

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
九州大学応用力学研究所

野田, 穰士朗
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/7375872>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告. 7, pp.31-36, 2025-07. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :



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

要 旨

構築中の重イオンビームプローブ（HIBP）は、放電プラズマ中に重イオンビームを入射し、プラズマ内での電子衝突によって生じる二次ビームを検出する計測装置である。この装置のビームライン上に、入射する重イオンビーム断面の強度分布を計測する回転式特殊ワイヤーを設置する。今回、このワイヤー軸を駆動するためにピエゾモーターとステッピングモーターを用いた制御を試みた。その開発について報告する。

キーワード

駆動制御 ステッピングモーター ピエゾモーター マイコンボード 高磁場環境

1. はじめに

九州大学応用力学研究所の高温プラズマ理工学研究センターでは、球状トカマク実験装置（以下、QUEST）を用いて、球状トカマクプラズマの長時間電流駆動やプラズマ・壁相互作用などの研究を進めている。閉じ込めプラズマの制御や維持のためには、プラズマの物性を解明する必要がある、そのための各種計測装置の開発が行われている。今回、プラズマ内部の計測を行う「重イオンビームプローブ（以下、HIBP）」の技術支援として、入射ビーム断面の強度分布を計測する回転式特殊ワイヤー軸を駆動させるモーターの制御開発を行った。

2. 重イオンビームプローブ（HIBP）とは

2-1. HIBP の概要

HIBP は、重イオンビームをプラズマに入射し、プラズマと衝突して電離した後のビームを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、スリットを通過し検出される。2 次ビームは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。QUEST に設置されている HIBP を図 2 に示す。QUEST-HIBP では、1 次ビームのエネルギーや入射角度を調整することで

プラズマ計測位置を変えることができ、図 3 のような範囲が計測可能領域となる。

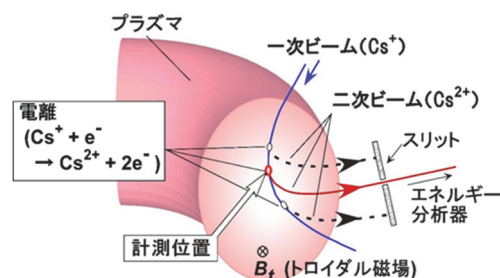


図 1 HIBP の概要

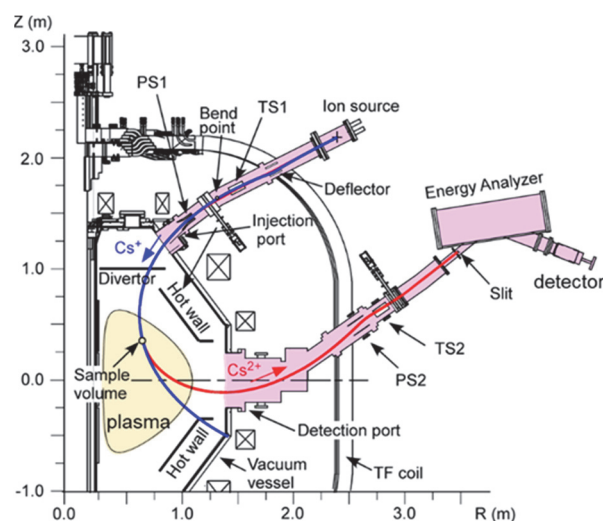


図 2 QUEST-HIBP 装置

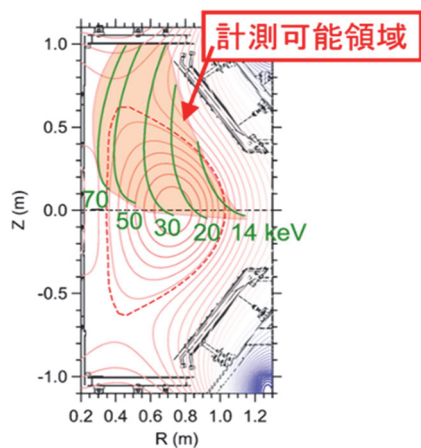


図3 QUESTにおけるHIBP計測可能領域

2-2. 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。

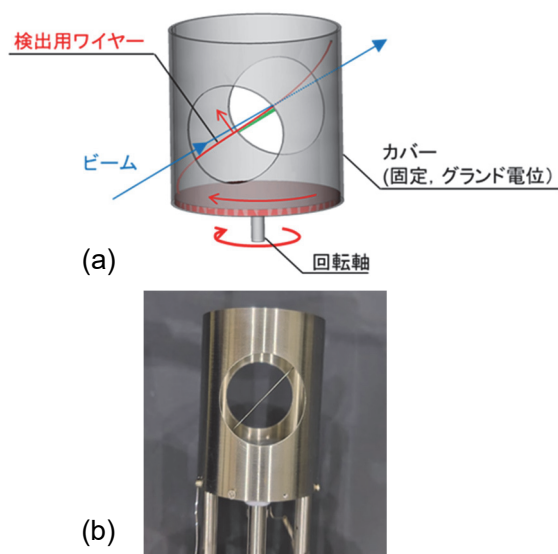


図4 (a)BPM機構の概要 (b)実際のBPM

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に、LED光がフォトトランジスタで電圧信号として検知されることにより、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か所あり、透過光量に差をつけることにより、どちらのスリットがLED位置に来たか判別できるようにしている。フォトトランジスタで検出した電圧信号は、ビーム計測のタイミング信号や検出ワイヤーを停止するための基準信号として使用される（図6(c)）。

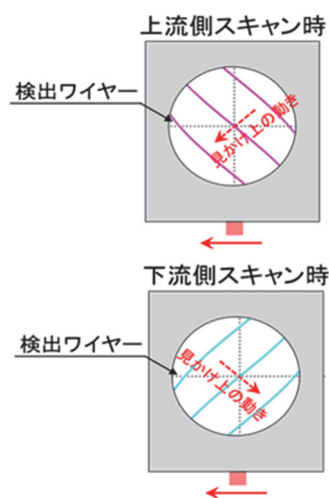


図5 ビーム通過窓からの検出ワイヤー

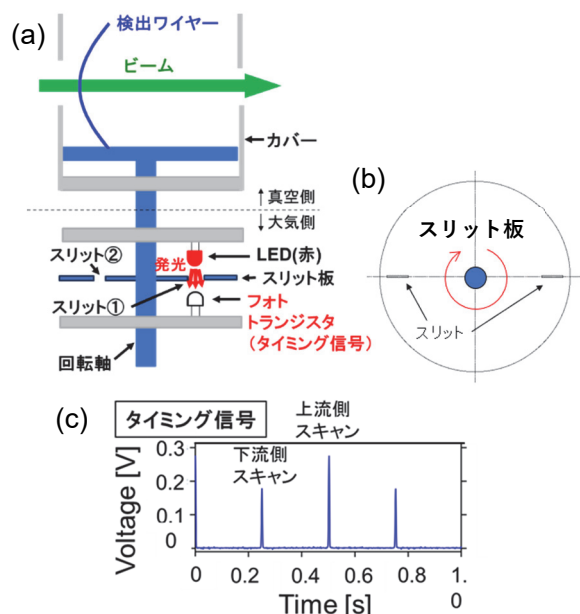


図6 (a)検出ワイヤー位置検出機構の概要 (b)スリット板 (c)検出された電圧信号

2-3. 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を計測するには、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・停止が自動でできる

3. モーター駆動制御システムの開発

3-1. モーター駆動制御システムの概要

検出ワイヤーの位置決めを容易に行うために、回転軸を駆動するモーターはピエゾモーターかステッピングモーターが候補となった。QUEST-HIBP の BPM 設置位置は高磁場環境のため、ピエゾモーターが選定された。また、QUEST はプラズマ発生装置のため、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、モータードライバーを制御し、要件どおりにモーターを回転・停止させる。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。端末とマイコンボード間はシリアル通信を用い、GUI 側からマイコンボードへの指令は、表 1 のようなモーター操作に対応した特定文字を送信する。端末は、Windows OS か Raspberry Pi OS になるため、GUI を含むコードは Python で開発し、マイコンボードは Arduino グループとした。また、本体室設置のこの端末にはリモートデスクトップ等でアクセスし、遠隔操作にも対応する。

表 1 モーター操作対応送信文字

送信文字	対応する処理
S	モーター回転
E	モーター停止
R	モーター位置初期化

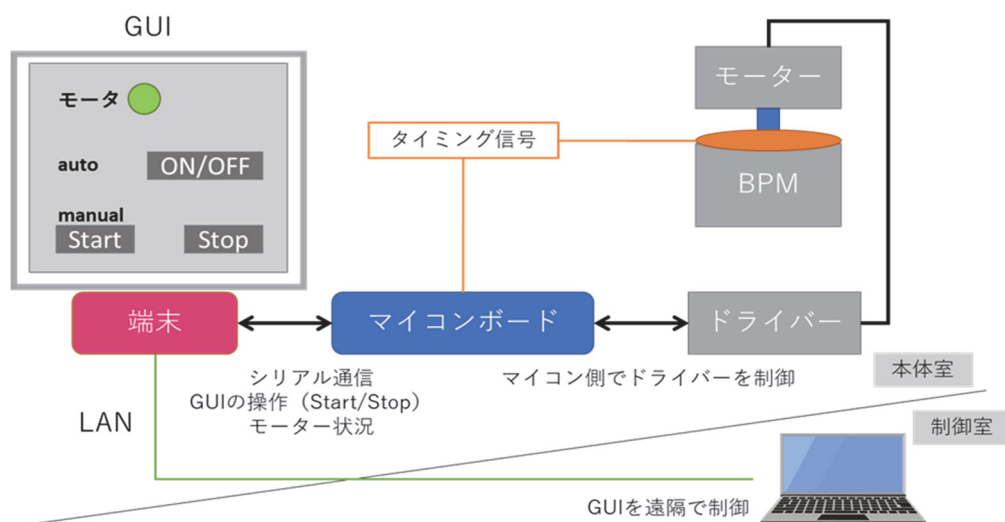


図 7 モーター駆動制御システム構成の概要

3-2. ピエゾモーターによる駆動

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。マイコンボードは、Arduino 互換ボード Seeed 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作し、GUIからの指令を受けるとドライバーへ制御パラメータ用データ^[1]を送る。Arduinoコードについては、後述する。

動作テスト時、モーターを連続駆動させていると、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もなく、また処理負荷も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ことにした。

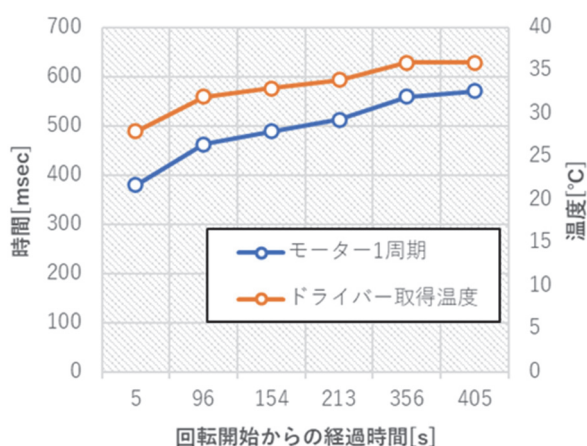


図8 モーター1周期の時間変化

3-3. ステッピングモーターによる駆動

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を含む端末側の Python コードは、マイコンボードとモーター操作に応じた文字を送信するだけのため、モーターが変わっても大きな変更はない。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コード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。

動作テストを行い、ステッピングモーターも連続駆動により発熱するが、回転数に影響はないことを確認した。

3-4. モーター停止処理と Arduino コード

BPM 計測時は、検出ワイヤーを回転させビームをスキャンする必要があるが、HIBP 計測時には検出ワイヤーはビームに干渉しない位置に停止する必要がある。そのため、モーター停止処理では、フォトトランジスタの電圧信号から停止基準位置を検出し、既定の回転角だけモーターを動かして停止することが求められる。停止基準位置は、図6(c)のような上流側のピーク値が大きい方とし、停止位置は、そこから 1/4 回転した位置としている。

マイコンボード側の処理としては、端末からの停止指令で、停止基準となる閾値を超えるピーク電圧を検出後、回転速度を少し落として、既定のパルス数を動かし停止する。1回転のパルス数やパルスカウント方法は、ピエゾモーターとステッピングモーターで異なる。図9および図10にそれぞれのモーターのマイコンボード側の制御概要（Arduinoコード概要）を示す。

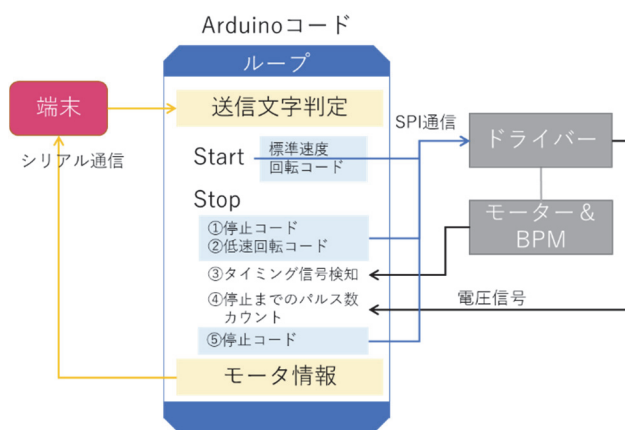


図9 ピエゾモーターの Arduino コード概要



図 10 ステッピングモーターの Arduino コード概要

4. 現在の状況と今後の予定

4-1. QUEST-HIBP への取り付けと BPM 計測テスト

QUEST-HIBP にモーター組み込み後の BPM を取り付けた（図 11）。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した。また、同ラック内の端末に GUI を含む 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 を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。

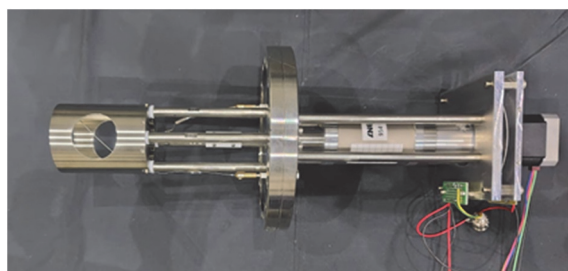


図 11 モーター組み込み後の BPM

実際に行った BPM 計測データ（タイミング信号とビーム信号）を図 12 に示す。これに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

適化を進めていけるようになった。

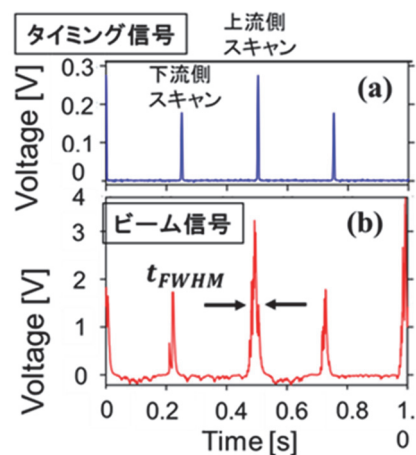


図 12 BPM 計測データ
(a)タイミング信号 (b)ビーム信号

4-2. モーター停止位置箇所の追加と自動操作

QUEST-HIBP のビーム調整を行う上で、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。停止箇所は、タイミング信号の上流側ピーク時と下流側のピーク位置で、ビームに検出ワイヤーが直接当たる場所である。GUI 上にこのビーム調整停止ボタンを増やし、停止までのパルス数を変えて対応した。

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、モーターの動作を判断させることで対応できる。この機能も追加しており、時期を見て動作テストを行う予定である。

5. 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 種類のモーターを、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 コード、ドライバー含めた配線、またモーターや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、BPM モーター駆動制御を完成形に近づけていきたい。

参考文献

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

謝辞

このモーター駆動制御システム開発の機会と、様々な助言を頂いた高温プラズマ理工学研究センター井戸教授にお礼申し上げます。