

ビーム放射分光計測が拓くMHD・乱流揺動の時空間構造

## Development in Beam Emission Spectroscopy for Clarifying Spatiotemporal Structure of MHD and Turbulent Fluctuations

小林進二<sup>1</sup>, 大島慎介<sup>1</sup>, 門信一郎<sup>1</sup>, 居田克巳<sup>2</sup>, 山本聡<sup>1</sup>, 長崎百伸<sup>1</sup>, 岡田浩之<sup>1</sup>, 南貴司<sup>1</sup>, 松田啓嗣<sup>3</sup>, 大石鉄太郎<sup>2</sup>, 小林達哉<sup>2</sup>, 中村祐司<sup>3</sup>, 横山雅之<sup>2</sup>, 村上定義<sup>4</sup>, 渡邊清政<sup>2</sup>, G. M. Weir<sup>1</sup>, 釦持尚輝<sup>3</sup>, 大谷芳明<sup>3</sup>, X. Lu<sup>3</sup>, 關良輔<sup>2</sup>, 木島滋<sup>1</sup>, 水内亨<sup>1</sup>  
S. Kobayashi<sup>1</sup>, S. Ohshima<sup>1</sup>, S. Kado<sup>1</sup>, K. Ida<sup>2</sup>, S. Yamamoto<sup>1</sup>, K. Nagasaki<sup>1</sup>, H. Okada<sup>1</sup>, *et al.*

<sup>1</sup>京大エネ理工研、<sup>2</sup>核融合研、<sup>3</sup>京大エネ科、<sup>4</sup>京大院工

<sup>1</sup>IAE, Kyoto Univ., <sup>2</sup>NIFS, <sup>3</sup>GSES, Kyoto Univ., <sup>4</sup>Grad. Sch. Eng., Kyoto Univ.

### 1. はじめに

ビーム放射分光(Beam Emission Spectroscopy; BES)法は、加熱・計測用の中性粒子ビームとプラズマ中のイオン及び電子との衝突によって励起・脱励起する際の輝線(ビーム輝線)を分光計測する。ビーム輝線はビーム速度に応じてドップラーシフトするため背景の輝線と分離ができることから、ビームとプラズマが交差する領域の局所的な密度およびその揺動を計測することができる<sup>1</sup>。密度揺動計測としてトーラス装置で広く適用されており、特にDIII-D<sup>2</sup>、MAST<sup>3</sup>、NSTX<sup>4</sup>等のトカマク装置では乱流揺動の時空間構造を計測する強力なツールとして発展してきた。またヘリカル系ではCHS<sup>5</sup>、LHD<sup>6</sup>でMHD揺動計測として用いられてきた。本研究ではヘリオトロンJで開発を進めてきたBESを例に<sup>7,8</sup>、その設計指針、装置の特徴、および計測の結果について述べる。

### 2. BESの原理・装置設計の指針

視線 $l$ を持つ観測視線で検出されるビーム放射光 $I_{BE}$ は以下の式で表される。

$$I_{BE} = \int dl \frac{A_{32}}{A_{32} + A_{31}} (n_i n_{beam} \sigma_i v_{beam} + n_e n_{beam} \langle \sigma_e |v_{beam} - v_e| \rangle) / (h \nu \epsilon S \Delta \Omega / 4\pi) \quad (1)$$

ここで $A_{mn}$ 、 $n_i$ 、 $n_e$ 、 $n_{beam}$ 、 $v_{beam}$ 、 $v_e$ 、 $\sigma_i$ 、 $\sigma_e$ 、 $\epsilon$ 、 $\int S dl$ 、 $\Delta \Omega$ はそれぞれ、 $n$ から $m$ の準位への遷移確率、イオン密度、電子密度、中性粒子ビーム密度、ビーム速度、電子の熱速度、検出効率、イオン・電子の反応係数、観測体積、プラズマから見た検出器の立体角である。一般に中型以上のトカマク装置では電子温度が数keV以上でビームエネルギーが100 keV程度である。この場合 $\sigma_e$ の寄与が小さくなるためイオン衝突による発光が支配的となる。一方で、電子温度が1 keV以下、およびビームエネルギーが30 keV程度であると、イオン・電子の発光は同程度となる。高い感度と空間分解能の両立には、観測視線を最適化する必要がある。ビーム

が通過する領域で観測視線を磁力線(もしくは磁気面)に沿わせること、立体角 $\Delta \Omega$ をできるだけ大きくとることが重要となる。このためヘリオトロンJでは事前に実際のビーム密度・プラズマの幾何形状を考慮したビーム放射光のシミュレーションを行い、視線を決定した<sup>7</sup>。図1にヘリオトロンJの観測視線を示す。ドップラーシフトしたビーム輝線が不純物の輝線による影響を受けないようにするため、対向するNBI(BL1)からのビームを観測することとした。20視線を径方向に並べており、ヘリオトロンJ標準配位では15視線がプラズマ中心から周辺部まで観測することができる。空間分解能は全領域で $\Delta \rho < \pm 0.07$ が実現できた<sup>8</sup>。最近、BESの視線をポロイダル方向に拡張した計測を試みており、この場合、1ショットで径方向×ポロイダル方向に8x2の領域を計測することが可能である。

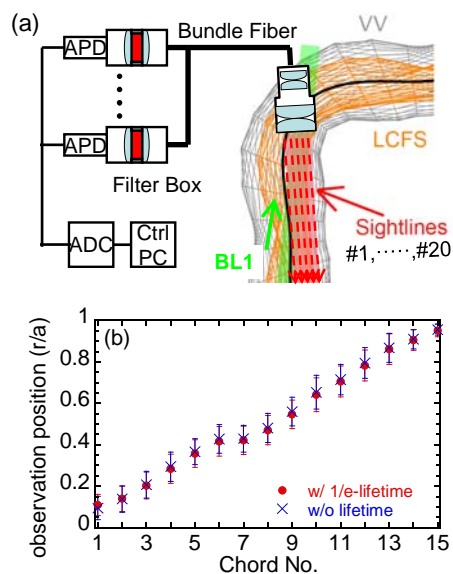


図1 (a)ヘリオトロンJで開発したBESの視線とビーム・プラズマの位置関係、および (b)各視線の観測位置と空間分解能<sup>8</sup>。

BES装置は一般に、レンズに光ファイバーもしくはミラーを組み合わせた対物・伝送光学系、干渉フィルター、および検出器で構成される。LHDでは負イオンNBIを用いておりビームエネルギーが大きいため( $V_{acc} = 90\text{-}170\text{ keV}$ )ドップラーシフトの変化も大きく、干渉フィルターの代わりに分光器を用いている<sup>9</sup>。検出器としては、冷却付きPIN photodiode (DIII-D、NSTX)、アバランシェフォトダイオード: APD (MAST、CHS)、APDCAM (MAST、LHD)が用いられている。ヘリオトロンJのBESの場合、バンドル光ファイバー( $NA = 0.22$ , コア径 $\phi = 0.8\text{ mm}$ )、干渉フィルター、APDで構成される。APDは効率を上げるため受光径3 mmのものを使用し、帯域周波数がDC~200 kHzのプリアンプを備えている。信号は1 MHzのADCで収集される。

### 3. MHD揺動の時空間構造

本節ではヘリオトロンJで開発したBESを用いてMHD揺動を観測した結果を2例紹介する。

70 kHz程度の周波数をもつバーストを伴った高速イオン励起MHD揺動に対して、ヒルベルト変換を用いて瞬時強度と瞬時位相差を評価すると、

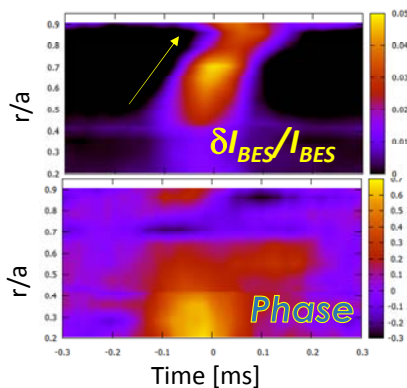


図2 高速イオン励起 MHD 揺動発生時の揺動強度と位相差の時間発展。[10]より引用。

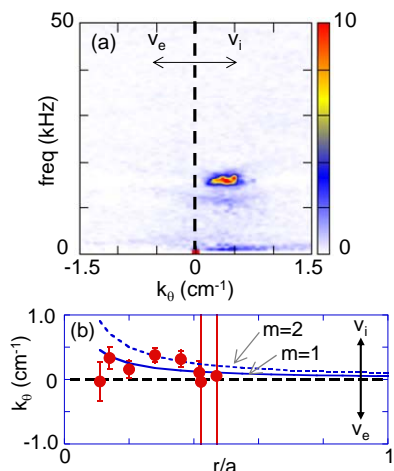


図3 プラズマ中心付近に存在するモードの (a)周波数・波数スペクトル、および(b)ポロイダル方向の波数  $k_0$  の空間分布<sup>11</sup>。

バーストの初期に  $r/a = 0.5$  付近で発生したモードが、時間と共に揺動強度の強い位置が周辺部に移動し、位相差の空間構造もバースト中に変化していることがわかった (図2参照)<sup>10</sup>。これはモードの発展に伴って実空間および速度空間上の高速イオン分布が変化していることを示唆している。

プラズマ中心付近に存在する  $f = 15\text{-}20\text{ kHz}$  のMHD揺動に対して、鉛直方向 (ポロイダル方向) の2視線のBES信号に2点相関法を適用し、周波数・波数スペクトルを評価した (図3参照)<sup>11</sup>。ポロイダル方向の波数は  $0.2 < k_0 < 0.5\text{ cm}^{-1}$  であり、その方向はイオンの反磁性方向であった。 $k_0$  の空間分布からポロイダルモード数は  $m = 1\text{-}2$  と推定された。本手法は、磁気プローブでのポロイダルモード数の同定が困難なプラズマ中心部に存在するモードに対して有効である。

### 4. 乱流揺動の計測に向けて

MHD揺動 ( $n/n \sim 1\%$ ) と比べ、乱流揺動 ( $n/n \sim 0.1\%$ ) は揺動強度が低く計測が困難である。初期結果ではあるが、最近、ヘリオトロンJの高密度放電で、H-mode遷移直前に観測される前駆振動において、高周波乱流と低周波揺動の結合を示唆するデータが得られた<sup>12</sup>。さらに乱流揺動との関連性を議論するためには径電場やレイノルズ応力の評価が必要であり、このためにはBESの2次元イメージング化が必須である。高い検出効率やS/N比を実現するために検出器の冷却も考慮すべき点である。APDを  $-20^\circ\text{C}$  以下に冷却した試験では、ノイズが3割程度低減する結果が得られており、改良を進めている。

### 5. 参考文献

- [1] R. J. Fonck, *et al.*, Rev. Sci. Inst. **61**, 3487 (1990).
- [2] Z. Yan, G. R. McKee, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 125002, (2014).
- [3] D. Dunai, *et al.*, Rev. Sci. Inst. **81**, 103503 (2010).
- [4] A. R. Field, *et al.*, Rev. Sci. Inst. **83**, 013508 (2012).
- [5] T. Oishi, S. Kado, *et al.*, Rev. Sci. Inst. **75**, 4118 (2004).
- [6] M. Ono, K. Ida, *et al.*, Plasma Conf. 2014, (Niigata, 2014) 18pD2-3.
- [7] S. Kobayashi, S. Kado, *et al.*, Rev. Sci. Inst. **81**, 10D726 (2010).
- [8] S. Kobayashi, S. Kado, *et al.*, Rev. Sci. Inst. **83**, 10D535 (2012).
- [9] S. Kado, T. Oishi, *et al.*, Rev. Sci. Inst. **81**, 10D720 (2010).
- [10] S. Ohshima, S. Kobayashi, *et al.*, to be published in Nucl. Fusion.
- [11] M. Kirimoto, S. Kobayashi, *et al.*, Plasma Conf. 2014, (Niigata, 2014) 19PA-037.
- [12] S. Kobayashi, S. Ohshima, *et al.*, 15<sup>th</sup> Int. WS H-Mode trans. bar. phys. (Munich, 2015) Topic5, M9.