



Study of impact ejecta from small bodies in the solar system

Yamamoto, Satoru

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

1999-03-31

(Date of Publication)

2015-06-11

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1907

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3156308>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001907>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	やまもと さとる 山 本 聡 （大阪府）
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	博い第104号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与の日付	平成11年3月31日
学位論文題目	Study of impact ejecta from small bodies in the Solar System （太陽系小天体における衝突現象および衝突放出物の研究）

審査委員	主査 教授 向 井 正	
	教授 松 田 卓 也	教授 伊 東 敬 祐
	助教授 中 村 昭 子	

論文内容の要旨

月、小惑星やエッディワース・カイパーベルト天体（EKO）などの大気を持たない太陽系小天体の表面では、宇宙空間を飛翔しているメテオロイドの絶え間ない高速度衝突が起こっている。これらの衝突によって生じたクレーターからの放出物は、惑星間塵となる。また、小天体間でおこる相互衝突は、多量の衝突放出物を惑星空間に放出し、彗星とならんで、惑星間塵の重要な起源として考えられている。本論文では、これらの衝突放出物の力学的特性について研究を行った。

本論文は大きくわけて二つのパートからなる。最初のパート（2，3章）では、月からの衝突放出物に関する研究を行った。太陽系内を飛翔しているメテオロイドが月表面に衝突すると、クレータが形成され、同時に大量の放出物（lunar ejecta）が生じる。これらの放出物が月の脱出速度を越えておれば、月の重力圏を出て地球に降り注ぐ可能性がある。地球近傍におけるダストや人工のスペースデブリの研究において、lunar ejecta の寄与を検討することは重要である。従来の lunar ejecta の研究では、月表面を堅い物質と仮定して（バルク近似）、衝突現象や放出物の生成について考察されてきた。しかし、実際の月、小惑星等の小天体表面は、レゴリス層と呼ばれる微粒子の層で覆われている。にもかかわらず、従来の室内衝突実験ではレゴリス層に対する研究は乏しかった。

そこで、第2章では、宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃を使ってレゴリス層に対する室内衝突実験に取り組んだ。二段式軽ガス銃を用いて高速度（ $\sim 4 \text{ km/s}$ ）に加速したナイロン球を、レゴリス層に模擬した表面構造を持つターゲット（シリケート物質の粉体層）に衝突させる。放出物を測定するために、ターゲットのまわりに薄いアルミシートを張っておいた。衝突放出物のうち速度がある値以上のものだけがアルミシートを貫通する。アルミシートの厚さを変えて実験を繰り返すことで、放出物の速度分布を見積もることができる。その結果、レゴリス層の衝突現象では（1）高速衝突で生成される塵のフラックスが、バルク近似から予想されていた値よりも低いこと、（2）前方方向への jet 状の放出が存在すること等が判ってきた。これらの成果は、既に論文にまとめて掲載されている（Yamamoto & Nakamura, 1997, *Icarus*, 128, 160–170）。

第3章では、2章で得られた結果を使って、レゴリス層からの lunar eject の放出量を定量的に見積もった。その結果を使って、レゴリス層からの lunar ejecta の生成量は、バルク近似の場合と比べて多くなることが定量的に分かった。ところで、lunar ejecta の地球近傍での軌道進化においては、そのサイズが重要となる。そこで、レゴリス層に対する実験で得られた結果をもとにして、レゴリス層からの lunar ejecta のサイズ分布について研究を行った。従来、行われてきた月を硬い表面としたモデルでは、大きさが $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の lunar ejecta は月重力圏を脱出しないとされてきた。しかし、レゴリス層を考慮した場合、 $10\text{ }\mu\text{m}$ ～数百 μm の lunar ejecta が月重力圏を脱出して、地球近傍の惑星間塵に寄与するという結果が得られた。この成果は論文としてまとめられて、現在 *Astron. & Astrophys.* に投稿中である (Yamamoto & Nakamura, 1998, submitted to *Astron. & Astrophys.*)

二つ目のパート (4, 5, 6, 7章) では、エッディワースカイパーベルト (EKB) 起源の衝突放出物 (ダスト) について研究を行った。EKB 領域では、小惑星同様に EKO 間の衝突が頻繁におこなわれていると考えられている。従って、EKO の研究を行う上で、衝突現象を考慮することが必要となっている。また、多量の星間塵が太陽系に流入しており、太陽系外縁領域において、これらの星間塵が EKO の表面に連続的に衝突していると予想される。

第4章では、これらの星間塵と EKO 天体の衝突現象について検討した。これまでに行ってきたレゴリス層に対する衝突実験の成果を応用して、これらの領域での衝突放出物に生成量を見積もった。その結果、星間塵の衝突による塵の生成量は非常に大量であり、EKO 天体間の衝突で生成される量と同程度であるという結果が得られた。星間塵の衝突速度は非常に高速 (約 26 km/sec) であるため、EKO の表面構造の衝突進化においても、星間塵の入射は重要な役割を果たすことが明かとなった。これらの成果は、論文にまとめて掲載されている (Yamamoto & Mukai, 1998, *Astron. & Astrophys.* 329, 785–791)。

EKO 相互衝突および星間塵との衝突により生成されたダストは、太陽系外縁部でダスト雲を形成していると思われる。また、ポインティング・ロバートソン効果により、内惑星領域まで到達するものもあると予想される。理論的に予想されるダスト生成量が多量であるにもかかわらず、過去における赤外線観測や探査機測定で EKB 起源のダストの存在は確認されていない。そのため、EKB 起源ダストの観測および測定可能性を検討することが重要である。また、理論的アプローチの結果と実際の観測データの比較検討により、まだ観測データが十分でない EKO の組成や空間存在量などについて制限を与えることができる。

そこで、第5章では惑星検査機による内惑星領域での測定可能性を検討した。EKO 天体間および星間塵との衝突によって生成されたダストは、太陽放射圧により EKO 天体とは異なる軌道をとる。また放出速度が速い場合も軌道が変化する。軌道変化が大きい場合、ダストは太陽に対してケプラー軌道を取ることができず、太陽系を脱出してしまう。一方、ケプラー軌道をとるダストは、ポインティング・ロバートソン効果の影響により太陽方向にスパイラル状に落ちていく。これらの現象について定量的に明らかにするために、EKB ダストの太陽放射圧の大きさを計算した。また、氷の衝突放出物の速度分布の結果を用いて、EKO から放出された直後のダストの軌道変化を解析的に見積もった。次に、これらのダストがポインティング・ロバートソン効果で木星軌道の内側に来たときの軌道要素を解析的に検討した。その結果、太陽放射圧が大きくなるようなダスト (ミクロンサイズ) は放出直後に大きな軌道離心率を持つが、EKB 領域か木星軌道付近に来るまでに、ポインティング・ロバートソン効果によってほとんど円軌道になるという結果が得られた。そのため内惑星領域における検査機で測定されるダストの軌道要素からは、EKB 起源ダストを同定することは難しいと予想され

る。これらの結果は月惑星シンポジウム学会収録集におさめられている (Yamamoto & Mukai, *Proc. of the 30th ISAS Lunar and Planetary Symposium*, 134–137, 1997)。

第6章では、EKB 領域でのダスト雲からの熱輻射量について計算を行った。また、赤外線天文惑星による地球上空での赤外線量の観測の可能性について検討した。ここでは、EKB ダストとして彗星起源ダストを考えた。Maxwell–Garnett mixing rule を用いて、氷とシリケート粒子の混合ダストについて光学定数を計算し、Mie 理論に従って、ダスト雲中のダストの平衡温度およびその熱輻射量を計算した。また、観測可能性について検討するために内惑星領域に存在する黄道面ダストからの熱輻射量と比較を行った。その結果、近、中間赤外波長領域では、内側の黄道光が卓越しているため、赤外線天文衛星による EKB ダスト雲の直接観測は難しいことがわかった。一方、EKO は比較的黄道面内に集中していると考えられているので、遠赤外およびサブミリ波長領域では、黄緯方向にそった観測を行うことで EKB ダスト雲を観測できる可能性があることが分かった。これらの成果は、論文にまとめて掲載されている (Yamamoto & Mukai, *Earth Planets Space*, 50, 531–537, 1998)。

これまでの研究では、実際に観測で見つかっている30–50AU に存在する EKO を対象として検討が行われてきた。一方、50AU より遠方でも太陽系初期に形成された微惑星が残っていると考えられている。EKB 起源のダスト雲の観測可能性についての研究をおこなう上で、30–50AU に存在する EKO だけでなく、50AU より遠方からのダストの寄与についても考慮する必要がある。そこで、第7章では、太陽系形成論に従って、50AU より遠方に存在する EKO の空間分布を見積もった。次に EKO 間の相互衝突および星間塵衝突を考慮してダスト生成率を見積もった。次に EKO 間の相互衝突および星間塵衝突を考慮してダスト生成率を見積もった。また、放出後のダスト間の衝突進化について検討を行い、EKB ダスト雲の空間およびサイズ分布を導出した。得られた結果をもとに、EKB ダスト雲からの熱輻射量について再検討を行った。その結果、50AU より遠方の EKO 起源ダストを考慮しても、EKB ダスト雲の熱輻射量は内側の黄道光からの量より下回るという結果が得られた。従って、依然赤外線天文衛星による EKB ダスト雲の直接観測は難しいことがわかった。これらの結果は月惑星シンポジウム学会収録集におさめられている (Yamamoto & Mukai, *Proc. of the 31st ISAS Lunar and Planetary Symposium*, 156–159, 1998)。

論文審査の結果の要旨

月、小惑星やエッディワース・カイパーベルト天体 (EKO) などの大気を持たない太陽系小天体の表面では、宇宙空間を飛翔しているメテオロイドの絶え間ない高速度衝突が起こっている。これらの衝突によって生じたクレーターからの放出物の一部は、惑星間塵となる。また、小天体間でおこる相互衝突は、多量の衝突放出物を惑星間空間に放出し、彗星とならんで、惑星間塵の重要な供給源として知られている。本論文では、これらの衝突放出物の放出過程や、その後の力学的振る舞いについて詳細に検討している。

1章のイントロダクションに続いて、2章では、宇宙科学研究所の2段式軽ガス銃を使った実施された、レゴリス層に対する室内衝突実験の結果が述べられている。二段式軽ガス銃を用いて高速度(～4 km/s)に加速したナイロン球を、レゴリス層に模擬したターゲット(シリケート物質の粉体層)に衝突させた。ターゲットのまわりに薄いアルミシートを張り、アルミシートの通過痕のサイズ分布の測定から、アルミシートを貫通する放出物の速度分布を見積もった。

3章では、2章で得られた結果を使って、レゴリス層からの lunar ejecta の放出量を定量的に見積

もった。その結果、レゴリス層からの lunar ejecta の生成量は、バルク近似の場合と比べて多くなることが定量的に分かった。また、従来、行われてきた月を硬い表面としたモデルでは、大きさが $1\mu\text{m}$ 以上の lunar ejecta は月重力圏を脱出しないとされてきた。しかし、レゴリス層を考慮した場合、月重力圏を脱出した $10\mu\text{m}$ ～数百 μm の lunar ejecta が、地球近傍の惑星間塵に混在するという予測が与えられた。

4章では、冥王星軌道の外側に広がるエッディワース・カイパーベルト天体（EKB）起源の衝突放出物（ダスト）について検討された。ここでは、近年、飛翔体による測定から明らかになった太陽系に流入する星間塵と、EKO天体の衝突現象が取り上げられている。2章で挙げたレゴリス層に対する衝突実験の成果に基づいて、エッディワース・カイパーベルト領域での衝突放出物の生成量が見積もられた。その結果、星間塵の衝突による塵の生成量は非常に多量であり、EKO天体間の衝突で生成される量と同程度であるという結果が得られた。星間塵の衝突速度は非常に高速度（約 26km/sec ）であるため、EKOsの表面構造の衝突進化においても、星間塵の入射は重要な役割を果たすことが明らかとなった。

5章では、惑星探査機を用いて EKB 起源の衝突放出物（ダスト）を測定する可能性が検討された。EKO天体間および星間塵との衝突によって生成されたダストは、太陽放射圧により EKO天体とは異なる軌道をとる。軌道変化が大きい場合、ダストは太陽系を脱出してしまう。一方、ケプラー軌道をとるダストは、ポインティング・ロバートソン効果により太陽方向にスパイラル状に落ちていく。これらの現象について定量的に明らかにするために、EKBダストに働く太陽放射圧の大きさが計算された。また、氷の衝突放出物の速度分布の結果を用いて、EKOから放出された直後のダストの軌道変化が解析的に見積もられ、これらのダストがポインティング・ロバートソン効果で木星軌道の内側に来たときの軌道要素が推定された。その結果、太陽放射圧が大きくなるようなダスト（ミクロンサイズ）は、放出直後に大きな軌道離心率を持つが、EKB領域から木星軌道付近に来るまでに、ポインティング・ロバートソン効果によってほとんど円軌道になるという結果が得られた。小惑星起源のダストも良く似た起動要素を持つので、軌道要素の測定から、EKB起源ダストを固定することは難しいことが明らかにされた。

6章では、EKB領域でのダスト雲からの熱放射量について検討され、赤外線天文衛星による観測の可能性が論じられている。その結果、近、中間赤外波長領域では、内側の黄道光の熱放射量が卓越しているため、赤外線天文衛星による EKBダスト雲の発見は難しいことがわかった。一方、EKOは比較的黄道面内に集中しているので、遠赤外およびサブミリ波長領域では、黄緯方向にそった観測を行うことで EKBダスト雲を観測できる可能性があることが分かった。

第7章では、他の太陽系の周りのダストディスクについて考察し、熱放射量の見積から、その測定可能性を検討している。

以上のように、本論文は、固体微粒子（ダスト）の衝突事象の検討と共に、惑星間塵の起源や空間分布についても言及している。本研究は、室内衝突実験に基づく、氷天体の表面衝突進化や、塵供給機構の研究について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者・山本聡は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。