

学術論文

## 鉄板中のうず電流計測における探針法の適用

## Application of the search needle method for the measurement of the eddy current in the sheet iron

巖 龍洙  
海老原大樹  
谷 善夫

武蔵工業大学  
武蔵工業大学  
東京部品工業 (株)

鳥居 肅  
三城 功

武蔵工業大学  
東京部品工業 (株)

Yongsu UM

Student Member

Susumu TORII

Member

Daiki EBIHARA

Member

Isao SANJO

Yoshio TANI

In general, characteristics of the flux and eddy current density on the inner part of the electric machine are investigated by using the numerical analysis. However, the experimental method to confirm the results obtained by the numerical analysis is not yet established. We have been investigated the measurement of the eddy current in the sheet iron by using the search needle method. But it is very difficult as compared with anti-ferromagnetic material because the influence of the induced e.m.f that is generated by the variation of the main flux in the sheet iron is large. This study presents the measuring method of the eddy current in the sheet iron by using the search needle method and the attention matters that demand special attention.

*Key Words:* Eddy current, search needle method, ferromagnetic material, induced e.m.f, eddy current brake.

### 1 緒言

導体内部に磁束変化によって生じるうず電流を利用した電気機器は素材特性の改良と電磁界解析手法の高度化に伴い産業界の様々な分野で開発・研究されている。しかし、機器内部の磁束及びうず電流などの特性把握は主に数値解析に頼っており [1], その妥当性検証のための実験的考察法がまだ完全に確立されていないのが現状である。これまでそれらの特性解明のためサーチコイル及び探針などを用いた計測方法がいくつかの論文より報告されている。具体的には金属板に複数の探針を埋め込み、探針間の電圧降下からその

部分でのうず電流を求める方法が報告されている [2]. しかしながら、当時では探針の設置の均一性に基づいたデータの信頼性などに問題が生じた。

この対処として非接触でうず電流を計測する比較的出力レベルの高い探針法の提案 [3][4] や二次側のうず電流のみならず発生力を含める瞬時値分布の計測も報告されている。導電性金属板、もしくは棒におけるこれらの計測方法は比較的良好なうず電流分布が観察できるようになった [5]. しかしながら、主磁束が大きく変化する磁性体中のうず電流計測では主磁束の変化に伴う誘導起電力がうず電流計測に強く影響するため、非磁性体のうず電流計測と異なりその対策が必要である。そこで、筆者らは、鉄板内でのうず電流計測を目的として、探針法の適用につき検討を行い、比較

連絡先: 海老原大樹, 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1, 武蔵工業大学

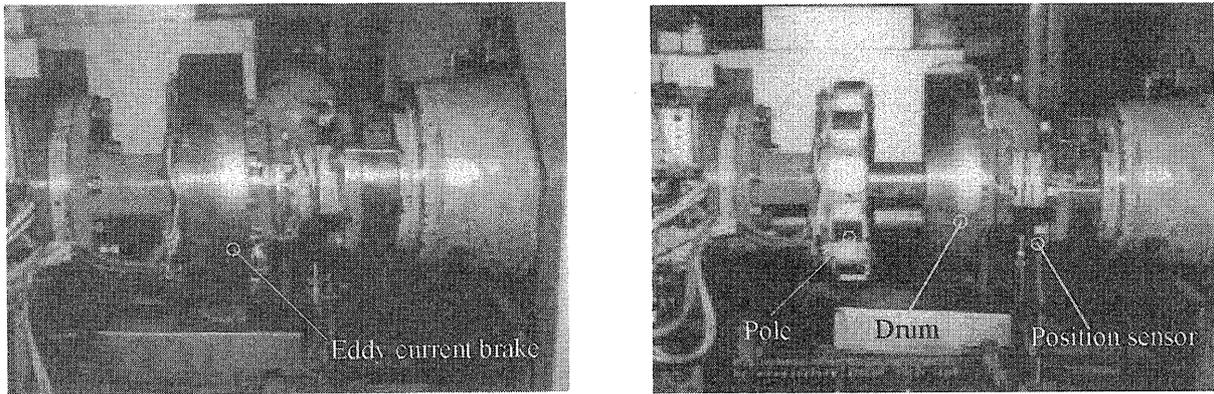
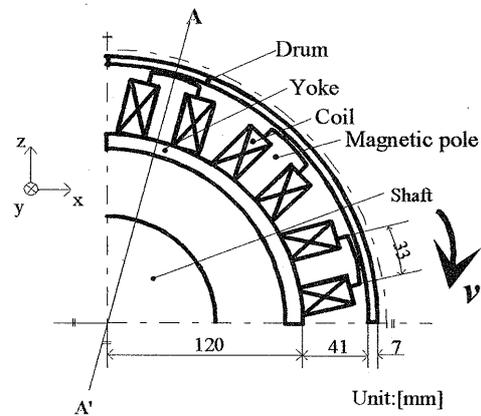


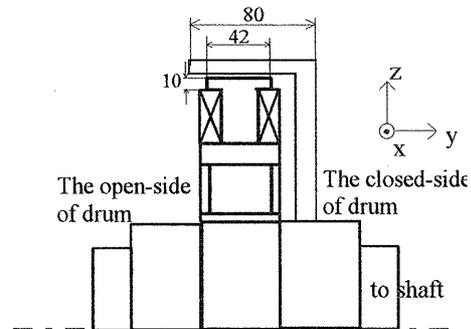
Fig. 1: Experimental scene of an eddy current brake.

Table 1: Specification of an eddy current brake.

Item	Value and Unit
Weight	20 (kgf)
Number of Pole	12
Pole Pitch	84 (mm)
Length of Gap	0.8 (mm)
Excitation Current	40.1 (A)
mmf	2307 (A)



a) A cross section to the rotating direction.



b) A cross section to the direction axis. (A-A')

Fig. 2: Structure of an eddy current brake.

的良好な測定値が得られた [6]. 本稿では、まず探針法の適用におけるその注意すべき事柄について述べ、次に本計測法より得られた結果を報告する。

## 2 探針法の適用モデル

本研究では、大型車両の新たな補助ブレーキとして注目されている電磁式うず電流ブレーキを基本モデルとして採用し、検討を行った。Fig.1 にと電磁式うず電流ブレーキの実験システムを示し、Fig.2 にその構造を示した。また Table 1 にはその仕様を示した。Fig.2 に示すように電磁式うず電流ブレーキの構造は大きく分けて磁極（一次側）とドラム（二次側）から構成されている。一次側は車両のミッションの直後に固定され、二次側はシャフトに直結され、常に回転している。ドラムの主材料は鉄材 (S15C) であるが、その内側には導電率向上のため銅メッキ (二次導体) が厚さ 0.086 [mm] で施されている。また、二次側の外側には、放熱対策と剛性を増やすためにフィンが取り付けられている (本実験では外している)。また、一次側と二次側間のギャップは約 0.8 [mm] となっている。

制動の動作原理は、一次側である電磁石に直流の励磁電流を流すことにより各電磁石には、N・S 極が交互に発生する。

この磁界によって回転する二次側にうず電流が発生する。この二次側でのうず電流と磁界との相互作用により、ドラムの回転方向とは逆に制動力が生じる。一般に、このうず電流ブレーキはアクセル連動形としておけば、アクセルを放した時、自動的にうず電流ブ

レーキが動作し、制動力が得られる。

### 3 探針によるうず電流計測法及び問題点

探針法は、探針を導体に埋め込み、それらの探針間の電圧降下を元に、導体に流れているうず電流の大きさと方向を予測する方法である。

うず電流ブレーキの回転ドラムに複数の探針を施した状態を Fig.3 に示す。探針 ( $\phi$  0.8 mm のエナメル線) は 2 種類設置する。即ち、二次側の内側に流れているうず電流を多数の線電流の集まりと考え、回転方向と直角方向の電圧を計測する探針 b,d と回転方向の電圧を計測する探針 a,c を図のように回転ドラム全幅に設置する。

Fig.3 のように二次側ドラムに探針を設置し、定速で回転させた時、サンプリング時間毎に  $x, y$  方向についての探針間の電位差 (うず電流による電圧降下分)  $e_x, e_y$  を測定し、サンプリング時間にあう位置に換算してその結果を合成することにより二次側内側  $x-y$  表面上のうず電流の方向および大きさを予測することができる。しかし、この計測方法は探針を設置するドラムが非磁性体の場合では問題がないが、主磁束回路を構成する鉄板中のうず電流計測には問題を生じる。即ち、主磁束が大きく変化する鉄板中でのこの探針法を適用する場合、Fig.4 に示されるように、探針間のうず電流による電圧降下成分  $e_e = I_e r$  の他に、探針とドラムの外側からの引き出し線が 1 巻コイルとなることから、主磁束  $\Phi$  の変化に伴う  $e_\Phi = d\Phi/dt$  にみあった誘導起電力及び速度起電力が強く影響を与える。これは、一巻コイルに磁石を近づけたり、遠ざけたりして磁束を変化させると、起電力が生じる現象と同じである。

非磁性体のうず電流計測においては、通常  $e_e \gg e_\Phi$  であり、計測が可能であるが、鉄板中の計測には主磁束の変化にみあう  $e_\Phi$  は大きく、うず電流計測には対策が必要である。主磁束の変化が大きい鉄板中のうず電流計測において、 $e_\Phi$  成分が大きく影響する方法で測定されたうず電流分布結果 (ドラムの回転数 1000 [rpm]) を Fig.5 に示した。 $e_\Phi$  成分をキャンセルしなかった場合、Fig.5 のようにうず電流は開口側の方で強く発生し、うず電流ループも閉じていない結果となりこの方法では制動力発生メカニズムの検討を行うことは困難である。

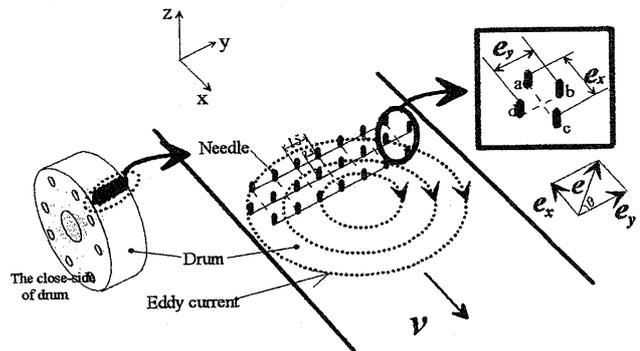


Fig. 3: Measuring method of an eddy current by search needles.

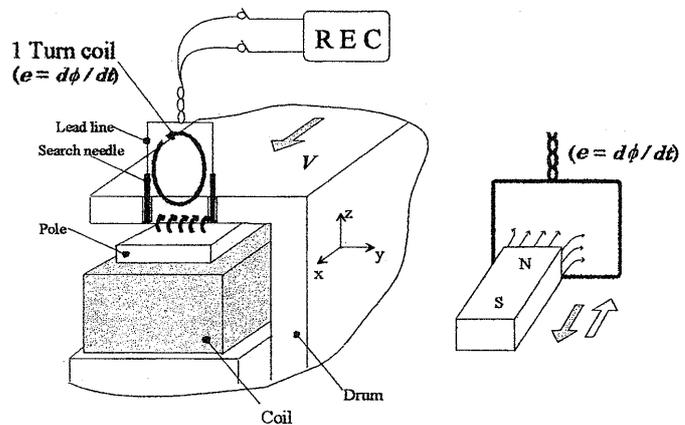


Fig. 4: Problem on the measuring method of Fig.3.

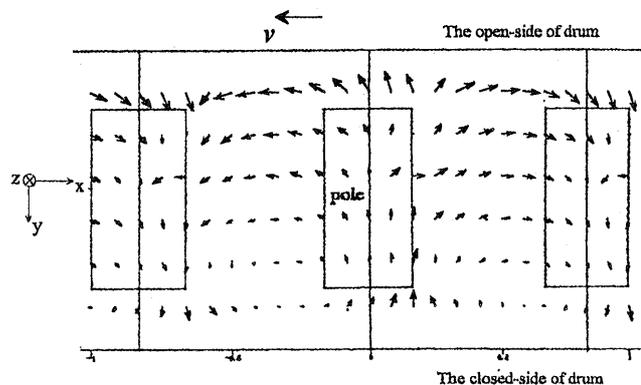
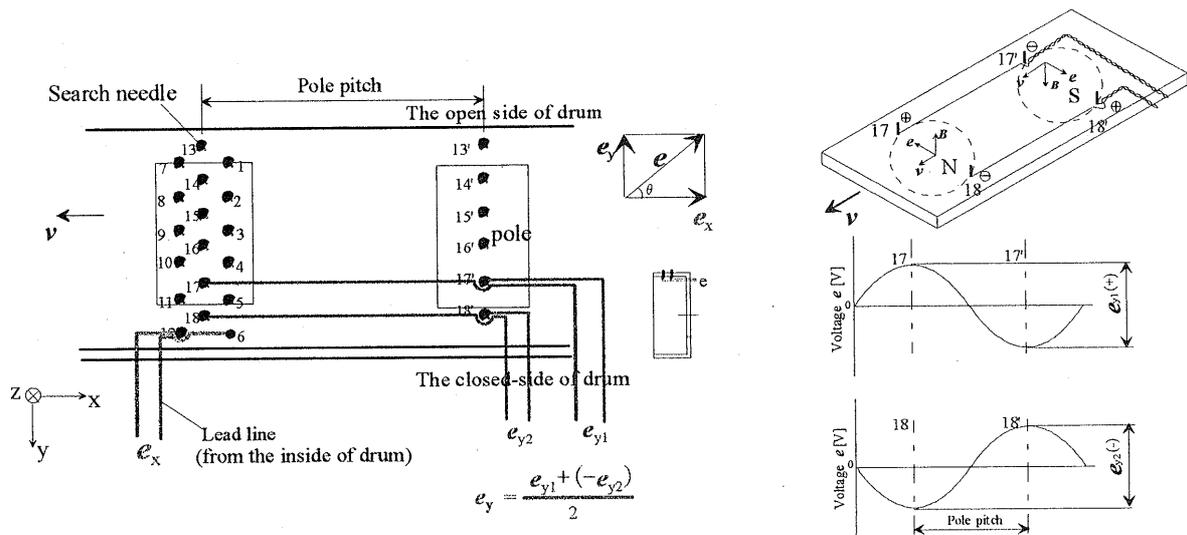


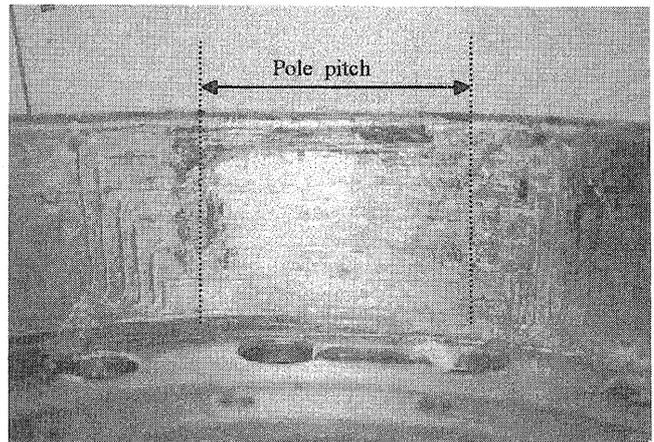
Fig. 5: Eddy current distribution obtained by the measuring method of Fig.3.

Fig. 6: Measuring method for the cancellation of  $d\Phi/dt$ .

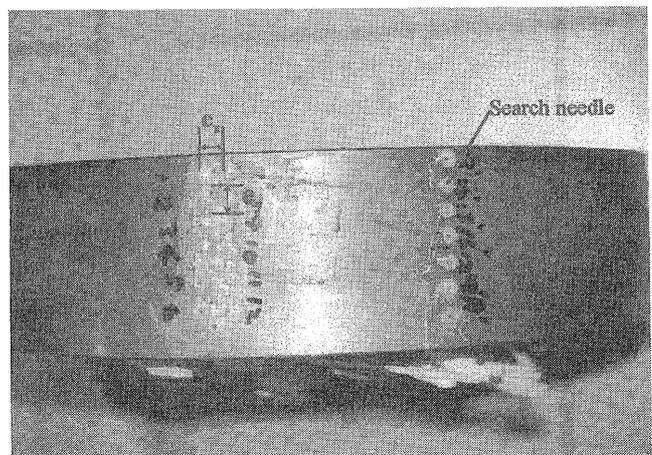
#### 4 $e_{\Phi}$ 成分のキャンセル法と測定結果

鉄板中の主磁束  $\Phi$  の変化による誘導起電力成分  $e_{\Phi}$  をキャンセルさせるための計測法を Fig.6 に示した。また, Fig.7 に探針をドラムに設置した場合, ドラムの内面と外面より見た実物図を示した。周方向における電位差  $e_x$  の測定は従来と同様に行うが,  $e_{\Phi}$  成分の影響が大きくなる軸方向における電位差  $e_y$  の測定には隣の磁極 (ポールピッチ分離れた位置) にもう一連の探針を埋め込み  $e_{\Phi}$  成分を消去する測定を行った。

例えば, 探針 17' 及び 18' で生じる電位は, 探針 17 及び 18 で生じる電位とは極性が異なるだけで大きさは同じであるため, 探針 17 と 17' との電位差  $e_{y1}$  と探針 18 と 18' との電位差  $e_{y2}$  を求め, それらを合成し, 2 で割ることによって探針 17 と 18 間の電圧降下成分  $e_y$  のみ求められ,  $e_{\Phi}$  成分をキャンセルすることが可能となる。この際, 探針 17 と 18 間に流れているうず電流による電位差の方向性を決める為, Fig.6 の波形のように探針 17 と 17' との電位差を正, 探針 18 と 18' との電位差を負とする。また, 従来での方法では探針と接している引き出し線をドラムの外径より取り出していた。そのため, 探針とドラムの外側からの引き出し線が 1 巻コイルとなり, 主磁束  $\Phi$  の変化による誘導起電力成分が強く影響を与える。そこで, 本計測法では, このような影響を避けるために引き出し線を内径より取り出している。Fig.8 に新計測手法より得られたドラムの内側の表面でのうず電流分布 (ドラムの回転数 1000 [rpm]) を示した。



a) Inside of the drum.



b) Outside the drum.

Fig. 7: Install scene of the search needle.

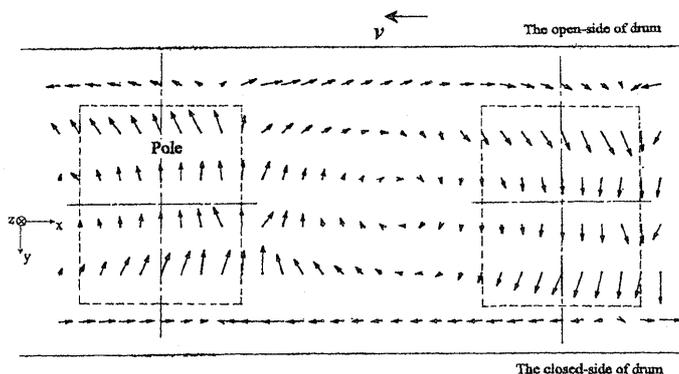


Fig. 8: Distribution of the eddy current.

Fig.8 よりうず電流は磁極の脱出部で強く発生し、また、うず電流ループが閉じていることがわかる。この結果は、筆者らが行った別の視点からうず電流分布を予測した結果と一致する。即ち、サーチコイルを用いた動磁束密度の特性結果よりうず電流分布を求める方式であり、制動力が磁極の脱出部で大きく形成されると予想した結果 [7] と一致し、うず電流の特性把握のため、本計測法が有効であることが裏つけられる。

## 5 結論

本稿では、鉄板でのうず電流計測のため、電磁式うず電流ブレーキを基本モデルとして採用し、探針法の適用を行った。しかし、主磁束が大きく変化する磁性体中のうず電流計測では、非磁性体のうず電流計測と異なり主磁束の変化に伴う誘導起電力がうず電流計測に強く影響するため、その対策が必要である。そこで、本研究では、鉄板での主磁束の変化に伴う誘導起電力の影響をキャンセルさせる方法について検討を行い、従来の方式に比べ有効な結果が得られ、うず電流ブレーキにおける制動力の発生メカニズムを把握することができた。

(1999年8月12日受付)

## 参考文献

- [1] K. Muramatsu, N. Takahashi, T. Hasio: 3D Eddy Current Analysis in Moving Conductors of Permanent Magnet Type Retarders Using Moving Coordinate System, *IEEE IEMDC Conference Record*, MC1-5.1 (1997).
- [2] 小柳・松宮・高木: リニアモータの2次電流に関する実験, 明治大学工学部研究報告, 30, 155 (1975).
- [3] 海老原・片木: リニア誘導モータの2次電流検出, *SICE 論文集*, 第19巻, 第5号 (1983) pp.45-77.
- [4] 毛利: アモルファス磁界センサによる2次電流検出, *電気学会マグネティックス研資*, MAG 83-113 (1983).
- [5] 海老原・片木: リニア誘導モータにおける2次側緒量の瞬時値分布の測定, *電気学会論文集*, Vol.104-B, No.12 (1984), pp.857-864.
- [6] 谷・市川・海老原: ドラム型渦電流ブレーキの渦電流計測について, 平7 電気学会全国大会, No.1006 (1995).
- [7] 巖・鳥居・海老原他: うず電流ブレーキの実験的考察によるうず電流算出法の検討, *電気学会リニアドライブ研資*, LD98-29 (1998), pp.17-21.