

## 1991年6月4日の重要度3Bフレアとモートン波

山口喜助, 桜井 隆, 入江 誠, 熊谷收可, 萩野正興,  
宮下正邦, 塩見靖彦, 日江井榮二郎

(2003年3月31日受理)

### The Flare of 1991 June 4 (Importance 3B) and the Associated Moreton Wave

Kisuke YAMAGUCHI, Takashi SAKURAI, Makoto IRIE, Kazuyoshi KUMAGAI, Masaoki HAGINO,  
Masakuni MIYASHITA, Yasuhiko SHIOMI, and Eijiro HIEI

#### Abstract

We observed a Moreton wave associated with a flare of importance 3B in the NOAA region 6659 on 1991 June 4. The Moreton wave was emitted from a flare bright point and initially showed the form of a loop. The speed of the Moreton wave was initially  $1500 \text{ km s}^{-1}$  and was later accelerated to  $1800 \text{ km s}^{-1}$ . This acceleration may be due to the propagation of the wave into a coronal hole (with low density and high Alfvén velocity).

#### 1. はじめに

太陽フレアはコロナ低部におけるプラズマの急激な加熱及び粒子の高エネルギーへの加速を引き起こす爆発現象であり, 活動領域における磁場の不安定化に起因するものと考えられている. 即ち, 太陽の内部において磁場は自転, 対流などの流れによりエネルギーを注入され, 磁束管として光球面に浮かび上がり, 低密度のコロナ中に出現した後, 周囲の磁場との相互作用なども加わって磁場の歪みが増し, エネルギーがどんどん蓄積されていく. フレアはその磁束管へのエネルギー蓄積が限界に達したとき, 磁気エネルギーが突然爆発的に解放される現象であるといわれている<sup>1-5)</sup>.

このフレアによってさまざまな現象が見られる. 高エネルギー粒子, 高温プラズマの生成, ガンマ線, X線, 紫外線,  $H\alpha$  フレア, 白色光フレア, 電波バースト (II型やIV型) など広範囲の電磁波放射, 衝撃波 (モートン波など), プラズマ雲 (Coronal Mass Ejection: CME) の放出などである<sup>1)</sup>.

モートン波は大きなフレアが起こった時に発生する. それはフレアの輝点から遠ざかる方向に, およそ弧状をなして太陽面上を  $1000 \text{ km s}^{-1}$  程度の速度ではるか遠くまで伝わって行く明るい波面 ( $H\alpha$  中心波長で見た場合), 及び暗い波面と明るい波面 ( $H\alpha$  線翼波長で見た場合) として観測される. この

現象を, 1960年に最初に観測した Moreton 等<sup>6)</sup>にちなみ, モートン波と普通呼んでいる. Moreton<sup>6)</sup>は1960年以来, リオ・フィルターの透過波長を  $H\alpha$  の短波長側, 長波長側翼部に移して観測を行い, この現象を発見した<sup>6-9)</sup>.

内田<sup>10-13)</sup>はモートン波を, フレアの爆発相 (explosive phase) に放出され, コロナを伝わる MHD fast-mode 衝撃波の球状波面が彩層に再入射する交線であると理論づけている. コロナ中での MHD fast-mode の伝搬速度は Alfvén 速度にほぼ等しく,  $1000 \text{ km s}^{-1}$  くらいになる. この理論は, 彩層での音速や Alfvén 速度よりもはるかに速い速度でモートン波が伝わることを説明しており, 現在でもモートン波の標準モデルと見なされている. 最近, 成影ら<sup>14)</sup>は「ようこう」衛星の X線観測と京都大学飛騨天文台フレアモニター望遠鏡の  $H\alpha$  観測を組み合わせ, 実際にコロナを伝わる衝撃波の兆候を捉えている.

Valniček<sup>15)</sup>はフレアからの放出物 (ejecta) を3つのグループに分類した.

グループ I: フレアの一部分が高速で空間に噴出する現象, スプレイ (spray) ともいう. 速度は  $1000 \text{ km s}^{-1}$  程度.

グループ II: 静穏型プロミネンス (ダーク・フィラメント) が突然, 空間に吹き飛ぶ現象, ‘disruption brusque’ 現象ともいう. 速度は  $250 \text{ km s}^{-1}$  程度.

グループ III：この型の現象の実例として Athay and Moreton<sup>9)</sup>を引用しており、爆発相を示すフレアからかなりの速度で進んで行く、かろうじて目に見える流れであると報告している。つまりモートン波現象である。波の伝搬速度は  $330 \sim 4200 \text{ km s}^{-1}$  としている。

Smith and Harvey<sup>16)</sup>は、1960年～1967年の期間に観測された、フレアに伴う波動現象 15 例について詳細に報告している。それらの速度の見かけの横方向速度は  $340 \sim 1060 \text{ km s}^{-1}$  が示されており、彩層を伝搬する波と仮定して太陽表面に沿った速度に換算すると、最も遅い速度として  $440 \text{ km s}^{-1}$  (1961年9月3日, 1966年12月30日の例), 最も速い速度として  $1125 \text{ km s}^{-1}$  (1967年5月23日の例) が報告されている。

Zirin and Russo Lackner<sup>17)</sup>は、最も典型的なモートン波としてよく引き合いに出される 1966年8月28日の重要度 3+ のフレアに伴った波動現象を報告している。そのモートン波はフレアの西側の部分から噴出したスプレイと起源が同一であり、フレアの爆発相に発生して、約  $1250 \text{ km s}^{-1}$  の速度を示したと報告している。また Zirin<sup>4)</sup>は、モートン波は通常、フィラメント又は活動領域のようなある種の磁氣的境界に達するまで伝搬すると論じている。

我々は国立天文台(東京天文台)においてビデオ録画により、活動領域 NOAA No. 4474 における 1984年4月25日の重要度 3B/X13.0 のフレアと、活動領域 NOAA No. 6659 における 1991年6月4日の重要度 3B/X12.0 のフレアにそれぞれ伴った 2 つのモートン波の観測を得ることができた。山口<sup>18,19)</sup>は次のように報告した: 前者のモートン波は初めに  $1260 \text{ km s}^{-1}$  で伝わって行き、約 140 秒後  $660 \text{ km s}^{-1}$  に減速した<sup>18)</sup>。このモートン波の伝搬速度が遅くなった位置は、波が進む方向にあった古い活動領域(黒点はすでにない)の磁気中性線を通じたときであった。一方、後者のモートン波は約  $2500 \text{ km s}^{-1}$  で伝搬を始め、その後およそ  $4000 \text{ km s}^{-1}$  に加速されて伝搬して行ったと速報的に報告した<sup>19)</sup>が、解析法に誤りがあり速度値が過大であった。本論文において再解析して速度値を訂正したが、加速の傾向はやはり見られ、前回の解釈と同様、コロナホール(密度が低い)に遭遇したことによると考えられる。

これまで多くの研究者による報告の中では、モートン波が発生した直後の波の模様については、ほとんど触れられてこなかった。我々の観測により、発生した直後に鮮明なスプレイ状になっている波の模様を確認することができたので、1991年6月4日

の重要度 3B フレアとそれに伴ったモートン波について、ここで詳細に報告する。

## 2. 活動領域 NOAA No. 6659 の変遷

1991年6月4日にモートン波を伴う重要度 3B のフレアを起こした活動領域は、図 1 に示したように、NOAA No. 6659 (キャリントン自転番号 1843, 経度 L248°, 緯度 N31°) である。この領域は第 22 太陽周期の中で最も活動的な領域であった。NOAA No. 6659 をさかのぼると、NOAA No. 6580 の誕生によって始まる。NOAA No. 6580 はキャリントン自転番号 1840 の経度 L280° ~ 295°, 緯度 N22° ~ 37° (Quarterly Bulletin on Solar Activity の synoptic charts of solar magnetic fields による) にあった古い活動領域の先行黒点部分(S 極即ち - 極)に、浮上磁場領域(emerging flux region, EFR)としてキャリントン自転番号 1841 の経度 L280°, 緯度 N29° に誕生した活動領域である。この NOAA No. 6580 は誕生した当初から双極磁場の軸が南北方向に向いた逆転配位(f/p 配位)を示しており、緯度方向に長い一つの大きな半暗部をもった黒点が典型的な  $\delta$  型に発達して西縁に没した。

次のキャリントン自転番号 No. 1842 では NOAA No. 6619 として回帰してきた。NOAA No. 6619 は円形に近い楕円形をした一つの半暗部をもった黒点で代表される黒点群に成長していた。

そしてキャリントン自転番号 No. 1843 に NOAA No. 6659 (経度 L248°, 緯度 N31°) として回帰し、一つの大きな半暗部の中に在る一つの大きな暗部が分裂と合併を繰り返しながら、半暗部が複雑なリアス式の形をして非常に大きくなって行った。この NOAA No. 6659 はやはり、双極磁場の軸が南北方向に向いて、逆転配位(f/p 配位)を示していた。また、黒点群の磁場の型及び McIntosh 分類は  $\beta\delta$ - $\beta\gamma\delta$  及び DKC-EKC-FKC-EKC で、際立った発達を示した。これらの暗部の分裂や合併に伴って 2000 G ~ 4100 G の磁場の強さをもつ + 極(N 極)及び - 極(S 極)の黒点が絶えず変化していた。

次にマグネトグラムでみると、活動領域 NOAA No. 6659 は非常に変化していることがわかる。まず、図 2a の NOAA No. 6619 では、5月10日と13日の模様が似ていることから、NOAA No. 6659(図 2b) に比べて安定しているようにみえる。次に図 2b の NOAA No. 6659 では、高緯度側に位置している 2 つの + 極  $f_1, f_2$  ( $f$  は後続極性を意味する) は合併して、その後、低緯度側の巨大な - 極(先行極性)の大きな主暗部に擦り寄って - 極を分断しながら、低緯度側の + 極  $f_3$  とつながった。この  $f_1, f_2$

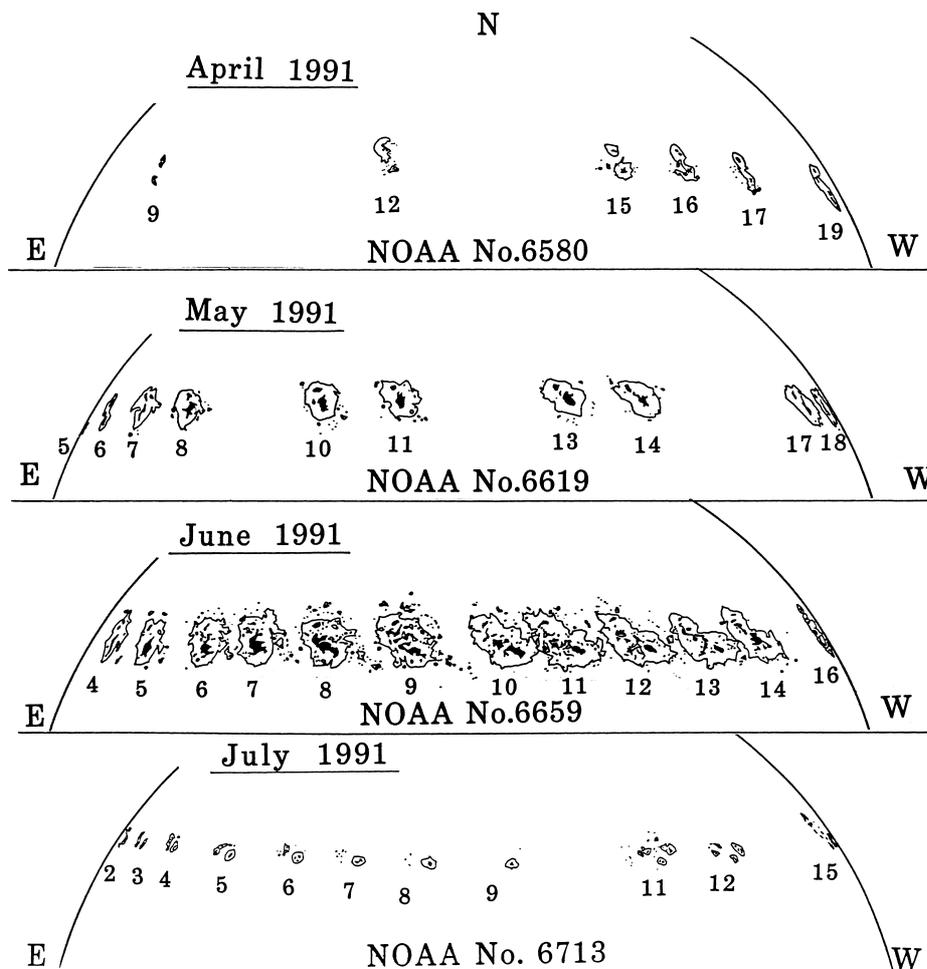


図1. 黒点のスケッチ観測に基づく NOAA No. 6659 の変遷

はもともと一つであった+極が分裂して回帰したものであり、一方、 $f_3$  は多分回帰してきた東縁付近で新しく浮上磁場領域(EFR)として誕生したものであると考えられる。その後、-極の進行により合併していた高緯度側の部分の+極が再び分裂した。このように NOAA No. 6659 の磁場分布はめまぐるしく絶えず変化していた。この光球面上の不安定により、磁気エネルギーの歪みが限界に達したのが6月1日や4日のフレアであると思われる。そして、6月4日の重要度3Bのフレアの最初の輝点(図3, 4, 5のⒶ点)は、17h32m~18h24mUT(以後UTは省略する)のデータでは、この低緯度側に出現した新しい磁場の+極 $f_3$ (EFR)と大きな主暗部の-極との中性線近くにあった。またモートン波の発生輝点(図3, 4, 5のⒶ点)は、高緯度側の分裂した+極 $f_1, f_2$  付近であった。

この活動領域のフレアについては、Schmieder et al.<sup>20)</sup>も報告している。また、本論文で解析したモートン波現象は Zhang<sup>21)</sup> が国立天文台および北京天文台のデータを使って研究している。なお、この領域における大きなH $\alpha$ フレアは、6月1日(1F/X12.0)、6月4日(3B/X12.0、白色光フレア)、

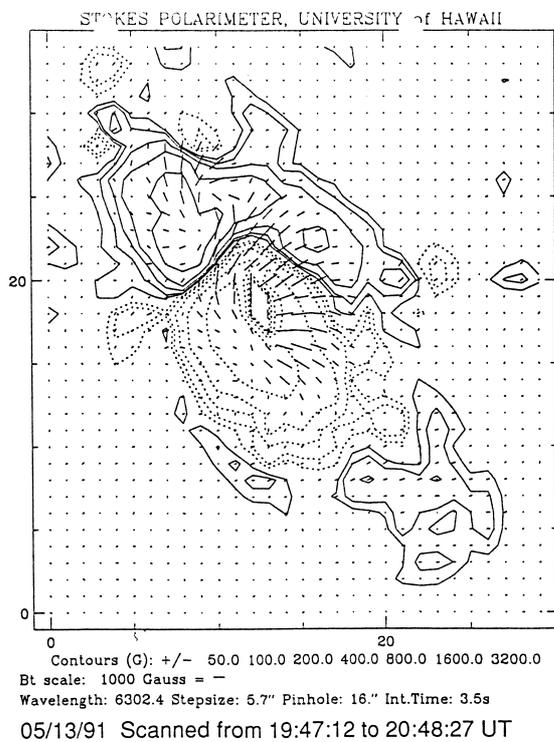
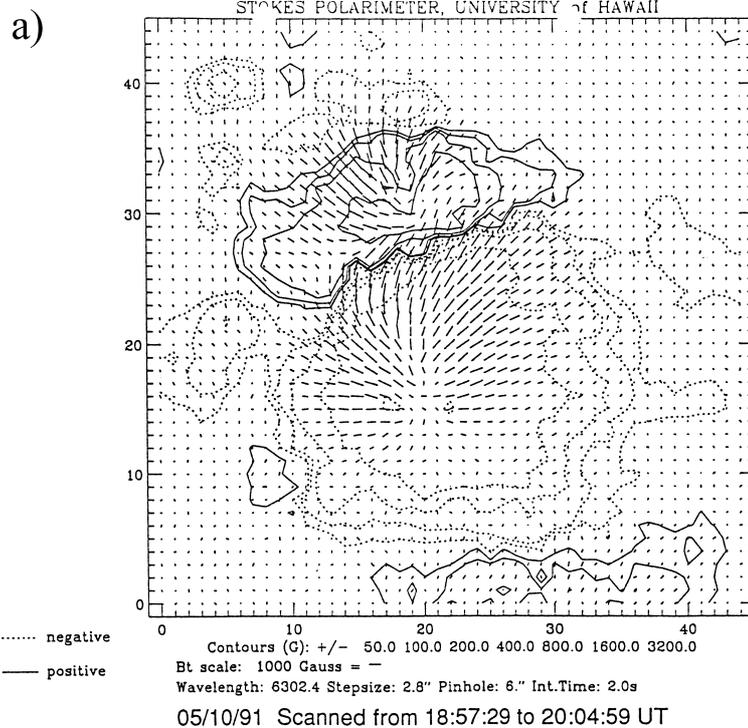
6月6日(4B/X12.0、白色光フレア)、6月7日(3B/M4.2)、6月9日(3B/X10.0、白色光フレア)、6月11日(3B/X12.0、白色光フレア)、6月15日(3B/12.0、白色光フレア)である。このように第22太陽周期の中で非常に活発なフレアの活動度を示した。

### 3. 1991年6月4日のH $\alpha$ フレアとモートン波

#### 1) H $\alpha$ フレア

##### a) 活動中心 (a)

この重要度3BのH $\alpha$ フレアは、その活動の中心が(a)と(A)の2つから成っていることがわかる(図3, 4, 5, 表1)。活動中心(flare active center)(a)では、フレア輝点Ⓐ(71.0°E, 32.0°N)が03h37m18sに始まり、フレア現象としては典型的な発展を示した。この活動中心(a)は大きな-極(先行極性)の黒点暗部側にフレアリボンI(輝点c, h, a, g, i)が緯度方向に配列しており、それに相対してフレアリボンII(輝点e, l, f, i, b)が+極(後続極性)側に同じく緯度方向に配列している。そしてビデオ画像をみると、いくらか発生時刻がずれているが、フレア輝点はeとc, lとh, fと



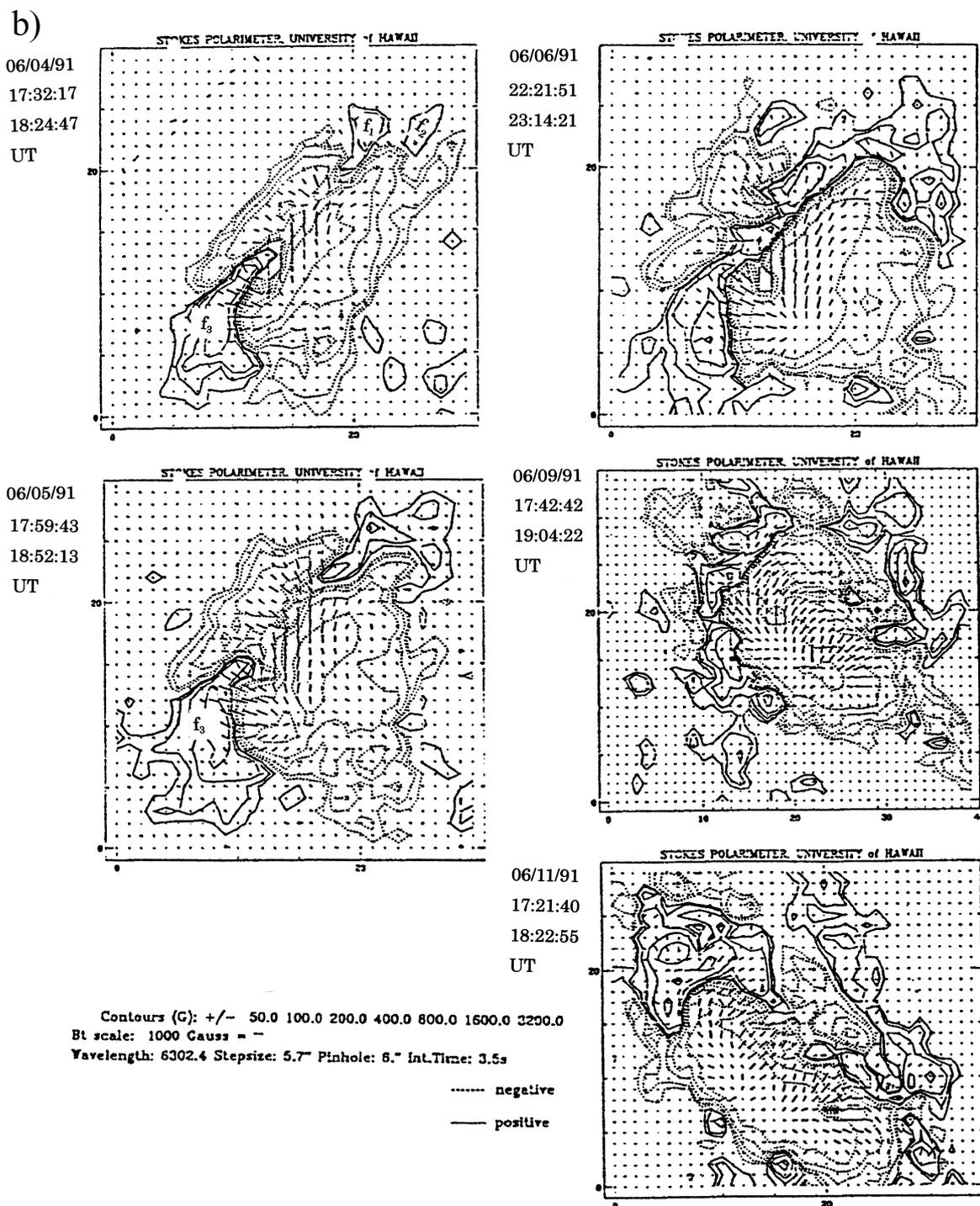


図 2. ハワイ大学ミース天文台のストークスパラリメータによるベクトル磁場観測 : a) NOAA No.6619 , b) NOAA No. 6659 (Courtesy of Mees Solar Observatory, University of Hawaii)

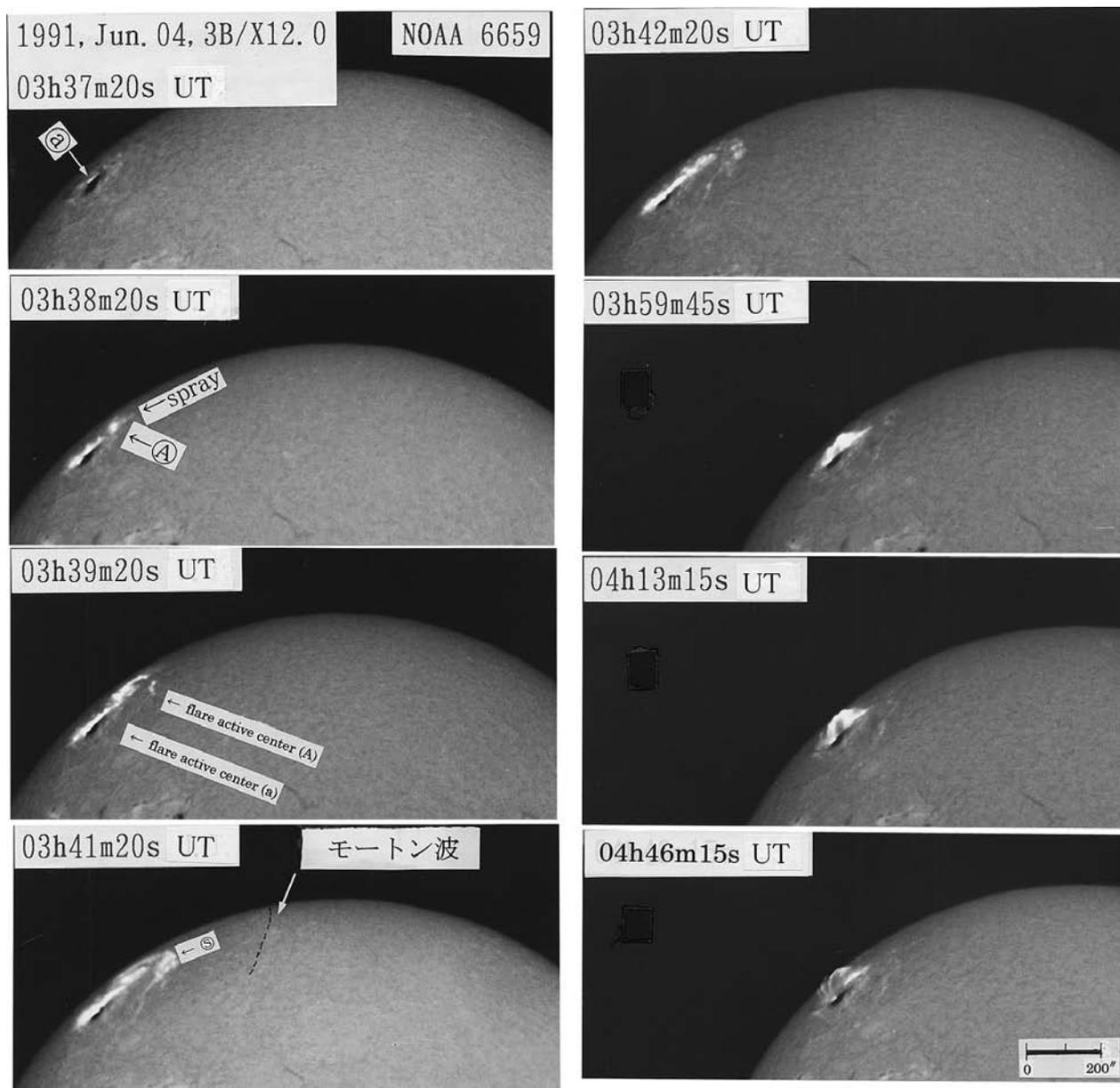


図3. H $\alpha$  単色太陽写真儀（口径 14 cm, 透過幅 0.75 Å リオ・フィルター）によって撮影された 1991 年 6 月 4 日のフレアの時間変化．03h39m20s が輝度最大，03h41m20s がフレア面積最大の時刻に相当する

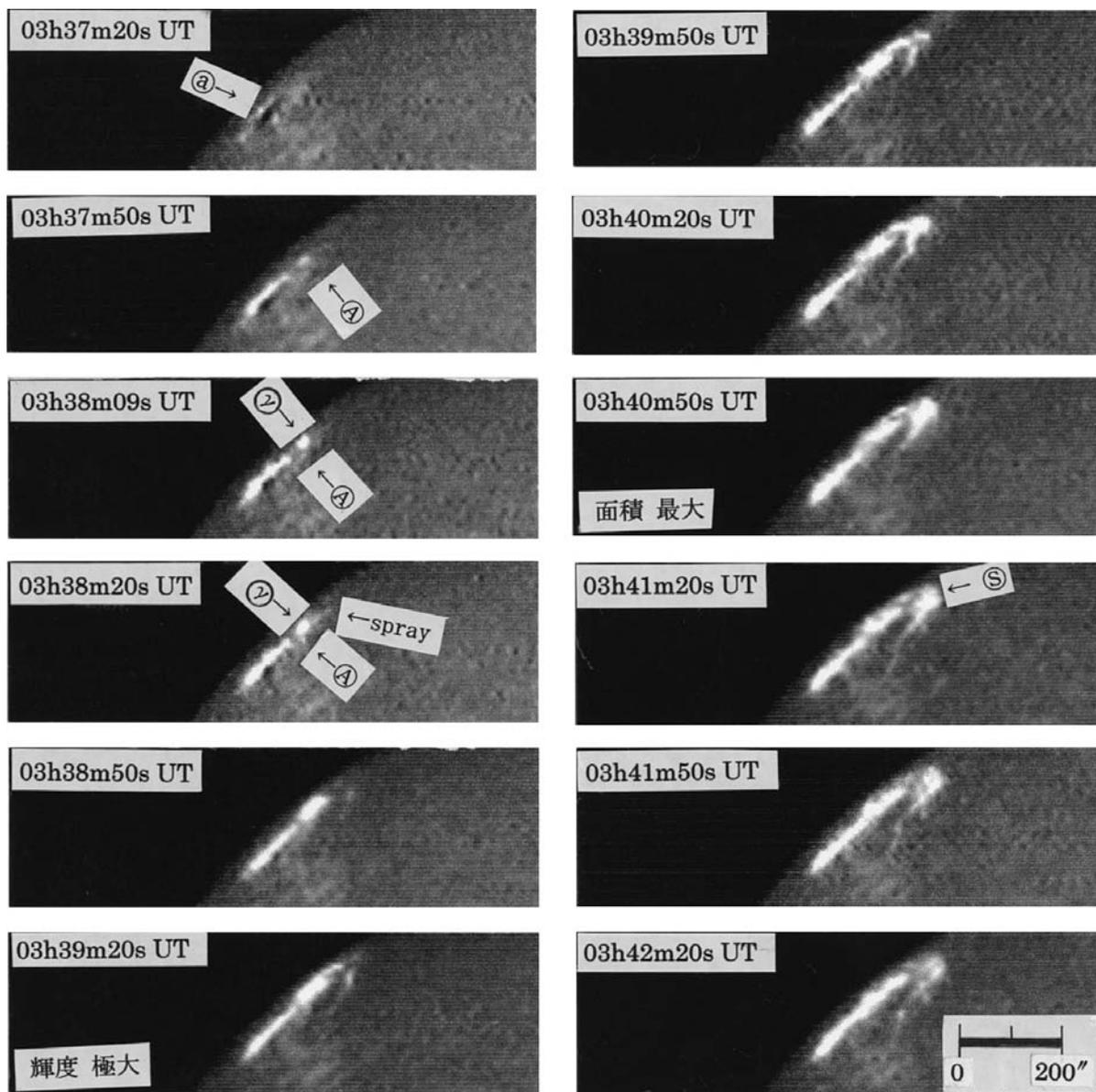


図4. 1991年6月4日のフレアの初相から最大相までのビデオ画像(口径4cm望遠鏡と透過幅0.5Åリオ・フィルターによる)

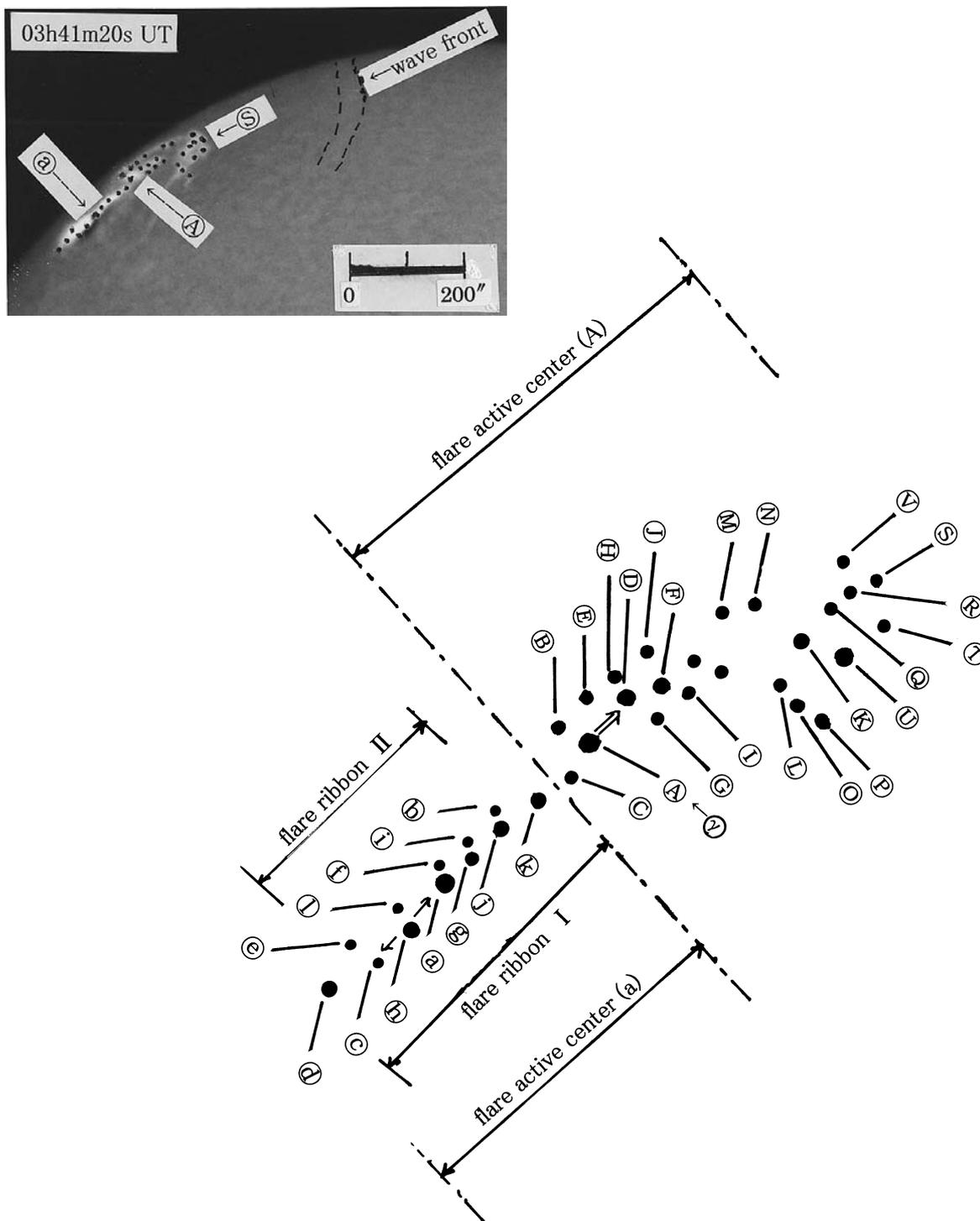


図 5. 03h41m20s の写真 ( 図 3 ) から求めた各フレア輝点の位置 . 小文字 , 大文字は各々活動中心 ( flare active center ) ( a ) , ( A ) に関連する輝点を示し , 時刻の順番に従ってアルファベットをつけた

表1. 各フレア輝点の発生時刻 (UT)

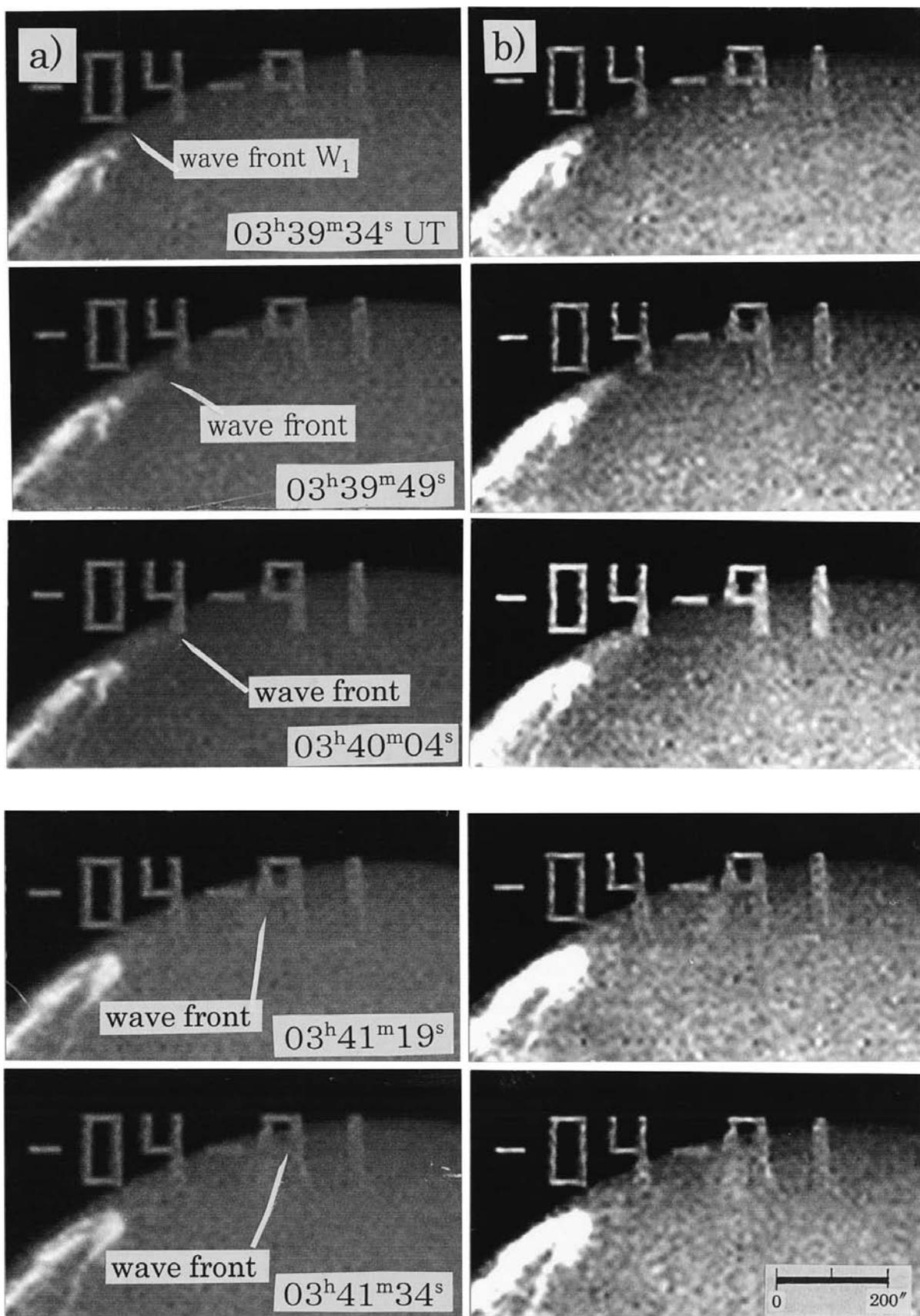
1) 活動中心 (a)		2) 活動中心 (A)	
フレア輝点	発生時刻	フレア輝点	発生時刻
Ⓐ	03h37m18s		
Ⓑ	03h37m29s		
Ⓒ	03h37m34s		
		Ⓐ	03h37m43s
Ⓓ	03h37m57s		
Ⓔ	03h38m09s	Ⓙ	03h38m09s
Ⓕ	03h38m15s		
Ⓖ	03h38m35s		
		Ⓚ	03h38m37s
		Ⓛ	03h38m39s
		Ⓜ	03h38m42s
		Ⓨ	03h38m46s
Ⓜ	03h38m47s		
		Ⓗ Ⓙ	03h38m49s
		Ⓢ	03h38m53s
Ⓝ	03h38m54s	Ⓣ	03h38m54s
		Ⓤ	03h39m02s
		Ⓚ Ⓛ	03h39m04s
		Ⓜ	03h39m11s
Ⓝ	03h39m15s	Ⓝ	03h39m15s
		Ⓞ	03h39m18s
		Ⓟ	03h39m20s
		Ⓠ Ⓡ	03h39m34s
		Ⓢ	03h39m38s
		Ⓣ Ⓤ	03h39m50s
		Ⓡ	03h40m00s
Ⓚ	03h40m07s		
Ⓛ	03h40m43s		

Ⓐ, ⓃとⓇ, ⓂとⓉが対になっている。このように活動中心 (a) は EFR の + 極  $f_3$  付近に起こったⒶ輝点を中心にして, 南北方向へ交互に爆発的に輝いて伸びた。輝度及び面積共に最大相 (03h39m20s ~ 03h42m20s) を過ぎたフレア後相では, 活動中心 (a) には擦れた低いループが  $H\alpha$  フレアリボン上に現われた。エネルギー解放 (明るい部分) はやがてループを伝わって上へ移動し, 低いアーケードから高いアーケードにエネルギー解放が進行して行くのがわかる。また擦れた多数の不連続なループ群から成り立っていることもわかる。そしてフレアはこの活動中心 (a) の輝点 Ⓜ, Ⓝ—Ⓚが最後まで残って, 07h11m20s に終わった。このフレア輝点 Ⓜ, Ⓝ—Ⓚはフレアループの足元であると考えられる。その後次第に輝度が弱くなったループ・プロミネンス (loop prominence system) は 06h32m15s にはおよそ 64000 km の高さに達し, 観測が再び雲の通過と日没によって中断されるまで次第にその高

さを増して行った。

#### b) 活動中心 (A)

一方, もう一つの活動中心 (A) は今までに観測されていない珍しい特徴を示している。活動中心 (A) は図 3, 4 そして 5 からわかるように, 一連の黒点をぐるりと取り囲んでいる環状の明るいプラージュ群ではなく, 高緯度側の先端にある鮮明な単独のプラージュ部分Ⓐを基点として, 見るからに噴出する様相を示した。その外側に存在している明るさの非常に微弱な筋状のプラージュも次々と増光した。しかも, この活動中心 (A) はすべて高緯度側 (北極) の方向へ発達して行った。この活動中心 (A) は, 03h37m43s に + 極  $f_1, f_2$  付近に起こったフレア輝点Ⓐ ( $71.0^\circ \text{ E}, 37.5^\circ \text{ N}$ ) と近接して 03h38m09s に起こったフレア輝点Ⓙ ( $71.5^\circ \text{ E}, 38.6^\circ \text{ N}$ ) の合併によって始まった。このフレア輝点Ⓙが一気に増光した時が活動中心 (A) の爆発相のスタートである



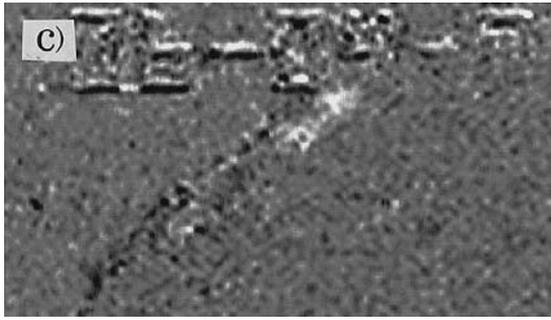


図6. ビデオ録画によるモートン波の画像  
 a) 取り込んだ画像の一部を拡大したもので、  
 b) a) のコントラストおよび明るさを調整してモートン波を鮮明にしたもの、  
 c) 03h39m34s と 03h40m04s の差分画像  
 なお、数字は録画時に入れている時刻文字である

と考えられる。フレア輝点④は 03h38m20s に④  
 ⑤点, ④ ⑥点, ④ ⑦点の方向にそれぞれ ejecta  
 を一気に放出しており、特に高緯度方向(つまり、  
 ④ ⑧点 ⑨点方向)への ejecta が最も強く見られ  
 た。その後⑥, ⑦, ⑧点が増光し、更に高緯度側へ④  
 ⑩点 ⑪点 ⑫点 ⑬点 ⑭点 ⑮点 ⑯点 ⑰点 ⑱点の方向へ数  
 秒~数十秒間隔(平均5秒間隔)で順次輝いて行っ  
 た。なお、フレア輝点④は活動中心(A)の最北端  
 である。そして(A)は活動中心(a)に背の低いル  
 ープがフレアリボン上に現われた時にはフレア輝点  
 ⑥, ⑦ ⑧ ⑨, ⑩ ⑪ ⑫ ⑬ ⑭ ⑮ ⑯ ⑰ ⑱は終わり、④  
 ⑲のみが残っている。そのフレア輝点④ ⑲も 05h13m15s  
 には終わり、元の筋状のプラージュに戻った。このように  
 フレア輝点の発達して行く過程の違う現象が同居  
 しているのは珍しい。

## 2) モートン波の観測

我々は上記のフレアに伴うモートン波を観測する  
 ことができた。H $\alpha$ 単色太陽写真儀の透過幅 0.75 Å  
 のリオ・フィルターによるフィルム撮影の観測で  
 は、図3に示したように 03h41m20s のただ1フレ  
 ームにしかモートン波は検出されなかった。しかし、  
 それを補うための透過幅 0.5 Å のリオ・フィル  
 ターによるビデオ録画によって、詳細な情報を得る  
 ことができた。

このモートン波はこれまで報告されているものに  
 比べて発生直後鮮明な形で見えている。まずモ  
 ートン波がどの方向に、どんな形で伝搬しているの  
 かをビデオ録画により調べた(図6a, b)。その結果  
 わかることは、波は鮮明なスプレイ状をして発生し  
 ており、その延長方向に波の最も明るい部分が伝  
 播して行った。そして波は円弧状に広がることによ  
 って、スプレイ状の延長方向よりも明るさが順次弱

くなりながら低緯度側の方向へも、太陽面上を掃い  
 いった。これまで報告されている多くのモートン  
 波の観測では、モートン波は漠然としたある固まり  
 の明るい部分が次第に円弧状になって遠くへ伝わっ  
 ているように見えている。しかし、今回のモートン  
 波は発生直後、スプレイ状の明るい部分をなして  
 おり、次第に円弧状になって遠くへ伝わって行っ  
 た。この波をもし真上から見ると、同心円状に広が  
 って伝搬していると推察できる。

ビデオ録画の各フレームでのモートン波の位置  
 は、静止画としてみていると決めにくいので、動  
 画として再生しつつ決めていった。差分画像(ある  
 時刻の画像とその前の時刻の画像の差を取る)も  
 試みたが、図6cのように初期の時刻では波面が  
 よく際だつものの、時間がたつて波が淡くなると  
 検出しにくいことは変わりなく、従って今回の解  
 析では、通常の強調画像(図6b)とビデオ再生と  
 を頼りに波の位置を決めた。現象が東縁近くに  
 発生したこと、画面内にスーパーインポーズして  
 いる時刻文字像の中を波が偶然にも進行したこ  
 とで、解析は困難な作業であった。

図7はこのようにして決めた波面の位置を30  
 秒間隔で示したものである。波は活動領域 NOAA  
 No. 6659の北端からほぼ東縁に沿って北極の方  
 へ伝搬して行った。波自体が淡いため、円弧状の  
 波面全体を決めることは難しい。従ってここで  
 は、波の主たる伝搬方向である大円を想定し、  
 この大円に近かつ波面上で明るい点を各時刻で  
 決めて追跡した。この輝点の位置の精度は、  
 輝点の広がりから評価して  $\pm 10''$  ( $\pm 7000$  km)  
 程度である。各輝点をつないでたどり速度を  
 求めようとすると、投影効果の補正に極度に  
 敏感になるので、以下に述べる波の伝搬速度  
 の導出では、こうしてマークした輝点④が、  
 ④点を中心とする同心円の上にあると仮定し、  
 その円の半径をもって各時刻での波の到達  
 距離と考えている。このモートン波の伝搬特  
 性を図8に示す。前に述べたようにモートン  
 波の発生地点は④点と考えられるので、図7  
 の各点の緯度  $\lambda$ 、経度  $\phi$  を日面経緯度  
 図を使って読みとり、

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos(90 - \lambda_0) \cos(90 - \lambda) \\ &+ \sin(90 - \lambda_0) \sin(90 - \lambda) \cos(\phi - \phi_0) \end{aligned}$$

により、各時刻のモートン波の波面と④点との  
 角距離  $\theta$  を計算した。 $\lambda_0$ 、 $\phi_0$  は④点の緯  
 度、経度である。 $\theta$  を太陽面上の距離に換  
 算したのが図8aである。次に測定点( )に  
 時間  $t$  の多項式をあてはめ(図8aの曲線)、  
 その多項式を微分して速度を求めた(図8b)。  
 $t$  の原点は、④点の輝き始める時刻  
 03h37m43s にとった。多項式のあてはめ  
 では、まず

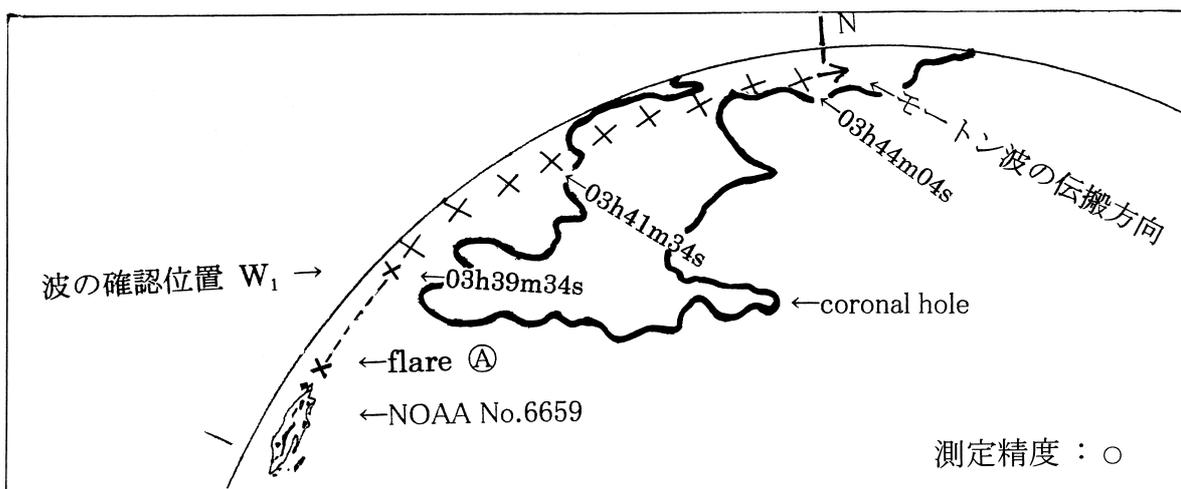
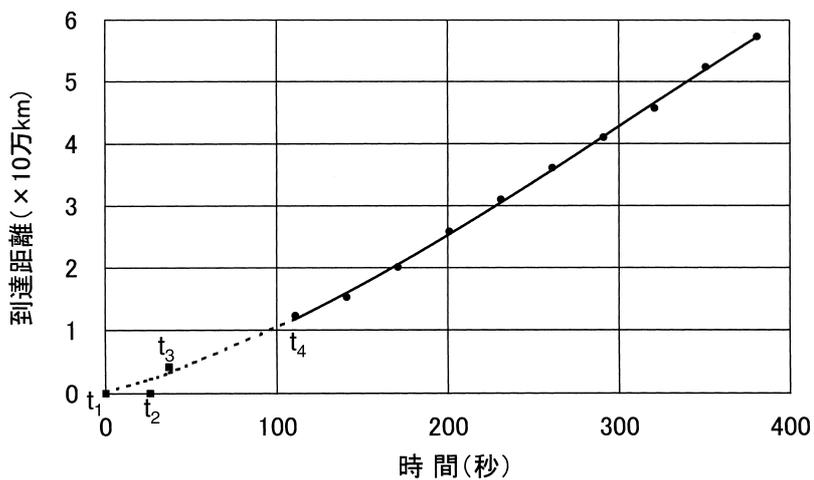


図7. モーション波の伝搬方向とコロナホールの位置．右下に挿入してある円は半径  $10''$  で，概略の測定精度を表している

a)



b)

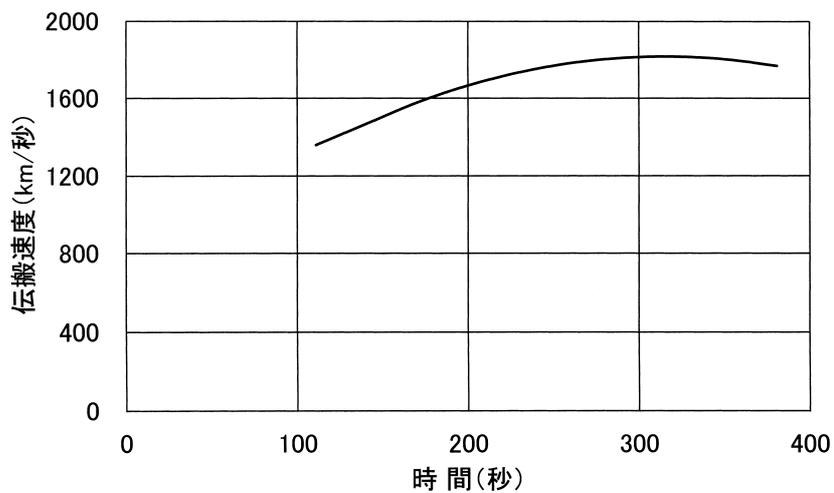


図8. 1991年6月4日のフレアに伴うモーション波の伝搬特性：(a) 到達距離，(b) 伝搬速度

1~6次式を仮定してAIC(赤池の情報量基準)を求めた。すると2ないし3次式がAICを最小にすることがわかったので、ここでは3次式を採用している。多項式あてはめ後の残差の標準偏差は約5000kmであり、見積もった波面位置の測定精度とだいたい同じ値となっている。

伝搬速度は、波が発生した初相では $1500\text{ km s}^{-1}$ 、そして後半には $1800\text{ km s}^{-1}$ の速さで北極の領域へ伝わって行った。この速さはこれまで多くの研究者によって観測されたモートン波の速さ<sup>9,16,17,22)</sup>の中でも大きい部類に入る。中でもZirin<sup>22)</sup>は、発生した当初の速度が $4000\text{ km s}^{-1}$ で、その後 $2600\text{ km s}^{-1}$ に減速しながら伝搬して行ったモートン波を報告している。ここに報告する1991年6月4日のモートン波では、伝搬速度がその逆の傾向を示した。

前節で述べたように、活動中心(A)から明るいプラズマがあたかも噴出するかのような様相を示し、全て高緯度方向(つまり、モートン波の進行方向)に発達していたことから、モートン波の発生源はフレア群の中の中心輝点Ⓐであると判断できる。フレア輝点Ⓐは $t_1=03\text{h}37\text{m}43\text{s}$ に輝き始め、フレア輝点Ⓞと合併する $t_2=03\text{h}38\text{m}09\text{s}$ が急激に一段と明るさを増した時刻である。 $t_3=03\text{h}38\text{m}20\text{s}$ には、Ⓐ点から発したと考えられるスプレイの先端がはっきり見え始めた(図9)。この3つの時刻を図8aにも示してある。縦軸の距離は、 $t_1$ 、 $t_2$ はⒶ点、 $t_3$ はその時刻のスプレイの先端としてある。図8aの点線は、あてはめた3次曲線を延長したもので、 $t_1$ 、 $t_3$ 点を通るが $t_2$ 点からはややはずれるように見える。このことからモートン波はⒶ点で時刻 $t_1$ に発生し、時刻 $t_2$ にⓄ点が輝いた時にはモートン波はすでにⓄ点より先に進行していたと考えられる。また、モートン波が $W_1$ 点で初めて認識される時刻は $t_4=03\text{h}39\text{m}34\text{s}$ であるから、Ⓐ点から $W_1$ 点に達するまでの目に見えない波の伝搬速度は約 $1100\text{ km s}^{-1}$ と計算される(時間差 $t_4-t_1=111$ 秒)。

なお、電波のII型バーストはモートン波との対応がよいとよくいわれているが、このフレアの例では、

II型バーストの発生は $\text{H}\alpha$ フレアの爆発相(03h38mころ)ではなく、それより後の最大相(03h40m)に対応している<sup>23)</sup>。しかしII型バーストは活動領域から遠い上層コロナに達してから電波放射として見えるので、II型バーストとモートン波の共通の原因であるMHD衝撃波は、時刻 $t_1$ にⒶ点から発せられたと考えてよいであろう。

### 3) 議論

a) モートン波は発生直後、一見してスプレイ状に見えるが、これをよく見るとループ状を成していることがわかる。図10a、bに示したように、進行方向に対して幾重にもループを成して、その中の最も明るい部分が時間と共に次々と遠くのループへ移動しているように見える。03h39m34sと03h40m04sの画像の比較から、低いループから高いループへ明るい部分が次第に移動している。

b) モートン波が後半加速して伝搬して行った起因は、コロナホールに遭遇したためであろう。図7はコロナホールの観測された6月2日から、太陽の自転角速度のみにより算出した6月4日相当の北極域コロナホールと、モートン波の進行方向を合成したものである。これからわかるように、モートン波は後半相にコロナホールの中を伝搬していることがわかる。モートン波の伝搬速度はほぼAlfvén速度 $V_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$ であるから、コロナホールにおける低い密度がモートン波の加速の原因と考えられる。

### 4. 結論

高速のモートン波を発生した活動領域 NOAA No. 6659 は第22太陽周期の中で最も活発だった領域で、双極磁場の軸が南北方向に向いた逆転配位(f/p配位)の非常に大きな一つの半暗部の黒点で象徴される黒点群である。黒点の分裂や衝突を繰り返して益々活動度が高くなった。その活動度が始まった時期は東縁近くで+極(f極)のEFRが出現した頃であり、その直後モートン波を伴った重要

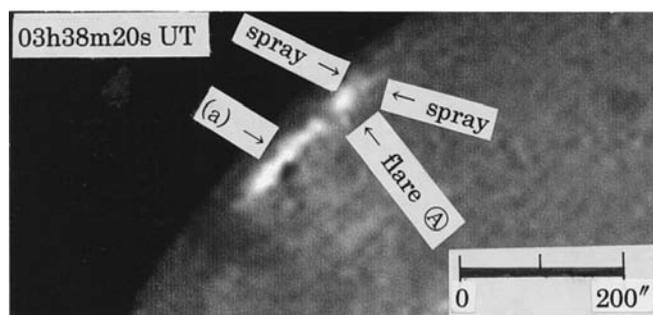
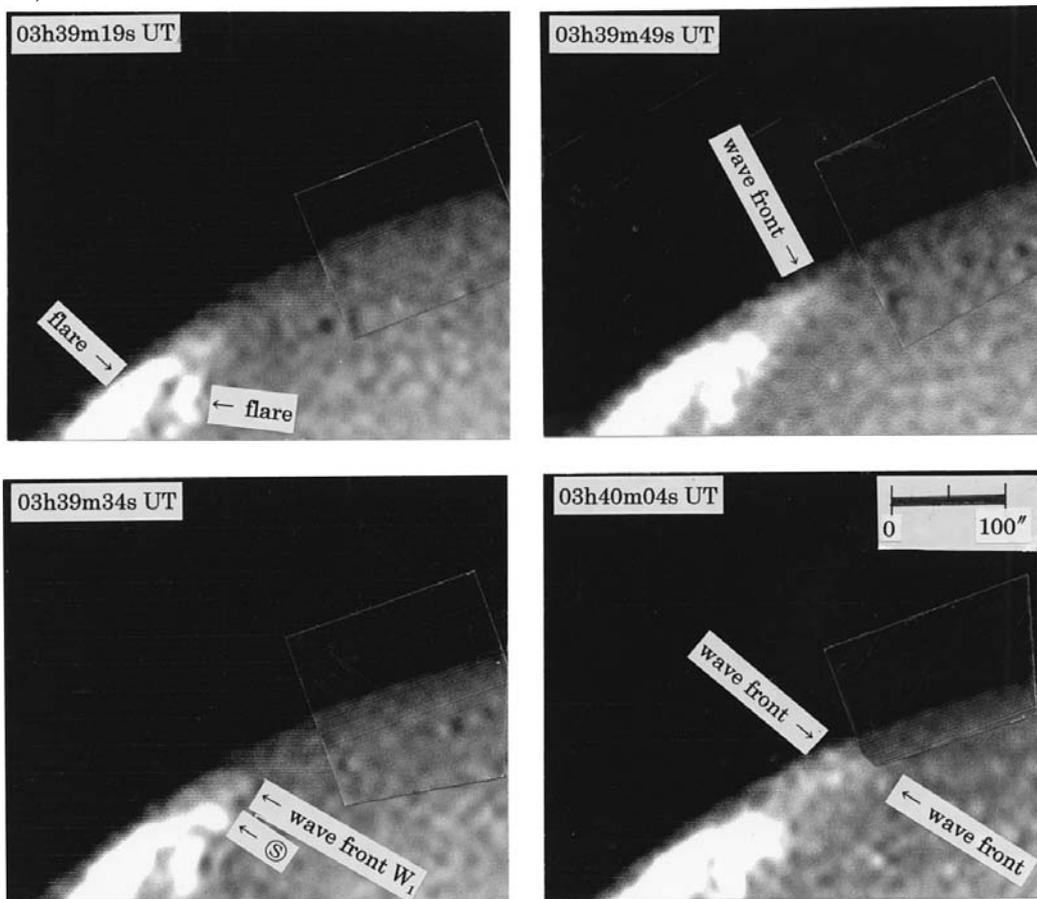


図9. モートン波の発生を示すスプレイ現象

a)



b)

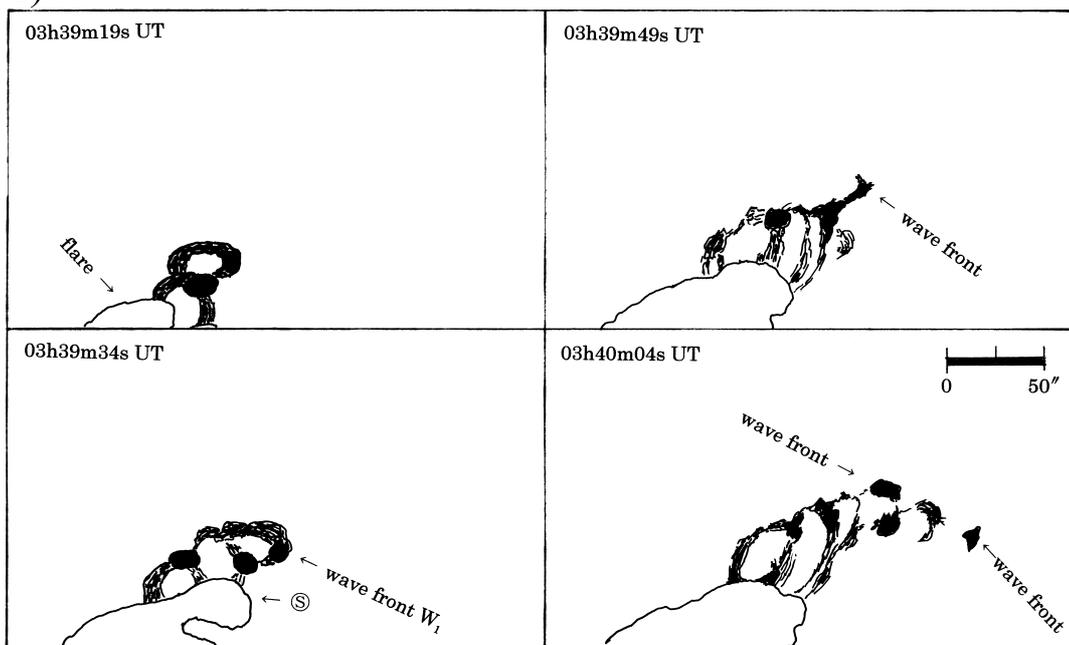


図 10. モートン波発生直後のループ状の波面

a) コントラストを強調したビデオ画像, b) a) を元にして作ったスケッチ

度3Bのフレアが起こった。このフレアは輝点Ⓐを基点として順次北極の方向(つまり,モートン波の進行する方向)へ発達して行く増光が特徴である。この輝点Ⓐが増光を始めたときがモートン波の発生したときである。

このモートン波は,波が確認された当初ループを成している。そして波の中での最も明るい部分はループを移動しているように見える。このモートン波の伝搬速度は当初  $1500 \text{ km s}^{-1}$  で,後相では  $1800 \text{ km s}^{-1}$  に加速した。これはモートン波が密度の低いコロナホールに進行したためと考えられる。

## 謝 辞

本稿をまとめるにあたり,筆者の一人(山口)は故 内田 豊 東大名誉教授より諸研究者の学説やいろいろな新情報をその都度教えていただき,くじけそうになるところを励まされた思いがする。ここに深く感謝申し上げると共にご冥福を心からお祈り申し上げます。なお田中伸幸,西野 洋平両氏にも解析を助けていただき深く感謝する。

## 参考文献

- 1) 田中捷雄:1981a, 太陽, 平山 淳 編, 恒星社, p. 135-139.
- 2) 田中捷雄:1981b, 天文月報, 74, p. 307.
- 3) R. L. Moore, G. J. Hurford, H. P. Jones, and S. R. Kane: 1984, *Astrophys. J.*, **276**, 379.
- 4) H. Zirin: 1988, *Astrophysics of the Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 343, 390.
- 5) T. Sakurai: 1989, 通信総合研究所報告, Vol. 35, No. 7, p. 49.
- 6) G. E. Moreton: 1960, *Astron. J.*, **65**, 494.
- 7) G. E. Moreton and H. E. Ramsey: 1960, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **72**, 357.
- 8) G. E. Moreton: 1961, *Sky and Telescope*, **21**, 145.
- 9) R. G. Athay and G. E. Moreton: 1961, *Astrophys. J.*, **133**, 935.
- 10) Y. Uchida: 1968, *Solar Phys.*, **4**, 30.
- 11) Y. Uchida: 1970, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **22**, 341.
- 12) Y. Uchida, M. D. Altschuler, and G. Newkirk Jr.: 1973, *Solar Phys.*, **28**, 495.
- 13) Y. Uchida: 1974, *Solar Phys.*, **39**, 431.
- 14) N. Narukage, H. S. Hudson, T. Morimoto, S. Akiyama, R. Kitai, H. Kurokawa, and K. Shibata: 2002, *Astrophys. J. Letters*, **572**, L109.
- 15) B. Valniček: 1964, *Bull. Astron. Inst. Czech.*, **15**, 207.
- 16) S. F. Smith and K. L. Harvey: 1971, in *Physics of the Solar Corona*, ed. C. J. Macris (D. Reidel Publ. Co., Dordrecht), p. 156.
- 17) H. Zirin and D. Russo Lackner: 1969, *Solar Phys.*, **6**, 86.
- 18) 宮沢正英, 山口喜助: 1987, 東京天文台報, **21**, 101.
- 19) T. Sakurai, K. Ichimoto, E. Hiei, M. Irie, K. Kumagai, M. Miyashita, Y. Nishino, K. Yamaguchi, G. Fang, M. A. Kambry, Z. W. Zhao, and K. Shinoda: 1992, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **44**, L7.
- 20) B. Schmieder, M. J. Hagyard, G. X. Ai, H. Zhang, B. Kalmán, L. Györi, B. Rompolt, and P. Démoulin: 1994, *Solar Phys.*, **150**, 199.
- 21) Heng Zhang: 2001, *Astron. Astrophys.*, **372**, 676.
- 22) A. Patterson and H. Zirin: 1981, *Astrophys. J. Letters*, **243**, L99.
- 23) T. Sakurai, M. Irie, M. Miyashita, K. Yamaguchi, and Y. Shiomi: 1995, in *Proceedings of the Second SOLTIP Symposium, STEP GBRSC News*, Vol. 5, ed. T. Watanabe, p. 33.