

非線形磁化特性のセルラー・オートマトンモデル

Cellar Automaton Model of Nonlinear Magnetization Characteristics

宮坂 総
So MIYASAKA
指導教員 齋藤 兆古

法政大学大学院システムデザイン研究科システムデザイン専攻修士課程

After we classified the magnetization curve of a ferromagnetic material into three magnetization regions, we applied the Preisach type cellar automaton model to each of three magnetizing regions. As a result, it is shown that the magnetization curves with high fidelity can be represented by the cellar automaton model.

Key words : 1/f Fluctuation, Preisach Model, Cellar Automaton

1. はじめに

セルラー・オートマトンは、1940年代にノイマンによって提唱された。その後、1984年にウルフラムによって複雑系のシミュレーションを行う決定的な方法として紹介され、近年、多くの分野で新世代シミュレーション技術として研究・開発が行われている。特に、従来の方法ではモデル化が困難であった交通渋滞や火事などのシミュレーションにも用いられており、今後さらなる研究開発と実用化が期待されている[1-5]。

一方、磁性体は極めて複雑な磁化特性を呈するが、1930年代にこの磁化特性を表現するモデルがプライザッハによって提唱された。このプライザッハモデルは極めて具体的な磁区理論に基づくため、他に代替えとなるモデルがなく、現代でも磁気記録理論や磁性体を含む磁界計算に広範に使われている[4]。

筆者らは既に磁化特性を表現するプライザッハモデルが、未だセルラー・オートマトンの概念が提唱されていない時代の提案にも拘わらず、一種のセルラー・オートマトンモデルであることを報告した[10-11]。

本論文では、最初に古典磁区理論に基づき磁性体の磁化過程を3領域、すなわち、可逆的磁壁移動、非可逆的磁壁移動、さらに磁化ベクトルの回転磁化領域へ分割した後、これらの3領域へプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルを適用した。その結果、プライザッハ型セルラー・オートマトンモデルの一般化が可能であることを報告する。

さらに、本論文で導いたプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルをベースとして、磁区挙動画像に見られたノイズを乱数で模擬することでバルクハウゼンノイズが表現可能であることを述べる。

2. セルラー・オートマトン

(1) セルラー・オートマトンとは

セルラー・オートマトンとは、格子サイトが多様な初期値を持つ不連続な系からなり、これらのサイトは、それぞれのサイトがいくつかの局所的な隣接サイトの値に基づ

いた新しい値と有限な数の過去の時間ステップを仮定すると、離散的な時間ステップで状態変化する系を与える[1-5]。また、セルラー・オートマトンには、空間の広がりに応じて1次元、2次元、さらに3次元のセルラー・オートマトンがある。

(2) セルラー・オートマトンの例

初期値(0 1 0 0 1 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 0)でセルラー・オートマトンのルール30(左近傍 tの値 右近傍)→t+1の値:(1 1 1)→0,(1 1 0)→0,(1 0 1)→0,(1 0 0)→1,(0 1 1)→1,(0 1 0)→1,(0 0 1)→1,(0 0 0)→0を適用した例を図1に示す。

t=0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1
t=1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
t=2	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
t=3	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1
t=4	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0
t=5	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
t=6	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1
t=7	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1

図1 1次元セルラー・オートマトンの例

3. 磁化特性のセルラー・オートマトンモデル

(1) プライザッハモデル

2次元セルラー・オートマトンを用いてレイリーループをシミュレーションした結果を図2に示す。

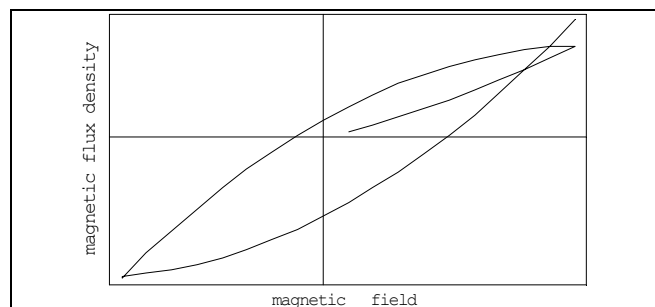


図2 2次元セルラー・オートマトンによるレイリーループ (初期磁化曲線)

図2のシミュレーションに使ったセルラー・オートマトンを図3に示す。図3では、黒色部分は+1の値、灰色部分は-1の値、白色部分は0の値を持つ。さらに図3で、黒に転移する場合はプラスに磁化、灰色に転移する場合はマイナスに磁化されると考える。また、図2は図3の個々の画像の総和を縦軸の値、横軸は磁界とする。ここで導いた図3は、プライザッハが提案したプライザッハ線図そのものである。

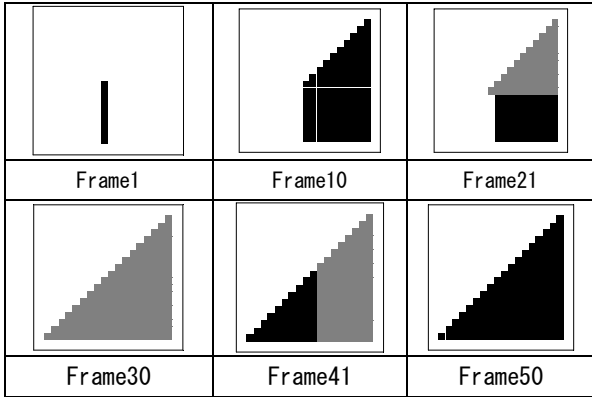


図3 セルラー・オートマトンを用いたプライザッハモデル

(2) 磁区挙動に基づく解析

実際に観察した磁区挙動画像を元に解析を行う。磁性体表面磁区挙動をビットア法によって可視化し、得られた磁区挙動画像を、磁化過程によって3過程に分類した。磁性体の磁化過程は、可逆的磁壁移動範囲、非可逆的磁壁移動範囲さらに回転磁化領域分けられる。ここでは非可逆的磁壁移動範囲について考える。非可逆的磁壁移動範囲で、正に単位磁化された部分を白色(数値1)、磁化されていない部分を黒色(数値ゼロ)として2値化した。その結果、得られた磁区画像図4は図3の白色部が空間的にランダムに位置するセルラー・オートマトン画像に対応する。図4から図3と同様にして磁化特性を描くと図5のようになる。

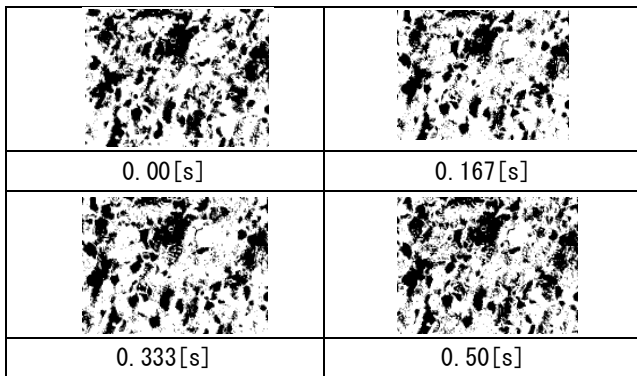


図4 非可逆的磁壁移動領域を二値化した磁区挙動画像

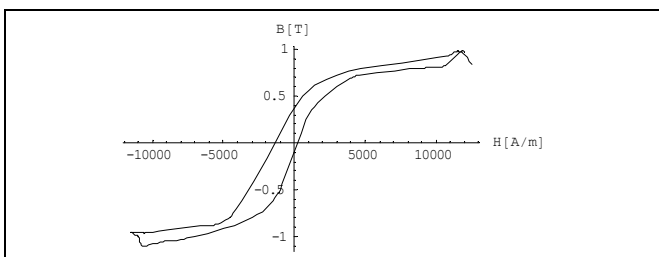


図5 非可逆的磁壁移動領域の画素値から求めた磁化特性

しかし、図4の磁区挙動画像から得られた図5の磁化特性は(1)節で述べた図2のシミュレーション結果と比較して多少の相違がある。これは、図4に示す磁区画像は本来、中間的なグレイレベルを持つにも拘わらず、単純な2値化を行ったことに起因する誤差であり、磁化曲線の反転部で顕著に誤差が観察される。ここでは、図4の2値化した磁区画像よりセルラー・オートマトンルールを導き、プライザッハモデルに適用することで、プライザッハ型セルラー・オートマトンモデルを導出する。このモデルを用いて実際に磁区挙動画像より導いた磁化特性を再現可能であることを示す。

図4の磁区画像から以下の状態遷移ルールが観察される。

- (i) 徐々に磁界を増加すると、しばらくはゆっくりと磁化される。
- (ii) その後、磁界がある閾値を越えると急激に磁化される。
- (iii) さらに、磁界の方向が反転する直前では、磁界が弱くなるためゆっくりと磁化される。

これらのセルラー・オートマトンの状態遷移ルールをプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルへ適用する。

(3) プライザッハ型セルラー・オートマトンモデル

(2)節で述べた状態遷移ルールを実行する方法の違いで2種類のプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルを考える。第一は、プライザッハモデルのセルのスイッチング(クロ: +1、グレイ: -1、白色: 0)で、(2)節で述べた状態遷移ルールを実行するモデルである。このルール、すなわち、スイッチング型のスイッチングルールを適用したモデルをプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルIとする。第二は、1セルに入る値を変数として(2)節で述べた状態遷移ルールを実行するモデルである。このルールを適用したモデルをプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルIIとする。以下にそれぞれのプライザッハ型セルラー・オートマトンの詳細を述べる。

a) プライザッハ型セルラー・オートマトンモデルI

(2)節の磁区挙動画像より磁区の移動を観察し、観察された磁区移動から決まる画素値のスイッチングをプライザッハモデルに適用する。

実際のルールを以下のように設定した。

- (i) 磁化開始後、磁化は暫く緩慢に進行する。
- (ii) ある程度磁化された後に磁化は(ある閾値をこえると)急激に進行する。
- (iii) 磁界の方向が反転する直前で、磁化は緩慢に進行する。

これらのルールを適用したプライザッハ型セルラー・オートマトンモデルIを図6に示す。

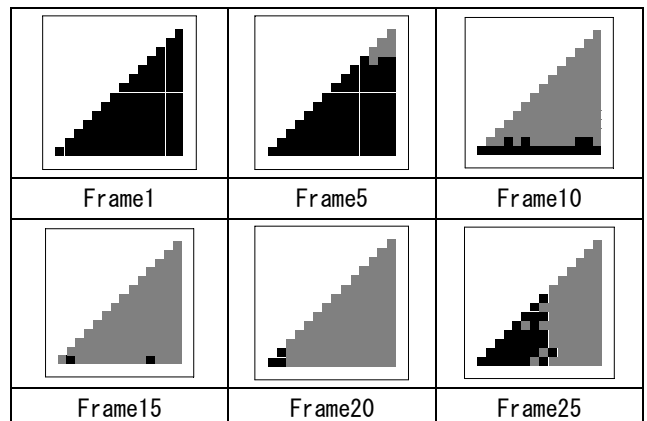


図6 プライザッハ型セルラー・オートマトンI

さらに、図6に示したプライザッハ型セルラー・オートマトンモデル I から得られる磁化特性を図7に示す。

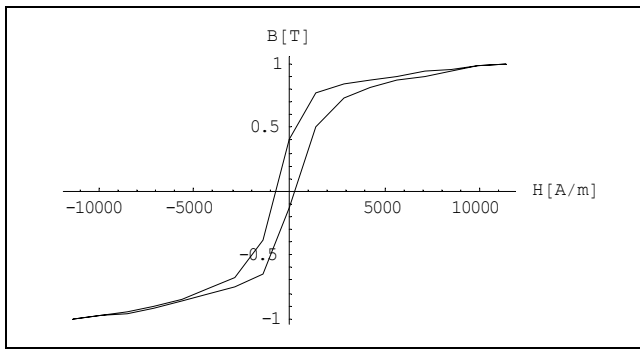


図7 プライザッハ型セルラー・オートマトン I から求めた磁化特性

b) プライザッハ型セルラー・オートマトンモデル II

プラスに磁化される場合とマイナスに磁化される場合、それぞれを3領域に分類する。さらに、それら3領域それぞれへ異なるセルラー・オートマトンルールを適用する。3領域へ分類する方法を図8に示す。それぞれの領域に対するセルラー・オートマトンルールを以下に述べる。

- (i) 白色部分：プラスに磁化される場合、各セルに入る値は右方向へ単調増加。マイナスに磁化される場合も同様に下方向へ単調増加。
- (ii) 灰色部分：プラスに磁化される場合、各セルに入る値は中心軸まで右方向へ単調増加、中心軸を通過後は右方向へ単調減少。マイナスに磁化される場合も同様に、中心軸までは下方向へ単調増加、中心軸を通過後は下方向へ単調減少。
- (iii) 黒色部分：プラスに磁化される場合、各セルに入る値は右方向へ単調減少。マイナスに磁化される場合も同様に下方向へ単調減少。

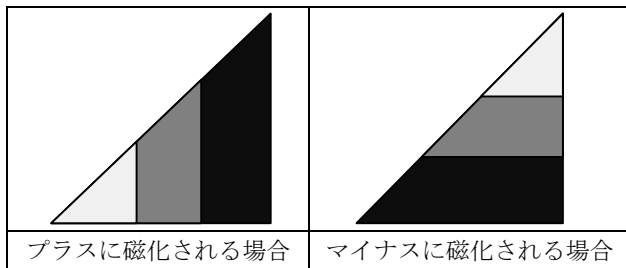


図8 プライザッハ型セルラー・オートマトン II

さらに、図8に示すプライザッハ型セルラー・オートマトンモデル II から得られる磁化特性を図9に示す。

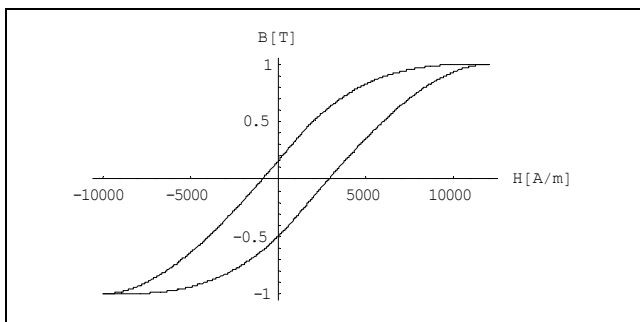


図9 プライザッハ型セルラー・オートマトン II から求めた磁化特性

4. バルクハウゼンノイズを含んだ磁化特性

(1) バルクハウゼンノイズとは

強磁性体に磁界を与えると、磁界と同じ方向を向いた磁区面積が大きくなる方向に磁壁が移動し始める。その際、材料内に、不純物、析出物、異相、欠陥、残留ひずみなどのさまざまな材質的不均一があると磁壁は滑らかに移動せず不連続に移動する。このため、磁気ノイズが発生する。この生じた磁気ノイズのことをバルクハウゼンノイズと呼ぶ。

このバルクハウゼンノイズを含む強磁性体の磁化曲線(ヒステリシスループ)は階段状になり図に示すと図8のようになる[5]。

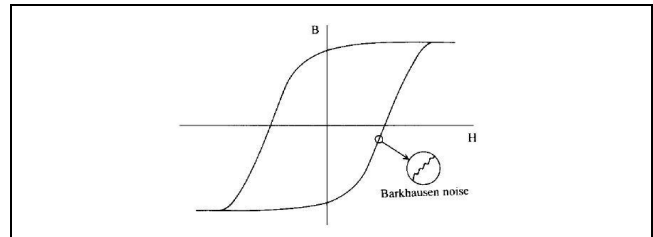


図.8 バルクハウゼンノイズ

(2) バルクハウゼンノイズの抽出

本論文で導いたプライザッハ型セルラー・オートマトンモデル II をベースとして、磁区挙動画像見られたノイズを乱数で模擬した結果を図9に示す。

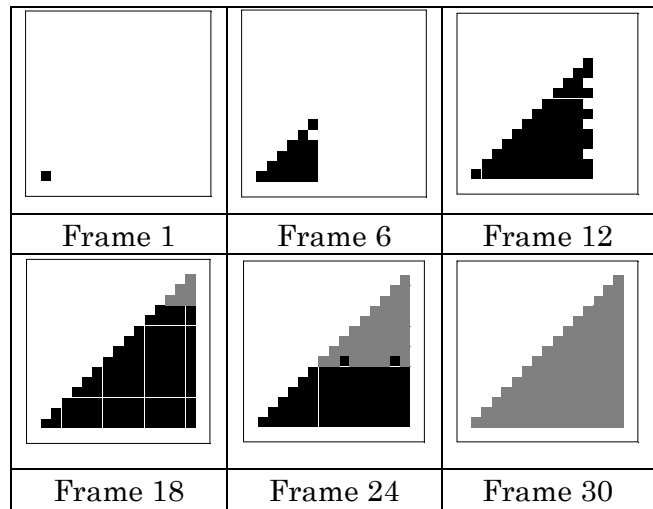


図9 バルクハウゼンノイズを乱数で模擬したセルラー・オートマトン型プライザッハモデル

さらに、図9から磁化曲線を描くと図10となる。

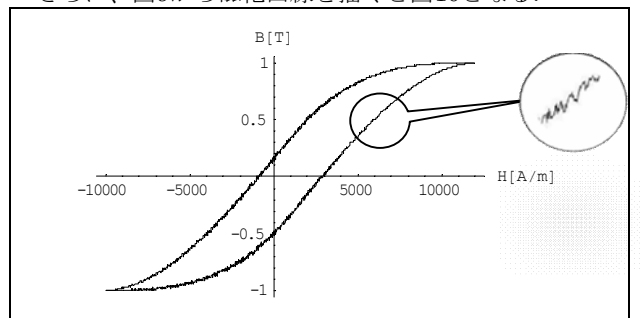


図10 バルクハウゼンノイズを乱数で模擬したセルラー・オートマトン型プライザッハモデルから求めた磁化特性

5. まとめ

本論文では、最初に2次元セルラー・オートマトンを用いて古典プライザッハ型磁化特性モデルを導きレイリーループを描いた。次に、ビッター法によって可視化された磁区挙動画像を、磁化過程の相違で可逆的磁壁移動領域、非可逆的磁壁移動領域、可逆的回転磁化領域の3領域へ分類し、分類したそれぞれの領域を画素値に応じて1かゼロへ2値化してセルラー・オートマトンモデルを導いた。第三番目に、実際の磁区挙動画像から得られたセルラー・オートマトンモデルの状態転移ルールおよび画素値の変化率からプライザッハ型モデルの状態転移ルールとセル値の変化率を導入し、実際に観測した磁化特性に対応する磁化特性の再現に成功した。最後に、実際の磁区挙動画像において観察されるノイズを乱数で模擬した状態転移ルールを考えることでバルクハウゼンノイズを含む磁化特性の再現に成功した。

以上、本論文では従来から顕著な非線形性に起因して不可能であった強磁性体の高精度なシミュレーションを可能ならしめる新しい手法として、セルラー・オートマトンモデルを提案し、その基礎的性質を明らかにすることで非線形磁界解析問題の新境地の一端を開拓した。

謝辞

本研究を進めるに当たり、齋藤兆古教授には多くのご指導、ご支援を賜りました。深く感謝いたします。

また、齋藤研究室の皆様には、公私にわたりご助言、ご支援を賜りました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 須永高志、齋藤兆古、堀井清之：ビッター法による磁性材料の鉄損分布の可視化：可視化情報学会シンポジウム(2007) c207
- 2) R.J.ゲイロード/P.R.ウェリン、(訳)荒井隆：Mathematica複雑系のシミュレーション物理学と生物学の探究
- 3) R.J.ゲイロード/西館数芽、(訳)西館数芽/西川清：Mathematica自然現象の計算モデル化セルラーオートマタ・シミュレーション
- 4) 西成活裕：セルラー・オートマトンによる複雑現象のモデル化、東京大学ホームページ
<http://www.soloton.t.u-tokyo.ac.jp/nishilab/mypapers/rikouJ.pdf>
- 5) バルクハウゼンノイズの材料評価への適用：豊田中央研究所R&Dレビューvol.27 No.4(1992.12)
- 6) 齋藤兆古、早野誠治、福島一弘、木住野泰光、津谷昇：磁化特性のモデリング(1986.MGA-86-109)
- 7) 須永高志：ビッター法による可視化磁区画像に関する考察～磁性体の1/fゆらぎと鉄損分布の可視化～、法政大学学術機関リポジトリ022 修士論文
- 8) 市川惇信：複雑系の科学
- 9) 強磁性体の磁化特性：岡山理科大学ホームページ
http://www.ous.ac.jp/DAS/phys/class/exp1/pdf/Ferro_magnetism.pdf
- 10) 宮坂総、齋藤兆古、堀井清之：セルオートマトンによる磁化特性の可視化 - 複雑系の物理とプライザッハモデル - (可視化情報Vol.28 Suppl.No.1 2008年7月 P01-004)
- 11) 宮坂総、齋藤兆古：セルラー・オートマトンによる磁化特性の表現(第51回自動制御連合講演会2008年11月22日、23日214、山形大学工学部)

電流分布の赤外線による可視化とその応用

Visualization of Current Distributions by Infrared Imaging and Its Application

鈴木剛

Goh SUZUKI

指導教員 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程

In order to realize the reliable nondestructive inspection systems, many infrared image sensor systems are developed and utilized because of their high visual capability. Recently, nuclear electric power plant is increasing its usefulness not warm up earth atmosphere accompanying with human life activities. We are now developing to enhance an infrared inspecting system to carry out the condition based maintenance methodology mainly for nuclear electric power plant use. At first, this paper clarifies a relationship between the pixel value constructing infrared image and absolute temperature even though automatic gain control function equipped in infrared CCD camera is activating to get the highest contrast image. Second we demonstrate the absolute temperature visualization when heating the targets by eddy currents. This makes it possible to clarify the versatile capability of our scheme for various condition based maintenance applications.

Key Words : *Infrared image, Nondestructive testing, induction heating*

1. 序論

映像情報による診断は、医学の世界で広汎に用いられているように、極めて具体的な状態把握を可能にする。たとえば言語の異なる民族間でも映像情報を用いることで意思疎通が可能となる。このように、人間の視覚情報処理は全地球人類共通の強力な知的機能である。人間は外部から得る情報のなかで80パーセント以上を視覚から取り入れている[1]。

近年、商品の品質検査・管理のために、赤外線カメラを用いた非破壊検査技術が広範に用いられている[2-4]。この背景として、赤外線カメラの広汎な普及と監視技術の高度化が挙げられる。

本研究は磁性体を含むあらゆる種類の金属材料を検査対象とする第2世代赤外線非破壊検査として、コンピュータを前提とする画像処理技術、すなわち、画像認識・識別・監視技術を含めた赤外線画像情報による知的非破壊検査・監視技術の開発を目指すものである。

知的非破壊検査・監視技術開発の基幹技術として、本論文では赤外線カメラを用いた“基準温度同時撮影法”を提唱する[4]。

本手法は検査対象である金属の過渡温度上昇分布動画を赤外線ビデオカメラによって得られた熱動画から

厳密に抽出可能とし、金属中の欠損やシステム欠陥箇所、また非金属中に混入した金属片を可視化する。

提唱する手法の検査速度はECTに比較して低下するが、被検査対象である金属の材質に依存せず、連続監視を可能とする高度なCBM(Condition Based Maintenance)技術開発の一方法へ繋がると考える。

2. 基準温度同時撮影法

本実験において使用した赤外線カメラは「三菱サーマルイメージャ(形式IR-SC1 三菱電機株式会社)」である。

赤外線カメラで撮影された画像は、対象物の温度分布をモノクロ濃淡情報として表示するものであり、温度の高い部分を白色、温度が低い部分を黒色で可視化する。本研究では赤外線ビデオカメラで撮影した赤外線可視化動画を絶対温度分布動画へ変換することを基幹技術とする。赤外線動画から絶対温度分布動画への変換で最も問題となるのが、殆んど全ての赤外線ビデオカメラに組み込まれているAGC(Automatic Gain Control)である。AGCとは赤外線カメラの感度レンジを撮影対象の温度分布中で最も支配的な温度に設定し、ダイナミックレンジを自動制御する機能である。この機能は、感度のダイナミックレンジが限られた赤外線CCDを用いて広範囲な温度幅の撮影

を高コントラストで可能とし、赤外線カメラの適用範囲をより広汎な温度へ対応可能とする。換言すれば赤外線カメラに AGC が備わっていない場合、温度感知範囲が限定されるため、不測の温度に対する熱画像の撮影が困難となる。

しかし、AGC 機能を持つ赤外線カメラはダイナミックレンジを自動制御するために、相対的な温度分布を把握するには極めて有効であるが、絶対的な温度分布画像を撮影不可能とする。

可動部分や動力源を含むシステムにおいては、相対的な温度分布よりも遙かに絶対的な温度分布が有意義である。これは、多くの機器が特定の許容絶対温度内で正常に機能すべく設計されていることから自明である。

以上の事より、大多数の AGC 機能を利用した赤外線可視化画像から、各種機器の適正動作温度を前提とする高精度連続監視システム構築は困難である。

また、赤外線カメラを用いて撮影された熱画像は対象の赤外線反射率に依存する。すなわち、対象の赤外線反射率が厳密に既知で無い限り厳密な熱画像・温度画像は得られない。

AGC と赤外線反射率問題を解決する一方法として、本論文では、赤外線画像中に既知の異なる温度を持つ複数の温度基準画像を、被温度測定対象と同時に撮影し、既知温度を有する複数個の画像を構成するそれぞれの画素値とそれらの温度間を用いて被温度測定対象の絶対温度を測定する“基準温度同時撮影法”を提唱する[2-4]。さらに、この基準温度同時撮影法と誘導加熱を併用した赤外線非破壊検査の幾つかの例を示す。

図 1 は、5 種類の異なる温度のお湯を満たしたコップの赤外線画像である。

それぞれのお湯の温度は、上段左のお湯が最も高温で 46.4、上段中央が 29.0、上段右が 25.2 である。さらに下段左は 15.7、下段右は 12.8 である。赤外線カメラの AGC 機能が有効に機能している為、高温から低温へ至るコップのお湯が最大コントラストで可視化され、目視においてもそれぞれの相対的な温度関係が極めて把握しやすい。

次に図 1 の赤外線画像における 5 種類のお湯部分を構成する画素値を吟味する。それぞれ、高温から順に、上段は 180、101、87 さらに下段は 52、43 なる画素値である。これらの画素値と絶対温度を比較すれば、単純な比例関係ではないことが判る。

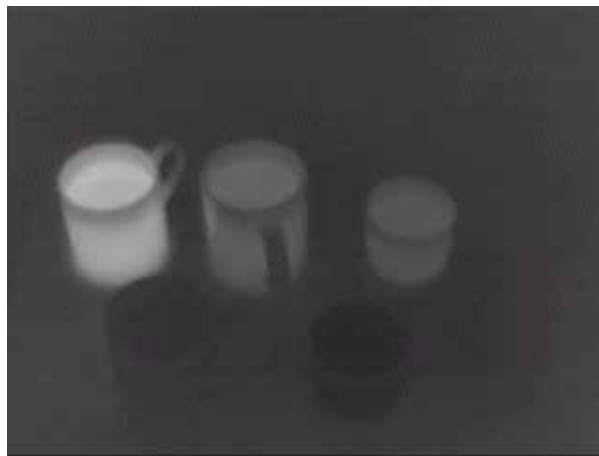


図 1 温度の異なるお湯の赤外線画像

多くの自然科学の問題では、温度上昇などの拡散現象は時間・空間に対しては指数関数的に変化する。このため、ここでは赤外線画像を構成する画素値と絶対温度の関係も指数関数的に関係すると仮定し、図 2 に示すように両者を両対数グラフへプロットする。図 2 から画素値と温度が比例することが判り、明らかに両者の関係は指数関数的である。したがって、この関係を用いて画素値を温度へ換算すれば絶対温度分布の可視化画像を得ることが可能となる。

通常のデジタルカメラ用 CCD であっても、赤外線波長領域に於ける光エネルギーの入射によって電荷移動が励起されることから、赤外線 CCD と同じ機能を有する。このため、仮に通常の CCD を用いて正確な絶対温度画像が取得可能であれば、遙かに低コストで温度センシングシステムの構築が可能となる。

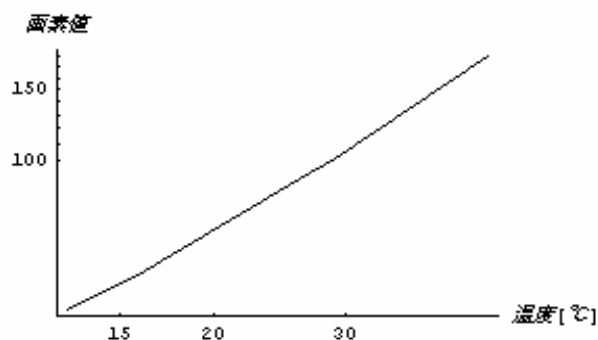


図 2 画素値と温度の関係図

3. 誘導加熱に拠る非破壊検査



図3 接合部分を含む鉄板



図4 接合部分を含む鉄板の赤外線画像

(1) 鉄板中の亀裂探査

鉄板中のクラックを模擬するため2枚の鉄板を接合した実験モデルを図3に示す。平面状スパイラル励磁コイルへ通電し図3のモデルを誘導加熱した。定常的な加熱状態を表す赤外線画像を図4に示す。図5は基準温度同時撮影法によって得られた絶対温度分布である。赤色部分が最も高温部を示し、白色に近づくにつれ低温部を示す。最も高温な部分は接合中心部分で、およそ摂氏60度を示した。この結果から鉄板接合部分は周囲に比べて摂氏30~40度高温であることがわかる。すなわち、加熱電流である渦電流密度は鉄板の接合部で最大となることがわかる。

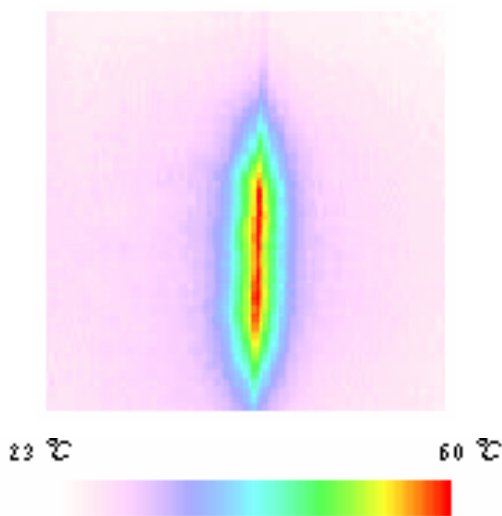


図5 接合部分を含む鉄板絶対温度分布画像

(2) 非金属材料中の金属探査

衣料品中の縫製針や魚介類中の金属網破片探査は直接人体の内外へ障害を与えるため、極めて精密で正確な検査を必要とする。

図6に示すように非金属中に混入した金属片を模擬し、二つ折りにした布間に1.0×1.0cm²の鋼板を挟んだ。図7に示す励磁コイルへ通電して生成される交流磁界中へ図6の金属片を挟んだ布を配置する。誘導加熱開始2分後に赤外線画像を撮影した。得られた赤外線画像へ基準温度同時撮影法を適用して絶対温度上昇分布を可視化した。図8は温度上昇画像を示す。



図6 1cm×1cmの鉄片を含む布画像



図7 誘導加熱に用いた励磁コイル

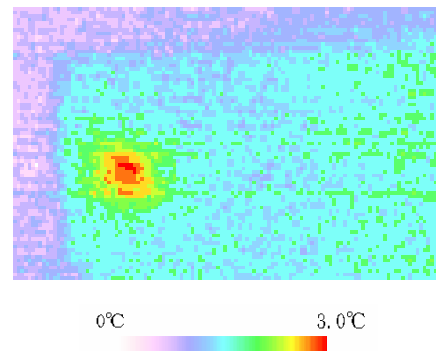


図8 鉄片を含む布の絶対温度分布画像

図9はノイズの状況を把握するために図8の温度上昇を縦軸に取った図8の3次元表示である。

図8、9より金属片が位置する部分の温度は、誘導加熱前と比較して、約3度温度上昇することが確認できる。すなわち、金属片は布の間に挟まれているため目視が不可能であるが、誘導加熱によって金属片が加熱され、結果として非金属中に混入した金属が可視化される。

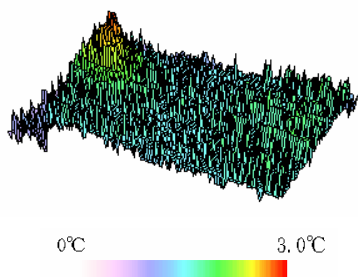


図9 鉄片を含む布絶対温度分布画像の3D表示

次に、加熱対象となる金属と温度上昇の関係について吟味する。図10はそれぞれ0.5×0.5、1.0×1.0、1.5×1.5、2.0×2.0、2.5×2.5、3.0×3.0cm²の6種類の金属片を示す。これらの金属片を前項と同様に、それぞれを布に挟んだ状態で誘導加熱を行い絶対温度上昇分布画像を基準温度同時撮影法によって得た。



図10 表面積の異なる、6種類の金属片

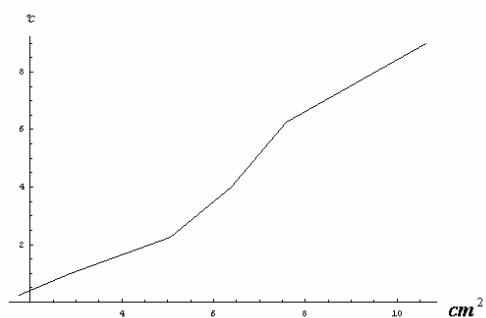


図11 温度と金属片の表面積の関係図

6種類の金属片において、それぞれの最高温度上昇は、摂氏1.76、2.95、5.66、6.39、7.59、10.63であった。金属片の表面積と温度上昇の関係を図11に示す。図10、11の比較から、以下のことがわかる。

- I. 同じ条件下で誘導加熱を行った場合、励磁コイル面と平行な加熱対象金属の表面積が大きいほど発熱量が大きい。
- II. 最大温度上昇値から金属片の励磁コイルに平行な面の相対的な寸法の概略が把握できる。

4 結論

本論文では、赤外線 CCD カメラを用いて絶対温度測定を可能とする一方法として“基準温度同時撮影法”を提唱し、その有効性を検証した。その結果、赤外線カメラを用いた絶対温度状態監視システム構築の一端が開けた。

謝辞:本研究を進めるに当たり、齋藤兆古教授、早野誠治元教授には多くのご指導、ご支援を賜りました。深く感謝致します。

また、齋藤兆古研究室の皆様、公私にわたりご助言、ご支援を賜りました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 中島 龍興、近田 玲子、面出 薫、”照明デザイン入門”、彰国社(1955)
- 2) 鈴木剛、齋藤兆古、堀井清之、”過渡熱伝達分布測定による金属欠損の可視化”、第35回可視化情報シンポジウム、可視化情報 C211、Vol.27、Suppl. No.1 (2007年7月)
- 3) 鈴木 剛、齋藤 兆古、堀井 清之、”電気抵抗の赤外線画像による可視化”、第36回可視化情報シンポジウム、可視化情報 P01-001、Vol. 28、Suppl. No.1 (2008年7月)
- 4) 鈴木 剛、齋藤 兆古、”電流分布の赤外線による可視化とその応用”、第17回 MAGDA コンフェレンス in 日立 (2008.11.20-21)

鉄共振現象に関する考察

Study of Ferroresonance phenomenon

松尾 佳祐

Keisuke Matsuo

指導教員 齋藤兆古

法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程

This paper studies nonlinear phenomenon caused by ferromagnetic materials. To represent nonlinear properties of ferromagnetic materials used in series ferroresonance circuit, we employ a Chua-type magnetization model composed of the nonlinear parameters: permeability μ , reversible permeability μ_r , and hysteresis parameter s independently measured from the past magnetization history. By the modified backward Euler method with automatic modification, a transient analysis of this initial value problem is carried out. As a result, it is clarified that some of the magnetic energy to be iron loss is recovered from magnetic materials when the ferroresonance phenomenon is occurring. This energy may be considered as a reason why the series ferroresonance is continuing even if a source voltage is reducing.

Key Words : Chua-type magnetization model, ferroresonance circuit

1. はじめに

磁気的結合など磁性材料の特性を積極的に利用した多彩な機能を有する電気機器が数多く開発され、実用化されている。しかし、磁性材料の持つ磁気飽和、ヒステリシス、渦電流等の特性は、時として磁性材料を用いる電気機器において、予測困難で複雑なシステム応答を示す場合がある。したがって、磁性材料を含む電磁界解析の高信頼化は、高度化する電気機器の設計に不可欠であり、予測し難いシステム応答の解明に重要な役割を果たす。このような現状と共に、近年のパーソナルコンピュータの演算速度の高速化は目覚しく、比較的大規模な有限要素解、非線形解析をも遂行可能としつつある。

磁気ヒステリシスを表現するためにさまざまな磁化特性モデルが提案されているが、その大半は過去の磁気履歴や物理的要因、例えば、残留磁気、残留応力等によって影響を受けるパラメータを用いている。このため、履歴特性を表現するパラメータそのものが履歴を含むことに起因して、再現される履歴現象は限定されることとなる。磁性材料を含む電磁界解析のキーは、材料の特性を表現する磁化特性モデル、すなわち構成方程式を導出し、Maxwell の方程式を解くことに帰する。従来から早野・齋藤らが提案する Chua 型磁化特性モデルに関し、強磁性体特有の現象であるヒステリシス、磁気余効、鉄共振現象などのシミュレーションおよびその実験的検証に成功し、電気機器設計に有用な鉄損、周波数特性、表皮深

さに関する報告がなされている[1,2]。さらに他の代表的磁化特性モデルとの関係も明らかにされている[1,2,3]。

本論文では、Chua 型磁化特性モデルを用いて直列鉄共振回路の共振時における磁化特性の解析を行い、鉄共振現象発現の根幹と考えられる現象を明らかにする。具体的には、Chua 型磁化特性モデルの構成方程式より導出される回路方程式を状態変数法で表現し、逐次修正型後方オイラー法を用いて過渡解析を行う[4]。その結果、磁化が磁気飽和（回転磁化領域）に達すると本来鉄損となるべき磁気エネルギーの一部が回路へ回生され、この回生エネルギーによって印加電源電圧の低減にもかかわらず共振が持続する。すなわち、鉄共振現象を喚起する磁性材料の性質を報告する。

2. Chua 型磁化特性モデル

鉄共振回路の過渡解析を行うために、式(1)で表現される Chua 型磁化特性モデルの構成方程式を用いる。

$$H = \frac{1}{\mu} B + \frac{1}{s} \left(\frac{dB}{dt} - \mu_r \frac{dH}{dt} \right) \quad (1)$$

式(1)の右辺第1項は静的な磁区状態を表し、第2項は動的な磁区状態を表す。ここで、 H 、 B はそれぞれの磁界の強さ H (A/m)と磁束密度 B (T)を表し、 μ 、 μ_r 、 s はChua型磁化特性モデルのパラメータであり、それぞれ透磁率(H/m)、可逆透磁率(H/m)、ヒステリシス係数(Ω /m)である。

この3パラメータは、過去の履歴や駆動周波数に依存しない方法で導出、測定されることが磁化特性モデル構成に関する最大のキーポイントである[5]。

図 1-3 は本論文で用いるパラメータ μ , μ_r , s を与える曲線である。

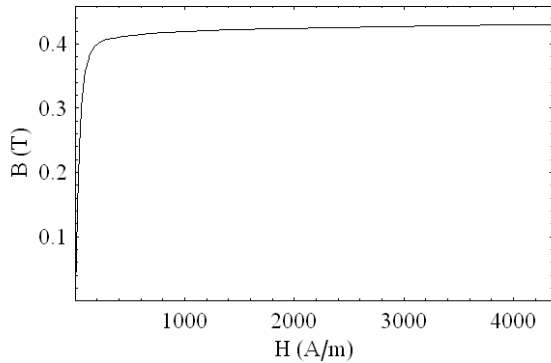


図 1 透磁率 μ を与える曲線(TDK H5A)

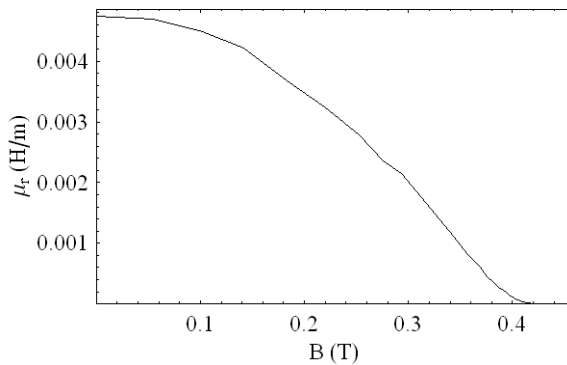


図 2 可逆透磁率 μ_r (TDK H5A)

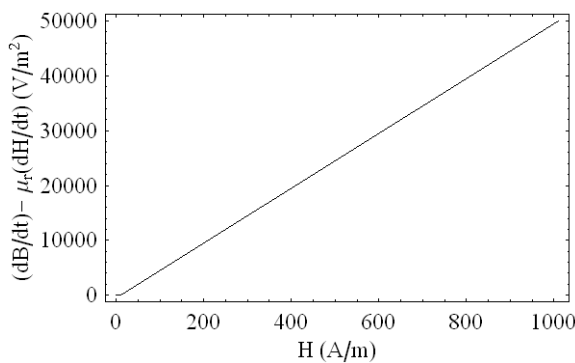


図 3 ヒステリシス係数 s を与える曲線(TDK H5A)

透磁率 μ は各点において交流消磁をして得られる理想磁化曲線から決定する。飽和値に達する周期的磁化状態のヒステリシスループにおいて、同一磁束密度における上昇曲線と下降曲線それぞれの磁界の平均値をトレースすると近似理想磁化曲線が得られることが知られている。この理想磁化曲線は過去の履歴を交流消磁して得られるから過去の履歴に無関係である。

可逆透磁率 μ_r もまた、過去の履歴に依存しないパラメータでなければならない。よって、過去の履歴に無関係

である理想磁化曲線測定時におけるマイナーループ、すなわち理想磁化曲線測定時に得られる増分透磁率を用いる。この増分透磁率を測定する場合、渦電流や表皮効果の影響を削減するため、極めて低周波の励磁電圧を用いて測定する必要がある。

ヒステリシス係数 s は、磁束密度 $B=0$ 時のサーチコイル誘起電圧より dB/dt と電流波形より dH/dt を求めることで決定できる。磁束密度 $B=0$ 時の磁界 H は、保磁力 H_c に対応するから式(1)よりヒステリシス係数 s は、

$$s = \frac{1}{H_c} \left(\frac{dB}{dt} - \mu_r \frac{dH}{dt} \right) \quad (2)$$

となる。結果として、励磁電圧を変化させ、磁束密度 $B=0$ 時の dB/dt と dH/dt より、ヒステリシス係数 s が求まる。また、可逆透磁率 μ_r は $B=0$ のとき最大となるため、ヒステリシス係数を求める式(2)で使用する値は最大可逆透磁率である。

3. 鉄共振回路の解析

(1) 直列鉄共振回路

本論文の解析対象は図 4 に示すように $R-L-C$ 直列回路を構成するものである。

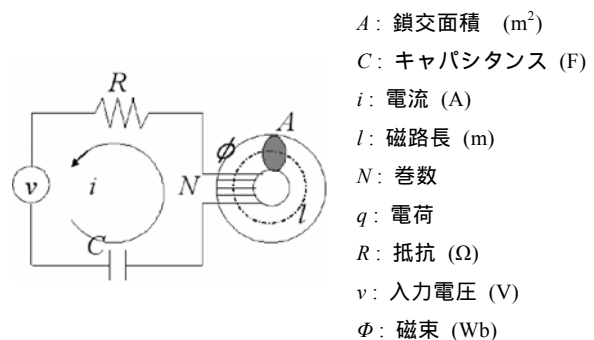


図 4 直列鉄共振回路

式(1)の構成方程式を、図 4 に示すトロイダルコアの磁路 l に沿って線積分することで、電流 i と磁束 Φ の関係式(4)を得る。

$$\int_0^l H + \frac{\mu_r}{s} \frac{dH}{dt} dl = \int_0^l \frac{1}{\mu} B + \frac{1}{s} \frac{dB}{dt} dl \quad (3)$$

$$Ni + \frac{\mu_r}{s} N \frac{di}{dt} = \frac{l}{\mu A} \phi + \frac{l}{sA} \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

図 4 に示す回路より、電流 i とその時間微分 di/dt は以下の式(5)、(6)でそれぞれ与えられる。

$$i = (v - N \frac{d\phi}{dt} - V_c) / R \quad (5)$$

$$\frac{di}{dt} = (\frac{dv}{dt} - N \frac{d^2\phi}{dt^2} - \frac{dV_c}{dt}) / R \quad (6)$$

式(5) (6)を電流 i とその時間微分 di/dt を磁束 ϕ の関係式(4)に代入し、解くべき連立微分方程式(7), (8)を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\mu_r N^2}{s R} \frac{d^2\phi}{dt^2} = & -\frac{l}{\mu A} \phi \\ & -\left(\frac{N^2}{R} + \frac{l}{sA} + \frac{\mu_r N^2}{s CR^2}\right) \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & +\left(-\frac{N}{R} + \frac{\mu_r N}{s CR^2}\right) V_c + \left(1 - \frac{\mu_r N}{s CR^2}\right) v + \frac{\mu_r N}{s R} \frac{dv}{dt} \\ \frac{di}{dt} = & \left(\frac{dv}{dt} - N \frac{d^2\phi}{dt^2} - \frac{dV_c}{dt}\right) / R \end{aligned} \quad (8)$$

式(7), (8)から式(9)の状態変数方程式が導かれる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi \\ \frac{d\phi}{dt} \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ \frac{d\phi}{dt} \\ V_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)の非線形状態方程式へ時間刻み幅自動逐次修正型後方オイラー法を適用して解く[6,7]。

(2) 解析結果

表1 直列鉄共振回路パラメータ

μ : 透磁率 (H/m)	図1
μ_r : 可逆透磁率(H/m)	図2
s : ヒステリシス係数 (Ω/m)	図3
A : 鎖交面積 (m^2)	48.0×10^{-6}
C : キャパシタンス (F)	1.0×10^{-6}
l : 磁路長 (m)	75.4×10^{-3}
N : 巻数	100
R : 抵抗 (Ω)	1.0
r : 内部抵抗 (Ω)	0.4
ε : limit of discrepancy	1.0×10^{-5}

表1に示す定数を用いて直列鉄共振回路の過渡解析を行った。ここでコンデンサの容量 C の決定法について述べる。鉄共振現象は LC 共振に基づいているから共振する条件を勘案しなければならない。

本論文においては、以下の手順でコンデンサ容量 C を

決定した。

- 1) 飽和領域に入る直前近傍の透磁率 μ を選ぶ
- 2) 1)で決定した透磁率 μ に対する線形回路におけるインダクタンス L を求める
- 3) 共振条件と励磁周波数からコンデンサ容量を決定する

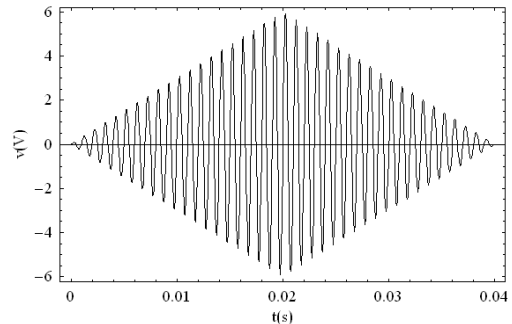
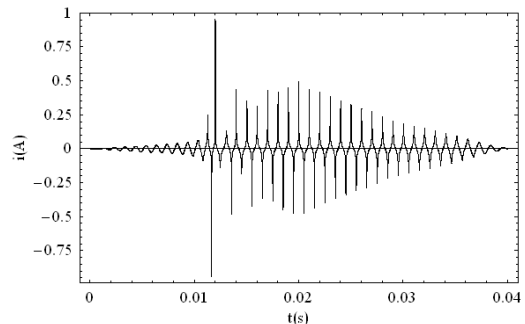
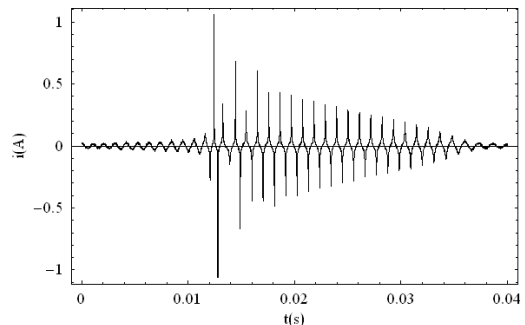


図5 入力電圧 v



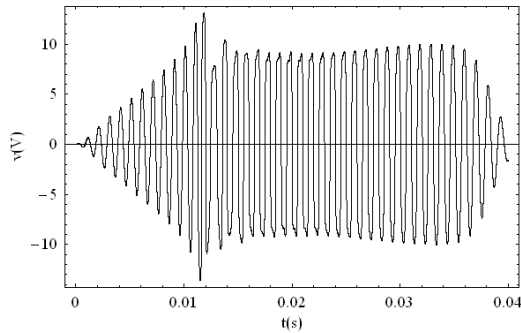
(a) 計算値



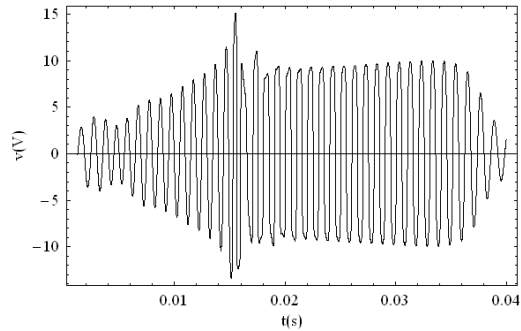
(b) 実験値

図6 電流 i の計算値と実験値

図5-8は、それぞれ入力となる駆動電圧 v 、コイルに流れる電流 i 、コイルの端子電圧 V_L 、磁束密度 B の時間波形の計算結果である。入力電圧は、周波数 1 kHz一定とし、振幅を 0Vから 6Vまで徐々に増加させ、その後 0Vまで減少させた波形である。

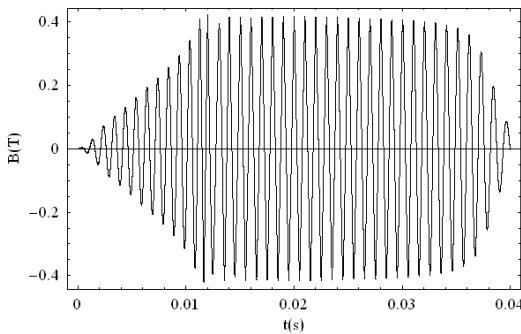


(a) 計算値

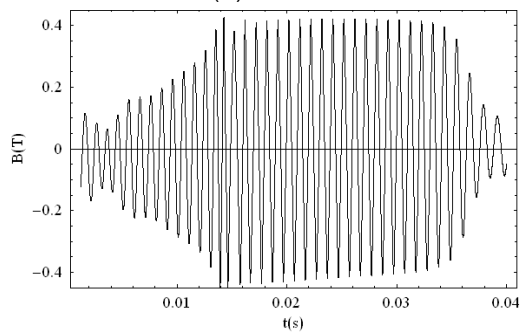


(b) 実験値

図7 端子電圧 V_L の計算値と実験値



(a) 計算値

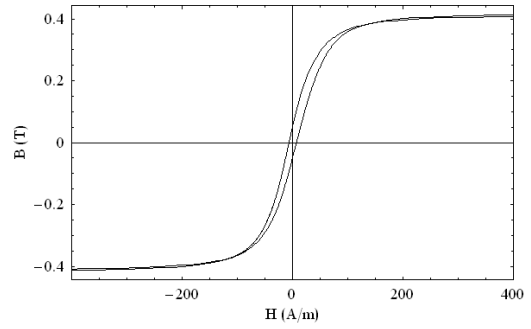


(b) 実験値

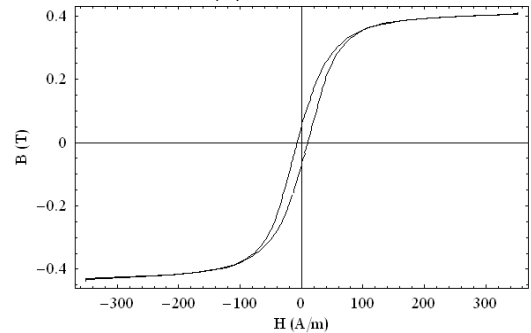
図8 磁束密度 B の計算値と実験値

図6, 7より, $t=0.013s$ 付近で鉄共振現象が起こり, 電流は急激に増加し, コイルの端子電圧はほぼ一定値を取っていることがわかる. また図8より, 鉄共振現象は, 磁気飽和領域に達する近傍で開始し, 飽和領域に達しなくなると終了していることがわかる. 図6-8の計算値と実験値は比較するとよく一致していることがわかる. また, 鉄共振現象は, 理想磁化曲線から計算される最大透

磁率近傍で開始されるということからもこの計算結果は妥当と考えられる.



(a) 計算値

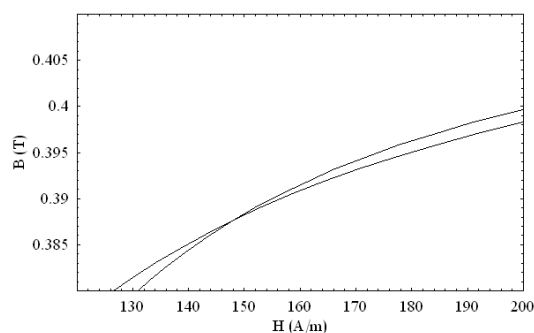


(b) 実験値

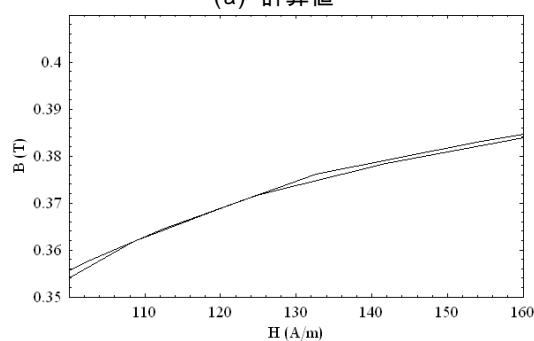
図9 ヒステリシスループ

図9に, 鉄共振中のヒステリシスループの計算値と実験値を示す. また図10は, 磁気飽和(回転磁化)領域に至る部分を拡大した図である. これらの結果から磁気飽和領域に達すると, 上昇曲線と下降曲線が反転したヒステリシスループが描かれることがわかる.

一般に, ヒステリシスループが囲む面積は単位体積あたりの鉄損に等しい. 上下反転したヒステリシスループは鉄損となるべき磁気エネルギーの一部が系へ回生されることを意味する. よって, 磁性体が磁化され, 磁気飽和領域へ達すると, 鉄損となるべきエネルギーの一部が系へ回生され鉄共振が開始する. そして飽和領域に達しなくなると, 系に回生されるエネルギーがなくなり鉄共振が終了する. 直列鉄共振現象は, 入力電圧が減少しているにも拘わらず出力電流が一定値を維持する特徴を持っている. これは, 磁性体の鉄損となるべきエネルギーの一部が回生し, 入力エネルギーへ重畳することで共振の持続がなされると解釈される.



(a) 計算値



(b) 実験値

図9 ヒステリシスループ (飽和領域)

4. まとめ

本論文では, Chua型磁化特性モデルを用いて, 直列鉄共振現象の過渡解析を行い, 鉄共振中の磁化特性の解析を行った.

その結果, 磁化が飽和領域まで達すると鉄損となるべき磁気エネルギーの一部が回路へ回生し, 結果として電源電圧の低下にも拘わらず共振持続を促し, 鉄共振現象を持続させると解釈可能であることを明らかにした.

謝辞: 本研究の発端となった田中祐司氏の修士論文およびオリジナルコードを提供していただいた, 田中, 遠藤両氏に深く感謝いたします.

参考文献

- 1)早野誠治:磁性材料の構成方程式に関する研究, 法政大学学位論文, 1995-1
- 2)Y. Saito, M. Namiki, and S. Hayano : A Magnetization Model for Computational Magnetodynamics, J. Appl. Phys., Vol.69, No.8, pp4614-4616, 1991-4
- 3)Y. Saito, S. Hayano, and Y. Sakaki ; A Parameter Representing Eddy Current Loss of Soft Magnetic Materials and Its Constitutive Equation, J. Appl. Phys., Vol.64, No.10, pp5684-5686 1988-11
- 4)R. S. Varger : Matrix Iterative Analysis, Prentice-Hall, NJ, 1962
- 5)遠藤久, 早野誠治, 齋藤兆古 : 可飽和インダクタンスを含む回路解析に関する考察, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-02-139, 2002-10
- 6)田中祐司, 齋藤兆古 : 磁化特性のモデリングと電気機器可視化解析への応用, 第15回MAGDAコンファレンス in 桐生 講演論文集, pp104-109, 2006-11
- 7)松尾佳祐, 齋藤兆古 : 鉄共振現象における磁化特性の可視化, 第17回MAGDAコンファレンス in 日立 講演論文集, pp459-462, 2008-11