

恒星の磁極反転

平成 26 年 4 月 25 日受付

中 道 晶 香^{*1}
新 崎 貴 之^{*2}
池 田 優 二^{*1}

要 旨

地球は不規則に、太陽は規則的に磁極反転を繰り返す。磁極反転を再現する理論モデルとして、私達は同期現象に基づいた「結合スピンモデル」を提案し、地球と太陽の磁極反転を両方とも再現することを示した。このモデルが正しければ、対流が効く種類の恒星も磁極反転を起こすはずである。そこで、本学天文台の 1.3m 荒木望遠鏡に備わる高分散偏光分光観測装置 VESPolA を改修し、強磁場星と太陽型星の両方のスペクトル型の恒星の磁場極性をモニター観測し、磁極反転を起こしている恒星を発見し、理論モデルを検証することを目的として、2013 年 8 月と 10 月の約 10 夜に G 型、Ap/Fp, B 型など強磁場星の試験観測を実施した。試験観測では 12 天体を観測し、中分散 ($R=8,000$) かつ直線偏光モードのみではあるが、観測方法およびデータの取り扱い方法について検討を行い、必要な装置改修についてまとめた。

キーワード：磁極反転，同期現象，恒星，偏光分光観測装置，観測

1. 研究の動機

地球と太陽は、磁極の反転が繰り返されているが、その様相は大きく異なる。例えば地球では、磁極の反転は不規則な周期で繰り返され、1 億 6 千万年の間に数百回の磁極反転が起きている。直近の磁極反転は 78 万年前だが (Matsuyama 1927)、磁極が自転軸から 45 度以上傾くエクスカージョンはその後 18 回以上も起こり、磁極がふらついていることが判明している (図 1)



図 1：横軸に 1 億 6 千万年の時間を取り、正磁極と負磁極の時期を色分けしたもの

一方、太陽では、過去 400 年間にわたる黒点数の観測から (図 2)、約 11 年周期で規則的に黒点数が増減している。マウンダー極小期のように黒点数がほとんど観測されない時期もあり、長周期の変

^{*1} 京都産業大学神山天文台

^{*2} 京都産業大学理学研究科

動も存在する。なお、太陽の磁極は約 22 年周期で規則的に反転する。黒点は、磁力線が太陽表面に出てきた場所だと考えられているため、黒点数の変動は、太陽磁場の変動を表している。

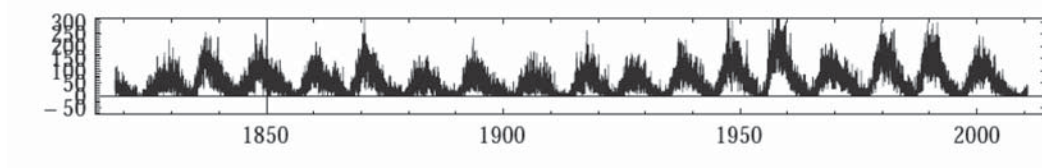


図 2：太陽黒点数の観測結果

しかし、磁極反転を起こすきっかけは解明されておらず、磁気流体力学のシミュレーションから反転のトリガーに迫ろうとする研究（例えば Kageyama, Miyagoshi & Sato, 2008）では、地球の自転速度と外核の粘性拡散速度との比を表すエクマン数は、実際には 10 の -15 乗のところを -7 乗が限度であるし、レイノルズ数も非現実的な値を使わざるを得ないなど、高信頼度、高精度のシミュレーションは困難であるという現状がある。また、複雑に絡み合ったさまざまな物理現象の結果として反転が再現されるため、反転の物理的エッセンスを得られにくいという問題もある。そこで、物理的エッセンスのみを抽出したモデルによって反転のトリガーを明らかにし、反転時期を予言可能な理論モデルを確立する研究が必要とされている。

我々は (Nakamichi, et. al. 2012), (Mori, Nakamichi, et. al, 2013) において、磁極反転のエッセンスを抽出した理論モデルとして、電流の巻き付きによって生成された磁場をモデル化してマクロなスピンのように表し、小さな複数のダイナモ要素に対応するスピンのように同期するモデルを考え、地球と太陽の両方の磁極反転を同じモデルで再現した。(図 3)

我々のモデルが正しければ、対流層を持ち、ダイナモ効果が働き、磁場を持つ恒星ならば、磁極反転を起こすはずである。一方、対流が効かない輻射優勢の恒星では、小さなダイナモ要素が無いため、磁極反転のような同期現象は起こらないと予想する。なお、我々以外では、「磁束輸送ダイナモモデル」という理論モデルが磁極反転理論として議論されている (Dikpati et al. 2009)。しかし、太陽以外の恒星の磁極反転を捉えた観測報告が無いため、恒星磁場における磁極反転現象の普遍性は未だ確認されていない。

そもそも、太陽と地球以外の恒星・惑星での磁極反転を長期モニター観測している例が無いのが現状である。長期モニターには、観測時間が豊富なホーム望遠鏡と高精度の高分散偏光分光装置が必要だが、両方の研究環境を整えているのはフランスの Donati のグループと本学神山天文台のみである。なお、強磁場星では短期のモニター観測が行われ、速い自転に伴う磁極の揺れは、例え

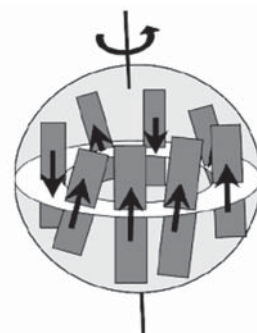


図 3：N 個のマクロ・スピン

ば J-F. Donati, et. al, 2008, MNRAS, 390, 545 など観測されている。そこで、ターゲットの恒星のスペクトル型の選定に関して予言力を持つ理論モデルへと拡張し、年間約 10 天体を選んで長期モニター観測を神山天文台で実施し、約 2 年以内に磁極反転を発見することを目標として設定した。我々のマクロ・スピン理論モデルの正しさを観測的に検証することが最終のゴールである。

2. マクロ・スピンモデルの現状と改良

地球の場合は、内部にある外核が流体鉄であり、地球の自転に伴って流体鉄が回転する。(図 4 の色付の部分) すると、自転車のライトに装備されているダイナモ発電機のように、電流を流す鉄が回転することによって磁場が生じる。生じた磁場がさらに電流を発生させるため、一度、地球磁場が発生すれば、流体鉄の回転によって磁場が増幅され、やがて安定値に近づくと考えられる。地球磁場の起源は、地球内部の流体鉄によるダイナモ効果である可能性が高い。

太陽の場合は、高温のためプラズマのガスが流体となっている。(図 5) 対流層は圧縮性の流体であるため、Taylor 柱は存在しない。しかし、太陽観測衛星「ひので」が詳細に捉えた粒状斑などのように、対流層には組織的な構造が観測されている。外側の対流層(図 5 の色付の部分)においてダイナモ効果が効いていると考えられる。

太陽のように対流駆動の恒星には、小さなダイナモが存在することが予想されるため、我々のマクロ・スピンモデルを同様に適用できるはずである。

コリオリ力が支配的な系では、非圧縮で密度一様な流体では流れが回転軸方向に一樣になることが知られている (Taylor-Proudman の定理)。実際、地磁気の先行研究の MHD シミュレーションでは、流体鉄の外核に Taylor 柱と呼ばれる柱構造またはさらに細かい構造のプリューム・シート構造が確認されている。Taylor 柱には電流が巻きつき、電流の向きは隣り合う柱で逆向きになる。

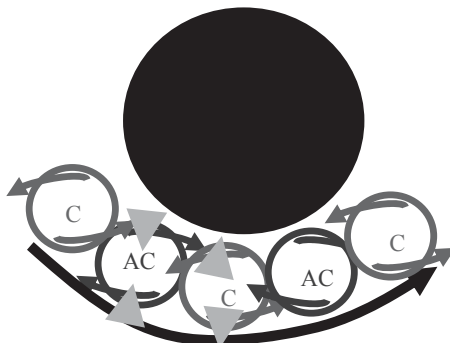
図 6 で C と記載しているものが「ふりほどき渦」、AC と記載しているものが「巻き



↑ 図 4：地球の内部構造



↑ 図 5：太陽の内部構造



↑ 図 6：内核の周囲の外核に Taylor 柱が並ぶ様子

込み渦」である。磁場を増幅する効果を持つのは AC（巻き込み渦）のみである。我々は、AC 電流の柱への巻き付き（巻き込み渦）によって生成された磁場をモデル化してマクロなスピンとして表す理論モデルを提案した。スピン同士は相互作用し、各スピンは地球のコリオリ力とも相互作用をする。スピンは AC 渦柱の数 N だけ存在する。各スピンは、自転軸から角度 θ だけ回転した方向を向き、スピンは平面上を回転する。

(図 7)

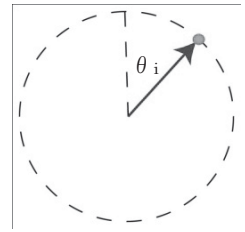


図 7 : i 番目のスピン

N 個のマクロ・スピンはその場で 1 次元回転する。スピンは当初ランダムな方向を向いているが、我々のシミュレーションの結果、或る時、急にバタバタと同期して向きが揃う時期が来ることが判明した。

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \dot{\vec{s}}_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \dot{\theta}_i^2$$

$$V = \mu \sum_{i=1}^N (\Omega \cdot \vec{s}_i)^2 + \frac{\lambda}{2N} \sum_{i < j}^N \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j$$

$$L = K - V$$

$$\frac{d(\partial L / \partial \dot{\theta}_i)}{dt} = \frac{\partial L}{\partial \theta_i}$$

全てのスピン同士の相互作用を考慮するモデルの運動方程式は左式ようになる。シミュレーションの結果、このモデルで磁極反転を起こす際、摩擦力とランダム力は不要であることが判明した。これは保存系で近似するモデルとなっている。

我々は、この 1 次元マクロ・スピンモデルの次元を上げ、より現実に近い理論モデルを構築しようとしている。2013 年秋にはスペインから Ferriz-Mas 氏が本学神山天文台へ来台し、マクロ・スピンモデルの改良に関する議論を深め、一定の進展を得た。今後、結合スピンモデルをさらに発展させ、磁極反転が起こる時間間隔を恒星の温度や質量の関数として捉え、恒星の種類と磁極反転の起こり易さについて予言力を持つ理論モデルへ発展させる。結合スピンモデルに含まれるパラメーターは、恒星の基本物理パラメーター（スペクトルタイプ、組成、自転速度）と複雑な物理現象を介して関連している。神山天文台における観測によって磁極反転現象との相関を調べることができるため、その結果を用いて理論モデルの改良を行うことによって初めて、恒星の磁場活動に関する普遍的な描像の理解が得られる。

3. ターゲット天体の試験観測

観測には、京都産業大学神山天文台 1.3m 望遠鏡に常設されている可視高分散偏光分光観測装置 VESPolA を用いた (図 8)。VESPolA は広波長域 (400-850nm) において高波長分解能 ($R \sim 8,000$) を維持しつつ、一度に $\delta \lambda = 150-300\text{nm}$ の波長域を偏光測定精度 $\delta P < 0.1\%$ で測定可能な偏光分光観測装置であり、echelle 分光系を用いて高分散及び広帯域化を維持す



図 8 : 1.3m 望遠鏡と VESPolA

するという、プロトタイプ装置である LIPS の特徴 (Ikeda, et. al, 2003) を受け継いでいる。

観測ターゲット天体は、A,F,G 型主系列星を中心に選定した。結合スピモデルからは、対流層が多く、かつ自転が速い天体ほど磁極反転が起こりやすいと予想されているが、現実の恒星においては対流層は低温度星ほど、自転速度は高温の星ほど大きいことが知られており、恒星の大部分を占める主系列星においては両方の条件を満たす恒星は存在しない。したがって、もっとも磁極反転が起こりやすいのは、両者が拮抗するであろう中温度の星（つまり、A,G,F 型星）であることが予想されるためである。具体的には、太陽に関する情報を適用できる複数の G 型主系列星と、磁場を検知しやすい強磁場星 (Ap/Fp 星) についての FeI, FeII 吸収線、水素のパルマー線 (Bagnulo, et. al, 2006) の偏光分光モニター観測を実施した。偏光ストークスプロファイル $S(\lambda) = (I(\lambda), Q(\lambda), U(\lambda), V(\lambda))$ の時間変動から得られる磁極の振れの様子から磁場活動度を推定し、磁極反転を行う恒星の発見を目指す。

試験観測では、現行の直線偏光モードを用いて 53Cam, HD21699, HR7575, HR8216, β CrB, 70Oph, ζ Her, 51Peg, ξ Boo, 16CygA, 16CygB, σ Dra の 12 天体を中分散 $R=8,000$ で偏光分光観測と解析を行った。このうち、2013 年 10 月に観測した Ap 型星 53Cam の結果を以下に示す。(図 9)

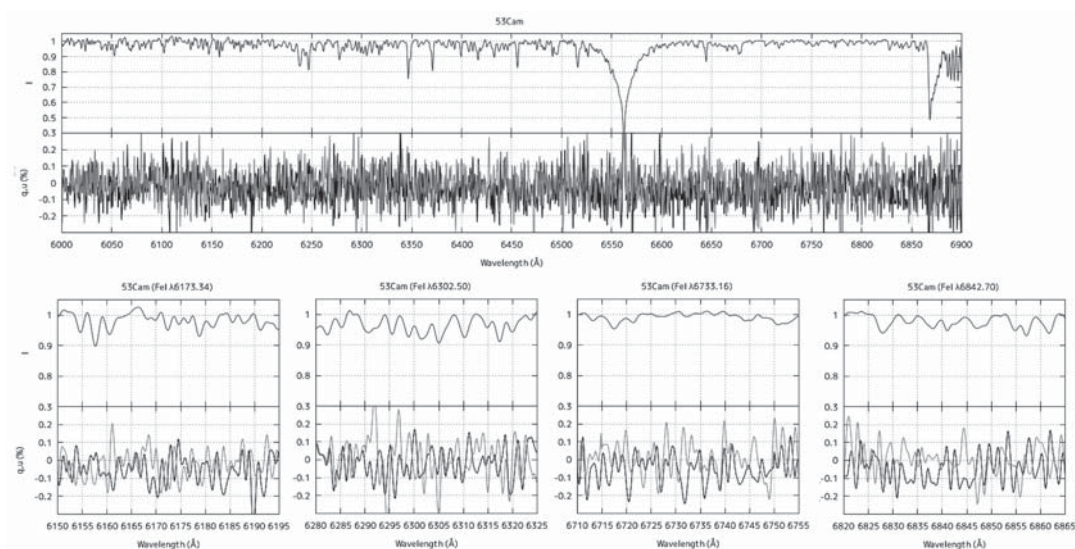


図 9：Ap 型星 53Cam の偏光分光観測結果

縦軸上側がストークス I, 下側がストークス Q, U, 横軸は波長を表す。

下段の 4 カ所のスペクトル拡大図はそれぞれ FeI 6173.34 Å, FeI 6302.50 Å, FeI 6733.16 Å, FeI 6842.70 Å 付近。

試験観測から VESPoIA の偏光測定精度は満足できることが判明したが、ゼーマン・スプリットは検出できていない。VESPoIA の現状の分解能は $\Delta\lambda = 0.62 \text{ Å}$ (5,000 Å の場合) であるため、恒星

磁場によるゼーマンスプリットを検出するためには、ランダの g 因子が $g = 1$ のラインに対しては $B > 110\text{kG}$, $g = 2$ では $B > 60\text{kG}$, $g = 3$ では $B > 40\text{kG}$ の磁場を持つ恒星であることが条件である。53Cam の恒星磁場は 12.7kG のため、分離幅の検出は厳しかったと考えられる。そこで、波長分解能を上げる改修も必要である。

4. 観測装置の改修計画

試験観測と解析の結果をふまえ、観測装置の改修計画を以下にまとめた。本改修は、平成 26 年度の科研費を使用して順次行っていく予定である。

恒星磁場の時間変動の検出のため、高分散偏光分光観測装置 VESPoA (図 10) に円偏光モードを追加することと、試験観測から明らかになった分解能の不足を補うため、高波長分解能化は必須である。円偏光モードには 5 枚のアクリルで構成された新しいタイプの無色波長板 (Ikeda et al. 2003) を用いるが、この技術を用いた波長板は世界的にもキエフ天文台のグループしか成功していないため、希少である。なお、古くから用いられている広帯域無色波長板 (Pancharatnam 型無色波長板) は、3 枚の SiO_2 と MgF_2 の屈折率が異なる一軸性結晶を貼り合わせて用いているため、その境界面で生じる fresnel 多重反射による ripple が発生し、それが高分散偏光分光における高精度化の妨げになる (Donati et al. 1999)。

高分散化のためには、より細いスリットを導入する必要がある。VESPoA では、天体光がスリットを通過する時に発生する機器偏光を抑えるために、誘電体材質であるアルミナ製スリットを使用する。アルミナは延性加工が困難な材料であるため、薄いスリット板 ($\sim 100\text{ }\mu\text{m}$) に対し、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下の幅の加工を行うには、加工の条件出しも含めての研究開発が必須である。

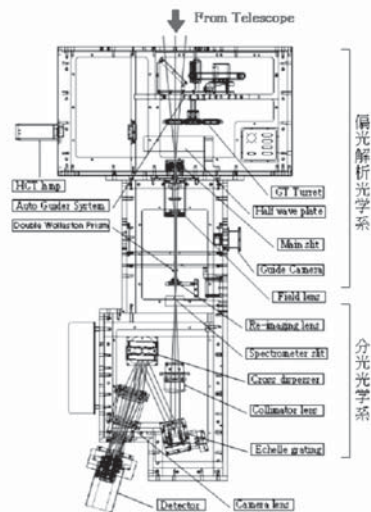


図 10： 改修前の VESPoA

謝辞

本研究は本学の平成 25 年度「新規研究課題挑戦支援プログラム」に採択され、引き続き平成 26 年度科研費「基盤研究 (C)」での研究継続が内定した。京都産業大学のサポートに感謝する。

参考文献

- Bagnulo, et. al, 2006, A&A, 456, 329
- Dikpati et al. 2009.SSRev, 144, 76
- Ikeda, et. al, 2003, Proc. of SPIE, 4843, 437

Kageyama, Miyagoshi & Sato, 2008, Nature 454, 1106

Matsuyama 1927, Japan J. Astron. Geophys., 4, 121

Nakamichi, Mouri, Schmitt, Ferriz-Mas, Wicht, Morikawa, 2012, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 423, 2977

Mori, Nakamichi, et. al, 2013, Physical Review E 87, 012108

Magnetic Polarity Reversal of Stars

Akika NAKAMICHI

Takayuki ARASAKI

Yuji IKEDA

Abstract

We proposed a general model to describe the magnetic polarity reversals in planets and stars. The synchronization of the macro-spins in this model well describes both the intermittent magnetic reversals in the Earth and the quasi-periodic ones in the Sun. If our macro-spin model were actually general, then many of the convection dominant stars must show magnetic reversals. Thus we set our goal: We try to discover the stellar magnetic reversals by monitoring the Solar type and the stars associated with strong magnetic fields. For this purpose, we use 1.3m Araki Telescope of Koyama Astronomical Observatory in Kyoto Sangyo University. We will improve the high-dispersion Echelle Spectropolarimeter "VESPolA" of this telescope for better resolution. We have, so far, observed 12 stars of type G, Ap/Fp, and B, with medium-dispersion $R=8,000$ linearly polarized mode, during the period of about 10 nights in August and October 2013. An efficient observation method using VESPolA and an effective data analysis have been discussed to find out the optimized modification of the VESPolA.

Keywords : magnetic polarity reversal, synchronization, stars, spectropolarimeter, observation