

極域電離層の問題点

高橋 忠利*

A Review on the Physical Processes in the Polar Ionosphere

Tadatoshi TAKAHASHI*

Abstract: A review of physical processes which control characteristic features of the polar ionosphere is given. Especially, roles of the two consequences of the magnetospheric processes, namely, the energetic particle precipitation and the convective electric field are discussed preponderantly. In connection with the thermal structure of the auroral ionosphere, anomalous resistivity and its ionospheric effects are mentioned briefly.

要旨: 磁気圏環境下の極域電離層における諸過程について最近の研究成果を参照しつつ論ずる。特に、極域電離層における特有のエネルギー源としての粒子降下および対流電場が、電離層の生成とその構造にかかわる問題について、その物理的過程に焦点をあてて議論する。また、極域電離層の熱構造に関連して、異常輸送係数、非熱的粒子分布等の問題について簡単に述べる。

1. 序

極域電離層についての研究の最近の発展は、非常に目覚ましいものがある。最近のこの分野での進歩は数多くの極軌道人工衛星による観測の蓄積、高緯度観測基地における、ロケット、バルーン等による飛しょう体観測、またこれらに呼応した各種の地上観測、さらには、Chatanika における IS レーダー観測、等々による膨大な観測事実の上に築きあげられてきた。

極域電離層の諸現象は、中低緯度のそれに比べて著しく複雑になっているが、これはこの領域が磁気圏と強く結びついており、太陽からの粒子起源のエネルギー流がこの領域に集中的に降り注ぐことによっている。つまり、一度磁気圏に蓄えられた太陽風起源のエネルギーの一部が対流電場、あるいはエネルギー粒子の降下等のかたちで極域の上層大気に注ぎ込み、その様相は、時間的、空間的に変動が著しい。ここに磁気圏に強く結びついた極域電離層に特有の諸問題が生ずることになる。

* 東北大学理学部。Geophysical Institute, Tohoku University, Aramaki Aoba, Sendai 980.

極域電離層の問題点として取り上げるべき課題はまことに多方面にわたるが、極域電離層の構造については、松浦 (1979) により、また極域電離層の電場と電流については KAMIDE (1979) によってすでにすぐれた review がなされている。ここでは主として極域電離層における特有のエネルギー源としての降下粒子、および電場を取り上げ、これらの役割をその物理的な過程に重点をおいて記述したい。以下、2章では、極域電離層の諸過程を述べるに先立ち極域電離層をとりまく環境を磁気圏との関連で概観する。3章では降下エネルギー粒子、4章では対流電場のそれぞれが極域の電離層に及ぼす影響を論ずる。さらに5章において電離層の熱構造について触れ、熱構造と降下粒子、 E_H 等との関連を議論する。

2. 極域電離層をとりまく環境

極域電離層は、その構造上特徴的ないくつかの領域に分けることができ、太陽風中の地球磁場環境下でいわば磁気圏の基部として、それぞれが磁気圏の特徴的な領域に対応している。

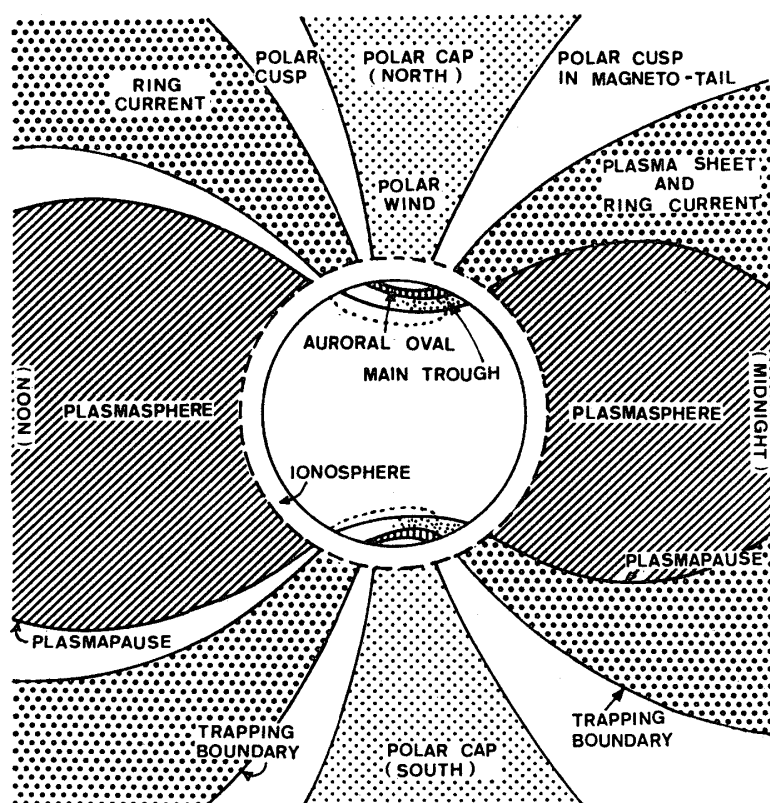


図 1 極域電離層と磁気圏の対応 (FRANK, 1975 による)

Fig. 1. A noon-midnight meridional cross section of the earth's magnetosphere, which shows the interrelation to the polar ionosphere (after FRANK, 1975).

また、その構造上の領域は他面では電離層に生起する種々の物理過程の様相の違いにも対応している。図1は FRANK (1975) により極域電離層と磁気圏の対応をまとめたものであるが、極域電離層としてはいわゆる主トラフ領域より高緯度の領域と考えるのが普通である。この主トラフ領域の低緯度側の端の位置は、おおむね磁気圏でのプラズマポーズに対応している。プラズマポーズは、共回転電場と対流電場の重ね合わせ電場によるプラズマの流れが地球と共回転する限界と考えられ、この意味で極域電離層は磁気圏対流電場の直接的効果の及ぶ領域と考えることができる。主トラフ構造は、夜側では顕著であるが昼側では必ずしもはっきりしない (AHMED *et al.*, 1979)。トラフ領域の高緯度側にはオーロラオーバル領域があり、この昼側の領域は磁気圏の昼側カusp領域、夜側の領域は磁気圏尾部のポーラーカusp領域、およびプラズマシートに対応している。オーロラオーバルの領域は、磁気圏からのエネルギーの注入が最も強い領域であり、サブストーム現象等に見られるようにエネルギー流入は、時間的にも空間的にも著しく変動する。オーロラオーバルの極側は極冠域であり、この領域の電離層プラズマは磁気圏電場により反太陽方向のドリフトを示す。

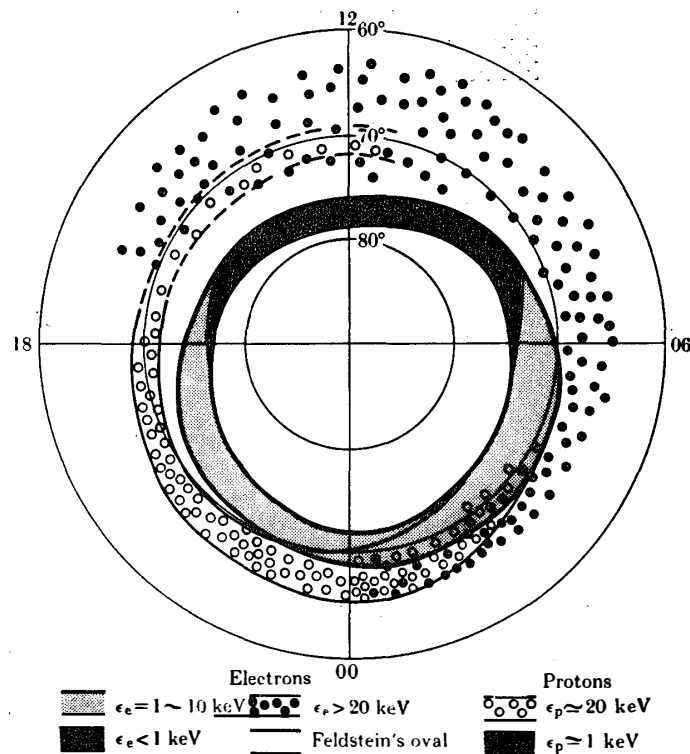


図2 極域における降下オーロラ粒子の分布 (AKASOFU and CHAPMAN, 1972)

Fig. 2. The precipitation of auroral particles in the polar region (AKASOFU and CHAPMAN, 1972).

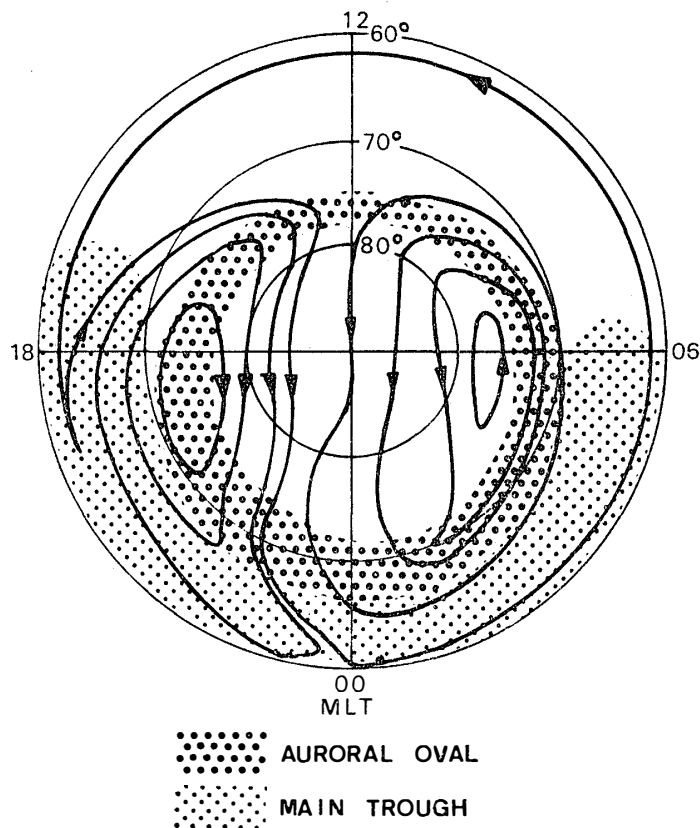


図 3 極域電離層におけるプラズマドリフトの形状 (HEPPNER, 1977 による)

Fig. 3. A representative plasma drift configuration in relation to the polar cap, the auroral oval, and the nightside main trough (after HEPPNER, 1977).

図 2 および図 3 は、極域電離層の特徴的様相を生み出す 2 大要因として粒子降下、および対流電場について、その主要な特徴をまとめたものである。図 2 は AKASOFU and CHAPMAN (1972) によるもので、粒子降下の平均的パターンを示している。エネルギーが数 keV 以下の粒子はオーバル状に分布しており、昼側では約 1 keV 以下のプロトン、および電子が降り込んでおりカusp電離層を形成する。夜側では 1-10 keV の電子が卓越する。これは「逆 V 字型」粒子降下現象を含み、discrete aurora に対応しており、夜側オーロラ領域での主たる電離源となっている。20 keV 程度以上のハードな粒子は地磁気緯度に対して同心円的な分布をし、真夜中の領域ではソフトな成分と重なり合っている。このハードな成分は diffuse aurora に対応するが、朝方の電子による mantle aurora、夜側から夕方にかけての proton aurora を含んでいる。図 3 は、HEPPNER (1977) によるもので静穏時の平均的対流パターンを示している。図中には同時にオーロラオーバル、および主トラフ領域も示してある。オー

ロラオーバルにおいて対流電場が強められる。主トラフ領域の低緯度端がプラズマ対流の限界で、それより低緯度側は共回転域となる。

極域電離層では以上に概観した粒子降下および対流電場に加え、磁力線方向の電場と電流も重要な役割を担っており、これらはたがいに関連し合いながら、サブストーム現象等に見られる複雑な磁気圏 - 電離圏結合系を作り出している。

3. 降下エネルギー粒子の電離層構造に及ぼす影響

3.1. 降下エネルギー粒子の観測

ロケット、人工衛星によるオーロラエネルギー粒子の計測はこれまで種々の条件下で数多くなされており、これらはいくつかの review 論文にまとめられている (ARNOLDY, 1974; HULTQVIST, 1974; BOYD, 1975; MILLER and WHALEN, 1976).

最近では降下粒子の計測結果は、現象との関連でますます詳しい議論がされるようになって

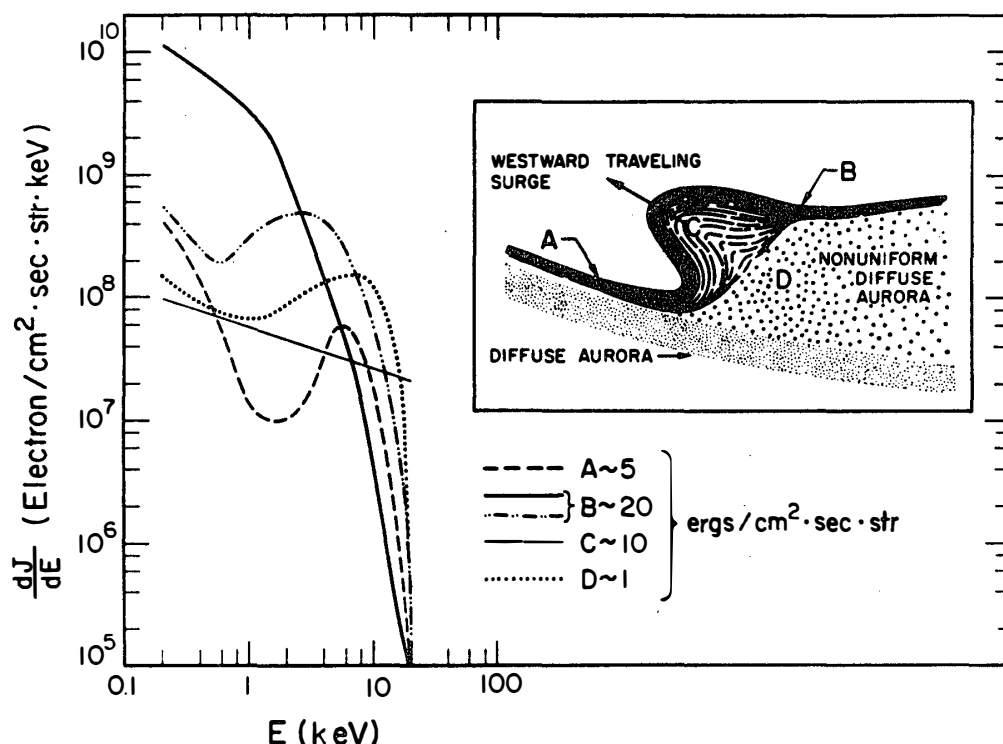


図4 オーロラ・サージ領域近傍におけるオーロラ粒子の特徴的スペクトル (MENG *et al.*, 1978)

Fig. 4. A schematic diagram summarizing the main features of the low-energy electron precipitations observed in the vicinity of an auroral westward traveling surge (MENG *et al.*, 1978).

てきている。図4は、MENG *et al.* (1978) が active aurora 中の粒子計測結果をまとめたものであるが、降下粒子のエネルギースペクトルは、aurora 中の特徴的部位に対応して異なる様相を示している。いわゆる「逆V字型」現象については、詳しい計測に基づいて、ピークエネルギーと温度との比例関係 (LIN and HOFFMAN, 1979), フラックス (J_{\parallel}) とピークエネルギーとの比例関係 (LYONS *et al.*, 1979) 等が報告されている。SHARP *et al.* (1979) はこの現象のピッチ角分布から、加速領域が高度約 7000 km 以上の場合と、それより低い場合とがあることを示している。さらに KAUFMAN *et al.* (1978) は分布関数が plateau を持つことか

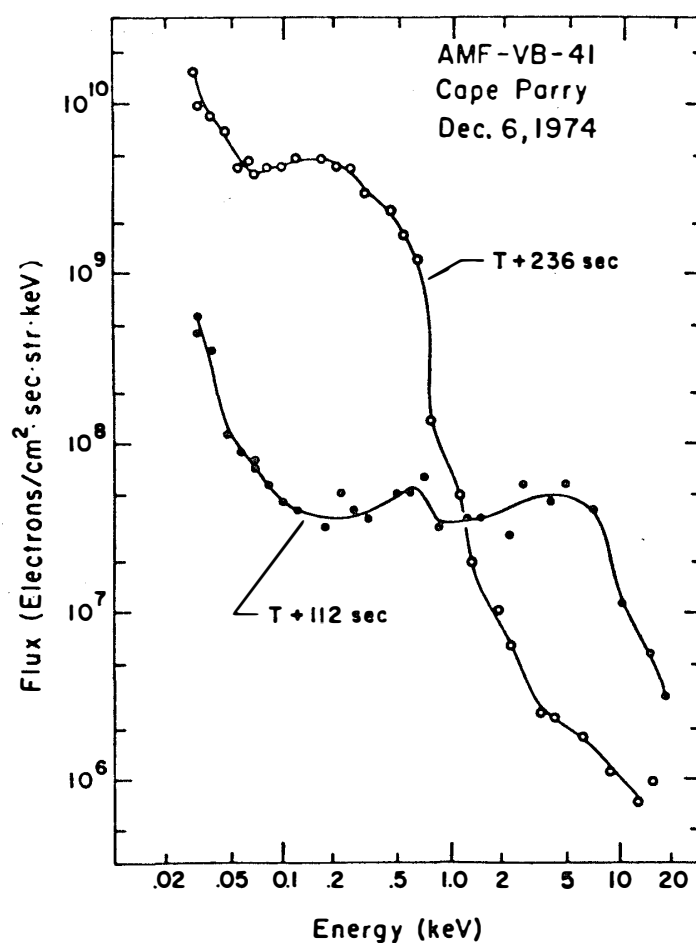


図5 昼側カusp領域における降下電子のエネルギースペクトル。黒丸はロケット発射後112秒後、高度142 kmのデータ。白丸は236秒後、高度235 kmのデータで、昼側カusp域の降下粒子のエネルギースペクトルを示す (SHEPHERD *et al.*, 1976)。

Fig. 5. Electron energy spectra precipitating into the dayside oval region. Solid circles indicate the data at 112 s after the launch and at 142 km altitude. Open circles the data at 236 s after the launch and at 235 km altitude. The spectrum given with open circles corresponds to the particles in the dayside cusp region (SHEPHERD *et al.*, 1976).

ら, aurora 粒子の加速が強い速度拡散を伴うことを論じている. これらはいずれも, オーロラ粒子の加速機構, およびその電離層への影響の観点より, 重要な手懸かりとなるものであるが, 総合的な解明は, 理論的研究とともに今後に残されているといつてよい.

昼側における降下粒子についても多くの計測結果が報告されているが, 図 5 に 1 例として SHEPHERD *et al.* (1976) の結果を示した. 図に白丸で示された 1 keV 以下にピークを持つ数 $\text{ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{str}^{-1}$ のフラックスが比較的狭い領域 (緯度幅 1° 以内) で観測されており, 昼側でのカスプ粒子降下の特徴的様相を示している.

3.2. 降下粒子のエネルギー損失過程

降下エネルギー粒子の上層大気中でのエネルギー損失過程とそれに伴う電離生成は, オーロラ現象の中でも, 最も古くから定量的取り扱いがなされてきたものの 1 つと言えよう (たとえば, CHAMBERLAIN, 1961). 最近ではこの問題への多様なアプローチがなされており, 計算機の発達とともにますます厳密な取り扱いが実行されてきている. これらをその方法の上から大別すれば, Boltzmann 方程式の近似的取り扱いに帰着できる手法と, テスト粒子を用いる統計的手法とに分けることができる. 前者はさらに, 古典的な連続エネルギー損失過程による近似 (REES, 1963), Fokker-Plank 型の拡散方程式により, ピッチ角散乱およびエネルギー損失を同時に見積もるアプローチ (WALT *et al.*, 1969), また, 比較的低いエネルギーの粒子に対して輸送方程式を解析的に解く方法 (STOLARSKI, 1972; TAKAHASHI, 1975), 同じ方程式への数値計算によるアプローチ (MANTAS *et al.*, 1976; STRICKLAND *et al.*, 1976) 等が報告されている. 後者については, モンテカルロ法によるエネルギー損失過程の評価が行われている (BERGER *et al.*, 1970; BERGER *et al.*, 1974). これらの手法による結果は BANKS *et al.* (1974a), および STRICKLAND *et al.* (1976) によって詳しく比較検討されているが, エネルギーが数百 eV よりも低い場合には大気分子との弾性衝突, ステップワイズなエネルギー損失等の効果が大きくなり, 古典的な手法, あるいは Fokker-Plank 方程式によるアプローチは誤差が大きくなっている. BANKS *et al.* (1974a) は 500 eV 以上の粒子には Fokker-Plank 型の解法を用い, それ以下のエネルギー粒子には上向きおよび下向きの 2 流近似による輸送方程式を解いて, 種々のエネルギースペクトルの降下粒子について電離生成率, その他の諸量を詳しく評価している. 図 6 はその結果の 1 例で単一エネルギーの入射フラックスに対する電離生成率の高度プロファイルを示している. 数 keV の逆 V 字型降下粒子によっては E 層レベル, 1 keV 以下の昼側カスプ領域での降下粒子によっては F 層レベルに効果的な電離生成が行われることになる.

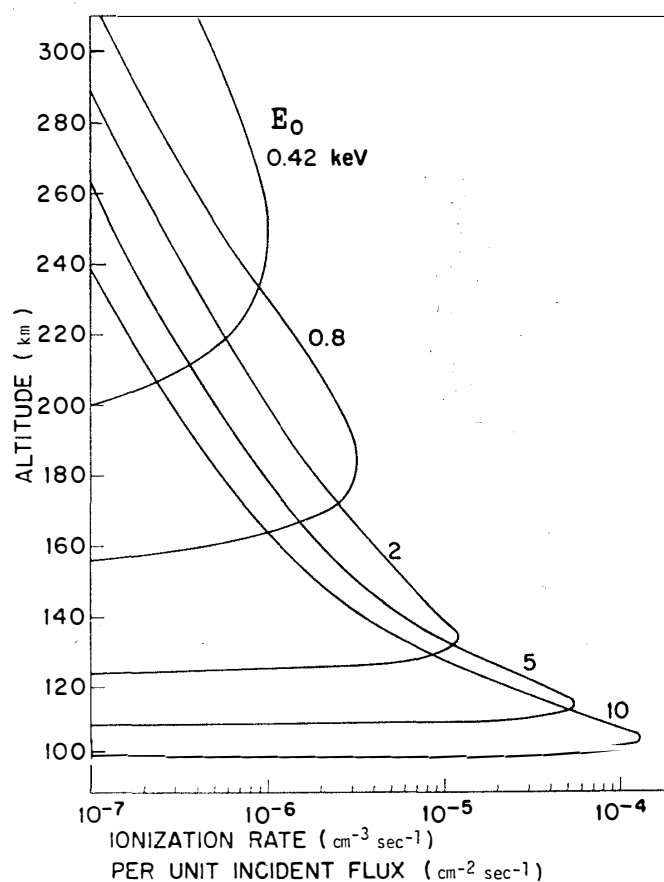


図 6 いくつかのエネルギーの降下電子フラックスによる電離生成率 (BANKS *et al.*, 1974a による)

Fig. 6. Plots of the ionization rates per unit incident flux for the monoenergetic electron fluxes (after BANKS *et al.*, 1974a).

以上は中性大気との相互作用による降下粒子のエネルギー損失過程について述べたが、最近降下粒子の電離大気との相互作用が、波動粒子相互作用、磁力線に平行な電場と異常輸送係数等との関連で議論され始めている。これ等の問題は、数 eV-数十 eV 程度の非熱的電子の分布に深くかかわっていて、電離層の熱構造にも影響を与えるものである。この点の議論は後にすることになる。

3.3. 電離層での諸過程

極域の電離層構造は、降下粒子によって生成された電離成分のその後の諸過程を介して決められていくことになる。極域においても当然、昼側、あるいは夏半球では太陽 EUV の効果があるので、実際の電離層モデルを考えるにあたってはこの効果も同時に評価していく必

ルで降下粒子に反応するが、中性大気微量成分のうち、 $N(^4S)$, NO 等はサブストーム間隔程度の時間では、定常状態に達せずオーロラ大気中に蓄積される。

4. 電場の極域電離層構造に及ぼす影響

極域電離層における電場、およびそれによって誘起される電離層電流、Birkeland 電流の morphology については KAMIDE (1979) により詳しく論じられている。このような電場の存在は極域 F 層の構造を決める重要な要素の1つともなっている。

BANKS *et al.* (1974b) によって提唱された電場のイオン化学への効果は、極域電離層の構造を理解する上で、重要な理論的基礎の1つを与えたものと言える。強い電場により $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトが音速を越えるほどになると、 $O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$ の反応が促進され、引き続き解離再結合 $NO^+ + e \rightarrow N + O$ によって電子密度は一定のレベルまでは急速に減少し、この領域

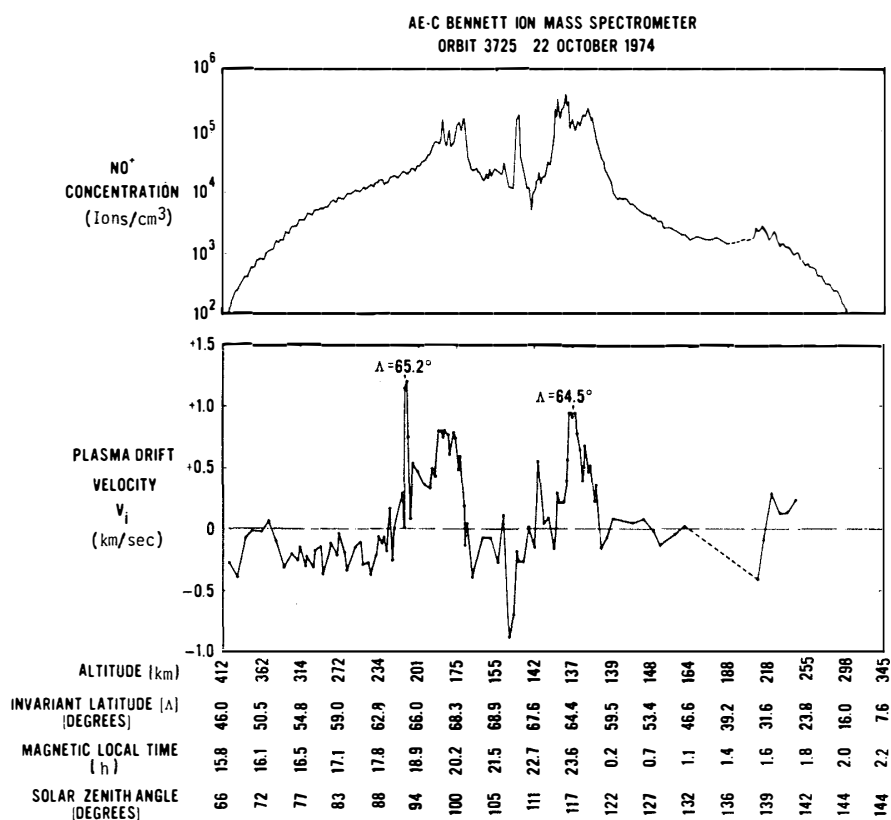


図 8 AE-C 衛星による NO^+ 密度、およびプラズマ・ドリフト速度の同時計測結果 (BRINTON, 1975)

Fig. 8. Simultaneous Bennett spectrometer measurements of NO^+ concentration and plasma drift velocity. The data were obtained during a perigee pass at southern high latitudes on October 22, 1974 (BRINTON, 1975).

でのイオンの主成分は NO^+ になる。この理論の定量的展開は SCHUNK *et al.* によって進められた (SCHUNK *et al.*, 1975; SCHUNK *et al.*, 1976). 図 8 は AE-C 衛星による NO^+ 密度およびプラズマドリフト速度の計測結果であるが, NO^+ 密度増加の見られる位置はドリフト速度の増加域と非常によい一致を示している (BRINTON, 1975). また, OGO-4, 6 の観測結果では, いわゆる高緯度トラフがしばしば NO^+ の増加を伴っていることが示されている (TAYLOR *et al.*, 1975; GREBOWSKY *et al.*, 1976). この問題に関しては, 電場の役割とは別に, 降下粒子等の効果で振動励起された N_2 も同様の反応促進の役割を果たし得る (NEWTON *et al.*, 1974; SCHUNK and BANKS, 1975). 今後両者の相対的寄与についての検討が必要である。

磁気圏電場のもとに対流する極域電離層の全体像をとらえようとする試みは観測結果の解析の面でも, 理論面でも精力的に行われている。観測面からは複数の衛星の組み合わせによって, いわば極域電離層のスナップショットを合成するもので, Alouette-2, ISIS-1 および ISIS-2 を用いた磁氣的に静かな時の例 (WHITTEKER *et al.*, 1976), ISIS-1, ISIS-2 の結果を用いた冬半球でのサブストーム時の例 (WHITTEKER *et al.*, 1978) が調べられている。図 9 は WHITTEKER *et al.* (1976) によるもので磁氣的に静かな時の例である。コンターは F 層ピーク

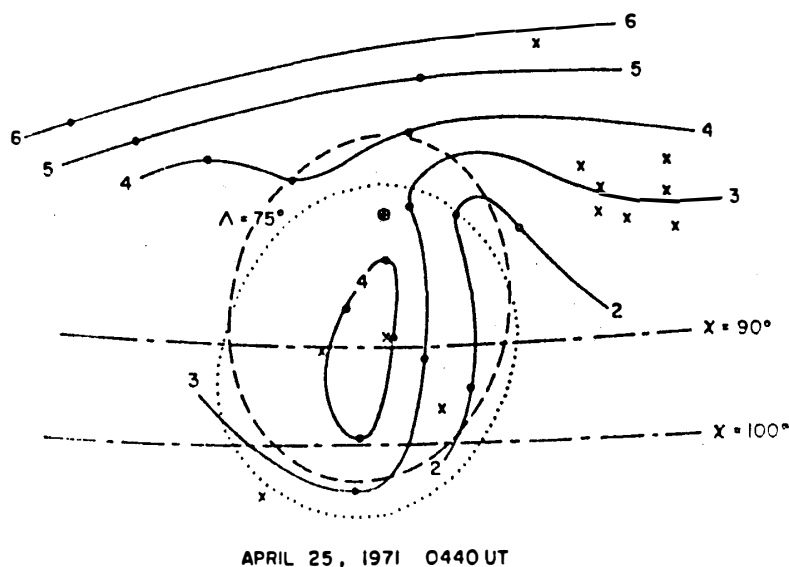


図 9 Alouette-2, ISIS-1 および ISIS-2 衛星のデータより求められた極域 F 層ピーク電子密度の等密度曲線。等密度曲線の数値は 10^5 cm^{-3} を単位として示してある。MLT は真下が 0 時で反時計方向に進む (WHITTEKER *et al.*, 1976)。

Fig. 9. F layer peak density contour plot of the polar ionosphere deduced from the data obtained from the Alouette-2, ISIS-1, and ISIS-2 satellites. Units on the contours are 10^5 cm^{-3} . Magnetic local time is indicated on the right hand diagram with midnight at the bottom (WHITTEKER *et al.*, 1976).

密度を示し、極冠域に舌状に張り出しているのは昼側に生成されたプラズマが対流電場によって再分布する様子を示している。

一方、KNUDSEN (1974) は対流パターンに沿って運動する磁力管内での連続の式に基づいて、極域電離層のグローバルなモデル計算を行っている。こうした理論的アプローチではその後、定常的流れの考えやすい静穏時の極域 F 層モデルについて研究が進んでいる (KNUDSEN *et al.*, 1977; WATKINS, 1978). 図10は WATKINS (1978) によるものであるが、対流電場モデルとして極冠域で一様な電場を考えた場合の結果である。図には4例の異なる季節の F 層ピーク電子密度の等密度曲線が示されている。これらの結果はいずれも極冠域で観

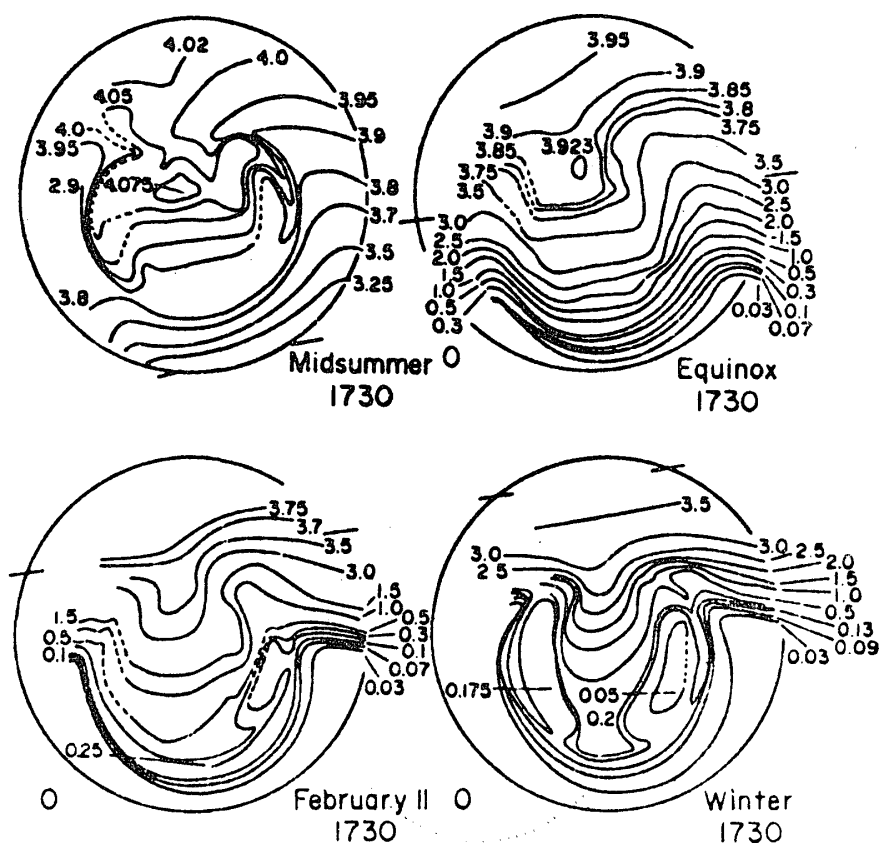


図10 4つの異なる季節における極域 F 層電子密度の計算結果。高度は 300 km で、等密度線は 10^5 cm^{-3} を単位として示してある。MLT は真下が 0 時で反時計方向に進む (WATKINS, 1978)。

Fig. 10. Plots of computed F -region electron density contours for four days of the year at 17:30 UT. The circle refers to 60 invariant latitude. Magnetic local time is indicated on the right hand diagram with midnight at the bottom. The two small bars on either side of the circle denote the line of zero solar depression angle. The contours (300 km altitude) are in units of 10^5 cm^{-3} (WATKINS, 1978).

測されたようなプラズマの舌状の張り出し、夜側の主トラフ等を再現している。また条件は磁氣的に静穏時であるので定在的なオーバルへの粒子降下による電子密度増加が認められる。これらの特徴はいずれも冬期において最も顕著である。

最近の AE-C 衛星による静穏時における極域、300 km 高度でのイオン成分、電子温度計測結果の解析によって、極冠域の真夜中から朝方にかけて特別に電子密度の低い領域 ('Hole') があることが報告されている (BRINTON *et al.*, 1978). この Hole 領域ではすべてのイオン成分の減少が見られ、NO⁺ 増加の見られる高緯度トラフとは区別されるもので、両者のくわしい比較研究が必要であろう。

以上、極域電離層構造と対流電場とのかかわりを見てきたが、対流パターンとその速度が極域の F 層には大きく作用する。最近の BURKE *et al.* (1979) の報告によると、惑星間空間磁場が北向きの時には 4 セル構造の対流パターンを示すことがある。こうした状態や、じょう乱時における対流と F 層構造とのかかわり合いなど今後の詳しい研究が期待される領域であろう。

5. 極域電離層の熱構造および関連する諸問題

5.1. 極域電離層の熱構造

極域の電離層は、その熱構造においても複雑な様相を呈している (SCHUNK and NAGY,

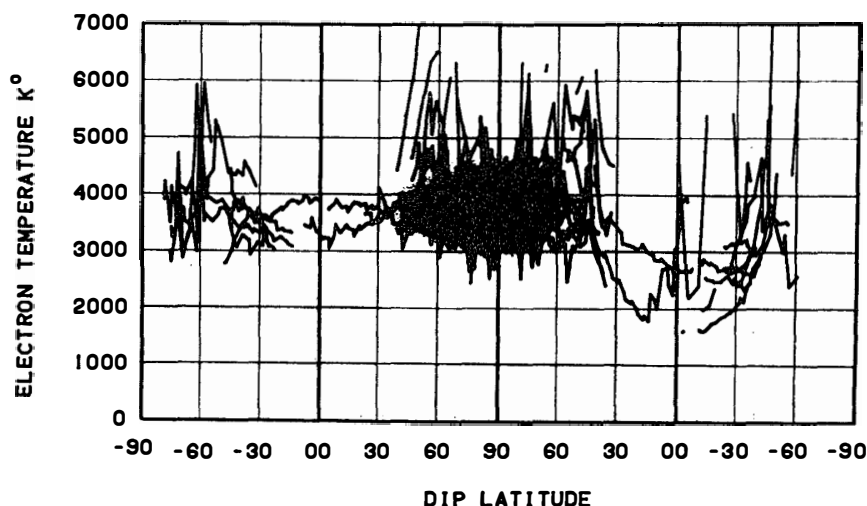


図11 ISIS-2 衛星によるじょう乱時 (August 4-7, 1972) の電子温度計測結果 (BRACE *et al.*, 1974)

Fig. 11. Global plot of electron temperature T_e for the disturbed period, August 4-7, 1972. The general enhancement of T_e in all passes and the irregular enhancements at the equator in some passes can be seen. The high-latitude temperature is usually irregular and high (BRACE *et al.*, 1974).

1978). 図11は, ISIS-2 によるじょう乱時における電子温度計測結果のプロットであるが, 極域において電子温度が激しく変動する様子がみられる. 電子温度は, ときおり 5000°K から 6000°K の高い値を示している (BRACE *et al.*, 1974). 電子温度の計測においても, IS レーダーはそのすぐれた性能を発揮するが, 図12に Chatanika における IS レーダーの電子密度, 電子温度, イオン温度の計測結果を示した (WATT, 1973). この結果の時間分解能はほぼ30分で, 太陽天頂角, Kp の値に示すように前半はじょう乱時, 後半は太陽 EUV が主たる電離源となっている. 地磁気じょう乱の条件下で電子温度は著しい変動を見せているが, 電離層熱構造の降下粒子等に対する応答時間は1分程度と考えられ, 一方じょう乱時のエネルギー流入は数分, あるいはそれ以下のタイムスケールで大きく変動することが知られている (BANKS, 1977). 電子温度もこれに対応してさらに微細な構造を示しているものと思われる.

電子温度の極域におけるグローバルな分布についてもいくつか仕事が行なわれているが (たとえば, WHITTEKER *et al.*, 1976; BRINTON *et al.*, 1978), 図13に WHITTEKER *et al.* による結

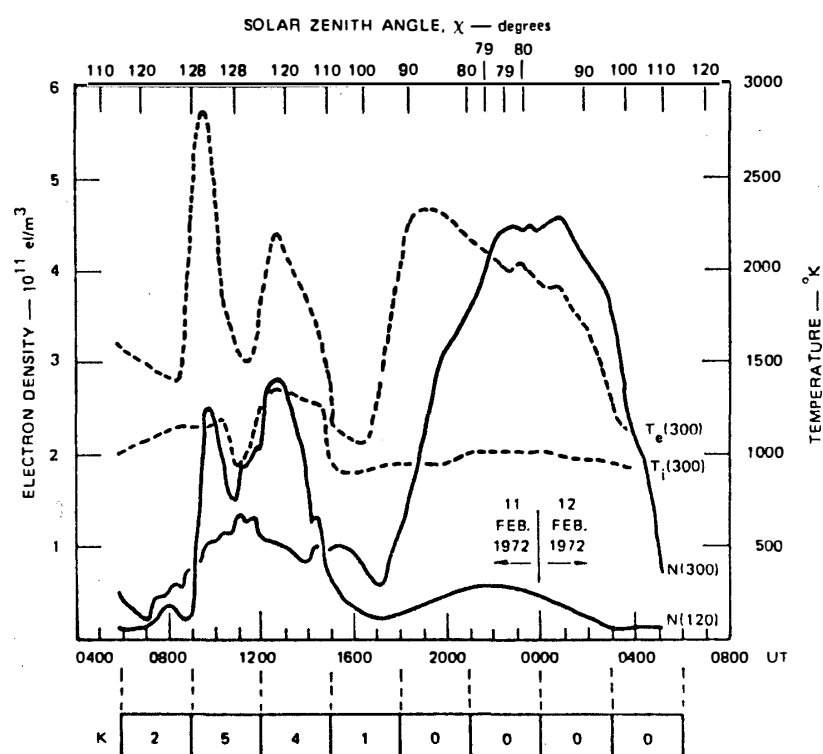


図12 Chatanika における IS レーダーの電離層パラメータ観測結果 (WATT, 1973)

Fig. 12. Plots of the four parameters, namely, electron temperature at 300 km altitude, ion temperature at 300 km, and electron number densities at 300 km and 120 km, for the 24-hour measurements on February 11-12, 1972. These data were obtained by an L band incoherent scatter radar (WATT, 1973).

果を示した。図13は図9に対応するもので3つの衛星の観測結果を合成したものである。図には昼側のカusp領域に電子温度の増加が見られており、オーバルの夜側では静穏時でもあり若干の温度増が認められる程度である。BRINTON *et al.* (1978) の結果によると、300 km 高度での比較的静穏時の電子温度にもオーバル状の増加域が認められている。

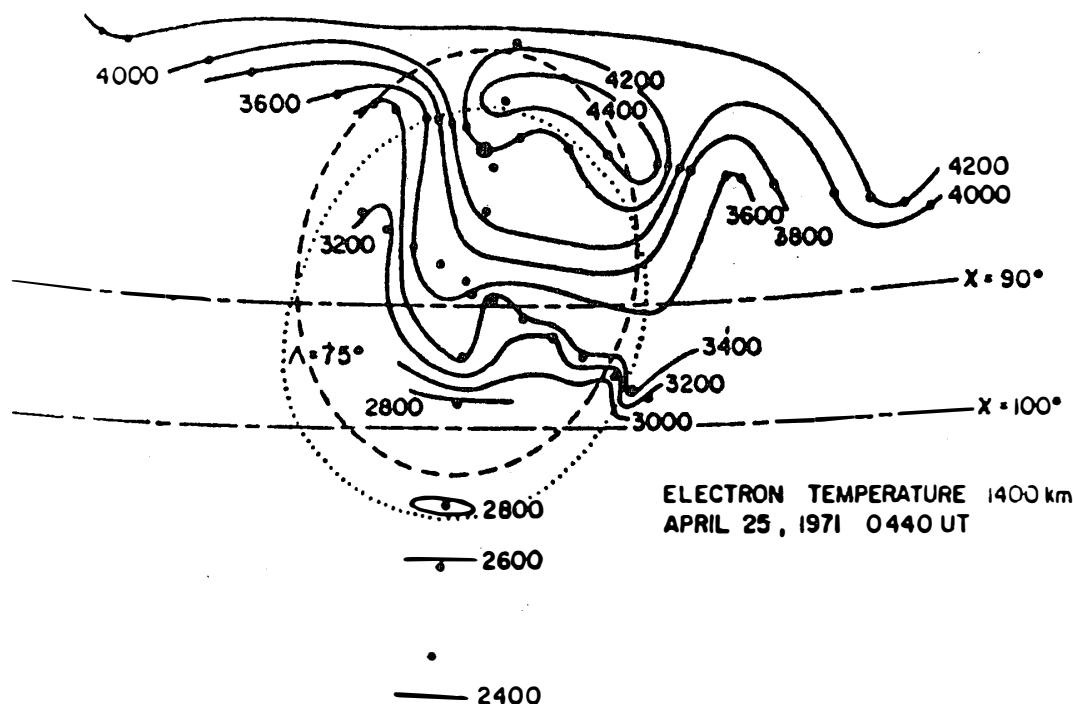


図13 Alouette-2, ISIS-1 および ISIS-2 衛星のデータによる極域トップサイド電離層 (高度約 1400 km) での電子温度分布。MLT は真下が0時で反時計方向に進む (WHITTEKER *et al.*, 1976)。

Fig. 13. Electron temperature contour plot deduced from the data obtained from the Alouette-2, ISIS-1, and ISIS-2 satellites. Magnetic local time is indicated on the right hand diagram with midnight at the bottom (WHITTEKER *et al.*, 1976).

5.2. オーロラ電離層の熱構造と異常輸送係数

オーロラ領域の F 層電子温度はしばしば数千度以上に及ぶ高い値を示すが、こうした高い電子温度は、古典的なクーロン衝突による輸送係数を用いるかぎり電離層の高い熱伝導率のため、電離層の E_{\perp} によるジュール加熱、あるいはエネルギー粒子、2次電子等による加熱で十分に説明し得ない。一方極域の F 層は広い波数域にわたる不規則構造を示している (McCLURE and HANSON, 1973; DYSON *et al.*, 1974; SAGALYN *et al.*, 1974; PHELPS and SAGALYN, 1976; WRIGHT *et al.*, 1977)。また、理論的にもプラズマの種々な集合モードが実効

的衝突を生み出し、電離層の異常輸送係数と結びついていることがしだいに明らかにされてきている (PAPADOPOULOS, 1977). これらの観測的、理論的基礎に基づいて IONSON *et al.* (1976) は 1000 km 以上の異常輸送係数のモデルを議論している. また, FONTHEIM *et al.* (1978) は 1000 km 以下電離層内の適当な異常輸送係数を与えてじょう乱時の電子温度の増加を計算している. 図14はその計算結果を示すもので, 7000°K ほどに達する電子温度プロ

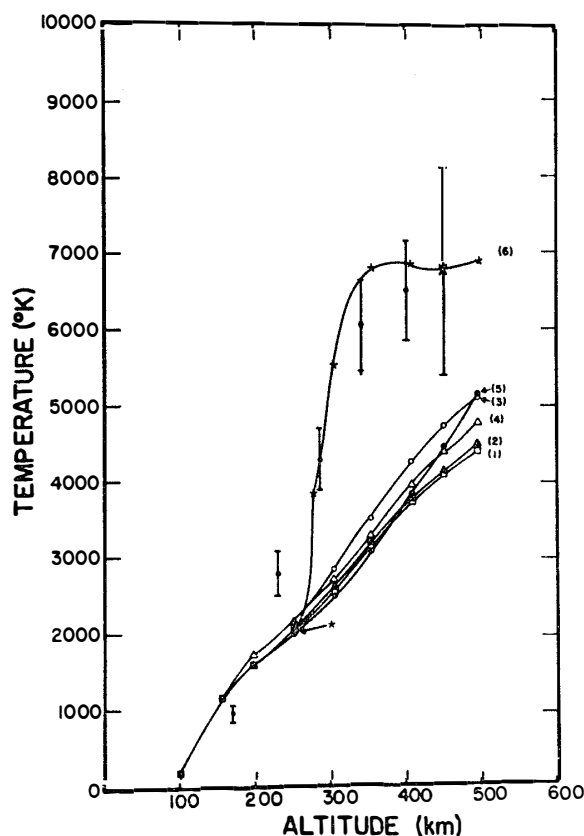


図14 オーロラ電離層についての種々な仮定のもとでの電子温度の計算結果と観測された電子温度との比較, 観測値はエラーバーを伴った黒丸で示してある. それぞれの計算結果は以下のような仮定に基づく. (1) トップサイドでの熱流を考えない, 通常のパラメータを用いた結果. (2) トップサイドからの 10^{10} eV/cm² s の熱流を考えた場合. (3) 電子-電子のクーロン衝突による加熱量を2倍にした場合. (4) J_{\parallel} を2倍にした場合. (5) トップサイド電離層に異常輸送係数を導入した場合. (6) F層ピーク付近に構造をもつ異常輸送係数を導入した場合 (FONTHEIM *et al.* 1978).

Fig. 14. Comparison between the observed and the calculated electrons temperatures. The observed temperatures are indicated by the points with error bars. The calculated temperature profiles refer to the following cases: (1) classical transport coefficients with no topside heat flux; (2) same as (1) but with topside heat flux of 10^{10} eV/cm² s; (3) twice the direct electron-electron heating rate Q_{ee} ; (4) twice the assumed field-aligned current; (5) anomal topside transport coefficients; and (6) anomal transport coefficient around F layer peak (FONTHEIM *et al.*, 1978).

ファイルの観測結果は、異常輸送係数とそれに基づく磁場平行電流のジュール加熱でのみ説明される。

異常輸送現象の問題は、 E_{\parallel} ひいてはオーロラ粒子の加速、プラズマ波動と電離層電子の分布関数に関係する非線型の問題である。これをひき起こすものとして大きくわけて **current driven** 不安定型、およびパラメトリック不安定による熱電子に効果的な波動の発生が考えられている (PAPADOPOULOS, 1977)。後者については、入射エネルギー粒子と熱的粒子との間に介在するいわゆる **suprathermal tail** での粒子観測結果との対応で議論がなされている (MATTHEWS *et al.*, 1976)。こうした方面の研究は電離層の熱構造への寄与等、実際的な応用の面では緒についたばかりであり、今後の発展が期待される領域である。

6. お わ り に

極域の電離層について主として、そこでの物理過程について述べてきた。個々の物理過程については最近その役割と定量的評価の面で大きな進歩を見せている。しかし、これらの事象は、極域の電離層においては相互に深くかかわっており、これらの関連の中で極域電離層の全体像をより明確にとらえてゆくことは今後の大きな課題であるといえよう。こうしたアプローチには種々の物理量の高度に組織化された観測がベースになる。この意味で極域における電離層観測は、惑星間空間、磁気圏から熱圏まで含めて、種々のレベルでの総合観測が近年ますます盛んになっており、こうした結果に基づく総合的観点からの研究の進歩が期待される。

文 献

- AHMED, M., SAGALYN, R. C., WILDMAN, P. J. L. and BURKE, W. J. (1979): Topside ionospheric trough morphology: Occurrence frequency and diurnal, seasonal, and altitude variations. *J. Geophys. Res.*, **84**, 489–498.
- AKASOFU, S. I. and CHAPMAN, S. (1972): *Solar Terrestrial Physics*. Oxford, Clarendon Press, 901p.
- ARNOLDY, R. L. (1974): Auroral particle precipitation and Birkeland currents. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 217–231.
- BANKS, P. M., CHAPPELL, C. R. and NAGY, A. F. (1974a): A new model for the interaction of auroral electrons with the atmosphere: Spectral degradation, backscatter, optical emission, and ionization. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1459–1470.
- BANKS, P. M., SCHUNK, R. W. and RAITT, W. J. (1974b): NO^+ and O^+ in the high latitude *F*-region. *Geophys. Res. Lett.*, **1**, 239–242.
- BANKS, P. M. (1977): Observations of Joule and particle heating in the auroral zone. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 179–193.

- BERGER, M. J., SELTZER, S. M. and MAEDA, K. (1970): Energy deposition by auroral electrons in the atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **32**, 1015–1045.
- BERGER, M. J., SELTZER, S. M. and MAEDA, K. (1974): Some new results on electron transport in the atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 591–617.
- BOYD, J. S. (1975): Rocket-borne measurements of auroral electrons. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 735–740.
- BRACE, L. H., MAIER, E. J., HOFFMAN, J. H., WHITTEKER, J. and SHEPHERD, G. G. (1974): Deformation of the nightside plasmasphere and ionosphere during the August 1972 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, **79**, 5211–5218.
- BRINTON, H. C. (1975): In situ measurements of plasma drift velocity and enhanced NO^+ in the auroral electrojet by the Bennett spectrometer on AE-C. *Geophys. Res. Lett.*, **2**, 243–246.
- BRINTON, H. C., GREBOWSKY, J. M. and BRACE, L. H. (1978): The high-latitude winter F region at 300 km: Thermal plasma observations from AE-C. *J. Geophys. Res.*, **83**, 4767–4776.
- BURKE, W. J., KELLEY, M. C., SAGALYN, R. C., SMIDDY, M. and LAI, S. T. (1979): Polar cap electric field structure with a northward interplanetary magnetic field. *Geophys. Res. Lett.*, **6**, 21–24.
- CHAMBERLAIN, J. W. (1961): *Physics of the Aurora and Airglow*. New York, Academic Press, 704p.
- DYSON, P. L., MCCLURE, J. P. and HANSON, W. B. (1974): In situ measurements of the spectral characteristics of F region ionospheric irregularities. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1497–1502.
- FONTHEIM, E. G., ONG, R. S. B., ROBLE, R. G., MAYR, H. G., BARON, M. J., HOEGY, W. H., WICKWAR, V. B., VONDRAK, R. R. and IONSON, J. A. (1978): Effect of anomalous transport coefficients on the thermal structure of the storm time auroral ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **83**, 4831–4836.
- FRANK, L. A. (1975): Magnetospheric and auroral plasmas: A short survey of progress. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 974–989.
- GREBOWSKY, J. M., CHEN, A. J. and TAYLOR, H. A., Jr. (1976): High-latitude troughs and the polar cap boundary. *J. Geophys. Res.*, **81**, 690–694.
- HEPPNER, J. P. (1977): Empirical models of high-latitude electric fields. *J. Geophys. Res.*, **82**, 1115–1125.
- HULTQVIST, B. (1974): Rocket and satellite observations of energetic particle precipitation in relation to optical aurora. *Ann. Geophys.*, **30**, 223–257.
- IONSON, J. A., ONG, R. S. B. and FONTHEIM, E. G. (1976): Anomalous resistivity of the auroral plasma in the topside ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 549–552.
- JONES, R. A. and REES, M. H. (1973): Time dependent studies of the aurora I. Ion density and composition. *Planet. Space Sci.*, **21**, 537–557.
- KAMIDE, Y. (1979): Recent progress in observational studies of electric fields and currents in the polar ionosphere: A review. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **63**, 61–231.
- KAUFMANN, R. L., DUSENBERY, P. B., THOMAS, B. J. and ARNOLDY, R. L. (1978): Auroral electron distribution function. *J. Geophys. Res.*, **83**, 586–598.
- KNUDSEN, W. C. (1974): Magnetospheric convection and the high latitude F_2 ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1046–1055.
- KNUDSEN, W. C., BANKS, P. M., WINNINGHAM, J. D. and KLUMPAR, D. M. (1977): Numerical model of the convecting F_2 ionosphere at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4784–4792.
- LIN, C. S. and HOFFMAN, R. A. (1979): Characteristics of the inverted-V event. *J. Geophys. Res.*, **84**, 1514–1524.
- LYONS, L. R., EVANS, D. S. and LUNDIN, R. (1979): An observed relation between magnetic field aligned electric fields and downward electron energy fluxes in the vicinity of auroral forms. *J. Geophys. Res.*, **84**, 457–461.

- MANTAS, G. P. and WALKER, J. C. G. (1976): The penetration of soft electrons into the ionosphere. *Planet. Space Sci.*, **24**, 409–423.
- 松浦延夫 (1979): 極域電離層の構造 (Review). *南極資料*, **65**, 1–14.
- MATTHEWS, D. L., PONGRATZ, M. and PAPADOPOULOS, K. (1976): Nonlinear production of suprathermal tails in auroral electrons. *J. Geophys. Res.*, **81**, 123–129.
- MCCLURE, J. P. and HANSON, W. B. (1973): A catalog of ionospheric *F* region irregularity behavior based on Ogo 6 retarding potential analyzer data. *J. Geophys. Res.*, **78**, 7431–7440.
- MENG, C. I., SNYDER, A. L., Jr. and KROEHL, H. W. (1978): Observations of auroral westward traveling surges and electron precipitations. *J. Geophys. Res.*, **83**, 575–585.
- MILLER, J. R. and WHALEN, B. A. (1976): Characteristics of auroral proton precipitation observed from sounding rockets. *J. Geophys. Res.*, **81**, 147–154.
- NEWTON, G. P., WALKER, J. C. G. and MEIJER, P. H. E. (1974): Vibrationally excited nitrogen in stable auroral red arcs and its effect on ionospheric recombination. *J. Geophys. Res.*, **79**, 3807–3818.
- PAPADOPOULOS, K. (1977): A review of anomalous resistivity for the ionosphere. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **15**, 113–127.
- PHELPS, A. D. R. and SAGALYN, R. C. (1976): Plasma density irregularities in the high-latitude top side ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **81**, 515–523.
- REES, M. H. (1963): Auroral ionization and excitation by incident energetic electrons. *Planet. Space Sci.*, **11**, 1209–1218.
- REES, M. H. and JONES, R. A. (1973): Time dependent studies of the aurora II. Spectroscopic morphology. *Planet. Space Sci.*, **21**, 1213–1235.
- ROBLE, R. G. and REES, M. H. (1977): Time-dependent studies of the aurora: Effects of particle precipitation on the dynamic morphology of ionospheric and atmospheric properties. *Planet. Space Sci.*, **25**, 991–1010.
- SAGALYN, R. C., SMIDDY, M. and AHMED, M. (1974): High-latitude irregularities in the top side ionosphere based on Isis 1 thermal ion probe data. *J. Geophys. Res.*, **79**, 4252–4261.
- SCHUNK, R. W. and BANKS, P. M. (1975): Auroral N_2 vibrational excitation and the electron density trough. *Geophys. Res. Lett.*, **2**, 239–242.
- SCHUNK, R. W., RAITT, W. J. and BANKS, P. M. (1975): Effect of electric fields on the daytime high-latitude *E* and *F* regions. *J. Geophys. Res.*, **80**, 3121–3130.
- SCHUNK, R. W., BANKS, P. M. and RAITT, W. J. (1976): Effects of electric fields and other processes upon the nighttime high-latitude *F* layer. *J. Geophys. Res.*, **81**, 3271–3282.
- SCHUNK, R. W. and NAGY, A. F. (1978): Electron temperatures in the *F* region of the ionosphere: Theory and observation. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **16**, 355–399.
- SHARP, R. D., JOHNSON, R. G. and SHELLEY, E. G. (1979): Energetic particle measurements from within ionospheric structures responsible for auroral acceleration processes. *J. Geophys. Res.*, **84**, 480–488.
- SHEPHERD, G. G., PIEAU, J. F., CREUTZBERG, F., McNAMARA, A. G., GERARD, J. C., McEWEN, D. J., DELANA, B. and WHITTEKER, J. H. (1976): Rocket and ground-based measurements of the dayside magnetospheric cleft from Cape Parry, N. W. T. *Geophys. Res. Lett.*, **3**, 69–72.
- STOLARSKI, R. S. (1972): Analytic approach to photoelectron transport. *J. Geophys. Res.*, **77**, 2862–2870.
- STRICKLAND, D. J., BOOK, D. L., COFFEY, T. P. and FEDDER, J. A. (1976): Transport equation techniques for the deposition of auroral electrons. *J. Geophys. Res.*, **81**, 2755–2764.

- TAKAHASHI, T. (1975): Behaviour of low energy electrons precipitating in the upper atmosphere—An approach with the discrete ordinate method. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **27**, 187–200.
- TAYLOR, H. A., GREBOWSKY, J. M., Jr. and CHEN, A. J. (1975): Ion composition irregularities and ionosphere-plasmasphere coupling: Observations of a high latitude ion trough. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, 613–623.
- WALT, M., MACDONALD, W. M. and FRANCIS, W. E. (1969): Penetration of auroral electrons into the atmosphere. *Physics of the Magnetosphere*, ed. by R. L. CAROVILLANO. Dordrecht, D. Reidel, 534–554 (*Astrophys. Space Sci. Lib.*, Vol. 10).
- WATKINS, B. J. (1978): A numerical computer investigation of the polar *F*-region ionosphere. *Planet. Space Sci.*, **26**, 559–569.
- WATT, T. M. (1973): Incoherent scatter observations of the ionosphere over Chatanika, Alaska. *J. Geophys. Res.*, **78**, 2992–3006.
- WHITTEKER, J. H., BRACE, L. H., MAIER, E. J., BURROWS, J. R., DODSON, W. H. and WINNINGHAM, J. D. (1976): A snapshot of the polar ionosphere. *Planet. Space Sci.*, **24**, 25–32.
- WHITTEKER, J. H., SHEPHERD, G. G., ANGER, C. D., BURROWS, J. R., WALLIS, D. D., KLUMPAR, D. M. and WALKER, J. K. (1978): The winter polar ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1503–1518.
- WRIGHT, J. W., MCCLURE, J. P. and HANSON, W. B. (1977): Comparisons of ionogram and Ogo 6 satellite observations of small scale *F* region inhomogeneities. *J. Geophys. Res.*, **82**, 548–554.

(1979年7月5日受理)