

太陽面のジェット現象

——スピキュールとサージの1次元非定常流体数値実験——

柴田 一成*

1. はじめに

太陽の縁を $H\alpha$ 単色光で見ると、針のような小さな突起物が無数に重なりあって上昇または下降運動しているのが見られる。これはスピキュールと呼ばれる一種のジェット状紅炎で、その平均の上昇（または下降）速度は 30 km/s 、最大高度は約 8000 km である。また、スピキュールと非常によく似た現象として、黒点活動域に出現するサージと名づけられた噴出型紅炎がある。サージはスピキュールより大規模な現象であり、その速度は $100\text{--}200 \text{ km/s}$ 、最大高度は 10 万 km を越えることもある。さらに大規模なのはスプレイと呼ばれる現象で時には太陽の脱出速度（約 600 km/s ）を越えて地球近傍まで飛んでくる。

これらのジェット現象はそれ自身興味深い対象であるのみならず、彩層、コロナの加熱や爆発現象（フレアなど）と密接な関係があると考えられ、古くから多くの観測家や理論家の興味をそそってきた。最近の観測技術や理論の発展にともなってその実態は少しずつは明らかにされつつあるが、それでもまだ統一的説明から程遠い状態である。以下では、スピキュールとサージについて、現在までに集積された観測事実や理論研究を簡単に概観するとともに、最近筆者のグループ（末松、柴田、西川、北井）が非定常流体数値実験によって到達した一つの理論的描像を紹介してみたい。

2. スピキュール

スピキュールの存在は 19 世紀にはすでに知られていたが、その本体及び周囲の物理状態が明確になり出したのは最近のことである。すなわち、 $H\alpha$ 線の中心波長から少しずれた波長で太陽面内を見ると、スピキュールは一様に存在するのではなく、いわゆる超粒状斑対流胞の境界に沿って網目状にはえていることがわかったのである。超粒状斑の境界では対流運動によって磁場がかき集められてくるので周囲より磁場強度は大きい。最近の観測では光球レベルで 1 kG にも達する強い磁場要素を発見したとの報告もある。磁場極性は一様であり磁力線は境界から放射状に出る。これらの磁場との関連からスピ

キュールの針状構造が磁力線の反映であろうことは容易に想像がつく。というのは、太陽大気の上層では磁気圧がガス圧にまさるため気体の流れは必然的に磁力線に沿ったものとなるからである。スピキュールの本体の物理状態は普通の紅炎とそれほど違わない。温度は約 1 万度 、密度は約 10^{-13} gm^{-3} ぐらいである。もちろん、もっと詳しい数値や構造の観測データも報告されているが（後述一図 2）、何しろ長さが 1 万 km 以下で幅が 1000 km 以下の小さな現象なので観測的にモデルを作るのはむずかしい。

太陽面内でスピキュールを見ると、その根元に輝点が存在することが多い。これは彩層レベルでの話だが、光球レベルでもそうらしい。実際、超粒状斑境界の光球部にはよく知られた白斑が見られ、最近の観測ではこの白斑は実は小さな（ $\leq 150 \text{ km}$ ）輝点の集まりであることがわかっている。このことから、スピキュールの根元が白斑輝点に対応している可能性が考えられる。

スピキュールの起源については古くから多くの理論が提唱されてきた。これらは大別すると、(1) 衝撃波仮説、(2) ガス圧加速仮説、(3) 磁気圧加速仮説の 3 つになる。衝撃波仮説というのは、スピキュールは鉛直上方に伝播する衝撃波の後流であるとする説で、トーマスが 1948 年に初めて提唱した。しかし、内田 (1961) のようにスピキュールの先端は衝撃波面であるとする説（スピキュールの高密度は輻射損失で説明される）がある一方で、オスターブロック (1961) のようにスピキュールの先端は接触不連続面であるとする説（彩層を伝播してきた衝撃波が彩層-コロナ間不連続面に衝突することによりこの不連続面が上方に飛び出す）などあって、衝撃波仮説の内容は必ずしも一義的ではなかった。その後、衝撃波のたねとなる音波を粒状斑と磁場の相互作用で生成するというパーカー (1964) の理論や、彩層中の衝撃波の伝播を調べたヴェンツェルとゾリンジャー (1967) の理論など現われたが、いずれもスピキュールのモデル構築までには至っていない。アセイ (1976) は、衝撃波仮説ではエネルギー収支から見てスピキュールを形成するのは不可能だと結論した。一方、ガス圧加速仮説は、文字通り圧力勾配によって物質を加速するという説であり、クッペルスとアセイ (1967) 以来各種の理論が提唱されているが、いずれも定性的議論のみに終始し

* 京大理 Kazunari Shibata: Jet Phenomena in the Solar Atmosphere

ている。磁気圧加速仮説というのは、磁力線再結合により磁気圧が生じて物質が加速されるという説で、ピケルナー (1969) や内田 (1969) の理論が有名である。しかし、これは磁場の観測と矛盾する。その他、上記の3つの分類には属さないものとして、海野達 (1974) の間欠泉類似説 (音波が間欠泉における泡の役割を果たすと考える) がある。しかし、この理論も定常流モデルに基づいており、決定打にまでは至っていない。以上のごとく、スピキュール形成の理論に関しては定説はない、というのが最近までの状況であった。

上記の多くの理論が結局の所成功しなかった、あるいは、少なくとも観測家を納得させることができなかった最大の原因は、どの理論も観測と比較可能な非定常モデル構築にまで至らなかったことである。そこで、末松達はスピキュールの非定常モデルを目ざして1次元非定常流体数値実験を試みた。(ここで1次元というのは、前述の磁場との関連に基づくもので、強い磁束管中の流れを想定している。) もちろん、数値実験である以上は何らかの作業仮説があるはずで、末松達の場合は、白斑輝点または超粒状斑輝点がスピキュールを形成するの

はないか、というものである。これらの輝点は周囲より温度 (従ってガス圧) が高くなっていると考えられており、その出現は瞬発的である。実際、ステンフロ (1976) は、光球上部または彩層下部における強い磁束管中の瞬発的な加熱がスピキュールを形成すると主張している。(しかし、彼は数値実験を試みていない!) 末松達の数値実験は基本的にはステンフロの主張の延長上にあるといえる。そして、数値実験は見事にスピキュールを再現したのである。

さて、その結果を以下にお見せしよう。図1は温度の空間・時間変化を示した図である。光球上部に輝点 (経験的な白斑輝点のモデルから、輝点の高さは光球最下部から測って 360 km, 圧力の増大率は 1.5 倍と仮定している) が突然出現すると、パルス状の音波が鉛直上方へ射出される。この音波 (または弱い衝撃波) は密度と圧力が急激に減少する上層へ伝播するにつれて成長し強い衝撃波となる。衝撃波は彩層-コロナ間不連続面に衝突し、以後不連続面は平均 30 km/s の速度で上昇する。スピキュールはこの接触不連続面後方の低温領域に相当する。不連続面の最大高度は約 7000 km, 上昇から落下



図1 1次元流体数値実験によって再現されたスピキュールの温度の空間・時間変化。計算は断面積一定、断熱運動などの仮定のもとになされている。

までの時間は約5分であり、これらの数値は観測とほぼ一致する。表紙は同じく密度の図である。約200秒の周期で衝撃波が再生されているのは、分散性媒質としての重力成層大気の性質と有限振幅起源の非線型効果に基づくものであるが詳しい話は省略する。さて、このようにして再現されたスピキュールの空間的構造が観測とどの程度一致するかについては図2を見ていただきたい。図2はスピキュールが最大高度に達したときのものである。この図から計算結果が観測とほぼ一致することがわかるであろう。

ところで、輝点の出現によってスピキュールができることはわかったが、その物理的機構はどうなっているのだろうか。これは図からほぼ自明であるが、一言でいうと、スピキュールは衝撃波によって形成される、ということである。ただし、スピキュールの先端は衝撃波面ではなくて接触不連続面である点に注意しなければならない。これは、初期条件としての静止大気モデルが接触不連続面(彩層-コロナ不連続面)を含んでいたことに起

因している。そして、衝撃波は通過後の彩層物質を上方へ加速するだけでなく、彩層-コロナ間不連続面に衝突することによって、この不連続面をさらに上方へ加速する役割も果たしている。この衝撃波と接触不連続面の衝突の問題は流体力学的には初期不連続の分解の問題に帰着し、図1のような結果になることは解析的にも証明できる。このような機構でスピキュールが形成されることは、前述のごとくオスターブロックがすでに提唱しており、従って末松達の数値実験は、観測家ステンフロの輝点-スピキュール関係の構想に基づいて、理論家オスターブロックの提唱した衝撃波仮説を非正常モデル化した、という具合にまとめることができる。

最後に、アセイが結論した衝撃波仮説の困難がこのモデルではいかにして解決されたのか述べておかねばならないだろう。それにはアセイのミスも含めて色々な要素が絡みあっているが、まず第一にアセイの用いた衝撃波のエネルギーフラックスの近似式が適切でなかったこと、第二にこのエネルギーをスピキュールの重力エネルギー

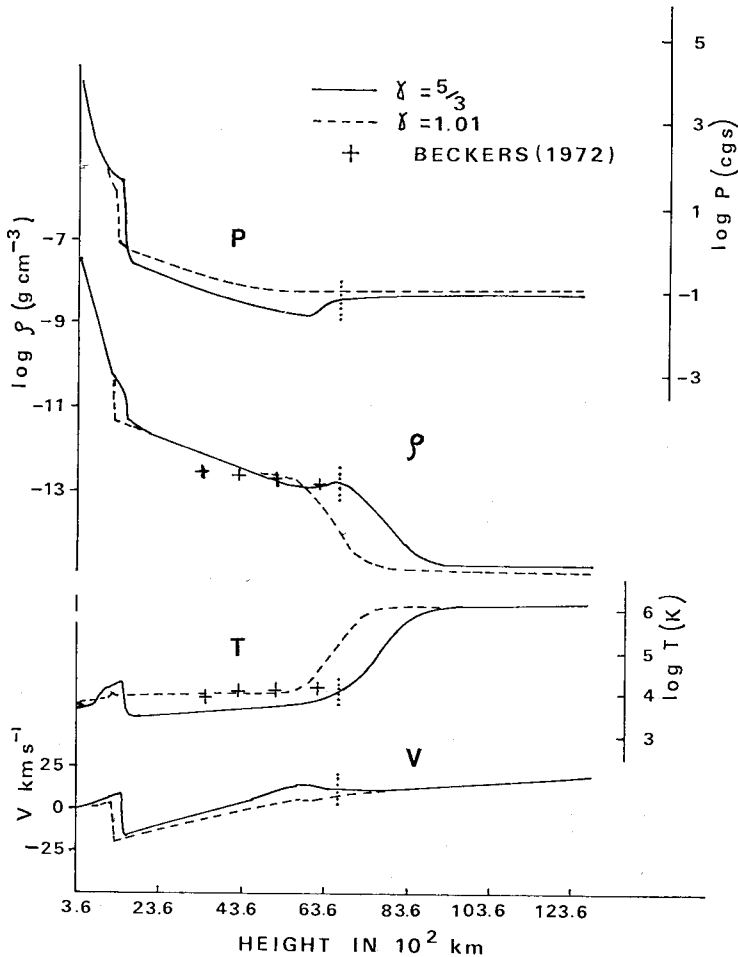


図2 数値実験(実線及び点線)とスピキュールの観測(+)の比較。γは比熱比である。

ギーと比較するとき初歩的な計算ミスをしていること、第三に末松達の非定常モデルではスピキュールの運動はほぼ弾道的であり、従ってその先端の初速度は平均速度(約 30 km/s)より大きい(約 60 km/s)こと、などである。この第三の点は現在の観測と一見矛盾するようだが(つまり、そのような大きな速度はドップラー速度として検出されていない)、非定常モデルの構造を詳しく調べてみると、大きな初速度をもっているのはまさにスピキュールの先端付近だけということがわかり、これを現在の観測技術で検出するのは極めて困難だろう、というわけで結局アセイが指摘した困難は解決されたのである。

3. サージ

サージはスピキュールと見かけ上よく似ている。すなわち、噴出された物質は主として重力によって減速され、最大高度に達したのちは上昇と同じ径路をたどって落下する。その径路を決定しているのはやはり磁場である。そして、密度や温度などもスピキュールと大差ない。サージが見かけ上スピキュールと異なる点はその最大高度または速度だけである。(もちろん、サージが活動域の現象なのに対して、スピキュールは超粒状斑境界の現象であるという点は異なる。)

サージの根元にもやはり輝点が存在する。ただし、この輝点には2種類あり、一つはエラーマン・ボムと呼ばれ、もう一つはサブフレアと呼ばれる。エラーマン・ボムはその $H\alpha$ 線の形状からムスターシュ(ひげ)という別名があり、彩層下部で発生することが知られている。サブフレアの方は、名前からわかるようにフレアの小型のような現象であるが、その発生層や物理状態はまだあまりよくわかっていない。ブルーツェク(1974)によれば、エラーマン・ボムから出現するサージは小さく(長さが 35000 km 以下)、サブフレアから出現するサージは大きい(40000 km 以上)。

サージ形成の理論に関しては、前節で述べたスピキュール形成の理論をそのままサージにもあてはめるという考えが多く、従って定量的に十分満足のゆく理論などほとんどなかったと言ってよい。ところが、最近になって、アメリカのスタイノルフソン達(1979)が、史上初めてサージ再現を目的とした1次元非定常流体数値実験を行ない、観測と見事に一致する非定常モデルをつくるのに成功した。彼らの計算は、彩層上部に輝点が発生すると、温度の増大によって圧力も増加し、そのため圧力勾配が生じて彩層上部の物質が上方へ加速されサージができる、というものである。ただし、実際の計算では、下部境界に輝点があるものと考えて、境界条件として圧力を増大させるという方法をとっている。実は、前節で

述べた末松達のスピキュールの数値実験は、このスタイノルフソン達の論文に刺激されて始めたという側面もあって、輝点を境界条件とするやり方など計算方法はほぼ同じである。

ところで、スタイノルフソン達はサージの根元の輝点が彩層上部にあるものと仮定したが、実際の観測では前述のごとく彩層下部の輝点(エラーマン・ボム)から出現するようなサージもある。彼らのモデルはこのようなサージにも適用可能だろうか? また前節の末松達のスピキュールのモデルでは、ジェット(スピキュール)は衝撃波によって形成されるのであったが、上述のスタイノルフソン達のサージのモデルではジェット(サージ)は輝点出現に起因する圧力勾配によって形成される。この違いはどこからきたのだろうか? また何を意味するのだろうか?

その答はこうである。筆者達が明らかにしたところによると、末松達とスタイノルフソン達のジェット形成過程の相違は基本的には輝点の高さの相違に基づく。輝点が彩層-コロナ間境界に近いと、輝点から射出された(弱い)衝撃波は十分成長しないうちにコロナに到達してしまうので衝撃波によってジェットは形成されず、輝点での圧力勾配によってジェットが形成される。しかし、輝点が彩層-コロナ間境界からかなり離れておれば(つまり深い所に位置すれば)、衝撃波は十分に成長することができるので結局これによってジェットが形成される。これを模式的に示したのが図3である。(a)がスタイノルフソン達のサージモデルに対応し、(b)が末松達のスピキュールモデルに対応する。(a)では接触不連続面を2重に書いてあるが、これは理想的な場合の図で、実際の計算では一つしか見られない。また(b)における輝点から射出された接触不連続面はスピキュールのモデル(表紙)では見えていないが、これは圧力の増大率が小さかったためである。筆者達は図3(a)の型をショック・チューブ型、(b)の型をクレスト・ショック型と呼んでいる。その理由は(a)の場合、ジェットの流体力学的構造が重力を無視すればよく知られたショック・チューブ(衝撃波管)のそれと同じであるためであり、(b)の場合は、ジェット形成上重要な衝撃波が彩層伝播によって成長して鋭い頂点をもつクレスト(波頭)となっているためである。

次に、筆者達の計算による事例を図4に示す。ここで、 h_0 は輝点の高さ、 p/p_0 は圧力の増大率をあらわすパラメータであり、この図ではすべて $p/p_0=5$ と固定してある。 $h_0=1050$ km(彩層中部)のときは2つの接触不連続面が明瞭に見られるが(クレスト・ショック型)、 h_0 が大きくなるにつれて上方の不連続面はしだいにうすくなり、 $h_0=1500$ km(彩層上部)のときには完

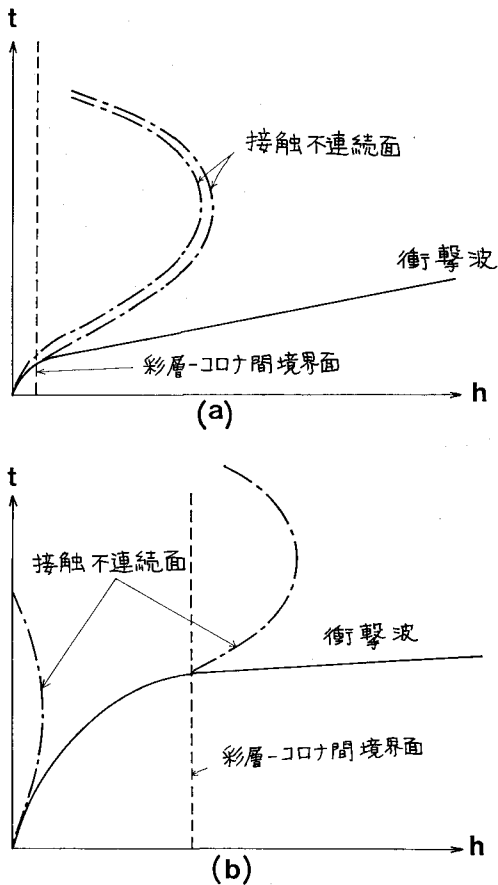


図3 ジェットの流体力学的構造の模式図。(a) ショック・チューブ型, (b) クレスト・ショック型。

完全に消えてしまう(ショック・チューブ型)。(ちなみに彩層-コロナ間境界は $h_0 \approx 1800 \sim 2000$ km である。)このように p/p_0 を一定にして h_0 だけ変化させるとジェットの流れ力学的構造はある高さを境にして、2つの型に分かれてしまう。これをもっと多くの p/p_0 で調べた結果が図5である。図では、ジェットの最大高度(h_{max})を h_0 の関数としてあらわしてある。破線の右側がショック・チューブ型、左側がクレスト・ショック型である。破線がちょうど $p/p_0 = 1$ の曲線の最小点を通っているのはおもしろい。このことは、2つの型のジェットの成因の違い(衝撃波と圧力勾配)から理解できるが詳しくは省略する。

さて、すでに明らかなようにこの2つの型は前節で述べた過去のジェット(スピキュール)形成理論の枠内で論じることができて、ショック・チューブ型=ガス圧加速仮説、クレスト・ショック型=衝撃波仮説となる。従って、その意味では2つの型自体は何ら新しいものではない。筆者達が新たに明らかにした最重要点は、ジェットの成因や構造を決める上で最も重要なパラメータは輝点の高さ(h_0)であるということであり、さらに具体的に述べると、輝点(または爆発)が彩層中部(≈ 1000 km)より深い層で発生したときは必然的に衝撃波によってジェットが形成されてしまう、ということである。このことは、例えば“光球から物質が噴出されてサージが形成される”というような言い方が誤りであることを意味するのである。この輝点の発生高度の重要性はこれまで全く見すごされていたのであった。

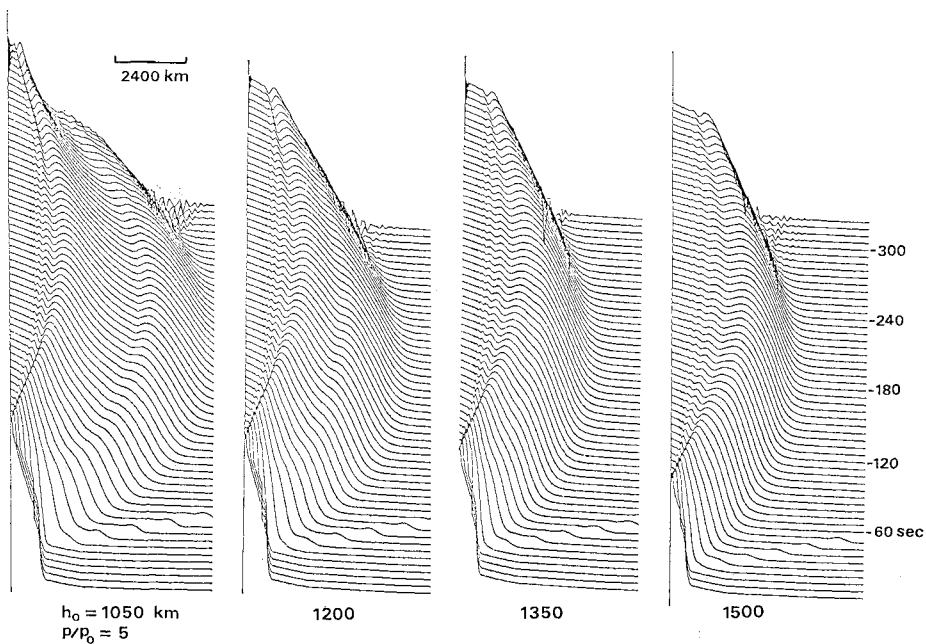


図4 輝点の高さ(h_0)によるジェットの流体力学的構造(この場合は密度)の変化。

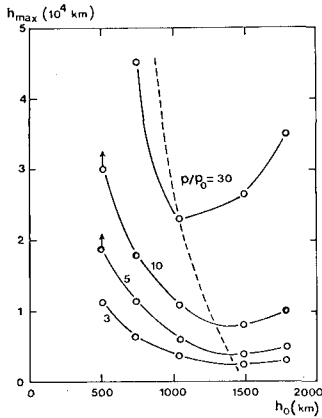


図5 h_0 の関数として示したジェットの高さ (h_{max}).

最後に観測事実との関係について述べておこう。図5に示したすべてのジェットがもつ密度や温度は、サージの観測データとほぼ矛盾しない値となる。従って、サージの形成機構が2つの型のどちらであるかは、輝点の高さで判別するしかない。(空間的構造の詳しい比較によって判別するには、観測データが不足しているし、計算上の仮定ももっと現実的なものにする必要がある。) エ

ラーマン・ボムは彩層下部 (500~1000 km) で発生するので、これから出現するサージはクレスト・ショック型に属す。サブフレアについてはその発生高度が不明なので確かな結論は下せないが、たぶんショック・チューブ型ではないか、というところである。

4. むすび

以上に紹介してきた筆者のグループの理論的描像はもちろんまだ確立したものではない。計算方法や仮定など今後改善あるいは拡張すべき問題点が多い。また、本稿では輝点の起源について全くふれなかったが、これも残された大きな問題の一つである。(この問題に関しては、過去の多くのジェット形成理論で考えられたエネルギー解放機構を再検討してみる価値はありそうである。)そして、もちろんこれらの理論的描像は観測で十二分にチェックされなければならないし、より詳しい観測データ、特に輝点の発生高度と物理状態のデータは早急に求められるべきであり、これらは観測家に残された大きな問題である。

筆者達の研究はまだ始まったばかりである。何年か先には、太陽面ジェット現象の統一的解明に関する解説が書けることを期待して筆をおきたい。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価350(千49円) '81-2月号・12月26日発売!

● 2月号のおもな内容

- ★ボイジャー1号からの報告を村山定男先生がグラフィックページ、カラーページ、本文でくわしく解説します。
- ★小惑星へのさそいは第2回目。アマチュア天文家の活躍ぶりを、大石英夫さんが紹介します。アマチュア向きの興味ぶかい分野です。
- ★厳寒期の天体観測は、日本から見える南十字星のうちの一つの星の観測ガイド、それにおなじみカノープスの観測、そして北海道では、はくちょう座のデネブは沈むか? という限界への挑戦の物語です。
- ★アマチュアの観測所はどうしたらよいかの座談会。場所の選定、管理、保守などの苦心談……ほか

新刊書

天文年鑑 1981年版

毎月の空のほか、惑星、小惑星、流星、彗星、新星、変光星、日食、月食などのこまかなデータを掲載。その他天体観測に最低限必要なデータなどもりだくさんな内容。
■天文年鑑編集委員会編/定価480円発売中

四季の天体観測

—肉眼・双眼鏡・小望遠鏡による—
刊行以来好評であった『新版・四季の天体観測』を全面的に書きかえ、新しい写真、新しい数値であらたに発売。
■中野繁著/定価2300円・最新刊発売中

星の話 星とはなんだろう

星との出会い、星座のおぼえ方など、天文ファンになっただけの少年たちにすばらしい星の世界を語ります。
■吉田正太郎著/定価980円・最新刊発売中