

波打つコロナ

岡本文典

〈国立天文台 チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: joten.okamoto@nao.ac.jp



太陽観測衛星「ひので」の成果の一つ、それが波動の発見である。微細な構造が揺れている様は太陽研究者に驚きをもって迎えられた。この揺れこそがコロナ中の磁力線を伝播する波動の証拠であり、波動によるコロナ加熱に現実味を与えた重要な観測結果である。その後10年、太陽大気の振動・波動現象は「ひので」やその他の観測衛星、地上望遠鏡でも多数報告され、ついに波動の散逸過程も捉えられ始めている。本稿では、波動に関するこれまでの成果をкаいつまんで紹介する。

1. 波動の重要性

太陽に限らず、そして固体、液体、気体にも限らず、物質があれば必ずそれを伝播する波は存在する。そう考えると、波動の検出がなぜ大発見なのかと思ってしまうかもしれない。ここで注目しているのは磁力線を伝播する波である。最も単純なものはアルヴェン波と呼ばれる。ゴムひもを弾いたり揺らしたりすれば波が立つが、そのひもが磁力線になった場合の波がアルヴェン波である。この波が重要なのだ。なぜか。

その理由はコロナ加熱問題にある。太陽コロナはとても熱い。太陽表面の6,000度に対し、コロナは100万度もある。太陽自身が熱源だから、外にいくほど冷たくなるのが普通だ。ということは、何か普通でない不思議なことが起こっているはずで、これをコロナ加熱問題と呼ぶ。X線の観測、太陽表面の磁場計測などから、磁場が何らかの役割を果たしているのは間違いない。そして、大きく分けて二つのアイデアが長年議論されてきた。一つはナノフレア（微小フレア）加熱説¹⁾、もう一つは波動加熱説²⁾である。ナノフレアというのは小さな爆発現象のことで、数十年前の装置では検出できないサイズの爆発が多数あって、その

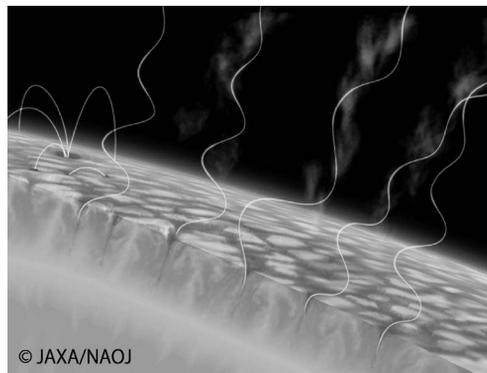


図1 波動加熱のイメージ図。

エネルギーを足し合わせればよいというのがナノフレア加熱である。一方、波動加熱は、対流などの作用により太陽面から伸びる磁力線が揺すられ、そこで生じたエネルギーが波動の形で上空に運ばれた後、コロナ中で熱化するものである（図1）。

波動加熱で鍵となるのがアルヴェン波である。波という形態のものであれば、ほかにも音波や、速い波、遅い波と呼ばれる磁気音波などもある。しかし、圧縮のない（あるいは極めて小さい）横波であるアルヴェン波はほかの波に比べて散逸しにくく、太陽表面近くでエネルギーを失うことなくコロナの遠方に運ぶことができるという利点が

ある。ところが、これまでに数多くの観測が実施され、波動の探索が行われたが、それらしい波動は見つからなかった。それゆえ、ナノフレアによる加熱が広く支持を集めていた。

2. 波動の発見

しかし、「ひので」³⁾登場により状況は変わる。「ひので」の主力装置である可視光望遠鏡⁴⁾(SOT)は、プロミネンスやスピキュールを構成する微細構造が振動していることを明らかにした^{5), 6)}(図2)。これらの微細構造はコロナ中の磁力線が可視化されたものであり、磁力線の振動は波動の伝播によって引き起こされると考えられる。これが波動の発見、特に空間分解されたアルヴェン波の振る舞いを示した初の観測例である。波動による振幅は非常に小さく、地上からの観測では大気揺らぎとこの微小振動を切り分けることが困難であった。SOTの高い空間分解能力⁷⁾と、時間的に安定した撮像システム⁸⁾の賜物である。

観測データから波動を抽出する方法としては、先述のSOTによる時系列画像から振動を空間分解する直接検出のほかに、ドップラー速度の周期変動の測定、時系列画像中においてアルヴェン速度での擾乱の伝播の検出などがある。実際、後者二つは「ひので」の極紫外線撮像分光装置⁹⁾(EIS)、X線望遠鏡¹⁰⁾(XRT)のそれぞれで見つかった¹¹⁾。

波動が見つければ、次はその輸送エネルギー量を知ることが重要である。観測された波動のエネルギーを見積もってみると 10^7 erg/cm²/s程度のもが多い。過去の研究から、黒点を伴う活動領域の加熱には同じ単位系で 10^7 、黒点のない静穏領域では 10^5 必要であると推定されている¹²⁾。ゆえに、観測された波動は加熱に十分なエネルギーをもっているといえる。これがすべて加熱に使われているかは不明だが、仮に1%使われているとすれば、少なくとも静穏領域の加熱には有効であろうと考えられる。

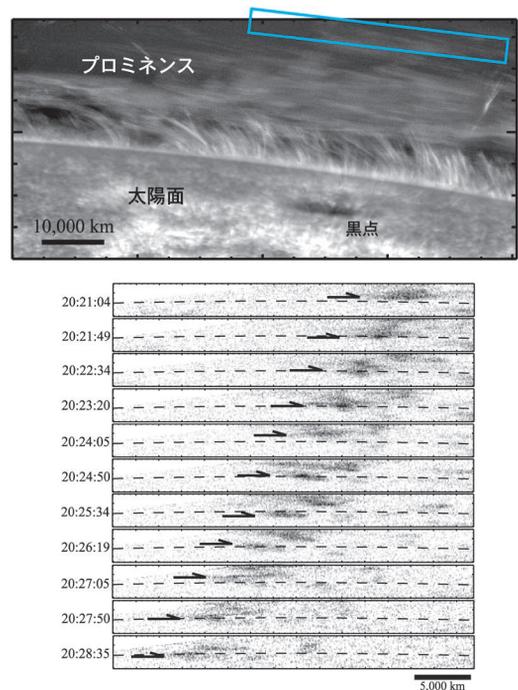


図2 波動の観測例⁵⁾。「ひので」SOTによる太陽リム外のプロミネンス。四角で示した箇所の時間変化が下図であり、ネガポジを反転している。矢印の位置に微細構造がある。破線は太陽面からの等高度線、横の数字は2006年11月9日の世界標準時(UT)をそれぞれ表す。

また、波動の周期や位相速度などの観測量から、偏光測定の難しいコロナ磁場の強度を導出することもできる¹³⁾⁻¹⁵⁾。これはコロナ震動学と呼ばれ、「ひので」が観測・理論両面に大きな進展をもたらした分野である。

波動の発見、そしてそれがもつ十分なエネルギー量に関するこれらの結果は、世界の波動研究を大いに活性化させている。類似の解析や波動検出手法をより改善した研究¹⁶⁾⁻¹⁸⁾が複数行われたほか、他の衛星・地上観測装置を用いた解析でも続々と報告^{19), 20)}がなされ、波動の存在は確固たるものになったといえる。

3. 波動の散逸

波動の存在、そしてその性質に関する研究はこ

れまで多くなされてきた。しかし、散逸に関する報告はない。波動はコロナ加熱に貢献しているのか。これを示さなければ意味がない。ところが、「ひので」単独ではこれまでにわかった事実以上の情報を得ることは難しい。波動の散逸を調べるには、これまで磁力線と考えていたものをより詳細に、太さのある磁束管として捉えて研究する必要がある。SOTは「ひので」の装置の中で唯一磁束管を空間分解できるものの、2次元運動しか追跡できない。そこで、これを補うためにNASAが新たな観測衛星「IRIS²¹⁾」を2013年に打ち上げた。「IRIS」は紫外線の撮像分光観測装置で、「ひので」と同レベルの空間分解能力で微細構造のスペクトル情報を取得する。

そこで、「ひので」と「IRIS」によるプロミネンスの共同観測を実施し、散逸の手がかりを探した。「ひので」SOTの撮像観測からはプロミネンスの2次元運動、「IRIS」のスペクトル観測からは視線方向速度を得ることで、微細構造の3次元運動がわかる。また、「IRIS」の撮像観測から10万度のプラズマの振る舞いが得られるため、「ひので」による1万度の観測データと比べることで、加熱の有無も調べることができる。

解析の結果、この観測は二つの重要な情報をもたらした。一つは振動に伴う温度変化である。「ひので」が1万度の微細構造の消失を捉えたのに対し、その消えた場所、消えた時刻に「IRIS」で10万度のプラズマの出現が観測されたのだ。これは振動に伴う温度上昇を示唆するものである。二つ目は波動散逸メカニズムを特定したことである。振動する微細構造の上下運動と視線方向の運動の位相を調べたところ、上下に最も振れた位置で視線速度が最大になっていた。通常の波動、特にアルヴェン波による振動は上下に最も振れたところで速度ゼロ、平衡位置で速度最大となるはずである。この奇妙な速度パターンに着目し、解析と議論を進めた結果、共鳴吸収^{22), 23)}という物理過程が働いてこの現象が起こっているのではない

かと推測した。ところが、その真偽については観測データのみでは判断できないため、微細構造を模した磁束管振動の数値シミュレーションと輻射輸送計算を駆使し、この現象の解釈を試みた。その結果、磁束管の振動に伴い、共鳴吸収により磁束管表面に流れが生じる。特に、このときの速度パターンは観測されたものと一致する。そして、この流れがケルビン・ヘルムホルツ不安定性により、磁束管表面に無数の乱流を生成する。この乱流内に電流層が生じ、そこで磁場のエネルギーが熱エネルギーに変換され、周囲のガスを加熱するのである。数値計算からは、少なくとも10万度まで加熱されることが示され、一連の観測の特徴をすべて説明できる。一方、回転やねじれアルヴェン波などほかの可能性も慎重に考慮したが、いずれも観測と合致しない。よって共鳴吸収が最もありうる解釈であり、これが波動の散逸を初めて観測的に示した証拠であると結論づけた^{24), 25)}(図3)。

4. 残された問題

「ひので」打ち上げ前は波動の存在すら疑われていたものが、波動の発見、その性質の詳細な調査、そしてコロナ中での波動の散逸まで捉えられるに至った。波動研究におけるこの10年の進展は目覚ましい。もうコロナ加熱は波動でどうにかなるのでは？と思うかもしれないが、まだまだ不明な点は数多く残されている。

まず、散逸は上述の1例で観測報告があるだけであり、さらなる観測が必要である。共鳴吸収が起こりうることを示した成果は大きいですが、位相混合、波動のモード変換による衝撃波生成など、ほかのメカニズムの存在を否定するものではない。おそらく未検出のメカニズムもあるだろう。また、加熱がコロナの温度に達しているかも明確にせねばならない。しかし、波長ごとの空間分解能や光学的厚さが大きく異なるため、十分に信頼できる証拠が得られないのが現状である。

波動の領域依存性も早急に統計的調査をすべき

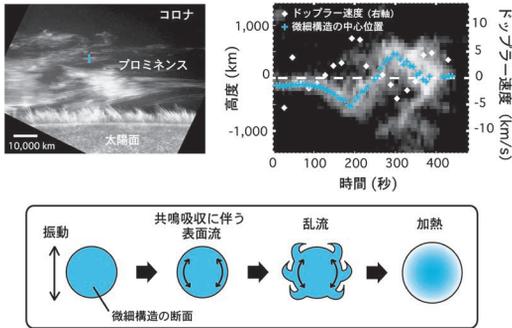


図3 波動の散逸^{24), 25)}. 左上図の青線を横切る微細構造の動きに着目し、時間-空間図にしたものが右上図. さらに、各時刻でのドップラー速度を白点で重ねてある. 下図は共鳴吸収に伴う一連の現象の模式図.

課題である. 静穏領域, 活動領域, コロナホールにおける波動の性質は同じか否か. 輸送するエネルギー量に違いはあるのか. 単純な問題だが, 意外にも手が付けられていない.

また, 今回割愛したが, 波動生成の視点から光球面での波動の振る舞いもよく調べる必要がある. SOTの偏光分光観測から磁場と視線速度の変動の位相を比較し, 波動モードを議論した研究²⁶⁾があるが, 観測時の時間分解能に結果が強くなる²⁷⁾ため, さらなる研究が望まれる.

コロナ加熱という観点では, ナノフレアも当然重要だ. 静穏領域は波動だけでも加熱可能と述べたが, 活動領域はおそらく波動とナノフレアのハイブリッドではないかと考えている. ただ, 既存の装置だけでこれを解き明かすのは難しい. 2016年より開始されるALMA太陽観測をはじめ, 次期太陽観測衛星計画や海外で建設中の大型地上望遠鏡などが新たな知見をもたらすツールになるだろう.

謝辞

「ひので」は国立天文台ひので科学プロジェクト, 宇宙科学研究所SOLAR-Bプロジェクトをはじめとする国内外の研究機関の研究者, 技術者に

よる長年の努力で開発されたものです. この素晴らしい観測装置を科学運用を通じて比較的自由に使用させていただき, 研究に活用させてもらえることに感謝し, 開発へ携わった方々へ深く敬意を表します.

参考文献

- 1) Parker E. N., 1972, ApJ 174, 499
- 2) Alfvén H., 1947, MNRAS 107, 211
- 3) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 3
- 4) Tsuneta S., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 167
- 5) Okamoto T. J., et al., 2007, Science 318, 1577
- 6) De Pontieu B., et al., 2007, Science 318, 1574
- 7) Suematsu Y., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 197
- 8) Shimizu T., et al., 2008, Sol. Phys. 249, 221
- 9) Culhane J. L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 19
- 10) Golub L., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 63
- 11) Cirtain J. W., et al., 2007, Science 318, 1580
- 12) Withbroe G. L., Noyes R. W., 1977, ARA&A 15, 363
- 13) Van Doorselaere T., et al., 2008, A&A 487, L17
- 14) Arregui I., et al., 2011, Space Sci. Rev. 158, 169
- 15) Soler R., et al., 2012, A&A 546, A82
- 16) He J., et al., 2009, A&A 497, 525
- 17) Okamoto T. J., De Pontieu B., 2011, ApJ 736, L24
- 18) Hillier A., et al., 2013, ApJ 779, L16
- 19) Tomczyk S., et al., 2007, Science 317, 1192
- 20) McIntosh S., et al., 2011, Nature 475, 477
- 21) De Pontieu B., et al., 2014, Sol. Phys. 289, 2733
- 22) Ionson J. A., 1978, ApJ 226, 650
- 23) Sakurai T., et al., 1991, Sol. Phys. 133, 227
- 24) Okamoto T. J., et al., 2015, ApJ 809, 71
- 25) Antolin P., et al., 2015, ApJ 809, 72
- 26) Fujimura D., Tsuneta S., 2009, ApJ 702, 1443
- 27) 加納龍一, 2016, 東京大学修士論文

Waves in the Solar Corona

Joten OKAMOTO

National Astronomical Observatory, 2-21-1
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The Hinode satellite discovered small-scale oscillations in the solar corona. Such oscillations are caused by Alfvénic waves, which are one of the promising candidates to solve the coronal heating problem. In the last 10 years, numerous observations of waves have been reported not only with Hinode, but also with other satellites and ground telescopes. Moreover, we obtained the evidence of wave dissipation. Here I introduce these results in wave observations.