

特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

月ダイナモの可能性について

桜庭 中¹

1. はじめに

過去のある時代において、月が固有磁場をもっていたのではないかと、そしてそれは月の中心核（コア）でおこるダイナモ作用によるのではないかと[1]、と考える根拠は二つある。一つは月の石がかなり強力に磁化しているという直接的な証拠が見ついていることである。その証拠には二つあり、一つは月の石の古磁気強度（paleointensity）が測定され、現在の地球なみの磁場強度が推定されること、もう一つは月の上空から測定される地殻の磁気異常が有意な値を示していることである[2]。月に固有磁場があったとする根拠のもう一つは、月と同じ程度の大きさをもつ他の天体に、固有磁場をもっているものがあるということである。その例としては水星、木星の衛星であるイオとガニメデなどがあげられる。とくにイオとガニメデとに有意な固有磁場が見つかったことは、月にも同様の固有磁場があったのではないかと主張を大いに支持するものである[3]。

本稿では、月ダイナモが駆動することで月の固有磁場を維持することができるかどうか、そしてそのとき月の表面での磁場強度はどの程度であるかを検討する。

2. ダイナモとはなにか

ここでいうダイナモとは、ある系の外部から電

磁気的エネルギーが与えられていないにもかかわらず、その系内部に定常的に電流を流し続けるような力学的なしくみのことをいう。たとえば地球ダイナモとは、地球のコアが冷却することからくる熱エネルギーが液体の鉄の熱対流運動を駆動し、さらにその運動が電磁誘導の法則によりコア内の電流を維持するという一連のしくみのことを指す。天体におけるダイナモ作用は、地球のみならずさまざまな天体でごく一般的にみられる現象である。

天体ダイナモの駆動源については次の二つが候補として考えられる。一つは、地球ダイナモの説明で触れたような、高い電気伝導度をもった流体（電磁流体）の熱対流（一般的には熱-組成対流）が駆動するダイナモである。このタイプのダイナモは、地球磁場の成因を説明するためのモデルとして精力的に研究されてきた。とくに近年の電子計算機の性能の向上とともに、数値シミュレーションによるダイナモの研究がさかんにおこなわれている。地球の磁場に関して言えば、現在みられるような磁場のかたち、磁場の永年変化、磁場の逆転などをうまく説明するようなシミュレーション結果が報告されており、このモデルの地球への応用の妥当性を示しているといえる[4,5]。こうした研究から示唆されることのうちとくに重要なことは、生成される磁場の形態や磁場強度が天体の自転の影響を強く受けている、ということである。

もう一つの候補として天体の自転軸の章動や潮汐力をエネルギー源とするダイナモが考えられる。

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻

たとえば章動に関してはマントルとコアとの自転軸のずれがコア内の流れをひきおこす[6]。しかしこうした流れ場で本当に磁場が維持されるのかは不明な点が多い。また同じく章動や潮汐と関連して、こうした外力で引き起こされる流れ場の擾乱がある種の不安定を起し、コアの中に大振幅の流れ場が生じるという研究もある[7]。ただやはりこの現象が磁場の増幅に関してどのような効力をもつか、これだけでダイナモを維持できるのかについてははっきりとは分かっていない。

またダイナモの定義からは外れるが、外部磁場が電磁流体の対流と密接に関係し、天体の固有磁場を形成する可能性も示唆されている[8]。この場合、かりに天体内部の対流運動がダイナモを駆動するだけの強さがなくても、外部磁場を種磁場として、効果的に磁場を強めることができる。この効果は強大な固有磁場をもつ惑星の周囲をまわる衛星においては重要となる。

3. 月ダイナモの可能性

3.1 ダイナモが起こるための条件

月ダイナモの可能性をさぐるために、まずダイナモが起こる条件とは何かを考える。なお以下ではダイナモの駆動源としては、地球ダイナモで一般的に考えられている熱-組成対流の場合を想定する。また電磁流体としては液体の鉄を考え、その容器のことをコアなどとよぶが、もちろん他の可能性を否定するものではない。

ダイナモ理論から導かれる、ダイナモが起こるためのほとんど唯一の条件は、磁気レイノルズ数 R_m が1よりも十分に大きい、すなわち

$$R_m = \frac{UL_c}{\eta} > 1 \quad (1)$$

ということである。ここに U は流体コアの平均的

な速度、 L_c はコアの半径、 η は流体の磁気拡散率（電気抵抗に比例する）である。どの程度に1よりも大きければよいかは流れのパターンに敏感に依存し、必ずしも自明のものではない。しかし回転する球殻流体の熱対流の数値シミュレーションによれば、ダイナモが起こる臨界磁気レイノルズ数はオーダーとして100の程度である。たとえば磁気レイノルズ数を100にしようとする、コアの大きさが3000km（地球に相当）ならば $U=0.01\text{cm/s}$ 、またコアの大きさが300kmならば $U=0.1\text{cm/s}$ となる。ただし融解した鉄の磁気拡散率として $\eta=3\text{m}^2/\text{s}$ を用いた。なお後者の例 ($L_c=300\text{km}$) は、もし月にコアがあれば、そこにあてはまるものと考えられる。ここで見積もられる程度の流速であれば、一般的な熱-組成対流で十分実現可能であろう。

流体の電気抵抗が大きければ、それだけ系の大きさが大きくなるか、あるいは流速が大きくなるかしなければならぬのは、磁気レイノルズ数の定義から明らかである。金属コア以外の可能性は、例えば身近な物質で考えると海水では電気抵抗が融解鉄の5桁、マグマならばそれよりさらに電気抵抗は大きいのであるから、月のサイズを勘案すればあまり現実的ではないように思われる。

流体のコアの中で熱-組成対流が起こるかどうかを決めるのは、対流不安定の原因である浮力の大きさと、逆に対流を妨げる性質のある自転による力（コリオリ力）とのせめぎあいである。対流の原因がコアの冷却のみによるとき、この関係は

$$RaE_k^{4/3} > O(1) \quad (2)$$

と表される[9]。ここで R_o はレイリー数で、拡散項に対する浮力項の大きさを表すのに対し、 E_k はエクマン数で、コリオリ力に対する粘性項の大きさを表している。これら無次元数の定義は、

$$R_o = \frac{\alpha\beta g L_c^4}{\kappa\nu}, \quad E_k = \frac{\nu}{2\Omega L_c^2} \quad (3)$$

ただし α は熱膨張率, ν は動粘性率, κ は熱拡散率, Ω は自転角速度, そして β と g はそれぞれコア表面での温度勾配および重力加速度である. 二つの拡散率 ν と κ とは, 液体の鉄の分子拡散をもとにすればおよそ $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ くらいであろうと考えられている. これらの値を用いて, 地球や他の惑星の場合について式 (2) を満たすような温度勾配をもとめてやると, きわめてわずかな温度勾配で熱対流が駆動されることがわかる. たとえば地球のコアの場合, コア表面での総熱流量は 10^6W 程度でよい ($\alpha = 10^{-5}/\text{K}$, コアの熱容量は $700 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ とした). もちろん今の議論はブシネスク近似 (流体の圧縮性を浮力項以外は無視した近似) に基づいたものであるから, 実際はコアの断熱温度勾配を考慮しなければならない. だから結局のところ熱対流に関して言えば, 断熱温度勾配程度の温度勾配をコアの冷却によって維持することができれば, 地球程度の自転速度であれば対流は簡単に駆動することができる, ということになる.

3.2 磁場強度はどのように決まるか

古典的な一つの経験則として, 天体の固有磁場の双極子モーメントの大きさとその天体の自転角運動量との間に比例関係があるという, 磁場に関するボーデの法則というものが知られている. しかしこれ自体物理的裏付けがあるものではない. その他いくつかのスケーリング則が提唱されているが, その中でもっとも有望なのはコリオリ力 (自転による力) とローレンツ力 (磁場の力) とのつりあいを仮定するスケーリングである. この説は, 浮力や圧力勾配などの他の力を無視しているところに問題が残る. しかし最近の数値シミュレーションによれば確かにそのようなバランスが対流セルのある部分で生じており, それが全体の磁場の強さを決めているようである [10]. ここではその結果に基づいて, 簡単な磁場強度の見積りをし

てみる.

まず高速回転する系での対流運動は, 回転軸に平行に, かつ回転軸を取り囲むように整列した数組の対流セルによって特徴づけられることがわかっている. そのような対流セルは, 北からみて時計回りに循環する高気圧型のセルと, それと逆向きに循環する低気圧型セルとに分類できる. すなわち高気圧型のセルでは圧力勾配は外向きであり, それと内向きのコリオリ力とがつりあっている. 生成された磁場は, 赤道付近において高気圧型の対流セルの中に閉じ込められる. これは赤道付近では高気圧型のセルの中心に向かって収束する二次的な流れ場が生ずるためである. 磁場の強さが強くなると, この高気圧に閉じ込められた磁束が流体に対しておよぼす力, すなわちローレンツ力の効果が無視できなくなる. ローレンツ力 (この場合磁気圧による力といってもよい) は高気圧セルの中心から外向きにはたらくので, 今度はコリオリ力とローレンツ力 (プラス圧力勾配) とのバランスが生じる. コリオリ力の大きさは熱輸送で決まっているので, 結局のところ磁場強度はそのコリオリ力の壁を越えることはできない.

以上の論理を数式で書くと次のようになる. 高気圧セルの半径を d , そこに閉じ込められた磁束密度を B_z , 高気圧セルを循環する流れ場の速度を U , 自転角速度を Ω , 流体の密度を ρ , 透磁率を μ_0 とすると, 高気圧セルの赤道付近でのローレンツ力とコリオリ力とのバランスは,

$$\frac{B_z^2}{\mu_0 d} \sim 2\rho\Omega U \quad (4)$$

である. 速度 U は磁気レイノルズ数で書くと, $U = R_m \eta / L_c$ であるから, 磁場強度として

$$B_z \sim \sqrt{2\rho\Omega\mu_0\eta} \sqrt{R_m(d/L_c)} \quad (5)$$

を得る。右辺の最初のファクターはよく知られた無次元数、エルサッサ数が1という条件で得られる磁場強度である。二番目のファクターは磁気レイノルズ数の平方根に比例する。式(5)は高気圧セルの赤道付近に閉じ込められた磁束密度であり、実際に地表で観測される磁場ではない。もしこの磁場がそのまま地表の磁場までつながっているとすると、地表の磁場 B_s は、惑星の半径を L 、対流セルの中心の位置が惑星中心から rL ($0 < r < 1$)の位置にあるとして、

$$B_s \sim B_c \left(\frac{rL_c}{L} \right)^3 \quad (6)$$

と見積もられる。ダイナモを起こしている電磁流体が液体の鉄であるとする、 ρ や η は既知である。また磁気レイノルズ数はダイナモが起こる条件から少なくとも数100よりは大きいので、たとえば1000程度として差し支えなからう。その他のパラメーターについては、数値シミュレーション結果からの情報と地球磁場を正確に与えるための条件などから、 $d/L_c \sim 0.1$ 、 $r \sim 0.3$ とおけば、あとは惑星の自転角速度 Ω とコアの半径比 L_c/L さえ分かれば磁場強度を見積もることができる(地球の場合は固体の内核があるため $r=0.3$ ということはある得ないが、式(4)が正確には成り立っていないこと、高気圧セルに閉じ込められた磁束の多くの部

分はトロイダル磁場となって、直接地表にはあらわれないことなどのさまざまな効果をすべて含んでいると解釈することができる)。

月および固有磁場があると思われるいくつかの天体について、以上の見積もりを行った結果を表1にまとめた。ただし月のコアの半径は300kmとした。またコアの密度は、地球は 10^4kg/m^3 、その他は $6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ とした。ガニメデの磁場強度についての見積もりは観測値をよく説明するが、水星とイオについては実際に観測される磁場強度の方が値が小さい。この例でいくと、月に磁場があったとしてもせいぜい地球上での値の百分の一以下であろうと考えられる。なおここでおこなった見積もりは、高速回転する系における熱-組成対流の場合に、そこで生成される磁場強度がどのように決まるのか、という問題設定でおこなったものであり、その他の状況下では結果が異なる可能性がある。

4. 議論

月の石の年代と古磁気強度の測定から、月が固有磁場をもっていたらしいとされるのは今から $3.2-4.0 \times 10^9$ 年前の間である。このような太古の月ダイナモを考えるためには、その当時の月の自転速度(および公転速度、月-地球間の距離)が

	L [km]	L_c [km]	Ω [10^{-5} rad/s]	B_c [mT]	B_s [μ T]	B_{obs} [μ T]
地球	6380	3480	7.27	14	30	30
月	1740	300	0.27	2.0	0.14	(10-100)
水星	2440	1750	0.12	1.3	6.7	0.2
イオ	1820	600-1000	4.11	8.0	3.8-17	1.3
ガニメデ	2630	400-1300	1.01	3.9	0.19-6.4	0.8

表1 鉄のコアをもつと考えられる諸惑星の半径 L 、コアの半径 L_c 、自転速度 Ω 、予想されるコアの赤道面付近での最大磁場強度 B_c 、観測される磁場強度 B_{obs} をかかげる。

どれだけであったのかがきわめて重要になる。それは一つにはコアの中で成り立つであろうローレンツ力とコリオリ力とのバランスに影響を与えるであろうし、また地球との間の潮汐や自転軸の章動にも関わってくる。

かりに月の岩石から推定される古磁気強度 $10-100\mu\text{T}$ を式(5)や(6)をもとに説明しようとする、月の自転速度が現在の値より1000倍以上速くしなければならないことになる。これはにわかには受け入れがたい数字である。月の古磁気強度が本当にそれほど強いものなのか、あるいは月の磁場の起源についてここで考えた以外の何らかのメカニズムが働いていたのか、現時点の知識のもとで決めるのには限界がある。

今後、太古の月の磁場に関する観測値が増えることを期待しつつ、ダイナモ理論の方面からこれからすべきことをまとめて、結論としたい。

1. ダイナモの解にどれだけ多様性があるか。磁場のかたち、磁場強度、またその時間変化などの諸性質について、まだ知られていないタイプのダイナモがあるかも知れない。例えば太陽のような規則的に逆転するダイナモの解についてもきちんと理解されている訳ではない。
2. 章動や潮汐がダイナモに対してどのような影響をもつか。とくに月のような天体ではこの効果が無視できないのではないか。
3. 外部磁場の影響はどの程度ありうるか。

月の磁場、というものを端緒にして、より一般的な天体ダイナモの物理的な描像が開けることを期待したい。

参考文献

- [1] Runcorn, S.K., 1978: The ancient lunar core dynamo. *Science*, **199**, 771-773.
- [2] Merrill, R.T., McElhinny, M.W. and McFadden, P.L., 1996: The magnetic field of the Earth. Academic Press, San Diego.
- [3] Rochette, P., 1997: Moon's magnetism: from Io's and Ganymede's present magnetic signatures to the ancient lunar dynamo. *Terra Nova* **9**, 188-191.
- [4] Glatzmaier, G.A. and Roberts, P.H., 1995: A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature* **377**, 203-209.
- [5] Kuang, W. and Bloxham, J., 1997: An Earth-like numerical dynamo model. *Nature* **389**, 371-374.
- [6] Vanyo, J., Wilde, P., Cardin, P. and Olson, P., 1995: Experiments on precessing flows in the Earth's liquid core. *Geophys. J. Int.* **121**, 136-142.
- [7] Aldridge, K., Seyed-Mahmoud, B., Henderson, G. and Wijngaarden, W., 1997: Elliptical instability of the Earth's fluid core. *Phys. Earth Planet. Inter.* **103**, 365-374.
- [8] Sarson, G.R., Jones, C.A., Zhang, K. and Schubert, G., 1997: Magnetoconvection dynamos and the magnetic fields of Io and Ganymede. *Science* **276**, 1106-1108.
- [9] Chandrasekhar, S., 1961: Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Dover, New York.
- [10] Sakuraba, A. and Kono, M., 1998: Effect of the inner core on the numerical solution of the magnetohydrodynamic dynamo. *Phys. Earth Planet. Inter.* (in press).