

Auroral-Electrojet の問題点

飯 島 健*

Some Comments on the Auroral-Electrojet Formation

Takesi IJIMA*

Abstract: The essence of the auroral-electrojet is an association with the rapid motion of the aurora. We estimate the three-dimensional current distribution based upon the change of 4278 Å line aurora observed at Syowa Station by HIRASAWA (1971). The auroral luminosity change (the local change plus the change due to the movement) implies the disturbance in the ionosphere electron density distribution over the auroral oval, which is directly associated with the field-aligned current. The ionosphere and magnetosphere electric field is eventually strained and results in the westward ionosphere current asymmetric with respect to the center of the arc (intense in the poleward side and weak in the equatorward side) presumable for the observed ΔH distribution over the auroral oval.

1. は し が き

地上で観測する時, polar disturbance の substorm らしさは aurora が急に明るくなって激しい運動を始め, 地磁気が大きく乱れていわゆる auroral-electrojet が発達していくことで言いあらわされる. 実はこういう事件が起こる前には下地になる先駆的現象が現われ, 特に磁気圏では background が徐々に励起されていくことが最近明らかにされつつある. これが substorm の growth phase であり, auroral electrojet の breakup を把む上で重要な過程である. この新しい流れはさておき, substorm の研究の一つの焦点は, auroral electrojet の形成機構であり, 半世紀近くにわたって注目されてきたがいまだにその実体は判っていない. 主な原因は電離層 dynamo 領域をはじめ, 外圏大気の構造が十分観測されていないことと, どの model も定常状態を思想の基本にしているためである. Substorm が breakup を起こした後の変化は aurora が激しい運動をすることに現象の本質があると考え, 平沢(1971)による昭和基地での aurora 観測の結果を参考にして, aurora

* 東京大学理学部地球物理研究施設. Geophysics Research Laboratory, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo.

の変化より期待される auroral-electrojet の分布を調べた結果、従来の model と異なり、観測される地磁気変動がよく説明できることが判った。

2. Auroral Motion に伴う Auroral-Electrojet

小口・永田 (1961) により実験的に確立された J (極光輝度) と n_e (電離層電子密度) の変化の関係より、auroral oval における aurora の輝度の緯度分布とその運動より、第一次近似的な n_e の時間・空間分布が知れる。 n_e 分布は source および sink を意味する auroral electron と proton の precipitation と cold electron の磁気圏への逃げ、さらには loss を意味する再結合効果とのかねあいである。この source-sink 効果の実体は field-aligned current であり、磁気圏赤道面ではそこでの convection の変化に伴う磁気圏電流 (主として分極電流) として姿を変えている。昭和基地で観測した 4278 Å line aurora の meridian-scanning data を基に n_e 分布とその変化を求めれば E-region での auroral-electrojet の分布が近似的に求まる。平沢・永田 (1971) によれば aurora はその変化により 2 個の type に分けられる。すなわち traveling aurora と stationary aurora である。これを model 化すると、traveling aurora (AEJ-1) は振幅は時間的にほぼ一定でその peak の位置が V_e ($\sim 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) で poleward に伝播する。振幅の緯度分布は sin 型で peak を中心に南北に各 100 km の幅をもつ。Standing aurora (AEJ-2) は振幅が周期 2 hours 程度の sin 型変化をし、その peak はいつもほぼ oval の中心にある。振幅の最大値は traveling aurora のその約 1/2 である。電離層 dynamo 領域での height-integrated n_e は

$$n_e(x, t) = 2\Delta n_e^0 \sin \pi \left\{ \frac{1-x+(5-V_e t)}{2} \right\} + \Delta n_e^0 \sin \pi \left(\frac{t}{T_0} \right) \sin \left(\frac{x+5}{10} \right)$$

座標系として equatorward を x , westward を y , vertical downward を z にとる。Oval は $x=0$ を中心に ± 5.0 の範囲とする。長さの unit は 100 km である。 n_e , height-integrated ionosphere current (I), field-aligned current (j_{11}) および 磁気圏電流は次の諸関係で結ばれる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial n_e}{\partial t} + V_e \frac{\partial n_e}{\partial x} = a F_{in}^e + b F_{in}^p - F_{out}^e - \alpha n_e^2 \\ j_{11} = e F_{in}^p + e F_{out}^e - e F_{in}^e \\ \left\{ \begin{array}{l} I_x = \sum_p E_x^{eff} - \sum_H E_y^{eff} \\ I_y = \sum_H E_x^{eff} + \sum_p E_y^{eff} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} E^{eff} &= E + \frac{kT}{en_e} \nabla n_e \text{ (運動系よりみて)} \\ j_{11} &= \text{div } \mathbf{I} \simeq \frac{\partial I_x}{\partial x} \\ \int j_{11} dx &= -C_M \left(\frac{\partial E_x^M}{\partial t} + V_x^M \frac{\partial E_x^M}{\partial x} \right) \end{aligned} \right.$$

但し、 F_{in}^e , F_{in}^p , F_{out}^e は各々、precipitating electron flux, proton flux および runaway cold electron flux, a, b は precipitation により生成される ion-electron pair 数, C_M は F -layer より磁気圏赤道面にかけての total capacitance, E_x^M , V_x^M は磁気圏赤道面での電場および convection 速度である. ここでは $F_{in}^p \ll F_{in}^e$, F_{out}^e と考え、dynamo 領域と磁気圏境界では F_{in}^e と F_{out}^e の oval 幅全体にわたっての積分は等しいと考える. これにより j_{11} の分布がきまる. 10 keV 程度の auroral electron を考えて $a \simeq 250$ とし観測結果を基に次の様な境界値を仮定した. n_e^0 (oval の外側での電子密度) = 10^{14} m^{-2} , $\Delta n_e^0 = 25 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$, $V_e = 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $P = H = 10^{-15} \text{ mho} \cdot \text{m}^2$, $C_M = 30 \text{ farad}$, $\alpha_e = 4 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $E_x^0 = \text{oval の外側で与えられる南北方向の電場} = 10 \text{ V} \cdot \text{km}^{-1}$ (電離層 dynamo 運動は除外して考えた). Aurora が oval の equatorward boundary ($x=5.0$) で breakup を始めてから, 500 s 後の 3次元電流密度分布を求め図1に示す. 従来の model では説明しきれなかった次の点が説明できる. ①aurora arc の中心から見て poleward 側で ΔH 減少が大きく, equatorward で ΔH 減少が小さいという arc を中心とし

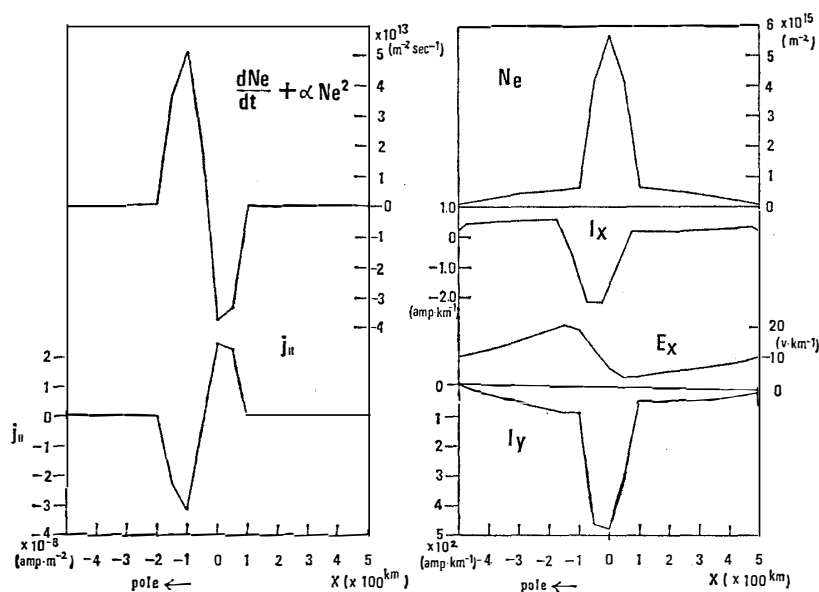


図1 Auroral motion に伴う 3次元電流密度分布. Breakup 後 500 sにおける状態

た南北の非対称性 (平沢・永田, 1971 の観測結果), ②arc 中に現われる南北方向の電場は arc の中心とその近傍で弱く poleward 側で強い (WESCOTT *et al.*, 1969). 特に重要な点は aurora 運動に伴う電子密度分布の変化を保持するため field-aligned current が流れ, これを作るために磁気圏での電場分布が歪み, その結果, 電離層の westward current I_y の分布が arc を中心に非対称になることである. なお n_e の勾配による電場の歪みは十分小さい ($\approx 0.01 \text{ V}\cdot\text{km}^{-1}$).

3. ま と め

これまで提唱されている定常 model と異なり, AEJ の 3 次元的形成には aurora の運動が本質的一面をもつ事が知れた. Arc が poleward expansion をしている breakup phase では arc の中心よりみて equatorward 側に field-aligned current が流入し, arc を横切って poleward ionosphere current が流れ, arc の poleward 側より磁気圏に流出する電流系と, これに随伴する arc の中心で最も強く, その poleward 側と equatorward 側で非対称な westward ionosphere current を合せたものが traveling aurora に伴う AEJ-1 の実体であろう. Arc の poleward expansion がやみ, equatorward にゆっくり戻りかけ全体的にはほぼ定在的で単に輝度だけが変わっていく post-breakup phase では上と逆向きの field-aligned current が加わり, 全体的には oval の最北端, 最南端より多く流入し, arc の中心で最も強く流出する field-aligned current system と, arc の中心で最も強くそこから南北に対称的に弱くなっている westward ionosphere current で構成される. これが standing aurora に伴う AEJ-2 であろう.

ここでは aurora 運動を考えることが従来の model と異なり, より本質にせまることであることを示したが, auroral-electrojet の真の姿を把握するには, まず足元の polar ionosphere の構造を rocket 観測で十分に調べ, 基本的物理量の標準値を求めていくことが先決問題であると考えられる.

文 献

- HIRASAWA, T. and T. NAGATA (1971): Space-time variation of aurora and associated phenomena. Paper presented at symposium on morphology and physics of the magnetospheric substorms, Moscow.
- OGUTI, T. and T. NAGATA (1961): Interrelations among the upper atmospheric disturbance phenomena in the auroral arc. Rep. Ionos. Space Res. Japan, 15, 31.
- WESCOTT, E. M., J. D. STOLARIK and J. P. HEPNER (1969): Electric fields in the vicinity of

auroral forms from motions of barium vapor releases. *J. Geophys. Res.*, **74**, 3469-3487.

(1971年11月20日受理)