

「サイズ分布ビッグピクチャー研究会」開催報告

長谷川 直¹, 野沢 貴也², 平下 博之³, 中村 昭子⁴,
臼井 文彦⁴, 和田 浩二⁵, 大坪 貴文⁶

1. はじめに

2016年2月11日と2月12日の2日間にわたり、東京スカイツリータウンソラマチ8階にある千葉工業大学東京スカイツリータウンキャンパスにて、「サイズ分布ビッグピクチャー研究会」を開催した。

我々の住む宇宙におけるさまざまな場、すなわち、太陽系・系外惑星系・星間空間・星形成領域・銀河系・系外銀河・銀河間空間において、固体物質がどのような起源であり、どのように進化していくかを知ること、は、宇宙・太陽系の形成進化史を理解する上で非常に重要である。固体物質は、宇宙の環境に応じて様々な特徴的なサイズ・サイズ分布を持って存在するため、それらのサイズ分布からダスト・微惑星・小天体の起源や進化に迫る手がかりが得られる。

比較的良好に知られている太陽系の火星・木星間のメインベルト領域については、直径1000 kmのケレスから10 nmの β メテオロイドサイズまで、固体物質が連続的に存在している。しかしその範囲としては、直径にして 10^{14} というダイナミックレンジを持つため、その計測方法は望遠鏡によるリモート観測から探査機によるその場計測まで多岐にわたり、さらにサイズ分布を表す単位すら異なっている。そのため、固体物質のサイズ分布をひとつの線として繋ぐことができておらず、太陽系科学の中でも研究分野として分断された状態にある。そこで、まず研究会の柱の1つとして、

太陽系内におけるダスト・小惑星のサイズ分布について、観測事実に関する統一的な描像を得ることを研究会の1つの目的とした。

研究会のもう1つの柱は、サイズ分布を変化させる要因としての、惑星の形成進化過程における衝突成長・破壊過程の最新の理論・室内実験の知見を取り入れることである。さらに太陽系をも飛び出して、星間物理学や銀河進化学におけるダストサイズ分布の起源・進化の理論・観測を俯瞰した議論を行うことも目的とした。これによって、固体物質の進化に共通する物理過程を洗い出し、星間空間ダスト生成から太陽系形成を一つのシナリオで結びつけることができる。太陽系内におけるダスト・天体サイズ分布はどういう物理過程を反映しているか、銀河・星間ダストと共通する物理過程は何か、太陽系ダストの性質に星間ダストの進化はどれくらい反映されるのか等、マルチスケールでの分野横断的な議論も研究会の目的とした。

2. 講演内容

講演内容プログラムについて下記に示す(敬称略)。

2月11日(木・祝)――

【太陽系内サイズ分布の観測】

吉田二美(国立天文台)

・小天体サイズ分布観測(近地球～TNOs各領域)

諸田智克(名古屋大学)

・探査機による太陽系天体表面のクレーターサイズ分布

石黒正晃(ソウル大学校)

・光学観測による太陽系内ダスト観測

1. 宇宙航空研究開発機構

2. 国立天文台

3. 台湾中央研究院

4. 神戸大学

5. 千葉工業大学

6. 東京大学

hasehase@isas.jaxa.jp

大坪貴文(東京大学)

- ・黄道ダスト・彗星ダストの中間遠赤外線観測

植田高啓(東京工業大学)

- ・黄道光の非対称性から推定する惑星間塵のサイズとその起源

平井隆之(宇宙航空研究開発機構)

- ・探査機によるダストその場サイズ分布計測

阿部新助(日本大学)

- ・可視光・大型レーダー流星観測による太陽系メテオロイドのサイズ分布

家 正則(国立天文台)

- ・衝突励起禁制線の物理を用いた流星サイズの測定

【室内実験によるサイズ分布計測】**中村昭子**(神戸大学)

- ・室内衝突破壊実験によるサイズ分布測定

西田政弘(名古屋工業大学)

- ・超高速飛翔体衝突時に発生する破片サイズ分布

道上達広(近畿大学)

- ・衝突破片形状分布～100 μm サイズから一枚岩の小惑星サイズ(100m)まで

門野敏彦(産業医科大学)

- ・衝突破壊による破片サイズ分布とクラック分布について

2月12日(金)—————

【太陽系・惑星系のサイズ分布の理論・観測】**藤原英明**(国立天文台)

- ・デブリ円盤ダストの観測

和田浩二(千葉工業大学)

- ・ダスト成長素過程とサイズ分布

小林 浩(名古屋大学)

- ・惑星形成における衝突過程により決まる天体のサイズ分布

【星間空間・超新星・銀河のサイズ分布観測】**尾中 敬**(東京大学)

- ・星間ダストサイズ分布

木村 宏(神戸大学)

- ・局所星間雲ダストのサイズ分布や物理特性

野沢貴也(国立天文台)

- ・超新星ダストのサイズ分布

平下博之(台湾中央研究院)

- ・銀河・星間空間ダストのサイズ分布進化

井上昭雄(大阪産業大学)

- ・銀河間空間におけるダストサイズ分布

各講演内容について、下記に示す。

吉田二美(国立天文台)は小天体サイズ分布観測(近地球～TNOs各領域)について講演をした。特に2012年に新潟で開催されACM2012以降に進展のあった太陽系形成モデルの概略と2012年以降に進展のあった木星トロヤ群やTNOsのサイズ分布についての研究の紹介が行われた。サイズ分布と色の観点から木星・海王星トロヤ群や一部TNOsは同一起源の可能性が示唆されること、TNOsは各グループ内に色が同程度に分散されており力学的に混合されていると思われること、小惑星のQ-typeは小惑星帯領域でなく、近地球領域に来てから惑星との近接効果によって表層がリフレッシュされたものが多いと思われること等を紹介した。

諸田智克(名古屋大学)は探査機による太陽系天体表面のクレーターサイズ分布について講演をした。クレーター記録の位置づけと基礎についてまず解説し、月・火星のクレーターサイズ分布から太陽系内側の衝突天体は同一起源であり、過去40億年で衝突天体の起源は変化していないこと、外惑星衛星のクレーターサイズ分布は内惑星と異なり、これは衝突天体の違いを反映していると考えられていること等を紹介した。

石黒正晃(ソウル大学校)は光学観測による太陽系内ダスト観測について講演をした。まず、ダスト雲形状の光学観測による軌道決定法から彗星・崩壊小惑星から放出されたダストのサイズとその分布を推定する方法を話した。また、当該手法を用いてのこれまでの研究をまとめ、彗星から10 cm～ μm サイズのダストが放出されていること、それらの微分サイズ分布の冪が $\beta = 3.5$ に近いこと、崩壊小惑星のダスト供給で現在の黄道光を説明することが難しいこと、ロゼッタ探査機搭載カメラによる直接ダスト計測と光学観測による推定法が一致すること等を紹介した。

大坪貴文(東京大学)は黄道ダスト・彗星ダストの中間遠赤外線観測について講演をした。中間遠赤外線観測によるアプローチから、彗星シリケイトダストの主要なサイズはsub- μm 程度であること、黄道光の構成粒子は100 μm 以上であること等を示した。

植田高啓(東京工業大学)は黄道光の非対称性から推定する惑星間塵のサイズとその起源について講演をした。観測データと小惑星・彗星から放出されたダストの軌道計算、温度プロファイルを付き合わせて、黄道光放射は300 μm 以上の彗星起源のダストが支配的であることを示した。

平井隆之(宇宙航空研究開発機構)は直径数十 μm 以下のダストを対象とした探査機によるその場サイズ分布計測について講演をした。その場ダスト計測についてその歴史を紹介し、過去の探査機・ダスト計測器の種類について1つ1つ丁寧に紹介した。地球近傍でのその場計測結果は、月サンプルからだけではわからなかった数 μm 以下のダスト分布に制約を与えた。一方、惑星間空間でのその場計測は、10例に満たないものの水星軌道から冥王星軌道まで幅広くカバーし、各領域におけるダスト分布の構造を明らかにした。また、これまで計測されてきたその場ダスト計測器の短所を開する為の新たな計測方法と、近い将来の探査機に搭載されるダスト検出器によって行われる探査と期待されるサイエンスの成果についても紹介した。

阿部新助(日本大学)は可視光・大型レーダー流星観測による太陽系メテオロイドのサイズ分布について講演をした。レーダー流星観測による計測方法を紹介し、地球に飛び込んでくる0.1~10 mmのサイズの流星とその幕についての初期成果を紹介した。

家正則(国立天文台)は衝突励起禁制線の物理を用いた流星サイズの測定について講演をした。M31外部ハロー領域を撮像中に偶然写った複数トラックを基に、衝突励起の禁制線・流星速度・中性酸素原子密度から

トラックの衝突断面積を求め、コラムの直径が数mmであることを明らかにした。

中村昭子(神戸大学)は室内衝突破壊実験によるサイズ分布測定について講演をした。室内実験による衝突破片のサイズ分布の冪乗について、さまざまな物質・空隙率・衝突履歴・衝突条件の観点から過去の実験事例を紹介した。サイズ分布の冪乗は複数回衝突でも冪部分の形状はエネルギー密度が同じなら同様になること、衝突速度があがると冪が急になる傾向にあること(秒速1 km以下の衝突だと β が2.8程度、秒速4 km程度だと β が3.5未満、秒速10 km以上だと β が3.5以上になることもある)等について紹介した。

西田政弘(名古屋工業大学)は超高速飛翔体衝突時に発生する破片サイズ分布について講演をした。特にアルミニウム合金についてのサイズ分布が紹介された。衝突速度・衝突角度・衝突材質によるサイズ分布の変化について示した。

道上達広(近畿大学)は~100 μm サイズの天体表面粒子から10 kmの小惑星サイズまでの衝突破片形状分布について講演をした。室内実験の破片形状比と100 μm から10 kmくらいまでの粒子~小惑星の形状比が類似していること等を紹介した。

門野敏彦(産業医科大学)は、原理的な側面からなぜ衝突破壊によってこれまで報告されているような破片サイズ分布になるのかについて講演をした。衝突破片のサイズ分布にはある特徴的な形があり、その形は指数関数と冪乗の分布があること、指数関数はランダム分割によるポアソン分布が起因であり、液体・リング状・棒状・金属・高空隙率の破壊によく見られること、



図1：研究会の集合写真。

冪乗分布はクラック分布がフラクタル的に成長することが起因と考えられること、脆性材料のサイズ分布については最大破片領域の指数関数部と微小破片領域の冪乗分布部の組み合わせであることを紹介した。

藤原英明(国立天文台)はデブリ円盤ダストの観測について講演をした。すばる望遠鏡やあかりで観測されたデブリ円盤について紹介し、それらのサイズ分布を示した。系外デブリ円盤のTNOs域は μm - mm サイズのダストが支配的であること、系外デブリ円盤でも小惑星帯領域にダストを持つ天体がほとんど見つからないこと、小惑星帯領域にダストを持つ系外デブリ円盤はFGK型だと $1\ \mu\text{m}$ くらいのダストが地球領域くらいに存在すること(太陽系のサイズ分布とは矛盾はしないこと)等を示した。

和田浩二(千葉工業大学)はダスト成長素過程とサイズ分布について講演をした。まず微粒子合体の基本的な物理について紹介し、それを踏まえた原始惑星系円盤内の微粒子合体のシミュレーション結果について紹介した。ダストサイズ分布の進化として、成長可能速度ではダストのサイズ差は拡大し、破壊速度では逆に拡大しないこと、ダストの成長において、まず低密度で大きくなり、次にガス抵抗による圧縮、自己重力による圧縮で $10\ \text{km}$ サイズまで成長ができることを紹介した。

小林浩(名古屋大学)は惑星形成における多発衝突により決まる天体のサイズ分布について講演をした。天体の衝突断面積・惑星重力・太陽輻射圧・ポインティングロバートソン効果・ヤルコフスキー効果等が惑星系内の衝突破壊進化で重要な役割を果たすことが示し、具体的には太陽系小惑星帯において、 $100\sim 1\ \text{km}$ 程度で衝突断面積が、 $100\ \text{m}\sim 1\ \text{m}$ 程度でヤルコフスキー効果が、 $100\sim 1\ \mu\text{m}$ でポインティングロバートソン効果が、 $1\ \mu\text{m}$ 以下で太陽輻射圧がそのサイズ分布に深く寄与することを紹介した。

尾中敬(東京大学)は、星間空間の減光から導出される星間ダストサイズ分布について講演をした。星間空間中には $10\ \text{nm}\sim 1\ \mu\text{m}$ サイズのダストが存在すること、 $10\ \text{nm}\sim 0.1\ \mu\text{m}$ のダストのサイズ分布は $\beta=3.2\sim 3.6$ で、衝突カスケードによる分布と一致していること、このサイズ分布をもつダストは超新星からは放出されないで、星間空間での破壊によってもたらされるべきであることを示した。

木村宏(神戸大学)は局所星間雲ダストのサイズ分布や物理特性について講演をした。ユリシーズ探査機で計測された太陽系近傍にあるローカルバブル星間空間起源のダストのサイズ分布を紹介し、また、その観測されているダスト組成についての理論的な説明についても紹介した。

野沢貴也(国立天文台)は超新星内で生成されるダストとそのサイズについての理論的な研究について講演をした。超新星は宇宙空間に存在するダストの主要なソースの一つであり、超新星でのダスト形成はガス濃度に依存して数 $\text{\AA}$ から数 μm サイズのダストが形成されること、リバース衝撃波によっておよそ $0.1\ \mu\text{m}$ 以下のサイズは破壊されるため、超新星からは $0.1\ \mu\text{m}$ から数 μm のダストが主に宇宙空間に放出されることを示した。

平下博之(台湾中央研究院天文及天文物理研究所)は銀河・星間空間ダストのサイズ分布進化について講演をした。講演者らのサイズ分布進化モデルを基に、濃い星間物質(分子雲など)でのダストの成長・合体と、星間物質の拡散成分でのダストの破壊・破砕が、ダスト量だけでなく、ダストサイズ分布を決定づけていることを紹介した。星形成と関連して、分子雲コアに μm サイズ以上のダストが存在する観測結果にも触れた。

井上昭雄(大阪産業大学)は銀河間空間におけるダストサイズ分布について講演をした。銀河間ダストの観測状況と理論予測およびそのサイズについての紹介をおこなった。銀河間空間では $0.1\ \mu\text{m}$ 以下のサイズのダストは破壊され、存在しているのは $0.1\ \mu\text{m}$ 以上のダストであることを紹介した。

3. まとめ

今回は惑星科学・天文学・宇宙工学分野までさまざまな背景を持つ人々が、サイズ分布というキーワードを元に参加した(図1)。今回の研究会で、太陽系内におけるサイズ分布について、観測事実に関する統一的な描像を得ることができ、また、室内実験によるアプローチからサイズ分布についての現象そのものに迫ることができ、宇宙におけるダスト生成から太陽系形成後の固体物質のサイズ分布進化までの道筋を辿ることができた。

特に、ダスト生成から星間空間のサイズは数nm～数 μm のサイズであること、ダストが数 μm 以上に成長するのは分子雲コア～原始太陽系円盤といった場所であること、デブリ円盤では数mm程度のダストが存在し、破壊による生成を考えるとmmサイズ以上のダストの存在の可能性があること、太陽系内のサイズ分布計測においてその冪が一致していること、サイズ分布には衝突だけでなく光子が塵や小天体に及ぼす力でも変化すること、衝突破壊のサイズ分布は指数関数+冪乗分布の形であらわすことができること、が主に研究会を通して再確認した項目である。

研究会の資料はhttp://komatta.astron.s.u-tokyo.ac.jp/size_dist_ws/にある。パスワードの保護がされているため、研究会参加者以外でご興味のある方は研究会世話人(size.dist.ws@gmail.com)までお問い合わせくださるようお願いしたい。

研究会開催に際して、世話人の1人(長谷川)の細かい講演指定に応じて発表を行っていただいた講演者の方々、研究会に参加し研究会を盛り上げてくださった参加者の方々に心から感謝申し上げたい。また、千葉工業大学惑星探査研究センターのご厚意により、東京スカイツリーに隣接したアクセスなどに利便性の高い魅力的な会場をお借りすることができたことと、大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台研究集会開催補助資金の補助をいただいたことも実り多い研究会開催に本質的に重要であった。本研究会のウェブページ開設、および上述の研究会の資料の掲載には東京大学大学院理学系研究科天文学専攻尾中研究室のウェブサーバをお借りした。これらの機関・補助にも深く御礼申し上げる。