

4.2 数値モデルによる太陽周期活動予測

今田 晋亮 (名古屋大学)

(2019年3月29日受付、2021年5月31日公開)

4.2.1 太陽周期活動予測とその社会的需要

国際宇宙ステーションの建設や、月ゲートウェイ計画にみられるように、宇宙空間は人類の活動の場の一つになってきており、最も身近な宇宙である太陽地球環境の変動を予測することに関して、社会的な関心・需要が高まってきている。我々が住む太陽地球環境は太陽活動によって大きな影響を受けており、太陽地球環境の変動を理解するには変動の起源である太陽の変動について理解する必要がある。太陽の黒点数は約11年の周期で変動していることが知られている(4.1.1節参照)。また、第3章で解説されている様に、黒点に関係した磁気的活動は太陽地球環境変動の大きな要因であることから、太陽圏全体も約11年の周期で変動する。

太陽における変動には太陽フレアに代表されるような突発現象に起因する1時間程度の短いタイムスケールの変動、太陽活動周期にともなう10年程度のタイムスケールの変動、さらに数十年以上の長期変動がある。これまで、第3章で解説されている様なフレア予報のような短いタイムスケールの宇宙天気研究が精力的に進められてきた。一方、4.1.1で議論されている太陽周期活動のメカニズムが太陽フレアなどと比べ、それほどよく理解されていない事もあり、長いタイムスケールの宇宙天気研究はそれほど多くないのが現状である。

太陽活動度(黒点数)はそれぞれの周期(サイクル)で異なる事が知られており、非常に多くの黒点が出現したサイクルもあれば、マウンダー極小期のようにほとんど黒点が現れなかったサイクルもある(4.1.1節の図1参照)。実際、現在の第24太陽周期は、過去100年間で最も黒点数が少ない特異な周期であった。しかし、その原因は現在もよくわかっておらず、次の第25太陽周期がマウンダー極小期のような活動が非常に弱いものになるのか、それとも第23太陽周期以前のような比較的活動が高いものになるのか注目が集まっている。

これまで、世界的に様々な研究者が様々な手法を用いて太陽周期予測研究に挑んできたが、その予測結果は依然混沌とした状況である(図1参照)。近年、次のサイクル活動を予測する方法として、次の太陽サイクルの種になると考えられている極域の磁場の強さを見積もる事で予測するという方法が注目されている。実際、太陽極小期における極域の磁場の強さと次の太陽サイクルにおける活動度との相関は、少なくとも近年のサイクルでは観測的に検証されている。

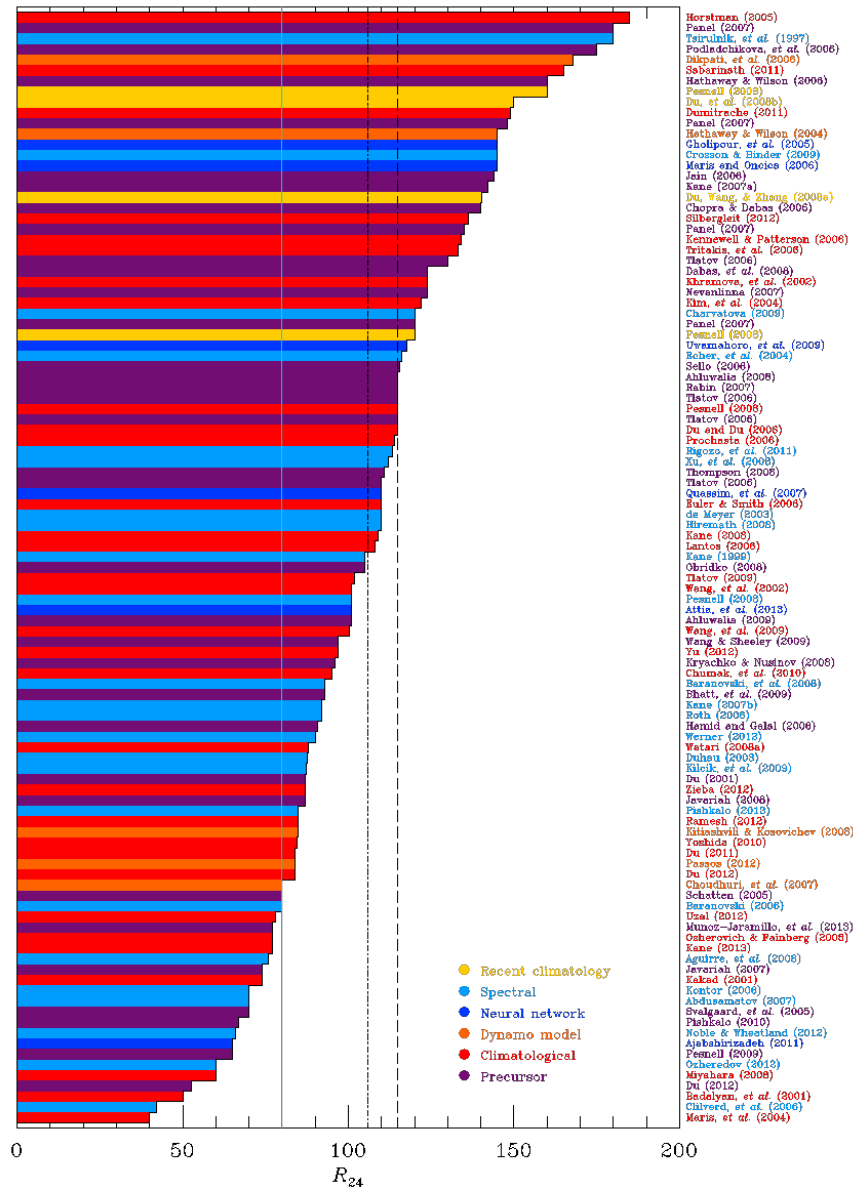


図 1. 第 24 太陽周期活動度の予測結果[Pesnell (2016)]. 上から下に向かって、予測結果が降順に表示されている。第 24 太陽周期活動度の正解である、2014 年（第 24 太陽周期の極大期）における黒点相対数は青い線で示されている。予測全体及び Climatology の平均には鎖線、点線が引かれている。注意：黒点相対数は（Clette & Lefevre 2016）改定前の値。改定後のものは大雑把にこの値の 1.67 倍。

本節では、様々な太陽周期予測手法およびその結果に関して簡潔に紹介し、特に近年注目されている太陽極小期の極域磁場を数値計算によって予測することで、次の太陽サイクル活動を予測する手法およびその結果に関して説明する。

4.2.2 これまでの周期活動予測研究

これまで様々な手法を用いて磁気太陽周期活動予測研究が行われてきた。Pesnell (2016) によるとそれらは Climatology (図 1: 赤), Recent climatology (黄), Precursor (紫), Dynamo model (オレンジ), Spectral (水色), Neural network (青) の大きく 6 個に分類される。以下これら 6 つの方法を簡潔に説明する。

Climatology による予測 (例えば、Du & Du 2006) では、未来のシステムの状態は、そのシステムの過去の状態の統計的特性のみから決定できる事を前提としている。つまりこの方法では、これまでの全てのサイクルの太陽黒点数の情報を入力値として、統計的性質を導き出し、次のサイクルの太陽黒点数を導き出す。

Recent Climatology による予測は、未来のシステムの状態を、そのシステムの比較的近い過去の状態の統計的特性のみから決定するものである。例えば太陽サイクル 24 の予測においては、太陽サイクル 17 以降のデータを入力として予測する等、使用データを比較的近い過去に限定するものである。

Precursor による予測 (例えば、Svalgaard et al. 2005) は、あるシステムの特徴量によって未来のシステムの状態を決定するものである。太陽周期活動を予測するのに、大きく 2 つのタイプが存在する。1 つ目は先述の太陽極磁場を用いた予測であり、太陽活動極小期の極域磁場を見積もることで次のサイクルの活動度を予測するというものである。2 つめは、地磁気活動度を用いた予測であり、太陽活動極小期の地磁気活動度を次の周期の太陽活動の指標とするものである。

Dynamo model による予測 (例えば、Choudhri et al. 2007) では、物理ベースの方程式を数値的に解く事で予測する。4.1.5 節で説明されている磁束輸送ダイナモの計算を行い、次のサイクルの活動度を予測するというのがその代表的なものである。これらの研究では、太陽表面磁場の観測情報をどのようにモデルに取り込むかが鍵であり、データ同化などの手法が精力的に研究されている。

Spectral という予測 (例えば、Duhau 2003) は、システムの時系列データの周波数解析を行う事で、未来のシステムを予測するものである。次期太陽周期活動予測においては、これまでの黒点の時系列データをフーリエ解析 (自己回帰予測、ウェーブレットベースの予測) し、次の太陽周期活動を予測するというのが典型的なものである。

最後は近年急速に発展してきたニューラルネットワークを用いた予測 (例えば、Quassim et al. 2007) である。この手法は、あるシステムの状態 (出力) とそれより前のシステムの状態 (入力) との間の複雑な関係をニューラルネットワークによりモデル化する事で、未来のシステムを予測するというものである。

以上のように様々な手法を用いて、これまで次期太陽周期活動の予測が行われてきたが、それぞれの手法ごとに予測結果の分散、スキルスコア (スキルスコアの説明は 3.3.2 節を参照) な

どをまとめたものが 図 2 である。どのカテゴリーの予測も比較的分散が大きく、予測手法の確立が難しいことがわかる。また予測のスキルスコアを見ると、ほとんどのカテゴリーでマイナスもしくは0に近い値を示しており、予測が難しいことがわかる。一方で、唯一 0.73 と高いスキルスコアを示しているのが太陽極域磁場を用いた予測であり、少なくとも第 24 太陽周期活動度の予測に関して最も良い結果を出したのは、太陽極域磁場を用いた予測であることがわかる。

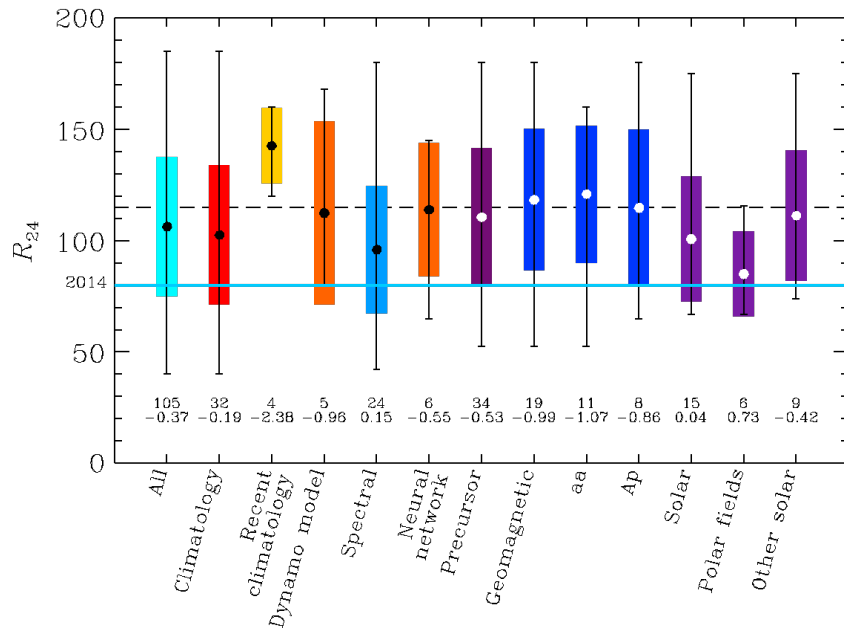


図 2. それぞれの手法でのサイクル 24 の予測結果のまとめ[Pesnel (2016)]。第 24 太陽周期の極大期における黒点相対数は水色線で示されている。予測全体の平均は鎖線で表されている。色の幅はそれぞれのカテゴリーでの予測値の 1σ 幅を表し、エラーバーはそれぞれのカテゴリーでの予測値の最小・最大を表す。また、数字は上からそのカテゴリーにおける予測結果の数、予測スキルスコアを表す。注意：黒点相対数は改定前の値。

4.2.3 太陽極小期の極域の磁場と次のサイクル活動の関係

前節で述べたように、太陽極域磁場を用いた次期太陽周期活動予測は現状では最も良い予測手法であると言える。本節では、太陽活動極小期の極域の磁場と次のサイクル活動の関係についての観測的な証拠と、両者の関係を直感的に説明する。

太陽表面に現れる黒点は磁場のかたまりであり、黒点が崩壊し表面の流れや拡散過程によって輸送されることで太陽表面磁場が変化している。図 3 は経度方向に平均した太陽表面の磁場分布の時間変化である（磁気バタフライダイアグラム）。この図からいくつかの特徴が見て取れる。太陽黒点が頻繁に出現する領域は、4.1 章にあるようにサイクルの初めは中緯度に、後半になると低緯度へ移動する。さらに、黒点が頻繁に出現する領域から極方向に向かって筋状に伸びる構造が見られる。これは子午面循環流および拡散過程によって黒点の磁場が極域へ運ばれ

るためである。4.1 節で説明があるように、先行黒点が後行黒点より低緯度に出現する事が知られている (Joy の法則, Hale et al. 1919, Zirin 1988)。この出現緯度の違いによって、後行黒点の磁場がより多く極域へ輸送される。また、後行黒点の磁場の極性は元々の極域磁場とは反対のものであり、極磁場はサイクルが進むにつれて減少し、極大期に反転し、極小期に最も強くなる。図 4 は太陽活動第 20 周期から第 24 周期にかけての極域磁場の観測である。極小期の極域磁場の強さをオレンジ色の矢印で表している。第 20 周期および第 21 周期の極小期における極磁場は他の 2 つのそれに比べ、強いことがわかる。一方、第 23 周期の極小期における極磁場は他のものと比べて極端に弱いことがわかる。それでは、次のサイクルの活動はどうであったか。前の極磁場が強かった、第 21 および 22 周期サイクルは比較的活動度が高いサイクルであり、極端に極磁場が小さかった第 23 周期の次の周期である第 24 周期はここ 100 年で最も低い活動度であった。残念ながら、わずか 4 周期分の例しかないが、確かに太陽活動極小期の極域磁場と次のサイクルの活動度は深い関係にある。

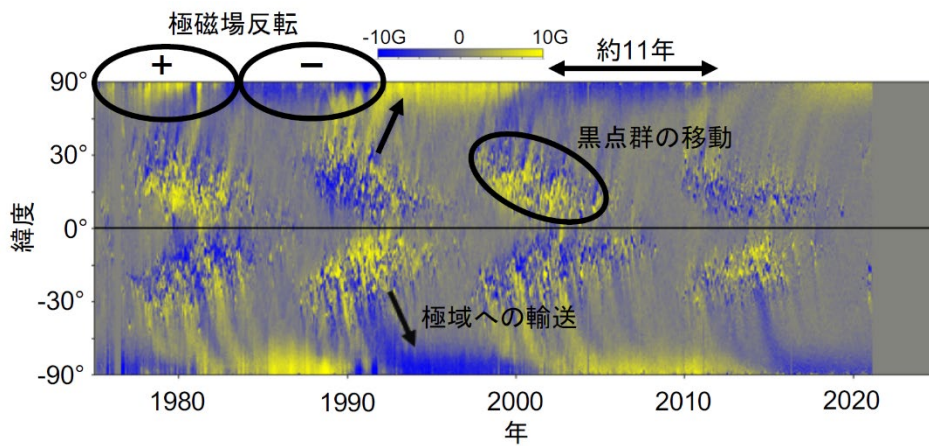


図 3. 経度方向に平均した太陽磁場の緯度分布の時間変化 (磁気バタフライダイアグラム) [Hathaway (2015)]。青は負の磁場を表し、黄色は正の磁場を表す。

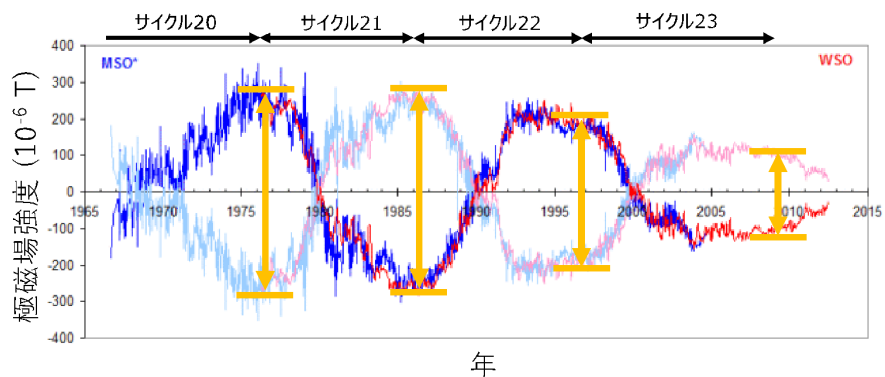


図 4. 太陽極域磁場の時間変化 [Svalgaard et al. (2005)を編集]。

極域磁場の観測自体は4周期分しかないが、地磁気活動などで代用し、太陽活動極小期における極域磁場、もしくはそれに相当する指標と次期太陽周期活動度の関係を表したものが図5である。太陽極域磁場は太陽圏における対局的な太陽風の構造を決めるため、太陽風と地球磁気圏の相互作用の度合いを表す地磁気指数とは平均的には相関がある。太陽極小期における極域磁場と次期太陽周期活動度は確かに比例関係にある。

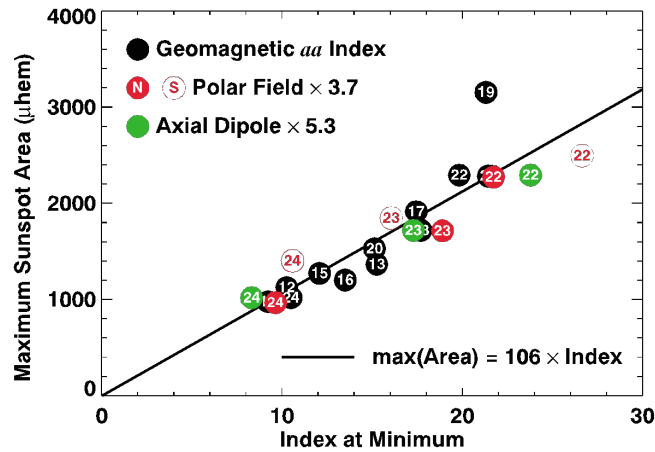


図 5. 太陽活動極小期における極域磁場、もしくはそれに相当する指標（横軸）と次期太陽周期活動度（縦軸）の関係[Hathaway & Upton (2016)]。注：Axial Dipole Momentは極域磁場に相当するもの、詳細は[Iijima et al. (2017)]を参照いただきたい。

次に、太陽活動極小期の極域磁場が次期太陽周期活動に何故関係するのかについて直感的な理解を試みる（数学的な定式化等の詳細に関しては[Cameron & Schussler (2015)]を参照いただきたい）。太陽の磁場を生み出す太陽ダイナモの標準的なモデルは4.1章にあるように、太陽内部における経度方向の流れ（差動回転）によるものと考えられている。太陽の北極から南極までを貫く双極子磁場が、太陽内部の差動回転により引き伸ばされ増幅され、黒点を形成する経度方向の磁場となる（4.1.3節の図5参照）。つまり、黒点の起源となる種磁場は、前のサイクルにおける北極から南極までを貫く双極子磁場であり、この種磁場である極域磁場が強ければ強いほど次のサイクルにおける太陽活動も活発になると考えられる。

4.2.4 太陽表面磁束輸送モデル (Surface Flux Transport (SFT) Model)

前節までで、太陽活動極小期における極域磁場を見積もることができれば、次期太陽周期活動が精度良く予測できることを説明した。この節では、どのような方法で、太陽活動極小期における極域磁場を見積もることができるかを簡潔に説明する。詳細は Jiang et al. (2014) を参照いただきたい。

黒点を起源とした太陽表面の磁場は太陽表面の流れおよび拡散によって太陽全球にわたり輸送される。その様子は以下の磁場の時間発展方式によって記述される。この式は MHD 方程式 (誘導方程式の球面座標における B_r 成分) から導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_r}{\partial t} = & -\frac{1}{R_s \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (u B_r) - \frac{1}{R_s \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v B_r \sin \theta) \\ & + \eta_H \left[\frac{1}{R_s^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta \frac{\partial B_r}{\partial \theta}) + \frac{1}{R_s^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 B_r}{\partial \phi^2} \right] + S(\theta, \phi, t), \end{aligned} \quad (1)$$

θ は緯度、 ϕ は経度座標を表す。また、 u は自転方向の流れ (差動回転)、 v は子午面方向の流れ (子午面循環) を表す。 η は乱流拡散の係数である。さらに S は浮上磁場によって太陽内部から供給される磁場を表している。この磁場の時間発展方式は、球殻における移流拡散方程式にソース項を加えた形となっている。

太陽表面磁束輸送計算によく用いられる差動回転および子午面循環の速度は以下である [Jiang et al. (2014)]。

$$u(\theta) = 13.38 - 2.30 \cos^2 \theta - 1.62 \cos^4 \theta - 13.2 \text{ deg day}^{-1} \quad (2)$$

$$v(\theta) = 31.3 |\sin \theta|^{2.5} \cos \theta \text{ m s}^{-1} \quad (3)$$

また、乱流拡散の係数としては $250 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$ が用いられる事が多い。SFT モデルで用いる大部分のパラメータは観測から決定することができるが、中には決定が難しいものもある。最も難しいものの一つに、将来の黒点の出現に関わるパラメータである、浮上磁場 (黒点) の出現位置、日時、大きさ、磁場強度、極性、形状などがあげられる。

図 6 は SFT モデルを用いて太陽表面磁場の時間変化を再現したもの (上段) と観測によるもの (下段) である。この SFT モデルを用いた計算の黒点出現に関するパラメータは全て観測されたものを使っている。SFT モデル計算で、極域への磁場の輸送されている様子など太陽表面磁場の時間変化をよく再現できていることがわかる。この結果から、基本的には未来の浮上磁場の情報さえ得られれば、未来の極域の磁場を推定することができることがわかる。

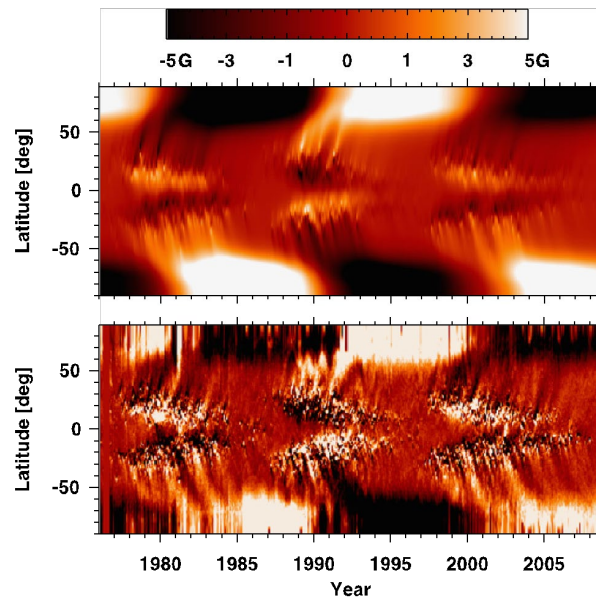


図 6. 経度方向に平均した太陽表面の緯度分布の時間変化（磁気バタフライダイアグラム）[Jiang et al. (2014)]. 上段：SFT モデルを用いた計算結果、下段：観測結果。

どのようにして、将来の浮上磁場（黒点）の出現に関わるパラメータを決定するのであろうか。これまで行われてきたほとんどの研究においては、これらのパラメータに関して、例えば 4.1 節で解説されている Joy の法則などの統計的な経験則を用いて、扱いやすい形でモデル化している[Cameron et al. (2016)]。また、過去の類似したサイクルの情報を用いて、未来の浮上磁場パラメータを決めるという方法を用いた研究もある。例えば、Upton & Hathaway (2014)では太陽活動第 24 周期の黒点数の時間変化は第 14 周期のものと似ている（図 7）ことから、未来の浮上磁場パラメータとして第 14 周期に観測されたものを用いた。

注意いただきたい点として、極磁場を反転させるのに必要な磁束量は、実は比較的大きい黒点数個で十分である点である。もちろん黒点は正の極性を持った黒点と、負の極性を持った黒点対になって現れるため、どちらか一方の極性だけ極域へ輸送することは難しい。一方で、Joy の法則を著しく逸脱した黒点もしばしば観測されており、そのような特殊な黒点 1 つが極磁場反転に強い影響を及ぼすこともあり得る。このため、浮上磁場パラメータの決定は非常に重要である。

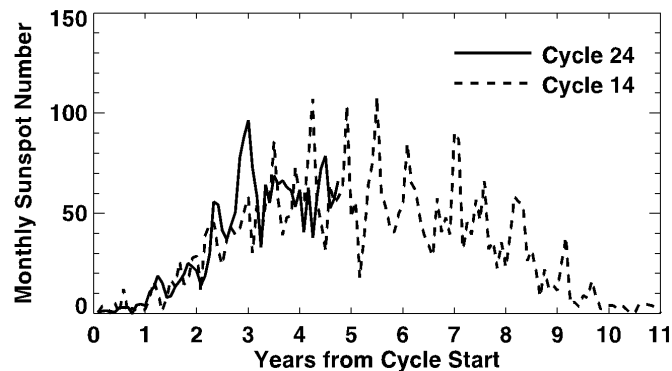


図 7. 太陽活動第 24 周期の黒点数の時間変化と太陽第 14 周期のものとの比較。[Upton & Hathaway (2014)]

浮上磁場の取り扱いに関して行った 1 つの研究を詳しく紹介する。Iijima et al. (2017) は、未来の浮上磁場を無視して SFT モデル計算を行い (式 (1) の $S=0$ とする)、過去のサイクルで観測とモデル計算の結果を比較する事で、周期のどの時期からであったら未来の浮上磁場によらず予測可能かを議論した。図 8 は観測される極磁場の時間変化と新たな黒点の出現が無い SFT モデル計算の結果を比較したものである。太い線は極磁場の観測値を表し、細い線は各時刻からの SFT モデル計算による極域磁場の時間変化を表す。極小期の 3 年ほど前から、未来の浮上磁場を無視した SFT モデル計算の結果と、極磁場観測の結果がほとんど変わらない事がわかる。これは、何らかの物理的な理由により、太陽の活動周期の後半 3 年間に出現する黒点は太陽極域磁場の変動に影響しないと解釈できる。つまり、黒点出現による極域磁場への影響は活動極小期の 3 年前から無視できるので、およそ 3 年前からそれ以降の浮上磁場を無視して活動極小期の極磁場を予測することができる事がわかる。周期終盤の黒点が極域磁場に影響を及ぼさない理由には様々な要因が考えられ、現在も議論がされている。

太陽活動極小期の極域磁場を約 3 年前に予測する事ができる事がわかった。では、その予測結果を用いて 2025 年頃に迎える太陽活動第 25 サイクル極大期の黒点相対数を予測する。先述のように、活動極小期の極域磁場と次のサイクルの黒点数には良い相関がある。過去 3 サイクルに関して、活動極小期の極域磁場を約 3 年前に予測した結果と、観測された次のサイクルの黒点相対数の最大値の関係を見ると図 9 のダイヤ印のようになり、良い相関を示す。では、この関係をもとに太陽活動第 24 サイクルの極小期の極磁場の予測値を用いて、太陽第 25 サイクルの黒点相対数の最大値を予測すると図 9 のプラス印のようになる。つまり、太陽活動第 25 サイクルはここ 100 年で最も低活動であった太陽第 24 サイクルの 7 割程度の活動度で、一層低活動な周期となる。様々な研究者も同様な方法で太陽活動第 25 周期の活動度を予測しており、ほとんどの予測研究において太陽第 25 周期活動は太陽第 24 周期活動と同程度か少し低いという結果が示されている。

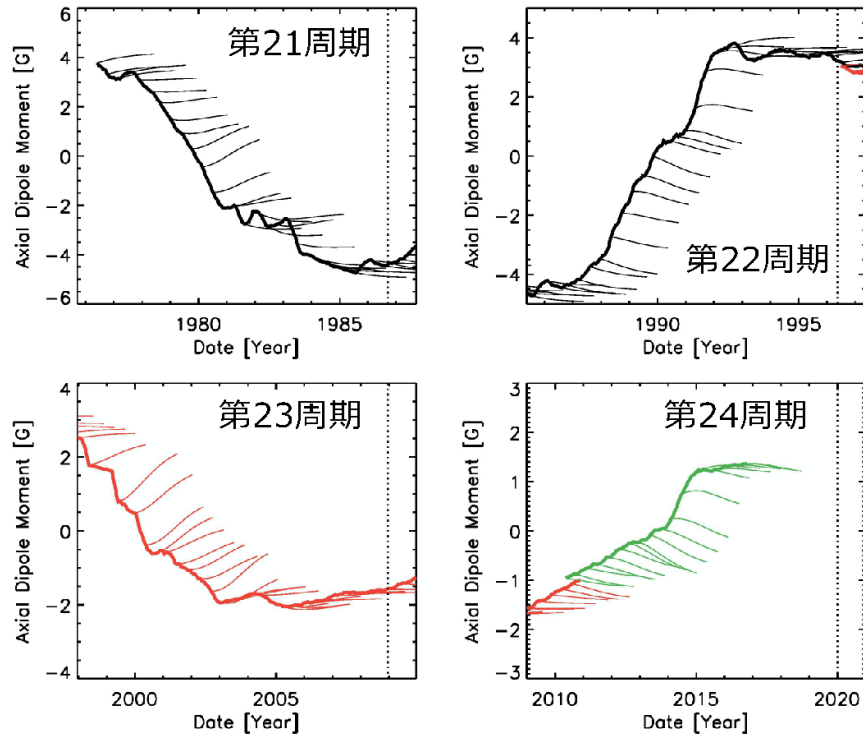


図 8. 観測された極磁場の時間変化（太線）と新たな黒点の出現を無視した SFT モデル計算の結果（細線）の比較[Iijima et al.(2017)]. 黒はスタンフォード大学ウィルコックス太陽観測所（WSO）、赤は SOHO 衛星搭載の装置 MDI、緑は SDO 衛星搭載の装置 HMI のデータを用いている。

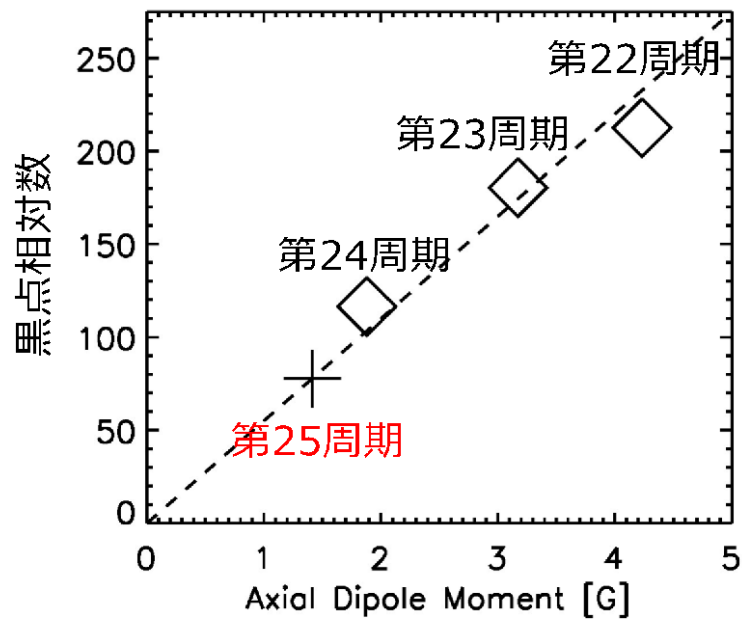


図9. 次期太陽周期の活動度と活動極小期3年前に予測した極磁場（Axial Dipole Moment）との関係（ダイヤ印）。第 25 周期活動の予測結果を+で示す[Iijima et al.(2017)]。

4.2.5 太陽周期活動予測研究における今後の課題

最後に太陽周期活動予測研究の今後の発展性について述べる。大きく分けて太陽周期活動予測研究の将来的な課題は、1) SFT モデルで用いられる物理パラメータの時間・空間変化が予測結果に対しどの程度影響するか、2) 次のサイクルより先のサイクルを予測できるか、3) マウンダー極小期のような極端に弱いサイクルを予測できるか、の3つである。

これまで行われてきたほとんどの予測研究では、差動回転や子午面循環流などは時間的に一定として行われてきた。一方で観測的にはこれらの流れは太陽周期ごとによっても異なるし、同じ周期内でも極大期と極小期では異なる事が知られている[Hathaway & Rightmire (2011)]。これらがどの程度予測結果へ影響を及ぼすかは重要な検討課題である。さらに流れは磁場の強度によっても変わる事が近年観測的に示されており[Imada & Fujiyama (2018)]、この磁場強度による流れへのフィードバックの影響も重要な課題である。

現在の予測研究では、次のサイクルを予測するにとどまっている。次期太陽周期活動予測研究における最大の不定性は黒点がどのような性質を持ってどのような頻度で出現するかであり、先述の Iijima et al. (2017) の説明にあるように極小期の3年前より前に予測することは難しい。ダイナモと合わせた形で浮上磁場のパラメータの統計的性質を理解する事ができれば、次のサイクルより先のサイクルの予測につながると考えられる。浮上磁場の理解が進む事が太陽周期活動予測にとって重要である。

現在の第24太陽周期は、過去100年間で最も黒点数が少ない特異な周期であり、今後マウンダー極小期のような活動が非常に弱いサイクルが続くのか注目が集まっている。一方で、マウンダー極小期のような周期がどのように訪れるのか未だによく理解されていない。太陽内部のダイナモ過程に原因があるのか、それとも別に原因があるのか、その理解は太陽周期活動予測研究にとっても非常に重要なものである。

参考文献

- Pesnell, W. D.: Predictions of Solar Cycle 24: How are we doing? *Space Weather* 14, 10–21 (2016).
<https://doi.org/10.1002/2015SW001304>
- Clette, F., Lefevre, L.: The New Sunspot Number: Assembling All Corrections. *Sol. Phys.* 291, 2629–2651 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s11207-016-1014-y>
- Du, Z., Du, S.: The relationship between the amplitude and descending time of a solar activity cycle. *Solar Phys.* 238, 431–437 (2006). <https://doi.org/10.1007/s11207-006-0175-5>

- Pesnell, W.D.: Predictions of solar cycle 24. *Solar Phys.* 252, 209–220 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11207-008-9252-2>
- Svalgaard, L., Cliver, E. W., Kamide, Y.: Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? *GRL* 32, L01104 (2005). <https://doi.org/10.1029/2004GL021664>
- Choudhri, A. R., Chatterjee, P., Jiang, J.: Predicting Solar Cycle 24 With a Solar Dynamo Model. *Physical Review Letters*, vol. 98, Issue 13, 131103 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.131103>
- Duhau, S.: An early prediction of maximum sunspot number in Solar Cycle 24. *Solar Phys.* 213, 203–212 (2003). <https://doi.org/10.1023/A:1023260916825>
- Quassim, M.S., Attia, A.F., Elminir, H.K.: Forecasting the peak amplitude of the 24th and 25th sunspot cycles and accompanying geomagnetic activity. *Solar Phys.* 243, 253–258 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11207-007-0447-8>
- Hale, G.E., Ellerman, F., Nicholson, S.B., & Joy, A.H.: The Magnetic Polarity of Sun-Spots. *ApJ*, 49, 153 (1919).
- Zirin, H., *Astrophysics of the Sun*, Cambridge University Press, p.307 (1998).
- Hathaway, D. H.: The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*. 12, 4 (2015). <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Hathaway, D. H., Upton, L.: Predicting the amplitude and hemispheric asymmetry of solar cycle 25 with surface flux transport. *JGR* 121, 10,744–10,753 (2016). <https://doi.org/10.1002/2016JA023190>
- Iijima, H., Hotta, H., Imada, S., Kusano, K., Shiota, D.: Improvement of solar-cycle prediction: Plateau of solar axial dipole moment. *A&A letters* 602, L2 (2017). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731813>
- Cameron, R., Schussler, M.: The crucial role of surface magnetic fields for the solar dynamo. *Science* 347, 1333–1335 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1261470>
- Jiang, J., Hathaway, D.H., Cameron, R.H., Solanki, S.K., Gizon, L., Upton, L., H.: Magnetic Flux Transport at the Solar Surface. *Space Sci. Rev.* 186, 491–523 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0083-1>
- Cameron, R.H., Jiang, J., Schussler, M.: Solar Cycle 25: Another Moderate Cycle? *ApJL* 823, L22 (2016). <https://doi.org/10.3847/2041-8205/823/2/L22>
- Upton, L., Hathaway, D. H.: Predicting the Sun's Polar Magnetic Fields with a Surface Flux Transport Model. *ApJL* 780, 5 (2014). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/780/1/5>
- Hathaway, D.H., Rightmire, L.: Variations in the Axisymmetric Transport of Magnetic Elements on the Sun: 1996–2010. *ApJ* 729, 80 (2011). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/729/2/80>
- Imada, S., Fujiyama, M.: Effect of Magnetic Field Strength on Solar Differential Rotation and Meridional Circulation. *ApJL* 864, L5 (2018). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aad904>