

## A slow mode wave as a cause of the primary acceleration of the aurora

坂 翁介 久留米高専  
藤田 茂 気象大学校  
**D.N.Baker Univ. Colorado**

### 1. はじめに

**Pi2** を伴う **Aurora breakup** を対象にして、磁気圏赤道面でのオーロラ粒子の1次加速についてMHDモデルを使って考察した。**Pi2** を **Slow Mode Wave** と捉えることにより、オーロラ粒子で未解決の「**Injection** プラズマ粒子のエネルギー依存性」<sup>1)</sup>の問題に示唆を与える事がわかった。

### 2. 観測 (Auroral precipitation, particle flux, Pi2)

**1. Auroral precipitation** と磁気圏赤道面での高エネルギー粒子フラックスが **Pi2** の周期で変調される例がしばしば観測される。変調は **Auroral precipitation** が強くなったとき、高エネルギー粒子フラックスが最大になるような関係で静止衛星の粒子データに現れる<sup>2)</sup>。

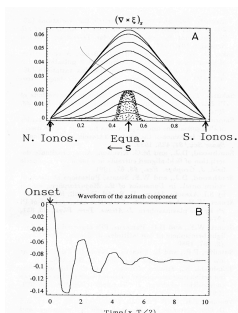
**2.** 粒子フラックスは **Pi2** 周期で変調を受けるが、数 **keV** を境にしてフラックスの変調に180度の位相ずれが起こる<sup>3)</sup>。

(1) と (2) の観測を組み合わせると、磁気圏赤道面での数 **keV** 以下のフラックスの減少は磁力線沿いのプラズマ損失であり、この損失粒子は途中で加速を受け地上ではオーロラとなって観測される。

### 3. Pi2 as a slow mode wave

静止軌道上における、粒子フラックスと磁場変動の研究から **Pi2** の励起の原因が粒子インジェクションに伴うプラズマ圧の増加に対する内部磁気圏磁場の過渡応答と捉えることが出来る。さらに過渡応答にはプラズマが内部磁気圏を地球側へ“押しこむ”効果と内部磁気圏へ“分け入り”二つの効果がある。これらは反磁性電流を形成しその結果夜側磁気圏に **Slow Mode Wave** を励起すると示唆されている<sup>4)</sup>。以上の視点から、**Slow mode** によるプラズマの、特に磁力線に沿う運動を調べる。

“分け入り” の **Simulation**<sup>4)</sup>



$$\frac{\partial^2}{\partial s^2} \left( \frac{\rho_0}{B^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\rho_0}{B} \right)_s \right) = \frac{\rho_0}{B} \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{1}{B^2} \right)$$

#### 4. 磁力線に沿うプラズマの運動

一般に **Injection** プラズマでは  $P_{\parallel}$  が  $P_{\perp}$  より大きい。このような圧力の **Asymmetry** が存在する場合、磁力線が収束する地球磁場の形状では、**Magnetic Mirror Force** が磁力線沿いの運動に寄与し、(1) 式が成立する。

$$m_0 \frac{dV_{\parallel z}}{dt} = -\frac{P_{\parallel 0}}{B_0} \frac{dB_{\parallel}}{dz} \quad (1)$$

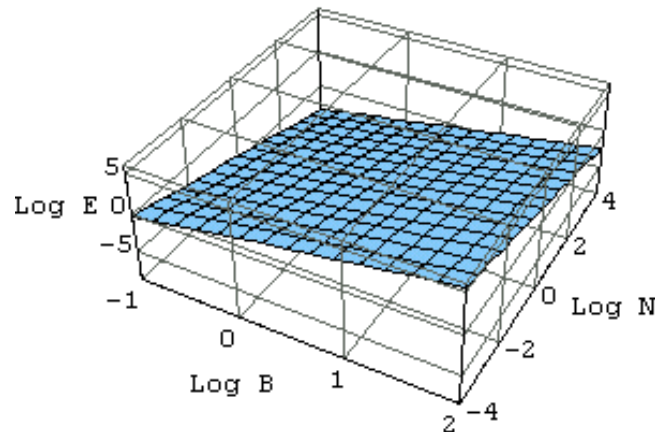
さらに、磁場の変動を Slow mode wave の条件下でプラズマ圧の変動に関連付けると (1) 式は最終的には、

$$m_0 \frac{dV_{\parallel z}}{dt} = (N_0 \frac{dP_{\parallel 0}}{dz} - P_{\parallel 0} \frac{dN_0}{dz}) \frac{1}{B_0} \quad (2)$$

と変形できる。

これから、磁力線沿いの運動は  $\mu = \frac{B_0}{m_0 N_0}$  で与えられる Magnetic moment から換算される

粒子エネルギー (zero acceleration energy) を境にして運動が異なる事がわかる。プラズマシートのパラメタ ( $B = 10^1 \text{ nT}$  and  $N = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ) を代入すると、このエネルギーは 5.1keV となる。この zero acceleration energy 面を粒子数 (N) と磁束密度 (B) の関数として表したのが下図である。



The plane of the “zero acceleration” energy  $E$  (keV) as a function of field magnitude  $B$  (nT) and number density  $N$  ( $\text{cm}^{-3}$ ). The particle energies above the plane are decelerated. The particle energy, field magnitudes, and number density are shown in logarithmic scale.

プラズマシートでは電子、イオンの粒子速度が局所的な Alfvén 波の速度を上回る。そのため、 $\pi/2$  の周期 (分) より短い “秒” のスケールでは電子とイオンの運動をある磁力線の形状に沿った定常流と捉えることが出来る。その事を次に示す。

### 5. Gases flow through a converging nozzle

“秒” のスケールでは (2) 式から時間微分の項が消える。その結果以下の式に変形できる。

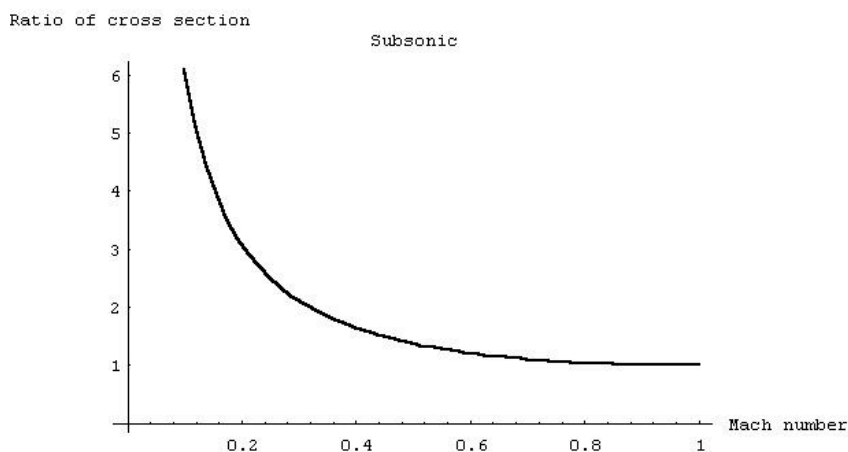
$$\rho(U \frac{\partial}{\partial z})U = \rho \frac{\partial P_1}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho U) = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\rho = N_0 \rho_0 \frac{\rho_0}{B_0} \approx 1$ ,  $U$  は磁場沿いの定常流とする。

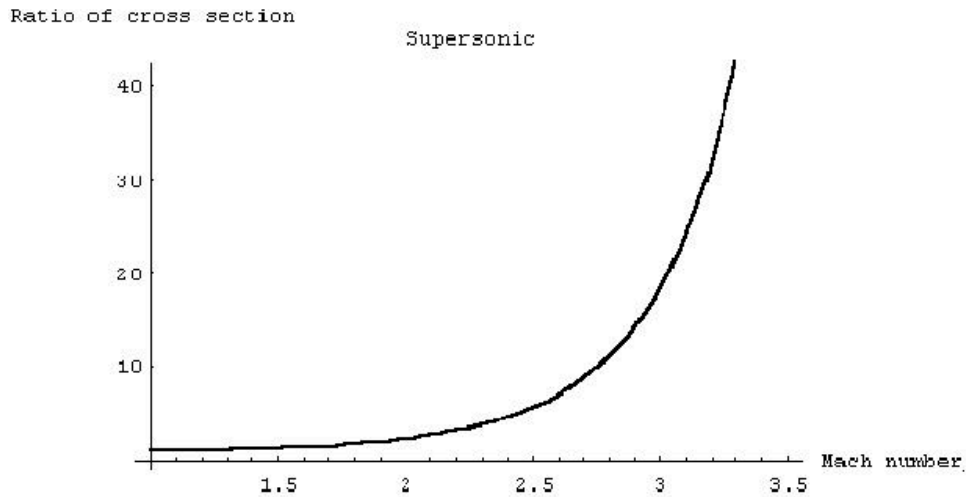
これは先細ノズルのなかの流れと同じで、それによると  $\alpha$  の符号によってノズルの中の流れの性質が異なる事がわかっている<sup>5)</sup>。

つまり、 $\alpha$  が負の場合は亜音速流、正の場合は超音速流として取り扱われる。これを流れの性質に直すと、 $\alpha$  が負の場合は非圧縮性流れとなり、流速はノズルの先端に向かい加速される (下図)。



**A subsonic case. Mach number of the flow is shown as a function of the ratio of the cross section. The flow is accelerated as a decrease of the cross section.**

しかし、正の場合は流れが先細ノズルの中で圧縮され逆に減速される (下図)。



**A supersonic case. Mach number of the flow is shown as a function of the ratio of the cross section. The flow is decelerated as a decrease of the cross section.**

## 6. 磁気圏プラズマの1次加速機構への応用

先細ノズルの中の流れの例を磁力線沿いの運動に当てはめると、5.1keV 以下のエネルギーを持つプラズマは地球方向へ磁力線に沿って加速され、それ以上のエネルギーを持つプラズマは磁気赤道面に閉じ込められたままであることが推察される。

磁気赤道面での磁力線に沿った圧力勾配の増加は  $\pi/2$  の周期で繰り返される。もしそのとき、圧力勾配が大きく加速が十分であり Ion と Electron の温度にそう違いが無ければ Ion は Electron より深く侵入し、地球近傍で2次加速を引き起こす事が出来よう<sup>6)</sup>。その結果、先細ノズルの中の低エネルギープラズマ流は Aurora として地上で観測される。

## 7. まとめと課題

Slow mode を記述するMHD方程式のなかにパラメタとしてエネルギーを導入し高いエネルギーを持つ場合と低いエネルギーを持つ場合では磁力線沿いの流れの特徴が異なる事を示した。さらに、“分”と“秒”の異なった時間スケールの **Dynamics** を組み合わせることによってプラズマシートの場合 5.1 keV より低いエネルギーの場合のみが磁力線沿いの損失に寄与することがわかった。

しかしながら現実の磁気圏プラズマは幅広いエネルギーからなる粒子の集団であるために、エネルギーをパラメタとした流体方程式を無条件に使うことは許されないであろうが位相

空間におけるプラズマの間での熱交換が重要でないような現象に関してはここでの結果が適用できると考えても大きな誤差はないと思える。

最後に、**Slow mode wave** が磁気圏内での一般的な存在として衛星によって直接観測されている最近の研究結果<sup>7)</sup> から鑑み、本稿で述べたオーロラ粒子の 1 次加速は **Pi2** 帯域に限定される事なく **Substorm expansion** に伴う **Aurora Breakup** という幅広い帯域を含む現象にも適用できるであろう。

## References

1. **Arnoldy and Moore, Longitudinal structure of substorm injections at synchronous orbit, JGR, 88, 6213-6220, 1983.**
2. Saka, O., O. Watanabe, K. Okada and D.N. Baker. A slow mode wave as a possible source of Pi 2 and associated particle precipitation: A case study. Ann. Geophysicae, 17, 674-681, 1999.
3. Arnoldy, R.L., Fine structure and pitch angle dependence of synchronous orbit electron injections, J.Geophys. Res., 91,13411, 1986.
4. Saka, O., H. Akaki, O. Watanabe and D.N. Baker. Ground-satellite correlation of low-latitude Pi2 pulsations : A quasi-periodic field line oscillation in the magnetosphere. JGR., 101, 15433, 1996.
5. 生井武文、松尾一泰, 圧縮性流体の力学 (理工学社、1995)
6. Sato, T., Auroral physics, in Magnetospheric plasma physics, edited by A. Nishida, D.Reidel, Tokyo, 1982.
7. Nakamizo, A., and T. Iijima, A new perspective on magnetotail disturbances in terms of inherent diamagnetic processes. J.Geophys.Res., 108, doi:10.1029/2002JA009400, 2003.