

太陽フレアの振動の起源

—振動の物理とその重要性



高 棹 真 介

〈名古屋大学理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻Ta研 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: takasao.shinsuke@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

太陽系最大の爆発現象である太陽フレアは、しばしばその光度曲線に準周期的な時間変動を見ることが知られている。それらの変動周期から直接測定が困難なコロナの物理量を引き出せるのではないかと理論・観測の両面から研究されてきた。太陽物理で培われたフレア領域の振動に関する知見は恒星フレアにも応用され、空間分解できない恒星の磁気活動性を探る強力な手段として認識されつつある。本稿では、太陽フレアと過去のフレア領域の振動モデルを概観し、筆者らの高解像度の磁気流体シミュレーションによる研究成果を紹介する。

1. はじめに

太陽は詳細な構造を見せてくれるため、地上望遠鏡や宇宙望遠鏡の鮮明な画像に驚きを覚えた方は少なくないのではないと思う。筆者もその一人であり、主にシミュレーションを用いた理論的研究をする一方で、そのような素晴らしい観測データを利用した観測的研究も行っている¹⁾。また太陽は磁気流体現象の宝庫であり、綺麗な画像や動画で実例まで提供してくれる磁気流体現象の「教科書」的存在である。本稿のテーマは太陽活動の花形的存在の一つである太陽フレアであり、さまざまな磁気流体過程が詰まった非常に興味深い現象である。太陽フレアと似た爆発現象はほかの恒星やコンパクト天体などで普遍的に見られる²⁾。そこに注目して、太陽フレアで学んだことをもとに他の天体のことをもっとよく知ることができれば面白い、というのが筆者の研究モチベーションの一つである。この面白さを本稿で皆さんにお伝えできれば幸いである。

2. 太陽フレアとは

今から150年ほど前にキャリントンが見つけた太陽面爆発、それが太陽フレアである。太陽フレアを一言でいえば「コロナにおける超高温（数千万度）プラズマ生成を伴う爆発現象³⁾」である。フレアの際は電波からガンマ線に至る幅広い波長の増光が見られ、特にH α 線や軟X線では数万km四方の面積が突発的に増光する様子がわかる。フレアのエネルギー源は黒点上空に蓄えられた磁気エネルギーであり、 10^{29-32} ergもの莫大な磁気エネルギーが数分から数時間で解放される。

太陽フレアのエネルギー解放は磁気リコネクションという過程で引き起こされていることが知られている。磁気リコネクションとは、磁力線が磁気拡散によってつなぎ変わってトポロジーが変わる現象を指す。磁力線にはゴムひものような張力が働くため、つなぎ変えが起きると磁力線上のプラズマは一気に加速される。この高速流はリコネクションアウトフローと呼ばれ、コロナ中では超音速ジェットになる。そのためアウトフローがどこかに衝突すると衝撃波が形成され運動エネルギー

ギーの熱化が起きる。さらに衝撃波などでは高エネルギー粒子の加速が起きる場合がある。このようにして、磁気リコネクションが起きると磁場のエネルギーがプラズマの運動・熱エネルギー、さらには非熱的粒子のエネルギーへと転換されていく。

図1左は磁気リコネクションを考慮した太陽フレアの標準モデルとして知られるCSHKPモデルである。この名前はモデル構築に重要な仕事をした人々(Carmichael, Sturrock, Hirayama, Kopp and Pneuman)の頭文字からきている。いろいろ大事なポイントがあるが、ここでは特に磁気リコネクションによるエネルギー解放の結果として高温の軟X線ループが形成されることに注目していただきたい。右図はより詳細なフレア領域の構造を表している。反平行成分をもつ磁場の間で磁気リコネクションが起きた結果、アウトフローや衝撃波が形成されている。また、フレアで解放されたエネルギーの一部は熱伝導や高エネルギー電子によって磁力線に沿って足元の彩層に運ばれる。すると彩層は急激に加熱され(そのためH α が増光)、彩層プラズマはコロナに向かって急膨張する。この噴出流はよく「彩層蒸発流」と呼ばれる。彩層蒸発流はフレアループのガス密度を上

げ、X線強度の増加につながっていく。

3. フレア領域の衝撃波

本稿では衝撃波が重要なキーワードとなるのでここで少し衝撃波について述べておく(図1右参照)。磁気リコネクションは超音速のプラズマ流を生じるので容易に衝撃波を作る。さらに彩層蒸発流の速度は音速程度になるので、これもまた衝撃波を形成しやすい。このため、フレアループ内やその周りには衝撃波が満ち満ちていることが予想されるのである。衝撃波はフレアループの密度構造に大きな影響を与え、さらには粒子加速にもかかわっている可能性があるなど、フレアにおいて重要な役割を担う。

フレアには軟X線フレアループの上空に非熱的電子起源の硬X線源を示すものがある。これはフレアループの上空(硬X線源の位置、あるいはそれより上空)で電子加速が起きている証拠だと理解されているが、いまだその物理機構は未解決問題として残っている。非熱的電子のエネルギーは典型的に10 keV-1 MeVである。フレアループ上空には図1右に示しているようにリコネクションアウトフローが下に降り積もった磁力線ループと衝突するときに生じる衝撃波(終端衝撃波と言わ

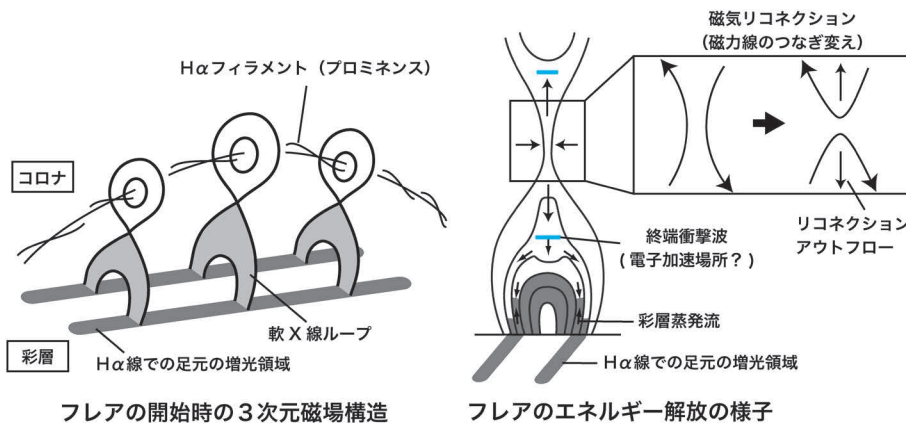


図1 フレアの標準モデル(CSHKPモデル)の概要。実線は磁力線、青線は衝撃波面を表す。左図のH α フィラメント(プロミネンス)はフレアの際に噴出して惑星間空間に出ることがある。そのようなガス塊の噴出はコロナ質量放出と呼ばれ、地球にも大きな影響を及ぼすことがある。

れる)があると考えられているが、近年の観測で
 どうやらその終端衝撃波がありそうな場所で電子
 加速が起きているという証拠が出てきた⁴⁾。

4. フレア領域の振動

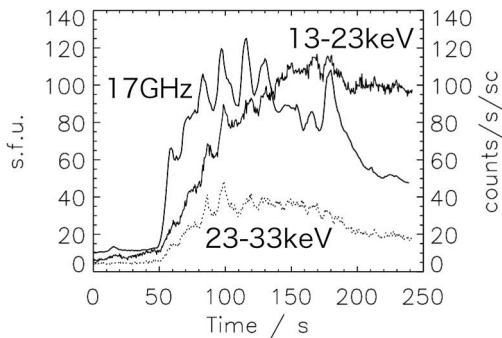
フレアは初期が最もエネルギー解放が激しい
 が、非熱的電子起源の放射強度が激しさを指標と
 なっている。ここからはその非熱的放射強度の時
 間変動について見てみよう。図2上はフレアの非
 熱的電子起源の光度曲線を表している。多くのフ
 レアは準周期的な時間変動をもつ光度曲線を示す
 ことが知られているが、図にあるように特に非熱

的電子起源の放射で顕著である。周期は秒以下か
 ら100秒程度までと幅広いが、本稿では磁気流体
 的スケールの現象にかかわっていると考えられて
 いる1秒以上の周期変動に注目しよう。

フレアは光度曲線以外にも振動的振る舞い
 を見せる。近年の高感度撮像観測により、非常にか
 ずかなシグナルだがフレア領域から準周期的に
 圧縮波動がコロナに放射されている様子が捉えら
 れた^{6),7)}。この波動(以下、コロナ波動)の周期
 は数十-300秒程度である⁸⁾。観測例が少なくわ
 かっていない点が多いが、非熱的放射の時間変動
 と関係しているイベントも報告されている。

このようなフレアが見せる準周期的な光度曲線
 の変動やコロナ波動は、フレア領域に周期的な擾
 乱源があることを示唆している。本稿ではこれら
 フレアの振動的振る舞いをまとめて「フレアの振
 動現象」と呼ぶことにする。

フレアの振動現象の物理はどう重要なのであ
 ろうか。一つは、振動周期などから直接測定が困難
 なコロナの物理量を推定する強力なツールを提供
 してくれる可能性がある点である。例として、フ
 レアによってフレアループ内に音波の定在波が励
 起されて、その定在波が光度曲線を準周期的に変
 化させている状況を考えてみよう。ループの両足
 とてっぺんに節をもつような振動モードを考えると、
 定在波の波長はループ長 L と一致するので周期 P は
 $P=L/C_s \propto LT^{-1/2}$ と書ける。ここで C_s は音
 速、 T は温度を表す。周期は光度曲線から、温度
 はX線観測などから求めることができるので、も
 しフレアを空間分解できなくともループ長 L が推
 定できる。実際にこのような方法は空間分解でき
 ない恒星フレアの空間サイズを推定するのに利用
 されており⁹⁾、多くの恒星で星半径程度の大フレ
 アが起きているという示唆が得られている。もう
 一つの重要な点は、フレアの振動現象はいまだ謎
 の多い粒子加速問題に新たなヒントを与える可能
 性をもつことだ。フレア領域の中で振動の起きる
 場所が特定されれば、それだけ粒子加速場所に制



極端紫外線(171Å)画像 171Åの強度の時間変動分

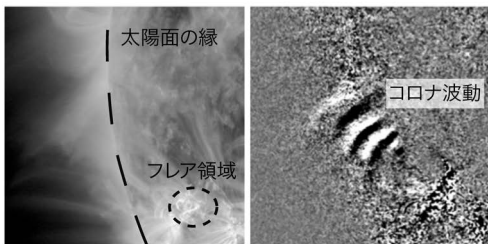


図2 上図: フレアの非熱的電子由来の光度曲線の
 例⁵⁾。太線は野辺山電波ヘリオグラフでとられ
 た17 GHz, 細線と点線はそれぞれ「ようこう」
 がとった13-23 keV, 23-33 keVである。s.f.u.は
 電波放射強度 (1 s.f.u.=10⁴ Jy), counts/s/scは
 サブコリメータ・1秒あたりのX線光子カウ
 ント数を表す。下図: 周期的に放射されるコロナ
 波動の例⁶⁾。171 Åの時間変動分で白い場所と
 黒い場所は、それぞれ前の時刻に比べて明る
 さが増加した場所と減少した場所を表している。
 明るさの変動は密度の変動に由来している。

限をつけることが可能になる。

われわれのフレアの振動現象に関する研究はひょうたんから駒のような形で始まった。筆者は別の研究で行き詰まっていたときに、「太陽フレアはよく研究されてきているし、新しい発見はないかもしれないが自分の勉強のためにちょっとシミュレーションしてみよう」という軽い気持ちで太陽フレアのシミュレーションを始めた。するとすぐに振動が起きていることを見つけた。そこで過去の研究を調べてみると太陽フレアの要となるリコネクションや熱伝導の物理を考慮していないものばかりであったため、シミュレーションの考察を深めることにした。正直なところ、筆者がフレアの計算を始めた当初は「フレアのような爆発現象で振動が現れるのは当然で、すぐ答えはわかるだろうからあまり面白味はないだろう」と思っていた。しかし、結果は予想に反しておりシミュレーション結果から実に多くのことを学ぶことができたのである。本稿ではその一部を紹介したい。

5. 無数の衝撃波とフレア領域の振動源の発見

過去の横山氏と柴田氏の先駆的な研究¹⁰⁾との比較もあって、シミュレーションの設定は非常に単純化した。太陽大気を模した低温高密度な彩層と高温低密度なコロナを作り、そこにまっすぐな反平行成分をもつフォースフリー磁場を置いた。電流シート中に電気抵抗を局所的に置くことで磁気リコネクションを駆動してフレアを起こし、その時間発展を追った。基礎方程式は2次元抵抗性磁気流体方程式であり、磁力線に沿った熱伝導も含まれている。過去の研究との主な違いは、本研究のほうが高解像度なスキームを使用しており^{11), 12)}、より細かい構造まで見えている点である。

図3がシミュレーションの結果のスナップショットである。上が密度分布、下が密度分布の時間変動分を表している。下図で明るいところが

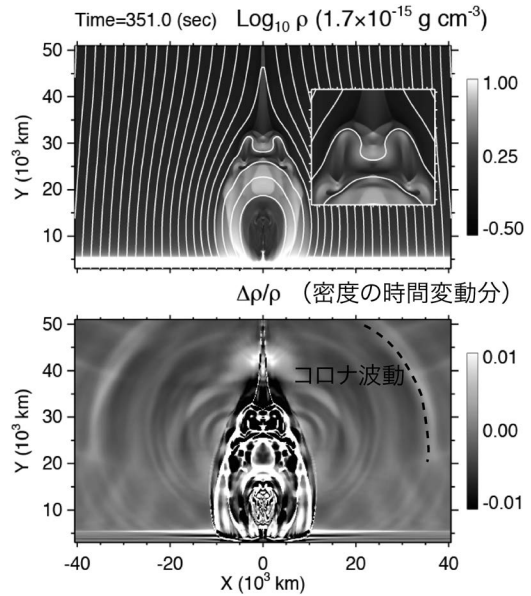


図3 太陽フレアのシミュレーション結果の密度分布(上)と密度の時間変動分(下)。実線は磁力線を表す。彩層蒸発流で満たされたループの上空(ループトップ上空)の拡大図も載せている。この狭い領域に無数の衝撃波が形成されている。コロナ波動の一つを点線で示している。X, Yはそれぞれ水平方向、鉛直方向の座標を表す。

前の時刻に比べて密度が増加している領域である。密度が不連続になっている場所が衝撃波であるが、上図から直ちにわかることはフレアは衝撃波で満ち満ちているということだ。さらに、下図ではフレアループからコロナ波動が繰り返し放射されている様子も見えている。ただ過去の研究よりも解像度の高い計算をただけで、近年の観測で見つかったコロナ波動と類似の現象が再現できたわけである。

無数の衝撃波を見つけたこと以外は、概ね筆者が予想したとおりの(面白みの少ない)結果に思える。しかし、実際は予想外のことが起きていた。筆者は最初、フレアの振動現象はシンプルにフレアループ全体がポヨンポヨンと揺れて生じていると思っていた。だが、そのような証拠はこの計算では見つからなかった。ループ内に他の定在

波が立ってフレアの振動現象を起こしている様子も見られない。ではどこで振動が起きているのであろうか？ 詳しく見てみると、実はコロナ波動の波源は何と軟X線フレアループに対応するループの上空（以下、ループトップ上空）に位置する、終端衝撃波が形成された非常に小さい領域だったのである（図3上の拡大図）。そこで、この小さい領域を詳しく見てみることにした。

終端衝撃波の領域を拡大したものを図4上に示した。これまで終端衝撃波はあまり時間変動しない1枚の衝撃波だと思われていた（図4左下）。しかし実際のシミュレーション結果を見ると、ループトップ上空では磁場が凹んで2本の腕をもつような形をとっており、その腕の間にアウトフローの方向に対して斜めの衝撃波が複数立っていることがわかる。過去の描像と比べるとその違いは明らかであろう。さらに、衝撃波構造が激しく

時間変化していることもわかった。この動的な構造は、高解像度の計算を行って初めて見えてきたわけである。

なぜ斜め衝撃波が立ったのだろうか？ このことを理解するために、まず磁場のない流体力学で考えてみよう。図5に流体実験の図を載せているが、ここには高速ジェット流をより高圧な流体の中に突入させた実験結果が示されている。ジェット流は高圧流体の中を圧縮を受けながら進まざるをえないため、ジェットは細く絞られる。このとき、ジェットと周囲のガスの圧力は不連続になっているのでジェットの絞り込みは衝撃波によって引き起こされることになる。これがこの流体実験における斜め衝撃波の原因である。

実は、全く同じ状況がフレアでも実現されているのである（図5下参照）。ループトップ上空で

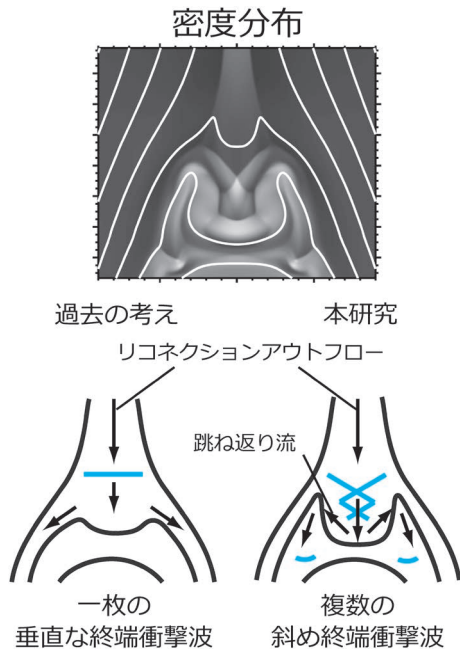


図4 上：ループトップ上空の密度構造。線は磁力線を表す。下：過去のループトップ上空の描像と本研究で得られた新しい描像の比較。青線は衝撃波を表す。

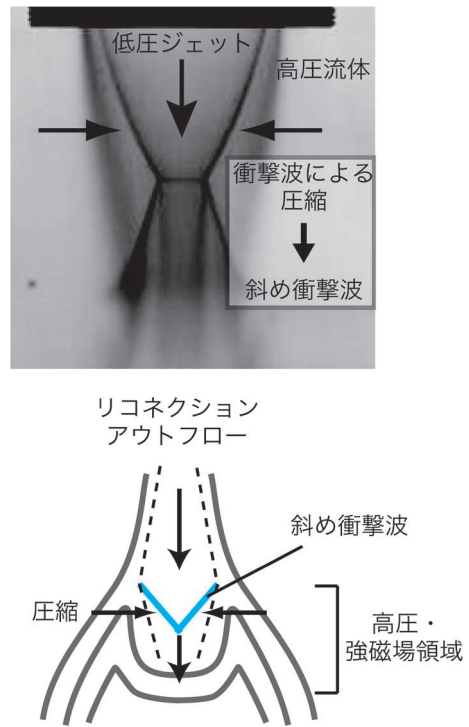


図5 上：低圧ジェットを高圧ガスに突入させる流体実験の結果（<http://www.aerospaceweb.org/question/propulsion/q0220.shtml>）。下：シミュレーションの斜め衝撃波形成過程の概念図。

は、アウトフローが減速するため運動エネルギーの熱化によりガス圧が高くなる。さらにそこには磁力線も降り積もっていくため磁気圧も上がる。そのため、アウトフロージェットに対してループトップ上空の全圧（ガス圧+磁気圧）は必ず大きくなる。したがってアウトフローは衝撃波によって絞り込まれるわけである。この斜め衝撃波は反射を通じて複数の衝撃波を作っていく。これが複数の衝撃波の原因である。ここで見た斜め衝撃波の基本物理は、実はロケットエンジンや活動銀河核から出る相対論的ジェットなど幅広い分野においても議論されているようなものである。

なぜフレアの振動現象の話をするのに斜め衝撃波について少し詳しく説明したかという点、筆者が衝撃波好きであるということもあるが、衝撃波の構造が振動の駆動に重要であったからである。

6. 磁気“音叉”による振動の発見

いよいよここから振動の物理の核心に迫っていく。ループトップ上空の時間発展を見てみると、曲がった磁力線の2本の腕は開いたり閉じたりを繰り返していることがわかった。そして、腕が開くときに外向きのコロナ波動が発生しており、腕が閉じるときに内向きの波動が発生していることが見つかった。この波の発生機構はまさに「音叉」と似ている。そこでわれわれはこの開閉する腕の部分「磁気音叉」、その振動のことを磁気音叉振動と呼ぶことにした。この磁気音叉振動が本稿で紹介するフレアの振動現象のエッセンスである。

磁気音叉振動を駆動する物理は何であろうか？ 図6(a) にループトップ上空領域の速度構造を載せているが、リコネクションアウトフローは複数の終端衝撃波を通過してその後上向きに跳ね返っている様子が見て取れる。実はこの跳ね返り流が磁気音叉振動を駆動しているのである。その様子を図6(b) に示す。跳ね返り流はまず磁気音叉の腕を外向きに押し込む。その際、腕の外側ではガ

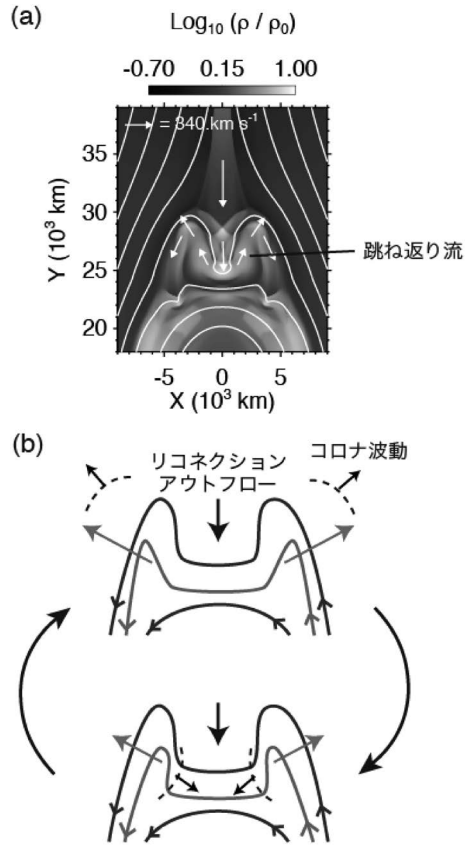


図6 上：ループトップ上空の速度構造。下向きのリコネクションアウトフローが跳ね返っている。下：磁気音叉振動とそれに伴う波動の形成過程。グレーの矢印は跳ね返り流による外向きの力を表す。

スと磁場の圧縮が起きるので外向きのコロナ波動が生じる。この腕の外側の磁場が圧縮によって強くなると、腕は内側に押し戻されてしまう。しかし跳ね返り流は腕の動きと関係なくリコネクションアウトフローによって生じているので、また腕は外向きに押し込まれる。このようにして、腕の開閉運動は繰り返されていたのである。

上記の磁気音叉振動の説明を見た方の中には「先ほど見た衝撃波の詳細な構造など関係なく、磁気音叉振動は単に高速流をぶつければ起きるのではないか」と思った方がいるかもしれない。しかし実際は衝撃波の構造が重要であることも本研

究でわかった。図5で見たような斜め衝撃波ではなくアウトフローに垂直な衝撃波が出現すると、振動は止まったのである。理由は、垂直衝撃波は斜め衝撃波に比べてアウトフローの強い減速を引き起こすため、磁気音叉振動を駆動する高速の跳ね返り流を作れないからである。振動が起きるには、終端衝撃波は斜め衝撃波である必要があったのである。

磁気音叉振動はコロナ波動を繰り返し生じていたが、その発生はほぼ周期的でその周期はおおよそ40秒であった。この値は観測されている値の範囲内である。さらに、終端衝撃波の強さも同じ周期で変動していることがわかった。衝撃波の強さの変動は、磁気音叉振動に伴って生じる内向きの波動によって生じていた。つまり、磁気音叉振動はコロナ波動と衝撃波強度の周期変動の両方を引き起こしていたのである。

何が振動周期を決めるのであろうか？ 振動はループトップ上空の跳ね返り流で駆動されるので、周期はその空間サイズと跳ね返り流の速度で決まるタイムスケールに比例すると予想される。跳ね返り流の速度はおおよそ初期のアルフベン速度のオーダーになるので、問題はループトップ上空の空間サイズがどう決まるかである。ここは少々複雑なので詳細は省くが、リコネクション理論と衝撃波理論の基本的なことを使いつつ「(リコネクションアウトフローでループトップ上空に入ってくる質量フラックス) = (跳ね返り流が運ぶ質量フラックス)」を考えるとループトップ上空の空間サイズを決める関係式が得られる。これらを踏まえると周期は磁場強度のおおよそ -2.1 乗に比例すると予想され、シミュレーションもこの結果を支持することを確認した(詳細は筆者の論文¹³⁾を参照していただきたい)。

なぜフレアループ全体がポヨンポヨンと上下に揺れるような振動がはっきり見えなかったのか？ その理由は、彩層蒸発によってフレアループは密度が上がって重くなりリコネクションアウトフ

ローで揺らすことが困難になるからである。さらに、彩層蒸発流はループ内の波を減衰させるように働くこともわかった。つまりコロナと彩層のカップリングもフレアの振動現象の理解に重要だったのである。ただし、彩層蒸発流による密度上昇の程度はフレアサイズなどのパラメータに依存するため、今後注意深く考察する必要がある。

7. まとめと議論

本稿では長年観測的に知られていたフレアの振動現象の起源についての高解像度磁気流体シミュレーションによる研究成果を紹介した。シミュレーションの結果、フレアの振動現象は確かに起きたがその様相は予想していたものと大きく異なっていた。シミュレーションで見えた振動領域はフレアループ全体ではなくループトップ上空の非常に小さい場所に局在化しており、リコネクションアウトフローの跳ね返り流によって駆動されていた。その振動は音叉的な磁場構造の開閉振動であり、この磁気音叉振動が周期的なコロナ波動の生成と衝撃波強度変動を引き起こしていた。磁気音叉振動の継続には終端衝撃波の構造が重要であり、アウトフローをあまり減速させない斜め衝撃波になっている必要があった。

本研究で見つかった磁気音叉振動は終端衝撃波の強度を周期的に変動させた。理論・観測的にも定かではないが、高エネルギー電子の多くが終端衝撃波で加速されており加速効率が衝撃波の時間変動で変化すると仮定してみよう。すると、長年の謎である非熱的電子起源の放射強度変動は説明できそうである。さらに近年見つかったコロナ波動も同時に説明できてしまう。本稿のまとめに相当する模式図を図7に載せている。今後より詳細な観測的検証が必要であるが、この研究によりこれまで断片的に議論されがちであった現象たち(リコネクション、衝撃波、振動、粒子加速)が有機的につながってきたように思える。

過去のモデルとの違いを少し述べたい。これま

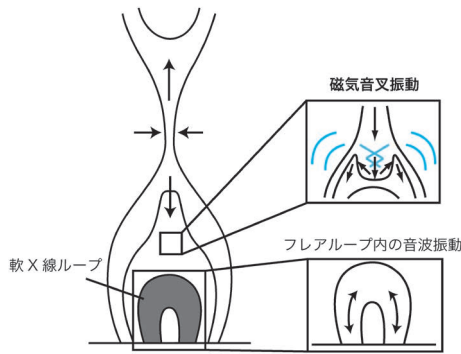


図7 過去の研究で議論されていたフレアループ内の振動（ここでは例として音波）と本研究で見つかった磁気音叉振動の比較。振動領域の位置と空間サイズの違いに注意してほしい。

ではフレアループの音波振動モデルがよく使われていた。図7で磁気音叉振動と音波振動を比較しているが、まず注目していただきたいのは振動領域の空間スケールが大きく異なる点である。周期について定量的に比べてみると、音波振動の場合に振動周期はおおよそ磁場強度の -0.43 に比例する。これに対し磁気音叉振動の周期は磁場強度の -2.1 に比例するため、磁気音叉振動の周期の方が磁場強度に敏感に反応する。これは観測される周期の分散が大きいことと整合的である。今後は観測データの正しい解釈に向けて、振動機構をより精密に特定していく必要がある。

8. 今後の展望

8.1 粒子加速

太陽フレアでは非熱的な電子の加速が起きている。その機構の一つとして衝撃波加速が議論されているが、マッハ数が低く（おそらく5よりも小さい）、磁気圧よりガス圧優勢であるような太陽フレアの終端衝撃波で電子加速が本当に起きるかは明らかではない。なぜなら、そのような衝撃波では超新星残骸のような強い衝撃波における粒子加速と同じ過程は期待できないからである。しかし太陽フレアの終端衝撃波と似たパラメータをもつ、合体に起因するような銀河団内衝撃波におい

ても電子加速が起きている証拠が見つかった。近年の粒子シミュレーションはそのような衝撃波においても電子加速が起きうることを示しており^{14), 15)}、今後実際の現象との詳細な比較が求められる。粒子シミュレーションは現実の現象より非常に小さい計算領域しか取ることができないが、本稿で紹介したような磁気流体シミュレーションの結果を踏まえれば、より現実的な粒子シミュレーションの初期条件、境界条件を設定できるだろう。このような横断的な研究は分野の発展にも重要だと考える。

8.2 空間分解できない星の活動性を調べる道具

太陽フレアと同様のフレアはほかの星でもよく観測されるうえ、フレアはその明るさゆえに星自身が暗くても観測されやすい。もしフレア観測からその星のフレアループの磁場強度やフレアのサイズを見積もることができたら、「この星は何ガウスの磁場強度をもっているのだ」などと星の磁気活動性を探ることができる。

過去に柴田氏と横山氏はX線観測から得られるエミッションメジャーと温度の情報だけから、フレアの磁場強度やサイズを推定するフレア理論を提案している¹⁶⁾。彼らの理論はフレアループの力学バランスを基礎としており、大局的な構造に注目するモデルとなっている。これは非常に強力な理論だが、温度に強い依存性をもつ熱伝導のせいで推定される物理量が温度に敏感となり、温度の不定性のため推定値の不定性が大きくなる問題点がある。それに対し筆者らが見つけたフレアの振動現象の物理は、フレアのより詳細な構造の時間変動に注目したものとなっている点で彼らのアプローチと異なる。そのため両者の理論を組み合わせれば、より信頼性の高い物理量診断が可能になると期待している。

本研究の天文学的展開の例について最後に一言述べたい。生まれたばかりの星である原始星は濃いガスやダストを含むエンベロープに覆われているため、直接星の表面を可視光で見ることが不可

能である。そのため原始星の進化はよくわかっていない点が多い。原始星領域は基本的に10–100 Kと非常に低温であるが、何と硬X線フレアが発見され世界に衝撃をもたらした¹⁷⁾。2 keV以上のX線はエンベロープを透過することができるため、X線観測から見えない原始星あるいはその近傍の情報を引き出すことができる可能性がある。さらに、フレアのX線輝度は 10^{32} erg s⁻¹にまで及ぶため¹⁸⁾、フレアは周囲のガスの電離状態を変えるなどして星・円盤進化へ大きな影響を与えるかもしれない。しかしこのようなフレア的重要性にもかかわらず、発見から20年ほど経った現在でもいまだフレアの起源はわかっていない。フレアの発生機構は何であろうか？ 星のもつ双極磁場と円盤の相互作用によって起きている可能性も指摘されているが¹⁹⁾,²⁰⁾、原始星の磁場構造は謎に包まれている。フレアはまだ見ぬ原始星領域の進化過程をひも解くカギをわれわれに教えてくれると期待している。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、筆者が京都大学の大学院生時代の指導教員であった柴田一成教授との共同研究の成果である、筆者の博士論文の一部および投稿論文¹²⁾,¹³⁾に基づいている。

参考文献

- 1) Takasao S., et al., 2012, ApJ 745, L6
- 2) Shibata K., Takasao S., 2016, in Magnetic Reconnection, Astrophysics and Space Science Library 427, eds. Gonzalez W. D., Parker E. N. (Springer International Publishing, Switzerland) p. 373
- 3) 柴田一成, 1996, 天文月報 89, 60
- 4) Chen B., et al., 2015, Science 350, 1238
- 5) Nakariakov V. M., Melnikov V. F., 2009, SSRv 149, 119

- 6) Yuan D., et al., 2013, A&A 554, 144
- 7) Liu W., et al., 2010, ApJ 736, L13
- 8) Liu W., et al., 2016, in Proceedings of the 14th International Solar Wind Conference, AIP Conf. Proc. 1720, eds. Wang L., et al. (AIP Publishing, New York) 040010
- 9) Mitra-Kraev U., et al., 2005, A&A 436, 1041
- 10) Yokoyama T., Shibata K., 2001, ApJ 549, 1160
- 11) Miyoshi T., Kusano K., 2005, JCoPh 208, 315
- 12) Takasao S., et al., 2015, ApJ 805, 135
- 13) Takasao S., Shibata K., 2016, ApJ in press
- 14) Matsukiyo S., et al., 2011, ApJ, 742, 47
- 15) Guo X., et al., 2014, ApJ 794, 153
- 16) Shibata K., Yokoyama T., 2002, ApJ 577, 422
- 17) Koyama K., et al., 1996, PASJ 48, L87
- 18) Tsuboi Y., et al., 2000, ApJ 532, 1089
- 19) Hayashi M., et al., 1996, ApJ 468, L37
- 20) Lopez-Santiago J., et al., 2016, arXiv:1603.06144

Oscillatory Nature of Solar Flares—Physical Mechanism and Its Importance in Astrophysics

Shinsuke TAKASAO

Department of Physics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: Observations revealed that various kinds of oscillations are excited in solar flare regions. Quasi-periodic pulsations in the flare emissions are commonly observed in a wide range of wavelengths, particularly in nonthermal emissions. The observations have motivated observational and theoretical studies to reveal the relation between the oscillation period and local coronal physical quantities that are difficult to measure. The coronal seismological techniques have been applied to stellar flares to explore the unresolved stellar magnetic activities. Here I will first introduce a general picture of solar flares and oscillations seen in flares. Then I will discuss our new findings of the oscillations in flares on the basis of our magnetohydrodynamics simulations of a solar flare.