



Title	ディープインパクト探査が明かす彗星の内部構造と太陽系の起源
Author(s)	杉田, 精司; Sugita, Seiji
Description	3章 惑星における氷の物理と化学
Citation	低温科学, 66, 97-105
Issue Date	2008-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/34718
Type	departmental bulletin paper
File Information	SUGITA.pdf





ディープインパクト探査が明かす彗星の内部構造と太陽系の起源

杉田 精司 東京大学

抄録：ディープインパクト計画は、短周期彗星であるテンペル第1彗星の内部の物質を調べることを目的として人工衝突探査を行った。本稿では、その探査によって得られた観測結果をレビューし、その太陽系および彗星の起源と初期進化における意義を解説する。主な結果としては、(1)テンペル第1彗星の内部物質は典型的な長周期彗星の構成物質とよく似ていること、(2)特に1000 Kを超える高温を経験した無水鉱物を大量に含んでいること、(3)衝突地点近傍にはサブミクロンの微小な炭素粒子に富んだ数十 cm の厚さを持つ表層があること、が分かったことが挙げられる。これらはそれぞれ、短周期彗星と長周期彗星の形成領域が近かった可能性が高いこと、原始太陽系星雲内では物質の混合効率が高かった可能性が高いこと、テンペル第1彗星が太陽系辺縁部にいた時代に形成した非常に古い表層が残っている可能性があることを示している。

1. はじめに

彗星は、その形成時から現在に至るまで極低温状態に保たれているため、物質的にほとんど変化しておらず、46億年前の太陽系形成の時代の貴重な情報を保持していると考えられている。また、彗星本体である核の内部は、主成分の水氷と共に、有機物や一酸化炭素などの様々な揮発性物質も大量に含んでおり、彗星の衝突によって地球の大気の起源に必要な物質をもたらした可能性も示唆されている(ただし、彗星のD/H比は地球の海のそれと有意に異なっており、「彗星衝突=海水の供給」という単純な描像は成り立たないことに注意する必要がある)。彗星には、また大量の有機物や有機氷が含まれており、生命の起源に重量な役割を果たした可能性もある。

このように非常に始源的な内部を持つと考えられる彗星であるが、表面は太陽の熱と光で大きな変成を受けていると考えられており、核の内部の様子を外から推測することは大変困難である。これが、NASA(アメリカ航空宇宙局)が、彗星の内部を調査するためディープインパクト探査計画を行った大きな理由である。この探査計画は探査機をテンペル第1彗星に接近させ、彗星近傍で衝突用の子機を切り離してこの彗星核にぶつけるというのが大まかな探査のコンセプトである。

ここで注意すべきは、探査によって掘削できる深さに限界がある点である。彗星は非常に小さい天体であると言っても数 km の直径はある。人工天体の衝突で掘削できる深さは、高々数 m から数十 m である。したがって、いくら人工掘削をしても彗星の表面からその直径の1/1000程度くらいの深さまでしか到達できない。したがって、彗星の本当の深部が掘削できる保証はどこにもない。

だが、彗星の表面下数 m の層は、太陽放射から得た熱エネルギーがそれより深い部分に伝導する効率を制御したり、逆に深部から湧き上がってくるガスや岩石塵などの流量を変化させたりする役割をしていると考えられている²⁾。彗星の太陽熱の受容とガス・岩石塵の吐き出しは、彗星の進化過程そのものと言ってもよく、これらのプロセスがどのように制御されているかを知ることは、彗星核の進化を考える上で非常に重要である。さらに、彗星の表面状態を知ることは、将来の探査計画の立案にも大きな影響を与える。彗星の表面物質が有機物質の光変成などの影響で硬くなっているのか、それとも強度をほとんど持たない砂地のような状態になっているのかによって、彗星表面に着陸したり試料回収を行ったりするために最適な機構は大きく異なってくる。このように、掘削できる深さには限りがあっても、非常に重要な情報が得られるはずであろうというのが、ディープインパクト探査計画の事前の読みであった。

さらにこの計画では、衝突によって彗星内部の物質を宇宙空間に放出させ、放出物を探査機母船および地上望遠鏡で観測することを想定していた。日本国内でも広く報道されたように、予定通り彗星への衝突に成功し、彗星内部物質が大量に宇宙空間に放出された。我々日本の観測チームも国立天文台のすばる望遠鏡を使って、ディープインパクト衝突の様子を観測し、衝突の特性や彗星内部の構造の解析を行った。本稿では、探査機本体の観測機器およびすばる望遠鏡観測が明らかにした彗星に関する新しい知見を概観する。

2. 探査計画とテンペル第1彗星の概要

ディープインパクト探査機は2005年1月に打ち上げられ、約6ヶ月の航行の後に子機をテンペル第1彗星に2005年7月4日に衝突させた。この時点で、テンペル第1彗星の太陽からの距離は1.51 AU（火星軌道と同等の日心距離）であり、地球からの距離は0.89 AUであった。衝突用の子機は直径が約1 m程度であり、彗星と衝突する前半は99%が銅で作ってあり（1%は強度増強のためにベリリウムを混ぜてある）、後ろ半分に制御系の機器が搭載されるという構造を持っている。また、衝突に際して、密度の低い彗星に子機が深く貫入しすぎて彗星物質の宇宙空間への放出効率が悪くならないように子機の平均密度は、0.46 g/ccと水より軽い推定彗星密度と同程度にしてある³⁾。衝突が起きるときに、親機は約500 kmという近距離にあり、そこから撮像観測、分光観測を行うよう設計されていた⁴⁾。約13分間のフライバイ期間の間にクレーター形成の様子と放出物の物質的特徴を詳細に調べ、その直後に衝突放出物の被弾に備えるために観測を一時停止し、安全が確保される衝突後約45分後に彗星を振り返って観測を再開するようプログラムされていた⁵⁾。衝突の速度は、10.3 km/sで、衝突角度は彗星表面から測って約 $30 \pm 5^\circ$ とかなり浅い角度であったと推定されている⁶⁾。

一方、標的となるテンペル第1彗星は、短周期彗星に分類され、公転周期は5.5年、軌道傾斜角は 10.5° 、自転周期は40.7時間である。このように数年に一度という高い頻度で太陽に近づく短周期彗星は、太陽熱で表面が強く変成しており、内部と大きく異なる物性や化学組成の表面を持っていると予想されている。ここで、短周期彗星は、もともと海王星軌道の外側に広がるカイパーベルトに由来している。長期にわたる惑星の摂動などを受けて太陽系の内側に至る軌道に入る。その際に、木星の強い重力摂動を受けると、内側太陽系に留まる軌道に乗り替わって短周期彗星となる。天体力学計算によると、短周期彗星の平均的な寿命は約 5×10^5 年と推定されている⁷⁾。なお、彗星には長周期彗星と呼ばれるグループがあり、これらはカイパーベルトに比べて圧倒的に大きな日心距離（1000~100,000 AU）を持つオールトの雲から来ている。長周期彗星は、太陽への接近の頻度は非常に低く、彗星の表面も日射による変成作用を受けておらずガスやダストの放出活動も非常に活発である。ただ、長周期彗星と短周期彗星の見かけ上の違いが、表面の変成の程度の違いにのみ起因するのか、それとも形成時からの組成や構造の違いに起因するのかはよく分かっていな

い。このどちらが正しいのかを知ることは、彗星の起源を知る上で非常に重要な手掛かりを与えてくれると期待されており、ディープインパクト探査の重要な科学目標の1つであった。

3. 探査機からの観測の結果

衝突の直前に探査機から送られてきた画像は、テンペル第1彗星の驚くべき姿を映し出してくれた（図1）。テンペル第1彗星の表面は、これまで他の探査機によって近接撮像されたハレー、ボレリー、ビルド2彗星のどれとも大きく異なっていて、溶岩流のような地形や月に見られるような大小のクレーターを持っていた⁸⁾。これは驚きであった。なぜなら、彗星内部は極低温に冷やされているので、溶岩流を作るような融解現象は起きないはずだからである。また、彗星の表面は太陽熱で気化したガスの噴出の影響で次々と剥げていくと予想されているので、クレーターのような地形が長期間残ることも説明が難しい。

一方、表面の反射率は平均で0.04と非常に低く、炭素化合物で覆われていることを示唆していた⁹⁾。図1を見ると、彗星表面は濃淡に富んでいて、白っぽい色をして氷の塊のように見える部分もある。しかし、この豊かな濃淡は、写真が見やすくなるように明るさのコントラストをつけた結果であり、絶対反射率で見るとどこも非常に暗い反射率（ ≤ 0.08 ）をしている。したがって、写真で白く見える場所も氷が外に露出しているわけではない。だがその一方で、赤外分光観測の精密解析から、黒っ

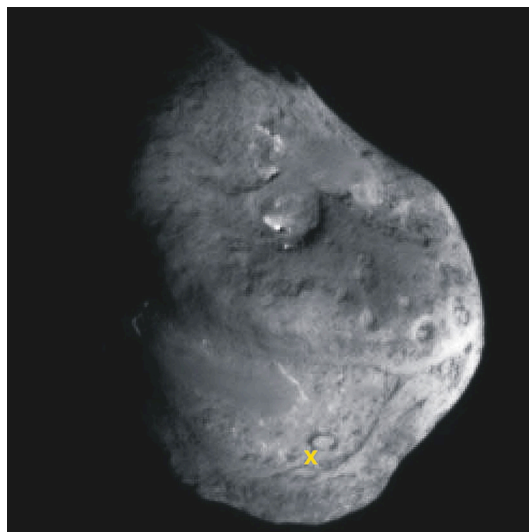


図1：衝突直前のテンペル第1彗星の姿（写真提供：NASA）。図中のx印は、探査機の衝突地点。

ばい彗星表面を H₂O の霜が非常に薄く覆っている部分もあることも分かってきた⁹⁾。

赤外撮像データからは、さらに彗星の表面温度の推定が可能である。太陽からの距離が火星と同程度であるため熱平衡温度は約 -40°C と低温だが、テンペル第 1 彗星の太陽直下点表面温度は約 60°C と、平衡温度より 100°C の高い値に達していることも判明した^{5,10)}。このような高温を達成するには、表面物質が熱的に安定な不揮発性物質でできていること、熱伝導率が非常に低い構造（おそらくは、微粒子がふわりと降り積もったような構造）をしていることを示している。表層物質の熱慣性 ($\sqrt{k\rho C}$ 。ただし、 k , ρ , C はそれぞれ熱伝導度、密度、比熱である) は、 $<50 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ と求められた。また、衝突機は、200~300 m 程度の直径を持つ 2 つのクレーターの間地点に命中したことも確認された。

衝突に際しては、高温の衝突蒸気雲の膨張が観測され、その初期温度は、分光観測から約 3500 K と見積もられている¹¹⁾。それに引き続いて低温の固体物質が放出される様子が観測された。放出物が低温であるのは、放出物プリズムが太陽光を遮って陰を作っていることが分かる。もし放出物が高温であれば、自発光するはずだから影はできない。放出物カーテンは、地表面から約 45° の角度を持って広がる典型的な逆円錐形の形状を示していた。ただし、詳細な観察によると、このカーテンの角度は途中で微妙に変化しているようである¹²⁾。また、この放出物の弾道軌道を追跡することによって、彗星の重力強度が計測された。その結果は、表面重力が $0.34 + 0.56 / - 0.17 \text{ mm/s}^2$ であり、彗星の形状（平均直径 $6.0 \pm 0.2 \text{ km}$ ）のデータと併せると、彗星の平均密度は $0.4 + 0.6 / - 0.2 \text{ g/cc}$ と推定された¹²⁾。密度の最大推定でも水の密度とほぼ同じであるが、材料物質には岩石などもっと高密度物質も含まれていることが分かっている。この天体は内部まで大きな空隙率を持っていることが分かる。また、衝突用の子機の密度 (0.46 g/cc) は、この彗星の密度を非常に良く予測して設計されていたことになる。

一方、衝突放出物の分光観測からは、彗星の構成物質の推定も行われた¹³⁾。解析の結果によると、表層の 1-2 m 以下の薄い上層には揮発性物質に欠乏しており、その下には水氷と不揮発性物質（ケイ酸塩鉱物および炭素粒子）からなるかなり新鮮な彗星物質層が埋まっていることが推定された。これは、以下に記すすばる望遠鏡の観測から得られた結論¹⁴⁾ともよく一致している。さらに興味深いのは、分光観測の結果が、下層から放出された物質に含まれる水氷粒子と不揮発性物質が光学的に分離して存

在していることを強く示唆していたことである。光学的に分離しているというのは、氷粒子に入射した光が不揮発性物質にも入射してから観測器に向かって射出することがなく、また逆も真なりという状況であることを意味している。もし従来考えられていたように、凝縮温度の高い不揮発性粒子の周りに氷が覆うようにして凝縮した粒子を作っていた¹⁵⁾ならば、光学的に 2 つの物質の両方を貫通して吸収を受けたスペクトルが観測されるはずであるが、観測された反射スペクトルは、このような複数の物質を通過した光はほとんどなく純粋な水氷の結晶のみを通過した時に見られるスペクトル形状を示していた¹³⁾。これは、彗星を構成する微粒子の起源を考える上で非常に重要な手掛かりを与えるものと考えられる。

探査機の観測の中で最も重要視されていた項目は、衝突によって形成された人工クレーターの撮像であった。これにより、クレーター直径が分かれば、彗星表面を構成する物質の強度が推定できるし、どの程度の量の物質が放出されたのか、どのくらい深い地点まで掘削が起きたのかなど、探査結果の解釈上、非常に重要な情報も同時に得られるはずである。さらに、クレーターの内壁の構造を観察できれば、彗星内部の層構造が見える可能性もある。ところが実際には、彗星内部の層構造どころか、クレーターの直径さえも測ることができずに終わってしまった¹⁶⁾。これは、逆円錐状の形をした衝突放出物のカーテンの内側にもかなりの微粒子が充満してしまい、そのために事前予測では見えるはずだった形成中のクレーターが見えなかったことが最大の原因であった⁶⁾。

4. 地上望遠鏡の観測結果

探査機の親機はおおよそ 10 km/s の高速で彗星核から離れていくので、1 時間も経つと探査機から見た彗星の視直径は $1/100^\circ$ 以下と急速に小さくなり、探査機カメラには近接撮影の利点が無くなってしまふ。そのなると、様々な測光装置を使って長時間にわたる広波長域観測ができる分だけ、地上望遠鏡や地球軌道上の宇宙望遠鏡が有利になってくる。したがって、地上望遠鏡では、探査機が観測していない波長帯を数時間から数週間の長い時間スケールで観測することに大きな意味がある。

地上観測には世界各国から大小さまざま 73 台もの望遠鏡が参加し、様々な観測を行った¹⁷⁾。紙面の関係上、それらの結果を網羅的に紹介することはできないので、ここでは大口径の望遠鏡が衝突直後の最良のタイミングで観測できたハワイ島のマウナケア山頂の 3 大望遠鏡の結果を中心に解説する。まず、36 枚の分割鏡を使った有効

径 10 m のケック望遠鏡は、近赤外におけるガス分子の蛍光輝線観測を行い、衝突によって気化する氷成分の組成及び温度計測を狙った^{18,19)}。一方、有効径 8 m の 1 枚鏡を持つすばる望遠鏡とジェミニ望遠鏡は、探査機の測器が観測できない中間赤外光の観測を行い、衝突に際して気化しない岩石成分および不揮発性炭素成分(以下では、両者を総称してダストと呼ぶ)の組成、結晶化率、粒子径分布を求めること、またダストの総量や空間分布からクレーター形成機構を理解することを狙うこととした^{20,21)}。ジェミニ望遠鏡のグループと我々すばる望遠鏡のグループは、独立にほぼ同じテーマを狙った観測計画を立てたため、空間分解能により優れるすばる望遠鏡が主に撮像観測を担当し、ジェミニは主に分光観測を担当することとなった。

すばる望遠鏡とジェミニ望遠鏡が狙った中間赤外波長域の 10 μm 近辺には、細粒のケイ酸塩粒子が発する発光帯がある。衝突の前には、10 μm 近辺には全く発光帯は見えていなかったが、衝突するや否や 10 μm 付近に強い発光帯が観測された。これは、細かいケイ酸塩粒子が衝突によって掘削されて宇宙空間に放出されたことを示している。さらに、この 10 μm 帯のスペクトルの形状から、構成鉱物の比率(オリビン結晶、輝石結晶、アモルファス粒子の比)や粒径分布が推定できる。従来の観測では、ヘルボップ彗星や百武彗星などオールト雲由来と考えられる長周期彗星については、結晶質粒子が多く、粒子数も直径の約 ~ 3.5 乗に比例して減るべき乗分布を示していることが知られている。一方、今回の観測対象となったテンペル第 1 彗星を含む短周期彗星は、オールト雲に比べるとずっと近い場所(50-100 天文単位)にあるカイパーベルトから来ていると考えられているが、彼らはあまり強い 10 μm 帯の発光を示さず、細粒のケイ酸塩粒子をあまり含んでないのではないかと考えられてきた。また、観測された微弱な 10 μm 帯の形状の分析から結晶質粒子が少なく、アモルファス粒子が大部分を占める比率になっているという結果が得られていた。しかし、短周期彗星は太陽の近くを何度も回っているため、表面が太陽光で熱変成したり物質分別を起こしたりして、本来の生の姿を見せていない可能性も高いと考えられている。したがって、この 10 μm 帯のスペクトル観測をすれば、短周期彗星と長周期彗星の間に見られる違いが、彗星の深部にまで続くような本質的な違いなのか、表面変性度の違いによる表面的な違いなのかが判別できる可能性があるわけである。

衝突現象の観測からはいくつかの重要な発見をもたらされた。まず、衝突直前まで全く見えていなかった 10

μm 付近のシリケート発光帯が、衝突が起こるや否や強く光り出した(図 2)。これは、彗星の内部から微細な(直径 1 μm からサブミクロン)のシリケート粒子が大量に掘削されたことを示している。この 10 μm 帯の発光量の絶対値観測および時間変化観測から、およそ 10^6kg のダスト成分が宇宙空間に放出されたこと、ダストの放出は基本的に衝突の瞬間だけであって長時間にわたる継続的なダスト放出が衝突によって誘起されることはなかったことなどが分かった²⁰⁾。ここで求めたダストの総放出量は、事前の検討値の中ではかなり大きい値に対応している。彗星の表面物質の強度は非常に小さいことを示している。また、 10^6kg という数値から、クレーターの直径が約 100 m 程度であろうと推定された。従って、今回の衝突で放出された種々の放出物は、彗星の表面下の数 ~ 10 m 程度の深さから掘削されたことになる。また、これは彗星表面物質の強度が低くサラサラの砂地のようになっていることを示している。同様の結論は、探査機データからも独立に出されている^{5,12)}。

一方、10 μm 帯の分光分析からは、彗星内部のシリケート粒子が非常に高い結晶化率を持っていること、粒子数が直径の約 ~ 3.5 乗に比例して減るべき乗分布を持っていることなどが分かった²⁰⁾。いずれもテンペル第 1 彗星が属する短周期彗星の従来の観測結果とは大きく異なっており、逆に長周期彗星の観測結果と酷似していた。ジェミニ望遠鏡のグループも独立に同じ結論に達しており²¹⁾、非常に確度の高い結果だと考えられる。一方のケック望遠鏡からも、これまで長周期彗星でしか見つからな

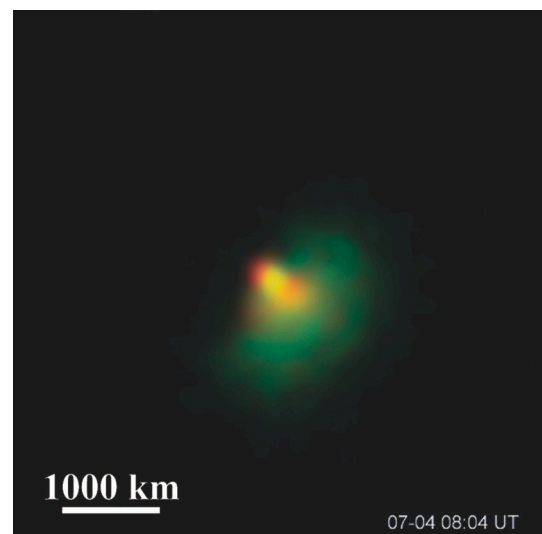


図 2 : すばる望遠鏡がとらえた探査機衝突およそ 3 時間後のテンペル第 1 彗星のまわりに形成した放出物のプルームの中間赤外画像²⁰⁾。緑色成分はシリケート粒子を赤色成分は炭素粒子を表している。

かった有機分子種が、衝突直後に観測されるという報告がもたらされた。これも、短周期彗星であるテンペル第1彗星の内部物質と一般的な長周期彗星の構成物質が非常に似通っているという我々の観測結果を支持している。

すばる望遠鏡の観測は、さらに彗星の内部構造に関する重要な発見をもたらした。ディープインパクトの衝突で作られたダストプルームの中に顕著な構造が見られたのである(図3)。衝突によって放出される物質の放出速度と放出前の深度には1対1の関係はないが、多対1の関係がある。標的物質の強度が低い今回のような場合においては、浅い部分の物質は高速放出物にも低速放出物にも含まれるが、深い部分の物質は低速放出物にしか含まれない。逆に言うと、高速成分は浅い部分に由来する物質のみを含み、低速成分になるほど深い部分からの物質の混合率が大きくなるという関係があるのである。さらに、放出物の速度は、彗星核からの距離という形で天球上に射影される。この関係のため、ダストプルームの外縁部は、彗星核の表面付近の物質で構成されており、プルームのより彗星核側の部分には彗星核の深部に由来する物質が多く含まれている。これを念頭に入れてダストプルームのデータ(図3)を見ると、プルームの外縁部には高温の炭素質粒子が濃集しており、彗星核よりには低温のケイ酸塩粒子が濃集していることが分

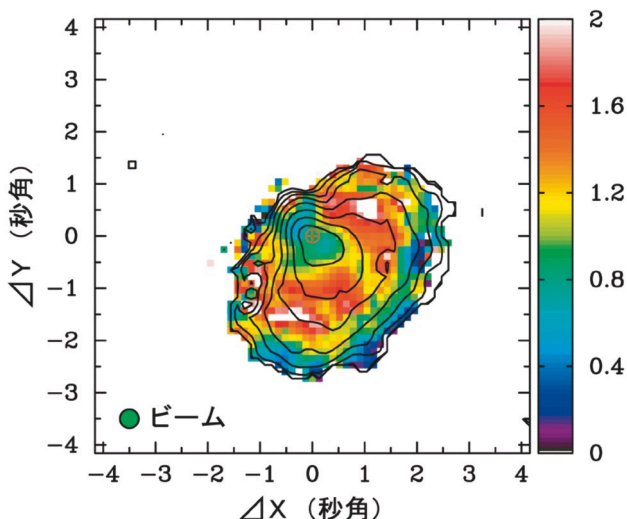


図3：すばる望遠鏡がとらえた探査機衝突およそ2時間後のテンペル第1彗星のまわりに形成した放出物のプルームの中間赤外画像¹⁴⁾。ケイ酸塩鉱物の赤外放射強度と、それ以外の物質(主に炭素質粒子)の赤外放射強度の比率の画像。赤いほどケイ酸塩鉱物が多く、青いところはケイ酸塩鉱物が少ないことを示している。扇形状の先端部分ほど青くなっていることが分かる。図中には、望遠鏡の解像度をビーム径として表示してある。

かる。ここで、粒子の温度は衝突による加熱などが原因ではなく、太陽光による加熱が原因である。細粒のほど赤外熱輻射効率がわるくなるので、高温になる性質がある。また、可視の反射率が低いほど高温になる。この関係を使うと、図のデータは、彗星核の表層に、細粒の炭素質粒子が濃集しており、その下層にはケイ酸塩の粒子が多いことを示していることが分かる¹⁴⁾。同様の傾向は、ジェミニ望遠鏡で得られた中間赤外スペクトルの時間変化データにも見ることができ²¹⁾、ダストプルームの変更観測の結果ともよく一致している²²⁾。

さらに、衝突放出物は、地球の望遠鏡の解像度の範囲において、等速直線運動をしていることが確認されている²³⁾。望遠鏡では解像できないほど彗星核に近い距離に放出物がある段階で氷の昇華が起こりダスト粒子を加速した可能性もあるが、ダストプルームの先端部には揮発性成分が見られておらず¹³⁾、衝突によって作られた初期放出速度がそのまま先端部のダスト粒子の運動に反映されていると考えることができる。そのため、ダストプルーム内の位置と時間から放出速度を求め、さらにそこから放出前の深度を逆算することができる。すばる望遠鏡のデータを基に計算を行うと、微細な炭素質粒子の濃集する表層の厚さは、数十cm程度であるという結果が得られる¹⁴⁾。この厚さの推定は、探査機の近赤外分光観測によって独立に推定された結果(氷に富む層は、彗星核表面から1-2m以下の浅い深さから始まっている)¹³⁾とも整合的である。さらに、中間赤外域での放射温度から炭素質粒子の直径を計算すると、 $1\mu\text{m}$ を下回るような非常に小さい値となる¹⁴⁾。

5. 太陽系の初期進化、彗星の進化

ここまでみてきたように、ディープインパクト探査は、彗星の構成物質や内部構造について多くの新しい知見をもたらした。そして、それらの知見は、彗星と太陽系の進化について非常に重要な手掛かりを与えてくれる。以下では、主な観測結果を改めて簡潔にまとめ、それらの意味するところを議論する。

1) 短周期彗星であるテンペル第1彗星の内部物質は、ケイ酸塩鉱物の結晶化度と粒径分布、揮発性物質組成などの複数の側面において、長周期彗星の観測値と良い一致を示していることが分かった。このことは、オールト雲天体とカイパーベルト天体が基本的には同じ物質でできている可能性があることを示している。この可能性は、最近の太陽系形成理論の発展に照らし合わ

せてみると非常に重要な意味を持っていることがわかる。1990年代までは、オールトの雲は現在の居場所よりずっと太陽に近い天王星から海王星の付近で形成して、天王星や海王星の重力散乱の影響で現在の数千～数万天文単位の距離まで放り出された結果できたものであり、もう一方のカイパーベルト天体は天王星・海王星の軌道よりずっと外側で形成し、これら巨大惑星の形成と関係なく45億年前から現在までほとんど軌道を変えずに静かに暮らしてきた小天体であると考えられてきた。しかし、最近数年の間に、外側太陽系の惑星形成に関する理論計算が大きく進展し、新しいモデルが提唱されていた。その説では、カイパーベルト天体には従来考えられてきたような太陽系の辺境で形成して以来現在までほとんど何の軌道変化も経ずに安定な円軌道を回っているもの（メインベルト天体）だけではなく、オールト雲天体と同じように太陽系のもっと内側で形成したものの天王星・海王星など巨大惑星の重力散乱の影響でカイパーベルト領域に放り込まれたもの（散乱ディスク天体）が多数存在することを予言している²⁴⁾。そして、短周期彗星として地球付近までやってくる天体のほとんどはこの散乱ディスク天体であり、物質的にはオールト雲天体と同一のものが短周期彗星の正体であるとする。ディーブインパクト探査の結果は、この新しい彗星の起源説を支持しているのである。

2) ケイ酸塩岩の多くが高い結晶化度を持っていることが分かった。これは、短周期彗星に含まれているケイ酸塩ダストの多くは太陽系内で1000 K以上の高温を経験したことを示している。ここで、「太陽系内で」と制限をつけることができるのは、恒星間空間に漂うケイ酸塩ダストは比較的短時間のうちに宇宙線の照射を受けてアモルファス化してしまい、結晶質のまま原始太陽系星雲にたどり着く可能性が非常に低いと推測されるからである。また、ヴィルド第2彗星を調べたスターダスト探査からも結晶質ケイ酸塩が大量に見つかっており²⁵⁾、テンペル第1彗星の結果が特異な例ではないことも明らかとなった。これらの発見は、太陽のかなり近くで高温に焙られた成分が低温の彗星形成領域にまで運ばれてきたことを強く示唆する。もう少し一般化して考えれば、原始太陽系星雲の円盤内では非常に効率的に動径方向の物質混合が起きていた可能性があることを示している。しかし、隕石には、CI、CMコンドライトのように揮発性成分を大量に含んでいて熱変成の影響の非常に少ないものから、エンスタタイトコンドライトのように高温形成鉱物で構成され

ている隕石まで大きな化学的多様性が見られる。さらに、小惑星帯中の小惑星の平均的スペクトル型も太陽からの距離に応じてきれいな順序で変化していることもよく知られているとおりである。これらの観測事実は、原始太陽系星雲の中で完全に物質的な均一化が起きてしまっただけでは説明が難しいものである。太陽系内の物質分布と輸送は、惑星の内部構造と進化を考える上でも非常に重要な要素である。今回明らかになった短周期彗星中の高温鉱物相の問題は、今後の惑星科学上の大きな研究テーマになるものと予想される。

3) テンペル第1彗星の衝突点近傍においては、数十cmの厚さの表層があり、1 μ m以下の微細な炭素粒子が濃集しており、そのすぐ下には氷とケイ酸塩鉱物微粒子に富むかなり新鮮な層が存在することが分かった。彗星の表層には、大きく分けて2つの形成過程がこれまで提案されている。1つは彗星が太陽系外縁領域にいたときに銀河宇宙線の照射で形成される表層で²⁶⁾、もう一つは彗星が太陽の近くを周回するようになってから太陽輻射による熱変性と昇華によって形成される表層である²⁷⁾。前者の過程の場合には、表層は数十cmの厚さであって構成粒子は微小粒子から比較的大きな粒子まで様々な大きさのものを含むことになる。それに対して、後者の過程でできた表層は、揮発性成分の昇華に伴って発生するガス流に吹き飛ばされない比較的大きな粒子のみが堆積して表層を形成することになるため、表層の構成粒子は比較的大きなもののみになる。そのため、今回の観測から推定される数十cmの厚さを持った1 μ m以下の微細な炭素粒子が濃集する表層は、前者の銀河宇宙線起源の古い表層がテンペル第1彗星の表面に残っていたことを支持している¹⁴⁾。もう少し一般的な言い方をすれば、太陽周回を重ねた後であっても、彗星の古い表面は全て消失してしまうのではなく、一部は古いまま残る可能性を示しているのである。さらに、このように古い表層が残っていることは、テンペル第1彗星の表面に多数のクレーターが残っていて地形学的な表面更新年代が古いこととも整合的である。テンペル第1彗星のクレーター年代を正確に見積もることは難しいが、ディーブインパクトの画像解析チームでは、小惑星のクレーター密度との比較からテンペル第1彗星の衝突点近傍の表面年代を計算し、10⁶年以上という値を得ている⁸⁾。さらに、この値が短周期彗星の標準的な軌道寿命を有意に上回っていることから、これらのクレーターの多くは彗星が太陽系外縁部にいたときに形成されたものであると推論している。もしこのように大変

古い彗星表面層が残っているとしたら、その直下にはかなり新鮮な揮発性物質が残っている可能性もあり、今後の彗星探査の方針を決める上で非常に重要な情報となる。

6. 将来展望

ディープインパクト探査は、彗星について多くの新しい知見をもたらした。その知見は、スターダスト探査の結果との相乗効果も得て我々の太陽系全体の起源についての理解を大きく進展させつつある。しかし、これらの探査機が調べたのは、たった2つの彗星でしかない。上述のような太陽系の初期進化の描像に結論を下すためには、まだ他の短周期彗星についての観測が必要である。また、内側太陽系に落ち来ることのないとされるカイパーベルトのメインベルト天体についての観測も必要である。前者については欧州宇宙機構のロゼッタ探査機が、後者についてはNASAのニューホライズン探査機が既に打ち上げられていて、対象天体に向かっている。これらの探査機が観測データを送ってくる数年後には、我々の住む太陽系の起源についてより確かな理解がなされることが期待される。

さらに2008年の秋にはLRO探査機が月に向けて打ち上げられる予定である。その際にロケットの最終段と子機（第1発目の衝突を近接観測する機器も搭載予定）の2つを弾丸として使い、月の極地にある永久影域に衝突させることが計画されている（衝突は2009年1月の予定で、衝突探査の部分にはLCROSS計画という呼称がつけられている）。極低温に保たれた永久影域に氷が存在すれば、この衝突は氷を日光の当たる上空に放出させるはずである。日光に曝された氷は昇華して水蒸気となる。この水蒸気はディープインパクト探査の時と同様に、探査機と地上望遠鏡の両方で観測ができる（NASAでは、氷が0.5%以上あれば検出可能であるとしている）。これらの観測によって水氷の存在度や深さ方向の分布が分かれば、将来月面に基地を作る際に重要な資源となることになる。このLCROSS計画は、ディープインパクト探査計画の成功を受けて立案されたものである。ディープインパクト探査は、このように新しいタイプの探査方法を実証試験して見せたという意味でも重要な意味を持っている。

参考文献

1) Delsemme, A., *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser.*

- A 325 (1988) p.509.
- 2) Prialnik, D., J. Benkhoff, and M. Podolak, in *Comets II*, ed. M. C. Festou, H. U. Keller, & H. A. Weaver (Univ. of Arizona Press)(2004) pp.359.
- 3) Richardson, J. E., H. J. Melosh, N. A. Artemeiva, and E. Pierazzo, *Space Sci. Rev.* **117** (2005) p.241.
- 4) Hampton, D. L., J. W. Baer, M. A. Huisjen, C. C. Varner, A. Delamere, D. D. Wellnitz, M. F. A'Hearn, and K. P. Klaasen *Space Sci. Rev.* **117** (2005) p.43.
- 5) A'Hearn, M. F. and 32 coauthors, *Science*, **310** (2005) p.258.
- 6) Schultz, P. T. C. A. Eberhardy, C. M. Ernst, M. F. A'Hearn, J. M. Sunshine, C. M. Lisse, *Icarus*, **190** (2007) p.295.
- 7) Levinson, H. F., M. J. Duncan, *Icarus*, **108** (1994) p.18.
- 8) Thomas, P. J. Veverka a, Michael J. S. Belton b, Alan Hidy c, Michael F. A'Hearn, T. L. Farnham d, Olivier Groussin d, Jian-Yang Li d, Lucy A. McFadden d, Jessica Sunshine, Dennis Wellnitz d, Carey Lisse e, Peter Schultz f, Karen J. Meech g, W. Alan Delamereh, *Icarus*, **187** (2007) p.4.
- 9) Sunshine, J. M., M. F. A'Hearn, O. Groussin, J. Y. Li, M. J. S. Belton, W. A. Delamere, J. Kissel, K. P. Klaasen, L. A. McFadden, K. J. Meech, H. J. Melosh, P. H. Schultz, P. C. Thomas, J. Veverka, D. K. Yeomans, I. Busko, M. Desnoyer, T. L. Farnham, L. M. Feaga, D. Hampton, D., Lindler, D. D. Wellnitz, *Science* **311** (2006) p.1453.
- 10) Groussin, O., M. F. A'Hearn, J. -Y. Li, P. C. Thomas, J. M. Sunshine, C. M. Lisse, K. J. Meech, T. L. Farnham, L. M. Feaga, W. A. Delamere, *Icarus*, **187** (2007) p.16.
- 11) Melosh, H. J. and the Deep Impact Team, *Lunar Planet. Sci. Conf.* (abstract), **37** (2006) #1165.
- 12) Richardson, J. E., H. J. Melosh, C. M. Lisse, B. Carcich, *Icarus*, **190** (2007) p.357.
- 13) Sunshine, J. M., O. Groussin, P. H. Schultz, M. F. A'Hearn, L. M. Feaga, T. L. Farnham, Kenneth P. Klaasen, *Icarus*, **190** (2007) p.284.
- 14) Kadono, T., S. Sugita, S. Sako, T. Ootsubo, M. Honda, H. Kawakita, T. Miyata, R. Furusho, and J. Watanabe, *Astrophys. J.*, **661**, (2007) p.L89.
- 15) Greenberg, J. M. and A. Li, *Space Sci. Rev.* **90** (1999) p.149.

- 16) Busko L., D. Lindler, M. F. A'Hearn, R. L. White, *Icarus*, **187** (2007) p.56.
- 17) Meech K. and 208 coauthors, *Science* **310** (2005) p. 265.
- 18) Mumma, M. A. DiSanti, K. Magee-Sauer, B. P. Bonev, G. L. Villanueva, H. Kawakita, N. D. Russo, E. L. Gibb, G. A. Blake, J. E. Lyke, R. D. Campbell, J. Aycock, A. Conrad, G. M. Hil, *Science*, **310** (2005) p.270.
- 19) Kawakita, H., E. Jehin, J. Manfroid, D. Hutsemékers, *Icarus*, **187** (2007) p.272.
- 20) Sugita, S. T. Ootsubo, T. Kadono, M. Honda, S. Sako, T. Miyata, Sakon, T. Yamashita, H. Kawakita, H. Fujiwara, T. Fujiyoshi, N. Takato, T. Fuse, J. Watanabe, R. Furusho, S. Hasegawa, T. Kasuga, T. Sekiguchi, D. Kinoshita, K. J. Meech, D. H. Wooden, W. H. Ip, M. F. A'Hearn, *Science*, **310**, (2005) p.274.
- 21) Harker D. E., C. E. Woodward, D. H. Wooden, *Science*, **310** (2005) p.278.
- 22) Furusho, R., Y. Ikeda, D. Kinoshita, W. -H. Ip, H. Kawakita, T. Kasuga, Y. Sato, H. -C. Lin, M. -S. Chang, Z. -Y. Lin, J. -I. Watanabe, *Icarus*, **190** (2007) p.454.
- 23) Feldman, P. D., S. R. McCandliss, M. Route, H. A. Weaver, M. F. A'Hearn, M. J. S. Belton, K. J. Meech, *Icarus*, **191** (2007) p.276.
- 24) Gladman, B., *Science*, **307** (2005) p.71.
- 25) Zolensky, M. E., and 74 coauthors, *Science*, **314** (2006) p.1735.
- 26) Strazzulla, G., and R. E. Johnson, in *Comets in the Post-Halley Era*, ed. R. L. Newburn Jr., M. Neugebauer, and J. Rahe (Dordrecht: Kluwer), (1991) p.243.

(2008年1月15日 改訂受付)

Deep Impact mission unveils the interior structure of a comet and the origin of the solar system

Seiji Sugita
Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo

abstract:

Deep Impact mission conducted an artificial impact experiment to investigate the interior of comet 9P/Tempel 1, a short-period comet. This article reviews the results of this mission and discuss their implications for the origin and early evolution of both comets and the Solar System. Major results of the mission are as follows. (1) Materials excavated from the interior of comet 9P/Tempel 1 are similar to those in long-period comets. (2) The excavated materials contain anhydrous minerals that have experienced high temperatures (>1000 K). (3) The surface of comet 9P/Tempel 1 near the impact point has a surface layer several ten cm in thickness and containing sub-micron carbon particles. These findings indicate that long- and short-period comets may have been formed in similar locations, that the solar nebula may have had a high radial mixing efficiency, and that comet 9P/Tempel 1 may have a very old surface layer that was formed when it was still in the outer peripheral region of the Solar System.

杉田精司

〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 基盤棟 414
東京大学 大学院新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻

Tel: 04-7136-5520 Fax: 04-7136-3953

E-mail: sugita@k.u-tokyo.ac.jp

<http://impact.k.u-tokyo.ac.jp>