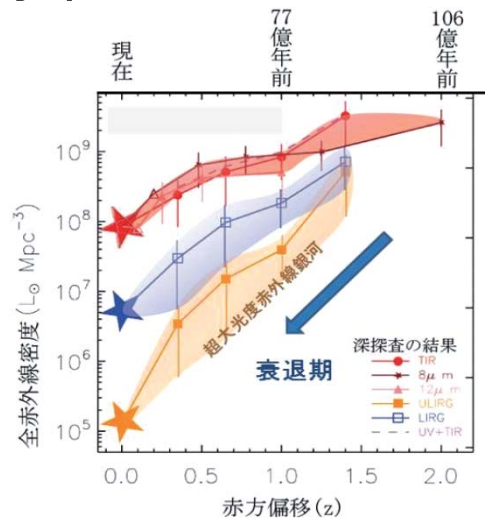


2. 主な成果

(1) 科学成果の例：宇宙の歴史の解明



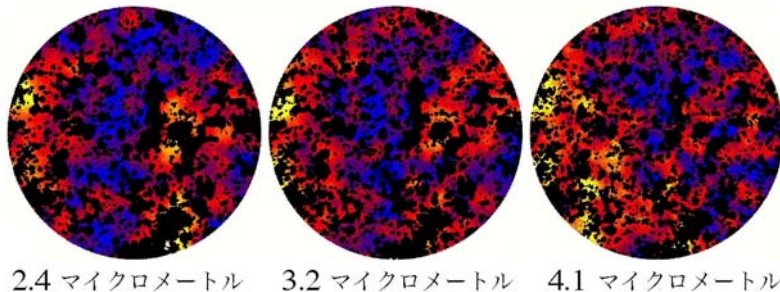
▶ 宇宙の進化と星形成活動の推移



■ 「あかり」の全天サーベイカタログと、北黄極カタログの解析により、宇宙の歴史の中で、星や銀河の形成活動が、**約90億年前には現在の約20倍も活発だった**ことが分かった。

Goto 他 (2011)

▶ 宇宙最初の星の光を検出



2.4 マイクロメートル

3.2 マイクロメートル

4.1 マイクロメートル

- 宇宙近赤外線背景放射の場所による揺らぎを検出。ビッグバンから3億年程度の宇宙で**最初に生まれた星々の光を捉えた**と考えられる。
- 揺らぎのスケールは宇宙初期の大規模構造に一致。宇宙初期の大規模構造を観測的に捉えたのは初めて。 Matsumoto 他 (2011)

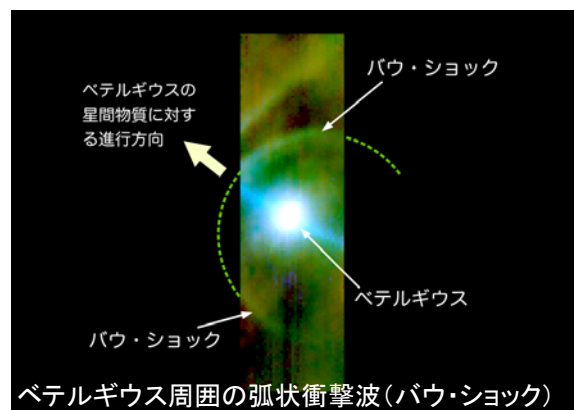
課題: 最初の星が生まれてから、90億年前までの活動を明らかにすること

2. 主な成果

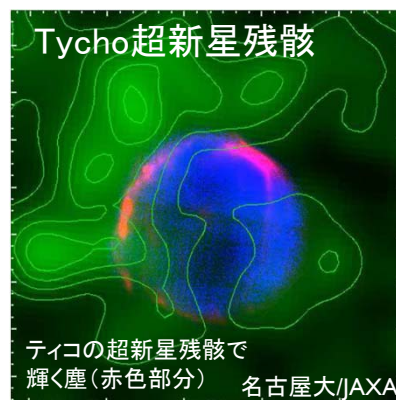
(1) 科学成果の例：宇宙の物質循環



▶ 星から放出された物質と星間物質の相互作用



Ueta 他 (2007)

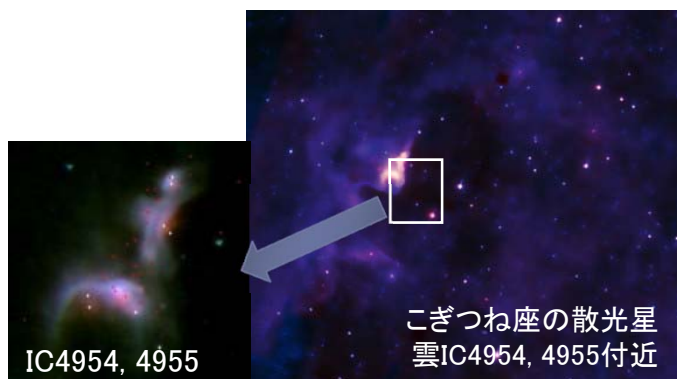


Ishihara 他 (2010)

■「あかり」は、宇宙の物質循環に関する新しい研究手法を確立

- 左図： オリオン座のベテルギウスが放出したガスとちりが、周囲の物質と衝突してできた弧状衝撃波（パウ・ショック）。詳細な解析から、星間物質の三次元的な流れを導出。この手法は「あかり」以降広く使われている。
- 右図：「ティコの超新星残骸」で捉えられた破壊されつつある塵と、新たに形成された塵が出す赤外線。星間ダストの起源に、新たな可能性を示唆。

▶ 星形成活動の連鎖



■「あかり」サーベイのもたらす広域データにより、三世代にわたる星形成の連鎖を俯瞰

- 右図： こぎつね座のIC4954, 4955付近では、かつて存在した大質量の星により、星間物質が吹き寄せられ100光年もの大きさの空洞が作られた。その壁に当たる部分では掃き寄せられ圧縮された物質から第二世代の星が誕生した。
- 左図： IC4954, 4955領域の中で、第三世代の星が連鎖的に誕生している証拠をとらえた。

Ishihara 他 (2007)

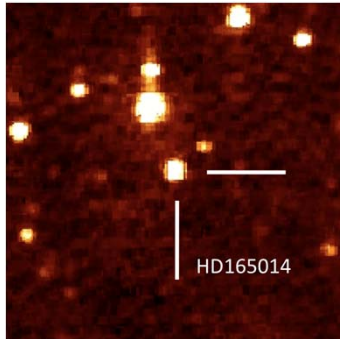
課題:様々な空間スケールで、星間物質の物理的・化学的構造を明らかにすること

2. 主な成果

(1) 科学成果の例：惑星系形成



▶ デブリディスクに結晶質シリケートを検出



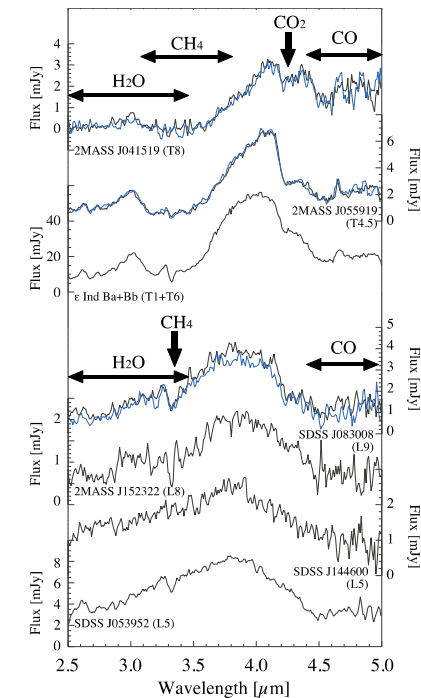
「あかり」の観測により発見された高温デブリディスクの18 μ m画像(中央)。

- 「あかり」全天赤外線カタログより、波長18 マイクロメートルで赤外線超過を示すデブリディスクを12天体同定した。うち、8天体は「あかり」で初めて発見したもの。
- そのうちの1天体を、「すばる」とスピッツァー宇宙望遠鏡で観測し、**結晶質シリケートの成分を同定した**。惑星形成時の環境を反映している可能性がある。 *Fujiwara 他 (2010)*

▶ 褐色矮星の大気構造研究を進展

- 「あかり」は、星と惑星の中間の天体である、褐色矮星の2.5～5.0 マイクロメートルの連続的なスペクトルを世界で初めて取得した。これは、将来の系外惑星大気の大観測的研究の基礎となる。
- **二酸化炭素を初検出**。その存在量が、炭素・酸素原子の存在量に強く依存することを確認。褐色矮星の元素組成に天体毎の違いがあることを示唆。
- 褐色矮星の**半径を世界で初めて推定**。褐色矮星進化理論との間に齟齬があることを指摘。 *Yamamura 他 (2010)*

課題: 化学的、鉱物学的情報を蓄積し、惑星系形成の総合的な理解へ発展させるこ



「あかり」による褐色矮星の近赤外線スペクトル。下から上に、有効温度が高い→低い順に並べている。

2. 主な成果

(2) データ利用状況、研究成果出版状況

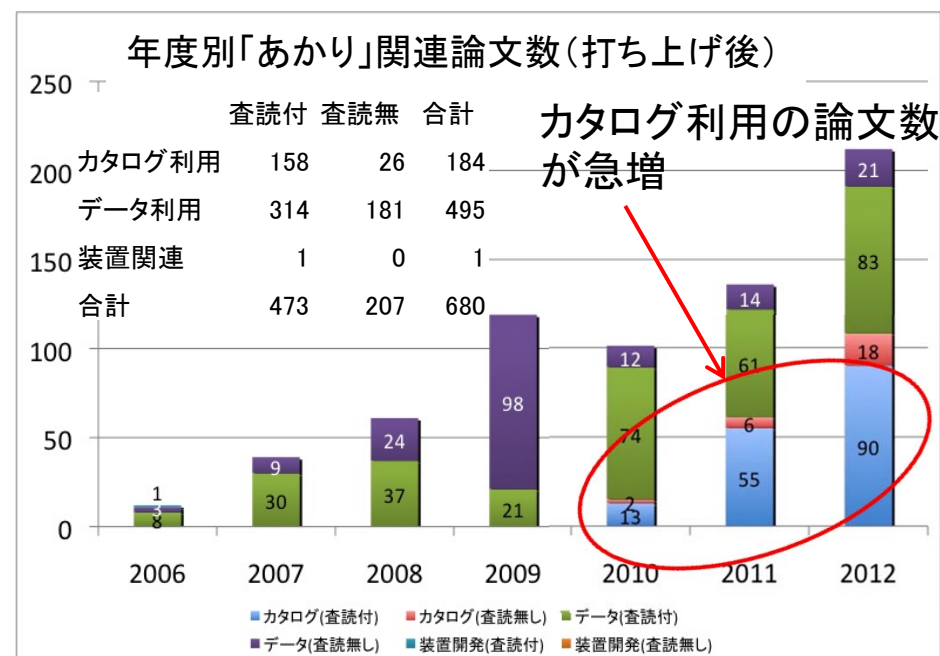


▶ カタログの利用

- ▶ 全天サーベイカタログは、2010年3月の公開以来2013年3月までに、ISASサーバへ世界の研究者から約78万件の検索。データファイルダウンロードは延べ約1100件。
- ▶ 小惑星カタログは2011年9月の公開以来ISASサーバからのダウンロード数が延べ約900件。
- ▶ これ以外にも、国内・海外のデータサーバ経由での利用が行われている。

▶ 「あかり」データを利用した論文数

- ▶ 打ち上げ後2013年3月までに査読付き論文が473編
- ▶ カatalogデータを利用した論文数が2011年以降急激に増加している。



2. 主な成果



(3) 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果、人材育成

- ▶ スペース赤外線天文学での国際プレゼンスの向上
 - ▶ 「あかり」の成功により、米・欧に並ぶ第3極としての地位を獲得、次期赤外線天文衛星「SPICA」(概念設計中の口径3m級次期宇宙赤外線望遠鏡)は、日本がリードする国際ミッションとして、欧州、台湾、韓国が参加を表明。
- ▶ 日本の戦略技術としての宇宙用冷凍機
 - ▶ 「あかり」のための冷凍機の開発は、1989年度から本格的に開始。住友重機械工業(株)のスターリングサイクル冷凍機は、最終的には100W以下の電力で、200mW以上(@20K)の冷凍能力(冷凍温度は無負荷時に約13K)を達成。当初は欧米に比べて10年以上遅れているとされた日本の宇宙用冷凍機は、現在では世界トップの技術となっている。
- ▶ 人材育成
 - ▶ 「あかり」の開発、運用、データ解析を通じて、大学院生、研究員などの若手が赤外線天文学の研究に合わせて光学設計、検出器駆動技術、検出器特性補正技術、低温技術、衛星運用技術、ソフトウェア開発、データベース技術などを学んだ。
 - ▶ 研究員の進路(JAXA雇用、科研費、学振研究員等36名中)
 - ▶ JAXA職員5名、大学等教員8名、大学等研究員12名、一般企業3名、現職8名
 - ▶ 博士学位を取得した大学院生の進路(関連大学含む、状況把握分のみ)
 - ▶ 大学等教員3名、JAXA/大学等研究員8名、企業3名
 - ▶ 学位取得状況(宇宙科学研究所外部の学生含む)
 - ▶ 博士: 打上げ前 5名、打上げ後 25名 修士: 打上げ前 21名、打上げ後 32名

3. 成功基準達成状況

(1) フル成功基準



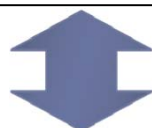
* 成功基準は、2005年6月3日 宇宙開発委員会・推進部会資料より

* ミニマム成功基準はフル成功基準に包含されるため省略

フル成功基準(運用期間最低1年)

1年以上の液体ヘリウム冷却による観測期間を実現し、以下の観測を達成して、天文学の重要課題の研究に大きな寄与を果たす。

- ◆ 遠赤外サーベイ装置により、過去の遠赤外線サーベイ観測^(註)より高解像度、高感度の全天サーベイを達成し、赤外線天体カタログを作成する。
- ◆ 遠赤外サーベイ装置及び近・中間赤外線カメラにより、多波長での広域撮像観測を達成する。(近・中間赤外線カメラによる観測では、分光データの取得も含む。)



実績: フル成功基準を達成

液体ヘリウム冷却による観測期間約1年4ヶ月(2006.5.8-2007.8.26、試験観測期間を除く)を達成し、以下の観測を行った。

- この間、遠赤外サーベイ装置による、過去の観測より、高感度、高空間分解能の全天サーベイを達成。天球のカバー率は96%以上。2010年3月に、赤外線天体カタログを一般公開。IRASカタログの約1.8倍の天体数(遠赤外線天体数では約4倍)。
- 液体ヘリウム冷却による観測期間中、約5000回の指向観測を行い、遠赤外サーベイ装置及び近・中間赤外線カメラによる多波長の広域撮像及び分光観測を達成

(註)過去の米・英・蘭の共同開発であるIRAS衛星(1983年打上げ)による観測を指す。

3. 成功基準達成状況

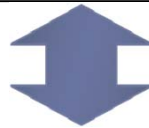
(2) エクストラ成功基準



エクストラ成功基準

フル成功基準に加えて以下のいずれかを達成し、天文学的成果を増大させる。

- ◆ 液体ヘリウム消費後も、機械式冷凍機による冷却のみにより、近・中間赤外線カメラを用いた近赤外線撮像／分光観測を継続する。
- ◆ 遠赤外サーベイ装置によるサーベイと並行して、近・中間赤外線カメラによる中間赤外線でのサーベイ観測を達成する。
- ◆ 遠赤外サーベイ装置の分光機能により、遠赤外線の分光観測を達成する。



実績 **エクストラ成功基準も達成**

- 液体ヘリウム枯渇後も機械式冷凍機のための冷却で近・中間赤外線カメラを用いた近赤外線撮像／分光観測（指向観測）を継続。2010年2月までに12,000回以上。
- 近・中間赤外線カメラも過去の観測より高感度、高空間分解能の全天サーベイを達成。2010年3月、中間赤外線天体カタログを一般公開。遠赤外線カタログと合わせ、IRASの約5倍の天体数。
- 遠赤外サーベイ装置による分光観測も達成（約600回の指向観測）

4. JAXAにおけるプロジェクト終了に係る手続



(1) 概要

▶ 宇宙理学委員会における終了審査

- ▶ 平成23年6月(第31回宇宙理学委員会):「あかり」終了審査委員会を設置。
- ▶ 平成24年6月(第36回宇宙理学委員会):「あかり」終了審査委員会が審査結果を報告。承認。
- ▶ プロジェクトの科学的成果と波及効果、プロジェクトにより得られた教訓・知見、「あかり」データアーカイブ整備計画について評価。



▶ 宇宙科学研究所(ISAS)における終了審査

- ▶ 平成24年12月6日及び19日に実施
- ▶ 宇宙理学委員会における評価を踏まえ、経営的な観点に重点を置いた審査を実施。
 - 投入した経営資源(資金・人員)、実施体制、スケジュールの実績の妥当性
 - プロジェクトチーム解散後に定常組織での業務に移行する「あかり」データアーカイブ化事業の目的・スコープ範囲、投入する経営資源(資金・人員)、実施計画、実施体制、スケジュールの妥当性に関する評価



▶ JAXA理事会における報告

- ▶ 平成25年1月29日理事会にて終了審査結果を報告、承認



▶ 文部科学省宇宙開発利用部会で報告(本日)

4. JAXAにおけるプロジェクト終了に係る手続

(2) 審査結果



▶ 宇宙理学委員会における審査結果

- ▶ 「あかり」プロジェクトはフルサクセスに加えエクストラサクセスを達成するとともに、世界の科学コミュニティに向けて天文学の重要な基礎データを提供するなどの成果を上げ、国際的、社会的に大きく貢献したと評価する。
- ▶ 「あかり」プロジェクトは衛星プロジェクトとしては終了することが妥当であるが、「あかり」によって得られたデータを科学コミュニティを含む社会へと還元するためには、「あかり」データアーカイブ・プロダクト作成作業を継続し、広く公開することが必要と判断する。
 - ▶ 作成を目指す「あかり」データプロダクトの種類と優先順位を示すため、プロダクトリストを作成(参考6. 表1参照)

▶ 宇宙科学研究所(ISAS)において実施した終了審査結果

- ▶ 「あかり」プロジェクトはエクストラサクセスを達成したことを確認した。「あかり」の成功により、スペース赤外線天文学における日本の国際プレゼンスの向上や、日本の宇宙用冷凍機技術の発展などの波及効果があったと評価する。
- ▶ 投入した経営資源(資金・人員)、実施体制、スケジュールの実績について、それぞれおおむね妥当な実施状況であったと評価する。但し、スケジュールについては、打上げ遅延のため海外ミッションに一部の観測を先んじられる、また他ミッションのデータアーカイブの公開時期までのアドバンテージが小さくなるなど、ミッションが本来目指した優位性の内、ある部分の成果の減少は避けられなかったと評価する。
- ▶ 開発中及び軌道上で発生した諸事項の処置についても、その対応が妥当であると評価する。これらの諸事項から得られた技術的知見、教訓については今後のミッションにも展開すべき事とし、2013年度中を目途に宇宙物理学研究系を中心として文書化することとした。また、教訓・知見、人材育成の結果についても確認をおこなった。
- ▶ 終了審査ではプロジェクト終了後の「あかり」データアーカイブ化事業計画についても評価を行い、妥当と判定する。
 - ▶ データアーカイブ化事業計画の妥当性を示すため、「あかり」の各データプロダクトの達成目標を明確化した、データアーカイブ化事業に関する5か年計画を作成。その活動は毎年度レビューを行い、次年度以降の作業計画を確認することとする。

5. 今後の計画

(1) データアーカイブ作成計画



- ▶ 「あかり」が取得した膨大なデータが持つ情報のうち、すでに天文学的成果として発表されたものはごく一部。
 - ▶ データ処理に、専用ソフトウェア、専門知識などが必要で時間がかかる。
 - ▶ そのため、新しい研究アイデアの試行、他波長での観測データとの比較などが簡単にできない。
- ▶ 「あかり」でしか得られない貴重な情報を、理論研究者を含む一般の天文学者に広く簡単に利用してもらうために、データ処理に習熟したチームにより Science Ready データを作成し、アーカイブを行う事でデータの利用を促進する。
- ▶ 宇宙理学委員会による終了審査においても、本事業を強く推奨。
- ▶ 実行計画
 - ▶ 2013年度から5年計画で、「あかり」の取得したデータの処理・アーカイブを進める。
 - ▶ 全天サーベイ: 天体カタログの改良に加え、全天イメージマップの作成を行う
 - ▶ 指向観測: 技術的に可能な範囲で、すべてのデータの処理、アーカイブを行う。
 - ▶ 宇宙科学研究所の科学衛星運用・データ利用センター(C-SODA)の下に、「あかりデータ処理・解析チーム」を設置し、大学研究者と協力して処理を進める。

5. 今後の計画

(2) 天文学研究の発展



「あかり」は多くの天文学成果をあげると同時に、多くの新たな研究課題を我々に提示した。

- ▶ 宇宙の歴史に関して：最初の星が生まれてから、90億年前までの活動を明らかにすること。
- ▶ 宇宙の物質循環に関して：様々な空間スケールで、星間物質の物理的・化学的構造を明らかにすること。
- ▶ 惑星系形成に関して：惑星系円盤や、惑星そのものの化学的、鉱物学的情報を蓄積し、惑星系形成の総合的な理解へ発展させること。
- ▶ 「あかり」カタログの中には、まだ知られていない、我々の宇宙の理解を大きく変える新しい天体が潜んでいる可能性がある。上記の具体的テーマに加え、カタログの解析と、多波長での追観測を続けることが必要である。



JAXAでは、「あかり」で培った技術を発展させ、優れた観測能力(広視野、高解像度、高感度、高分光能力)を持つ、天文台型の次世代赤外線衛星「SPICA」計画を研究中



6. まとめ

JAXAは、プロジェクトの企画立案と実施に責任を有する立場から、JAXA自らが評価実施主体となって評価を行った。具体的には、宇宙理学委員会、宇宙科学研究所において「あかり」プロジェクト終了審査を行い、評価結果を了承した。

- 日本初の赤外線天文衛星「あかり」は、フルサクセスに加えエクストラサクセスまでのすべての基準を達成した。
- 従来のカタログを20数年ぶりに塗り替えた「あかり」の赤外線天体カタログは、今後数十年に渡り世界中の研究者に使われる天文学の基礎資料であるとともに、「あかり」の観測データから宇宙の星形成史や大規模構造を解明するなど、数々の科学成果をあげた。
- このように、天文学の重要な基礎データを我が国が提供し、国際的、社会的に大きく貢献することで、赤外線天文学における日本の国際プレゼンスが向上。さらに宇宙用冷凍機技術の発展や人材育成などの波及効果を得て、日本のスペース赤外線グループは世界の第一線に立ち、将来の赤外線衛星計画をリードする立場となった。
- 開発中及び軌道上で発生した諸事項の処置は妥当であり、そこから得られた技術的知見や教訓は、今後のミッションに展開すべきこととされた。
- 今後の課題として、「あかり」データアーカイブ・プロダクト作成を継続し、広く公開していく必要がある。

以上の評価結果を踏まえ、JAXAは、「あかり」で得た成果や知見をさらに発展させ、次期赤外線天文衛星「SPICA」の実現を目指していく。



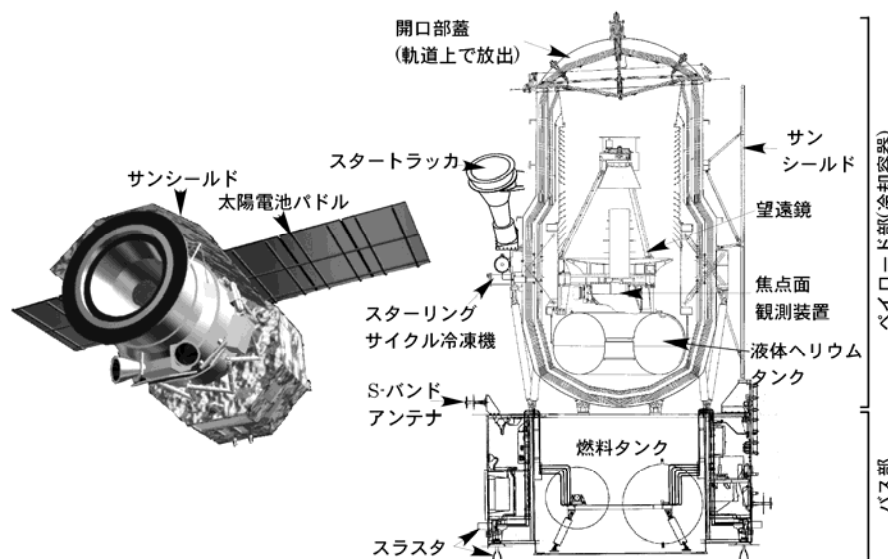
参考

1. 「あかり」(ASTRO-F) の概要

(1) 衛星主要諸元



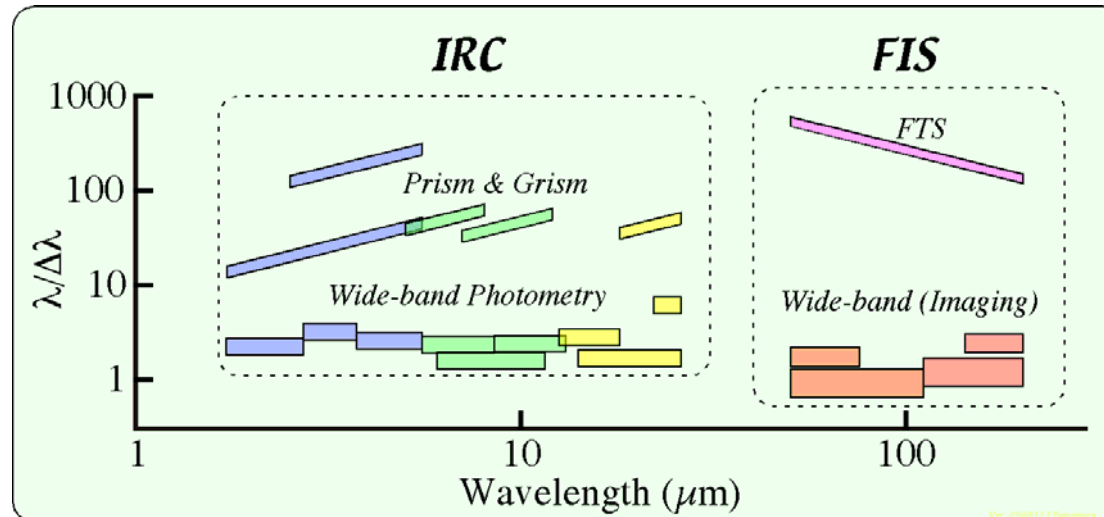
質量	952 kg (打上げ時Wet)
サイズ	2026 × 1880 × 3675 mm (打上げ時)
太陽電池パドル	2翼 × 3枚、発生電力 940 W (3年後)
蓄電池容量	22 AH (Ni-MH, 1系統)
通信系	S帯でコマンド受信、低速テレメトリ送信 X帯で高速テレメトリ送信
姿勢制御	3軸姿勢制御
推進系	1液(3N × 4)・2液(20N × 4)デュアルモード(調圧式)
軌道	太陽同期軌道／昼夜境界帯周回 軌道高度: 700 km (円軌道) 軌道傾斜角: 98度



国際標識番号
2006-005A

1. 「あかり」(ASTRO-F)の概要

(2) 観測装置



「あかり」の観測波長帯と波長分解能

空間分解能(軌道上での実績値)

FIS: 65/90 μ m帯で約40秒角、140/160 μ m帯で60秒角

IRC: 2/3/4 μ m帯で約4秒角、5 μ m～24 μ m帯は5～7秒角

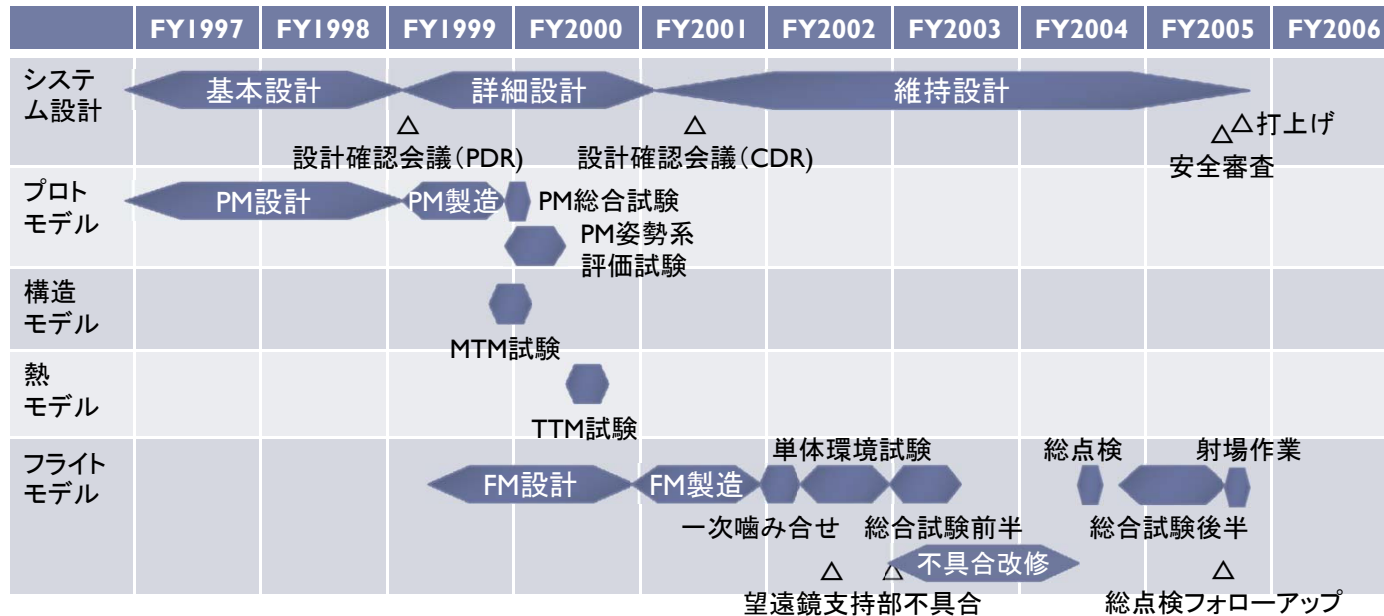
ただし、全天サーベイでは9, 18 μ m帯ともに約10秒角

観測姿勢モード

- 全天サーベイ: 約100分の軌道周期で360度を連続的にスキャン(3.6'/s)
- 指向観測
 - スロースキャン: 8～30"/sで天をスキャン。主にFISによる高感度マッピング等。
 - ステップスキャン: 指向観測中に最大5'、指向方向をずらして複数の天域を観測。
 - マイクロスキャン: IRCのditheringのためのモード

2. プロジェクトの経緯

(1) 開発の経緯

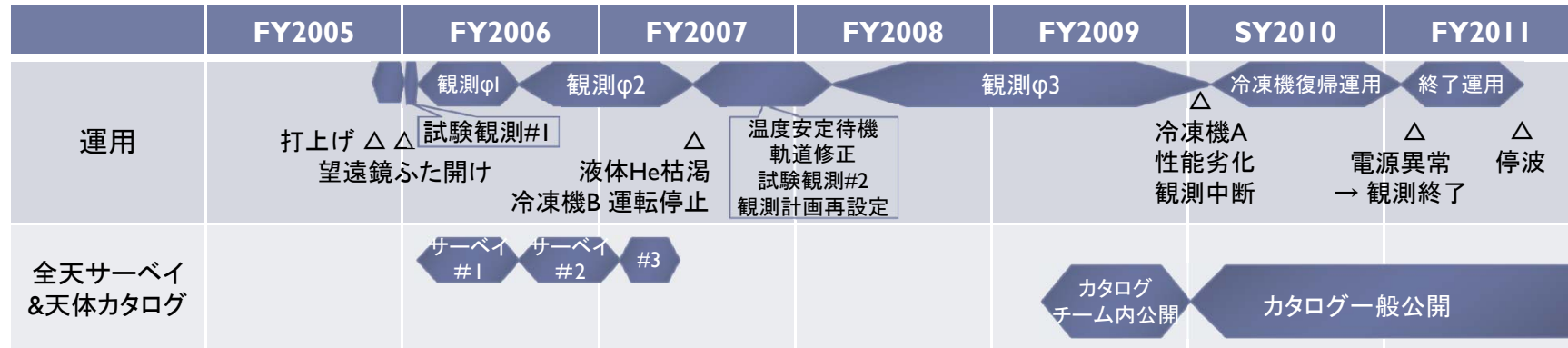


1989年5月 宇宙理学委員会の下に赤外線天文衛星WG発足
1993年11月 ミッション提案書を理学委員会に提出(当時の名称はIRIS計画)
1995年1月 1994年8月～12月の評価小委員会での議論を受け、宇宙理学委員会本委員会にてミッション採択
1995年1月～ 日本初の衛星搭載赤外線望遠鏡である、Space Flyer Unit (SFU) 搭載赤外線望遠鏡Infrared Telescope in Space (IRTS) 打上げ、成功裏に運用。
1997年度より 「ASTRO-F」として開発開始。当初は6年計画(打上げ目標2002年度末)
1999年7月 第1回設計確認会議(PDR相当)
2000年 M-Vロケットの遅れ等により、**打上げ目標2003年度末へ**
2001年10月 第2回設計確認会議(CDR相当)
2002年4月～7月 フライトモデル一次噛み合せ試験
2002年11月 望遠鏡極低温振動試験において、主鏡支持部の接着の剥離発生

2003年4月 接着工法改良後の振動試験にて剥離再発。宇宙科学研究所内に不具合対策会議発足、原因究明と改修へ。
2003 6月 宇宙開発委員会に、不具合発生と打上げ延期を報告。**打上げ目標は2005年度末へ**
2003年4月～10月 総合試験前半(バス部のみ組立て・試験)
2004年7月 望遠鏡不具合改修、及び環境試験による検証を終了
2004年9月 望遠鏡不具合対策会議による最終レビュー(不具合対策完了)
2004年9月～11月 総点検。過電流対策(電流リミッタ・保護抵抗の追加等)を中心に10項目の処置。処置のフォローアップは12月に実施。
2005年2月～12月 総合試験後半(ミッション部を含む組立て、試験)
2005年11月 安全審査
2005年12月 出荷前審査
2006年1月2日 射場作業開始
2006年1月11日 M-V-8号機 最終確認会議
2006年2月22日 午前6時28分 **打上げ**

2. プロジェクトの経緯

(2) 運用の経緯



2006年2月22日 日本時間6:28打上げ。M-V-8号機により初期軌道への投入成功
 打上げ直後に「太陽面問題」発生。2台の太陽センサが太陽を捉えられない等、衛星太陽指向面の複数の機器に異常。地上からの指令により3軸姿勢を確立、電力を確保。太陽同期極軌道への投入に成功。また、太陽センサーなしで姿勢制御を行うよう搭載ソフトウェアを改修し、以後の運用に成功。

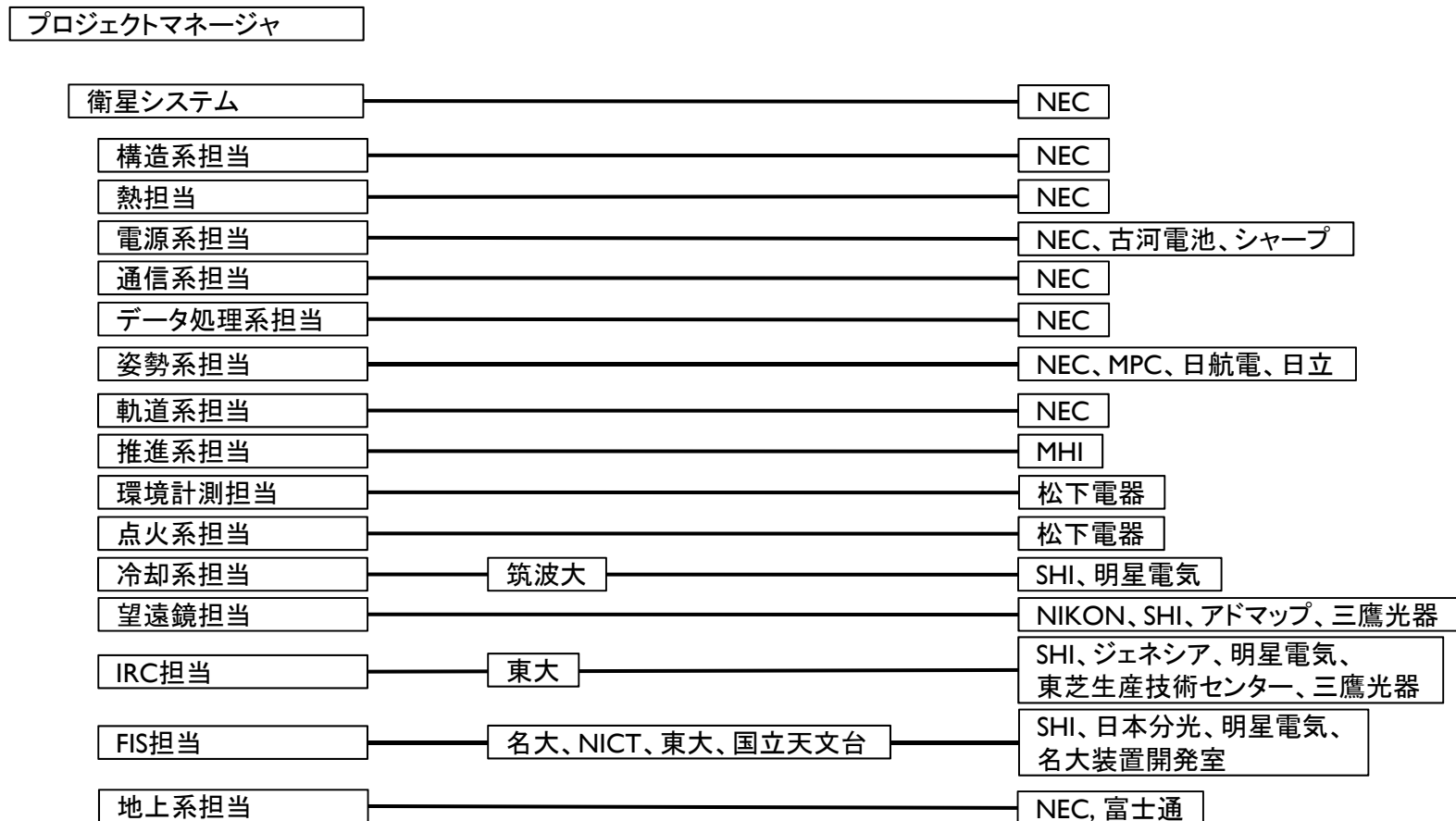
2006年4月13日 望遠鏡ふた開け。4月16日より試験観測を実施
 2006年5月8日 本観測開始(フェーズ 1)
 2006年11月8日 最初の全天サーベイ終了。フェーズ 2 へ移行
 2007年8月26日 液体ヘリウム全量消費
 2007年9月20日 2台の冷凍機のうち1台に異常電流。運転を停止
 2008年6月1日 本観測再開(フェーズ 3)
 2010年2月14日 冷凍機異常電流、性能劣化
 2010年5月より 観測中断。冷凍機性能復活のための運用
 2011年5月23日 電源系異常発生。
 2011年6月 観測運用終了の決定
 2011年9月～11月 衛星姿勢の再確立～軌道降下運用
 2011年11月24日 停波・衛星運用終了

▶ 「あかり」の観測運用フェーズ

- ▶ 観測フェーズ1(上の表ではφ1): 本観測開始より半年間。第1回全天サーベイを最優先で実施。
- ▶ 観測フェーズ2(φ2): 第2回全天サーベイ開始より液体ヘリウム枯渇までの期間。全天サーベイに加えて多くの指向観測を実施。
- ▶ 観測フェーズ3(φ3): 液体ヘリウム枯渇後、冷凍機冷却のみで近赤外線の指向観測を実施。

2.プロジェクトの経緯

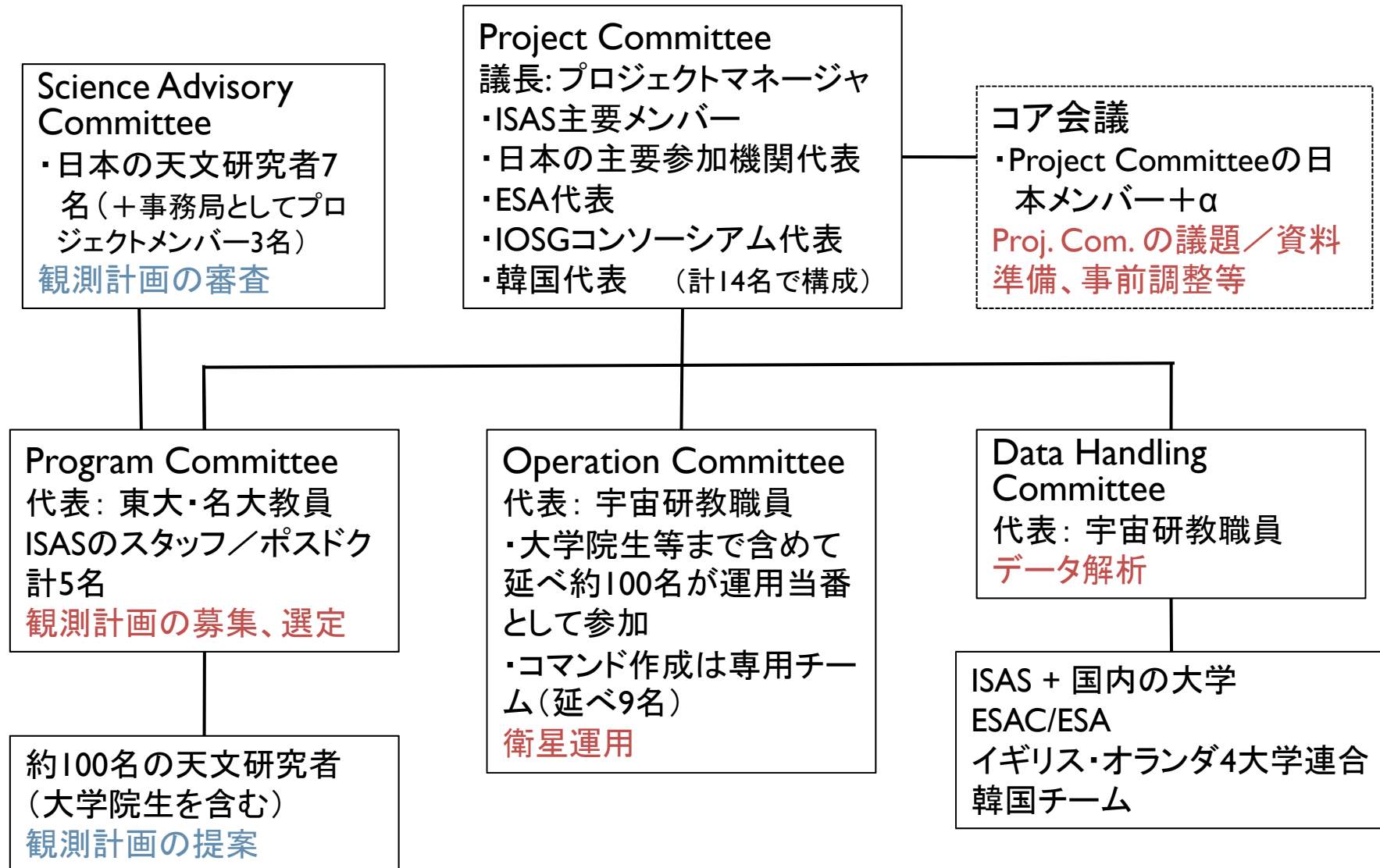
(3) 衛星開発体制



◆ IRC, FIS については常勤職員のほかに研究員、
大学院生の寄与があった

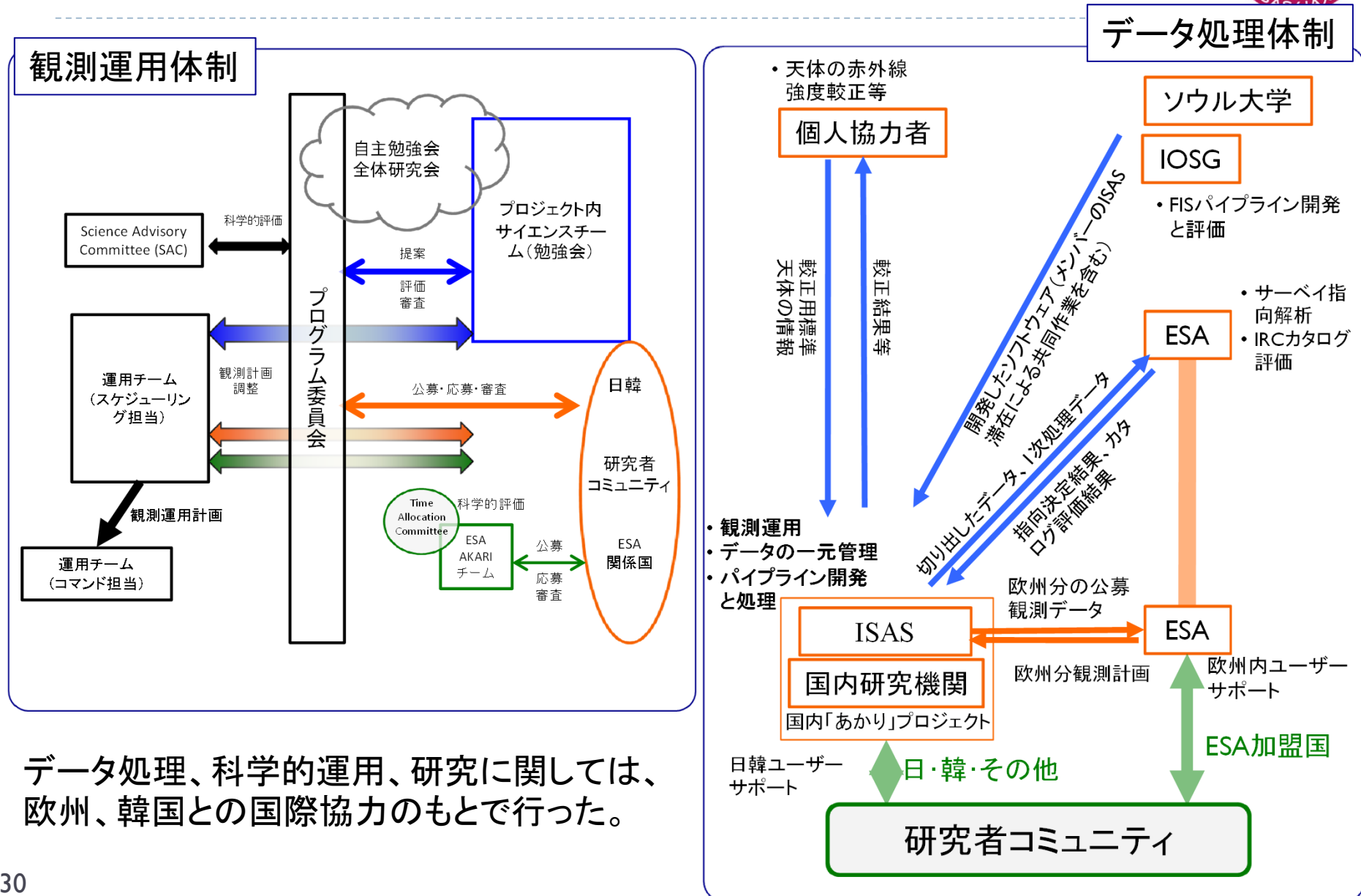
2. プロジェクトの経緯

(4) 運用組織



2. プロジェクトの経緯

(5) 観測運用／データ処理体制



データ処理、科学的運用、研究に関しては、欧州、韓国との国際協力のもとで行った。

2. プロジェクトの経緯

(6) 国際協力



- ▶ 前ページのデータ処理体制図に示したように、「あかり」ではデータ処理において欧州と韓国との国際協力によって体制を強化することができた。
 - ▶ ESAに対して公募観測機会の30%を提供した。それに対し、ESAは地上局を提供するとともに、望遠鏡指向方向の決定および欧州観測者への支援を担当した。
 - ▶ 欧州の4つの研究機関 Imperial College London, The Open University, The Sussex University, University of Groningenは、データ処理ソフトウェアの開発を担当し、プロジェクト内部の研究機関として観測計画作成と取得したデータによる天文研究に参加した。
 - ▶ 韓国ソウル大学は、日本への人材の派遣を含めてデータ処理ソフトウェア開発に参加し、観測面では日本チームの一員として観測計画作成と天文研究に参加した。
- ▶ 赤外線天体カタログ初版が2010年3月に公開できたことに対しては、これらの国際協力が大きく寄与している。
- ▶ 上記以外に、個人の立場で「あかり」データの較正等に協力してくれた海外研究者が2名存在する。

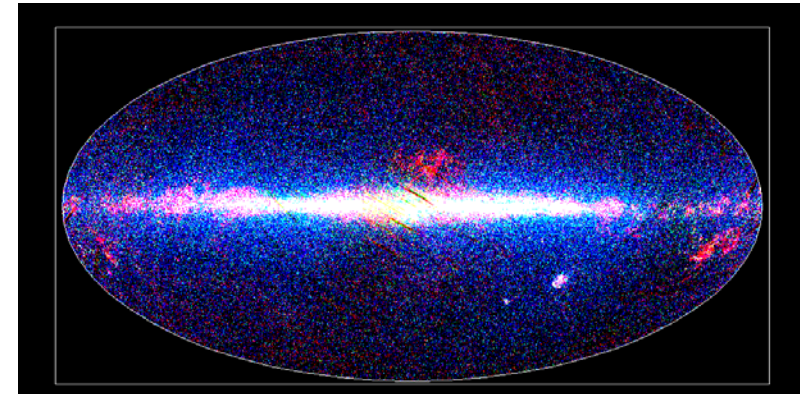
3.1 成功基準の達成状況

(1) データ公開状況 (1/4)



「あかり」全天サーベイデータより、中間赤外線(9, 18 μm)、遠赤外線(65, 90, 140, 160 μm)での点源天体を抽出、測定してカタログ化 (Bright Source Catalogue)

- ❖ 総計約**130万天体**(IRAS点源カタログの5倍以上)
- ❖ 2010年3月30日に世界中に公開
- ❖ 今後数十年にわたって使われる天文学の基礎資料
- ❖ さらにデータ処理過程を改良を進め、信頼性を高めたBright Source Catalogueの改訂、さらに検出能力を高めたFaint Source Catalogueの準備を実施中。



9 μm , 18 μm , 90 μm 3色合成による全天点源分布図
カバーした天域(2回以上観測)は、全天の96%を超える。

	IRC PSC ver.1		FIS BSC ver.1			
波長バンド	9 μm	18 μm	65 μm	90 μm	140 μm	160 μm
天体数	844,649	194,551	29,336	373,819	117,994	36,646
	870,973		427,071			
検出限界	50 mJy	130 mJy	3.2 Jy	0.55 Jy	3.8 Jy	7.5 Jy
測光精度	5~20 %	7~20 %	20 %			
空間分解能	~7 arcsec		48 arcsec (source extraction)			
位置精度	1-3 arcsec		~6 arcsec			

「あかり」全天点源カタログ
仕様

全天カタログについての詳細は FIS Bright Source Catalogue Release Note (Ver. 1), IRC Point Source Catalogue Release Note (Ver. 1)参照。(http://www.ir.isas.jaxa.jp/ASTRO-F/Observation/PSC/Public/)

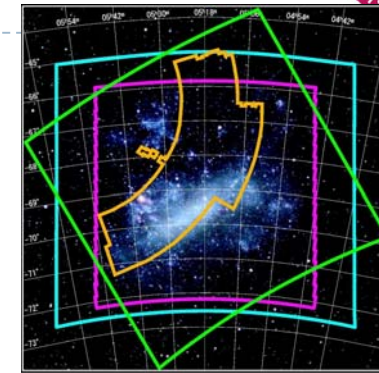
3.1 成功基準の達成状況

(1) データ公開状況 (2/4)



大マゼラン雲(LMC)天体カタログ

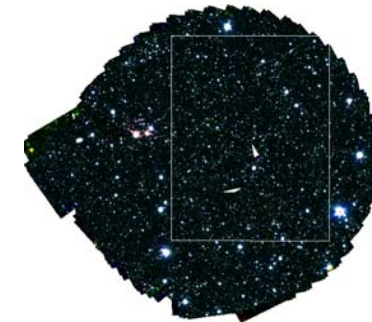
- ❖ 指向観測で、波長3, 7, 11, 15, 24 μm の5波長で観測
- ❖ 約10平方度の領域をカバーし、**66万天体**を含む世界最大規模のカタログ
- ❖ 2012年11月に成果論文を発表、データを一般公開。
- ❖ 1757天体を含む世界初の分光カタログも2013年1月に論文発表と一般公開。
- ❖ 星形成や晩期型星研究の基礎資料として今後の天文学研究に重要な役割
- ❖ 可視光、近赤外線などによる地上観測、Spitzer宇宙望遠鏡による観測と合わせた研究を期待。特に「あかり」の波長11, 15 μm のデータは、「暖かい」ダストをまとった星の性質を調べるのに有効



「あかり」LMCサーベイ領域(オレンジ)と他波長でのサーベイ領域
可視光(Zaritskyら): 水色、近赤外線サーベイ(加藤ら): ピンク
Spitzer宇宙望遠鏡サーベイ(Meixner): 緑

北黄極領域(NEP)天体カタログ

- ❖ 指向観測で、波長2~24 μm を9波長バンドで観測
- ❖ 二種類のカタログデータ
 - NEP-ディープサーベイ (0.38 平方度)
中間赤外線で約7,300天体 (**波長15, 18 μm で世界最大の銀河サンプル**)
 - NEP-広域サーベイ (5.8 平方度)
近赤外線天体で約115,000天体
- ❖ 遠方銀河の中間赤外線放射特性について、全天で最も質の高い情報が得られるカタログ
- ❖ 2012年に成果論文を発表。2013年3月にカタログを一般公開した。



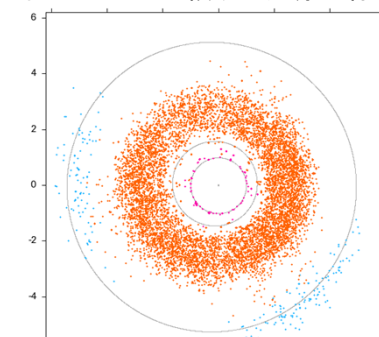
全天サーベイに基づく小惑星カタログ

- ❖ IRASによるカタログの約2倍の**5,120個の小惑星**を含む
- ❖ 成果論文を発表し、カタログを公開(2011年9月)

南天「あかり」ディープフィールドの天体カタログ

- ❖ 指向観測によるディープサーベイ(全天サーベイの20倍高い感度)
- ❖ 12平方度をカバーし、波長90 μm で2,000個以上の銀河を検出
- ❖ 遠赤外線での貴重な銀河カタログ。
- ❖ 成果論文を準備中。

NEPディープサーベイ領域の近赤外線画像



カタログ化された小惑星の位置
(円は、内側から地球、火星、木星の軌道)



3.1 成功基準の達成状況

(1) データ公開状況 (3/4)

- ◆ これまでに「あかり」の大規模サーベイデータから作成され、世界中の研究者に公開された天体カタログを以下にまとめた。

プロダクト名	一般公開日	天体数	説明
遠赤外線点源天体カタログ ver.1	2010/03/30	427,071	波長 65, 90, 140, 160 マイクロメートルでの全天サーベイにより検出された天体の位置と明るさの情報
中間赤外線点源天体カタログ ver.1	2010/03/30	870,973	波長 9, 18 マイクロメートルでの全天サーベイにより検出された天体の位置と明るさの情報
小惑星カタログ ver.1	2011/09/16	5,120	中間赤外線全天サーベイで検出された小惑星の直径と表面の反射率
大マゼラン雲点源天体カタログ ver.1	2012/11/13	660,286	波長 3, 7, 11, 15, 24 マイクロメートルで観測した大マゼラン領域約10平方度で検出した天体の位置と明るさ
大マゼラン雲近赤外線分光カタログ ver.1	2013/01/07	1757	上記点源カタログに記載されている天体の一部について、波長2.5～5.0マイクロメートルのスペクトル
北黄極広域査領域点源天体カタログ ver.1	2013/03/15	114,794	波長 2, 3, 4, 7, 9, 11, 15, 18マイクロメートルで観測した、北黄極領域5.4平方度の天体の位置と明るさ
北黄極深探査領域点源天体カタログ ver.1	2013/03/15	7,284	波長 7, 9, 11, 15, 18マイクロメートルで観測した、北黄極領域0.67平方度の天体の位置と明るさ。上記の広域探査領域のカタログに比べ、感度で2-3倍優れている。

- ◆ ミッションプログラム、公募観測、ディレクタータイムの指向観測データ(有効観測数約22,400回)は、生データ+解析ソフトウェアツールキットの形で、観測提案者に対する1年間の占有期間を経て、一般に公開されている。

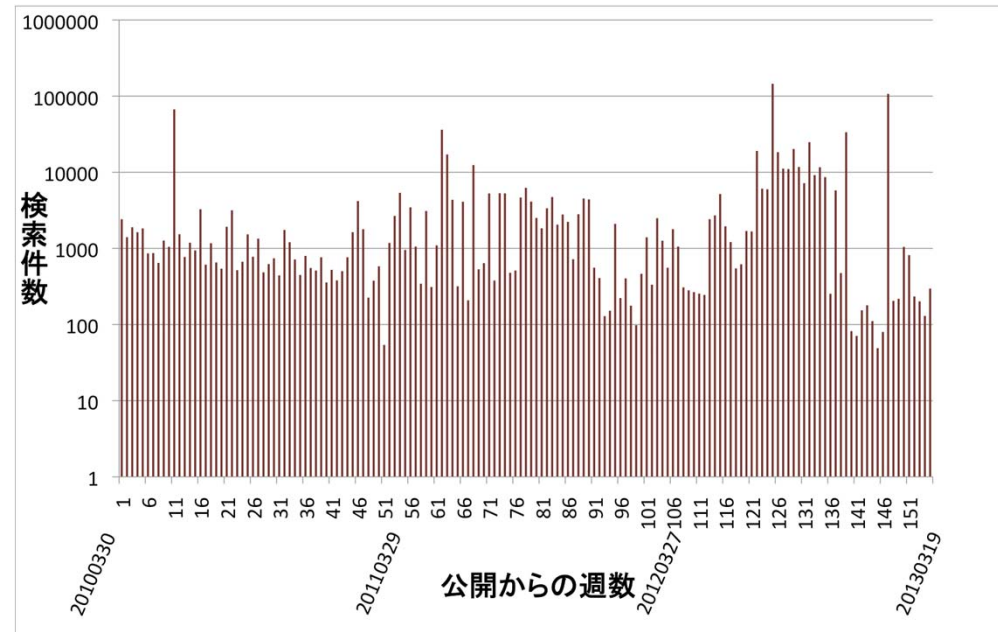
3.1 成功基準の達成状況

(1) データ公開状況 (4/4)



データの利用状況

- ❖ 2013年3月までに、カタログデータファイルのダウンロードは延べ約1100回(計数できるISASサーバからのダウンロード数のみ)。
- ❖ 科学衛星運用・データ利用センター(C-SODA)の運営する衛星データアーカイブシステムDARTS上に、高機能の検索ツールであるカタログアーカイブサーバ(CAS)が構築されている。CAS経由でのカタログ検索は公開以来一週間あたり数百件を維持している。
- ❖ 欧州宇宙機関(ESA)の運用する **Herschel 宇宙天文台の観測立案ツール**に、CASへのアクセスサービスが実装されている。
- ❖ 国立天文台やアメリカ、欧州等数力所のデータセンターが運用するデータサービスにも、「あかり」天体カタログが登録。



「あかり」点源カタログの、1週間当たりの検索回数 (2010年3月30日より2013年3月19日まで)

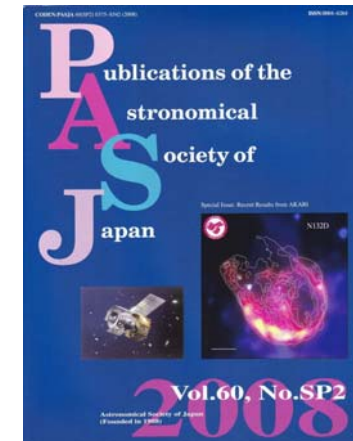
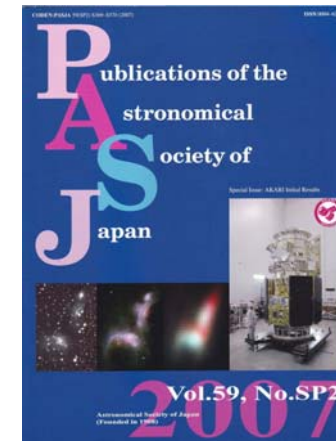
3.1 成功基準の達成状況

(2) 学術研究成果出版状況 (1/2)



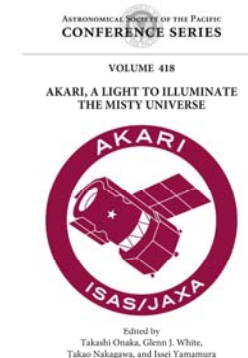
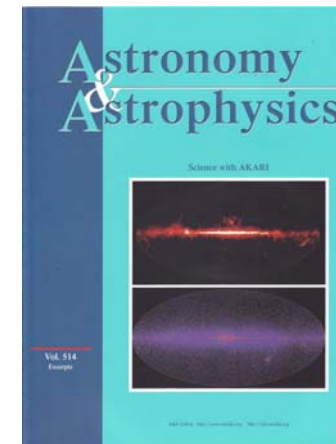
学術論文誌で3回の特集号発行

- ❖ Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ; 日本天文学会欧文報告誌), Vol. 59, SP2 (2007年10月10日発行)・・・19編
- ❖ Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ; 日本天文学会欧文報告誌), Vol. 60, SP2 (2008年12月25日発行)・・・13編
- ❖ Astronomy & Astrophysics (ヨーロッパの天文天体物理学専門誌), Vol. 514, 2010年5月3日発行)・・・17編



「あかり」国際研究会収録

- “AKARI, a Light to Illuminate the Misty Universe”, eds., T. Onaka, Glenn J. White, Takao Nakagawa, Issei Yamamura, ASP Conference Series, Vol 418・・・86編
- “A Paramic View of the Dusty Universe”, eds, M. Im and H. M. Lee, Publication of the Korean Astronomical Society, Vol.27, No.4 (2012)・・・71編



学位論文(2013年3月現在)

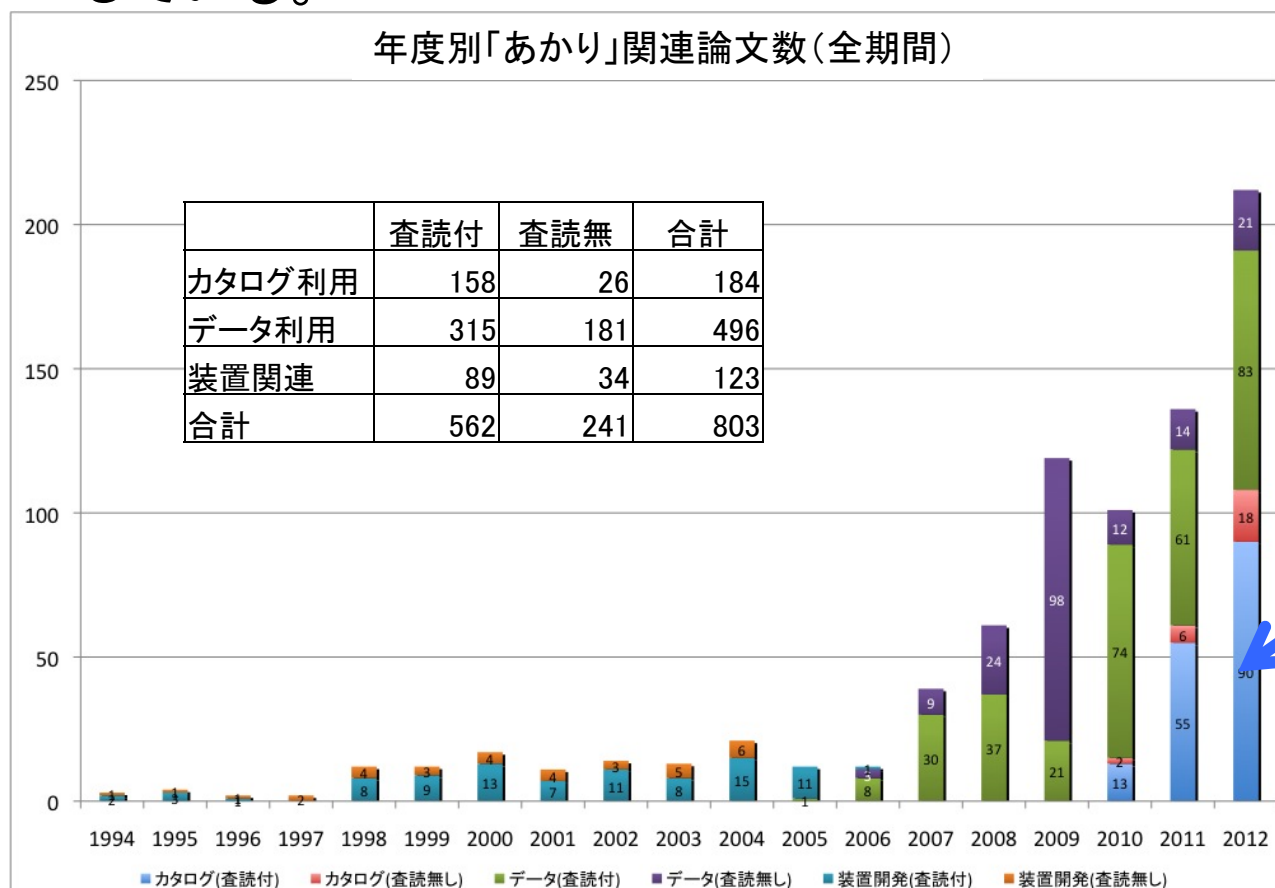
- ❖ 修士論文: 観測データ利用 27件、装置開発など 26件
- ❖ 博士論文: 観測データ利用 23件、装置開発など 7件

3.1 成功基準の達成状況

(2) 学術研究成果出版状況 (2/2)



- ▶ これまでに発表された「あかり」関連の論文数の推移を示す。2010年に全天赤外線天体カタログが一般公開されて以来、プロジェクト外の研究者によるカタログデータを利用した論文数が急速に増加している。



カタログデータを利用した論文数が急速に増加

3.2 天文学研究の成果 —研究成果概観—



- ▶ 小惑星・彗星
 - ▶ 小惑星の大きさ・反射率の測定
 - ▶ 彗星の分光観測
- ▶ 黄道光・惑星間塵
 - ▶ 黄道光の分布の計測
 - ▶ 黄道光放射を担う塵の同定
- ▶ 惑星系形成／デブリディスクの観測
 - ▶ 高温デブリディスクの同定
 - ▶ 協同観測によるデブリディスク中の塵の鉱物学的性質の解明
- ▶ 褐色矮星の研究
 - ▶ 褐色矮星の分光観測
- ▶ 宇宙の物質循環と銀河進化
- ▶ 星の形成－銀河スケールから0.3光年スケールまで－
 - ▶ 大質量星がガスを吹き払い圧縮することによる星形成の連鎖（数百光年スケールの探査）
 - ▶ 銀河円盤へのガス降着による誘発的星形成の物理過程の解明（数万光年スケールの探査）
 - ▶ 星の母体である分子雲の形成メカニズムを明らかに（10－100光年スケールの探査）
 - ▶ 大きな分子雲に付随せず、孤立して形成する星々の存在（数100光年スケールの探査）
- ▶ 中小質量星のガス放出とダスト形成
 - ▶ 質量放出星のダストシェルの遠赤外線観測
 - ▶ 星周物質と星間物質の相互作用の発見
- ▶ 星間物質の進化
 - ▶ 橢円銀河NGC4589中のダスト進化
 - ▶ 大マゼラン雲中の若い星周囲からCO2氷を検出
- ▶ 超新星爆発によるダスト形成と破壊
 - ▶ 超新星残骸と星間物質の相互作用の観測
 - ▶ Ib型超新星2006jcの近・中間赤外線分光・撮像観測
- ▶ 銀河からのガス・ダスト流出
 - ▶ 銀河の衝突によるダスト流出
 - ▶ 爆発的星形成を起こしている銀河からのダスト流出
- ▶ 活動銀河核／ブラックホール
 - ▶ 高赤方偏移クェーサーの近・中間赤外線分光観測
 - ▶ 「あかり」中間赤外線全天サーベイからの活動銀河核探査
 - ▶ 近傍の超高光度赤外線銀河 UGC05101の近・中間赤外線分光観測
 - ▶ 約300天体の近赤外線分光による統計
- ▶ 遠方銀河観測と宇宙の星形成史
 - ▶ 遠方銀河のスペクトル
 - ▶ 北黄極(NEP)ディープサーベイから求めた星形成史
- ▶ 宇宙背景放射
 - ▶ 近赤外線の観測結果－宇宙第一世代の星の探求－
 - ▶ 遠赤外線の観測結果

3.2 天文学研究の成果

(1) 研究成果(小惑星・彗星)



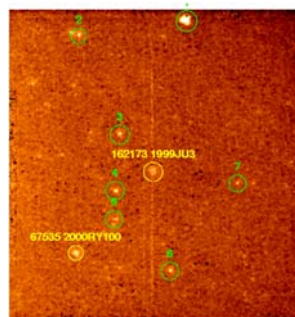
(1) 小惑星・彗星

地上からでは実現不可能な観測手法を用いて、小惑星カタログを作成するなど現在の太陽系内小天体の詳細な描像を明らかにし、また惑星が形成された頃の原始太陽系星雲中に存在する氷ダストの物理状態を特定した。一方、太陽系探査計画に対して、ターゲット選定に必須である天体の大きさ・反射率などの情報を赤外線衛星観測(「あかり」)が提供し、日本の観測衛星・探査機間で密接に連携できる可能性を示した。

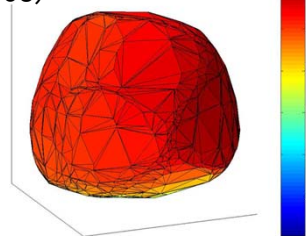
小惑星の大きさ・反射率の測定

・中間赤外線のサーベイデータを基に、小惑星について最も基礎的な情報である大きさと反射率(アルベド)を決定した。その数は**5120天体**であり、これは従来使われていた **IRAS衛星の成果の2倍**にのぼる(Usui et al. 2011, PASJ, 63, 1117)。直径が15km以上のものについては、ほぼすべての小惑星を調べることができている。

・また、太陽系探査候補小天体に対し必須情報であるサイズ・アルベド・表層状態や形状・自転軸を求めることができた。



Hasegawa et al., PASJ, 60, S399, (2008)



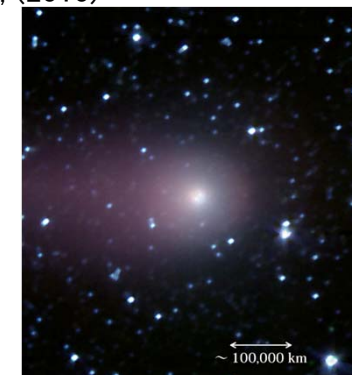
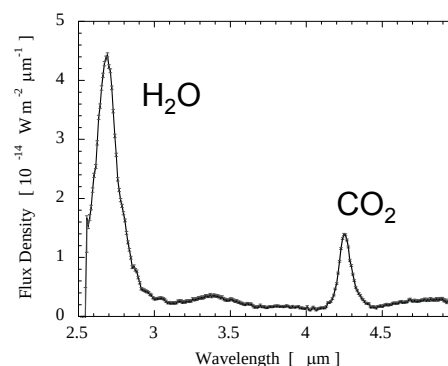
波長 $15\mu\text{m}$ で撮像した**はやぶさ2候補天体**162173 1999 JU3(図左; 黄丸)、形状と温度分布(図右)。

観測の結果、アルベドは低く始原的な天体であり、表層は月の様に砂ではなくイトカワの様に小石で覆われている可能性を示した。

彗星の分光観測

・観測例が非常に限られていた彗星の**CO₂分子**の検出数をこれまでの**約4倍**に増やし、彗星のCO₂氷のH₂O氷に対する存在量から、原始太陽系星雲での彗星核周辺の温度環境など物理情報の手がかりを得ることができた。

Ootsubo et al., ApJL, 717, L66, (2010)



ルーリン彗星(C/2007 N3)の近赤外線スペクトル(図左)、2、3、 $4\mu\text{m}$ の三色疑似カラー写真(図右)。

$2.66\mu\text{m}$ (H₂O)と $4.26\mu\text{m}$ (CO₂)付近の強度から、H₂OとCO₂が彗星から大量に放出されていること、ルーリン彗星は他の彗星に比べCO₂が少ないことが分かった。

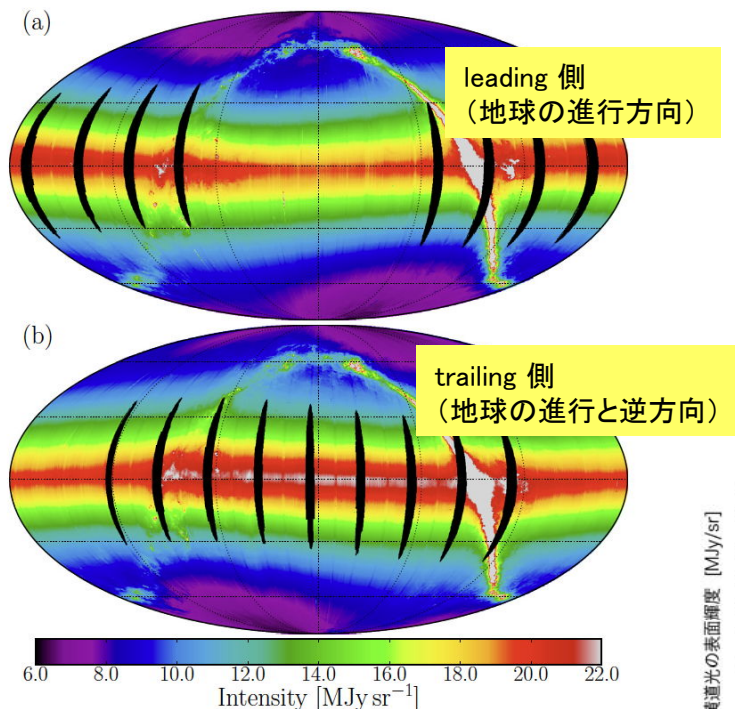
3.2 天文学研究の成果

(2) 研究成果(黄道光・惑星間塵)



黄道光の全天分布を調べ、我々地球を広く取り巻く惑星間塵の空間分布を明らかにし、その供給源として小惑星だけでなく短周期彗星の寄与も大きいことの観測的証拠を得た。「あかり」の黄道光全天データは今後の太陽系探査や太陽系外惑星系の研究にとって重要なだけでなく、広い分野の多くの拡散光観測データを正確に解釈する上でも欠くことのできない基礎テンプレートを提供するものである。

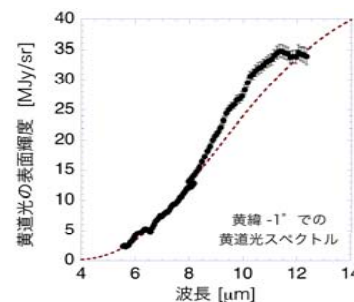
黄道光の分布の計測



9 μ mの黄道光全天マップ。惑星間塵雲の対称面が黄道面(地球軌道面)に対して傾いているのが見えている。Pyo et al. A&A, 523, 53, (2010)

・過去の衛星を越える感度と空間分解能で赤外線サーベイを行い、全天での黄道光の輝度分布を調べた。これは、地上観測では捉えることが難しい太陽系に広がっている塵の大局的・三次元的な空間分布を明らかにするもので、赤外線サーベイ衛星にしかできないことである。

・これらの結果は太陽系内起源と太陽系外起源の放射を切り分けるためにも非常に重要であり、宇宙背景放射や銀河系内の拡散放射を正確にとらえる際にも、前景放射として分離するために欠くことのできない基礎データで、これまで様々な分野でほぼIRAS/DIRBEの結果にのみ依存していた黄道光モデルを大幅に改訂し、基礎テンプレートとして世界中に提供していくことになる期待される。



黄道光放射を担う塵の同定

黄道光のスペクトルを、地球上のケイ酸塩鉱物や成層圏で採集された地球外起源の惑星間塵などと比較することで、鉱物組成の同定をおこなった。黄道面付近の中間赤外線スペクトル(左図)は、輝石・カンラン石が凝集した10-100 μ m程度の(短周期彗星起源の)惑星間塵とよく一致することが分かった。Ootsubo et al. ASPC, 418, 395, (2009)

3.2 天文学研究の成果

(3) 研究成果(惑星系形成／デブリディスクの観測) (1/2)



惑星系形成過程を探る上でカギとなるデブリディスクの候補天体を、全天サーベイ観測データの中から新たに複数同定し、ディスク中の塵の量や鉱物学的特性について調査。

▶ 背景と目的

近年太陽以外の星にも続々と見つかった惑星系の形成メカニズムを探るため、また太陽系創生期の姿を探るためには、原始太陽系と似た若い星の観測的研究が重要である。特に、惑星の材料である小天体同士の衝突が起こり、大量の塵が放出されることで形成されたと考えられるデブリディスク(残骸円盤)は、材料物質の惑星への成長を探る上でカギとなる天体であると考えられる。

これまでのデブリディスクの研究は、IRAS衛星の遠赤外線観測に基づくものであり、中心星から遠方にある低温の塵の議論が中心であった。一方で、地球に似た岩石質惑星が形成すると期待される内側領域に存在する、高温のデブリディスクの諸性質については、あまり理解が進んでいなかった。

そこで「あかり」では、中間赤外線全天サーベイ観測の特性を生かし、

- (1) 高温デブリディスクの探査を行い、新たなサンプルを同定する、
- (2) 検出されたデブリディスクの赤外線放射から、惑星材料物質の性質に制限を付ける、ことを狙い、研究が進められている。

3.2 天文学研究の成果

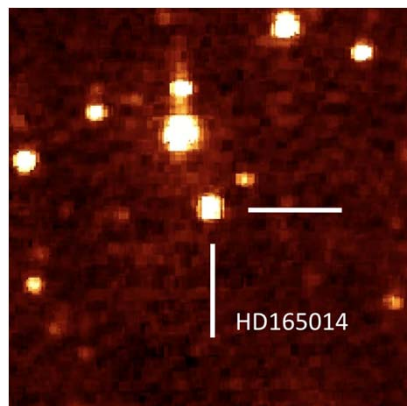
(3) 研究成果(惑星系形成／デブリディスクの観測) (2/2)



高温デブリディスクの同定

中間赤外線全天点源カタログより、波長18 μ mで赤外線超過を示す高温デブリディスクを12天体同定した。うち8天体は「あかり」で初めて発見されたものであり、高温デブリディスクのサンプルを大幅に増やすことに成功した。また、同定されたデブリディスクには、太陽系惑星間塵に比べて1000倍以上濃い塵が存在することを、中間赤外線光度から突き止めた。

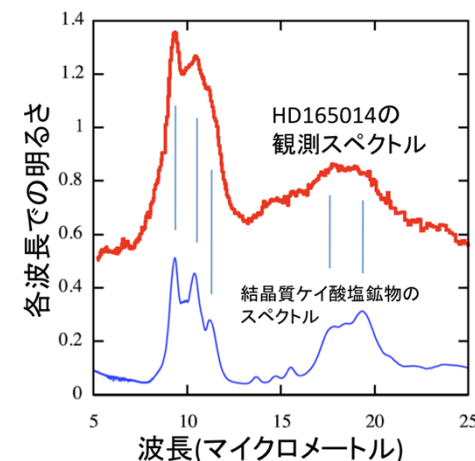
Fujiwara et al. ApJL, 695, L88, (2009), Fujiwara et al. ApJL, 714, L152, (2010)



「あかり」の観測により発見された高温デブリディスクの18 μ m画像(中央)。

協同観測によるデブリディスク中の塵の鉱物学的性質の解明

「あかり」で同定されたデブリディスクを、すばる望遠鏡やスピッツァー宇宙望遠鏡などで観測し、ディスク中の塵について鉱物種の同定に成功した。塵はケイ酸塩系の特性を示すものの、詳細な元素比は天体毎にばらつきが見られることから、**デブリディスク内側領域では、惑星材料物質が多様な形で進化していることを突き止めた。**



スピッツァー宇宙望遠鏡との協同観測で得られたデブリディスク天体(HD165014)の赤外線スペクトル。

3.2 天文学研究の成果

(4) 研究成果(褐色矮星の研究)

褐色矮星の分光観測

自らは水素の核融合反応を起こせず、恒星と巨大ガス惑星の間に位置する、低温矮星の分光観測を行い、10数天体のスペクトルを取得した。**褐色矮星大気研究にとって最も重要なデータセット**である。

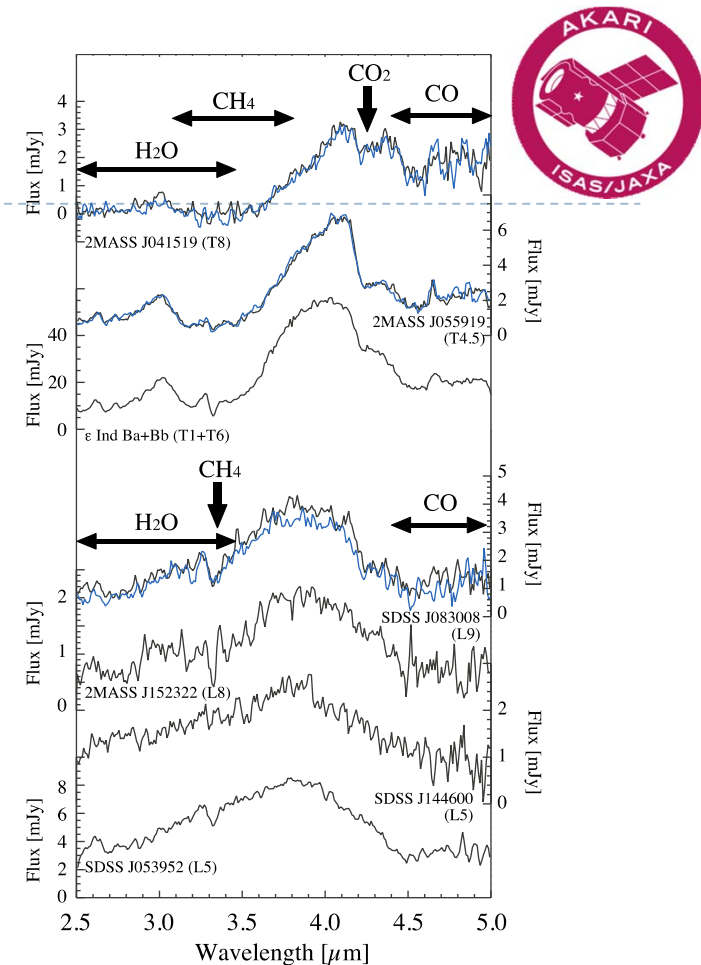
世界で初めて褐色矮星大気から二酸化炭素(CO_2)が検出された。Yamamura et al. ApJ, 722, 682 (2010)

また、もっとも低温(表面温度 800 K)の褐色矮星大気に一酸化炭素の存在が確認された。

→ これらのスペクトルは熱平衡状態では理解できず、褐色矮星大気の非平衡化学状態を解明するための研究が行われている。

Tsuji et al. (ApJ, 734, 73, 2011) では、 CO_2 の吸収バンドの強度が、C, O の存在量に強く依存することを発見し、**褐色矮星に金属量が異なる少なくとも二種類のグループがあることを世界で初めて指摘した。**

Sorahana et al., (ApJ, 760, 151, 2012; ApJ, 767, 77, 2013) では、解析天体を16に拡張したうえ、有効温度 1700 K 前後の**褐色矮星の半径が、理論進化モデルの予想に比べて小さくなることを指摘した。**

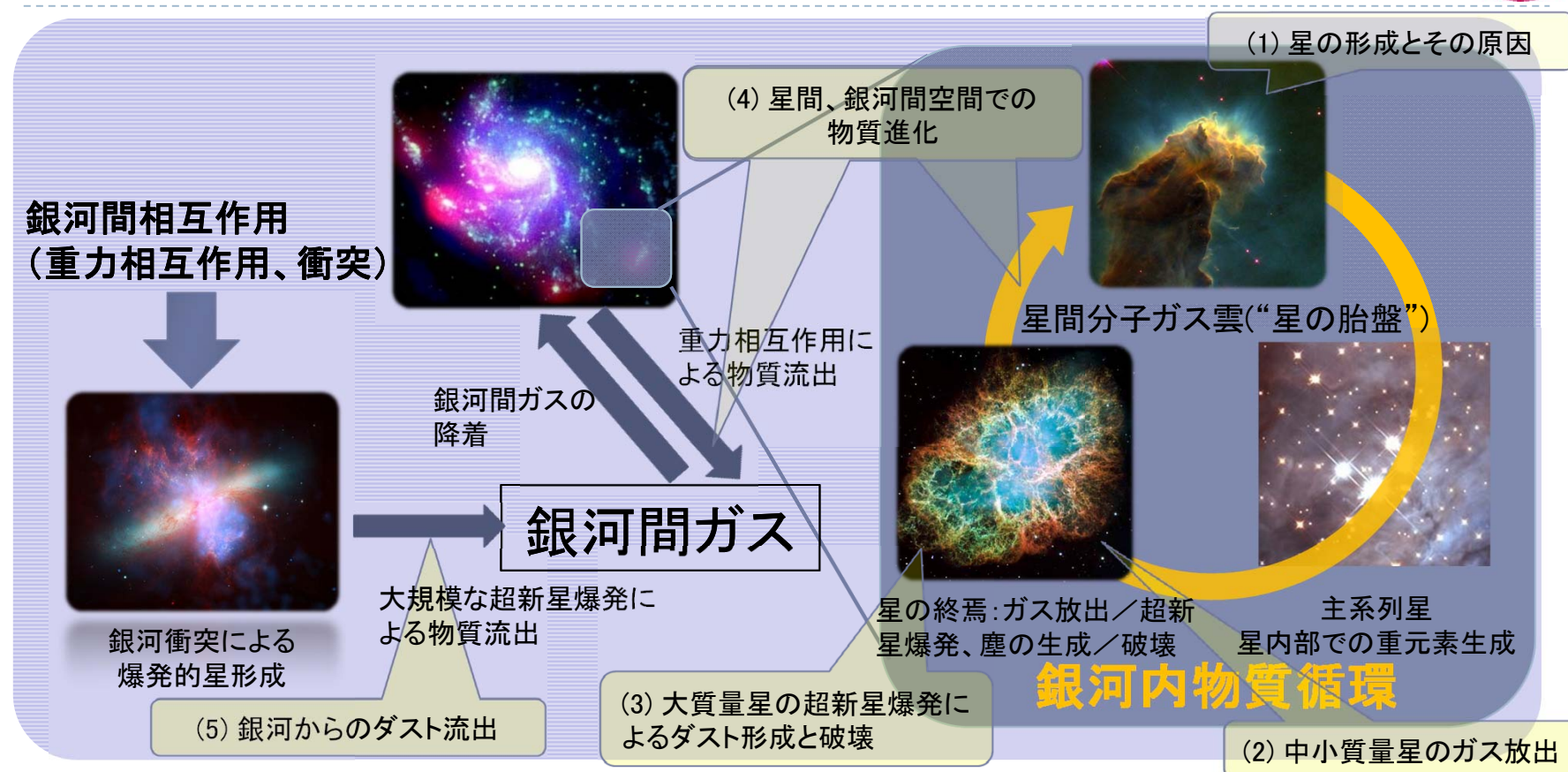


「あかり」による褐色矮星の近赤外線スペクトル。下から上に、有効温度が高い→低い順に並べている。相対的に温度が高いL型褐色矮星では、なめらかなスペクトルにメタン(CH_4)による吸収帯が見え始めているのがわかる。より温度の低いT型褐色矮星で、 CO_2 を初検出。また、非常に深いCOの吸収を観測。これらは、褐色矮星大気構造の解明に重要。

(Yamamura et al. 2010)

3.2 天文学研究の成果

(5) 研究成果(宇宙の物質循環と銀河進化)



宇宙での基本構成要素は銀河である。それゆえ、銀河の成長(銀河進化)を解明することは、今日までの宇宙の進化を理解することを意味する。また、銀河の基本構成要素は星であり、星の誕生と終焉により、銀河の光度や重元素量などが複雑に変化していく(銀河の光度進化・化学進化)。上図は、宇宙での物質(ガス、ダストや有機物)の循環を表したものである。ダストや有機物の素である重元素は星の内部で作られ、それらが銀河円盤内や銀河間で循環が起きることで銀河は進化し、やがて人類の誕生へ至ると考えられている。重元素生成工場である星はどのような環境下で生まれるのか?ダストや有機物はどのようにして生成・破壊が起きていくのか?物質循環の追跡は、銀河進化を理解するための現代天文学の重要なテーマの一つであると言える。こうしたテーマを取り組むためには、幅広い空間スケールでの議論が必要不可欠である。これを最大限に可能にするのが、高品質な全天サーベイ観測および指向観測データを有する「あかり」である。

3.2 天文学研究の成果

(6) 研究成果(星の形成- 銀河スケールから0.3光年スケールまで -) (1/2)



大質量星がガスを吹き払い圧縮することによる星形成の連鎖(数百光年スケールの探査)

100光年もの大きさの空洞の中央部分で第一世代の星が誕生し、その星が星間物質を掃き集め、空洞周囲(IC4954, 4955付近)で第二世代の星が誕生した。さらにIC4954, 4955領域の中で、第三世代の星が連鎖的に誕生している証拠を捉えた。
Ishihara et al., PASJ, 59, S443, (2007)

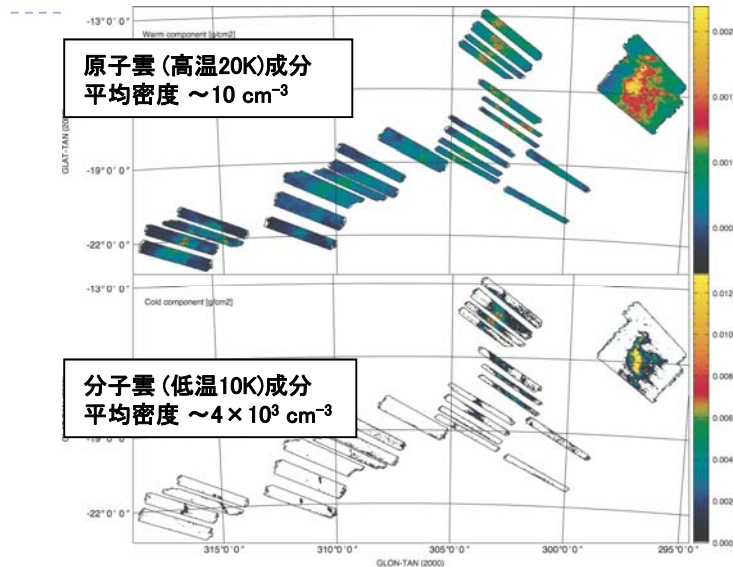


銀河円盤へのガス降着による誘発的星形成の物理過程の解明(数万光年スケールの探査)

M101銀河円盤への高速ガス降着による爆発的星形成の誘起。銀河外縁部の赤く示した領域が、星形成により加熱された塵(50-60 K)の分布を示す。
今後、「あかり」全天サーベイ観測データを利用することで、銀河サンプルが増え、銀河の形態別・環境別の系統的研究へが期待される。Suzuki et al., (2010), A&A, 521, 48, Suzuki et al., PASJ, 59, S463, (2007)

3.2 天文学研究の成果

(6) 研究成果(星の形成- 銀河スケールから0.3光年スケールまで -) (2/2)



星の母体である分子雲の形成メカニズムを明らかに (10 - 100 光年スケールの探索)

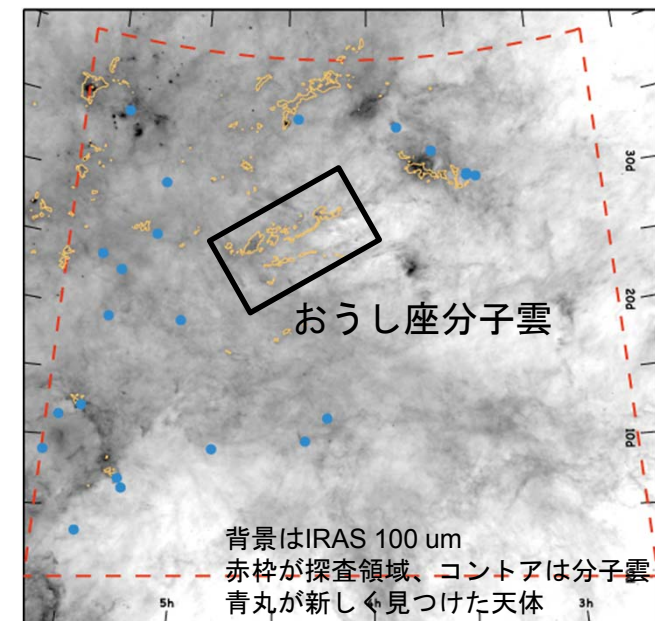
星形成領域カメレオン座の遠赤外線マップから、原子(HI)雲／分子(H₂)雲成分の温度を測定。同領域で初の全域にわたる原子雲／分子雲柱密度マップを得ることに成功。

希薄な原子ガス雲は全域一様に広がっているのに対して、星を生み出す分子ガス雲は限られた場所にのみ存在している。一様な原子雲は、過去の超新星爆発による熱不安定性で形成できる一方、引き続いてコンパクトな分子雲を形成するには星間乱流の散逸と重力不安定性による収縮を経る必要があることを初めて示した。

Ikeda et al. (2012), ApJ, 745, 48

大きな分子雲に付随せず、孤立して形成する星々の存在 (数100光年スケールの探索)

若い星は、その母体である分子雲周辺に密集しているが、そこから数光年以上離れた場所にも存在することが知られていた。このような孤立した若い星の探索を、「あかり」の中間赤外線全天サーベイを用いることで、分子雲から数10 - 100 光年離れた領域まで延伸した。探索領域(1800平方度)内で新たに23個の若い星を発見したが、これらは既知の分子雲から遠く離れて分布している。分子雲から孤立した天体の起源は、母体となった分子雲は大きさが1光年程度と小さかったために分子雲自体がすでに散逸したと考えられる。「あかり」の結果は、小さな分子雲での星形成はレアケースではなく、より一般的な星形成の理解のためにはこのような種族も考慮する必要があることを示している。今後は全天に範囲を拡大させる。



3.2 天文学研究の成果

(7) 研究成果(中小質量星のガス放出とダスト形成)



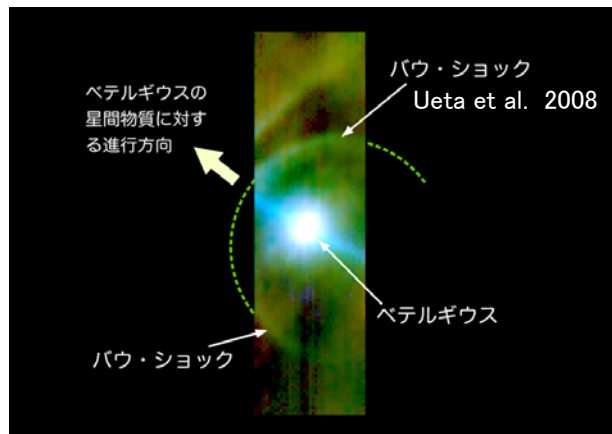
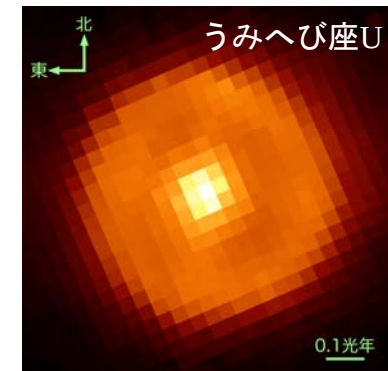
質量放出星のダストシェルの遠赤外線観測

140天体を観測して、以前のサンプル数を10倍の規模に拡大(約半数の星の周囲に広がったダストシェルを検出)。小・中質量星の進化最末期における、質量放出の履歴を系統的に研究。

(上図) うみへび座U星の星周ダストシェル構造を詳細に解析し、このシェルが、**たかだか千年ほどの間に地球30個分ほどのダストと、その100倍ほどのガスが一気に放出されて作られた事を導いた**。このような短期間の激しい放出は、恒星進化末期に起きるヘリウム殻フラッシュに起因している可能性が高い。Izumiura et al. A&A, 528, 29, (2011)

(下図) ポンプ座U星を取り囲むダストシェルの、**中間赤外線画像の取得に世界で初めて成功**。高い空間分解能を生かし、ダストシェルの構造を今までにない詳しさを調べた。遠赤外線観測の情報を合わせて解析することで、ダストシェルの温度分布を高い精度で決定。その結果、**この星のダストシェルが、大きく異なる温度を持つ二層の構造を持ち、さらに二つの層で塵の固体微粒子の大きさに違いがあることを明らかにした**。

Arimatsu et al., ApJ, 729, L19, (2011)



星周物質と星間物質の相互作用の発見

膨張する星周ガス・ダストが、星間物質の流れと相互作用し、**バウショック(弧状衝撃波)が生じていることを発見**。

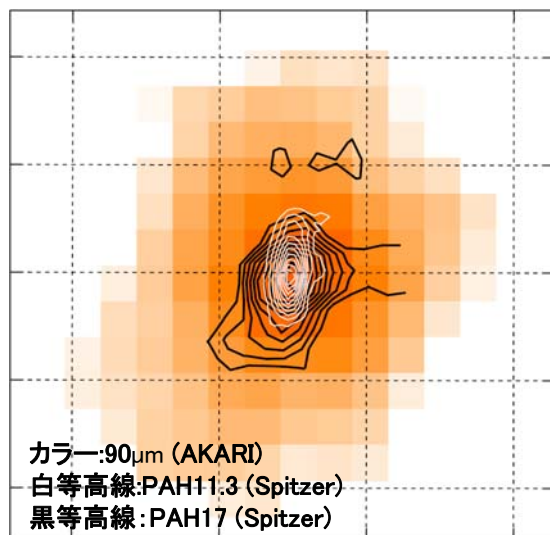
星からの質量放出の情報のみならず、**星間物質の状態を三次元的にとらえる新しい手段を初めて確立**。Ueta et al., A&A, 514, 15, (2010), Ueta et al., PASJ, 60, S407, (2008)

3.2 天文学研究の成果

(8) 研究成果(星間物質の進化)



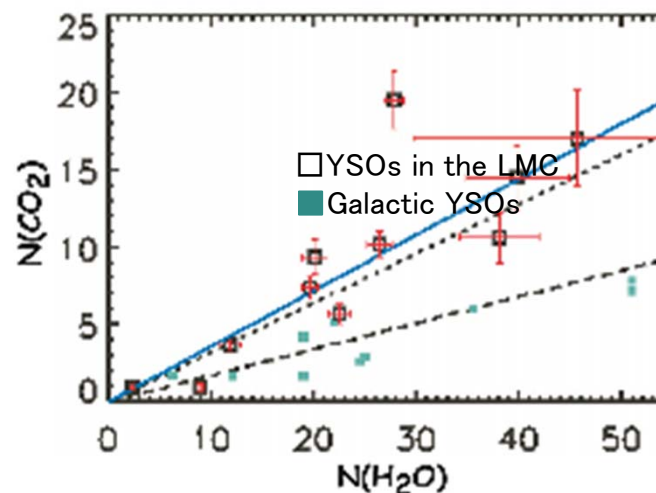
楕円銀河NGC4589中のダスト進化



銀河衝突／合体による爆発的星形成を経て作り上げられた楕円銀河において、星の分布と星間物質の分布が異なることを発見。ダストと、有機物分子の中でも大きなものは、銀河衝突の名残を残す分布を示す。それに対して有機物分子の比較的小さなものは、銀河の中心に集中しており、**注ぎ込まれたガスから2次的に作られた**ことを示している。

Kaneda et al., PASJ, 60, 467 (2008), Kaneda et al., ApJ, 716, 161 (2010)

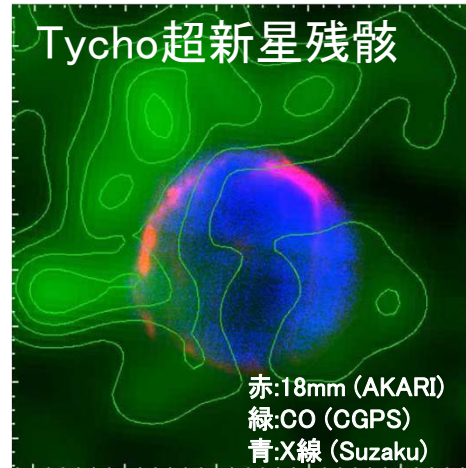
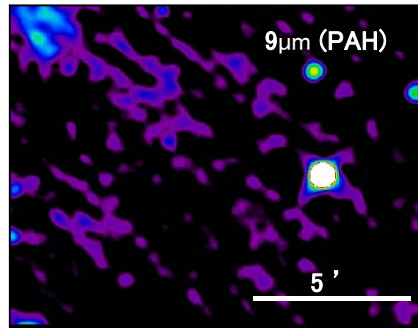
大マゼラン雲中の若い星周囲からCO₂氷を検出



大マゼラン雲(LMC)中の前主系列星を「あかり」のサーベイ等から抽出し、近赤外線分光観測を行ない、得られたスペクトルから3 μ mのH₂O氷と4.3 μ mのCO₂氷の量を見積もった。その結果、**LMCでは銀河系に比べて、CO₂氷のH₂O氷に対する相対存在量が2倍程度大きい**ことを精度よく示した。Shimonishi et al., ApJL, 686, L99 (2008), Shimonishi et al., A&A, 514, id.A12 (2010)

3.2 天文学研究の成果

(9) 研究成果(超新星爆発によるダスト形成と破壊)



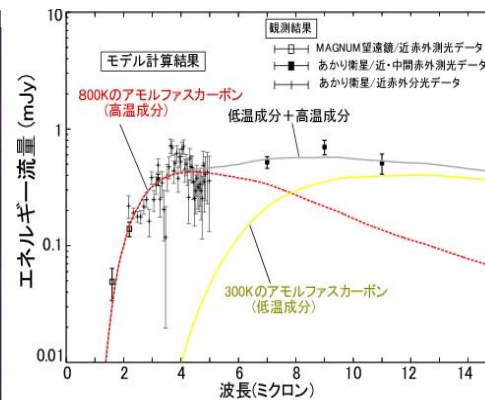
超新星残骸と星間物質の相互作用の観測

X線で見える高温プラズマとダストの相互作用を、赤外線でもクリアに捉えた。星間空間にダストと共に存在する**巨大有機物分子(多環式芳香族炭化水素)**が壊されていることを確認。

Ishihara et al., A&A, 521, L61, (2010)



爆発後200日後でも超新星周囲のダスト放射により赤外線でも明るく輝いている



Ib型超新星2006jcの近・中間赤外線分光・撮像観測

超新星爆発放出物質中で**生成されたダスト量(高温成分)**は、**ダスト形成理論計算の予測より大幅に少ない**ことが示された。

一方、**超新星爆発前に形成されたダスト(低温成分)**を検出し、星間空間への年老いた大質量星からのダスト供給について新しいデータを得た。Sakon et al., ApJ, 692, 546, (2009)

この他にも多くの超新星・新星、超新星残骸の観測を行い、ダストの形成と破壊過程について重要な結果を得ている。

Koo et al., ApJ, 732, 6, (2011), Ohsawa et al., ApJ, 718, 1456, (2009), Lee et al., ApJ, 706, 441, (2009), Seok et al., PASJ, 60, S453, (2008) 他

3.2 天文学研究の成果

(10) 研究成果(銀河からのガス・ダスト流出)

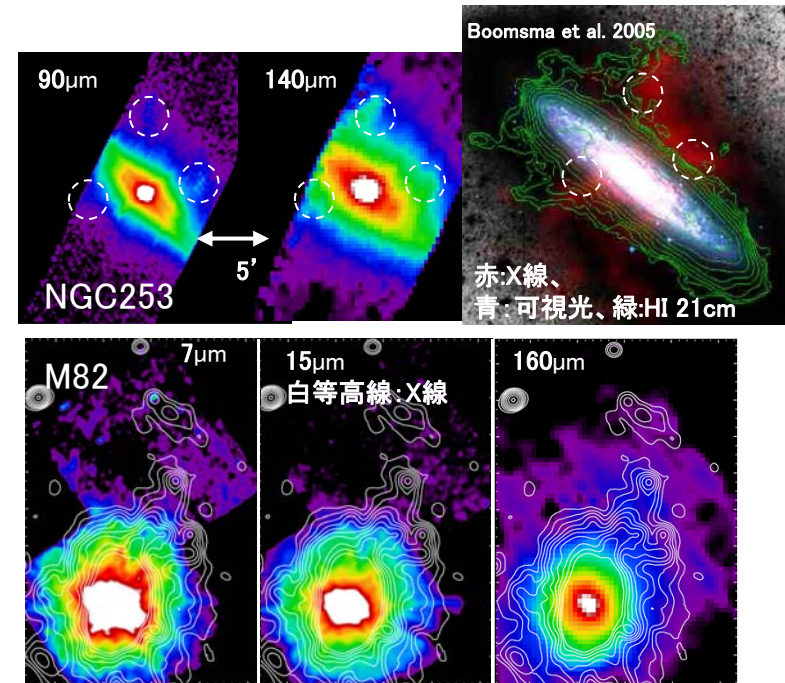


銀河の衝突によるダスト流出

銀河同士の衝突／重力相互作用により、銀河円盤内では爆発的星形成が起きたり、銀河中のガスやダストが銀河の外にまき散らされる。爆発的星形成が起きた銀河では、同時多発的な超新星爆発による爆風で、やはりガスやダストが銀河外にまき散らされる。

「あかり」は、これまで明確に分かっていなかった銀河間空間の低温ダスト(20 K)の存在を明らかにした。(上図の赤色部分が発見された銀河間ダスト分布)

今後も、全天サーベイ観測による広域マップを利用し、近傍で大規模な銀河衝突を起こしたM81-M82銀河グループ等で銀河間ダストの存在および、その空間分布を初めて詳細に調べることが期待される。Suzuki et al. ApJL, 731, L12 (2011)



爆発的星形成を起こしている銀河からのダスト流出

X線でガスの流出を示す銀河のダストと有機物分子の分布を調べ、各銀河でダスト流出を検出した。ガス/ダストの質量比は、中心から銀河円盤、周辺部に行くにつれて小さくなり、ダストが大量に銀河から流れ出ていることを示唆している。

NGC3079: Yamagishi et al., PASJ, 62, 1085 (2010); M82: Kaneda et al., A&A, 514, 14 (2010); NGC253: Kaneda et al., ApJL, 698, 125 (2009)

3.2 天文学研究の成果

(11) 研究成果(活動銀河核／ブラックホール) (1/3)



目的と背景

中心に超巨大ブラックホールを持ちそのブラックホールへ質量を供給することでエネルギーを解放する活動銀河核は、この宇宙において重要なエネルギー源の一つであると考えられている。そのような天体がどのように生まれ現在まで進化してきたのか、またその存在量を見積もることは重要な問題である。

活動銀河核の存在量を見積もるにあたって、活動銀河核が厚い星間物質に隠されていることがあり、その存在を認識することが出来ない天体がある。特に高光度で赤外線で輝く超高光度赤外線銀河の正体として、その活動銀河核の存在を明らかにすることは、宇宙のエネルギー源を見積もるに当たって重要な課題である。また、これまでの活動銀河核探査で見落とされている塵に覆われた活動銀河核の存在が従来の観測から示唆されている。このような天体の探査には、「あかり」中間赤外線全天サーベイのフォローアップ観測が重要となった。

活動銀河核がどのように生まれ、どのように進化してきたかという問題も未だに解決できていない。活動銀河核の主要構成物からの放射が主となる、静止系で可視・近赤外線にあたる波長域が、その赤方偏移のために赤外線域にシフトしていることにより、近傍天体と同等のデータの取得が困難であったからである。このような比較をするためには「あかり」による観測が必要となった。

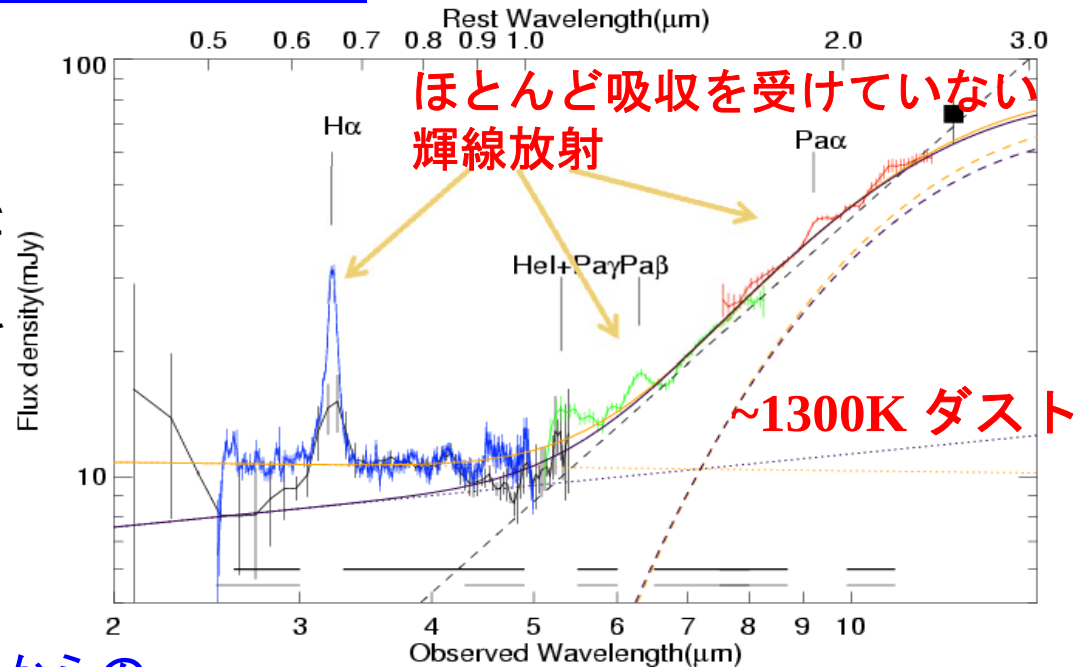
3.2 天文学研究の成果

(11) 研究成果(活動銀河核／ブラックホール) (2/3)



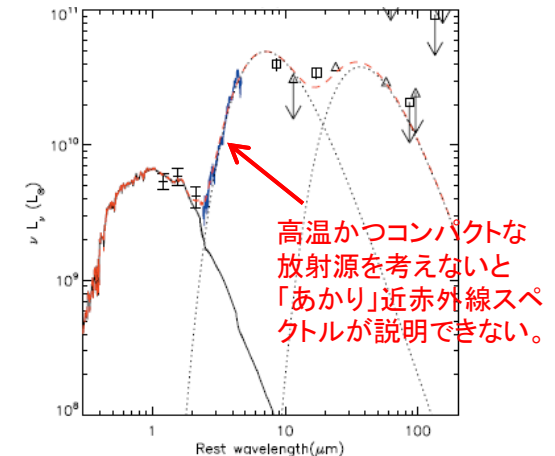
高赤方偏移クェーサーの近・中間赤外線分光観測

•120億年前の高光度活動銀河核(クェーサー)を観測しても、近場でのクェーサーと大きな違いを見つけることが出来なかった。クェーサーのシステムは、宇宙誕生から17億年後にはできあがっていたという観測的証拠。
Oyabu et al. ApJ, 697, 452, (2009)



「あかり」中間赤外線全天サーベイからの活動銀河核探査

•「あかり」の波長域で、～500Kの温度を示すコンパクトな放射源を発見。その活動銀河核の兆候が「あかり」でしか見ることの出来ないダストに完全に覆われた活動銀河核と考えられる。
Oyabu et al. A&A, 529, id.A122, (2011)

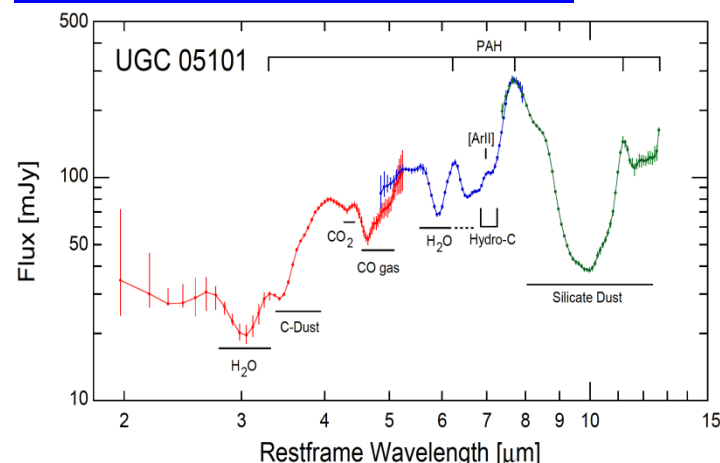


3.2 天文学研究の成果

(11) 研究成果(活動銀河核／ブラックホール) (3/3)



近傍の超高光度赤外線銀河 UGC05101 の 近・中間赤外線分光観測



「あかり」によるUGC05101のスペクトル
(Shirahata et al., ASP Conf. Series, 373, 505, 2007)

記者発表: 2007年3月26日,

「ブラックホールの活動で暖められたCOガスを発見」

約300天体の近赤外線分光による統計

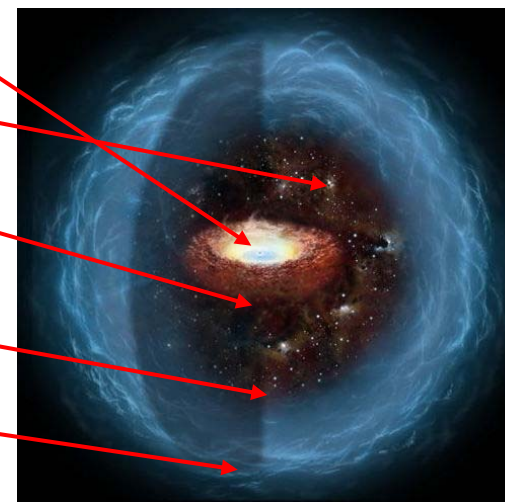
Imanishi et al., PASJ, 60, S489, (2008);

Imanishi et al., ApJ, 721, 1233, (2010)

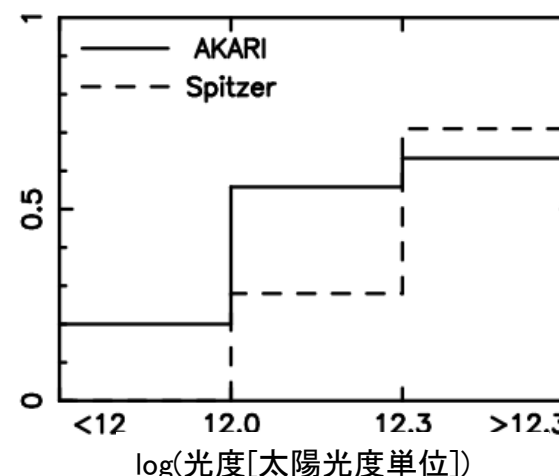
・明るい超高光度赤外線銀河ほど、星形成活動ではなく、塵に隠された巨大ブラックホールの活動により輝いている銀河の割合が増加することを発見。

スペクトルから予想される
銀河中心核の構造(想像図)

巨大ブラックホール
星形成領域
(PAH放射)
濃くて暖かいガス
(CO分子吸収)
濃くて冷たいダスト
(H₂O分子吸収)
薄くて冷たいダスト
(ダスト吸収)



ブラックホール周囲の活動により
輝いている銀河の割合



3.2 天文学研究の成果

(12) 研究成果(遠方銀河観測と宇宙の星形成史)(1/2)

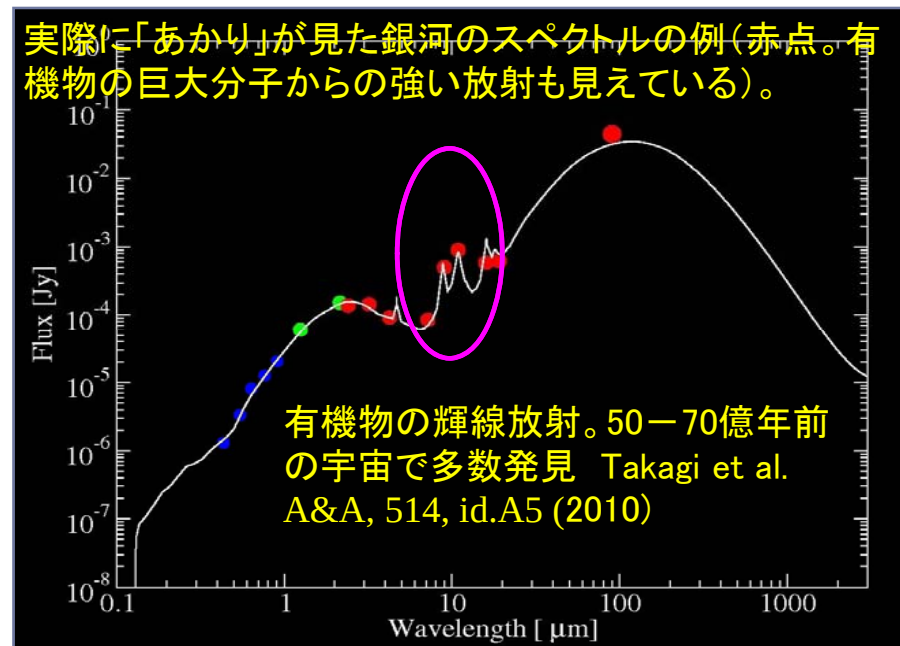
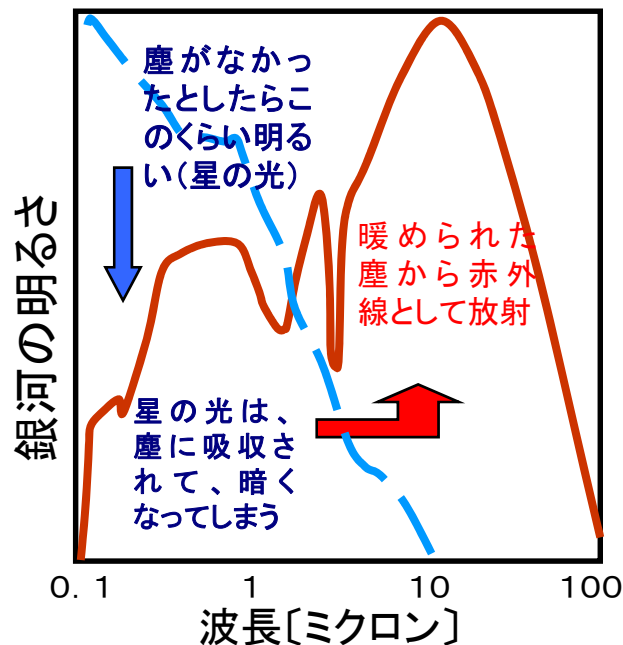


遠方銀河のスペクトル

- ▶ 宇宙の大半の活発な星形成中の銀河は、塵に覆われて可視光では調べるできない。逆に赤外線では非常に明るくなる(下図左)。

赤外線の明るさ＝星形成活動の指標

- ▶ 北黄極領域のディープサーベイのデータを元に、今から70－90億年の昔に、このような赤外線でも明るく輝く銀河がどれくらい存在したのかを調査した。
- ▶ サーベイからは、多くの星形成中の銀河を発見。
- ▶ 有機物の巨大分子(多環式芳香族炭化水素)の放射も見えた。これは中心のブラックホール周囲の活動ではなく、星形成活動が活発であることを示す。



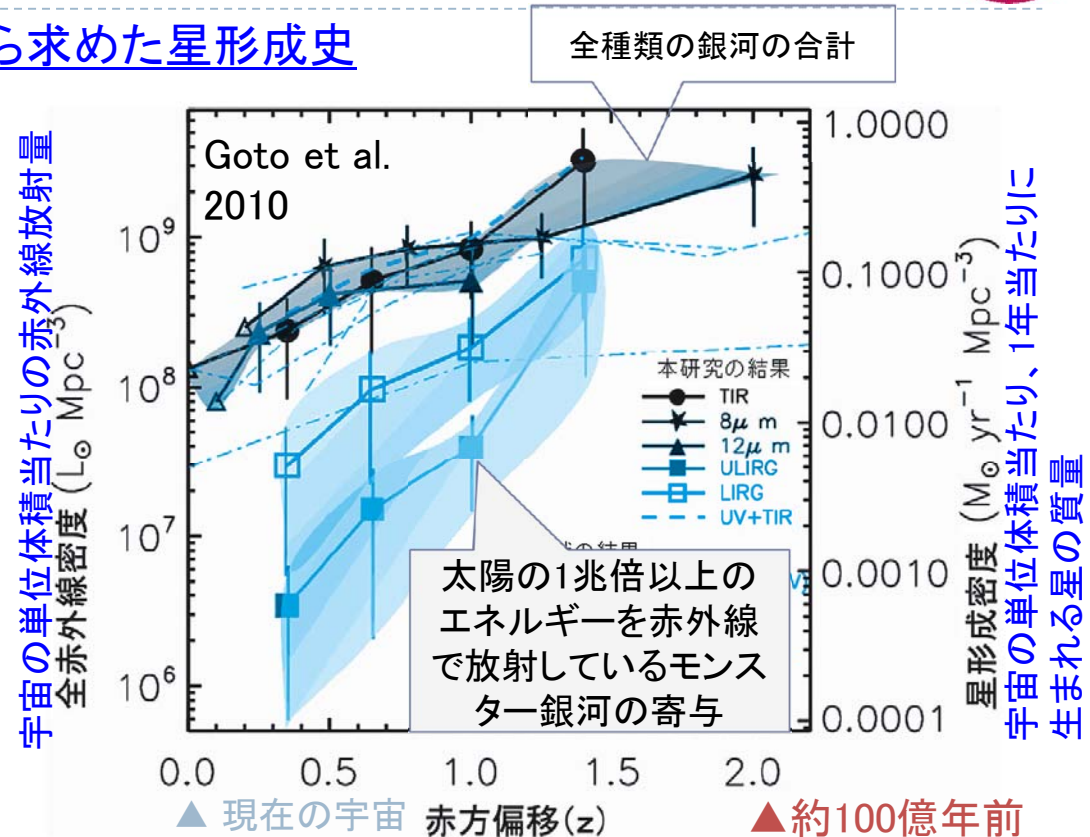
3.2 天文学研究の成果

(12) 研究成果(遠方銀河観測と宇宙の星形成史) (2/2)



北黄極(NEP)ディープサーベイから求めた星形成史

- NEPサーベイは目標の指向観測回数(約700回)の95%を達成。
- 検出限界は、目標の半分程度にとどまったが、過去70-90億年にさかのぼった宇宙の星形成史の解明を達成。
- NEPサーベイのDeep領域(0.38平方度)では、近赤外線でも2万個以上、中赤外線でも5,000~8,000個の天体を検出。Wada et al. PASJ, 60, S517, (2008), Lee et al. ASPC, 418, 291, (2009)



- ▶ 宇宙の赤外線光度密度の進化図の決定版
- ▶ 赤外線密度=星形成密度が100億年前に向かって数十倍増加
- ▶ 特に爆発的星形成をしている超大光度銀河(10^{12} 太陽光度以上)の寄与は $z=0.35 \rightarrow 1.4$ で500倍変化。

Goto et al., MNRAS, 410, 573, (2011), Goto et al., A&A, 514, id.A6, (2010)

3.2 天文学研究の成果

(13) 研究成果(宇宙背景放射) (1/3)



目的と背景

宇宙背景放射: 個別には検出が困難な宇宙初期天体をまとめて背景放射として検出

過去の観測: COBE(米国)や IRTS(日本)によれば、近赤外と遠赤外波長域の宇宙背景放射には銀河では説明のつかない超過エネルギーが存在

超過成分の解釈:

近赤外線 - 赤方偏移 ~ 10 の時代に宇宙で最初に形成された第一世代の星によるライマン α 線

遠赤外線 - 遠方銀河の星形成や活動的銀河核(ブラックホール)に伴うダスト熱放射

課題: 前景放射(主に、黄道光と系外銀河)の寄与推定に不定性

「あかり」によるブレークスルー:

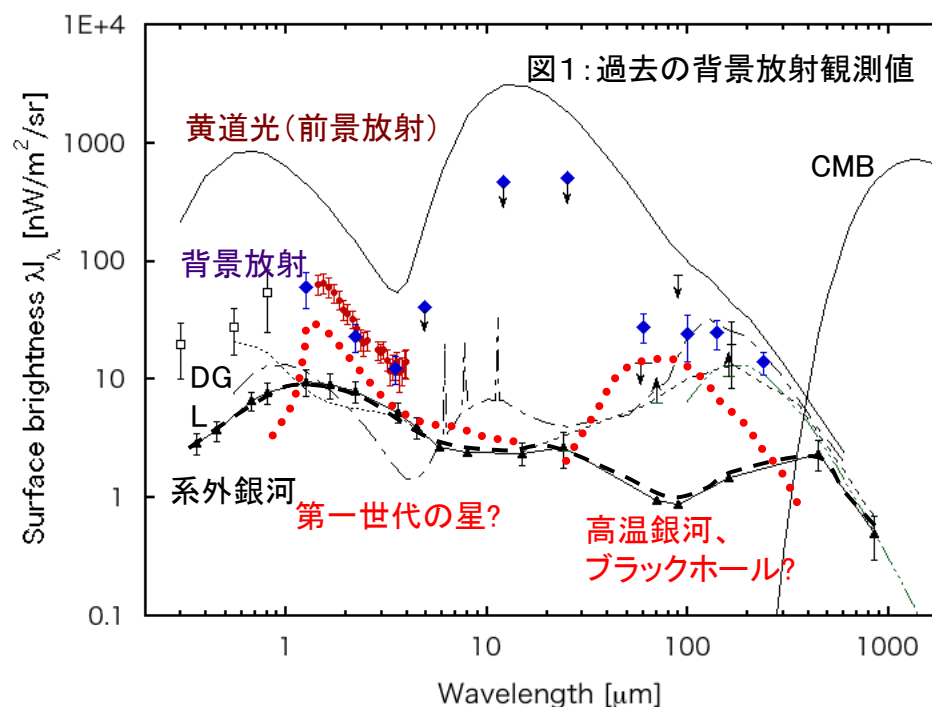
COBEやIRTSよりも10-100倍

高い角分解能により、

- ・遠方の暗い銀河や星を除外した背景放射測定

- ・黄道光の影響が小さい背景放射の角度ゆらぎ測定

が可能、宇宙初期起源を検証



3.2 天文学研究の成果

(13) 研究成果(宇宙背景放射) (2/3)



近赤外線観測結果 ―宇宙第一世代の星の探求―

- IRC撮像／分光指向観測、北黄極サーベイ領域中心部の6平方度をマッピング
- 点源(銀河・星)の影響がない宇宙背景放射の測定を実現
- 系外銀河では説明できない**大角度(10分角スケール)の背景放射ゆらぎを発見**
 - 第一世代星の分布や放射スペクトルの理論的予測と良い一致
 - 観測的宇宙論に大きなインパクト

成果論文:

丹下勉, 東工大修士論文 2008年

Seo et al., ASP Conf. Ser., 418, 539 (2009)

Matsumoto et al., ApJ, 742, 124, (2011)

ISAS web発表 2011年10月21日

今後の研究展開:

- 全観測データを用いた高度な測定
- IRC分光データを用いた第一世代の星からの輝線探査
- ($H\alpha$, $H\beta$, $HeII$ 等)
- FISによる遠赤外域の背景放射データとの相関解析
- 波長 $2\mu m$ 以下でのロケット観測(CIBER)との相関解析

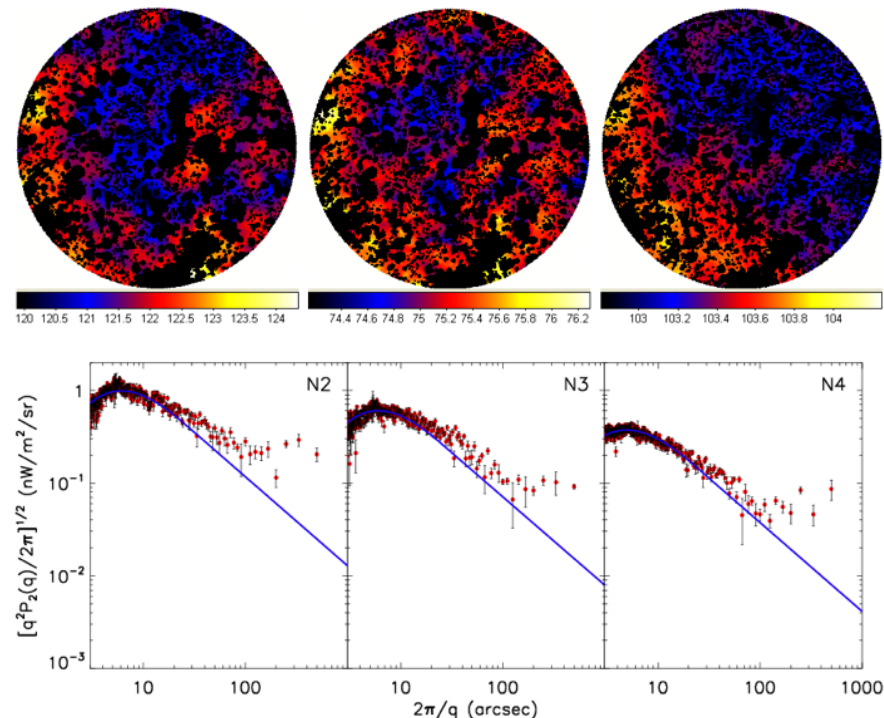


図2: 上図 - 観測領域の部分画像(左から波長 2.4 , 3.2 , $4.5\mu m$).
下図 - ゆらぎの角度パワースペクトル(横軸は角度スケール、縦軸はゆらぎ振幅、データ点は青線のポアソンゆらぎの推定値より超過している).
(Matsumoto et al. 2011)

3.2 天文学研究の成果

(13) 研究成果(宇宙背景放射) (3/3)



遠赤外線の観測結果

- 南天のダスト放射が少ない領域(「あかり」ディープフィールド; ADF-S)で、指向観測により全天サーベイの20倍高い感度で12平方度を観測
- 2,000個以上の銀河を検出(波長90 μ m)
- 遠赤外線背景放射ゆらぎの検出
 - 遠方の銀河の集合(宇宙の大規模構造)を検出
- 銀河の集合では説明できない謎の遠赤外線放射成分を発見
 - 未知天体の存在、宇宙初期天体の可能性

「あかり」研究会2009年(Shirahata et al., Matsuura et al., Malek et al., Hatsukade et al., Sedgwick et al., White et al.)

松浦周二 パリティ 2010年5月号

Malek et al. A&A, 514, id.A11, (2010), Hatsukade et al., MNRAS, 411, 102, (2011), Clements et al., MNRAS, 411, 373, (2011), Sedgwick et al., MNRAS, 416, 1862, (2011), Matsuura et al., ApJ, 737, 2, 2011

ISAS web発表 2011年8月10日

今後の研究展開:

- 国際研究チームによる多波長フォローアップ観測のデータを用いて超過成分の起源を探る
- IRCやCIBERの近中赤外データとの相関解析により第一世代の星との関係を探る

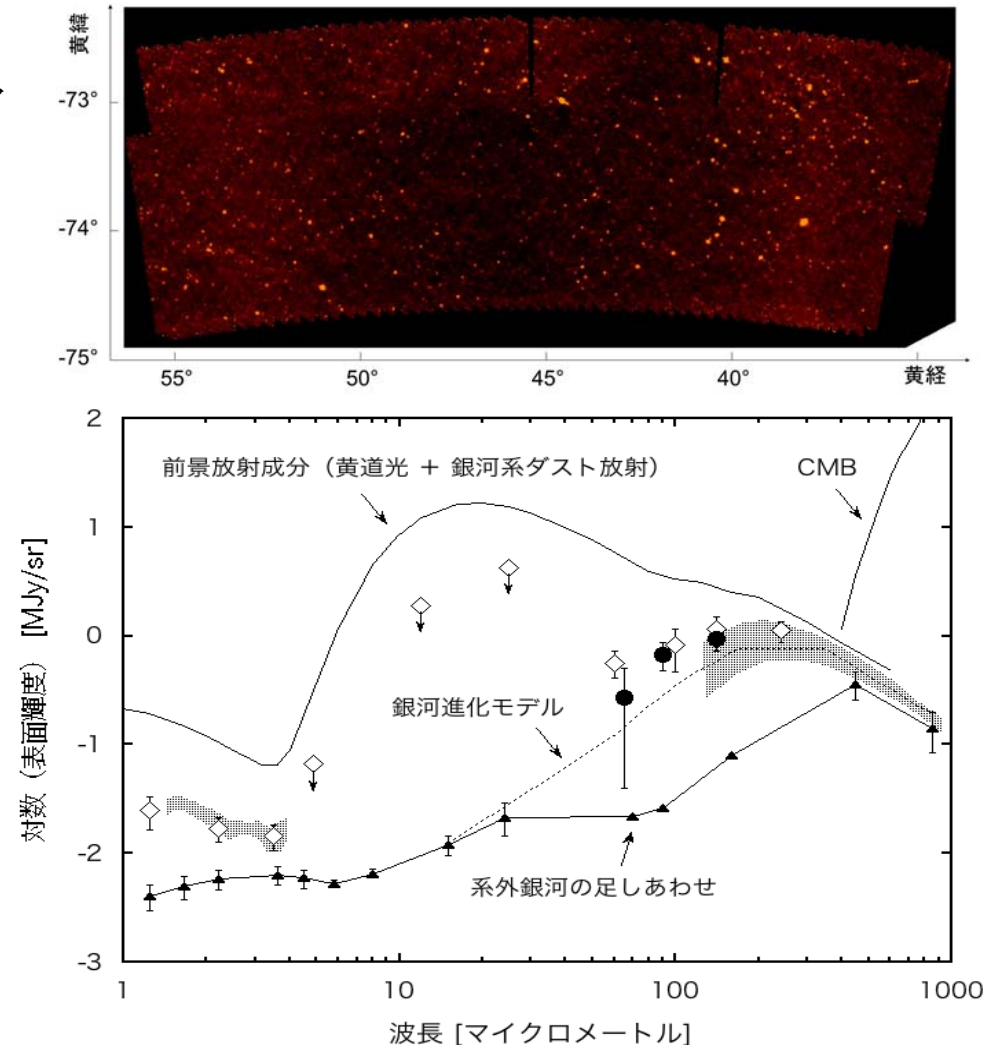


図3: 上図 - 90 μ mの観測画像。下図 - 観測された背景放射スペクトル。◇と陰影部分はCOBE、●は「あかり」のデータ。背景放射の観測値は、銀河進化モデルの予測よりも明るい。(Matsuura et al. 2011)

3.2 天文学研究の成果

(14) アウトリーチ (1/2)



▶ メディアによるアウトリーチ

以下のような報道により、宇宙科学の成果の国民への発信、理科教育への貢献を果たした。また大学・大学院での教育にも貢献している。

▶ 一般向け雑誌

- ▶ ニュートン(2001, 2009, 2010, 2013)、月刊天文(2006)、天文ガイド(2006, 2011)、月刊星ナビ(2006, 2007, 2012)、日経サイエンス(2007)、ナショナルジオグラフィック日本版(2007)、宇宙年鑑2007、Nature(2007)、SKY&TELESCOPE(2007)、NEW SCIENTIST(2007)、パリティ(2010)、新潮45(2011)

▶ テレビ・ラジオ(JAXA発表に基づくニュース報道は除く)

- ▶ 九州朝日放送「ドオーモ」(2006)、NHK教育「サイエンスZERO」(2006, 2010)、NHKラジオ第一「ラジオタ刊」(2006)、PODCAST番組ヴォイニッチの科学書(2006)、TBS「ニュース23」(2006)、BS朝日「わくわく科学な時間」(2007)、J-WAVE「GOOD MORNING TOKYO」(2007)、FMさがみ「JAXA相模原チャンネル」(2012)

▶ 新聞報道

- ▶ 2006年の打上げ以来、15回の新聞発表(うち1回は欧州のみでの発表、また東京大学、国立天文台、名古屋大学よりの発表それぞれ1回を含む)、2回のweb発表(<http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Outreach/results/results.html> 参照)
- ▶ 打上げ前の2005年より現在までの新聞掲載回数は、主要全国紙5紙で49件。
 - ▶ 読売(8)、朝日(14)、毎日(12)、日経(5)、産経(10)
- ▶ その他の全国紙、地方紙は、プロジェクトで把握しているもののみ、参考情報として以下に記す。
 - ▶ 東京(10)、中日(1)、神奈川(10)、南日本(9)、西日本(5)、赤旗(2)、
 - ▶ 日刊工業(10)、日本産業(1)、フジサンケイビジネスアイ(2)、電波(1)
 - ▶ JAPAN TIMES(1)、DAILY YOMIURI(1)、時事通信(1)

3.2 天文学研究の成果

(14) アウトリーチ (2/2)



- ▶ メディアによるアウトリーチ(続き)
 - ▶ 学会・研究機関・博物館等の広報誌、ホームページ等
 - ▶ JAXA's (2006, 2007, 2010)、ISASニュース(2009年に特集号、他多数)、名古屋市科学館友の会・天文クラブ機関誌(2006)、総研大ジャーナル(2007)、広報いばら(美星天文台がある岡山県井原町広報誌;2007)、American Museum of Natural History HP (2007)、天文月報(天文学会広報誌;2009年に9号にわたって特集)、ISASビデオシリーズ vol.13 (2009)、大学ジャーナル(2009年)、日本化学会教育協議会「化学大好きクラブニュースレター」(2010)、名古屋大学理学部「理 philosophia」(2010年)、東京大学理学部ニュース(2010)、SPACE RESEARCH TODAY (2011)
 - ▶ 関連企業の広報誌
 - ▶ NAS技報(2006)、NIKON HP(2006)
 - ▶ プラネタリウム番組
 - ▶ 名古屋市科学館(2012)、相模原市立博物館(2012)
- ▶ 「あかり」データを元にした教育用素材の製作が進められており、今後理科教育現場での活用が期待できる。

3.3 波及効果



(1) 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (1/2)

1. スペース赤外線天文学での国際プレゼンスの向上

- ▶ 「あかり」の成功により、米・欧に並ぶ第3極としての地位を獲得
- ▶ 日本の次期赤外線衛星として概念設計中のSPICA(口径3.2m赤外線天文衛星)には、すでに欧州が参加を表明しているだけでなく、米国でも最重要のミッションとして参加が検討されている。これは「あかり」による国際プレゼンス向上の結果である。

2. 産業への効果

- ▶ 「あかり」の衛星開発により国内産業への一次波及効果は200億円程度、消費拡大による二次波及効果は130億円程度と見られる(三菱総研見積り)。波及倍率は他の科学ミッションと同程度。
- ▶ 「あかり」では冷却装置の比重が大きいことから、電気産業に加えて、機械産業への波及効果が他の科学衛星よりも大きいと推測される。

3.3 波及効果



(1) 社会的/政策的/国際的貢献状況や波及効果 (2/2)

3. 日本の戦略技術としての宇宙用冷凍機

- ▶ 「あかり」のための冷凍機の開発は、1989年度から本格的に開始された。冷凍機望遠鏡実現を目指して各種方式の冷凍機の調査／検討、特にパルス管冷凍機の試作が東芝と行われた。
- ▶ 1991年度に、「あかり」冷却系は液体ヘリウムと冷凍機の併用とする方針が決まり、20Kまでの冷凍温度が求められる冷凍機は、80K冷凍機技術を持っていた住友重機械工業(株)により開発が進められた。住友重機械工業(株)のスターリングサイクル冷凍機は、最終的には100W以下の電力で、200mW以上(@20K)の冷凍能力(冷凍温度は無負荷時に約13K)を達成した。
- ▶ 宇宙用冷凍機は、現在ではJAXA研究開発本部熱グループの主導により開発が継続されており、様々なミッションに採用されているだけでなく、上記スターリングサイクル冷凍機とJT冷凍機や断熱消磁冷凍機を組み合わせることにより、4Kあるいは1K以下までの冷凍が可能となっている。
- ▶ 当初は欧米に比べて10年以上遅れているとされた日本の宇宙用冷凍機は、現在では世界トップの技術となっている。

3.3 波及効果

(2) 人材育成結果



- ▶ 装置開発に関わった大学院生、ポスドクは赤外線天文学の研究に併せて光学設計技術、検出器駆動技術、低温技術などに深い経験と知識を得た。
- ▶ 衛星の運用、データ処理に関わった大学院生、ポスドクは赤外線天文学の研究に併せて、赤外線検出器の特性・補正技術、衛星運用技術、衛星データ処理技術、ソフトウェア技術、データベース技術などを習得した。
- ▶ 研究員の進路(JAXA雇用、科研費、学振研究員等36名中)
 - ▶ JAXA職員5名、大学等教員8名、大学等研究員12名、一般企業3名、現職8名
- ▶ 博士学位を取得した大学院生の進路(関連大学含む、状況把握分のみ)
 - ▶ 大学等教員3名、JAXA/大学等研究員8名、企業3名

「あかり」関係学位論文状況

	「あかり」データ が主要な内容		「あかり」データ を補助的に利用		装置開発関連		データ処理技術、 キャリアブレーション		合計	
	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M
打ち上げ前 (～2005年度)	—	—	—	—	4	21	1	0	5	21
打ち上げ後 (2006年度～)	18	26	5	1	0	1	2	4	25	32

4.プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映



(1) 開発中の発生事象への対応と今後への反映 (1/2)

望遠鏡支持部不具合

▶ 問題の概要

- ▶ 2002年11月、及び2003年4月の極低温振動試験後の検査で、望遠鏡の主鏡支持部の接着剤剥離による主鏡外れが発見された

▶ 主な原因

- ▶ 主鏡接着パッドの材料であるスーパーインバーの、極低温での相変態による熱膨張係数増大を見逃したこと
- ▶ 破壊力学的な面からの解析、試験(クラックの進展に伴うエネルギー開放率の評価)を行わなかったこと

▶ 対応

- ▶ 対応: 東大、JAXA研究開発本部及び宇宙科学研究所(ASTRO-Fプロジェクト外)の構造／材料の専門家、プロマネ経験者等で構成した不具合対策会議により、不具合改修を主導。以下の改修を行った。
- ▶ 接着パッドの材質をスーパーインバーからノーマルインバーに変更すると共に、発生応力の低い構造に設計変更。
- ▶ バネ構造の主鏡支持金具の形状を変更し座屈強度を上げた。
- ▶ 接着部のSiC表層がわずかに剥離した主鏡を、バックアップ主鏡に交換した。

▶ 今後への反映事項

- ▶ 極低温での物性が明らかでない材料を使う場合には、常温からの外挿ではなく、実際に使用する温度での物性値測定を実施した上で、採用の判断、設計を行うべきである。



4. プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映

(1) 開発中の発生事象への対応と今後への反映 (2/2)

総点検

衛星の開発・打ち上げ・運用を確実にを行うため、衛星システム全体を総括し、ミッションに致命的な影響を及ぼす不具合が隠れていないかを洗い出すための総点検作業を実施した。

▶ 点検経過

- ▶ 2004年9月29日のキックオフ会議より2004年11月まで：プロジェクトによる自己点検
- ▶ 2004年11月22、及び25日：独立評価チームによる総点検
- ▶ 2005年11月までに要検討事項、要処置事項の処置を行い、2005年12月16日に独立評価チームによるフォローアップを実施。

▶ 要検討事項／要処置事項と実施した処置の概要

▶ 要処置事項10件

- ▶ 電源／機器の短絡対策に関わるもの5件 ⇒保護抵抗の挿入、電流リミッタの追加等により対策
- ▶ その他は、帯電対策の追加、火工品ヒーターの冗長化、ACTEL社製FPGA不具合、リアクションホイールの追加検査、観測装置電気系不具合改修、各1件 ⇒指摘事項の実施、部品交換等実施

▶ 要検討事項20件

- ▶ 追跡運用における信頼性向上に関わるもの6件 ⇒JAXA統合追跡ネットワーク技術部が運用する地上局（新GN局）とのコマンド／テレメトリリンクの強化、スバルバード局での受信運用追加、USC20mアンテナ設備強化等
- ▶ 他衛星の電気系不具合に関する検討2件、帯電対策2件、機器の耐久性関連2件、熱制御2件、液体Heスロッシング、コンタミネーション、打上げ手順、チタン合金ファスナ、電源短絡、極低温機構 各1件 ⇒解析を実施、一部試験を追加。

▶ 効果

- ▶ 総点検の中でFPGA不具合への対応ができた等、信頼性向上に大きく寄与。
- ▶ コマンドアップリンク運用を、新GN局からも可能にしたことが、打上げ後の不具合対応（太陽面問題、冷凍機障害、終了運用等）を可能にした。

4. プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映

(2)軌道上運用中の発生事象への対応と今後への反映(1/4)



太陽面問題

- ▶ 問題の概要
 - ▶ 打上げ直後に、2次元太陽センサーの視野に検出不能領域が発生、二次元精太陽センサーによる太陽光検出ができない等、6項目の問題が発生した。
- ▶ 主な原因
 - ▶ 問題が発生した機器はすべて太陽指向面にあり、それらを覆う何らかの遮蔽物がある、との仮説が最も確からしい。遮蔽物はミッション部サンシールド起因である可能性が除外できないが、特定不可。
- ▶ 対応
 - ▶ 太陽電池パドルの出力電圧を頼りにマニュアルで太陽捕捉し、観測軌道への投入を実施。
 - ▶ 太陽面問題検討チームを立ち上げて原因究明を実施した。
 - ▶ 以下の対策を実施して観測を開始した。その結果、姿勢制御精度を維持し、その他の劣化もマージンの範囲内に収まった。これに伴い、望遠鏡蓋開け、観測開始が約一ヶ月遅れた。また、姿勢センサーの冗長性が減少した。
 - ▶ 観測用姿勢制御は、精太陽センサーを用いず、ジャイロとスタートラッカーで実施。
 - ▶ 粗姿勢制御では、太陽センサーではなく、地球センサーを用いてジャイロを較正する方式に変更。
 - ▶ 姿勢異常検出も太陽センサーを用いず、ジャイロ信号より太陽方向を推定する方式に変更。
 - ▶ ISAS安全・品質保証室に軌道上不具合情報として展開。
- ▶ 今後への反映
 - ▶ 原因の可能性の一つとして指摘されたMLI剥離に関しては、JAXA安全・信頼性推進部に設計標準WGが設置され、地上実証、検討が行われた。その結果は、MLI剥離防止設計標準（JERG-2-311）としてまとめられ、知見が展開されている。



4. プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映

(2)軌道上運用中の発生事象への対応と今後への反映(2/4)

冷凍機異常電流、及び性能劣化

▶ 問題の概要

- 1) 2007年6月より2台の冷凍機のうちB系のCold Head(膨張器)駆動電流が上昇する現象が発生、2007年9月に冷凍機駆動電気系の温度急上昇、Cold Head 低温部の温度急上昇により、B系冷凍機をコマンドで停止。
- 2) 2008年7月より、A系冷凍機Cold Headにも異常電流が見られるようになった。2010年2月、A系駆動電気系温度が急上昇。問題が起きない低電力での運転へ。
- 3) 2)と共に、本来必要な冷却温度を達成できたはずの駆動電力でも、近赤外線検出器性能が十分得られる温度まで冷却できない、という性能劣化が判明。

▶ 主な原因

- ▶ 問題1)、2)については、Cold Headの摺動部で駆動コイル絶縁材料が摩耗、駆動回路の一部が接地されている周辺部に接触し地絡した可能性が高い
- ▶ 3)については、冷凍機動作ガス(He)中に不純物(CO₂の可能性が高い)ガスが増加、低温部で固化して冷凍機動作を妨げている可能性が高い

▶ 対応

- ▶ 問題1)、2)について、冷凍機開発の主体である研究開発本部・熱グループ、ISAS品証室と共同で原因究明の後、2008年11月に報告会を実施し、類似冷凍機搭載予定のプロジェクトに水平展開。JAXA信頼性改革会議にも報告し、水平展開を図った。
- ▶ 問題3)の原因と推定した冷凍機ガス中の不純物の問題については、開発中より研究開発本部・熱グループを中心に、冷凍機搭載予定のASTRO-H、SPICAとの共同で調査と対策検討を進めており、本事象についても他プロジェクトに研究開発本部・熱グループ経由で情報伝達。
- ▶ 問題3)について、2010年5月より観測を中断して、低温部の温度を一旦常温に戻す等、動作ガス不純物による性能劣化からの復帰を目指した運用を実施した。冷凍性能はある程度回復したが、赤外線検出器の温度要求は満たせないまま電源異常(次ページ参照)により観測運用終了。

▶ 今後への反映事項

- ▶ 問題1)、2)について原因究明の結果に基づく冷凍機改良が、研究開発本部・熱グループにより実施された。
- ▶ 問題3)については、不純物および混入経路について同定。改善方法について研究開発本部・熱グループを中心に検討を進めている。

4. プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映

(2)軌道上運用中の発生事象への対応と今後への反映(3/4)



電源異常

▶ 問題の概要

- ▶ 2011年5月23日、バッテリーに異常が発生し、充電が自動停止した。
- ▶ 放電が進みバッテリー電圧低下によりUVCモード となり、その直後の日陰で衛星OFF。3軸姿勢制御は失われ、日照中に太陽電池パドルに日が当たる姿勢のときだけ自動的にオンになる状態となった。温度制御もオフとなり、推進系燃料も凍結に至った。

▶ 主な原因

- ▶ 16セルの組電池の高電圧側8セルの何処かで、地絡が発生したと考えられる。
- ▶ ただし、地絡経路は不明。

▶ 対応

- ▶ プロジェクトで発生した現象を解析、結果をDE組織電源グループへ引き継ぎ。

▶ 今後への反映事項

- ▶ Ni-MHバッテリーは「あかり」以後の衛星では使用されないこともあり、現状では水平展開は不要と判断。

4. プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映

(2)軌道上運用中の発生事象への対応と今後への反映(4/4)



運用終了

▶ 運用の概要

- ▶ 前項の電源異常により、姿勢制御は失われてタンブリング状態、温度制御も失われて推進系の推薬は凍結した。
- ▶ 2011年8月より「あかり」の軌道が全日照条件になるのを待ち、太陽指向軸回りのスピナップを行い、姿勢のspin安定を目指した。9月末には成功し、安定した電力を確保、3軸姿勢制御の復帰まで行うことができた。
- ▶ 電力確保により温度制御が可能となり、10月末までに燃料の解凍に成功した。
- ▶ 11月10、14、17日に軌道変更運用を実施し、近地点高度を450kmまで低下させ（遠地点高度は約700kmのまま）、11月24日に停波を行い、「あかり」の軌道運用を終了した。

▶ 効果

- ▶ 「あかり」の観測軌道（高度約700kmの円軌道）の軌道寿命は100年を超えると予想されたが、軌道低下に成功したことにより、デブリ防止の国際的合意である25年以内の有用軌道からの離脱を達成可能となった。デブリ防止の措置を実際に実施したのは、日本の衛星で初めてである。

▶ 今後への反映事項

- ▶ 姿勢復帰運用の結果は論文（坂井ら）にまとめられた。
- ▶ 総括的な報告書面は、「あかり」不具合・知見のまとめとともに作成する方針。

4. プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映

(3) 教訓、知見など (1/2)



【宇宙理学委員会の終了審査におけるまとめ(概要)】

1. 「あかり」以前のIRTS等の経験について

- ▶ 日本では初の赤外線衛星「あかり」が成功したのは、SFU搭載赤外線望遠鏡IRTSの開発・運用を通じて、宇宙用極低温冷却システム等、「あかり」でも核となる技術開発を実施できたこと、また衛星プロジェクトの進め方について非常に多くのことを学んだことによっている。
中型以上の衛星を実現する前にIRTSのような小型ミッションを経験することは、本質的に重要と考える。

2. 成功基準について

- ▶ 「あかり」成功基準は、宇宙開発委員会によるミッション評価が行われることになったのに伴い、急遽定義された。
- ▶ ただし宇宙理学委員会による評価基準としては、もう少し具体的な科学的成果に関する成功基準を設定することが妥当であったと思われる。これにより、プロジェクト側としてもデータ処理／解析作業の優先順位がより明確になり、成果の創出を加速する効果がある程度期待できる。

4. プロジェクトにおける発生事象への対応と今後への反映

(3) 教訓、知見など (2/2)



3. 観測計画立案、Science Advisory Committeeについて

- ▶ 「あかり」の観測計画の立案に際して、プロジェクト外の日本の天文学研究者からなる Science Advisory Committee (SAC) が設立された。SACは、プロジェクトが責任を持って遂行する大規模サーベイとプロジェクトメンバーが組織する研究グループによる観測計画立案への助言、公募提案の評価を行った。
- ▶ 研究者から提出された観測提案をレビューし、成果発表までのプロジェクト活動を外からモニターするSACの役割は、「あかり」の科学的成果を生み出す上で重要であり、うまく機能したと評価できる。
- ▶ スケジュール遅延や軌道上不具合等による観測計画の変更へのSACの役割が多少不明確であったこと、データ取得後に、各研究グループによるデータ解析に関する知見の共有化、フィードバックが不足したことが反省点である。

4. データ処理に要する人員・リソースについて

- ▶ 「あかり」のデータは大量であり、また処理が複雑である。これを迅速に処理してデータプロダクトを作成するには多くのリソースを必要とする。これまでの科学衛星ではこのための十分な体制を組むことは許されていない。その状況下でも、「あかり」ミッションの根幹である全天サーベイデータについては、赤外線天体カタログの初版を公開するところまでこぎ着けた。
- ▶ 「あかり」ではミッション採択にあたり、宇宙理学委員会よりデータ処理体制を不安視する意見が出されたこともあり、衛星運用を含めて3名の常勤招聘研究員の雇用が許された(後に常勤2名＋非常勤1名)ことが大きな助けとなった。
- ▶ 科学衛星でもデータ処理の専任チームが立ち上げられるのが望ましい。これには、データアーカイブを迅速に作り、科学衛星の成果を将来にわたって利用できるようにすることの重要性が、理解される必要がある。

5. プロジェクトの効率性について

(1) 資金管理(実績)



■プロジェクト総資金は**213.7億円**である。内訳は下表の通り(予算ベース)。

衛星開発 (試作・製作・総合試験)	ロケット製作・打上げ (関連経費含む)	運用費(初期運用、定常運用 1年分、観測事業費)	合計
133.5	76.8	3.4	213.7

このほかに、競争的資金(科研費他)から約30億円を獲得。

(単位:億円)

観測装置技術の基礎開発や、科学的解析・研究活動等に用いた。

参考: 諸外国の赤外線ミッション(2000年代の打上げ)とのコスト比較

ミッション	国	打上げ	望遠鏡口径, 質量, 軌道	開発費	備考
Spitzer	米	2004年	85cm, 950kg, Heliocentric	\$720M	1996年以降の開発・打ち上げ・初期運用
「あかり」	日	2006年	70cm, 952kg, 近地球	214億円	開発・打ち上げ・初期運用
WISE	米	2009年	40cm, 750kg, 近地球	\$320M	開発・打ち上げ・初期運用
Herschel	欧	2009年	3.5m, 3300kg, L2	€1,100M	開発・打ち上げ・科学(定常)運用

5. プロジェクトの効率性について

(1) 資金管理(評価)



「あかり」開発コストが低く済んだ理由

- ▶ サーベイミッションとして狙うサイエンスに必要な能力を追求し、例えば高い分光性能は求めないなど観測装置の仕様を絞り込んだ。
- ▶ バス機器は先行ミッションの機器設計を多く採用し、新規開発要素を抑えた。
- ▶ 地上試験装置(電源、テレメトリ受信、コマンド送信等の試験装置)は、他のミッションと共通の設備を使用。
- ▶ 機器開発体制の低コスト化
 - ▶ SFU搭載IRTSで磨いてきた、宇宙用液体ヘリウムクライオスタットの基礎技術を活用
 - ▶ 観測装置の要素技術開発・設計の多くを、ISAS、関連大学及び研究機関のインハウスで実施

「あかり」は海外の赤外線ミッションと比較して、「シンプルなミッションデザイン」「先行ミッションの設計を採用」「開発済み基礎技術を採用」などの理由から、比較的低コストで開発・運用を行うことができた。また、科研費等の競争的資金も多く獲得して開発に寄与していた。

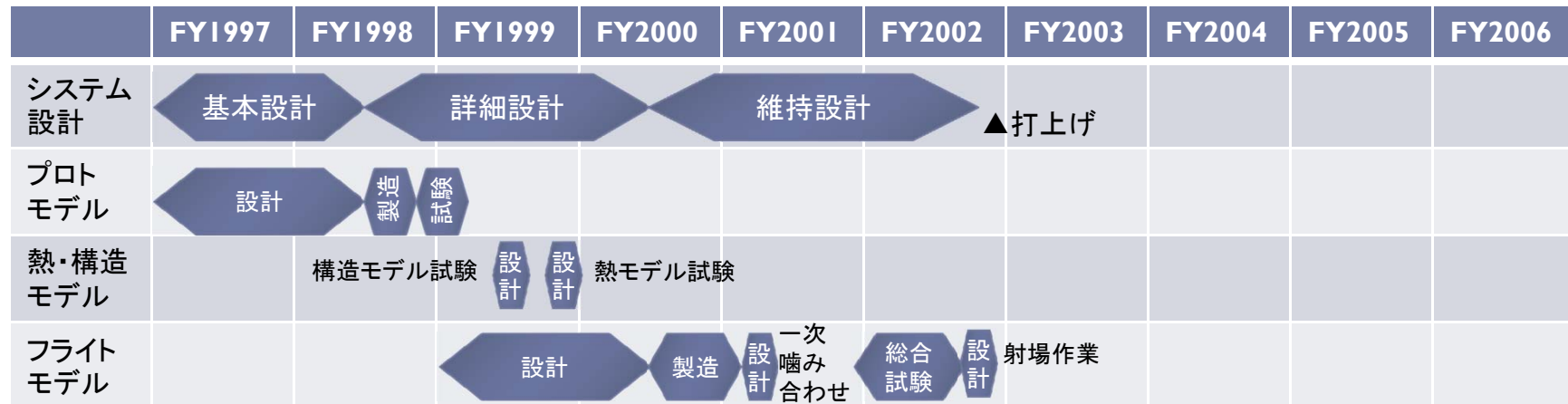
このことから、「あかり」のプロジェクト資金管理は総合的に見ておおむね妥当であったと結論される。

5. プロジェクトの効率性について

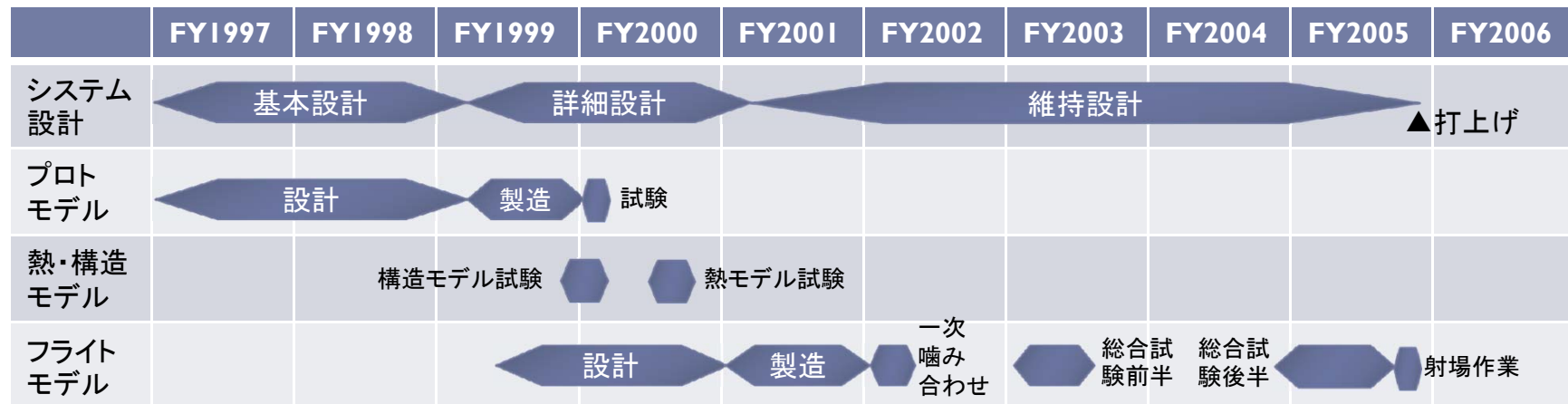
(2) スケジュール管理 (実績)



当初のスケジュール(1997年7月時点)



スケジュール実績



5. プロジェクトの効率性について

(2) スケジュール管理 (評価)



▶ スケジュール遅延と理由

- ▶ 2000年度に、打上げ目標時期を、2002年度末から2003年度末へ変更
理由: M-Vロケットの開発遅延等
- ▶ 2003年6月、打上げ目標を2005年度末に変更
理由: 望遠鏡の極低温振動試験で主鏡支持部の接着剥がれが起き、改修のために1年半の開発遅延が発生(4(1))項参照)、さらに他衛星打上げスケジュールとの調整により、計2年の遅延となった。

▶ 遅延の影響

- ▶ 「あかり」は天文衛星であり、太陽系探査機のように確定した打上げウィンドウはないため、大きな計画変更には至らなかった。
- ▶ ただし、米国Spitzer Space Telescopeに一部の観測を先んじられた、後発の米国WISE衛星のデータが「あかり」データ公開からそれほど間を置かずに公開された等、ミッション優位性のある程度の減少は避けられなかった。この意味では、天文衛星といえども、スケジュールの維持は重要である。

6. データプロダクト作成について

表1. 作成を目指すデータプロダクトと優先順位(1/2)



(理学委員会終了審査最終報告書より)

	番号	名称(仮)	内容	優先順位
全天	1-1	FIS Bright Source catalogue v.2	公表済みのBright Source Catalogueの改訂版。測光精度・位置精度の向上、検出信頼性の向上がはかれる。天体数は大きな変更なし。	1
	1-2	FIS Single Scan Photometry Database	FIS Bright Source Catalogueの1スキャン毎の測光情報。変光天体研究に有効であり、公開に対し多くの要望が寄せられている。	1'
	1-3	FIS Scan Density Data	FIS Bright Source Catalogue の作成に際して、天球上の各点のスキャン回数を記録したデータ。既知天体の非検出が観測領域外であるためか等の情報を与える。FIS Bright Source Catalogue v.1 に対するデータは既に存在。v.2作成時にv.2用データを作成。	1'
	1-4	FIS Faint Source Catalogue	高黄緯の多数回スキャン領域で検出感度を上げた遠赤外線天体カタログ。Bright Source Catalogueに比べて、20万個程度の天体数の増加が期待される。	1
	1-5	FIS All-Sky Map	波長60, 90, 140, 160 μ mの全天画像。IRASの画像に比べて約5倍の解像度。太陽系天体、星間物質から遠方銀河に至る非常に多くの研究に用いられる、非常に需要の多いデータ。広報・教育目的でも非常に重要。初版公開後に、2, 3回の改訂作業を予定している。	2
	1-6	IRC Bright Source catalogue v.2	公表済みのBright Source Catalogueの改訂版。今後必要が生じた場合のみ作成。現状では作成予定無し。	5
	1-7	IRC Single Scan Photometry Database	1-2項のIRC版。IRC Bright Source Catalogue v.1に対するデータは既に存在。v.2を作成する場合のみ、v.2用データを作成。	5'
	1-8	IRC Scan Density Data	1-3項のIRC版。IRC Bright Source Catalogue v.1に対するデータは既に存在。v.2を作成する場合のみ、v.2用データを作成。	5'
	1-9	IRC Faint Source Catalogue	波長9, 18 μ mでのfaint source catalog。Bright Source Catalogueに比べて2~3倍の天体数が期待される。米国WISEとは異なるユニークな波長帯のカタログで、多く利用されるカタログになる。	1
	1-10	IRC All-Sky Map	波長9, 18 μ mの全天マップ。FIS All Sky Map同様、非常に多様な研究に用いられる。黄道光を除去した画像が提供される。初版公開後に、1, 2回の改訂作業を予定している。	2
	1-11	AKARI Asteroid Catalogue v.2	公開済みのv.1が約5,000個の小惑星を含むのに対し、さらに1,000個以上の小惑星数増加を期待。v.1, 2ともに小惑星熱モデル計算によるサイズとアルベドの情報を含む。遠赤外線での小惑星カタログも追加できれば非常にユニーク。	5

6. データプロダクト作成について

表1. 作成を目指すデータプロダクトと優先順位 (2/2)



(理学委員会終了審査最終報告書より)

	番号	名称(仮)	内容	優先順位
指向	2-1	FIS FTS Data	遠赤外線フーリエ分光器による3次元データ。ISO以来の遠赤外線スペクトル。大マゼラン雲、銀河面などを中心に、600点の観測。習熟者でないと解析が難しいため、輝線マップ等の最終解析結果の公開を目指す。	5
	2-2	IRC Slit Spectroscopy Data	拡散光の近・中間赤外線分光データ。指向観測2,000回以上のデータ。特に近赤外線スペクトルは「あかり」特有で高感度であり、多くのアウトプットが期待できる。公開済みの生データではなく、改良された手法で処理した、位置-波長の2次元データを公開。	4
	2-3	IRC Short Slit Spectroscopy Data	点光源の近赤外線分光データ。指向観測6,000回以上のデータ。地上から得られない波長帯を含み、多くのアウトプットが期待できる。公開済みの生データではなく、改良された手法で処理した、位置-波長の2次元データを公開。	4
	2-4	IRC Slitless Spectroscopy Data	波長2~25 μm のユニークなSlitless分光データ。液体ヘリウム消費後の近赤外線のみ観測まで含めると指向観測約3,000回分。公開済みの生データではなく、改良された手法で処理した2次元データを公開。	5
	2-5	IRC Pointed Observation Images	波長2,3,4,7,9,(11),15,(18),24 μm での多色画像データ。指向観測8,000回分以上のデータ。公開済みの生データではなく、改良された手法で処理した、2次元データを公開。	4
	2-6	FIS Slow Scan Data	FIS指向観測でのスロースキャン約1100回分のSW, LW検出器のスキャンデータと処理済み画像データ。現在公開しているデータパッケージ(スキャンデータのみ)の改訂。	4
	2-7	IRC Slow Scan Data 1	指向観測でのスロースキャンによる波長9, 18 μm のスキャンデータと処理済み画像。全天画像よりも約5倍の感度を達成している。ただし、約20指向観測程度の少量データ。	4
	2-8	IRC Slow Scan Data 2	2-5項と同様のデータであるが、観測提案によるものではなく、FISスロースキャン時に自動的に得られたデータ。ただし500指向観測分以上のデータがある。	5
	2-9	AKARI Deep Field South Faint Source Catalogue	遠赤外線での深銀河サーベイ観測で得られた銀河の測光結果をカタログとして公開。約2,000個の銀河を含み、遠赤外線でのカタログとしてはこれまでで最大規模。	3
	2-10	IRC North Ecliptic Pole Catalogues	近・中間赤外線の深銀河サーベイ観測で得られた銀河のカタログ。北黄極付近で広くて浅い“Wide”と狭くて深い“Deep”の2種のサーベイ。Deepサーベイは中間赤外線7,000を越える銀河を検出、中間赤外線では世界最大のデータベース。	3
	2-11	IRC LMC Star Catalogues	近・中間赤外線による大マゼラン雲サーベイによる、数十万個の星のカタログ。重い元素が少ない大マゼラン雲における星の進化研究には最重要のデータベース。	3
源泉	3-1	FIS Time Series Data	FIS全観測の源泉データ。時系列の各波長の輝度データ+指向方向、ステータスデータ等、及びその時点での最新の処理結果がまとめられる。	—
	3-2	IRC All-Sky Segment Data	IRC全天サーベイの源泉データ。各スキャンの電荷蓄積リセットごとに区切られた画像データ集。	—

7. 将来計画

一次期赤外線天文衛星「SPICA」



目的

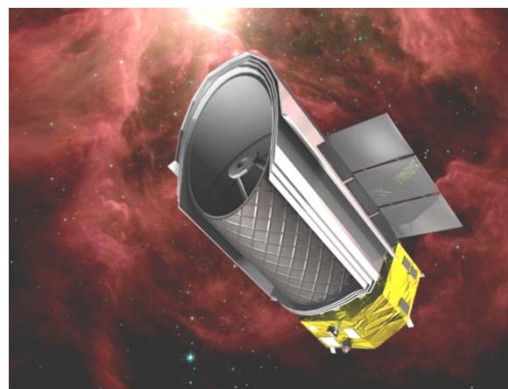
赤外線における高感度観測により、「ビッグバンから生命の誕生まで」の宇宙史の本質的過程を解明する。

科学的な位置付け

- ・宇宙塵に阻まれて他波長では観測できない、宇宙での歴史の中で最も重要な「天体の進化過程」を、赤外線高感度観測により解明する。
- ・具体的に、(1) 銀河誕生と進化過程の解明、(2) 惑星系形成過程の総合理解、(3) 銀河星間空間における物質循環の解明、の科学課題がお互いに有機的につながって、宇宙史の解明を目指す。
- ・ALMA(サブミリ波)、JWST(可視・近赤外)、TMT(すばる後継望遠鏡)の間の波長をつなぐSPICAの実現は、科学目的達成のために極めて重要である。これら地上・宇宙の次世代大型計画間のシナジーにより、より高い科学成果の創出を行う。

国際的な位置付け

- ・赤外線天文学分野では、これまで各国が特色あるミッションを交代で主導し発展させてきた。今後更なる発展を遂げるため、国際協調の下に一つの計画に集中し、分担して進めなければならない時代に入しつつある。
- ・欧州は独自計画でなくSPICAに国際協力参加することを選択した。日本は、冷却技術など日本独自の技術を活かして主導しつつ、欧州他から各国の得意分野を持ちよることにより、チャレンジングなミッションを確実に実行する体制を構築する。



冷媒を使わない
新冷却システム
(冷却方式の革命)

日本の宇宙開発の
戦略技術の実証・発展

「あかり」観測成果
(「あかり」天体カタログ)
を発展的に活用

人類の宇宙観を変革

- ・銀河誕生と進化過程の解明
- ・惑星系形成過程の総合理解
- ・宇宙の物質循環の解明

主要諸元(案)

- ・望遠鏡口径: 3.2 m
- ・主要観測波長: 5-210 μ m
- ・望遠鏡温度: 6K
- ・質量: 約3700kg
- ・打上げ: 平成34年度 H-IIA-204
- ・軌道: 太陽・地球ラグランジュ点2周りのハロー軌道
- ・ミッション期間: 3年(5年目標)

実施体制

JAXAが主導し、全国の大学や研究機関との協力によって進める。さらに、欧州、韓国、台湾との国際協力により実施。

日本にとっての意義

- ・日本の戦略的技術(冷却系)、ユニークな科学成果(「あかり」サーベイ等)を活用・発展させる計画。
- ・日本が主導し、世界が参加する大型ミッションにより、人類の宇宙観に大きな影響を与える成果を期待。



8. 「あかり」終了審査委員会メンバー

宇宙理学委員会終了審査委員会メンバー

海老沢 研	JAXA 宇宙科学研究所・教授(委員長)
原 弘久	自然科学研究機構 国立天文台・准教授
鳥居 祥二	早稲田大学 理工学術院総合研究所・教授
山本 智	東京大学大学院理学系研究科・教授
山田 亨	東北大学大学院理学研究科・教授
佐藤 毅彦	JAXA 宇宙科学研究所・教授
芝井 広	大阪大学 大学院理学研究科・教授 (オブザーバ)
上野 宗孝	JAXA 宇宙科学研究所・宇宙科学プログラム オフィス室長(オブザーバ)

※ メンバーはいずれも宇宙理学委員会の委員

宇宙科学研究所終了審査委員会メンバー

稲谷 芳文	JAXA 宇宙科学プログラム・ディレクタ (委員長)
中村 正人	JAXA 宇宙科学研究所 研究総主幹
鈴木 和弘※	JAXA 宇宙科学研究所 科学推進部長
上野 宗孝	JAXA 宇宙科学研究所 宇宙科学プログラム・ オフィス室長
海老沢 研	JAXA 宇宙科学研究所 学際科学研究系・教 授
篠原 育※	JAXA 宇宙科学研究所 衛星運用・データ利 用センター・科学データ利用促進グループ長
尾崎 正伸※	JAXA 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系・ 助教
水本 好彦※	自然科学研究機構 国立天文台・教授
原 弘久	自然科学研究機構 国立天文台・准教授

※ 宇宙理学委員会委員でない審査員