

5. 「オーロラ」

京大理学部* 佐藤哲也

§ 1. はじめに

「オーロラ」というコトバを我々日本人が耳にするとき、何か詩的な感覚にとらわれるのではないかと思う。筆者が「オーロラ」なるものの研究に数年前より興味を抱き始めたのも、学問的興味というよりは、むしろこの「オーロラ」なるものの正体を一度見てみたいという単純な動機からである。不幸にして、まだそれを見る機会に浴していないが、これはオーロラを理論的に研究する者にとってはある意味では幸いであるかもしれない。というのは恐らくオーロラの実体なるものをつぶさにみれば、その複雑な形状・運動の故に、理論にはつきものの勝手な仮定(?)が許され得ないのを知るであろうから。

余談はさておき、まずオーロラの歴史から簡単にお話する。オーロラなる現象がそもそも地球上で始まったのは一体何日頃からであろうか? 後で述べるが、オーロラ現象がみられるには — まず地球磁場が現在のような形で存在すること、次に、太陽から粒子(プラズマ)が放出され、その粒子(エネルギー)が地球大気にまで到達すること — この二つの前提が満たされることが必要である。地球誕生以来、これらの関係が現在までそれほど大きく変わっていないものと推定されることから、オーロラの年も地球のそれとそれほど違っていないと考えられる。このことから当然人類は神代の昔からこのオーロラを見、それに興味をいだいてきたであろう。地理的条件からギリシャやローマにはその神話はないようであるが、アイスランド、ノルウェー、エスキモーのような北方民族の間にはいろんな神話が伝えられている⁽¹⁾。例えばエスキモー人はオーロラを死者の靈魂をヨミの国へ導びく精霊の持つ松明の行列の火と信じていたといわれる。

科学の対象としてオーロラをとらえたものとしてはギリシャ人のものが最初であろう^{(1),(2)}。例えば、紀元前4世紀のアリストテレスの「Meteorologia」の中にもオーロラの記述がある。彼は太陽熱で生じた地表からの蒸気が彼のいわゆる四元素の一つの「火」元素と衝突

* 現住所 C/O Dr. G. Harendel
Max-Planck-Institut
für Physik und Astrophysik
Institut für Extraterrestrische Physik
8046 Garching bei München
West Germany

した結果生じる焔がオーロラであるという。もし「火」元素なるものを太陽から放出される粒子と考え、地表からの蒸気を超高層の大気と考えるならば、彼の説は全く的を得ているともいえる。ノルウェーの年代記「The Kings' Mirror」(1250)には、オーロラの原因が (1) 地球をとりまく火焰、(2) 地平下に没した太陽の光線、あるいは、(3) 焔を出す氷河、のいずれかであろうと書かれている。もう少し科学的な記述として、フランスの数学・天文学者の Gassendi (1592 - 1655) のものが最初であろう。彼は北半球のオーロラを「aurora borealis」(北の夜明け)と名づけている。(これに対し Captain Cook は1773年南極のオーロラを「aurora australis」と呼んだ)。18世紀に入ると、多数の科学者がオーロラに興味をもち始める。例えば Halley, Euler, Franklin, Dalton 等々といった人達がオーロラについて書いている。Halley は1716年の大オーロラをロンドンで観測し、その形状から現在でいう地球磁場に沿ってオーロラ光線が光ることを知り、磁力線に沿って伝わる「magnetic particles」なる粒子が大気を光らせていると想像した。

19世紀に入ると、オーロラの観測がさかんになり、その地理上の発生頻度図がえがかれたりもした(現在でいう auroral zone (地磁気緯度で $65^{\circ} \sim 73^{\circ}$ 程度)の存在が明らかとなる)。この世紀におけるオーロラ研究への最大の寄与は Ångström によるスペクトル中の黄緑線(これがオーロラの光の主成分である酸素原子の $^1D - ^1S$ 遷移による $5577\text{\AA}$ であることが後に判明)の発見であろう(1876年)。

このように古い歴史をもつオーロラの科学も、観測に裏づけされた論理の学問として発展したのは今世紀に入ってからである。もっと厳密に言う、ここ10年来(ロケット・人工衛星により種々のデータが出はじめてから)といっても過言ではないであろう。前世紀までいろいろと想像されたオーロラの原因が太陽から放出されて飛んでくる電子のビームに帰因するのではないかと最初に提唱したのは、オーロラ科学の創始者ともいわれる Birkeland である。彼は陰極線を用いる室内模擬実験も行なっている。彼の同僚の Störmer は1910年に、太陽からやってきた電子が地球双極子磁場の影響でどのような軌道をとるかという膨大な軌道計算を始めた。彼等のモデルは太陽粒子が電子のみからなるという前提に立っているため、Schusterによってその取扱いは不適だという批判(静電反発力の無視)がなされはしたが、彼等の研究が大いに以後の研究を促進させたことは事実である。Schusterの批判にもとづいて Lindemann は太陽粒子が荷電粒子から

成っているが、全体として中性であるべきだと暗示している（これはいわゆる「プラズマ」という概念の最初のものであろう）。これ以後、プラズマと地球磁場の相互作用ということが、オーロラ科学の重要なテーマとなる。

ChepmanとFerraroはChapmanの古い磁気嵐の理論（1918、太陽粒子を電子ガスとして取扱う）をプラズマと磁場の相互作用という立場から練り直し、地球磁場は太陽からのプラズマ流（後に太陽風と呼ばれる）によって変形され、その流れから遮閉された孤立した一つの空洞（cavity）を構成するという結論に達した（1930年前後）。これは地球物理学上非常に大きな発見で、これが現在「地球磁気圏」と一般に呼ばれているものの原型である。彼等はそのcavityの境界面（現在magnetopauseと呼ばれる）上にいわゆるChapman-Ferraro電流と呼ばれる電流が流れ、この電流によって無元空間までのびるべき地球双極子磁場が有限空間（cavity）に閉じ込められていると結論した。彼等はこのcavityの半径は大体 $10 R_E$ （ R_E ：地球半径、約6370km）であると推定した。（この値はその後の人工衛星による観測とよい一致を示している）。彼等の遮閉されたモデルでは、太陽粒子のもつエネルギーが如何にしてそのcavityの内側（地球側）に伝達され、その結果、例えば、オーロラをひき起すかという点が説明され得ない。これを説明すべく諸々の人達によって現在でも研究が続けられている。未だ確立された説はないが、太陽風のエネルギーを磁気圏内に導く機構として「磁気をつなぎ変わり機構」（field line reconnection）なるものが現在最も有力である。これは、太陽風によって運ばれてきた磁場（惑星間空間磁場、太陽風に凍結した磁場）が地球磁場とつなぎ変わるという説（後述）である。

一方、Alfvénはオーロラや磁気嵐の理論において、磁気圏内の電場の働きの重要性を強調し、これが荷電粒子の運動に大きな寄与をしていることを指摘している⁽³⁾。更に彼は、このような研究の過程の中で磁気流体力学の基礎を確立した（ガイディング中心、磁気モーメントの保存、凍結の概念、アルフベン波等）。

以上、ごく大ざっぱに1950年以前のオーロラ科学の発展を話したが§2及び§3で現在のオーロラに対する理論をのべ、§4ではオーロラ・アーク生成の一つの理論例（筆者等による）を簡単に紹介する。

§ 2. オーロラの性格

オーロラの性格を話すには太陽と地球の相互作用から話さねばならないが、これについては次節でのべることにして、ここではオーロラの直接点な性格について述べる。

オーロラ現象とは、磁力線に沿って（磁気圏から）降下してきた荷電粒子（群）が大気組成の分子や原子（主に O_2 , N_2 ）、あるいはそれらのイオンと衝突してひき起こす諸々の物理的・化学的現象というふうに定義してよからう。これらの諸現象は主に下部電離層（E 層、90 ~ 120 km の高さ）で生じる。諸現象の主なものとして次のものがあげられる。

(1) 原子、分子が励起され、その結果光が放出され、目に見えるオーロラ（visual aurora）をつくる。(2) 大部分の降下荷電粒子のエネルギーは原子、分子の電離に費やされ、その結果、電離層の電子密度が異常に増加する。この密度増加は太陽などからの電波の吸収を増す。これを Auroral Absorption (AA) という。あるいは Cosmic noise の異常吸収をおこす (CNA)。更に電子密度の増加は電離層の導電率（特に磁場に垂直）を増し（平常時の 100 倍にも達する）。その結果、オーロラ領域の電離層に特殊な電流系（オーロラ・エレクトロジェット）が発生する。（オーロラ地方の電離層には磁気圏から磁力線に沿って相当大きな電場が写像されている。数 mV/meter ~ 数 10 mV/meter）。この電流は地磁気の変動となって地上で観測される。又その強い電流（ $10^4 \sim 10^6$ amp.）によって種々のプラズマ波動が励起される（例えばイオン音波）。従って、レーダーによる散乱としてオーロラを観測することもできる（Radio aurora）。(3) 高いエネルギーをもった降下電子（ > 40 keV）は、オーロラ電子と呼ばれる 1 ~ 10 keV の電子よりも大気中に深く侵入し、制御放制によって X 線を出す（X 線オーロラ）。(4) オーロラの関連現象として、磁気圏内での VLF, LF 周波数帯の電磁波（auroral hiss など）の発生がみられる。これらについて全て記述することは紙面の制約もあり、筆者の能力も足りないもので、適当に取捨選択してお話する。

最初にオーロラの光の正体についてのべる。オーロラの光は窒素、酸素及びそれらのイオンの molecular bands 及び atomic lines が主体である。もっとも有名なのは酸素原子の $^1S \rightarrow ^1D$ 遷移による 5577 Å 線（黄緑）である。酸素原子の低レベルのエネルギー図を図 1 に示す。5577 Å 線はほとんど高さ 100 km 附近に集中して現われるもっとも典型的な黄緑色をしたオーロラの主成分である。100 km という低い高さでは 1D 状態は collisional de-excitation をこうむるため 6300 Å の光はほとんど存在しない(110

秒という長い life time)。しかしながら 200 km 以上の高さになると大気密度がぐんと減り、衝突が非常に少なくなるため 6300 Å の赤みをおびた type A red aurora といわれるオーロラがみられる (200 ~ 600 km)。もっとも卓越した分子バンドとしては N_2 の First Positive (赤-赤外), Second Positive (紫-紫外) 及び Vegard-Kaplan バンド (紫外), N_2^+ の First Negative (青-紫外), Meinel バンド (赤外), 及び O_2 の Atmospheric バンド (赤外), Infrared Atmospheric バンドがある。

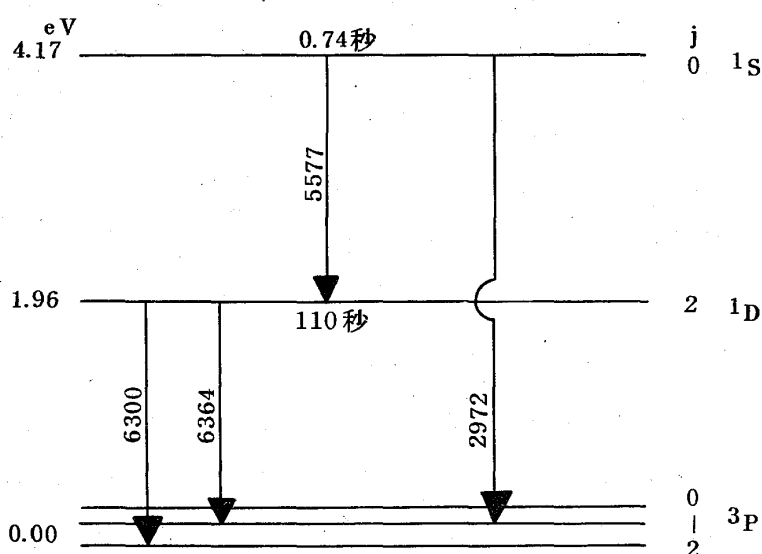


図1 酸素原子のエネルギー準位図

オーロラの形状・運動を知る上で最も簡単な方法は肉眼による観測であろう。記録として残す必要から全天カメラなるものが古くから使われている。現在ではTVカメラ(イメージ-オルシコン)を飛行機にのせ、オーロラの運動を追うという方法もさかんに用いられている。統計的な観測データの解析の結果、オーロラはほぼ90 km から120 km の高さに集中していることが示されている⁽⁴⁾。それではオーロラはどのような地域でみられるのであろうか? 一般には単に高緯度地方ならどこでもみられるのではないかという感じをもっているかもしれないが、実はオーロラが発生するのは非常に限られた地域であり、しかも時間的な制限もある。図2にオーロラの最もよく存在する領域(auroral oval と呼ぶ)を示す。この auroral oval というのはオーロラが発生する領域を示したもので、こ

の領域はオーロラの活動に応じて伸縮する。しかも、オーロラがこの oval 全域にわたってべったり光るのではなく、次にのべるように、オーロラ・アークと呼ばれる一般に複数個の細長い、oval に沿った平行なアークから成っている。これらのアークがオーロラ活動に応じて、非常に興味ある運動・変形を繰り返すのである。

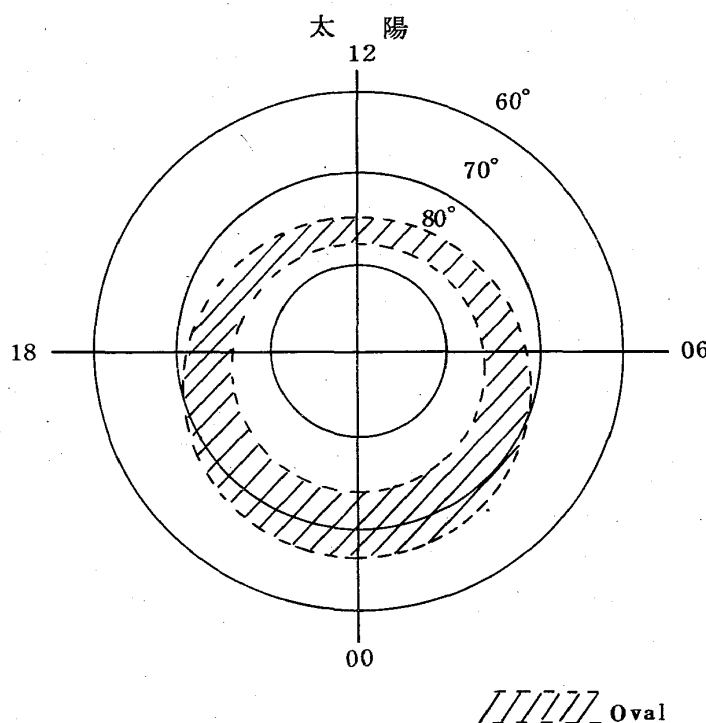


図2 Auroral Oval

太陽フレアによりはきだされた太陽プラズマが磁気圏に到達し、その前面を圧縮するとともに太陽プラズマと磁気圏の相互作用が始まる。それより1～2時間後に最初の auroral substorm が始まり、10時間ほどの間に数回の substorms (各 substormは1～3時間続く) が繰り返えされる。この間、中低緯度の地磁気の水平成分が減り続ける(これを磁気嵐の main phase と呼ぶ)。その後 substormはおさまり、1日から数日を費して、地磁気変動がもとの状態にもどっていく(recovery phase)。これが一つの太陽フレアに伴う磁気嵐の典型的な時間推移である。ここで興味があるのはその substormである。一連の substorms はほぼ同じようなオーロラ活動の繰り返えしとみることが出来るので、一つの substormの間のオーロラ・アークの運動形態についてのべる⁽⁵⁾。

Substorm の始まる静かな時期のアークは真夜中を中心に auroral oval (東西)に

沿って、図3のAにみられるように、1000～2000kmの長さを持ち、南北に10km程度の中をもつ、非常に細長い形状をしている（高さの巾は10～30km）。このようなアーキが南北に数10kmの間隔をおいてほぼ平行に並んで弱く光っている。突然、ovalの南端の方に位置していた一本あるいは二本のアーキが明るく輝き出す（図3のB）。

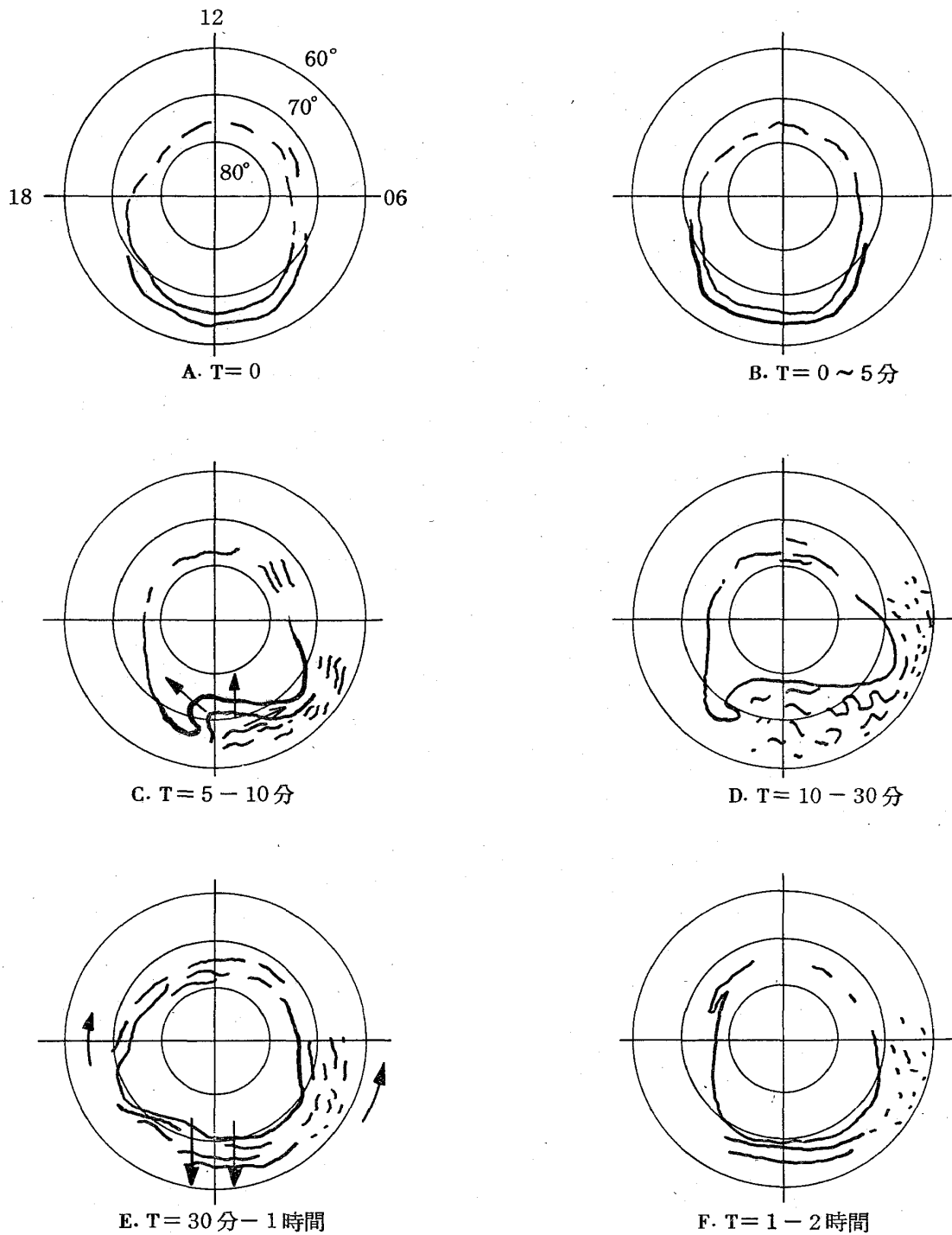


図3 オーロラ・アーキの振舞い

これが auroral breakup の始まりである。そしてこの輝き出したアークが極に向って急速に北上しながら、その西端の部分がくびれだし、そのくびれが西に向って約 1 km/sec の速さで走りだす（図3のC）。これが westward traveling surge と呼ばれるものである。その明るいアークの通り去った後（南側）には、活動的な不規則な形をしたアークが残され、これらが北上しながら、東に $200 \sim 300 \text{ m/sec}$ の速さでドリフトし続ける。この不規則なアークの東端にはしばしば Ω の形をした omega band なるものができている（図3のD）。breakup から30分乃至1時間たつと、真夜中の部分の活動は弱まり始め（東西の運動は続けられるが）今度は全体としてアークがゆっくりと（ 100 m/sec 程度）南下を始め1～2時間後には、不規則でバラバラになっていたアークが元のように oval に沿う均一な細長いアークの列に再編成され直し、光も次第に弱まってくる（図3のE及びF）。

次にどのようなエネルギーの粒子がオーロラを光らせているかについてのべる。粒子の種類としては電子と陽子の二種類である（普通オーロラと呼ぶ場合電子によって光らされているものをさし、陽子によって光らされているオーロラを特にプロトン・オーロラと呼ぶ）。まず電子から話を進める。観測は主にロケット（時には衛星）で行なわれたものである為、それ程データの蓄積はないが、おおよその状態を知るには十分である。

Breakup 前の静かなときの電子の differential energy spectra の例を図4に示す⁽⁶⁾。図5は breakup 及び postbreakup 時のエネルギー・スペクトルである。これらの図より静かなアークに寄与している電子は比較的“軟かく” $1 \sim 10 \text{ keV}$ 以上では急激におちていることがわかる。ところが breakup 以後の荒れた時期のスペクトルは“硬く”， 10 keV 以上の数がぐんと増していることがうかがわれる。エネルギー・フラックスは静かな時で $6 \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ sec ster})$ ，あれた時で数 $10 \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ sec ster})$ 程度である。低エネルギー部分（ $< 1 \text{ keV}$ ）に対する観測はあまりないが、図6にその一例をあげる⁽⁷⁾。 10 keV 附近にピークを有する部分がオーロラに寄与している（オーロラ・アークのないところでは、このピークが観測されない）。

プロトン・オーロラは水素の Balmer 線， H_α ($6563 \text{ \AA}$)， H_β ($4861 \text{ \AA}$) として観測される。一般に降下プロトンのエネルギーは電子のそれに比べて、オーロラ活動に応じてそれほど劇的な変化は示さず、そのエネルギー・フラックスは電子に比べて $10 \sim 30\%$ 程度と推定されている。例えば静かなときで $2 \sim 3 \text{ erg}/(\text{cm}^2 \text{ sec ster})$ という値が出されている。

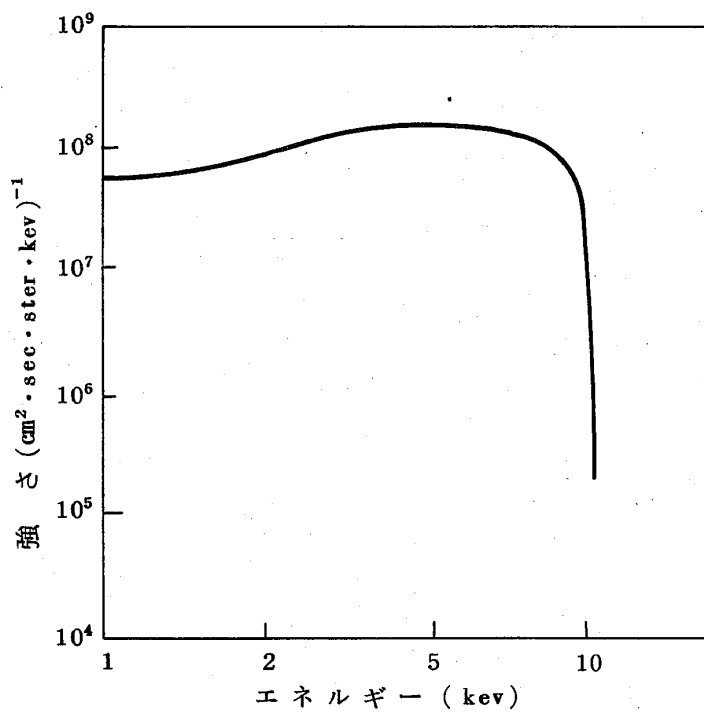


図4 オーロラ活動の静かなときの電子の
differential energy spectrum

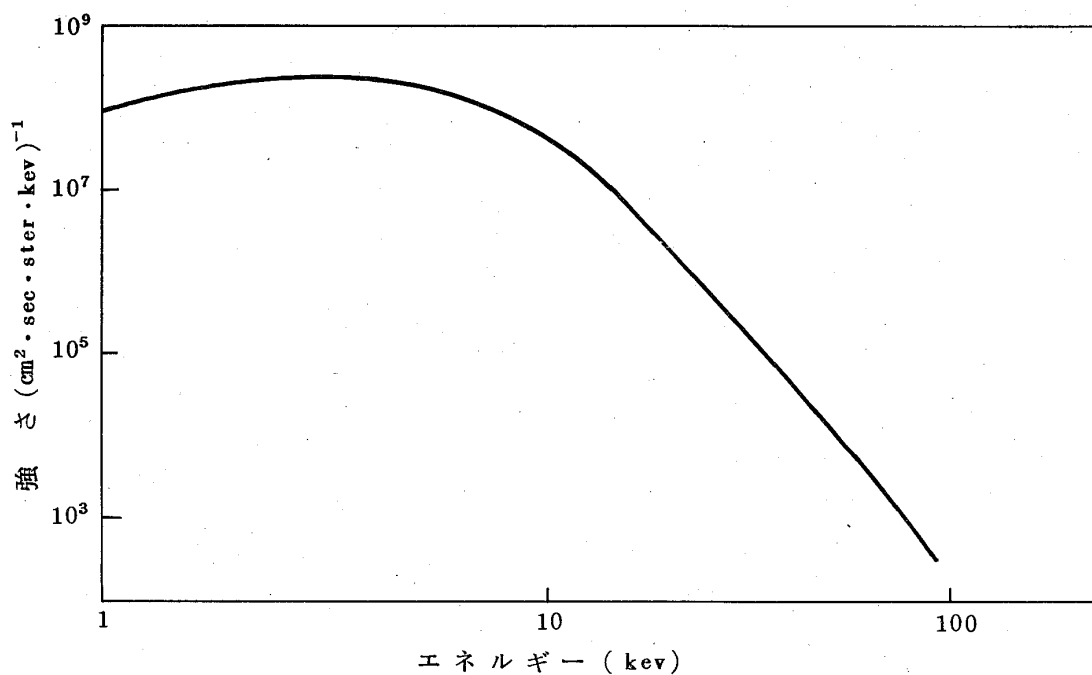


図5 Breakup時及びその後の電子の
differential energy spectrum

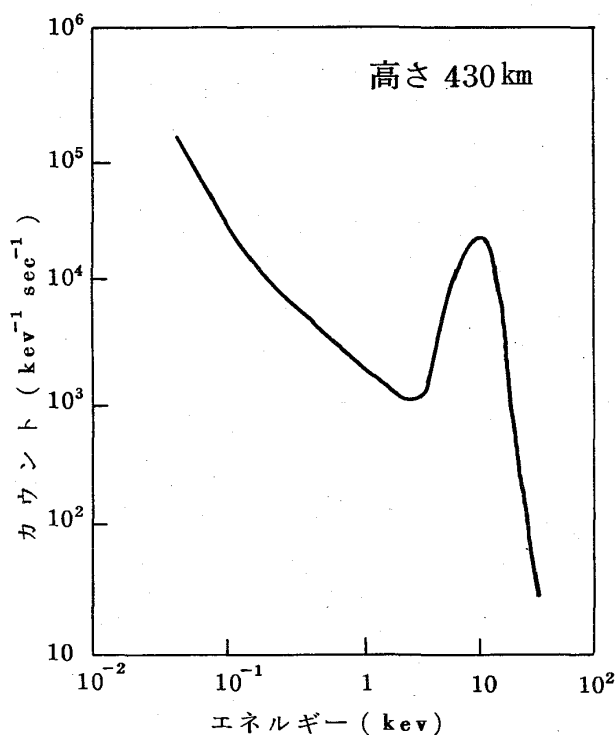


図6 エネルギー・スペクトル

§ 3. 太陽風・磁気圏・オーロラ

前節では、オーロラ現象そのものに着目して話しを進めたが、この節ではそれらの現象をひき起こすエネルギーについてのべることにする。

§1 で述べたように、太陽風なるものがオーロラのエネルギーの源であることは既に知っている。この最初のアイデアは300年ほど前のHalleyにさかのぼるが、その後、オーロラ現象を説明するためにBirkeland, Chapman-Ferraroによって再びひき出された。彼等は、太陽フレアにともなって、プラズマが離散的に飛んでくると考えていたが、Biermannはすい星のtype I飛跡が常に反太陽方向に向いていることに注目し、太陽から径方向に向う粒子の流れを理論化した。Biermannの後をうけて、Chapmanは太陽大気のモデルを作り出した。こういった先駆者の後けて、Parker⁽⁹⁾は太陽風の一般理論を発展させた。太陽風については、ここでは割愛し、他の専門書をみていただきたい⁽¹⁰⁾。

太陽風の地球軌道附近での速度は静かなときで $300 \sim 350 \text{ km/sec}$, 乱れたときで 800 km/sec にも達する。太陽風陽子のエネルギーはほぼ $0.5 \sim 1 \text{ kev}$ あたりにピークがあり、その密度は 10 個/cm^3 程度である。これに対し電子のもつエネルギーは kev よりもはるかに小さい。磁気圏の太陽風に対する衝突断面積を $\pi \times (15 \text{ Re})^2$ ($\text{Re} : 6370 \text{ km}$) とすると約 $10^{20} \sim 10^{21} \text{ erg/sec}$ のエネルギーが磁気圏にぶつかることになる。一方、地球物理的現象として磁気圏内で費やされる総エネルギーは $10^{18} \sim 10^{19} \text{ erg/sec}$ と推定されている。そのエネルギーは主に (1) 磁気圏環状電流 (Magnetospheric Ring Current) といわれる地球を取り囲むように赤道面 (地球半径の数倍のところ) を流れるプロトンに基づく電流, (2) オーロラ現象, (3) 電離層に流れる電流等に費やされる。従って太陽風エネルギーの約 1% が地球磁気圏内に侵入することになる。ここで、次の二つのことがらが問題となる。一つはどのようにして太陽風のエネルギーが、磁場で囲まれた磁気圏内に運び込まれるかという問題。もう一つは太陽風の電子のエネルギーは 1 kev 以下であるのに、どうしてオーロラを起こす 10 kev というような電子が作られるかという問題。これらの問題は将来明らかにされるべき地球物理学上の主要問題で、現在のところ確立された定説はないといってもよからう。数年前までは磁気圏境界面と bow shock (磁気圏前面に太陽風が衝突することによってできた shock front) との間の乱流領域 (magnetosheath, その巾 $1 \sim 2 \text{ Re}$) に存在する種々のプラズマ波動によって、磁気圏内に異常輸送されるという考え方⁽¹¹⁾ が流行していたが、現在では次にのべるリコネクション・モデルがもてはやされている。このモデルは、Dungey⁽¹²⁾ によって提唱されたもので、太陽風によってはこばれてくる惑星間空間磁場が南向きであったとする。地球磁場が北向きであることから、これらが衝突したときに、その接点 (線又は面) において両方の磁場がつながり変わるというものである (図 7)。このリコネクションがどのような速さで進むか等に対する数学的モデルがいくつかあるが、この点にはふれずに、十分な速さでこの磁場のつながり変わりが起るものとして議論を進める。磁気圏前面で生じたリコネクションによりつながり変わった磁場は太陽風によって地球後方に流されるであろう (凍結の理によってプラズマも一緒に後方に運ばれる)。こうして流された一群の磁場は磁気圏尾部の上下から尾部のプラズマを圧縮する。その結果、尾部の中央部に存在する磁気圏中性面のどこかで、磁気圏前面で起こったと同じ磁場のつながり変わりが起こることが予想される (図 7 参照)。磁気圏前面で、この磁場のつながり変わりが生じているらしいという証拠として、南

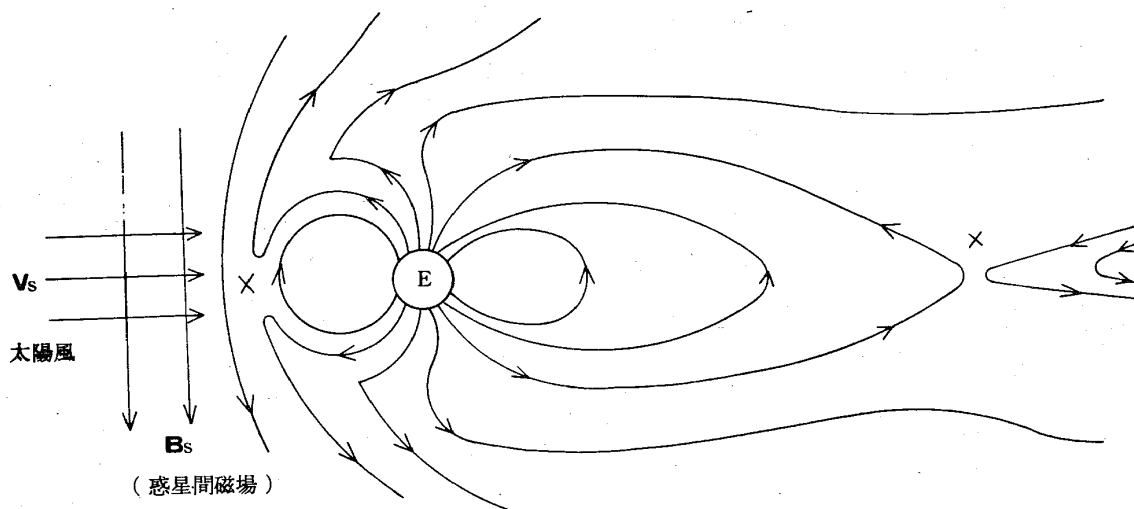


図7 リコネクション・モデル

向きの惑星空間磁場とオーロラとの良い相関が論ぜられている⁽¹³⁾。

このリネクション・モデルの卓越した点は、これまで遮閉されていた磁気圏が局所的にしろ破れ、太陽風と磁気圏内とが直接つながるという事実である。この結果、磁気圏内にプラズマの対流、いいかえるとその対流を起こす電場が生じることになる。この電場は大むね、 $\mathbf{E} = \mathbf{V}_s \times \mathbf{B}_s$ ($\mathbf{V}_s$: 太陽風の速さ; $\mathbf{B}_s$: 惑星間空間磁場) によって与えられる。

$\mathbf{B}_s$ が南向きであるとする電場は磁気圏尾部で夜明け側から夕方側 (東から西) に向かうことになる。Speiser⁽¹⁴⁾ はこの電場と尾部中性面でのリコネクションの定常モデルを仮定して、中性面内での単一粒子の軌道を解き、電場による加速という形でオーロラ粒子 (1~10 keV) が作られるという説を立てている。(筆者は彼の機構で keV 電子が中性面附近で作られることには反対ではないが、加速された粒子が直接オーロラ粒子となって電離層まで降下してオーロラを光らせるという考え方には反対である。というのは磁気圏中性面を磁力線に沿って電離層まで投影した場合、オーロラ領域よりも極側にくるため、オーロラに直接寄与しているとは考えにくい)。

ここで、オーロラの位置と磁気圏の構造との関連について少しのべる。オーロラの理論において非常に重要なポイントは、オーロラが閉じた磁力線上にあるのか、それとも開いた磁気圏尾部を構成する磁力線にあるのかということである。図7の点線はその境界を示す。即ちその点線より高緯度地方の磁力線は閉じていず、磁気圏尾部を構成する磁力線にあるのかということである。図7の点線はその境界を示す。即ちその点線より高緯度地方の磁力線は閉じていず磁気圏尾部につながっている。この境界の定義は、現実には、かな

りあいまいで、しかも太陽風の状態にも大いに依存すると思われるが、一応、オーロラはこの境界よりも低緯度に位置しているものと考えてよからう。図の斜線をほどこした領域はプラズマ・シートと呼ばれ温かいプラズマで満たされている領域である。このプラズマ・シートなるものがどのようにして出来るのかは未だ解かれていないが、電子のエネルギー分布のピークは $0.1 \sim 10 \text{ keV}$ 、陽子のピークは $1 \sim 20 \text{ keV}$ にある。(Speiser の機構はこのプラズマ・シートの生成に有効なのではないかと思う。このプラズマ・シートのすぐ内側(地球側)の端がオーロラ・アークの存在する(即ち auroral oval) 低緯度側の境界に相当しているのではないかと思う。)このプラズマ・シートのすぐ内側(あるいはオーバーラップして)に磁気圏環状電流(Ring Current)が流れ、更にそれに内接して plasmasphere と呼ばれる地球とともに回転する領域が存在する。その境界面(plasmapause)においてプラズマ密度が 10^3 cm^{-3} (外側)に急激に減少している。

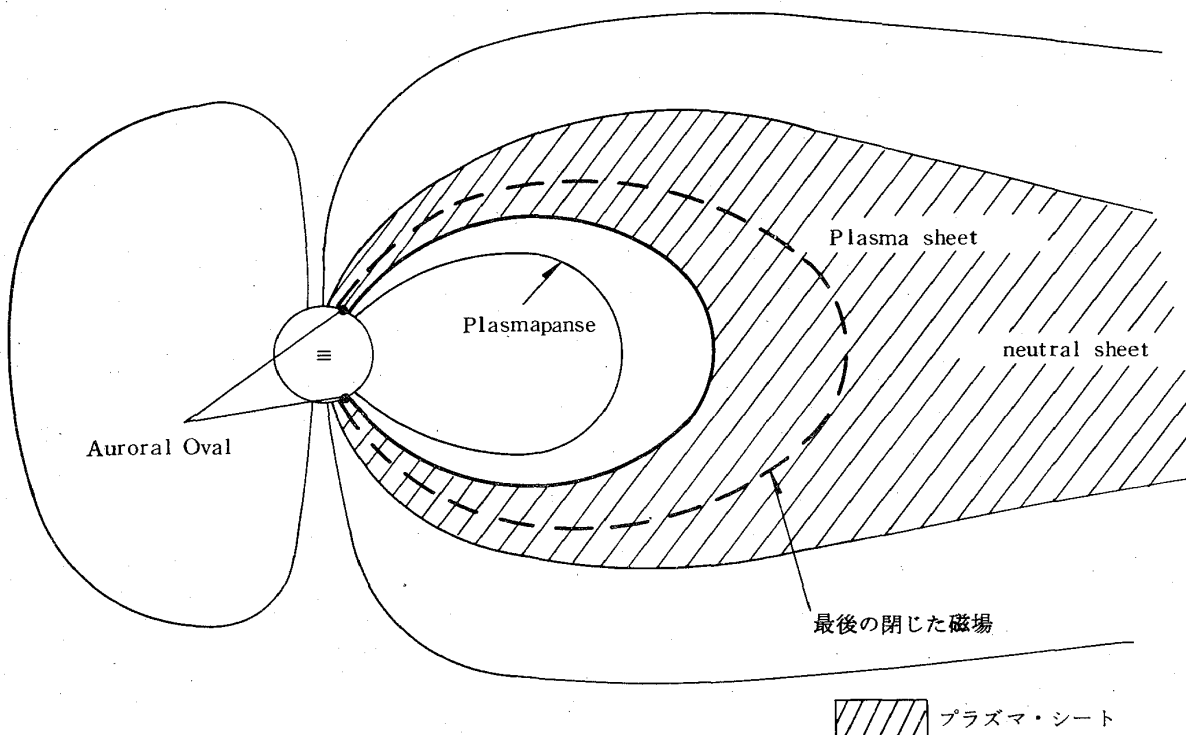


図8 磁気圏尾部の構造

ここで、オーロラに至るまでの問題点を総括すると次の三つに分けられると思う。

- (1) 太陽風(惑星間磁場も含め)と磁気圏の相互作用及びその結果、エネルギーがどのようにして磁場圏尾部まで運ばれるか。
- (2) その結果尾部(中性面も含め)でどのような加速機構によって、プラズマ・シート

が形成されるか。

(3) プラズマ・シート内の荷電粒子がどのようにして電離層まで下降し、オーロラを作るか。

(1)の問題に関して、最近 Kennel⁽¹⁵⁾が興味ある理論を提唱している。(理論そのものにはかなり不明な点があるが)。彼の理論は磁気圏前面で南向きの磁場(惑星間)にともなう、磁場のリコネクションが生じるという前提から始まる。観測データの統計によると惑星間磁場が南を向いてから30分ないし1時間後に substorm が生じている。彼はこの時間遅れを説明するためにリコネクションを生じた電場が電離層による短絡効果を受け、そのために電場が弱められ、従って、磁気圏内のプラズマ対流の速度が低下するためであると考えた。(2)の問題は未だ解かれていない。(3)の問題に関しては実験的にも理論的興味ある結果が出はじめている。これについては節を改めてお話しする。

§ 4. オーロラ・アークの生成

最近の衛星ロケットによる観測では、オーロラ・アークにともなう磁力線に沿う電流 (field-aligned current) が存在することがほぼ確かだとされている⁽¹⁶⁾。一方、理論的に、磁力線に沿う電流がある値を越えるとプラズマ不安定性が生じ、磁力線に沿って異常抵抗が現われることが予想されている⁽¹⁷⁾。その値として 10^{-6} amp/m² という値がだされている。この値は観測されている電流値とほぼ同じ程度の大きさであることから、磁力線電流によって、現実にはプラズマ不安定性(イオン・サイクロトロン波)が生じていることが十分うかがわれる。もしこのような不安定波動が磁力線に沿って生じているとするならば、磁力線に沿ってミラー運動をしていた粒子(オーロラは閉じた磁力線上にある)は強いピッチ角拡散を受け Loss cone におちる。即ち電離層に降下するであろう。又前にのべたように異常抵抗が磁力線沿いに発生するであろう。異常抵抗が発生すると磁力線に沿って相当の電位差(例えば 10 kv)が出来、その結果、粒子が電場加速を受けてオーロラ粒子となって電離層に降下するであろう。従って問題はどのようにして磁力線に沿う電流が作られうるかということになる。

この問題に対して、最近電離層の不均一性が重要な役割りを演じているという立場の理論が二、三出はじめている^{(18),(19),(20)}(文献(18),(20)は明らかに不適当な仮定のもとに理論化されている故、ここではとりあげない)。筆者等の理論(19)も現実問題として

佐藤 哲也

かなり無理がある。そこで最近筆者等⁽²¹⁾は問題を出来る限り厳密に解くことを試み、その結果、観測と非常に良い一致を示すことがわかった(文献(16)の Park と Cloutier の観測)。この理論的モデルについて簡単にのべる。

例えば北半球のオーロラ領域の電離層を“active”であるとする。この“active”な領域から出る磁力線につながる磁気圏及び南半球の電離層を“passive”であるとする。そして active な電離層で生じた擾乱(電気ポテンシャル)が passive な領域の応答を受けもとの擾乱に帰還されるというループを考える(図9)。そしてこの閉じたループが、ある形の擾乱に対し正帰還、いいかえると不安定となり、擾乱が成長することを示す。解析の結果、この不安定となる擾乱の形が、実際のオーロラ・アークの形とよい一致をしていることが示された。

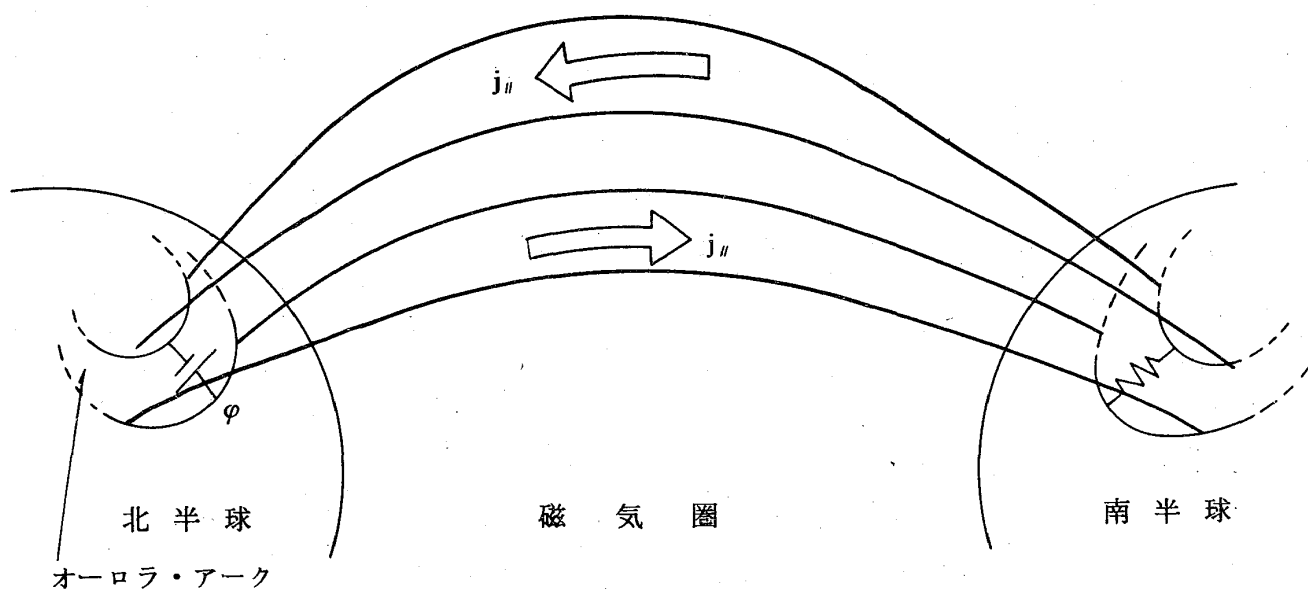


図9 電離層と磁気圏のカップリング

磁気圏の応答が、非常に低周波の入力に対して、マックスウェル及び運動方程式から出発して、磁力線に沿っては(//)

$$\mu \frac{\partial j_{||}}{\partial t} = \nabla^2 E_{||} \quad (\mu ; \text{透磁率}) \quad (1)$$

磁力線に垂直には ($\perp$)

$$j_{\perp} = \frac{1}{\mu V_A^2} \frac{\partial E_{\perp}}{\partial t} \quad (V_A; \text{アルフベン速度}) \quad (2)$$

で表わされることが求められる。(j; 電流密度 : E; 電場)。(1)(2)はそれぞれ

$$\varphi_{\parallel} = L \frac{\partial I_{\parallel}}{\partial t} \quad (3)$$

$$I_{\perp} = C \frac{\partial \varphi_{\perp}}{\partial t} \quad (4)$$

に変形される。(φ; ポテンシャル : I; 電流)

この結果より、磁気圏は磁力線に沿うインダクタンスと磁力線に垂直なキャパシタンスで表わされることが知る。(L, C は磁気の形状・プラズマ密度・磁場の大きさなどから求めることができる)。次に passive な電離層は中性粒子数が荷電粒子数を圧倒していることから(弱電離プラズマ)、その特性は単に抵抗Rで代表される。従って, passive な領域の応答はL, C, R よりなる電気回路で模擬されることになる(図10)。

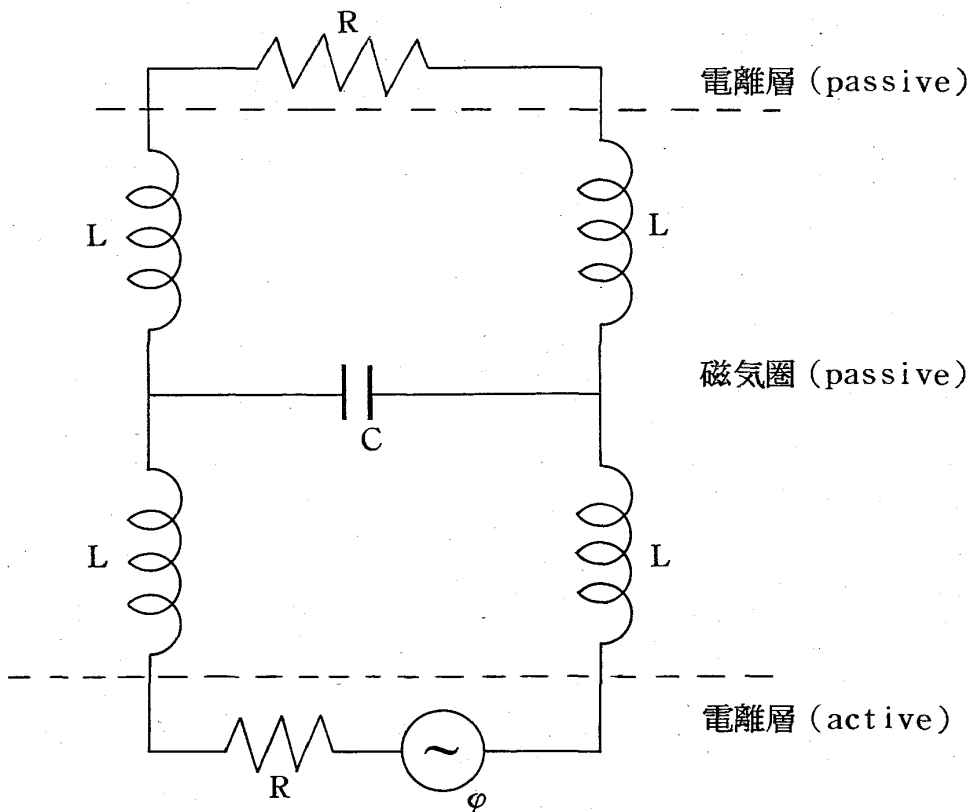


図10 電離層と磁気圏の結合を示す電気等価回路

次に“active”な電離層の電流と電圧の関係を求める。質量及び電流の保存式より次の関係式が得られる。(x; 南向き)

$$\frac{\partial n}{\partial t} + V_x \frac{\partial n}{\partial x} = \frac{j_{||}}{he} - 2\alpha Nn \quad (5)$$

$$\frac{\partial j_x}{\partial x} = -\frac{j_{||}}{h} \quad (6)$$

$$j_x = -\sigma_p \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (7)$$

ここに n は電子密度 (擾乱成分), N は定常電子密度, V_x は電離層に存在する定常電場 (西向き) によるドリフト速度 ($\sim E_0/B_0$), α は再結合係数, h は考えている電離層の巾 (高度 130 ~ 160 km を対象とする), e は電荷量, そして σ_p は電離層の導電率, をそれぞれ示す。(4) - (6) 式において, 擾乱は東西方向に非常に長いと考え, その方向の微分は無視した。

前に議論したことから passive な領域の応答は次式で与えられる。

$$\phi = z j_{||} \quad (8)$$

ここに z は応答関数で (L, C, R を含むオペレーター)。(4) 式から (7) 式で閉じた方程式となり, これらから擾乱に対する分散関係を求めることができる。解析の結果, 西向きの電場 (E_0) が数 mV/meter から 10 数 mV/meter であるとする, 東西に 1000 km, 南北の波長が数 10 km の擾乱が最も大きな成長率をもって成長する (数分の成長時間をもって) ことが示される。更にその時流される磁力線に沿う電流 ($j_{||}$) が大体 3×10^{-6} amp/m² となり, イオン・サイクロトロン波を励起するに十分であることが示される。その他細かい点においても観測結果 (前述の Park と Cloutier の実験) と良い一致を示している。このことから筆者等の理論で静かなときのオーロラ・アークの説明が十分できるのではないかと自負している。

§ 5. おわりに

神話の時代から現代までのオーロラに対する解釈をごく粗っぽくお話したが, 重要な

点で、とりこぼしているところが多々あると思いますが、筆者のいたらぬところとして御勘弁願いたい。

オーロラという現象がただ単に“光る”というだけの問題ではなく、複雑に諸々の因果関係が入り乱れた結果として現われる一つのアウトプットであるということを理解願えれば満足である。即ち太陽風というインプットがいくつものシリーズに連なったブラック・ボックスを通り抜けた後最後に出てくるアウトプットがオーロラ現象である。しかも各ブラック・ボックス間には帰還ループが存在し（電離層と磁気圏の相互作用など）、問題を更に複雑にしている。しかも信号（エネルギー）が伝わる媒質が有限（境界の影響）で、非平衡、しかも完全電離プラズマ（磁気圏）から弱电離（電離層）、更には絶縁媒質（高度100 km 以下）にまで連続的につながっているということも理論的研究をむづかしくしている。

「風」吹けば「桶屋」がもうかる式に、「太陽風」が吹けば「オーロラ」が光るまでの長い物語が、一連の理路整然とした因果関係で話しができる日が近いものと信じる。（盲人や猫はぼつぼつ登場してきているが、鼠の数（オーロラ粒子の数）が増えるあたりの論理がまだ不十分なようである）。

参 考 文 献

- (1) W. Petrie, KEOEEIT — The Story of Aurora Borealis
(The Macmillan Company, New York, 1963)
- (2) S. Chapman, Aurora and Airglow, edited by M. McCormac
(Reinhold Publishing Corporation, New York, Amsterdam, London, 1967) p.15
- (3) H. Alfvén, see Cosmical Electrodynamics (Oxford, London, 1950)
- (4) A. Egeland and A. Omholt, Aurora and Airglow, (前述) p. 143
- (5) S-I. Akasofu, Polar and Magnetospheric Substorms
(Springer, New York, 1968)
- (6) B. A. Whalen and I. B. McDiarmid, Atmospheric Emissions, edited by
M. McCormac and A. Omholt (Van Nostrand Reinhold Company, 1969)
p. 93
- (7) L. H. Westerlund, PhD. Thesis, Rice University, Houston, Texas (1968)

- (8) R. H. Eather and S. B. Mende, J. Geophysical Res. 76, p. 1746, 1971; *ibid.* 77, p. 660, 1972
- (9) E. N. Parker, Interplanetary Dynamic Processes, (Interscience, 1963)
- (10) J. C. Brandt, Introduction to the Solar Wind (W. H. Freeman, San Francisco, Calif., 1970); Dessler, Rev. Geophysics, 5, p. 1, 1967, etc.
- (11) W. I. Axford and C. O. Hines, Can. J. Phys. p. 1433, 1961
- (12) J. W. Dungey, Phil. Mag. 44, p. 725, 1953; Phys. Rev. Letters, 6, p. 47, 1961
- (13) A. Nishida, J. Geophys. Res. 73, p. 1795 及び 5549, 1968; R. L. Arnorlly, J. Geophys. Res. 76, p. 5189, 1971.
- (14) T. W. Speiser, J. Geophys. Res. 70, p. 4219, 1965; *ibid.* 72, p. 3919, 1967
- (15) C. F. Kennel, preprint, 1971.
- (16) J. C. Armstrong and A. J. Zmuda, J. Geophys. Res. 75, p. 7122, 1970;
R. J. Park and P. A. Cloutier, J. Geophys. Res. 76, p. 7714, 1971;
B. A. Whalen and I. B. McDiarmid, J. Geophys. Res. 77, p. 191, 1972.
- (17) J. M. Kindel and C. F. Kennel, J. Geophys. Res. 76, p. 3055, 1971.
- (18) G. Atkinson, J. Geophys. Res. 75, p. 4746, 1970.
- (19) T. Ogawa and T. Sato, Planet. Space Sc., 19, p. 1393, 1971.
- (20) F. V. Coroniti and C. F. Kennel, J. Geophys. Res. 77, p. 2835, 1972.
- (21) T. Sato, T. E. Holzer, and T. Ogawa, 投稿予定