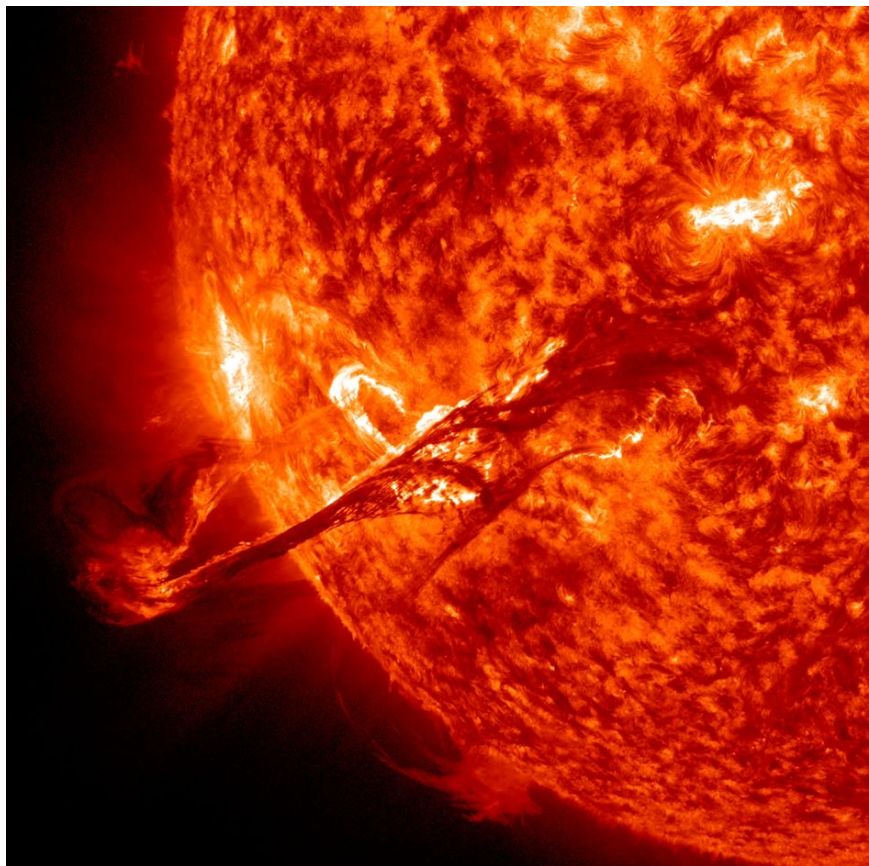


磁気対流の影響を考慮した
太陽面爆発現象の
磁気流体シミュレーション

金子岳史, Sung-Hong Park, 草野完也

(名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

太陽フレア・プラズマ噴出

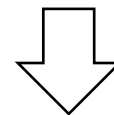


太陽フレア・プラズマ噴出の観測例
(SDO/AIA 304 Å)

太陽フレア

太陽大気中で発生する**爆発現象**。

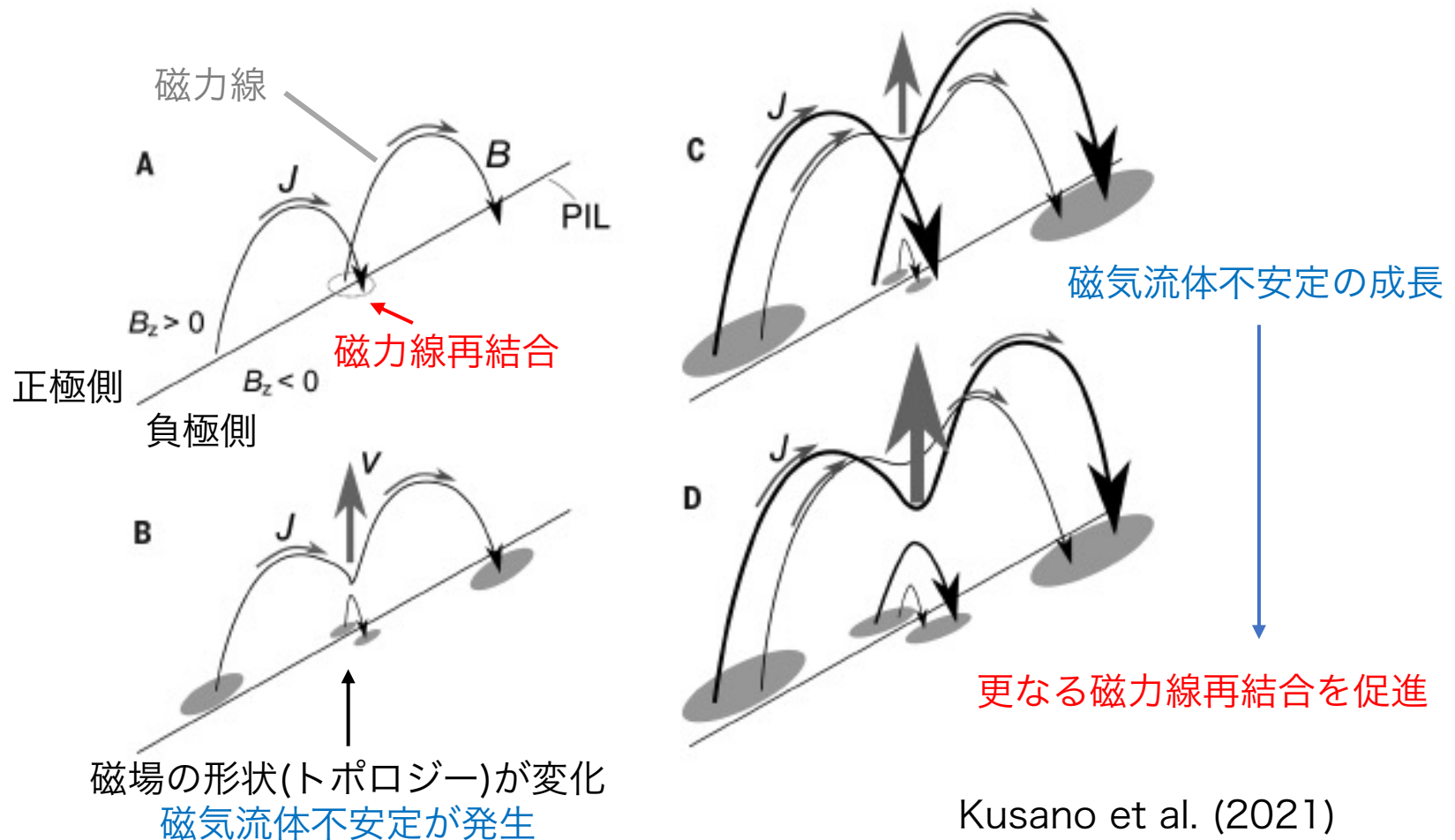
強いX線放射や、大量のプラズマ放出を伴う。



宇宙飛行士・航空関係者の被曝、人工衛星の故障・通信障害などの原因となる。

テクノロジーに依存した現代社会にとって脅威。

フレア発生の基本メカニズム



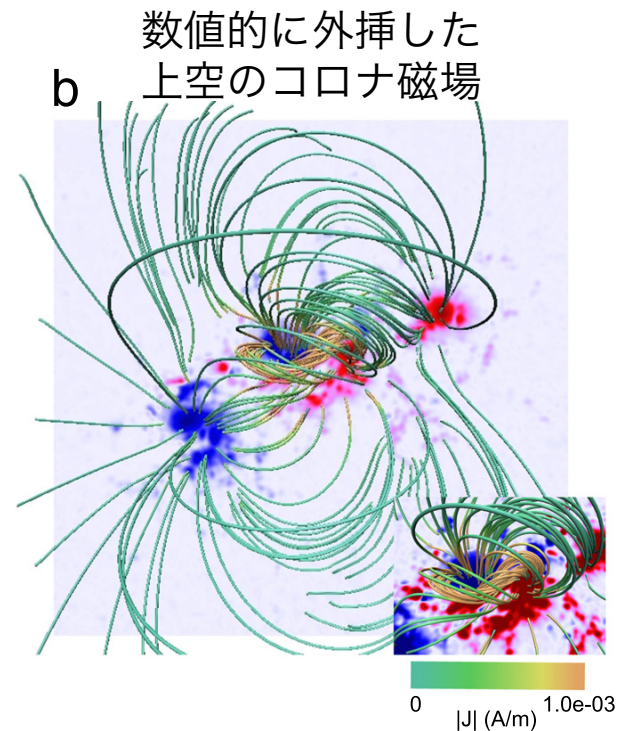
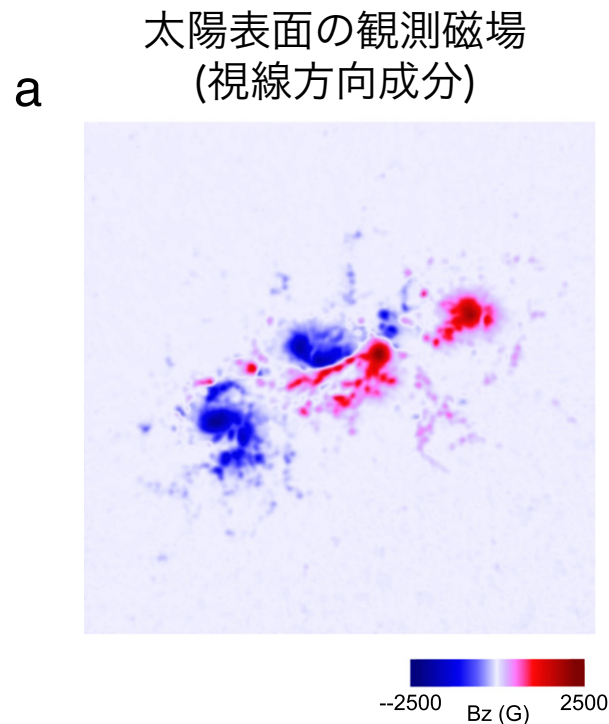
磁力線再結合(リコネクション)と磁気流体不安定性のフィードバックにより、爆発的エネルギー解放が発生

コロナ磁場の数値モデリング

磁気流体不安定の臨界条件の評価には3次元磁場構造が必要

- 太陽表面(光球)の磁場はベクトル成分まで詳細な観測が可能
- 上空のプラズマ大気層(コロナ)の磁場は観測不能

→ 数値モデリングにより推定



Inoue (2016)

コロナ磁場の数値モデリング手法

非線形フォースフリー磁場外挿法

- 現在主流の方法。力学平衡を仮定し、太陽表面のベクトル磁場データを元に、上空のコロナ磁場を外挿。
- ある時刻のスナップショット1枚を用いる。

データ駆動型シミュレーション

- 太陽表面観測磁場の時系列データを下部境界条件として用い、磁気流体方程式を数値的に解く。力学平衡の仮定をおかず、コロナ磁場の時間変化を物理解として再現できる（はず）。
- 手法によってかなり異なる数値解になる (Toriumi et al., 2020)、プラズマの動きと磁場の動きの同期が困難 (Hayashi et al., 2019; Guo et al., 2019)など、多くの課題。

本研究の目的

課題

観測データを導入する下部境界付近で発生する、
プラズマ速度と磁場の時間発展の物理的不整合の解消

本研究

- 新たな速度場駆動型手法を提案($E \times B$ -driven method)

観測磁場の時系列データから、太陽表面の速度場を導出。
下部境界付近にこの速度場を導入し、実際に誘導方程式を
数値的に解いて観測磁場を再現。

→少なくとも速度場と磁場の物理不整合は解消されるが、
観測イベントをどこまで再現できるかは要検証。

- 実際の観測イベントへ適用し、実用性・再現性を確認。

速度場導出 1/2

磁場の時間発展方程式(ファラデー・マクスウェルの誘導方程式)

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}, \quad \mathbf{B}: \text{磁場}, \quad \mathbf{E}: \text{電場}$$



観測磁場データ

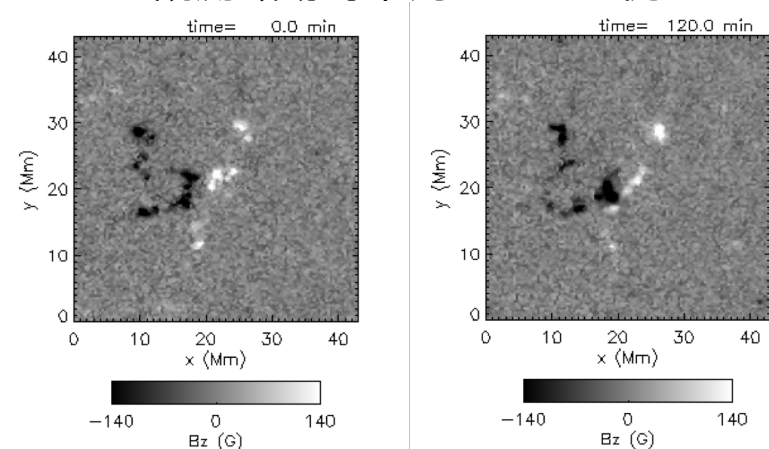
$$\frac{B_{\text{obs}}^{n+1} - B_{\text{obs}}^n}{\Delta t} = -\nabla \times \mathbf{E}^I,$$

観測時間幅 インバージョン電場

観測磁場時系列データの差分を左辺とし、
誘導方程式を逆に解いて、電場を求める。

ただし、観測磁場は2次元データなので、鉛直微分は直接評価できない。本研究ではPoloidal-Toroidal Decomposition (Fisher et al., 2010)で対処。

観測磁場時系列データの例



速度場導出 2/2

ゲージ変換

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^I - \nabla\phi \longrightarrow \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$$

ゲージ変換により、**電場が磁場に垂直な成分のみ**を持つようにする。

※抵抗がない場合、電場は $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ で与えられる。

$\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$ は必要条件

速度場計算

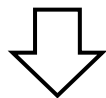
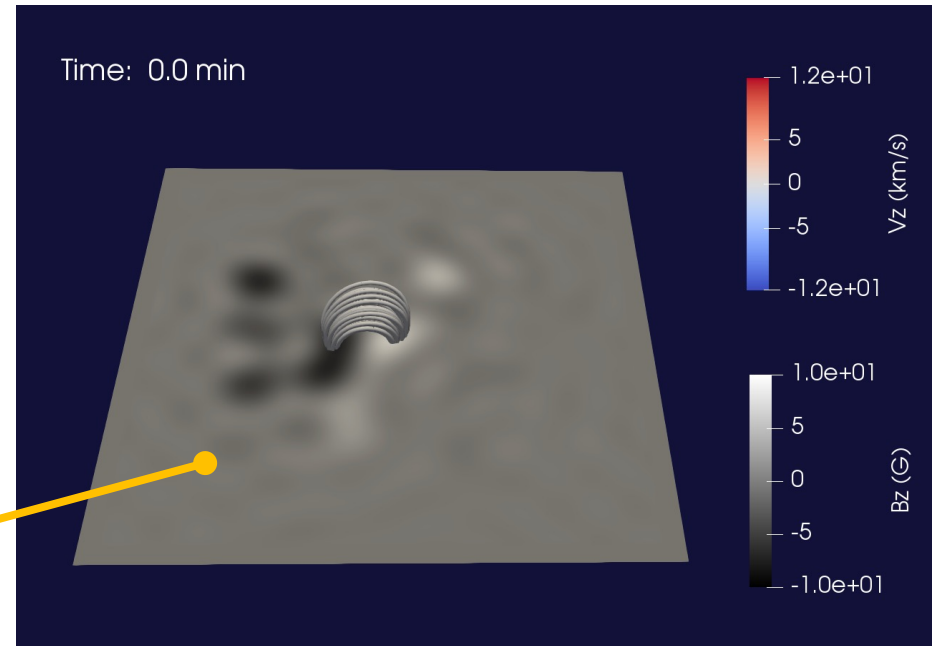
$$\mathbf{v}^I = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \quad \left(= \frac{(\mathbf{E}_\perp + \cancel{\mathbf{E}_\parallel}) \times \mathbf{B}}{B^2} \right)$$

ゲージ変換で消去

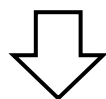
速度場は、磁場と求めた電場から簡単に計算できる。

シミュレーション設定

- 観測ノイズを軽減するため、lowpass filterを適用
- 初期磁場はポテンシャル磁場 (自由エネルギーが0の磁場)
- $B_{\text{sim}} = B_{\text{photo}}/10$
- 下部境界に $\mathbf{v}^I = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$



下部境界の磁場は、 \mathbf{v}^I を誘導方程式に代入し、数値的に時間発展させる。



観測磁場を数値的に再現しつつ、上空のコロナ磁場も再現できる。

基礎方程式

太陽コロナでは磁気エネルギー>>内部エネルギーなので、ガス圧を0と仮定した磁気流体方程式を数値的に解く。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad \text{連続の式}$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \frac{B^2}{8\pi} \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B}\mathbf{B}}{4\pi} \right) = 0, \quad \text{運動方程式}$$

ローレンツ力

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E}, \quad \text{ファラデー・マクスウェルの誘導方程式}$$

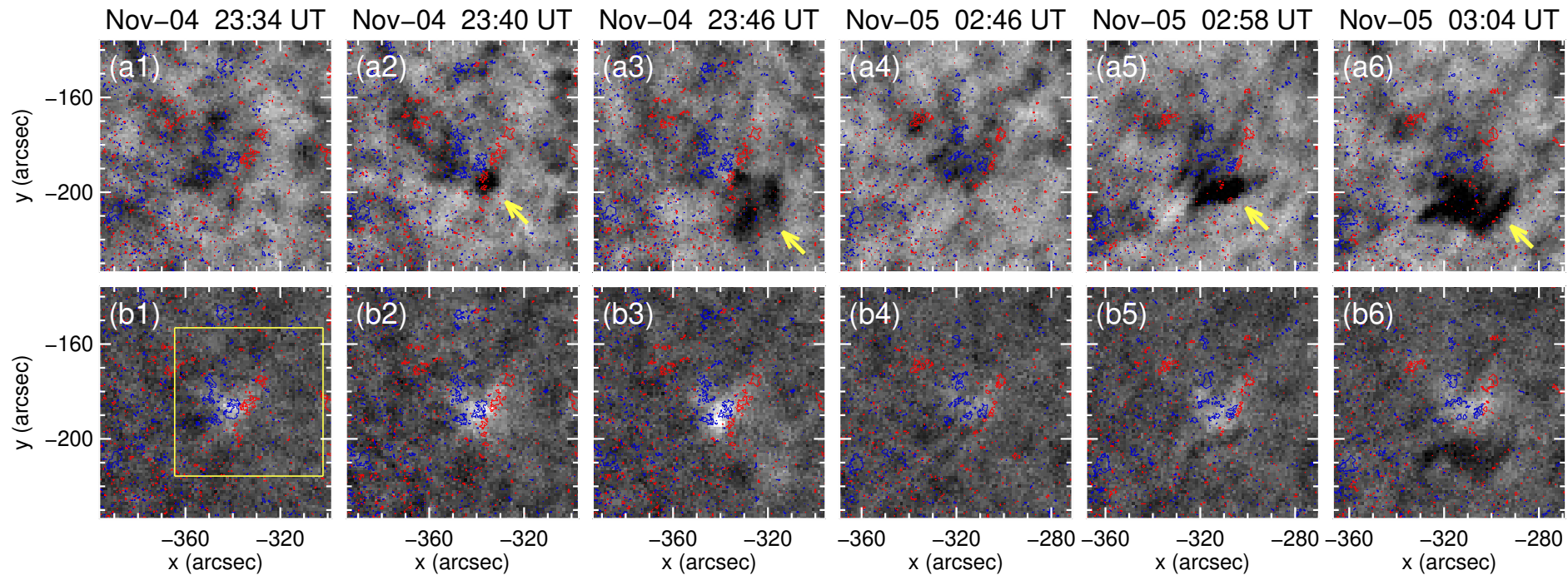
$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{4\pi\eta}{c^2} \mathbf{J}, \quad \mathbf{J} = -\frac{c}{4\pi} \nabla \times \mathbf{B}$$

オームの法則

アンペールの法則

観測ターゲット

プラズマ放出現象 (飛騨天文台SMART/SDDIにより観測)



上段: H α -0.5 Å (ドップラーシフト), 下段: H α line center

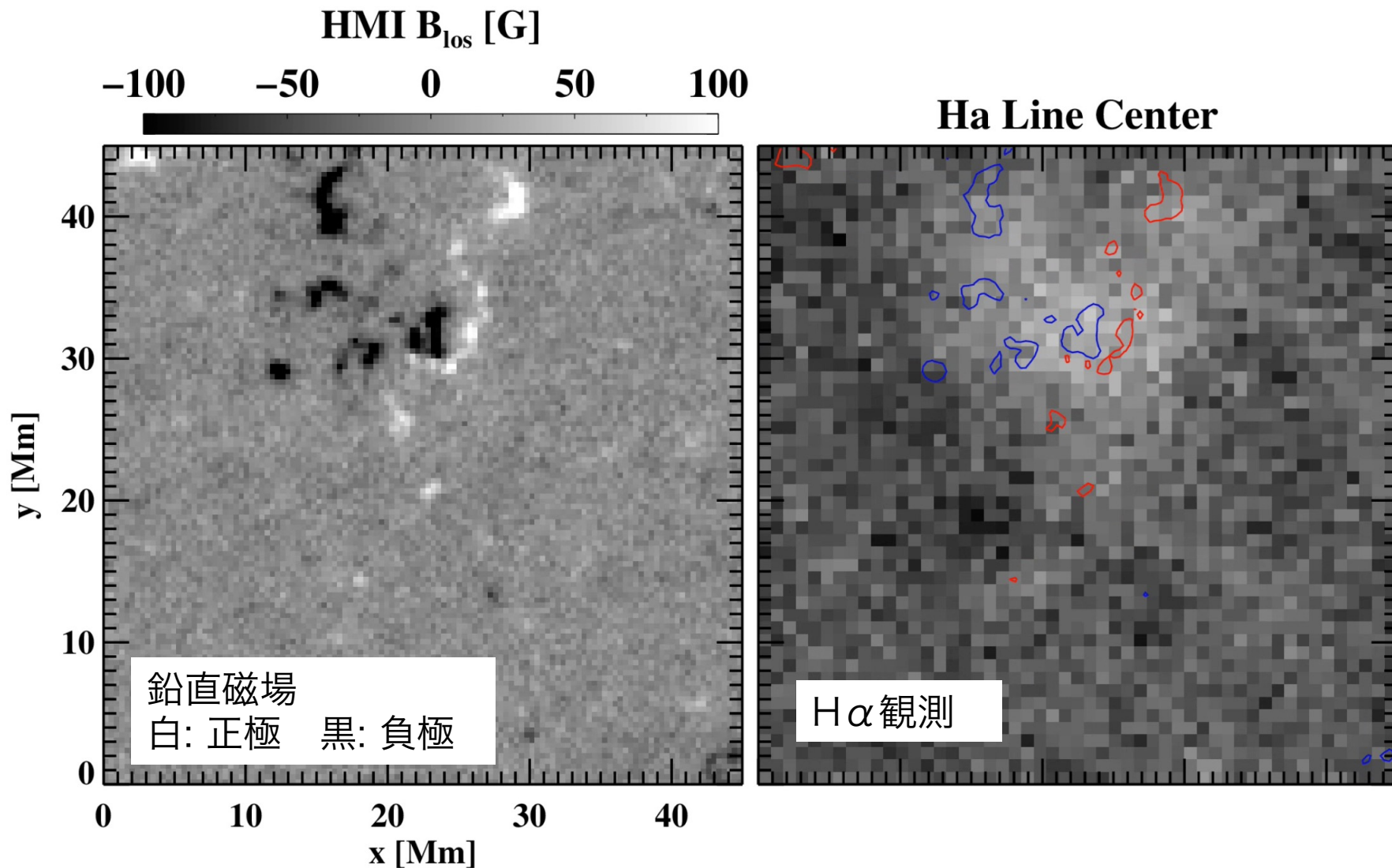
(H α 線は温度 10^4 K程度のプラズマから出る可視光)

同じ領域から2度のプラズマ噴出 (黄色矢印で示した黒い領域)

連続した噴出はよく観測されるが、エネルギー蓄積の詳細は不明

磁場との関係 1/3

SMART (5-Nov-2017 02:33:12.000) / HMI (5-Nov-2017 02:31:56.300)

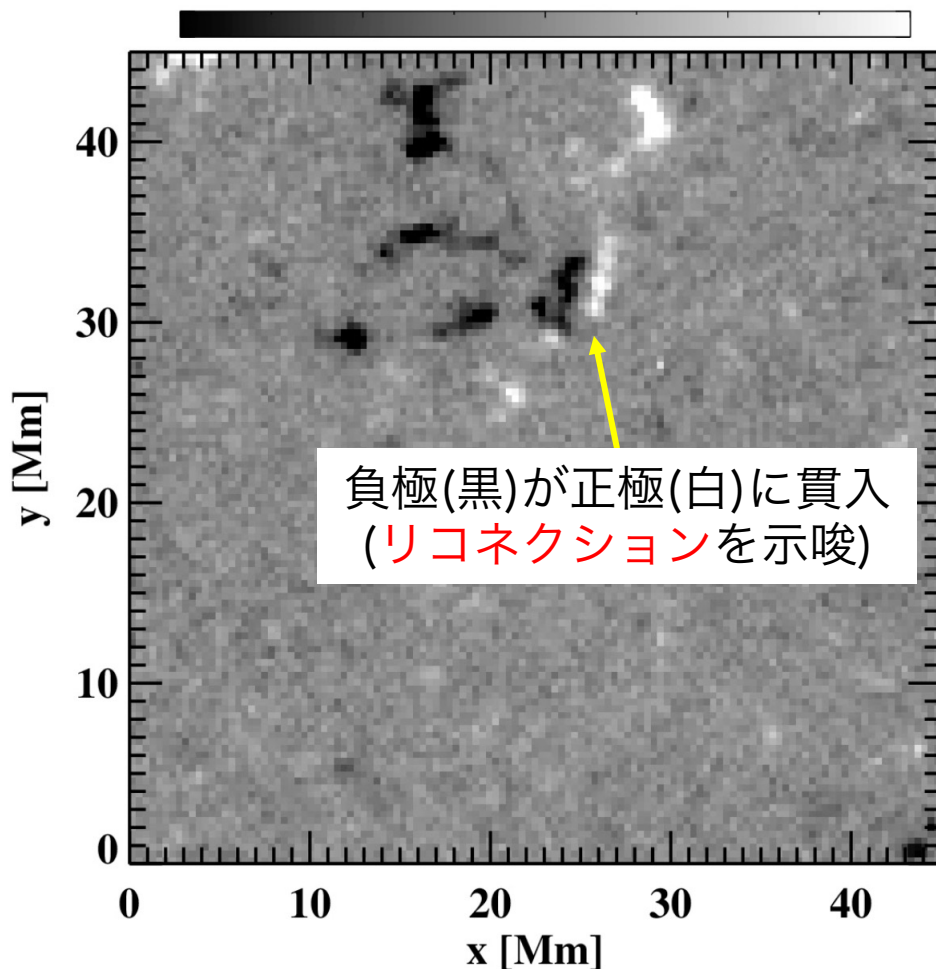


磁場との関係 2/3

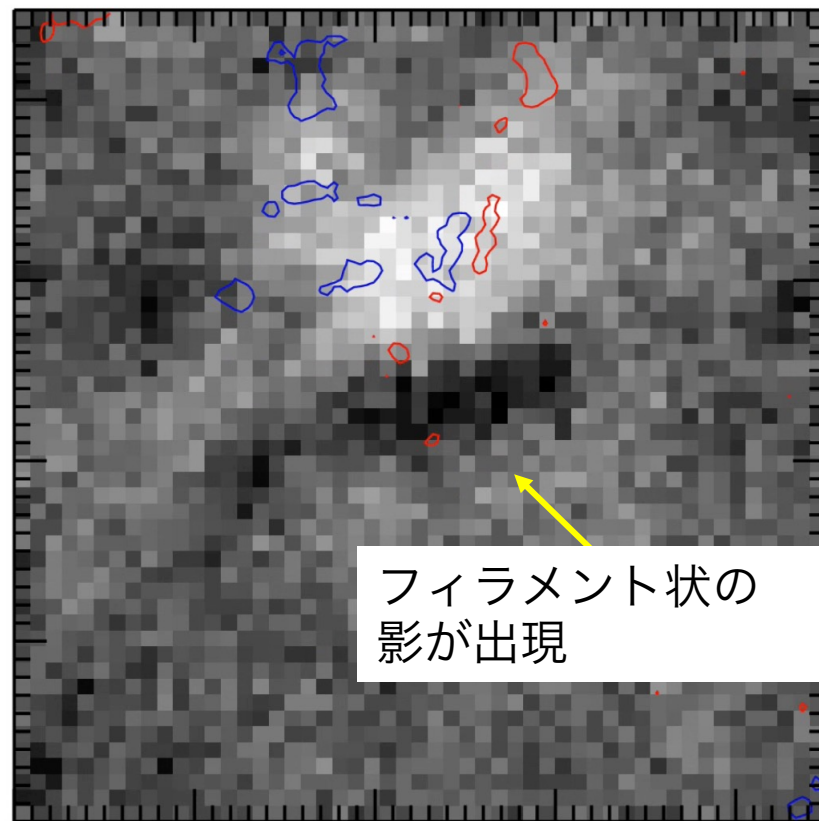
SMART (5-Nov-2017 03:00:18.000) / HMI (5-Nov-2017 02:58:56.300)

HMI B_{los} [G]

-100 -50 0 50 100

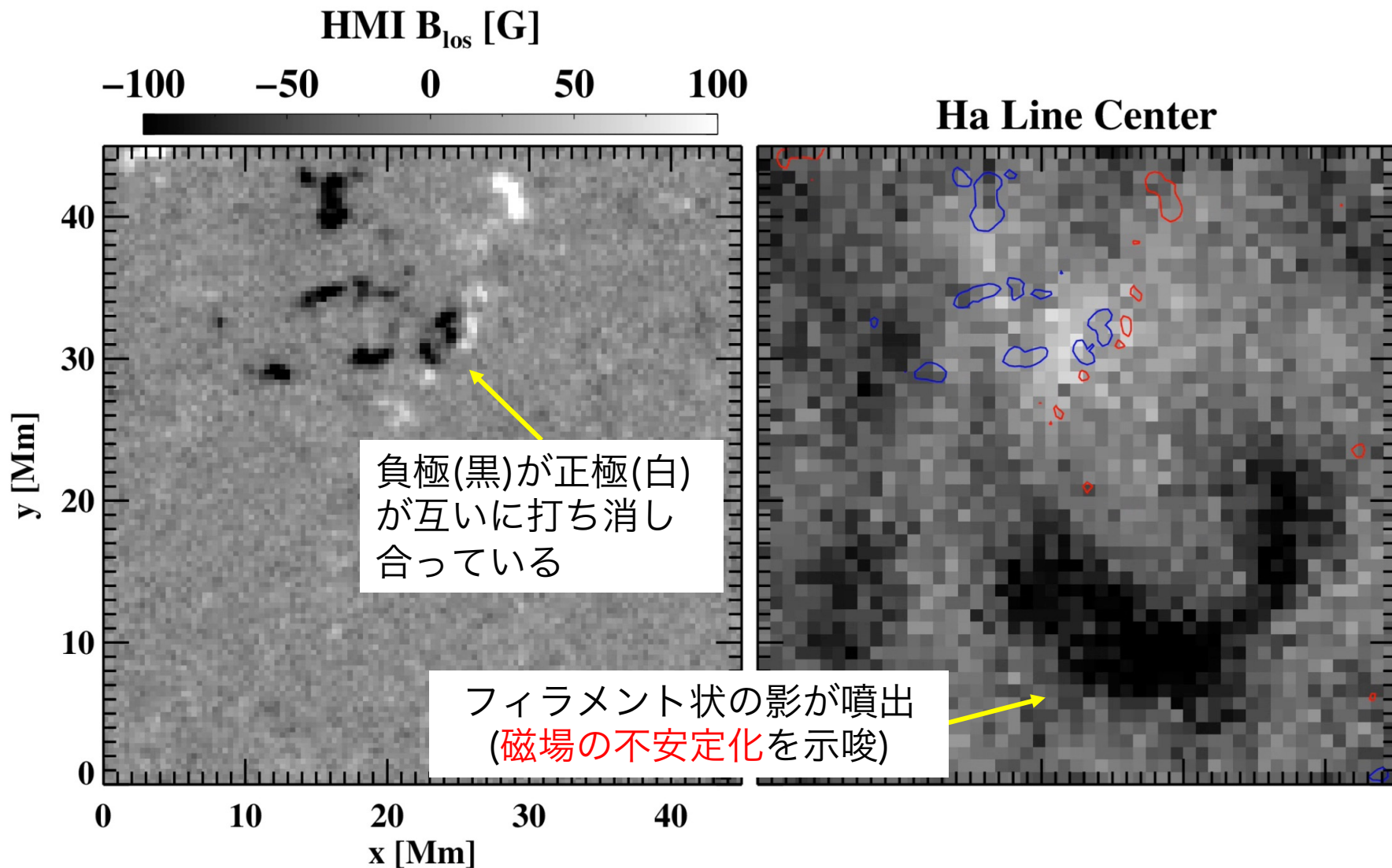


Ha Line Center

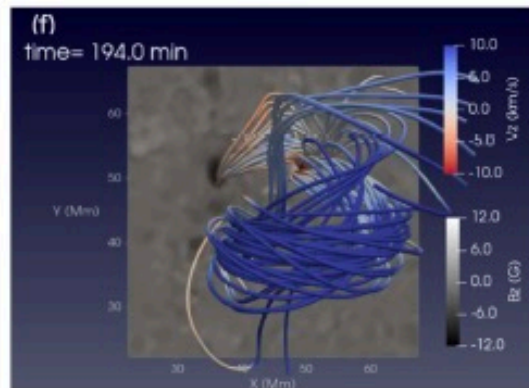
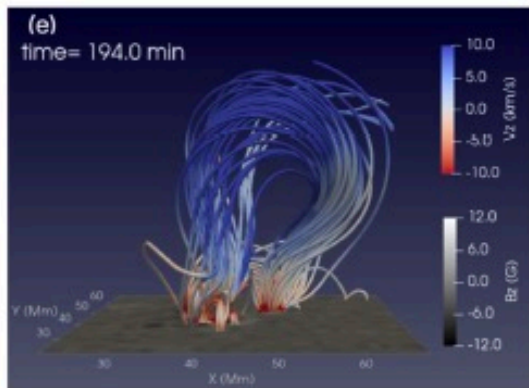
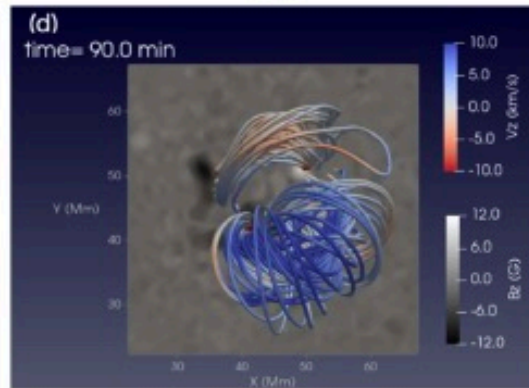
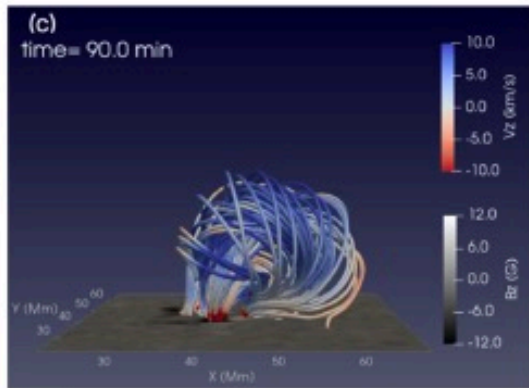
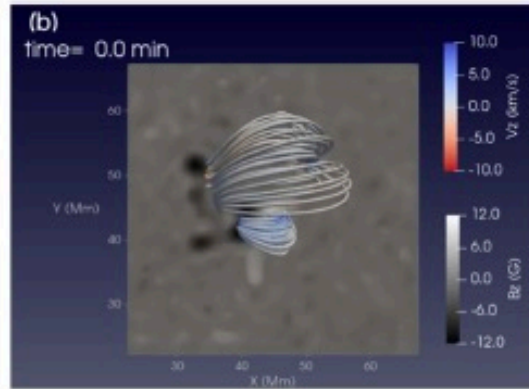
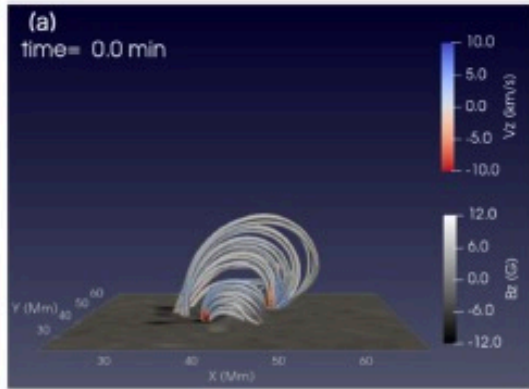


磁場との関係 3/3

SMART (5-Nov-2017 03:09:21.000) / HMI (5-Nov-2017 03:07:56.300)



シミュレーション結果(3次元コロナ磁場)



3次元磁場構造の時間発展

(a),(b) 観測時刻初期

(c),(d) 1度目の噴出

(e),(f) 2度目の噴出

線：磁力線

線の色：鉛直速度

青：鉛直上向き

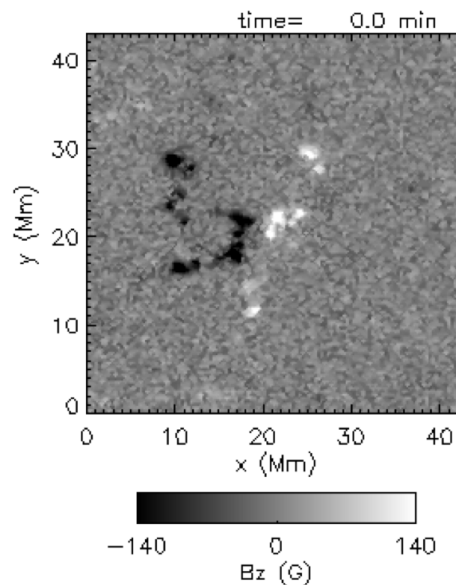
赤：鉛直下向き

グレースケール：

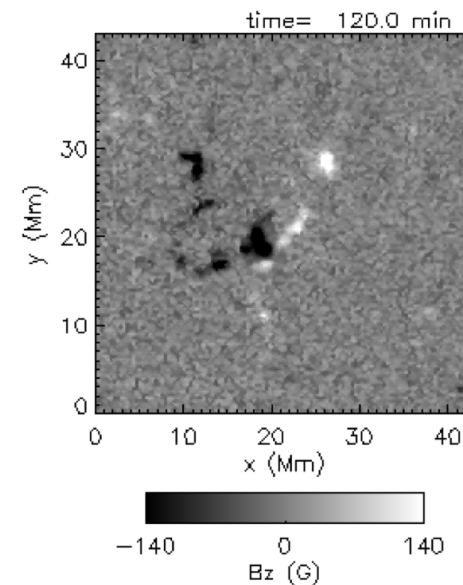
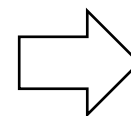
下部境界付近の鉛直磁場

観測磁場の再現性 1/3

観測磁場
(鉛直成分 B_z)

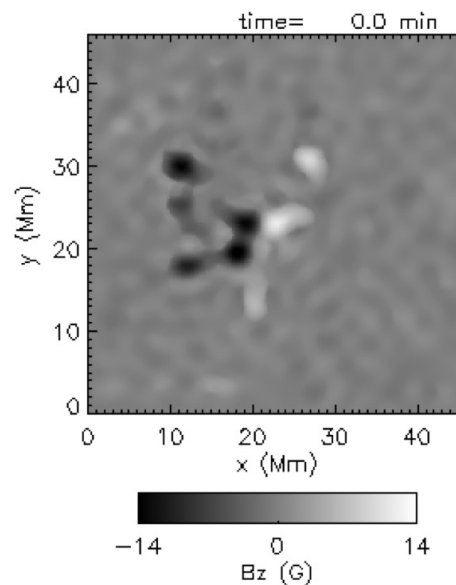


2hr

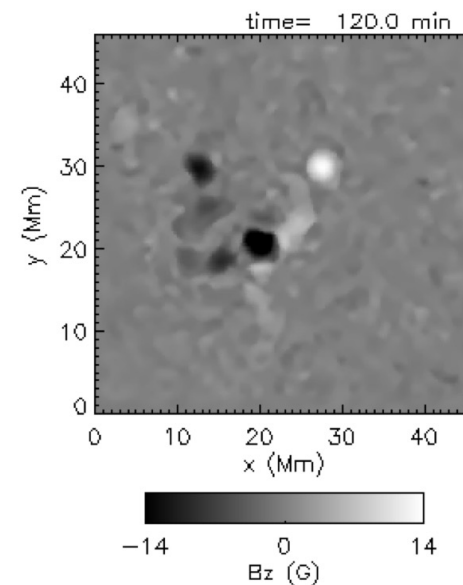
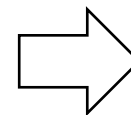


シミュレーション結果

- 時間変化は再現できている
- 微細構造はlowpass filterの影響で再現できていない

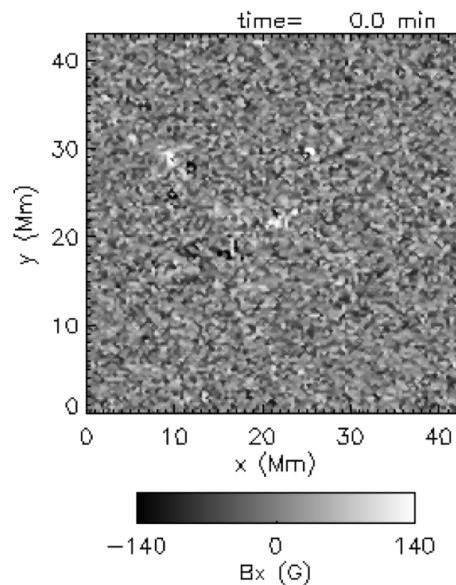


2hr

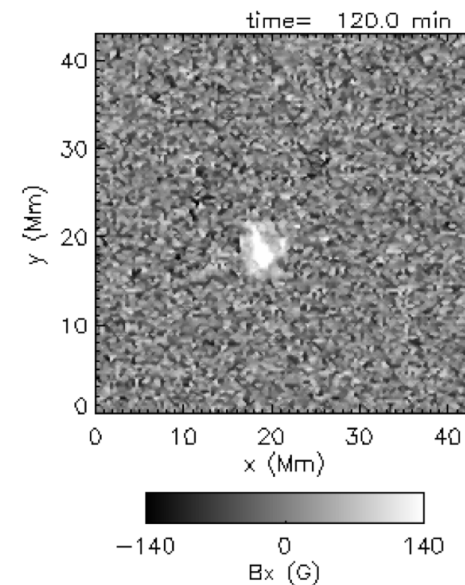


観測磁場の再現性 2/3

観測磁場
(水平成分 B_x)

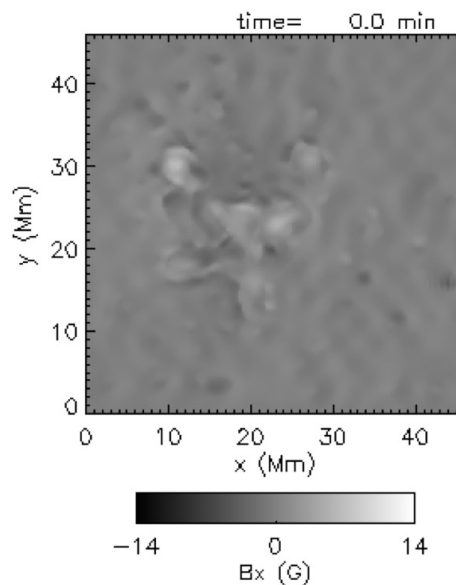


2hr
→

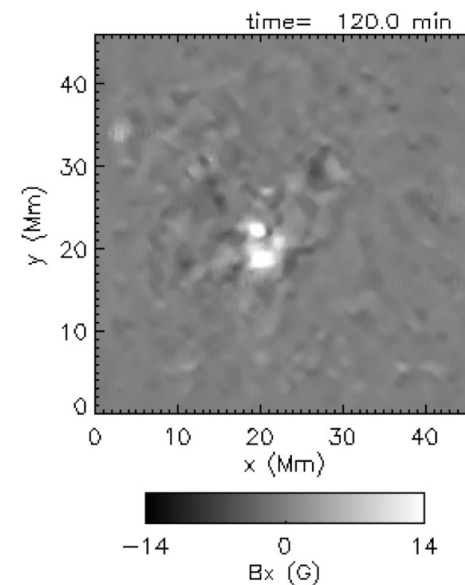


シミュレーション結果

- 時間変化は再現できている
- 微細構造はlowpass filterの影響で再現できていない

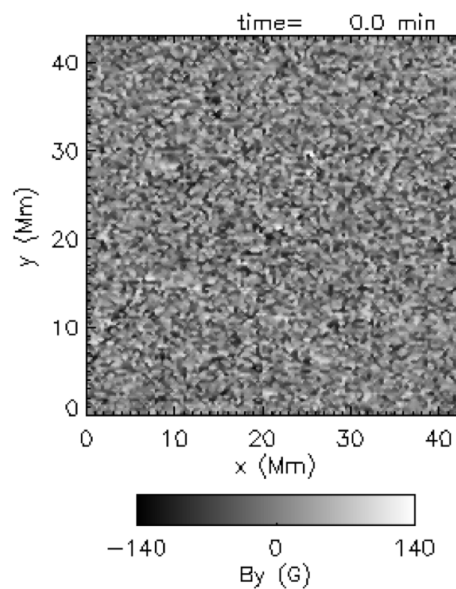


2hr
→

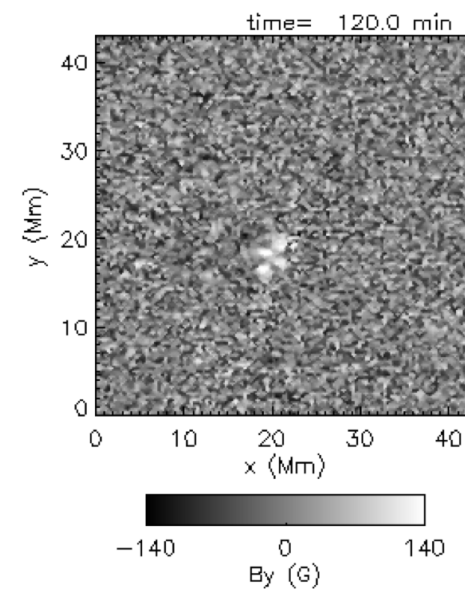


観測磁場の再現性 3/3

観測磁場
(水平成分 B_y)

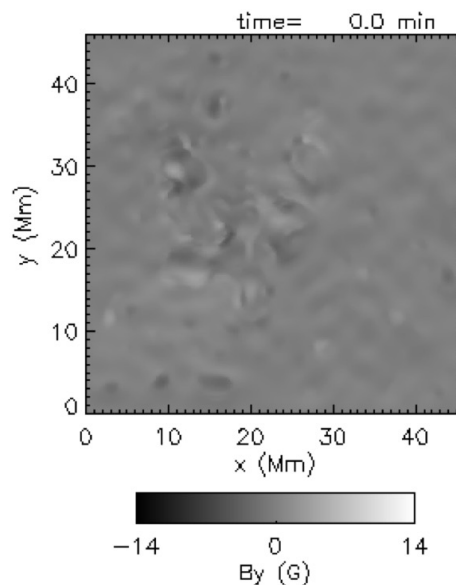


2hr
→

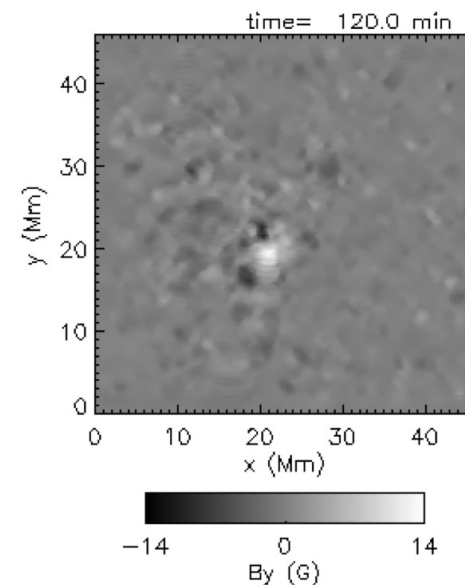


シミュレーション結果

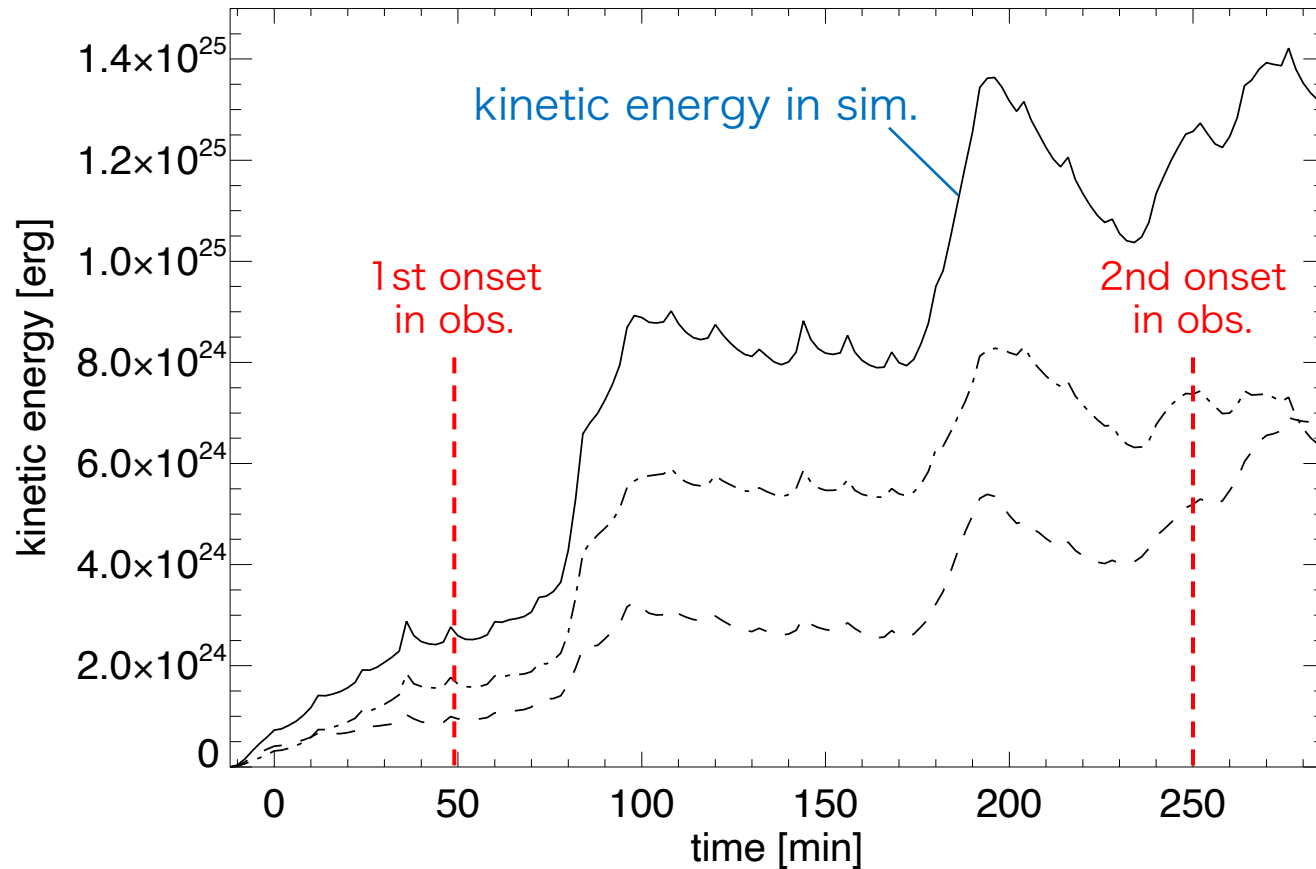
- 時間変化は再現できている
- 微細構造はlowpass filterの影響で再現できていない



2hr
→

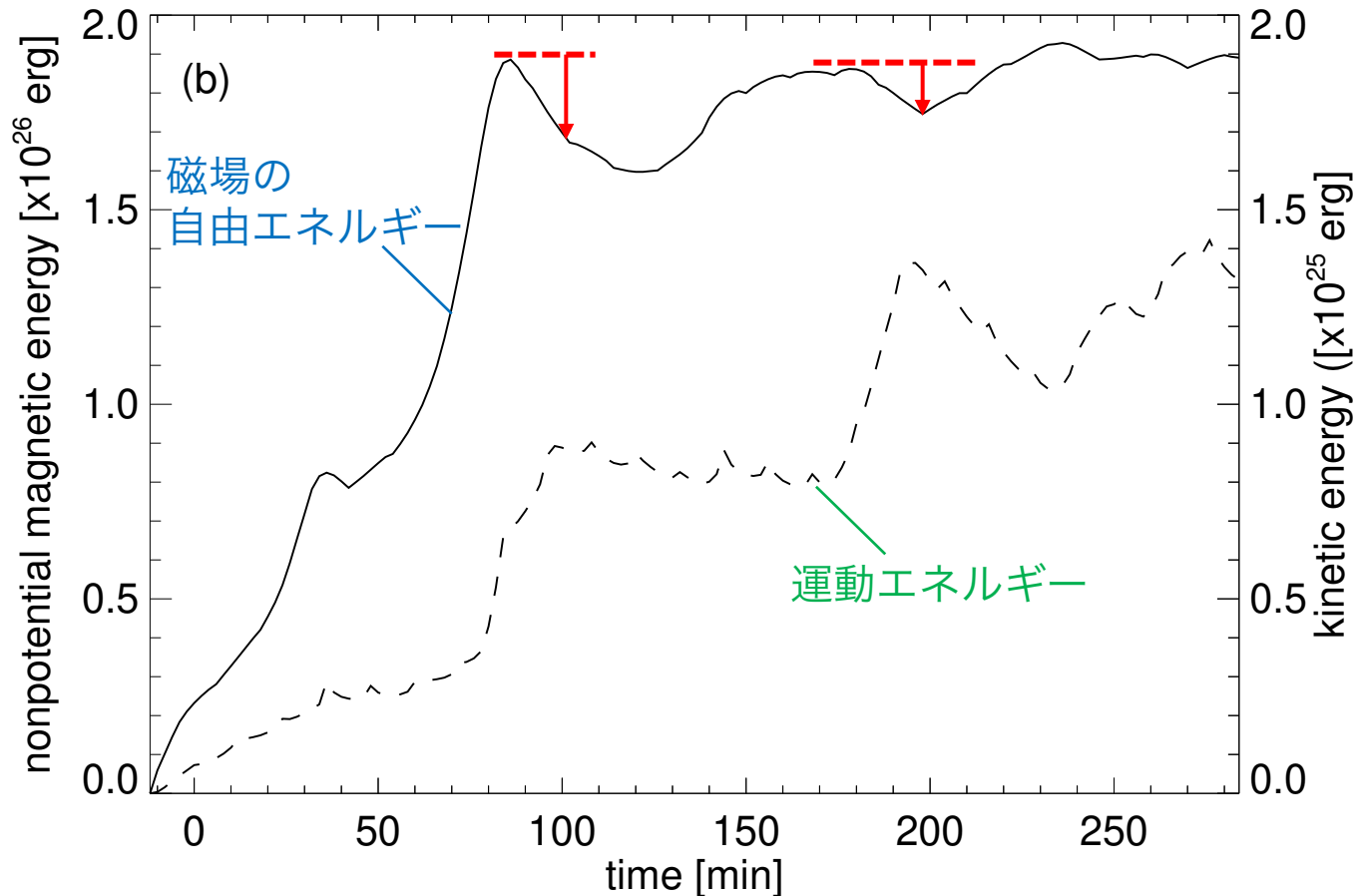


運動エネルギーの時間変化



- 運動エネルギーのピーク (t~90min & 200min) が噴出に対応
- 2度の噴出を再現できたが、時刻に0.5-1hrのずれ

磁場の自由エネルギーの変化



- 噴出に対応して、自由エネルギーの減少を確認
- 解放エネルギーは全自由エネルギーの10%未満
- 1度目の噴出後もエネルギー蓄積あり

- 噴出発生時刻のずれについて

総エネルギー量は大局的な磁場構造で決まるが、リコネクションや不安定など、**噴出のトリガには微細な磁場構造が関与**すると考えられている(e.g., Kusano et al., 2012, 2021)。今回は**観測ノイズを消すためにlowpass filter**を強くかけており、噴出発生時刻のずれにつながったと考えられる。観測ノイズの除去方法について更なる検討が必要である。

- 磁場の自由エネルギーの時間変化について

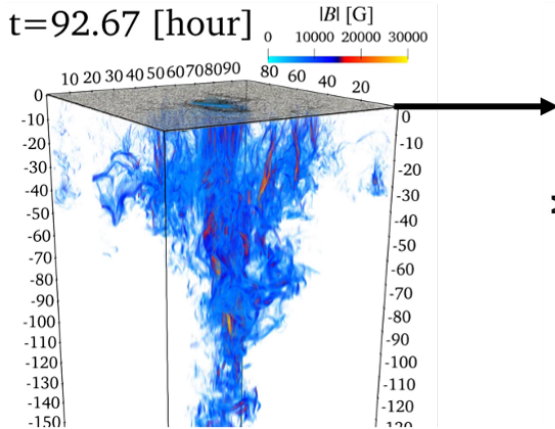
蓄積された全自由エネルギーに対し、**解放されたエネルギーは10%未満**であった。過去のフレア研究でも、蓄積されている全てのエネルギーが解放されているわけではないことが指摘されている。

1度目の噴出後、一時的に自由エネルギーは減少するが、**2度目の噴出前には元のレベルに回復**しており、**継続的に自由エネルギーが注入**されていることが示唆される。これは正極と負極の収束運動によるものと考えられる。

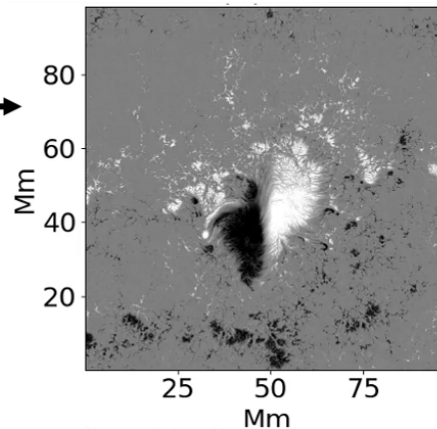
今後の展望

現在進行中の対流層-コロナ結合シミュレーション

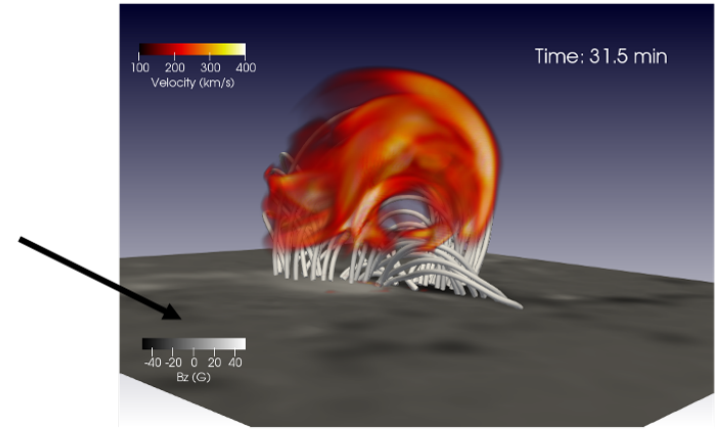
(a) 輻射磁気流体シミュレーション
(黒点形成：太陽内部-太陽表面)



(b) 再現された黒点磁場
(太陽表面)



(c) データ駆動型シミュレーション
(フレア：太陽表面-上空コロナ)



- 太陽表面磁場の時間変化は**太陽内部の対流運動**に起因。一方、太陽内部は直接観測できない。
- 近年、**太陽内部から表面付近までの**輻射磁気流体シミュレーションによって、現実的な太陽表面磁場を再現できるようになった(Hotta & Iijima, 2019, Toriumi & Hotta, 2020, Hotta & Toriumi, 2021)。
- 今後、輻射磁気流体シミュレーションで再現された太陽表面磁場を元に、上空コロナのデータ駆動型シミュレーションを行い、フレアを再現する。**フレアを発生させる太陽表面磁場形成と太陽内部ダイナミクスの関係の解明**を目指す。

まとめ

- 速度場駆動型のデータ駆動手法($E \times B$ -driven)を開発した。
- 実際の観測イベントに適用したところ、2度のプラズマ噴出現象を再現することに成功した。ただし、噴出時刻には多少のずれがあった。
- 解放されたエネルギーは全体の10%未満であった。また、1度目の噴出の後にも自由エネルギーが継続的に蓄積されていた。これは磁場の収束運動によるものと考えられる。

参考文献

T. Kaneko, S-H. Park, K. Kusano (2021)
“Data-driven MHD simulation of successive solar plasma eruption”,
The Astrophysical Journal, 909, article id 155
DOI: 10.3847/1538-4357/abe414