

新しい木星磁気圏磁場及びカレントシートモデルの構築とそれらの長期変動に関する研究

太陽惑星系電磁気学分科 修士2年 桃木尚哉

木星磁気圏の夜側には、プラズマ密度が高いシート状の領域、すなわちカレント・シート(CS)が存在している。その形状は、木星自転に伴う木星固有磁場の振動や太陽風などにより時間変化する。またCSは、それ自身を流れる電流によって磁場を生成しており、このCS由来の磁場は、夜側磁気圏において木星固有磁場と共に支配的な成分を構成する。

木星圏ではPioneer 10号による初観測以来、これらCSの形状及び磁場についてのモデリングが行われてきた。しかし、Galileo探査機やそれに続く現在運用中のJunoといった新しい探査機によるデータを用いたモデルの更新は、十分に行われているとは言えない状況にある。これを踏まえ本研究では、CS形状としてKhurana (1992)モデルに、CSによる磁場としてKhurana (1997)モデルに注目し、Voyager 1/2号と新たに加わったGalileo及びJunoによるデータ、また新たに開発した手法を用いて、探査機ごとにこれらのモデルを更新した。さらに磁場モデルについては、モデル・パラメータの誤差推定を行い、磁場モデルのパラメータ変化に基づく木星磁気圏長期変動の検出も行った。

CS形状モデルは、木星自転に伴って回転する曲面として表現され、その形状を特徴づける要素として、(i)有限の振動伝搬速度に由来するbendback(図1)、(ii)太陽風に由来するhinge(図2)の二つがある。形状モデル更新の結果、Galileoモデルではbendbackの弱化が見られ、Galileo探査機の活動期間中に何らかの理由によって磁気圏内の平均的なAlfvén速度が増加していたことが明らかになった。またJunoモデルではhingeの弱化が見られ、これは太陽活動度の変化に伴う太陽風動圧の減少に関係している可能性がある事が示唆された。

CS由来の磁場モデルは、オイラー・ポテンシャルと呼ばれる2つのスカラー・ポテンシャルによって表現され、CS形状モデルに依存する形で求められている。磁場モデル更新の結果、観測された磁場をモデルがよく再現している事に加え、得られたモデル・パラメータの値がモデル更新に用いるデータに依存している事が明らかになった。またパラメータの誤差推定を磁場データの測定分解能を利用して行った結果、一部のパラメータが長期変動の影響を強く受けていることがわかった(図3)。木星磁気圏磁場変動の主な要因として、太陽活動度の変化及びCSの電流量(CS電流量)の変化の二つが考えられる。更新した磁場モデルによる比較を行った結果、太陽活動度の変化に関係した長期変動は見られなかったものの、CS電流量の変化に起因すると解釈できる長期変動の存在が明らかになった。CS電流量がGalileo探査機の観測期間中に有意に減少していたと考えられることに加え、GalileoとJuno両データから得られた結果を比較すると、Juno探査機の観測期間中はCS電流量が相対的に大きくなっていったと定性的には推定できる。

本研究で得られた磁場モデルは、探査機が観測する磁場の予測(図4)や磁場を生成する電流密度、すなわちCSによる電流密度を解析的に計算できる他、各ガリレオ衛星が感じる外部磁場変化の予測(図5)に用いることができる。ガリレオ衛星のうち、氷で覆われたエウロパ・ガニメデ・カリストの三衛星は、その内部に液体の水を有している可能性が指摘されており、NASAのEuropa ClipperやESAのJUICEといった既に打ち上げが決定している木星圏探査機が将来もたらずデータを解析する際に、本研究で得られた手法及び結果が、氷ガリレオ衛星の電磁誘導探査等の場面で活用されることが期待される。

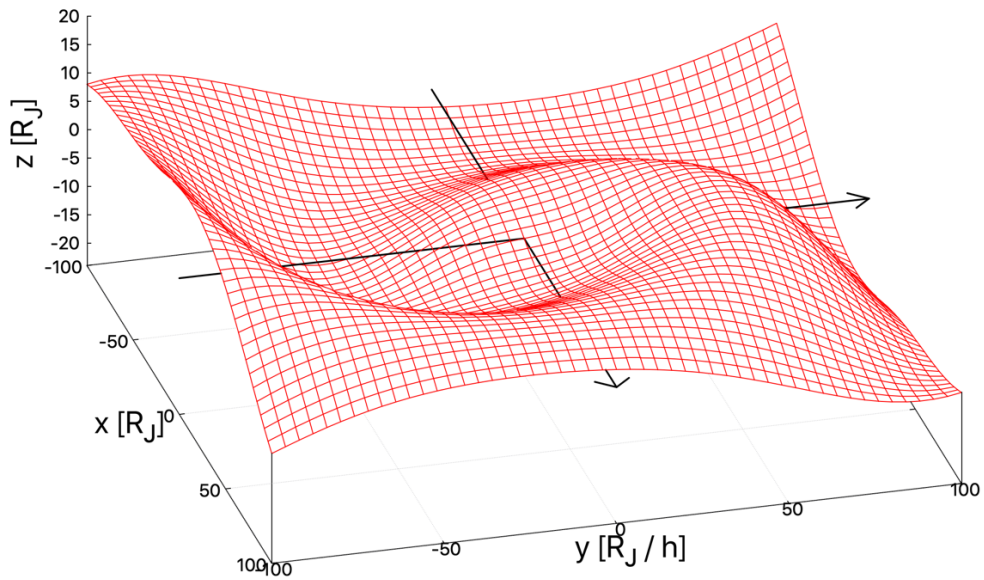


図 1. bendback の概念図

x 及び y 軸を木星の赤道面上に、 z 軸を木星自転軸方向にとった座標系における、とある時点での 3 次元 CS 形状を表したもの。木星自転軸に対して傾きを持つ木星固有磁気双極子が木星とともに回転することにより、磁気赤道も回転することになる。またとある子午面でそれは磁気双極子や磁気赤道の振動として見える。この振動が有限の速度(Alfvén 速度)で伝搬するため、CS は木星を中心に西側へ巻きつくような形状(bendback)をとることになる。

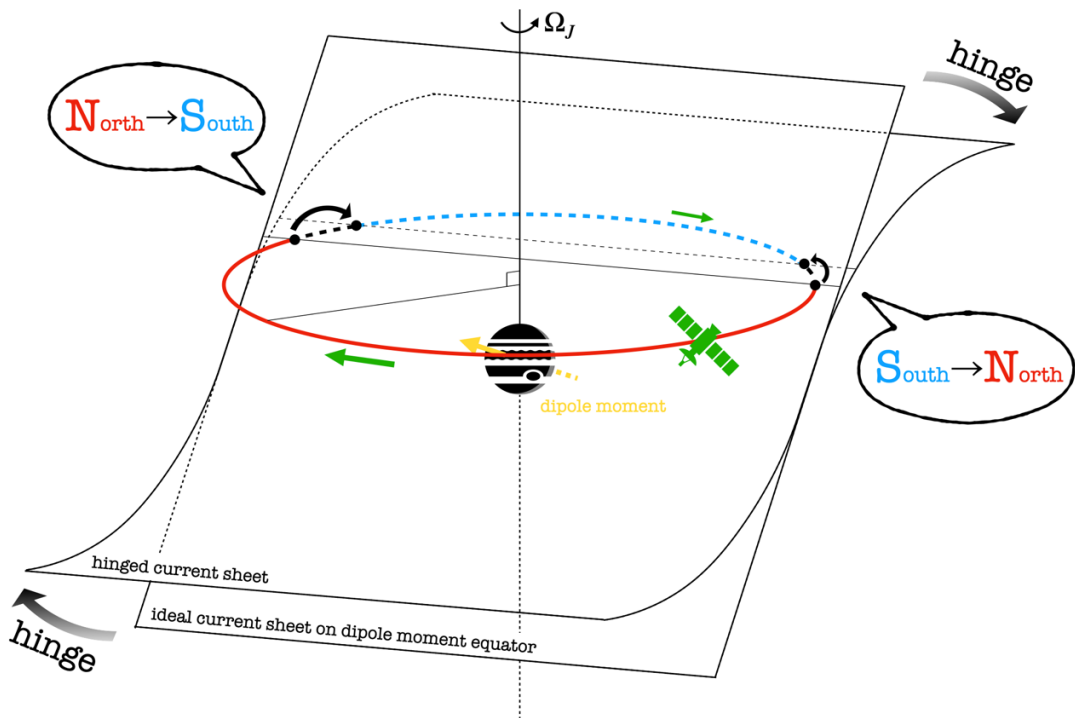


図 2. hinge の概念図

中心の天体は木星、木星を上下に貫く直線は自転軸、黄色の矢印は磁気双極子、緑色は探査機及び木星から見たその進行方向を表す。また赤色と青色の曲線は木星に固定された座標系から見た探査機軌道、平面は磁気双極子赤道面、曲面は hinge を受けた CS を表す。hinge は太陽風とそれに伴う磁気圏の圧縮により起こると考えられ、hinge を受けることによって CS の緯度は減少し、実際の CS 通過位置(黒色点)は、磁気双極子赤道面上ではなく黒矢印の先の点で観測されることになる。

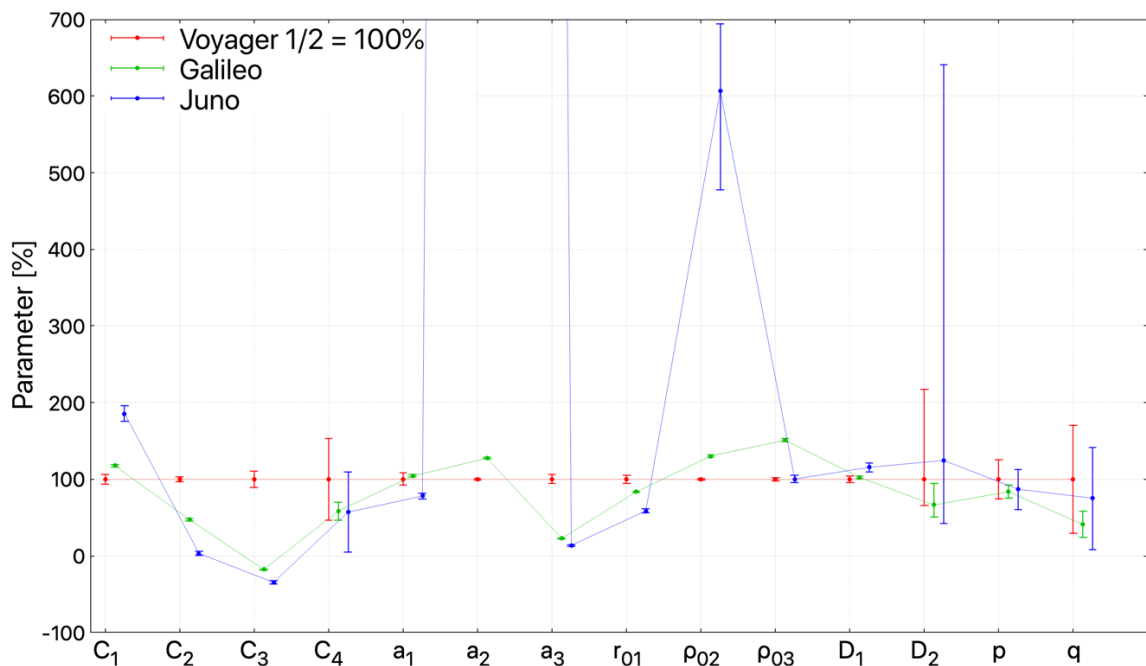


図 3. 更新された各モデルのモデル・パラメータ値とその推定誤差

横軸に各モデル・パラメータ、縦軸に Voyager 1/2 モデルを 1 としたときの各更新パラメータの比を取った。赤が Voyager 1/2、緑が Galileo、及び青が Juno モデルを表している。Juno モデルの a_2 パラメータだけ他と大きく異なるので、 a_2 以外のパラメータの違いを示した。一部のパラメータで誤差範囲を超えた変化(長期変動)が見られる。

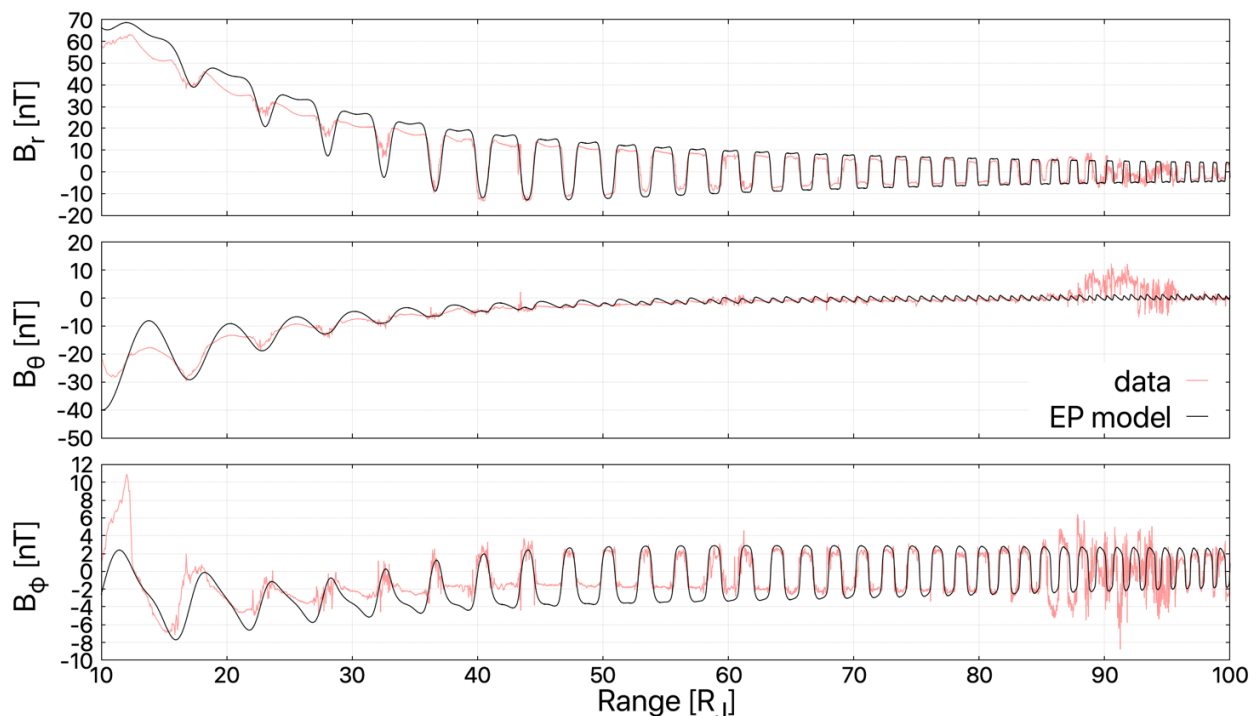


図 4. Juno 第 6 軌道インバウンドにおけるデータとモデルを用いたその予測例

横軸に木星中心からの距離、縦軸に各磁場成分をとった。データを赤色で、本研究で更新したモデルから計算される予測値を黒色で示している。この例では $90R_J$ 付近を中心とした大きな不規則変動が見られ、探査機の磁気圏界面への接近がその原因であると考えられる。こういった不規則変動の自動検出及び原因の同定が、本研究で更新したモデルを用いて行われることが期待される。

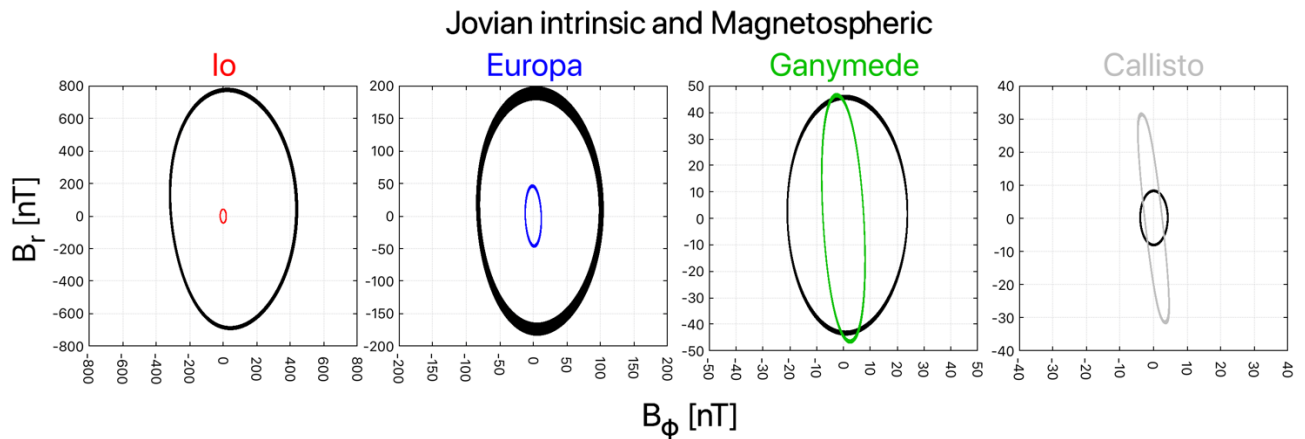


図 5. 各ガリレオ衛星地点での磁場予測

黒色は木星固有磁場，その他の色は CS による磁場を表す。左からイオ，エウロパ，ガニメデ，及びカリスト地点での磁場で，全て横軸に B_ϕ ，縦軸に B_r を取っている。ただし，木星固有磁場として JRM09 モデル (Connerney et al., 2018)，CS による磁場として本研究で更新した Juno モデルを用いている。両モデルによる磁場は，木星自転に伴う楕円形の時間変化を示すとともに，各衛星公転軌道の零でない離心率や軌道傾斜角に起因する時間変化(各楕円の曲線の太さに相当)を示す。

参考文献

- Khurana, K. K. (1992). A generalized hinged-magnetodisc model of Jupiter's nightside current sheet. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 97(A5), 6269-6276.
- Khurana, K. K. (1997). Euler potential models of Jupiter's magnetospheric field. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A6), 11,295-11,306.
- Northrop, T. G., Goertz, C. K., & Thomsen, M. F. (1974). The magnetosphere of Jupiter as observed with Pioneer 10, 2. Nonrigid rotation of the magnetodisc. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 79(25), 3579-3582.
- Seufert, M. (2012). *Callisto: Induction signals, atmosphere and plasma interaction*. (Doctoral dissertation, Universitäts-und Stadtbibliothek Köln).
- Smith, E. J., Davis Jr., L., Jones, D. E., Coleman Jr., P. J., Colburn, D. S., Dyal, P., . . . Frandsen, A. M. A. (1974). The planetary magnetic field and magnetosphere of Jupiter: Pioneer 10. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 79(25), 3501-3513.