

活動領域スピキュールの物理量の推定

吉塚 弘康¹, 野澤 恵¹, 北井 礼三郎², 上野 悟³, 大辻 賢一³

¹茨城大学理学部

²立命館大学

³京都大学飛騨天文台

Estimating Physical Quantities of Spicules over Active Region

Hiroimichi YOSHIKAWA¹, Satoshi NOZAWA¹, Reizaburo KITAI², Satoru UENO³, Kenichi OTSUJI³

¹Ibaraki University, College of Science, 2-1-1, Bunkyo, Mito, Ibaraki, Japan, 310-8512

²Ritsumeikan University, 56-1, Toji-in Kitamachi, Kita-ku, Kyoto, Japan, 603-8577

³Hida Observatory, Kyoto University, Kurabashira, Kamitakara, Takayama, Gifu, Japan, 506-1314

hiro19sol@gmail.com, satoshi.nozawa.i@vc.ibaraki.ac.jp

(Received 2019 October 11; Accepted 2019 December 11)

概要

2018年5月10日に太陽表面上の活動領域NOAA12709付近に対し、京都大学飛騨天文台の水平分光器を用いて分光観測を行った。取得した分光データを用いて、クラウドモデルから微細な噴出現象であるスピキュールの先端のドップラー速度および光学的厚さの時間変化などの物理量を導出した。その結果、最大の長さや高度には、最大速度との間に正の相関がみられ、これは低高度での急激な圧力の上昇によりスピキュールが発生するという衝撃駆動モデルで説明可能である。加えて、活動領域付近のスピキュールの寿命は静穏領域のそれより短く、傾斜角を変えながら発達または衰退した。また、スピキュールが曲った道筋となることを示し、光学的厚さが時間とともに増加するという結果も得た。この光学的厚さの時間変化を理解するためには、スピキュール内でのガスの流れの構造を捉える解析が、今後必要である。

Abstract

We spectroscopically observed a solar active region NOAA12709 on the Domeless Solar Telescope at Hida Observatory of Kyoto University. We could detect several spicules in our data which show jet-like dynamic features. Using the acquired spectral data, physical quantities such as the time change of Doppler velocities and optical thicknesses at the tips of the spicules were derived from the cloud model. As a result, a positive correlation was found among the maximum length, height and the maximum speed. This could be obtained by a jet-like model that the spicules were generated by a rapid increase in pressure at low altitude. The lifetime of the spicules near the active region was shorter than that of the quiet region, and the spicules developed or declined while changing the inclination angle. Clear interpretation of the optical thickness increase will require further analysis to detect internal structure of flow field of spicules which are grown along the curve.

Key words: Sun: Chromosphere — Sun: jet — Sun: plages

1. はじめに

スピキュールは太陽彩層の最も基本的な要素の1つである。Michard(1974)のレビューによると、それらは非常に薄い針状であるという形態上の特徴があり、急激な時間変化を示し、太陽のリムで一様に観測される(Pasachoff et al. 1968, 2009; Shoji et al. 2010)。しかし、以前の観測では時空間分解能の限界のため、スピキュールの発達を完全に追跡し、それらの物理を理解することは困難だった(Sterling 2000)。

過去には磁場が比較的強いプラージュ領域上にはスピキュールが存在しないことが報告されていた。スピキュールは、プラージュ(網状組織の小さなプラージュ)、またはそれよりも大きなプラージュ領域の端にしか見られない(Zirin 1974)。静穏領域のスピキュールはSuematsu et al. (1982)によって提唱された衝撃駆動モデルに基づいているとして、Shibata and Suematsu(1982)では、鉛直上方に延び

る一次元の流体計算を行い、プラージュ上のスピキュールの長さは静穏領域のそれより短く、観測できないことを示唆した。この衝撃駆動モデルはKudoh and Shibata(1999)やSuzuki and Inutsuka(2005)、Matsumoto and Shibata(2010)によって拡張された。

最近の観測機器や画像処理技術の発達により、活動領域上のスピキュール(通常は「動的フィブリル」と呼ばれる)および、リムのスピキュールを詳細に解析することが可能となった。De Pontieu et al. (2004, 2007a)では、プラージュ上のスピキュールジェットを議論しており、リムの“タイプ-I”スピキュールと同じ特徴が見られた。さらに、これらのスピキュールジェット(動的フィブリル)とリムのスピキュールの間には密接な関係があることを報告している(Christopoulou et al. 2001; Hansteen et al. 2006; De Pontieu et al. 2007b; Rouppe van der Voort et al. 2007; Zaqarashvili et al. 2007)。加えて、H α 線にはプラージュ上の上部彩層振動を示す観測が多くある。これらの振動はスピキュー

ル構造内の周期的な流れに対応すると考えられている(De Pontieu et al. 2003). De Pontieu et al. (2007a)もまた密なプラージュ領域とNOAA AR 10813の2つの小さな黒点を囲む薄いプラージュ領域との間のフィブリル特性の有意な差を報告した。また, Anan et al. (2010)では, プラージュ上のスピキュールのダイナミクスを Hinode SOT を用いて解析し, 実際にプラージュ上にスピキュールが存在することを示し, 静穏領域のものより短いという結果を得た。しかしながら, スピキュールの鉛直方向の運動の時間変化, 光学的厚さの時間変化については研究が行われていない。

この研究の目的は, 活動領域付近のスピキュールの水平方向, 鉛直方向の運動の考察および, 光学的厚さの時間変化を考察することを目的とする。

以下, 2章では観測について, 3章では解析方法について, 4章では水平方向, 鉛直方向の物理量及び光学的厚さの結果について, 5章では議論・まとめを述べる。

2. 観測

観測対象をFig. 1に示す。この観測対象に対して京都大学飛騨天文台 ドームレス太陽望遠鏡(Domeless Solar Telescope : DST)の水平分光器を用いて, 分光スリットをスキャンさせる方式で2次的にH α 線周辺の分光観測を行なった。観測概要はTable. 1に示す。

3. 解析方法

本研究では, 水平方向の長さ, 速度, 加速度, 鉛直方向の高さ, 速度, 加速度, 寿命, および光学的厚さを導出した。それぞれの導出方法を述べるにあたり, 以後使用する表記と物理量をTable 2に示す。

ただし, 観測領域は太陽中央部から離れているが, 解析を単純にするため, 太陽面に対して経緯及び緯度の角度補正は行なわない。

3.1. 画像作成

スピキュールを同定するために分光データから2次元画像(スペクトロヘリオグラム)を作成した。画像の作成方法について述べる。

観測において, Fig.2のような分光プロファイルが各ピクセルで取得される。縦軸が強度, 横軸が波長 ($\text{\AA}$)である。黒縦線が短波長側から順それぞれにH α -1.25 $\text{\AA}$, H α -0.5 $\text{\AA}$, H α +0.5 $\text{\AA}$, H α +1.25 $\text{\AA}$ を示す。短波長側の青い横線がH α -1.25 $\text{\AA}$ からH α -0.5 $\text{\AA}$ の間の強度の平均値(以後 bw), 長波長側の青い横線がH α +1.25 $\text{\AA}$ からH α +0.5 $\text{\AA}$ の間の強度の平均値(以後 rw)をそれぞれが示す。H α -1.25 $\text{\AA}$ からH α -0.5 $\text{\AA}$ の間のピクセル数を N_{bw} , H α +1.25 $\text{\AA}$ からH α +0.5 $\text{\AA}$ の間のピクセル数を N_{rw} とすると, bw , rw は,

$$bw = \frac{1}{N_{bw}} \int_{H\alpha-1.25}^{H\alpha-0.5} I_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

$$rw = \frac{1}{N_{rw}} \int_{H\alpha+0.5}^{H\alpha+1.25} I_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

とそれぞれ表すことができる。

bw , rw を全ピクセルで導出した後, bw , rw の平均値を示したのがFig. 3左図(以後, add image)である。一方, Fig.

3右図は全ピクセルに対してH α 線中心波長の強度を示した画像である。縦軸, 横軸は空間方向を示し, 単位は秒角である。左図では, 鉛直方向に, 速度が25 km s^{-1} 以上のものまたは速度が-25 km s^{-1} 以下のものは黒く見え, Fig. 3右図のH α 線画像では見づらいスピキュールなどのジェットを見やすくすることができる。

3.2. スピキュールの同定

前節で述べた方法で作成した画像を動画にしてスピキュールの同定を行った。そのうえで次のような条件のもとに同定を行った。

- 伸び縮みしている。
- 寿命が100秒以上(連続する8枚以上の画像に写っている)

以上の2つの条件の下で目視によりスピキュールの両端と思われる場所の座標を記録する方法を用いた。

同定したスピキュールの一例がFig. 4である。Fig. 4は7:59ごろから8:03ごろまでのスピキュールの4分間の時間変化を示した図である。赤のアスタリスクがスピキュールの両端を示している。(0)から(12)までの約3分間はスピキュールが伸び, (13)から(19)までの約1分間は縮んでいる。このようにスピキュールが伸び縮みしていることがわかる。

3.3. 水平方向の物理量

スピキュールの水平方向の長さ L はスピキュールの同定に用いた両端の座標を用いて推定する。スピキュールが直線的であると仮定し, 先端と根元の座標をそれぞれ $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, 1秒角 = 700 kmとすると, 長さ L は,

$$L = 700 \sqrt{\{px(x_2 - x_1)\}^2 + \{py(y_2 - y_1)\}^2} \quad (3)$$

と表すことができる(ここで px, py はPixel Resolution で Spatial sampling の about 0.37 秒角を用いる)。水平方向速度 v_h , 加速度 a_h は, 長さ L を1階微分, 2階微分をすることにより求めた。式にすると,

$$v_h = \frac{dL}{dt} \quad (4)$$

$$a_h = \frac{d^2L}{dt^2} \quad (5)$$

である。ここで Fig.4 の例と同様, 全てのスピキュールの根元の位置ずれは, ほとんど標準偏差一秒角以内に入ることを確認している。

3.4. 鉛直方向の物理量

鉛直速度 v_v は, クラウドモデル(Beckers, 1964)で導出されるスピキュールの先端と判断した箇所のドップラーシフト量 $\Delta\lambda$ を用いて推定する。Beckersのクラウドモデルでは, スピキュール中の源泉関数, 光学的厚み, ドップラー幅, ドップラーシフト量を与えることで, 観測されるプロファイルの形状を求めることができる。このクラウドモデルを観測で得られたプロファイルにフィッティングすることで, スピキュールの物理量を導出することが可能である。なお, フィッティングの際には各物理量の初期値は, 先人らの研究から推定される典型的なスピキュールの物理量を適用した。ドップラー速度の推定には, ドップ

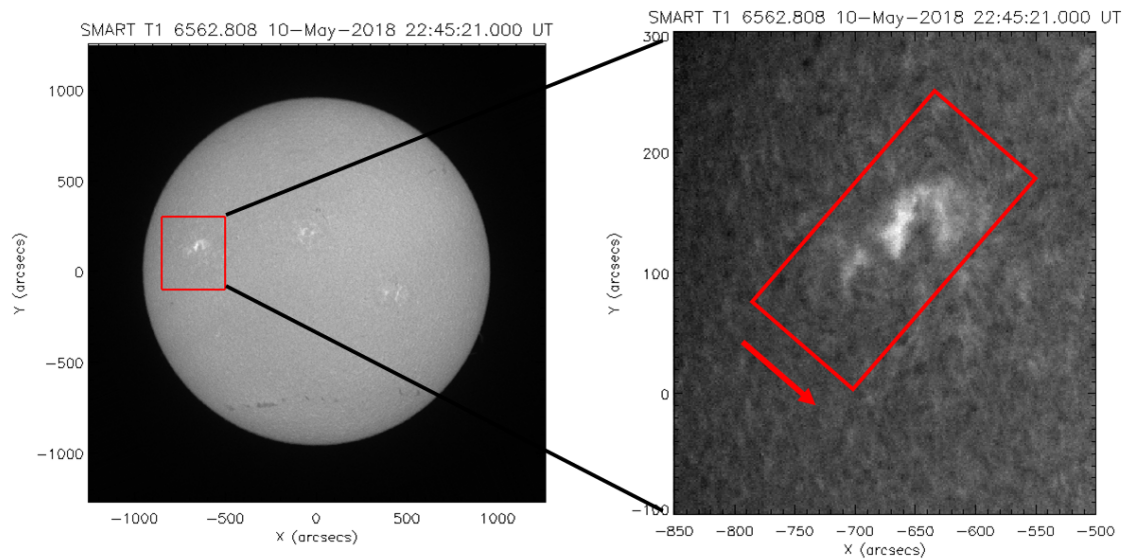


Fig. 1. Two $H\alpha$ center images with the Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART) in Hida Observatory of Kyoto University on 2018 May 10. The right image is an enlargement of the region indicated by the red box on the left image. The analyzed area is shown by red line on the right $H\alpha$ center image. The red thick arrow is scan direction.

Table 1. Observation summary

Target	near NOAA12709
Date (JST)	2018, May-11 7:45 - 8:10
Camera	AVT Prosilica GE1650
Pixel number	1600×1200
Spatial sampling	about 0.37 Arcsec / pixel
Wavelength sampling	about 0.01 Å / pixel
Exposure time	0.02 sec
Slit	0.1×50 mm ($0''.64 \times 216''$ on the Sun)
Scan width	$140''$
Scan interval	about $0.44''$
time scan cadence	about 12 sec
Spectral images in one scan	about 320 images

Table 2. Notation and physical quantities to be used afterwards.

Notation	Physical quantities	Notation	Physical quantities
H	Height [km]	L	Length [km]
v_h	Horizontal velocity [km s ⁻¹]	v_v	Vertical velocity [km s ⁻¹]
a_h	Horizontal acceleration [km s ⁻²]	a_v	Vertical acceleration [km s ⁻²]
px	Pixel Resolution of X axis [Arcsec pix ⁻¹]	py	Pixel Resolution of Y axis [Arcsec pix ⁻¹]
τ	Optical thickness	λ	Wavelength [Å]
$\Delta\lambda$	Doppler shift [Å]	c	Light velocity [km s ⁻¹]
θ	Inclination [degree]		

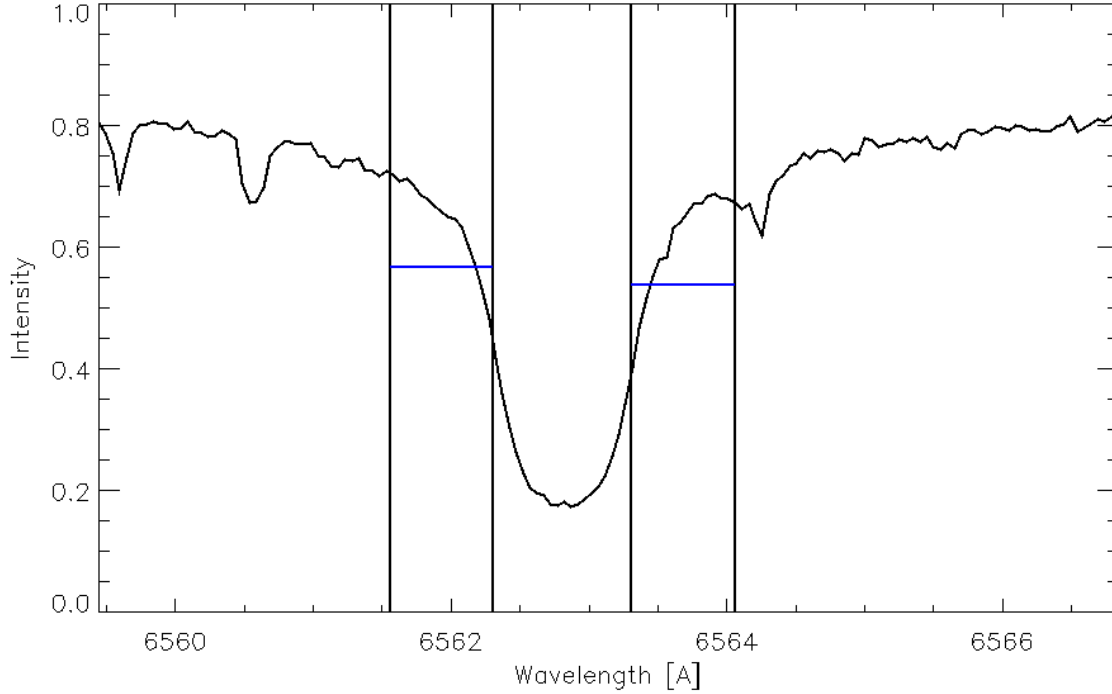


Fig. 2. Spectral profile. X axis indicates wavelength (Å). Y axis indicates intensity. Blue line of left and right indicate average intensity from $H\alpha - 1.25\text{\AA}$ to $H\alpha - 0.5\text{\AA}$, average intensity from $H\alpha + 0.5\text{\AA}$ to $H\alpha + 1.25\text{\AA}$, respectively. Each black vertical line indicate the wavelengths $H\alpha - 1.25\text{\AA}$, $H\alpha - 0.5\text{\AA}$, $H\alpha + 0.5\text{\AA}$, $H\alpha + 1.25\text{\AA}$, respectively.

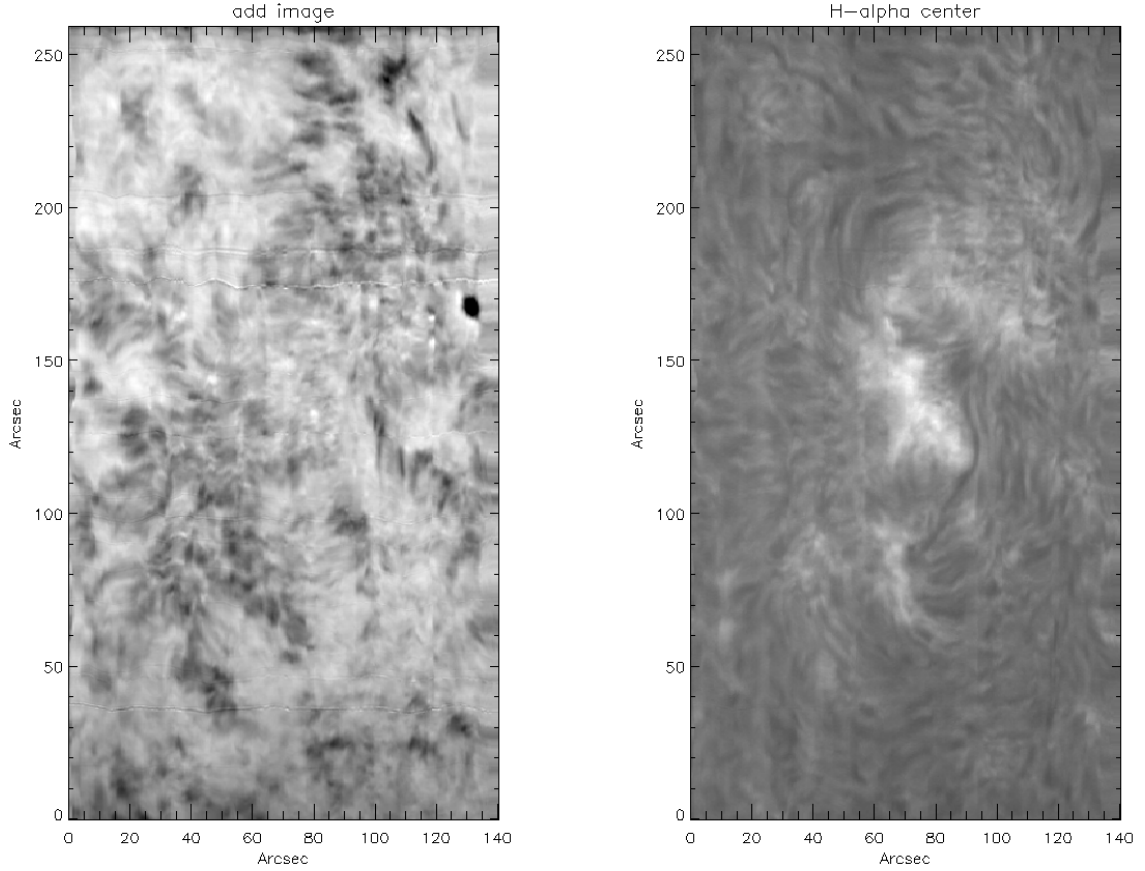


Fig. 3. Left : Add image. Right : H α center image. Horizontal and vertical axis in unit of arcsec.

ラーシフト量 $\Delta\lambda$ と観測波長 λ , 光速 c を用いる. ドップラー速度 v_D は鉛直速度 v_v と等しいとみなし,

$$v_v = v_D = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (6)$$

と表すことができる.

高さは, ドップラー速度をスピキュールが見え始めた時刻から水平方向の長さが最小となる時刻まで積分することにより求めた. ここで各時刻での高さ $H(t)$ は鉛直速度 v_v を用いて, $H(t) = \int v_v dt$ として導出される. 推定される最大の高さ H_{max} は, 見え始めた時刻 t_s , 最大の長さの時刻 t_{max} から,

$$H_{max} = \int_{t_s}^{t_{max}} v_v dt \quad (7)$$

と表すことができる. そして加速度 a_v は導出された高さ H を2階微分することにより導出した. つまり,

$$a_v = \frac{d^2 H}{dt^2} \quad (8)$$

と表すことができる.

3.5. 傾斜角

太陽面に対する傾斜角 θ は, 求めた鉛直方向の高さと水平方向の長さから三角関数の逆関数を使い,

$$\theta = \arctan \frac{H}{L}. \quad (9)$$

として求めた. ここでは, 3-3章で述べたように, スピキュールの根元は水平方向にほぼ不動であったので, 根元の高さも変化していないとみなしている.

3.6. 光学的厚さ

光学的厚さ τ は3-4章で述べたクラウドモデルフィッティングにより導出した.

4. 結果

6本のスピキュールを同定することができた. 水平方向の最大の長さ(L_{max})の平均は4271 km, 最大速度($v_{h\ max}$)の平均は90 km s⁻¹, 平均加速度($\bar{a}_h$)は-1.23 km s⁻², 鉛直方向の最大の高さ(h_{max})の平均は1821 km, 最大速度($v_{v\ max}$)の平均は30.5 km s⁻¹, 平均加速度($\bar{a}_v$)は-0.18 km s⁻², 平均寿命は248秒だった (Table. 3).

Fig. 5は鉛直方向の高さ(H)と水平方向の長さ(L)の散布図であり, 最初と最後をアスタリスクで示している. ここで, 鉛直方向に延びるsp1, sp3, sp6と, ある傾斜角で射出されたsp2, sp4, sp5と分けることができる. 特に後者では直線や自由落下の運動でなく, 傾斜角が時間とともに鉛直に近付き, 立ち上がる構造となっている.

Fig. 6はスピキュールの先端の光学的厚さ(τ)の時間変化を示した図であり, 縦軸が光学的厚さ, 横軸がスピキュールが発生してから時間である. 光学的厚さは, いずれのスピキュールでも時間とともに増加する傾向が見られることがわかる.

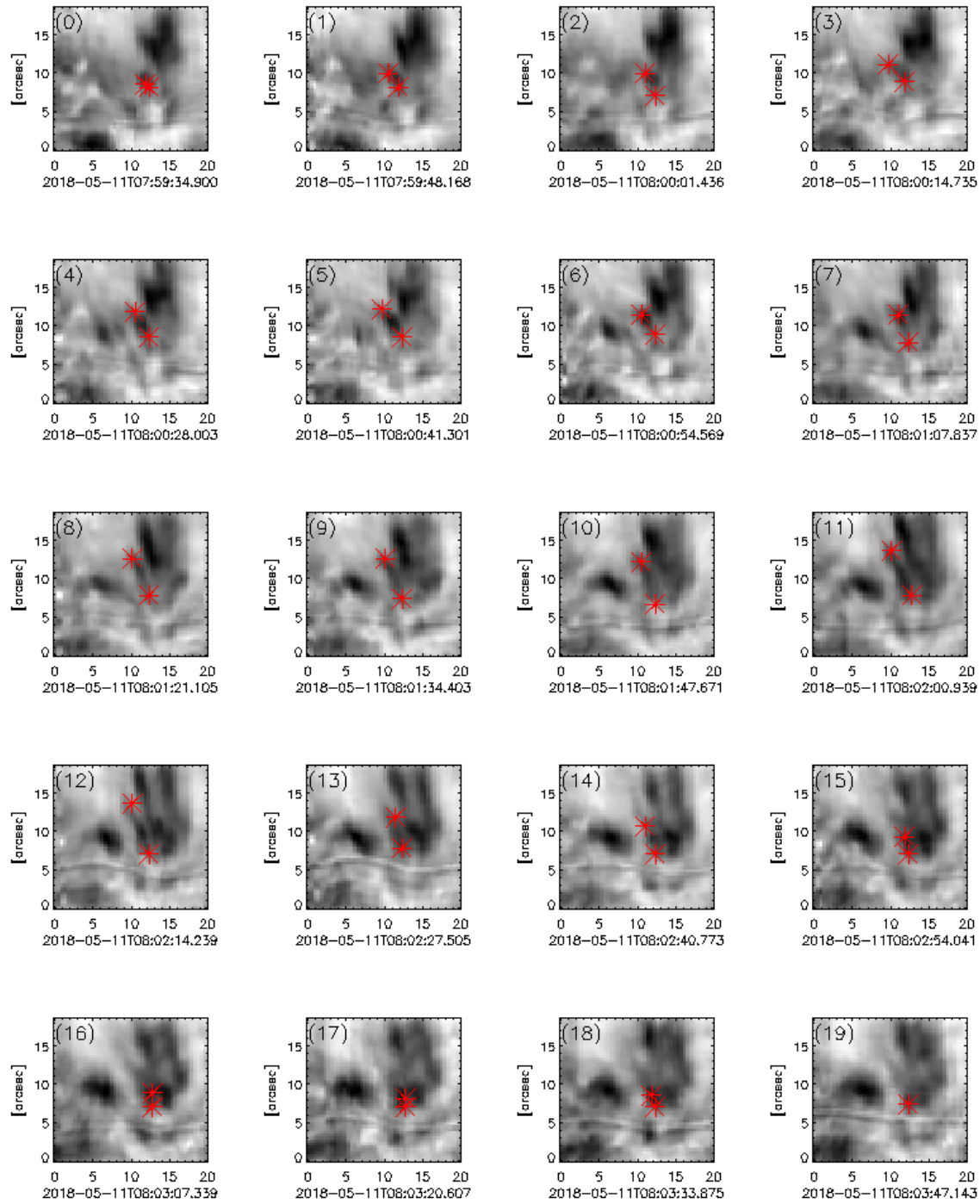


Fig. 4. One example of spicule we identified (7:59 - 8:03JST). Horizontal and vertical axis indicate arcsec. Red asterisks indicate both ends of spicule. (0) to (12) are extending, (12) to (19) are shrinking. The lifetime of this spicule is 252 seconds.

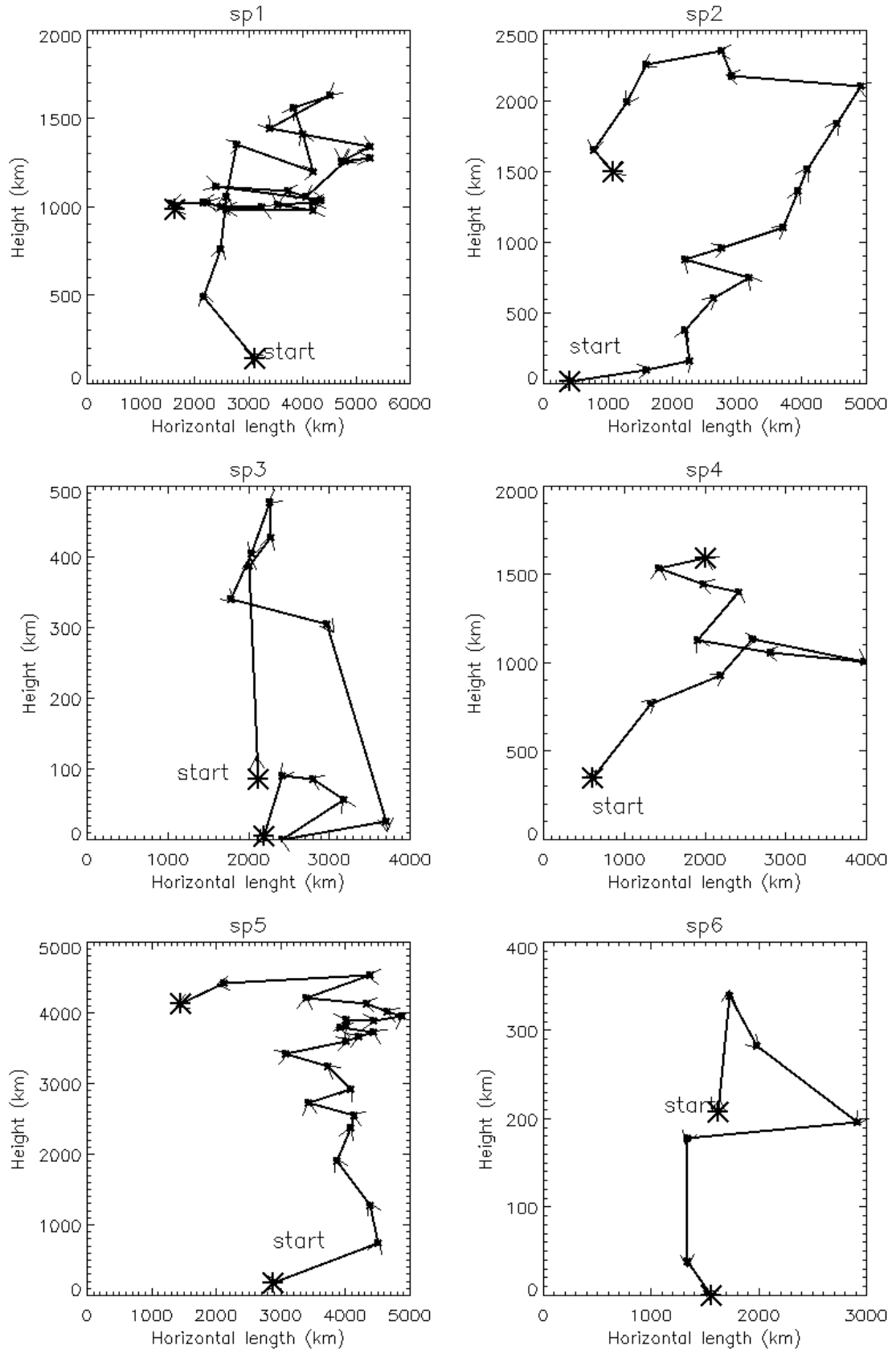


Fig. 5. Scatter plot of each spicule's height vs. length. Arrows indicate velocity vectors for each observed points. The asterisk marks are indicated the start and stop of observation.

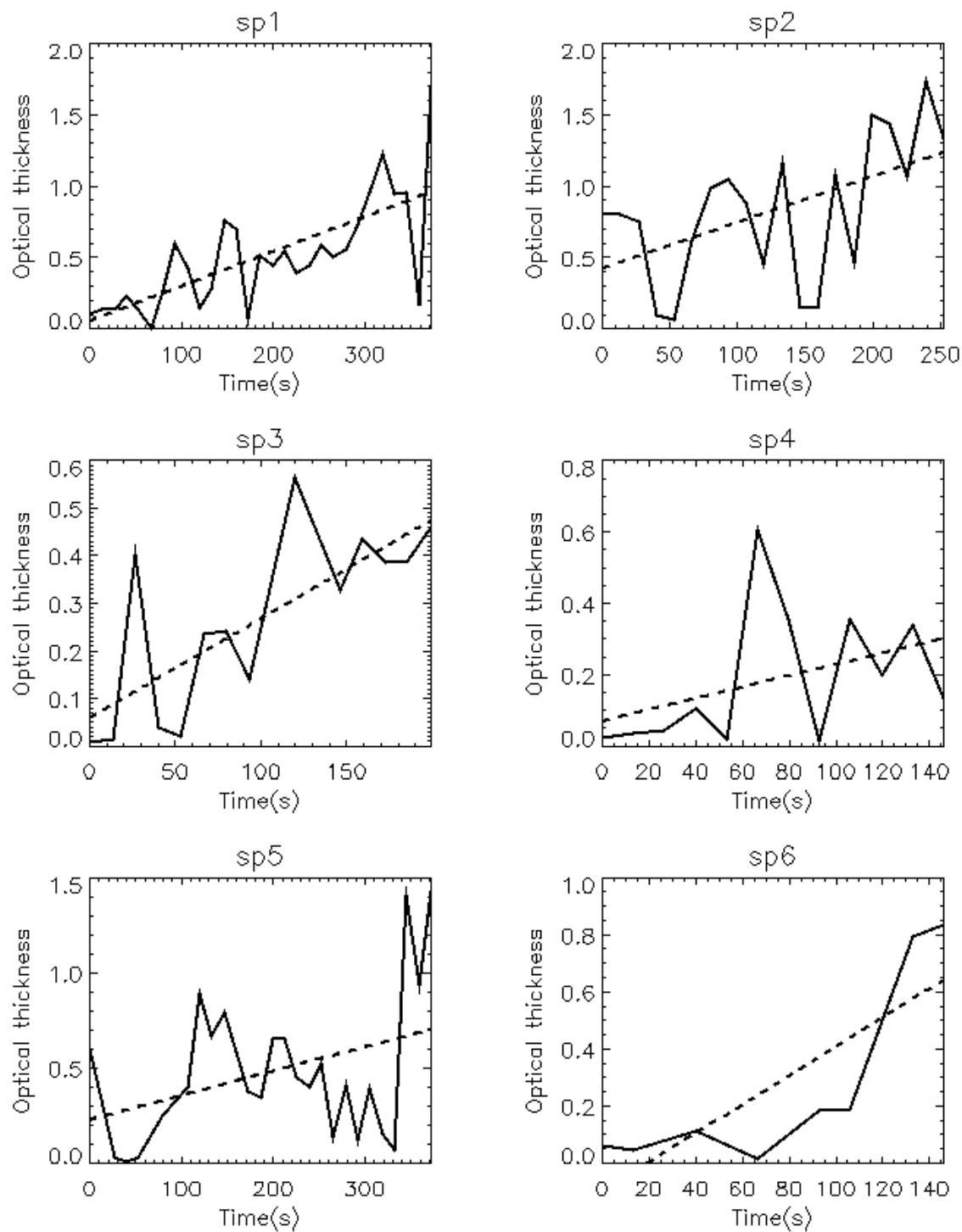


Fig. 6. Time evolution of optical thicknesses at the tips of all spicules. The dotted lines are the best-fitting lines.

Table 3. Summary of physical quantities of six spicules studied. Bottom two rows show the average value and standard deviation for each quantity.

	Horizontal direction			Vertical direction			
	L_{max}	$v_{h\ max}$	$\overline{a_h}$	H_{max}	$v_{v\ max}$	$\overline{a_v}$	lifetime
	(km)	(km s ⁻¹)	(km s ⁻²)	(km)	(km s ⁻¹)	(km s ⁻²)	(秒)
sp1	5250	146	-0.25	1633	29	-0.11	371
sp2	4909	89	-1.25	2354	22	-0.01	252
sp3	3702	89	-1.76	477	33	-0.42	199
sp4	3975	104	-1.77	1595	41	-0.38	146
sp5	4874	74	-0.91	4530	44	-0.07	371
sp6	2913	35	-1.42	339	14	-0.09	146
Avg.	4271	90	-1.23	1821	30.5	-0.18	248
S.D.	839	36.4	0.58	1530	11.4	0.17	103

5. 議論・まとめ

5.1. 寿命

本研究で同定したスピキュールの平均寿命は248秒 (Table. 3)であり, De Pontieu et al.(2007a)のプラージュに隣接するスピキュールの平均寿命が280秒という結果に近い値になった. この値は, 静穏領域のリムのスピキュールの寿命である60 秒- 600 秒(Lippincott, 1957 ; Bray and Loughhead, 1974)の平均的な値より短い. このことは, Anan et al. (2010)でも確かめられたことであるが, 今回の観測でも確認したことになる. 以上のことから, 活動領域に隣接するスピキュールは短命であると判断できる.

5.2. 形状

Shibata and Suematsu (1982) ではプラージュ上のスピキュールの最大の長さは静音領域のそれより短いとされていた. 本研究の観測でも鉛直方向の最大の長さ, 水平方向の最大の長さともに静音領域のリムのスピキュールの長さ6500 – 9500 km (Beckers, 1968, 1972)より短いという結果で, Shibata and Suematsu (1982) と一致した.

Fig. 7は最大の高さ(H_{max})と最大の鉛直速度($v_{v\ max}$)の散布図である. ヒシ型が観測値, 点線が観測値の近似直線である. またこの図に加え, Fig. 5から, 観測のスピキュールは鉛直方向や一定方向に伸びているのではなく, 発達中や衰退中に傾斜角を変えながら発達, 衰退することわかる. これはスピキュールの先端の軌跡が単純な直線ではなく, 曲っていることを示している.

Shibata and Suematsu (1982) の衝撃駆動説は一次元の計算のため, このような二次元の軌跡の変化には言及されていなかった. しかし, 近年は三次元のスピキュールの計算として, Iijima and Yokoyama (2017)などがあり, スピキュールが回転によって傾斜角を変え得ることが示唆されており, 今回の観測結果がこれと同じメカニズムで発生した現象なのかどうか, 更なる議論・検証が重要である.

5.3. 傾斜角と速度

Fig. 8は傾斜角(θ)と速度(v_h, v_v)の絶対値の散布図である. 黒線が傾斜角が30度であることを示す. 傾斜角が

30度より小さければ比較的速い速度を示すのに対し, 30度より大きければ速い速度をほぼ示さない. このことは, Heggland et al.(2007)の傾斜角が大きくなるにつれ, スピキュールの最大速度が小さくなったというシミュレーションの結果を支持する結果となった.

5.4. 光学的厚さ

光学的厚さが時間とともに増加する理由は, いくつか考えることができる.

5.3で示したように, 傾斜角が大きければ速度が遅いことがわかった(Fig. 8). また, 時間とともに2本のスピキュール(sp3,sp6)を除き, 傾斜角が大きくなった. 以上の2つのことから, もしスピキュールの上方だけ傾斜角が大きくなり, 下方は傾斜角が小さいままの構造をしていたとすれば, 時間とともに先端の速度が遅くなり, 後ろの速いガスの塊が追いつくことにより, 密度が大きくなり光学的厚さが時間とともに増加したと考えられる.

他にも, 内部は上昇しているが先端付近が下降に転じたことで, 水素ガスが濃縮することで光学的厚さが増加したと考えることもできるし, スピキュール全体の傾斜角が大きくなることにより, 実際に幾何学的に視線方向の厚みが増した, と考えることもできる.

このように様々に解釈することができるのは, スピキュールの内部の流れが未解明なためである. そのため, 今後スピキュール内部の流れを捉えることが課題である.

5.5. まとめ

本研究の観測では以下のことがわかった.

- (1) 活動領域付近のスピキュールを6本同定した.
- (2) 活動領域付近のスピキュールの寿命(~250 秒)は, 静穏領域のそれ(60 ~ 600 秒)より短い.
- (3) 最大の長さ・高さと最大速度との間に正の相関が見られた.
- (4) 傾斜角を変えながら発達・衰退し, 先端は曲がった軌跡を示す.
- (5) 光学的厚さが時間とともに増加した.

光学的厚さが時間とともに増加する傾向が見られたが, これを解釈するためには, スピキュール内でのガスの流

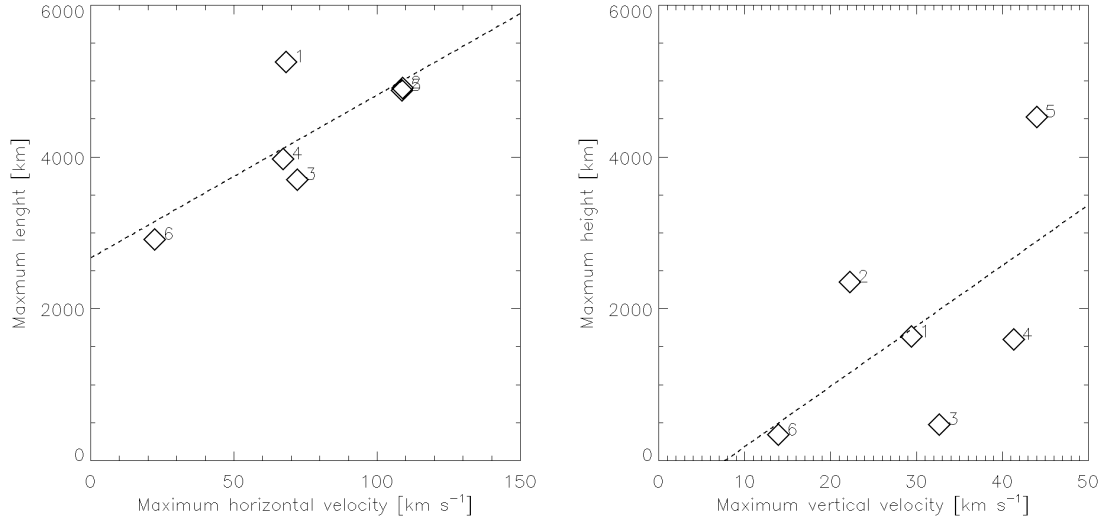


Fig. 7. Scatter plot of spicule's maximum horizontal length vs. maximum horizontal velocity (Left). Scatter plot of spicule's maximum vertical height vs. maximum vertical velocity (Right). White diamonds indicates the observed spicules in this work. The dotted lines are the best-fitting lines.

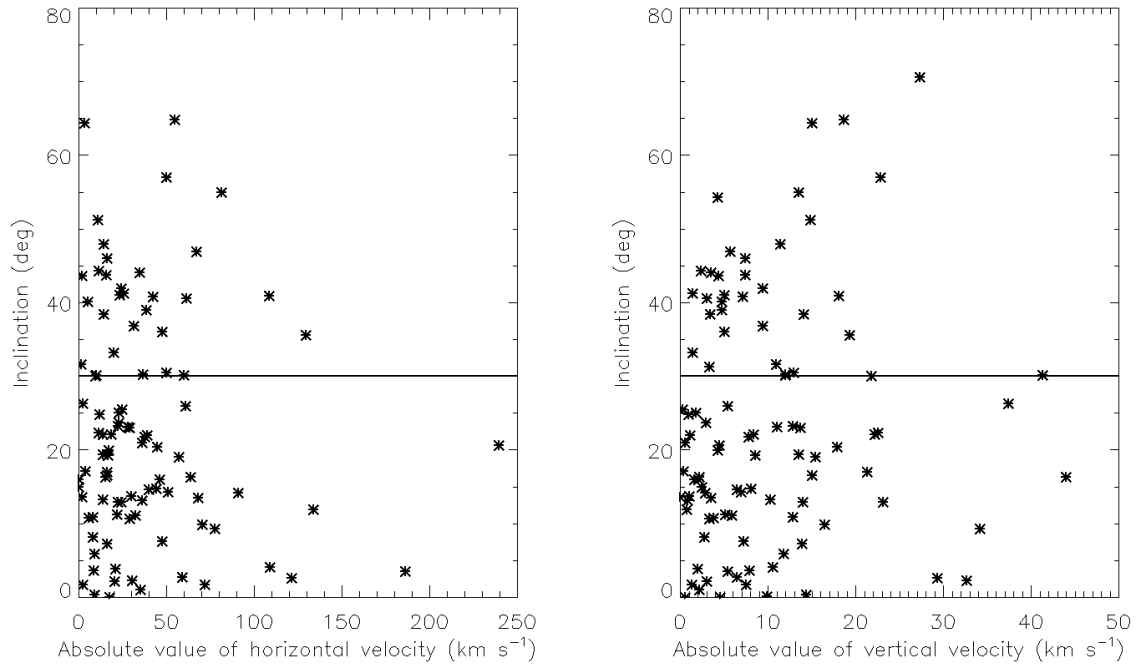


Fig. 8. Scatter plot of spicule's inclination vs. absolute value of horizontal velocity (Left). Scatter plot of spicule's inclination vs. absolute value of vertical velocity (Right). Asterisks indicate observed values at all time of all spicules in this work. Horizontal lines indicate inclination equals 30 degrees.

れを捉えることが必要であると結論づけ、今後の課題を以下に示す.

- (1) スピキュール内のガスの流れを理解する.
- (2) 6本のスピキュールのみで議論を行っているため、シーイングが良いときに観測をし、今後統計的な解析が必要である.
- (3) スピキュールを自動検出できるようなコードを開発する.

今後、これらの3つの課題に取り組む必要があると考えられる.

acknowledgments

この研究は、京都大学飛騨天文台の共同利用の一般公募の一環として行われました. ここに飛騨天文台の皆様と、協力を頂いた方々へのご支援に感謝いたします. また本研究はJSPS科研費 17K00958 の助成を受けたものです. この論文は吉塚の卒業論文を基に、投稿用に精査したものです.

References

- Anan,T. et al. 2010, PASJ, 62, 871
 Beckers, J. M. 1964, Ph.D. Thesis, University of Utrecht(AFCRL-Environmental Research Paper, No.49)
 Beckers,J.M., 1968, Sol.Phys., 3, 367
 Beckers, J. M. 1972, Annual Review of A & A, 10, 73
 Bray,R. J., Loughhead,R.E., & Tappere,E.J., 1974, Sol. Phys., 39, 323
 Christopoulou, E. B., Georgakilas, A. A., & Koutchmy, S. 2001, Sol. Phys., 199, 61
 De Pontieu, B., Erdélyi, R., & de Wijn, A. G. 2003, ApJL, 595, L63
 De Pontieu, B., Erdélyi, R., & James, S. P. 2004, Nature, 430, 536
 De Pontieu, B., Hansteen,V.H., Rouppe van der Voort,L., van Noort,M., & Carlsson,M., 2007a, ApJ, 655, 624
 De Pontieu, B., McIntosh, S., Hansteen, V. H., et al. 2007b, PASJ, 59, S655
 Hansteen, V. H., De Pontieu, B., Rouppe van der Voort, L., et al. 2006, ApJL, 647, L73
 Heggland,L., De Pontieu,B., & Hansteen,V.H. 2007, ApJ, 666, 1277
 Iijima, H., & Yokoyama, T. 2017, ApJ, 848, 38
 Kudoh, T., & Shibata, K. 1999, ApJ, 514, 493
 Matsumoto, T., & Shibata, K. 2010, ApJ, 710, 1857
 Michard, R., 1974, Chromospheric Fine Structure, 3
 Lippicott,T., 1957, Smithson.Contrib.Astrophys., 2, 15
 Pasachoff, J. M., Noyes, R. W., & Beckers, J. M. 1968, Sol.Phys., 5, 131
 Pasachoff, J. M., Jacobson, W. A., & Sterling, A. C. 2009, Sol.Phys., 260, 59
 Rouppe van der Voort, L. H. M., De Pontieu, B., Hansteen, V. H., et al. 2007, ApJL, 660, L169
 Shibata,K., and Suematsu,Y., 1982, Sol.Phys., 78, 333
 Shoji, M., Nishikawa, T., Kitai, R., et al. 2010, PASJ, 62, 927
 Sterling, A. C. 2000, Sol.Phys., 196, 79
 Suematsu, Y., Shibata, K., Nishikawa, T., et al. 1982, Sol.Phys., 75, 99
 Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-I., 2005, ApJL, 632, L49
 Zaqarashvili, T. V., Khutsishvili, E., Kukhianidze, V., et al. 2007, A&A, 474, 627
 Zirin, H. 1974, Chromospheric Fine Structure, 161