太陽極域磁場と太陽周期活動

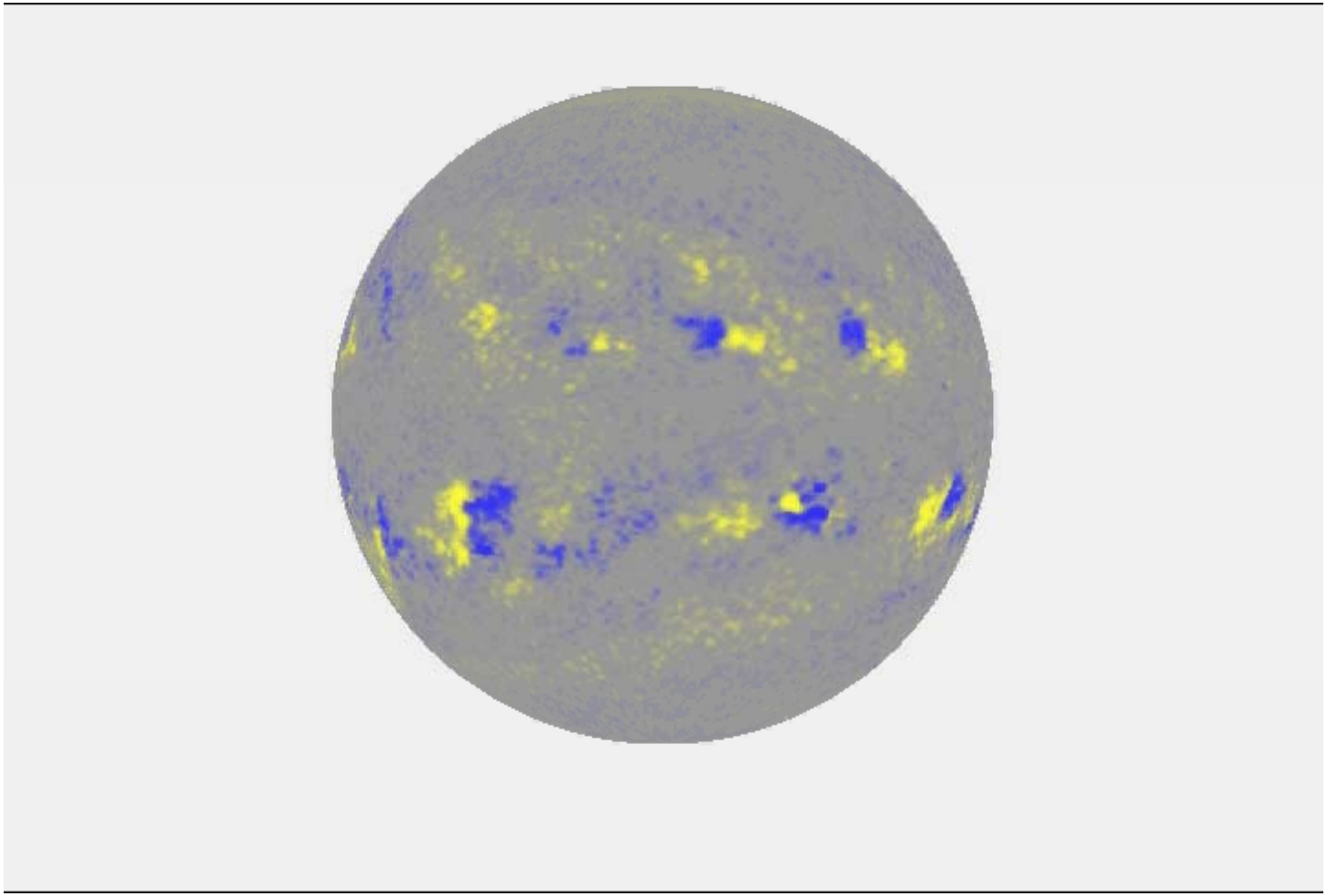
塩田大幸(理研)
宮原ひろ子(東大)
片岡龍峰(東工大)

2012.10.1　東工大
第2回極端宇宙天気研究会

topics

- 太陽磁場の長期変動
- ひのでで観測した太陽極域磁場の極性反転
- 極域磁場とダイナモ

太陽光球磁場の長期変動

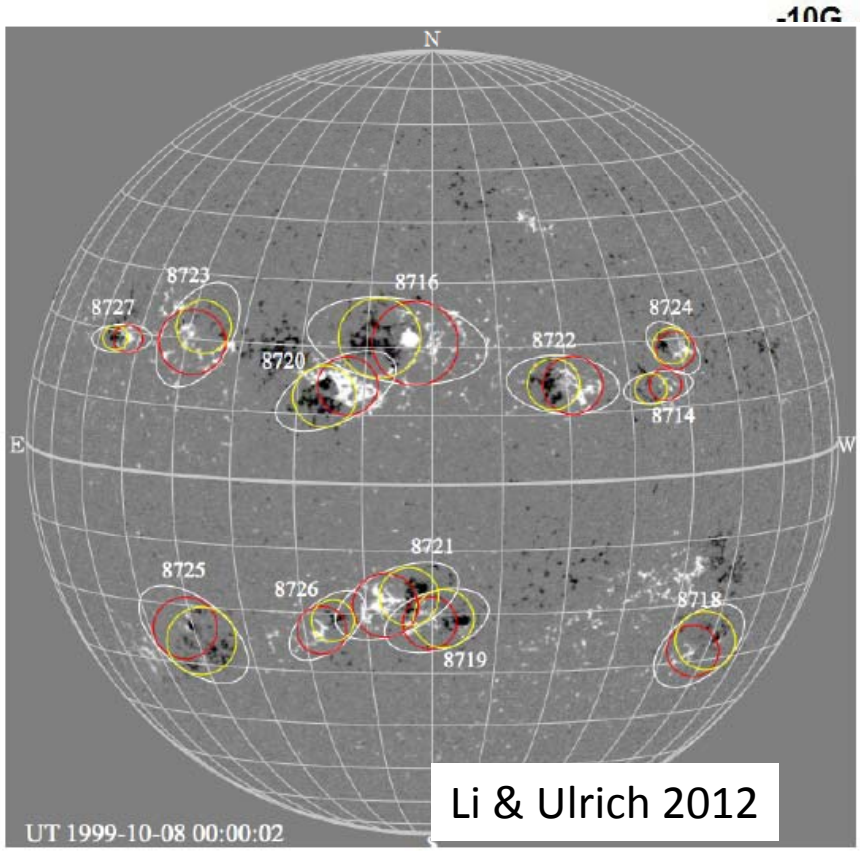


Synoptic map:太陽全球の磁場をメルカトル図法的に示した図

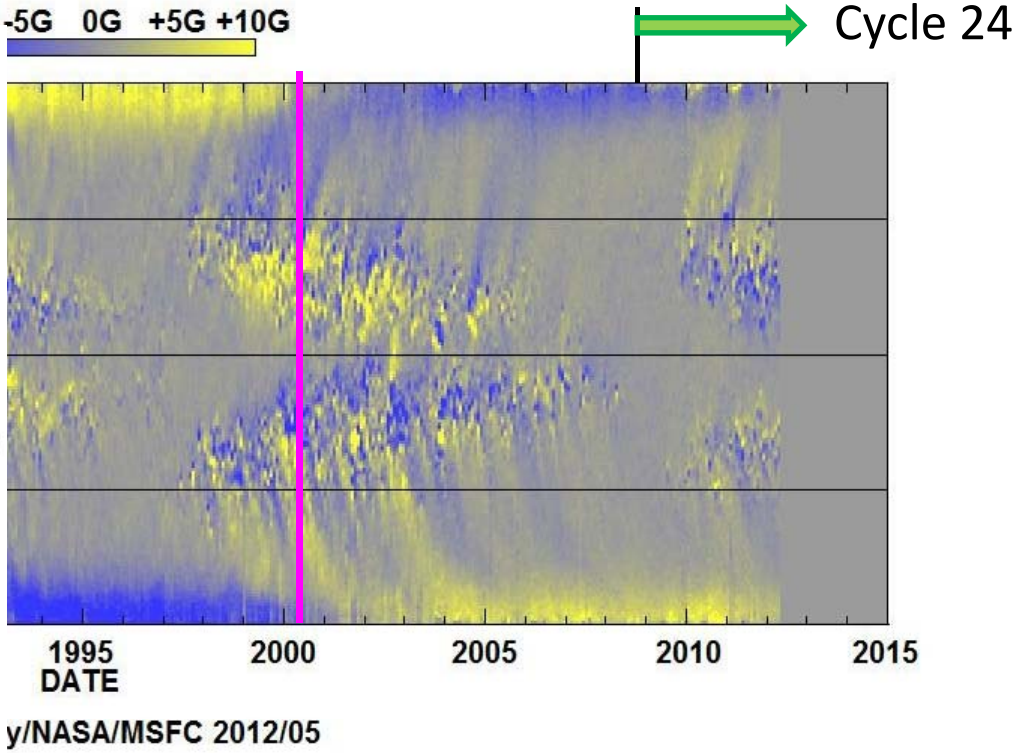
- 濃い黄色と青のペアの構造：黒点群(活動領域)
- 黒点群は崩壊して、周りに拡散していく。

http://solarscience.msfc.nasa.gov/movies/HathawayMovie.avi

太陽活動周期と黒点群



Li & Ulrich 2012

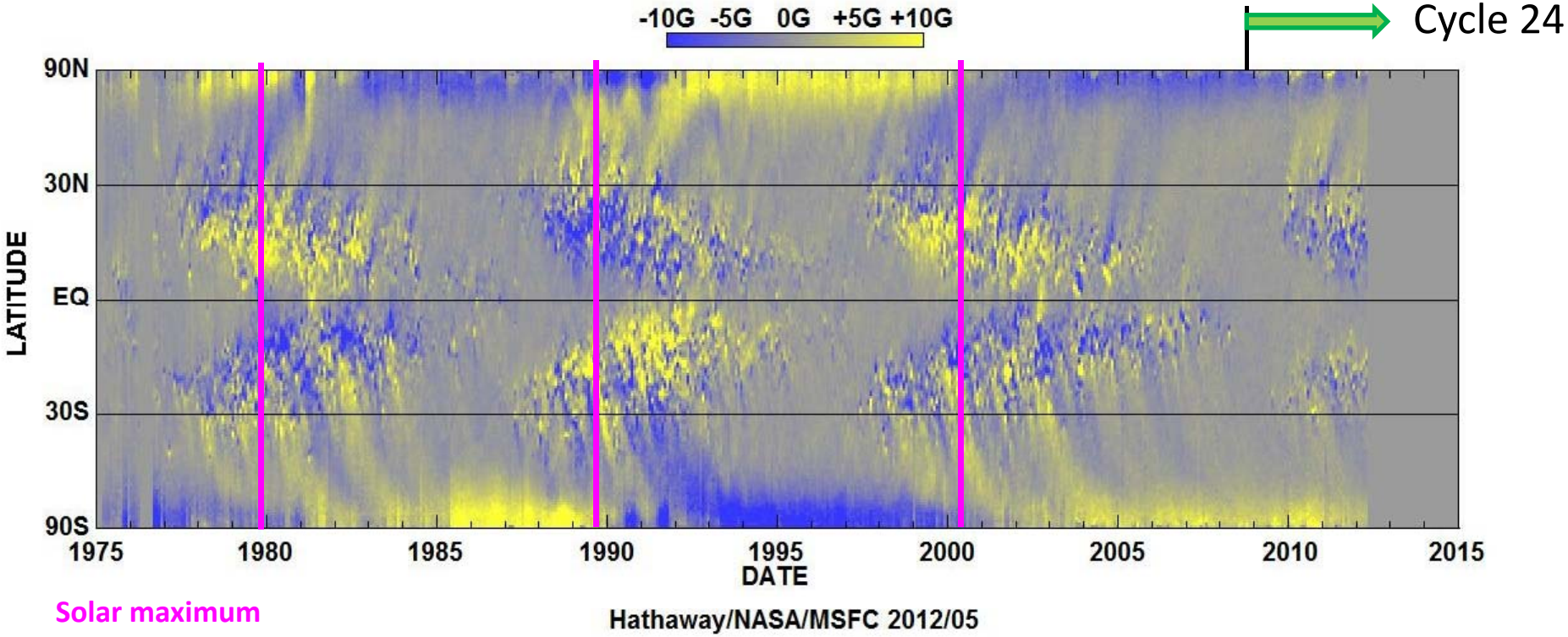


度方向に平均したものを時間方向に並べた図

- 活動周期ごとに黒点の極性が入れ替わる
- 黒点群は、活動周期初めは中緯度に現れ、徐々に低緯度側に現れる
- 後行(東側の)黒点は平均的には高緯度側に現れる(向きの分散は大きい)

http://solarscience.msfc.nasa.gov/dynamo.shtml

太陽活動周期と極域磁場



Butterfly diagram: synoptic map を経度方向に平均したものを時間方向に並べた図

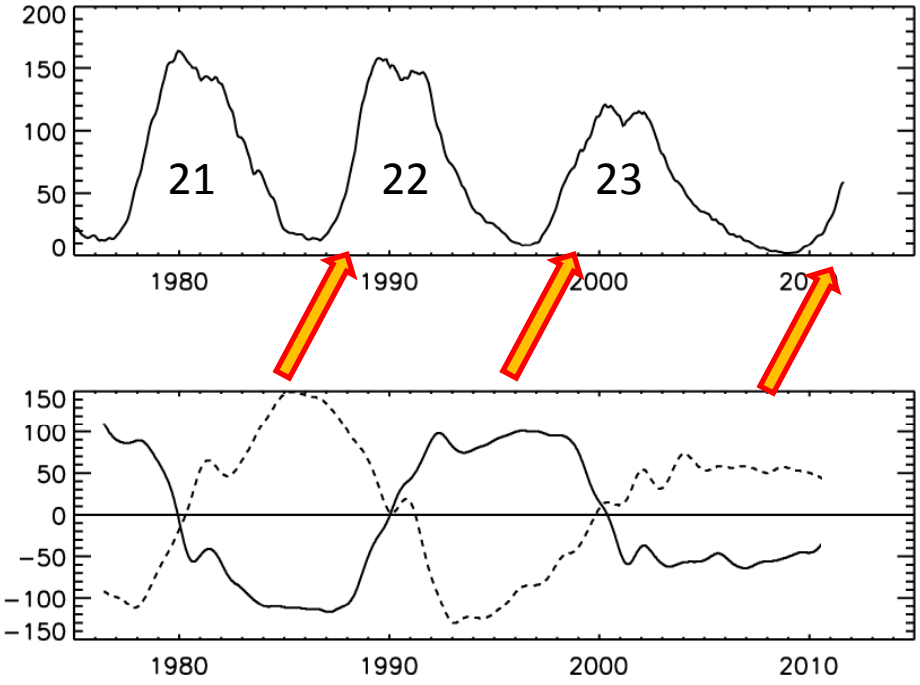
- 太陽極域磁場の極性は極大期に入れ替わる (Babcock 1959)
- 黒点が崩壊した後の残骸が極に向かって、移動しているように見える

http://solarscience.msfc.nasa.gov/dynamo.shtml

極域磁場強度と太陽活動度

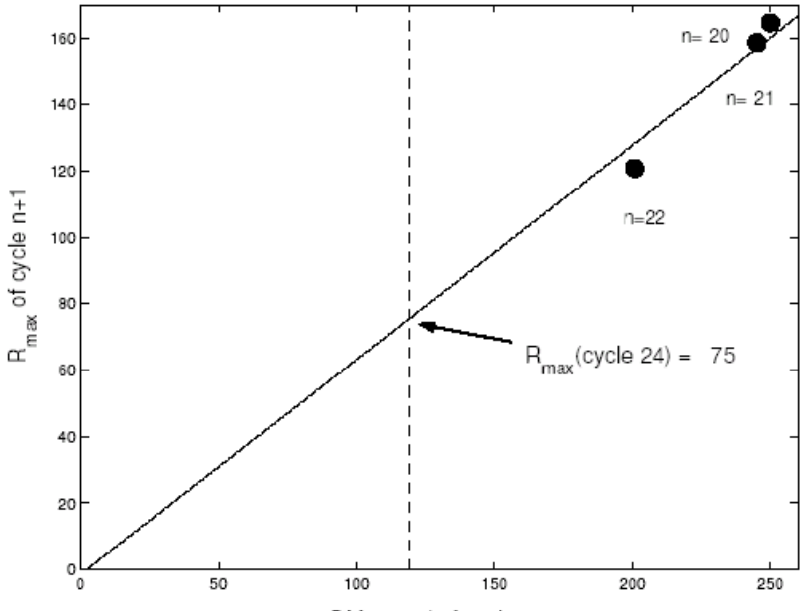
- 極小期の極域磁場強度
  ＝＞次の周期の黒点数
  相関(Svalgaard et al. 2005)

太陽黒点数



太陽極域磁場　(μT)

サイクルn+1のピーク黒点数



サイクルnの双極子磁場強度[μT]

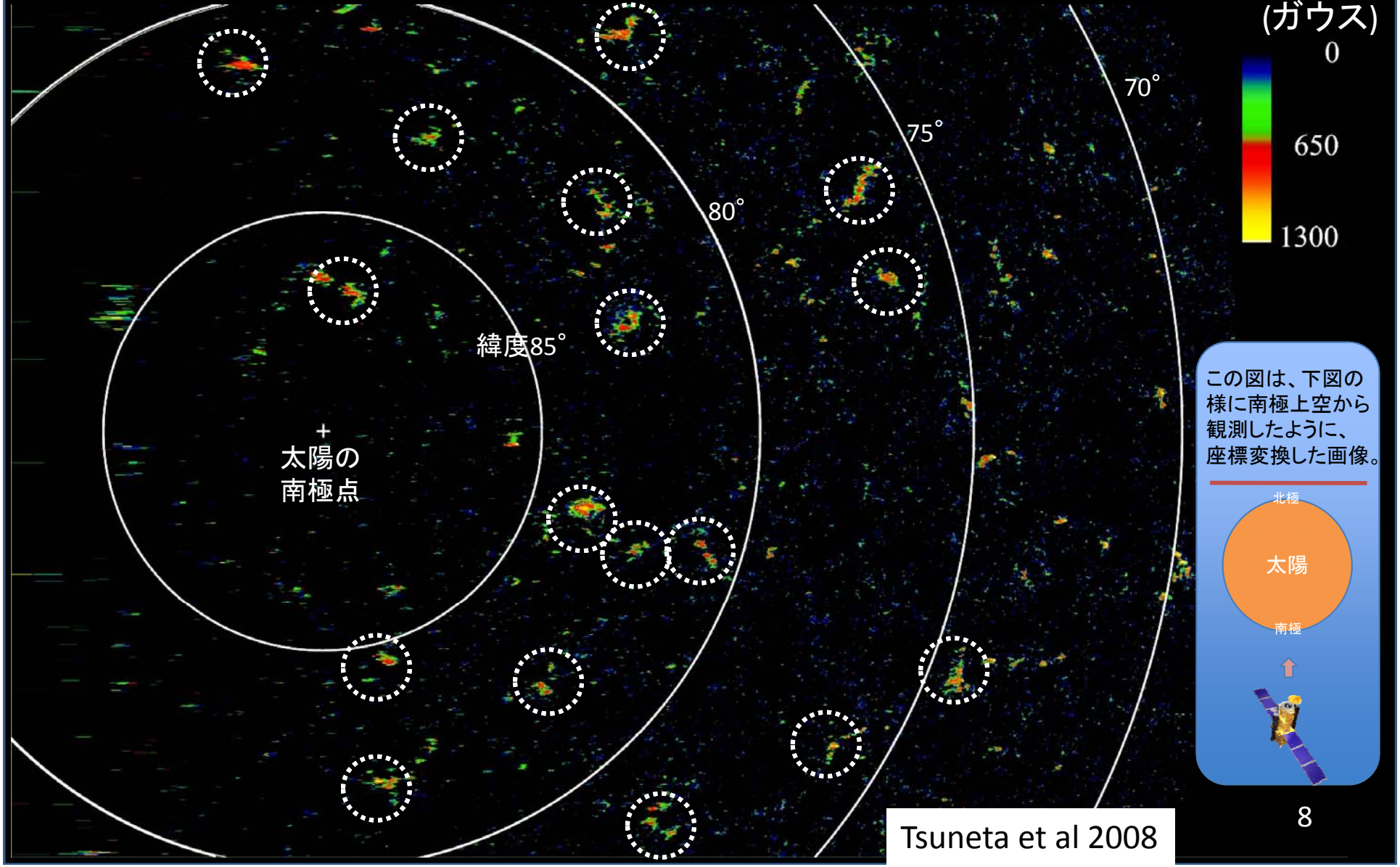
Choudhuri 2008

極域磁場強度がどうやって決まるのかがわかれば、次のサイクルの活動度を予測できる

ひのでで観測した
太陽極域磁場の極性反転

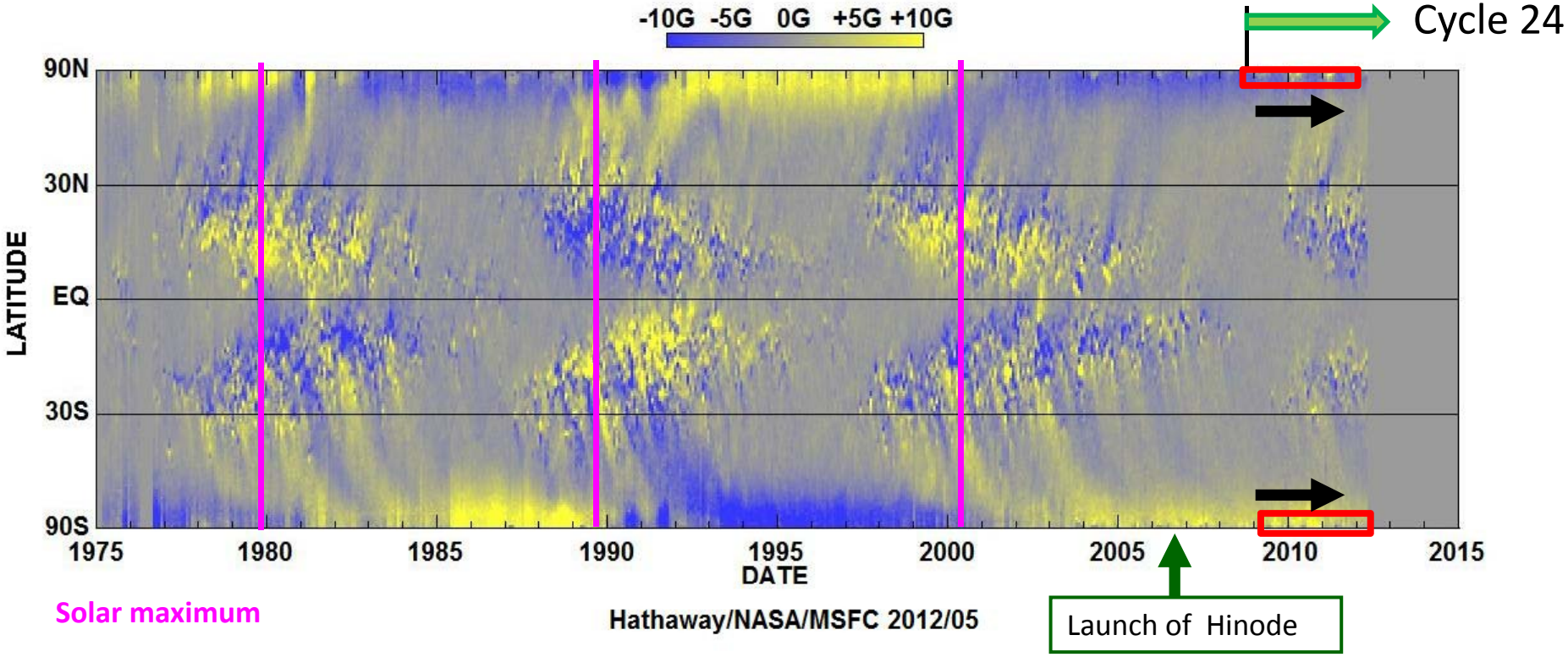
“POLAR FIELD REVERSAL OBSERVATIONS WITH HINODE”
Shiota et al. 2012, ApJ, 753, 157

太陽極域に強磁場斑点(パッチ)が存在



Tsuneta et al 2008

ひのでによる極域磁場観測

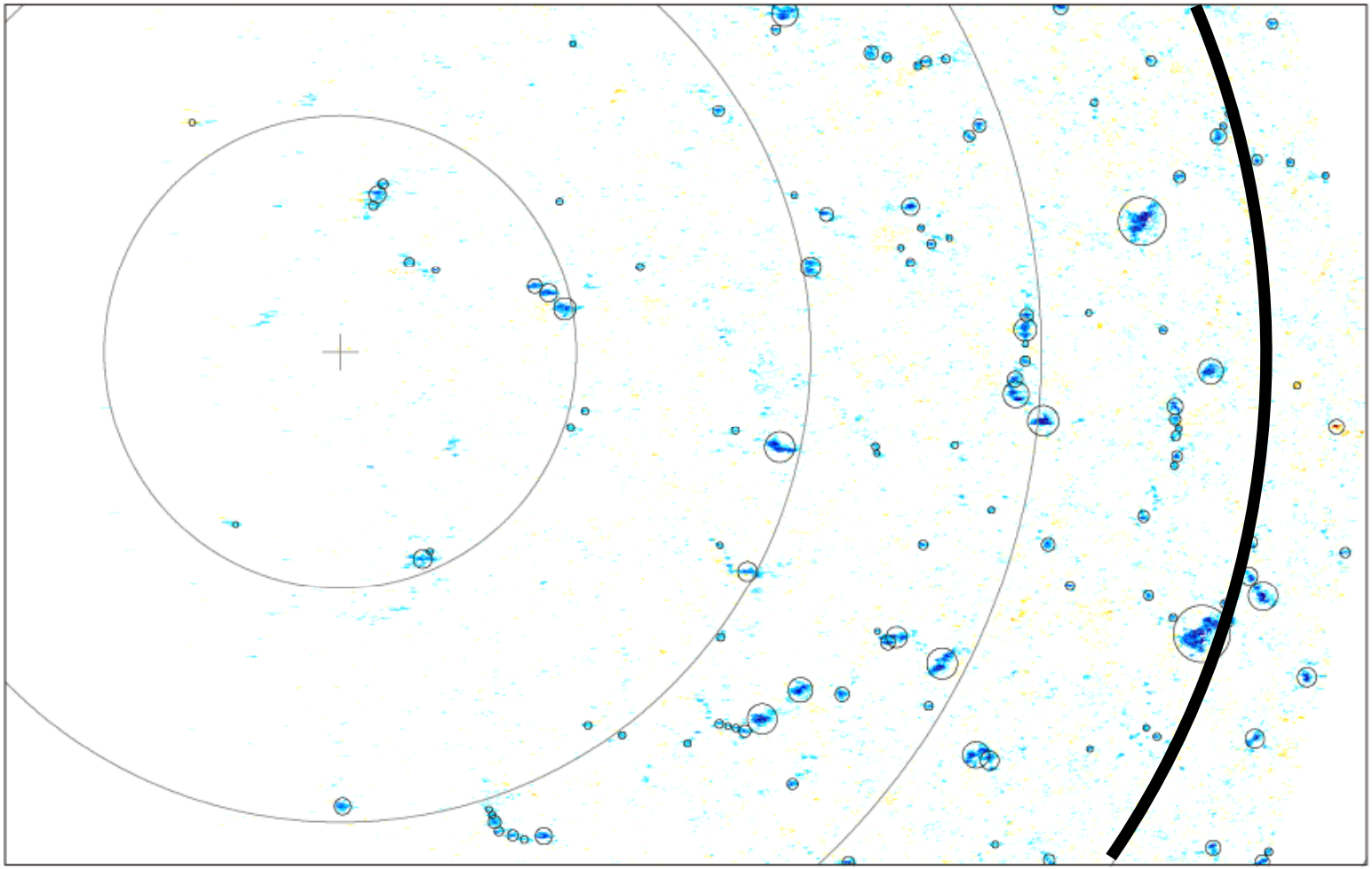


磁気要素(パッチ)の分布が極域磁場の変動とともにどう変化するのか？

南北極域の磁場の分布を長期間モニター観測

強磁場パッチの検出

The clustering procedure is applied to vertical flux density map (Shiota et al. 2012)



$B_{vertical}$ [Mx cm^{-2}]

200

0

−200

Inclination
<40 deg.
or > 140 deg.

Grey lines:
5 degree
latitude lines

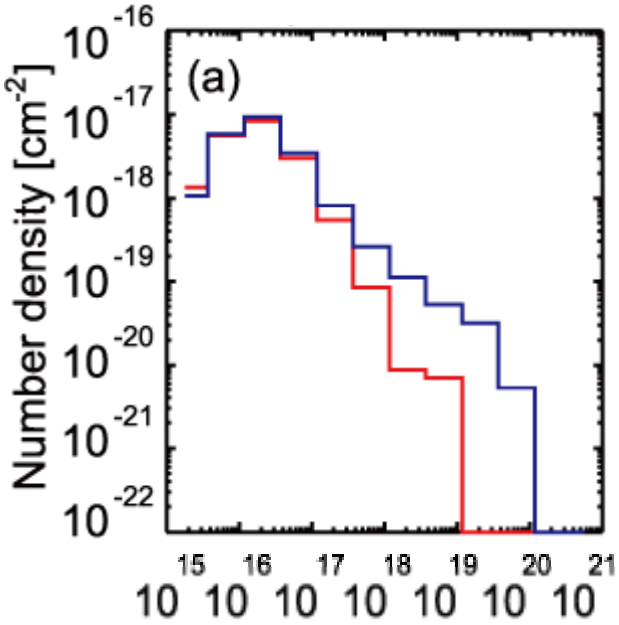
Poleward data (in Latitude > 70 degree) are used

Black small circles show large magnetic concentrations (flux > 10^{18}Mx)

強磁場パッチのヒストグラム

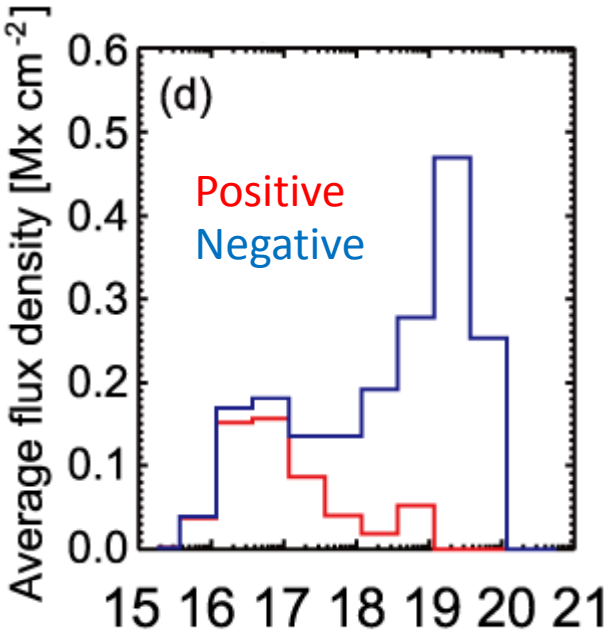
(Shiota et al. 2012)

number density histogram



Magnetic flux
in each concentration

flux density histogram



Magnetic flux
in each concentration

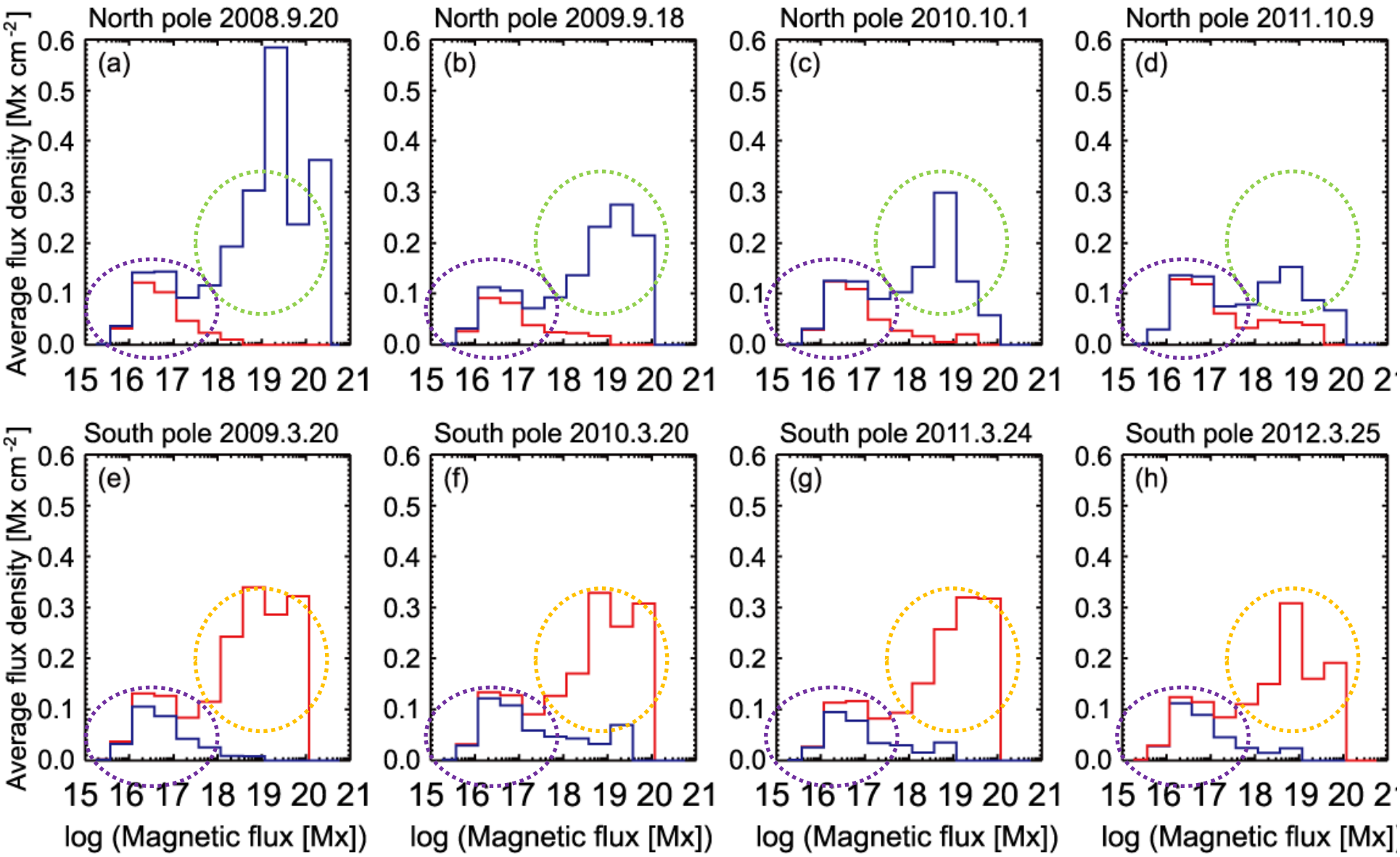
Definitions

$$\frac{\text{number of patches within each bin}}{\text{observing area}}$$

$$\frac{\text{total of magnetic flux in patches within each bin}}{\text{observing area}}$$

Yearly variation of flux density histogram

(Shiota et al. 2012)

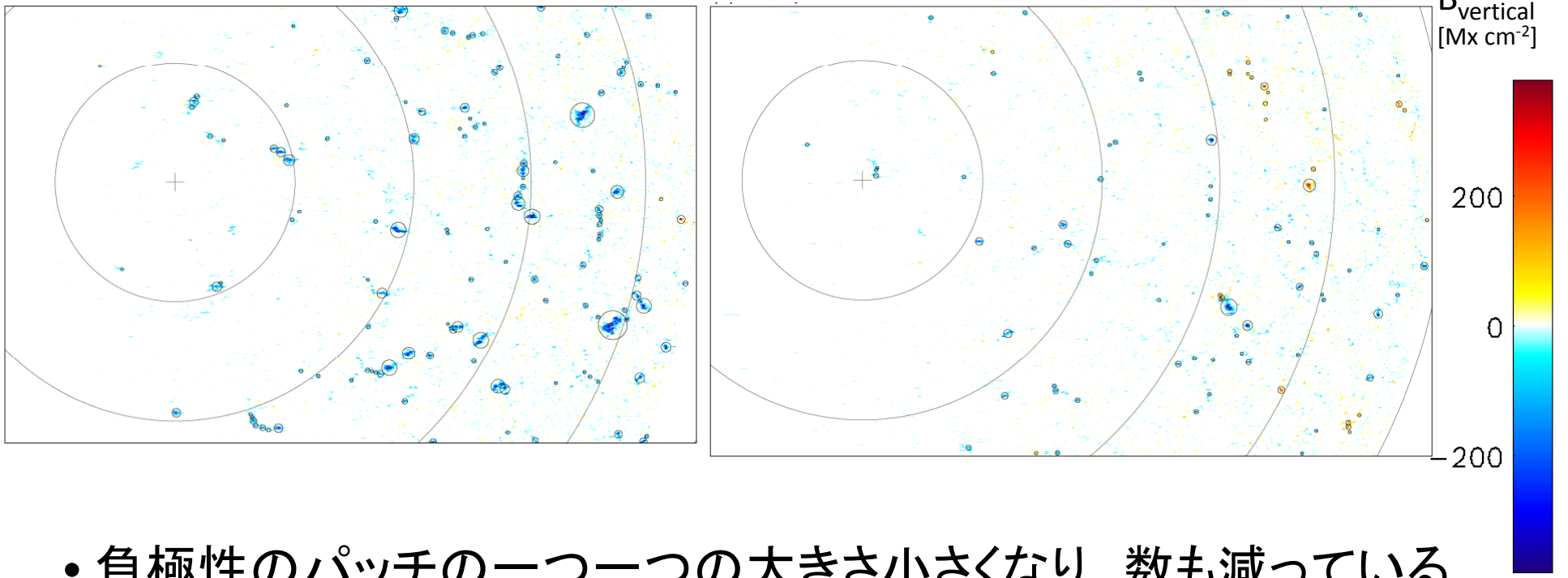


磁場分布の違い

(Shiota et al. 2012)

North pole 2008 September 20

North pole 2011 October 9

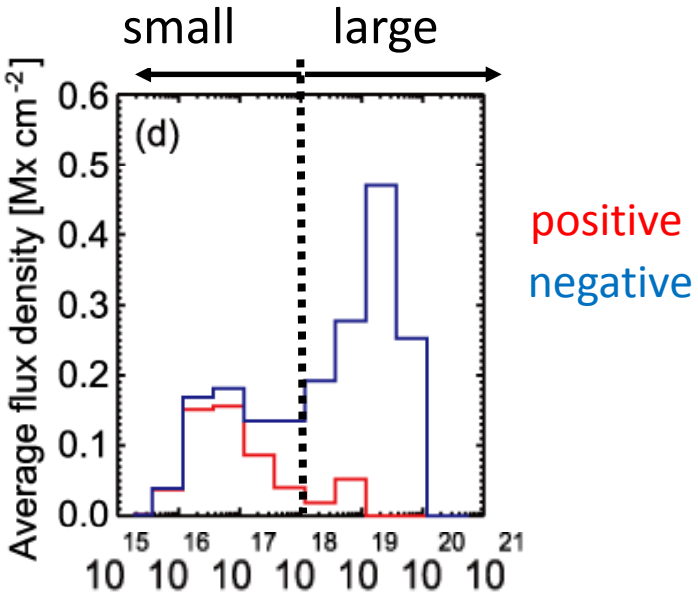


- 負極性のパッチの一つ一つの大きさ小さくなり、数も減っている
- 逆の極性のパッチが低緯度側に現れ始めた

平均の磁束密度の年変化

(Shiota et al. 2012)

磁束密度ヒストグラム



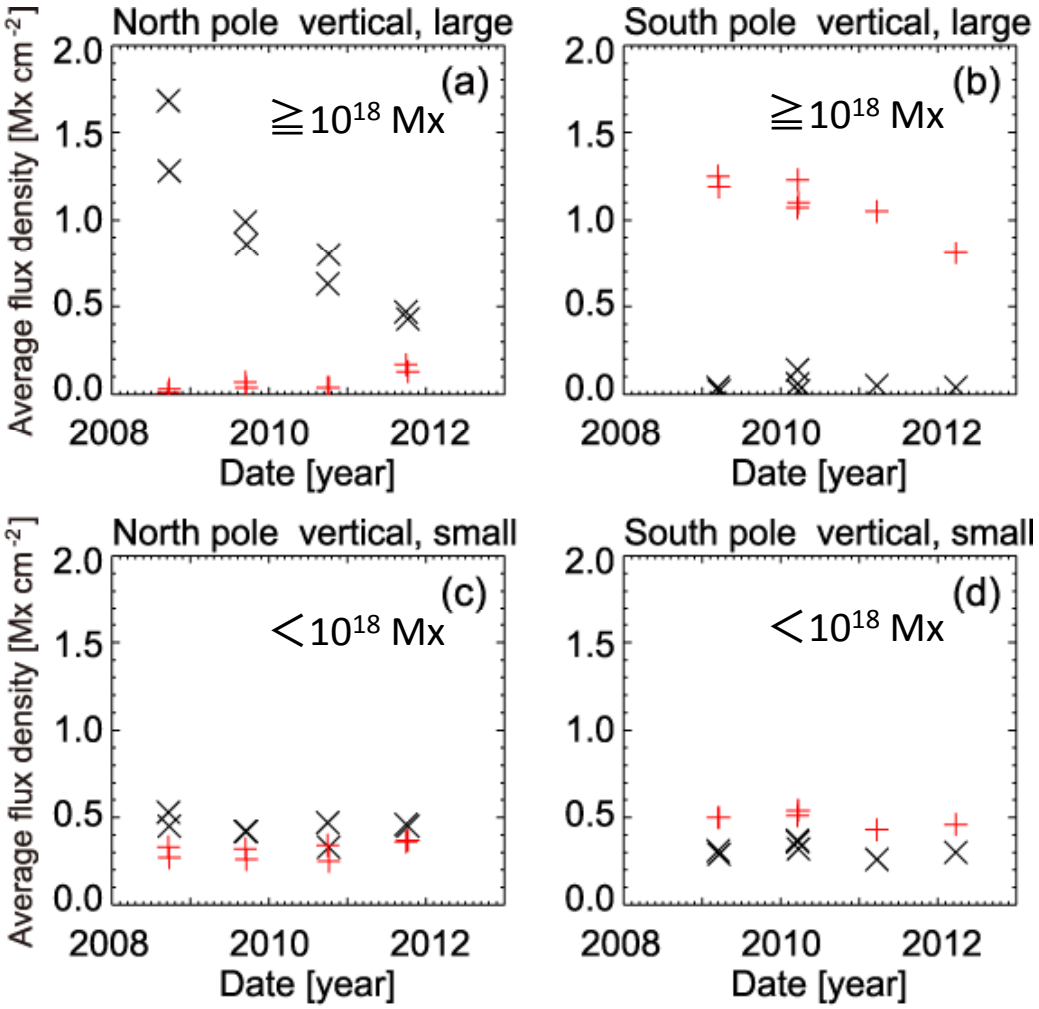
positive

negative

各パッチの磁束[Mx]

大きなパッチ(≧10^{18}Mx)で
平均磁場の極性を決まる

磁束密度ヒストグラムを大小異なる範囲で積分

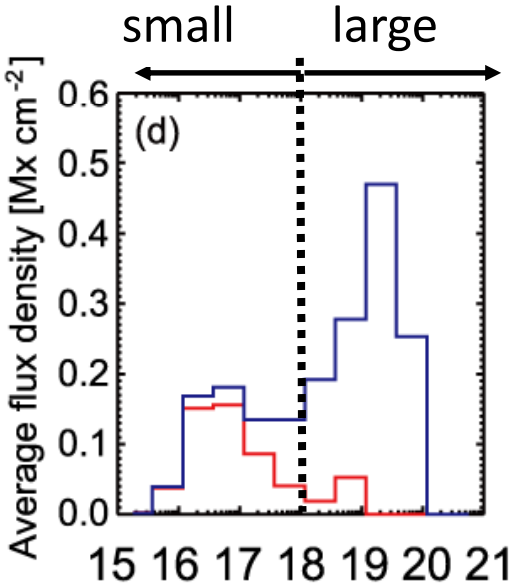


positive negative

観測のまとめ

今回の観測結果：

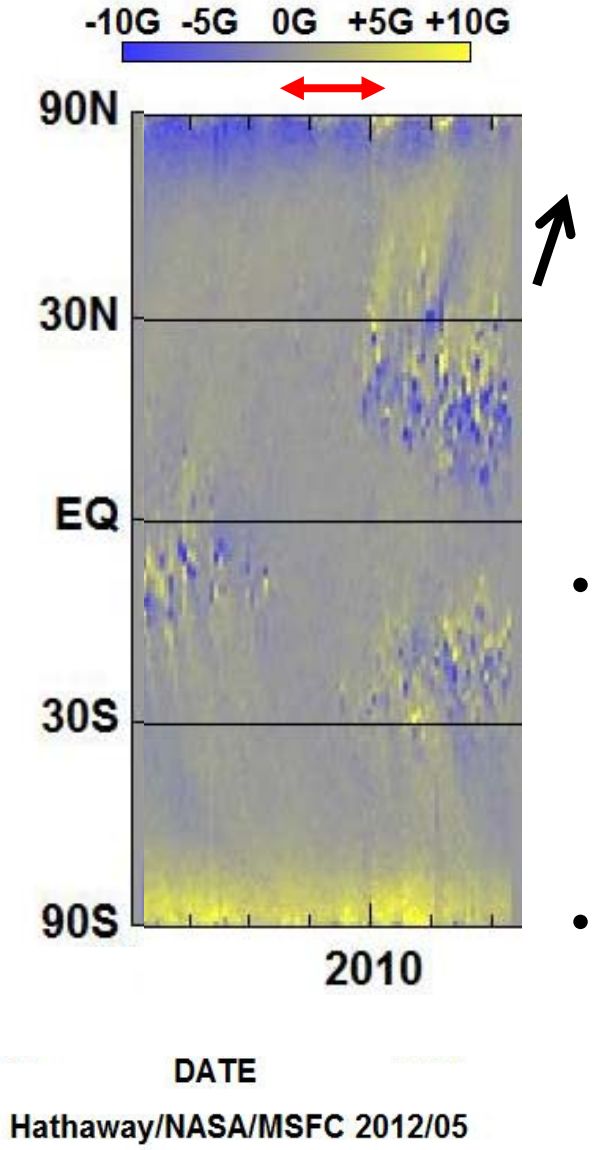
極域垂直磁場の磁気要素は2種類の異なる成分で形成されていることを示している。

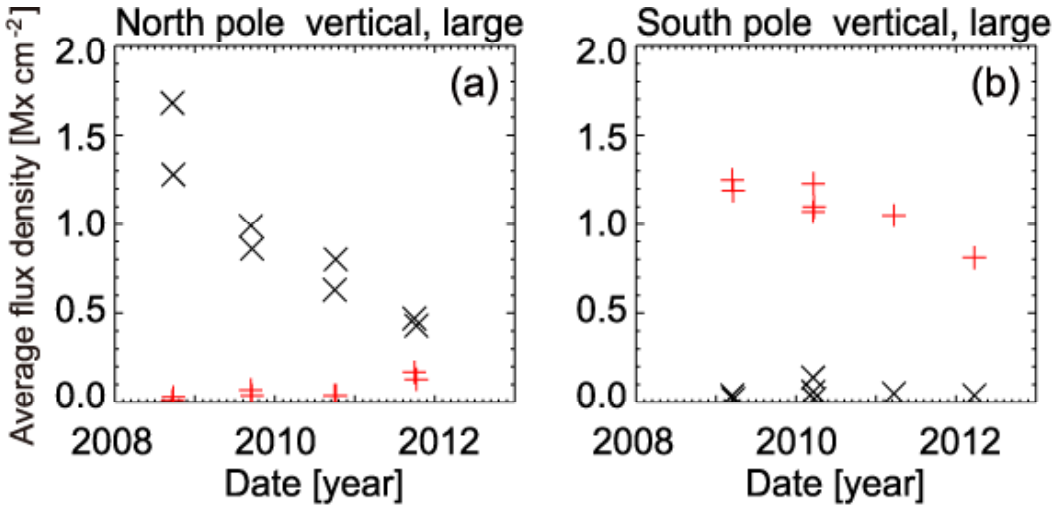


- 支配的な極性の大きな磁気要素($\gtrsim 10^{18}$Mx)
  平均磁束密度が大きい極域に顕著にみられる。
  太陽活動度の上昇とともに大きさと数が減少。
  極性が偏っている＝極域の平均磁場に寄与
  グローバルな磁場の変動によるもの
- 両極性が同程度の小さい磁気要素(10^{15} ～ 10^{17}Mx)
  両極域、静穏領域に存在
  磁束は太陽活動度に関係なく両極性でほぼ同量。
  ローカルな対流によって作られる磁場

境界は明確でない。寿命も大きなもので半日程度。
形成・分裂を繰り返し、お互いに磁束を交換していると考えられる

Discussion: 極域磁場反転





- 北半球の低緯度領域では2009年後半まで黒点はほとんど現れず、その結果2010年ごろまで逆極性の磁束が北極まで輸送されていない。それにもかかわらず、2008年から2009年までの時期に北極の磁束が最も減少している。
- この結果は、活動領域からの磁束の供給というモデルと整合しない可能性がある。

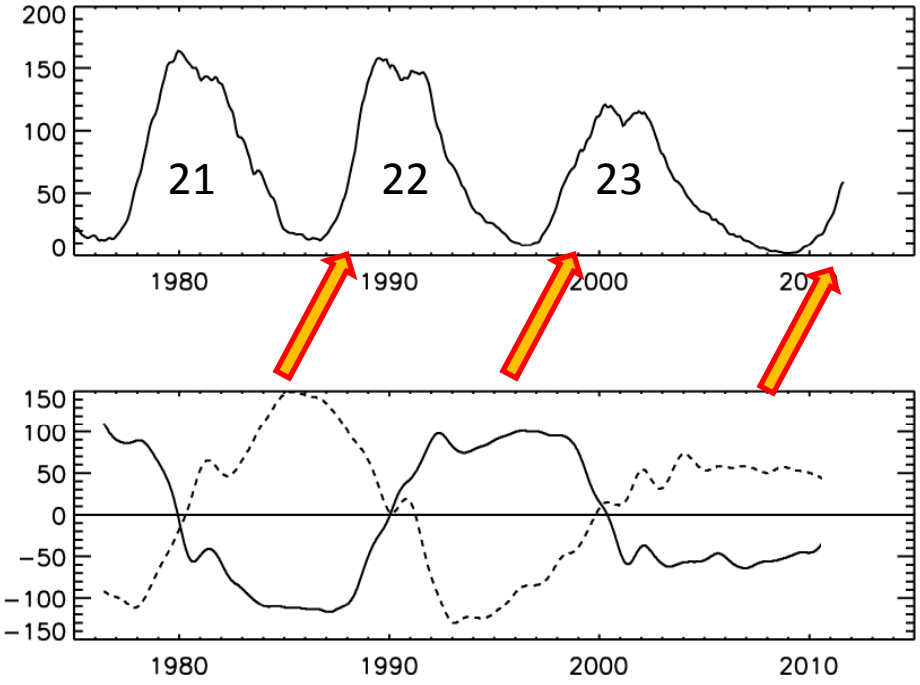
地上観測と異なって、極近傍のみだけをみている
その違いを含めモデルを見直す必要があるかもしれない

太陽極域磁場とダイナモ

極域磁場強度と太陽活動度

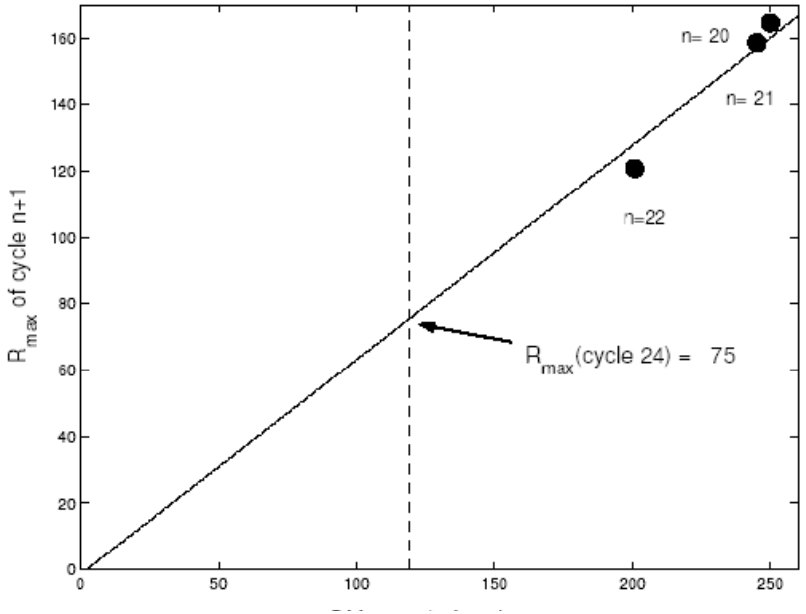
- 極小期の極域磁場強度
  ＝＞次の周期の黒点数
  相関(Svalgaard et al. 2005)

太陽黒点数



太陽極域磁場　(μT)

サイクルn+1のピーク黒点数



サイクルnの双極子磁場強度[μT]

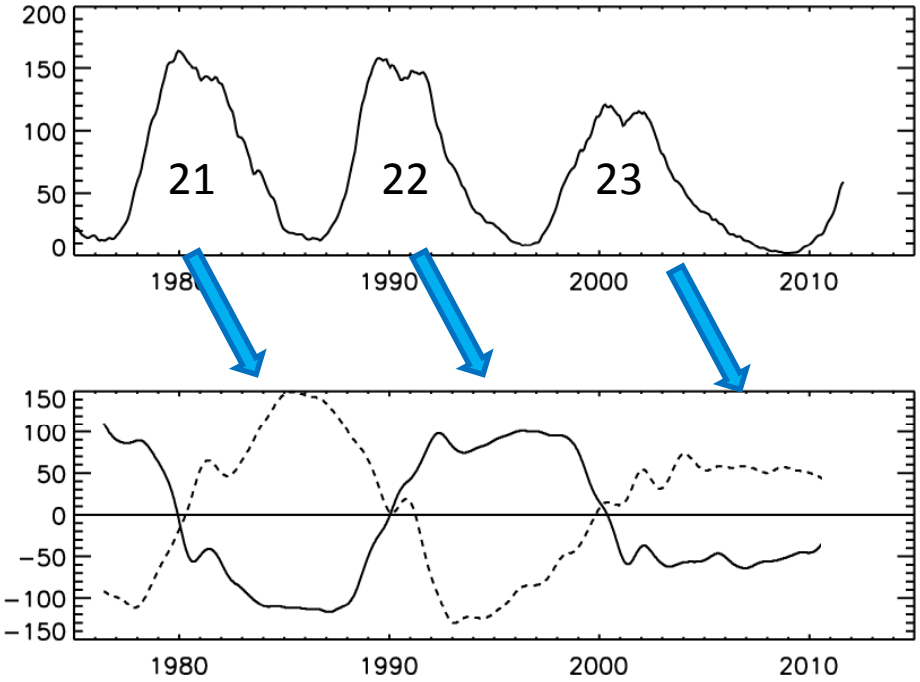
Choudhuri 2008

極域磁場強度がどうやって決まるのかがわかれば、次のサイクルの活動度を予測できる

極域磁場強度と太陽活動度

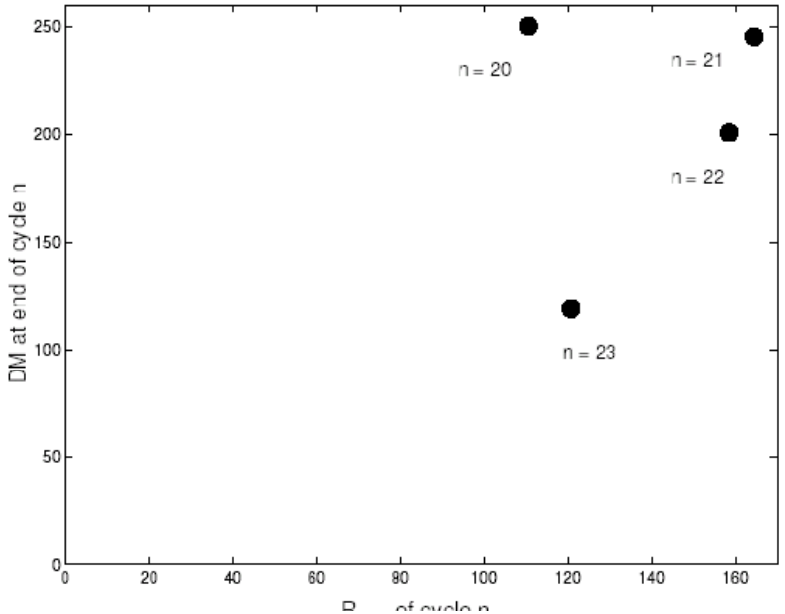
- 黒点数
  ＝＞極小期の極域磁場強度は相関がない

太陽黒点数



太陽極域磁場　(μT)

サイクルnのピーク黒点数



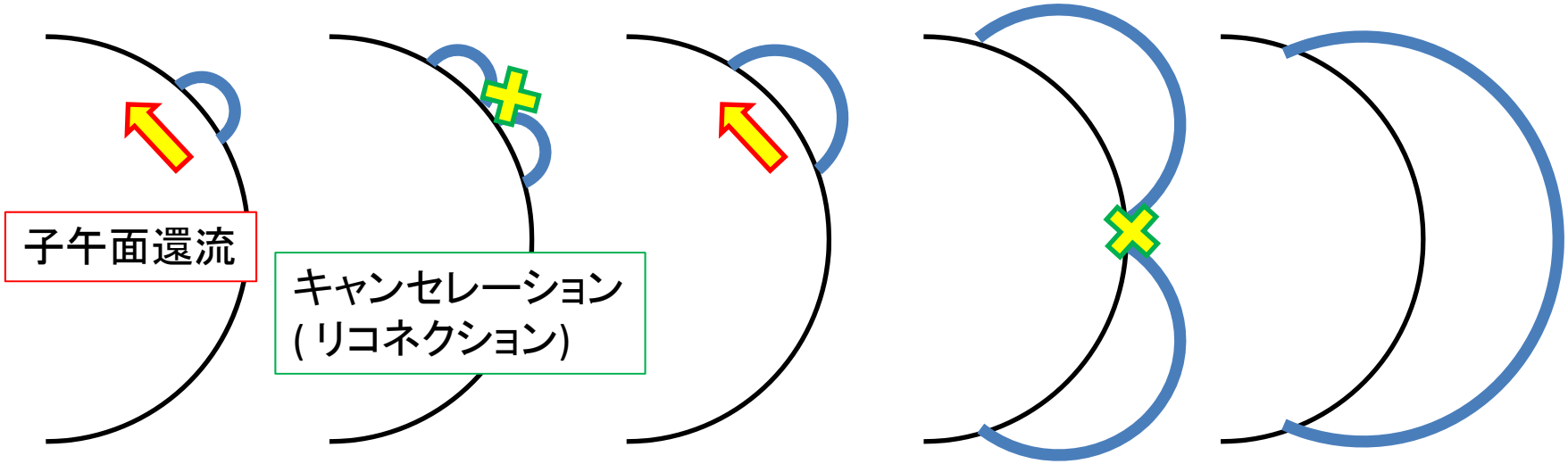
サイクルnの双極子磁場強度[μT]

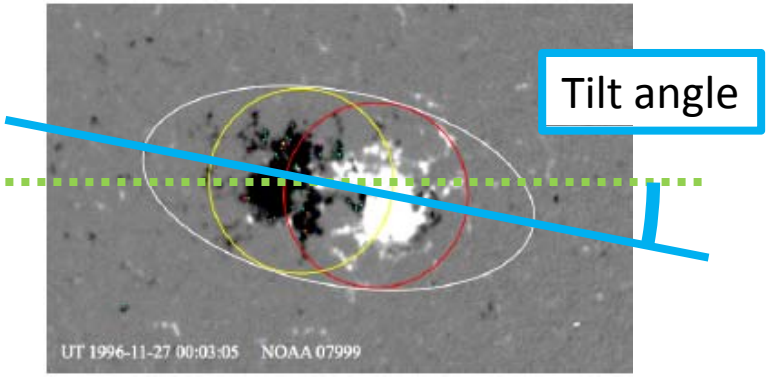
Choudhuri 2008

極域磁場強度がどうやって決まるのかは単純ではなさそう

極域磁場強度はどうやって決まる?

- Babcock-Leighton メカニズム





Li & Ulrich 2012

極域磁場強度はどうやって決まる?

- 重要な役割を果たしていると思われる要素
  - 活動領域(黒点群) 活動領域の磁束量 × tilt angle

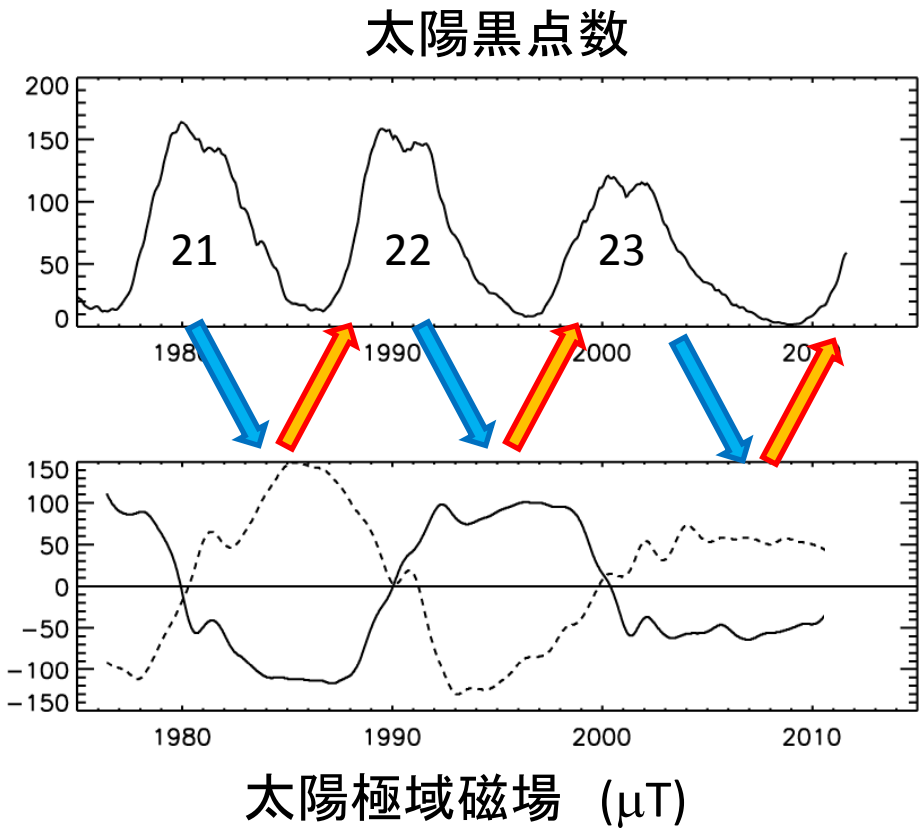
    南北方向の磁束がどれだけ供給されるか？
  - 子午面還流　(周期の長さ=速度の逆数)

    南北方向の磁束を拡散で消える前に極域に輸送できるか？
  - 活動領域どうしの位置関係　(緯度、時期、経度)

    ⇒キャンセレーションの効率

    どれだけ片方の極性の磁束だけを極域に輸送できるか?

Flux transport dynamo model



Choudhuri, Chattejee & Jiang 2007
Jiang, Chatterjee & Choudhuri 2007

- 極磁場(ポロイダル)
  ⇒黒点(トロイダル)
  差動回転による増幅
  ordered process
  Choudhuri, Chattejee & Jiang 2007

- 黒点(トロイダル)
  ⇒極磁場(ポロイダル)
  Babcock-Leighton メカニズム
  ランダムキック
  - 子午面還流 (周期の長さ)
  - 極磁場強度の変化

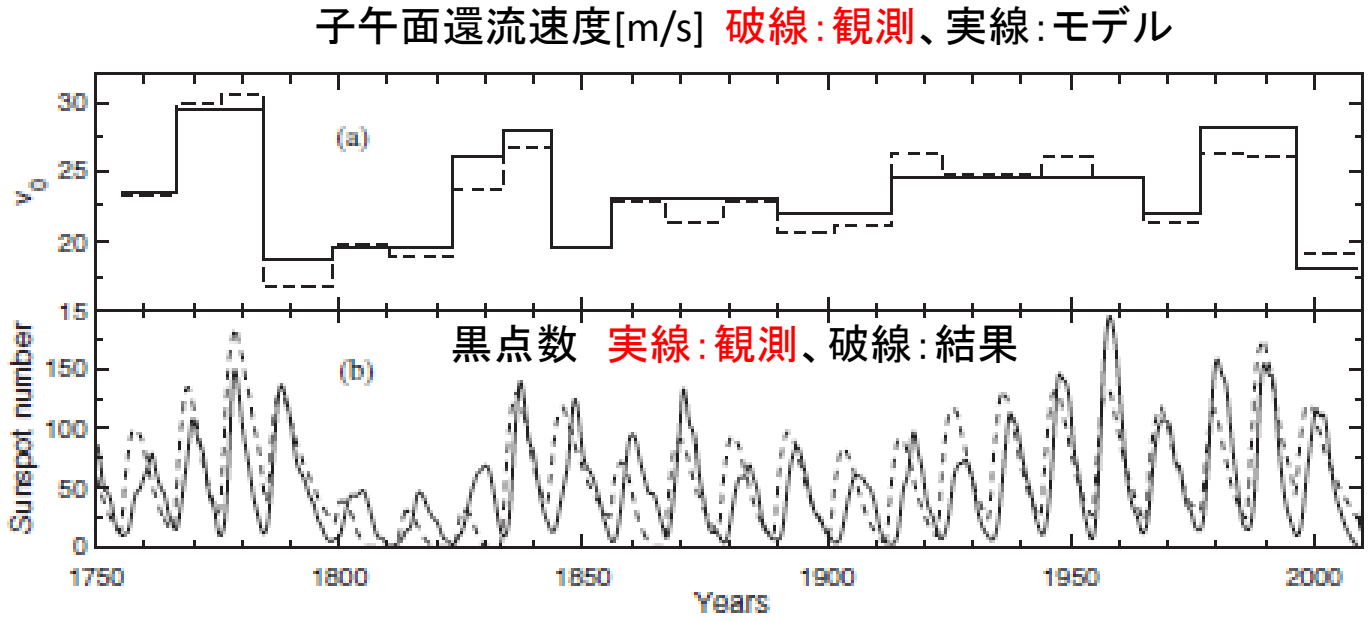
周期の長さと活動度

Waldmeier effect　(Waldmeier 1935)

- 黒点数と上昇率との間に相関

周期の長さ(子午面の速度の逆数)も時間変化

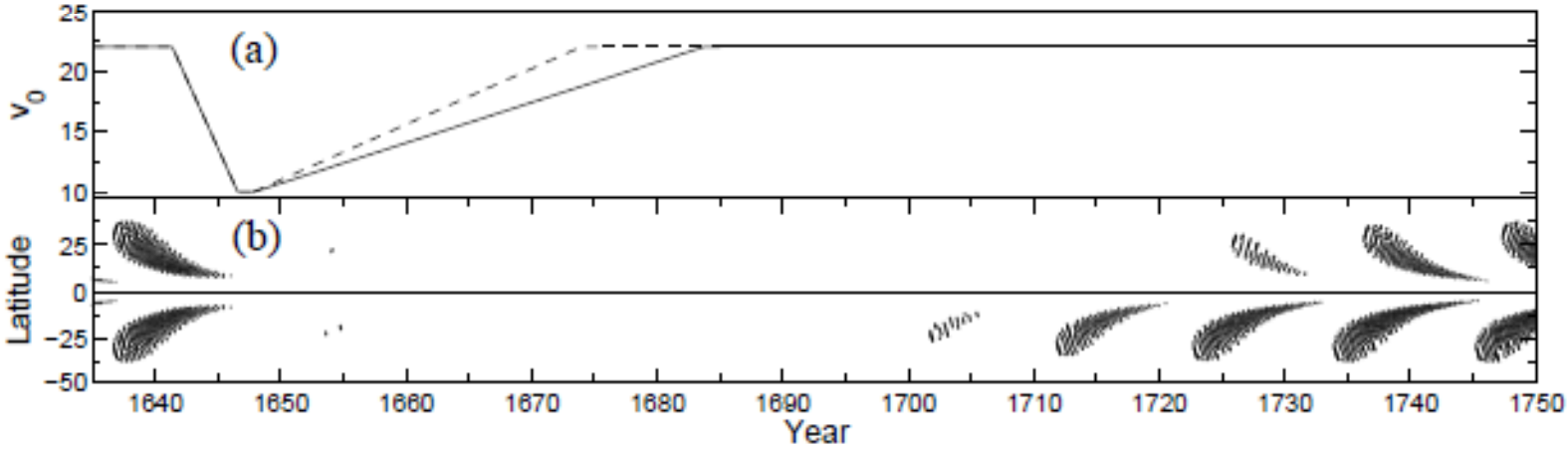
子午面還流の速度を変えたモデル　(Karak　2010)



$$T = 97.48 v_0^{-0.696}$$

マウンダー極小期のモデル

- 子午面還流の速度を低下(Karak 2010)　V=10 m/s　=> T～20年弱



子午面循環速度v　**半減**であれば、1サイクルの伸びで説明可能

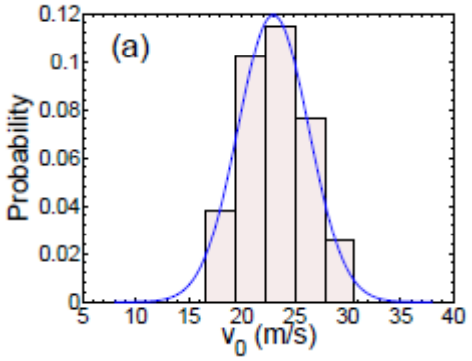
ただし、ダルトン極小期の直前で13.6年、マウンダー極小期の直前～13年
⇒　**数十%程度の低下**が2サイクル持続したと考えるのが妥当

マウンダー極小期のモデル

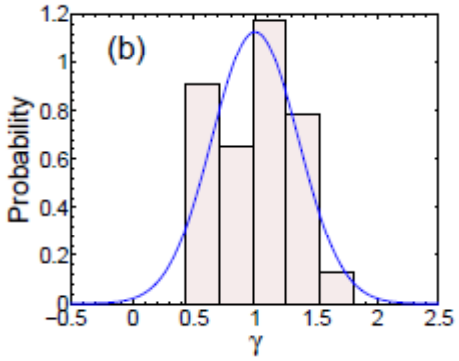
- 子午面還流の速度と極磁場をランダムに変化

  Choudhuri & Karak (2012)

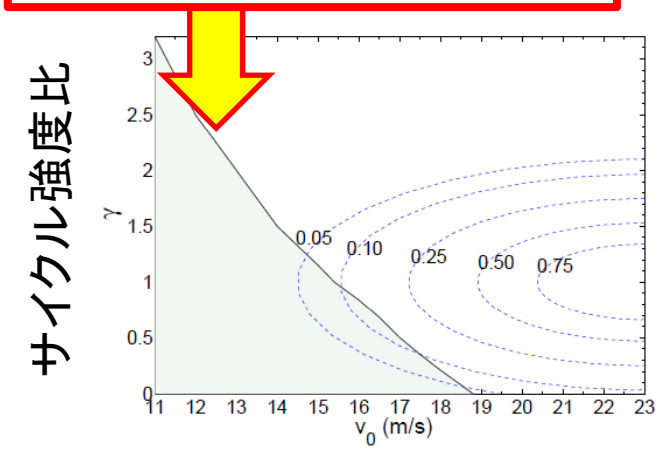
速度の分布



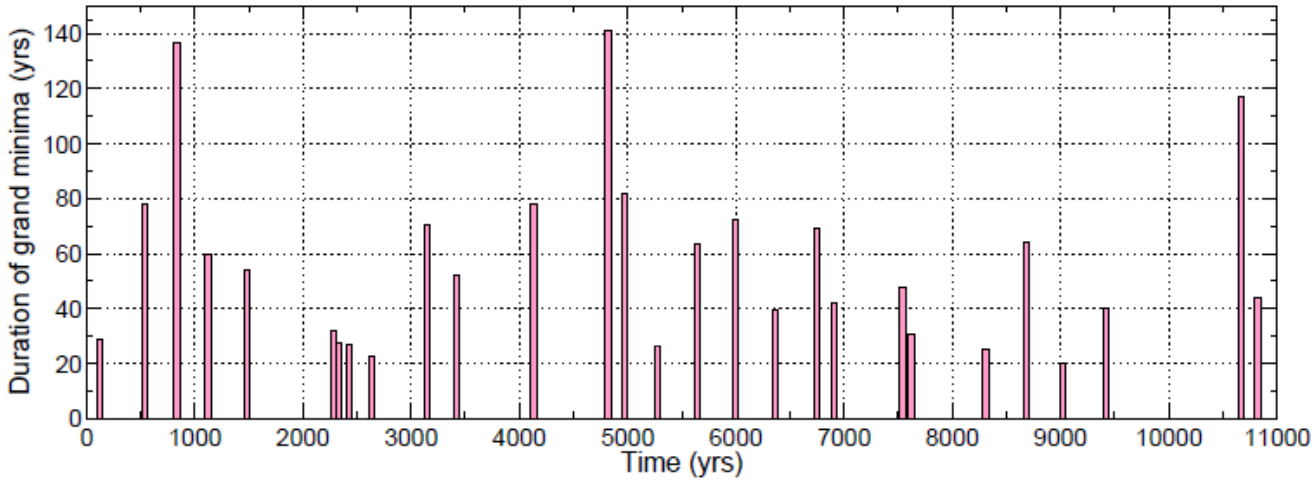
サイクル強度比の分布



Grand minima が始まる範囲



速度



極域磁場強度はどうやって決まる?

- 重要な役割を果たしていると思われる要素
  - 活動領域(黒点群) 活動領域の磁束量 × tilt angle

    南北方向の磁束がどれだけ供給されるか？
  - 子午面還流　(周期の長さ=速度の逆数)

    南北方向の磁束を拡散で消える前に極域に輸送できるか？
  - 活動領域どうしの位置関係　(緯度、時期、経度)

    ⇒キャンセレーションの効率

    どれだけ片方の極性の磁束だけを極域に輸送できるか?

極域磁場を作る決め手となる兆候を観測から見つけられないか?

まとめ

- 極域磁場は、太陽周期活動を決定づける。
- 極域磁場の極性反転が現在進行中。ひのでの観測によって、極性反転が進行する過程が明らかになった。

  しかし、磁場強度の時間変化と黒点の関係はこれまでのモデルでは説明できていない。
- 極域磁場が反転する過程とともに、極域磁場が作られていく過程を理解することで太陽の周期活動の予測につなげられると期待。