

電離層熱的電子エネルギー分布の非マクスウェル特性
(S-310-14号機による観測結果)

雨宮 宏*・小山孝一郎・平尾 邦雄

(1984年12月15日受理)

Non-Maxwellian Characteristics of the Energy Distribution of
Ionosphere Thermal Electrons
(Result of Observation by an S-310-14 Rocket)

By

H. AMEMIYA, K. OYAMA and K. HIRAO

Abstract: Observation of the energy distributions of thermal electrons are made in a lower mid-latitude ionosphere between 90km and 220km at dusk by an S-310-14 rocket on 18h16m, Sept. 16, 1983. Measurements were based on the Druyvesteyn method using Langmuir probes.

Between 108 and 160 km, bumps appeared on the high energy tail. The densities of such non-thermal electrons were of the order of 10^{-2} of those of thermal electrons and the energy gap between the peaks of the non-thermal and thermal electrons was about 0.3eV. On the other hand, above 170 km (F-layer), distributions had no bumps on the tail but deviated slightly from Maxwellian. The temperature of thermal electrons showed a gradual increase with height and became about 900° K in the F-layer. Mechanism of the appearance of the non-thermal electrons is considered to be due to super-elastic collisions between $N_2(v>0)$ and thermal electrons.

概 要

本報告は1983年9月16日、日没時、中層大気観測器と共にS-310-14号機ロケットに搭載された熱的電子エネルギー分布観測器による測定結果に関する。測定はラングミュアプローブを用いるドリベステン法によっており、高度90から218kmに亘り正常なデータを

* 理化学研究所

得た。

観測の結果、高度 90 から 160 km にかけて高エネルギー尾部に非熱的電子の存在を示す凸部が見られ、その密度は熱的電子の約 10^{-2} 倍、熱的電子とのエネルギー間隔は約 0.3 eV であった。一方、170 km 以上 (F 層) ではその様な凸部は現われなかったが、分布はマクスウェル分布から若干ずれた形を示した。熱的電子の温度は高度と共にゆるやかな上昇を示し F 層で約 900°K となった。非熱的電子の発生機構として振動励起された N_2 と熱的電子間の非弾性衝突が考えられる。

1. はじめに

電離中のプラズマ電子のエネルギー分布に関してはこれまでいくつかの実験的[1, 2]および理論的研究[3, 4]が行われ、分布のマクスウェル分布からの歪みとその原因が議論されて来た。本報告は昨年秋中層大気 (O_2 , O_3 , NO) 観測器と共に S-310-14 号ロケットに搭載されたラングミュアプローブによる熱的電子エネルギー分布の測定結果に関する。ここでは特に中間圏界面附近における電子と原子分子との相互作用、両者間のエネルギー授受機構を説明することを主眼としている。

以下、実験条件、実験結果、検討の順に述べる。

2. 実験装置、方法、条件

プローブ特性 $i_p(V_p)$ およびその二次微分 $i_p''(V_p)$ を得るため交流法、遅延法を併用し、各回路にそれぞれ 3 mmφ, 4 mmφ の 20 cm 長ステンレス製円筒プローブを接続した。プローブは表面を真空中で約 200°C の下で処理しガラス封じした[2]。プローブ電圧 V_p はロケット本体に対し -0.9 V から 1.6 V まで変る 2.5 Hz の三角波とした。その回路図は既に報告したが[6]、前回と異なる点は微分器 D_1 の前で三段階の増幅をしマルチプレクサ MPX で時分割送信したこと、コイル L をパーマロイケースで囲み地球磁場を遮蔽したこと、立上り特性を改善するため LC 回路を 15 段に増加させたことで、これによりデータの改良が得られた。

エネルギー分布 $f(E)$ は

$$f(\text{eV}) = \frac{2\sqrt{2} m^{1/2} \sqrt{V}}{S e^{5/2}} \cdot i_p''(V) \quad (1)$$

で与えられ、プラズマ密度 n_e はその積分から求められる。即ち、

$$n_e = \int_0^{\infty} f(eV) eV \quad (2)$$

ここで、 e , m は電子の電荷と質量、 S はプローブ表面積、 V は空間電位とプローブ電圧の差である。出力電圧 V_0 と i_p'' との関係は

$$V_0 = RG(\Delta V)^2 i_p'' \quad (3)$$

となる。ここで、 R は入力抵抗、 G は利得、 ΔV は分解能で $\Delta V = \tau \cdot dV_p / dt$ 。 $R = 5 \times 10^5 \Omega$ 、 $S = 25.1 \text{ cm}^2$ 、MPX の前のゲインが $\times 1$ の場合 $G = 2.5 \times 10^3$ 、 $\Delta V = 0.031 \text{ Volt}$ を代入すると、

$$n_e = 1.4 \times 10^5 \int_0^{V_{\max}} V_0 \sqrt{V} dV \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (4)$$

となる。 V_{\max} としては 0.6 V とした。

ロケットは 1983 年 9 月 16 日午後 6 時 16 分 50 秒 (日没後)、内の浦より発射角 80° で打上げられ、最高高度 217.8 km 、着地点は ($132^\circ.37 \text{ E}$, $29^\circ.37 \text{ N}$) 附近であった。打上げ後のタイミングは以下の通りである。

- $t = 50$ 秒 ノーズコーン開頭
- 51 秒 テレメタ計測から切替
- 52 秒 ガラス封じ管割り
- 54 秒 プローブ展張

テレメタチャンネルは二次高調波法、遅延法に対しそれぞれ # 15, # 14 を使用した。ロケット本体下部は導電物質を塗布しプローブに対する基準極表面積を十分大きくした。

第 1 図はロケットの軌道を示し、曲線上のパラメタは打上げ後の時間 t (秒) を表わす。

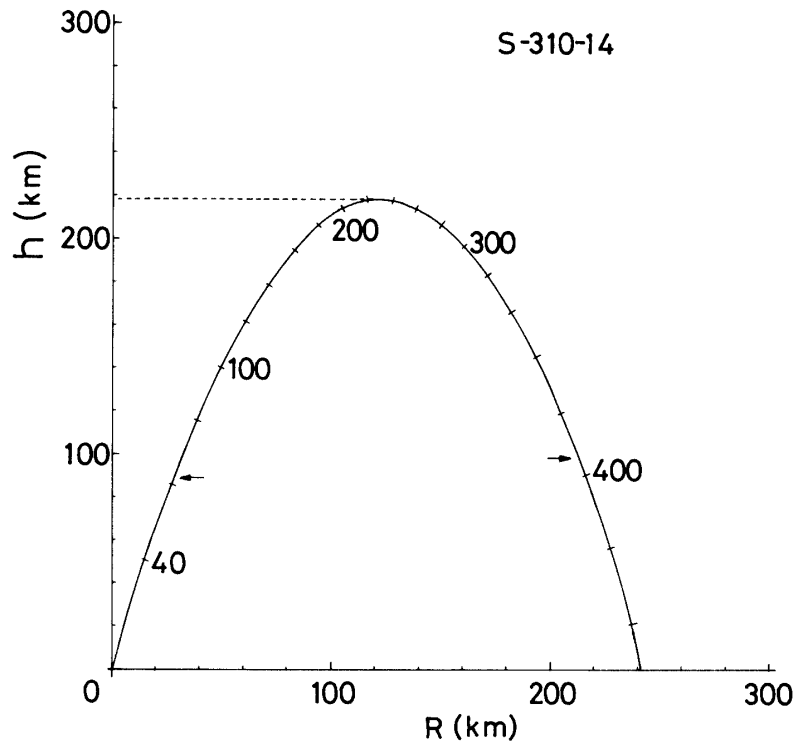


Fig. 1 Relation between height and range of S-310-14 rocket. Numbers on the curve denote time from launching.

データは $t=64$ から 394 秒 (矢印で示す時間) に亘って得られた。 $t=39$ 秒より 76.8 秒毎にダミー非線形素子への切替えを行い標準信号を発生させ飛行中の動作を監視した。

3. 観測結果

第2図は利得 $\times 1$ (実際は $G=2.5 \times 10^3$) の場合の高度 $h=90$ km から 160 km に亘る二次微分 $i_p'' (\propto f(E)/\sqrt{E}, E: \text{エネルギー})$ を示す。プローブ電圧の上昇時のデータのみを採用した。110-123 km で E 層と思われる電子密度の領域がある。130 km まで一旦密度が下

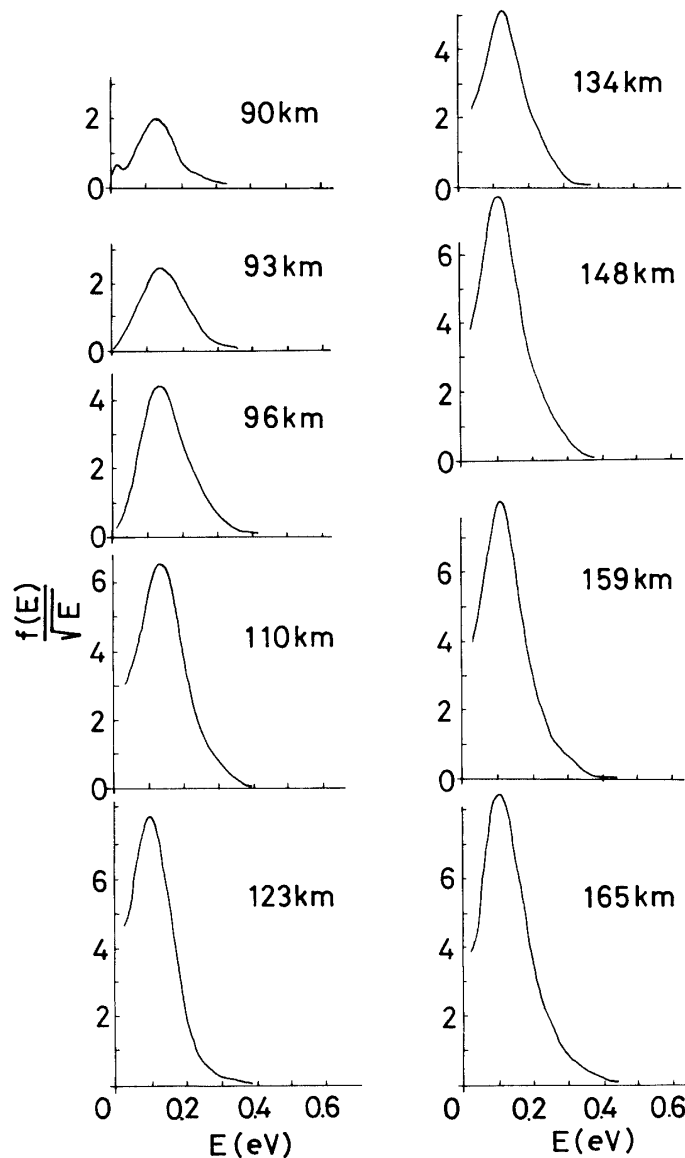


Fig. 2. Energy distributions measured at lower heights between 90 and 165 km with a low gain ($\times 1$). All figures were drawn in the same arbitrary unit of $\text{cm}^3\text{eV}^{-1}$.

った後, 134 km 以上から再び密度上昇が生じ F 層へと接続する. $f(E)/\sqrt{E}$ の E に対する傾斜は高度と共に増加する. 即ち, 電子温度は高度と共に増加し高エネルギー尾部が増す傾向が見られるが, $\times 1$ の利得では尾部に凸部はない. マクスウェル分布では $f(E)/\sqrt{E}$ の最大値は $E=0$ の所に来る筈であるが, 低エネルギー部の涸渇のため最大値は約 0.1 eV エネルギーの高い方向にずれている. 1.0 eV 以上の高エネルギー部分で約 100 Hz の波状雑音が飛翔中見られたので, 0.8 eV 以上の部分は切捨てた. 一方, 前回 K-9M-76 号機で見

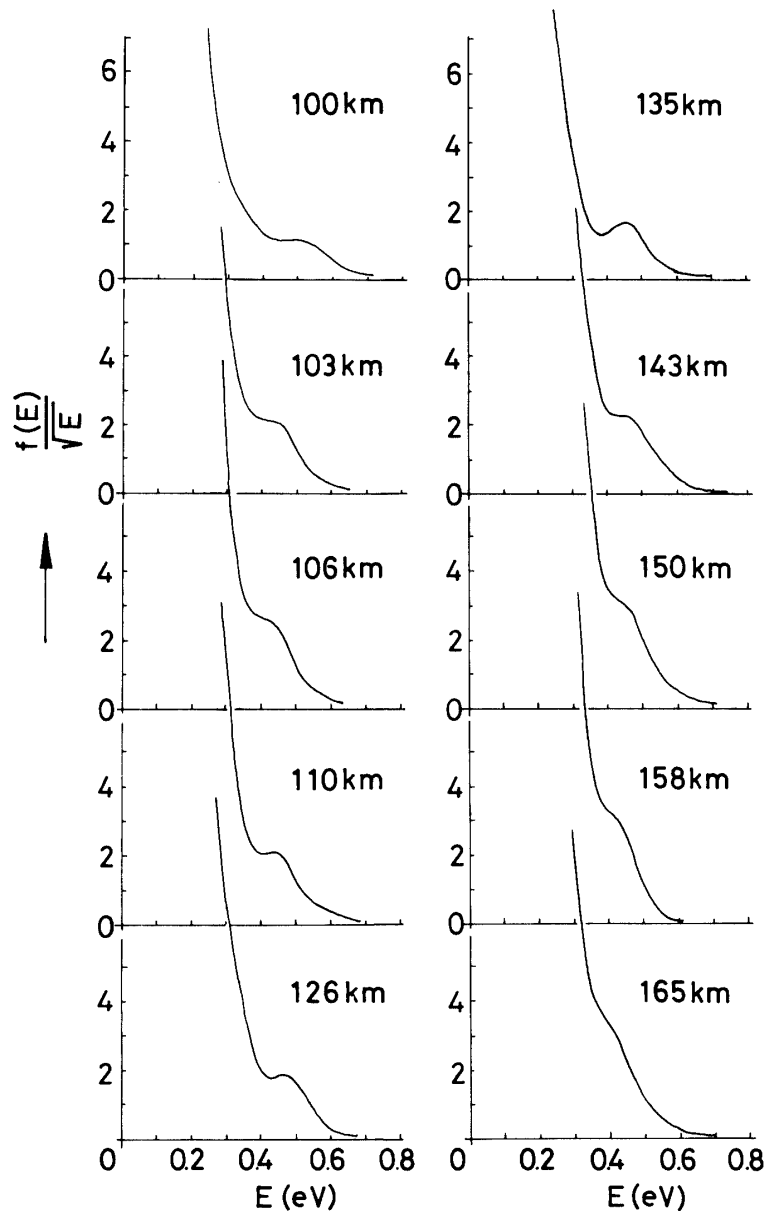


Fig. 3 Energy distributions measured at lower heights between 108 and 165 km with a high gain ($\times 10$). All figures were drawn in the same arbitrary unit of $\text{cm}^3\text{eV}^{-1}$.

られた電子電流飽和領域における 200 Hz 程度の波状雑音は消失した。

第3図は同様の低域における利得 $\times 10$ ($G=2.5 \times 10^4$) のデータを示す。高エネルギー尾部では小さい凸部が現われている。その密度は熱的電子(主ピーク)の密度に対し約 10^{-2} で、そのピークの位置から熱的電子のピークの位置までのエネルギー間隔 E_g は大体一定している。この様な非熱的電子群は 90 から 160 km に亘ってみられ、 E_g を高度 h に対しプロットすると第4図の様になる。160 km 以上では凸部の形は崩れた。90-100 km では E_g は 0.6 eV, 160-170 km では多少のばらつきがあるが、100-160 km ではほぼ 0.3 eV の所に集中している。これらはロケット上昇時のデータである。

高度 170 km 以上では低域でみられた様な非熱的電子群は消失し、分布は一つのピークから成っていることが分った。第5図は 170-218 km (最高高度) に亘る利得 $\times 1$ (Δ 印) と $\times 10$ (\circ 印) の i_p をつなげて V_p に対しセミログプロットしたものを示す。その傾斜は一つの直線上には載らず途中折れ曲りがある。即ち、分布は完全なマクスウェル分布ではなく、0.4 eV 以下の低エネルギー部は約 800°K, 0.5-0.7 eV の部分は約 600°K, そして更に高エネルギー部は多少の盛り上りを示す。低エネルギー部の傾斜より電子温度 T_e を求め、高度 h に対しプロットしたものを第6図に示す。約 10% 程度のばらつきが見られるが、 T_e は低域からしだいに h と共に増加し F 層ではほぼ一定値 900°K に落ち着くことが分る。

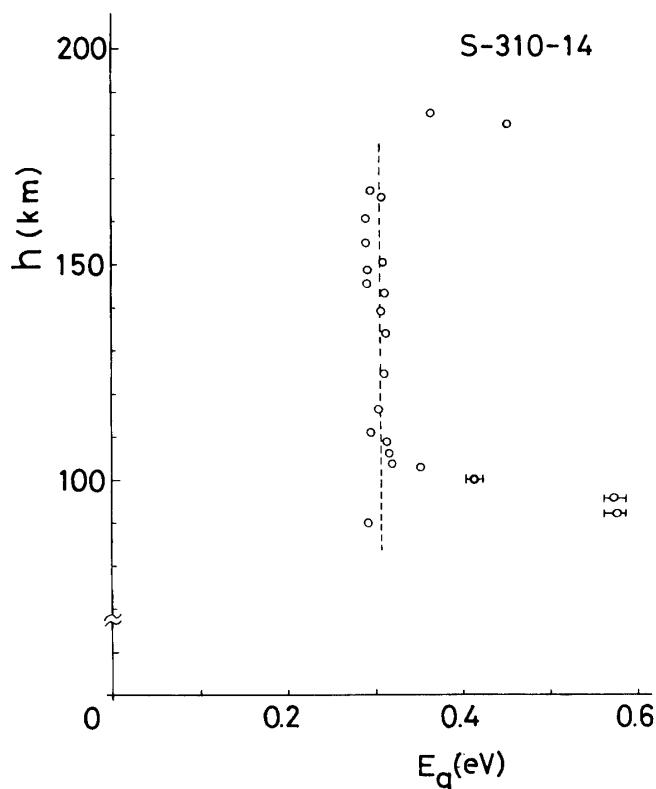


Fig. 4 Energy gap E_g between peaks of thermal and non-thermal electrons vs. h at the autumn evening.

4. 検 討

以上の観測結果から分る様に、180 km 以上の F 層では非熱的電子による大きい歪みは生じない。これは電子同士のクーロン衝突の効果と考えられる。しかし、分布は完全なマクスウェル分布とは言えず、0.3-0.5 eV の中間部の温度は低エネルギー部分に比し低い(第5図)。低温度の中間エネルギーの部分を経た後、0.5 eV 以上の高エネルギー尾部では再び温度が上昇している。これは高エネルギー部分が光電子の低エネルギー部と混在するか、低エネルギーの熱的電子が原子分子との非弾性衝突でエネルギーを得たためと考えられる。160 から 180 km の中間域では上記の傾向は明確ではなく、非熱的電子の発生が見られるより低域との遷移領域をなしている。

90-160 km においては 0.4 eV 附近に相対密度 10^{-2} 程度の凸部が見られる。この様な非熱的電子は以前冬の 11 時においても 0.5-0.6 eV で見られた[7]。一方、夜間では観測されていない[6]。従って、この現象は太陽光の存在する時間帯に現われるのではないかと思わ

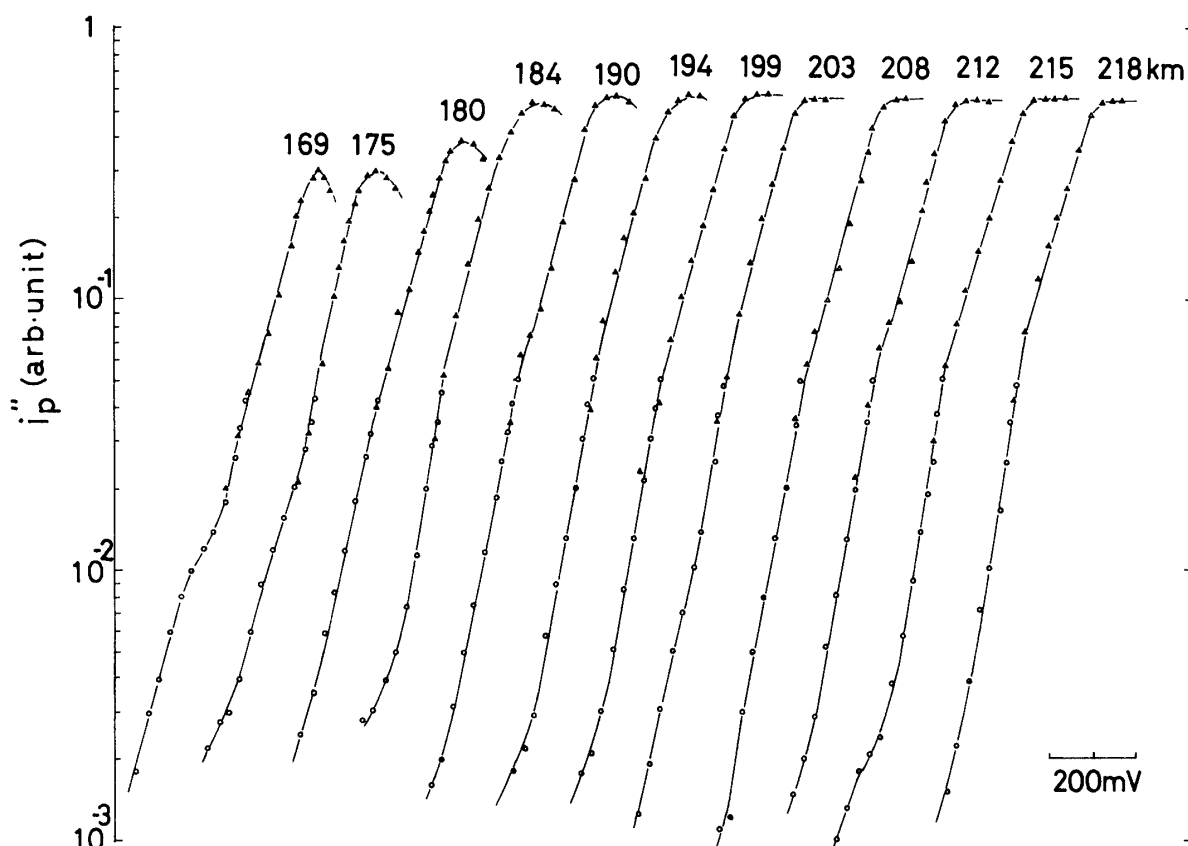
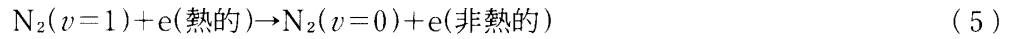


Fig. 5 Semi-log plots of second derivatives i_p'' at medium heights above 169 km. ▲: measured with a low gain, ●: measured with a high gain. Ordinate is in an arbitrary scale of $\text{cm}^3\text{eV}^{-3/2}$.

れる。熱的電子の温度は第6図より8-900°Kである。マクスウェル分布では分布のピークは $kT_e/2 \approx 0.04$ eV になければならないが、低エネルギー部の涸渇があり実験的には0.1-0.13 eVの辺りに発生している(第3図)。低エネルギー部の涸渇は古いデータ[1]でも見られ、再結合過程等が関係していると思われる。プローブ特性の空間電位附近の歪みにも一部原因している。熱的電子とのエネルギー差 E_g が0.3 V 附近に集中していることは振動励起された N_2 との非弾性衝突



が起っているのではないかと考えられる。E, F層の N_2 , O_2 の振動温度の計算はこれまでいくつか行われて来た[8-10]。そして、 $N_2(v>0)$ の発生機構として以下のものが考えられている。

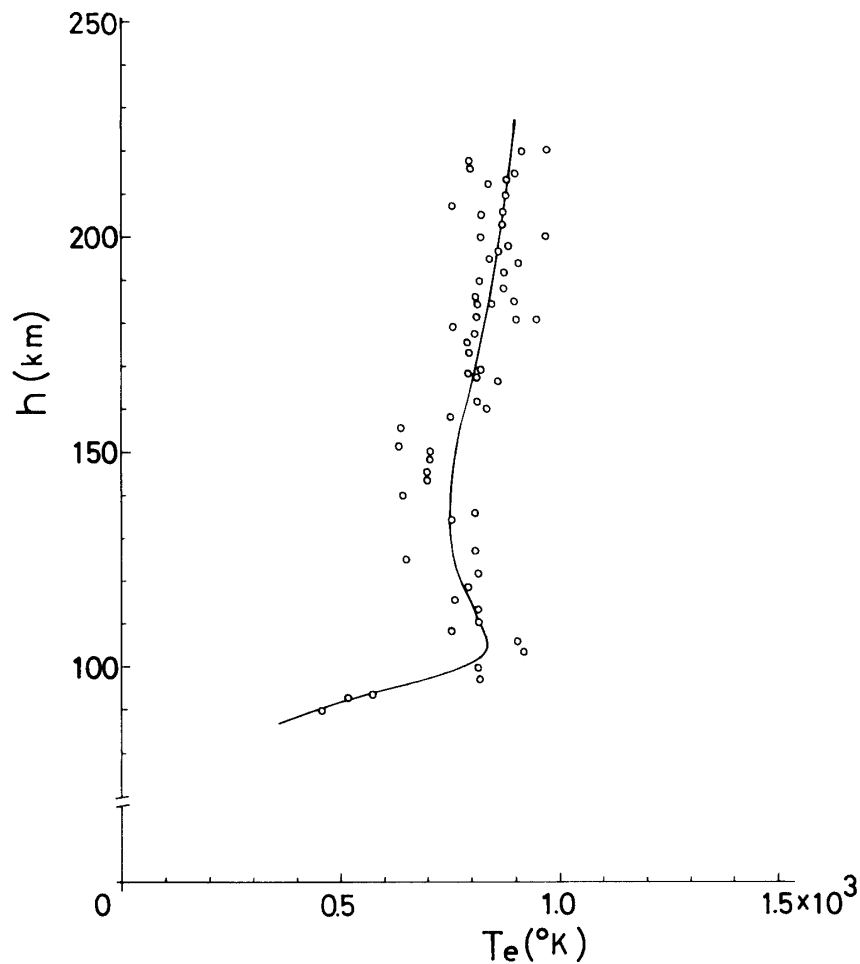


Fig. 6 Electron temperature T_e of thermal electrons vs. height h .



上記(6)の反応が実際起っていることは光電子のスペクトルに N_2 の共鳴的振動励起に対応する凹部が現われる観測結果[11, 12]から推察出来る。しかし、光電子が N_2 の振動温度に識別しうる増加を起すには $10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上の粒子束が必要である[13]。中緯度での向井氏等のデータ[12]によると 2-14 eV において $10^8 - 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ st}^{-1} \text{ eV}^{-1}$ であるから光電子による N_2 の加熱は十分には期待出来ない。Varnum の計算[10]によると、太陽活動の低い場合 150 km 以下では反応(7)が最も大きい確率で起こり、振動温度は電子温度より高くなり、特に、日没時附近で最大となる日変化を示す。 $\text{O}(^1\text{D})$ が生じるのは主として O_2 の光解離によると考えられる。

第7図は太陽活動度に依存した気体温度 T_g 、 N_2 の振動温度 T_v の高度 h に対する分布を示す。これは先述の Varnum の正午における計算値を日変化を考慮して夕方6時に外挿して得たものである。 $\text{N}_2(v)$ がこの T_v に対するボルツマン分布に従うとして $\text{N}_2(v=1)$ の密度を計算した。 N_2 の全密度は位置や日時によりばらつきがあるが[14-16]、文献[16]の値を採用した。第8図に示す N_2 の密度において点線部分は外挿値である。 $\text{N}_2(v=1)$ の密

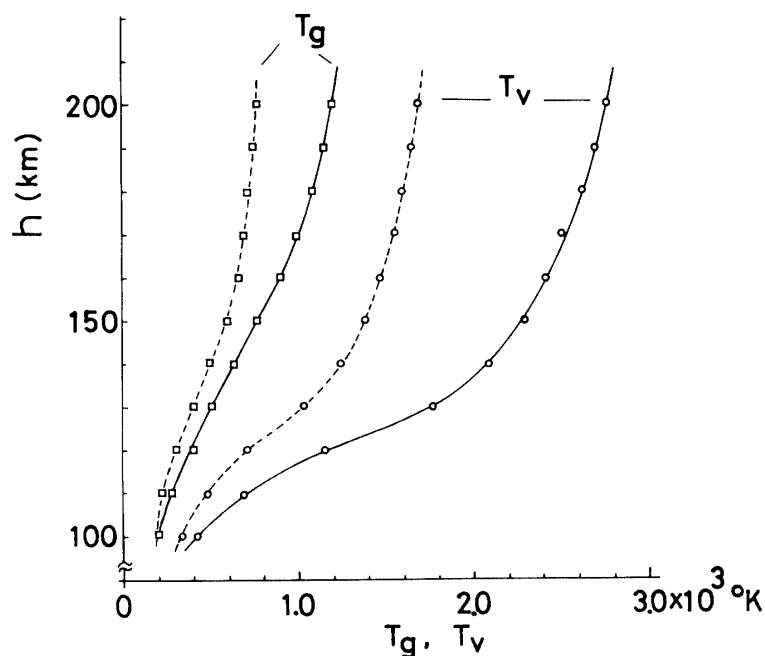


Fig. 7 Theoretical vibration temperature T_v and gas temperature T_g . Solid: high solar activity, dotted: low solar activity.

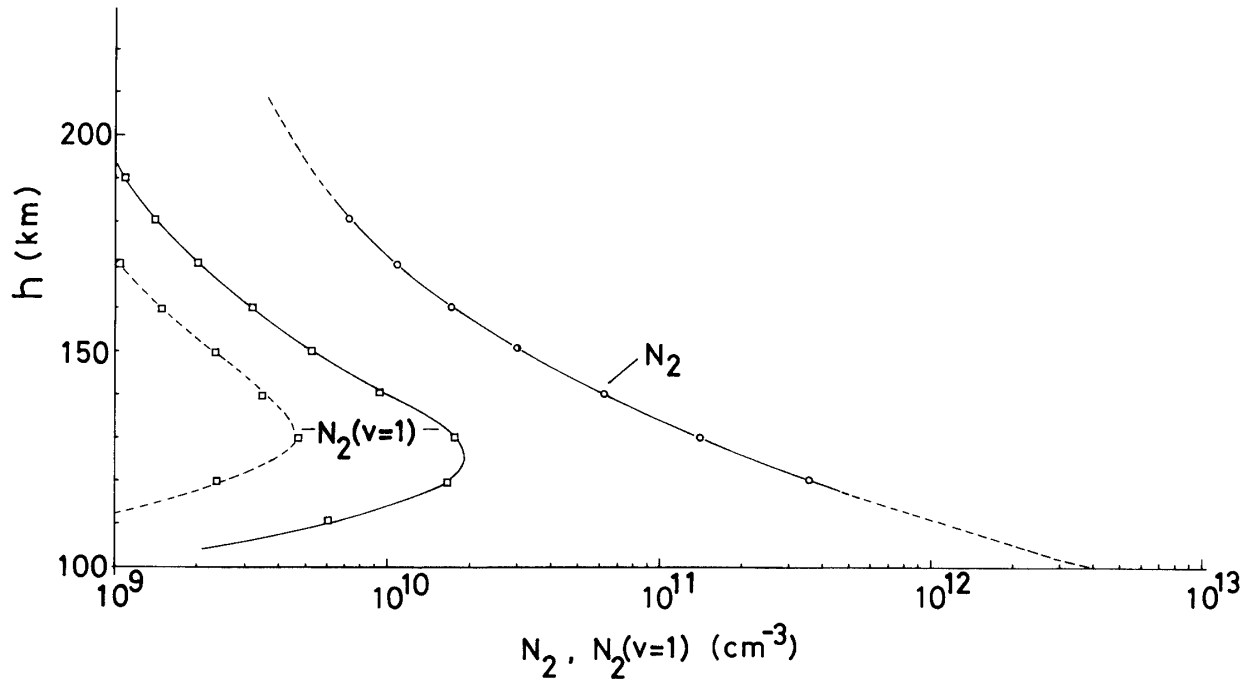


Fig. 8 Density of N_2 and calculated density of $N_2(v=1)$ vs. height h . Solid: high solar activity, dotted: low solar activity.

度は太陽活動度の大小に応じて4倍程の差が生じるが、 $h=120-150$ kmにかけて極大値を示す。これは低域では T_v が低いため、高域では N_2 の密度が下るためである。実験で $E_0=0.3$ eVに対応する非熱的電子のピークが得られたのは $h=110-160$ kmであるから、例えば太陽活動の低い場合 $N_2(v=1)$ の密度が 10^9 cm^{-3} 以上で反応(5)の影響が生じると考えると実験結果に対しある程度の説明が得られる。

次に、非熱的電子の生成率を計算する。脱励起衝突(5)の断面積 $\sigma_{1,0}$ は存在しないので、(5)の逆過程に対する断面積[17] $\sigma_{0,1}$ に詳細均衡の原理を適用する。即ち、

$$\sigma_{1,0}(E_1)J(E_0/E_1)\sigma_{0,1}(E_0) \quad (9)$$

ここで、 E_0, E_1 はそれぞれ非熱的電子および熱的電子のエネルギーで第2, 3図より $E_0=0.4$ eV, $E_1=0.1$ eVとする。これより $\sigma_{1,0}=2.3 \times 10^{-21}$ cm^2 が得られ、非熱的電子の生成率 γ は

$$\gamma = n\{N_2(1)\} \cdot n_e \cdot \langle \sigma_{1,0} v_e \rangle \quad (10)$$

で与えられる。ここで、電子密度 n_e は第9図に示す様に今回の実測値を採用し、電子の平均速度 v_e は第6図から計算した。 γ の高度分布を第10図に示す。 γ は $h=120-150$ kmで極大をもつことが分る。この γ の高度分布は観測結果より得られた非熱的電子の発生する高度範囲、108-165 km、(第3図参照)に対して比較的妥当な定性的説明を与える。しかし、

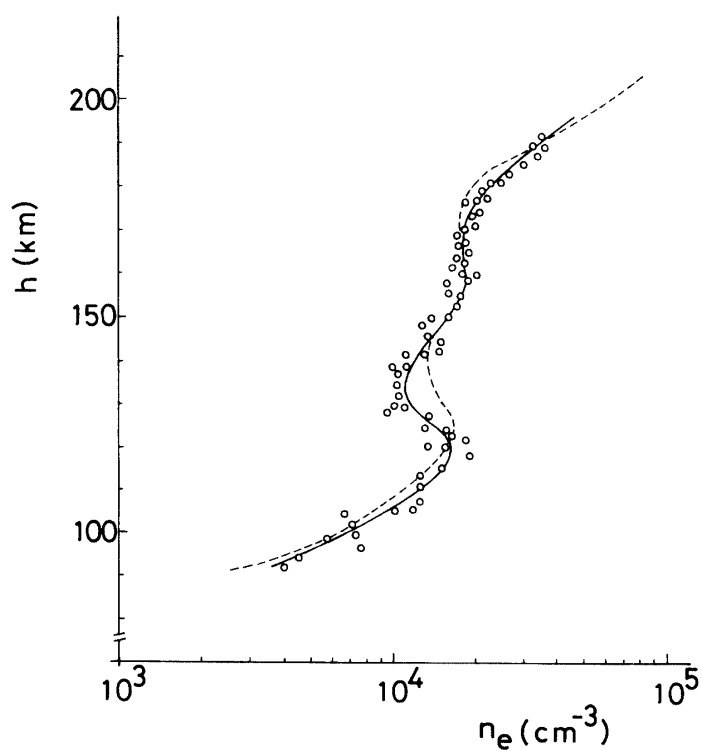


Fig. 9 Measured electron density n_e vs. height h (solid curve) in comparison with that by an impedance probe (dotted curve) [18].

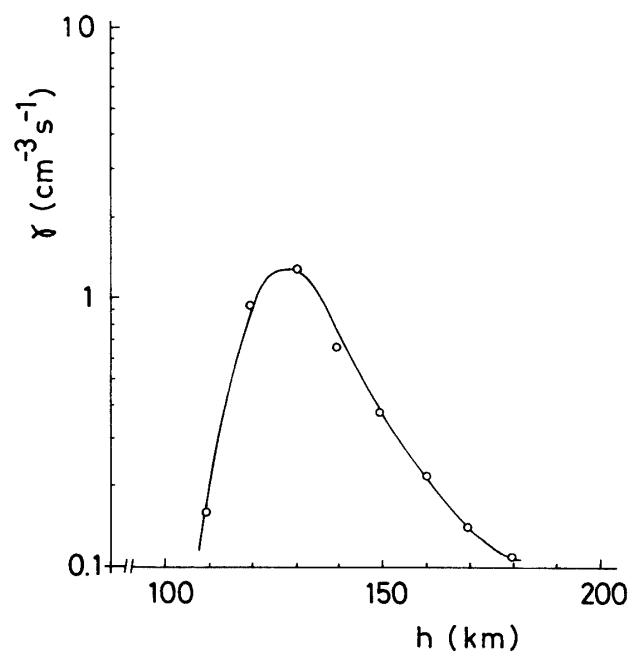


Fig. 10 Production rate γ of superthermal electrons vs. h .

$h > 150$ km, $h < 120$ km では γ の減少の仕方が急な印象を受ける。上記の計算では, (i) $N_2(v)$ がボルツマン分布に従う, (ii) $N_2(v)$ の損失は CO_2 との衝突で主として決まる, (iii) 光電子による励起率は一定の天頂角の値に固定する, 等単純化されたモデルが用いられている。さらに, (5)式では $v=1$ からの脱励起のみ考慮したこと, 振動温度の値がモデル値であることにより多少のくい違いがあるものと思われる。

5. 結 論

以上, S-310-14号機による日没時において見られた熱的電子の非マクスウェル分布特性, 特に低域における非熱的電子の存在について述べた。その発生機構を振動励起された N_2 の脱励起過程によるものと考え励起分子 $N_2(v=1)$ の密度の高度分布を計算した所実験的に非熱的電子が観測された高度と比較的良好一致を得た。上記推論は $N_2(v)$ の日変化が日没時に極大を示すという予測とも定性的に合致した。今後種々の時間帯での電子エネルギー分布の詳細な測定と並行して振動温度, 励起分子密度の測定が行われることにより電離層中の電子のエネルギー緩和機構が明らかになっていくことが期待される。

最後に, 本観測におけるプローブの作成に対し理化学研究技術部, 菅原正吾技師に感謝する。また, 観測器の製作に対し松栄電子株式会社堀江茂氏, 佐藤確吉氏に感謝する。

また, 分子衝突に関する討論に対し理化学研究所, 島村 勲氏に感謝する。

参 考 文 献

- [1] P. B. Hays and A. F. Nagy: Planet. Space Sci. 21 (1973) 1301.
- [2] K. Oyama and K. Hirao: Planet. Space Sci. 24 (1976) 900.
- [3] O. Ashihara and K. Takayanagi: Planet. Space Sci. 22 (1974) 1201.
- [4] J. R. Jasperse: Planet. Space Sci. 25 (1977) 743.
- [5] K. Oyama and K. Hirao: Rev. Sci. Instr. 47 (1976) 101.
- [6] 雨宮, 小山, 平尾: 宇宙科学研究所報告 特9 (1984) 45.
- [7] 雨宮, 小山, 平尾: 宇宙科学研究所報告 16 (1983) 1.
- [8] J. C. G. Walker, R. S. Stolarski and A. F. Nagy: Ann. Geophys. 25 (1969) 831.
- [9] W. S. Varnum: Planet. Space Sci. 20 (1972) 1865.
- [10] R. H. Kummler and M. H. Bortner: Space Research 12 (1972) 711.
- [11] P. B. Hays and W. E. Sharp: J. Geophys. Res. 78 (1973) 1153.
- [12] T. Mukai and K. Hirao: J. Geophys. Res. 78 (1973) 8395.
- [13] G. P. Newton, J. C. G. Walker and G. P. Mantas: J. Geophys. Res. 82 (1977) 187.
- [14] J. D. George, S. P. Zimmerman and T. J. Keneshea: Space Research 12 (1972) 696.
- [15] A. F. Timothy, J. G. Timothy, A. P. Willmore and J. H. Wager: J. Atmos. Terr. Phys. 34 (1972) 769.
- [16] D. R. Hickmann and A. O. Nier: J. Geophys. Res. 77 (1972) 2880.
- [17] N. Chandra and A. Temkin: NASA Tech. Note TN D-8347 (1976) 1.
- [18] 渡辺勇三: private communication 1984.