

第10回 若手科学者によるプラズマ研究会

# TST-2における高次高調速波による パラメトリック不安定性と放射光揺動の計測

**TST2**  
Tokyo Spherical Tokamak

鳥居 祐樹、大迫 琢也<sup>1)</sup>、江尻 晶<sup>1)</sup>、増田 鉄也<sup>1)</sup>、  
佐々木 真<sup>2)</sup>、東條 寛<sup>1)</sup>、奴賀 秀男<sup>2)</sup>、島田 喜行<sup>1)</sup>、住友 信幸<sup>2)</sup>、  
辻村 次郎<sup>1)</sup>、海永 壮一郎<sup>2)</sup>、杉山 純一<sup>1)</sup>、高瀬 雄一<sup>1)</sup>

東京大学高温プラズマ研究センター

<sup>1)</sup>東京大学大学院新領域創成科学研究科

<sup>2)</sup>東京大学大学院理学系研究科

# アウトライン

- 背景と目的
- TST-2装置
- RFピックアッププローブによる計測
  - RFピックアッププローブ
  - 計測結果
- 高速光ダイオード計測器による計測
  - 高速光ダイオード計測器の開発
  - RF揺動の初計測
- まとめと今後の課題

# 研究目的

- 背景
  - 球状トカマクでは高 $\beta$ プラズマを安定に生成できる。高 $\beta$ プラズマは高誘電率を持つ。その条件下で有効な電子加熱・電流駆動法の確立は重要。その候補として高次高調速波 (HHFW :High Harmonic Fast Wave) がある。
- 目的
  - HHFW吸収の劣化原因の一つであるパラメトリック崩壊不安定性、および密度揺動による多重散乱について調べる。
- 手法
  - RFピックアッププローブをトロイダル方向に複数設置し、周波数スペクトル、波動磁場強度の空間分布を測定する。
  - 波動による密度揺動は放射光揺動を引き起こす。高速光ダイオードを製作し、放射光揺動を計測する。

# 球状トカマク装置 TST-2

**TST2**  
Tokyo Spherical Tokamak



大半径  $R_0 \sim 0.38\text{m}$

小半径  $a \sim 0.25\text{m}$

アスペクト比  $R_0/a \sim 1.5$

トロイダル磁場  $B_t \sim 0.1\text{T}$

電子密度  $n_e \sim 10^{19}\text{m}^{-3}$

プラズマ電流  $I_p \sim 70\text{kA}$

HHFW:

$f=21\text{MHz}$

$N_{\text{toroidal}} \sim 10$

$P < 200\text{kW} \times 2$

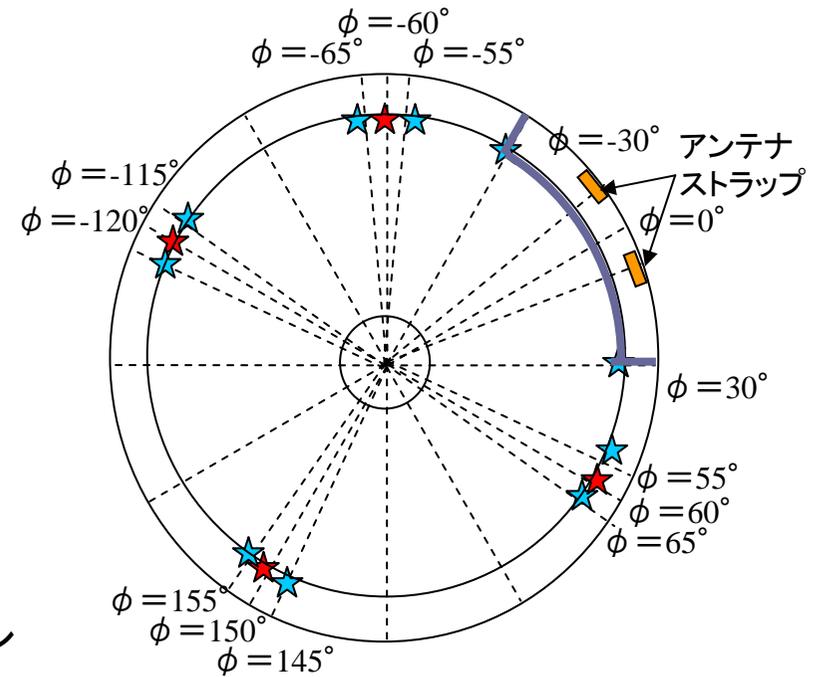
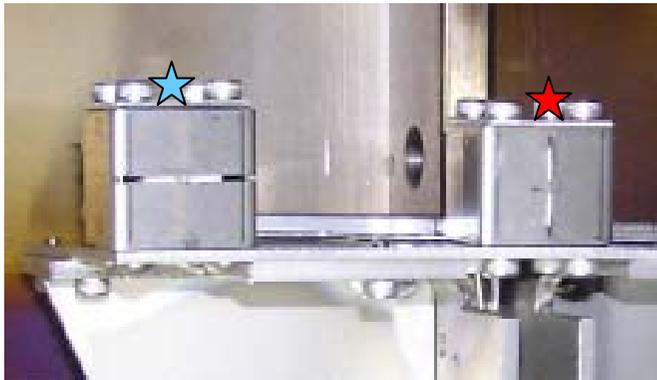
# RFピックアッププローブによる計測



- RF-pickup Probeをトロイダル方向に多数(14個)設置しHHFWがプラズマ中でどのように励起されているか調べた。
- これにより、空間的なパラメトリック崩壊不安定性の構造、密度揺動による多重散乱の影響を調べる事ができる。

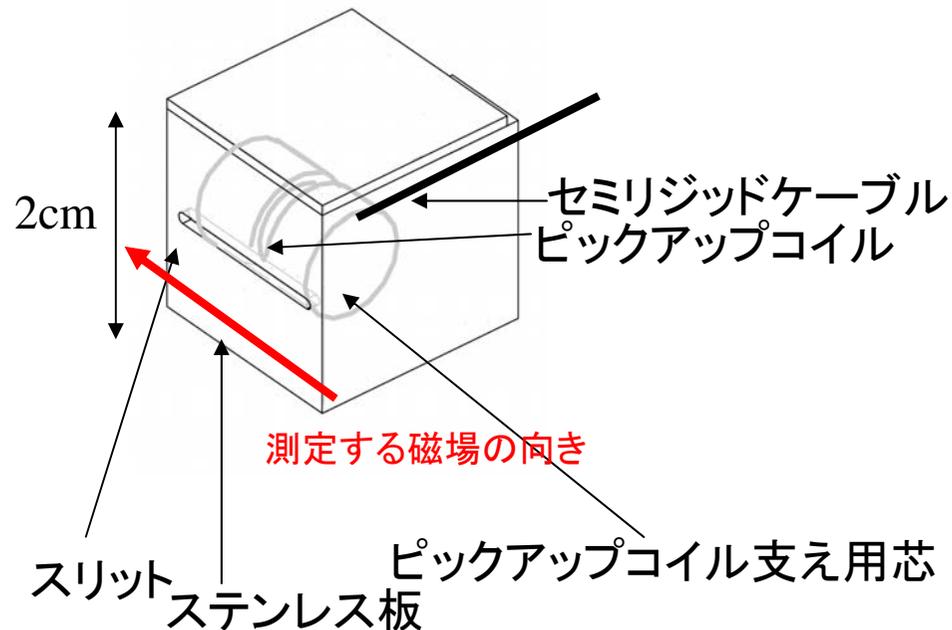
# RFピックアッププローブ

TST2  
Tokyo Spherical Tokamak



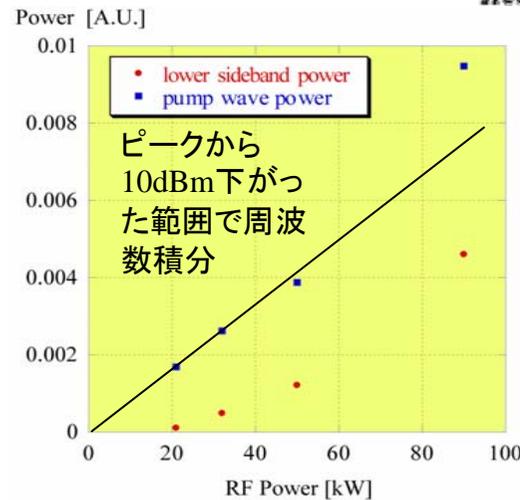
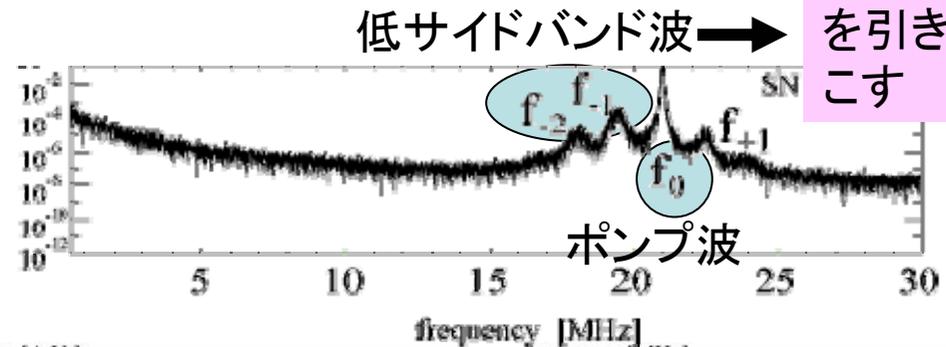
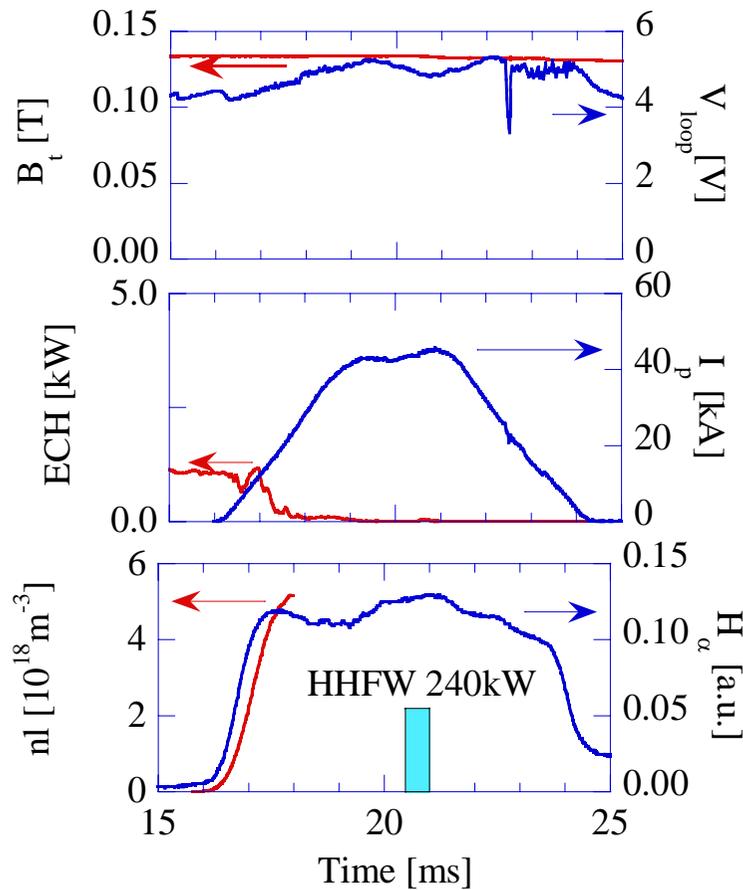
トロイダル方向14箇所を設置

- ★ トロイダル磁場計測
- ★ ポロイダル磁場計測

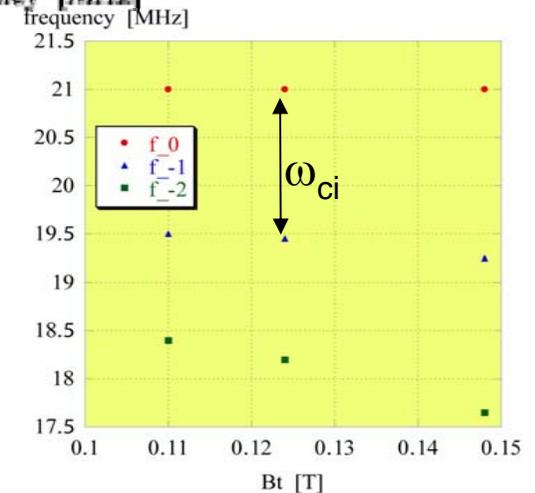


# パラメトリック崩壊不安定性の特性

TST?



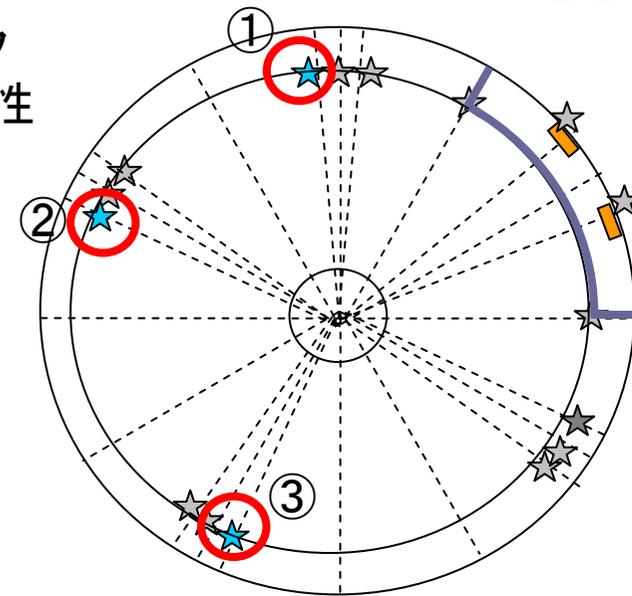
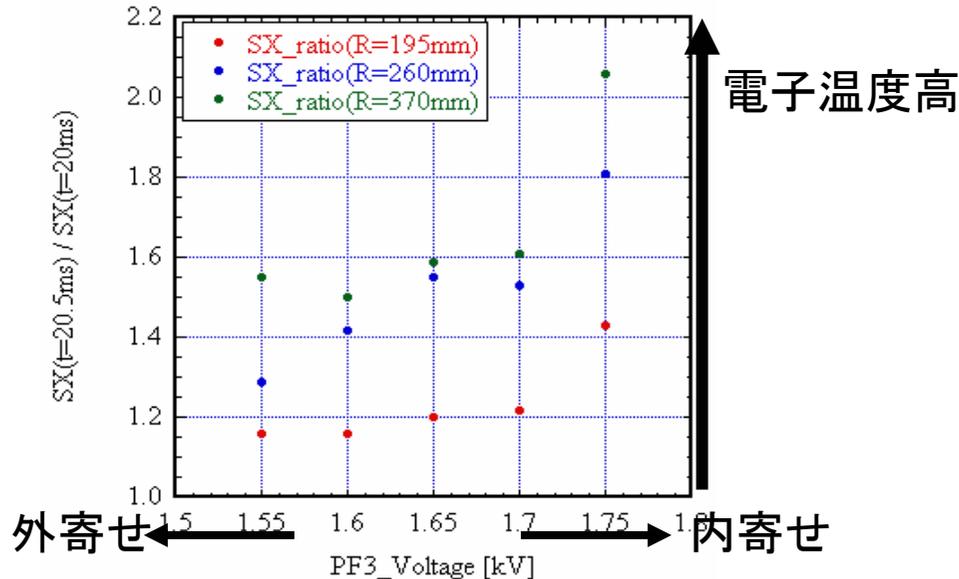
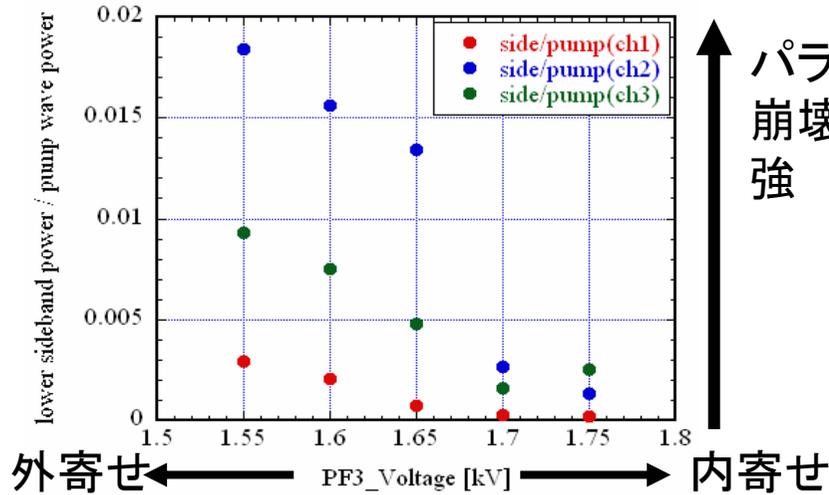
ポンプ波が線形に増加するのに対して低サイドバンド波には閾値が存在した。閾値パワーは20kW



ピークの差は磁場に比例しイオンサイクロトロン周波数に一致した。→ Ion Cyclotron Quasi-Mode

周辺加熱を引き起こす

# プラズマの位置と加熱効果の関係



プラズマを外寄せにした場合

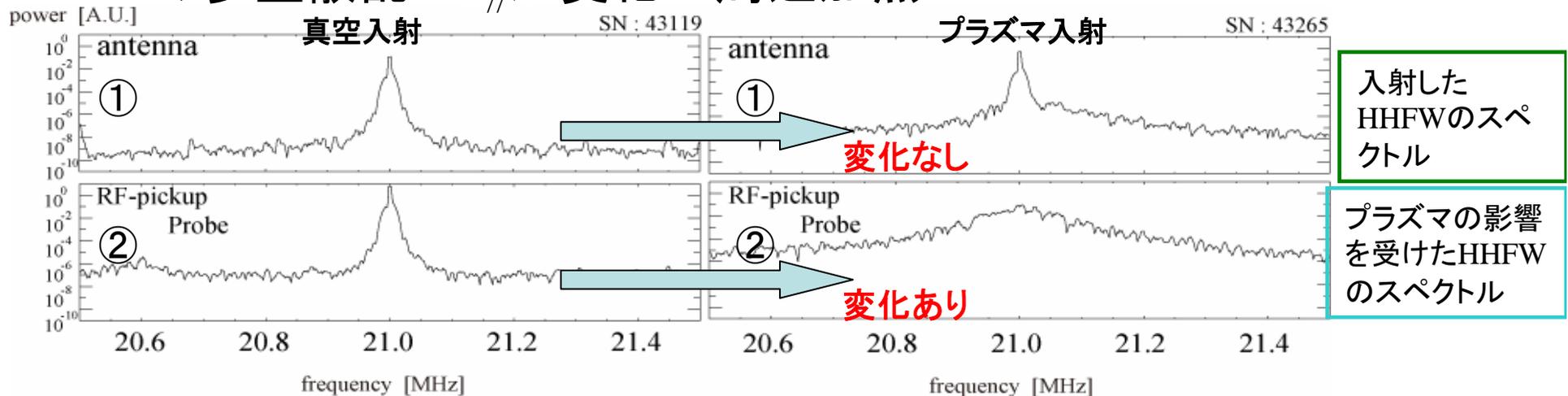
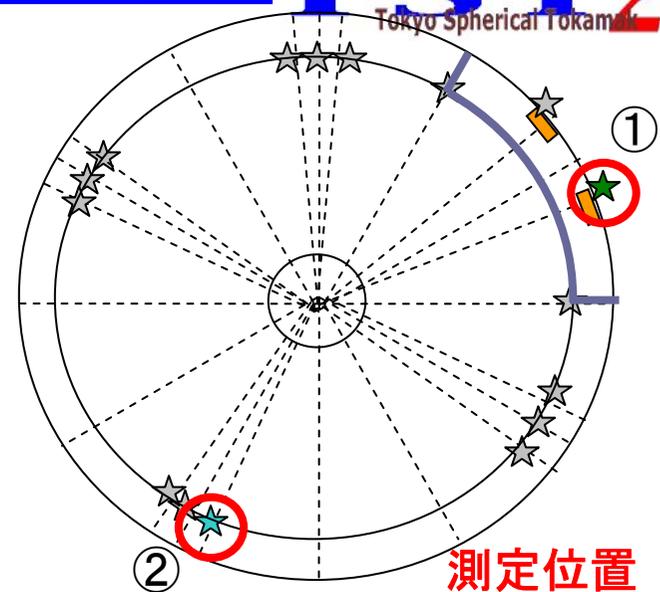
↓  
周辺部の密度が上昇

↓  
パラメトリック崩壊不安定性が強く、加熱のロスが起こっていると考えられる

# スペクトル広がり の空間依存性

TST2  
Tokyo Spherical Tokamak

- プラズマの影響でスペクトルの広がりが起こっている。
- 周辺部の密度が高いほど、スペクトルは広がった。
- 密度揺動により、RFが多重散乱を受けていると思われる。
- RFの多重散乱→ $k_{//}$ が変化→周辺加熱



# 高速光ダイオードによる 放射光揺動の計測

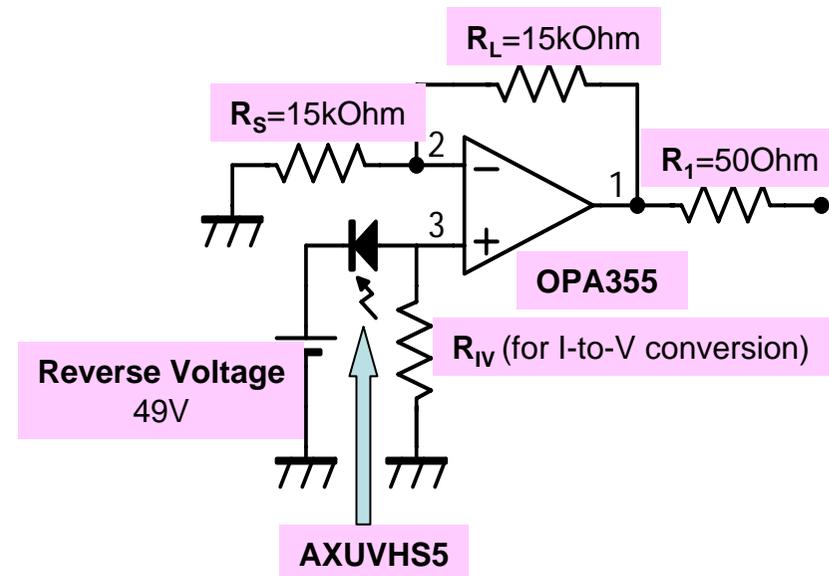
TST2  
Tokyo Spherical Tokamak

- プラズマ中にRF電場が存在する場合、RF周波数で密度揺動が発生する。従って、密度揺動により、プラズマ放射光(制動放射、線輻射etc.)も揺動する。
- 高速光ダイオードを用いた計測器を製作し、この計測を試みた。
- 高速光ダイオード計測器は、簡素な構造、安価、真空容器外から計測可能なことが特長である。
- 高速光ダイオードによるプラズマ放射光のRF揺動の計測は他の装置では行われていない初めての計測である。

# 高速光ダイオードと専用増幅器

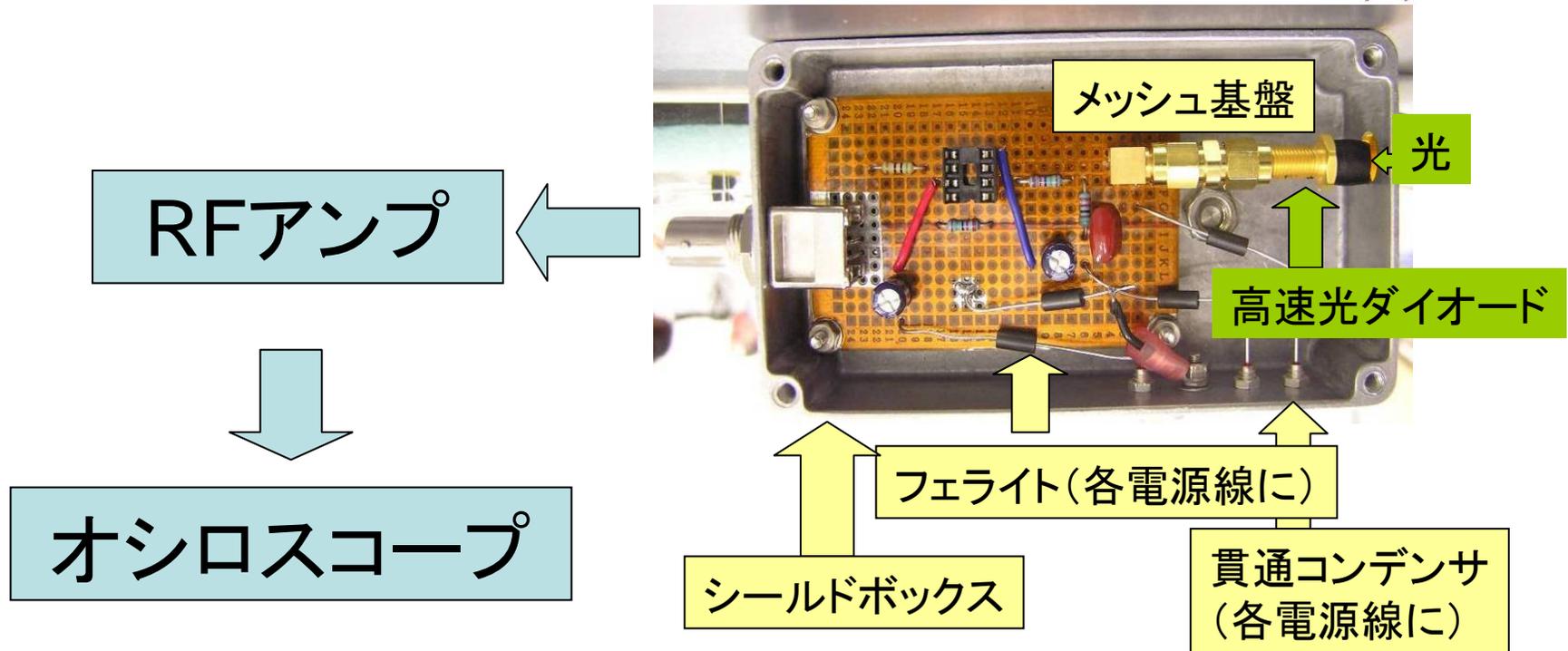
TST2  
Tokyo Spherical Tokamak

- 立ち上がり時間700psの光ダイオード
- 高速応答、低バイアス電流の電流→電圧変換増幅器を製作。

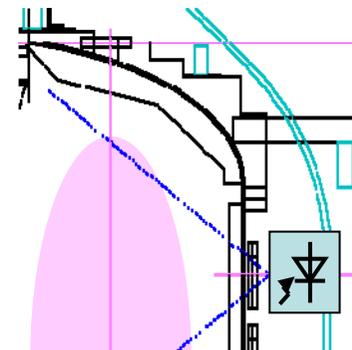


# 高速光ダイオード計測器

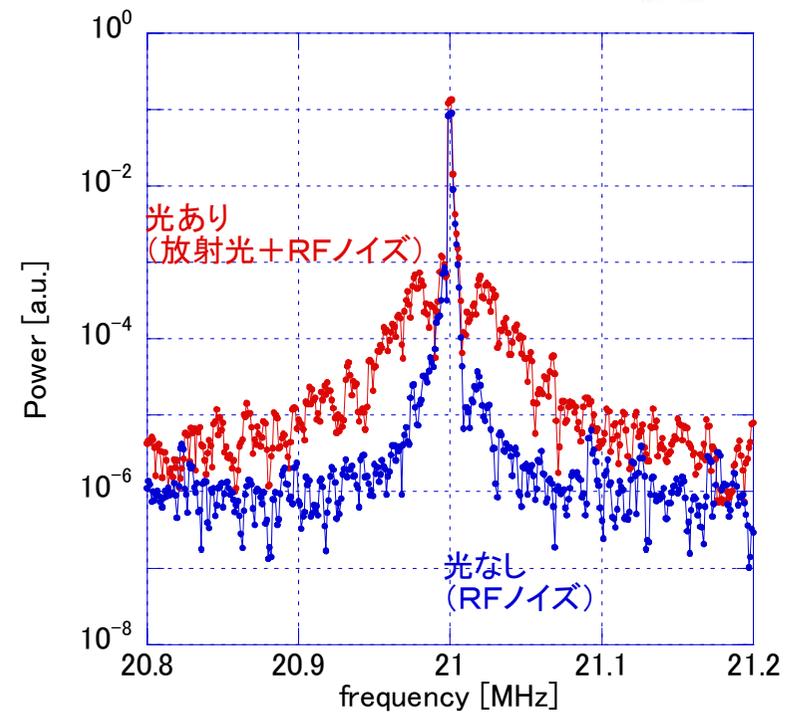
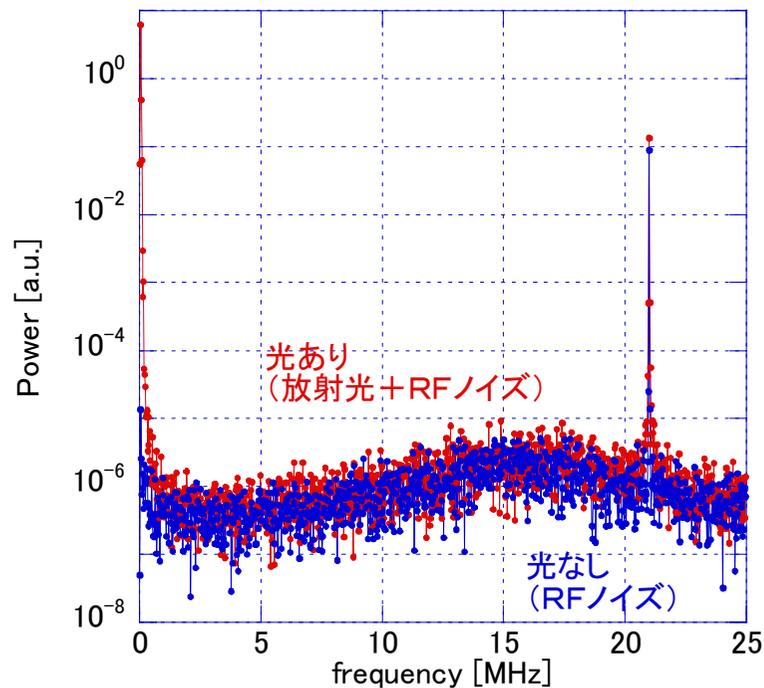
TST2  
Tokyo Spherical Tokamak



真空容器外側に計測器を設置し、プラズマ放射光を窓越しに計測。



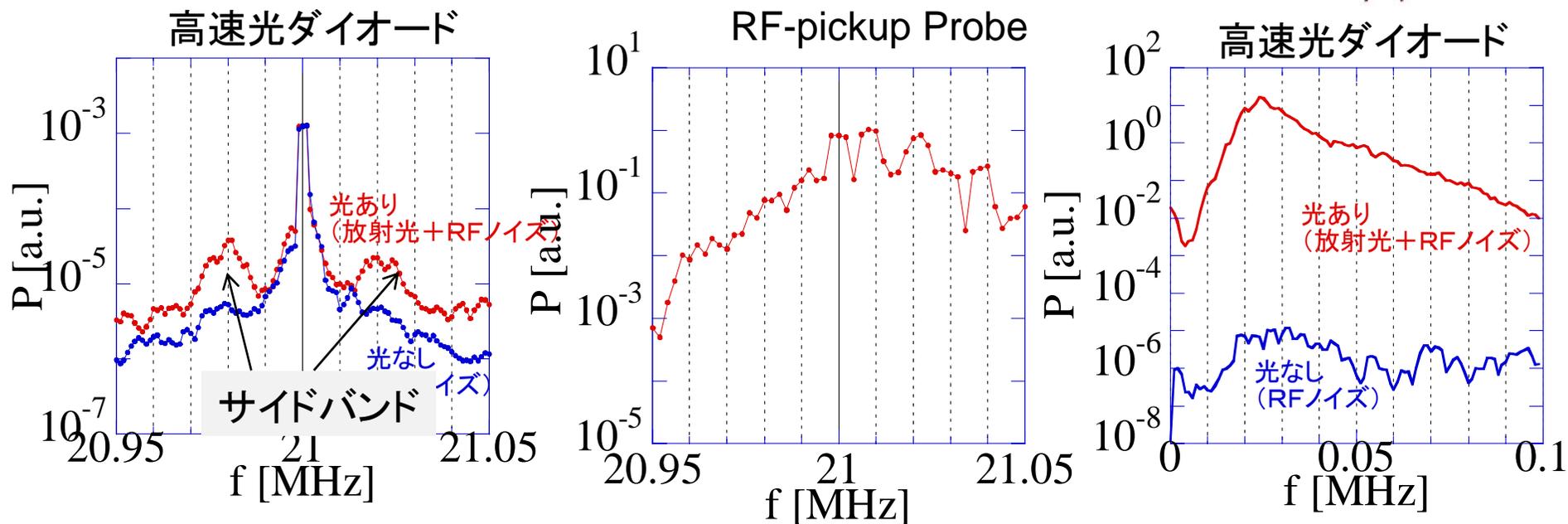
# スペクトル広がり



- RFノイズ評価のため、計測器の入光部を綿の暗幕で覆った場合も計測。
- パラメトリック崩壊不安定性はみられなかった。
- 光がある場合、光がない場合でスペクトルに違いが見られた。

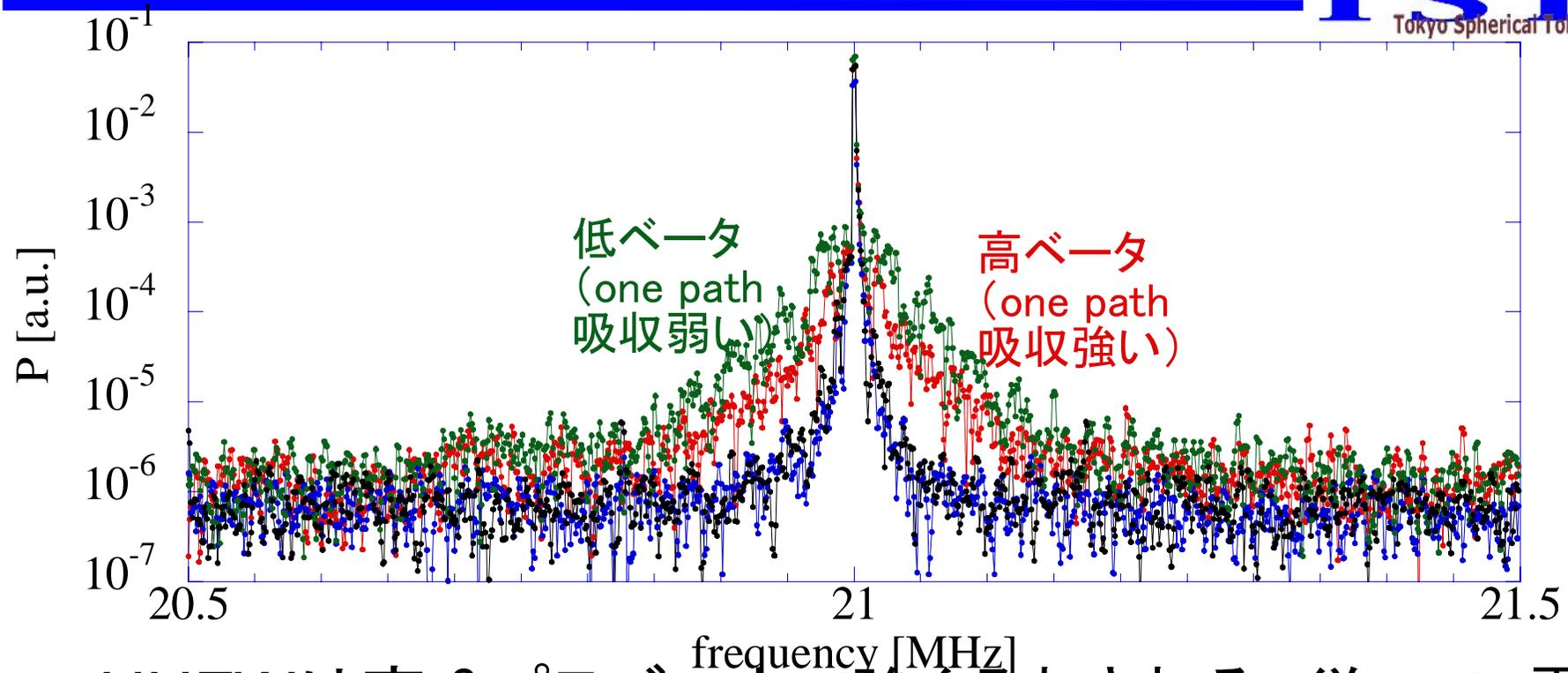
– HFWの放射光揺動が検出できた。

# ±20kHzサイドバンドの揺動



- RFピックアッププローブでは発見できなかった21MHz±20kHz (サイドバンド)の揺動が見られた。20kHz付近の揺動がカップリングしていると思われる。
- サイドバンド成分は入射電力に対し非線形的に大きくなった。詳細については検討中。

# RF電場の強弱による違い



- HHFWは高 $\beta$ プラズマ中で強く吸収される。従って、電場は高 $\beta$ において弱くなると予想される。
- 磁場が弱く、密度が高いプラズマにおいて、放射光のHHFWによる揺動が弱くなっている事が確認された。

# まとめ

- RFピックアッププローブ・高速光ダイオード検出器を用いて、HHFW吸収の劣化原因の一つであるパラメトリック崩壊不安定性、および密度揺動による多重散乱についてその特性を調べた。
- RFピックアッププローブ計測より、パラメトリック崩壊不安定性はion cyclotron quasi-modeである事が推定され、その強さはプラズマ周辺部の密度に依存することが確認された。HHFWがプラズマ中を伝播する過程で密度揺動による散乱の影響を受けることが分かった。
- **高速光ダイオードによる放射光のRF揺動計測に成功した。**電子密度がRF周波数で揺動していると解釈される。 $\beta$  値の違いによるRF電場の強弱や、20kHz付近の放射光揺動が観測された。

# 今後の予定・展望

- パラメトリック崩壊不安定性、および密度揺動による多重散乱について、成長率、single-pass吸収への影響を計算する。
- 高速光ダイオード計測器のノイズ対策(特にポンプ周波数)をさらに進める。また、計測器を複数設置し、放射光のRF揺動の分布計測する。
- 高速光ダイオードによる放射光のRF揺動の計測成功により、真空容器外からのプラズマ中心部のRF電場計測の実用化が期待される。