

太陽周期活動とその予測

飯島陽久 (総合解析、PSTEP)

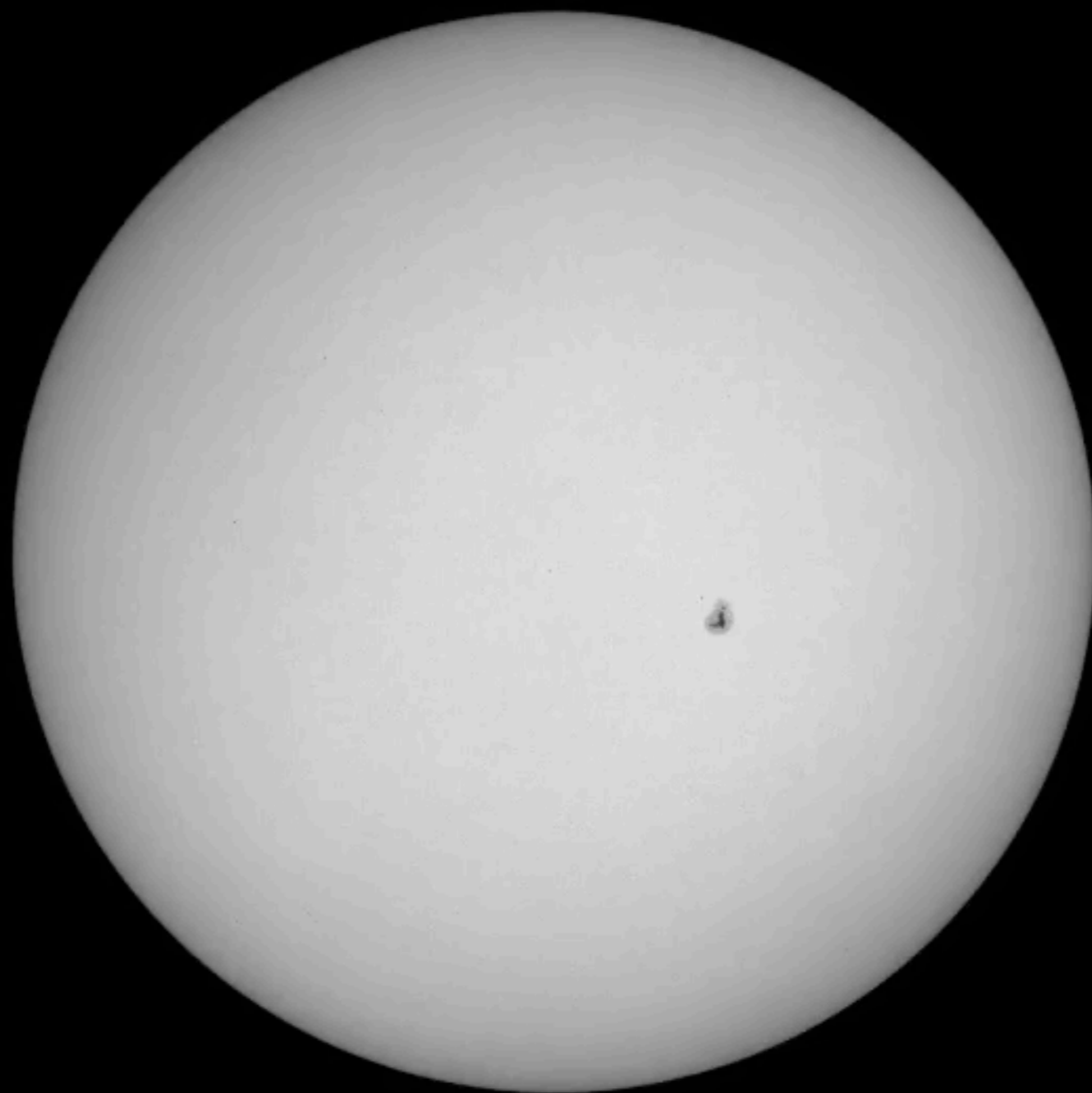
共同研究者: 堀田英之、今田晋亮、

塩田大幸、草野完也

もくじ

- 太陽周期活動
- 太陽活動を予測するには
- 表面磁束輸送モデル
- 表面磁束輸送モデルを用いた次期太陽周期活動度の予測

太陽周期活動



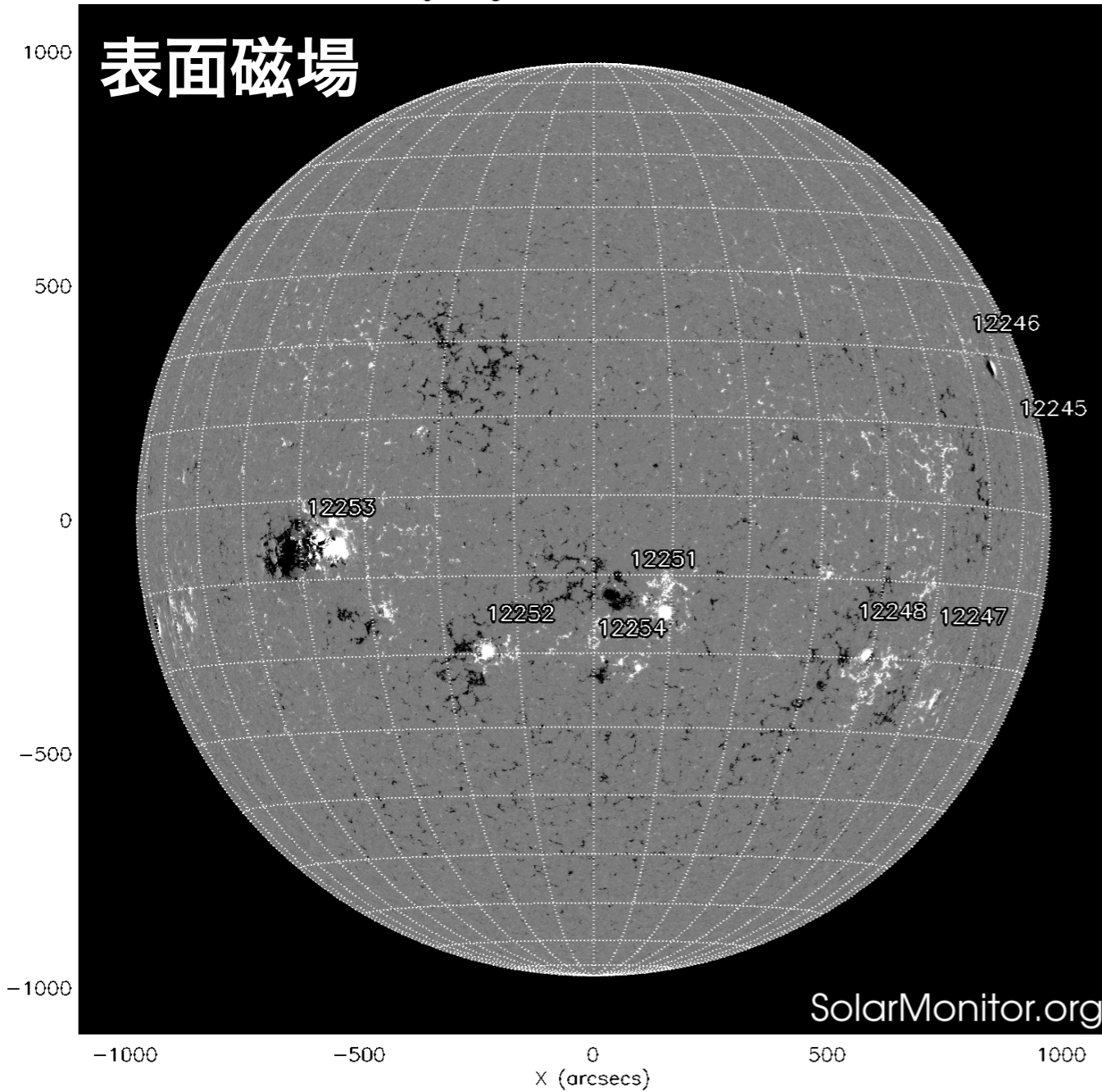
T. J. Okamoto (NAOJ/JAXA)

171,000 km

磁場と黒点

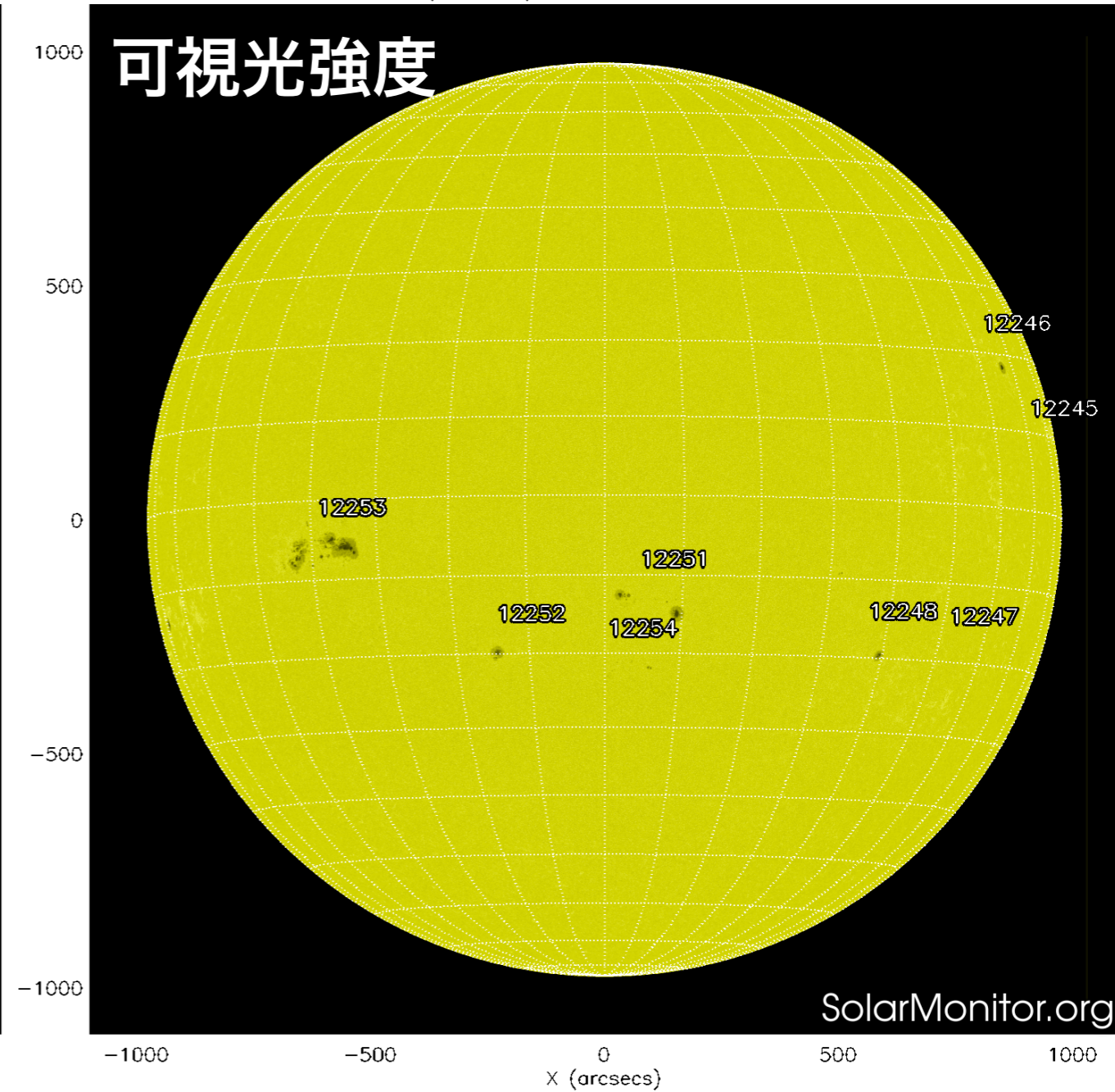
SDO HMI Magnetogram 1-Jan-2015 21:46:09.100

表面磁場



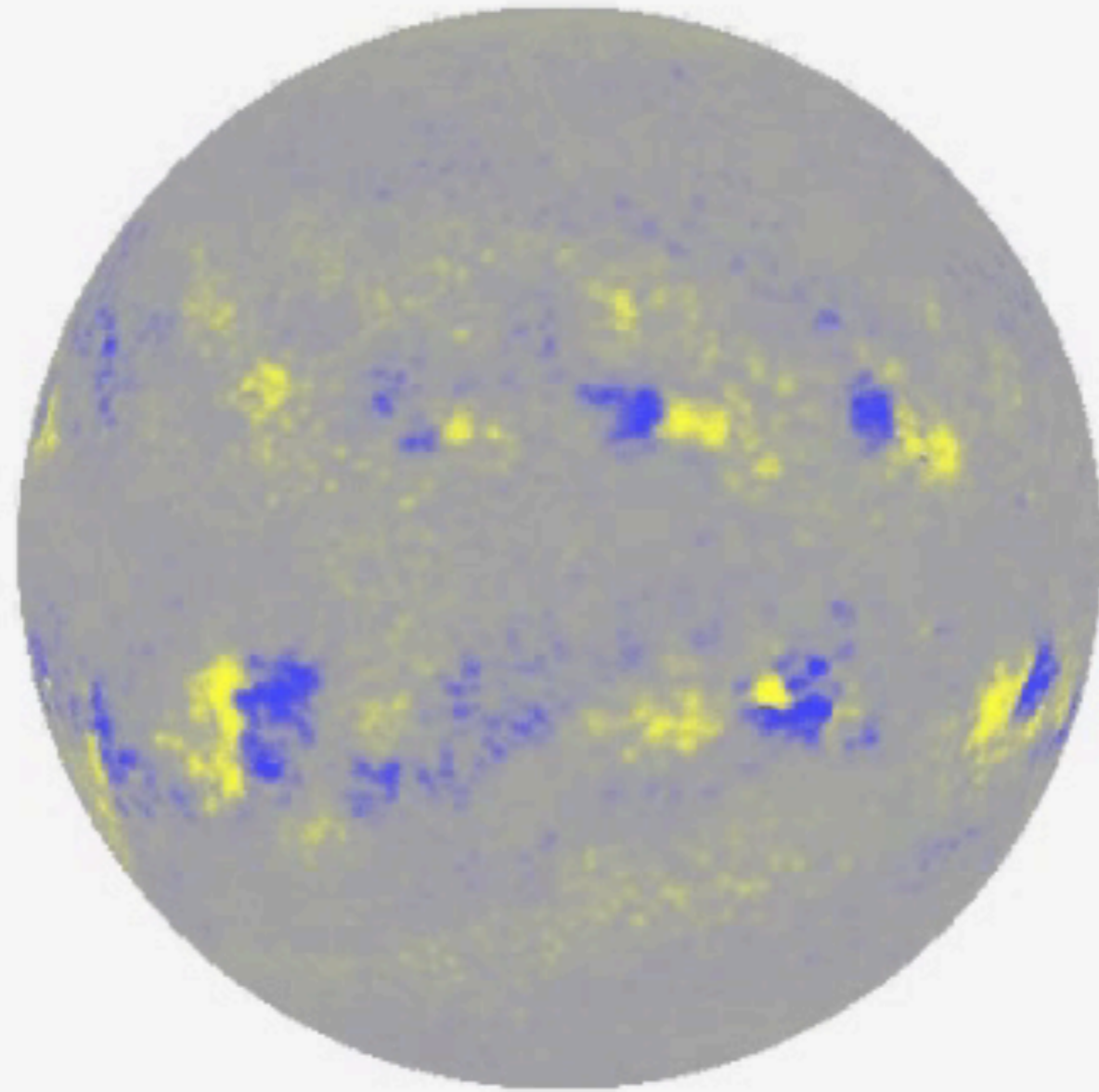
SDO HMI (6173 Å) 1-Jan-2015 21:46:09.100

可視光強度



強い磁場 => 熱対流の抑制 => 表面温度の低下 => 黒点

太陽表面の磁場構造



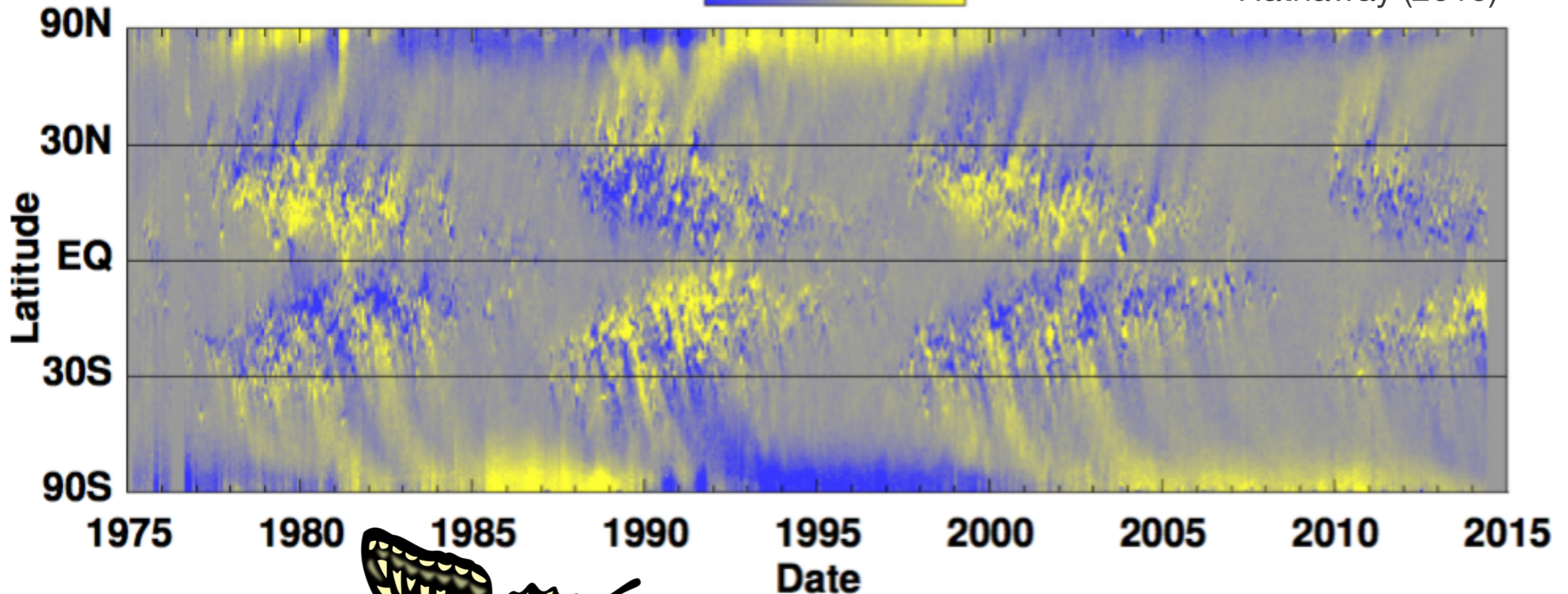
Hathaway (2015)

磁気バタフライダイアグラム

B_r averaged over longitude for each solar rotation

-10G 0 +10G

Hathaway (2015)



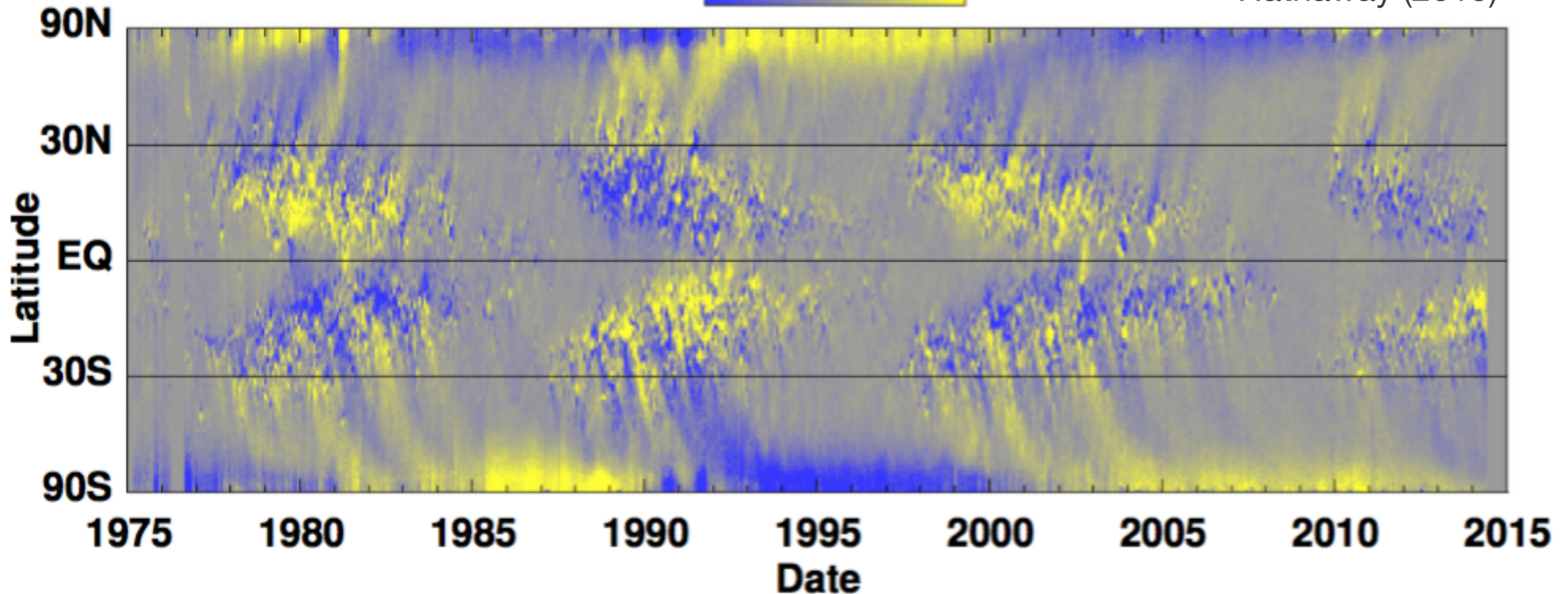
蝶形図

磁気バタフライダイアグラム

B_r averaged over longitude for each solar rotation

-10G 0 +10G

Hathaway (2015)



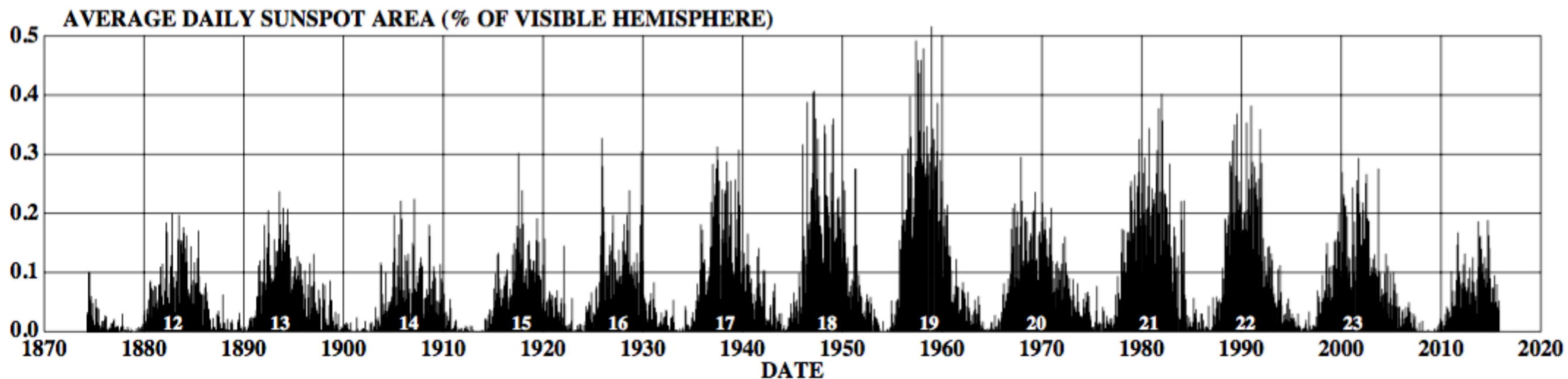
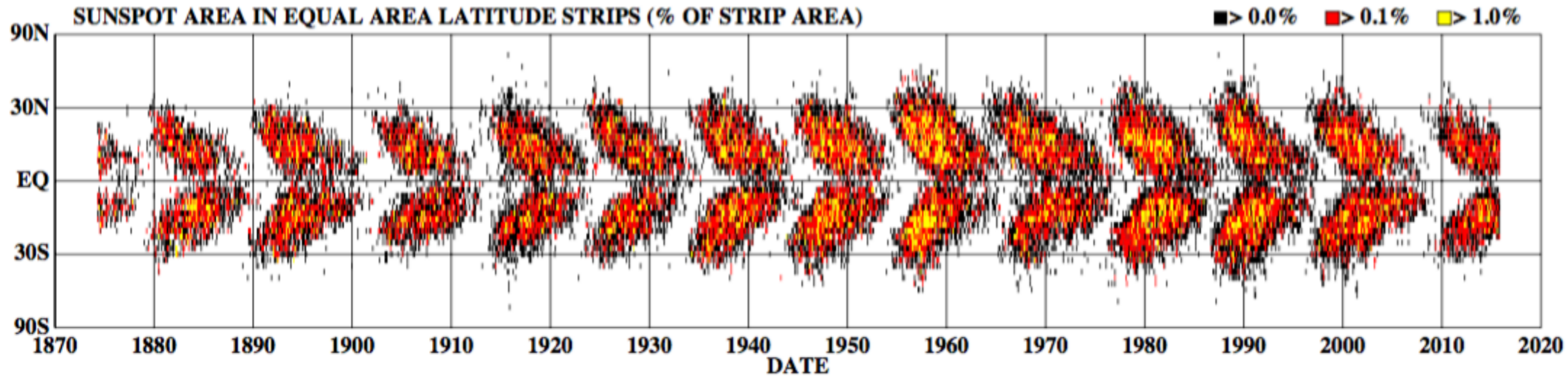
← 1太陽サイクル ~ 11年

↑ サイクル極大期 (極磁場ゼロ)

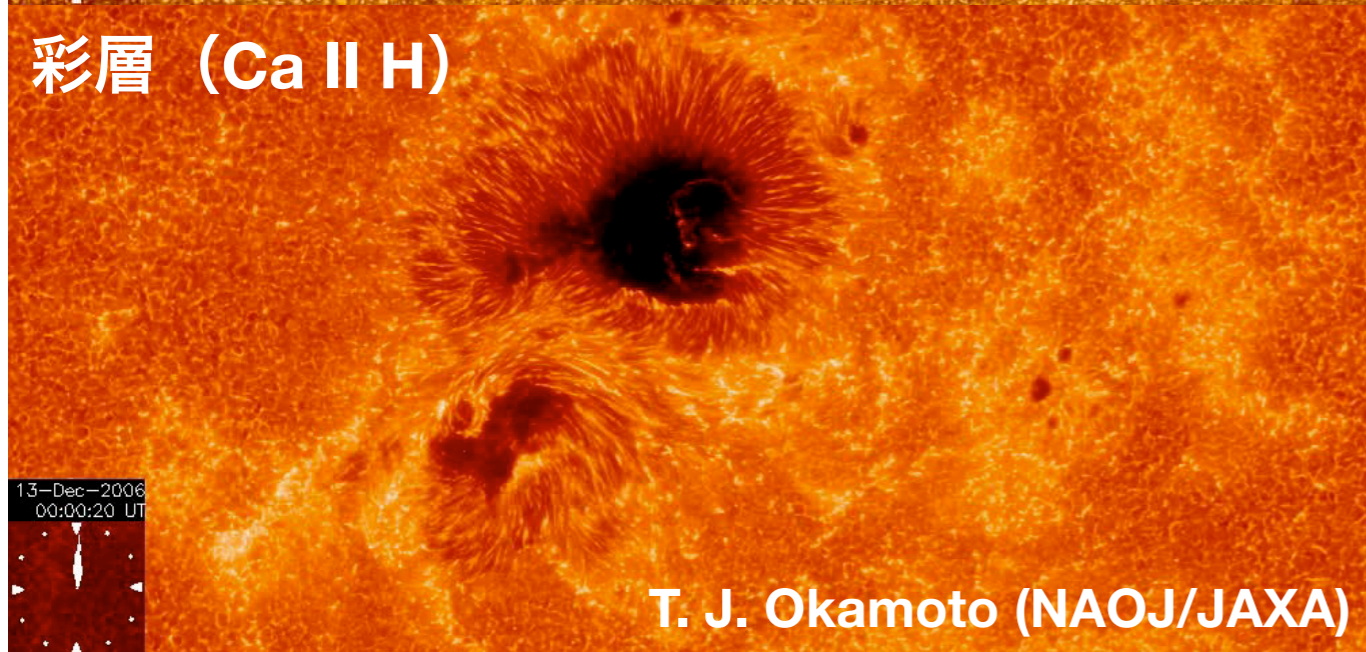
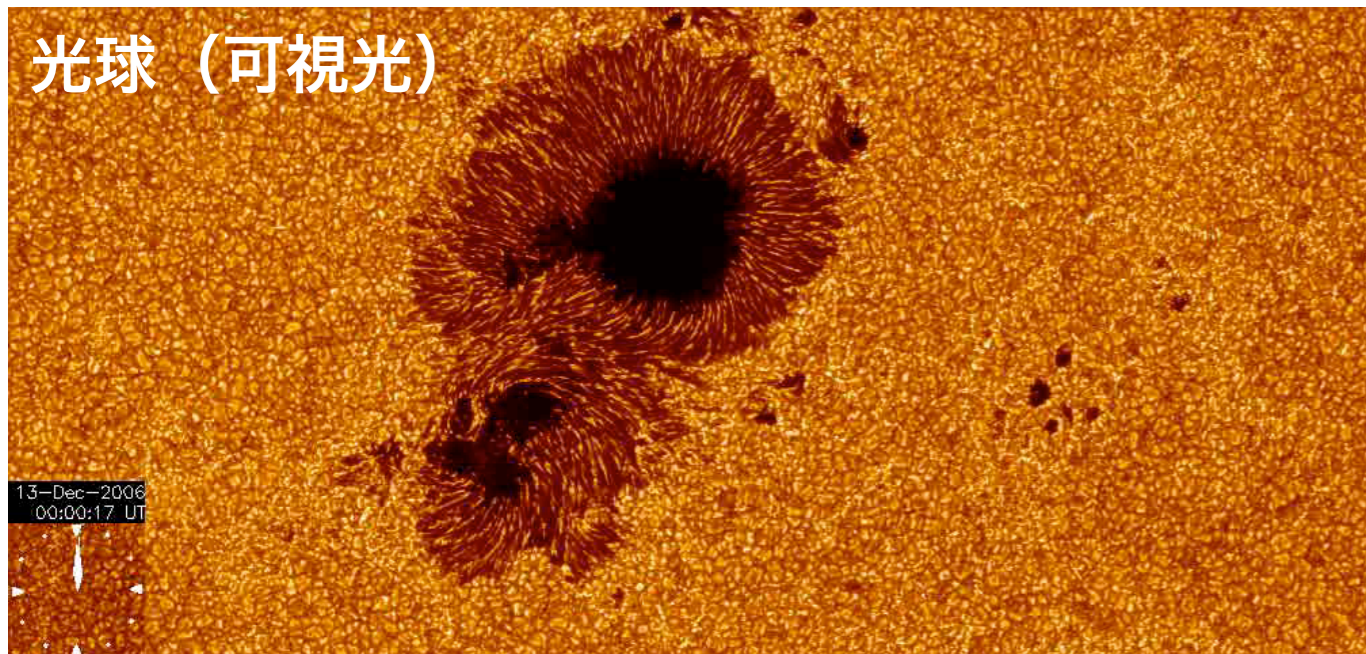
↑ サイクル極小期 (極磁場最大)

太陽活動の長期変動

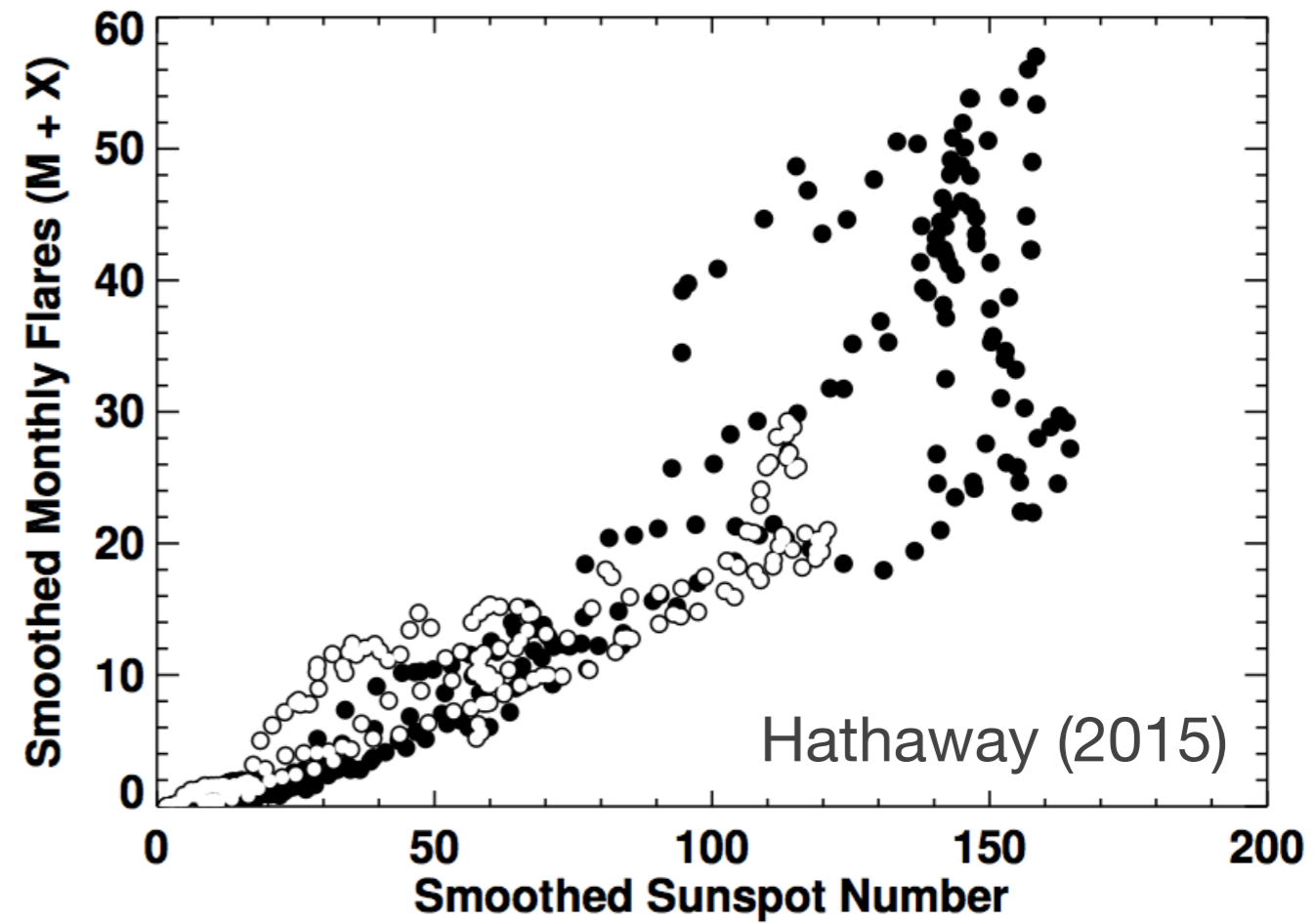
DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



黒点とフレア



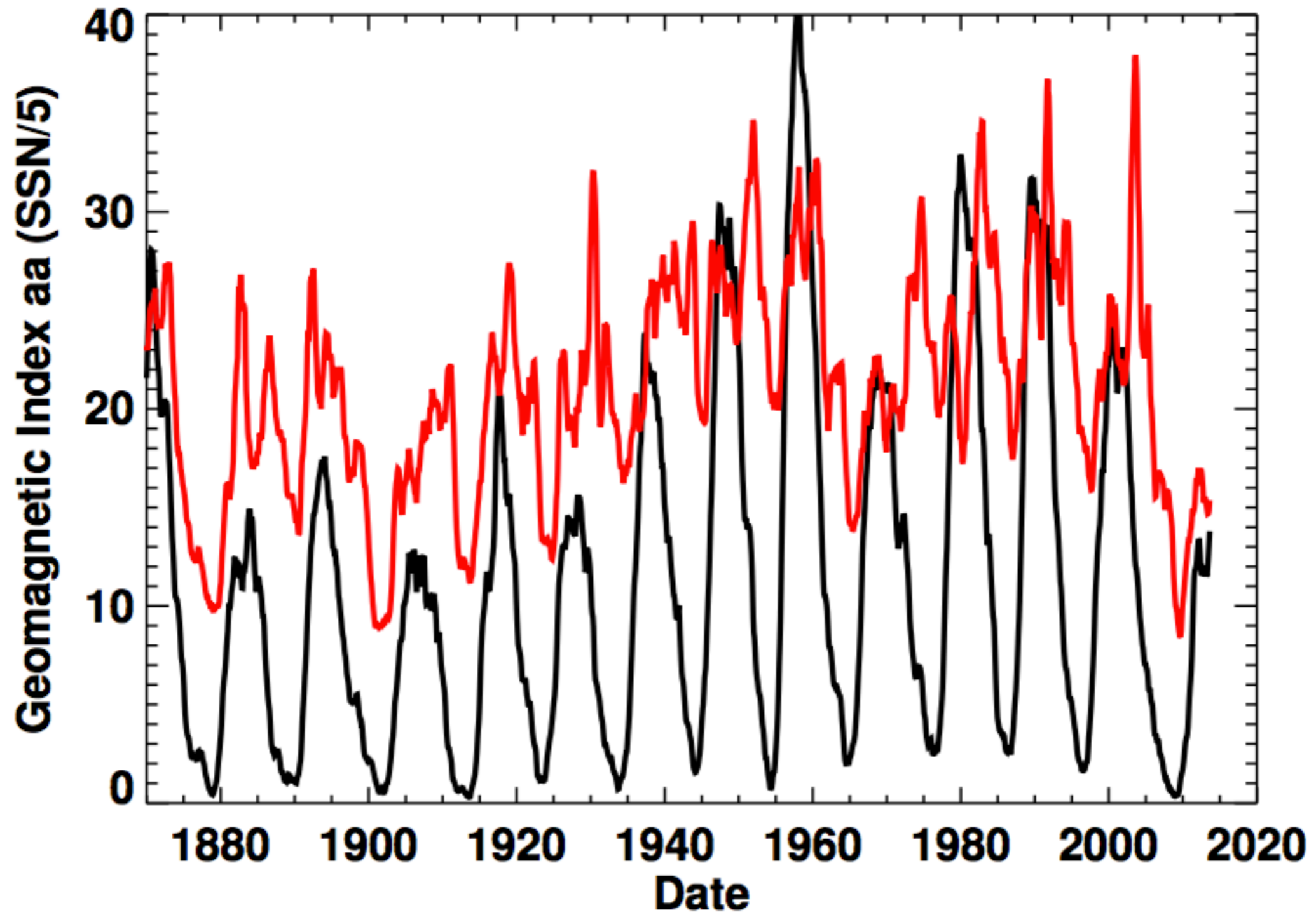
黒点数とフレア数の相関



黒点と地磁気

黒点数と地磁気活動度指数の時間変化

Hathaway (2015)

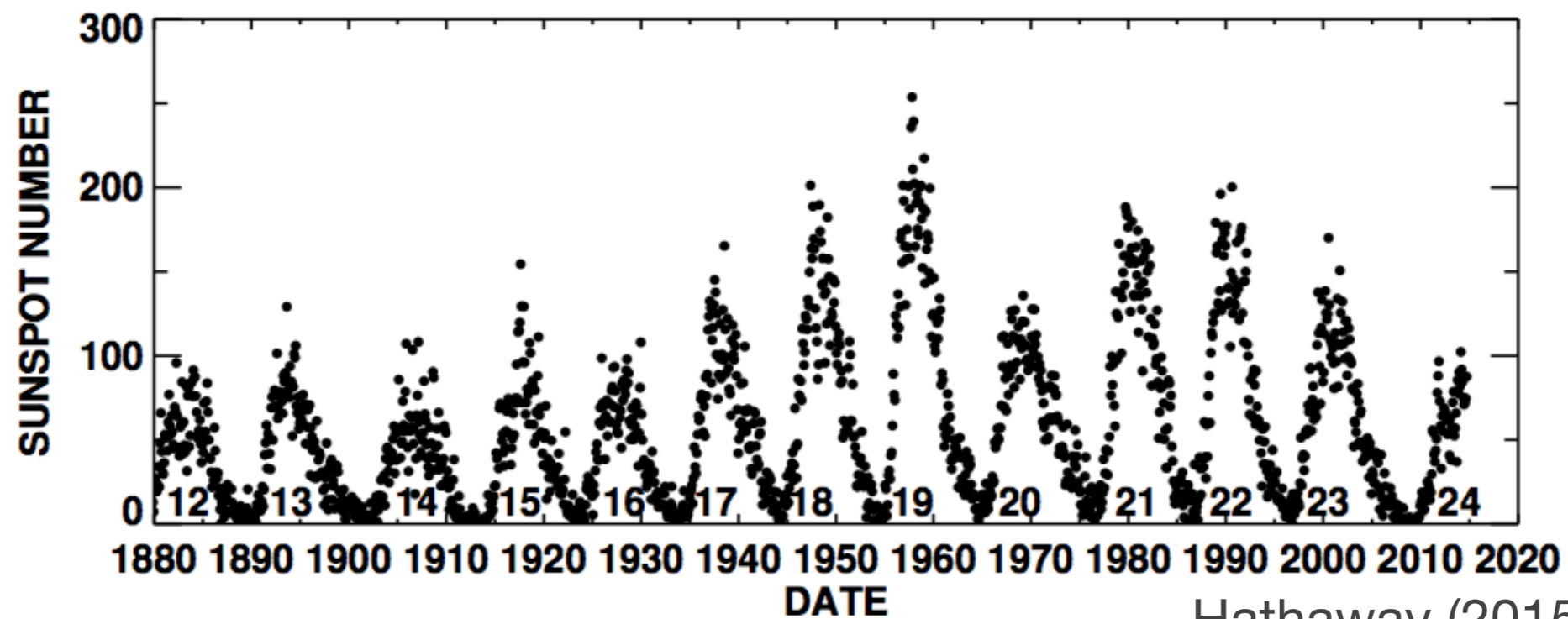
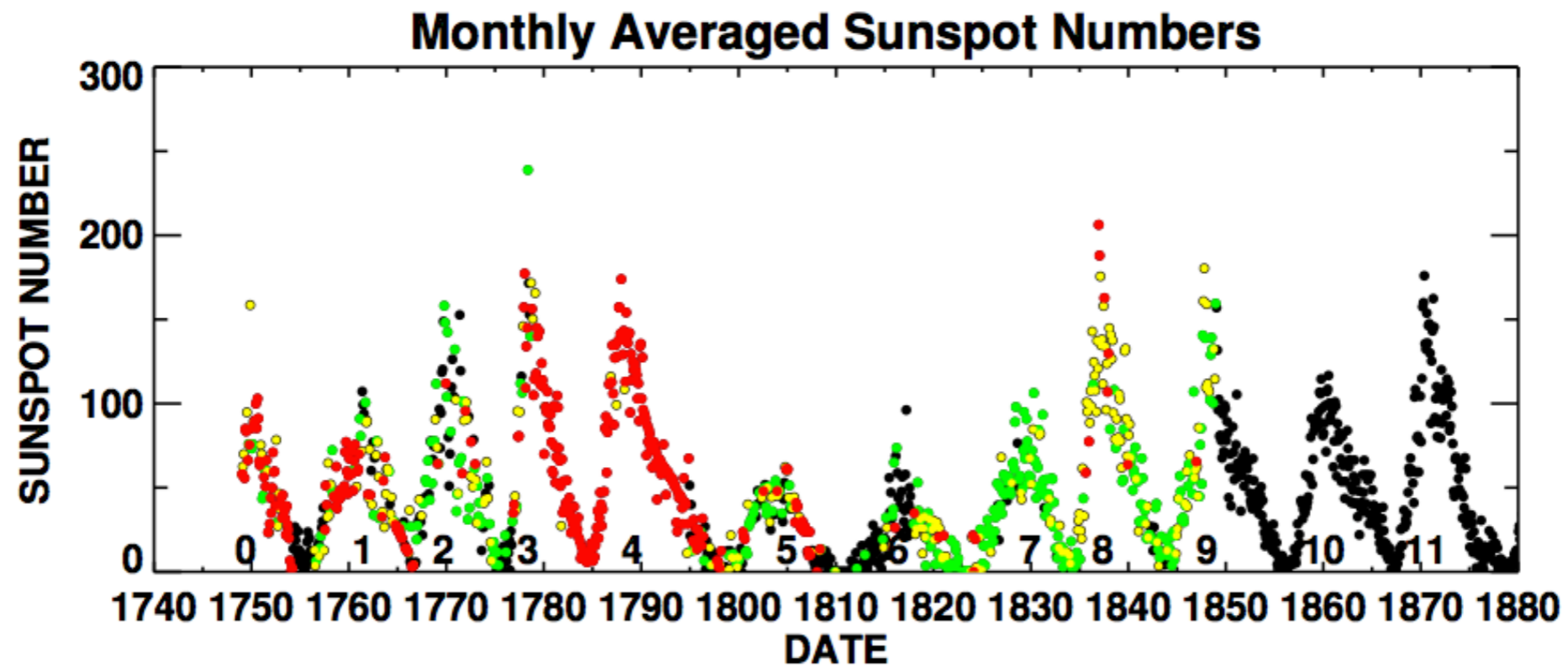


太陽周期活動

- 太陽の黒点は11年周期で増減する。
- 黒点は強い磁場を持ち、フレアやCMEを引き起こし、地磁気の活動に影響を与える。

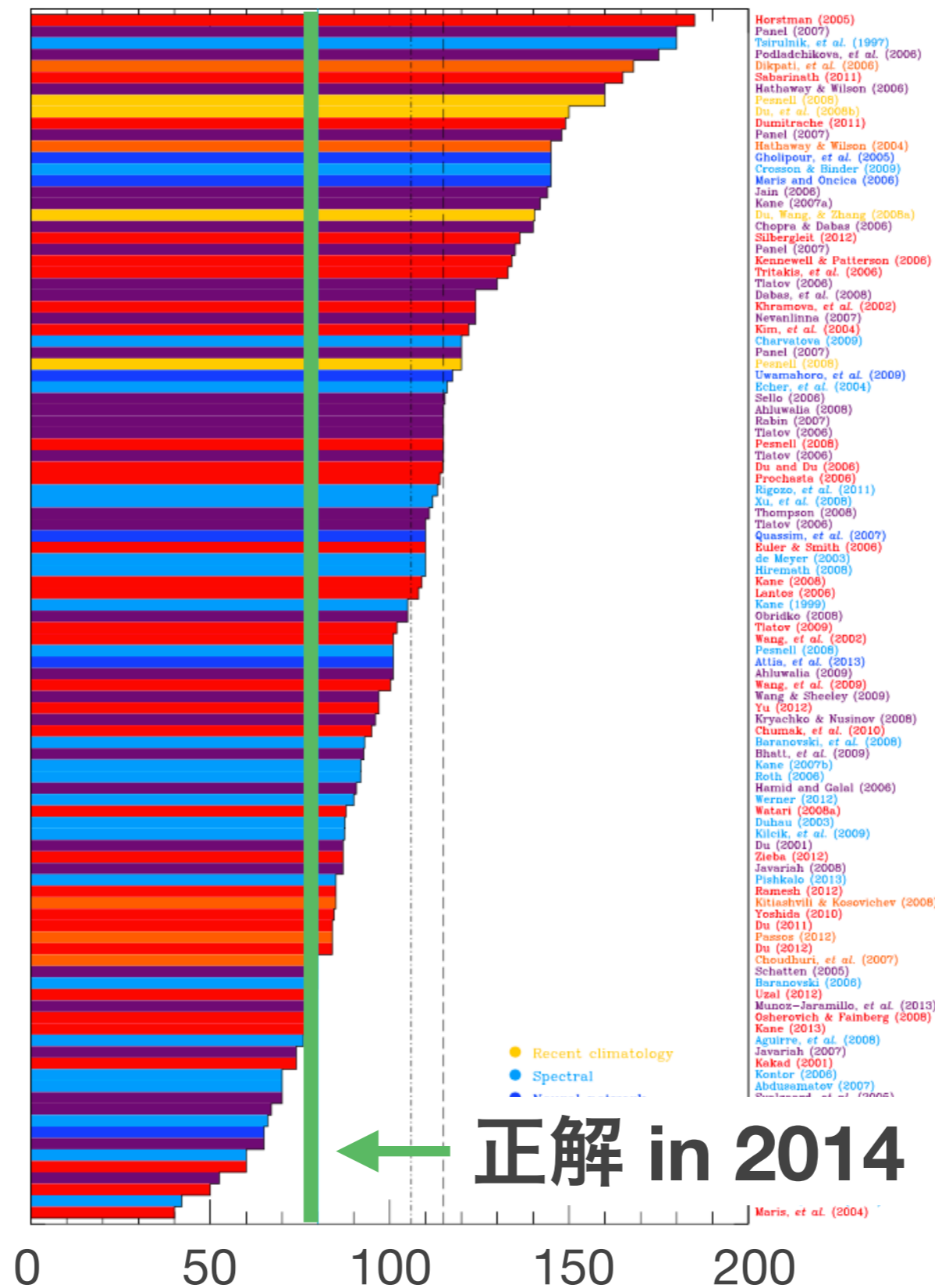
太陽活動を予測するには

黒点数の変化



Hathaway (2015)

今太陽活動周期（サイクル24）の予測研究



Pesnell (2016)

- Horstman (2005)
- Panel (2007)
- Tsirulnik, et al. (1997)
- Podladchikova, et al. (2006)
- Dikpati, et al. (2006)
- Sabarinath (2011)
- Hathaway & Wilson (2006)
- Pesnell (2008)
- Du, et al. (2008b)
- Dumitrache (2011)
- Panel (2007)
- Hathaway & Wilson (2004)
- Gholipour, et al. (2005)
- Crosson & Binder (2009)
- Maris and Oncica (2006)
- Jain (2006)
- Kane (2007a)
- Du, Wang, & Zhang (2008a)
- Chopra & Dabas (2006)
- Silbergleit (2012)
- Panel (2007)
- Kennewell & Patterson (2006)
- Tritakis, et al. (2006)
- Tlatov (2008)
- Dabas, et al. (2008)
- Khranova, et al. (2002)
- Nevanlinna (2007)
- Kim, et al. (2004)
- Charvatova (2009)
- Panel (2007)
- Pesnell (2008)
- Uwamahoro, et al. (2009)
- Echer, et al. (2004)
- Sello (2006)
- Ahluwalia (2008)
- Rabin (2007)
- Tlatov (2006)
- Pesnell (2008)
- Tlatov (2006)
- Du and Du (2006)
- Prochasta (2008)
- Rigozo, et al. (2011)
- Xu, et al. (2008)
- Thompson (2008)
- Tlatov (2006)
- Quassim, et al. (2007)
- Euler & Smith (2006)
- de Meyer (2003)
- Hiremath (2008)
- Kane (2008)
- Lantos (2006)
- Kane (1999)
- Obridko (2008)
- Tlatov (2009)
- Wang, et al. (2002)
- Pesnell (2008)
- Atlia, et al. (2013)
- Ahluwalia (2009)
- Wang, et al. (2009)
- Wang & Sheeley (2009)
- Yu (2012)
- Kryachko & Nusinov (2008)
- Chumak, et al. (2010)
- Baranovski, et al. (2008)
- Bhatt, et al. (2009)
- Kane (2007b)
- Roth (2008)
- Hamid and Galal (2006)
- Werner (2012)
- Watari (2008a)
- Dubau (2003)
- Kilecik, et al. (2009)
- Du (2001)
- Zieba (2012)
- Javariah (2008)
- Pishkalo (2013)
- Ramesh (2012)
- Kitiashvili & Kosovichev (2008)
- Yoshida (2010)
- Du (2011)
- Pascoe (2012)
- Du (2012)
- Choudhuri, et al. (2007)
- Schatten (2005)
- Branovski (2008)
- Uzal (2012)
- Munoz-Jaramillo, et al. (2013)
- Osherovich & Fainberg (2008)
- Kane (2013)
- Aguirre, et al. (2008)
- Javariah (2007)
- Kakad (2001)
- Kontor (2006)
- Abdusematov (2007)
- Swanson, et al. (2005)

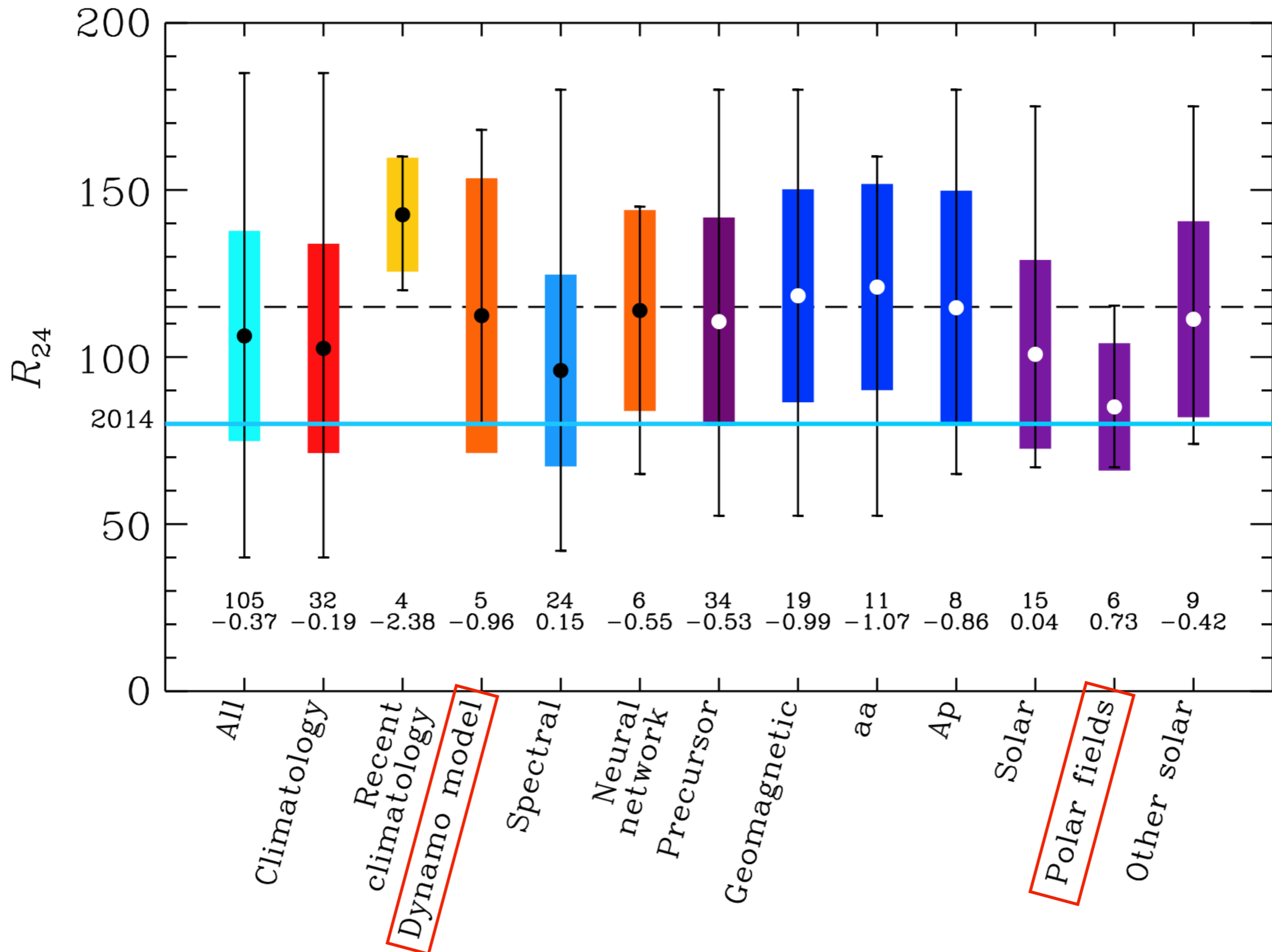
正解 in 2014

Maris, et al. (2004)

代表的な予測手法

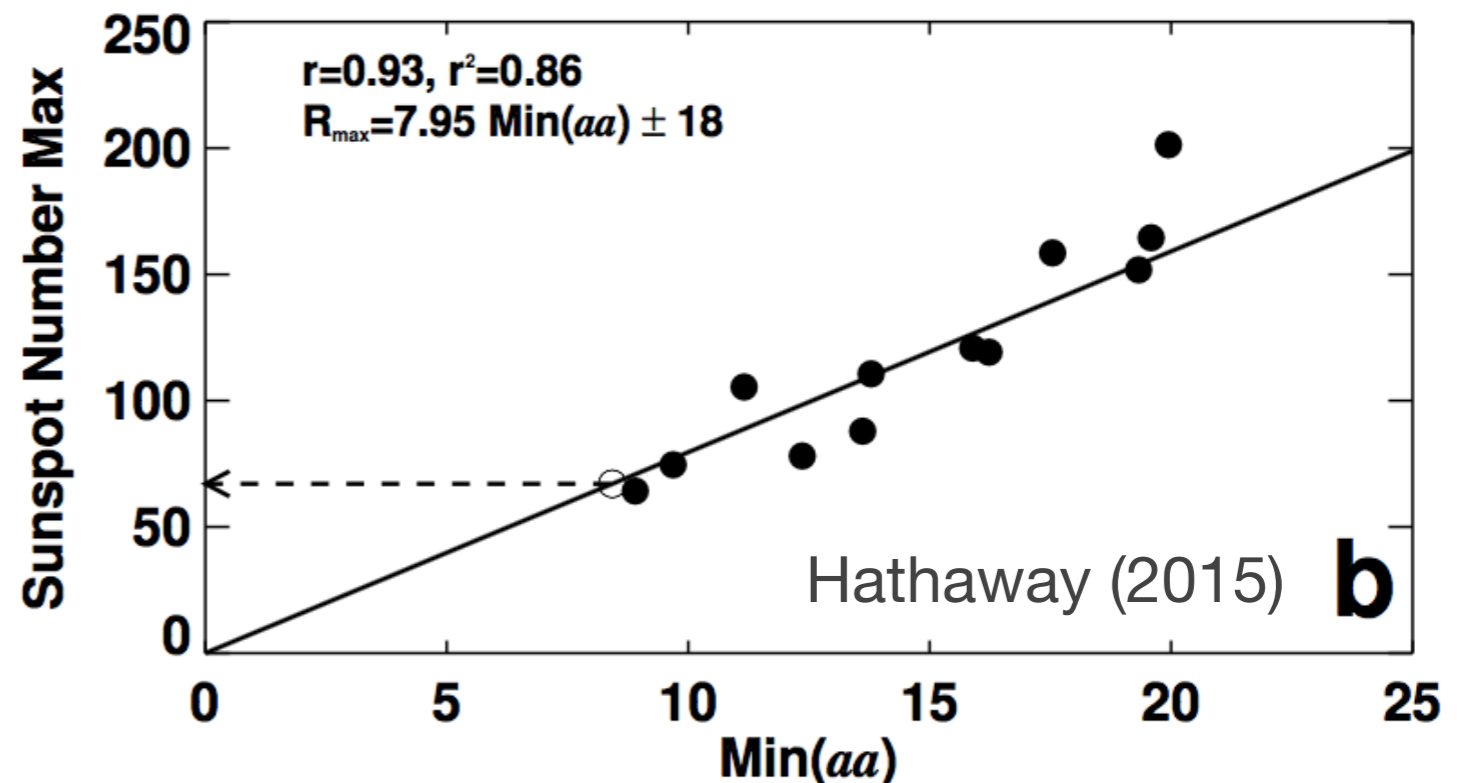
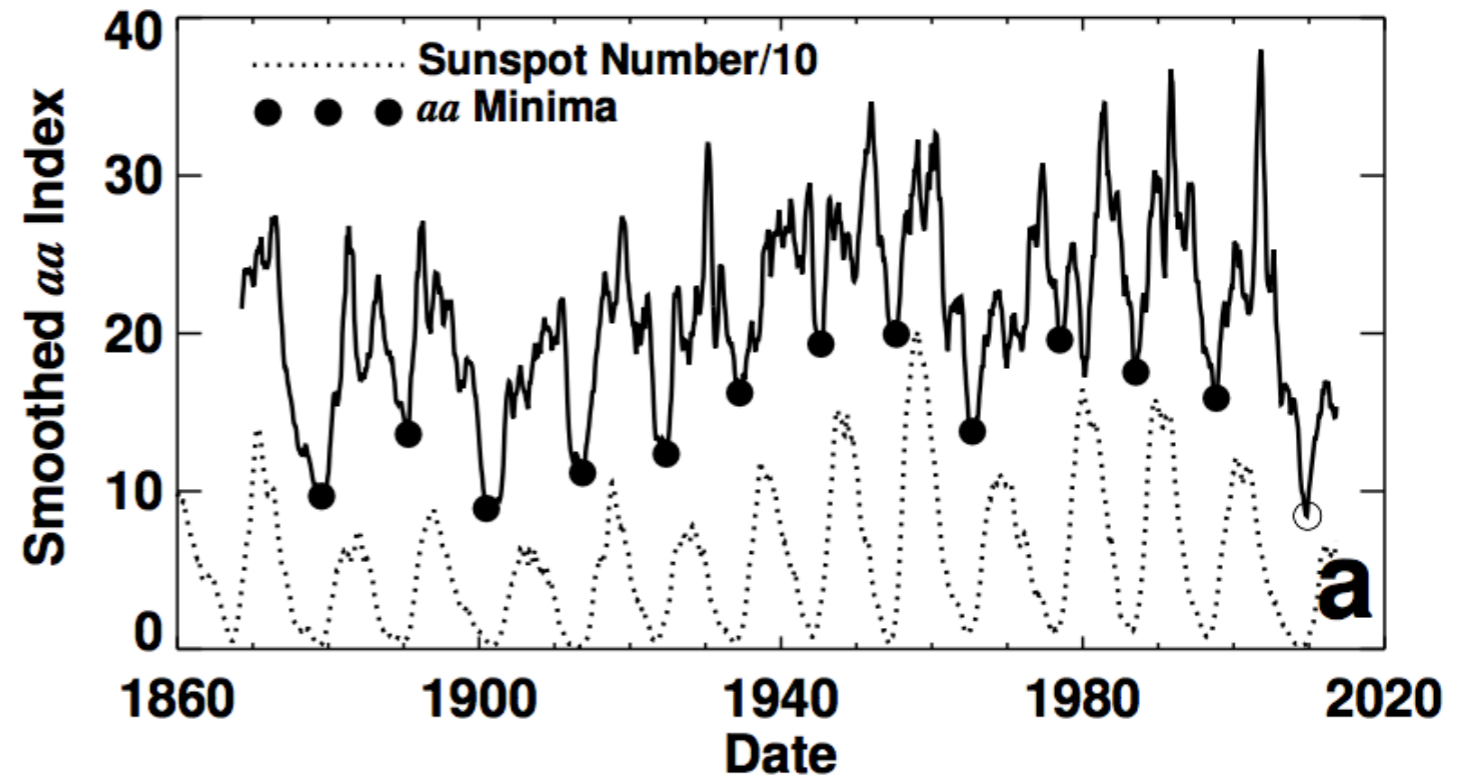
- 統計的外挿
 - 統計数理的なモデル、機械学習など。
- プレディクター
 - 黒点数、地磁気活動度指数など。
- 物理モデル
 - ダイナモモデルなど。

今太陽活動周期（サイクル24）の予測研究



極小期の地磁気活動度指数と次の周期の黒点数

極小期における地磁気活動度指数(aa指数)は、次の周期の最大黒点数と高い相関を持つ (Ohl, 1966)。

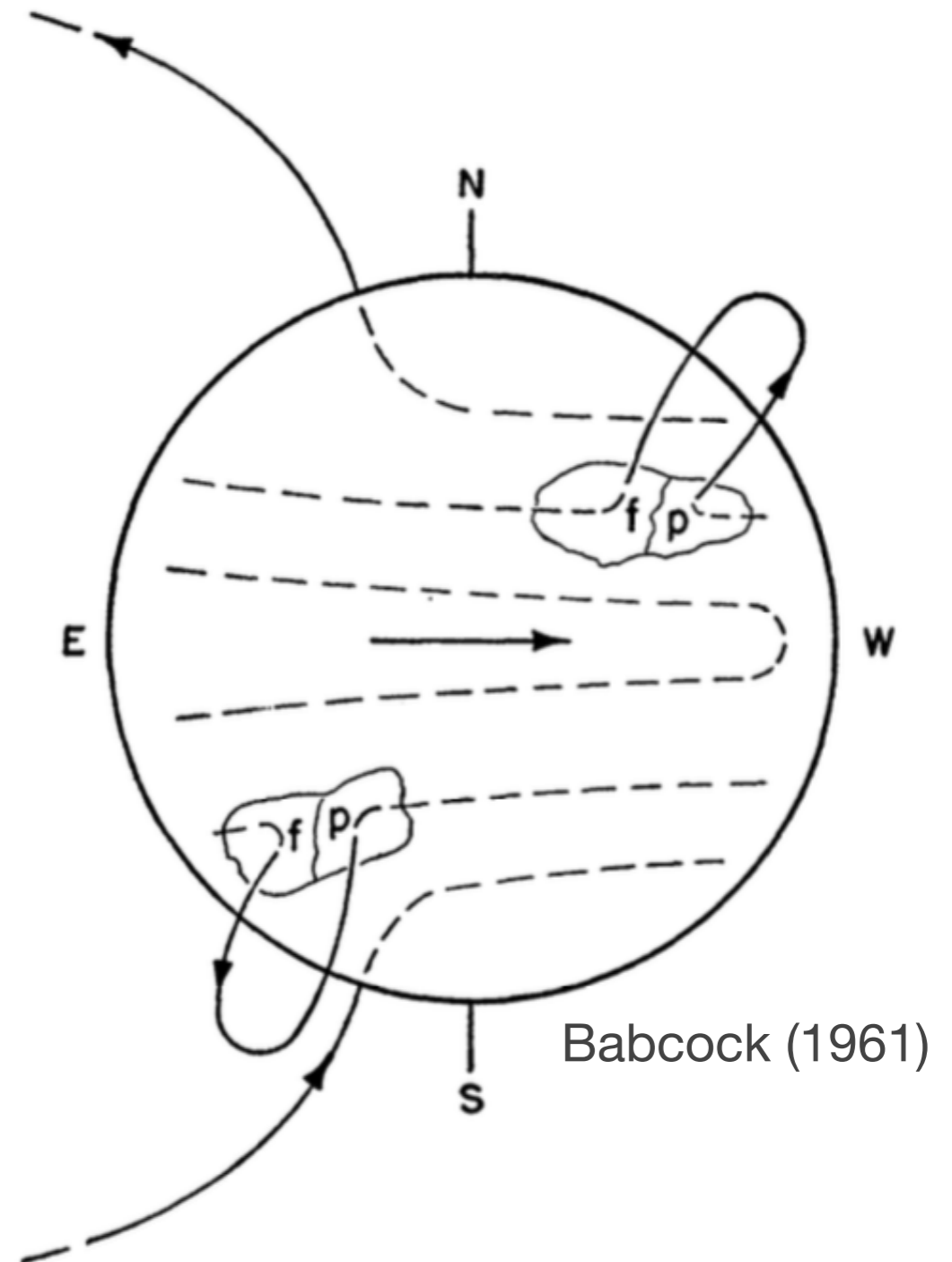


極磁場とトロイダル磁場

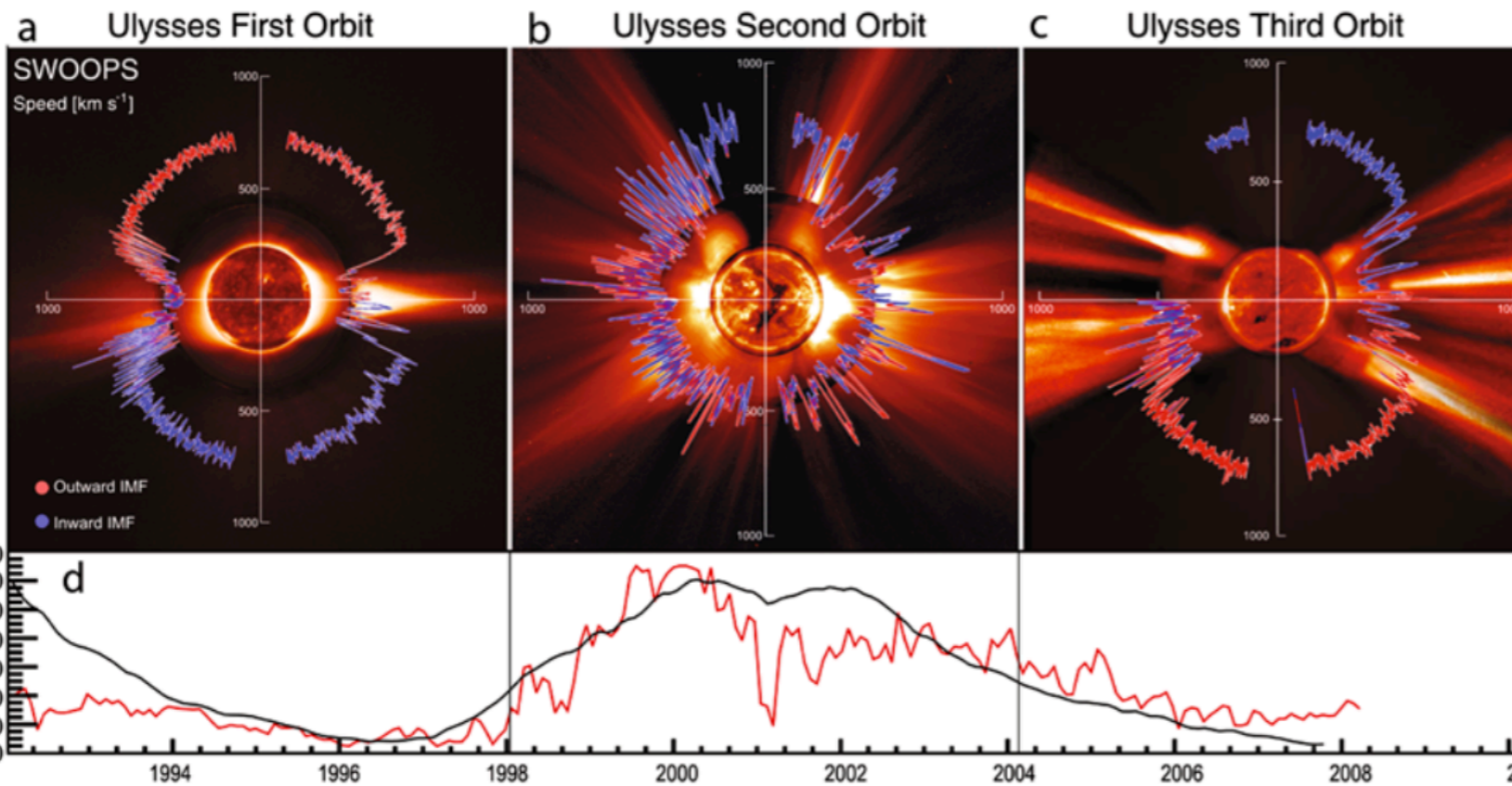
Toroidal: B_ϕ

Poloidal: B_r and B_θ

太陽表面で観測される**極磁場**は、 **Ω 効果**で差動回転によりひねられるポロイダル磁場の現れであり、黒点を生み出す**トロイダル磁場**に直接的に関係している。



極小期の地磁気活動度指数と極磁場

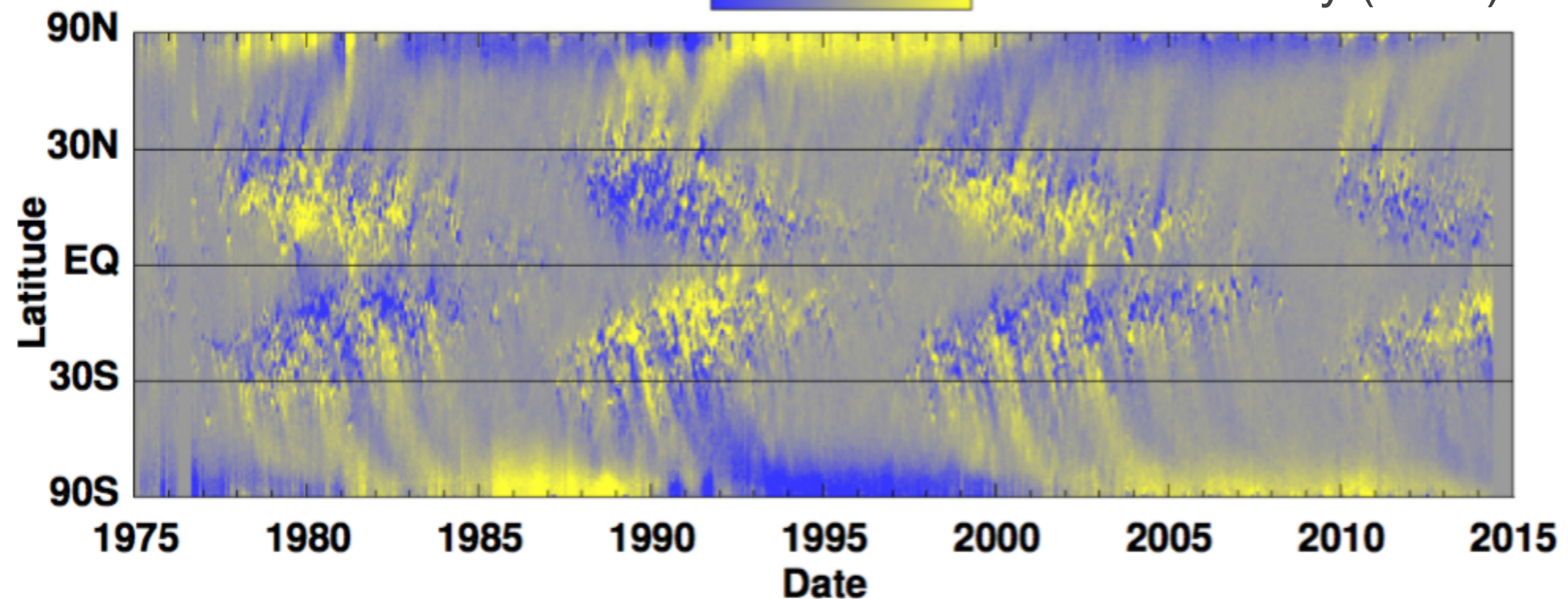


McComas et al. (2008)

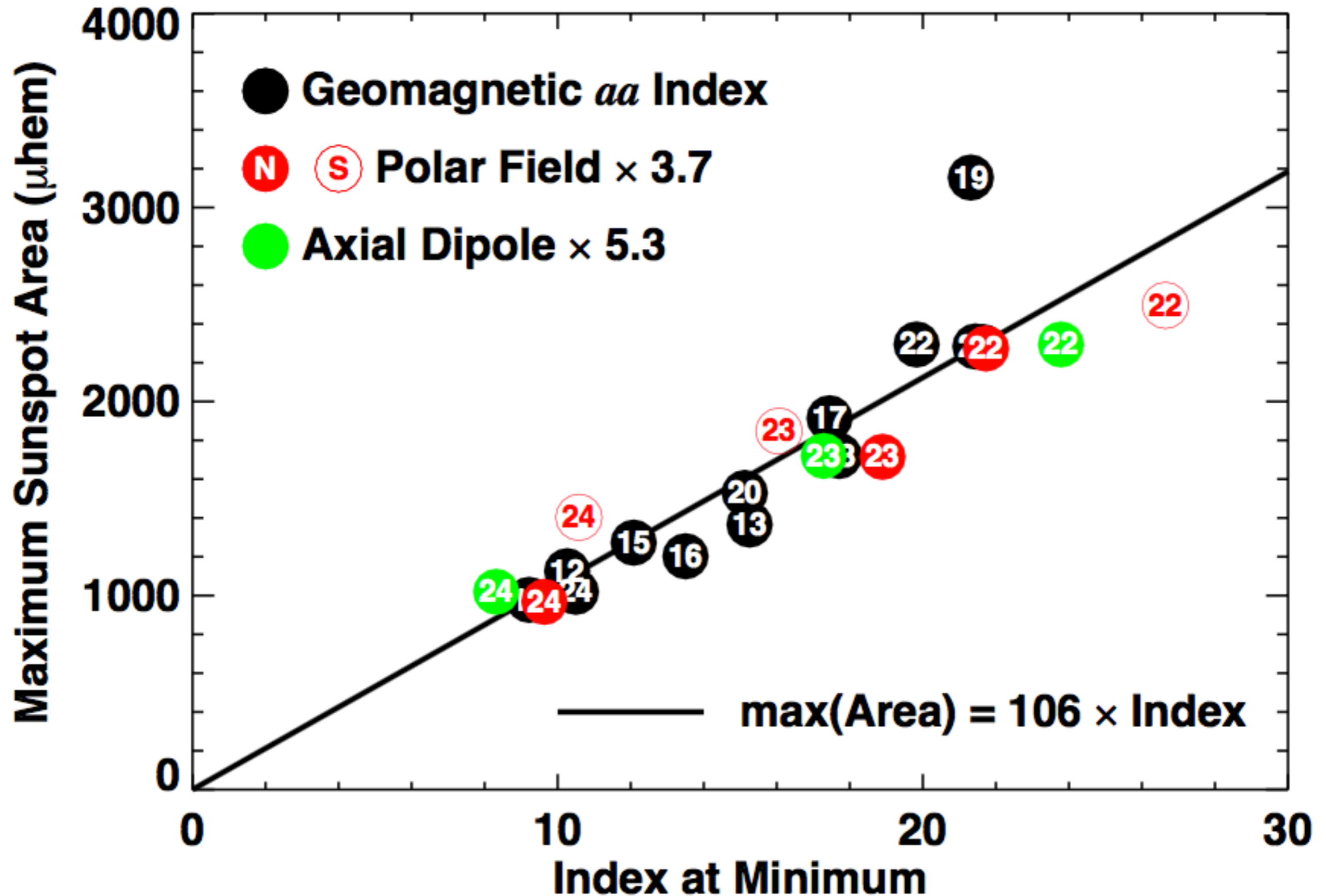
上: 太陽風速度の分布
下: 磁気蝶形図

-10G 0 +10G

Hathaway (2015)



極小期の極磁場と次の周期の黒点数



太陽活動を予測するには

- 太陽周期活動の予測はなかなか当たらない。
- 全員が信じているダイナモモデルはない。
- 極小期の極磁場（地磁気活動度指数、磁気ダイポールモーメント）と次の太陽周期の強度は、高い相関を持つ。

表面磁束輸送モデル

基礎方程式

表面上の B_R の時間発展は、球面上の移流拡散方程式で表される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (BR_{\odot}^2 \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} (V_{\theta} BR_{\odot} \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \phi} (V_{\phi} BR_{\odot}) \\ &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\eta_H \sin \theta \frac{\partial B}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\eta_H}{\sin \theta} \frac{\partial B}{\partial \phi} \right) + SR_{\odot}^2 \sin \theta \end{aligned}$$

Meridional flow **Differential rotation**

Diffusion by the turbulent convection **Flux emergence**

θ : colatitude

ϕ : longitude

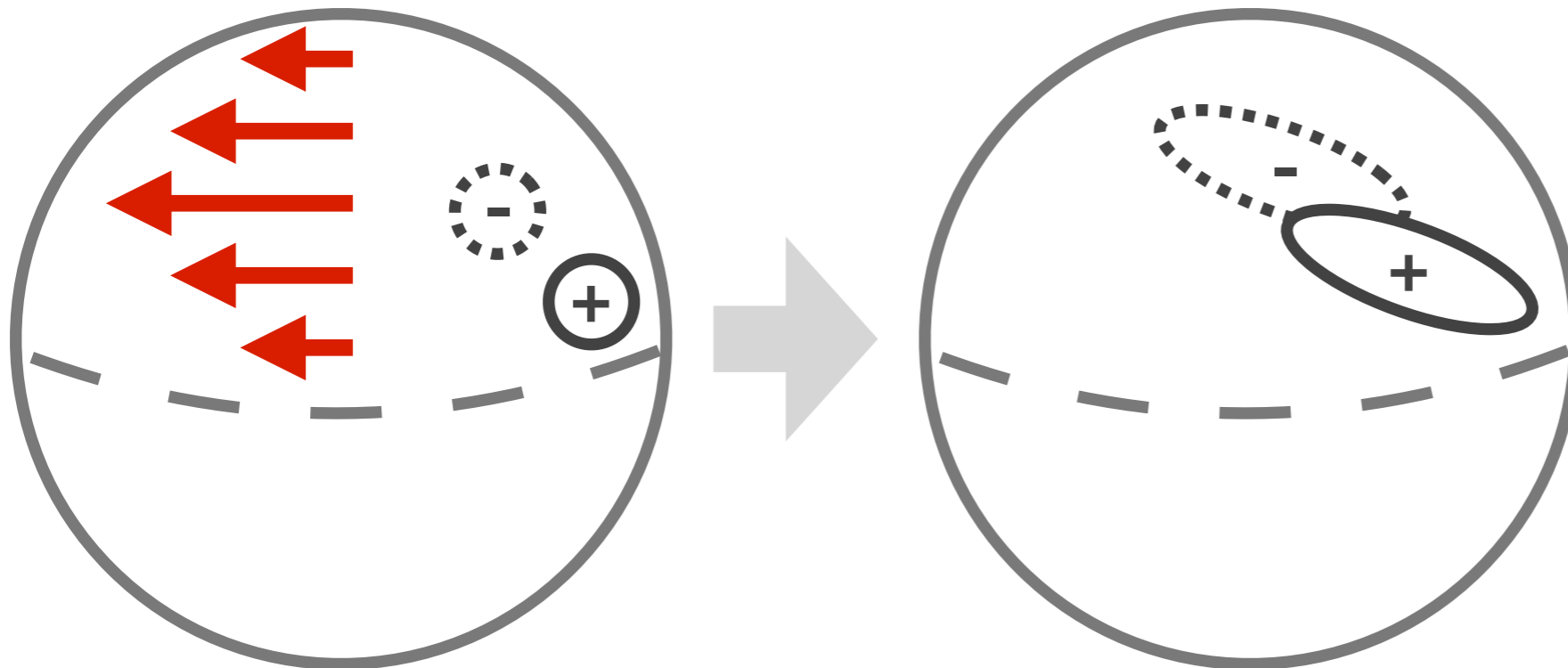
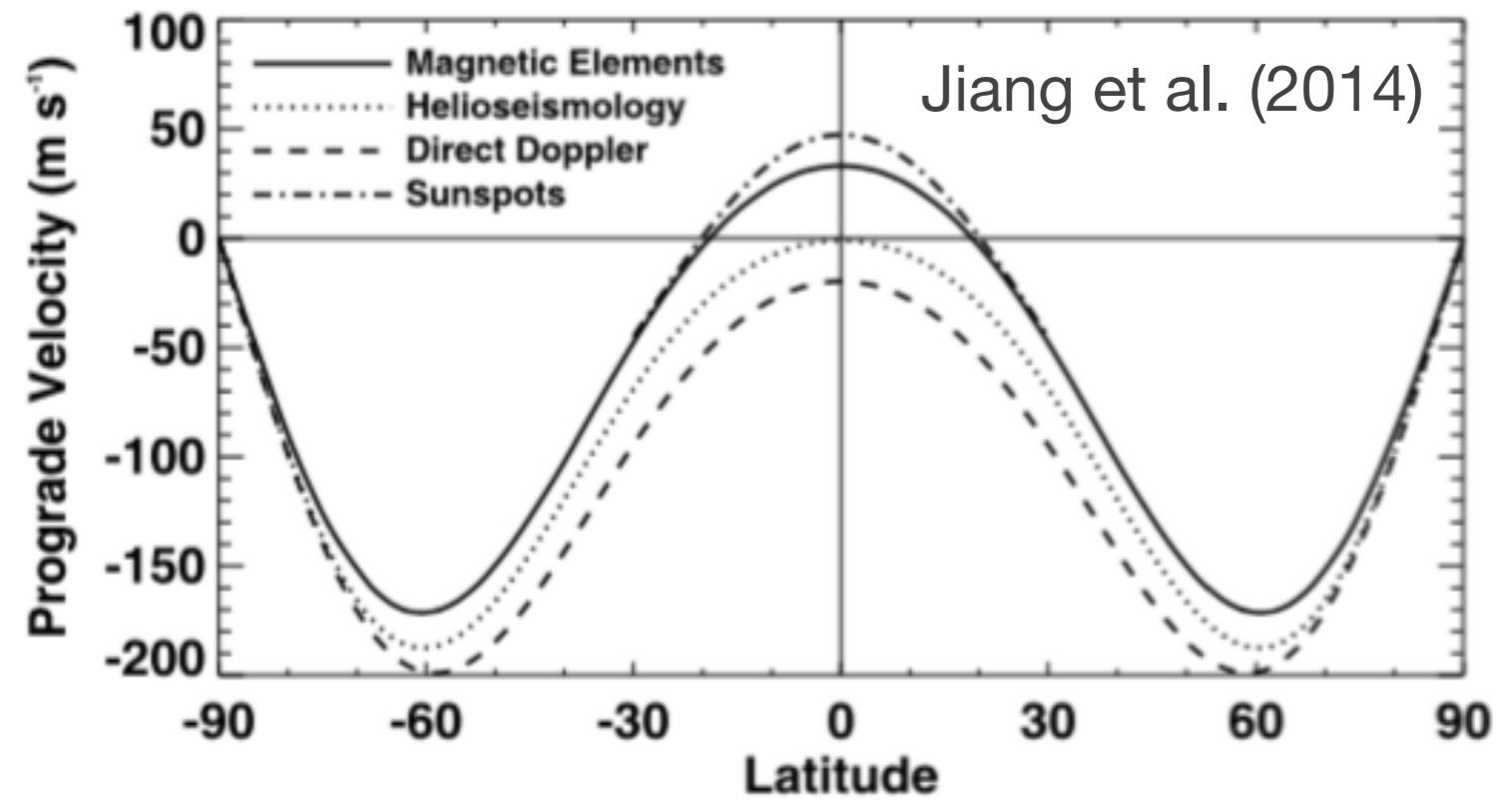
R_{\odot} : solar radius

V_s : s-velocity

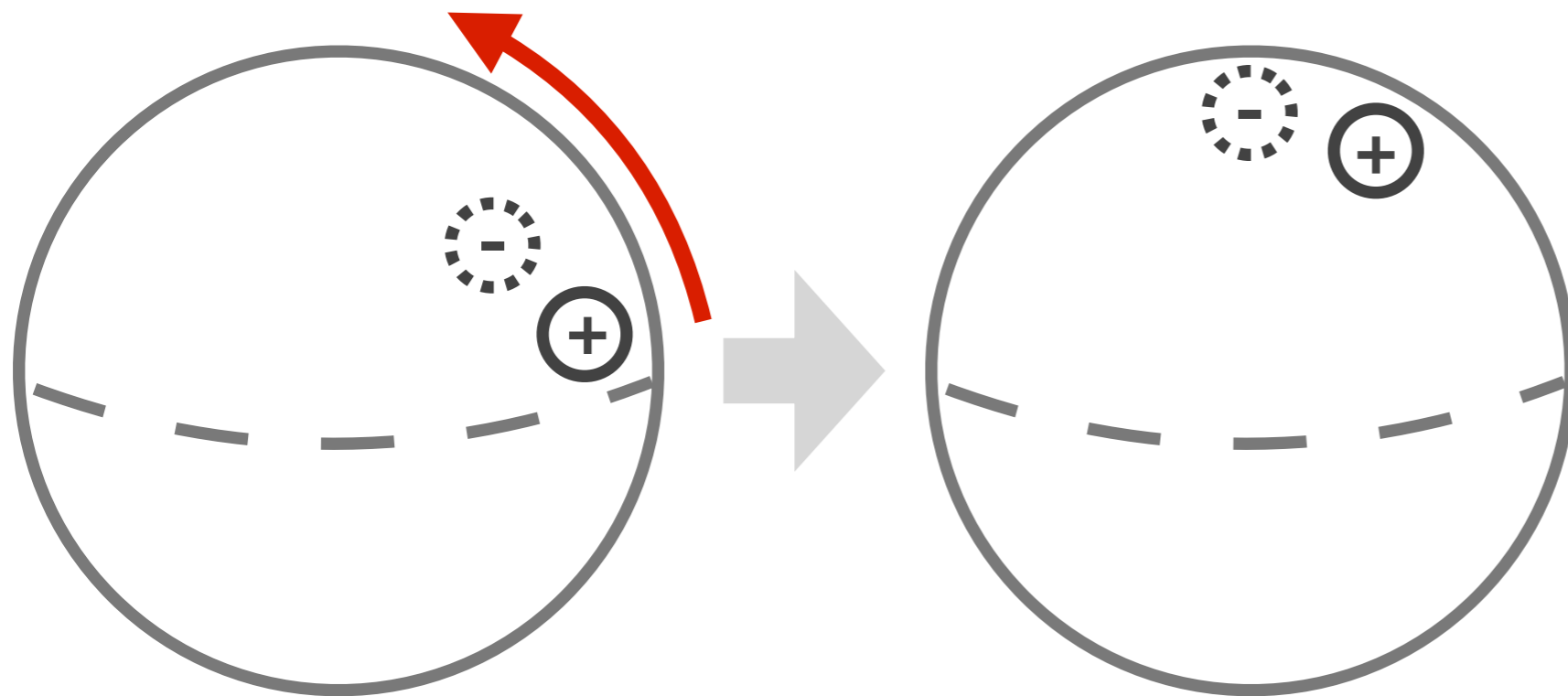
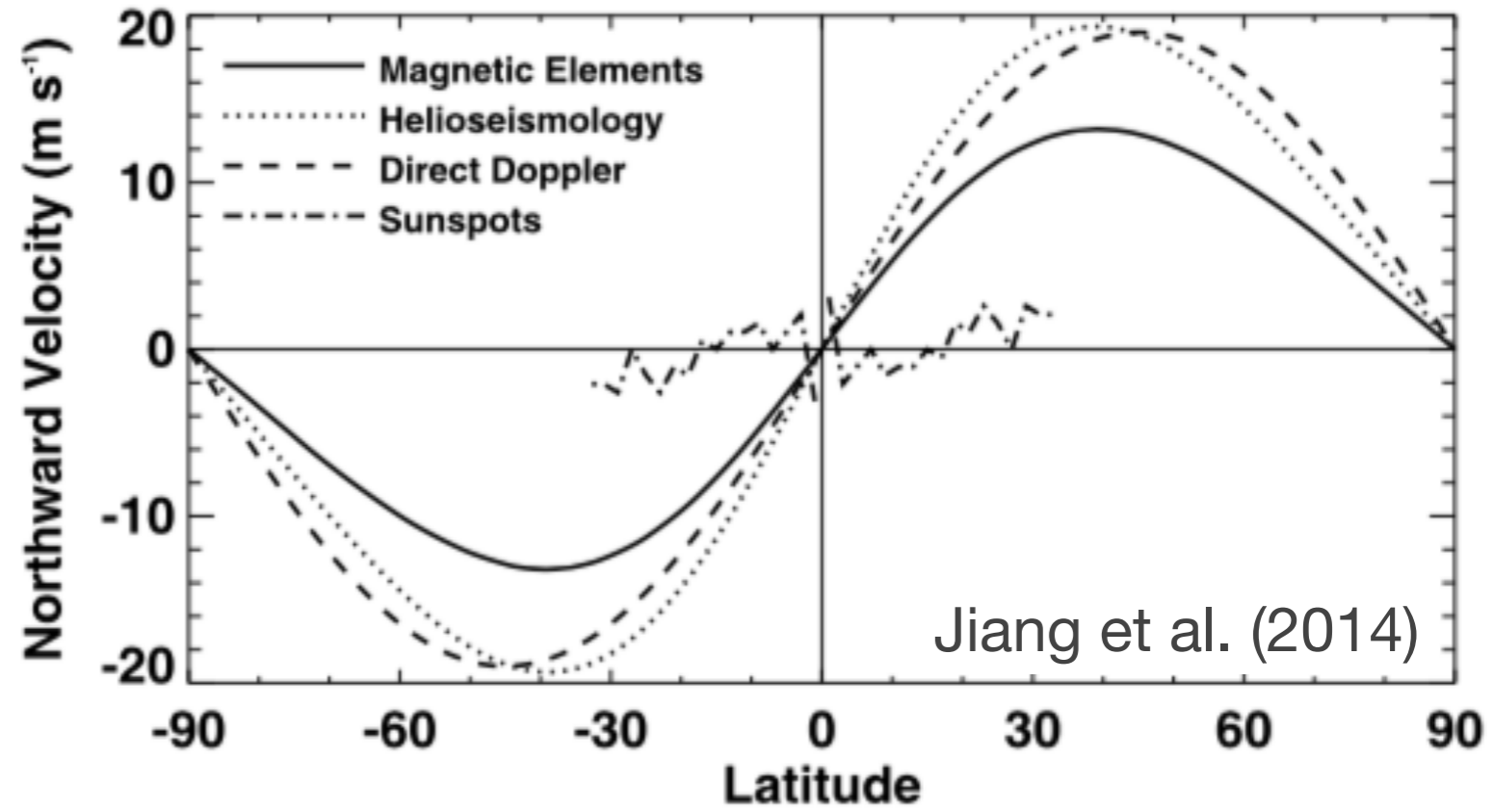
η_H : turbulent diffusivity

S : flux emergence

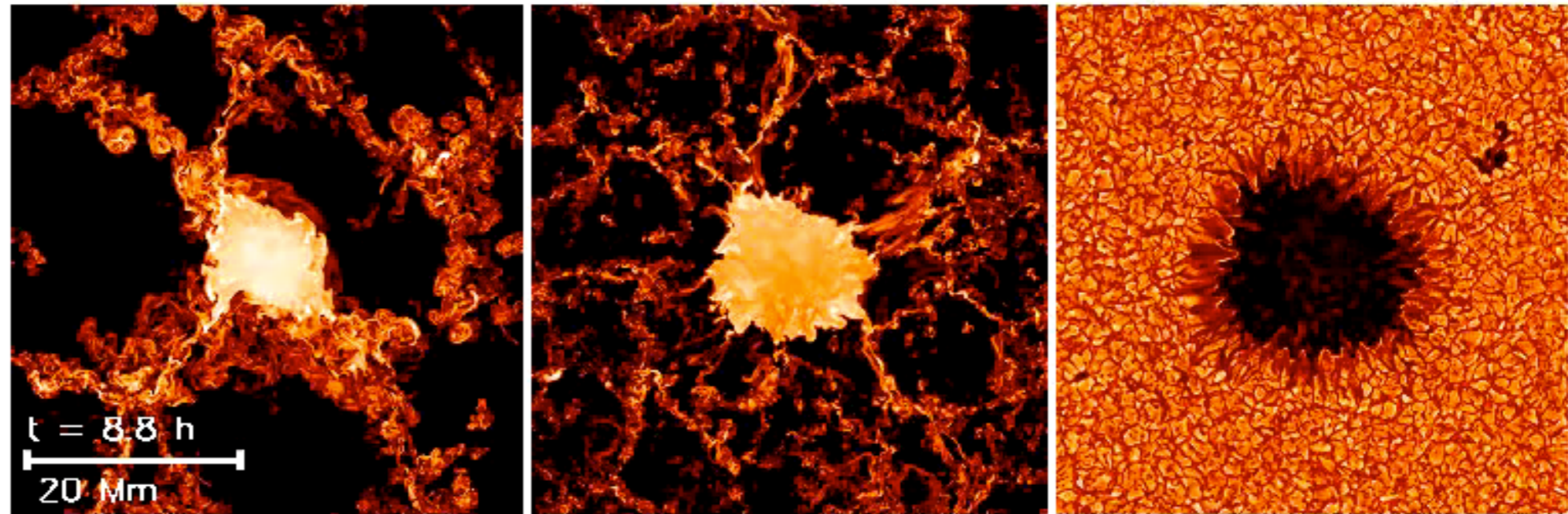
差動回轉



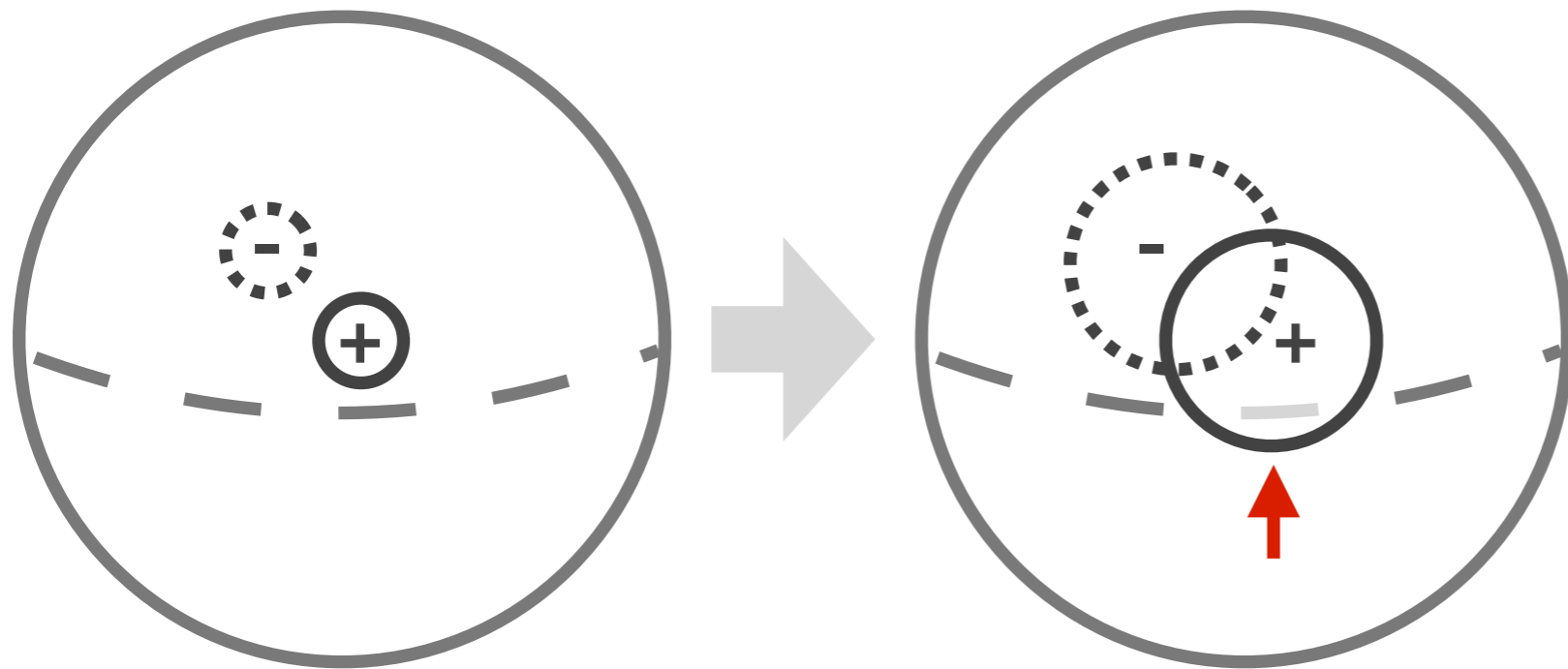
子午面流



乱流拡散



Rempel (2011b)



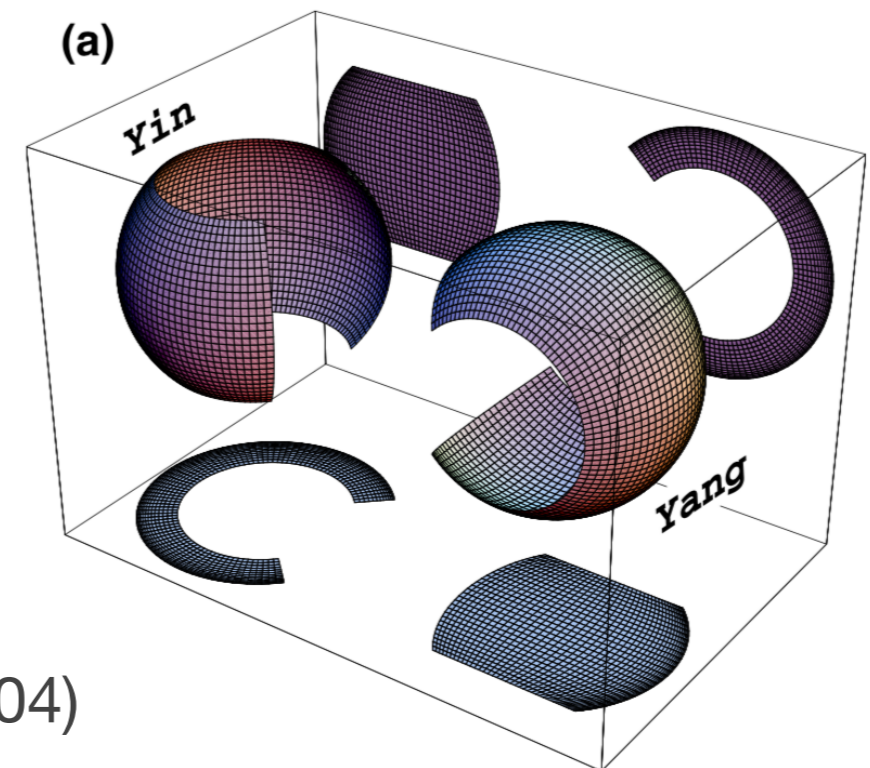
新しい表面磁束輸送コード

Spherical coordinates with Yin-Yang grid

2nd-order MUSCL method with MC limiter

2nd-order SSP Runge-Kutta method

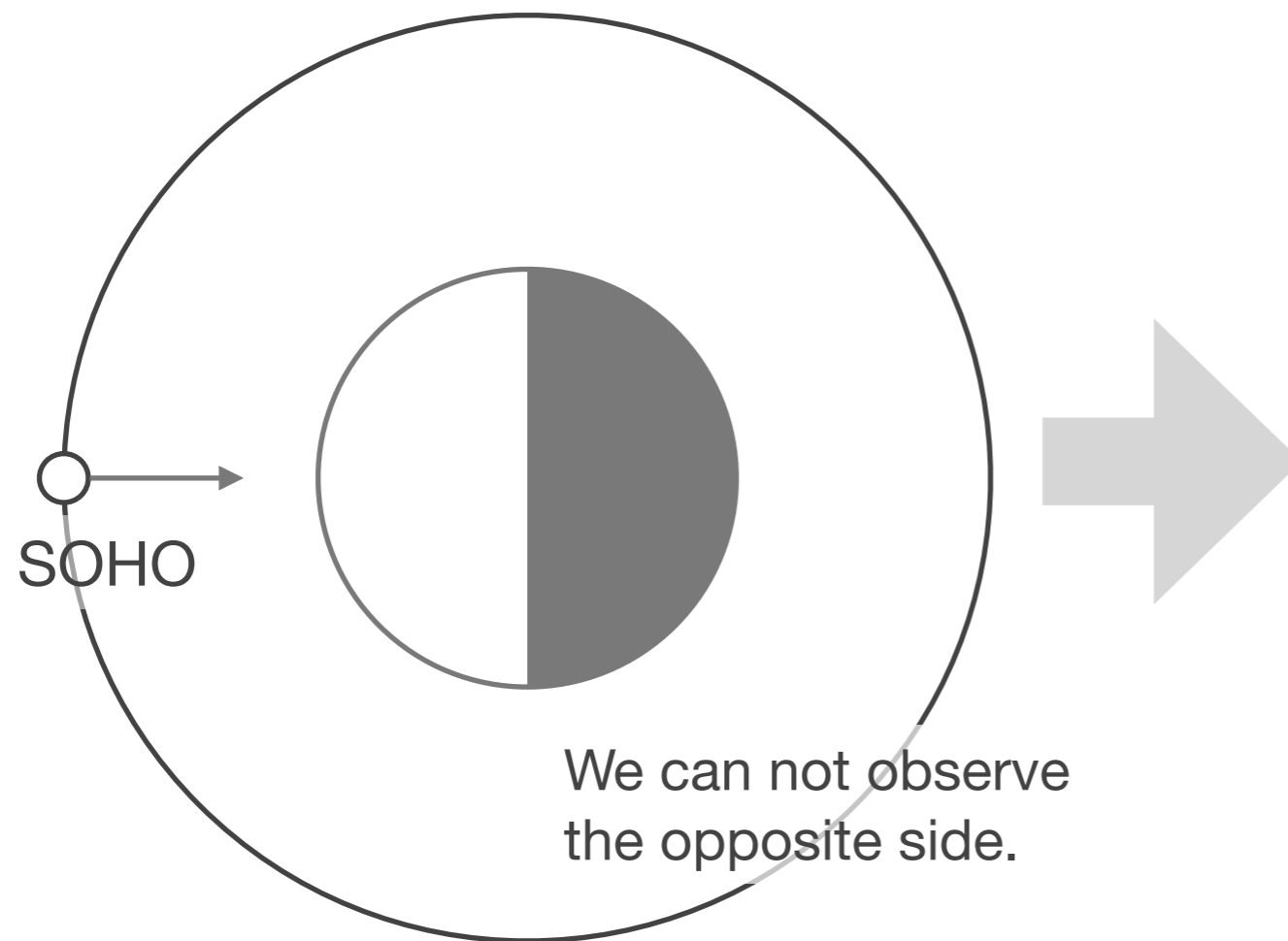
MPI parallelized



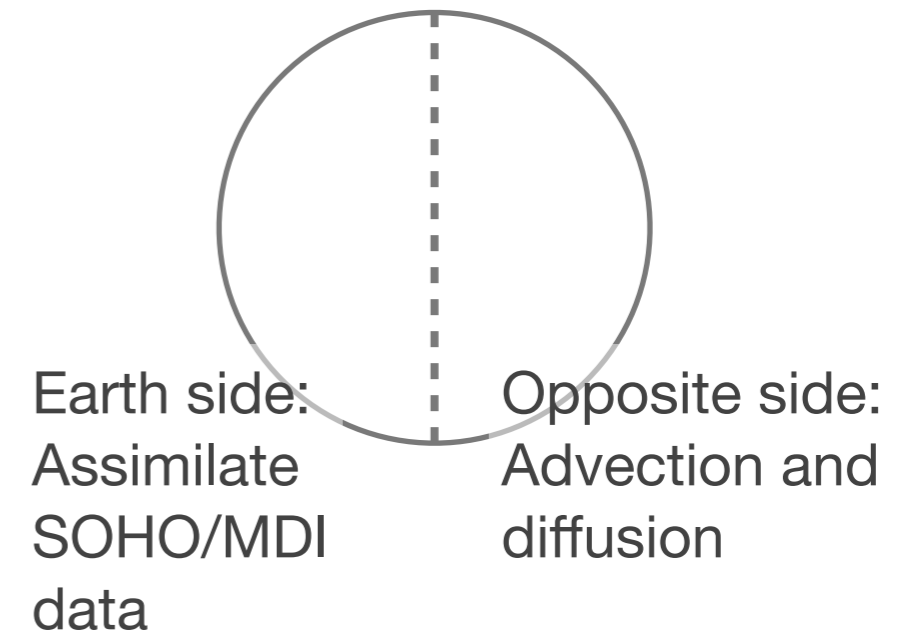
Kageyama & Sato (2004)

太陽表面磁場観測に基づくデータ駆動計算

Observation

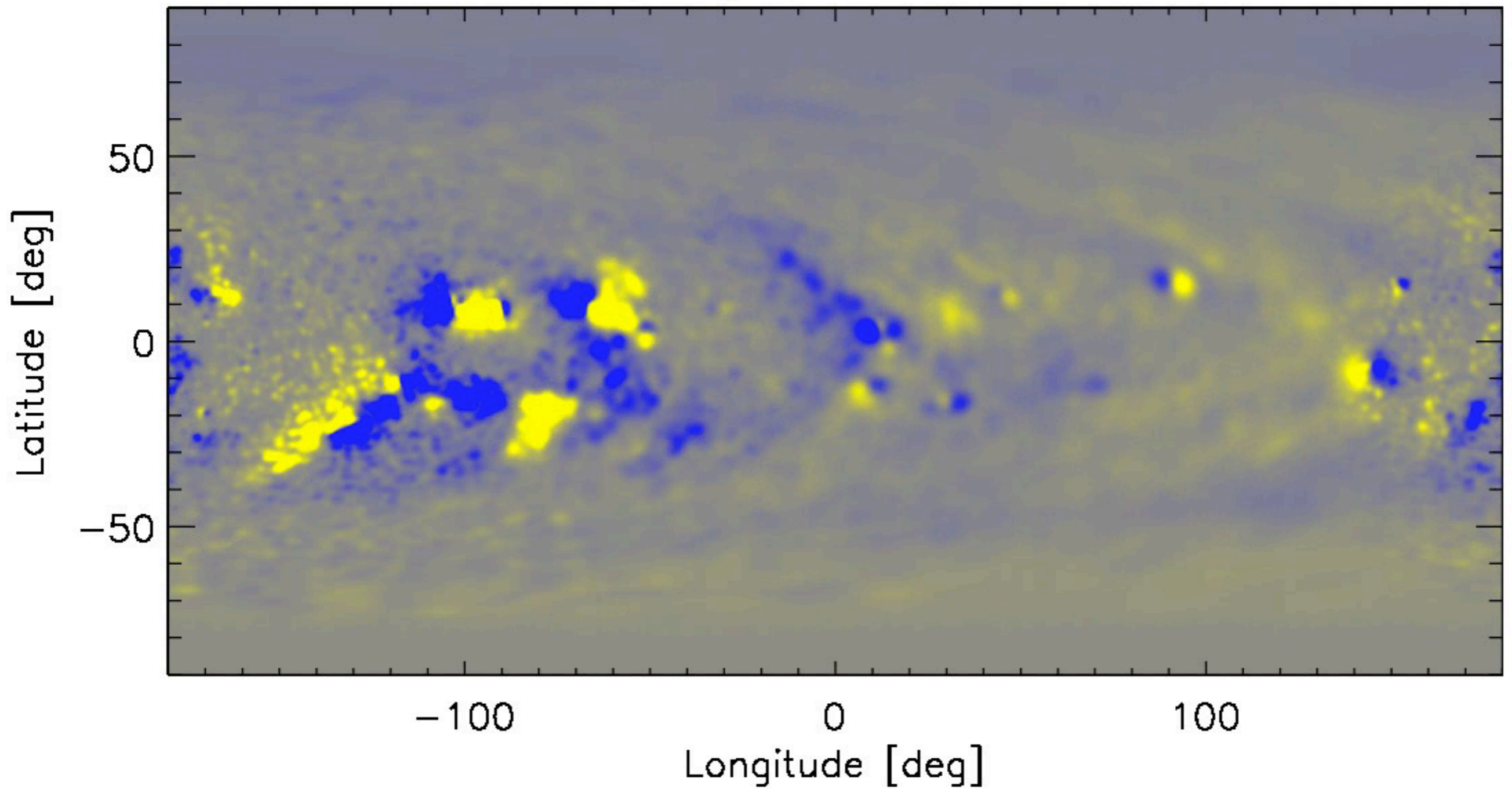


SFT

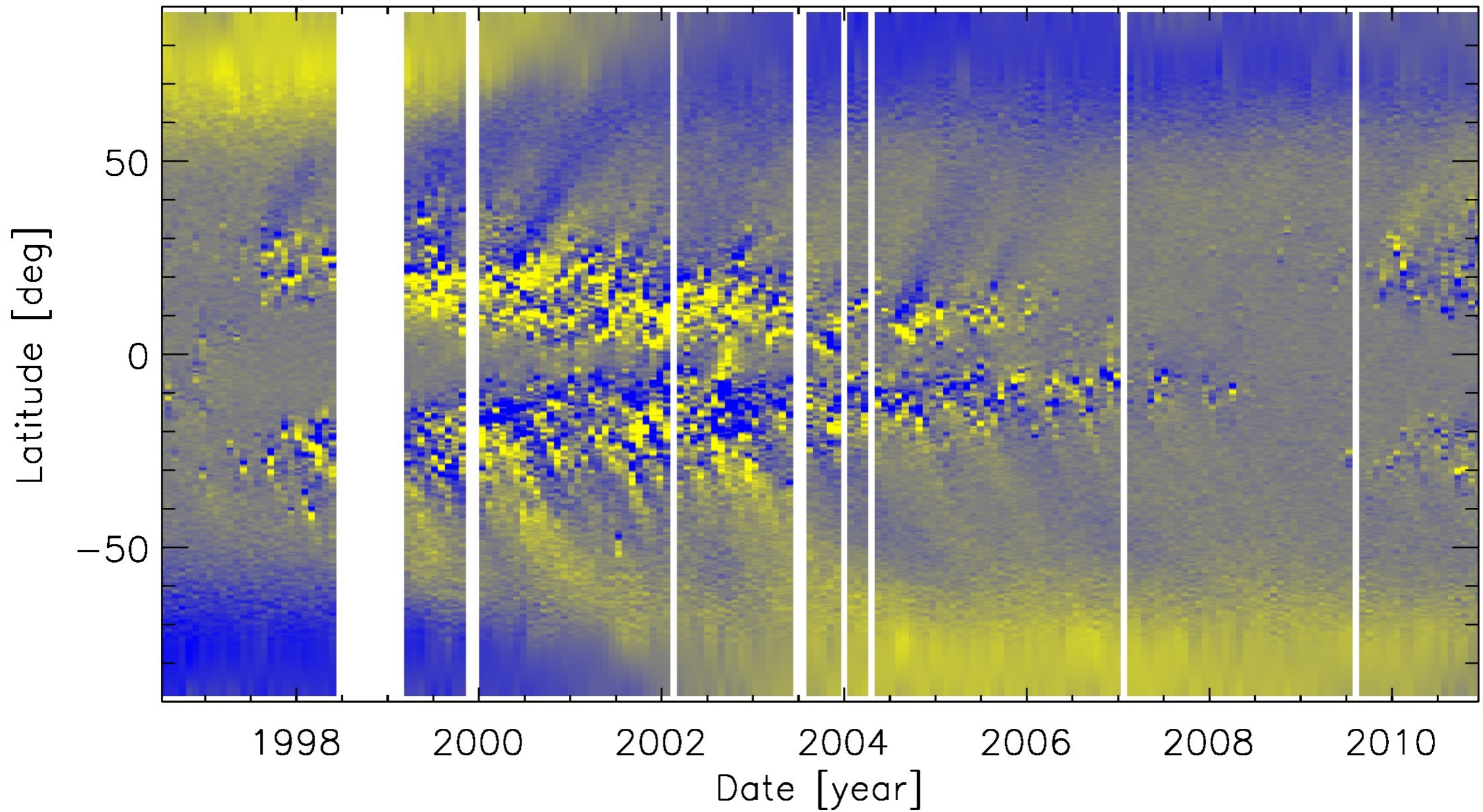


Results

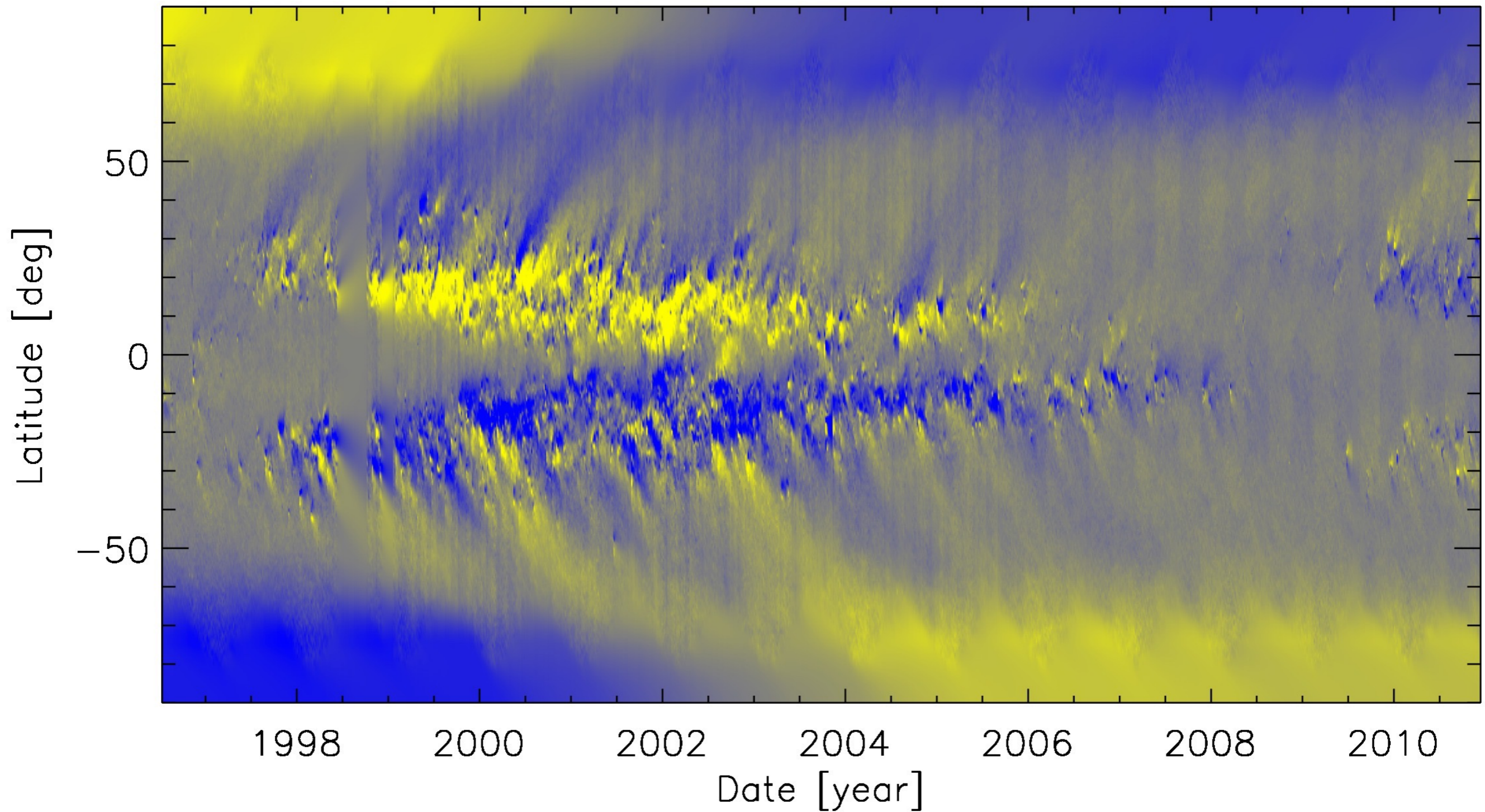
2003/12/30 23:59:28.000



Magnetic butterfly diagram | SOHO/MDI



Magnetic butterfly diagram | Simulation

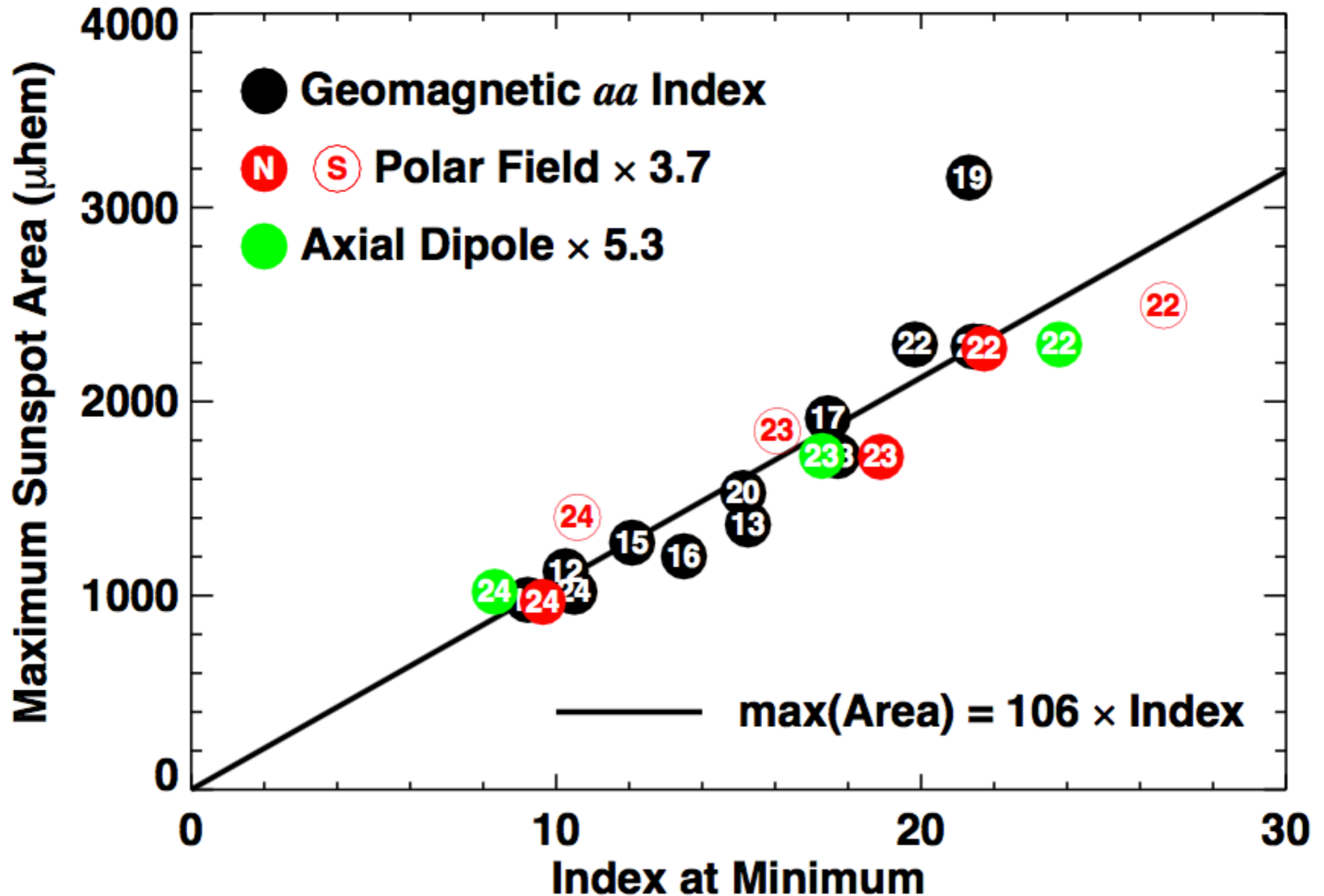


表面磁束輸送モデル

- 表面磁束輸送モデルは、太陽表面上の磁束の2次元的な輸送を記述するモデル。
- 観測される磁場を直接挿入することで、観測できない極付近の磁場や太陽の裏側の磁場構造を得ることができる。

表面磁束輸送モデルを用いた 次期太陽周期活動度の予測

極小期の極磁場と次の周期の黒点数



基礎方程式

表面上の B_R の時間発展は、球面上の移流拡散方程式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (B R_{\odot}^2 \sin \theta) &+ \frac{\partial}{\partial \theta} (V_{\theta} B R_{\odot} \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \phi} (V_{\phi} B R_{\odot}) \\ &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\eta_H \sin \theta \frac{\partial B}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\eta_H}{\sin \theta} \frac{\partial B}{\partial \phi} \right) + S R_{\odot}^2 \sin \theta \end{aligned}$$

Meridional flow **Differential rotation**

Diffusion by the turbulent convection **Flux emergence**

θ : colatitude

ϕ : longitude

R_{\odot} : solar radius

V_s : s-velocity

η_H : turbulent diffusivity

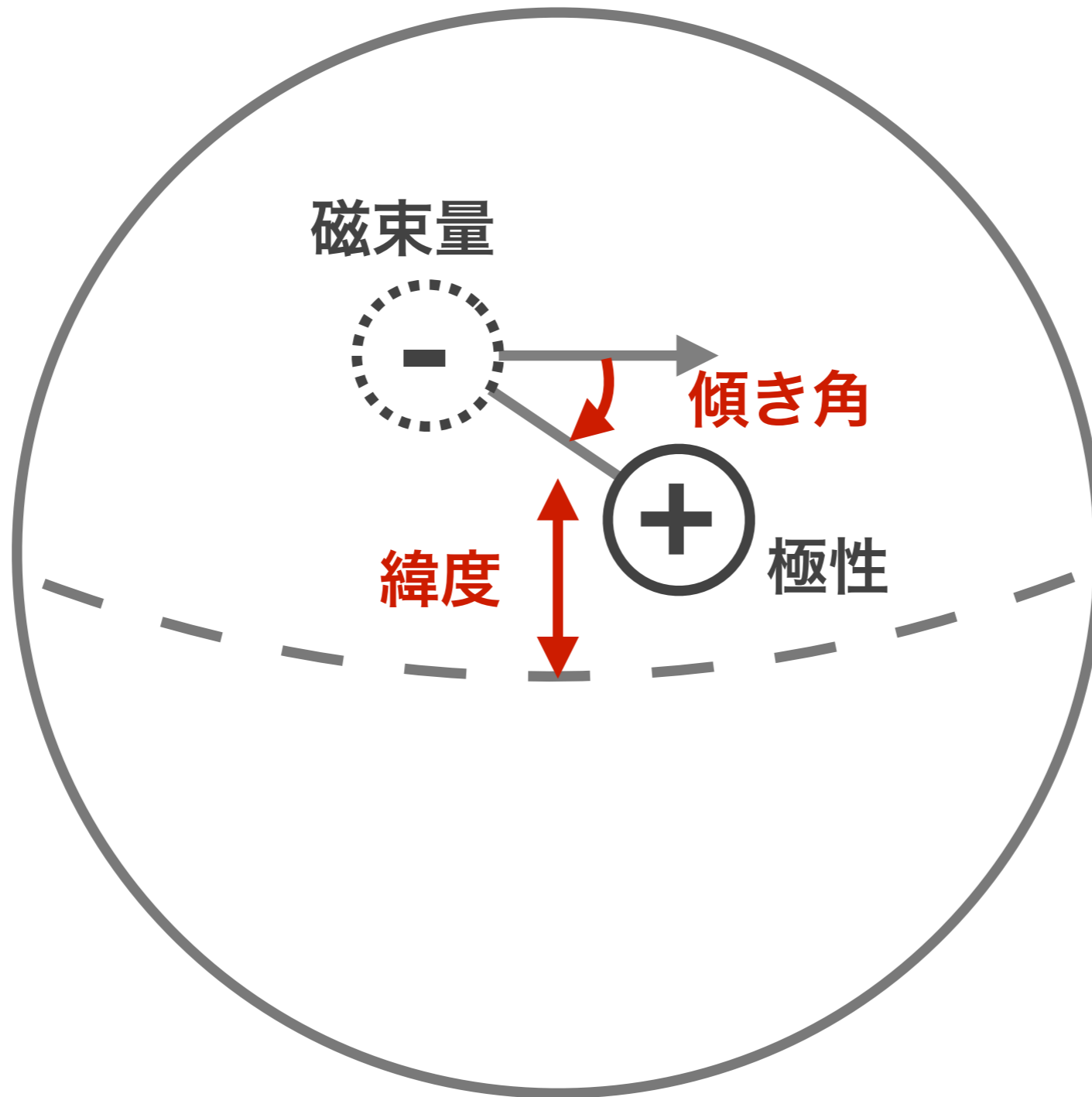
S : flux emergence

Rempel & Cheung (2014)

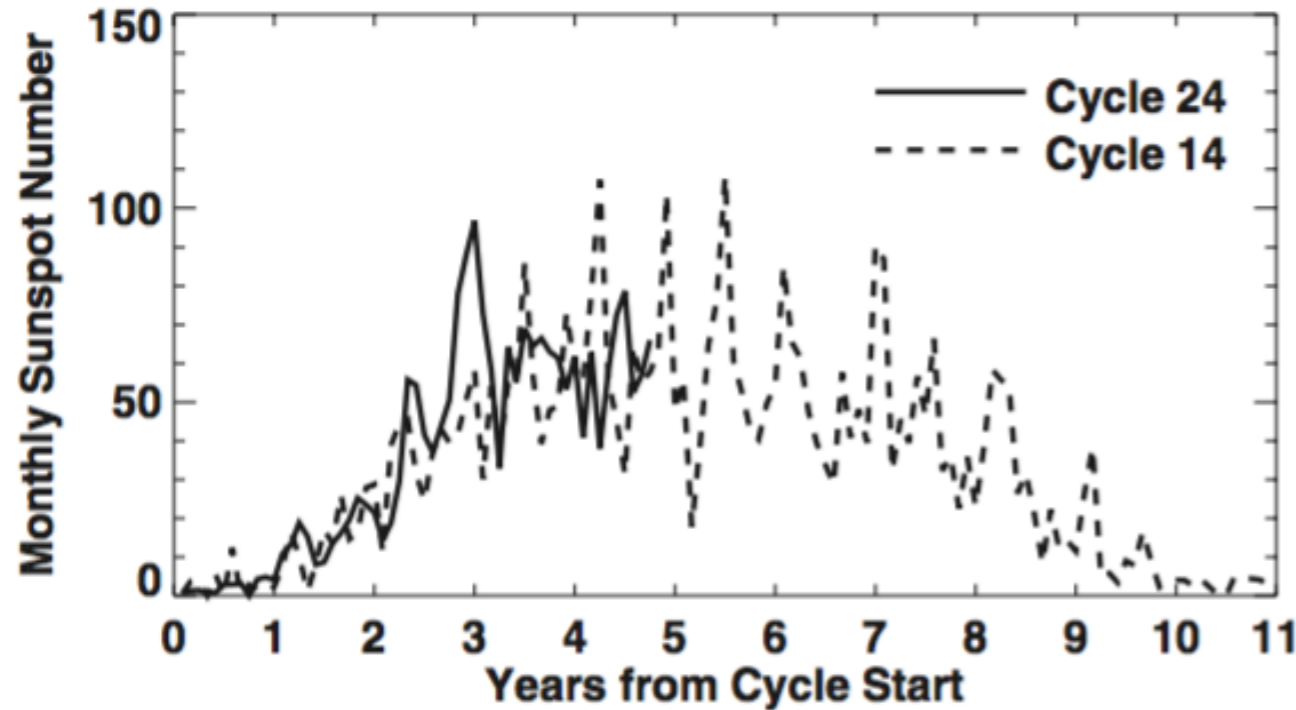
$t = 0.0$ h

30 Mm

浮上磁場のパラメータ



SFTによるサイクル24/25 (2020年ごろ)の予測研究



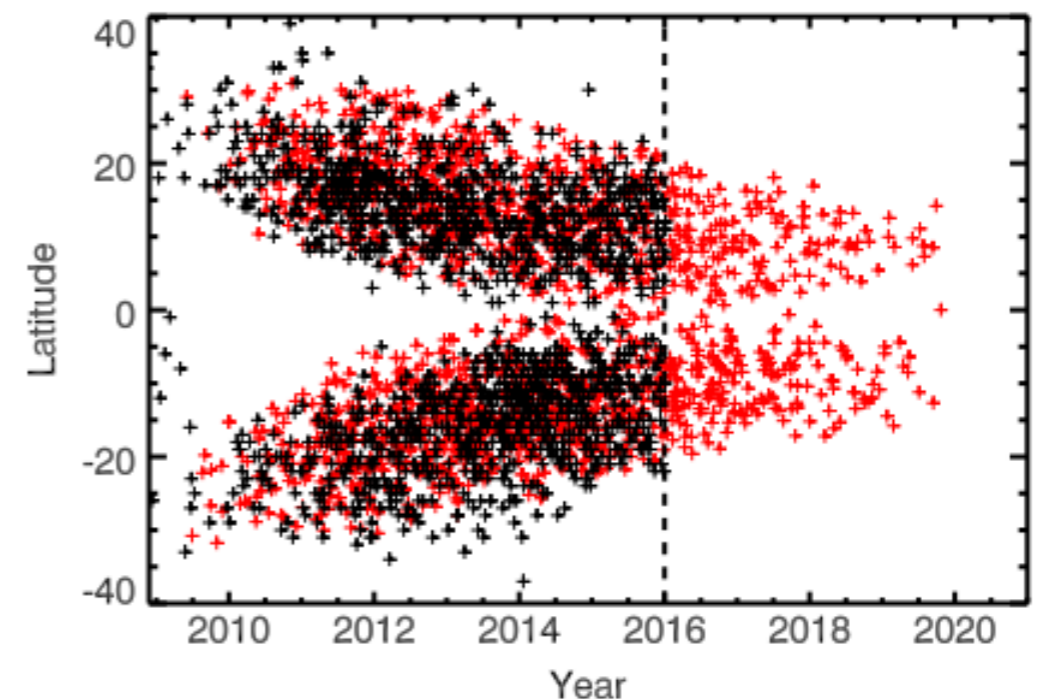
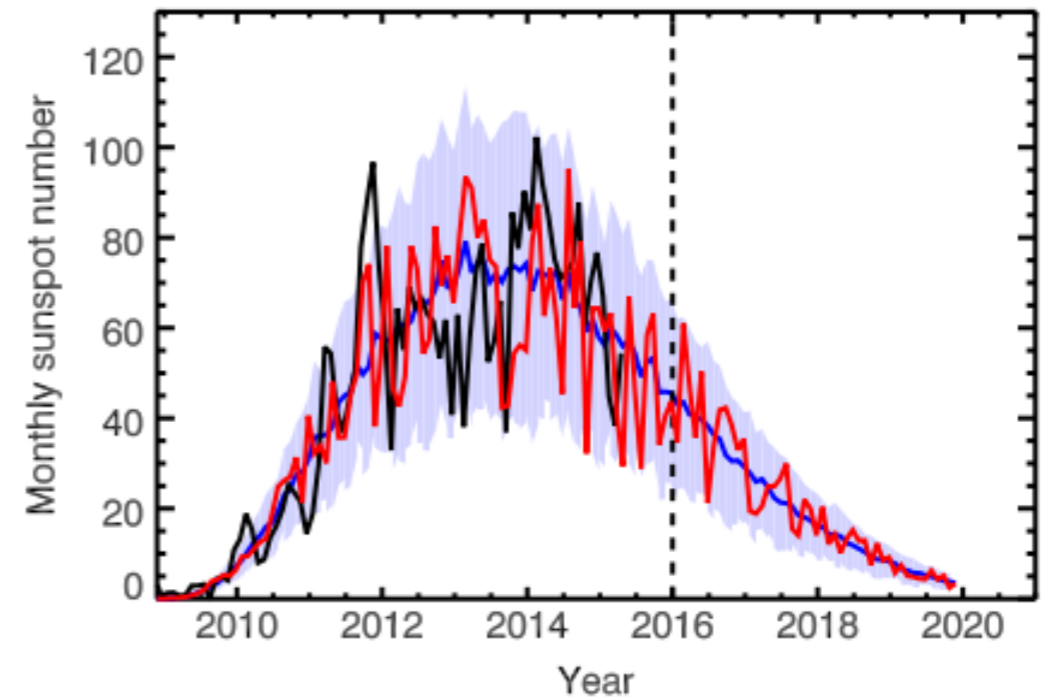
左上: Upton & Hathaway (2014a)

「似ている」過去のサイクルの浮上磁場パラメータを利用。

先行研究では、未来の浮上磁場パラメータを決定するために、何らかの経験的なモデル化を行っている。

右下: Cameron et al. (2016)

浮上磁場パラメータを観測的な経験則により予測。



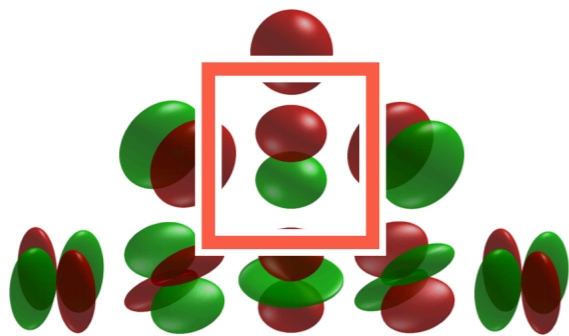
本研究の目的

- 表面磁束輸送モデル (**SFT**) により**極小期の極磁場を予測し**、極磁場と次期太陽活動度との高い相関から次期太陽活動度を推測する。
- 先行研究では、SFTを使って予測計算を行う場合、**未来の黒点の浮上という不確定要素**を仮定する必要があった。
- 本研究では、**新たに浮上磁場を挿入しないSFT**を実施することで、**純粋な磁束の2次元輸送のみによる極磁場の予測能力を検証**する。

「極磁場」の定義

ダイポールモーメント（今回採用）

$$D_{Axial}(t) = \int_{4\pi} B_R(\theta, \phi, t) \cos \theta d\Omega$$

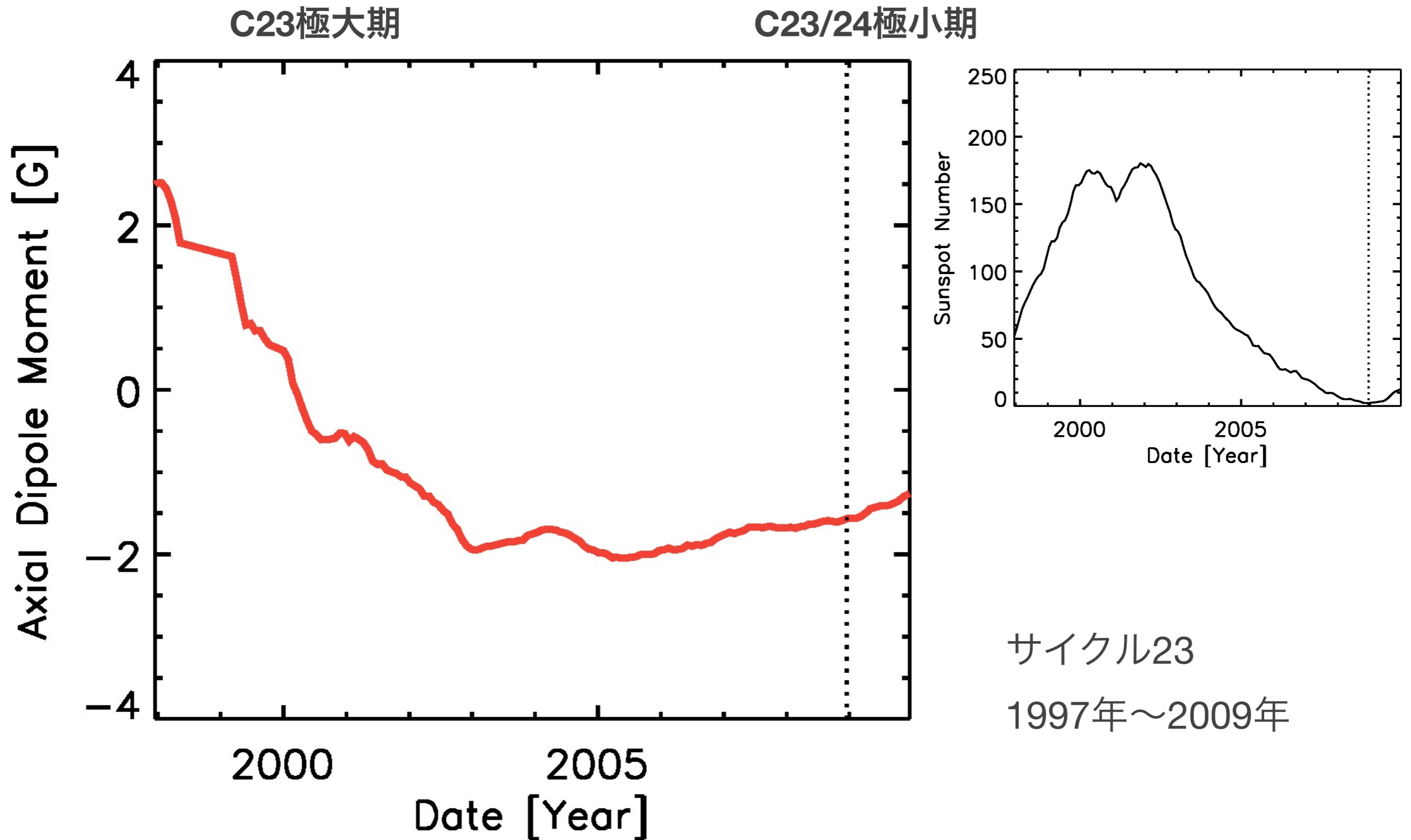


Wikipedia: 球面調和関数

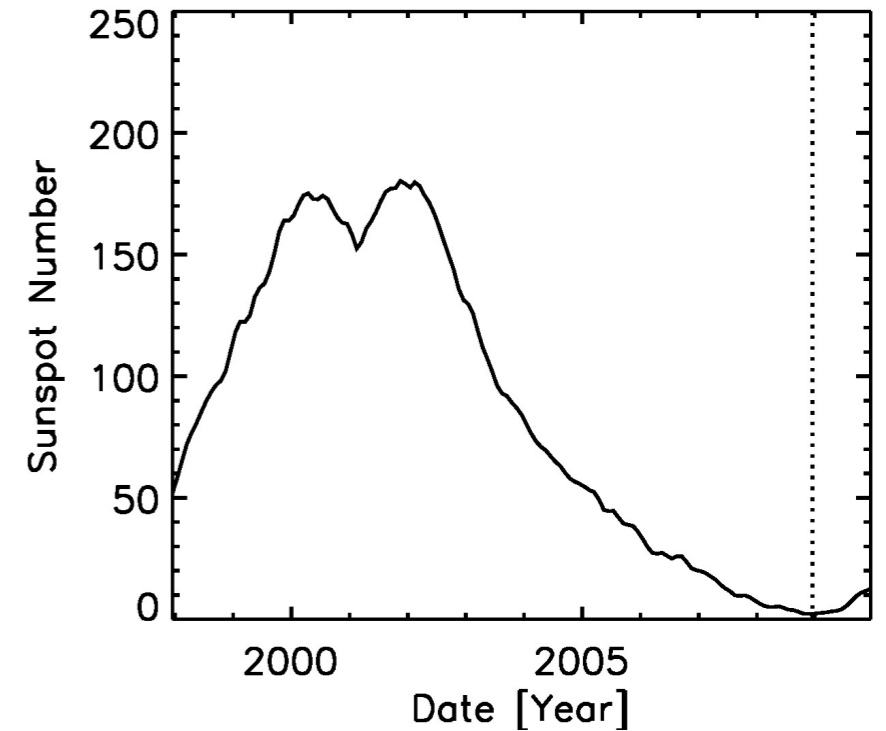
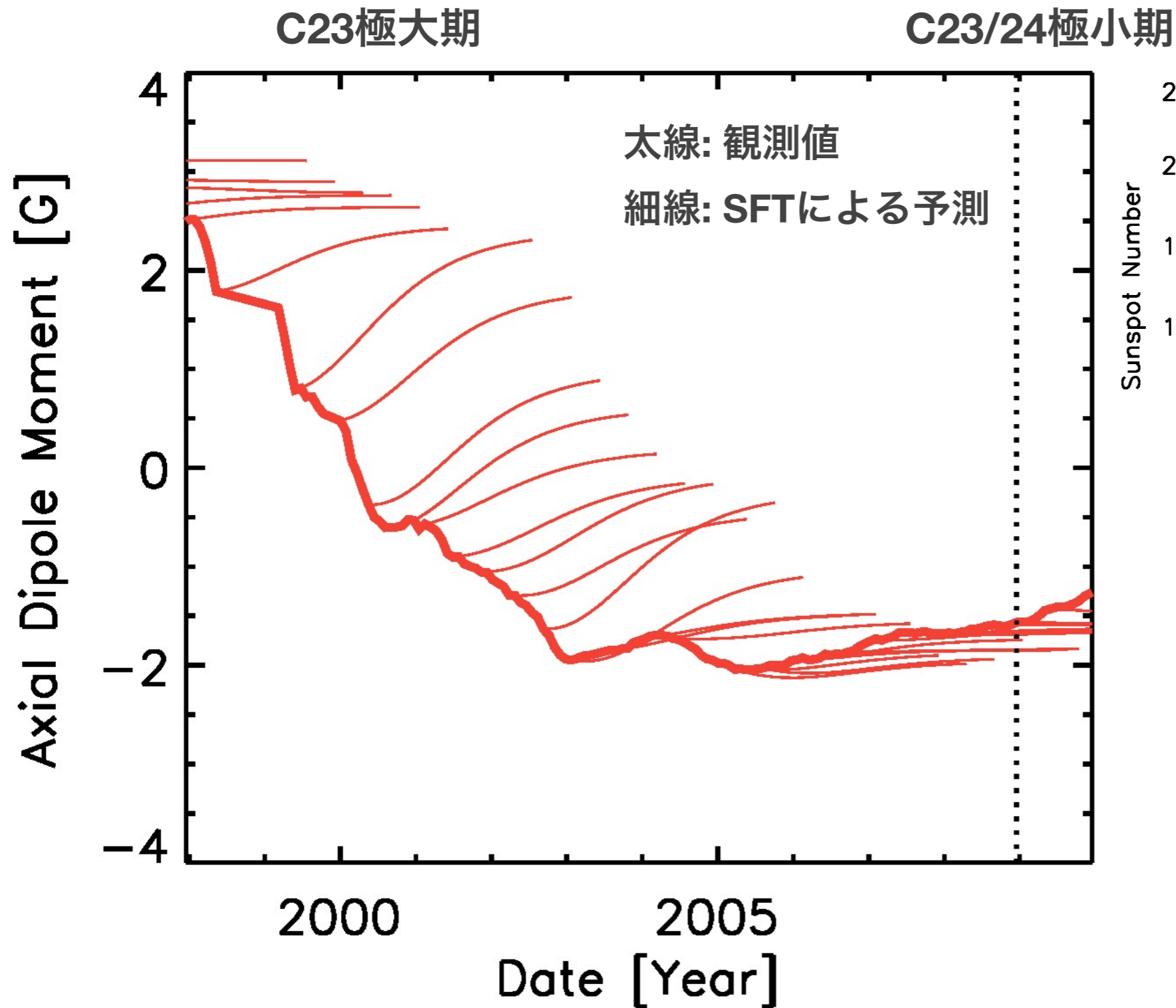
極付近の平均磁場

ある緯度より上の磁場の平均。
緯度のしきい値の決め方、南北情報の潰し方など研究により異なる。
今回は利用しない。

ダイポールモーメント | 観測

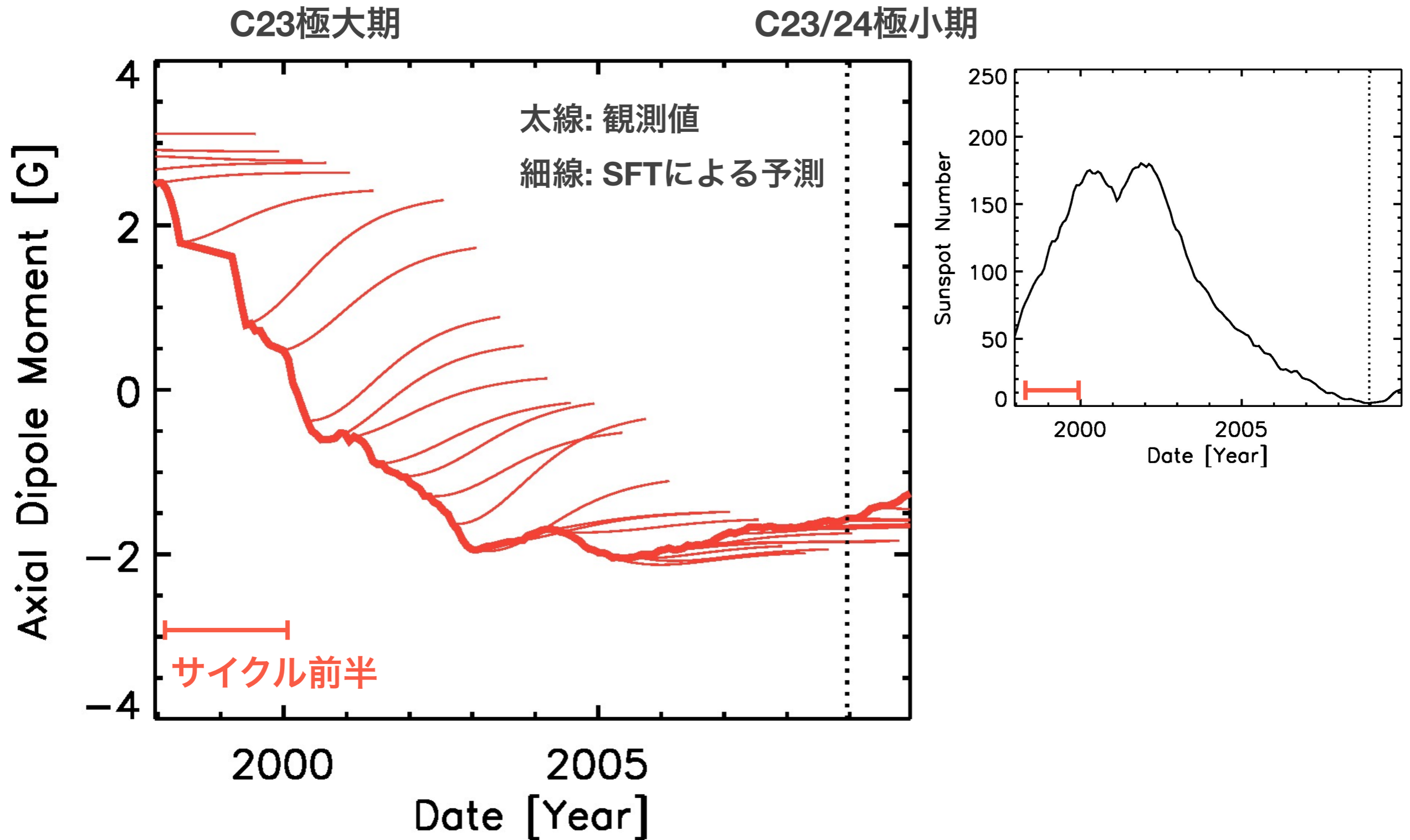


ダイポールモーメント | 観測

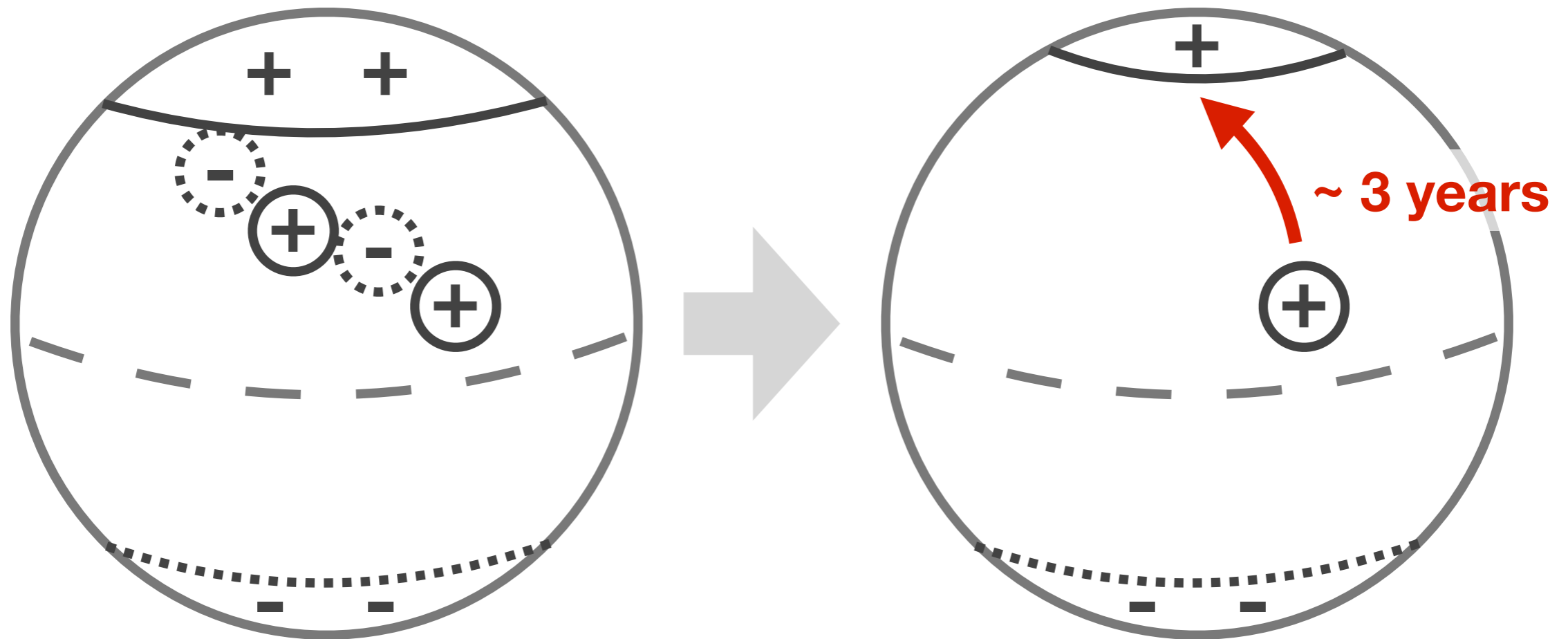


サイクル23
1997年～2009年

ダイポールモーメント | 観測 + 浮上磁場なしSFT

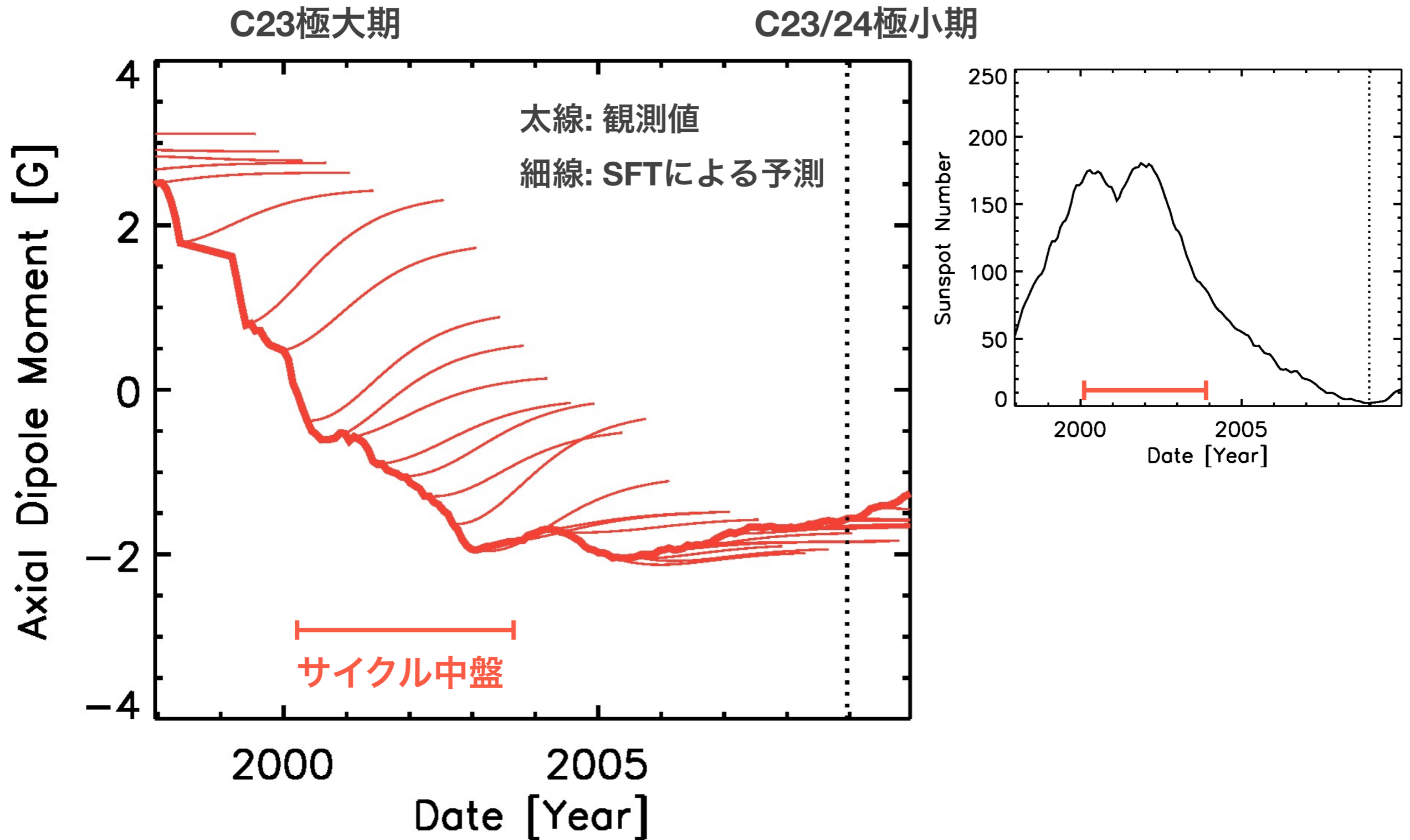


サイクル前半 | 高～中緯度に浮上磁場が出現

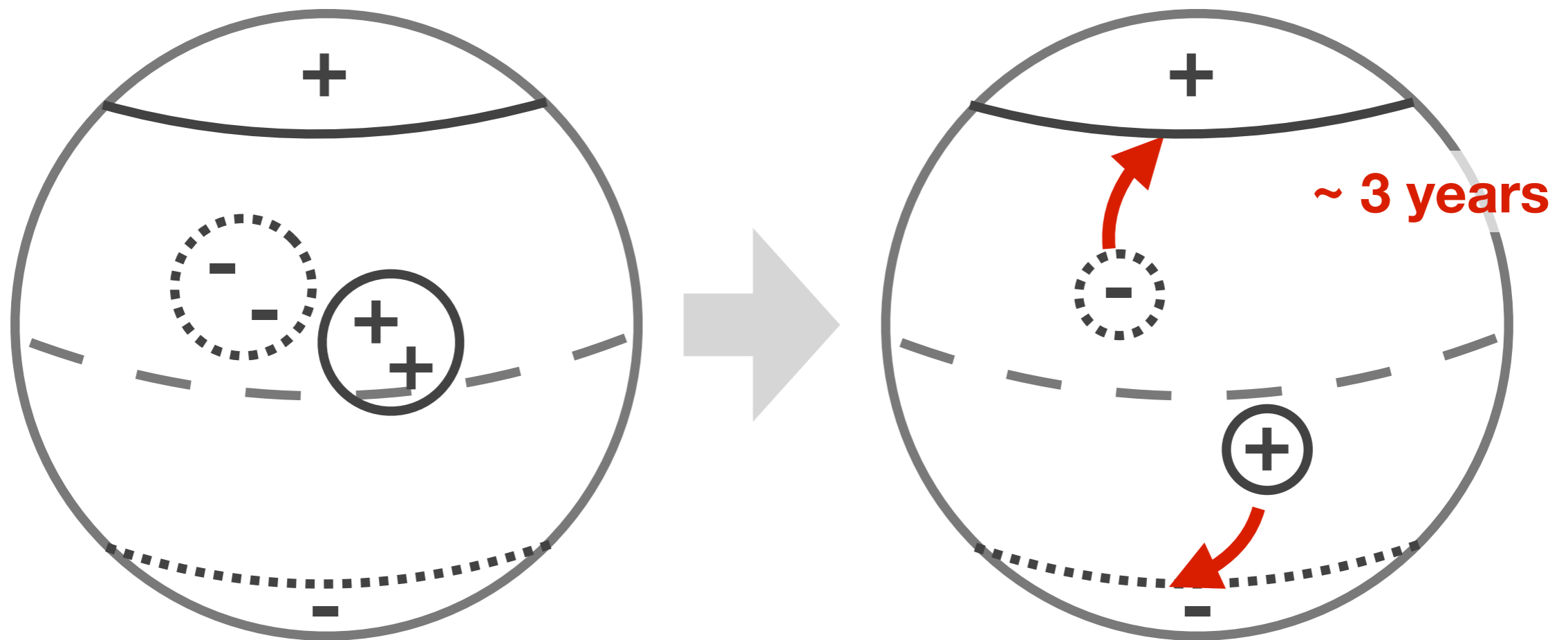


赤道を横切る輸送: 無～小

ダイポールモーメント | 観測 + 浮上磁場なしSFT

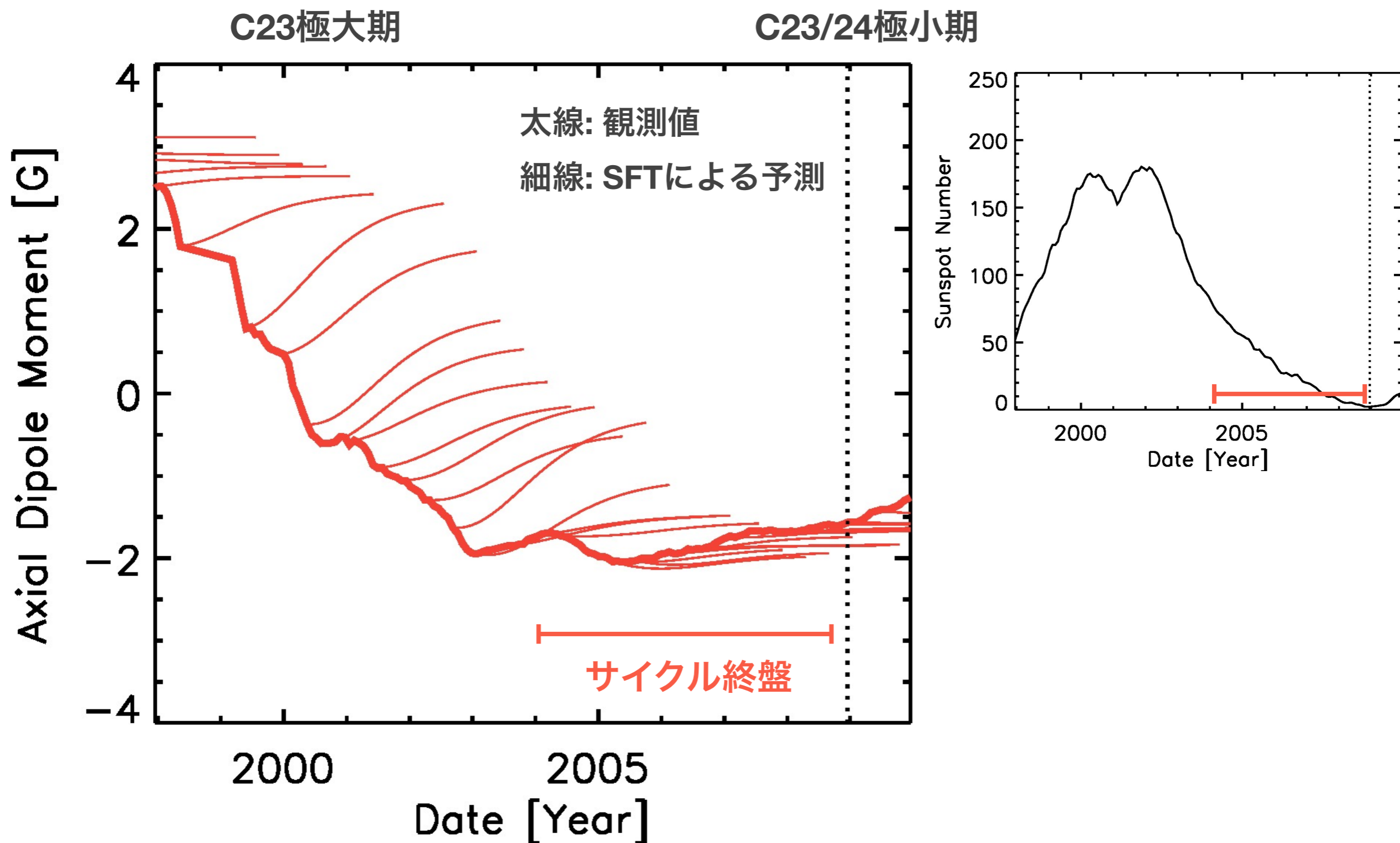


サイクル中盤 | 低緯度に浮上磁場が出現

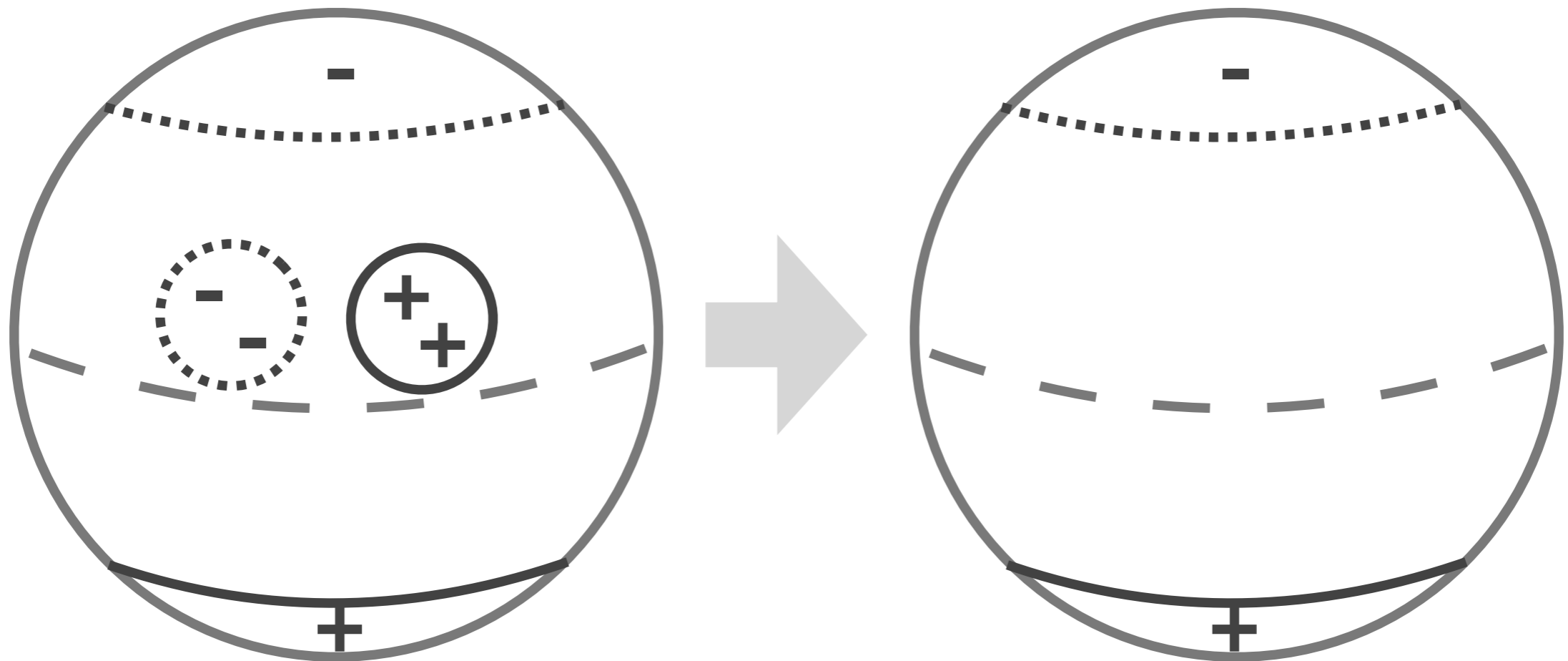


赤道を横切る輸送: 大

ダイポールモーメント | 観測 + 浮上磁場なしSFT

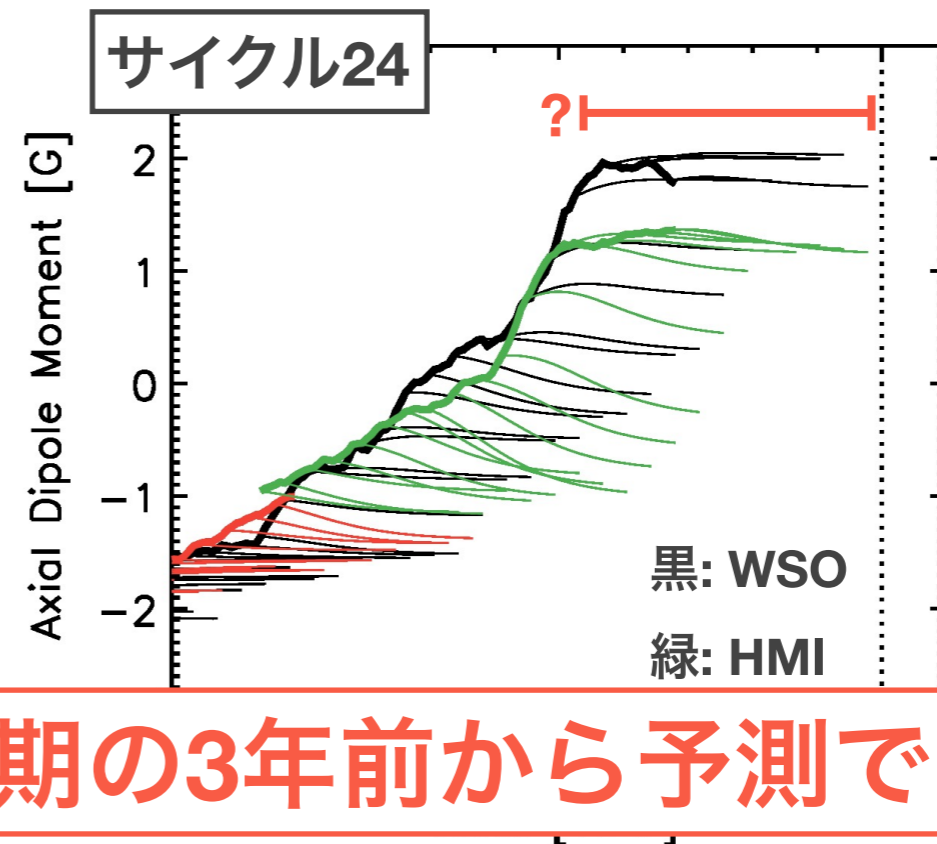
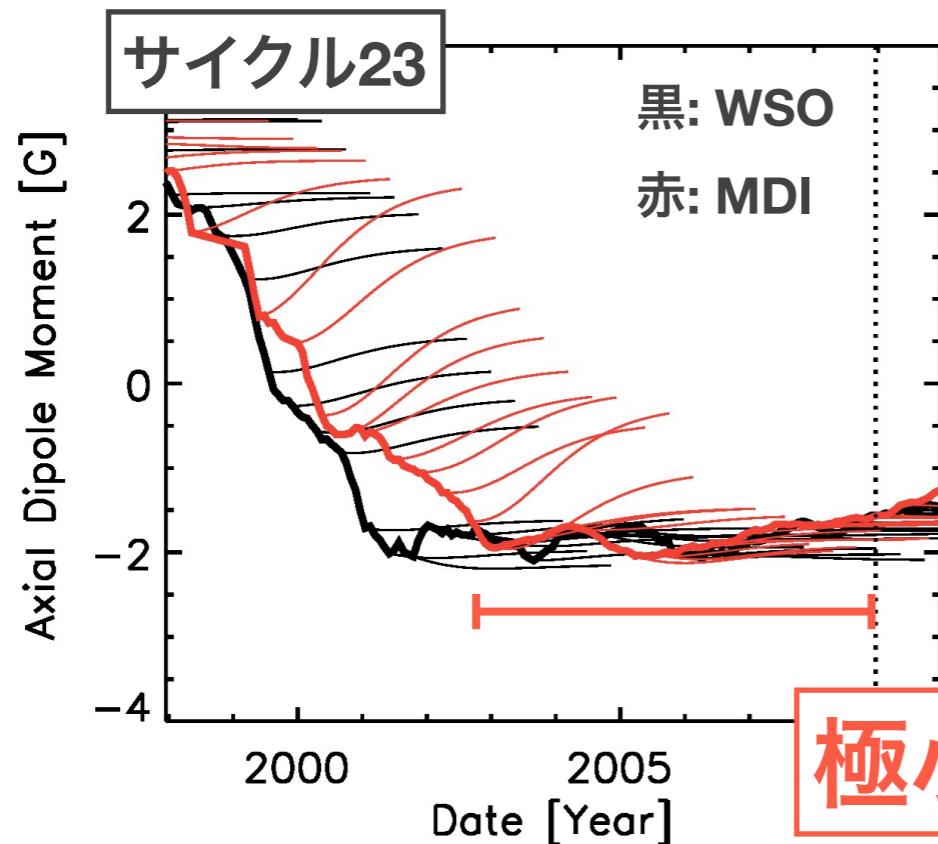
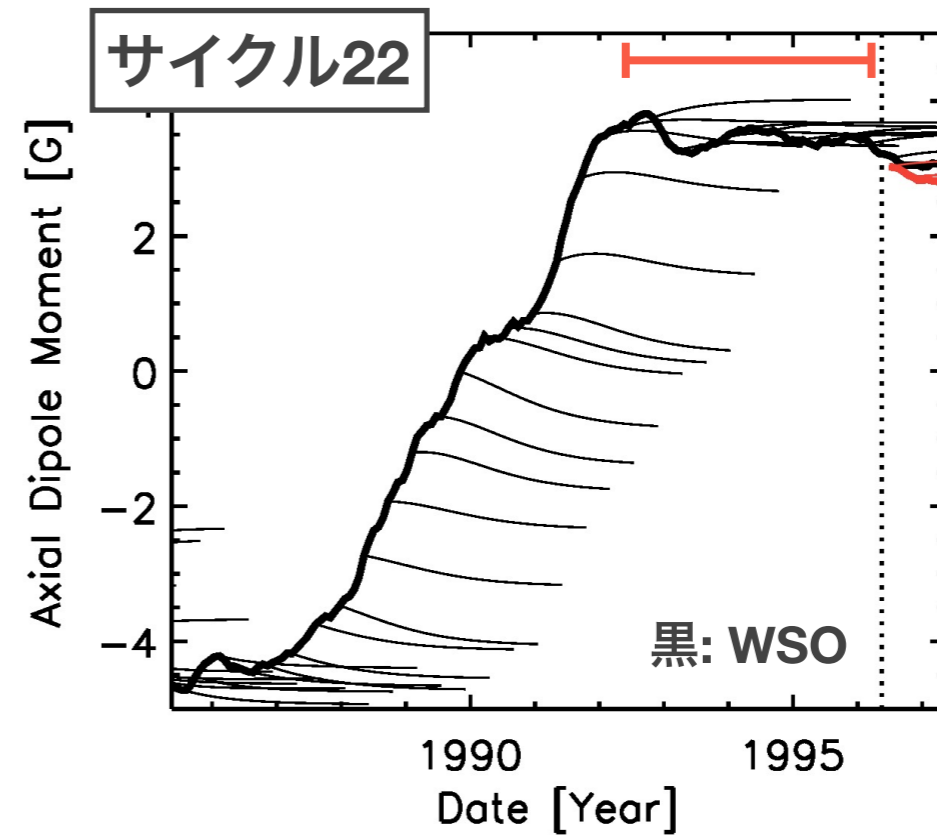
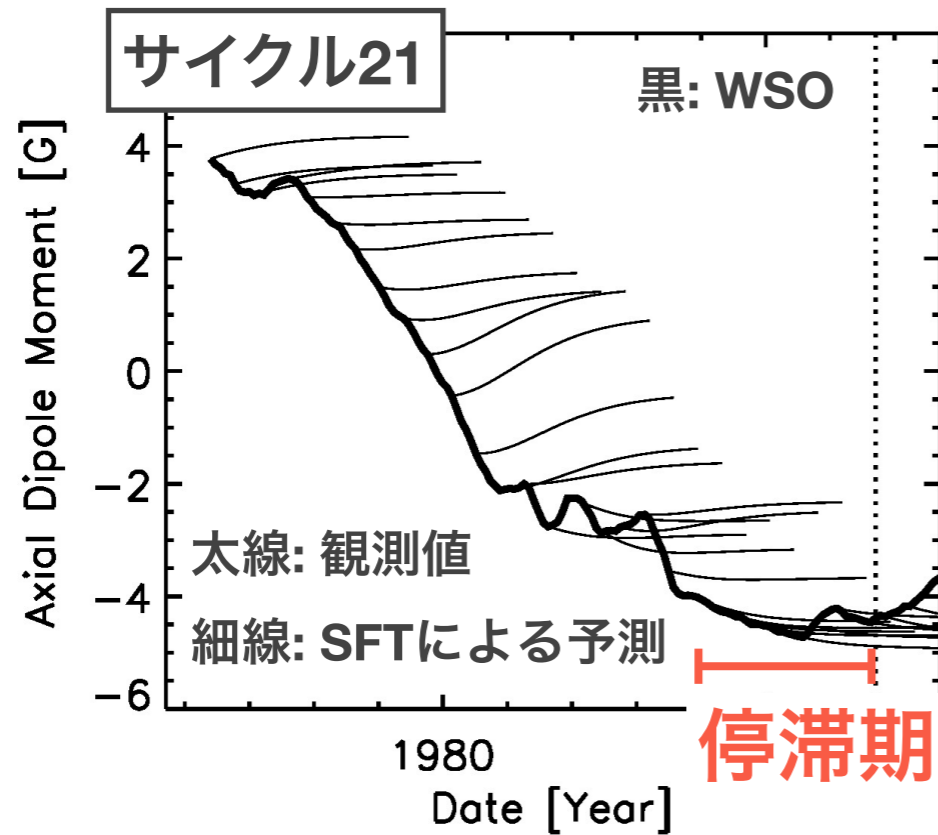


サイクル後半 | 傾き角が小さい



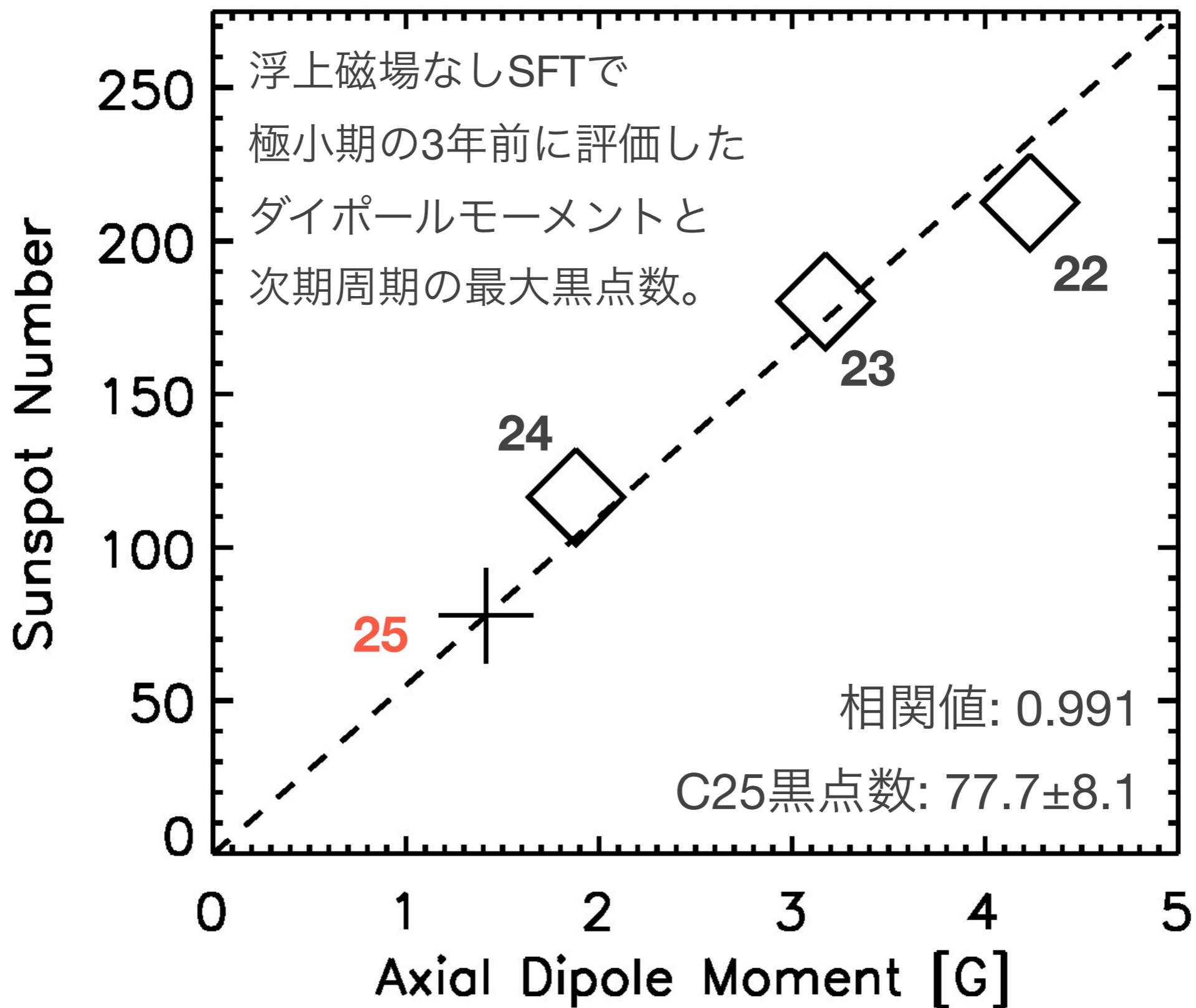
赤道を横切る輸送: 小

浮上磁場なしSFTによる極磁場予測

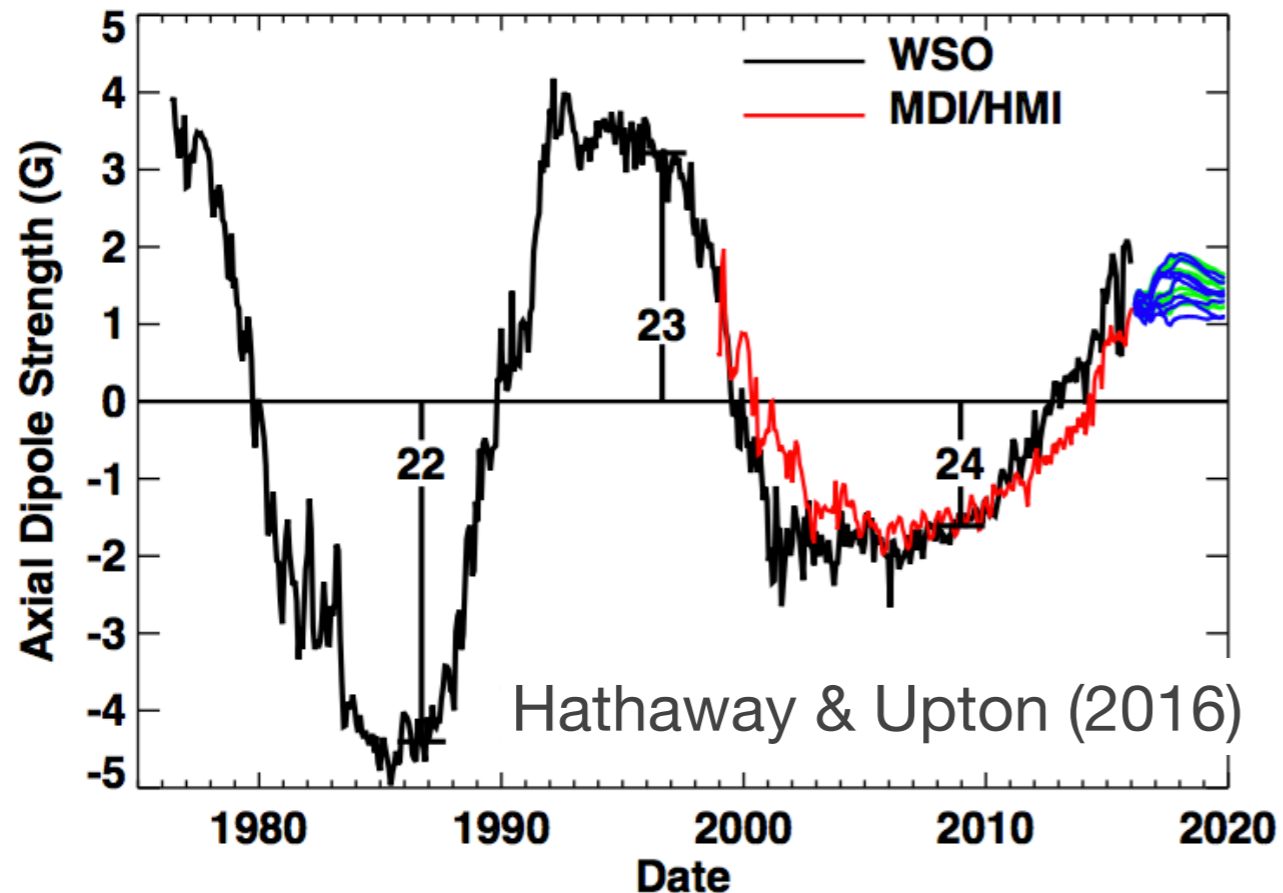
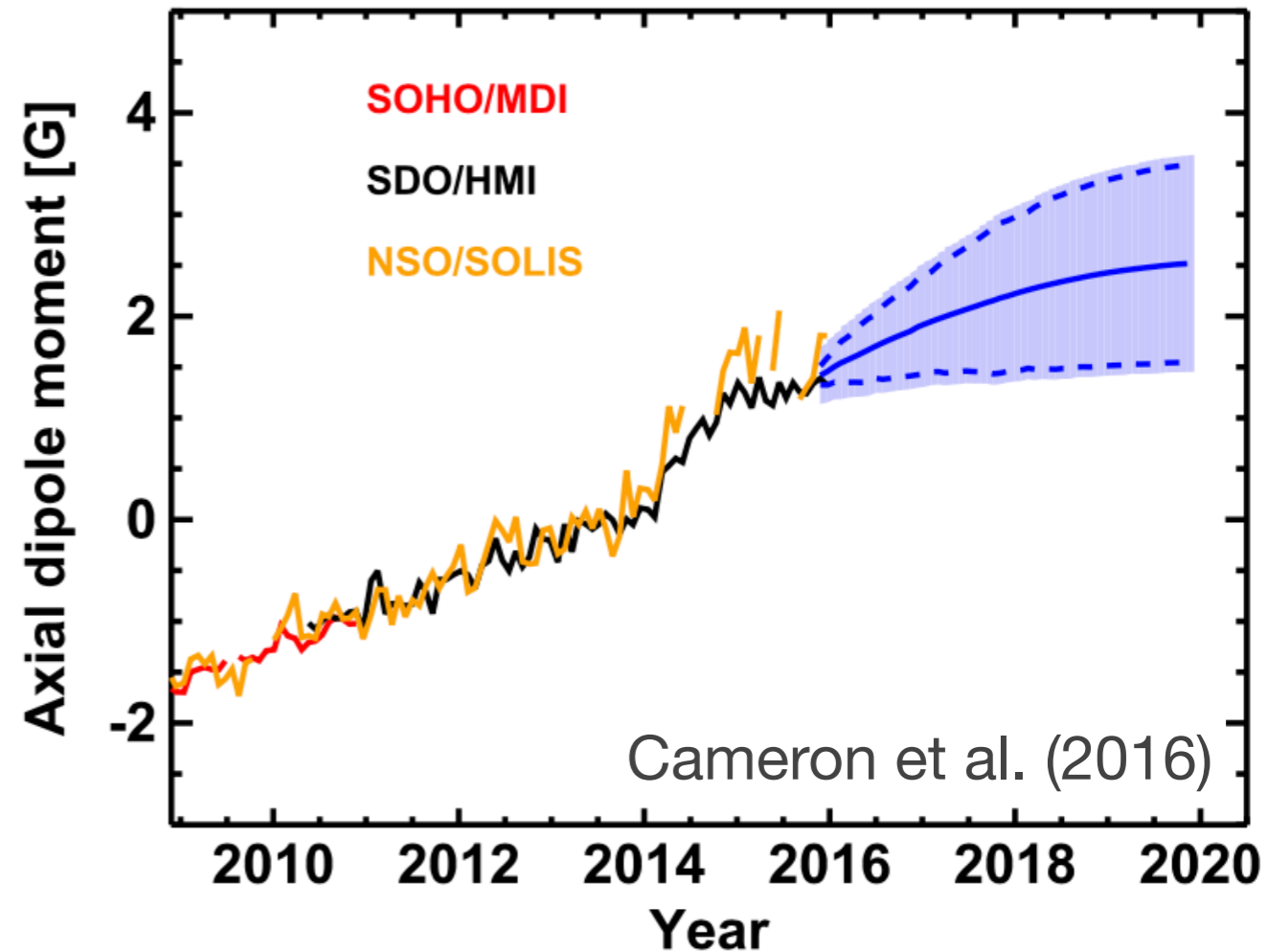
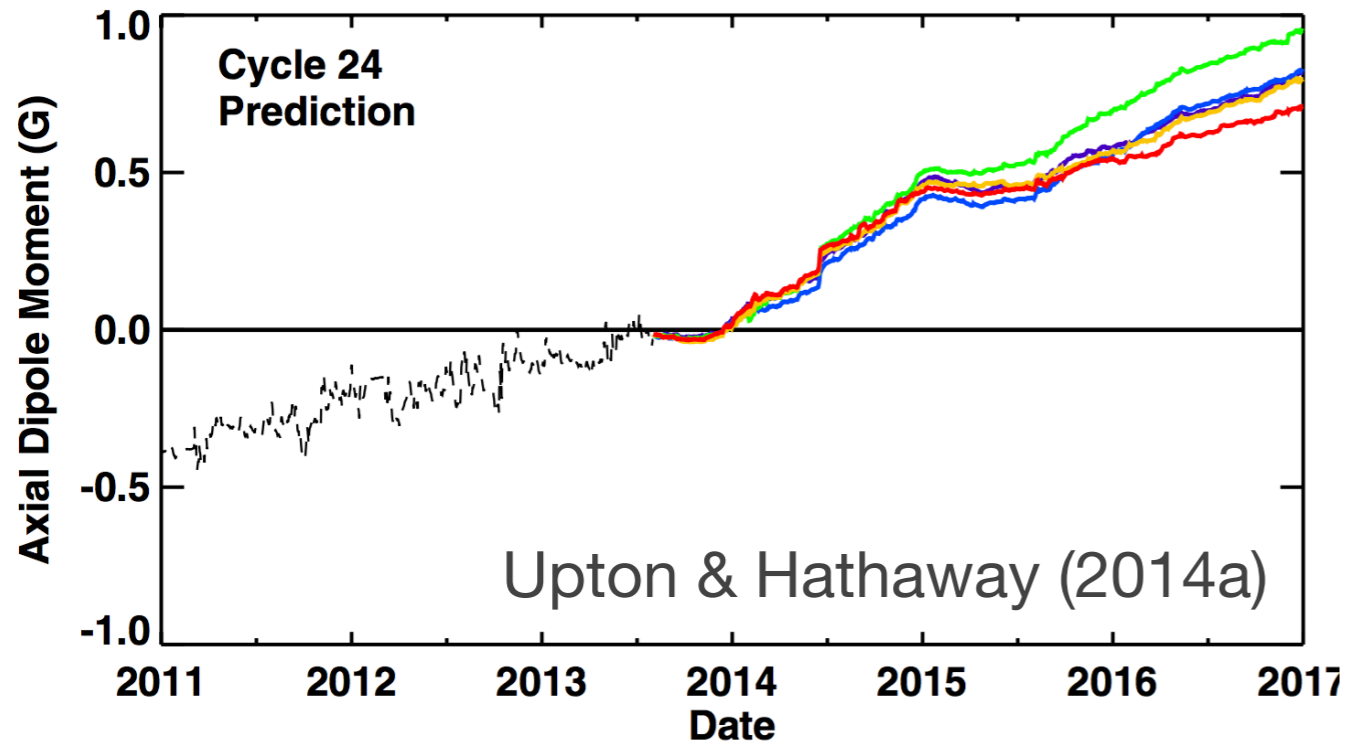


極小期の3年前から予測できそう！

浮上磁場なしSFTによるサイクル25予測



先行研究の予測結果との比較



研究	予測時期	予測結果
UH14	2013年中盤	$24 \leq 25$
C+16	2016年初頭	$24 \leq 25$
HU16	2016年中盤	$24 \cong 25$
本研究	2015-2016年	$24 > 25$

表面磁束輸送モデルを用いた次期太陽周期活動度の予測

- 表面磁束輸送モデル（**SFT**）により**極小期の極磁場を予測し**、極磁場と次期太陽活動度との高い相関から次期太陽活動度を推測する。
- 先行研究では、SFTを使って予測計算を行う場合、**未来の黒点の浮上という不確定要素**を仮定していた。
- 本研究により、**黒点の浮上に関する任意性の高いモデル化をせずとも、極小期の2~4年前から極磁場を予測することができる**ことがわかった。
- 次の太陽周期（サイクル25）の活動度は、**サイクル24の60-80%程度**と予想される。