

# Position control of a superconducting magnet-floating coil in a magnetsphere shaped plasma device RT-1

磁気圏型プラズマ装置RT-1における超伝導磁気浮上コイルの位置制御

56220 矢野善久

(指導教員 吉田 善章 教授)

Key Words : HTS magnet-floating coil, position control, PID feedback system, error field, mass imbalance

## 1. 序論

我々の研究グループでは、高速流プラズマの持つ新たな高β閉じ込めの可能性を検証するためにRT-1装置によるプラズマ実験を行なっている。RT-1装置は真空容器の内部に高温超伝導(HTS)線材Bi-2223で作られたコイルを磁気的に浮上させることが出来るため、高い磁場強度のみならずサポートなどの障害物が閉じ込め領域内に侵入しないデータタッチメントプラズマを実現することが出来る。

浮上コイル(起磁力250kA,質量112kg)は真空容器の上部に取り付けられた常伝導の引き上げコイル(30kA)により浮上させることが出来るが、一般には上に行くほど引き上げコイルによる磁場が強くなるためにコイルのz軸方向の運動は不安定である。そこでRT-1装置においてはPID負帰還制御により引き上げ電流を制御することで安定化している。(図1)

また浮上コイルは地磁気を主成分とする誤差磁場(引き上げ磁場以外の磁場)とコイルに内在する質量偏差(重心のずれ)によって傾いたり回転することが考えられる。装置周辺の誤差磁場は0.3Gauss程度の地磁気成分が主であることが分かっており、質量112kgコイルの質量偏差は工学的に補正するのは限界があるために実際に浮上させて補正する必要がある。

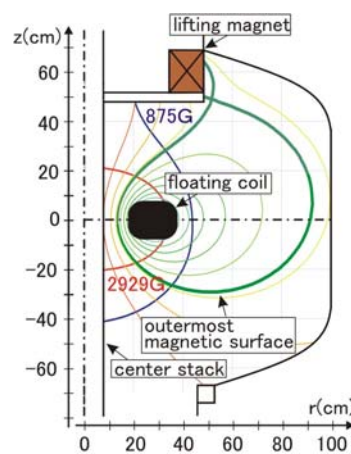
本研究では、 $10^{-3}$ 以下の磁場精度の実験装置の建設を目標としておりRT-1装置の制御系の開発および評価を行ない、誤差磁場と質量偏差の補正を行なっている。

## 2. RT-1磁気浮上制御システムの開発及び評価

RT-1浮上制御系は主に次の5つの要素から成り立っている。浮上コイル、位置センサ(3本)、PIDコントローラ、引き上げコイル系、真空容器の持つ渦電流である。

1)浮上コイル 運動方程式は次のようになる。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = 2\pi R I_F B_r - mg$$



(図1.RT-1装置の磁場構造。)

m:浮上コイル質量  
 z:浮上コイル位置  
 R:浮上コイル半径  
 $I_F$ :浮上コイル電流  
 $B_r$ :引き上げ磁場  
 g:重力加速度

運動方程式より、電磁力の不安定性はz=0mmの地点で次のように計算できる。

$$\alpha(z) \approx \frac{\partial B_r}{\partial z} / B_r = 4.05 (m^{-1})$$

また運動方程式より線形近似により得られる伝達関数は $G=g/(s^2 - \alpha g)$  となり $s=(40)^{1/2}$ の不安定な極を持っている。

2)位置センサ  $50 \mu m \rightarrow 1mV \quad \therefore 20 V/m$

3)PIDコントローラ

$P=5.2 \quad I=20/(20s+1) \quad D=0.32s \quad \therefore 5.2(1+0.06s)$

4)Lコイル系  $\therefore 150/(s/150+1) A/V$

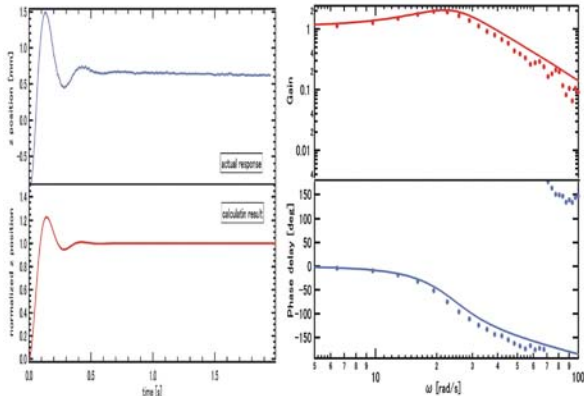
5)渦電流の効果  $\therefore 1/(s/80+1)$

なおLコイル系と渦電流の効果は周波数応答を実測した上で1次遅れ系で近似している。

RT-1の制御系で不安定な浮上コイルが安定化できることを実証するために、コイルと同じ形でさらに不安定な伝達関数を持つモックアップが安定化されることを確認した。

実証試験を経て、浮上コイルを安定に浮上させることに成功している。得られたステップ応答および周波数応答(図2)はモデルによる計算結果と非常に一致しており伝達関数のモデルで実際の系がよく表現できていることを確認した。

伝達関数のモデルより計算されるゲイン余裕、及び位相余裕はそれぞれ $g_M=16.5$   $\phi_M=29.5\text{deg}$ であり、定置制御系として十分な余裕を持つことが分かる。



(図2. (左) ステップ応答(上) 実験結果(下) 計算結果 (右) 周波数応答(上) ゲイン(下) 位相(点) 実測値(実線) 計算結果 )

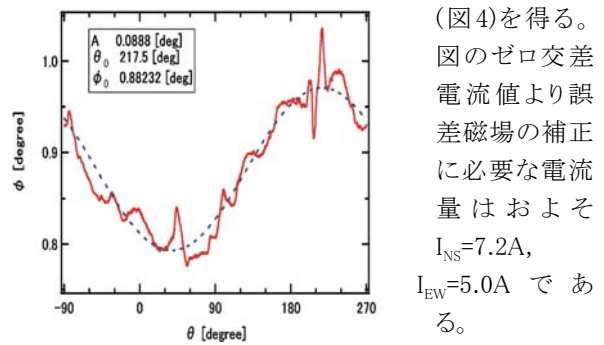
### 3. 誤差磁場、質量偏差によるコイルの傾きの補正

浮上コイルに誤差磁場と質量偏差が存在した場合、コイルは2つの効果が合成された方向と角度だけ傾きさらに2つの効果が平行でなかった場合は回転を行なうことが考えられる。実際にRT-1の浮上コイルにおいても約2degの傾きと振り子のような回転運動が確かめられている。浮上コイルの持つ大きな電流のために浮上コイルの傾きによる磁場の乱れは大きい。約2degの傾きでも最外殻磁気面付近では3%近くの誤差を生じる。 $10^{-3}$ の磁場精度を目指すためには傾きを0.057deg以内に抑える必要がある。補正コイルを用いて誤差磁場をゼロにするための電流を求め、コイルによる傾きの成分を低減するためにコイルのバランスを補正する。

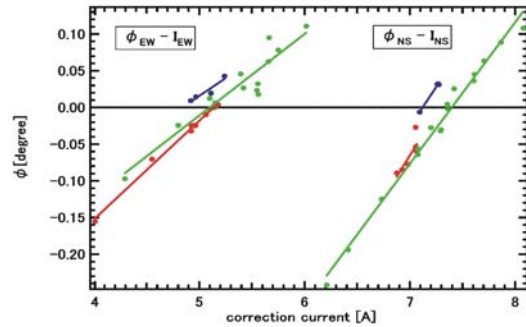
コイルの傾きは120度毎に設置された3本の位置センサの出力から計算することができ、得られるコイルの傾いている方向を $\theta$ 、角度を $\phi$ とする。磁場の補正用に2組のヘルムホルツコイル(1.2m×0.8m)を装置の東西(20巻,  $I_{EW}$ )南北(30巻,  $I_{NS}$ )に設置し流す電流を変えることでコイルの感じる誤差磁場を変化させることが出来る。

位置センサの出力より得られる $\theta$ と $\phi$ はその瞬間の誤差磁場と質量偏差が合成された傾きを示しているために分離して評価する必要がある。回転している間の $\phi$ の $\theta$ に対する軌跡をプロットすると正弦波的な波形を得ることができ、その中心値が質量偏差による成分 $\phi_m$ であり振幅が磁場による傾き $\phi_B$ だと評価することが出来ることを利用する。(図3)

ある( $I_{NS}, I_{EW}$ )における $\phi_B$ の南北方向と東西方向への傾きを $\phi_{NS}$ と $\phi_{EW}$ とするならば、それらは $\phi_B$ とそのピークの $\theta$ から計算でき、( $I_{NS}, I_{EW}$ )についてプロットして



(図3.  $\phi - \theta$  図。  $z=0\text{mm}$ .,  $I_{NS}=7.05[\text{A}]$ ,  $I_{WE}=4.55[\text{A}]$ )



質量偏差の補正は、予想される偏差の方向とトルクに対してコイルの反対側の位置にバランスを配置することで行なった。段階的に補正を行ない、 $z=0\text{mm}$ に浮上させた場合に初めに0.88deg存在した質量偏差は0.36deg, 0.06degと減少し、最終的には測定の限界以下だと考えられる0.057deg以下に低減することが出来た。目標である0.057deg以下を達成したと言えるだろう。また計算ではコイルに内在していた質量偏差によるトルクは74400[mm・g]であった。

### 4. 結論

磁気圏型プラズマ装置RT-1における超伝導浮上コイルの位置制御に関する研究を行なった。

システムを構成する各要素を個々に伝達関数で評価し、モックアップによる浮上実証試験を経て超伝導コイルの磁気浮上を行なった。またステップ応答と周波数応答との比較により伝達関数のモデルは実機の伝達関数と一致しており、モデルによる計算ではゲイン余裕および位相余裕はそれぞれ $g_M=16.5$   $\phi_M=29.5\text{deg}$ となり充分であることが分かった。

コイルの傾きの原因となる誤差磁場と質量偏差の補正を行なった。コイルの回転を測定することでそれぞれの傾きに分離した。結果としては、誤差磁場を補正するために必要な補正コイル電流はおよそ $I_{NS}=7.2\text{A}$ ,  $I_{EW}=5.0\text{A}$ であり、コイルに内在する質量偏差74400[mm・g]がバランスによる補正で目標である0.057deg以下に低減した。