

# 高速掃引プローブの開発と 高気圧・高熱流プラズマ3次元分布測定のための改良

名古屋大学工学部・工学研究科 高木 誠

## 1. はじめに

大型トカマク装置のダイバータプラズマと同程度のパラメータをもつ定常高熱流プラズマの計測に際してプラズマ中にプローブを数秒以上挿入することは、熱的な損傷をまねくため困難である[2]。プローブの熱的な損傷を軽減する方法にはいろいろあるが、プローブチップとプラズマの接触時間を短縮するために、定常高熱流プラズマ中を高速で往復し、その間にデータを採取することのできる高速掃引プローブ計測システムを以前試作した[2]。その後高速掃引プローブを高性能・コンパクト化を行ないつつ低価格に製作するために改良を行ない、今回新たに大気圧・高周波熱プラズマ発生装置のプラズマ3次元分布測定のために改良したので、そのシステムの紹介と改良について報告する。

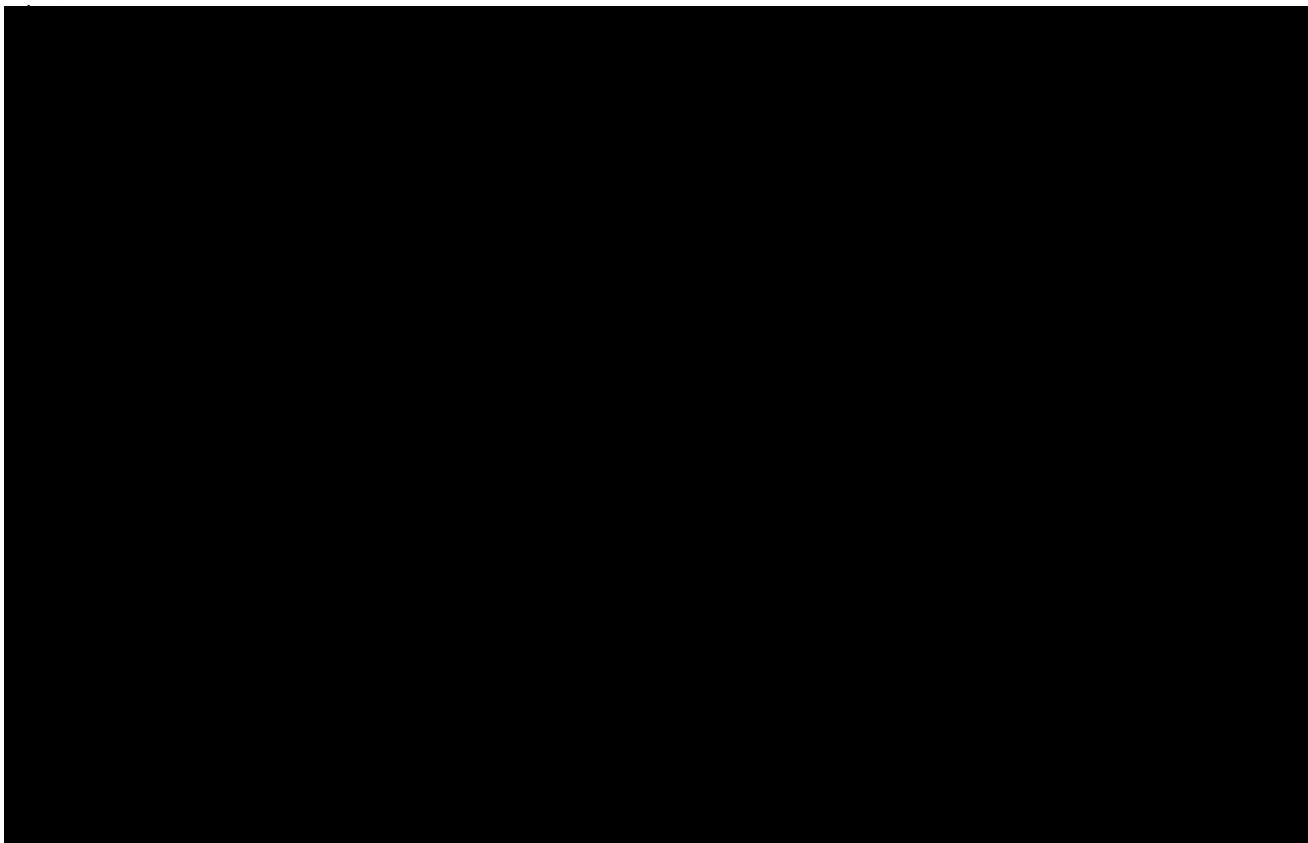
## 2. 高速掃引プローブ計測システム

高速掃引プローブ計測システムは、圧搾空気シリンダー使用によるプローブ駆動系と高速ファイバマークセンサ（プローブの位置検出）使用による計測系からなる。試作の結果プローブは200mmの距離を圧搾空気シリンダーの圧力（使用圧力0.7MPa）の上下にはあまり左右されず、行き0.3sec 帰り0.5sec で掃引し、2mm間隔でプローブデータを取ることができる。

### 2.1 駆動系

図1に最初試作した高速掃引プローブ駆動系の概要を示す。プローブの高速掃引駆動には圧搾空気高速シリンダー（最高使用圧力0.99MPa、最高スピード3,000mm/s、ストローク200mm、チューブ径32mm）を2本使用し、プローブの水平方向の掃引を行ない、高密度プラズマに接触している時間を最小限にして、その熱負荷を小さくすることができる[1]。シリンダー本体をボールネジで水平方向へ150mm動かし、掃引開始位置を変えることができる。また駆動部を可動フランジに載せ、リニアウエイベアリングを用いることにより固定フランジと可動フランジを0.2mm間隔で鉛直方向へ100mm上下させることもできるので、プラズマ断面にわたりプラズマ密度・温度等の2次元分布計測が可能である[1][2]。その隙間は二重Oリングでロータリーポンプにより差動排気を行なっている。

プローブ本体は、その支持パイプ（10mm -長さ875mm）に厚み0.5mmのテフロンスリーブを被せ、真空封入用の溶接ベローズ（板厚0.1mm、5ブロック×96山、内径14mm、外径28mm、）のガイドの中を滑らせ、ベローズの支持も兼ねさせている。その先端にはレモコネクター（4ピン）を装着し、ラングミュアプローブだけでなく、マッハプローブ・静電エネルギー分析器・粒子分析器などの装着が可能であり、その後端には電流導入端子を溶接し、2つの圧搾空気シリンダーのピストンロッドに連動した支持板の中央に固定して



## 2.2 計測系

第2図に高速掃引プローブの計測系を示す。プローブの位置検出はプローブの掃引速度が一定ではないため困難であったが、高速ファイバマークセンサ（応答時間0.1msec、最小検出幅0.1mm）をプローブと連動させ、固定バーコードを読み取らせることで解決した[2]。バーコードには2mmごとに0.2mmの黒線を入れており、2mmの空間分解能を得ている。高速ファイバマークセンサはバーコードを読み取り2mmごとに12Vの方形波信号を発生し、この位置信号をトリガー信号として高速掃引プローブコントローラは電圧10Vp-p、時間幅0.2msecの鋸歯状波を出力する。鋸歯状波はプローブ印加信号用アンプ（最大電圧200Vp-p、最大電流5A、出力インピーダンス10m以下）により増幅された後プローブに印加される。プローブ特性データは、高速掃引プローブコントローラのA/D変換器（サンプル時間1μsec、12bit）を通して計算機に取り込む[2]。

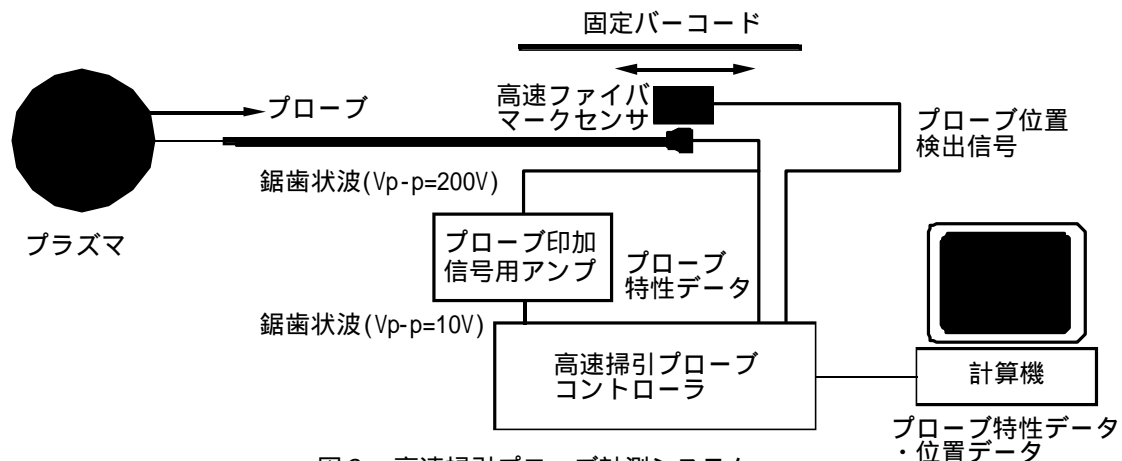


図2 高速掃引プローブ計測システム

## 3. 高性能・低価格・コンパクト化のための改良

最初試作した高速掃引プローブは、プローブの水平の動きに対して駆動力である圧搾空気シリンダーロッドの力がなるべくシリンダー軸と直角方向にかからないように、プローブパイプを両側からシリンダーロッドで挟むように固定するため圧搾空気シリンダーを2本使用し、それらシリンダーを固定し前後に可動できるようにするため更にボールベアリング・シャフトを2セット使用し、且つそれらを可動フランジに載せる構造であったので構造が複雑で高価且つ大型になった。

改良型は、可動フランジに載せる後述部品（1個ずつ）をプローブ支持パイプ、圧搾空気シリンダー、掃引開始位置可変用ボールベアリング・シャフト、ボールネジと垂直に下から上へ直線上に並べた。そのため駆動用圧搾空気シリンダーを中心に下にプローブ支持パイプを、上には水平掃引の軸を安定させるためのボールベアリング用シャフトを置くことが可能となり、シリンダーロッドを中心に水平掃引の際の負荷となるプローブ支持パイプとボールベアリングの摩擦などの垂直方向の負荷の力が打ち消し合っており、掃引スピードが0.4secと却って速くなった。そのボールベアリング用シャフトは圧搾空気シリンダーの固定用軸と兼ね、他方では更に掃引開始位置可変ボールネジ固定用軸と兼ねており、小型で少ない部品により高速掃引プローブの改良を行くことができた。図3はその改良の概要を示す。

#### 4. 3次元分布測定のための改良

近年産業面へのプラズマ応用が顕著で、SF6の分解・無害化処理に高周波誘導熱プラズマの適用が進められているが、高周波誘導熱プラズマは10,000Kにも達する温度のため、密度や温度に関して分光計測により測定されている程度であり、その他の物性や物理的・化学的過程などについては解明されていないことが多い[3][4]。大気圧・高周波熱プラズマ発生装置“RIP”(Radio Frequency Inverter Plasma Torch)は現在熱プラズマ中の高周波分布を磁気プローブにより測定を行なっている程度で、今回この実験装置のプラズマ3次元分布測定のために高速掃引プローブの改良を行なった。その概略を図4に示す。

当該実験装置のプラズマトーチ部は内径70mm長さ200mmのパイレックスガラスで、その外側に誘導コイルが8ターン巻かれている。そのためプローブ駆動系を垂直に設置し、トーチの軸方向からプローブ掃引を行ない、掃引軸中心から±50mm上下(横方向)可動とプローブ駆動系全体の回転とで3次元分布測定を可能とした。実験装置側に固定フランジを、回転フランジに高速掃引プローブ駆動系を載せ、クロスローラーリングで回転させ、平歯車で位置を決める。固定フランジと回転フランジの隙間にテフロンリングを1mm間隔で向かい合わせ、その間を二重“O”リングで差動排気を行ないつつ回転方向への負荷も少なくしている。

#### 5. まとめ

試作した高速掃引プローブは、使用した圧搾空気高速シリンダーにバウンド現象もなく、クッション調整も簡単でプローブ駆動に適しており、当初の目的である定常高熱流プラズマの計測に利用され研究の進展に大きく貢献している。その後の高性能・低価格・コンパクト化のためにシリンダーを2本から1本へという改良では、一見シリンダー2本の方が掃引速度は速いのではないかという著者の思い込みに対して反対の結果が与えられ、大いに反省させられた。3次元分布測定のための改良では、回転の位置決めが外径の大きい小モジュールのウォームホイールがないために、平歯車の組み合わせを使用することになり、回転方向に力が加わると位置がずれる可能性がある。

高速掃引プローブの駆動に圧搾空気シリンダーを使用したが高価な溶接ペローズを使用せざるを得ないことや行き帰りのスピードに差が生じるなどの問題も多いので、今後真空容器内に駆動部全体を納める方式を検討したい。

しかしプラズマ実験装置では強力な磁場が使われ、且つ磁場を乱すことが嫌われることが多いので電気モーター類は使用できないこともあり、今後の検討課題も多く残されている。

#### 謝辞

この開発・改良に関し、ご指導ご教示いただいた名古屋大学理工科学総合研究センター総合エネルギー科学上杉喜彦助教授、同大学工学部・工学研究科エネルギー理工学専攻大野哲靖助教授に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 高木 誠、増崎 貴、大野哲靖、森 光雄、高村秀一、石井和重  
“NAGDISにおける高速掃引プローブ系の開発”1991年プラズマ・核融合学会第8回年会予稿集 pp.187
- [2] 増崎 貴、大野哲靖、高木 誠、高村秀一  
“高熱流プラズマの生成とその高速掃引プローブ計測システムによる計測”T. IEE Japan, Vol.112-A, No.11, 1992
- [3] 近藤健二、M. A. Razzak、上杉喜彦、高村秀一  
“高周波誘導熱プラズマの磁場計測”平成14年度電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集 pp.106-111
- [4] 近藤健二、M. A. Razzak、上杉喜彦、高村秀一  
“磁場計測による高周波誘導熱プラズマの物性評価”2003年プラズマ・核融合学会第19回年会予稿集 pp.121

