

1.1. オーロラ観測の歴史

・赤気・紅気：日本の古い史書における低緯度オーロラの名称。日本で見られた最も古いオーロラの記録は、日本書紀における記述である

1-2. オーロラ研究の幕開け

・陰極線(cathode ray)：真空管の中で観察される電子の流れであり、電子線とも呼ばれる
・オーロラ電子(precipitating electrons)：降下電子、降り込み電子とも呼ばれる。オーロラの発光源となる宇宙観から地球大気へと加速されて降ってくる電子のことを表す。磁気圏から電離圏へ降下する電子は、磁気圏-電離圏結合において重要な役割を持つ。降下電子のエネルギーが大きいほどオーロラは低い高さで発光する

・磁気嵐(magnetic storm)：太陽面で起こる大規模な爆発により放出されたコロナガスの塊が地球磁気圏に到達した際に観測されるような地磁気擾乱を磁気嵐という。中低緯度に位置する日本では、磁気嵐の際に地磁気の水平成分が大きく変動する。水平成分が急に増加する時間帯を初相(initial phase)、その後地磁気水平成分が減少し極小になるまでを主相(main phase)、極小に達したのち緩やかに地磁気が回復する時間帯を回復相(recovery phase)という

・磁北(magnetic north)：方位磁針の N 極が指し示す方向
・偏角(declination)：地磁気ベクトルの水平成分(磁北の向き)と真北(北極点、即ち自転軸の北端)との成す角度であり、真北から見て東側を正として計る
・伏角(inclination)：地磁気ベクトルと水平面のなす角であり、下向きを正として図る。北半球で高緯度になるほど大きくなる。

1-3. オーロラの出す光

・電子ボルト(electron volt)：エレクトロンボルトということもある。1 ボルトの電位差で加速された電子 1 つのエネルギーが 1 電子ボルトである。電子ボルトの単位は[eV]と表記され、ジュールに換算すると $1.6 \times 10^{-19} [J]=1[eV]$ である

1-4. オーロラ概観

・オーロラ爆発(auroral break-up)：オーロラブレイクアップとも言う。夜空の一点から突然光が輝き出し、一気に空全体にオーロラが広がり明るく輝く現象を break-up(破れる)という。この爆発現象は低緯度側から発達し、激しい動きをしながら天頂から極方向へ移動してやがて弱まる。継続時間は 10 分程度

・ディスクリートオーロラ(**discrete aurora**) : 形がはっきりしているタイプのオーロラ。一般に知られるカーテン状のオーロラや、アーク状のオーロラなどが含まれる。ディスクリートオーロラは磁 力線上の加速域と呼ばれる電場を通じて加速された降下電子によって生成される

・脈動オーロラ(**pulsating aurora**) : パルセーティングオーロラ、明滅型オーロラとも呼ばれる。脈動オーロラは、数秒から数十秒の準周期的な周期で明滅を繰り返すオーロラ現象であり、サブストーム回復相のサブオーロラ帯(オーロラ帯の低緯度側に広がる領域)で頻繁に発生する。不規則な形をしたパッチ状のオーロラ構造をしている。脈動オーロラは準周期的な数 keV から数十 keV の比較的高エネルギー電子の降り込みにより生成される

・オーロラオーバル(**auroral oval**) : オーロラを極域上空から観測すると磁極を中心とする歪んだリング状に見え、このリングをオーロラオーバルと呼ぶ

・オーロラ帯(**auroral zone**) : オーロラベルトと呼ばれることもある。オーロラが統計的に出現しやすい磁気緯度が 65° から 70° の地帯

・オーロラサージ(**auroral surge**) : 極めて明るいディスクリートオーロラの種類。西向きに伝搬していく西向き伝搬性サージ(**westward traveling surge**)とも呼ばれる

・低緯度オーロラ : 太陽活動の活発な時期には、日本のような低緯度地帯でもしばしば北の空が暗赤色に染まるようなオーロラが観測される。これを低緯度オーロラと呼ぶ。大きな磁気嵐が発生すると、プラズマシートの地球側境界がより地球に近くなり、オーロラが低緯度でも見られるようになる。比較的低エネルギーの電子によって生成されるため、高い高度で光る赤いオーロラとして現れる

1-5. 宇宙からのオーロラ観測

1-6. 地球磁気圏

・地球磁気圏(**geomagnetosphere**) : 宇宙空間の中で地球が持つ磁場の勢力が届く領域を指す。太陽風が吹き付けている磁気圏の前面は圧縮され、地球の夜側は、太陽風によって引き伸ばされて磁気圏尾部 (磁気圏テール) が形成される

・プラズマシート(**plasma sheet**) : 磁気圏において、赤道面付近で磁気圏の北側のローブと南側のローブの間に位置し、熱いプラズマの密度が濃く、磁場が弱いシート状の領域

・磁気圏ローブ(**lobe**) : 赤道を挟んで、北と南に伸びている空洞な領域をローブと呼ぶ。ローブには、地球の極域から伸びている磁力線が、夜側に長く引き伸ばされている。磁力線の向きは、北半球では地球向き、南半球では反地球向きである

・磁力線再結合(**magnetic field reconnection**) : 磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに変換される過程。反対向きの磁力線が接合するときが発生する。再結合、磁気リコネクション、磁気再結合、磁場の繋ぎ変え、など様々な表現がされる

1-7. オーロラのふるさとを探る

1-8. 他の惑星のオーロラ

- ・イオ衛星(Io) : 木星のガリレオ衛星の1つで、木星に最も近い軌道を周る。太陽系で最も活発な火山活動が観測されている

- ・トーラス (Io plasma torus) : イオプラズマトーラス、イオトーラスともいわれ、木星周囲をイオ衛星の軌道に沿ってプラズマがドーナツ状(トーラス状)に分布したもの。イオ衛星はその火山噴火により硫黄や酸素の中性粒子を木星磁気圏に供給し、それが磁気圏の電子と衝突励起、電荷交換反応をすることでイオン化される。さらにそのイオンが木星の磁場にピックアップされることで木星の磁場と共に木星の周囲を公転する

2-1. 恒星としての太陽

- ・熱核融合反応 (nuclear fusion reaction) : 軽い原子核同士が結びついて、より重い原子核になる反応。核融合反応とも言う

- ・温度 (temperature) : 分子の運動の度合い。振動もせず完全に静止している状態が、絶対0度である

2-2. 太陽の内部構造

- ・放射層 (radiation zone) : 太陽中心核で発生したエネルギーが放射によって伝達する領域

- ・対流層 (convection zone) : エネルギーの伝達が、対流によって行われる領域

- ・ガンマ線 (Gamma ray) : 波長が10pmより短い電磁波

- ・X線 (X ray) : 波長が1pm-10nmの電磁波 (ガンマ線と重複する部分がある)

2-3. 太陽大気

- ・コロナ (corona) : 太陽の外延大気。電離された状態になっている

- ・ドップラー効果 (Doppler effect) : 波の発生源と観測者との相対的な運動により、波の周波数が異なって観測される事

2-4. 太陽風

- ・太陽風 (solar wind) : 太陽から外に向かって飛び出していくコロナ大気を構成する粒子 (主として陽子と電子)

- ・コロナホール(coronal hole): 太陽面を X 線などで見た時、周囲より暗く見える部分

2-5. 太陽の磁場

- ・磁場の凍結 (frozen-in of magnetic field) :磁場がガスの運動とともに、一緒に動く事

2-6. 黒点

- ・黒点 (sun spot) : 太陽表面を観測した時、黒い点のように見える部分。黒点はペアになって現れる事が多く、自転の方向にある黒点を先行黒点と呼ぶ

2-7. 黒点の長期変動

- ・太陽の一般磁場 : 太陽にも地球全体のダイポール磁場と同様の一般磁場が存在する。これは極域で顕著に見られるので極域磁場とも呼ばれる

2-8. 太陽フレア

- ・太陽フレア (solar flare) : 太陽面で見られる爆発現象。広い波長の電磁波で確認される
- ・磁気再結合 (magnetic field reconnection) : 磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに変換される過程。反対向きの磁力線が接合するときが発生する

2-9. コロナ質量放出

- ・CME (coronal mass ejection) : 塊となって飛び出していくコロナガス
- ・フィラメント (filament) : 太陽の光球の上に細長く糸状に延びている構造。リム (淵) ではプロミネンスと呼ばれる
- ・太陽放射線 (solar cosmic ray) : 太陽が作る非常にエネルギーの高い粒子 (主成分は、陽子、ヘリウム、電子) をいう
- ・宇宙天気予報 (space weather prediction): 人工衛星や宇宙ステーションに危害を及ぼす宇宙線など、宇宙空間の危険を予測する事

3-1. 惑星の磁場

- ・磁場 (magnetic field) : 電氣的現象・磁氣的現象を記述するための物理的概念。磁場は

磁力線により構成され、プラズマはこの磁力線に巻き付く性質を持つ

- ・核 (core) : 中心核とも言い、天体の中心部分の構造。地球の核は高温で、太陽の表面温度の 6000K までに達する

- ・マントル (mantle) : 惑星や衛星などの内部構造で、核 (コア) の外側にある層

- ・マントル対流 (mantle convection) : 太陽の対流層では、中心の熱で熱せられたプラズマが膨張し、軽くなり上部のプラズマと入れ替わることで、エネルギーを外に伝達しているが、地球の内部も同様にマントルでこのような対流が起こっていると考えられている。対流は液体に起こる現象であるが、固体であるマントルも長期的にみると対流が発生し得ると考えられている

- ・電気伝導度 (conductivity) : 電気伝導率、導電率とも呼ばれる。定義は j を電流密度、 E を電場と表したとき、 $j = \sigma E$ の σ で与えられ、電気の流れやすさを表す

- ・導体 (conductor) : 伝導体、良導体ともいい、熱・電気を伝えやすい物体。金属などが例に挙げられる

- ・双極子磁場 (dipole magnetic field) : 正負の磁極の対を磁気双極子といい、磁場形状が磁気双極子で表すことのできる磁場や、それと近似できる磁場をいう

3-2. 地球磁気圏

- ・プラズマシート (plasma sheet) : 磁気圏において、赤道面付近で磁気圏の北側のローブと南側のローブの間に位置し、熱いプラズマの密度が濃く、磁場が弱いシート状の領域

- ・太陽の磁場 (Interplanetary Magnetic Field; IMF) : 太陽風の磁場、惑星間空間磁場ともいわれ、太陽で作られた磁場であり、それが太陽風とともに太陽系全体に広められた磁場をいう。太陽は自転しているので、太陽を中心にスパイラル状に広がっていく

- ・磁力線 (magnetic field line) : 磁場の中の曲線で、その上の各点での接線が、その点の磁場ベクトルの向きと一致するものをいう

- ・磁気再結合 (magnetic field reconnection) : 磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに変換される過程。反対向きの磁力線が接合するときが発生する。再結合、磁気リコネクション、磁気再結合、磁場の繋ぎ変え、など様々な表現がされる

- ・磁気圏尾部 (magnetotail) : 単に尾部ともいわれ、磁気圏の尾部をいう。尾部とは、惑星の磁気圏が太陽風に引き流されている領域をいい、そのため惑星から反太陽方向の領域に形成される

- ・電子ビーム (電子線, electron beam) : 電場などで加速された電子の光線状の流れ

3-3. 地球のオーロラ

- ・イオンビーム(ion beam) : イオン線ともいい、電子ビーム同様、電場などで加速されたイオンの光線状の流れ

- ・エネルギー準位 (energy level) : 量子力学において、原子、分子、原子核などの安定状態がもたらすエネルギーの値、あるいはそのエネルギーをもつ状態自体をエネルギー準位という。 エネルギーは任意の値をとることを許されず、不連続的なとびとびの値をもつ

3-4. 宇宙空間のさえずり

- ・オーロラ電子(precipitating electron) : 加速電子、降下電子ともいわれ、オーロラ発生域上空で局所的に発生した電場により地球方向に加速され降下していく電子のことで、オーロラが発生する原因となる電子

- ・ヴァンアレン帯 (Van Allen radiation belt) : 地球の磁場にとらえられた、陽子、電子からなる放射線帯。1958年にアメリカ合衆国が人工衛星エクスポローラー1号を打ち上げ、衛星に搭載されたガイガーカウンターの観測結果より発見された。名称は発見者であるアメリカの物理学者、ジェームズ・ヴァン・アレンに由来する。ヴァンアレン帯のさらなる理解のため、ERG衛星が昨年12月に打ち上げられた

3-5. 木星のオーロラ

- ・トーラス (Io plasma torus) : イオプラズマトーラス、イオトーラスともいわれ、木星周囲をイオ衛星の軌道に沿ってプラズマがドーナツ状(トーラス状)に分布したもの。イオ衛星はその火山噴火により硫黄や酸素の中性粒子を木星磁気圏に供給し、それが磁気圏の電子と衝突励起、電荷交換反応をすることでイオン化される。さらにそのイオンが木星の磁場にピックアップされることで木星の磁場と共に木星の周囲を公転する

3-6. 木星からの電波

- ・イオフットプリント(Io magnetic footprint; IFT) : 講義では、イオ衛星がつくるスポット状のオーロラと表現されていた。また英語表記では Io Magnetic Footprint であり、頭文字をとると IMF であるが、惑星間空間磁場も IMF と表記されるので、その混同をさけるために IFT と表現される。Magnetic とあるのは、イオ衛星を通過する磁力線が最終的に木星の電離圏と結びついており、その結合点が footprint であることを示している

3-7. 土星のオーロラ

- ・土星のリング : 太陽系で最も顕著な惑星の環である。 μm 単位から m 単位の無数の小さ

な粒子が集団になり、土星の周りを回っている。環の粒子はほぼ全て水の氷であり、塵やその他の物質が少量混入している

3-8. 天王星と海王星のオーロラ

3-9. 水星の磁気圏

4-1. 地上からのオーロラ多点観測

・ ALIS(The Auroral Large Imaging System) : スウェーデン北部に展開される地上多点観測網。ALIS のカメラは CCD カメラを用いており、無人の遠隔自動観測システムによって運用されている。主に 427.8、557.7、630.0、844.6 nm の干渉フィルターを CCD カメラに取り付けてオーロラの撮像を行う。

・ EISCAT (European Incoherent SCATter) : EISCAT 科学協会が運営している非干渉散乱(IS : Incoherent Scatter) レーダーシステムの総称である。EISCAT レーダーは地上から電波を送信し、超高層大気中の電子の散乱波を受信することで、高度 70 km から約 2000 km までの電子密度、電子温度、イオン温度の分布を高精度で観測できる。この EISCAT レーダーシステムは以下の3つのレーダーから成る。

1)ノルウェー北部のトロムソ (磁気緯度 66° N、磁気経度 117° E) に設置された世界唯一の3局方式のUHFレーダー (他に受信アンテナがキルナおよびソダンキラに設置されている)

2)単局方式のVHFレーダーと電離圏加熱装置

3)スヴァールバル諸島ロングイヤビンに設置されている2機のUHFレーダー

4-2. 宇宙からのオーロラ観測

・ 紫外線 (ultraviolet) : 波長が 10 - 400 nm、即ち可視光線より短く軟 X 線より長い不可視光線の電磁波

・ X 線 (X ray) : 波長が 1pm-10nm の電磁波 (ガンマ線と重複する部分がある)

・ 軌道傾斜角 (inclination) : ある天体の周りを軌道運動する天体について、その軌道面と基準面とのなす角度を指す。我々の太陽系の惑星や彗星・小惑星などの場合には、基準面は主星である天体、太陽の自転軸に垂直な平面つまり太陽の赤道面である

4-3. 地上からの惑星オーロラ観測

- ・トーラス (Io plasma torus; IPT) : イオプラズマトーラス、イオトーラスともいわれ、木星周囲をイオ衛星の軌道に沿ってプラズマがドーナツ状 (トーラス状) に分布したもの。イオ衛星はその火山噴火により硫黄や酸素の中性粒子を木星磁気圏に供給し、それが磁気圏の電子と衝突励起、電荷交換反応をすることでイオン化される。さらにそのイオンが木星の磁場にピックアップされることで木星の磁場と共に木星の周囲を公転する

4-4. 宇宙からの惑星オーロラ観測

- ・クエーサー (quasar) : 非常に離れた距離に存在し極めて明るく輝いているために、光学望遠鏡では内部構造が見えず、恒星のような点光源に見える天体

4-5. 木星探査機による観測

4-6. 土星探査機

- ・Eリング (E ring) : 最も外側の環で、E環とも呼ばれる。ほとんどが氷から構成される希薄なディスクであり、ケイ素や二酸化炭素、アンモニアも含まれる。他の環とは異なり、顕微鏡サイズの粒子から成り立っている。E環の粒子は、氷ではなく、塵、ガス、煙であり、2005年、その源は、エンケラドゥスの南極付近の氷火山の噴火により放出されたものであると確定された

- ・電離 (ionization) : イオン化とも呼ばれる。電氣的に中性である原子や分子が、なんらかの外部要因によって荷電した原子、分子になること。宇宙空間においては、太陽の紫外線からエネルギーを得て電離 (光電離) したり、高エネルギーな電子と衝突して電離 (電子衝突電離) したり、他の荷電粒子から電荷を受け取り電離 (電荷交換反応) したり、電離方法は様々である

4-7. 木星探査機 JUNO

- ・極軌道 (polar orbit) : 人工衛星、探査機が天体の極上空を通過するような軌道。よって軌道傾斜角は天体の赤道面に対して 90 度に近い値を持つ

4-8. 水星探査機