

水星磁場構造の研究背景

人類史上初めて水星を探査したのは 1973 年に NASA によって打ち上げられたマリナー10号であり、1974年から1975年にかけて数度水星に接近し観測を行った。この探査において、天体磁場と太陽風の相互作用に因るものと解釈される十分に発達したバウショック（衝撃波面）が観測され、水星が地球に似た固有磁場を持つことが初めて判明した（Ness et al., 1975; Ness et al., 1979）。マリナー10号による予期せぬ磁場の発見により、水星は大きな関心を集めたが、天体自体の重力が小さく太陽の重力の影響の方をより強く受けるため探査機を周回軌道に投入するのが難しい事に加え、水星が太陽に最も近い惑星であるため探査機が強い太陽熱に曝されることに対する対策も必要であるので、水星探査はマリナー10号以降ほとんど行われてこなかった。

メッセンジャー探査機（MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry, and Ranging; MESSENGER）は 2004 年に NASA によって打ち上げられた探査機であり、2011年から2015年まで水星の周回軌道に初めて投入され様々な観測を行った。この観測で明らかになった水星固有磁場の特徴として、磁場の南北非対称性が強いこと、磁場の大きさが理論的な予測よりも1桁以上弱いこと、他の地球型惑星と比べて巨大な金属コア（天体半径の約8割を占める）内のダイナモ作用によって作られていると推定されることなどが挙げられる。

水星磁場構造に関するこれまでの研究としてはまず、水星磁場の低次構造に関する解析例があり、2011年3月から2012年4月にメッセンジャーが水星の磁気赤道を通過した点をピックアップし、強い南北非対称性を持つ平均的な水星の磁場構造が推定された（Anderson et al., 2013）。また、水星の電磁誘導現象に関する研究については、Coronal Mass Ejection (CME) などの時間的に急激な現象が発生した時の誘導磁場の寄与を数値シミュレーションによって計算した例（Jia et al., 2015）などがある。

その一方で、年周変化などの長期的な磁場変動に対する電磁誘導現象について議論した例は、現在までにただ一例と少ない（Johnson et al., 2016）。しかし、この研究でも観測データから直接外部磁場や誘導磁場を抽出して、水星内部の電氣的性質を議論してはいない。

本研究の概要

これらを踏まえて本研究では、メッセンジャー探査機が取得した約17水星年分（1水星年=87.97地球日）のベクトル磁場データを使用し、このデータが捉えた電磁誘導現象を用いて水星の内部電気伝導度構造、具体的には水星の核半径を推定した。過去の研究では、水星磁場の平均モデルを用いて水星の電磁誘導現象を議論しているため、誘導磁場や外部磁場変動をデータから明示的に示してはいなかったが、本研究では探査機が取得したデータを軌道毎に解析することで、ガウス係数の時系列データを求める事を試みた。これにより、水星磁場環境の時間変動を直接取り扱うことを可能にした。

まず、天体内部の電磁誘導現象を考える際、重要な因子となる外部磁場の変動周期を推定した。電磁誘導が効くタイムスケールでは水星の固有磁場は定常と見なせるとすると、マグネトポーズ（天体固有磁場勢力圏の外側境界）の位置は外部磁場変動の指標と考えることが出来る（図1）。メッセンジャー探査機の観測データから探査機が水星磁気圏を横切った点を判別し、磁気圏界面形状モデルを用いてサブソーラー距離の時系列データに変換、それを周波数解析することで外部磁場変動の特性周期が1水星年と半水星年であるという結果を得た。

次に観測データを軌道毎に球関数解析することで、ガウス係数の時系列データを得た（図2）。この解析において、1.データの空間分布が限定的であるため高次展開すると計算が不安定になる、2.外部ガウス係数変動に対する内部ガウス係数が大き過ぎるという問題が生じたので、1に対しては球関数展開時に用いる最小自乗法に拘束条件を付与する、2に対しては長期的な平均から算出された外部磁場モデルをサブソーラー距離の関数とみなして外部磁場変化を推定するという方法を採用した。得られたガウス係数の時系列データから水星コア半径を推定すると、zonal項について4次まで展開した場合には、全結果の平均値及び標準偏差をとると $2011 \pm 90 \text{ km}$ 、Activity Indexに基づき静穏な年を選ぶと $1847 \text{ km} \sim 2277 \text{ km}$ という結果を得た。

主要参考文献

- ✓ Anderson, B. J., Johnson, C. L., Korth, H., Winslow, R. M., Borovsky, J. E., Purucker, M. E., ... & McNutt, R. L. (2012). Low-degree structure in Mercury's planetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *117*(E12).
- ✓ Johnson, C. L., Philpott, L. C., Anderson, B. J., Korth, H., Hauck, S. A., Heyner, D., ... & Solomon, S. C. (2016). MESSENGER observations of induced magnetic fields in Mercury's core. *Geophysical Research Letters*, *43*(6), 2436-2444.
- ✓ Johnson, C. L., & Hauck, S. A. (2016). A whole new Mercury: MESSENGER reveals a dynamic planet at the last frontier of the inner solar system. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *121*(11), 2349-2362.
- ✓ Korth, H., Tsyganenko, N. A., Johnson, C. L., Philpott, L. C., Anderson, B. J., Al Asad, M. M., ... & McNutt, R. L. (2015). Modular model for Mercury's magnetospheric magnetic field confined within the average observed magnetopause. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *120*(6), 4503-4518.
- ✓ Winslow, R. M., Anderson, B. J., Johnson, C. L., Slavin, J. A., Korth, H., Purucker, M. E., ... & Solomon, S. C. (2013). Mercury's magnetopause and bow shock from MESSENGER Magnetometer observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *118*(5), 2213-2227.

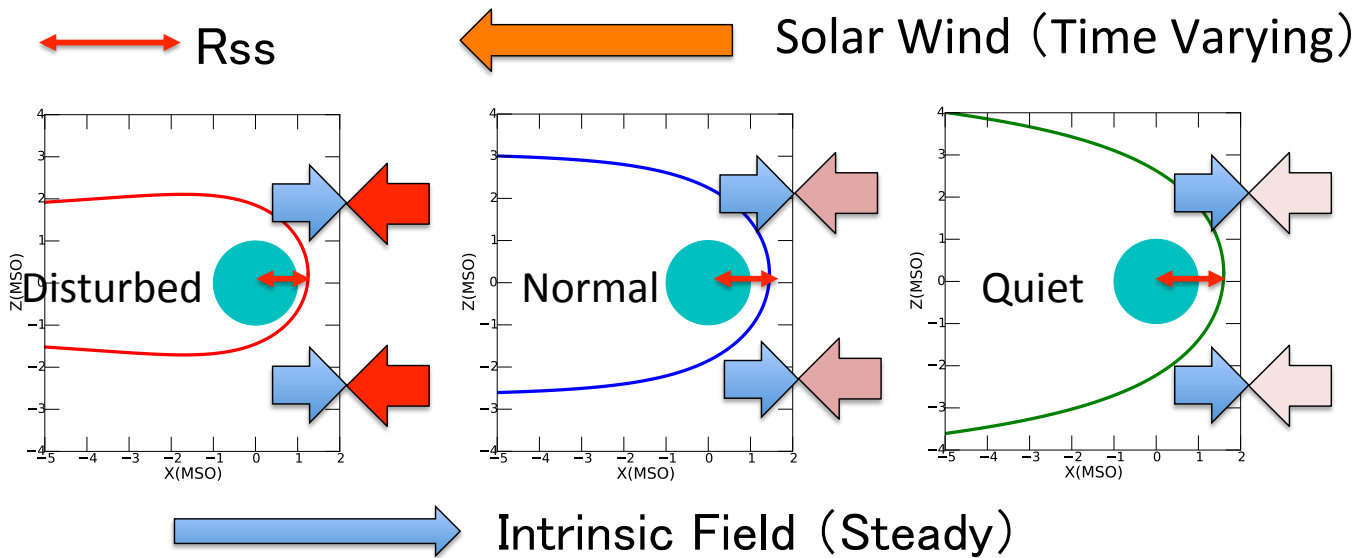


図1 外部磁場変動の特性周期推定の模式図。電磁誘導が効くタイムスケールでは水星の固有磁場は定常と見なせるとすると、マグネトポーズ（天体固有磁場勢力圏の外側境界）の位置は外部磁場変動の指標と考えることが出来る。

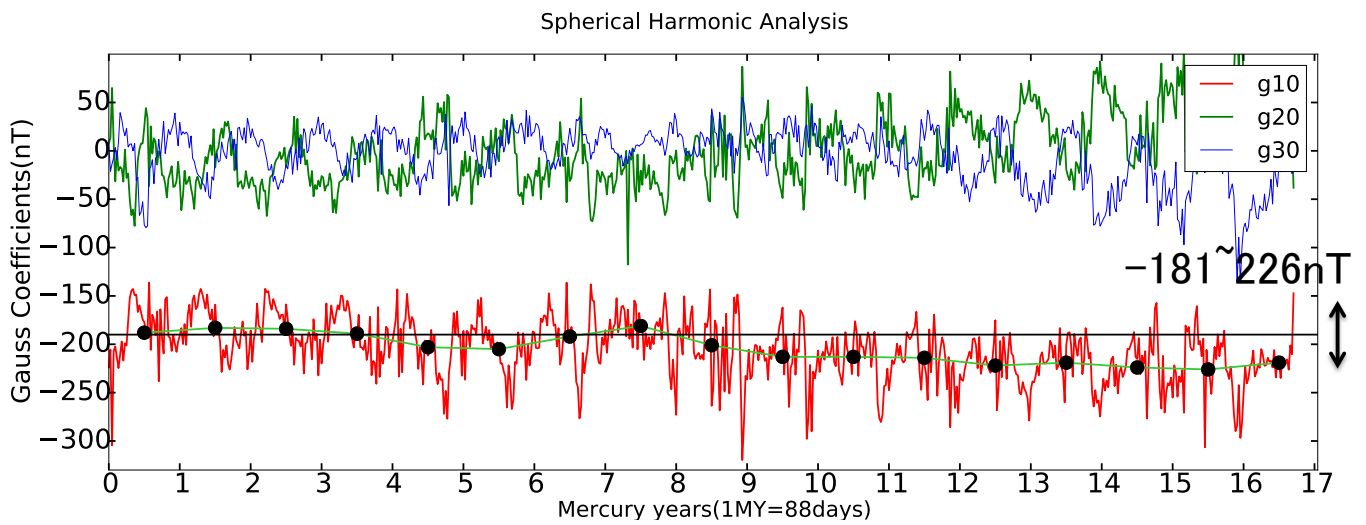


図2 外部磁場をモデルから仮定し、内部磁場についてのみ球関数解析した場合の内部ガウス係数の値の時間系列。横軸に平行な黒線は、Anderson et al. (2012)で長期データから算出された g_1^0 のガウス係数の推定値。データを1年ごとに切り分け、その平均値から算出した g_1^0 の固有磁場成分を黒丸で示している。