

やさしい天文学シリーズ
II. 太陽物理学 (2)

太陽物理学 (2)

川口 市郎*

5. 太陽大気運動

太陽粒状斑は水素の電離エネルギーを原動力とした太陽の対流運動の観測的証拠とみなすことができる。太陽光球で対流によって運ばれるエネルギーと光によって運ばれるエネルギーの割合を定量的に知るためには、上昇してくる粒状斑と沈みこんでゆく粒状斑間隙のガスの温度差と速度差を知らなくてはならない。このためには粒状斑と粒状斑間隙のスペクトル撮影が必要になってくる。しかも上昇運動は 1 km/sec ぐらいの微量であるために高分散スペクトルが必要となり、露出時間も直接像撮影よりも 2 桁以上も長くなり、この観測はよほど良いシーイングが必要となってくる。

太陽像中心付近に分光器のスリットをおくと粒状斑にあたる部分のスペクトルの吸収線は上昇運動のため、正規の位置から紫側にズレ、暗い粒状斑間隙ではガスの下降運動のため、その吸収線は赤側にズレる。シーイングが理想的であるとき、分光器のスリットの位置とそのスペクトルを図 6 に模式的に示した。また乗鞍岳コロナ観測所で撮影された粒状斑のスペクトルを図 7 に示した。

1960 年まで太陽大気静穏領域の運動は対流運動だけであり、明るい粒状斑は上昇運動、暗い粒状斑間隙は下降運動と考えていた。しかしながら実際観測してみるとこの簡単な予測は 100% の精度で実証されず、単に統計的に正しいというのがせいぜいばいの所であった。当時の人々はこれが実証されないのは観測が悪いからであると考えて一層良い観測結果をえようと努力したのであったが、1960 年合衆国のレイトンが画期的な観測方法を開発して、太陽の速度場が一目でわかるようになり、太陽大気運動は粒状斑の上下運動だけでないことが明らかになった。

通常の写真は発光体の光量に比例した濃淡をフィルム上に記録するが、レイトンは視線速度を写真の濃淡にあ

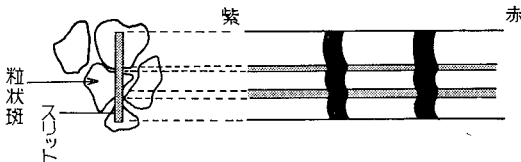


図 6 粒状斑スペクトルの模式図。粒状斑から出る連続スペクトルは明るく、粒状斑間隙の連続スペクトルは暗い。スペクトルの中の濃い縦線は吸収線を示す。

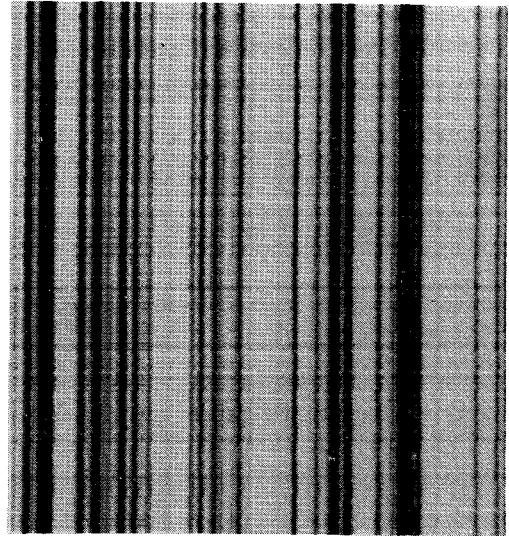


図 7 粒状斑のスペクトル写真 (東京天文台乗鞍岳観測所日江井氏の好意による)

らわす方法を考案したもので、この“速度像”をみれば太陽のどの部分のガスがどれ位の速度で上昇又は下降しているかを一目で知ることができる。コロンブスの卵の譬のように、この偉大な発見も原理はきわめて簡単であるので、図 8 にその原理を模式的に示しておく。太陽望遠鏡で太陽像を作るとき、その途中に光学素片をおいて太陽光束を 2 つにわけて 2 個の同じ明るさの太陽像を分光器の第一スリット上を作る (図 8a)。スリットを通ってきた光は通常の高分散分光器で 2 本のスペクトルに分散されるが、2 本のスペクトルをすこしズラせておく。つぎに第 2 スリットを 2 本のスペクトルの同じ吸収線を切るように配置し、スリットのすぐ後にフィルムを取付ける。こうしておいて一樣なスピードで太陽像とフィルムを連動させると (図 8b)、吸収線の特定の波長の光だけでみた太陽の単色像が撮影される。この方法で最も大切なことは、太陽大気が完全に静止しているとき、スペクトル A, B 上における第 2 スリットの位置を一本の吸収線の中心から等距離になるようセットすることである。(図 8c) すなわちこのときには第 2 スリットから等量の光が送られ、作られた単色像は同じ濃度になる。もし太陽大気のある部分のガスが上昇しているとすると、その部分のスペクトルは紫にズレるので、第 2 スリットから

* 京大理 I. Kawaguchi

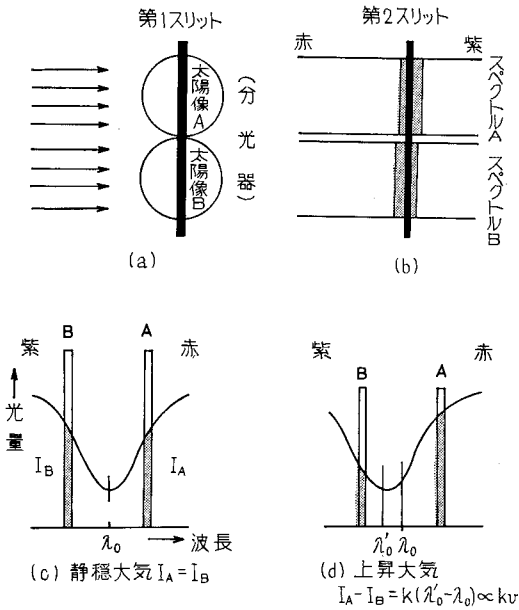


図8 レイトンの視線速度測定器の原理図

入ってくるスペクトルAとBの光は等量でなく(図8d)、単色像Aは単色像Bよりも濃くなる筈である。

こうして作られた一対の単色写真のうち、1枚はそのポジを作り、1枚はネガのまま、この両方を重ねて焼付けるとガスの視線速度がゼロの場所ではグレイに、大きな下降速度をもつ場所は濃く、また大きな上昇速度をもつ場所では淡く仕上がり、太陽面全面に亘りその速度を一目で知ることができる。図8bでは模式的に真直な吸収線を描いたが、本当の太陽スペクトルは図7のようにジグ・ザグ模様を示すので、良好なシーイングの下で撮影された一対の写真は視線速度に関する膨大な情報を提供する。しかし実際問題としては太陽は自転運動をしており、東縁と西縁では視線速度も異なるのでその補正をほどこさねばならずこのような装置の製作は可成むづかしい。このあとでのべる磁場測定装置と共に、この装置は太陽観測に必須のものであり、世界的にみてそれ程珍しいものでもないが我国には一台もない。経済大国を自称する日本の観測研究のレベルは決して大国ではないことを強調しておきたい。

太陽粒状斑が太陽全面に分布しているように、速度像に太陽周縁近くでは至る所に規則的に直径約3万kmの模様が現れた。この模様の中の濃淡から太陽像中心側ではガスは観測者に近づく方向に、太陽周縁側では観測者から遠ざかる方向に流れていることがわかる。また太陽像中心付近では模様は現れず周縁部にだけみられることから、このガスは水平に流れていると考えてよい。とするとこの模様の中心部付近でガスが上昇してきて太陽表面で向きを変え水平に流れそのまわりに沈みこんでい

るといよう。この点に関しては粒状斑とよく似ているが、粒状斑の直径が約1000kmであるのに比べて、その30倍も大きな直径をもつ。この模様は超粒状斑とよばれている。太陽像中心付近でみえない理由は視線速度がないため、超粒状斑は太陽の普遍的現象である。

太陽スペクトルの吸収線の中で最も強いものはカルシウムH、K線及び水素のH α -線である。これらの強い吸収線の中心部分だけの光で太陽の写真をとると粒状斑は消滅してしまって彩層特有のコントラストの強い微細構造を示す。身近な例でいうと直接太陽像を通常の天気図にたとえると、カルシウムKの単色像は高層天気図であるということが出来る。図9には筆者が岡山天体物理観測所で撮影したH α -単色像を示す。このような単色像をよくみると、黒点のまわりの活動域などでは明るい場所が線状やある面積に亘って分布している。このような明るい場所は静穏領域にも網状に分布していることがカルシウム単色像で特に顕著であり、これを網状構造とよんでいる。一方磁場測定器により静穏領域における太陽磁場の分布はこの網状構造に丁度一致するので、K-線の強い輝線をだす網状構造はまた磁場の強い場所でもあり、K-線の強い輝線は何等かの意味で磁場に原因していることは疑いない。

超粒状斑が太陽大気のマカニズムに基礎的に重要な役割を果たしていることは、K-線の網状構造が超粒状斑にびたりと一致していることから推定される。すなわちK-線の網状構造と磁場分布の関係から超粒状斑のまわりで磁場は強く、その内部では磁場は弱いといえよう。その理由としては超粒状斑の内部では磁場があったとしても水平のガスの流れによってその周縁に運ばれて、そこで磁場がたまり、この磁場に沿ってエネルギーが運ばれて、彩層の中でカルシウムK-線を強く発光させているのであると解釈することができる。図10では今迄のべてきた太陽大気構造を模式的に書いておく。

では超粒状斑とは一体何物であろうか。観測によると平均直径は3万km、またその平均寿命は24時間、その様相は大規模な粒状斑と考えられるので、大きな対流要素であるといわれている。超粒状斑はどのくらいの深さから上昇してきた対流要素であろうか。何故太陽対流層の対流要素は粒状斑と超粒状斑の2種類だけにわかれていたのであろうか。今のところ誰も答えることはできない。

6. 太陽大気の振動

レイトンは太陽速度像の時間的変化も調べて太陽大気全面が垂直方向に5分周期で振動していることも発見した。この発見の原理を簡単に説明してみよう。(図11)太陽像中心付近のある限られた領域について2つの速度像を作る。まずA-速度像は東から西に走査し、つづい



図 9 H α 線中心部 0.5 Å 幅で撮影された H α -単色像 (1973 年 8 月 25 日 岡山天体物理観測所にて撮影)

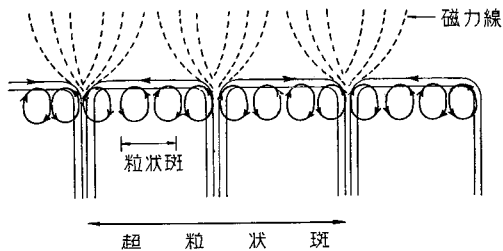


図 10 静穏領域におけるガスの流れと磁場分布。

て同じ領域について B-速度像を西から東に走査して作ることとする。この速度像が露光された時刻を、露出開始時刻を原点として図に記入しておいた。実際の観測によると、図 11 の B' と D' 付近で粒々の模様が現れるが、A'', C'', E'' ではグレイとなる。この模様の出現は太陽大気が 5 分の周期で規則正しい振動をしているからであると解釈することができる。すなわち D'' は D と D' の重ね焼きであり、その時間差は 2.5 分である。たとえば D の速度が +1 km/sec (プラスは観測者から遠ざかる速度を示し、マイナスは観測者に近づく速度を示す。) であれば半周期の 2.5 分後の D' では -1 km/sec の速度を示すと仮定しよう。速度像でプラスは淡く、マイナスは濃く現れるものとする、A-速度像のポジと B-速度像のネガを重ねると 5 分周期の振動をしている領域は濃くなるであろう。しかし C と C' を重ね焼きしてもその濃さは相殺するので模様は現れない。このよ

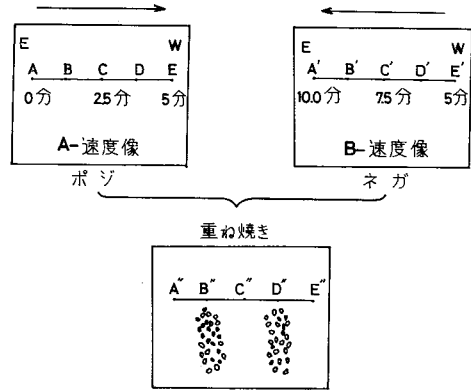


図 11 太陽大気 5 分周期振動発見の原理図。

うにしてレイTONは太陽全面が 5 分周期で振動しており、その振幅は約 1 km/sec、また 1 つの振動要素とみなせる領域の大きさの直径は数千 km であることを発見したのである。この発見は当時誰もが予想もなかったことであり、筆者も大変驚いた記憶がある。

太陽大気の 5 分周期の振動はこんな高尚な装置を使わなくても分光器のスリットを太陽像の 1 カ所に固定したまま、スペクトルを一定の時間間隔をおいて撮影しそれを注意深く比較すれば気が付く。筆者も岡山天体物理観測所でこのような観測をおこなったが、あまりシーイングが良いと粒状斑のこまかい速度場にまどわされるが、粒状斑のつぶれるくらいのシーイングで 5 分間周期振動は比較的簡単に観測できる。事実レイTONの発見後、分光器だけで行った観測結果が数多く公表されているが、一つの振動とみなしうる大気の三次元的な拡がりなど、観測者によって値が異なりまだなすべきことが残されているようだ。

太陽大気の 5 分周期振動は波動現象である。太陽大気の波動はどんな性質をもちどうして発生するのであろうか。一般に波動現象は平衡状態に、ある変位を与えると、もとの状態にかえろうとする復元力が働いたとき生じることはよく知られている。例えば空気を圧縮すると、圧縮された空気はもとの状態にもどるとき隣接した空気に新たな圧縮を生じさせて音波として伝播してゆく。太陽大気においても粒状斑が下層から表面に浮び上がったときその上層の大気が圧縮され音波となって上方に伝播、コロナで反射されて 5 分周期の振動が生じると考えられたことがあった。しかしながら観測をくわしく調べると、一つの振動とみなせる領域の大きさが粒状斑よりはるかに大きいことや、粒状斑の出現したとき 5 分周期振動が始まるといった観測もないことは事実である。

太陽大気に磁場があるとき磁場の一部分に力を加えて磁場を歪ませると、磁場の復元力が働いて歪は磁場に沿って伝播する。この波をアルフヴェン波とよんでいる。

太陽大気では磁場とガスは凍りついたように一緒に動くのでガス粒子も振動を起す。しかし観測された 5 分周期振動は磁場の極めて弱い静穏領域の振動であるので、この波を考えるのは適当ではない。

重力もまた波動現象を生じさせる。対流現象を説明した図 5 で対流の生じないとき (図 5 の右側)、ガス塊をすこし上昇させてやるとやがて浮力を失って落下するが、ある程度落下すると再び浮力をえて上昇し振動を繰返す。これを大気自由振動と称している。自由振動はどのような大気でも生じるのではなく、大気構造が一定の物理条件を満たした場合にだけ発生する。

実際の太陽大気における振動は復元力としてガスの圧縮性と重力の両方が作用しており、生じる波動は複雑なものとなり波の性質もその波長によって変わってくる。太陽大気の温度構造は次章でのべるように粒状斑の存在する光球内では上層にゆく程温度は低下し、やがて極小温度に達する。彩層に入ると温度は上層に増加しはじめて、光球の上層数千 km で約 1 万度に達した後うすい転移層をへて 100 万度にまで上昇しコロナに接続しているものと考えられている。この特有の温度構造が浮力を主な復元力とした長い波長の波を極小温度をはさんだ一定の拡がりの中で持続させて 5 分周期振動として観測されているという考え方が一般的である。

太陽大気の高分散スペクトルをとると吸収線にこまかいジグ・ザグ模様があり、太陽光球は複雑な運動状態にあることを示している。粒状斑の上昇運動と粒状斑間隙の下降運動だけで観測されたジグ・ザグ模様を説明しようとしてもうまくゆかない理由も今や明らかになった。しかしながら粒状斑の出現は上昇運動をともなっていることも事実であるので、観測からこの速度を求めようとすると、超粒状斑内でのガスの水平運動と 5 分周期の振動をさし引いた残りが粒状斑による本当の上昇運動を示すのであろう。しかもこの 3 つの成度成分の大きさの比率は太陽大気の高さによっても異なっているので、本当の太陽大気内での運動を観測から理解することは至難の業であるといわなければならない。

7. 太陽大気の温度構造

望遠鏡を太陽にむけ、白紙に太陽像を投影すると像中心が最も明るく、縁にゆく程明るさが減少している。この現象を周縁減光という。観測は白色光でなく分光器を用いて吸収線の少ない波長域の連続光で行う。周縁減光の生じる理由は連続光をだす光球では深い所ほど温度が高いからである。図 12 では太陽像中心と周縁の幾何学的位置関係を示す。3. 太陽内部の章でのべたように、観測している光がどこから発生するかをきめる量は、太陽大気を構成するガスの“不透明度”と視線の太陽大気を切る“長さ”である。太陽周縁をみるとときには大気層

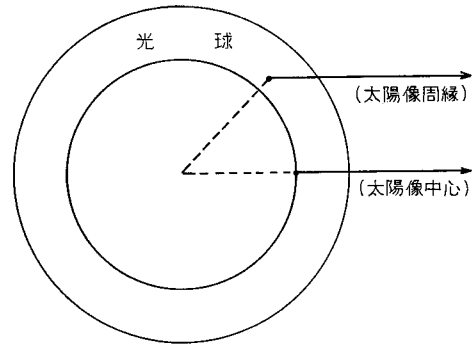


図 12 太陽周縁減光の説明

を斜めにみるので、太陽像中心をみるときよりも浅い所から放射された光を観測しており、縁が暗いということはそれだけ温度が低いと考えてよいのである。

実際問題として太陽大気の温度構造を求めるために連続光での周縁減光を利用するには、周縁部に極めて近い領域の観測を正確に行うことが必要である。たとえば 10 cm の太陽像を使用した場合には縁から 1 mm 以内の部分の明るさが重要となるので、通常のシーイングの下では観測はきわめてむづかしい。それゆえ皆既日食時に月が太陽をかくす最後の瞬間の前後を映画撮影する方法がとられてきた。近頃では科学衛星から 900 Å より短波長側の紫外線領域に拡がるライマン連続光の周縁減光 (ライマン連続光の場合には太陽赤道で周縁増光となる) を用いたりして、光球からその上層 2000 km ぐらいの彩層までの温度分布が求められている。その 1 例としてハーバード・スミスソニアン・レファレンス・アトモスフィアと称せられる太陽大気モデルの温度分布を図 13 に示しておく。横軸は光球内のある深さを原点として km 単位であらわした“高さ”を与えている。正確にいうならばこのモデル大気は周縁減光の観測だけでなく、大気の力学的安定条件も考慮して作られたものである。おそらくこのモデル大気は、その大部分の高さにおいて、現実の平均的な大気の温度分布と 200~300°K 以内の精度で一致しているものと思われる。

周縁減光という観測を用いて温度分布が求められるということは太陽にだけ可能なので有限の大きさのみえない恒星では全面的に理論に頼らねばならない。恒星の場合にはその有効温度と表面重力を知り、かつ恒星大気内でエネルギーの輸送が光だけで行なわれ、その量が時間的にも変化しないという条件と、力学的にも静止しているという条件を用いて温度及び密度の分布を理論的に計算することができる。この方法は確立しており、この方法を太陽に適用してみると、光球では周縁減光にもとづく大気モデルと大差のない大気モデルをうることができるので、その理論は信頼できるものである。しかしながら本質的な相違は周縁減光にもとづいたモデルは極小温

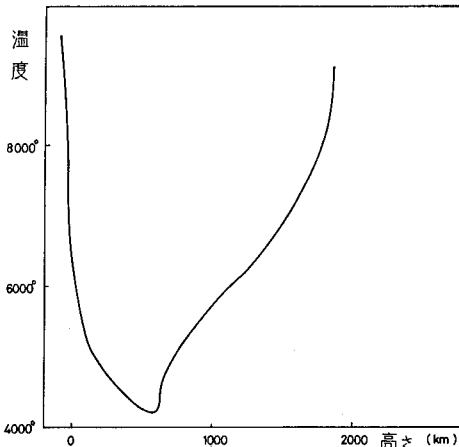


図 13 太陽大気モデルの温度分布 (Harvard Smithsonian Reference Atmosphere). 0 km は可視連続光が太陽像中心からでる高さにほぼ対応する。

度 4200°K から上層で温度が増加に転じるが理論では温度の反転は生じない。これが序論で述べた恒星の彩層を知ることができない理由である。

熱エネルギーは高い温度の領域から低い温度の領域に流れる。従って大気中の極小温度より上層では熱エネルギー以外のエネルギーがたえず供給された結果温度が

高く保たれていると考えねばならない。従ってこの極小温度を境としてその上層と下層とは物理的に性質の異なった大気と考えられる。この意味から極小温度の上層の大気を彩層とよび、極小温度の下層であり、かつ直接連続光で観測できる大気を光球とよんで区別しておく。

彩層を高い温度に保っているエネルギー源は何かという問題は太陽物理学の最も重要な問題の1つである。現在では太陽の対流層で発生した音波がその原因であると信じられている。光球から彩層にうつると密度が急速に減少するので光球を伝播する音波は彩層に入ると粒子速度が大きくなり衝撃波となり急速に熱エネルギーに転換される。この場合音波のエネルギーの減衰は波長に関係するが、彩層では5分周期の振動にみられるような長波長ではなくずっと短い波長の音波が彩層を熱しているといわれる。一方密度の小さい彩層の連続光放射は極めて弱く、主として $H\alpha$ 線とかカルシウム H, K 線、あるいは紫外線領域にある強い線スペクトルを放射して彩層の熱エネルギーを放射し、供給される音波エネルギーと放射エネルギーが等しくなるように温度が調節されている。しかしながらこの非熱エネルギーと放射エネルギーを定量的にくわしく求めることは極めてむつかしく、彩層の温度を理論的に求め観測と比較することはまだむつかしい。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価280円(〒45円) 78-8月号・7月5日発売!

●8月号のおもな内容

- ★夏の夜は、涼しげな星の世界に想いをさせて、星の名前の物語りをお届けしましょう。名前の由来、読み方いろいろ等々。原患さんです。
- ★新製品紹介、今月は五藤光学のマークXシステムです。アマチュアの間話題を呼んだこの機械、性能はどうでしょうか。富田先生の解説です。
- ★8月8日朝、金星食が東日本で見られます。条件は悪いのですが、観測ガイドをのせました。
- ★本誌6月号でご紹介したステッピングモーター、第2回を掲載します。具体的な工作の例が中心です。
- ★視野照明装置は、先月号に続き暗視野照明法の解説。

小型天体望遠鏡教室 選び方と使い方

天文の好きな少年が、学校の先生や父親、天文台の先生との会話を通して、望遠鏡の選び方や正しい使い方を学んでいくという、初心者低学年向けの望遠鏡の本です。天体望遠鏡を買う前の予備知識、店頭で実物を前にしての選び方、具体的な使い方までやさしく書いてあります。レンズ工場の見学や、夏休みでの合宿観測への参加体験記、それに天文台の見学記なども加えて、楽しくおもしろく読める本です。

●富田弘一郎著/B6判・222ページ・900円・発売中

誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京7-6294 電話03(292)1211