

## 地磁気嵐とその太陽源—太陽活動上昇期—

齋藤尚生<sup>1\*</sup>・赤祖父俊一<sup>2</sup>・亘 慎一<sup>3</sup>・佐藤夏雄<sup>4</sup>・三澤浩昭<sup>5</sup>

### Geomagnetic storms and their sources on the sun: the rising phase of the sunspot cycle

Takao Saito<sup>1</sup>, Syun-Ichi Akasofu<sup>2</sup>, Shinichi Watari<sup>3</sup>, Natsuo Sato<sup>4</sup> and Hiroaki Misawa<sup>5</sup>

(2012年5月7日受付; 2012年11月29日受理)

**Abstract:** Solar phenomena, including solar flares and coronal holes, are considered in the context of a NEWS coordinate system, obtained by application of the heliographic and heliomagnetic coordinate systems to the solar latitude and longitude, respectively. By expressing the occurrence of solar phenomena in terms of NEWS coordinates, we discovered that solar flares tend to converge in the NE and SW quadrants of the solar disk, where they act as sources of sporadic storms. Meanwhile, coronal holes converge to solar longitudes of 0° and 180°, where they are sources of recurrent storms. Because of their concentration in the NE- and SW-quadrants, this correlation is referred to as the 'NEWS law'.

The neutral line of the source surface shows a beautiful single wave in its declining phase, while it tends to show a double wave in the rising phase. Solar rotation numbers 2118 to 2119, where the neutral line exhibited two complicated asymmetric waves in both the N-S and S-W directions, were chosen for detailed analysis. Notwithstanding such an extremely complicated case, the NEWS law is satisfied when the double wave is separated into its two single-wave parts.

**要旨:** 太陽は地球よりも千倍以上速く磁極を反転する磁変星なので、大規模現象を記述するために、緯度に helioGRAPHIC、経度に helioMAGNETIC という折衷型座標系を適用した。地磁気嵐はその発生の周期性から、突発性と回帰性の二種に大別される。突発性地磁気嵐の原因とされる太陽フレアは、この座標系でNE四半球とSW四半球に分布し、回帰性地磁気嵐の太陽源であるコロナホールは、経度0°と180°線に沿って分布することが明らかになり、この太陽サイクルに依存し

<sup>1</sup> 東北大学名誉教授。Taihaku 3-6-29, Taihaku-ku, Sendai, 982-0212.

<sup>2</sup> アラスカ大学フェアバンクス校・北極圏研究センター 創立センター長。Founding Director, International Arctic Research Center, University at Alaska Fairbanks. 930 Koyukuk Drive, P.O. Box 747346 Fairbanks, AK 99775-7340, USA.

<sup>3</sup> 情報通信研究機構電磁波計測研究センター。National Institute of Information and Communications Technology. Space Weather and Environment Informatics Laboratory. 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795.

<sup>4</sup> 情報・システム研究機構国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>5</sup> 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター。Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai, 980-8578.

\* Corresponding author. E-mail: saitots@nifty.com

ない不変則は NEWS の法則と名付けられた。この法則は、流源面中性線が single wave として現れる太陽活動下降期に顕著であるが、上昇期にしばしば現れる double wave を二つの single wave に分けると、それぞれについて下降期と全く同様に NEWS の法則が成立することが明らかとなり、少なくとも上昇・下降期には太陽活動 phase にも依存しない不変則であることが明らかになった。

## 1. はじめに

地磁気嵐は大別して突発性と回帰性の二種に分けられる。突発性磁気嵐は太陽サイクルの極大期に、回帰性嵐は下降期に起こりやすいという特色がある。一方、太陽・地球電磁関係 (Solar-Terrestrial Relationships, STR) を太陽側から見た場合、太陽諸現象の活動は極大期に最も活発になる。すなわちフレアは多発し、プロミネンスは激しく噴出し、TEL (Trans-Equatorial Loop; Saito *et al.*, 2007) は盛んに爆発し、それらは CME (Coronal Mass Ejection) となって惑星間空間に飛び出す。それが地球方向へ向かって地球磁気圏に衝突すると、Sc 型の突発性磁気嵐を誘発する。したがって、極大期の Sc 型突発性磁気嵐の研究のほうが回帰性嵐の研究に比べて圧倒的に多い。しかしこの関係を地球から眺めた場合、地磁気擾乱指数は、太陽活動の極大期と下降期にそれぞれ 1 個ずつのピークを持つが、両者の値は同程度かむしろ下降期のほうが大きい (Cliver *et al.*, 1966; Watari, 2011)。換言すれば、オーロラ嵐活動に貢献しているのはむしろ下降期の回帰性嵐であるという事実はあまり着目されていない。まして下降期以外の時期の回帰性嵐については、ほとんど研究が等閑に付されているという現状である。本研究の目的は、現在上昇期にある太陽サイクルと同時進行しながら、従来ほとんど顧みられなかった「上昇期の回帰性嵐」を糸口にして、太陽・地球電磁関係 (STR) を再研究することにある。

## 2. 従来の回帰性嵐に関する研究

回帰性嵐は突発性嵐とは別の、特殊な太陽—地球間電磁因果関係に支配されている。そこで、これまでの回帰性嵐の研究が、その最盛期である下降期に焦点を絞って Akasofu, *et al.* (2005) によって精査された。本研究の大事な前提となるので、下記にその要点をまとめておく。

### 2.1. 太陽活動下降期の地磁気嵐とその太陽源

本研究に係わる余談であるが、1940 年代までの日本の電離層物理学において、電離層に関する観測データは、geoGRAPHIC coordinates で表示するのが常識であった。しかし、地球電磁気学の分野で geoMAGNETIC coordinates が用いられていることを永田 武教授から聞いた前田憲一教授が、foF2 (電離層 F2 層の O モード臨界周波数) を geomagnetic coordinates (地磁気座標) で表示したところ、見事に規則的な分布が得られ、赤道帯異常などの発見に

導いたというのは有名な話である。

太陽はプラズマの塊で、フレアなどの局部的現象のモデル構築には必ず磁場の効果が考慮されている。まして太陽全体の大規模構造を論ずるモデルでは、heliomagnetic coordinates で太陽現象を記述すれば、複雑な太陽諸現象もきれいな法則性を示しながら記述されるはずである。しかし、今までほとんど誰もこれを試みなかった。その理由は、確かに磁気座標で表現すれば、例えば「コロナホールは常に太陽の南北両磁極域に存在する」というような単純明快な法則が得られる。しかし法則は単純でも、わずか11年でheliographicな南北両極の間をめまぐるしく移動する両磁極が現実の太陽を目の前にしたとき、現在どの位置にあるのかは明確でない。これでは、法則はあっても無きに等しい。

## 2.2. NEWS 座標系

そこで Akasofu *et al.* (2005) は、緯度のほうは heliographic をそのまま使い、経度だけ heliomagnetic にした折衷型の座標系を採り入れた。これを仮に NEWS 座標系と名付けておく。そして Heliomagnetic longitude の原点は、球面調和関数の係数を  $g_1^1$ ,  $h_1^1$  としたとき、

$$L_0 = \arctan(g_1^1/h_1^1) + \alpha \quad (1)$$

で表し、磁極の極性は太陽サイクルが奇数か偶数かで交互に変わるので、調整項として

Odd cycle の場合	$\alpha = 0^\circ$
Even cycle の場合	$\alpha = 180^\circ$

と与えた。

原点  $L_0 = 0$  から  $L_0 - 360^\circ$  までの新しい solar rotation number を、もとの Carrington Rotation Number (CRN) に対して NEWS Rotation Number (NRN) と呼び、

$$\text{NRN} = \text{CRN} - L_0/360^\circ \quad (2)$$

と定義した。

## 2.3. 下降期の回帰性嵐に関する NEWS の法則

Akasofu *et al.* (2005) はこのような NEWS 座標系を用いて複雑な太陽現象を表示したところ、体系的な分布が得られた。彼らは太陽の近代的観測資料の整った太陽サイクル Nos. 20–22 のデータを用い、回帰性嵐が起こった太陽活動下降期の太陽現象を精査した。

Akasofu *et al.* (2005) は太陽関連の様々な現象を様々な手法で解析し、その結果を24個の図で表示しているが、ここではその要点を図1と図2に凝縮して示すことにする。

図1ではそのうちサイクル22の下降期を代表として抜き出し、(a)はフレアが発生した場所を示す。一般に回帰性嵐が盛んになる頃にはフレア活動は静まるので、ここではサイク

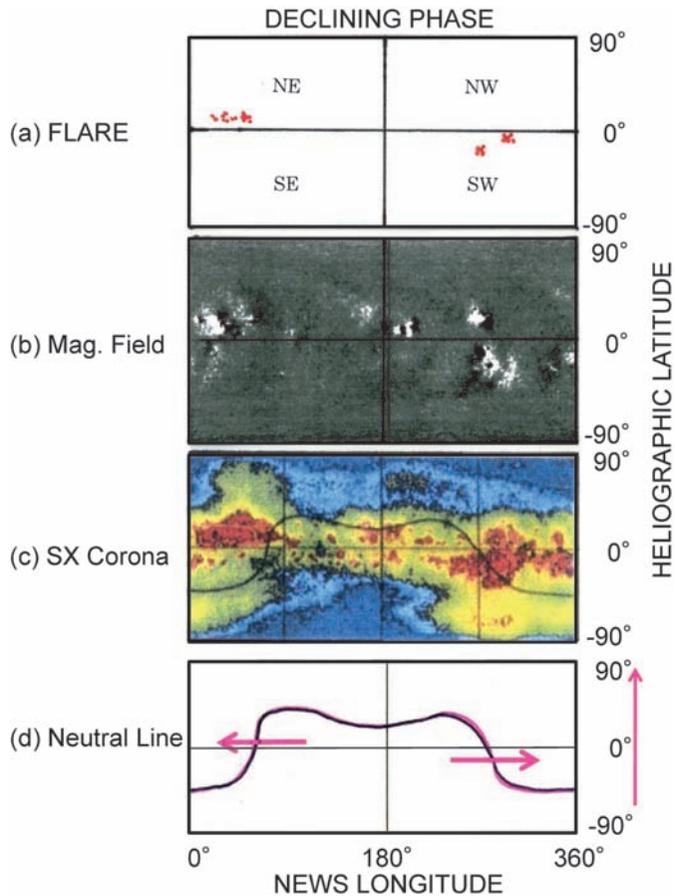


図 1 NEWS 座標系で示された太陽サイクル 22 の下降期における諸太陽現象  
 (a) フレア発生場所  
 (b) Kitt Peak National Solar Observatory による太陽光球面磁場  
 (c) 「ようこう」による軟 X 線コロナの輝度分布(カラー)と流源面中性線(黒曲線)  
 (d) WSO により観測的に求められた流源面中性線(黒曲線)と Triple-dipole model (3 双極子モデル) の等価双極子から計算で求めた流源面中性線(赤矢印と赤曲線). 赤矢印は, (a) の複合双極磁域を置き換えた光球面双極子.

Fig. 1. Solar phenomena as expressed in the NEWS coordinates system for the declining phase in Solar cycle 22.

(a) Flare nest

(b) Photospheric magnetic field observed at the Kitt Peak National Solar Observatory

(c) SX corona obtained with YOHKOH.

(d) Neutral line of the source surface observed at the Wilcox Solar Observatory (WSO: black) and calculated (red) based on the three equivalent dipoles (arrows), adopting the triple-dipole model.

ル 22 下降期の前半にあたる NRN=1876.61-1879.58 について, 国際フレアカタログに表示されているフレアすべてについてプロットした. 4 ローテーションに限定したのは, この前

後のローテーションを加えても傾向はほぼ同じであり (Akasofu *et al.*, 2005 の Fig. 18a 参照), フレアは全く同じ場所に再発する傾向があるので, 4 ローテーション以上プロットすると scattered diagram (散布図) で表示する意味が失われるからである.

さて, 図 1a の Synoptic chart を NEWS 経度  $180^\circ$  と赤道で四半球に分けた場合, フレアは明らかに (1) NE 四半球と (2) SW 四半球に集中して起こっていることがわかる. フレアは光球面上の磁場の強い場所で起こるので, 図 1 (b) に示した Kitt Peak National Solar Observatory による NRN1876.51 の光球面磁場では, 予想どおり, フレア発生場所に強い双極磁域が連なっていることがわかる. さらに太陽観測衛星「ようこう」による軟 X 線コロナの輝度分布を CRN1873-1886 について平均し, NEWS 座標系に変換して示した図 1 (c) でも, やはり NE 四半球と SW 四半球に赤い領域, つまりコロナの最輝部の集中が見られる. コロナの最暗部であるコロナホール (濃紺) をたどってみると, 一つは (3) 北極域から NEWS 経度  $0^\circ$  線に沿って低緯度に伸びており, もう一つは (4) 南極域から  $180^\circ$  線に沿って低緯度に伸びていることが明らかである.

Akasofu *et al.* (2005) はサイクル 20-22 の名古屋大学による太陽風速分布図や, 地上観測によるコロナ輝度分布図などとも比較しているが, それぞれの時間・空間分解能を考慮に入れても, 上記 (1)(2)(3)(4) の分布は変わらない. フレア発生場所 (1)(2) は Sc 型突発性地磁気嵐の太陽源を示し, コロナホールの位置 (3)(4) は回帰性嵐の太陽源を示すから, 地磁気嵐のすべての太陽源を, 太陽サイクルや太陽極域磁場反転に係わりなく (1)(2)(3)(4) という単純明快な普遍則で突き止められたことになる. これは驚くべきことで, 太陽観測が始まって以来何世紀にもわたって太陽に一定の活動経度があると報告されては消え, 報告されては消えてきたが, ここに初めてサイクル等に依存しない活動経度が発見されたことになる.

さらに, 太陽単一磁域 (UM-region; Saito, 1964) の性質がまだ明らかでなかった 20 世紀初頭に, 世界の学界を二分して半世紀以上所在が争われた太陽の Mysterious region (M-region) もまた, NEWS 座標系を用いることによって, 太陽サイクルに依存することなしに, 経度  $0^\circ$  と  $180^\circ$  付近に定在することが発見されたことになる.

一般に四半球の組み合わせは, NE/NW, SE/NW など 24 通りもあるので, NE と SW 四半球にフレアが発生し, 経度  $0^\circ$  と  $180^\circ$  付近にコロナホールが発生しやすいことを覚えやすいよう, この法則を NEWS の法則と名付ける. 厳密な英語表記では NESW でなければならないが, これを敢えて NEWS にしたのは, あくまで覚えやすくするための便法である.

さらに驚くべきことは, この座標系で Wilcox Solar Observatory (WSO) が観測的に求めた太陽風流源面上の磁気中性線を示すと, 図 2 に見られるように, サイクルや極域磁場反転に係わりなく, 中央 (磁気経度  $180^\circ$  付近) が盛り上がった single wave が見出された.

しかも同じ synoptic chart 上に上記 (1)(2) の双極磁域の代わりに双極子を光球面に置いてみる. その向きは Hale-Nicholson の極性則に忠実に従わせる. 一方, 太陽中心には自転軸

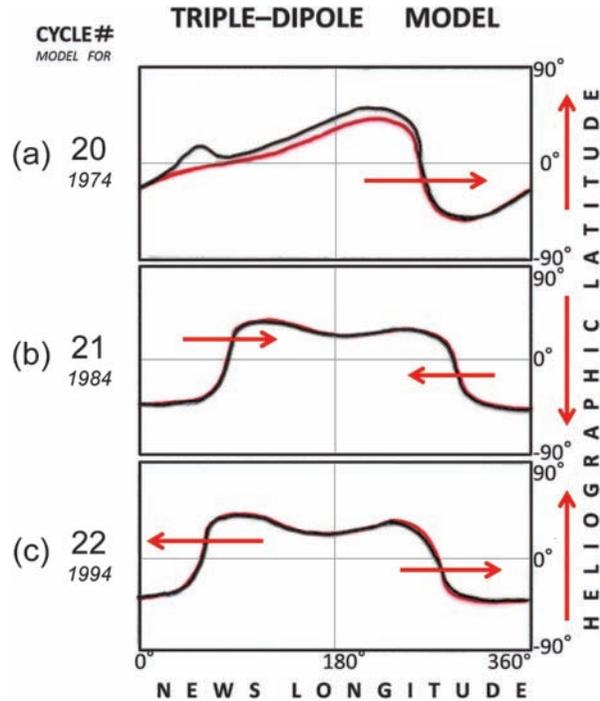


図 2 サイクル 20–22 の下降期に観測された流源面中性線（黒曲線）と Triple-dipole model による等価双極子（矢印）から計算された流源面中性線（赤曲線）

Fig. 2. Source-surface neutral lines observed during the declining phases of cycles 20–22. Source-surface neutral lines observed at the Wilcox Solar Observatory (WSO) (black) and calculated (red) based on the equivalent dipoles (arrows), adopting the triple-dipole model.

に平行な等価双極子を置いて、その極性は極域磁場に忠実に従わせる。そして、この2個の光球面双極子と1個の軸並行中心双極子という合計3個の双極子だけから Triple-dipole model (3双極子モデル; Saito *et al.*, 1989) に基づき「計算によって」流源面上の磁気中性線(図2, 赤曲線)を求めてみると、これとは別に「観測的に求めた」黒曲線(それぞれ NRN = 1615.19, 1750.87, 1881.64) とほとんど完全に一致していることがわかる。このことは Triple-dipole model が正しいことを裏付けるだけでなく、光球面上にほかに双極磁場が散乱していても、それらは流源面までにはほとんど影響しないことも示している。同じ下降期中では、中性線の位置や形がほとんど変わらない (Akasofu *et al.*, 2005, Fig. 1 参照) ことが特徴で、上記3個の NRN で十分それぞれの下降期を代表させ得るが、特にサイクル 21 と 22 では、太陽の時期や諸条件が全く異なるにもかかわらず、全く同一の3個の dipole (3双極子) で表示できる点は注目に値する。しかし一般には中性線の形にはサイクルごとの特徴が考えられ、サイクル 20 では SW の双極場が異常に強かった (Akasofu *et al.*, 2005, Fig.24 参照) こ

とから、そこだけに光球面双極子を置いた2個の dipole (2 双極子) による計算結果が赤曲線で表されており、これだけでも観測は近似されるが、同図にも存在する NE の弱い双極場の位置に弱い双極子を置けば、さらに近似度は高まることは自明である。

このような cycle independent な普遍則は、下降期に対して見つかったので Triple-dipole model と総称されているが、下降期での中性線は図に見られるように、中央だけが盛り上がっている single wave になっていることに留意していただきたい。

### 3. 上昇期の NEWS の法則

#### 3.1. サイクル 23 上昇期の NEWS の法則

上昇期では single wave ではなく、しばしば double wave になるのが特徴である (Akasofu *et al.*, 2005, Fig. 1 参照)。きれいな double wave になった場合のサイクル 23 については、Space Science Reviews 上で紹介した (Akasofu *et al.*, 2005)。上昇期の典型的な一例として、ここに図 3 として再出する。

この図 3a に見られるように、WSO が観測から求めた NRN1942.88 の流源面中性線は double wave を示す。これを等価中心極子で表すと、下降期の単純な等価中心双極子に較べて複雑な等価中心四重極子が卓越し、四重極子成分 (Q) に対する双極子成分 (D) の割合 (D/Q 比) が減少した (Saito, 1988, Fig. 3.2.) ことに相当する。そのときのコロナの明るさ分布は図 3c に示すとおりだが、明るい領域は4箇所にてきているから、これを図 2 に倣って中性線に重ねると、図 3d の4個の矢印 (光球面双極子) で示したようになる。double wave を青線 (図 3d 参照) で single wave として二つの部分に分けると、それぞれの部分でやはり NEWS の法則が成り立っていることがわかる。したがって、サイクル 23 に関する限り、上昇期でも NEWS の法則は成り立っていた。これが上昇期の太陽大規模磁場に関する、サイクル 23 までの結論である。

このように double wave になった場合には、4 個の光球面双極子と 1 個の軸平行中心双極子の合計 5 双極子のほうが近似は高まるが、これも Triple-dipole model と呼んでいるのは、極めて安定した下降期の single wave が 3 双極子でほとんど完全に近似できたからであり、また 5 双極子の考えは、この基本形になっている 3 双極子モデルの応用・発展形であるためである。

#### 3.2. サイクル 24 上昇期の NEWS の法則

そこで今期間 (サイクル 24) の上昇期では、どのような位置関係になるのかを調べる。WSO が発表している本稿投稿時点での最新データを図 4 に示す。2012 年 1 月中旬までの光球面磁場観測データから求めた流源面中性線は、太い曲線で示したように経度 360° の間に double wave になっていて、さらに東西の double wave が非対称であるという大変複雑な形に

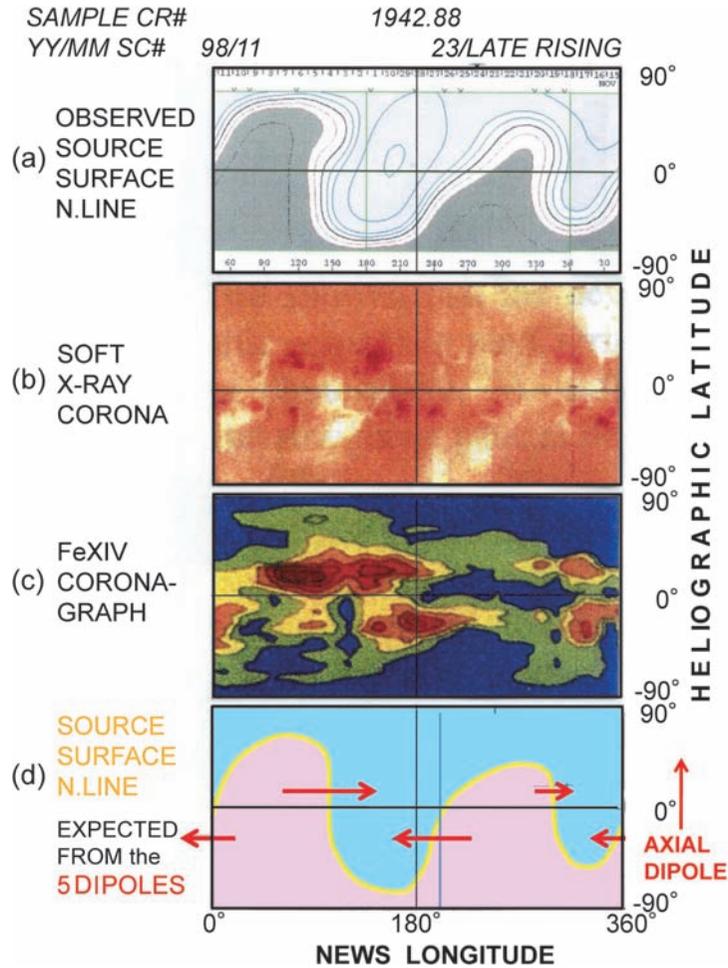


図 3 サイクル 23 上昇期に現れた double wave 型中性線  
 (a) WSO で観測した流源面磁場  
 (b) 「ようこう」が取得した SX コロナ  
 (c) Sac Peak NSO で観測した FeXIV コロナ  
 (d) Triple-dipole model で想定した 4 個の光球面双極子と 1 個の軸並行中心双極子 (矢印) から計算された流源面中性線 (黄曲線). 青い縦線は, double wave を二つの single wave 部分に分けるための補助線.

Fig. 3. Double-wave-type neutral-line appearance during the rising phase of cycle 23.  
 (a) Source-surface neutral line observed at the Wilcox Solar Observatory (WSO).  
 (b) SX corona obtained with the YOHKOH satellite.  
 (c) FeXIV corona observed at the Sacramento Peak National Solar Observatory.  
 (d) Source-surface neutral line (yellow) calculated based on the equivalent dipoles (arrows), adopting the triple-dipole model.

なっている。その上、太陽の北極磁場はずっとマイナスであったが、1月11日にはっきりとプラスに反転している。しかし、南極磁場は27日間を通じて全部プラスのままなので、1

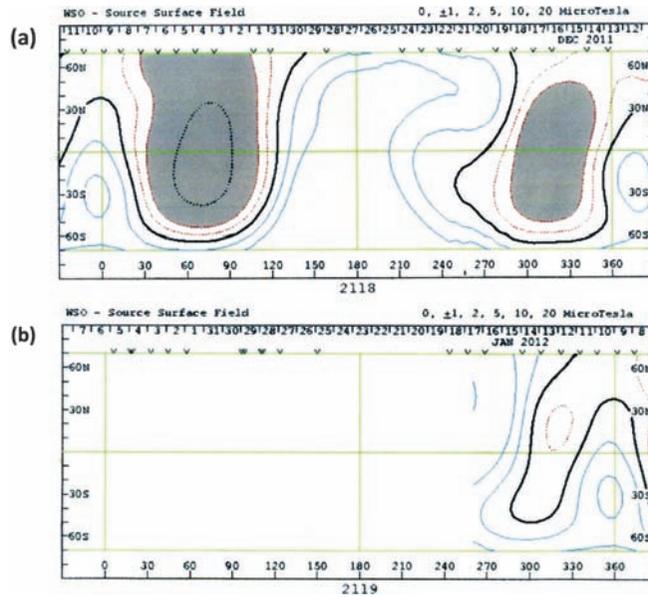


図 4 サイクル 24 上昇期に現れた最新の複雑な流源面中性線

Fig. 4. Source-surface neutral line observed at the Wilcox Solar Observatory (WSO) during the rising phase of cycle 24.

月中・下旬には南北両極ともプラスの、一見モノポール（磁気単極子）天体のような、非常に複雑な状態になっていた。図 4 の Carrington 座標系を NEWS 座標系にし、中性線を抜き出して図 5a のように表示しても大変複雑な形をしているが、それを Kitt Peak National Solar Observatory の光球面磁場データ（図 5b）と比べてみる。

赤丸で囲んだように、南半球に大規模な複合双極磁域が 1 箇所、その東側に小規模な磁域が 3 箇所あり、それらを中性線に重ねてみると図 5a の赤矢印で示したようになる。

これ全体を例のとおり図 5a のように青い縦線で二つに区切り、二つの single wave の部分に分けると、図 3 で示したサイクル 23 のきれいな例と全く同様に、NE と SW, NE と SW にきちんと双極子が位置している。つまり、これほど複雑な中性線になっても NEWS の法則が成り立っていることに驚かされる。図 4b では、ほかにも主に NW 四半球の光球面に双極場が点在しているが、これらは実際、流源面の中性線にまでは影響を及ぼしていないこともわかる。

### 3.3. 突発性磁気嵐源と NEWS の法則

ところで、この場合のフレア発生位置を赤点でプロットすると、図 5c に示すように一見中性線とは無関係のように見える。ところが先ほどの図 5b と重ねてみると、図 5c のフレアネストは規則的に南半球の複合双極磁域の範囲に入っている。ただし、ここで図 5a の縦軸

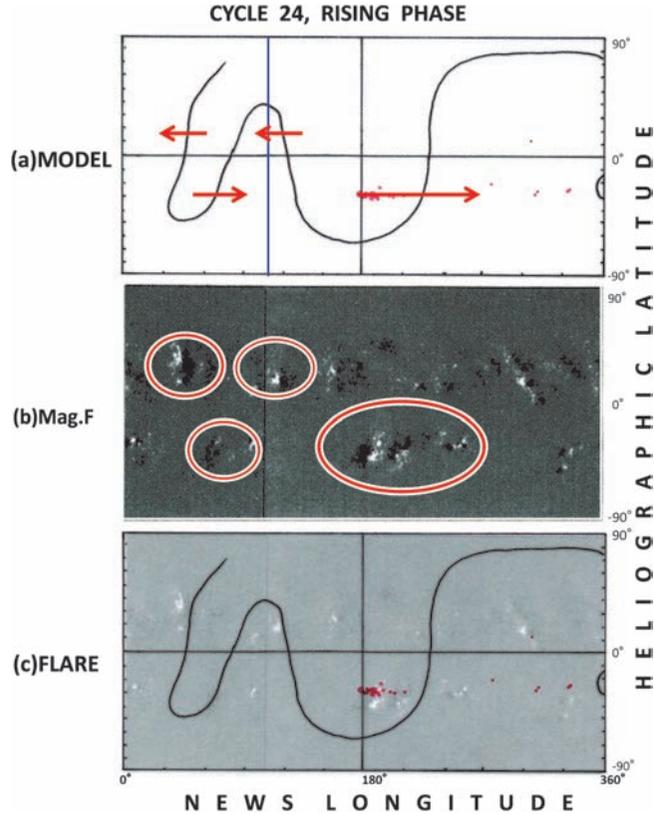


図 5 NEWS 座標系で表した (a) 流源面中性線 (観測) と光球面双極子 (モデル). 青い縦線は double wave を二つの single wave 部分に分けるための補助線. (b) Kitt Peak NSO で観測した光球面磁場. 赤楕円で囲んだ部分は, 特に強力で面積の大きい複合双極磁域. この磁域を光球面双極子に置き換えたのが (a) の矢印. (c) フレア発生場所 (赤点) と磁場 (背景)

Fig. 5. (a) Source-surface neutral line observed at the Wilcox Solar Observatory (WSO) and equivalent dipoles from the model.

(b) Solar magnetic field observed at the Kitt Peak National Solar Observatory.

(c) Flare nest (red spot) and magnetic field (background).

は linear scale で目盛を記した heliographic latitude で表示されており, 図 5c の曲線や赤点もこの目盛によっている. 一方図 5b の縦軸は, 同じ緯度  $\theta$  でも  $\sin \theta$  で目盛を記してある. したがって, 両者を重ねた図 5c では, 縦軸目盛の微妙なずれを考慮に入れて比較する必要がある. 横軸は同じ NEWS 経度なので目盛りのずれはないのだが, 赤点の密集領域は中性線よりも東方にずれているように見える. しかし, このようなずれは前のサイクルでもしばしば見られた傾向 (例えば Akasofu *et al.*, 2005 の Fig. 18a) で, フレアと中性線の起こる条件が全く違うからである. つまり, 中性線は散開磁域全体が総括的に流源面に効いてくるのに

対して、フレアはそのうちの光球面で、たとえ部分的でもとにかく磁場が強いところで発生するから、中性線とフレアネストがずれても当然ということができる。

### 3.4. 上昇期の回帰性嵐の周期性

次に Sc (Sudden Commencement) 型回帰性嵐の周期性の問題に移る。図 6 に、本稿投稿時点で最新の Kp 指数の 27 日回帰図を示す。

ところで回帰性嵐は Sc を伴わないことが多く、いつの間にか擾乱が起きては消えることが多いことから、ともすると回帰性嵐=緩始型嵐ともみなされ、補遺で後述するように長い間日本では回帰性嵐はしばしば「Sg 型磁気嵐」と呼ばれてきた。ところが図 6 の青丸で囲んだ Sc をたどると、その後に擾乱を伴っており、擾乱は約 26 日周期で回帰しながら 1 年間位継続していることがわかる。つまりこれらは「Sc 型回帰性嵐」であり、しかもその回帰周期は 27 日より早い約 26 日と、遅い約 28 日が混在している。

そこで、なぜ上昇期に 26 日と 28 日の周期が見られるのかを考える。

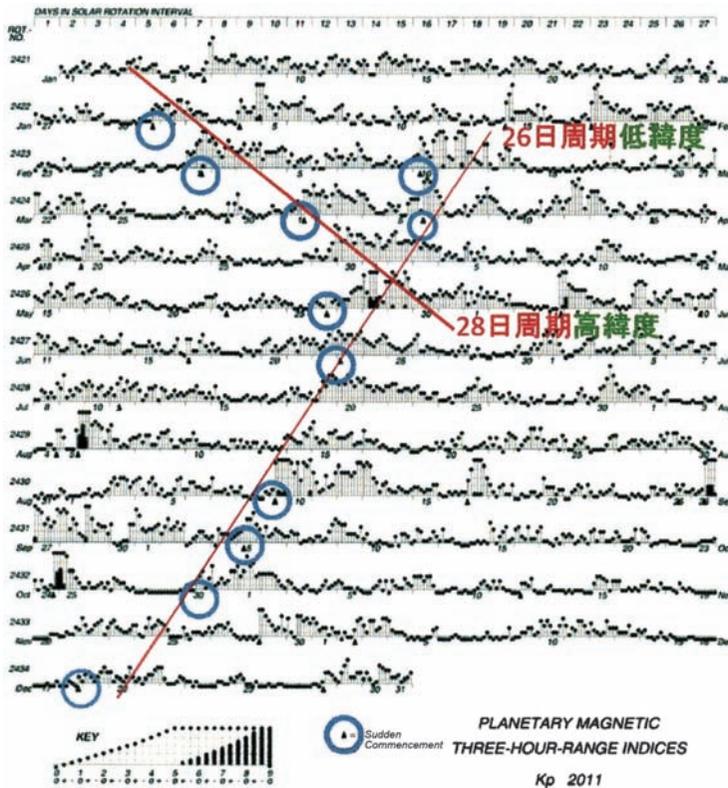


図 6 2011 年の Kp 指数 (地磁気擾乱指数) の 27 日回帰図  
 Fig. 6. 27-day recurrent time pattern of Kp index in 2011.

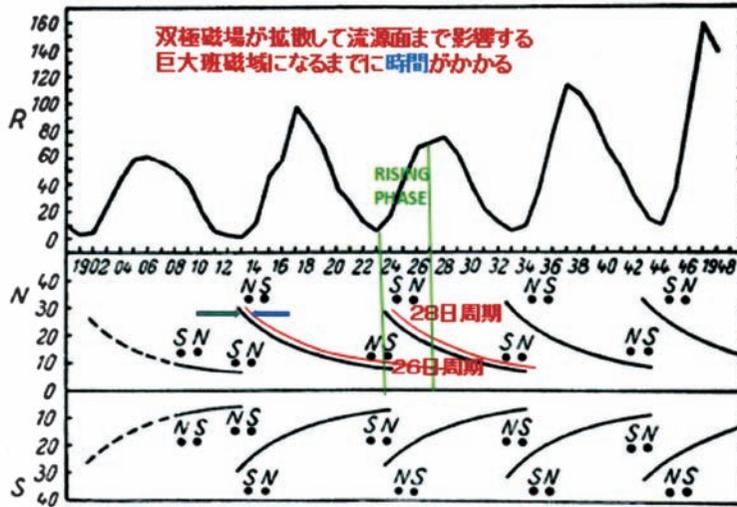


図 7 光球面の双極場（黒曲線：Hale-Nicholson）と、それが拡散した巨大斑磁域（赤曲線）

Fig. 7. Dipole field in the photosphere (black: Hale-Nicholson) and divergent giant magnetic region (red).

図 7 の黒曲線は、おなじみの黒点を作る双極磁域のバタフライダイアグラム (Hale and Nicholson, 1938) だが、この双極磁域が回帰性嵐に関係する流源面にまで影響が及ぶのは、できたての小さく強い双極磁域ではなく、それが拡散して単極巨大磁域 (UM-region, Saito, 1964) になってからであり、それまでに時間がかかるため、図 7 の赤曲線で巨大斑磁域を示す。上昇期には、この低緯度の旧サイクル生き残りの赤線と、高緯度の新サイクルに属する赤線の 2 箇所 に双極磁域ができて、それぞれが差動回転にしたがってコロナホールを動かすことにより、結果として 26 日周期と 28 日周期の 2 種類の回帰性嵐が発生したと解釈できる。

太陽—地球間の磁気現象には太陽サイクルごとに個性的な差異が見られるが、ちなみに過去に遡ってこの回帰性を調べると、各サイクルの下降期には 27 日周期が顕著に見られるが、上昇期には 28 日周期のほうが目立ち、26 日周期は 1955 年にわずかに見られる (Saito, 1988, Fig. 5.2) 程度である。したがって、今サイクル上昇期は顕著な 26 日周期が出ていることが特色として挙げられよう。

#### 4. Sc 型回帰性嵐

前述のように、突発性は Sc 型、回帰性は補遺で述べるように Gc 型と振り分けられてきたように思うが、今期は Sc 型回帰性嵐が多発していた。しかし太陽面上の経度差  $\Delta L$  隔たった東西 2 点で、それぞれ速度  $V_e$ ,  $V_w$  の太陽風が噴出し、 $V_e > V_w$  の場合、東からのビームが西からのビームに追いつけば定在性ショックが形成されて、太陽と共回転をする (Saito,

1978, Fig. 6). 追いつき点が地球軌道より内側なら Sc 型回帰性嵐となり, 外側なら Gc 型回帰性磁気嵐になるだけの話である. ただし, 見かけは同じような Sc でも, 突発性と回帰性では, 突発性がフレアによる進行性ショックによるものであり, 回帰性はコロナホールによる定在性ショックによるものなので, 発生機構が異なっていることに留意すべきであろう.

## 5. 討 論

上記のように, これだけ NEWS の法則によって大規模現象であるコロナホールも小規模現象であるフレアも説明できると, ともすると大規模構造 (流源面中性線) のほうが先に存在しており, その左肩右腰の場所に結果として後で光球面磁場ができるように錯覚しがちだが, 筆者らはそうは考えない. やはり今までの常識どおり, まず勝手に光球面磁場が次々に発生してフレアを産み, その磁場が散逸した結果, 巨大単極磁域 (UMR や G-UMR) ができ, 流源面中性線が決まり, コロナホールが決まって, それぞれ突発性と回帰性の磁気嵐を励起するのだと考えて無理はない. したがって, フレアネストは流源面中性線の真下にできなくても当然だと考える.

## 6. おわりに

以上をまとめて記す.

(1) 複雑な太陽現象を表示するのに, 折衷型の NEWS 座標系を太陽サイクル 20-22 の下降期に適用した.

(2) その結果フレアは① NE 四半球と② SW 四半球に分布し, コロナホールは③経度  $0^{\circ}$  と④  $180^{\circ}$  に沿って分布した.

(3) このことは NEWS 座標系の採用により, 太陽物理学始まって以来探し求められてきたフレアや黒点の活動経度が, 太陽サイクルなどに依存することなしに, 特に太陽活動下降期に北半球では  $90^{\circ}$  付近, 南半球では  $270^{\circ}$  付近に集中し, また 20 世紀初めに国際学会を二分して半世紀以上争われてきた太陽の Mysterious region が, 経度  $0^{\circ}$  と  $180^{\circ}$  付近に定在することが明らかになった.

(4) この, サイクルに依存しない普遍則を NEWS の法則と名付けた.

(5) WSO が観測的に求めた流源面中性線は, Triple-dipole model (3 双極子モデル) から計算で求めた流源面上の中性線と非常に良い近似を示し, モデルの正しさを裏付けた.

(6) 太陽活動下降期について見出された NEWS の法則が, どの程度上昇期にも成立するのか検証された.

(7) 上昇期の太陽圏中性面は, 単純な single wave だけでなく double wave になったり, 東西非対称や南北非対称になったりと複雑に変化する.

(8) 下降期に比べると, 弱い回帰性嵐が 26 日周期と 28 日周期で混在し, それが上昇期の

複雑化の原因にもなっている。

(9) そのような複雑性にもかかわらず、NEWS の法則は上昇期にも保たれていることが明らかになった。

(10) 今期間中、極磁場は 2012 年 1 月中旬に、北極だけマイナスからプラスに反転して、一見モノポール状態になった。

## 謝 辞

本研究の一部は、国立極地研究所の共同研究費（「宇宙天気とその境界領域の研究」）によるものであり、ここに感謝する。また光球面磁場、太陽風流源面磁場、FeXIV コロナ、SX コロナの資料は、それぞれ Kitt Peak NSO, WSO, Sac Peak NSO, 太陽観測衛星「ようこう」観測チームのホームページから利用させていただいた。ここに深く感謝申し上げる。

## 補遺 Gc 型嵐の提言

回帰性嵐は Sc を伴わないことが多く、いつの間にか擾乱が起きては消えることが多いところから、回帰性嵐＝緩始型嵐とみなされ、長い間日本では回帰性嵐そのものが「Sg 型磁気嵐」と呼ばれてきた。

この Sg は Gradual Storm の略であると漠然と考えられてきたように思う。しかし Sg-storm とも呼ばれてきたのであるから、これでは Gradual Storm Storm となり、おかしい。

では Sg の S は、Sc の S に引きずられた呼び名だと解釈しても、Sc は Sudden Commencement の省略形であるから、これでは Sg が Sudden Gradual の省略形になり、やはりおかしい。

もし省略形を残すのなら、原意の緩始 Gradual Commencement を、そのまま省略した Gc 型という名称を用いるべきである。日本においては国内向け研究会と国際研究会との境目がなくなってきている現状から、日本でしか通用しない「Sg 型」の呼称は廃して「Gc 型」を用いるべきだと考え、ここに理由と共に提言する次第である。

## 文 献

- Akasofu, S.-I., Watanabe, H. and Saito, T. (2005): A new morphology of solar activity and recurrent geomagnetic disturbances: The late-declining phase of the sunspot cycle., *Space Sci. Rev.*, **120**, 27–65.
- Cliver, E.W., Boriakoff, V. and Bounar, K.H. (1996): The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. *J. Geophys. Res.*, **101**, 27091–27109, doi: 10.1029/96 JA02037.
- Hale, G.E. and Nicholson, S.B. (1938): Magnetic observations of sunspots, 1917–1924. Pt. 1. Washington, D.C., Carnegie Institution of Washington, 56 p.
- Saito, T. (1964): A new index of geomagnetic pulsation and its relation to solar M-regions, Part 1. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*, **18**, 260–274.
- Saito, T. (1978): M-region, heliomagnetosphere, and their solar cycle variations. *Proc. Magnetosphere Symp. Held at ISAS, Tokyo Univ.* 12–13, January, 5–13.
- Saito, T. (1988): Solar cycle variation of solar, interplanetary, and terrestrial phenomena. Laboratory and space plasmas: Proceedings on the Second International Workshop on the Relation Between Laboratory and Space

- Plasmas, held in Tokyo, Japan, November 25–26, 1986, ed. by H. Kikuchi, Tokyo, Springer, 473–528.
- Saito, T., Oki, T. Olmstead, C. and Akasofu, S.-I. (1989): A representation of the magnetic neutral line on the solar source surface in terms of the sun's axial dipole at the center and two equatorial dipoles in the photosphere. *J. Geophys. Res.*, **94** (A11), 14993–14999, doi: 10.1029/JA094iA11p14993.
- Saito, T., Sun, W., Deehr, C.S and Akasofu, S.-I. (2007): Transequatorial magnetic flux loops on the sun as a possible new source of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, **112**, A05102, doi: 10.1029/2006JA011941.
- Watari, S. (2011): Forecast of recurrent geomagnetic storms. *Adv. Space Res.*, **47**, 2162–2171, doi: 10.1016/j.asr.2010.07.029.