

水星の外核の半径の推定～磁場の大きさと外核の速度を用いた検証に基づく～

後藤 稜弥 (高2) 【大阪府立北野高等学校】

要 旨

本研究では、惑星の磁場が外核に存在する自由電子の運動によって生じているという事実を用いて水星の外核の半径を推定した。その際に、既に構造が明らかになっている地球の内部構造と比較を行った。

1. 研究の背景

惑星には、外核という磁場を生み出す源となっている高温・高圧の液体の層が存在する。その外核が磁場を生み出すメカニズムはアンペールの法則であり、電子が運動することで磁界が生まれている。そのように考えたときに、惑星は内部の電子運動によって生じる電流と磁場との相関があるのではないだろうかと考え、この研究を開始した。

2. 方法

今回は地球型惑星で固有磁場を十分に保持している水星と地球の比較を行うことで水星の外核の半径を推定した。そのとき、地球も水星も内部の物質は鉄やニッケルなどであるため、同じ構成物質であるとみなした。

今回使った公式

1. $I = envS$ (I =電流の大きさ[A], e =電子1個の電気量[C/個], n =自由電子の単位面積あたりの個数[個/ km^2], v =自由電子の平均速度[km/h], S =導体の断面積[km^2])

2. $H = I/2r$ (H =磁場の大きさ[A/km], I =電流の大きさ[A], r =円形電流の半径[km])

この2つの公式から $H = envS/2r$ が算出される。よって、外核の半径は円形電流の半径と一致するため r [km]となる。そのため、 r 以外の変数が求まれば、半径についての方程式を立てることが可能である。

また、図1のように惑星表面での磁場、自転速度、惑星の半径をそれぞれ

H [A/km], V [km/h], R [km]とする。また、外核付近での磁場、外核の回転速度、外核の半径をそれぞれ h [A/km], v [km/h], r [km]とする。また、外核の密度を ρ [g/cm³]とする。このとき速度は $V : v = R : r$ であるので、 $v = (r/R) \cdot V$ である。導体の面積 S は外核を円とみなしたときの円の面積の半分、つまり $S = \pi r^2/2$ である。自由電子の個数 n は半径 r の外核の(体積×密度)の定数倍であるため $n = 4\pi r^3/3 \cdot \rho \cdot \alpha$ (α は定数)。磁場の大きさは距離の3乗に反比例するので $h = H \cdot (R-r)^3 \cdot \beta$ (β は定数)。このことから $h = envS/2r$ は次のように変形することが可能である。

$$H \cdot (R-r)^3 \cdot \beta = envS/2r = \{e(4\pi r^3/3 \cdot \rho \cdot \alpha) \cdot (r/R) \cdot V \cdot (\pi r^2/2)\} / (2r) = \alpha e \pi^2 \rho r^5 V / 3R \Leftrightarrow \alpha / \beta = 3HR(R-r)^3 / e \pi^2 \rho r^5 V$$

表1のデータの値を代入する。

I.地球のデータから定数 α / β の値を求める。ここでは $\alpha / \beta = k$ とする。

II.この定数 k を用いて水星の r についての五次方程式を立てる。

$$a_1 r^5 + a_2 r^4 + a_3 r^3 + a_4 r^2 + a_5 r + a_6 = 0 \quad (a_1=1, a_2=0,$$

$$a_3=2.1736 \times 10^7, a_4=-1.5910 \times 10^{11},$$

$$a_5=3.8822 \times 10^{14}, a_6=-3.1575 \times 10^{17})$$

る。

表1 水星と地球のデータ

	惑星の半径 R[km]	外核の半径 r[km]	自転速度 V[km/h]	表面磁場 B[nT]	表面磁場 H[A/km]	密度 ρ [g/cm ³]
地球	6371	3478	1574	30600	24351.4	10
水星	2440	求める値	10.83	195	155.181	3.43

これを解くと $r = 2.06 \times 10^3$ [km] つまり、水星の外核の半径がおおよそ 2060km である。

3. 議論

現在の提唱としては水星の外核の半径はおおよそ 1800 km であるとされている。今回の結果を踏まえると、今回の結果の値 2.06×10^3 km がある程度正しいことがわかる。また、水星が確かな固有磁場を保有する理由には、1.惑星に占める外核の半径が大きいため核に自由電子を多く含み、電流が生じやすいこと、2.自転速度が速いため電子の回転する速度が速いこと、が挙げられると考えた。今回は地磁気逆転等の考慮をしていないので、その点がこれからの展望である。

(参考文献)[1]NASA Solar System Sizes <https://science.nasa.gov/resource/solar-system-sizes/>

[2]NOAA Planet Rotations <https://sos.noaa.gov/catalog/datasets/planet-rotations/>

[3]ScienceDirect Planetary Magnetic Field <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/planetary-magnetic-field>

[4]ScienceDirect Core mantle boundary topography from short period PcP, PKP, and PKKP data <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031920102002042>

[5]AGU Journals Mercury's Interior Structure Constrained by Density and P-wave Velocity Measurements of Liquid Fe-Si-C Alloys

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020JE006651>

[6]神奈川県立 生命の星・地球博物館 地球のからくり <https://nh.kanagawa-museum.jp/kenkyu/epacs/museum/3b03.htm>

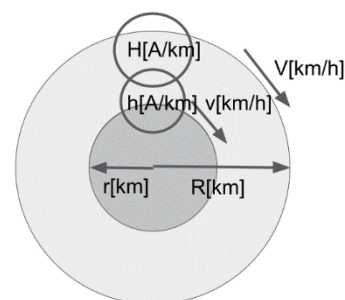


図1 惑星の内部構造