

地球にマグマオーシャンは存在したのか？

富樫茂子 Shigeko TOGASHI

原始地球にマグマオーシャンがあったという直接的な証拠は見つかっていない。マグマオーシャンの存在を示す状況証拠の主なものは、次の3つである。(ⅱ)地球の熱史モデルでは、集積、短寿命放射性核種の壊変、地球中心核の分離、大気の保温効果などにより、高温を達成する条件がそろっている。(ⅲ)月にマグマオーシャンがあったとすれば、約100倍の質量をもつ地球にないはずはない。(ⅳ)地球の初期の歴史には数億年の空白があり、その間にマグマオーシャンの証拠はかき消された、というものである。これらについて検討してみよう。

1. 熱史

熱史については、パラメーターの数が多いので、モデルの域を越えるために、何らかの観測事実で妥当な境界条件を狭めてほしいというのが、門外漢の感想である。

2. 月のマグマオーシャン

月のマグマオーシャンモデルは次のように提起された。月の海の玄武岩の溶融実験によれば、リキダス付近には斜長石が晶出せず、海の玄武岩のREEパターンのユウロピウム(Eu)の負異常は、玄武岩マグマから斜長石が晶出分離したことによるものではなく、月のマントルそのものがEuの負の異常を持っているためだと考えられた。一方、月の高地の斜長岩はEuの正の異常を持っており、マントルと相補的な関係にあり、超塩基性マグマオーシャンからマントルと斜長岩地殻が生じたと考えられた。

しかし、高地の岩石の性質が明らかになるにつれ、マグマオーシャンの存在に疑問を持つ人がでてきている(Longhi and Ashwal,1985)。高地は斜長岩というよりは、斜長石に富むノーライトまたはガブロであり、マグマより重いマフィック鉱物を含む。岩石は変化に富み、Euの異常も必ずあるわけではない。しかも、高地の斜長岩は、地下浅所に生じた玄武岩マグマだまりにおいて晶出・濃集し、固体貫入で地表に達したとしても説明できる。また、月の海の玄武岩のEuの負の異常は、斜長石を分別した分化マグマと未分化マグマの混合を考えれば、岩石溶融実験と矛盾しないという(Walker,1983)。

このような状態では、月のマグマオーシャン説を地球のマグマオーシャン存在の根拠にするのは早計であろう。その点で、月の高地の成因を追求することは、地球の歴史の解明にとっても重要性を増しつつある。ところが、月の高地についての私たちの知識は、アポロの時代から増加していない。再び、人類が月の探査に目を向け、月の裏側の高地地殻の詳細な研究をすることは、データ中継衛星が必要だという困難を越えても、近い将来の重要な課題となるであろう。

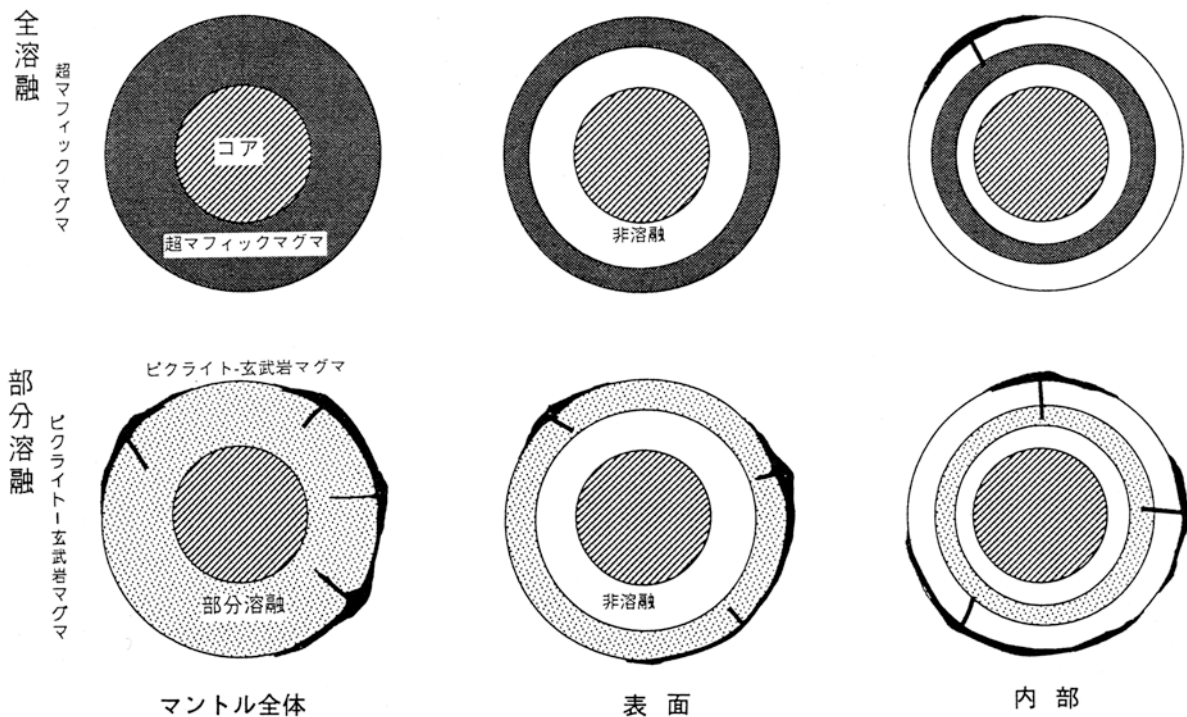


図1. マグマオーシャンについての様々な概念

3. 地球初期の空白の数億年に何が合ったか？

マグマオーシャンが高温であった時期以前の記録が消え失せたとしても、その冷却固化の過程で生じたなんらかの証拠は残っているに違いないと、多くの試みがなされてきた。

ところが、火山岩やマンタルノジュールから想定される現在のマンタルは、きわめて限定された範囲の組成の変化を示し、あたかも始源的なマンタル（原料の隕石から集積後に中心核と揮発成分、アルカリ元素を差し引いたもの）がわずかな変化を受けただけのように見える。機器分析の精度が増し、同位体組成は化学組成の比の変化に敏感であるため、これまで見えなかった不均一が見えてきて、これはこれで重要なのだが、“不均一”が過大評価されている場合もある。たとえばDUPALのような同位体異常も組成の変化範囲は限られている。上部マンタルを構成すると考えられているスピネルレルゾライトとガーネットレルゾライトの主成分組成は、 SiO_2 が $46 \pm 2\%$ 、 MgO が $44 \pm 4\%$ 、 FeO が $8 \pm 1\%$ 程度しか変化しない (Hawkesworth et al.,1990)。微量元素はオーダーで変化するが、これとても、数%以下の部分溶融によって生じたマグマの、部分溶融の程度のわずかな加減で、多くの場合が説明できる。つまり、マンタルはかなり“均一”なのである。

このようなマンタルの“均一性”に対する解釈には次の3つがある。a) マグマオーシャンの冷却固化で分化したマンタルが、後から良くかくはんされた (Ohtani,1985)、b) マグマオーシャン組成のリキダスとソリダスの温度差が小さいので、分化せずに固化した (Takahashi & Scafe,1985)、c) マグマオーシャンは存在しなかった (Kato et al.,1988)。

マグマオーシャンの冷却固化を考える際に忘れてはならないことは、マグマオーシャンとは一体何かということだ。なぜなら、人によって認識は必ずしも同じではないからである（図1）。マグマの組成についていえば、始源的なマントルが全溶融すれば超塩基性組成のマグマとなり、部分溶融の場合には、その程度により超塩基性組成から玄武岩組成に変化する。マグマの組成が異なれば、その温度も異なるし、水の溶解度も異なる。マグマオーシャンができる位置についても、地球の表層と考えるのが一般的だが、地下のある深さに存在すると考えている場合もある。表層の場合にも、どこまでの深さが溶融したのかが問題になる。このように、想定されるマグマの組成や存在する圧力が異なれば、冷却固化するときを生ずる結晶の種類もその量も異なってくるはずだ。

いずれにせよ、一度液体になったものが分化せずに固体になるためには、かなり条件が限られる。液体になったかどうかを明らかにするためには、マントルの不均一性が時空と物質において、どのようなスケールで生じているかを明らかにすることが必要であろう。その点で、火山岩はマントルの天然のサンプラーであり、大いに利用価値があると考えている。大陸地殻の下には、少なくとも20億年くらい前の組成を保持したマントルが、かなり普遍的に存在していることがわかっている。それならば、場所によっては46億年前の始源マントルが残っていてもよい（Togashi, et al., 1992）のではないか。

現時点で手にいれることができなかったが、最近開かれたマグマオーシャンについてのワークショップの報告書（テキサス州ヒューストンにある月惑星研究所のテクニカルレポート 92-03）を楽しみにしている。

参考文献

- Hawkesworth, C.J., Kempton, P.D., Rogers, N.W., Ellam, R.M. and van Calsteren, P.W., 1990: Continental mantle lithosphere and shallow level enrichment process in the Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 96, 256-268.
- Kato, T., Ringwood, A.E. and Irifune, T., 1988: Experimental determination of element partitioning between silicate perovskites, garnets and liquids: constraints on early differentiation of the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 89, 123-145.
- Longhi, J. and Ashwal, L.D., 1985: Two-stage models for lunar and terrestrial anorthosites: Petrogenesis without a magma ocean. *Jour. Geophysic. Res.*, 90, Suppl. C571-C584.
- Ohtani, E., 1985: The primordial terrestrial magma ocean and its implication for stratification of the mantle. Melting temperature distribution and fractionation in the lower mantle. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 38, 70-80.
- Takahashi, E. and Scarfe, C. M., 1985: Melting of peridotite to 14 GPa and the genesis of komatiite. *Nature*, 315, 566-568.
- Togashi, S., Tanaka, T., Yoshida, T., Ishikawa, K., Fujinawa, A. and Kurasawa H., 1992: Trace elements and Nd-Sr isotopes of island arc tholeiites from frontal arc of Northeast Japan. *Geocem. Jour.* (in press).
- Walker, D., 1983: Lunar and terrestrial formation. *Jour. Geophysic. Res.*, 88, Suppl. B17-B25.

スペース・ウォッチ

－ 地球近接小惑星をさがす－

小松 吾郎 Goro KOMATSU

恐竜の絶滅が、小惑星と地球との衝突によって起きたという説が出されてから久しい。衝突した小惑星は、直径約 10～20km と見積もられている。現在、地球近接軌道の小惑星は、直径数十 m～数十 km の範囲で、約 200 個（アポロ・アテン・アモール群の総数）が発見されている。しかし未発見のものを含めると、直径 1 km 以上の地球近接小惑星の総数は 2000 個にも達すると推定されている。実際は、これよりもはるかに小さくとも、地球上にかなりの被害を及ぼす。アメリカの探査機ガリレオは昨年 10 月、はじめて小惑星ガスプラ（ $19 \times 12 \times 11$ km）の姿をとらえたが、こんな石ころ 1 つの衝突で、人類 6000 年の文明はおろか、地上の生物相の多くが消し去られてしまうのである。

スペースウォッチプログラムは、アリゾナ大学のトム・ゲーレルズによって 1980 年に提案された。目的は地球近接小惑星の発見で、とくに早期警戒に重点がおかれている。スペースウォッチのシステムは、簡単なものである。望遠鏡は、キットピーク山のスチュアート天文台（アリゾナ大学天文学部所属）の 91cm F 5 ニュートン式が使われている。焦点にはテクトロニクスの Tk2048CCD（ 2048×2048 画素、写真 2）が取付けてあり、これで星野画像が取得される。画像データは SUN のコンパチであるソルボーン 5/600 ワークステーションに流し込まれ、処理される（写真 3）。目玉は小惑星を見つけ出すソフトウェアで、現在リアルタイム自動発見システムが稼働している。これは以下のようなしくみではたらく。

画像は、望遠鏡の追尾を止めて取得される。当然その間に視野は動き、30 分間に 2048×2048 画素の画像データがワークステーションに記録される。1 画素あたり 1.21 秒の視野角である。小惑星の搜索には、同じ星野で細長い画像を 3 回得ることが必要である。CCD からの読み取りは星野の動きとシンクロされているので、このときの恒星像は点状に写る。しかし高速移動天体は、視野内で動くために、棒状に写る。観測者はこのような天体をチェックする。合計 3 回の画像取

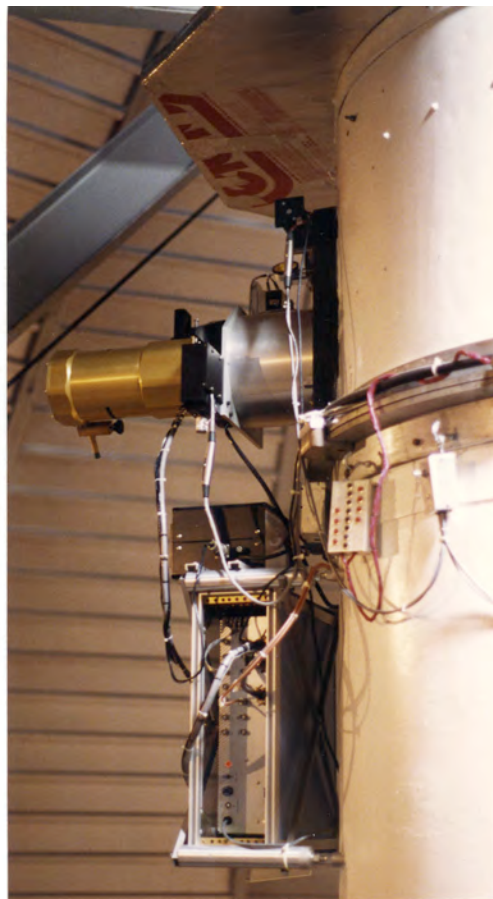


写真 1. スペースウォッチ・プログラムに使用される 91cm 望遠鏡ドーム（中央）、右は 4 m 望遠鏡ドーム。



写真2 (右) . 91cm ニュートン焦点にとりつけられた
テクトロニクス の Tk2048CCD とその冷却部

写真3 (上) . ジム・スコッティと自動発見システム稼
働中のワークステーション、ソルボーン 5/600



得では、すべての明るい天体の位置が記録され、恒星とは違った動きをする天体（移動速度のやや遅い天体）が抽出される。この手順によって、大量のメインベルトの小惑星が拾いだされる。ではどのように、地球近接小惑星を選別するのだろうか。

まず位置リストから、黄道座標上での移動速度が計算される。地球近接、メインベルト、ハンガリアン（高傾斜角）、火星近接小惑星などは、その軌道特性によって移動速度が違ってくるので（図1）、抽出されたばかりの天体のデータを当てはめることによって、どのような小惑星なのかがわかる。このようにして見つかった小惑星は、翌日の観測によって確認され、軌道が確定される。

この方法の長所は、通常の写真観測にくらべて限界光度が暗いことである（スペースウォッチの CCD で約 20.5 等級、写真では 17~17.5 等級）。この結果、遠日点付近にある遠く、暗く、動きの遅い小惑星を発見できるようになった。図2のように 1981~91 年にスペースウォッチによって発見された地球近接小惑星は、写真観測によるものとくらべて、その移動速度がメインベルト小惑星に近いことがよくわかる。

1991 年 4 月 22 日、実際の観測を見るために、観測者の一人であるジム・スコッティとキットピークに向かった。高層雲はあるが、天気はそれほどひどくはない。観測ドームは、スチュアート天文台 4 m 鏡のすぐ隣にある（写真1）。到着するとすぐ、CCD の冷却をはじめる。気温は意外と高く、今夜の観測が楽しそうだ。カフェテリアに食事を取りにいくと、他の望遠鏡群で観測する連中も集まっていて、夜までのひとときをくつろいで過ごしていた。キットピークは国立光

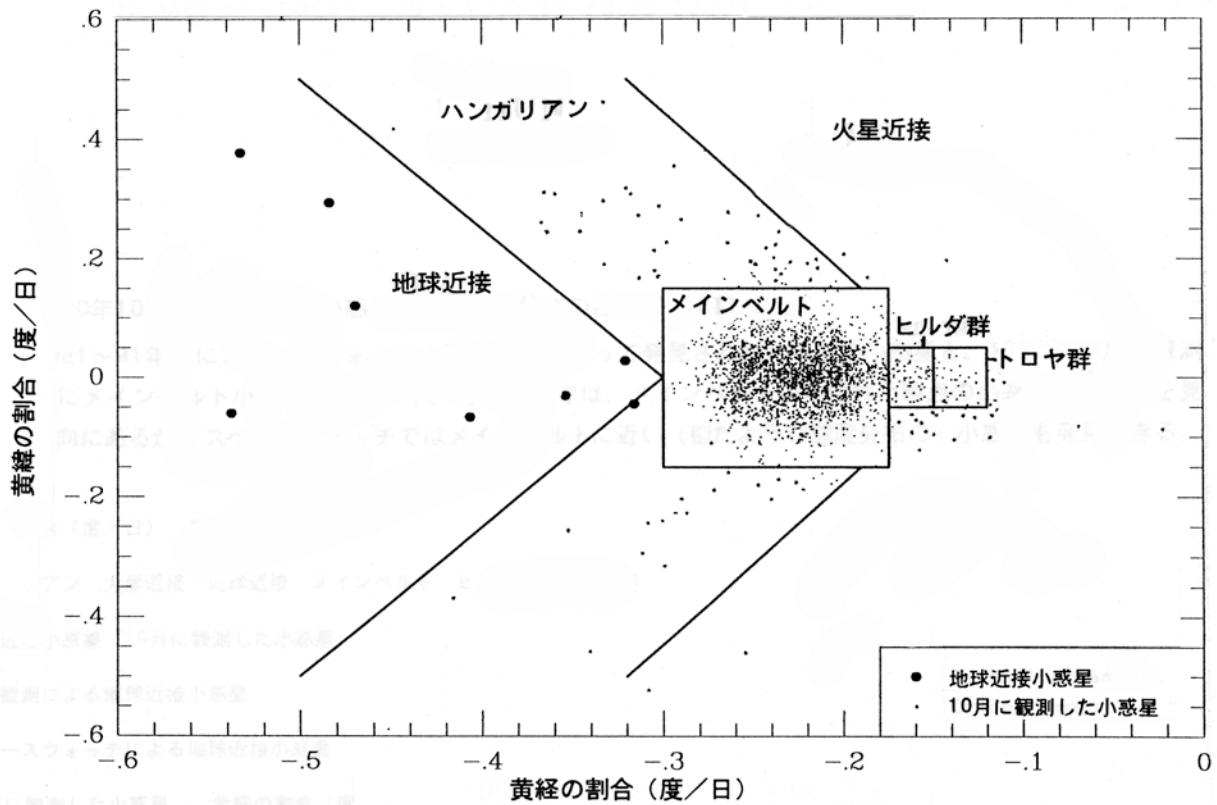


図1. 1990 年 10 月に観測された小惑星の黄道座標状での移動速度分布

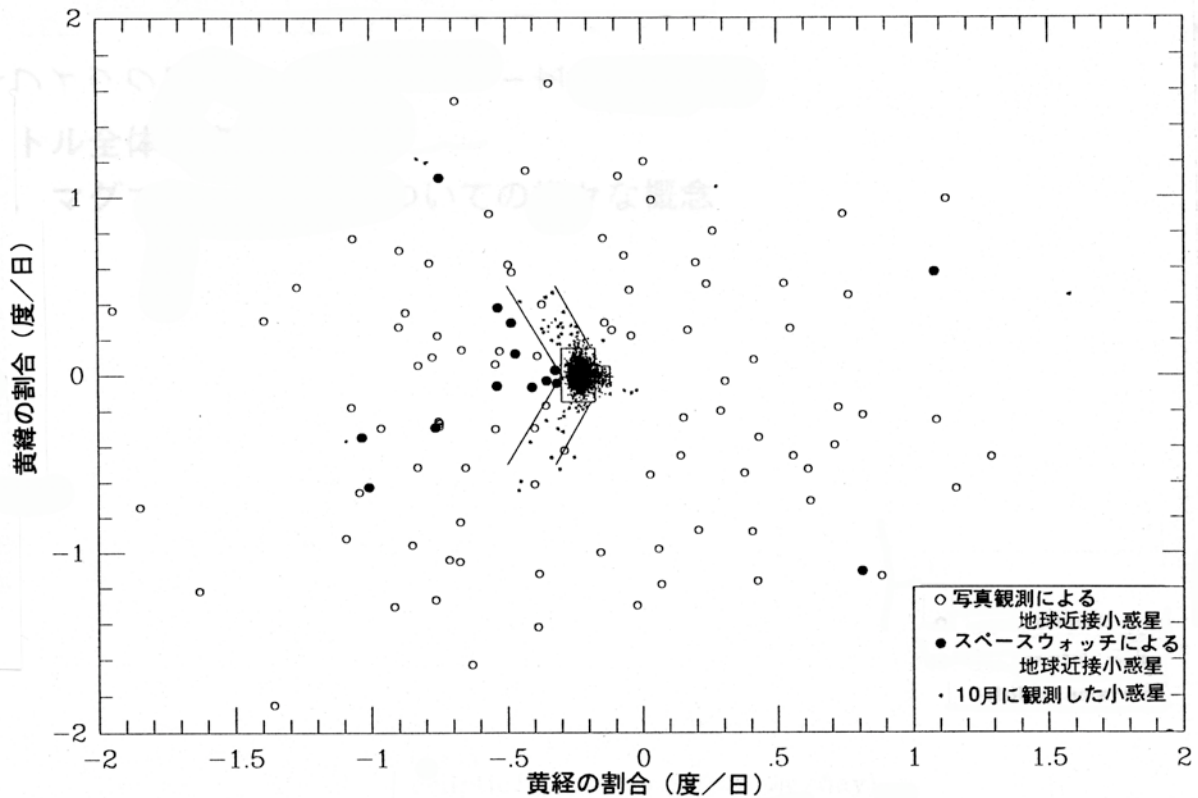


図2. 1981~91 年間にスペースウォッチと写真観測によって発見された地球近接小惑星と、1990 年 10 月に観測された主にメインベルト小惑星のプロット。写真観測では、メインベルトから離れた時点の小惑星（高速）を見つける傾向にあるが、スペースウォッチではメインベルトに近い（似たような速度分布の）小惑星も発見できる。

学天文台、アリゾナ大学以外にも全米の大学が観測所をもっていて、常時数十人の人間がいる。

ドームに戻ると、日没間近だった。ジムは、今夜再発見できる周期彗星がないかをチェックしはじめた。星が出ると、焦点を合わせはじめる。雲がやや多くて心配だ。ジムは、今夜は手頃な彗星はないと判断したようだ。しばらくは観測する方向に雲が広がり、開始できずひたすら待つ。外を見ると、ツーソンやノガレスなどの周辺の街明かりが広がっていることに気づく。23時45分、ようやく雲が切れて1回目のスキャンを開始。ワークステーションが次々に拾い上げる棒状天体をジムがチェックし、明らかに小惑星でないものを落としていく。棒状銀河、二重星、人工衛星等がまぎらわしい。プログラムは、画像処理もできるようになっており、チェックを助けている。0時20分頃、月が昇ってきてバックグラウンドがやや明るくなる。プログラムは1回目のスキャンで抽出した天体が2回目で動いていないかをチェックして、観測者に知らせる。1時15分、3回目のスキャンが終わり、最初の領域を終了する。この日は合計2つの領域をスキャンし、午前3時に観測を終了した。

私はツーソンに戻ったが、ジムはあと2日残って観測を続け、3日間で合計350個の小惑星を観測した。2日目の観測で、アポロ群の地球近接小惑星（マースデンによって1992HFと命名）を発見している。

観測データは、翌日にはツーソンにファイル転送されるので、そこにいる同僚がデータを確認できる。アリゾナ大学月惑星研究所で、私がいた晩の観測結果をディビット・ラヴィノウィツに見せてもらった。前述のように3回目のスキャン後、ワークステーションは天体の位置確認リストを作成し、恒星と違う動きの天体を拾い出す。ディビットは、その中から本物と思われるものを選び出し、あとでくわしく分析する。

このようにしてスペースウォッチでは、小規模ではあるが効果的な搜索をしている。現在までに発見された地球近接小惑星約200個のうち、27個がスペースウォッチで発見されたものである。将来、1.8m望遠鏡を使うことによって、より暗い、あるいはより広範囲の観測が予定されている。地球に衝突する小惑星が見つかった後、どのように対処するかはまだこれからの研究課題であるが、“その日”を予測する確率は、スペースウォッチのおかげで飛躍的に高まったのである。

（アリゾナ大学月惑星研究所）

論文紹介

小惑星ガスプラー – ガリレオ探査速報

Belton, M.J.S., Veverka, J., Thomas, P., Helfenstein, P., Simonelli, D., Chapman, C., Davies, M.E., Greeley, R., Greenberg, R., Head, J., Murchie, S., Klaasen, K., Johnson, T.V., McEwen, A., Morrison, D., Neukum, G., Fanale, F., Anger, C., Carr, M., and Pilcher, C., 1992 : Galileo Encounter with 951 Gaspra : First Pictures of an Asteroid. Science, 257, 1647-1652.

1991年10月29日、木星探査機ガリレオは、951番ガスプラに1600kmの距離まで接近し、小惑星の初の近接画像を得ることに成功した。ガリレオはまだ高感度アンテナを展開できないので、今回（1991年11月）の送信は低感度アンテナによる4枚の画像のみであったが、残りは

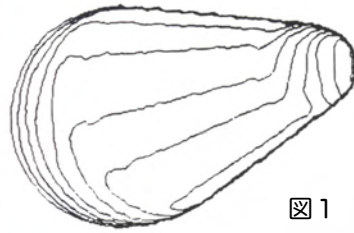


図1 (左) . ガスプラの姿

図2 (右) . ガスプラのコーンモデル

1992 年末の第2回地球フライバイ時に送られてくる。このレポートは、最初に送られた4枚の画像の予備的解析のまとめである。

ガスプラは平均半径約7 kmで、角ばった横長のサメの頭のような姿をしている。軌道の長半径は2.21 天文単位で、メインベルトの最内縁に近く、いわゆるフローラ (Flora) 族にぞくする小惑星である。地上からの反射スペクトルの性質は、異常に赤く、かんらん石 (olivine) の多いS型小惑星の仲間であることを示している。

形状と大きさ

写真 (図1) でみる輝いている部分 (径約 16×12 km) の形は、地上からの観測による光度曲線にもとづく予想と一致し、赤経 9° 、赤緯 $+28^\circ$ の方向 (写真では左上の方向) の軸を中心に、周期 7.04 時間で反時計周りに自転している。写真に写っているのはガスプラ全表面の30%ほどであるが、右半分の明瞭なへりを左半分の明暗境界の方へ延長して全体像を復元すると、モデルの大きさは $18.7 \times 12 \times 11$ km となる。ただし、このモデルはまだ完全なものではない。

一方、地上の観測で得られた光度曲線の非対称性からも、ガスプラの形が見積られる。それによれば、2つの半球が円錐の両端にくっついたコーンモデル (図2) が、ガリレオの画像とよく合う。このモデルにもとづけば、ガリレオはガスプラの尖った先の方をみていたことになる。ガスプラの平均半径7 kmは、火星の衛星フォボス (11.1 km) とデイモス (6.2 km) の中間的な値である。天体はサイズが小さいほど球形からはずれ、形が不規則になる傾向をもっているが、ガスプラはこれまで観測された天体のなかでは最も不規則な形をしている。

クレーター

写真には約60のクレーターが認められる。このうち52個は直径が330m (2画素分) より大きい。一番大きなクレーターは直径1.6 kmと1.3 kmの2つである。1.3 kmのクレーターではもり上がったリムがかすかにわかる。他の衛星と比べると、ガスプラは単位面積あたりのクレーターの数が少なく、直径2~6 kmの中程度のクレーターが欠けている。画像でみる限り、クレーターのまわりの放出物の被覆ははっきりしないが、小クレーターに伴われるアルベドの異常部分があることから、それらしいものはあると思われる。

表面の年代

表面のクレーター分布密度を、月の海形成後のそれと比較することによって、ガスプラ表面の相対年代を見積もった。著者らによれば、ガスプラでの直径1 km以上のクレーター生成率は月の場合の50倍である。ガスプラは月の海に比べて1 km大のクレーター分布密度が3~4倍で

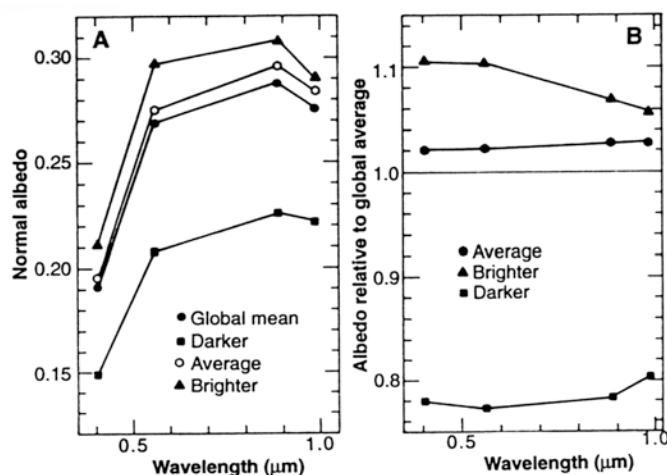


図3. ガスプラ表面のアルベド（反射能）

A : ガスプラ全面の平均的アルベド（Global mean）と3つの特徴的な部分のアルベドの比較
B : Global mean を基準とした3つの部分のアルベドの比較

あり、月の海が35億年の年齢をもつことから考えると、ガスプラのクレーター形成年代は約2億年となる。このサイズの天体が衝突の合間に生き残れる寿命は平均5億年程度と考えられる。ガスプラの現在の形は、おそらくフローラ族の母天体群の衝突・破壊を通じてできたのだろう。

ガスプラがもし岩石よりも強い金属質の組成をもつなら、その寿命はずっと長くなるにちがいない。上の見積もりは、ガスプラが岩石組成のものと仮定しての話である。ガスプラの平均密度が未決定なので、本当の組成はまだわからない。

レゴリスとその色、アルベド

ガスプラの形は不規則ながら、その表面起伏は和らげられているようにみえる。へりがとがらないでこのようにスムーズな外観ができるためには、厚いレゴリス（regolith、表土）が必要である。ガスプラの表面重力は約 1 cm/s^2 しかなく、衝突による放出物はほとんど宇宙空間へ逃げ出してしまう。しかし小刻みな衝突がくり返せば、ある程度のレゴリスは残るだろう。比較的厚いレゴリスをもつと思われるフォボスとデイモスとの類推から、10~20mの厚さのレゴリスはガスプラにあるかもしれない。未撮影の側に大きなクレーターがあれば、十分な厚さのレゴリスの生成も期待できよう。

ガスプラ表面のアルベドと色には微妙な変異があり、一部のクレーターの周辺などにある明るい物質（brighter）、リッジの間をうめる暗い物質（darker）、表面に最も広く分布する中間的物質（average）の3つに分けられる。これらとガスプラ全体のアルベドとの比較を図3に示す。このうち、かんらん石と輝石（pyroxene）の存在を示す $1 \mu\text{m}$ での吸収を一番はつきり示すのはbrighterである。darkerの低いアルベドと $1 \mu\text{m}$ での弱い吸収は、コンドライト物質の衝突変成または金属成分が多いことによるのだろう。

今回のミッションは安全性を考えて、ガスプラへの接近距離は大きめに設定されたので、この小惑星の質量を決めることはできなかった。今年末の残りの画像の送信がうまくいけば、体積の見積もりは可能だろうけれども、平均密度が求められないのは残念である。（小森長生）

論文抄録

ユリシーズ接近時のイオの火山活動

Spencer, J.R., Howell, R.R., Clark, B.E., Klassen, D.R., and O'Conner, D., 1992 : Volcanic Activity on Io at the Time of the Ulysses Encounter. Science, 257, 1507-1510.

NASA と ESA (ヨーロッパ宇宙機関) が共同で打ち上げた太陽探査機ユリシーズが木星に接近した前後の 1991 年 10 月から 1992 年 3 月にかけて、イオの火山活動を地上から追跡した報告。観測はハワイ島マウナケア山頂の 3.2m 赤外望遠鏡でなされた。その結果、この期間のイオの活動は静かだった。とくにイオ最大のホットスポット・ロキ火山のエネルギー放出は、1979 年のボイジャー 1 号接近時の半分以下であった。これは、ユリシーズ接近時の木星磁気圏の粒子密度が低かったことと対応する。(K)

水星の極地に氷が存在する証拠

Slade, M.A., Butler, B.J., and Muhleman, D.O., 1992 : Mercury Radar Imaging : Evidence for Polar Ice. Science, 258, 635-640.

Harmon, J.K., and Slade, M.A., 1992 : Radar Mapping of Mercury : Full-Disk Images and Polar Anomalies. Science, 258, 640-643.

Paige, D.A., Wood, S.E., and Vasavada, A.R., 1992 : The Thermal Stability of Water Ice at the Poles of Mercury. Science, 258, 643-646.

最近、水星のレーダー探査で、極地に氷の存在する証拠が検出されている。この 3 編の論文のうち第 1 のものは、カリフォルニア州ゴールドストンの 70m アンテナと、ニューメキシコ州の国立電波天文台の VLA (27 基の 25m アンテナ) による観測結果。第 2 論文はアレシボの 300m レーダーを使つての観測報告。いずれも水星の北極と南極に、火星の極冠に似た、氷と思われる明るい電波反射源が確認された。第 3 の論文は、太陽にきわめて近い水星でも、極地の永久に影となる部分では 60 K に達する低温地域があること、 H_2O の氷は 112 K 以下では長期にわたって安定に存在しうるとを論証している。(K)

INFORMATION

●Human in Space 展示会の御案内

本展示会では、いままで人類が挑んできた軌跡と現状、また未来に向けて開発が進んでいるテクノロジーを通じて“人と宇宙のかかわり”を探っていきます。会場内では、H-II ロケットやスペースプレーン HOPE など、宇宙輸送システムの展示から、リモートセンシングによる地球観測、資源探査や、微小重力実験等の宇宙利用の実例、さらには宇宙ステーション“フリーダム”などの将来的な宇宙生活の構想を一堂に展示します。くわしい情報は TEPIA VOICE メールサービス Tel.03-5474-6127、または TEPIA FAX メールサービス Tel.03-5474-6129 へ問い合わせ下さい。

会 期：1992 年 10 月 9 日 (金) ～93 年 3 月 12 日 (金) 月曜日休館 入場無料

会 場：TEPIA (機械産業記念館) 東京都港区北青山 2-8-44 Tel.03-5474-6111

開催時間：10 時～18 時 (土・日は 17 時まで)

主 催：(財) 機械産業記念事業財団

〈ひとこと〉ボイジャー実物大模型をはじめ、惑星探査関係の展示もありますので、訪れてみて下さい。



編集後記：今年も残すところ、あと 10 日余りとなりました。今年は、日本惑星科学会の設立や多数の大学で“惑星”を冠した講座が発足するなど、日本でもいよいよ惑星科学が本格化する兆しがみられました。『惑星地質ニュース』もさまざまな研究分野の方々から原稿を頂き、バラエティに富んだ誌面を作ることができました。来年もよろしくお願いいたします。(S)