

太陽フレアーとオーロラ嵐

大 林 辰 藏*

はじめに

太陽は宇宙空間にたえずエネルギーを放出している。そのもっともはげしいのがフレアーである。フレアーは太陽の彩層からコロナ域にかけての局所的な爆発で、光ではH α 線で観測され、電波X線バーストなどをともない、地球には磁気嵐、オーロラなどをおよぼす巨大なプラズマ嵐を惑星間空間におこす。

このプラズマ嵐ときわめて似た現象が地球の大気圏外域にも起っている。それはオーロラ嵐である。極北の夜空にあやしくゆれるオーロラはながい間人々にとって神秘の天上の炎として恐れられていた。しかしこれが大気圏外から侵入してくる高速度の荷電粒子によってつくられるもので、その起源は磁気嵐の中で起っているプラズマ嵐にあることが理解されるようになって来た。「太陽フレアーとオーロラ嵐」という課題はこの2つの現象のもつ類似性に着目して相互の対応をしらべ、フレアー機構の本質を理解する手がかりにしようとするものである。もちろん、二つの現象のスケールのちがいはあるが、現象に関与する物理機構は多くの共通点を含み相互に比較することの意義はきわめて大きい。

フレアーの発生と地球嵐

フレアーの発達は次のように、三段階にわけて考えることができる。すなわちエネルギーためこみの段階（プレフラッシュフェイズ）急激に放出する段階（フラッシュフェイズ）そしてその結果として起るプラズマ嵐のはじまり（後のフェイズ）である。関連して観測される現象を表1に示す。また表2に、種々な現象に配分されるエネルギーを示したが、ここで大部分のエネルギーがプラズマ嵐に流れることに着目いただきたい。

フレアー域で発生するエネルギーは、 10^4 erg/cm^2 にも

表2 フレアー各現象に配分されるエネルギー

フレアー	重要度 1-	重要度 3+
X 線	10^{28} エルグ	10^{30} エルグ
E U V	10^{28}	10^{30}
H α	10^{26}	10^{30}
電波帯	10^{20}	10^{24}
プラズマ	10^{29}	10^{32}

* 東大宇宙航空研究所 Tatsuzo Obayashi
Solar flare and Aurora Storm

表1 フレアー発達の各段階

プレフラッシュフェイズ
黒点磁場のまきこみ、ねじれ
ダークフィラメント（プロミネンス）の活動
マイクロ波 (>3 GHz) S成分の増加: コロナコンデンセーション H α プラージュ輝点
フラッシュフェイズ
H α 輝点の急増大と中性線に沿うリボン形成 (v_{11} = 100~1000 km/s)
X線バースト (0.1~10 A): 2ステージ放射
電波バースト(マイクロ波インパルス, Type III): 高速電子流の放出 (10~100 km)
サージ (モートン 100~1000 km/s)
太陽宇宙線 (<100 MeV)
後のフェイズ
電波バースト (Type II, III, IV)
フレアーリボンの発達とドリフト (極方向 $v_1=2\sim 10$ km/s)
ループ・プロミネンスの浮上運動 (外方向 $v_1=2\sim 10$ km/s)
黒点磁場のもどり、再結合
太陽宇宙線 (1~100 MeV)
プラズマ雲 (Blast Wave) $V=1000$ km/s

達するが、これは磁場のエネルギーに換算すると500 Gaussにも相当する。黒点磁場の持つエネルギーが、なんらかの方法でプラズマの運動エネルギーに変換される過程がフレアーである。そこで問題となるのは

- i) エネルギーが黒点磁場内に蓄えられる原動力
- ii) 急激なエネルギー放出の機構とその契機
- iii) 粒子加速、電磁波放射の機構

を理解することである。

エネルギーの原動力は、おそらく、黒点域光球下にあるガス対流や回転のような力学的な流体運動でそれによって黒点磁場に生じたねじれなどの変形から磁場内に余剰のエネルギーが蓄えられる。このエネルギーが領域内に生じた不安定性によって急激に放出される。不安定としては磁場崩壊現象であると考えられる。

パーカー・ペチェック等は磁場の向きが逆になった「中性域」に生じるX型に交差した中性点を考える。X型の磁場配位はプラズマのねじれ運動などで逆向きの磁力線が接近したときに起るが、これによって磁場内に蓄積されたエネルギーがある値以上になってはじめて不安定性が急速に成長しエネルギーの爆発的な解放がある。

フレアーで急激に磁場のエネルギーが解放される具体的な機構はまだよくわかっていないが、おそらく図1の

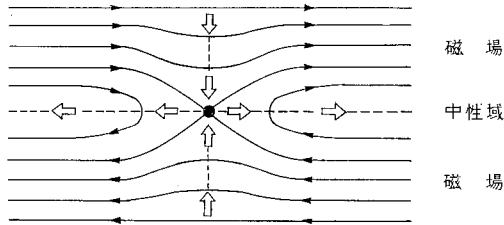


図1 X型磁場配位

ようにコロナの磁気中性域においてであろう。

中性域で不安定が生じ、加速された電子群が磁力線に沿って彩層に落下し、中性水素ガスを励起発光させる。光球と彩層の境界付近(高さ 500 km) 磁場の磁性反転線にそってその両側から発光がはじめる(双子ポインフレアー) 発光層は強いジェット電流でもあったと考えられそのオーム熱が充分大きなものとなり得る(コロナからの熱伝導との考えもある)。いずれにせよ、複雑な電磁学的運動によって磁力線の結合、つなぎかわり、分離などが起り、各種の電磁波、高エネルギー粒子群の加速、放出、コロナガスの流出など太陽フレアー特有の現象が現れる。

フレアーにともなって粒子加速、加熱等が起り、Haフレアー、X線バースト、電波バーストまた太陽からの宇宙線(プロトン、アルファ粒子、1~1000 MeV、電子 >100 keV) などが観測される。太陽宇宙線は極域での異常電離(Polar Cap Blackout) や宇宙線増加としてとらえられる。

それにおくれること1~2日、プラズマ雲とそれに先行するショック波が津波のように地球の大気圏外域到達し磁気嵐やオーロラを起す。宇宙線線として知られている銀河宇宙線の減少もこのプラズマ雲によるものである。このような一連の擾乱を地球嵐とよぶ。主なものを列記すれば、

- i) フレアーX線によるD層の電離増加 (SID)
- ii) 太陽宇宙線による極冠帯電離増加 (PCA)
- iii) プラズマ津波による磁気圏の変形(磁気嵐初相)
- iv) オーロラ粒子による発光と電磁波放射(オーロラ)
- v) 磁気圏内の電場による電離層電流系(極磁気嵐)
- vi) 放射線帯の変動と赤道環電流系 (磁気圏嵐)
- vii) 電離層内の加熱と大気化学変化 (下層擾乱)
- viii) 銀河宇宙線の変動 (宇宙線嵐)

などである。このうち、iv~viは地球磁気圏内で起る嵐でその素過程をサブストームとよんでいる。太陽フレアーときわめて多くの類似性を持つのでこれをオーロラフレアーと名付けよう。

オーロラ嵐

太陽フレアーにともなって起る地球嵐のうち、もっと

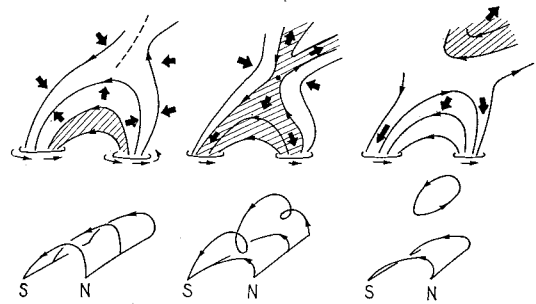


図2 フレアー域での黒点磁場とガス運動

エネルギー蓄積 フレアー エネルギー放出

図2 フレアー域での黒点磁場とガス運動

も古くから知られていたのがオーロラである。18世紀以降になってオーロラは磁気嵐にともなって起る超高層の発光現象であることがしだいに明らかにされ、今世紀に入っての組織的な研究で地球磁気圏で起る巨大なプラズマ嵐の一つの側面としてのオーロラの姿が明らかになって来た。しかし、依然としてそれは我々の感覚に直接訴えることのできる唯一の大気圏外の現象であることに変わりはない。

オーロラの研究は北欧の科学者、パークランドやステルマーによってはじめられ、チャップマン、フェラロ、アルフベン等の磁気嵐論として発展した。パークランド、ステルマーはオーロラを発光させる高速粒子が地球磁場でまげられ高緯度帯にしか侵入し得ないことを示した。しかし粒子源として太陽を考えたとき、なぜ夜(太陽の反対側)だけにオーロラが発生するかを理解できなかった。最近になって地球が高エネルギー粒子の放射線帯、太陽風に吹きながされる磁気圏にとりまかれていることを知った。この磁気圏尾部にオーロラをおこすエネルギーが蓄えられ、規模こそ小さいがある種の爆発現象でオーロラが起って来るとも明らかになって来た。

以下関連現象を順を追ってみて行こう。

(a) オーロラ発光

オーロラは磁気緯度 65~70° の超高層大気(100~150 km) の発光で、薄いカーテン状あるいは斑状の形ではげしく変動する。分光的には大気組成である酸素や窒素の分子又は原子の発光で、侵入する高エネルギーの電子やプロトンによって励起されるものである。

オーロラ全体の姿は、各地におかれたオールスカイカメラや科学衛星からの観測で捉えることができる。発光が侵入する電子によるものは明るくてよく研究されているが、プロトンによるものは暗く観測も困難とされていた。南極の昭和基地では数年前からこの観測に取組み成果をあげている。

オーロラ発光ははじめ真夜中側に静かなアークとしてはじまり、それが激しいブレイクアップへと続いて行く、

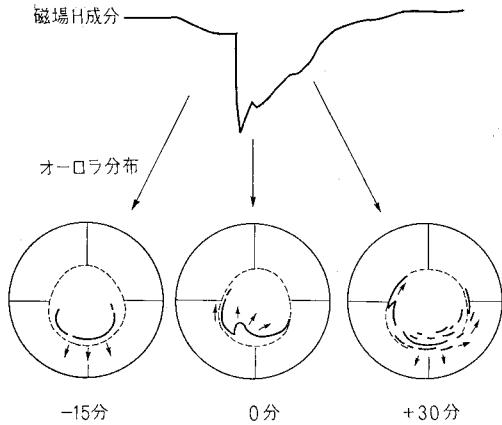


図 3a 極磁気嵐とオーロラ分布(北極から見たパターン)

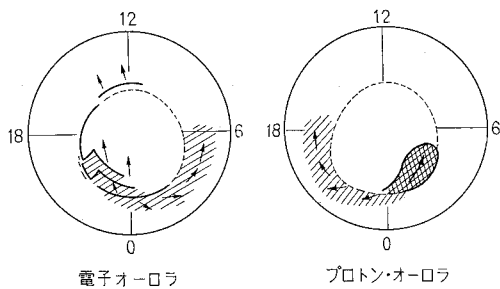


図 3b 電子, プロトン・オーロラの分布

また、電子による発光とプロトンによるものが真夜中を中心として対称に起っているのも興味深い。

(b) 極磁気嵐

極光帯に沿って強いジェット電流が現われオーロラアークの直下では地磁気 H (垂直) 成分が著しく減少する湾型変化が起る。このジェット電流は百万アンペアにも達する強いもので極域電離層の高さ 90~120 km を西に向かって流れ電離層を加熱しいくつかの擾乱現象をおこす。

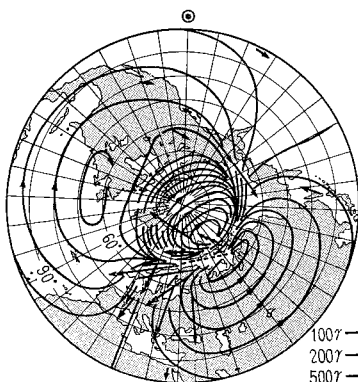


図 4 オーロラ嵐電流系 (DP-1)

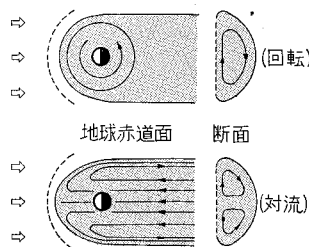


図 5 磁気圏内の対流モデル

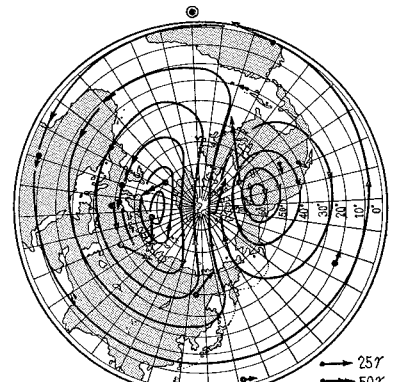


図 6 極域渦電流系 (DP-2)

(c) オーロラ粒子群

主として 1~10 keV の電子とプロトンで、磁気圏の中で爆発的に作られると考えられている。オーロラ発光を起すほか磁気脈動、VLF 放射などの電磁波や、高エネルギー電子群による X線放射も起す。また極光帯での異常電離増加も起る。

極光帯は、地球磁力線が閉じている放射線帯より外側につながっていて、オーロラ粒子群はその境界または外側にある磁気圏尾部の開いた磁力線のところに源があることがわかる。科学衛星の観測によれば磁気圏尾部の磁気中性面付近に高温 (エネルギー 1 keV) のプラズマが存在していてこれが地球に向かっておしよせるときオーロラ嵐ははじまると考えられている。

(d) 放射線帯

放射線帯の変動は場所によって異なるが、高エネルギー粒子が減少しそして低エネルギー粒子が増加する。嵐の初相で地球磁場に捉えられていた粒子が大気に落下し同時に磁気圏尾部から低エネルギー粒子が補給される。また磁気圏内にはプロトンベルトが形成され赤道環流の源となる。

最近になってわかったことだが放射線帯の大部分がこのオーロラ嵐にともなう粒子補給がもとになっていると考えてよい。

(e) プラズマ対流

太陽風によって地球磁気圏に作られた巨大な対流がプラズマ対流である。磁気圏をとりまいて太陽風が流れそれによって長い磁気圏の尾がつけられるが、内側では太陽風と反対に流れるプラズマ風系がある。地球回転と渦対流をモデル的に描いたのが図 5 でそれに対応する極域渦電流系が図 6 である。

オーロラ嵐に対応する電流系 (図 4) を DP-1 型、この極域渦電流系を DP-2 型と呼んでいる。DP-1 はオーロラにともなうジェット電流系で、DP-2 は磁気圏尾部の西向き電場が原因となるプラズマ対流によってい

る。

ここできわめて重要なことは、オーロラ嵐のはじまる前に DP-2 型電流系が強くなる。オーロラ嵐の先駆現象がプラズマ対流の増加として現れるのである。しかも、あとでのべる様に、このプラズマ対流は、太陽風とともに流れて来る惑星間磁場が南向きになると発達しはじめることが発見された。太陽風の中にある偏極電場（速度×磁場）が西向きになると磁気圏内にもそれと同方向の電場によるプラズマ対流が発達しオーロラ嵐につながる。この先駆現象を成長期 (Growth Phase) とよび、この期間に嵐を起すエネルギーが磁気圏の中に蓄えられるのである。

オーロラ嵐のエネルギー源がどこにあるかということはい長い間のパズルであった。その源をフレアーにもとめるのは自然だとしても、オーロラ粒子群が直接太陽からやって来ると考えるには前に述べたように無理があった。それが、太陽風によって作られるプラズマ対流から放射線帯への粒子の補給という形で解決されようとしているのである。

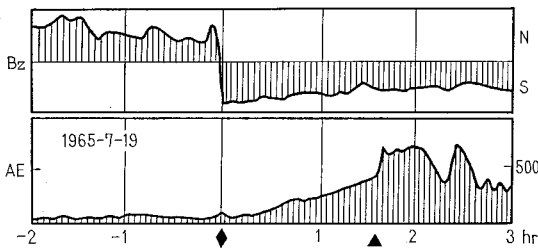


図 7 惑星間磁場とオーロラ活動度

オーロラ嵐の発達機構

一般に、オーロラ嵐は磁気嵐などをともなって起るが、比較的静穏な期間にも発生するものもあり、このような「孤立した」嵐として分離して扱うことが発達過程をしらべる上で都合がよい。嵐の発達過程は前節に少しふれた成長期 (Growth Phase) と発達期 (Expansion Phase) にわけられる。

(a) 成長期 (Growth Phase)

オーロラ嵐のエネルギーが磁気圏内に蓄積されるステージで、太陽風とともに地球におしよせる惑星間磁場が南向きになったときから始まる。図 7 の例では、惑星間磁場の南北成分 (B_z) が正から負 (北向きから南向き) に変ると (下図の) オーロラ活動度 AE が上昇はじめる。1.5 時間後 (▲印) でブレイクアップが起っている。一般に、 B_z の逆転から 1 ~ 2 時間後にオーロラ嵐が起る確率がきわめて高い。物理的には、 $B_z < 0$ のとき (南向き) 惑星間磁場と地球磁場の結合 (つなぎ変り) が起り磁気圏前面の磁場フラックス (磁力線) が後部にはこ

ばれ、太陽風エネルギーが磁場ポテンシャルエネルギーとして磁気圏尾部に蓄えられる事実、この期間太陽風圧一定にもかかわらず磁気圏前面までの距離が減少し、磁気圏尾部の磁場強度は $B=5\sim 10\gamma$ 程度増加することが確められている。

磁気圏尾部の磁場フラックスが増加すると共に太陽風と反対方向をもったプラズマ対流が磁気圏内部で強められる。これは惑星間磁場と地球磁場の磁力線結合にともなって惑星間の偏極電場 (西向き) が磁気圏内に侵入し、プラズマ対流を誘発するとも考えてよい。磁気圏尾部の磁気中性域には高温プラズマに満されたプラズマ・シートがあるが、その厚さが薄くなることも磁場フラックスの増加と符合している。

プラズマ・シートの前面が地球の方向に動くと共に、そこから磁力線に沿って落下する電子群によってつくられるオーロラ・アークは赤道方向に移動を始める。またプラズマ対流に対応する DP-2 型電流系が極域で発達することは地磁気観測で認められる現象と一致する。そして突然、アークの一部が輝きを増し Expansion Phase (ブレイクアップ) に移行するわけである。

(b) 成長期 (Expansion Phase)

オーロラはここで急に活動的になり、ループ形成が始まって、サージ状のオーロラ・シートが真夜中から西に向かって極光帯に沿って移動を始める。またアークの極方向への急速な動きも特徴的である。オーロラ・ループやシートの局所的な運動は負電荷の蓄積による電場ドリフトと一致する方向 (磁力線に対して右廻り) に起る。また

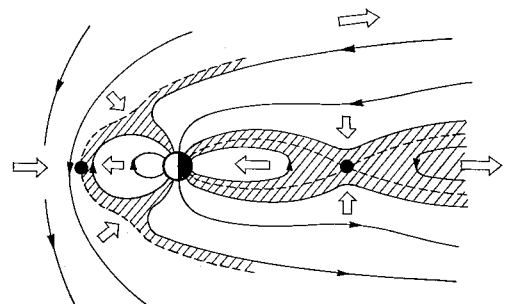


図 8 地球磁気圏のプラズマと磁力線の運動

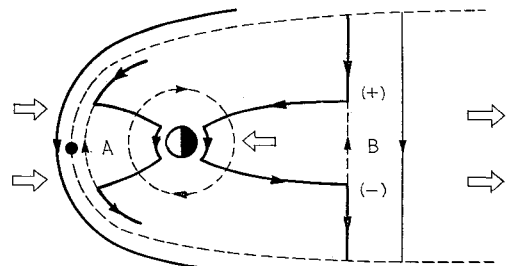


図 9 地球磁気圏 (赤道面) の電流系

オーロラ・アークに沿った電流ジェット (DP-1 型) は急激に成長し極全域に拡がる。

磁気圏尾部では磁場強度が減少し、距離が地球半径の 10~15 倍のところ X 型磁気中性点がつくられる。ここで磁力線の再結合作用が起り中性点以内のプラズマは地球に向かって侵入し、中性点以遠は後方に向かって吹きぬける。これは太陽フレアの場合の X 型磁場配置 (図 1) とよく似ている。

オーロラにともなう極磁気嵐は極域電流ジェットに代表されるが、それは電離層・磁気圏をつなぐ立体的な電流系によって閉じられている。すなわち、磁気圏の前面および後部につくられる磁気中性点 A, B で、磁気圏表面電流およびテイル電流がそれぞれ切断され、それが磁力線に沿ってオーロラ帯電離層を經由して流れる。とくに B の両端にかかる電圧は 10~50 kV に達し、これがオーロラ電流ジェットのエネルギー源であると考えられている。朝側の磁気圏から流入し、夜側の電離層を経て夕側の磁気圏に抜けるこの電流系は、今から 70 年も前に考えられていたもので、その予言者の名をとってバークランド電流と呼んでいる。

バークランド電流は磁力線に沿って流れる部分と電離層域 (90~120 km) を磁力線を横切って流れる部分に分けられる。電離層電流はカウリング効果によって強められ、電気伝導度は通常の場合の 10~100 倍に相当する大きさになる。電流が磁力線に沿って流れるとプラズマ不安定が生じて、異常抵抗現象が発生し、このため磁力線に沿って電位差がきわめて大きくなるのが予想される。電場の方向は朝側が下向き、夕側が上向になるが、この電場によってプロトンは朝側で下向きに加速され、電子は夕側で下向きに加速される。このことはプロトンおよび電子によって励起されるオーロラが真夜中を境にして朝・夕で対称のパターンになることと見事に一致している。

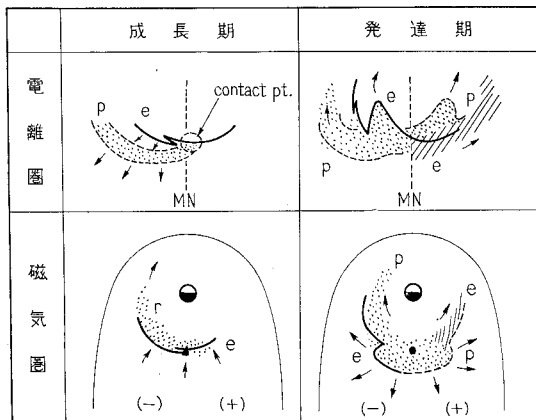


図 10 プロトン(p), 電子(e) オーロラ分布と発生機構

プロトンおよび電子オーロラは図 10 のように変化する。これから磁気圏内では真夜中を中心にして磁気中性域が東西に拡大されて行く様子がわかり、磁気崩壊域が時間と共に急速に拡大され、その境界のところで粒子加速が行なわれていることを示している。

Expansion Phase から回復期にかけての変化は磁気圏で生成された加速粒子群のドリフト (電子: 東向き, プロトン: 西向き), プロトン・ベルト (環電流) の形成などと続くが、磁気圏尾部に蓄えられたエネルギーは放散され、やがてオーロラ嵐の終りとなる。もちろん放射線帯への粒子拡散, 電離層の加熱効果等はかなりの時間にわたって持続される。

オーロラフレアと太陽フレア

オーロラフレアと太陽フレアの対比を表 3 に示す。個々の現象については別々に説明したが、この表 3 によって対比させればその類似性がよくわかる。主なちがいは現象の規模にあるのであろう。以下各項にそって調べてみよう。

表 3

項 目	太陽フレア	オーロラ・フレア
エネルギー源	光球のガス運動	太陽風
エネルギー蓄積	黒点磁場	磁気圏尾部
Growth Phase (時間)	S 成分, GRF, プロミネンス磁場の変形と戻れ $\tau \approx \text{day?}$	テイス磁場の増加 プラズマ対流 $\tau = 1 \sim 2 \text{ hrs}$
Explosion Phase (時間)	H α 輝点 リボン・フレア $\tau \sim 10^3 \text{ sec}$	オーロラ Break up オーロラ, 電流ジェット $\tau \sim 10^3 \text{ sec}$
フレア放射	電磁波バースト 太陽宇宙線 プラズマ雲ショック波	ULF・VLF 波放射 高エネルギー粒子群プラズマ?
エネルギー放出	$10^{30} \sim 10^{32}$ エルグ	$10^{19} \sim 10^{20}$ エルグ

(a) エネルギー蓄積機構

オーロラ嵐のエネルギー源は太陽風にあり、それによってつくられる地球磁気圏の尾部に磁場エネルギーが蓄えられる。地球磁場の安定なかたちは双極子型のものであるから、それからずれたところでは不安定エネルギーと見てよい。エネルギーの流入は磁気圏前面のところで太陽風によって運ばれてくる惑星間磁場と地球磁場が磁力線結合することによって有効に行なわれ、太陽風の運動エネルギーの一部が磁気圏に磁場エネルギーとして蓄えられるようになる。太陽の場合には光球内の対流運動が黒点磁場の変形をもたらし、磁力線の振れやずれができ

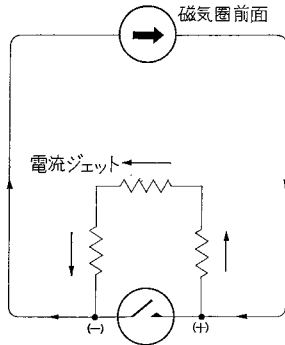


図 11 オーロラ・フレヤーの電流システム

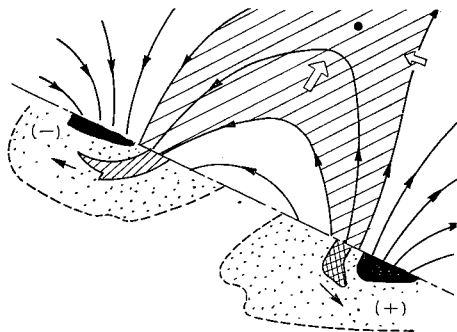


図 12a フレヤー磁場配位

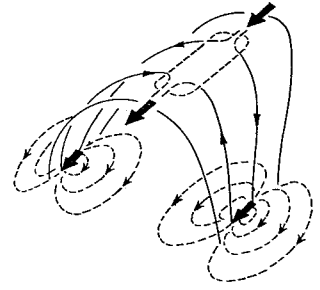


図 12b 電流システム

る。この磁場配位はエネルギー最小のポテンシャル磁場 ($\nabla \times \mathbf{B} = 0$) に対して余剰のエネルギーをもつわけである。

磁場エネルギーの急激な放出がフレヤー現象であるが、その機構はともかくとして、磁場配置が不安定なものから安定なものにもどることが $H\alpha$ フレヤー写真に見られる磁場分布の変化から推察される。

(b) エネルギー解放機構

蓄積された磁気エネルギーの解放は磁気中性域における磁場崩壊機構が重要なものとされていた。しかしその重要性もさることながら、最近のオーロラ嵐の研究からいくつかの新しい現象や機構が注目されるようになった。とくに磁気圏内での電場分布、極域電流ジェット、および磁力線に沿った電流による不安定現象などの役割が明らかにされると共に、これに対応する太陽フレヤー現象を調べることが必要となっている。

オーロラ・フレヤーのエネルギー蓄積は磁気圏後部に偏極電場（+朝側、-夕側）を強めることになるが、それに関連した西向き電流が磁気中性点近傍で切断されると電流は極光帯を經由して流れようとする。このとき磁力線に沿う電流路には異常抵抗不安定が起きるため、10kV以上もの電位差が磁力線に沿ってでき、それによる磁子加速がオーロラ粒子群のつくられる原因となっている。極光帯電離層に流れる電流ジェットは十～百万アンペアであるから、これによるジュール熱放出は 10^{10} ワット程度になる。

太陽フレヤーではオーロラ発光域に相当するのが $H\alpha$ フレヤー域であろう。発光層は彩層下部領域にあると推定されるが、そこはまた強い電流ジェット層でもありと考えられる。地球大気の場合の類推から、フレヤー電流層の高度は光球面 ($r=1$) から $h \approx 500$ km の Cowling 電気伝導度がピークになる位置にあると推定される。予想される電場、電気伝導度などから、全電流値は $J \sim 10^{12}$ アンペア、ジュール・エネルギー発生率は、 $10^{18} \sim 10^{19}$ ワット

ト、すなわち彩層域のフレヤーエネルギーと同程度のものになる。

フレヤー電流ジェットは彩層下部の加熱、 $H\alpha$ 輝線の励起、磁力線のつなぎ変り(磁場配位の変化)、コロナ彩層域につくられる電場 ($E_{\parallel} \sim 10^7$ volt) による粒子加速などさまざまな現象を説明することができる。このようにオーロラ嵐と太陽フレヤーは共に磁気圏/コロナ域の電圧を、電離層/彩層のところでショートすることによってエネルギーの解放が誘発される。すなわち、フレヤー現象は大規模なプラズマ放電であるといえよう。

このようなフレヤー機構をもとに描いたモデルを図12に示そう。まずフレヤーの Growth Phase では黒点磁場域の中に蓄えられるエネルギーは上向きの圧力勾配をつくり、これと平衡するローレンツ力 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ に対応する電流がコロナ域下部の磁気中性点近傍を流れている。この電流が何らかのトリガーによって突然に切断され磁場崩壊が始まると、電流システムは彩層下部の電流層を經由した回路を形成し、フレヤー現象の Flash Phase となる。回路の磁力線に沿った部分では異常抵抗不安定による粒子加速が起り、それが電流層の電気伝導度をあげ電流ジェットを増大させることに寄与する。このシステムは一種のポジティブ・フィードバック系であるため、蓄積エネルギーが完全になくなるまでフレヤー現象は急速に発達することになる。電流ジェットの効果は彩層域の加熱ループの浮上などさまざまな現象を説明しうる可能性がある。

太陽フレヤーとオーロラ嵐の研究は宇宙プラズマの中で起るフレヤー現象の典型的な例として、今後一層の精力的な研究が望まれている。これには地球周辺、太陽および種々の天体での現象と実験室内でのプラズマ・シミュレーションの研究が互に情報を交換しあう学術的なテーマとして取上げることが必要であろう。本解説がその一助となれば幸である。