

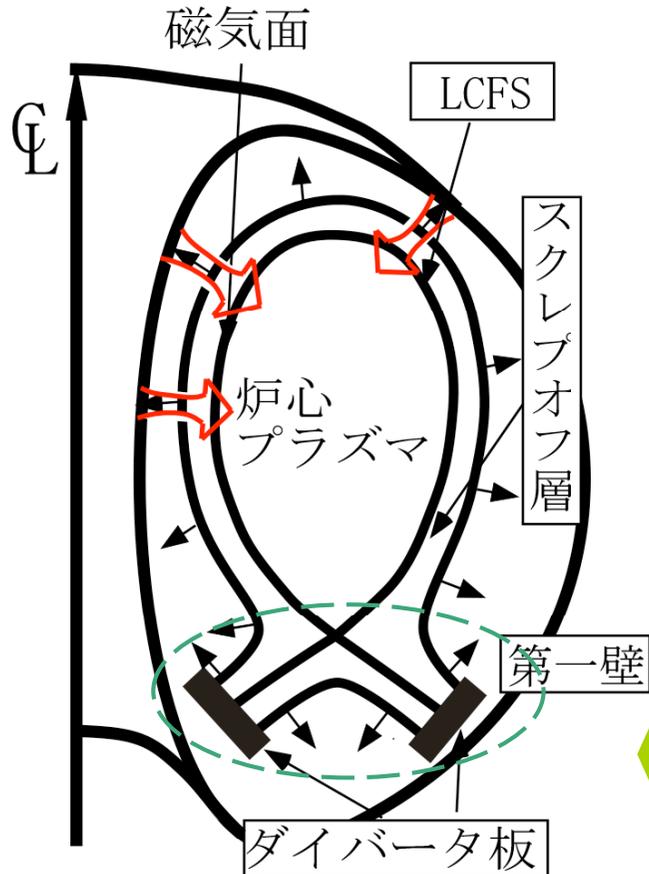
LHD周辺プラズマ揺動計測

名古屋大学 エコトピア科学研究所
大野哲靖, 田中宏彦

世話人: 増崎貴

研究の背景

異常輸送・・・磁場閉じ込め核融合炉実現課題の一つ



→ : 磁力線を横切る輸送
⇒ : 水素リサイクリング
不純物の混入

- ▶ **磁力線を横切る輸送**(拡散、対流)
- ▶ 古典、新古典理論から予想される拡散を上回る
- ▶ 原因の同定など十分でない

問題点

- 水素リサイクリング
- 不純物の発生
- 炉壁の損耗

非接触プラズマ

- ダイバータ板熱負荷低減に期待
- 体積再結合によりプラズマ消失
- **再結合時間** \gg (接続長/イオン音速)
⇒ 異常輸送も熱流拡散に寄与？

異常輸送物理の解明は大きな意味を持つ

揺動データの取り扱い

信号

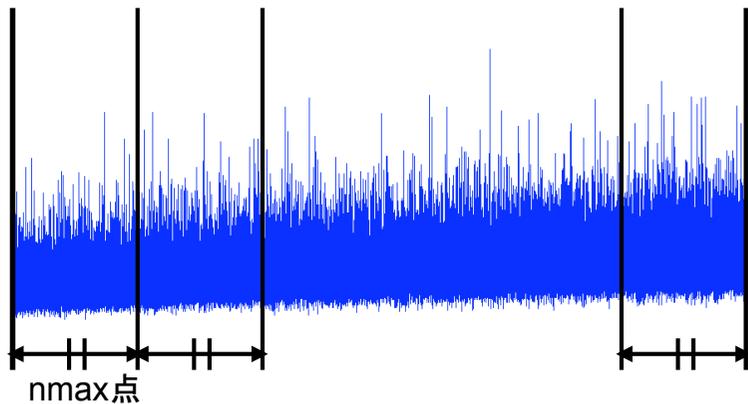
$$x = \tilde{x} + \bar{x}$$

揺動成分 平均値

大型装置の揺動解析における問題点

- ◆ 長時間のデータが得られない
- ◆ 平均値成分が常に変動(非定常)

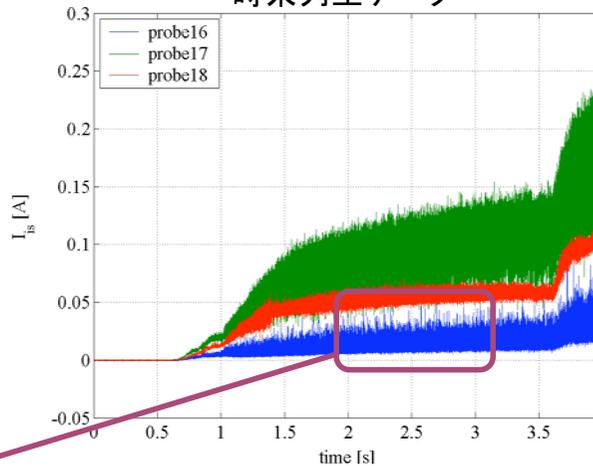
x_1, \bar{x}_1, σ_1 x_2, \bar{x}_2, σ_2 x_N, \bar{x}_N, σ_N



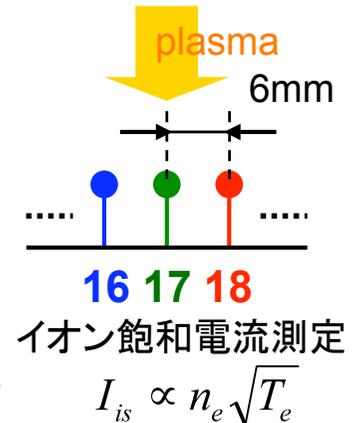
平均値成分... 平均値or最小2乗法
nmax ≫ 注目する揺動のスケール

LHD #44190 ダイバータプローブデータ

時系列生データ



弱磁場 ⇔ 高磁場



解析手順(計算:f)

- ① 対象信号の切り出し及び等分割
- ② 各分割の平均値、標準偏差σの決定
- ③ 各分割を準定常と仮定、解析
- ④ 計算結果をアンサンブル平均

$$E[f(\tilde{x}, \sigma)] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(\tilde{x}_k, \sigma_k)$$

確率密度分布関数(PDF)

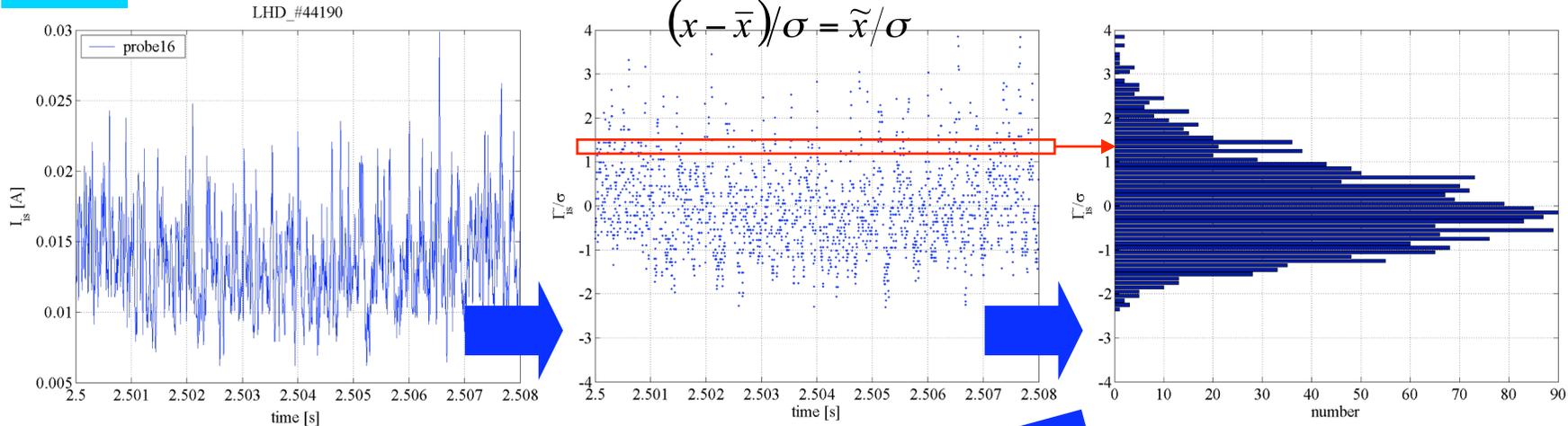
(無次元化した)確率密度分布関数作成の手順

LHD

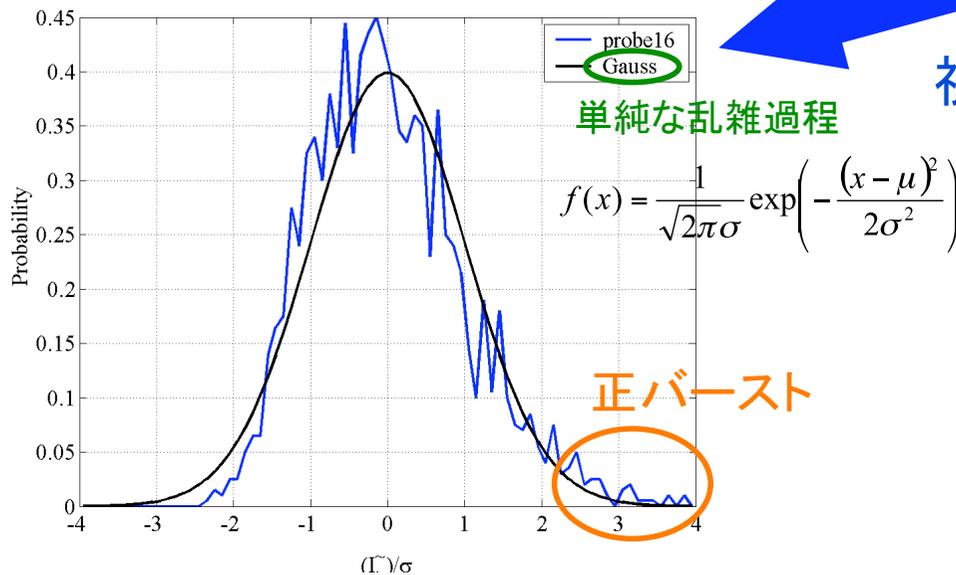
①時系列生データ

②揺動成分を標準偏差で無次元化

③時間方向に個数を加算



④個数を確率に正規化



視覚的に揺動の分布を把握できる

定量的にPDF型を評価するには...

- ✓ Skewness, Flatness
- ✓ Gram-Charlie級数展開
- ✓ カルバックライブラーのダイバージェンス

Skewness・Flatness

歪度 (S) ... 分布左右対称性のずれ

$$Skewness = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^3 p(x) dx}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \right]^{3/2}} = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}$$

扁平度 (F) ... 分布の広がりのなだらかさ

$$Flatness = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^4 p(x) dx}{\left[\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx \right]^2} = \frac{m_4}{m_2^2}$$

信号 $x = \tilde{x} + \bar{x}$

揺動成分 平均値

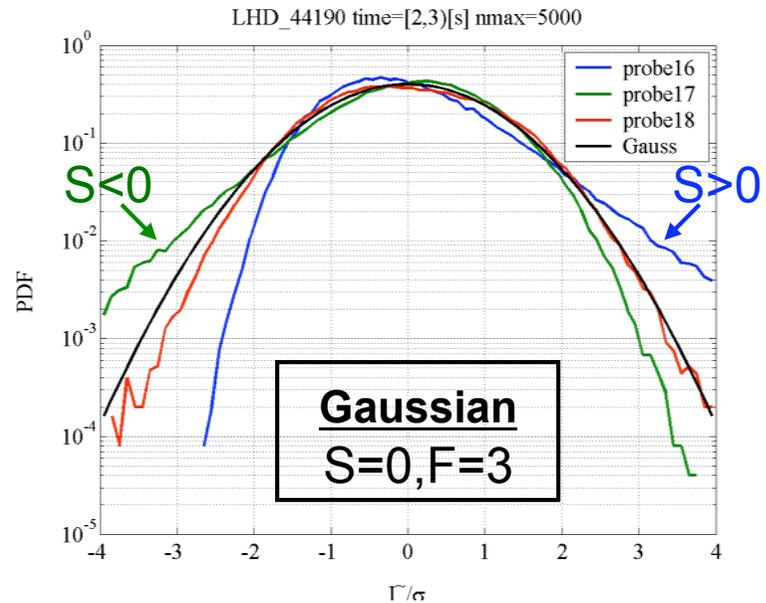
$$S = \frac{\langle \tilde{x}^3 \rangle}{\langle \tilde{x}^2 \rangle^{3/2}}, F = \frac{\langle \tilde{x}^4 \rangle}{\langle \tilde{x}^2 \rangle^2}$$

平均値 $\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x) dx$

分散 $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx$

中心モーメント $m_n = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^n p(x) dx$

LHD PDFテールに注目→片対数プロット



| | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| probe16 S=1.10 F=5.91 | probe17 S=-0.45 F=3.57 | probe18 S=0.13 F=2.75 |
|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|

隣り合うプローブでPDF型が大きく異なる

複雑な磁力線構造、接続長の違い

Brob輸送現象

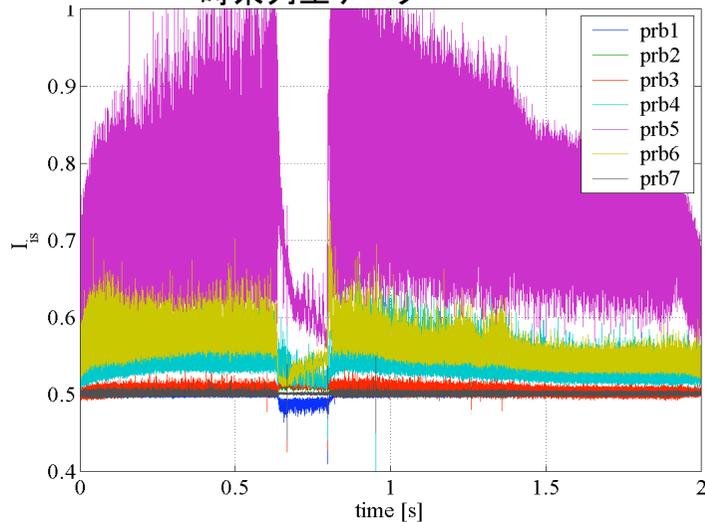
LHD_非接触プラズマデータ解析(1)

LHD

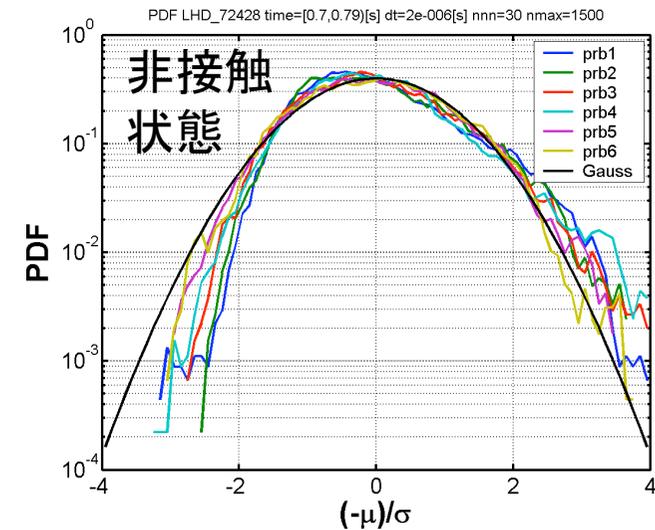
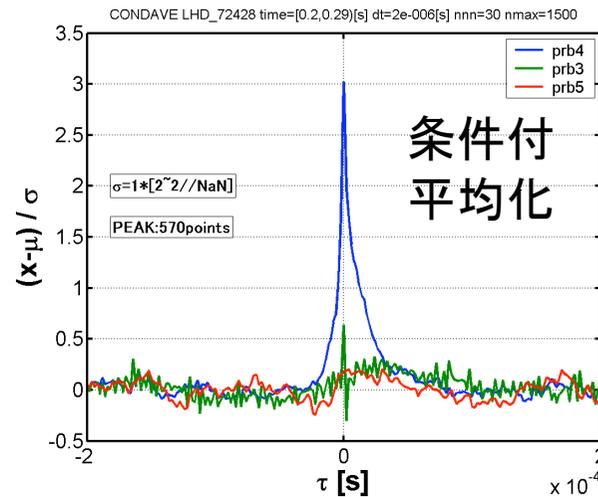
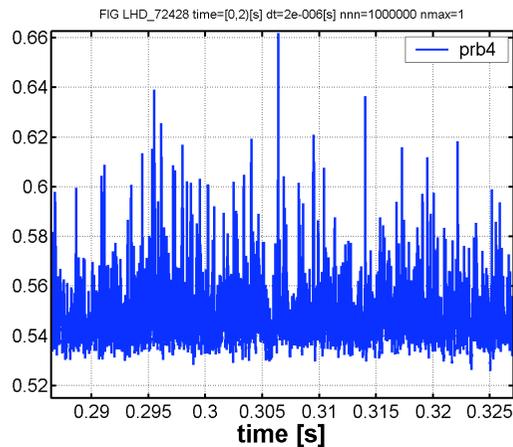
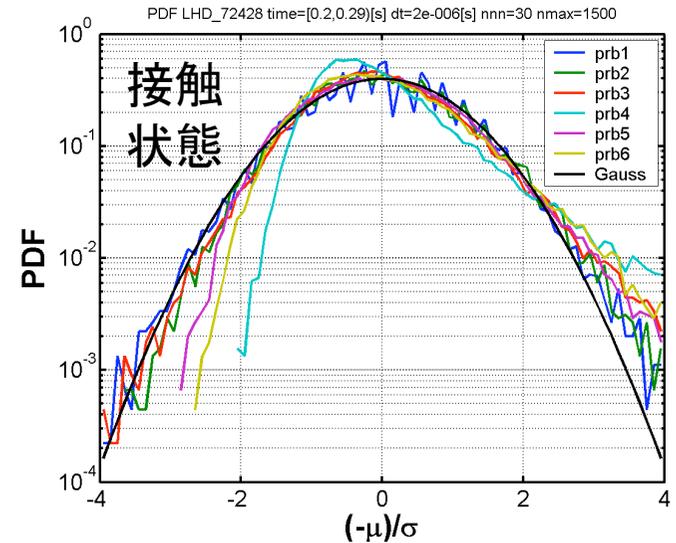
#72428 外寄せ配位における高密度ガスパフ放電実験
(ガス種=He,水素, $R_{ax}=3.9m, B_t=2.539T$)



時系列生データ



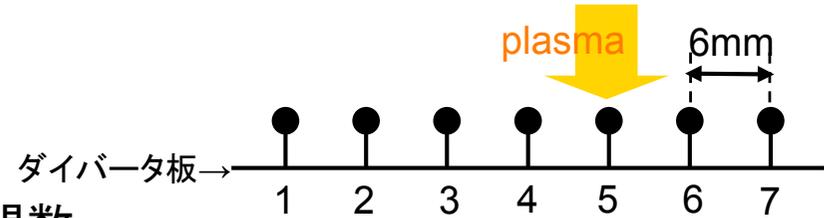
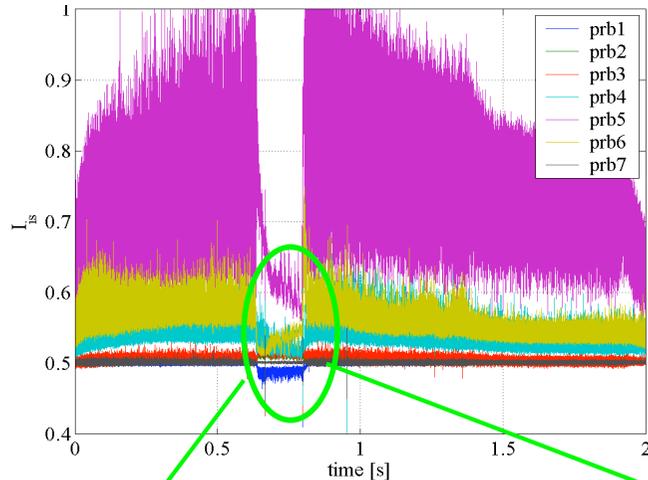
ダイバータ板



LHD_非接触プラズマデータ解析(2)

LHD

時系列生データ

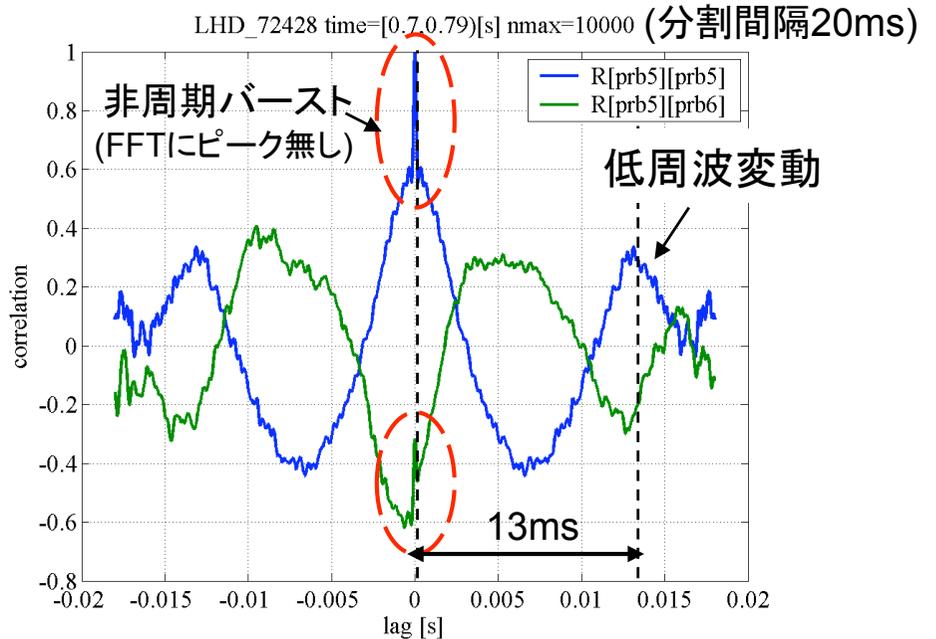
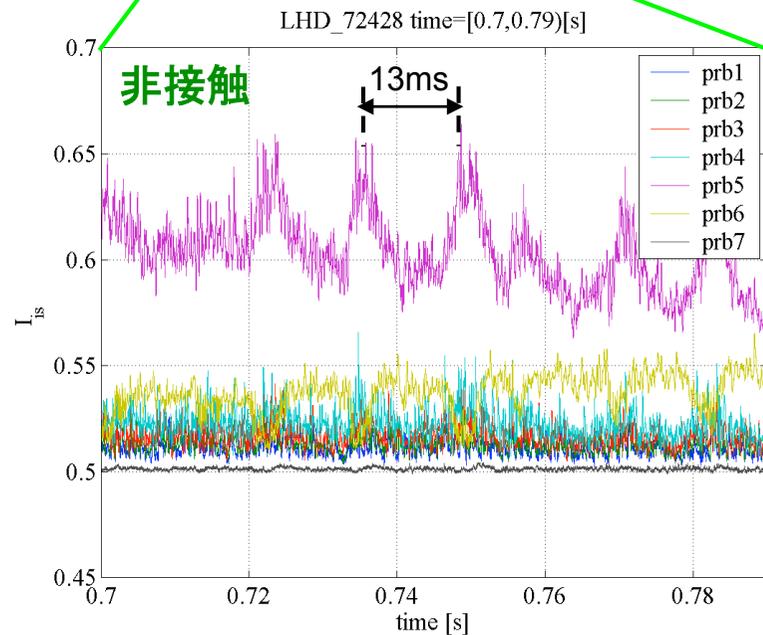


相関関数

相互相関関数 $C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)}$

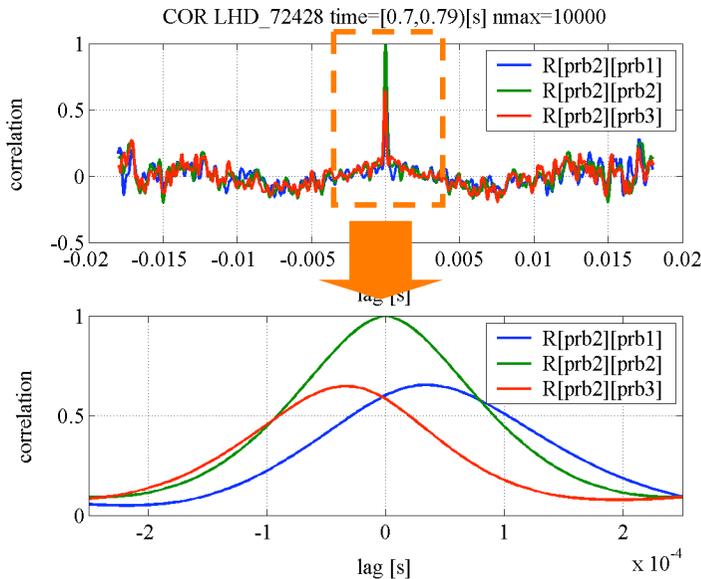
相互相関係数 $R_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)} / \sqrt{\overline{x^2}} \sqrt{\overline{y^2}}$

x=yのとき自己相関



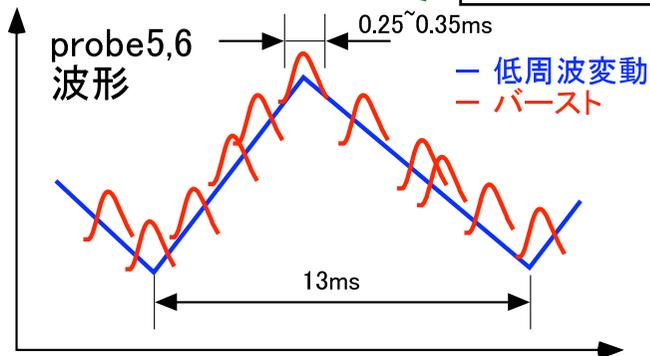
LHD_非接触プラズマデータ解析(3)

LHD probe1,2,3の相関(低周波変動少)



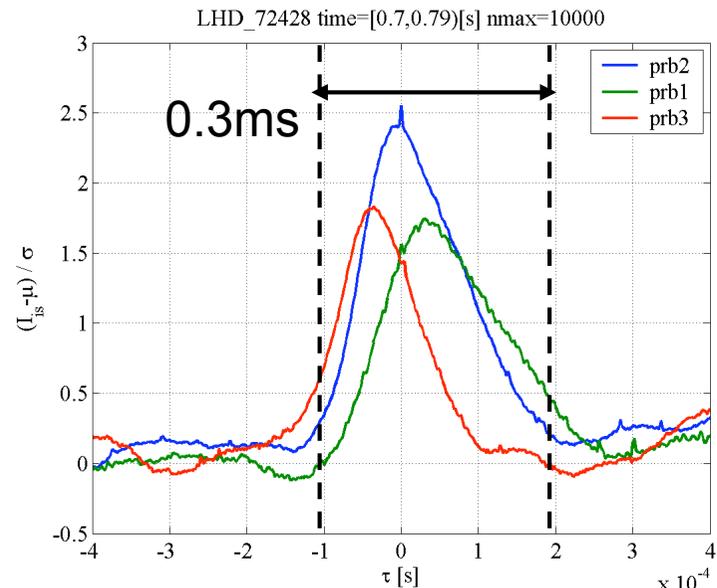
⇒相関係数0.5を越す大きな正相関

probe5,6で計算
...約0.25~0.35ms



条件付き平均法(conditional averaging)

probe2の 2σ 以上のピーク点を検出
⇒ピーク中心にデータ平均化



類似のバーストが時間遅れをもって伝播(3→2→1)
⇒この時間遅れが相関のピーク間隔に対応

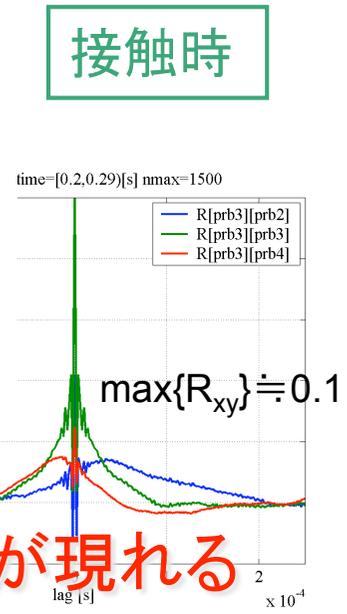
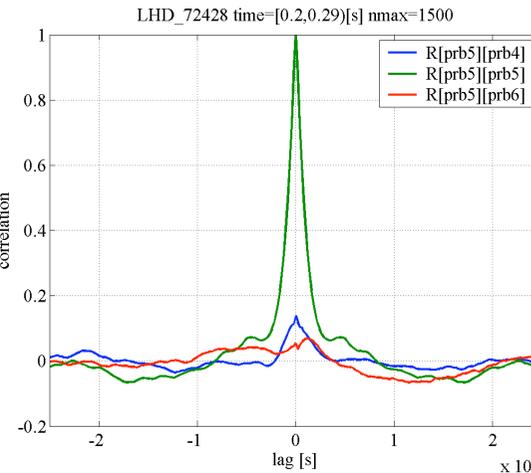
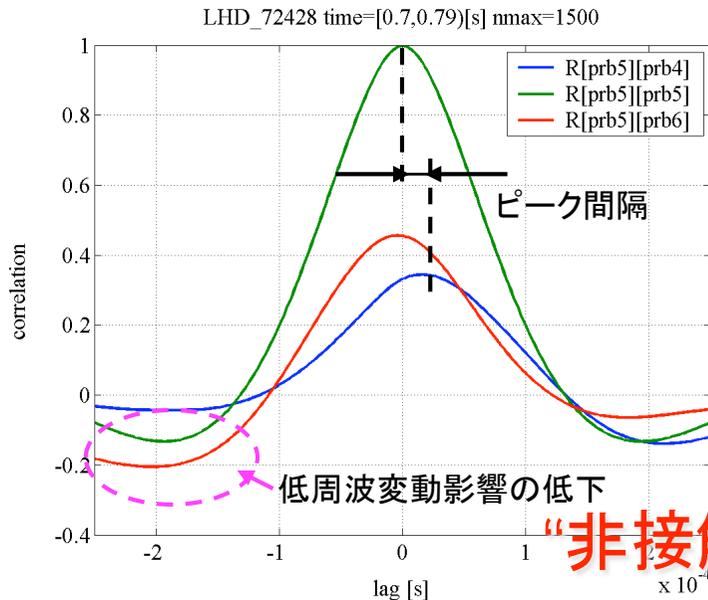
※この手法はノイズに対して非常に弱い

分割間隔を短くして低周波変動分を取り除く

{ 揺動=最小2乗法差分で計算 ⇒ 3ms間隔
分割間隔 ≫ バースト幅
で分割

LHD_非接触プラズマデータ解析(3)

LHD probe4,5,6の相関(分割間隔3ms)



“非接触状態”では明確な相関が現れる

相関ピーク間隔 = 平均時間遅れ(進み)

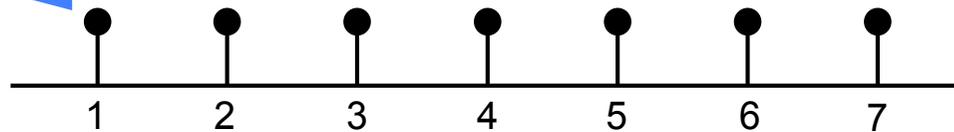
バーストの平均速度 = (プローブ間隔) / (ピーク間隔)

プローブ間隔: 6mm

plasma

FFT垂直カット(>1kHz)
750m/s

190m/s 180m/s 200m/s 380m/s (1500m/s)



$$C_s = 10 \sim 50 [km/s]$$

$$v_a = O(10^4) [km/s]$$

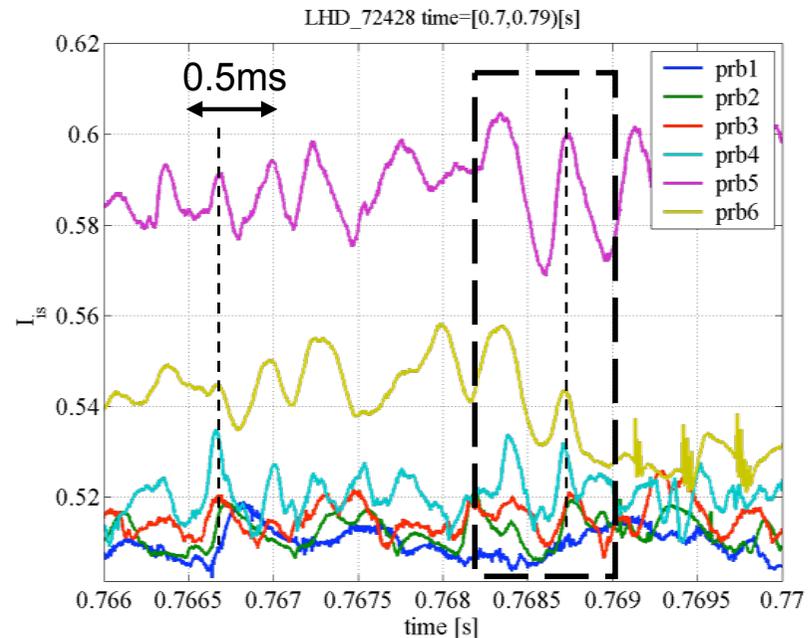
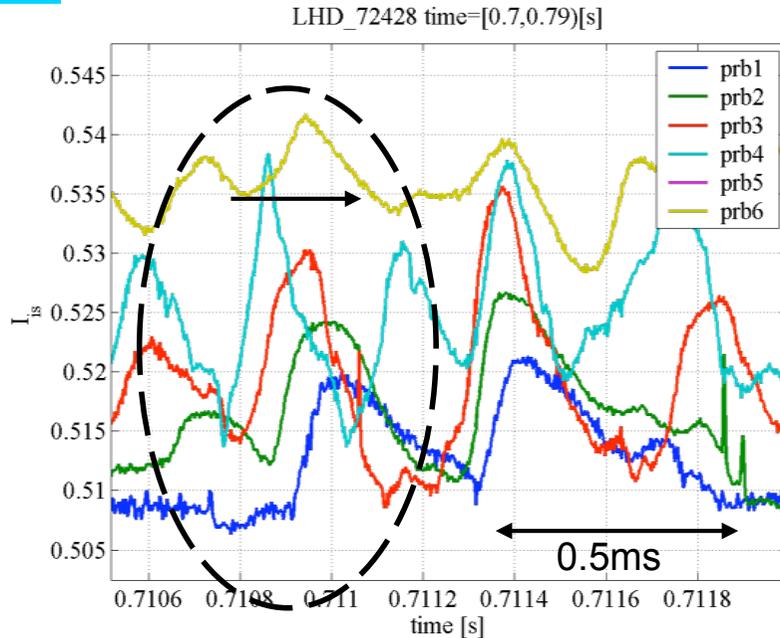
非接触状態中の異常輸送?

- その他低周波成分除去方法
- ⇒ ・ローパスフィルタ
 - ・径方向速度分布

LHD_非接触プラズマデータ解析(4)

LHD

時系列生データ(非接触時)

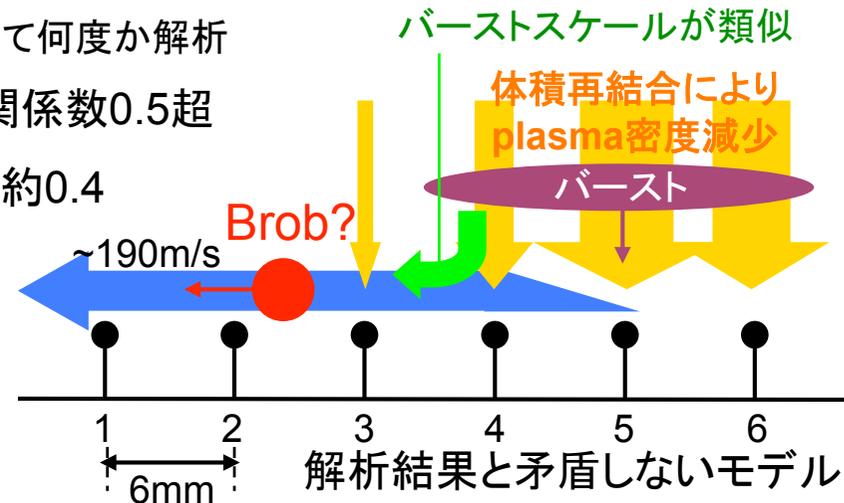


相関係数絶対値の評価 ...対象時間を変えて何度か解析

- probe{1,2,3}間、probe{5,6}間では相関係数0.5超
- probe{3,4,5}間の相関係数は最大でも約0.4

イオン飽和電流平均値

- probe{1,2,3} : 接触時 < 非接触時
- probe{4,5,6} : 接触時 > 非接触時



Gram-Charlie級数展開(1)

確率密度関数 $p(x)$ を直交展開

Hermite多項式(直交関数)

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2/2} \frac{d^n}{dx^n} e^{-x^2/2}$$

$$\int H_m(x) H_n(x) \phi(x) dx = \begin{cases} m! & (m = n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases}$$

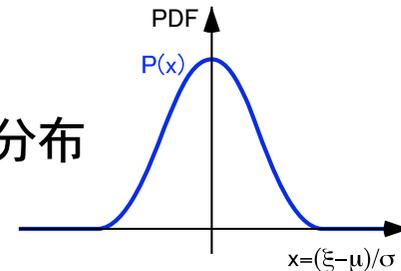
(複素フーリエ級数)

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{j2\pi nt/T}$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi nt/T} dt$$

無次元化した変数 $x = (\xi - \mu)/\sigma$ について

$$\begin{cases} p(x) = c_0 \phi(x) + \frac{c_1}{1!} \phi'(x) + \frac{c_2}{2!} \phi''(x) + \dots + \frac{c_n}{n!} \phi^{(n)}(x) \\ \phi^{(n)}(x) = (-1)^n H_n(x) \phi(x), \phi_x : \text{ガウス分布} \\ c_n = (-1)^n \int_{-\infty}^{+\infty} H_n(x) p(x) dx \end{cases}$$



$\rightarrow c_0 = 1, c_1 = c_2 = 0, c_3 = -\frac{m_3}{\sigma^3}, c_4 = \frac{m_4}{\sigma^4} - 3$

Skewness

Flatness

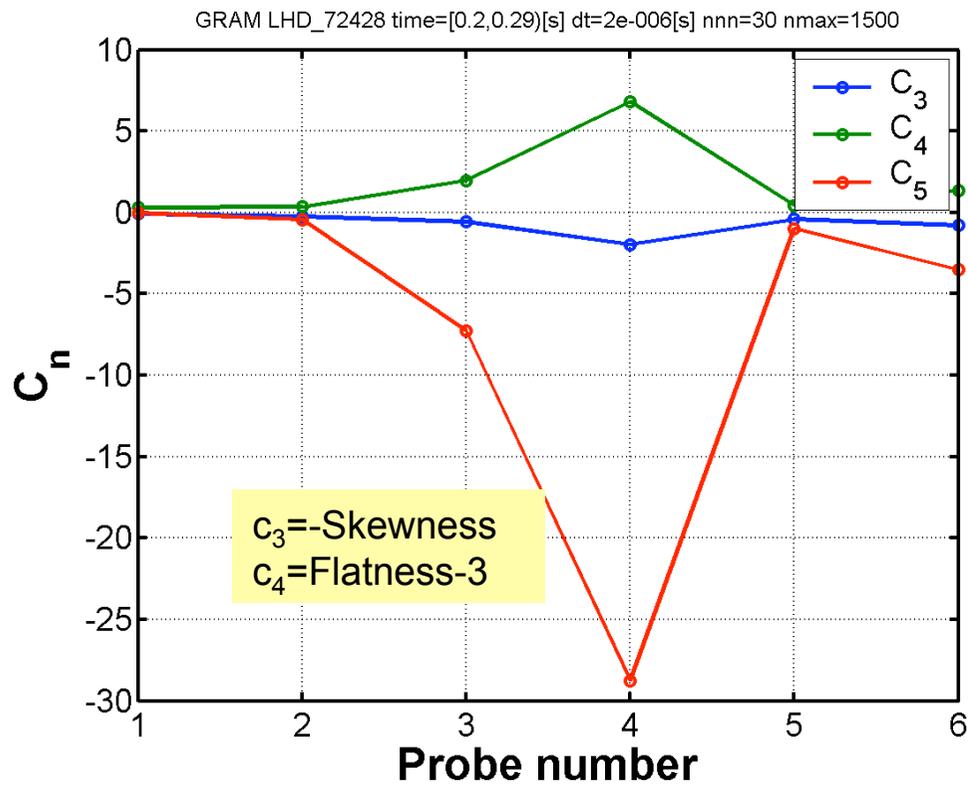
ガウス分布

$$c_0 = 1, c_n = 0 \quad (n \geq 1)$$

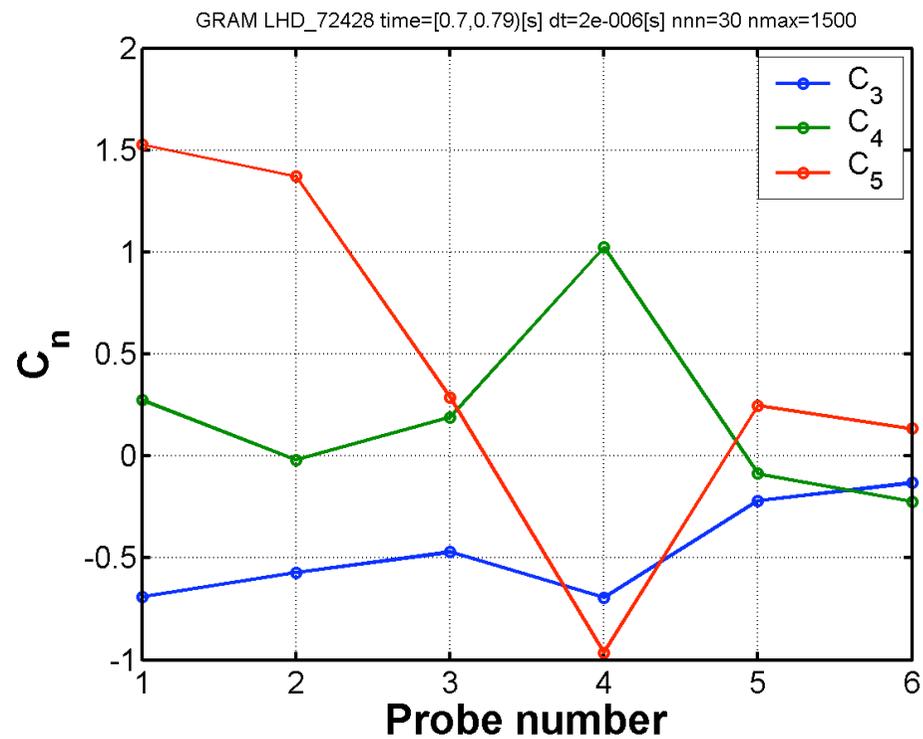
確率密度関数の展開係数 C_n を求めることで
ガウス分布からの偏差を定量的に評価

Gram-Charlie級数展開(2)

LHD



接触状態



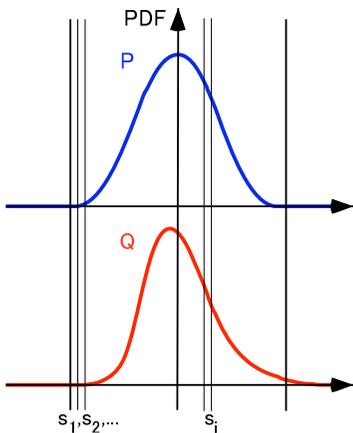
非接触状態

カルバックライブラーのダイバージェンス(KLD)

$$D(P \parallel Q) = \sum_{\{s\}} P(s_i) \log(P(s_i)/Q(s_i))$$

$P(s)$ と $Q(s)$, $\{s\} = \{s_1, s_2, \dots\}$ は離散化されたPDF

$\left\{ \begin{array}{l} P = Q \Rightarrow D(P \parallel Q) = 0 \\ P \neq Q \Rightarrow D(P \parallel Q) > 0 \end{array} \right.$



- PDF型の類似度を判断する指標
- 微妙な差異を識別可能
- 情報理論の分野で広く用いられる

$$D(P \parallel Q) = - \sum_{\{s\}} p(s_i) \log q(s_i) + \sum_{\{s\}} p(s_i) \log p(s_i)$$

$$= H(P, Q) - H(P)$$

- 積分範囲を定める必要がある

- 短時間データ
- 分布の大きく異なるPDF

テールの評価ができない

長時間データ取得が必須

