

第五回若手科学者によるプラズマ研究会
周辺プラズマにおける浮遊電位の構造

永島芳彦、山田琢磨、江尻晶*、高瀬雄一*、白岩俊一*
東大理、*東大新領域

星野克道、川島寿人、仙石盛夫、上原和也、三浦幸俊、JFT-2Mグループ
原研那珂

目次

動機－浮遊電位の振る舞いから何がいえるか

実験装置－高速駆動プローブ

これまで得られている浮遊電位の特徴的な振る舞いについて
相関の一時的減少など

フェライト実験前後における浮遊電位低下位置の変化

同一磁気面にプローブがないことの考察

H-mode実験における浮遊電位研究(LSN配位)

実験条件

浮遊電位の電極間の差

ダイバータープローブとの比較実験

浮遊電位勾配と揺動の関係

まとめ

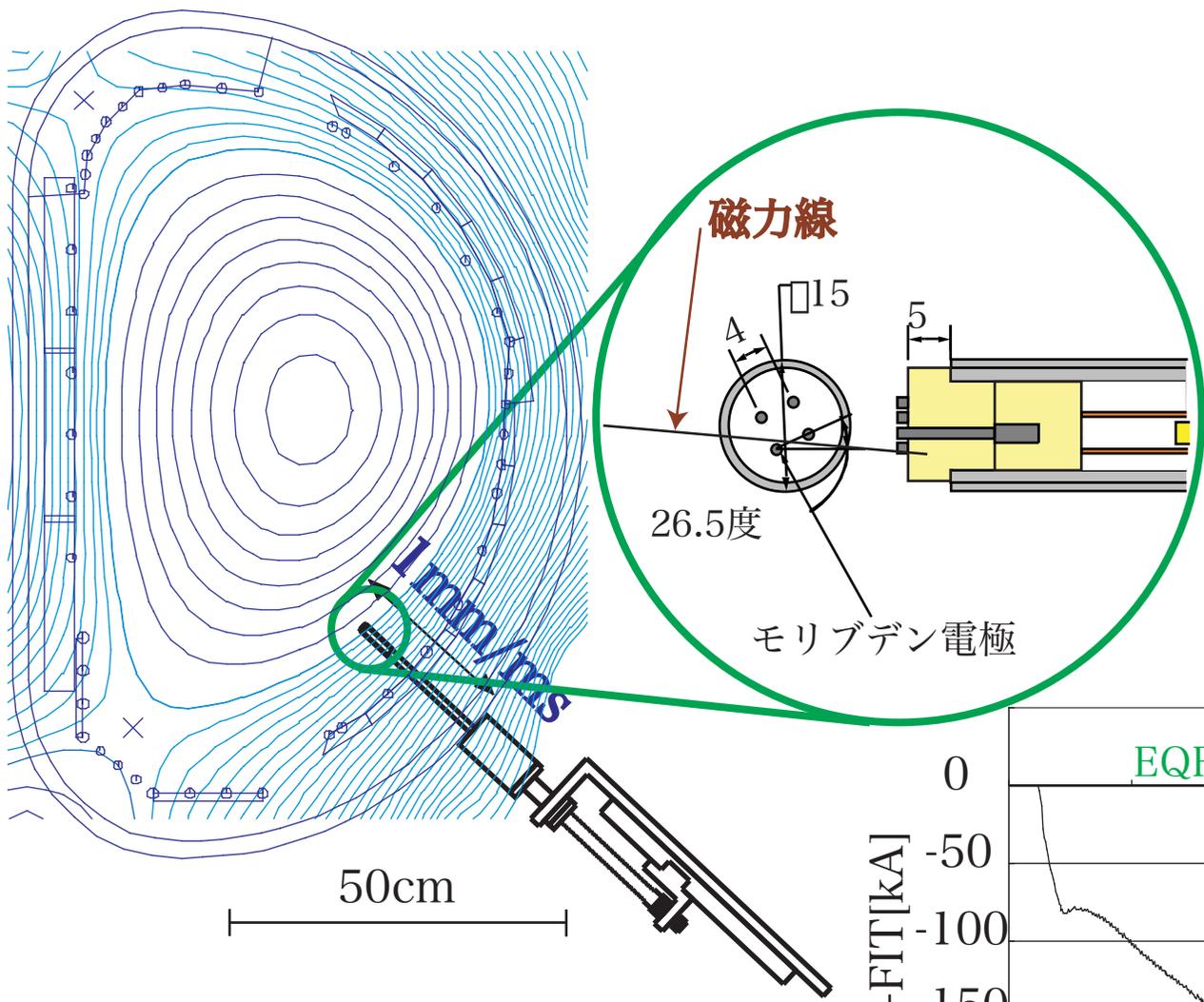
動機—浮遊電位の径構造は何を意味するか

JFT-2Mにおける高速駆動プローブの実験では、トリプルプローブ法に基づくプラズマ空間電位の直接測定は成功していない。実験データは3つの電極が同じ位置にあると仮定できないことを示している。

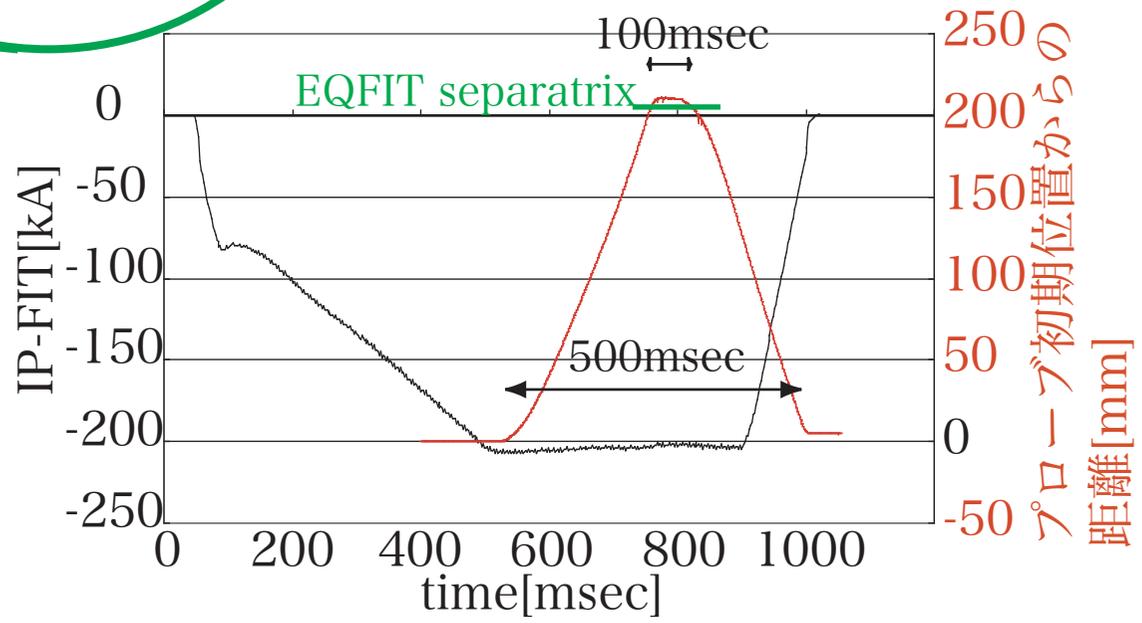
しかし、浮遊電位のデータからは興味深い径方向の構造が観測されている。

そこで、浮遊電位について様々な視点から考察を行い、プラズマの小半径方向の構造と結びつけるための研究を行なった。

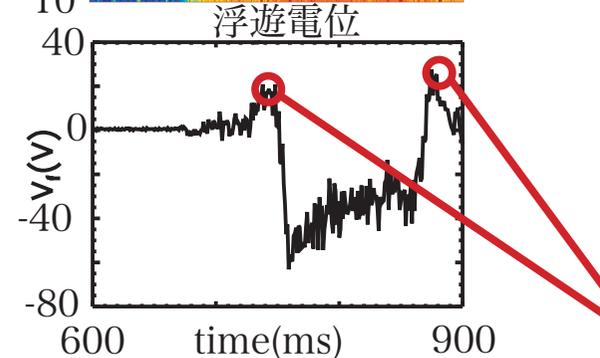
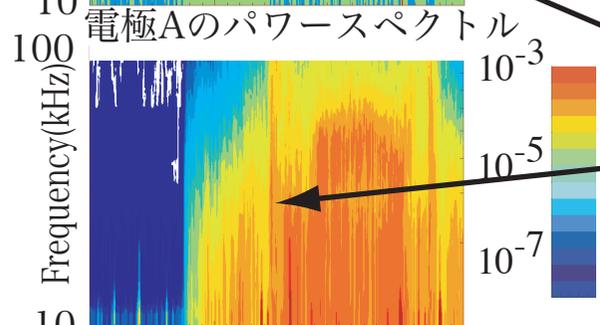
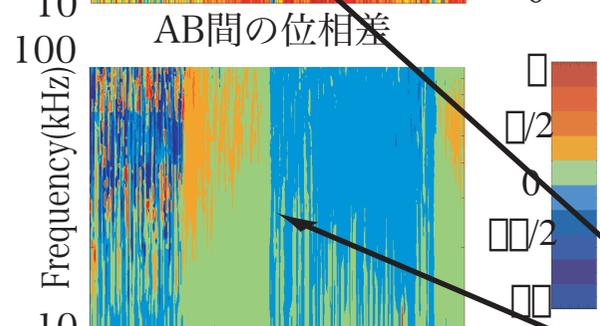
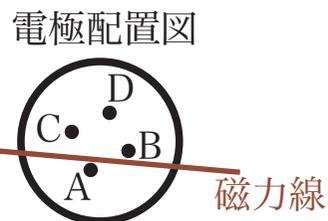
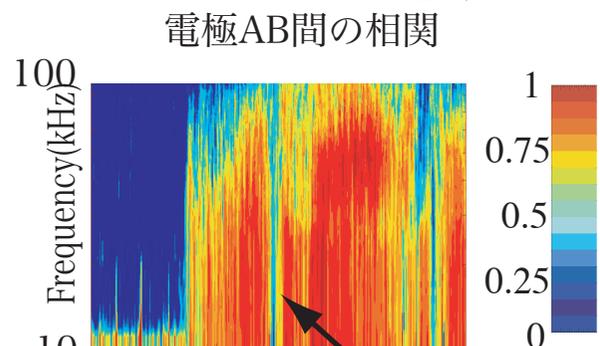
測定器の説明—高速駆動プローブ



左図は、平衡配位とプローブの設置位置、下図はプラズマ電流の時間発展とプローブの動作を示している。



過去の実験で得られた浮遊電位の特徴



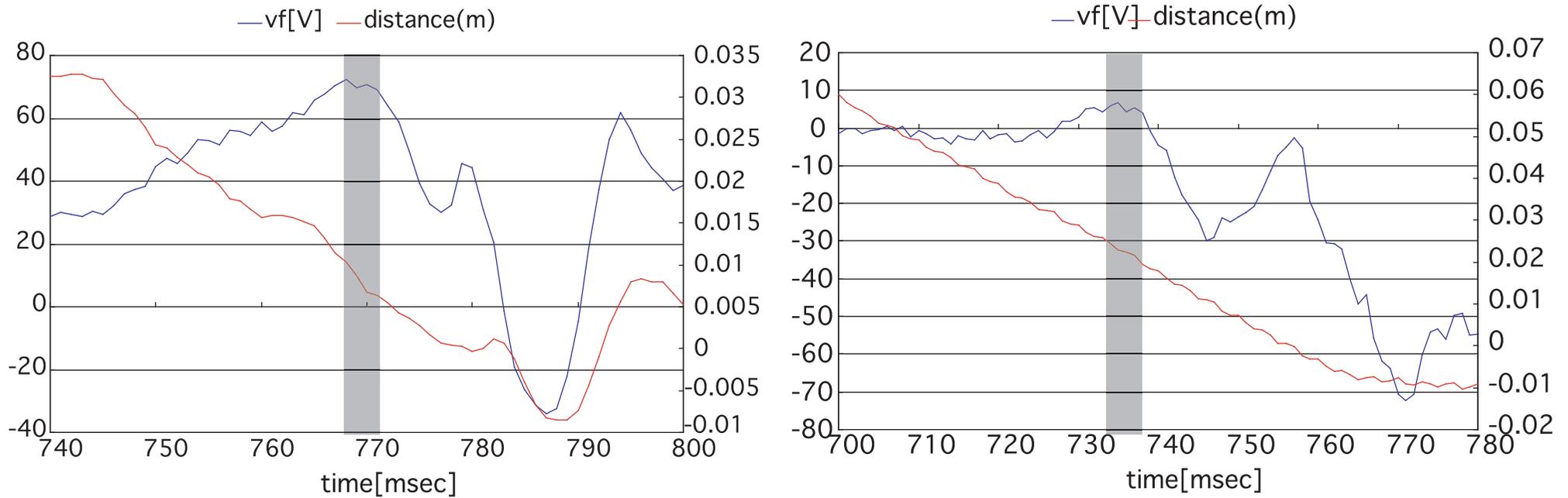
プローブをプラズマ中に入れていくと、あるところで浮遊電位が急激に負に転じる。この位置では、浮遊電位の揺動の周波数帯域が広がり、また異なる電極での相関が小さくなる。

上から、相関の減少、位相のずれ、パワーの周波数幅の広がり

この場所は何を意味するのだろうか。

ここ

フェライト実験前後における浮遊電位低下位置の変化

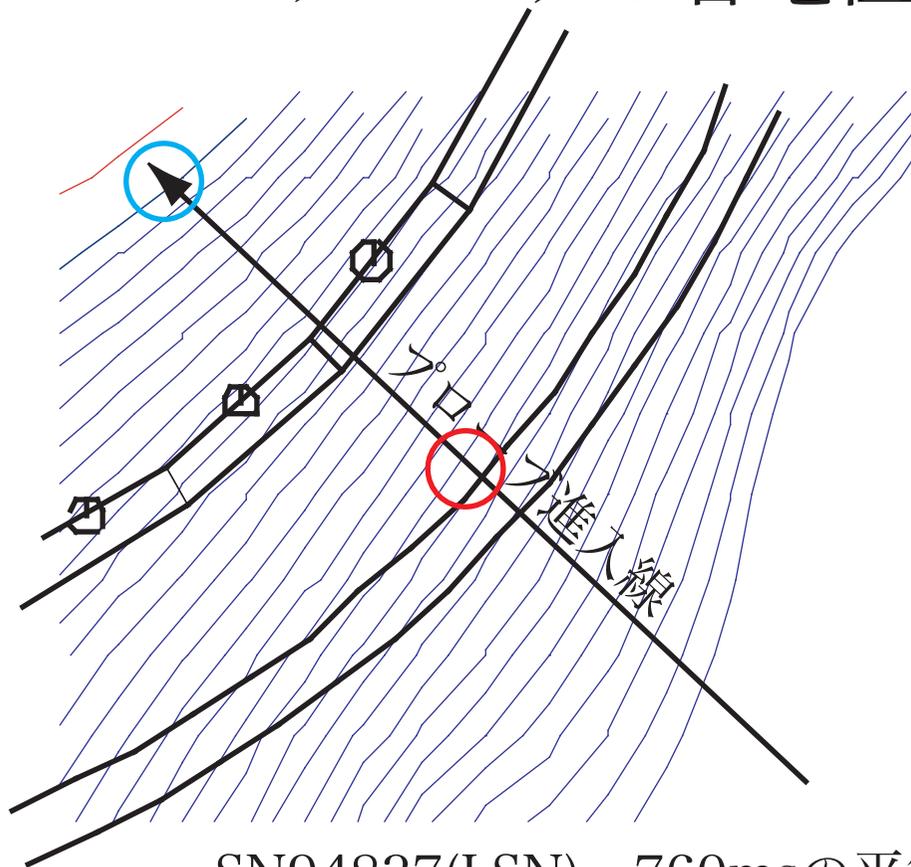


フェライト実験前(SN91263,USN) フェライト実験後(SN94837,LSN)

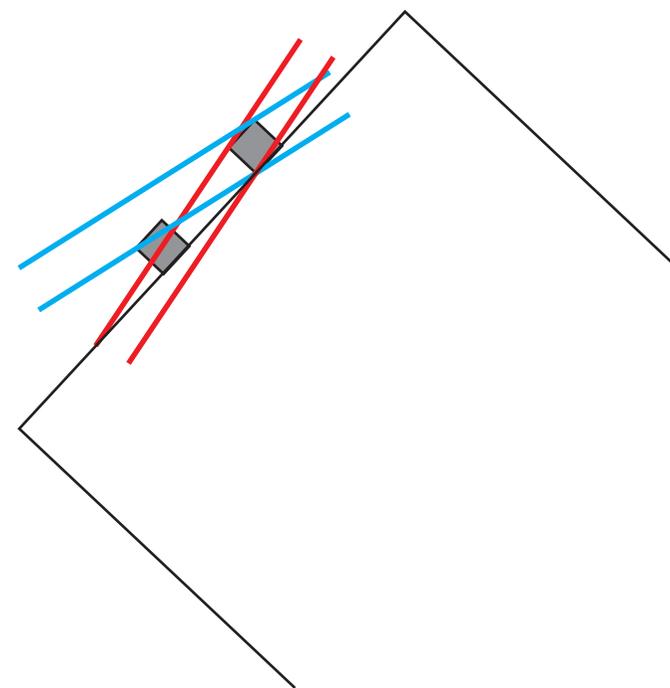
青は浮遊電位、赤はプローブとセパトリックスの距離を赤道面に投影したもの

全体的な傾向として、JFT-2MのAMTEX実験前後で、プローブの浮遊電位の低下する位置（灰色ハッチ）が若干外側に広がっている様子が観測されている。

プローブの各電極が同一磁気面でない可能性



SN94837(LSN)、760msの平衡配位と
プローブの進入線



プローブ電極（灰色）と、平衡配位から求めた磁気面の傾き。青と赤は左図の丸で囲まれた位置に対応する。

一般に、プローブがプラズマ内部に進むにつれて、2種の電極は同一磁気面にあるという仮定からずれていくことが考えられる。

磁気面量のSOLとedge plasmaの違いがプローブの浮遊電位計測へどのように反映するか

$$\phi_{\text{floating}} = \phi_{\text{plasma}} + T_e \ln \left[0.61 \frac{A_i}{A_e} \sqrt{\frac{m_e}{m_i} \left(1 + \frac{T_i}{T_e} \right)} \right]$$

SOLでは磁力線が閉じていないため、等磁気面と等電位面が一致しているとは限らない。

LCFSの内部では、等磁気面では磁力線が閉じているので、0次の近似ではスカラポテンシャルは磁気面量と考えられる。

電極BとDが同じ磁気面になれば、その浮遊電位差は

SOLでは

$$\phi_{\text{floating}_{BD}} = \phi_{\text{plasma}_{BD}} + T_e$$

edge plasmaでは

$$\phi_{\text{floating}_{BD}} = \phi_{\text{plasma}_{BD}} + T_e \left[E_r r_{BD} + T_e \right]$$

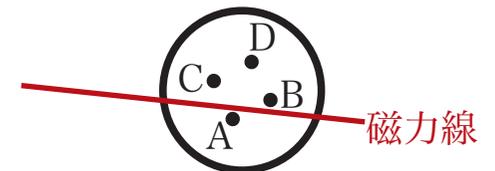
ないし

$$\left[E_r r_{BD} \right] \left[T_e \right]$$

⊗

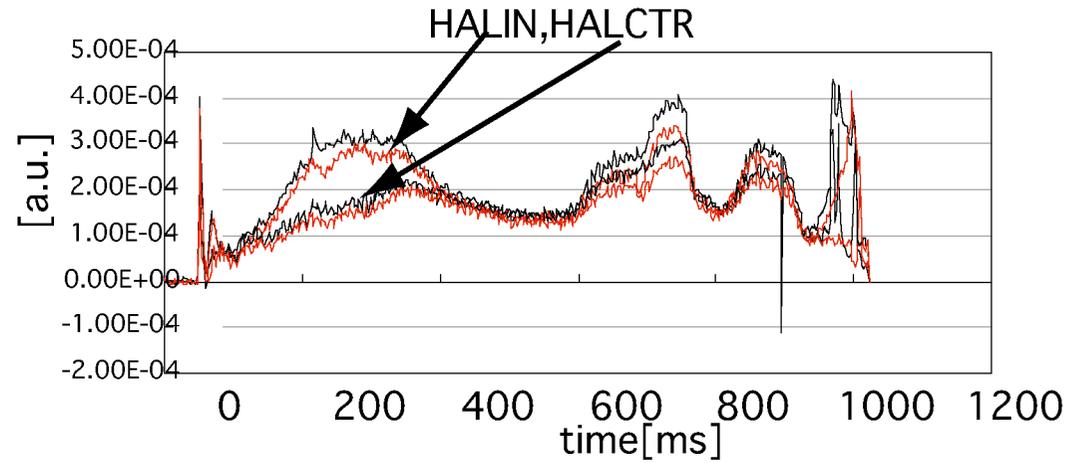
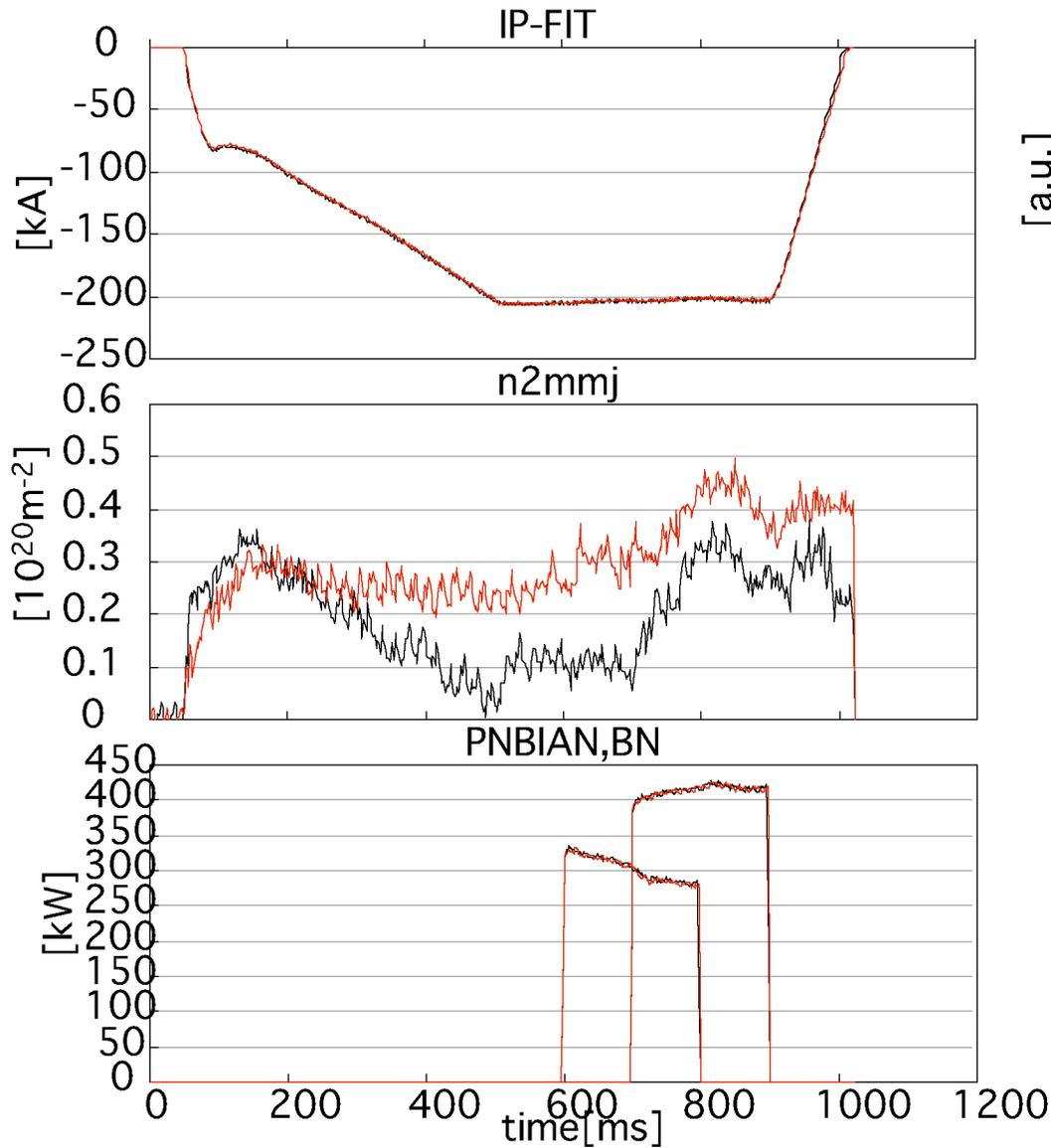
磁気面と電極面の傾きの極性で異なる

電極配置図

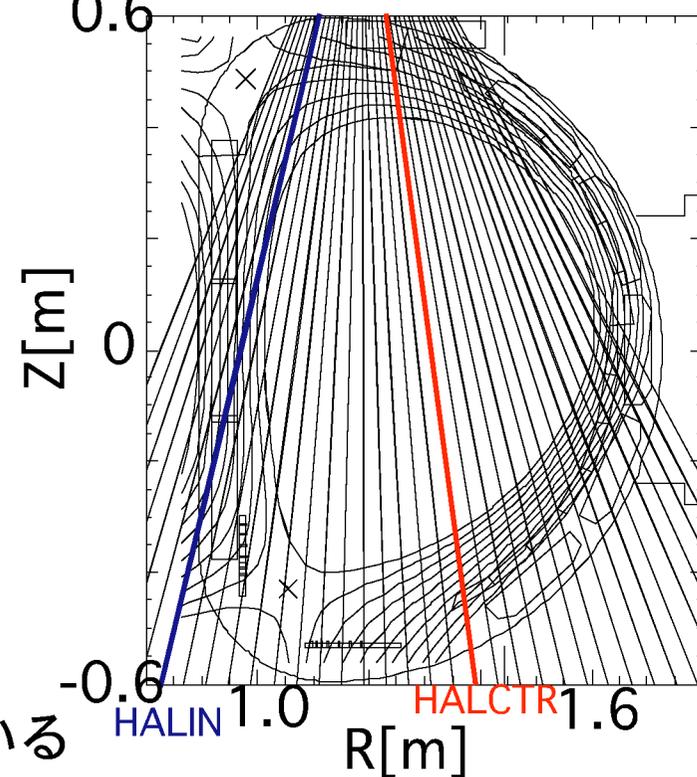


但し、 $\phi = \ln \left[0.61 \frac{A_i}{A_e} \sqrt{\frac{m_e}{m_i} \left(1 + \frac{T_i}{T_e} \right)} \right]$

H-mode、LSN配位プラズマにおける浮遊電位計測 放電条件

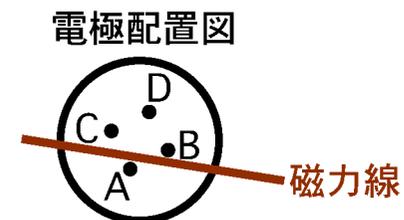
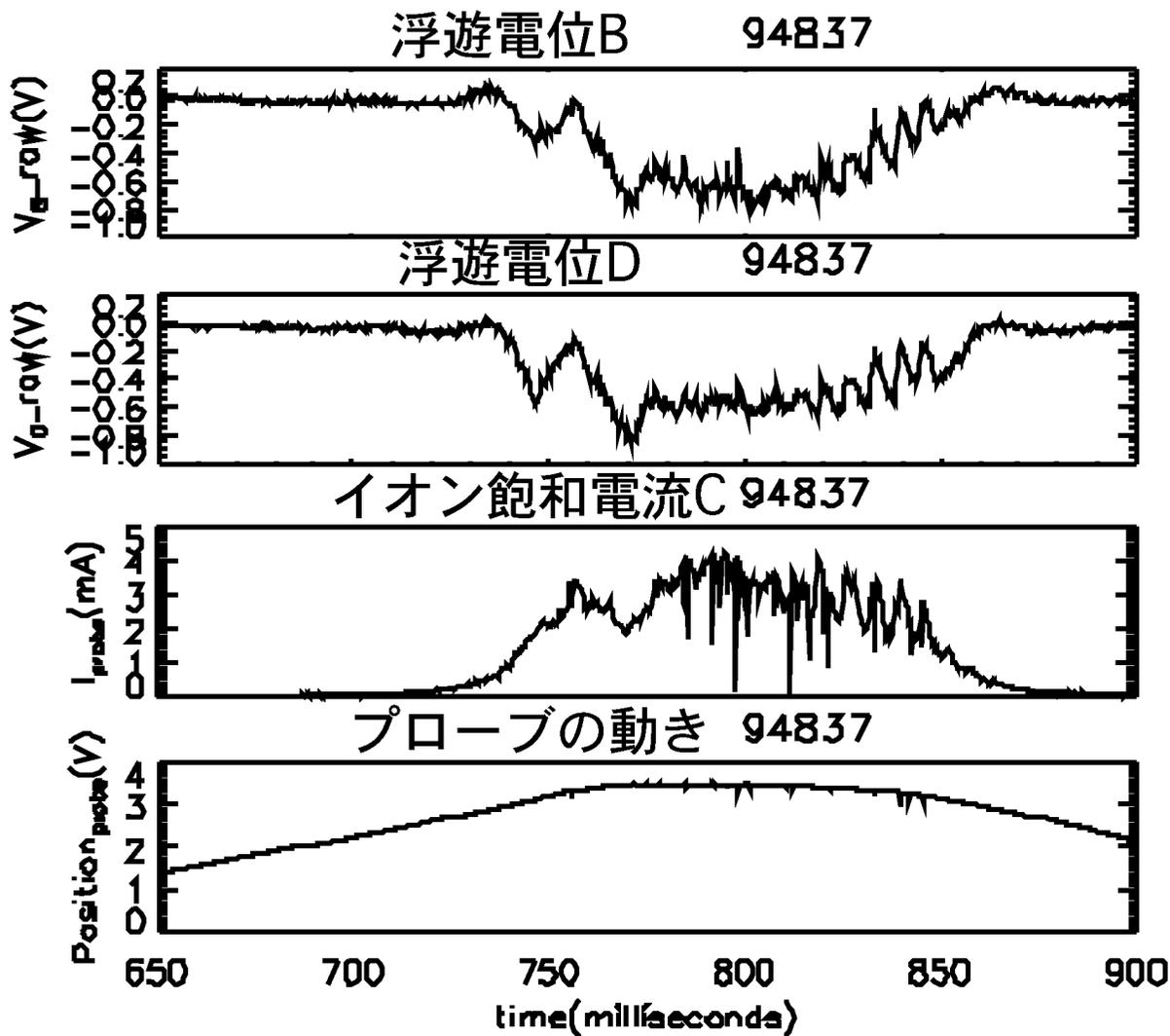


SN94837 760msec 平衡とDa視線



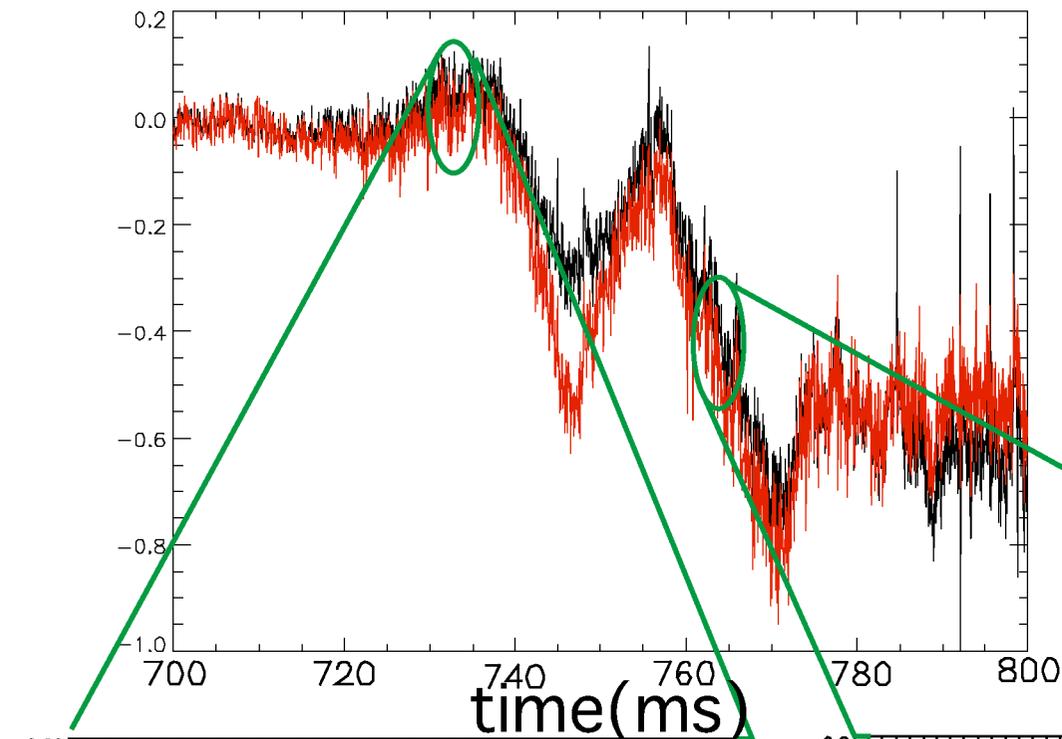
黒はSN34937、赤はSN34936を表している

H-modeにおける浮遊電位計測 プローブシグナルの時間発展



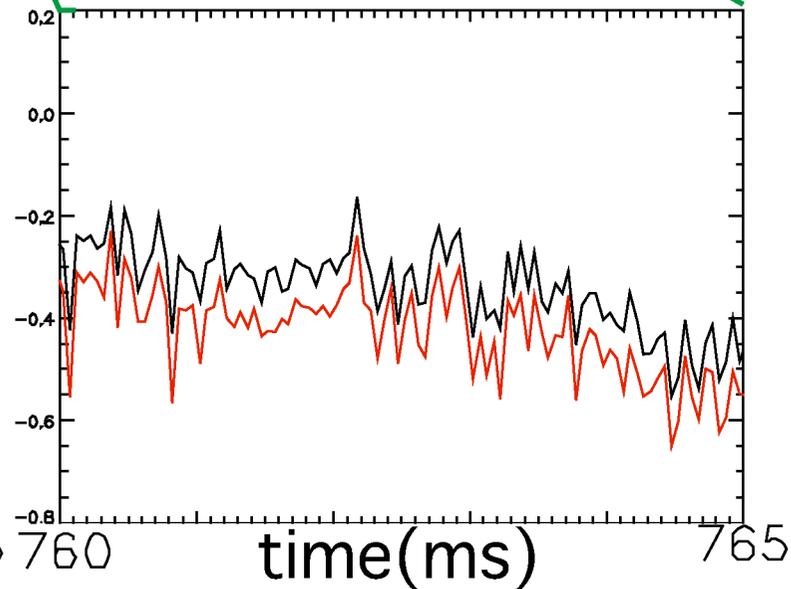
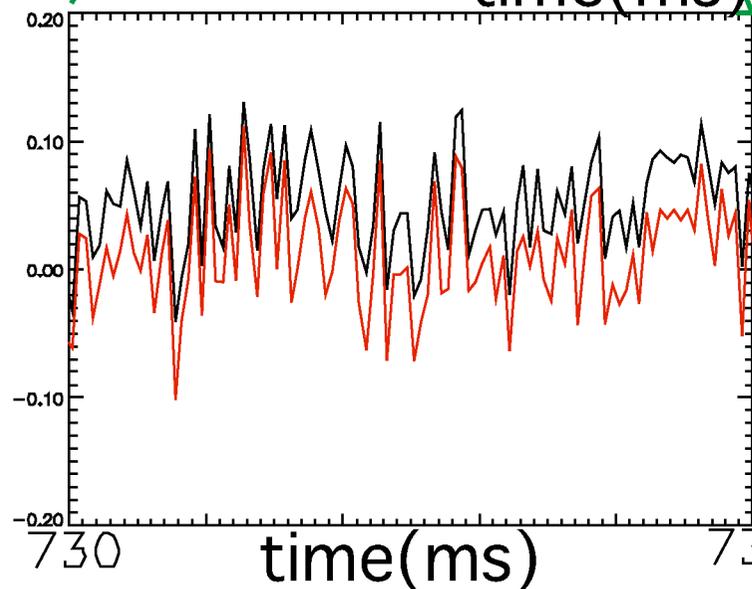
放電後半で、振動が観測されている。

電極ごとの浮遊電位の差—径方向の電場？



揺動成分はおおむね一致しているように見える。

しかし、浮遊電位のシアがあるところでスタティックな浮遊電位差が見られる。

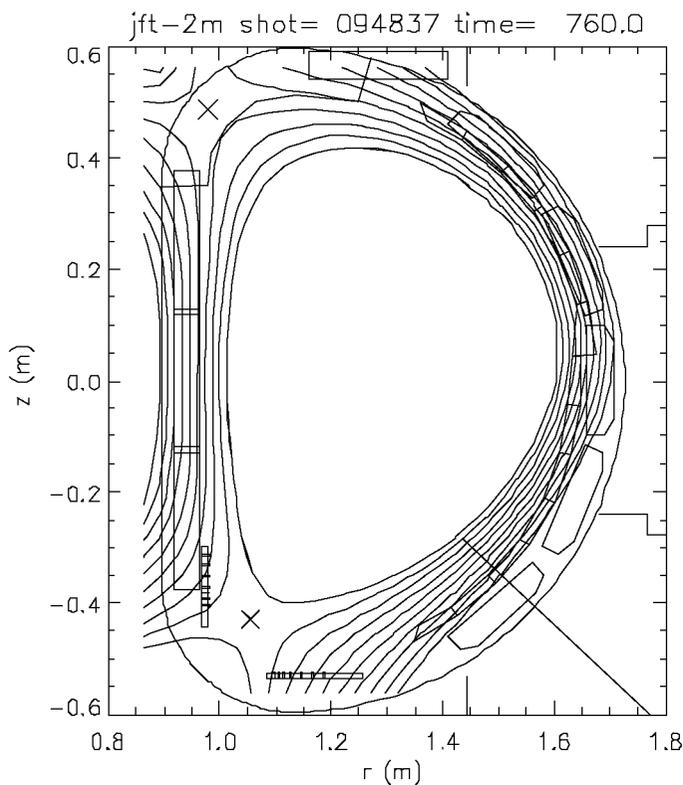


プローブはこの時間帯は動いており、径方向の電位差を検出している可能性がある。

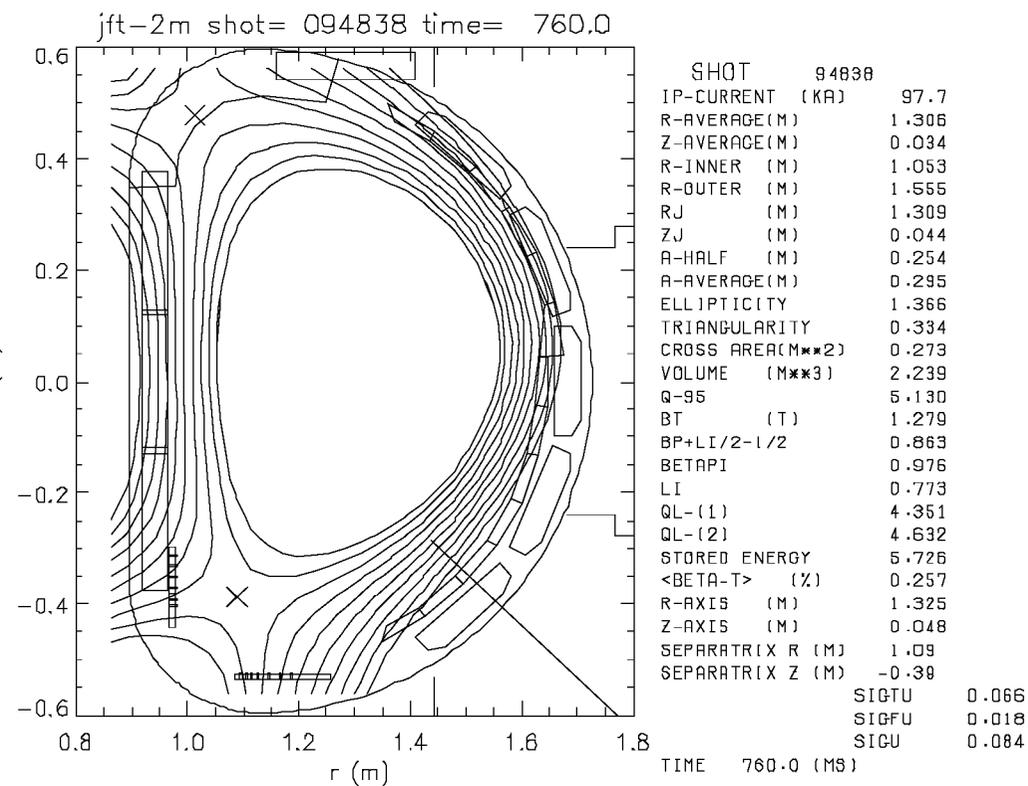
4プローブでの浮遊電位計測

(1) 実験時のLSN配位の相違

SN94836,7はイオン飽和電流と浮遊電位（2点）を、SN94838は浮遊電位（4点）を計測。SN94838では浮遊電位差がコンシステントにポロイダル方向もしくは径方向のパラメータの差となっているかを調査。

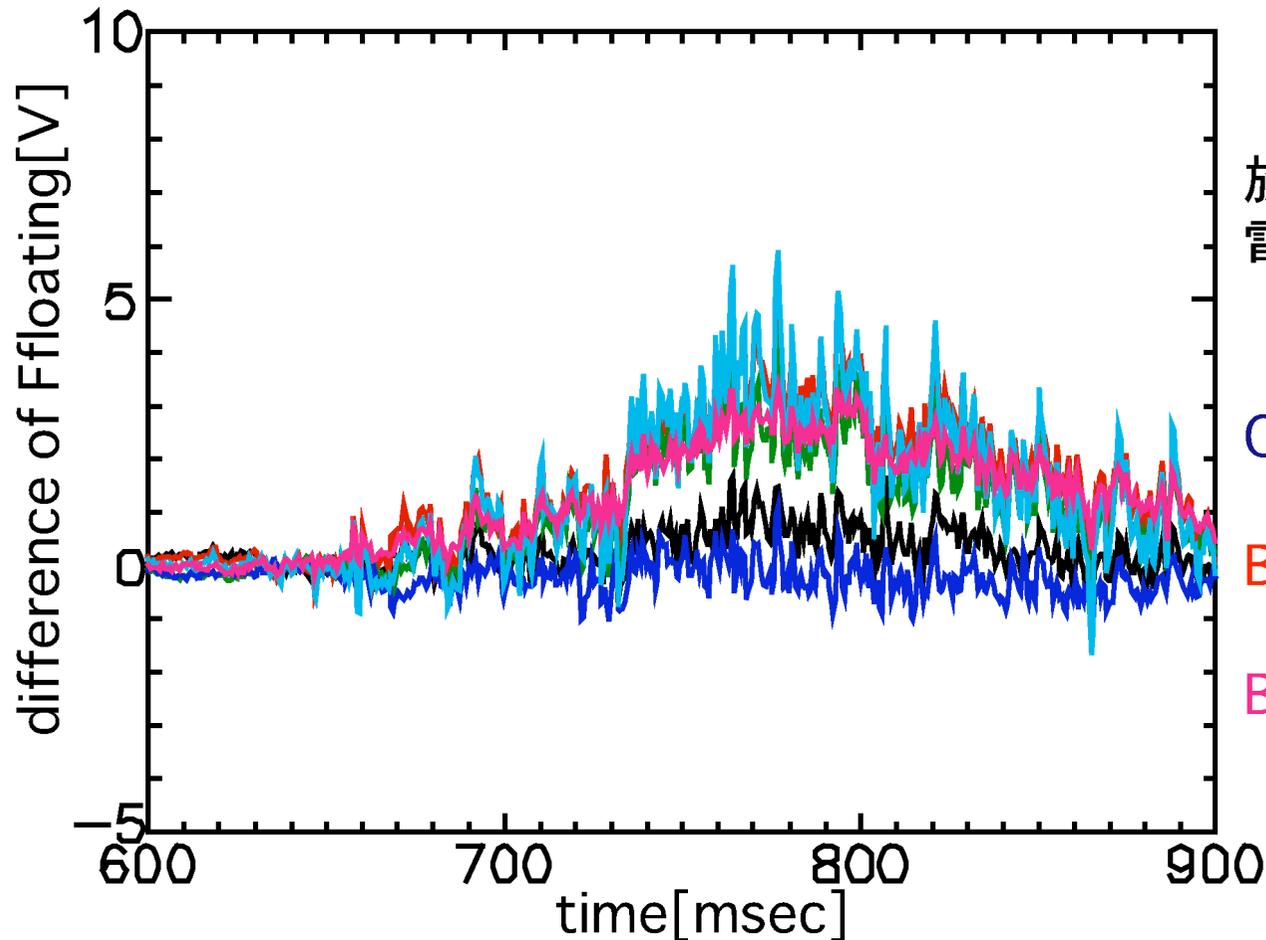


SHOT 94837	
IP-CURRENT (KA)	206.8
R-AVERAGE(M)	1.309
Z-AVERAGE(M)	0.009
R-INNER (M)	1.012
R-OUTER (M)	1.602
RJ (M)	1.307
ZJ (M)	0.031
A-HALF (M)	0.297
A-AVERAGE(M)	0.344
ELLIPTICITY	1.377
TRIANGULARITY	0.394
CROSS AREA(M**2)	0.372
VOLUME (M**3)	3.059
Q-95	3.482
BT (T)	1.275
BP+LI/2-1/2	0.661
BETAPI	0.725
LI	0.873
QL-(1)	2.780
QL-(2)	3.014
STORED ENERGY	19.077
<BETA-T> (%)	0.636
R-AXIS (M)	1.328
Z-AXIS (M)	0.038
SEPARATRIX R (M)	1.06
SEPARATRIX Z (M)	-0.43
SIGTU	0.159
SIGFU	0.042
SIGU	0.201
TIME	760.0 (MS)



SHOT 94838	
IP-CURRENT (KA)	97.7
R-AVERAGE(M)	1.306
Z-AVERAGE(M)	0.034
R-INNER (M)	1.053
R-OUTER (M)	1.555
RJ (M)	1.309
ZJ (M)	0.044
A-HALF (M)	0.254
A-AVERAGE(M)	0.295
ELLIPTICITY	1.366
TRIANGULARITY	0.334
CROSS AREA(M**2)	0.273
VOLUME (M**3)	2.239
Q-95	5.130
BT (T)	1.279
BP+LI/2-1/2	0.863
BETAPI	0.976
LI	0.773
QL-(1)	4.351
QL-(2)	4.632
STORED ENERGY	5.726
<BETA-T> (%)	0.257
R-AXIS (M)	1.325
Z-AXIS (M)	0.048
SEPARATRIX R (M)	1.09
SEPARATRIX Z (M)	-0.39
SIGTU	0.066
SIGFU	0.018
SIGU	0.084
TIME	760.0 (MS)

4プローブでの浮遊電位計測 (2) 各プローブ同士の浮遊電位差

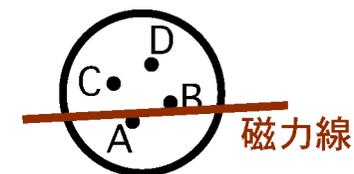


全電極で浮遊電位を計測した放電における、電極同士の浮遊電位差。

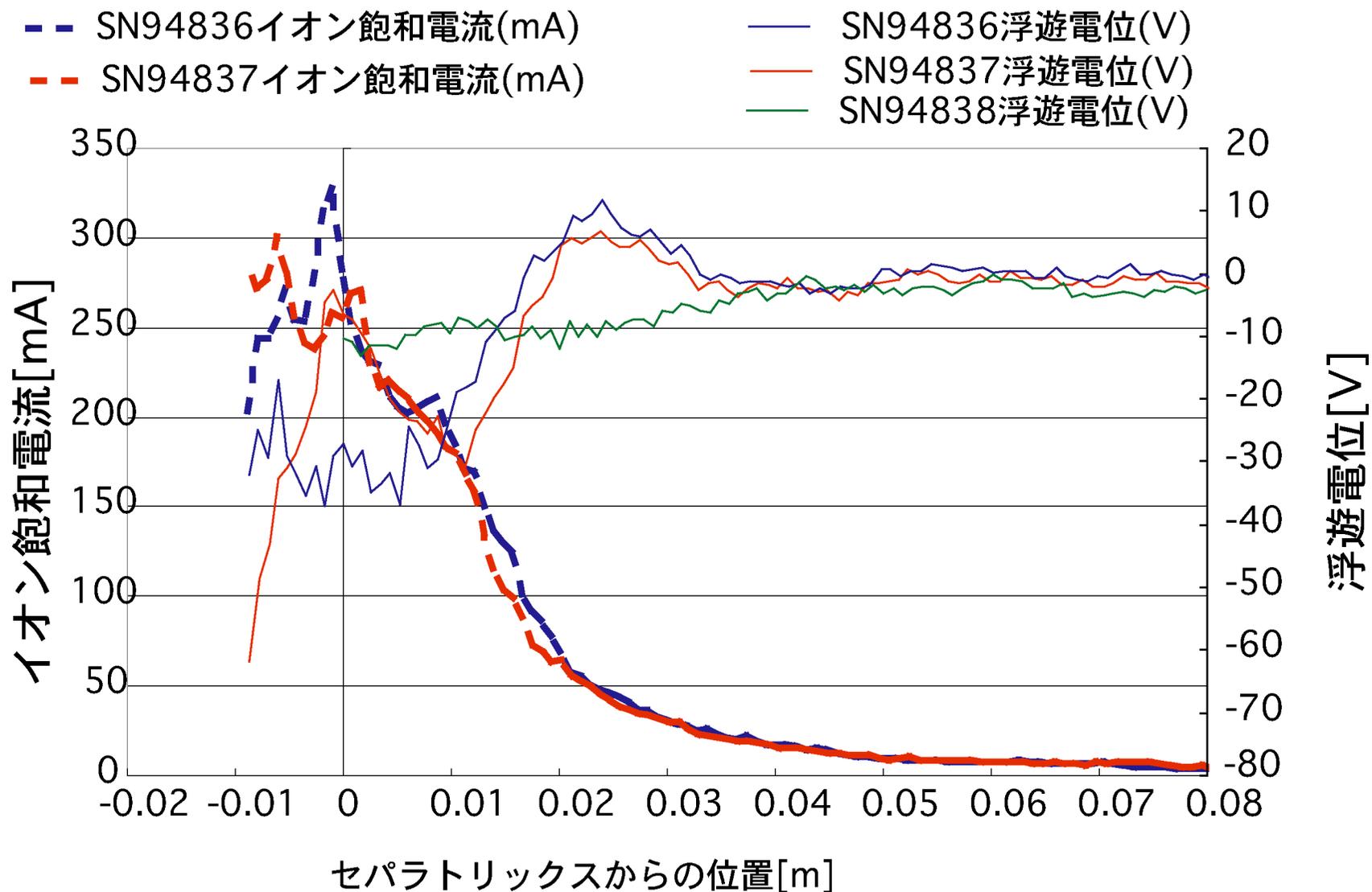
黒色、青色はそれぞれ電極AB、CD同士
緑色、赤色はそれぞれ電極AC、BD同士
水色、桃色はそれぞれ電極AD、BC同士

磁力線にそった方向には差は小さく、磁力線に垂直方向には差が大きい。ポロイダル方向、もしくは径方向のパラメータの差を反映しているといえる。

電極配置図

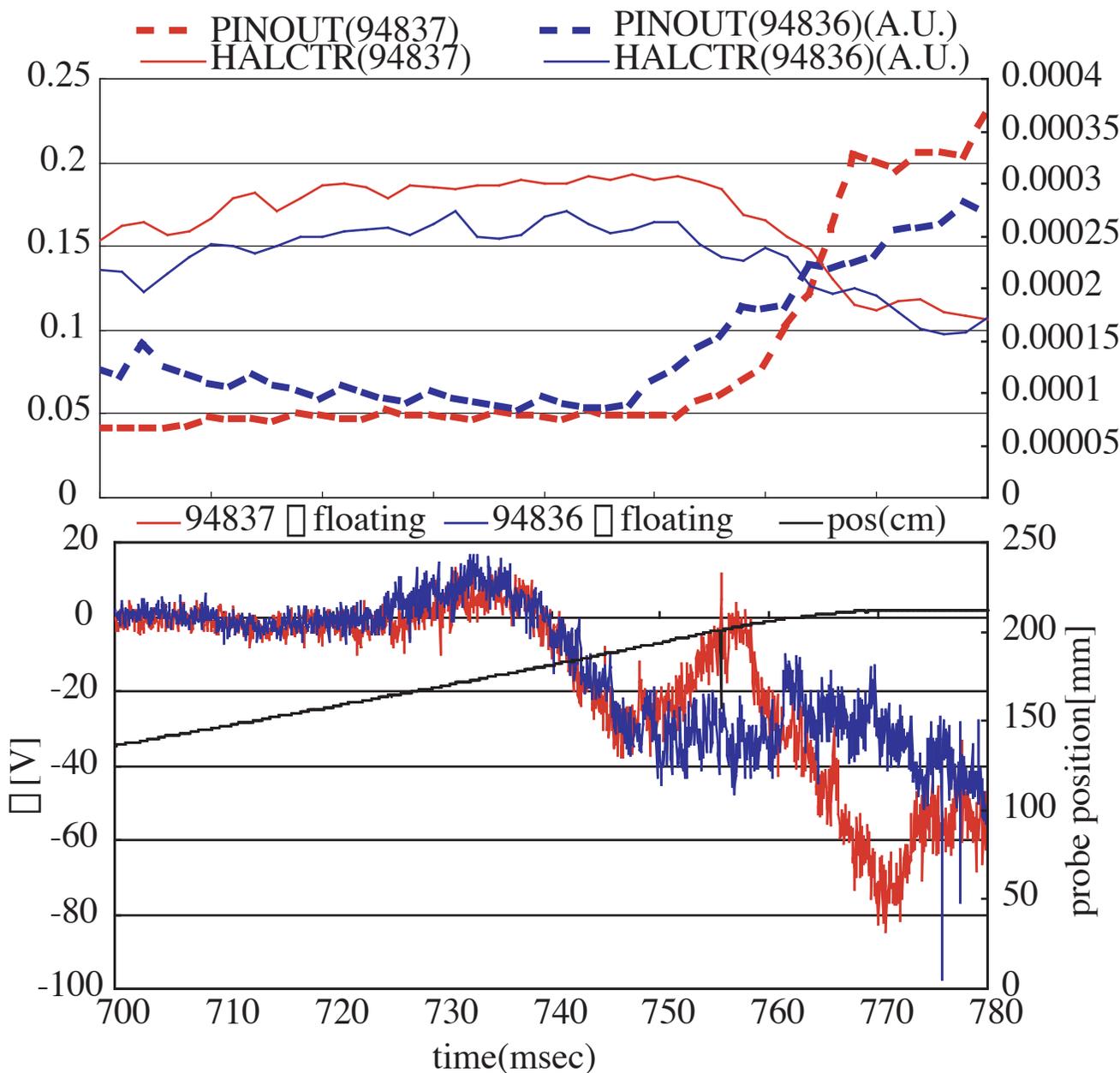


3種の放電のパラメータ径方向分布



SN94837ではセパトリックスからその1cm外側にかけてプラズマ→SOLの浮遊電位の勾配がある。

H-mode遷移時間の相違における浮遊電位の変化

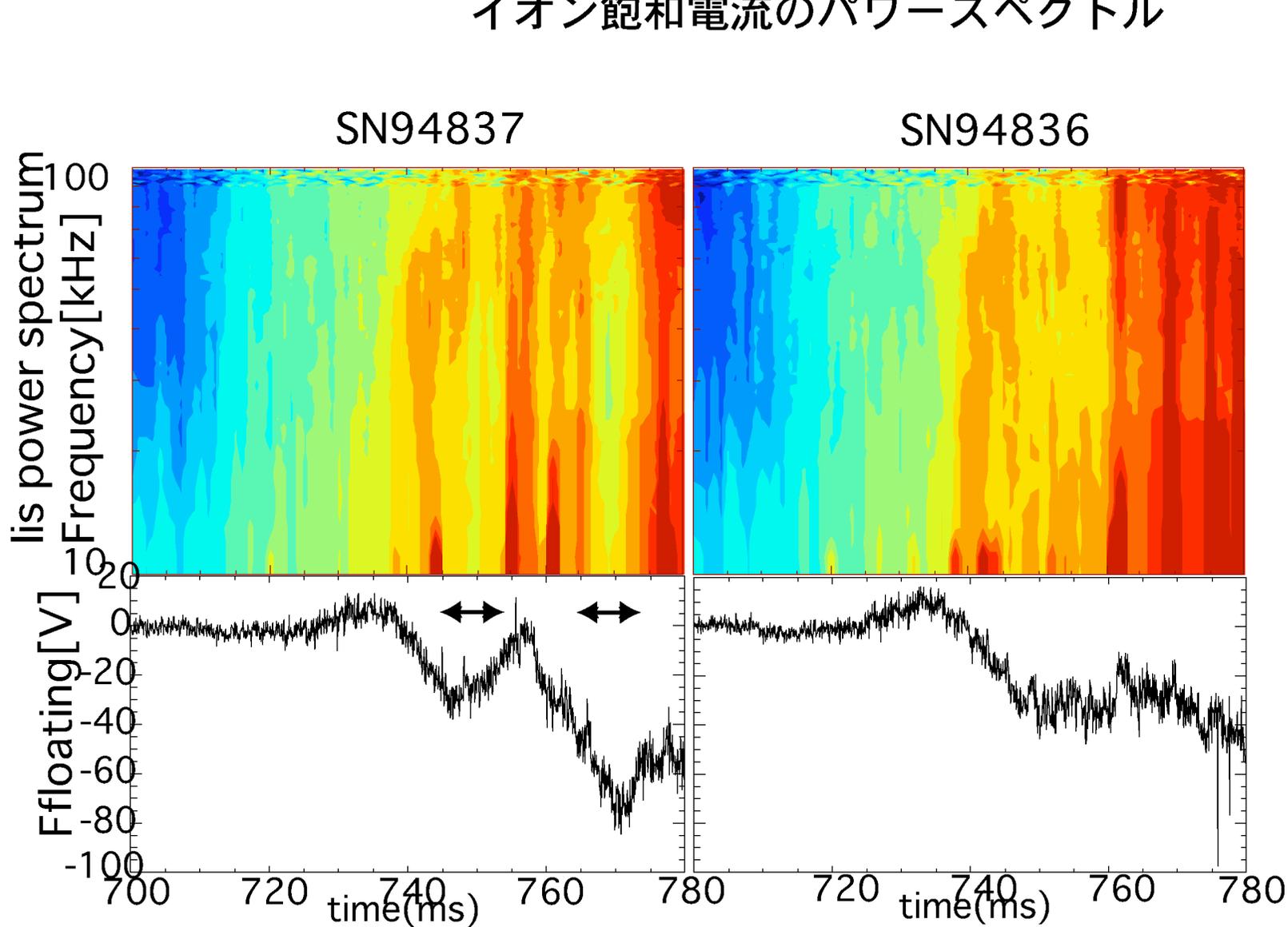


Daでは判別しにくいですが、SXRの観測では遷移時間が微妙に異なる。

なお、平衡計算との比較では、770msec以降はプローブとプラズマの相対距離は変化していない。

浮遊電位が変化する時間帯での揺動の抑制

イオン飽和電流のパワースペクトル

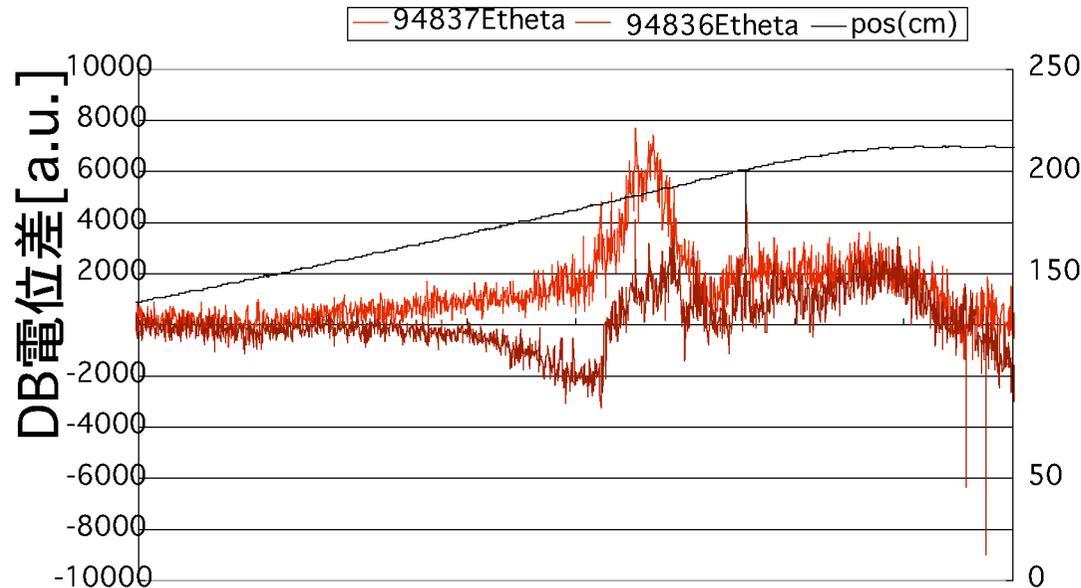


740msで揺動が一時揺動レベルが上昇し、その後再び小さくなる。

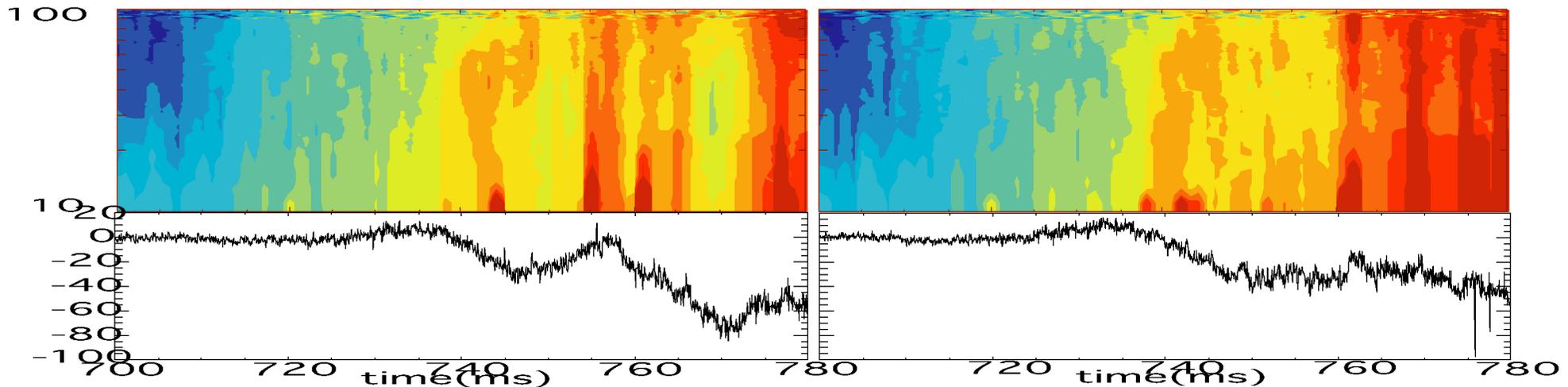
SN94937はL-H遷移が早い放電、SN94936は遅い放電である。

矢印で揺動が小さくなる位置を示している。765以降の時間帯はプローブはプラズマに対して動いていない。

電極の浮遊電位差と揺動の抑制



H-modeが遅いショットは電位差が反転している。早いショットは反転がおこらず、740~750msecで揺動が押さえられている時間と同期している。

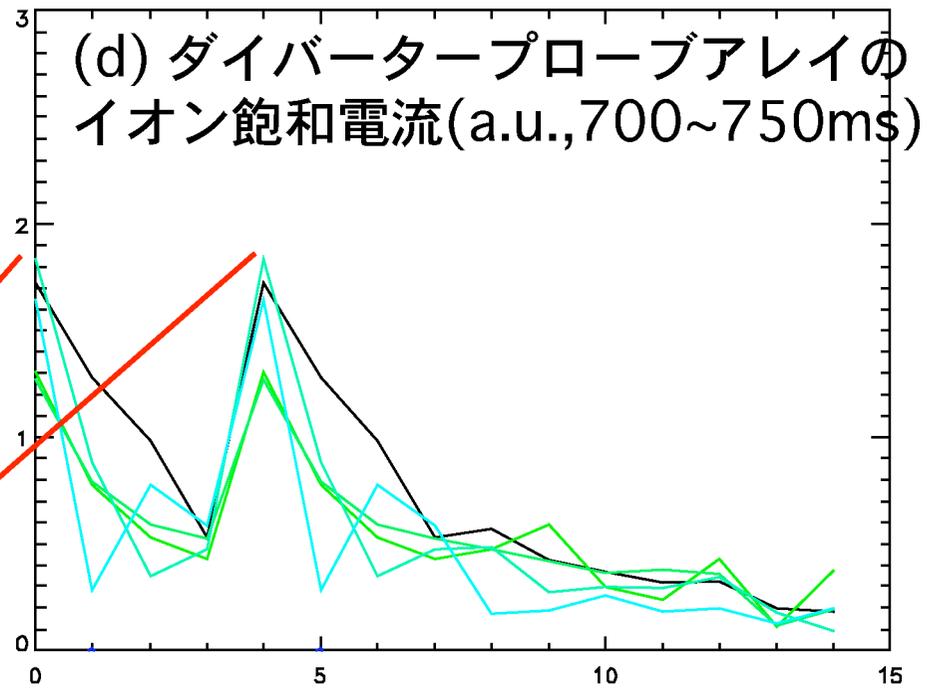
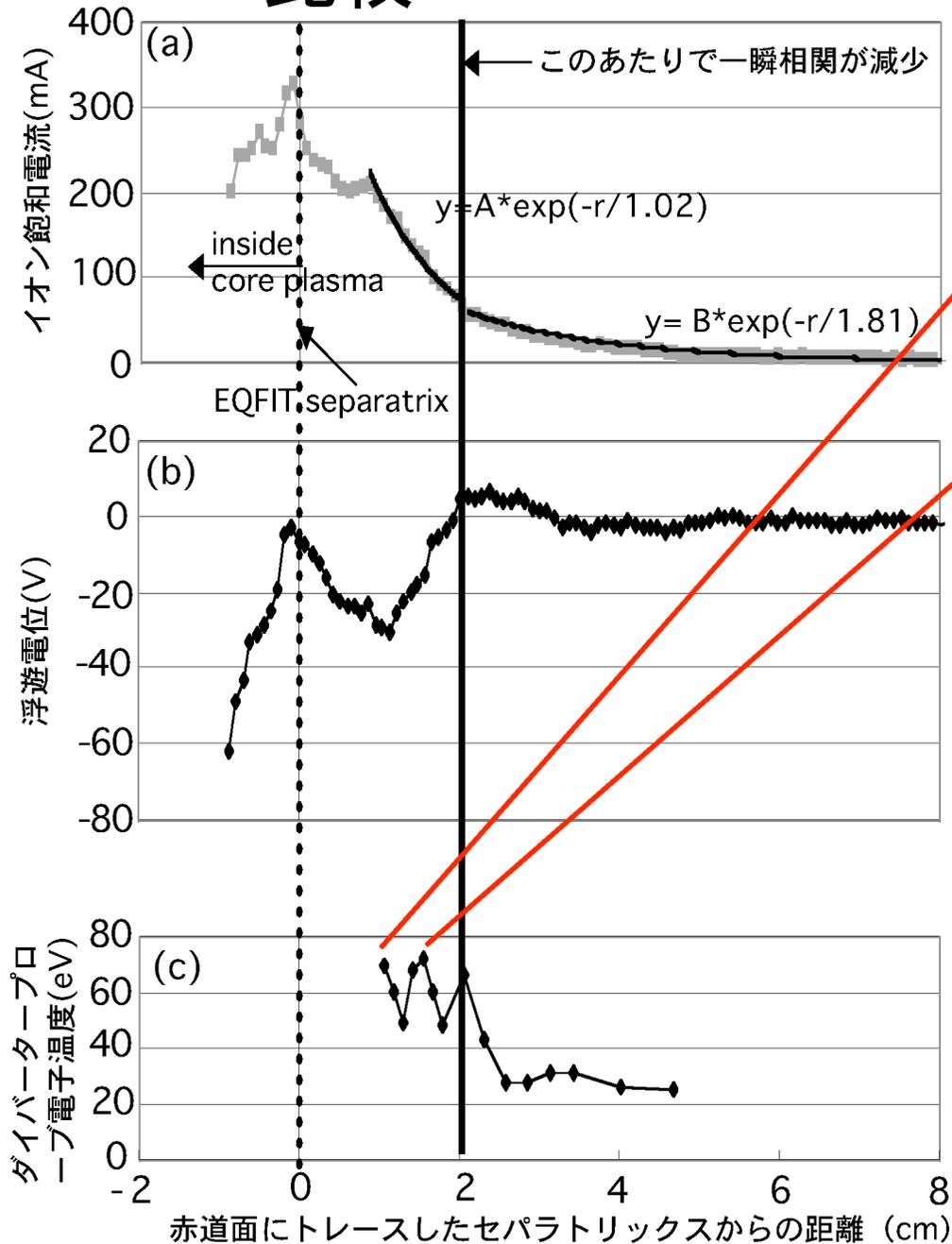


SN94837

SN94836

L-H遷移が早いショットで、径電場が出来ているとすれば向きはプラズマ→SOL。これは浮遊電位の径分布から推測される電場の向きと一致。

ダイバータープローブと高速駆動プローブの比較



平衡計算で同一磁気面を比較すると、イオン飽和電流のピークがいくつか存在する。しかし、セパトリックスまでは観測できていないので、このピークの意味は現在のところ不明。

まとめ

- ・ JFT-2Mの高速駆動プローブによる浮遊電位計測では、平衡計算のセパトリックスよりSOL側で浮遊電位勾配の反転と相関の減少がほぼ同じ径方向位置で観測されている。これは、電場のシアの存在によって説明できる可能性があり、SOLの物理を知る上で興味深い結果である。
- ・ そこで、H-mode中の浮遊電位やイオン飽和電流の構造を知るために、それらのスタティックな成分、揺動成分の振る舞いを計測した。
- ・ 結果としてL-H遷移のタイミングが微妙に異なるショットで、浮遊電位の振る舞いが大きく異なる様子が観測され、グローバルに似た放電でもSOLでは異なる振る舞いを示していることが分かった。
- ・ 径方向の浮遊電位勾配の反転する位置の近くでイオン飽和電流の揺動の減少が観測された。2つの電極で計測した浮遊電位差を径電場とすると、浮遊電位の空間分布から得られた径電場と、生じる時間帯や極性が一致している結果が得られた。
- ・ ダイバータープローブと高速駆動プローブの比較では、浮遊電位の低下する磁気面よりプラズマ側で、イオン飽和電流に2か所のピークが観測された。ピーク位置は平衡計算のセパトリックスより外側にある。
- ・ 浮遊電位について、H-mode時やダイバータープローブとの比較はまだ限られたショットでの解析結果であり、今後の解析から電場についての検証や、ダイバータープローブのイオン飽和電流ピークと高速駆動プローブの浮遊電位低下位置について検証を行っていく予定である。