

# *Role of Whistler Waves in Magnetic Reconnection*

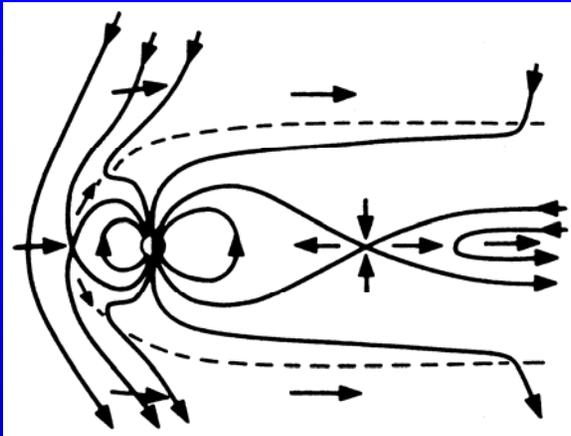
K. Fujimoto<sup>1,2</sup>, R. D. Sydora<sup>3</sup>, and T. Ogino<sup>1</sup>

1. STE Laboratory, Nagoya University
2. JSPS Research Fellow (PD)
3. Department of Physics, University of Alberta

“Whistler waves associated with magnetic reconnection”, *Geophysical Research Letters*, to be published in the next week.

# Magnetic Reconnection in Space

[ Magnetospheric substorms ]

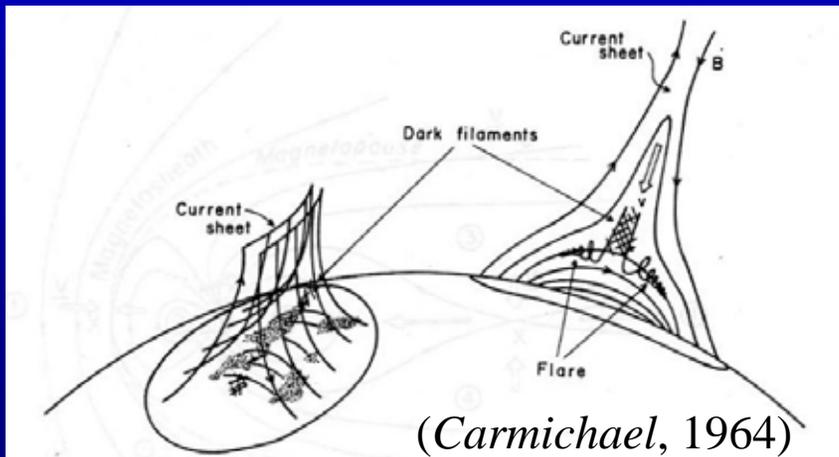


(Cowley, 1985)

- 爆発的なエネルギー開放を可能にする**効率的な磁気リコネクション**

$$E_{\text{rec}} \sim 0.1 V_{A0} B_0,$$

[ Solar flares ]



(Carmichael, 1964)

- 現象の時間スケールにわたって長時間持続する**定常的な磁気リコネクション**

数分 ~ 数時間

# Whistler Mediated Reconnection

## ➤ 理論

*Mandt et al. (1994), Biskamp et al. (1997),  
Shay et al. (1999), ..., Drake et al., (2008)*

ホイッスラー波分散関係

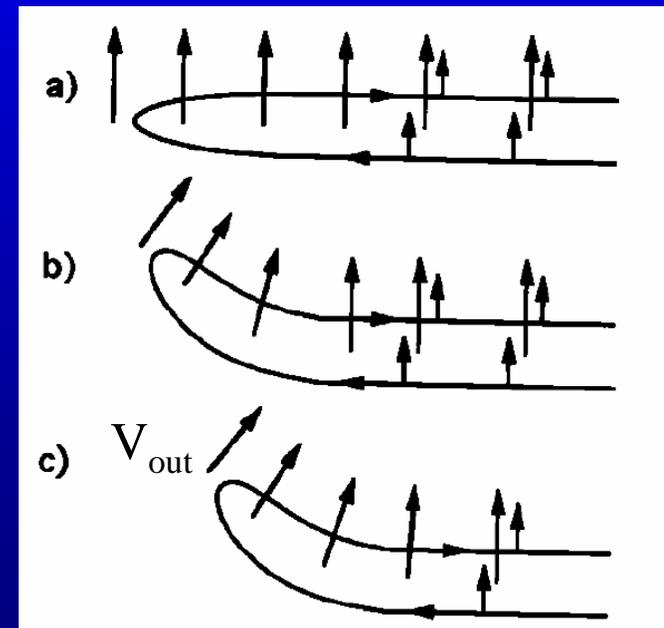
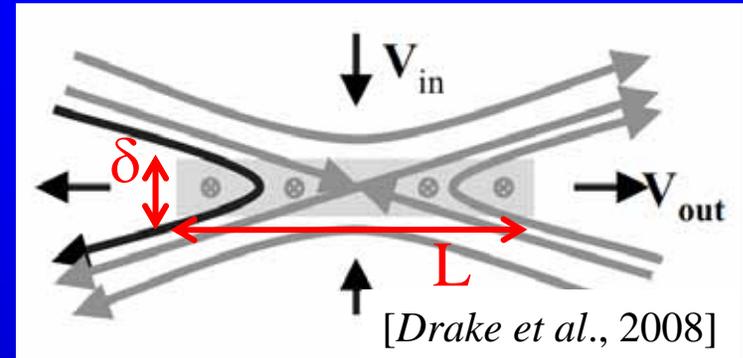
$$\omega = k^2 \lambda_e V_{Ae}$$

電子の加速

$$V_{out} \sim \omega/k \sim V_{Ae} \quad (k \sim 1/\delta \sim 1/\lambda_e)$$

リコネクション効率

$$E_{rec}/V_{A0}B_0 = \lambda_e/L \sim 0.1$$

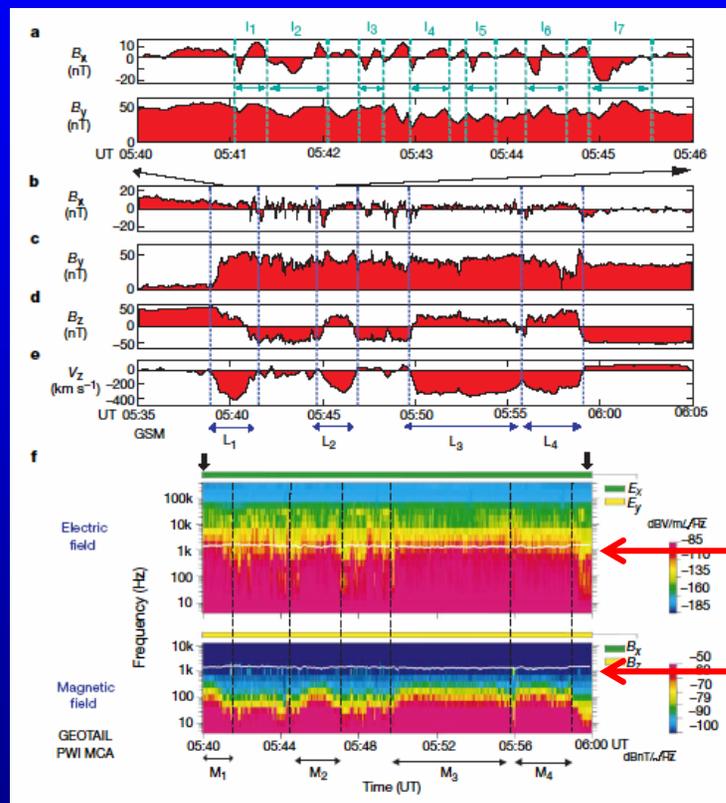
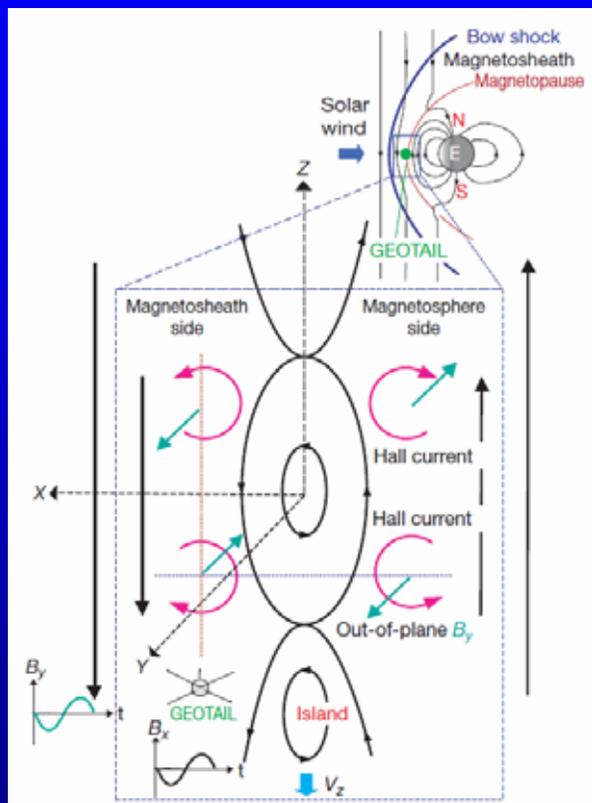


[Mandt et al., 1994]

# Whistler Mediated Reconnection

## 観測的証拠

*Deng and Matsumoto (Nature, 2001)*



リコネクションにともなってホイッスラー波がしばしば観測される (*Farrell et al., 2002, 2003; Deng et al., 2004; Wei et al., 2007*).

# Whistler Mediated Reconnection

## ➤ 問題点

- ✓ ホイッスラー波の励起メカニズムが不明。
- ✓ 人工衛星による1点観測から、ホイッスラー波とリコネクションの因果関係を示唆するのは困難。
- ✓ 理論的に示唆されているホイッスラー波は定在波、観測されたのは振動波。
- ✓ 電子スケールのホイッスラー波 ( $\lambda \sim \lambda_e \sim 10 \text{ km}$ ,  $T \sim \omega_{ce}^{-1} \sim 10^{-3} \text{ sec}$ ) が本当に大規模なリコネクション過程 ( $L \sim 10^5 \text{ km}$ ,  $t \sim 10^2 \text{ sec}$ ) を制御しているのだろうか？



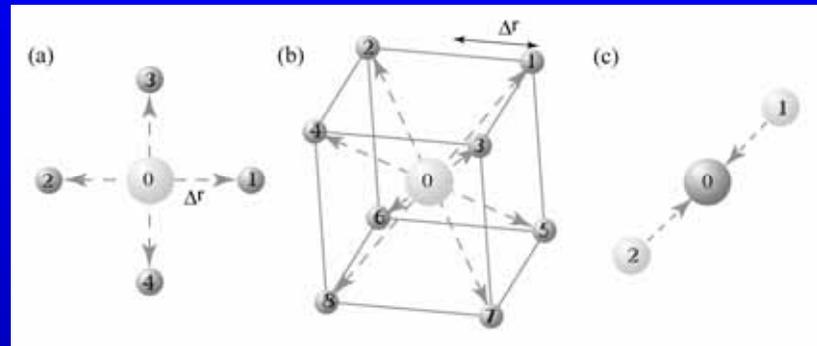
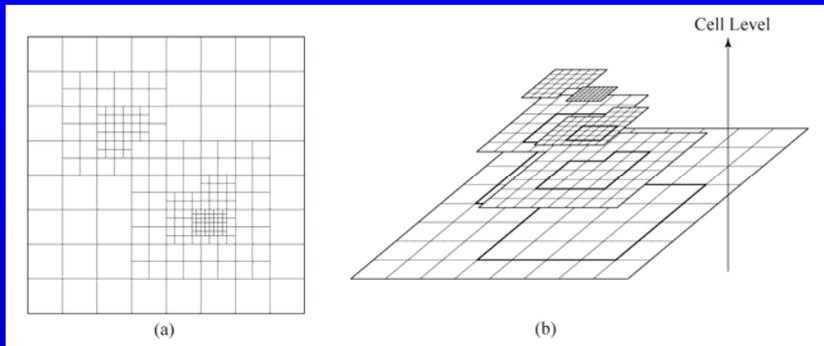
数値シミュレーションを実施することによって、磁気リコネクションとホイッスラー波の因果関係を明らかにする。

# Simulation Model

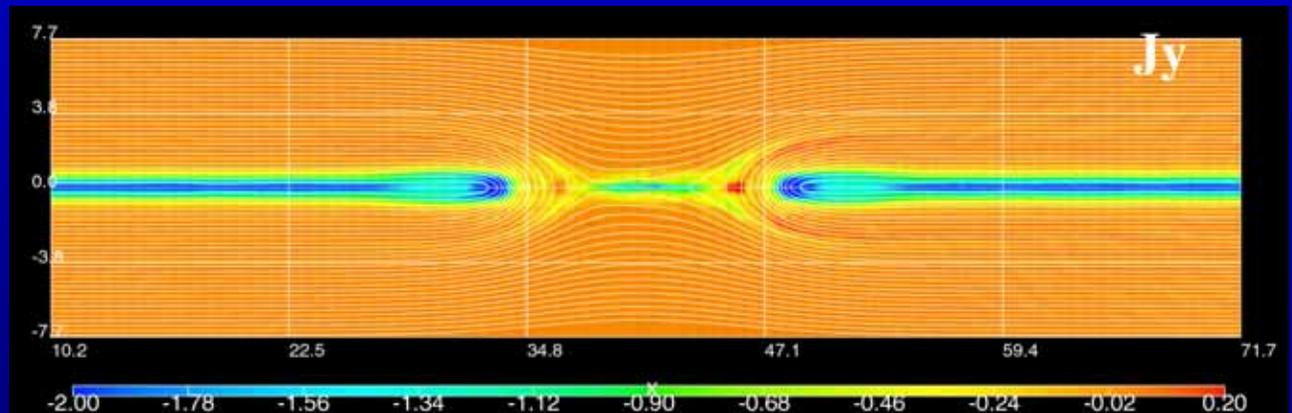
2D-EM-PIC (2次元電磁粒子コード)

+ AMR (適合細分化格子) + 粒子分割法

[Fujimoto and Machida, JCP, 2006;  
Fujimoto and Sydora, CPC, 2008]



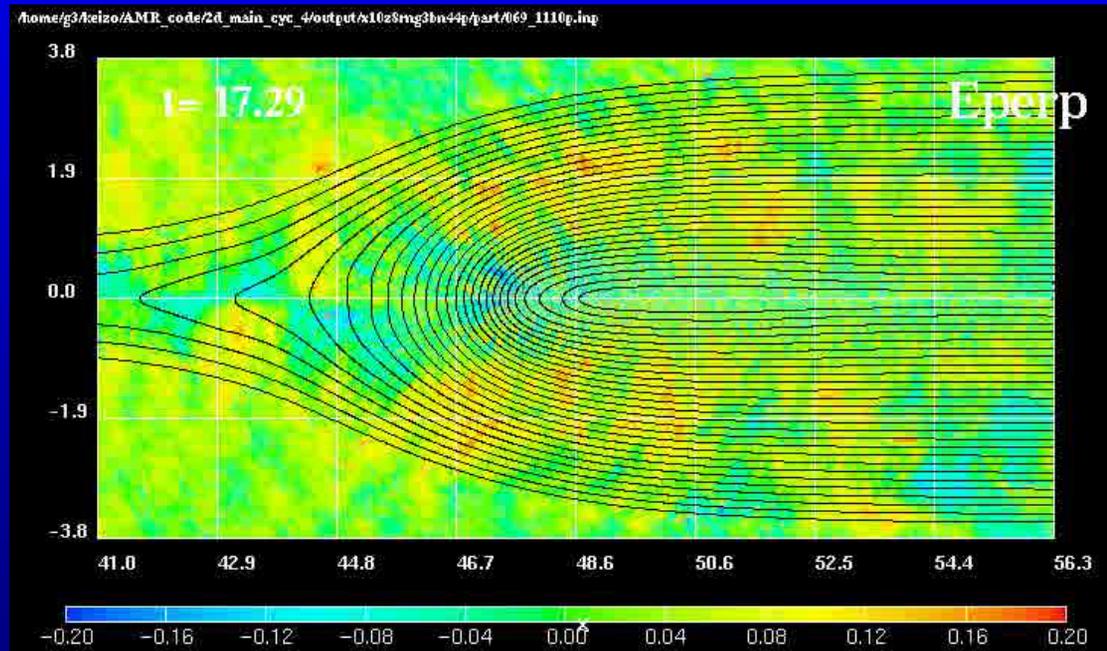
$$\begin{aligned} m_i/m_e &= 100, \\ c/V_A &= 29, \\ L_x \times L_z &= 82 \lambda_i \times 20 \lambda_i \end{aligned}$$



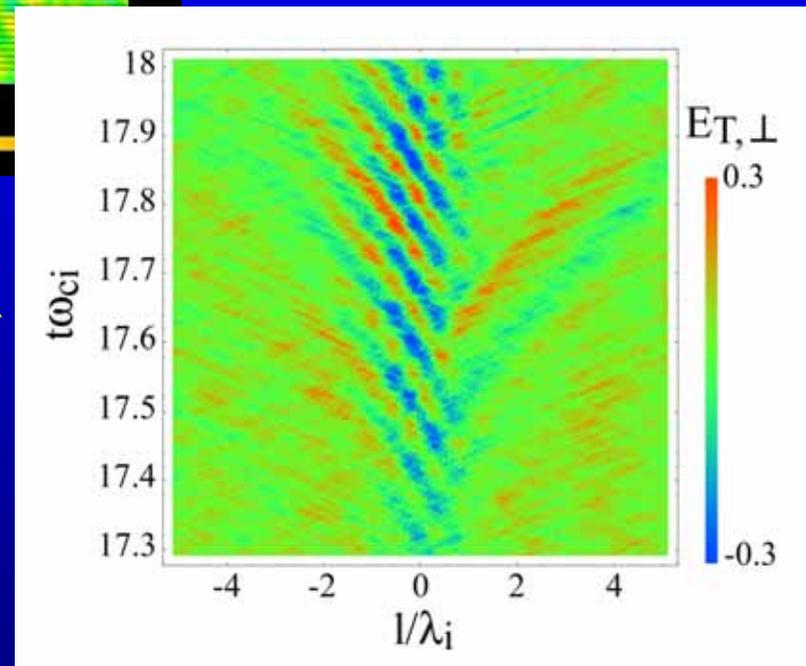
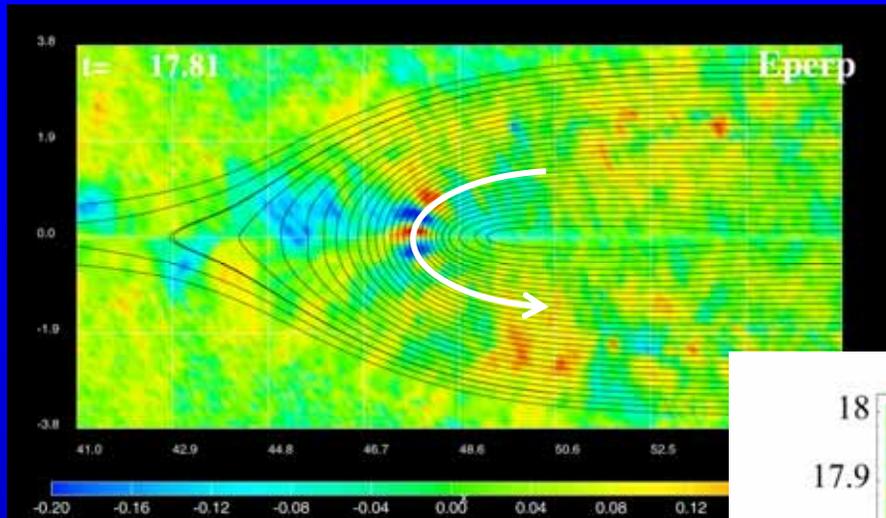
# Perpendicular Comp. of the Transverse Field: $E_{T,\perp}$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_L + \mathbf{E}_T \quad (\quad \times \mathbf{E}_L = 0, \quad \cdot \mathbf{E}_T = 0)$$

$$\mathbf{E}_{T,\perp} = \mathbf{E}_T \cdot \mathbf{e}_\perp$$



# Electromagnetic Waves at the Downstream Region



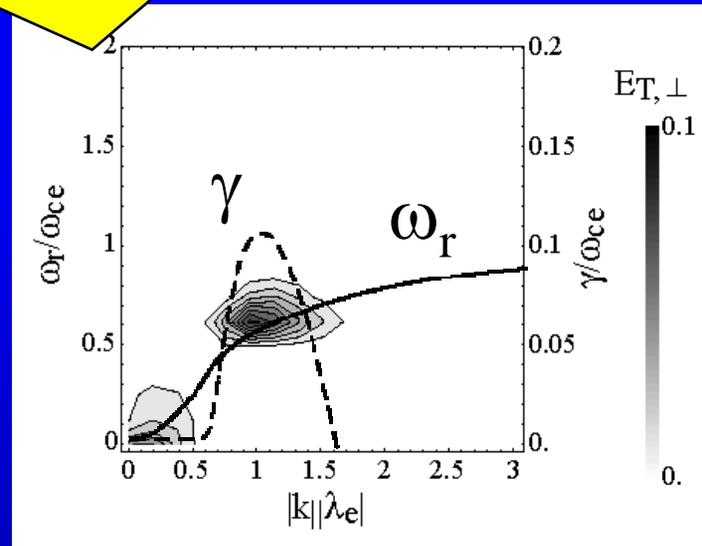
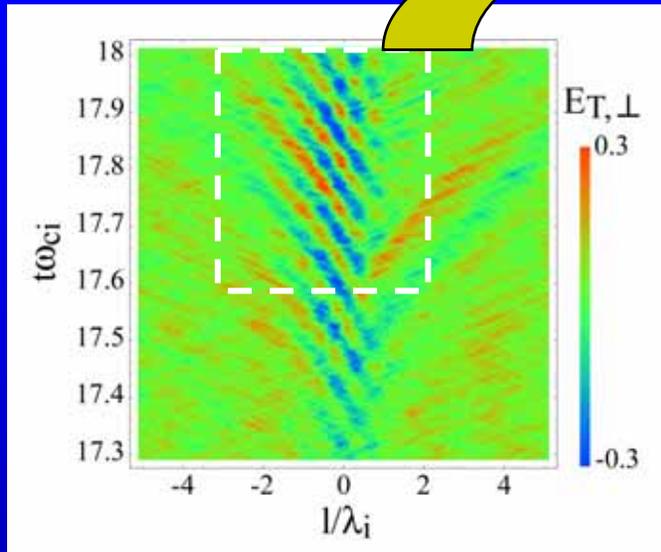
- 赤道面で励起
- 磁力線に沿って伝播

時間  $t$



磁力線方向  $l$

# Wave Dispersion for the EM Mode



$$k_{\parallel}\lambda_e \sim 1$$

$$\omega \sim \omega_{ce}$$

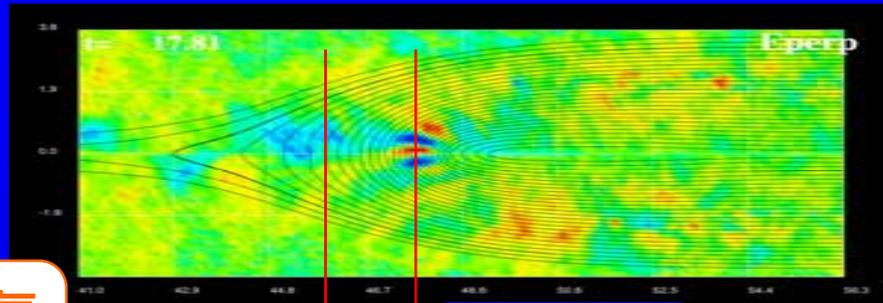
## ホイッスラー波の線形分散関係

[Gary, 1993]

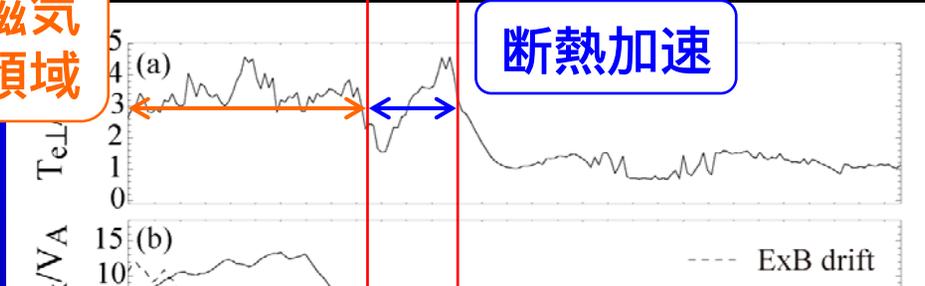
$$X^2 - \frac{1}{(\omega_{pe}/\omega_{ce})^2} Y^2 - \frac{Y}{X\sqrt{\beta_e}} Z(\xi) + \frac{1}{2} \left( \frac{T_{e\perp}}{T_{e\parallel}} - 1 \right) Z'(\xi) = 0$$

$$\xi = \frac{Y - 1}{X\sqrt{\beta_e}}, \quad X = \frac{k_{\parallel}c}{\omega_{pe}}, \quad Y = \frac{\omega_r + i\gamma}{\omega_{ce}}$$

# Condition for the Whistler Emission

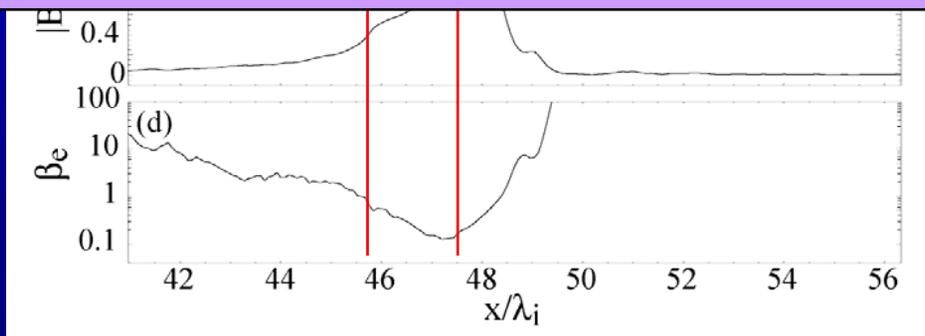


電子磁気  
拡散領域



- 大きな温度異方性 ( $T_e > T_{e||}$ )
- 電子が十分磁化されている

ホイッスラー波が磁気リコネクションを制御しているという証拠はない。



- 磁気拡散領域の下流
- 磁場がpile-upしているところ ( $B_z \sim B_0$ )

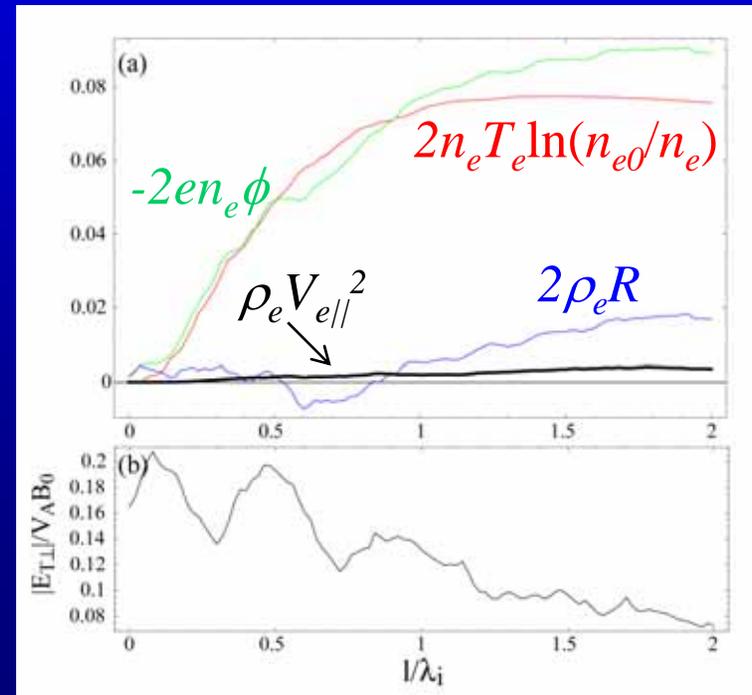
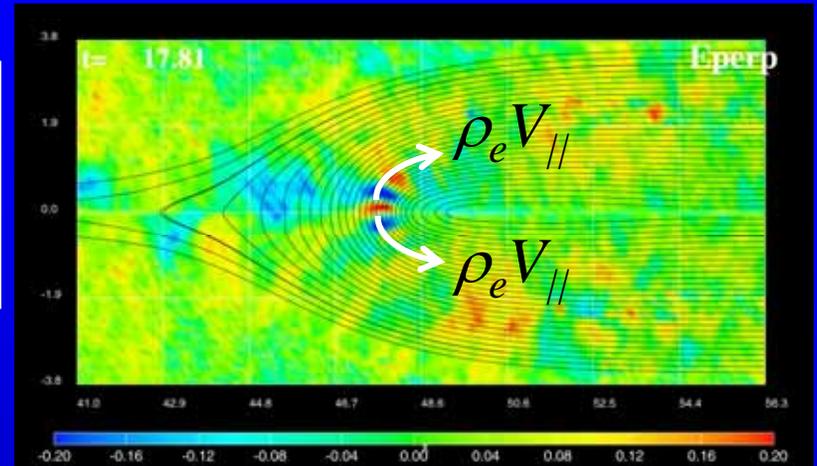
# Role of the Whistler Waves

- ✓ ピッチ角散乱による温度異方性の解消。
- ✓ 沿磁力線方向への運動量輸送。

$$\rho_e \frac{dV_{e\parallel}}{dt} = -\nabla_{\parallel} p_{e\parallel} + en_e \nabla_{\parallel} \phi + r$$

$$\partial V_{e\parallel} / \partial t \sim 0, \quad \nabla_{\parallel} T_{e\parallel} \sim 0$$

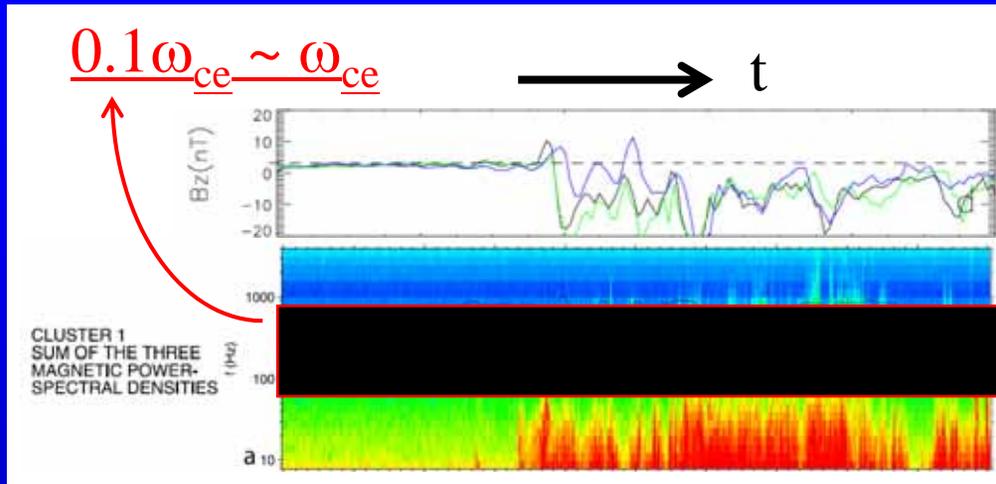
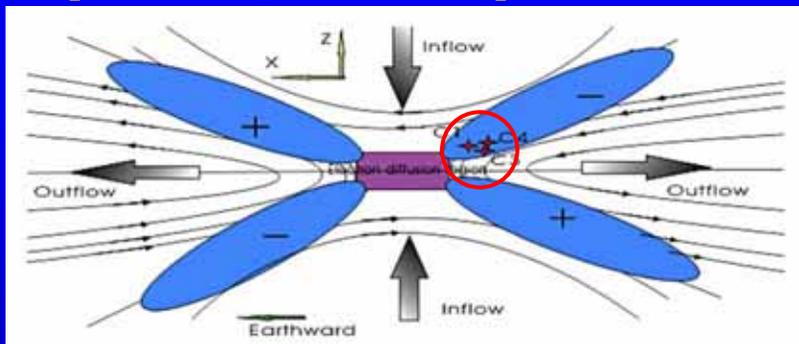
$$(\rho_e V_{e\parallel}) V_{e\parallel} = 2\rho_e \left[ \frac{T_{e\parallel}}{m_e} \ln \left( \frac{n_{e0}}{n_e} \right) + \frac{e}{m_e} \phi + R \right]$$



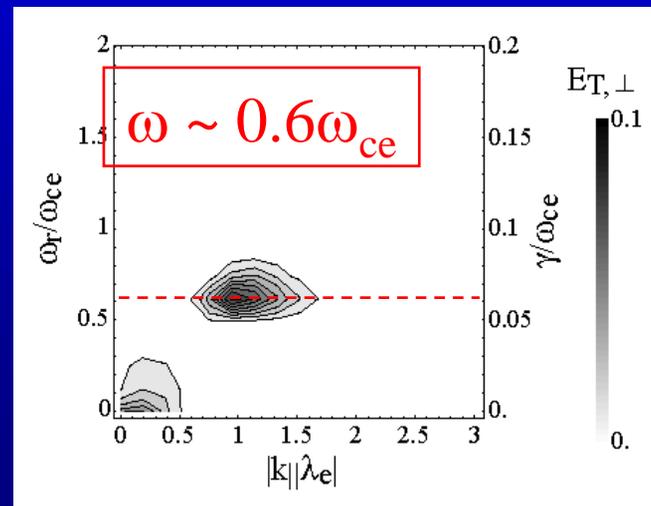
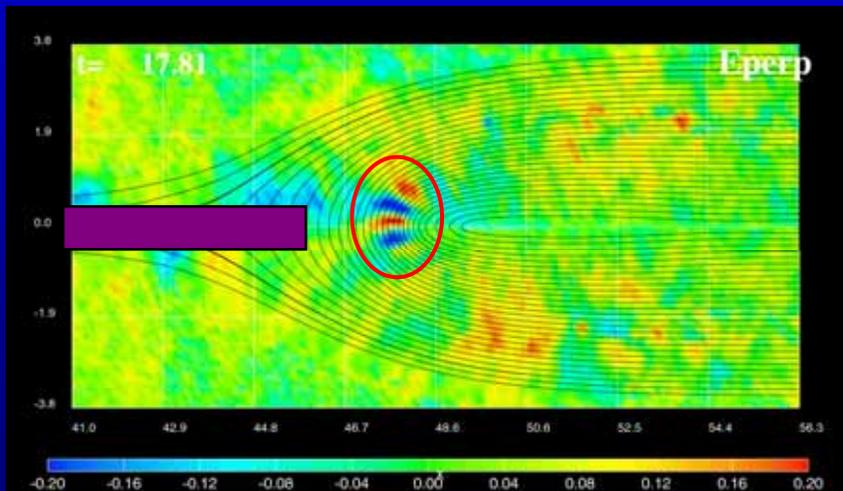
ホイッスラー波による効果は圧力勾配効果の10%以下。

# Comparison with Satellite Observations

- Cluster衛星による観測  
[Wei et al., JGR, 2007]



- Simulation result



## Summary and Conclusions

磁気リコネクションにともなってホイッスラー波が励起されることを、初めて数値シミュレーションによって実証した。

- 電子磁気拡散領域の下流側、磁場pile-up領域で励起。
- エネルギー源は電子の温度異方性 ( $T_{e\perp} > T_{e\parallel}$ )。
- ホイッスラー波はリコネクションを制御するものではなく、リコネクションの結果として励起される。
- ピッチ角散乱によって磁力線方向への運動量輸送を助けるが、主導的な役割は果たさない。

リコネクションを制御している物理は何か？