

太陽大気の微細構造

末元善三郎*

サングラスを着けた望遠鏡で太陽を観察すると、大概の場合は黒点が散在しているのが見える。黒点は群をなして現われることが多い。黒点の数は毎日毎週増減するが、比較的短期間の増減を繰り返しながら、11年を周期として大きく変化する。11年の周期のはじめに黒点がふえはじめる頃には、黒点は太陽の高緯度に現われることが多い。黒点の数が増加して極大に達し、その後ゆっくりと減ってゆく過程で、発生地帯は次第に低緯度地帯に移ってゆく。

黒点群は通常東西に伸びた形をしている。黒点の磁場の極性は1つの黒点群の中で複雑に入りまじっているが、大ざっぱに言えば、西の部分と東の部分で逆の極性になっている。太陽の自転を考えると、西の部分が先行していることになるので、前者をP (preceding) の極性、後者をF (following) の極性という。今北半球にある1つの黒点群のP, F極性が夫々N, Sであるとすると、同じ北半球の他の黒点群でも同じ関係が成り立っている。この場合南半球のP, F極性はすべてS, Nと逆になっている。1つの11年周期の間は同じ関係が持続されるが、次ぎの11年周期に入って再び高緯度に黒点が出現する時には、南北夫々の半球において前周期と全く逆の極性が現われることになる。

黒点の暗部は2,000~3,000 Gaussという強い磁場を持つ。この磁場は太陽面に立ったと考えて、ほぼ垂直な方向を持っている。半暗部では磁場は1,000 Gauss程度の強さであり、ほぼ水平に暗部から外へ流れ出す方向を持っている。気体はこの磁力線に沿って2 km/sec位の速さで流れ出している。磁場があるのは黒点の部分だけではない。黒点群の地域には数十、数百Gauss程度の磁場が方々に散在している。これ等の磁場も、先程の黒点の磁場と同じく、大まかに言って、黒点群の西半分ではP極性を、東半分ではF極性を持っている。

磁場は単に黒点群に存在するだけではなく、それ以外の静かな地域にも散在している。ただし様に散在しているのではなく、主として超粒状斑(supergranulation)の境界に沿って分布している。表紙は粒状斑(granulation)の写真である。今まで撮られた粒状斑の最良のものは、勿論、気球から撮影されたものである。ここに示したも

のは地上から撮られたものであるが、気球のものに可成り近い位良く撮れている。もっとも地上からこの様なものが撮れる確率は極めて小さい。さて粒状斑は太陽大気下部にある対流層の運動の1つの現われである。若しこれが実験室で作られる対流運動と同じだとすると、1つ1つの粒の中で流体は明るい中心で浮き上がり、周、即ち、境界に向かって水平運動に移り、境界で冷えて暗くなって下降する様な運動である筈である。粒状斑はほぼこの性質を持って居り、従って対流運動であると考えられる。粒状斑の大きさの程度は約1,000 km、地球から見た時の視直径は約1"である。

超粒状斑は粒状斑の何十倍もの規模のものであり、平均直径は30,000 kmである。大きいために、中心から境界に向かっての水平運動が一番顕著に観測され、その速度は0.5 km/secの程度である。また多角形状の境界における下降速度も観測されており、約0.1 km/secである。よって超粒状斑もまた大規模な対流運動である。超粒状斑は静かな部分にも、黒点群すなわち活動領域にも認められる。つまり太陽面は全部超粒状斑の亀の甲状の網目で覆われているのである。

磁場は超粒状斑の中の水平運動によって、いわばその境界に掃き寄せられ、網状に太陽面に散在している。このような網目状の模様は実はずっと古くからカルシウムK線の単色像において明るい網として知られていたのであるが、今や正にK線の明るい網と同じ場所に数十乃至数百Gauss程度の磁場があり、且そこで下降運動が認められるという関係が確立されている。また最近ではK線の網目構造はもっと弱い吸収線の単色像でも認められるばかりか、連続光でも僅かに(約1%)明るく白斑の様に認められることが明らかにされており、超粒状斑の構造が根深いものであることが立証されつつある。ただ明るい境界で下降運動が起っているという事実は普通の対流運動では期待されないことであり、一寸不思議ではある。

単色像で見える網は、細かく見ると糸が完全につながってはいないで、とぎれととぎれである。つまり網は数千粒程度の大きさの明るい斑紋(bright mottle)で構成されている。明るい斑紋を更に細かく見ると、1,000 km位の大きさの明るい点(bright point)から成り立っていることがわかる。この様な明るい点は黒点付近では網から離れたところ、例えば半暗部の周辺などにも多数散見される。それ等の明るい点は100 Gauss程度の磁場を持つ

* 東京大学理学部天文学教室
Zenzaburo Suemoto: Fine Structures of the Solar Atmosphere.

ており、また黒点から遠ざかる水平運動をしている。速度は約 1 km/sec である。彼等はいずれは黒点の納まっている超粒状斑の境界を構成することになる。しかし中には境界に達する前に消滅するものもある。消滅は単独では起らないで、複数の明るい点がくっつくことによって起る。その場合それ等の明るい点は異なる磁極であるらしい。さて超粒状斑を構成している明るい点は発生したり、水平運動したり、その結果消滅したりして絶えず変化しているが、境界の位置は長時間ほぼ保たれる。

境界に沿って散在する明るい斑紋或いは点からは、針状紅炎 (spicule) が明るい光球を背景として、暗くて細い暗条として何本も突出しているのが H_{α} 線の単色像でよく見える。月報アルバム 3 はその例である。これ等の針状紅炎は光球に対してほぼ垂直に立っているらしくて、この写真の様に太陽円板上の比較的周縁部で見ると、見掛け上外に向かってなびいて見える。また太陽円板の周りのすぐ外側では彩層の構造として明るい針状紅炎として観測される。これ等の針状紅炎は超粒状斑の境界に沿って立ち並ぶものであるから、月報アルバム 3 の様な写真も超粒状斑の存在を或る程度示している筈である。事実この写真は広い野原を何十かの細かい地域に生垣で区切った様な印象を与えるであろう。

超粒状斑の網目は数時間位では変化しない安定した模様であるが、何日かのうちにはすっかり変わった模様になる。この変化は、網を構成している点が出没をくりかえしているうちに、網がゆっくりとずれてゆくというよりは、網目の中程に新しい明るい点が紐状に並んで発生してそこが新しい境界になるという形で起ると考えられている。超粒状斑の内部には、境界を形成する明るい斑紋と同じ大きさ位の、10 ガウス程度の磁場の島が点在しているが、それ等は以前そこにあった境界の名残りであると解釈されている。この様な超粒状斑の移動によって、黒点群の中の磁束は直径 1,000 km 位の小さな磁束にほごされ、1本1本あっちこちと持ち運ばれて、やがて太陽全面にひろがり、その結果、極地方にはP極よりF極の方が多く持ち込まれることとなり、次ぎの11年周期の用意がなされてゆくのだという考え方がある。

静かな太陽の部分にはもう1つ大切な構造がある。それは上下方向に振動する構造である。振動の周期は5分、振動単位の大きさは約 3,000 km、上下の速度は 0.5 km/sec 位である。振動は大気全体として足並みを揃えて行なわれるわけではなく、夫々の単位が勝手な位相関係で振動する。奇妙な事にはこの振動運動は活動領域では認められない。これは多分活動領域の強い磁場、或いはその分布状態のために上下運動が抑制されるためであろう。この運動は多分一種の共鳴運動であって、粒状斑の運動とは直接の関係はない、粒状斑の運動単位はもっと小さ

く、また時間的にはもう少し長い時間を要する運動である。

密度の高い光球や対流層では気体の運動が磁力線をもてあそび、変形させ、超粒状斑の網目や、黒点を作るのであるが、密度の低い彩層やコロナでは、反対に、気体は通常磁力線に沿ってのみ運動することを強要される。従って、静かな部分の針状紅炎がケバ立った姿勢をしていることは、そこでは磁力線もケバ立っていることを意味している。つまりそこから出た磁力線は太陽風に乗ってコロナから吹き流されるか、或いはコロナの中を長々と旅行した末に、遠いところで光球にやっとたどりつくのかのいずれかなのであろう。この様な長い長い磁力線の1本1本の根元の部分が夫々針状紅炎として見えているわけである。

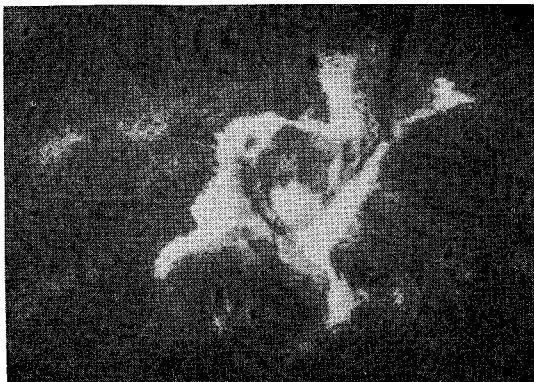
これに対して、活動領域では異極が入り乱れているので、磁力線は比較的短距離で光球へ戻ってくるのが可能である。そのためか活動領域の針状紅炎に相当するものは静かな部分のものよりもずっと寝た姿勢になる。この場合も根元に近い部分だけしか見えないものも多いが、長さは針状紅炎に比してずっと長く 10,000 km 以上であることが多い。これ等の短毛状の暗条 (fibril) は明るい斑紋から1方向になびいて射出している様に見える。月報アルバム 1 では画面のまわりの辺で短毛群が画面の外へ向かってなびいている様子がよく見える。この場合には多分異極はそう近くにはないのであろう。これに対して異極がもっと近くに、数万軒のところにある場合は、両方の根元が見えるだけでなく、途中が長々とながって、磁力線的全貌が見える場合がある。これはいわば異極を結ぶ糸 (thread) である。糸状の暗条には数千軒から数万軒まで色々の長さのものがある。長い場合には磁力線に沿って雄大な曲線を描く。月報アルバム 1 の中ほどにこの様な糸状の暗条が沢山認められる。

磁場の分布は吸収線のゼーマン効果を利用して観測されるが、視線方向に平行な成分 $H_{||}$ の方が、垂直成分 H_{\perp} よりずっと測り易い。 $H_{||}$ の分布図を作ってみると、前に述べた様に、活動領域は大体東西にP極の部分とF極の部分にわかれる。その境界線は当然 $H_{||} = 0$ の線である。これを磁場の中性線 (magnetic neutral line) と呼ぶ。ここでは $H_{||}$ は0であっても、 H_{\perp} は大きいかも知れない、従ってこれは決して全磁場 H が0のところとは限らない。磁場の中性線は実際は幅を持たせて中性帯という方が適当である。事実 H_{α} 単色像では中性帯には微細な構造が少なく、廊下 (corridor) の様なのっぺりした感じである。活動領域の暗条 (active region filament) は廊下に沿って長く横たわる。また中性線をまたぐかっこうで、廊下の片側から他の側へ短かいアーチ状の暗条の列 (neutral line arch row) ができることもある。

さて廊下のすぐ外側はどうであろうか。そこでは短毛状の暗条がひしめいている。その姿勢は大体において廊下に平行であり、またなびく方向は両側で逆になっている。従って磁力線は平面図では中性線の両側で共にそれに平行に、同じ向きに流れており、立面図では太陽面に対して斜入射の形をとり、片側ではやや下向き、他の側ではやや上向きの姿勢になっていると思われる。

フレヤは磁場の中性線附近に発生することが多く、特に中性線が異常な向きになっている時に起り易い。但し正常な向きとは東西に活動領域を分割する線として、子午線に平行な向きのことを言うのである。フレヤは通常中性線をはさむ2点で発生し、それと平行にリボンが2本並んだ形に発達することが多い。この様な場合X線ではこの2本のリボンをつなげるアーチ型の橋が観測される。向きの異常な中性線は例えば次ぎの様にして形成される。今正常な中性線が活動領域を東、西にF、P極の地域に分割しているとする。今P極の地域の中に新しい1対のF、P極が東、西に並んで発生したとすると、古いP極と新らしいF極との関係は当然異常となる。実際には方向が 180° も異常なことはあまり起らない。 90° も違えばすでに極めて異常と考えられている。尚補足するならば、新らしい強い磁場はあたかも鯨が水面に背中を現わしてくる様な按配で出現する。その際 H_α 単色像では1対の磁極をつなげる、何本かの鮮やかなアーチ型暗条群(arch filament system)が認められる。

この様な異常な磁場の分布は、光球や対流層の気体が、磁場にとって最も自然な分布が何であるかということに頓着なく、すなわち磁場に無関係な要因で運動する結果起るのである。その結果コロナの中の磁場には大きな歪みを生じ、局部的に異常な量のエネルギーが蓄積されてゆく。このエネルギーが何等かの原因で爆発的に放出されると、高エネルギー粒子が放出され、太陽電波やX線に異常な増加が起り、またエネルギーの一部が彩層



第1図 (a)

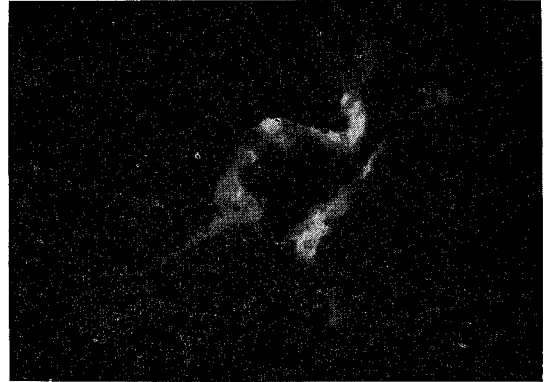
フレヤの単色像(中心波長) (a) 適正露出, 2条のリボンをつなげる何本かの暗条に注意(本文参照).
(b) 不足目の露出, 背景の景色は全く写っていないがフレヤの部分では細かい模様がよく見えている。

に達すると彩層が異常発光をして、 H_α 単色像上のフレヤとして観測されることとなる。

フレヤの見掛けの幅は数千軒であるが、分光学的に推定される厚みはその100分の1位しかない。そこでフレヤは綿の様なすき間だらけの構造を持っているか、或いは本当にたった1枚の薄いシートであるかのいずれかであるわけであるが、最近、後の見解をとるモデルも考えられている。第1図には普通のフレヤの写真(a)とあわせて、わざと不足気味の露出で撮った(b)を示してある。(b)には(a)では見えない微細な模様が認められるが、上に述べた2つの見解のいずれを裏書きするものではない。

フレヤの直後にフレヤ近くの場所から噴出状の紅炎(surge)が吹き出す。またフレヤがおさまりはじめの頃には輪が立ち並んだ様な形の紅炎(loop prominence)が現われる。第1図(a)にその俯瞰図が多少認められる。輪形の紅炎に沿っての気体の運動は下降運動であり、火山の噴火の後に灰が降るのに似ている。更にフレヤ発生後数分経った頃に、あたかもフレヤから吹き出た風が麦稈を吹き抜ける様なざわめきが、何万軒も何十万軒も離れた地域に認められることがある。これはモートン波(Moreton wave)と呼ばれるものである。風は太陽表面に平行に伝わるのではなく、コロナをアーチ状に伝わり、電波を発生しつつ、遠方の彩層に下降するのである。その場合風の波面は黒点や活動領域上空の磁場や密度の分布によって乱されることが多く、フレヤから見て或る程度限られた方位にのみ都合よく伝わり、モートン波として観測されることとなるのである。

以上で太陽大気の中の種々の構造物について大変荒っぽい描写を試みたのであるが、今まで述べたことが皆正しいわけではない。目下論議的となっているものも幾つかある。ここで読者にお伝えしたいことは、必ずしも個々の現象の正しい説明ではなく、太陽大気が如何に複



第1図 (b)

雑な様相を呈しているか、ということと、それ等の諸構造、諸現象が今や何となく納得されかかっているという感じとである。太陽の大気がかくも複雑なのは太陽に中途半端な磁場が存在しているからである。若し太陽の磁場がもっとも弱いか、もっとも強ければ、大気の構造はもっと簡単であるかも知れない。太陽の磁場は、光球や対流層では、気体の運動を支配する程強くはなく、反対に大気の無慈悲な運動にひっかき廻されているのである。磁場をいじめる運動の一番小規模なものは粒状斑の運動である。然し何故かこの運動が磁場に与える影響は小さい様である。それは粒状斑の境界に磁場が掃き寄せられているという証拠が今のところないからである。これに比して超粒状斑の大規模な水平運動、およびそれに伴う深部の運動の影響力は甚大である。黒点群の中に散在する無数の黒点や磁場の生成消滅、コロナの中の磁場に歪みをつくる作業を司っているのは多分この運動であるに違いない。今までは述べなかつたけれども、もっとはるかに雄大な規模の対流運動も最近真剣に考えられる様になっている。それは例えば太陽を両極をよぎって数個の西瓜切りに分割した様な広い地域での大対流運動である。この運動が強くなった磁力線の一部を大気表面近くを持ち上げる作用をしているのかも知れない。またこの運動は極から赤道地帯に自転の角運動量を運ぶ役目もして、太陽の自転にいわゆる赤道加速を起しているとも考えられている。今磁力線が太陽面上で子午線に沿って長く横たわっているとすると、赤道加速によって低緯度の方がより多数回自転することとなり、磁

力線は太陽をぐりぐり巻きに回ることになる。そのために磁力線の長さが長くなり、磁場の強さが強くなる。強くなった磁場は大対流運動によって表面近く持ち上げられ、超粒状斑の運動で更に細工されて表面に出て黒点群となるのである。この様な種々の規模の深部の運動によって磁場は幾重にもいためつけられるのである。彩層に現われる種々な模様はいわばいためつけられた磁場の苦悩を表わしているとも考えられる。しかし実はここから上層ではもはや気体の支配は終り、今度は磁場が天下をとることとなる。深部でいじめられた磁場がコロナでくしゃみをするると気体は吹っ飛ばされたり、赤くなったり、青くなったりすることになる。これがフレアである。

太陽の研究の中で今まで述べた様な精緻を極めた形状学が発展しだしたのはほんのここ数年来のことである。現在では映画による運動学の研究も可成り行なわれるようになってきている。研究の主力は米国である。宇宙の中の電磁流体力学的現象は太陽以外にも多々ある。しかし形状の時間的変化をも追跡できる天体は太陽以外にそうあるわけではない。その意味で太陽の電磁流体力学の研究の持つ意義は大きい。太陽物理学が今まで天体輻射論の基礎となってきたと同じ様に、宇宙の電磁流体力学の基礎としても重要な役割を演ずるようになるのは、そう遠い将来のことではないと期待される。

最後にこの稿のために素晴らしい写真を提供して下さいましたサクラメント・ピーク天文台のダン博士(Dunn)に謝意を表す。

学会だより

欧文報告投稿の送り先宛名について

投稿規定によると、「東京都三鷹市大沢 東京天文台パブリケーションズ編集係」宛になっております。これを見て奇怪な宛名だと訝る向きが多いと聞きました。これは、当該郵便物が迅速かつ簡便に、編集理事寿岳潤氏の手に入ることを目的として、寿岳氏と会計理事が、奇怪さを承知しつつ、採用したものであります。寿岳氏の名を陽に表わすことがなお目的にあうと思われませんが、編集理事の賛成が得られませんでした。事務所が天文台のなかの、寿岳氏よりかなり離れた個所にあり、連絡の入手の得られないかぎり、やむを得ぬことと思ひますの

で、会員諸氏にはまげて御了承願います。

年会の忘れ物 傘一本(直角に近く曲った木の柄)

秋季年会の予定

今秋の天文学会秋季年会は、岩手県水沢市の農協会館で、10月23日(月)から25日(水)までの3日間にわたって催されることになりました。詳細は天文月報次号誌上をご参照下さい。

天文月報創刊以来の会員佐々井信太郎氏が、昨年末に97才をもってなくなられたと嗣子典比古氏より御通知いただきました。永年の御愛読を感謝し、謹んで御霊安をお祈りいたします。