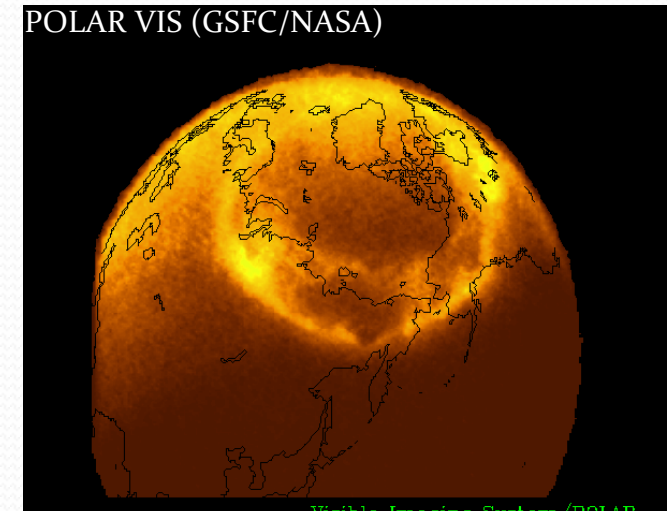


# 磁気圏-電離圏結合系における オーロラ発達とAlfven乱流の励起

渡邊智彦, 兼山将寿, 前山伸也, 三輪有輝  
名大・理・物理

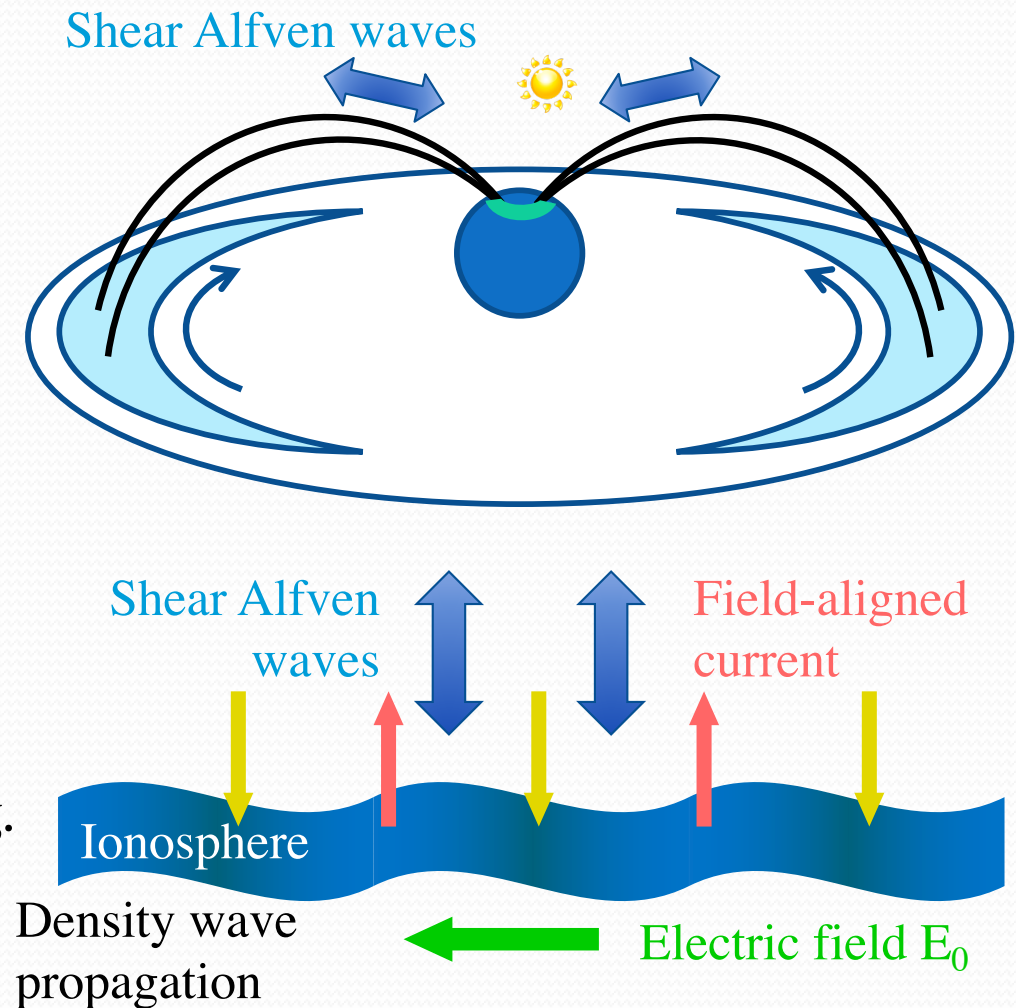
# Auroral arc growth as an instability in M-I coupling

- Separation of characteristic scales
  - Global geometry of M-I coupling system
    - => Field-line length  $\sim 100,000\text{km}$
    - => Auroral oval  $\sim$  a few 100's km in N-S
  - Spatio-temporal structures of auroral arcs
    - => Distance of multiple arcs  $\sim 10\text{ km}$
- What is a physical mechanism providing the **arc structures** and its **dynamics** (drift velocity, growth rate, ...)?
  - **Feedback instability** (primary) for formation of arc structures
  - **Nonlinear instability** (secondary) for deformation of arc structures



# Feedback instability in M-I coupling

- Feedback instability: a possible mechanism to explain spontaneous growth and formation of auroral arc structures in M-I coupling (Atkinson, Sato, in 1970's)
- When the convection  $E$  field exceeds a critical value, auroral arcs can grow through resonance of the shear Alfvén wave and the density wave in the M-I coupling.
- => 3-D MHD simulation of feedback instability



# フィードバック不安定性理論の拡張

- ジャイロ運動論による磁気圏プラズマの記述
  - オーロラ構造の発達と粒子加速を説明する統一モデル
- オーロラアーク構造の発達にともなう二次的不安定性の成長
  - オーロラにともなうシア流からの渦構造変形(K-H不安定)
- 磁気圏のプラズマの有限圧力勾配と磁場曲率効果
  - Ballooningモードとの競合、オーロラのビーズ構造との関連
- 大規模沿磁力線電流によるシア磁場効果
  - 大域的な磁場形状のオーロラ構造への影響評価へ
- オーロラ乱流のシミュレーション
  - オーロラ構造の発達とアルヴェン乱流

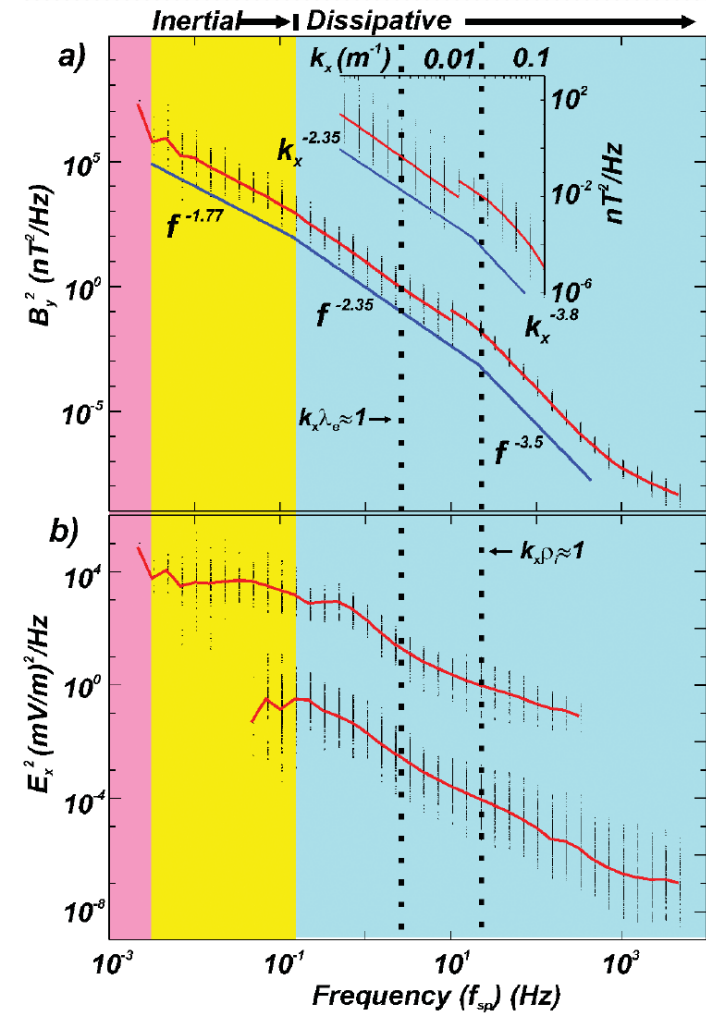
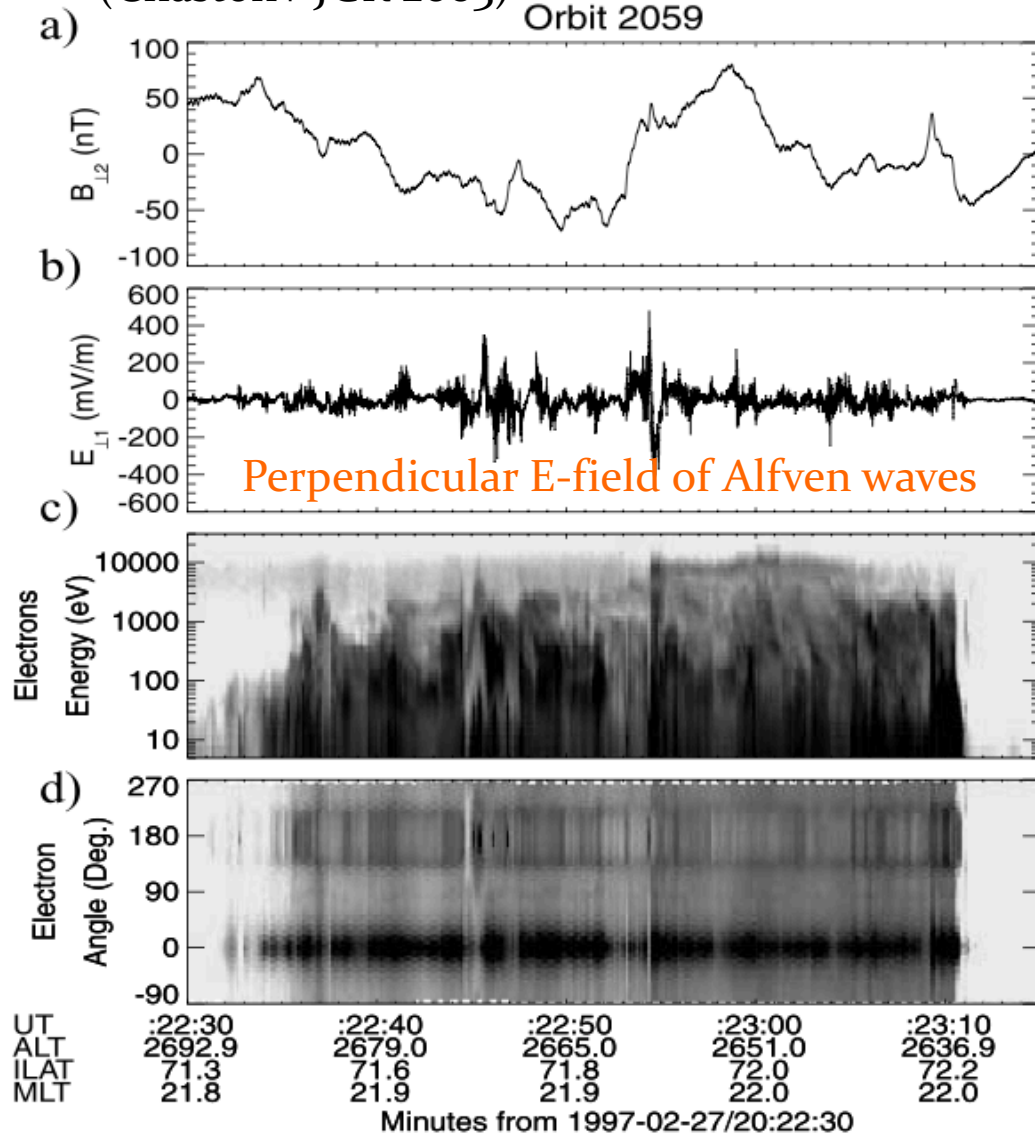
# フィードバック不安定性理論の拡張

- ジャイロ運動論による磁気圏プラズマの記述
  - オーロラ構造の発達と粒子加速を説明する統一モデル
- オーロラアーク構造の発達にともなう二次的不安定性の成長
  - オーロラにともなうシア流からの渦構造変形(K-H不安定)
- 磁気圏のプラズマの有限圧力勾配と磁場曲率効果
  - Ballooningモードとの競合、オーロラのビーズ構造との関連
- 大規模沿磁力線電流によるシア磁場効果
  - 大域的な磁場形状のオーロラ構造への影響評価へ
- **オーロラ乱流のシミュレーション**
  - **オーロラ構造の発達とアルヴェン乱流**

# Observation of Alfvén waves and turbulence in auroral region

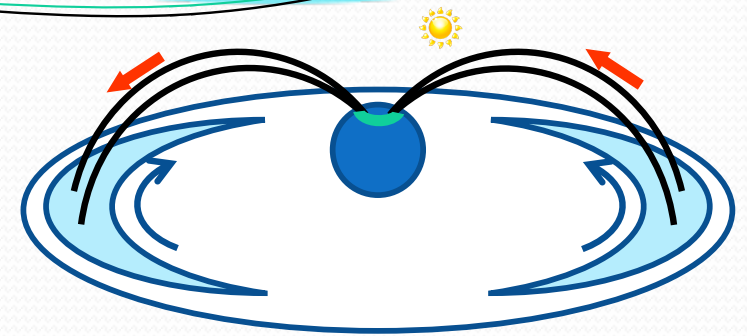
(Chaston+ JGR 2003)

(Chaston+ PRL 2008)



# Reduced MHD model for the magnetosphere

- $\delta B \ll$  Earth's  $B$  field, and low- $\beta$
- Perpendicular wave length ( $x_f$ )  $\ll$  parallel wave length ( $x_s$ ), equilibrium scales ( $x_s$ )
- Local flux tube model (periodic in the perpendicular direction)
- Impose **uniform electric field  $E_0$**  driving the convection flow

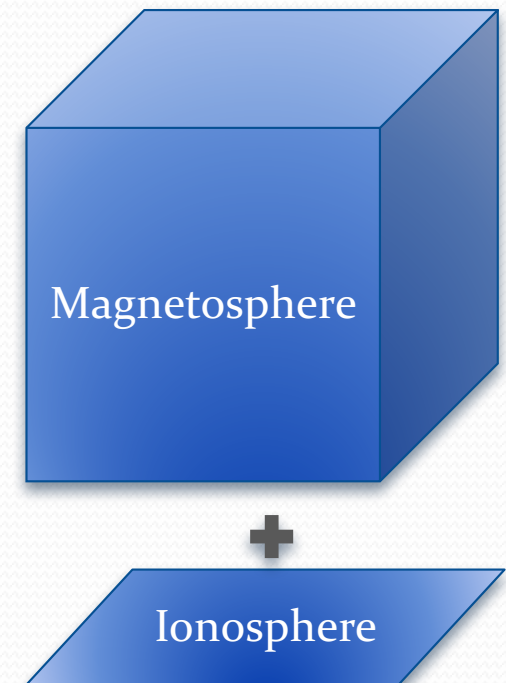


$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{E}_0 \times \mathbf{B}_0}{B_0^2} \cdot \nabla_{\perp} \right) \omega = \frac{B_0^2}{\rho_0} \nabla_{\parallel} \left( \frac{j_{\parallel}}{B_0} \right) - \{\phi, \omega\} + \nu \nabla_{\perp}^2 \omega$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{E}_0 \times \mathbf{B}_0}{B_0^2} \cdot \nabla_{\perp} \right) \psi = \frac{1}{B_0} \nabla_{\parallel} (B_0 \phi) + \frac{\eta}{\mu_0} \nabla_{\perp}^2 \psi$$

$$j_{\parallel} = \frac{B_0}{\mu_0} \nabla_{\perp}^2 \psi \quad , \quad \omega = \nabla_{\perp}^2 \phi \quad , \quad \nabla_{\parallel} = \mathbf{b}_0 \cdot \nabla + \{\psi, \quad \}$$

$$\{f, g\} \equiv \mathbf{b}_0 \cdot \nabla_{\perp} f \times \nabla_{\perp} g$$



# Two-fluid equations for the ionosphere

- Continuity of electron and ion density (height-integrated)

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}_0}{B_0^2} \cdot \nabla_{\perp} n_e = \frac{j_{\parallel}}{eh} - \alpha n_i n_e \quad \frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla_{\perp} \cdot (\mu_P n_i \mathbf{E} + D \nabla_{\perp} n_i) = -\alpha n_i n_e$$

coupled with the quasi-neutrality equation ( $n_i = n_e$ )

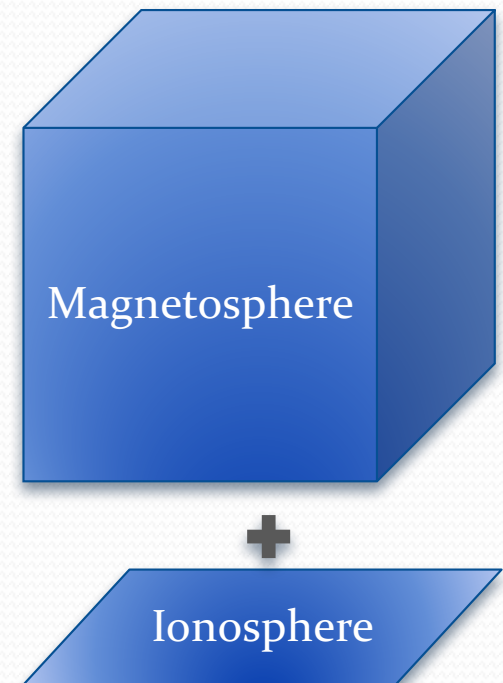
=> Continuity of the ionospheric density and current

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}_0}{B_0^2} \cdot \nabla_{\perp} n = \frac{j_{\parallel}}{eh} - \alpha n^2$$

$$\nabla_{\perp} \cdot (\mu_P n \mathbf{E}) - \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}_0}{B_0^2} \cdot \nabla_{\perp} n = D \nabla_{\perp}^2 n - \frac{j_{\parallel}}{eh}, \quad \mathbf{E} = -\nabla_{\perp} \phi$$

- Here, we ignore nonlinear polarization terms
- Closure relations

=> Continuity of  $\phi$  and  $j_{\parallel}$  => **M-I coupling**

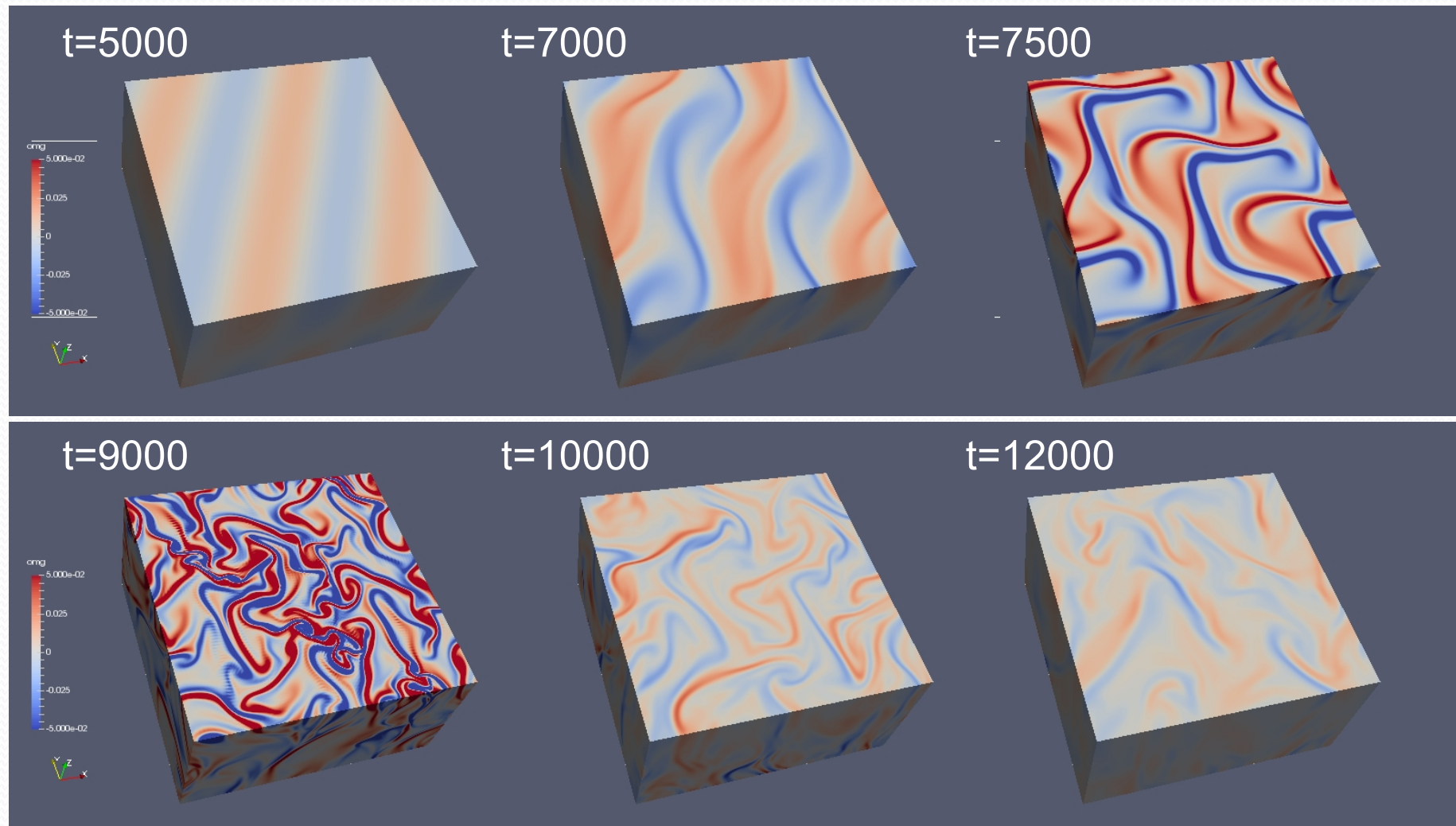




# Vorticity distributions

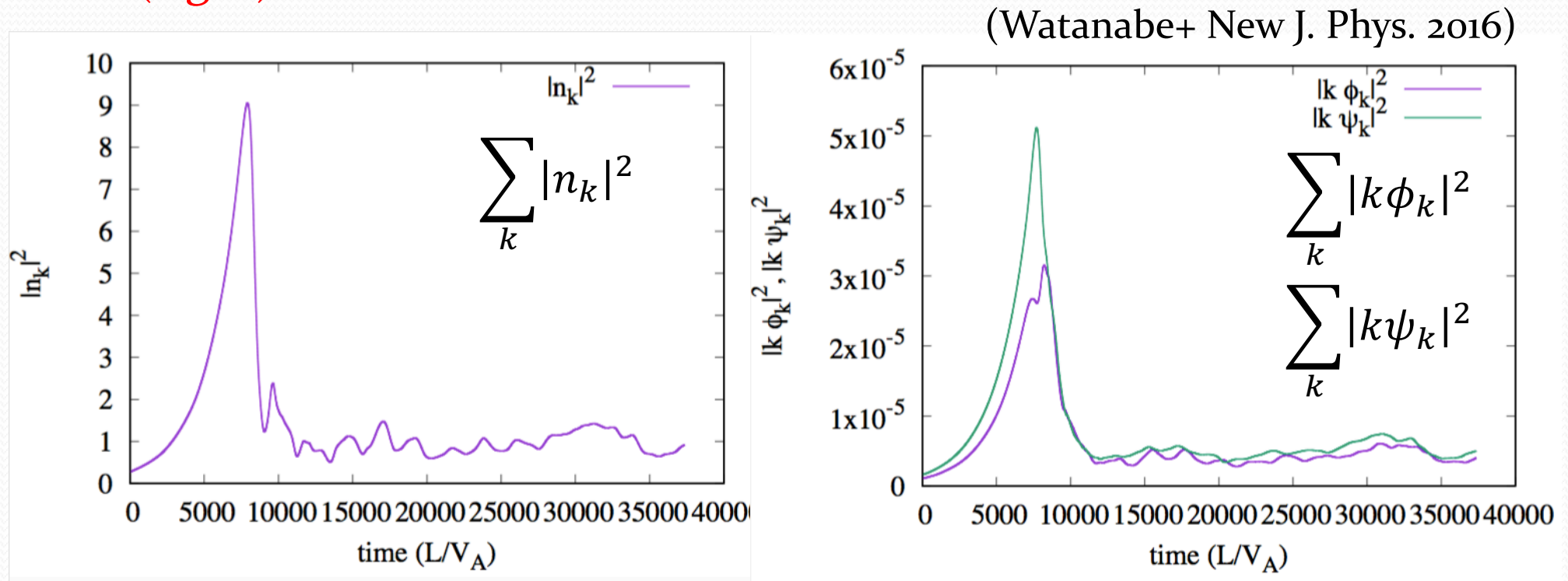
(Watanabe+ New J. Phys. 2016)

- Turbulence transition through the secondary instability



# Nonlinear stage of the feedback instability with constant drive

- Time history of **density (left)** and **electromagnetic field energy (right)**



- Transition to the Alfvénic turbulence ( $\delta E^2 \sim \delta B^2$ ) after saturation of the feedback instability growth

# フィードバック不安定性理論の拡張

- ジャイロ運動論による磁気圏プラズマの記述
  - オーロラ構造の発達と粒子加速を説明する統一モデル
- オーロラアーク構造の発達にともなう二次的不安定性の成長
  - オーロラにともなうシア流からの渦構造変形(K-H不安定)
- 磁気圏のプラズマの有限圧力勾配と磁場曲率効果
  - Ballooningモードとの競合、オーロラのビーズ構造との関連
- 大規模沿磁力線電流によるシア磁場効果
  - 大域的な磁場形状のオーロラ構造への影響評価へ
- オーロラ乱流のシミュレーション
  - オーロラ構造の発達とアルヴェン乱流

# 大規模沿磁力線電流と磁気シア

- オーロラ領域に流れる大規模沿磁力線電流は、平衡磁場に準静的なシア成分を与える

沿磁力線電流強度  $j_{||} \sim 1 \mu\text{A}/\text{m}^2$

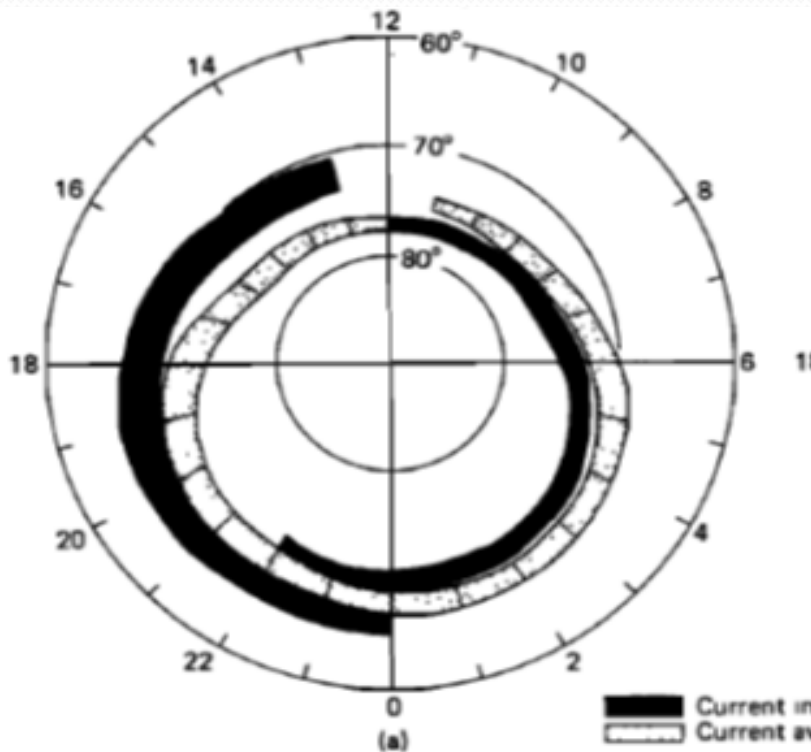
南北スケール  $\Delta \sim 100 \text{ km}$

$\gg$  アーク幅・間隔  $\delta \sim 10 \text{ km}$

磁気シア  $s = (dB_y/dx)/B_0$   
 $\sim \mu_0 j_{||} / B_0 \sim 2.5 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$

磁力線長  $l = 10^5 \text{ km}$  では  $sl \sim 2.5$

- Alfven波の伝播に影響する可能性
- FACの方向、強度によるフィードバック不安定性への効果は?



Iijima and Potemura (1978)

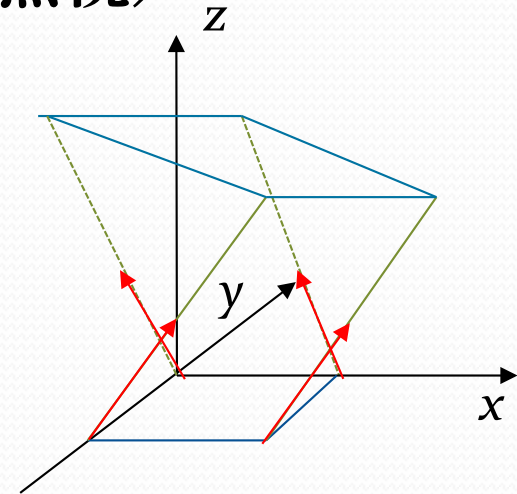
# 磁気座標を用いた不安定性解析

- 磁気シアを加えた磁気座標を用いてMHD方程式を記述し、磁気圏の固有方程式を導出（直線磁場,  $p$ 無視）

$$\xi = x - \hat{s} \frac{y}{L_{\perp}} z, \quad \eta = y, \quad \zeta = z$$

$$\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \left( \frac{\partial}{\partial \eta} - \hat{s} \zeta \frac{\partial}{\partial \xi} \right)^2, \quad k_{\perp}^2 = k_{\xi}^2 + (k_{\eta} - \hat{s} \zeta k_{\xi})^2$$

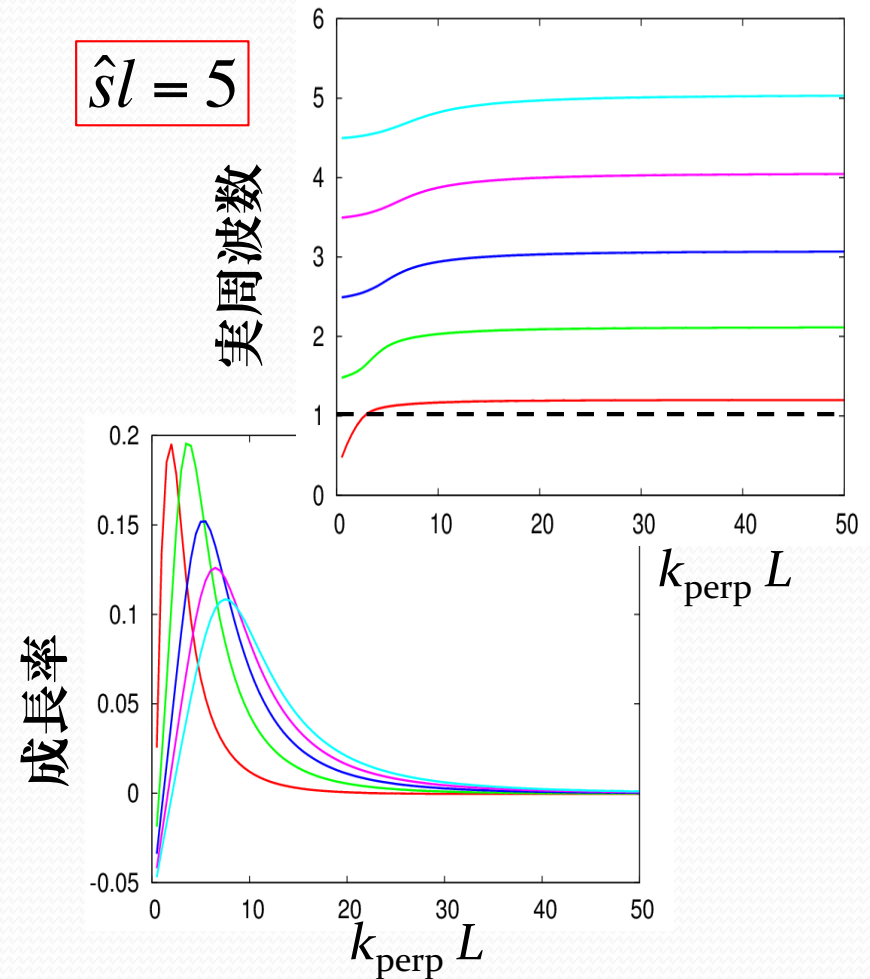
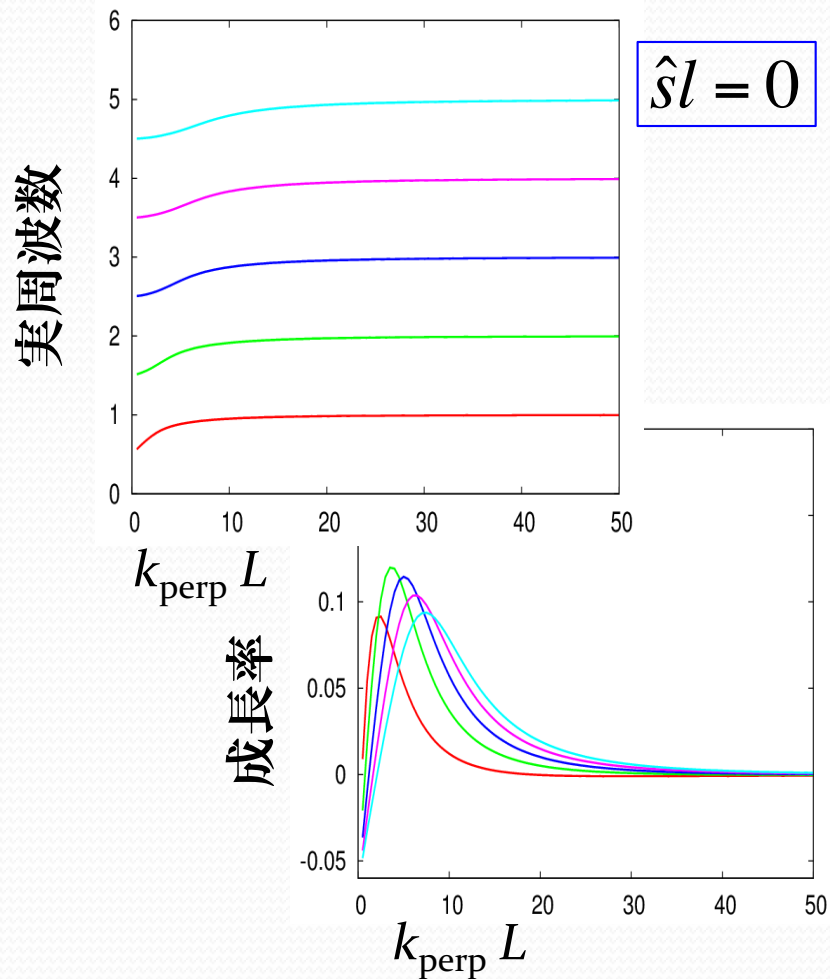
$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} + D_{\eta} \nabla_{\perp}^2 \psi, \quad \frac{\partial}{\partial t} \nabla_{\perp}^2 \phi = V_A^2 \frac{\partial}{\partial \zeta} \nabla_{\perp}^2 \psi + D_{\nu} \nabla_{\perp}^4 \phi$$



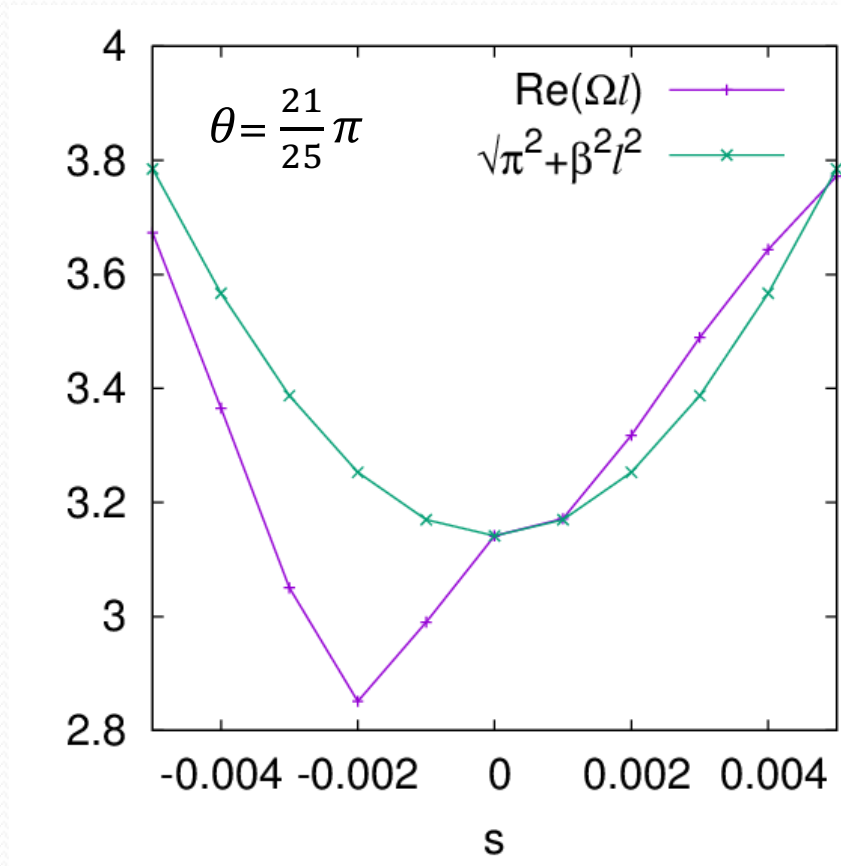
- 電離圏プラズマの分散関係式と結合して固有値・固有関数を求める

# 有限磁気シア下でのフィードバック不安定性解析

- $\theta = \tan^{-1}(\mu_P/\mu_H)$  での理想MHDでの解析例 ( $D_\eta = D_\nu = 0$ )



# 共鳴周波数の磁気シア依存性



- $k_{\perp} L \rightarrow \infty$  での共鳴周波数を比較 ( $m = 0$ )
- 磁気シアの増大とともに共鳴周波数上昇
- シアの符号に対する非対称性  $\Rightarrow$  朝夕非対称性
- 近似解は大まかな磁気シア依存性を再現

# 弱磁気シアでの近似解

- $|s\zeta| \ll 1$  の場合、 $\phi, j_{\parallel}$  に関する固有方程式を近似すると減衰振動の方程式に帰着

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \zeta^2} - 2\beta \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} + \Omega^2 \phi = 0$$

- その解は

$$\phi = \frac{1}{2} \frac{\Omega}{\Omega'} e^{\beta(\zeta-l)} (e^{i\Omega'(\zeta-l)} + e^{-i\Omega'(\zeta-l)})$$

$$\Omega' = \sqrt{\Omega^2 - \beta^2}, \quad \beta = \frac{sk_{\xi}k_{\eta}}{k_{\xi}^2 + k_{\eta}^2} = \frac{1}{2}s \sin 2\theta$$

- $k_{\perp}L \rightarrow \infty$  では  $\phi(0) = 0$  となり、 $\Omega'l = m\pi$  (共鳴条件) から

$$\Omega l = \sqrt{(m\pi)^2 + (\beta l)^2}$$

- 磁気シアによる共鳴周波数の上昇



# 磁気シア効果がもたらすオーロラ 発達の多様性

- 磁気シアによる**周波数・成長率影響** (ideal)
- 磁気シアの符号への依存性 (背景電流のup - downに対応)
- 粘性や抵抗性散逸効果の増大 (アーク構造の stretchによる)
  - => 沿磁力線電流の向き・強度への依存性
  - => **朝方、夕方、極冠域でのオーロラの発達特性に影響**
- 大域的な特性と同時に局所構造へも影響
  - => 電場とアーク構造の相対的な関係 (シア効果の $\theta$ 依存性)
  - => オーロラアークの変形・非線形構造(2次構造)への影響
  - => バルーンモードの安定化に働く
- 現実的な磁場配位での解析、観測との比較へ

# まとめ

- 大規模沿磁力線電流によるシア磁場効果
  - 大域的な磁場形状がオーロラ構造へ影響を及ぼし得る
  - 朝夕非対称性
  - 共鳴周波数の磁気シア依存性の摂動論的解析
- オーロラ乱流のシミュレーション
  - オーロラ構造の発達の結果、アルヴェン乱流へ遷移（ただし十分な駆動源がある場合; 駆動乱流）
  - 電離層密度の微細構造形成
  - 密度微細構造の非線形電場ドリフト