

理論面からの検討：
エネルギー蓄積からフレアトリガまで

鳥海 森（国立天文台）

フレア検討チーム

清水敏文、渡辺恭子、浅井歩、伴場由美、草野完也、塩田大幸

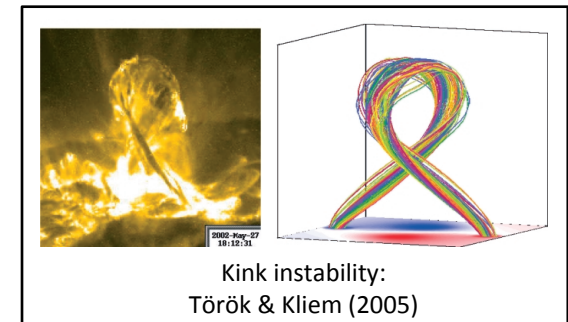
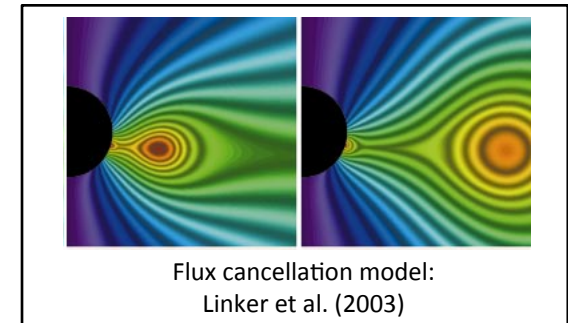
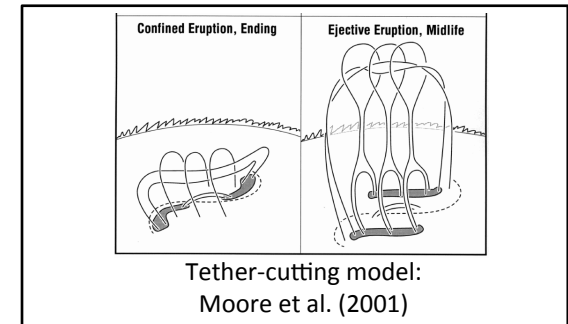
1. フレア理論

➤ フレア・CME理論モデル

➤ 数多く存在

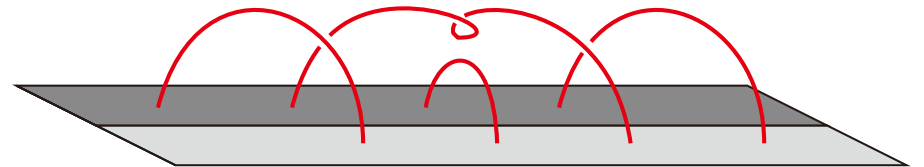
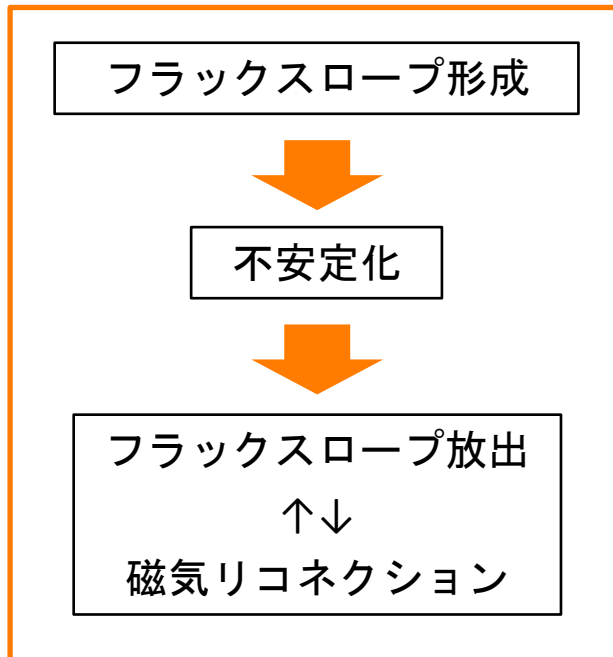
- Tether-cutting model: Moore et al. (2001)
- Filament formation: van Ballegooijen & Martens (1989)
- Filament eruption: Chen & Shibata (2000)
- Flux cancellation model: Linker et al. (2003)
- Reversed shear model: Kusano et al. (2004)
- Kink instability: Török & Kliem (2005)
- Torus instability: Fan & Gibson (2007)
- etc.

➤ 関連する観測も多数



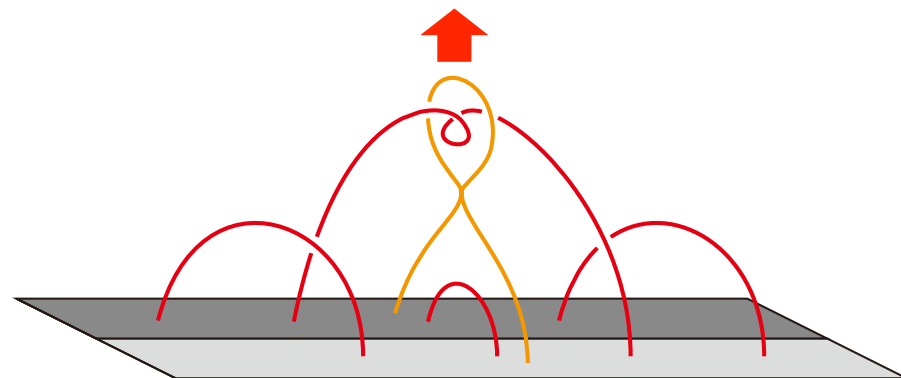
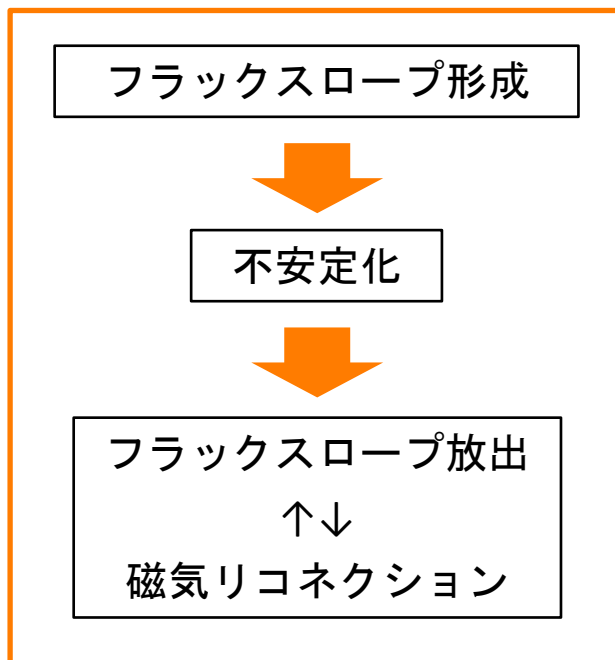
1. フレア理論

- フレア・CME理論モデル
 - 共通理解：基礎過程として



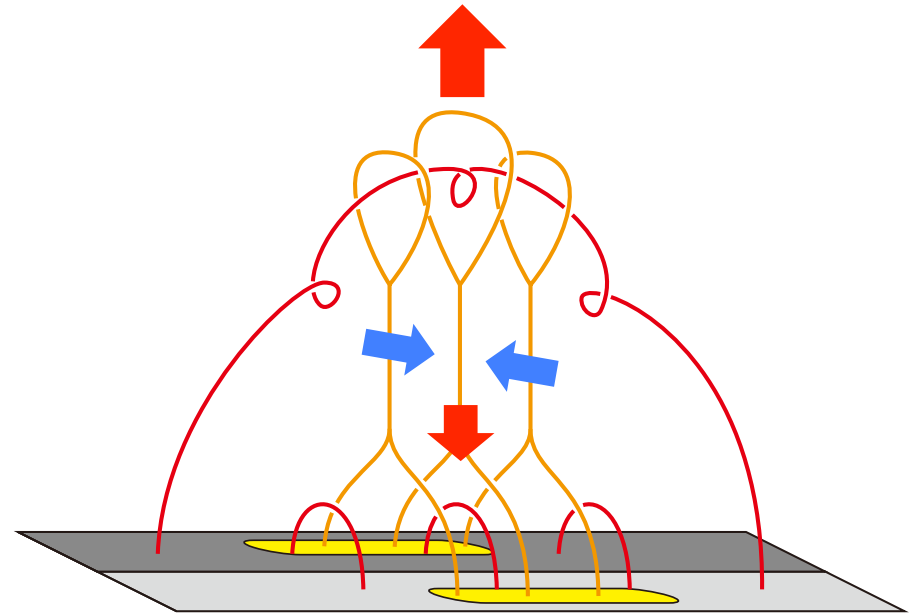
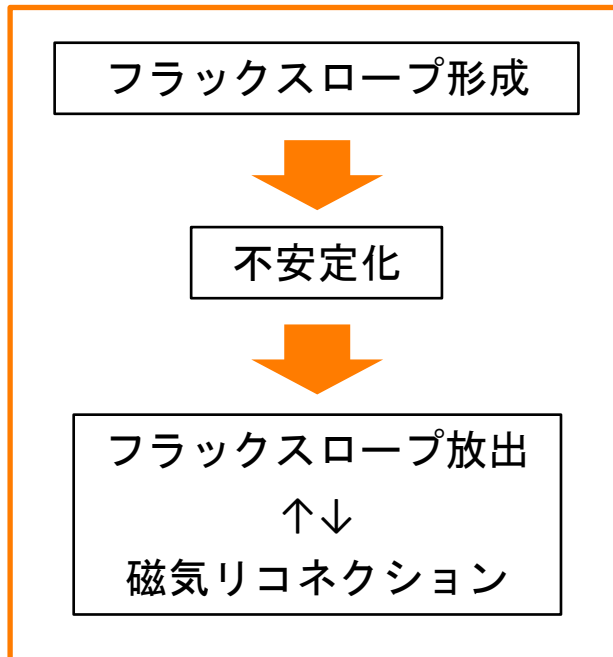
1. フレア理論

- フレア・CME理論モデル
 - 共通理解：基礎過程として



1. フレア理論

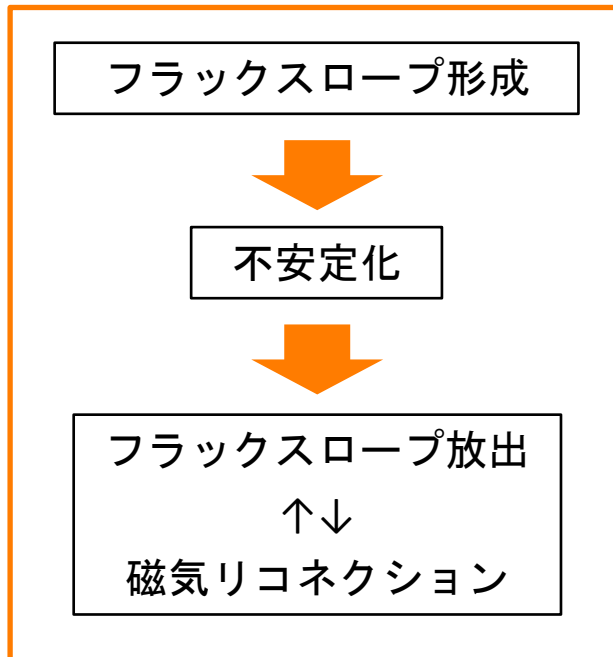
- フレア・CME理論モデル
- 共通理解：基礎過程として



1. フレア理論

➤ フレア・CME理論モデル

➤ 共通理解：基礎過程として

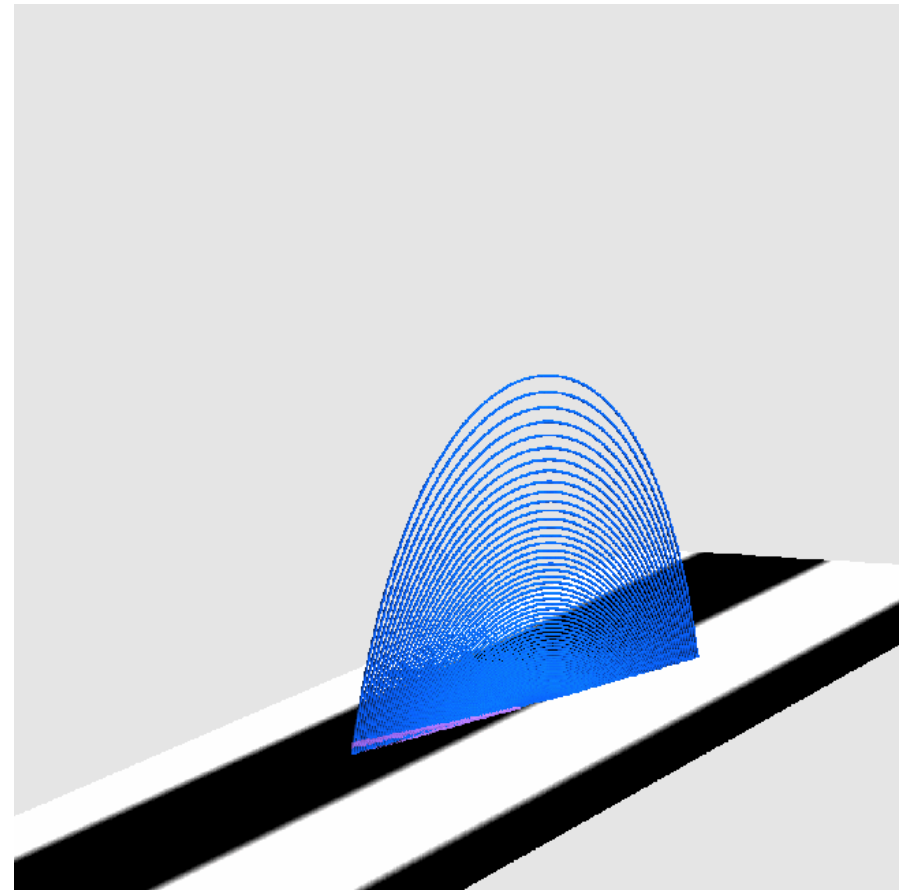
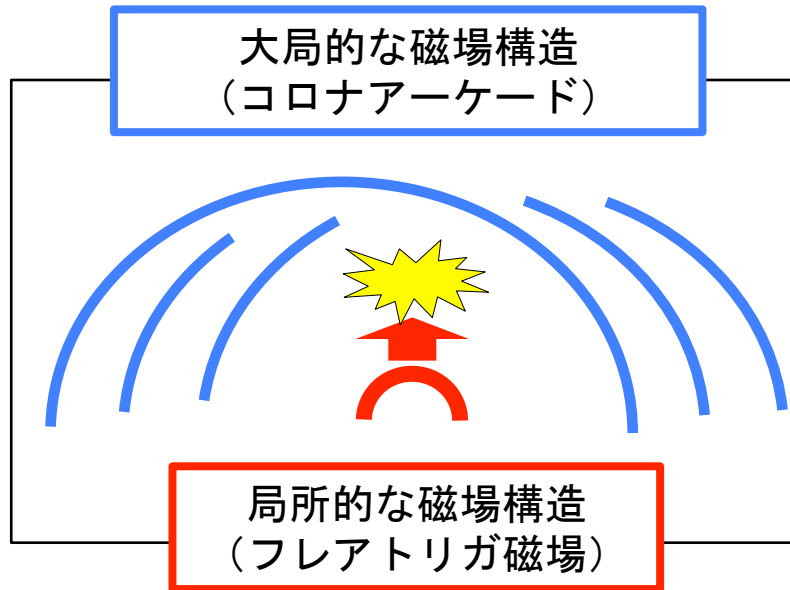


- 問題は「いつ・何が系を不安定化させるのか？」
- 不安定化させる要因（＝フレアトリガ）に関する研究は不十分
- 研究はあまり多くないらしい：see, e.g, Forbes (2000) and Schrijver (2009)

1. フレア理論

➤ フレアトリガ研究

- コロナアーケード中に**局所磁場構造**が出現→フレア発生
- 低層大気における**磁気リコネクション**によってフラックスロープが形成

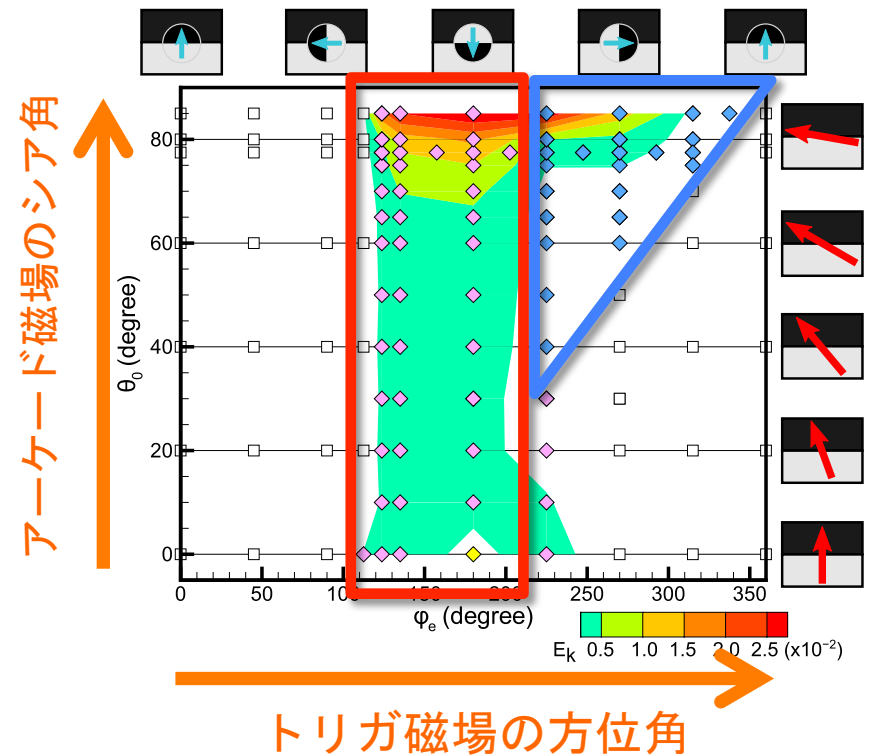
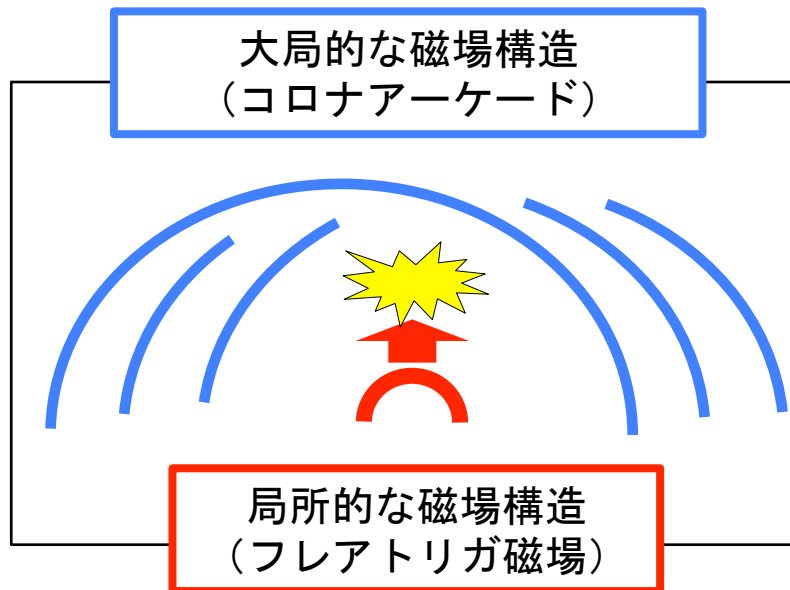


Kusano et al. (2012)

1. フレア理論

➤ フレアトリガ研究

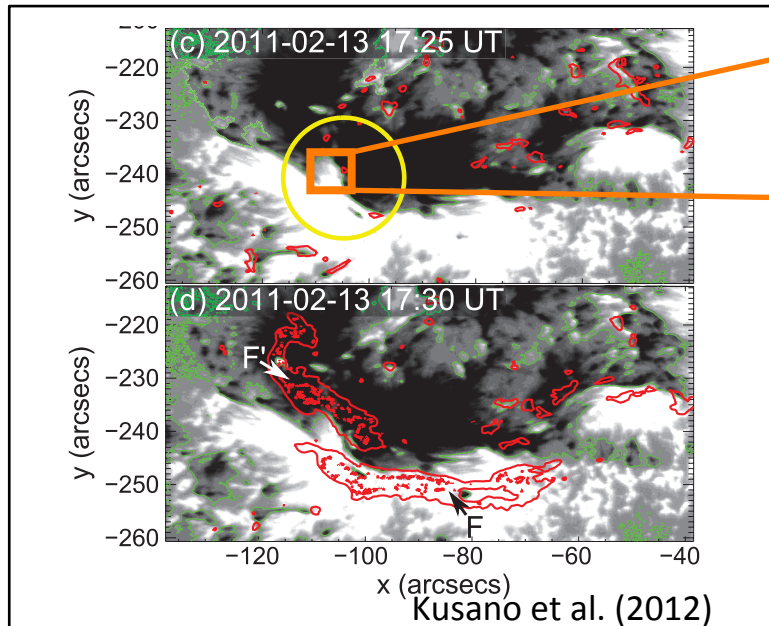
- コロナアーケード中に**局所磁場構造**が出現→フレア発生
- 低層大気における**磁気リコネクション**によってフラックスロープが形成
- トリガ磁場の**方位角**に依存



Kusano et al. (2012)

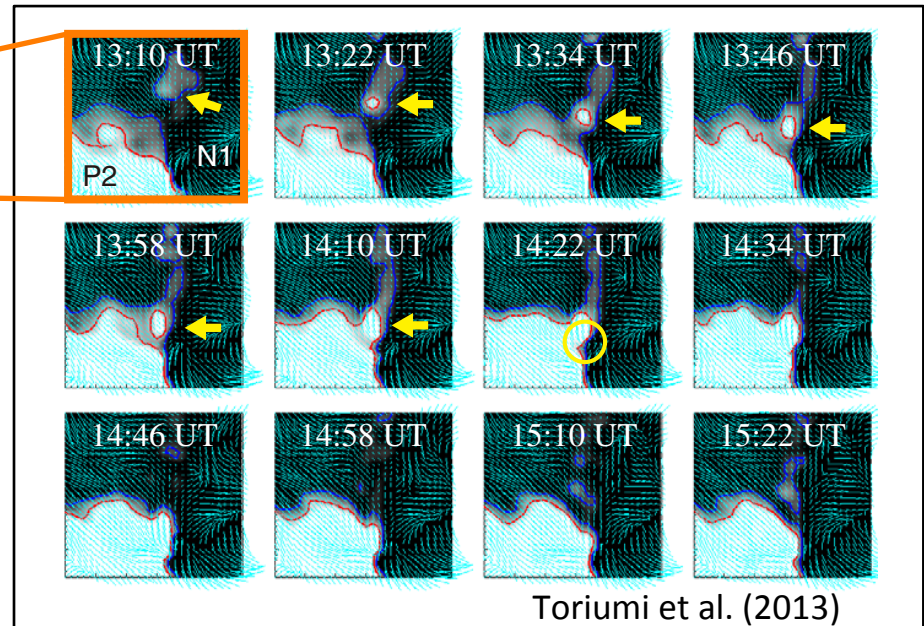
1. フレア理論

➤ フレアトリガ研究



➤ 観測との比較

- AR 11158 Mフレアにおけるトリガ磁場を「特定」
- トリガ磁場：5000 km程度



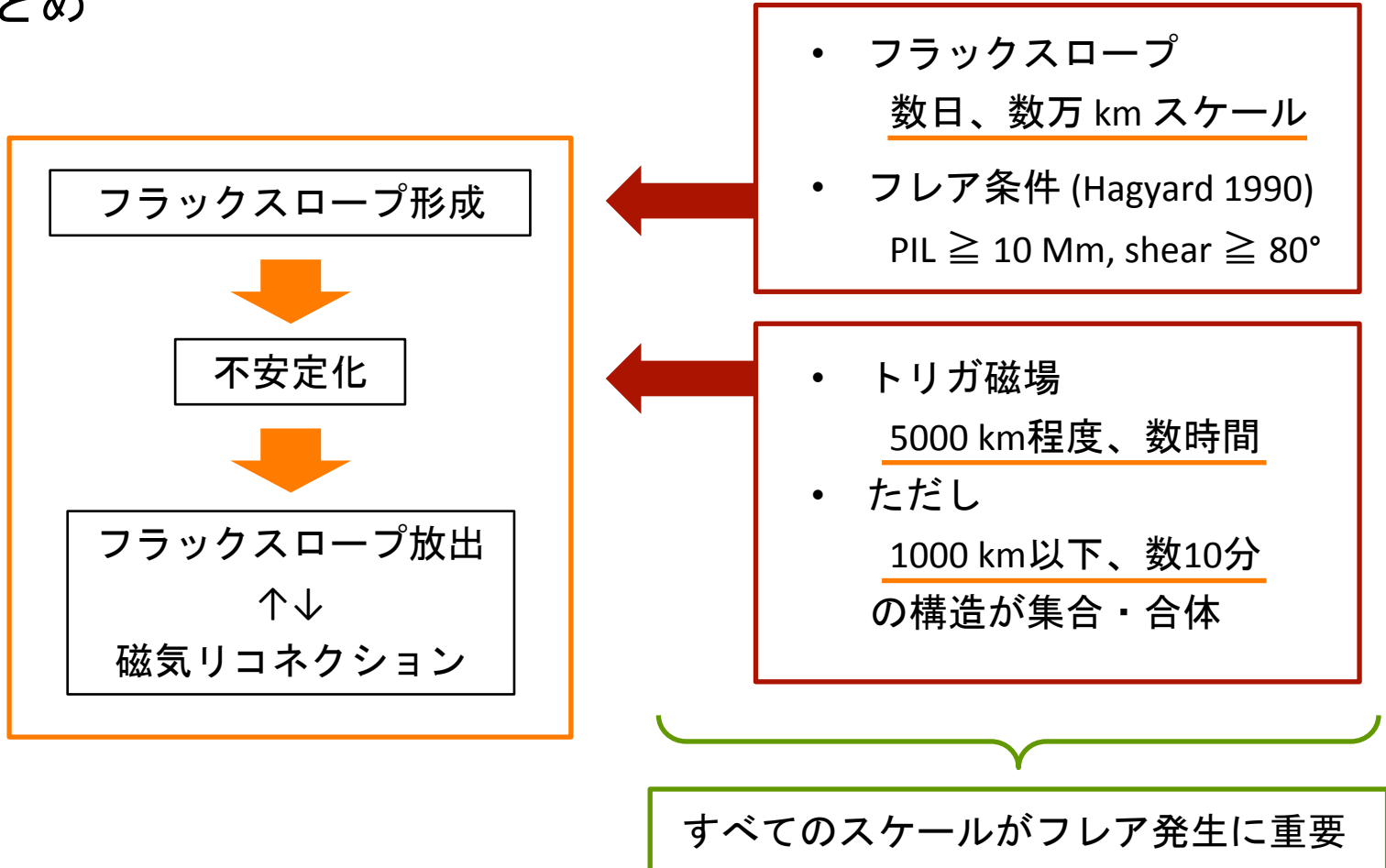
➤ AR 11158の詳細な観測

- コロナアーケード：数日・数万kmのスケール
- トリガ磁場：数10分・1000 km以下の要素が合体して形成

c.f. Bamba et al. (2013)

1. フレア理論

➤ まとめ



2.1. 取得データとその解釈

➤ RMHD計算・インバージョン

➤ RMHD計算は「必須」

➤ Bifrostコードの導入 or 国産モデル開発

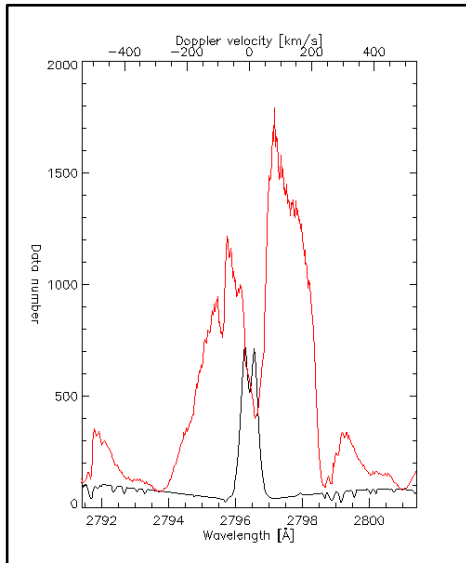
• 輸入が楽ではある

➤ 彩層スペクトルの複雑さ：IRISデータから

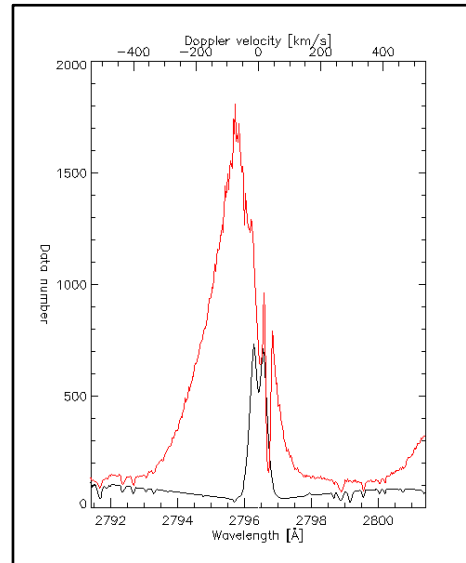
➤ 静穏領域はBifrostモデルと比較できそう

➤ 活動領域・リコネクション・フレアは再現困難か

• Bifrostでどの程度再現可能か？
• Bifrostを用いて、そもそもSolar-Cで彩層磁場等が観測可能か事前に調べる必要あり



• 通常のEBスペクトル (Mg II k)

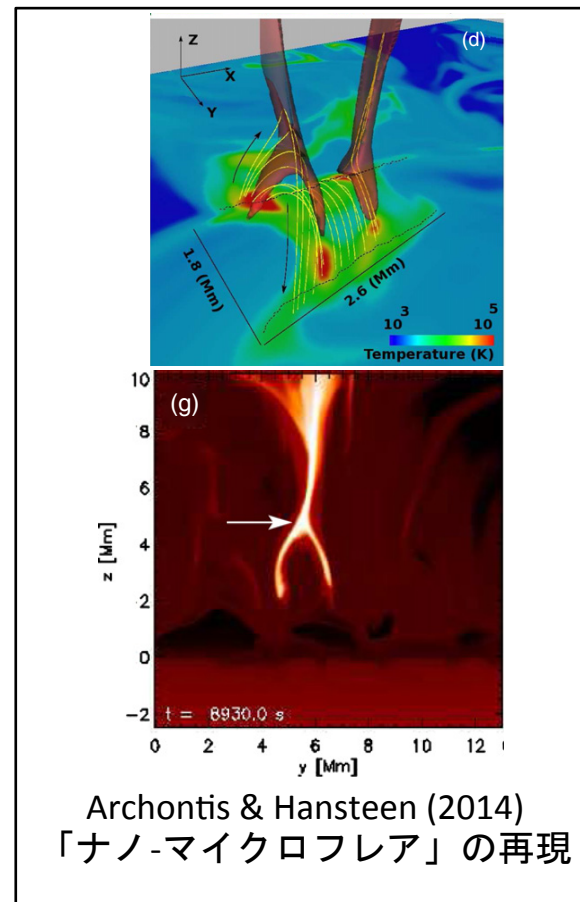
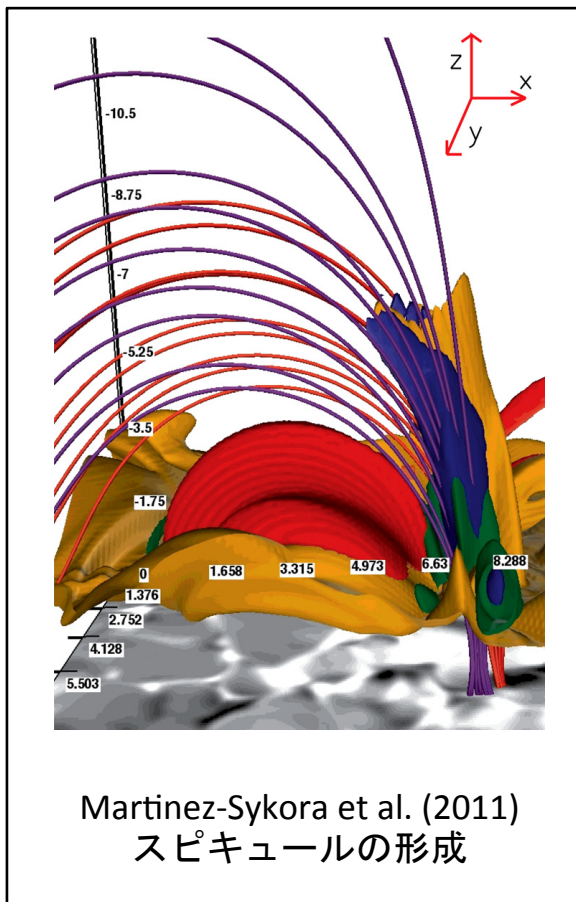


• “異常”なEBスペクトル
→ シングルピークなら $V_D = -100 \text{ km s}^{-1}$

2.1. 取得データとその解釈

➤ RMHD計算・インバージョン

➤ Bifrost計算の例：ダイナミックな現象の計算は少ない（難しい）



2.2. フレア研究における観測との連携

➤ 観測・運用との連携

➤ Solar-Cの制約：テレメトリとの勝負

1. Solar-Cの現行計画値
 - FoV : $180'' \times 180'' = 130 \text{ Mm} \times 130 \text{ Mm}$
 - Resolution : $0.1'' = 70 \text{ km}$
2. なるべく活動領域全体の発展を追いたい
3. トリガ観測としては分解能 $0.1''$ は悪くない？
4. ケーデンスも考慮する必要あり

→ 詳細な議論は伴場さん講演を参照

➤ 「1日前予報」の精度は現在とさほど変わらないのでは？

→ 「数時間前予報」なら精度は向上するかも

➤ トリガ的磁場はPIL周辺に多数存在

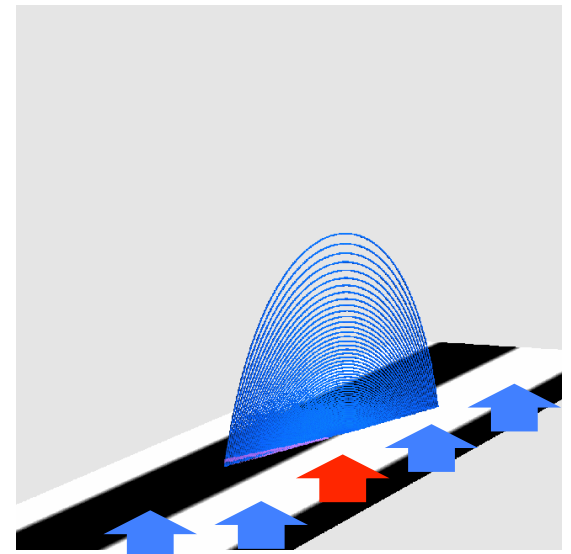
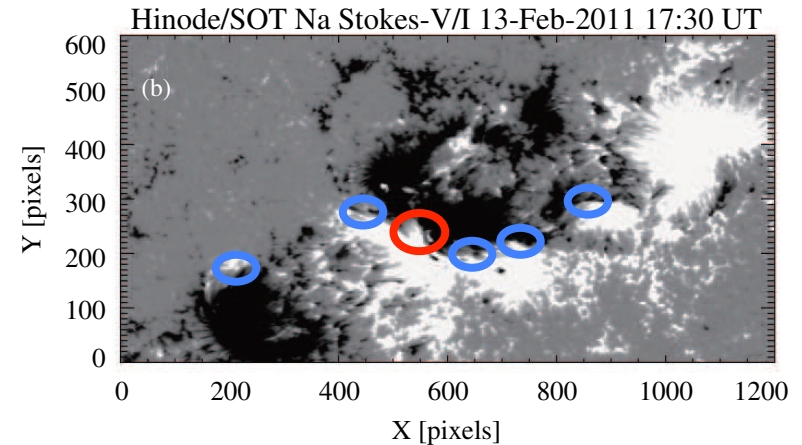
→ トリガの事前特定を可能にしておく必要性あり（次ページ）

2.2. フレア研究における観測との連携

- 課題：詳細なトリガ研究
 - 複数の「容疑者」？
 - 実際の活動領域には多数のフレアトリガ的な磁場構造が存在
 - 観測視野が狭いため、事前にある程度「容疑者の絞り込み」が必要
 - トリガリコネクションの発生高度？



- シミュレーションの改良
 - 複数トリガの導入
 - フルMHD下でのシミュレーション
 - “リアリスティック”モデル
- ひので観測の向上も必須



2.3. 成功基準とフレア予測の実践

➤ Solar-Cでのフレア研究に向けて

➤ 成功基準：何を目標とするか？

- フレア領域の光球・彩層磁場測定 ← (ミニマムサクセス)
- エネルギー蓄積～トリガ機構の物理解明 ← フルサクセス
- フレア発生時刻・場所の 事後 特定 ← フルサクセス
- フレア発生時刻・場所の 直前～同時 特定 ← エクストラサクセス
 - フレア数時間前の地上観測へのフィードバックを想定
- フレア発生時刻・場所の 事前 特定 ← エクストラサクセス
 - 1-2日前予報によるSolar-C運用へのフィードバックを想定
- 地球近傍への影響の 事前 予測 ← Solar-Cでは厳しいか
 - CME地球到達以前の「正確な」影響評価を想定

2.3. 成功基準とフレア予測の実践

➤ Solar-Cでのフレア予測

➤ やるべきか？

- 目指すべきではある
- 「フレア（直前・事前）予測」をエクストラサクセスとする場合、計画段階からそこに全軍投入して良いのか
 - 観測→予測→運用フィードバック は相応のコストがかかる
- 理論・観測研究の進展やSolar-C打ち上げ後の運用状況を見てから

➤ フレア補足率は向上するか？

- 現在の理論研究・観測研究や運用体制の改善でまだまだ出来るはず（希望）
- 「今できる研究」を進めるべき

➤ フレア予測の実現可能性？

- 正直、分からない
- フレア過程を完全に理解すれば予測・予報は実現するはず

3. まとめ

➤ 現在までの理解：フレア理論

- エネルギー蓄積：コロナアーケード・フラックスロープ形成
 - 数日、数万km スケールの現象
- トリガ過程：トリガ磁場発生
 - 数1000 km、数時間程度の構造
 - 1000 km以下、数10分スケールの微小磁場が関与している可能性あり

➤ Solar-Cのフレア研究

- ミニマムサクセス：フレア磁場の測定（彩層含む）
- フルサクセス：物理機構の解明
- エクストラサクセス：事前予報（数時間前）
 - 「予報」は物理を解明してから。物理を完全に解明すれば出来る

3. まとめ

➤ 課題

➤ RMHDコードとインバージョン

- RMHDはBifrost輸入が現実的か

➤ フレアトリガの事前特定

- 草野シミュレーションの改良
- ひのちによるフレア補足率の向上

➤ Solar-Cによるフレア観測の可能性

- Bifrostなどを活用し、

- 浮上磁場
- リコネクション
- フレア

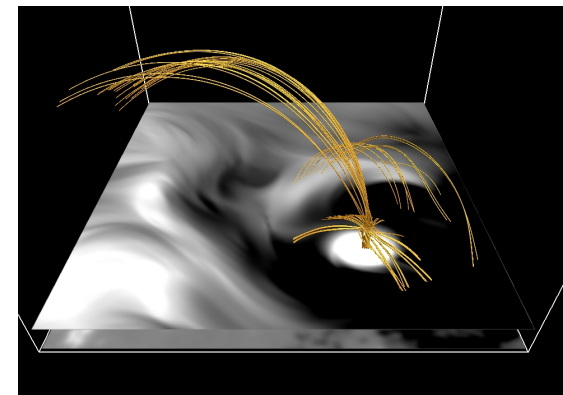
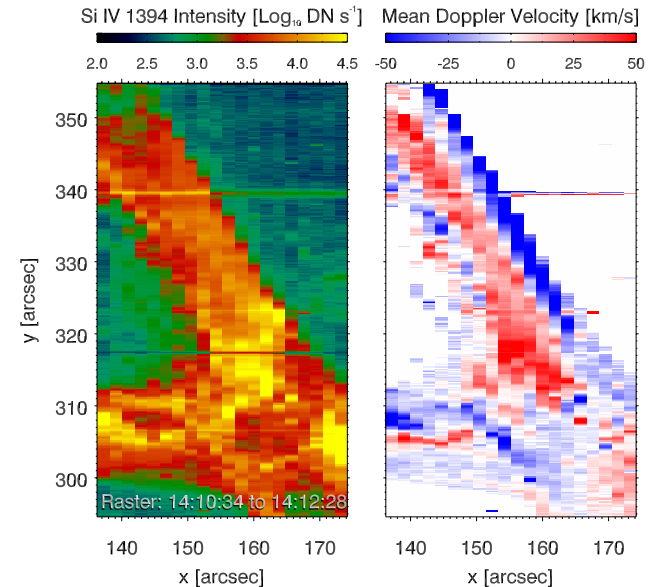
の彩層磁場等、観測可能性を検証



Thank you for your attention!

Appendix

- データ駆動型シミュレーション
 - シミュレーションの境界条件
 - 現状：光球の3次元磁場データを利用して上空の磁場を推定
 - Cheung et al. (in prep)：ジェットを生じた周囲の磁場環境を再現、IRIS観測と比較
 - 彩層観測のメリット
 - 光球磁場・彩層磁場観測から磁場勾配を計算 → 電流場を推定可能
 - 密度・エネルギーフラックスなども観測できればシミュレーションの精度を向上できる



(b) B_z at $z = 4$ Mm

Cheung et al. (2014, in prep)