

## 特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

# 月の核と月磁気／古月磁気学

渋谷秀敏<sup>1</sup>，綱川秀夫<sup>2</sup>

## 1. 磁気からの二つの道筋

月－地球系の形成史を考える上で，月に金属核が存在するか，存在するとすると半径はどれだけかと言うのは重要な問題点である．月の平均組成，特に鉄の含有量の推定に直接影響を及ぼすからである．

磁気（磁場／磁化）の測定からこの問題にせまる道筋には二つある．一つは月岩石に残った過去の磁場の化石を検討することで，もう一つは外部磁場の変動が引き起こす月内部の誘導電流による磁場を測定して，電気伝導度が極めて高い核があるか検討する方法である．岩石磁気を測定する手段はさらに岩石試料の磁化を測定する方法と，月の磁気異常を測定してそれから月表面の岩石の磁化方位を推定する方法に分類できる．この内，電気伝導度の推定は測定地点の移動する衛星からの測定で核の深度まで迫るのは難しいので，ここでは古月磁気に絞って議論する．

アポロ計画で月表面付近の磁場が測定された時，事前に期待されたものより大きな磁場が見い出され，古月磁気と月の核については大きな議論を巻き起こした（例えば[1]）．しかし，アポロ15号16号のサブサテライトで磁場をマッピングできた地域は全体の5%程度で[2]，磁気異常が観測できたクレータの数も限られており，結論は決定的ではない．そこで，セレーネ計画ではより広い範囲（90%以上）の磁場のマッピングから過去に月が固有磁場を持って

いたかを明らかにしたいと考えている．

## 2. 古月磁気の可能性

地球上の古地磁気学においては，岩石の定方位試料を採集して，その磁化を測るのが最も標準的な手法である．しかし，古月磁気においてはこれをそのまま適用するのは非常に難しく成功していない．最大の問題点は試料のオリエンテーションである．地上でも我々がしばしば苦勞することは，新鮮な岩石のとれる露頭をさがして，定方位で試料を取ることである．月では露頭をさがすのも大変であろうし，また，マークを付けてドリルなりハンマリングなりをして試料を取り出す装置を作るのは非常に困難である．そこで，岩石試料の磁化を用いた古月磁気研究は，これまで，もっぱら古月磁気強度の推定を通じて月の固有磁場の有無に言及するのが常であった．

しかし，古磁気強度研究は地上においても古磁気方位の研究に比べて難しいものである．磁化の強度が磁化獲得時の磁場に比例すると考えるのは一般的で，磁化強度を測定してそれを磁性鉱物の量で規格化して磁場の強度とする．しかし，この比例定数が磁化獲得の機構に大きく依存するであろうことは明白であるし，月の岩石の磁化獲得の機構がただの熱残留磁化と考えて良いかは議論のあるところである．その上，月の岩石は生成以来地球と比べて還元的な雰囲気にあって，地球の酸

1 熊本大学・理学部

2 東京工業大学・理学部

化的な雰囲気中の岩石でつちかって来た古地磁気/岩石磁気研究の経験がそのまま適用できるかも明白ではない。その結果、アポロ計画の試料を用いた古月磁気強度決定の結果は万人の受け入れるところとはなっていない。

地球での古地磁気研究にはもう一つの流れがある。それは、地表（主に海面上）での地磁気異常の測定から、海山や海洋底の磁化の方位を推定する方法である。これは、古地磁気測定に欠かせない消磁をしていない残留磁化を測定するわけであるから、我々のように岩石試料の磁化測定を生業にして来たものにとってはかなり抵抗がある。しかし、例えば大平洋プレートの古地磁気極は海山の本体の火山岩試料を定方位で得るのが難しいという問題からこの方法で求められており、その他のプレートの古地磁気極との比較に使われている。しかも、月には大気もなくテクトニクスも単純であるので、岩石は地球のものとは違って冷却後の化学変化（酸化、風化、変質など）を受けにくく、また、現在の磁場も弱いことから地球で必ず問題となる、比較的新しい二次磁化の影響も小さいであろう。従って、部分消磁を適用できないと言うデメリットは月では問題が少ない。この場合は過去の磁場の強度を問題とするのではなく（磁性鉱物の量や磁化獲得の効率を見積もれない）磁化方位を問題とすることになる。月にはホットスポットも海山もなさそうであるが、隕石の衝突でクレータ中の岩石はある深さまでキュリー温度をこえた後に急速に冷却し、古月磁気の記録を残していると期待される。

### 3. 古月磁気と核の存在

ではこの方法で古月磁気研究が可能となった時に核の存在といかに結びつくのであろうか。惑星では液体金属の核が存在しさえすれば固有磁場を

持つのはさほど難しいことではない。月は自転速度が遅いのでダイナモが出来にくいように見えるが、理論によればダイナモ生成に必要な自転速度に比べれば十分に速く、核の中での対流さえ起これば想定されている核の半径（数百km程度）であっても地心双極子（GAD: Geocentric Axial Dipole）が卓越した固有磁場を持つことになりそうである。核形成時には今より温度も温度勾配も高かったと思えば、固有磁場があったと考える方がむしろ自然であろう。双極子の卓越を固有磁場の特徴と考えると、過去に月が固有磁場を持っていたなら月磁場の方位に秩序がないといけないこととなる。

我々古地磁気屋は古地磁気方位の表現としてしばしば仮想地磁気極（VGP: Virtual Geomagnetic Pole）を用いる。GADを仮定すれば試料採集地点の地磁気方位と極の位置とは1:1に対応する。こうして地磁気方位から求めた極がVGPである（図1）。この投影は線形ではないがGADが卓越していれば沢山の地点から求められたVGPは極の周りに分布し、その平均は極に一致することが期待できる。この変換が半径に依存しないことは自明であ

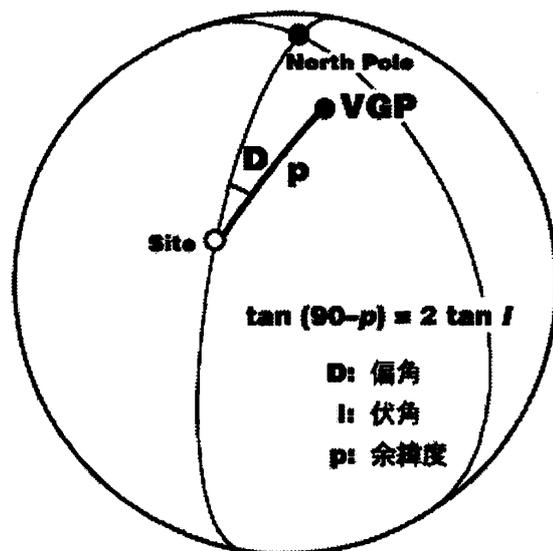


図1 地球（月面）上の一点の磁場方位からVGPが求まる。伏角から図中の式で余緯度が求まるので、偏角の示す方向にその角度だけ進んだ点がVGPとなる。

るので、月にも適用できる。

従って、月が金属核をもっており、それが過去に液体で対流していたとするとその当時形成されたクレータの磁化の方位から求めたVGPはその当時の極の近くに分布するはずである。地球の場合はVGPの不一致から地殻のテクトニクスを議論するのであるが、月は地球と違ってテクトニクスが単純で月表面の相對運動はほとんどないと考えられるので、月全体から得られたVGPを単純に比較しても構わない。月面上のクレータの磁化をできるだけ地域に偏りのないように測定して、VGPが一致すれば液体金属核が存在したことを言えるのである。一方、一致しなかった時には核が存在しない可能性の他に、磁化の獲得が単純でないという古月磁気学の問題や、初期から対流が活発でなかった可能性を否定できないのではあるが、核の存在の可能性はかなり低くなる。

ここで強調しておきたいことは、アポロ計画を通じて観測された予想より強い古月磁場の原因の可能性として様々に検討されている [1] うちで、(1) 双極子が卓越している、(2) 逆転が起きる、という2条件をクリアするのはダイナモを起源と考えた時のみであるし、また逆に、ダイナモを起源として考えればこの二つの条件は満たすと考えるのが普通である。言い換えれば、この二つの条件と月のダイナモの存在とは、ほぼ、必要十分条件なのである。

もう一つ考えておかねばならないことは極移動の可能性である。月の角運動量が一定であった場合でも月の地殻から見た極の位置の移動はあり得るし、力学的にも慣性モーメントテンソルの変化さえあれば極の位置が移動することになる。従って、VGPの比較の際にはクレータの年代を推測することが重要となる。VGPの位置や集中度の時間変動は核の存在だけでなく月の初期プロセスの解明に重要な情報を与えるであろう。

以上のような議論に基づいて、アポロ15号16号

のサブサテライトの測定データをRuncorn [3]は解釈し、初期の月での液体金属核の存在を主張した。しかし、用いることの出来たクレータの数が限られている上に、極移動の仮定が必要で、そうなる各時代のVGPの数はいよいよ乏しくなり、議論はかなり強引なものにならざるを得なかった。

## 4. セレーネ計画での観測

それでは、セレーネで上記のシナリオにどの程度迫れるのであろうか。セレーネ計画の枠組みがかなり明確になったので、具体的な数値に基づいて計算してみた。計画によればおよそ100Kmの高度でほぼ全球磁場のマッピングを行い、余裕があれば高度を下げるということになっている。100Kmの高度で検知可能なクレータを見積もるため、クレータを直径100Km厚さ10Kmの一様磁化した円板と考える。磁化強度を0.2A/mとすると30nT程度の磁気異常が100Kmの高度で期待できる。これは、十分検出可能である。

とりあえず100Kmクラス以上のクレータは検出可能として、クレータのサイズ分布を考慮すれば [4]、セレーネ計画で測定可能なクレータの数は少なくとも200個あることになる。実際にはもう少し弱い磁場でも磁化方位の決定が可能であるが、この中には磁化が弱すぎて方位を決められないものもあるかもしれないので、概数として200個程度の磁化方位、ひいてはVGPを決定することができるであろう。これは、アポロ計画での20程度と比較して一桁増えることとなり、VGPの統計の困難を解消することになるであろう。

## 5. おわりに

セレーネ計画の月磁場のマッピングの重要な目的の一つは初期の月にダイナモがあったかどうか

である。上に述べたように、マッピングが十分な精度で行なえれば、これの当否はほぼ確実に明らかにすることができると考えている。月に金属核があれば、少なくとも初期には液体であったと考えるのが妥当であるだろうし、対流が存在してダイナモ作用が起きていたと考えるのは、むしろ自然であろう。月磁場のマッピングから金属核の存在までの推論はストレートフォワードであるし、もし、マッピングから逆転する双極子の存在が否定的であれば、これまた、ストレートフォワードに金属核の存在も否定的になる。残る問題は、十分な数のクレータの磁化方位を決定できるかどうかにかかっている。少しでも多いクレータの磁化方位を決定するための、即ち少しでも小さなクレータの磁化を測定するための運用を切望している。

## 参考文献

- [1] Fuller, M. and Cizowski, S. M., 1987, Lunar Paleomagnetism, in Geomagnetismed. J. A. Jacobs, vol. 2, Academic Press, pp. 307-455.
- [2] Hood et al., 1981, Contour Maps of Lunar Remanent Magnetic Fields, J. Geophys. Res., 86,1055-1069.
- [3] Runcorn, S. K., 1983, Lunar magnetism, polar displacements and primeval satellites in the Earth-Moon system, Nature, 304, 589-596
- [4] 藤原 顕, 1997, 惑星上の衝突過程, 岩波講座地球惑星科学12巻, 比較惑星学, pp.87-130