

「ひので」が捉えた磁気流体波の重要性

松本 琢磨

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区吉野台3-1-1〉

e-mail: takuma.matsumoto@nagoya-u.jp



「ひので」衛星のもつ安定した高空間分解能観測は、数多くの波動を発見したばかりでなく、そのエネルギー輸送量の定量的評価や散逸過程の発見をもたらした。また波動の種類を特定し、分光観測による密度診断と組み合わせることで、非常に高精度なコロナ磁場推定が可能になった。その一方で、すべての周期的現象を波動と解釈してしまうと、準周期的な質量流出といった基本的な現象を見逃してしまう危険性も指摘された。本稿では、波動によるエネルギー輸送・磁場推定や波動に極めてよく似た特徴をもつ質量流出現象に焦点を当てて解説する。

1. はじめに

一度でも「ひので」衛星が捉えた動画を見たことのある方であれば、太陽がどれほど複雑かつダイナミックな運動に満ちあふれているかということはご存じかと思う。太陽表面がこれほどまでに多様で激しい活動性を示している理由は、太陽の非一様な大気構造を支配する磁場にある。非一様な構造というのはここでは、スピキュールと呼ばれるジェット状の噴出現象や、太陽表面に浮かぶ雲のようなプロミネンス、黒点の間をつなぐループ状の構造、X線に至る所に観測されるジェットなど、いずれも磁力線の上を運動するプラズマ構造のことを指す。これらの構造は、足元の対流運動や磁気エネルギーの突発的な解放によって絶えず揺らされ、「磁気流体波動」と呼ばれる波動現象を伴うと考えられてきた。

物体の最も基本的な運動が振動・波動であり、宇宙の物質の99%がプラズマであることを考えると、プラズマ中の波動である磁気流体波動は天体物理学で最も基本的な要素といえる。その波動の顕著な特性の一つにエネルギー・運動量輸送という重要な性質がある。磁気流体波動によるエネ

ルギー輸送は、冷たい太陽光球（約6千度）の上空に超高温のコロナ（100万度超）をいかにして生成するのかというコロナ加熱問題の答えとして一つの大まかな道筋を与えている。また、磁気流体波動による運動量輸送は、超高温のコロナ大気をもつガス圧勾配により吹き出ている太陽風と呼ばれるプラズマ流に運動量を供給している。最も高速な太陽風は地球軌道付近で秒速800 kmにまで加速されているのである。

本稿ではこれら磁気流体波動に対して、エネルギー輸送・磁場推定・質量流出の観点から「ひので」衛星での発見を概説する。

2. あいつぐ波動の発見

2007年12月発行の米科学誌「サイエンス」を飾った「ひので」論文9本のうち3本は波動の発見に関するものであった。サイエンス誌に掲載された論文は、スピキュールを伝わる波¹⁾、プロミネンスを伝わる波²⁾、そしてX線ジェットを伝わる波³⁾の発見を主張している。発見された波動はいずれも磁気流体波動の一種であるアルフベン波 (Alfvén wave) と呼ばれており、ハンス・アルフベン (Hannes Olof Gösta Alfvén) が理論的

に予言し、その功績により1970年にノーベル賞を受賞したものである。「ひので」以前にはどの地上望遠鏡も、またどの衛星観測においてもアルフベン波を明確に捉えた例はなく、「ひので」衛星には波動の明確な発見が期待されていた。これら三つの論文を皮切りに、「ひので」衛星により次々と波動発見の報告がなされた。すべての太陽物理学者がアルフベン波の発見を認めたというわけではないが、「ひので」衛星の発見により磁気流体波動の研究は新たな時代を迎えることになった。

磁気流体波動の重要性は、エネルギーを輸送するという物理的に最も基本的な性質にある。太陽物理学においては特に、光球からコロナへのエネルギー輸送過程として重要視されている。光球はコロナより温度が低く、熱的にエネルギーを輸送するわけにはいかないため、波動によるコロナへのエネルギー輸送が1940年代から考えられてきた。光球における対流運動によってプラズマや磁場を揺り動かし、光球のもつ力学的エネルギーを波動として上空に輸送するというアイデアは波動加熱説と呼ばれ、コロナ加熱問題を解決する理論の一つとして現在広く受け入れられている。コロナを加熱するのに必要なエネルギー流量は、太陽が放出するエネルギーのたった1万分の1程度と微小なものではあるが、波動によるエネルギー流量がこれを満たすほど十分存在するのかを定量的に明らかにすることは、波動加熱説を検証するうえで不可欠である。

「ひので」衛星を用いた波動観測の論文を眺めてみると、大きく分けて三つの方法で波動を観測していることがわかる(後の例ほど不定性は大きい)。まず最初にすぐ思いつく(が決して簡単ではない)方法は、磁場と速度場の時系列データを用いて磁気流体波のもつエネルギー流量(ポインティングフラックス)を出す方法である。この方法を用いて、光球表面上の至る所に点在する太さ数百km程度の磁束管から発生する波動のエネルギー流量が $2.7 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ であると見積もら

れている⁴⁾。次にシーイングによる揺らぎのない安定した動画を解析し波形を追跡することで、速度振幅や位相速度を推定する方法がある。特にジェット状の細長い構造をもつスピキュールは彩層に普遍的に存在し頻りに観測できるため、それを伝わる横波のエネルギー流量を求めることができる^{1), 5), 6)}。これらの観測により、静穏領域の光球や彩層においては、コロナ加熱に必要なエネルギー流量と同等かそれ以上のエネルギー流量が得られていることが明らかになった。最後の方法は極端紫外線の輝線幅を用いて、コロナ中の速度擾乱の大きさを求める方法である。太陽極域にスリットを当て分光観測することで、極域上空における速度擾乱の高さ変化を求めることができる⁷⁾。

最近の観測ではエネルギー輸送からさらにもう一步踏み込んで、エネルギー散逸の現場を捉えた研究^{8), 9)}もあることを付け加えておく。アルフベン波の散逸機構として、有力視されている理論の一つに共鳴吸収と呼ばれる機構があり、アルフベン波が共鳴しながら散逸していく様子をIRIS衛星との共同観測により捉えたというのが彼らの主張である。波動によってどれだけエネルギーが運ばれようと、コロナ中で波動を散逸・熱化させない限り、コロナを加熱することはできない。したがって、これからの観測ではエネルギー輸送のみならず散逸の過程を捉える研究が期待される。

3. 数値実験によるエネルギー流量推定

次に、数値実験と「ひので」の観測を組み合わせ、コロナへのエネルギー輸送量を推定するわれわれの取り組みを紹介しようと思う。前の章では「ひので」の観測から波動によるエネルギー輸送量を定量的に求める試みを紹介した。波動の直接観測は波動加熱説の理解に大きな進歩をもたらしたが、スピキュールを伝わる波のように観測しやすい目立った現象を用いることでその統計的性質にはバイアスが生じる。また「ひので」で観測

された彩層中の波のいったいどれだけの量が、コロナまで到達できるのかを観測だけから決めることはできていない。今のところこのような問題に対しては、プラズマの基礎方程式である磁気流体方程式に基づいた数値実験などを用いて理論的に補完するしかない。

波動の輸送量を計算するうえで必要になるのが、速度擾乱などの境界条件である。太陽表面は速度擾乱の源である粒状斑と呼ばれる大きさ1,000 km程度の対流セルで埋めつくされている(図1)。この対流運動の運動エネルギーがコロナにエネルギーを供給する源泉となっていることは現在広く受け入れられており、光球に点在する磁束管が対流に揺らされることで磁気流体波動が発生すると考えられる。複雑な対流運動が生み出す波動のうちコロナ加熱に最も重要と考えられているアルフベン波は、磁束管が水平方向に押されたり、渦運動によりひねられることで生じる。つまり、光球での速度擾乱のうち水平方向の成分が境界条件として最も重要と考えられる。

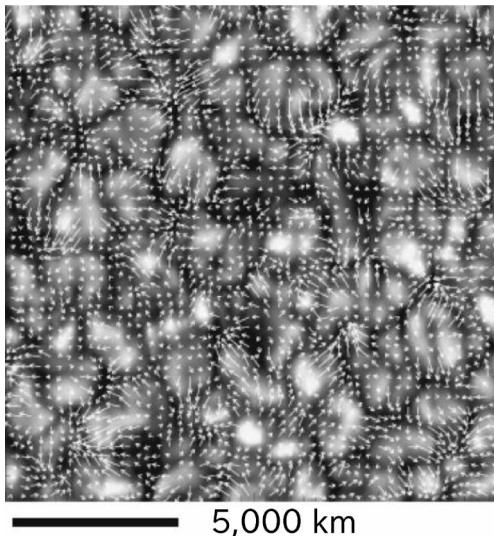


図1 局所相関追跡法により導出された太陽表面の水平速度場。背景画像はSOT/G-bandフィルターによる撮像観測。白い矢印が水平速度場の大きさと向きを表す。

水平速度場の擾乱スペクトルを求めるには、地球大気によるシーイングの影響を受けない安定した時系列画像が必要になる。2枚の連続した画像に対して局所的に相関をとることで、例えば対流セルのような特徴的な構造がどこに移動したかを特定し、水平速度場を得ることができる。この方法では大気揺らぎによる構造の変化によっても偽の速度場を検出してしまうため、これまでの地上望遠鏡による撮像観測では信頼性の高いデータを得ることはできなかった。「ひので」可視光望遠鏡(SOT)による安定した時系列撮像観測にこの局所相関法を適用することで初めて、水平速度場に対する信頼性の高い時間スペクトルを得ることが可能になった^{10), 11)}。当時粒状斑の大きさを分解し、局所相関法を適用できるほど高解像度のデータが得られるのは「ひので」衛星のみであった。得られた時間スペクトルは速度振幅1.1 km/s程度で3分程度の周期でべきの折れる乱流的なスペクトルであった。

観測的に求められた水平速度場を磁気流体力学に基づく1次元太陽大気モデルの境界条件として与えることで、光球・彩層・コロナにおけるアルフベン波の輸送過程を推定することができる。ここでは詳細は省き結果だけ書くと、コロナにまで到達するエネルギー流量は $3\text{--}4 \times 10^5 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ であり、黒点などの活動的な領域ではない静穏領域上空のコロナを加熱するには十分なエネルギーが供給され得ることが明らかになった¹¹⁾。また、同様の振幅をもつ速度擾乱を与えた1次元¹²⁾または2次元¹³⁾の磁気流体計算を用いることで、コロナ加熱に十分なエネルギーが供給できることのみならず、実際に波動が散逸するようすも再現されている。これらの計算により、光球で発生させたアルフベン波が伝播・散逸していく過程として自然にコロナが高温に加熱され太陽風が駆動されることが示された(図2)。

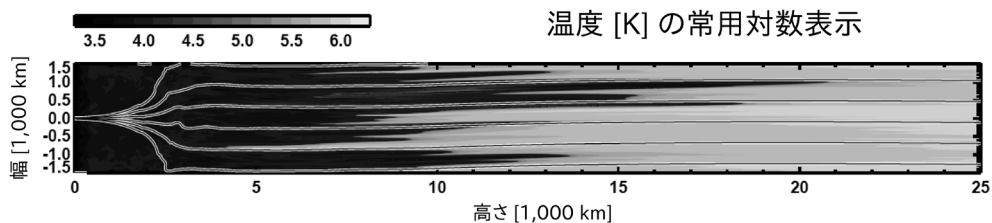


図2 2次元磁気流体計算により得られた温度分布図のスナップショット。背景の色が温度を、白黒線が磁力線をそれぞれ表している。松本・鈴木¹³⁾の計算の高解像度版を載せている。上空に高温のコロナが生成されていることがわかる。

4. 波動による磁場推定

この章ではプラズマ中の最も基本的な量のひとつである磁場を、波動を用いて測定するという話に移ろうと思う。「ひので」衛星が搭載しているSOTは、ゼーマン効果と呼ばれる磁場による吸収線の分裂を測定することで光球の磁場を求めることができる。しかしながらより活動的な現象にあふれている彩層やコロナでの磁場をこの方法で求めることは、それほど簡単ではない。

コロナや彩層の磁場の推定する別の手法として、彩層やコロナ中の波動を上手く用いる方法がある。かつて、この方法を用いた磁場推定の弱点は密度の不定性による誤差の大きさであった。「ひので」衛星搭載の極端紫外線撮像分光装置(EIS)がもつ高精度な密度診断能力はその弱点を克服し、誤差を大幅に抑えることが可能になった。EISにより最初に捉えられたコロナループ振動はループの軸が揺れるモードであるキंक波による基本振動であると特定された¹⁴⁾。同様の振動は、極端紫外線の撮像観測を用いた過去の研究においても報告されている^{15), 16)}。EISの分光観測による密度診断能力の向上は、ループのもつ磁場が 39 ± 8 Gであるという過去の研究の倍以上も高精度な推定をもたらすことに成功した。波動による磁場推定はコロナの磁場を高精度で測定できるほぼ唯一の方法として、今後ますます発展する研究分野になると思われる。

5. 波動or質量流束?

最後に、振動しているように見えるものがすべて波動に起因するわけではなく、別の重要な物理が潜んでいることもあるという例を挙げたい。「ひので」以前の太陽観測衛星TRACEやSOHOにおいても多数の振動現象が極端紫外線の撮像観測を用いて発見されていた。それらのうちのひとつに、コロナループの根元付近を伝わる振動現象がある。この振動現象は多くの活動領域付近のコロナループに見られる普遍的な現象であると考えられている。周期5分・秒速120 km程度で伝わるその現象は、磁気流体波の一つである遅い磁気音波と解釈されエネルギー流束などが導かれた¹⁷⁾。

この波動的な解釈に疑問をもたらず契機になったのが、活動領域ループ周辺に見られる上昇流の存在である。この上昇流はひのでX線望遠鏡(XRT)の画像解析により広く知られるようになった¹⁸⁾。活動領域のループ足元からは準周期的に絶えずジェット状の噴出物が吹き出ており、太陽からの質量放出の約半分を担う遅い太陽風の源となっていることが示唆されている¹⁹⁾。またEISによる分光観測によっても高速な上昇流が観測されている²⁰⁾。これらの上昇流は決して特異な現象ではなく、活動領域周辺に普遍的に見られるものであることが「ひので」の観測によりわかってきた。

これらの準周期的な上昇流に着想を得て、ループの根元付近の振動現象の再解釈がなされた²¹⁾。振動現象は波動によるものではなく、この上昇流

に起因するものであると考えたのである。量的には僅かであるが秒速50 km程度のジェットが準周期的に吹き出ることでも振動の観測的特徴を説明できるというものであった。EISにより新たに加えられた特徴である輝線幅の周期的変動も、この解釈を支持するものであり、波動的な解釈では輝線幅の変動幅を説明するのは困難である。この解釈がほかの似たイベントに対していつも正しいわけではないだろうが、すべての周期的現象が波動の証拠になるわけではないことは注意しておかなければならない。

6. おわりに

太陽のみならずほかの恒星からの質量損失率も磁気流体波動による駆動機構により支配されている。輻射による駆動が効かない星、例えばB型星より晩期型の主系列星や低質量の前主系列星、巨星や超巨星などからの質量損失機構においては、アルフベン波による運動量輸送の重要性が指摘されている^{22), 23)}。恒星風による質量損失は、恒星自身の進化や星を取り巻く惑星系、さらには銀河中のガスやダストの進化にも多大な影響を与える²⁴⁾。したがって、磁気流体波動の伝播・散逸過程を捉えた「ひので」の観測は、太陽からの質量損失率を決定する精緻な理論モデルを構築し、ほかの恒星へと応用するうえで、非常に有用なデータを提供しているといえる。

謝辞

「ひので」衛星は国立天文台 (NAOJ) や NASA, STFC (UK) の協力の下、ISAS/JAXA によって打上げられた日本の宇宙ミッションです。また衛星の運用は上記の機関のほか、ESA や NSC (Norway) の協力で行われています。本稿は「ひので」の開発に携った上記の機関の方々の尽力のうえに成り立っていることをここに明記し感謝します。最後に、本稿の執筆を薦めてくださった今田晋亮氏、有益なコメントをいただいた上野悟氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) De Pontieu B., et al., 2007, *Science* 318, 1574
- 2) Okamoto T. J., et al., 2007, *Science* 318, 1577
- 3) Cirtain J. W., et al., 2007, *Science* 318, 1580
- 4) Fujimura D., Tsuneta S., 2009, *ApJ* 702, 1443
- 5) He J.-S., et al., 2009, *A&A* 497, 525
- 6) Okamoto T. J., De Pontieu B., 2011, *ApJ* 736, L24
- 7) Hahn M., Landi E., Savin D. W., 2012, *ApJ* 753, 9
- 8) Okamoto T. J., et al., 2015, *ApJ* 809, 12
- 9) Antolin P., et al., 2015, *ApJ* 809, 18
- 10) Matsumoto T., Kitai R., 2010, *ApJ* 716, L19
- 11) Matsumoto T., Shibata K., 2010, *ApJ* 710, 1857
- 12) Suzuki T., Inutsuka S.-i., 2005, *ApJ* 632, L49
- 13) Matsumoto, T., Suzuki T. K., 2014, *MNRAS* 440, 971
- 14) Van Doorselaere T., et al., 2008, *ApJ* 487, L17
- 15) Aschwanden M., et al., 1999, *ApJ* 520, 880
- 16) Nakariakov V. M., et al., 1999, *Science* 285, 862
- 17) de Moortel I., Ireland J., Walsh R. W., 2000, *A&A* 355, L23
- 18) Sakao T., et al., 2007, *Science* 318, 1585
- 19) Brooks D. H., Warren H. P., 2011, *ApJ* 727, L13
- 20) Hara H., et al., 2008, *ApJ* 678, L67
- 21) De Pontieu B., McIntosh S. W., 2010, *ApJ* 722, 1013
- 22) Lamers H. J. G. L. M., Cassinelli J. P., 1999, *Introduction to Stellar Winds* (Cambridge University Press, Cambridge, UK)
- 23) Suzuki T. K., 2007, *ApJ* 659, 1592
- 24) Cranmer A. R., Saar S. H., 2011, *ApJ* 741, 54

The Importance of Magnetohydrodynamic Waves Observed by Hinode

Takuma MATSUMOTO

Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara 252-5210, Japan

Abstract: Robust and high spatial resolution observation of Hinode provides us discoveries of waves in the solar atmosphere. It also leads us to estimate the energy supply by waves and find dissipation processes of waves. Moreover, by specifying the wave modes and estimating density with spectroscopy, precise measurements of coronal magnetic field are now available. On the other hand, it is pointed out that if we interpret any periodic events as waves, we would miss some important features such as mass flows. In this documents, I will explain energy transfer and magnetic field estimation by waves and quasi periodic upflows that have similar observational features with waves.