

地磁気とオーロラ

荒木 徹*

磁気の見つけと磁気コンパス

BC600年頃、ギリシャのターレスがマグネシア地方で鉄片を引きつける鉱物があると記述している。これがマグネットの語源だとされている。マグネシア地方は、ギリシャと小アジアにそれぞれある。

やがて、磁針の指北性が判り、磁気コンパス（羅針盤）として航海に利用されていく。荒天で太陽も星も見えない大海原でも羅針盤で船の進路を決めることが出来る。羅針盤のデータが集まると、磁針の方向が真北からずれる事、また、そのずれ（偏角）が場所によって変わることが判ってきた。C.コロンブス（1446?-1506）は大西洋横断（1492年）の航海日誌に、初めは東にずれていた偏角が、北緯28度、東経28度で真北を向き、その後、西向きになったと記録している。偏角は、高緯度では大きくなるので、その分布は航海者に必要な知識であった。天文学者のE.ハレー（1656-1742）は、英海軍の依頼により等偏角地図を作った（1702年）。電波航法（複数の固定点から送信される電波による三角測量）が導入される近年まで、羅針盤と偏角図は必須の航海装置であった。

偏角の認識と共に、磁針の水平面からの傾き（伏角）が調べられ、赤道で水平であった伏角が緯度とともに傾きを増し、北極では垂直になることが明らかになった。W.ギルバート（1543-1601）は、地球の中心に置いた磁石の磁力線の地球表面での傾きが、この伏角の緯度変化と合うことから、地球が球形磁石になっていると考えた（図1）。彼は「磁気学の父」と呼ばれており、磁気・地磁気を詳述したラテン語の大著‘De Magnete’は、

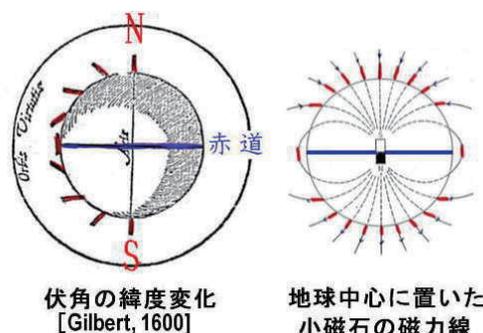


図1. ギルバートの地球磁石

G.ガリレイ（1564-1642）に感銘を与えた。

H.ジェリブランド（1597-1636）は、ロンドンの偏角が54年間に7度変化したことを報告し、地磁気が時間的にも変化することが判ってきた。二条城の敷地は少し東に傾いており、北極星でなく磁北を北として建てられたのではないかと推定される。今では西へ数度の日本の偏角は、江戸初期には東に傾いていた。永年変化と呼ばれるこの長期変化は、地磁気の成因の考察に重要な性質になる。G.グラハム（1675-1751）は、長さ30cmの長い磁針の微妙な動きを観察し、偏角が規則的な日周変化（日変化）をすること、また、時には大きな不規則な変化をすることを見つけた。以後、年変化、太陽活動に伴う11年変化等の周期的変化や、磁気嵐やオーロラ活動に伴う変化等の擾乱変化が発見されていく。

天文・気象・地質・古生物・植物・動物・地理・民族・言語・歴史などに広い関心のあったA von フンボルト（1769-1859）は、太陽・太陽黒点や地磁気とオーロラにも強い興味を示した。南米への探検旅行（1799-1804）の結果、地磁気赤道・地磁気緯度という概念を導入し、永年変化や磁極の移動を調べた。彼の博識は5巻の大著

*京都大学名誉教授

‘Kosmos’ に纏められている。

数学者 F. ガウス (1777-1855) は地磁気の研究でも大きな貢献をした。絶対値測定に巧妙な方法を導入し、球関数展開によって地磁気の大部分が地球内部に起源を持つことを証明、また、地磁気時間変化を記録する装置を作り、1839年には、「地磁気的一般理論」を出版した。彼はフンボルトと協力して磁力計の設置を進め、ゲッチングン地磁気ユニオンを作って世界的観測網を整備した。ゲッチングン郊外の山中に作った非磁性の地磁気観測室が今も残っている。

地磁気の起源

地球が磁石であるとするギルバートの考えは、地磁気の原因が地球内部にあるとするガウスの理論に合うが、キューリー点 (数百度) 以上の温度で物質の帯磁が失われること、地球内部の温度が下部ほど高くなり、中心では6千度位になることが判ってくると無理になった。替わって、地球内部に発電機 (ダイナモ) があり、その電流が作る磁場が地磁気を維持するというダイナモ説が浮上してきた。

半径 6370 km の地球表面から 2900 km 以下 5100 km までは外核と呼ばれ、鉄・ニッケル等の金属の溶融流体で出来ている (図2)。外核の上のマントルと下の内核は固体である。外核に小さな磁場 H_0 があり、この磁場を横切る金属流体の運動 V_0 が生じたとすると電流 J_0 が流れる。こ

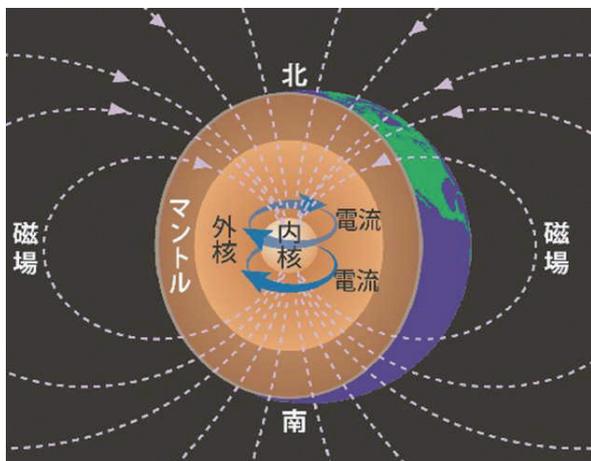


図2. 地磁気ダイナモ

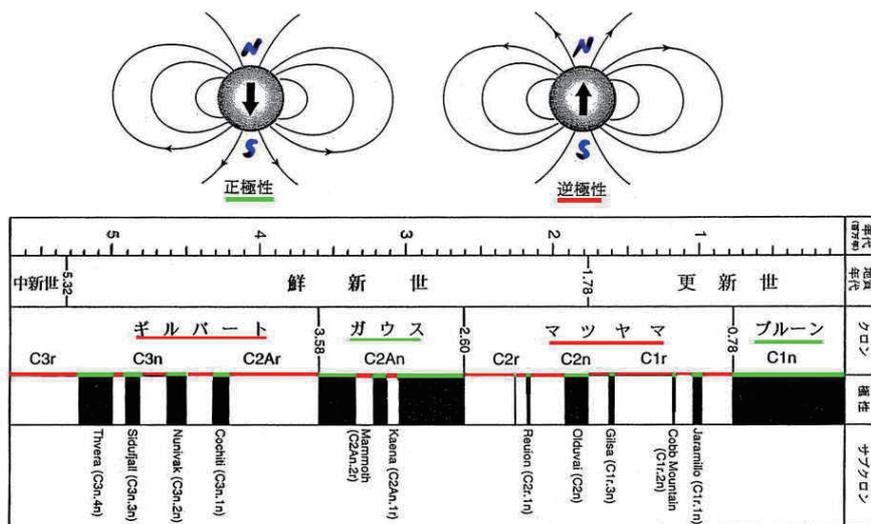
れがダイナモである。 J_0 は磁場 H_1 を作り、 H_1 が H_0 を強めれば最初の磁場が成長したことになる。磁場中を電流が流れると力が働く (この力を回転力にするのがモーターである) が、 J_0 に働く力が運動 V_0 を弱めてしまえばダイナモが成立しなくなる。ダイナモとモーターがうまく噛み合って磁場と運動を維持できれば、ダイナモ説が有効になる。地球の場合の運動は外核流体の自転と物質対流であり、磁場中の導電性流体を扱う磁気流体力学のシミュレーションにより、地磁気ダイナモ説は確からしいと言われている。太陽や他の惑星も恒星も磁場を持っており、磁場は天体の基本的性質なので、詳しい観測データが得られる地磁気ダイナモの考察には普遍的意義がある。

古地磁気学と地磁気逆転

高温で帯磁がなくなる火山岩がキューリー点以下に冷える時、地磁気の方に磁化されて固まる。また、海中の微岩石粒が沈降するときにも、地磁気の方に揃って海底に堆積する。これらの火山岩や堆積岩の位置と方向が生成時から変わっていないとすると、その帯磁から当時の地磁気方向を知ることが出来る。岩石の帯磁機構を調べるのが岩石磁気学、岩石の残留磁気から過去の地磁気分布を知るのが古地磁気学である。

松山基範 (1884-1958, 京大教授) は、現在の地磁気と逆方向の帯磁を持つ岩石を玄武洞で見つけ、満州など他の地域も調べて、地磁気方向が逆転していた時代があったと主張した。当時、これは注目されなかったが、その後の古地磁気学の発展により、地磁気方向が十数万年-数十万年の間隔で逆転していることが判った。正極期、負極期の時代を区分する図3には、ギルバート期、ガウス期と並んでマツヤマ期という時代名が記載されている。

海底の堆積岩が隆起して陸上に出来た崖の岩石磁気を測ると堆積当時の地磁気方向が判る。房総半島中央部の市原市養老溪谷に地磁気逆転が明確に判る崖が露出している (図4)。上部の正極期



過去 500 万年間の地磁気極性の逆転 [Ogg; 1995 を改変]

図 3. 地磁気極性の時間変化：年代は 100 万年単位（河野）

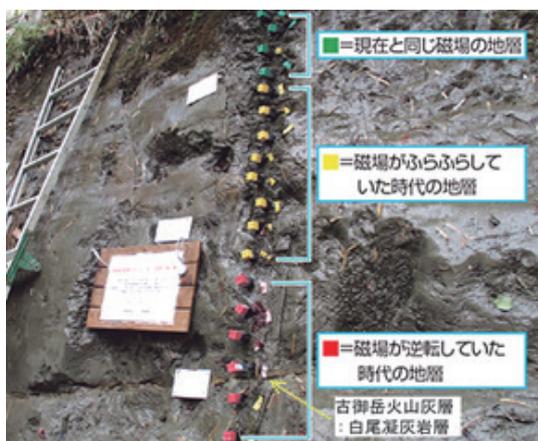


図 4. 地磁気逆転を示す地層（国立極地研究所）

（現在の極；緑色）と下部の負極期（マツヤマ期；赤色）の間に 77 万年前に対応する数メートルの転移層（黄色）があり、この期間に逆転が起こった。海底であったこの地層の堆積速度が速かった（約 2 m/1000 年）ので高精度の年代測定ができた。また、この地層は薄い火山灰層を含んでおり、逆転期の少し前に起こった古御岳噴火時のものであることが判っている。2019 年、国際地質科学連合 (IUGS) は、この地層を国際標準模式地の一つに指定、77 万年から 12 万 6000 年前までの期間（第四紀更新世中期）を Chibanian と呼ぶと決めた。

大陸の移動と海洋底拡大

地表のどの点でも磁針が地磁気北極方向を指す

ように、残留磁気はその岩石が出来た時の地磁気極の方向を保存しているから、地表の異なる二点での同時代岩石の残留磁気方向の延長線の交点が、その時代の地磁気極になっている筈である。この考えに基づき、アメリカ、アジア、ヨーロッパ、アフリカ、オーストラリア等のデータを用いて各地質時代の地磁気極が求められたが、異なる大陸のデータから求めた北極の位置は一致しなかった。どの時代でも地磁気北極は一つしかないから、北極点が一点に一致するよう時代ごとに大陸の配置を変えると数億年にわたる大陸移動が明らかになる。これは、1910 年代に A. ウエーゲナー (1880-1930) が提唱して受け入れられなかった大陸漂移説の実証であった。

古地磁気学は、海洋底では正極性、負極性の細長い地帯が縞模様になって分布していることを明らかにした（図 5）。これは、中央海嶺付近でマントルから上昇してきた熱いマグマが冷える際に、その時の地磁気を記憶して両側へ動いていくと解釈された。いわゆる海洋底拡大説であり、地球が十数枚の板（プレート）で覆われていて、それが移動し、境界にできる沈み込み帯で地震が多くなると言うプレートテクトニクスに根拠を与えるものであった。

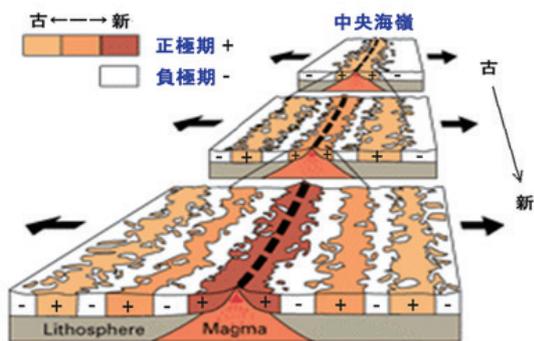


図5. 海洋底の拡大 (USGS)

宇宙空間開発競争

第2次世界大戦後最初の国際共同観測事業である国際地球観測年 (IGY; 1957.7-1958.12) が始まって間もなくの1957年10月4日、ソ連のスプートニク1号 (重量: 83 kg) が、11月にはライカ犬を載せた2号 (508 kg) が打ち上げられ、米ソの宇宙空間開発競争が始まった。当初の数年間ソ連優位で、ルナー1号 (1959年1月) は月から6000 kmの地点に接近し、ルナー2号 (9月) は月面に到達してペナントを残し、ルナー3号 (10月) は月裏側の写真を電送した。1961年4月にはY. ガガーリン (1934-1968) を載せたボストーク1号が地球を1周し、続いて8月にはG. チトフ (1935-2000) がボストーク2号 (5トン) で地球を17周 (25時間18分) した。しかし、ソ連は失敗もしており、上の成功例は多くの失敗の上に築かれたものであって、ガガーリンもミグ15戦闘機の飛行訓練中に墜落死している。

ソ連の人工衛星打ち上げは、米国の情報網も予知できず、全ての面での世界一を信じていた米国民にとって、宇宙空間からの攻撃をも可能にする「スプートニクショック」は深刻であった。スプートニク2号打ち上げの一ヶ月後に急いで発射したバンガードロケットは2秒後に爆発炎上し、ソ連に先行しようとした最初の月ロケット (1958年8月) も爆発炎上した。続いて月を目指したパイオニア1号 (10月)・2号 (11月)・3号 (12月) は、共に地球引力圏を脱出できず逆戻りした。パイオニア4号 (1959年3月) は月へ向かえたが、誘導技術未熟のため月から56000 kmの遠方を通過

した。米国月ロケットの成功は、1964年のレインジャー6、7号まで待たねばならなかった。

ガガーリンに対抗する有人飛行では、A. シェパード (1961.5, マーキュリー3号, 15分間)、グリソム (1961.7, 同4号, 16分間) の弾道飛行の後、J. グレンが地球を3周 (同6号, 1962.2, 4h 55m) して米国民の大歓迎を受けた。軌道周回飛行は、S. カーペンター (1962.7, 同7号, 3周, 260分)、W. シラー (1962.8, 地球6周) と続き、米国は少しずつ落ち着きを取り戻していく。

次節で述べるように、米国にもIGY期間中に10数kgの人工衛星を上げる計画はあったが、海軍のバンガードと陸軍のエクプローラー両計画が競合し、アイゼンハワー政府がバンガードを選択したのが遅れの原因と言われる。1958年7月に宇宙開発を担う航空宇宙局 (NASA) が作られた。

新学問分野の誕生

スプートニク・ルナー・ボストークはソ連の国威発揚には大いに役立ち、米国を慌てさせたが、科学観測では米国が着実に進んでいた。中でも、ヴァンアレンは、1952年に、気球から打ち上げたロケット (ロッキー) で、オーロラ帯上空の強い放射線を観測し、14 kgの小さな人工衛星エクプローラー1号 (1958.1 打ち上げ) と3号 (1958.12) のガイガーカウンターでヴァンアレン放射線帯を発見した。これは、IGY最大の成果と言われている。

IGYの頃まで、大気電気・地磁気・電離層・宇宙線の地上観測により緩やかに進んできた地球電磁気学は、人工飛翔体による宇宙空間直接現場観測により爆発的に発展していく。放射線帯に続き、磁気圏、太陽風、定在無衝突衝撃波などが発見され、真空で学問の対象ではないと思われていた電離層より上の空間が、希薄な磁化プラズマで充たされ、複雑な構造と、波動励起・荷電粒子加速・磁場再結合などの基本物理過程から生じる多彩な現象が生起していること、プラズマ物理学の

実験場としても重要であることが判ってきた。

この頃には、新観測事実の発見と共に、太陽風 (Parker, 1958), 磁場再結合 (Dungey, 1961), 磁気圏対流 (Axford/Hines, 1961) の理論, 大気重力波の超高層大気への応用 (Hines, 1961) など, その後の学問の指導原理となる概念が提起され, 新しい学問分野の爆発的興隆に相応しい躍進的な時代であった。以後, 地球電磁気学は, 太陽地球 (惑星) 系物理学へと変貌し, 超高層物理学, 磁気圏物理学, 宇宙空間物理学, 比較惑星学, Space Physics などの学問分野が生まれていく。

オーロラ

オーロラ (図6) は, その華麗でダイナミックな振舞いから, 多くの人々の関心を呼んできた。オーロラは高緯度のオーロラ帯では日常的に見られるが, 稀にしか現れない低緯度の住人にとっては不思議な現象で, 戦争など凶事の前兆かと言われていたりした。紀元前のギリシャ, ローマ, 中国で, オーロラと思われる現象が記録されている。日本では日本書紀にその記述がある。

今では, 東西方向に数千キロメートルの長さを持って揺れ動く光のカーテンの裾 (高さ約 100 km 以上) を地表から見上げるのがオーロラだと判っているが, この構造や分布の決定には長い時間を要した。

明確な目標点が無く激しく変化するオーロラを極夜に三角測量して高度を決めるのには大変な苦労があった。出現頻度分布の決定にも十数年の蓄積データを必要とし, 地磁気極を中心とする地磁気緯度 65–70 度の緯度円が出現頻度最大のオーロラ帯であることが判った (地磁気極は地理極から 11.5 度離れている)。A.J. オングストレーム (1814–74) はオーロラ光がいくつかの輝線で出来ており, 最も強い緑の輝線の波長を 5577 \AA と測定したが, それが酸素原子の輝線であると同定できたのは漸く 1925 年であった。当時の真空放電管実験では, オーロラ高度の超高層大気の実現するのが難しかったからと言われている。



図6. イエローナイフ (カナダ) のオーロラ (的場)

100 km 以上と判った高度測定は, オーロラが気象現象ではなく超高層大気現象であること, オーロラ帯は, 地磁気がオーロラを支配しているらしいこと, また, 輝線スペクトルは, オーロラが大気の放電発光現象であることを明確にした。オーロラは太陽光の雲による反射であるとの説もあったが, そうだとすると輝線ではなく連続スペクトルになる。やがて, オーロラに伴って磁針が動くことが発見され, オーロラが地磁気と関連していること, さらにまた, 両者が太陽活動とも関係していることも判ってきた。

大学院生の時 (1964 年), 私は, フェアバンクス郊外のアラスカ大学で, 同志社大学で作られたオプティカルポンピング磁力計のテスト観測をした。林の中に磁力計センサーを設置して観測室に置いた記録計を見ていると, 夜中近くに大きな変化が現れた。高緯度ではこんなに大きく磁場が変るのかと感心して眺め, 1 時頃に宿舎に戻ろうと外に出ると, 満天の星空に鮮やかなオーロラが舞っていた。オーロラには地磁気の乱れが伴うという知識は持っていたが, 記録計の大きな変化を見ながら, オーロラが出ているかもしれないという思いに至らず, 実地体験の重要性を痛感した。しかし, 想定外であっただけに初めて見るオーロラの印象は強烈で, この分野の研究を続けようとする動機の一つになった。

オーロラ帯は, 長期蓄積データの統計が決めた最も活発なオーロラが見られる地域で, 地磁気極を中心とする同心円ベルトであるが, 人工衛星の

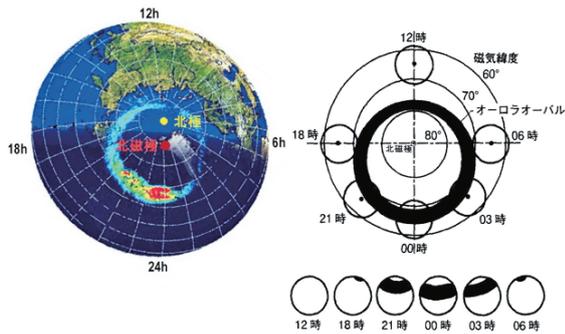


図7. 左図：上空からのオーロラ光度分布 (NASA),
右図：オーロラオーバルとオーロラ帯 (地磁気緯度 65-70 度) でのオーロラの見え方 (赤祖父・佐藤)

観測から、個々のオーロラの分布は楕円形ベルト (オーロラオーバル) になっていることが判った。

図7左図は、上空から撮影したオーロラの光度分布で、最強光度を赤色で表している。右図は、このオーバルの標準的な位置を示している。オーバルは、夜側にシフトしていて、昼側 (太陽側) で地磁気極に近く、夜側では遠くなっていて、真夜中でオーロラ帯の緯度 (65-70 度) と一致する。

図7右下図の6個の小円は、地磁気緯度 65 度の緯度円上の点からみた全天視野である。12 時の点からはオーロラオーバルは遙か北にあり視野に入らない。オーバルは、18 時頃に視野の北限に見え始め、南に移動して、0 時になると天頂の南まで入ってくる。オーロラ活動はこの時間に最も活発化し、明け方になるにつれて、再び北へ去っていく。

太陽風と惑星間空間磁場 (IMF)

太陽からは希薄なプラズマ流 (太陽風; 電子・陽子・少しのヘリウムイオンから成る) が常に吹き出しており、これにより地球磁場は細長い空洞 (磁気圏) に閉じ込められていて (図8), そのサイズは、 Re を地球半径として太陽側で $10 Re$ であり、反対側 (尾部) は $200 Re$ 以上に伸びている。

太陽は小規模で強い黒点磁場と弱いが大規模な一般磁場を持っており、一般磁場は太陽系全空間に延びて惑星間空間磁場 (IMF) を作っている。正磁極期の地球磁場の磁力線は南極から出て北極

に入るから、赤道面では南→北の方向を向いている。IMF が南向きになると北向き地球磁場との間に磁場がゼロになる点が出来、ここで IMF と地球磁場とが繋がる。これは磁場の再結合と呼ばれ、磁気流体力学においてエネルギーの変換と流入を支配する重要な基礎物理過程になる。

IMF が南向きの時と北向きの時では磁気圏のトポロジーが変わり (図9), 磁気圏前面で再結合が起こる南向きの時には太陽風のエネルギーが磁気圏へ流入して、磁気圏擾乱が生じる。数時間のサブストームは頻繁に、数日続く磁気嵐は時々起こり、オーロラも活性化する。太陽面で大きな擾乱が起こると2, 3日後に大きな磁気嵐が起こると予報されることがあるが、太陽面擾乱が大きくても地球近傍の IMF が南向きにならないければ磁気圏擾乱は大きくならない。

オーロラオーバルは、IMF が北向きの時は小さく縮み、南向きに大きくなると膨張して低緯度でもオーロラが見えるようになる。それでも、オーロラが日本や中国の真上までくることは滅多

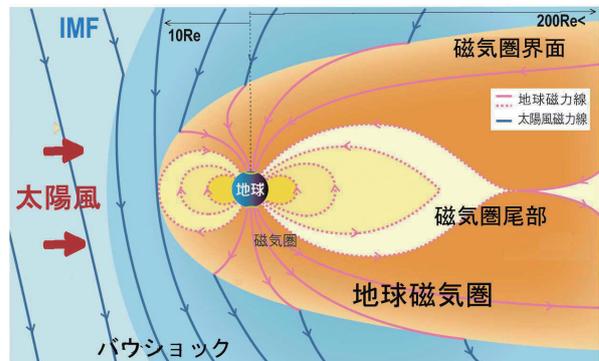


図8. 太陽風, 惑星間空間磁場 (IMF), 地球磁気圏

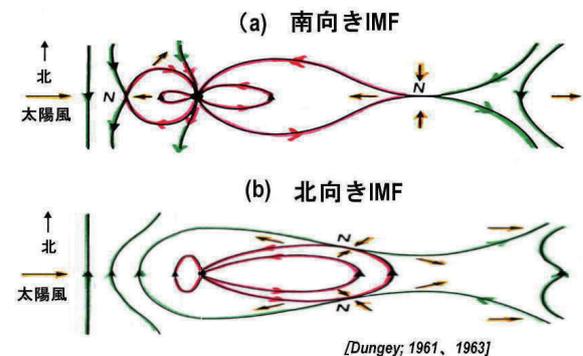
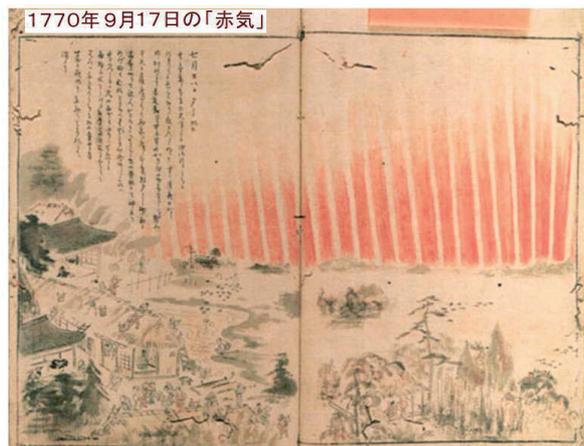


図9. 磁気圏の二つのトポロジー
赤：地球の磁場, 緑：惑星間空間磁場 (IMF)



尾張藩士高力種信著「猿猴庵随観図会」1778年頃 国立国会図書館蔵

図 10. 日本で見られた赤いオーロラ (赤気)

はなく、北方に近づいてきたオーロラの上部を見ることになる。低緯度で見えるオーロラは赤い(赤気と呼ばれた)が、これは、北方に現れるオーロラの赤い(6300 Å; 酸素原子の輝線)高所部分を見ているからである。オーロラの典型色である緑黄色の高度は低いので低緯度からは見えない。図6の写真も、下方は黄緑で上方が赤味を帯びている。私は、地磁気緯度が約50度のユタ州ローガンで赤いオーロラを見たが、北の山の向こうで山火事が起こっているようであった。古代ローマでは消防隊が出動したことがあるそうである。

図10は、日本に現れた赤いオーロラのスケッチである。これは、北海道から佐賀まで全国で見られ、多くの記録が残されている。日本の地磁気緯度は25-35度とかなり低い。

現在では、地球からの距離10 Re ~ 20 Reの磁気圏尾部で加速されて磁力線沿いにオーロラ帯超高層大気に入射した高エネルギー荷電粒子(主に電子)が、原子・分子と衝突して励起状態を作り、それが元のエネルギーレベルに戻る時に出る光がオーロラで、入射粒子のエネルギースペクトルによって発光高度と発光色が変わると判っており、

地上観測、飛翔体現場観測のデータ解析と計算機シミュレーションを組み合わせて、磁気圏プラズマ中での電流や粒子加速の研究が進んでいる。磁力線再結合が尾部でも起こり、重要な役割を果たしていることも判ってきた。太陽風とIMFは地球磁気圏の構造を決める重要な基礎物理量なので、地球の太陽側約200 Reのラグランジュ点(太陽と地球の引力が等しくなる点)に常駐している飛翔体が常時モニターしている。

私は、イエローナイフ(カナダ)へのオーロラツアーに同行したことがあり、IMFのリアルタイム観測値からのオーロラ出現予測が、かなり良く当たって不思議がられた。

参考文献

- 赤祖父俊一, オーロラ 地球を取り巻く放電現象, 自然選書, 中央公論社, 1975
- 赤祖父俊一, オーロラへの招待, 中公新書1273, 中央公論社, 1995
- 荒木徹, 地磁気世界資料解析センターの設立, 京大地球物理学研究の百年, 2010
- 小口高, 神秘の光オーロラ, NHKブックス329, 日本放送出版協会, 1978
- 小口高, 河野長, 地球から宇宙へ: プラズマの海の孤島(理科年表読本), 丸善, 1984
- 佐藤夏雄・門倉昭, オーロラの謎 南極・北極の比較観測, 極地研ライブラリー, 成山堂書店, 2015
- 力武常治, なぜ磁石は北をさす, 地球電磁気学入門, ブルーバックB-364, 光文社, 1984
- Schlegel, K., Space weather and Alexander von Humboldt's Kosmos, Space Weather, AGU, 2006.