

## 赤道横断磁気ループ (TEL) 型太陽爆発に伴う新型磁気嵐

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

W. Sun<sup>6</sup> and C. S. Deehr<sup>6</sup>

Transequatorial magnetic flux loops on the sun:  
a possible new source of geomagnetic storms

Takao Saito<sup>1\*</sup>, Hiroaki Misawa<sup>2</sup>, Natsuo Sato<sup>3,4</sup>, S.-I. Akasofu<sup>5</sup>,  
W. Sun<sup>6</sup> and C.S. Deehr<sup>6</sup>

(2009年3月30日受付; 2009年7月6日受理)

**Abstract:** Following the traditional way of expression, geomagnetic storms have been classified into three types; flare-type Sc storms, CH-type Sg storms, and DB-type Sc storms (Sc: sudden commencement; CH: coronal hole; g: gradual; DB: disparition brusque). We have discovered that some transequatorial loops (TEL) give rise to geomagnetic storms, when the TEL explodes near the central meridian of the sun. The axial magnetic direction of the TEL can be inferred, since TELs connect sunspot groups or remnant magnetic regions between the northern and southern hemispheres. Since the axial fields tend to have a large Bz component in interplanetary space, we have examined various effects on the configuration of geomagnetic storms. Topics are proposed for future works on the TEL-type Sc storms.

**要旨:** 地磁気嵐とその発生起源である太陽現象をペアとして捉える太陽・地球電磁関係物理学の手法に従い、従来のフレア型急始 (Sc) 嵐, コロナホール型緩始 (Sg) 嵐, フィラメント消失型 Sc 嵐のほかに、本研究では新たに次のような赤道横断磁気ループ型 Sc 嵐が見出された。

太陽の赤道を跨ぐ大きな磁気ループ (Transequatorial loop: TEL と略称) が急激に膨張、爆発して、大規模なコロナ質量放出 (CME) を発生させる事実は半世紀

<sup>1</sup> 仙台市太白区太白 3-6-29, Taihaku 3-6-29, Taihaku-ku, Sendai 982-0212.

<sup>2</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, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578.

<sup>3</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>4</sup> 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>5</sup> International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA

<sup>6</sup> Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska, USA

\*Corresponding author.

以上前から観測され、太陽のふち (limb) 現象として、太陽物理学分野で大きく注目されてきた。この TEL 型爆発は太陽のふち (limb) で頻繁に観測されるからには、太陽正面でも発生するはずであると推定して調べたところ、ディスク中心付近でかすかな線条構造が認められてから数日後に、地球で磁気嵐が発生していることが見出された。この線条付近ではフレアもフィラメントもコロナホールも認められなかったことから、これは新しい TEL 型 Sc 嵐であると認定した。このような TEL は南北両半球にある黒点群または黒点消滅後の残留磁域とつながっているため、磁気ループの軸磁場の方向が求められる。この軸磁場は惑星間磁場 (IMF) の強い  $B_z$  成分を生むので、その地磁気嵐構成への影響について調べた。TEL 型 Sc 嵐については、将来様々な興味深い研究成果が期待されるが、現時点で考えられる様々な課題についての提言がなされた。

## 1. はじめに

18 世紀に太陽フレアが磁気嵐の原因と思われることが提唱されて以来、太陽地球電磁関係物理学 (Solar-terrestrial physics) という新しい学問分野が開かれ、原因となる太陽現象を磁気嵐のメカニズムとセットとしてとらえる潮流ができた。本研究ではその立場に立ち、これまでのフレア、フィラメント消失、コロナホールのいずれにも属さない赤道横断磁気ループ (TEL) 型磁気嵐が見いだされたので報告する。磁気嵐は複数のオーロラサブストームの集積効果であるという説もあり、TEL 型嵐の発見は、南極における超高層物理学研究にも重要な影響を及ぼすと考える。新型嵐であることを示すために、まず従来の嵐や惑星間の磁気ロープ (magnetic flux rope) の研究を概説し、それらと較べていかなる点で新しいかを明らかにしよう。

### 1.1. 従来の 3 種類の磁気嵐とその太陽源

磁気嵐の究極の原因は太陽にあり、「太陽源-磁気嵐」のように、磁気嵐を太陽源とセットとして表現した場合、これまで 3 種類が考えられてきた。年代順に列記してみると次の通りである。

#### 1.1.1. フレア型 Sc 嵐

これは太陽面上の活動領域にフレアが発生し、それによって太陽風領域に爆風性衝撃波 (Blast Wave) が引き起こされ、それが地球磁気圏に到達して起こした急始 (Sc) 型の磁気嵐である。最初の発見は 1859 年のフレア-磁気嵐現象であるが、まだ RIOT-FILTER が発明される以前のことであり、特に強力な白色光フレアとして偶然目視されたとされている (Carrington, 1859)。フレアの発生は Flare Buildup Study の進展により、ある程度予測できるが、発生には特別な周期性が見出されないため、フレアによる磁気嵐は、突発性 Sc 嵐とも呼ばれる。

#### 1.1.2. コロナホール型 Sg 嵐

この型の磁気嵐はコロナホール発見以前から Bartels (1932) によって見出されており、その太陽源は仮想的な Mysterious region (M-region) とされてきた。この M-region は単一磁場

領域 (UM-region) であろうとの指摘がなされていた (Saito, 1964). その後 MARINER-2 により高速太陽風との関係が見出され (Snyder *et al.*, 1963), 更に高速太陽風の発生源として, 単一磁場領域であるコロナホール (Coronal hole, 略称 CH) が同定された. (Krieger *et al.*, 1973)

コロナホールから吹き出す高速太陽風による磁気嵐は, Sc のような明瞭な開始の兆しなしに緩やか (gradual) に発生するところから, 緩始 (Sg) 嵐を伴うとされている. コロナホールの位置や消長に変動がなければ, およそ 27 日ごとに繰り返される回帰性嵐として観測される. 太陽活動極小期直前に現れるのを特徴とする. 回帰性磁気嵐については, CH や太陽諸現象の発生に関して見出された NEWS の法則や太陽周期との関係等が, 赤祖父らによりまとめられている. (Akasofu *et al.*, 2005)

### 1.1.3. DB 型 Sc 嵐

太陽面上で暗条 (Dark filament) が突然消える現象 (DB: Disparition Brusque と呼ばれる) が起きてから 2-4 日して地球磁気圏で発生する Sc 型の磁気嵐がこれにあたる (Joselyn, J. A., 1981). この現象はフィラメント構成物質が太陽大気内で地球に向かって急上昇するためにドップラー効果により H $\alpha$  領域から外れるので, 見かけ上フィラメント消失として観測されると考えられている. フィラメントを構成するプラズマがコロナ質量放出 (Coronal mass ejection, 略称 CME) を起こして地球に励起する嵐なので, DB 型嵐も突発性磁気嵐に分類されている.

これまで知られていた上記 3 種類の磁気嵐太陽源のほかに, 今回新たに第 4 番目の太陽源である赤道横断磁気ループ (TEL) と, それによる TEL 型 Sc 磁気嵐が見いだされたので報告する.

この TEL, つまり Trans-Equatorial な loop そのものは, 太陽大気内でふち (limb) に現れる現象として太陽物理学分野では以前から注目されていたが, 磁気嵐の太陽源として太陽のディスク中央部 (Disk center) 現象として着目し, 太陽から地球までの一連現象として捉えたのは今回の報告が初めてである. そこで太陽大気内の「ふち (limb) 現象としての TEL」についての観測を予備知識としてここでまとめておこう.

## 1.2. 過去の太陽大気内 limb 現象としての TEL に関する報告

### 1.2.1. GRAND-PA

過去の TEL 現象として本著者の一人 (T. Saito) の記憶に留ったのは, 彼が客員研究員として滞在した HAO (The High Altitude Observatory) の, 当時所長をしていた W. O. Roberts によって観測記録された有名な GRAND-PA 現象である. これは太陽大気内のプラズマが構成する巨大アーチが急に爆発的上昇を起こし, アーチが太陽視半径を越える位まで成長する過程を動画で記録したものであり (図 1), その衝撃的な映像とともに太陽物理学の進展に大き

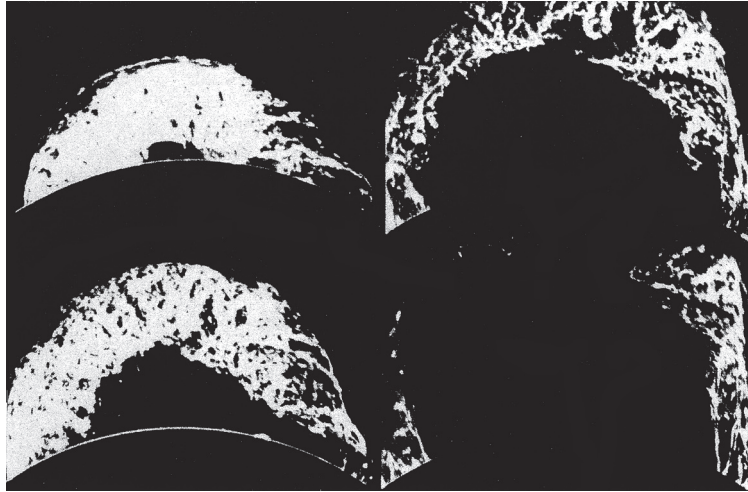


図 1 本研究で見出された磁気嵐の新しい太陽源としての「赤道を跨ぐ巨大磁気アーチ (TEL と略称)」は、太陽の東縁または西縁付近では半世紀以上前から見出されていた。図は米国 Climax 観測所で 1946 年 6 月 4 日に記録された TEL 現象で、その巨大さのゆえに GRAND-PA という親称で呼ばれているほどであった。

*Fig. 1. A large explosive prominence with the TEL type arch structure as observed with the movie coronagraph at the Climax Observatory.*

く貢献し、半世紀以上たった今なお、日本のお茶の間のテレビで繰り返し放映されている大爆発である。しかし記録はまだ第 2 次大戦終了直後、つまり今日ほど諸データが簡単に入手出来なかった時代の現象だったため、当日の他の太陽面諸現象との関係やアーチの日面経緯度的位置の同定などは、残念ながら調査しきれていない。現象は太陽中心に対するアーチの両脚が  $60^\circ$  に及び、これは片側半球だけの活動領域緯度幅約  $30^\circ$  より大きいところから、TEL である可能性が極めて高い。ただしこの現象が地球に磁気擾乱を起こしたという報告はない。爆発が地球から見て太陽のふち (limb) で発生したために、コロナ物質が地球方向に対し直角な方向にそれて飛び去ってしまったからだと考えられていた。

#### 1.2.2. 1973 年 12 月 19 日現象

Skylab で捕らえられた現象として太陽物理学者やマスコミによって何度も取り上げられている現象である (図 2)。これも地磁気擾乱を伴ったという報告はない。

#### 1.2.3. 1980 年 4 月 14 日ほかの現象

SMM 衛星搭載のコロナグラフで、TEL を含む多数の CME が報告された。図はそのうちの 1980 年 04 月 14 日現象である (図 3)。

#### 1.2.4. 1992 年 3 月 29 日現象

Takahashi *et al.* (1993) は、科学衛星「ようこう」SX 画像の中に 2 個の双極磁域を東西に結ぶ 2 本の磁力線群と、赤道をまたいで南北に結ぶ 2 本の TEL 型の磁力線群の合計 4 本の

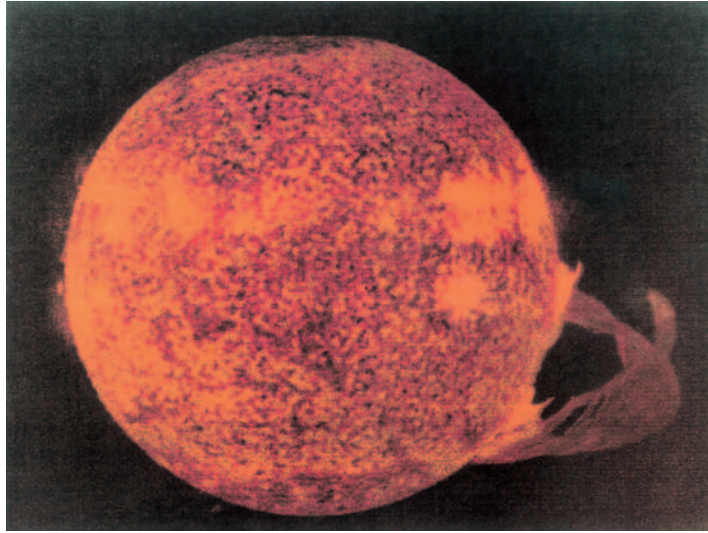


図 2 Skylab で 1973 年 12 月 19 日に観測されて有名になった TEL 現象。  
 Fig. 2. A TEL type arch structure observed by Skylab on 19 December 1973.

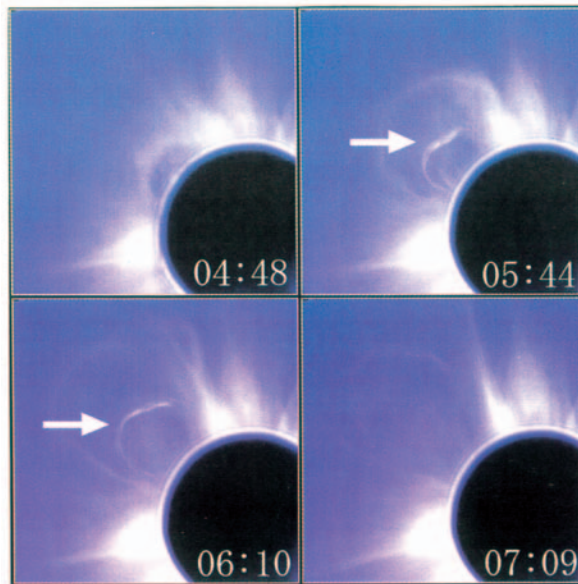


図 3 太陽観測衛星 SMM 搭載のコロナグラフが 1980 年 4 月 14 日に記録した TEL. 矢印が eruptive prominence で、その上方に CME の先端がみえる (柴田ほか, 2004).

Fig. 3. An example of CME events observed at SMM on 14 April 1980 (Shibata *et al.*, 2004). The arrows indicate the prominence. The arc above the prominence is the front of the CME.

磁力線群からなる4重極子 (Quadrupole) 構造 (図4) を見出した. 2本のTEL型磁力線群のうち南向き主軸磁場を持つほうのTELの根元では白色光フレアが発生し, 5日後の4月3日に  $K_p = 6$  に及ぶ地磁気擾乱を起こした. 黒点活動が極大期から極小期にかけては, 南北両半球の活動領域は赤道に近付くので, もしふたつの活動領域が同時に南北両半球の同じ経度付近で発生すると, それぞれの半球の双極磁域を結ぶ2本の東西方向磁力線群のほかに, 南北の双極磁域が赤道を越えて2本のTEL型の磁力線群で結ばれ, SX画像に見られるように全体として4本の磁力線群からなる安定した4重極子構造になるはずである. この3月29日現象では南北半球の双極磁域が赤道に近いので, TELの頂点はプラズマ密度が高いコロナ域底部を通るので, 4重極子構造は太陽ディスク内でも的確に検出でき, かつ爆発後でも太陽のふち (limb) で同じように復元された構造が見えた典型例である.

#### 1.2.5. 1992年7月31日ほかの現象

この現象 (図5A) は「ようこう」のSX望遠鏡と国立天文台野辺山の太陽電波望遠鏡で

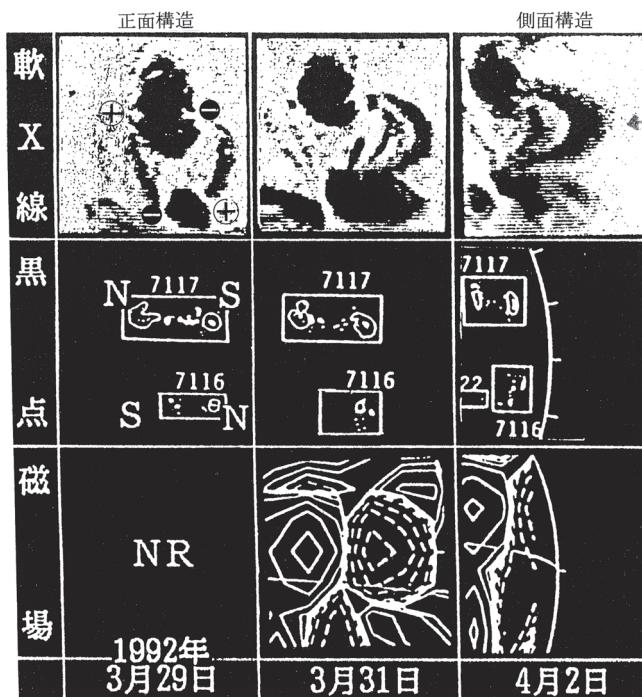
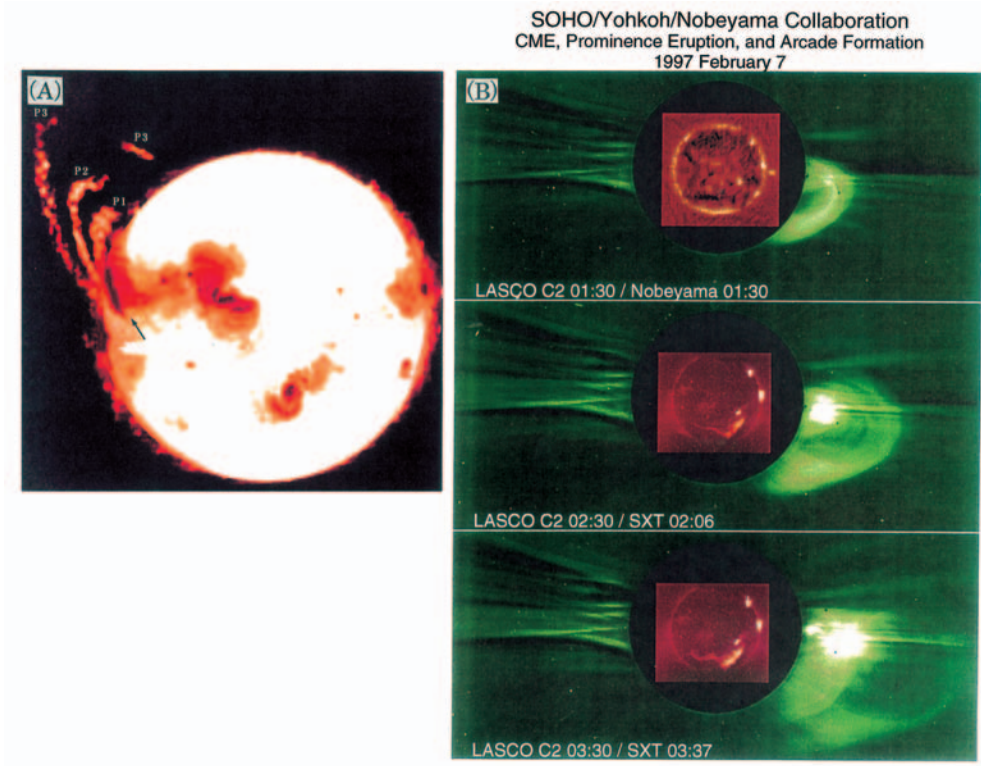


図4 「ようこう」の軟X線望遠鏡で捉えた4重極子型TEL. 1992年3月29日に, 南北の黒点群を繋ぐ2本の線条として観測されたTEL構造が4月2日に西縁に近づくとき, アーチを形成していることが分かる.

Fig. 4. The quadrupole type distribution of the four fieldline bundles around the northern and southern bipolar sunspots near the disk center on 29 March 1992. The SX images (top) are compared with sunspots (middle) and magnetic fields (bottom).



- 図 5A 1992 年 7 月 31 日に観測された TEL 現象の合成図．野辺山観測所で得られた太陽の電波図（太陽ディスク外）と、「ようこう」による SX 画像（ディスク内）が合成されている．左上の TEL (P1 → P2 → P3) の下に見えるアーケード構造は，TEL 爆発機構を説明する上で示唆的である．
- 図 5B 1997 年 2 月 7 日に観測された TEL 現象の合成図．赤い像は（上）野辺山で取得された太陽電波図と，（中と下）「ようこう」による SX 画像．緑の画像は SOHO/LASCO が取得した C2 画像．

Fig. 5. A composite image of the radio heliogram (off disk) obtained at the Nobeyama Observatory and the SX image (within the disk) obtained at Yohkoh. See the arcade structure indicated by the arrow in the SX image.

同時に捉えられた太陽大気内現象としてよく知られている (Hanaoka *et al.*, 1994)．電波で捉えた巨大な噴出性紅炎（プロミネンス）の下方に SX 画像でアーケード構造が見られるのは示唆的である．

同じく Hanaoka (Hanaoka *et al.*, 1994) によって示された図 5B は，1997 年 2 月 7 日の TEL 現象について，太陽ディスクの内外を対比的に示したものである．中央の赤い画像は国立天文台野辺山の電波画像（上）または「ようこう」の SX 画像（中・下）であり，外側の緑色画像は SOHO/LASCO の C2 画像である．太陽半径の実に 7 倍近くまで広がっている巨大な TEL 現象が可視化されている．

## 1.2.6. 1997年11月6日ほかの現象

SOHO に搭載された太陽半径で 60Rs の範囲に及ぶ広角コロナグラフで、多くの劇的な TEL 現象が太陽のふち (limb) 領域で観測された。そのうちでも顕著なのが図 6 の現象である。この現象は SOHO が観測した史上最大級の太陽爆発現象としてホームページにギャラリーとして特出されており、太陽物理学者たちにも衝撃を与えた特大の現象である。この TEL 現象を起こした活動領域は、太陽と一緒に自転しながら 1 週間位連日のように、極めて類似した大規模な爆発現象を発生させた (Dere *et al.*, 1999)。この大規模爆発は当然太陽動径方向 R、経度方向 Y、緯度方向 Z のいずれの方向にも 3 次的に複雑なプラズマ運動が展開され

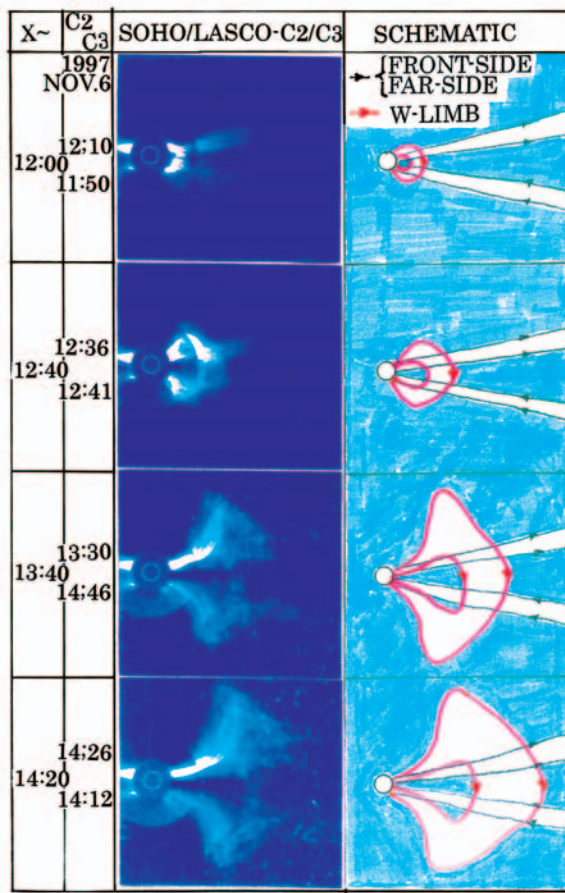


図 6 (左) 1992年11月6日に SOHO/LASCO のコロナグラフ捉えた史上最大級の TEL 爆発と、(右) 観測から導き出されたモデル。

Fig. 6. The C3 images, 30Rs of the coronagraph superposed on the C2 images 6Rs of the violent explosion of the transequatorial loops on 6 November 1992 (left). The schematic model on the representative fieldlines of the bivalve type on the front- and far-sides of the sun and the balloon type near the west limb. The two transparent types were observed to be superposed on the RZ plane.



ているはずである。幸いなことに半透明なプラズマ現象が真っ暗な宇宙空間を背景に太陽のふち (limb) で起こっており、しかも連続発生した爆発現象が形態的に互いに類似しているため、明瞭なデータをもとにそれらに共通したメカニズムが構築できる。そこで太陽のふち (limb) の TEL 型爆発にともなうプラズマ構造の、この RZ 平面に投影された時間変化から、図 7 に示すような RYZ 空間での 3 次元的な爆発プロセスが追跡された。コロナ域最底部にある黒点などによる局所的磁場に比べて、太陽外部コロナ域では、太陽仮想中心双極子による主磁場が卓越するので、磁場もプラズマも、静穏時には北半球と南半球からなる二枚貝的な分布が期待される。そのとき内部で TEL 爆発が起こると、プラズマは貝殻に抑えられて、

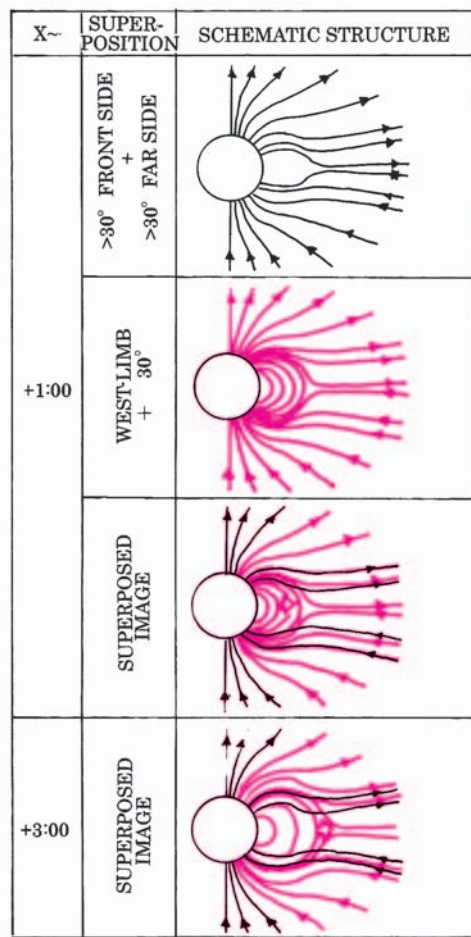


図 7 図 6 に酷似して繰り返し観測された limb 現象をもとに構築された TEL 爆発の 3 次元モデル。現象は limb で頻繁に観測されたので、同じ機構で太陽正面でも爆発していると推定された。

Fig. 7. The schematic model of the fieldlines for the 6 November 1992 event. This limb event is considered to have occurred also on the front side of the sun, giving rise to a geomagnetic Sc storm.

まず経度方向に広がり、次に中心経度付近で二枚貝を内部からこじ開けて、磁気圧の低い周囲の空間に向かって風船のように膨らむ構造が広がる。ここで「太陽のふち (limb) 方向にこれだけ頻繁に発生している TEL 型爆発ならば、図 7 と同じメカニズムで必ずや太陽正面でも発生して地球方向にコロナ質量放出 (CNE) を起こし、地球に大磁気嵐を起こすに違いない」という発想が生まれるのは極めて自然である。このようにして本研究の調査が始められた。

なお太陽のふち (limb) の CME を克明に調べた Yashiro (2004) によると、CME の年間総数は 1997 年の 335 件に対して極大期にはその 4 倍以上になるので、TEL 発生数も膨大だったはずである (図 8 の左側)。なお同図の横軸である CME の「見かけの」緯度とは、原因となった活動領域そのものの緯度ではなく、噴出したループ状 CME の対象軸の緯度で決めたから、図で緯度範囲が赤道に集まっているのは、まさに赤道を横断する現象が多数含まれていることを示唆している。

### 1.3. 太陽風中で観測された磁気ロープと回転磁場

太陽風中ではしばしば磁気ロープ (magnetic flux rope) が観測され、それが人工衛星を通過すると磁場の回転が観測された (Lepping *et al.*, 1990; Marubashi, 1986)。磁気ロープの両脚は、原因となるフレアや暗条 (Dark filament) の東西方向双極磁場域と考えられたので、従来のモデルとしてはすべて東西方向つまり水平面内に磁気主軸を持つ構造が考えられてきた (図 9B 上)。これに対して本研究では磁気ロープ両脚が太陽南北半球の活動領域であると考えられているので、磁気ロープの主軸も南北、すなわち垂直方向であることに最大の特徴がある。換言すれば従来の伝統的水平思考に対して、垂直思考を導入したと表現することもできる (図 9A)。

### 1.4. 用語について

本論文に用いられている TEL (Transquatorial Loop) なる用語は、用いられている場合によって少しずつ下記のように内容が異なる。しかし繁雑さを避けるためにすべて TEL の一語で通しているのです、その場所場所によって正確な内容を異にしていることをあらかじめご承知おき頂きたい。

一般的 TEL: 赤道を越えて南北半球にそれぞれ足をもつアーチ構造を一般的に TEL と呼称する。

#### 1.4.1. 太陽のふち (limb) とディスク正面 (Disk center)

太陽のふち (limb) では背景が真っ暗なのでアーチ構造ははっきり認められるが、同じものでもディスク正面では、3 次元的アーチを太陽面に投影した形、つまり一般には縦方向のゆるい平凡な曲線として見えるはずである。換言すれば TEL 現象は正面画像で、「大きさ」

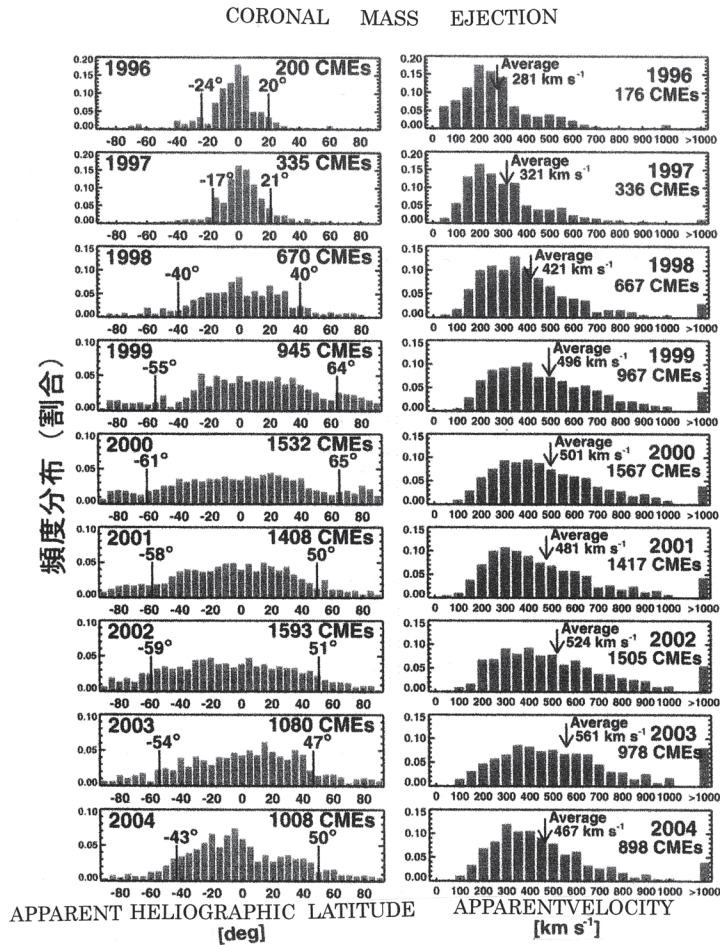


図 8 1996 年から 2004 年まで観測された CME の (左) 中心緯度と (右) 速度の分布 (Yashiro *et al.*, 2004 による). 赤道に分布の山があることは, TEL 爆発が頻繁に起こっている証拠を提示している.

Fig. 8. Distribution of the heliolatitude (left) and the velocity, respectively (right) of the CMEs observed from 1996 to 2004 (Yashiro, 2004). The concentration of the CMEs near the equator, where neither sunspots, plagues, nor strong magnetic fields are dominant, may support strongly the present TEL type explosion hypothesis.

「形」, 「解像度」の全てにおいて見分けにくいという宿命を負っている. しかしここではふちや正面という見かけ上の形などの違いを区別せずに, 共通して TEL の用語で通す.

#### 1.4.2. 静止と活動

太陽大気圏でループ状に固定, 静止している場合には, 地球に何も影響を及ぼさない. 激しい上昇活動は, 太陽のふち (limb) では劇的な映像として観測できるが, 正面画像では「運動」も指摘しにくいはずである. 本論文では, 用語上は静止状態のものと活動中のものとを

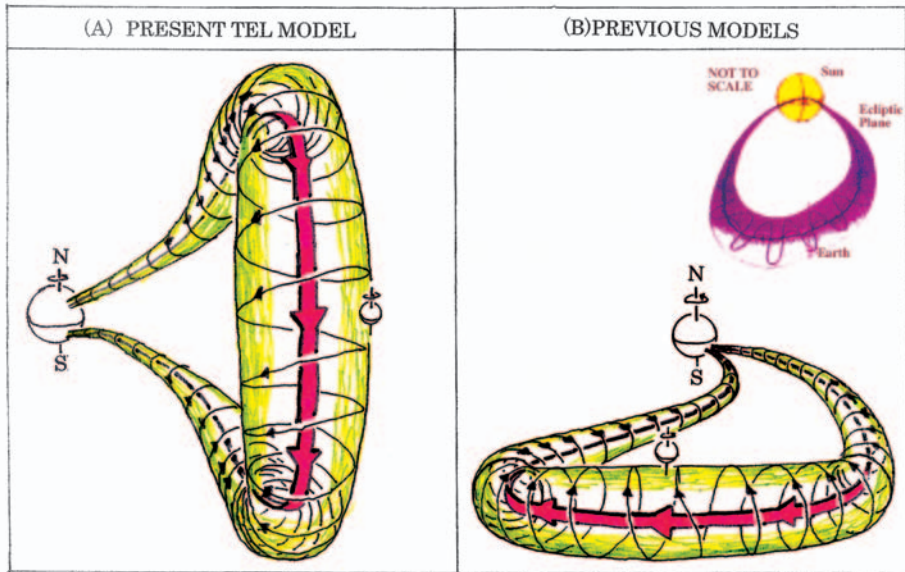


図 9 惑星間空間に広がる磁気ロープ (magnetic flux rope). (A) 本研究で提示されている垂直型モデルと (B) 従来の水平型モデル. 主軸磁場が南向きだと, 垂直型ロープのほうが大きな磁気嵐を起こすことが考えられる.

Fig. 9. Previous (B) and present (A) models of interplanetary magnetic flux ropes. In the previous model, the two legs of the horizontal flux ropes have been considered to anchor in the horizontal bipolar magnetic regions of the sun.

区別しない.

#### 1.4.3. コロナ領域中と太陽風領域

太陽からの脱出速度を超えて太陽風領域を飛来している場合に, 磁気構造として磁気ロープ (magnetic flux rope) の語を用いる場合があるが, 特に磁場構造を問題にしない場合は TEL という共通語を用いる.

#### 1.4.4. 地球への影響の有無

これも特に用語上は区別しない.

## 2. データ

調査に用いたデータは次の通りである.

- ・科学衛星「ようこう」による太陽の軟 X 線 (SX) 全面画像
- ・白色光全面画像: 太陽活動領域との関係を調べるために用いた.
- ・ $H\alpha$  全面画像: フレアやフィラメント等との関係を調べるためである.
- ・磁場全面画像: フレアやフィラメントとの磁気的關係を調べるためである.
- ・太陽風流源面上の磁気中性線: アーチ構造の太陽大規模磁場との関係を調べた.

- ・ Kp および Dst ダイアグラム：太陽の TEL 現象と地球の Sc 嵐との時間差や嵐の形態や規模を調べた。
- ・ 太陽風パラメータ：TEL の惑星間空間でのふるまいを調べるために、WIND 衛星のデータが用いられた。
- ・ 調査期間：「ようこう」衛星がデータを提供している期間の 1992 年～2000 年である。

## 2.2. 正面画像に現れたかすかな現象の重要性について

太陽のふち (limb) での TEL 爆発は、可視化された太陽画像でこれ以上巨大な構造は見当たらないほど最大級の現象なので、正面でも同規模・同確率で発生しているはずであると考えるのは極めて合理的である。しかしいざ正面画像で同じような TEL 現象を見つけようとすると、途端に困難に遭遇する。以下に述べるように、極めてかすかな兆候でしか見られない。ところが、かすかだから価値がないと考えるのは、極めて合理的でない。ではどの点で検出し難いかを抑えておくことは、将来の TEL 研究開拓の上で極めて有用である。

### 2.2.1. 大きさ

太陽直径の数倍に及ぶ巨大アーチでも、それを真上 (正面) から見ると、1 本のかすかな線条としてしか識別できない。

### 2.2.2. 形

太陽のふち (limb) では巨大に広がるアーチ構造も、磁力線のねじれを示唆する派手な微細構造も、正面画像では明暗差がわずかであるせいもあり、形態的に大げさな特徴は見られない。

### 2.2.3. 運動

Morton wave のように、静止画では識別不可能なほどかすかな映像でも、動画にすればはっきり分かる場合もある。しかし正面 TEL のように視線方向への運動では、動画の手法でも識別困難である。ドップラー効果を利用することもできない。

### 2.2.4. 明暗差

真つ暗な惑星間空間を背景とする太陽のふち (limb) 画像と異なり、極端に明るい太陽が背景になる正面画像では、明暗差は悲劇的に小さくなる。しかも高度が低くなるほど指数関数的に光り輝く低高度コロナに取り囲まれているので、識別はますます困難になる。

### 2.2.5. 解像度

たとえ明暗差がわずかでも、境界が明確ならば識別は容易である。しかし対象がプラズマであるから、境界の濃淡は連続的であり、輪郭がピンボケ状態を呈するのは宿命である。

以上「大きさ」、「形」、「運動」、「明暗」、「輪郭」の何れを採っても、正面画像では劣る条件ばかりである。例えば側面に派手な装飾を施して他のビル群を圧してそびえる世界一の超高層ビルでも、真上 (正面) から見下ろした航空写真では、背の低い明るいビル群に囲まれ

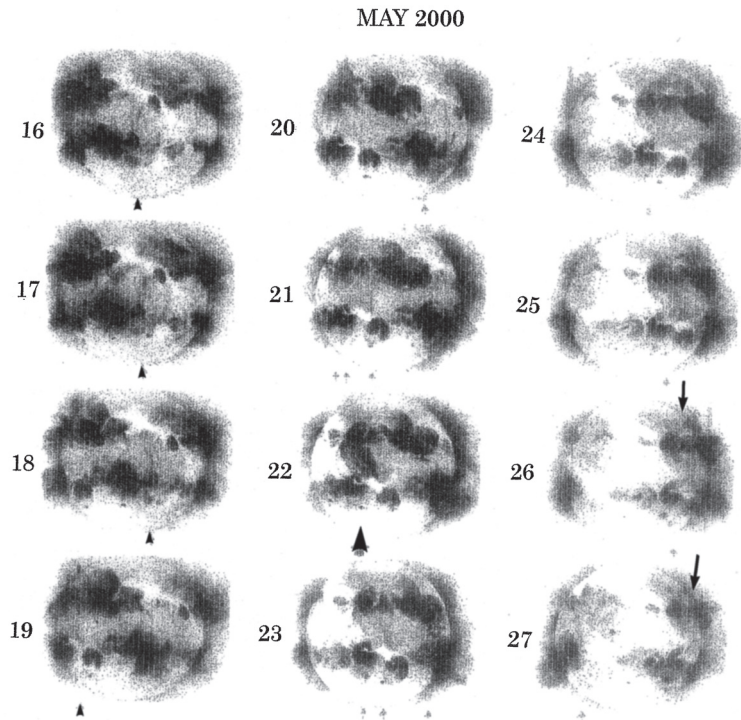


図 10A 2000年5月22日のTEL現象と、その前後の16-27日のようこうSX全面画像。三角矢印がTEL現象の位置を示し、大きい矢印は最大の爆発を示す。下向き矢印はアーチ構造を示す。  
 Fig. 10A. Day-to-day SX-images of TELs during 16-27 May 2000. Thin arrows indicate TELs while the thick arrow is an explosion on 22 May. The downward arrow indicates the arch structure.

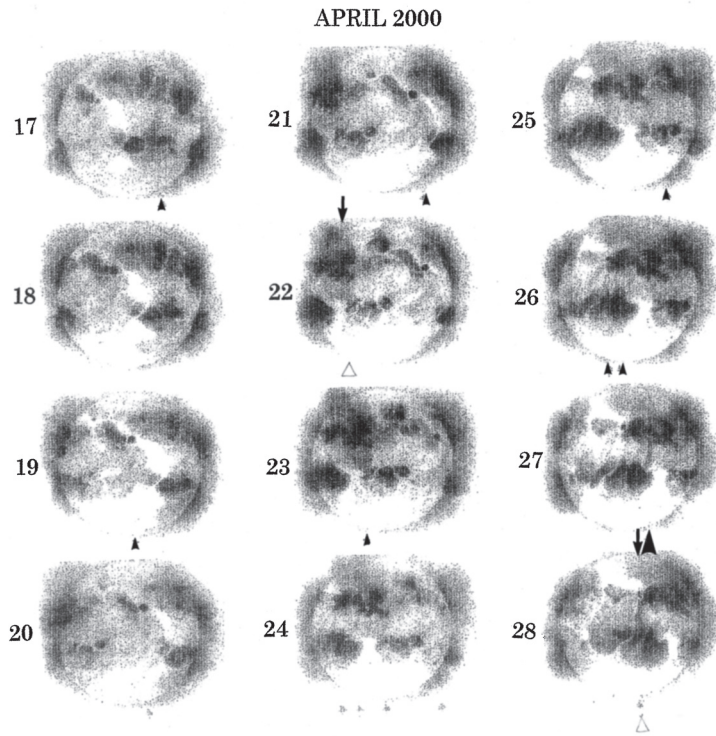
て、極めて識別困難になるのと同じであろう。

ただでさえ一見雑然とした太陽画像に、もし見慣れていない読者がおられたらまことに申し訳ないが、これらの困難さを充分念頭に置いて頂いた上で、いよいよ次項から実際例について調べてみよう。

### 3. TEL現象の調査

#### 3.1. 逐日調査

「ようこう」のSX全面画像すべてを調査して、ディスク正面付近で太陽の磁気赤道を超えて南北両半球にまたがる曲線状の線條をすべてTELとして収録した。TEL現象は太陽正面付近で発生すると、前項で述べたように、かすかにしか見えない。この難しさが今までTEL型Sc嵐の発見を遅らせた原因とも言えるので、読者に将来のTEL型磁気嵐研究の難しさの程度を正しく認識してもらうためにも、識別しがたいとのご批判を承知の上、敢えて3例を示すことにする。比較のためTEL爆発をしたと思われる当日の前後数日間の全面画像



**図 10B** 2000年4月27日のTEL現象と、その前後の17-28日のようこうSX全面画像．三角矢印がTEL現象の位置を示し、大きい矢印は最大の爆発を示す．下向き矢印はアーチ構造を示す．  
*Fig. 10B. Day-to-day SX-images of TELs during 17-28 April 2000. Thin arrows indicate TELs while the thick arrow is an explosion on 27 April. The downward arrow indicates the arch structure.*

を調査して、TELの消長を捉え、またこの領域が太陽のふち (limb) 付近にあるときに、アーチ構造になっていることを確認した (図 10A, B, C の中の下向き矢印)．もともとの画像では印刷の際つぶれてしまう可能性があるため、白黒を反転した画像で示してある．それでも画質は日によって異なるので、毎日条件を変えた数枚の画像を作成し、その中で最も鮮明な画像を選んで並べた．

なお前述 (1.2.4.) の3月29日現象に酷似した4重極子型TEL現象は、南北活動領域の緯度幅が狭いため、正面から見下ろした見かけ上のTELの長さは短い、アーチが低いので明るい (反転したこの図では濃い) 例として掲げてある (図 10C)．

注目していただきたい線条状TELの経度を上向き三角矢印で示す．TELは赤道をまたいで現れるので、南北の活動帯に挟まれた左右の直径 (赤道=緯度 $0^{\circ}$ ) 付近と、矢印 (経度) の交点付近にある南北の線条 (群) としてTELを捉えて頂きたい．大きな三角矢印は、自転している間に最も濃くなった、つまり発光・爆発したと思われる日を表している．

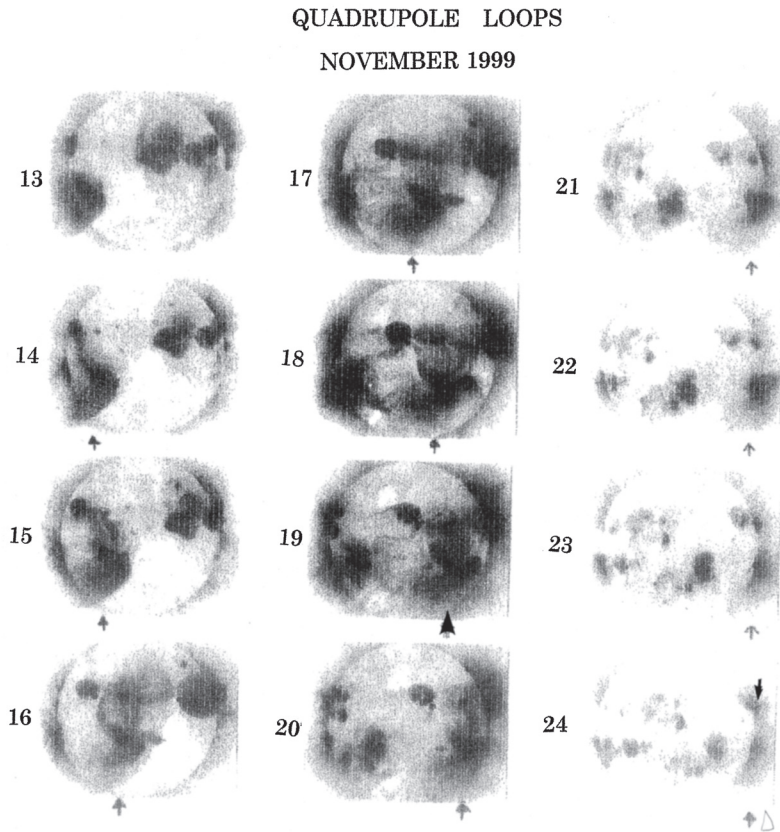


図 10C 1999 年 11 月 19 日の TEL 現象と、その前後の 13-24 日のようこう SX 全面画像．三角矢印が TEL 現象の位置を示し、大きい矢印は最大の爆発を示す．下向き矢印はアーチ構造を示す．

Fig. 10C. Day-to-day SX-images of TELs during 13-24 November 1999. Thin arrows indicate TELs while the thick arrow is a explosion on 19 November. The downward arrow indicates the arch structure.

### 3.2. TEL 現象と太陽の諸現象との関係

見出された TEL 現象の中から比較的明瞭なものを 3 例厳選して図 11A-C に示した．これらは同じフォーマットなので、まずフォーマットについて通説する．下段の 6 枚のパネルは太陽の正面画像 (Front view; 4 枚) と limb 画像 (Side view; 2 枚) である．Solar-geophysical data の原図は微妙に大きさが違うので、それぞれのパネルは 1/100 の精度で縮率を揃え、しかも注目すべき場所が印刷時に最大の拡大率になるように、各パネルを厳密に揃えた上で不要部分を切り除いてある．日付はそれぞれの右下に省略形で記されている．下向き矢印が TEL 爆発したと思われる日の SX 画像である．すでに前項で述べたように TEL 現象の正面画像は limb 画像に比べて宿命的に劣っている．SX 画像のどの部分を TEL とみているのかを示すために、他の 3 パネルの正確に同じ位置に赤線で示してある．別種の画像との位置合わせ



は太陽画像では非常に大切でかつ難しいので、衛星「ようこう」では重量制限の厳しい衛星上に軟 X 線望遠鏡のほかに軸をそろえた白色光望遠鏡をわざわざ搭載したほどである。したがって赤い線は決して安易な模式図ではなく、正確な位置合わせも兼ねている。赤い線は更に TEL の足元に反対極性を持った強い磁場領域があり (MAG. FIELD)、その領域が黒点かその残留域かを示し (SUNSPOT)、H $\alpha$  画像ではフレアも暗条 (Dark filament) も見られないことを示している。

図 11 の共通フォーマットとして左上部分に、 $R = 2.5R_s$  にあると仮定した太陽風流源面上の磁気中性線に重ねて、TEL の線條が転記されていて、コロナ域の磁場大規模構造を示している。図の右上には Kp のミュージック・ダイアグラムを示し、TEL 現象を含む Sc 嵐前後の地磁気変化の推移を示している。

このようなフォーマットに従って、以下に 3 例の TEL-Sc 嵐の例を示す。TEL 現象は太陽の正面で発生すると極端に判別しにくい。もっとも明瞭な一例だけ示せばよいという意見もあったが、3 例も掲げるのには次の理由があった。

1. TEL 現象は limb で捉える限り、可視的に観測される太陽現象の中で最大級の爆発現象であり、同じ TEL 爆発が太陽正面で発生すれば、地球にも最大級の嵐を誘起するはずである。しかし既に述べたように、太陽正面では宿命的に極端に検出にくい。故に磁気嵐研究の見地からは、検出困難の度合いを正しく知り、そのしきい値も正しく抑えた上で、将来それを克服していくことこそ、最も大切である。
2. 「南極資料」では、その編集方針からして、むしろ検出不能ぎりぎりまで愚直に示し、将来の TEL-Sc 嵐研究者に伝えることが、検出困難な観測技術や解析手法を開拓していくための最短距離である。
3. TEL-Sc 嵐にはイベントごとに個性があり、1 例だけで TEL の多様性を表現することはできない。

以上の見地から、以下 3 例を示す。

### 3.2.1. 1997 年 11 月 3-6 日現象

図 11A に見られるように、3 日の SX-コロナ画像のディスク正面付近に 2 本の長い線條が見られる。この TEL 構造は「ようこう」のホームページ画像ではもう少しはっきりと認められる。しかし印刷にするとどうしても淡い階調が消えてしまって、一見検出を困難にしている。しかしこの日から 3 日経過した 11 月 6 日の SX 画像で西縁を見ると、赤道をまたぐきれいなアーチ構造が認められる。このことから上記線條が TEL であることが推定できる。6 日に始まった Sc 嵐には原因となる太陽現象があるはずであり、Sc 発生の前日には惑星間空間で赤道を横断するループも観測されており、かすかではあるがそれらにすべて整合的に符合する構造が 3 日の SX 画像に見えている。しかもフレアもフィラメント消失も起こっていないとなれば、3 日の構造を TEL と同定せざるを得ない。しかもこの TEL は 11 月 3 日に地

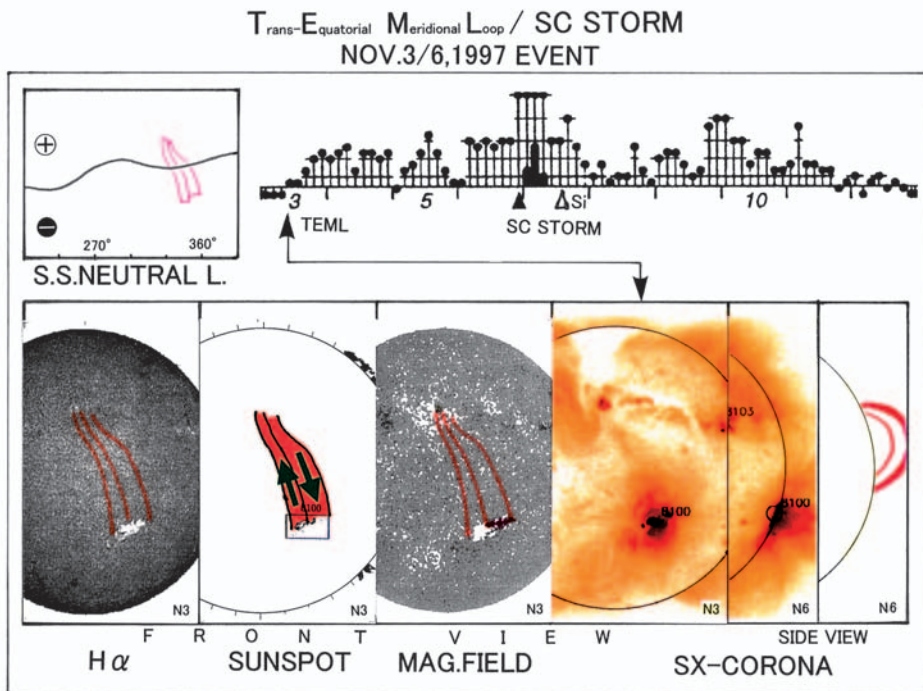


図 11A 1997年11月3-6日のTEL/STORM現象. (下段) 下向き矢印で示された軟X線画像上のTEL爆発に対応した太陽諸現象(左)と太陽のふち(limb)で見られたアーチ構造(右). (上段左)太陽風流源面上の磁気中性線(黒)に対するTEL線条(赤)の比較. (上段右)Kpのミュージックダイアグラム上で示されたTEL爆発日(上向き矢印)とSc嵐.

Fig. 11A. Relations among various solar and geomagnetic phenomena in connection with TEL. The lower panels indicate the front view of the solar images in H $\alpha$ , visible light, magnetic field, and soft x-ray, respectively, and side view of the SX corona. The red curves indicate the exact position of the TEL phenomenon. Note that neither filaments, flares, nor coronal holes can be seen in the vicinity of the TEL and that the TEL shows a clear arch structure at the west limb. The filaments, sunspots, and magnetic fields are viewed on the front side and the limb, respectively. The observed TELs are superposed on the synoptic chart of the neutral line at the source surface. See the time lag from the TEL to the Sc of the geomagnetic storm as expressed by the Kp diagram.

球方向に爆発したはずであるが、一旦爆発しても脱出速度に達しないプラズマが太陽重力によって引き戻されると、爆発前の磁場構造に従って再配置され、それを西縁でTELとして観測したと解釈される。このような復元再配置は、フィラメント消失でも頻繁に見られる現象であり、また前記したように11月6日現象に酷似したTEL爆発現象が、太陽の同じ領域で連続して発生していることから、上記復元再配置という解釈は、正しいと考えてよからう。

そこで上記のSX画像で見られるTELを黒点及び磁場画像と重ねて見ると、太陽黒点画像の逆平行矢印で示したような2本のTELから成り立っていると考えられ、それぞれのTELの両脚は、N(またはS)とS(またはN)磁極に根を下ろして、縦長で斜めの4重極子構造をしていることが推定できる。南半球の磁極は黒点に対応しているが、北半球では黒点と

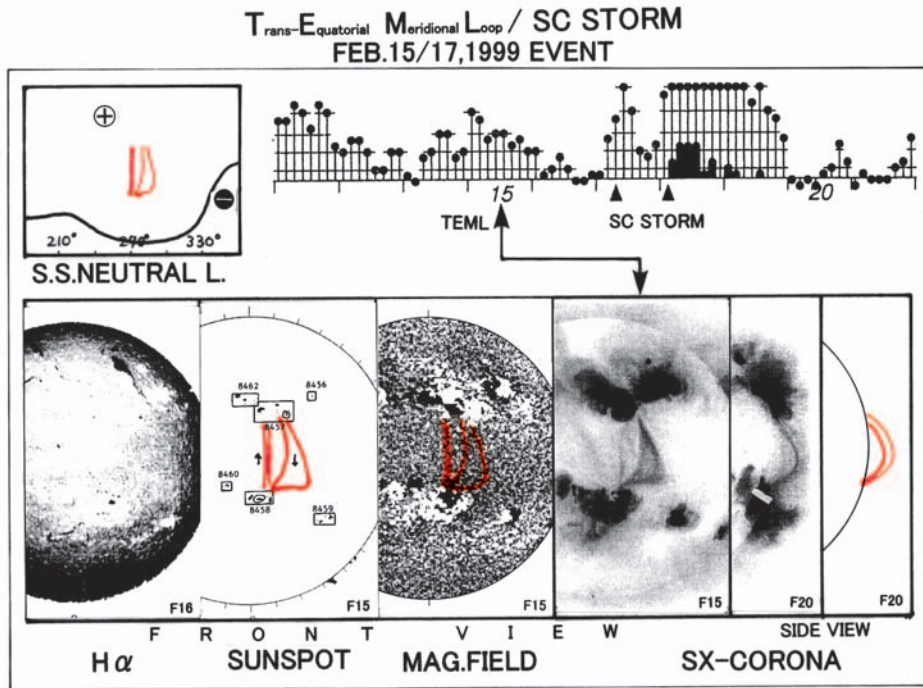


図 11B 1999年2月15-17日のTEL/STORM現象。(下段)下向き矢印で示された軟X線画像上のTEL爆発に対応した太陽諸現象(左)とlimbで見られたアーチ構造(右)。(上段左)太陽風流源面上の磁気中性線(黒)に対するTEL線条(赤)の比較。(上段右)Kpのミュージックダイアグラム上で示されたTEL爆発日(上向き矢印)とSc嵐。  
 Fig. 11B Relations among various solar and geomagnetic phenomena in connection with TEL. The lower panels indicate the front view of the solar images in H $\alpha$ , visible light, magnetic field, and soft x-ray, respectively, and side view of the SX corona. The red curves indicate the exact position of the TEL phenomenon. Note that neither filaments, flares, nor coronal holes can be detected in the vicinity of the TEL and that the TEL shows a clear arch structure at the west limb. The filaments, sunspots, and magnetic fields are viewed on the front side and the limb, respectively. The observed TELs are superposed on the synoptic chart of the neutral line at the source surface. Note that the southward magnetic field of the TELs coincides with the southward field at the source surface. Note also that twin TELs would give rise to twin Scs of the storm.

しては消失し、残留双極磁域に対応している。H $\alpha$ 画像と対比すると、TEL部分に暗条(Dark filament)をはじめフレアなど特別な現象はなにも認められない。このことから本研究で指摘されたTELに伴う磁気嵐は、これまでのフレア-Sc嵐やフィラメント消失-Sc嵐とは異なる、新種のTEL-Sc磁気嵐であるという以外の解釈は見当たらない。

なお、TEL群をsynoptic chart上で流源面磁気中性線と重ね合わせて見ると、この中性線とほぼ直交しながら、中性線に沿って並んでいることが分かる。このことから、並列配置している2本のアーチ桁の上に、モノレールのような流源面中性線が載っている磁場の立体構造が推定できる。

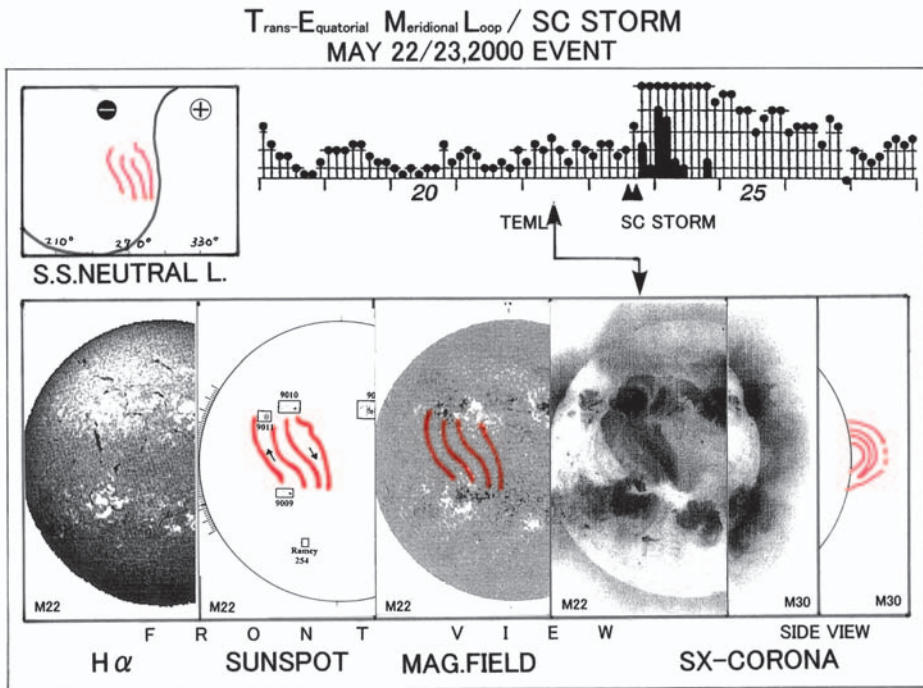


図 11C 2000 年 5 月 22-23 日の TEL/STORM 現象. (下段) 下向き矢印で示された軟 X 線画像上の TEL 爆発に対応した太陽諸現象 (左) と limb で見られたアーチ構造 (右).

Fig. 11C. Relations among various solar and geomagnetic phenomena in connection with TEL. The lower panels indicate the front view of the solar images in H $\alpha$ , visible light, magnetic field, and soft x-rays, respectively, and side view of the SX corona. The red curves indicate the exact position of the TEL phenomenon in question. Note that neither filaments, flares, nor coronal holes can be detected in the vicinity of the TEL and that the TEL shows a clear arch structure at the west limb. The filaments, sunspots, and magnetic fields are viewed on the front side and the limb, respectively. The observed TELs are superposed on the synoptic chart of the neutral line at the source surface. Note that the distinct southward TELs are oblique to the source surface neutral line and may give rise to twin Sc strong geomagnetic storms within the short travel time.

図 11A の右上に示した Kp-ダイアグラムで, 11 月 3 日に太陽で TEL が発光 (爆発) してから 3 日後の 11 月 6 日に地球で Sc 型磁気嵐が発生している. 図 12 に示すように太陽-地球間の太陽風空間で磁気ロープが観測されているから, 3 日に太陽正面で爆発した TEL が磁気ロープとなって太陽風空間を飛来し, 地球磁気圏に衝突して磁気嵐を起こしたと考えられる. なお 11 月 7 日には Si 現象がみられるが, 磁気嵐中の Si は従来軽視されて, しばしば報告が省略される. しかしこの重要性については 4. で再述する.

### 3.2.2. 1999 年 2 月 15-17 日現象

図 11B の下向き矢印で示された SX 画像に見られるとおり, 西側の 2 本の TEL と, 東側の一本のかすかな TEL の 2 成分から成り立っており, MAG. FIELD 画像から, 両側の TEL の

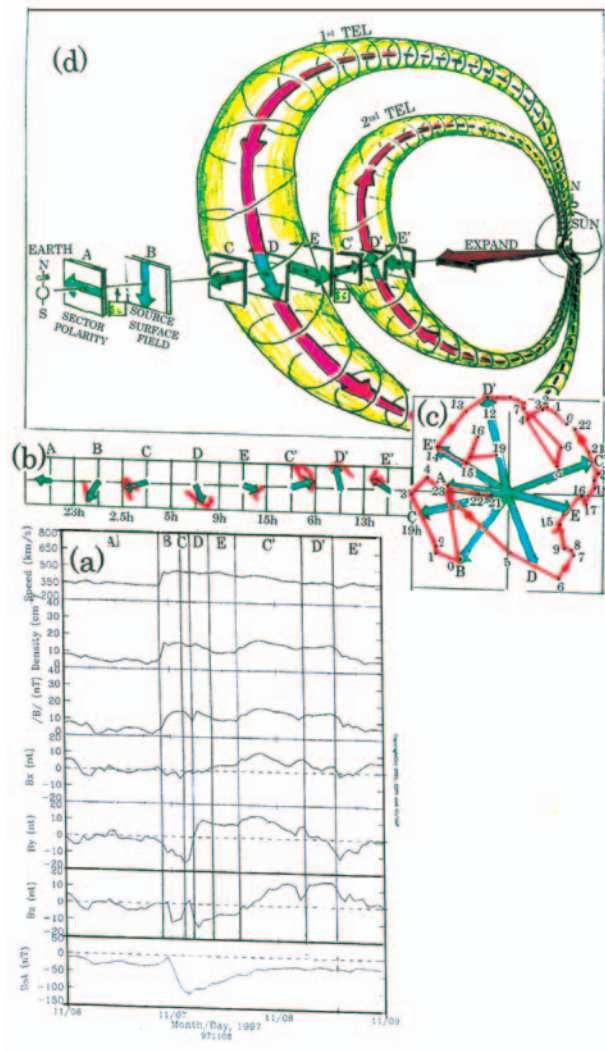


図 12 (a) WIND 衛星で観測された太陽風の諸変量. 以下との比較を容易にするために A-E' と 8 分割されている. (b) (a) の By と Bz 成分から作成されたホドグラフ (赤) とベクトル (青矢印). (c) (b) をまとめた総合ホドグラフ. きれいに E → S → W → N → E に回転しており, 2 個の flux rope から成っていることを示している. (d) 図 11A と図 12a-c などから構築された惑星間空間に広がる TEL 型 flux rope のモデル. 2 本のロープがそれぞれ Sc-storm と, Si-recovery phase によく対応している. 実際のロープは, この図で示すよりも経度方向に広がっていたと考えられる.

Fig. 12. (a) The solar wind parameters observed with the spacecraft, WIND, which are separated into 8 intervals from A to E' in order to facilitate the following comparison. The bottom panel indicates the geomagnetic Dst index. (b) The magnetic hodographs (red) and the vectors (blue arrows) as composed from By and Bz in (a). (c) The synthetic hodograph (red) and vectors arrows from A through E'. (d) The two interplanetary flux ropes as inferred from Figure 11A and Figure 12c. The first rope (left) and the second rope (right) may be responsible for the Sc and the main phase, and Si and recovery phase, of the storm, respectively. *n* (thin lines) are well explained by the HAF model (thick lines).

主軸磁場は2本共南向きである。TELの位置は流源面中性線に対して北にずれているが、太陽の主磁場と極性が合致しているため、二枚貝構造太陽磁気圏の、北側貝殻を主にこじ開けて地球に到達したであろう。2本のTELは立て続けに爆発して17日、18日という2個のScから成る嵐を誘発したと思われる。一般に太陽面上のA地点でフレアが発生してから続けて、Aと離れたB地点で2発目のフレアが発生することがある。これは一発目のフレアによる擾乱がMoreton波などを通じてAからB地点に伝わり、そこで2発目のフレアを誘発すると考えられており、2発目をSympathetic flareと呼ぶ。TELはフレアよりもはるかに激しい擾乱がコロナ領域のはるかに広い範囲にわたって爆発的に広がる現象なので、図11A B Cのように隣接しているTELが存在すると、1発目のTEL擾乱が直接Y方向に伝わって、隣接するTELに爆発を誘発し、図12のようにR方向に重なる2本の磁気ロープを発生する機構が十分考えられる。従って発生する領域によってそれぞれSympathetic TEL（またはSympathetic flux rope, またはSi, Sc）などと呼ぶことができよう。

### 3.2.3. 2000年5月22-23日現象

図11C中の下向き矢印で示されたSX画像ではかなり明るい（反転してあるので濃い）TELが認められる。何本もの線条から成り立っているが、MAG. FIELD画像と比較すると、少なくとも西側数本については主軸磁場は南向きである。線条は流源面磁気中性線とは斜交関係にあるが、フィラメントの場合も（活動性であれば尚更）中性線と斜交関係にあるという観測事実と対比すると、磁場エネルギーを貯め込む機構として示唆を含んでいる可能性がある。激しいTEL爆発を暗示する現象が観測された翌日に、2個のScと $K_p = 8$ ,  $Dst = -147$ に達する大磁気嵐が生じたが、これは西側の南向き線条のうちの2本が立て続けに爆発したと考えれば、磁気嵐の激しさも到達時間の短さもよく符合する。

なお、本論文では正面画像でのTELの識別度を最優先にして3例を選んだ結果、偶然3例とも双子のTELであった。しかし単独のTELも同じくらい観測されていることを付記しておく。

## 4. 太陽風領域のTEL型磁気ロープ

太陽でTEL爆発が観測されたのちに太陽風領域でWIND衛星が観測した太陽風の諸パラメータの一例を、図12aに示す。のちにモデルと細かく対比するために、記録をA, B, C, D, E, C', D', E'の8部分に分割し、太陽風磁場の $B_y$ ,  $B_z$ 成分を合成してホドグラフ表示したのが図12bの赤線であり、各パネルのホドグラフ起点を青矢印のベクトルで示してある。8枚のパネルをすべてまとめたのが、図12cである。まず図12cの赤線ホドグラフで、太陽風磁場の方向が時間とともに $E \rightarrow S \rightarrow W \rightarrow N \rightarrow E$ 方向へと大きくきれいに回転しているところから、磁気ロープ現象であることが想定できる。しかも一本の磁気ロープごとに期待される回転は半回転である（図9A参照）。このようにして図12dに示すようなそれぞれ主軸の

磁場が南向きの C, D, E と、北向きの C', D', E' からなる 2 本の TEL 型磁気ループのモデルが構築された。

これを更に図 11A の太陽現象と比較すると、図の SUNSPOT パネルに示した南向きと北向きの 2 本の TEL が、太陽風領域で観測されたこの 2 本の磁気ループに、まさに対応している。図 11A では 2 本の TEL は経度を異にしているが、TEL はこのままの形ではコロナ域を飛び出さない。図 6 および 7 で示したように、磁場エネルギーの強いコロナ領域では、まず南北方向から二枚貝で挟まれるように抑えられるから、経度方向に膨らまされ、磁場が弱いコロナ域上部に達してから 2 枚貝を内側から突き破って太陽風領域に噴出すると考える。したがって 2 本とも太陽風空間では経度幅が広がっているから、1 機の WIND 衛星で発生経度の異なる 2 本の TEL を続けて観測しても不思議はない。なお南向き TEL に続いて北向き TEL が地球を襲った場合の Si 現象の意味については、次項で述べることにする。

## 5. 地磁気嵐

### 5.1. 激しい磁気嵐を起こす TEL

同じフォーマットで示した図 11A-C (および本論文では省略した図 D-H) の Kp ダイアグラムを通覧すると、すべてのイベントを通じて、太陽ディスク正面付近で TEL の発光現象が観測されてから、その後 1-4 日経過すると地球で Sc 嵐が発生している。この時間間隔は太陽高速プラズマの到達時間として極めて妥当である。さらに図 11A で示したように南向き TEL が北向き TEL に比べて大きな磁気嵐を誘発することはもちろん、図 10C で示したように明瞭で明るい (=濃い) TEL ほど到達速度は大きく、激しい磁気嵐を伴う傾向があると思われる。図 11 で TEL を 3 例に厳選した結果、偶然 2 本の TEL が連続的に飛来するケースが多かったが、本研究の限りでは単独飛来のケースも同じくらい多い。

### 5.2. Multiple TEL

地磁気変動において、Sc と Si をその部分だけ取り出すと、地球に現れた応答は同等であることが知られている。それにもかかわらず Si が軽視されているのは、直後に Kp の増加を伴わないという定義に起因する。特に磁気嵐中に発生した Si は、大きなものでも無視される傾向がある。ところが図 11A において、Sc のあとに南向き TEL が襲って Dst = -104 の磁気嵐主相を誘発したあと、Si が発生して北向きの TEL が襲い、擾乱が収まって磁気嵐を収束させている。一方図 11C の場合、同じ 2 本の TEL が襲っても、両方とも南向きだと、それは Double Sc として認定される。従って磁気嵐中の Si については、その役割を再認識する必要がある。

Double TEL が磁気嵐を誘起する場合は、磁気嵐の初相、主相、終相の長さ、つまり磁気嵐の形状研究にかかわってくる。

### 5.3. 太陽 limb の効果

太陽 limb で観測される TEL は、地球方向とは明らかに直交する西方または東方にプラズマが放出すると思わせた。しかし第 1, 2 章で採り上げた過去の太陽 limb の大 TEL について、本研究で念のために改めて調査してみると、そのほとんどのイベントの後で、磁気嵐級の地磁気擾乱が認められた。地球には影響を及ぼさないだろうとの先入観を激しく反省するとともに、影響を及ぼす経度範囲がほとんど  $\pm 90^\circ$  という広範囲に及ぶことに、驚かざるを得ない。フレア効果についても、太陽の自転効果によって、西側への偏りが報告されていたが、TEL についても今後改めて嵐発生への経度効果を調べる必要がある。

## 6. 結論

以上の観測データの解析から、TEL 型 Sc 嵐に関して次のような形態論的モデルが推論される。

- 1) 地磁気嵐の発生起源である太陽現象として、従来のフレア、フィラメント消失、コロナホールのほかに、第 4 番目の TEL 型爆発現象が提唱された。
- 2) この Transquatorial loop の爆発現象は、太陽 limb で発生する場合は、太陽の可視的現象としては最大級のものとして研究者の目を引いているが、太陽正面付近で発生すると、太陽現象の宿命として、極端に検知しにくくなる。これは現象の規模、形、運動、明暗差、解像度のいずれについても、見掛け上正面現象は宿命的に劣るからであるが、検出の困難さは決してその研究の重要性を損なうものではない。本研究では太陽 SX 正面画像において、赤道をまたいで南北に走る線条構造は、地球方向に爆発中の TEL であるという事実を見出したので、後に続く研究者によって太陽正面画像における TEL 現象の解像度を上げる観測的・解析的手法が開拓されることを切に希望する。
- 3) TEL 爆発のメカニズムについて、形態論的モデル (図 6, 7) が提出された。
- 4) WIND 衛星による観測データから、南北方向に磁気主軸を持つ惑星間空間磁気ロープが想定された。
- 5) これらの噴出モデルや磁気ロープは、観測された太陽現象・太陽風現象や磁気嵐の性質をきわめて調和的に説明した。

## 7. 討論

本論文で導いたのは形態論的モデルなので、主に次の項目は、これからの研究にゆだねられる。

### 1) 加速・発光機構

TEL 状に配置していたプラズマがどのようなエネルギー注入機構によって突然発光し、上昇加速されるかのメカニズムは目下のところ不明である。相対的に磁気エネルギーが卓越して



いるコロナ域現象なので、加速には磁場が関わっている可能性が多分にある。TELの両脚のいずれかの根元でフレアか「ようこう」衛星で見出だされたマイクロフレアがきっかけとなっている可能性もあり、「ひので」衛星データを精査することを計画準備中である。この可能性に対して、観測された太陽のTEL軸が、子午面に対して北東—南西方向に傾いている傾向が見られたのは、東西型ループとの再結合を考えると示唆的である。

2) 太陽の大気圏におけるTELで、その主軸磁場の向きは1/2の確率で太陽主磁場の向きと順平行か逆平行になるはずである。どちらもCMEとなって太陽を離れることが考えられるが、このうち逆平行のものについては、上昇を始める瞬間から主磁場と次々に再結合を起こして勢力を削られる可能性がある。一方太陽活動は明瞭な22年周期を持つのに、地磁気活動のそれは明瞭ではないのが謎とされてきた。太陽の主磁場は22年周期で反転するのに磁気嵐は南向き成分にしか反応しないことを考えると、上記の可能性は、地磁気活動に関する長年の謎を解くかもしれない。

3) TEL爆発は連鎖的に発生する傾向があるようである。TELから他のTELへの直接伝搬なのか、Sympathetic flareなどのように間接伝搬なのか、なども今後の研究に委ねられる。

4) TELの強さを表す指数の設定、指数と到達時間や磁気嵐規模との関係、指数とTEL発生の相対経度との関係、指数と過去のlimbで観測されたTELとの関係など、今後の研究者に引き継ぐ問題は多い。

## 謝 辞

NICT (情報通信研究機構) の亘慎一氏には大変有益な討論を頂いたので感謝する。元群馬大学教授の高橋忠利氏と、東北大学の岩井一正氏にはデータ解析上のお世話になった。

国立極地研究所には本研究に対して共同研究費を頂き、厚く感謝する。特に山岸教授をはじめ、超高層部門の先生方には絶えずご激励やご援助をいただいた。また高濱信子氏と安養寺春子氏には事務手続き上大変お世話になり、感謝する。

## 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, doi: 10.1007/s11214-005-8052-3.
- Bartels, J. (1932): Terrestrial-magnetic activity and its relations to solar phenomena. *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, **37**, 1–52, doi: 10.1029/TE037i001p00001.
- Carrington, R. C. (1859): Description of a singular appearance seen in the sun on September 1, 1859. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **20**, 13–15.
- Dere, K. P. *et al.*, (1999): LASCO and EIT observations of helical structure in coronal mass ejections. *Astrophys. J.*, **516**, 465–474, doi: 10.1086/307101.
- Hanaoka, Y., Kurokawa, H., Enome, S., Nakajima, H., Shibasaki, K., Nishio, M., Takano, T., Torii, C., Sekiguchi, H., Kawashima, S., Bushimata, T., Shinohara, N., Irimajiri, Y., Koshiishi, H., Shiomi, Y., Nakai, Y., Funakoshi, Y., Kitai, R., Ishiura, K. and Kimura, G. (1994): Simultaneous observations of a prominence

- eruption followed by a coronal arcade formation in radio, soft X-rays, and  $H\alpha$ . *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **46**, 205–216.
- Joselyn, J. A., and McIntosh, P. S. (1981): Disappearing solar filaments: a useful predictor of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **86** (A6), 4555–4564, doi: 10.1029/JA086iA06p04555.
- Krieger, A. S., Timothy, A. F. and Roelof, E. C. (1973): A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. *Sol. Phys.*, **29**, 505–525, doi: 10.1007/BF00150828.
- Lepping, R. P., Jones, J. A. and Burlaga, L. F. (1990): Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. *J. Geophys. Res.*, **95** (A8), 11957–11965.
- Marubashi, K. (1986): Structure of the interplanetary magnetic clouds and their solar origins. (COSPAR, SCOSTEP, and IAU, plenary meeting, 26th symposium on the physics of solar flares, 5th, Toulouse, France, June 30–July 11, 1986). *Adv. Space Res.*, **6**, 335–338, doi: 10.1016/0273-1177(86)90172-9.
- Saito, T. (1964): A new index of geomagnetic pulsation and its relation to solar M-regions, Part I. *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, **18**, 260–274.
- 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.
- 柴田一成・大山真満(2004): 写真集太陽—身近な恒星の最新像. 東京, 裳華房, 97p.
- Snyder, C. W., Neugebauer, M. and Rao, U. R. (1963): The solar wind velocity and its correlation with cosmic-ray variations and with solar and geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **68**, 6361–6370.
- Takahashi, T., Saito, T., Shibata, K., Kozuka, Y. Minami, S. and Mori, Y. (1994): Structure of the soft X-ray corona and its effect to the earth; quadrupole type and sea anemone type, ed. by Y. Uchida *et al.* X-ray solar physics from Yohkoh: proceedings of the International symposium on the Yohkoh scientific results, on February 23–25, 1993, Sagami-hara, Kanagawa. 305–311. (Frontiers science series. 10)
- Yashiro, S., Gopalswamy, N., Michalek, G., St. Cyr, O. C., Plunkett, S. P., Rich, N. B., Howard, R. A. (2004): A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft. *J. Geophys. Res.*, **109**, A07105, doi: 10.1029/2003JA010282.