

太陽大気中の進行波

—動画を使ったデータ解析—



岡 本 丈 典

〈国立天文台ひので科学プロジェクト 〒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」の打ち上げ以降、彩層やコロナにおける波動の観測的研究が熱を帯びている。特に、可視光望遠鏡 (SOT) の撮像観測は、プロミネンスやスピキュール上の波動を磁力線の振動としてとらえ、波動の存在に関する認識を新たにしたと言える。太陽大気における進行波はコロナにエネルギーを運ぶ有用な手段の一つであり、コロナ加熱問題解明のためにも十分に調べる必要がある。そこで、これまでの研究における進行波と定在波の曖昧さを克服し、波動の統計的理解に踏み込んだ。また、「ひので」が膨大に取得している動画の解析に必要な技術開発も進めており、太陽物理学における解析手法も併せて紹介する。

1. 太陽大気の波動

太陽大気コロナはなぜ熱いのか、少しでも熱いなどという生易しいものではなく、太陽表面の6,000度より3桁も高い100万度もある。ちょっとやそっとじゃ起こりそうにないこのカラクリを解く鍵は磁場にある。太陽大気で起こる現象はほぼすべて磁場が何らかの役割を果たしていると考えてよい。そしてコロナを熱くする原因もやはり磁場の性質が一枚かんでいる。この謎を解くべく、多くの理論的研究がなされてきたが、その中でも有力なものとしてナノフレア加熱説¹⁾と波動加熱説²⁾が挙げられる。ナノフレア加熱とは、無数の小さなフレアにより、磁場のもつ潜在エネルギーを解放してコロナに熱を与える。一方、波動加熱とは、磁場を伝わる波のエネルギーを熱エネルギーに変換してコロナを温める。

どちらももっともらしいが、観測による証拠探しは長年困難を極め続けた。そこで太陽観測衛星

「ひので」³⁾の登場である。「ひので」搭載の可視光望遠鏡によって、プロミネンス⁴⁾やスピキュール⁵⁾といった彩層・コロナ中の微細構造が振動している様子を動画としてとらえたのである。微細構造は磁力線を可視化したものとみなすことができ、観測された磁力線の振動はその磁力線を伝播する波動によって引き起こされていると考えられる。筆者を含めた「発見者たち」は、これがコロナを伝わる波動の証拠であり、統計的にもコロナの波動加熱説は大いにありうると世界中で宣伝して回った。

しかしながら、先のわれわれの研究には問題点があることも認識していた。それは、観測された波動が進行波か定在波か区別できなかったことである。進行波はエネルギーを一方方向に運ぶため、コロナへ効率的にエネルギー輸送がなされていると言えるが、定在波の場合、波がどこかで反射して戻ってきていることを意味するため、コロナまで波動のエネルギーが供給されているのかがあやふやになる。進行波を動画内で捕まえる努力は世界中で行われ、いくつかの研究グループから進行

2012年4月より宇宙科学研究所に異動

波を検出したとのイベント解析数例が報告された⁶⁾⁻⁹⁾。だが、統計的にどの程度の波動がコロナへ抜けているのか、またそのエネルギー輸送量がどれくらいなのかを明らかにせねばならない。

2. スピキュールの動画解析

そこで進行波の統計解析に取り組むことにした。2010年度の1年間、筆者はアメリカのロッキードマーティン太陽天体物理学研究所に滞在して研究を行うことになっていたので、当研究所のDe Pontieu氏（発音が難しいので英語のまま記す）と共同で行うことにした。彼は先述の「ひので」によるスピキュール観測のデータから波動を発見した人物で、筆者自身が学べることも多そうであり、組んで研究すればよい成果が出せるのではないかと密かに思っていた相手である。研究対象は彼の得意分野に合わせてスピキュールを使うことにした。「ひので」による観測を実施し、1.6秒の超高時間分解能の撮像間隔で約1時間分のデータを取得した（図1参照）。太陽の縁から生えている針状の構造がスピキュールである。このスピキュールは惑星間空間に開いた磁場の足元に位置しており、コロナ加熱ならびに太陽風加速の観点からも波動の性質を調べる意義が大きい。

さて、約2,000枚の画像が手元にある。その中にスピキュールもたくさん写っている。読者のみなさんはこの状況をどう感じるだろうか。他分野の天文研究者の方なら、「データがたくさんあってうらやましい」とか「もう成果が出たも同然」と思うかもしれない。しかし、太陽観測データの解析はそんなに楽ではない。空間2次元に加えて、時間方向にも情報があるのだ。いや、だからこそ得られる物理ももちろんある。だが、それを解析・処理する特殊な方法を自分で考え出さねばならない。ここで手を抜く、または迂闊に進むと、貴重な情報を見逃し、価値のない論文ができあがる。誰にも引用されない論文ばかりを書くなどは、税金と研究者人生の無駄遣いであるので

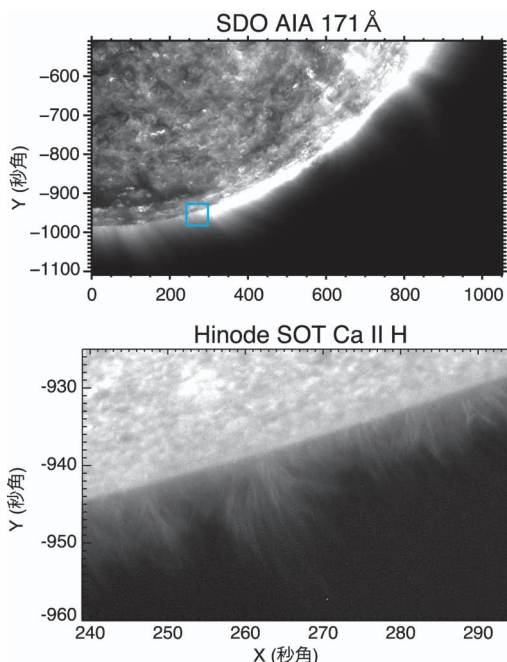


図1 観測領域。太陽の南極コロナホール。上図の青い四角で囲った領域がSOTの視野。1秒角は太陽面で約700 km。

自分は慎重に進みたい。この辺りの話は鈴木 建さんの月報記事¹⁰⁾がためになるので読んでいただくことにして、今回筆者は渡米して研究を遂行していたこともあり、有意義な成果を出すことに専念した。

スピキュールのデータ解析の難点は、視線方向の重なりをいかに分離するかである。スピキュールは時間とともに横に動く。そうすると画像の上で横にいた別のスピキュールと重なり合い、そしてまた離れていく。これがあちこちで起こっている。一つのスピキュールを綺麗に分離しなければ、統計解析は実施できない。過去のいくつかの研究がイベント解析で終わっている理由がここにある。この問題を打破してこそ、自分の価値が上がるというものだ。

ところが、これがなかなかうまくいかない。De Pontieu氏との議論の中で、「手動検出はしない」というルールを作り、スピキュールの自動検

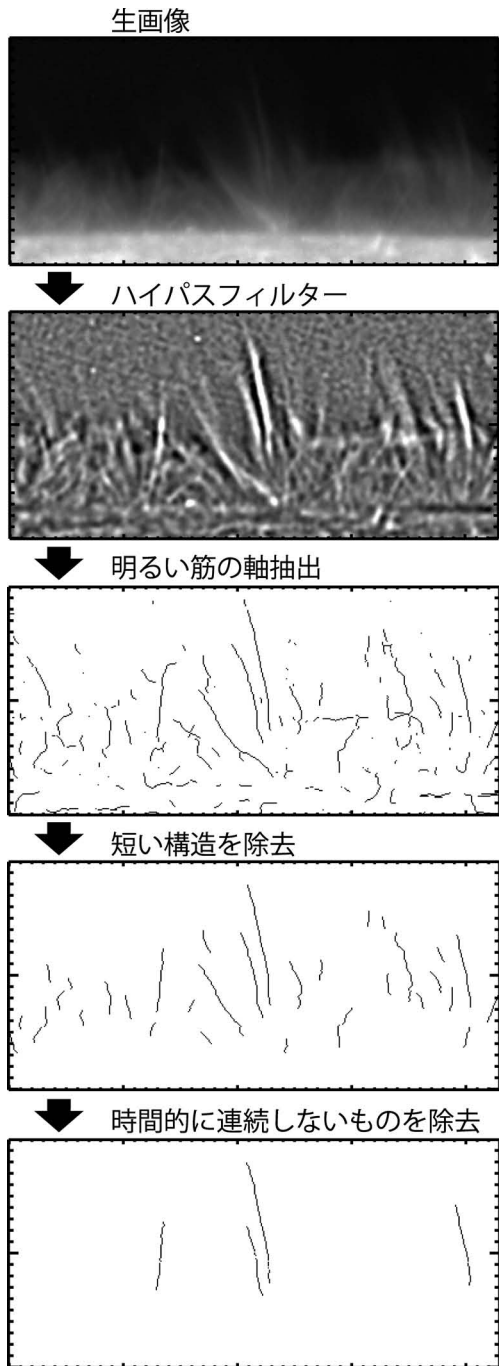


図2 おおまかな画像処理の手順.

出を試みていたのだが、結局完成までに6カ月以上かかった。詳細な判定条件は書かないが、太陽動画解析の一例として手順を紹介する。図2のように、まずはハイパスフィルターをかけて微細な構造を強調、その明るい構造の中心座標を取得し、ノイズ起源のものを除去した後、時間的に連続するものだけをスピキュールと認定した。アメリカ滞在の半分以上はこの自動検出プログラムの作成に費やしたことになる。その間、虫垂炎にかかってアメリカの病院で手術を受けたりもした（費用47,000ドル！）が、何とかアメリカ滞在中に統計解析に取り組むことができた。

3. 進行波の検出

ここからが研究の本編である。自動検出プログラムにより、取得した動画から89のスピキュールを得た¹¹⁾。統計結果にいく前に、具体例を二つ紹介しよう。

まずは1例目。図3をご覧いただきたい。左2枚のパネルはある時刻のスピキュールの2次元画像で、これらは同じものである。針状構造がいくつか写っているが、ここで取り上げるのは、図中に線で強調してあるスピキュールである。この線は高さごとに色を変えてある。つまり、スピキュールの低い位置のものは濃い色、高くなるにつれて薄い色を付けてある。さて、このスピキュールに沿った波動があるとすれば、スピキュールの各高度でうねりが伝播する様子が見られるはずである。そこで、高度ごとの水平方向の動きを調べたものが右のパネルである。横軸は水平方向の位置、縦軸が時間で、色は左パネルのものに対応している。もしスピキュールのある高さの部分が、ある位置から動かなければ、右パネルの図においてその点は縦に真っすぐな点の列となる。左右にくねりがあることからわかる通り、このスピキュールは振動している。そして、黒い点で示したくねりの位置が時間とともに上昇していることもわかる（時間とともに濃い色から

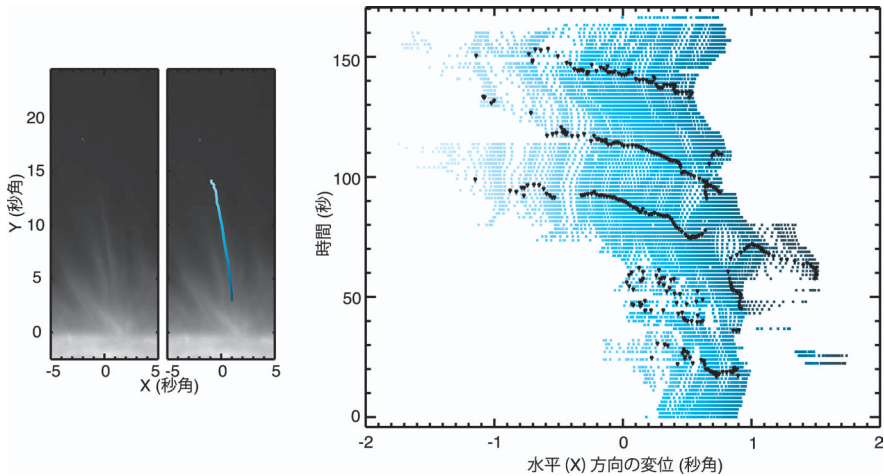


図3 検出されたスピキュールの例. 左2枚は同じ図だが, 片方だけスピキュールの軸を強調してある. 色の違いは高さを表す. 低い部分が濃く, 高い部分は薄く表示されている. 右パネルは各高度の部分が水平方向に動く様子を示す位置-時間図. 色は左パネルの高度に対応. 各高度でのくねりのピーク位置に黒い点を打ってある.

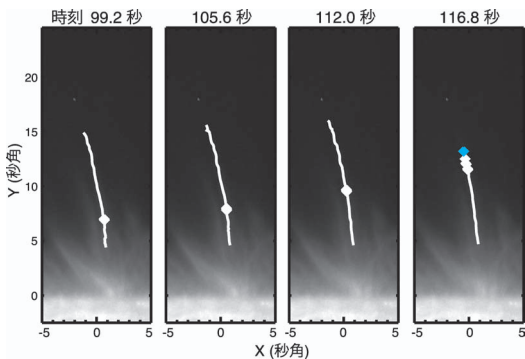


図4 図3のスピキュール上を伝播する波動. 白・青点はそれぞれ上向き進行波・定在波を表す.

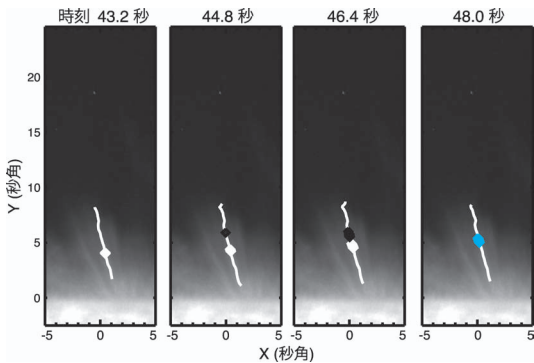


図5 別のスピキュール上を伝播する波動. 白・黒・青点はそれぞれ上向き進行波・下向き進行波・定在波を表す.

薄い色に向かって黒い点が移動している). これは, スピキュールに沿って上向きの進行波があることを示している.

筆者と De Pontieu 氏はこの図で大いに感激できるのだが, 他人にはどうも理解してもらいにくい. その理由は明白で, 3次元の情報を2次元に落とし込んでいるからであり, ほかに容易な表現の仕方がないのである (求む電子媒体!¹²⁾). 4回くらい前段落を読み直して図を見ればわかっていただけだと思う. とはいっても, 理解されないのは本意ではないので, 進行波の存在を強調した図を紹介する. 図4は時間の異なる4枚の図で, 各時刻におけるくねりの位置を丸で示している (白が上向き進行波, 黒は下向き進行波, 青は定在波). この図では, 上向き進行波が伝播していく様子が示されている. 位相速度は数百 km/s である. また, 周期は約 50 秒であり, これまで報告されている波動 (3分以上)^{4), 5), 13)} と比較して高周波である.

同様に, 別のスピキュールの例を図5に示す. このスピキュールでは, 上向き・下向きの両進行波がある高さでぶつかり, 定在波を形成している様子がわかる. 感動的な結果だ.

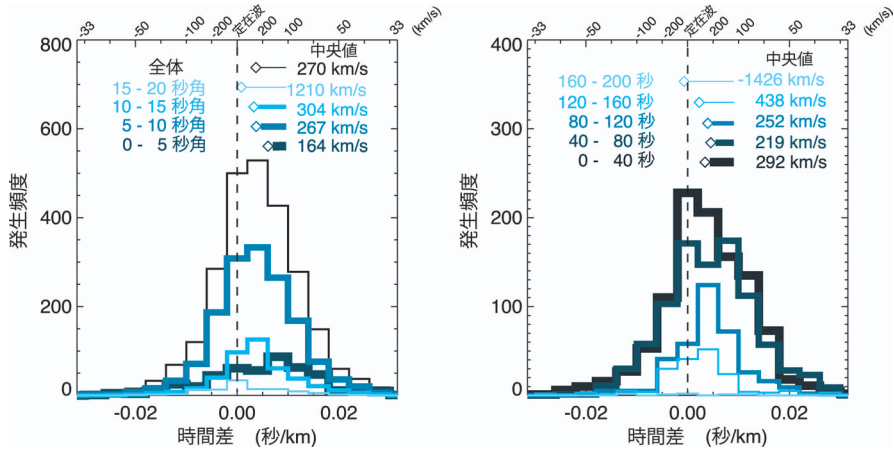


図6 位相速度の高度分布（左図）と時間分布（右図）。横軸は位相速度の逆数。

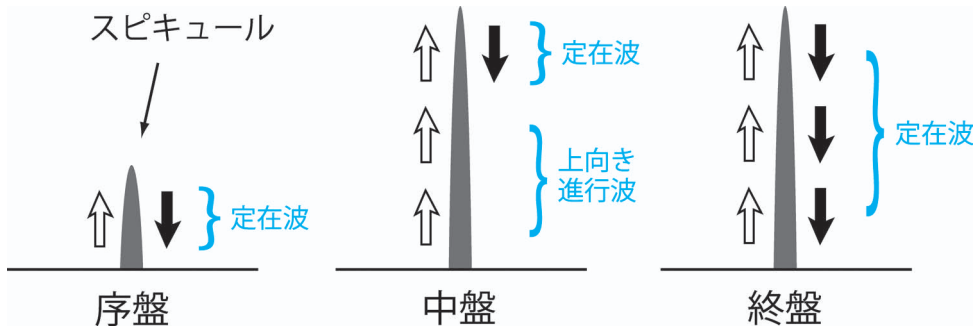


図7 位相速度の高度・時間依存性に基づいた解釈。

4. スピキュール波動の統計的性質

本研究では、すべてのスピキュールについて進行波・定在波の検出を行い、各波動の位相速度を求めた。ここでは、位相速度の高度および時間ごとの変化を調べた結果を紹介する。

まずは高度ごとの位相速度について。高度を5秒角ずつに分け、それぞれの高さでの位相速度の分布を示したのが図6の左パネルである。横軸は位相速度の逆数となっている点に注意されたい。X軸中央が定在波、右側が上向き進行波、左側が下向き進行波である。この図から、全体的に上向き進行波が多いことが挙げられる。また、低い部分では上向き進行波が多いが、高度の上昇とともに定在波の傾向が強くなっていることがわかる。

つづいて、時間ごとの位相速度について。スピキュール発生（厳密には、検出プログラムがスピキュールと認識し始めた時刻）から40秒ごとの位相速度の分布を調べた。結果は図6の右パネルのとおり。位相速度が一度下がって再度上がる傾向が見られる。全体的には上向き進行波が多いものの、スピキュール初期は定在波がやや多めに存在し、その後上向き進行波が卓越、終盤に向かって再度定在波の傾向が強くなっていることが示されている。

これらは何を意味するのか。筆者らの解釈を図7に示した。まず、波動はスピキュールの足元で生成されていると考える。そして、スピキュール発生初期はスピキュール自身の背が低い。そのため、上向き進行波はすぐにスピキュールの上端に

達し、直ちに反射されて根元に戻ろうとする。ゆえに、スピキュール全体で上向き+下向きの波動が同時に存在するため、定在波となる。つづいて中盤においては、時間とともにスピキュールの身長は伸びる。すると、上向き進行波はスピキュール上端で反射されるため、上端付近では定在波が多く見られるものの、反射波が足元まで帰ってくる時間はないため、残りの部分では上向き進行波の観測割合が増える。終盤にかけて、スピキュール自身の成長は止まり、上端での反射波は足元まで帰ってくるができる。よって、スピキュール全体で定在波が見られる。この解釈は位相の高度・時間依存性を的確に説明できるが、あくまで統計的な見方であり、個々の例で顕著に見えるわけではない。スピキュールのダイナミクスにも強く関連するため、実際はもっと複雑であろう。

一つ強調しておきたいことは、観測された位相速度は局所的なアルヴェン速度を反映しているわけではないということである。この解析結果からわかるとおり、上向き・下向きの波動の合成が随所で起こっており、実際のアルヴェン速度よりも大きな値が観測されている可能性が高い。よって、スピキュールを用いた震動学を行う際には注意が必要である。さもなくば、間違った磁場強度などを算出しかねない。

5. コロナ加熱の可能性

観測された高周波波動について、エネルギー輸送量（ポインティングフラックス）を見積もった。統計解析から求めた位相速度と速度振幅（270 km/s, 7 km/s）、およびプラズマ数密度を 10^{10} 個/cm³ と仮定すると、約 10^5 erg/cm²/s となる。静穏コロナの加熱エネルギーとしては十分な値¹⁴⁾ではあるが、大半はスピキュール上端付近で反射されているため¹⁵⁾、コロナへ抜ける波動はこれよりもずっと少ないと考えられる。そのため、今回観測された高周波波動によるコロナ加熱への寄与は小さく、より多くのエネルギーを運ぶ

低周波波動がより重要である⁵⁾と結論づけられる。

しかし、この研究は現在も発展途上であり、今後複数の観測領域における波動の比較や統計量の精度向上に伴い、これらの結論はより正確なものになると期待される。なお、今回の解析のために作成した自動検出プログラムは完璧ではなく、スピキュールの成長速度や波動の発生地点および反射高度、速度振幅の時間変化などを正確に導出するに至っていない。これらをうまく導きだし、理論モデル¹⁶⁾⁻¹⁹⁾と定量的な比較を行うことも必要であろう。

6. 最後 に

ここで紹介した解析結果から、スピキュールを伝播する進行波の存在は事実となった。ただし、今回検出されたものはどれも高周波の波動であるが、動画を見る限り低周波の波動も同時に存在している。これらが除かれているのは、水平変位のくねりの高度伝播を波動の判定条件とする検出プログラムの特性による。振動周期とスピキュールの寿命がほぼ同じである低周波波動は、半周期程度の運動しか観測されないため進行波の判定が困難である。一方、高周波波動は1スピキュールにおいて複数のくねり（数周期分）が見られるため、進行波の性質を調べやすいというメリットがあり、今回の成果につながった。進行波の低周波成分を正確にとらえるには、スピキュール上空に伸びる高温かつ長寿命の磁力線の観測が必要となる。そのためには、現在運用中のSDO、将来ミッションのIRISやSolar-Cなどによる紫外線・極紫外線観測が有効な手段である。

謝 辞

本研究は筆者（岡本文典）と Bart De Pontieu 氏の共同研究¹¹⁾に基づいています。また、筆者は日本学術振興会の特別研究員として、さらに筆者のアメリカ渡航期間の一部は同会の「組織的な若手研究者等海外派遣プログラム」の援助を受けています。ロッキードマーティン太陽天体物理学研究所の職員のみなさんにもお世話になりましたことを記しておきます。

参考文献

- 1) Parker E. N., 1988, ApJ 330, 474
- 2) Hollweg J. V., et al., 1982, Sol. Phys. 75, 35
- 3) Kosugi T., et al., 2007, Sol. Phys. 243, 3
- 4) Okamoto T. J., et al., 2007, Science 318, 1577
- 5) De Pontieu B., et al., 2007, Science 318, 1574
- 6) Lin Y., et al., 2009, ApJ 704, 870
- 7) Nishizuka N., et al., 2008, ApJ 683, L83
- 8) He J., et al., 2009, A&A 497, 525
- 9) Verth G., et al., 2011, ApJ 733, L15
- 10) 鈴木 建, 2011, 天文月報 104, 619
- 11) Okamoto T. J., De Pontieu B., 2011, ApJ 736, L24
- 12) 天文月報 200 巻記念特集, 2007, 29
- 13) Fujimura D., Tsuneta S., 2009, ApJ 702, 1443
- 14) Withbroe G. L., Noyes R. W., 1977, ARA&A 15, 363
- 15) Hollweg J. V., 1984, ApJ 277, 392

- 16) Suematsu Y., et al., 1982, Sol. Phys. 75, 99
- 17) Shibata K., et al., 1982, Sol. Phys. 77, 121
- 18) Suzuki T. K., Inutsuka S., 2005, ApJ 632, L49
- 19) Matsumoto T., Suzuki T. K., 2011, ApJ, submitted (arXiv: 1109.6707)

Propagating Waves in the Solar Atmosphere: Data Analysis with Movies Takenori J. OKAMOTO

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

Abstract: Coronal heating and the acceleration of the solar wind are unsolved problems in solar physics. The propagation of Alfvénic waves along magnetic field lines is one of the candidate mechanisms to carry energy to large distances from the surface and heat the coronal plasma. Recent Hinode observations have directly resolved small-scale transverse oscillations of field lines as a result of Alfvénic waves in prominences and spicules. Here we address the statistical properties of propagating and standing waves along spicules. In addition, we show how to analyze time-series' of movies of the Sun.