

2009年7月22日の日食に伴う地上磁場変動と 統合モデルによるシミュレーション

佐伯悠樹¹, 源 泰拓², 藤田 茂³, 長町信吾⁴

¹石垣島地方気象台, ²地磁気観測所技術課, ³気象大学校, ⁴地磁気観測所観測課

2010年11月30日受付, 2010年12月8日改訂, 2010年12月15日受理

要 旨

これまで、1999年8月11日におけるヨーロッパでの事例を除けば、皆既日食が地磁気に及ぼす定量的な影響は研究の対象となっておらず、その事例においても、日食時の電離層における電気伝導度の局地的な変化を基にして、地上の磁場の変化を再現できる数値モデルが存在しなかったため、皆既日食が地磁気に影響を及ぼすか否かは曖昧なままであった。

そこで今回、現在新しく開発中である、大気大循環モデル・電離層のプラズマ運動と電場を計算するモデル・磁気圏の運動を計算するモデルの統合モデルを用いて、2009年7月22日の皆既日食が地上の磁場に与える影響について定量的な評価を行った。

その結果、鹿屋で観測されたZ成分の変化を再現することに成功し、世界で初めて、日食が地上の磁場に影響を与えることが数値モデルを用いて確認できた。

1. はじめに

地磁気日変化の原因が電離層電流であることはよく知られている。昼間の時間帯は、電離層は太陽からの紫外線により大気分子が電離され、プラズマ化する。この時に紫外線のエネルギーは分子の電離と運動エネルギーに変換されるため、大気温度は上昇する。一方、夜間は熱源がないため温度が下降する。この温度差により電離層における風が発生し、電離層のプラズマ（電離された大気の正イオン成分）が引きずられることにより、電流が流れる。この電流がもたらす磁場変化が、地磁気静穏時に地上でみられる日変化（Solardaily variation on quiet days: Sq）である。Sqは近似的には地球上の緯度の等しい場所では、ほぼ同じような変化をし、赤道に近づくほど増大する傾向がある。

日食により太陽の放射が途絶えた領域では、中性大気では大気放射加熱の急激な減少により大気低温域が形成され、これに伴い中性風が励起され大気循環が変化する。また、局所的な温度変動に伴い、重力波などの大気変動が励起される可能性もある。一方電離層においては、大気放射の急激な現象により電子密度が減少する。こうした高層大気の電氣的・力学的な変動により、日食時にはSq電流系が変

動し、地上磁場へ影響すると考えられる。

しかし、これまでに日食が地磁気に与える影響については、その有無さえも不明確なままであった。1999年8月11日の日食では、地磁気観測所が多く展開されているヨーロッパに皆既帯がかかったため、日食時の地磁気変動についての調査がいくつかなされている。しかし、例えば Korte *et al.* (2001) は、日食は電離層の電気伝導度には影響を与えるが、地上で観測される磁場には影響を与えなかったとしている。一方、Hvoždara and Prigancová (2002) は、地上で観測される磁場にも影響したとしている。

本稿では、2009年7月22日の日食における地磁気観測所、出張所および無人観測点における磁場変動を示す。ついで統合モデルによる日食時の磁場をシミュレートして、観測された磁場変動との対応を示す。

2. 日食時に観測された地上磁場

2009年7月22日の日食は、屋久島からトカラ列島、奄美大島付近で皆既食となったほか、ほぼ日本全国で部分食となった。なかでも地磁気観測所鹿屋出張所では最大食分が96.6%、父島常時観測点では98.3%に達し、日食による地磁気への影響がフラッ

クスゲート磁力計による3成分毎秒値によって観測される貴重な機会となった。

日食は7月22日0150UTCにおいて最大となり、このとき食の中心は北緯30度、東経125度付近にあった。

7月21日1200UTCから22日1200UTCまでの、鹿屋でのH, Z, D各成分の地磁気変化を図1に示す。鹿屋では22日0200UTCごろに最大食分となっており、Z成分にこれに符合して20nT程度の増減が見られる。なお磁気嵐が発生したため、0400UTCごろ以降の記録から日食の影響を分離するのは困難である。

図2に、7月21日1200UTCから22日1200UTCまでの女満別、柿岡、鹿屋、父島での地磁気Z成分の変化を示す。22日0100UTCごろまで、4観測点の地磁気変化傾向はほぼ一致しているが、日食に符合するZ成分に現れた特徴的な変化は鹿屋だけで観測されていて、最大食分がさらに大きかった父島では見られない。

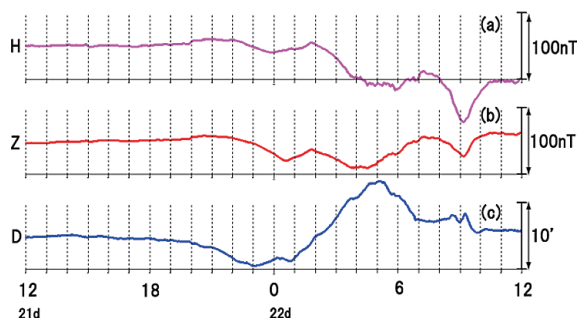


図1 2009年7月21日1200UTC～22日1200UTCまでの鹿屋における地磁気各成分の変化。(a), (b), (c)は各々H, Z, D成分を表す。

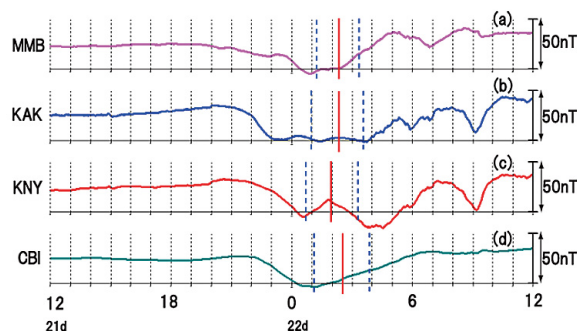


図2 2009年7月21日1200UTC～22日1200UTCまでの各観測点の地磁気Z成分の変化。(a), (b), (c), (d)は各々女満別、柿岡、鹿屋、父島での観測値を表す。青い点線はその地点での食の開始、終了時刻を、赤い線は最大食の時刻を表す。

3. 電離圏・中性大気統合モデルによるシミュレーション

本項では電離圏・中性大気の統合モデル（以下、単に統合モデルとする）による7月22日の日食の解析結果を示し、モデルがどの程度現実の現象を再現しているかを確認すると同時に、日食が地磁気に与える影響を定量的に評価する。

今回用いた統合モデルとは、例えば中性大気・電離圏・磁気圏の運動を解くような1つのモデルではなく、独自に開発されてきたそれぞれのモデルについて、その他のモデルで計算された値を境界条件として用いて計算を行うものである。今回の解析には熱圏まで拡張した中性大気モデル (Miyoshi and Fujiwara, 2003) と電離圏モデルを使用し、磁気圏のモデルは用いていない。電離圏モデルはリアルタイム宇宙環境シミュレーションシステム (<http://www2.nict.go.jp/y/y223/simulation/realtime/enter.html>) の一部として開発された、数種類の主要なイオンと電子について質量、運動量およびエネルギーの方程式を解く全球モデルである。計算にあたっては拡散、対流過程に加えて、光化学反応によるイオンの生成、消失も考慮されている。水平方向のグリッド間隔は緯度1km、経度5kmで、鉛直方向は高さ600km以下で10km間隔、それ以上の高度では間隔を広げており、最大高度は3000kmに設定されている。なお、時間分解能は0.5秒である。詳細は Jin *et al.* (2010) として発表される。モデルを用いて日食が磁場に与える影響を予測しようという試みは Curto *et al.* (2006) によっても行われているが、これは等価電流系を用いて磁場を計算しようとしているものであり、中性大気の大循環モデルを用いて地上の磁場を計算しようという試みは世界でも初めてのものである。

今回の解析では、電場と電離層大気の電気伝導度から電離層電流を求め、この電流についてビオサバルの法則を適用して地上磁場変化を導出した。

3.1 電離圏の電気伝導度

高度170～300kmの領域では、波長が102.5nm以下の極端紫外線 (EUV: extreme ultraviolet) による原子、分子の電離反応が活発で、EUV入射の変化は電離反応に影響し、前述のイオンと中性粒子の衝突の様相が変化する。このため、大気の電気伝導度も変化する。今回の解析では、皆既中の太陽からのEUVは通常1%に減少すると仮定して、大気の電気伝導度の変化を算出した。計算に考慮したイオンは N^{2+} , NO^+ , O^+ , O^{2+} の4種で、これらのイオン密度の初期条件として、電離圏のモデルから出力さ

れた2009年7月22日0150UTCの値を与えた。原子量は、N: 14.0067, O: 15.9994を用いた。電子の密度は、電気的中性条件を用いて、4種の正イオンの密度を足し合わせたものを用いている。磁場の値は国際標準磁場モデル (International Geomagnetic Reference Field: IGRF) による、IGRF2000.0を用いた。また、電子の質量は 9.109×10^{-31} [kg]、電気素量は 1.602×10^{-19} [C]とした。衝突周波数はTohmatsu (1989) による。

図3にペダーセン伝導度及びホール伝導度の、図4に縦伝導度の高度分布を示す。図3, 図4の高度分布から、日食がある時は電気伝導度の値は日食がない時と比較してホール伝導度・ペダーセン伝導度とともに、大きさが7割程度となっていること、及び縦伝導度 (σ_0) はホール伝導度・ペダーセン伝導度と比較して非常に大きな値となっていることがわかる。なお、統合モデル内の電離圏の運動を計算するモデルにおいて $\sigma_0 = \infty$ としているため、この後の解析に σ_0 は用いていない。またペダーセン伝導度 (σ_1) はホール伝導度 (σ_2) と比較して、ピークの高度は高く、その値は小さくなっている。さらにこのグラフから、電気伝導度が大きい領域は高度130km ~ 160km程度の領域に限られているため、高度150kmを代表として選び、ペダーセン伝導度とホール伝導度の分布を図5 ~ 図8に示す。日食の効果を表すと記した図は日食の効果を考慮して計算した値から日食の効果を考慮せずに計算した値を引いたものである。全て単位は mho/m である。

図6, 図8より、電気伝導度で見る日食の影響は北緯30度、東経125度を中心として半径数100km程度であることがわかる。

なお、ホール伝導度、ペダーセン伝導度、縦伝導度の3つの電気伝導度について、簡単な説明を

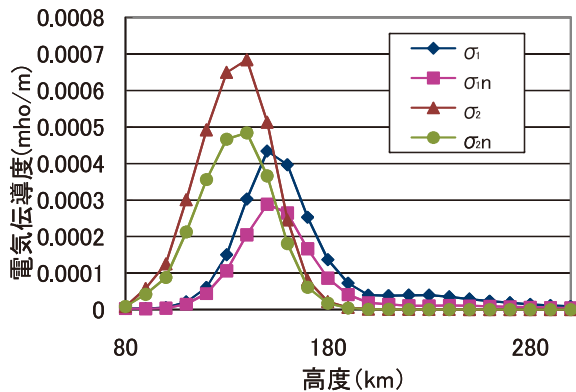


図3 北緯31度、東経130度での2009年7月22日0150UTCにおける σ_1 (ペダーセン伝導度), σ_2 (ホール伝導度)の高度分布。nは日食の効果を考慮していることを表す。

Appendixとして付した。詳細はTohmatsu (1989)を参照されたい。

3. 2 電離圏を流れる電流

電離圏を流れる電流を求めるために用いた電場の高度150kmにおける分布を図9, 図10に示す。電場の分布は統合モデル内の電離圏モデルから出力され

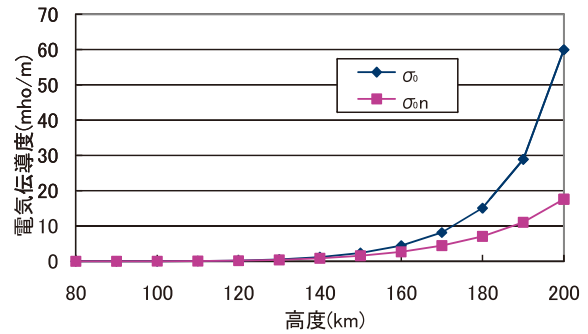


図4 北緯31度、東経130度での2009年7月22日0150UTCにおける σ_0 (縦伝導度)の高度分布。nは日食の効果を考慮していることを表す。

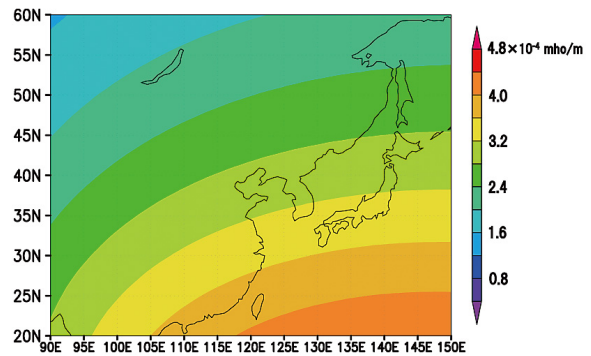


図5 2009年7月22日0150UTCにおけるペダーセン伝導度。食の中心は北緯30度、東経125度付近。単位は mho/m。

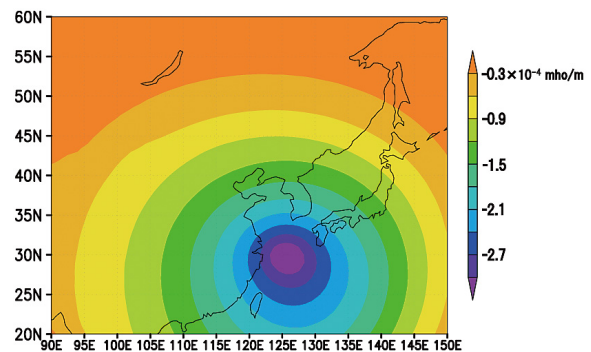


図6 2009年7月22日0150UTCにおけるペダーセン伝導度、日食の効果を考慮して計算した値から、日食の効果を考慮せずに計算した値を引いたもの。食の中心は北緯30度、東経125度付近。単位は mho/m。

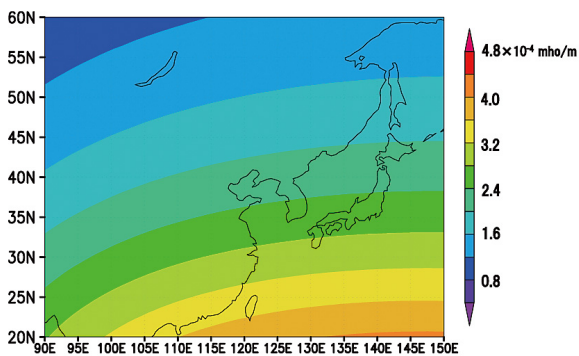


図7 2009年7月22日0150UTCにおけるホール伝導度. 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は mho/m.

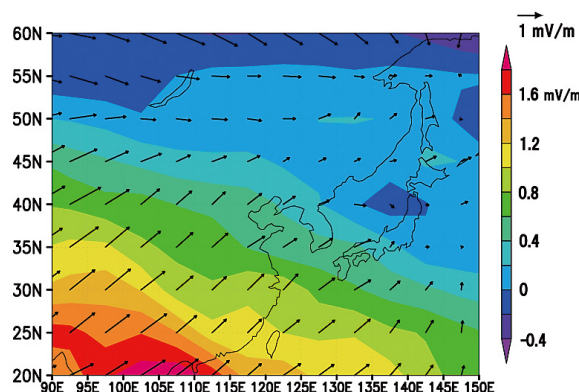


図9 2009年7月22日0148UTCの高度150kmの電場, 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は mV. 等値線は上向きを正とした鉛直成分, 矢印は水平成分を表している.

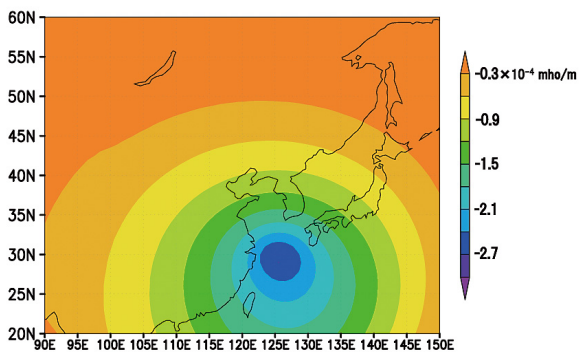


図8 2009年7月22日0150UTCにおけるホール伝導度, 日食の効果を考慮して計算した値から, 日食の効果を考慮せずに計算した値を引いたもの. 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は mho/m.

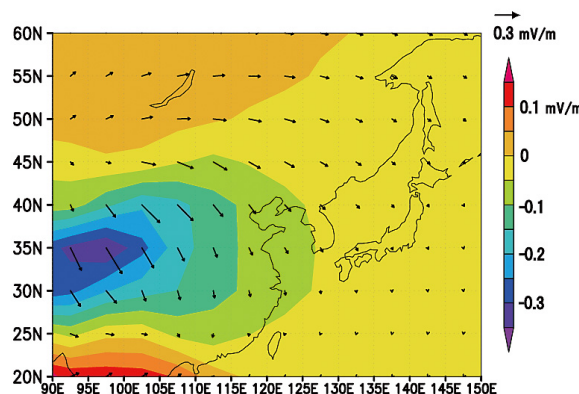


図10 2009年7月22日0148UTCの高度150kmの電場, 日食の効果を考慮して計算した値から, 日食の効果を考慮せずに計算した値を引いたもの. 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は mV. 等値線は上向きを正とした鉛直成分, 矢印は水平成分を表している.

た2009年7月22日0148UTCの値を用いた. 等値線は鉛直成分を, ベクトルは水平成分を表している. なお, これ以降の図はすべて, 南向き・東向き・上向きが正である右手系で表わす.

高度150kmを流れる磁力線に対して垂直な電流及び磁力線に沿った電流の分布を図11~図14に示す. 計算に用いたプラズマ密度の時刻は2009年7月22日0150UTC, 電場の時刻は2009年7月22日0148UTCであり2分の差があるが, 皆既帯の移動速度が遅くその程度の時間では解析結果に大きな影響はなく, また後の解析結果には電気伝導度が大きく寄与しているため, のちの解析結果は全て便宜上2009年7月22日0150UTCの解析結果であるとする.

磁力線に垂直な電流: 図11を見るとSqとして知られるような反時計回りの渦を確認できる. また, 水平成分の向きが高度によって変化するのだが, これは高度によってホール伝導度とペダーセン伝導度の比率が異なるためである. 例えばホール伝導度が0であれば, 電流は電場に沿った方向にしか流れないことになる.

北緯30度, 東経125度を中心とする領域は日食の

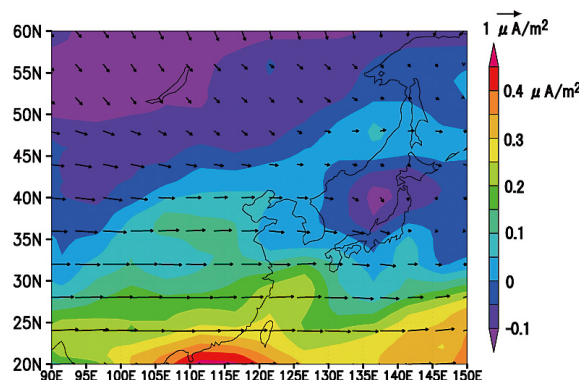


図11 2009年7月22日0150UTCにおける磁力線に垂直な電流. 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は μA/m^2. 等値線は上向きを正とした鉛直成分, 矢印は水平成分を表している.

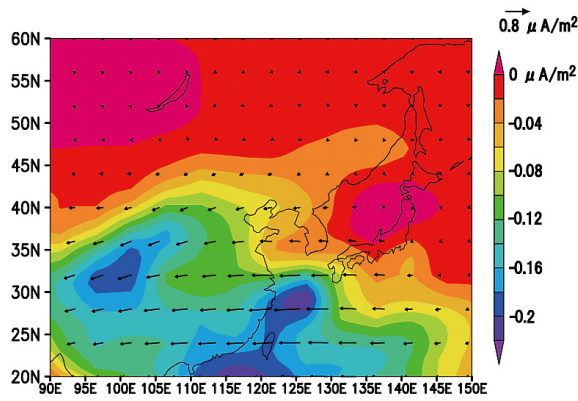


図12 2009年7月22日0150UTCにおける磁力線に垂直な電流. 日食の効果を考慮して計算した値から, 日食の効果を考慮せずに計算した値を引いたもの. 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は $\mu\text{A}/\text{m}^2$. 等値線は上向きを正とした鉛直成分, 矢印は水平成分を表している.

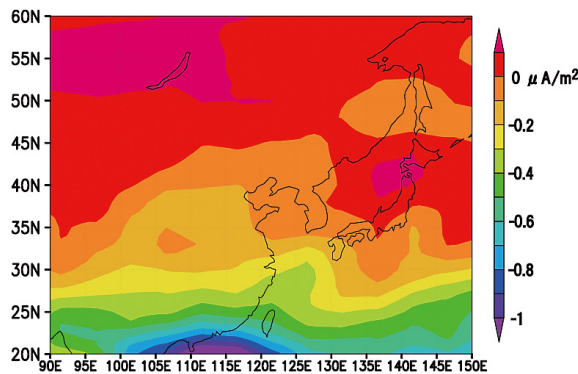


図13 2009年7月22日0150UTCにおける磁力線に沿った電流. 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は $\mu\text{A}/\text{m}^2$. 磁力線に沿った方向を正とした値を等値線で示している.

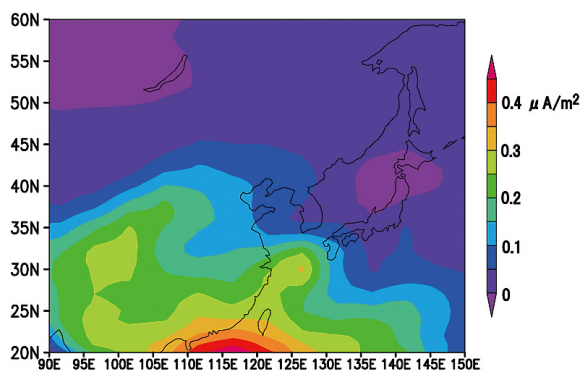


図14 2009年7月22日0150UTCにおける磁力線に沿った電流. 日食の効果を考慮して計算した値から, 日食の効果を考慮せずに計算した値を引いたもの. 食の中心は北緯30度, 東経125度付近. 単位は $\mu\text{A}/\text{m}^2$. 磁力線に沿った方向を正とした値を等値線で示している.

中心であり, 電気伝導度の図(図6, 図8)を見てもプラズマ密度の減少量が最も多い領域であるので, 妥当な結果と言えるだろう. 北緯30度~35度, 東経95度~100度の領域でも日食の効果が強く出ている. この領域は日食による効果が電場に与える影響が最も大きい(図4). また, 赤道付近では, 東向きに大きな電流が流れることが知られているが, この効果も表現されている.

日食の効果が出てくる領域が電気伝導度と電場で異なる理由としては, 日食による低温域の生成から中性風が励起され, ダイナモの効果が起こって電場に影響するまでに時間がかかることが考えられる.

3. 4 地上における磁場の変化

高度80km~300kmの電離層を流れる電流が作る磁場を足し合わせたものを図15, 図16に示す. 図15より, 図11の電流の分布から予想される地上の磁場変化が正確に再現されていることがわかる. また, 図16より日本の九州付近では磁場の値が大きく減少していることがわかる. さらに, 図16鉛直成分を見ると, 北緯33度, 東経125度と北緯25度, 東経125度を中心にそれぞれ負, 正のピークが見られる. これは, その中間の領域を流れる水平電流が日食によって著しく減少したためであると考えられる. さらに, 北緯33度, 東経125度に見られるピークは鹿屋の磁場の値には大きく影響を与えるが, 柿岡での磁場の値にはほとんど影響を与えていないことがわかる. これは観測とも一致している.

4. 考察と議論

統合モデルにより, 日食によりプラズマ密度が減少したとき, その領域での電離圏の電気伝導度, その領域を流れる電流は減少し, それに伴い地上で観測される磁場にも変化が現れることが示された. 特に鹿屋では地上の磁場の鉛直成分は減少する一方, そのような変化が柿岡では見られないという観測と一致した結果が得られた. これにより, モデルが実際の現象を正しく再現していること, 日食が地上の磁場に影響を与えることが確認できた.

しかし, シミュレーションでは鉛直成分よりも水平成分の変化が大きく出ているが, これは観測事実と異なる. 実際に日食が地上の磁場の水平成分に影響を与えない可能性もあるが, 統合モデル側の要因もいくつか考えられる.

まず理論の上では沿磁力線電流は南北半球で対称となるはずである. すなわち磁気赤道での沿磁力線電流は0になるはずであるが, 今回の計算ではそうになっていない. これは低緯度の計算に問題があると

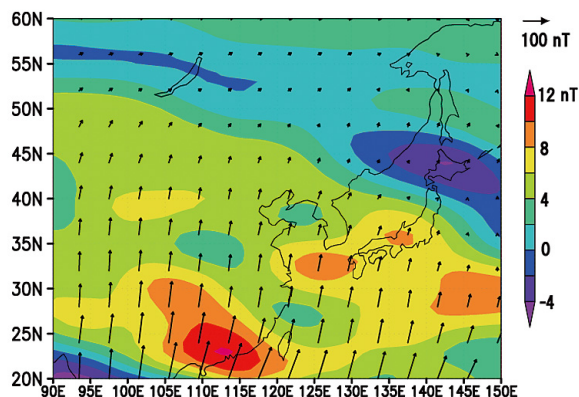


図15 2009年7月22日0150UTCにおける地上磁場変化。日食の中心は北緯30度，東経125度付近。単位はnT。等値線は上向きを正とした鉛直成分，矢印は水平成分を表している。

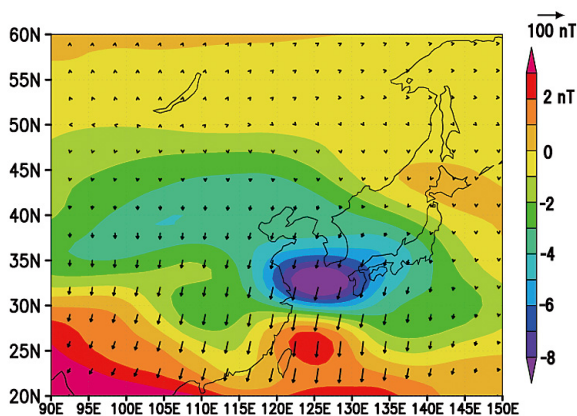


図16 2009年7月22日0150UTCにおける地上磁場変化。日食の効果を考慮して計算した値から，日食の効果を考慮せずに計算した値を引いたもの。食の中心は北緯30度，東経125度付近。単位はnT。等値線は上向きを正とした鉛直成分，矢印は水平成分を表している。

考えられる。他にも，統合モデル内のモデル同士の結びつきが不十分，300km以上の高度における沿磁力線電流を考えていないといった原因が考えられる。

また，シミュレーションの結果は，観測と比較して日食の効果が大きすぎるように思える。これは日食によるプラズマ密度の減少量が大きすぎるという

ことになる。今回は日食によるEUVの減少量を99%としているが，これが過大である可能性があることと，地面の下を流れる電流を考慮していないからであると考えられる。

今回は父島に日食域が到達した際のシミュレーションには至らなかった。また，磁力線が繋がっている地磁気の共役点では，今回の日食による影響は観測されなかった。これらの再現及びモデルの問題点の改善を今後の課題としたい。

謝辞

三好勉信博士（九州大学），藤原均博士（東北大学），陣英克博士（情報通信研究機構），品川弘之博士（情報通信研究機構）には，本研究に必要なデータを提供していただき感謝する。

参考文献

- Curto, J. J., B. Heilig and M. Piñol, Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999, *J. Geophys. Res.*, 111, A07312, doi:10.1029/2005JA011499, 2006.
- Hvoždara, M. and A. Prigancová, Geomagnetic effects due to an eclipse induced low-conductivity ionospheric spot, *J. Geophys. Res.*, 107, 1467, doi:10.1029/2002JA009260, 2002.
- Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, N. Terada, M. Ishii, Y. Otsuka and A. Saito, Vertical Connection from the Tropospheric Activities to the Ionospheric Longitudinal Structure Simulated by a New Earth's Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JA015925, 2010, in press.
- Korte, M., H. Lühr, M. Förster, V. Haak and P. Bencze, Did the solar eclipse of August 11, 1999, show a geomagnetic effect?, *J. Geophys. Res.*, 106, A9, doi:10.1029/2001JA900006, 2001.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara, Day-to-day variation of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1789, doi:10.1029/2003GL017695, 2003.
- Tohmatsu, T., *Compendium Of Aeronomy*, revised by Toshihiro Ogawa, Kluwer Academic Publishers, pp259-300, 1989.

A Numerical Simulation of Ground Magnetic Field at Total Solar Eclipse on 22 July, 2009 based on Coupled Model

by

Yuki SAEKI¹, Yasuhiro MINAMOTO², Shigeru FUJITA³ and Shingo NAGAMACHI⁴

¹**Ishigakijima Local Meteorological Observatory**

²**Kakioka Magnetic Observatory**

³**Meteorological College**

⁴**Kakioka Magnetic Observatory**

Received 30 November 2010; received in revised form 8 December 2010;
accepted 15 December 2010

Abstract

It has been uncertain whether geomagnetic variations are associated with a solar eclipse. The uncertainty may be derived from lack of a reliable numerical model for yielding geomagnetic signatures associated with localized and temporal decrease in ionospheric conductivities occurring in a solar eclipse event. Therefore, by using a newly developed integrated numerical model - Atmospheric Global Circulation model combined with an ionospheric dynamo model and an ionospheric plasma circulation model - we perform numerical studies of geomagnetic signatures in 2009 total solar eclipse event. The simulation successfully reproduces geomagnetic Z variations observed at KNY. It is noteworthy that this is the first work in the world that confirms definitely geomagnetic variations caused by a solar eclipse based on a realistic numerical model.

Appendix：電離層電気伝導度について

電離層電気伝導度として、ホール伝導度、ペダーセン伝導度、縦伝導度の3つがある。このうち縦伝導度（Longitudinal conductivity）は、磁力線に平行方向への電気伝導度で、磁場がないときの伝導度と同じである。ホール伝導度、ペダーセン伝導度（図17）について簡単に説明する。

式（1）は一様な磁場B中で質量m、電荷qのk種の粒子が速度vで運動しているときの運動方程式である。

$$m_k \frac{dv}{dt} = q_k(v \times B) \tag{1}$$

式（1）を解くと解は円運動（ラーマー運動）を表し、その周波数（2）をラーマー周波数、回転半径（3）をラーマー半径と呼ぶ。この式からラーマー半径が速度に依存していることが読み取れる。

$$\Omega_k = \frac{q_k B}{m_k} \tag{2}$$

$$r_{Lk} = \frac{v}{|\Omega_k|} = \frac{m_k v}{|q_k| B} \tag{3}$$

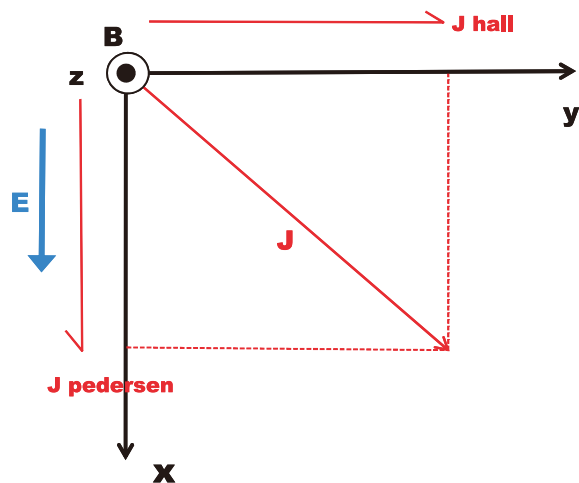


図17 磁力線および電場に対する電流の向き

荷電粒子が磁場の中をラーマー運動している時、運動の方向と電場によって加速と減速が起こる。回転運動中のある位相においては運動の方向と電場の方向が一致し加速となるが、半周期の時間の後では運動の方向が逆になるので電場によって減速されることになる。加速された時は、速度が大きくなるためにラーマー半径が大きくなり、逆に減速されたときはラーマー半径が小さくなる。このため、荷電粒子は電場と磁場に垂直に動き、電流が生じる。この磁力線及び電場の双方に垂直な方向の電流がホール電流である。

一方、この荷電粒子の運動に衝突の効果を加わった場合、イオンは衝突によって電場方向に動く（図18）。この衝突の効果による、磁力線に垂直で電場方向への電流がペダーセン電流である。

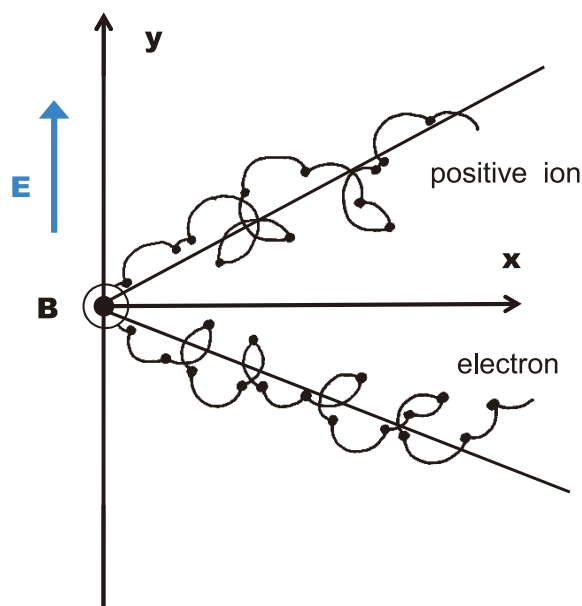


図18 中性粒子との衝突があるときのドリフト