

LUNAR-A に搭載される月撮像カメラ

白尾元理・小笠原雅弘

Motomaro SHIIRAO・Masahiro OGASAWARA

1. はじめに

1997 年夏、文部省宇宙科学研究所では、わが国初の月探査機 LUNAR-A を打ち上げる。この探査機の主目的は、ペネトレータ（槍型の観測装置）を月面の 3 地点に打ち込み、地震計や熱流量計を使って月の内部構造を調べることである。しかし、月周回軌道をまわる LUNAR-A 母船には小型カメラ LIC（Lunar Imaging Camera：月撮像カメラ）が搭載される。LIC には数々の制約はあるものの、約 1 年という長寿命であることと低高度の円軌道であることを生かした観測計画が検討されている。ここでは、LIC のしくみと月周回軌道での運用を中心に述べる。

2. LUNAR-A の主なイベント

LUNAR-A の打ち上げには、宇宙科学研究所で現在開発中の新しいロケット M-V の 2 号機が使われる。LUNAR-A はトランスファー軌道をへて、半年後の 98 年 2 月に軌道傾斜角 25° の月周回軌道に投入される。投入後まもなくは高度 $45\text{km} \times 200\text{km}$ の楕円軌道をまわり、3 本のペネトレータを月面に落とす。設置地点は、アポロ 12 号着陸地点近傍、危難の海、月の裏側（アポロ 12 号地点のほぼ反対側）の 3 点である。これらのペネトレータでは、月震計測、および熱流量計測を約 1 年間実施し、月の内部の地震学的構造、熱的構造についてのデータを取得する。

一方 LUNAR-A 母船はペネトレータ投下後、高度 $200 \sim 300\text{km}$ の円軌道に移り、母船のスピンドルを毎分 3 回転に低下させてから、LIC の本格的な運用をはじめる。ペネトレータ分離期間中の近月点付近から、より高分解能の撮像が可能かどうかは、現在検討中である。

LUNAR-A は、電力を 3 枚の太陽電池パネルから得る。このため、月食による長期間の発生電力の低下は、致命的な打撃を与える。1999 年 7 月 28 日には食分 0.40 の本格的な月食があり、この影響を克服するのは困難と思われる。

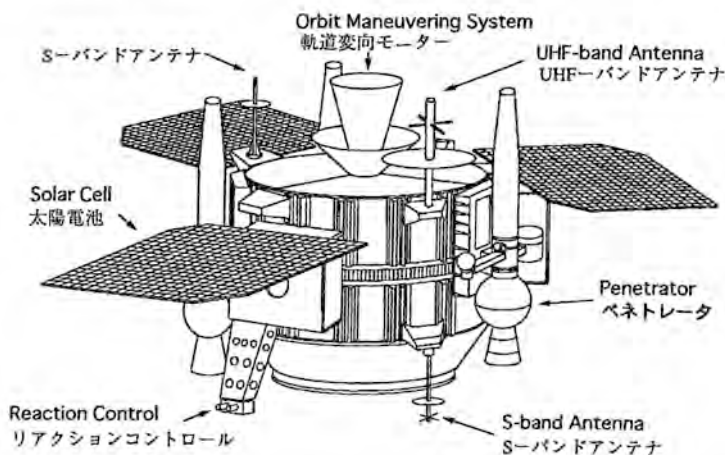


図 1 LUNAR-A 衛星の外観、LIC は太陽電池パネルがフードの役割をはたす（宇宙科学研究所提供）。

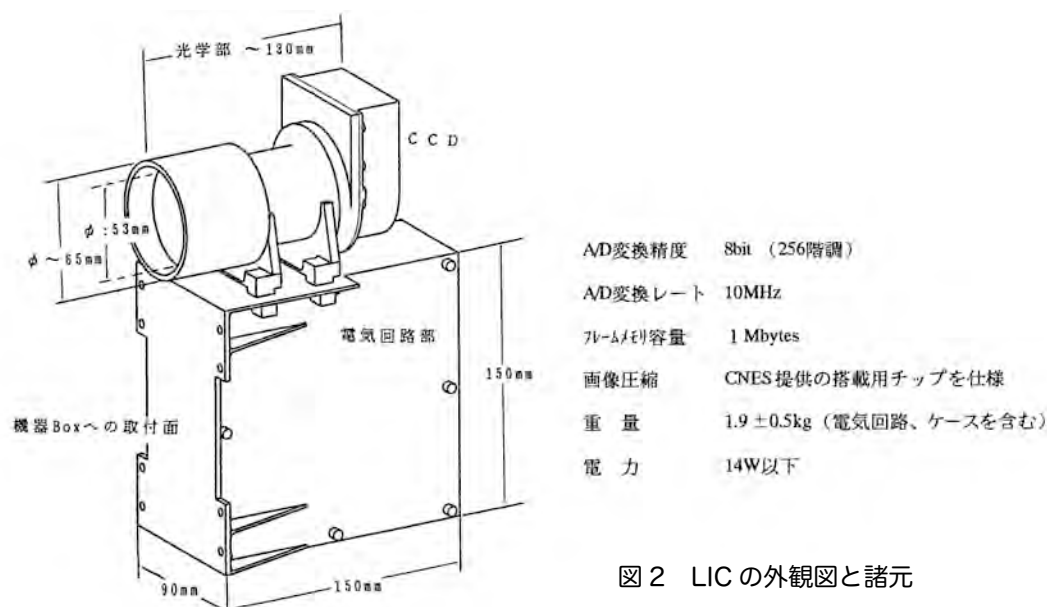


図2 LICの外観図と諸元

3. LICの仕様

LICは焦点距離70mm、口径比1.4の光学系と、その焦点面に定かれた2560画素の1次元モノクロCCDおよび付属の電気回路から構成される。LUNAR-Aはスピン安定型の探査機で、CCDはスピン軸と平行に配列されており、探査機がスピンすることによって2次元の画像が得られる。スピン軸は常に太陽方向を向く。撮像方向は首振り機構で変更する代わりに、2560画素に対応する 16.3° の視野をカバーしておき、必要な画像データのみを切りとってメモリに保存する。切りとる画像のサイズは、 512×512 、 1024×1024 画素の正方形のフォーマットと、縦横が 512×1024 、 512×1536 、 512×2048 画素（縦長と横長のそれぞれ2通りずつ）の合計8通りである。

4. LICの軌道上での運用

LUNAR-Aの軌道傾斜角は 25° なので、月の高緯度部分は撮像できない。LUNAR-Aが緯度 25° の高度250kmにある場合（図3）、緯度 54° の位置にある月の地平線を見渡すことになる。また直下から 45° 離れた地点は直下点から272kmに位置し、これは緯度 34° の地域を斜めに見下ろすことになる。したがって実際的に地形をとらえられるのは、緯度 $\pm 34^\circ$ 以内の範囲だといえる。

母船のスピン軸は太陽指向である。LICの光学系はスピン軸に対して直角に配置されているので、LICでは明暗境界線付近を直下にとらえることになる（図4）。このことで陰影のついたコントラストの高い月面を見ることになり、鮮明な写真を撮るには好都合である。いっぽう明暗境界線から離れるほど斜め下を見下ろすことになり、太陽高度の高い地域はLICの視野からはずれてしまい、撮像することができない。

母船の高度が250kmの場合、軌道に沿った方向では1スピンの20秒間に直下点は28km移動する。一方、カメラの視野角が 1024×1024 画素（ $5.8 \times 5.8^\circ$ ）のとき、撮像領域は $25.3\text{km} \times 25.3\text{km}$ となり、重なりを作ってマッピングすることができる（図5）。

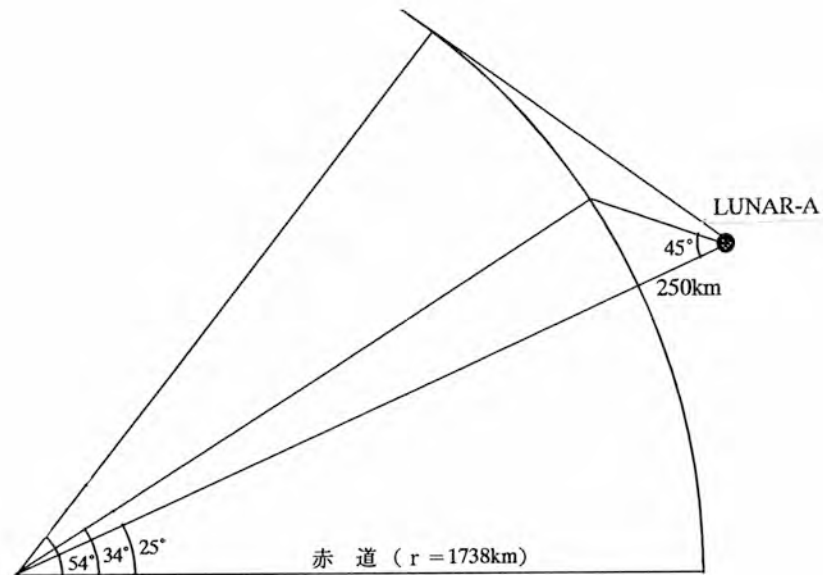


図3 LUNAR-Aが緯度25°、高度250kmにいるときの撮像範囲

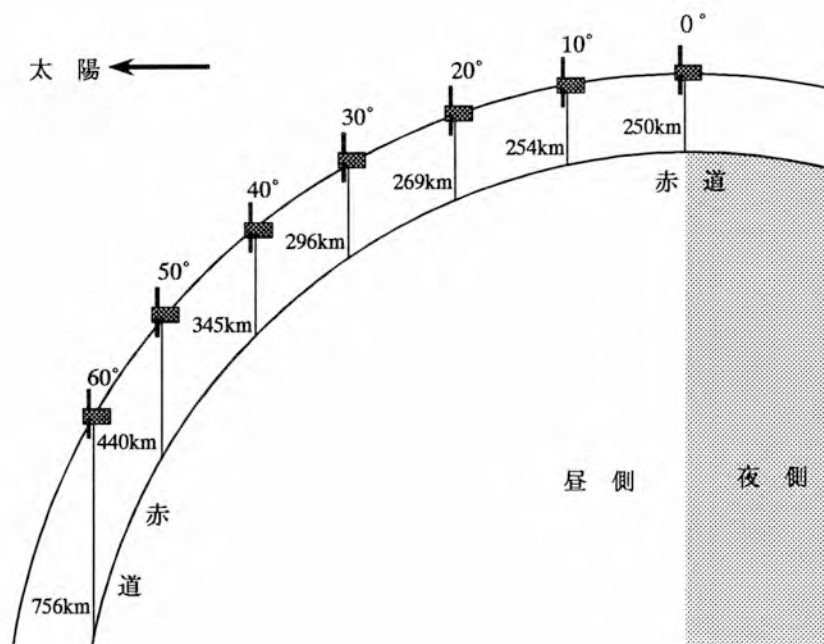


図4 LUNAR-Aの姿勢とLICの視野

しかし、高度が250kmよりも低いと、連続した画像が得られない。この場合にはスピンレートをわずかに速めることによって、連続画像を得ることができる。1周回後には昇交点の位置が30kmずれるので、LICでは $\pm 25^\circ$ 以内の地域を隙間なくマッピングできる。

5. ステレオ画像の撮像

異なる角度から同一地域を撮像すれば、ステレオ画像を作ることができる。2つの撮像位置の距離Bと撮像高度Hの比B/Hをベースハイト比と呼び、この値が1:2程度であれば、実体視しやすく、また精度の高い地形図ができる。LICでは仰角方向の制限(14.6°)により、同一軌道での

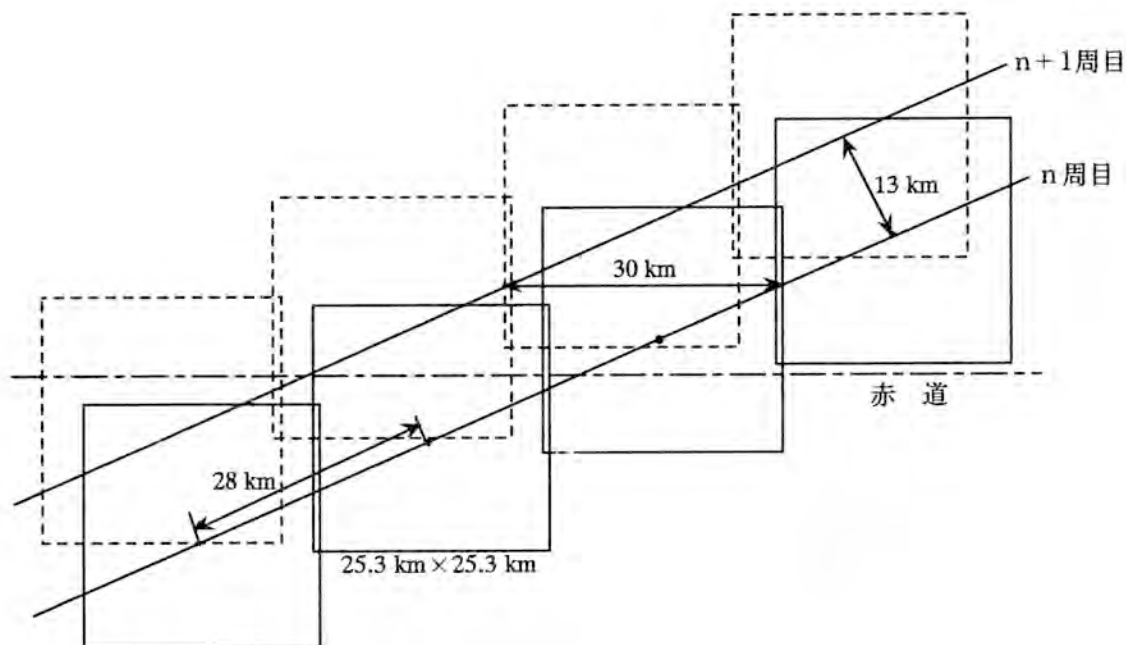


図5 LICの撮像範囲（高度250km、3rpm、1024×1024画素の場合）

ステレオ撮像ができない。そこでスポット衛星で採用されている隣接軌道間ステレオ視が可能かどうかを調べる。

ベースハイト比1:2をとるために必要な軌道間の距離は、LUNAR-Aでは100~150kmで、赤道付近では6~7周の、緯度25°では約30周の間隔が必要となる。このためには赤道付近では13時間待つことになり、この間に太陽高度は7°変化する。緯度25°では65時間も待つことになり、太陽高度は33°も変化するので影の様子はいちじるしく変わってしまい、ステレオ視は難しい。この方法での効果的なステレオ撮像は、経度±10°以内の低緯度に限られるだろう。

次に月を隔ててのステレオ視の可能性を調べてみる。1朔望月の周期である29.5日後に、影の様子は同じ状態になる。しかし軌道の昇交点Ωは約60°移動する。これは朔望月と分点月の時間差からくる角度差30°と、月の重力ポテンシャルによる摂動によって昇交点が移動する角度30°との和に相当する。LUNAR-Aからは、緯度で20°、距離で約600kmも離れた同一地点を見ることになり、ステレオ撮像には適さない。

29.5日で軌道面が360+60°回転すると、その6倍の177日でふたたび満ち欠けと軌道面がほぼ一致することになる（図6）。このときには、満ち欠けが一致し、明暗境界線での軌道位置も3~4°の違いで、ステレオ撮像には最適なベースハイト比1:2が達成される。LICでは、主にこの方法によってステレオ根像が行われるだろう。

6. 従来の探査機画像との比較

LICでは、高度250kmからの月面の分解能は直下点で25m、45°斜め下で35mとなる。アポロ軌道船のメトリックカメラは、これをやや上回る分解能であるが、緯度±20°以内の地域の約50%の画像しか得ていない。

また1994年春に月周回軌道に入ったクレメンタインの紫外-可視カメラでは、月全面をカバー

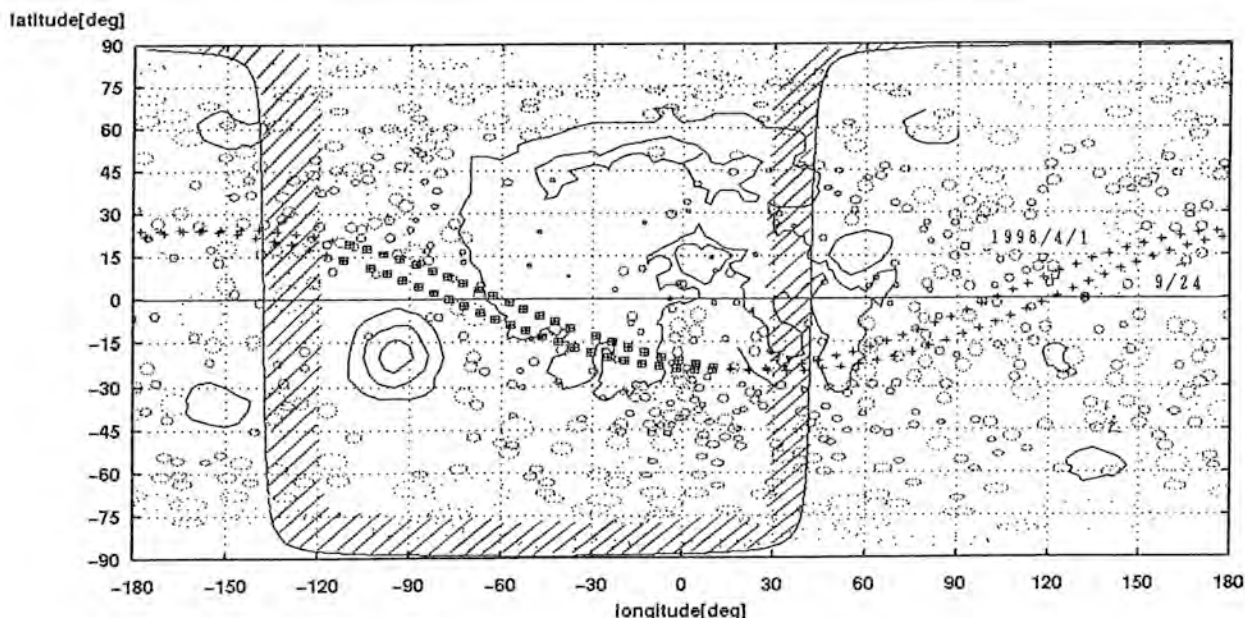


図6 6 朔望月を隔てた軌道直下点の位置 (1998年4月1日、9月24日)

カメラの種類	近月点	極上空
紫外-可視 UVVIS	115m	306m
近赤外 NIR	178m	475m
高分解能 HIRES	30m	90m
遠赤外 LWIR	65m	195m

近月点の高度は425km、極上空の高度は1275kmとして求めた。

したものの、分解能は100mよりも悪い(表1)。一方、クレメンタインの高分解能カメラはLICとほぼ同じ分解能であるが、全球をカバーしてはいない。また、クレメンタインでは軌道面が太陽を向いた極軌道であるため、低緯度では太陽高度が高く、地形は陰影の少ないのっぺりしたものとなる。これとは反対に LUNAR-A では、低太陽高度での撮像に適した姿勢で月を周回する。

LIC のもうひとつの特徴は、約 10 カ月という長期間にわたって撮像を続けることである。これは、

アポロの約一週間、クレメンタインの二ヶ月に比べると著しく長寿命である。このため、科学的に興味のある地形は、実体視できる画像を含めて、様々な角度からとらえることができる。クレメンタインは合計 11 波長のスペクトル画像を得て、岩石の組成を知る上で重要なデータをもたらした。しかし、低緯度地域の分解能が重要な観測では、LICがクレメンタインを上回る成果が期待される。

7. おわりに

この解説は『LUNAR-A 月撮像カメラ』(宇宙科学研究所, LIC 科学チーム編, 1995 年 6 月発行。48p) を要約したものである。このパンフレットは、LIC での観測を提案しようという研究者、大学・高校・中学・科学センターなどの教育関係者、マスコミなどを対象に LUNAR-A の月撮像カメラを解説したものである。ご希望の方は、〒229 相模原市由野台 3-1-1 宇宙科学研究所惑星研究系 中村昭子 (TEL.0427-51-3911 内線 2731 FAX.0427-59-4237 email: akiko [at] planeta.sci.isas.ac.jp) へ連絡をお願いします。(白尾元理:惑星地質研究会,小笠原雅弘:NEC宇宙航空システム)

論文紹介

月における鉄の存在度と分布

Lucey, P.G., Taylor, G.J., and Malaret, E., 1995, Abundance and Distribution of Iron on the Moon. Science, 268, 1150-1153.

アポロとルナによって採集された月の岩石、および月起源の南極隕石などの研究から、月の起源や初期進化、ならびに化学組成からみた地殻構造について、多くの知識が得られた。しかし、これらの情報はまだ決して十分とはいえない。月の性質や起源を論ずるには、月表面のグローバルな組成の情報も必要である。著者らはこの論文で、クレメンタイン探査で得られた月面のグローバルなデータをもとに、月の地殻の化学組成とそれにもとづく構造、月の起源の問題を論じ、ジャイアントインパクト起源説をつよく支持している。

月の鉄

月の原始地殻は、月全体をおおっていたマグマオーシャンの中で、軽い斜長石が浮上して Al に富む上部地殻が、重い鉱物が沈降して Fe に富む下部地殻が形成されたという仮説が広く受け入れられている。この仮説を検討するのに最も役立つ元素の 1 つが鉄である。Fe 量は Al やその他の難揮発性元素の量と逆比例の関係にあり、鉄は重要な key element である。

著者らは、可視波長のマルチスペクトル画像から、鉄の存在度を 1~2 重量%の精度で導き出す方法を開発し、これをクレメンタイン探査で得られた月のデータ解析に応用した。クレメンタインのスペクトルデータは、100~300m の解像度で月の全面をカバーしている。そこでこのなかの、緯度 70°N~70°S (月面の 93%) のデータを 35km の解像度で再処理して、Fe の分布図を作製した。

月の鉱物中における鉄存在度の大小は、月面の反射率を支配し、Fe²⁺が多いほど反射率は減少する。そこで Fe 量分布図の作製に際しては、アポロ 16 号採取の土壌 (No.62231、Fe 量は 4 重量%) の反射率を基準にしてスペクトルデータを処理し、Fe 量の分布をえがき出した (原著にはこうして求めた Fe 量分布図がカラー図版で掲載されている)。この資料をもとに、月のいくつかの基本的な問題を考察した。

マグマオーシャン

マグマオーシャン仮説は、アポロ 11 号の岩石研究以来急速に発展してきた考えである。このモデルによれば、浮上した斜長石などの集合体としてできた斜長岩 (アノーソサイト) 類は、そ

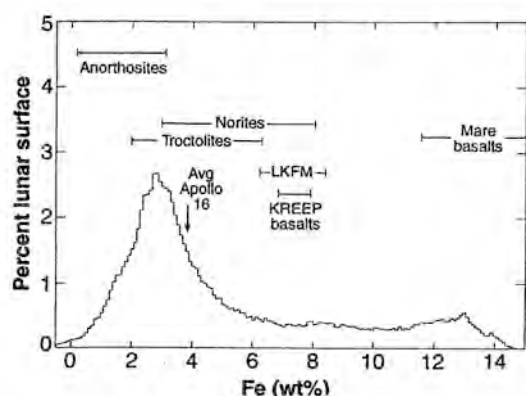


図 1 月における鉄存在度のヒストグラム (いくつかの岩石タイプの Fe 量レンジとアポロ 16 号岩石の Fe 量平均値も示す。)

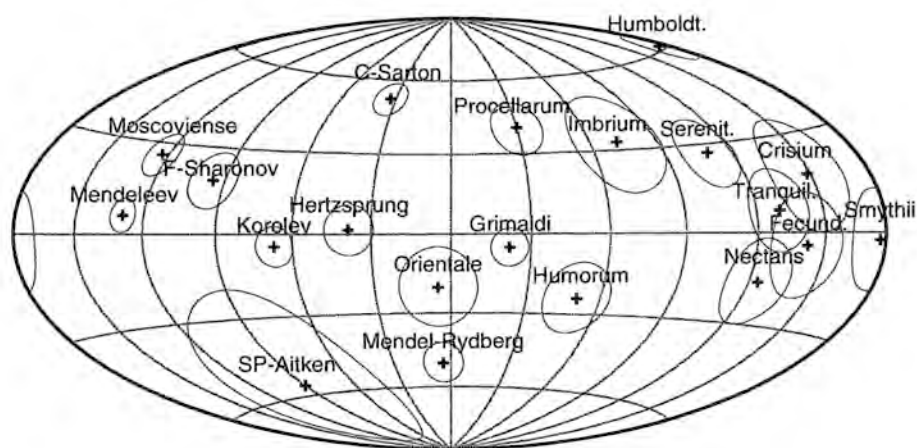


図2 月のバيسンの分布と、南極エイトケンバيسン（SP-Aitken）の位置（右半分が表側、左半分が裏側）

のFe量が0.2～4質量%の範囲に入る（平均1重量%）はずである。アポロ16号着陸地点の岩石は、典型鈣な高地の地殻を示すものとされてきたが、著者によれば、比較的Feに富んでいる（平均して約3.8重量%）ので、高地の地殻を代表するものとは考えられない。

著者らのクレメンタインデータの分析によれば、月の地殻からの二次的生成物である海の玄武岩でおおわれた部分を除いた月の表面の60%は、アポロ16号地点の岩石よりもFe量に乏しい（図1）。とくに月のうら側ではFe量がいちじるしく枯渇していて、場所によってはほとんど0に近い。この事実は、マグマオーシャン仮説の予測通り、月の広い地域の上部地殻が、典型的な斜長岩からなっていることを示している。

月の下部地殻の組成

衝突クレーターは月面下の深い部分の物質を掘りおこし、クレーターの周囲に放出物のおおい（ejecta blankets）を堆積させる。したがってこの物質を調べることによって、月の地殻の垂直構造をある程度まで知ることができる。

G. Ryder and J.A. Wood（1977）は、この原理を用いていくつかのクレーターやバيسンの放出物を調べ、月の下部地殻はLKFM（Low-K Fra Mauro basaltの略。アポロ14号が初めて採集した岩石で、カリウムが少ない特異な岩石）とよばれる月の岩石に似ていると唱えた。この岩石は玄武岩質の組成をもつインパクトメルトで、衝突で放り出された月の下部地殻の岩石と思われるものである。月の岩石コレクション中のほとんどのLKFMは、7～8.5重量%のFe量をもっている。

著者らの解析結果もこの考えを支持するものである。月のうら側の南方、180°E、56°Sに中心をもつ直径2500km、深さ8.2kmの大構造「南極－エイトケンバيسン」（South Pole-Aitken Basin）（図2）の内部の地殻は薄く（約30km）、バيسン形成後に隆起した下部地殻の部分からなっていると考えられる。そのFe量は約8重量%で、LKFMのFe量に相当する。月のおもて側の雨の海のバيسンも、海をつくった玄武岩層の下の岩石は、約8重量%のFe量をもつと考えられ、このことは、アポロ15号と17号が採集した岩石にLKFMが見つかったことで支持される。このようにして、南極－エイトケンバيسンなどの観察から、月の下部地殻がLKFMの組成をも

つことは確かだと著者たちはいう。

月の起源

月のバルク化学組成は、月の起源を明らかにする手がかりを与えてくれる。月が地球から分かれたとする分裂説や、微惑星集まって地球と同時にできたという説をとるとすれば、月と地球の珪酸塩部分は同じ組成でなければならない。一方、捕獲説やジャイアントインパクト説をとれば、月のバルク組成が地球の珪酸塩部分（主にマントル）と同じである必要はない。

Al、U、Th のような難揮発性元素の存在度は、月の形成時に生じた熱の影響を受けていないという点で重要である。著者らの見積もりによれば、月の Al のバルク含有量は、地球のマントルに比べて約 50% 多い。月の地殻の Al 含有量は、以前には 13.8~14.8 重量% (Al_2O_3 にして 26~28 重量%) とされていた。これに対して著者らが、月の高地の平均的 Fe 含有量を約 3 重量% として、これに対応する Al の量を求めたところ、 16 ± 0.5 重量% (Al_2O_3 にして 29~31 重量%) となった。

南極-エイトケンベイスンで掘りおこされた斜長岩層の厚さを、S.Mueller ら (1988) は 20km としたが、著者らは、これでは薄すぎて、もっと厚い斜長岩の上部地殻があったと考える。そしてこのことから、月は地球に比べてずっと難揮発性元素に富んでいたはずだという。この考えは、月の起源が分裂説や同時形成説では説明できないことを意味し、ジャイアントインパクト説のみが、力学的にも化学組成他にも、理にかなった起源説であると結論している。 (小森長生)

論文抄録

イオの SO_2 に富む赤道盆地と地形形成作用

McEwen, A.S., 1995, SO_2 -Rich Equatorial Basins and Epirogeny of Io. *Icarus*, 113, 415-422.

木星の衛星イオの表面では、地形、火山活動、熱流量、 SO_2 の分布などが密接に関係している。熱流量の高い地域は赤道帯にあり、赤道帯の盆地には SO_2 が集中して分布する。今後イオで起こる噴火活動を予測すると、ペレ式の大噴火は高地とその周辺で多く、プロメテウス式の小・中規模のプリューム噴火は赤道盆地とその周辺で集中して起こる可能性がある。 (K)

火星のアウトウォッシュプレーンとサーモカルスト

Costard, P.M., and Kargel, J.S., 1995, Outwash Plains and Thrombolites on Mars. *Icarus*, 114, 93-112.

火星表面にみられる罌壁クレータ (rampart craters) のタイプと分布の特徴から、地下の水は半球的に非対称に分布していると考えられる。罌壁クレータは北半球の平原に多く、それらはシベリアのヤクーツク地方や北米大陸の北極海沿岸にみられるサーモカルスト地形とよく似ている。ユートピア平原やアキダリア平原では、水に富む厚い堆積物が広がり、これらの地域では地球上の周氷河地帯でおこったサーモカルスト形成に似た過程が進行したと思われる。 (K)

衝突によって引き起こされたマグマの発生

Ryder, G., 1994, Coincidence in time of the Imbrium basin impact and Apollo 15 KREEP Volcanic The case for impact-induced melting. *Geol. Soc. Amer. Special Paper* 293, II-18

インブリウムベイスン形成の直後、地殻の部分溶融によるマグマが生産され、K、REE、Pで特徴づけられる KREEP 玄武岩が噴出した。この噴出年代は、インブリウムベイスンの衝突から 20Ma 以内で、年代的にはインブリウムベイスンのインパクトメルトと区別できないが、化学組成と岩石学的特徴はインパクトメルトとは全く異なる。KREEP 玄武岩の噴出は、インブリウムベイスン直後に限られ、また他のベイスン形成直後には、このような玄武岩の噴出はみられない。KREEP 玄武岩は部分溶融の程度が大きいことから、溶融寸前の状態であったところに、インブリウムの衝突がおり、圧力の減少によって生産されたと推定される。(S)

.....

新刊紹介

巨大衝突と惑星の進化

Dressier, O.B., Grieve, R.A.F., and Sharpton, V.L., 1994, Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution. Geol. Soc. Amer. Special Paper 293, 348pp.

この論文集は、1992 年 9 月にカナダのサドベリーで開催された International Conference on Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution で講演された 84 の論文の中から、ピックアップされた 28 の論文をまとめたものである。全体は次の 5 部から構成され、各部は 5~6 論文が収録されている。1. Planetary Constraints and Perspective, 2. Processes and Effects on Impact Cratering. 3. Products of Impact cratering, 4. Investigations of Terrestrial Impact Craters, 5. Sudbury Structure-Origin and Evolution.

衝突をテーマにした論文集としては、1977 年に Impact and Explosion Cratering (Roddy, et al. eds)、1981 年に Proceedings of the Conference on Multi-Ring Basins (Schultz and Merrill, eds) が出版されているが、それらと比較すると最近 10 年間の研究の成果が理解される。いくつかをあげると、①地球上の衝突クレーターがくわしく調査された。特に直径が 150km をこえるサドベリー (カナダ) やヴェルデフォルト (南ア) の隕石孔が精査されるにつれて、それにとまなう火成活動のようすもわかってきた。②月についても、テクトニクス・衝突実験などの方法とアポロのサンプルの見直しによって、ベイスン形成直後の圧力減少による火成活動がおこった可能性があることがわかってきた、③マゼランによって金星のベイスンが、地球や月のそれとはかなり異なったものであることがわかった、などである。

これらのことから惑星 (もちろん地球を含む) の形成初期の数億年間での巨大衝突は、その後の進化に決定な影響を及ぼしたことが、いくつかの論文では結論されており、そのことが本書のタイトルにもなっている。もちろん論文集であるのでそれぞれの論文の主張が食い違っていることはあるが、その違いがどのような根拠から引き出されているのかを考えながら読んでいくのは、なかなか楽しいことである。本書は下記から購入することかできる。送料込みの価格は US\$97 で、国際郵便為替で送金するのが便利。

The Geological Society of America

3300 Penrose Place, P.O.Box 9140, Boulder, Colorado 80301, USA

(白尾元理)

INFORMATION

●第 4 回 LIC 月の地質勉強会のお知らせ

日 時： 7 月 5 日 (水) 13:30~17:00

場 所： 東京大学理学部 5 号館 3 階 308 号室

内 容： 1. 安部正真 月の軌道進化と地球の潮汐力の月地殻への影響

2. 寺蘭淳也 NASDA の月探査計画

3. 白尾元理 LIC の観測プロポーザルの一例：月のドームの観測

問い合わせ先： 白尾元理 (Tel. 03-3844-5945 Fax. 03-3844-5930)

●惑星科学フロンティア・セミナー

今年は、近年いちじるしい発展をみせている複雑性の物理学の最新成果を、その専門家に解説してもらうことになりました。一方、それらの成果が、惑星科学にとってどのような意味を持つかについても議論します。

日 時： 7 月 17 日 (月) 14:00~19 日 (水) 12:00

場 所： 静岡県清水市三保ユースホテル (清水市三保 2399 TEL.0543-34-0826)

内 容： 惑星科学と複雑性の物理

参加費： 6000 円

問い合わせ先： 神戸大学理学部地球惑星科学科向井研究室内 惑星科学夏の学校事務局

TEL.078-803-0574 FAX.078-803-0490 email kobe [at] komadori.earth.s.kobe-u.ac.jp

●惑星科学夏の学校

日 時： 7 月 19 日 (水) 14:00~7 月 21 日 (金) 18:00

内 容： 探査・観測で明らかにされる惑星の姿

参加費： 3000 円

場 所： 問い合わせ先： 惑星科学フロンティア・セミナーに同じ

●第 2 回「月の起源」研究会

宇宙研では LUNAR-A による月探査の計画が着々と進み、宇宙開発事業団でも月周回リモートセンシングやサンプルリターンなどの計画が進んでいます。しかし月探査の進展にくらべて、日本ではサイエンス側の議論力が十分とはいえません。このような状況をふまえ、今年は月の起源を、地球化学、地球物理学、地質学、天体力学、惑星形成論などの角度から総合的に討論します。

日 時： 7 月 22 日 (土) 13:00~17:00、7 月 23 日 (日) 9:00~15:00

場 所： 宇宙科学研究所 6 階会議室

問い合わせ先： 東京工芸大学理学部地球惑星科学科 井田 茂

TEL.03-5734-2620, FAX.03-3727-4662, e-mail : ida [at] geo.titech.ac.jp

●第 28 回月・惑星シンポジウム

日 時： 7 月 31 日 (月) ~8 月 2 日 (水)

場 所： 宇宙科学研究所本館 2 階会議場 (相模原市由野合 1-1-1)

問い合わせ先： 宇宙科学研究所 清水幹夫 (0427-51-3911 内線 2529) 水谷仁 (内線 2515)

編集後記：夏を迎えて例年にも増してたくさんの集会が開かれます。Lunar-AやPlanet-Bなどの探査計画を間近に控えて、惑星地質学にもわかに活気を帯びてきたのが、肌で感じられます。有意義な夏をお過ごしください。(S)