



修士論文

磁気圏から極域電離圏へ流入する電磁エネルギーと
降下粒子エネルギーに関する研究

名古屋大学 大学院理学研究科

素粒子宇宙物理学専攻 宇宙地球物理系

(太陽地球環境研究所)

半田弘司

平成 18 年度

要旨

磁気圏—電離圏結合を理解する上で重要な、磁気圏から極域電離圏へ流入する電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの統計的な描像を理解するために、ノルウェーのトロムソ（69.6°N, 19.2°E）にある EISCAT UHF レーダーを用いて統計的な研究を行った。EISCAT UHF レーダーの沿磁力線方向を観測するモード（CP-1）で得られた1987年1月14日から2004年11月13日までのデータを用いて、磁気圏から流入する電磁エネルギーと降下粒子のエネルギーを統計解析し、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの磁気地方時依存性、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの kp 指数（地磁気擾乱度）依存性、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動依存性を調べた。さらに、これら2つのエネルギーの電離圏の状態依存性を調べるために、電離圏の電子密度に大きな影響を与える太陽天頂角（具体的には、電子密度については天頂角、エネルギーの依存性については日照・日陰）に対する依存性を調べた。

電磁エネルギーと降下粒子エネルギーともに時間・空間的に流入量は大きく変化していたが、同時に大きな値を取る割合は少なく、片方のエネルギーが大きければもう片方は小さいという負の相関関係が見られた。降下粒子エネルギーは kp 指数と正の相関が見られ、電磁エネルギーも明け方と夕方 kp 指数と良い相関関係にあった。真夜中における電磁エネルギーは日陰時のみ良い相関があった。両エネルギーの太陽活動依存性を調べた結果、電磁エネルギーは太陽活動度と正の相関が、降下粒子エネルギーは負の相関が認められた。

両エネルギーの電離圏の状態への依存性については、日照・日陰が磁気圏から電離圏へのエネルギー流入をコントロールしている事が示唆された。両エネルギーともに、トロムソにも日照がある時には日陰の時よりも流入量が少なかった。日照時は電気伝導度が大きい事から電場が日陰時に比べ小さくなっていた事が分かった。さらにトロムソと磁気共役点両方の日照依存を調べた所、トロムソが日陰時でも共役点に日照がある時の方が、降下粒子エネルギーが多く流入していた。降下粒子エネルギーほどでは無いが、電磁エネルギーもトロムソと共役点における日照の有無によって変化していた。これらの効果は、トロムソだけでなく、共役点を含めた2地点における日照の有無が磁気圏—電離圏エネルギー結合をコントロールしている可能性がある事を示唆している。

目次

要旨

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 序章 | 1 |
| 1.1 電離圏 | 1 |
| 1.2 磁気圏 | 2 |
| 1.3 磁気圏—電離圏結合 | 5 |
| 1.4 太陽活動周期 | 6 |
| 第2章 本研究の背景及び目的 | 12 |
| 2.1 研究背景 | 12 |
| 2.2 本研究の目的 | 14 |
| 第3章 観測装置とデータ | 17 |
| 3.1 EISCAT レーダーの概要 | 17 |
| 3.2 非干渉散乱レーダーによる物理量の導出 | 18 |
| 3.3 観測プログラム | 20 |
| 第4章 解析手法 | 23 |
| 4.1 電磁エネルギーフラックス | 23 |
| 4.2 降下粒子エネルギー | 25 |
| 4.3 データ | 28 |
| 第5章 解析結果 | 32 |
| 5.1 太陽光により生成される電子の密度分布のモデル化 | 32 |
| 5.2 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係 | 34 |
| 5.3 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 依存性 | 36 |
| 5.4 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの kp 指数依存性 | 37 |
| 5.5 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動度依存性 | 38 |
| 5.6 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性 | 39 |
| 5.7 結果のまとめ | 43 |
| 第6章 考察 | 68 |
| 6.1 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの平均値の比較 | 68 |
| 6.2 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 依存性 | 68 |
| 6.3 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係 | 69 |

| | | | |
|----------|-------------------------------|-------|----|
| 6.4 | 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの kp 指数依存性 | | 70 |
| 6.5 | 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動度依存性 | | 70 |
| 6.6 | 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性 | | 79 |
| 第7章 | 結論と今後の課題 | | 71 |
| Appendix | | | 81 |
| 参考文献 | | | 90 |
| 謝辞 | | | 95 |

第 1 章 序章

1.1 磁気圏

地球は固有磁場を持っている。地球磁場は無遠慮まで双極子型で広がってはならず、太陽から吹き出している太陽風 (solar wind) と呼ばれる高速のプラズマ流と相互作用し、磁気圏 (magnetosphere) と呼ばれる領域を形成している。磁気圏の構造を図 1.1 に示す。太陽風の動圧によって磁気圏の昼間側は圧縮され、その一方で磁気圏の夜側は反太陽方向に引き延ばされる。太陽風の動圧と地球磁場の磁気圧が釣り合う一番外側の境界を磁気圏境界面 (magnetopause) と呼び、太陽風によって引き延ばされた磁気圏の夜側領域を磁気圏尾部 (magnetotail) と呼ぶ。地球から昼側の磁気圏境界面までの距離は約 $11 R_E$ ($R_E = 6370 \text{ km}$) であるのに対し、夜側の磁気圏境界面までの距離はその十倍以上にもなる。磁気圏境界面の昼間側には、超音速の太陽風が磁気圏に遮られる事により衝撃波面が形成される。この衝撃波面をバウショック (bow shock) と呼び、バウショックと磁気圏境界面との領域をマグネトシース (magnetosheath) と呼ぶ。磁気圏赤道面の南北両側に広がる領域には低温プラズマが存在し、この領域はローブ (lobe) と呼ばれている。ローブの磁力線を電離圏に投影した領域は極冠域 (polar cap) と呼ばれている。ローブには含まれた磁気赤道面付近の領域はプラズマシート (plasma sheet) と呼ばれ、高温プラズマが蓄積している。プラズマシートの磁力線を電離圏に投影した領域をオーロラ帯 (auroral oval) と呼ぶ。オーロラを発生させる高エネルギー粒子の重要な供給源はプラズマシートである。プラズマシートよりも地球側にある、地球近傍を取り囲むように高エネルギープラズマが存在する領域を放射線帯 (radiation belt) またはヴァンアレン帯 (Van Allen belt) と呼ぶ。放射線帯よりも地球側に存在する、低温プラズマによって満たされている領域をプラズマ圏 (plasmasphere) と呼ぶ。プラズマ圏の外側境界はプラズマポーズ (plasmopause) と呼ばれ、地球中心から約 $4 R_E$ に位置する。

磁気圏は、地球磁場と太陽風の相互作用によって形成されていることから、太陽活動に呼応して形状を変化させる。また、磁気圏内の粒子環境も磁気嵐やサブストームなどの発生に伴い大きく変化する。これらの磁気圏の擾乱は様々な形で電離圏に強く影響を及ぼしている。

1.2 電離圏

電離圏とは、地球の超高層大気が太陽から放射される極端紫外線や X 線などの短波長の電磁波を吸収して部分的に電離し、磁気圏と電磁氣的に結合している高度 60 km から約 1000 km までの領域である。電離源の主要なものとしては、この他に銀河宇宙線、太陽宇宙線が挙げられる。極域においては、磁気圏から電離圏へ降り込んでくる高エネルギー電子やプロトンも重要な電離源である。超高層大気を構成する原子や分子の束縛電子が電離源からエネルギーを受け取り、束縛電子が遊離した結果、正イオンと自由電子が生成され、再結合により消滅する。電離圏の電子密度のピークはおよそ 300 km の高度に現れ、ピーク高度より高高度では電子密度は指数関数的に減少する。ピーク高度より低高度でも電子密度は減少するが、いくつかの特徴的な高度で電子密度の高度分布に膨らみが見られる。電離圏は電子密度の高度分布の特徴を基に、低高度から *D* 領域（高度 60-90 km）、*E* 領域（高度 90-150 km）、*F* 領域（高度 150-600 km）と区分される。以下、各領域について順に説明する。また、各種イオンと電子の数密度の高度分布を図 1.2 に示す。

・ *D* 領域

D 領域は高度約 60-90 km の、正の分子イオンと電子の他に正負の電荷を持つ水和イオンが共存する弱電離状態（電離度： 10^{-12} - 10^{-10} ）の領域である。太陽放射のライマン α （波長 121.6 nm）を電離エネルギー源とする、一酸化窒素 (NO) の電離が顕著である。*D* 領域で起こる現象の例として極冠域電波吸収 (PCA: Polar Cap Absorption)、極域夏期中間圏エコー (PMSE: Polar Mesosphere Summer Echoes)、夜光雲 (NLC: Noctilucent Clouds) が挙げられる。極冠域吸収は太陽起源の高エネルギープロトンによる異常電離（電離度： 10^{-10} - 10^{-8} ）によって引き起こされる短波帯電波の異常吸収現象である。極域夏期中間圏エコーと夜光雲は、夏に極域中間圏界面付近（高度 80-90 km）が極低温 (< 150 K) になる時に見られる。極域夏期中間圏エコーは短波帯電波が反射される現象で、夜光雲は日出前や日没後に観測される現象である。

・ *E* 領域

E 領域は、高度約 90-150 km の領域である。日中には電子密度が 10^{11} /m³ 程度のピークが高度 110 km 付近に存在する。主な電離源は太陽の極端紫外線であ

る。そのため電子密度は基本的には太陽天頂角に支配されている。極域では極端紫外線の他にオーロラ粒子も重要な電離源であり、オーロラ粒子の影響が強い際には電子密度は中・低緯度における日中の E 領域と同程度あるいはそれ以上になる事もある。1 次イオンとして窒素分子イオン (N_2^+)、酸素分子イオン (O_2^+)、酸素原子イオン (O^+) が電離生成されるが、生成と消滅の化学反応によって、最終的なイオン組成は一酸化窒素イオン (NO^+) が約 75%、酸素分子イオン (O_2^+) が約 25%となる。 E 領域には、スポラディック E 層と呼ばれる突発的で狭い高度範囲に高い電子密度層が現れる現象があり、赤道域から極域までの広い緯度範囲で見られる。この現象は流星起源の金属イオンが E 領域の中性大気風の方向がある高さで逆転するシアーによって、集積される事によって発生する。また、それに加えて赤道域と極域ではそれぞれ特有の発生機構があり、赤道域では磁気赤道 E 領域に現れる赤道ジェット電流に伴って、高緯度ではオーロラ現象に関連してスポラディック E 層が発生する。

E 領域の重要な特徴としてイオンが中性粒子と衝突し、電子と異なる運動をする事によって電流が流れる事が挙げられる。この領域ではイオンのジャイロ周波数とイオン—中性粒子間の衝突周波数が近づき、イオンの運動は中性大気が静止している系では電場ドリフトの方向から偏向される。しかし電子は、電子のジャイロ周波数が電子—イオン粒子間の衝突周波数よりも十分大きいため、衝突による効果が無視でき、電場ドリフトすると考えて良い。イオン—中性粒子間の衝突周波数、電子—中性粒子間の衝突周波数の高度分布を図 1.3 に示す。この結果イオンと電子の速度に差が生じ、電流が流れる。電離圏を流れる電流は磁力線方向と磁力線に垂直な方向のベクトル和で表され、電流 (\mathbf{j}) の式は、

$$\mathbf{j} = \sigma_P \mathbf{E}_\perp - \sigma_H \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B} + \sigma_\parallel \mathbf{E}_\parallel \quad (1.1)$$

と表される[Brekke, 1997]。ここで、 \mathbf{E}_\perp は磁力線に対して垂直方向の電場、 \mathbf{E}_\parallel は磁力線に対して平行方向の電場、 σ_P はペダーセン電気伝導度、 σ_H はホール電気伝導度、 σ_\parallel は磁力線方向の電気伝導度である。式(1.1)の右辺第一項がペダーセン電流 (Pedersen current)、第二項がホール電流 (Hall current)、第三項が沿磁力線電流である。ホール電流は主として電子により担われて流れる電流で、電場ドリフト方向のイオンと電子の速度差によって流れ、ペダーセン電流は電場方向に運動するイオンと電子の速度差によって流れる。電離圏でのエネルギー散逸は電流と電場の内積で表され、式(1.1)と電場の内積を取るとペダーセン電流の

みがエネルギー散逸に寄与する事が分かる。中性大気の運動を考慮した場合のエネルギー散逸やペダーセン電気伝導度、ホール電気伝導度は4.1節で述べる。

・ F 領域

F 領域 (高度約 150-600 km) では、日中に二つの電子密度のピークが現れ、高度 120 km から 200 km に出現するピークを F_1 層、高度 300 km 付近のピークを F_2 層と区別している。 F_1 層は夜間に消滅するが、 F_2 層は常に存在する。 F_2 層より低高度では、イオンと中性大気の衝突が重要であり、極端紫外線で電離したイオンは、イオン再結合や電荷交換反応といった化学反応によって消滅し、おおよそ光化学平衡が成り立っている。夜間は電離源である極端紫外線が侵入しないので、電離生成が小さくなり、光化学平衡を保つために消滅が進む。その結果、電子密度が減少し、 F_1 層が消滅する。一方で、 F_2 層より高高度では、イオンと中性大気の衝突周波数が小さくなり、化学反応による効果だけではなく、個々の粒子における拡散による輸送の影響が大きくなる。その結果、イオンや電子は中性大気中を拡散し、重力と圧力勾配力が均衡する拡散平衡に近づく。この時、イオンと電子の質量差により重力分離が生じる。しかしイオンと電子の分極から生じる静電場が作用し、電子が静電場を中和するように運動するので、両者は等しい速度で拡散運動を行う。このように電子とイオンが電氣的引力によって互いに引きずりあう形で拡散することを両極性拡散と呼ぶ。 F_2 層が夜間でも消滅しないのは、両極性拡散によって F_2 ピーク上部からプラズマが下降し補充されるためである。 F 領域の主要なイオンは酸素原子イオン (O^+) である。 F 領域の上側は、より軽い水素イオン (H^+)、ヘリウムイオン (He^+) が主要なイオンとなる。この領域は中低緯度ではプラズマ圏、極域では磁気圏へとつながっている。プラズマ圏は地球磁力線に沿って電離圏 F 領域から補充されるプラズマで満たされており、磁気圏の中では、プラズマ密度の比較的濃い領域 (10^8 - 10^9 / m^3) となっている。このため、極域 F 領域は中低緯度 F 領域よりも電子密度が低くなる。

1.3 磁気圏—電離圏結合

磁気圏と電離圏は磁力線を介してエネルギーや物質を交換し合い、相互に作用を及ぼし合っている。これを磁気圏—電離圏結合と呼んでいる。

磁気圏では太陽風との相互作用によって明け方から夕方に向かう大規模な電場が発生し、プラズマ対流が駆動されている。磁力線に沿う方向の電気伝導度は、磁力線に直交方向の電気伝導度に比べて十分大きいので、各磁力線はほぼ等電位と考える事が出来る。そのため、磁気圏に存在する電場は磁力線を介して極域電離圏に投影される。磁気圏のいくつかの領域では、正電荷と負電荷が異なる方向に運動する事によって磁場に直交方向の電流が流れている。磁気圏尾部のプラズマシートには尾部電流、放射線帯には赤道環電流が流れている。磁気圏内で閉じる事ができない電流は、電気伝導度を持つ電離圏に沿磁力線電流として流れ込み、極域電離圏電流につながる電気回路を構成している。大規模で比較的常時存在する沿磁力線電流分布として、*Region 1* 電流系と *Region 2* 電流系が存在し、*Region 1* 電流系はオーロラ帯高緯度側の午前側に下向き沿磁力線電流、午後側に上向き沿磁力線電流の電流系で、*Region 2* 電流系はオーロラ帯低緯度側に存在し、高緯度側の *Region 1* 電流系と逆向きの電流系である[Iijima and Potemra, 1976]。図 1.4 に *Region 1* 電流系と *Region 2* 電流系の分布を示す。沿磁力線電流は主に電子によって担われ、ディスクリートオーロラに伴う上向き電流系では電子が磁気圏で下向きに加速されている。粒子を加速する機構の一つに沿磁力線電場による加速があり、代表的な例として *inverted-V* 構造が知られている[Marklund and Karlson, 1997]。

磁気圏から電離圏へ電場が投影され、沿磁力線電流が流れる事から、磁気圏—電離圏間には電磁エネルギーの流れ（ポインティングフラックス）が存在する。基本的には、電磁エネルギーは磁気圏から電離圏へ流入している[Gary et al., 1994; 1995]。一方、沿磁力線電流を担う降下電子に着目すると、降下電子の運動エネルギーは電離圏の中性粒子に与えられ、エネルギーを受け取った中性粒子は励起や電離をする。例えばオーロラは、降下粒子からエネルギーを得た中性粒子の電子が励起され、その高いエネルギー準位から低いエネルギー準位に戻る際に余剰エネルギーを放出する発光現象である。以上に述べたように、磁気圏と電離圏は電磁エネルギーや降下粒子の運動エネルギーをやり取りし合うエネルギー結合を形成している。

1.4 太陽活動周期

地球周辺の宇宙環境は、太陽から常に放射している電磁波と太陽風によって、その基本的な構造が決められている。これに加えて、太陽フレアやコロナガスの噴出（CME）といった突発的なエネルギー放出現象が太陽表面付近で起こる。太陽で起こるこれらの突発的な活動現象には、太陽の磁場が深く関係している。太陽面で強い磁場がある場所には太陽黒点が観測されている。このことから、太陽黒点と太陽活動は密接な関係にあると言える。太陽活動の指標として最もよく使われるものは、太陽黒点相対数 R と波長 10.7 cm の太陽電波強度 ($F_{10.7}$ 指数) である。太陽黒点相対数 R はウォルフによって以下のように定義された[Hargreaves, 1992]。

$$R = k(10g + f) \quad (1.2)$$

f : 太陽全面に見えるすべての黒点群の中にある一つ一つの黒点の総数。

g : 黒点群の数。

k : 観測者や望遠鏡の違いを補正する係数。

太陽黒点相対数 R はいくつかの周期を持って増減している。最もはっきりした周期は約 11 年であり、11 年周期の変動を太陽活動周期変動と呼んでいる。太陽活動によって太陽放射エネルギーは図 1.5 のように変化する[Chamberlain, 1978]。 R が最大の時期を太陽活動度極大期、最小の時期を太陽活動度極小期と呼ぶ。

$F_{10.7}$ 指数は、カナダのオタワにあるドミニオン天文台で測定される 10.7 cm (周波数は 2.8 GHz) 太陽電波の強度を、1 AU (AU = 約 1.5×10^{11} m) での値に換算した 10^{-22} W /m² Hz 単位で表した値である。10.7 cm 太陽電波の強度が極端紫外線や X 線の強度と良い相関にある事が示されており、電離圏物理研究では頻繁に用いられている。また、 $F_{10.7}$ 指数は太陽黒点相対数 R と良い相関を持っており、 $F_{10.7}$ 指数は太陽活動度をよく示すと言える。本研究では、太陽活動度の指標としてこの $F_{10.7}$ 指数を用いる。図 1.6 に 1987 年から 2004 年までの $F_{10.7}$ 指数の年変動を示す。今後本論文では太陽活動度の高低の基準として、各年の $F_{10.7}$ 指数の年平均値が 120 より大きい時期を「太陽活動度が高い (High)」と呼び、120 より小さい時期を「太陽活動度が低い (Low)」と定義する。

太陽活動の変化によって電子密度、及びその高度分布は変化する[Richmond,

1987]。太陽活動度極大期と極小期における電子密度の高度分布を図 1.7 に示す。太陽活動極大期における高度 400 km 以上の電子密度は太陽活動極小期に比べ、昼夜ともに約 6 倍高くなる。次に、中性大気組成の太陽活動度による違いを図 1.8 に示す。各組成の高度 400 km 以上における密度は、太陽活動極小期より太陽活動極大期の方が大きい事が分かる[Brekke, 1997]。

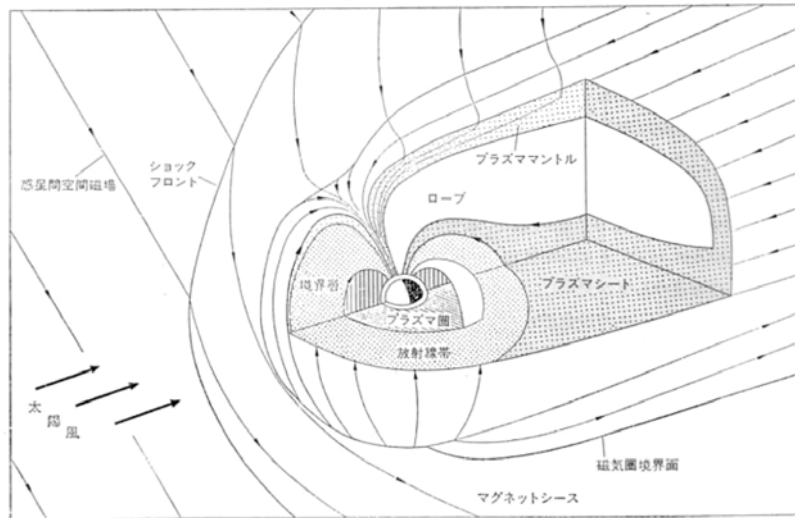


図 1.1：磁気圏の構造[福西他、1983]。

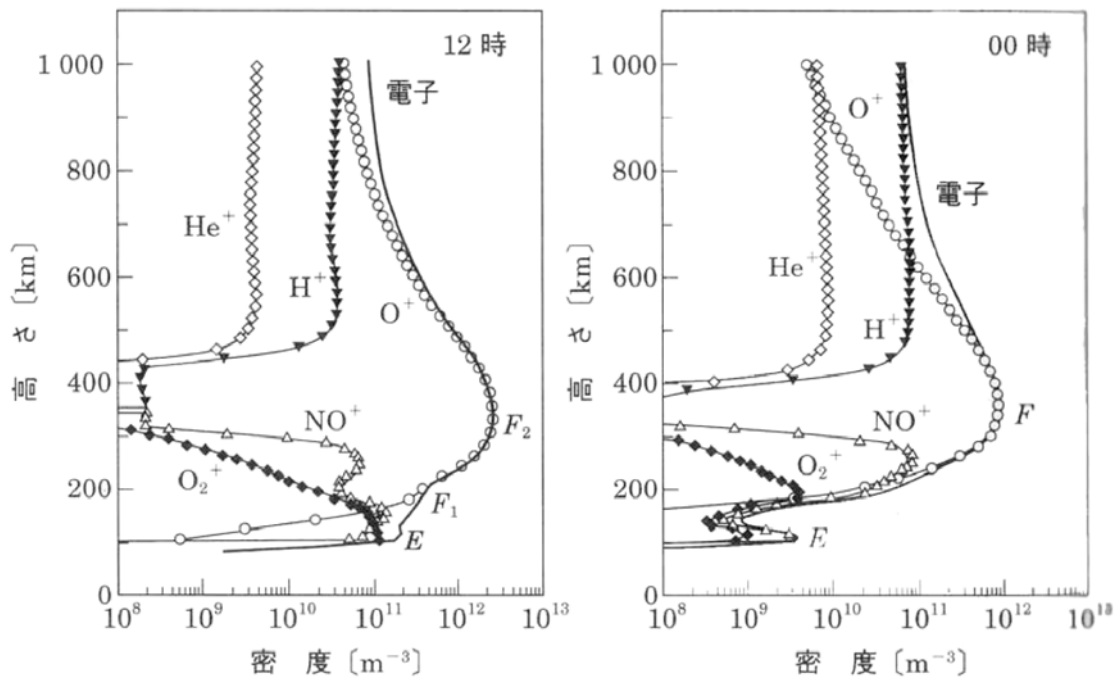


図 1.2：東京上空の電離圏における電子と各種イオンの高度分布。太陽極大期の春分における昼（12時 LT）、右が夜（0時 LT）の例である[恩藤他、2000]。

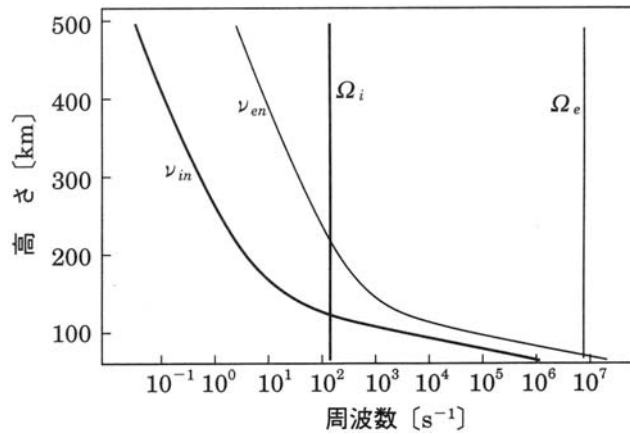


図 1.3：東京上空におけるイオンのジャイロ周波数 (Ω_i)、電子のジャイロ周波数 (Ω_e)、イオン-中性粒子の衝突周波数 (ν_{in})、電子-中性粒子の衝突周波数 (ν_{en}) の高度分布の例。時間は、太陽極大期の春分における昼 (12 時 LT) で、イオンは O_2^+ を仮定している[恩藤他、2000]。

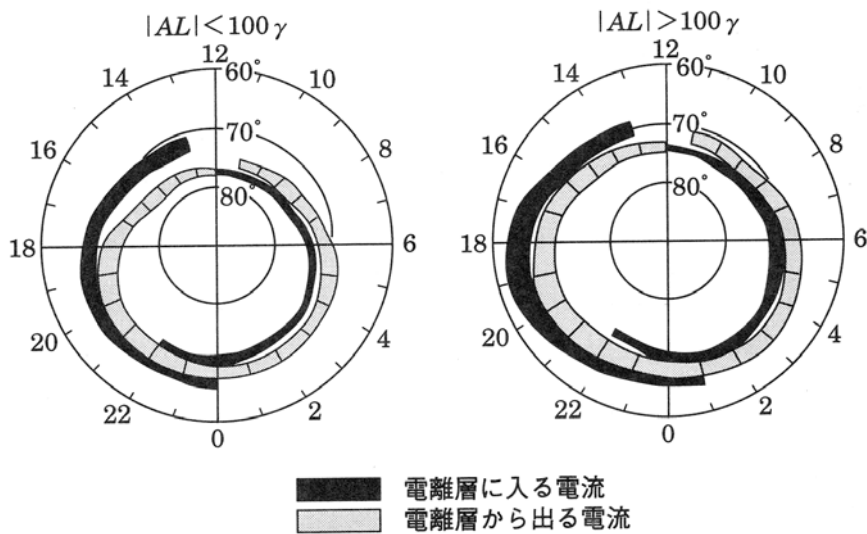


図 1.4：沿磁力線電流の分布。左図は地磁気活動度が静かな時、右図は地磁気活動度が活発な時を示す[Iijima and Potemra, 1976]。

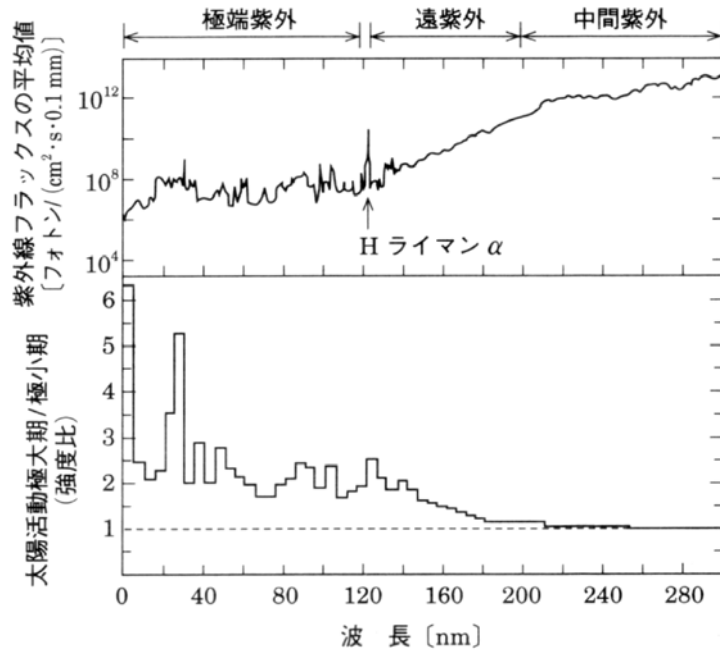


図 1.5：地球の位置で測定した太陽紫外線強度の平均スペクトル（上図）と太陽活動極大期／極小期の比で示す図（下図）。波長が短い成分ほど 11 年周期の太陽活動による変化が大きい[Chamberlain, 1978]。

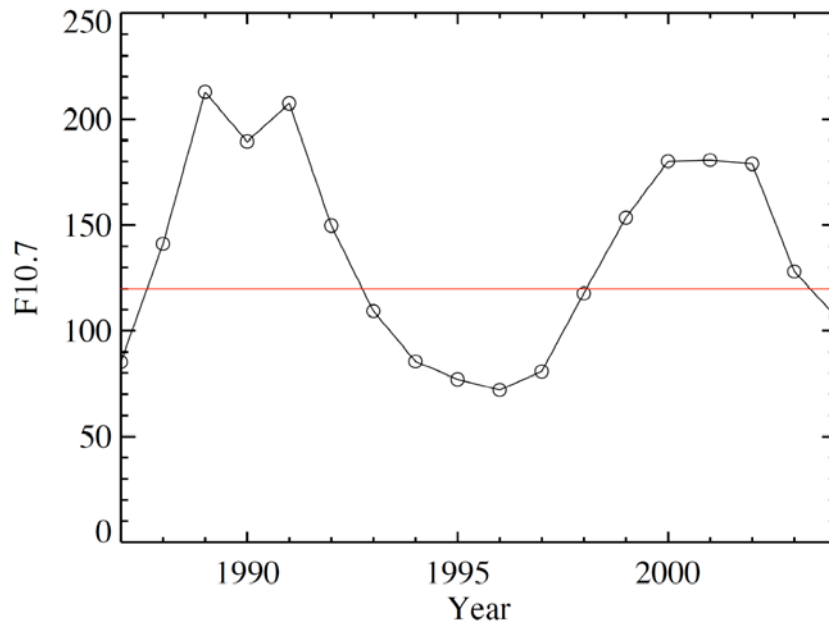


図 1.6： $F_{10.7}$ index の年平均の変動。 $F_{10.7}$ index を 1 年平均した値を示している。図中赤線は本研究で決めたしきい値で $F_{10.7}=120$ を指す。

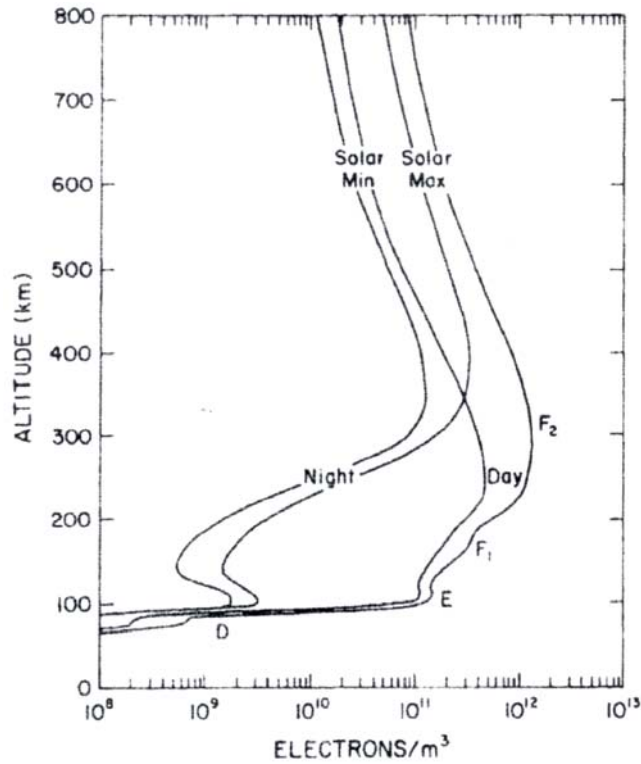


図 1.7：電離圏電子密度の太陽活動度による違い。太陽活動極大期における高度 400 km 以上の電子密度は太陽活動極小期よりも約 6 倍高い[Richmond, 1987]。

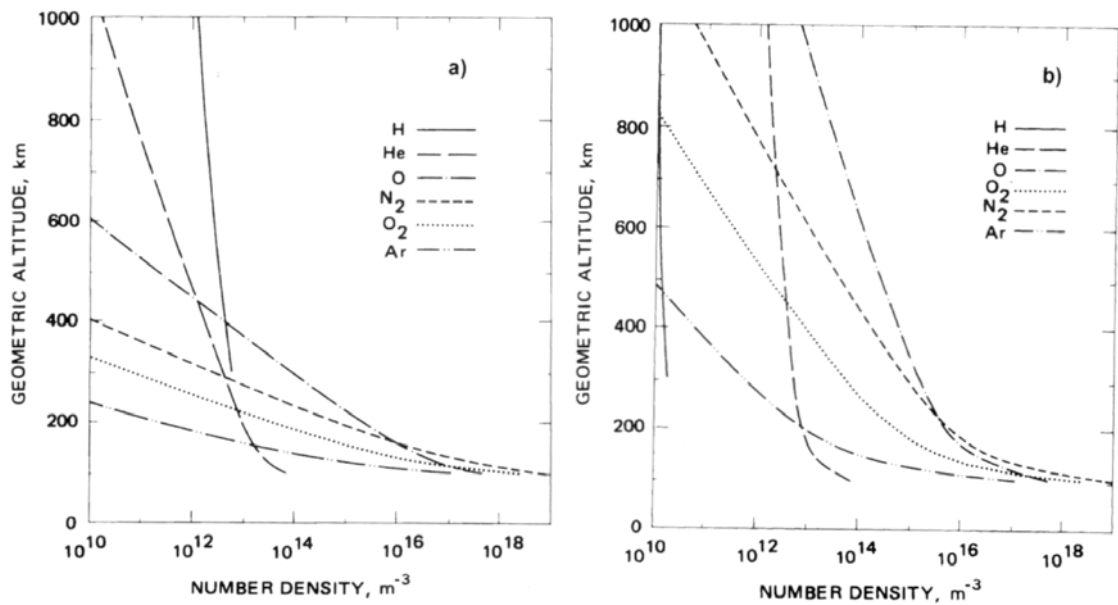


図 1.8：中性大気組成の太陽活動度による違い。左図(a)は太陽極小期、右図(b)は太陽極大期[Brekke, 1997]。

第 2 章 本研究の背景及び目的

本章では、磁気圏と極域電離圏間のエネルギー結合に関する過去の研究を紹介し、未解決問題を整理する。そして本研究の目的を述べる。

2.1 研究背景

磁気圏から極域電離圏へ流入するエネルギーに関する研究は、1970 年代より現在に至るまで約 30 年間行われてきた。極域電離圏へ流入し、消費される主なエネルギーとしては、降下粒子のエネルギーと電磁的なエネルギーが挙げられる [Banks, 1977]。降下粒子エネルギーや電磁エネルギーの特性及び両エネルギーの関係に関する理解は、極域の Chatanika (65°N, 147°W)、Sondrestrom (67°N, 51°W)、EISCAT レーダーに代表される非干渉散乱 (IS) レーダー観測 [e.g., Brekke and Rino, 1978; Banks, 1981; Vickrey et al., 1982; Brekke, 1983; Fujii et al., 1998; 1999; 2000; Thayer et al., 1998; 2000] や人工衛星を用いた観測 [e.g., Foster et al., 1983; Baker et al., 2004]、シミュレーション [e.g., Thayer et al., 1995; Lu et al., 1995; Zhang et al., 2005]によって進歩してきた。

Vickrey et al. [1982] は、Chatanika IS レーダーを用いて降下粒子エネルギーとジュール加熱の磁気地方時 (MLT) 依存性と磁気緯度 (MLAT) 依存性を調べ、降下粒子エネルギーは夕方よりも明け方で大きく、ジュール加熱は明け方よりも夕方が大きくなる事を発見した。また、基本的には降下粒子エネルギーよりもジュール加熱の方が大きい事も述べている。しかし、Chatanika IS レーダーは 1 局方式のレーダーであり、彼らはビームの視線方向のみのイオン速度で電場を導出した。そのため電場を過小評価していた可能性が高く、ジュール加熱の見積もりが不十分であると言える。

Foster et al. [1983]は AE-C 衛星による観測から、極域電離圏におけるジュール加熱の総量の MLT-MLAT 分布と、ジュール加熱が持つ Kp 指数依存性、季節依存性が明らかにした。彼らは磁気緯度 50°から 80°の範囲におけるジュール加熱の総量を議論したが、極冠域、オーロラ帯、サブオーロラ帯といった領域ごとの比較はしていない。すなわち彼らは最も基本的なジュール加熱の総量を調べた事になる。しかし極域の領域ごとに降下粒子の特性や電場・電流分布が異なるので、エネルギー散逸過程を理解するためには領域を分類して調べる必要がある。

Lu et al. [1995] は NCAR (The National Center for Atmosphere Reserch) の TIGCM (Thermosphere-Ionosphere General Circulation Model) によるシミュレーションから、磁気圏が静穏時、ジュール加熱は東向き電流ジェットに対応する夕方重要となり、磁気圏が擾乱している時には、西向き電流ジェットに対応する明け方で重要となる事を報告している。さらに、磁気圏が擾乱している時には平均して、電磁エネルギーは降下粒子エネルギーの約 4 倍の値を取る事も報告している。

Baker et al. [2004] は TIMED 衛星の GUVI (Global UltraViolet Imager) と SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) を用いて、比較的静穏であった時の夜側極域電離圏でのエネルギー流入量を調べ、ジュール加熱は *Region 1* 電流領域付近に対応するような強い電場がある所で大きくなり降下粒子エネルギーは、*Region 2* 電流領域付近に対応するような電場が小さい所で大きくなる事を発見した。つまり降下粒子エネルギーとジュール加熱は、どちらかが大きい時は、もう一方が小さくなるという負の相関関係になる傾向がある事を指摘している。従来のような衛星のみの観測ではなく地上との同時観測をした事により、極域全体におけるエネルギー流入の描像を明らかにしたと言える。しかし、降下粒子エネルギーの導出には GUVI を使っているため、間接的ないしは仮定に基づいている。

Zhang et al. [2005] は CEJH (a Complied Empirical global Joule Heating) モデルから、太陽活動を示す $F_{10.7}$ 指数の増加に伴い、ジュール加熱も増加する事を示している。電磁エネルギーや降下粒子エネルギーは太陽活動度依存性を持つ事が示唆されるが、太陽活動周期に匹敵するような長期観測がわずかしかな行われていないため、十分な理解がされていない。

近年、下向き沿磁力線電流の担い手である電離圏電子を、沿磁力線上向き加速に加速するための沿磁力線電場の生成が、電離圏の状態に強く依存する事 [Elphic et al., 2000] や、オーロラの出現頻度もやはり電離圏の日照・日陰に依存する事 [Newell et al., 1996; 2001] など、磁気圏—電離圏結合に電離圏が能動的な役割を果たしている事が分かってきた。しかし、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性については今まで統計的には研究されてきていない。特に日照時における降下粒子エネルギーの導出は大変困難であるため、降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性の研究は皆無と言って良い。その困難の理由は、IS レーダーで観測する電子密度からは、次節以降に述べるように降下粒子

が電離圏に持ち込むエネルギーを精度良く求める事が出来るが、日照時については降下粒子のみならず極端紫外線や X 線などの太陽放射による中性大気の電離もあるため、降下粒子による電離を分離する事が困難であったためである。一方、*Newell et al.* [1996; 2001]は、DMSP 衛星が観測した 1984 年から 1992 年までの 9 年分のデータから、エネルギーが 5 keV 以上の降下電子に対応したオーロラの出現頻度は、電離圏日陰時（太陽天頂角が 110° より大きい時）の方が日照時（太陽天頂角が 85° 未満の時）よりも高い事を示した（図 2.1 参照）。彼らは太陽光が磁気圏から電離圏へのエネルギー流入を遮っていると指摘している。しかし、今まで電離圏日照時の降下粒子エネルギーについて定量的な取り組みは無く、未解明であった。

降下粒子の効果と日照の効果を切り離す前段階の研究として、日照の効果によって増減する電子密度の高度分布を、中低緯度での観測を基にしたモデルによって再現しようとする試みがなされてきた。例えば電子密度を $F_{10.7}$ 指数と太陽天頂角の変数にして見積もる GLOW モデル[e.g., *Solomon et al.*, 1988; *Solomon and Abreu*, 1989; *Bailey et al.*, 2002]が挙げられる。*Doe et al.* [2005]は Sondrestrom レーダーを用いて GLOW モデルを拡張し、日照の効果を見積もった。電子密度のモデル値と観測値の平均値を比べると 5% 程度の差なので良く再現出来ているとしているが、それは太陽活動極大期の太陽天頂角が小さい時のみの比較であり、モデルとして十分なものとは言えない。このように、日照の効果によって増減する電子密度を再現する事ですら未だ十分に確立されていないというのが現状であると言える。

過去の研究により磁気圏と電離圏のエネルギー結合の理解は深まってきたが、以上に述べたように電離圏の状態への依存性も含めた磁気圏と電離圏のエネルギー結合については十分な理解は得られていない。

2.2 研究の目的

前述のように近年の観測から、電離圏は磁気圏—電離圏結合に従来考えられている以上に能動的な役割を果たしている事を示唆する結果が報告されている[*Elphic et al.*, 2000; *Newell et al.*, 1996; 2001]。しかし、磁気圏—電離圏結合を理解する上で重要な、電磁エネルギーおよび降下粒子エネルギーの電離圏の状態依存性に関する統計的な研究は行われていない。特に電離圏に日照がある場合の降下粒子エネルギーの見積もりは今まで行われていない。電磁エネルギーは

日照の有無に関わらず導出方法は同じであるが、日照の有無による電離圏の状態依存性は行われておらず、未解明な問題である。さらに長期観測を基にした電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動度依存性も未だ取り組まれていない。本論文で扱う未解決問題を以下にまとめる。

- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーはどのような関係を持つのか。両者に負の相関関係があるのは一般的なのか。
- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーは太陽活動度に依存するのか。
- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーは、電離圏の状態にどのように依存するのか、特に、電離圏に日照がある時と無い時で流入量が異なるのか。

本研究は、磁気圏から流入するエネルギーが電磁および降下粒子のエネルギーにどのように配分されるかを明らかにし、磁気圏と電離圏のエネルギー結合の特性と、電離圏の能動的な役割について解明する事を目的とする。具体的には、トロムソに位置する EISCAT UHF レーダーの、沿磁力線方向にビームを固定して観測するモード (Common Program One : 以下、CP-1) で、1987年1月14日から2004年11月13日までに観測されたデータを用いて、以下にまとめる電磁エネルギーと降下粒子のエネルギーに関する基本特性及び未解決問題について明らかにする。

- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係
- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 依存性
- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの磁気擾乱度 (kp 指数) 依存性
- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動依存性
- ・ 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性

を解明する事を目的とする。

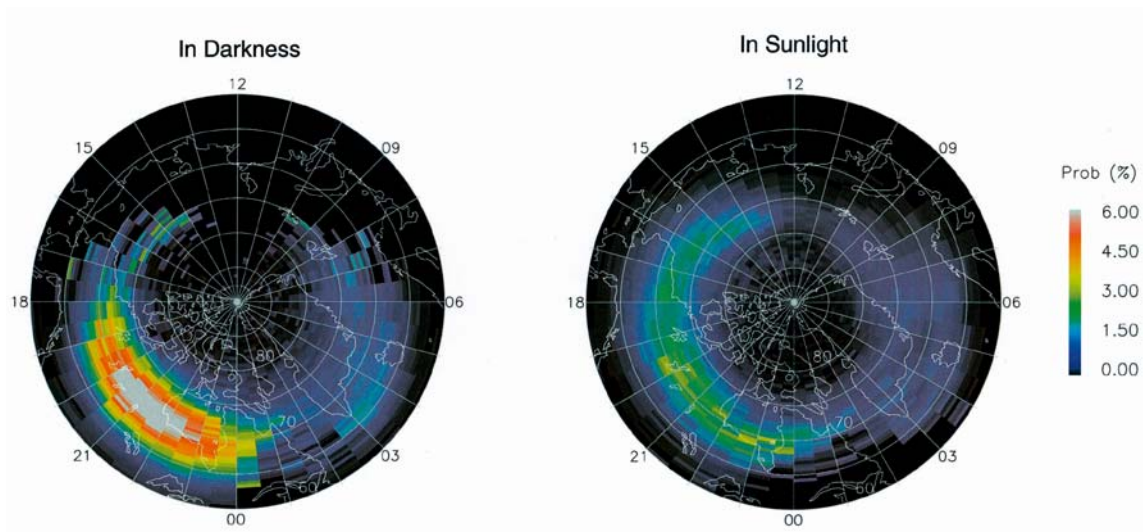


図 2.1 :日照の有無によるオーロラの出現頻度の違い。左図が電離圏日陰時（太陽天頂角が 110° より大きい時）、右図が日照時（太陽天頂角が 85° 未満の時）
[Newell *et al.*, 2001]。

第 3 章 観測装置

本研究では、EISCAT UHF レーダーの観測データを用いて、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの統計解析を行った。この章では、本研究で用いた EISCAT レーダーの概要、非干渉散乱レーダーによる物理量の導出、観測プログラムについて説明する。

3.1 EISCAT レーダーの概要

EISCAT (European Incoherent Scatter) レーダーは北欧に設置されている非干渉散乱 (Incoherent Scatter: IS) レーダーシステムの総称である。EISCAT レーダーは、フィンランド、フランス、ドイツ、スウェーデン、イギリス、ノルウェー及び日本の 7 か国が参加する EISCAT 科学協会によって運営されている。EISCAT レーダーシステムは、UHF (Ultra High Frequency) レーダー、VHF (Very High Frequency) レーダー、Svalbard レーダー (ESR: EISCAT Svalbard Rader) の独立した 3 つのレーダーシステムから構成されている。以下にそれぞれのレーダーの特徴を記述する。各レーダーの設置場所は図 3.1 にまとめた。

・ UHF レーダーシステム

UHF レーダーシステムは、ノルウェーのトロムソ (Tromsø: 69.6°N, 19.2°E) に設置された送受信機、スウェーデンのキルナ (Kiruna: 67.9°N, 20.4°E) とフィンランドのソダンキラ (Sodankylä: 67.4°N, 26.6°E) に設置された受信機で構成されている。トロムソの送信機の中心送信周波数は 931 MHz で、1981 年より稼働している。図 3.2 に本研究で使用したトロムソに設置されている UHF レーダーの写真を示す。このレーダーシステムの特徴は、3 局 1 点方式によって世界で唯一 3 次元的にイオン速度を観測する事が出来る点である。

・ VHF レーダー

VHF レーダーは、30 m × 40 m のパラボリックシリンダー型のアンテナ 4 枚から構成される中心送信周波数 224 MHz の、1 局方式のレーダーである。VHF レーダーはトロムソに設置され、1987 年より稼働している。UHF レーダーシステムでは観測が難しいトップサイド電離圏、及び D 領域を観測する際に有効である。

・ Svalbard レーダー (ESR)

ESR は口径 32 m の可動式と口径 42 m の沿磁力線方向固定式のパラボラ型アンテナ 2 機により構成される、中心送信周波数 500 MHz のレーダーであり、スヴァールバード (Svalbard) 諸島のロングイヤビン (Longyearbyen: 78.2°N, 16.0°E) に設置されている。可動式 32 m アンテナは 1996 年から、固定式 42 m アンテナは 1999 年から稼働している。このレーダーの大きな特徴の一つは、太陽風プラズマが直接電離圏へ侵入する昼間側カस्प域の観測が可能である事である。

3.2 非干渉散乱レーダーによる物理量の導出

非干渉散乱レーダーは、電離圏の自由電子によるトムソン散乱を利用して、電子密度、レーダーの視線方向のイオン速度、イオン温度、電子温度を観測している。EISCAT UHF レーダーの送信電波の波長は約 0.32 m であるのに対し、電離圏のデバイ (Debye) 長は、電子密度を $N_e=10^{11} /\text{m}^3$ 、電子温度を $T_e=10^3 \text{ K}$ と仮定すると、

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{N_e e^2}} \sim 6.9 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3.1)$$

である。ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 k_B はボルツマン定数、 e は電荷素量を表す。これより、送信電波の波長は電離圏のデバイ長より十分長い事が分かる。そのため、電離圏の自由電子がトムソン散乱によって散乱波を生んでいるが、デバイ長よりも十分大きなスケールで見た場合、イオンに捕捉されている電子の塊を見る事になり、結果的にイオンの運動を捉えている事になる。送信した電波はイオン音波と電子音波の 2 種類の静電波により散乱され、非干渉散乱レーダーはイオン音波の散乱波を用いて物理量を導出する。イオン音波の位相速度 V_+ は次式(3.2)により表される。

$$V_+ = \sqrt{\frac{k_B T_i}{m_i} \left(1 + \frac{T_e}{T_i} \right)} \quad (3.2)$$

ここで、 m_i はイオン質量、 T_i はイオン温度、 T_e は電子温度を表す。送信電波の波長を λ_0 とすると、電波を最も効果的に散乱する電子密度のゆらぎの波長 λ は、 $\lambda = \lambda_0/2$ である。散乱波はドップラーシフトを受け、そのために生じる周波数のずれは、

$$2\frac{V_{\pm}}{\lambda_0} = \pm \frac{2}{\lambda_0} \sqrt{\frac{k_B T_i}{m_i} \left(1 + \frac{T_e}{T_i}\right)} \quad (3.3)$$

となる (図 3.3 参照)。また、電子はイオンに捕捉されているのでイオンの運動によっても後方散乱波はドップラーシフトを起こしている。イオンの視線方向の速度を V とすると、周波数のずれは

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \nu_0 \left(\frac{c+V}{c-V} - 1 \right) \approx \nu_0 \left(1 + 2\frac{V}{c} - 1 \right) = 2\frac{V}{\lambda_0} \quad (3.4)$$

となる。ここで、 c は光速、 ν_0 は入射波の振動数、 ν は散乱波の振動数を表す。これに加えて、熱運動によるスペクトル線の広がりや、中性大気との衝突の効果、などによって実際に受信される散乱波のスペクトルは図 3.4 のようになる。イオン組成を仮定し、観測により得られた散乱波のスペクトルをフィッティングすると、電子密度、イオン速度、イオン温度、電子温度を導出できる。具体的には、受信強度から電子密度が、図 3.4 のイオンラインの幅からイオン温度、2つのイオンラインの間のへこみからイオン温度と電子温度の比、中心周波数のずれから視線方向のイオン速度が求まる。

EISCAT UHF レーダーは 3 局 1 点方式によって 3 次元的にイオン速度を観測する事が出来る。 F 領域では、イオンと電子両方ともに $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト運動をしているため、測定したイオン速度を用いて、磁場に直交方向の電場が導出できる。磁束密度は国際的な磁場モデルである IGRF-10 [IAGA Division V working Group V-MOD, 2005] の値を本研究では用いている。

$$\mathbf{E} = -(\mathbf{v}_i \times \mathbf{B})_{278 \text{ km}} \quad (3.5)$$

また電場の他にも、中性大気モデルを利用することにより、4.1 節に示すように電気伝導度、電流、中性風速度、ジュール加熱等の物理量も導出する事ができる。

3.3 観測プログラム

EISCAT レーダーの観測プログラムには、EISCAT 科学協会自身が行う、長期にわたる観測を目的とした共通実験 (Common Program: CP) と、EISCAT 加盟各国の研究者による独自の観測である特別実験 (Special Program: SP) に大きく分類される。CP には、CP 1 (磁力線方向観測)、CP 2 (4 方向スキャン観測)、CP 3 (磁気子午線方向スキャン観測)、CP 4 (ポーラーキャップ観測)、CP 5 (CP 1 と CP 3 を組み合わせた観測)、CP 6 (中間圏観測)、CP 7 (トップサイド電離圏観測) の 7 種の観測モードがある。本研究で使用した CP-1 モードはトロムソの UHF レーダーを用いて、沿磁力線方向にビームを固定して観測するモードである。主に高度 90-600 km の観測に適していて、キルナとソダンキラの受信機を合わせた 3 局 1 点方式によって 3 次元イオン速度を導出することができる。3 局観測を行う高度は CP-1 のバージョンによって異なっているが本研究では、*F* 領域 (高度 278 km) で行われる 3 局観測の積分時間が 2 分のデータを使用した。

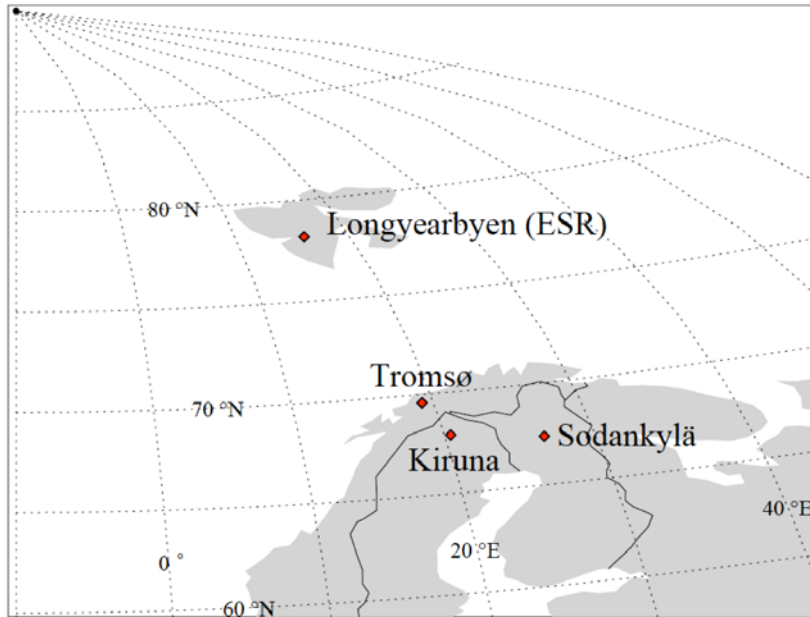


図 3.1 : EISCAT レーダーの場所。



図 3.2 : EISCAT UHF レーダー。

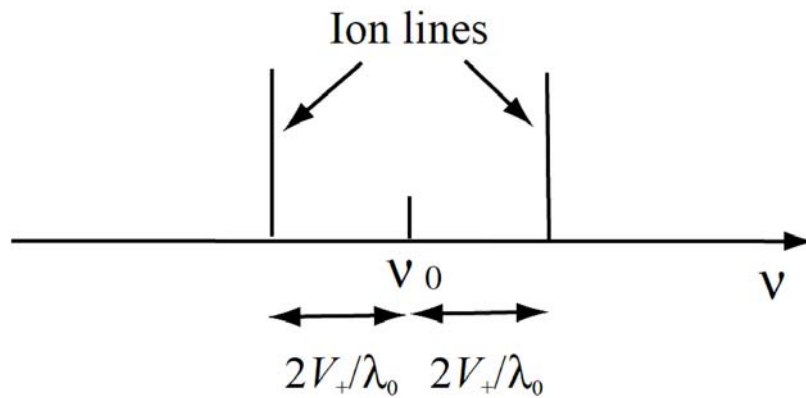


図 3.3 : 受信スペクトルの模式図[Nygren, 1996]。散乱波の周波数は送信周波数から $\pm 2v_+/\lambda_0$ だけずれる。(v_+ :イオン音波の位相速度、 λ_0 :送信電波の波長、 ν_0 :送信電波の振動数)

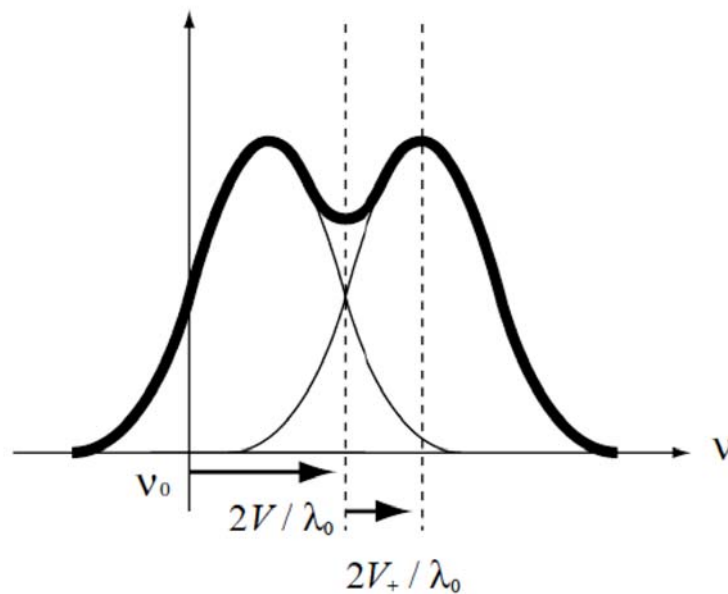


図 3.4 実際に受信されるスペクトルの模式図[Nygren, 1996]。イオンラインは、散乱により $\pm 2V_+/\lambda_0$ ずれ、さらに全体的な運動により $2V/\lambda_0$ だけずれる。

第4章 解析手法

本研究で用いた電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの導出方法について述べる。また、統計解析をする際に行った、磁気地方時（MLT）や季節などに関する場合分けについても説明する。

4.1 電磁エネルギーフラックス

磁気圏から電離圏へ流入する電磁エネルギーは、電磁エネルギーフラックスを用いる。電磁エネルギーフラックスの導出に必要な電気伝導度の導出方法、電磁エネルギーフラックスの導出方法について述べる。

ペダーセン伝導度とホール伝導度は *Brekke and Hall* [1988] の式を用いる。

$$\sigma_P = \frac{N_e e}{B} \left[\frac{\omega_e v_{en}}{v_{en}^2 + \omega_e^2} + q_L \frac{\omega_{iL} v_{inL}}{v_{inL}^2 + \omega_{iL}^2} + q_H \frac{\omega_{iH} v_{inH}}{v_{inH}^2 + \omega_{iH}^2} \right] \quad (4.1)$$

$$\sigma_H = \frac{N_e e}{B} \left[\frac{\omega_e^2}{v_{en}^2 + \omega_e^2} - q_L \frac{\omega_{iL}^2}{v_{inL}^2 + \omega_{iL}^2} - q_H \frac{\omega_{iH}^2}{v_{inH}^2 + \omega_{iH}^2} \right] \quad (4.2)$$

- B : IGRF モデルで与えられる磁束密度
- m : 電子の質量
- M : イオンの質量
- N_e : 電子密度
- ω_e : 電子のジャイロ角周波数 (eB/m)
- ω_i : イオンのジャイロ角周波数 (eB/M)
- v_{en} : 電子と中性粒子の衝突周波数
- v_{in} : イオンと中性粒子の衝突周波数

ペダーセン伝導度及びホール伝導度の単位は S/m である。プラズマは電氣的には中性であるので、電子密度とイオン密度は同じであるとしている。また、式(4.1)、式(4.2)の添字 L は軽いイオン、添字 H は重いイオンを意味している。軽いイオンの質量 (M_L) は酸素原子イオンの質量を表し 16.0 である。重いイオン

の質量 (M_H) は平均質量 30.51 で、イオン組成が一酸化窒素イオン (NO^+) 約 75%、酸素分子イオン (O_2^+) 約 25%の時の値である。

電子と中性粒子の衝突周波数は *Schunk and Nagy* [1978]の式を、イオンと中性粒子の衝突周波数は *Schunk and Walker* [1973]の式を用いる。

$$\begin{aligned} \nu_{en} = & 2.33 \times 10^{-17} \times n(N_2) \times (1 - 1.21 \times 10^{-4} \times T_e) \times T_e \\ & + 1.82 \times 10^{-16} \times n(O_2) \times (1 + 3.6 \times 10^{-2} \times \sqrt{T_e}) \times \sqrt{T_e} \\ & + 8.9 \times 10^{-17} \times n(O) \times (1 + 5.7 \times 10^{-4} \times T_e) \times \sqrt{T_e} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\nu_{inH} = [4.29 \times n(N_2) + 4.23 \times n(O_2) + 2.41 \times n(O)] \times 10^{-16} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \nu_{inL} = & [6.82 \times n(N_2) + 6.66 \times n(O_2) + 0.342 \times n(O) \times \sqrt{T_i} \\ & \times (1.08 - 0.139 \times \log_{10} T_i + 4.51 \times 10^{-3} \times (\log_{10} T_i)^2)] \times 10^{-16} \end{aligned} \quad (4.5)$$

| | | |
|----------|---|----------|
| $n(N_2)$ | : | 窒素分子の数密度 |
| $n(O_2)$ | : | 酸素分子の数密度 |
| $n(O)$ | : | 酸素原子の数密度 |
| T_i | : | イオン温度 |
| T_e | : | 電子温度 |

本研究では、磁気圏から電離圏へ流入するエネルギーのフラックスではなく総量を調べるので、導出したペダーセン伝導度とホール伝導度を高度積分する。

$$\Sigma_P = \int_{h_1}^{h_2} \sigma_P dh \quad (4.6)$$

$$\Sigma_H = \int_{h_1}^{h_2} \sigma_H dh \quad (4.7)$$

Σ_P は積分したペダーセン伝導度、 Σ_H は積分したホール伝導度で、単位は S である。積分区間は $h_1 = 90 \text{ km}$ から $h_2 = 300 \text{ km}$ とする。

電離圏の電場は、磁気圏から投影された対流電場(\mathbf{E})と電離圏高度に存在する中性風が作り出すダイナモ電場の和で表される。電離圏の電場を \mathbf{E}' 、中性風

の速度を \mathbf{U} とすると、

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B} \quad (4.8)$$

と表される。この \mathbf{E}' は、中性風と共に動く座標系で測定したときの電場 (\mathbf{E}) に相当する。磁場に直交して流れる電離圏電流は、次式で表す事が出来る。

$$\mathbf{J}_{\perp} = \Sigma_p \mathbf{E}' - \Sigma_H \frac{\mathbf{E}' \times \mathbf{B}}{\mathbf{B}} \quad (4.9)$$

電磁エネルギーフラックスは、電離圏に流れる電流 (\mathbf{J}_{\perp}) と対流電場 (\mathbf{E}) の内積で導出されるので、電磁エネルギーを Q_{EM} とすると、

$$\begin{aligned} Q_{EM} (\text{W}/\text{m}^2) &= \mathbf{J}_{\perp} \cdot \mathbf{E} = \left(\Sigma_p \mathbf{E}' - \Sigma_H \frac{\mathbf{E}' \times \mathbf{B}}{\mathbf{B}} \right) \cdot \mathbf{E} \\ &= \Sigma_p (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{E} - \Sigma_H \frac{(\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{E} \quad (4.10) \\ &= \Sigma_p (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{E} - \Sigma_H \frac{(\mathbf{U} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{E} \end{aligned}$$

となる。式(4.10)を見ると中性風速度が残っている事が分かる。本研究で用いる EISCAT UHF レーダーの CP-1 モードは、1993 年以降に関しては F 領域でのみしか 3 局方式の観測をしていない。そのため対流電場 (\mathbf{E}) しか導出出来ない。しかし、対流電場 (\mathbf{E}) がダイナモ電場 ($\mathbf{U} \times \mathbf{B}$) より十分大きい場合には、

$$Q_{EM} (\text{W}/\text{m}^2) \approx \Sigma_p \mathbf{E}^2 \quad (4.11)$$

と表す事が出来る。一般的に E 領域における中性風速度 (\mathbf{U}) は 100 m/s 以下であるので、対流電場 (\mathbf{E}) が 10 mV/m 以上であればダイナモ電場 ($\mathbf{U} \times \mathbf{B}$) の影響は無視出来ると考えられる[e.g., Nozawa and Brekke, 1995; 1999a; 1999b]。

本研究では式(4.11)の近似を用いるため、対流電場 (\mathbf{E}) が 10 mV/m 以上のデータのみを用いる事とする。

4.2 降下粒子エネルギー

降下粒子エネルギー (Q_p) は Vickrey *et al.* [1982] の式を用いる。

$$Q_p (\text{erg}/\text{cm} \cdot \text{s}) = 5.6 \times 10^{-6} \int_{h_1}^{h_2} \alpha_{eff}(h) N_e^2(h) dh \quad (4.12)$$

単位は cgs 単位系で表記されている。 α_{eff} は有効再結合係数で、次式で定義されている。

$$\alpha_{eff}(h) = 2.5 \times 10^{-6} \exp(-h/51.2) \quad (4.13)$$

式(4.13)の h は単位が km である。降下粒子エネルギーの導出にあたって次の 4 つの仮定が置かれている。(1) 用いるデータの積分時間 (本研究の場合 2 分) の間は電離圏が定常状態である事、(2) イオンの輸送効果が無視出来る高度 160 km 以下を対象とする事、(3) 降下粒子がイオン生成の唯一のソースである事、(4) エネルギー 35 eV がイオンと電子の対を作るのに使われる事である。仮定のため、積分区間は $h_1 = 90$ km から $h_2 = 160$ km とした。電離圏でのイオン生成は降下粒子のみが寄与するという仮定から、式(4.12)は電離圏に日照がある場合は適応できない。そこで、電離圏に日照がある場合でも降下粒子の効果を取り出すために、日照によって増減する電子密度のモデル化をする。

電離圏におけるイオンの増減はチャップマン電離生成率によって記述する事ができる。電離生成率は、

$$q = q_m \exp\left(-\frac{z-z_m}{H}\right) \exp\left[1 - \exp\left(-\frac{z-z_m}{H}\right)\right] \quad (4.14)$$

のように表す事が出来る[Brekke, 1997]。ここで z は高度、 z_m はイオン生成率が最大となる高度、 q_m はその時の最大電離生成率、 H はスケールハイトで、 q_m は太陽天頂角 χ を変数に持つ次式 (4.15) 関数である。

$$q_m = q_{m,0} \cos\chi \quad (4.15)$$

$q_{m,0}$ は太陽天頂角が 0 の時の最大電離生成率である。式(4.14)に式(4.15)を代入し、変形すると、

$$q = q_{m,0} \exp\left[1 - \frac{z-z_m}{H} - \sec\chi \exp\left(-\frac{z-z_m}{H}\right)\right] \quad (4.16)$$

となる。電離生成率の高度分布を図 4.1 に示す。電離生成は高度と太陽天頂角を変数として表される。イオンは永続的に増加し続ける事は無く、消滅過程や輸送過程を経て、最終的には平衡状態に戻ると考えられる。本研究で対象としている E 領域では、再結合に要する時間が短く輸送の効果が無視出来るので、光化学平衡を仮定する事が出来る。消滅過程は、放射再結合と仮再結合が考えられる。消滅率 l_i は再結合係数を α とすると、

$$l_i = \alpha n_e^2 \quad (4.17)$$

となる。光化学平衡より式(4.16)と式(4.17)が等しくなるので、

$$l_i = q_i = q_{m,0} \exp\left[1 - \frac{z-z_m}{H} - \sec\chi \exp\left(-\frac{z-z_m}{H}\right)\right] = \alpha n_e^2 \quad (4.18)$$

したがって、ある高度 z の電子密度は、

$$n_e(z) = \sqrt{\frac{q_{m,0}}{\alpha}} \exp\left[\frac{1}{2}\left(1 - x - \sec\chi \exp(-x)\right)\right] \quad (4.19)$$

ここで x は、

$$x = \frac{z - z_m}{H} \quad (4.20)$$

である。再結合係数の高度変化を無視すると電子密度は、

$$n_m = n_{m,0} (\cos\chi)^{1/2} \quad (4.21)$$

となる。これはチャップマン α 分布と呼ばれている。式(4.21)より日照によって増大する電子密度は、太陽天頂角に依存している事がわかる。そこで、UHF レーダーが観測した電子密度を $\cos\chi$ の多項式でフィッティングし、モデル化をする。モデル化をするにあたって、降下粒子が見られない電離圏静穏時で、日照がある時刻のデータを選定する。高度 160 km 以下では輸送の効果が弱く、生成と消滅が平衡であると考えるので、

$$\begin{aligned} \frac{dN_{e,CP-1}}{dt} &= q_{SUV} + q_{Precipitation} - \alpha N_{e,CP-1}^2 \\ &= \alpha N_{e,SUV}^2 + \alpha N_{e,Precipitation}^2 - \alpha N_{e,CP-1}^2 = 0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

- q_{SUV} : 太陽放射による電離生成率
- $q_{Precipitation}$: 降下粒子による電離生成率
- $N_{e,Precipitation}$: 降下粒子によって生成された電子密度
- $N_{e,CP-1}$: UHF レーダーが観測した電子密度
- $N_{e,SUV}$: 日照の効果によって生成された電子密度

と表す事が出来る[e.g., *Watermann et al.*, 1993; *Brekke*, 1997; *Doe et al.*, 2005]。日照の効果によって生成された電子密度を、モデルを用いて与えるので、

$$n_{e,Precipitation}^2 = n_{e,CP-1}^2 - n_{e,Model}^2 \quad (4.23)$$

- $n_{e,Model}$: 日照の効果のモデルから得られた電子密度

という関係が得られる。式(4.23)を用いて降下粒子の効果を取り出し、式(4.12)から降下粒子エネルギーを導出する。

4.3 データ

統計研究をするにあたって、いくつかの場合分けを定義する。電磁エネルギーの導出に用いた対流電場や、磁気圏からの粒子の降り込みには午前、真昼、午後、真夜中で異なる性質を示すので、これらの領域を、磁気地方時 (MLT) を用いて以下のように定義する。

夕方： 15 MLT – 21 MLT

真夜中： 21 MLT – 03 MLT

明け方： 03 MLT – 09 MLT

昼間： 09 MLT – 15 MLT

トロムソにおける UT と MLT の関係及び UT と LT の関係は、

$$\text{MLT (hour)} = \text{UT (hour)} + 2.5 \text{ (hour)} \quad (4.24)$$

$$\text{LT (hour)} = \text{UT (hour)} + 1.0 \text{ (hour)} \quad (4.25)$$

とした。ただし、09 MLT から 15 MLT の昼間は、オーロラ帯の赤道側境界が磁気緯度 70.0°以上に位置しているため、磁気緯度 66.2°のトロムソはオーロラ帯を観測していないと考えられる。そのため、本研究では昼間については取り扱わないとした。季節に関しては、春を 2-4 月、夏を 5-7 月、秋を 8-10 月、冬を 11-1 月とする。データの分布は図 4.2 から図 4.5 に示す。1996 年から 1999 年までのデータが無いのは、観測は行われていたが電子密度の絶対値較正が出来なかったため本研究に使用出来なかったためである。2000 年は UHF レーダーの改修が実施されたため観測はされていない。トロムソは北極圏に位置するため夏は白夜、冬は極夜になる。そのため季節ごとのデータ分布を示す図 4.4 を見ると夏にはトロムソ日陰時のデータがきわめて少ない。また、冬でもトロムソ日照時のデータが無い事が分かる。本研究で用いたデータは Appendix A にまとめた。

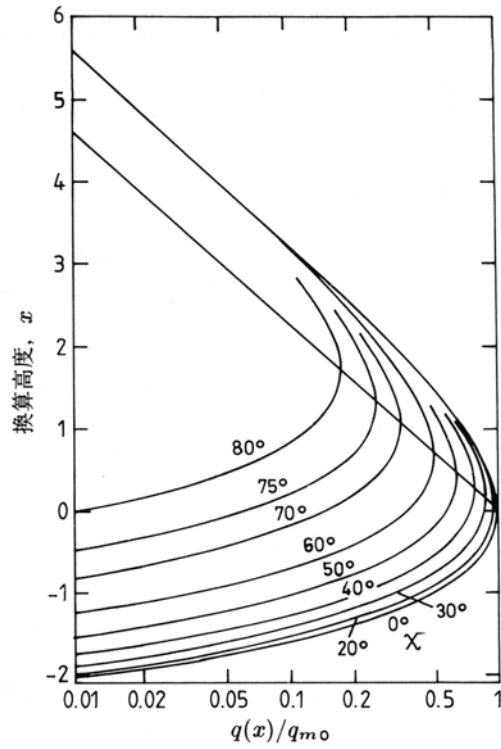


図 4.1 様々な太陽天頂角(χ)に対するチャップマン電離生成率分布[Brekke, 1997]。

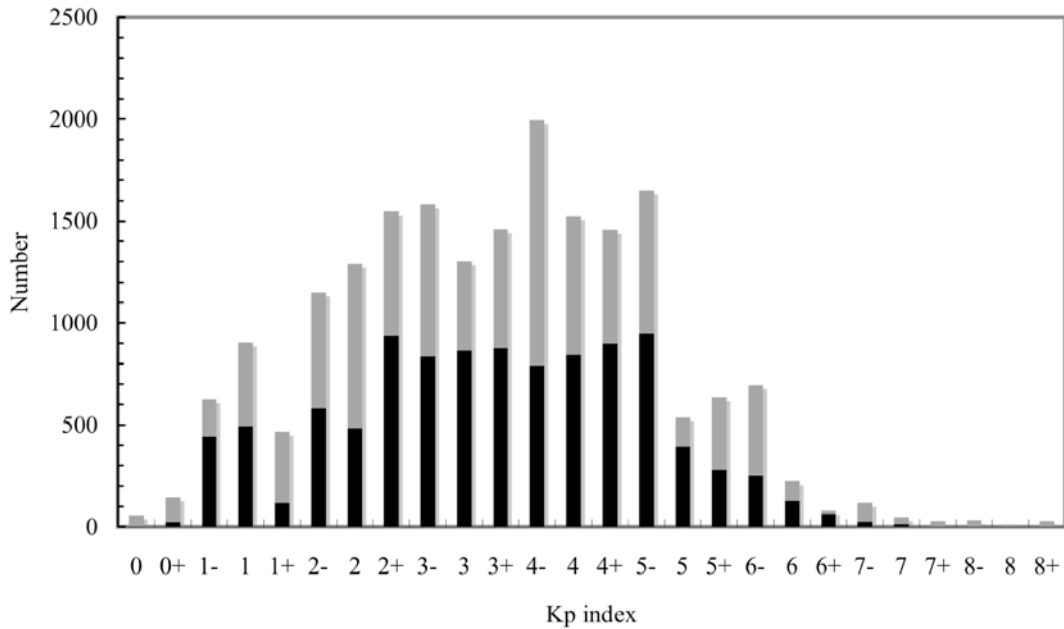


図 4.2 データの kp 指数分布。黒が日陰時のデータ数、グレーが日照時のデータ数を表している。

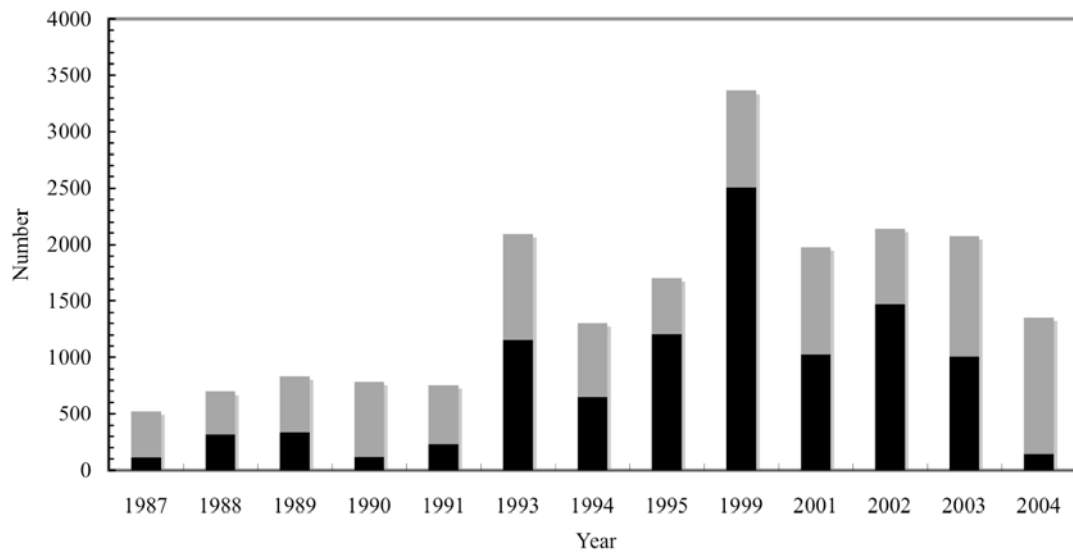


図 4.3 データの年分布。黒が日陰時のデータ数、グレーが日照時のデータ数を表している。

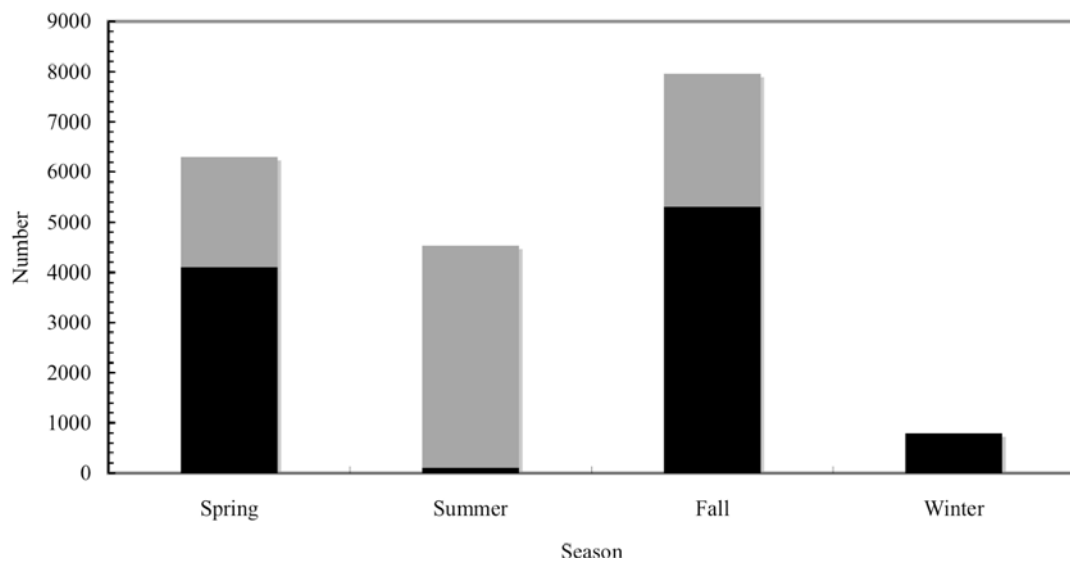


図 4.4 データの季節分布。黒が日陰時のデータ数、グレーが日照時のデータ数を表している。

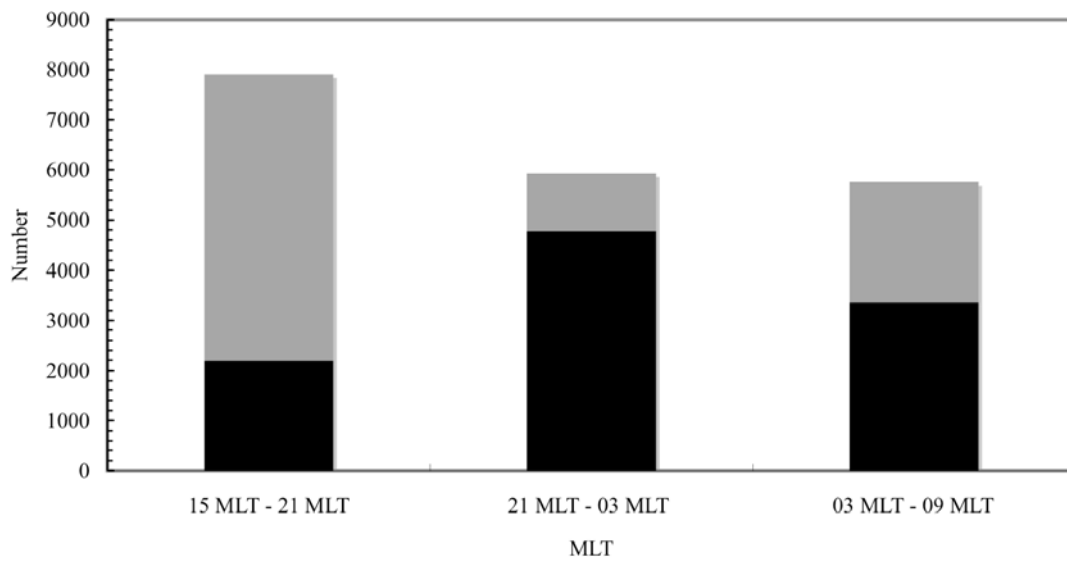


図 4.5 データの MLT 分布。黒が日陰時のデータ数、グレーが日照時のデータ数を表している。

第5章 解析結果

本章では、まずトロムソ日照時の降下粒子エネルギー導出に必要な、太陽光により生成される電子の密度分布のモデル化について述べる。次に、EISCAT UHF レーダーCP-1 モードで、1987年1月14日から2004年11月13日までに観測されたデータを用いて統計解析した結果を順番に述べる。

5.1 太陽光により生成される電子の密度分布のモデル化

2004年6月3日にUHFレーダーが観測した高度120 kmの電子密度の時系列プロットを図5.1に示す。赤線は日照があった事を意味し、南中時刻は1045 UT (1145 LT) で図中に点線で示す。電離生成の理論によれば、降下粒子が無く日照の効果のみが作用していれば電子密度は南中時刻を中心に前後の時間で対称となるはずである。しかし図5.1を見ると対称にはなっていない。0000 UT から0900 UTの間や2130 UT以降では降下粒子がある事が分かる。つまり日照の効果と降下粒子の効果の両方が作用している事になる。このように、UHFレーダーが観測した電子密度は両方の効果が作用した結果であり、降下粒子の効果のみを表してはいない。日照の効果と降下粒子の効果を分離するために、太陽光により生成される電子の密度分布のモデル化を試みる。

図5.2に、2001年9月21日にUHFレーダーが観測した高度121 km電子密度の時系列プロットを示す。図5.2で赤線の部分は日照がある時間帯で、南中時刻は1036 UT (1136 LT) である。昼間は磁気圏が静穏であり有為な降下粒子が見られない。南中時刻(点線)を中心に、前後の時間の電子密度は、対照的な形をしている。4.2節の議論を基に、このデータを用いて $(\cos\chi)^{1/2}$ の線形フィッティングを試みた。

$$N_e (\text{m}^{-3}) = \left[a(\cos\chi)^{1/2} + b \right] \times 10^{11} \quad (5.1)$$

結果を図5.3に示す。フィッティングによって得られた関数は、

$$N_e (\text{m}^{-3}) = \left[2.93(\cos\chi)^{1/2} - 0.15 \right] \times 10^{11} \quad (5.2)$$

であり、図5.3中の青線に対応している。相関係数は0.93と非常に良い。高い相関係数は、太陽光による電離分布が式(5.1)により定量的に精度良く表現できることを示している。式(5.2)から求められる電子密度のモデル値と観測値の比

較ために、電子密度の時系列プロットにモデル値を加えて、図 5.4 に示す。図中の青線が式(5.2)により与えられる電子密度に対応し、実際の観測を良く再現しているが、図 5.4 を見ると観測値のほぼ半数がモデル値を下回っている。図中の各データサンプリングの時間スケールで、 10^{10} m^{-3} 程度の変動をする電子密度は、観測機器に起因する可能性が高いが、自然現象である可能性も排除できない。後者の場合は、我々が求めたいのは、この短期変動の下限値により規定される電子密度分布である。この下限値により規定される電子密度のモデル化のために、 $(\cos\chi)^{1/2}$ の値を 0.03 ずつ区切り、その範囲内での電子密度の最小値を選び、それらを線形フィッティングした。この手法で得られた関数は、

$$Ne (\text{m}^{-3}) = \left[2.10 (\cos\chi)^{1/2} + 0.07 \right] \times 10^{11} \quad (5.3)$$

である。相関係数は 0.97 であった。式(5.3)から求められる電子密度のモデル値と観測値の比較のために、電子密度の時系列プロットにモデル値を加えて図 5.5 に示す。図中の青線が式(5.3)に対応する。この手法が日照の効果によって増大する電子密度の見積もりに効果的であり、降下粒子が無い時間帯のデータがあれば電子密度のモデル値を与えられる事が分かる。2001 年 9 月 21 日の高度 99 km から 144 km までの係数 a, b を表 5.1 にまとめる。

別の例として、2004 年 6 月 3 日の高度 121 km の電子密度と $(\cos\chi)^{1/2}$ の関係を図 5.6 に示す。図中の赤線はフィッティングによって求められたものである。高度 99 km から 144 km までの高度ごとの係数を表 5.2 に示す。得られた係数を用いて、日照の効果を差し引く前と差し引いた後の降下粒子エネルギーの時系列プロットを図 5.8 に示す。図中黒線が日照の効果を差し引く前の、観測された電子密度を用いて高度積分された降下粒子エネルギーである。一方、式(4.22)を用いて、観測された電子密度から、モデル化した日照により生成される電子密度を差し引いて、降下粒子により生成された電子密度を導出し、その電子密度を用いて求めた降下粒子エネルギーを赤線で示す。降下粒子が見られた 00 UT から 05 UT では日照の効果を差し引いても差はわずかである。しかし、05 UT から 20 UT では日照の効果の割合が大きい事が分かる。図 5.8 の赤線で表される昼間（日照期間）のエネルギー量、降下粒子がないと仮定すると 0.0 mW/m^2 になるべきであるが、これらの誤差の影響を受けて、約 1.0 mW/m^2 程度の値を持っている。即ち上記の誤差の総和は、図 5.8 の場合では、約 1.0 mW/m^2 であることを意味している。他の例でも同様の考察を行った結果、本手法で求められる

日照効果を考慮した降下粒子エネルギーの、導出の誤差ないし不確定性は約 1.0 mW/m^2 であることが分った。そのため、日照がある時の降下粒子エネルギーの定量的な評価では、この値以下の違いは意味がないと考えられる。

以上より、この手法によって日照の効果を差し引けば、 1.0 mW/m^2 程度の確かさで日照時における降下粒子のエネルギーを見積もる事が可能である事が示された。上記 2 例に加えて、日照時に有意な降下粒子が見られない各々 1-3 日間のデータセット全てについて本手法でモデル化を行った。表 5.1 と表 5.2 から分かるように、同じ高度でも近似される値は異なる（係数 a や b が二つの例で異なる）が、一つのデータセット内では、日照による電離は、相関係数が 0.9 以上で、 $(\cos\chi)^{0.5}$ の 1 次式で極めて良く近似されることが分った。このことは、一つのデータセットの中で、日照に加えて降下粒子による電離がある場合でも、日照期間中に降下粒子の影響が無いと判断される時間帯が 2 カ所以上存在すれば、式(5.1)の中の二つの係数 a , b を決定できるので、日照による電子密度を精度良く推定することができることを意味している。本研究で用いたデータを、一日ごとに上述の方法で係数を決定し、日照の効果を差し引いて降下粒子エネルギーを見積もった。

5.2 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係

図 5.9 に 2001 年 12 月 12 日 2330 UT から 13 日 0100 UT までの電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの時系列プロットを示す。赤線が電磁エネルギー、青線が降下粒子エネルギーである。2336 UT から 2344 UT まで電磁エネルギーと降下粒子エネルギーが同時に増加し、減少している。2344 UT から 2352 UT までや、0032 UT から 0050 UT の間では電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの増減が逆になっている。全体的に、電磁エネルギーが増加すれば降下粒子エネルギーが減少するという負の相関関係があるように見える。

電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係を調べるために、CP-1 モード全てのデータについて、縦軸を電磁エネルギー、横軸を降下粒子エネルギーとした散布図を図 5.10 に示す。図 5.10(a)がトロムソ日照時で、電磁エネルギーの平均値が 7.0 mW/m^2 、降下粒子エネルギーの平均値が 1.1 mW/m^2 であった。

図 5.1(b)がトロムソ日陰時で、電磁エネルギーの平均値が 9.5 mW/m^2 、降下粒子エネルギーの平均値が 2.7 mW/m^2 であった。電磁エネルギー、降下粒子エネルギー共に、図 5.10(a), (b)では、これら平均値よりも大きい所に多数分布しているにも関わらず、低い平均値になっているのは、両エネルギーともに、これらの平均値付近ないしはそれ以下のエネルギーを持つデータの数が、それ以上のエネルギーを持つデータの数よりも圧倒的に多い事を示している。これらの両エネルギーとも低いデータ以外を見てみると、図 5.10(a)では降下粒子エネルギーが 10.0 mW/m^2 の時には、データの多くは電磁エネルギーが 20.0 mW/m^2 以下の所に分布している。逆に、電磁エネルギーが比較的高い場合には、降下粒子エネルギーは 5.0 mW/m^2 以下のものが多くなっている。すなわち、電磁エネルギーが大きい時には降下粒子エネルギーが小さくなり、降下粒子エネルギーが大きい時には電磁エネルギーは小さくなり、両者は負の相関関係にあるように見える。

上記は、「目で見た感じ」を述べたにすぎない。以下で、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの統計的關係を、もう少し定量的に把握することを試みる。ここで知りたい事は、図5.11(a)で、線で囲った3カ所A, B, Cの中に分布するデータ数の比較である。Aは電磁エネルギーが比較的大きく、降下粒子エネルギーが比較的小さい場合を、Cは降下粒子エネルギーが比較的大きく、電磁エネルギーが比較的小さい場合を、Bは降下粒子エネルギー、電磁エネルギー双方が同じようなエネルギーを持つ場合である。しかし、電磁エネルギーの方が降下粒子エネルギーよりも7倍程度大きなエネルギーを持つために、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの絶対値の比較は意味をなさない。実際比較しなければならないのは、より大きな平均値を持つ電磁エネルギーの、その取りうる比較的広いエネルギー範囲内での大小と、より小さな平均値を持つ降下粒子エネルギーの、その取りうる比較的狭いエネルギー範囲内での大小の比較である。そのため、ここでは、導出された観測に基づく電磁エネルギーと降下粒子エネルギーを、それぞれの平均値で規格化して比較する。これは降下粒子エネルギーを $k = (\text{電磁エネルギー} / \text{降下粒子エネルギー})$ 倍し、相互比較することに相当する(図5.11(b), (c))。この規格化されたデータについて、図5.11(d)に示すように、等面積の領域を設定し、その中のデータ数をカウントする。具体的にはエネルギーが比較的高い領域(1)、低い領域(3)、その中間(2)の3つそれぞれについて、上記Aに対応する [1]: 電磁エネルギーが比較的大きく、降下

粒子エネルギーが比較的小さい、**B**に対応する[2]、**C**に対応する[3]を、各々の領域の面積が等しくなるように設定する。[1], [2], [3]それぞれにおいてデータ数をカウントし、ヒストグラムを作成する。作成したヒストグラムが図5.11(e)の赤線のように、[1], [3]の出現頻度が大きく、[2]の出現頻度が小さい時は、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーは負の相関関係である事を意味し、青線のように、[2]の出現頻度が最も大きくなった時は、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーは正の相関関係である事を意味する。

この手法によって調べた、夕方、真夜中、明け方ごとの結果を図 5.12 に示す。磁気圏の状態は、 kp 指数を 0 以上 6 未満として限定した。この時の、夕方での電磁エネルギーの平均値は 7.5 mW/m^2 、降下粒子エネルギーの平均値は 1.0 mW/m^2 であった。降下粒子エネルギーは、わずかししか流入していなかった。真夜中の電磁エネルギーの平均値は 6.7 mW/m^2 、降下粒子エネルギーの平均値は 2.6 mW/m^2 で、明け方の電磁エネルギーの平均値は 11.6 mW/m^2 、降下粒子エネルギーの平均値は 2.9 mW/m^2 であった。そのため、夕方では降下粒子エネルギーを 7.5 倍、真夜中では 2.5 倍、明け方では 4 倍して、データの分布を調べた。夕方では比較的能量が高い時（黒線）、中程度の時（赤線）、低い時（青線）全てで、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーは正の相関関係であった。真夜中と明け方では、比較的能量が低い時と中程度の時では相関関係が見られなかったが、比較的能量が高い時では、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーは負の相関関係であった。

5.3 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの磁気地方時依存性

電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの磁気地方時（以下、MLT と呼ぶ）依存性を調べるために、磁気圏の状態を「擾乱時」と「静穏時」に分類する。なぜなら、降下粒子や電場の時間・空間的な特性が磁気圏の状態によって変化するからである。本論文では kp 指数が 0 以上 3 未満の場合を「静穏時」、3 以上 6 未満の場合を「擾乱時」と定義する。さらにトロムソに日照があるか無いかで場合分けする。トロムソにおける太陽天頂角 χ が 90° 以上の時を「日陰時 (Dark)」、 χ が 90° 未満の時を「日照時 (Sunlit)」と定義する。

電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 分布を図 5.13 に示す。図 5.13 の(a)はトロムソに日照があり (Sunlit)、磁気圏が静穏であった場合で、(b)はトロムソに日照があり、磁気圏が擾乱していた場合である。(c)はトロムソに日照

が無く (Dark)、磁気圏が静穏であった場合で、(d)はトロムソに日照が無く (Dark)、磁気圏が擾乱していた場合である。図中の赤実線が電磁エネルギーの一時間平均値を表し、青実線が降下粒子エネルギーの一時間平均値を表し、エラーバーは標準偏差を表す。電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 依存性について順番に述べる。

・ 降下粒子エネルギーの MLT 依存性

トロムソに日照があった時の、図 5.13(a), (b)を見ると、降下粒子エネルギーは明け方で大きくなっていた。トロムソが日陰の時の降下粒子エネルギーは、磁気圏が静穏な場合(c)、真夜中から明け方にかけて降下粒子エネルギーがほぼ一定量電離圏に流入していた。磁気圏が擾乱な場合(d)では、真夜中と明け方で、多くの降下粒子エネルギーが電離圏に流入していた。降下粒子エネルギーは、磁気圏静穏時ではトロムソにおける日照・日陰による差は無いが、磁気圏擾乱時では、トロムソ日照時よりもトロムソ日陰時の方が、降下粒子エネルギーが電離圏へ多く流入していた。

・ 電磁エネルギーの MLT 依存性

図 5.13 を見ると、電磁エネルギーは、磁気圏の状態や日照・日陰の電離圏の状態によらず夕方と明け方にピークを持っていた。磁気圏静穏時における電磁エネルギーは、トロムソに日照がある時 (以下、トロムソ日照時) よりも無い時 (以下、トロムソ日陰時) の方が夕方、真夜中、明け方全てで大きかった。磁気圏擾乱時における電磁エネルギーは、夕方と明け方では日照・日陰による差が見られなかったが、真夜中では、日照時に無いピークが日陰時に現れていた。

5.4 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの kp 指数依存性

図 5.14 に降下粒子エネルギーと電磁エネルギーの kp 指数分布を、時間帯ごとに示す。 kp 指数の表記は、例えば 1 の時は、 kp 指数が 1^- 以上 1^+ 未満を表す。上段(a), (b)はトロムソが夕方の時、中段(c), (d)が真夜中の時、下段(e), (f)が明け方の時で、左側(a), (c), (e)が降下粒子エネルギーを、右側(b), (d), (f)が電磁エネルギーを示し、図中黒線がトロムソ日陰時、赤線がトロムソ日照時を示す。

図中のエラーバーは標準偏差を示し、図の上に各エネルギーの kp 指数ごとの平均値と kp 指数の相関係数を記載した。

降下粒子エネルギーは、トロムソに日照がある時の夕方(a)では、相関係数が 0.40、真夜中(c)では相関係数が 0.53 と、 kp 指数との相関があまり良くなかった。トロムソ日陰時における降下粒子エネルギーは、全ての時間帯において相関係数が 0.8 以上であり、 kp 指数と良い相関関係にあった。降下粒子エネルギーは、全ての時間において日照時よりも日陰時の方が、相関係数が高かった。

電磁エネルギーは、明け方と夕方では日照・日陰の両条件で kp 指数と良い相関関係にあった。日照・日陰で比較すると、日陰時よりも日照時で電磁エネルギーと kp 指数の相関係数が高かった。真夜中における電磁エネルギーは、日照時は kp 指数と良い相関が無かったが、日陰時は良い相関があった。

5.5 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動度依存性

図 5.15 に磁気圏が擾乱し、太陽活動度が高い時と低い時の降下粒子エネルギーの MLT 分布を示す。上段(a)、(b)はトロムソ日照時で、下段(c)、(d)はトロムソ日陰時である。左側(a)、(c)は降下粒子エネルギー、右側(b)、(d)は電磁エネルギーである。図中赤線は太陽活動度が高い時を表し、青線は太陽活動度が低い時を表している。エラーバーは標準偏差を示す。降下粒子エネルギーと電磁エネルギーの太陽活動度依存性を順番に述べる。

・ 降下粒子エネルギーの太陽活動度依存性

図 5.15(a)を見ると、トロムソ日照時における降下粒子エネルギーは、夕方では太陽活動度の低い時で 0.3 mW/m^2 であり、電離圏にほとんど流入していなかった。太陽活動度が高い時の降下粒子エネルギーも 1.1 mW/m^2 であり、わずかし電離圏に流入していなかった。真夜中における、トロムソ日照時の降下粒子エネルギーは、太陽活動度が高い時は 0.9 mW/m^2 と電離圏にわずかし流入しているが、太陽活動度が低い時は 2.8 mW/m^2 であり、電離圏に多くのエネルギーが流入していた。明け方は太陽活動度の高低に関わらず電離圏へエネルギーが流入していたが、太陽活動度が低い時の流入量の方が大きかった。図 5.15(c)トロムソ日陰時の降下粒子エネルギーは、夕方では太陽活動度の高低による流入量の違いが見られなかった。真夜中、明け方ともに降下粒子エネルギー

は太陽活動度が高い時よりも低い時の方が大きかった。真夜中の降下粒子エネルギーは、同じ太陽活動度で比較すると日照時よりも日陰時の方が大きかった。降下粒子エネルギーは太陽活動度が高い時よりも低い時に電離圏へ多く流入していた。

各条件における降下粒子エネルギーの大小関係を、以下にまとめる。

- (1) 太陽活動度 低い時 > 高い時
- (2) 日照・日陰 日陰時 > 日照時

・電磁エネルギーの太陽活動度依存性

電磁エネルギーは日照の有無に関わらず全ての時間帯において、太陽活動度が低い時よりも高い時の方が大きかった。トロムソ日照時(b)では、太陽活動度の高い時、低い時ともに夕方で電磁エネルギーが多く流入していた。トロムソ日陰時(d)では太陽活動度が高い時は明け方に多く電磁エネルギーが流入し、太陽活動度が低い時は目立った傾向は見られなかった。電磁エネルギーは太陽活動度が低い時よりも高い時に電離圏へ多く流入していた。

各条件における電磁エネルギーの大小関係を、以下にまとめる。

- (1) 太陽活動度 高い時 > 低い時
- (2) 日照・日陰 日照時 > 日陰時 (夕方)
日陰時 > 日照時 (夕方以外)

5.6 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性

前節まで、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性について、MLT 依存性、 k_p 指数依存性と共に述べてきたが、本節では、より詳しく調べる。

磁気圏からの電磁エネルギーの流入を考えた場合、それに伴う沿磁力線電流は、トロムソ上空の電離圏だけでなく、同じ磁力線で結ばれた磁気共役点上空の電離圏の状態にも関連すると考えられる。トロムソの磁気共役点は、IGRFモデルを使って計算すると、(61.0°S, 65.2°E)である。以下、トロムソの日照・日陰だけでなく、磁気共役点の日照・日陰も考慮して解析を行う。考えられる組み合わせは、

- (1) トロムソ日陰時、共役点日陰時

- (2) トロムソ日陰時、共役点日照時
- (3) トロムソ日照時、共役点日陰時
- (4) トロムソ日照時、共役点日照時

の4通りである。本節では季節による影響を除くために、地球の自転軸と公転面がほぼ垂直になる春と秋のデータを用いた。以下、降下粒子エネルギーと電磁エネルギーの日照・日陰依存性について順番に述べる。

・降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性

降下粒子エネルギーを、トロムソとトロムソの磁気共役点での、日照の有無によって場合分けした時の MLT 分布を図 5.16 に示す。上段(a)、(b)は太陽活動度が高い時で、下段(c)、(d)は太陽活動度が低い時、左側(a)、(c)は磁気圏静穏時で、右側(b)、(d)は磁気圏擾乱時である。図中の黒実線は、トロムソと共役点ともに日陰時、黒点線はトロムソが日陰で共役点は日照の時である。赤実線はトロムソと共役点ともに日照時、赤点線はトロムソが日照で共役点が日陰の時である。トロムソに日照があり、共役点が日陰の時(赤点線)と、トロムソと共役点ともに日照時(赤実線)は、全てにおいてデータが無い時間帯が含まれていたため、直線を載せなかった。トロムソが日陰時も、データが無い時間帯がある場合には、直線を載せなかった。各条件での降下粒子エネルギーの平均値、データ数等は表 5.3 と表 5.4 にまとめた。

磁気圏静穏時(a)、(c)の夕方では太陽活動度の高低に関わらず、トロムソに日照がある時は、降下粒子エネルギーが電離圏にわずかししか流入していない。太陽活動度が高い時(a)では、トロムソ日陰かつ共役点日照時(黒点線)は、降下粒子エネルギーが 0.5 mW/m^2 と、電離圏にわずかししか流入していなかったのに対し、トロムソ共役点ともに日陰時(黒実線)は 1.1 mW/m^2 ほど流入していた。磁気圏が擾乱し、太陽活動度が高い時(b)は、トロムソ日照時の夕方では、降下粒子エネルギーが流入していなかった。太陽活動度が低い時(d)は、トロムソ共役点ともに日照時(赤実線)は 1.1 mW/m^2 、トロムソ日照かつ共役点日陰時(赤点線)は 1.2 mW/m^2 であり、降下粒子エネルギーの流入量は同程度であった。太陽活動度が高い時(b)では、トロムソと共役点ともに日陰時が 1.9 mW/m^2 で、トロムソ日陰かつ共役点日照時も 1.9 mW/m^2 であり、やはり共役点の日照による違いは見られなかった。しかし、太陽活動度が低い時(d)では、トロムソ共役点ともに日陰時は 2.0 mW/m^2 なのに対し、トロムソ日陰時共役点日照時は

3.3 mW/m²であり、共役点に日照がある時の方が、降下粒子エネルギーが大きかった。真夜中は、春と秋においてはトロムソに日照がある時間はほとんど無い。そのためトロムソが日陰時で、共役点に日照がある時と無い時を比較する。太陽活動度が低く磁気圏が擾乱している時は、共役点の日照の有無による降下粒子エネルギーの違いは見られない。しかし、太陽活動度が低い時は、トロムソ日陰かつ共役点日照時の降下粒子エネルギーの方が、トロムソ共役点ともに日陰時よりも全ての時間帯で大きく、その差は夕方では 1.3 mW/m²、真夜中では 0.7 mW/m²、明け方では 1.0 mW/m²であった。太陽活動度が高く磁気圏が擾乱している時(b)の、明け方における降下粒子エネルギーは、トロムソ及び共役点の日照の有無に関わらず 2.0 mW/m²以上であり、日照・日陰依存性が見られなかった。

・電磁エネルギーの日照・日陰依存性

電磁エネルギーの、トロムソとトロムソの磁気共役点両地点での日照の有無による違いを MLT ごとに図 5.17 に示す。分類は図 5.16 と同じである。各条件での電磁エネルギーの平均値、データ数等は表 5.3 と表 5.4 にまとめた。

夕方の、太陽活動度が低く磁気圏静穏時(c)においては、トロムソと共役点ともに日陰時の場合 7.1 mW/m²であるのに対し、トロムソ共役点ともに日照時の場合は 1.5 mW/m²で、トロムソ日照かつ共役点日陰時の場合は 2.1 mW/m²であった。(c)以外では日照時と日陰時で明確な差は見られなかった。

真夜中は、太陽活動度が高く磁気圏静穏時(a)では、トロムソ日陰かつ共役点日照時が 12.3 mW/m²、トロムソと共役点ともに日陰時が 8.3 mW/m²であった。磁気圏擾乱時(b)でも、トロムソと日陰共役点ともに日照時が 11.6 mW/m²であるのに対しトロムソ共役点ともに日陰時は 13.4 mW/m²であり、同じトロムソ日陰時でも、共役点に日照がある時の方が、電磁エネルギーが大きかった。太陽活動度が低い時は、共役点の日照の有無による違いは無く、太陽活動度が高い時よりも電磁エネルギーが低かった。

明け方は、太陽活動度が高く磁気圏静穏時(a)では、トロムソ共役点ともに日陰時は 13.7 mW/m²、トロムソ日陰かつ共役点日照時は 11.6 mW/m²、トロムソ日照共役点日陰時は 6.2 mW/m²であり、共役点ともに日陰の時が最も大きかった。磁気圏擾乱時(b)の夕方を見ると、トロムソ共役点ともに日陰時は 20.2 mW/m²で、トロムソ日陰かつ共役点日照時は 12.9 mW/m²、トロムソ日照かつ共役点日

陰時は 10.3 mW/m^2 、トロムソ共役点ともに日照時は 10.0 mW/m^2 であり、トロムソ共役点ともに日陰時が最も大きかった。太陽活動度が低い時の明け方は、どの条件もほぼ同じような値を取っており、全て 7.0 mW/m^2 を下回っていた。太陽活動度の高低で比較すると、太陽活動度が低い時よりも高い時の方が電磁エネルギーは大きくなっていた。

今までに述べてきた平均値は、統計的な電離圏へのエネルギーの流入を示している。5.1 節で述べたように、平均値以上のデータ数よりも、平均値程度か、それ以下のデータ数が圧倒的に多い。そこで、平均値よりも値が大きいデータの出現頻度を、トロムソ及び磁気共役点の日照・日陰で場合分けをして調べた。夕方と明け方における降下粒子エネルギーと電磁エネルギーのエネルギー分布を、トロムソとトロムソの共役点における、日照の有無で場合分けをして調べた。結果を図 5.18 から図 5.21 まで示す。真夜中は、日照時のデータが極めて少ないので調べないとした。降下粒子エネルギーは 2.0 mW/m^2 ずつエネルギーを区切ってデータ数を調べ、電磁エネルギーは 4.0 mW/m^2 ずつエネルギーを区切って調べた。

・ 降下粒子エネルギーについて

夕方における降下粒子エネルギーのヒストグラムを図 5.18 に示す。図 5.18 を見ると、4 つの条件全てで、日照日陰の条件に関わらず 0.0 mW/m^2 から 2.0 mW/m^2 の間にデータが多く存在しているのが分かる。太陽活動度が高く、磁気圏静穏時(a)を見ると、トロムソ共役点ともに日陰時が 2.0 mW/m^2 から 4.0 mW/m^2 の間で出現頻度が大きくなっている。太陽活動度が高く磁気圏擾乱時(b)では、(a)と同様にトロムソと共役点ともに日陰時が 2.0 mW/m^2 以上で出現頻度大きくなっている。トロムソと日陰共役点日照時は(a)と比べると 2.0 mW/m^2 以下で出現頻度が大きくなっているが、トロムソと共役点ともに日陰時と比べると、その出現頻度は小さかった。(a)、(b)を見ると、共役点の状態に関わらずトロムソに日照がある時は 2.0 mW/m^2 以上のエネルギーが電離圏に流入する頻度が極めて低い事が分かる。太陽活動度が低く磁気圏が静穏である時(c)は、トロムソ及び共役点の状態に関わらず電離圏に降下粒子エネルギーが流入していなかった。しかし、磁気圏が擾乱している時(d)は、4 つの条件全てで 2.0 mW/m^2 以上の出現頻度が増加していて、トロムソと共役点ともに日陰時よりもトロムソ日陰かつ共役点日照時の方が、高エネルギー側で最も出現頻度が大きくなっていた。

磁気圏が擾乱している時で、太陽活動度が高い時と低い時を比較すると、共役点の状態に関わらずトロムソに日照がある時の 2.0 mW/m^2 から 6.0 mW/m^2 の出現頻度が、太陽活動度が高い時よりも低い時の方が大きかった。

次に、明け方における降下粒子エネルギーのヒストグラムを図 5.19 に示す。図 5.19 を見ると、太陽活動度の高低や日照・日陰の状態に関わらず、トロムソ共役点ともに日陰時では、夕方よりも高エネルギー側の出現頻度が大きい事が分かる。トロムソ共役点ともに日照時や、トロムソ日照かつ共役点日陰時も、磁気圏擾乱時は高エネルギーの出現頻度が大きかった。

・電磁エネルギーについて

夕方における電磁エネルギーのヒストグラムを図 5.20 に示す。図 5.20 を見ると、太陽活動度が高く磁気圏静穏時(a)では、トロムソ共役点ともに日陰時の 0.0 mW/m^2 から 4.0 mW/m^2 の出現頻度が他の条件より小さく、 4.0 mW/m^2 から 12.0 mW/m^2 で出現頻度が大きくなっていた。しかし、太陽活動度が高く磁気圏擾乱時(b)では、日照日陰問わずほぼ同じような出現頻度であった。太陽活動度が低く磁気圏静穏時(c)では、トロムソ共役点ともに日陰時の方が、ともに日照時よりも 4.0 mW/m^2 以上で出現頻度が大きくなっていた。太陽活動度が低く磁気圏擾乱時(d)では、トロムソ共役点ともに日陰時が 0.0 mW/m^2 から 4.0 mW/m^2 の低エネルギーで最も出現頻度が大きくなっていた。明け方における電磁エネルギーのヒストグラムを図 5.21 に示す。図 5.21 を見ると、磁気圏が擾乱し、太陽活動度が高い時(b)には、トロムソ共役点ともに日照時が 8.0 mW/m^2 以上で出現頻度が大きい事が分かった。トロムソ共役点ともに日陰時の分布は、4つの条件で大きな違いが見られなかった。

5.7 結果のまとめ

5.2 節から 5.6 節で述べた結果を、以下にまとめる。

(1) 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの平均値の比較

本論文で定義した磁気圏擾乱度、太陽活動度を同一にして、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの平均値を比較すると、夕方、真夜中、明け方全てで、降下粒子エネルギーよりも電磁エネルギーの方が大きかった。

(2) 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係

真夜中と明け方では、電離圏へ流入するエネルギー量が比較的多い時に、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの間に負の相関関係が見られた。

(3) 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 依存性

磁気圏擾乱度、トロムソにおける日照・日陰に関わらず、電磁エネルギーは夕方と明け方にピークを持ち、降下粒子エネルギーは明け方にピークを持つ事が分かった。トロムソ日陰時で磁気圏が擾乱している時には、電磁エネルギー、降下粒子エネルギーともに、真夜中にピークが現れていた。磁気圏擾乱時では、トロムソ日照時よりもトロムソ日陰時の方が、降下粒子エネルギーが多く電離圏へ流入していた。

(4) 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの kp 指数依存性

トロムソ日陰時では、電磁エネルギー、降下粒子エネルギーともに全ての時間帯において kp 指数と良い相関関係にあった。トロムソに日照がある時は、降下粒子エネルギーは明け方でのみ kp 指数との相関が良く、電磁エネルギーは夕方と明け方で、 kp 指数と良い相関関係にあった。

(5) 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動度依存性

降下粒子エネルギーは、夕方、真夜中、明け方全てにおいて、太陽活動度が高い時よりも低い時の方が大きく、トロムソ日照時よりも日陰時の方が大きかった。

電磁エネルギーは、夕方、真夜中、明け方全てにおいて、太陽活動度が低時よりも高い時の方が大きかった。夕方における電磁エネルギーは、トロムソが日陰の時よりも日照がある時の方が大きかったが、明け方と真夜中では、トロムソに日照がある時よりも、日陰の時の方が大きかった。

(6) 両エネルギーとトロムソ及び共役点の日照・日陰との関係

夕方における降下粒子エネルギーは、太陽活動度が高く、磁気圏が擾乱している時は、トロムソが日陰で共役点が日照の時よりも、トロムソと共役点共に日陰時の方が大きかった。しかし、太陽活動度が低く、磁気圏が擾乱している時は、トロムソと共役点共に日陰時よりも、トロムソが日陰で共役点が日照

の時方が、降下粒子エネルギーが大きかった。

真夜中における降下粒子エネルギーは、太陽活動度が高く、磁気圏が擾乱している時には、トロムソと共役点ともに日陰の時と、トロムソが日陰かつ共役点日照時はほぼ同じであった。しかし、それ以外ではトロムソと共役点ともに日陰時よりも、トロムソ日陰かつ共役点日照の方が大きかった。

明け方における降下粒子エネルギーは、太陽活動度が低く磁気圏擾乱時には、トロムソと共役点ともに日陰時よりも、トロムソ日陰かつ共役点日照時の方が大きかった。太陽活動度が高く磁気圏擾乱時には、トロムソと共役点ともに日照時よりも、トロムソ日照かつ共役点日陰時の方が、降下粒子エネルギーが大きかった。

夕方における電磁エネルギーは、太陽活動度が高く、磁気圏静穏時には、トロムソ日陰かつ共役点日照時よりも、トロムソと共役点ともに日陰時の方が大きかった。しかし、太陽活動度が高く、磁気圏擾乱時には、トロムソと共役点ともに日陰時よりもトロムソ日陰かつ共役点日照時の方が大きかった。

真夜中における電磁エネルギーは、太陽活動度が高い時は、トロムソと共役点ともに日陰時よりも、トロムソ日陰かつ共役点日照時の方が大きかった。しかし、太陽活動度が低い時は、トロムソ日陰かつ共役点日照時よりもトロムソと共役点ともに日陰時の方が大きかった。

明け方における電磁エネルギーは、太陽活動度が低く、磁気圏擾乱時には、トロムソと共役点ともに日陰時よりもトロムソ日陰かつ、共役点日照時の方が大きかった。

以上、両エネルギーとトロムソ及び共役点の日照・日陰との関係を、さらにまとめるために、トロムソと共役点の日照・日陰時における、エネルギーを表す次の4つの文字を定義する。

$Q_{\text{Dark, Dark}}$: トロムソ、共役点ともに日陰時

$Q_{\text{Dark, Sunlit}}$: トロムソが日陰で、共役点が日照の時

$Q_{\text{Sunlit, Dark}}$: トロムソが日照で、共役点が日陰の時

$Q_{\text{Sunlit, Sunlit}}$: トロムソ、共役点ともに日照時

これらを用いて、以下にまとめる。

・降下粒子エネルギー

夕方: $Q_{\text{Dark, Dark}} \geq Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ (太陽活動度が高く、磁気圏擾乱時)

| | | |
|------|---|---------------------|
| | $Q_{\text{Dark, Dark}} < Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が低く、磁気圏擾乱時) |
| 真夜中： | $Q_{\text{Dark, Dark}} \approx Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が高く、磁気圏擾乱時) |
| | $Q_{\text{Dark, Dark}} \leq Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が高く、磁気圏擾乱時以外) |
| 明け方： | $Q_{\text{Dark, Dark}} < Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が低く、磁気圏擾乱時) |
| | $Q_{\text{Sunlit, Dark}} > Q_{\text{Sunlit, Sunlit}}$ | (太陽活動度が高く、磁気圏擾乱時) |

・電磁エネルギー

| | | |
|------|---|-------------------|
| 夕方： | $Q_{\text{Dark, Dark}} > Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が高く、磁気圏静穏時) |
| | $Q_{\text{Dark, Dark}} < Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が高く、磁気圏擾乱時) |
| | $Q_{\text{Sunlit, Dark}} > Q_{\text{Sunlit, Sunlit}}$ | (太陽活動度が低く、磁気圏静穏時) |
| 真夜中： | $Q_{\text{Dark, Dark}} < Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が高い時) |
| | $Q_{\text{Dark, Dark}} \approx Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が低い時) |
| 明け方： | $Q_{\text{Dark, Dark}} < Q_{\text{Dark, Sunlit}}$ | (太陽活動度が低く、磁気圏擾乱時) |
| | $Q_{\text{Sunlit, Dark}} > Q_{\text{Sunlit, Sunlit}}$ | (太陽活動度が高く、磁気圏擾乱時) |

磁気圏擾乱時は、トロムソと共役点ともに日陰時よりもトロムソ日陰かつ共役点日照時の方が、高エネルギー側で最も出現頻度が大きくなっていた。磁気圏が擾乱している時で、太陽活動度が高い時と低い時を比較すると、共役点の状態に関わらずトロムソに日照がある時の 2.0 mW/m^2 から 6.0 mW/m^2 の出現頻度が、太陽活動度が高い時よりも低い時の方が大きかった。

明け方における降下粒子エネルギーは、太陽活動度の高低や日照・日陰の状態に関わらず、トロムソ共役点ともに日陰時では、夕方よりも高エネルギー側の出現頻度が大きい事が分かった。

夕方における電磁エネルギーは、太陽活動度が高く磁気圏静穏時に、トロムソ共役点ともに日陰時での、 4.0 mW/m^2 から 12.0 mW/m^2 で出現頻度が大きくなっていた。太陽活動度が低く磁気圏静穏時では、トロムソ共役点ともに日陰時の方が、ともに日照時よりも 4.0 mW/m^2 以上で出現頻度が大きくなっていた。太陽活動度が低く磁気圏擾乱時では、トロムソ共役点ともに日陰時が 0.0 mW/m^2 から 4.0 mW/m^2 の低エネルギーで最も出現頻度が大きくなっていた。明け方では、共役点の日照・日陰に関わらず、トロムソ日陰時が日照時よりも高エネルギーの出現頻度が大きかった。

これらの結果に関する議論・解釈を次章で行う。

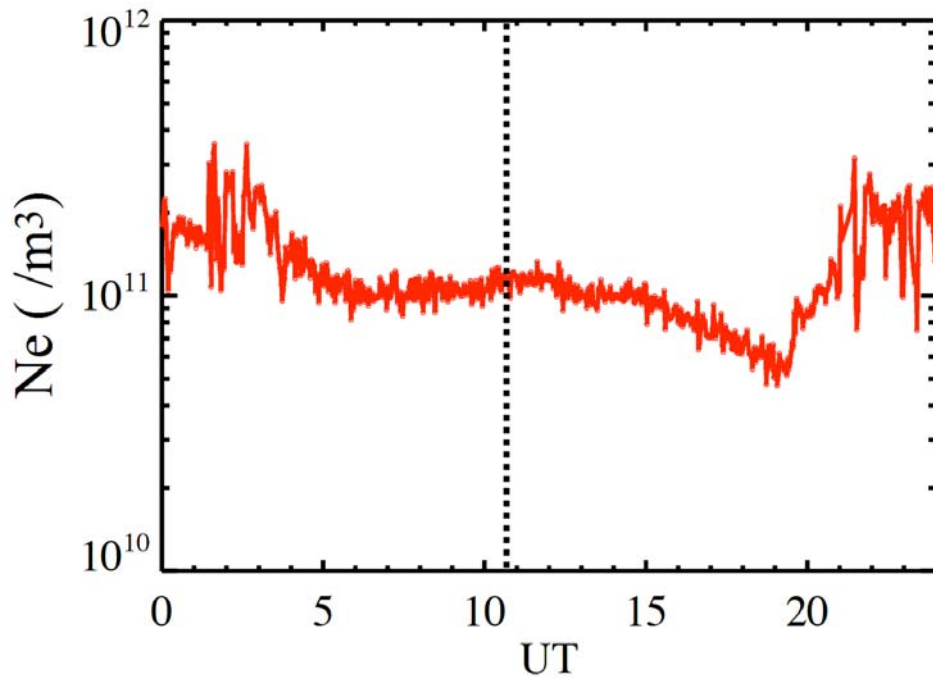


図 5.1 : 2004 年 6 月 3 日高度 121 km の電子密度。赤線がトロムソに日照があった時刻を表す。図中の点線が南中時刻で 1045 UT。

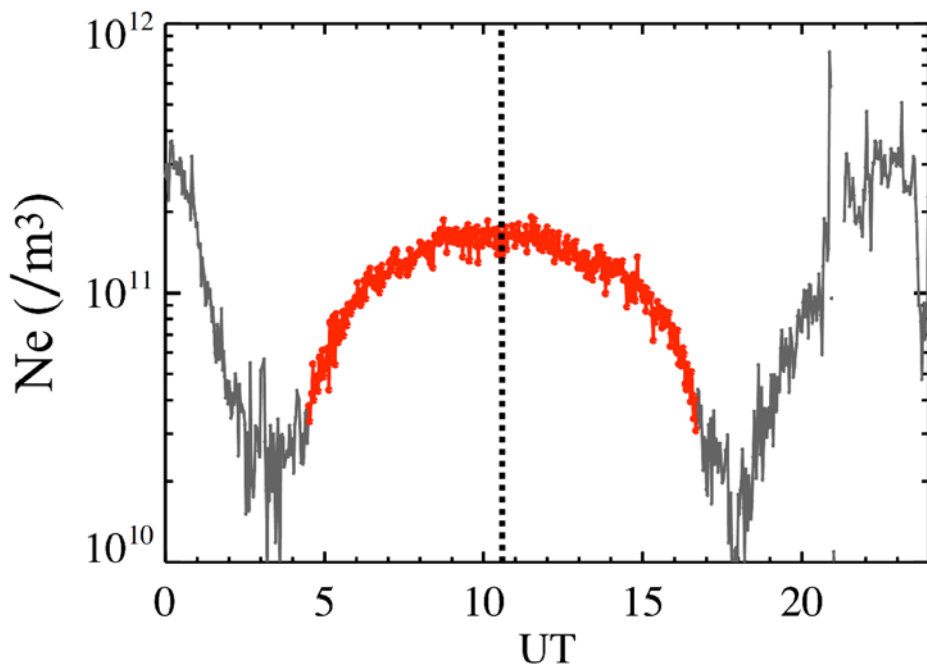


図 5.2 : 2001 年 9 月 21 日高度 121 km における電子密度の時間変動。赤線がトロムソに日照があった時刻を表す。図中の点線が南中時刻で 1036 UT。

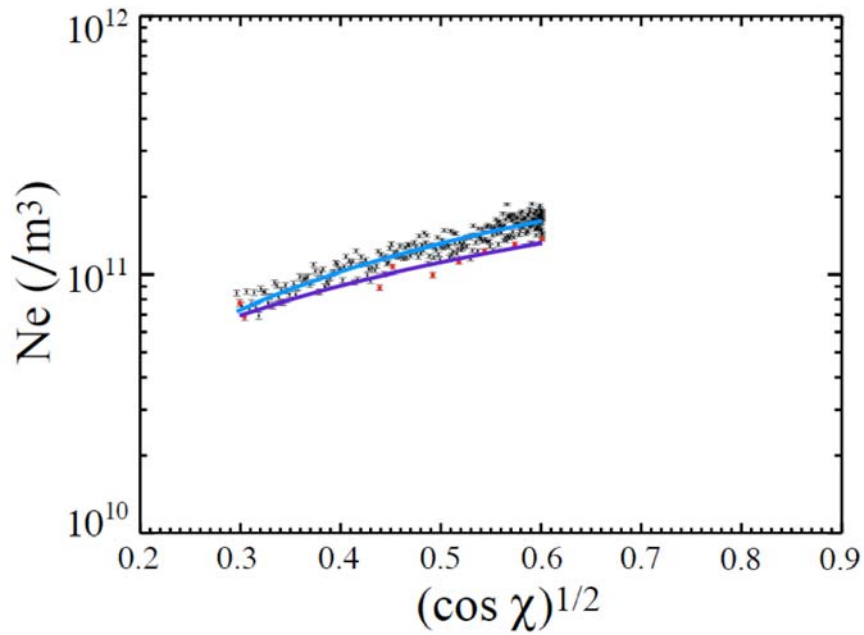


図 5.3 : 2001 年 9 月 21 日高度 121 km の電子密度と $(\cos \chi)^{1/2}$ の関係。青線が線形フィッティングによって描かれた直線。赤色丸印は $(\cos \chi)^{1/2}$ を 0.03 ずつ区切った際の電子密度の最小値を示し、紫線は赤色丸印を線形フィッティングして描かれた直線。

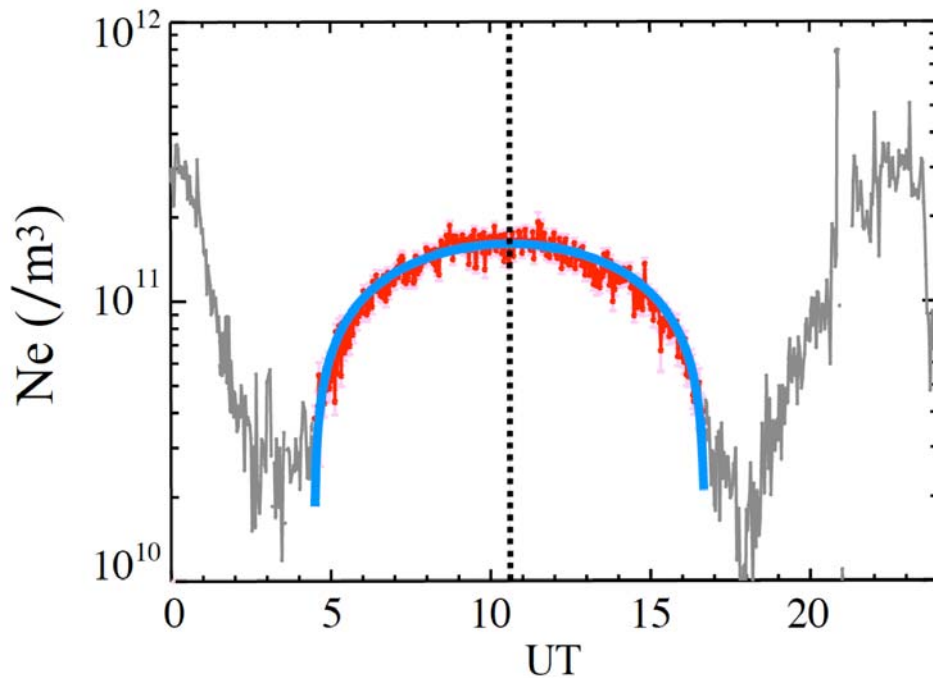


図 5.4 : 2001 年 9 月 21 日高度 121 km における電子密度の時間変動。青線がモデル (式 (5.1)) によって見積もられた電子密度で、図 5.3 中の青線に対応する。

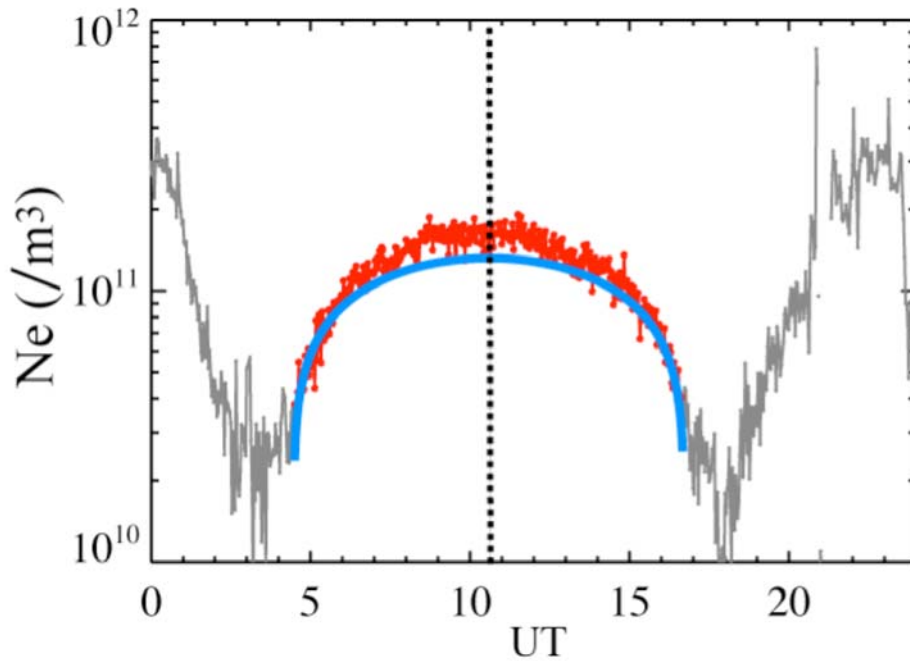


図 5.5 : 2001 年 9 月 21 日高度 121 km における電子密度の時間変動。青線がモデル (式 (5.2)) によって見積もられた電子密度で、図 5.3 中の紫線に対応する。

表 5.1 : 2001 年 9 月 21 日の高度 99 km から 144 km の高度ごとの係数、電子密度の誤差及び相関係数。

| 高度 (km) | 係数 a | 係数 b | 誤差 $\times 10^{11}$ ($/m^3$) | 相関係数 |
|---------|--------|--------|--------------------------------|------|
| 99 | 2.51 | -0.89 | 0.03 | 0.98 |
| 102 | 2.45 | -0.77 | 0.05 | 0.97 |
| 105 | 3.24 | -0.81 | 0.05 | 0.98 |
| 108 | 2.89 | -0.42 | 0.07 | 0.98 |
| 111 | 2.68 | -0.26 | 0.07 | 0.98 |
| 114 | 2.83 | -0.27 | 0.06 | 0.99 |
| 117 | 2.34 | -0.08 | 0.06 | 0.98 |
| 121 | 2.10 | 0.07 | 0.06 | 0.97 |
| 123 | 1.88 | 0.12 | 0.05 | 0.98 |
| 126 | 1.76 | 0.15 | 0.05 | 0.98 |
| 130 | 1.79 | 0.14 | 0.07 | 0.96 |
| 144 | 2.62 | -0.08 | 0.05 | 0.99 |

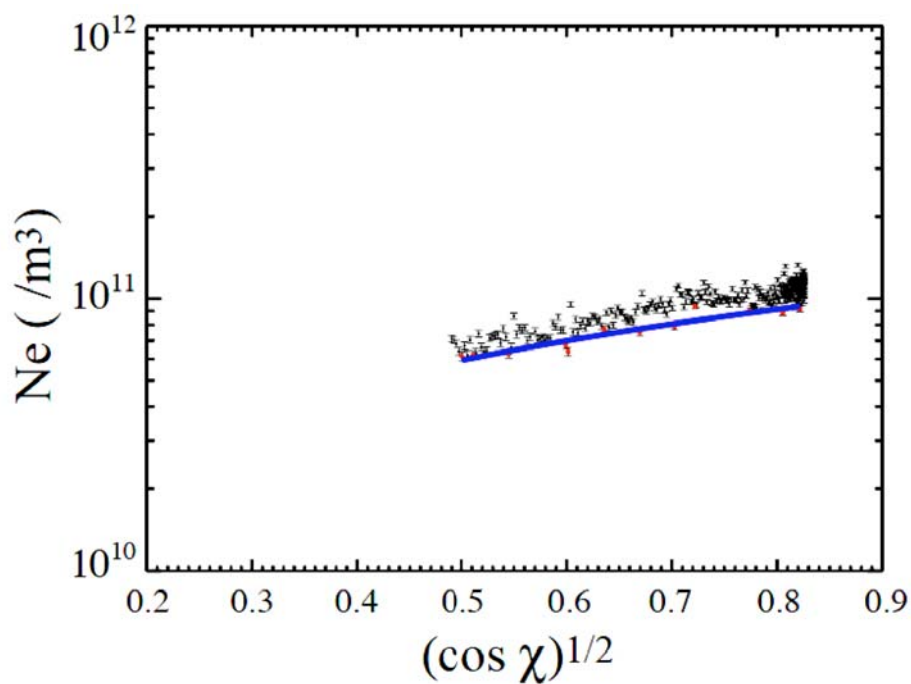


図 5.6 : 2004 年 6 月 3 日高度 121 km の電子密度と $(\cos \chi)^{1/2}$ の関係。水色丸印は $(\cos \chi)^{1/2}$ を 0.03 ずつ区切った際の電子密度の最小値を示し、赤線は水色丸印を線形フィッティングして描かれた直線。

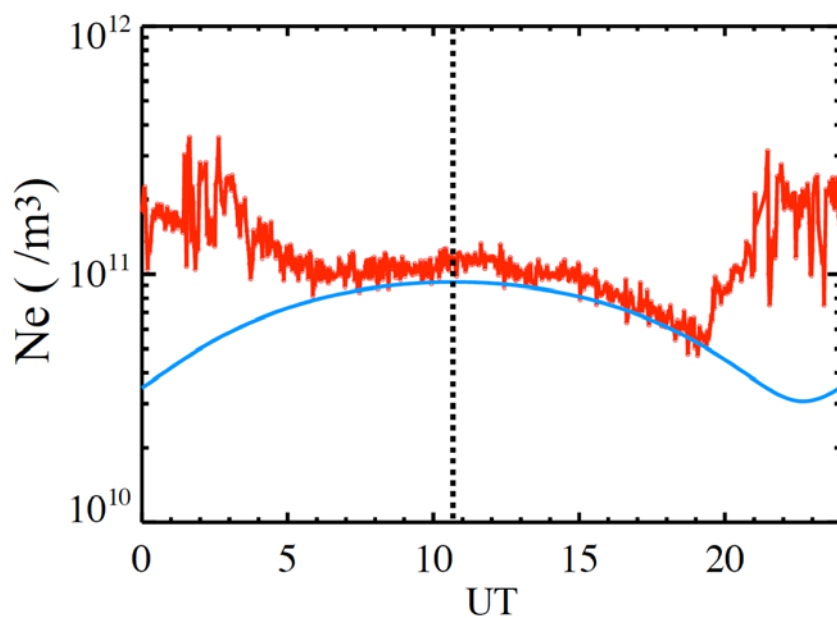


図 5.7 : 2004 年 6 月 3 日高度 121 km における電子密度の時間変動。青線がモデルによって見積もられた電子密度で、図 5.6 中の紫線に対応する。

表 5.2 : 2004 年 6 月 3 日の高度 99 km から 144 km の高度ごとの係数、電子密度の誤差及び相関係数。

| Altitude (km) | <i>a</i> | <i>b</i> | Error x 10 ¹¹ (/m ³) | Crrelation |
|---------------|----------|----------|---|------------|
| 99 | 1.41 | -0.34 | 0.04 | 0.96 |
| 102 | 1.62 | -0.43 | 0.02 | 0.99 |
| 105 | 1.43 | -0.26 | 0.04 | 0.97 |
| 108 | 1.16 | -0.06 | 0.04 | 0.94 |
| 111 | 1.24 | -0.08 | 0.03 | 0.97 |
| 114 | 1.32 | -0.13 | 0.04 | 0.96 |
| 117 | 1.01 | 0.08 | 0.05 | 0.92 |
| 121 | 1.07 | 0.06 | 0.04 | 0.94 |
| 123 | 1.17 | 0.00 | 0.04 | 0.94 |
| 126 | 1.51 | -0.20 | 0.07 | 0.92 |
| 130 | 1.68 | -0.25 | 0.04 | 0.98 |
| 144 | 2.10 | -0.30 | 0.07 | 0.96 |

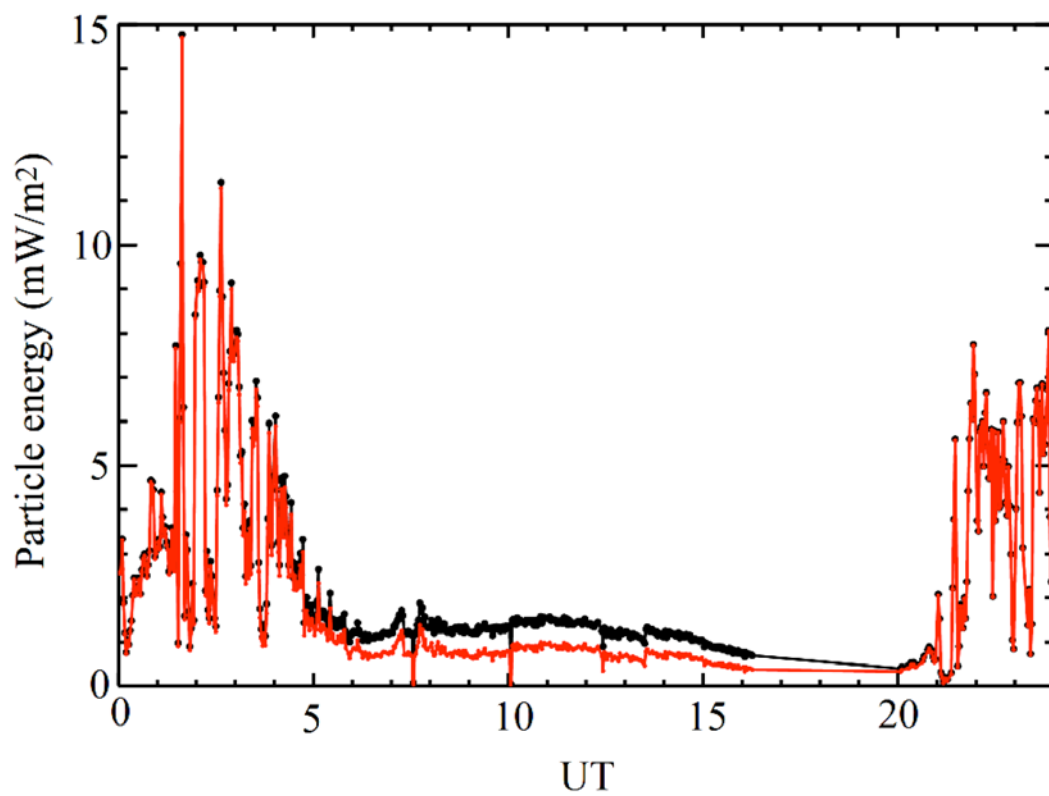


図 5.8 : 2004 年 6 月 3 日の降下粒子エネルギーの時間変動。黒線が日照の効果を差し引く前、赤線が差し引いた後。

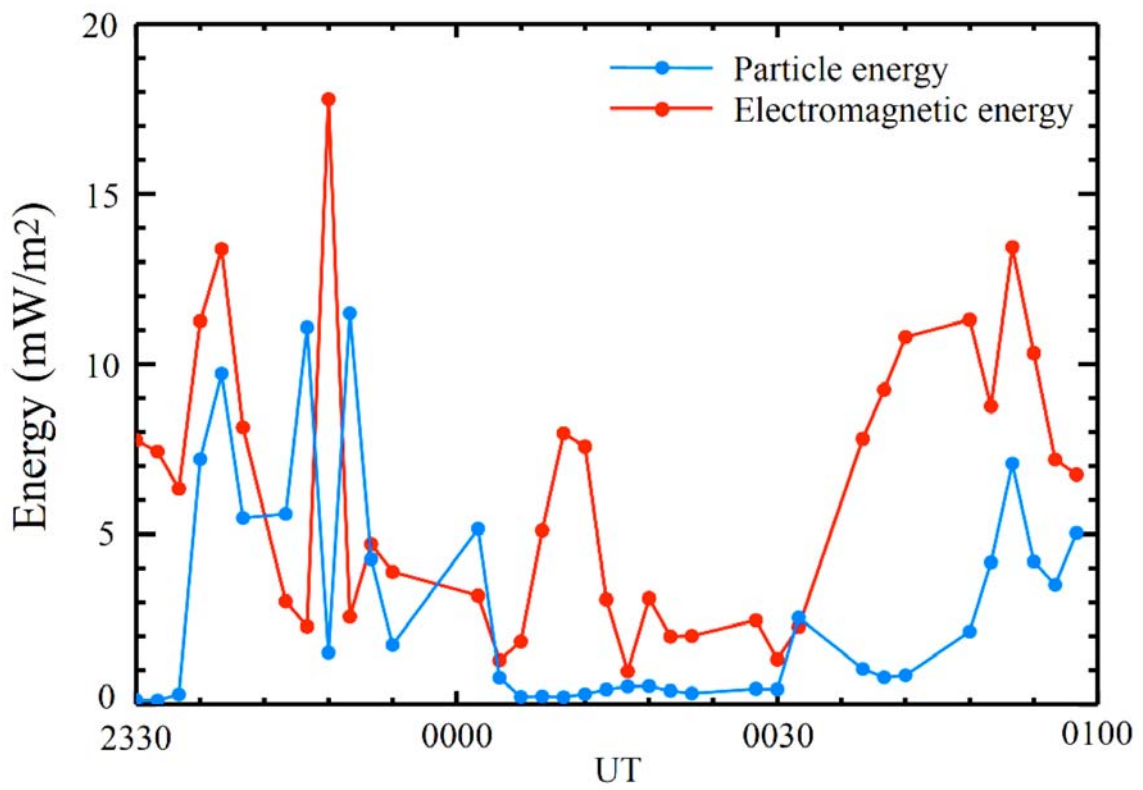


図 5.9 : 2001 年 12 月 12 日 2330 UT から 13 日 0100 UT までの電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの時間変動。赤線が電磁エネルギー、青線が降下粒子エネルギーである。

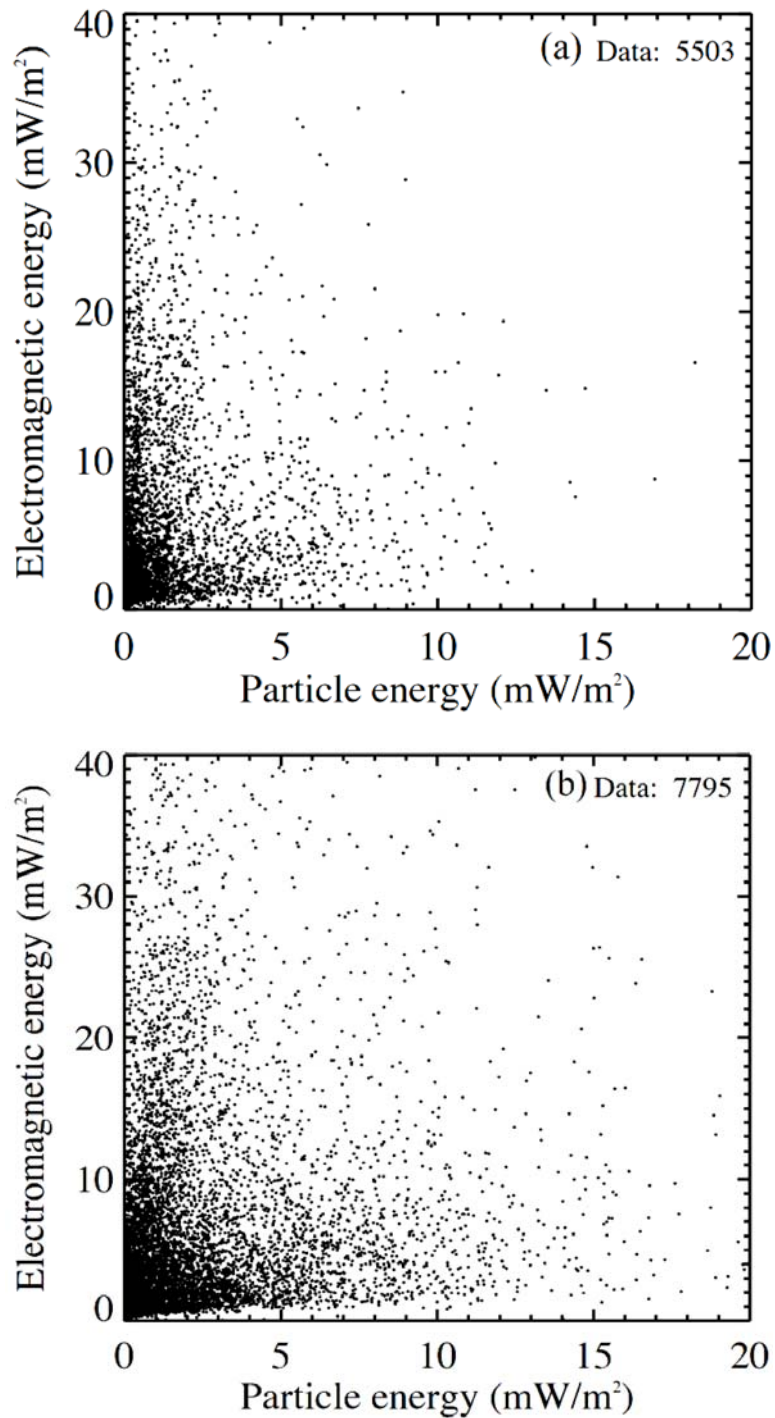


図 5.10：電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの対応関係。(a)がトロムソ日照時で、電磁エネルギーの平均値が 7.0 mW/m^2 、降下粒子エネルギーの平均値が 1.1 mW/m^2 であり、データ数は 5503 である。(b)がトロムソ日陰時で、電磁エネルギーの平均値が 9.5 mW/m^2 、降下粒子エネルギーの平均値が 2.7 mW/m^2 であり、データ数は 7795 である。

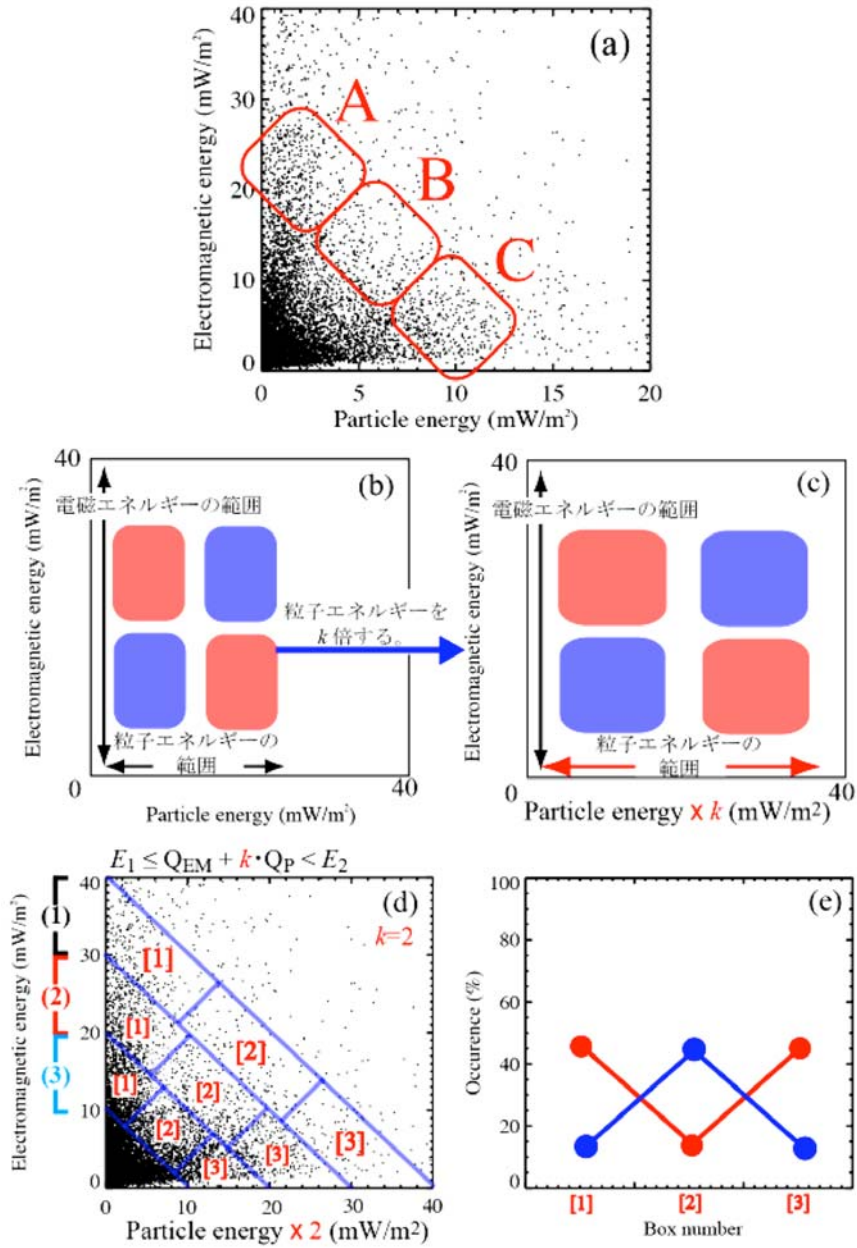


図 5.11 : 電磁エネルギーと降水粒子エネルギーの関係の調べ方。(a)が実際の電磁エネルギーと降水粒子エネルギーの分布を表す。(b)はデータの分布の概略図、(c)は降水粒子エネルギーを k (電磁エネルギー/降水粒子エネルギー) 倍した時のデータの分布の概略図。(d)がデータ数の調べ方を示す。(e)の赤線は電磁エネルギーと降水粒子エネルギーが負の相関関係である事を意味し、黒線は明確な負の相関ではなく、電磁エネルギーが一方的に大きい事を表し、青線は電磁エネルギーと降水粒子エネルギーに正の相関がある事を表している。

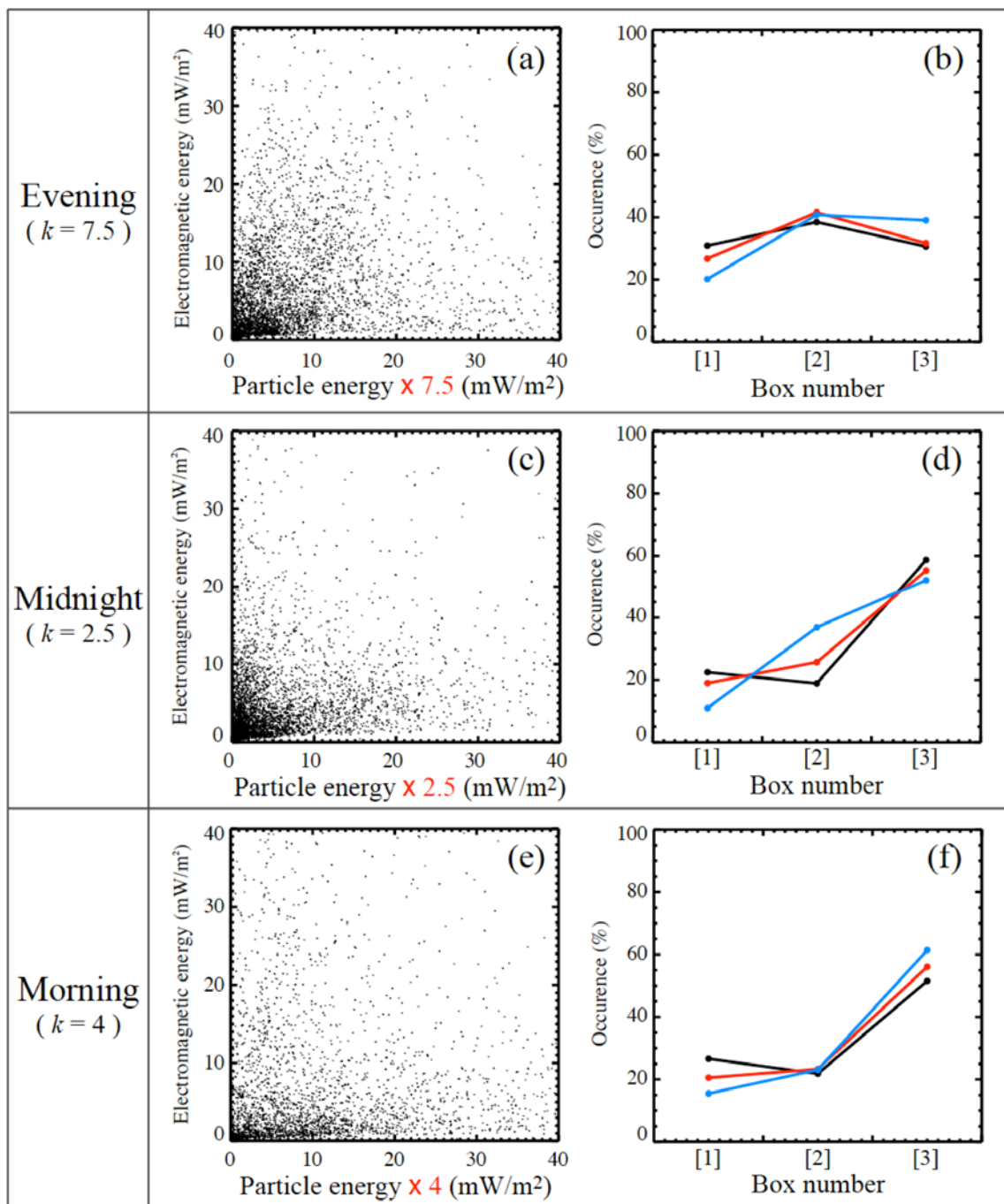


図 5.12 : 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの関係。上段(a)、(b)が夕方、降下粒子エネルギーを 7.5 倍して調べた結果である。中段(c)、(d)が真夜中で、降下粒子エネルギーを 2.5 倍、下段(e)、(f)が明け方で、降下粒子エネルギーを 4 倍してそれぞれ調べた。

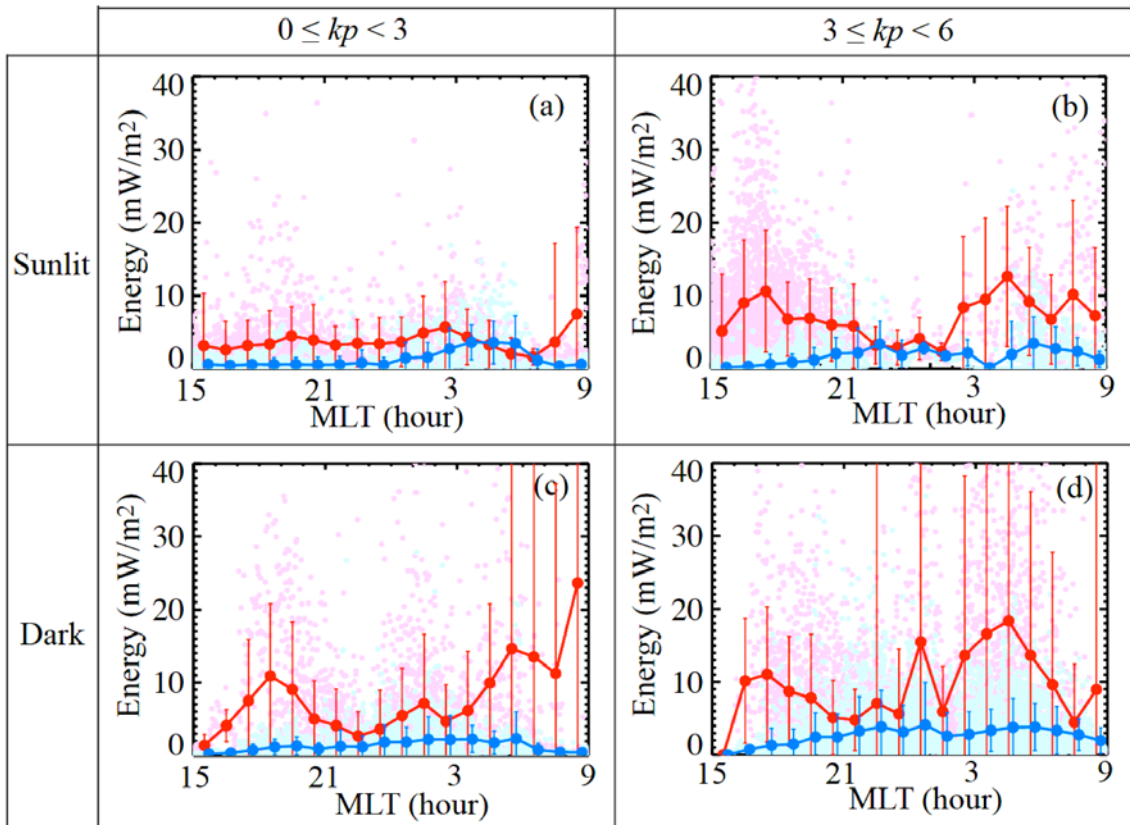


図 5.13 : kp 指数、日照の有無で場合分けした時の電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 分布。上段(a)、(b)はトロムソに日照がある時 (Sunlit) で、下段(c)、(d)はトロムソに日照が無い時 (Dark)。左側(a)、(c)は磁気圏静穏時で右側(b)、(d)は磁気圏擾乱時。図中赤実線が電磁エネルギーの一時間平均値を表し、青実線が降下粒子エネルギーの一時間平均値を表している。エラーバーは標準偏差を示す。図中の点はデータの MLT 分布を示し、桃色が電磁エネルギー、水色が降下粒子エネルギーである。

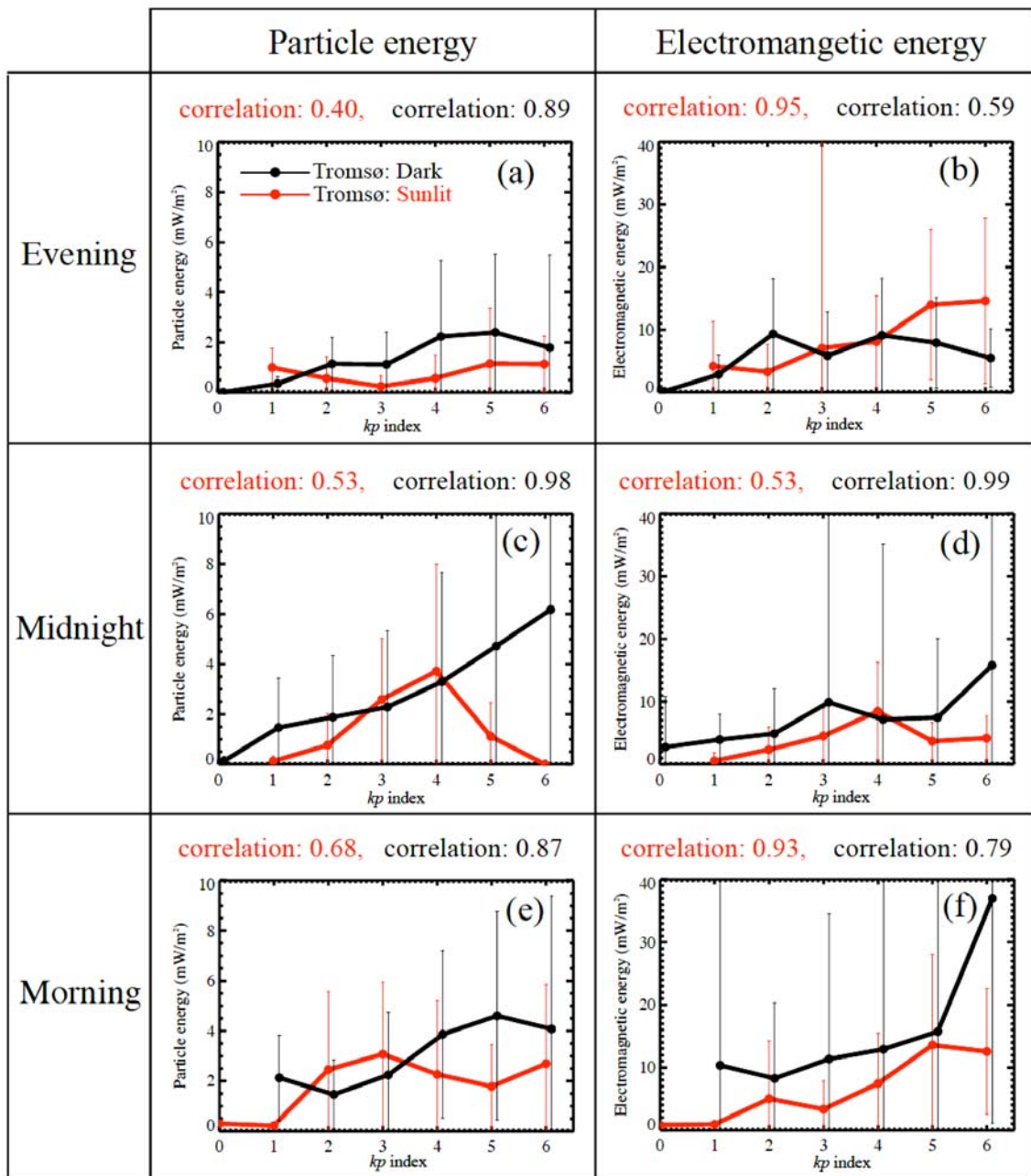


図 5.14: 各時間帯における電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの kp 指数分布。上段(a)、(b)はトロムソが夕方の時、中段(c)、(d)が真夜中の時、下段(e)、(f)が明け方の時。左側(a)、(c)、(e)が降下粒子エネルギーを、右側(b)、(d)、(f)が電磁エネルギーを示す。図中黒線がトロムソ日陰時、赤線がトロムソ日照時で、エラーバーは標準偏差である。各図上に記載したのは日照時と日陰時の相関係数である。

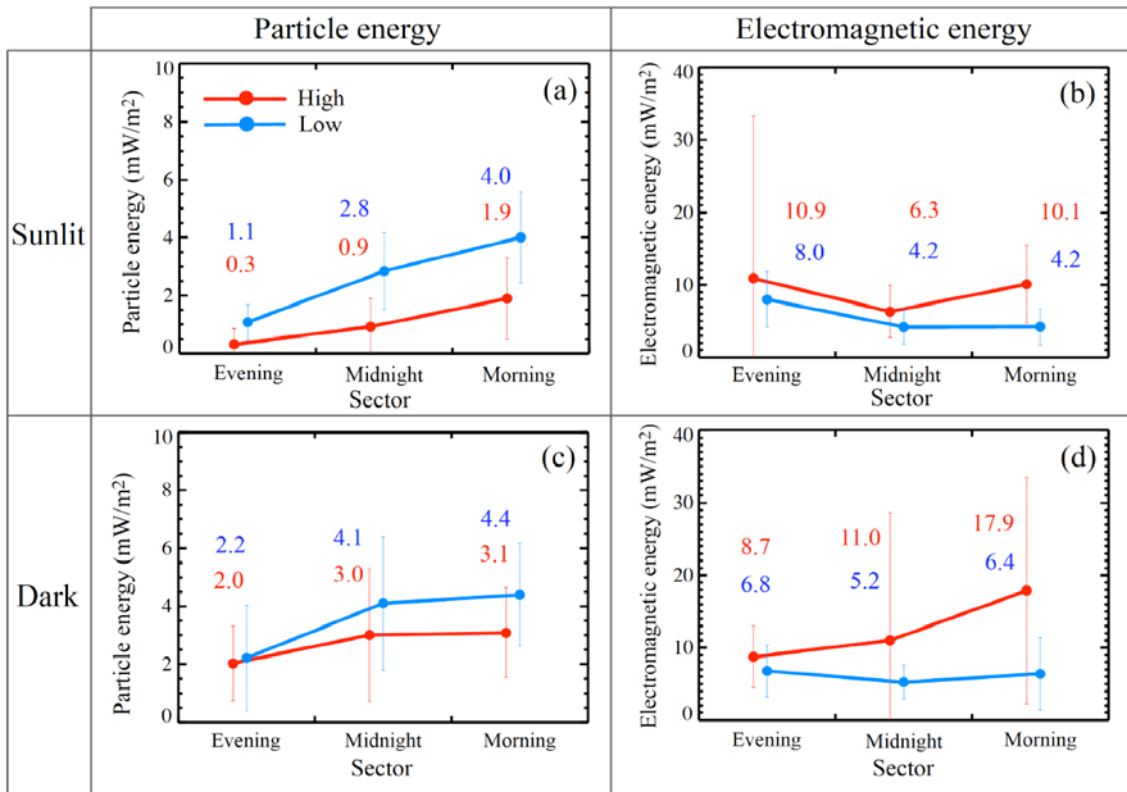


図 5.15 : 太陽活動度が高い時と低い時の降下粒子エネルギーの MLT 分布。磁気圏擾乱時のデータのみ使用している。上段 (a)、(b)は Tromsø 日照時で、下段 (c)、(d)は Tromsø 日陰時である。左側 (a)、(c)は降下粒子エネルギーを、右側 (b)、(d)は電磁エネルギーを示す。図中赤線は太陽活動度が高い時を表し、青線は太陽活動度が低い時を表している。エラーバーは標準偏差を示す。

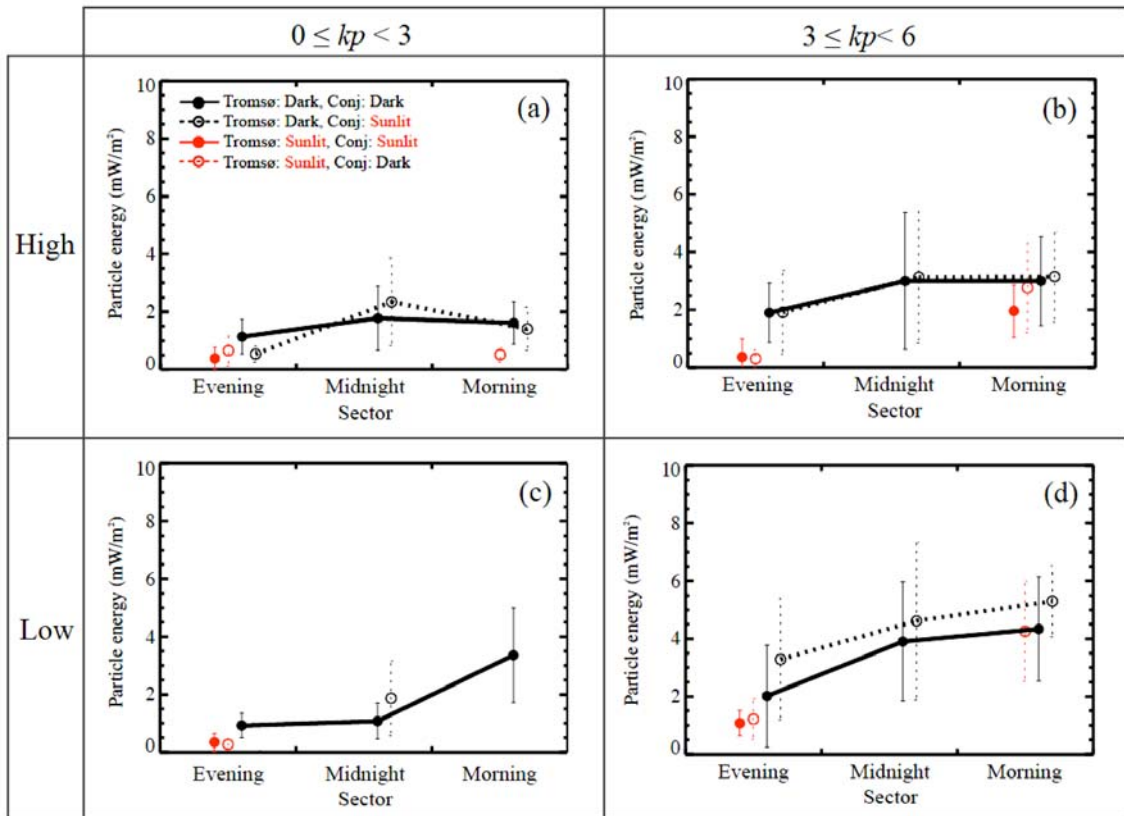


図 5.16: 太陽活動度、 k_p 指数で場合分けした時の降下粒子エネルギーの MLT 分布。上段 (a)、(b) は太陽活動度が高い時 (High) で、下段 (c)、(d) は太陽活動度が低い時 (Low)。左側 (a)、(c) は磁気圏静穏時で、右側 (b)、(d) は磁気圏擾乱時である。図中の黒実線は、トロムソと共役点ともに日陰時、黒点線はトロムソが日陰で共役点は日照の時である。赤実線はトロムソと共役点ともに日照時、赤点線はトロムソが日照で共役点が日陰の時である。トロムソに日照があり、共役点が日陰の時 (赤点線) と、トロムソと共役点ともに日照時 (赤実線) は、(a) から (d)、全てにおいてデータが無い時間帯が含まれていたもので、直線を載せなかった。トロムソが日陰時も、データが無い時間帯がある場合には、直線を載せなかった。

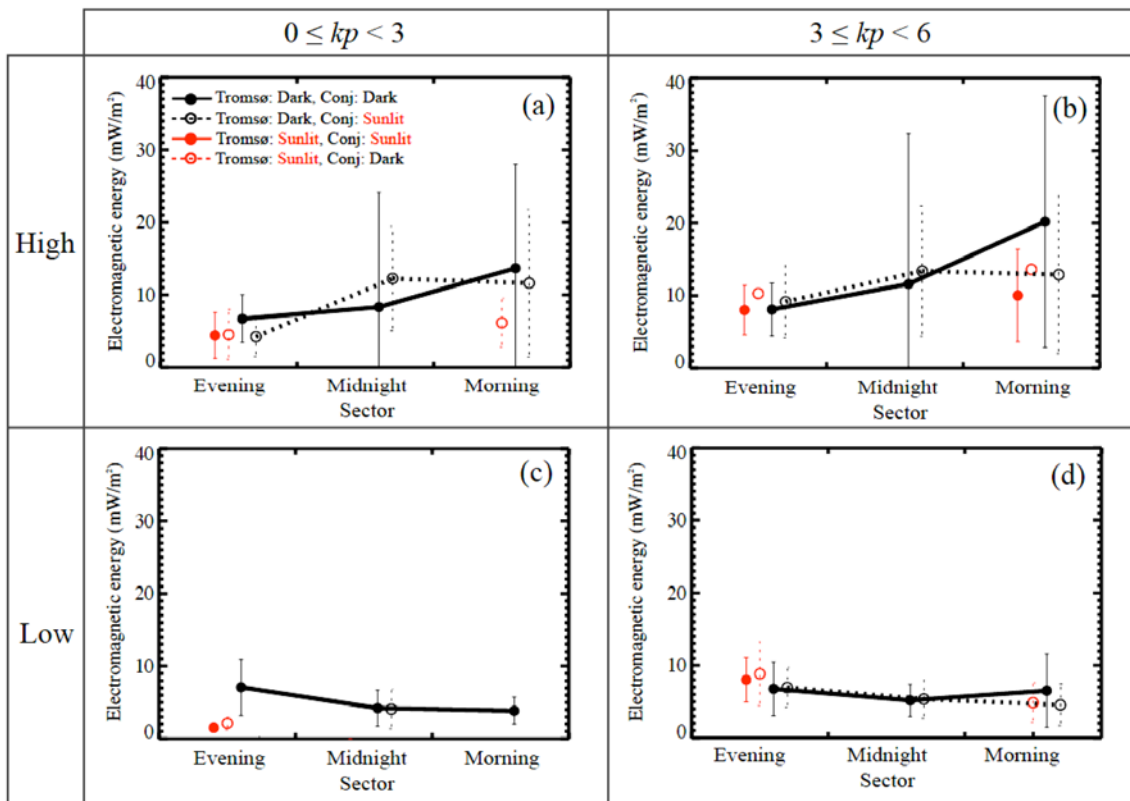


図 5.17 : 太陽活動度、 kp 指数で場合分けした時の電磁エネルギーの MLT 分布。上段(a)、(b)は太陽活動度が高い時で、下段(c)、(d)は太陽活動度が低い時。左側(a)、(c)は磁気圏静穏時で、右側(b)、(d)は磁気圏擾乱時である。図中の黒実線は、トロムソと共役点ともに日陰時、黒点線はトロムソが日陰で共役点は日照の時である。赤実線はトロムソと共役点ともに日照時、赤点線はトロムソが日照で共役点が日陰の時である。トロムソに日照があり、共役点が日陰の時(赤点線)と、トロムソと共役点ともに日照時(赤実線)は、(a)から(d)、全てにおいてデータが無い時間帯が含まれていたため、直線を書き入れなかった。トロムソが日陰時も、データが無い時間帯がある場合には、直線を書き入れなかった。

表 5.3 : 磁気圏静穏時の各時間帯の電磁エネルギー(Q_{EM})と降下粒子エネルギー(Q_P)の平均値とデータ数。太陽活動度、トロムソ及び共役点の日照の有無で場合分けしている。括弧内の値は標準偏差を表す。

| Solar activity | Tromsø | Conjugate | Sector | Q_{EM} (mW/m ²) | Q_P (mW/m ²) | Data |
|----------------|--------|-----------|----------|-------------------------------|----------------------------|------|
| High | Dark | Dark | Evening | 6.7 (6.6) | 1.1 (1.2) | 148 |
| | | | Midnight | 8.3 (31.6) | 1.8 (2.2) | 875 |
| | | | Morning | 13.7 (28.6) | 1.6 (1.5) | 310 |
| | | Sunlit | Evening | 4.2 (5.5) | 0.5 (0.6) | 93 |
| | | | Midnight | 12.3 (14.4) | 2.3 (3.0) | 247 |
| | | | Morning | 11.6 (20.3) | 1.4 (1.5) | 227 |
| | Sunlit | Dark | Evening | 4.5 (6.9) | 0.7 (1.1) | 158 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | 6.2 (6.7) | 0.5 (0.5) | 34 |
| | | Sunlit | Evening | 4.4 (6.3) | 0.4 (0.8) | 250 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | -- | -- | -- |
| Low | Dark | Dark | Evening | 7.1 (7.8) | 0.9 (0.9) | 285 |
| | | | Midnight | 4.2 (5.0) | 1.1 (1.3) | 352 |
| | | | Morning | 3.9 (3.8) | 3.4 (3.3) | 125 |
| | | Sunlit | Evening | -- | -- | -- |
| | | | Midnight | 4.1 (5.5) | 1.9 (2.6) | 119 |
| | | | Morning | -- | -- | -- |
| | Sunlit | Dark | Evening | 2.1 (1.9) | 0.3 (0.3) | 154 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | -- | -- | -- |
| | | Sunlit | Evening | 1.5 (1.2) | 0.3 (0.6) | 61 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | -- | -- | -- |

表 5.4 : 磁気圏擾乱時の各時間帯の電磁エネルギー(Q_{EM})と降下粒子エネルギー(Q_P)の平均値とデータ数。太陽活動度、トロムソ及び共役点の日照の有無で場合分けしている。括弧内の値は標準偏差を表す。

| Solar activity | Tromsø | Conjugate | Sector | Q_{EM} (mW/m ²) | Q_P (mW/m ²) | Data |
|----------------|--------|-----------|----------|-------------------------------|----------------------------|------|
| High | Dark | Dark | Evening | 8.1 (7.3) | 1.9 (2.0) | 532 |
| | | | Midnight | 11.6 (41.5) | 3.0 (4.8) | 969 |
| | | | Morning | 20.2 (34.7) | 3.0 (3.1) | 928 |
| | | Sunlit | Evening | 9.2 (10.0) | 1.9 (2.9) | 297 |
| | | | Midnight | 13.4 (18.0) | 3.1 (4.6) | 239 |
| | | | Morning | 12.9 (21.7) | 3.2 (3.1) | 384 |
| | Sunlit | Dark | Evening | 10.3 (9.0) | 0.3 (0.6) | 408 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | 13.6 (10.1) | 2.8 (3.1) | 77 |
| | | Sunlit | Evening | 8.0 (6.8) | 0.4 (1.3) | 664 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | 10.0 (12.8) | 2.0 (1.8) | 99 |
| Low | Dark | Dark | Evening | 6.8 (7.4) | 2.0 (3.5) | 307 |
| | | | Midnight | 5.2 (4.4) | 3.9 (4.1) | 615 |
| | | | Morning | 6.5 (10.2) | 4.3 (3.6) | 505 |
| | | Sunlit | Evening | 7.0 (5.5) | 3.3 (4.2) | 57 |
| | | | Midnight | 5.4 (5.3) | 4.6 (5.5) | 287 |
| | | | Morning | 4.6 (5.7) | 5.3 (2.5) | 33 |
| | Sunlit | Dark | Evening | 8.8 (8.8) | 1.2 (1.4) | 471 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | 4.9 (5.5) | 4.3 (3.5) | 85 |
| | | Sunlit | Evening | 8.0 (6.1) | 1.1 (0.9) | 335 |
| | | | Midnight | -- | -- | -- |
| | | | Morning | -- | -- | -- |

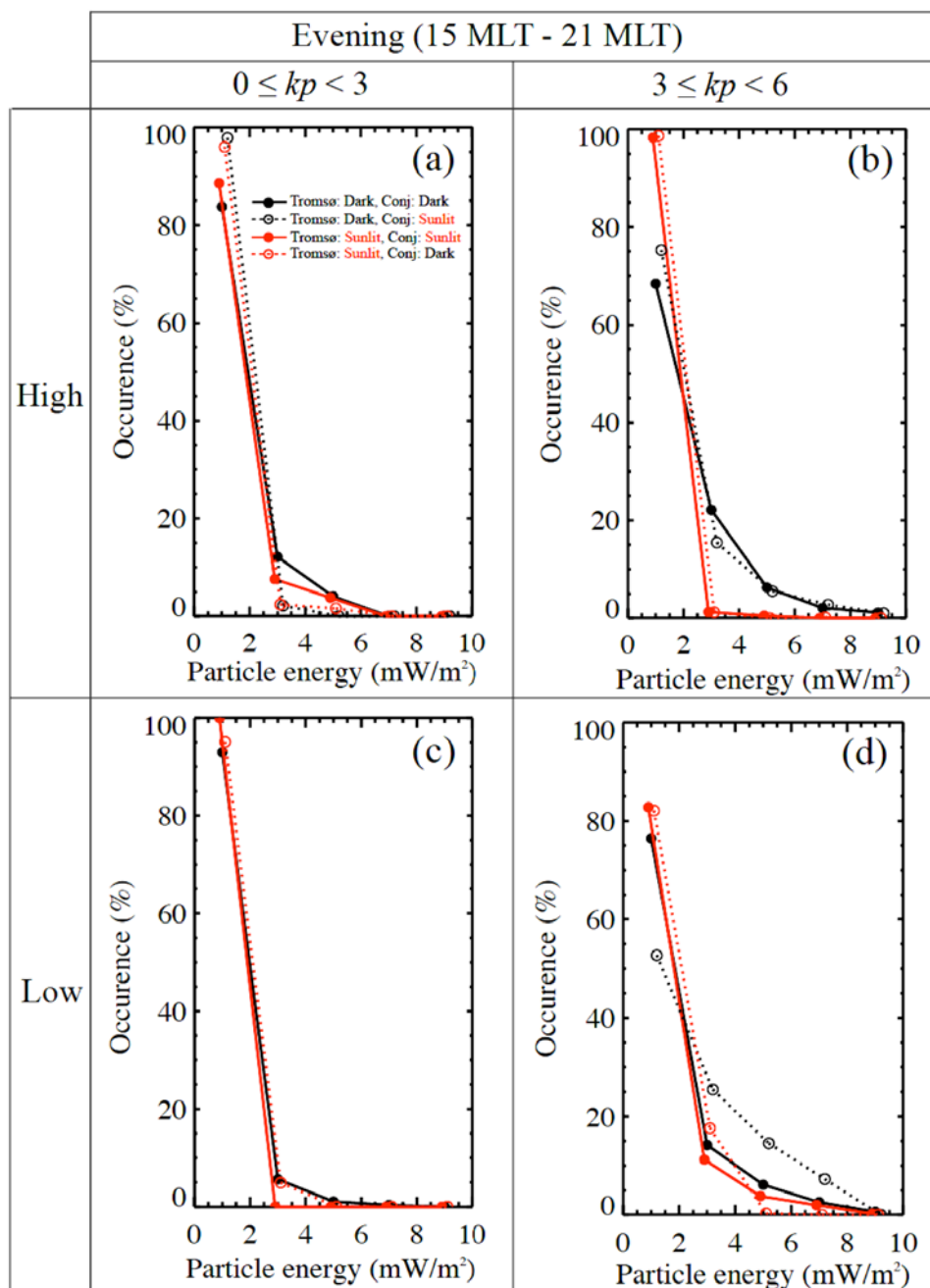


図 5.18 : 太陽活動度、 kp 指数で場合分けした夕方における降下粒子エネルギーのヒストグラム。上段(a)、(b)は太陽活動度が高い時で、下段(c)、(d)は太陽活動度が低い時。左側(a)、(c)は磁気圏静穏時で、右側(b)、(d)は磁気圏擾乱時である。図中の黒実線は、トロムソと共役点ともに日陰時、黒点線はトロムソが日陰で共役点は日照の時である。赤実線はトロムソと共役点ともに日照時、赤点線はトロムソが日照で共役点が日陰の時である。降下粒子エネルギーを 2.0 mW/m^2 ずつ区切って調べた。

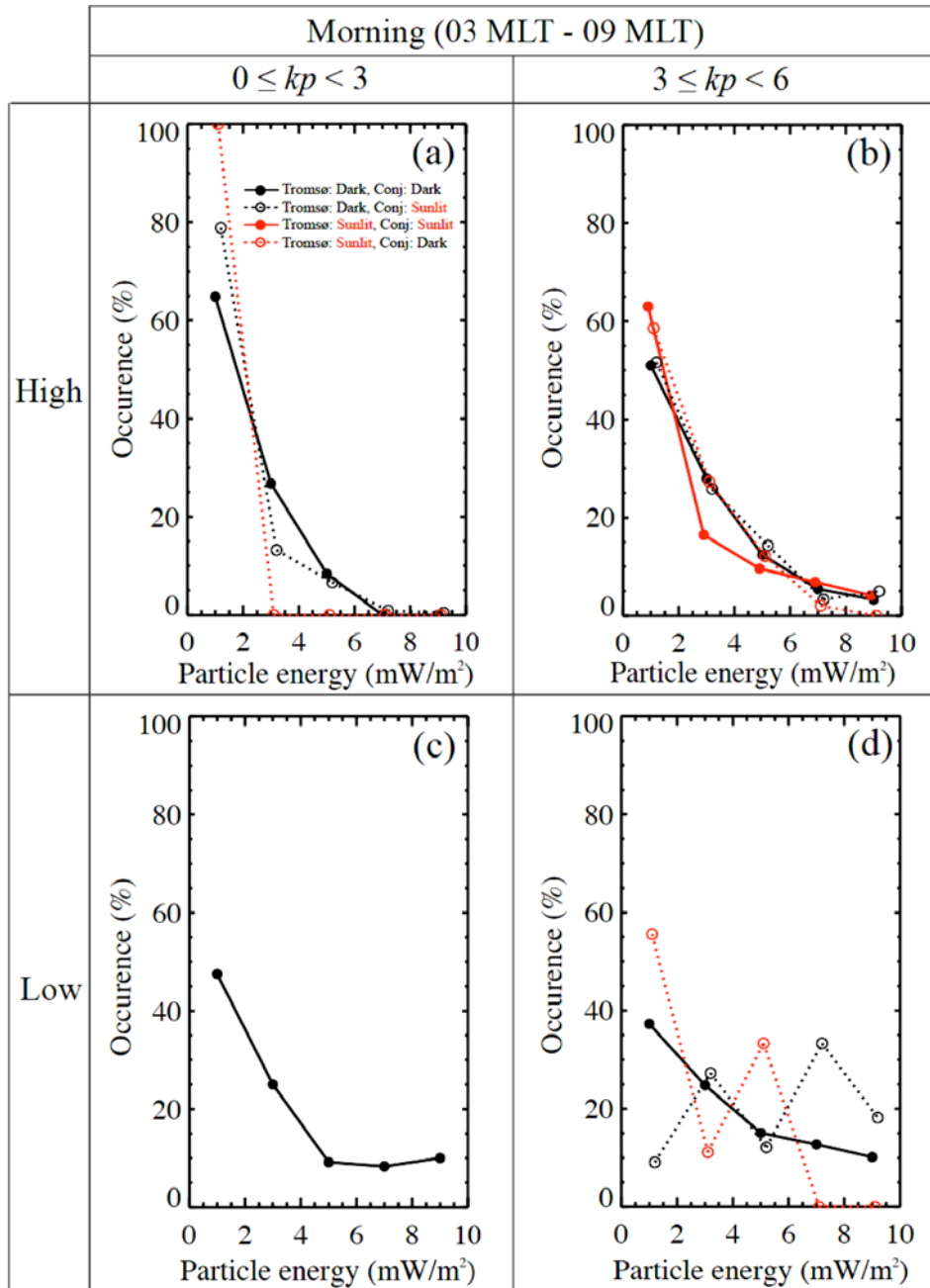


図 5.19 : 太陽活動度、 kp 指数で場合分けした明け方における、降下粒子エネルギーのヒストグラム。上段(a)、(b)は太陽活動度が高い時で、下段(c)、(d)は太陽活動度が低い時。左側(a)、(c)は磁気圏静穏時で、右側(b)、(d)は磁気圏擾乱時である。図中の黒実線は、トロムソと共役点ともに日陰時、黒点線はトロムソが日陰で共役点は日照の時である。赤実線はトロムソと共役点ともに日照時、赤点線はトロムソが日照で共役点が日陰の時である。降下粒子エネルギーを 2.0 mW/m^2 ずつ区切って調べた。

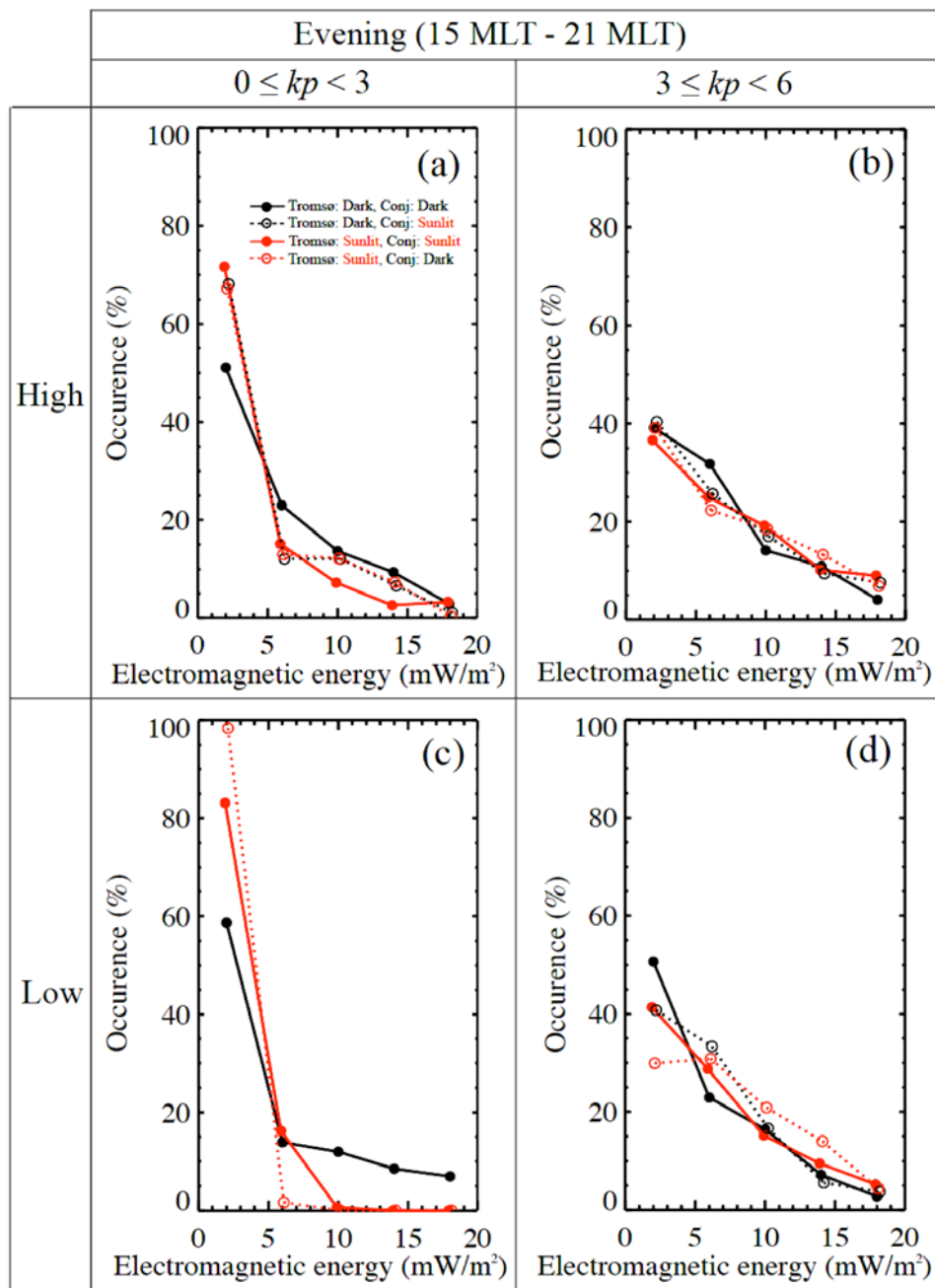


図 5.20 : 太陽活動度、 kp 指数で場合分けした夕方における電磁エネルギーのヒストグラム。上段(a)、(b)は太陽活動度が高い時で、下段(c)、(d)は太陽活動度が低い時、左側(a)、(c)は磁気圏静穏時で、右側(b)、(d)は磁気圏擾乱時である。図中の黒実線は、トロムソと共役点ともに日陰時、黒点線はトロムソが日陰で共役点は日照の時である。赤実線はトロムソと共役点ともに日照時、赤点線はトロムソが日照で共役点が日陰の時である。電磁エネルギーを 4.0 mW/m^2 ずつ区切って調べた。

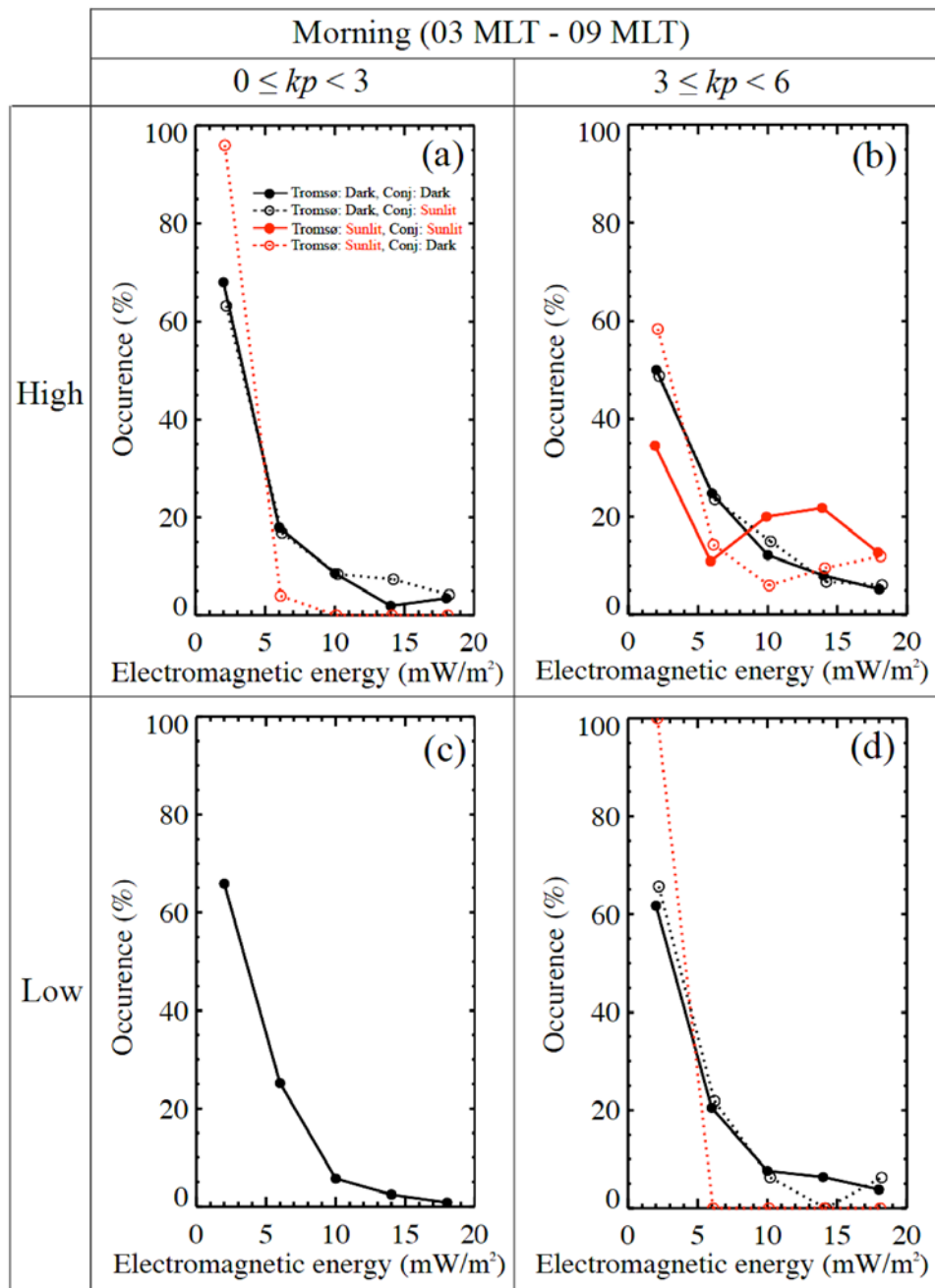


図 5.21 : 太陽活動度、 kp 指数で場合分けした明け方における電磁エネルギーのヒストグラム。上段(a)、(b)は太陽活動度が高い時で、下段(c)、(d)は太陽活動度が低い時。左側(a)、(c)は磁気圏静穏時で、右側(b)、(d)は磁気圏擾乱時である。図中の黒実線は、トロムソと共役点ともに日陰時、黒点線はトロムソが日陰で共役点は日照の時である。赤実線はトロムソと共役点ともに日照時、赤点線はトロムソが日照で共役点が日陰の時である。電磁エネルギーを 4.0 mW/m^2 ずつ区切って調べた。

第 6 章 考察

6.1 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの平均値の比較

本論文で定義した磁気圏擾乱度、太陽活動度を同一にして、電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの平均値を比較すると、夕方、真夜中、明け方全てで、降下粒子エネルギーよりも電磁エネルギーの方が大きかった。電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの大小関係は、*Vickrey et al.* [1982]の、降下粒子エネルギーよりもジュール加熱の方が大きいという結果と一致する。降下粒子エネルギーは電子密度の二乗に比例するので、サブストームに伴うような強い降り込みが無ければ大きくはならない。一方、電磁エネルギーは、ペダーセン電気伝導度と電場の二乗の積で導出される。図 6.1 に示した、電磁エネルギーとペダーセン電気伝導度の関係及び、電磁エネルギーと電場の関係から明らかなように、電磁エネルギーはペダーセン電気伝導度、つまりは電子密度よりも電場に強く依存する。降下粒子エネルギーと電磁エネルギーの平均値の違いは依存する物理量の特性和分布の違いに依ると言える。

6.2 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 依存性

電磁エネルギーが夕方と明け方にピークを持つという結果は、過去に行われた、衛星や、北極域の IS レーダーによる観測に基づいた研究と一致する[e.g., *Banks et al.*, 1981; *Vickrey et al.*, 1982; *Foster et al.*, 1983; *Fujii et al.*, 1999; *Thayer et al.*, 2000]。統計的には、電場は真夜中よりも明け方と夕方で強いと考えられる。電磁エネルギーは電場に強く依存するので、電場の強い明け方と夕方でピークを持ったと考えられる。

EISCAT UHF レーダーは磁気緯度 66.2°に位置し、平均的には、夕方では下向き *Region 2* 電流系領域、明け方では上向き *Region 2* 電流系領域に、真夜中は擾乱度に応じて上向き又は下向き電流領域に、オーロラとしては、サブストーム時にはブレイクアップオーロラ領域に相当する。降下粒子エネルギーが明け方にピークを持つという結果は *Vickrey et al.* [1982]の結果と一致する。上にも述べたように、明け方の明るいディフューズオーロラを作り出すような加速を受けていない高エネルギーの粒子が、広範囲に降り込んでいるためであると考え

られる。*Baker et al.* [2004]の結果 (図 6.2 参照) から明らかな通り、降下粒子エネルギーは明け方では磁気緯度 60°付近まで広く流入しているのに対し、夕方では磁気緯度 65°付近までしか流入せず、流入量も明け方より少ない。夕方では降下粒子エネルギーが小さいという結果になったのは、EISCAT UHF レーダーが下向き *Region 2* 電流系領域を観測したためと考えられる。

トロムソが日陰時で、磁気圏擾乱時に、降下粒子エネルギー及び電磁エネルギーともに真夜中でピークを持っていた事は、真夜中付近で起こるサブストームに依っていると考えられる。上にも述べたように真夜中は、サブストームに伴う、粒子の強い降り込みや電場の増大が見られる。そのために、電磁エネルギー及び降下粒子エネルギーともに大きくなったと言える。

6.3 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの相関関係

電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの関係は、真夜中と明け方では電磁エネルギーが 20.0 mW/m² 以上の時、つまり電離圏にエネルギーが多く流入している時に電磁エネルギーと降下粒子エネルギーが負の相関関係になる傾向にあった。*Davies and Lester* [1999]や *Sugino et al.* [2002]は、EISCAT レーダーを用いて統計的に夜側のオーロラ領域では、電場と伝導度が負の相関関係になる事を示している。伝導度と電場の関係は、図 6.3 に示す沿磁力線電流と電離圏電流が結合した 3次元電流系を考える事によって理解する事が出来る。図 6.3 に示すように、2つの沿磁力線電流を電離圏内でつなぐ電離圏電流では、電流の連続性から、電気伝導度と電場の積で表される電流密度が一定となるため、電子が降り込んでいる上向き沿磁力線電流の領域では電場は小さくなり、下向き沿磁力線電流の領域では電子が降り込まず電場が大きくなる。電離圏電流を \mathbf{J}_\perp とすると、電磁エネルギー(Q_{EM})と電離圏電流、ペダーセン電気伝導度及び電場の関係は、

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_\perp &= \sigma_p \mathbf{E} = \text{constant} \\ Q_{EM} &= \mathbf{J}_\perp \cdot \mathbf{E} = (\sigma_p \mathbf{E}) \cdot \mathbf{E} = \text{constant} \cdot \mathbf{E} \end{aligned} \quad (6.1)$$

となる。式(6.1)から分かるように、電場が大きい時の方が小さい時よりも、大きい電磁エネルギーを持つ。一方、降下粒子エネルギーは、図 6.4 の降下粒子エネルギーとペダーセン電気伝導度の関係から明らかなように、ペダーセン電気伝導度と正の相関が見られるので、式(6.1)の関係から、電場が小さい所でペダーセン電気伝導度が大きくなり、同時に降下粒子エネルギーも大きくなる。この、ペダーセン電気伝導度と電場の負の相関関係が、電磁エネルギーと降下粒

子エネルギーの負の相関関係に反映されたと考えられる。

6.4 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの kp 指数依存性

トロムソ日陰時では、電磁エネルギー、降下粒子エネルギーともに全ての時間帯において kp 指数と良い相関関係にあった。これは、AE-C 衛星を用いて極域全体のジュール加熱を調べた *Foster et al.* [1983]の、ジュール加熱は kp 指数と正の相関関係にあるという結果と良い一致を示す。EISCAT UHF レーダーが統計的に位置し、観測している領域を 6.2 節で述べたが、磁気圏が擾乱している時にはオーロラ帯の位置が変動し、EISCAT UHF レーダーが観測している領域も変動すると考えられる。例えば、真夜中では粒子の強い降り込みが見られる、ブレイクアップオーロラ領域を観測すれば降下粒子エネルギーは増大する。磁気圏の擾乱に伴い、EISCAT UHF レーダーが活動領域を観測する頻度が増加するため、降下粒子エネルギーが kp 指数と正の相関関係にあったと考えられる。

トロムソに日照がある時は、降下粒子エネルギーは明け方でのみ kp 指数との相関が良く、電磁エネルギーは夕方と明け方で、 kp 指数と良い相関関係にあった。第 4 章 4.1 節で述べたが、*Newell et al.* [1996; 2001]は電離圏に日照がある時よりも無い時、つまり日陰時の方がディスクリートオーロラの出現頻度が高い事を示している。さらに、*Newell et al.* [1998]は、DMSP 衛星による観測から、日照がある時のオーロラ活動領域は、太陽活動度が高い時の方が低い時よりも範囲が狭いという結果を示している。つまり、トロムソ日陰時よりも日照時の方が、オーロラ活動領域を観測する頻度が低いという事を意味する。一方、電磁エネルギーは電場の二乗に比例するので、例えオーロラ活動領域を EISCAT UHF レーダーが観測しなくても、対流電場の増大が観測されれば大きな値を取る事が出来る。そのため、電磁エネルギーが、トロムソ日照時でも夕方と明け方で kp 指数と良い相関関係にあったと考えられる。

6.5 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの太陽活動度依存性

真夜中と明け方はトロムソの日照の有無に関わらず太陽活動度が高い時よりも低い時の方が、降下粒子エネルギーが大きかった。電離圏 E 領域へ降下する粒子のエネルギーは 1 keV 以上でありエネルギーごとに侵入出来る高度 (Stopping height) が異なる (図 6.5 参照)。太陽活動度が高い時の方よりも低い

時の方が、降下する粒子のエネルギーが小さいのか、それとも E 領域を通過し D 領域に到達するほど降下粒子のエネルギーが大きいのか、今後詳しく調べる必要がある。

トロムソ日陰時は全ての時間で太陽活動度が低い時よりも高い時の方が、電磁エネルギーが大きかった。この結果は、Zhang *et al.* [2005]の、ジュール加熱の大きさが $F_{10.7}$ 指数と正の相関があるという結果と良い一致を示している。

6.6 電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの日照・日陰依存性

真夜中では、降下粒子エネルギーはトロムソと磁気共役点ともに日陰時よりも、トロムソが日陰で共役点が日照の時の方が大きく、共役点に日照があるか無いがで、トロムソ上空へ流入する降下粒子エネルギー量が異なるという結果であった。Newell *et al.* [1996; 2001]の結果によれば、恐らく日照の共役点へは降下粒子エネルギーがあまり流入せず、日陰の共役点へは、より多くの降下粒子エネルギーが流入する事が出来るのであろう。この結果が示唆するのは、磁気圏のエネルギーがトロムソとトロムソの磁気共役点に常に等分されず、どちらか片方に日照があった場合には日陰の地点の方に、磁気圏のエネルギーのより多くが流入するという事である。

夕方では、太陽活動度が高くトロムソに日照がある時は、降下粒子エネルギーは流入していなかった。6.1 節で述べたように、夕方では降下粒子エネルギーはあまり流入していなかった。その上さらに日照の効果によって、降下粒子エネルギーの流入が押さえられたためだと考えられる。太陽活動度が低く、磁気圏擾乱時の夕方では、トロムソ共役点ともに日陰時よりもトロムソ日陰共役点日照時の方が、降下粒子エネルギーが大きかった。これは真夜中と同じく、磁気圏から流入してきた降下粒子エネルギーが、共役点へはほとんど流入せず、大部分がトロムソへ流入してきたためと考えられる。

明け方は磁気圏が擾乱し太陽活動度が高い時で、トロムソ共役点ともに日照時で、降下粒子エネルギーが流入していなかったが、それ以外ではトロムソ及び共役点の日照の有無に関わらず、降下粒子エネルギーは流入していた。明け方の降下粒子は磁気圏の擾乱に強くは依存せず、ピッチ角散乱によって電離圏へ侵入しているためである。

電磁エネルギーは、太陽活動度が高く磁気圏擾乱時では、トロムソ日陰共役点日照時よりもトロムソ共役点ともに日陰時の方が大きく、共役点に日照が

無い時の方が、電磁エネルギーが大きいという結果であった。日照がある場合は、電離圏の電気伝導度は太陽放射によって増大している。日照時は日陰時よりも電気伝導度が高いが、電気伝導度と電場の負の相関関係により、電場は小さくなると考えられる。さらに日陰時は、日照時よりも磁気圏が擾乱する頻度が高いため[Newell et al., 1996]、結果的に日照時の電磁エネルギーが日陰時よりも大きくならず、同程度か、それ以下になってしまうのである。夕方では太陽活動度が低く磁気圏静穏時のみ日照による違いはあったが、磁気圏擾乱時では日照による違いは無かった。太陽活動度が低い時は共役点の状態による電磁エネルギーの変化が見られなかった。日照の効果は太陽活動度と正の相関がある。つまり太陽活動度が低い時は日照の効果が弱くなっている。そのため、共役点日照時と共役点日陰時の差が見られなかった

夕方では、降下粒子エネルギーは、太陽活動度が高くトロムソと共役点ともに日陰時に、高エネルギーの出現頻度が他の条件よりも大きくなっていたが、太陽活動度が低く磁気圏擾乱時では、トロムソ日陰及び共役点日照時が他の条件よりも高エネルギーの出現頻度が大きくなっていた。これも日照の効果による、降下粒子エネルギーの流入の遮蔽作用が働いていると考える事が出来る。太陽活動度が高い時はトロムソに日照があると、降下粒子エネルギーは流入していない。しかし、太陽活動度が低い時は、わずからながら、トロムソに日照があっても降下粒子エネルギーが大きくなる事がある。トロムソ日陰時に至っては、太陽活動度が高い時は共役点の日照の有無による違いは小さかった。日照の効果が作用し、磁気圏から電離圏への降下粒子エネルギー流入が減少していると考えられる。

夕方における電磁エネルギーは、磁気圏が擾乱している時にはトロムソと共役点に置ける日照の有無に大きな違いが見られなかった。

明け方における電磁エネルギーは、太陽活動度が高く磁気圏擾乱時ではトロムソ共役点ともに日照時の場合、 8.0 mW/m^2 以上で割合が大きくなっていた。その他では、トロムソ日陰時が日照時よりも高エネルギー側で割合が大きくなっていた。この時には磁気圏対流が *IMF* によって変調を受けていた可能性がある。しかし、トロムソ日照かつ共役点日陰時を見てみると、トロムソ日陰時のヒストグラムとほぼ一致している。電磁エネルギーは、降下粒子エネルギーほど日照の効果を受けていないと考えられる。トロムソでの日照の有無が磁気圏

からのエネルギー流入をコントロールさせているだけでなく、共役点の日照の有無もエネルギー流入をコントロールしている可能性を示唆している。すなわち、磁気圏に蓄積されたエネルギーは磁力線を介して 2 地点に供給されるが、どちらかが日照時の場合は、日陰時であるもう片方へエネルギーがより多く流入する事を示唆している。

図 6.6 に降下粒子エネルギーを例にして電離圏に日照がある時と無い時の違いをまとめた。トロムソと共役点ともに日陰(a)であれば、降下粒子エネルギーは両地点に分配される。しかし、共役点が日照の時(b)は、降下粒子エネルギーは日陰であるトロムソへ多く流入する ($Q_{p, \text{Ionosphere}} > Q_{p, \text{Conjugate ionosphere}}$)。電離圏への降下粒子エネルギーの総流入量も、電離圏に日照がある場合低下する ($Q_a \geq Q_b$) 可能性が示唆される。

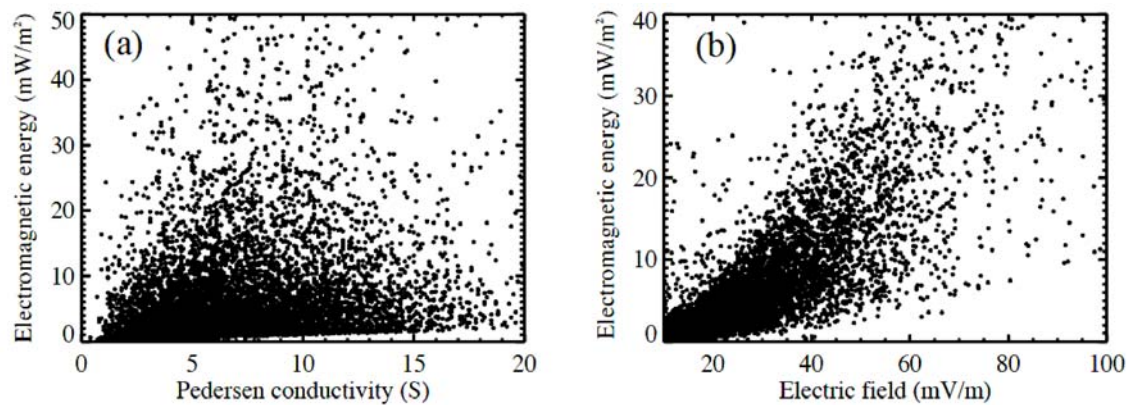


図 6.1 : 電磁エネルギーとペダーセン電気伝導度の関係(a)及び、電磁エネルギーと電場の関係(b)。トロムソが日陰の時のデータを示した。

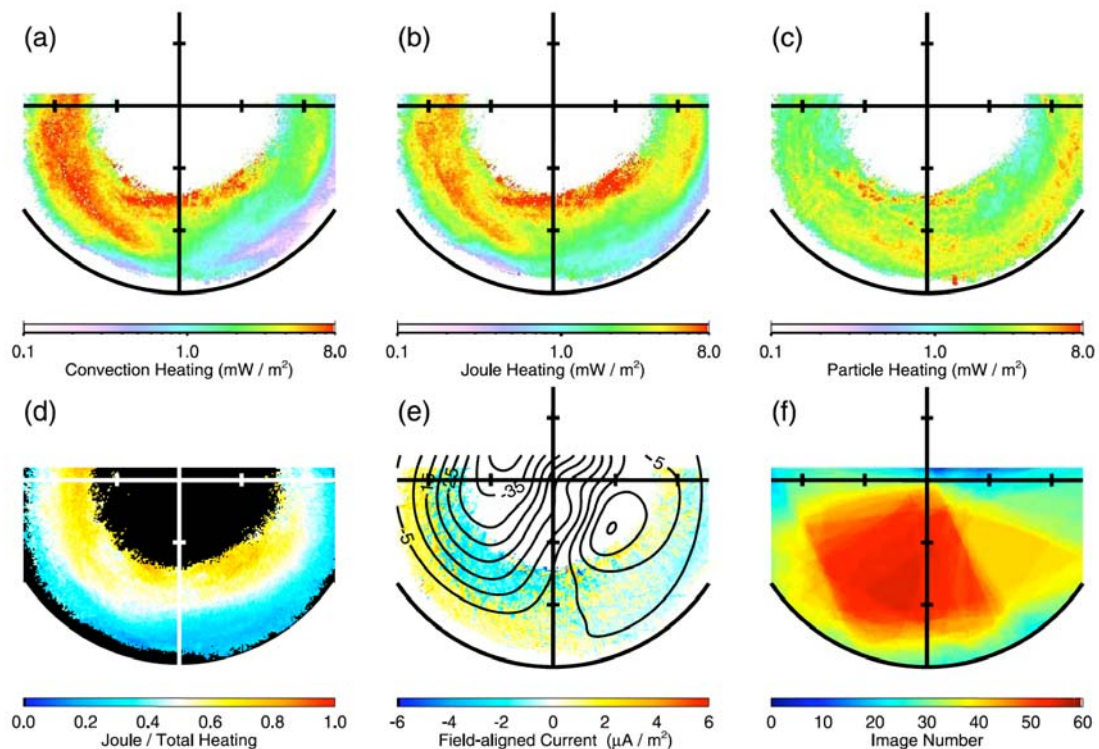


図 6.2 : Baker *et al.* [2004]が示した極域におけるエネルギー分布。図(a)が本研究の電磁エネルギーに対応する。(c)は降下粒子エネルギーである。(b)は中性風のモデル (HWM-93) を用いて導出したジュール加熱である。(d)はエネルギーの総量に対するジュール加熱の割合、(e)は沿磁力線電流の分布、(f)は TIMED 衛星が撮影した画像の数を表す。

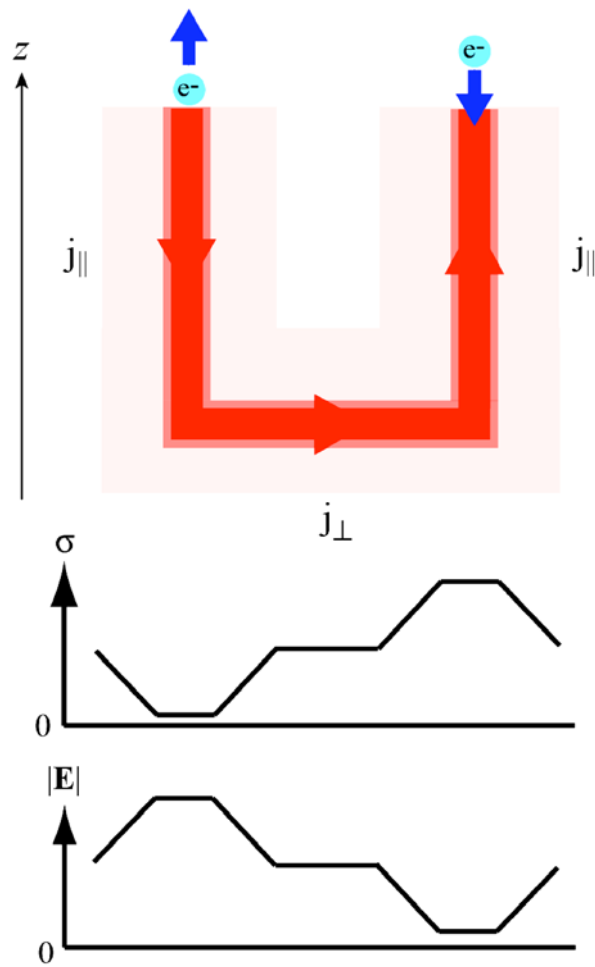


図 6.3 : 沿磁力線電流と電離圏電流に対応する電気伝導度と電場の関係。上段の赤色が電流を表し、中段が電気伝導度、下段が電場を表している。電離圏から出ていく上向き沿磁力線電流の付近では電子が降り込んでいて、電気伝導度が大きくなっていると考えられる。

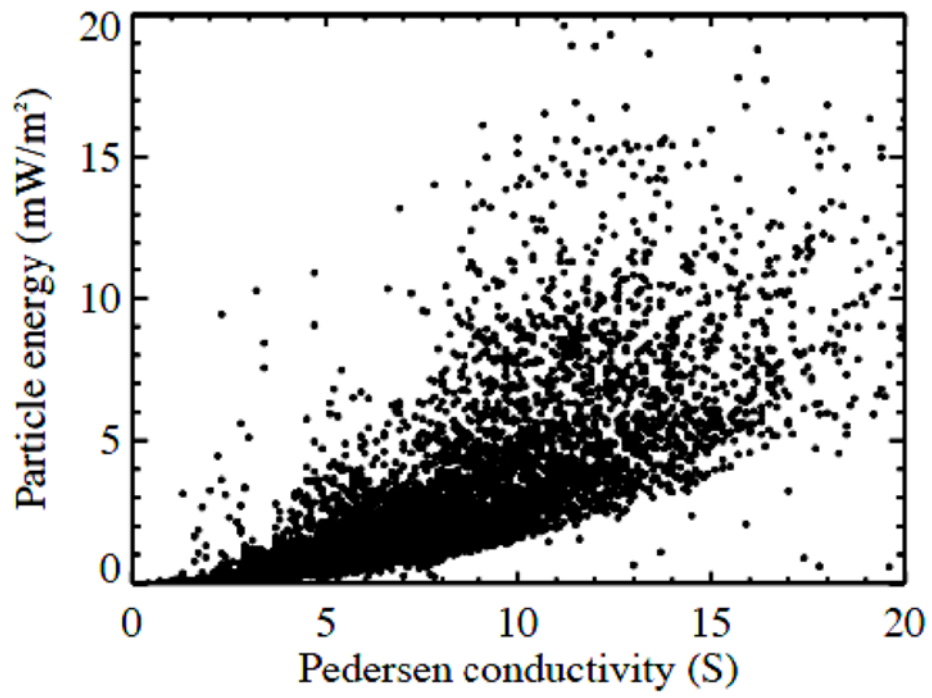


図 6.4 : トロムソ日陰時における降下粒子エネルギーとペダーセン電気伝導度の関係。

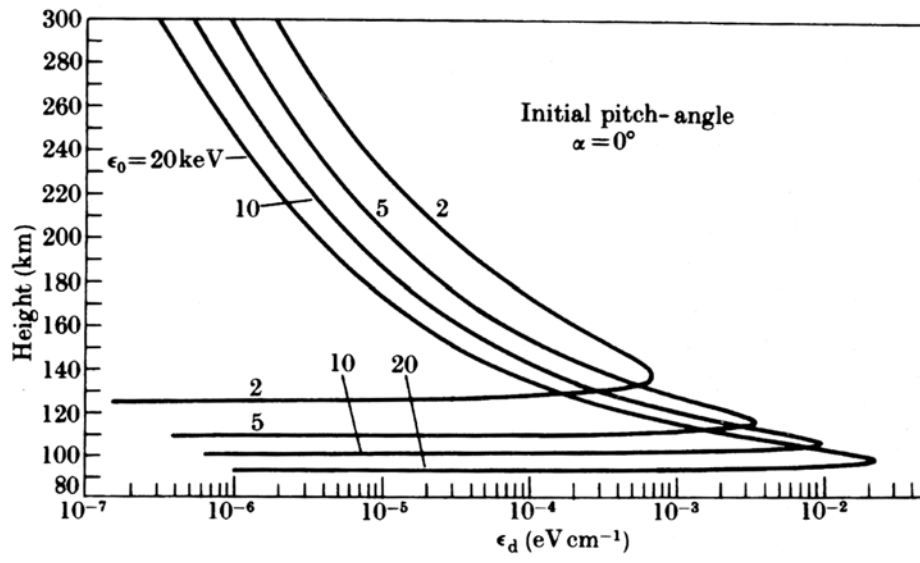


図 6.5 : 電離圏に侵入した電子のエネルギー損失の高度分布[Berger *et al.*, 1970]。

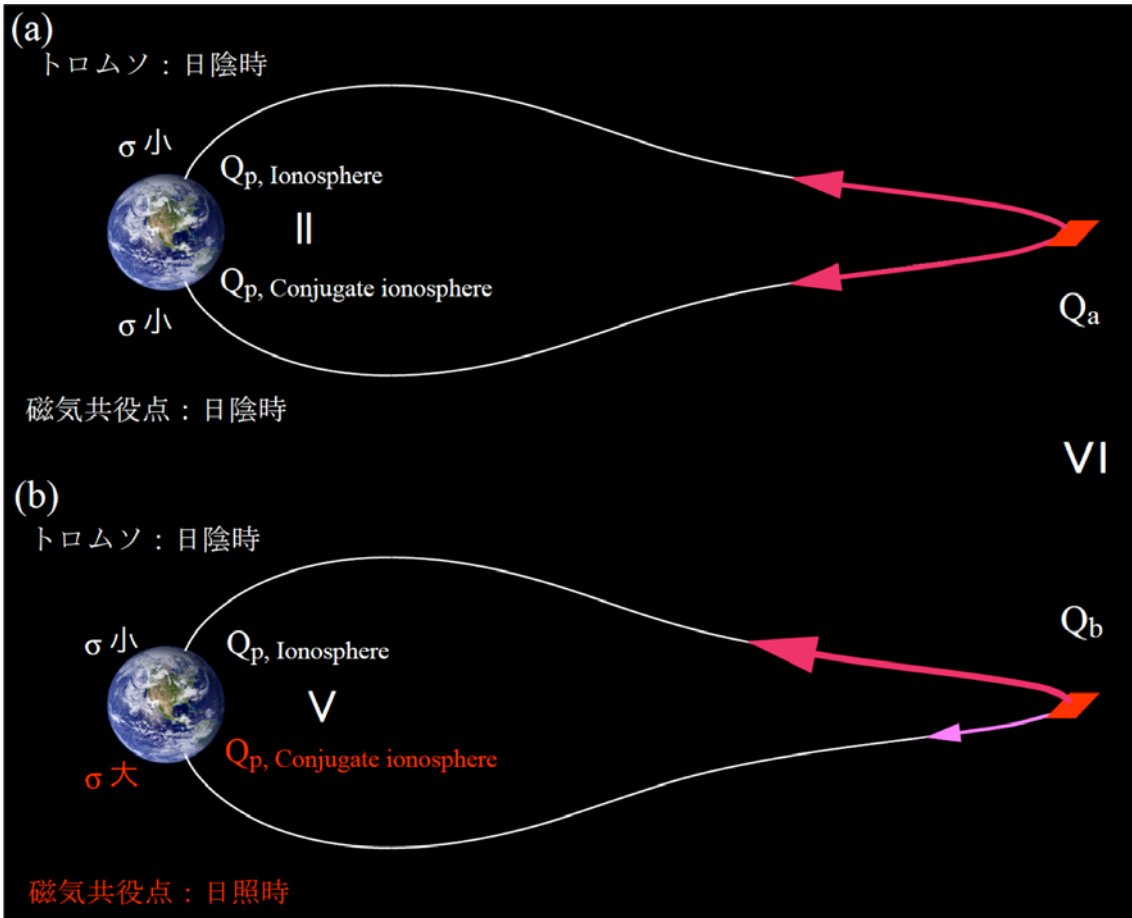


図 6.6：磁気圏から電離圏へのエネルギー流入に及ぼす日照の影響。(a)はトロムソとトロムソの磁気共役点ともに日陰時、(b)はトロムソが日陰で、共役点が日照時。

第7章 結論と今後の課題

本研究は、磁気圏と電離圏のエネルギー結合の一般的な様相と、電離圏の能動的な役割を解明するために EISCAT UHF レーダーの、1987年1月14日から2004年11月13日までに観測されたデータを用いて磁気圏から流入する電磁エネルギーと粒子のエネルギーを解析し、統計的な描像を調べた。具体的には電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの MLT 依存性や地磁気擾乱度 (kp 指数) 依存性、太陽活動依存性、日照依存性を調べた。主な結果は以下にまとめる。

電磁エネルギーと降下粒子エネルギーの平均値を比較すると、電磁エネルギーの方が大きく、磁気圏から電離圏へ流入しているエネルギーの多くは電磁エネルギーが占めている事が分かった。両エネルギーともに流入量は大きく変化していたが、同時に大きな値を取る割合は少なく、片方のエネルギーが大きければもう片方は比較的小さくなるという負の相関関係にあり、過去の研究と一致した。

降下粒子エネルギーは kp 指数と正の相関が見られ、電磁エネルギーも明け方と夕方 kp 指数と良い相関関係にあった。真夜中における電磁エネルギーは日陰時のみ良い相関があった。両エネルギーの太陽活動依存性を調べた結果、電磁エネルギーは太陽活動度と正の相関が、降下粒子エネルギーは負の相関が認められた。

電磁エネルギーと降下粒子エネルギーともに日照の有無によって流入量が異なり、日照時よりも日陰時の方が両エネルギーともに大きな値を取っていた。この事から、日照の効果が磁気圏から電離圏へのエネルギー流入をコントロールしている事が示唆された。さらにトロムソと磁気共役点両方の日照依存を調べた所、トロムソが日陰時（または日照時）でも共役点の日照の有無によって降下粒子エネルギーは変動していた。電磁エネルギーも日照の有無によって変化していたが、降下粒子エネルギーほど明確には変化していなかった。磁気圏から電離圏へ流入するエネルギーは磁気共役である 2 地点へ分配されているはずである。しかし、常に両方ともに日陰時あるいは日照時という訳では無い。両地点における日照の有無こそが磁気圏—電離圏エネルギー結合をコントロールしている可能性がある。しかし物理機構は未解明であり、解明するためには

両地点で同時にエネルギーを観測から見積もる必要がある。そのため最低でも2つ以上の観測機器を用いた同時観測をすべきである。現実的な方法としては、北極域の IS レーダーと衛星の同時観測や、地上に設置された光学機器による観測が挙げられるが、容易では無いであろう。しかし、電離圏の状態依存、つまり日照・日陰依存性は、今後さらに取り組みられるべき重要課題であると言える。

Appendix A

本研究で使用した CP-1 データについて表 A.1 にまとめた。表 A.1 には、観測年月日、観測開始時刻と終了時刻及び観測時間を記した。

表 A.1 CP-1 データリスト

| 観測 年月日 | | | 開始 時刻 | | 終了 時刻 | | 観測 時間 |
|-----------|----|----|----------|----|----------|----|----------|
| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 時 | 分 | 時 |
| 1987 | 01 | 14 | 00 | 00 | 22 | 59 | 23.0 |
| 1987 | 02 | 10 | 10 | 12 | 24 | 00 | 13.8 |
| 1987 | 02 | 11 | 00 | 00 | 23 | 00 | 23.0 |
| 1987 | 02 | 24 | 09 | 00 | 24 | 00 | 15.0 |
| 1987 | 02 | 25 | 00 | 00 | 09 | 17 | 9.3 |
| 1987 | 03 | 24 | 09 | 03 | 24 | 00 | 15.0 |
| 1987 | 03 | 25 | 00 | 00 | 22 | 54 | 22.9 |
| 1987 | 04 | 14 | 08 | 38 | 24 | 00 | 15.4 |
| 1987 | 04 | 15 | 00 | 00 | 22 | 00 | 22.0 |
| 1987 | 05 | 12 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1987 | 05 | 13 | 00 | 00 | 21 | 54 | 21.9 |
| 1987 | 06 | 16 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1987 | 06 | 17 | 00 | 00 | 07 | 55 | 7.9 |
| 1987 | 07 | 28 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1987 | 07 | 29 | 00 | 00 | 07 | 55 | 7.9 |
| 1987 | 09 | 21 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1987 | 09 | 22 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1987 | 09 | 23 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1987 | 09 | 24 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1987 | 09 | 25 | 00 | 00 | 08 | 00 | 8.0 |
| 1987 | 11 | 10 | 12 | 00 | 24 | 00 | 12.0 |
| 1987 | 11 | 11 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1987 | 11 | 12 | 00 | 00 | 22 | 55 | 22.9 |
| 1987 | 11 | 17 | 09 | 00 | 24 | 00 | 15.0 |
| 1987 | 11 | 18 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1988 | 03 | 16 | 09 | 07 | 24 | 00 | 14.9 |
| 1988 | 03 | 17 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1988 | 03 | 18 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1988 | 03 | 19 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1988 | 03 | 20 | 00 | 00 | 08 | 55 | 8.9 |
| 1988 | 04 | 05 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1988 | 04 | 06 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1988 | 04 | 07 | 00 | 00 | 06 | 15 | 6.3 |
| 1988 | 05 | 03 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1988 | 05 | 04 | 00 | 00 | 07 | 55 | 7.9 |
| 1988 | 08 | 30 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1988 | 08 | 31 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1988 | 09 | 01 | 00 | 00 | 22 | 00 | 22.0 |
| 1989 | 01 | 11 | 00 | 00 | 23 | 00 | 23.0 |
| 1989 | 02 | 07 | 09 | 00 | 24 | 00 | 15.0 |
| 1989 | 02 | 08 | 00 | 00 | 09 | 35 | 9.6 |
| 1989 | 03 | 28 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |

表 A.1 (続き)

| 観測 年月日 | | | 開始 時刻 | | 終了 時刻 | | 観測 時間 |
|-----------|----|----|----------|----|----------|----|----------|
| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 時 | 分 | 時 |
| 1989 | 03 | 29 | 08 | 00 | 22 | 00 | 14.0 |
| 1989 | 05 | 02 | 07 | 59 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1989 | 05 | 03 | 00 | 00 | 08 | 00 | 8.0 |
| 1988 | 09 | 20 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1989 | 09 | 06 | 00 | 00 | 13 | 00 | 13.0 |
| 1989 | 11 | 14 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 1989 | 11 | 15 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1989 | 11 | 16 | 00 | 00 | 16 | 05 | 16.1 |
| 1990 | 01 | 24 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 1990 | 01 | 25 | 00 | 00 | 02 | 00 | 2.0 |
| 1990 | 04 | 09 | 0 | 22 | 24 | 00 | 23.6 |
| 1990 | 04 | 10 | 00 | 00 | 16 | 00 | 16.0 |
| 1990 | 06 | 05 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 1990 | 06 | 06 | 00 | 00 | 16 | 00 | 16.0 |
| 1990 | 06 | 12 | 08 | 00 | 24 | 00 | 16.0 |
| 1990 | 06 | 13 | 00 | 00 | 13 | 40 | 13.7 |
| 1990 | 07 | 02 | 10 | 31 | 24 | 00 | 13.5 |
| 1990 | 07 | 03 | 00 | 00 | 15 | 55 | 15.9 |
| 1990 | 09 | 25 | 10 | 00 | 22 | 00 | 12.0 |
| 1990 | 09 | 26 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1990 | 09 | 27 | 00 | 00 | 21 | 55 | 21.9 |
| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 時 | 分 | 時 |
| 1988 | 09 | 21 | 00 | 00 | 08 | 00 | 8.0 |
| 1989 | 08 | 01 | 13 | 00 | 24 | 00 | 11.0 |
| 1989 | 08 | 02 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1989 | 08 | 03 | 00 | 00 | 16 | 00 | 16.0 |
| 1989 | 09 | 05 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 1991 | 02 | 12 | 15 | 04 | 24 | 00 | 8.9 |
| 1991 | 02 | 13 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1991 | 02 | 14 | 00 | 00 | 07 | 55 | 7.9 |
| 1991 | 02 | 20 | 10 | 01 | 24 | 00 | 14.0 |
| 1991 | 02 | 21 | 00 | 00 | 11 | 40 | 11.7 |
| 1991 | 05 | 02 | 10 | 04 | 24 | 00 | 13.9 |
| 1991 | 05 | 03 | 00 | 00 | 13 | 55 | 13.9 |
| 1991 | 07 | 10 | 14 | 30 | 24 | 00 | 9.5 |
| 1991 | 07 | 11 | 00 | 00 | 15 | 55 | 15.9 |
| 1991 | 09 | 10 | 09 | 00 | 24 | 00 | 15.0 |
| 1991 | 09 | 11 | 00 | 00 | 16 | 00 | 16.0 |
| 1991 | 12 | 08 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 1991 | 12 | 09 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1991 | 12 | 10 | 00 | 00 | 16 | 00 | 16.0 |
| 1993 | 02 | 16 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 1993 | 02 | 17 | 00 | 00 | 21 | 57 | 22.0 |

表 A.1 (続き)

| 観測 年月日 | | | 開始 時刻 | | 終了 時刻 | | 観測 時間 |
|-----------|----|----|----------|----|----------|----|----------|
| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 時 | 分 | 時 |
| 1993 | 04 | 20 | 10 | 24 | 24 | 00 | 13.6 |
| 1993 | 04 | 21 | 00 | 00 | 20 | 00 | 20.0 |
| 1993 | 07 | 20 | 22 | 35 | 24 | 00 | 1.4 |
| 1993 | 07 | 21 | 00 | 00 | 22 | 00 | 22.0 |
| 1993 | 10 | 18 | 13 | 40 | 24 | 00 | 10.3 |
| 1993 | 10 | 19 | 00 | 00 | 23 | 01 | 23.0 |
| 1994 | 03 | 15 | 16 | 01 | 24 | 00 | 8.0 |
| 1994 | 03 | 16 | 00 | 00 | 22 | 58 | 23.0 |
| 1994 | 04 | 12 | 16 | 00 | 22 | 00 | 6.0 |
| 1994 | 04 | 13 | 00 | 00 | 22 | 00 | 22.0 |
| 1994 | 06 | 08 | 16 | 08 | 24 | 00 | 7.9 |
| 1994 | 06 | 09 | 00 | 00 | 22 | 00 | 22.0 |
| 1995 | 02 | 28 | 14 | 00 | 24 | 00 | 10.0 |
| 1995 | 03 | 01 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 1995 | 03 | 02 | 14 | 00 | 17 | 00 | 3.0 |
| 1995 | 03 | 28 | 15 | 00 | 24 | 00 | 9.0 |
| 1995 | 03 | 29 | 00 | 00 | 20 | 00 | 20.0 |
| 1999 | 02 | 09 | 10 | 03 | 23 | 59 | 13.9 |
| 1999 | 02 | 10 | 00 | 00 | 23 | 59 | 24.0 |
| 1999 | 02 | 11 | 00 | 00 | 23 | 59 | 24.0 |
| 1999 | 02 | 12 | 00 | 00 | 15 | 59 | 16.0 |
| 1999 | 09 | 15 | 15 | 08 | 23 | 59 | 8.9 |
| 1999 | 09 | 16 | 00 | 00 | 23 | 59 | 24.0 |
| 1999 | 09 | 17 | 00 | 00 | 15 | 57 | 16.0 |
| 1999 | 10 | 12 | 10 | 00 | 23 | 59 | 14.0 |
| 1999 | 10 | 13 | 00 | 00 | 23 | 59 | 24.0 |
| 1999 | 10 | 14 | 00 | 00 | 23 | 59 | 24.0 |
| 1999 | 10 | 15 | 00 | 00 | 15 | 59 | 16.0 |
| 2001 | 07 | 07 | 20 | 00 | 24 | 00 | 4.0 |
| 2001 | 07 | 08 | 00 | 00 | 03 | 00 | 3.0 |
| 2001 | 07 | 11 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 2001 | 07 | 12 | 00 | 00 | 22 | 00 | 22.0 |
| 2001 | 09 | 17 | 11 | 05 | 24 | 00 | 12.9 |
| 2001 | 09 | 18 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2001 | 09 | 19 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2001 | 09 | 20 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2001 | 09 | 21 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2001 | 09 | 22 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2001 | 09 | 23 | 00 | 00 | 22 | 00 | 22.0 |
| 2001 | 09 | 25 | 15 | 00 | 24 | 00 | 9.0 |
| 2001 | 09 | 26 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2001 | 10 | 13 | 13 | 30 | 22 | 00 | 8.5 |

表 A.1 (続き)

| 観測 年月日 | | | 開始 時刻 | | 終了 時刻 | | 観測 時間 |
|-----------|----|----|----------|----|----------|----|----------|
| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 時 | 分 | 時 |
| 2001 | 10 | 15 | 12 | 00 | 22 | 00 | 10.0 |
| 2001 | 10 | 16 | 15 | 00 | 24 | 00 | 9.0 |
| 2001 | 10 | 17 | 16 | 00 | 27 | 00 | 11.0 |
| 2001 | 10 | 18 | 15 | 00 | 22 | 00 | 7.0 |
| 2001 | 12 | 12 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2002 | 01 | 31 | 15 | 00 | 21 | 00 | 6.0 |
| 2002 | 02 | 04 | 15 | 00 | 20 | 00 | 5.0 |
| 2002 | 02 | 06 | 08 | 00 | 12 | 00 | 4.0 |
| 2002 | 02 | 17 | 07 | 00 | 24 | 00 | 17.0 |
| 2002 | 06 | 11 | 06 | 00 | 24 | 00 | 18.0 |
| 2002 | 06 | 12 | 00 | 00 | 12 | 00 | 12.0 |
| 2002 | 10 | 07 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2002 | 10 | 08 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2002 | 10 | 09 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2002 | 12 | 05 | 00 | 00 | 21 | 30 | 21.5 |
| 2003 | 05 | 27 | 09 | 00 | 22 | 30 | 13.5 |
| 2002 | 10 | 10 | 00 | 00 | 07 | 02 | 7.0 |
| 2002 | 10 | 15 | 10 | 00 | 24 | 00 | 14.0 |
| 2002 | 10 | 16 | 00 | 00 | 23 | 30 | 23.5 |
| 2002 | 10 | 17 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2002 | 10 | 18 | 00 | 00 | 07 | 00 | 7.0 |
| 2002 | 12 | 03 | 13 | 00 | 24 | 00 | 11.0 |
| 2002 | 12 | 04 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 観測 年月日 | | | 開始 時刻 | | 終了 時刻 | | 観測 時間 |
| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 時 | 分 | 時 |
| 2003 | 05 | 28 | 06 | 00 | 24 | 00 | 18.0 |
| 2003 | 05 | 29 | 00 | 00 | 23 | 30 | 23.5 |
| 2003 | 05 | 30 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2003 | 05 | 31 | 00 | 00 | 14 | 00 | 14.0 |
| 2003 | 09 | 22 | 09 | 00 | 24 | 00 | 15.0 |
| 2003 | 09 | 23 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2003 | 09 | 24 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2003 | 09 | 25 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2003 | 09 | 26 | 00 | 00 | 18 | 00 | 18.0 |
| 2003 | 10 | 24 | 07 | 30 | 20 | 00 | 12.5 |
| 2003 | 10 | 25 | 00 | 00 | 20 | 00 | 17.4 |
| 2004 | 03 | 10 | 07 | 47 | 24 | 00 | 16.2 |
| 2004 | 03 | 11 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2004 | 06 | 01 | 06 | 59 | 24 | 00 | 17.0 |
| 2004 | 06 | 02 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2004 | 06 | 03 | 00 | 00 | 24 | 00 | 24.0 |
| 2004 | 06 | 04 | 00 | 00 | 15 | 59 | 16.0 |
| 2004 | 11 | 09 | 08 | 30 | 24 | 00 | 16.1 |
| 2004 | 11 | 10 | 00 | 00 | 24 | 00 | 16.2 |
| 2004 | 11 | 11 | 00 | 00 | 24 | 00 | 16.3 |
| 2004 | 11 | 12 | 00 | 00 | 24 | 00 | 16.4 |
| 2004 | 11 | 13 | 00 | 00 | 16 | 00 | 16.5 |

Appendix B

トロムソ大学イオノゾンデを用いた CP-1 データの較正

1987年から1991年の間に EISCAT UHF レーダーが観測した CP-1 データの中で、EISCAT サイトに設置されたイオノゾンデで較正が出来なかったデータを、トロムソ大学オーロラ観測所が所有していたイオノゾンデで較正し、エネルギーの導出、電子密度のモデル化に用いた。

トロムソ大学のイオノゾンデは1984年から1992年の間、69.6° N, 19.2° E に設置されていた。EISCAT UHF レーダーとは約 500 m 離れていた。トロムソ大学のイオノゾンデの出力は 2 kW であった。1回の観測の所要時間は2, 3分で、周波数を 1 MHz から 16 MHz まで増やしながら観測し、イオノグラムを取得していた。観測間隔は 20 分であった。

$foF2$ は、イオノグラムから $foF2$ だと思われる所を視認し、周波数を読み取って決定した。図 B.1 はイオノグラムで、赤い直線が $foF2$ 、error と示したのが誤差範囲である。その他、 $feF2$ 、 $foF1$ 、 foE も示した。読み取った $foF2$ から次式を用いて電子密度を導出した。

$$foF2 \text{ (Hz)} = 80.5\sqrt{N_e} \quad (\text{B.1})$$

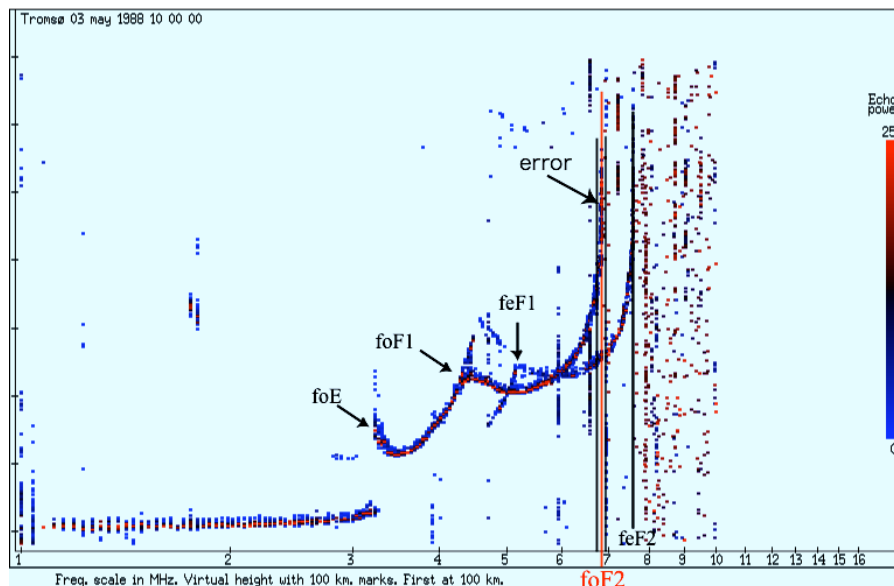


図 B.1 : 1988 年 5 月 3 日 1000 UT のイオノグラム

未校正 CP-1 データの中から、イオノゾンデが同時刻に観測しイオノグラムを取得出来ていたものを表 B.2 にまとめた。これらのデータの較正を試みた。

表 B.2: イオノゾンデが同時刻に観測していた未校正 CP-1 データのリスト

| 年 | 月 | 日 | 観測時間 (UT) |
|------|---|----|---------------|
| 1987 | 3 | 25 | 00:00 - 22:59 |
| 1987 | 4 | 14 | 08:38 - 24:00 |
| 1987 | 4 | 15 | 00:00 - 22:00 |
| 1987 | 5 | 12 | 08:00 - 24:00 |
| 1987 | 5 | 13 | 00:00 - 21:54 |
| 1987 | 6 | 16 | 08:00 - 24:00 |
| 1987 | 6 | 17 | 00:00 - 07:55 |
| 1987 | 9 | 21 | 08:00 - 24:00 |
| 1987 | 9 | 22 | 00:00 - 24:00 |
| 1987 | 9 | 23 | 00:00 - 24:00 |
| 1987 | 9 | 24 | 00:00 - 24:00 |
| 1988 | 9 | 21 | 00:00 - 08:00 |

| 年 | 月 | 日 | 観測時間 (UT) |
|------|---|----|---------------|
| 1990 | 1 | 24 | 10:00 - 24:00 |
| 1990 | 1 | 25 | 00:00 - 02:00 |
| 1990 | 4 | 9 | 10:22 - 24:00 |
| 1990 | 4 | 10 | 00:00 - 16:00 |
| 1990 | 9 | 25 | 10:00 - 22:00 |
| 1990 | 9 | 26 | 00:00 - 24:00 |
| 1991 | 2 | 12 | 15:00 - 24:00 |
| 1991 | 2 | 13 | 00:00 - 24:00 |
| 1991 | 2 | 14 | 00:00 - 07:55 |
| 1991 | 2 | 20 | 10:01 - 24:00 |
| 1991 | 2 | 21 | 00:00 - 11:40 |

イオノゾンデが観測した $foF2$ と EISCAT UHF レーダーが観測した $foF2$ は、EISCAT UHF レーダーが沿磁力線方向を観測していたのに対し、イオノゾンデは地表に対して鉛直上向きを観測していたため、完全には一致しないと考えられる。しかし、磁気圏からの粒子の降り込みが無く電離源が日照効果のみの場合は、電離圏の電子密度はある程度地表に対して水平方向に一様であると考えられる事が出来る。この考えが成立するがどうか確認するために、較正済みの CP-1 データから得られた $foF2$ と、イオノゾンデの $foF2$ を比較した。表 B.2 に 1989 年 8 月 2 日のデータをまとめた。表 B.2 に示した時間帯は、 Kp 指数が 1 から 2 であった。イオノゾンデと CP-1 の $foF2$ を比較すると、その違いは 10% 程度であった。

次に、1988 年 5 月 3 日のデータで比較を行った。データセットは表 B.4 にまとめた。この日も Kp 指数は 1 から 2 であった。表 B.3 を見ると、10:00 UT からイオノゾンデと UHF レーダーの $foF2$ に大きな違いが見られた。最も違った 10:40 UT では、 $foF2$ の高度が下がり、低高度では電子密度の増大が見られた。

また、電子温度の上昇も見られた。日照の効果のみが電子密度の増大に作用している場合、太陽天頂角が低くなるにつれて $foF2$ の高度は下がると考えられる。なので、太陽天頂角が単調増加あるいは単調減少している間に、 $foF2$ の高度が急に上下している場合は電子密度の一様性を仮定する事は出来ず、較正に用いないとした。イオノゾンデを用いて、CP-1 データを較正する際に、CP-1 データから以下の事柄を調べる事とした。電子密度の高度分布から突発的な降り込みが無く、 $foF2$ の高度が急に下がっていない時刻のデータを較正した。

表 B.3: 1989 年 2 月 13 日のイオノゾンデと UHF レーダーから得られた $foF2$

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | $foF2$ (sonde) (MHz) | $foF2$ (CP-1) (MHz) | difference (%) |
|------|---|---|----|----|----------------------|---------------------|----------------|
| 1989 | 8 | 2 | 13 | 20 | 6.29 | 6.98 | 9.9 |
| 1989 | 8 | 2 | 13 | 40 | 6.17 | 6.63 | 6.9 |
| 1989 | 8 | 2 | 14 | 0 | 6.34 | 6.73 | 5.8 |
| 1989 | 8 | 2 | 14 | 20 | 6.44 | 6.81 | 5.4 |
| 1989 | 8 | 2 | 14 | 40 | 6.32 | 6.92 | 8.7 |
| 1989 | 8 | 2 | 15 | 0 | 6.53 | 7.04 | 7.2 |
| 1989 | 8 | 2 | 15 | 20 | 6.67 | 7.21 | 7.5 |

表 B.4: 1988 年 5 月 3 日の $foF2$

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | $foF2$ (sonde) (MHz) | $foF2$ (CP-1) (MHz) | difference (%) |
|------|---|---|----|----|----------------------|---------------------|----------------|
| 1988 | 5 | 3 | 8 | 40 | 6.76 | 6.37 | 6.1 |
| 1988 | 5 | 3 | 9 | 0 | 6.69 | 6.38 | 4.9 |
| 1988 | 5 | 3 | 9 | 20 | 6.71 | 6.34 | 5.8 |
| 1988 | 5 | 3 | 9 | 40 | 6.72 | 6.45 | 4.2 |
| 1988 | 5 | 3 | 10 | 0 | 6.85 | 8.54 | 19.8 |
| 1988 | 5 | 3 | 10 | 20 | 6.75 | 8.33 | 19.0 |
| 1988 | 5 | 3 | 10 | 40 | 6.39 | 9.26 | 31.0 |
| 1988 | 5 | 3 | 11 | 20 | 6.49 | 8.00 | 18.9 |
| 1988 | 5 | 3 | 11 | 40 | 6.62 | 8.15 | 18.8 |
| 1988 | 5 | 3 | 12 | 20 | 6.33 | 7.90 | 19.9 |
| 1988 | 5 | 3 | 13 | 40 | 5.61 | 6.91 | 18.8 |
| 1988 | 5 | 3 | 14 | 0 | 5.72 | 7.02 | 18.5 |
| 1988 | 5 | 3 | 14 | 20 | 6.00 | 7.30 | 17.8 |
| 1988 | 5 | 3 | 14 | 40 | 6.00 | 7.35 | 18.4 |
| 1988 | 5 | 3 | 15 | 0 | 5.84 | 7.14 | 18.2 |
| 1988 | 5 | 3 | 15 | 20 | 5.61 | 7.20 | 22.1 |
| 1988 | 5 | 3 | 15 | 40 | 5.73 | 7.10 | 19.3 |
| 1988 | 5 | 3 | 16 | 0 | 5.62 | 6.99 | 19.6 |

イオノグラムを用いた CP-1 の較正を行った。図 B.2 は、縦軸をイオノグラムから求めた $foF2$ に対応する電子密度、横軸を CP-1 から求めた $foF2$ に対応する電子密度として作図したものである。これより、直線でフィッティングをし、電子密度の絶対値較正に必要な係数(Magic constant)を決定した。表 B.5 に係数をまとめた。これらを用いて CP-1 を較正した。

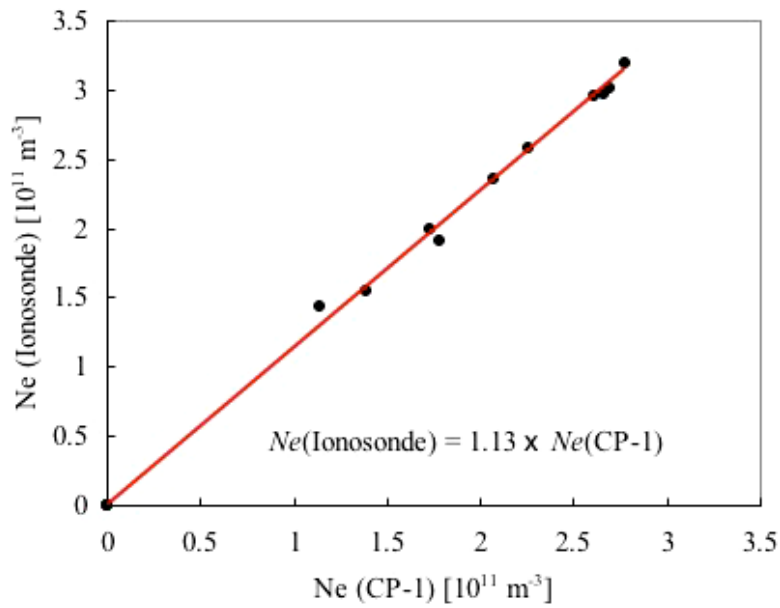


図 B.2 : 1987 年 3 月 25 日のイオノグラム $foF2$ と CP-1 データ $foF2$ の関係。縦軸をイオノゾンの $foF2$ に対応した電子密度 (m^{-3})、横軸を CP-1 データの $foF2$ に対応した電子密度(m^{-3})とした。赤い直線はフィッティングによって決定した。

表 B.5: Magic constant 一覧

| 年 | 月 | 日 | 観測時間 | Magic_const |
|------|---|----|---------------|-------------|
| 1987 | 3 | 25 | 00:00 - 22:59 | 1.13 |
| 1987 | 4 | 14 | 08:38 - 24:00 | 1.17 |
| 1987 | 4 | 15 | 00:00 - 22:00 | |
| 1987 | 5 | 12 | 08:00 - 24:00 | 1.05 |
| 1987 | 5 | 13 | 00:00 - 21:54 | |
| 1987 | 6 | 16 | 08:00 - 24:00 | 1.12 |
| 1987 | 6 | 17 | 00:00 - 07:55 | |
| 1987 | 9 | 21 | 08:00 - 24:00 | 1.08 |
| 1987 | 9 | 22 | 00:00 - 24:00 | |
| 1987 | 9 | 23 | 00:00 - 24:00 | |
| 1987 | 9 | 24 | 00:00 - 24:00 | |
| 1990 | 4 | 9 | 10:22 - 24:00 | 1.01 |
| 1990 | 4 | 10 | 00:00 - 16:00 | |
| 1990 | 9 | 25 | 10:00 - 22:00 | 1.25 |
| 1990 | 9 | 26 | 00:00 - 24:00 | |
| 1991 | 2 | 12 | 15:00 - 24:00 | 1.29 |
| 1991 | 2 | 13 | 00:00 - 24:00 | |
| 1991 | 2 | 14 | 00:00 - 07:55 | |
| 1991 | 2 | 20 | 10:01 - 24:00 | 1.14 |
| 1991 | 2 | 21 | 00:00 - 11:40 | |

参考文献

恩藤忠典、丸橋克英、ウェーブサミット講座 宇宙環境科学、オーム社、2000.

福西浩、國分征、松浦延夫、南極の科学2 オーロラと超高層大気、国立極地研究所編、古今書院、1983.

柴崎清澄、藤井良一、増田富士雄、藤井理行、三上岳彦、東正剛、大塚柳太郎、野上道男、環境理学 —太陽から人まで—、古今書院、2006.

Baker, J. B. H., Y. Zhang, R. A. Greenwald, L. J. Paxton, and D. Morrison, Height-integrated Joule and auroral particle heating in the night side high latitude thermosphere, *J. Geophys. Res.*, *31*, L09807, doi:10.1029/2004GL019535, 2004.

Bailey, S. M., C. A. Barth, and S. C. Solomon A model of Nitric Oxide in the lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, *107*, 1205, 2001.

Banks, P. M., Observations of joule and particle heating in the auroral zone, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *39*, 179, 1977.

Banks, P. M., J. C. Foster, and J. R. Doupanik, Chatanika radar observations relating to the latitudinal and local time variations of Joule heating, *J. Geophys. Res.*, *86*, 6869-6878, 1981.

Brekke, A., *PHYSICS OF THE UPPER POLAR ATMOSPHERE*, Praxis Publishing, 1997.

- Brekke, A., and C. L. Rino, High-resolution altitude profiles of the auroral zone energy dissipation due to ionospheric currents, *J. Geophys. Res.*, 83, 2517-2524, 1978.
- Brekke, A., and C. Hall, Auroral ionospheric quiet summer time conductances, *Ann. Geophys.*, 6, 361-376, 1988.
- Davies, J. A. and M. Lester, The relationship between electric fields, conductances and currents in the high-latitude ionosphere: A statistical study using EISCAT data, *Ann. Geophys.*, 17, 43-52, 1999.
- Doe, R. A., J. P. Thayer, and S. C. Solomon, Incoherent scatter radar measurements and modeling of high-latitude solar photoionization, *J. Geophys. Res.*, 110, A10303, doi:10.1029/2005JA011129, 2005.
- Elphic, R. C., J. Bonnell, R. J. Strangeway, C. W. Carlson, M. Temerin, J. P. McFadden, R. E. Ergun, and W. Peria, FAST observations of upward accelerated electron beams and the downward field-aligned current region, *Magnetospheric Current Systems*, Geophysical Monograph 118, 173-180, 2000.
- Fujii, R., S. Nozawa, S. C. Buchert, N. Matuura, and A. Brekke, Study on neutral wind contribution to the electrodynamics in the polar ionosphere using EISCAT CP-1 data, *J. Geophys. Res.*, 103, 14,731-14,739, 1998.
- Fujii, R., S. Nozawa, S. C. Buchert, and A. Brekke, Statistical characteristics of electromagnetic energy transfer between the magnetosphere, the ionosphere and the thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 104, 2357-2365, 1999.

- Fujii, R., S. Nozawa, S. C. Buchert, and A. Brekke, Energy coupling between the magnetosphere, ionosphere and thermosphere, *Adv. Space Res.*, 25, No.1, 213-218, 2000.
- Gary, J. B., R. A. Heelis, W. B. Hanson, and J. A. Slavin, Field-aligned Poynting flux observations in the high-latitude ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 99, 11,417-11,427, 1994.
- Gary, J. B., R. A. Heelis, and J. P. Thayer, Summary of field-aligned Poynting flux observations from DE 2, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1861-1864, 1995.
- Hedin, A. E., Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 96, 1159-1172, 1991.
- Hargreaves, The solar-terrestrial environment, *Cambridge University Press*, 1992.
- Iijima, T. and T. A. Potemra, The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad, *J. Geophys. Res.*, 81, 2165, 1976.
- Lu, G., A. D. Richmond, B. A. Emery, and R. G. Roble, Magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling: Effect of neutral winds on energy transfer and field-aligned current, *J. Geophys. Res.*, 100, 19,643-19,659, 1995.
- Marklund, G., and T. Karlsson, On low-altitude particle acceleration and intense electric fields and their relationship to black aurora, *J. Geophys. Res.*, 102, 17,509-17,552, 1997.

- Newell, P. T., C. -I. Meng, and K. M. Lyons, Discrete aurorae are suppressed in sunlight, *Nature*, 381, 766-767, 1996.
- Newell, P. T., C. -I. Meng, and S. Wing, Relation to solar activity of intense aurorae in sunlit and darkness, *Nature*, 393, 342, 1998.
- Newell, P. T., R. A. Greenwald, and J. M. Ruohoniemi, The role of the ionosphere in aurora and space weather, *Rev. Geophys.*, 39, 137-150, 2001.
- Nozawa, S., and A. Brekke, Studies of the E region neutral wind in the disturbed auroral ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 100, 14,717-14,734, 1995.
- Nozawa, S., and A. Brekke, Studies of the auroral E region neutral wind through a solar cycle: Quiet days, *J. Geophys. Res.*, 104, 45-66, 1999a.
- Nozawa, S., and A. Brekke, Seasonal variation of the auroral E-region neutral wind for different solar activities, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 61, 585-605, 1999b.
- Nygren, T., *INTRODUCTION TO INCOHERENT SCATTER MEASUREMENTS*, Vol. No.1 of *INVERS PUBLICATIONS*. Invers Oy, 1996.
- Solomon, S. C., P. B. Hays, and V. J. Abreu, The auroral 6300 emission: Observations and modeling, *J. Geophys. Res.*, 93, 9867, 1988.
- Solomon, S. C., and V. J. Abreu, The 630 nm dayglow, *J. Geophys. Res.*, 94, 6817, 1989.

- Sugino, M., R. Fujii, S. Nozawa, S. J. Buchert, and H. J. Opgenoorth, Relative contribution of ionospheric conductivity and electric field to ionospheric current, *J. Geophys. Res.*, *107*, A10, 1330, doi:10.1029/2001JA007545, 2002.
- Thayer, J. P., and J. F. Vickrey, R. A. Heelis, and J. B. Gary, Interpretation and modeling of the high-latitude electromagnetic energy flux, *J. Geophys. Res.*, *100*, 19,715-19,728, 1995.
- Thayer, J. P., Height-resolved Joule heating rates in the high-latitude E region and the influence of neutral winds, *J. Geophys. Res.*, *103*, 471-488, 1998.
- Thayer, J. P., High-latitude currents and their energy exchange with the ionosphere-thermosphere system, *J. Geophys. Res.*, *105*, 23,015-23,024, 2000.
- Vickrey, J. F., and R. R. Vondrak, and S. J. Matthews, Energy Deposition by Precipitating Particles and Joule Dissipation in the Auroral Ionosphere, *J. Geophys. Res.*, *83*, 5184-5196, 1982.
- Watermann, J., O. De La Beaujardiere, and F. J. Rich, Comparison of ionosphere electrical conductances inferred from coincident radar and spacecraft measurements and photoionization models, *J. Atmos. Terr. Phys.*, *55*, 1513-1520, 1993.
- Zhang, X. X., C. Wang, T. Chen, Y. L. Wang, A. Tan, T. S. Wu, G. A. Germany, and W. Wang, Global patterns of Joule heating in the high-latitude ionosphere, *J. Geophys. Res.*, *110*, A12208, doi:10.1028/2005JA011222, 2005.

謝辞

2005年4月に入学して1年と約10ヶ月が過ぎました。本論文の執筆に至るまで多くの方々に支え助けていただきました。

本研究で使用した EISCAT UHF レーダーのデータは、EISCAT 科学協会によって取得されたものです。EISCAT 科学協会を始め、EISCAT サイトで観測に携わった全ての関係者に感謝致します。CP-1 の電子密度較正には、トロムソ大学が所有するイオノゾンのデータを使用しました。イオノゾンに関連する全ての方々に感致します。

当研究室の藤井良一教授には、多忙にも関わらず多くの時間を割いていただきました。研究に関する議論やセミナーを通して多くの知識を与えて下さり、研究に対する姿勢を学ばせていただけたからこそ、私が本論文を執筆出来たと思います。心より感謝致します。指導教官である野澤悟徳助教授には、基本的な物理の知識、解析データの扱いや物理量の計算といった研究面から、私生活に至るまでご指導していただきました。特に私の人生設計に関する助言は非常に参考になりました。心より感謝致します。昨年度まで当研究室の助手で、現在国立極地研究所の小川泰信講師には、データの解析から物理の基礎知識に至るまで、丁寧にご指導していただきました。心より感謝致します。今年度より着任された大山伸一郎助手には、本論文の執筆にあたり文章の校正や助言をいただき、大変お世話になりました。心より感謝致します。当研究室 COE 研究員の元場哲郎博士には、ゼミや研究だけでなく私生活で手厚いサポートをしていただきました。心より感謝致します。PD の小泉宜子博士にもゼミで困っていた時に、参考文献を片手に助言していただきました。心より感謝致します。当研究室の先輩である津田卓雄さんには、事あるごとに質問を投げかけてしまいました。その度に熱心に助言をして頂きました。ここに感謝致します。同輩である澤津橋磨由子さんには研究を進めて行く中で良い刺激を与えてくれました。後輩である渡邊太基さんは忘れかけていた新鮮な気持ちを思い出させてくれました。ここに感謝致します。秘書の岸田さん、山口さんにもお世話になりました。ここに感謝致します。

最後になりましたが、生活面でサポートして下さった家族と、精神的に支えてくれた早川久美子さんに厚く御礼申し上げます。