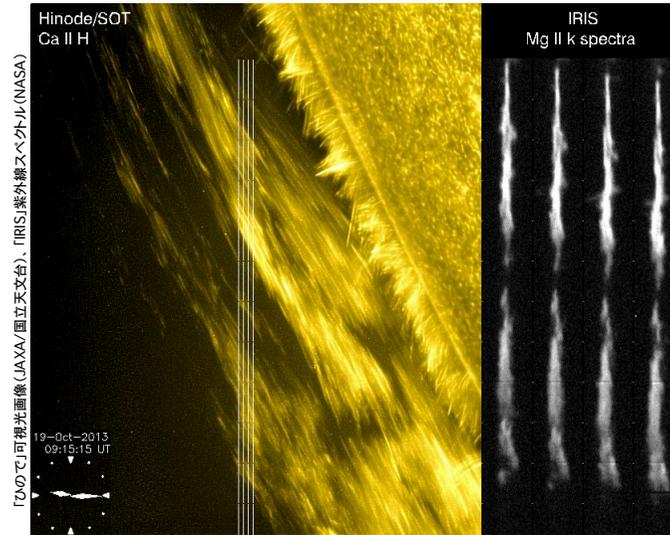


# 日米太陽観測衛星「ひので」「IRIS」の共演 ～ 太陽コロナ加熱メカニズムの観測的証拠を初めて捉えた～

動画



おかもとじょうてん

**岡本文典**

宇宙科学研究所 研究員  
(現 名古屋大学 研究員)

パトリック アントリン

**Patrick Antolin**

国立天文台 研究員

論文タイトル: プロミネンス中の波動による共鳴吸収とその加熱(1. 観測、2. 理論)

著者—論文1: 岡本文典, Patrick Antolin, Bart De Pontieu, Han Uitenbroek, Tom Van Doorselaere, 横山央明

—論文2: Patrick Antolin, 岡本文典, Bart De Pontieu, Han Uitenbroek, Tom Van Doorselaere, 横山央明

元となる論文は次の通り。

●“Resonant Absorption of Transverse Oscillations and Associated Heating in a Solar Prominence. I. Observational Aspects”

T. J. Okamoto, P. Antolin, B. De Pontieu, H. Uitenbroek, T. Van Doorselaere, T. Yokoyama 2015, Astrophysical Journal, 809, 71

●“Resonant Absorption of Transverse Oscillations and Associated Heating in a Solar Prominence. II. Numerical Aspects”

P. Antolin, T. J. Okamoto, B. De Pontieu, H. Uitenbroek, T. Van Doorselaere, T. Yokoyama 2015, Astrophysical Journal, 809, 72

著者の所属:

岡本文典・・・宇宙科学研究所(2015年4月より名古屋大学)

Patrick Antolin・・・国立天文台

Bart De Pontieu・・・ロッキードマーティン太陽天体物理学研究所

Han Uitenbroek・・・アメリカ国立太陽天文台

Tom Van Doorselaere・・・ルーベン大学

横山央明・・・東京大学

# 概要

- ・ 太陽コロナ加熱問題
- ・ 加熱における波動の重要性とその問題点
- ・ 「ひので」「IRIS」による波動の観測
- ・ 共鳴吸収による波動の熱化
- ・ 数値シミュレーションを用いた検証
- ・ コロナ加熱問題における本研究の位置付け

# コロナ加熱問題

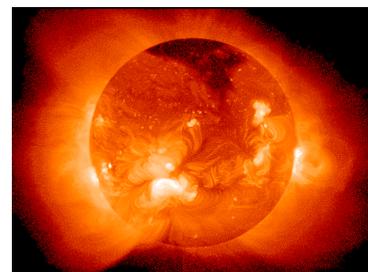
## 太陽大気コロナ

100万度もある

(1940年台から知られている)

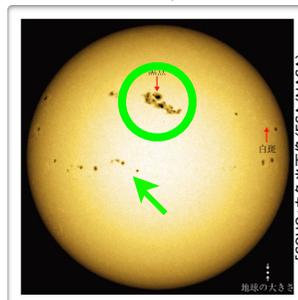
なぜ熱いかわからない

(しかし、磁場が絡んでいるのはわかる)



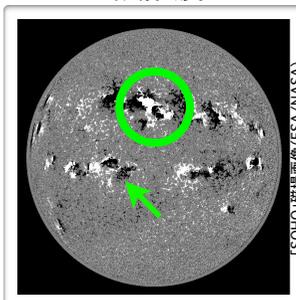
「ようこう」X線画像 (JAXA/国立天文台)

白色光



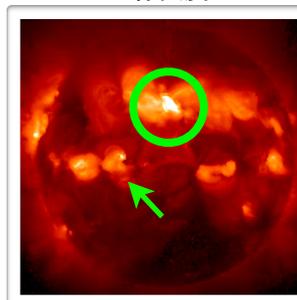
「SOHO」白色光画像 (ESA/NASA)

磁場強度



「SOHO」磁場画像 (ESA/NASA)

X線強度



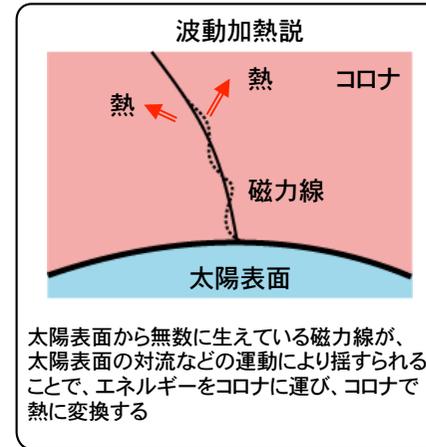
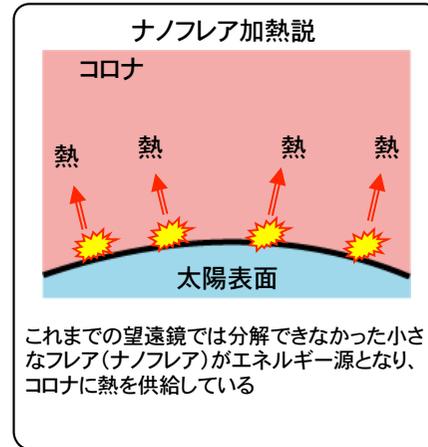
「ようこう」X線画像 (JAXA/国立天文台)

太陽表面は 6,000度ですが、その上空の大気(コロナ)は 100万度という高温です。通常ならコロナも 6,000度を超えることはありません。では、何がコロナを温めているのか。これが太陽物理学において長年謎とされているコロナ加熱問題です。これは他の天体にも共通する大きな問題です。

太陽コロナは一様ではなく、高温領域が局在化しています。特に、太陽表面の磁場が強い場所ではコロナも高温となっています。このことから、磁場が重要な役割を果たしており、磁場を介した加熱メカニズムがこれまで考えられてきました。

# コロナ加熱問題

磁場を介した加熱のアイデアは 2つ

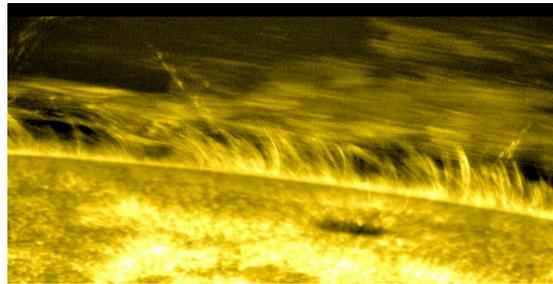


しかし、いずれも長い間観測にはかかりませんでした。

「ナノフレア加熱」「波動加熱」の2つが有力です。しかし、既存の観測装置ではナノフレアは小さすぎる、または感度不足で見えず、波動はその存在が疑われることになるほど検出されることなく数十年が過ぎました。

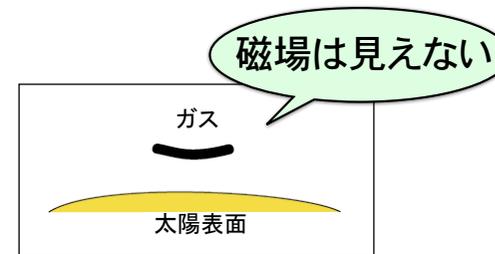
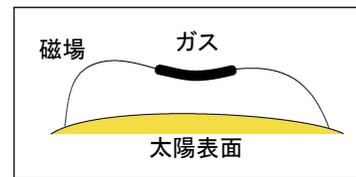
# 「ひので」が見つけた波動

動画



すじすじ構造 = 磁力線

「ひので」観測のプロミネンス

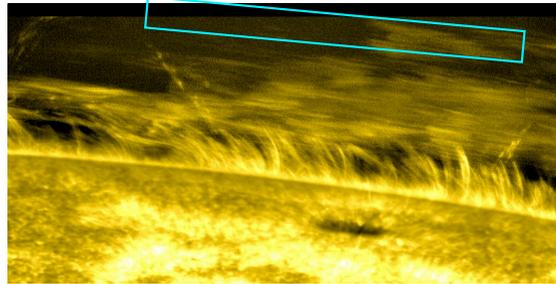


参考: 2007年12月「米科学誌 Science」等における「ひので」特集号の発行について

波動の発見に大きな功績を残したのが日本の太陽観測衛星「ひので」です。2006年の打ち上げ直後、筋状構造の集まりであるプロミネンスの観測から、これらの筋構造が振動している様子が観測されました。磁場とプラズマはくっついて動く性質があり(磁気凍結の原理)、プロミネンスの筋状構造は磁力線を表しています。

# 「ひので」が見つけた波動

動画



すじすじ構造 = 磁力線

動画



すじすじの上下方向の動き = 磁場の振動

→ 磁場を伝わる波 (アルヴェン波)

参考: 2007年12月「米科学誌 Science 等における「ひので」特集号の発行について

つまり、プロミネンスの振動は磁力線の振動であり、その原因はコロナ中の磁力線を伝播するアルヴェン波によるものであると結論づけました。また、観測された波動はコロナ加熱に十分なエネルギーを持っていることもわかりました。

# コロナ加熱問題と波動

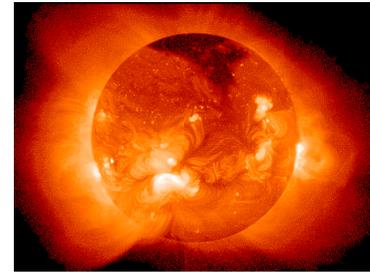
## 太陽大気コロナ

100万度もある

(1940年台から知られている)

なぜ熱いかわからない

(しかし、磁場が絡んでいるのはわかる)



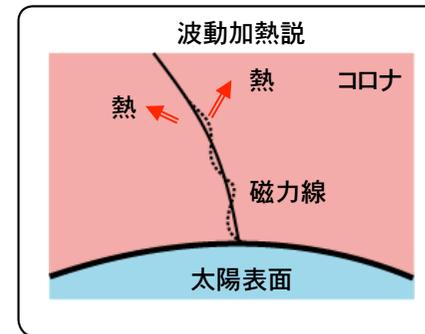
「ようこう」X線画像(JAXA/国立天文台)

波動エネルギー ⇨ 熱エネルギー

(アルヴェン波なら高い所までエネルギーを運べて都合が良い)

(そういう波が見つかった)

コロナ加熱問題は解決か!?



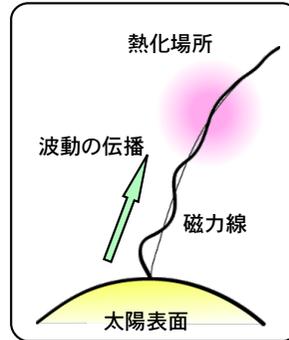
「ひので」の観測から、太陽大気には波動が満ち溢れていることが明らかとなり、波動によるコロナ加熱研究が盛んになりました。

# 波動の問題点

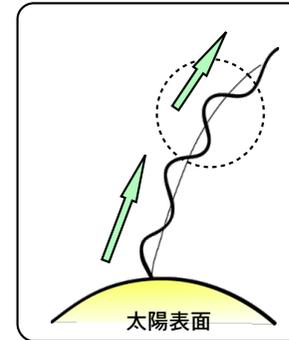
コロナ加熱問題は解決か!?

No!

熱化する場合



熱化しない場合



アルヴェン波は熱化しにくく、エネルギー変換の仕組みがナゾ

※熱化 = 散逸

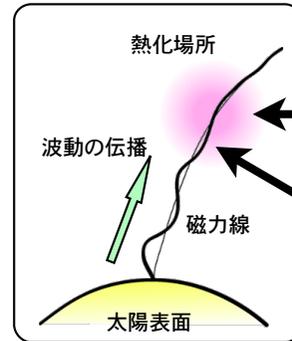
※アルヴェン波は横波のため、衝撃波などの散逸を伴いやすい波動に変わりにくい

しかし、観測されているアルヴェン波は熱化しにくいという問題があります。この波動は太陽表面近くで熱化しやすい他の波に比べて遠くまでエネルギーを運べますが、一方でコロナでエネルギーを落とさない可能性があり、加熱への寄与がどのようになされているのかわかっていません。

# 課題

熱化の現場を捉える

熱化する場合



熱化は本当に起こっているのか？

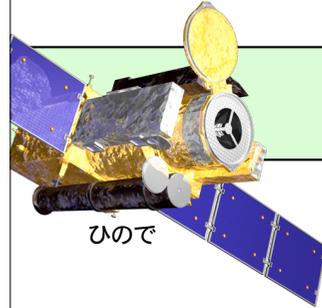
その時、波動の振る舞いに何か特徴が見られないか？

ひのけだけではこの課題に迫ることができません。  
そこで、新しく打ち上げられた太陽観測衛星 IRIS を用いて取り組みました。

波動の性質、つまり磁力線の振る舞いを精密に調べてこの問題に迫る必要があります。

アイリス  
**太陽観測衛星 IRIS**  
Interface Region Imaging Spectrograph

- ▶ NASA 小型衛星ミッション (SMEX)
- ▶ 2013年6月26日打ち上げ
- ▶ ひのでの観測を踏まえて提案・開発
- ▶ 紫外線分光観測 → 物理量の取得
- ▶ 温度感度の異なる撮像観測



ひので

(高空間分解能)  
● 2次元面運動

+

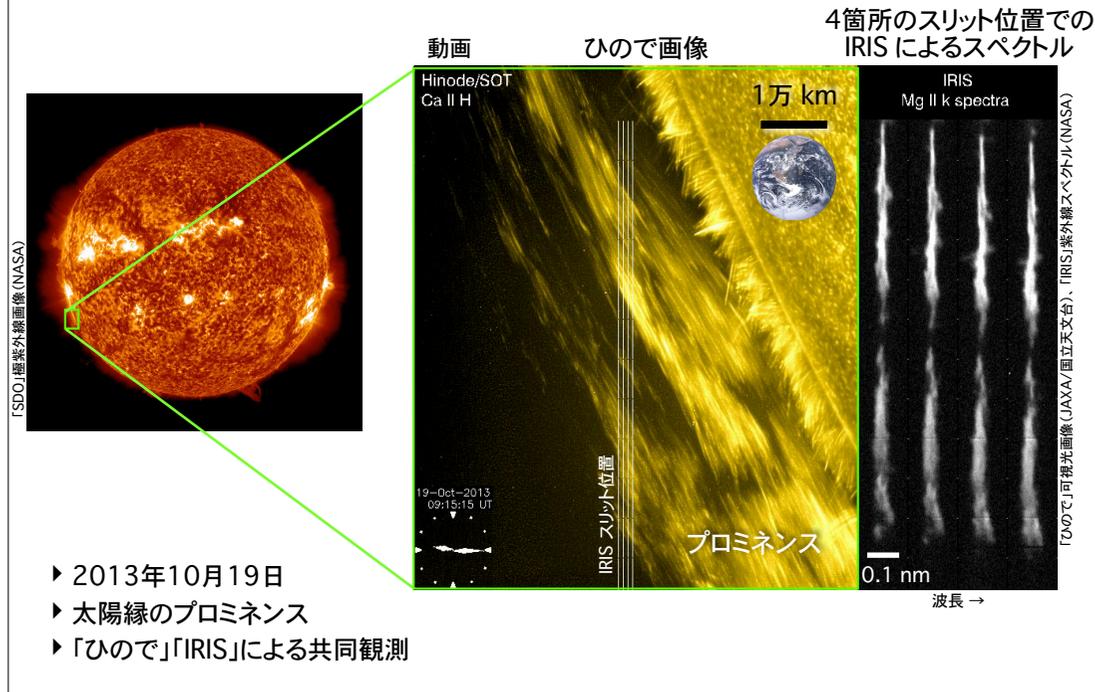
(高空間分解能)  
● 奥行き方向速度  
● 多温度観測

3次元的な動きを観測

熱化の現場を捉える

ひのでは世界最高の空間分解能で時系列データを取得できるため、めまぐるしく変化する構造や現象を追跡することができますが、その物理量を測ることができません。一方、IRIS はひのと同程度の空間分解能を持ち、激しく変化する構造を追跡した上で、物理量の取得を行います。「ひので」と「IRIS」を組み合わせることで、3次元的な運動を明らかにすることができます。この能力を以て、波動の振る舞いに迫ります。

# 観測領域

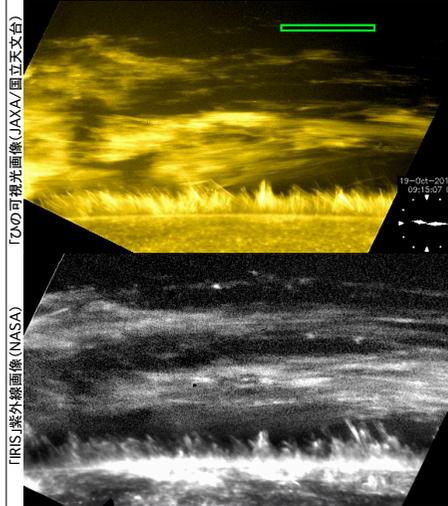


今回の研究で使用したデータは、「ひので」からは可視光望遠鏡 (SOT) のカルシウム線撮像画像、「IRIS」はシリコン線の撮像とマグネシウム線の分光データ (スペクトル) です。IRIS のスペクトルからは奥行方向の速度 (ドップラー速度) を測ることができます。0.1 nm は 100 km/s の速度に相当します。スペクトルは、スリットを当てた 1箇所 (縦線位置) においてのみ撮ることができます。ですので、4箇所撮るにはスリットを動かす必要があり、時間も 4倍かかります。プロミネンスは筋状構造の集まりで、振動しながら飛び回っていることがわかります。

# 温度変化

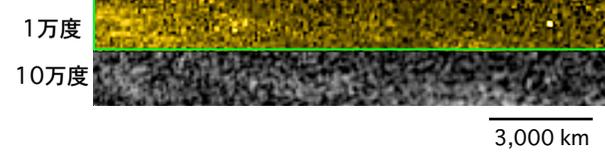
動画

ひので画像(カルシウム線 1万度)

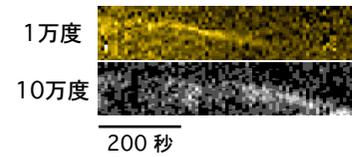


IRIS 画像(シリコン線 10万度)

動画 ↓



動く構造(上図の矢印)を追いかけて切り出し、横に並べたもの



低温(1万度)の構造が消えた後、高温(10万度)の構造が引き継ぐよう出現しています。つまり、構造が加熱されていることを示しています。

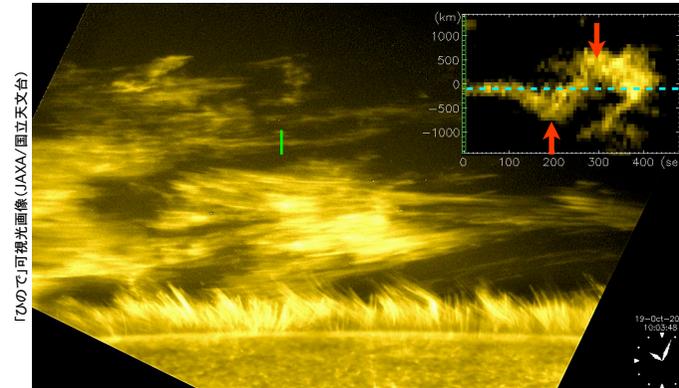
振動している筋状構造を追跡すると、低温(1万度)の構造が消えた後、高温(10万度)のものが出現する様子が捉えられました。プロミネンスにおいて、振動に伴う加熱が起こっていることが示唆されます。

# 微細構造の 3 次元的動き

まずはひのでの観測から 2 次元的な動きを確認

動画

緑色の線を横切るプロミネンスの動きに着目



空間-時間  
ダイアグラム

時間毎に緑線部分を切り  
出して、右に並べていく

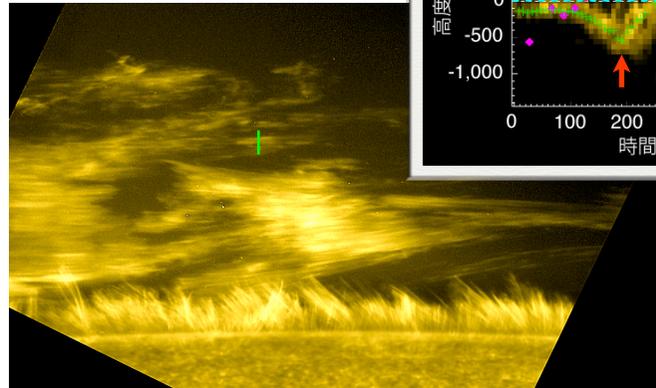
一度下がった後、上がる運動が見られます。  
過去の観測と同様、アルヴェン波による磁力線の振動を示しています。

1つの振動する微細構造の動きに着目し、詳細を調べました。「ひので」の観測からは、微細構造の上下振動がわかります。

# 微細構造の 3 次元的動き

次に、IRIS による奥行き方向速度を重ねます

ピンク色の点:  
向こうに動くとき正の値、手前に動くとき負の値



振動の最上点と最下点で速度が最大、中央位置で速度ゼロであることがわかりました。

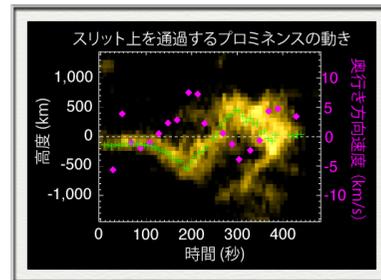
「IRIS」のスペクトルデータから、その場所での奥行き運動(ドップラー速度)を重ねたところ、振動の最上点と最下点で速度が最大、中央位置で速度ゼロであることがわかりました。

# 微細構造の 3 次元的動き

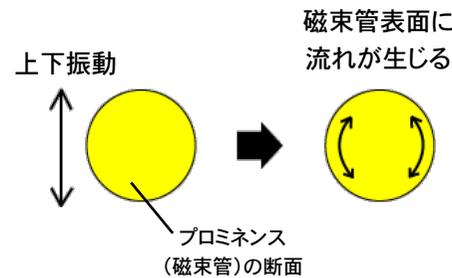
振動の最上点と最下点で速度が最大、中央位置で速度ゼロであることがわかりました。

⇔ 最上点と最下点で速度がゼロ、中央位置で速度最大 となるのが通常の振動

## 観測結果



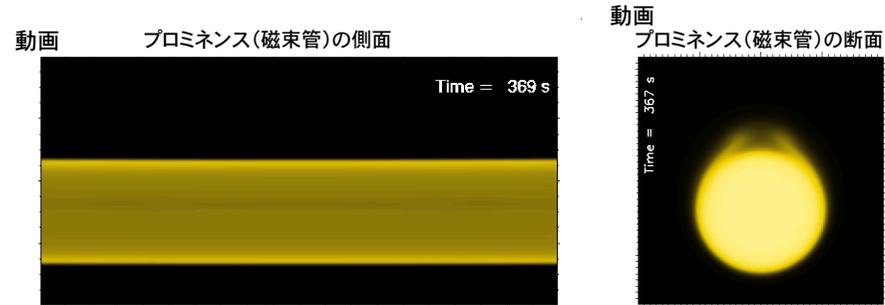
このパターンのずれに波動のナゾ解明の鍵があると考え、「共鳴吸収」によるプロミネンス表面の流れを考慮すれば説明できるのではないかと推測しました。



この振動のパターンは奇妙です。通常は、振動の最上点と最下点で速度がゼロ、振動の中心位置で最大速度となるはずですが。このことから、IRIS で観測された速度には単純ではない要素が含まれていることとなります。この事実に着目し、我々は「共鳴吸収」と呼ばれる物理過程の存在を推定しました。共鳴吸収は波動の熱化において重要な役割を果たすと理論的に提起されていますが、これまで観測的証拠が得られたことはありません。振動するガスにおいて共鳴吸収が起こると、その表面に流れが生じます。この研究では、その可能性について数値シミュレーションを用いて検証を行いました。

# 数値シミュレーション

国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ」を用いて検証しました。

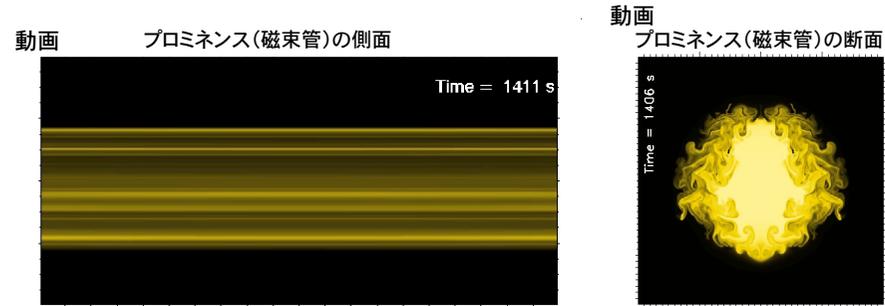


まず、振動の開始とともに表面に変化が現れます。  
共鳴吸収により、振動のエネルギーが表面の運動に変換されるためです。  
これにより、上下振動とは異なる速度を持つ領域が生成されます。

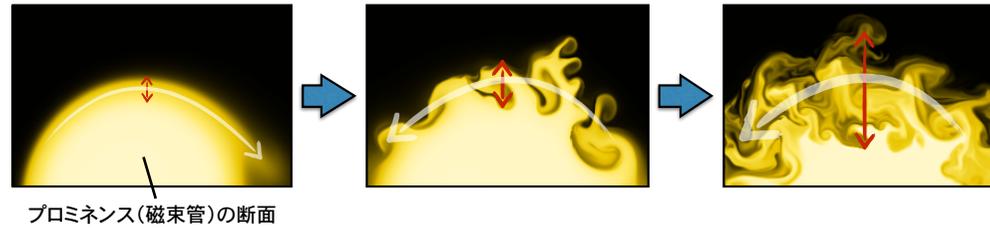
プロミネンスの微細構造(磁束管)を模し、上下に振動させる数値シミュレーションを実施しました。すると、磁束管の表面が振動による動きから次第にずれた運動をするようになります。これが共鳴吸収によるもので、磁束管の振動エネルギーが磁束管の表面付近の運動エネルギーに変換され、磁束管を取り巻くような動きが生じます。

# 数値シミュレーション

また、その表面の流れにより、乱流(無数の小さな渦)が生成されます。



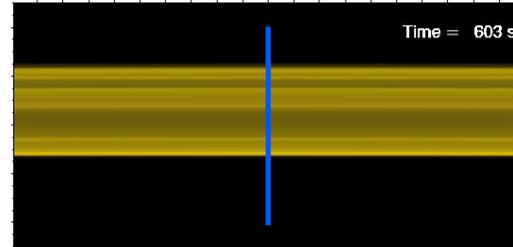
乱流(渦)は異なる速度を持つ領域を拡大させます



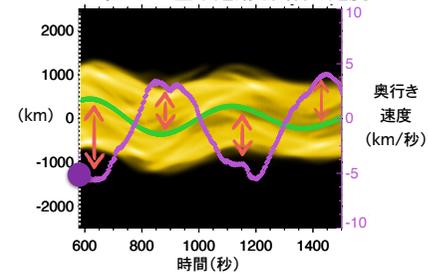
さらに詳しく見てみると、共鳴吸収による別の影響が見られます。共鳴吸収で作られた表面の運動は、さらに磁束管表面に乱流(渦)を生み出します。この渦が磁束管表面を大きく変形させ、元々は局所的であった共鳴吸収の影響領域を大きく広げることになります。

# 3次元的動き

動画 プロミネンス(磁束管)の側面

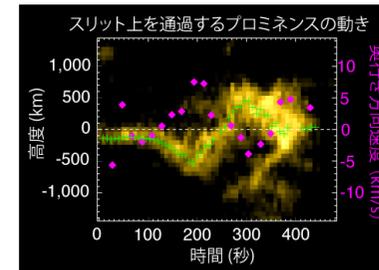


数値シミュレーションから再現した  
プロミネンスの上下運動と奥行き速度



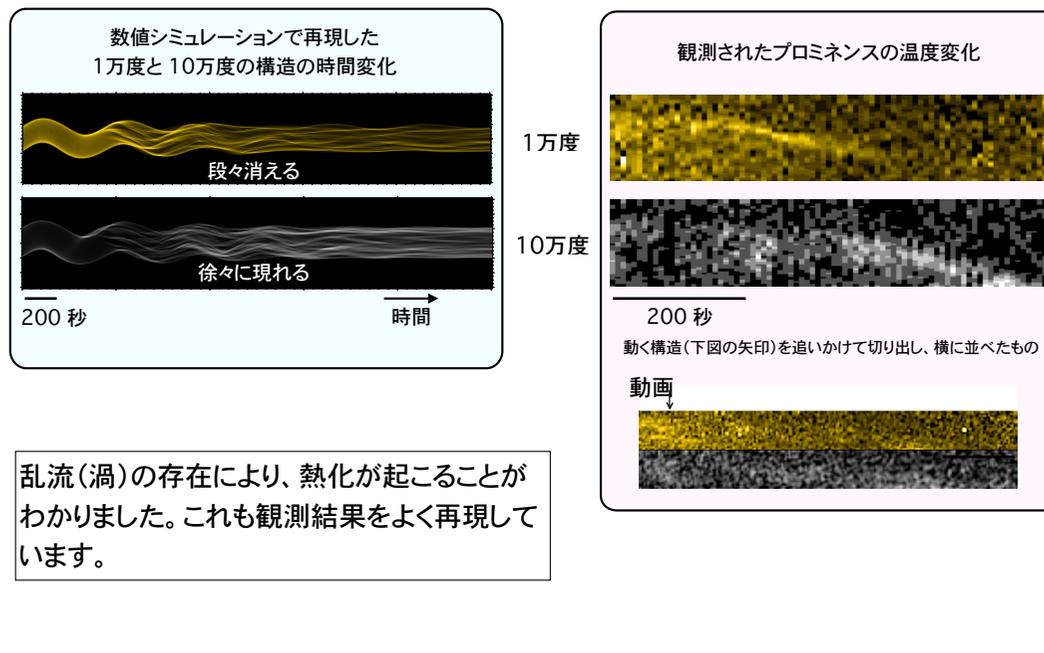
観測と同様の図を作ってみると、  
ずれのパターンは観測結果と非常に  
良く一致することがわかります。

観測結果



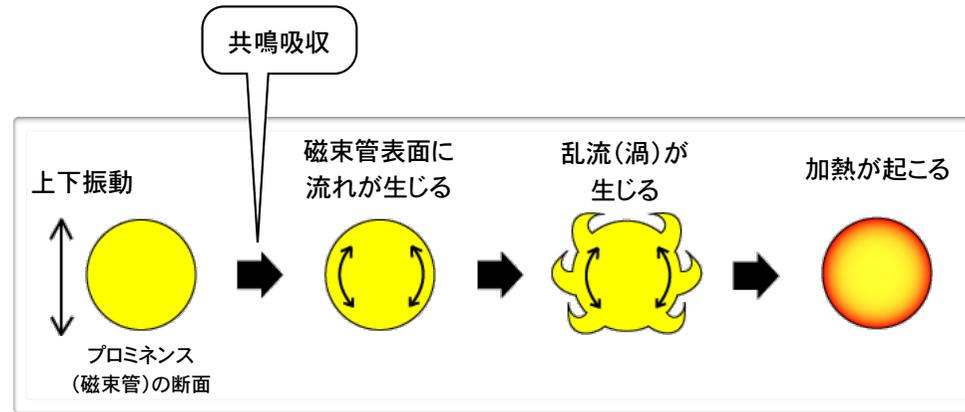
影響範囲が広がった結果、特異な運動を持つ領域が IRIS の観測に捉えられるくらいになり、今回の観測結果につながったと考えています。シミュレーション結果から、観測と同様の図(空間-時間ダイアグラム)を作ってみると、上下振動と奥行き速度の関係が再現されていることがわかりました。

# 振動に伴う加熱について



また、数値シミュレーションの結果、この運動に伴い加熱も再現されていることが示されました。磁束管表面の乱流(渦)の形成により、微細な電流層が発生し、そこで磁場のエネルギーが熱に変わります。

# 解釈



観測と数値シミュレーションの融合研究から、共鳴吸収に伴い、プロミネンス表面に流れができ、さらに乱流(渦)が生成され、乱流の存在により加熱が起きるといった一連の過程が明らかになりました。

以上をまとめると、波動に伴うプロミネンス(磁束管)の振動が、共鳴吸収を経て磁束管表面の運動を励起します。この運動が今度は磁束管表面に乱流(渦)を形成し、その乱流内において加熱が起こります。これは観測された現象を上手く説明しており、これが共鳴吸収によるものであると結論づけました。波動の熱化(散逸)過程を観測で示したのは初めてのことです。

# まとめ

「ひので」及び「IRIS」による観測から、コロナを伝播する波動の熱化に伴う現象を検出した。

数値シミュレーションとの比較により、波動の散逸過程の1つ、共鳴吸収とそれに伴う乱流によるものであると結論付けた。

熱化過程の観測的証拠を得たことは、コロナ加熱問題の解明へつながる重要な成果である。



この研究は、以下の科研費のサポートを受けています。

「太陽彩層を紐解く:スペース観測で迫るプラズマ運動と磁場構造」  
(岡本文典 / 若手研究 B / 25800120)

「太陽コロナ・彩層加熱現象に迫る — ひので・IRIS・CLASP から  
SOLAR-C へ」  
(常田佐久 / 基盤研究 S / 25220703)

本研究には以下の研究機関が関わっています。

