

CME モデリング研究の現状と今後の課題

真柄 哲也

京都大学理学研究科附属花山天文台

SOLAR-B時代の太陽シミュレーション

2006年6月 於 東京大学

講演内容

1. 海外研究活動報告
2. 種々の CME モデルの紹介とその特徴
3. 問題点検証
4. 発展に向かったのアプローチ
5. 今後の研究行程

海外活動報告 (2000年～2006年)

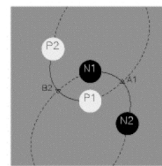
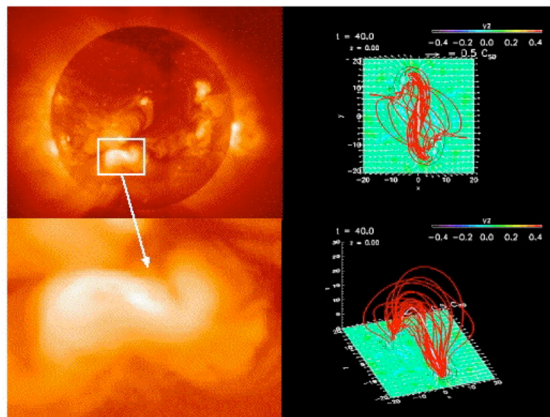
- 2000年5月～2003年4月
米国モンタナ州立大学太陽物理学部門所属
- 2003年4月～2006年3月
米国カリフォルニア大学バークレ校附属宇宙科学研究所所属

2000年5月~2003年4月

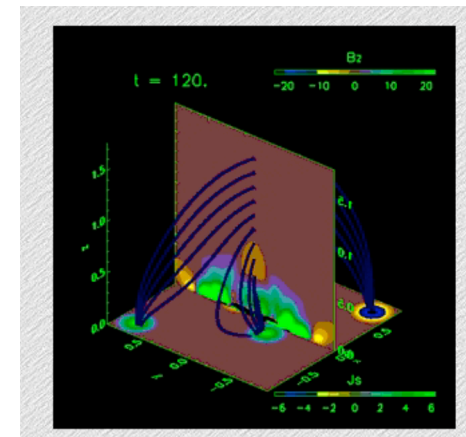
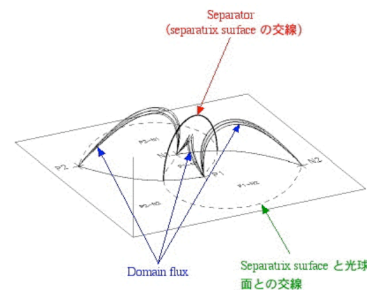
米国モンタナ州立大学太陽物理学部門

主な取り組み：

- Flux emergence の数値シミュレーション（2次元, 3次元）を本格的に開始
- Magnetic topology の研究
- Magnetic topology model の数値シミュレーションを実行

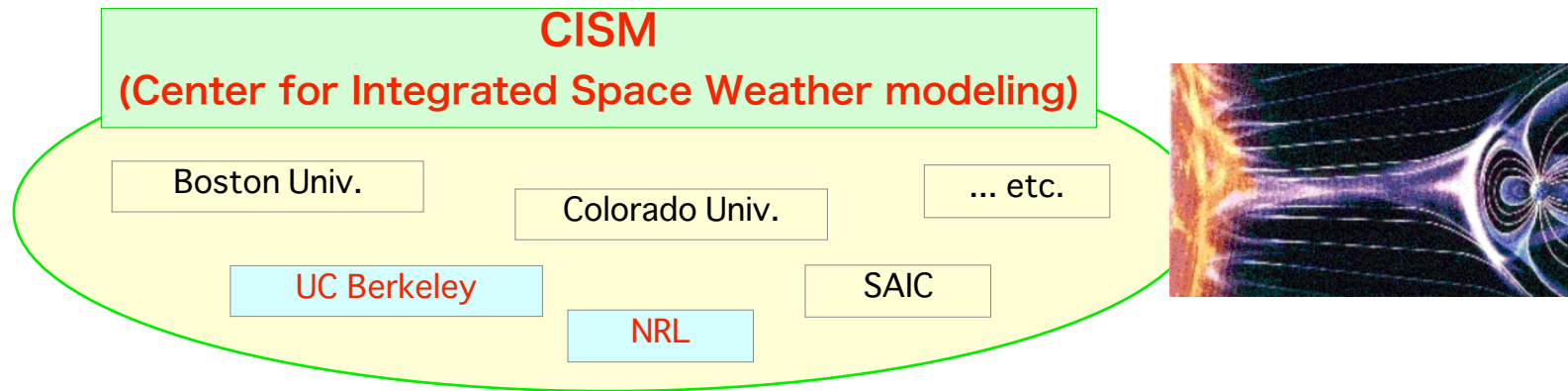


A1, B2, null point
P1, N1, ... magnetic polarity



2003年4月～2006年3月

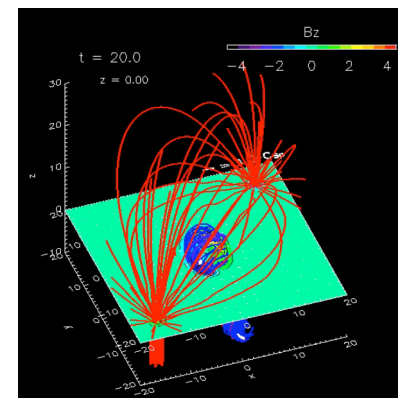
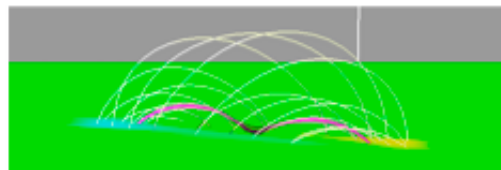
米国カリフォルニア大学バークレ校附属宇宙科学研究所



主な取り組み：

CISM の太陽部門の所属メンバーとして，太陽面擾乱（Coronal mass ejection 等）の駆動要因を，特に太陽面で生じる flux emergence の観点から研究した。研究課題は，

- Flux cancellation の発生機構
- CME 駆動要因としての magnetic topology



Outside research...



CME モデルの紹介とその特徴

*PFR... preexisting flux rope

Multiple flux domain system (quadrupolar, multipolar configuration)

Reconnection

near the surface... Chen and Shibata (2000) (emerging field) *PFR

in the upper corona... Antiochos (1998) (breakout)

in the lower corona

... Sturrock et al. (1984), Moore et al. (2001) (tether cutting)

... Kusano (2005) (annihilation of opposite helicity)

Single flux domain system (bipolar configuration)

Reconnection

near the surface...

Linker et al (2003) (flux cancellation), *PFR

Forbes and Isenberg (1991), Amari et al. (2000)

(loss of equilibrium) *PFR

Non-reconnection

Chen (1989) (injection of poloidal flux) *PFR

Fan and Gibson (2003) (kink instability) *PFR

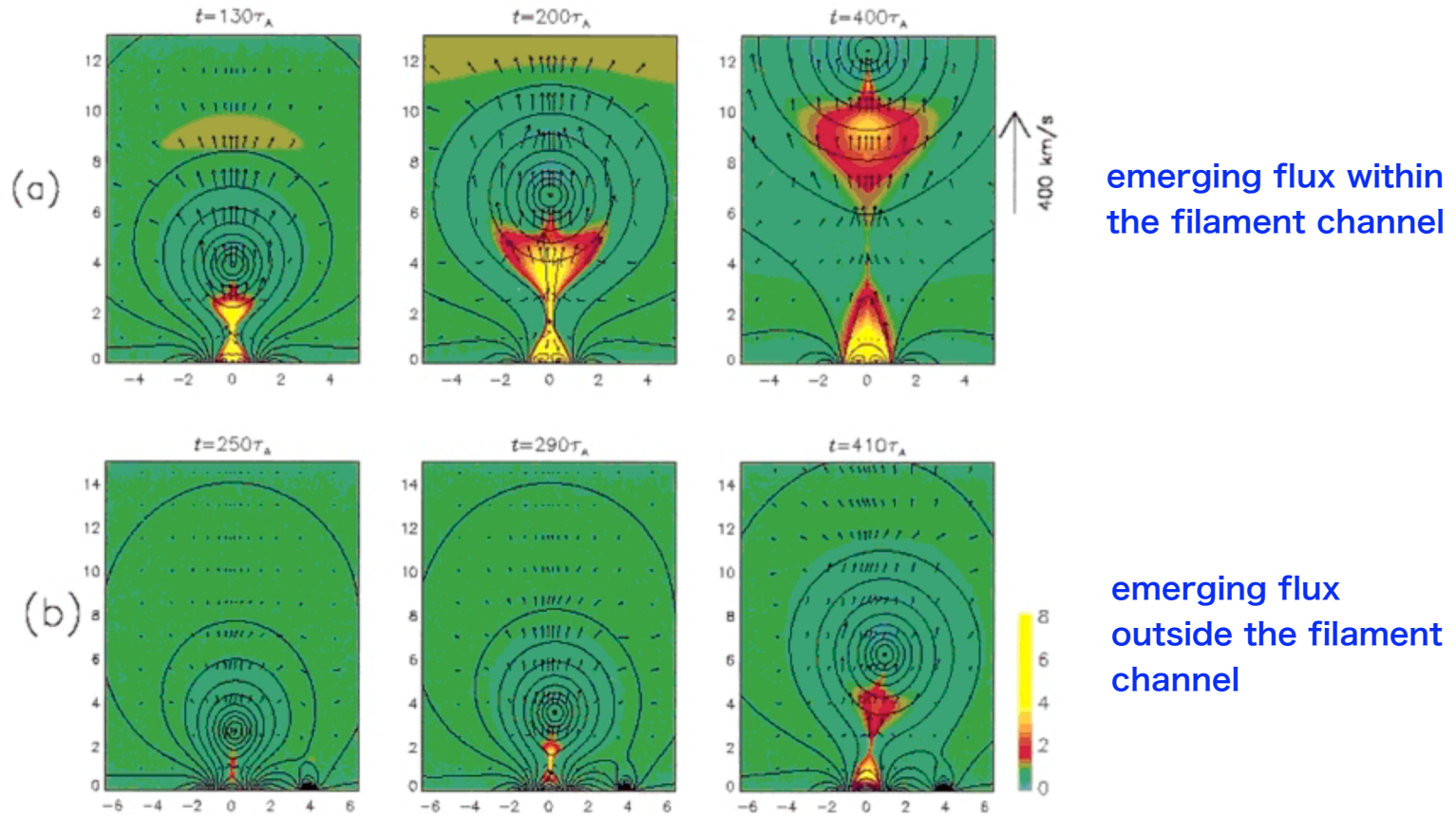
Low (1996) (magnetic buoyancy) *PFR

References

- Amari, T., J. F. Luciani, Z. Mikic, and J. Linker *Astrophys. J. (Lett.)*, 529, L49-L52, 2000
- Antiochos, S. K., *Astrophys. J. (Lett.)*, 502, L181-L184, 1998
- Chen, J., *Astrophys. J.*, 338, 453-470, 1989
- Chen, P. F., and Shibata, K., *Astrophys. J.*, 545, 524, 2000
- Fan, Y., and Gibson, S. E., *Astrophys. J.*, 589, 105, 2003
- Forbes, T. G., *J. Geophys. Res.*, 105, 23153-23165, 2000 (Review)
- Forbes, T. G., and P. A. Isenberg, *Astrophys. J.*, 373, 294-307, 1991
- Klimchuk, J. A., in *Space Weather (AGU Monograph Series)*, edited by P. Song, G. Siscoe, and H. Singer, AGU, Washington, 2000, (Review)
- Kusano, K., *Astrophys. J.*, 631, 1260, 2005
- Low, B. C., *Solar Phys.*, 167, 217, 1996
- Linker, A. J., Mikic, Z., Lionello, R., and Riley, P., *Phys. of Plasmas*, 10(5), 1971, 2003
- Moore, R. L., A. C. Sterling, H. S. Hudson, and J. R. Lemen, *Astrophys. J.*, 552, 833, 2001
- Sturrock, P. A., P. Kaufman, R. L. Moore, and D. F. Smith, *Solar Phys.*, 94, 341-357, 1984

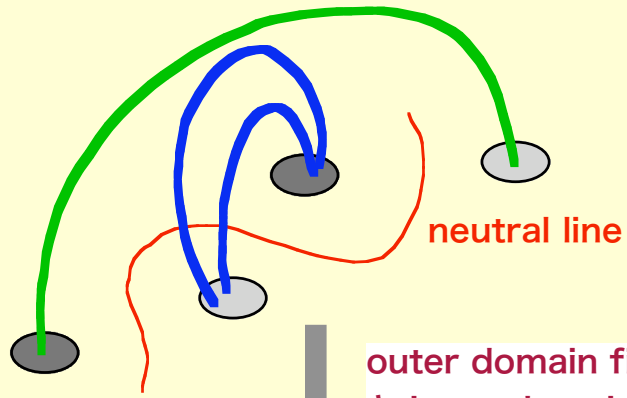
Chen and Shibata (2000)

flux emergence model

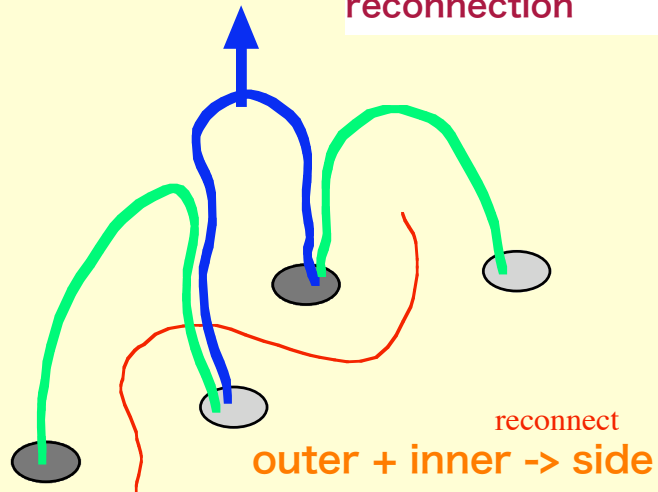


preexisting flux rope + $\left\{ \begin{array}{l} \text{emerging flux within the filament channel} \\ \text{emerging flux outside the filament channel} \end{array} \right. \Rightarrow \text{eruption!}$

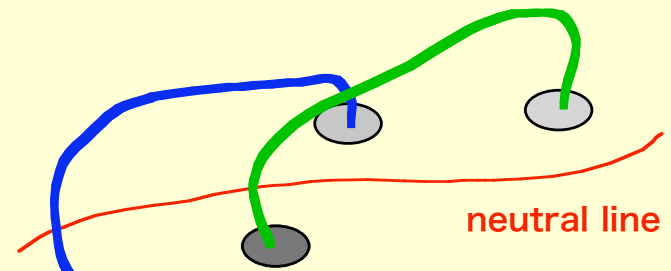
breakout model (Antiochos 1998)



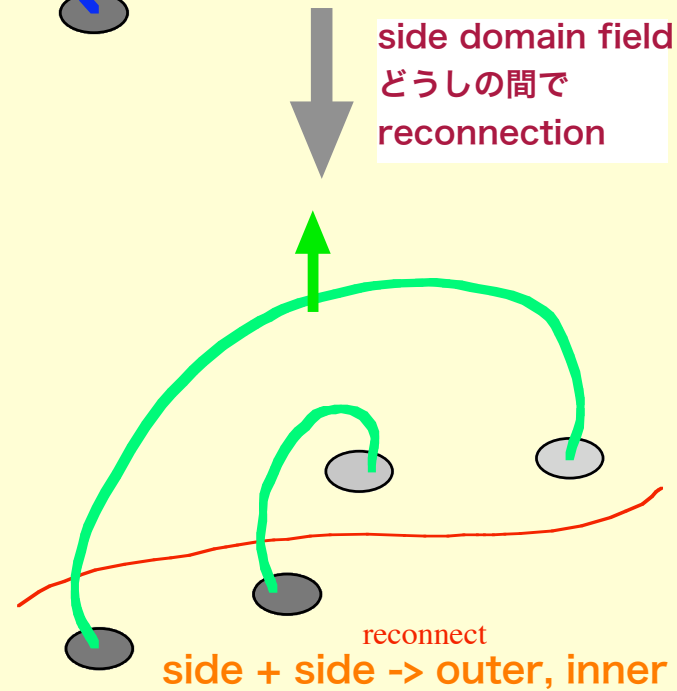
outer domain field
と inner domain
field との間で
reconnection



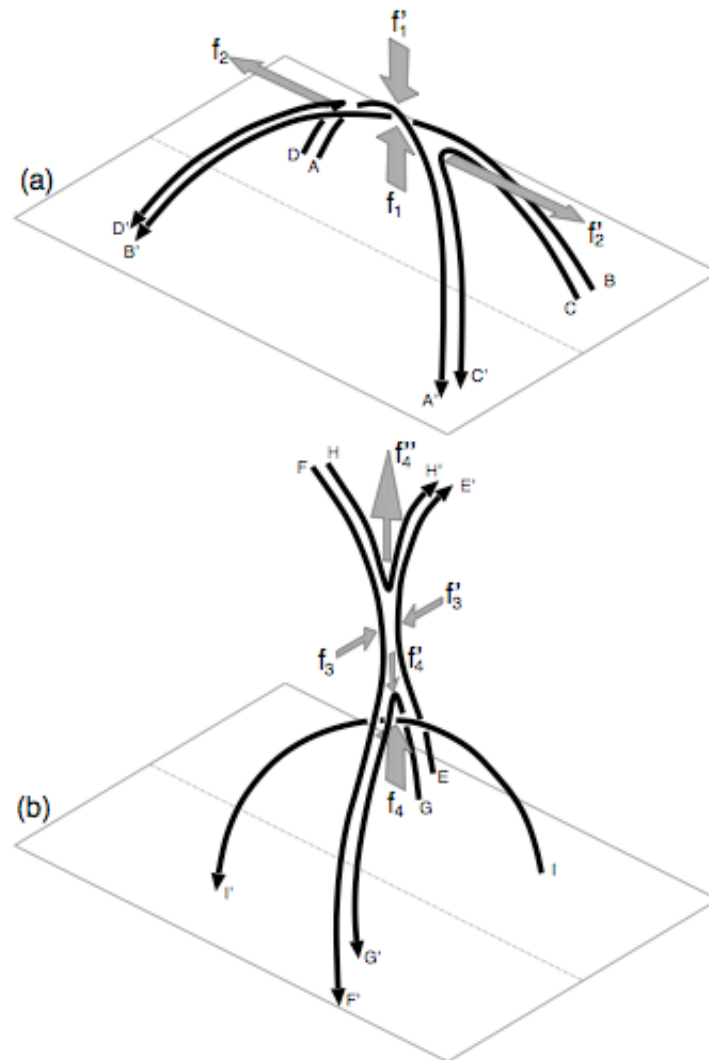
tether cutting model
(Moore et al 2001)



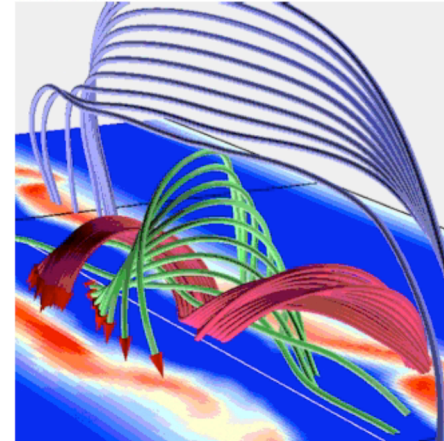
side domain field
どうしの間で
reconnection



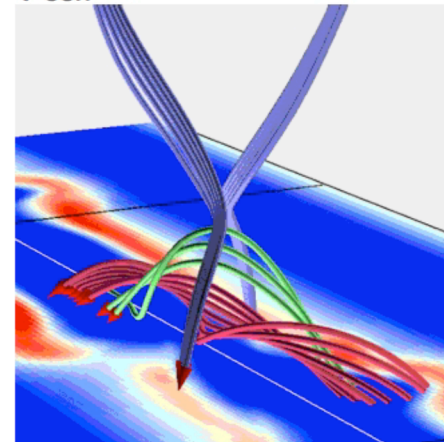
“annihilation of helicity” model (Kusano 2005)



t=30.1

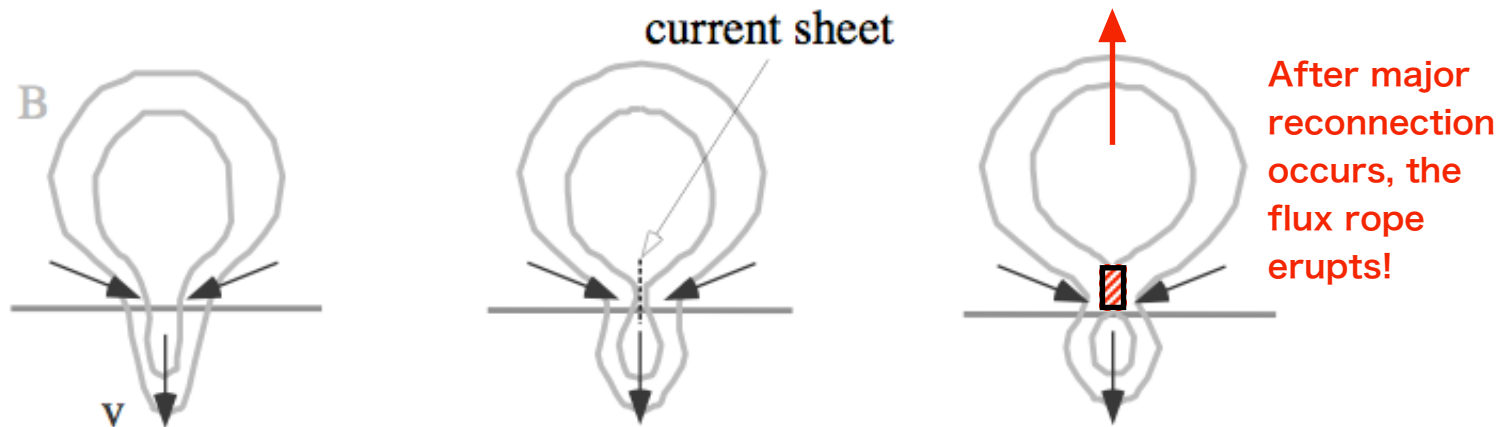
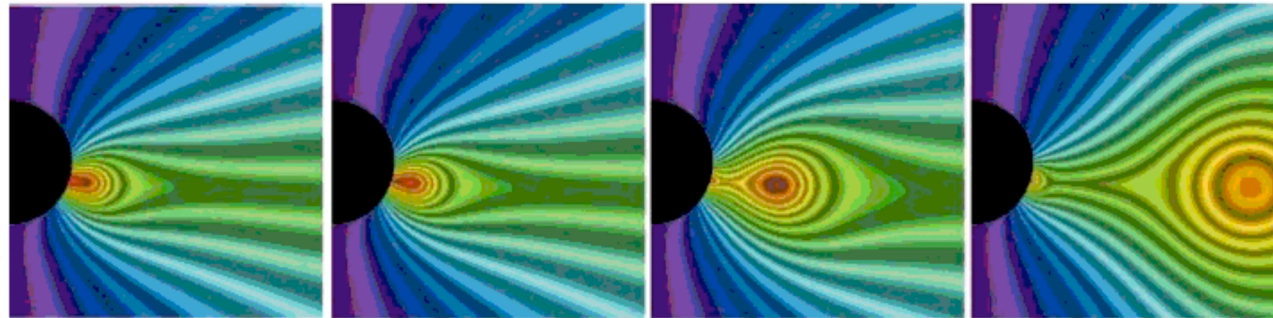


t=58.7



Linker et al. (2003)

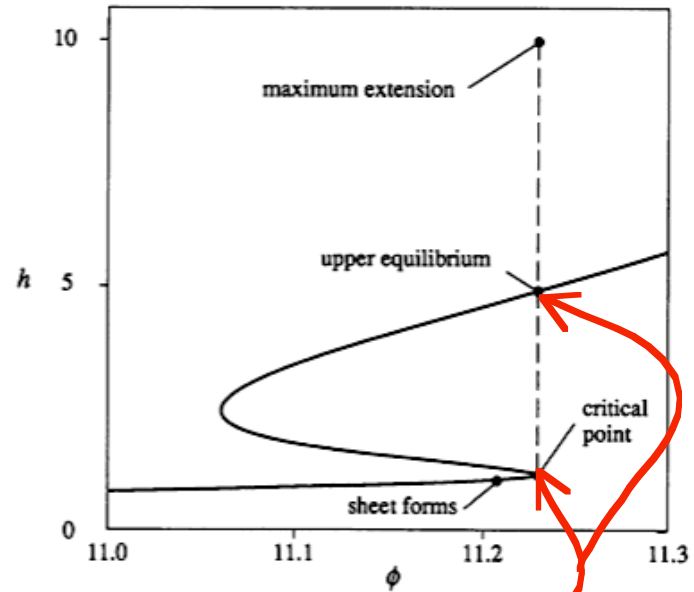
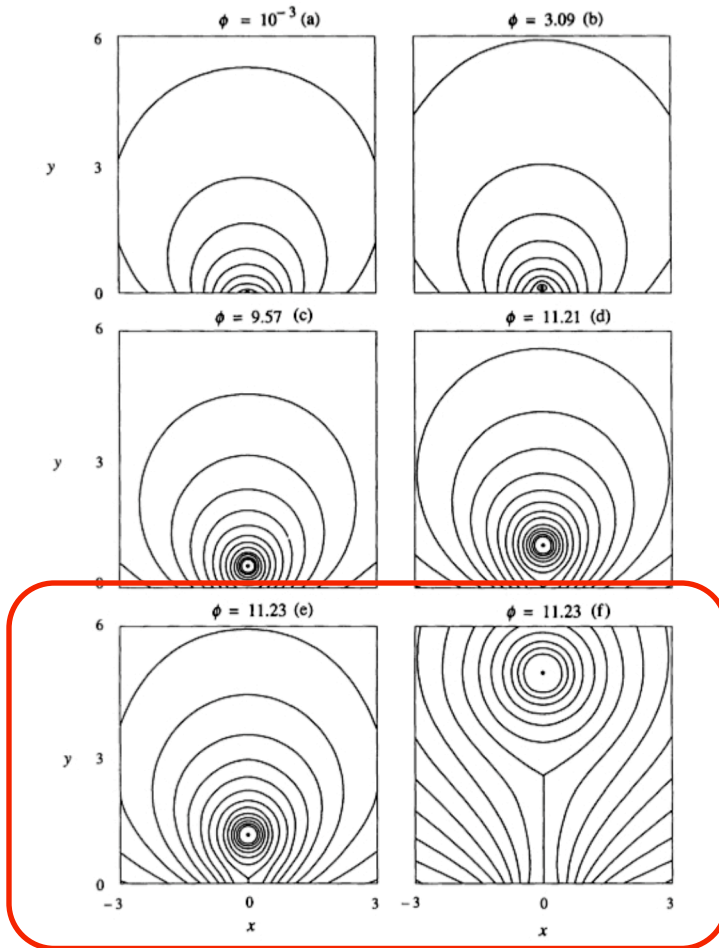
flux cancellation model



Converging flow causes flux cancellation in the photosphere, which reduces the confining effect of magnetic tension and the flux rope gradually rises. Major reconnection occurs at a current sheet formed below the flux rope.

Forbes and Isenberg 1991

“loss of equilibrium” model



Converging flow increases the amount of flux between the filament and the photosphere, which causes loss of equilibrium.

Amari et al. (2000)

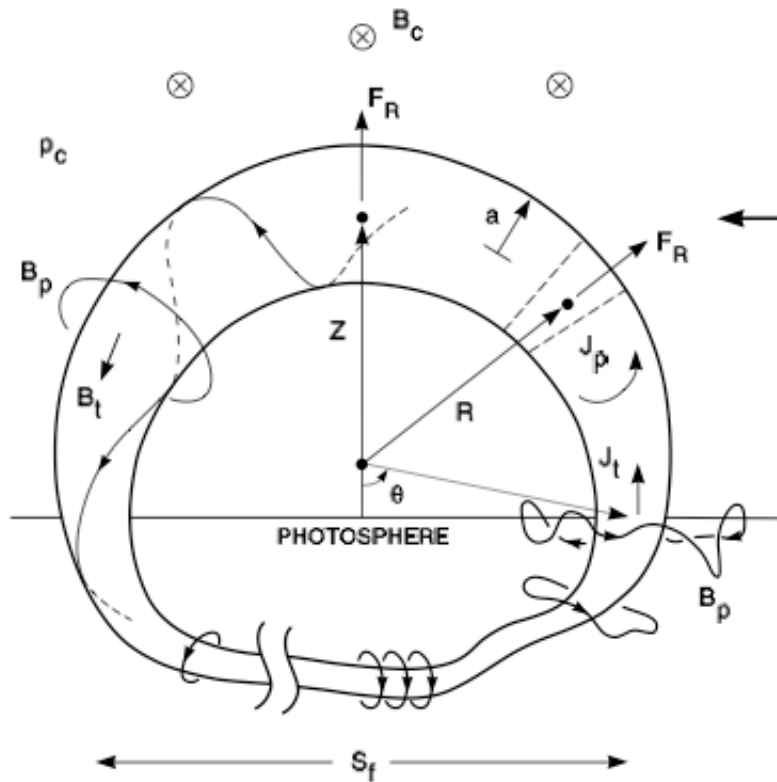


3-dimensional version of “loss of equilibrium” model

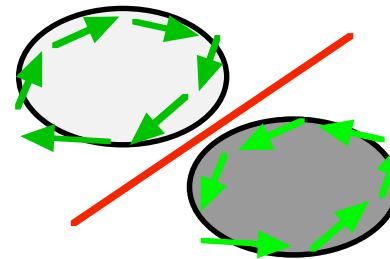
A twisted flux tube is artificially created by adding new polarity regions to the original bipolar region (not by the emergence of flux).

Chen (1989)

flux injection model

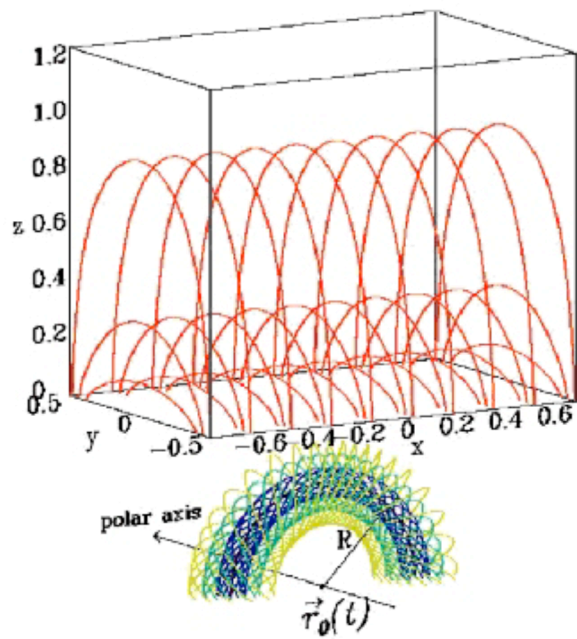


Flux rope eruption is caused by the injection of poloidal flux (B_p).



torsional motion

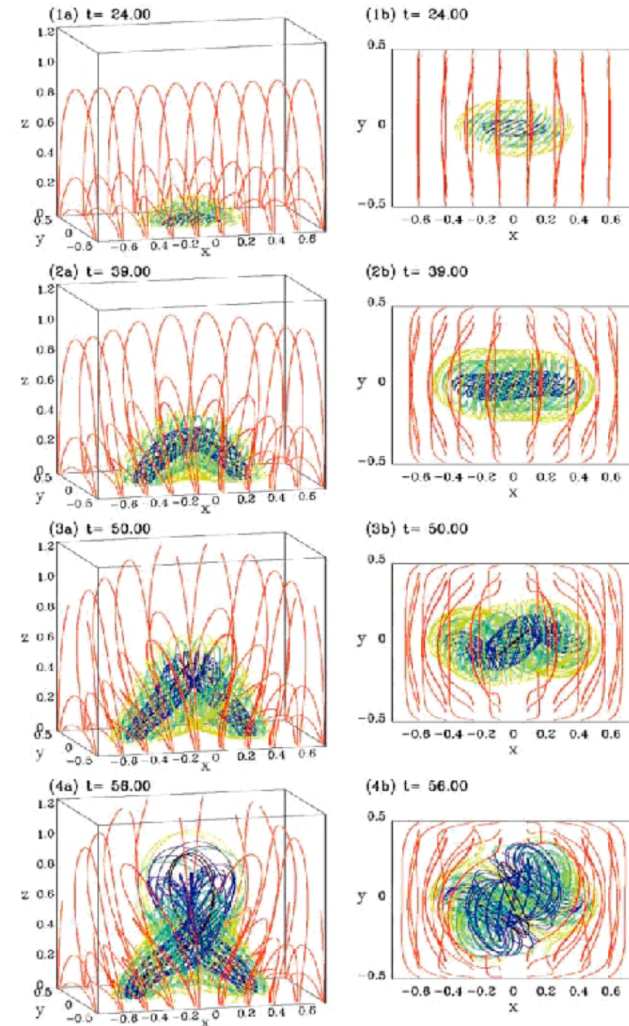
Fan et al. (2003)



preexisting arcade

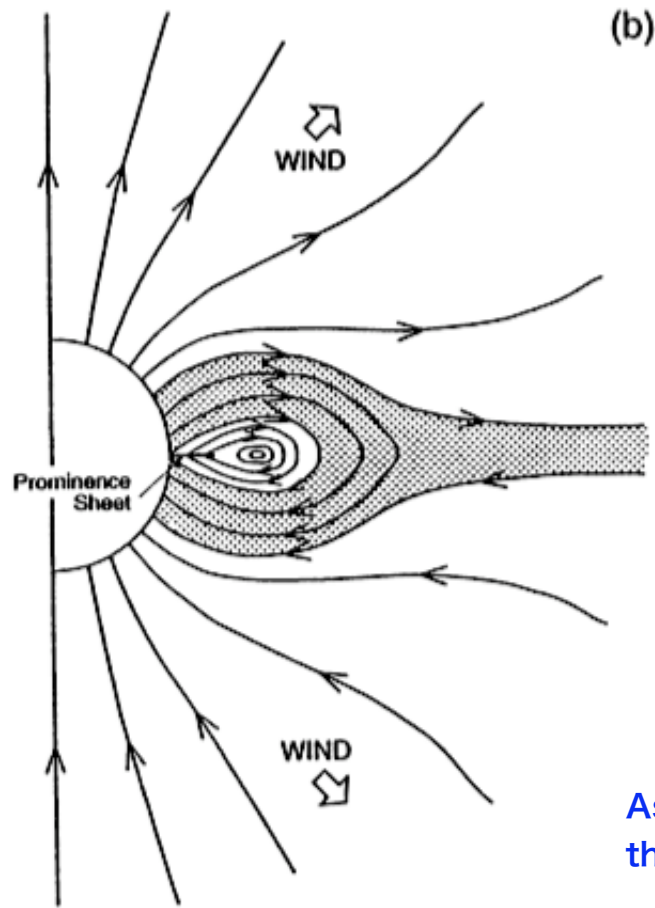
+ emerging twisted flux tube

kink instability



Low (1996)

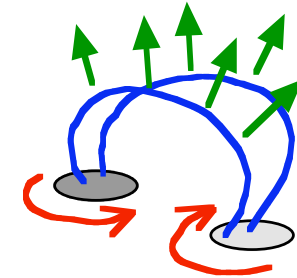
mass loaded model



As the mass loaded into the rope drains out, the flux rope rises by magnetic buoyancy.

問題点提起

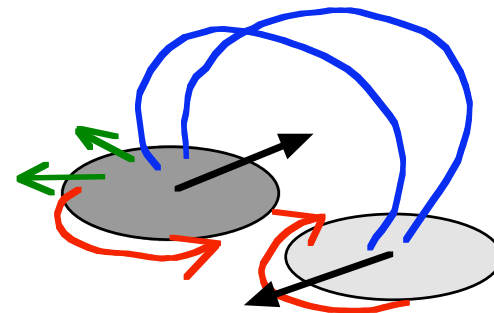
これまで紹介してきたモデルはいずれも eruption の発生をよく説明している。特に、数値シミュレーションを駆使した研究は、eruptive process の再現に成功している。



しかし、不確定性が存在する。

駆動条件、具体的に言えば光球境界で与えられる条件に関しては、これまでのところかなり簡略化されたものが用いられてきた（例えば、固定点周りの回転運動、磁気中性線を挟んだ反平行流、単純な上昇流による磁気浮上等）。

従って、こうした光球面で与えられる条件を実際の光球運動の特性をとらえた形でモデルに取り込んでいくことが今後の発展にとって大切になる。



今後の発展に向かってのアプローチ

実際の光球運動の特性を内包するモデル

Self-consistent モデリング...

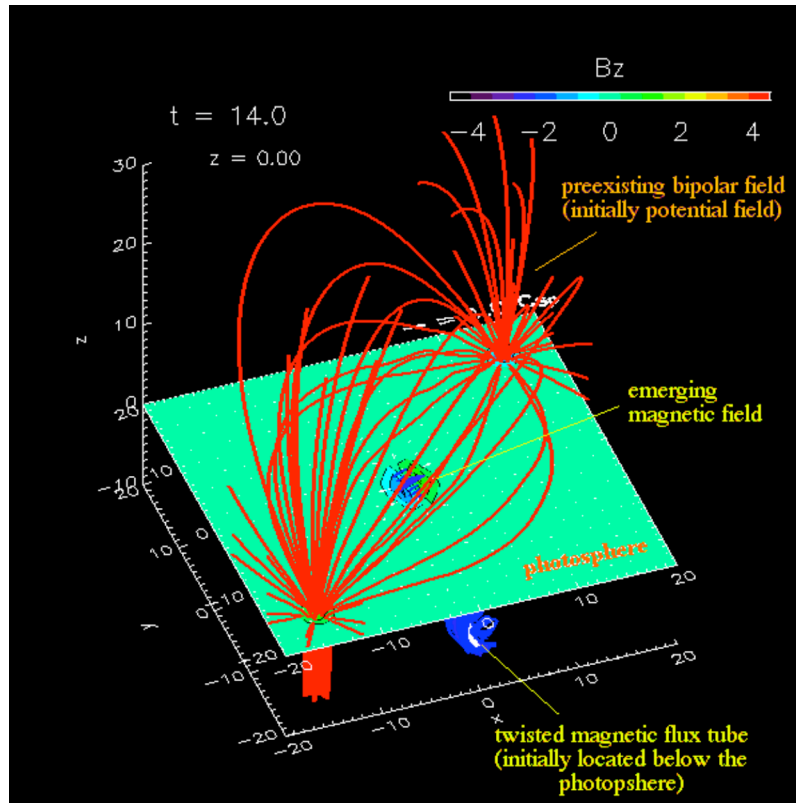
計算領域に subphotosphere を取り入れたシミュレーション (flux emergence simulation) を行い、self-consistent な光球運動を直接モデルに取り込む。

境界条件型モデリング...

Flux emergence simulation により得られた光球運動を解析して光球運動のモデルを作り、それを境界条件として採用する。

Self-consistent modeling

movie->file:///Volumes/Workspace/Research/flinet14_38.gif



Preexisting bipolar field が存在する
大気中へ twisted flux tube が浮上



Breakout model が想定する磁場形状
を self-consistent に再現

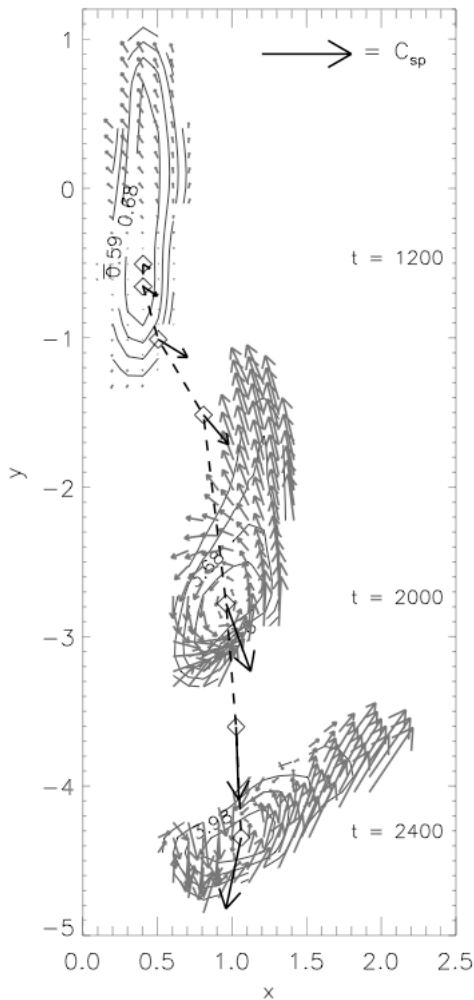
Self-consistent modeling の特徴 :

長所... 光球運動を self-consistent に再現したモデルが構築できる

短所... 光球のスケールとコロナのスケールを同時に扱うため、計算時間等コストが高くなる (計算機の発達により克服可能か?)

境界条件型モデリング

始めに flux emergence sim. によって得られた光球運動を解析する。



We decompose the photospheric flow into

flow at the peak flux location (PFL)

relative velocity around the PFL

$$\mathbf{r}_p \equiv \frac{\iint_{z=0} B_z(x, y, 0, t) \mathbf{r} dx dy}{\iint_{z=0} B_z(x, y, 0, t) dx dy} \quad \text{for } B_z(x, y, 0, t) > 0.98 \max[B_z(x, y, 0, t)]$$

... definition of the peak flux location (PFL)

Only a positive flux region is displayed.

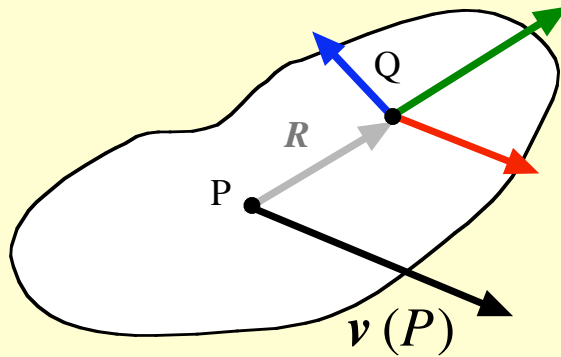
contour... Bz value

black arrow... flow at the PFL

gray arrow... relative velocity around the PFL

dashed line... trajectory of the PFL

Relative velocity -> decomposed into **rotation**, **expansion**, **shearing**



(Stokes' theorem;
ref. *Gas Dynamics* by F. Shu 1992)

$$v(Q) - v(P) \approx \Omega \times R + K R + \nabla_R F$$

/ rotation / expansion | shearing

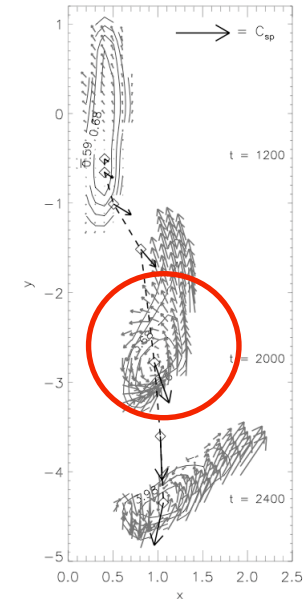
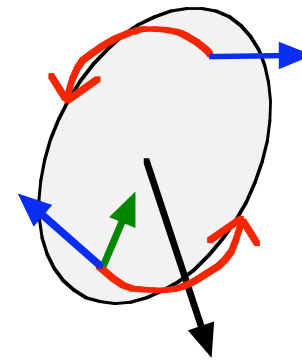
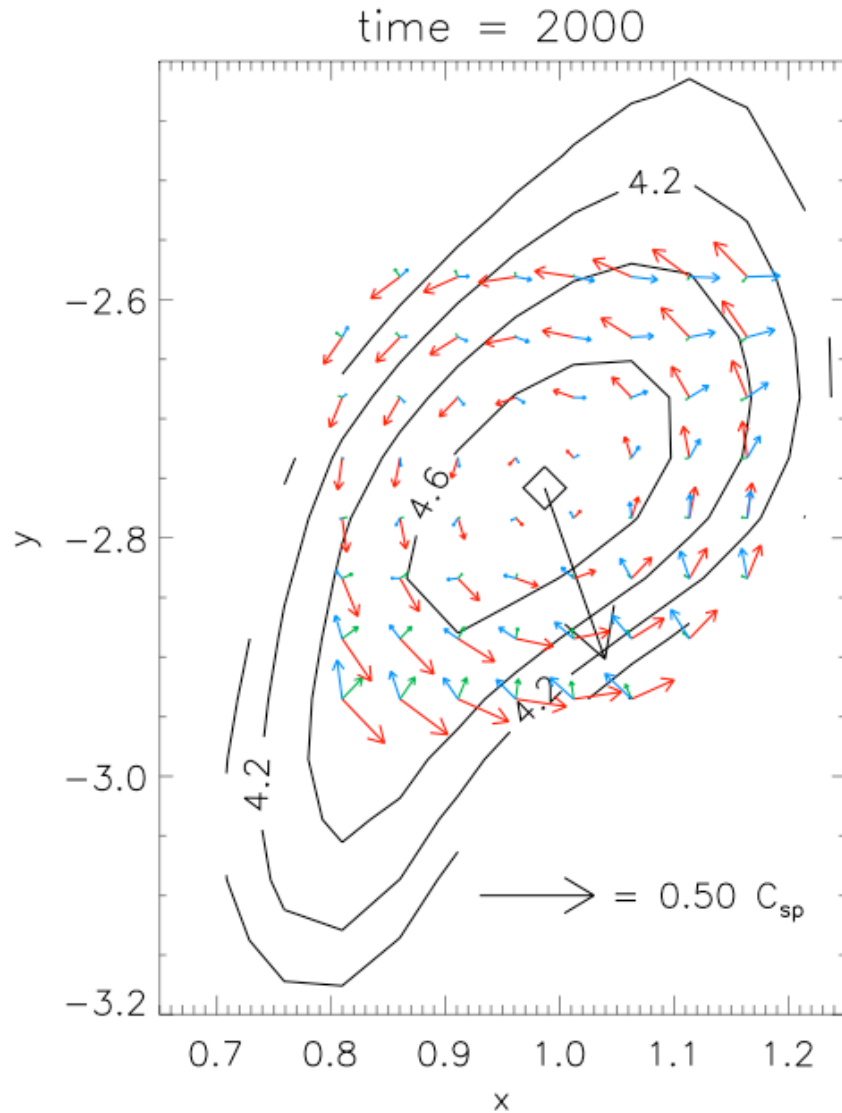
$\Omega \times R$... rotation $\left(\Omega = \frac{\nabla \times v}{2} \right)$

$K R$... expansion $\left(K = \frac{\nabla \cdot v}{3} \right)$

$\nabla_R F$... shearing $\left(F = \frac{D_{ik} R_i R_k}{4}, D_{ik}: \text{deformation rate tensor} \right)$

$$D_{ik} \equiv \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v) \delta_{ik}$$

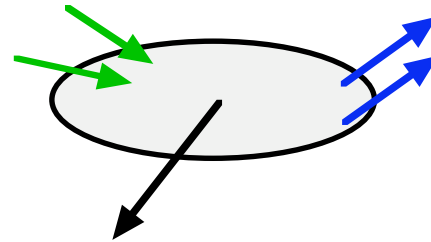
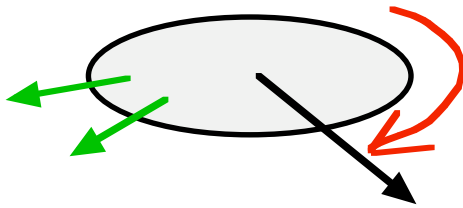
Decomposed flow components



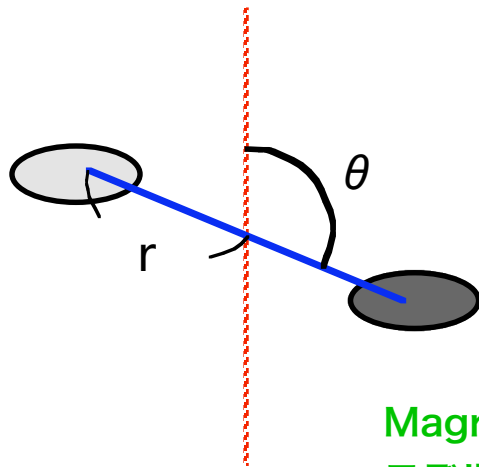
フラックスのピーク地点の運動
 ... 磁気中性線 (y軸) に沿って移動

相対運動
 ... torsional motion (左回り)
 ... shearing motion
 ... contraction

Flux emergence の各進化段階での光球運動の特徴を明らかにする。



Magnetic polarity region 周りの
速度場構造をモデル化



Magnetic polarity region の相対的な進化を
モデル化

Longcope & Magara (2004) に見る研究例

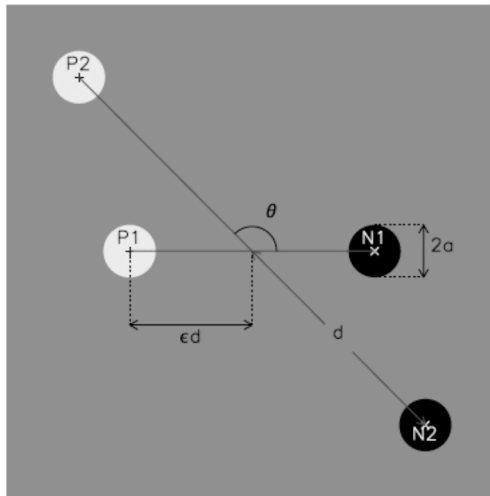
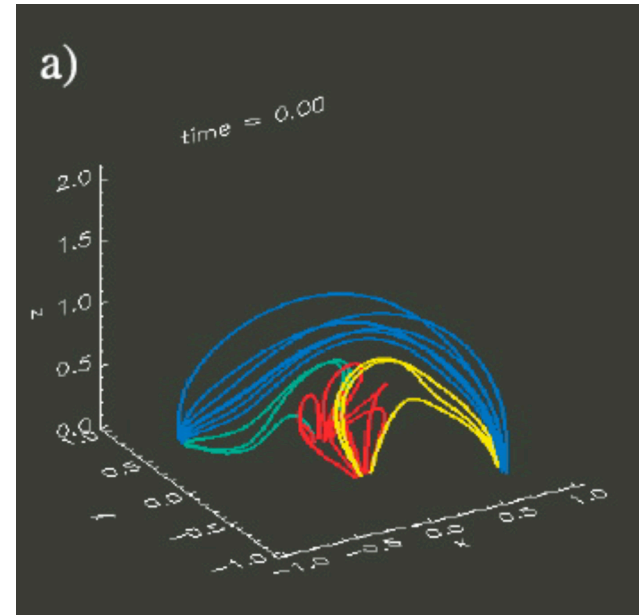


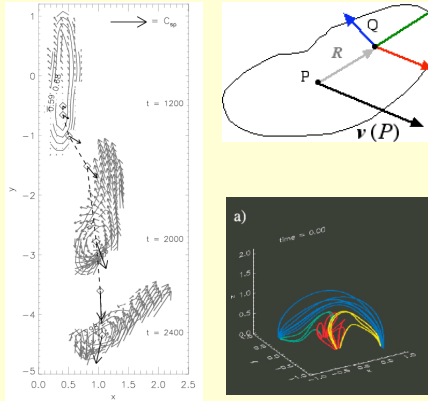
FIG. 1.—Generalized quadrupole consisting of four photospheric sources, P1, P2, N1, and N2. Each source is a disk of radius a and flux $\pm\Phi_0$. The outer and inner dipoles have separations $2d$ and $2d\epsilon$, respectively. The axes of the dipoles make an angle θ with respect to one another.



[movie->file:///Volumes/Workspace/Research/Research_3DCS.html](file:///Volumes/Workspace/Research/Research_3DCS.html)

今後の研究行程

光球運動の modeling



光球運動を要素に分解してその特性を明らかにする。
→光球を境界条件とするコロナ進化のシミュレーションに応用

観測データの活用

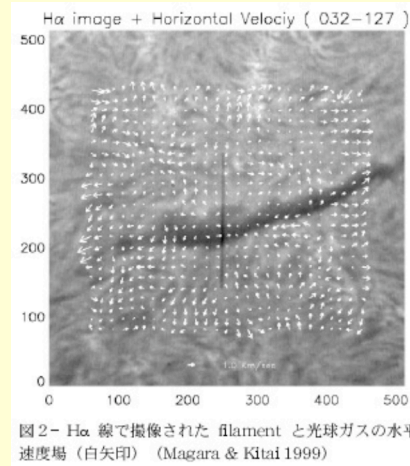
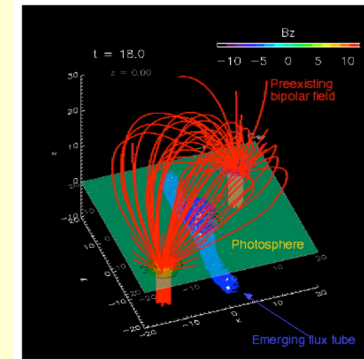


図2- H α 線で撮像された filament と光球ガスの水平速度場 (白矢印) (Magara & Kitai 1999)

同様に、観測データからも CME に関与する光球運動と磁場構造の特性を明らかにする。

Solar-B, SMART の活用

Self-consistent modeling



- subphotospheric dynamics の取り込み
- 境界条件型が仮定する初期の磁場形状の形成から再現
- Chen & Shibata model の3次元化

始めはコロナ領域まで、将来的には地球近傍領域まで計算領域に含めた大規模MHDシミュレーションを推進 (デカルト座標系→球座標系、using advanced numerical scheme)