

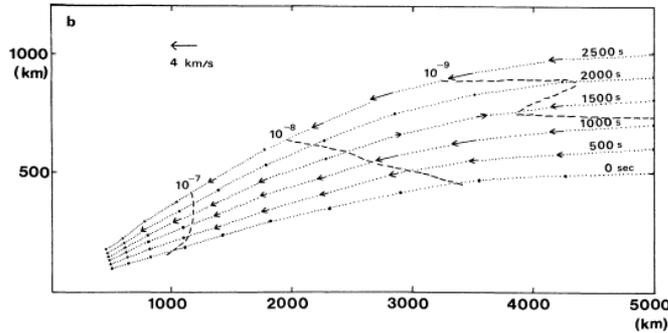
# 太陽数値シミュレーションの将来

横山 央明・磯部 洋明  
(東京大学地球惑星)

# 太陽シミュレーションの歴史 浮上磁場を例に 1/2

前スペース観測時代

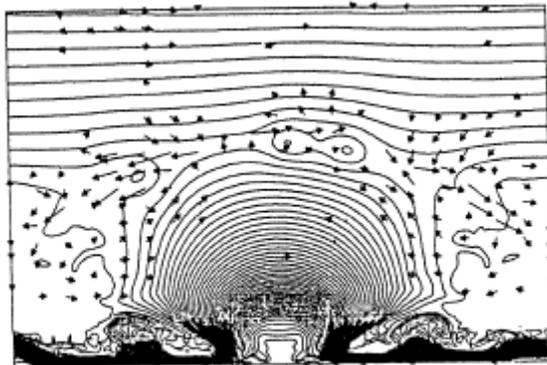
Shibata (1980) 1次元流体



数十点 数十Mflops (Cf. P4 4G 数Gflops)

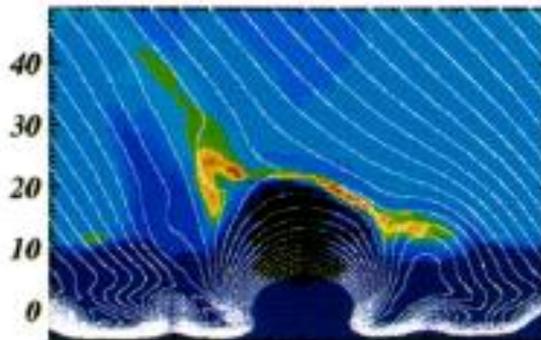
「ようこう」時代

Shibata et al. (1992) TY& Shibata (1995) リコネクション



TIME = 90.2 NS = 25000

Time = 105.6

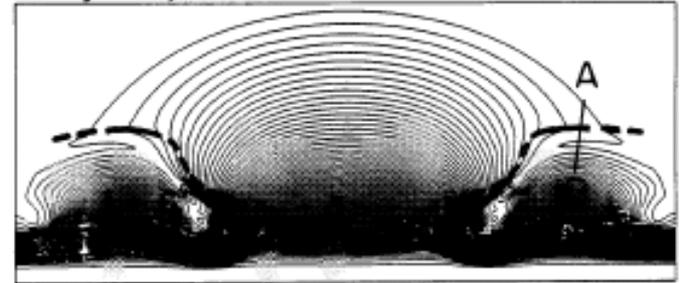


600Mflops 10万点

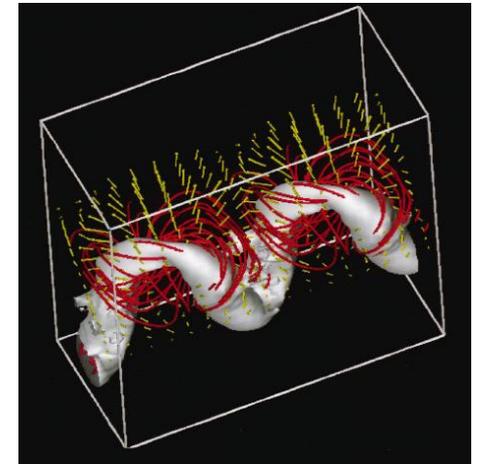
「ひのとり」時代 1万点

Shibata et al. (1989) 2次元MHD

$\tau_0(j) B, t/\tau = 58.5$   $x/H = 80$



「Solar-B」さきがけ  
Matsumoto et al. (1998) 3D



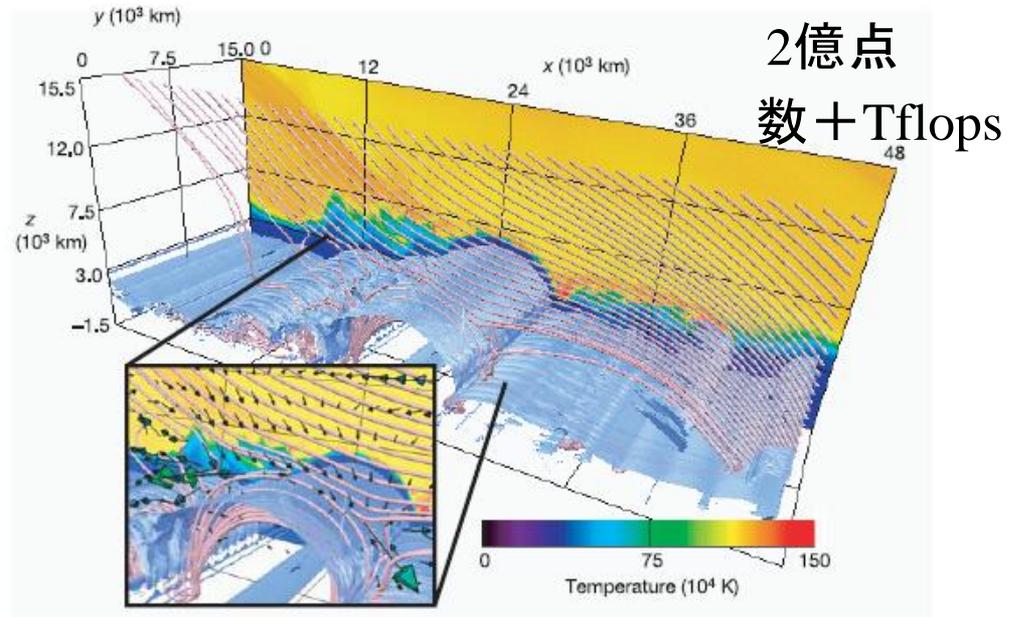
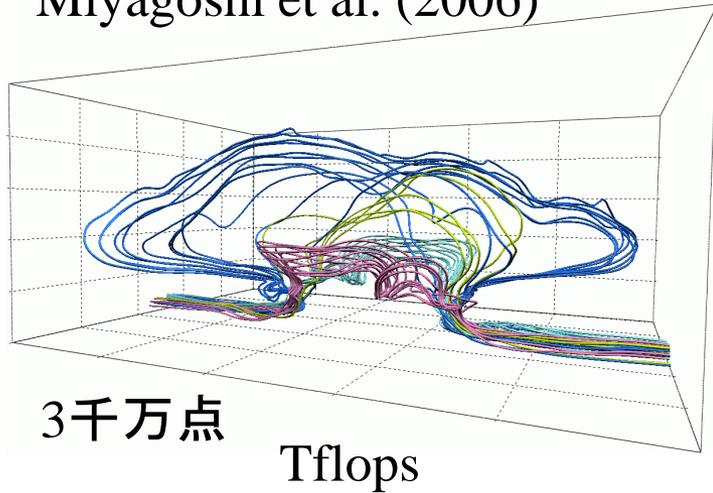
30Gflops 50万点

# 太陽シミュレーションの歴史 浮上磁場を例に 2/2

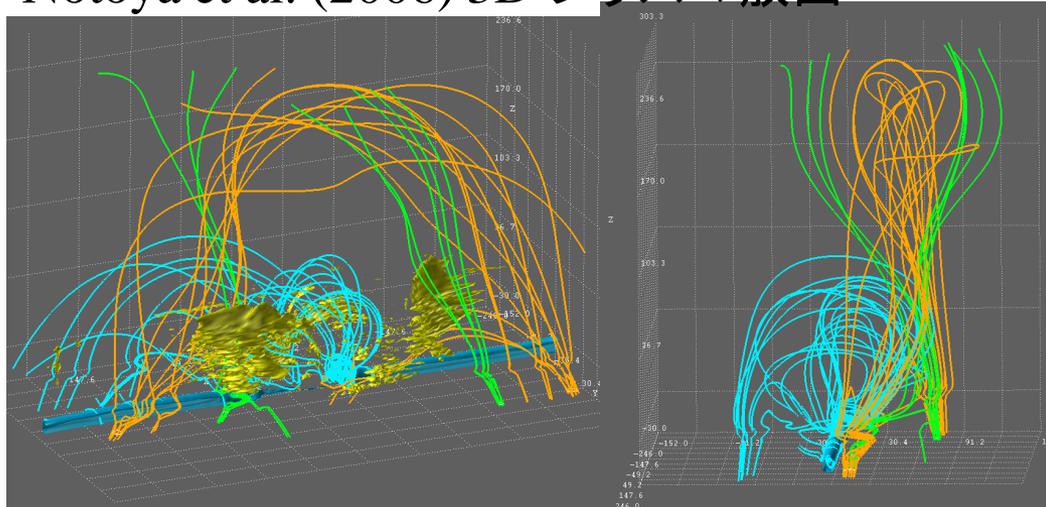
「SOLAR-B」直前

Isobe et al. (2005) 3Dリコネクション 地球シミュレータ

Miyagoshi et al. (2006)



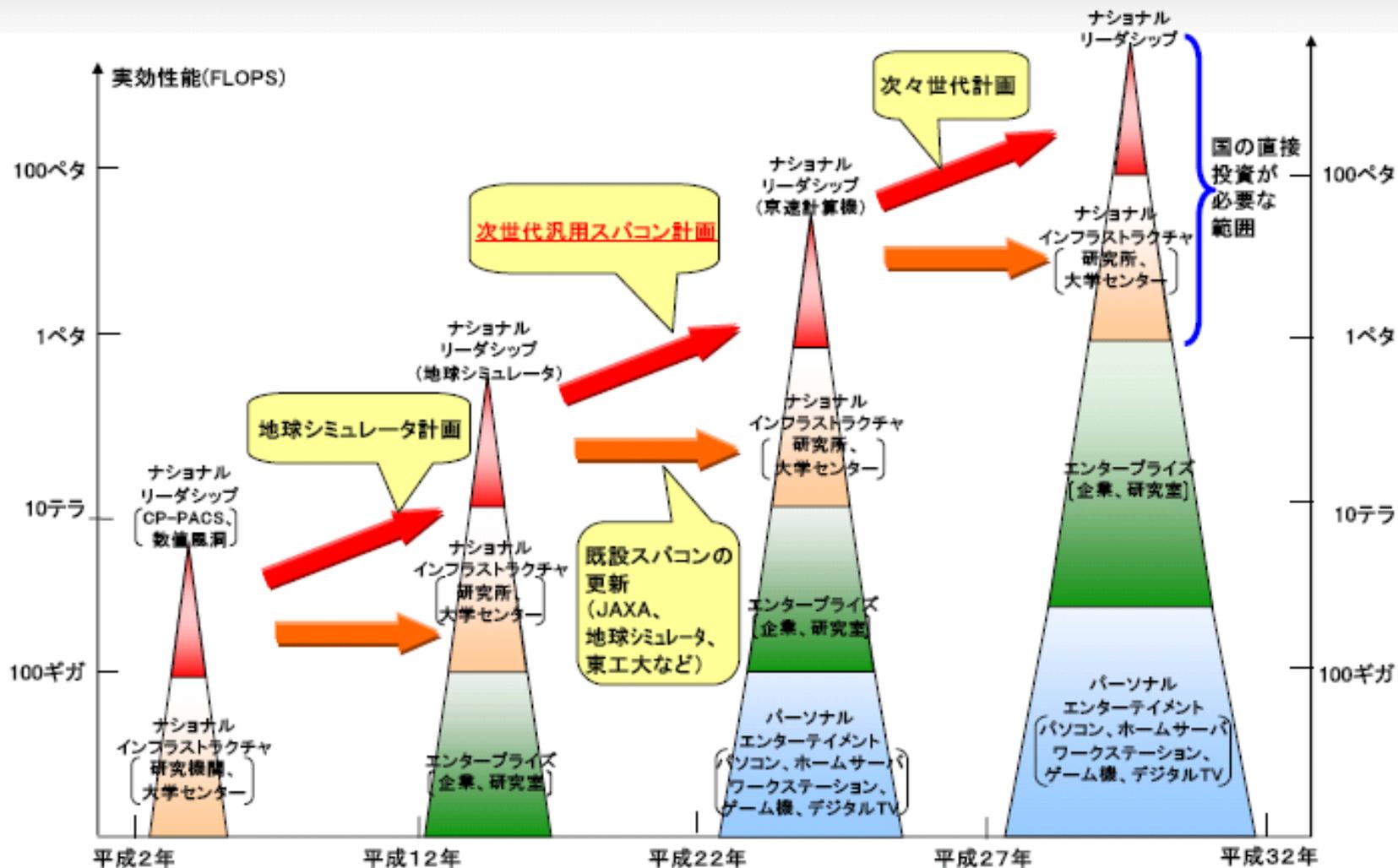
Notoya et al. (2006) 3D プラズマ放出



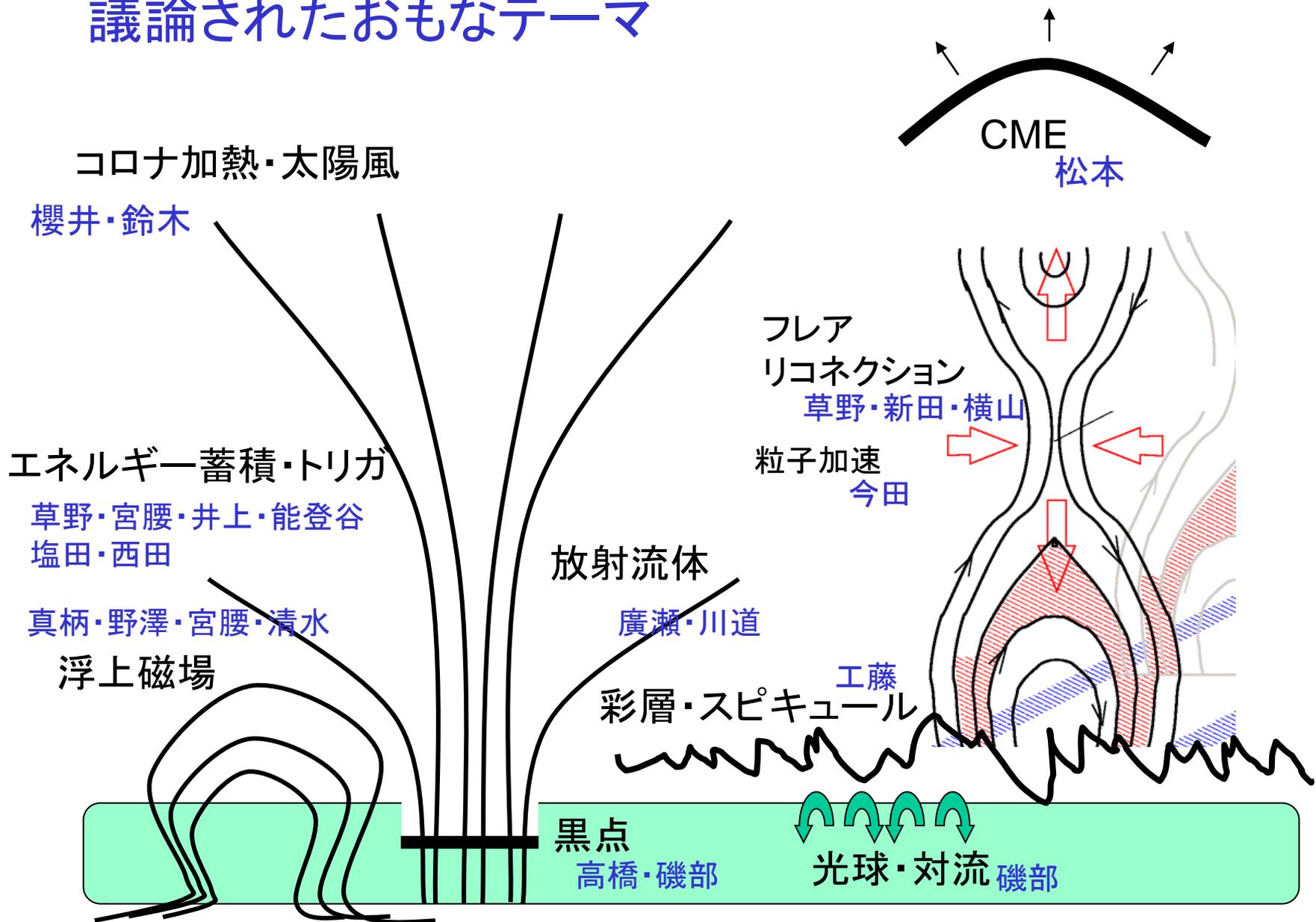
## スーパーコンピュータ環境について

- これまで
  - 数十Mflopsから数十Tflopsへ(6桁)
  - 数十点(1980)から数億点(現在)へ7桁
- 国立天文台 VPP 数百GFlops →2008年更新予定
- 宇宙研SX6 TFlops
- 地球シミュレータ(ES)数十TFlops
- 理研 特定高速計算機(「京速計算機」) ペタFlops

# リーダーシップシステムからインフラシステムへの展開(1)



# 議論されたおもなテーマ



# 議論されたおもなテーマ

コロナ加熱・太陽風

櫻井・鈴木

エネルギー蓄積・トリガ

草野・宮腰・真柄・井上・能登谷  
塩田・西田・清水

宮腰・野澤

浮上磁場

放射流体

廣瀬・川道

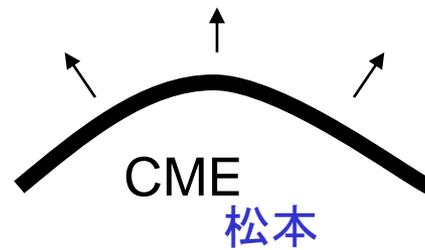
彩層・スピキュール

工藤

黒点

高橋・磯部

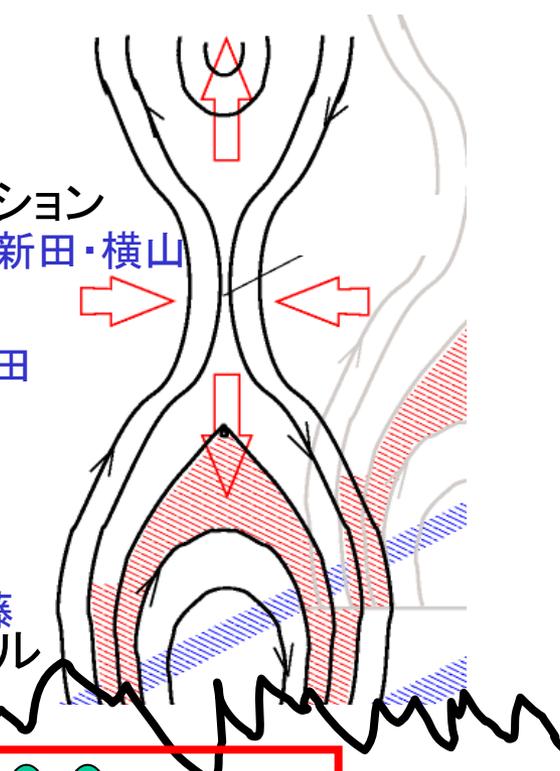
光球・対流  
磯部



フレア  
リコネクション

草野・新田・横山

粒子加速  
今田

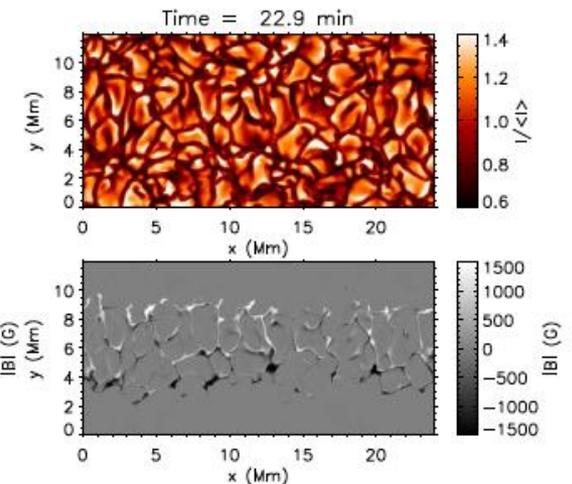
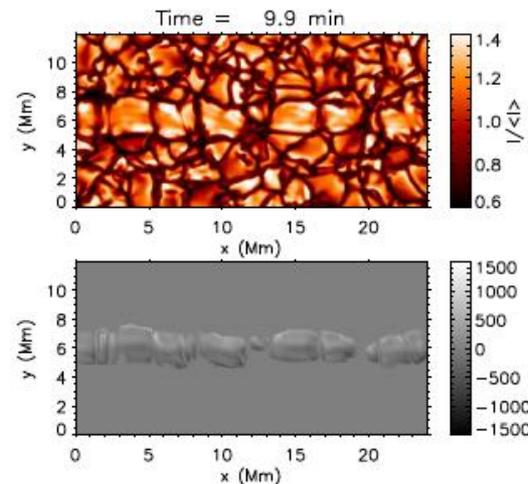
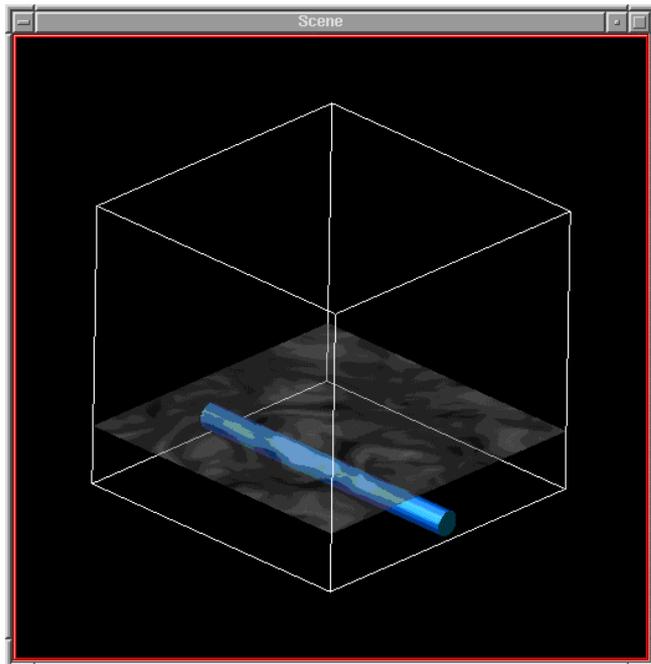
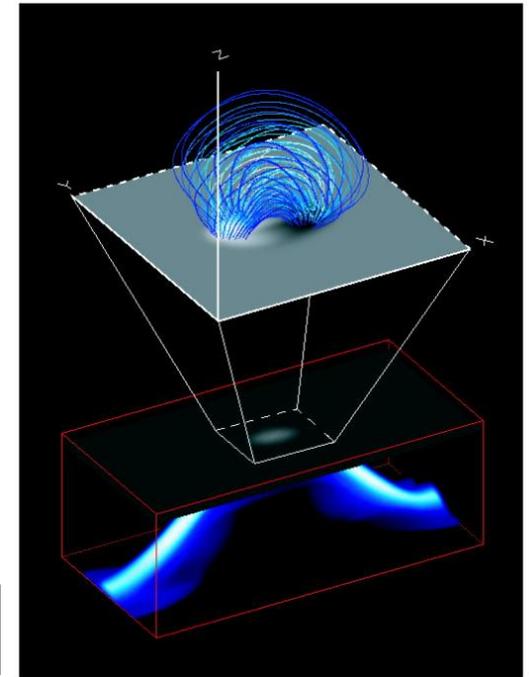


## 浮上磁場と対流との相互作用(磯部・宮腰)

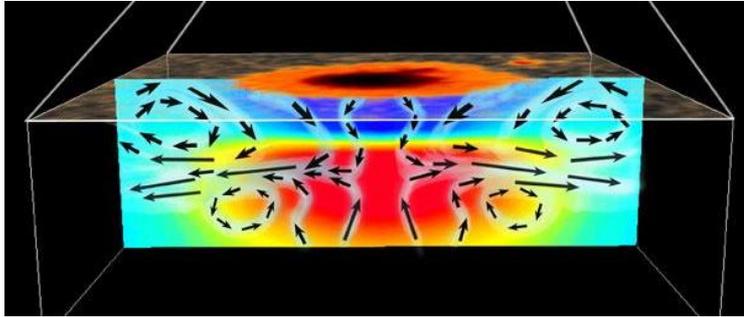
- 今の浮上磁場の3次元計算はどれも小さい、時間も短い。
- 対流が入るとあっという間に壊れる。(Isobe & Shibata 2004、Cheung et al. 2005)



深く大きな計算領域で計算

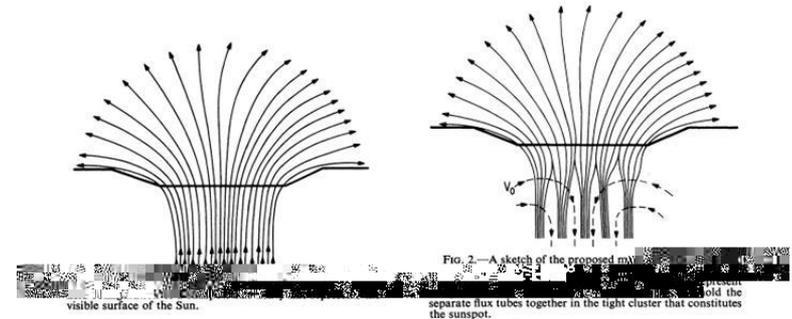


# 黒点構造のモデリング、黒点形成(磯部・高橋)



光球下の音速分布、速度場(Kossovichev)

## Parker's model

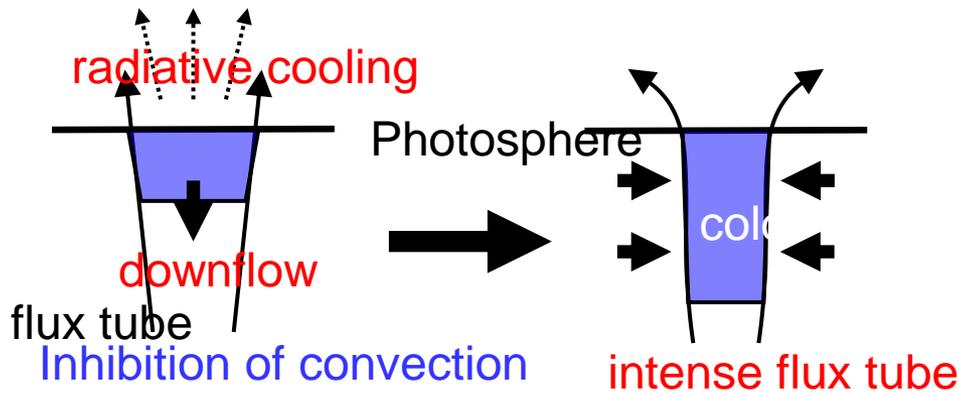


Monolithic model

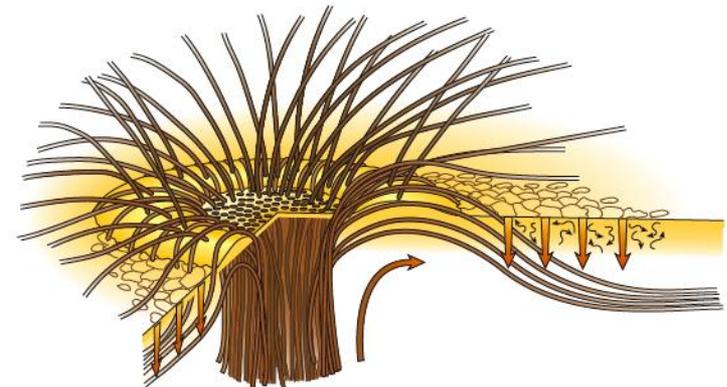
Cluster Model

Helioseismology provides strong evidence for the cluster model.

## 対流コラプス



## 光球下の磁場構造は？



Thomas et al. 2002 半暗部の構造の起源:pumping?

# 議論されたおもなテーマ

コロナ加熱・太陽風  
櫻井・鈴木

エネルギー蓄積・トリガ  
草野・宮腰・井上・能登谷  
塩田・西田

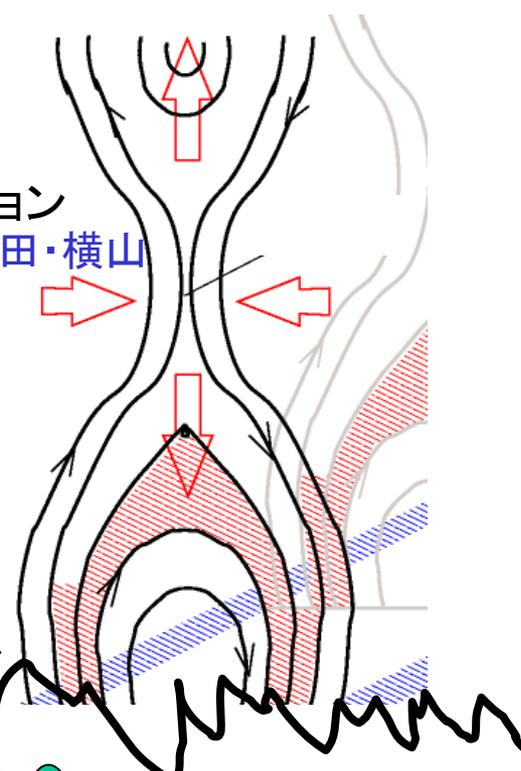
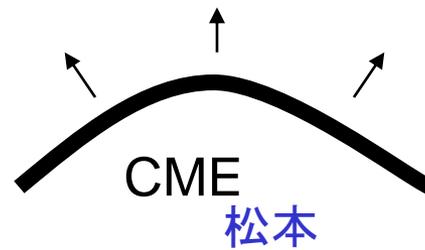
真柄・野澤・宮腰・清水  
浮上磁場

放射流体  
廣瀬・川道

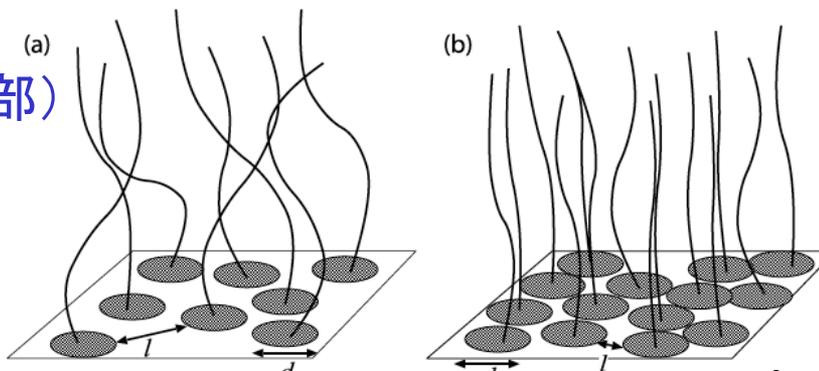
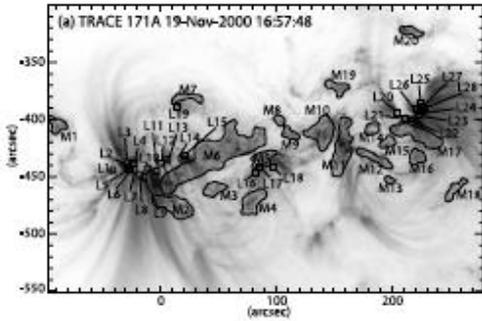
彩層・スピキュール  
工藤

黒点  
高橋・磯部

光球・対流  
磯部

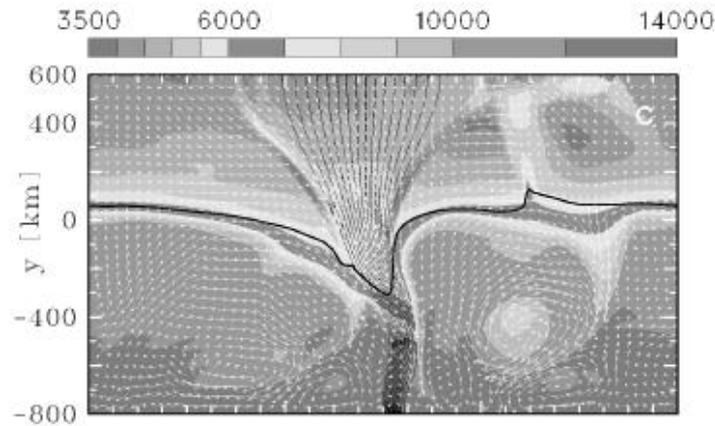


# 磁気対流とコロナ加熱(磯部)

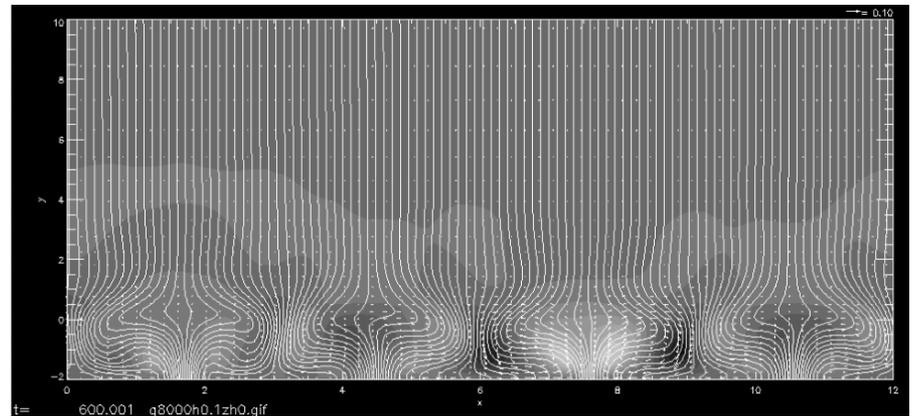


- Katsukawa & Tsuneta 2005高温ループの方がフィリングファクターが小さい。磁束管が自由に動けるから？

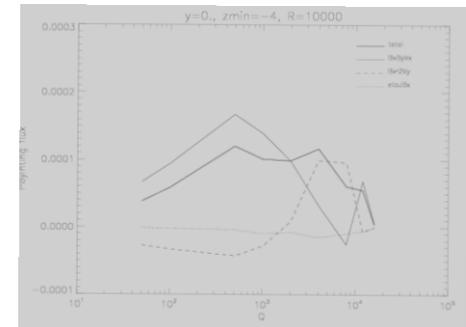
## Isobe (2006) 2次元シミュレーション

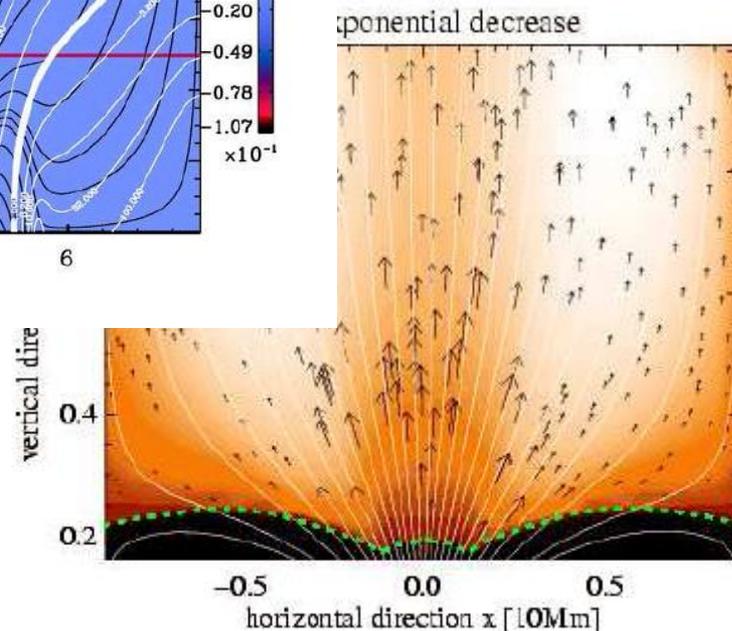
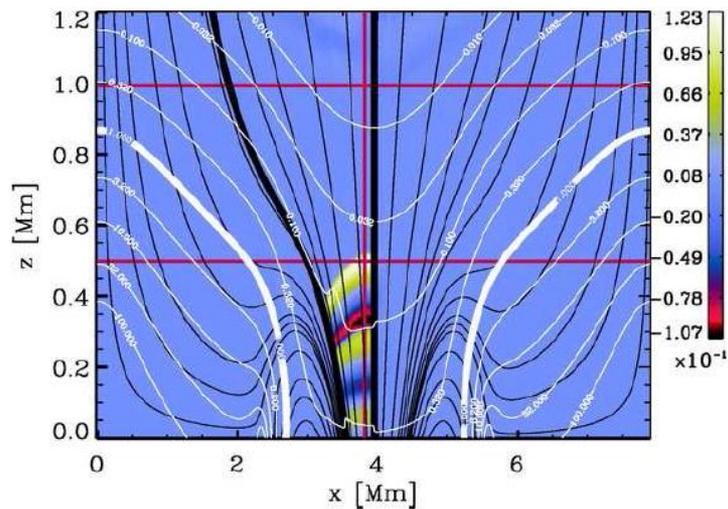
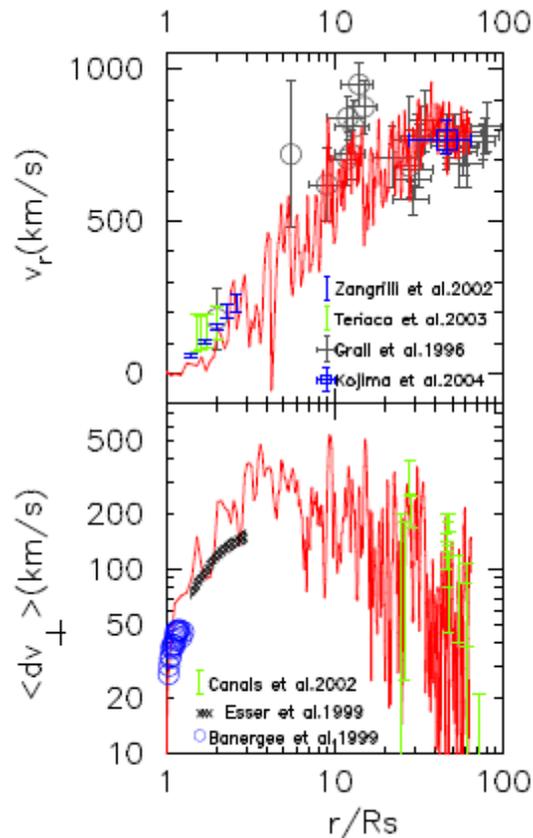


Steiner et al. 1998



3次元シミュレーションに拡張して、ねじりAlfven波発生の効果を取り入れる





## コロナ加熱・太陽風(鈴木)

波あり + 太陽風あり (~10Rsまで) + 閉じた領域あり (2,3D)

具体的には以下のようなSimulation

- 領域は光球から ~10Rs
- とりあえずコロナホール
- まず2D; 5000 x 100
- メッシュは0.01Hzの波を追えるように(できればAMR)

# 議論されたおもなテーマ

コロナ加熱・太陽風

櫻井・鈴木

エネルギー蓄積・トリガ

草野・宮腰・井上・能登谷  
塩田・西田

真柄・野澤・宮腰・清水

浮上磁場

放射流体

廣瀬・川道

彩層・スピキュール

工藤

黒点

高橋・磯部



光球・対流 磯部

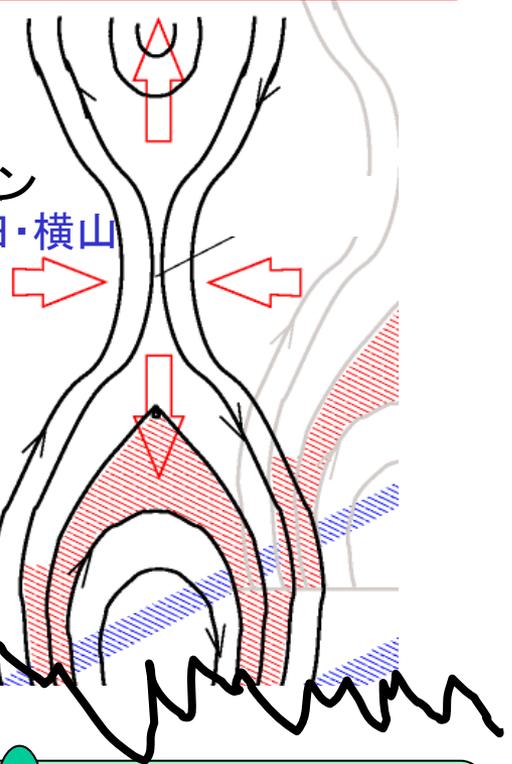
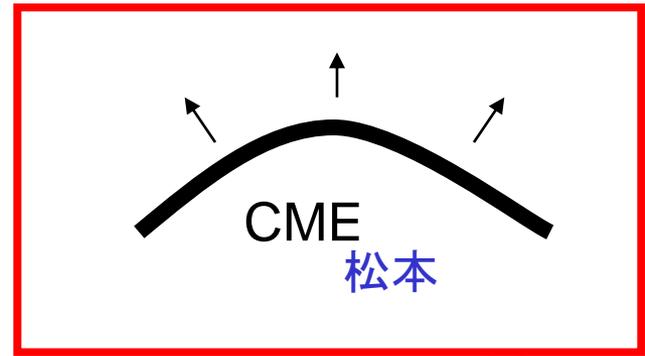
フレア  
リコネクション

草野・新田・横山

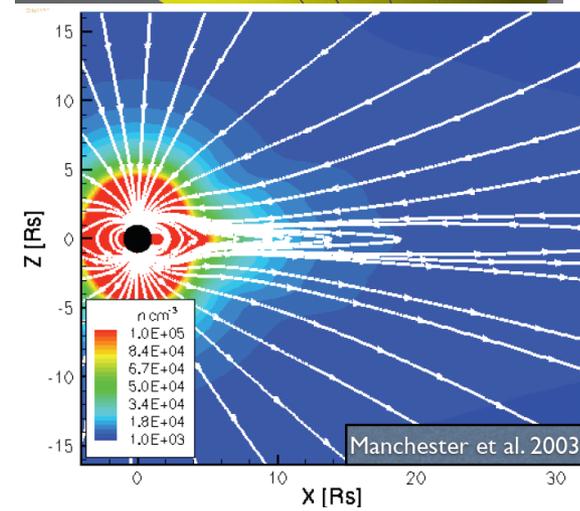
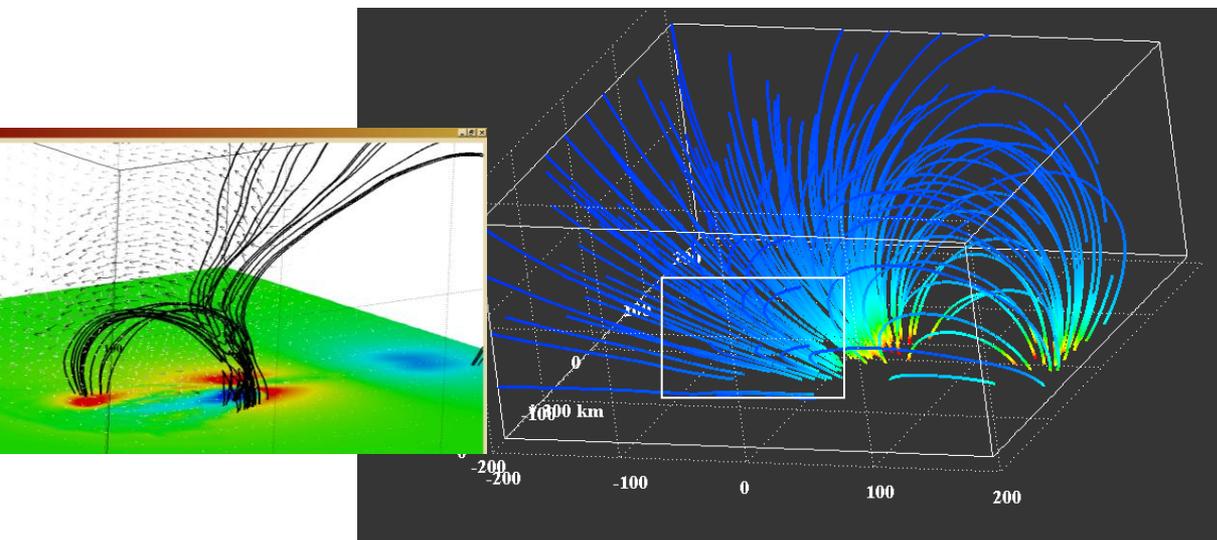
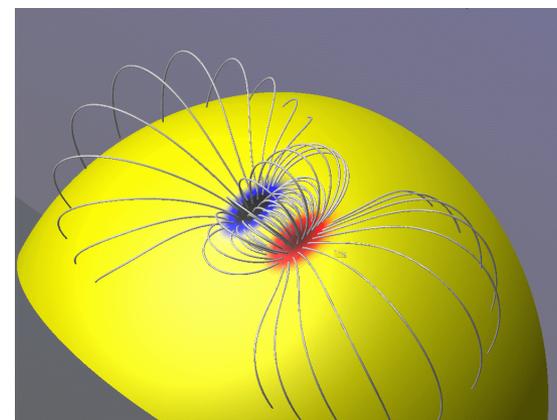
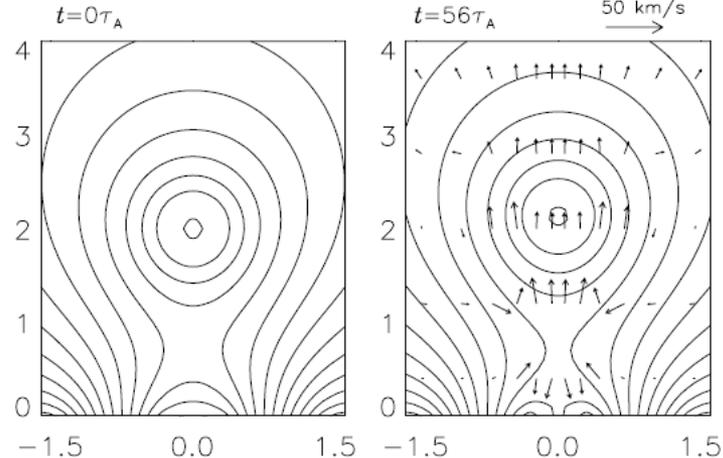
粒子加速  
今田

CME

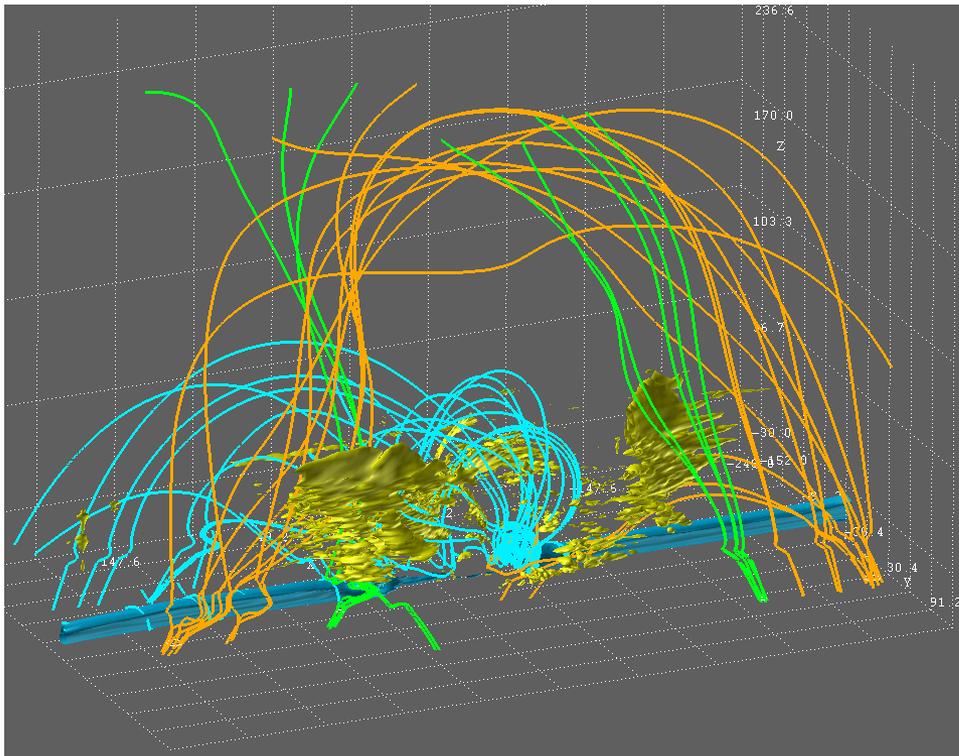
松本



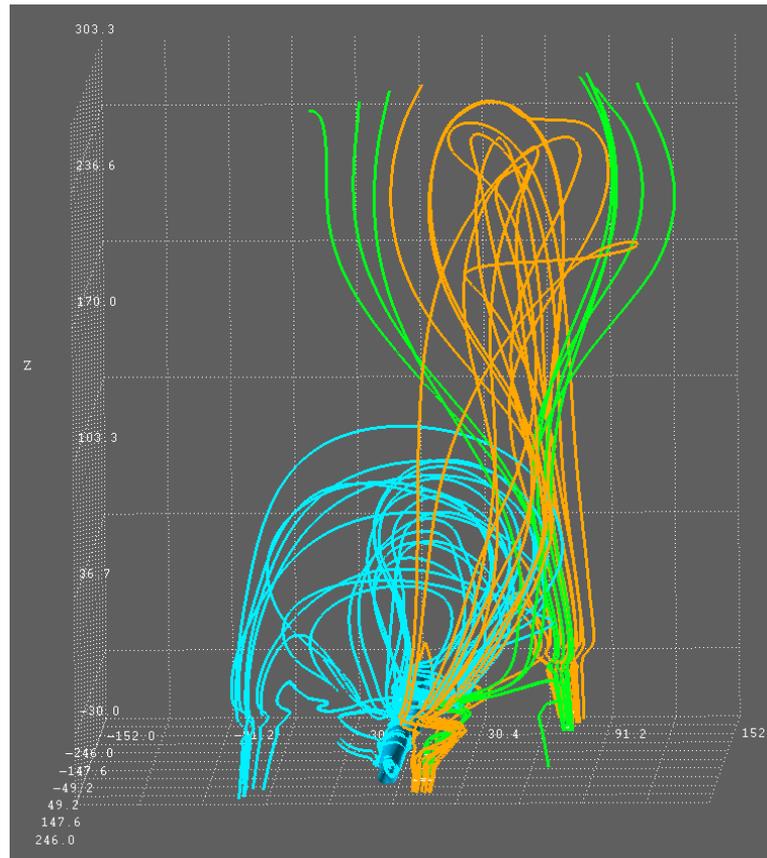
- 京大グループでの役割分担
  - 浮上磁場、エネルギー蓄積 (清水)
  - フレア・CMEのトリガー、エネルギー解放 (西田)(塩田)
  - 太陽風、惑星間空間の伝播 (松本)
- 最終的にはこれらを統合して計算する
- 下層での計算結果を、上層の初期条件・境界条件として計算する
- 同時にすべてをとく必要はない



# フィラメント放出過程(能登谷)



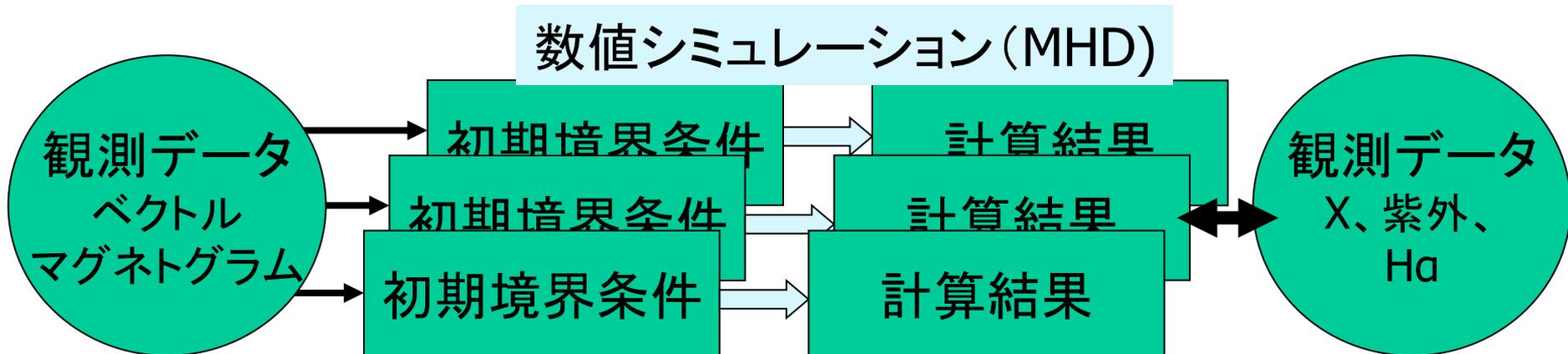
リコネクションした磁力線は  
周囲の磁力線を引き伸ばして  
上昇していく。



リコネクションに伴って  
電流シートが散逸される。

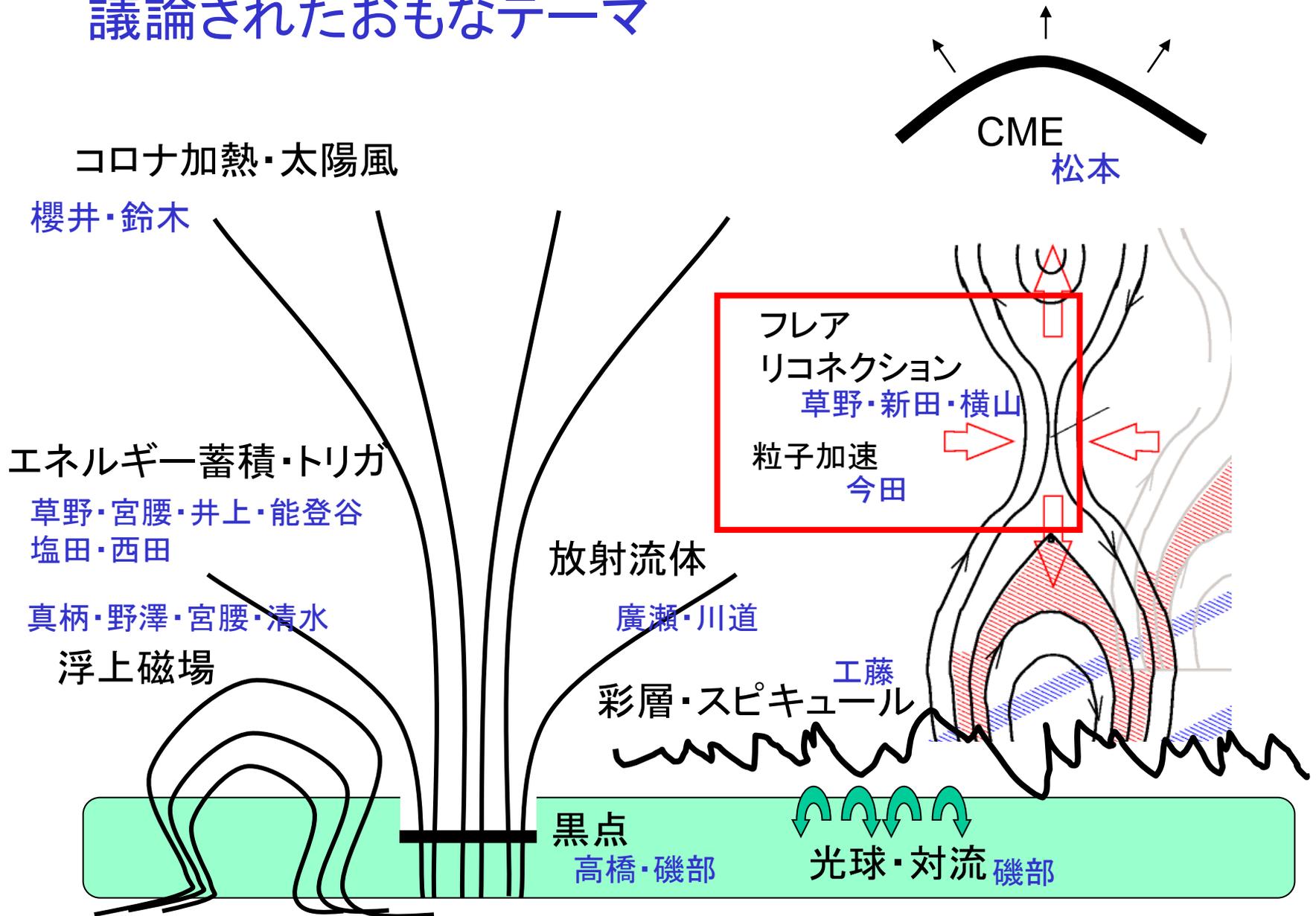
# データ駆動型モデリング

- データ同化に基づく数値シミュレーション



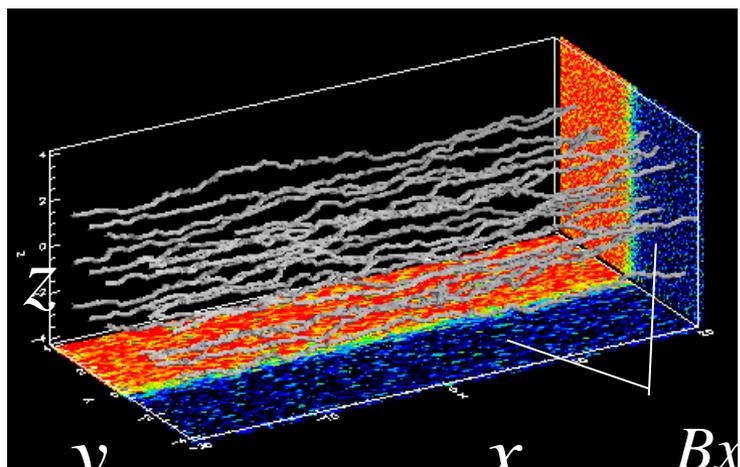
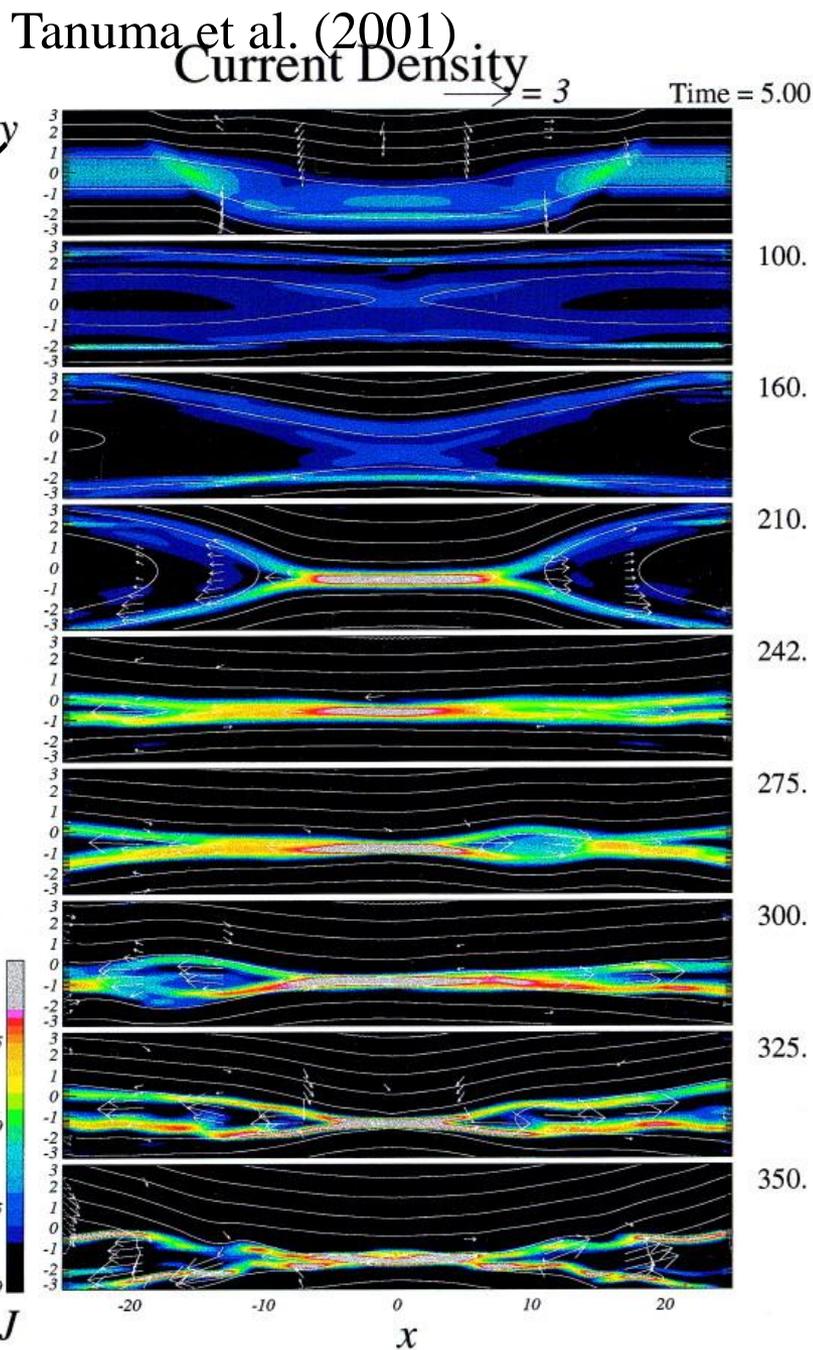
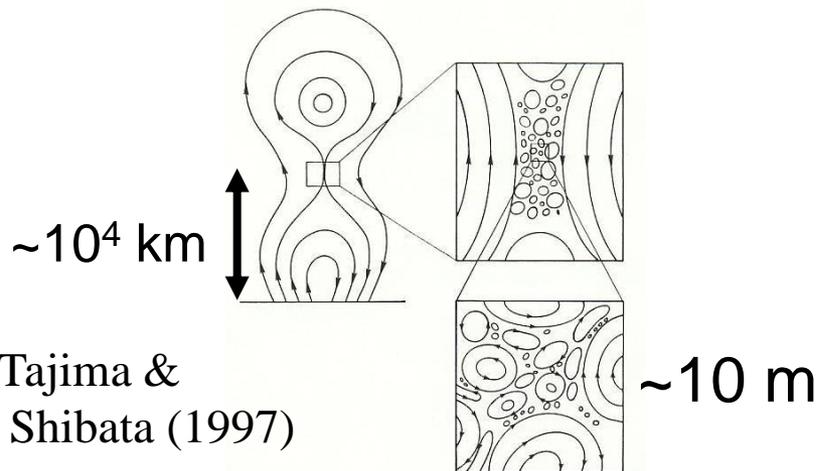
- 同化手法の開発
  - 3次元コロナ磁場の同化(初期条件)
  - 光球面電場の同化(境界条件)
- シミュレーションモデルの開発
  - 活動領域から全球コロナへのmulti-resolutionモデル

# 議論されたおもなテーマ



# 「乱流」リコネクション

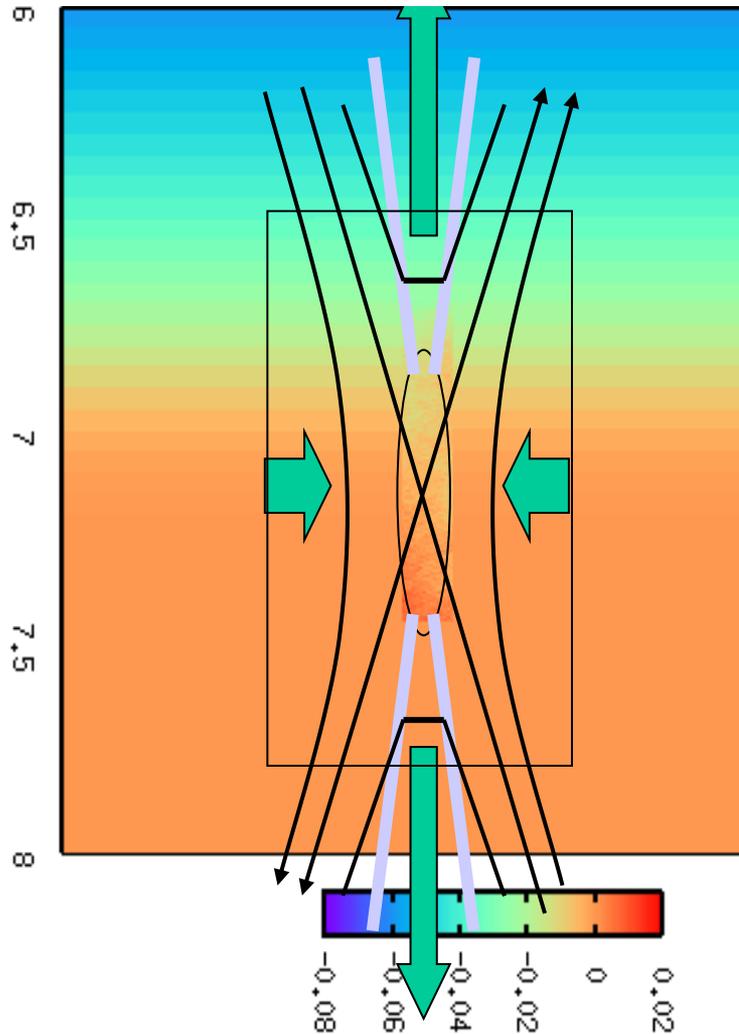
MHDマクロスケールと運動論的ミクロスケールの  
 の中間スケール 「大域的電流シート」  
 リコネクションの間欠性・非定常性



横山(2001)

# 連結階層リコネクションモデル(杉山、草野)

$$\mathbf{E} = \alpha \mathbf{E}_{MHD} + (1 - \alpha) \mathbf{E}_{PIC}$$



## 電磁流体 (MHD) モデル

一般化されたオームの法則

$$\mathbf{E}_{MHD} + \mathbf{U} \times \mathbf{B} = 0$$

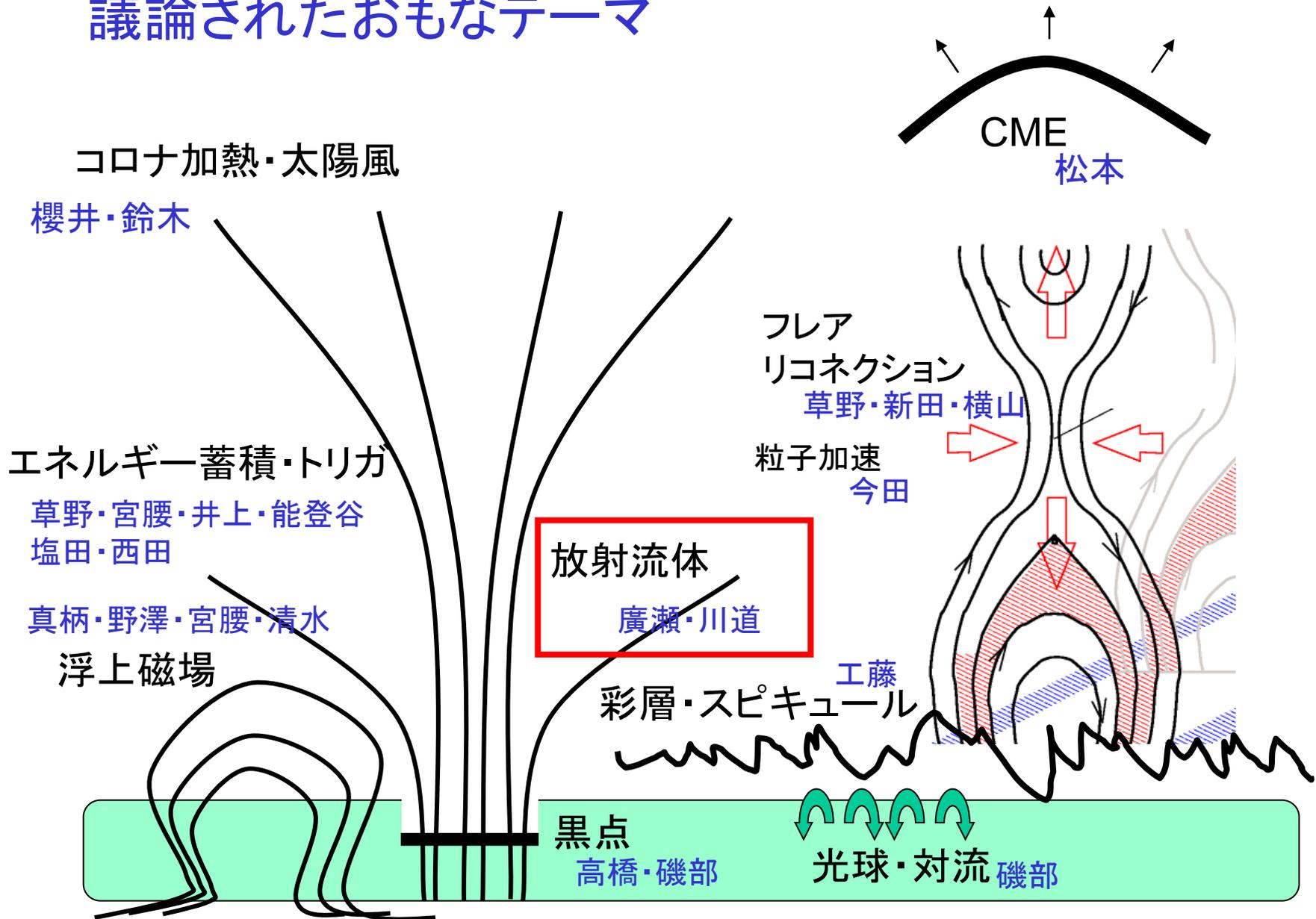
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}_{PIC}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{J}_{PIC}$$

マックスウェル方程式

粒子 (PIC) モデル

# 議論されたおもなテーマ



## 輻射流体と光球・彩層のダイナミクス(川道ほか京大グループ)

- フレアループの1次元輻射流体シミュレーション
  - 分光・偏光観測との比較により、非熱的粒子、彩層ダイナミクスの診断
  - White light flare
  - 恒星フレアへの応用
- 彩層ダイナミクス・加熱
  - 浮上磁場、Ellerman bomb
  - MHD波動、リコネクション
- MHD + 部分電離
  - 光球・彩層リコネクション
  - 浮上磁場 (Leake & Arber 2006)
  - 原始星降着円盤への応用
- (M)HD + 電離非平衡イオン
  - リコネクションによる加熱(加速)時間 < 電離平衡に達する時間
  - 電離状態が異なる => 電離平衡を過程した分光診断に影響あり (Solar-B/EISの観測の解釈)
  - 1Dフレア/コロナループ (Bradshaw & Mason 2003)

## 「太陽シミュレーションの今後」キーワード

- 浮上磁場・黒点形成・コロナ波動加熱
- フレア・CMEエネルギー蓄積 データ連携シミュレーション
- 階層間結合 リコネクションなど
- マルチ物理 輻射、電離非平衡など

# 東京大学横山グループの今後 1/2

- Solar-Bを見据えた研究
  - 波動による加熱
    - 磁気対流による波動発生
    - 波動によるコロナループ加熱の多次元シミュレーション
  - 磁気対流・浮上磁場
    - 黒点・ポアの形成・崩壊
    - デルタ型黒点(活動領域)の形成
  - フレア・プラズマ放出
    - 浮上磁場によるコロナ磁場の非平衡・不安定化
  - 磁気リコネクションの基礎研究
    - 「乱流」リコネクション

## 「太陽シミュレーションの今後」キーワード

- 浮上磁場・黒点形成・コロナ波動加熱
- フレア・CMEエネルギー蓄積 データ連携シミュレーション
- 階層間結合 リコネクションなど
- マルチ物理 輻射、電離非平衡など



ここまでは、現在のサイエンス(とSOLAR-B)の延長  
何か欠けている、、、

# 太陽物理学の重要課題

- フレア
- コロナ加熱

• ダイナモ！！！！！！

# 太陽物理学の重要課題

- フレア

- エネルギー解放—リコネクション

済ようこう

- エネルギー蓄積・トリガ

- 粒子加速

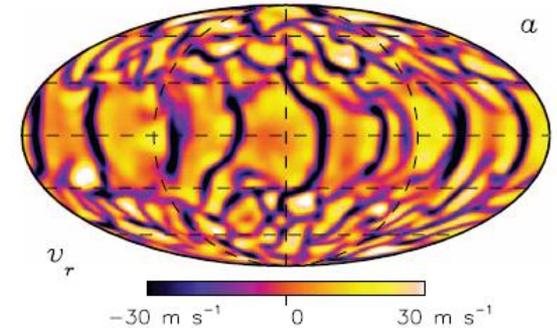
- コロナ加熱

済? Solar-B

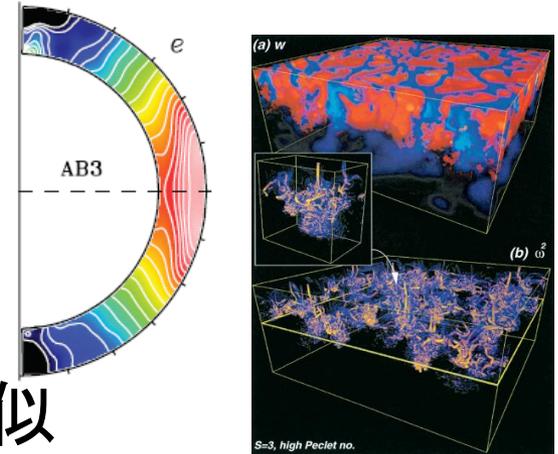
- ダイナモ

## 東京大学横山グループの今後 2/2

- Solar-Bの先
  - 「より深く」「より遠くへ」をめざす
- 対流からダイナモへ
  - 対流層中での浮上磁場
  - 回転勾配層
  - 天体ダイナモ 銀河、降着円盤
- 他天体へ「太陽物理学は天文学」
  - 特殊相対論・一般相対論
  - 放射流体力学 はじめはFLD近似
- 粒子加速
  - Fokker-Planckシミュレーション

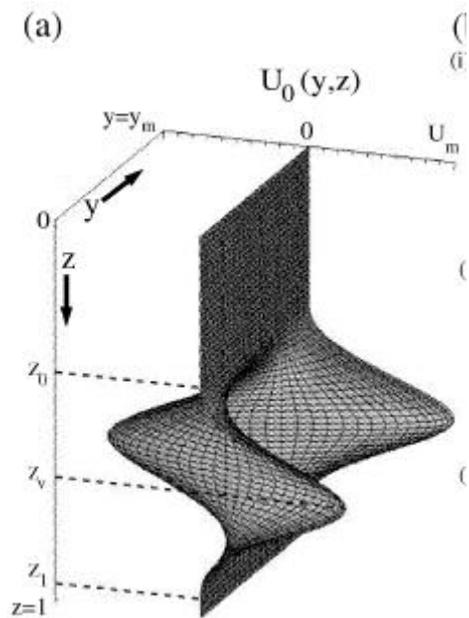
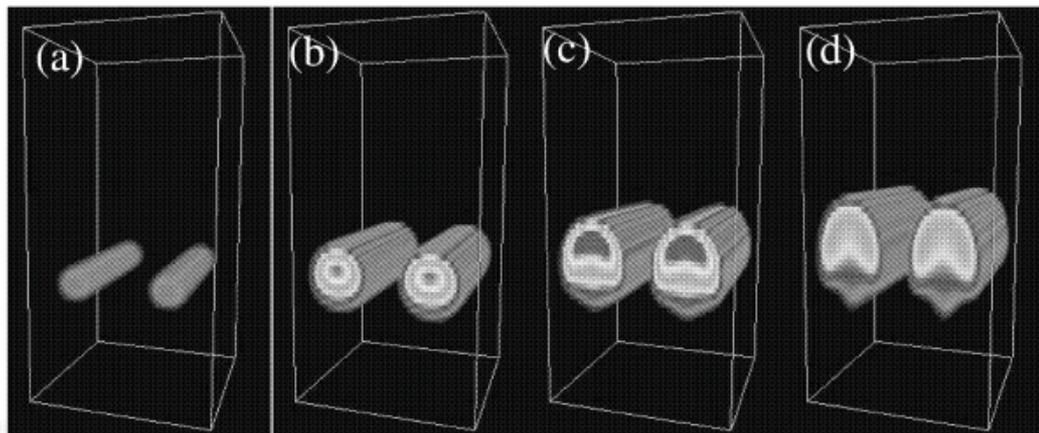
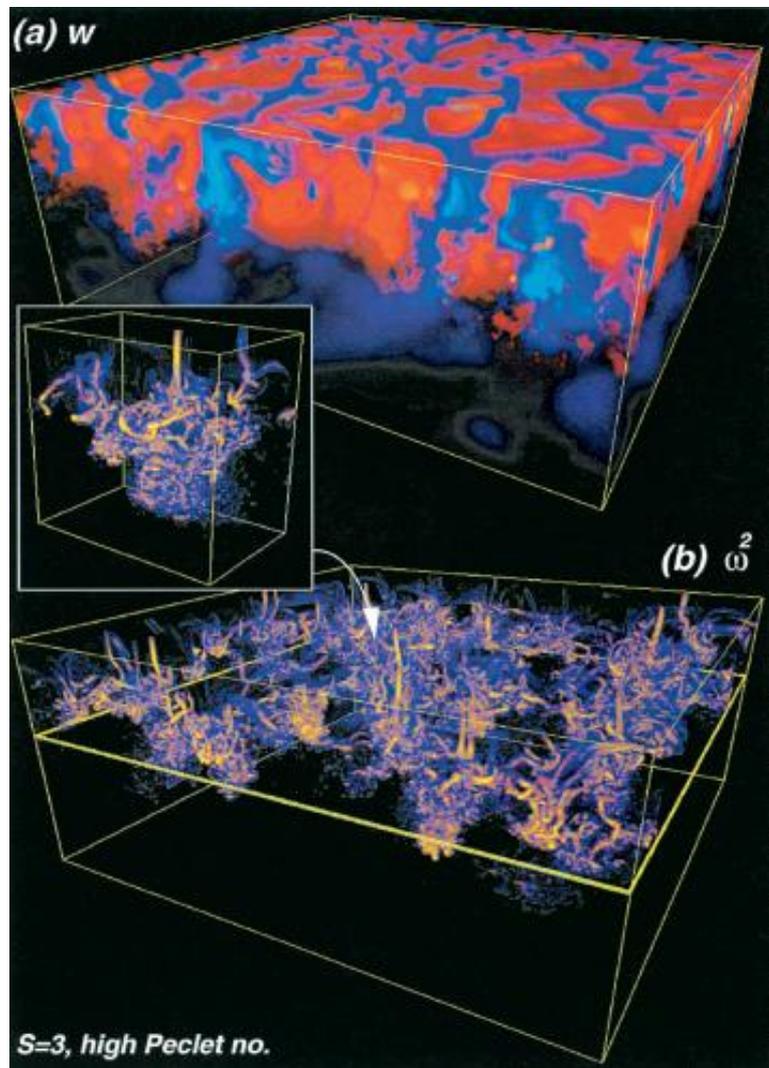


Miesch et al. 2006



Brummel et al. 2002



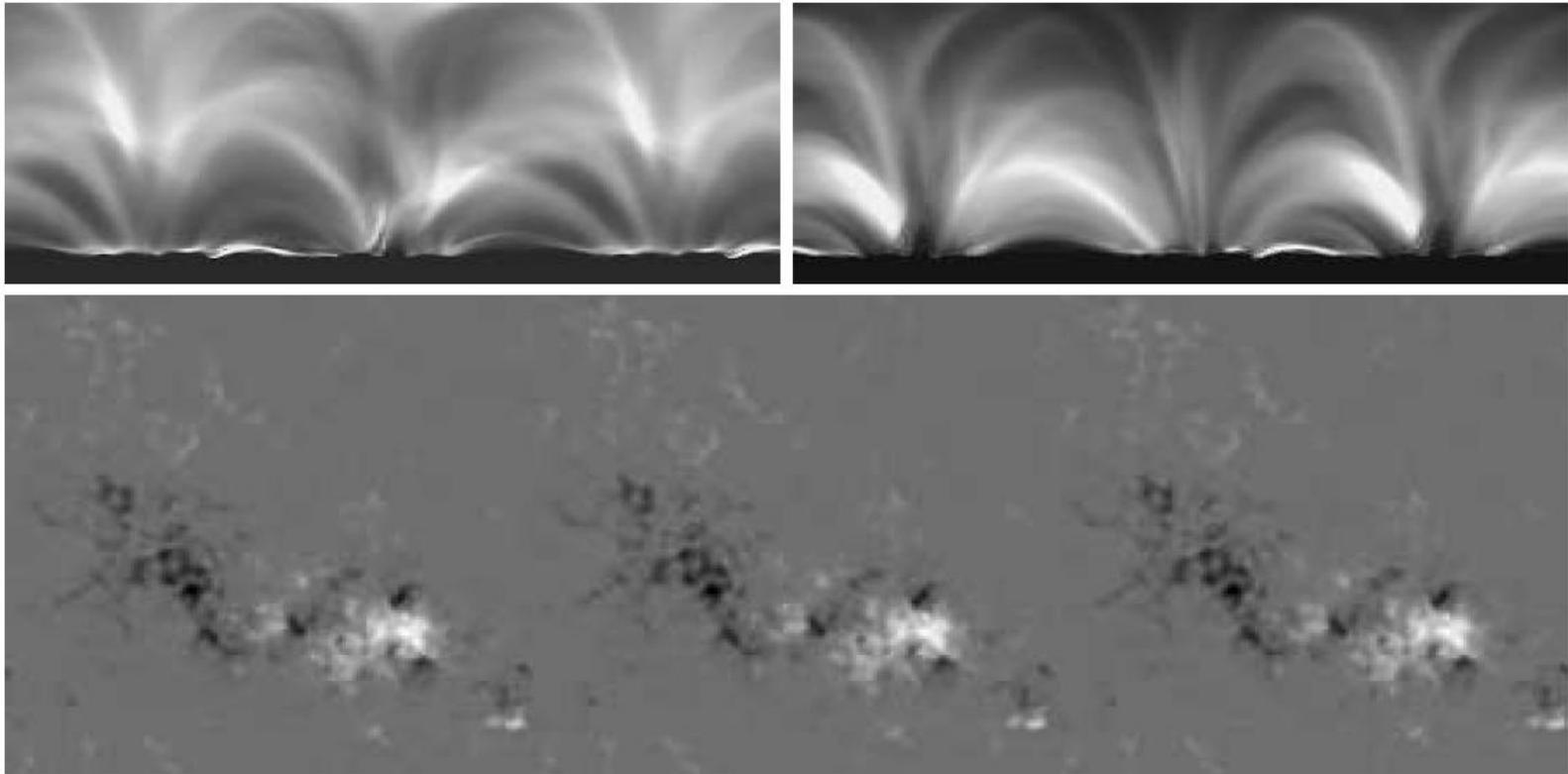


## MHD+輻射以外のマルチフィジクスを含むシミュレーション

- MHD+部分電離
  - 光球・彩層リコネクション
  - 浮上磁場 (Leake & Arber 2006)
  - 原始星降着円盤への応用
- (M)HD+電離非平衡イオン
  - リコネクションによる加熱(加速)時間 < 電離平衡に達する時間
  - 電離状態が異なる => 電離平衡を過程した分光診断に影響あり (Solar-B/EISの観測の解釈)
  - 1Dフレア/コロナループ (Bradshaw & Mason 2003)

## 3D シミュレーション

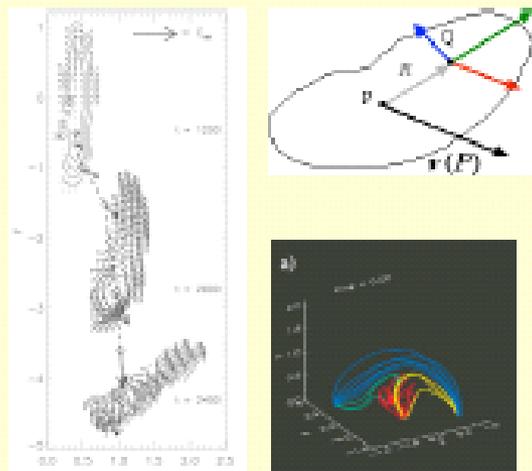
- Gudiksen and Nordlund (2005)
  - model granulation as a driver



.—Emulated *TRACE* 171 (*top left*) and 195 (*top right*) images both spanning 1.5 box lengths, and the underlying photospheric magnetic field.

# 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

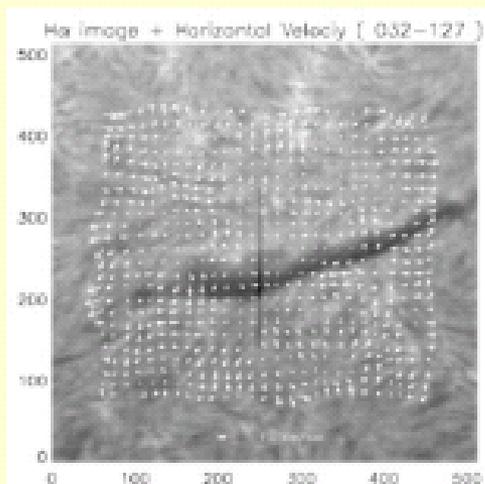
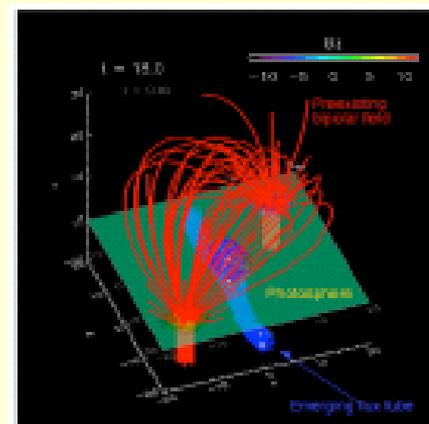


図2- H $\alpha$  像で観測された filament と光球ガスの水平速度場 (白矢印) (Magara & Kato 1999)

同様に、観測データからも  
CME に関する光球運動  
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)



## Future Work

今までの解析結果より、**厳密なForce Free解であるならば**、Relaxation Methodを用いてほぼ収束する事はだいたいわかった。

### 実際の太陽コロナ

- (1) 本当にForce-Freeなの?? 速度場の影響は??
- (2) そもそも有限 $\beta$ 効果を見捨ててもいいのか?? 得られる観測磁場データは光球面上のもので、ここは $\beta = 0$ の近似は使えない。

厳密なForce-Free解  
(Low & Lou)での検証

この場合は基本的に収束する。我々も検証済み。

数値シミュレーション  
結果を用いての検証  
(非平衡度合い、有限 $\beta$ の効果など)

このSTEPは難しい  
と思う。

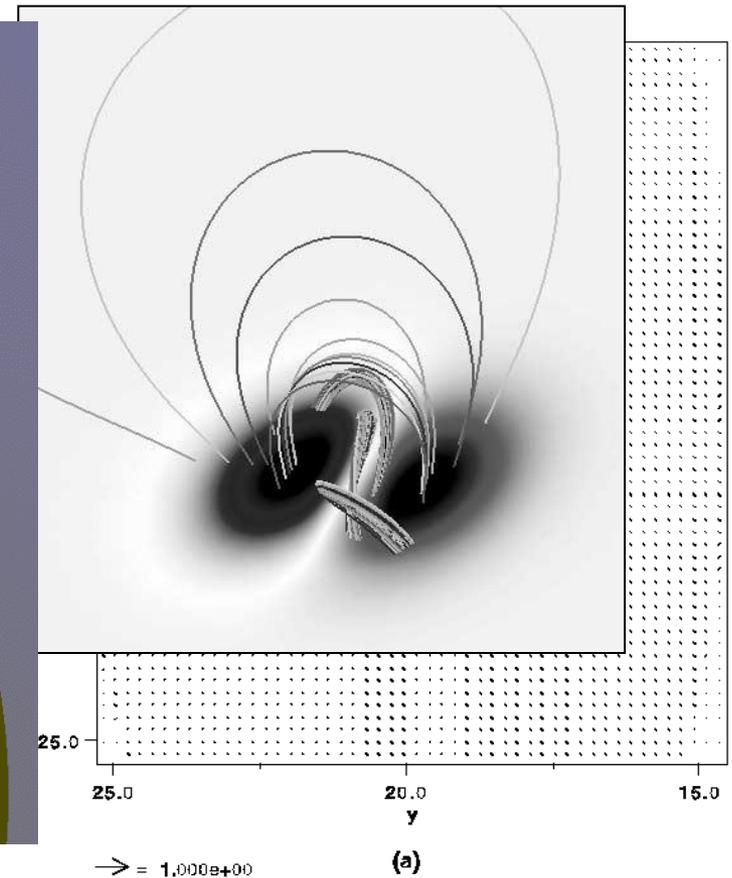
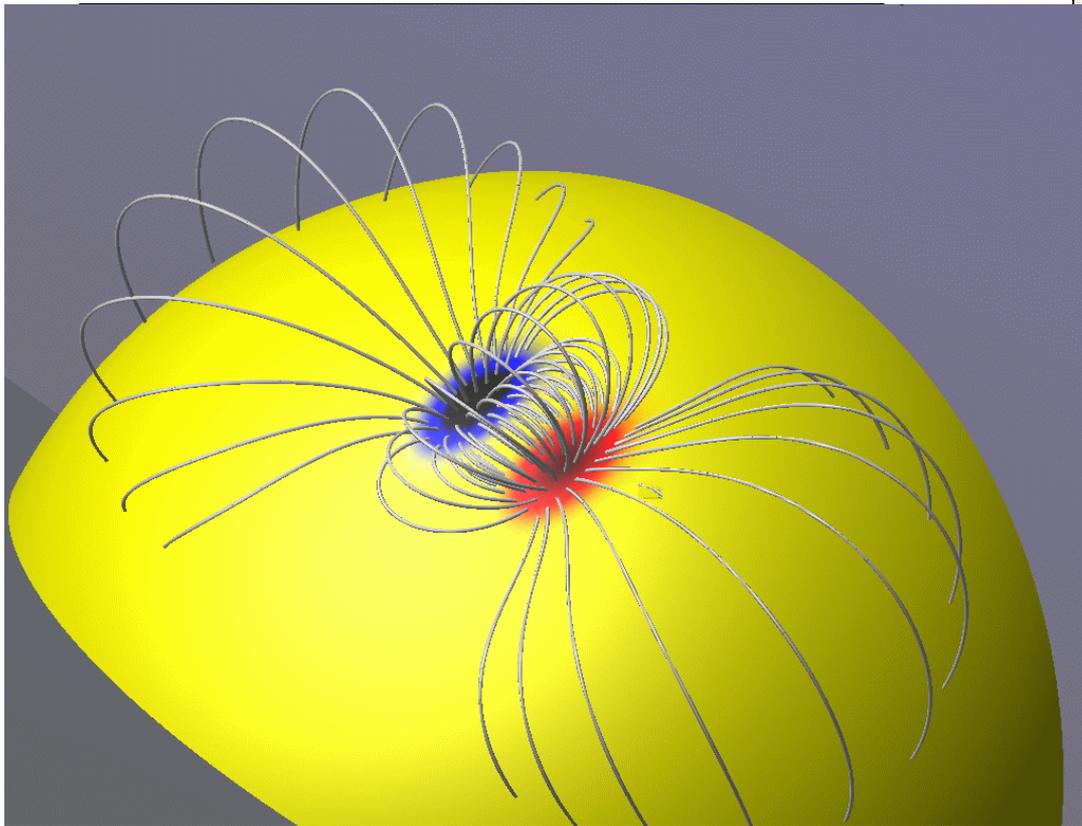
光球面磁場データを用いての検証

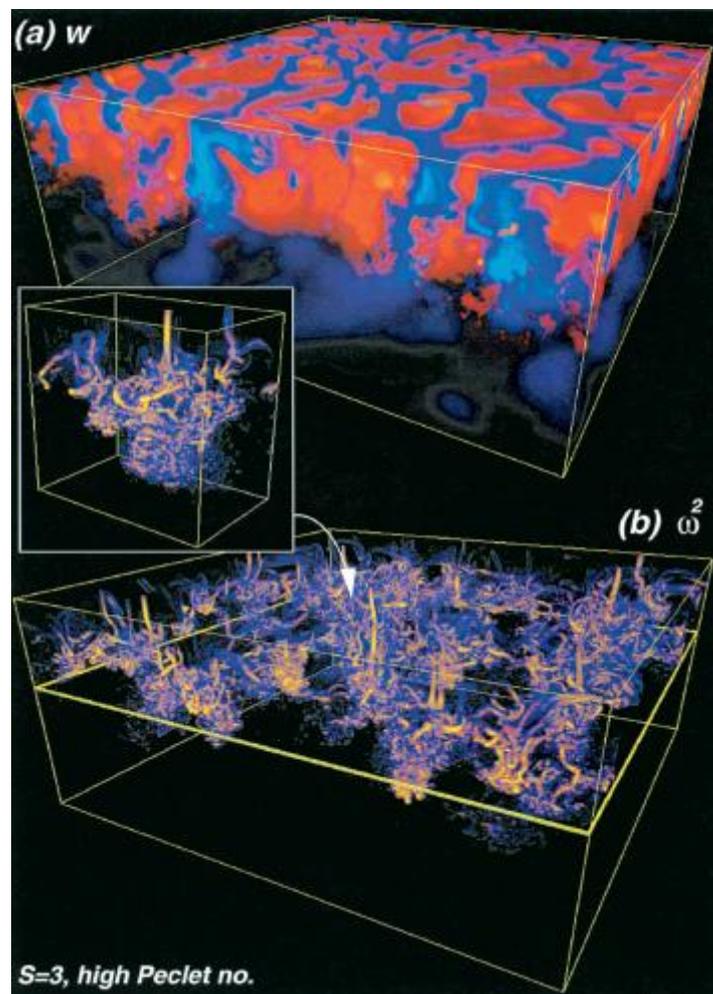
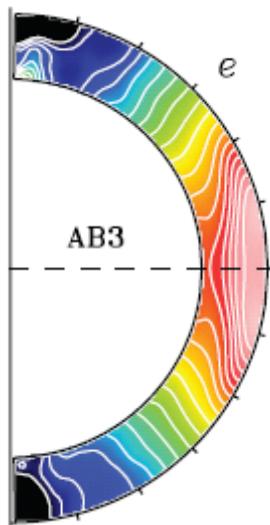
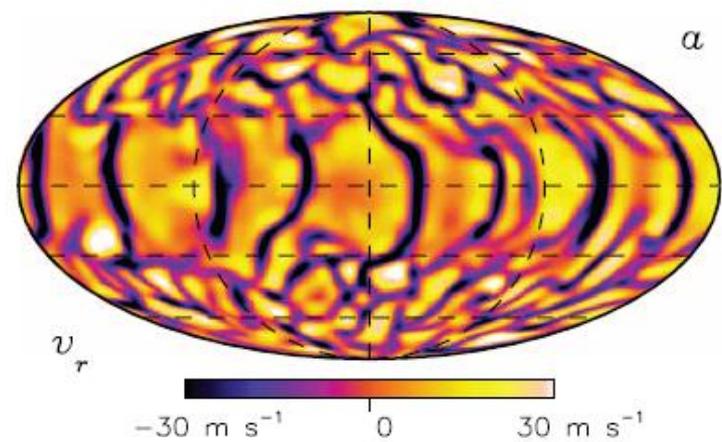
この場合は収束しない。  
上の理由もあるし、そもそもデータが粗いので、Force-Free解かどうか怪しい。

# フラックスロープ構築

Amari et al. 2003

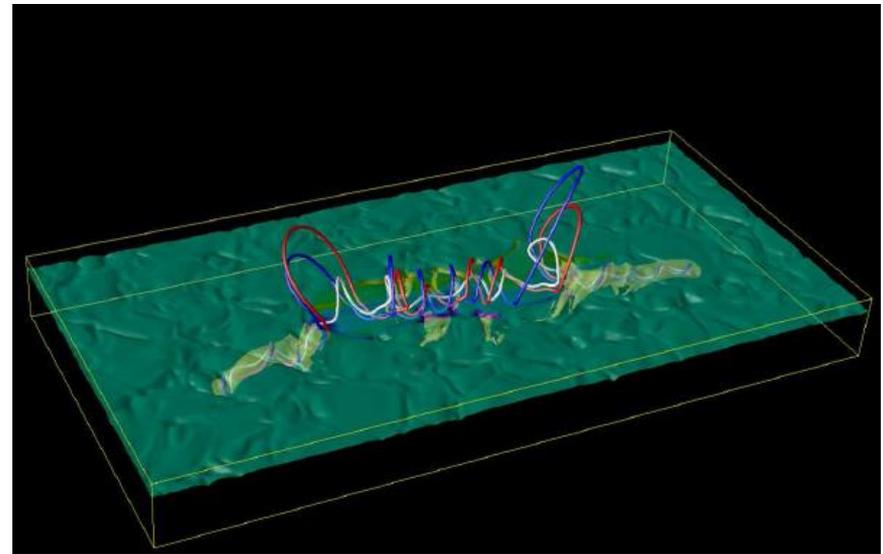
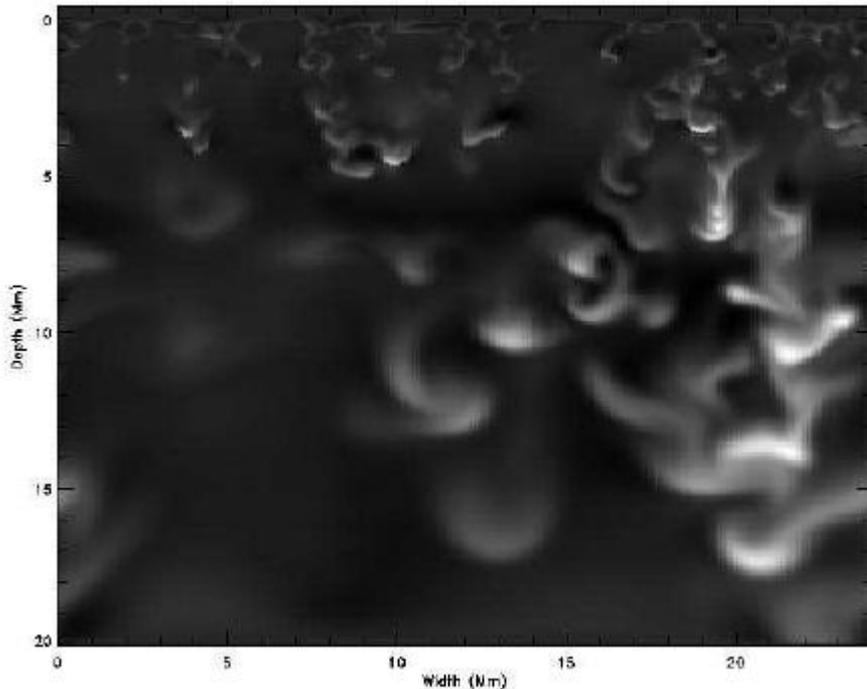
bipolar potential field + twist motion (bottom boundary)





## Realistic simulationの最近の成果

- 深い計算領域でマルチスケール対流(Benson, Stein, Nordlund)
- 対流＋磁束管浮上(Cheung, Schuessler, Moreno-Insertis)

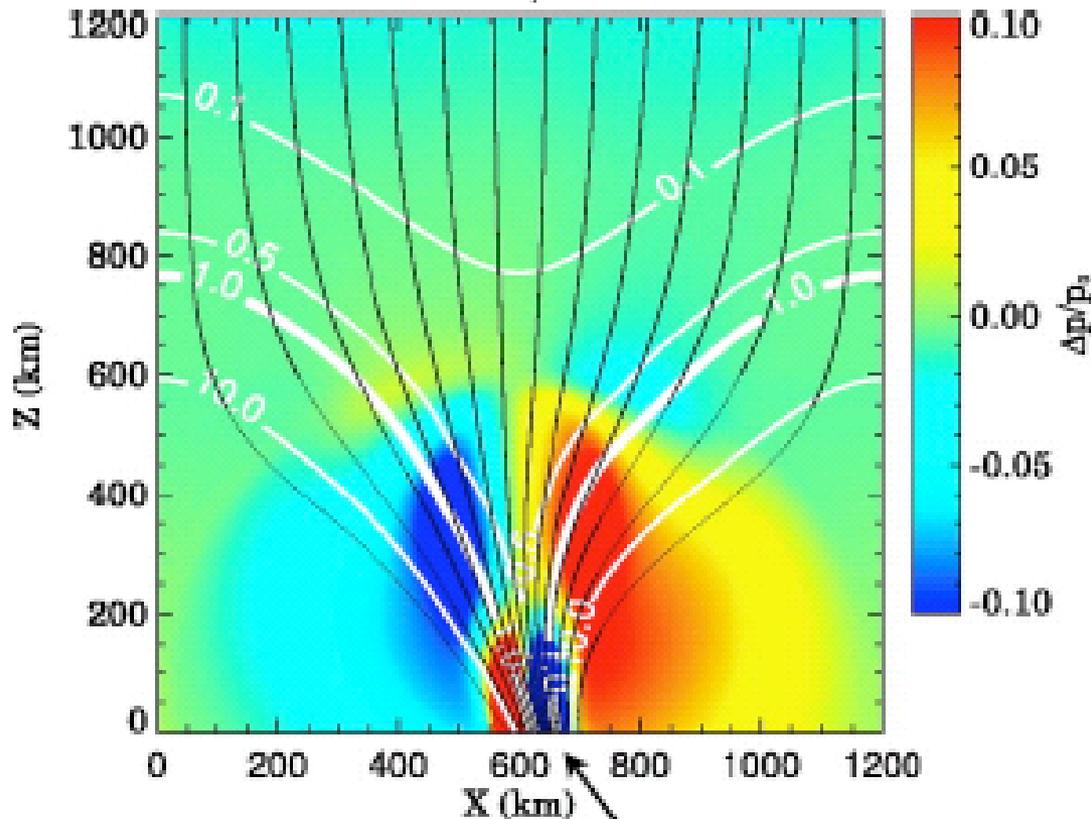


# 2次元シミュレーション

Hasan et al. 2005

$$\rho \sim 10^{-11} \text{ g/cm}^3$$

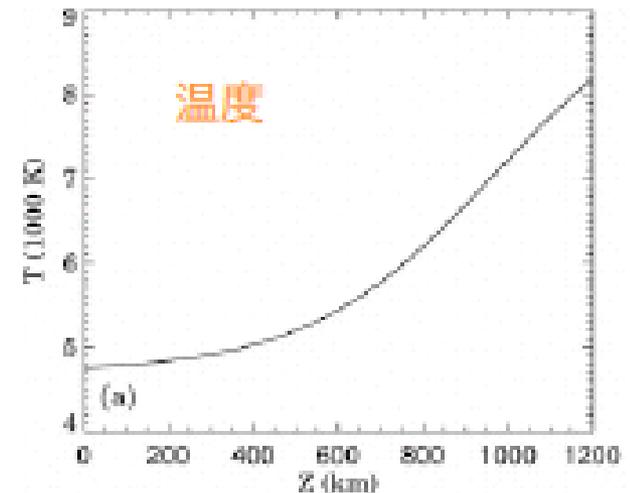
磁束管中を伝わる波の  
数値シミュレーション



$$\rho \sim 10^{-7} \text{ g/cm}^3$$

スピキュールの計算  
にはなっていない。

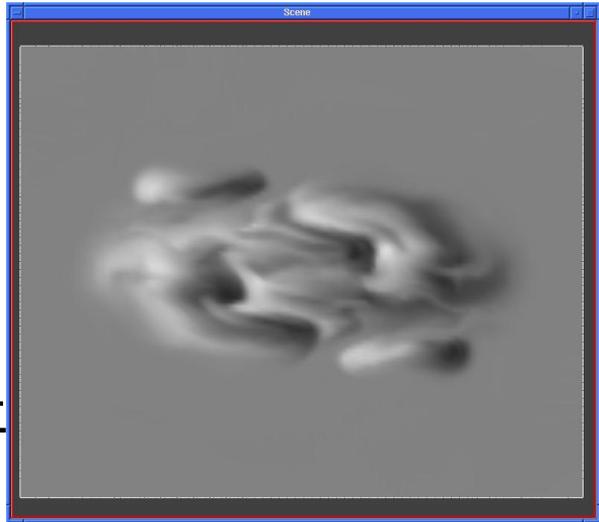
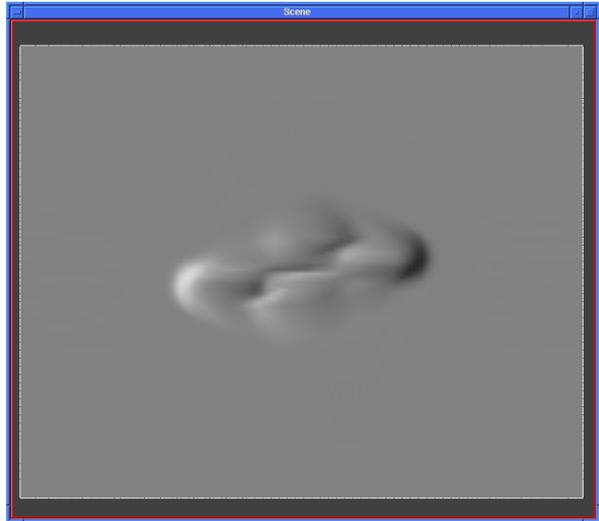
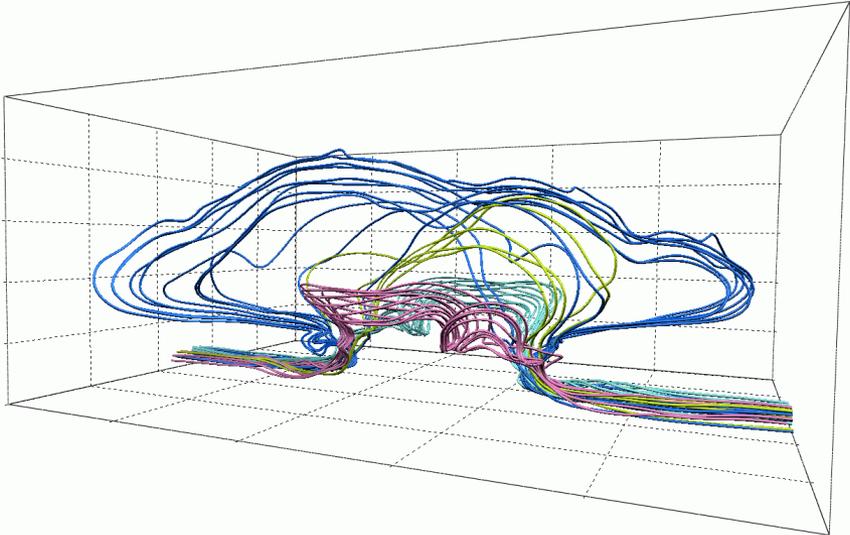
計算領域が彩層中



q=0.005 (捻れ弱)

Miyagoshi et al. (2006)

コロナ上空およそ14000kmへ浮上後  
の磁力線構造(俯瞰図)



- ・計算の空間時間スケール(～2万km、1時間)  
を現実の活動領域形成(5万km～、数日)に近づける  
---太陽表面磁場の時間発展を観測と詳細比較
- ・熱的プロセス(エネルギー式:断熱)をリアリスティックに  
---浮上磁束によるコロナループ形成  
---放射冷却による黒点形成

## 高磁気レイノルズ数領域のリコネクション

MHD性

- 多重リコネクション
- 乱流リコネクション
- Hall MHDリコネクション
  - Whistler wave
- Collision-less リコネクション
  - Meandering motion
- 異常抵抗
  - LHDI, Ion Acoustic Instability, etc.

非MHD性

# マルチスケール問題としてのリコネクション

