

## 実験で解明した宇宙風化作用：月・小惑星の「色」の変化

佐々木晶 Sho SASAKI

月や小惑星といった大気のない固体天体の表面は、隕石の激しい衝突で生成されたレゴリスというソイル状の微粒子で主に構成されている。直接の証拠として挙げられるのは、ソイル状の月面のレゴリスに刻まれたアポロ宇宙飛行士の足跡である。レゴリスの存在は反射光の位相角依存性や、赤外線から求まる熱慣性のデータ、さらには電波の反射などからも推測される。

ところで、アポロ探査が持ち帰った月の石とソイル状物質には、光学的に大きな違いがあった。平均的な化学組成は同じでも、月の石を粉末にしたものと、月ソイルの反射スペクトルでは、ソイルの方が暗く、しかも近赤外よりも可視の方が暗いというスペクトルの赤化を示していた。また、反射スペクトル中の鉱物特有の吸収帯も非常に弱い。この石粉末からソイルへの光学的性質の変化を、宇宙風化作用 (Space Weathering) と呼んでいる (図1)。原因はソイルに大量に含まれるガラス状物質であると考えられていた。大規模な衝突のときに溶融・飛散・急冷されて形成されたガラス状物質が、反射スペクトルの暗化、赤化を支配しているという説である。

しかし、ガラス質が形成されるだけでは、鉱物吸収帯こそ弱くなるものの、暗化や赤化を単純に説明することは難しい。Hapke は 1970 年代にすでに、「色」変化の原因は、ソイル粒子中に、ナノメートルスケールの鉄微粒子が形成されたことが原因であると考えた (Hapke, 1973)。実際に、電子スピン共鳴の強度は、暗くなったソイルほど強く、鉄微粒子が存在する可能性を示唆する。しかし、ガラス質を多く含むソイルフラクションほど暗いという傾向があり、鉄微粒子説は支持を受けなかった。

## 小惑星反射スペクトルがもたらす問題点

最初に分光データの得られた小惑星はベスタである (McCord et al., 1970)。ベスタとエコンドライトの反射スペクトルが比較的良く合ったため、小惑星帯では宇宙風化作用による「色」の変化は小さいと、はじめは考えられた。小惑星帯での衝突速度は月面よりもずっと小さく、ガラス質物質を生むような高速衝突は少ない。起きたとしても小惑星そのものが破壊されてしまう。そのため、小惑星では月面のような宇宙風化作用がないのでは、という

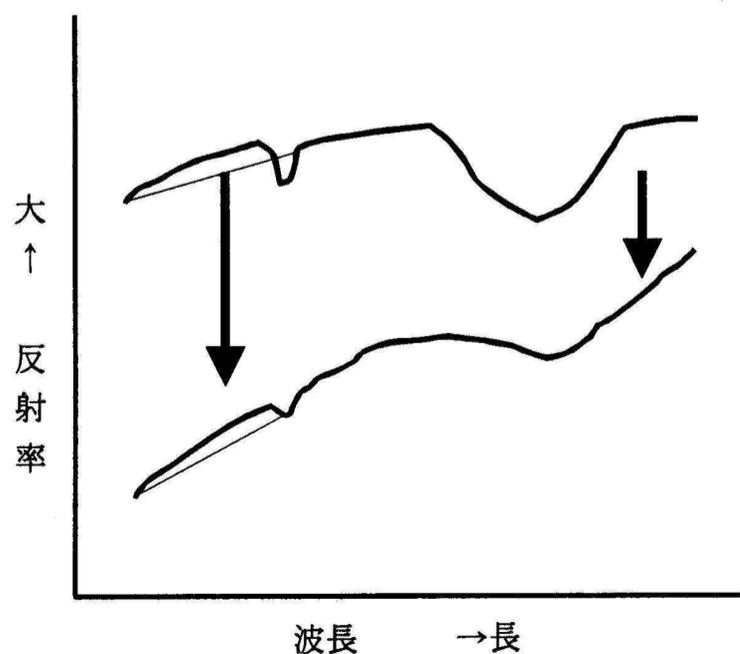


図1 宇宙風化作用による反射スペクトル変化の特徴。反射スペクトルの低下・赤化と吸収帯の浅化。

考えが支配的であった。

一方、小惑星の分光観測が進むにつれて、大きな問題が生じた。それは、地球上に落下する隕石の大部分を占める普通コンドライトの反射スペクトルに対応する小惑星が非常に少ない。一方で、小惑星帯の多くを占めるS型と呼ばれる小惑星の反射スペクトルに対応する隕石（石鉄隕石）は非常に少ないことである。S型小惑星の反射スペクトルは明らかな赤化傾向がある。観測データが増えるとともに、宇宙風化作用により、普通コンドライトの反射スペクトルがS型の反射スペクトルに変化するという意見が強くなってきた。しかし、地球にやってくる隕石は小惑星帯の限られた共鳴軌道に由来するため、小惑星帯の型の分布と隕石の種類分布には不一致が出るという反論がある。普通コンドライトを供給するような天体は、小さくて観測にかかりにくいという主張もある。

Binzel et al. (1996) は、比較的小さな小惑星を数多く分光的に観測して、S型と普通コンドライトの間にはいる反射スペクトルを持つ小惑星を多く発見した。これは、宇宙風化作用により連続的に反射スペクトルが変化している可能性を示している。決定的になったのは、ガリレオ探査機によるS型小惑星イダの観測である。比較的新しいクレーター内部や放出物では、赤化が進んでいなくて、S型と普通コンドライトの間の反射スペクトルを示している。新鮮な物質は普通コンドライトの「色」に近く、宇宙空間に晒されていると時間とともにS型の「色」へと変化していく。NEAR探査機のエロスの観測も同様の主張を裏付けるデータを得ている。

#### 宇宙風化作用研究の歩み

さて、私がどのように宇宙風化作用の研究に引きつけられて研究を開始したか、振り返ってみよう。1996年夏にフランスのベルサイユで開かれた「小惑星・彗星・流星」会議に出席したとき、一つの講演に興味を持った。ロシアのMorozがレーザー照射により宇宙風化作用の加熱過程を模擬して、反射スペクトルの変化が得られた、という発表を行った。宮殿で開かれた懇親会で彼女に直接話を聴くと、使っているのはマイクロ秒のパルスレーザーで、照射試料にはガラスができていくという(Moroz et al., 1996)。このとき、マイクロ秒の加熱は長すぎるのではないかと直感した。簡単に見積もると、ミクロンサイズのダスト微粒子の10km/s以上の高速衝突による加熱時間はナノ秒のオーダーであることがわかる。われわれのグループは宇宙用のダスト分析機の開発を進めていた。ダスト衝突を模擬するために使われるパルスレーザーのパルス幅は実際にナノ秒オーダーである。そこで、実際にナノ秒パルスレーザーを鉱物に当てて、どのような変化が生じるか実験することを計画して、科学研究費の萌芽的研究を申請した。

翌年、わずかではあるが小型チェンバーを製作できる程度の予算が認められた。また、宇宙研を通じてダスト計測器開発用としてナノ秒パルスレーザーの購入予算がついた。そこで、修士課程の学生で小惑星に関する研究を希望していた山田真保を説得して、宇宙風化作用の実験を開始した。まず、実験用に使うレーザーの購入交渉からのスタートである。照射するのは、レゴリス粒子を想定して、鉱物を粉碎した粉末である。反射スペクトル測定のためには少なくとも5mm四方の均質な照射面積が必要である。均質な照射の方法を、山田と宇宙研の藤原顕と何度も議論した

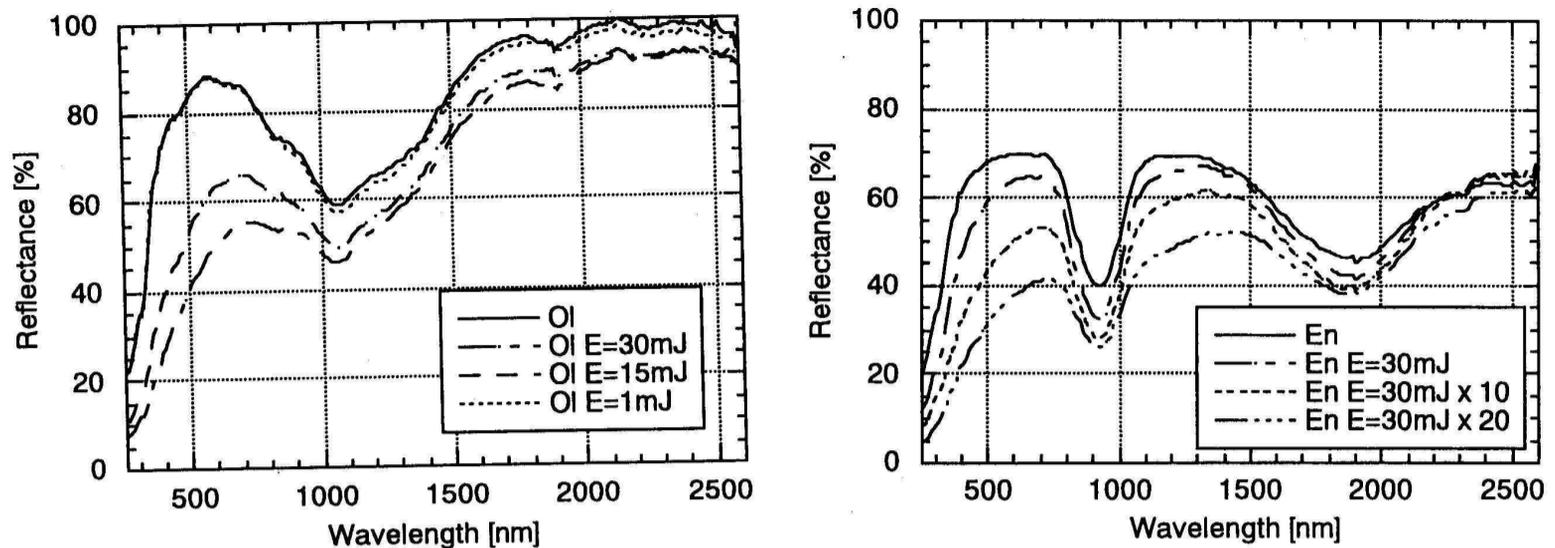


図2 パルスレーザー照射によるカンラン石（サンカルロスオリビン:FeO=8.97wt%）（上）と輝石（エンスタタイト:FeO=9.88wt%）（下）の反射スペクトル変化。横軸は波長、縦軸は測定した反射率（入射角30度、反射角0度の二方向反射率）。1, 5, 30mJはパルスのエネルギーを示す。輝石は繰り返し照射を行わないと大きな変化は生じない。

結果、レーザーのビームを振るよりも、ターゲットをX-Yステージで動かす方がよい。また、サンプルを入れた小型真空チェンバー全体をX-Yステージの上に乗せて、ガラス窓を通じてレーザーを入射すれば、均質な照射が行えるめどがついた。そして数ヶ月かけて照射システムを作り上げていった。

ダスト微粒子照射の他にも、太陽風粒子の照射も宇宙風化作用にとって重要であると考えられていた。太陽風粒子の照射自体が加熱過程になるだけではなく、打ち込まれた水素原子が、酸化鉄の還元剤として使われる可能性がある。そのため、加速器を使って太陽フレアに相当するMeVのエネルギーの水素原子を粒子試料へ打ち込むことも行った。

年末にレーザーが一度壊れるというトラブルがあったが、光学系ではなく回路部のトラブルであったためボードを至急交換することで大事がなく実験を継続することができた。翌年早々には、カンラン石粉末へのレーザー照射で色が変化すること、さらに、反射スペクトル全体としても赤化の傾向を示すことが明らかになった。水素原子の打ち込みだけでもわずかに反射スペクトルは変化するがレーザー照射と比較すると弱い。ただ、打ち込んだ量が宇宙空間での照射量に比べるとはるかに少ない。一方、水素原子の打ち込みのあとにレーザー照射を行っても、水素なしの場合と比べて、「色」変化が大きくなることはなかった。

さらに、エンスタタイトやハイパーシンといった輝石試料についても実験を行った。その結果、同じ強度・回数の照射では、輝石よりもカンラン石の方が反射率の低下・赤化が大きいことが明らかになった（図2）。これは、宇宙風化作用に鉱物組成依存性があることを示している。多くの良質なデータは、山田が修士論文を提出した後に続けた、追加の実験から得られた。（この経験は、良い結果を得るためには修士論文を提出後も研究を続けることが重要である、という教訓を与えた。）この実験結果を整理して、6月の南極隕石シンポジウムで発表したところ、ブラウン大学の廣井孝弘より、得られた反射スペクトルが、一部の小惑星のデータに似ているとの指摘が

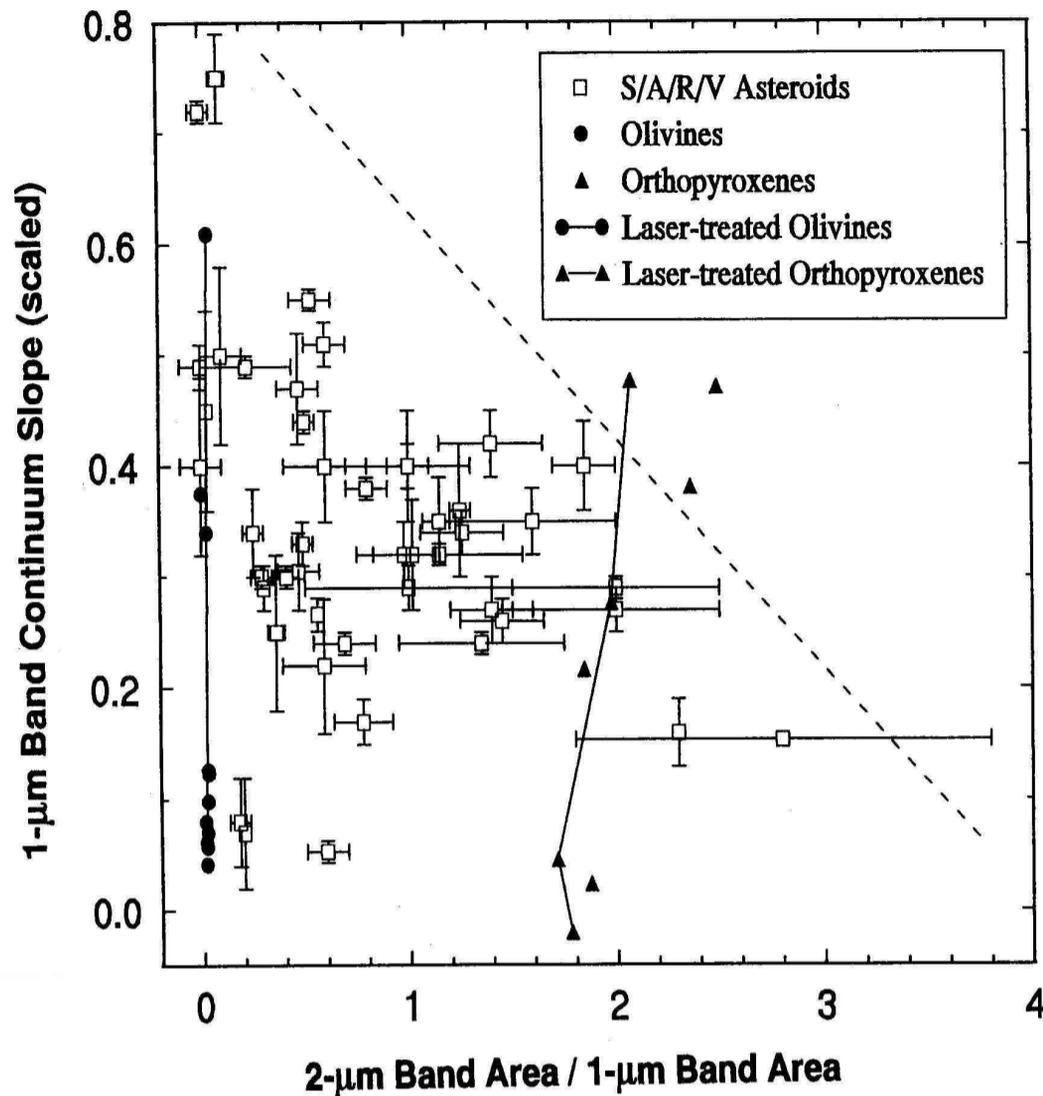


図3 小惑星(S,A,R,V型)の可視・近赤外反射スペクトルの1ミクロン帯の傾き(縦軸)と「2ミクロン帯面積÷1ミクロン帯の面積」(横軸)の比較。左側ほどカンラン石に富み、右側ほど輝石に富む。照射実験で使った試料の反射スペクトルから求めた値もグラフに入れてある。

あった。実際に、照射した後のスペクトルを小惑星の観測データと比較すると、小惑星 Aeternitas の反射スペクトルはカンラン石へレーザを照射後の反射スペクトルとほぼ一致した。この結果を加えて、われわれのそれまでの実験結果を Yamada et al. (1999) にまとめた。

また実際の小惑星の反射スペクトルの1ミクロン吸収帯付近の傾きと、1ミクロン、2ミクロンの吸収帯の面積比との関係を調べてみた。輝石が1ミクロン、2ミクロンの両方に吸収帯がある一方、カンラン石には1ミクロン付近の吸収帯しか存在しない。そのため、2ミクロン帯面積÷1ミクロン帯の面積という値は低いほどカンラン石に富む。S型などの小惑星の反射スペクトルの傾きは、カンラン石に富むほど大きい。つまり赤化しているということがわかった(図3)。さらに、レーザ照射を行った試料の反射スペクトルを混合させることで、小惑星 Dembowska と Aeternitas の観測スペクトルをほぼ再現できることが可能であることも示した。この結果を、廣井が主となって Meteoritics and Planetary Science 誌に1999年に投稿したが、小惑星の宇宙風化作用に反対する編集者と査読者に審査が回ったため、再投稿を経て最終的に掲載されたのは2001年末であった(Hiroi and Sasaki, 2001)。

宇宙風化の原因はなにか

われわれは、パルスレーザ照射で反射率の低下、赤化が起きることは示したが、ミクロスケールで何が起きているかはまだわからなかった。光学顕微鏡の観察では、色が変わっているのは粒

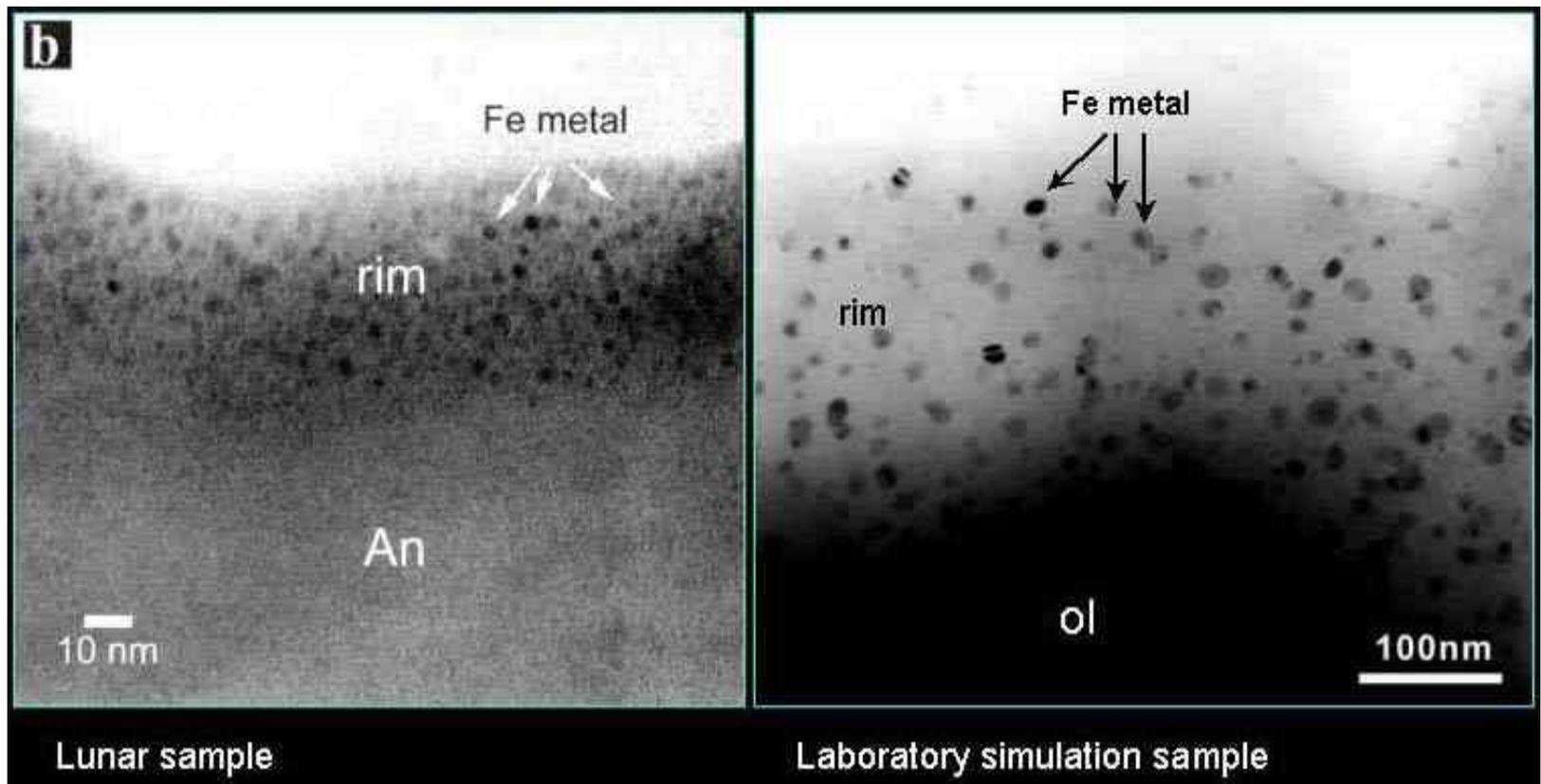


図4 月ソイルのリム中の鉄微粒子（左）と、パルスレーザー照射を行ったカンラン石粒子のリム中の鉄微粒子（右）。

子の周囲の部分のようである。Yamada et al. (1999) の論文では、永原裕子が行った走査型電子顕微鏡による観察結果を使い議論している。照射を複数回行った表面には小孔が空いていて、いかにも蒸発による変成が進んでいるように見える。実際に、レーザー照射時には真空ゲージの値が変化するため、表面物質が蒸発していることは予想していた。また、粒子が飛散するのを防ぐためにサンプルの上方に置いたカバーガラスに蒸着した物質に色がついていた。そのため、蒸発した残渣ではなく、再凝縮したときに色の変化が起きたと考えた。また、カンラン石の磨いた結晶表面にレーザーを照射した場合、表面は少し削れるが、色の変化は全く認められなかった。この場合は、蒸発した物質は再凝縮せずに飛散してしまったと考えられる。照射対象がレゴリス状の粒子の場合、蒸発物質が、近くの他の粒子表面に凝縮できるため色の変化が起きるのではないかと期待できる。

宇宙風化作用の原因として Hapke が提唱していた鉄微粒子のサイズは 10nm スケールである。実際に月のソイルで Keller らが発見した鉄微粒子のサイズもこれに対応する (Keller and McKay, 1993)。この確認のためには、サンプルの透過型電子顕微鏡による観察が必須である。はじめは、カンラン石の結晶にレーザー照射を行ったサンプルを張り合わせたものから（イオン照射により）薄膜を作り、照射表面を観察したが、変化は見られなかった。結晶表面への照射だと「色」変化を引き起こさないという観察を裏付けた。そのため、レゴリス状物質に照射したサンプルから「色」のついた粒子を取りだして、それより電子顕微鏡試料を作り観察する必要がある。2000年3月の月惑星会議で、電子顕微鏡および原子間力顕微鏡を使った宇宙塵の研究をドイツで行っていて、神戸大学の大学院に戻る予定の中村圭子と会った。宇宙風化作用の照射試料で微小鉄が確認できたら面白いという話をしたところ、興味をもってくれて、レーザー照射したカンラン石粒子

からマイクロトームで薄片試料を作り、神戸大学で透過電子顕微鏡観察を行うことになった。

早くも5月に最初の結果が出た。カンラン石粒子の周囲にアモルファスのリムが形成されていて、その中に数 nm から数 10nm の微小粒子が多数発見された。分布形態は、Keller らが月ソイルで観察したものと非常によく似ている(図4)。蒸発したものが再凝縮する過程で生まれたリムであることは、組成からほぼ推定できる。さらに、個々の微小粒子の回折パターンを撮影することに成功した。金属鉄  $\alpha$ -Fe の (110) 面の間隔に相当する間隔 0.204nm の明瞭な格子縞が観察された。これより、パルスレーザー照射により鉄微粒子が形成されていて、他に大きな変化はないため、反射スペクトル変化の原因となっていることを示すことができた。この結果を、中村が8月に隕石学会で報告したところ反響は非常に大きかった。反射スペクトル変化と鉄微粒子を関係づけたわれわれの論文は、一度、Science 誌に受付を断られたが、最終的に2001年3月にNature 誌に掲載された(Sasaki et al., 2001)。この間、試料へのレーザー照射と反射スペクトル測定が、倉橋映里香、濱邊好美らによって行われた。

2000～2001年はちょうど、Pieters らが月の宇宙風化作用が鉄微粒子によると結論するまとめの研究を行い、Hapke が鉄微粒子による宇宙風化作用の理論的見積もりをまとめた論文を出したタイミングとも重なった。現在では、宇宙風化作用が、宇宙空間ダストの高速衝突加熱による、鉄微粒子形成が原因ということは、ほぼ確立されている。

#### 現在の研究とこれからの課題

われわれの実験は、現在は倉橋が中心となり、混合物や隕石試料へのレーザー照射によるスペクトル変化の研究を進行させている。また、阪大の山中千博と協力して、レーザー照射した試料では電子スピン共鳴のシグナルが強く出て、鉄微粒子の生成に対応していることがわかった。

宇宙風化作用の程度を正確に見積もることは、分光観測から天体表面の組成を求める上で、非常に重要である。とくに、日本が計画している、小惑星探査(MUSES-C)、月探査(SELENE)、水星探査(BepiColombo)では、宇宙風化作用の進んだ天体を研究する可能性が高い。探査機から分解能のよい観測を行えば、新鮮なクレーターなど比較的宇宙風化作用の弱い地域の反射スペクトルを求めることができる。これと広い範囲のデータを比較することで、宇宙風化作用の進行度と、その影響を考慮した、表面の鉱物組成を求めることが可能になるだろう。

この宇宙風化作用の研究には多くの人たちの協力がある。実験・観察を主に行ったのは、山田真保、倉橋映里香、濱邊好美、中村圭子という若い大学院生たちである。データ解釈では、常にブラウン大学の廣井孝弘が重要な役割を果たしてきている。実験の初期には、宇宙研の藤原顕、長谷川直、矢野創、東大の永原裕子、秋山演亮、小暮敏博、田賀井篤平、小林紘一、柴田裕実、川西俊男、森田明、東京水産大の大橋英雄、宇宙開発事業団の大嶽久志、大和田淳子らの協力が重要であった。また、東大の塩見慶、中村正人とは紫外領域の反射率変化の研究を行い、「のぞみ」の月面観測データと比較を行った。東大の杉田精司、宮本正道、神戸大の留岡和重、大阪大の山中千博、さらに、Rick Binzel, Tom Burbine, Clark Chapman, Beth Clark, Lyuba Moroz ら、われわれの研究に協力・支持してくれた国内外の研究者たちにも感謝したい。

## 参考文献

- Binzel, R. et al. (1996) Spectral properties of near-Earth asteroids: Evidence for sources of ordinary chondrite meteorites, *Science* 273, 946-948.
- Hapke, B. (1973) Darkening of silicate rocks by solar wind sputtering, *Moon* 7, 342-355.
- Hapke, B. (2001) Space weathering from Mercury to the asteroid belt, *J. Geophys. Res.* 106, 10039-10073.
- Hiroi, T. and Sasaki, S. (2001) Importance of Space Weathering Simulation Products in Compositional Modeling of Asteroids: 349 Dembowska and 446 Aeternitas as Examples, *Meteor. Planet. Sci.*, 36, 1587-1596.
- Keller, L. P. and McKay, D. S. (1993) Discovery of vapor deposits in the lunar regolith, *Science* 261, 1305-1307.
- McCord, T. B., Adams, J., and Johnson, T. (1970) Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications, *Science* 167, 1445-1447.
- Moroz, L. et al. (1996) Optical effects of regolith processes on S-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrites and other mafic materials, *Icarus* 122, 366-382.
- Pieters, C. M. et al. (2000) Space weathering on airless bodies: Resolving a mystery with lunar samples, *Meteor. Planet. Sci.* 35, 1101-1107.
- Sasaki, S., et al. (2001) Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar-like space weathering, *Nature* 410, 555-557.
- Yamada, M., et al. (1999) Simulation of Space Weathering of Planet-Forming Materials: Nanosecond Pulse Laser Irradiation and Proton Implantation on Olivine and Pyroxene Samples, *Earth Planets Space*, 51, 1255-1265.

(東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学)

---

## 論文紹介

### 炭素質隕石から発見された糖関連有機化合物

Cooper, G., 他5名, 2001, Carbonaceous meteorites as a source of sugar-related organic compounds for the early Earth. *Nature*, 414, 879-883.

生命体にとって必須の物質であり、生命の誕生にも重要な役割を演じたと考えられる糖とそれに関連する化合物、ポリオール類 (polyols) が、隕石中に存在するという確実な証拠はこれまで報告がなく、生物学的に重要な有機化合物が地球上でどのようにして生まれたかについての、われわれの知識は不十分であった。今回著者たち (NASA エームズ研究センター) は、炭素質コンドライトのマーチソン隕石とマレー隕石から各種のポリオール類を検出することに成功し、それらが、両隕石に固有のものであることを確かめた。このことから著者らは、このような有機化合物の形成プロセスが地球外に存在し、ポリオール類を含む天体の飛来が、原始地球上での生命の誕生に大きな役割をはたしたのではないかと推測している。

### 糖類が発見された2つの隕石

今回ポリオール類が発見された隕石のうち、まずマーチソン隕石は、1969年9月28日、オーストラリアのビクトリア州マーチソンの町 (36°37' S, 145°12' E) に落下したもので、大気突入時に多数の破片に分裂、シャワーとなって降りそそぎ、回収された破片だけでも数百個、総



図1 マーチソン隕石のサンプルの1つ。(にぎりこぶし大)

重量は100kgに達した。代表的な炭素質コンドライト(CM2タイプ)で、アミノ酸の発見で有名になったことは周知の通りである(図1)。

もう1つのマレー隕石は、1950年9月20日、米国ケンタッキー州キャロウェイ・カウンティのマレー(36°36'N, 88°06'W)に、やはり隕石シャワーとなって落下し、合計12.6kgの破片が回収されている。マーチソン隕石と同じCM2タイプの炭素質コンドライトである。

#### 検出されたポリオール類

著者たちは、2つの隕石に含まれる有機物を水で抽出し、抽出液をガスクロマトグラフィーとマススペクトロメトリーの手法で分析した。その結果判明したポリオール類を図2に示す。この図から、両隕石には水に溶ける多様なポリオール類が含まれていることがわかる。

糖のジヒドロキシアセトン、糖アルコールは、3炭素のグリセロール(グリセリン)から6炭素のグリシトールとその異性体まで存在する(図2)。グリセロールの2炭素同族体であるエチレングリコールも含まれ、グリセロールとエチレングリコールは、確認されたポリオール類のなかで最も豊富である。両隕石について、エチレングリコールはグリセロールのほぼ2倍あり、グリセロールはマーチソン隕石ではアミノ酸の濃度の約2倍である。これ以外の糖アルコールの量は、検出されたポリオール類のなかで最低である。

糖酸は、3炭素のグリセリン酸から6炭素の糖酸とその異性体まで、多くの種類が認められた(図2)。このうちグリセリン酸の量(80nmol/g)はアミノ酸の存在量に近い。自然界にはあまりみられない2メチルグリセリン酸も多い。デオキシ糖酸は自然界では糖ほどには存在しないが、糖のアルカリ反応の産物としてはよく知られており、そのいくつかは実験室での合成にも成功した。6炭素の2デオキシヘキサン酸(メタサッカリン酸)は、マーチソン隕石にのみ認められた。

以上の物質について、地上の微生物などによる汚染物質があるかどうかは当然心配されるが、著者たちはその可能性はない(あってもごくわずかだ)という。グリセロールなどは天然にも広く存在するので、汚染の可能性がないとはいえないが、含有量が比較的多く、スペクトルは0

	Sugars	Sugar Alcohols	Sugar Acids	Dicarboxylic Sugar Acids	Deoxy Sugar Acids			
3C	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\   \\ \text{C}=\text{O} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Dihydroxyacetone	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Glycerol 160 nmol/g (100%)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Glyceric acid 80 nmol/g	—				
4C	—	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Erythritol & Threitol (1%)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Erythronic & Threonic acid (4nmol/g)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{CO}_2\text{H} \end{array}$ Tartaric & Mesotartaric acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2-Methyl glyceric acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2, 4 Dihydroxy butyric acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$ 2, 3 Dihydroxy butyric acid (& diastereomer)	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 3, 4 Dihydroxy butyric acid
5C	—	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Ribitol & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Ribonic acid & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CO}_2\text{H} \end{array}$ 2, 3, 4-Trihydroxy Pentanedioic acid	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2-Deoxypentonic acids			
6C	*	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Glucitol & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ Gluconic acid & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{HO}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CO}_2\text{H} \end{array}$ Glucaric acid & Isomers	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 2-Deoxyhexonic acids	$\begin{array}{c} \text{CO}_2\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\   \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$ 3-Deoxyhexonic acid		

図2 マーチソン隕石とマレー隕石から検出されたポリオール類

非生物的分布パターンを示すことから、そのほとんどが隕石固有のものであることは確かである。また各種ポリオールの同位体分析の結果によると、<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比とD/H比は、ともに地上の有機物の値よりも高く、隕石に固有のものであることを示している。

ポリオール類の成因を考える

では、隕石中のポリオール類は、どのようにして地球外で生成したのだろうか。著者たちは、星間分子雲中でまず最初につくられた可能性があることを議論している。実験室でのシミュレーションにもとづいて推察すると、分子雲中のダスト粒子の表面をおおうCO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>Oなどの氷状混合物から、星の光の光化学反応によって、比較的低分子のエチレングリコール、グリセロール、グリセリン酸などが生成したのではないかと考えられる。その後星間分子雲の収縮で原始太陽系星雲が生まれ、ガスとダストの円盤から惑星が誕生したが、その過程で星間有機物分子が生きのびたならば、形成途上の微惑星にもとり込まれたであろう。マーチソン隕石やマレー隕石の母天体が、こうした微惑星の生き残りの天体であったのならば、そこでさらに複雑なポリオール類が形成された可能性がある。

マーチソン隕石とマレー隕石には、その母天体に液体の水が存在し、そのために初生物質が粘土鉱物や水和鉱物に変質したことを示す証拠がのこっている。炭素質隕石に含まれる水は弱

アルカリ性 (pH7~9) なので、このような水環境では、「ホルモース反応」に似た一連の化学反応がおこったのかもしれない。ホルモース反応とは、ホルムアルデヒド、ジヒドロキシアセトンとその異性体のグリセリンアルデヒドの混合物、あるいはグリコールアルデヒドなどに、弱アルカリ水が作用して、より高分子の糖類が生成する作用である。ホルムアルデヒドは星間雲や彗星に比較的多くてよく知られた分子であり、グリコールアルデヒドも星間雲中に確認されている。このようなことから、ホルモース反応によって、星間分子雲中のみならず炭素質隕石の母天体でも、一連のポリオール類が生成した可能性が考えられる。

糖、糖アルコール、糖酸などのポリオール類は、核酸や細胞膜の構成要素であるとともに、生命活動のエネルギー源としても重要な物質である。アミノ酸だけでなくこのようなものまで宇宙で生成していることが、地球生命、ひいては宇宙生命の誕生とどうかかわってくるのか、興味深いことである。 (小森長生)

---

## 論文抄録

### 火星大気中の水素分子からさぐる水の歴史

Krasnopolsky, V.A., and Feldman, P.D., 2001, Detection of molecular hydrogen in the atmosphere of Mars. *Science*, 294, 1914-1917.

著者は FUSE (遠紫外スペクトル探査衛星) による観測で、火星大気のスเปクトルに水素分子 ( $H_2$ ) 線を検出した。大気中の  $H_2$  の存在比は  $15 \pm 5$  ppm で、これは水分子が太陽光の紫外線によって分解し生成したものである。また火星大気中の D/H 比は地球の 5.5 倍あるが、35 億年前に火星から放出された火星隕石の D/H 比は 1.9 倍である。著者の大気進化モデルによると、35 億年前から現在までの間に D/H 比が 1.9 から 5.5 倍に上昇したことは、この惑星を 30m の厚さでとりまく海に相当する水が失われたことを意味する。火星の誕生時にさかのぼると、1.25km 以上の厚さの水があったと推定されるが、現在はその 4% ほどが残っているにすぎないと考えられる。 (K)

### 火星における氷雪の厚さの季節変化

Smith, D.E., Zuber, M.T., and Neumann, G.A., 2001, Seasonal variations of snow depth on Mars. *Science*, 294, 2141-2146.

マーズグローバルサーベイヤー (MGS) 搭載のマーズオービターレーザー高度計 (MOLA) によって、1 火星年にわたって得られた 4 億以上の精密な高度測定データを解析し、火星表面の高度の季節変化を調べた。火星の極地 (緯度  $80^\circ$  以上) の高度は最大 1.5m ~ 2m 変動するが、これは  $CO_2$  の地面への凍結と昇華のくり返しの結果で、地表と大気の間で季節的な  $CO_2$  の交換がおこっていることを示す。このパターンとは異なる局地的変動もおこるが、それはダストストームの発生などとの関係があるらしい。また、MGS の電波のドプラー追跡データの解析によって、季節変化をおこす  $CO_2$  堆積層の密度を見積もると、冬に発達する  $CO_2$  氷層の平均密度は  $0.91 \pm 0.23$  g/cm<sup>3</sup> で、これは地球上の雪よりもかなり密度が高い。(K)

### 火星の活動的なドライアイスリザーバー

Malin, M.C., Caplinger, M.A., and Davis, S. D., 2001, Observational evidence for an active surface reservoir of solid carbon dioxide on Mars. *Science*, 294, 2146-2148.

MGS のマーズオービターカメラ (MOC) による高解像度撮影で、火星の南極冠の活発な変化が明らかになった。1999 年 7 月の画像と、ほぼ 1 火星年後の 2001 年 7 月の画像 (いずれも火星の日心黄経  $L_s = 223^\circ \pm 4^\circ$  から始まる) を比較した結果、南極冠地域の氷崖の 25% から 50% が、1~3m 後退していることがわかった。この変化は水の氷の昇華よりも 1 桁速く、 $CO_2$  氷の昇華に原因があると考えた方が合

理的である。このことは、極冠が固体 CO<sub>2</sub> の大きなリザーバーであるという以前からあった考えを支持する。南極冠の後退現象は火星の長期的気候変動に関係があると考えられ、もし同じ割合で後退が続けば、南極冠の CO<sub>2</sub> は数千年間で消失し、火星大気の CO<sub>2</sub> 濃度は倍増するであろう。(K)

月のインブリウムの溝とサウスポールエイトケンのトリウム異常はセレニタティス起源か  
Wieczorek, M.A., and Zuber, M. T., 2001, A Serenitatis origin for the Imbrian gooves and South Pole-Aitken thorium anomaly. J. Geophys. Res., 106, E11, 27853-27864.

South Pole-Aitken (SPA) ベイスンの北西部には、高濃度トリウム分布地域があり、尾根と溝から特徴的な地形 (Imbrian gooves) がある。これらはほぼインブリウムベイスンの対極点にあるので、従来インブリウムの衝突起源であると考えられていた。しかし、筆者らの月の自転を考慮した衝突放出物の堆積モデルによれば、インブリウムベイスンからの放出物は対極点よりも 12° 以上も西に収束する。むしろ、セレニタティス (晴の海のベイスン) への斜め衝突放出物の方が Imbrian gooves をうまく説明できる。もしそうだとするとセレニタティス地域には高濃度のトリウムを含み、地震動ではなく、放出物の収束によって Imbrian gooves ができた可能性が高い。(S)

月の割れ目のあるクレーターは粘性による地形緩和によってできたか？

Dombard, A.J., and Gillis J.J., 2001, Testing the viability of topographic relaxation as a mechanism for the formation of lunar floor-fractured crater. Jour. Geophys. Res., 106, E11, 27901-27909.

月の割れ目のあるクレーターの成因については従来、クレーター底での火成岩体の貫入と地形緩和による2つの考えがあった。今回筆者らは弾粘塑性有限要素法 (elastoviscoplastic finite element model) と月の地殻物質に似た地球上の揮発性物質を取り除いた粗粒玄武岩の可塑性の計測値をあてはめることによって、地形緩和の可能性を調べた。結果は、直径 60km 程度のクレーターでの地形緩和は、実際の割れ目のあるクレーターの断面形の数%しか説明できない。このことから、割れ目のあるクレーターは、火成岩体の貫入によってできた可能性が高い。(S)

---

## INFORMATION

### コントゥアー探査機いよいよ打ち上げ

NASA のディスカバリー計画の一環であるコントゥアー探査機 (Comet Nucleus Tour, CONTOUR) が、今年7月1日に打ち上げられる。彗星核の撮影、組成調べなどを目的とした探査機。先ず2003年11月にはエンケ彗星 (2P/Encke) に 160km まで接近、100~200m の解像度で核を撮影するほか、赤外スペクトロメーターで核の組成を調べる。エンケ彗星は公転周期 3.28 年という、知られている限り最も短い公転周期の彗星。核の大きさは平均直径 5km ほどと推定されているが、この探査で正確なことがわかるだろう。コントゥアーはその後2006年6月にシュワスマン・ワハマン第3彗星 (73P/Schwassmann-Wachmann 3) に接近、さらに2008年にはダレ彗星 (6P/d'Arrest) フライバイが予定されている。

なお、NASA のもう1つの彗星探査機ディープインパクト (Deep Impact) も、2004年1月の打ち上げをめざして準備中である。これは2005年7月にテンペル第1彗星 (9P/Tempel 1) に接近して、核に観測器を打ち込み、組成や密度等を調べることになっている (本誌 Vol.11, No.3 も参照)。

### ロゼッタ探査機の打ち上げ準備すすむ

ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の彗星探査機ロゼッタ (Rosetta) の準備が順調に進んでいる。2001年12月3日、オランダのライデン近くにある ESA 宇宙科学センターで、オービターとランダーの諸テストが実施された。オービターはイタリアのチュリンの工場から陸路で、ランダーはドイツのミュンヘンから空路で運ばれた。

ロゼッタは2003年1月に打ち上げられ、地球を2回、火星を1回スイングバイしたあと、2007年にウィルタネン彗星 (46P/Wirtanen) へのランデブー軌道にのる。ウィルタネン彗星は公転周期 5.46 年、

軌道離心率 0.657、軌道傾斜角  $11.7^\circ$  である。ロゼッタは自身の軌道をこの彗星と同じ傾斜角にして近づき、2011年11月にランデブー、その後核を回る軌道に入り、ランダーを核の表面に着陸させる予定である。

オービターとランダーはさまざまな観測をおこなうが、そのなかで注目されるのは、彗星核サウンディング実験 (Comet Nucleus Sounding Experiment, CONSERT) であろう。オービターから核に向けてパルス電波が発射されると、核内部に伝わった電波は反対側にいるランダーに受信され、オービターに送り返される。そのときの速度変化の解析から、彗星核の密度や内部構造が決められる。これがうまく成功すれば、彗星核の実態について貴重な資料が得られるものと期待される。

#### 小惑星ケレスとベスタをめざすドーン計画

NASAは、第1番小惑星ケレス(直径910km)と第4番小惑星ベスタ(直径500km)を探查するドーン(Dawn)計画を昨年末に発表した。2006年に打ち上げられ、まず2010年7月にベスタに接近して組成や構造を調べる。その後2014年8月にはケレスに接近する。ケレスは太陽系最大の小惑星で、反射スペクトルからその表面組成は炭素質コンドライトに対比されている。またベスタの反射スペクトルは、分化した隕石の玄武岩質エコンドライトのそれに類似し、ユークライトの母天体と考えられている。こうした現在の知識がどう検証されるか楽しみなことである。

#### オマーンで発見された新しい火星隕石

スイスのベルン大学とベルン自然史博物館の地質学者たちは、2001年1月から2月にかけてのオマーンでの調査中に、180以上の隕石を発見したが、そのなかに火星起源隕石が1つ含まれていた。にぎりこぶし大、223gの岩片で、Sayh al Uhaymir 094 (SaU 094) と命名された。オマーンでは1999年にSaU 005、SaU 008、2000年にSaU 051、Dhofar 091の4個の火星隕石がすでに発見されており、今回の発見は5番目になる。性質はいずれもシャーゴタイトである。なおSaUと名づけられた以上の4つは、同一個体が分裂したものである可能性が高い。

#### 南米パナマに衝突構造発見

パナマ運河のあるガトゥン湖の西に、衝突構造が存在することが、南フロリダ大学のLivio L. Tornabeneたちの調査で明らかになった。パナマ共和国の地質学者Bob Stewartは、すでに1990年と1995年にこの地域から衝突岩と思われる岩石を採集し、衝突構造の存在を予想していた。1998年にその岩石サンプルを目にしたTornabeneたちは現地調査をおこない、衝突構造を確認した。現地は深い森におおわれ、調査は困難をきわめたが、合計約9kg、30個ほどの岩石を採集した。それらの分析の結果、衝突時の高圧で生成した衝撃ガラスの一種(diaplectic glass)がふくまれることを発見。衝突地点は直径約3kmの環状構造をなし、直径150mの小惑星が11km/sで衝突したとTornabeneは見積もっている。また生成時期は約2000万年前と考えられる。(「The NEO News」Vol.6, No.1, その他による)

#### 第27回南極隕石シンポジウムのお知らせ

南極隕石はもちろん、非南極隕石、月試料、宇宙塵、実験等の惑星科学全般の発表がおこなわれます。

期 間：6月11日(火)～13日(木)

場 所：国立極地研究所6階講堂

問い合わせ先：国立極地研究所 南極隕石研究センター 〒173-8515 東京都板橋区加賀1-9-10

TEL：03-3962-2938 E-mail：curator@nipr.ac.jp

編集後記：本号では佐々木晶さんから宇宙風化作用の最新的话题を寄せていただきました。この方面の研究はまだ少なく、日本の若い研究者による成果は貴重だと思います。これからの発展を祈ります。前号で新年度の会費納入をお願いしたところ、多数の方からご協力をいただきました。厚くお礼申し上げます。ご期待にそむかぬようがんばります。(K)