

電離層 Dynamo 領域における電子の加熱に 関する予備的考察

小山 孝一郎・平尾 邦雄

Electron heating in the ionospheric dynamo region
(preliminary study)

By

Koichiro OYAMA and Kunio HIRAO

Abstract: Abnormal Temperature increase occurs around 11 O'clock in local time. Temperature increases sometimes up to 1,500 K, depending on the magnitude of the horizontal geomagnetic component. Temperature increase seems to decrease gradually toward evening. Joule dissipation in the ionosphere which is given by $Q_j = j^2/\sigma_3$ is not enough to explain the electron temperature increase. It is suggested that electron energy distribution is not maxwellian and at least $10^4/\text{cc}$ electrons must have high energy.

概 要

高度 100 km を中心としてあらわれる電子温度の高い層は Dynamo 領域を流れる電流による Joule 加熱の結果, energy 分布の High energy tail の Enhancement というこ
とで説明できるかもしれない. この電子温度の高い層は, 地方時 11 時ごろをピークとし
て夕方になるにつれ, きえてゆく傾向にある. 電子温度の上昇は磁場の変化分に関係して
いる.

1. 序

高度約 130 km 以下における電離層中の電子温度について報告されているものは少なく,
またプローブによる測定の場合, その結果は必ずしも正確ではない [1][2]. この高度では
電子温度は中性ガス温度にほとんど等しいとされてきた. R. H. Wand, F. W. Perkins [3] ら
は Arecibo における Thomson Backscatter の測定から 106 km 付近に中性温度より約 80°K
高い電子温度, イオン温度のピークがあることを報告している. かれらはこれを内部重力波
による Dynamical なヒーティングであり, 113 km にあらわれた温度最小はこの高度におけ
る水平方向の熱輸送の結果によるものと考えた. これにさきだち Hines [4][5] は内部重力
波と Tide による二つの Heating のメカニズムを議論した. W. H. Hooke [6] は Wand ら
の結果は Atmospheric Tide にともなう加熱によるものであろうと報告している.

一方磁気嵐時における高緯度地方の電離層中荷電粒子の温度上昇を電離層中の電場によって説明する試みがなされている [7][8][9][10]. 加藤 [11] は赤道 Dynamo 領域において Joule heating によって 2~300°K 程度の上昇が期待されることを報告している.

筆者らは 1970 年 1 月以来改良型の電子温度計 [12] による電子温度の測定を行ってきたが, その期間, 高度 105 km を中心とする厚さ約 10 km 程度の電子温度の異常に高い層が S-210-4, S-210-6, K-9 M-34, L-3 H-6 号機であいついで観測された. このような高い電子温度の層は, 地球磁場の H 成分がもっとも減少したとき, すなわち, Dynamo 領域の東西方向の電流が最も強く流れるとき, 最も顕著であるとおもわれ, 夕方になるにつれ中性ガス温度へ近づいているようにみえる. このような電子温度の高いかつシャープな層の存在は理論的にまだ予知されていないが, 電子温度の上昇が Dynamo 領域 [13][14][15][16] の電流により引き起こされるものと考えれば, 既存の理論ではこのような高い電子温度は説明できず, むしろ, 電流層中に生じた非熱的な電子の存在を考えた方が妥当とおもわれる.

2. 実験結果

電子温度の高い層を観測したロケット名と発射日の K_p , R_z , $F_{10.7}$ 等を表にするとテーブルのようになる.

ロケット名	発射日	発射時刻 JST	K_p index	$F_{10.7}$	R_z	E_0E (MHz)
S-210-4	1971/1/16	11:00	3 ⁻	156.4	65	3.35
K-9 M-34	1971/1/24	11:00	2 ⁻	177		
L-3 H-6	1970/1/21	11:00	0 ⁺	177	120	3.4
K-9 M-32	1970/9/27	15:42	3 ⁺	145	87	3.55
S-210-6	1972/1/21	11:24	2 ⁻	127.9	78	

上記のうち, 本論文では 1972 年 1 月に発射された S-210-6 号機をのぞくロケットのデータを議論する. また上記ロケットのうちあげられた時間には内之浦での電離層観測装置は E_s layer をとらえていない.

図 1 は K-9 M-34 号機により得られた高度 100 km 付近の電子温度計の出力波形であり, この中で電子温度計の Reference 電極の検出する Floating 電圧にも上記のように Sporadic E layer の存在した形跡はみられない. 電子温度計の出力波形は高度 100 km をすぎた付近で明らかな異常を示している. このような波形は High energy tail の卓越した電子 Energy 分布を考えると一応納得できる. このような場合, 電子温度を定義することはできないが, 一応マクスウェル分布として電子温度のプロファイルを S-210-4, L-3 H-6 についても同じようにプロットすると第 2 図のようになる. 三つの観測データはいずれも高度 100 km をすぎた所で明らかなピークを示している. これらのうち, S-210-4 号機によるデータには 110 km を中心とする高い電子温度の層の下にもう一つの電子温度の高い層をみいだすことがで

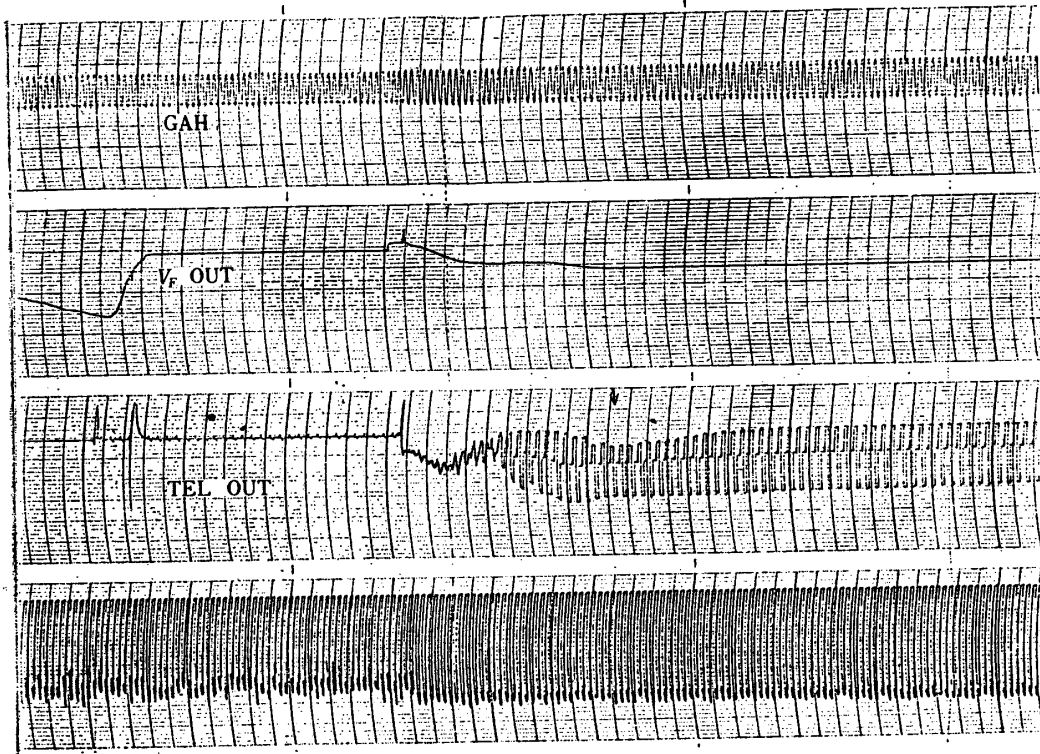


図 1 K-9M-34号機により得られた電子温度計の波形。
矢印の個所で零レベルが shift している

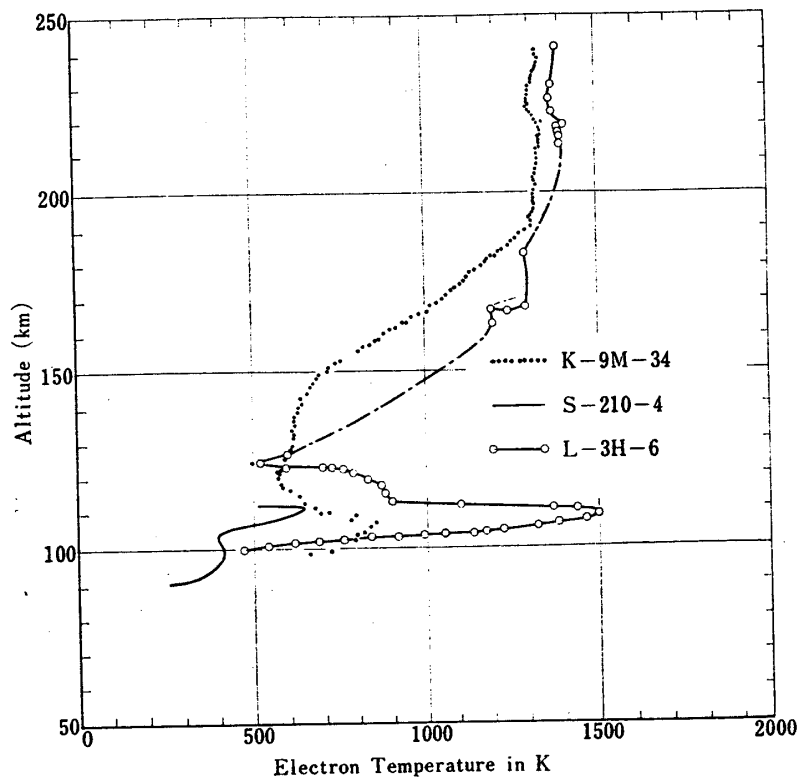


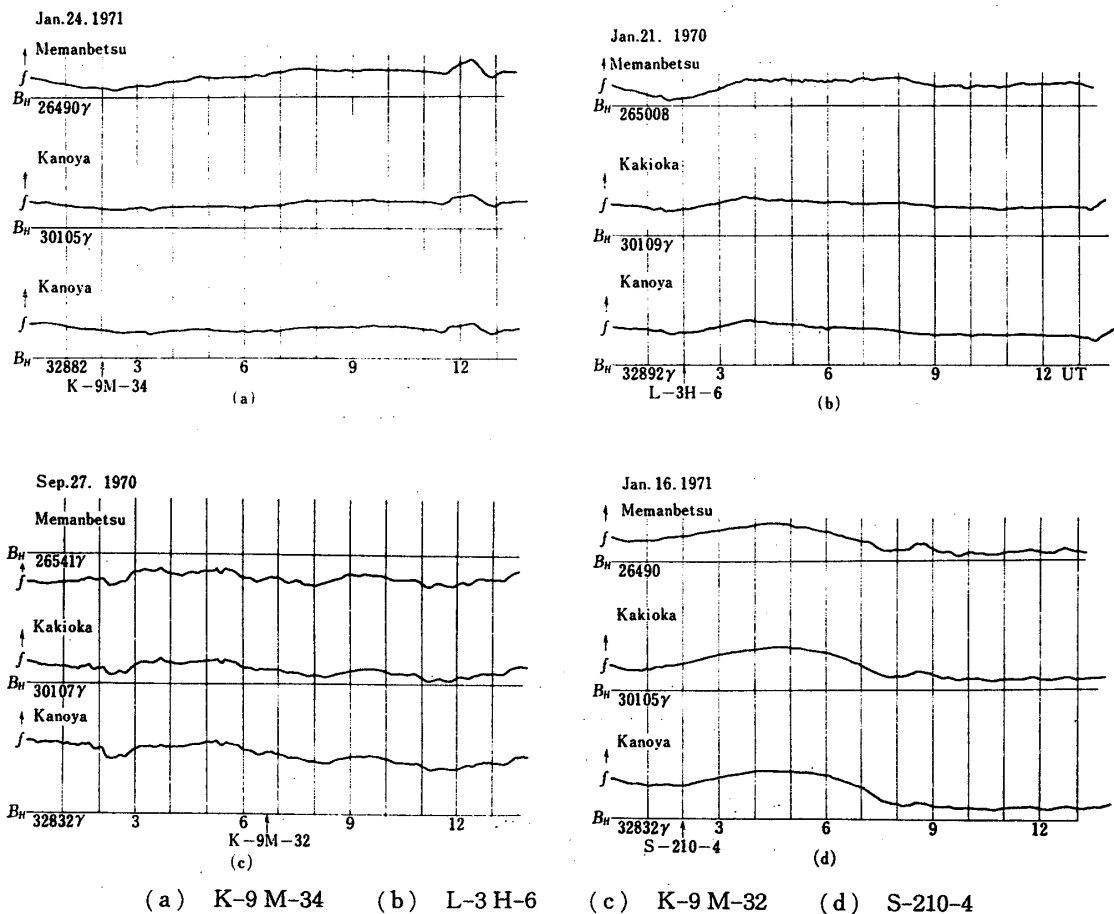
図 2 11時に観測された電子温度の高い層

きるが、これについては後述する。

図3には女満別 (Geographic $43^{\circ}54'30''$ N, Geomagnetic $+34 \cdot 0^{\circ}$), 柿岡 (Geographic $36^{\circ}13'51''$ N, Geomagnetic $+26 \cdot 0^{\circ}$), 鹿屋 (Geographic $31^{\circ}25'14''$ N, Geomagnetic $+20 \cdot 5^{\circ}$) のロケット発射日の地磁気の H 成分を示してある。これらのデータから Dynamo 電流の focus [17] の位置をしることは困難であるが*, 発射日の鹿屋のデータにおいて, それぞれのロケットに共通でかつ注目すべきことは, 電子温度の高い層は, H 成分が最少になる付近で生じていることである。このことを考えると電子温度の高い層は Dymamo 電流と関係があると推測せざるを得ない。

さらに図4には鹿屋における地磁気の D, H 成分から磁場の変化分をとり出し, そのベクトルの向きと大きさを計算した結果が示されている。図5には図4から得られたベクトルの大きさと電子温度の上昇のぐあいが示されている。

また図6には K-9 M-32 号機で同時に観測された電流の高度分布 [18] と $(T_e - T_n)$ [19] の関係が示されている。さらに図7には K-9 M-34 号機による磁場の測定結果が示されてお



(a) K-9 M-34 (b) L-3 H-6 (c) K-9 M-32 (d) S-210-4

図3 女満別, 柿岡, 鹿屋のロケット発射日の H 成分

* 柳原氏私信

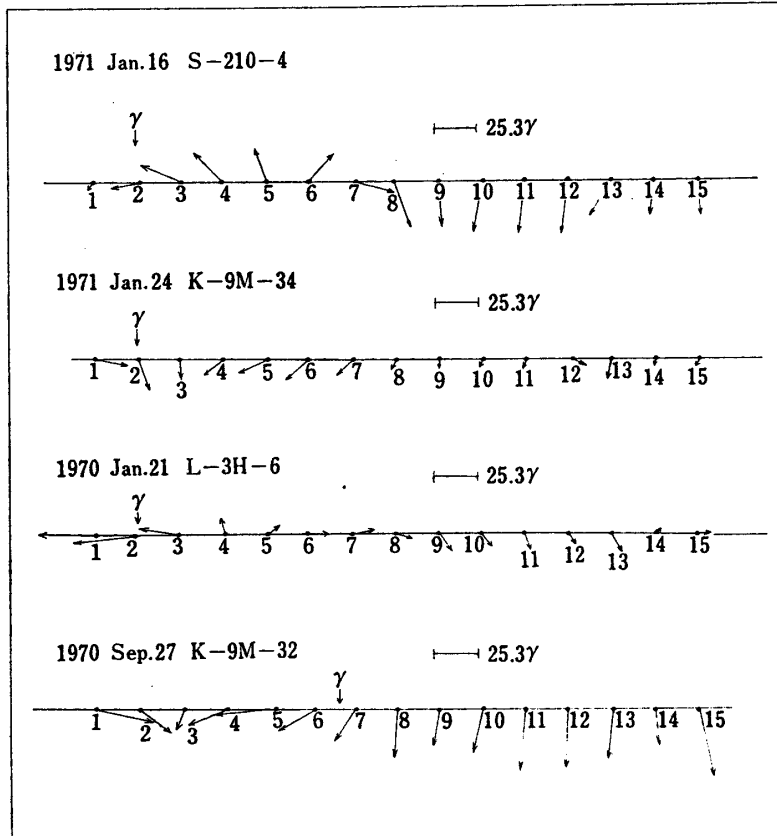


図 4 ロケット発射日の日変化電流によるおもわれる磁場のベクトル
横軸上の数字は UT を表わす

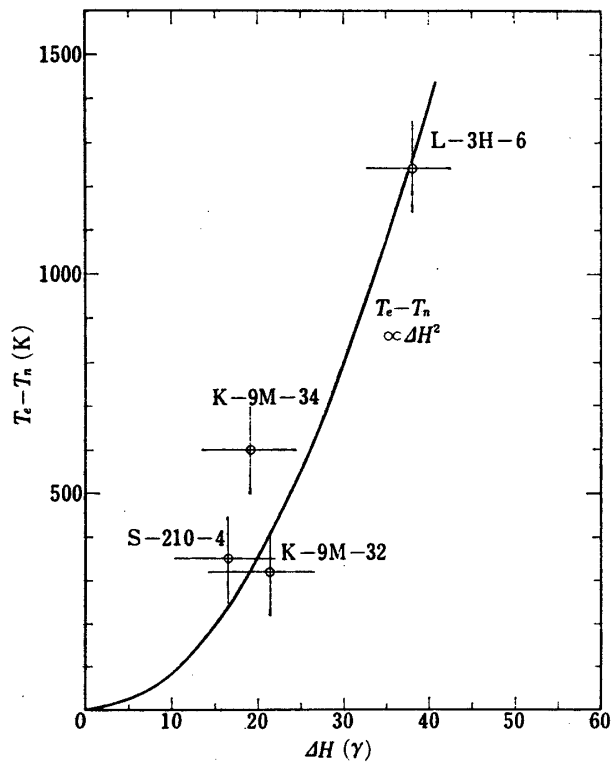


図 5 地方時 11 時における磁場ベクトルの大きさと電子温度の上昇分との関係

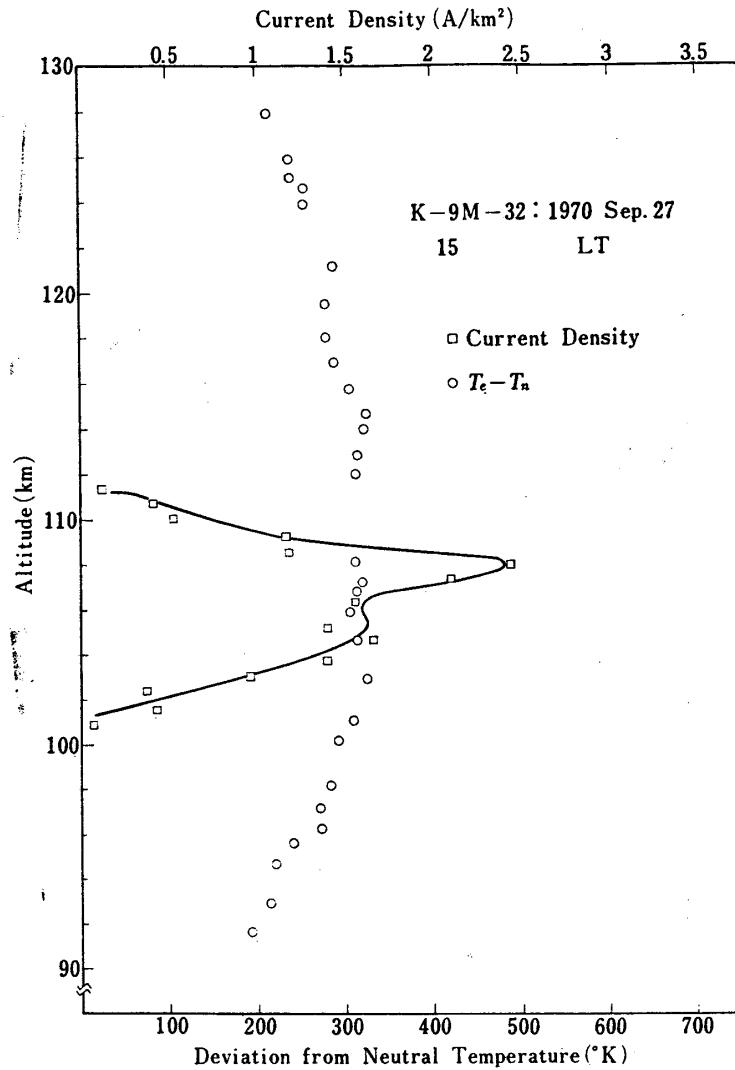


図 6 K-9M-32号機における磁場と電子温度の同時観測

り、電流は約 108 km 付近を中心にながれていると考えられるが、これは電子温度最大の点とかなり一致している。

以上述べきたったように Dynamo 領域における電子温度の上昇は地球磁場の水平成分と密接な関係にあり、以下ではこれらの電子温度上昇を Dynamo 領域を流れる電流による抵抗損で説明しようとする試みについて議論する。

3. 議 論

3.1 地磁気変動の基準線のとり方について

図 4 に基準線からの H, D 成分のずれから電離層電流によるとおわれる磁場のベクトルが示されたが、この場合、基準線をどこに設定すべきかは重大でかつ、いまだ解決されていない問題であるが、ここでは L-3H-6 号機については 1970 年 1 月の地磁気変動の静かな日

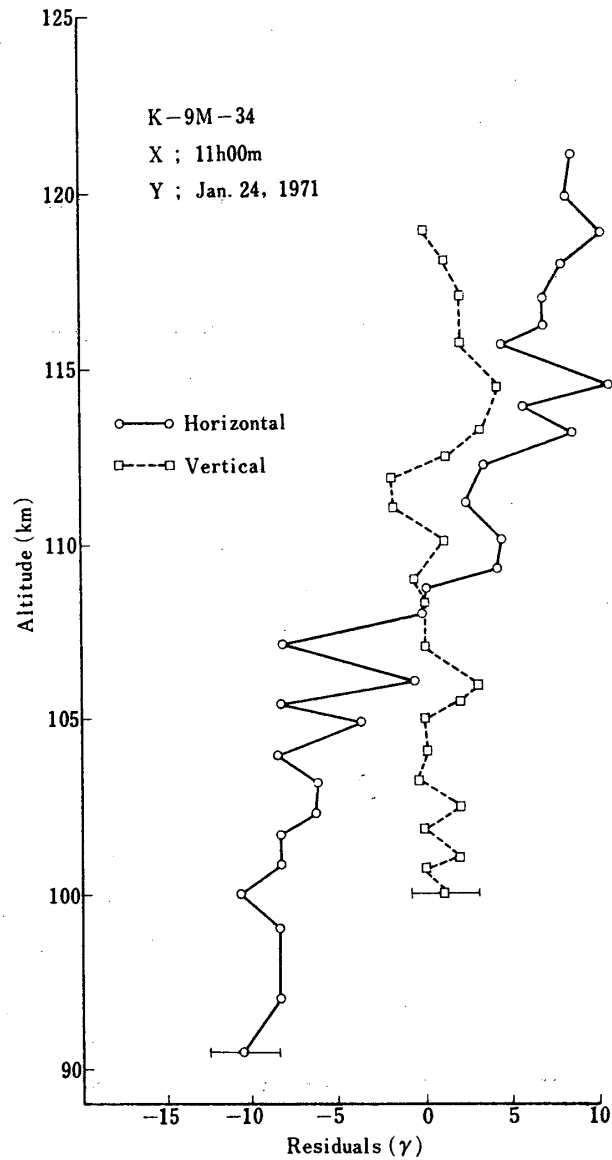


図 7 K-9M-34号機における磁場のデータ
(図 2 の K-9M-30号機による電子温度プロファイルを参照)

々の日本標準時 24 時の H 成分, D 成分の平均 32941γ , $4^\circ 703'$ を基準にとる. この値は 1970 年 1 月 21 日 (L-3H-6 号機発射日, $K_p=0^+$) 日本標準時 24 時の値が H 成分 32943γ , D 成分 $4^\circ 700'$ であることを考えると一応妥当な値と考えてよいと思われる. S-210-4, K-9M-34号機については 1971 年 1 月の静かな日々の日本標準時 24 時の H 成分, D 成分の平均をベースに, K-9M-32 号機については 1970 年 9 月の資料から同じように算出した.

3.2 Dynamo current による Energy input [8][9][15][18]

高度 105 km 付近においてあらわれる電子温度の高い層が抵抗損によって説明できるかもしれないことをのべた. 本節では抵抗損による熱量によって電子温度の上昇を説明できるかを議論する.

Joule heating による熱量 Q は

$$Q = \vec{I} \cdot \vec{V} = \vec{I} \cdot \frac{\vec{I}}{\alpha} = \vec{I} \cdot [\sigma]^{-1} \vec{I} = (I_x, I_y) \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ -\sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix}$$

$$= \frac{(I_x, I_y)}{\Delta} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{yy} I_x - \sigma_{xy} I_y \\ \sigma_{xy} I_x + \sigma_{xx} I_y \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} (\sigma_{yy} I_x^2 + \sigma_{xx} I_y^2)$$

$$\Delta = \sigma_{xx} \sigma_{yy} + \sigma_{xy}^2$$

ここで $\sigma_{xx} = 3 \times 10^{-16}$, $\sigma_{yy} = 3 \times 10^{-16}$, $\sigma_{xy} = 6 \times 10^{-5}$ でかつ K-9 M-32 号機により得られた電流密度 $I_y = 2.5 \text{ A/km}^2$ を考慮すると

$$Q \approx 10^4 \text{ eV/cm}^3/\text{sec}$$

ここで

$$\sigma_{xx} = \frac{\sigma_0 \sigma_1}{\sigma_0 \sin^2 \phi + \sigma_1 \cos^2 \phi}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma_0 \sigma_2 \sin \phi}{\sigma_0 \sin^2 \phi + \sigma_1 \cos^2 \phi}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_0 \sigma_1 \sin^2 \phi + (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \cos^2 \phi}{\sigma_0 \sin^2 \phi + \sigma_1 \cos^2 \phi}$$

ϕ は Geomagnetic Dip angle

一方電子に与えられた energy は中性分子, 原子との衝突によってそのエネルギーをうしなうが, その Loss L は [20][21][22][23][24][25]

$$L = L_{ei} + L_{es} + L_{e0}^*$$

ここで L_{ei} は電子のイオンとの衝突による loss で 0^+ の場合

$$L_{ei} = 4.8 \times 10^{-7} n_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2} \text{ eV/cm}^3/\text{sec}$$

と表わされる.

L_{es}, L_{e0}^* に関しては

$$L_{es} = n_e \{ 2.47 \times 10^{-18} [\text{O}] (T_e - T_n) T_e^{1/2} + 1.71 \times 10^{-19} [\text{N}_2] (1 - 2.1 \times 10^{-4} T_e) (T_e - T_n) T_e$$

$$+ 1.21 \times 10^{-18} [\text{O}_2] (1 + 3.6 \times 10^{-2} T_e^{1/2}) (T_e - T_n)^{1/2} + 3.1 \times 10^{-14} [\text{N}_2] (T_e - T_n) T_e^{-1/2}$$

$$+ 10^{-13} [\text{O}_2] (T_e - T_n) T_e^{-1/2} + 2.46 \times 10^{-17} [\text{He}] T_e^{1/2} (T_e - T_n)$$

$$+ 9.63 \times 10^{-16} [\text{H}] (1 - 1.35 \times 10^{-4} T_e) (T_e - T_n) T_e^{1/2} \text{ eV/cm}^3/\text{sec}$$

$$L_{e0}^* = (5.92 - 4.68 \times 10^{-4} T_e) (9.06 + 6.57 \times 10^{-4} T_n) \times 10^{-25} n_e [\text{O}] \times (T_e - T_n) / T_n$$

$$\times \frac{1}{1.6 \times 10^{-12}} \text{ eV/cm}^3/\text{sec}$$

これらの Loss 項のうち, 100 km 付近で圧倒的に寄与するのは O_2 による rotational excitation による Loss で

$$L = 10^{-13} [\text{O}_2] [T_e - T_n] T_e^{-1/2}$$

において

$$T_e - T_n = 300^\circ \text{K}, T_e = 600^\circ \text{K}, n_e = 10^5 \text{ ele/cm}^3, [\text{O}_2] = 10^{12}$$

とすると

$$L \doteq 10^5 \text{ eV/cm}^3/\text{sec} \text{ となり}$$

Joule 加熱によって説明できるか、できないかの瀬戸ぎわである。しかしながら、たとえば約 1 割の電子、すなわち 10^4 ele/cm^3 が高い電子温度をもっているとすると、 $L=10^4 \text{ eV/cm}^3/\text{sec}$ となり、熱収支上はあわせることができる。

したがって、高度 100 km 付近の高い電子温度を既存の理論で説明するためには Energy 分布の High energy tail の Enhancement を仮定する必要がある。

一方、理論的な Conductivity の幅にくらべ観測された電流層の幅が極端にせまいことを考えると、既存の理論が必ずしも十分であるとはいえず、Energy 分布のひずみを仮定する必要があるかもしれない。

3.3 電子温度ピークのあらわれる時間について

電子温度のピークは 11 時ごろを中心に比較的せまい時間帯であらわれているようにみえる。電子温度の高い層は Dynamo 領域の電流が強いときに最も顕著であるようにみえる。したがって電子温度の高い層のあらわれる時刻は地磁気の H 成分が最も減少する時刻から予想できるであろう。図 8 は東西方向の電流による磁場が最も強くなる時間確率を示したものである。46 年 10 月 28 日から 47 年 4 月 16 日までの、Storm で日変化がわからない日をのぞいた約 160 日間のデータから得られた結果は 9 時 30 分から 10 時 30 分に電子温度のピークが最大になる可能性が最も強いことを示している。

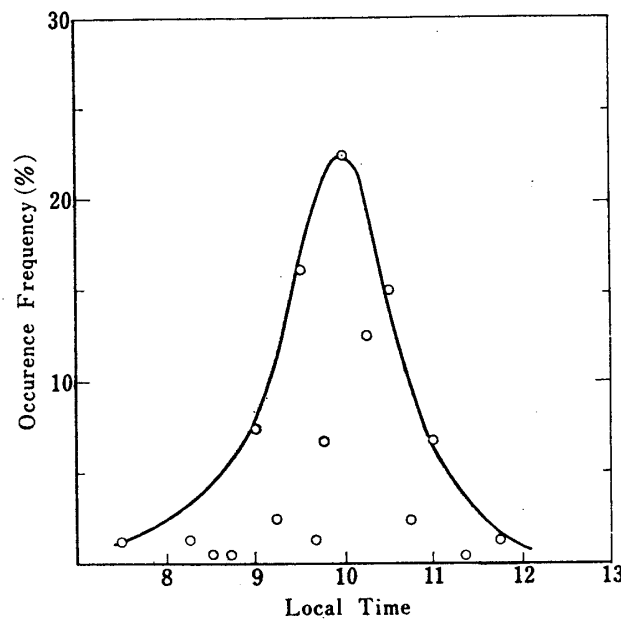


図 8 電流が最大になる時間を約 160 個のデータについて分類したもの

4. 結 論

高度 100 km 付近に 11 時ごろあらわれる電子温度の高い層は Dynamo 領域を流れる電流による加熱ということと説明できるとおもわれる。ここでは 4 例を示したにすぎないが、この考えは今後の電子温度測定によって、さらに詳細には磁力計による磁場測定、電子密度の

同時観測によってひきつづいて確められるであろう。ここでは今まで注目されなかった電流による Dynamo 領域の加熱が電子温度の上昇を伴うかもしれないことを示したが、このような、電子温度の層を注意深く調べることにより、電流層の幅、電流の強さ等を行うことができるかもしれない。また S-210-4 号機により観測された二つの電子温度のピークは電流層が二つに分かれて流れていることを示唆していると考えられ、小川、藪崎も 90 km 付近に小さな磁場の変動を報告している。また電子温度上昇分の測定による電場測定の可能性も否定できない[11]。

謝 辞

地磁気データに関する有益な Comment を下さった気象庁地磁気観測所所長柳原一夫氏、同所大和田真一氏、有益な助言をいただいた本研究所西田篤弘助教授、京大工学部前田憲一、加藤 進教授に深甚の謝意を表す。K-9 M-34 号機に関しては東海大学、青山 徹助教授、遠山氏、K-9 M-32 号機に関しては京大小川教授、藪崎氏等の磁力計のデータを提供していただいた。おわりに本研究所伊藤富造、河島信樹両助教授の日頃の御激励に対して深く謝意を表す。

1972年8月31日 新設部(科学)

参 考 文 献

- [1] K. Hirao and K. Oyama; Electron temperature observed with the Langmuir probe and Electron Temperature probe, J. Geomag. Geoelect., 23, 161~167, 1971.
- [2] K. Hirao and K. Oyama; A critical study on the reliability of electron temperature measurements with Langmuir probe, to be published in 1973.
- [3] R. H. Wand and F. W. Perkins; Radar Thomson Scatter Observations of Temperature and Ion-Neutral Collision Frequency in the E region, J. Geophys. Res, 73, 6370, 1968.
- [4] C. O. Hines; Dynamical Heating of the upper Atmosphere, J. Geophys. Res, 70, 177, 1965.
- [5] C. O. Hines; The upper atmosphere in motion, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 89, 1, 1963 a.
- [6] W. H. Fooke; Radar Thomson Scatter Observations of E-Region Temperatures Interpreted as Revealing Reversible Heating by Atmospheric Tides J. Geophys. Res., 74, 1870~1872, 1969.
- [7] M. H. Rees and J. C. G. Walker; Ion and electron heating by auroral electric fields, Ann. Geophys., 24, 193, 1968.
- [8] K. D. Cole; Joule heating of the upper atmosphere Austrian Jour., 15, 223~235, 1962.
- [9] K. D. Cole; Joule heating of the ionosphere over Haley Bay, Nature, 199, 444, 1968, 1963.
- [10] S. C. Chang; Joule heating and winds due to Geomagnetic Disturbance, Space Research, XII, 1971.
- [11] S. Kato; Joule heating at the magnetic equator, planet. Space Sci. 11, 1297, 1963.

- [12] K. Hirao and K. Oyama; An improved type of electron temperature probe; *J. Geomag. Geoelect.*, 22, 393, 1970.
- [13] J. D. Tarpley; The ionospheric wind dynamo-II, *Planet. Space Sci.*, 18, 1091~1103, 1970.
- [14] S. Matsushita and J. D. Tarpley; Effects of Dynamo-Region Electric Fields on the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 75, 5433~5443, 1970.
- [15] R. J. Stening; Joule heating and the excitation of thermotidal modes in the dynamo region, *Planet. Space Sci.*, 1970, 18, 423~430, 1970.
- [16] S. Matsushita; Dynamo current, winds, and electric fields, *Radio Sci.*, 4, 771~780, 1969.
- [17] M. Hasegawa; On the position of the Focus of the Geomagnetic Sq Current System, *J. Geophys. R.*, 65, 1437~1447, 1960.
- [18] 藪崎, 塚田, 小川; K-9 M-32 号機による磁場観測, *宇宙研報告*, 7 卷 1 号, 101, 1971.
- [19] L. G. Jacchia; Revised static Models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles, *S. A. O. Special report* 332, 1971.
- [20] A. Dalgarno and T. C. Degges; Electron cooling in the upper atmosphere, *Planet. Space Sci.*, 16, 125, 1968.
- [21] A. Dalgarno, M. B. McElroy and J. C. G. Walker; The diurnal variation of Ionospheric Temperatures, *Planet. Space Sci.*, 15, 331, 1967.
- [22] L. H. Brace, H. G. Mayr and G. R. Carignan; Measurements of Electron Cooling Rates in the Midlatitude and auroral-zone Thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 74, 257, 1969.
- [23] P. Banks; Collision frequencies and Energy transfer electrons, *Planet. Space Sci.*, 14, 1085, 1966.
- [24] K. Takayanagi and Y. Itikawa; Elementary processes involving Electrons in the ionosphere, *Space Sci. Reviews*, 11, 380, 1970.
- [25] J. R. Herman and S. Chandra; The role of atomic oxygen in the ionospheric E-and F-region Behavior, *Planet. Space Sci.*, 17, 1247, 1969.