

直線型磁化プラズマ中電子温度勾配モード の非線形ダイナミクス

*Nonlinear Dynamic of Electron Temperature Gradient
Mode in Linear Magnetized Plasmas*

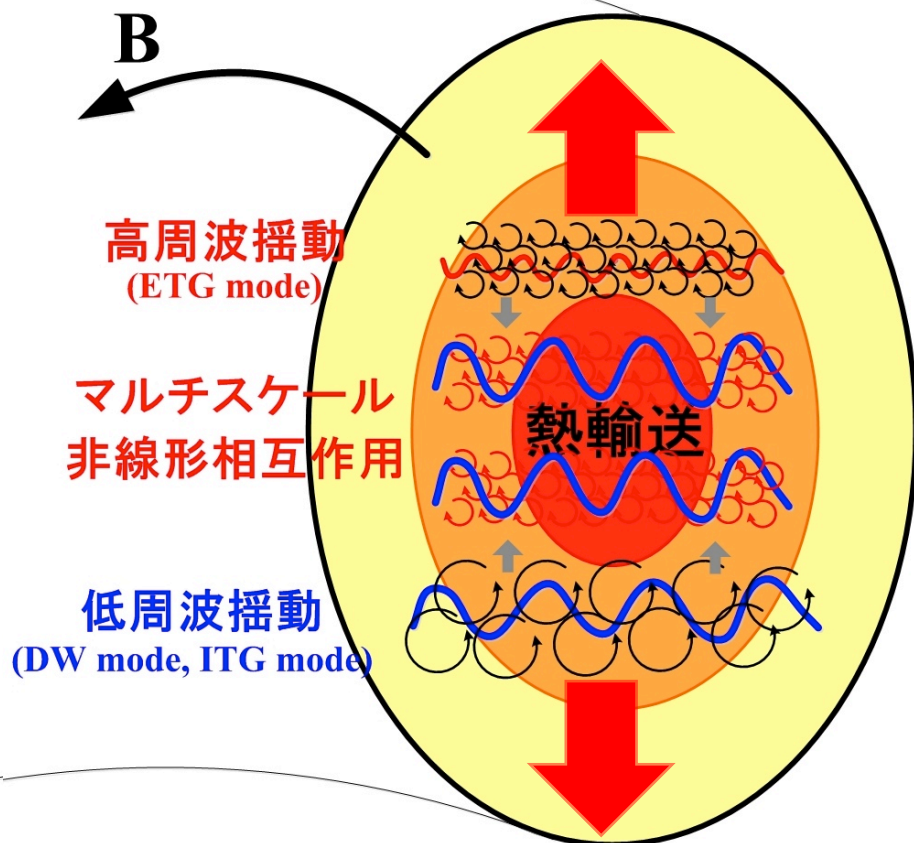
マックス・プランクプラズマ物理学研究所
文 贊鎬 (Moon, Chanhoo)



畠山 力三, 金子 俊郎, 伊藤 公孝, 伊藤 早苗,
居田 克己, 稲垣 滋

東北大学大学院工学研究科, 九州大学
応用力学研究所, 核融合科学研究所の
スタッフの皆様

研究背景と目的



ETGモードは不明な点が多い

- 励起機構
- 抑制機構

1) W. Horton, Rev. Mod. Phys. **71** (1999) 735.

2) F. Brochard *et al.*, Phys. Plasmas **12** (2005) 062104.

3) V. Sokolov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 095001.

4) S. K. Mattoo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 255007.

異常熱輸送 –イオンスケール–

プラズマ空間勾配駆動

- Drift wave (DW) mode¹⁾
- Flute mode²⁾
- Ion temperature gradient (ITG) mode³⁾

異常電子熱輸送

電子温度勾配モード

Electron Temperature Gradient (ETG) Mode⁴⁾

電子熱輸送 ~ イオン熱輸送

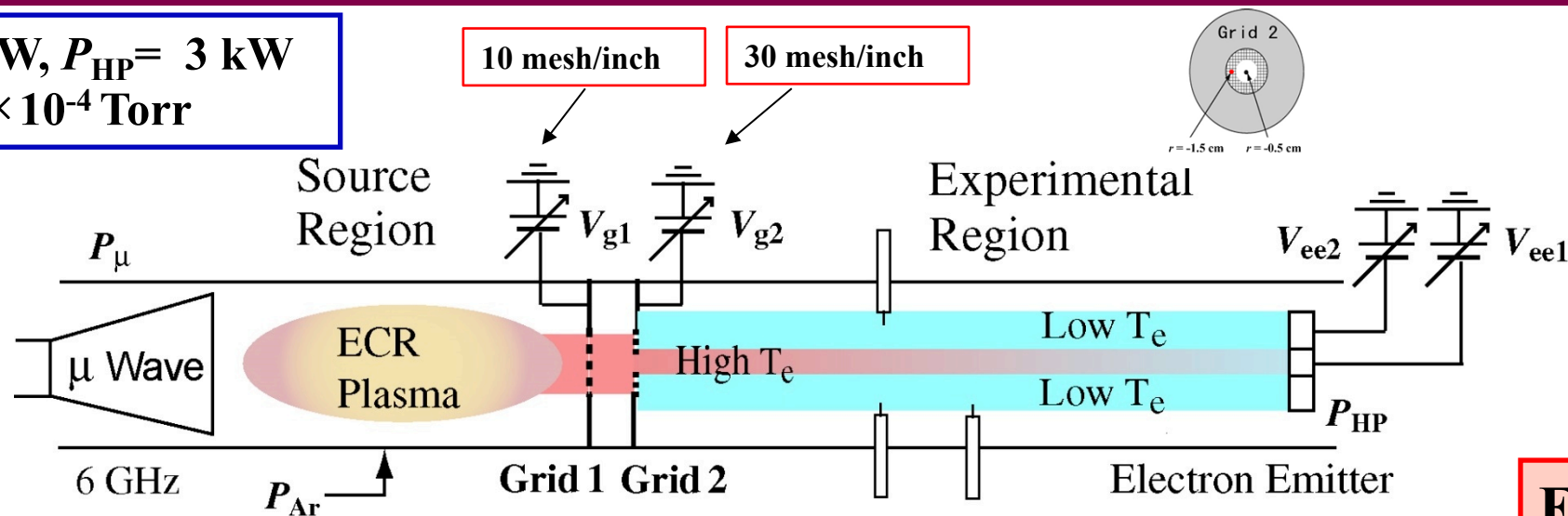
$$(\chi_i \sim \chi_e)$$

ETG及び垂直電場 (E_r)の形成と制御
ETGモードの励起・抑制機構の解明

実験装置図及び電子温度勾配の制御と形成

$$P_{\mu} = 20 \text{ W}, P_{\text{HP}} = 3 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Ar}} = 1 \times 10^{-4} \text{ Torr}$$



ETG

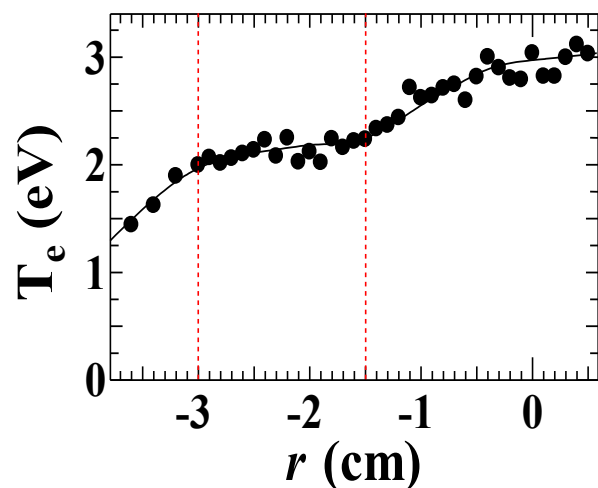
Q_T Upgrade Machine

$$V_{ee1} = -4 \text{ V}, V_{ee2} = -1.5 \text{ V},$$

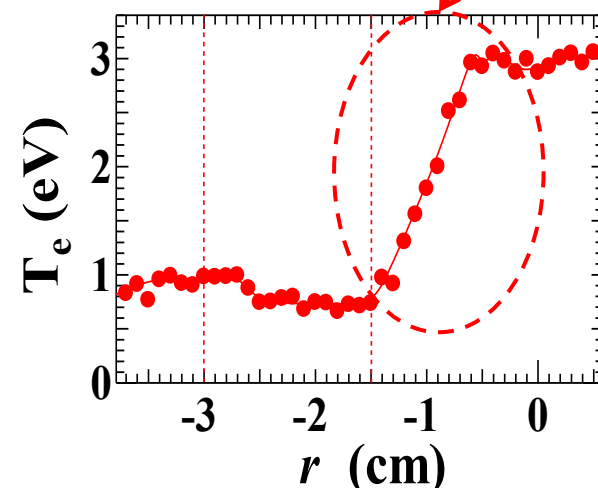
$$V_{g1} = -10 \text{ V}, r = -1.5 \text{ cm}$$

電子温度勾配
の制御と形成

$$V_{g2} = 3 \text{ V}$$



$$V_{g2} = -30 \text{ V}$$



高・低周波揺動のETG依存性

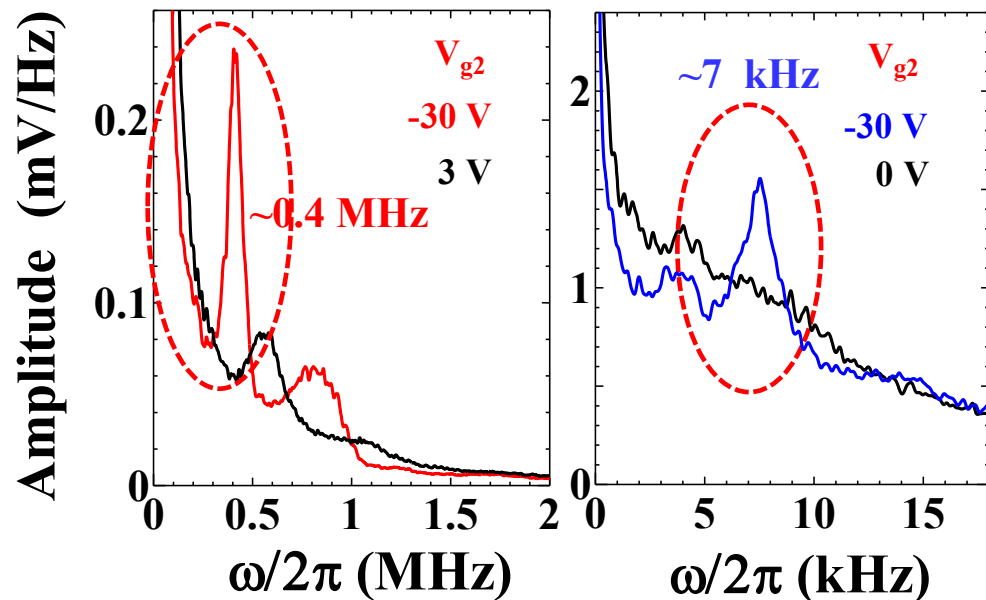
$$P_{\mu} = 20 \text{ W}, V_{ee1} = -4 \text{ V}$$

$$V_{ee2} = -1.5 \text{ V}, V_{g1} = -10 \text{ V}$$

$$r = -1.5 \text{ cm}, \rho_e = \sim 0.04 \text{ mm}$$

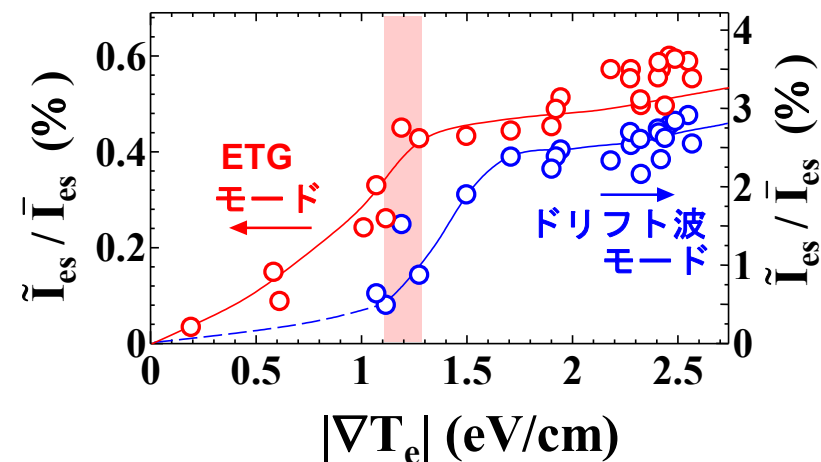
ETGモード

ドリフト波

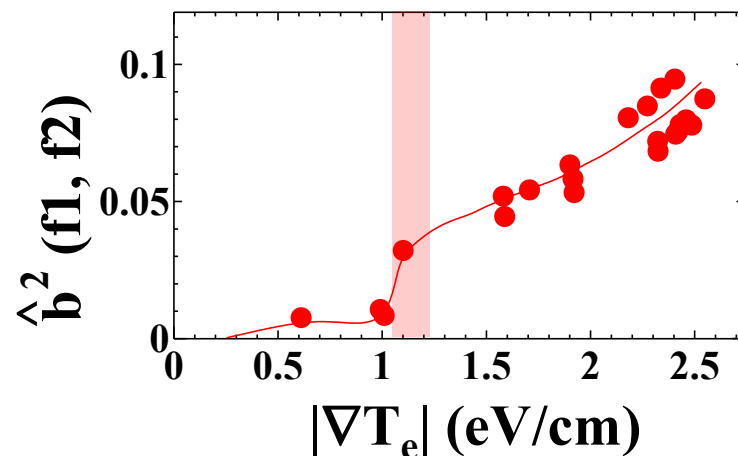


high and low frequencies

高
低
周
波
揺
動



非
線
形
結
合



C. Moon et al., *Phys. Rev. Lett.* 111, 115001 (2013).

ETG強度が $\sim 1.2 \text{ eV/cm}$ を超えると、ETGモードとドリフト波モードとの非線形結合が助長され、エネルギーが移送される。

スラブETGモード及びDWモードの分散関係

➤ 一様磁場($B = \text{const.}$)を持つスラブ配位のプラズマの場合:

典型的なプラズマ実験条件

$$\tau + (k_{\perp} \lambda_{De})^2 + b \left(1 + \frac{1}{2\lambda_e^2} \right) - \frac{1}{2\lambda_e^2} + b \frac{\omega_{Te}^*}{\omega} + \frac{\omega_{Te}^*}{4\lambda_e^2 \omega} (1 + b) = 0,$$

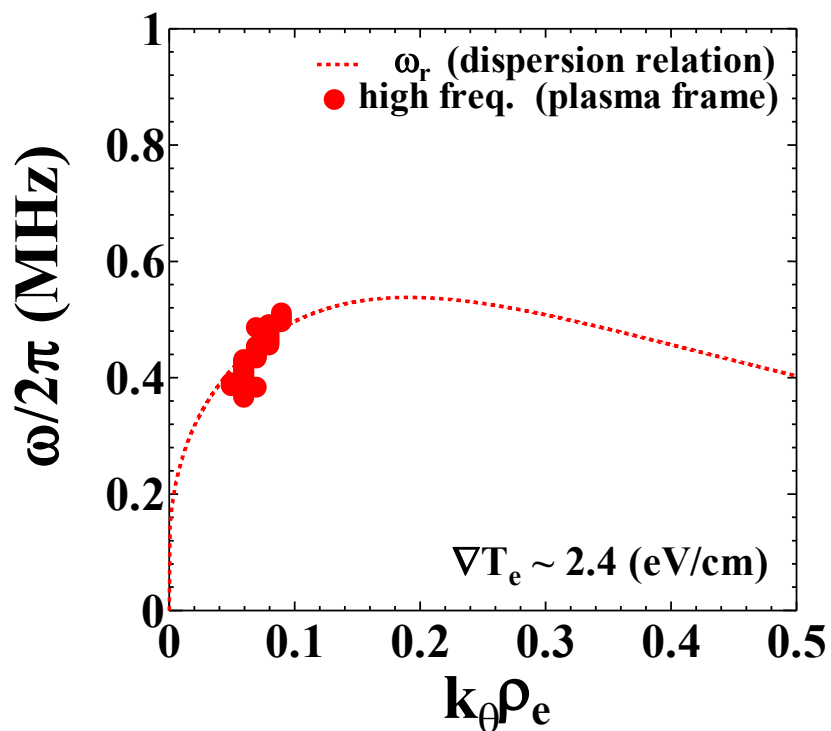
where $\tau = \frac{T_e}{T_i}$, $k_{\perp} = k_y$, $\lambda_e = \frac{\omega}{k_{\parallel} v_e}$, $b = \frac{(k_{\perp} \rho_e)^2}{2}$, $\omega_{Te}^* = \frac{k_{\perp} T_e}{eBL_{Te}}$.

$$T_{e0} = 3 \text{ eV}, T_i = 0.3 \text{ eV}, n_e = 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3},$$

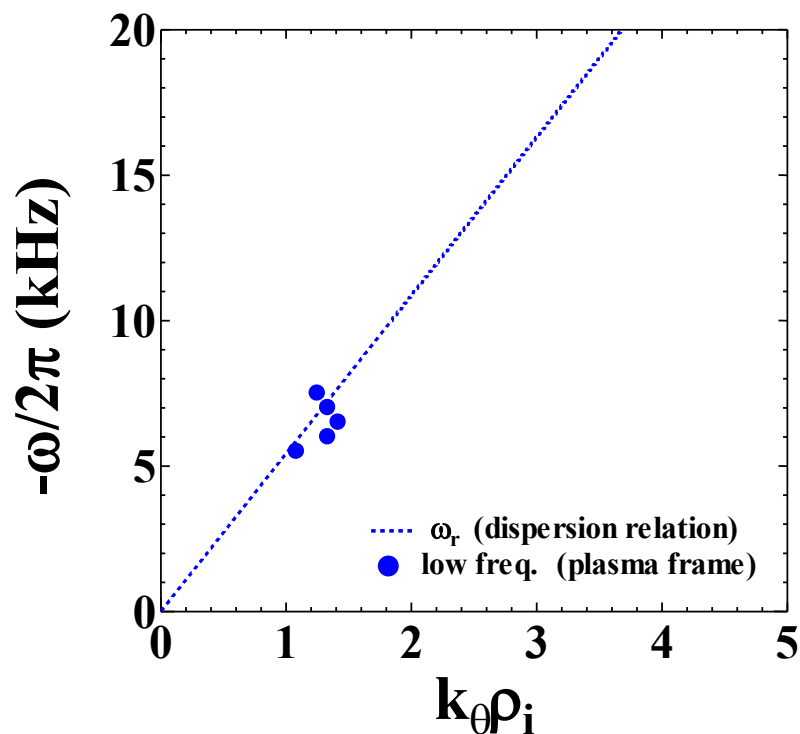
$$\lambda_{De} = 0.039 \text{ cm}, B = 2300 \text{ G}, L_{Te} = 1.2 \text{ cm},$$

$$k_{\parallel} = 0.06 \text{ cm}^{-1}, \rho_e = 0.004 \text{ cm}, \rho_i = 0.25 \text{ cm}.$$

[Phys. Fluids **30**, 1331 (1987), Phys. Plasmas **17**, 042108 (2010)]



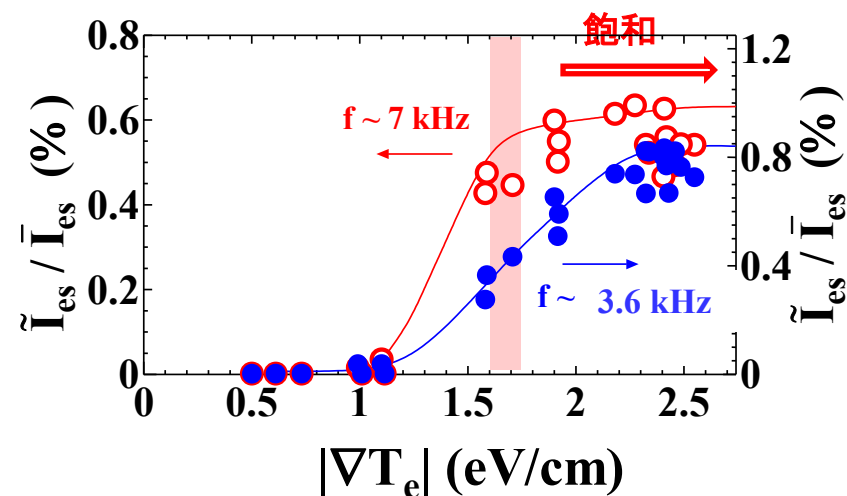
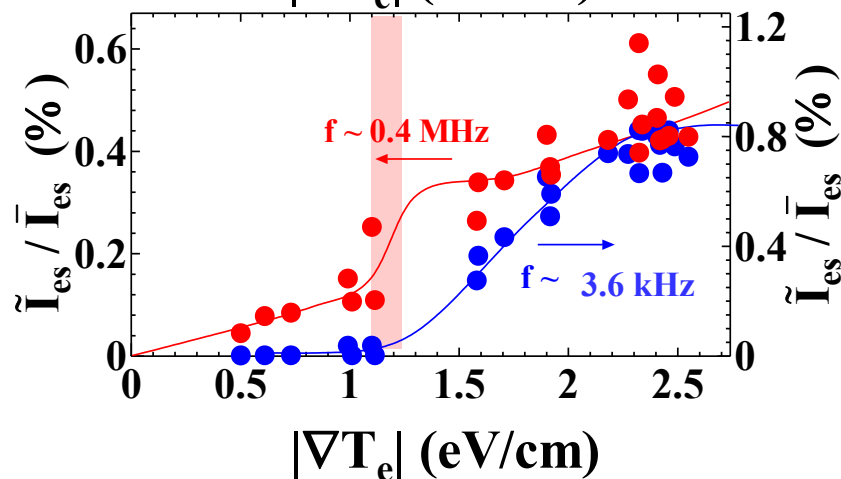
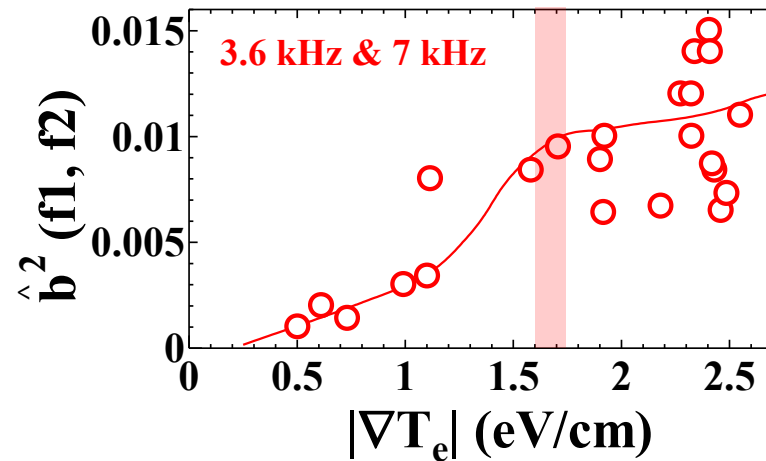
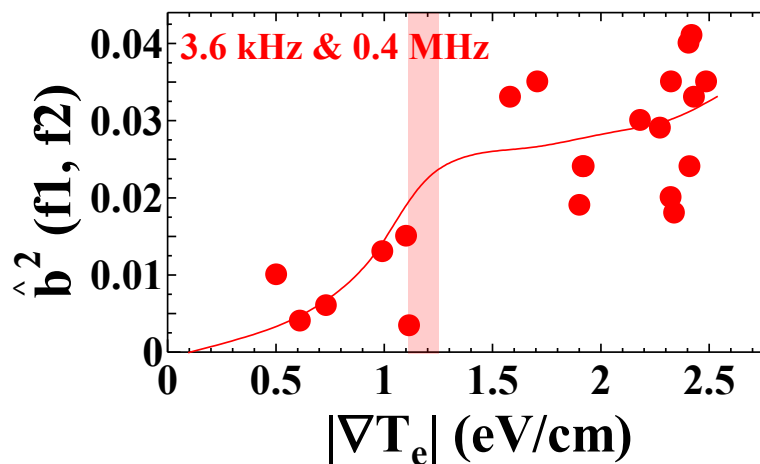
ETGモード (~0.4MHz)



ドリフト波モード (~7 kHz)

ETGによる非線形相互作用(フルートモード)

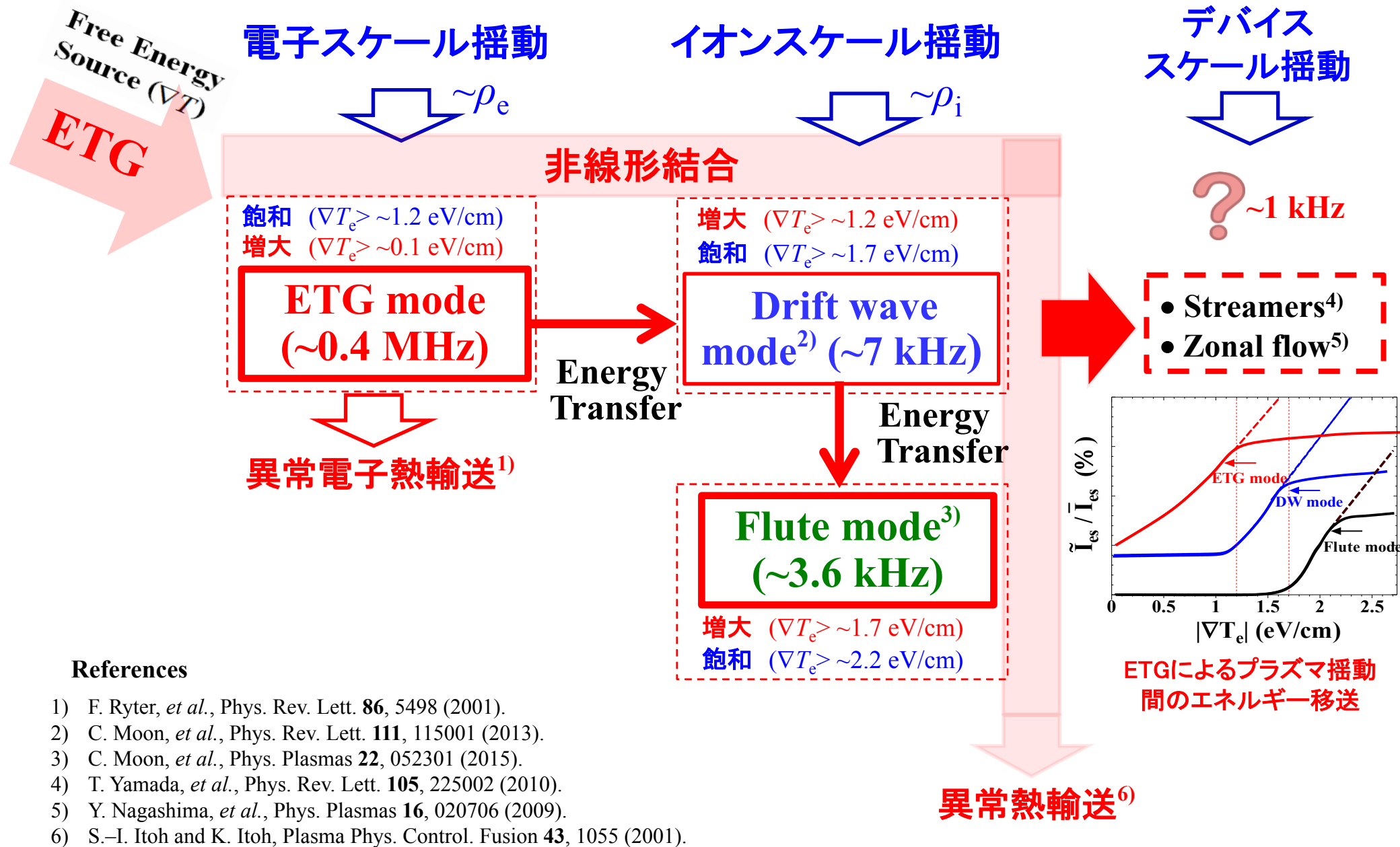
$$P_{\mu} = 20 \text{ W}, V_{g1} = -10 \text{ V}, V_{ee1} = -4 \text{ V}, V_{ee2} = -1.5 \text{ V}, r = -0.9 \text{ cm}$$



C. Moon, et al., Phys. Plasmas 22, 052301 (2015).

ETG強度が閾値を超えると、ドリフト波モード強度は飽和し、そのエネルギーが移送されることでフルートモードが増幅される。

プラズマ揺動間のエネルギー移送



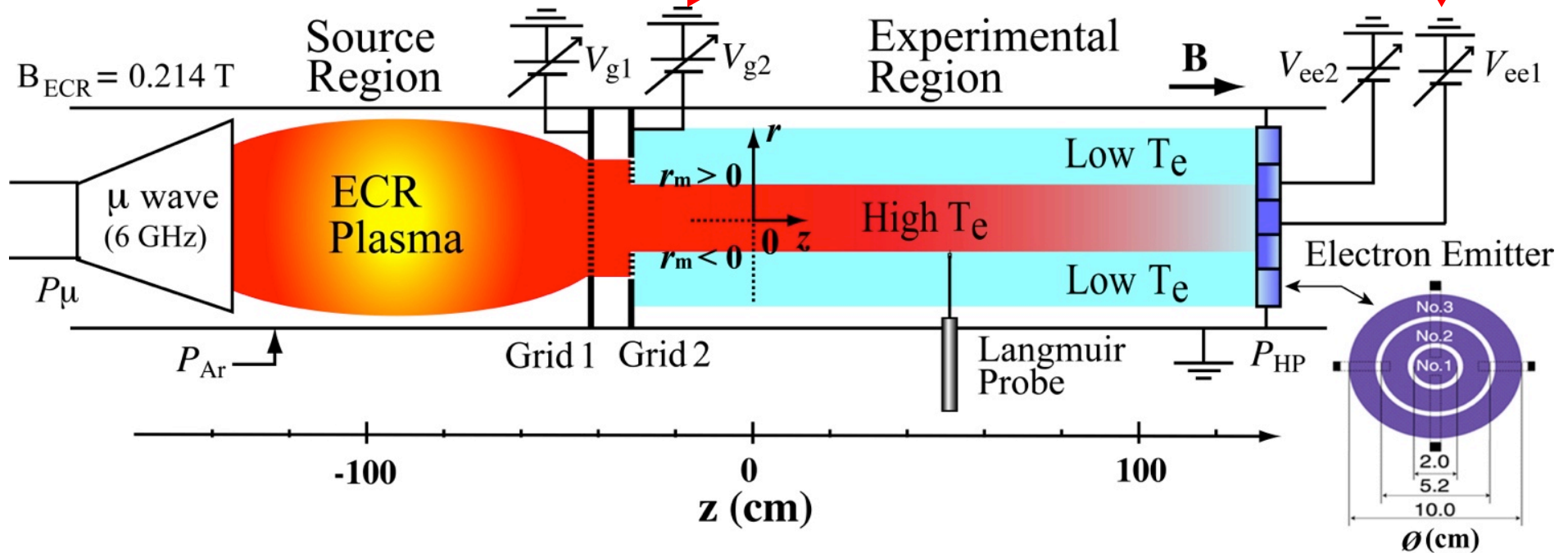
ETGモードに対する $E \times B$ シアの効果

$B : 0.214 \sim 0.23 \text{ T}$
 $\rho_e = \sim 0.04 \text{ mm}, \rho_i = \sim 2.5 \text{ mm}$

ETGの制御

垂直電場(E_r)の制御

$$E_r = -\partial\phi(r)/\partial r$$



Q_T Upgrade Machine at Tohoku University

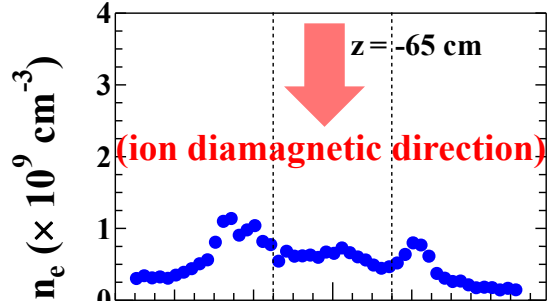
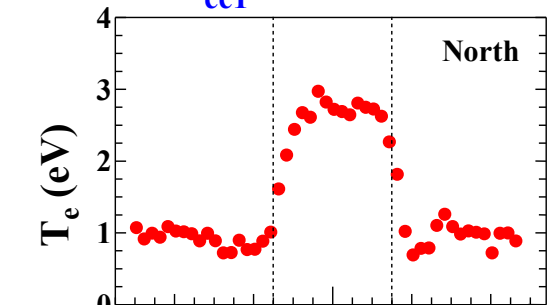
垂直電場 (E_r) の形成と制御

B ⊗

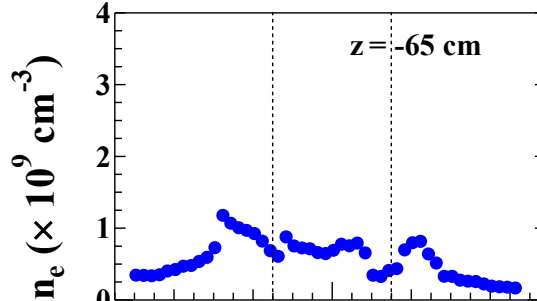
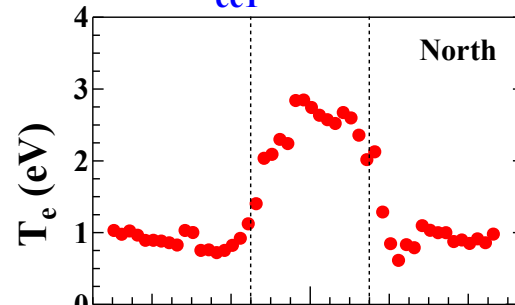
$$P_\mu = 20 \text{ W}, V_{g1} = -10 \text{ V}, V_{g2} = -30 \text{ V}, V_{ee2} = -1.5 \text{ V}$$

$$E_r = -\partial\phi(r)/\partial r$$

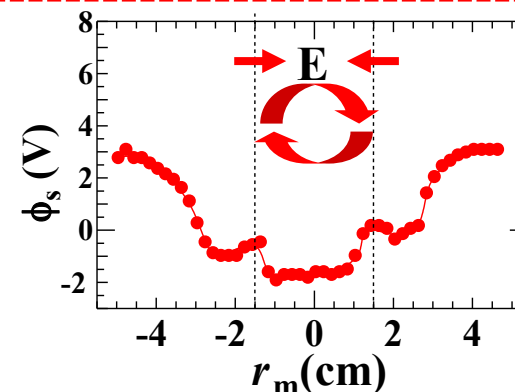
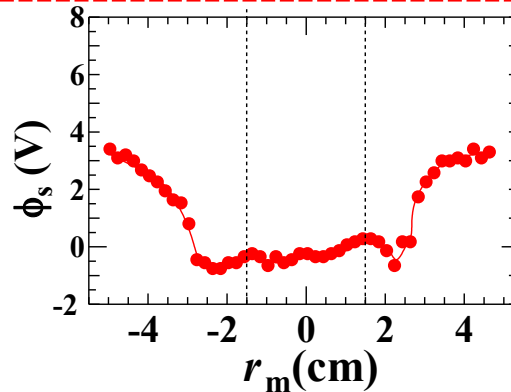
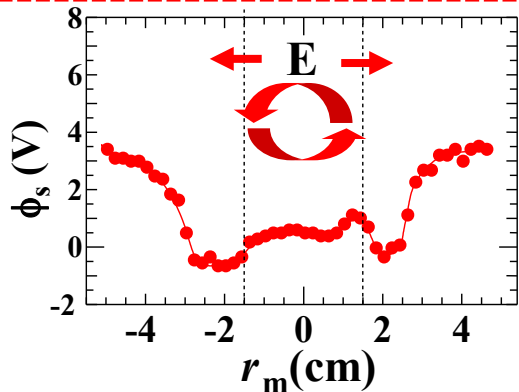
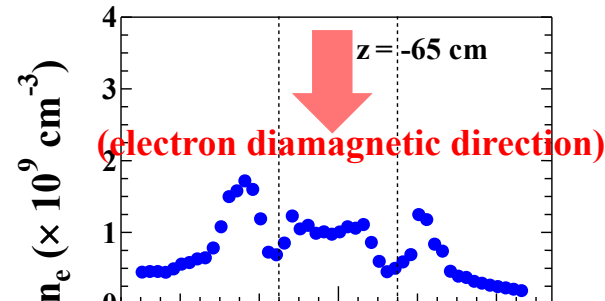
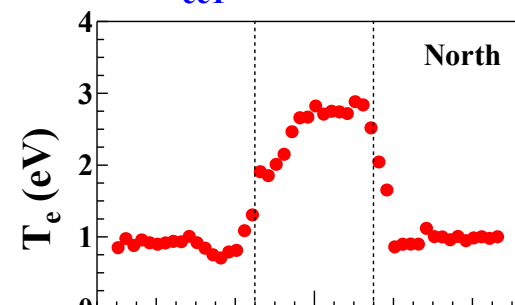
$V_{ee1} = -3 \text{ V}$



$V_{ee1} = -4 \text{ V}$



$V_{ee1} = -5 \text{ V}$



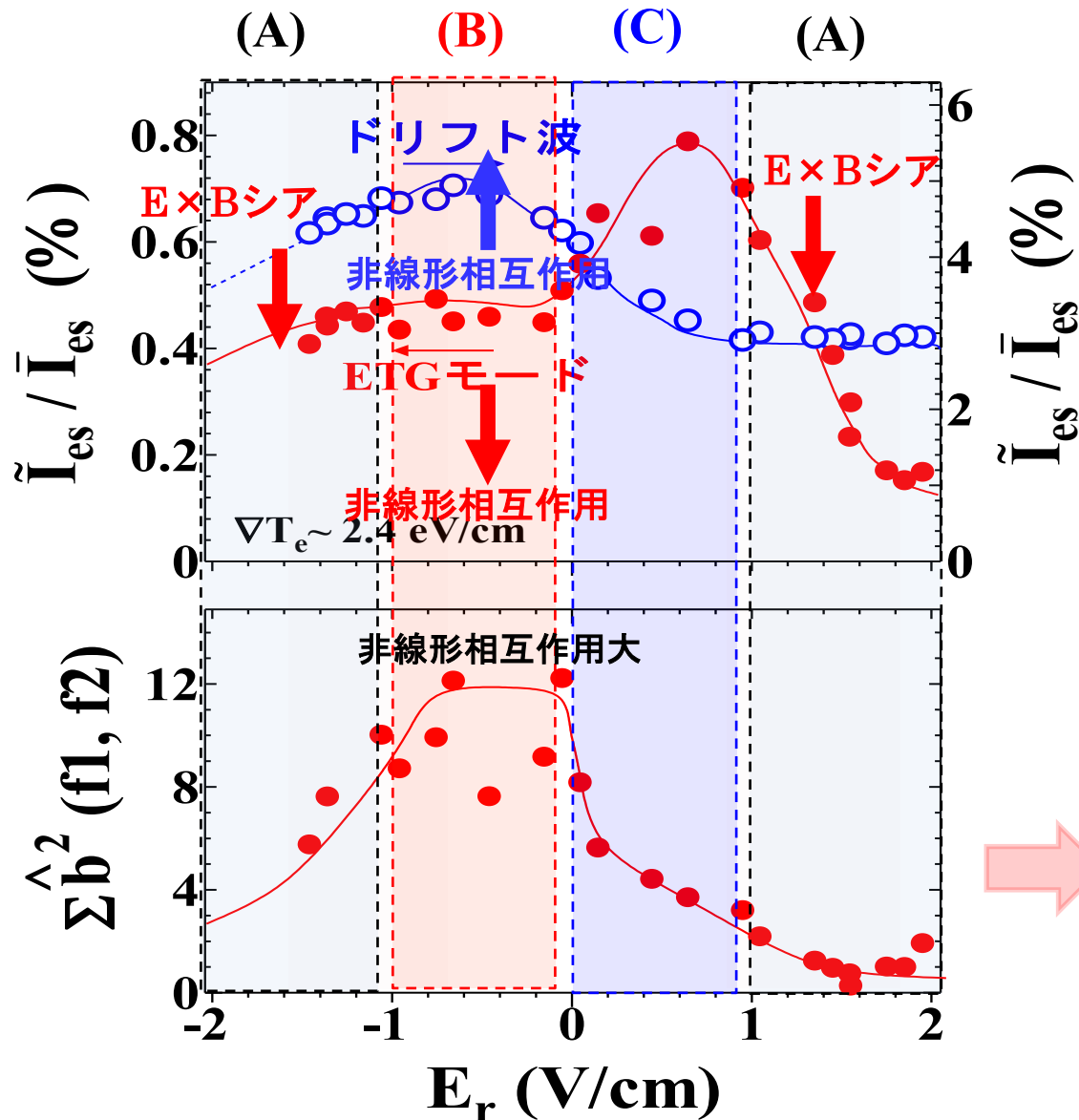
$$E_r \approx 1.1 \text{ (V/cm)}$$

$$E_r \approx -0.1 \text{ (V/cm)}$$

$$E_r \approx -1.0 \text{ (V/cm)}$$

E_r によるETGモードとDWモードの非線形相互作用

$$P_{\mu} = 20 \text{ W}, V_{g1} = -10 \text{ V}, V_{g2} = -30 \text{ V}, V_{ee2} = -1.5 \text{ V}, r = -0.9 \text{ cm}$$



(A) **ETGモード 抑制**

=> 強い E_r による
E×Bシア効果

(B) **ETGモード 抑制**

=> DWモード強度増大
=> **非線形相互作用が増加**

(C) **ETGモード強度維持**

=> **非線形相互作用が減少**
=> DWモードへのエネルギー
移動なし

マルチスケール非線形相互作用による**新たなETGモードの抑制機構**が明らかになった。

C. Moon et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* 58, 105007 (2016).

ECRプラズマの高温電子と低温の熱電子を用いて、電子温度勾配(ETG)形成・制御することで観測される高・低周波揺動に対する非線形相互作用及びETGモードの抑制機構を詳細に調べた結果、以下のことが分かった。

- ETG強度が閾値を超えることで、この**ETGモードのエネルギーが非線形相互作用**によって、ドリフト波モードやフルートモードなどの低周波揺動に移送されることを世界で初めて明らかにした。
- ETGモードに垂直電場を制御して印加することで、弱い垂直電場でも、径方向内向きの電場の場合には、ETGモードとドリフト波モードとの非線形結合が助長され、エネルギーが移送されることに伴いETGモード強度が減少するという**新たなETGモードの抑制機構**を解明した。

ご清聴ありがとうございます。