

やさしい天文学シリーズ
II. 太陽物理学 (4)

太陽物理学 (4)

川口市郎*

11. プロミネンス

太陽のさまざまな事象のうちで最も美しいものはプロミネンスであろう。図 19 はその 1 例であるが形態は千差万別、ループ状、アーチ状、カーテン状、螺旋状、もり上った小山のようなマウンド、空中にうかぶ羽毛、表面から突き出た棒状、針状、きのこ状、雨あられとふりそそぐ輝いた粒粒 等々数え上げればきりが無い。最も特徴的なことはシーイングの合間にちらりちらりとみせてくれる微細構造のすばらしさである。筆者はこの美しさの故にプロミネンスの良い像をとろうとしたが、ピック・デュ・ミデイでの観測を含めて眼でみた美しさを正直に表現している写真は本当に一枚もとったことがない。この微細構造をきめているものは何なのであるのか？ その運動は何によってきまるのか？ 一定の輝きを保持させているエネルギー収支はどうなっているのか？ 等の疑問がうかんでくるが、まだ解決したとは思えない。

プロミネンスの分類法はいろいろと提唱されている。その運動に着目すると静止型と活動型にわけることができるし、その起源に注目するとコロナ型と彩層型にもなるし、またスペクトルの金属線強度に重点をおくと、金属線型と水素・ヘリウム型とに分類することも可能である。また出現場所を考えて極地型と活動領域型と考えることも理由のあることである。いずれの分類法も互に全く無関係ではありえず、このような雑多な分類が可能となる程種類も多いが、その物理的状態はごく少数のプロミネンスを除いて、どのプロミネンスも殆んど同じであろうと考えられる。

プロミネンスはコロナに浮ぶ“雲”であり、その上下・左右から光球・彩層・コロナからの放射にさらされている。強い吸収線の中心部からの光とライマン連続光放射を除いて大部分の光はプロミネンスを素通りするのでプロミネンスには何の影響も与えない。しかしながらライマン α 線とライマン連続光放射はプロミネンスにはいと吸収・放出という散乱過程によってプロミネンス深部まではいりこむ。従ってプロミネンスの温度がどんなに低くても、水素原子の第 2 エネルギー準位にある原子数は彩層・コロナからの放射によって確保され、光球からの $H\alpha$ 線がプロミネンスにあたると、この光子を散乱してプロミネンスを輝かしている。いいかえるとプロミネンスの明るさはプロミネンスのもつ熱的状況を殆んど



図 19 静止型プロミネンス (飛騨天文台・黒河氏撮影)

反映しないで、単に視線方向にみる“雲”の厚みだけできまってしまうであろう。こう考えるとプロミネンスでみえる種々の元素の輝線強度比が非常によく揃っているという観測事実は自然なことである。

勿論あついコロナから凝縮したてのプロミネンスなどはまだ温度が高いかもしれない。このようなプロミネンスでは水素原子のエネルギー第 2 準位にある原子数は、彩層・コロナからの紫外線放射による励起と高温度のときに特有な自由電子との衝突励起、さらに水素イオンとの再結合過程によってきまる。ヘリウム原子の励起は静止型プロミネンスの励起とは異なっていることも考えられる。事実、フレアのあとで生じるループ・プロミネンスなど部分的にヘリウム輝線が相対的に強いこともあるが、このようなプロミネンスは例外的な存在である。

プロミネンスの $H\alpha$ 輝線放射機構が光球・彩層からの光の散乱であれば、輝線強度は当然入射してくる光量に比例する。静止したプロミネンスは図 20 のように λ_0 を中心とした $d\lambda$ の波長範囲の光を散乱していると仮定しよう。もしこのプロミネンスが突然に速度 v で上昇運動をはじめたとすると、このプロミネンスからみて、彩層・光球からの $H\alpha$ 線について図 20 の λ_1 を中心とした $d\lambda$ の波長範囲の光を散乱することになる。この 2 つの光量をくらべると λ_1 を中心とした $d\lambda$ の波長範囲の光の方が数倍大きくなる。すなわちプロミネンスは静止しているときより運動しているときの方が明るく輝くはずである。この推論は観測から正しいことがみとめられている。

プロミネンスの高さはプロミネンス毎に変わるが、数万 km も光球からつきでコロナの中につっ立っているプロミネンスもまれではない。もしプロミネンスと彩層の温度がほぼ等しく、プロミネンスを支えるガス圧以外の力

* 京大理 I. Kawaguchi

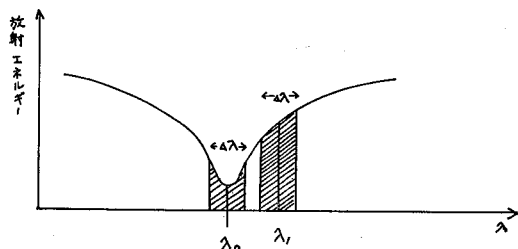


図 20 H α 吸収線輪廓

が動かない場合には、プロミネンスも彩層と同じように、光球にへばりついた薄いものになってしまうことは、§3でのベタ力学的釣合から理解できよう。彩層の場合その厚みをきめているのはガス圧であるので、プロミネンスにはガス圧を何十倍も上回る圧力が存在することは明らかである。

太陽面上のプロミネンスは水素 H α 線単色像でみると明るい彩層に対して暗い線条として見える。この暗い線条の位置と太陽磁場分布を比較するとプロミネンスはいつでも磁極の変わり目に生じる。あるいは端的にいうと、プロミネンスはコロナ磁場が水平の場所に生じている。この事実にもとづいてプロミネンスは水平な磁力線にのっかって上下に長くのびていると信ぜられている。静止型プロミネンスは分光観測からも、また単色像の時間的変化を調べてみても運動はきわめて小さいので、プロミネンスの“高さ”を説明するには磁気圧以外は考えにくい。以上の推定が正しいとしてもプロミネンスの微細構造は磁場にどのように関与しているのだろうか？ まだまだ研究問題が残されているようだ。

プロミネンスは極地域近くで太陽にかけた首飾りのように、一直線上にいくつもならぶことがある。これを“ポーラー・クラウン”と称している。このプロミネンスは§10でのベタ太陽磁場の拡散と密接に関係している。太陽活動がさかんになると多数の黒点が現れてその従属磁場はだんだんと極地方に拡散してゆく。一方極地域には前サイクルの残留磁場があり、両者の磁性は互に逆であるので、その境界に“ポーラー・クラウン”が現れると考えられる。活動サイクルがすすむにつれて黒点の拡散磁場も極に近づくので“ポーラー・クラウン”の出現領域も極に近づく。丁度梅雨時、北の冷い気団と南の暖い気団の間に梅雨前線が生じ、南気団の発達と共に前線が北上するのに対応している。同様に1つの活動領域の中でもプロミネンスが磁場の変わり目に現れ、時間と共に外部へ流されるのを見かけることもあるが、われわれはプロミネンスを通して磁場の消長を知ることができる。

太陽活動現象の中で一番みごたえがあるのは大きなフレアであることに異論はないが、大きな静止型プロミネンスが太陽の縁にあり、これが崩壊する現象もフレアに



図 21 コロナル・レイン (飛騨天文台・黒河氏撮影)

劣らずみごたえがある。筆者は岡山天体物理観測所で何度もこの現象を観測する機会に恵まれたが(30~40日滞在して1回の割合)、あまり現象が大きいので、何を、どうして観測するのか決断できずにものになっていない。まずプロミネンス内で内部運動がはげしくなり、膨張・上昇し、プロミネンスは分裂し、一部は落下、一部は上昇し惑星間空間にとび去る。このときプロミネンス破片はもとのプロミネンスより明るくなり、不思議なことに下の彩層まで異常に明るくなる。この現象をX線映画でみると、X線がみたコロナも異常に明るくなるので、プロミネンス物質の大きな運動のためにコロナは加熱され、この熱が磁力線に沿って下降、彩層をも熱するのではないかと考えている。

プロミネンスの崩壊現象はプロミネンス近くで新しい磁束の出現に大いに関係があるらしい。プロミネンスを支えていた磁場構造は新しい磁束の出現によって、別の磁場構造に転移し、従来閉じていた磁力線が開いた磁力線に変わったりするので、プロミネンス物質ははねとばされるのであろう。プロミネンス物質が磁力線に沿って運動していると考え、もし回転運動が観測されると磁力線自体がねじれていることになる。このような現象をうまく観測するとコロナの中の磁力線の分布を知ったり、あるいは磁力線の“再結合”を具体的に知る手掛りになるのかもしれない。

コロナ物質がコロナ内の特定の場所で凝縮し“輝く雨粒”となって彩層に俄雨のように落下してくることもある。これをコロナレインと称している。この雨粒の軌跡をしらべてみると美しいループ状をしている。活動領域のコロナの中にループ状の微細構造があり、コロナの磁力線を示すことは§9でのべた。コロナの雨はこのような磁力線に沿って落下してくる。ただ奇妙なことにループの先端に淡いプロミネンスの“たまり”のようなものがあり、雨粒はここを起点として四方に落下することがある。この“たまり”は物質の補給口であろうがコロナ内での物質循環機構は判っていない。図21は飛騨天文台で撮影されたコロナレインの写真である。

プロミネンスの密度はコロナの密度よりも100倍も大きいので、プロミネンスの放射エネルギーはコロナよりもずっと大きい。一方入ってくる波動エネルギーはコロ

ナとプロミネンスで非常に異なっているとは思えないのでプロミネンスが熱的安定を保つためには他のエネルギー源を考えなくてはならない。このエネルギー源としてプロミネンスの中性水素原子による彩層からの、ライマン連続放射の吸収も 1 つの有力候補となりうるであろう。いずれにせよコロナにおいては安定した 2 つの状態がある。1 つはコロナ自体であり 1 つはプロミネンスである。そしてこの両者は状況に応じて一方から他方へと姿を変えることができると考えてよい。

12. フレア

1972 年 8 月、珍らしく大きなフレアが発生した。このフレアについてガンマ線・X線・紫外線・ラジオ電波等の観測、さらに光球面での磁場や速度場の観測など、今迄発生したどのフレアよりも多種多様の観測が行なわれた。さらにこのフレアに関する国際シンポジウムも企画されるなど、このフレアは観測史上に長くその名をとどめることは疑いない。このフレアに関して発表された論文数はおそらく優に 100 をこえることだろうと思われる。まさにこのフレアは太陽研究者にとって早天の慈雨であった。岡山天体物理観測所においても良いシーイングにめぐまれて、京大の観測者 2 名はフレアの始めから終わりまで 100 コマをこえる H α 単色像を撮影した。図 22 はこのうちの一枚である。

フレア現象は決して珍らしいものではない。活発な活動領域があるとその一部分はときどき明るくなったり暗くなったりしている。このうちいくつかはサブフレアと称せられる淡いフレアであろうが明るさからみて、どこまでサブフレアというのかはっきりとした定義はない。こんなサブフレアまで数のうちにいれると、活発な活動領域は 1 日に数十個のフレアが起ることもあるのであろうが、1972 年 8 月のような大きなフレアは 11 年活動周期についてせいぜい 10 個内外であり、太陽活動の上昇期よりも減少期に多いといわれている。国際的なきまりによるとフレアは H α の単色光でみて面積について、サブフレアと重要度 1 から 4 までに分類されている。

重要度 3 とか 4 の大きなフレアはその形態からみて two ribbons flare とよばれている。活動領域で磁極の変わり目を磁気中性帯とよんでいるがフレアはこの磁気中性帯近くで発生する。まず核とよばれるいくつかの明るい点があらわれてやがて核を結ぶ明るい帯となる。この帯は時間と共に平行な 2 本の帯となり、この両者はゆっくりと離れてゆく。フレアが始まって 15 分ぐらい後に、この帯に両端をもつループ状の明るいプロミネンスが現われてフレアはだんだんと明るさを失なってゆく。以上は H α -単色光でみたフレアの描写であるが X 線でみるとループ状構造全体が明るく輝き、ループと表面の接す



図 22 1972 年 8 月フレア (岡山天体物理観測にて小田・前田両氏撮影: H α 単色像)

る所が H α でみた 2 本の帯となっているらしい。またフレアの発生と同時に種々の型の電波バーストが発生する。しかしながら重要度の小さいフレアは必ずしも上記の経過を示すとは限らない。筆者の岡山天体物理学観測所での観測経験によると、彩層のほんのせまい領域、点とでもいうべき場所だけが著しく明るくなっているフレアもある。このフレアを分光器でのぞくとフレアに典型的な H α 線輪廓を示しているのど、どうみてもフレアとしかいようがない。こんなフレアでは寿命は 1 分足らずのものもあり、どのフレアも皆同じ機構であるとは思えないのだが、論文にあらわれたフレアの研究は two ribbons flare を前提としたものが多いので、この線に沿って話をすすめてゆく。

フレアとは一時に大量のエネルギーが放出される現象である。エネルギー放出とは高速粒子の生れることと、大気の一部が高温に熱せられることを意味する。フレアのときだけ観測される 1.8 Å 輝線は鉄の 25 回電離イオンと同定され、太陽大気の部分が 4000 万度になることを意味する。硬・X線 (波長 1 Å より短い電磁波) のエネルギー・スペクトルからみちびかれる粒子のエネルギー・スペクトルは熱的スペクトルとは全く異なり、III型ラジオバーストの観測からは光速の 1/3 という速度の粒子群の存在も確かめられている。

フレアは稀に白色光であることができる。このようなフレアを白色光フレアとよび昔はきわめて稀な現象であるといわれてきた。白色光フレアは重要度の高いフレアに限られており、こんなフレアが発生すると高速粒子に基因する太陽宇宙線が地上観測所でも記録される。しかしながら太陽像の分解能があがるにつれて白色光フレアは昔想像されていた程稀でもなく時々観測することができるらしい。白色光フレアはコロナで発生した高速粒子群が磁場に沿って光球にまで達して、そこでガス粒子と衝突して光球の一部を加熱する現象と考えられてい

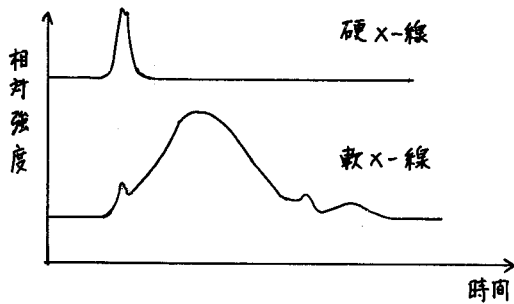


図 23 フレアにおける硬X線と軟X線の時間経過

る。光球にまで達する粒子はエネルギーの高い粒子に限られており、エネルギーの低い粒子はコロナ底部や彩層上部を熱するだけである。フレアの発生にまず現れる核は、やはり高速粒子にたたかれて熱せられた彩層の一部である。

図 23 にはフレアにともなう硬X線 (1 \AA より短い波長のX線) と軟X線 (1 \AA より長い波長のX線) の時間的変化を模式的に示している。硬X線は高速粒子群からでると思われるので、硬X線はすぐに消えてしまうことから、高速粒子群はフレアのごく初期にだけ存在するのである。一方軟X線は鉄の 25 回電離イオン輝線の存在から、フレアにともなって数千万度に熱せられた高温ガスが発生することを示す。このガスの加熱に要するエネルギーは粒子を高速に加速するエネルギーにくらべて大きく、かつその加熱も徐々におこなわれる。加熱場所はコロナ底部か彩層上部であろうから、熱は磁力線に沿って彩層を熱してフレアにみられる強い $H\alpha$ 輝線の発光原因となる。ふつうのフレアでは光球に起源をもつ吸収線は影響をうけていないので、フレアが生じても光球はふだん通りであろう。

フレアのあとに生じるループ・プロミネンスはコロナの一点でコロナ物質が凝縮して、プロミネンスとなって次から次へと落下する現象である。奇妙なことにこのループの先端にある凝縮点は時間と共に上昇してゆく。ループ・プロミネンスによって落下する物質の全質量はコロナ全質量よりも大きいので、ループ・プロミネンスとなる物質は彩層から補給されたものでなくてはならない。一方フレアのさなか、彩層物質が上層へはこぼれているという観測的な証拠はないが、彩層のすぐ上部が数千万度に熱せられたとき、彩層先端の温度は急激に上昇し、ガス圧は増加し、大気は膨張する。水素原子の電離の進行のため直接観測することはできなくなるけれども、彩層先端は大擾乱の状態になることは想像される。東京天文台の平山氏の表現によれば彩層は燃えあがり、その物質はコロナにまきちらされたり、あるいは一部分プラズマ雲となって地球にまで来襲するのかもしれない。ループ・プロミネンスはこのもえつきた彩層物質に

原因するのである。

ではエネルギーの急激な解放はどのような機構によるのであろうか？ この問題こそ太陽物理学の1つの焦点であり、無数のアタックにもかかわらず、まだ解決からは程遠い。しかしながら太陽磁場の理解が深まるにつれて研究は着実に前進していることは疑いない。まずフレア発生機構に活動領域磁場が深く関係していることは明らかである。フレアの解放する全エネルギーをためこむものとして磁場以外に考えるものがないからである。そこで問題は太陽磁場にギリギリの状態にまでエネルギーをためこんで、それを一時に解放することができるかどうかである。

1972年8月フレアについて東京天文台田中氏が合衆国でジリンと行った研究はエネルギーが磁場のためこまれていった過程を示す研究として大変面白い。このフレアを発生した黒点は、数個の大黒点が1つの群を形成しており、この黒点の個有運動の結果、黒点磁場はひずみを受けていったという。磁場がひずみを受けると全磁束は変らなくても磁場のエネルギーは増大してゆく。田中氏は個有運動の結果増大していった磁場のエネルギーを数値的に計算して、このエネルギーの増加量は大きなフレアのエネルギーに対応することを確かめた。この立場に立つとフレアの根本原因は黒点の個有運動をおこさせた太陽大気のガスの大規模の流れであり、直接的には磁場のひずみであるといえよう。また田中氏は8月フレア以外に過去の大きなフレアを調べてこのような個有運動がどのフレアにもみられるという。

では何故磁場のひずみが極限に達したとき急激なエネルギー放出が生じるのであろうか？ 磁気中性帯が一役買っているというのが現在の有力な考え方である。磁気中性帯でのエネルギー解放機構を焦点としたいくつかの論文が提出されているが、一長一短があり決定版といえるものはまだのようである。一方プラズマ実験室で磁気中性帯に似た状況を作りだし、発生したエネルギーの比較からフレアエネルギー解放機構を解明しようとするところみがあり注目をあびている。しかしながらプラズマ実験室と太陽大気物理状況が異なりすぎているので、果してこの実験をフレアの“近似”とみなしうるのかどうか、筆者には判断の資格はない。

フレアは場所的にコロナ底部または彩層とコロナの間層で生じていることはX-rayの単色写真像などからみて間違いない。だが、フレアとはいわれないが、マスターシュとかあるいは大きなサーージュ・プロミネンスの根元などは、その輝線輪廓とか時間的変化はフレアとよく似ており、やはりエネルギーの急激な解放現象である。ただフレアと根本的に異なることは、フレアよりも深い所で生じている。また磁場分布図でみると、これらの現象は

新しい磁束が太陽表面に現れたときか、一つの磁極の領域の中に異なった磁極の領域が生じたときにみられるという。これらの現象の理論的研究は殆んど行なわれていないが、フレア理論がどの程度適用できるのか、筆者は興味をもって試している。

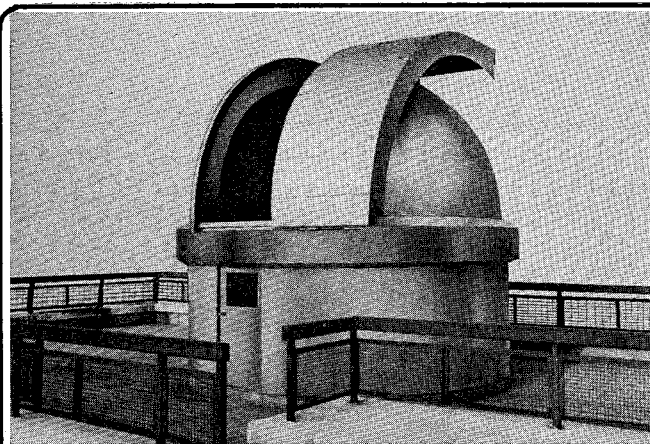
13. 結 び

太陽静穏領域とフレアについて筆者のもつ太陽のイメージを一通りのべてみた。だが現在脚光をあびているトピックスや重要な太陽活動に関するいくつかの現象とその解釈について殆んどふれることなく結びにきてしまった。このトピックスの1つとしてマウンダース極小期について一言だけ追加しておきたい。西暦 1650 年～1700 年の間、黒点極大期においても黒点相対数は殆んどゼロに近い。しかもこの期間、黒点観測の記録から太陽の微分回転（太陽自転周期は緯度により異なっており、赤道では最短である。）は現在の微分回転とは異なっていたと

いう。もしこれが事実であれば太陽磁場の起源について重要な情報であることを指摘しておきたい。

約 30 年前、筆者がまだ学生であった頃、当時の宮本正太郎教授は太陽・星雲・特異星の物理学を主なテーマとして2年間に亘る講義をして下さった。この中で輻射輸送論の基礎的理論については現在と大差はないが、コロナに関しては先生御自身で作られたコロナ電離論も展開されたが、コロナが 100 万度であること自体最新のニュースでさえあった。彩層に関してはその扱いがやっと議論され始めたところであり、先生の講義も“彩層に関してはよく判らない”というのが結論であったと記憶している。思えば太陽物理学は単葉プロペラ機から、ジャンボ・ジェット機へと進歩・発展したというべきであろう。更に 30 年後太陽物理学はどのような姿になっているであろうか、日本の若人の大いなる貢献を期待して筆をおきたい。

☆ ☆ ☆



- 営業品目
- ★天体望遠鏡ならびに双眼鏡
 - ★天体写真撮影用品及び部品
 - ★望遠鏡各種アクセサリ
 - ★観測室ドームの設計・施工



← L N-10 E 型
25cm 反射赤道儀

★総合カタログ
ご希望の方は切
手 300 円同封お
申込みください

ASTRO 光学工業株式会社



〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321