

# 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星での2年間: 彗星探査機ロゼッタ

小林 正規<sup>1</sup>, ハラルド・クリューガー<sup>2</sup>

本記事は、「Physik in Unserer Zeit」というドイツの一般向けの雑誌に掲載された記事(Die Kometenmission Rosetta, 6/2016 (47)274-281)に、今回、著者のHarald Krüger博士が加筆・修正したものを和訳したものである。ロゼッタは、軌道上から彗星を詳細に調査した初めての探査機である。また、ロゼッタ探査機に搭載され現地で切り離された着陸探査機「フィラエ」は、このような小さな天体に見事な状況で着陸した。ロゼッタ・ミッションは、彗星や初期太陽系についてさまざまな新しい知見をもたらした。

## 1. はじめに

彗星は1億キロにも及ぶ尾を持ち、太陽系内で最も大きな構造物の一つである。しかし、その実際の天体である彗星核は、直径数キロメートルの非常に小さなものである。現在の知見では、約45億6000万年前、太陽系がガスとダストの星間雲から形成されたときに、彗星は惑星とはほぼ同時に形成されたと考えられている。そして形成されたのはおそらく、太陽から遠く離れた、水(H<sub>2</sub>O)や一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)などの揮発性物質が凝縮するような寒冷的な領域だと考えられている。彗星核の主成分は、これらの物質に加えて鉱物のダストや有機物が混ざったものだ。彗星は形成されて以来、主に太陽系の最外縁の惑星、海王星の軌道を越えた温度の低い領域、つまり、カイパーベルトやオールト雲にあった。そのような場所ではほとんど変化がないため、彗星は「太陽系初期」から来た「使者」だと考えられている。

彗星の核が楕円軌道で我々の太陽に近づくと、太陽からの放射と共にその天体の表面温度が上昇す

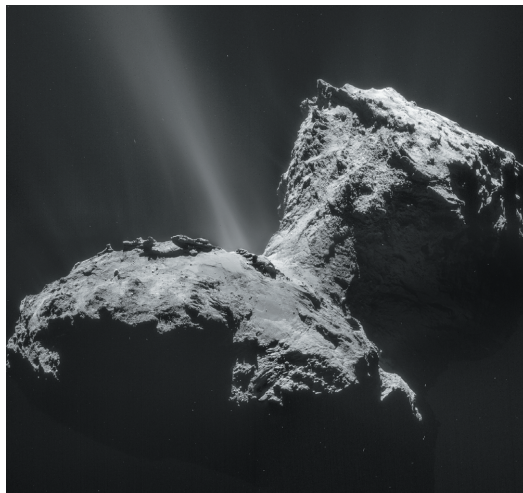


図1: 2015年1月31日、首の部分に指向性のガスジェットを持つ約4kmの彗星67P(Photo: ESA/Rosetta/NAVCAM).

ると、揮発性の成分が昇華し、球形の大気であるコマが形成される。ガスは太陽からの紫外線によってイオン化し、生成されたプラズマは太陽風によってコマから離れた場所に運ばれるようになる。その結果、反太陽方向に向かうイオンテイルが形成され、その長さは1億キロ以上にもなる。また、ダスト粒子は昇華したガスによって核からコマの中に放出

1.千葉工業大学惑星探査研究センター

2.マックスプランク太陽系研究所

kobayashi.masanori@it-chiba.ac.jp



図2: ロゼッタとフィラエの67Pとのイメージモンタージュ(グラフィック: ESA/ATG medialab; ESA/Rosetta/NavCam).

表1: ロゼッタミッションの主要な数値.

サイズ	2.8 × 2.1 × 2.0 m <sup>3</sup>
太陽電池の全長	32 m
打ち上げ時の総質量	2900 kg
燃料質量	1720 kg
科学機器の質量	165 kg
フィラエ着陸機の質量	100 kg
3.4AUでの太陽電池発電力	850 W
5.3AUでの太陽電池発電力	395 W
駆動方式	24 nozzles, 10 N thrust
燃料	ヒドラジン
メーカー	EADS Astrium, Friedrichshafen <sup>1</sup>
打ち上げ	2004年3月2日
彗星への到着	2014年8月6日
ミッション終了日	2016年9月30日

<sup>1</sup> 現在のエアバス・ディフェンス・アンド・スペース社

表2: チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星(67p).

発見年	1969	
サイズ	大きい方の胴体	4.1 × 3.3 × 1.8 km <sup>3</sup>
	小さい方の胴体	2.6 × 2.3 × 1.8 km <sup>3</sup>
自転速度	approx. 12.4 hours	
太陽公転周期	6.45 years	
近日点距離	1.24 AU	
遠日点距離	5.68 AU	
黄道面に対する傾斜角	7°	
最近の近日点通過(2016年時点)	2015年8月13日	
現在の太陽周回軌道	1959年以降	

される。それらのダスト粒子は太陽の輻射圧を受け、湾曲したダストテイルを形成する。

新しく作られる天体望遠鏡はさらに大きくなり、性能は向上し続けているが、地球から彗星の核を調査できる範囲は非常に限られている。遠くにあるときは点状に見え、太陽の近くではコマに埋もれて核は見えない。すなわち、宇宙探査機でしかその詳細を調べることができないのだ。

欧州宇宙機関(ESA)の彗星探査機「ロゼッタ(Rosetta)」は(表1)、世界で初めて彗星の核を周回する軌道での運用を成功させた探査機であり、着陸機「フィラエ(Philae)」は初めて彗星の核に着陸した探査機である。ロゼッタ探査機は2年以上にわたり、太陽の周りを回るチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星(67P/Churyumov-Gerasimenko, 以下、67P)に同行し、多くの新しい知見を提供してきた。2016年9月30日、ロゼッタ探査機は67P彗星の核に着地し、大成功を取めたミッションは2回目の着陸ですべての幕を閉じた。

## 2. ロゼッタの長い旅

ロゼッタは2004年に打ち上げられ、目標の彗星である67Pに到達するまでに10年間を要した。ミッションのためにはまず、67Pの軌道に探査機を限りなく近づけなければならなかった。まだ核が活動していない日心距離にある時にフィラエを着陸させる必要があるが、67Pに同行する軌道へ投入は太陽系外部領域、3AU(1AUは太陽-地球間の平均距離1億4,956万kmに相当)の位置で行われた。67Pと会合する太陽系外部領域に送り出すために、地球と火星で何度もスイングバイ・マヌーバ(訳注:惑星のような大きな重力を持つ天体の重力を利用した軌道変更運用)を行って探査機を加速させる必要があった。そのようなロゼッタ探査機のクルーズ軌道は、それまであまり調査されていなかった小惑星シュテインス(Steins)とルテティア(Lutetia)の近くを通過するように設計された<sup>1</sup>。

ロゼッタ探査機システムの電気系統は太陽電池のみで駆動されているため、太陽と探査機の距離が遠

くなるにつれ、利用可能な電力は減少し続けた。そして2012年、ロゼッタ探査機は太陽から最も離れた遠日点(約5.7AU)に到達した。この時、ロゼッタ探査機は巨大な惑星である木星よりも太陽から遠ざかっていた。電力不足のため、探査機は2年半以上にわたりメインのコンピュータシステムなどを除いてすべての機器が電源オフの状態で「冬眠状態」に入った。2014年1月ようやくロゼッタ探査機システムは再起動し、搭載されている科学機器や着陸機フィラエを含む探査機システムの電気系統に関わる機能を再度確認した後、2014年5月に67Pの彗星核の探査運用を開始した。

2014年7月初めには、遠くの恒星のような点ではなく、67P彗星の核の形状がわかる画像が初めて地球に届いて関係者を興奮させたが、ロゼッタ探査機はさらに67P彗星に近づいていった。そして関係者をさらに驚かせたのは、67Pが予想以上に不規則な形をしていることだった(図1)。長さが約4キロメートルしかない核は、真ん中に深くびれがあるダンベル型の「二重結合天体」で、非常に多様な地形に富んでいた(表2)。表面は非常に急勾配の斜面や山が続き、起伏が多くて凸凹だらけだった。そのうえ、数十メートルから数百メートルもある丸い形をした高台や丸い穴が多数存在した。

ロゼッタ探査機は2014年8月6日ようやく67Pとほぼ同じ軌道位置に到達し、まず高度約100kmのところまで近づいた。2014年10月までに、核をさらに近い距離から調べたり、フィラエの着陸に適した場所を見つけたりするために、軌道を徐々に10kmまで下げた。しばしば探査機は67Pに対する軌道がピラミッド型や三角形になるように航行した。そのために必要な軌道修正には、彗星の重力が弱いために、ほとんど燃料を使わずに済んだ。彗星表面からの脱出速度は約1.5m/sで、自転車の速度よりも小さかったのだ。

三ヶ月以内にフィラエを着陸させるのに適した場所を見つけなければならなかったが、不規則な地形を持つ二重結合天体の上に見つけるのは難しいことがわかった。フィラエが転倒するのを防ぐためには、平らな場所に降りる必要があった。また、着陸地点の日照時間が67Pの自転周期(6.2時間)の半分以上でなければならなかった。フィラエの運用は数カ月

<sup>1</sup>ロゼッタの惑星間クルージング軌道の動画([www.youtube.com/watch?v=5yoYZERieuQ](http://www.youtube.com/watch?v=5yoYZERieuQ))。2021年11月の時点で視聴可。



図3: フィラエの着陸時に高度40mから撮影された最初の着陸地 Agilkia(Photo: ESA/Rosetta/ Philae/ROLIS/DLR).

間行われるように計画されていたので、着陸後も十分な時間の日照を確保して、科学搭載機器を稼働させるのに十分な電力を太陽電池が供給できるようにする必要があったのだ。さらに、彗星ガスによる圧力で着陸地点の不確定要素が大きくなるため、着陸地点で彗星活動が活発でありすぎない場所である必要があった。最終的に、すべての基準を考慮して、着陸地点は結合している二つの胴体のうち小さい方の胴体の上選ばれた。

### 3. フィラエの着陸

2014年11月12日、フィラエは、高度20kmの地点から、あらかじめ圧縮されたバネを用いた分離機構によって、ロゼッタ探査機から放出され、67P彗星の核に着陸した(図2)。フィラエは自前の推進力を持っておらず、噴出する彗星ガスによってわずかに減速されただけの自由落下で彗星表面に降りていった。フィラエの降下軌道はロゼッタ探査機の軌道と分離操作のみで制御するしかなく、フィラエ着陸機は回転する67P彗星核表面のターゲットエリアに、局所的に決まっている脱出速度以下で到達するようにしなければならなかった。さらに、着陸時にフィラエが転倒しないよう、横方向(彗星表面に平行な方向)の速度は可能な限り小さくする必要があった。

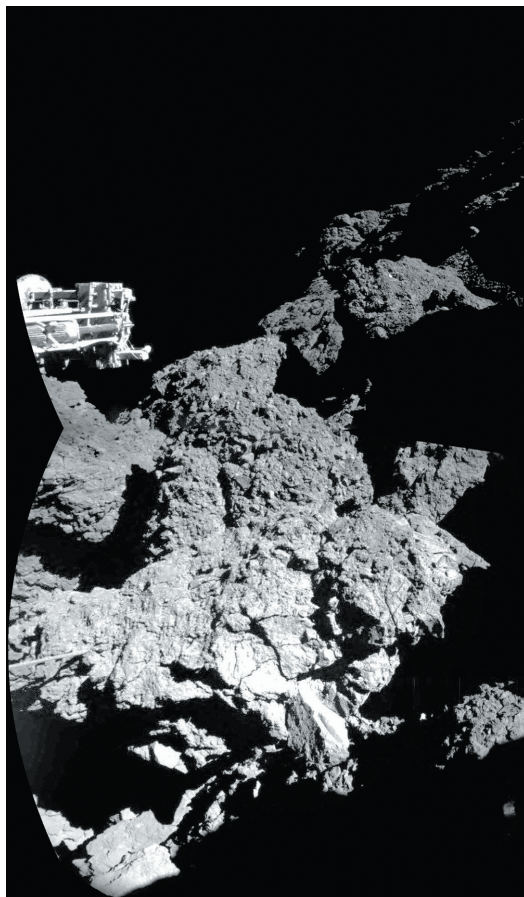


図4a: 最終着地点アビドスでフィラエのパノラマカメラが撮影した2枚の画像のモザイク。左上には探査機の足が見え、左下には彗星物質に接触しているアンテナが見える。見えている壁は約1メートル先にある。地平線はほぼ水平で、フィラエは窪みの中で約90°回転している。壁は地球の硬い岩石のように見えるが、ミネラル分を多く含み、有機物を加えた水氷である(Photo: ESA/Rosetta/Philae/CIVA)。

7時間かけた自由落下の間は地球からの介入が不可能だったが、フィラエは予定より1分弱早く、予測されたタッチダウンポイントからわずか約110メートルの地点に、0.95m/sの速度で彗星表面に到達した。これはロゼッタとフィラエの運用を担当したESA、フランスの宇宙機関CNES、ドイツ航空宇宙センター(DLR)のフライトチームにとって、ほぼねらい通りの着陸であり、大成功であった。

地表に降下する間、いくつかの機器が計測結果を記録し、画像を撮影した。その写真には、平坦でわずかに起伏のある地形が写っていた。そこには、10cm以下から数mの大きさの小石や岩が多く写っ

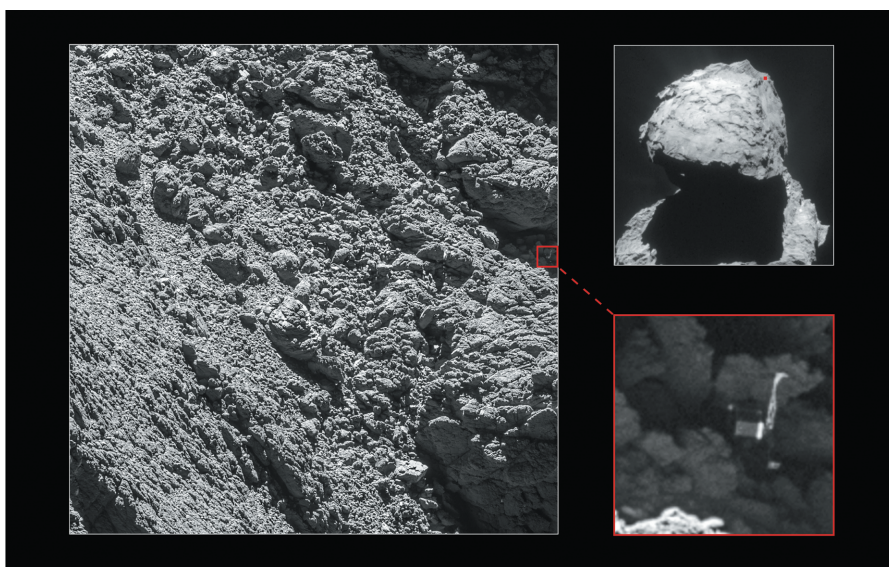


図4b:2016年9月2日, ロゼッタに搭載されたカメラでフィラエを発見した(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

ていて(図3), 表面の粗い部分と, 大きな塊が少ない滑らかな部分が区別できる。これは, 岩石が転がっているのか, それとも岩石の周囲の物質が完全に浸食されたのかは, まだ明らかになっていない。また, いくつかの大きな塊はダストで覆われていて, それは地球で見られる風による吹き溜まりのようである。これは, 彗星の活動によって動かされた物質であると考えられている。

残念なことに, フィラエは「アジルキア(Agilkia)」と名付けられた着陸予定地点で停止しなかった。最初の着地の後, 探査機を地面にしっかりと固定するはずの機構のうち二つが故障したのだ。探査機の上にあるコールドガス(訳注: 化学反応を利用しないスラスタ)のノズルが最初の着地の直後に点火してフィラエを地面に押し付け, 同時に2本の鉤が地面に突き刺さってしっかりとグリップするはずだったが, いずれもそうならなかった。幸いなことに, 搭載装置が収められた区画と着陸装置の間にある電気機械式のダンパーが, 意図したとおりに運動エネルギーの大部分を吸収することで, また宇宙空間に放り出されるという最悪の事態を防ぐことができた。しかし結果的に, フィラエはそれから何度も地面に着地しては跳ね返され, 2時間後に約1200メートル離れ

た場所で停止した。この時のフィラエの着陸の様子を再現した動画がインターネット上に公開されている<sup>2</sup>。

最終着陸地点である「アビドス(Abydos)」では, フィラエは穴やくぼみのような場所に好ましくない姿勢で着陸し, 約90度傾いて横向きになってしまった(図4)。搭載されたパノラマカメラで撮影された画像には, フィラエの足と地面に触れているアンテナが写っていて, 岩壁のようなゴツゴツした壁がいくつかの方向に見えている。これらの大部分はダストや有機物が混じった氷のように見え, 非常にもろくて粒の大きさもまちまちのようだが, その組成はわからなかった。アビドスの温度は, 着陸後の数日間, 夜間は-180度, 日中は-140度の間で変動した。このような低い温度では彗星の活動はほとんどなく, フィラエに搭載されたガス分析装置で彗星ガスが測定されなかったのだ。

フィラエの外側に設置された太陽電池は, 彗星1日あたり約1.5時間しか電力を供給できなかった。数カ月に及ぶ測定作業を予定していたにもかかわらず, 電力供給の時間はあまりにも短すぎた。そのため, 搭

<sup>2</sup>ESAが公開しているフィラエ着陸の再現動画([www.youtube.com/watch?v=rJ2eqH3Bz4c](http://www.youtube.com/watch?v=rJ2eqH3Bz4c)). 2021年11月時点で視聴可。

載された機器が約56時間の測定に成功した後、フィラエは冬眠に入った。

その後、彗星が太陽に接近したため日射量が増えて太陽電池の出力が上がり、フィラエは2015年4月の初めに再起動したと推測されている。2015年5月から7月にかけて、母船であるロゼッタ探査機を介して短期間にわたる無線通信が繰り返されたものの、フィラエの科学機器を再び使って計測することはもはやできなかった。ロゼッタのミッション終了のわずか4週間前の2016年9月2日にロゼッタに搭載されたカメラで撮影された画像で探査機が確認されるまで、フィラエの着陸地点は大まかにしか分からなかった。

#### 4. ロゼッタがチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星を探査

2014年11月にフィラエを着陸させた後、ロゼッタは67P彗星が太陽の周りを回る軌道に同行し、核の活動が拡大していく様子を詳細に観測した。予想通り、全表面のうち主に太陽の光を多く受ける昼側が活動した(図5)。活動がもっとも大きくなるのは通常、彗星上での正午前後から午後の早い時間帯に相当する場所に集中しているが、日の出から数分以内の場所で活動が突然始まる様子も観測された。

彗星ガスの測定結果は核から放出されるガスは主に水蒸気で構成されていることを示していて、水の生成率の測定結果からは、核が最も活発になる近日点でも核表面の約6%しか活動していないということが分かった。そのように活動は表面の小さな領域に集中しているが、局所的な日照条件や地形が重要な役割を果たしているようだ。太陽光にさらされている部分は、長い間日陰のままの部分よりも強く熱せられ、侵食が早くなる。場所によっては、活動の影響で数日から数週間で表面の構造が変化したところもあった(図6)。

ロゼッタ探査機が67P彗星の核に接近した際には、電波のドップラーシフトを利用して67P彗星の重力場を測定することができた。その結果、平均密度は約 $500\text{kg m}^{-3}$ であることがわかり、水氷の約半分、コルクと同程度の密度しかなく、他の彗星の核でも見られる典型的な値であることがわかった。そのた

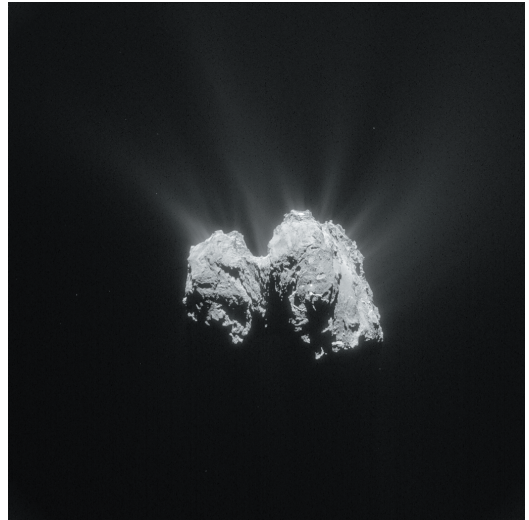


図5: 2015年5月3日の67P彗星。太陽からの輻射により、彗星核の日照側で活動が活発になっている(Photo: ESA/Rosetta/NAVCAM)。

め、67P彗星の核の主成分は水氷であると考えられるが、表面にはほんのわずかの水氷しか露出していないようだ(図7)。また、密度が低いのでこの彗星の核は非常に空隙率が高いと考えられる。

また、結合している二つの丸い胴体のうち、小さい方の胴体については内部構造も調べることができた[1]。この目的のためにロゼッタとフィラエには送信機と受信機が搭載されていて、両者の間で電波を往復させる観測を行った。電波が核の内部を透過させることで、核の内部構造をおおよそ推測できる。具体的には、彗星物質の誘電率や均質性、氷とダストの比率などを知ることができるのだ。そのような調査の結果、興味深い結果が得られた。電気的特性は、約10メートル以上の長さのスケールでかなり均一であることが分かった。推定される空隙率(porosity)は75%であることから、氷とダストの体積比は0.4~2.6の範囲の値となり、67P彗星の体積の約半分だけがダストや鉱物成分で構成されている一方、残りは空隙であることを意味している。ダスト観測装置で測定されたサブミリメートルの粒子のほとんどが同様に高い空隙率を持っていることから、67P彗星の物質はさらに小さなスケールでもとても多孔質であると言える[2]。

核はかなりの部分が水氷で構成されているが、その表面は入射した太陽光の5%程度しか反射してい

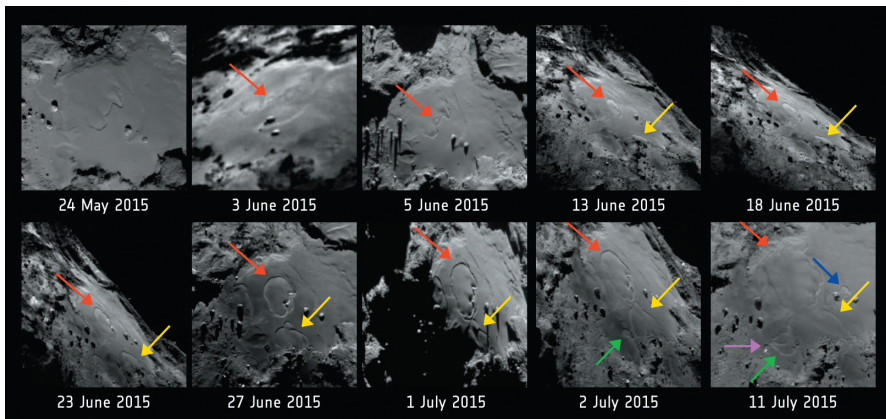


図6: 約2か月間の67P表面の変化(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

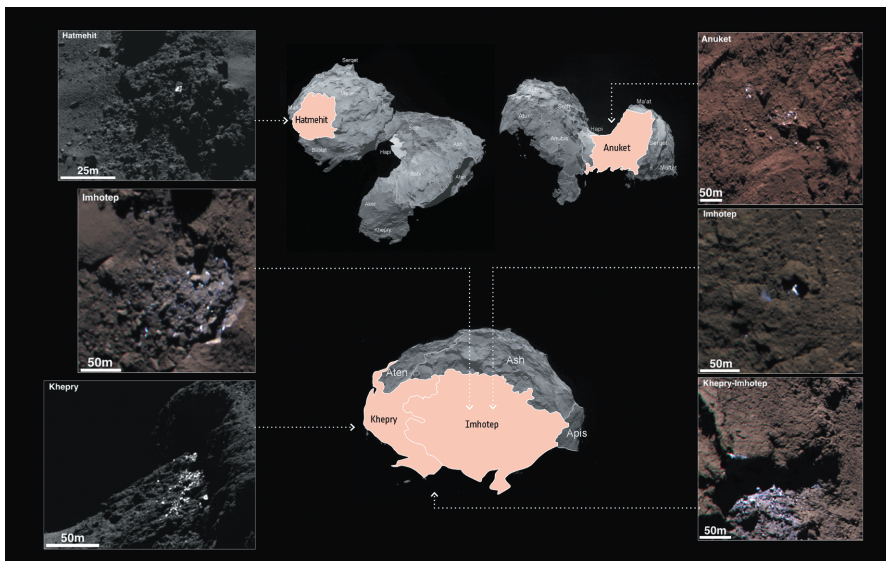


図7: ところどころに水の氷を発見(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

ない[3]. 他の彗星の核でも観測されるように、表面は石炭のように真っ黒なのだ。表面の大部分は微細なダストの層で覆われており、ロゼッタに搭載された赤外分光計の測定結果が示すように、おそらく非常に暗い有機物を含んでいるのだろう。そのせいで核の表面が暗い色をしているといえるが、この点については後述する。

フィラエが最初にタッチダウンしてから数分後にロゼッタ探査機が撮影した写真には、フィラエがアジルキア(Agilkia)の最初の着陸地点に残した足跡(訳注:着陸脚が着地した跡)が写っている。これらの足跡から、ダストの層の厚さは少なくとも10～

20cmであることが推測される。残りの表面では、ダストの層の厚さは分かっていないが、彗星活動によってダストが表面全体に撒き散らされるので場所によっては何メートルもあると思われる。そしてそのようなダストは彗星活動そのものにも影響を与える。なぜならば、たとえそれが薄いダスト層であっても、太陽光が土壌を透過して揮発性物質を昇華させるのを妨げるからだ。

フィラエの足(着陸脚)には加速度センサーが取り付けられており、最初のタッチダウンの際にスイッチが入れられた[4]。これらの測定結果から、ダストの下には非常に硬い層があるはずで、おそらく凍った

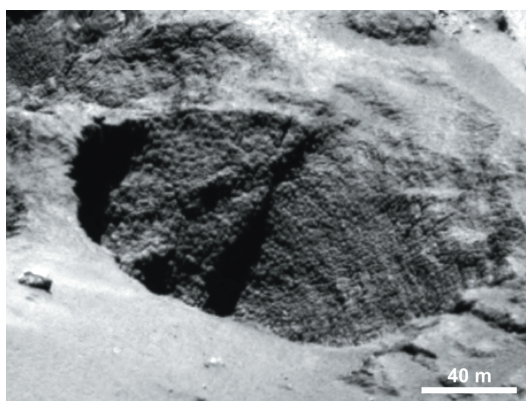


図8: 67P上の窪みの一つの壁面に見られる, 鳥肌のような粒状の粗い質感. 個々のスポットの大きさは約3m (Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

水氷でできているということがわかった. 最終着陸地点であるアビドス(Abydos)では, 長さ30cmの棒の地面への打ち込が試みられた[5]. 最大の衝撃力でも棒の先は地面を貫通しなかったが, 土壌の硬さを測定することができ, 測定値から硬い凍った氷であることがわかった.

表面のクレーター状の穴やピット(窪み)は, 彗星の活動に関連している可能性が高いようだ. ロゼッタが取得した画像によると, 数メートルの大きさのピットの壁には, 研究者達が鳥肌に例えるような荒い粒状の構造が見ることができ(図8), このように彗星核の表層下の様子を見ることができる. これらの構造が彗星核形成時の名残なのか, それとも活動の結果なのか, さらには隕石や小さな小惑星の衝突によるものなのかは, 今のところ不明のままである. ある場所では, ピットの壁からガスやダストが漏れ出る様子が観測され, また別の場所では, ガスやダストが空間に向かって一方向に向かって吹き出す現象, いわゆるジェットの噴き出し口となっていることが分かった.

ピットの大部分が内部にある要因によって発生したと考えるならば[6], 次のようなことが起きると考えられる. まずCOやCO<sub>2</sub>などの揮発性物質の昇華により, 深さ数百メートルにいたるまでの領域に小さな空洞が形成される. これらの空洞が時間をかけて成長すると, 上の被覆層がどんどん薄くなって, ついには崩壊あるいは昇華ガスで吹き飛ばされることでオープンピットが形成されるのだ. その後, 太陽光に

よって露出した壁から物質が昇華し, ピットはさらに成長し続けることになる. もしこの場所での活動が低下すると, 彗星の他の場所からの堆積物で埋められることもありえる.

したがって, 空洞の形成には, 昇華に必要な熱を供給するための太陽光が必要となる. そのためには, 太陽の光が深く浸透するような割れ目や歪みが存在することが大前提となりそうだ. しかし, 彗星の核の内部に熱源があるとも考えられる. その熱源として考えられているのは, 約-140℃の温度で起こり大きなエネルギーを放出するという, 非晶質の水氷が結晶質の水氷に変化による発熱過程である. しかし, 彗星に非晶質の水氷や放射性核種が含まれているかどうか, 含まれているとしたらどのくらいの量なのかは, まだ明らかになっていない. 他の熱源として考えられるのは, 彗星が形成されたときにすでに存在していた長寿命の放射性核種で, その崩壊熱によっていまだに内部が加熱されるとも考えられる.

ピットができた別の原因として, 隕石や小惑星が衝突してできたクレーターではないかと考えられている. このような説明は, 過去の彗星探査ミッションでの観測結果からすでに提唱されてきた. 多孔質体を使った実験室での衝突実験では, 67P彗星で観測されたピットと非常によく似た衝突構造が見られた. これは, 例えば月面にあるような見慣れた衝突クレーターのように, 固体の岩石に衝突して形成されたクレーターが典型的なお椀型をしているのとは全く異なる. このピット構造が, 活動と衝突クレーター, あるいはその両方のいずれの形成過程によってもたらされたのか, 現時点では明らかになっていない.

## 5. 二重結合天体

ダンベル型の67P彗星の核(訳注: 湯船に浮かべるアヒルのおもちゃに似ているとも云われた)は, 二つの独立した天体から構成されているようだ. また, 彗星表面のいくつかの場所では, 少なくとも800メートルの深さまでたどることができる段丘として現れた層で形成されているようだ. 同様の地層は, 他ミッションによって観測されたテンペル第1彗星(9P/Tempel 1またはTempel 1)やヴィルト第2彗星(81P/WildまたはWild 2)でも発見されているが,



撮影された画像の解像度は十分ではなく、その起源を調べることができなかった。

ロゼッタによって撮影された画像と、それを基に作成した彗星核の三次元モデルによって、核表面の局所的な重力場に対する核内部の層構造を初めて解析することができた[7]。それによると、ダンベルの両端は、重力によって結合された二つの胴体を表しているようだ。層構造は一種のタマネギの皮のような構造をしているが、これが45億6000万年前に彗星の核が形成されたときの状態を反映しているのか、それとも後から作られたものなのかは、まだ不明だ。また、ロゼッタ探査機の観測データは二つの胴体の組成の違いを示していて、約10%の密度の違いがあるようだ。これらの観測事実は、それぞれの胴体の起源が異なることを示している。

いくつかの彗星では、近日点付近の活動によるアウトガスを主な要因として、比較的短期間で自転周期の大きな変化が観測されている。自転周期は、ロケットのノズルのように減速したり加速したりすることがある。67Pの自転周期は、前回の近日点通過(2009年)の際に約22分間短くなり、現在(2016年の時点)は約12.4時間で自転している。しかし、今後、自転がどのように推移するかを予測することは困難である。

67Pでは、特に二つの胴体が結合している天体の間の「首」と呼ばれる部分に明確な断層が見られる。これは、彗星本体に強い張力がかかっていることを示している。このような二重結合天体が異なる回転速度でどのように振る舞うかを調べるには、彗星材料の破壊力学的特性を考慮して、コンピュータ・シミュレーションを用いることができる。それによって、もし7時間以下の自転時間で回転した場合、核は遠心力によって首の部分で分裂してしまい[7]、切り離された二つの小天体は、しばらくすると再び接近して新しい二重結合天体を形成する可能性があることがわかった。

他のダンベル型の彗星核でも、そのような再構成が行われていた可能性がある。成層化は、崩壊時に放出された小片やダストが次第に本体に集まってくる過程の結果であるといえる。そうすると、彗星の核はこれまで想定されていたほど不変ではないのだろう。これまで重要視されてこなかったこのプロセスが、彗星核やその他の小天体の形成にどの程度重要

であるのか、現在のところ不明である。

探査機や地球のレーダーで撮影された小惑星や彗星核の高解像度画像の数が増えていることから、小さな天体には二重結合天体の形状がわりと多いのではないかと考えられている。2019年にNew Horizons探査機が訪れたカイパーベルト天体486958 Arrokothもその代表例だ。

## 6. 化学成分

ロゼッタに搭載されたガス質量分析計は、67P彗星の核に含まれる多数の化学物質を測定した。他の彗星に比べて非常に低い温度で昇華する揮発性物質であるCOとCO<sub>2</sub>の割合が高いことから、67Pの組成は核の形成時からほとんど変化していないことがわかった。このことは、67Pがロゼッタミッションのターゲットとして選ばれた際の重要な選択基準だった。

水蒸気(H<sub>2</sub>O)、CO、CO<sub>2</sub>に続いて彗星ガスの中で4番目に多いのは酸素(O<sub>2</sub>)で、67Pの彗星のコマで初めて発見された。このほか、窒素(N<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)、エタン(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)、アルゴンなどの揮発性物質も測定された。67P彗星核の夏半球と冬半球では、コマに含まれるそれらの物質の存在量には大きな違いが見られた[10](図9)。

測定されたいくつかの物質の組成と存在量から、67P彗星の核は約-253℃を下回る温度で形成されたと考えられる。しかしながら、そのような低温となるには純粋な凝縮物質である必要があるものの、非晶質の氷の形で保存されるのであれば、かなり高温の約-140℃でも可能となる。いずれにしても、彗星の核は太陽から遠く離れた太陽系星雲の非常に冷たい領域で形成されたことが証明された。

彗星に関連してよく議論されるのは、複雑な有機分子を形成するための基本的な成分を彗星が地球にもたらし、最終的に生命が誕生したのではないかということだ。ロゼッタミッション以前には、すでに多くの有機物が彗星にあると観測されていた。ロゼッタ探査機とフィラエ着陸機に搭載された質量分析計によって、これまでの彗星の研究では知られていなかった数十種類の物質が見つかった。今回見つかった物質の中には、これまでヴァルト第2彗星でし

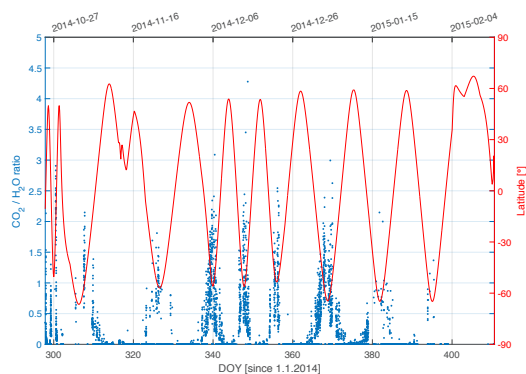


図9: 二酸化炭素と水:ロゼッタに搭載されたガス質量分析計で測定された $\text{CO}_2$ と $\text{H}_2\text{O}$ の比(青)と彗星核上の探査機の鉛直下点の緯度(赤)の関係。測定された $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比は、彗星の緯度によって大きく変化する。今回の測定では、南半球(冬)よりも北半球(夏)の方が照度が高かった。水は $\text{CO}_2$ よりもはるかに昇華温度が高いため、冬の季節である南半球の上空では、水はかなり少なかった([10])。

か検出されていなかった単純なアミノ酸であるグリシンも含まれている。これらの物質の多くは、我々が知っているような生命の基本的な成分を合成するための重要な分子で [11], これらほとんどは、星間雲の中にも存在する。しかし、星間物質からの比較的複雑な化学物質が、太陽系形成の間ほとんど変化せずに彗星の核に取り込まれたのか、あるいはしばらくしてからその大部分が彗星の中でのみ形成されたのかは、依然として未解決の問題のままである。

67Pの表面には様々な炭化水素が複雑に混ざっているが、これまでに詳細な同定はできていない[3]。また、コマで測定されたダスト粒子には、始原的隕石の一種である炭素質コンドライトに類似した有機分子が多く含まれていた。残念ながら、これまでに調べられたダスト粒子の中には、いずれの有機化合物も確認できていない[12]。

## 7. 地球上の水はどこから来ているのだろうか?

彗星は、地球上の水のほとんどがどこから来たのかという疑問の解決にも役立つかもしれない。内太陽系での生成条件を考えると、地球の水の量は現在よりもはるかに少ないはずである。そのため、地球上の水の大部分は、地球が形成された後にもたらされ

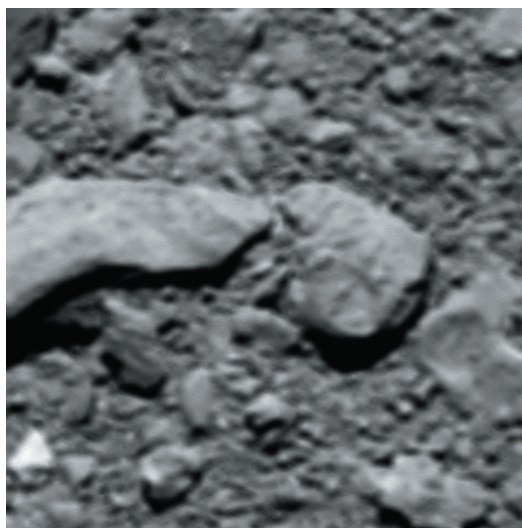


図10: 地上約20mのロゼッタの最後の画像。OSIRISカメラが十分に焦点を合わせることができなかった。解像度は1ピクセルあたり2mm、縦方向の拡大は約96mであった(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team)。

たと考えられている。彗星の核は主に水の氷で構成されており、初期の地球への衝突は現在よりもはるかに頻繁であったため、彗星は地球の水の起源の有力な候補と考えられている。

地球上の水の起源を明らかにするために、重水素(重水素)と通常の水素の関係(D/H比)について考えてみると次のようになる。D/H比は、彗星だけでなく地球の海や他の天体でも決めることができ、オールト雲から来たいくつかの彗星では、D/H比の値が、地球上で見られる値よりもはるかに高い結果となった。一方、原始太陽系星雲では、D/H比の値は地球よりもかなり低くなっている。ロゼッタによる測定でも、67Pでは地球のものよりも約3倍も高い値が得られている。このように、彗星は地球の海水の唯一の供給源ではないようだ。

ロゼッタはすでに多くの素晴らしい結果を出しているが、観測されたデータ全体を包括的に解釈することはまだほとんどできていない。多数のプロセスを詳細に理解するためには、実験室での人工彗星の実験やコンピュータシミュレーションが大きく貢献する。パズルのすべてのピースを組み合わせることで全体像を把握するには何年もかかるだろう。また、これらの結果は、将来の彗星探査の準備にも利用されるだろう。

このような小さな天体の探査における次の大きな

ステップは、彗星の核から物質サンプルを採取して彗星の温度で凍結させた状態で地球に輸送し、地球の研究機関で利用可能な最高の技術で分析することだ。これは大きな技術的な挑戦であり、このマイルストーンがいつ達成されるかは未知数である。

## 8. まとめ

2016年9月30日に探査機が彗星に落下することで終了したロゼッタ・ミッションは(図10)、彗星とその形成に関する研究において画期的な宇宙ミッションだった。その中でも特に驚いたのは、目的天体であった67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星が不規則なダンベル型をしていたことだ。この彗星は、おそらく二つの独立した天体が重力によって結合したものだと思われる。彗星の表面は非常に粗く、様々な過程を経たことを示す非常に多様な地形が見られた。彗星核は、10~100メートル以上の大きさのスケールでは均質であると考えられるが、それよりも小さなスケールでは不均質であることが、その活動の原因と考えられる。彗星核の活動は小さな領域に集中しており、また、数日から数週間の間にかかる表面変化は局所的なものだった。彗星物質の中には多くの有機物質が測定され、その中には生命の基本的な成分を合成するための重要な分子とされるものも含まれている。

## 参考文献

- [1] Kofman, W. et al., 2015, *Science* 349, aab0639-1.
- [2] Langevin, Y., 2016, *Icarus* 271, 76.
- [3] Capaccioni, F. et al., 2015, *Science* 347, aa0628-1.
- [4] Biele, J. et al., 2015, *Science* 349, aaa9816-1.
- [5] Spohn, T. et al., 2015, *Science* 349, aab0464-1.
- [6] Vincent, J.-B. et al., 2015, *Nature* 523, 63.
- [7] Okamoto, T. and Nakamura, A. M., 2017, *Icarus* 292, 234.
- [8] Franceschi, M. et al., 2020, *PNAS* 117, 10181.
- [9] Hirabayashi, M. et al., 2016, *Nature* 534, 352.
- [10] Mall, U. et al., 2016, *Astrophys. J.* 819, 126.
- [11] Goesmann, F. et al., 2015, *Science* 349, aab0689-1.
- [12] Fray, N. et al., 2016, *Nature* 538, 72.

## インターネット上の参考ウェブサイト

ロゼッタが惑星間を移動する際のアニメーション。  
[www.youtube.com/watch?v=5yoYZERieuQ](http://www.youtube.com/watch?v=5yoYZERieuQ)

フィラエの着陸を再現する  
[www.youtube.com/watch?v=rJ2eqH3Bz4c](http://www.youtube.com/watch?v=rJ2eqH3Bz4c)

ESA, DLR および MPSのウェブサイト  
[rosetta.esa.int](http://rosetta.esa.int)  
[www.dlr.de/rosetta](http://www.dlr.de/rosetta)  
[www.mps.mpg.de/de](http://www.mps.mpg.de/de)

ロゼッタおよびフィラエのミッション搭載機器のサイト  
[sci.esa.int/rosetta/35061-instruments](http://sci.esa.int/rosetta/35061-instruments)  
[sci.esa.int/rosetta/31445-instruments](http://sci.esa.int/rosetta/31445-instruments)