

Flux Transport Dynamo Model における子午面還流の抑制の効果
(B. B. Karak and A. R. Choudhuri (2012) のレビュー)

名古屋大学太陽地球環境研究所(M1) 宿谷 大志

1 導入

1.1 太陽 Dynamo

太陽 Dynamo (ダイナモ)とは、太陽磁場を生成・維持するメカニズムのことである。太陽内部のプラズマの運動によって磁力線を引き伸ばしたり、捻ったりして増幅し、プラズマの運動エネルギーを磁場エネルギーに転換することにより、磁場を生成・維持する。

1.2 Flux Transport Dynamo Model

太陽の対流層内とその少し下の領域での磁場の発展を考えたモデルである。このモデルでは、日震学によって得られた速度場(差動回転・子午面還流)を仮定して、磁場の発展を議論する。

具体的には、初めに、図 1 に示すような差動回転、主に対流層底部の速度勾配の大きな領域、タコクラインによってポロイダル磁場が方位角方向に引き伸ばされトロイダル磁場となる(Ω 効果)。そして、このトロイダル磁場が、図 2 に示すような向きの 20 m/s 程度の速さを持った子午面還流によって対流層底部を赤道方向に運ばれていく。そこで磁気圧や対流により磁束が表面に浮上し、その際にコリオリ力によって磁束は捻られ、先行黒点に対して後方黒点が少し高緯度側にずれて現れる。その後、黒点が拡散していき、子午面還流によって高緯度側の後方黒点が多く極に運ばれていき、当初とは逆の磁性のポロイダル磁場が作られる(Babcock-Leighton 機構 (α 効果))。

このように磁束が子午面還流によって運ばれ、各効果がつながることでダイナモを維持するモデルを Flux Transport Dynamo Model (磁束輸送ダイナモモデル)という。

本論文で用いている磁場の発展方程式は、

$$\frac{\partial B}{\partial t} + s\vec{u}_p \cdot \nabla \left(\frac{B}{s}\right) + B\nabla \cdot \vec{u}_p = \eta_t \left(\nabla^2 - \frac{1}{s^2}\right) B + \frac{1}{r} \frac{d\eta_t}{dr} \frac{\partial}{\partial r} (rB) + s(\vec{B}_p \cdot \nabla)\Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{s}(\vec{u}_p \cdot \nabla)(sA) = \eta_p \left(\nabla^2 - \frac{1}{s^2}\right) A + \alpha B \quad (2)$$

である。第1式がトロイダル磁場の式で、第2式がポロイダル磁場の式である。右辺最後の項がそれぞれ Ω 効果と α 効果のソースタームである。その他の項は移流や拡散による変化の項である。

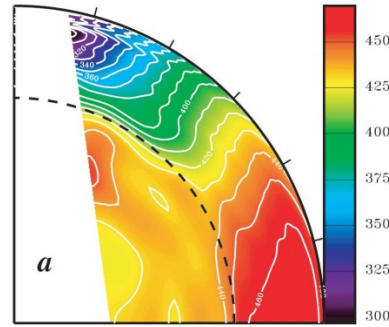


図 1 差動回転

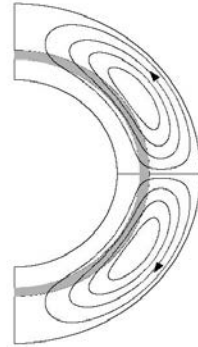


図 2 子午面還流

2 レビュー

2.1 目的

D. H. Hathaway and L. Rightmire (2010) によると、磁場の強さと子午面還流の速さの間には関係があり、極大期、つまり、対流層底部の磁場が強い時には還流は遅くなり、逆に、磁場が弱い時には還流が速くなるという逆相関の関係があるという観測を報告した。本論文の目的は、この観測事実を加味することによって磁束輸送ダイナモモデルがどのような変化を見せるのか調べることである。

2.2 方法

子午面還流が遅くなったとすると、二つの反目する効果が現れる。片方は、ソースタームの Ω 効果が長い時間効いて、磁場が強くなるというもので、もう片方は、拡散が長い時間効くために、磁場が弱くなるというものである。そして、結局、磁場の強さがどうなるのかは、2つの効果の大小関係で決まる。 Ω 効果の方は差動回転によるものであり、観測された速度場を仮定しているので変えられない。そこで、拡散の値を変えて調べてみることにする。

なお、子午面還流の変動については、

$$u_0 = u_0^{max} [1 + (\bar{B}/B'_0)]^{-1} \quad (3)$$

このような抑制項を用いて起こす。ここで u_0 は還流の速さ、 u_0^{max} は還流の速さの上限値、 \bar{B} はタコクラインでの平均磁場の強さ、 B'_0 は磁場の規格化定数である。マイナス1乗がか

かっているのです、磁場が強くなれば還流の速さは遅くなる。逆に、弱くなれば速くなる。

2.3 DC99 モデル

本論文ではまず、Dikpati and Charbonneau (1999) のモデル、ここでは DC99 と呼ぶことにするが、これを使って拡散の値を変えた計算結果を見てみる。なお、計算範囲は、太陽内の子午面 2 次元の北四半球で、深さは太陽半径の 0.6 倍から光球面までの間で行っている。

2.4 結果(拡散小)

まず、拡散が小さい ($\eta_0 = 5 \times 10^{10} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$) ときは、図 3 のようになった。この図は二つの図を一緒に載せたもので、横軸に時間を単位は年でとり、縦軸は、上半分では、左の赤い目盛と破線が子午面還流の速さ、右側の黒い目盛と実線が、緯度 15 度での対流層底部のトロイダル磁場のエネルギー密度を表している。下半分は、縦軸に緯度をとっており、等高線はトロイダル磁場を、背景の色は拡散された後の視線方向の、弱い磁場を表している。赤と青の違いは磁性の違いで、左の方にある青い縦線は、還流の抑制を入れ始める境界を示している。

還流の抑制を入れると、まず、拡散が小さいために磁場が強いまま残っているのです、(3) 式のとおり還流が抑えられる。還流が抑えられると、 Ω 効果が長く効いて磁場が更になくなっていく。これを繰り返すと、最後には還流はほぼゼロになってしまい、安定的に還流を保つことができなくなる。

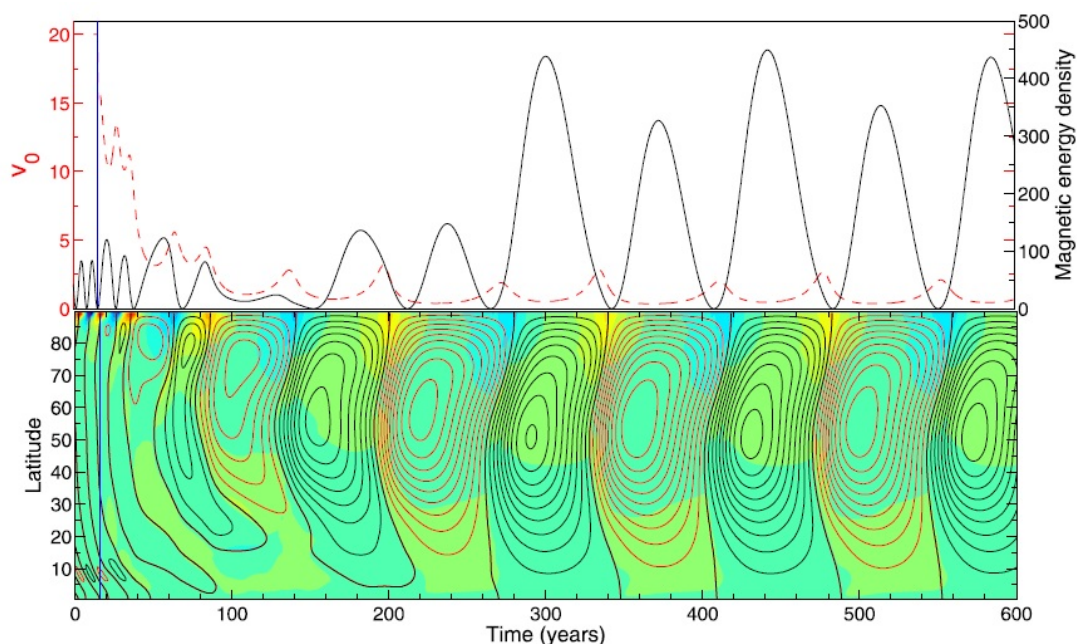


図 3 DC99 モデル(拡散小)の磁場と還流の時間発展

2.5 結果(拡散大)

同じ DC99 モデルで、拡散だけ大きくして ($\eta_0 = 2.8 \times 10^{12} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$) 計算をしてみると、図 4 のようになった。拡散が大きいと、磁場は強くなり過ぎ無いため還流があまり抑えられない。すると、還流の抑制を入れた前後で、磁場はほとんど変わらない値の範囲を振動し続け、還流の速さもこれに従って一定の範囲で振動をする。この還流と磁場の関係は観測によって得られた関係と一致する。よって、拡散を大きく取ると、還流の速さが振動するモデルが作れるとわかった。

しかし、図 4 の下半分を見ると、周期が極端に短く、磁場もバタフライの形になっていない。この原因は、2.6 節で少し触れるが、ソースタームの扱い方にあると著者は言っている。

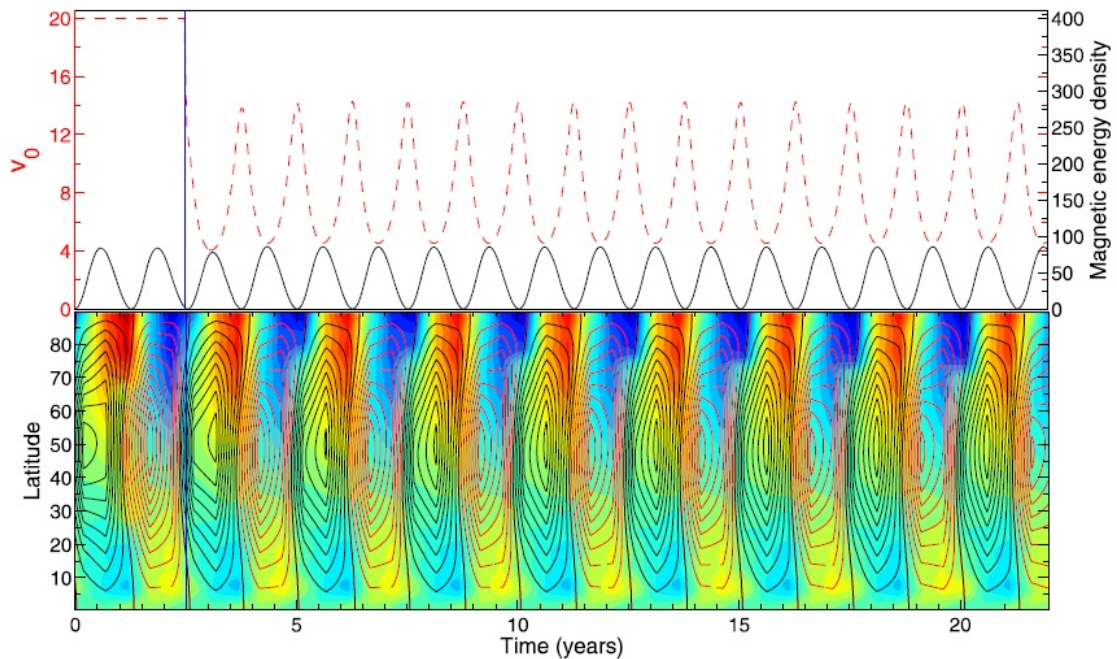


図 4 DC99 モデル(拡散大)の磁場と還流の時間発展

2.6 K10 モデル

次に、Karak (2010) のモデル、K10 モデルと呼ぶことにするが、これを使った計算結果を見てみる。このモデルは、磁気浮上の仕方、 α 効果の項の磁場の扱い方などが DC99 モデルと違って、筆者はより solar-like なモデルであると考えている。拡散が大きい方 ($\eta_0 = 2.8 \times 10^{12} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$) が安定することは DC99 モデルの例でわかっているので、ここでは拡散が大きい時のみ示す。なお、計算範囲や他のパラメータ等は本質的に DC99 と同じである。

2.7 結果(K10)

結果は図 5 のようになった。K10 モデルでは、しっかりバタフライの形が現れていて、この点でより solar-like であると著者は考えているが、このモデルでも DC99 モデルと同様、観測に合うような還流の速さの振動を入れることができた。

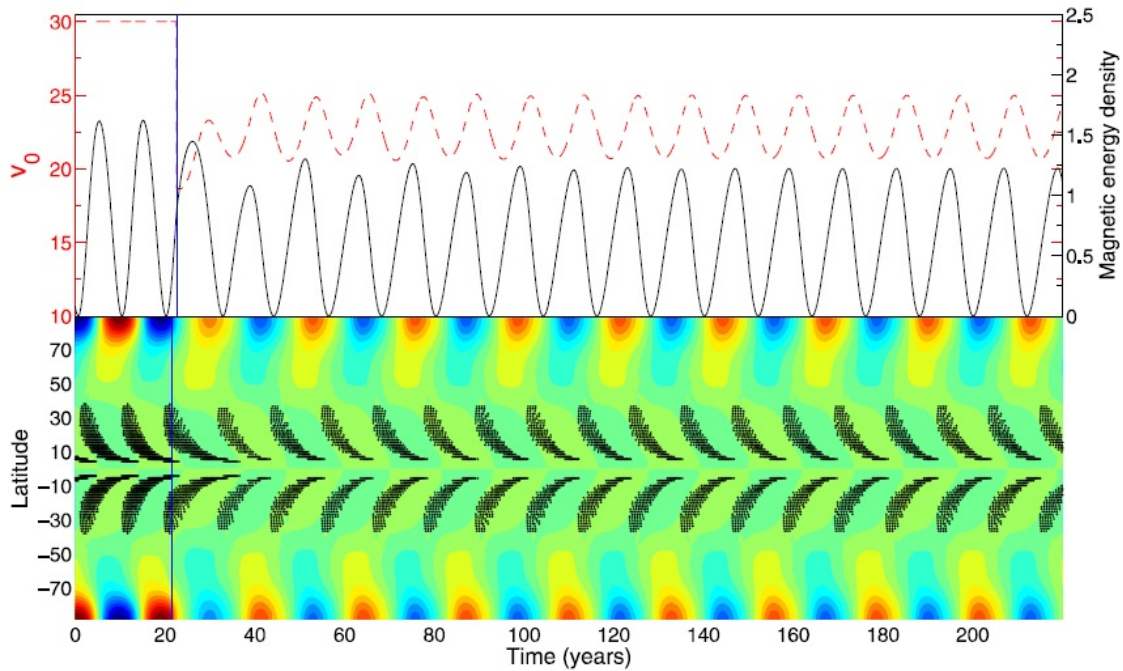


図 5 K10 モデル(拡散大)の磁場と還流の時間発展

3 まとめ

拡散が小さいと、還流は安定した値を保てず、殆んど消えてしまう。そして、拡散が大きいと、還流の抑制によって磁場の強さの振動範囲はほとんど影響を受けず、安定して振動を続ける。そして、より solar-like なモデルでも同様の結果となった。

そして、実は過去の研究において、「太陽磁場のパリティ、極小期の極域磁場と次の太陽活動の強度との関係、マウンダー極小期」などの観点からも拡散が大きいモデルの方がより良く太陽現象を説明するという事は分かっており、今回の結果もこれを支持するものとなった。

結論として、拡散が、

$$\eta_0 \leq 2 \times 10^{11} \text{ cm}^2\text{s}^{-1} \quad (4)$$

以下であると、子午面還流の抑制を入れたダイナモは不安定になると言える。

4 考察

4.1 筆者の展望

今回の計算では、子午面還流の抑制の効果を、式(3)を用いて扱ったが、今後はナビエ・ストークスの方程式を解いてもっと詳細な扱いをしたいと考えている。

4.2 考察(自分)

D. H. Hathaway and L. Rightmire (2010) では、Cycle23, Cycle24 を中心に解析した結果、子午面還流の速さと活動周期の長さの間に関係を見出している。その関係とは、還流が速いと周期は長くなり、遅いと短くなるというものである。ところが、ここで扱っている Flux Transport Dynamo Model では、子午面還流の速さと活動周期の長さの間関係はこの観測結果とは反対のものになってしまう。このことも含め、還流とダイナモの関係を研究していこうと思う。