

# 重イオンビーム分布計測のためのモーター駆動制御について

○東島 亜紀、野田 穰士朗  
九州大学 応用力学研究所技術室

## 1. はじめに

### 1-1. 重イオンビームプローブ (HIBP) の概要

重イオンビームプローブ (以下、HIBP) は、重イオンをプラズマに入射し、プラズマと衝突してイオン化したビームをエネルギー分析する装置である。まず、図1のようにプラズマ中に1価の正イオン (1次ビーム) を入射する。1次ビームはプラズマ中の電子やイオンと衝突し、2価の正イオン (2次ビーム) に電離される。スリットを通過した2次ビームが検出され、エネルギー分析され、プラズマ内の電位、密度、磁場の揺らぎなどを計測できる。九州大学応用力学研究所の球状トカマク実験装置 (以下、QUEST) に設置されているQUEST-HIBP (図2) では、1次ビームのエネルギーや入射角度を変えることで、プラズマ計測位置を図3のように変えることも可能である。

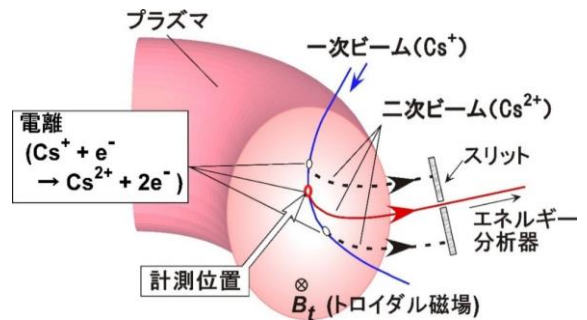


図1 HIBP の概要

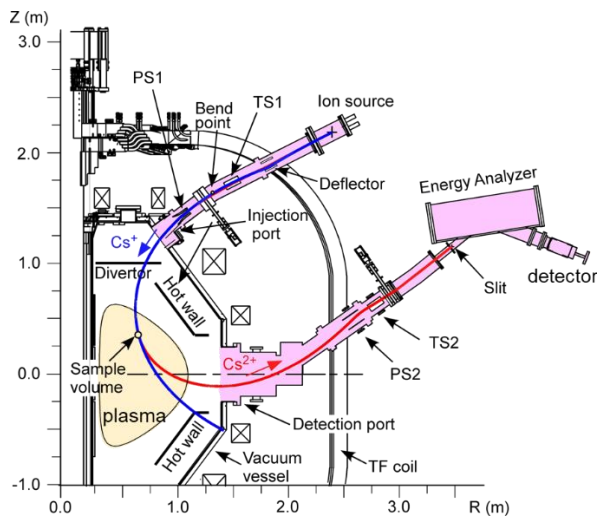


図2 QUEST-HIBP の概要

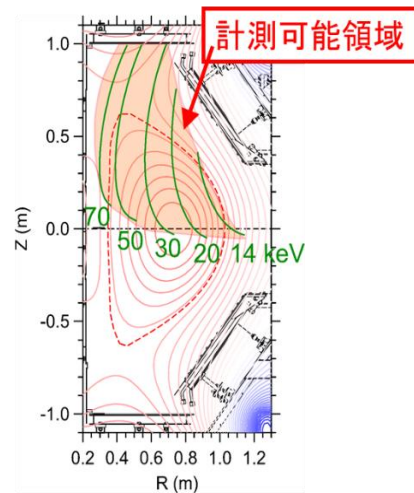


図3 QUEST-HIBP の計測可能領域

### 1-2. HIBP におけるビーム強度分布計測の機構

HIBP における計測空間分解能はビーム径によって決まる。そのため、ビーム径の状態を把握し調整するために、ビーム断面の強度分布計測 (ビームプロファイルモニター: BPM) を行う必要がある。BPM の回転式特殊ワイヤー (以下、検出ワイヤー) 機構の概要と実際の写真を図4に示す。BPM は、1次ビームライン上に設置されており、一方向に回転する検出ワイヤーはビームを横切った時に流れる電流を検出し、2次元分布を計測する。ビームが BPM に入射する側を上流とすると、図5のようにビームを二方向からスキャンできる。また、回転中の検出ワイヤーの位置を確認するため、図6(a)のように回転軸にスリット板を取り付けている。スリットが LED とフォトトランジスタの間を通過した時、LED 光がフォトトランジスタで電圧信号として検知され、ワイヤー位置を検出できる機構である。図6(b)のようにスリットは2か所開いているが、透過光量に差をつけることによりどちらのスリット位置からの信号か判別できる。これらの信号は、ビーム計測のタイミング信号となり、また、検出ワイヤーを停止す

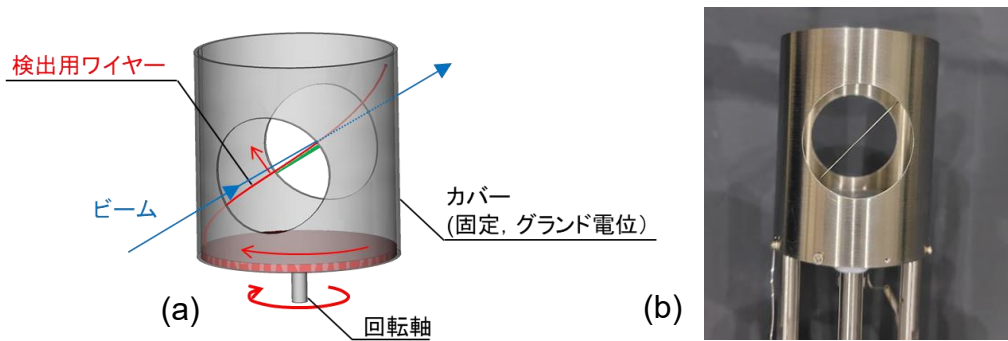


図 4 (a)BPM 機構の概要 (b)実際の BPM

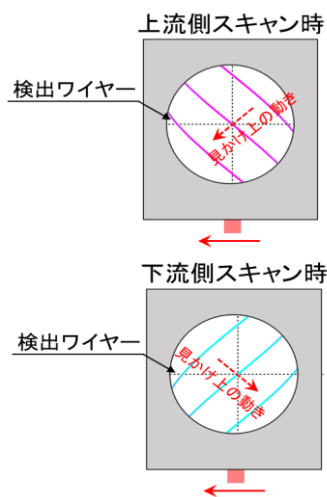


図 5 ビーム通過窓から見た検出ワイヤー

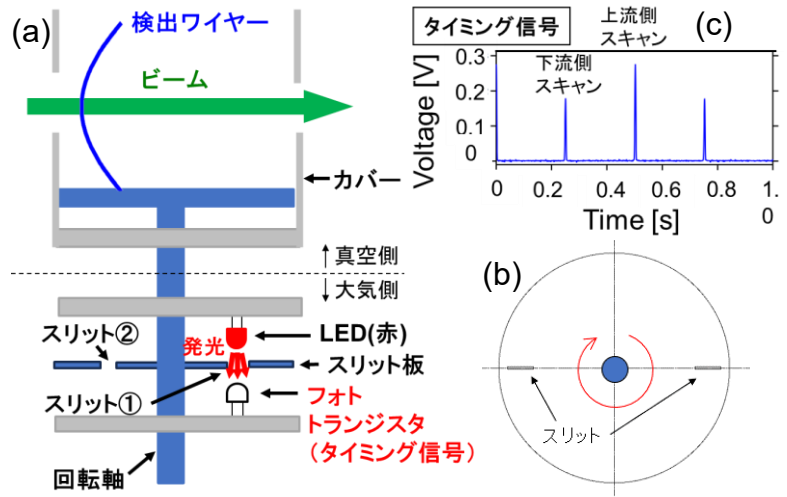


図 6 (a)検出ワイヤー位置検出機構の概要 (b)スリット板 (c)タイミング信号

るための基準信号となる (図 6(c)).

### 1-3. 検出ワイヤー回転軸の動作要件と制御用モーター

ビームプロファイル計測のため、BPM の回転軸を駆動させるモーターを制御する必要がある。BPM モーター駆動制御の要件は、次のとおりである。

- 回転軸を一定方向 (今回は CW)、一定速度 (2Hz 程度) で回転させる
- 外部スイッチ (GUI) による操作で、回転と停止を行う
- 検出ワイヤーの停止位置は、指定された場所 (ビームと干渉しない位置) にする
- 現場および遠隔で、モーターの回転・停止を手動操作できる
- 将来的に、実験シーケンスと連動してモーターの回転・停止が自動で出来る

## 2. モーター駆動制御システムの開発

### 2-1. モーター駆動制御システムの概要

位置決めを容易に行うために Piezo モーターか ステッピングモーターが候補となったが、QUEST-HIBP の BPM 設置位置は高磁場環境のため、Piezo モーターを選定した。また、QUEST はプラズマ発生装置であるため、実験中は装置がある本体室には入室できない。実験中は、遠隔で GUI を操作する必要がある。

これらを踏まえて、BPM のモーター駆動制御システムの全体構成を図 7 に示す。端末上の GUI を操作し、モーター回転 Start・Stop 指令をマイコンボードに送る。マイコンボードは、モータードライバ

一を制御し、要件どおりにモーターを回転・停止させる。モーター停止のプロセスは、BPM から検出ワイヤーのタイミング信号を検出した後、既定の回転角だけモーターを動かして停止する。また、マイコンボードはドライバーからモーター状態を取得し、端末側へ送る。端末は、Windows OS か Raspberry Pi OS となるため、GUI 含むコードは Python で開発し、マイコンボードは Arduino グループとした。

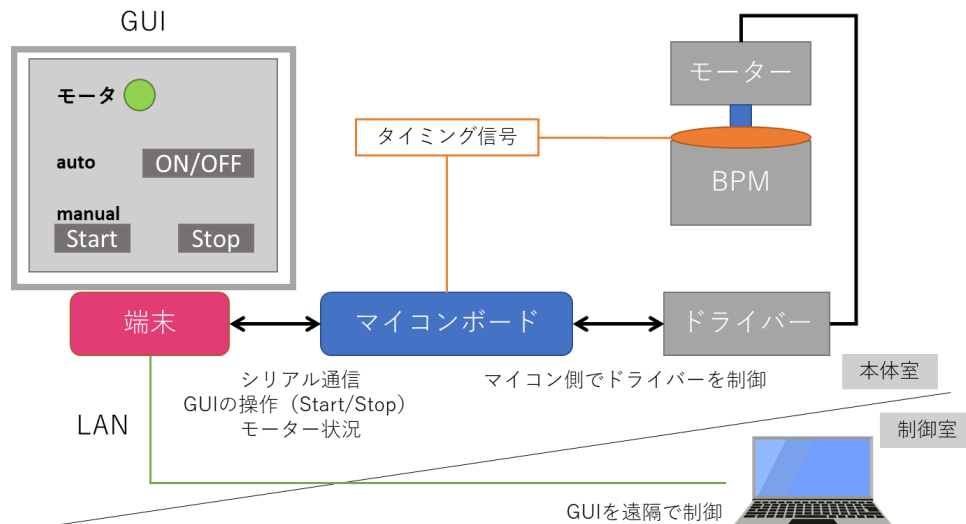


図7 モーター駆動制御システム構成

## 2-2. ピエゾモーター駆動制御システムの開発

駆動用に用意されたピエゾモーターとドライバーは、Piezo Sonic 社製の PSM60N-E2T と PSMD-PCC I である。端末とマイコンボード間はシリアル通信を行い、GUI からマイコンボード側への操作指令は、モーター回転・停止などに対応した特定の文字を送信する。現時点では、回転・停止に加えて、タイミング信号を検出後に停止位置まで回転角分移動するパルス数や、タイミング信号を検出する閾値を、GUI 側から変更できるようにしている。送信文字と対応する操作を表1に示す。

マイコンボードは、Arduino 互換ボード Seed Studio XIAO nRF52840 を使用し、SPI 通信を用いてモーターを制御する。Arduino 言語で作成したプログラムはシングルループで動き、送信文字による指令を受けるとドライバーへ制御パラメータ用データを送る。モーター停止プロセスは、タイミング信号検出後、モーターからのエンコーダー信号にて指定した回転角となるパルス数をカウントしてから、ドライバーへ停止用の制御パラメータを送る。

動作テスト時、モーターを駆動させていると、モーターが発熱し、徐々に回転数が落ちていく現象が見られた。2.5Hz 弱で回転させた時点からの経過時間と、モーターが1回転する時間（1周期）、ドライバーから取得した温度のグラフを図8に示す。

モーターの空冷など簡単な除熱を試してみたが、モーター発熱による回転数への影響を防ぐことはできなかった。モーターエンコーダー信号を用いて、マイコンボード側で回転数調整機能を追加する案もあったが、速度が安定する保証はない。また、マイコンボードの負荷が大きくなりそうであった。そのため、高磁場環境下ではあるが、ステッピングモーターの制御へと変更してみるようになった。

表1 送信文字と対応する操作

送信文字	意味
S	モータ回転 (Start)
E	モータ停止 (End)
R	モータ位置初期化 (Reset)
L,数値	数値で、LED入力値の検出値を設定
P,数値	数値で、停止までのパルス数を設定 500パルス/1回転 (0~500) ※ ※ステッピングモーターの場合

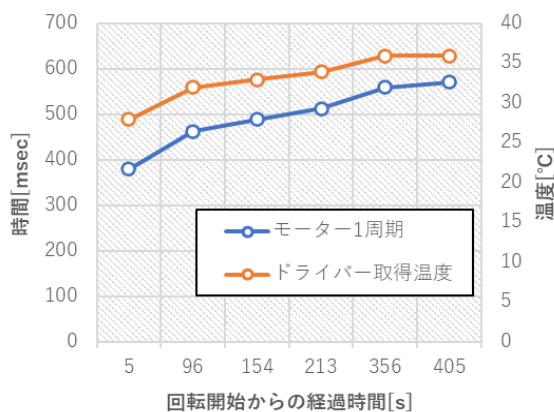


図8 モーター1周期の時間変化

### 2-3. ステッピングモーター駆動制御システムの開発

用意されたステッピングモーターとドライバーは、オリエンタルモーター社製の PK545NAW と CVD507B-K である。GUI を含めた端末側の Python コードは、マイコンボードとシリアル通信を行う処理を司るため、モーターが変わっても変更はない。しかし、マイコンボード側は、モーターを駆動するためのパルス出力処理が追加で必要になる。Arduino プログラムはデュアルループに変更し、片側を GUI 端末との通信処理用、片側をドライバーへのパルス出力処理用とした。デュアルループに対応するため、マイコンボードは、Arduino 互換ボード Seeed Studio XIAO RP2040 に変更した。ステッピングモーターの停止プロセスは、タイミング信号検出後、指定した回転角となるパルス数を出力して停止する。Arduino コード変更後、動作テストを行った。ステッピングモーターも回転を続けると発熱するが、回転数に影響はないことを確認できた。

## 3. 現在の状況と今後の予定

### 3-1. QUEST-HIBP への取り付けと BPM 計測テスト

QUEST-HIBP にステッピングモーターとセットになった BPM (図 9) を取り付けた。ドライバーやマイコンボードは磁場の影響を避けるため、少し離れた場所のラック内に金属ケースに入れて設置、また、同ラック内の端末に GUI 含む Python コードをインストールした。今回、1 次ビームラインの 2 か所に BPM を取り付けており、2 台のモーターを個別に手動操作できるように、GUI 含めて少々コードを改修した。設置後、磁場印加中の動作テストとして約 0.1T のもとで 1 分間回転させる試験を繰り返したが、現在のところ問題は発生していない。

実際に行ったビーム上流側 BPM のタイミング信号とビーム計測を図 10 に示す。この信号より現時点でのビームの直径は 11mm であることが分かった。この情報に基づきビームフォーカスの最適化を進められるようになった。

### 3-2. モーター停止位置箇所の追加など

HIBP-QUEST のビーム等の調整を行う上で、モーターの停止箇所を増やしてほしいとの要望があった。タイミング信号の上流側・下流側のピーク位置となる部分である。GUI 上に停止ボタンを増やして対応する。また、QUEST 実験シーケンスと連動しモーターを回転・停止する機能は、シーケンス時刻を読み取り、時刻とモーター操作を連動させることで対応できる。GUI にはこの機能を追加しており、時期を見て動作テストを行う。

### 3-3. まとめ

今回、BPM 用モーター駆動のため、ピエゾモーター、ステッピングモーターの 2 つを、SPI 通信やパルス出力で制御する機会に恵まれた。マイコンボードにてモーター制御を行う Arduino プログラム、ドライバー含めた配線、またモーター&ドライバーの特性など非常に勉強になった。引き続き、QUEST-HIBP の運転へ向けて、BPM モーター駆動制御を完成に近づけていく。

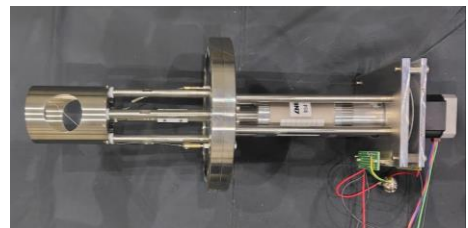


図 9 モーター含む BPM 全体写

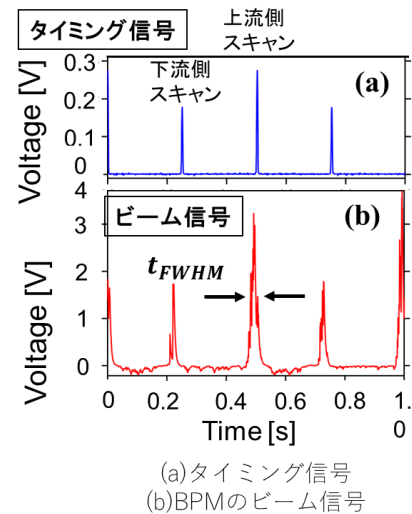


図 10 実際の BPM 計測データ

## 参考文献

- [1] マニュアル: PSM Driver 【PCC】 SPI 通信仕様書 Ver 1.22