特集・核 融 合

U.D.C. 621.039.634.026:621.3.014.4

核融合装置におけるうず電流現象の解析 Analysis of Eddy Current Phenomena in Nuclear Fusion Apparatus

トカマク型の核融合装置では,磁場の変化に伴い真空容器,ライナ,架台などの 金属性構造物にうず電流が誘起されて流れる。これらのうず電流はプラズマの制御 に影響を与えるほか,磁場と作用して構造物に電磁力を発生させるため,装置設計 の段階でうず電流を精度よく算定する必要がある。

この論文では、電流ベクトルポテンシャルを用いたうず電流計算法の開発結果に ついて述べる。またその応用例として、薄肉のベローズと厚肉金属部とが交互に溶 接された構造をしているため、うず電流の流れ方が3次元的で複雑となる真空容 器について、計算結果を示した。次に、ベローズを備えたトーラス型の真空容器 電磁モデルを用いた実験を行ない、本計算法の妥当性を確認したので、その結果 をも述べる。

高橋孝夫*	Takao Takahashi
高橋源治*	Genji Takahashi
滝沢照宏**	Teruhiro Takizawa

1 緒 言

核融合装置で、プラズマ、変流器、垂直磁場コイルなどの 電流による磁場が変化すると、真空容器、ライナ、架台など の金属性構造物にうず電流が誘起されて流れる。このうず電 流による不整磁場はプラズマの制御に影響を与えるほか、ト ロイダル磁場コイルの作る強磁場をはじめとする各種磁場と 作用して、金属性構造物に電磁力を発生する。また、うず電 流によるジュール損失は効率の低下を招くおそれがある。し たがって、装置設計の段階で、各金属部分に流れるうず電流 を精度よく算定することが要求される¹⁾。 けを考えると、電流ベクトルポテンシャルは垂直成分 Vn だけ となり、次式のように、スカラポテンシャルとして取り扱え ることになる。

1 ∂B_n

(=)

例えば、トカマク型の核融合装置での真空容器は、1ター ン電流を抑制するために、薄肉ベローズと厚肉金属部とを交 互に溶接した構造となっており、うず電流の流れ方が複雑と なる。このうず電流を計算するために、電流ベクトルポテン シャルを用いた過渡うず電流計算法を開発して、計算を行な った。

また、この計算法の妥当性を確かめるために、金属性構造物を模擬したモデルを製作し²⁾、うず電流を実測して計算結果と対比した。

2 電流ベクトルポテンシャルを用いたうず電流計算法

うず電流i は源泉がなくdiv i = 0 であるから、ベクトルポ テンシャル V を仮定すると、

磁場 Bの時間変化に伴い発生する電界 Eは,

rot
$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
.....(2)

で与えられる。電界 E により導電率σなる金属体に流れるう ず電流iは、

 $i = \sigma E$ (3)

rot
$$\overline{\sigma}$$
 rot $V_n = - \overline{\partial t}$
(5)式を例えば、差分法により離散化するに当たり、同式と







となる。金属体を薄板近似し、金属体に垂直に入る成分 Bn だ

図 | 計算法の説明 電流ベクトルポテンシャルを用いたうず電流計算 法で,差分による離散化を行なう場合には,積分形の場の方程式を用いるのが 便利である。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場

368 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)

等価な次式で表示される積分形の方程式を用いる。

ここで, esdsは図1(a)に示すように閉ループに沿った任意部分の電圧降下であり、 ¢ は閉ループと鎖交する磁束量である。

金属構造物によって座標系を適宜選択できるが、ここでは 簡単のために、同図(b)で示すx、yから成る直角座標系で考 える。うず電流の2方向成分 i_x 、 i_y は、(1)式から次式で与え られる。

(7)式のうず電流を用いて,図1(b)の斜線部に前の(6)式を適用すると,

となる。ここで、 ρ_1 、 ρ_2 、…は各メッシュの固有抵抗、 B_{n0} は ノード零での垂直磁場である。

(8)式を用いて、金属体全体にわたる離散化の結果を行列式で表示すると、



となる。ここで、[A]、[A']は係数行列である。 $[B_n]$ は、各 ノード点での外向き法線方向の磁場から成る行列である。

 $[B_n]を、外から印加された磁場<math>[B_0]$ と、うず電流による反作用磁場 $[B_e]$ とに分けて考えた場合(9)式は、

$$[A][V_n] = [A'] \frac{\partial}{\partial t} [B_0] + [A'] \frac{\partial}{\partial t} [B_e] \cdots \cdots (10)$$

となる。うず電流 $[i_e]$ は変換行列 $[C_e]$ を用いると(1)式から、

 $[A][V_n] = [A'] \frac{\partial}{\partial t} [B_0] + [A'][D_e][C_e] \frac{\partial}{\partial t} [V_n] \cdots (13)$

となる。(13)式をRunge-Kutta法を用いて解き、 $[V_n]$ の時間変化を求めれば、金属体に流れるうず電流は、(11)式から計算す

54

(b) 断面略図

図2 真空容器うず電流計算モデル JT-60の真空容器は卵形断面形 状をしており、全周6箇所にベローズ部がある。

ることができる。また、 V_n の等ポテンシャル線は、うず電流の流れ図を与える。

3 真空容器に関する数値計算

大形の核融合装置の真空容器は、一般に、1ターン抵抗を大 きくするための薄肉のベローズと所要の強度を確保するため の厚肉金属部とを、交互に溶接した構造となっている。ベロ ーズ部と厚肉部の抵抗の違いにより、厚肉部を循環して流れ るうず電流(一般にくら形電流と呼び、真空容器中をトーラ ス方向に流れるうず電流であるループ電流と区別している。) が生ずる。このくら形電流は、ひとつにはトロイダル磁場コ イルの作る強磁場を横切って流れるため、発生電磁力に関し て問題となる。

図2はJT-60を対象とした真空容器の計算モデルである。



図3 プラズマ電流の作る 磁場 プラズマ電流の作る磁 束線の一部は,真空容器と鎖交 する。



図4 t=13.9msにおけるうず電流の流れ図 ベローズ部の高抵抗 によりうず電流は抑制されるため、厚肉部をくら形に循環して流れる。 抵抗が増大するのを,曲面平板の抵抗に異方性を考慮することにより模擬している。

磁場変化の例として、プラズマ電流が時定数50msで内側に 収縮消滅する場合を考える。図3に、変化の直前でプラズマ 電流が作る磁場の様子を示す。真空容器の中央の穴を貫く 磁束のほか、容器の壁に垂直に印加する磁束もあることが分 かる。

以上の条件の下に計算したうず電流の流れ図を, 図4, 5 に示す。図4は, t=13.9msで容器全体に流れるうず電流を 容器の真上から見たものである。

図5は、プラズマが内側へ移動しながら減衰消滅するときに、真空容器に流れるうず電流の流れの様子を時間を追って プロットしたものである。t=1.9msでは、容器中をトロイ ダル方向に流れるループ電流が支配的であるが、それ以後は 時間の経過とともにベローズ部での高抵抗のためにループ電 流が抑制され、うず電流は厚肉部中をくら形に流れる傾向が 顕著となっている。

図6は、うず電流をループ電流とくら形電流とに分けて求め、その時間変化を示したものである。ループ電流のほうがピーク値が早く現われ減衰も速い。これはベローズ部での高抵抗のために、電流変化の時定数が小さくなるものと考えられる。

4 核融合装置真空容器に流れるうず電流の実験検討

容器断面は卵形形状をしている。長さがトロイダル方向角度で それぞれ50度,10度の厚肉部とベローズ部が,各々6個交互 に溶接されている。板厚は厚肉部40mm,ベローズ部3.45mmで, 材質としての固有抵抗は,厚肉部,ベローズとも130μΩ・cmで ある。計算では、ベローズの山を無視して厚肉部と同じ曲面 平板で近似し、ベローズの山と板厚によりトロイダル方向の 既述した電流ベクトルポテンシャルを用いたうず電流計算 法の妥当性を検証する実験モデルの一つとして、ベローズを 備えたトーラス型の真空容器電磁モデルを製作した。本モデ ルは、主半径609.6mm、小半径203.2mmの円形断面をもつトー ラス型状をしており、ステンレス製である。全周4個所に厚 さ0.5mm、展開長1,240mmのベローズ部を設けた。厚肉部の板 厚は8.2mmである。図7に、製作した電磁モデルと磁場発生コ



図 5 うず電流の流れ方の 時間変化 プラズマ電流が 時定数50msで減衰消滅する場合 に,真空容器中に誘起されて流 れるうず電流の時間変化を示す。

55

370 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)



図6 ループ及びくら形電流の時間変化 くら形電流よりもループ電流が時間的に早く流れる。

イルとを組み合わせた状態の写真を示す。印加磁場の形状, 周波数を変えて,容器各部に流れるうず電流,1ターン電流, 容器内部に浸透する磁場の分布などを測定した。



図8 トロイダル方向に流れるうず電流に関する計算値と実測値 の比較 ベローズ部ではループ電流によりうず電流は一方向であるが,厚 肉部ではくら形電流のため容器の内側と外側でうず電流の方向が反対となる。



図8は、容器中をトロイダル方向に流れるうず電流 I_{φ} について計算と実測とを比較して示したものである。ベローズ部を流れるうず電流は、小円周上のすべての点で同一方向となるが、厚肉部のうず電流は、内側($\theta = 0^{\circ}$)と外側($\theta = 180^{\circ}$)で流れの方向が反転していることが分かる。

図9は、容器中をポロイダル方向に流れるうず電流 I_bについて計算と実測結果とを比較して示したものである。厚肉部とベローズ部の接合部に、うず電流が集中して流れることが分かる。これはいわゆるくら形電流によるものである。また、接合部に沿って流れるうず電流は、厚肉部とベローズ部で電流密度に関して連続しており、したがって、接合部ではそれぞれの板厚に比例した電流が流れることが分かる。

図8,9で計算値と実測値とは良好に一致しており,本論 文で紹介した電流ベクトルポテンシャルを用いたうず電流計 算法が,妥当なものであることが実証された。



図9 ポロイダル方向に流れるうず電流に関する計算値と実測値 の比較 厚肉部とベローズ部の接合部では、くら形電流のためポロイダル 方向のうず電流が大きくなる。

5 結 言

(1) 電流ベクトルポテンシャルを用いたうず電流計算法の開 発結果を紹介するとともに, JT-60の真空容器計算モデルに 適用し, うず電流の様子を明らかにした。

(2) 真空容器電磁モデルを用いて実験を行ない,計算法の妥当性を確かめた。

終わりに、本研究に当たり御指導をいただいた日本原子力 研究所JT-60第3開発室室長,鈴木康夫理学博士に対し深く謝 意を表わす次第である。

図7 真空容器電磁モデルと磁場発生コイル ベローズ付でトーラス 型状をした真空容器電磁モデルを2個の円筒コイルの間に置き,磁場を印加する。

参考文献

- 1) 亀有,外:有限要素回路法による渦電流解析,JAERI-M 7120 (1977-6)
- 2) T. Takahashi, et al.: Numerical and Experimental Analysis of Eddy Currents Induced in Tokamak Machine, Proceedings of the Seventh Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, 1393~1397 (1977)

56