

日本時間2012年5月21日の金環日食に伴う日本列島における地磁気変化 — 序 報 —

竹内昭洋¹⁾・大久保 寛²⁾・磯上 慎二³⁾・香取勇太²⁾・長尾年恭¹⁾・竹内伸直⁴⁾

Changes of the Geomagnetic Field in Japan islands during the Annular Solar Eclipse of 21 May 2012 JST — Preliminary Report —

Akihiro Takeuchi¹⁾, Kan Okubo²⁾, Shinji Isogami³⁾, Yuta Katori²⁾,
Toshiyasu Nagao¹⁾ and Nobunao Takeuchi⁴⁾

Abstract

The annular solar eclipse of 21 May 2012 (JST) passed along Japan islands where the public dense network of geomagnetometers has been set up for the long-term observations. We also observed the 3-component geomagnetic fields during the eclipse using fluxgate magnetometers and a liquid nitrogen SQUID magnetometer, in addition to some electric and meteorological observations, in Northeastern and Central Japan. Most of our observation sites were within the path of this eclipse, and one was within the area of more than 90 % magnitude of the eclipse. In this paper, we preliminarily report the changes in the 3-components of the geomagnetic field in Japan area. The changes were defined as the difference from the average obtained from the geomagnetically calm days in May 2012. As a result, we found that the amplitudes of the changes in the x, y, z-components and the total force were about +5, -20, -5, and +5 nT, respectively.

-
- 1) 東海大学海洋研究所地震予知研究センター 〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1
Earthquake Prediction Research Center, Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University, 3-20-1
Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, Japan
 - 2) 首都大学東京システムデザイン学部 〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6
Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065, Japan
 - 3) 福島工業高等専門学校 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾30
Fukushima National College of Technology, 30 Aza-Nagao, Tairakamiarakawa, Iwaki 970-8034, Japan
 - 4) 東北大学大学院理学研究科地震・火山噴火予知研究センター 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6
Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku
University, 6-6 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

(2012年12月27日受付 / 2013年1月8日受理)

緒 言

日食は人類が太古から幾度も経験してきた最も神秘的な天体現象の一つであろう。日食時には気温低下や微風といった気象学的現象の伴うことは経験的に知られている。他にも、生物活動やオゾン層の変化も報告されている(例えば, Gerasopoulos *et al.*, 2008)。一方で、日食は地表だけでなく電離層にも陰を落とすため、一時的に電離層の電子密度が減少することは想像に難くない。例えば、1999年8月11日にヨーロッパからインドにかけて発生した皆既日食の際に、 f_0F_2 が減少したことが報告されている(Korenkov *et al.*, 2003)。また、2010年1月15日にインド洋に発生した金環日食の際に、GPS-TECが減少したことが報告されている(Kumar and Singh, 2012)。

電離層の電子密度変化は電離層の電気伝導度変化と密接に関わってくる。このため、日食に伴い電離層内の電流場が変化し、結果として地圏に特異な地磁気が誘導されることが期待される。この観点から、日食に際する実際の地磁気観測データと数値モデルとの比較が古くから試みられている(例えば, Chapman, 1933; Nagata *et al.*, 1955; Rikitake *et al.*, 1958; Hvoždara and Prigancová, 2002; Tomás *et al.*, 2009)。以上のように、電離層の変化と地磁気の変化のカップリングを明らかにする上で、日食現象は一つの重要なケーススタディといえよう。

日本時間で2012年5月21日に、日本列島を縦断するように金環日食が発生した。日本列島の各地にはフラックスゲート磁力計などを用いた地磁気3成分の連続観測点が多く存在し、また我々も東北日本から中部日本にいくつかの観測点を設けて地磁気3成分を連続観測している。この日食は日本の地磁気観測者にとって稠密な地磁気変化マップを得られる可能性のある貴重な機会であったと言えよう。そこで本研究では、我々の観測点で得られた地磁気データを中心に、日食に伴う地磁気変化(および臨時に観測したいくつかのデータの変化)を検証したので、ここに報告する。

金環日食の概要

Fig. 1に、金環日食に伴う地表における陰の経路を示す。地球表面に陰が現れるのは、日本時間で6時頃から11時頃に掛けてである。朝の6時頃にフィリピンの東部に陰が現れ始め(Fig. 1a)、7時から8時頃に

掛けて陰の中心部が日本列島を縦断し(Fig. 1b)、9時頃には陰の中心部が日付変更線を通過し(Fig. 1c)、11時頃に北米の南西部で陰が消える(Fig. 1d)。

陰の中心部が通過した近畿－東海－関東地方では、約5分間にわたって金環日食現象が継続した。しかし、当日午前中の天候は晴れ時々曇りで、金環日食の様子は薄曇の合間に断続的にしか目視できなかった。

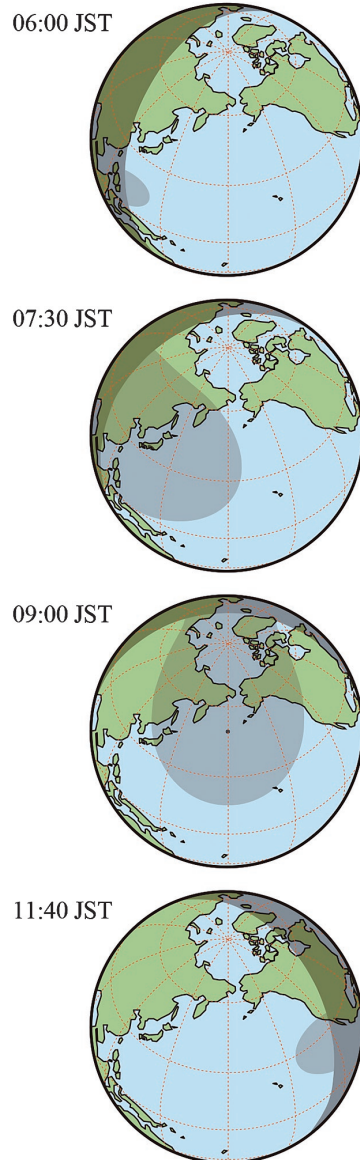


Fig. 1 Global maps of the annular solar eclipse of 21 May 2012 (JST).

観測点の位置と観測項目

Fig. 2に、地表において金環日食現象が起こる領域の移動経路と本研究で取り扱う全地磁気観測点22ヶ所の位置とリストを示す。それらのうち、細倉(HSK, 北緯38°49′東経140°53′)・いわき(IWK, 北緯37°01′東経140°44′)・奥多摩(OKM, 北緯35°51′東経139°02′)・三保(MIH, 北緯35°01′東経138°31′)の4ヶ所は自前の観測点である。特に三保は今回の日食観測のために臨時に設営したものであり、現在は撤去されている。いわき(IWK)・奥多摩(OKM)・三保(MIH)は金環の経路内にあり、細倉(HSK)でも食は90%以上に達した。その他の公共データを提供している観測点においても、80–100%の食に達した。

細倉(HSK)は、宮城県北西部にある細倉鉾山の敷地内にある。フラックスゲート磁力計(テラテクニカ製, MAG-03TB)を地表から1 mの深さのところに設置してあり、1 Hz サンプリングで地磁気3成分を連続観測している(Okubo *et al.*, 2011)。いわき(IWK)は、いわき市西部郊外の山間部開拓地にある。液体窒素を用いたSQUID(テラテクニカ製, 試作品)を地表に設置してあり、10 Hz サンプリングで地磁気3成分の変動成分を連続観測している。また、金環日食当

日は簡易計測器(ティアンドデイ製, TR-73U)を用いて、臨時に気温・湿度・大気圧も5 sec サンプリングで計測した。奥多摩(OKM)は、東京都北西部の山間部にある。フラックスゲート磁力計(テラテクニカ製, RF-725)を地表から1 mの深さの所に設置しており、32 Hz サンプリングで地磁気3成分を連続観測している。三保(MIH)は、静岡県三保半島の東海大学社会教育センターの敷地内にあった。地電位差計付きのフラックスゲート磁力計(テラテクニカ製, U43)を地表から1 mの深さの所に設置し、32 Hz サンプリングで地磁気3成分と地電位差2成分を同時連続観測した。同時にフィールドミル(テラテクニカ製, EF-308T)を設置し、10 Hz サンプリングで大気電場の垂直成分を連続観測した。また、日食当日は簡易計測器(ティアンドデイ製, TR-73U)を用いて、臨時に気温・湿度・大気圧も5 sec サンプリングで計測した。

以上の自前観測点における観測項目の詳細をTable 1に示す。これら観測データの他に、気象庁および国土地理院がウェブ提供する地磁気3成分の連続観測データを使用した。国土地理院の一部の観測データが1分値であるため、気象庁による10分値気象データ以外の全てのデータを1分平均値に統一し、以降の比較検討に用いた。

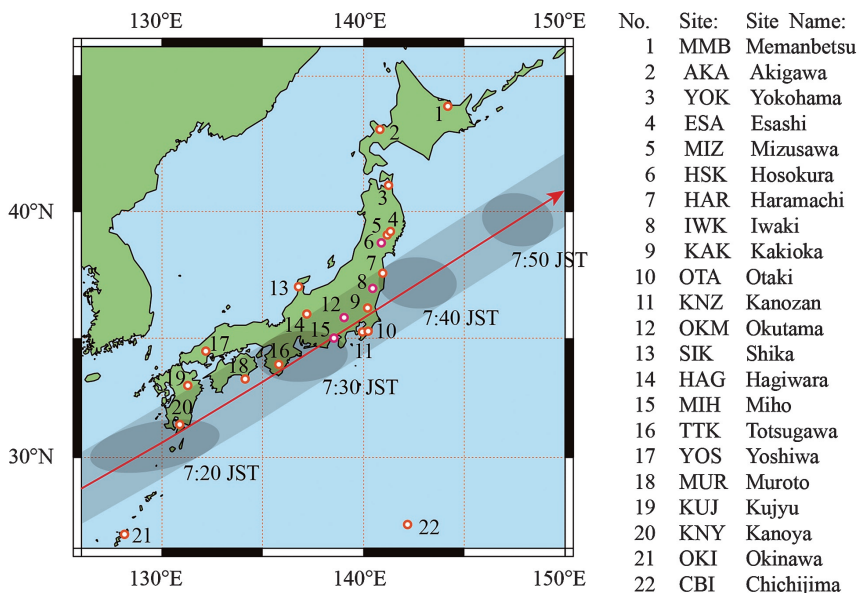


Fig. 2 The pass of the annular solar eclipse of 21 May 2012 (JST) and the site locations of geomagnetic field observations in Japan.

観測結果

地磁気の観測データから日食に伴う変化量を抽出するために、静穏な地磁気の日変動(バックグラウンド平均値)を求め、当日の観測値からバックグラウンド値を差し引くこととした。あいにく日食当日の前後の日は静穏ではなかったため、2012年5月における静穏な日のデータの平均値をバックグラウンド値とすることにした。地磁氣的に静穏である日として、(1)日本時間で3時から12時の時間帯において柿岡(KAK)・女満別(MMB)・鹿屋(KNY)の3ヶ所全てでK指数が0または1である日、かつ(2)その時間帯におけるK指数の合計が2以下である日だけを選定した。具体的には、1・5・7・27・28日が選定され、日変動の平均値と $\pm 1\sigma$ 値を観測点ごとに求めた。

地磁気水平成分の2成分に関しては、国土地理院によって求められている地域毎の偏角値を参考に軸回転させ、地理的南北成分(Hx)と地理的東西成分(Hy)に統一した。ただし、いわき(IWK)の地磁気データに関しては、国土地理院によって求められているいわき(IWK)周辺の水平成分値および全磁力値になるよう、各成分に適度な値を付け加えた。全観測点における地磁気全磁力(Hf)に関しては、3成分のベクトル和から求めた値を用いて同様の解析を行った。

Figs. 3-6に、細倉(HSK)・いわき(IWK)・奥多摩(OKM)・三保(MIH)における各観測項目毎の5月21日および5月平均値 $\pm 1\sigma$ 値のプロットを示す。ただし、いわき(IWK)および三保(MIH)における気温・湿度・気圧に関しては、最寄りの気象庁観測点(それぞれ、小名浜および静岡観測点)のデータから導出された5月平均値 $\pm 1\sigma$ 値も示されている。また、三保(MIH)の地電位差データに関しては、電極間距離(南北成分・東西成分ともに50 m)で割ることにより電場に変換したデータをもとに導出してある。以下、観測点毎に得られたデータの特徴を記述する。

細倉(HSK, Fig. 3): 地磁気南北成分(Hx)は一日を通して平均値より幾分低い。これは前日までの磁気乱れを引きずっているためであると予想される。東西成分(Hy)は日食時間帯に先駆けて一旦増加し、その後は日本時間で18時頃まで大きく減少している。垂直成分(Hz)は南北成分(Hx)とは逆に幾分高い。全磁力(Hf)は全体としてほぼ平均値に近いが、日食時間帯前に若干減少し、時間帯後に若干増加し

ているようにも見える。日本時間で12時頃から16時頃に掛けて、各成分に減少が確認できる。この時間帯は地球上から日食の陰が消え去っているため、この減少は日食現象とは別の原因によるものであろう。

いわき(IWK, Fig. 4): 地磁気各成分は細倉(HSK)のそれらと同様の特徴を示す。気温(Temp.)は日食時間帯に低下するのに対し湿度(Hum.)は増加しており、調和的な負の相関になっている。一方で気圧(Pres.)に明瞭な変化は確認できない。現地で計測した気圧値と気象庁による気圧値とに大きな差があるが、これは観測点の標高の違いによるものであろう。

奥多摩(OKM, Fig. 5): 地磁気南北成分(Hx)と東西成分(Hy)は、細倉(HSK)のそれらと同様の特徴を示す。垂直成分(Hz)と全磁力(Hf)に関しては、午後の減少以外に細倉(HSK)やいわき(IWK)との明瞭な共通点は見当たらない。

三保(MIH, Fig. 6): 地磁気各成分は細倉(HSK)やいわき(IWK)よりも奥多摩(OKM)と同様の特徴を示す。他の観測点に比べノイズ環境が悪いため、前後2分のデータを用いて平滑化してある。気象の3項目は、いわき(IWK)と同様の特徴を示す。地電場2成分(ExおよびEy)の平均値と $\pm 1\sigma$ が午後に大きく乱れているのは、磁場のデータ処理と条件を等しくするために、午後から雨の降った5月28日

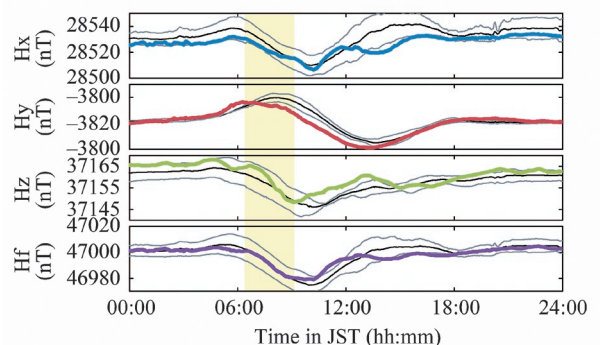


Fig. 3 Daily variations of the geomagnetic field on 21 May 2012 (JST) with the average and \pm of the standard deviation at the HSK site. Hx : the x-component, Hy : the y-component, Hz : the z-component, Hf : the total geomagnetic force. The yellow zone means the period between the 1st contact and the 4th contact.

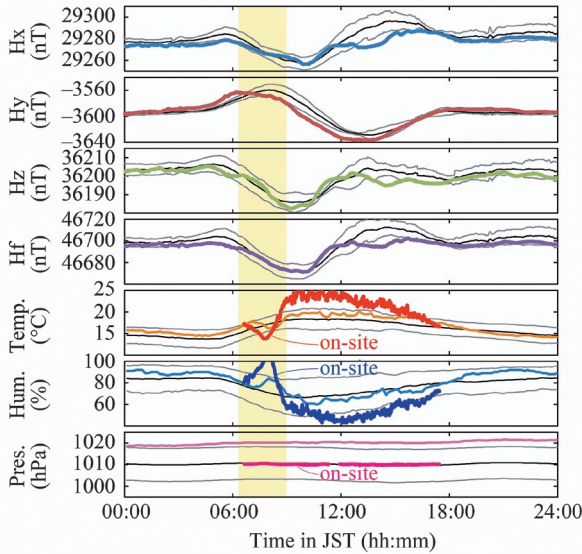


Fig. 4 Daily variations of the geomagnetic field and meteorological parameters on 21 May 2012 (JST) with the average and \pm of the standard deviation at the IWK site. Hx : the x-component of the geomagnetic field, Hy : the y-component of the geomagnetic field, Hz : the z-component of the geomagnetic field, Hf : the total geomagnetic force, Temp : the air temperature, Hum : the air humidity, Pres : the atmospheric pressure. The yellow zone means the period between the 1st contact and the 4th contact.

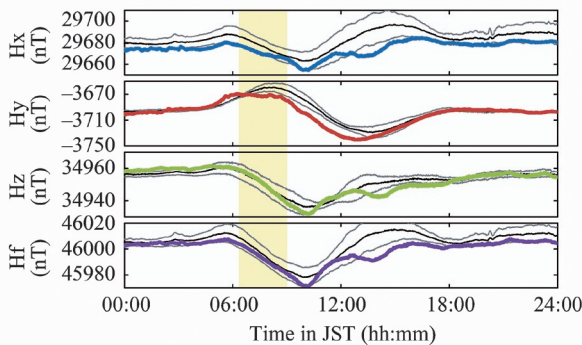


Fig. 5 Daily variations of the geomagnetic field on 21 May 2012 (JST) with the average and \pm of the standard deviation at the OKM site. Hx : the x-component of the geomagnetic field, Hy : the y-component of the geomagnetic field, Hz : the z-component of the geomagnetic field, Hf : the total geomagnetic force. The yellow zone means the period between the 1st contact and the 4th contact.

のデータも用いたからである。日食の発生時間帯は午前中なので、午後の乱れたデータは考慮しないこととした。図では分かりにくいのが9時前後をピークに若干の増加を示している(後述)。他の観測点に比べノイズ環境が悪いため、前後1分のデータを用いて平滑化してある。大気電場の垂直成分 (E_a) は大きく乱れており、明瞭な変化は確認できない。一般的に大気電場は雲の影響を大きく受けるが、あいにく当日は曇りがちな天候であった。

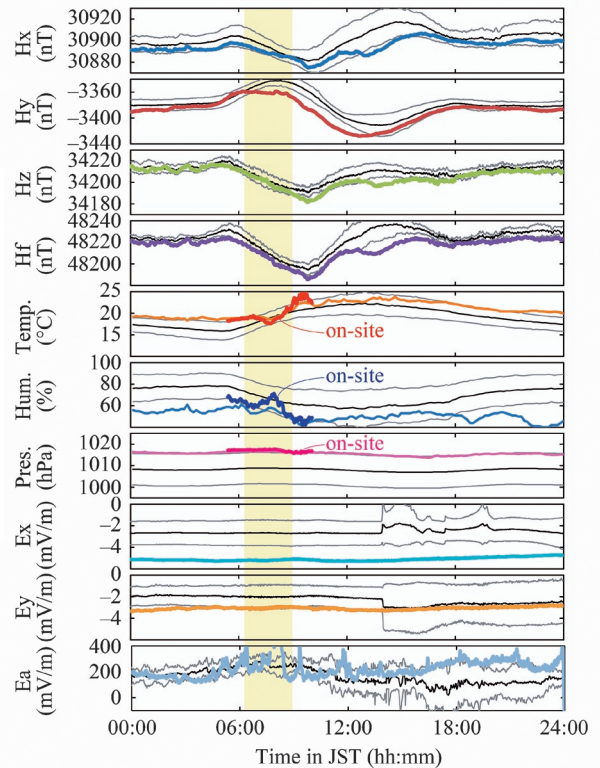


Fig. 6 Daily variations of the geomagnetic field, meteorological parameters, geoelectric field and atmospheric electricity on 21 May 2012 (JST) with the average and \pm of the standard deviation at the MIH site. Hx : the x-component of the geomagnetic field, Hy : the y-component of the geomagnetic field, Hz : the z-component of the geomagnetic field, Hf : the total geomagnetic force, Temp : the air temperature, Hum : the air humidity, Pres : the atmospheric pressure, Ex : the x-component of the geoelectric field, Ey : the y-component of the geoelectric field. The yellow zone means the period between the 1st contact and the 4th contact.

議論と今後の課題

金環日食の発生時間帯を考慮し、これ以降は日本時間で3時から12時の時間帯だけに注目する。Figs. 7-10に、全観測点における地磁気各成分と全磁力の変化量をAE指数およびDst指数の変化とともに示す。ここで各成分の変化量は、バックグラウンド平均値を差し引いた後、日本時間で3時と21時とで値が0となるように更にトレンド(前日までの磁気乱れの影響と思われる成分)を差し引いたものである。以下、成分毎に得られたデータの特徴を記述する。

地磁気南北成分の変化 (ΔH_x , Fig. 7): 第一接触前後では特に顕著な変化は確認できない。その後徐々に5-10 nT程度増加する傾向を示す。増加量は北部と南部の観測点で顕著である傾向がある。第四接触後には女満別(MMB)を除いて減少し始める。11時頃に再

び5 nT程度のピークが現れ、12時頃にはほぼ元のレベルに戻っている。概してAE指数やDst指数との明瞭な相関は確認できない。

地磁気東西成分の変化 (ΔH_y , Fig. 8): 第一接触に先駆けて5時頃から増加する。その後は減少に転じて、第四接触までには20-25 nT程度減少する。減少量は北部と南部の観測点で顕著である傾向がある。第四接触後は若干増加に転じるが、12時頃になっても完全には元のレベルまで回復しない。概してAE指数との明瞭な相関は確認できない。Dst指数との間には3時頃から7時頃に掛けて相関があるようにも見えるが明瞭ではない。

地磁気垂直成分の変化 (ΔH_z , Fig. 9): 南北成分や東西成分に比べて、時系列変化の緯度依存性または観測点依存性が著しい。最北部の女満別(MMB)では、第一接触に先駆けて5 nT程度減少し、日食

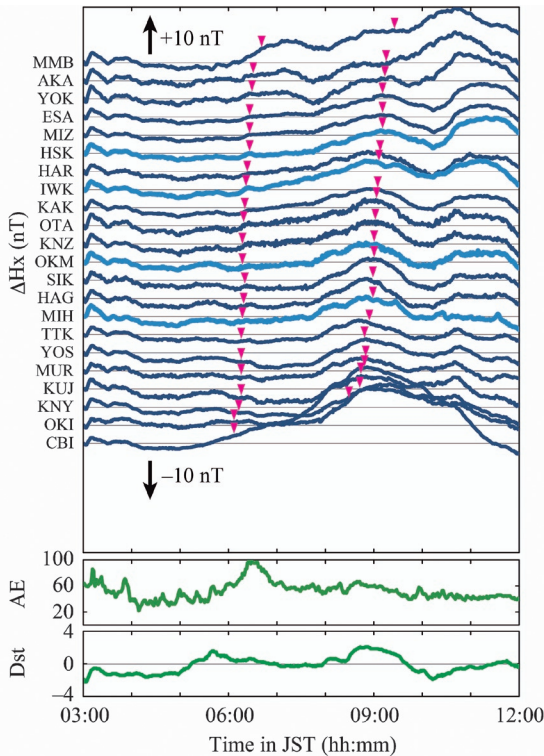


Fig. 7 The 9-hour variations of the x-component differences of the geomagnetic fields at the 22 observation sites and the variations of the AE and Dst indices on 21 May 2012 (JST). The pink triangles mean the period between the 1st contact and the 4th contact at each site.

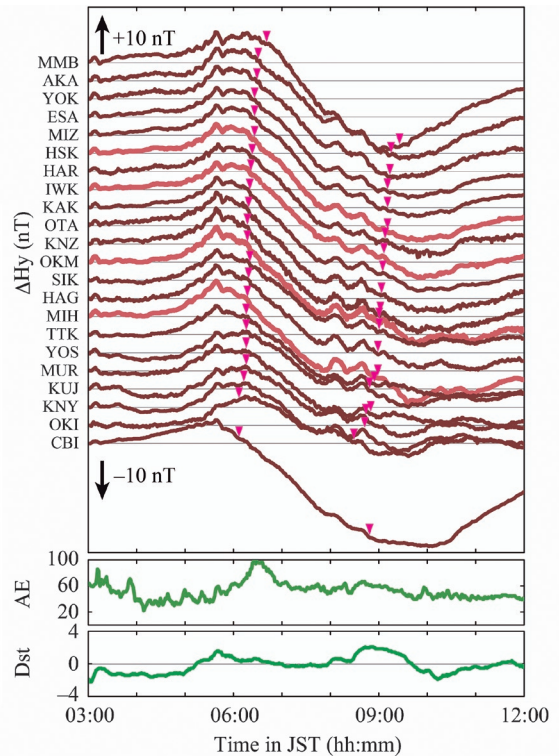


Fig. 8 The 9-hour variations of the y-component differences of the geomagnetic fields at the 22 observation sites and the variations of the AE and Dst indices on 21 May 2012 (JST). The pink triangles mean the period between the 1st contact and the 4th contact at each site.

中は元のレベルに戻り、第四接触後に5 nT程度増加し、12時頃には再び元のレベルに戻る。東北日本の観測点では、第一接触に先駆けて減少し、日食中は増加と減少が起こり、11時頃に再び5 nT程度のピークが現れ、12時頃にはほぼ元のレベルに戻るか観測点によっては若干戻り切らない。関東より南の観測点では、第一接触前の明瞭な減少は見えなくなり、その後第四接触に掛けて5 nT程度減少し、12時頃には再び元のレベルに戻るか観測点によっては若干戻り切らない。概してAE指数やDst指数との明瞭な相関は確認できない。

全磁力の変化 (ΔH_f , Fig. 10): 垂直成分と同様に、緯度依存性または観測点依存性が著しい。最北部の女満別(MMB)では、第一接触に先駆けて5 nT程度減少し、その後第四接触に掛けて10 nT程度増加する。その後更に一旦5-10 nT程度増加し減

少するが、12時頃でも戻り切らない。東北日本の観測点では、第一接触前に若干の減少が現れ、日食中にはほぼ元のレベルに戻るが、第四接触から11時頃に掛けて緩やかに増加する。その後減少に転じるが、12時頃には元のレベルには戻り切らない。関東地域の観測点では、第一接触前に若干の減少が現れ、第四接触に掛けて緩やかに5 nT程度増加する。10時頃には一旦ほぼ元のレベルに戻るが、11時頃に5-10 nT程度のピークが現れ、12時頃にはほぼ元のレベルに戻る。関東より南の観測点では、第一接触に先駆ける減少は見られず、その後は不明瞭な増減を繰り返し、12時頃には元のレベルより5 nT程度減少している。父島(CBI)では、第一接触から第四接触に掛けて10 nT以上増加し、その後減少に転じて、12時頃にはほぼ元のレベルに戻る。概してAE指数やDst指数との明瞭な相関は確認できない。

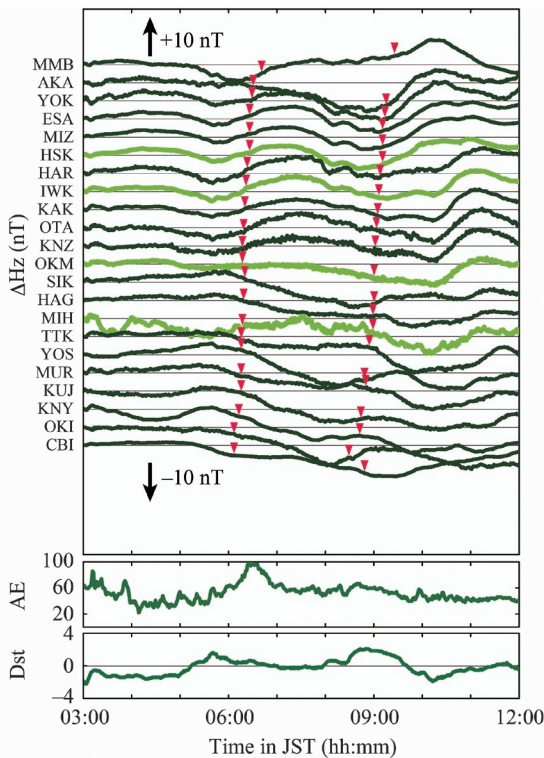


Fig. 9 The 9-hour variations of the z-component differences of the geomagnetic fields at the 22 observation sites and the variations of the AE and Dst indices on 21 May 2012 (JST). The pink triangles mean the period between the 1st contact and the 4th contact at each site.

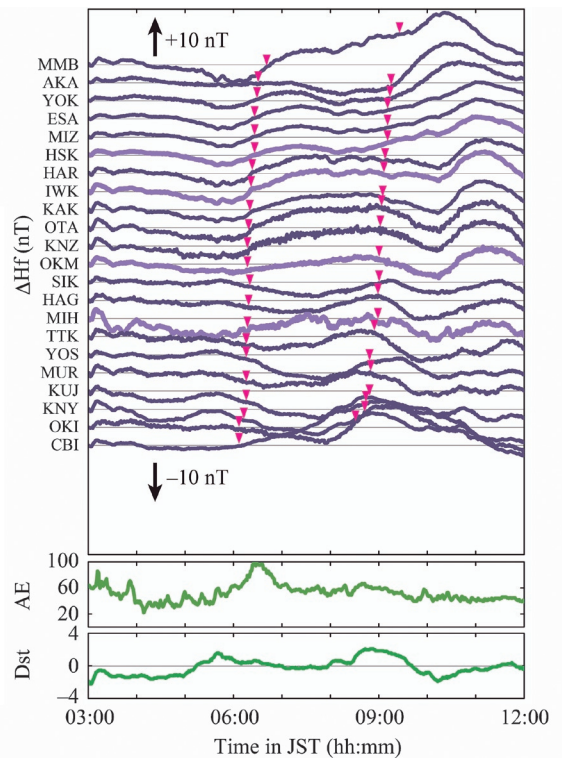


Fig. 10 The 9-hour variations of the total geomagnetic force differences at the 22 observation sites and the variations of the AE and Dst indices on 21 May 2012 (JST). The pink triangles mean the period between the 1st contact and the 4th contact at each site.

日本時間で2012年5月21日午前中における地磁気の日変動は、静穏日の変動に比べ東西成分が大きく変化した。概してAE指数やDst指数とは明瞭な相関のないことから、この変化は全地球的に起こったものではない。やはり、金環日食が電離層に陰をつくることによる電流場の変化に誘導されたものであると考えられる。第四接触の辺りを谷とする約20 nTにもおよぶ大きな減少は、地磁気の西方への傾倒を示し、地球上から日食の陰が消えた12時頃(日本時間)になっても引きずるように残っている。単純なシート状の電離層を仮定した時、この西向き地磁気変化を電離層内の電流で誘起させるためには、日本領域全体的な北向きの電流が必要となる。ただし、今回の金環日食は日本領域上空を早朝に通過しているため、太陽仰角が約15–40°しかない。つまり、電離層内には陰の円柱が浅く斜めに形成されているため、実際には電離層内で乱される電流場の鉛直成分も無視できないであろう。よって、従来のシートモデル(例えば、Chapman, 1933; Nagata *et al.*, 1955; Rikitake *et al.*, 1958; Hvoždara and Prigancová, 2002)では十分に有効な地磁気変化のシミュレーションが難しいことは想像に難しくなく、電離層に3次元構造を持たせたモデルの構築が今後の課題と言える。

電離層内を流れる電流によって誘導される地磁気は、大地に電流を誘導する。よって、日食による特異な地磁気変化は、やはり特異な地電流を誘導するはずである。三保(MIH)における地磁気と地電場の南北成分と東西成分に関する変化をFig. 11に示す。地電場に関しても地磁気と同じ解析手順を踏んでいる。前述のように、地電場の2成分には日本時間で9時頃にピークが確認できる。地磁気変化の南北成分(ΔH_x)と地電場変化の東西成分(ΔE_y)とには、第四接触付

近にピークがあるという点で、若干の相関がありそうである。一方で、地磁気変化の東西成分(ΔH_y)と地電場変化の南北成分(ΔE_x)とには、明瞭な相関は見られない。三保(MIH)は半島の先端付近に位置するため、観測される地電場は地磁気の寄与だけでなく海流や海そのもの(海水の分布)による影響(例えば、Chapman and Kendall, 1970; Osgood *et al.*, 1970)も複雑に絡んでいると考えられる。詳細な比較検討のためには、MT解析により周波数毎の見かけインピーダンスを求め、物理モデルを基にした理論値を得るのが一つの有効な方法であろう。ただし、そのためには今回のような臨時観測(約1ヶ月間)では不十分で、もっと長期間にわたる観測データの蓄積が必要になる。

ま と め

日本時間で2012年5月21日の午前中に日本列島を縦断するように発生した金環日食は、日本列島全体にわたって地磁気に変化をもたらした。特に東西成分に顕著に現れ、第四接触の前後で西方向に最大約25 nT変化した。今回の日食に伴う変化は、気温や湿度および地電場にも現れている。

謝 辞

観測点の一つである三保(MIH)を、東海大学社会教育センターの好意により敷地内に臨時設営させていただいた。また、気象庁および国土地理院より地磁気データ、K指数データおよび気象データを提供していただいた。さらに、京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センターよりAE指数データおよびDst指数データを提供していただいた。笹井洋一博士には電離層内の電流と日食がつくる陰との関係について、有益なコメントをいただいた。

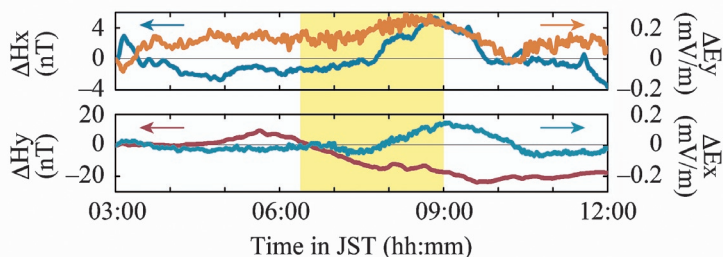


Fig. 11 The 9-hour variations of the x- and y-component differences of the geomagnetic and geoelectric fields at the MIH site on 21 May 2012 (JST). The yellow zone means the period between the 1st contact and the 4th contact.

Table 1 The observation parameters at our 4 sites

No.*	Name / Location	Parameter (Unit)	Equipment details
6	Hosokura (HSK) / N38°49', E140°53'	3-component geomagnetic field (nT)	Fluxgate magnetometer (Tierra Tecnica, MAG-03TB) 1 Hz sampling Placed 1-m below the ground surface
		3-component geomagnetic field (nT)	High Temperature SQUID (Tierra Tecnica, Prototype) 10 Hz sampling Placed on the ground surface
8	Iwaki (IWK) / N37°01', E140°44'	Air temperature (°C)	Ondotori (T and D, TR-73U)
		Air humidity (%)	5 s sampling
		Atmospheric pressure (hPa)	Placed above the ground surface
		3-component geomagnetic field (nT)	Fluxgate magnetometer (Tierra Tecnica, RF-725) 32 Hz sampling Placed 1-m below the ground surface
12	Okutama (OKM) / N35°51', E139°02'	3-component geomagnetic field (nT)	Fluxgate magnetometer (Tierra Tecnica, U43**) 32 Hz sampling Placed 1-m below the ground surface
		Air temperature (°C)	Ondotori (T and D, TR-73U)
		Air humidity (%)	5 s sampling
		Atmospheric pressure (hPa)	Placed above the ground surface
		2-component geoelectric field (mV)	Electrodes (Tierra Tecnica, U43**) 32 Hz sampling Placed 1-m below the ground surface
15	Miho (MIH) / N35°01', E138°31'	Vertical component atmospheric electricity (V/m)	Field mill (Tierra Tecnica, EF-308T) 10 Hz sampling Placed 1.5-m above the ground surface

* The site number indicated in Fig. 2.

** U43 simultaneously measures the 3-component geomagnetic field and the 2-component geoelectric field.

引用文献

- Chapman, S. (1933) : The effect of a solar eclipse on the Earth's magnetic field. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 38, 175–183.
- Chapman S. and P. C. Kendall (1970) : Sea tidal generation of electric currents and magnetic fields : Applications to five stations within the British Isles. *Planetary and Space Science*, 18, 1597–1605.
- Gerasopoulos, E., C. S. Zerefos, I. Tsigouri, D. Founda, V. Amiridis, A. F. Bais, A. Belehaki, N. Christou, G. Economou, M. Kanakidou, A. Karamanos, M. Petrakis and P. Zanis (2008) : The total solar eclipse of March 2006 : overview. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 5205–5220.
- Hvoždara, M. and A. Prigancová (2002) : Geomagnetic effects due to an eclipse-induced low-conductivity ionospheric spot. *Journal of Geophysical Research*, 107, 1467.
- Korenkov, Y. N., V. V. Klimenko, F. S. Bessarab, N. S. Nutsvalyan and I. Stanislawska (2003) : Model/data comparison of the F2-region parameters for the 11 August 1999 solar eclipse. *Advances in Space Research*, 31, 995–1000.
- Kumar, S. and A. K. Singh (2012) : Changes in total electron content (TEC) during the annular solar eclipse of 15 January 2010. *Advances in Space Research*, 49, 75–82.
- Nagata, T., Y. Nakata, T. Rikitake and I. Yokoyama (1958) : I. Effect of the solar eclipse on the lower parts of the ionosphere and the geomagnetic field. *Report of Ionosphere Research in Japan*, 9, 121–135.
- Okubo K., N. Takeuchi, M. Utsugi, K. Yumoto, Y. Sasai (2011) : Direct magnetic signals from earthquake rupturing: Iwate-Miyagi earthquake of M 7.2, Japan. *Earth and Planetary Science Letters* 305, 65–72.
- Osgood C. W. G. V. Rosser and N. J. W. Webber (1970) : Electric and magnetic fields associated with sea tides in the English Channel. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 4, 65–77.
- Rikitake, T., S. Uyeda, T. Yukutake, I. Tanaoka and E. Nakagawa (1958) : Preliminary report on the effect of the solar eclipse on April 19, 1958 on the geomagnetic field. *Report of Ionosphere Research in Japan*, 12, 174–181.
- Tomás, A. T., H. Luhr and M. Rother (2009) : Mid-latitude solar eclipses and their influence on ionospheric current systems. *Annales Geophysicae*, 27, 4449–4461.