

# 太陽-地球系の新しい視点 - 変動する太陽環境の中の地球

地球電磁気・地球惑星圏学会高校地学教育ワーキング・グループ：

中井仁<sup>o</sup>（大阪府立茨木高等学校），荻島智子（目白学園中学高等学校），  
森尻理恵（産業技術総合研究所）

**要約：**高校生を対象に、地球が磁気圏と呼ばれる固有の空間を有すること、また磁気圏を介して地球環境が太陽環境の影響下にあることを理解させるためのプログラムを提案する。全体構成を示し、その中の2つの単元（「磁気圏とオーロラ」、および「コロナ爆発の影響」）について詳述する。

## 1．はじめに

20世紀、特に人工衛星による観測が可能になった1960年代以降、地球環境が太陽の動的な活動の影響を常に受けていることが分かってきた。オーロラの出現や地表における地磁気の短期変動は、地球磁気圏が太陽活動の影響を受けて起こす擾乱がその原因である。また、通信や資源探査などのために人工衛星を利用することが日常化した今日、太陽活動が社会的な注目を引く事態が生じている。たとえば、観測衛星「あすか」は、X線天文衛星として数々の成果を上げた後2000年7月、太陽活動が地球大気にもたらした影響のために機能不全に陥った。また、2003年10月に起こった資源衛星「みどり」の事故は、宇宙環境の厳しさを我々に改めて認識させた。こうした観測衛星の事故は、もちろん避けるべき事ではあるが、身近に報じられる事故が一般の人々の地球近傍宇宙への関心を惹起することにもなった。

従来から地学の教科書には、「太陽風」や「磁気圏」等の用語の説明が含まれている。しかし、そこから得られる太陽-地球系の概念は、太陽活動は地質学的な時間スケールにおいて安定していて、地球は太陽から定常的かつ永続的な影響を受けているというものである。本稿では、太陽-地球系のもう一つの側面に触れ、地球はダイナミックに変動する太陽環境の中にあり、その変動に対して地球が、磁気圏を介して複雑で興味深い応答をしていることを紹介する。第2節では、高校生に授業をすることを念頭において、「講義の概要」を述べる。第3節では、第2節にあげた項目のうち第7章と第8章に

ついて、それぞれテキスト例を示す。

## 2．講義の概要

太陽の中心部から地球大気までの空間で起こる現象を、なるべく身近な出来事と関連させて紹介することを念頭において、以下の章立てを考えた。

### （1）太陽の光

身近な太陽光線を取り上げて、虹が見える理由、太陽光のスペクトルを紹介し、電磁波の種類をあげる。可視光線以外の周波数域を観測することによって、より多くの情報が得られることに気づかせる。

### （2）太陽のエネルギー源

太陽定数を示して、燃焼等の化学変化によっては太陽が放出しているエネルギーをまかなうことができないことに気づかせる。直達日射量の測定を行う。太陽の標準モデルに因って、内部の物理状態を説明。核融合反応、エネルギーの伝搬についての考察を行う。

### （3）光球面とコロナ

太陽表面の物理状態について説明する。スペクトル中の暗線の存在とその意味に触れる。スペクトル管による輝線、および太陽光の暗線の直視観測を行う。太陽の構成元素を示し、そこから太陽の歴史が読みとれることを指摘する。コロナの物理状態を解説して、熱伝導について説明する。太陽風について触れる。

### （4）黒点

黒点の画像から太陽の自転速度を計算する。微分回転、太陽磁場および黒点の11年周期変化、蝶型図を示して、バブコック説を紹介する。11年周期発見の経緯を説明して、その意義に気づかせる。

### （5）フレアとコロナ爆発

科学衛星「ようこう」その他が捉えたフレアの画像を示し、フレアのモデルを説明する。コロナ爆発(CME)について触れる。フレア発見の歴史にも触れる。

### （6）太陽風と惑星間空間磁場

彗星の尾の研究から太陽風の存在が予測されたことを述べ、太陽風の観測例を示す。太陽風速度と粒子密度の周期的な変化と、太陽の自転との関係に気づかせる。電磁誘導の法則から磁場の凍結についての定性的な説明を行

い、太陽磁場が惑星間空間に拡張する機構を紹介する。磁場のセクター構造にも触れる。

### (7) 磁気圏とオーロラ

地表磁場の磁力線を延長していくと、宇宙に到達することに気づかせる。地球磁場と惑星間空間磁場との間に形成される境界層を説明し、ジオテイル衛星等の人工衛星による観測データを示す。磁気圏発見の歴史にも触れる。オーロラの画像を示し、発光のメカニズム、降下粒子生成の機構について説明する。オーロラが惑星間空間磁場と地球磁場の相互作用によって生じることに気づかせる。

### (8) コロナ爆発の影響

コロナ爆発の一例を挙げ、コロナ観測から地表観測に至る過程を、データをもとに解説する。磁気嵐に伴って放射線外帯に発生する高エネルギー電子について、リングカレントのメカニズムと観測について触れる。

### (9) 地球大気と温室効果

金星、火星の大気と比較しながら地球大気が保っているバランスに気づかせる。温暖化を題材にして地球大気の熱収支について述べる。温暖化ガスと非温暖化ガスの違いについて触れる。マウンダー極小期を紹介し、太陽活動と気候変動の関連について説明する。全放射量の変動に関するデータを示す。

邦語テキスト中での観測衛星の表記は、適宜分かりやすいと思われる表記を行った。「ようこう」、ジオテイル等の仮名もしくはカタカナ表記によるもの、GOES等の略称を用いたものがあるが、それぞれに統一して使用する。

## 3. 第7, 8章のテキスト

### 7 オーロラと磁気圏

方位磁針(コンパス)は、地球磁場の磁力線に沿った方向にN S極が向き、我々に方位を教えてくれる。日本がある北半球の中緯度では、地磁気の磁力線は、南から北に向かって水平面に入り込んでいる。もし磁針を均質に作れば、そのような磁針は北の方が下に向かって傾くはずである。だから、方位磁針は、水平を保つようにS極の方を少し重く作ってある。磁針が鉛直面で回転できるようになっている伏角計という特殊な磁針を使うと、水平面に対する磁力線の向きを観察することができる(図7-1)。磁力線は、赤道付近ではほぼ水平面に平行だが、緯度が高くなるほど伏角が大きくなる。ただし、磁北極、磁南極は地理的な北極、南極とは一致しないため、地理的緯度と地磁氣的緯度は異なる

った値になる(磁北極は北緯82度、西経113度付近に位置する)。例えば、茨城県柿岡の地磁気観測所の地理的緯度は36.2度だが、地磁気緯度は26.6度である。柿岡を通る磁力線を南の方に

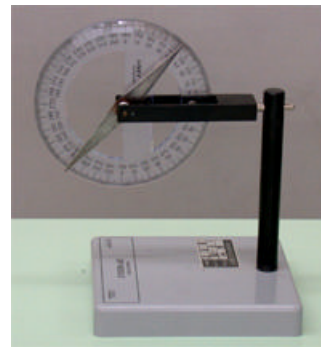


図7-1 伏角計

向かってたどっていくと、赤道付近の上空で1500~2500 kmの高度に達する(図7-2参照)。国際宇宙ステーション

の飛行高度(約380 km)をはるかに超える立派な宇宙である。宇宙でなんらかの電磁気的な変動が生じると、磁力線を伝ってその変化が磁針に伝わってくる。精密な磁力計があれば、その変化を測定することができる。磁力線によって宇宙と地表が結びついているのである。磁北極

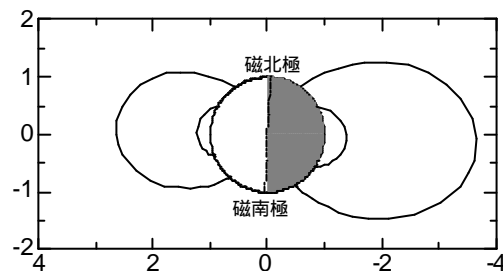


図7-2 地表から宇宙にのびる磁力線。日本付近を通る磁力線と、磁気緯度55度付近を通る磁力線を示す。左が昼、右が夜半球である。目盛りの数字は、地球の赤道半径(=6378 km)を単位としている。同じ、磁気緯度を通る磁力線でも、昼間側は太陽風によって圧縮されるため、夜側のほうがより高々度に達する。

や磁南極の近くでは、地表の磁力線はさらに深宇宙へとつながっている。

陽子や電子といった電気を帯びた粒子(荷電粒子)は磁力線に沿って運動するという性質がある(詳しくは章末の解説を参照)。そのため、宇宙空間の荷電粒子は地磁気の磁力線に沿って地上に向かって振り込んでくることのできる。極地方の空を彩るオーロラは、宇宙から大量に降下してきた荷電粒子が大気原子を励起・発光させることによって生じる現象である。図7-3参照)。図3-3で見たスペクトル管の(場合は、電圧によって加速された電子が、ガラス

管内の水素原子を励起し、決まった振動数の光を放射した。オーロラの発光は、これと同じ原理で起こる。ただし、オーロラの場合、大気中の酸素原子が出す光が、可視領域における光の

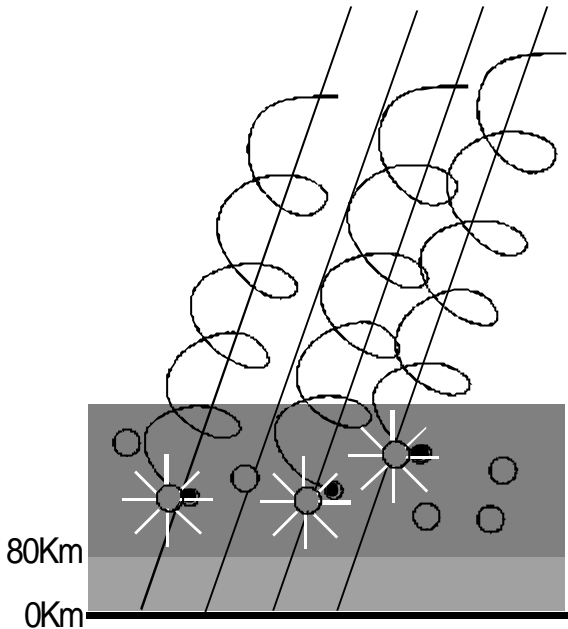


図7-3 宇宙から磁力線に巻き付いて降り込んでくる荷電粒子が大気中の原子を発光させる。

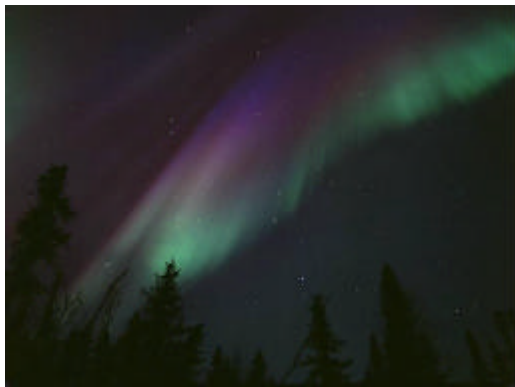


図7-4 オーロラ。(上)2000年3月30日フェアバンクス(アラスカ)(下)1999年1月10日イェロウナイフ(カナダ)

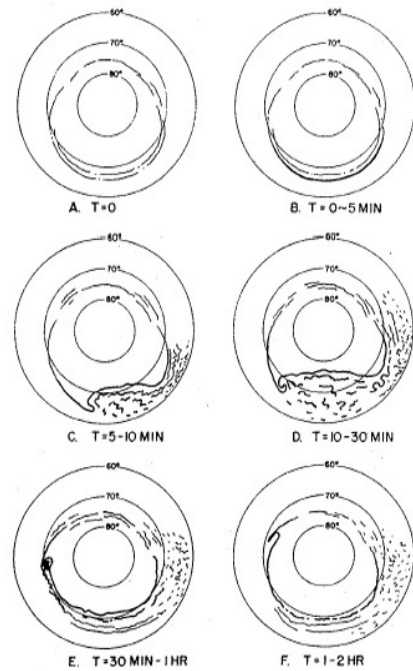


図7-5 オーロラ発達の模式図。各図の上方に太陽が位置する。同心円は中心の方から磁気緯度80度、70度、60度を示す。

最も主なものである。オーロラが現れるのは高度約80km以上の超高層大気中である(次章に紹介する電離圏とほぼ重なる)。地表からオーロラを眺めたとき、地平から天頂を越えて反対側の地平まで見渡せたとして、差し渡しおよそ500kmになる。しかし、オーロラのスケールは、それをはるかに越える。その上、オーロラは、図7-4のように様々な形態をもって現れる。そのため、地上観測からオーロラ活動全体を把握することは極めて困難である。赤祖父(1960)は、全天カメラで撮った膨大な枚数のオーロラ写真を分析して、オーロラが磁極をとり囲むようにして帯状に連続していることなど、オーロラの全容を初めて明らかにした(図7-5)。その後、オーロラ撮像装置を搭載した人工衛星によって、オーロラの全体像が1枚の画像に納められるようになった。そして、時々刻々変化するオーロラを捉えた見事な映像が、オーロラについての我々の理解を一層深めることに貢献した。

観測衛星の一つであるポーラー衛星が、1996年12月10日の16:31UTと17:55UT(世界時)に撮ったオーロラ像を、図7-6に示そう。図は、光の強さを疑似カラーコードを用いて示したもので、赤い部分が特に光度の強い領域である。撮像は紫外線領域を用いている。太陽は、画面

の上方右約 30 度の方向に位置している。図には、海岸線が、地理的な緯度、経度線と共に、白線で描かれている。これらの画像と、図 7-5 を見比べてみよう。図 7-6 の左図は、オーロラが活発に活動し始める前の A あるいは B の状態で、右図は最も活発な D の状態の時と分かる。

図 7-6 右の画面下のやや右寄りに、北海道が見えている。このように日本列島は、オーロラが出現する地域からはかなり離れたところに位置しているので、残念ながら日本からは全天に広がるオーロラを見ることはできない。ただし、中部日本以北では北の空が赤く光ることがある。これはオーロラ帯上空に発生したオーロラの上空部分を見ているのである。アラスカやカナダ、北欧へのオーロラ見学ツアーは、特に日本人の間で人気が高い。幽玄と云う、光と闇の間に独特の芸術性を見いだす、伝統的美的感覚に訴えるものが大きいのもかもしれない。

活発なオーロラが出現したとき、宇宙からオーロラ帯に流入するエネルギーは  $1 \times 10^{11}$  W を越える。例えば、活発なオーロラが 30 分間続くと、総量で  $1 \times 10^{15} \sim 10^{16}$  J のエネルギーになる。これはマグニチュード 7 クラスの地震の規模に匹敵する。これだけのエネルギーが、どのようにして極地方上空に供給されるのだろうか。また、図 7-4 や図 7-6 のように、オーロラの活動は時によって大いに異なる。その原因は、何だろうか。

我々は、前章において惑星間空間が、太陽から吹き出してくるプラズマ(太陽風)と磁場(惑星間空間磁場)によって満たされていることを知った。また、本章の始めには、地上の磁力線が宇宙空間まで伸びていると述べたが、それは一体どこまで伸びているのだろうか。地球の磁力線と太陽の磁力線は、繋がっているのか、それともそれぞれ独立を保っているのだろうか。

1962 年人工衛星エクスプローラ 10 は、惑星

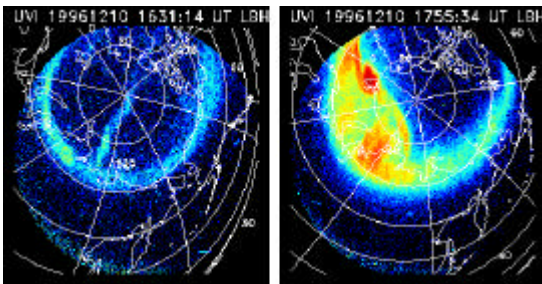


図 7-6 ポーラー衛星によって撮られたオーロラ(1996 年 12 月 10 日)の全体像。同じ日の、活動の静穏な時と活発な時のオーロラ。このような大きな違いは、なぜ生じるのだろうか。

間空間磁場と地球の磁場の間にはっきりした境目があることを発見した。前章で説明したよ

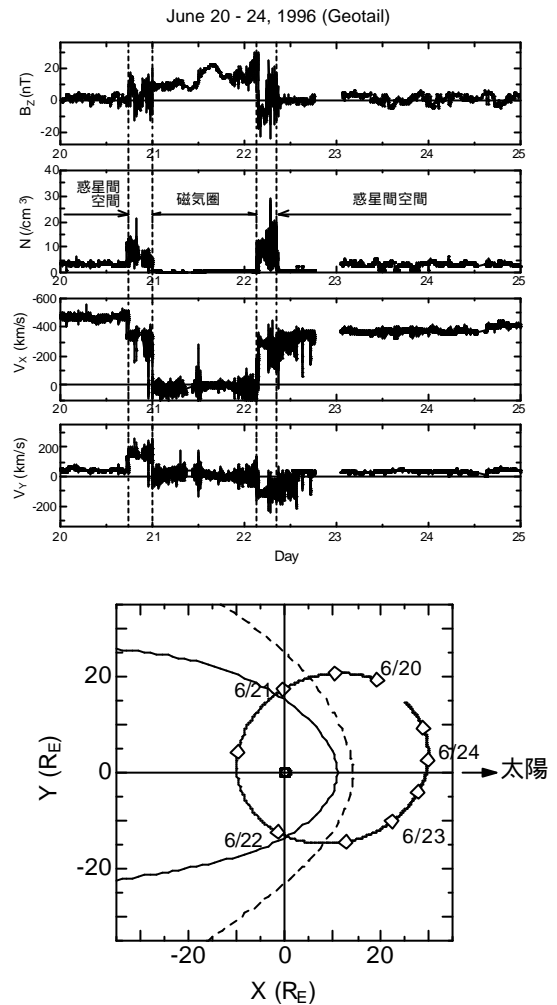


図 7-7 (上)1996 年 6 月 20 日-24 日の間にジオテイル衛星によって観測された磁場の南北成分( $B_z$ )とプラズマの密度( $N$ )と速度( $V$ )。 (下)ジオテイル衛星の軌道を北極上方から見た図。中央の小円が地球。磁気圏境界面を実線で、衝撃波面を破線で示す。目盛りの数値は、地球半径( $1R_E=6378\text{km}$ )を単位として地球の中心からの距離を表している。

つに、太陽風は磁場を凍結し、磁力線を惑星間空間に引き出してくる。このことは、立場を変えると、惑星間空間磁場が太陽風のプラズマを閉じこめているとも言える。そのため、太陽風は、惑星間空間磁場から離れて他の磁場領域、例えば地球磁場の領域に侵入することができない。このようにして、地球近傍の宇宙空間に地球磁場と惑星間空間磁場の境界ができるのである(より詳しくは、章末の解説を参照)。

図 7-7 は、1996 年 6 月 20 日から 24 日の間にジオテイル衛星が観測した磁場の南北成分( $B_z$ )

粒子密度 ( $N$ )、太陽風速度 ( $V_x$ : 地球から見て太陽の向きを正とする /  $V_y$ : 地球の公転方向と逆向きを正とする)、およびジオテイル衛星の軌道を示した。この図から、磁気圏とその周辺について多くのことが分かる。

(問) 図 7-7 のグラフと軌道図から読みとれることを上げてみよう。

図 7-7 から分かるように、地球近傍には、太陽風が占める惑星間空間に比べてより強い磁場とより希薄なプラズマによって占められた、太陽風が侵入してこない空間がある。この空間を磁気圏と呼んでいる。また、磁気圏と惑星間空間との境目を磁気圏境界面と言う。軌道図に

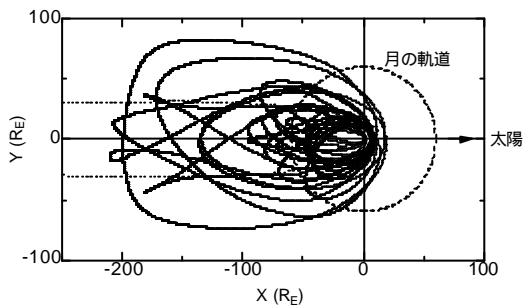


図 7-8 ジオテイル衛星が 1992 年から 1995 年にかけて探査した磁気圏尾部の領域。月の軌道ならびに磁気圏境界面をそれぞれ破線と点線で示す。

は、多くの観測から得られた磁気圏境界面と、磁気圏が存在することによって太陽風中に生じる衝撃波面の平均的な形を、それぞれ実線と破線の曲線で書き入れてある。

磁気圏は、図のように、太陽に面した方は圧縮され、反対側は引き延ばされて、彗星のように尾(磁気圏尾)を引いている。図 7-8 にジオテイル衛星が 1992 年から 1995 年にかけて探査を行った軌道を描いてある。点線を用いて表した曲線は平均的な磁気圏境界面である。磁気圏尾が、地球半径の 200 倍を越えて伸びていることが確認された。

このように、地球は太陽風が容易に入り込むことができない太陽と反対側に長く伸びる独自の空間(磁気圏)を従えながら、公転軌道を回っているのである。しかし、上に見たオーロラの形態の大きな変化は、太陽風のエネルギーが磁気圏に侵入することによって、生じることが分かっている。それには、太陽風がコロナから引っ張ってきた惑星間空間磁場が、大きく関

わってくる。

図 7-10 に典型的な事例を示そう。オーロラ撮像装置を搭載して、北極上空約 5 万 km の軌道を飛行していたポーラー衛星が、1996 年 12 月 10 日 16:00 - 19:00 (世界時) の間に撮影したオーロラ画像である。撮影した画像を地磁気座標に変換してある。地磁気座標は、磁北極、磁南極を 90 度、-90 度とした座標である。図 7-10 の最初の図は、図 7-6 の左図を変換したものである。図 7-6 では、オーロラの低緯度側の端が緯度 70 度付近に在るのに、図 7-10 では、より低緯度の 64 度付近に見えるのは、座標変換の結果である。オーロラは磁極を取り囲むように現れるので、多くのオーロラ現象を比較検討するためにこのような座標が用いられる。図 7-10 の各画面の上方に太陽がある。オーロラ像の上半分が欠けたようになっているのは、ポーラー衛星が北極上空反太陽側に位置していたため撮像装置の視野に収まらなかったこと、または太陽光のために撮影が不可能だったことによる。

太陽風の様々な物理量の中でオーロラの活動に最も強く関係するのは、惑星間空間磁場の南北成分 ( $B_z$ ) であることが分かっている。図 7-10 には、オーロラ画像と共にウィンド衛星が観測した多くのデータの中から、 $B_z$  の時間変化を選んで掲載してある。16 時台には、 $B_z$  はほぼ 0nT だったが、同時刻のオーロラは、ごく弱い帯状のオーロラが写っているだけである。(nT (ナノテスラ) は磁場の強さを表す単位。日本の地表磁場強度はおよそ 47000nT である。前章で述べたように惑星間空間磁場の主成分は、地球の公転軌道面内にあることが多いので、 $B_z$  が 0 であっても、磁場強度が 0 という訳ではない。この例の場合も、およそ 8nT の磁場強度があつて、これは地球近傍の惑星間空間磁場の強度としては平均的な値である。) このようにぼやっと広がったオーロラの可視領域の光は極めて弱いため、肉眼では見えない。16:50 頃から  $B_z$  に乱れが生じてくると、オーロラ活動の活発な部分が現れてきた(17:02 の画像)。そして、 $B_z$  が負に大きくなるにつれて、オーロラが活発化していったのが分かる(17:02, 17:15, 17:32 の画像)。

先に太陽風は磁気圏に入り込めない、と述べた。では、なぜこのように、オーロラと惑星間空間磁場の間に密接な関係性があるのだろうか。実は、条件によっては、地球の磁力線と太陽の磁力線が結合して繋がることのできるのである。地球の磁力線は、図 7-2 のように南半

球から出て、北半球に入っているの、太陽風が吹いてきて最初に出会う地球磁場は北向きの磁場である。そのとき、太陽風の磁場が南の成分を持っていると、地球磁場と惑星間空間磁場の間で磁力線の繋ぎ替えが起こる。図 7-9 に概念図を示そう。画面のはるか左方に太陽がある。太陽風に乗って惑星間空間磁場がやってくる（紫色）。磁気圏（白抜きの部分）の前面（赤い星印）で地球の磁力線（赤色）と出会い、結合する（紫色と赤色の磁力線が一旦切れて、つなぎ変えられるところから「再結合」と呼ばれる）。太陽の磁力線と結合した地球の磁力線（青色）は、太陽風に引っ張られて磁気圏の尻尾のほうに移動していく。このままだと、尻尾に磁力線がたまる一方だから、下流の方（黄色い星印）で北半球の磁力線と南半球の磁力線が、再び再結合してループ状になり、地球の側面を通過してプラズマと共に昼間側へと対流していく。このように磁力線の一部が惑星間空間磁場と結合している磁気圏を、開かれた磁気圏と呼ぶ。図は紙面の都合で、磁気圏前面に比べて尾部を圧縮して短く描いてある。黄色い星印の地球からの平均距離は、地球半径（6400km）の 100 倍、一方、赤い星印までの距離は、10 倍程度と考えられている。このように、惑星間空間磁場が南向きの成分を持つとき、磁気圏内の大規模な対流が強くなり、それに伴ってオーロラ活動が活発化するのである。オーロラの出現がおおよそ磁気緯度 60 度から 75 度の高緯度地方に限られるのは、図 7-9 の赤線で表された磁力線に沿って降下してきた高エネルギー粒子によって、大気中の原子が発光させられるからである。

さて、もう一度、図 7-10 を見てみよう。惑星間空間磁場は 17:30 頃に北向きの成分を持つようになるが、こうなると図 7-7 のような惑星間空間磁場と地球磁場の結合は起こらない。ところが、17:37 のオーロラ画像を見ると、画面の左下（磁氣的地方時 21 時頃）に強いオーロラが出現したのが分かる。その後、この活動は拡大し、緯度にして 15 度以上に及ぶ最大級のオーロラに発達した。その時、地球から  $25R_E$  離れた磁気圏尾でジオテイル衛星が観測した、磁気圏尾の磁場強度を調べると（図 7-10：一番下のグラフ）、このオーロラの発達につれて磁場強度が急減しているのが分かる。これは図 7-9 に模式的に示したように磁気圏尾に蓄積されていった磁場のもつエネルギーが、急速に粒子の運動エネルギーに変換されたことを物語っている。このような、磁場エネルギーの粒子

エネルギーへの急速な変換は、前述した太陽表

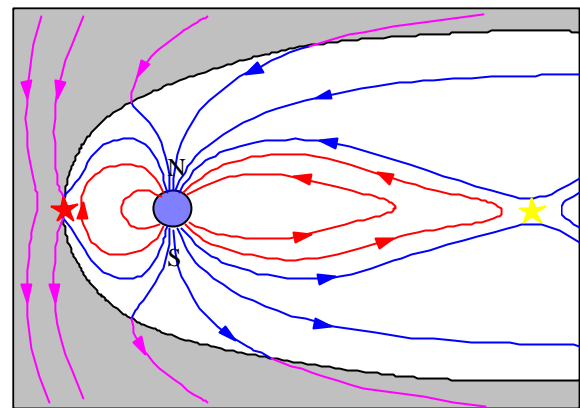


図 7-9 惑星間空間磁場と地球磁場のつなぎ換え。画面左に太陽がある。磁気圏前面で、南向きの成分をもつ惑星間空間磁場と北向きの地球磁場との間で磁力線の繋ぎ替えが起こり、磁力線は磁気圏尾の方へ流されていく。磁気圏尾にたまった磁力線は、南北間で再び繋ぎ替えが起こり、磁気圏内を昼間側の方へ向かって流れていく。

面で起こるフレアを始め、宇宙でおこる爆発的な現象の物理過程として注目されている。

本章で概観したように、極地方で見られるオーロラは、地球が磁気圏を介して惑星間空間の変化に反応していることを示す、一つの証拠である。上に紹介したように、オーロラが活発に活動する際には、宇宙から極地方の超高層大気に莫大なエネルギーが供給される。そのエネルギーが、長期的な気象や大気組成の長期的変化に、どのような影響をもたらすかという問題は、近い将来に解決されるべき重要課題である。

1996/12/10

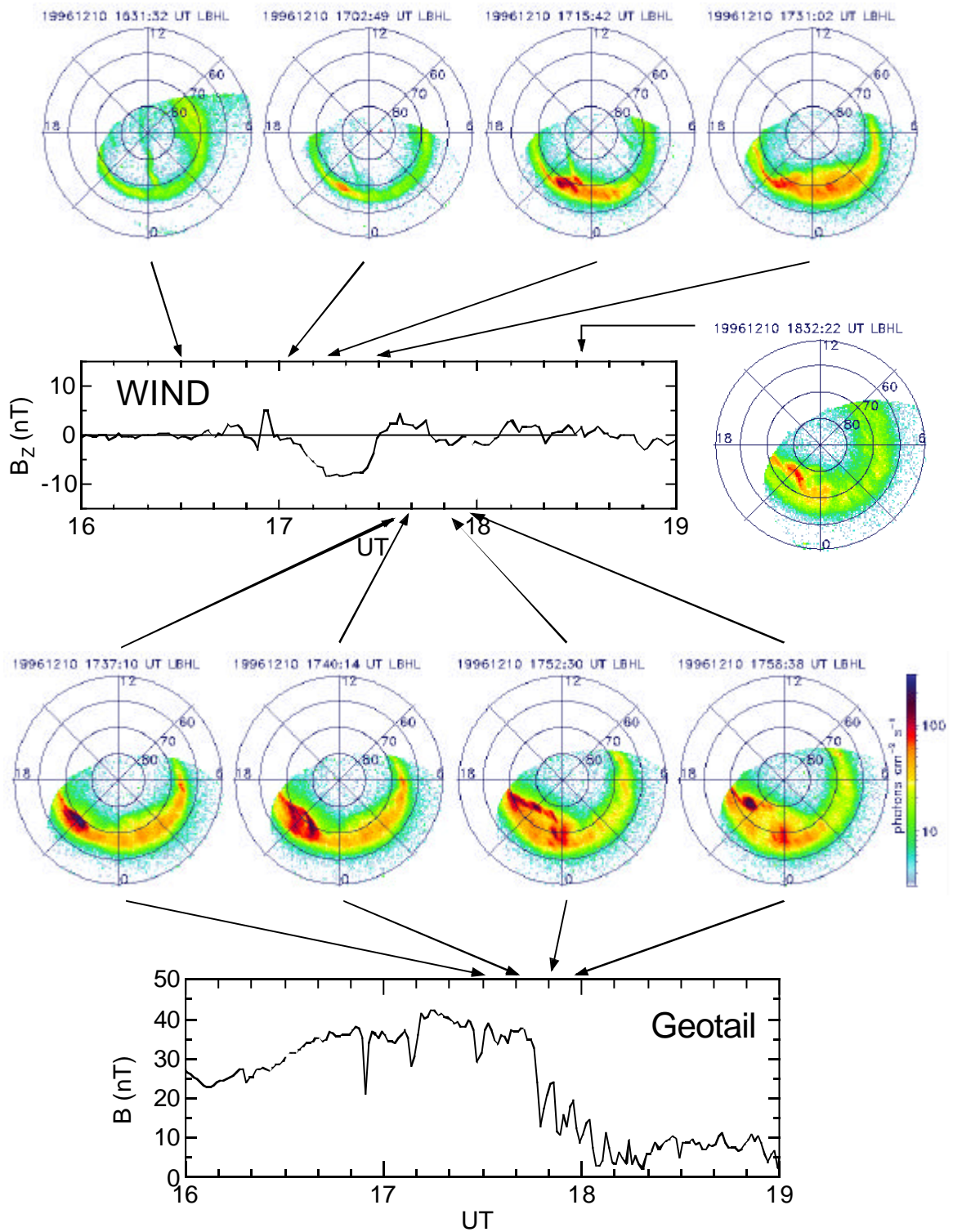
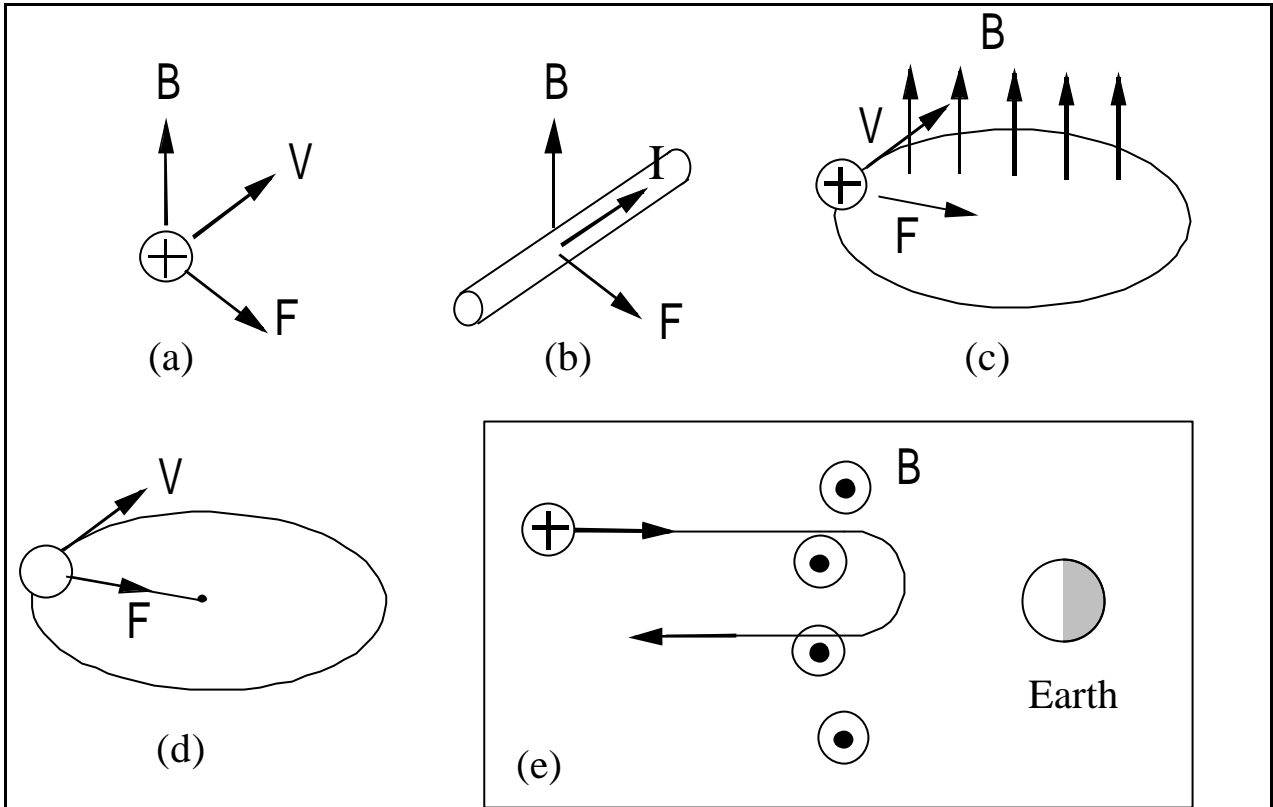


図 7-10 WIND 衛星によって観測された惑星間空間磁場の南北成分。Polar 衛星によるオーロラ画像。ジオテイル衛星によって観測された磁気圏尾の磁場強度。惑星間空間磁場が南向きの成分を持つと、オーロラの活動が活発化する。また、磁気圏尾の磁場強度の急減に伴って、尾部に蓄積された磁場エネルギーが解放されると、最大規模のオーロラが発生する。



### 磁場中の荷電粒子の運動

( a ) 磁場中を運動する正の電荷を持った粒子、例えば陽子は、磁場と運動方向の両方に直角な方向に力を受ける。この力を、ローレンツ力と言う。

( b ) 電荷が集団で運動すると、電流になる。フレミングの左手の法則でおなじみの電流が磁場から受ける力は、導体中を流れる電子が受けるローレンツ力がその源である。

( c ) 一様で平行な磁場中を運動する荷電粒子は、常に運動と直角方向に力を受けるので、円運動をする。

( d ) 糸の先に付けたおもりを振り回して円運動させるとき、おもりには常に糸の張力が円の中心方向に働く。このように円運動を維持する力を向心力という。( c ) の場合、ローレンツ力が向心力の役割を果たしている。

( d ) 北極の上空から地球磁場を見ると、地球の磁場は、紙面の裏から表へと向いている (丸に点の記号は、こちら向きを意味する)。太陽風の荷電粒子 (陽子) が左方から地球磁場内に侵入すると、ローレンツ力を受けて跳ね返される。この効果によって、太陽風が侵入できない地球磁場の領域 (磁気圏) ができる。



## 8 . コロナ爆発の影響

商品経済が活発化すると、物が余っている場所と、逆にそれを必要としている場所に関する情報が、極めて重要なものになる。しかもその情報は、他人より少しでも速く手に入れなければならない。つまりは通信手段が、事業の成否を決定することになる。のろしや手旗信号が最も速い通信手段であった時代から比べると、ケーブルを用いた電信技術は画期的なものであった。大西洋を横断するケーブルが施設され、ヨーロッパとアメリカ大陸の間で通信が可能に成ったのは、1866年のことである。第1章で紹介したように、1888年にヘルツによって電磁波が発見されると、無線通信の実用化に多くの科学者・技術者が取り組み、その結果、早くも

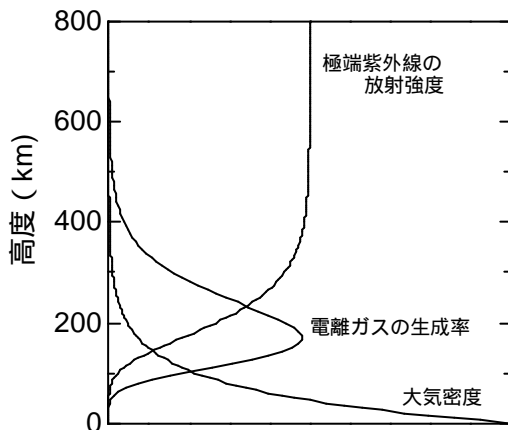


図 8-1 太陽の極端紫外線による大気中原子の電離 (模式図)。

1901年には、マルコーニが大西洋を挟んでイギリス - カナダ間の無線通信に成功した。1912年に起きた大西洋横断客船タイタニック号の事故は、無線通信技術の存在と重要性を、一般の人々にまで認識させる大きなきっかけとなった。映画「タイタニック」の中で、通信士がSOSの発信を命じられるシーンがあるのを覚えている人は、少ないかもしれない。しかし、事故の速報に接した当時の人々には、史上最悪の海難事故と共に、無線通信の技術が強く印象づけられた。

直進する電波を用いて、弧を描く地表の2点間を結ぶことができるのは、上空約100 kmに電波を反射する層(電離層または電離圏)があるから、と予想された。1925年アップルトンは、

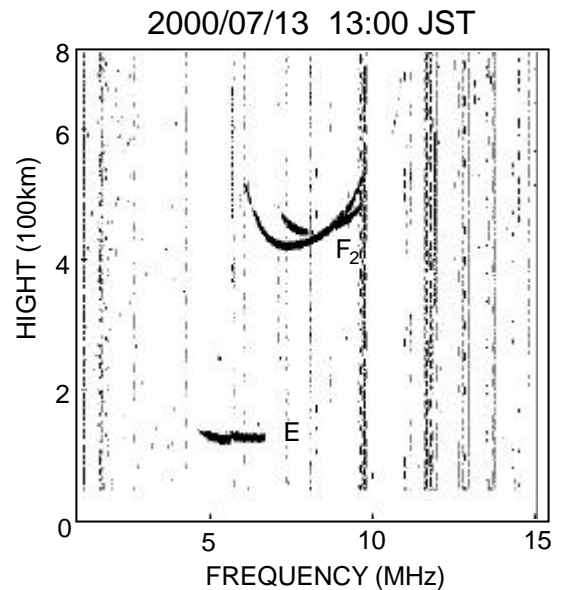


図 8-2 イオノグラムの観測例(通信総合研究所)。横軸は電波の周波数(MHz)。縦軸は高度(100km単位)。

その予想に基づいて上空約100 kmに電離層の存在を確認することができた。このように、無線通信が実用化されてから電離層が発見されたのである。科学と技術の関係を考える場合、基礎科学の成果の上に应用技术が開発されると考えるのが一般的である。しかし、電離層の発見は、遠距離通信技術によってもたらされた。新しい技術が新しい科学を生み出すことがある、ということの一つの好例であろう。その後、皆既日食のときの電離層高度の変化を調べると、太陽が完全に月に覆われたとき高度が最大になることが分かった。この観測は、太陽光線によって大気中の原子が電離されて電離層が形成されることの決定的な証拠となった。

太陽光には、可視光線の最短波長380 nmより波長の短い電磁波、紫外線が含まれることを第1章で学んだ。電離層生成に関係するのは、100 nmより短い波長の極端紫外線である。極端紫外線は原子を電離しながら大気に侵入してくる。深く侵入するにつれて放射強度は減少するが、同時に原子の密度が上がるために、単位高さあたりに電離される原子の個数、イオン生成率は増加する。しかし、イオン生成率は、高度200 km付近を極大として低下する。それは、極端紫外線の減衰が著しいからである。図8-1は、イオン生成率が高度200 km付近でもっとも強くなることを、模式的に示している。

短波、中波による無線通信は、宇宙通信が可能となった現在でも、実用の面で欠かすことのできない技術である。しかし、電離圏による反射を利用するために、時々起こる電離圏嵐の影響によって通信不能に陥ることは、避けることができない。従って、世界各地に分布する観測施設において、常に電離圏の状態が監視されている。電離圏の状態を知るためには、図8-2のようなイオノグラムと呼ばれるデータを用いる。これは、横軸に地上から天頂に向けて発射した電波の周波数を取り、縦軸に電波を反射する層の高度をとってある。その高度は、反射して返ってきた電波を受信することによって、発射と受信の時間差から求められる。図は、2000年7月13日13:00（日本標準時）に、沖縄で取られたデータである。この日は、電離圏の状態が静穏な一日だった。雑音による縞模様の中に髭状に見えているのが、反射電波すなわちエコーである。例えば、5MHzの電波が、およそ110kmの高度で反射されたことが

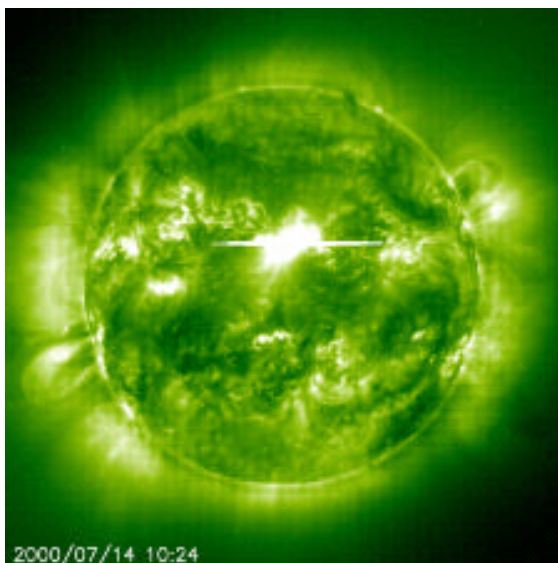


図8-3 フレア（中央やや上方の輝き）。  
<http://sohowww.nascom.nasa.gov>

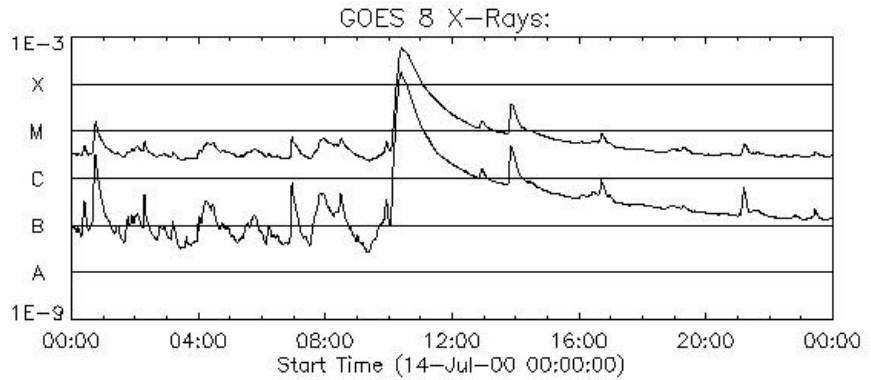


図8-4 静止軌道衛星 GOES 8 による太陽X線強度 (0.05?0.4 nm, 0.1?0.8 nm)。  
[http://www.lmsal.com/SXT/plot\\_goes.html](http://www.lmsal.com/SXT/plot_goes.html)

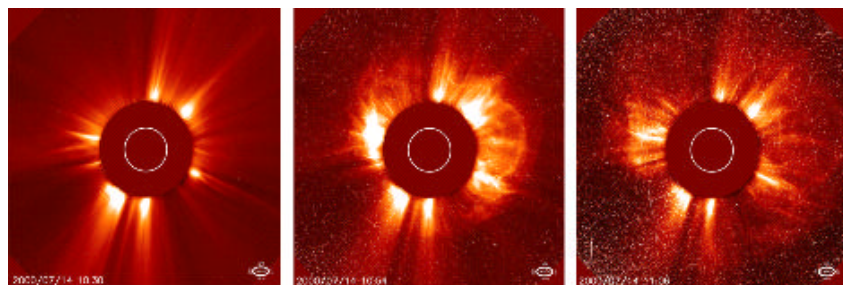


図8-5 コロナ爆発（CME）。左から、10:30, 10:54, 11:06（世界時）、コロナの撮像のために、光球面をディスクで覆ってある。内側の白円が光球面を表す。  
<http://sohowww.nascom.nasa.gov>

分かる。一方、8MHzの電波は430kmの高度で反射された。それぞれE層、F<sub>2</sub>層と呼ばれる大気中の原子あるいは分子の電離度の違いで生じる電離圏の層構造に対応している（F<sub>1</sub>層が、E層とF<sub>2</sub>層の間に現れることがあるが、このデータでは見られない）。

このイオノグラムが取られた日の翌日、10:30（世界時）頃に、デリンジャー現象と呼ばれる、通信障害がヨーロッパからアフリカにかけて発生した。ほぼ同時刻に、人工衛星SOHOが強いフレアの発生を捉えた（図8-3）。それに先だつ10:04に静止軌道を回っているGOES衛星が、太陽X線の急増を観測した（図8-4）。問題の通信障害は、フレア領域で発生したX線が、電離圏を乱すことによって起こったと考えられる。

続いて、太陽観測衛星SOHOによってコロナ爆発（CME: Coronal Mass Ejection）が観測された（図8-5）。地球から見てコロナ爆発の影響は全方向に広がって行くが、10:54と11:06の画面には右方向に広がって行く衝撃波が、特にはっきりと見られる。

（問）上の衝撃波が地球から見て垂直方向に広がったとして、10:54と11:06の図から、衝撃

波の速度を見積もって見よう。図中の白円が光球面の大きさを表している。(約 1500 km/s)

11:06 の画面の一部が白い斑点で覆われているのは、太陽から飛来した高エネルギー粒子の爆撃を、撮像装置が記録した結果である。この直後、画面は白い斑点で覆い尽くされてしまった。ACE 衛星の粒子検出器が、その高エネルギー

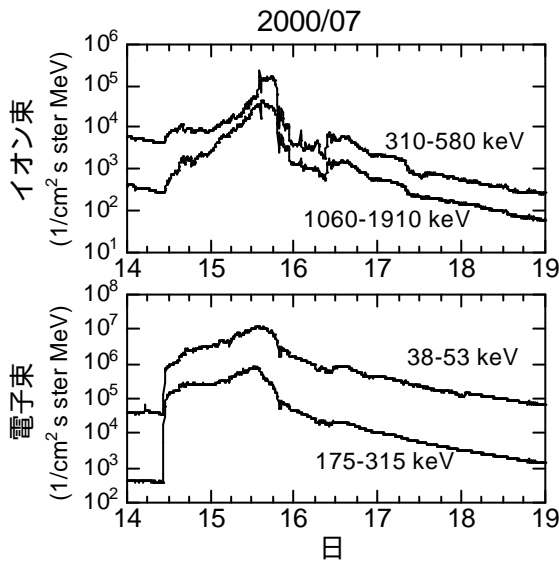


図 8-6 ACE 衛星による高エネルギー粒子の観測。

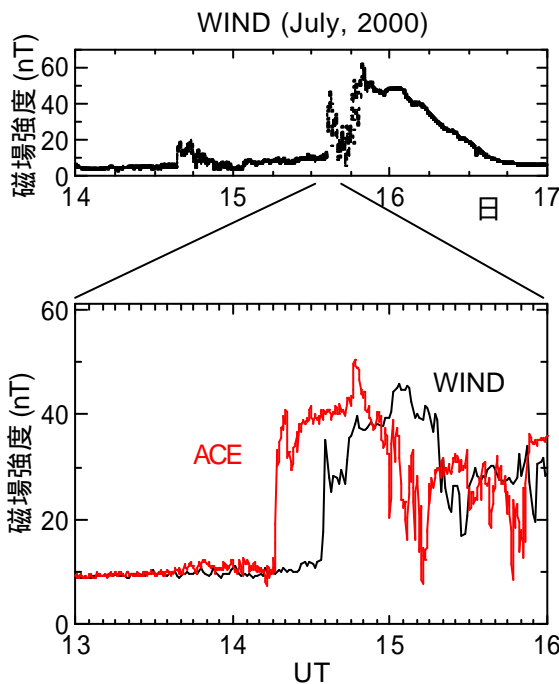


図 8-7 人工衛星 ACE および Wind による、惑星間空間磁場強度の測定。

ギー陽子および電子の増加を捉えた(図 8-6)。図から、爆発の影響は、2日から3日続いたことが読みとれる。Coronal Mass Ejection を直訳すると、コロナ物質の放出ということになるが、この名前は、推定で  $10^{13}$  kg の大質量の物質が惑星間空間に向かって放出されることに由来する。極めて大雑把な見当としては、標高 1000 m の山一個分程度の質量である。

コロナ爆発が地球に面した位置で起こると、爆風の衝撃波が地球に向かってやってくる。衝撃波の前面では、惑星間磁場が圧縮されるため磁場強度が急増する。図 8-7 は、地球から太陽方向に  $1.5 \times 10^6$  km 離れたところに位置していた人工衛星 ACE と、地球近傍にあった Wind が、それぞれ観測した磁場強度を示している。(補足: ACE は、ラグランジュ・ポイントと呼ばれる地球と太陽の重力場の特異点の一つである、L1 ポイントの周辺に位置している。それは、月の軌道半径の約 4 倍に当たる距離だけ、地球から太陽の方向に離れている。ずいぶん遠くに思えるが、それでも地球太陽間の約 100 分の 1 の距離である。人工衛星を、地球から遠く離れた位置で、しかも地球 - 太陽系に対して固定した位置に維持することは、一般には大量の燃料を必要とする。(その理由を考えて見よう。)しかし、ラグランジュ・ポイントでは、比較的容易に衛星を同一地点に留めておくことができる。)

図 8-7 に示すように、ACE 衛星は、15 日 14:16 に磁場の急増を観測し、それより約 18 分遅れて地球近傍に居た WIND 衛星でやはり磁場が急増した(図 8-8 に示した両衛星の位置を参照)。両者の距離と、観測時間の差から求められる衝撃波の伝播速度は、約 1400 km/s になり、上で図 8-5 の画像から求めた値と近似的に一致している(ただし、衝撃波の速度は、全方向で同じとは限らないし、太陽から遠ざかるほど遅くなるから、完全に一致することに意味はない)。伝播速度で、太陽 - 地球間  $1.5 \times 10^8$  km を割ると、太陽からの伝播時間が約 30 時間となる。一方、図 8-4 の X 線の増加が始まる時刻の 8 分前(X 線が地球に届くまでの時間)9:56 を、フレア発生時刻とすると、コロナ爆発から ACE 衛星が衝撃波を観測するまでの時間は約 28.4 時間である。衝撃波の速度が徐々に落ちてくるであろうことを考えると、二つの推定時間はよく一致していると言える。このことは、ACE 衛星と Wind 衛星が観測した衝撃波が、SOHO 衛星が観測したコロナ爆発によって発生した衝撃波と、同一のものであることを保証している。

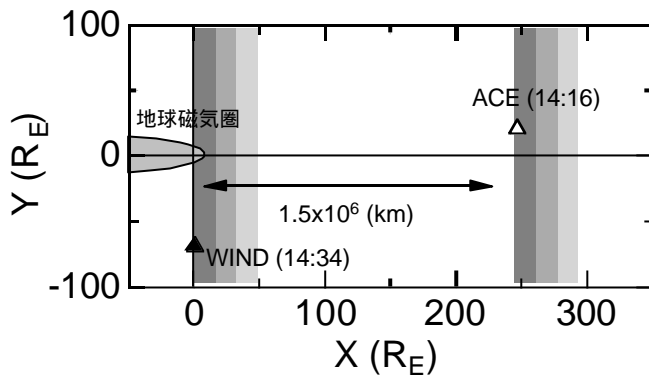


図 8-8 衝撃波の伝播を示す模式図。画面右方向に太陽がある。

太陽からの衝撃波が地球を通過するとき、磁気圏は太陽風に圧縮される。今問題にしている衝撃波の時は、磁気圏境界面が静止衛星の軌道を越えて、地球に接近した。地球の磁場は低緯度では北向きだから、静止衛星が南向きの磁場を観測したとすると、それは磁気圏が圧縮されて衛星が太陽風の領域に出たことを意味する。図 8-9 の上図に示したように、静止衛星 GOES 8

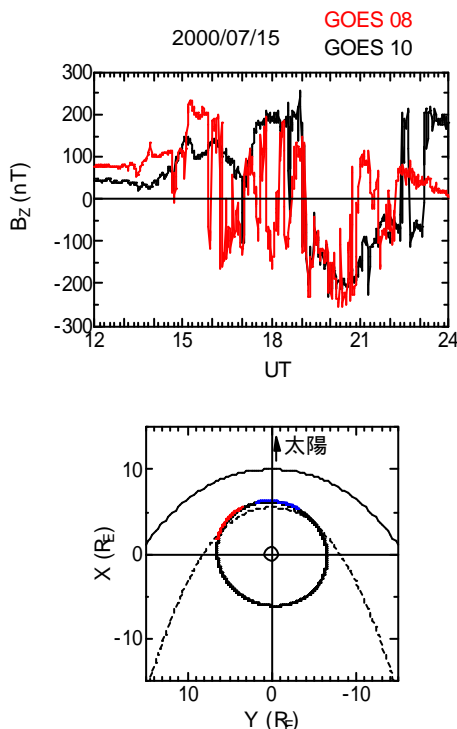


図 8-9 (上) 静止衛星 GOES 8、および 10 による磁場南北成分。(下) 静止軌道(黒細線:黄道面に投影)、19:00 - 22:00 間の GOES 8 (赤線) および GOES 10 (青線) の位置。太い実曲線は平均的な磁気圏境界面、破線は衝撃波によって圧縮された磁気圏境界面を示す。

および 10 は、7月15日の19:00 から 22:00 の間、南向きの強い磁場を観測した。同時刻に磁気圏外で Wind が取ったデータも、ほぼ同様のパターンで強い南向きの惑星間空間磁場を示している(図 8-10)。図 8-9 の下図は、この間の GOES の位置から、磁気圏境界面の位置を推定したものである(破線)。太線で示した平均的な位置と比較すると、このとき磁気圏境界面は強く圧縮されたことが分かる。

前章で述べたように、惑星間空間磁場が南向きの成分を持つと、太陽風のエネルギーが磁気圏に侵入して磁気圏尾に蓄えられる。そのエネルギーが解放されるとき、極地方に大規模なオーロラが出現する。7月15日から16日にかけてのオーロラ活動は極めて広範囲に及び、北海道でも観測されたという報告がある。このような磁気圏の大規模な変動を、地上で常時監視するために、Dst と呼ばれる地磁気指数が用いられる。(Dst 指数は、地磁気赤道付近の磁場の減少を表す。より詳しくは、章末の囲み記事を参照。)図 8-11 は、2000年7月の Dst 指数の変化である。Dst 値が  $\approx 300$  nT を下回るほど大規模な磁気嵐は、太陽の活動期においても、年に一、二回程度である。これ以前には、同年4月6~7日、以後には翌年の3月31日に同規模の磁気嵐が起きている。

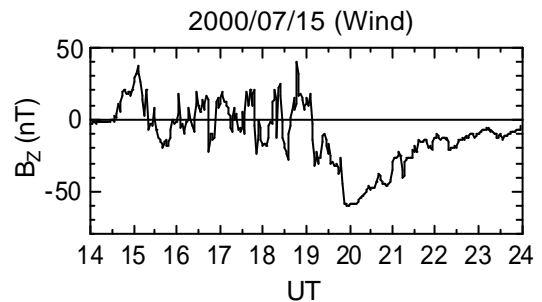


図 8-10 WIND 衛星が観測した惑星間空間磁場の南北成分。

本章の冒頭で述べた通信障害は、フレアによる X 線の増加、およびその後の磁気嵐に伴う磁場変動によって電離圏の電子分布に大きな変化が生じて起こった、と解釈される。地球が、太陽の作り出す環境の中にある惑星の一つで

あることを示す格好の例として、ここに紹介した。衛星通信が用いる周波数の高い電波は、電離圏を貫通するため、磁気嵐の影響を被ることは少ない。また、通信衛星が飛航する静止軌道は磁気圏内にあるため、普段は太陽からの強い放射線からは守られている。しかし、この例のように強いフレアが発生すると、高エネルギー粒子は静止軌道にまで侵入することがある(図8-12)。そして、被曝によって電子機器が障害を受けて、衛星自身が機能を失うことがある。1997年1月6日に通信衛星の一つが機能を失った事故は、同日に発生したコロナ爆発が原因と見られている。被害を受けるのは電子機器だけではない。宇宙飛行士が船外活動をしているときに、同程度に被曝すると、致死量を超えると予想されている。また、宇宙船内に居ても、現在の宇宙船の構造では、甚大な被曝は免れ得ない。

と、その運動は非常に複雑なものになる。例え

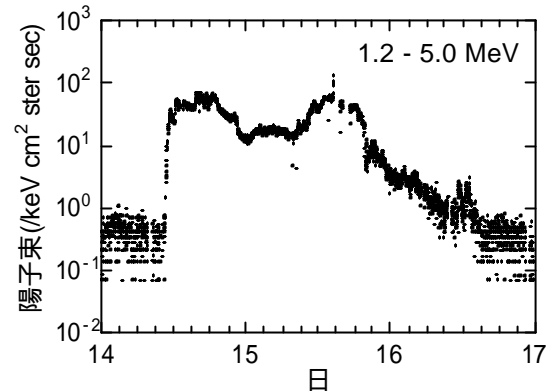


図8-12 静止衛星(LANL1989)が記録した高エネルギー陽子束の増加。

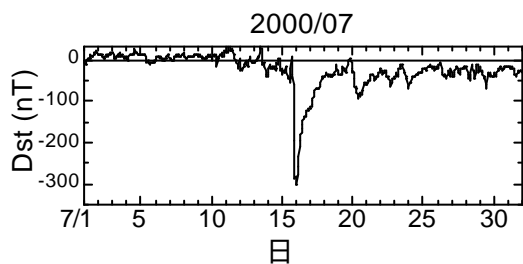


図8-11 2000年7月のDst指数(京都大学地磁気資料センター)。

人類の宇宙における活動が、今後より活発化する事態に備えて、宇宙天気予報の可能性が現在探られている。1820年、史上最初の天気図(気圧分布図)が描かれた。ドイツ人のブランデスは、この天気図を見て、時折ドイツを襲う嵐が、広範囲に渡る気圧配置の変化が原因で起こることに気づいた。その後、天気予報というものが可能になり、今日では、地上と宇宙からの立体的な観測によって、信頼性の高い予報が可能になっている。現時点における、宇宙天気予報は、1820年における天気予報と似たような状況にあると言えるだろう。我々が、毎朝、その日の天気予報に注意を向けるように、将来、宇宙ステーション内で、あるいは月面基地で、宇宙天気予報が話題になるかもしれない。

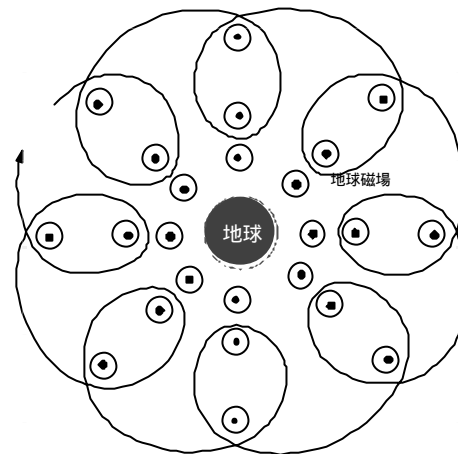
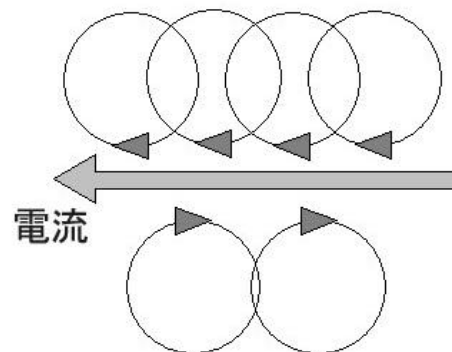


図8-13 地球の周りの正電荷の軌跡(模式図)。



### Dst 指数

前節で述べたように、一様な磁場中を運動する荷電粒子は、ローレンツ力によって円運動をするが、場所によって磁場の強さに違いがある

ば磁気的な赤道面では、円運動の半径は磁場が強い地球の近くでは小さく、遠くでは大きくな

る。その結果、図 8-13 のように、正の電荷は西回りに、負の電荷は東回りに地球の周りを回転する。電荷が磁力線と平行な速度成分を持つ場合、さらに複雑な運動をする。

このような荷電粒子は、磁気圏に閉じ込められ地球の周りに放射線帯を作る。粒子の密度は、地球の中心から半径の3-4 倍のところが高くなる。密度のピークの外側では、より内側の粒子が多いため、地球を取り巻く西向きの電流が流れる。逆に密度ピークの内側では、東向きの電流が流れる(図 8-14)。このような地球を取り巻く電流を冠電流(リング・カレント)と呼ぶ。西向きの電流は、地表付近の磁場を弱め、東向きの電流は強める。両方の効果が合わさるが、結果的には、西向き電流の効果が勝って磁場を弱めることになる。この磁場の変化量を低緯度に分布する4つの観測所で測定して算出しているのが、Dst 指数である。

極端にエネルギーの高い粒子は地球磁場に関係なく、ほとんど直進する。また、エネルギーが低すぎても、円運動の半径が小さすぎて、密度差の効果が出ない。最も効率よくリング・カレントを作れる粒子は、数十~数百 keV の陽子である。(1eV=1.6 × 10<sup>19</sup> J、電子または陽子を 1V の電圧で加速したときに得られるエネルギー。)太陽風のエネルギーが磁気圏に流入してくると、大量の低エネルギー粒子が加速され、リング・カレントを作る粒子が増加する。このようなとき、Dst 指数は、図 8-11 のように負のピークを示す。

#### 4. まとめ

この分野の解説には電流と磁場の関係、ローレンツ力等の電磁気学の少なくとも定性的な知識が必要である。教師は、演示実験(できれば生徒実験)を行って、生徒の理解を助ける必要がある。宇宙空間で起こっている現象が、実験室で確かめられる物理法則を用いて説明できることを知って、生徒は自分の認識領域の広がりを実感するであろう。

第2節の各項目で取り上げられる内容の多くは、すでに明らかにされたものであるが、その内のいくつかは、現在でもまだ決着が付いていない。例えば、温暖化と太陽活動の因果関係など、これらは近い将来に解かれるべき課題である。未解決の問題をそのまま示すことによって、現在も活発に研究されている分野であることを生徒に印象付けるとともに、生徒自らが研

究への意欲を持つことを期待したい。

本稿の第3節では、現象を典型的に示す例を精選し、観測された多くのデータから比較的理理解が容易なものを選んで示した。叙述に当たっては、身近な現象から始めて、それを引き起こす源を探求するという構成を心がけた。中には重要な項目ではあっても、割愛せざるを得なかった項目がある。例えば、第3節では、内容的にはサブストームの説明を行ったが、あえてその用語は用いなかった。それは、電流系の説明無しにサブストームの概念を紹介しても、あまり意味がないと考えたからである。そして、サブストームの電流系についてはまだ不確定な要素が多すぎると判断した。また、バウショックについても説明しなかった。これは、全体を理解する上で支障を来さない、と考えたからである。教師が図7-7を、読み解く過程でバウショックについても触れてもらいたい。このように割愛したところは多々あるが、全体の流れは把握できるように工夫した積もりである。読者が、この原稿を読むことによって、様々な観測データを積み重ねて一つの描像を描いていく作業を追体験し、地球惑星科学の醍醐味を味わうことができたとしたら、それは、著者達にとってこの上ない喜びである。

謝辞：SGEPSS の多くの会員諸氏から、有意義な助言と暖かい励ましをいただきました。厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 宇宙空間物理学, 大林辰蔵, 裳華房(1970)
- 超高層大気物理学, 永田武, 等松隆夫, 裳華房(1973)
- 太陽, ケネス・R・ラング(渡辺堯, 桜井邦朋訳), シュプリンガー・フェアクラーク東京(1997)
- 宇宙環境科学, 恩藤忠典, 丸橋克英, オーム社(2000)
- Pioneers of Space Physics, edited by Tamas I. Gombosi, Bengt Hultqvist, and Yosuke Kamide, J. Geophys. Res., 99, A10, 19,099 - 19,212, 1994
- Pioneers of Space Physics 2, edited by Tamas I. Gombosi, Bengt Hultqvist, and Yosuke Kamide, J. Geophys. Res., 101, A5, 10,477 - 10,586, 1996
- Sun-Earth Plasma Connections, edited by James L. Burch, Robert L. Carovillano, and Soiro K. Antiochos, Geophysical Monograph, 109, American Geophysical Union, Washington, DC, 1999
- A Millennium of Geomagnetism, David P. Stern, Review of Geophys., 40, NO.3, 1 - 30, 2002

中井仁: nakai@ibaraki.osaka-c.ed.jp

荻島智子: ogi@ja2.so-net.ne.jp

森尻理恵: g8808@ni.aist.go.jp

注)地球電磁気・地球惑星圏学会の領域の一つである固体地球磁場関係から、「仮想磁極曲線」の作成シートを以下に添付します。

## 磁極移動曲線の作図 (作成：荻島智子)

<目的> 岩石が持っている残留磁気はウェゲナーが唱えた大陸移動の最も有力な証拠となったが、どのように残留磁気から大陸移動が示されるのかを確かめる。

### <必要な基礎知識>

火成岩や堆積岩に含まれる磁性鉱物は、岩石生成時に方位磁針のように磁極を指して固定される。これを残留磁気といい、その後何億年間も保持される。

残留磁気を示す方向は偏角と伏角で表される。(図1)

残留磁気の伏角から岩石が生成された場所の緯度がわかる。

例えば、赤道で生成された岩石の伏角は0°、北磁極で生成された岩石の伏角は90°である。(図2) 北磁極は北極点と一致しているものとする。

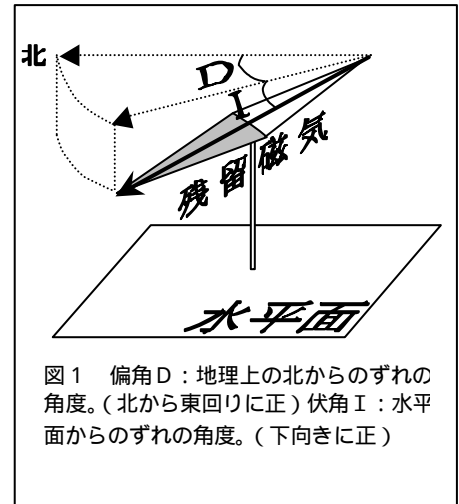


図1 偏角D：地理上の北からのずれの角度。(北から東回りに正) 伏角I：水平面からのずれの角度。(下向きに正)

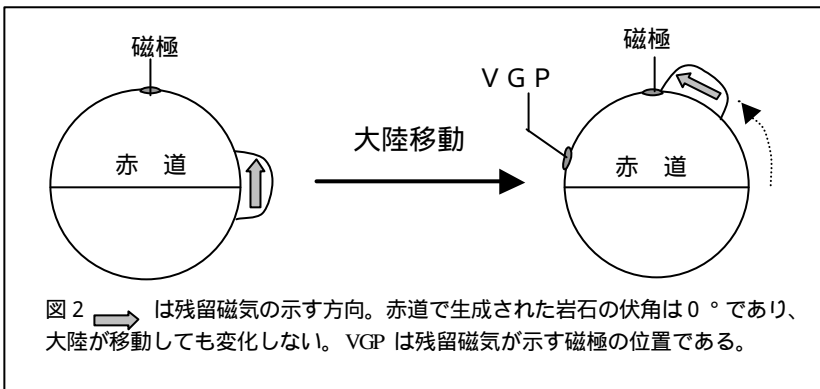


図2 は残留磁気を示す方向。赤道で生成された岩石の伏角は0°であり、大陸が移動しても変化しない。VGPは残留磁気を示す磁極の位置である。

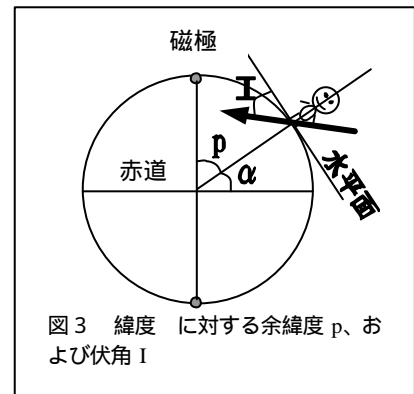


図3 緯度に対する余緯度 p、および伏角 I

残留磁気を示す磁極の位置を**仮想地磁気極 (Virtual Geomagnetic Pole 略して VGP)** という。仮に大陸が移動しないものとする、時代をさかのぼるにつれて VGP の位置が、現在の磁極から徐々にずれていく。各時代の VGP をつないだ線を**磁極移動曲線**という。実際は地質年代を通して磁極はほぼ同じ位置に存在したと考えられるので、磁極移動曲線はつまり大陸が移動したことを表す。

### < VGP の求め方 >

岩石採集地から偏角 D の方向に地球を 1 周する大円を描く。(図4)

残留磁気の伏角 I から余緯度 p (図3) を計算する。I と p の間には電磁気学的に以下のような関係がある。

$$\frac{1}{\tan p} = \frac{1}{2} \tan I$$

大円に沿って岩石採集地から余緯度 p だけ北上する。その地点が VGP である。(図4)

### < 岩石採集地の緯度・経度と VGP の緯度・経度の関係 >

岩石採集地の緯度・経度を ( , )、VGP の緯度・経度を ( , ) とする。(図5) また残留磁化の偏角を D、余緯度を p とすると、

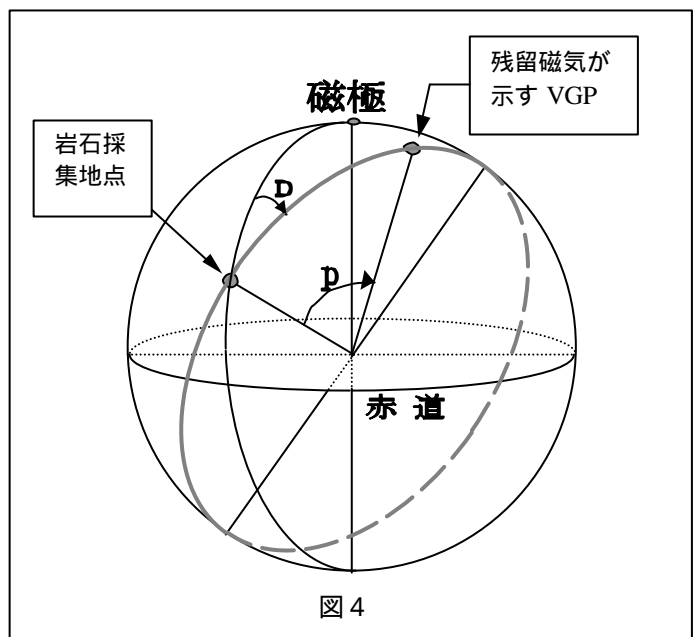


図4

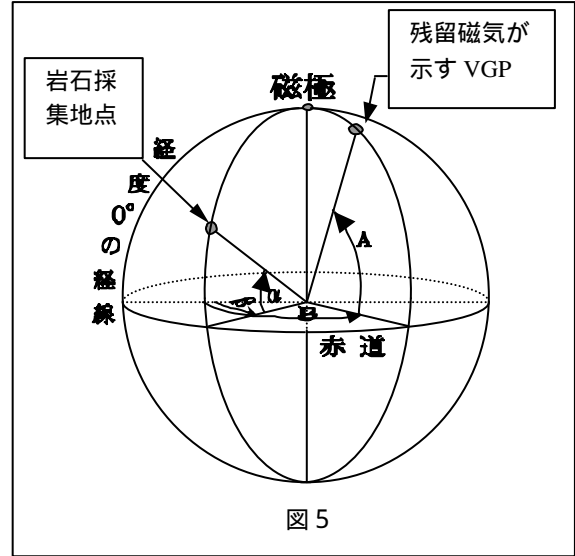
球面三角法により、次の関係式が得られる。

$$\begin{cases} \sin A = \sin p \cos D + \cos p \sin D \cos B \\ \sin(B - A) = \sin p \sin D / \cos p \end{cases} \quad \text{式 式}$$

<実習>

インドで採集された岩石のデータ(表1)から式を用いてVGPの緯度A・経度Bを求め、図6の地図にプロットしてみよう。VGP どうしは年代順に直線でつないでよい。また計算には三角関数表もしくは三角関数が計算できる電卓・パソコン等を利用するとよい。

なお、VGPを求める際、地磁気の逆転は気にしないでよい。なぜなら地磁気の逆転の有無に関わらず北極付近のVGPの位置とその反対側にある南極付近のVGPの位置が計算できるため、北極付近のVGPをつなげば北極点を始点とする磁極移動曲線が描けるからである。



(表1) インドで得られた残留磁気データの

岩石採集地点 *1	岩石の年代(年)*2	残留磁化の偏角D	残留磁化の伏角I	余緯度P	sin A	A (VGPの緯度)*3	sin(B - A)	B - A *4	B (VGPの経度)
緯度 = 20° 経度 = 77°	4500 万	340 °	0 °	90 °					
	6000 万	341 °	- 28 °	105 °					
	7000 万	338 °	- 48 °	119 °					
	1.1 億	302 °	- 59 °	130 °					
	1.8 億	289 °	- 53 °	124 °					
	2.5 億	282 °	- 59 °	130 °					
	2.75 億	273 °	- 56 °	127 °					

\* 1 表1はインド各地の約450ヶ所で採集された岩石から計算された各時代の平均値である。簡単のため岩石採集地点はインド中央部の1地点とする。

\* 2 年代は複数の岩石の平均である。例えば4500万年前の偏角・伏角のデータは3500万年前~5600万年前の複数の岩石のデータを平均したものである。このように年代の幅をとることで地磁気の永年変化を打ち消すことができる。

\* 3 sin A=定数より、2つのAの値(Aと180-A)が得られるが、Aは緯度であるので-90°~90°の値を採用する。

\* 4 cos(B - A)=定数より、2つのB - Aの値(B - Aと180 - (B - A))が得られるが、cos p < sin p・sin Aのときは、180 - (B - A)を採用する。このデータでは全て180 - (B - A)を採用することになる。

<確かめ> 各時代の(A,B)はおよそ次の通りである。正しく求められたか確認してみよう。

4500万年(62°, 304°), 6000万年(50°, 287°),  
7000万年(37°, 281°), 1.1億年(9°, 298°),  
1.8億年(3°, 309°), 2.5億年(-4°, 306°),  
2.75億年(-10°, 311°)

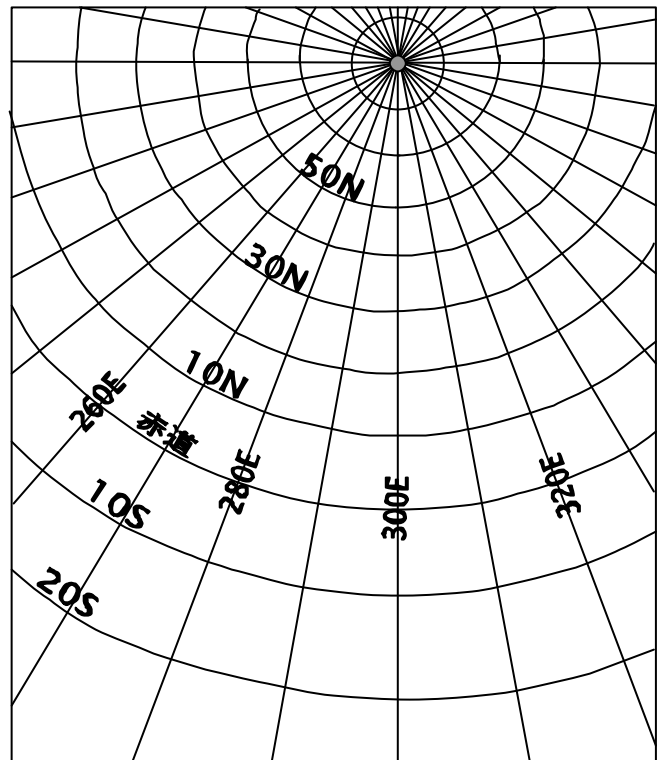


図6



—付記—

球面三角法を用いずに、次のようにおよその VGP の位置を求めてもよい。

< 用意するもの >

地球儀、メジャー、筆記用具、紙、ハサミ、メンディングテープ（セロハンテープ）、コンパス

< 準備 >

地球儀の北極を利用して、紙に方位を書き込む。( 図 a )

方位を書き込んだ紙をインドの岩石採集地（北緯  $20^{\circ}$ 、東経  $77^{\circ}$ ）に貼る。( 図 b )

メジャーで地球儀の全周の長さを測り、データの余緯度  $P^{\circ}$  が、使用している地球儀の表面では何 cm になるか計算しておく。( 図 c )

< VGP の位置の求め方 >

岩石採集地から偏角  $D$  の方向へ、メジャーを1周させる。( 図 d )

メジャーに沿って、岩石採集地から余緯度  $p^{\circ}$  にあたる長さ分北上する。そこが VGP である。( 図 e )

以上 を各年代ごとに行う。( 図 f ) これらの VGP を年代順につなぐと磁極移動曲線となる。



図 a



図 b



図 c



図 d



図 e

