

# 急冷薄帯磁心材料と磁化特性の表現

RAPIDLY QUENCHED RIBBON-FORM SOFT MAGNETIC MATERIALS  
AND A REPRESENTATION OF MAGNETIZATION CHARACTERISTIC

斎藤兆古 早野誠治 中村秀男  
Y. SAITO S. HAYANO H. NAKAMURA

法政大学 工学部  
COLLEGE OF ENGINEERING, HOSEI UNIVERSITY

## 1. はじめに

高透磁率材料の溶融合金を高速回転しているディスク外周上に噴出し、急冷固化させるディスク法や溶融合金を高速回転しているロール間に噴出し、急冷固化させるロール法などによつて得られる急冷薄帯は保磁力として極めて低いものが知られ、かつその鉄損も従来の方向性珪素鋼板より低い値であることから、現在トランス材料への応用を目指し着実な研究が進められている。

一方、有限要素法に代表される数値解析法によつて変圧器、回転機などの磁気装置に対して、磁場の解析や解析結果からの設計が試みられている。さて、磁場の解析を行う場合、磁性材料の特性、すなわち磁化特性の表現の問題があり、特に数値解析法によつて磁気ヘッド等の局部的な磁界を解析する場合、磁気飽和のみならずヒステリシスをも考慮しなければならない。このように、磁気材料を含む系において、磁化特性を模擬する方法は極めて重要であり、急冷薄帯を磁心材料として用いた変圧器等の設計において、その磁化特性が従来の方向性珪素鋼板と異なるため、過渡特性、損失分布ひいては熱分布等を算定する必要から、より高精度の磁化特性モデルが必要である。磁化特性を表現する方法として、アナログシミュレーションのために、非可逆スイッチによるモデルが、大照によつて提案された[1]。その後、Saitesmas等によつて、ヒステリシスの解析的モデルが提案され、鉄共振回路のアナログシミュレーションに成功した[2]。デジタル計算機を用いた電子回路シミュレーションプログラム開発のため、Chua等によつて微分形の動的磁化特性モデルが提案され、さらに非可逆のスイッチの概念を用いて静的磁化特性モデルまで拡張された[3,4]。Charapは、この微分形モデルについて磁区の理論による説明を試みた[5]。また同様な微分形のモデルがTalukdar等によつて、Chua等とは独立に提案された[6]。斎藤等は、Chua形モデルの一般化とパラメータの決定法を提案し、分布定数系や集中定数系のデジタルシミュレーションに有効であることを報告した[7-9]。磁区の理論に基づきPreisach形モデルを用いて、奥村等は集中定数系のデジタルシミュレーションを報告した[10]。斎藤等はPreisach形とChua形モデル間に密接な関係があることを報告している[11]。最近では、Prusty等がChua形モデルのパラメータを実効値で測定した飽和曲線と損失から決定する方法を提案している[12]。

このように、Chua形モデルは現時点で最も有効なモデルであることから本稿で取りあげることとする。

## 2. 磁化特性の表現

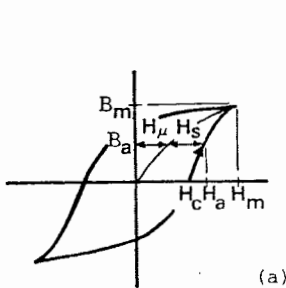
Chua形の磁化特性モデルは、物理的な理論に基づくものでなく、磁化特性を単に数学的に表現しようとするものであり、その一般形は、 $B$  と  $H$  さらに  $dB/dt$  をそれぞれ磁束密度、磁界の強さおよび磁束密度の時間変化率として、次式で与えられる。

$$H = f(B)B + g(dB/dt)dB/dt \quad (1)$$

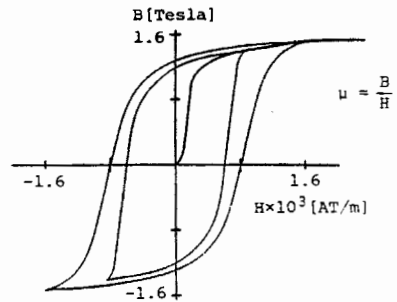
ここで、 $f(B)$  と  $g(dB/dt)$  はそれぞれ  $B$  と  $dB/dt$  の1価関数であり、また  $B$  および  $dB/dt$  の符号の如何を問わず正の値を取る関数とする。

磁化特性の主要な特徴は、(a) 同一の磁化力  $H$  の値に対して、過去の履歴に依存する異なった磁束密度  $B$  の値を取る、(b) 磁束密度  $B$  が飽和磁束密度に達した場合、同一の磁化力  $H$  に対して同一の磁束密度  $B$  の値を取る等であろう。

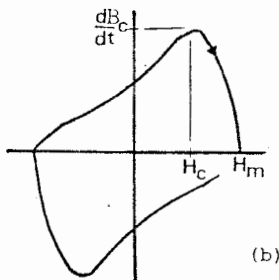
(1) 式は、係数が  $B$  や  $dB/dt$  に依存する非線形の微分方程式である。従って、(1) 式の解は磁束密度  $B$  の初期値に応じて決定される積分定数を含むことになり、これが過去の履歴を代表し (a) の条件を満足できる。また、 $B$  が飽和値に達した場合、 $dB/dt$  が零に近づくため、(1) 式の第2項も又零に近づく、よって(1) 式は (b) の条件を満足できる。



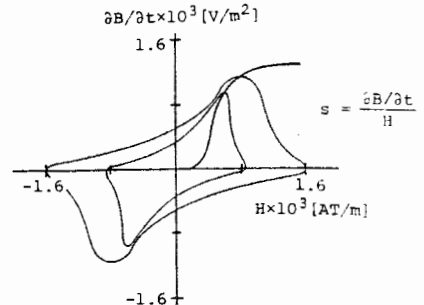
(a)



(a) B vs. H curve.



(b)



(b)  $\partial B/\partial t$  vs. H curve.

第1図 典型的ヒステリシス ループ.

第2図 (4) 式の係数  $\mu$  と係数  $s$  の決定.

次に、(1) 式の  $f(B)$  と  $g(dB/dt)$  を決定する方法を考える。第1図で、 $B = B_m$ 、 $H = H_m$  なる点においては、 $dB/dt = 0$  であるから、(1) 式は  $H_m = f(B_m) B_m$  となり、よって、 $B_m$  における関数値は  $f(B_m) = H_m / B_m$  で与えられる。従って、一連の  $B-H$  ループの頂点を結ぶ曲線は、磁束密度を変数とする関数  $f(B)$  を与える。さて、一連の  $B-H$  ループの頂点を結ぶ曲線は一種の飽和曲線であるから、明らかに関数  $f(B)$  は透磁率  $\mu$  の逆数に相当する。すなわち第2(a)図に示すように、

$$\mu = 1 / f(B) \quad (2)$$

である。次に、第1図で  $B = 0$ 、 $H = H_c$ 、 $dB/dt = dB_c/dt$  なる点において、(1) 式は  $H_c = g(dB_c/dt)$  となる。よって、 $dB_c/dt$  における関数値は  $g(dB_c/dt) = H_c / (dB_c/dt)$  で与えられる。多くの場合、磁束密度  $B$  が零を取る点では、磁束の時間変化率の絶対値が最大値を取る。従って、第2(b)図に示すように、一連の  $dB/dt - H$  ループの頂点を結ぶ曲線は、磁束密度の時間変化率  $dB/dt$  を変数とする関数  $g(dB/dt)$  を与える。(2) 式にならってヒステリシス係数  $s$  を次式によって定義する。

$$s = 1 / g(dB/dt) \quad (3)$$

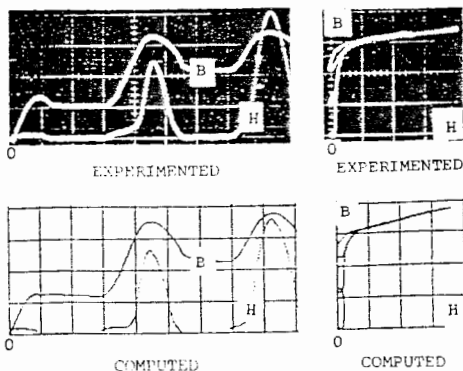
(2) 式と(3)式を用いて、(1) 式は次式のように書き直される。

$$H = (1/\mu) B + (1/s) dB/dt \quad (4)$$

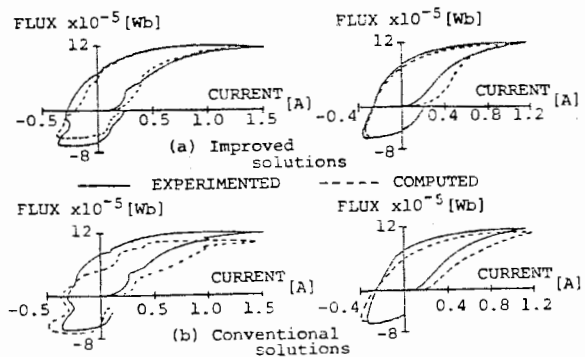
### 3. 例題

(4) 式で与えられる磁化特性モデルがかなり広範な範囲まで妥当であることを示すため、過渡的問題とマイナーループを含む問題さらに鉄板の積層に起因する非等方性問題についての例題を与える。

第3図に一次元集中定数モデルによる半波整流回路における過渡現象を示し、



FLUX DENSITY B 0.5 [Tesla] per Div.  
FIELD INTENSITY H 2857 [AT/m] per Div.  
TIME t 5 [msec] per div.



第4図 準三次元モデルにおける過渡的磁化特性。

第3図 半波整流回路における過渡的磁化特性。

第4図にトロイダルリアクトルの準三次元モデルによる過渡的ヒステリシスループを、非等方性を考慮した場合としない場合について示す。いずれの場合も、比較的よく磁化特性が再現されている。

#### 4. むすび

本稿では、磁化特性を表現するモデルで、現時点で最も有効と考えられているChua形モデルの一種を紹介し、その原理および妥当性を吟味した。第3図および第4図に示されたように、磁性材料を含む磁界分布や設計に極めて有効であり、急冷薄帯を用いた磁気装置の設計や解析に適用可能であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 大照 完, "磁気ヒステリシス関数発生器," 計測, Vol. 11, No. 8, 昭和36年8月(1961).
- [2] J. G. Santesmases, J. Ayala and H. Cachero, "Analytical Approximation of dynamic hysteresis loop and its application to a series ferroresonant circuit," Proc. IEE Vol. 117, NO. 1, (1970).
- [3] L. O. Chua and K. A. Stromsmoe, "Lumped circuit models for Non-linear inductors exhibiting hysteresis loops," IEEE Trans., Circuit Theory, Vol. CT-17, No. 4, Nov., (1970).
- [4] L. O. Chua and S. C. Bass, "A generalized hysteresis model," IEEE Trans., Circuit Theory, Vol. CT-19, No. 1, Jan., (1972).
- [5] S. H. Charap, "Magnetic hysteresis model," IEEE Trans. Magnetics, Vol. MAG-10, No. 4, Dec., (1974).
- [6] S. N. Talukdar and J. R. Bailey, "Hysteresis model for system studies," IEEE Trans., Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 4, July/August, (1976).
- [7] Y. Saito, "Three-dimensional analysis of magnetodynamic fields in electromagnetic devices taking into account the dynamic hysteresis loops," IEEE Trans., Magnetics, Vol. MAG-18, No. 2, March, (1982).
- [8] Y. Saito, H. Saotome, S. Hayano and T. Yamamura, "Modeling of non-linear inductor exhibiting hysteresis loops and its application to the single phase parallel inverters," IEEE Trans., Magnetics, Vol. MAG-19, No. 5, Sep., (1983).
- [9] Y. Saito, S. Hayano, T. Yamamura and H. Saotome, "Hysteretic fields in a toroidal reactor," IEEE Trans., Magnetics to be published.
- [10] 奥村浩士, 木嶋昭, "ヒステリシス特性のデジタルシミュレーションとその応用," 電気学会論文誌B, Vol. 103, No. 7, 昭和58年7月(1983).
- [11] Y. Saito, S. Hayano, T. Yamamura and N. Tsuya, "A representation of magnetic hysteresis," IEEE Trans., Magnetics, to be published.
- [12] S. Prusty and M. V. S. Rao, "A novel approach for predetermination of magnetization characteristics of transformers including hysteresis," IEEE Trans., Magnetics, Vol. MAG-20, No. 4, July(1984).