

# 太

陽の研究がなぜ大切な  
か。

「太陽がわれわれにいちばん近い  
恒星だからです。太陽がわかれ  
ば、恒星がわかります。恒星を知  
ることは宇宙を理解するための第  
一歩です。太陽の研究は宇宙を知  
るための最も基本的なステップな  
のです」

と小川原嘉明教授はいう。

実際、太陽以外に、我々が近く  
から観察できる恒星はない。太陽  
に次いで近い恒星は、ケンタウル  
ス座のアルファ星だが、近いとい  
っても、4・3光年。地球と太陽  
の距離の26万倍。40兆<sup>キ</sup>のかなた  
にある。どんな望遠鏡を使つて  
も、太陽のような詳細な観測は不  
可能だ。

# 立 花 隆



# 100億年の



# 旅

38

宇宙科学研究所「ようこう」観測チーム

# 劇的な太陽の 素顔に迫る<sup>(中)</sup>

立花隆  
評論家

写真 戸澤裕司

## すべての元素が プラズマの状態

太陽の研究によって、星の生き  
た営みがどのように展開されてい

るのが徐々にわかってきた。星  
はいかにして光り輝くのか。星の  
本体は何なのか。どこからあのエ  
ネルギをくみ出しているのか。

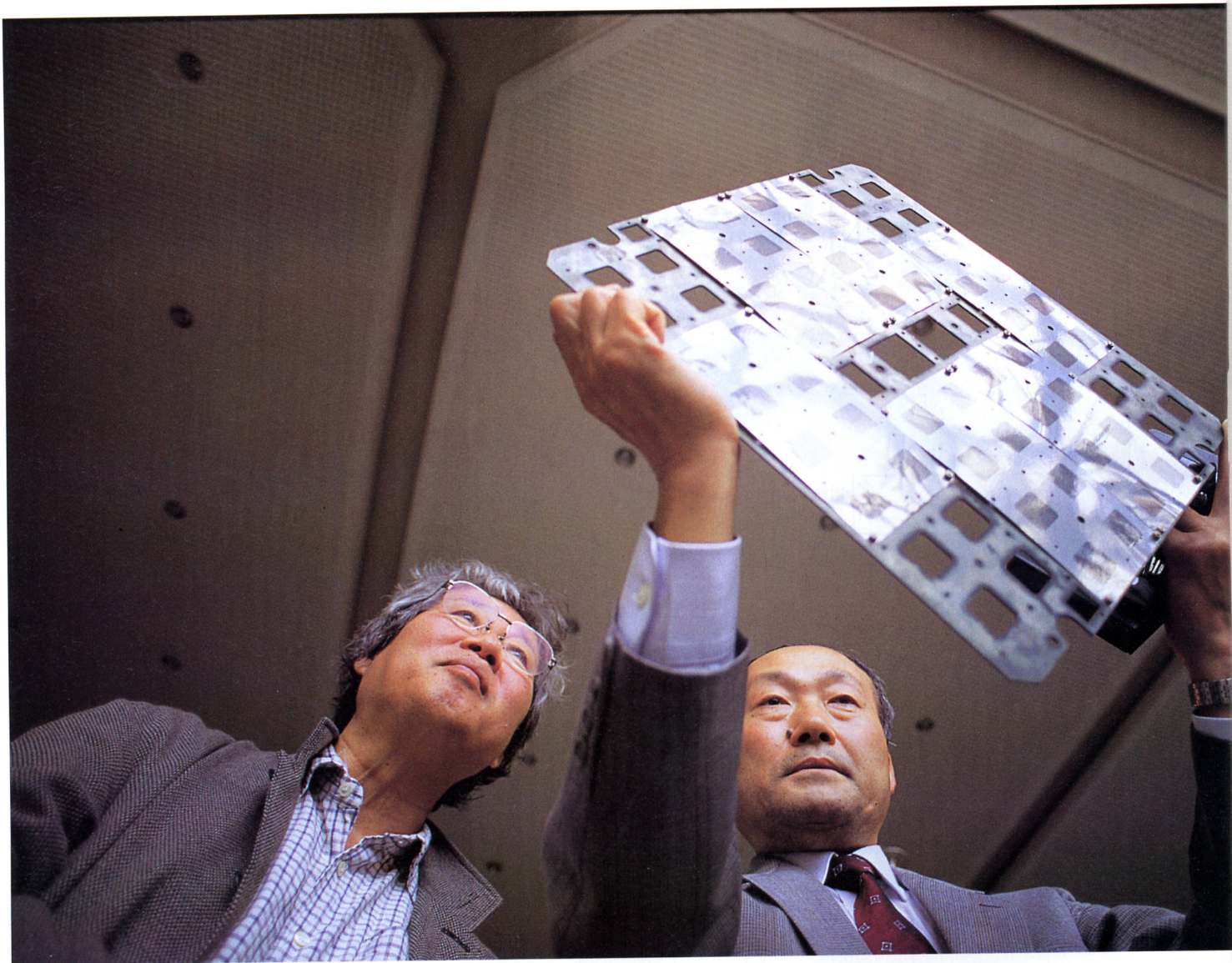
前号で述べたように、太陽は  
99%が水素とヘリウムからなるガ

ス球である。水素、ヘリウム以外  
にも、炭素、窒素、酸素など、多  
くの重い元素があることが知られ  
ているが、それを全部合わせて  
も、やっと1%にしかない。

それらすべての元素が、太陽で  
はプラズマ状態になっている。プ  
ラズマ状態というのは、原子核の

まわりをすべての電子がまわって  
いるという安定した状態になくて、  
原子が電子をはぎ取られた状態  
(電離状態)、つまりイオンになっ  
ていることだ。太陽に限らず、実

は宇宙のほとんどの物質がプラズ  
マ状態にある。太陽以外の恒星も  
そうだし、銀河と銀河の間にも大



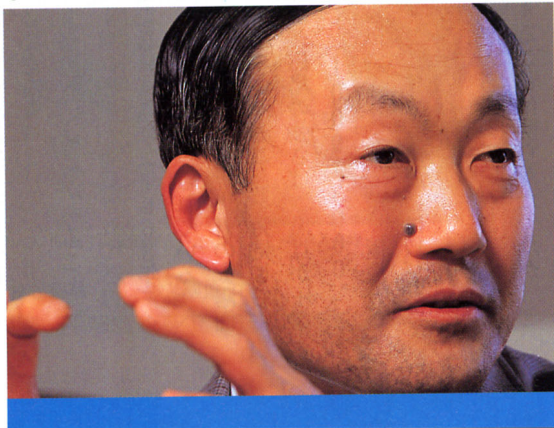
量の高温プラズマが広がっている。地球のような冷たい惑星の上では、物質は基本的に、固体、液体、気体のいずれかの相にあり、プラズマ状態にあるものはめったにない（蛍光灯の中、大気上層の電離層、地球深部マントルなどくらい）。しかし、宇宙ではプラズマ状態が普通なのである。

プラズマは、プラスないしマイナスの電荷をもった粒子でできた世界だから、大半が電氣的に中性の粒子でできた我々の日常世界では考えられないような現象がいろいろ起こる。電荷をもった粒子が動けば、電流が流れる。電流が流れば磁場が発生する。磁場の中で電流が流れば電流は力を受ける。太陽のような高温高エネルギーの天体プラズマは電氣的な良導体だから、発生する電流も磁場もきわめて強力で（電流は数十億安になる場合もある）、プラズマはいわゆる電磁流体となって動きまわり、激しい相互作用を際限なく繰り返す。つまり天体プラズマの世界は、変幻きわまりないダイナミズムの世界である。

プラズマ物理の世界は、基本的に電氣と磁氣の世界なのだが、太陽における磁氣の重要性がわかってきたのは、1952年にバブコックがマグネトグラフという磁氣の強さを目に見える形で示すことができる観測器を作り出してからのことである。

次頁右上の図に示したのが、マグネトグラフで撮った写真だが、白く見えるところがN極、つまり磁力線が外に出ていくところ、黒く見えるところがS極、磁力線が内部に入っていくところである。N極とS極がペアになって出現しているところ（黒点に多いが、それに限らない）では、その下の図に見るように、磁力線はN極から

●小川原嘉明教授



出てループを描いてS極に入っていく。それとは別に、地球の磁場と同じように、太陽の北極から出て南極に入っていく大きな磁極線の流れもある。

マグネトグラフが可能になったのは、19世紀の終わりにオランダのゼーマンが発見したゼーマン効果（1902年ノーベル賞）によることである。ゼーマンは、次頁左

の図のような装置で、光に強い磁場をかけると、本来一本であるはずのスペクトル線が数本に分離されるというのを発見した。この原理を逆に使えば、その光がどれくらいの強さの磁場の中で発生し

たかがわかるわけだ。はじめは、ゼーマン効果を測定して太陽黒点に磁場があるかどうかを調べる程度だったが、52年に、スペクトル分光器、光学望遠鏡、光電装置などを組み合わせ

て、磁場の強さを太陽の全表面にわたって、目に見えるようにする装置として、マグネトグラフが作り出されたのである。はじめ数百スガ程度の感度しかなかったマグネトグラフの性能はどんどん向上し、

いまでは数スガというような微弱なレベルまで測れるようになってい

## 対流層から 磁場が浮き上がる

日本では、1992年に国立天文台三鷹に高性能のベクトル・マグネトグラフが置かれた。これ

で観測すると、左下の図に示すように磁場の方向と強さをベクトルの形で示すことができるのである。

「太陽で起こっている物理現象は非常に複雑ですから、1つの観測手段でその全貌をつかむことはできません。しかし、太陽はいろいろの手段でいつも観測されていますから、何かイベントが起こったら、その観測データを総合的に解析することが可能なのです。この

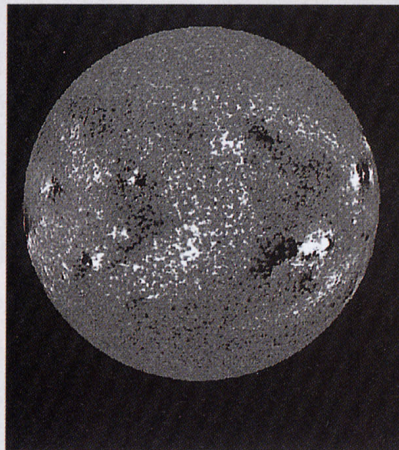
3つの写真は、92年8月に起きた大きなフレアの直前の状況を、国立天文台三鷹の太陽フレア望遠鏡による磁場の分布図とH $\alpha$ 線像、『ようこう』の軟X線像をならべたものです。これを見ると、光球の下の対流層からいま磁場が浮上しつつあるところだというのがわかります。浮上磁場が太陽フレア爆発の引き金を引くのだと考えられています」

浮上磁場というものを理解して

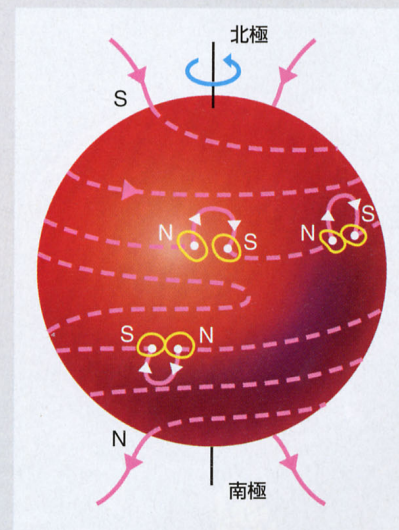
いたくためには、もう少し説明が必要だろう。太陽黒点に磁場があることは、ゼーマン効果が発見されてさほどたないうちに(1908年)ヘールによって観測されている。ヘールはその後、黒点以外の太陽面にも磁場があることを発見しているが、磁場の強さは、黒点が圧倒的で(10000~30000スガ)、黒点以外のところでは、極地方が数十スガ、他の太陽表面は数スガというところだった。

強さからいって黒点と磁場が関係することは明らかだったが、どう関係するのかわからなかった。光学的に観測すると、黒点はよくN極とS極がペアになってあらわれ、黒点周辺には、いかにも磁力線の流れを示すような形状が観察された(40ページの右上図参照)。

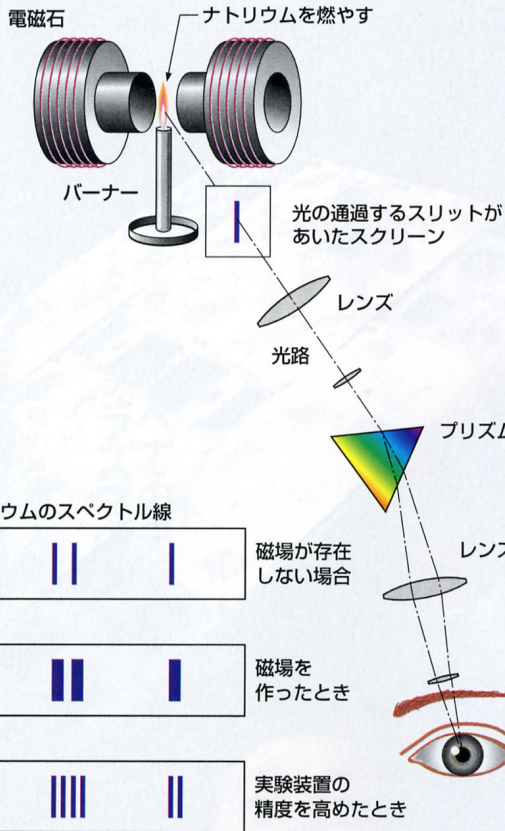
黒点と磁場の関係が本格的にわかってくるのは1950年代に入ってからである。マグネトグラフが発明され太陽磁場の観測が広く行われるようになって、実



■マグネトグラフで撮った写真。白いところがN極、黒いところがS極で、それぞれいちばん強いところで2000Gくらい



■磁力線はN極から出てループを描いてS極に入っていく



■ピーター・ゼーマンが行った実験の模式図

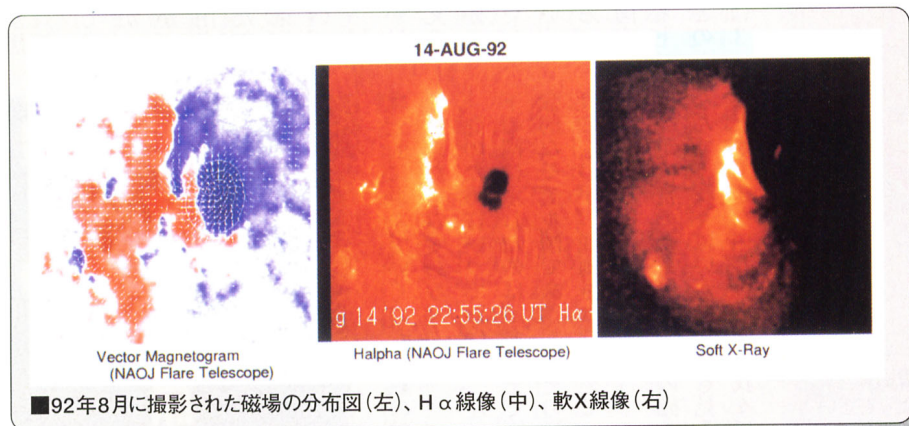
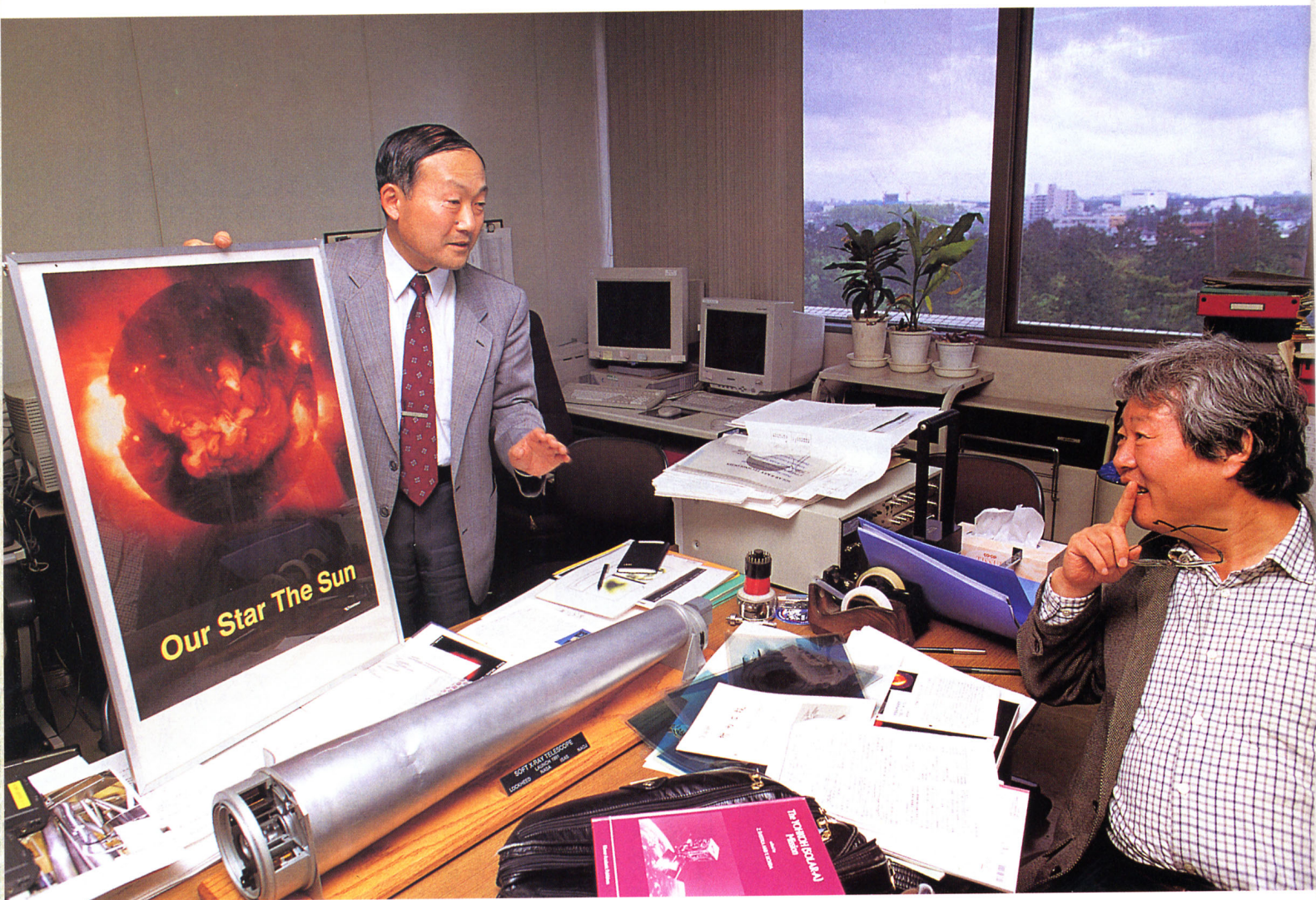
研究室でもプラズマの研究がすすんでプラズマ物理がだいぶわかってくるからである。

1960年代はじめに、アメリカのバブコック、日本の吉村宏和（東京大学理学部助教授）らによって、電磁流体化したプラズマが自然の発電機（運動エネルギーの電磁エネルギーへの変換機）となる、とするダイナモ理論が作られた。太陽のさまざまな激しい活動はこのダイナモ理論に基づいて説明される。

まず最初に知っておいていただきたいことは、太陽のような高温高エネルギーのプラズマと磁場の共存している世界では、磁場のエネルギーが強ければ、磁場はプラズマをとじこめ（「凍結」）、プラズマのエネルギーが強ければ、プラズマの運動が磁場を引きずるということである。磁力線の集合を磁束管というが、太陽では磁束管とプラズマの複雑な相互作用により、磁束管は普通では考えられないような動きを示す。よじれたり、ねじれたりするのである。

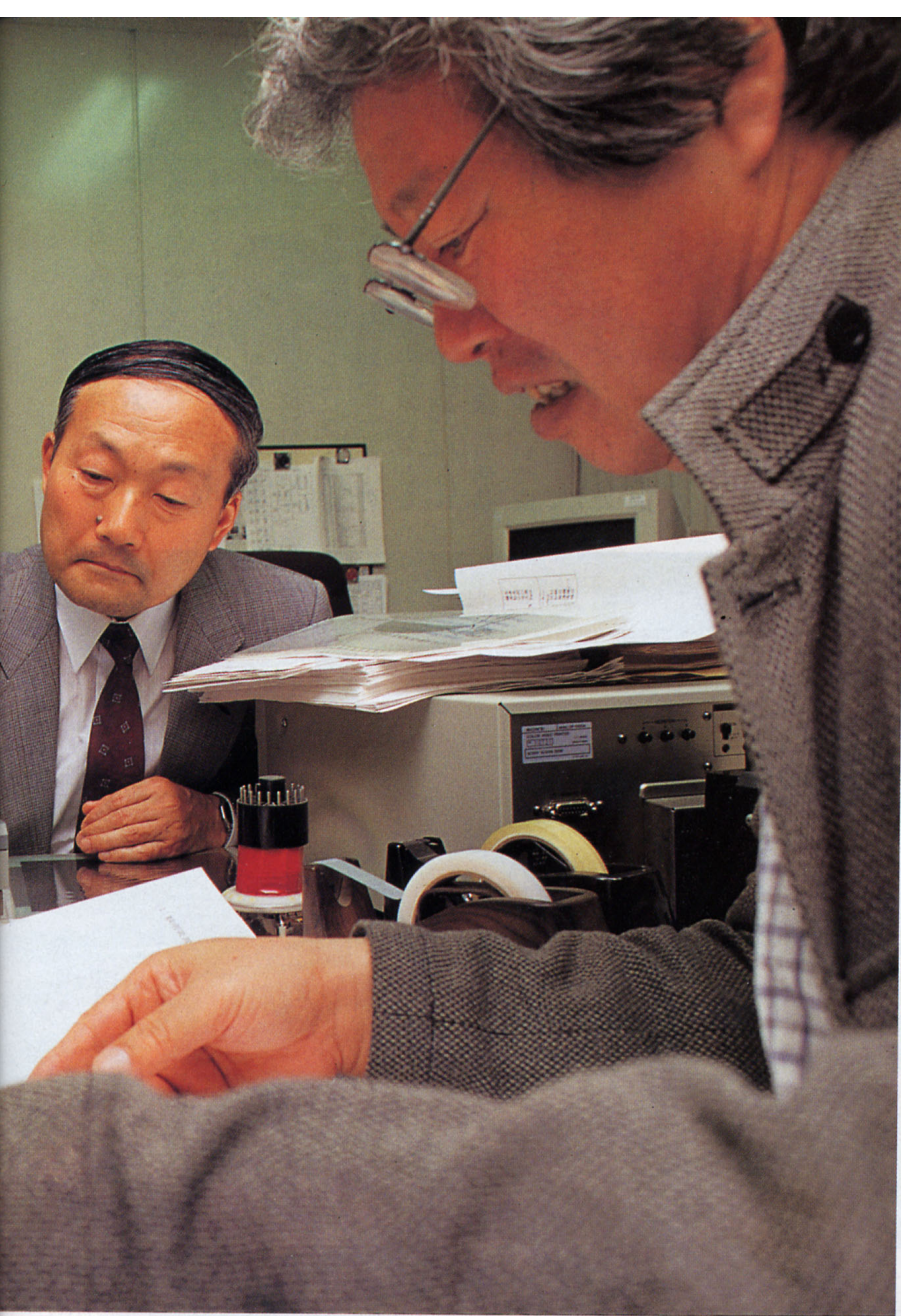
太陽内部には、超高温の熱エネルギーの流れもある。中心核の部分で起こっている核融合では、1600万度にも及ぶ高熱が発生し、その熱が放射と対流で、太陽表面に運ばれていく。

太陽プラズマには、太陽の自転による運動エネルギーも注ぎ込まれている。太陽は、地球のような



剛体とちがって、極地方と赤道地方では自転速度がちがう（40度下の図）、微分回転（差動回転）という奇妙な回転を行っている。そのメカニズムはよくわからないが、赤道に近いほど速くまわるのである。

太陽にはもともと北極と南極を結ぶ磁場（ポロイダル磁場）がある。そのような磁場があるということは、北極と南極を結ぶ磁力線

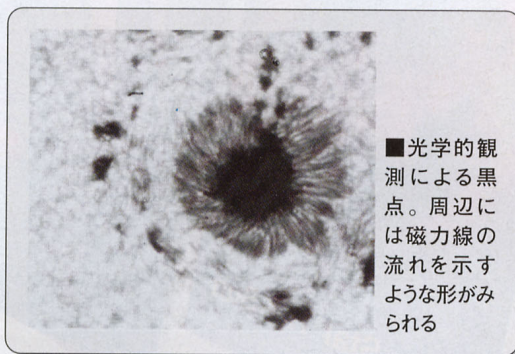


## 光球表面の黒点は 磁束管の切り口

があるということである。太陽が自転すると、プラズマもそれにひっぱられてまわりはじめる。それはポロイダル磁場の磁力線にぶつかって、それをひきずるような形になる。そのうちそれは引きのばされて、太陽の赤道と平行な円環状の磁場（トロイダル磁場）になってしまふ。

は電場や磁場の力、回転の運動エネルギーギー、対流の運動エネルギーなどを受けて、左下の図に見るように、ねじり合わされたり、湾曲したループ状の部分ができたりする。

ねじられた所は磁力線が重なり、強い磁場を持つ。そういう部分は、光球内部の周囲の磁場の中で、「浮力」を受けて上昇する。これが先に出てきた「浮上磁場」なのである。ループ状になった磁束管が浮力を受けて光球表面に出てしまったとき、光球表面にあら

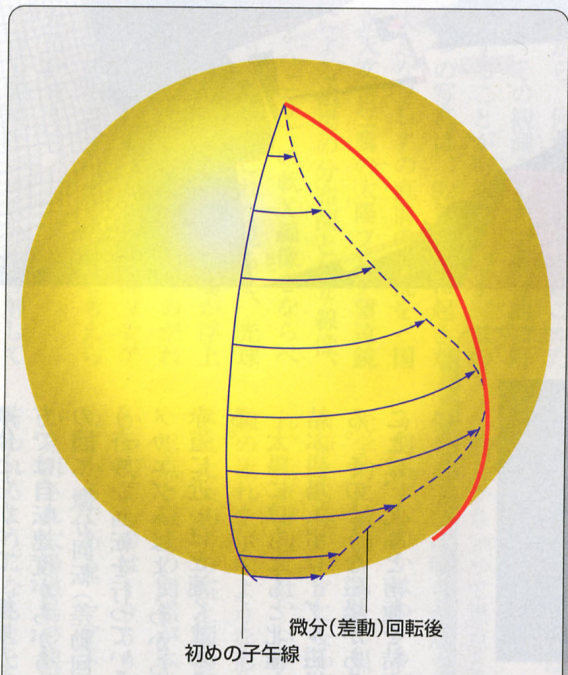


■ 観測による黒点の周辺に磁力線が流れを示すような形がみられる

われた磁束管の切り口の部分が黒点なのである。

なぜ黒点の部分がきわだかって磁場が強いのか、これで説明がつく。黒点がN極とS極の2つがベアになってあらわれてくる理由もこれである。光学望遠鏡で見ただけでは、磁力線が見えず、磁束管に詰めこまれて動きがとれないプラズマの断面しか見えないから、黒点は何やら黒いスポットとしか見えない。しかし、磁力線が見える目で3次元的に見れば、N極から磁力線が太陽大気中に吹き出し、ループを描いてS極に戻っていくところが見えるはずなのである。

左下の図に示したのは、国立天文台岡山のベクトル・マグネトグラフで撮った映像の上に、どのように磁力線がN極からS極に3



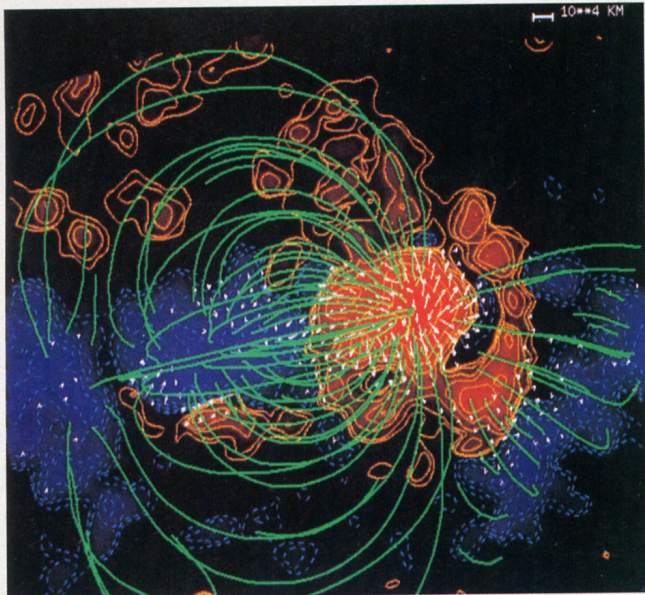
■ 太陽表面の回転速度は緯度によって違う。位置回転する時間は赤道付近(25日)が、高緯度帯(30~35日)よりも短い

次元的に飛んでいくのかを緑の線で示したものである。

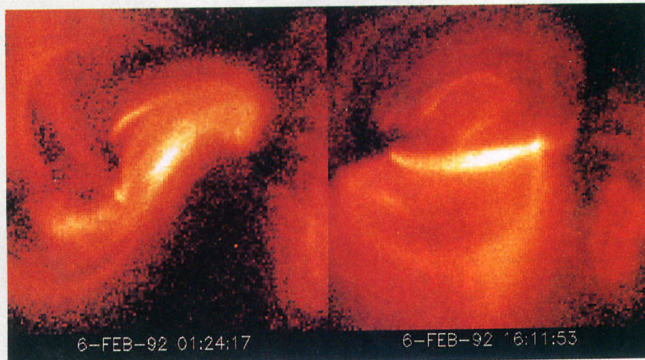
念のためにいっておけば、左下の図に示したのは、あくまで概念的なモデル図であって、その通りのものが、観測されて見えているというわけではない。

「光球内部の磁束管の本当の動きなんて、我々はいかにしても見る事ができないわけです。我々に





■N極からS極へと飛んでいく磁力線(緑色の線)。光球のベクトル磁場から推測



■1992年2月6日のフレアの前(左)と後(右)の軟X線画像



観測できるのは、あくまで表面にあらわれた現象だけです。あとは、その観測データを説明するためには、その背後でこういうことが起こっているとしか考えられないと理論的に詰めていくわけです。基本的には、いま説明してきたようなダイナモ理論が大枠では正しいだろうと専門家はみな考えていますが、理論の細部になると、いろんな考え方のちがいがあります。しかし『ようこう』のX線データで、これまでの光学観測では見えなかった部分が見えてきて、磁束の形状や運動がはっきりかになり、ダイナモ理論とのむすびつきがよりいっそうたしからしくなりました」

その一例を示せば、上の2点の写真である。これは、92年2月のフレアの前(左)と後(右)の軟X線画像である。「一目見て、左の写真では磁気ループがねじれていて、右の写真ではねじれがなくなっているのがわかるでしょう。つまり磁場のねじれの中に蓄えられていたエネルギーが、爆発的に解放されてフレアになったということなんです。エネルギーを解放したあとはねじれが解消し、磁場がきれいになつてる様子がマグネトグラフの観測結果(上)とよく一致していることわかるでしょう」(「ようこう」研究グループ、渡邊鉄哉・国立天文台助教教授)上の写真(左)

「ようこう」以前は、このような磁場のねじれなど、見たくても見えなかったのである。

(次号に続く)

