「赤外線観測と惑星科学」研究会開催報告

臼井 文彦1, 大坪 貴文2

(**要旨**) 2014年10月8日~9日の2日間,神戸大学惑星科学研究センター(CPS)にて「赤外線観測と惑星科学」と題した研究会を開催した。これは、惑星科学・太陽系科学と天文学の研究者が一堂に会して、赤外線観測でこれまで得られた知見と現在の重要な科学課題をレビューし、将来重点的に取り組むべきテーマ・達成すべきテーマを明らかにすることを目標としたものである。研究会は世話人からの依頼講演のみとして、合計17名にそれぞれの分野のレビューから将来の計画、希望、期待などを含めて講演して頂いた。本報告では、この研究会の講演概要を紹介する。

2014年10月は1週間で2つの台風が本州に上陸するという荒天に見舞われたが、その合間を縫うように、10月8日~9日の2日間、神戸大学惑星科学研究センター(CPS)にて「赤外線観測と惑星科学」と題した研究会を開催した、世話人は、小林浩(名古屋大学)、臼井文彦(東京大学)、大坪貴文(東京大学)、木村宏(神戸大学)、芝井広(大阪大学)、山本哲生(神戸大学/CPS)の6名が務めたが、ここでは代表して臼井・大坪の2名がその内容について報告する。

惑星科学は、現在、様々な手法によって多方面から総合的に研究が進められているが、赤外線の波長域における天文観測は、その中でも欠くことのできない手法であるとともにユニークな位置を占めている。太陽系の惑星や小天体などは、一般に、太陽の散乱光を可視光で、熱放射を赤外線で見ることになるため、赤外線観測は対象天体の光学特性・熱特性を知るのに非常に有効である。また、赤外線の波長域には、分子・氷・鉱物など多様な物質の回転・振動バンドによる吸収や放射の特徴的なスペクトルが存在し、太陽系天体の構成物質をとらえるのに欠かせない波長域である。本格的な赤外線天文学が始まったのは1970年代からであ

るが、21世紀に入ってからも、地上の多くの望遠鏡に加え、Spitzer宇宙望遠鏡、赤外線天文衛星「あかり」、広域赤外線探査衛星WISE、Herschel宇宙望遠鏡などの赤外線衛星が貴重な観測結果を提供してきている。そして、現在進行中のDawnやRosetta、「はやぶさ2」などによる探査、JWST宇宙望遠鏡や超大型地上望遠鏡TMTなど、今後の大型望遠鏡により太陽系科学がさらに進展することが期待される。また、2020年代には日本の次期赤外線衛星SPICAなどの大型赤外線衛星が計画されている。SPICAに関しては、太陽系小天体観測グループ有志によって、これまでにいくつもの観測提案が練られてきているが、SPICAの本格的な始動の時期を迎えつつある今、赤外線観測が惑星科学に果たすべき役割について再度立脚点を明確にしようという気運が高まってきていた。

そこで、惑星科学・太陽系科学と天文学の研究者が一堂に会して、太陽系科学において赤外線観測でこれまで得られた知見と現在の重要な科学課題をレビューし、将来重点的に取り組むべきテーマ・達成すべきテーマを明らかにすることを目標として、今回の研究会を企画した、特にSPICAやその他の赤外線観測などで遂行すべき観測に関連した話題を軸として、広く討議・共有することを目的とした、研究会は世話人からの依頼講演のみとして、世話人5名の講演を除き、合

^{1.} 東京大学大学院理学系研究科

^{2.} 東京大学大学院総合文化研究科

計12名にそれぞれの分野のレビューから将来の計画, 希望,期待などを含めて講演していただいた.時間の ないところでの講演依頼にも関わらず,すべての方が 快諾してくださったことに深く感謝する.

本報告では,以下でこの研究会の講演概要を紹介する.

1. 「赤外線観測と惑星科学 | 研究会概要

1講演あたり質疑応答込み30分でプログラムを組んだが、実際には多くの活発な議論がなされたために予定時間を大幅に超過してしまった。また、会場設備の都合により一部円滑な運営ができない場面もあった。この点について、世話人として、講演者ならびに参加者の皆様にはお詫びを申し上げたい。

1.1 プログラム

「赤外線観測と惑星科学」研究会プログラム

日 時:2014年10月8日(水曜日)~9日(木曜日)

場 所:神戸大学惑星科学研究センター(兵庫県神 戸市中央区)セミナー室

参加者数:18名(1日目)・24名(2日目),各日ともテレビ会議接続あり(最大9局)

1日目(10月8日)—

芝井 広(大阪大学): 赤外線望遠鏡衛星SPICAと惑 星科学への期待

大坪貴文(東京大学): 赤外線観測で見た太陽系の氷ダ スト

日井文彦(東京大学):小惑星の赤外線観測

石原大助(名古屋大学):SPICAによるデブリ円盤の 研究

小林 浩(名古屋大学):惑星形成の歴史と天体のサイ ズ分布

玄田英典(東京工業大学):地球形成に関わる巨大衝突 とデブリ円盤

2日目(10月9日)-

本田充彦(神奈川大学): 星周円盤の氷ダスト観測

田口 真(立教大学):あかつき中間赤外カメラによる 金星大気の研究

関根康人(東京大学):惑星・衛星の有機物と氷の化学 長谷川直(JAXA宇宙科学研究所):SPICAによる TNOsの観測の検討

薮田ひかる(大阪大学):太陽系有機化学:隕石学と次世代赤外天文学の融合への期待

小林仁美(京都産業大学/京都虹光房):彗星の赤外線 観測から探る太陽系形成時の分子進化

日高 宏(北海道大学):太陽系天体の氷

和田浩二(千葉工業大学):小惑星における「衝突」を 見る

松浦周二(JAXA宇宙科学研究所):深宇宙探査機による黄道光の赤外線3D計測

谷川享行(産業医科大学):衛星系形成過程

木村 宏(神戸大学): The Organic-Rich Carbonaceous Component of Dust Aggregates in Circumstellar Disks: Effects of Its Carbonization on Infrared Spectral Features of Its Magnesium-Rich Olivine Counterpart

1.2 講演の概要

以下, 講演の概要をまとめる. 講演者名については 敬称略とさせていただく.

(1)1日目(10月8日)

芝井(大阪大学)は、計画されている次世代赤外線天文衛星SPICAの現状報告を、現在および将来の可視光・赤外線・電波の観測機器との比較を含めて報告した。現在、SPICAプロジェクトは、JAXAリードのもと、欧州宇宙機関(ESA)および欧州コンソーシアムとの密接な協力のもと衛星全体の開発検討が進められている。特に中間赤外線・遠赤外線の波長域において、圧倒的な性能を誇るSPICAが惑星科学・太陽系科学に大きい貢献を果たし、太陽系外惑星研究との密接化、宇宙生命探査に向けた連携が深められるとの期待を語った。

大坪(東京大学)は、「あかり」の全天サーベイ観測のデータから、黄道光放射を詳細に解析し、特に小惑星起源の微細構造などで従来広く使われてきたCOBE/DIRBEモデルの改訂が必要であることを示した。さらに、「あかり」の指向観測による5~12 μmの連続的な分光観測の結果から、黄道光のスペクトルが単一温度の黒体放射では再現できず、温度の高い成分が存在すること、また結晶質シリケイトのフィーチャが存在し、その空間領域による違いを将来の赤外線衛星観測でとらえることが重要であることを示した。

臼井(東京大学)は、IRAS、「あかり」、WISE といった赤外線全天サーベイ衛星の観測から得られた小惑星のサイズ・アルベドカタログと、軌道やスペクトル分類のデータを総合した大規模なデータを紹介した。これを用いて、スペクトル型ごとのサイズ・アルベドの関係の多様性、スペクトル型ごとの存在割合やアルベドの日心距離依存性について議論した。小惑星のサイズを決定することは、単にデータ数を増やすことだけではなく、太陽系における物質分布を考える上で必須なものであると述べた。

石原(名古屋大学)は、「あかり」・WISEを含む、可視光~赤外線での観測時期の異なる観測データを組み合わせてデブリ円盤の探査の結果を紹介した。これらのサンプルにおいて従来のデブリ円盤の標準理論では説明がつかず、非定常プロセスを検討する必要性があることを示した。また、惑星形成過程におけるシリケイトの進化の理解のためには、原始惑星系円盤からデブリ円盤にかけて、中間赤外線での分光観測の必要性を説いた。前者はSPICAを用いた空間分解や変光現象の検出を含めて統計的に理解をする必要が、後者はSPICAの中間赤外線の分光機能を発揮した観測が必要であると議論した。

小林(名古屋大学)は、小天体のサイズ分布を決定することが太陽系の歴史を明らかにすることにつながることを示した。惑星形成の際には暴走成長を起こすサイズが系の質量を決めるが、これはサイズ分布から明らかにできる。このサイズは微惑星サイズとしてよく議論されており、惑星形成理論の大問題である「微惑星形成」に対しての大きな手がかりとなる。小惑星帯では数100 kmとすでに観測的に明らかになっている

が、カイパーベルトでも今後の赤外線観測により決められることを説いた。また、小さい天体のサイズ分布は衝突破壊によって決まるベキ分布をしているが、数10m程度の天体ではYarkovsky効果が効くためこのベキ分布よりも数が減る。この減り方を決めることで、Yarkovsky効果の不定性を小さくすることになる。これは、我々の太陽系のような「淡い」デブリ円盤の理解に重要であることを述べた。

玄田(東京工業大学)は、地球型惑星形成とデブリ円盤の関係から、巨大天体衝突ステージにおいてどの程度の破片がばらまかれ、赤外超過としてどのように観測されるのかを、段階ごとにN体計算とSPH計算を組み合わせて評価を行った。この結果、巨大衝突で0.4地球質量ほどの破片がばらまかれ、それによって10⁸年にわたってデブリ円盤が維持され、赤外超過として観測される可能性を示した。さらに、分光観測による長期モニタリングで、惑星形成段階でのデブリの生成・消滅といった動的プロセスを追跡することが重要であることを述べた。

なお、1日目の夜は皆既月食で、神戸市内でも赤銅 色の月を楽しめたことを記しておく.

(2)2日目(10月9日)

本田(神奈川大学)は、星周円盤中の H_2O 氷に関して、非晶質氷から結晶質氷への遷移をとらえることが分子雲から太陽系に至る氷ダストの熱史の理解に重要であることを述べた。これには、特に44、46、62 μ mのフィーチャが有効なプローブとなるが、ISO以来40 μ m帯での分光観測は行われておらず、JWSTでも観測できないため、将来のSPICAなどに期待が寄せられる。また原始惑星系円盤のスノーラインの位置をとらえる



図1:研究会の様子.

ために、中間赤外線・遠赤外線の水蒸気輝線が重要であり、その観測可能性について議論がなされた.

田口(立教大学)からは、金星探査機「あかつき」の中間赤外カメラによる金星の観測結果について紹介があった。「あかつき」は2010年12月に金星の夜側を、2011年3月に昼側を観測した。中間赤外線でみた雲はモデルよりも勾配が急になっていることがわかるなど、雲の分布をとらえるのに有効である。このカメラは非冷却のマイクロ・ボロメータアレイ検出器(UMAD)を搭載しているが、冷却が不要なので衛星搭載に幅広く活用され、今後の応用も期待されている。

関根(東京大学)からは、太陽系天体のハビタビリティに関し、エネルギー、材料、場(溶媒・物質循環)、という3つのキーワードが提案された。今後ターゲットとして、エウロパ・エンセラダス・タイタンなどの衛星が有望である。プリューム活動の時間変化や希薄大気成分の同位体観測は重要であるが、高空間分解・高分散分光ではALMAによる地上観測が現実的であると予想される。大気中の有機エアロゾルなどの微量成分について化学構造・光学特性をとらえるために、中間赤外線・遠赤外線分光観測が有効であることが示された。

長谷川(JAXA宇宙科学研究所)は、SPICAによる太陽系外縁天体の観測の詳細検討の状況を報告した. 現時点で想定されている観測装置の感度をもとに見積ると、1000個以上の既知の外縁天体のほとんどすべてについて、測光観測からサイズ・アルベド・熱慣性を決定し、基礎的な物理量が決められること、さらにその約半分については分光観測によって組成を調べられることを示した、外惑星の衛星についても、既知のものはすべて測光観測からサイズ・アルベドを求めることができる。このような天文学的手法は、探査機によるその場観測の結果と結び付けることで、現在の太陽系の姿を明らかにする手がかりとなることを議論した。

薮田(大阪大学)は、滞在先のカナダから、現地で夜遅くにもかかわらず講演していただいた。小天体有機物分析化学研究の過去45年の変遷を振り返り、超微量分析に顕微分析が加わることで、分析対象が生体関連分子の探索から、より始原的な組成の理解へと発展してきたことをまとめた。その上で、近年の局所微小領域分析によって、超炭素質南極宇宙塵の有機化学的・

鉱物学的な総合理解が進んでいることを紹介した. そして, 今後赤外線観測と連携することで, 原始惑星系円盤や小天体形成初期の物質進化の理解へと迫れる可能性を展望した.

小林(京都産業大学/京都虹光房)は、彗星コマ中の分子の赤外線高分散分光が、太陽系の素材となった分子雲の温度や原始太陽系円盤中の化学反応プロセスの解明にとって有効であること、特にD/H比、¹⁴N/¹⁵N比など同位体比を調べることの重要性を示した。この観測のためには、既存の分光装置では圧倒的に感度不足であり、SPICAなど将来の赤外線衛星での高分散分光観測が不可欠であることを提案した。

日高(北海道大学)は、氷Ih、氷XIの構造・特性について示し、氷Ihの水素原子が秩序化した相である氷XIの太陽系内における存在環境について示した、氷Ih、氷XIの判別には遠赤外線領域(100-350 cm⁻¹)の分光観測が有効であるが、温度環境の点ではカイパーベルト天体や氷衛星にこうした氷が存在する可能性が想定されるため、そうした遠方天体の赤外線衛星による分光観測の重要性が議論された。

和田(千葉工業大学)は、クレーターの形状や密度、あるいは小惑星の形状を手がかりに探る太陽系の衝突進化史について紹介した。探査機で近づいた上での観測では十分な数のサンプルを得ることは難しいため、赤外線による観測がどの程度有効であり、小惑星の形状やクレーターの存在に制限がつけられるか議論がなされた。また、将来の衝突探査と赤外線衛星の連携による「アクティブ衝突実験」の可能性についても提案がなされた。

松浦(JAXA宇宙科学研究所)は、これまでのCOBE/DIRBEやロケット実験CIBERによる黄道光の赤外線観測の結果をレビューしつつ、地球近傍からの黄道光観測では日心距離2AU以遠の惑星間塵の分布を制限するのは難しいため、地球軌道および黄道面を離れた深宇宙からの黄道光観測が重要であることを示した。トロヤ群小惑星をターゲットとして現在検討されているソーラー電力セイル探査機であれば、トロヤ群だけでなくクルージングフェーズを利用した黄道光の立体的観測やその場計測などが可能である。

谷川(産業医科大学)は、衛星系形成過程に関して、Gas-starved disk modelとSpreading tidal-disk modelの2つの有望なモデルについてレビューを行った、ど

ちらのモデルにも、海王星系や木星系をうまく説明できないなど、まだクリアすべき問題点はいくつかあるが、確実に形成理論が進展している様子が伺えた。また土星のリング内でのmoonletの形成の可能性について紹介があり、観測の重要性が議論された。

木村(神戸大学)は、彗星やデブリ円盤の赤外線スペクトルに見られるシリケイト・フィーチャを再現するダスト・モデルについて最新の成果を紹介した。これまで、シリケイト・フィーチャの形状やピーク波長がシリケイト・ダスト粒子の形状や温度によって変化することが知られているが、それよりも、有機物の体積比や有機物の炭化度がピーク波長を決定する上で重要なパラメータであることを示した。彗星やデブリ円盤のさらなる赤外線分光観測が重要となるが、モデルによる結果の解釈にとって考慮すべき重要な観点を提供した。

2. まとめ

以上のように、1日半という短い期間ではあったも のの、幅広い視点をカバーしたとても盛りだくさんの 内容で、非常に活発な議論が行われた大変有意義な研 究会となった。この内容を見てもわかるように、惑星 科学研究は急速に広がりをみせているが、これまでそ のテーマは、日本では必ずしも赤外線観測と十分有機 的に連携した形にはなっていなかったように思われる. 「はやぶさ」をはじめ、日本でも探査機による惑星科 学は着実に進展を見せているが、探査機によるその場 観測だけでは多数存在する天体を網羅的に調べること は事実上不可能である. その意味では. 太陽系の歴史 を広く俯瞰的に理解するために、望遠鏡による(太陽 系だけでなく系外惑星系も含めた)様々な天体の天文 学的観測がこれからも有効であることに変わりはない. SPICA をはじめ、日本の将来の赤外線衛星計画の実 現は2020年代以降とまだ少し先のことではあるが. その頃に赤外線観測と日本の惑星科学研究が密接にリ ンクし実りある成果をもたらしてくれるためにも、こ の研究会がきっかけとなり将来へ続いていけばと期待 している.

今回は立案から開催までの期間が短く一般講演なしの開催となってしまったが, 是非講演したかったという声も開催後に複数いただいた. 今後の開催予定は未

定であるが、次回以降は是非幅広く講演を募り、惑星 科学からの面白いアイデアを取り入れた赤外線観測研 究を展開していければと考えている.

なお、本研究会は惑星科学研究コンソーシアムの活動の一環として開催されました。研究会当日の講演資料に興味をお持ちの方は、inquiries@cps-jp.orgまでお問い合わせください。開催に際しては神戸大学惑星科学研究センター(CPS)からご支援をいただきました。この場を借りてお礼を申し上げたいと思います。