

# 太陽光球面磁場から外挿される 太陽コロナ磁場の3次元構造

井上 諭

〈Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Justus-von-Liebig-Weg 3,  
37077 Göttingen Germany〉  
e-mail: inoue@mps.mpg.de



太陽コロナで観測される爆発現象「太陽フレア」は、コロナ磁場（特に活動領域磁場）のエネルギーの解放現象であるが、これらの現象を理解するためには太陽活動領域の3次元磁場構造を正しく理解する必要がある。その一方で、現時点では観測技術の問題上、磁場は太陽の表面である光球面上でしか測定できない。上空の磁場を推定するために、光球面の磁場を境界条件として、3次元のコロナ磁場を数値的に外挿する方法がある。「ひので」は、宇宙空間から高精度で太陽光球面の磁場3成分を観測し、高精度なコロナ磁場の外挿を初めて可能とした。本稿は、外挿された3次元磁場から得られた重要な結果や知見を紹介する。

## 1. 太陽コロナ・活動領域磁場

太陽活動領域磁場は太陽フレアなどの爆発現象を起こす源であり、その3次元の磁場構造を理解することは、太陽フレアなどの磁気活動を理解するうえでも極めて重要となる。その一方で、観測では太陽表面の磁場しか測定できないので、3次元磁場を知るためには、観測磁場を境界条件とした境界値問題を解く必要がある。フレアなどのダイナミックな活動現象が発生している最中を除いては、活動領域磁場はアルヴェンタイムスケールに比べて、ゆっくりと準平衡を保ちながら運動するので、その物理状態としては、磁場のローレンツ力と、プラズマのガス圧勾配と重力が釣り合うような電磁流体力学(MHD)平衡場を考えてやれば良い。さらに、フレアが発生するような太陽コロナの底部では、磁気圧がプラズマのガス圧に対して支配的であるような、低 $\beta$ プラズマ近似がよく成り立つと報告されている<sup>1)</sup>。その場合、MHD平衡場はプラズマのガス圧と重力の効果を

無視した、磁場のローレンツ力が0の条件

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

と磁場の無発散の条件

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

へと簡略化される。電流密度は、 $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B}$ に従う。これらの方程式系に従う磁場は、“フォースフリー磁場”と呼ばれる。方程式は簡略化された一方で、磁場も電流も空間の関数となるので、式(1)は非線形方程式となり、解析的に解くのは困難となる。

フォースフリー磁場は、磁場と電流が平行な関係にあるので、係数 $\alpha$ を用いて式(1)は、 $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$ と書くこともできる。たとえば、 $\alpha$ を定数と仮定すると、この方程式は線形方程式に帰結するので、適切な境界条件の下で解析的に解くことが可能である<sup>2)</sup>。この仮定に基づいて導出される磁場を、線形フォースフリー磁場と呼ぶ。その中でも、 $\alpha$ がゼロ、つまり全空間で電流が流れてい

ないという条件下で導出される磁場を、ポテンシャル磁場と呼ぶ。一方、フレアを起こすような現実的な活動領域では、強い電流が流れており、かつ $\alpha$ も空間の関数であるので<sup>2)</sup>、正しく磁場構造を理解するためには、近似を課さずに非線形方程式を直接解く必要がある。

## 2. 非線形フォースフリー磁場外挿

上記のような近似を課さずに、直接フォースフリーの式(1)と(2)を解いて得られる磁場を、「非線形フォースフリー磁場 (non-linear force-free field)」と呼ぶ。上述したように、解析的に解くのは困難なので、観測で得られる光球面磁場3成分を境界条件として、上空はフォースフリーを満たすように、数値的に磁場を外挿する必要がある。標準的な方法は、まず最初に初期条件として、観測磁場の法線成分を満たすようなポテンシャル磁場を用意する。次に、境界でポテンシャル磁場の接線成分を観測磁場の接線成分に置き換えることで(磁場をねじることに対応する)、観測磁場3成分を満たしながら、上空は式(1)と(2)を満たすような解に収束するまで反復計算を実施する。この反復計算法に関しては、今日までさまざまな方法が提案されている<sup>3)</sup>。ただし、線形フォースフリー磁場と異なり、任意に与えられた境界条件の磁場3成分に対して、フォースフリー解の有無や、あるいは解の一位性などは保証されないことに注意したい。

今から10年前の2006年の時点で、すでにいくつかの非線形フォースフリー磁場求解法が提案されていた。そこでSchrijverらは、図1(a)のような半解析的に導出された厳密なフォースフリー解<sup>4)</sup>(LL解と呼ぶ)の境界条件から、提案されている求解法を通して得られる非線形フォースフリー磁場が、どの程度の精度でLL解を再現できるかを検証した<sup>5)</sup>。その結果、求解法による解の依存性は顕著に見いだされた。ただし、この10年で求

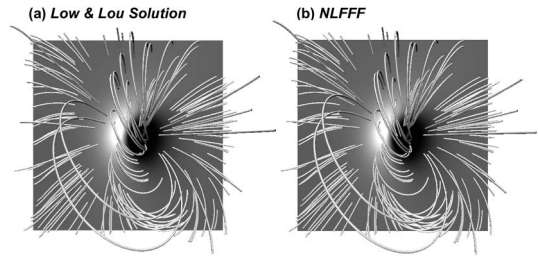


図1 (a) Low & Lou<sup>4)</sup>によって導出されたフォースフリーの厳密解(LL解)。(b)井上らによって開発された、MHD緩和法<sup>6)</sup>を用いて、LL解の境界値のみから、内部の磁場を外挿した結果。

解法自体もかなり洗練されてきており、たとえば井上らは、近年に彼らによって開発されたMHD緩和法が、図1(b)のように、LL解の境界条件から精度良くLL解を導出できることを報告している<sup>6)</sup>。他の方法でも、同程度の精度でLL解が再現されていることが報告されている。

ところが、実際の光球面磁場を用いてフォースフリー磁場外挿を行うと、状況は一変する。注意しなければならないのは、境界条件である光球面自体がフォースフリー条件を満たしてなく、その一方で、上空はフォースフリーを満たそうとするので、境界と上空との間に矛盾が生じてしまう。こういった矛盾は、考えている系全体のフォースフリー性を悪くするだけでなく、ソレノイダル条件(2)の満足性も悪くするので、エラーの処方箋などが必要になる。この問題に対して、たとえばWiegmannらは、光球面磁場の接線成分を誤差の範囲で修正して、不連続を緩和させる方法を提案している<sup>7)</sup>。

## 3. 観測された光球面磁場を用いたフォースフリー磁場外挿

2006年9月に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」<sup>8)</sup>は、宇宙空間から極めて高い精度の磁場3成分を観測しており、高精度の非線形フォースフリー磁場の外挿を可能にした。折しも、打ち

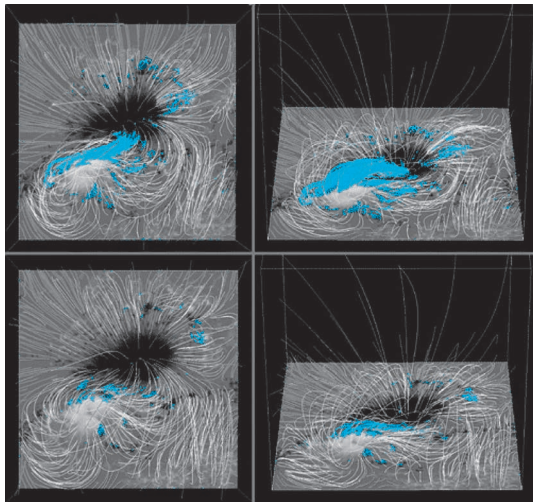


図2 Schrijver et al.<sup>9)</sup> によって導出された、活動領域10930の非線形フォースフリー磁場。X3.4クラスフレア前後での外挿磁場であり、白線は磁力線を表しており、強い電流領域が青で表現されている。

上げから3カ月後の2006年12月13日に、活動領域10930で巨大なXクラスフレア (X3.4) が発生し、「ひので」はフレア前後の光球面磁場の観測に成功した\*1。Shrijverらは、さまざまな非線形フォースフリー磁場外挿法を用いて、フレア前後のフォースフリー解を導出した<sup>9)</sup>。その一例を図2に示す。上図がフレア前の磁力線と強い電流が流れている領域をプロットしている。下図はフレア後である。これらの結果から、フレア後では磁力線のねじれが緩和し、強い電流密度領域もほとんど消失していることがわかる。このように、フレア前後の3次元磁場の構造の変化が示されたのは世界で初めてであり、「ひので」の画期的な成果の一つである。その一方で、問題面も具体化した。たとえば、磁場の自由エネルギーの値などが外挿方法に依存しており、(当時)多くの非線形フォースフリー外挿磁場が、Xクラスフレアを説明できるほどの自由エネルギーをもち合わせて

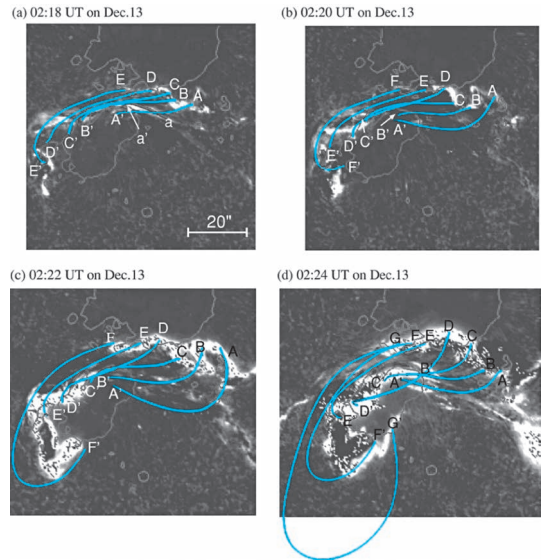


図3 Inoue et al.<sup>13)</sup> によって導出された活動領域10930の非線形フォースフリー磁場 (青線) と、「ひので」が観測したX3.4クラスフレアのツーリボンフレア (背景の白い領域) の比較。ねじれた磁力線の足元で、ツーリボンが強く増光していることがわかる。

ないことも指摘された。またDeRosaらによれば、磁場構造自体も外挿法によってかなり依存してくることが指摘されている<sup>10)</sup>。それにもかかわらず、非線形フォースフリー磁場は、フレアに至るまでの3次元磁場の時系列変化や<sup>11), 12)</sup>、安定性などの議論<sup>13)</sup>、さらにはフレア時のダイナミクスを示唆するなど<sup>14)</sup>、これまでにはない議論を可能とした。1例として、井上らによって再現されたフレア発生前の非線形フォースフリー磁場<sup>11)</sup>を、図3に示す。背景は、「ひので」がフレア時に観測したツーリボンフレアである。一般的に、フレアはねじれた磁力線によって引き起こされると考えられており<sup>15)</sup>、図3のねじれた磁力線の両足元が、増光されたフレアリボンに対応していることから、彼らはフレアを引き起こした3次元磁場の特定に成功した。さらに、磁力線のねじ

\*1 8月号に掲載された清水による解説記事の図2。

れなども定量的に議論し、理想MHD不安定性に対する安定性解析も実施している。これらの結果は、「ひので」が観測した光球面磁場を用いて初めて示された結果であり、「ひので」の重要な成果の一部である。

#### 4. 現在の動向と今後

「ひので」が観測した高精度の光球面磁場を用いて、高精度の非線形フォースフリー磁場外挿が可能となった。ただし、光球面磁場がフォースフリー条件を満たしていないといった問題などから、外挿された磁場にもいくつか問題が残る。それでも、コロナ中、あるいは活動領域の磁場の3次元構造を明らかにし、また理想MHD不安定性に対する安定性解析なども実施され、フレアの発生機構の議論も活発になされるようになった。ここ数年で、外挿されたフォースフリー磁場を用いた、MHDシミュレーションも実施され始めており<sup>16)-18)</sup>、フレア時の磁場のダイナミクスまでもが明らかにされつつある。

近年、特に光球面とコロナの間に生じる不連続を緩和させるために、光球面の接線成分磁場を用いない代わりに、 $H\alpha$ フィラメントや極紫外線画像で得られる磁力線構造に、見合うようなフォースフリー解を探す試みも提案されている<sup>19), 20)</sup>。また次世代太陽観測衛星SOLAR-Cが彩層磁場の観測を計画しており、彩層磁場は光球面磁場よりもフォースフリー条件をよく満し、かつ光球面とコロナとの間の緩衝地帯でもあるので、光球からコロナまでをスムーズに接続できる役割を担うことも期待される。今後、向上されるであろう観測技術に伴い、フォースフリー磁場外挿、あるいはMHD平衡場の外挿などの精度の向上も期待される。

#### 謝 辞

清水敏文氏から原稿について有益なコメントをいただきました。また、編集委員の上野悟氏にはたいへんお世話になりました。本記事で用いた図

の一部は、アメリカ天文学会の承認を得て文献9と13から引用しました。

#### 参考文献

- 1) Gary G. A., 2001, *Solar Physics* 203, 71
- 2) Sakurai T., 1989, *Space Science Review* 51, 11
- 3) Wiegelmann T., Sakurai T., 2012, *Living Reviews in Solar Physics* 9, 5
- 4) Low B. C., Lou Y. Q., 1990, *ApJ* 352, 343
- 5) Schrijver C. J., et al., 2006, *Solar Physics* 235, 161
- 6) Inoue S., et al., 2014, *ApJ* 101, 780
- 7) Wiegelmann T., et al., 2006, *Solar Physics* 233, 215
- 8) 常田佐久, 2008, *天文月報* 101, 638
- 9) Schrijver C. J., et al., 2008, *ApJ* 675, 1637
- 10) De Rosa M. L., et al., 2009, *ApJ* 696, 1780
- 11) Inoue S., et al., 2012, *ApJ* 760, 17
- 12) He H., et al., 2014, *JGRA* 119, 3286
- 13) Inoue S., et al., 2011, *ApJ* 738, 161
- 14) Guo Y., et al., 2008, *ApJ* 679, 1629
- 15) Priest E. R., Forbes T. G., 2002, *A&AR* 10, 313
- 16) Inoue S., et al., 2014, *ApJ* 788, 182
- 17) Amari T., et al., 2014, *Nature* 514, 465
- 18) Inoue S., et al., 2015, *ApJ* 803, 73
- 19) van Ballegoijen A. A., 2004, *ApJ* 612, 519
- 20) Aschwanden S., et al., 2013, *ApJ* 763, 115

### Three-Dimensional Coronal Magnetic Fields Extrapolated from the Photospheric Magnetic Field

Satoshi INOUE

*Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung,  
Justus-von-Liebig-Weg 3, 37077 Göttingen,  
Germany*

Abstract: It is widely believed that the solar flares are driven by the free magnetic energy stored in the solar corona. Therefore, in order to understand them, it is necessary to correctly understand the three-dimensional (3D) coronal magnetic fields. Unfortunately, since the magnetic fields can be measured only on the photosphere, the extrapolation based on the photospheric magnetic field is strong tool to extract the information of 3D coronal magnetic field. *Hinode* observes the photospheric magnetic field from space with unprecedented accuracy, which enables us to extrapolate the highly precise 3D coronal magnetic field. I review important results and new knowledge obtained from the extrapolated coronal magnetic field.