

3. 研究成果概要

太陽系物理学分野

飛騨天文台は1956年以来花山天文台で行われてきた火星観測を引き継ぎ、火星大気現象の観測を行っています。火星軌道と火星自転軸の傾きにより、火星の同一地域の同一季節を観測できるチャンスは15年に1回しかありませんので、飛騨天文台の30年に亘る火星観測は世界的に貴重な資料となっています。飛騨天文台は火星の他に、1970年代までは月や惑星の地形学の研究、それ以降は木星や彗星の観測・研究も行っています。

(1) 月及び地球型惑星の地形の成因

月の地形は「陸」と「海」に大別されます。陸は明るく且つ一面にクレータでおおわれていますが、海は暗く平坦でクレータの密度が極端に低くなっています。月では海が表側、すなわち地球側に集中しています。大局的に表側を海半球、裏側を陸半球とみなす事ができます。火星では北半球と南半球とで地形に大きな相違があります。北半球はクレータが少なく平坦ですが、南半球にはクレータが多く且つ北半球より標高が高くなっています。月や火星のかような地形の分布は次数1のマントル対流により形成される地形の分布に対応しています。

月、火星、水星にはいろいろな形態のクレータがあります。また、海とクレータとの中間的な地形も多く見られます。形態学的に個々の地形を調べてみますと、あるものはマグマによる溶融や隆起、あるいは水蒸気爆発により形成されたことがわかります。

(2) 火星の大黄雲と大気大循環

火星が太陽に最も近づく時は火星南半球の晩春でありますから、南半球の夏は北半球の夏よりかなり日射量が多くなります。そのため晩春から盛夏にかけて南半球の中緯度帯に大規模な砂嵐がしばしば発生します。それは黄雲と呼ばれています。黄雲は上空の気流に乗って西へ流され、火星を一周します。同時に北へも移動し、赤道を越えて北半球へ広がっていきます。その間、発生源からダストが供給されつづけますので、大黄雲は2週間ほどで火星全体を覆ってしまいます。これらの観測事実から、火星の大気大循環は地球と異なっていることがわかります。すなわち、火星上空では全域で偏東風が吹き、大気は夏半球から赤道を越えて冬半球へと流れています。

大黄雲の供給源は必ずしも発生源の一カ所のみとは限りません。黄雲が発生し、そのフロントが西へ移動するにつれて、フロント付近で別の黄雲が発生する事もあります。それは最初の黄雲と一体となってさらに西へ移動しながら、また新たな黄雲を誘発します。1973年の大黄雲では少なくとも3カ所の供給源が確認されています。黄雲をつくっているダストの量を見積もるために、その光学的厚さが必要となります。1973年の大黄雲では成長期における黄雲の光学的厚さは5以上でありました。図1は1973年の大黄雲の初期の様子です。

(3) 火星中緯度帯の雲

火星北半球の春から夏の季節には、火星の大気中に水蒸気が多くなります。それは主に北極の万年氷がとけることによりますが、北半球の低・中緯度帯の特定の場所からも水蒸気が供給されていると推

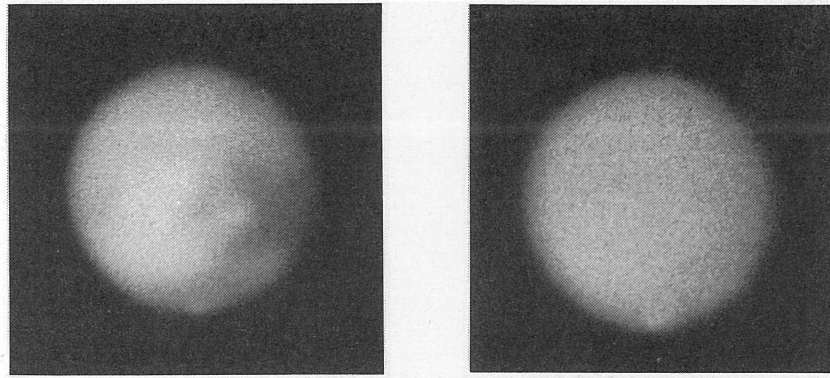


図1. 発生後2日目の大黄雲 (Oct. 15, 1973)。左：赤色光による像。中央から左下の明るい部分が黄雲。右：青色光による像。青色光では黄雲が見えにくい。

定されます。水蒸気が多くなりますと当然雲が発生しやすくなります。この時期に北半球の低・中緯度帯に発生する雲は活動時刻により朝雲、昼雲、夕雲に分類されます。朝雲と夕雲はそれぞれ朝方と夕方のリム（あるいは明暗境界線）付近に見られ、北緯30度から南緯30度に及ぶ大きな雲であります。仲春のころは限られた場所にしか発生しませんが、最盛期の晩春から盛夏では、南半球低緯度帯から北半球中緯度帯のすべての地域で朝・夕雲が見られます。最盛期には朝雲は日中でも消えずに残り、やがて夕雲へと移行します。低・中緯度帯の朝雲が日中でも残るようになりますと、低・中緯度帯は雲の帯で取り巻かれているように見えます（図2）。

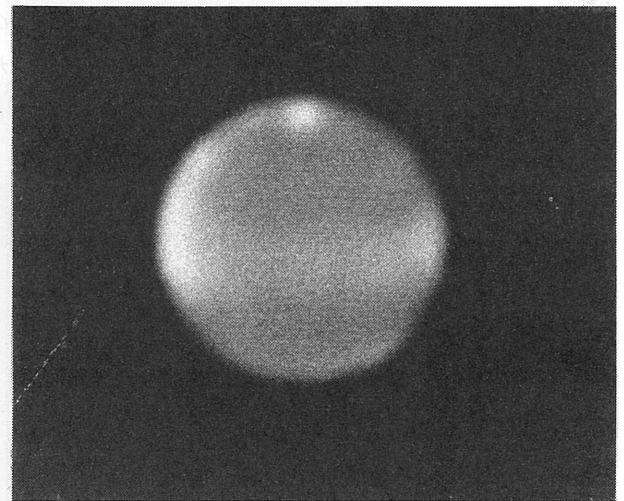


図2. 火星中緯度帯を取り巻く雲
(Mar. 5, 1997)

雲の光学的厚さはその活動の日安となります。タルシス地方に発生する朝雲の光学的厚さの時間的変化を求めてみますと、早朝では1.5から2.0ですが、火星地方時の10時ころには1ほどに減少し、11時から14時の間は極小値の0.5前後を保っています。その後は時間と共に増加していきます。光学的厚さの時間的変化から、夕雲は14時頃から活動を始める事がわかります。朝雲の高度は意外と低いことがタルシス地方の観測から推定されます。タルシス地方にはオリンパス山など高い火山がいくつかあります。観測によりますと高い火山の峰は朝雲の上に出ていますので（図3）、朝雲の高さは山頂よりも低いことがわかります。山の高さから朝雲の高度は20 km 以下と推定されます。

昼雲は直径500 km から1000 km の雲塊でして、エリシウムやタルシス地方の巨大な火山に発生します（図4）。昼雲は早春から見られるようになります。その頃は北極冠はまだドライアイスに覆われていて、万年氷は露出していませんので、早春の昼雲をつくる水分は雲が発生する地域から供給されていると推察できます。昼雲の活動の最盛期は朝・夕雲と同じ晩春から盛夏であります。タルシス地方のオリンパス山にかかる昼雲は朝雲が薄くなる10時頃から目立ってきます。夕方に向けてみかけの明るさは増加しますが、それ以上に夕雲の方が明るくなりますので、午後遅くなりますと昼雲は夕雲の中に埋もれてしまいます。昼雲の光学的厚さの時間的変化を追跡してみますと、それは地方

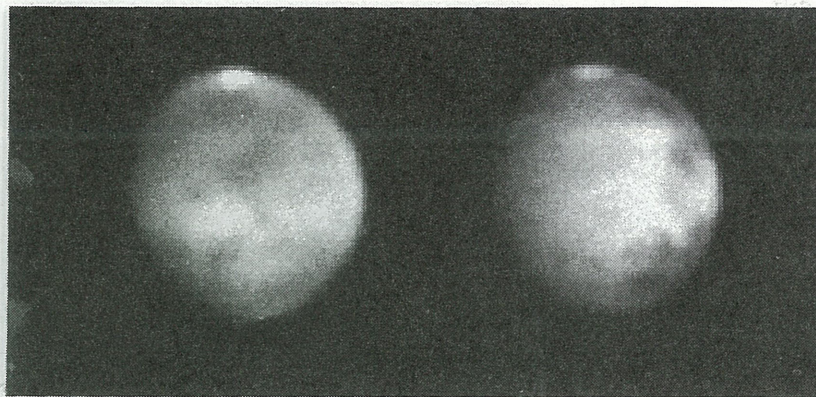


図3. 左：火星タルシス地方の朝雲（中央少し左よりの大きな明るい斑点。120 W, 10 N）。その雲の縁にある複数の暗い斑点は火山の峰である。（Apr. 13, 1994. CM=112, Ls=84）。右：ほぼ同時刻の赤色光による像。雲を透して地面の様様が見えている。CM：中央経度。Ls：火心太陽黄経。

時の13時から14時にピークに達します。その時の値は1ほどです。火星大気の水は低いですが、雲をつくる水分は氷粒になっています。それを水に換算してみますと、昼雲のピーク時の水量は1.4 pr ミクロン、すなわち単位面積当たり 0.0014 mm の水柱となります。

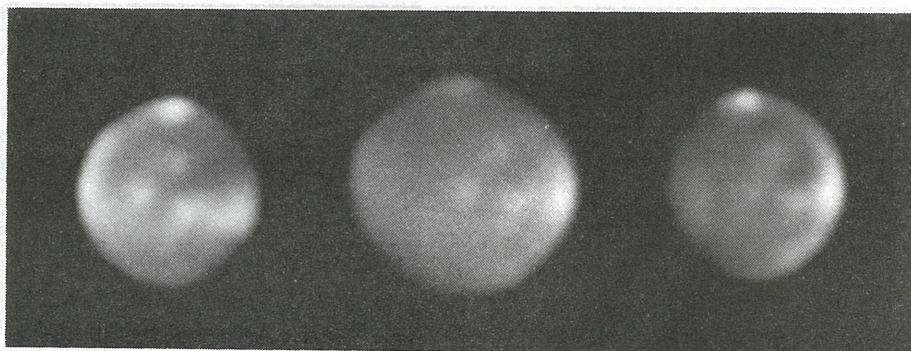


図4. 火星タルシス地方の昼雲(1997). 左:Feb. 14. CM=118, Ls=78. 中:Mar. 24. CM=141, Ls=96. 右:Apr. 26. CM=143, Ls=110.

(4) 火星の極雲

火星の北極地方は晩夏から翌年の早春まで、極雲で覆われます。発生したばかりの北極雲は不安定でしばしば消滅してしまいます。しかし、初秋には安定し、終日極地方をおおうようになります（図5右、図6右）。極雲は日変化をしない安定した雲とみなされていましたが、実は規則的な日変化をしていることがわかりました。朝方の極雲は北緯30度付近にまで張り出していますが、正午頃の極雲の縁は北緯50度付近となり、午後には60度以北にまで後退してしまいます。また、同一地点の極雲の光学的厚さは朝方が最も高く、時間と共に減少します。北緯60度付近の正午頃における極雲の光学的厚さは0.6ほどであります。日中に衰退した極雲は夜間に回復し、翌朝には元の状態に戻っています。かような極雲の規則的な日変化は初秋から晩冬まで繰り返えされます。このように極雲は安定していますが、極雲の縁付近にはしばしば明るい斑点（雲）が発生します。それは緯線に沿って東へ移動し、数日間で消滅してしまいます。この雲は極前線と関係しているように思われます。

(5) 火星の極冠

極冠は極地方をおおう氷原であります。冬の極地方は火星自転軸の傾きにより地球からは観測しにくい位置にありますし、その上、極雲で覆われていますので極冠の観測は容易ではありません。しかし、1971年以来継続しています写真観測の資料を解析して、極冠に関する重要な事実がわかってきました。真夏に露出している北極の万年氷は別としまして、極冠は大気が凍ったドライアイスからできています。それ故、極地方の大気温度が最低となる真冬に極冠は最大となるはずですが、観測によりますと、観測資料が未だ不十分なために断定はできませんが、極冠は晩冬に最大となるようです。冬期の極冠は極雲で覆われていますから、眼視でそれを確認することは難しいのですが、赤色フィルターをかけて写真撮影し、画像処理を行うと地面の様子が見えてきます。その結果、1975年の観測では真冬には地肌が露出していて、極冠は未完成の状態であることがわかりました。私たちが観測した1975年の極冠の成長がたまたま遅れていたという可能性もありますが、15年後の観測でも同じような現象が見られました。極冠がいつピークに達するかは火星大気大循環モデルに大きく影響する重要な問題であります。

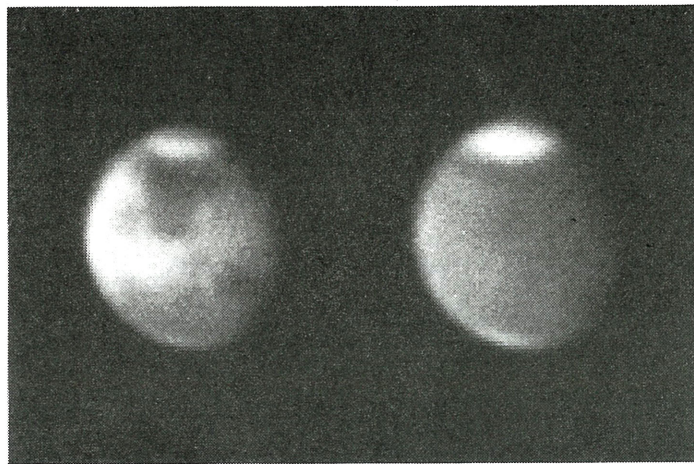


図5. 左：火星の北極冠（赤色光）。右：青色光では極雲がみえている（Nov. 29, 1994. Ls=25）。

春になりますと極雲は薄くなり、また極地方が地球へ向いてきますので極冠の観測は容易になります（図5左、図6左）。しかし、時すでに遅く、極冠のピークは過ぎて縮小期に入っています。北極冠と南極冠とでは縮小の仕方が異なっています。北極冠は春先には北緯65度から60度あたりまで広がっています。それはわずかながら縮小していく傾向にはありますが、仲春まではほぼ同じ大きさを保っています。その後一定の早さで極方向へ後退していきます。そして春の終わり頃になりますと、万年氷のみが残ります。一方、南極冠は早春には南緯60度から55度あたりにまで広がっていて、早春から一定の割合で縮小します。なぜ北極冠は仲春までピーク時とほぼ同じ大きさ保つのかは今後の研究を待たねばなりません。多分極雲や極地方の大気の循環パターンが影響しているものと思われます。極冠の大きさやとける速さには年毎に多少の差があります。特に南極冠の大きさにはばらつきが目立ちます。それは南半球の夏に発生する大黃雲と関係があります。大黃雲が発生した直後の冬にできた極冠はとける速さがゆっくりで、遅くまで大きな極冠が残ります。微小なダストはなかなか落下しなく、1－2年間は大気中に漂っています。それが太陽光を遮るためと思われます。

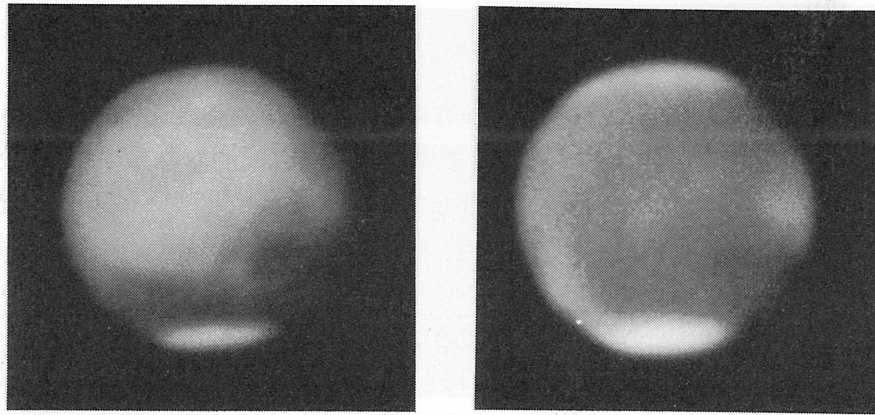


図6．火星の南極冠（July 3, 1986. Ls=199）。左：赤色光の像。右：青色光の像。すでに北極雲が発生している。

（6）火星のブルー・クリアリング

火星の地表面の様子は緑より長波長ではコントラストが高く容易に識別できますが、青や紫外線では識別できません。短波長での火星面の反射能はどこもほぼ同じで、濃淡の差がないためであります。しかし、時には短波長でも長波長で見られるのと同じ模様を識別できることがあります。この現象をブルー・クリアリングと呼んでいます。一例として図7に大シルティスのブルー・クリアリングを示します。青色光の写真でも大シルティスを識別できます。なぜブルー・クリアリングがおこるのかは火星の写真観測が始まった今世紀初めからの謎でありました。

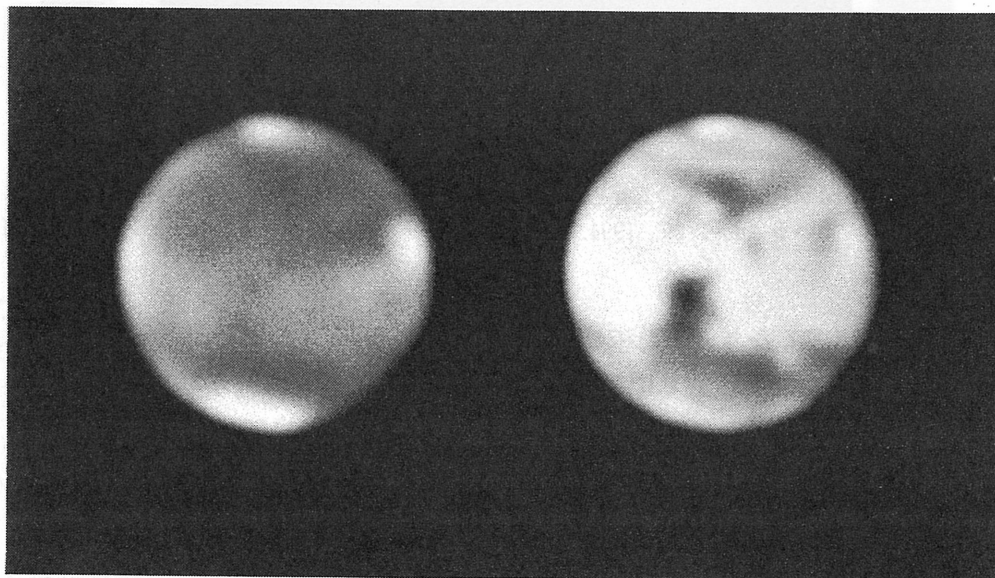


図7．左：大シルティスのブルー・クリアリング（Mar. 5, 1997. CM=273, Ls=67）。右：左の像とほぼ同時刻に撮られた赤色光の像。

火星には月と同じように衝効果があります。衝効果とは衝付近で惑星の光度が急激に明るくなる現象で、惑星の地面の微細構造によるものであります。火星では可視光の全波長域にわたって、明るい地域は暗い地域よりも衝効果が大きくなっています。したがって衝付近（位相角が数度以内）では短波長でもコントラストがつき、明暗の模様を識別できるようになります。衝のところにブルー・クリアリングが多く観測されているのは衝効果のためとおもわれます。

ブルー・クリアリングの他の原因に、北半球の低・中緯度帯に発生する朝雲があります。朝雲の高度は低いですから、朝雲は高地をさけて低地に発生するように見えます。火星では一般に暗い模様に見える地域はその周囲の明るい地域よりも高くなっています。雲の厚いところは明るく見えますので、周囲より高い地域は相対的に暗くなり、短波長でも地面の模様を識別できることになります。北半球の夏に大シルチスなど低・中緯度帯の模様が短波長で識別できるのは朝雲による場合があります。1997年の例では大シルチス上の雲の光学的厚さは周囲の明るい地域よりも0.4ほど低くなっていました。

(7) 木星の大気が発生する渦

木星の縞模様は東西方向に流れる強い気流によるもので安定しています。その模様の中には大小の斑点が多く見られます。それらは渦でありまして、その大きさは大小さまざま、寿命も短いものから長いものまであります。大赤斑は最も大規模で寿命の長い渦であります(図8)。数値モデルを使い、いろいろな東西流の中で高気圧性と低気圧性の渦の安定性を調べてみました。それによりますと、一様流の場合、速い西向流では低気圧性渦が安定ですし、遅い西向流では高気圧性渦が安定であります。また、シェアー流では、周りの流れの渦度と渦の渦度が一致する場合(高気圧性シェアー流の中の高気圧性渦、低気圧性のシェアー流の中の低気圧性渦)には、渦が安定して存在できること、シェアー流の渦度と渦の渦度が逆の場合は渦が消滅する事がわかりました。

西向きジェット流の中に低気圧性渦をおきますと、それはジェット流をすりぬけていく事ができます。この結果は木星の南熱帯攪乱と呼ばれる現象を再現していると考えられます。



図8. 木星の大赤斑(Sep. 14, 16h UT, 1998)。左:メタンバンドの像(890nm)。中:メタンバンドの像(725nm)。右:青色光の像(430nm)。

木星の北温帯縞には秒速165mにも達する東向きのジェット気流がありまして、そこにしばしば白斑が発生します。そして白斑の西側では暗班が次々とほぼ等間隔に生まれています。この現象を再現するために、数値モデルを使って強い東向きジェット流の中に高気圧性渦をおき時間変化を調べてみました。変形半径が大きい場合はすべての方向に内部重力波が伝搬していきましたが、変形半径が小さい場合には渦の西側にのみ内部重力波が発生しました。この結果から、暗班は内部重力波であり、木星大気の変形半径は小さいことがわかります。

(8) 彗星の二次ダスト・テイル

彗星の尾をつくっているダストは頭部から連続的に放出されていますが、しばしば突発的に大量のダストを出すことがあります。この現象をバーストとよんでいます。このとき彗星の尾の中に明るいすじができます。1回のバーストにより1本のすじが生まれます。それはシンクロンとよばれる曲線です。シンクロンは頭部から同時刻に放出された様々な大きさの粒子の軌跡です。従って、ダストの尾に見られる明るいすじは一般には頭部へ収斂します。



図9. ウェスト彗星。いくつかの明るいすじは頭部に収斂しない。

しかし、彗星によっては頭部に収斂しない明るいすじも見られます。その代表的な例はウェスト彗星です(図9)。その尾に見られるいくつかの明るいすじの軌跡を計算してみると、それらは頭部から発せられた特定のすじ上に始点を持つシンクロンであることがわかりました。すなわち、バーストによって頭部から放出されたダストがさらに分裂して二次の明るいすじをつくったのです。すじの明るさからダスト量を見積もってみますと、大きな彗星は1回のバーストで100億キログラムほどのダストを放出していることがわかります。

太陽物理学分野

太陽はその表面で起こっているダイナミックなプラズマ活動現象の変化を、詳しく観測して、そのメカニズムを具体的に研究出来る唯一の天体です。従って、太陽は我々の宇宙を理解するための実験場であり、又、高温プラズマ物理学の天然の実験室ともなっています。

一方太陽は、我々生命の母であり、地球環境をコントロールするエネルギー源でありますから、宇宙ステーション等大気圏外における、人類の今後の活動に大きな影響を与える太陽面爆発現象や、11年周期等の太陽活動周期的変動のメカニズムを解明することが、現在文明にとって重要な課題となっています。

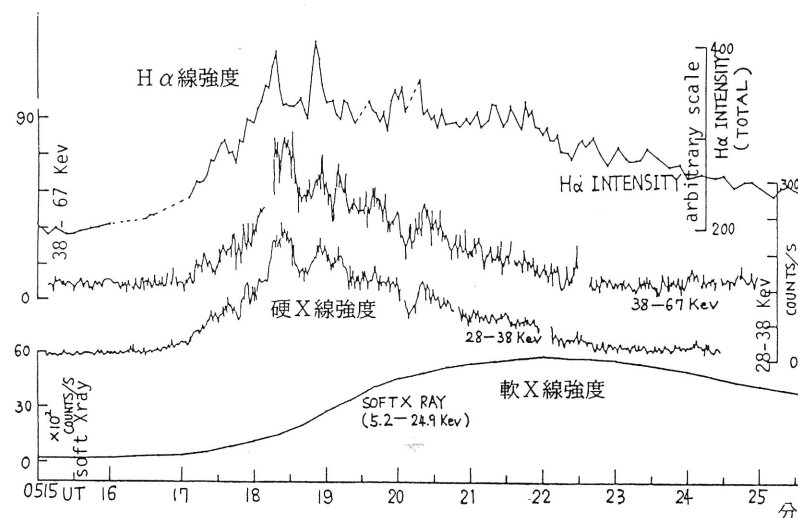
附属天文台では、花山天文台における太陽研究と天文機械工学研究の成果を基盤として、世界第一級の高分解能を持つドームレス太陽望遠鏡を飛騨天文台に建設する事に成功しました。以来、この望遠鏡を中心として、多くの研究成果が挙げられてきております。

(1) 太陽面爆発（フレア）の衝撃的発達構造とエネルギー伝搬機構

太陽フレアの初期は非常に早い変化によってエネルギーが解放されるので、従来その爆発初期の正確な構造の変化を捕らえることは至難の業でしたが、ドームレス太陽望遠鏡の高空間分解且つ高時間分解の観測によって、はじめて彩層フレアの微細構造が明らかにされました。

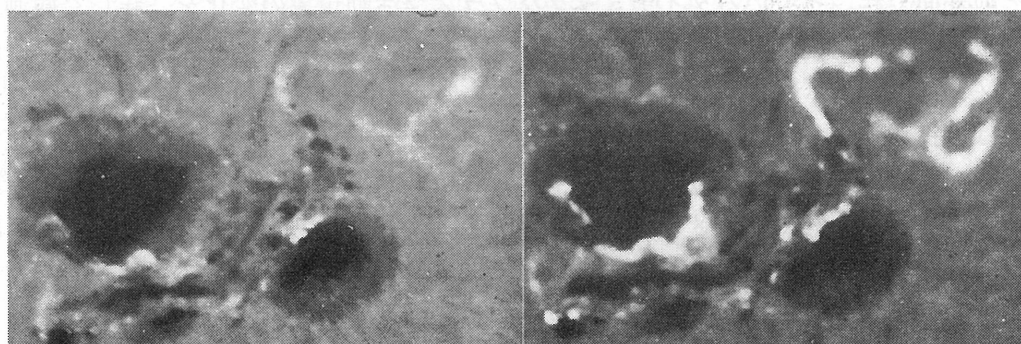
高速電子流による彩層加熱の証拠を掴んだ

太陽フレアが発生すると、彩層で水素の $H\alpha$ 線が非常に赤く輝くのが観測されます。我々は、ドームレス太陽望遠鏡を用いて、これまでに無い高時間分解（約1秒）と高空間分解（0.5秒角）で、多くのフレアを観測した結果、 $H\alpha$ フレアは角度で1秒以下の微細な輝点の集合で、それらが次々と場所を変えて衝撃的に明るく輝く事、これらの輝点の時間変化は従来の教科書で定説とされていた軟X線ではなく、硬X線及びマイクロ波の衝撃的増光と秒単位の精度で一致していることを見出しました（図1）。又、更に重要なことは、一本のフレアループの両足が $H\alpha$ 線で1秒以内の時間差で、同期して輝くことを発見したことです。この結果は、コロナで解放されたフレアエネルギーの伝搬機構について強い制約を与えるもので、フレアの衝撃的爆発期には、高速電子流が彩層加熱エネルギーの主たる運び手であることを示す、有力な証拠となりました。次ページの写真は、高速電子流の突入によって、彩



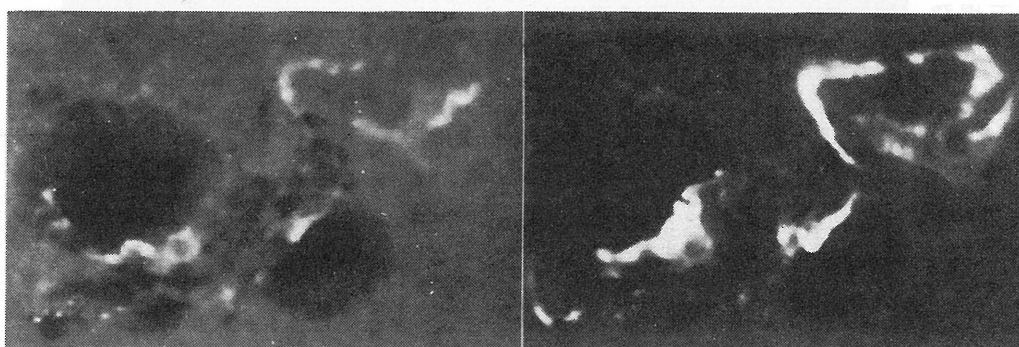
図：フレアの衝撃的爆発期の $H\alpha$ フレア強度の時間変動は硬X線強度の時間変動と同期していることを明確に示した。軟X線とは爆発後期のみ一致。

層フレアが黒点の間の磁気中性線に沿って、爆発的に発達している様子が示されています。数字は時、分、秒を世界時で表しています。



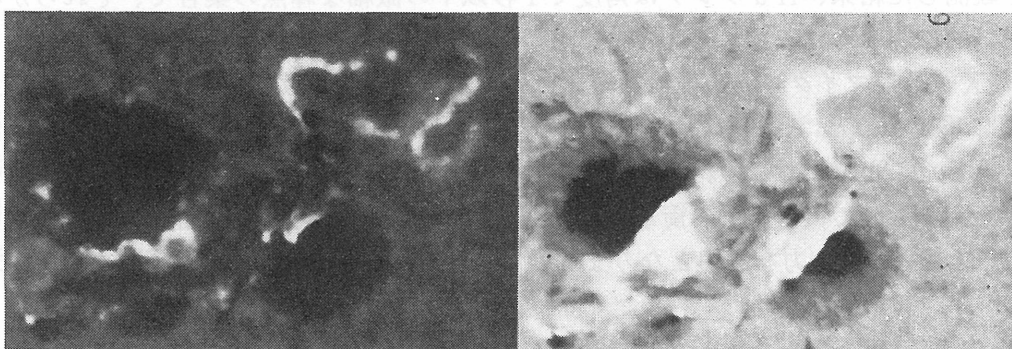
(a) 06 23 01 UT

(d) 06 24 57 UT



(b) 06 24 03 UT

(e) 06 26 20 UT



(c) 06 24 31 UT

— 20''

(f) 06 27 46 UT

写真：黒点間の磁気中性線に沿って爆発的に広がる、 $H\alpha$ フレア輝点の時間的変化

フレア彩層中に秒速 100km の高速降下流を発見

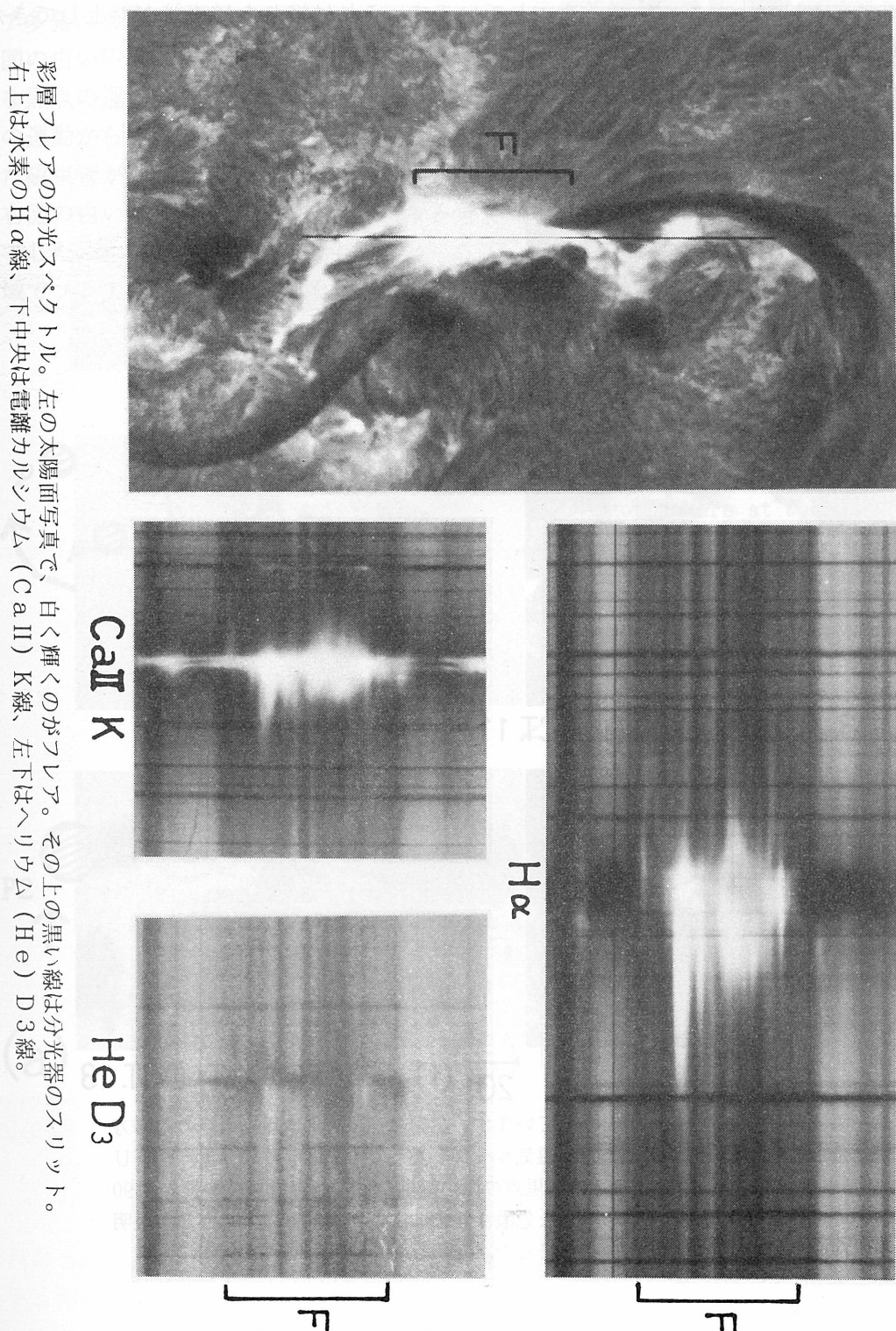
我々はドームレス太陽望遠鏡の垂直分光器で、フレアの衝撃的爆発初期を捕らえた分光観測に始めて成功しました。フレアの発生場所を特定することが出来ないため、衝撃的爆発初期のフレア核を分光器のスリット上に捕らえて保持し、秒単位のスペクトル時間変化を観測することは、非常に困難で、それまで誰も成功してはいませんでした。この成功によって、 $H\alpha$ 輝線輪郭の中心は、爆発初期には、長波長側に大きく変移していることを発見しました。これは、これまでの定説を覆すもので、それまで謎であったフレア輝線の赤側非対称輪郭の原因に始めて解答を与えるものでした。速度にして秒速 100km にもおよぶ赤方変移がその原因であったのです。この高速下降流は、彩層上部がコロナからの急

激な加熱によって蒸発する際に、その反作用によって生ずることも示されました。

また、複数のスペクトル線の同時観測によって、この様な高速下降流は、ヘリウムD3輝線と電離カルシウムHK輝線等にも存在することが始めて確認されましたが、同時に撮影されたナトリウムD線その他の金属線では、秒速わずか数kmの速度しか観測されないことも判りました。これらは、フレア彩層の深さによる加熱の違いを明らかにする重要な結果であり、現在コンピューターによるモデル大気の計算と詳細に比較する研究が進められています。

下の図3は白く輝く彩層フレア中心に当てられた分光器のスリットの位置と、水素H α 線、電離カルシウムK線、ヘリウムD3線のスペクトルを示しています。長波長（右）側に伸びた鋭い輝線は高速下降流を示しています。

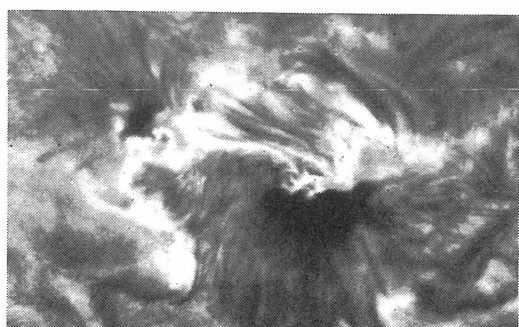
RED-SHIFTED EMISSION STREAKS OF A FLARE (OCT. 1989)



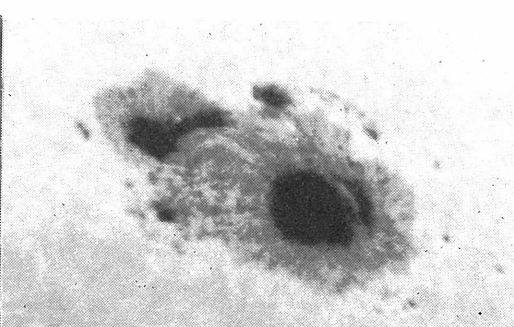
彩層フレアの分光スペクトル。左の太陽面写真で、白く輝くのがフレア。その上の黒い線は分光器のスリット。右上は水素のH α 線、下中央は電離カルシウム(Ca II) K線、左下はヘリウム(He) D3線。

(2) 太陽面爆発のエネルギー蓄積機構

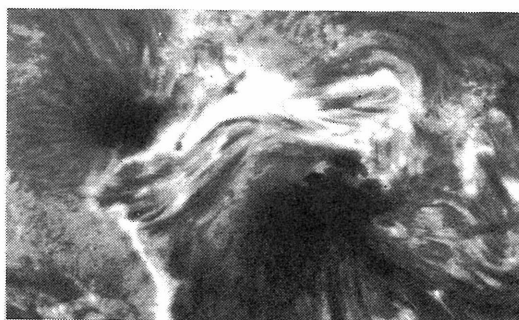
ドームレス太陽望遠鏡の高分解写真によって、多くの黒点領域の磁場構造の進化を詳細に追跡した結果、磁場の捻れが大きい黒点領域ほどフレアが発生しやすいこと、又中でも、黒点が発達しながら強い捻れが同時に形成される時には、特に強いフレア活動が発生することを明らかにしました。この結果は、フレアのエネルギーは太陽内部の対流層で磁場がねじ曲げられることによって与えられ、浮上してくる磁束管にあらかじめ蓄えられていることを強く示唆しています。この研究成果は、フレアのみならず他の太陽面活動現象のメカニズムを考える上でも、更に他の宇宙磁気プラズマ爆発現象のメカニズムを解明する上でも重要な示唆を与えています。下の写真は、異なる磁極の黒点の間に、傾きの違った磁力線が次々に浮上している様子を示しています。これは捻れた磁束管が浮上してきた証拠で、この後非常に大きなフレアが起きました。



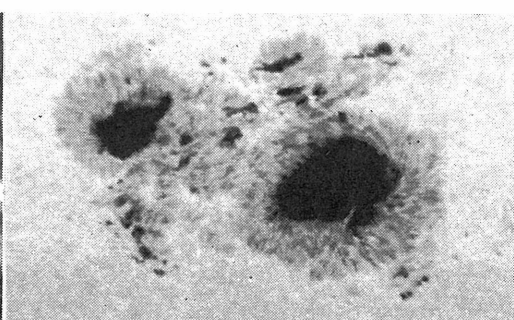
(a) 03 08 41 UT



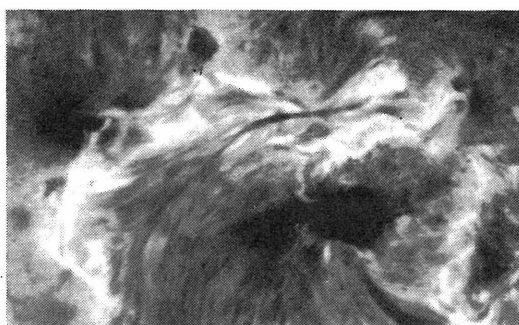
OCT.11 (b) 01 10 00 UT



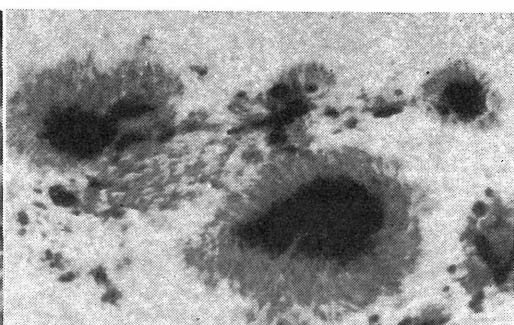
(c) 23 57 25 UT



OCT.11 (d) 23 56 24 UT



(e) 23 51 27 UT OCT.12



$\overline{20}$ (f) 01 27 04 UT OCT.13

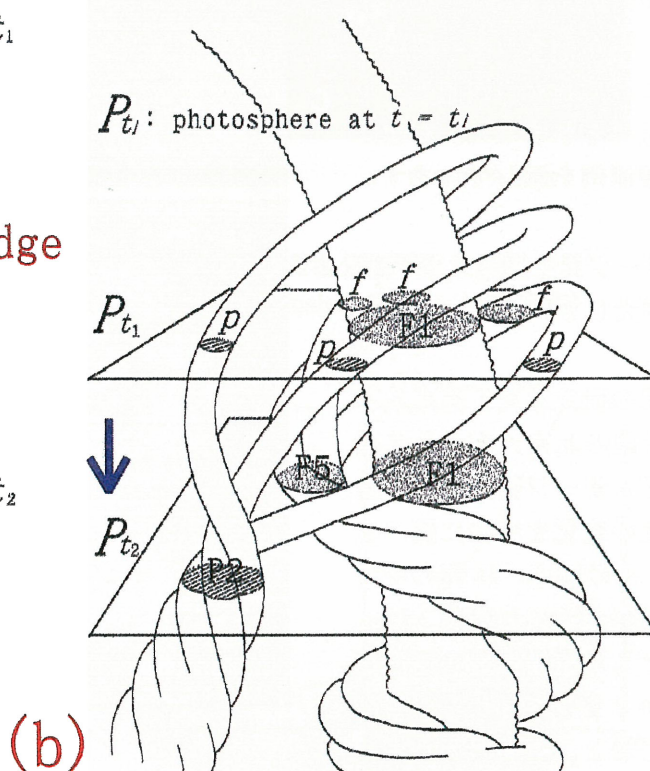
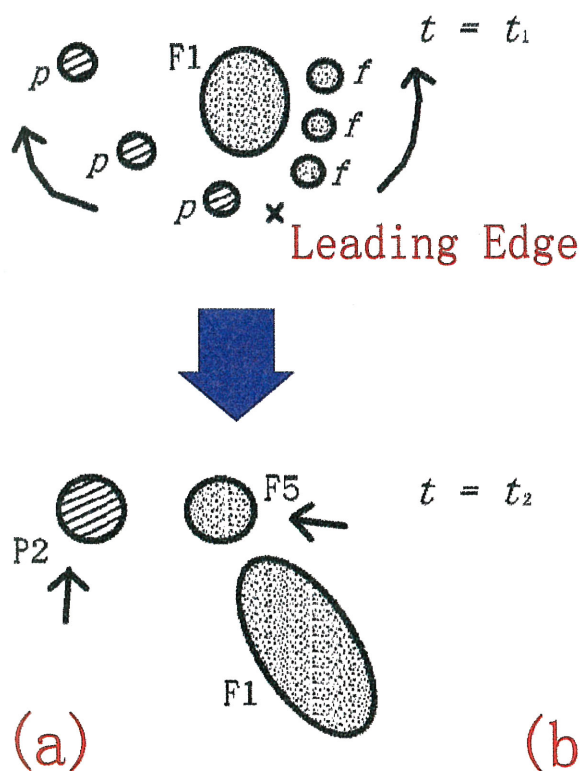
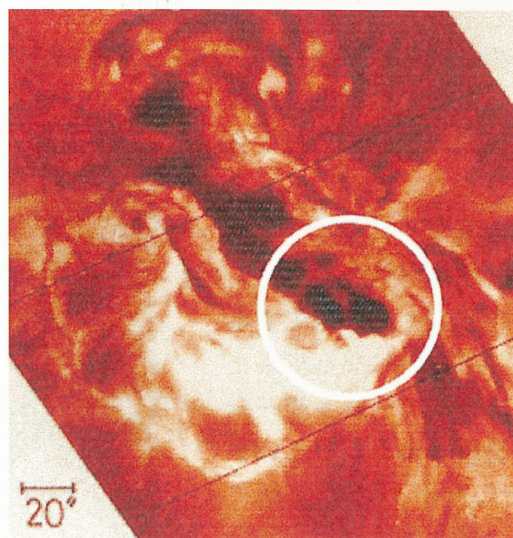
写真：右側は黒点の発達する様子を示しています。左側のH α 写真は黒点上空の磁場方向の変化を示しています。黒い筋模様が磁気ループを表しています。時刻は世界時（UT）で表しています。上2段の写真から、黒点の間の磁場の方向が約21時間の間に約90度回転していることが判ります。この様な急激な回転は捻れた磁束管の浮上でしか説明出来ません。この後、大フレアが発生しました。

太陽フレアは、太陽における爆発的なエネルギーの解放現象であり、電波からX線まで様々な波長で急激な増光現象として観測されます。

右図は、ドームレス太陽望遠鏡を用いてH α 線とらえた太陽フレアの例です。白い部分がフレアによって光っている領域です。この領域ではフレアが繰り返し何度も発生していました。その原因は何だったのでしょうか？

我々は、下図のような捻れた磁束管の浮上がフレア多発の原因であることを突き止めました。

右図の白い円で囲まれた領域では、下図(a)のような黒点の運動が観測されました。これらの黒点の運動から、この領域では下図(b)のような捻れた磁束管が浮上していたことが推測できます。右図の白い円の周辺領域は、フレアが多発領域でした。従って、捻れた磁束管の浮上が、この領域でフレアを多発させたと考えられます。



(3) 浮上磁場領域における磁気再結合現象

浮上磁場領域におけるH α サージ噴出現象の発見

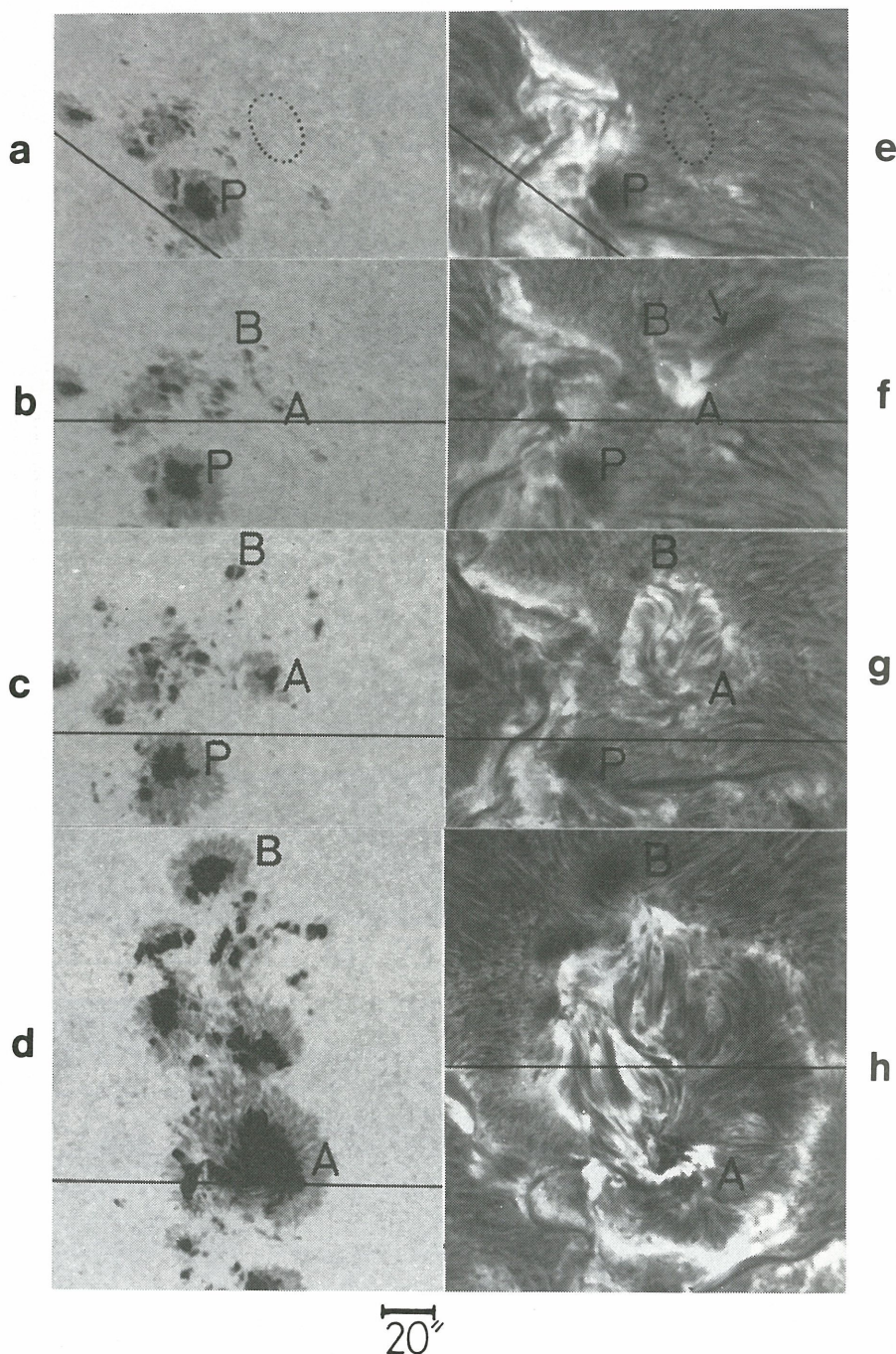
太陽の活動領域（黒点領域）は、双極磁場が対流層から太陽表面に浮上して来た時に誕生し、発達します。この黒点誕生の直前に、噴水のように活発なH α サージの噴出が起こることが、ドームレス太陽望遠鏡の観測によって発見されました。

観測を重ねるにつれて、多くの活動領域がこの様なH α サージの噴出と共に誕生することが、明らかになって来ました。それまで、H α サージの噴出機構は良く判っていませんでしたが、この発見によって、浮上磁場が本質的な役割を演じていることが明らかとなり、また同時に、浮上磁場と既存の磁場との再結合モデルが非常に有力となりました。実際、その後の理論計算によって我々の観測モデルが裏付けられました。右図はその観測例を示しています。

H α サージ発生領域で、磁場強度が増大していることを発見

上記の研究を更に進める為に、中国の北京天文台と共同で、H α サージ発生領域の磁場強度の変化を詳細に調べました。その結果、15例の中で約半数の領域において、はっきりとした磁場強度の増加が見つかりました。サージ噴出が起こると、磁場エネルギーは失われるはずですから、それにも拘わらず、増加しているという結果は、非常に重要です。これによって、H α

サージは浮上磁場で発生するという先の我々の発見が裏付けられ、浮上磁場と周囲の磁場との再結合モデルがいよいよ有力になったと考えています。下の図1と図2では、H α サージ発生場所とそこに



写真：左右は同時刻の連続光（左）とH α （右）写真。写真aとeの点線の部分に、写真bとfでは、浮上磁場領域ABが誕生して、その後（c d、g h）急速に発達していることが判ります。

サージ（写真fの矢印）はその誕生初期に噴出しています。

おける磁場分布が示されています。磁場分布上では白色がN極、黒色がS極の磁場を表しています。図4では、サージ発生場所のN極磁場が時間的に増加していることが判ります。

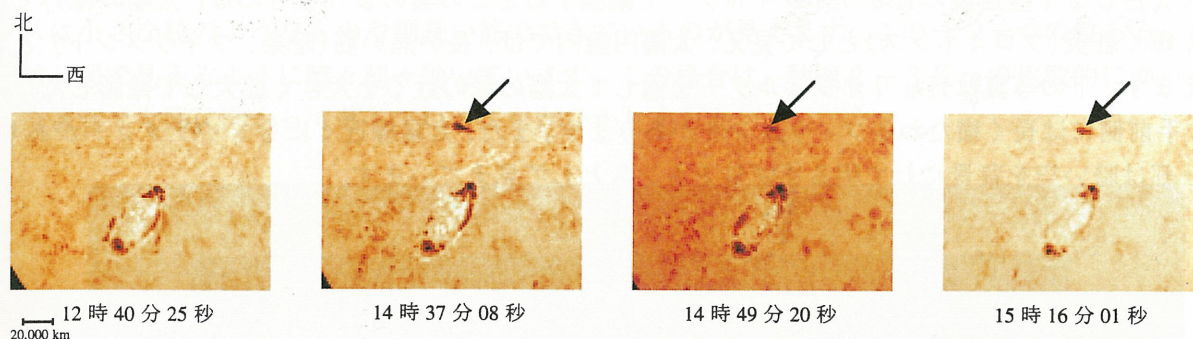


図1. 1992年11月4日に活動領域 NOAA7332 で発生したサージ
(飛騨天文台 60 cm ドームレス太陽望遠鏡にて撮影)

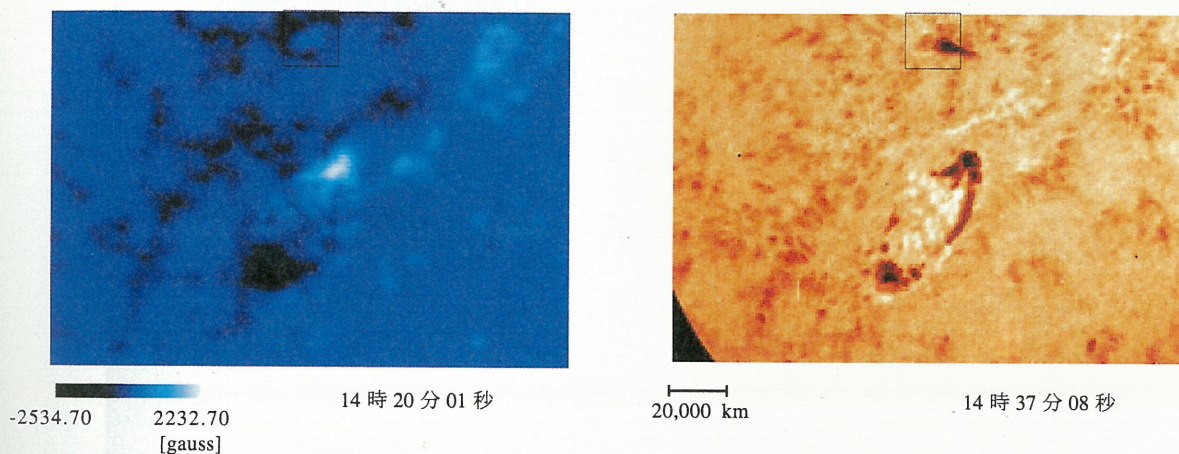


図2. サージ発生領域の太陽磁場分布図と太陽像
(太陽磁場分布図は北京天文台 Huairou Station にて測定)

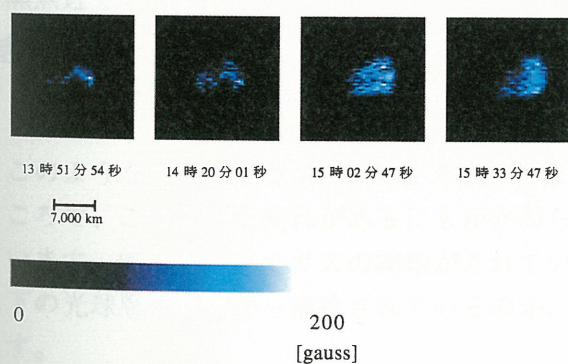


図3. 孤立磁場領域の磁場強度の時間変化の様子

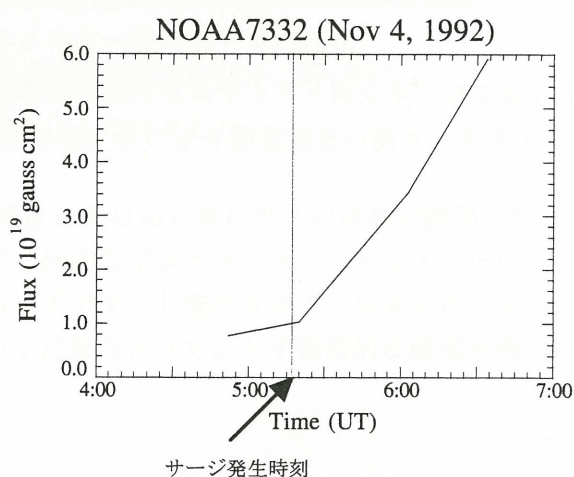
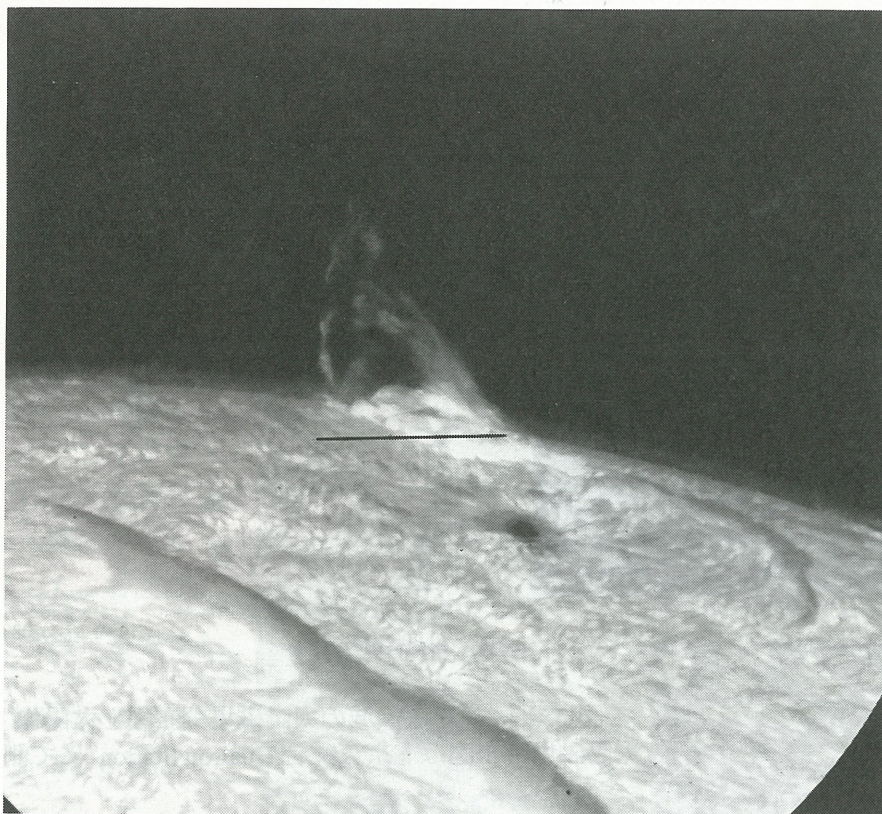


図4. 孤立磁場領域の磁場強度の時間変化のグラフ
(時刻は世界時)

(4) プロミネンス・フィラメントの構造と速度場

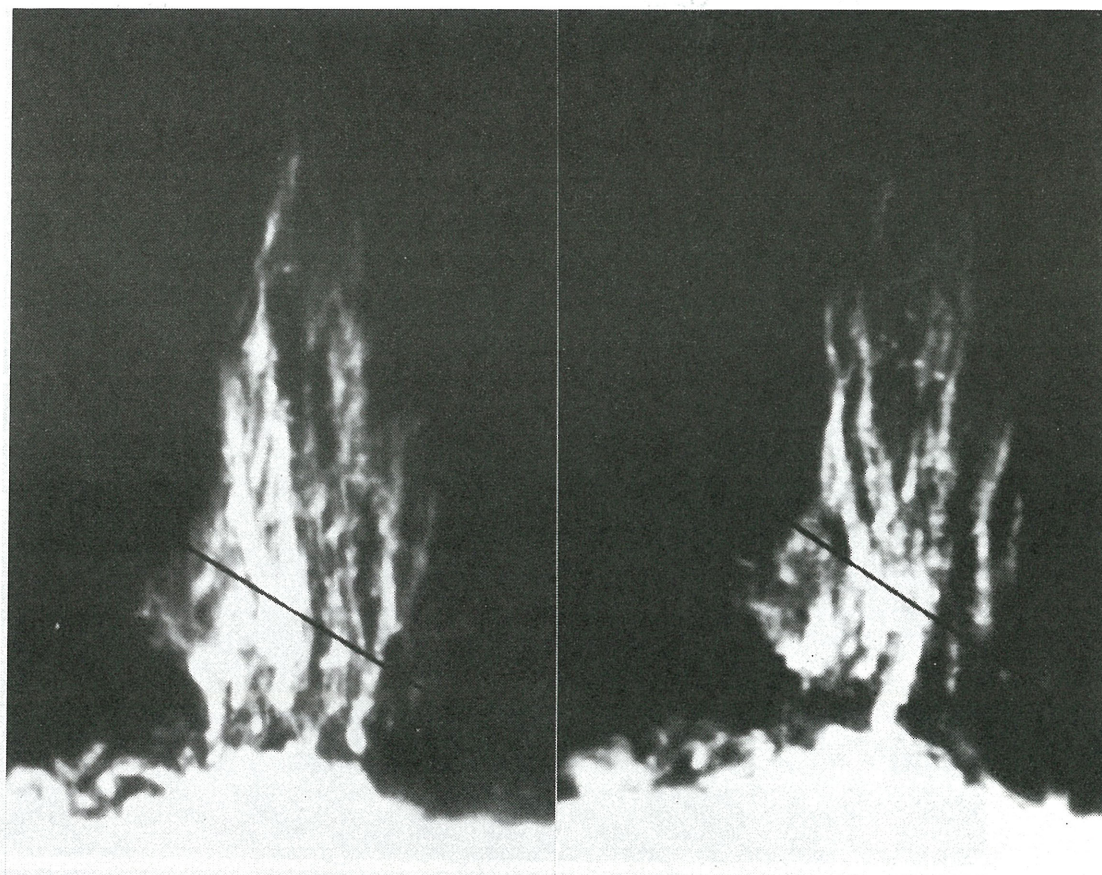
200万℃の太陽コロナ中には、1万℃以下の比較的低い温度を示す雲のようなものが浮かんでいます。飛騨天文台DST望遠鏡の $H\alpha$ リオフィルターで観察するとこの雲のようなものは、太陽の縁外では明るく輝く紅炎(プロミネンス)として見え、太陽円盤内では、長い黒い筋(暗条、フィラメント)として見えます。下の写真は $H\alpha$ リオフィルターを通して太陽の縁の近くを大きく拡大して撮影したものです。手前側には長く横たわるフィラメントがあります。また、太陽縁近くにもフィラメントがあり、その一部は暗い空を背景にして明るくプロミネンスとして見えています。



このようなプロミネンス・フィラメントのガスの流れ、運動状態、温度、密度などは、DST望遠鏡のリオフィルターと高い分散性能をもつ分光器を用いて詳しく調べられてきています。

プロミネンスの中のガスの流れ

下の図は、太陽の縁にある静穏型のプロミネンスと呼ばれるものの H_{α} リオフィルター像です。左の像を撮影して、15分後の状態を右の図に示しています。DST望遠鏡で撮影したもので、プロミネンスは小さな粒のようなものや細長い筋でできているのが見えます。この一つ一つの粒あるいは筋模様は、図で見えるように時々刻々動いています。この場合は、秒速2-3 Kmの比較的にゆっくりとした速度で太陽に向かって落ちていることが分かりました。



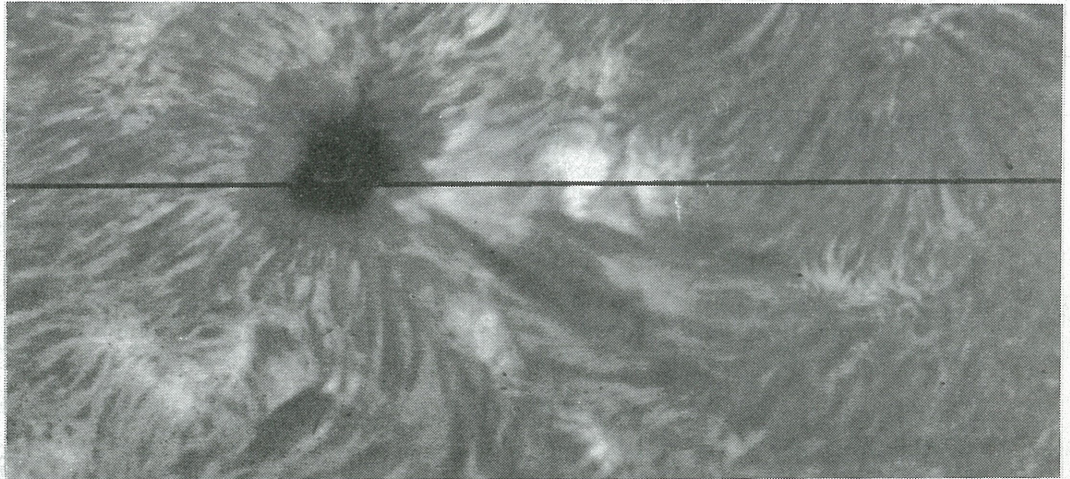
黒点近くの活動領域フィラメントでも、リオフィルター像を用いて黒点に流れ込むガスが一般的であることが観測されました。その例を次のページに示します。この場合は、秒速30 Kmの速度で流れ込んでいました。

このようなプロミネンス、フィラメントでは、速度の差はあれ常にガスの流れが観測されています。ところで、このような流れがあるにもかかわらず全体的なプロミネンス、フィラメントの形は保たれています。何らかの形でガスの補給がされているはずです。上空のコロナからガスがくるのかあるいは下の光球層、彩層から補給されているのか、いまだ解決されておらず観測的な研究が続けられています。

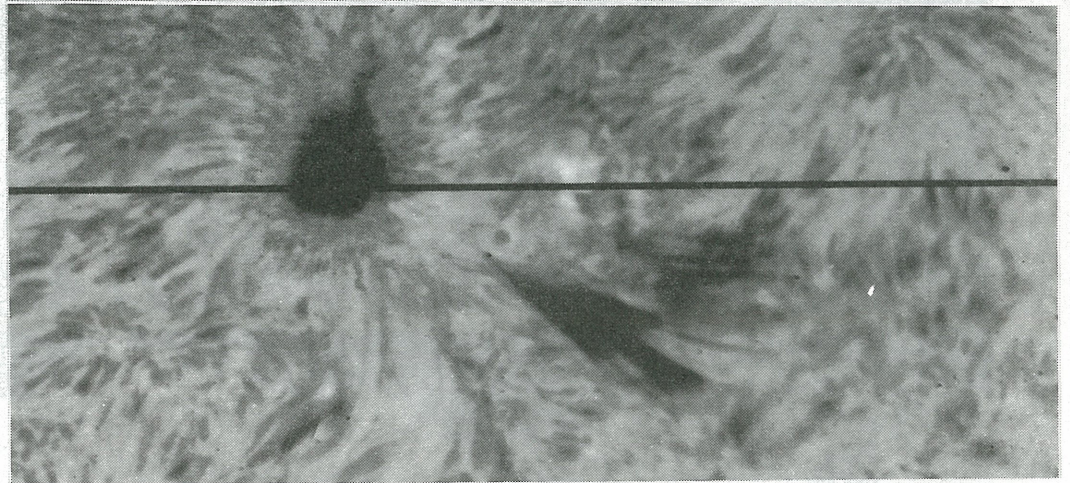
黒点に流入する暗条の流れ

1990年6月13日11時45分

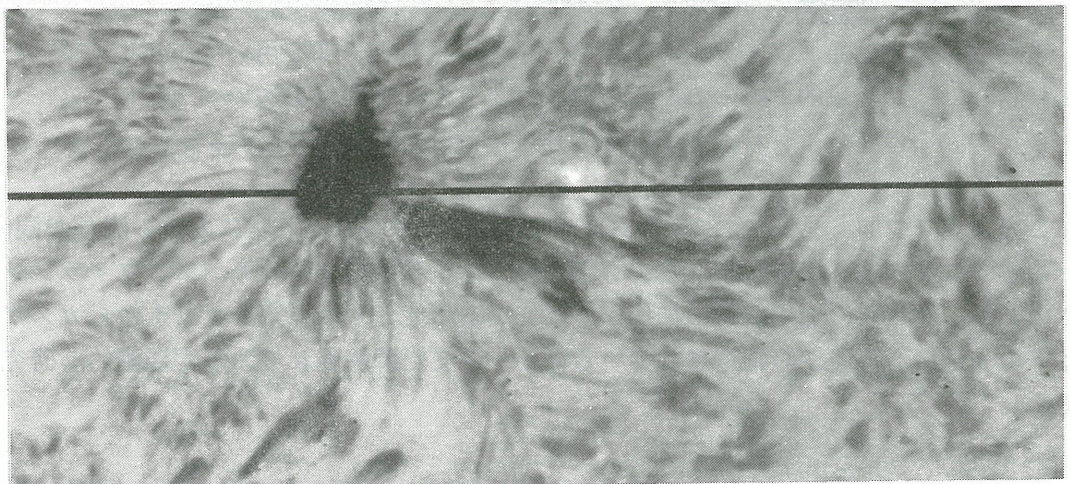
$H\alpha \pm 0.0$



$H\alpha - 0.5$

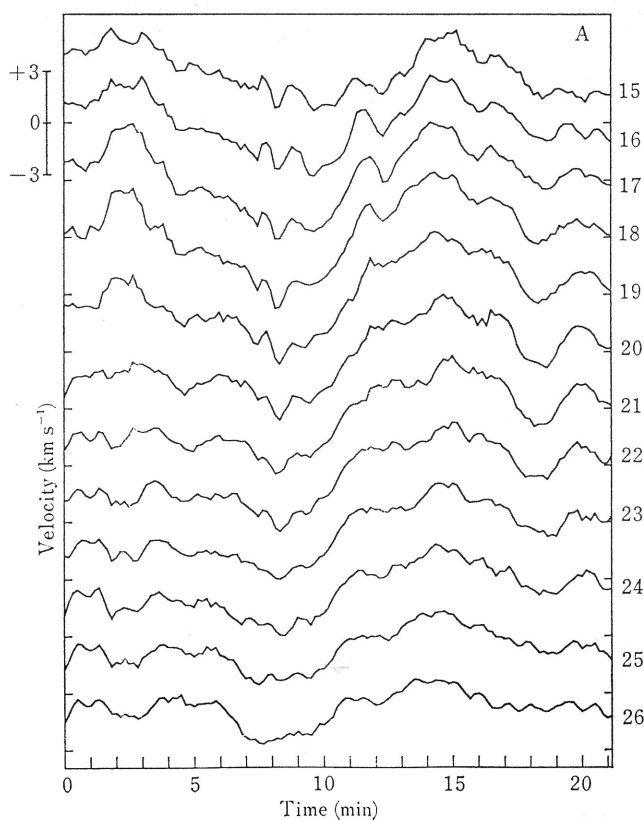
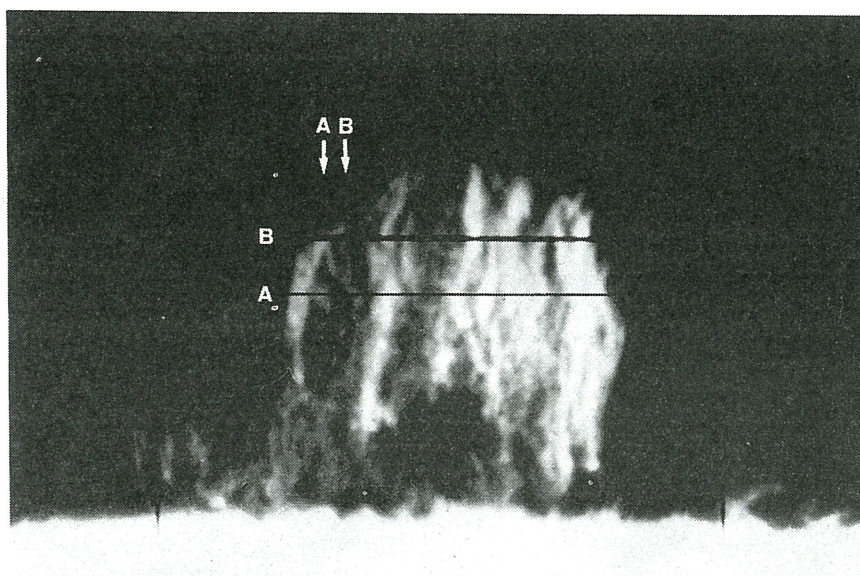


$H\alpha + 0.5$



プロミネンスの振動現象

プロミネンスの輝線スペクトルをDST望遠鏡の高い分散のスペクトルで観測すると、ガスが我々に近づいたり遠ざかったりしたときの速度を詳しく求めることができます。プロミネンス内のこのガスの動きの時間変化をDSTでとらえることに成功しました。そして、静穏型のプロミネンスにおいては、時間的に繰り返す運動（振動現象）が見出されました。下の図は、観測されたプロミネンスの $H\alpha$ 像と、線A上の各場所でのガスの速度の時間変化を示しています。600秒の周期的な運動が明らかに観測されています。色々なプロミネンスを観測すると、その周期は160－600秒、振動の振れ幅は秒速3 Km程度であることが分かりました。この振動現象は、通常の方法では難しい問題（プロミネンスを支える磁場の強さ、プロミネンスの質量の見積もり）を解く重要な手がかりを与えてくれます。



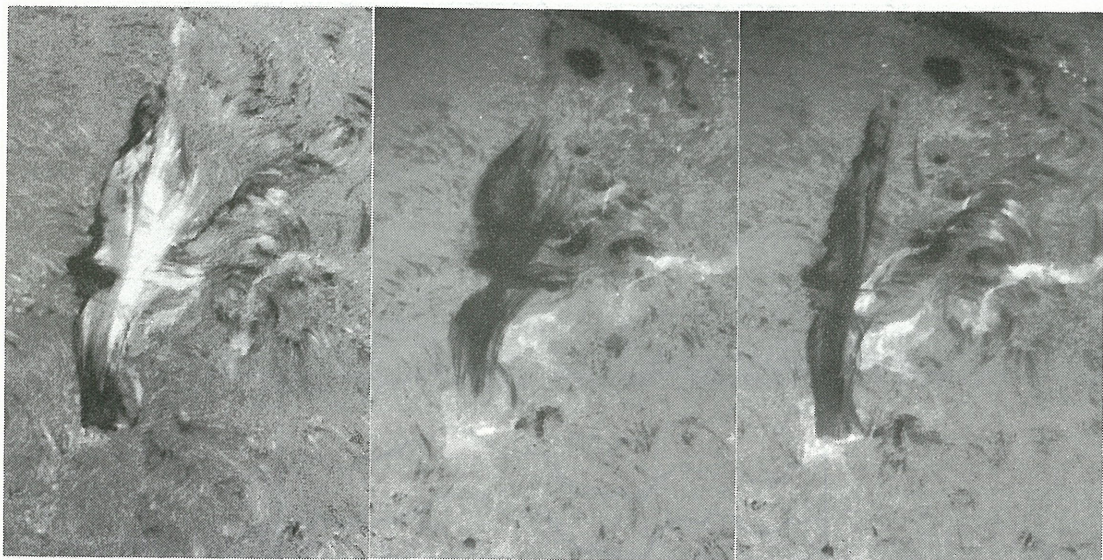
(5) プロミネンス爆発機構と地球磁気嵐への影響

回転しながら噴出するプロミネンス（フィラメント）爆発をとらえた

1984年4月25日に発生した大フレアの後に、その領域から、ねじれた $H\alpha$ フィラメントが回転しながら噴出する過程が、はじめて見事にとらえられました。下の写真aは、このフレア爆発とこれによって片足が切れた捻れたフィラメントの噴出直前の姿を示しています。写真cとdはそれぞれ、 $H\alpha - 1.0A$ と $+1.0A$ での単色像で、写真bはそれらを合成した速度場写真です。bでは、白が我々に近づく成分、黒が遠ざかる成分を表しているので、フィラメントが回転しながら太陽表面から噴出していることが良く判ります。この様な回転噴出運動は、磁場の捻れが解けながら加速されるという柴田－内田モデルによって良く説明されることがはじめて示されました。



写真a：白く輝く大 $H\alpha$ フレアと、黒くとぐろを巻いて捻れた、噴出直前のフィラメント



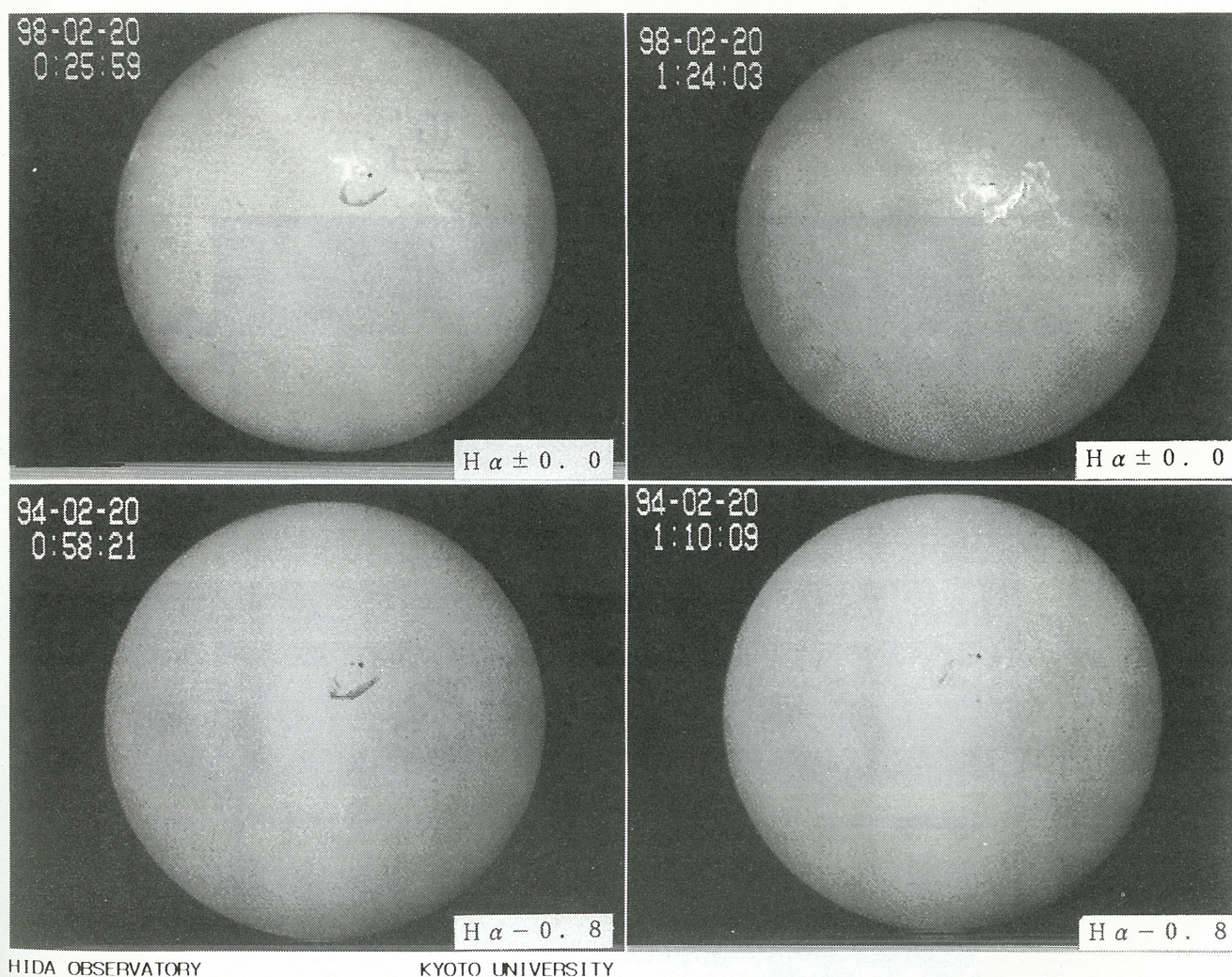
b：噴出フィラメントの速度場

c： $H\alpha - 1.0A$ 像

d： $H\alpha + 1.0A$ 像

フィラメント消失の速度場と地磁気嵐発生規模の関係を探る

1991年から5ヶ年計画で実施された太陽地球エネルギープログラム (STEP) 国際協同研究に参加して新設された太陽フレア監視望遠鏡によって、非常に多くのフィラメント消失とプロミネンス噴出のデータが得られました。世界各地で稼動している太陽全体像監視望遠鏡は $H\alpha$ 中心像を撮影しているのみですが、本望遠鏡は $-0.8\text{\AA}$ と $+0.8\text{\AA}$ でも同時撮影しているため、消失が上昇によるのか、落下によるのか、または加熱によるのかの区別が出来ます。これによって、フィラメントが惑星間空間に放出されたかどうかの判定が可能となり、地磁気嵐との因果関係をより正確に研究できるようになりました。下の写真は1994年2月20日のフィラメント消失とそれに伴う大フレアを示していますが、野辺山太陽電波ヘリオグラフとの協同解析によって秒速600kmから1400kmにもわたる高速でフィラメントが噴出したことが確認されました。この速度は、地磁気の発生時刻を説明するとともに、その時太陽から3.5AU離れた位置を飛んでいたアメリカの探査機ユリシーズが約1週間後に観測した惑星間衝撃波をも説明することが出来ました。

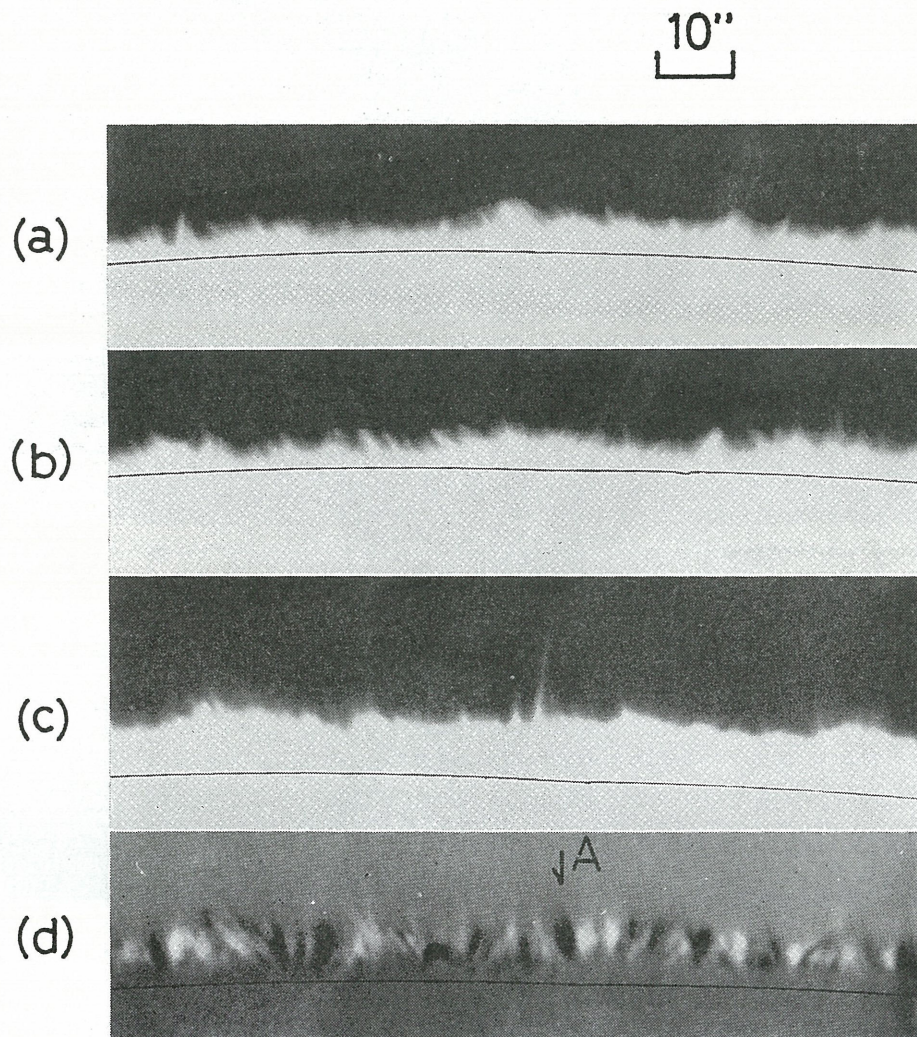


写真：上段は $H\alpha$ 中心像、下段は $H\alpha - 1.0\text{\AA}$ 像。最初(00時25分59秒)に $H\alpha$ 中心で見ていたフィラメントが消失して、00時58分21秒には $H\alpha - 0.8\text{\AA}$ 像で見えている。更に高速で上昇した為、01時10分09秒には -0.8 像でも見えなくなっている。

(6) スピキュールの微細構造と運動

スピキュールは、太陽の周縁部の非常に薄い層で観測されるもので、高い空間分解能をもつ望遠鏡が必要です。我が国では、DST望遠鏡によって初めてその観測が可能となりました。DST望遠鏡での観測から、スピキュールは幅500Kmで高さ10000Kmの針状の形をしており、秒速30Km以上の速さで伸縮していることが明らかになりました。下の図は、太陽の縁の部分でH α リオフィルターを通して撮影したもので、微細な針状のスピキュールが、数え切れないほどとらえられています。図(a)は、H α の波長中心から短波長側で撮影したもの、(b)は長波長側で撮影したもの、(c)は波長中心で撮影したものです。(d)は、(a)、(b)から合成されたもので、我々に向かって動いているスピキュールが白く、我々から遠ざかって動いているスピキュールが黒く示されています。

この観測結果は、京都グループが行った理論数値シミュレーションと比較検討され、スピキュールの起源を説明する最も有力な説の基礎となっています。

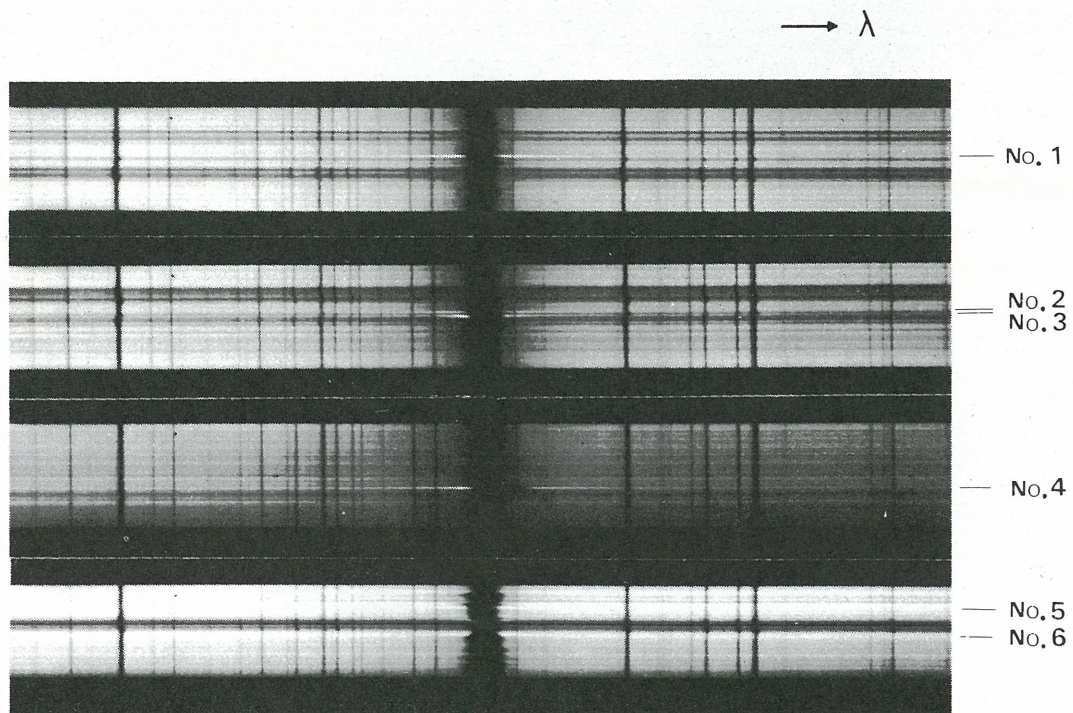


(7) エラーマン爆弾の物理構造

黒点の周辺を、DST望遠鏡の $H\alpha$ リオフィルターで観測すると様々な微細なものが見えてきます。特に、リオフィルターの波長を $H\alpha$ の波長中心からずらして観測すると、小さな明るい輝点が無数に見えます。これらは、エラーマン爆弾と呼ばれているもので、黒点周辺の小規模な爆発と考えられています。ところが、その大きさが極めて小さくその素性は明らかではありませんでした。高い空間分解能をもつDST望遠鏡での観測から、その性質が明らかになってきました。

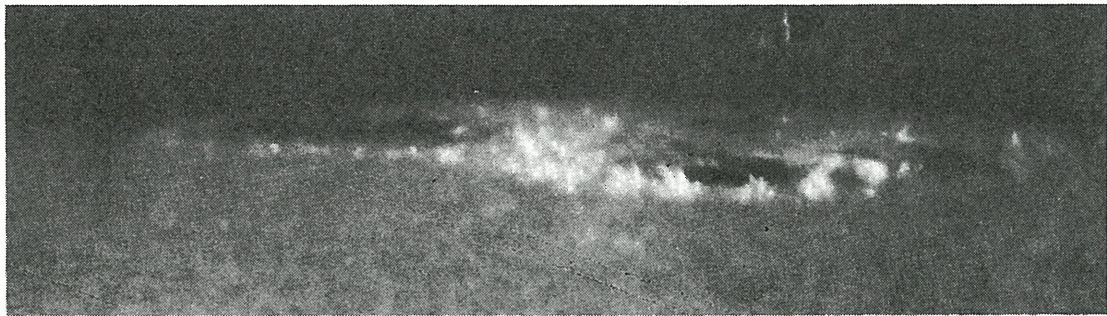
エラーマン爆弾の特異な線輪郭を解明

下の写真は、エラーマン爆弾の $H\alpha$ 線のスペクトルです。きわめて小さなサイズの構造のスペクトルがこのような高い波長分解能で得られました。我が国で、このようなスペクトルを観測することは、DST望遠鏡によって初めて可能となりました。エラーマン爆弾の場所では、 $H\alpha$ 線の波長中心では吸収されて暗くなっていますが、波長中心から左右（波長の長短）に長く伸びる輝線が伴う極めて特異なスペクトルとなっています。このスペクトルの解析から、エラーマン爆弾のところでは、上空に高温高密のプラズマがつくられていること、また、秒速5－6 Kmの速さでプラズマが上昇していることが明らかになりました。



エラーマン爆弾は増光しながら針状に伸びることを発見

$H\alpha$ リオフィルター像の時間変化を調べることによって、エラーマン爆弾の別の性質が明らかになりました。図は、 $H\alpha$ 線の中心波長より短い波長で撮影した、黒点周辺の様子です。多くのエラーマン爆弾が白く輝いて見えています。それぞれのエラーマン爆弾の明るさとサイズと形の時間変化を調べた結果、エラーマン爆弾は、針状に明るさを増しつつ伸びて行くことがわかりました。また、その寿命は平均12分ということが得られました。この運動の様子は、スペクトルの解析結果と見事に一致しています。



(a)



(b)

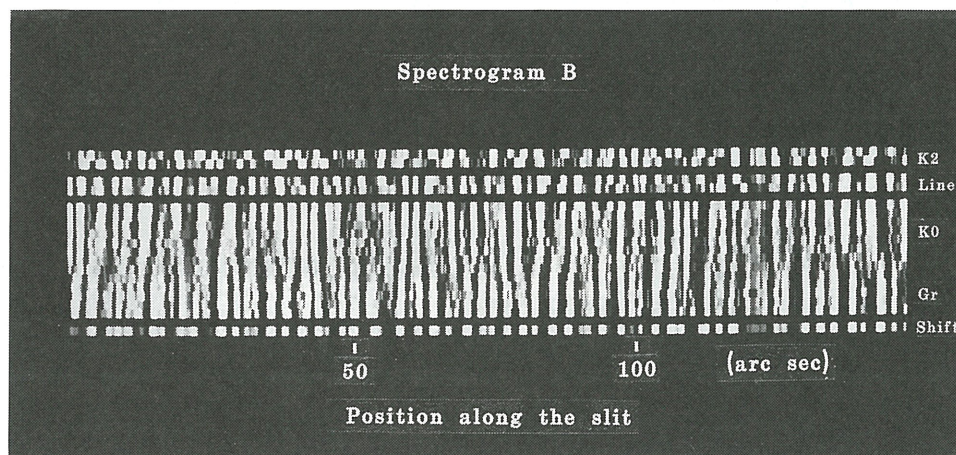
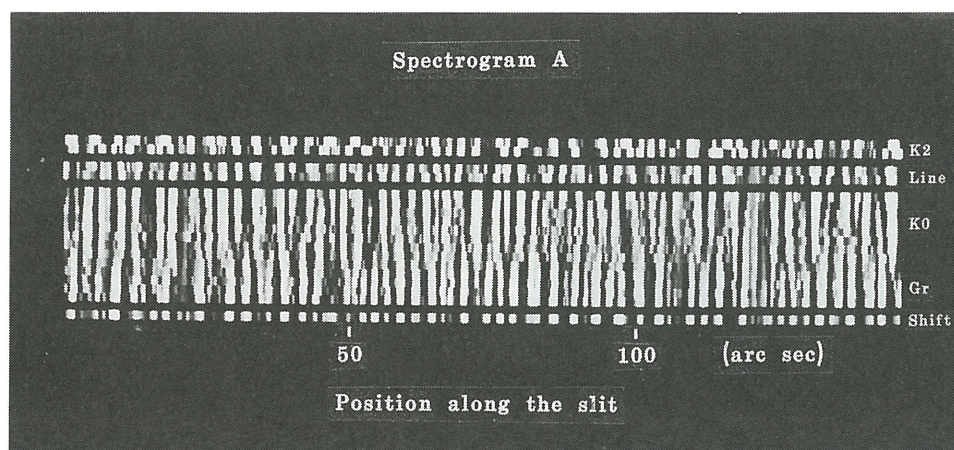


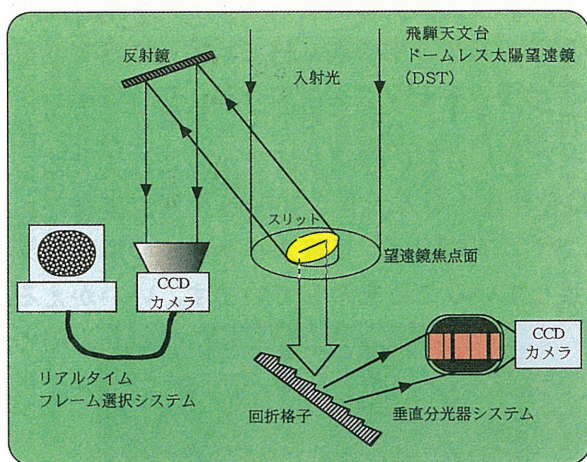
(c)

(8) 太陽内部の対流現象

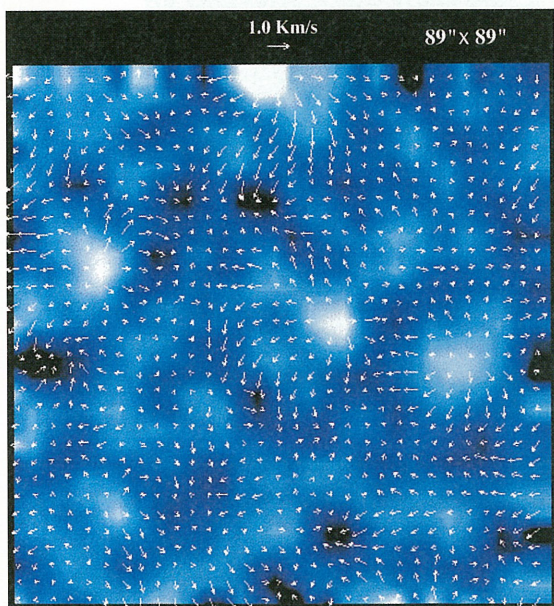
粒状斑間上空における加熱領域の発見

DST望遠鏡の垂直分光器は、世界一の分散性能を持っています。これを用いて、電離カルシウムのK線の高分解能スペクトルが観測されました。そのスペクトルの形の詳細な研究からこれまで知られていなかったことが見出されました。静穏な光球層では粒状斑という大きさ1000Kmの対流模様があり、その中心は明るく縁では暗くなっているのが一般的です。下の図は、K線スペクトルの解析結果で、粒状斑の暗い場所と、上空における明るい場所が一致していることを示しています。いいかえると、上空では、粒状斑の縁の部分でより加熱されていることが明らかになりました。これは、太陽の外層の大気の加熱という謎を解く重要な手がかりを与える結果です。対流と磁場とが加熱に大きな影響を持っていることを示唆しています。

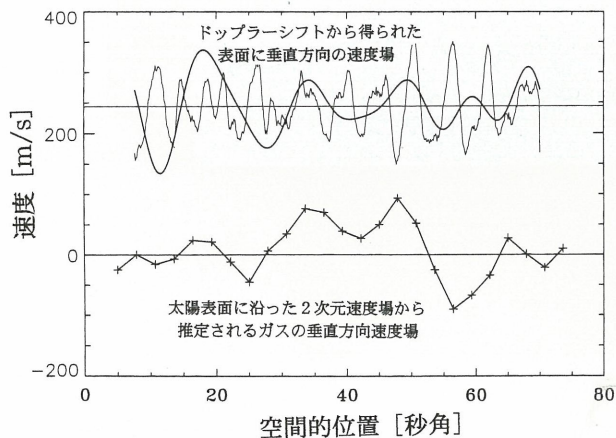




太陽表面の視線方向と水平方向の速度場を同時に取得します。



水平方向の速度場とその勾配。暗い部分がガスが集中して来ている領域、明るい部分が逆にガスが流れ出している領域。

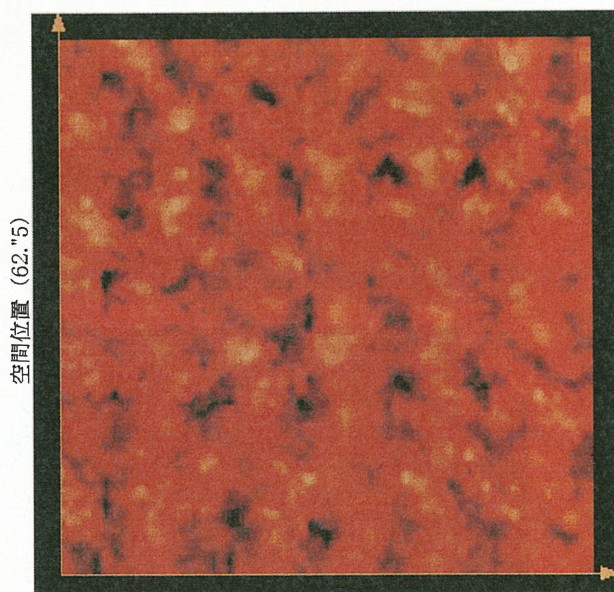


太陽表面のある1直線上での、ガスの垂直方向、水平方向の運動速度の関係。パターンが非常に良く一致しています。

太陽表面の対流について、粒状斑 (granulation) の底が中性水素が電離する境界面に対応し、超粒状斑 (supergranulation) の底が1回電離ヘリウムがさらに電離する境界面に対応していると考えられていることから、古くから中性ヘリウムが電離する境界面に対応する、その中間規模の対流、中規模粒状斑 (mesogranulation) の存在が想像されていました。

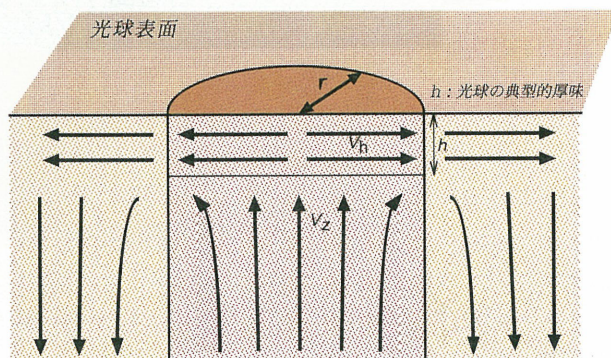
飛騨天文台では、光球上を水平に運動するガスの動きを検出する撮像観測と、太陽表面に垂直な方向の運動を10m/sの高精度で決定できる分光観測を同時に行うことにより、それに対応すると思われる速度場構造を3次元的に見事に検出しました。

現在でもその正体が色々議論されている中規模粒状斑が、実際に理想的な対流セルを反映しているという証拠を明確に示したことになります。



時間 (30 分)

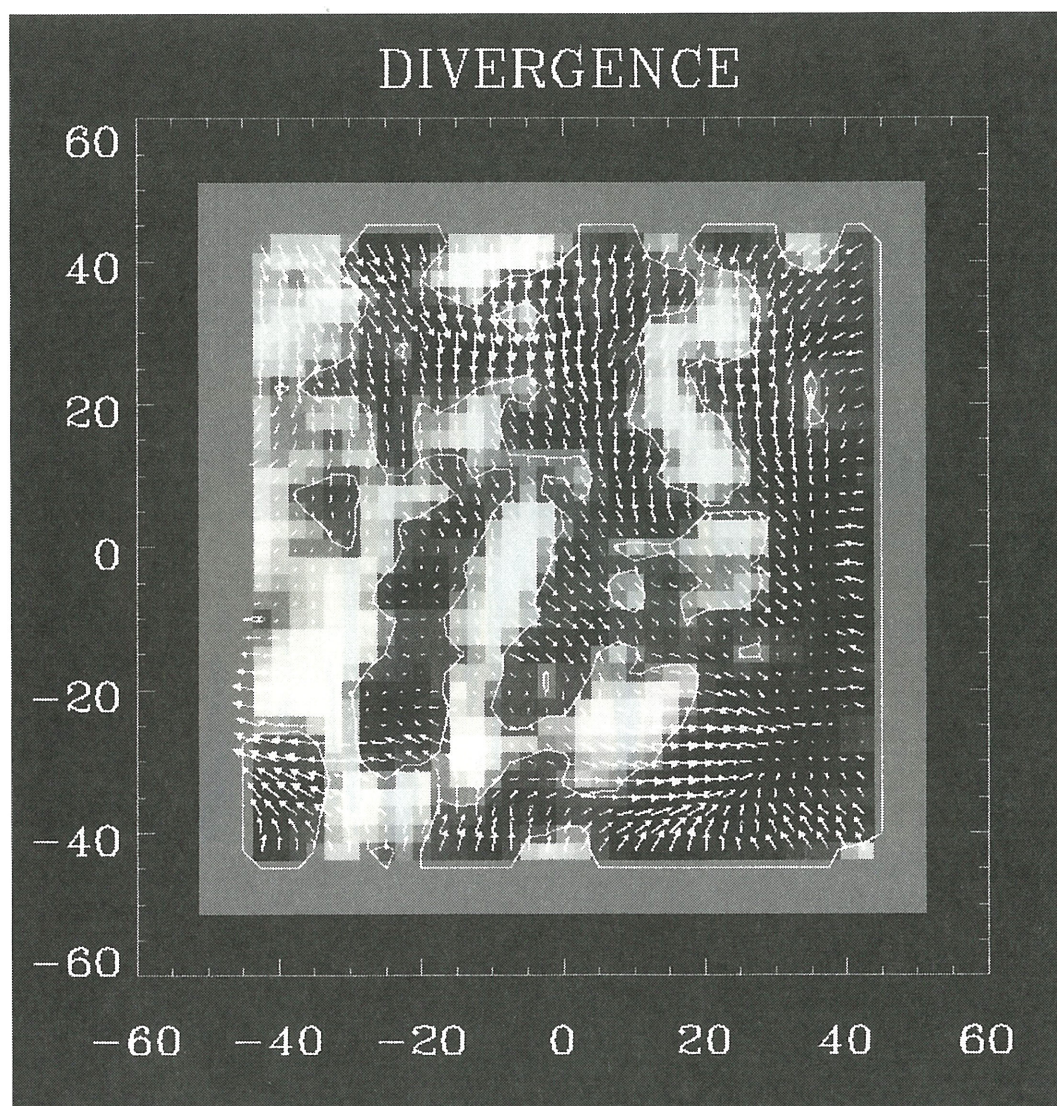
太陽表面に垂直な方向のガス運動の時間変化。約5分周期で大気が振動していることが良く分かります。ここから、対流運動の成分だけを取り出します。



おそらく中規模粒状斑は、このような理想的な対流運動による結果と考えられます。

巨大対流斑

太陽では、粒状斑、中間粒状斑、超粒状斑といった対流による模様があることが知られています。理論面からは、さらに太陽半径と同程度の大きさをもつ巨大粒状斑があることが予想されています。この巨大粒状斑は、太陽の11年の周期活動に深く関係しているといわれています。ところが、これまで観測的には、その有無が確認されていません。飛騨天文台では、フレアモニター望遠鏡の太陽全面連続観測データの解析から、巨大粒状斑をとらえる研究を進めています。これは、太陽全面にある超粒状斑の動きを求めて、超粒状斑を動かしているより大規模な流れの様子をもとめようとするものです。下の図は、観測された流れの場から、太陽の自転成分を差し引いた残りの水平流れの様子を矢印ベクトルで示したものです。また、流れが水平吹き出しのところは明るく、逆に流れ込みの部分は暗く表示されています。太陽経緯度で、南北120度、東西120度の範囲の様子です。巨大対流の吹き出し部分が、逆”く”の字型にならんでいて、理論が予想する形とよく似ています。巨大対流斑の存在の証拠が浮かび上がってきたと考えています。

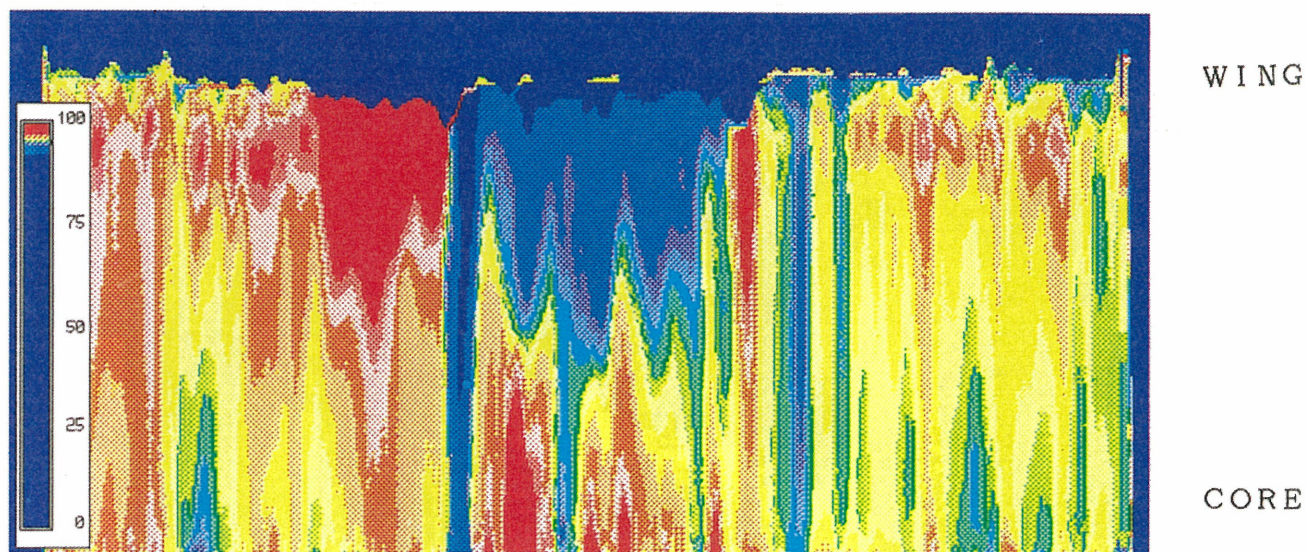


(9) 黒点とその周辺部の速度場

エバーシェッド流の構造

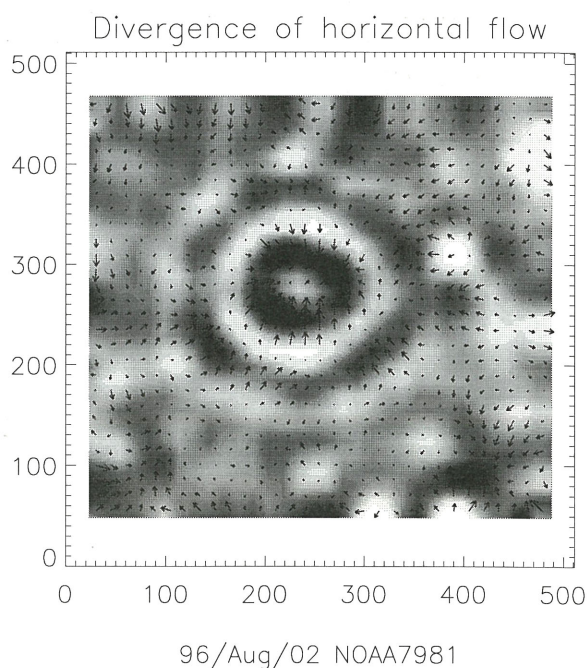
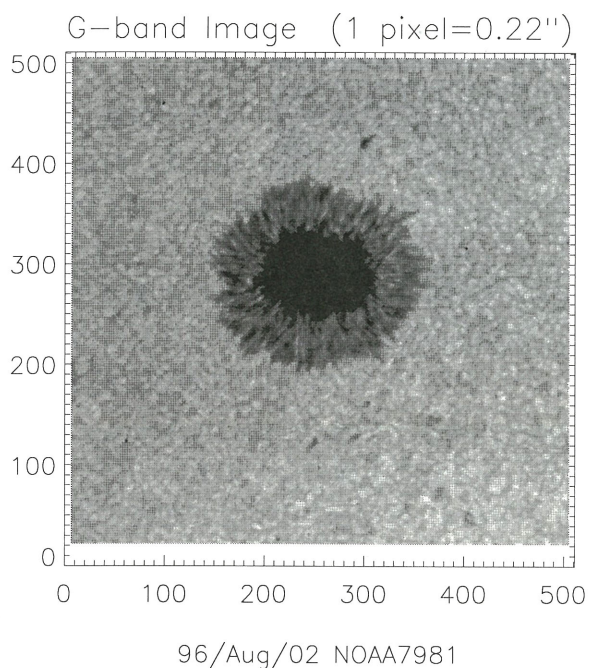
太陽黒点の半暗部には、黒点からその半径方向に外へ向かう流れがあつて、エバーシェッド流と呼ばれています。DST水平分光器の多波長同時スペクトル観測によって、半暗部の深いところでは大きな速度で外向きに流れ、上空に行くにしたがつて速度は小さくなり、やがては内向きの流れになるということが精密に確認されました。更に、垂直分光器を用いて、高い空間分解能を生かして、半暗部の場所ごとのスペクトルを詳しく観測すると、エバーシェッド流は、一様で定常な層状の流れではなく、多数の筋状の管の中を様々な速度でガスが流れている複雑な状態であることがわかりました。図は、高分解能スペクトルから得られた結果で、半暗部断面での速度の分布を示しています。暖色系統は半暗部から外向きの、寒色系統は内向きの流れを示します。横方向は半暗部の場所の違いを示します。縦方向は、大気の深さを示します。同じ深さでも、場所によって内向き、外向きの流れがあつて複雑な流れとなっています。DST望遠鏡による磁場の高空間分解能データとの総合解析によって、流れの起源が解明されると期待しています。

Line Asymmetry $\lambda 5434$

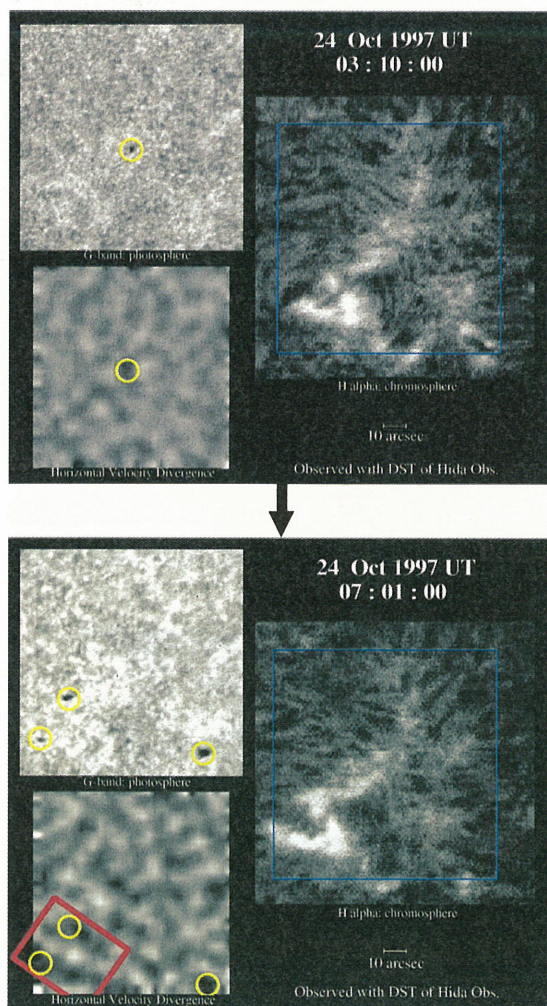


安定な黒点での流れの場

太陽光球部の粒状斑の模様の移動から、中間粒状斑が発見されました。同じ手法を太陽黒点に応用してみたところ、安定な黒点の暗部、半暗部、周辺光球部に極めて特徴的な流れの場があることが見出されました。図の左側は、黒点とその周辺の粒状斑の様子を示します。右側は、得られた水平速度場を矢印ベクトルで示しています。また、流れの吹き出し部分を明るく、流れ込みの部分を暗く表示しています。黒点内部の内向きの流れと半暗部外周光球部から黒点に向かうリング状の流れが明らかにとらえられています。黒点内部の流れは、黒点内部の小さな輝点の運動を一つ一つ求めて得たものと一致しています。周辺のリング状の流れは、初めて見つかったものです。



黒点誕生時の速度場の時間発展を捉えた



黒点周辺の光球速度場の研究は古くから行われてきていますが、様々な黒点のある一時期の速度場を測定するにとどまったものが多く、ある黒点の形成から崩壊までの大気運動の時間発展を連続的に追尾した研究はまだ少数です。

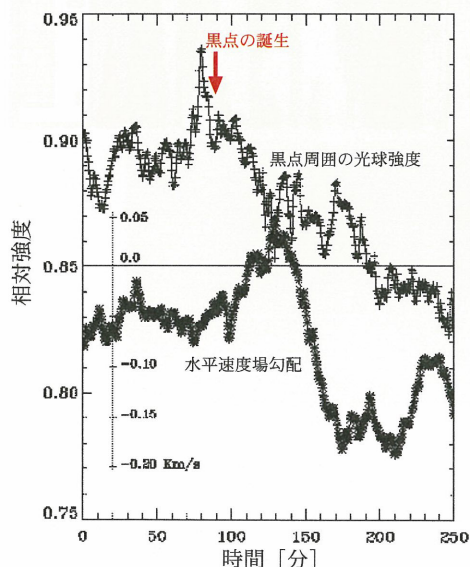
飛騨天文台では、その様な研究の一環として、磁束管浮上領域での小黒点 (pore) の生成消滅の様子を詳細にとらえる観測を行いました。

左図は、比較的穏やかな活動領域を含む領域を、6時間以上に渡って時間分解能30秒で追いつけた観測で取得したイメージからの抜粋です。光球を写し出すフラウンホーファーのG線と、彩層の構造を反映する中性水素線のイメージを比較しつつ、水平方向の光球速度場の勾配を示しています。

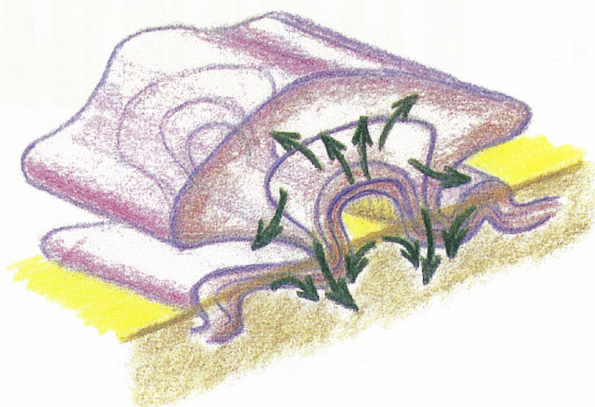
これらの時間発展の様子から、小黒点が消滅して行く過程、誕生して発達して行く過程における、特に光球の水平方向のガスの運動の状態を詳細に知ることができました。それによれば、黒点のできる領域上空では、すでに彩層において磁束管中に閉じこめられた水素ガスの構造物が存在し、光球へ向けてその一部が下降しつつあります。その後、その足元の光球での明るさが急に低下し、直後、その周辺の光球ガスが黒点に向けて集中し、その結果黒点は安定して存在するようになります。

彩層においてアーケード的に見える磁場構造物 (Arch Filament System) の足元に相当する2本のベルト状の領域においても、黒点こそ出現はしていませんが、上記の様なガスの集中が起っている事が確認され、磁束管が対流層から光球を横切り、彩層に至る過程を数値的にシミュレートした理論的研究による描像とも非常に良く一致することが確認されました。

今後、さらに大規模な黒点に関わる大気運動の時間的な変化を詳細に調査して行く予定です。



黒点誕生時前後における、太陽光球の明るさとガスの水平方向運動速度の勾配。黒点誕生時の大気運動の時間変化を詳細にとらえることができました。



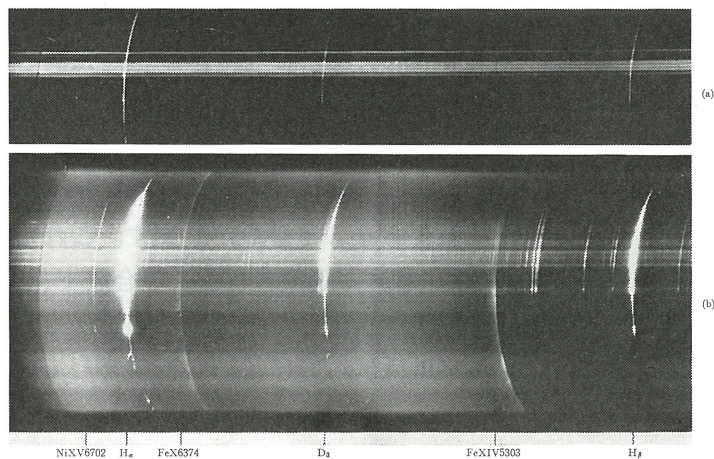
数値シミュレーションから想像される、磁束管浮上時の磁場の形体と、それに伴う大気運動の様子。光球でみられる速度場構造とぴったり一致します。

(10) 太陽コロナの温度密度構造

附属天文台では、飛騨天文台発足後も、1970年（メキシコ）、1973年（モーリタニア）、1976年（オーストラリア）、1980年（ケニア）、1983年（インドネシア）、1991年（メキシコ）と次々と皆既日食観測隊を派遣して、多くの成果を挙げてきました。

彩層の微細構造（スピキュール）の間は100万度の高温コロナであることを実証

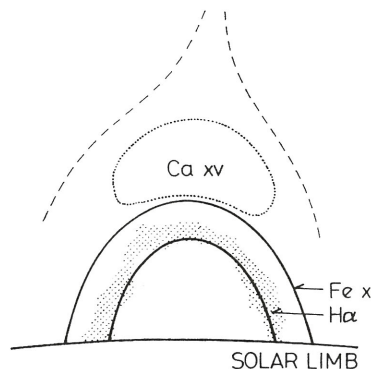
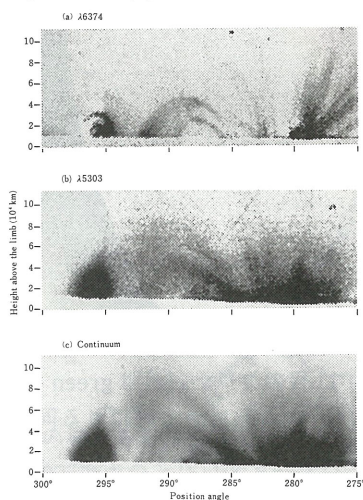
特別に設計した分光器によって、コロナ輝線のスロット・スペクトルを太陽縁ぎりぎりまで、はじめて撮影する事に成功しました。これによって、Fe Xイオンから放射される100万度のコロナ輝線強度が光球上1000 kmまで増加し続けることを見出し、スピキュールと呼ばれる低温ジェット低部まで、その間は高温コロナで満たされていることを、初めて実証しました。



写真：1970年メキシコ日食で撮影されたフラッシュ・スペクトル。上段は第2接触直前の低部彩層のスペクトル。下段は第2接触直後の彩層及びコロナのスペクトル。

皆既日食でフレアループを初めて観測

1980年の皆既日食で、フレア発生後のポストフレアループを高空間分解のコロナ輝線像（a）と分光スペクトルの両方で初めて同時に撮影することに成功しました。この解析から、100万度の低温コロナループ（Fe X 6374）の上に350度（Ca XV 5694）の高温プラズマがカスプ状の構造の中に存在していることを示しました（b）。この高温プラズマ成分は、現在のX線衛星「陽光」でも、確認されました。



a：コロナの微細ループ構造：左の黒い小山がフレアループ。 b：フレアループの温度構造

100 万度と 200 万度のコロナループは独立に存在する

図 1 は、1991 年 7 月 11 日にメキシコで観測された皆既日食中のコロナで、東縁付近に見られた活動領域上空の画像です。(a) (b) は、鉄イオン Fe^{+13} および Fe^{+9} の出す波長それぞれ $5303 \text{ \AA}$ および $6374 \text{ \AA}$ の光を取り出して見たもので、それぞれ 200 万度、100 万度のプラズマの分布を代表しています。(c) は連続光で見た画像で、温度に依らない領域全体の密度分布を反映しています。図 1 を見ると、コロナには細い管状の構造が数多く存在しているのがわかります。これらはコロナループと呼ばれるもので、コロナ中の磁場にコロナを構成するプラズマが閉じ込められている姿だと考えられています。これらの画像を詳しく比較することにより、観測領域内の異なる温度成分がどのような分布をし、それらがプラズマ全体に対してどの程度の寄与をしているかを調べることができます。

以前の観測（1980 年ケニア日食）の解析からは、フレア直後の活発な領域では 200 万度の太いコロナループの芯部分に 100 万度の細いループが存在しているという、同軸構造を示す結果が得られています。今回の解析では、より広範囲にわたる分布の違いを再現可能でより定量的な方法で評価するために、OMC (Octdirectional Maxima of Convexities) と呼ばれる構造強調のためのアルゴリズムを利用しました。OMC の使用により、特に (c) の連続光画像では、濃淡が極めて薄く判別の難しかった構造をうまく抽出することができました（図 2 を参照）。図 3 は、異なる波長の構造強調画像を色を違えて重ね合わせたものです。(1) は、200 万度（緑色）と 100 万度（赤色）の画像の合成で、両者の構造は重なり合うことなく、ほぼ排他的な位置関係にあることがわかります。これに対して (2) (3) は、それぞれ 200 万度（緑）と連続光（橙）、100 万度（赤）と連続光（橙）の合成で、両者とも (1) に比べて重なり合う度合いが高くなっているのがわかります。以上より、100 万度と 200 万度の構造は全く独立に存在しており、それらが観測領域のプラズマにほぼ対等に量的な寄与をしている、という新しい描像が明らかになりました。

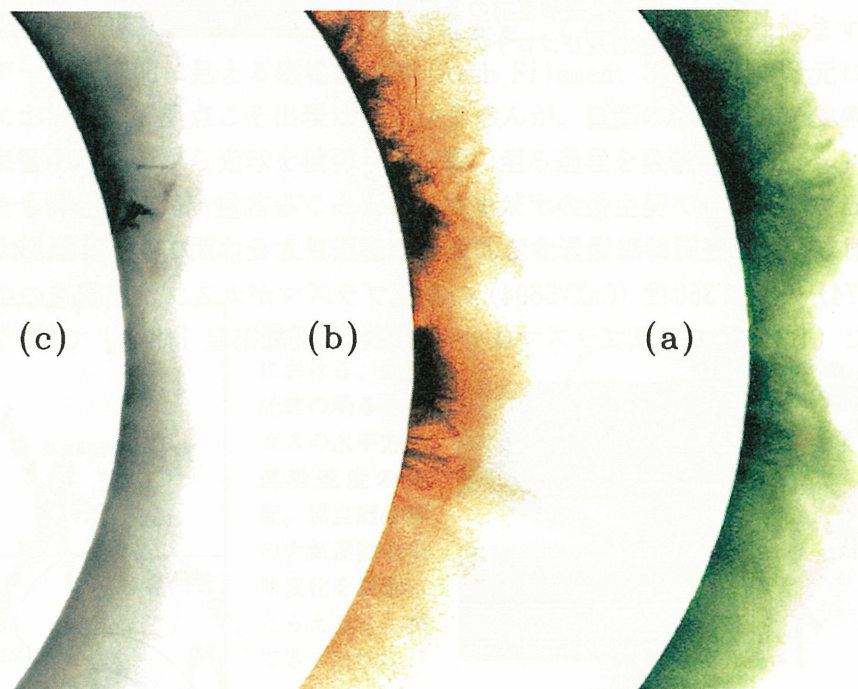


図 1. 京都大学日食観測隊が観測した 1991 年 7 月 11 日のコロナ。(a) は green line と呼ばれる鉄イオンの輝線で約 200 万度のプラズマの指標。(b) は red line と呼ばれる同じく鉄イオンの輝線で約 100 万度のプラズマの指標。(c) は連続光で密度の指標。

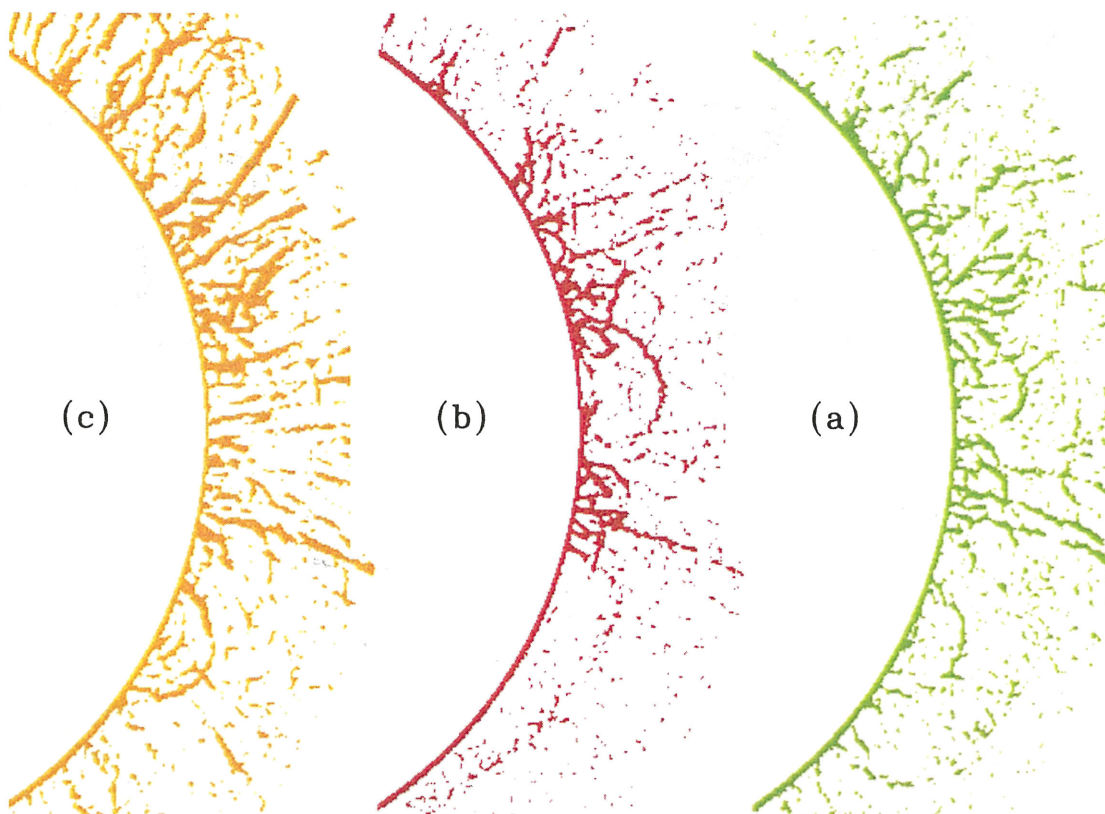


図 2．図 1 の画像を OMC アルゴリズムによりループ構造を強調したもの。
(a) (b) (c) は図 1 のものに対応。

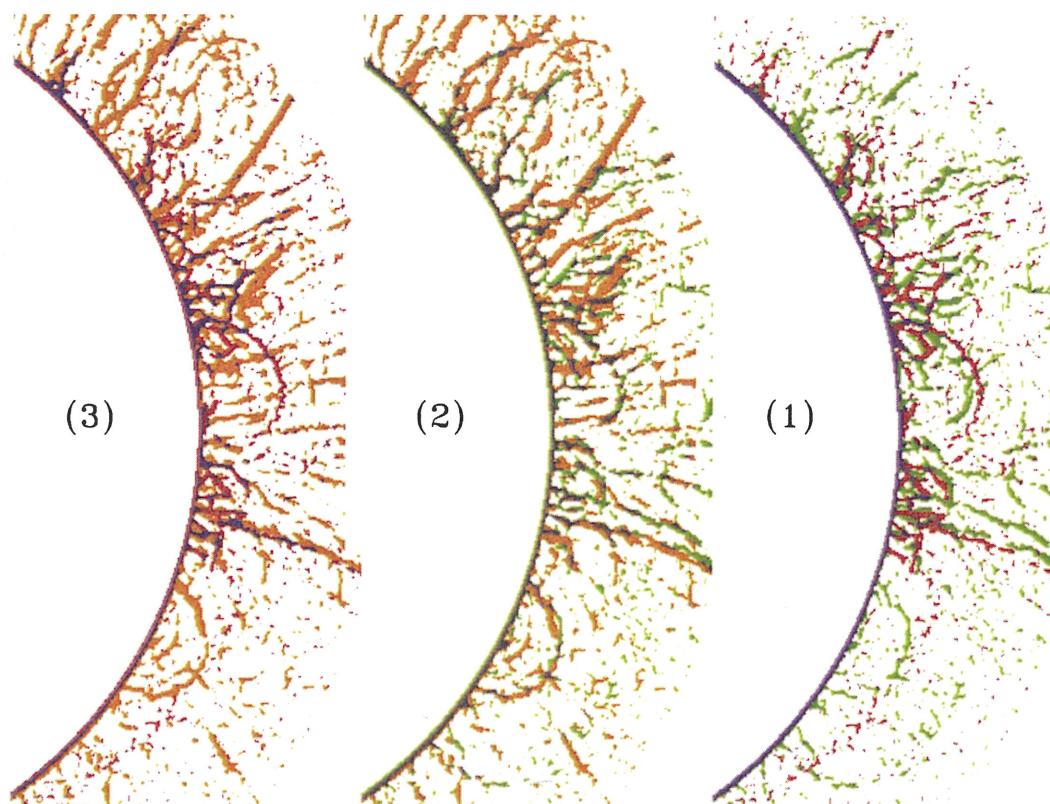
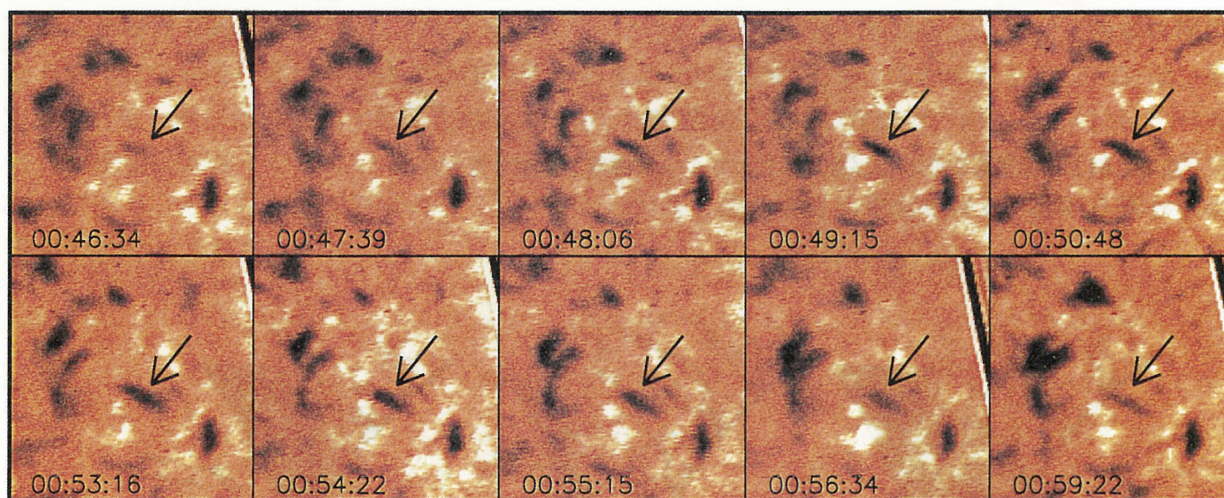


図 3．図 2 の画像の異なる 2 枚を重ね合わせたもの。
(1) は図 1 の (a) 200 万度成分と (b) 100 万度成分の合成。同様に (2) は (a) 200 万度成分と (c) 全密度、(3) は (b) 200 万度成分と (c) 全密度の合成。

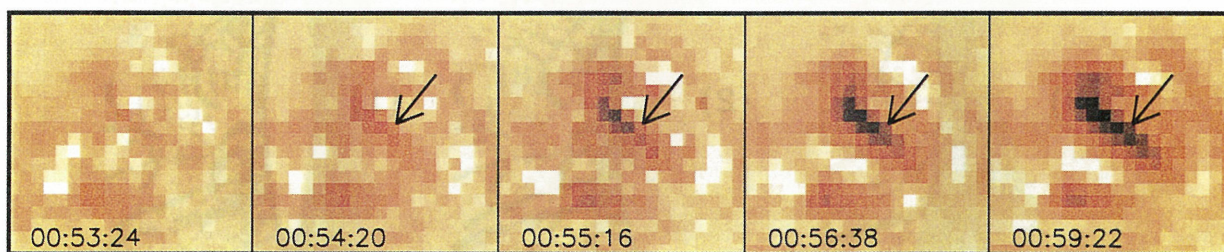
(11) 浮上磁束管が引き起こすコロナループ加熱現象の発見

「コロナ」が何故200万度の高温であるのか？という疑問は「コロナ加熱の問題」と呼ばれ、太陽物理学における、今なお解決されない長年の問題です。

H α 線像で見られる磁束管は一万度程度のものなので、「活動領域」の初期段階である「磁束管浮上領域」を観測すれば、その一万度の磁束管が「コロナ」の数百万度にまで加熱される様子が見られるはずです。我々は、今までに数回、日本が1991年に打ち上げた人工衛星「ようこう」と共同観測を行い、飛騨天文台で得られたH α 線像と「ようこう」の軟X線を比較することによって、「磁束管浮上領域」における低温磁束管(H α で確認)と高温のそれ(軟X線で確認)の関係について調べました。その結果、H α 線像で低温の浮上磁束管が確認されてから数分後に軟X線像で明るい高温のループが発生する様子を初めて観測することに成功しました。この現象は、浮上してきた磁束管が、コロナ中の磁場との間で、「磁場の再結合」と呼ばれる現象を起こしており、その結果として磁束管が数百万度の高温にまで加熱されていることを示しています。このような対応関係は、ほとんどの浮上磁束管において見つかっており、かなり一般的な現象であると思われます。このような clearな時間関係が示されたのは、世界でも初めてのことです。



(a)



(b)

(a) はドームレス太陽望遠鏡で撮られた画像の時間変化で、H α 線で見えた太陽表面の一部です。図中に矢印で示したものが浮かび上がってきた磁束管です。「 Ω 」形のループを真上から見ているので「線分」に見えています(これは軟X線の図でも同様です)。それぞれの画像の左下に示されているのは、画像の取得時間(世界標準時)です。(b) は「ようこう」で撮られた軟X線画像です。色の濃い部分は、そこに何らかのエネルギー解放が起ったことを示しています。