

太陽スピキュールの運動の研究*

(第2回科学部研究報告)

A Study on the Motion of Solar Spicules

(The 2nd Report of the Science Club of Yonago National College of Technology)

青木良枝** 大島由也*** 木村宗*** 角田俊一*** 松本卓***
Yoshie AOKI Yuuya OHSHIMA Soh KIMURA Shunichi TSUNODA Taku MATSUMOTO

竹内彰継****
Akitsugu TAKEUCHI

概要

スピキュールとは太陽表面に無数に存在する微小なジェット現象である。従来の観測ではスピキュールは約 20km/s の等速度で上昇・下降し、高度約 1 万 km にまで達すると報告されている。一方、理論からはスピキュールは弾道的に運動すると予想されている。そこで、スピキュールの運動は本当に等速的なのか、それとも理論の予想通り弾道的なのか、飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡で観測されたスピキュールの時系列 H 線画像を用いてその運動の研究を行った。しかし、観測時のシーイングは十分ではなくスピキュールの上昇・下降運動がとらえられたのは 3 例で、そのうち信頼できる物理量が求まったのはわずか 1 例だけだった。高度の測定誤差が約 ±2000 km であったことから、スピキュールの運動が弾道的なのか、等速的なのか区別はできなかった。

1. はじめに

スピキュールとは太陽表面に無数に存在する微小なジェット現象である(図1)。スピキュールは約 20km/s の速度で上昇・下降し、高度約 1 万 km にまで達する(Beckers 1972)。また、スピキュールは主に H 線(波長 6563 nm、水素原子が主量子数 3 から 2 へ遷移する時に放射する光)などの彩層輝線を放射しており、そもそも「彩層」とはスピキュールの集団を見ていると考えられている(Johannesson & Zirin 1996)。

しかし、スピキュールのサイズは望遠鏡の分解能と比較して十分大きくはなく、その運動が等速的なのかそれとも弾道的なのかといった基本的なことすらわかっていない。そのうえ、現在の知識はおもに写真で観測が行われていた時代に得られたものである。したがって、CCD を用いて観測すれば新しい結果が得られるかもしれない。

そこで、わたしたちは京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡で観測されたスピキュールの時系列 H 線画像を用いてその運動の研究を行った。



図1 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で 2003 年 8 月 13 日に撮像された太陽の H 線画像。太陽の縁に沿って見えるぼやけた層が彩層で、そこから針状に突き出したものがスピキュールである。スピキュールは約 20km/s の速さで上昇し、高度約 1 万 km にまで達した後、ほぼ同じ速さで下降する。

*平成 16 年 9 月 1 日受理

**物質工学科 学生

***電子制御工学科 学生

****機械工学科

なおこの研究は、わたしたち科学部が名古屋大学で開催された日本天文学会 2004 年春季年会のジュニアセッションで発表したものである（図 2）。



図 2 2004 年 日本天文学会春季年會ジュニアセッションにおける発表メンバー。右から大島、松本、木村、青木、角田。学会会場入り口にて。



図 3 飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の外観。高さ 20m の塔の上端に望遠鏡が固定されており、地上の大気のゆらぎの影響を受けないようになっている。

2. 観測

2.1. 観測装置

観測は 2003 年 8 月 13 日に京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡（図 3，4）を用いて行われた。なお、ドームレス太陽望遠鏡は地上で得られる最高の分解能を達成するために作られた望遠鏡である。また、観測者は飛騨天文台助手上野悟博士である。以下にドームレス太陽望遠鏡の性能を示す。

- [型式] ドームレス型真空式塔望遠鏡
- [光学形式] グレゴリー式反射望遠鏡
- [有効口径] 600mm
- [主鏡焦点距離] 3,150mm
- [副鏡との合成焦点距離] 32.19m
- [副鏡との組合せによる明るさ] $F/53.7$
- [分解能] 0.18
- [二次太陽像直径] 299.95 mm = 1922
- [望遠鏡鏡筒内真空度] 2 ~ 5mmHg
- [望遠鏡総重量] 21 トン

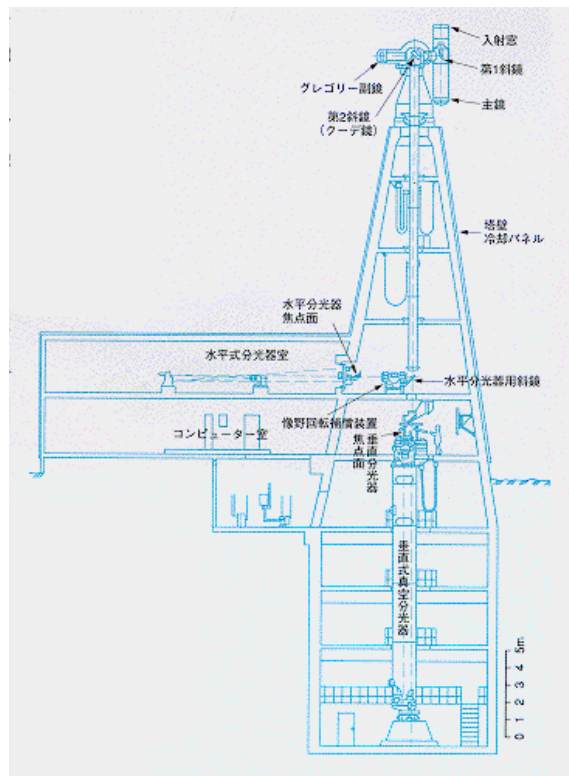


図 4 ドームレス太陽望遠鏡の内部構造。

2.2. 観測方法

まず、望遠鏡の焦点部分にとりつけてあるリオフィルタ（ある特定の波長の光だけ選び出すフィルタ）の中心波長を H 線中心（6563 nm）にあわせた。続いて、その透過光の半値幅を 0.25 nm にした。そして、望遠鏡の視野を太陽の縁（以下「リム」という）のある位置に固定し、20 秒間隔で撮像した。このとき、CCD カメラの露出時間は 0.5 秒とした。なお、観測の継続時間は 11 時 07 分から 12 時 47 分（JST）までの約 2 時間である。

観測時、シーイングは短時間で良から悪までめまぐるしく変化した。そして、シーイングの平均値はじょじょに悪くなっていった。また、視野全体が雲に隠されることが観測時間内に数回あった。

なお、画像は 2×2 にビニングしたため、1020×1012 ピクセルとなった。なお、ピクセルサイズは太陽面上で約 290 km（角度にして 0.4 arcsec）である。そして、データは 10 ビット tiff ファイルとして保存した。

3. 解析

解析では画像処理言語 IDL を使用した。なお、解析に使ったコンピュータは Sony VAIO PCG-GRX71 である。

3.1. 解析プログラム

解析には IDL で次のようなプログラムをつくり、使用した。

）画像のリム上の 3 点の座標を読み込んで、リムに円をフィッティングするプログラム（図 1）。

）リム（フィッティングした円）を基準として、スピキュールの軸（図 1）に沿った光の強度分布を抜き出し、それを太陽の中心からの距離の関数としてあらわすプログラム。

）スピキュールの高度を測定するプログラム。あるスピキュールの光度を動径の関数で表すと図 5 のようになる。図の「段」が光球、「棚」のような部分がスピキュールなので段を光球とし、さらに棚の先端をスピキュール最上部としてスピキュールの高度を求めるプログラム。

）スピキュール高度の時間変化を解析するプログラム。上昇・下降部分それぞれに 1 次関数を、上昇・下降全体に 2 次関数をあてはめる。

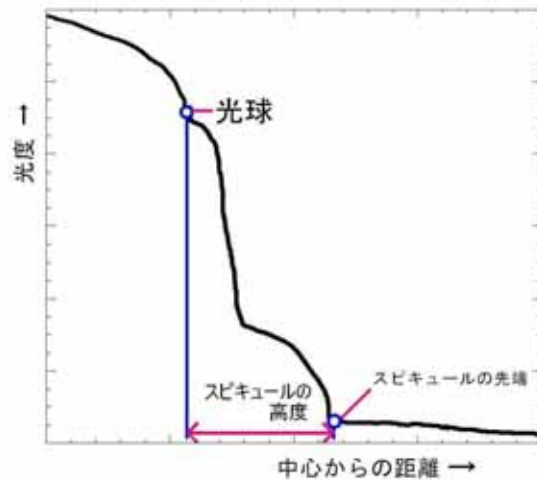


図 5 スピキュールの軸に沿っての光度分布を動径の関数として表わした模式図。図の「段」が光球、「棚」のような部分がスピキュールなので段を光球とし、さらに棚の先端をスピキュール最上部としてスピキュールの高度を求めた。

3.2. 解析手順

まず、高度測定するスピキュールを選択した。撮像された画像からムービーを作り、

シーイングがよいこと。

周囲から孤立しており常に先端が見えていること。

上昇・下降の過程が完全にとらえられていること。

の 3 条件を満たしているスピキュールを選び出した。なお、本研究では約 300 コマもの画像を取得していたにもかかわらず、この条件が厳しかったため、上の 3 条件を満たしたスピキュールはたった 3 本だけだった。しかし、Nishikawa (1988)でも解析されたスピキュールは 4 本だけだったので、本研究での解析数は少ない数字とは言えない。本研究ではこれらをスピキュール 1、スピキュール 2、スピキュール 3 と名づけ、区別した。

図 1 をみると、リムが薄く 2 重になっている。内側のリムはリオフィルタのサイドバンドからの光球の光の侵入により生じているもので、光球リムそのものである (Johannesson & Zirin, 1996)。一方、外側のリムは彩層の頂上である。したがって、この内側のリムからスピキュールの先端までの距離がスピキュールの高

度である。そこで、光球リムからのスピキュールの高度を測るため、光球リムに円をフィッティングし、測定の基準として利用した。

スピキュールの軸に沿って、光球リムを中心として動径方向に±29000km分の光の強度分布を抜き出した(図5)。

図5はスピキュールの軸に沿っての光の強度分布の模式図である。縦軸に光度をとり、横軸に円(太陽の中心)からの距離をとった。図5を見ると、「段」のような部分があるがこれが光球である。また「棚」のような部分がスピキュールである。したがって「段」から「棚」の先端までの距離がスピキュールの高度となる。スピキュールの高度を測るには、部員一人一人が「段」と「棚」の先端の位置をマウスで入力した(図5)。なおこのとき目測誤差を減らすため、部員5人(青木、大島、木村、角田、松本)が独立に測定を行った。

4. 結果と考察

4.1. 過去の観測結果との比較

図6にスピキュールの高度の時間変化の測定例を示す。横軸は時間(秒)で、時間の原点は適当な位置にとつてある。また、縦軸はスピキュールの高度(km)で光球を原点にしてある。スピキュールが上昇し、高度1万kmに達した後、下降していく様子がとらえられている。なお、同じ時間に測定点が5個あるのは、部員5人の測定結果をすべてプロットしたからである。図より、5人の測定が同じ傾向を示していることから、測定は十分信頼できるものであることがわかる。また、5人の測定値のちら

ばり具合から高度の測定誤差が約±2000 kmであることもわかる。

ところで、スピキュールの運動は弾道的にも見え、また等速度で上昇・下降しているようにも見える。そこで、最小二乗法で測定値に放物線(実線)をあてはめ、最高高度、有効重力加速度、初速度(光球から打ち出されたと仮定したときの光球での速度)、寿命(光球から打ち出されて再び光球に落ちてくるまでの時間)を求めた。また、上昇部分・下降部分にそれぞれ直線(点線)をあてはめ、その速度も求めた。スピキュール1, 2, 3のあてはめのパラメータを表1にまとめ、Beckers(1972), Nishikawa(1988)の測定値と比較した。

高度(km)

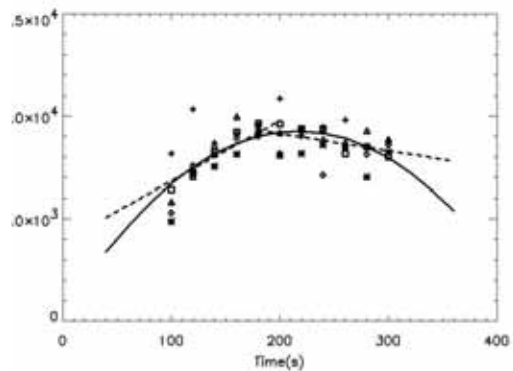


図6 スピキュール1の高度の時間変化。スピキュールの運動は弾道的にも見え、また等速度で上昇・下降しているようにも見える。そこで、最小二乗法で測定値に放物線(実践)をあてはめた。また、上昇部分・下降部分にそれぞれ直線(点線)をあてはめた。

表1 スピキュールの先端の運動が弾道的、等速度的であると仮定して導かれた物理量。比較のために、Beckers(1972), Nishikawa(1988)の結果も示している。なお、Nishikawa(1988)は彼の測定の平均値である。

番号	弾道運動			寿命	等速度運動	
	最高高度 (km)	有効重力加速度 (m/s ²)	初速度 (km/s)		上昇速度 (km/s)	下降速度 (km/s)
スピキュール1	9252	375	83	444	22	8.4
スピキュール2	10865	83	42	1020	11	7.8
スピキュール3	10600	52	33	1266	4	1.5
Beckers 1972	10000	*	*	*	20	20
Nishikawa1988	8650	567	95	338	42	35

まず、スピキュール 1, 2, 3 の測定値と Beckers (1972) の結果を比較する。Beckers (1972) は、スピキュールは約 20km/s の速度で上昇・下降し、その最高高度は約 1 万 km であると報告している。一方、私たちが測定したスピキュール 1, 2, 3 の最高高度はすべて約 1 万 km なので Beckers (1972) の結果を追認したと言える。しかし、スピキュールの運動を等速度運動とみなした場合の上昇・下降速度と比較すると Beckers (1972) と一致しているのはスピキュール 1 の上昇速度のみで、その他は遅めの値 (特にスピキュール 3 の下降速度などは 1.5 km/s で非常に遅い値) となっている。この原因については以下で詳しく議論する。

続いて、スピキュール 1, 2, 3 の測定値と Nishikawa (1988) の結果を比較する。Nishikawa (1988) の特徴は、スピキュールの運動を単なる等速度運動と解釈せず、弾道運動とみなした場合の解析も行っていることである。そこで、弾道運動とみなした場合の結果 (表 1) と比較すると Nishikawa (1988) と一致しているのはスピキュール 1 のみであり、スピキュール 2, 3 は有効重力加速度が小さく、初速度が遅く、そして寿命が長い結果となった。しかし、スピキュールの有効重力加速度が何倍も異なっているとは考えにくく、さらに、スピキュール 2, 3 の寿命がスピキュール 1 のそれぞれ 2, 3 倍であることから、スピキュール 2, 3 は上昇開始時刻が異なる複数本のスピキュールが視線方向に重なっていたと解釈するのが妥当と考えられる。したがって、運動について考察を加えられるのはスピキュール 1 のみである。

4.2 スピキュールの理論との比較

現在までに提唱された主なスピキュールの理論を列挙すると Suematsu et al. (1982), Hollweg et al. (1982), Hollweg (1992), Kudoh & Shibata (1999) となる。これらの理論に共通する点は、磁力線に沿って伝播する Slow Mode MHD 衝撃波が、コロナ・彩層境界 (これを「遷移層」と言う) と衝突し、彩層物質をコロナ内高く持ち上げたものを「スピキュール」と解釈する点である。したがって、これらの理論ではスピキュールの運動は必然的に弾道的となる (図 7)。そこで、これらの理論で計算されたスピキュールの先端の運動に放物線をあてはめて有効重力加速度と初速度を求めてみた (表 2)。

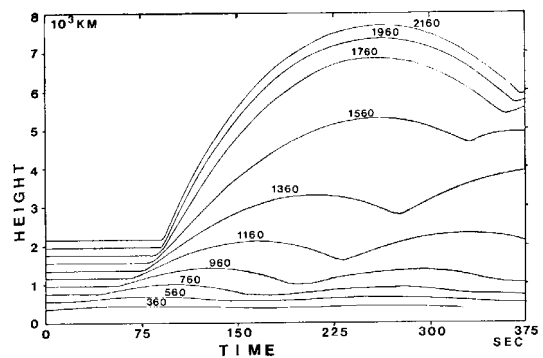


図 7 Suematsu et al. (1982) の理論で予想されるスピキュールの高さの時間変化。一般的にスピキュールの理論では、磁力線に沿って伝播する Slow Mode MHD 衝撃波が遷移層と衝突し、彩層物質をコロナ内高く持ち上げたものを「スピキュール」と解釈する。したがって、スピキュールの運動は必然的に弾道的となる。

すると理論と一致しているのもスピキュール 1 のみであり、スピキュール 2, 3 は有効重力加速度が非常に小さいことがわかる。そもそも太陽の重力加速度は $274 \text{ (m/s}^2\text{)}$ であり、スピキュールの運動には重力だけでなくガスの圧力が関与しているとしてもこれから大幅にずれるとは考えにくい (表 2)。以上のことよりスピキュール 2, 3 は新しい現象を観測したのではなく、上昇開始時刻が異なる複数本のスピキュールが視線方向に重なっていたと解釈するのが妥当と考えられる。したがって、本研究で使えるデータはスピキュール 1 のみとなった。

図 6 より、高度の測定誤差が約 $\pm 2000 \text{ km}$ であることから、スピキュールの運動が弾道的なのか、等速的なのか区別するのはきわめて困難といわざるを得ない。したがって、本研究ではスピキュールの運動は弾道的なのか? 等速的なのか? という従来の問題を解決することはできなかった。

この問題を解決するためには、飛騨天文台での最高シーイング時 (高度の測定誤差を $\pm 200 \text{ km}$ にするため) に、100 本以上の多数のスピキュールの運動をとらえる必要がある。

表2 スピキュールの理論計算の結果に放物線をあてはめて、有効重力加速度と初速度を求めたもの。現在のスピキュールの理論では、スピキュールの運動は必然的に弾道的となるが、その有効重力加速度は太陽の重力加速度 $274 \text{ (m/s}^2\text{)}$ と似た値となる。

理論名	有効重力加速度 (m/s^2)	初速度 (km/s)
Suematsu et al. (1982)	355	74
Hollweg (1982)	310	76
	226	75
Hollweg (1992)	282	52
	388	59
	358	57
Kudoh & Shibata (1999)	202	44

5. まとめ

スピキュールとは太陽表面に無数に存在する微小なジェット現象である。Beckers (1972) は、スピキュールは約 20 km/s の等速度で上昇・下降し、高度約 1 万 km にまで達すると報告した。一方、スピキュールの理論 (Suematsu et al., 1982; Hollweg et al., 1982; Hollweg, 1992; Kudoh & Shibata, 1999) では、スピキュールは弾道的に運動すると予想されている。しかし、スピキュールのサイズは望遠鏡の分解能と比較して十分大きくはなく、その運動が等速的なのかそれとも弾道的なのかといった基本的なことすら区別できないでいる。しかし、現在の知識はおもに写真で観測が行われていた時代に得られたものである。したがって、CCD を用いて観測すれ

ばスピキュールの運動は等速的なのかそれとも弾道的なのか区別できるかもしれない。そこで、わたしたちは京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡で観測されたスピキュールの時系列 H 線画像を用いてその運動の研究を行った。

しかし、観測時のシーイングは十分なものではなくスピキュールの上昇・下降運動がとらえられたのは3例で、しかもそのうち意味のある物理量が求まったのはわずか1例だけだった。高度の測定誤差が約 $\pm 2000 \text{ km}$ であることから、スピキュールの運動が弾道的なのか、等速的なのか区別するのはきわめて困難といわざるを得ない。

この問題を解決するためにはよりシーイングの良いときに多数のスピキュールの運動をとらえる必要がある。

謝辞

本研究は京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡を用いて行われました。データの使用を許可して下さった黒河宏企天文台長、観測して下さった上野悟博士、そして飛騨天文台の皆様にお礼申し上げます。

<参考文献>

Beckers, J. M. 1972, ARAA, 10, 73

Hollweg, J. V. 1982, ApJ, 257, 345

Hollweg, J. V. 1992, ApJ, 389, 731

Johannesson, A., & Zirin, H. 1996, ApJ, 471, 510

Kudoh, T., & Shibata, K. 1999, ApJ, 514, 493

Nishikawa, T. 1988, PASJ, 40, 613

Suematsu, Y., Shibata, K., Nishikawa, T., & Kitai, R.

1982, Sol. Phys., 75, 99

京都大学理学研究科付属天文台パンフレット

現代天文学 ウンゼルト著 小平桂一訳 岩波書店