

一般講演

第16回若手科学者によるプラズマ研究会
日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所
2013年3月4 - 6日

TST-2球状トカマク装置におけるフロー 及びプラズマ乱流構造計測

曾根原正晃, 永島芳彦^A, 江尻晶, 高瀬雄一, 古井宏和, 角田英俊,
大迫琢也, 山口隆史, 若月琢馬, 平塚淳一, 加藤邦彦,
新屋貴浩, 橋本貴博, 富樫央, 中西綾香

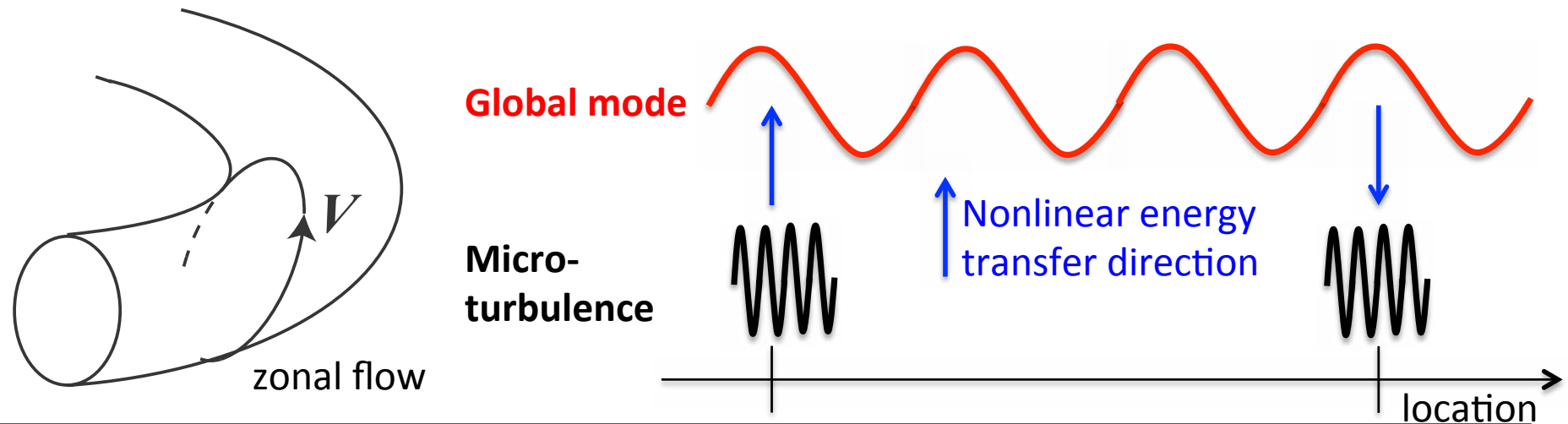
東京大学、九州大学^A

発表内容

- 研究動機
- 計測装置
 - 三軸ピックアップコイル
 - マツハプローブ
 - 静電プローブ
- 周波数スペクトル
- マクスウェルストレス
- プラズマフロー
- まとめ

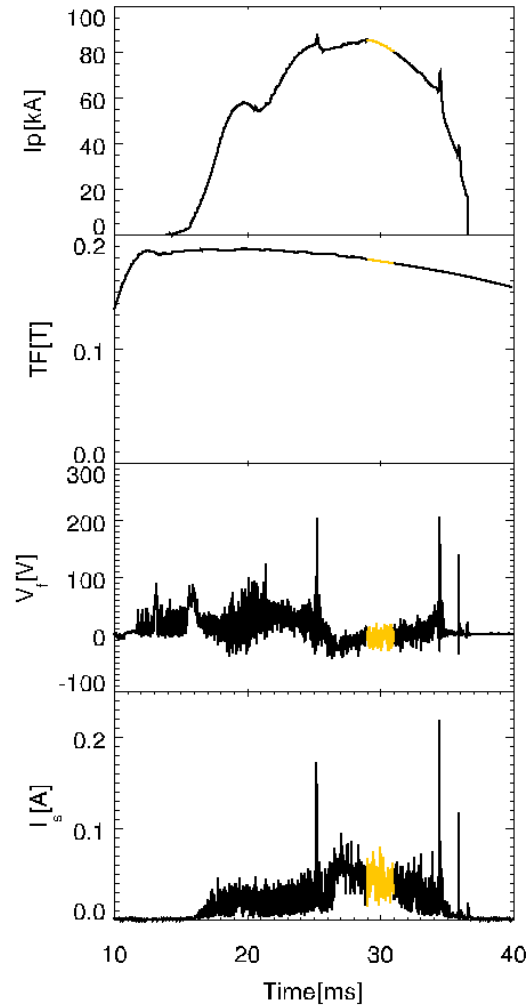
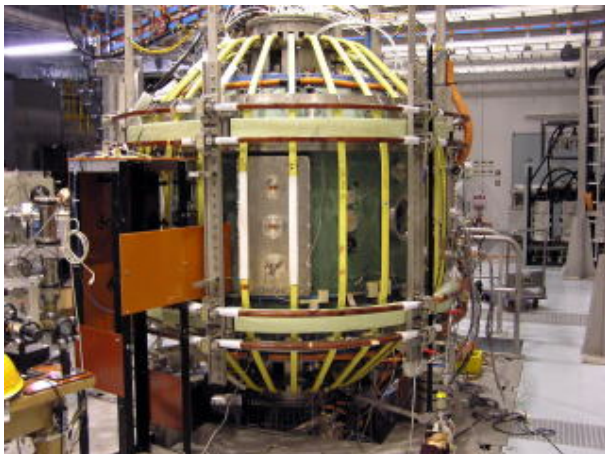
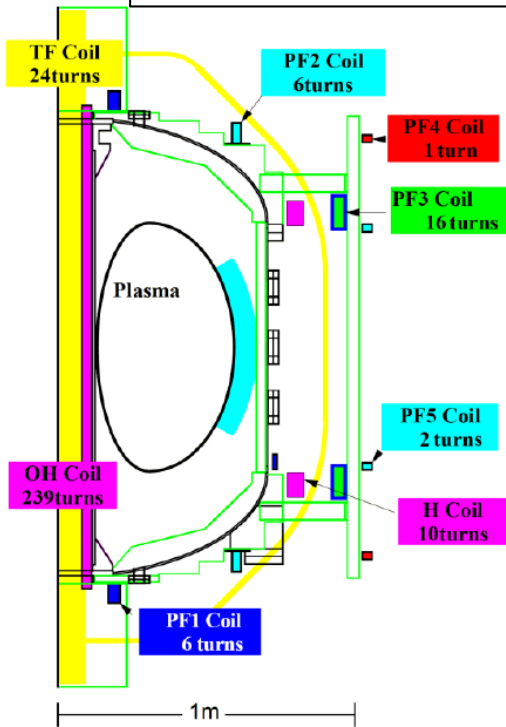
研究動機

- ゾーナルフローやMHD揺動といった大域的乱流構造の生成メカニズムを探るため、エネルギー、運動量輸送の効果を評価することを目的としている。



TST-2 装置におけるOH加熱による放電の周辺部乱流構造を静電プローブ、マッハプローブ、ピックアップコイルが一体となったプローブで観測した。

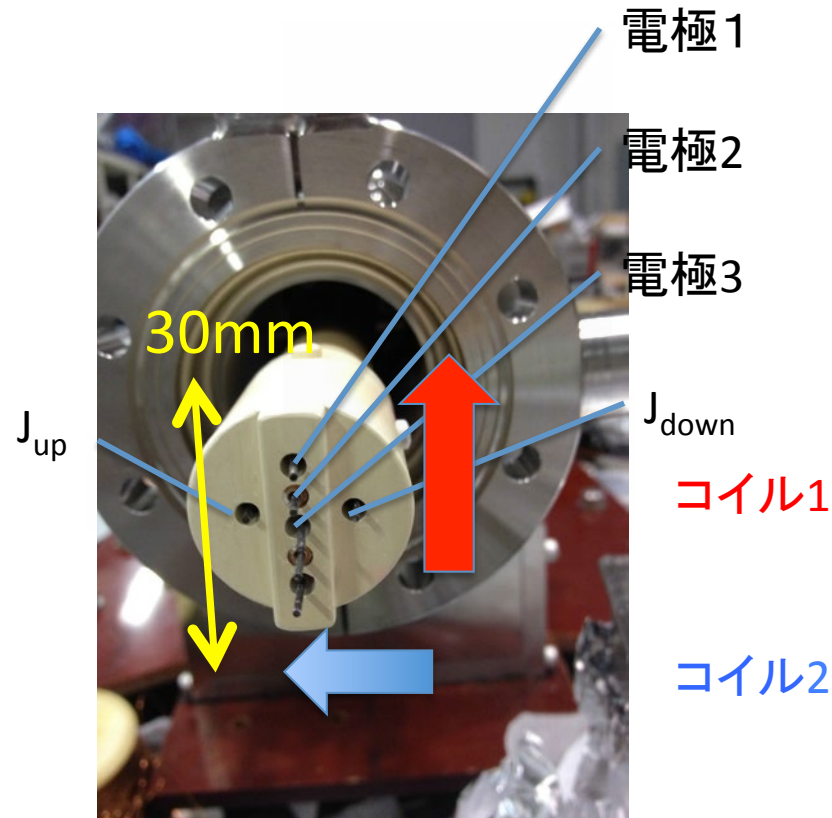
球状トカマク装置 TST-2



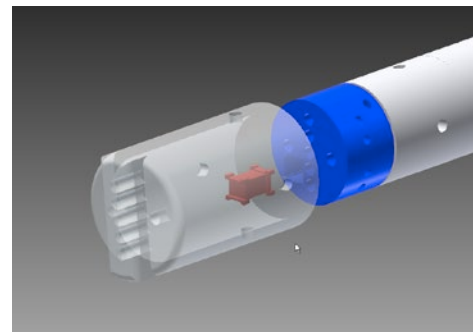
<主なプラズマパラメータ>

- 大半径: $R < 0.38$ [m]
- 小半径: $a < 0.25$ [m]
- アスペクト比: $A = R / a \sim 1.5$
- トロイダル磁場: $B_t < 0.2$ [T]
- プラズマ電流: $I_p \sim 100$ [kA]
- 放電時間: $\Delta t \sim 40$ [ms]
- 電子密度: $n_{e0} \sim 10^{19}$ [m⁻³]
- 電子温度: $T_e \sim 100$ [eV]

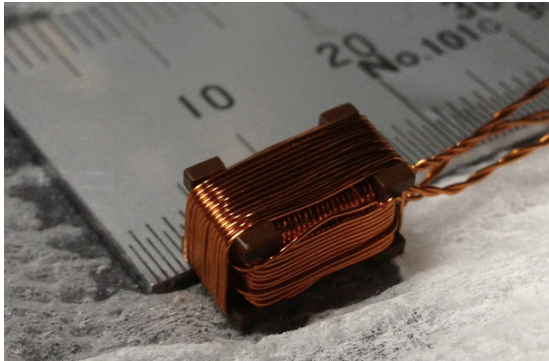
プローブ先端部構造



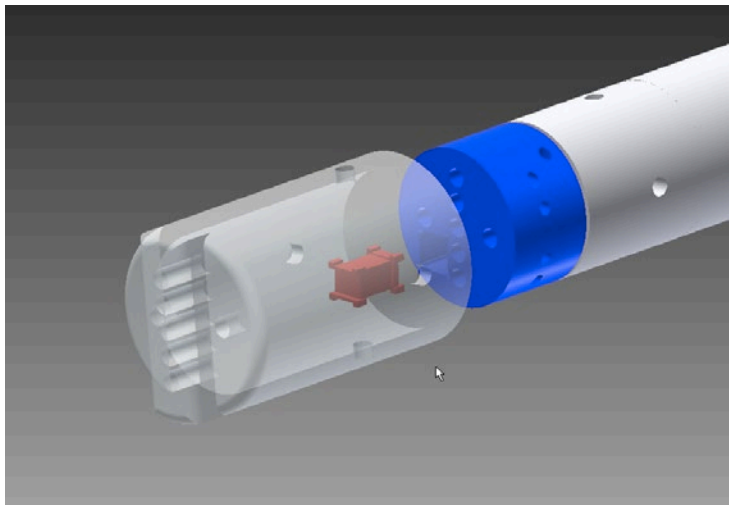
- プローブ先端は回転可能になっており、プラズマフロー、磁気揺動、浮遊電位、イオン飽和電流を同時に計測する事ができる
- 各種信号が混入せずに方向性を持っていることを調べるため、各種信号の角度分布を計測した



3軸ピックアップコイル



3-axis pickup coil

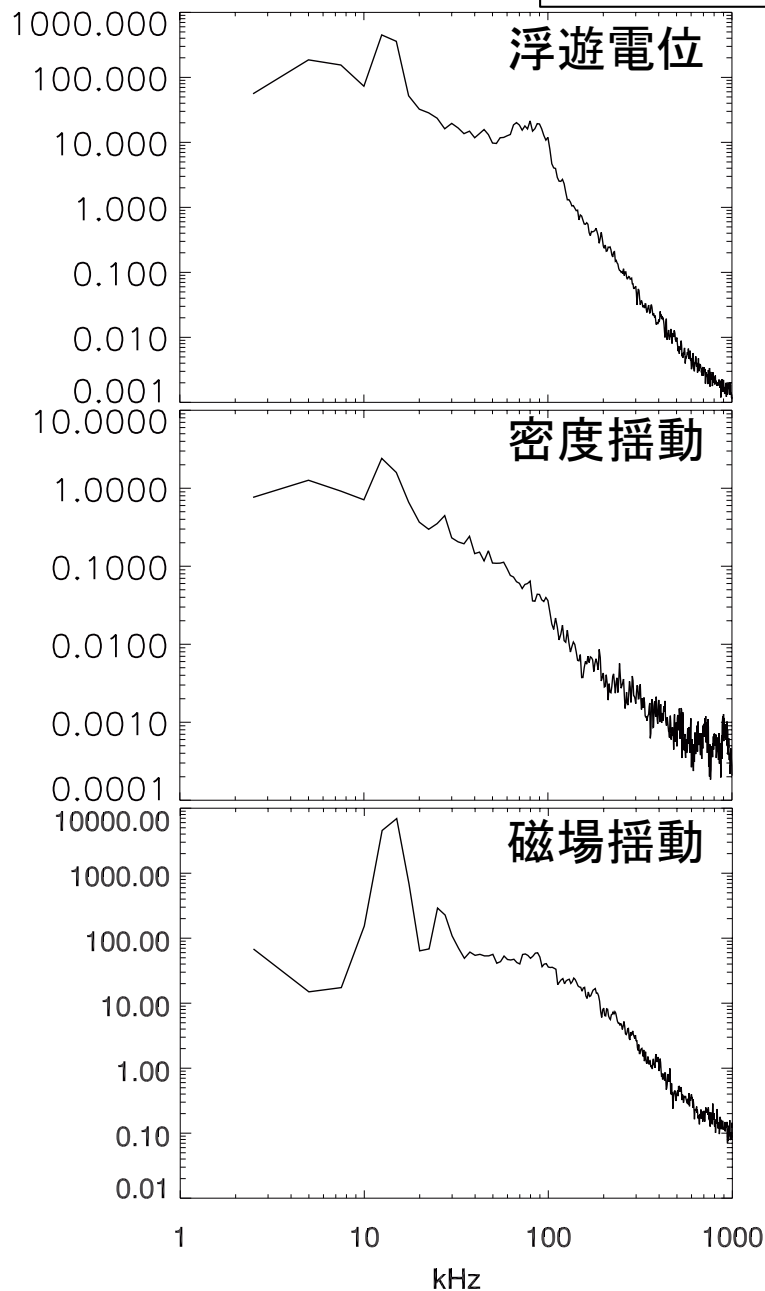


- 三軸の磁場揺動を同時に計測するためのピックアップコイルを制作した
- 高 β の球状トカマクでは磁気揺動が非線形輸送に大きく寄与する可能性がある
- マクスウェルストレス $\langle \tilde{B}_r \tilde{B}_\phi \rangle$ が運動量方程式を通じゾーナルフローの生成に寄与する可能性がある

マクスウェルストレスは以下の式変形により得られる

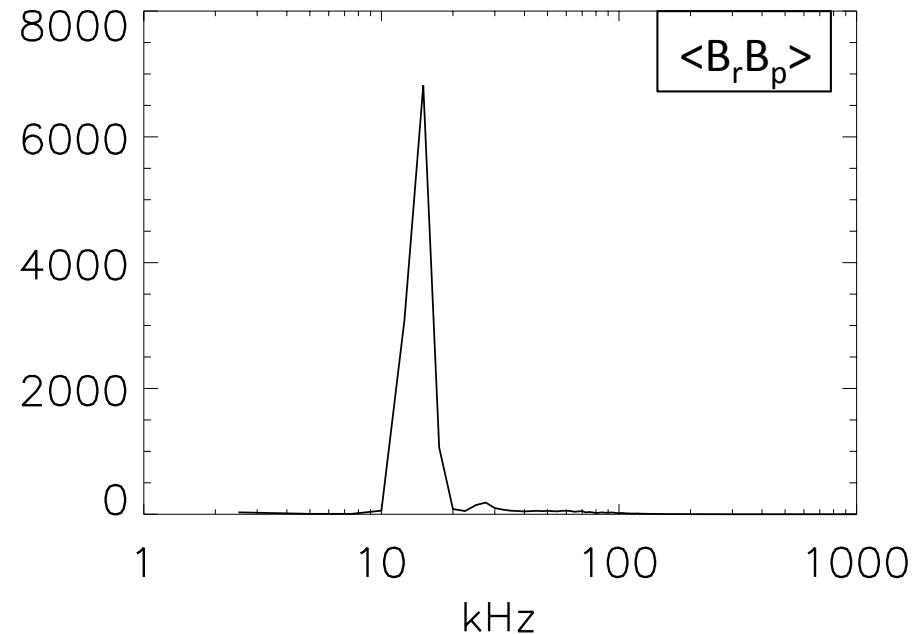
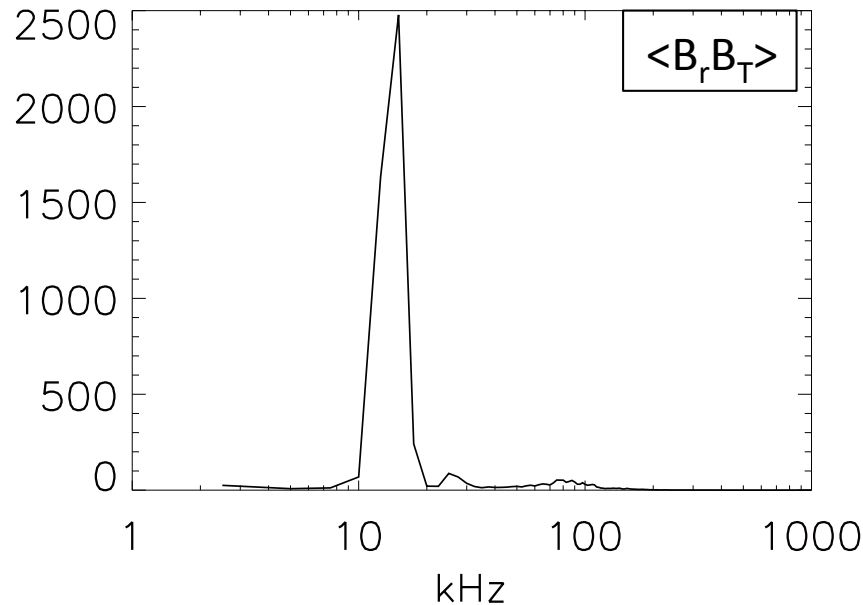
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \right) u_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \underline{(\mathbf{j} \times \mathbf{B})_i} + \nu \nabla^2 u_i \quad \frac{\partial V_{ZF}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (\tilde{v}_r \tilde{v}_\phi - \underline{\tilde{B}_r \tilde{B}_\phi}) = \nu V_{ZF}$$

周波数スペクトル



- リミター位置内側(R=580)おいての浮遊電位、イオン飽和電流、磁場揺動のパワースペクトルを示す
- 各揺動で14kHzにおいてMHD揺動によるピークがあり、100kHz付近まで平坦なパワーが存在している
- 浮遊電位では70~100kHz付近に、磁場揺動では28kHzにもピークが観測される

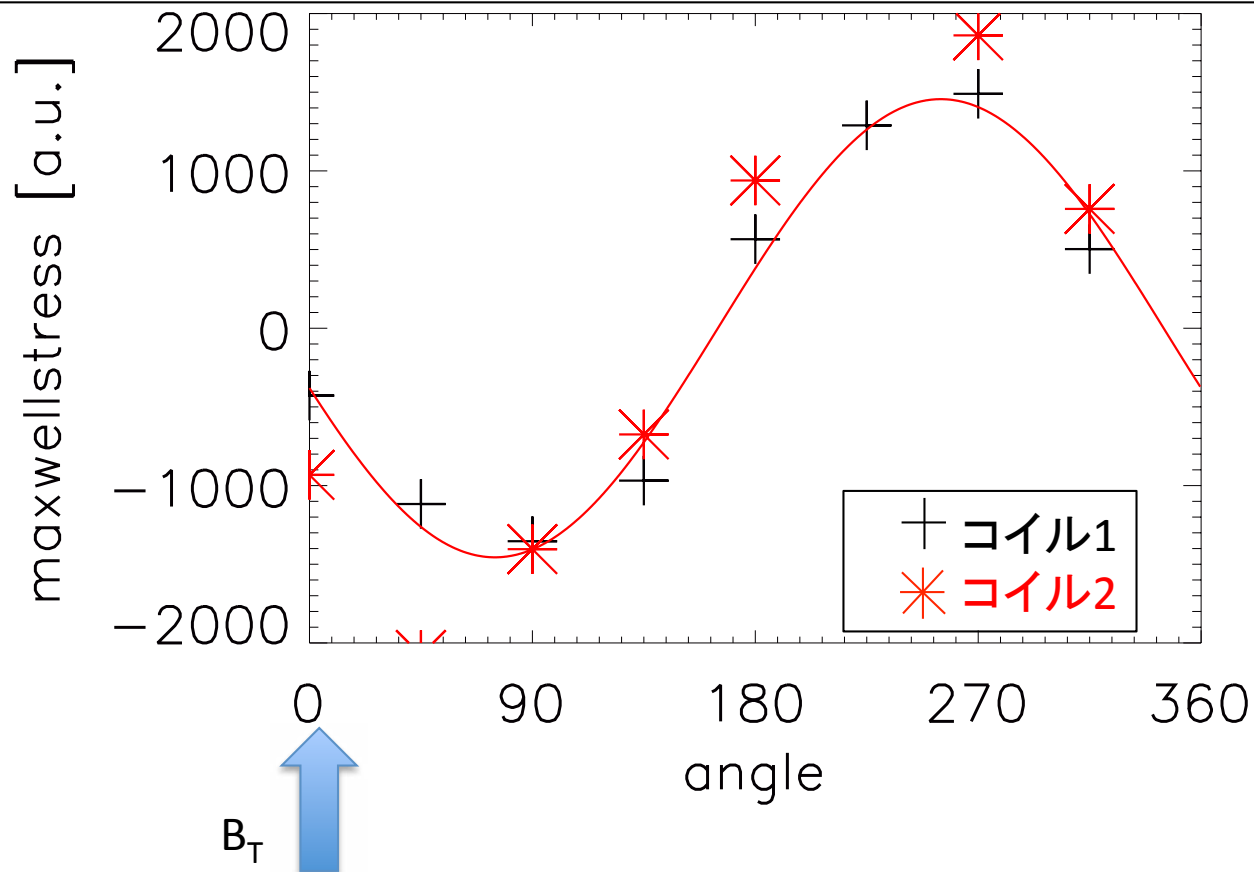
マクスウェルストレス



- $\langle B_r B_T \rangle$, $\langle B_r B_p \rangle$ を以下の式から評価した
- 14kHzのピークからの寄与が殆どを占めている

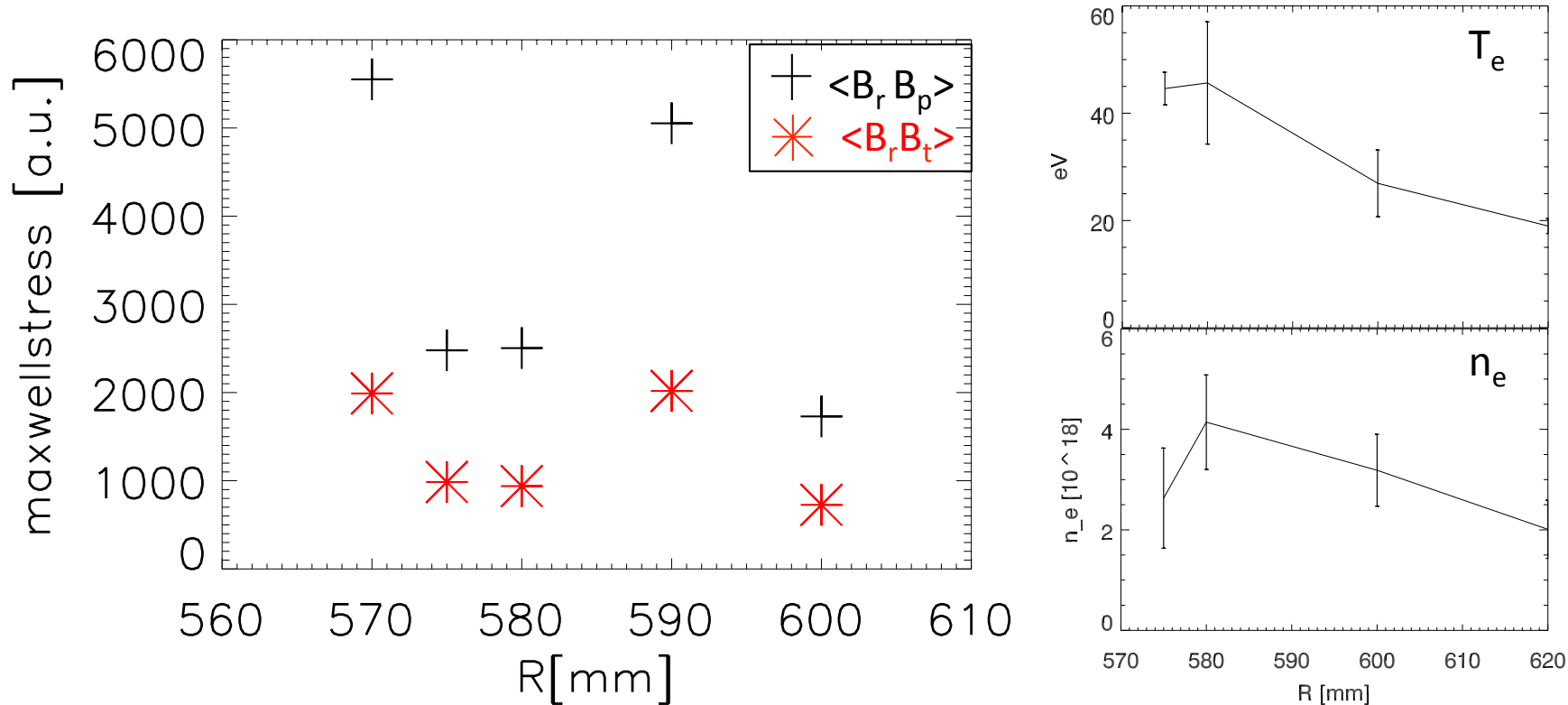
$$\langle \tilde{B}_r \tilde{B}_t \rangle = \sqrt{P_{\tilde{B}_r} P_{\tilde{B}_t} \gamma^2 \sin \alpha} = \sqrt{P_{\dot{B}_r} P_{\dot{B}_t} \gamma^2 \sin \alpha / \omega}$$

マクスウェルストレス角度分布



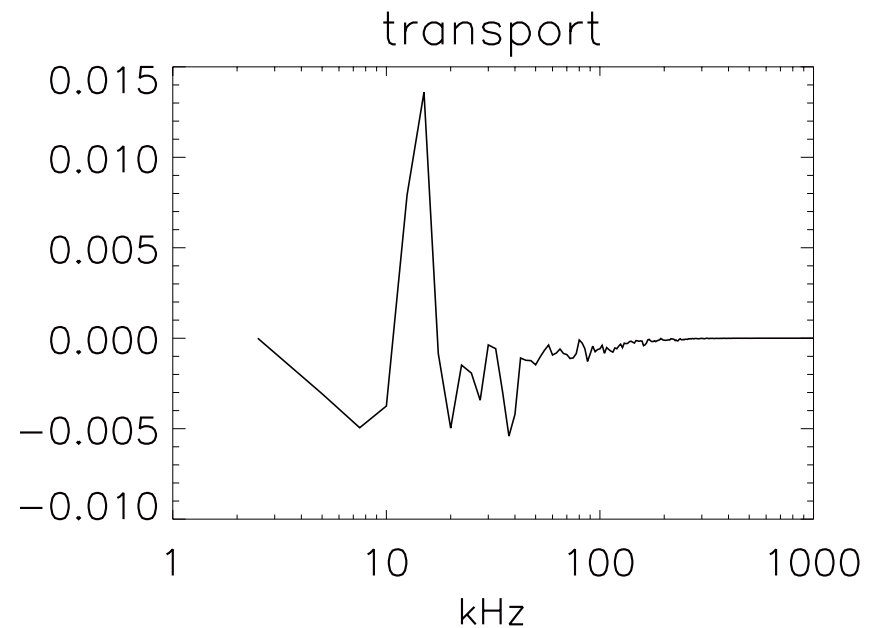
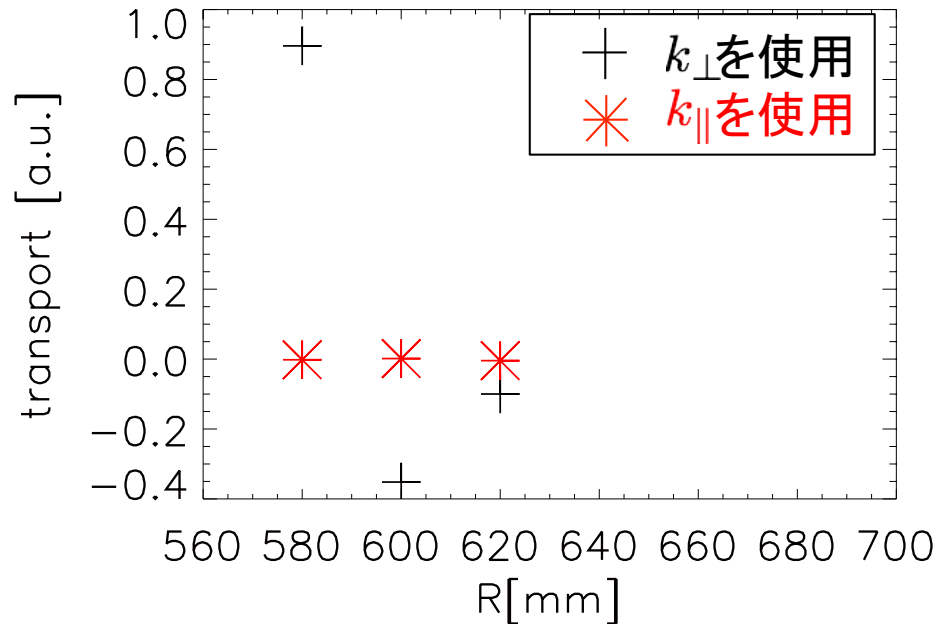
- トロイダル方向の磁場を 0° とし、 $R=580$ でマクスウェルストレスの角度分布を求めた。
- サインカーブを再現しており、信号間の位相差が検出できていること、またトロイダル方向の磁場揺動が支配的であることがわかる。

マクスウェルストレス径方向分布



- ピックアップコイルから求めた $\langle B_r B_p \rangle$, $\langle B_r B_t \rangle$ の径方向分布
- リミター位置前(R=595)で増大していることが観測された

E×B輸送



- E×Bによる輸送を以下の式に従い、浮遊電位、イオン飽和電流による信号から求めた。
- 輸送においても14kHzからの寄与が支配的である
- k_{θ} を求める際、電極間の位相差を用いたが、検証のため電極を B_T 平行にした場合との比較を行った結果、大きく輸送が減少したことから k_{θ} が正確に検出できていると思われる

$$\Gamma_{E \times B} = \langle \tilde{n} \tilde{v}_{E \times B} \rangle = \frac{1}{B} \sum_f \text{Re}[i \langle n_f k_{\theta_f} \phi_f \rangle] = \frac{2}{B} \sum_f k_{\theta_f} \sqrt{P_n P_{\phi}} \gamma^2 \sin \alpha$$

プラズマフロー

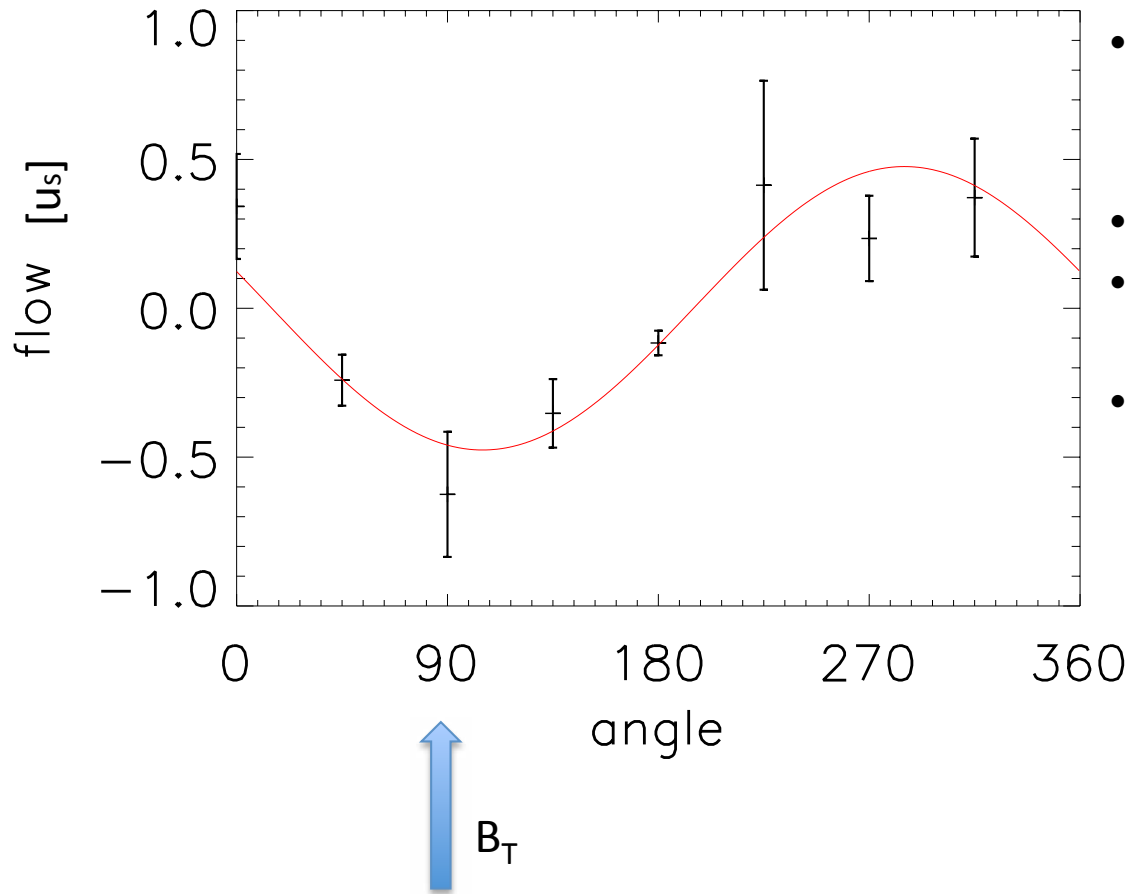
角度分布

- R=580でのプラズマフローの角度分布 (ポロイダル方向を0°としている)

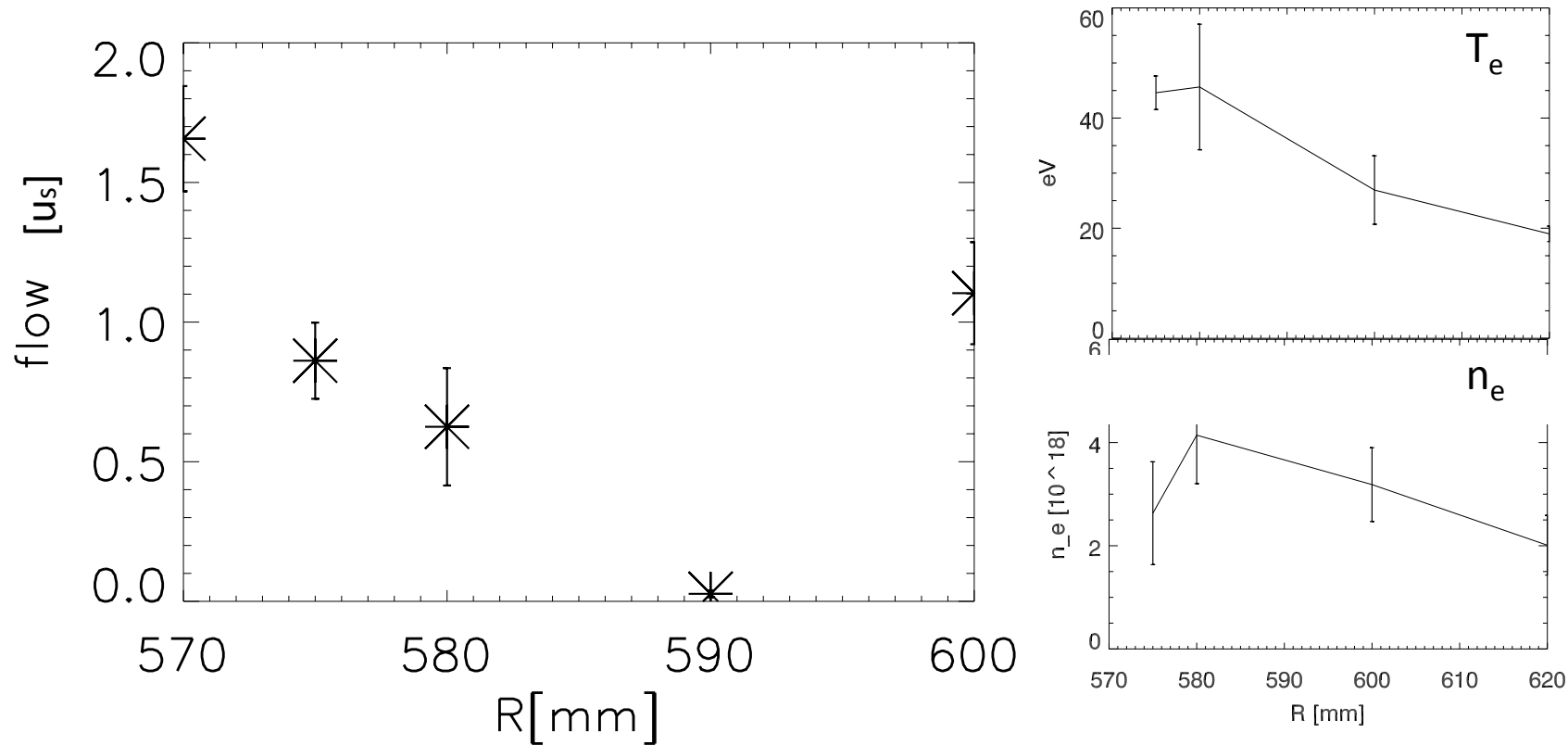
- $\frac{j_{\text{up}}}{j_{\text{down}}} = R = \exp(Ku_f)$

$$u_f = u_d / \sqrt{k_B T_e / m_i}$$

- K=2の(Free fall モデル)を採用する
- トロイダル流速 $\sim 0.5 * u_s$
ポロイダル流速 $\sim 0.1 * u_s$
- フローの角度分布を再現しており、マッハプローブが計測出来ていることを示している



プラズマフロー径方向分布

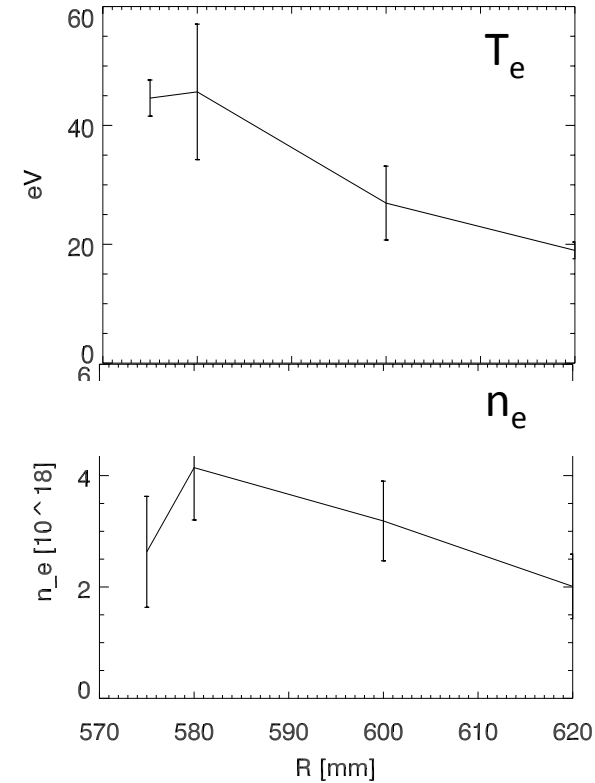
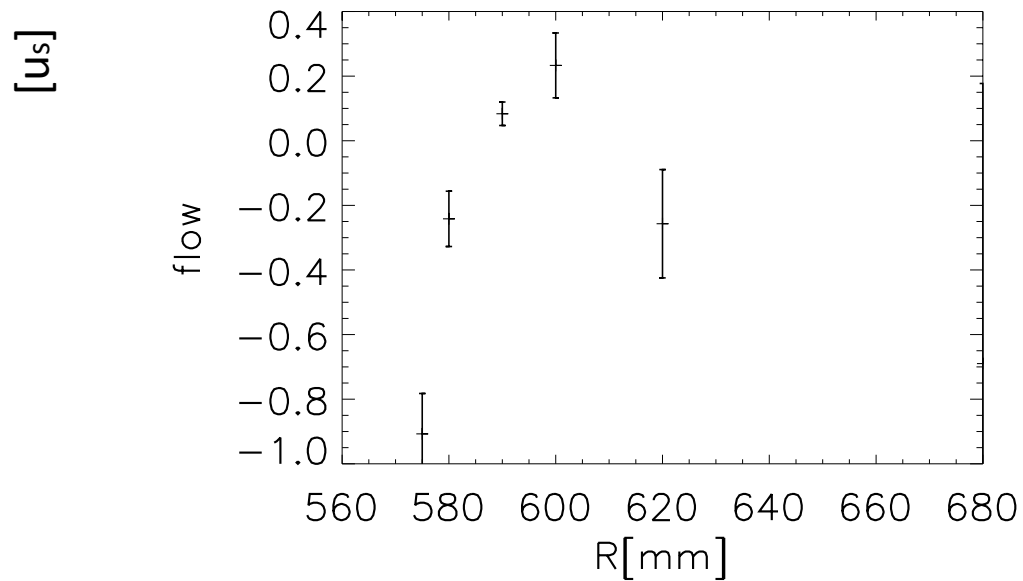


- トロイダル方向のフローの径方向分布
- リミター位置前後(R=595)で減少し、外側で再び上昇している

まとめ

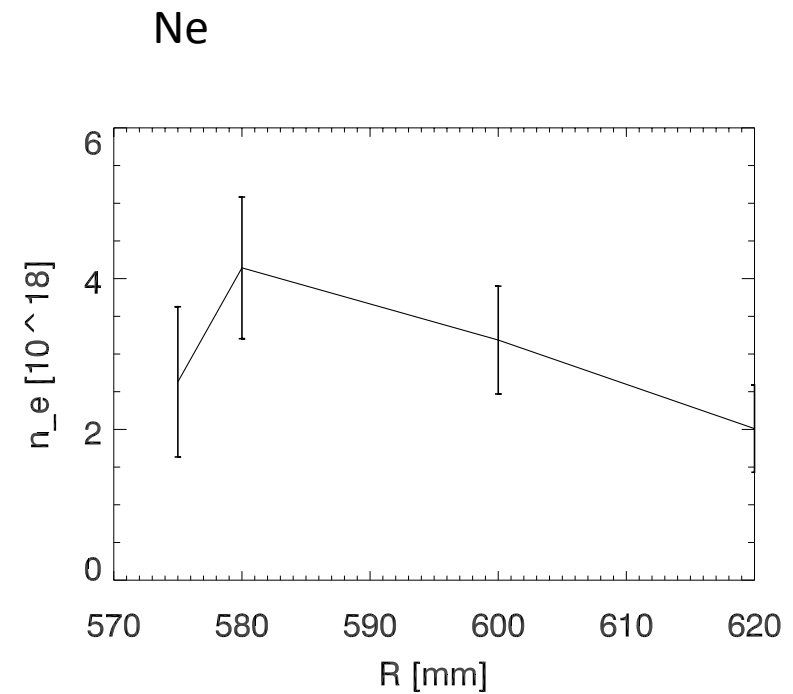
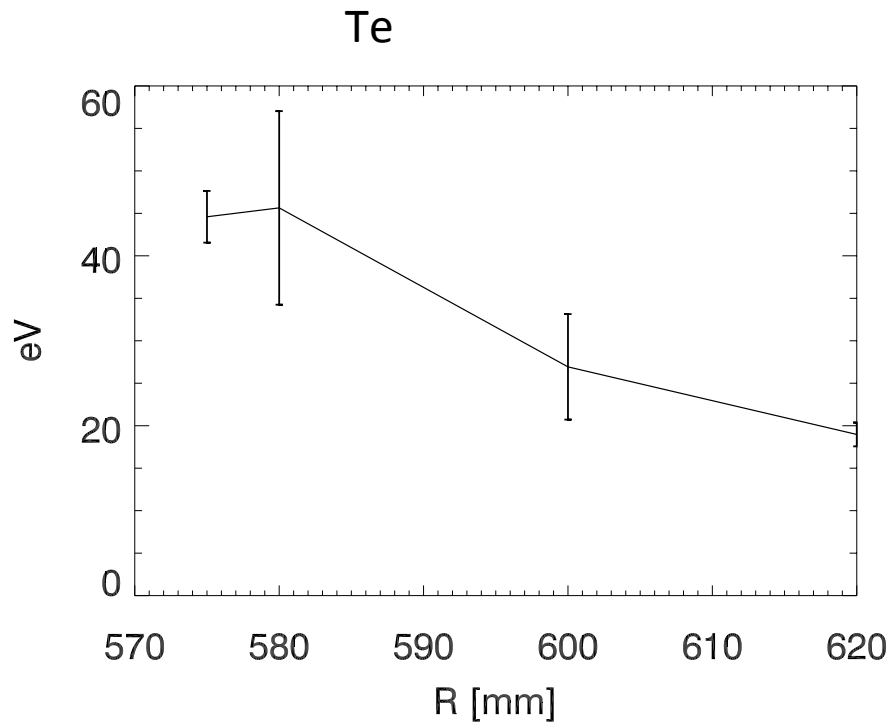
- 球状トカマク装置TST-2において静電プローブ、磁気プローブ、マッハプローブが一体となったプローブの制作を行い、磁場揺動、プラズマフローの計測を行った
- プラズマ輸送、マクスウェルストレスの評価を行った結果、両者共に $\sim 14\text{kHz}$ のMHD揺動の寄与が支配的であることがわかった
- 磁場揺動はポロイダル方向の揺動、プラズマフローはトロイダル方向のフローが支配的であることがわかった

プラズマフロー径方向分布



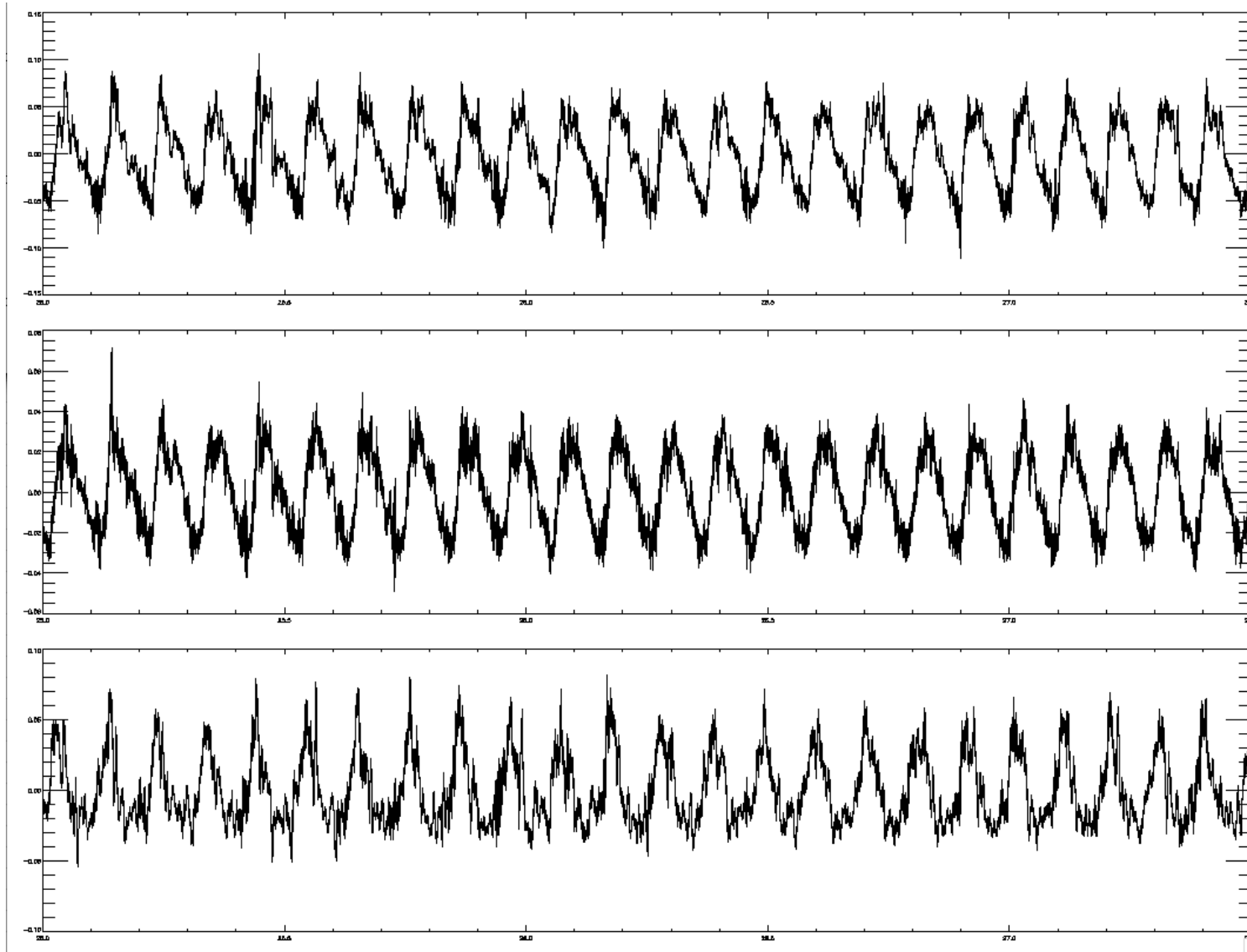
- 45°でのフローの径方向分布
- $R=600$ で向きが逆転している

温度、密度分布



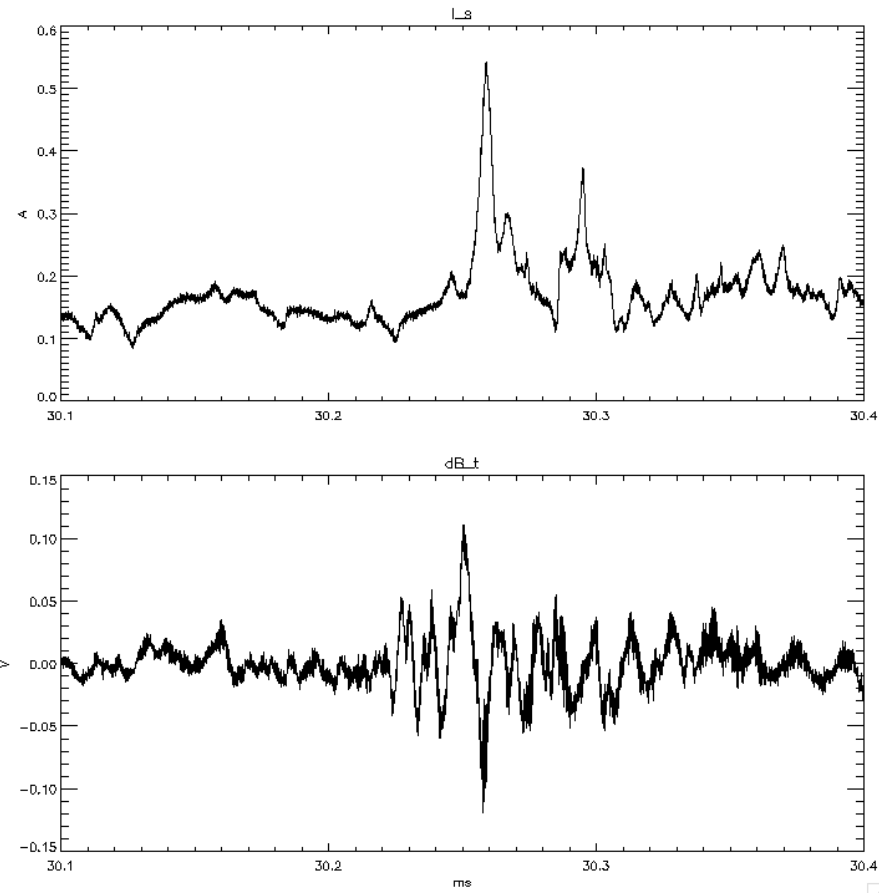
- リミター一位置R=595

磁気プローブ信号



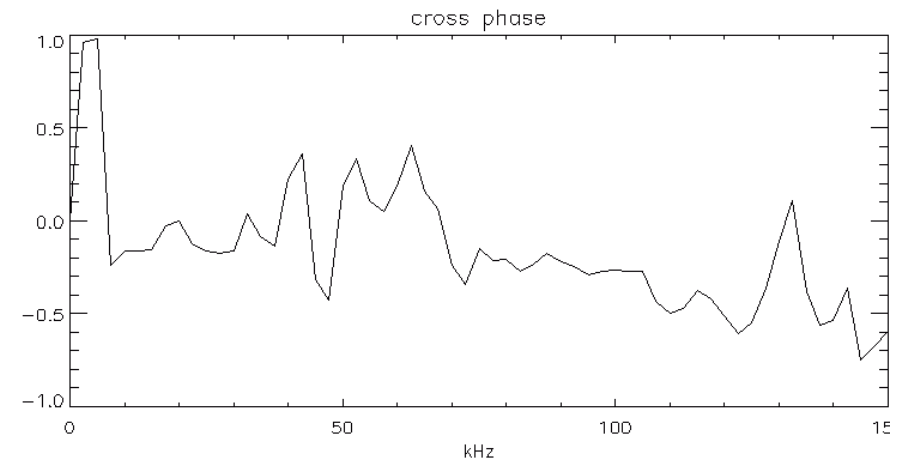
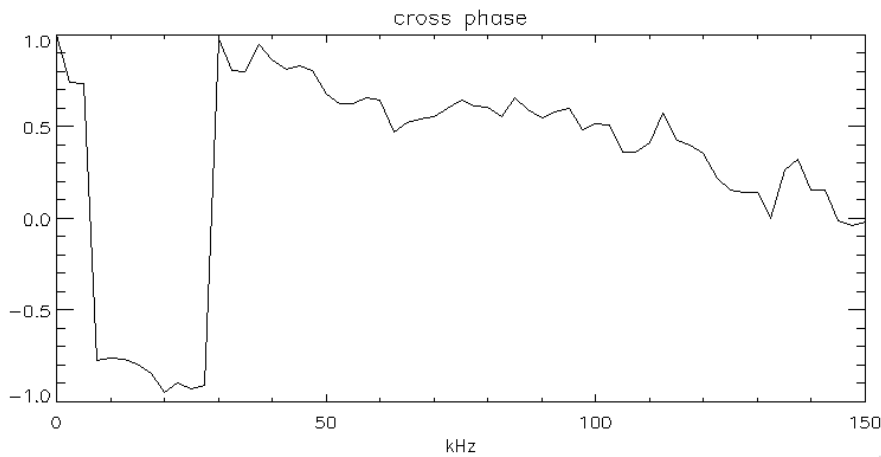
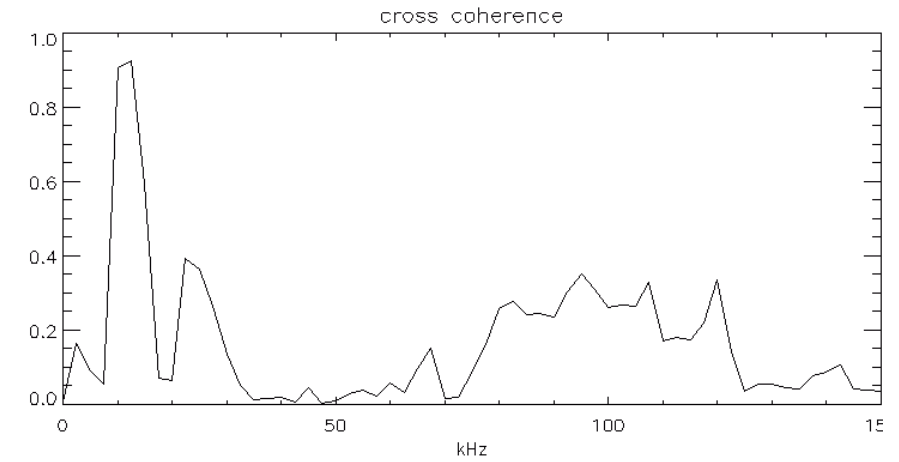
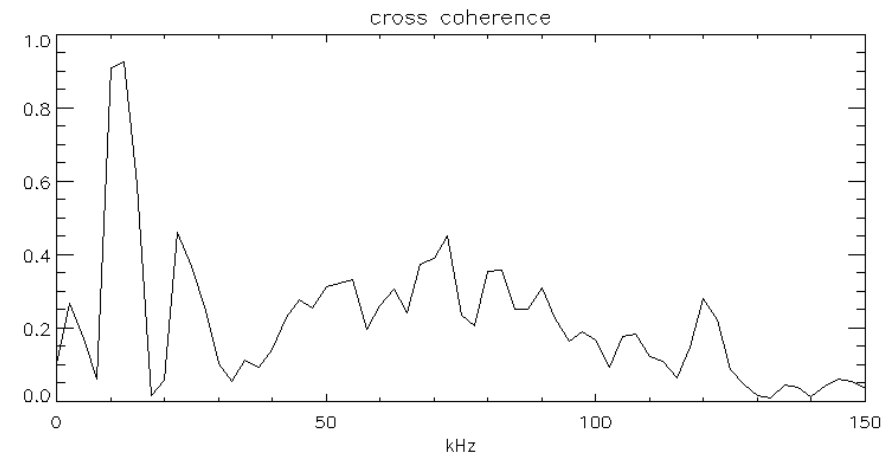
- 生信号

スパイク



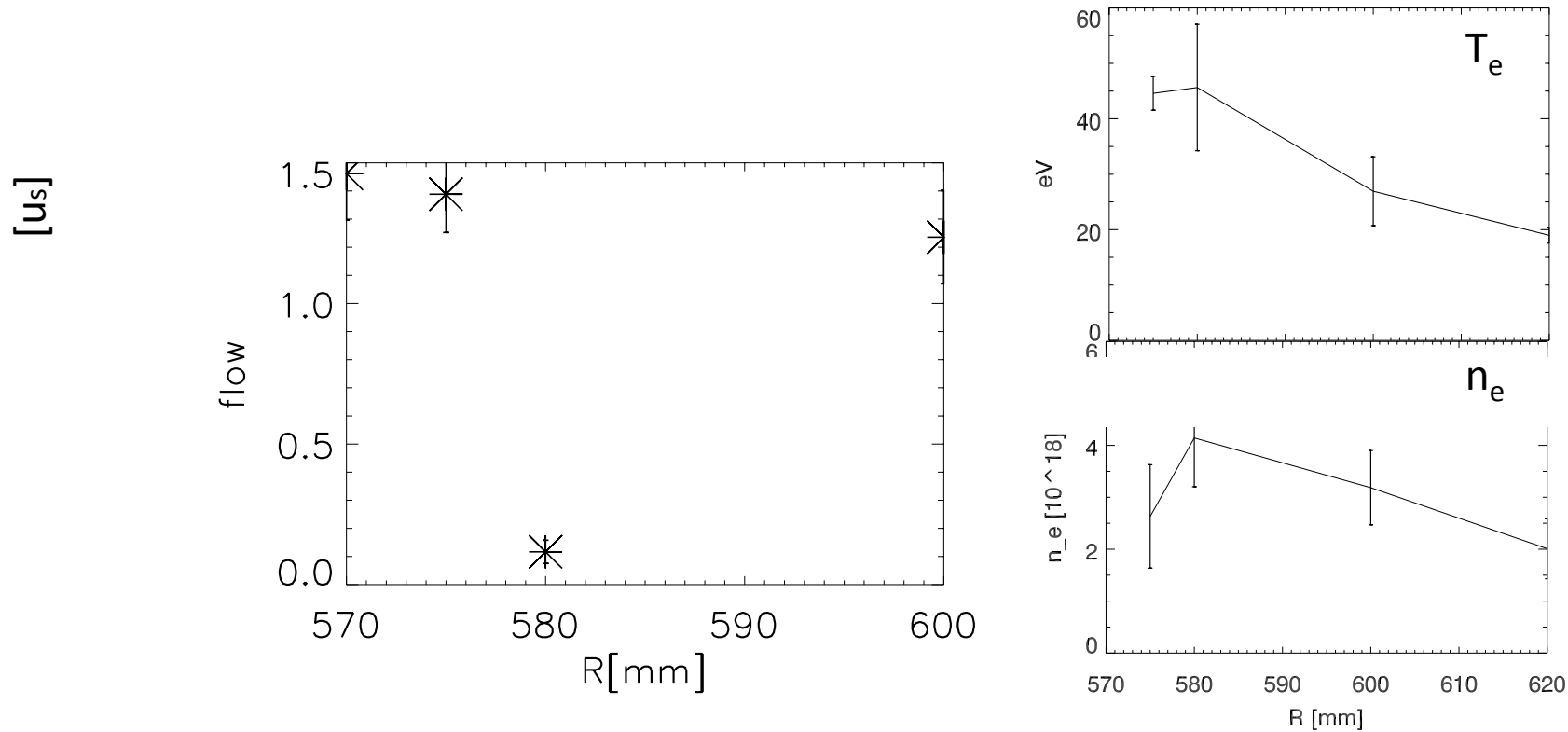
- $\Delta t < 50 \mu s$

磁気コイル、浮遊電位相関



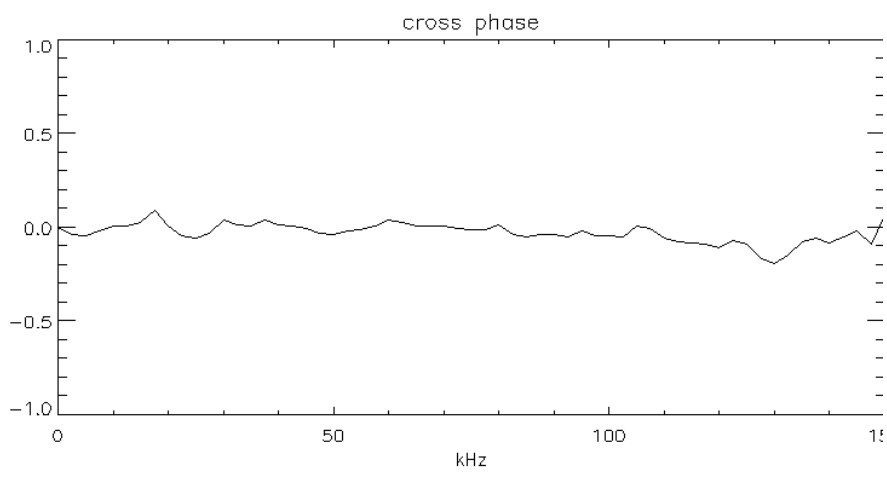
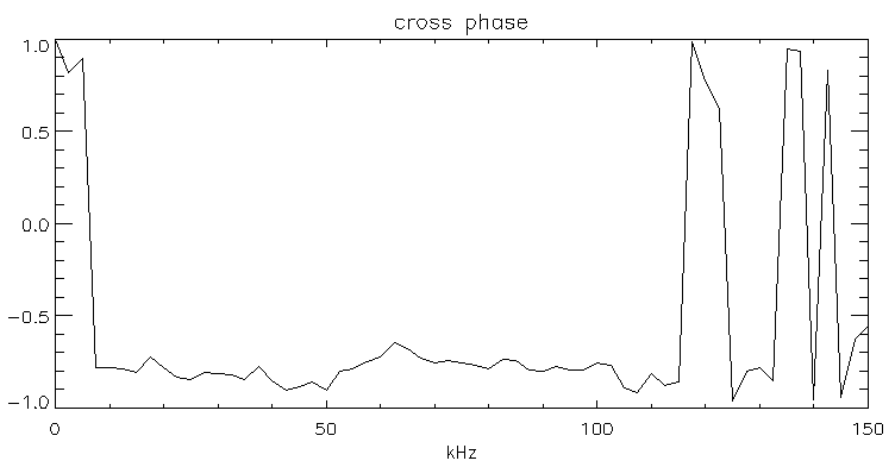
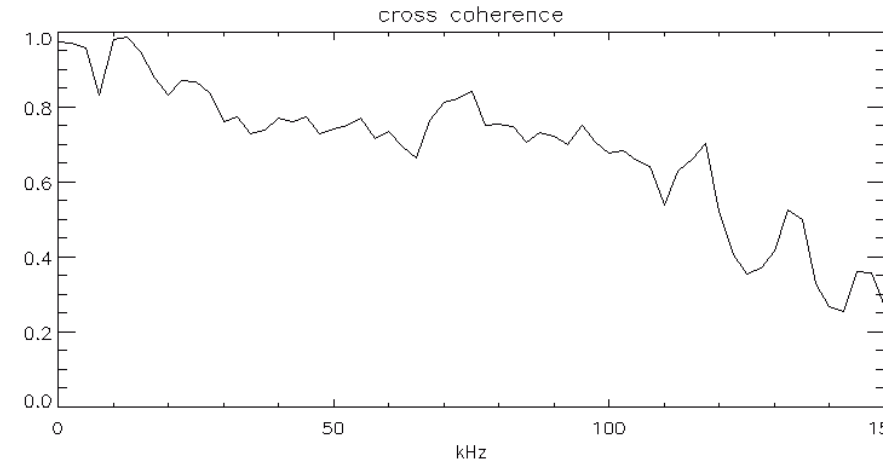
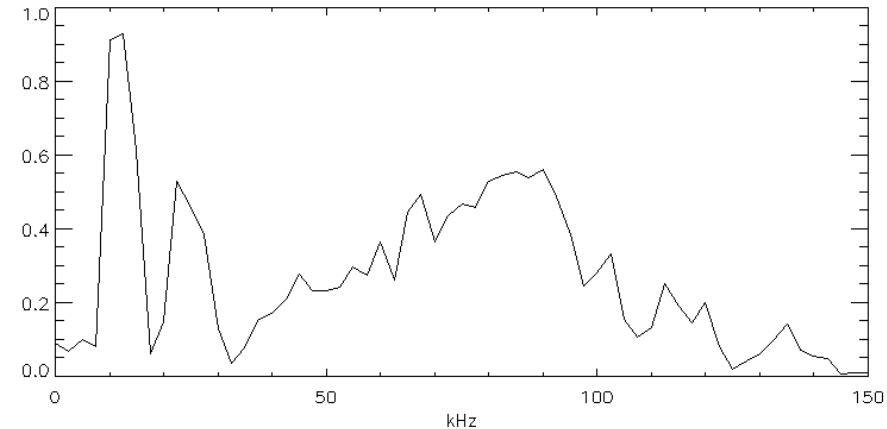
- B_pとイオン飽和電流位相, B_rとイオン飽和電流位相

プラズマフロー径方向分布



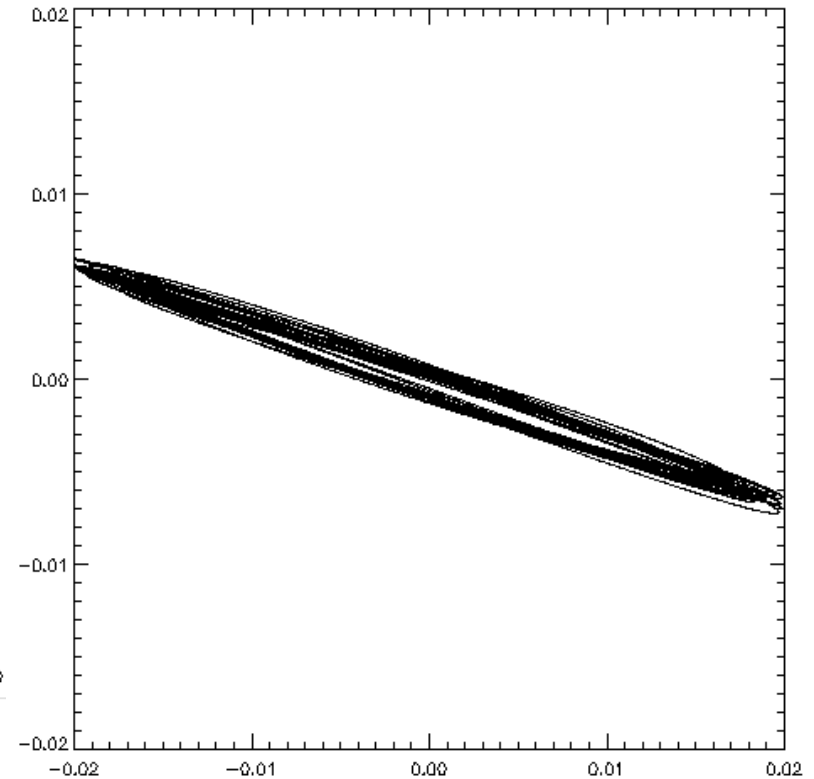
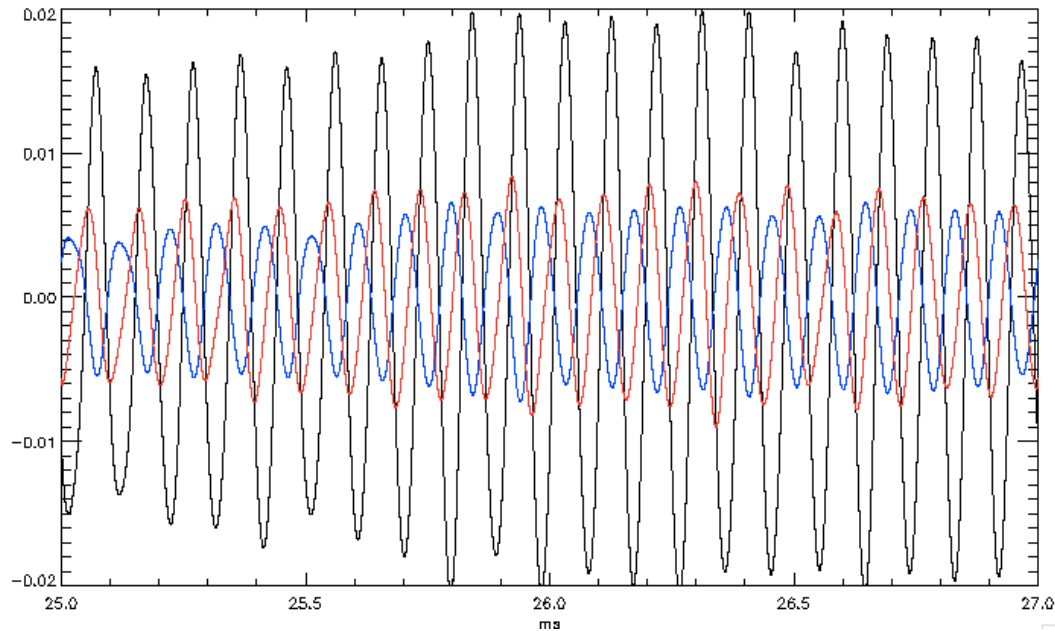
- ポロイダル方向のフローの径方向分布
- R=600で向きが逆転している

磁気コイル, イオン飽和電流, 浮遊電位電極間位相

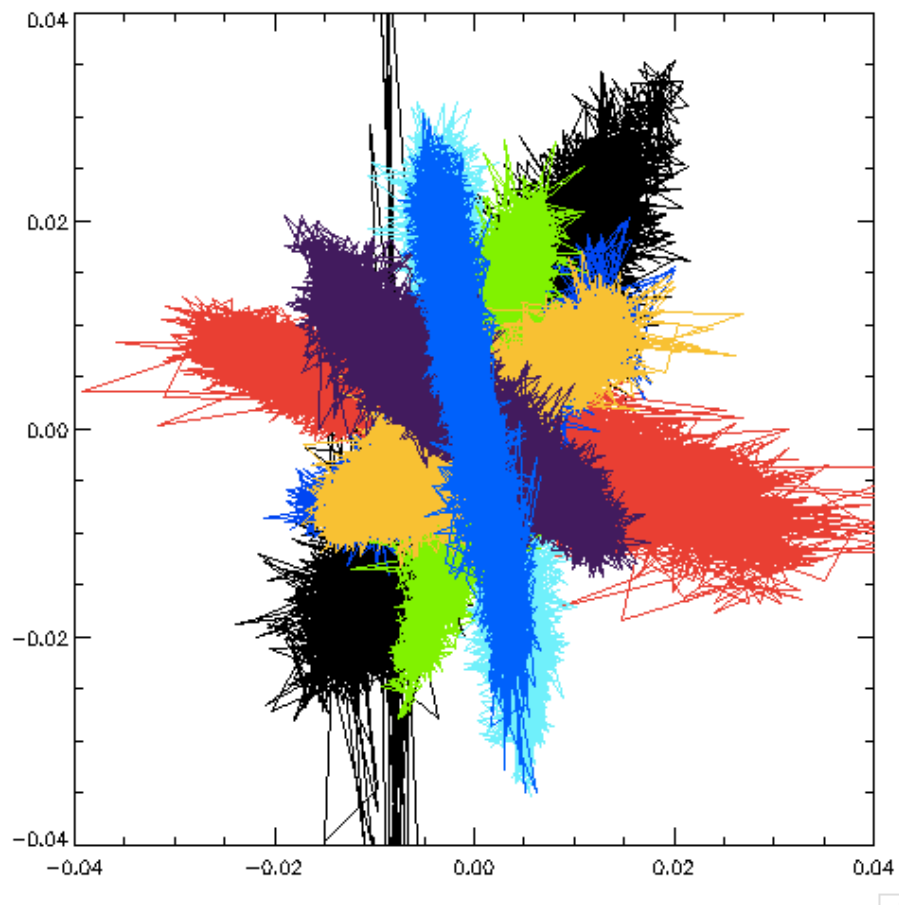


- B_tとイオン飽和電流位相, 浮遊電位電極間位相

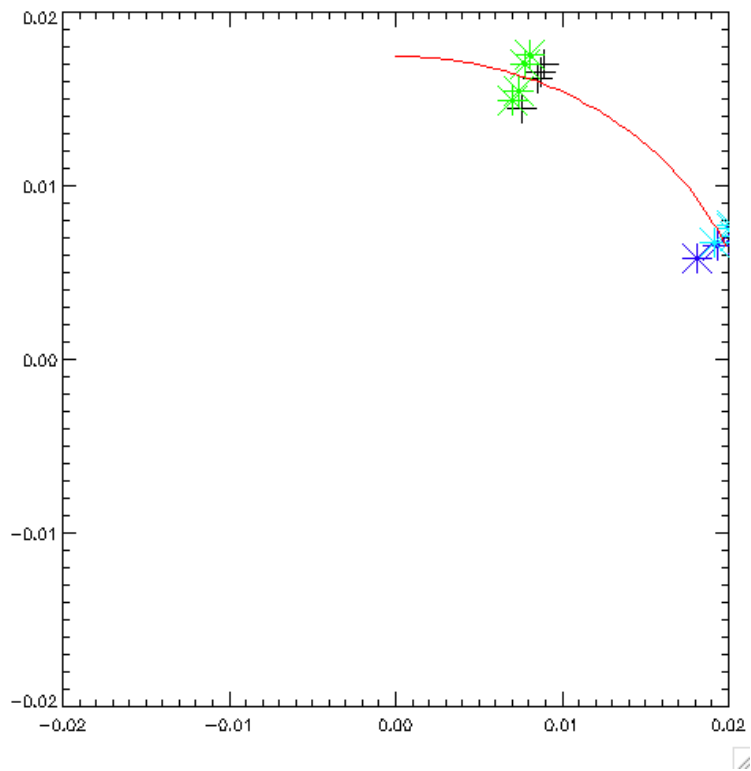
10kHzでのフィルター結果



- 10kHzでの信号
- 三軸コイルの磁場を復元
- コイル1,コイル2の信号をプロット
- 磁場は一定の角度を保ちつつ振動している→ $\tilde{\mathbf{B}} = \Delta r \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial r}$ の描像と一致？

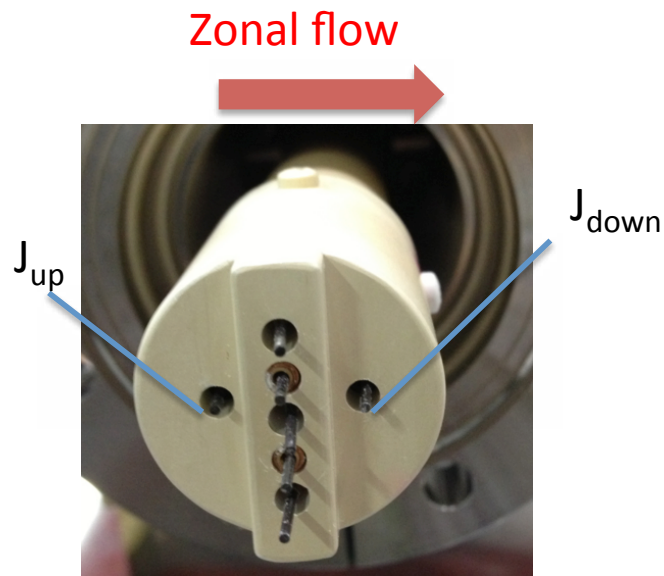


- 角度を変えたデータでの場合
- 本来なら半径が同一になるはずだがそうならないのは校正値がずれているせいと思われる



- 振幅が対称となるようにフィッティングをかけた(コイル1の強度を0.82倍)
- 校正後の結果10kHz揺動は22°の角度を持ちつつ振動している.

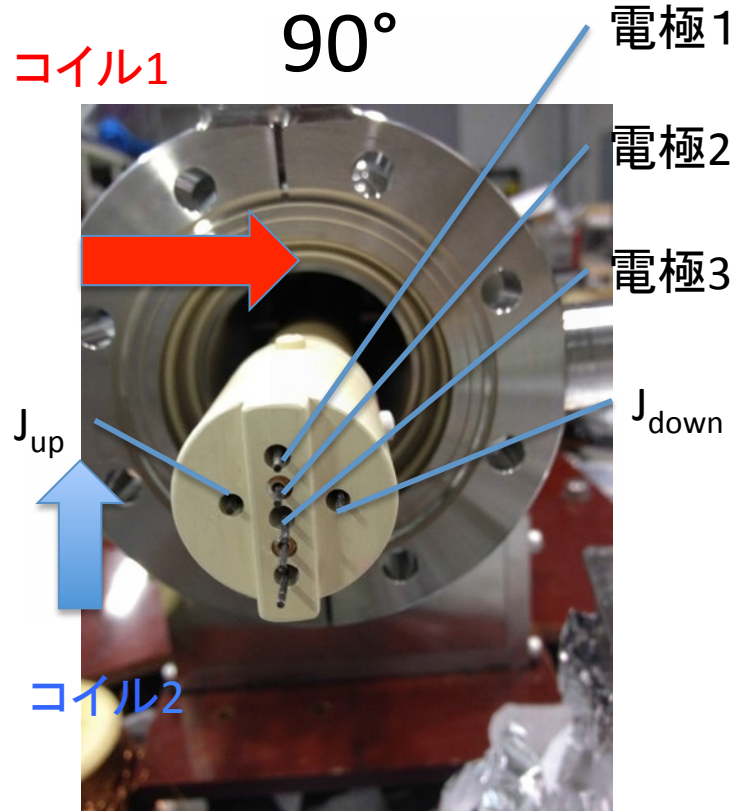
マッハプローブによる計測



$$\frac{j_{\text{up}}}{j_{\text{down}}} = R = \exp(Ku_f) , \quad u_f = u_d / \sqrt{k_B T_e / m_i}$$

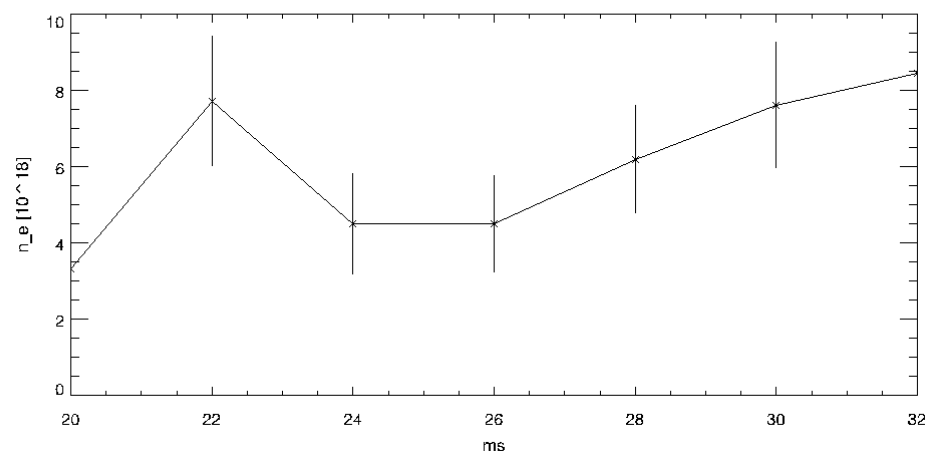
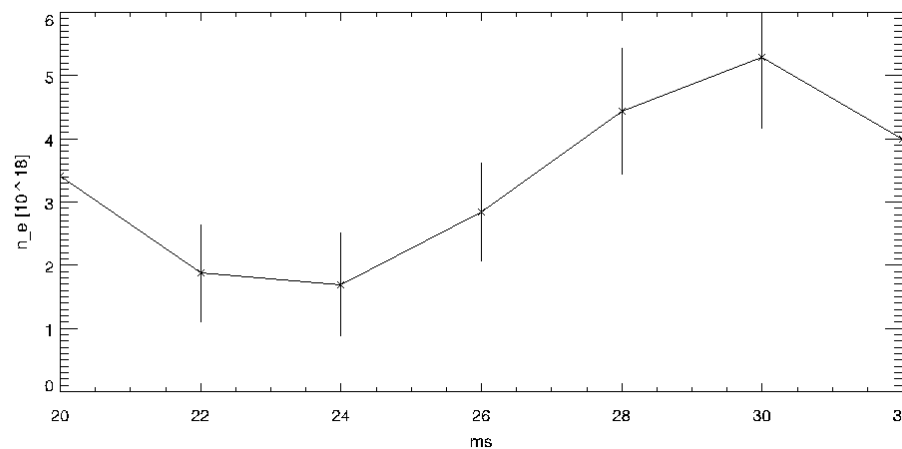
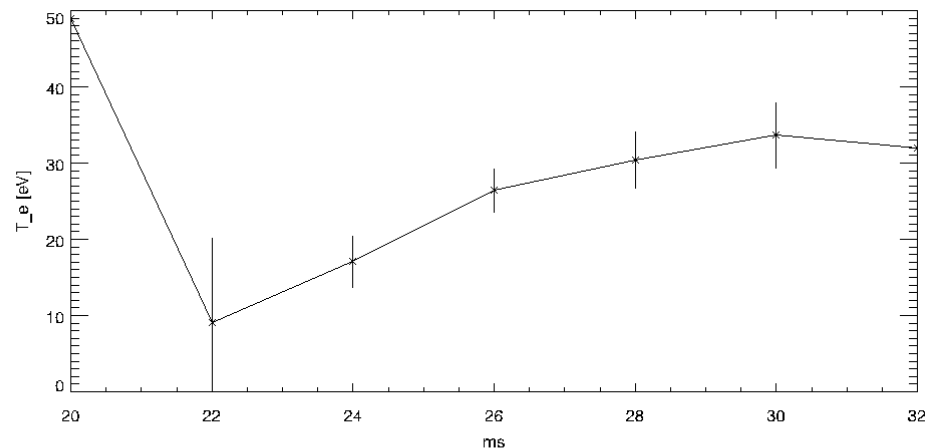
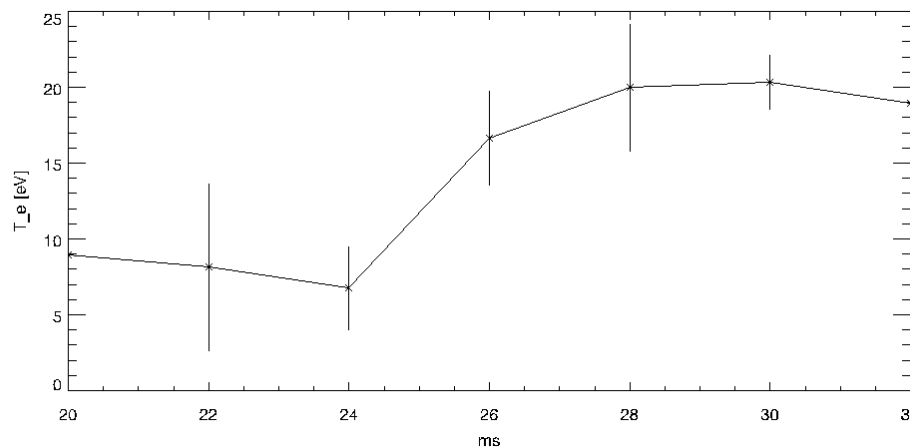
- マッハプローブによりプラズマの流速を測定し、それとゾーナルフローの発展との比較を行う

プローブ回転時



- 浮遊電位揺動が磁場揺動に混入しているかどうかを調べるため、R=580での浮遊電位、磁場揺動間の位相差の角度分布を調べた
- 浮遊電位には電3,30~31msの信号を利用

温度・密度の時間変化

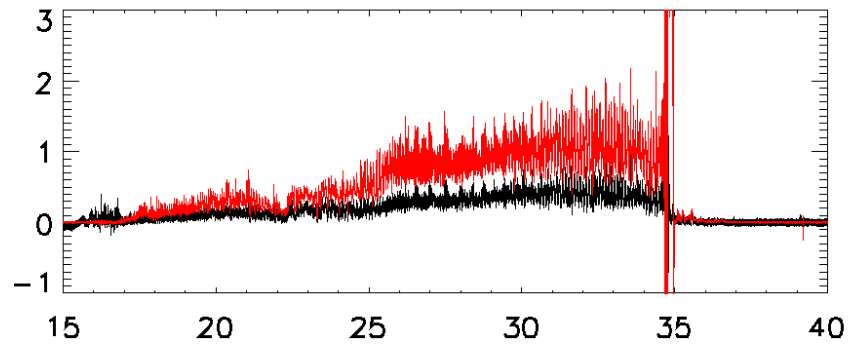


• R=620

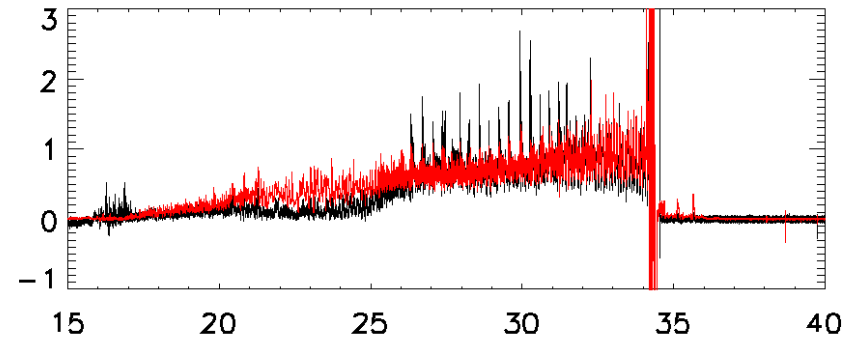
• R=580

R=575でのマツハプロローブ信号

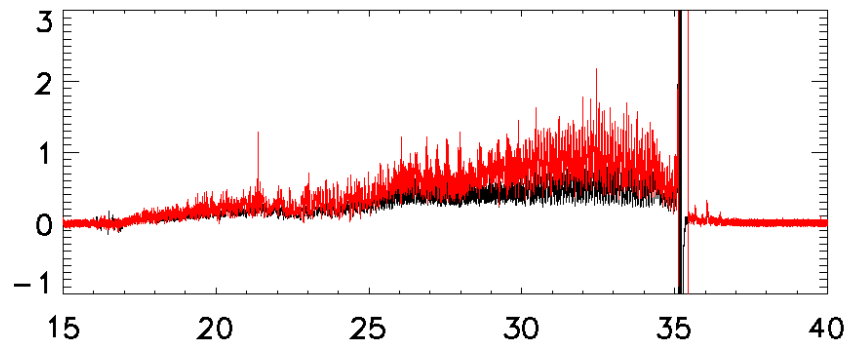
0°



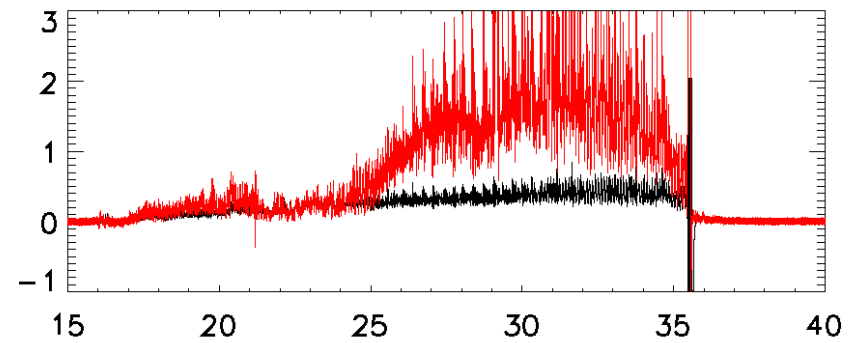
90°



180°

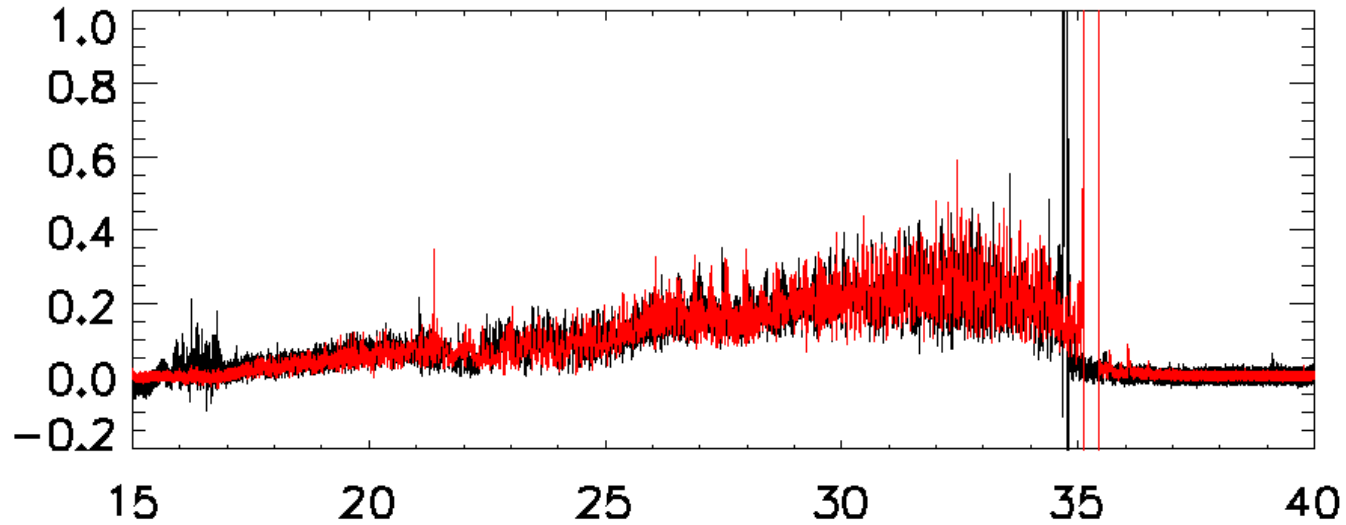


270°

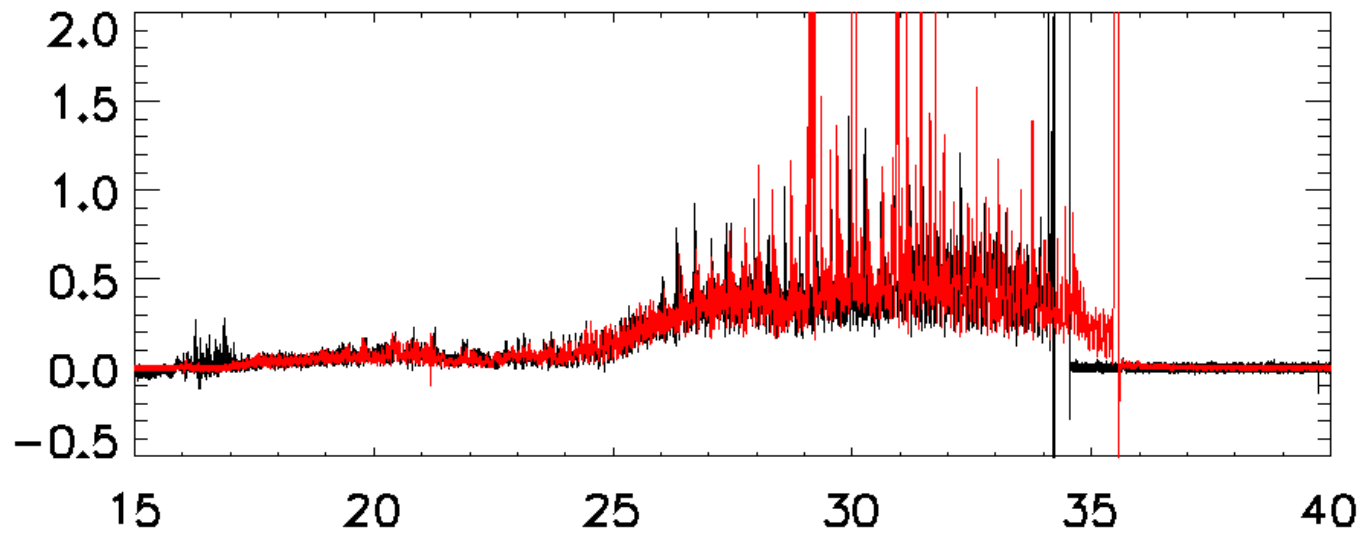


面積で割った場合

0° & 180°

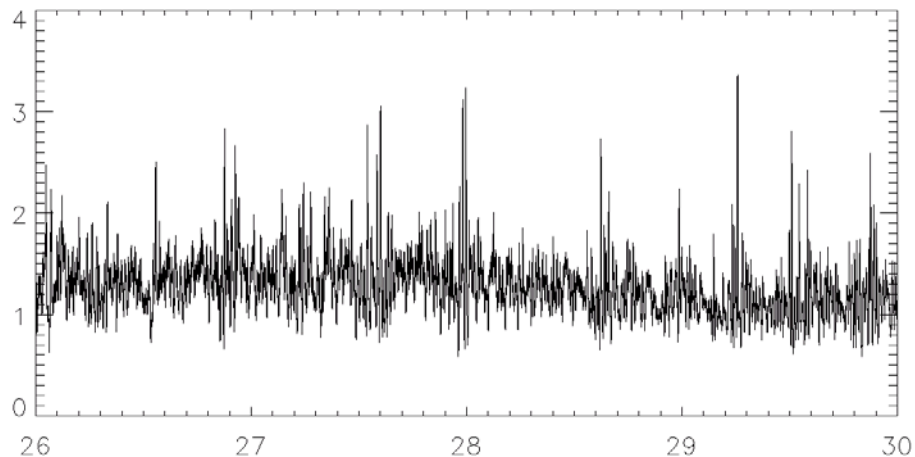
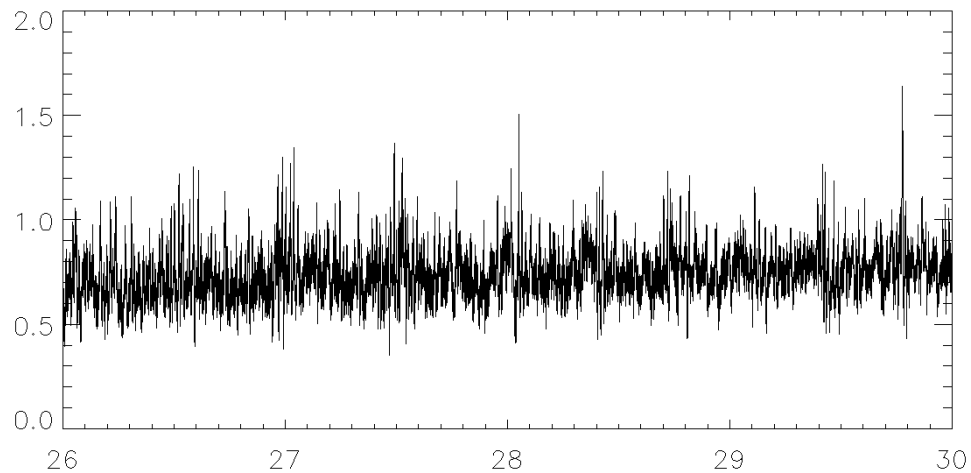


90° & 270°

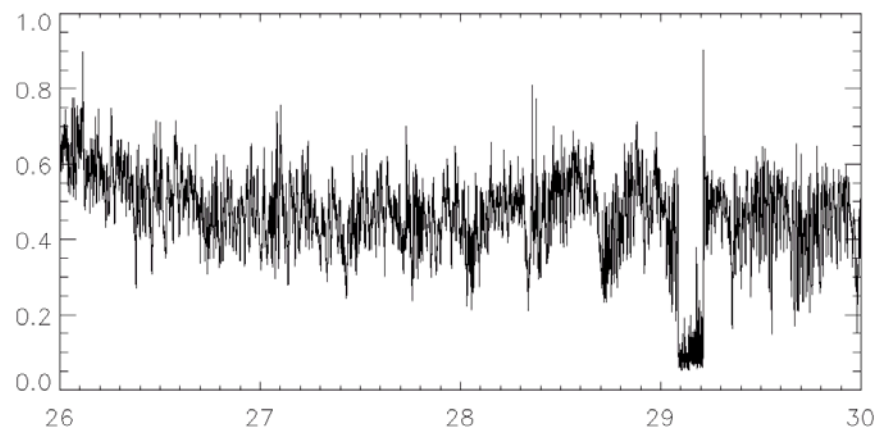
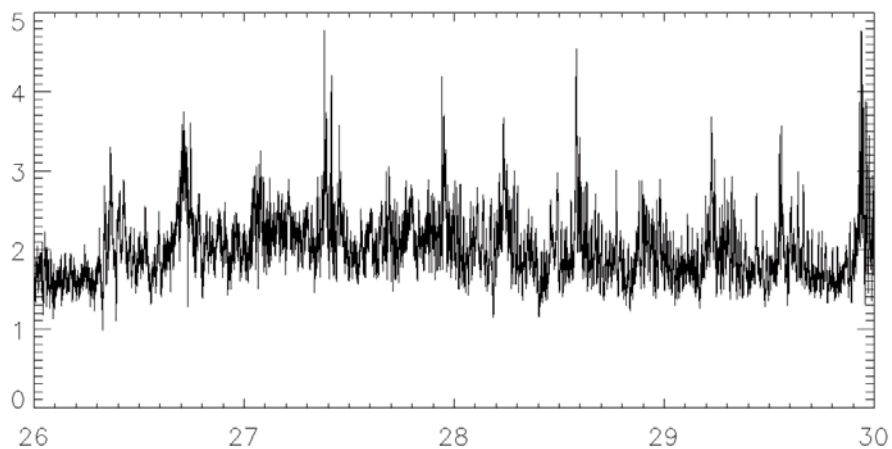


イオン飽和電流比

0° 180°

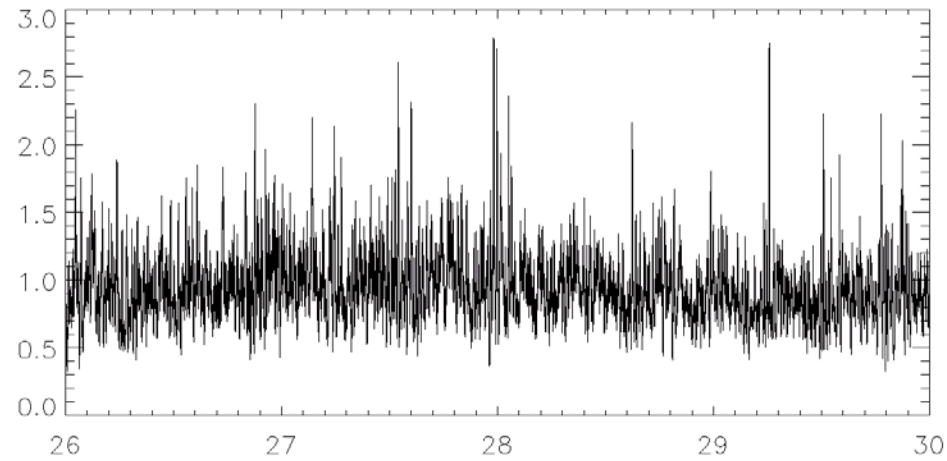


90° & 270°

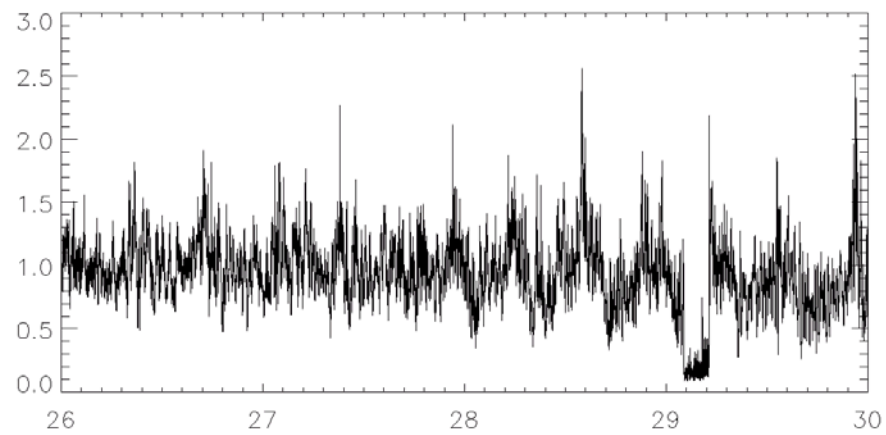


両者の積

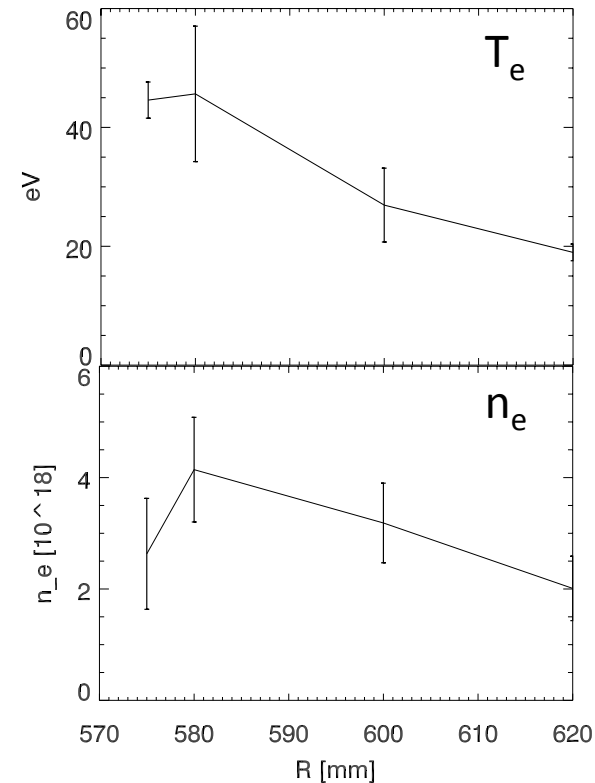
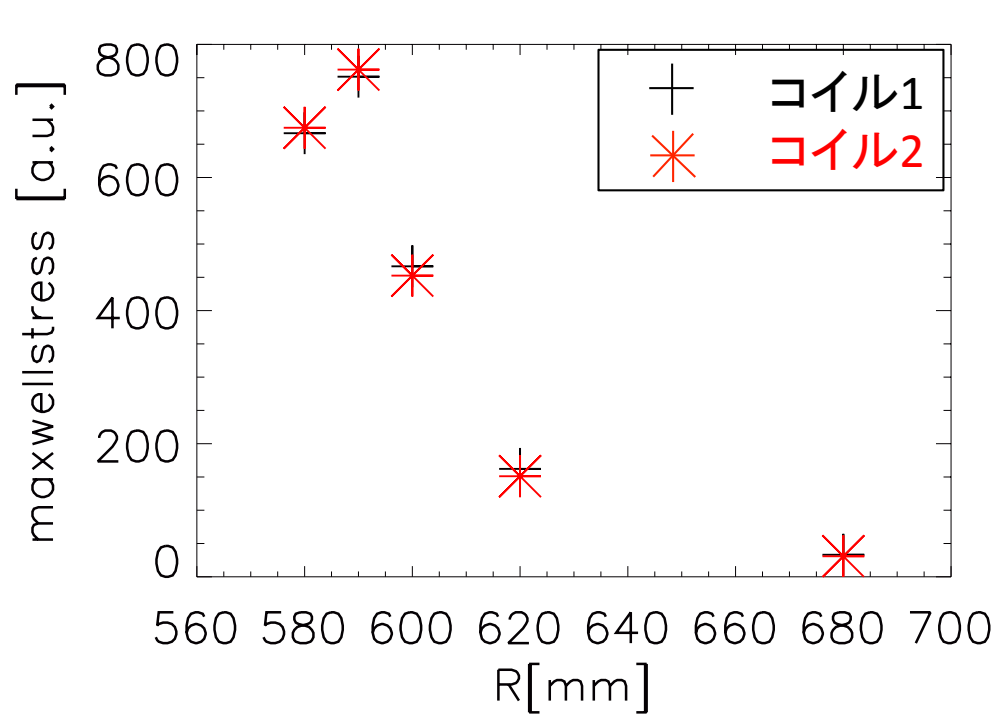
0° & 180°



90° & 270°

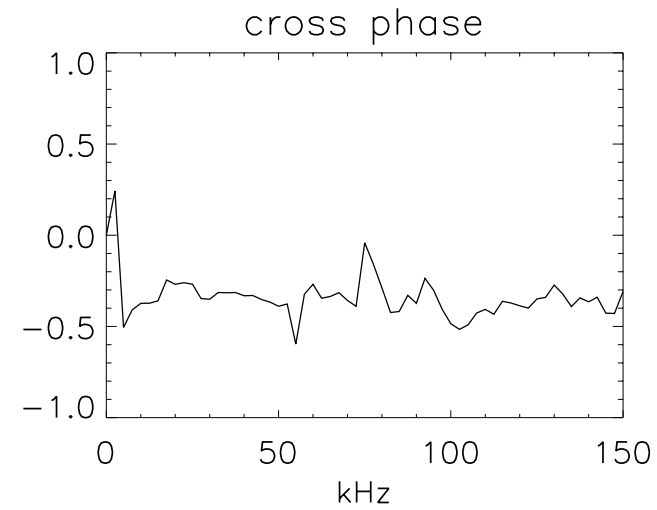
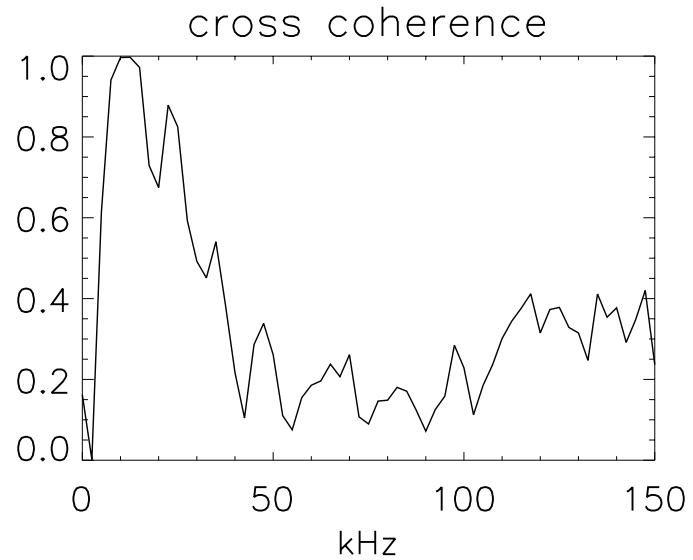


マクスウェルストレス径方向分布



- コイル1, 2を角度45°にしてそれぞれから求めた $\langle B_r, B_p \rangle$ の径方向分布
- リミター位置前後(R=595)で増大していることが観測された

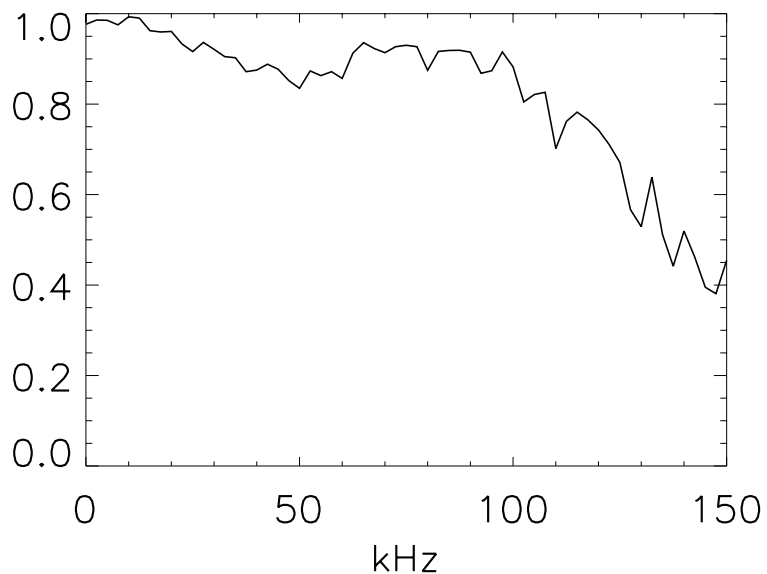
磁場揺動のコヒーレンス



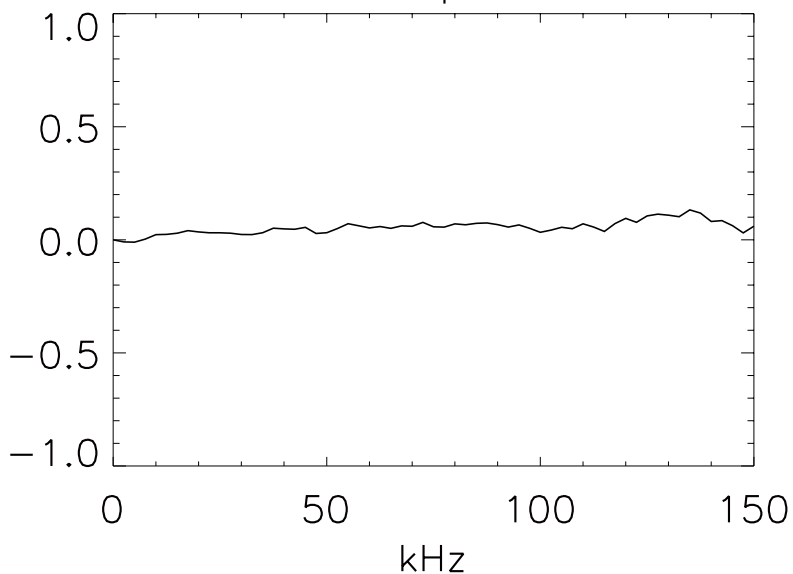
- R=580

I_s, V_f 揺動のコヒーレンス

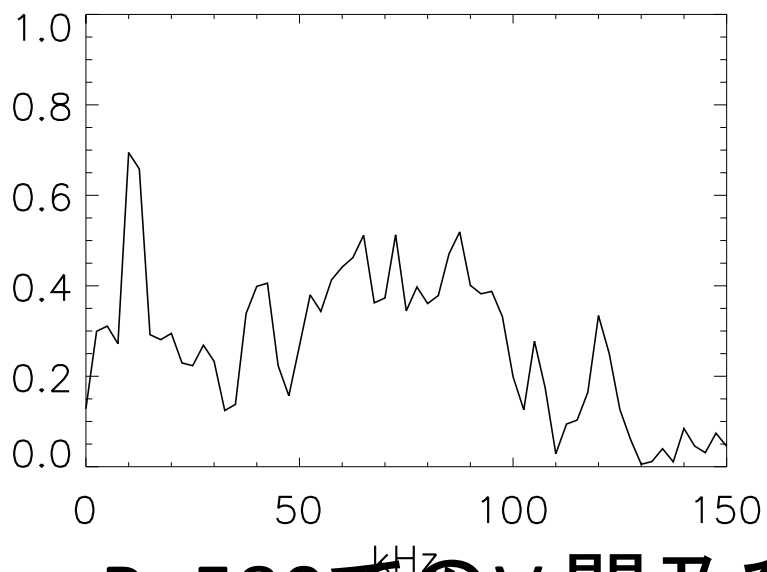
cross coherence



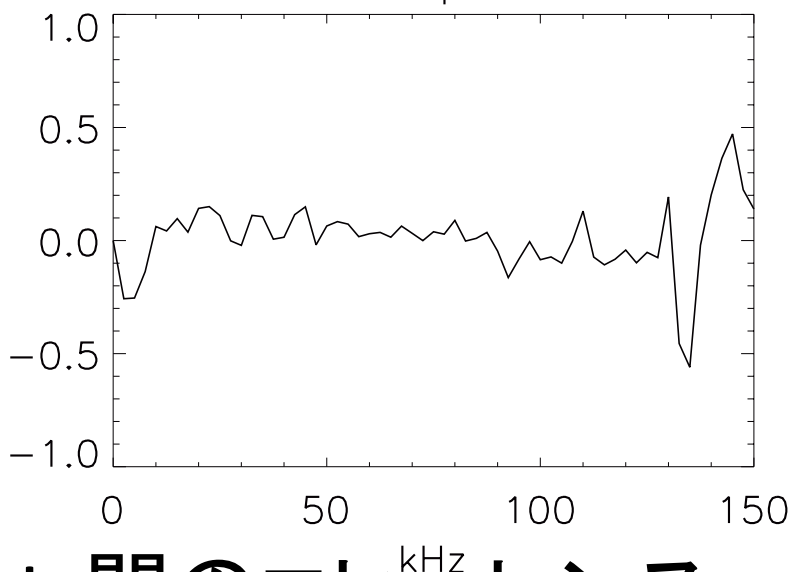
cross phase



cross coherence



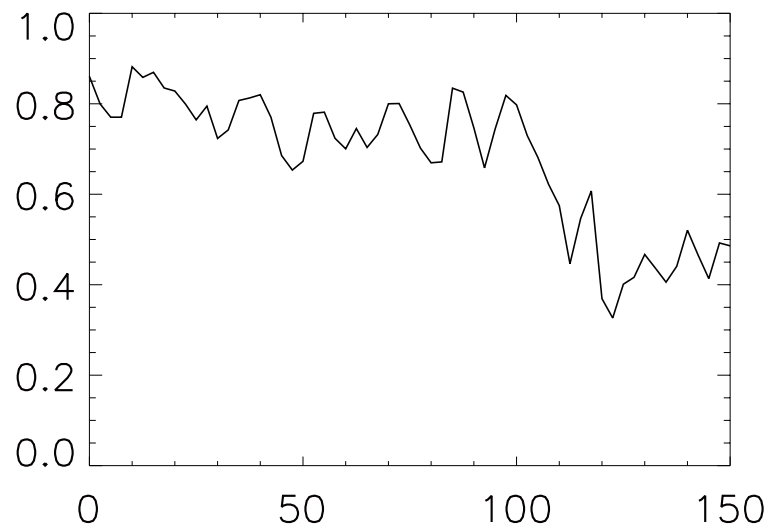
cross phase



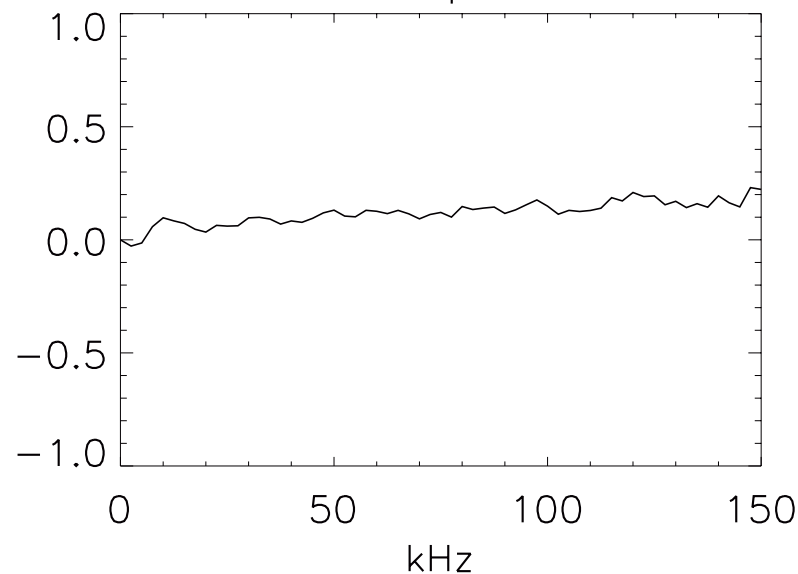
- R=580での V_f 間及び V_f, I_s 間のコヒーレンス

I_s, V_f 揺動のコヒーレンス

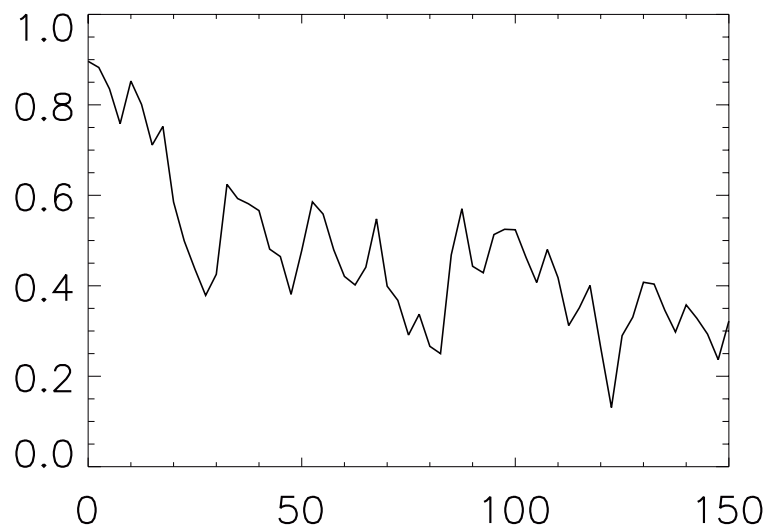
cross coherence



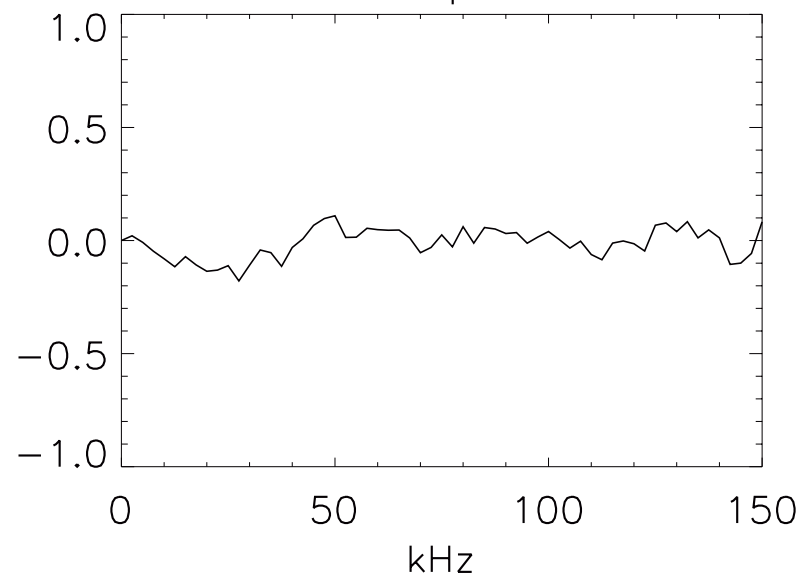
cross phase



cross coherence



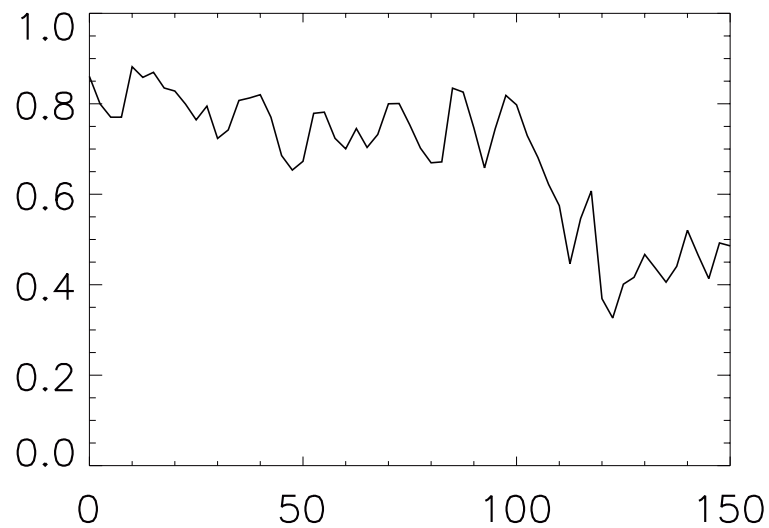
cross phase



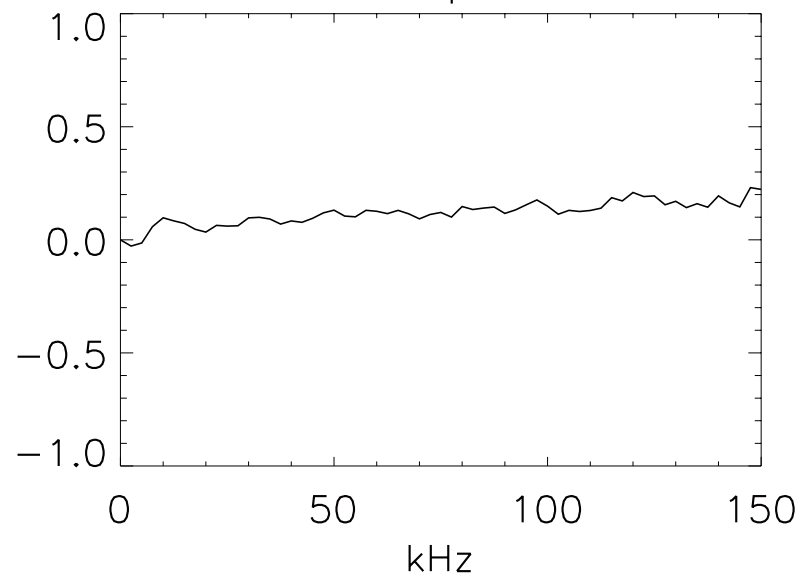
- $R=600$ での V_f 間及び V_f, I_s 間のコヒーレンス

I_s, V_f 揺動のコヒーレンス

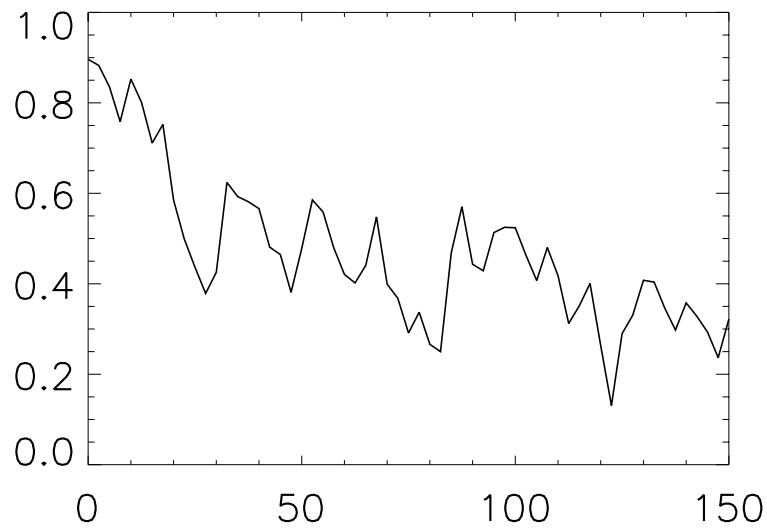
cross coherence



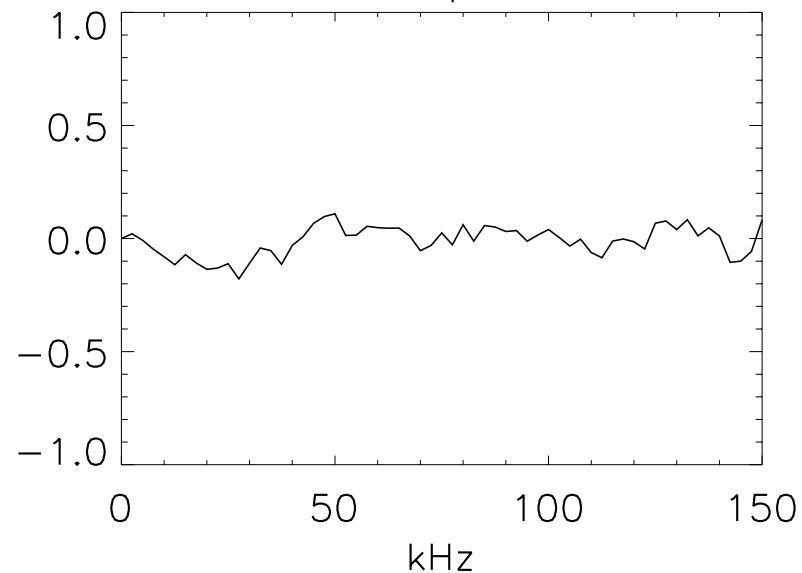
cross phase



cross coherence

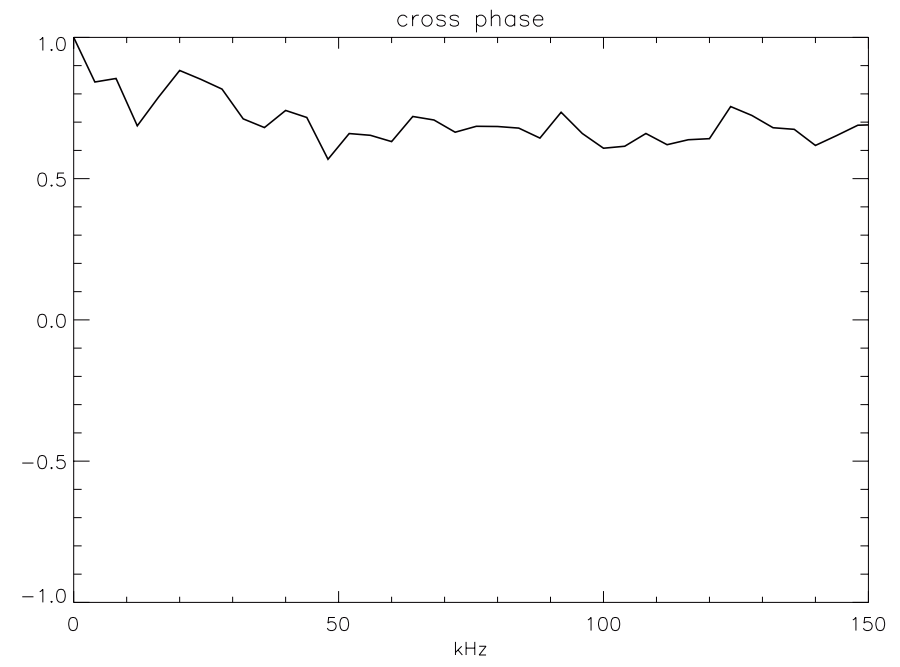
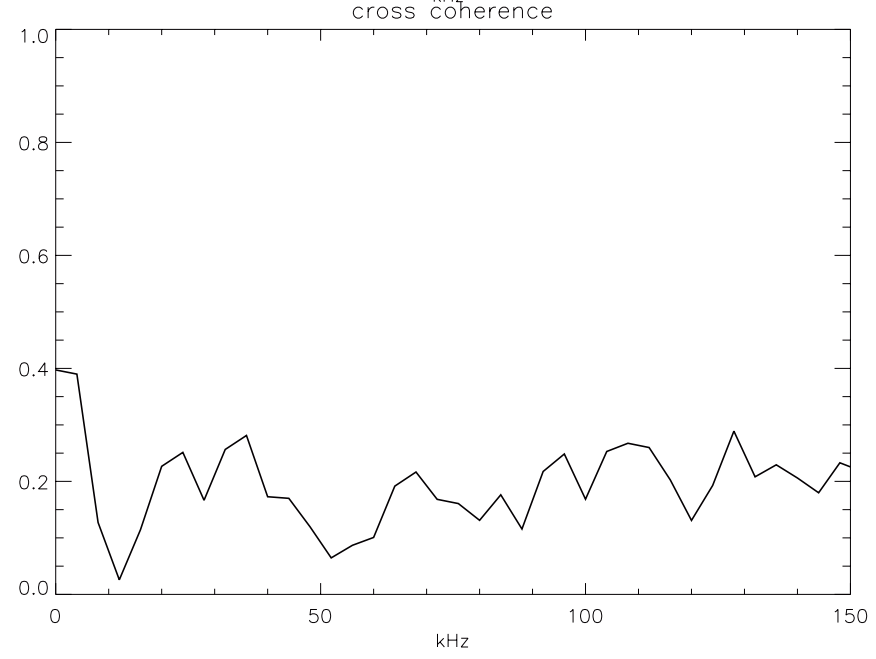
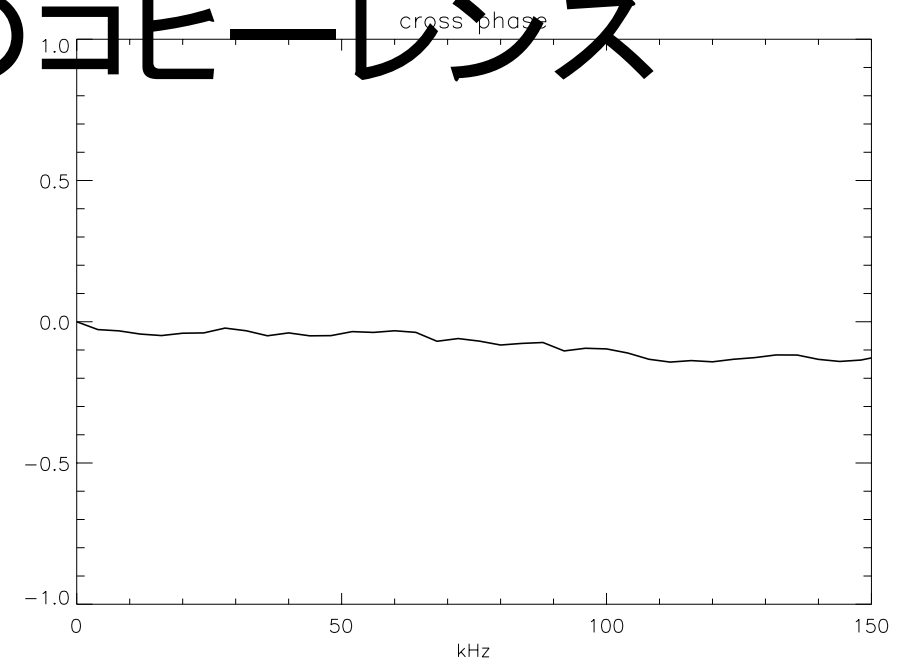
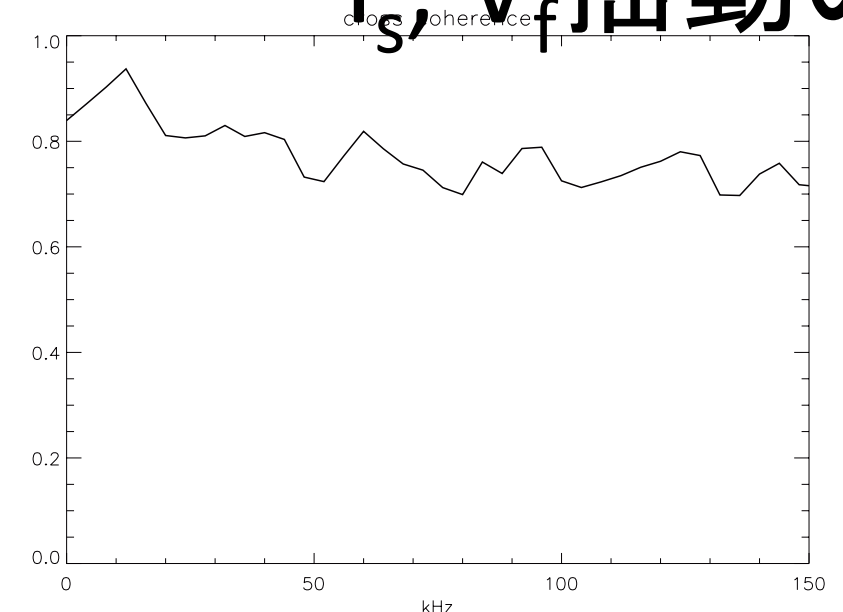


cross phase



- R=600での V_f 間及び V_f, I_s 間のコヒーレンス

I_s, V_f 揺動のコヒーレンス



- R=620での V_f 間及び V_f, I_s 間のコヒーレンス