

博士論文

金属構造物の低周波磁気非破壊検査方法の研究開発

二〇一七年三月

宋楠楠

博士論文

金属構造物の低周波磁気非破壊検査方法の研究開発

2017 年 3 月

宋 楠楠

岡山大学大学院

自然科学研究科

要約

近年、磁気的非破壊検査法を用いて金属工業製品やインフラを対象とした内部探傷検査が広く注目されている。しかし、よく使われる磁気的非破壊検査計法である渦電流探傷検査法と漏洩磁束検査法については、実際の検査の場面では検出結果の安定性、計測システムの簡便性など多くの課題がある。本研究では、新たな検査方法として低周波磁場印加を用いた非破壊検査方法の開発を行った。ここで、低周波磁気を印加したときの各種対象の磁気応答を計測するためのシステムの最適化を行った。また提案したシステムの有効性を確認するため、有限要素法を用いてシミュレーションを行い、新たな方法の妥当性を理論的に議論した後、提案した計測システムを製作し実測を行った。

対象としては磁性体である鋼板のスポット溶接の接合強度判定、非磁性体であるアルミや磁性体である鋼板の表面のみならず内部き裂検出の可能性について検討を行った。

鋼板のスポット溶接の良品判定を、従来超音波検査でしかできなかったものを新たに開発した低周波渦電流検査法で判定ができないか試みた。ここで、新たな解析方法として位相変化を 3 次元的に画像化することを行い、内部スリットの検出、傷の位置、サイズ、深さの判断ができる内部構造の画像化に成功した。この結果、スポット溶接内部のナゲット部分の品質評価ができ、スポット溶接の接合強度判定が可能であることを初めて報告した。

また、厚い非強磁性体金属板のアルミ板に対しては、磁気センサを用いた低周波渦電流法を用いた、検出磁場の強度と位相を評価パラメータとして利用し、表面のみならず内部スリットの検出、傷の位置、サイズ、深さの判断ができようになったとともに、傷内部構造の画像化に成功した。

強磁性体金属板の場合、表皮効果が強いため、渦電流探傷検査では磁性体としての磁化信号が無視できなくなるため、新たな方法として磁気センサを用いた漏洩磁束検査法を開発して信号解析した。従来の漏洩磁束検査法を用いて鋼板を計測する場合、対象物を磁化飽和させる必要があったため、新たな装置では対象物を磁化飽和させず、微小信号を磁気センサで検出する漏洩磁束検査法を提

案した。この方法により鋼板の表面のみならず内部の傷の検出、とその位置、サイズ、深さの判断ができるようになった。

本研究により、低周波磁気を用いた新たな渦電流探傷法と漏洩磁束検査システムを開発し、従来表面しか検査できなかったものを、内部まで検査可能とすることができ、その有効性を明らかにした。

目次

第1章 序論	1
<1.1> 研究背景と非破壊検査	1
<1.2> 研究の目的	5
<1.3> 本論文の構成	6
第2章 有限要素法 (FEM) によるシミュレーション	9
<2.1> 有限要素法の概要と発展の歴史	9
<2.2> 有限要素法の各種三次元有限要素	10
第3章 渦電流探傷検査システム	13
<3.1> はじめに	14
<3.2> 渦電流探傷検査法	14
<3.3> 表皮効果	16
<3.4> リフトオフの影響	16
<3.5> 渦電流探傷検査システム	18
<3.6> シミュレーションによる測定システムの評価	19
<3.7> シミュレーション結果と考察	20
<3.8> まとめ	30
第4章 渦電流検査による三層スポット溶接内部構造可視化評価	31
<4.1> はじめに	31
<4.2> スポット溶接	32
<4.3> 測定試料	34
<4.4> 測定結果と考察	35
<4.5> 内部構造三次元化	43
<4.6> まとめ	47
第5章 渦電流探傷法を用いた金属内部スリット傷の測定	49
<5.1> はじめ	50
<5.2> 磁気非破壊検査用磁気センサ	51
<5.3> 測定サンプル	58

<5.5> 厚い金属板を対象とする場合のシミュレーション設計と計算結果	61
<5.5.1> 厚い金属板を対象とする場合のシミュレーション結果	61
<5.5.2> 厚い強磁性金属板を対象とする場合のシミュレーション結果	63
<5.6> アルミ板の測定結果	64
<5.7> まとめ	67
第6章 漏洩磁束検査法を用いた鋼板内部スリット傷の測定	68
<6.1> はじめに	69
<6.2> 漏洩磁束探傷検査法	70
<6.3> 小信号漏洩磁束検査システム	71
<6.4> 有限要素法による小信号漏洩磁束検査妥当性の検討	73
<6.5> 開発した漏洩磁束探傷システムを用いた測定結果と考察	78
<6.6> まとめ	80
第7章 結論	82
謝辞	86
参考文献	87
業績	95

第1章 序論

<1.1> 研究背景と非破壊検査

金属は船や橋のような巨大なものから、精巧なエンジン部品、さらには日用品など様々な形で使用されており、現代社会において重要な材料の1つである。金属材料の健全性は、金属で生産された製品、建造物などの健全性、安全性を決める重要な要因の1つである。金属材料で構成されるインフラの安全性検査には、非破壊検査が利用されているが、検査精度が低く、傷を高精度に検出できない場合もある。また、インフラの利用環境によっては、検査装置が適用できず、検査が困難な場合もある。また、自動車ボディなどの金属を溶接した部分の品質検査には破壊検査が広く使われており、コストが高くて、全数の品質を確保する事が難しい。このような状況から、迅速で精度高く利便性の高い非破壊検査法は、工業製品の品質を保障し、社会の安全性を考えるうえで非常に重要な課題である。

非破壊検査(NDT: Non Destructive Testing)とは、検査対象を引っ張ることによる分離及び力を加えることによる変形で破壊することなく内部または表面の欠陥の有無及び位置、大きさ、形状を検出する手法であり、素材や製品、構造物の保守管理や品質保証の手段として用いられる方法である⁽¹⁾⁽²⁾。製品や構造物に欠陥が存在する場合、品質の低下や事故にもつながる可能性があるため、これらの検出を目的としている非破壊検査は、現在の社会において必要不可欠となっている。さらに非破壊検査法には様々な種類があり、検査対象の材質や形状によって各検査法の特徴を活かした測定を選択することができる。非破壊検査の種類としては、目視検査(VT: Visual Testing)、放射線透過検査(RT: Radiographic Testing)、超音波探傷検査(UT: Ultrasonic Testing)、浸透探傷検査(PT: Penetrant Testing)、磁気探傷検査(MT: Magnetic Testing)、ひずみ測定(ST: Stress Testing)、アコースティック・エミッション(AE: Acoustic Emission)、赤外線検査法(IT: Infrared Testing)等がある⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これらの検査方法は、現在使われている多くの非破壊検査の中でも、経済性、利便性、可搬性に優れていることから、

一般的に利用されている検査方法である。以下にこれらの検査法の原理と特徴を示す。

1) 目視検査(VT: Visual Testing)

人間の目をセンサとし、直接、あるいは鏡やファイバースコープなどの補助機器を用いて間接的に検査対象を観察し評価する。最もシンプルな非破壊試験方法である。状況に応じた柔軟な対応が可能であり、迅速に測定が可能で経済的にも優れているが、検査を行う人間の視力などの自然条件により結果にバラツキが生じるなど確実性が低い。また、目視可能な欠陥に限られる。

2) 放射線透過検査(RT: Radiographic Testing)

放射線が物質を透過する性質を用い、検査対象を透過した後の放射線をフィルムに投影し、強度変化を調べることで検査を行う。信頼性が高く、内部構造の検査も可能、欠陥の形状、大きさ、分布状態を詳しく測定できる。放射線透過検査は工業や医療などの広い分野で、パイプライン、金属溶接部の健全性検査、厚い鋼板、生物の骨関節など⁽⁵⁻¹⁰⁾、様々な材料を検査するために使用されている。近年、放射線透過検査に応用できる自動化コントロールシステムの研究開発も盛んであり、将来的にはより広い領域で適用が可能と見られる。ただし、放射線透過検査は危険な放射線を取り扱うため使用環境が限られ、検査を実施する作業員の知識に対する要求も高い。

3) 超音波探傷検査(UT: Ultrasonic Testing)

超音波は主に医療分野で広く利用されている。また、近年は金属材料などを対象として、レーザーを用いて超音波を励起、計測するレーザー超音波計測も開発されている。超音波の高い指向性を利用し、欠陥による超音波の反射または透過減衰の変化を用いて欠陥を検出する。検出精度が高く、欠陥の寸法や形状⁽¹¹⁾を推定できる。超音波探傷検査は広い分野で使われており、チタン管、CFRP材料、ステンレス鋼板、金属溶接部、厚い鋼板、木材の内部傷など⁽¹²⁻¹⁸⁾、様々な材料と工業製品を検査するために使用されている。ただし、検査を行うためには対象との直接接触が必要であり、測定結果の正確な判別には熟練者を必要

とする。

4) 浸透探傷検査(PT: Penetrant Testing)

検査対象に浸透液を浸透させ一定時間経過後、現像液を用い欠陥中の浸透液を吸い出すことで検査を行う。材質に関係なく検査することができ、欠陥の形状を精密に測定することができる。ただし、表面に開口を有する欠陥しか検出できず、検査に時間がかかる。近年は航空機や高真空部などに応用するための研究が行われている⁽¹⁹⁻²⁰⁾。

5) 磁気探傷検査(MT: Magnetic Testing)

磁気現象を利用する非破壊検査法である。その原理に応じて様々な手法が存在する、その中で、最も普及しているのは渦電流探傷と漏洩磁束探傷の2つの方法がある⁽²¹⁻³²⁾。

渦電流探傷法(ECT: Eddy Current Testing)は、交流電流を印加したコイルを導電性のある検査対象に近づけ、発生した渦電流が欠陥部で変化することを用いて欠陥を検出する。検査時間が短く、非接触で検査が可能である。さらに、取り扱いが容易で制御・自動化がしやすく記録性に優れている。工業分野では主に高周波磁場を用い表面と表面近傍の欠陥検査に用いられている。ただし、高周波の渦電流では内部欠陥の検出が難しい。

漏洩磁束探傷法(MFL: Magnetic Flux Leakage)は、磁性材料の検査を目的として発展してきたもので、対象材を強く磁化させたときに傷から発生する漏洩磁束を磁気センサによって検知する方法である。検査時間が短く、非接触で検査が可能である。ただし、対象材を完全磁化飽和させるため、強い磁場、大電流が必要となる場合がある。そのため、特定環境での実施となる。

6) ひずみ測定(ST: Stress Testing)

ひずみゲージと呼ばれるひずみを電気信号として検出するセンシングエレメントを構造物に貼付してホイートストンブリッジ回路を組み抵抗の変化を電圧の変化に変換して欠陥を検出する。定期的な測定が容易で広範囲の測定が可能である。ただし、欠陥の位置を把握することが困難である。

7) アコースティック・エミッション(AE: Acoustic Emission)

試料の亀裂の発生時や進行中に発生する振動や音波を検出し、欠陥を発見する。亀裂の発生の初期から検出が可能であり、亀裂進行中の監視用としても使用されている。ただし、高コストで電磁ノイズに弱い。

8) サーモグラフィ試験(IRT: Infrared Ray Testing)

サーモグラフィ試験は検査対象に欠陥が存在する場合、健全部と欠陥部での赤外線放射エネルギーに変化が生じる現象を利用して行われる。赤外線カメラ(サーモグラフィ)を使って、機器、設備、建築物などの表面温度分布の画像を得る非破壊非接触型の検査診断手法である。サーモグラフィ試験の応用については、医療分野に止まらず、欧米では電気設備、建築建造物の診断などを対象に広く普及が進んでいる⁽³³⁻³⁴⁾。対象物に触れずに異常の有無を手軽、正確に検査診断できる。ただし、測定対象の表面状態に大きく影響される、周囲の影響を受けやすいという欠点がある。

9) 近赤外分光法(NIRS: Near-Infrared Spectroscopy)

近赤外分光法は物質に照射した近赤外光の吸収を測定することで物質濃度を計測することができる、非破壊非接触分析法である⁽³⁵⁾。近赤外光を用いた分析は、近赤外光の透過性の高さから非破壊での分析が可能であり、近赤外域には多くの物質の吸収が現れることから多成分の同時分析が可能である。食品工業や農業分野での研究が盛んに行われており、果実の糖度や酸度、魚介類の脂肪量などの品質管理に利用され始めている⁽³⁵⁻³⁷⁾。また医学分野においても、糖尿病の臨床検査⁽³⁹⁾、脳機能⁽³⁸⁾の計測法などに応用するための研究が行われている。

上記の検査法の中で、放射線透過検査、超音波探傷検査、磁気探傷検査は工業分野において数多く用いられている。

他の非破壊検査法と比べ、磁気探傷検査法は非接触性、安全性、自動化制御が容易、コストが低いなどの特徴があるため、将来の工業生産、金属製品の健全性評価、社会インフラの安全性日常検査などに広く応用される事が期待されている。

<1.2> 研究の目的

本研究では、磁気非破壊検査法を用いて磁場を金属サンプルに印加したときの磁気応答を計測する磁気計測システムの開発と、計測データの解析により実用的な検査を行うことを目的として、金属サンプルの磁性に応じた最適な非破壊検査方法の確立を行うことについて研究を行った。また、本研究で提案した磁気計測システムを用いて、金属サンプルに磁場を印加したときの磁気応答を各周波数領域で計測し、磁気位相を用いて金属内部構造を画像化する研究を行った。

金属サンプルの磁性に応じて、渦電流探傷検査法と漏洩磁束探傷検査法のシステムを提案した。本論文の構成を述べる前に、この2つのシステム開発の目的について説明する。

渦電流検査法は交流磁場を対象金属に印加し、金属で発生した渦電流が欠陥部で変化することを用いて欠陥を検出する事である。一般的には、磁場の強度を用いて測定結果を解析する。ただし、対象物の形状、計測環境など多くの原因で検出コイルや磁気センサと対象物との距離であるリフトオフが発生する。このリフトオフにより磁場の強度が著しく減衰し、場合によっては対象物にある傷を検出できない事もある。リフトオフの影響を抑えるため、渦電流検査システムの設計や測定結果解析方法の改善が必要となる。本研究では渦電流探傷検査法で取られた磁場信号の強度だけでなく、位相を用いることでリフトオフの影響を低減して対象物の構造解析を行うことを提案した。

また、提案した渦電流探傷検査システムを用いて厚い金属板の内部傷の検出を行った。鋼材などの強磁性体を対象とする場合、磁性により表皮効果の影響が大きくなり、生成された渦電流が対象物の表面に集中し、内部欠陥による渦電流への寄与が弱くなる。これにより、渦電流探傷検査法を用いて探傷検査を行う場合、強磁性体の表面傷しか検出できず、内部傷の検出が難しい。そこで、本研究では鋼材など強磁性体を対象物とする場合、渦電流探傷検査法でなく、漏洩磁束検査法を用いて鋼板内部傷の探傷検査を検討した。

漏洩磁束探傷法は一般的に強度の強い直流磁場あるいは直流と交流磁場を併用させて、鉄鋼材を磁気飽和させて用いられている。ただし、厚い金属板を対象とする場合、対象物を完全に磁化飽和させるため大きい印加電流により強い印加磁場を発生させて対象物を磁化させる必要がある。従って、対象物を磁化させるために強磁場を発生させる大型の装置を使用する必要がある。大電流と強磁場を使用する場合、安全の確保が必要となり、漏洩磁束探傷検査は特定な環境で実施する必要がある。実用的な検査を考慮すると、漏洩磁束探傷検査法を用いて測定環境を選ばずに安全な検査を実現できる方法が必要となる。その問題を解決するため、本研究では弱い交流磁場だけで検査することを試みた。

<1.3> 本論文の構成

本研究論文は、磁場を金属サンプルに印加したときの磁気応答を計測することで、金属サンプルの磁性に応じた解析方法をまとめたものであり、8章から構成されている。次章以降の内容は次に示すとおりである。

第2章では、本研究で提案のシステム改善法の妥当性を確認するため行った有限要素法（FEM）によるシミュレーションの概要、理論について述べる。まず、FEMの基本原理を説明する。その後、FEMの応用の現状を紹介し、最後にFEMで電磁場解析を行う方法について述べる。

第3章では、渦電流探傷システムの問題点を提起し、その問題点に対する改善法の概要と特徴について述べる。まず、渦電流探傷検査法の原理を述べ、対象物の内部探傷検査を行う場合に低周波磁場を使用する基本原理、表皮効果について説明する。次に、リフトオフが渦電流探傷法へ与える影響について説明する。具体的には検出コイルやセンサと対象物の間にリフトオフが発生する場合、リフトオフの影響で磁場が減衰し、検出した磁場強度で対象物の内部構造解析ができない点である。そして、リフトオフの問題点に対する解決法として、磁場の強度だけでなく、測定した結果の位相を用いて結果解析する事を提案する。最後に、提案した位相を用いて対象物を評価する方法の妥当性を確認するためのシミュレーションモデルと計算結果を示す。シミュレーション結果を議

論する場合、まず、周波数の浸透深さを利用して対象物の内部構造可視化方法について説明する。続いて、磁場の強度と位相は対象物の透磁率変化と関連性があることを示す。最後に、磁場の強度がリフトオフの影響を受けやすく、磁場の位相が比較的リフトオフの影響を受けにくい事を示す。

第 4 章では、提案した渦電流探傷法を用いて三層スポット溶接内部構造可視化評価について述べる。まず、スポット溶接と現状のスポット溶接の健全性検査法について説明する。次に、実際に計測するために用意したサンプルを述べ、実際の計測システムを作製し、品質が異なるスポット溶接の試料を用いて実測した結果を示す。計測結果を議論する場合、まず、検出した磁場強度と位相はスポット溶接の溶接部の存在によって変わる事を示す。その後、リフトオフが検出した強度と位相へ与える影響を確認する。さらに、検出した位相を用いて、スポット溶接の品質評価が可能と確認した。最後に、スポット溶接を全面完全に検査するため、対象物を 2 次元スキャンし、内部構造を 3D 画像化した結果を示す。内部構造の 3D 画像を用いて品質評価が可能と確認した。

第 5 章では、低周波渦電流探傷検査システムを用いて、厚い金属板の内部探傷検査を行った。厚い金属板の内部傷検出が目的であるため、非常に低い周波数磁場を印加し計測する必要があるため、磁場の検出には低周波磁場にも十分な感度持つ磁気センサを使用する必要がある。本章では、まず磁気センサについて紹介する。金属の磁気特性による違いも確認するため、非磁性金属のアルミ板と強磁性金属 SS400 鋼板の二種類を試料として用いた。まず、有限要素法によるシミュレーションで、それぞれの対象金属板を検査する場合に適切な周波数範囲を決めるため、アルミ板と鋼板を対象物としてシミュレーションを行った結果を示す。アルミ板に対してシミュレーション結果により選んだ最適な印加磁場で計測した結果を示し、アルミ板内部傷の検出、位置の推定、形状の解析、傷深さの推定ができた事を示す。鋼板については、低い周波数の磁場を印加しても磁場が対象物の内部にある十分深い所まで侵入できず、渦電流探傷法では探傷検査が難しい事を述べる。

第 6 章では、漏洩磁束検査システムの問題点と改善法の提案について述べる。第 5 章で明らかになった渦電流探傷検査法による強磁性厚板の内部傷検査が難しいという問題点に対して、本章で漏洩磁束検査法を用いる事を提案する。また、これまでの漏洩磁束検査法の問題点である磁化飽和について説明し、磁気飽和が不要な小信号漏洩磁束検査法を提案し、その計測システムを紹介する。そして、提案した小信号漏洩磁束検査システムを用いて、強磁性金属鋼板の内部スリット傷を非破壊で検出する事により計測システムの妥当性について述べる。まず、鋼板を磁化飽和させず漏洩磁束検査を行う場合のシミュレーション結果を説明する。シミュレーション結果により、ついでには磁化飽和無しでも結果により磁束が空間に漏洩することを示す。さらに、漏洩磁束の影響で空間磁場の位相の変化量と欠陥の深さとの相関性を示す。シミュレーションにより提案した小信号漏洩磁束検査法の妥当性を確認した上で、実際に計測システムを作製し、スリット傷の深さが異なる鋼板を用いて内部傷の探傷検査を行った。計測結果の解析について、まず、傷近くの磁場をスキャンニングすることにより、取得画像は鋼板内部傷と相関性あることを示す。次に、印加磁場周波数により浸透深さが変化する現象を利用して、鋼板内部傷の深さなどの情報をまとめる結果を示す。

第 8 章では、本研究で得られた結果をまとめる。

第2章 有限要素法 (FEM) によるシミュレーション

シミュレーションは対象となるシステムで働いている法則を推定、抽出し、それを真似るようにして組み込んだモデル、模型、コンピュータプログラムなどを用いて行われる。現実のシステムを動かしてその挙動や結果を確かめることが困難、不可能、または危険である場合にシミュレーションが用いられる。シミュレーションはコストが低い、効率が高い、精度が高い、操作が容易、そして実行環境と関係なく理論的に解析できるなどいろいろ利点があるため、近年、シミュレーションが重要な科学研究手法として広く応用されている。

本研究では、磁気非破壊検査法を広く応用するため、従来の方法の問題点に対する改善法を提案しているが、これらの提案した新たな磁気非破壊検査法の妥当性を解析するため、有限要素法 (FEM : Finite Element Method) を用いてシミュレーションを行った。本章では有限要素法について紹介する。

<2.1> 有限要素法の概要と発展の歴史

有限要素法 (FEM : Finite Element Method) は、解析したい領域を多数の要素と呼ばれる小領域に分割し、その要素に含まれる節点や辺上で定義されるポテンシャル分布などを求める手法である⁽⁴⁰⁾。

有限要素法は航空機構造技術者の手によって 1950 年代に開発された。この手法は 1850 年から 1875 年の期間に開発された骨組構造解析の概念 (Maxwell, Castigliano, Mohr ら) を発展させたものである。航空機の翼振れを解析するためにロンドン大学航空科学の Argyris (1954) や米国ボーイング社の Turner ら (1956) によって、有限要素法の自術の母体となったマトリックス構造解析法が開発された⁽⁴⁰⁻⁴²⁾。有限要素法という名前は、米国カリフォルニア大学の Clough (1960) によって初めて使われ、ダムの応力解析に応用された。時を同じくして、IBM 社により世界で最初の技術計算用の電子計算機が開発されたため、有限要素法は急速に広まった。

1967 年、英国エェールズ大学の Zienkiewicz の著書「マトリックス有限要素法」(The Finite Element Method) が出版されてから、構造工学分野以外の流体力

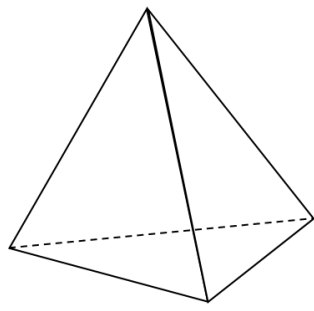
学，電磁場，化学反応などの問題解析にも有限要素法が広く応用されるようになった。

有限要素法が電磁界解析に適用されるようになったのは 1960 年後半からである。米国ローレンスリバモア研究所の Winslow が 1967 年に適用したのがはじめてとされ，その後，米国 GE 社の Chari やカナダのマッギル大学のシルベスタらによって，非線形性を考慮した回転機の磁界解析が行われ，電気電子機器の電磁界解析に本格的に使用されるようになった。その後，節点に未知変数を定義する，いわゆる節点要素が広く使われていたが，1990 年頃から，ベクトル量の辺への射影成分を積分した値を未知変数とする辺要素がよく使われている。高周波の解析で問題となっていた非物理的な解が出ないということで注目されたが，高精度，高速，記憶容量が節約できるなど多くの利点を認識され，低い周波数の非線形渦電流解析などのも広く使われてきた。

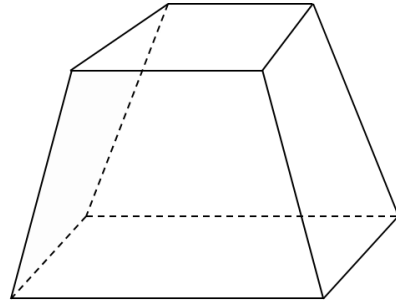
<2.2> 有限要素法の各種三次元有限要素

有限要素法では，磁束分布などの三次元的な振舞いを計算するために，解析したい領域を要素と呼ばれる多数の小領域に細分し，各々の要素内のポテンシャル分布を単純な関数で近似して解析する⁽⁴³⁾。三次元要素としては，図 2-1 のような四面体要素や六面体要素がある。各角の点を節点と呼ぶ。

ベクトル A を未知変数として三次元解析する場合，三次元磁界解析に用いる一次四面体要素と一次六面体要素はそれぞれ図 2-2 と図 2-3 に示すような節点要素と辺要素がある⁽⁴⁵⁾。節点要素は各節点の A の x , y , z 方向成分を未知変数とする要素で，辺要素は各辺上で A の接線方向成分を積分した値を未知変数とする要素である⁽⁴⁴⁻⁴⁵⁾。図 2-2 (a) と図 2-3 (a) に示している各変数を x , y , z の一次関数で近似して取り扱う要素をそれぞれ一次四面体節点要素，一時六面体節点要素と呼ぶ。また，図 2-2 (b) と図 2-3 (b) のような各辺上で A の接線方向成分を積分した値を各辺上で近似して取り扱う要素をそれぞれ一次四面体辺要素，一時六面体辺要素と呼ぶ。

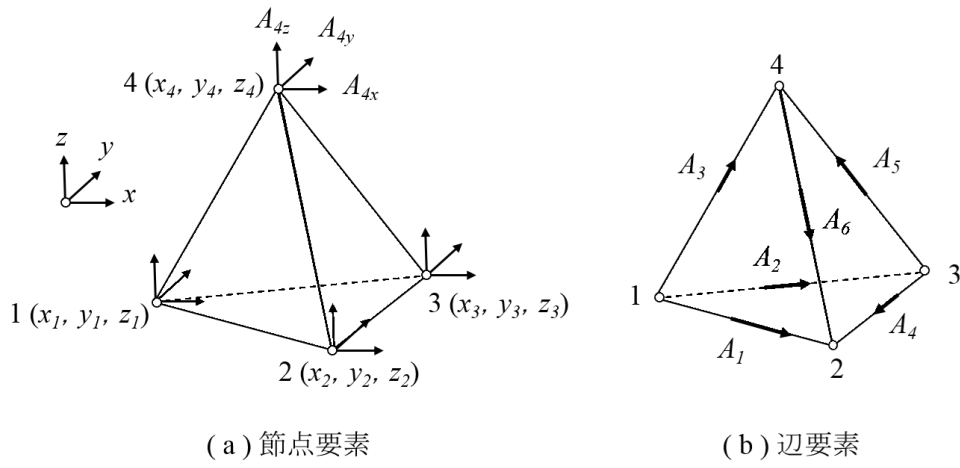


(a) 四面体要素



(b) 六面体要素

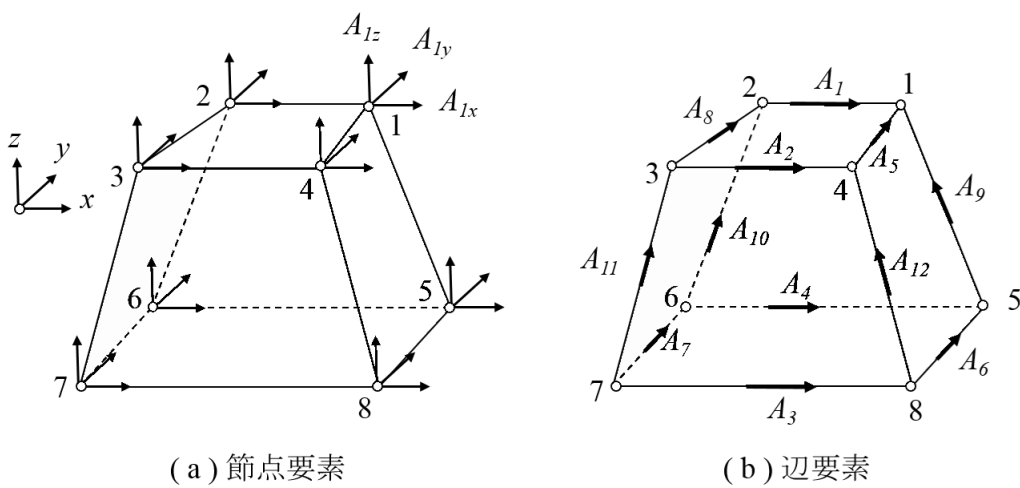
图 2-1 三维有限要素



(a) 节点要素

(b) 边要素

图 2-2 一次四面体要素



(a) 节点要素

(b) 边要素

图 2-3 一次六面体要素

解析対象領域を要素に分割する際に、要素サイズが解析精度と直接関係がある。小さく分割する場合、解析の精度が高いが、計算時間が長くてデータの量が多いため、保存、整理などが不便である。大きく分割する場合、データの量が少ないため、精度が低い反面、データ量が少なく、計算時間も短くなる。

本研究ではシミュレーションする際に、要素を一次四面体に分割し、一次四面体節点要素を採用した。シミュレーションする場合要素のサイズは傷がある部分など重要な部分で要素を小さく分割したが、データ量を抑えるため、傷がなく計測位置より遠方の要素は大きく分割した。これにより、計算時間の短縮し、計算精度への影響が抑制できる。解析対象によって、適用な条件を設定できた場合、有限要素法を用いて、効率的に検査システムの妥当性確認ができる。

第3章 渦電流探傷検査システム

本章では渦電流検査システムについて述べる。磁気非破壊検査は磁気現象を利用する非破壊検査法である。その原理に応じて様々な手法が存在する、その中で、最も普及しているのは渦電流探傷と漏洩磁束探傷の2つの方法がある。本章では磁気探傷検査の方法の一つ、渦電流探傷検査法を用いて対象金属の内部構造解析及び内部探傷検査を行う場合に重要となるリフトオフの影響を説明し、その解決法を提案した。

本章では以下の内容について述べる。

3.1 節は、本章の導入部である。

3.2 節では、渦電流探傷検査法の計測原理について説明する。渦電流発生、空間磁場変化の発生及び計測原理など含めて説明する。

3.3 節では、磁場の表皮効果の深さについて説明する。本研究で提案したシステムは金属の内部構造解析及び金属の内部傷探傷検査を行うために提案したため、対象金属物内部に侵入できる信号が必要である。本研究で必要な印加信号について説明する。

3.4 節では、渦電流探傷検査法において問題点の一つであるリフトオフについて述べる。リフトオフによる影響の解決法として、渦電流探傷法を用いて対象物を評価する場合、検出磁場の強度だけでなく、磁場の位相を用いて対象物を評価する事を提案する。

3.5 節では、提案したリフトオフに対する解決法を応用する渦電流探傷システムについて説明する。

3.6 節では、提案した位相を用いて対象物を評価する方法の妥当性を確認するためのシミュレーションモデルの設計、パラメータの設定などについて述べる。

3.7 節では、3.6 節で説明したシミュレーションモデルを用いて、渦電流探傷検査法により、対象金属対象物の内部構造解析の計算結果を示す。シミュレーション結果により、提案した検査法の妥当性を議論する。

3.8 節は、本章のまとめである。

<3.1> はじめに

本研究の目的は対象金属の内部構造解析と探傷検査を磁気非破壊検査法で高精度に行う事である。渦電流探傷検査は磁場を用いて非接触、安全に測定でき、測定の自動化を実現しやすい方法である。ただし、測定環境により適応が困難であったり、測定感度が低下したりすることがある。渦電流探傷法を幅広く応用するには、各問題点に対する改善が必要となる。本章では、渦電流探傷検査の主な問題点の一つであるリフトオフの影響を説明し、リフトオフの解決法として、渦電流探傷法を用いて対象物を評価する場合、検出磁場の強度だけでなく、磁場の位相を用いて対象物を評価する事を提案した。

<3.2> 渦電流探傷検査法

ここでは、本研究で用いた渦電流探傷検査の歴史、探傷の基本原理及び近年の研究状況について述べる。

渦流探傷試験の歴史は比較的浅く、1952年にドイツの Friedrich Förster によって渦流探傷試験の理論と実験による実証が行われた⁽⁴⁶⁾。Friedrich が示したのは、金属に交流磁界を印加したときの磁気応答を検出コイルのインピーダンス変化として検出するもので、正規化インピーダンスと位相解析の理論は、現在の渦流探傷試験の基礎となるものであった。その後、1968年に Dodd⁽³²⁾ によって、金属板や金属パイプの渦流探傷試験は一般式として表され、コイルのインピーダンスダイアグラムを介した渦流探傷試験による金属の傷検出は、産業界の非破壊検査方法として重要な一翼を担うまでとなった。

図 3-1 では渦電流探傷検査の原理を示す。図 3-1 の原理図に示すように測定対象物である導体に対してコイルなどを用いて交流磁束を発生させる。交流磁束が金属などの導体を貫いた場合、導体内に磁束を打ち消すような向きの渦電流が流れる。このとき、印加磁場と渦電流の位相は同相ではなく、渦電流の位相が印加磁場の位相に対して $\pi/2$ rad 遅れる。そして、右手の法則に従い、渦電流によって磁界が発生する。導体内欠陥や不連続部がある場合、図に示して

いるように、外部磁場により金属内部に渦電流を発生させ、その導体内で発生した渦電流は、導体内にある欠陥や不連続部によって大きさ、電流の向きが変化する。渦電流の変化は二次的な磁場にも変化を及ぼし、その変化をコイルや磁気センサで取得することで欠陥の有無や不連続部を検出する事が出来る⁽⁴⁷⁾。

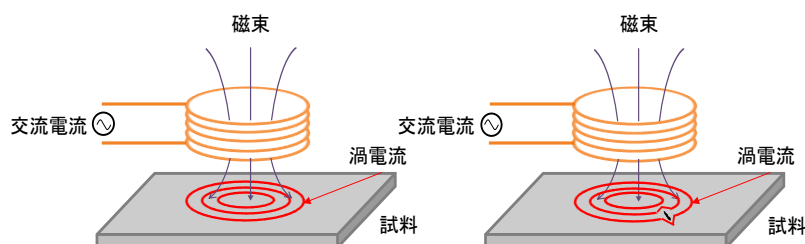


図 3-1 渦電流探傷検査の原理

渦電流探傷検査法は安全性、安定性及び計測システムの自動化を実現しやすいなどの特性を持つため、様々な対象物へ応用する要求が高まってきた。渦電流探傷検査法は上記で述べた通り、渦電流により発生した磁場を検出する方法であるため、流れる渦電流を大きくし、発生する磁場を大きくすることが望ましい。そのため、高周波磁場を印加し欠陥検出を行うことが一般的である。しかし、高周波磁場を印加した場合、表皮効果により検出できる傷の深さが制限される。近年、この解決法として、高周波磁場でなく、駆動周波数を低周波化した磁気計測法により、金属深部からの欠陥を検出する事が注目されている⁽⁴⁸⁻⁵²⁾。

また、もう一つ注目されているのがパルス渦電流探傷試験である⁽⁵³⁻⁵⁴⁾。パルス渦電流探傷試験はパルス磁場をサンプルに印加し、磁気応答の波形を計測する事でサンプルの磁気応答を得ていた⁽⁵⁵⁾。パルス磁場は広い帯域の周波数情報が含まれており、パルス磁場を用いることで一度の計測で多くの情報を得られるため、効率的に計測することが可能という利点がある。

ただし、渦電流探傷検査法はリフトオフなどの影響を受けやすいため、環境の適応性、感度の安定性が不足するなどの問題点がある。そのため、渦電流探

傷検査法はリフトオフに対する改善が要求されている。

<3.3> 表皮効果

内部の欠陥を検出するためには渦電流を内部に発生させる必要がある。しかし、一般的に交流磁場の周波数が高くなればなるほど表皮効果によって渦電流は表面に集中するため、高周波磁場での内部欠陥の検出は困難である。その電流の流れる深さを表皮深さといい、表皮深さ δ は次式で表さる。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.1)$$

ここで μ は $\mu_s\mu_0$ で表され、 μ_s は材質固有の比透磁率であり μ_0 は $4\pi \times 10^{-7}$ 、 σ は導体の導電率、 $\omega = 2\pi f$ である。(3.1)式より低周波磁場を用いることで内部に渦電流を発生させ、その二次磁場を検出することができれば内部の欠陥を検出可能である。

ただし、磁場の浸透深さに影響あるパラメータが周波数だけでなく、材質固有の比透磁率 μ_s も関係する。強磁性金属の比透磁率はより大きいため、渦電流探傷検査を用いて検査する場合、材質によって磁場は対象物内部に侵入できない場合もある。

<3.4> リフトオフの影響

渦電流探傷検査法を用いて対象物の探傷検査を行う場合、検出コイルや磁気センサを用いて磁場を検出する。多くの原因で、検出コイルやセンサと対象物の間に間隔が発生する。試験体と検出コイルや磁気センサとの相対距離がリフトオフと呼ばれる。

リフトオフの一例として、スポット溶接を取り上げる。スポット溶接の溶接部の表面形状を測定した結果を図 3-2 に示す。写真からスポット溶接の溶接部の表面に窪みが存在することが分かる。溶接の品質を評価するために渦電流探傷検査を実行する場合、この窪みはリフトオフが発生する原因となり、検出結果はリフトオフの影響を受けることを考えられる。

リフトオフは渦電流探傷検査における主な誤差要因の一つである。リフトオ

フの影響が発生する場合、応答信号を乱し、誤った結果につながることが多い。リフトオフが大きくなると渦電流探傷試験の感度は低下する。したがって、渦電流探傷試験の感度を維持するためには、リフトオフを小さく保つ必要がある。なお、プローブが試験体上を走査するときリフトオフが変化すると、大きな雑音が発生する。そのため、感度を高く保って探傷するためには、リフトオフを小さく、しかも一定に保つことが必要である。

ただし、スポット溶接だけでなく、磁気探傷検査を広く応用する場合、様々な形状の金属が検査対象となり、全ての対象物でリフトオフを小さく、しかも一定に保つことは難しい。そのため、リフトオフの影響を受けにくい検査法が必要となる。

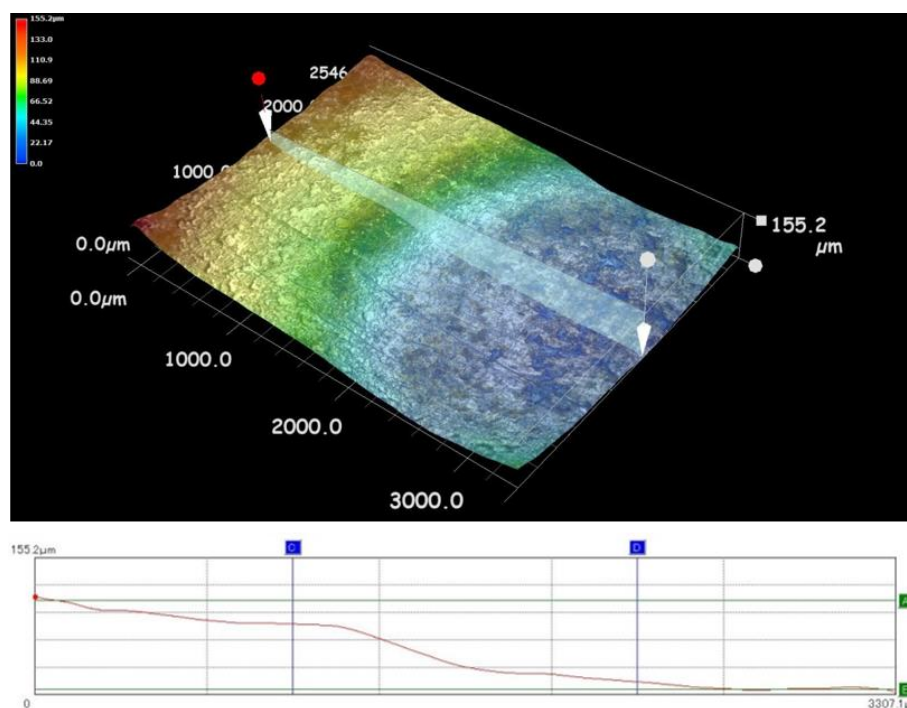


図 3-2 スポット溶接の溶接部表面写真

本研究では、リフトオフの影響を低減するために、磁界の位相を用いて複数の周波数で対象物の健全性を評価する方法を提案する。

<3.5> 渦電流探傷検査システム

3.2 節では、渦電流探傷検査法の計測原理 について述べた。そして、3.3 節では、リフトオフの影響について述べ、解決法を提案した。本節では、3.2 節で述べた計測原理を元に開発した低周波磁気イメージングシステムについて説明する。図 3-3 に、渦電流探傷システムの構成を示す。

図 3-3 に示している装置は発信器、交流電流源、印加コイル、検出コイル、ロックインアンプと PC より構成されている。印加コイルと検出コイルはフェライトコアを使用し、コイルの径は 4.8 mm、印加コイルの巻き数は 50 回、検出コイルの巻き数は 200 回である。測定は印加コイルに 3 mA_{p-p}、周波数が 10 Hz~10 kHz の交流電流を印加し、測定試料から発生した二次的磁場信号を検出コイルで検出する。検出した信号はロックインアンプにより磁場強度と位相成分で検出する。

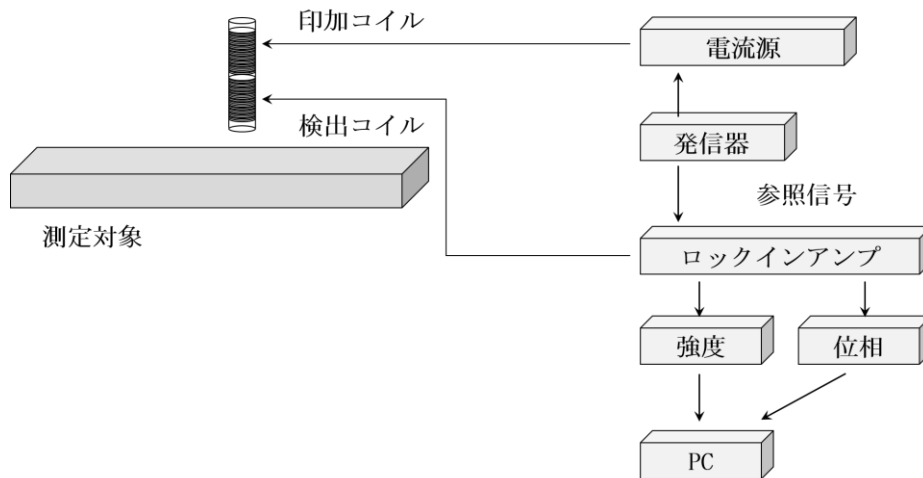


図 3-3 渦電流探傷システムの構成

表皮深さは、磁場の周波数に依存する。磁場強度だけでなく磁場の位相を利用して、対象物の内部構造可視化する事を行った。可視化により、測定者の熟練度に依らず結果を容易に評価することができ、適用可能な対象物が広がると考えられる。

<3.6> シミュレーションによる測定システムの評価

本研究提案した測定システムで前述したフェライトコア及びコイルの形状によるシミュレーションモデルを作成し、磁束の解析を行った。電磁界解析ツールとして市販シミュレーションソフト **JMAG** を用いた。作成したシミュレーション解析モデルを図 3-4 に示す。フェライトコアと印加コイルを解析対象サンプルの中心に設置した。実測システムでは検出コイルを用いて磁場を検出するが、シミュレーションでは、印加コイル中心の直下でリフトオフを変化させた各点の磁場を算出し空間磁場を検出した。

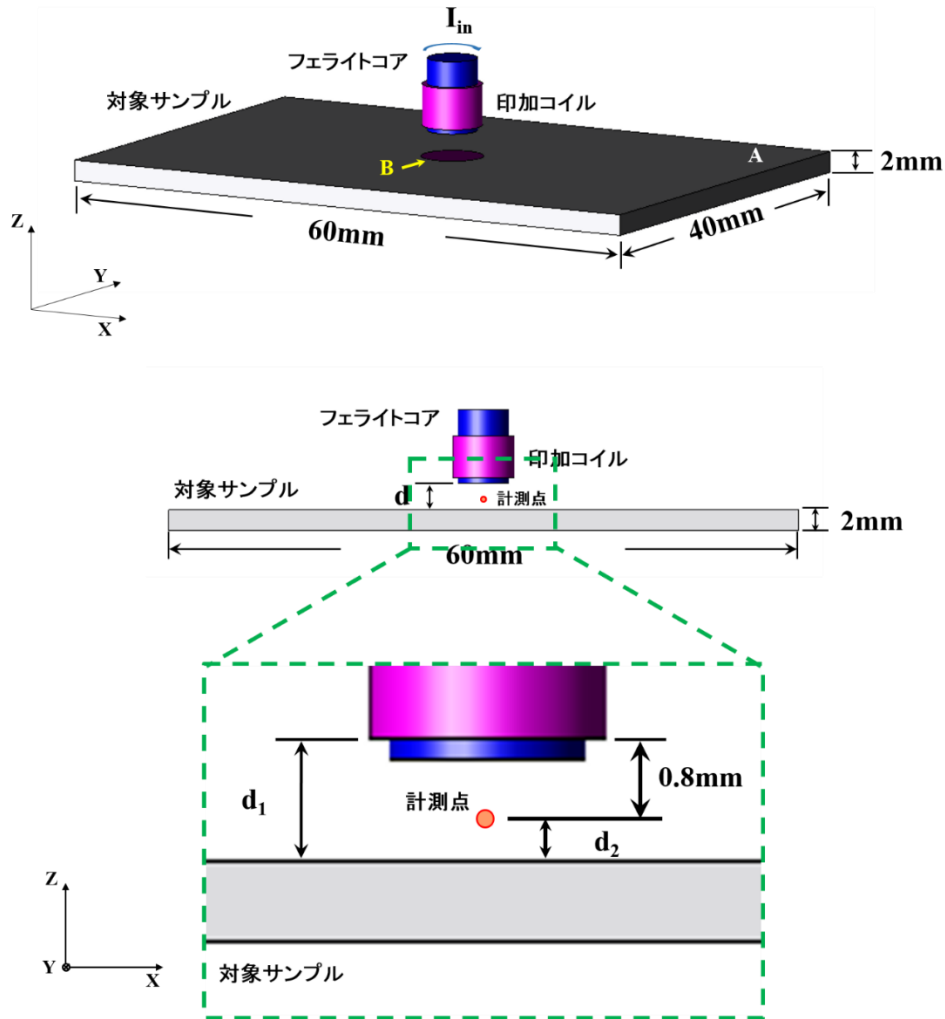


図 3-4 渦電流探傷検査シミュレーションモデル

シミュレーションモデルに設置したフェライトコアの径は 5 mm, 印加コイルの内径は 5 mm, 外径は 6 mm である. 解析対象サンプルは面積が 60 mm × 40 mm, 厚みは 2 mm の金属板に設定した. 解析対象の真ん中に, 貫通の円柱形部分を作成し透磁率が異なる金属に設定した, これは, 図 3-4 に B 部分と表示している. B 部分の径は 6 mm である. 印加コイルと対象金属の間の距離は d_1 と表示する. 測定位置は印加コイルの中心で, 印加コイルの下面から 0.8 mm の点に設定し, 図 3-4 に赤い点で計測点を表示した. $d_1 = 1$ mm, $d_2 = 0.2$ mm の場合をリフトオフの解析基準, `lift-off = 0` として設定した. リフトオフを調整する場合, フェライトコア, 印加コイルと計測点の位置を同時に移動させて調整する.

A 部分と B 部分には, それぞれ異なる透磁率を設定し, A 部分の比透磁率 μ_A は 2000, B 部分の比透磁率 μ_B は 200 から 1000 の間で 200 ごとの 5 種類とした. また, 磁場の検出強度と位相がリフトオフの影響を受ける程度を確認するため, リフトオフを 0 mm から 2 mm の間 0.5 mm 間隔で 5 段階設定した.

シミュレーションでは, まず, 渦電流の生成を確認するとともに, 渦電流と磁束密度の分布が透磁率異なる部分の有無でどのように変化するかを確認する. そして, 指定した測定点の磁場の強度と位相でそれぞれ B 部分の円柱形を検出する事を確認する. 次に, 印加磁場の周波数が変わる場合, 磁場の強度と位相それぞれの変化を計算する. 最後に, リフトオフを変化させた場合の磁場の強度と位相の変化量を計算する.

<3.7> シミュレーション結果と考察

シミュレーションに使用したサンプルを表 3-1 に示す. 印加電流が 1A_{p-p}, 印加周波数が 100Hz である.

まず, 渦電流の生成を確認するとともに, 渦電流と磁束密度の分布が透磁率異なる B 部分の有無でどのように変化するかを確認を行った. 周りの材質と異なる B 部分が有る場合と無い場合に計算した渦電流の分布を図 3-5 に示す. 矢印は電流の流れる方向を示す, 色は電流密度の大きさを示す. 上の図はサンプ

ル0を対象とする場合、下の図はサンプル1を対象とする場合の電流密度分布を示す。まず、渦電流が生成することを確認できた。さらに、透磁率が異なる部分がある場合とない場合の渦電流分布が異なる現象も見られた。

表 3-1 シミュレーション用サンプル一覧

サンプル番号	0	1	2	3	4	5
μ_A	2000	2000	2000	2000	2000	2000
μ_B	—	200	400	600	800	1000

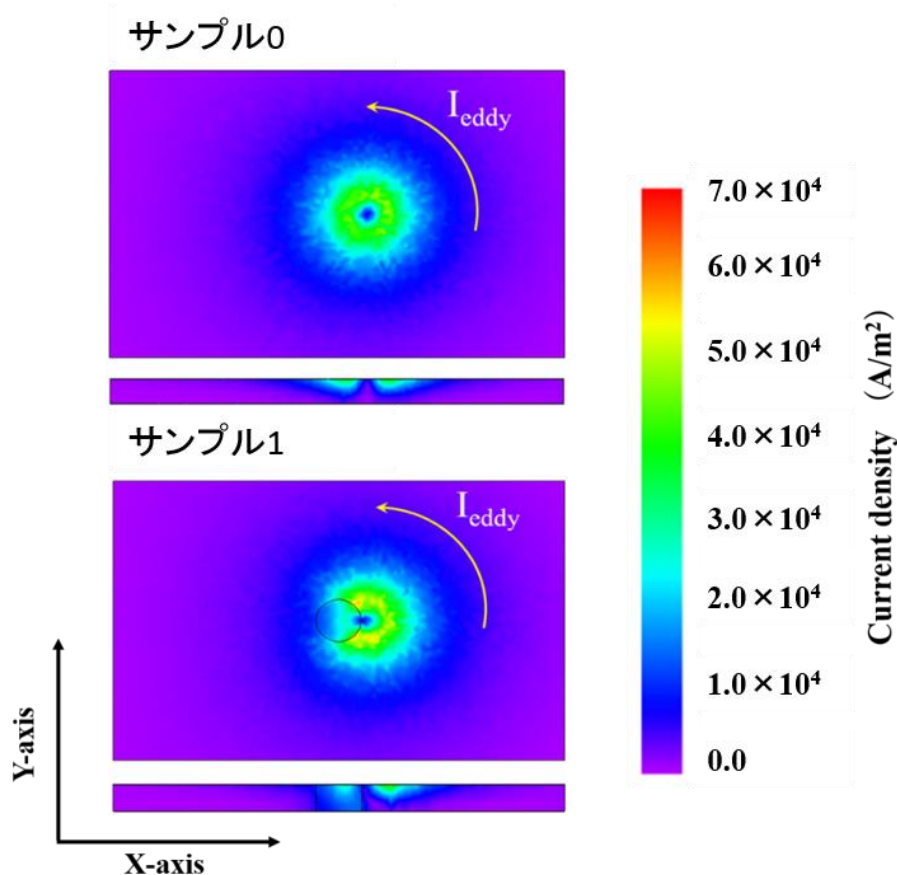


図 3-5 透磁率の異なる部分が有る場合と無い場合の金属板の渦電流分布

この結果の原因として、比透磁率の異なる B 部分がある場合、B 部分の透磁率が A 部分より小さいため、B 部分の磁場浸透深さが A 部分より深い。その

ため、渦電流が表面近くで集中する程度が異なる。その影響で、渦電流から生成する二次磁場が異なることが考えられる。2つのサンプルを用いて、空間磁束密度を計算した結果を図3-6に示す。色は磁束密度の大きさを示す。上の図はサンプル0を対象とする場合、下の図はサンプル1を対象とする場合の磁束密度の分布を示す。この結果から、B部分の磁束密度の分布が変わることがわかった。この影響で、計測点の磁場の強度と位相が若干変わることが考えられる。

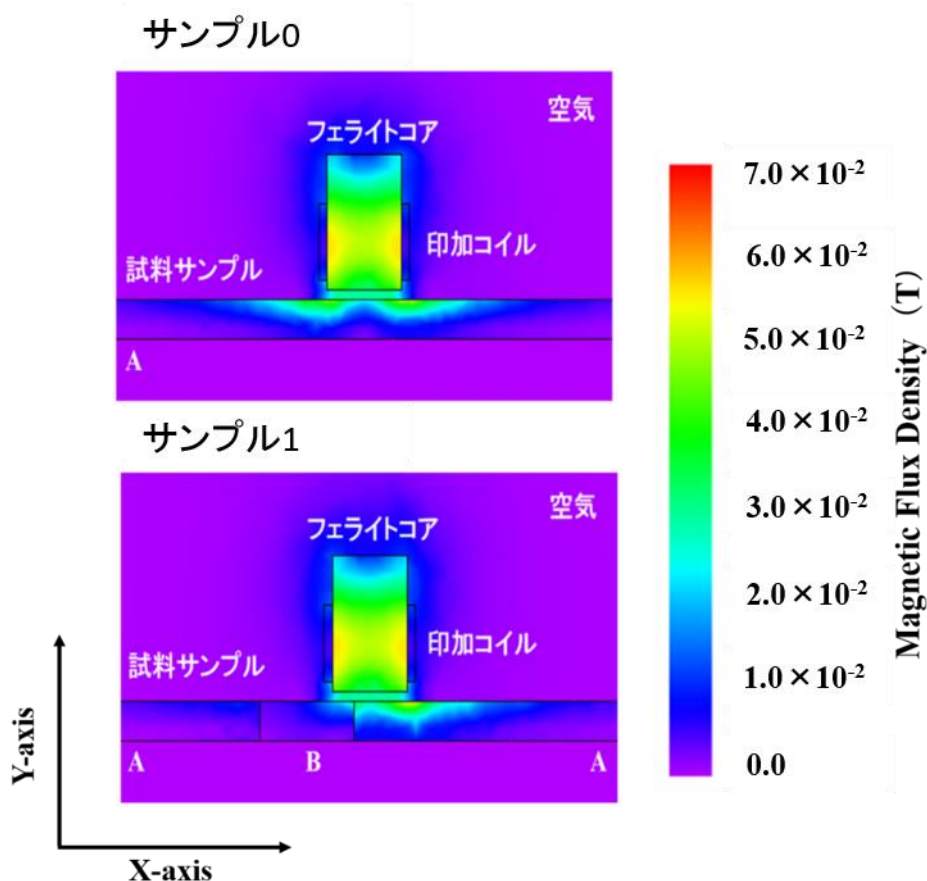


図3-6 透磁率が異なる部分の有る場合と無い場合の金属板の磁束密度分布

空間磁場の変化を確認するため、図3-7に示しているように、フェライトコアと印加コイルをB部分の中央のラインで移動し、2mm間隔で11点の磁場

信号を計算した。シミュレーションの対象サンプルは均一金属板のサンプル 0 と非均一金属板のサンプル 1 の 2 種類である。印加周波数は 10 kHz である。磁場強度の計算結果を図 3-8 に示す。

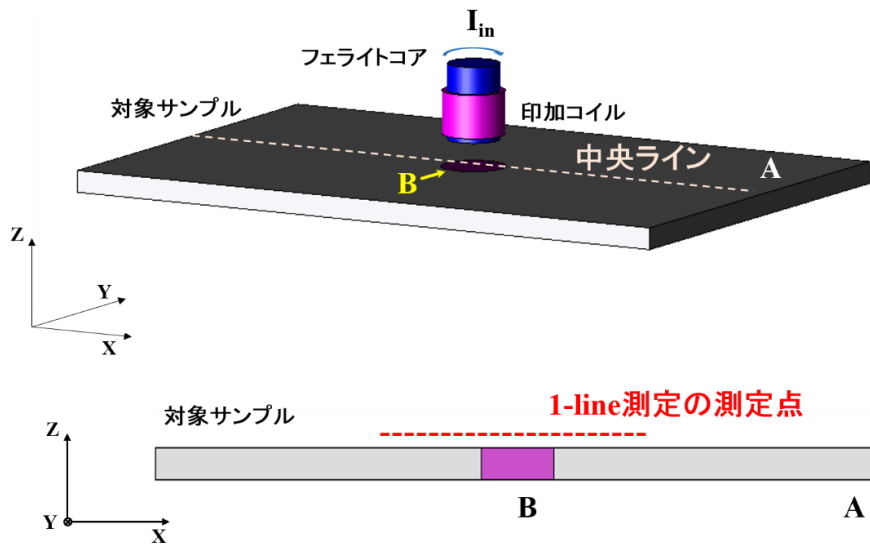


図 3-7 空間磁場の 1-line 測定モデル

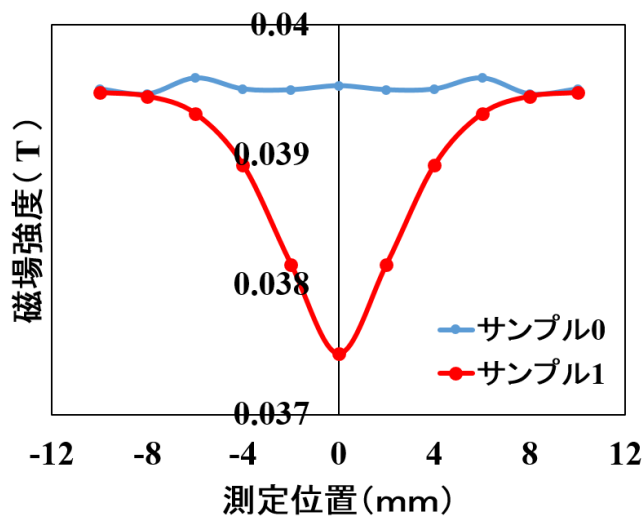


図 3-8 サンプル 0 とサンプル 1 に対する磁場強度の 1-line 測定

図 3-8 に示している青線は表 4-1 に示したサンプル 0, 赤線がサンプル 1 を用いて計算した結果を示す. サンプル 0 とサンプル 1 の磁場強度の測定結果を比較すると, サンプル 0 はほとんど変化しなかったが, サンプル 1 を用いて計算した磁場強度は, 対象物の中心部で最小値を取り, その値は測定範囲の両端と大きく異なっていた. この変化の位置は B 部分の位置と対応しており, 磁場強度の変化が B 部分の存在で生じたと考えられる. そのため, 提案した渦電流探傷システムのシミュレーションモデルで磁場強度により B 部分を検出できることが確認できた. これらの結果は, これまでに報告された渦電流探傷検査法を用いた金属に対する探傷検査の結果と一致している⁽³⁴⁾. 従って, 渦電流探傷システムのシミュレーションの妥当性を確認できた.

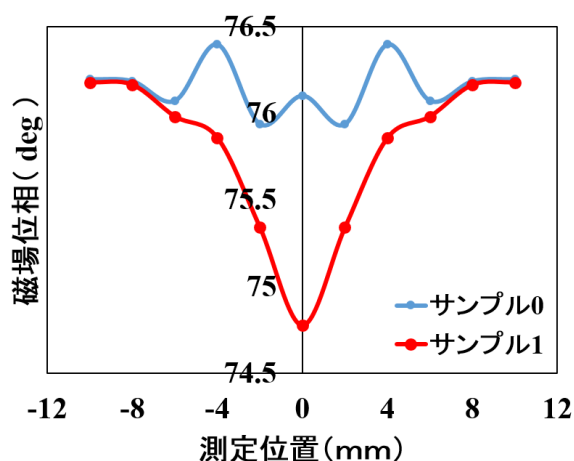


図 3-9 サンプル 0 とサンプル 1 に対する磁場強度の磁場位相の 1-line 測定

同時に, 磁場の位相が B 部分を検出できるかを確認するため, 磁場の位相を図 3-9 にまとめた. 図 3-9 において, 均一金属板, B 部分なしのサンプル 0 を用いて計算した位相は変化量が少ない. 一方, 透磁率の異なる B 部分がある場合, 同じ周波数の磁場を印加すると, 磁場の浸透深さが異なるため, B 部分で生成した渦電流の分布が変わり, 渦電流から生じる二次磁場の強度が変わり, 磁場の位相も変化すると考えられる. その結果, 空間の磁場位相に大きな変化

が生じ、B部分の検出ができるとみられる。

磁場の表皮効果の影響により、表面及び表面付近の解析には高周波磁場が必要であり、対象物深部の構造解析には低周波磁場が必要となる。そのため、対象物の全体を評価するためには、広い周波数帯域の磁場を印加する必要がある。本研究では、渦電流探傷検査法を用いて、磁場強度と位相が対象物深部の構造解析が可能であることを確認するため、シミュレーションで周波数が10 kHz から100 Hzの磁場を印加した。

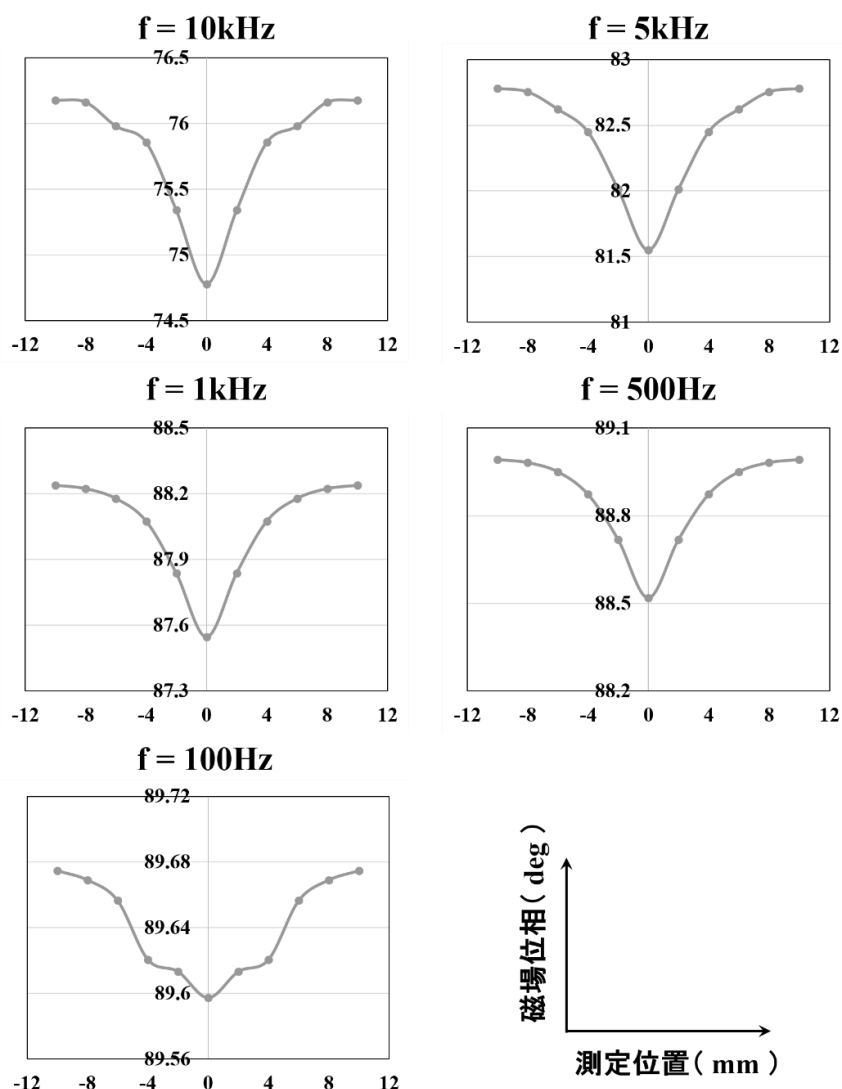


図 3-10 各周波数における 1-line 測定の磁場位相

図 3-10 が 1-line 測定で取られた磁場位相の結果を示す。横軸が測定位置であり、B 部分の中央位置を原点と設定し、測定位置の `0` と示す。縦軸は磁場の位相を示す。印加磁場の周波数は 10 kHz, 5 kHz, 1 kHz, 500 Hz と 100 Hz である。どの周波数においても、中央部で磁場位相に大きいな変化が見られ、磁場位相を用いて対象物中心にある B 部分が検出可能であることを確認した。この結果より、渦電流探傷検査を用いて金属の構造解析を行う場合、磁場の強度だけでなく、磁場の位相でも対象物の解析が可能と分かった。

以上の計算結果から、交流磁場を金属に印加した場合金属内部に渦電流が生成し、生成した渦電流の分布が対象物の材質の変化により変わる。渦電流の変化により、磁束密度分布の変化も生じる。そのため、渦電流探傷検査で金属内部の透磁率が異なる部分の検出が可能と確認できた。

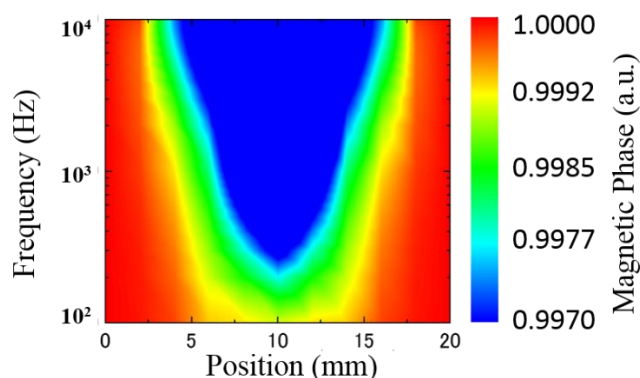


図 3-11 規格化した磁場の位相の画像化結果

磁場の表皮効果により印加磁場の周波数が異なる場合、取得した磁場信号は異なる深さの情報を示している。そのため、各周波数の磁場を印加した場合に取得した磁場信号をまとめると対象物の内部全体の構造解析が可能と考えられる。様々な周波数の測定データを一つにまとめるには周波数に依存しない規格化処理が必要である。そこで各周波数の磁場を印加して計算した結果を用いて、周波数ごとに -10 と 10 の位置で計算した結果の平均値を基準として計算結果を

規格化することにした。

規格化した磁場位相の結果を1つの図にまとめて磁場位相の画像化を行った。この結果を図3-11に示す。縦軸は周波数、横軸は測定位置である。色は磁場の位相を示している。磁場の位相のシミュレーション結果において、対象物の中心部では値が小さく、測定範囲の両端の値とは大きく異なっていることが分かる。これらの変化の位置はB部分の位置と対応し、磁場位相の変化がB部分の存在で生じたと考えられる。

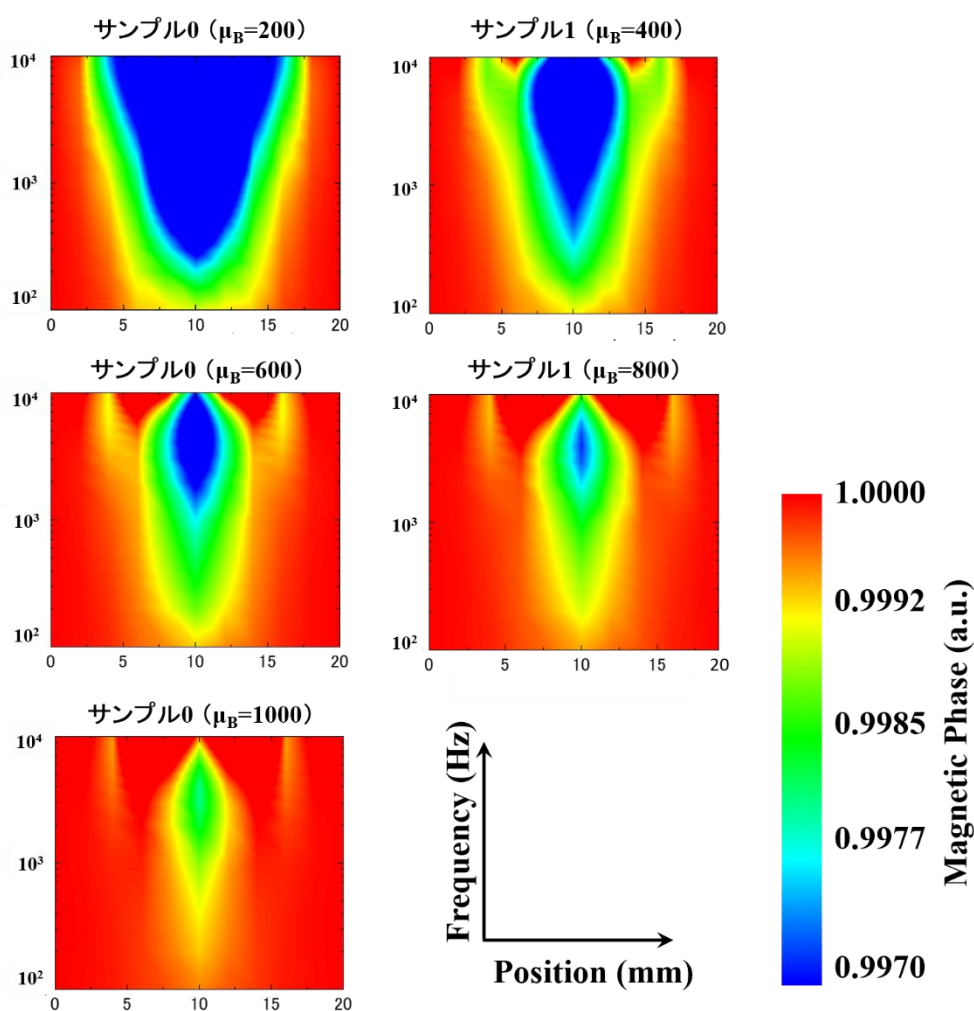


図 3-12 B 部分の透磁率異なる場合検出した磁場位相

次に、磁場位相で B 部分の透磁率が異なるサンプルの区別が出来るかを確認した。表 3-1 に示している番号 1-5 の金属サンプルを用いて、内部構造解析シミュレーションを行い、磁場位相を用いて対象物内部構造を画像化した結果を図 3-12 に示す。

各サンプルの解析結果において、それぞれ対象物の B 部分が存在する中心部では値が小さくなっており、B 部分の検出が可能と考えられる。B 部分の透磁率が変化した場合、検出した磁場位相が変わる。B 部分と A 部分の透磁率の差が大きい場合、磁場の浸透深さの差が大きいため、渦電流の分布が大きく変わり、空間の磁場の位相が大きくずれる。逆に、B 部分と A 部分の透磁率の差が小さい場合、A 部分と B 部分の磁場の浸透深さの差が小さいため、渦電流から生成された二次磁場の位相のずれが小さい。以上の結果より、検出した磁場の位相マップを比較するだけで各サンプルの区別が可能と考えられる。

次にリフトオフの影響を解析するため、図 3-4 に示している d_2 を変化させ、サンプル 1 を用いて、計測点の磁場強度と位相を計算した。 d_2 と lift-off の設定を表 3-2 に示す。

表 3-2 シミュレーション用 d_2 と lift-off の設定

d_2 (mm)	0.2	0.7	1.2	1.7	2.2
Lift-off (mm)	0	0.5	1.0	1.5	2.0

Lift-off を 0 から 2.0 mm の間で変化させた場合に計算した磁場強度と位相をそれぞれ図 3-13 と図 3-14 に示す。

図 3-13 は、lift-off が変化した場合の磁場強度のマップを示している。リフトオフが小さい場合、信号の減衰がなく、B 部分と A 部分で検出磁場強度に大きい差があり、中心の B 部分を明確に検出する事が出来る。しかし、Lift-off が増加すると、信号が大きく減衰するため、B 部分と A 部分から検出する磁場の強度の差が小さくなる。Lift-off がある程度大きくなると、磁場強度のマップに B 部分と A 部分の境界が見えなくなり、B 部分の検出が出来なくなる。

図 3-14 は、lift-off が変化した場合の磁場位相のマップを示している。リフト

オフが小さい場合、信号の減衰がなく、B部分とA部分で検出磁場の位相に大きい差があり、中心のB部分を検出する事が出来る。一方、Lift-offが増加した場合、値は少し減衰するが、磁場強度の場合と比較すると影響は小さく、lift-offが大きすぎない範囲ではlift-offによる位相への影響が無視できる事が分かった。

以上の結果によって、今回提案した磁場位相を用いて対象物の内部構造解析を行う事の妥当性を確認する事が出来た。

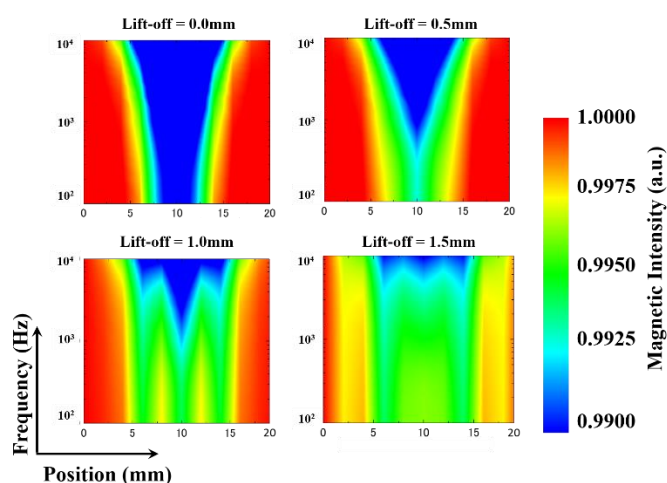


図 3-13 リフトオフが変わる場合の磁場強度

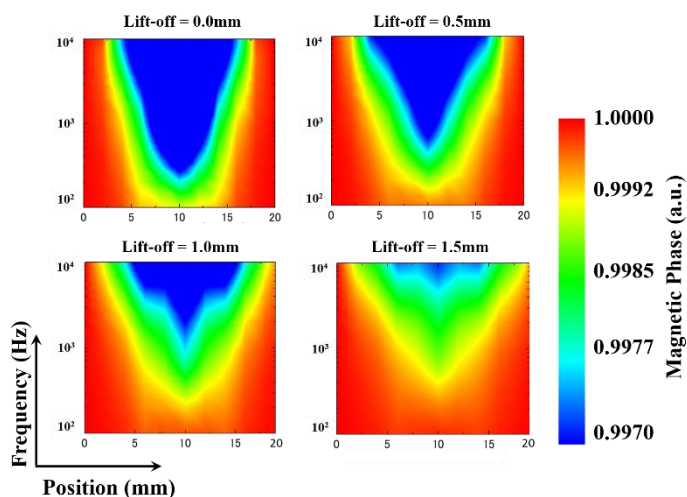


図 3-14 リフトオフが変わる場合の磁場位相

<3.8> まとめ

本章では、渦電流探傷検査法の問題点の一つであるリフトオフの変化による信号強度の変化を取り上げ、その解決法として、検出した磁場強度だけでなく、磁場の位相を用いて対象金属を評価する手法を提案した。低周波渦電流探傷法を用いて、リフトオフによる影響を低減するため、検出磁場の位相を評価パラメータとして対象金属を評価する方法の妥当性を確認するためのシミュレーションを行った。

交流磁場を対象金属に印加した場合、金属に渦電流が生成したことを確認した。対象金属に比透磁率の異なる部分がある場合、生成した渦電流の分布が変わると共に、渦電流から生成された二次磁場の分布も変わったことを確認できた。測定点で検出した磁場の強度と位相により、対象物内部に存在する比透磁率の異なる部分を検出できることがわかった。リフトオフが発生した場合、磁場の強度は大きく影響を受け、検出した結果の精度が低下したが、磁場の位相はリフトオフの影響をあまり受けないことが確認できた。これにより、磁場の位相を用いて対象物を評価する手法の有効性を示せた。

第4章 渦電流検査による三層スポット溶接内部構造可視化評価

本章ではスポット溶接で接合された三層鋼板を対象物として第3章で説明したシステムを用いてスポット溶接の健全性を評価した。まず、スポット溶接を評価する方法の妥当性を確認するためのシミュレーションを行った。妥当性を確認した後、実測のために用意した品質が異なる三層スポット溶接のサンプルを対象物として、提案した渦電流探傷システムを用いてスポット溶接の品質評価を行った。検出した磁場の強度だけでなく磁場の位相を利用して、対象物の内部構造可視化を行った。

本章では以下の内容について述べる。

4.1 節は、本章の導入部である。

4.2 節では、本章の解析対象のスポット溶接の溶接法、応用領域、評価基準などについて説明する。

4.3 渦電流探傷検査法を用いて実際に評価を行うために用意した測定対象のスポット溶接サンプルについて紹介する。

4.4 節では、提案したシステムと解析法を用いて実測した結果とその結果に対する議論を述べる。

4.5 節では、検出した磁場の強度と位相を用いて測定対象のスポット溶接の内部構造を3D画像化して、対象物の品質評価結果に対する議論を述べる。

4.6 節では、本章のまとめである。

<4.1> はじめに

従来の研究では低周波磁場を印加したスポット溶接の内部探傷検査は検出コイルで磁場の強度を測定しスポット溶接の品質評価を行っていた。しかし、強度を用いて対象物の健全性評価する場合、リフトオフの影響を受け、リフトオフを一定にしないと再現性の確保ができず、評価の信頼性が低下する事が考えられる。ここで、ロックインアンプを用いると信号強度だけでなく、位相も計測することが可能であり、検出する磁場は強度と位相をもつ磁場ベクトルで表

すことが出来る。本研究では一般的に評価用パラメータとして用いられる磁場強度だけでなく、位相もスポット溶接の品質評価パラメータとして使用することを考えた。位相と強度がリフトオフの影響を受ける程度を議論するため、リフトオフが異なる場合に検出した磁場のベクトルを用いて、磁場の強度と位相の変化量を測定し、位相と強度の適用性を比較した。

そして、本研究で開発したシステムはサンプル表面の法線方向（z axis）の磁場を測定する検出コイルを使用し、法線方向の磁気イメージングを取得できる設計とした。このとき、磁気イメージングは、印加磁場の周波数により磁場の浸透深さが変化する表皮効果を利用し、印加磁場の周波数に依存した磁気イメージングを得ることで対象物の断面構造解析事が出来る。本章では、品質異なるスポット溶接の磁気イメージングを比較することで、スポット溶接の品質評価を行った。

最後に、スポット溶接の溶接部およびその周辺の一定範囲で多ライン、多点でスキャンニングする事で、スポット溶接部の3D画像化を行った。

<4.2> スポット溶接

ここでは、測定対象物であるスポット溶接について述べる。図 5-1 にスポット溶接の説明図を示す。溶接方法の一種であるスポット溶接は、別名抵抗溶接ともよばれ、抵抗熱で金属を溶かして接合する溶接技術である。2枚あるいは3枚の鋼板を圧着させた状態で、電極を溶接部に当て、圧力を加えながら電流を流して接合する方法で、自動車のボディなど広く用いられている。

スポット溶接は電極を押しつける力、電流、通電時間によってナゲットの形成の良さが決まり、品質が決まる。また同条件下で溶接した場合でも、溶接対象の電流分布の違いによって品質が異なる場合がある。ナゲットとは鋼板と鋼板が溶融・固化し合成された部分である。ナゲットの成分はマルテンサイトに変わる。スポット溶接の良品と不良品を比較すると、溶接する場合に生成したナゲットの大きさが異なる。これは図 4-2 に示した溶接部の断面写真を比較することでわかる。

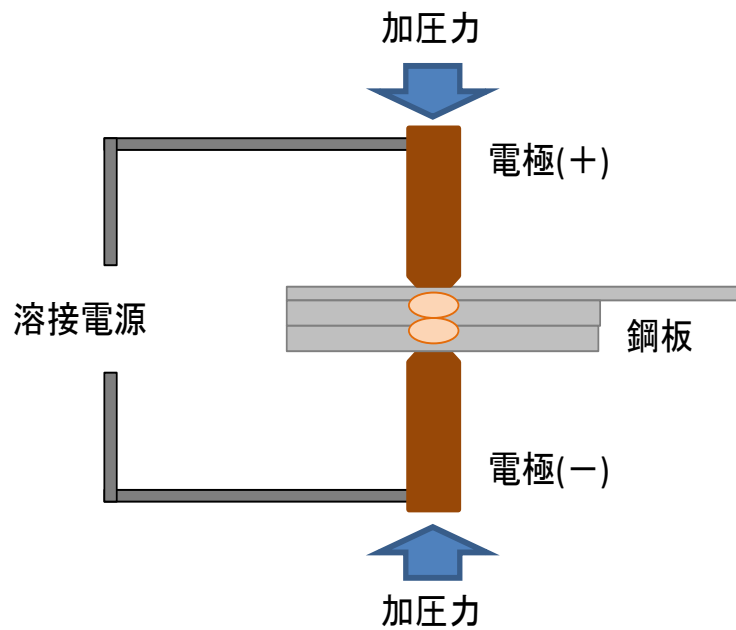


図 4-1 スポット溶接の説明図

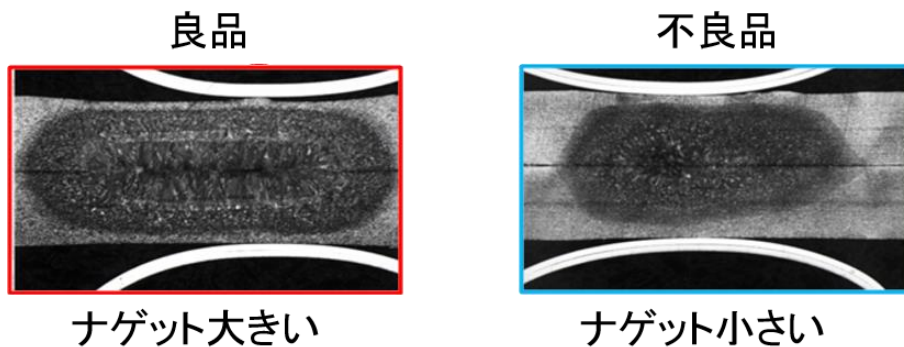


図 4-2 品質が違うスポット溶接の溶接部の断面写真

スポット溶接の品質を評価する一般的な方法として、おもに引張せん断試験、垂直引張試験、断面試験、ピール試験、ねじり試験、たがね試験などがあるが、どれも破壊検査である。破壊検査は一定の割合でサンプルを抜き取り、破壊検査を行う事が一般である。そのため、被検査品の全ての品質を完全に判断する事が出来ない。生産されたスポット溶接の品質と安全性を保障するには、短時

間、少ない労力でスポット溶接の品質検査を行う必要がある。

スポット溶接の溶接部の組織は主にマルテンサイトであり、良品の場合だとマルテンサイト割合が多く、不良品の場合はナゲット小さくてマルテンサイトの割合が少なくなる。溶接部に磁場を印加するとマルテンサイトの割合により渦電流分布の変化が生じるため、渦電流分布の変化によってスポット溶接内部構造評価が可能と考えられ、渦電流探傷法を用いたスポット溶接の評価について次節以降に述べる。

<4.3> 測定試料

本節では、実測用の3層スポット溶接サンプルについて説明する。

図4-3に測定試料の形状と測定点を示す。

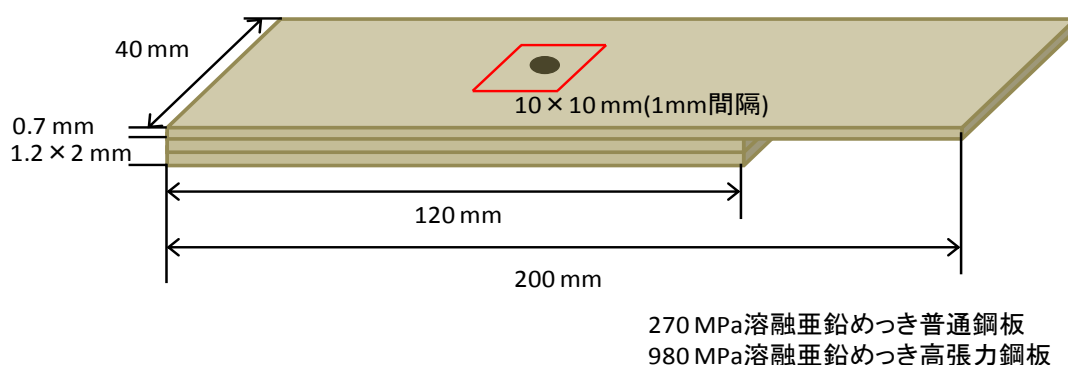


図4-3 測定試料の形状と測定点

この測定試料は実際の自動車に採用されている鋼板である。測定試料は3枚の鋼板で構成されており、上から引張強さ270 MPa溶融亜鉛めっき普通鋼板0.7 mm、980 MPa溶融亜鉛めっき高張力鋼板1.2 mm、980 MPa溶融亜鉛めっき高張力鋼板1.2 mmである。鋼板の大きさは40 mm×200 mm×3.1 mmである。これを40×125 mmの範囲でオーバーラップさせ、その中心部においてサーボ式スポット溶接機(60 Hz)を使用してスポット溶接を施した。溶接条件は通電時間1~20 cycles、加圧力4 kN、溶接電流9.6 Aである。測定試料は溶接条件の一つである通電時間サイクル数を1~20 cyclesの範囲で変え、合計20種類作製し

た. cycles とは電源周波数 60 Hz の 1 周期を 1 cycles としている. 用意したサンプルの中で, サイクル数が一番大きい 20 cycle のサンプルが良品となり, サイクル数が小さくなると溶接を形成するための時間が十分でないため, 不良品になる割合が高くなる.

<4.4> 測定結果と考察

本節では渦電流探傷検査を用いたスポット溶接の品質評価の結果を説明する. まず, 渦電流探傷検査を用いて, 磁場の強度と位相を用いてスポット溶接の内部構造解析を行った.

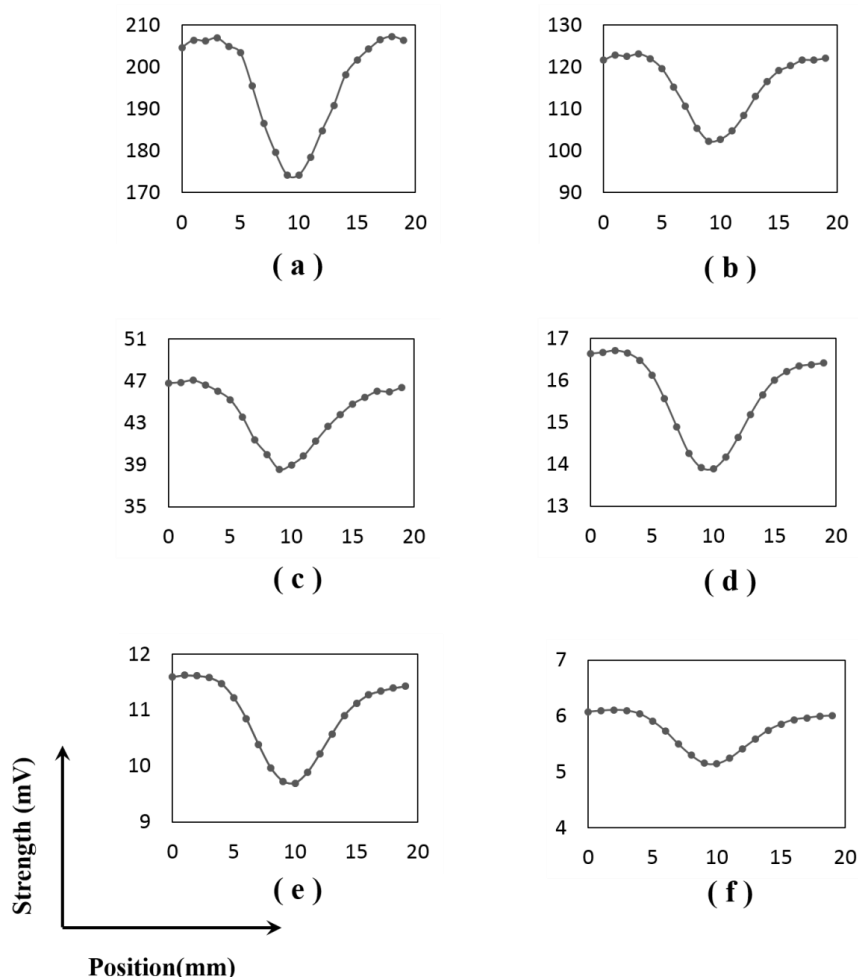


図 4-4 スポット溶接 (20 cycle) の良品を用いて 1-line 測定した磁場強度
 (a) 10 kHz, (b) 6 kHz, (c) 2 kHz, (d) 600 Hz, (e) 400 Hz, (f) 200 Hz

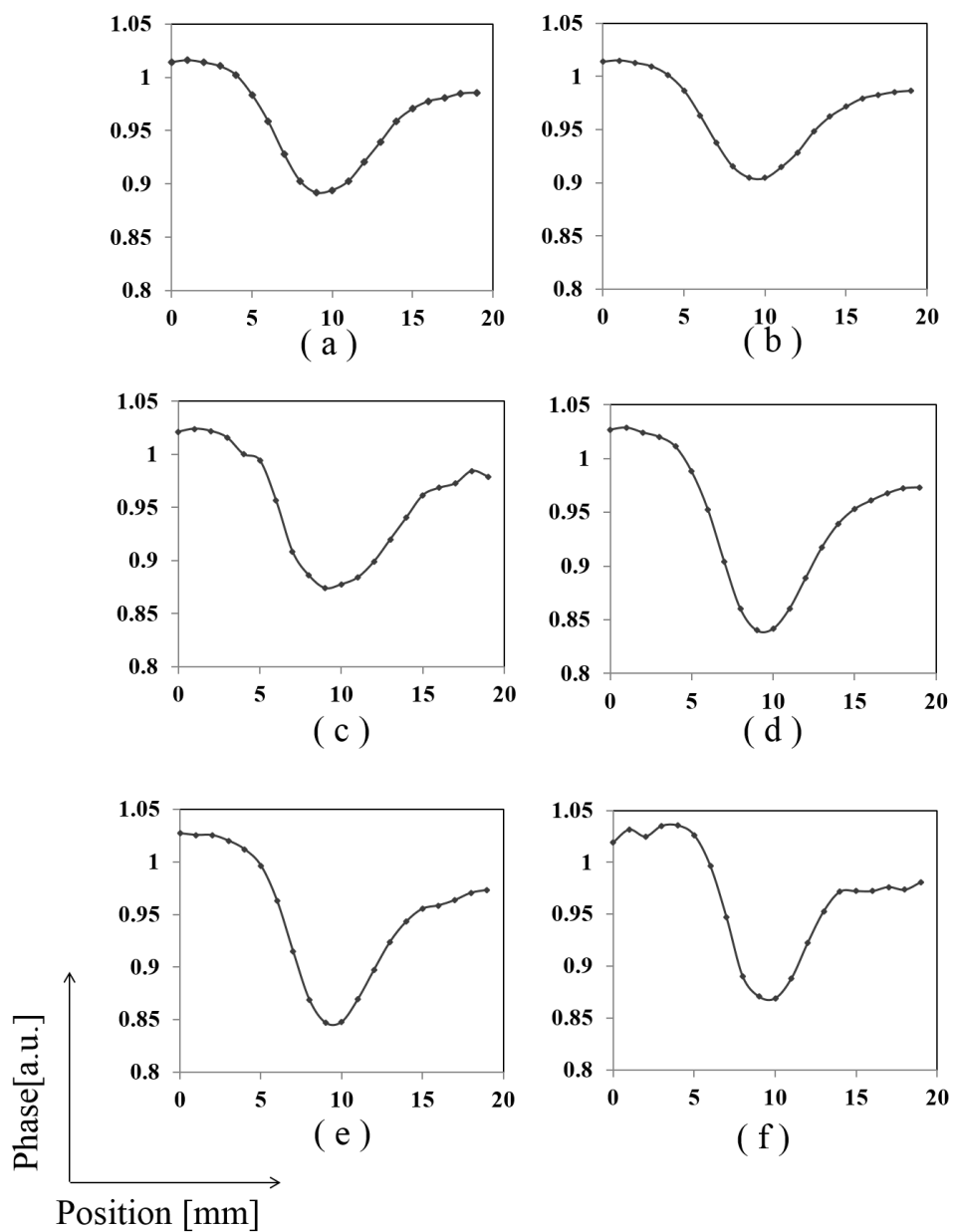


図 4-5 スポット溶接 (20 cycle) の良品を用いて 1-line 測定した磁場位相
 (a) 10 kHz, (b) 6 kHz, (c) 2 kHz, (d) 600 Hz, (e) 400 Hz, (d) 200 Hz

印加コイルには電流値 $0.3 A_{p-p}$, 周波数 10 Hz~10 kHz の交流電流をそれぞれ印加した. 測定範囲は溶接部を中心として 1 ラインで 1 mm 間隔で 20 点を測定した, サイクル数は 20 cycles であり, リフトオフ一定のまま自動測定を行った.

検出コイルを用いて得られた磁場の強度と位相をそれぞれ図 4-4 と図 4-5 に示す。

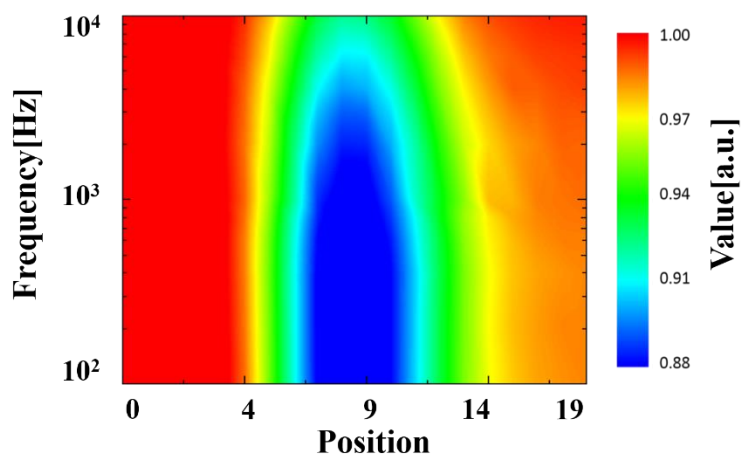
図 4-4 に示したように、各周波数の磁場を印加した場合、中心の溶接部に対応した範囲で取得した磁場の強度が大きく低下した。この結果より、渦電流探傷検査法を用いて検出磁場強度を評価パラメータとして応用する場合、スポット溶接の溶接部を検出できることが分かった。

シミュレーション結果により、リフトオフが変化した場合、磁場強度変動し、対象物の評価が正しく行えない可能性がしめされた。逆に、磁場強度と同時に検出する磁場の位相はリフトオフの影響が小さく、リフトオフがある程度変わっても対象物を正確に評価できる事もシミュレーションにより示された。

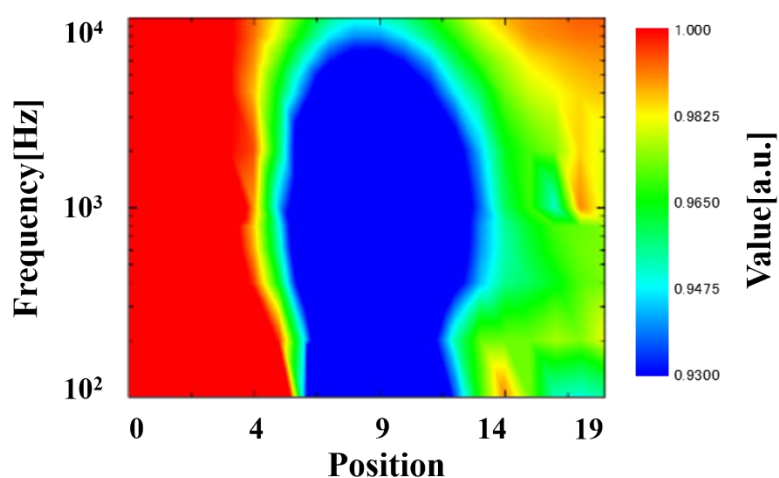
このシミュレーション結果を実際の測定で確認するため、磁場の位相を測定しスポット溶接の評価を行った。中心 1 ラインの磁場位相の実測結果を図 4-5 に示す。各周波数を印加した場合、中心部の溶接部に対応した点で得られた磁場の位相が磁場強度と同じように、大きく低下した。従って、渦電流探傷検査法において検出磁場の位相を評価パラメータとした場合でも、スポット溶接の溶接部を検出できることが分かった。

次に、中心の 1 ライン測定で取られた磁場の強度と位相について、各周波数の磁場応答を 1 つのマッピング像にし、スポット溶接の内部構造の画像を試みた。その結果を図 4-6 に示す。周波数の変化によって磁場強度が異なるため溶接されていない両端の各 1 点を平均し、その平均値で規格化を行った。図 4-6 (a) は磁場強度、図 4-6 (b) は磁場位相の検出結果を用いて画像化した結果を示す。縦軸は印加磁場周波数、横軸は測定位置、色の変化は磁場の強度と位相の変化を示す。異なる周波数磁場をサンプルに印加した場合、印加磁場の浸透深さの影響で、検出磁場は周波数に応じて表面から異なる深さの情報を含める。印加磁場周波数が低いほど表面から深い処の情報を検出できる。その特性を利用して、広い周波数帯域の磁場をサンプルに印加し、検出した磁場を用いて画像した結果が検査位置の断面構造とみられる。図 4-6 (a) と図 4-6 (b) はそ

れぞれ検出した磁場強度と位相を用いてサンプル中心ライン断面構造を画像化した結果である。渦電流探傷検査法を用いて、検出した磁場の強度と位相のマップでスポット溶接の溶接部の検出が出来た。



(a) 磁場強度の中心ライン断面画像化



(b) 磁場位相の中心ライン断面画像化

図 4-6 スポット溶接 (20 cycle) の良品の磁場信号中心ライン断面画像化

磁場の強度と位相のマップを用いて、リフトオフの影響を実際に確認した。まず、印加周波数とリフトオフの大きさを調整してスポット溶接の溶接部中心点で磁場の実部と虚部の信号を検出した。その結果を図 4-7 に示す。

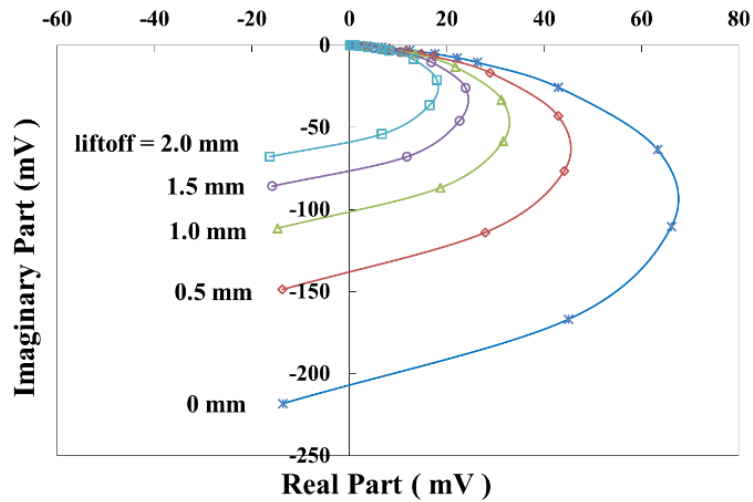


図 4-7 リフトオフを変化させた場合のスポット溶接部
中心点における磁場の検出結果

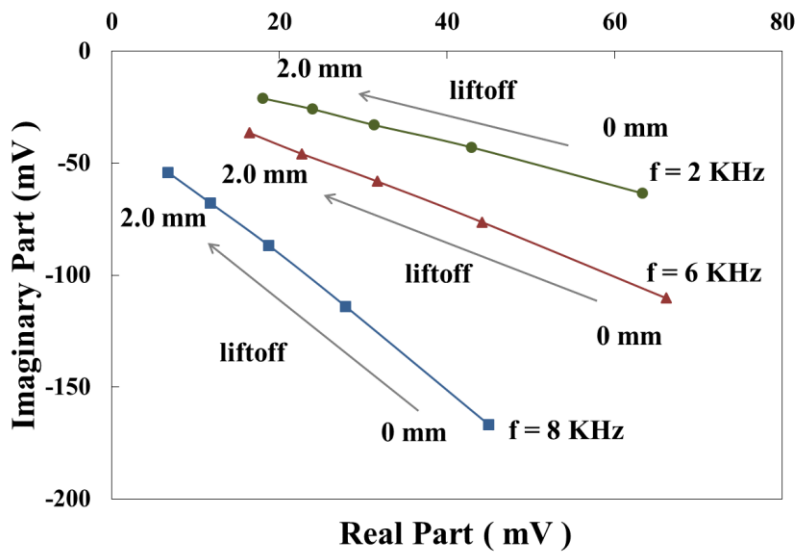


図 4-8 各周波数磁場を印加する場合スポット溶接部の接部の
中心点磁場検出結果

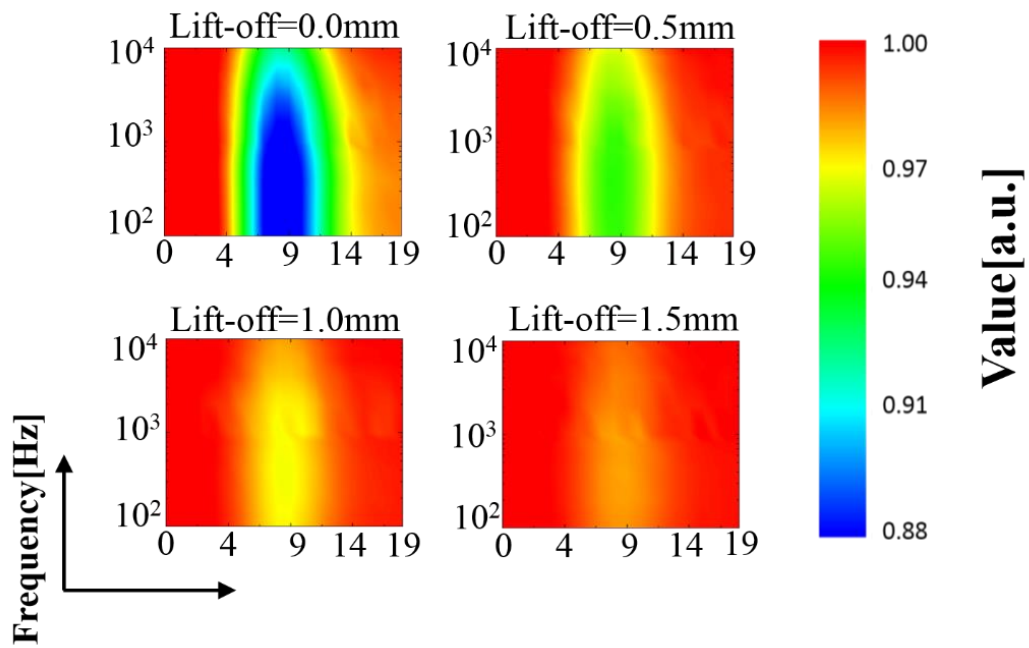
図 4-7 の縦軸は虚部，横軸は実部を示している．印加周波数が 100 Hz から 10 kHz まで変化させ，リフトオフが 0 mm から 2.0 mm までの 0.5 mm 間隔で測定を行った．各色がそれぞれのリフトオフに対応している．図 4-7 におい

て、原点との距離が磁場強度、ベクトルと横軸と角度が位相を示す。リフトオフが大きくなると、検出信号の強度は大きく減衰することが見られる。そのため、リフトオフがある程度大きくなると、磁場の強度を用いて対象物の検査が困難となる。

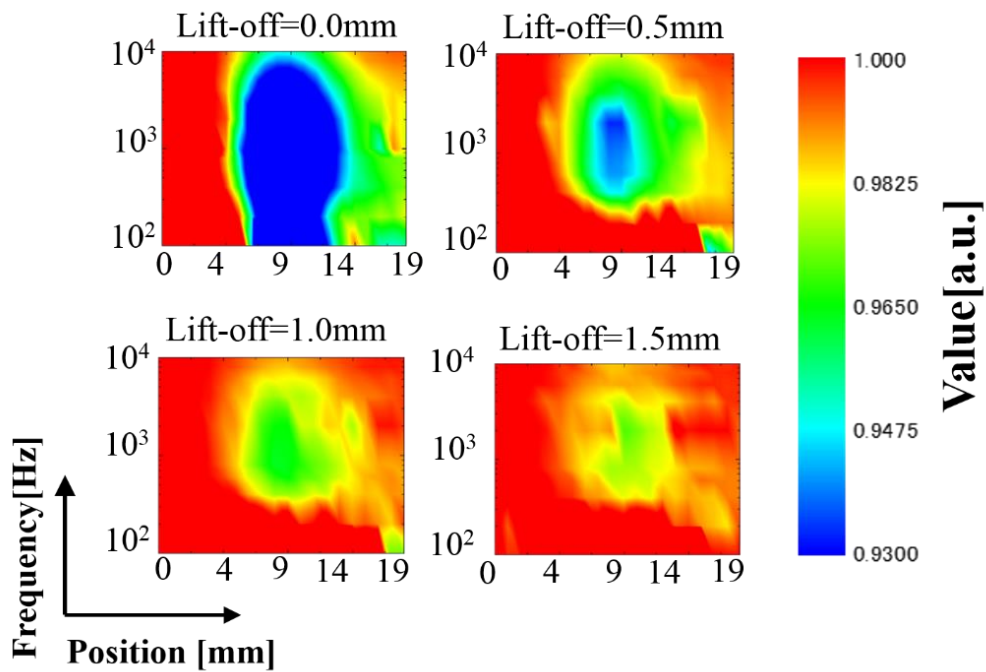
リフトオフの影響を具体的に解析するため、8 kHz、6 kHz と 2 kHz の磁場を印加した場合の検出結果を抽出し、図 4-8 に示した。各周波数の結果を見ると、リフトオフが変化し周波数が同じ場合、検出した結果は原点を通る直線に近いことが分かる。検出した値と原点との長さが磁場の強度を表し、減点と検出した値を結ぶ線と横軸の角度が磁場の位相を表すため、図 4-8 よりリフトオフの変化により、直線の長さが大きく変化し磁場強度の変化が大きいことが分かる。一方、どの周波数の軌跡も直線に近いいため横軸となす角度は変化が小さく、磁場の位相がほとんど変わらないことが分かる。以上より、磁場の強度より磁場の位相がリフトオフの影響を受けない事が分かった。そのため、スポット溶接など一定のリフトオフを確保できない場合には、渦電流探傷検査の磁場強度だけでなく、磁場の位相を用いて対象物を評価することで、検査結果の信頼性を向上させることができると考えられる。

リフトオフが変化した場合の磁場強度と位相への影響を実際に確認するため、溶接部中央の 1 ラインで周波数を変化させ測定し、図 4-6 と同様のマッピングを作成した。測定した結果の画像化を図 4-9 に示す。測定条件は、印加周波数が 100Hz から 10 kHz で、リフトオフが 0.0 mm から 1.5 mm の範囲で 0.5 mm 間隔としている。使用したサンプルのサイクル数は 20 cycle である。

図 4-9 (a)は各リフトオフに対する磁場強度を画像化した結果を示す。縦軸は印加磁場の周波数、横軸は X 方面の測定位置、カラーバーは規格値を表している。リフトオフが大きくなると、スポット溶接部で見られた強度の低下が徐々に見られなくなり、リフトオフが 1.0 mm 以上になった場合では、磁場強度の変化が少なく、溶接部の検出が難しくなった。



(a) リフトオフによる磁場強度の中心ライン断面画像化の変化



(b) リフトオフによる磁場位相の中心ライン断面画像化の変化

図 4-9 リフトオフが変化した場合の検出した磁場信号の画像化

一方、図 4-9 (b)は各リフトオフに対する磁場位相の検出結果を用いて画像化した結果を示す。結果によって、リフトオフが大きくなるとスポット溶接部における磁場位相の変化がやや小さくなったが、磁場強度のマップで示した場合と比較して、磁場位相が受けるリフトオフの影響は少ないと考えられる。以上の実測結果からも、リフトオフを一定にとコントロールする事が難しい場合、磁場の位相を用いて対象物を評価する方が信頼性が高くなることが示された。

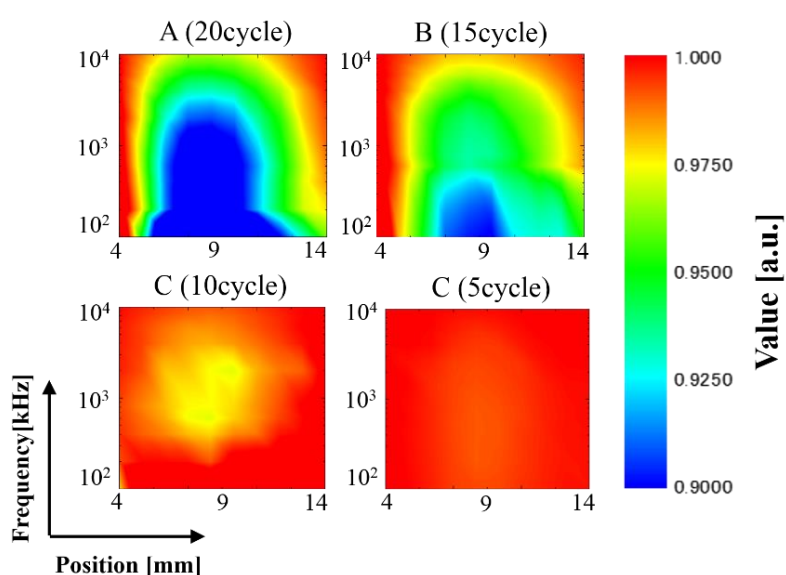


図 4-10 磁場位相を用いたスポット溶接の信頼性評価

渦電流探傷検査法で検出した磁場の位相を用いてスポット溶接の品質検査ができるかを確認するため、サイクル数が異なるサンプルを用いて内部構造解析を行った。測定範囲は溶接部を中心として 1 mm 間隔の 20 点で、サイクル数は 20, 15, 10, 5 cycles であり、リフトオフを 0 mm に設定して自動測定を行った。印加磁場の周波数範囲は 100 Hz から 10 kHz である。溶接部近くの測定結果をはっきり見るため、測定範囲の中心部、第 4 点から第 14 点の 11 点で測定した結果を図 4-10 に示す。各サンプルで測定結果の縦軸が印加磁場周波数、横軸が x 方向の測定位置、カラーバーは規格値を表している。サンプルの中で一番サ

サイクル数が大きい 20 cycles でも 15 cycles, 10 cycles と溶接時間の少ないサイクル数でも規格値の変化によって溶接位置を確認することができる。5 cycles のサンプルは溶接時間短すぎるため、中心の溶接部が生成されておらず、溶接位置を確認する事が出来なかった。サイクル数が異なるサンプルで測定した結果を比較すると、サンプルの中で一番サイクル数が大きい 20 cycles の溶接部が一番大きいと見える。サイクル数が下がると、中心部の溶接部における磁場位相の変化が小さくなり、実際の破壊検査の評価基準と一致した。

渦電流探傷検査法で計測点の磁場位相を用いて対象物の内部構造画像化する方法はリフトオフの影響を受けないため、検査結果の信頼性が高く検査方法も簡易であるため、生產品の全数検査に応用する事が期待される。

<4.5> 内部構造三次元化

中心ラインの断面構造評価を用いてスポット溶接を品質評価する場合、溶接部に生成されたナゲット全体の広がりの評価には不十分であった。そのため、本研究では中心ラインだけでなく、図 4-11 に示しているように、溶接部を中心として 9 mm×9 mm の範囲で 2 次元スキャンを行い、磁場測定結果を 3D 画像化する方法を考案し、3 層鋼板スポット溶接試料の評価を行った。

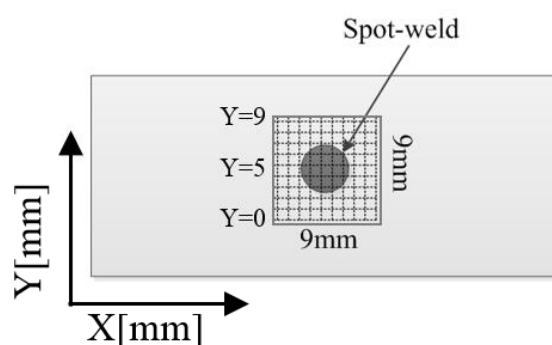
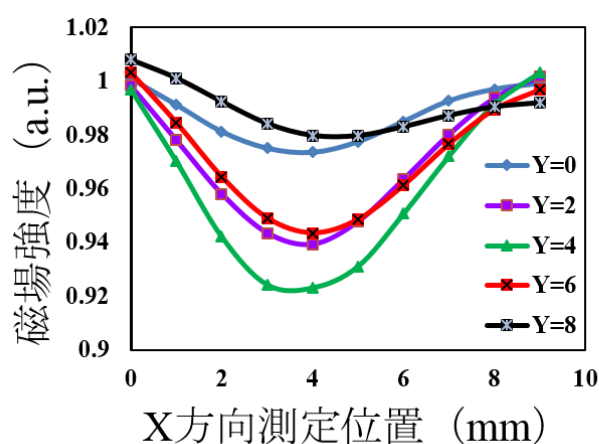


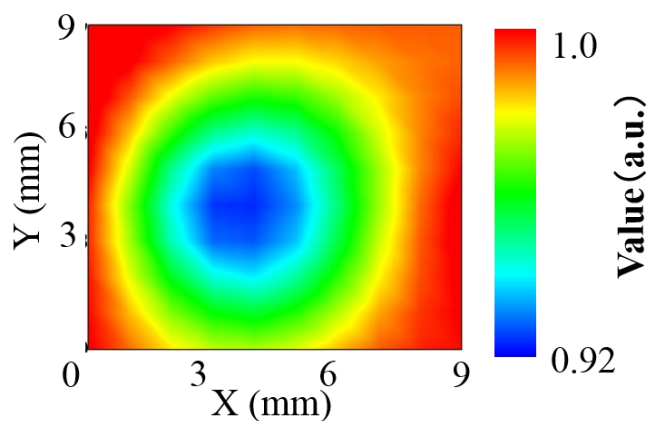
図 4-11 2 次元スキャンの計測範囲

溶接時間 20 cycle の試料を対象として、8 kHz の磁場を印加する場合の測定結果を一例として図 4-12 に示す。

図 4-12 (a)は測定位置変わる場合、各ラインの磁場強度測定結果である。結果により、溶接中心部に大きく変化した。そして、各ラインの結果を比較すると、Y 方面も中心部に変化が大きいと分かった。測定結果を測定位置と合わせて、結果を1つにまとめると図 4-12 (b)の2次元マップを作成した。縦軸と横軸はそれぞれ X と Y 方面の測定位置である。また、カラーの変化が磁場強度の変化と示しています。



(a) Y が異なる場合各ラインで検出した磁場強度結果



(b) 磁場強度二次元スキャン磁場強度のマッピング結果

図 4-12 磁場強度二次元スキャン磁場強度の計測結果

図 4-12 (b) より，溶接部の中心を画像で判断できることが分かった．品質異なるサンプルを用いて計測した結果を図 4-13 に示す．マッピング結果を用いて，サンプルの品質を評価する事が出来る．測定した結果から強度を等高抽出するとナゲットの範囲を確定できる，図 4-13 に黒い線で示している．10cyc と 5cyc の試料は溶接条件によって，生成したナゲットが小さいか，ナゲットがあまり生成してないため，磁場強度の変化が小さくて，等高線の抽出ができなかった．

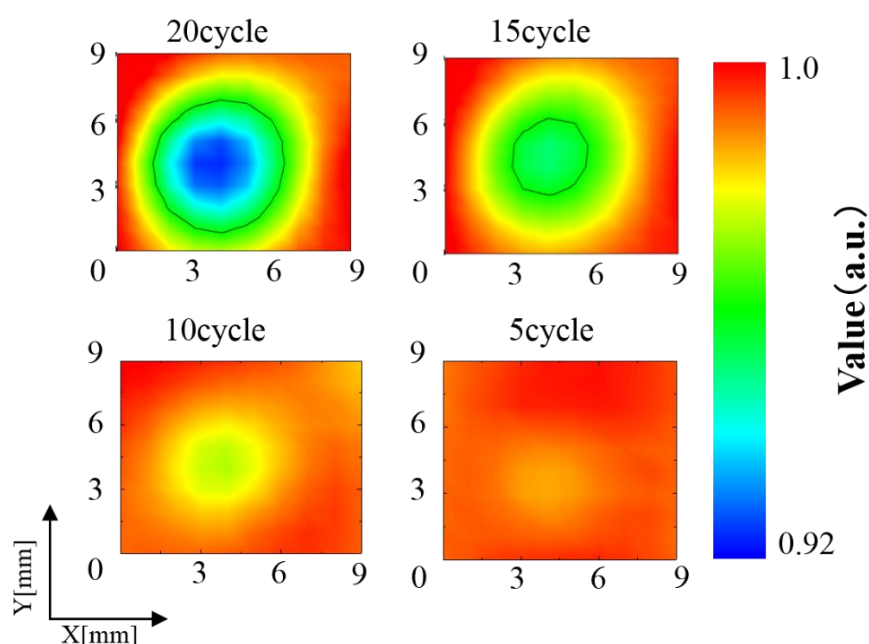


図 4-13 品質異なるサンプルを用いて計測した磁場強度の結果

異なる周波数で平面マッピングを測定し，検出した磁場のある値を閾値として等高線抽出すると，スポット溶接の内部構造を 3D 画像化して溶接部全体の状況を調べることが可能と考えられる．そこで 20 cycle と 15 cycle の試料を対象として測定した磁場強度より 3D 画像化した結果をそれぞれ図 4-14 (a) と図 4-14(b) に示す．縦軸が周波数，X と Y は測定位置である．サイクル数が大きいほどナゲットがきれいに生成され，サイズも大きいと見える．図 4-14(b)に

示している 15 cycle の内部 3D 画像により，対象物が不良品の場合生成したナゲットの大きさが小さいとナゲットがきれいに生成できず，周りに傷が有ると見えた．検出した磁場強度を用いて内部構造 3D 画像化した結果を利用し，対象スポット溶接の品質評価が出来ると分かった．

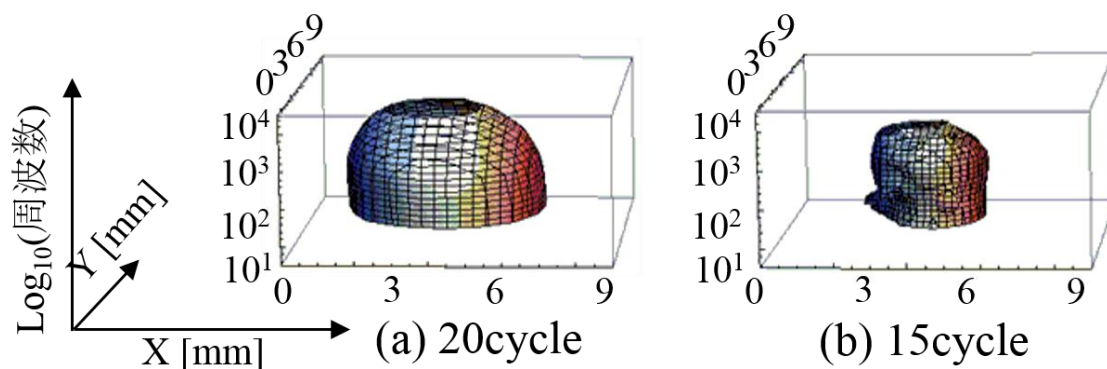


図 4-14 品質異なるサンプルを用いて測定した磁場強度の 3D マップ

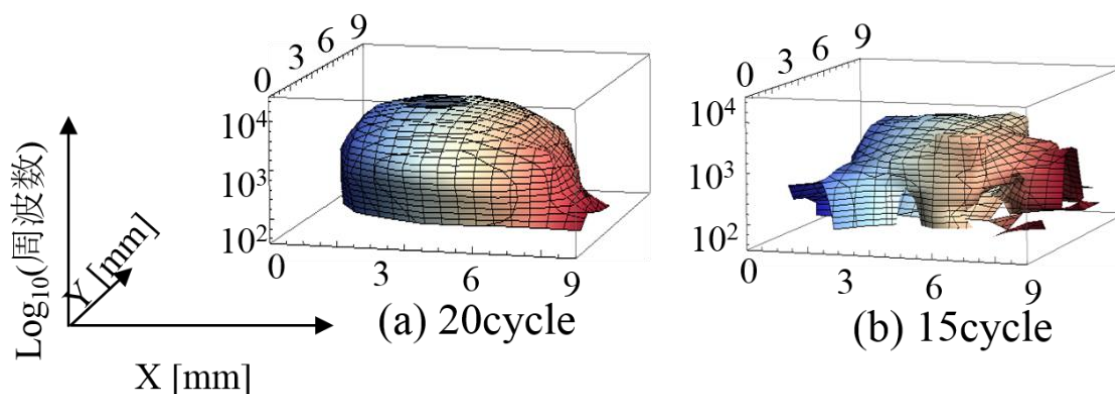


図 4-15 品質異なるサンプルを用いて測定した磁場位相の 3D マップ

強度と同じように，検出した位相も各周波数で測定した結果から等高線を抽出して，ナゲットの内部構造 3D 画像化した結果が図 4-15 に示す．20 cycle と 15 cycle の試料を対象として測定した磁場位相より 3D 画像化した結果をそれぞれ図 4-15 (a) と図 4-15(b) に示す．縦軸が周波数，X と Y は測定位置である．

検出した磁場の位相を用いて作成した内部構造 3D 画像化した結果により、サイクル数が大きいほど検出されたナゲットが大きくてきれいに見える。図 4-15(b)に示している 15 cycle の内部 3D 画像により、対象スポット溶接の溶接部の周辺に欠陥が見られ、不良品と判断できる。検出した磁場位相を用いて内部構造 3D 画像化した結果を利用し、対象スポット溶接の品質評価が出来ると分かった。

各周波数の磁場を印加して広い範囲でスキャンすると、磁場強度と位相の 3D マップでスポット溶接の内部構造を全面的に評価する事が可能と分かった。

<4.6> まとめ

本章ではスポット溶接で接合された三層鋼板を対象物として第 3 章で説明したシステムを用いてスポット溶接の健全性を評価した。4.2 節では、本章の解析対象のスポット溶接の溶接法、応用領域、評価基準などについて説明した。

4.3 節では、渦電流探傷検査法を用いて実際に評価を行うために用意した測定対象のスポット溶接サンプルについて紹介した。4.4 節では、提案したシステムと解析法を用いて実測した結果とその結果に対する議論を述べた。まず、提案した渦電流探傷検査システムを用いて検出した磁場の位相を評価パラメータとしてスポット溶接の溶接部を検出できることを確認した。また、周波数を変化させて検出した結果を用いて、スポット溶接の内部構造の画像化に成功した。また、リフトオフの影響を確認するため、リフトオフが変化した場合の検出した磁場強度と位相変化を確認した。磁場の強度はリフトオフの影響を受け、リフトオフがある程度大きくなると対象物の内部構造解析が難しいが、磁場の位相はリフトオフの影響を受ける程度が小さいため、リフトオフを一定にコントロールし難い場合には検出磁場信号の位相を用いて対象物の評価が適していることを明らかにした。4.5 節では、検出した磁場の強度と位相で作成した 3D マップを用いてスポット溶接欠陥の内部構造解析結果に対する議論を述べた。溶接部を中心とした 9 mm × 9 mm の範囲で 10 Hz から 10 kHz までの様々な周波数を印加し、表皮効果による磁場の浸透深さの違いを利用して、

磁場強度を用いて溶接状況の深さ分布を画像化した。溶接部の 3D マップからナゲットの状態を判断することができ、溶接の内部構造解析が可能であることが分かった。

第5章 渦電流探傷法を用いた金属内部スリット傷の測定

本章では渦電流探傷検査法の応用領域を広げるため、厚い金属材料の内部スリット傷の探傷検査を行った。

一般的な渦電流探傷検査法では印加コイルが作る磁場により渦電流を試料内に発生させ、検出コイルで渦電流から生じる二次磁場を検出する。ただし、厚い金属の内部探傷検査する場合、対象物の深部を検査するには、対象物の裏面まで磁場を侵入させる必要がある。それを実現するには低周波でも安定した磁気の検出感度を持つ磁気センサが必要となる。本研究では低周波磁場を高周波磁場と同じ感度で検出できる磁気センサを導入して、厚い金属板の内部スリット傷の探傷検査を行った。本研究の対象物は非磁性金属のアルミ板と強磁性金属である SS400 鋼板の二種類である。磁気を対象物に印加する場合、非磁性金属と強磁性金属に生成される渦電流と磁場の分布が異なる、特に内部構造解析と内部傷探傷検査を行う場合、対象物の磁気特性の影響は無視できない。そのため、磁気非破壊検査を用いて内部構造を解析するには、対象金属の磁性によって妥当な計測方法で行う必要がある。本章では、2 種類の金属に対する妥当な計測法を議論する。

本章では以下の内容について述べる。

5.1 節は、本章の導入部である。

5.2 節では、磁気非破壊検査で用いられる磁気センサについて紹介する。

5.3 節では、対象サンプルについて紹介する。

5.4 節では、厚いアルミ板と SS400 鋼板を対象とする場合の内部スリット傷探傷検査のシミュレーションモデルを紹介し、シミュレーションで計算した結果を紹介する。

5.5 節では、渦電流探傷検査法を用いて厚いアルミ板の内部探傷検査の結果を紹介する。

5.6 節では、渦電流探傷検査法を用いて厚い鋼板の内部スリット傷の検査結果を紹介し、鋼板を用いた場合の問題点を明らかにする。そして、厚い鋼板を

対象物とする場合の最適な探傷検査法を提案する。

5.7 節は、本章のまとめである。

<5.1> はじめに

金属板は、現在社会において非常に重要な材料の一つとして非常に広く応用されている。金属板にはアルミ板などの非磁性金属と鋼板などの強磁性金属の主に二種類がある。

アルミニウムは常温常圧で高い熱伝導性、電気伝導性を持ち、加工性が良く、また軽量であり、高い耐食性を持っており、現在我々の身の回りでアルミニウムが広く用いられている。実用金属としては、耐震ブレース、アルミの橋、アルミトラスなどに広く使われている。また、今日の自動車産業では燃費向上が求められているため、アルミの採用が推進されている。そのため、アルミニウムの安全性を保障する常時検査できる検査法が必要とされている。

一方、鋼板は建造物や橋梁、船舶、飛行機などに使用されている。鋼板の健全性が建造物などの安全性を決める重要な要因の1つである。鋼板に傷がある場合、場合によっては建造物の破壊まで進展する恐れがある。このような状況から、鋼板による建造物を定期的に検査することは、社会の安全性を考えるうえで非常に重要な課題である。

本章では、これら2種類の金属板を対象として渦電流探傷検査法を用いて内部スリット傷の探傷検査を行った。

一般的な渦電流探傷検査法では印加コイルが作る磁場により渦電流が発生し、検出コイルで渦電流から生じる二次磁場を検出する。コイルは、高周波磁場に対して感度がよいことから、導電性材料の表面および表面付近の傷を検出する手段として用いられている。しかし、金属の内部構造解析と内部探傷検査を実現するには磁場の表皮効果の影響により低周波磁場を印加する必要がある。検出コイルは低周波磁場に対しては感度が低く、周波数によって出力電圧の大きさが異なるため補正する必要があるなどデメリットがある。安定で信頼性の高い渦電流検査法を実現するには、低周波でも安定した磁気感度を持つ磁気セン

サが必要となる．そこで磁場の検出に磁気センサを用いた非破壊検査法が考えられる．磁気センサは周波数に対して感度が一定であり，低周波磁場でも高感度取得が可能である．低周波磁場は浸透深さが深くサンプル内部に磁場を侵入させることができるため，内部の欠陥の情報を取得できる⁽⁴⁹⁾ことから注目されている．低周波磁場で高い感度を持つ磁気センサを用いた探傷実験としては超伝導磁束量子干渉計（Superconducting Quantum Interference Device：SQUID）⁽²³⁻³⁰⁾ や MR⁽⁵³⁾センサを用いた渦流探傷試験の例がある．SQUID は最も磁気感度の高い素子であり，DC を含めた低周波領域での磁気感度を持つが，その高い磁気感度から磁気計測をするときには磁気シールドを必要とすることと，超伝導を保持するための温度管理が必要となる．その反面，磁気抵抗センサは，磁気検出感度は SQUID には及ばないが，磁気シールドを必要としないことと比較的安価に入手できることから，磁気計測システムには磁気抵抗センサを用いるほうが産業界への実用化に大きなアドバンテージがある．磁気センサには異方性磁気抵抗 (Anisotropic Magneto Resistance) 効果を持つ AMR センサや AMR センサの数倍の感度を持つ巨大磁気抵抗 (Giant Magneto Resistance) 効果を持つ GMR センサ^(31,57,58)，さらには近年，非破壊検査で使用され始めてきたトンネル磁気抵抗 (Tunnel Magneto Resistance) 効果を持つ TMR センサなどがある．これらの磁気センサは，高感度かつ扱いやすいため磁気計測の応用範囲はますます広がっている．

<5.2> 磁気非破壊検査用磁気センサ

本節では，磁気を検出するセンサについて，その種類と感度などについて述べるとともに，本研究の磁気検出に用いた磁気抵抗効果素子の原理について述べる．

まず磁気を検出する磁気センサについて述べる．磁界のエネルギーレベルは範囲が広く，極低磁場では人間の心臓内を流れる心電流により発生する磁場から，地球が磁気を帯びていることから発生する地磁気，そして，モータから発生する電磁界などがあり，その磁場を計測する磁気センサも多種にわたる．図

(Superconducting QUantum Interference Device: SQUID と略) であり, ジョセフソン接合 (Josephson junction) を超伝導ループで接合した素子である⁽⁶³⁾. SQUID は超伝導ループを維持するために極低温に保たなければならないことや, 磁気シールド内での使用に限られるなどの制約があるが, 生体内の微弱な電流から発生する極微量な磁場の計測も可能で, 脳磁場 (Magnetencephalography)⁽⁶⁴⁾や心磁図 (Magnetocardiogram)⁽⁶⁵⁾などで実用化されている. 以下, 各素子について説明する.

ホール素子は, ホール効果 (Hall effect) を利用したもので, 電流を流した薄膜に外部磁界を印加した際, ローレンツ力により電子の進行方向が曲げられ, 薄膜内での電子の分布が偏ることにより発生する電位差を検出するものである. この現象は, 1879 年にアメリカの物理学者 Edwin Herbert Hall により発見されたので, このような名前がつけられている⁽⁶⁶⁾. 広いダイナミックレンジを持ち, 極性の判別が可能であることや, 磁界に対する出力特性がリニアな事が利点として挙げられる. 詳細については後述する.

磁気インピーダンス素子は, 1993 年に毛利が発見した磁気インピーダンス効果 (Magnet impedance effect) に基づく磁気センサで, 1997 年にパルス通電磁気インピーダンス効果を CMOS 電子回路で実現した新原理の高感度マイクロ磁気センサであり⁽⁶⁷⁾, MI センサと称する. MI センサは高周波電流を通電した軟磁性体に対し, 外部磁界を印加することで磁性体のインピーダンスが変化することを利用した磁気センサである^(68, 69).

フラックスゲート磁気センサは, 1936 年に Aschenbrenner と Gaubau によって発明されたもので, フラックス・ゲートセンサとは, 励起コイル, 受信コイル, 高透磁率 (軟磁性) 磁性材料からなるコア, 励起・受信回路で構成され^(70, 71), コア (鉄芯) にそれぞれ逆向き的一次および二次コイルが巻かれ, 一次コイルに交流を流すことによってコアを励磁して外部の直流磁界によって生じる二次側の出力電流から磁界強度を求める⁽⁷⁵⁾. 鉄心の代わりに軟磁性のフェライトやアモルファス合金も使用される.

フラックスゲート磁気センサの長所として以下の 6 点がある⁽⁶⁸⁾:

1. 磁場分解能が高い.
2. DC~100 Hz の磁界を測定可能.
3. 温度安定性が良い. 入力磁場に対する直線性が高い.
4. 磁力計がコンパクトに構成できる.
5. コイルの熱膨張や磁芯材料の特性のためドリフトや温度特性を生じる.
6. リングコア型フラックス・ゲートセンサでは磁芯の終端が無いいため優れた特性の磁力計が構成できる.

フラックスゲート磁気センサの短所が以下の 4 点がある⁽⁶⁸⁾:

1. 磁気パターン検出の際の空間分解能が悪い.
2. 巻線コイルを含む構造が複雑で製造コストが高い.
3. 絶対精度ではプロトン磁力計よりも劣る.
4. 移動体での測定では精度の高い姿勢情報が必要となり、その使用は特別な場合に限定される.

光ポンピング磁力計は、磁界中の原子のエネルギー準位がゼーマン効果 (Zeeman effect) で分離したとき、光照射により準位間の原子数の差を大きくし、分離した準位間エネルギー差から磁界の大きさを精密に測定するものである。超伝導を用いている SQUID の次に感度の高い磁気センサであり、心磁図などにも応用されている⁽⁷⁶⁾。

光ポンピング磁力計の長所は以下の 4 点がある⁽⁷⁵⁾:

1. プロトン磁力計に比べて周波数が約 100 倍なので磁力値の読みとり桁数も 2 ケタ程度増やすことが容易なので高感度.
2. プロトン磁力計に比べて低消費電力.
3. 連続測定が可能.
4. 超伝導量子干渉素子 (SQUID) に匹敵する高感度を冷却装置なしに達成可能.

光ポンピング磁力計の短所が以下の 5 点がある⁽⁷⁵⁾:

1. ゼーマン効果係数が正確にわかっていない.
2. 光の吸収バンドが有限の周波数幅を持つ.
3. 磁場と光軸との角度がわずかながら影響を与える.
4. 構造上、高感度を維持するためには小型化には限界がある($\sim 1\text{cm}^3$)ので集積化が困難.
5. ダイナミックレンジが狭く、0 付近の磁場強度で機能する.

磁気抵抗素子 (Magneto-resistive element) は、本研究で用いた磁気センサであり、ホール素子と合わせて以下で詳しく述べる⁽⁷²⁻⁷⁴⁾.

磁気抵抗素子は固体の電気抵抗が磁界によって変化する磁気抵抗効果を利用して磁場の大きさを計測することを目的とした磁気センサである. 磁場によって物質の電気抵抗が増加する現象は 1856 年にイギリスのウィリアム・トムソンによって発見され、磁気抵抗効果 (Magnetoresistance) と呼ばれている.

この磁場による抵抗の変化には、素子を構成する物質の抵抗率それ自身が磁場によって変化する物理的な磁気抵抗率変化と、磁場によって素子内の電流経路に変化が起き、見かけ上電流経路が長くなるために素子の抵抗が増加する素子形状による磁気抵抗効果がある. なお、一般に用いられている磁気抵抗素子は、抵抗変化の大きな後者の効果を利用しており、抵抗率の変化の大きさは素子の形状とキャリアである電子の移動度に依存している.

以下に、磁気抵抗素子について、ホール素子を含めて説明する^(79,80). ホール素子と磁気抵抗素子、それぞれの説明図を図 5-2 に示す. なお図 5-2 は、素子に直流電流 I を通電し、外部磁界 H を印加した場合に、素子に発生する電界 E について説明しており、これらは総称して、ガルバノ効果 (Galvano magnetic effect) と呼ばれている.

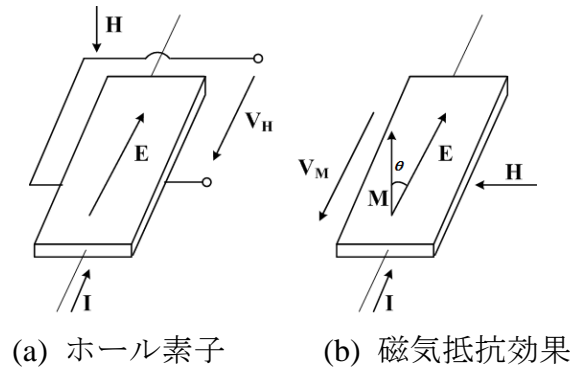


図 5-2 ガルバノ磁気効果

図 5-2 で示すガルバノ効果は、ロシアの Landau によって現象論的に電界ベクトル E に 関する次式で表されている⁽⁵⁵⁾。

$$E = \rho i + a(i \times H) + bH(i \cdot H) \quad (5.1)$$

ここで、 ρ は電気抵抗率、 i は電流密度ベクトル、 H は外部磁界ベクトルで、 a および b は定数である。

式 5.1 において、第一項はオームの法則によって発生するオーミック電界ベクトル E_ρ 、第二項はホール電界ベクトル E_H 、第三項は磁気抵抗効果の電界ベクトル E_{MR} である。

ホール電界ベクトル E_H は、電流密度 i と逆方向に移動する伝導電子が、 i と外部磁場 H のなす面に垂直方向にローレンツ力を受け、試料の表面にキャリアがたまり、電流と磁場の両方に直交する方向に電場（ホール電場）が生じ、起電力が発生する。 $R_H = -E_H/iH$ はホール係数と呼ばれる。ホール係数が既知の物質を用いて、ホール電界を計測すれば、磁界が計測できる。このような原理と構造を持つ磁界センサをホール素子と呼ぶ。

磁気抵抗効果は、式 5.1 の右辺第三項による効果である。外部磁場 H の方向に電界 E_{MR} を生じる現象である。 $R_M = E_{MR}/iH^2$ は、磁気-抵抗係数とよばれる。今、素子に磁性体を考え、その磁化ベクトル M を磁化率 χ を用いて $M = \chi H$ とした場合、式 (2.1) の右辺第三項は以下の式で表される。

$$E_{MR} = b \frac{M}{\chi} (i \cdot \frac{M}{\chi}) = \beta M (i \cdot M), \quad \beta = \frac{b}{\chi^2} \quad (5.2)$$

式(5.2)より磁性体では E_{MR} は M の方向に生じる。磁化ベクトル M と電流密度

ベクトル i のなす角を θ としたとき、 E_{MR} は i ベクトルの進行方向に $\beta l M^2 \cos^2 \theta$ 、垂直方向に $(\beta l M^2 / 2) \sin 2\theta$ の電界成分を発生する。

素子の長さを l 、断面積を S 、電流を I とすると、素子の長さ方向に発生する電圧 V は、 $V = \beta l (I/S) M^2 \cos^2 \theta$ となるので素子の電気抵抗 R は次式で表される。

$$R = (\beta l M^2 / S) \cos^2 \theta \quad (5.3)$$

磁気抵抗素子は磁性薄膜で作製されることが多く、磁気異方性は素子の長さ方向に設定され、式 (5.2) より、 $H = 0$ では $\theta = 0$ ($\cos \theta = 1$) となり素子の抵抗 R が最大値となり、式 5.3 より、 H に対して対称的に R が減少することがわかる。このように、磁界を印加すると内部抵抗が減少する特性を負の磁気特性と呼ぶ。

本研究では低周波磁場を検出する必要があるため、検出コイルではなく磁気異方性を利用した AMR センサを使用した。実際に用いた磁気抵抗素子は Honeywell 社の HMC1021 であり、その形状とピン配置を図 5-3 に示す。また、HMC1021 の諸特性を表 5-1 に示す。本 AMR センサは組み立てが容易で、高速 SMT アセンブリとの互換性がある、ノイズが低い、強い磁場環境で使用できるなどいろいろ特性があるため、本研究では Honeywell 社の HMC1021 センサを選んだ。

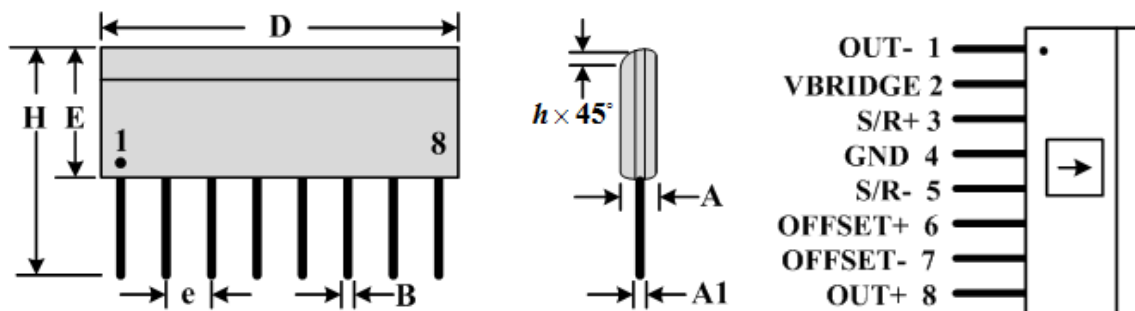


図 5-3 MR センサの形状

表 5-1 MR センサの諸特性

Characteristics	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Field Range	Full scale (FS) – total applied field	-6		+6	gauss
Sensitivity	Set/Reset Current = 0.5A	0.8	1	1.25	mV/V/gauss
Noise Density	@ 1Hz, Vb=5V		48		nV/sqrt Hz
Resolution	10Hz Bandwidth, Vb=5V		85		μgauss
Bandwidth	Magnetic signal (lower limit = DC)		5		MHz
Disturbing Field	Sensitivity starts to degrade.	20			gauss
Cross-Axis Effect	Cross field = 1 gauss, Happlied = ±1 gauss		+0.3		%FS
Max. Exposed Field	No perming effect on zero reading			1000 0	gauss
Set/Reset Straps					
Resistance	Measured from S/R+ to S/R-	5.5	7.7	9	ohms
Current	0.1% duty cycle, or less, 2μsec current pulse	0.5	0.5	4	Amp
Offset Straps					
Resistance	Measured from OFF+ to OFF-	38	50	60	ohms
Offset Constant	DC Current Field applied in sensitive direction	4	4.6	6	mA/gauss

<5.3> 測定サンプル

本研究では 2 種類のサンプルによる測定を行った。1 つ目はアルミニウム厚板である。2 つ目は厚い鋼板，材質は SS400 である。2 種類のサンプルの形状は同じであり，図 5-4 に示す。サンプルの寸法は 120 mm×150 mm×10 mm である。測定サンプルの中心には幅 1 mm，長さ 15 mm のスリット欠陥を，サンプル裏

側から 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm の深さで設けた.

測定範囲は図 5-4 の点線で示すようにスリット傷を中心として 40 mm×40 mm の範囲を 2 mm 間隔で 21×21 点測定し, 検出信号の位相による鋼板の内部構造の画像化を行った.

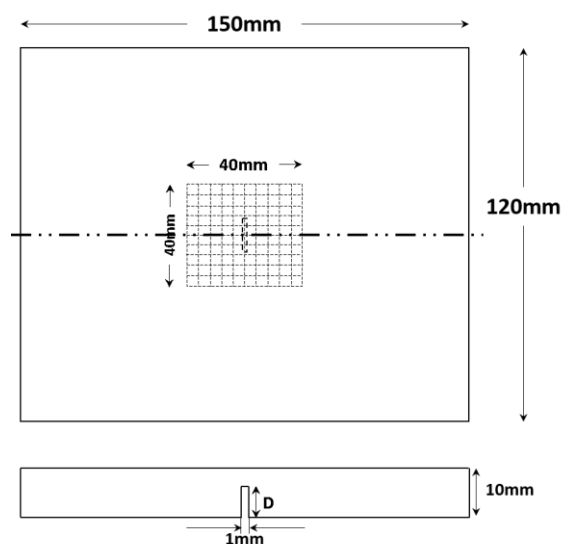


図 5-4 解析対象厚い金属板サンプル

<5.4> 測定システム

図 5-5 に測定装置の構成を示す. 発振器, 交流電流源, 磁場印加コイル, AMR センサ, X-Y 自動走査ステージ, ロックインアンプ, PC で構成される. 安定した磁場を試料に印加するため, 本研究で用いた印加コイルは手巻きコイルでなく, 長方形 24.55 mm × 13.80 mm の 5 層プリント基板楕円コイルを採用した. 印加電流は周波数 100 Hz, 振幅 0.1 A の交流電流である.

検出部には異方性磁気抵抗素子(AMR)を用いた. AMR センサ部分には直接印加磁場が入るのを防ぐために, 印加磁場と逆相になるように補償コイルを巻いた. これは S/N 比を向上させるとともに, センサのダイナミックレンジを広げる役割を持っている. 印加コイルプローブの構成を図 5-5 に示す. 図 5-6 (a) は印加コイルプローブの写真を示す. 図 5-6 (b) は印加コイルとキャンセルコイルの接続法を示す. 印加コイルとキャンセルコイルの巻き数はそれぞれ 50 回巻,

10 回巻きである。また、印加周波数の切り替えやデータの保存には LabVIEW™ を用いた。

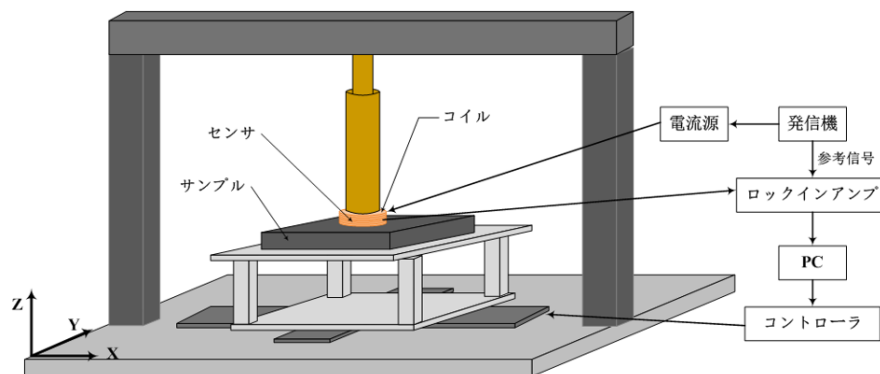
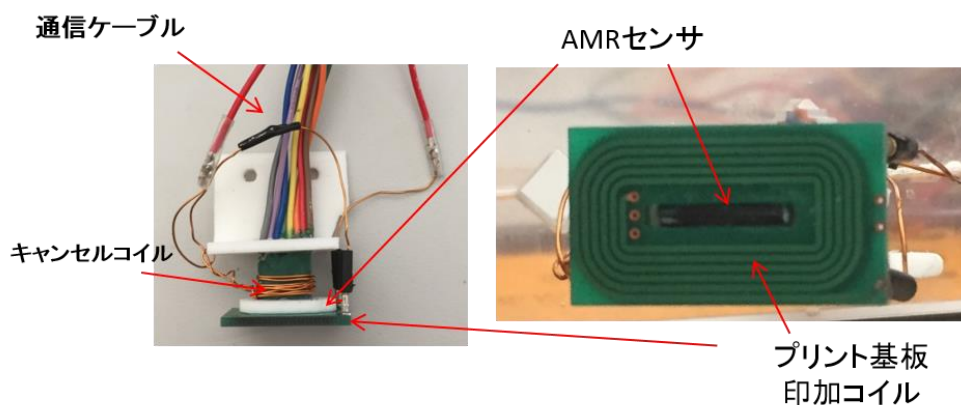
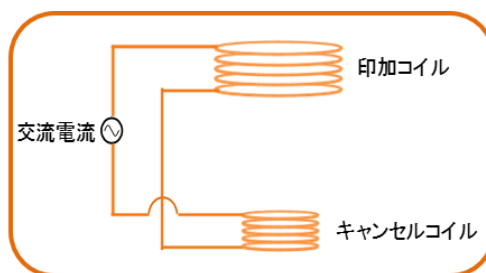


図 5-5 測定装置の構成



(a) 印加コイルプローブの写真



(b) 印加コイルとキャンセルコイルの接続法

図 5-6 印加コイルプローブの構成

<5.5> 厚い金属板を対象とする場合のシミュレーション設計と計算結果

実際の測定装置と対象サンプルをもとにして作ったシミュレーションモデルの概略図を図 5-7 に示す。

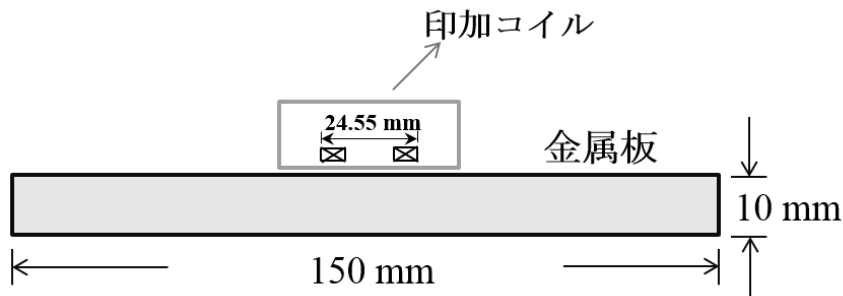


図 5-7 シミュレーションモデル

対象物の金属板のサイズは実測のために用意したサンプルと同じであり、120 mm×150 mm×10 mm に設定した。裏面のスリット傷の長さが 15 mm、幅が 1 mm であり、深さが 10 mm (貫通傷)、8 mm (表面下 2 mm)、6 mm (表面下 4 mm)、4 mm (表面下 6 mm)、そして 0 mm の (健全サンプル) の 5 種類である。印加コイルは長方形 24.55 mm × 13.80 mm にし、金属板の表面から 1 mm 離れて設定した。

<5.5.1> 厚い金属板を対象とする場合のシミュレーション結果

まず、10 mm のアルミ板を対象とする場合、裏面まで完全に探傷検査できる印加磁場の周波数を調べるため、健全サンプルを用いて、10 kHz、1 kHz、100 Hz、10 Hz と 1 Hz の磁場を印加してアルミ板内部の磁束密度の分布を計算した。各周波数磁場を印加した場合の計算結果を図 5-8 に示す。

図 5-8 に示している結果において、縦軸は Z 方向、横軸は X 方向、カラーバリエーションの変化は磁束密度の変化を表す。高周波磁場を印加した場合、表皮効果の影響によって、磁束は表面の近くに分布する事が見られる。しかし、印加磁場の周波数を下げた場合、磁束より深い部分にまで侵入する事が分かる。図 5-8 よ

り、10 mm 深さのアルミ板を検査対象とする場合、アルミ板内部までを完全に探傷するには、周波数が 100 Hz 以下の印加磁場を必要とする。検査時間など考慮し、印加磁場周波数は 100 Hz に設定した。

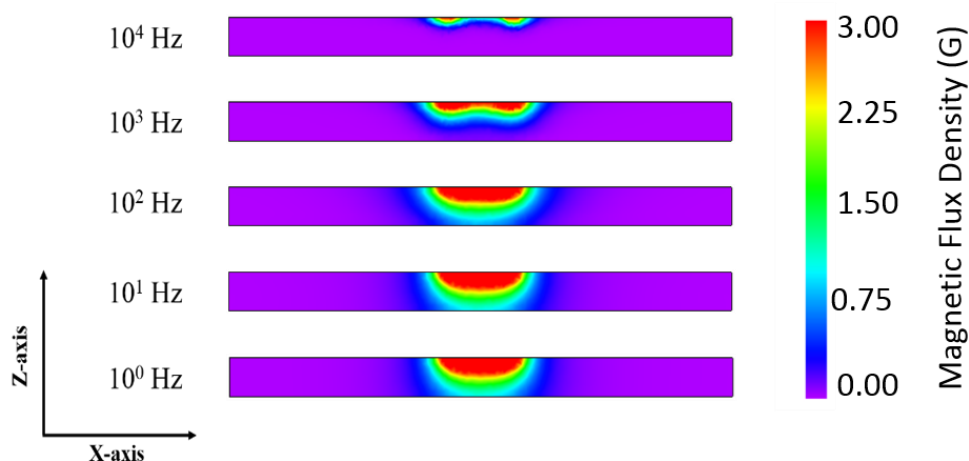


図 5-8 健全アルミ板サンプルを用いて金属板内部磁束密度の分布

アルミ板の裏面に各深さのスリット傷が存在する場合について、100Hz の磁場を印加した場合の渦電流分布を計算し、その結果を図 5-9 に示した。

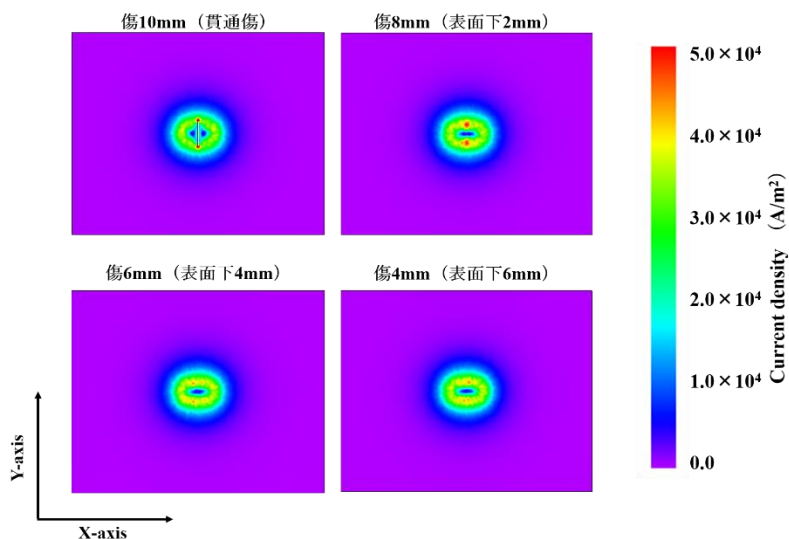


図 5-9 各深さのスリット傷が有るアルミ板に発生した渦電流の分布

図 5-9 において、まず、交流磁場を印加した場合に渦電流の生成が確認できた。また、貫通傷が有るサンプルで計算した結果から、渦電流の流れる通路に傷が有る場合、その部分には渦電流が流れず傷を避けようとするため、貫通欠陥ではエッジ部分で渦電流分布が集中していることも分かる。さらに、内部傷が表面付近にある場合、表面の渦電流分布の変化が見られる。渦電流分布の変化によって、渦電流から生じる二次磁場が変化する事が考えられる。傷の深さの違いにより、渦電流の位相に差が生じ、渦電流が作る磁場の位相のずれも異なることが考えられる。この結果を利用し、検出した磁場信号によって傷の深さを判断する事が可能と考えられる。

<5.5.2> 厚い強磁性金属板を対象とする場合のシミュレーション結果

強磁性金属を対象とする場合、金属内部の磁場を印加周波数の磁場を変えて計算した結果を図 5-10 に示す。10 mm の鋼板を対象とする場合、裏面まで完全に探傷検査できる信号を調べるため、健全サンプルを用いて、10 k Hz, 1 k Hz, 100 Hz, 10 Hz と 1 Hz の磁場を印加して鋼板内部の磁束密度の分布を計算した。

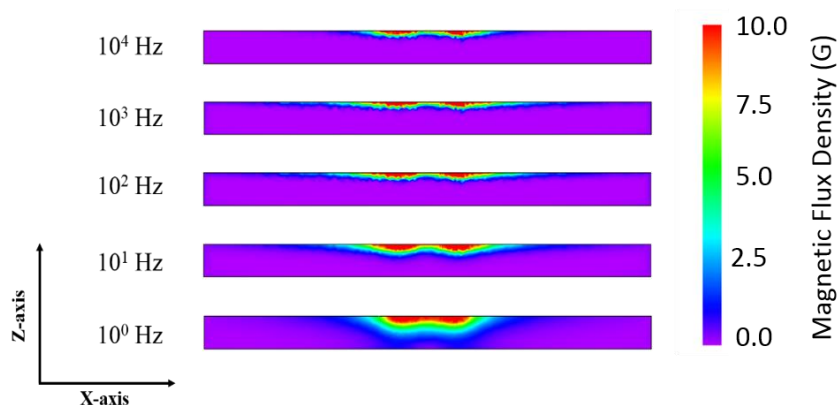


図 5-10 健全銅板サンプルを用いて計算した金属板内部磁束密度の分布

図 5-10 に示している結果において、各結果図の縦軸は Z 方向の位置、横軸は X 方向の位置、カラーバーの変化は磁束密度の変化を表す。高周波磁場を印加した場合、表皮効果の影響によって、アルミ板の場合と同様に磁束は鋼板表

面の近くに分布する事が見られる。印加磁場の周波数が低くした場合磁束は鋼板内部に侵入したが、アルミ板の場合と比較して侵入する深さが小さくなった。これは、強磁性金属である鋼板の透磁率が大きく、浸透深さが小さくなったためである。シミュレーション結果に示しているように、対象物が厚い鋼板（シミュレーションには 10 mm の鋼板）である場合、非常に低い周波数磁場を印加しても磁束が裏面まで届かない。そのため、厚い強磁性金属板を対象とする場合、渦電流探傷検査法でなく、鉄鋼材料の自動検査を目的として発展してきた漏洩磁束探傷検査を用いて探傷する方がよいと考えた。具体的な方法は第 6 章で紹介する。

<5.6> アルミ板の測定結果

シミュレーション結果から、厚さ 10 mm のアルミ板を完全に探傷できる磁場周波数は 100 Hz 以下であることが分かったため、実測では印加磁場の周波数を 100 Hz に設定した。

まず貫通傷のサンプルを用いて、磁場の強度と位相でアルミ板の評価を行った。測定結果の規格化したものを図 5-11 に示す。

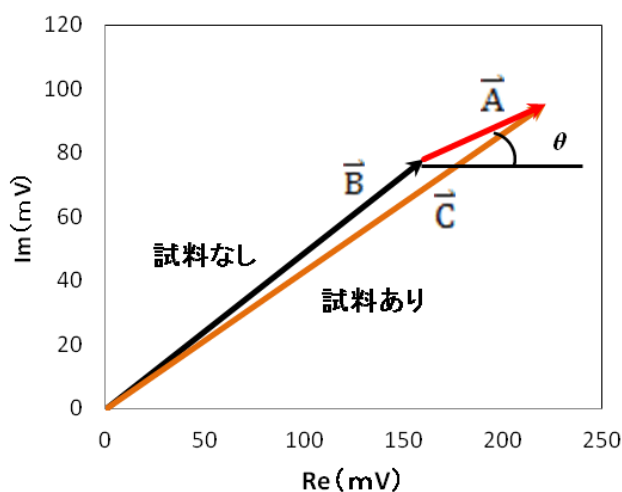


図 5-11 測定結果の規格化した値

Bは試料なしで測定した結果、Cは試料ありで測定した結果である。BとCを差分して結果を規格化したAの強度と位相を用いて測定範囲の強度マップと位相マップを作成した。結果を図5-12に示す。結果により、強度マップでは傷の検出がうまくできてない、位相マップでは傷をきれいに検出できることが分かった。検出磁場の強度はリフトオフなどの影響を受け、減衰しやすいため、外部環境により傷の検出が困難であることが考えられる。そこで本研究では位相マップを裏面欠陥評価に採用した。

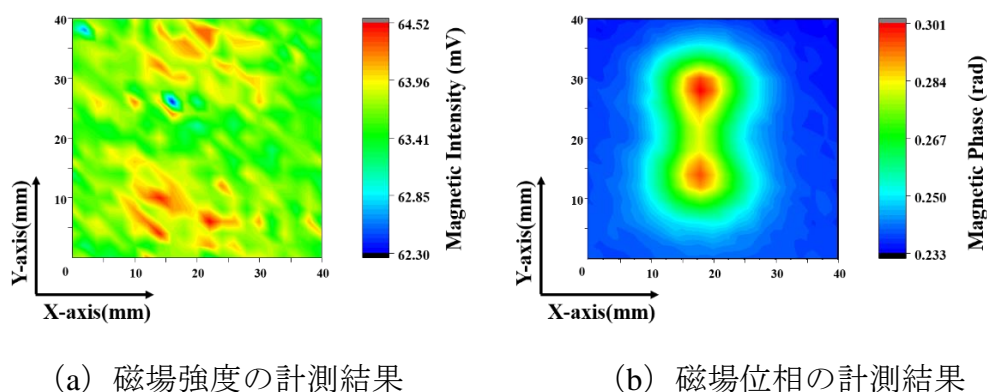


図5-12 測定した結果の強度と位相を規格化したマップ

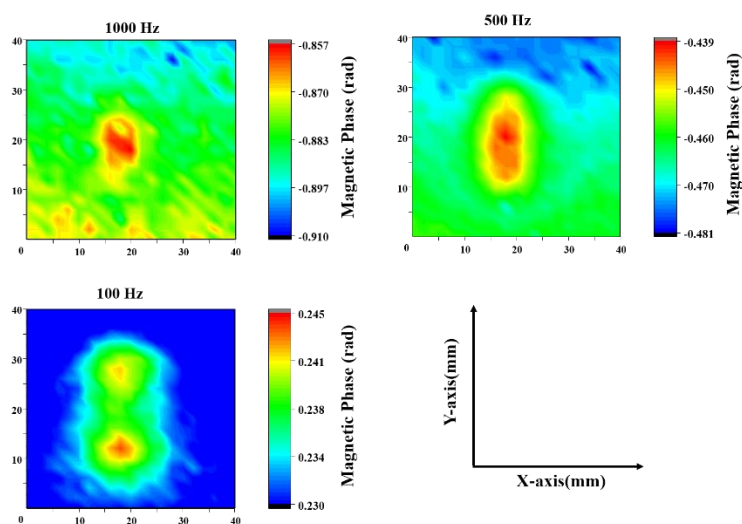


図5-13 傷深さ8mmのサンプルを用いて印加磁場周波数による位相マップ

傷深さ 8mm のサンプルを用いて各周波数磁場を印加した場合の磁場位相マップを図 5-13 に示す。印加磁場の周波数は 1 kHz, 500 Hz と 100 Hz の場合に測定した結果である。裏面にあるスリット傷の深さが 8mm (表面から下 2 mm) の傷を探查する場合、一番高い周波数の 1kHz の磁場を用いて傷の検出ができたが、傷の大きさや形状などを判別することは困難である。一方、印加磁場の周波数を下げると、傷の検出だけでなく、傷の範囲、形状を判断する事が可能と考えられる。

そこで、印加磁場周波数を 100 Hz に固定し、傷の深さを変化させた場合の位相マップを図 5-14 に示す。それぞれ裏面にあるスリット傷の深さは 10 mm, 8 mm, 6 mm と 4 mm のサンプルを用いて測定した結果である。同じ周波数の磁場を印加した場合、傷の深さに応じて渦電流の分布が異なり、検出した磁気信号も傷の深さに応じて変わる。そのため、図 5-14 で示したように、傷の深さに応じて位相マップが変化し、位相マップで傷の深さを判断することが可能と考えられる。

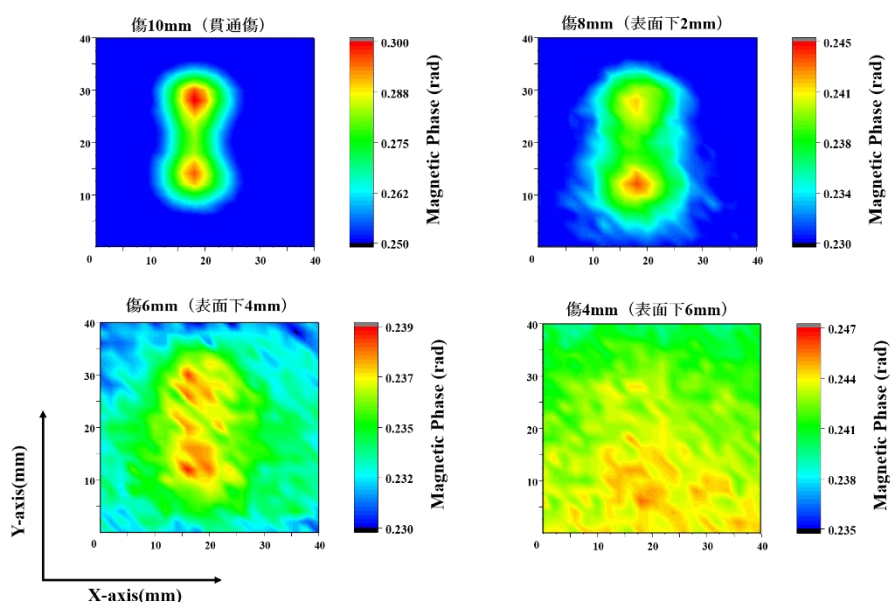


図 5-14 周波数 100 Hz に固定し傷深さ異なるサンプルを用いて測定した位相マップ

<5.7> まとめ

低周波渦電流探傷法を用いて金属板の内部傷解析を行った。低周波磁場の浸透深さが深いため、低周波渦電流探傷法により金属内部の傷を検出することが可能であることが分かった。検出した磁場強度と位相をマッピングの作成し比較した結果、磁場強度は環境の影響を受けやすいため、内部傷の検出が難しいが、本研究で提案した位相マッピングは、金属内部傷の形状及び傷の深さに応じて位相マッピングが変化し、内部傷を判断する事が可能と分かった。

ただし、強磁性金属を対象とする場合、磁場の表皮効果の影響が大きいため、磁場が対象物の内部に侵入しにくい。そのため、低周波渦電流探傷検査法を用いて、厚い強磁性金属を対象とする探傷検査が難しいことも明らかになった。次章では、この問題に対する解決法を提案する。

第6章 漏洩磁束検査法を用いた鋼板内部スリット傷の測定

本章では漏洩磁束探傷検査システムについて論ずる。第3章から第5章では磁気非破壊検査で最も普及している渦電流探傷検査法を用いて三層スポット溶接の品質評価、厚いアルミ板の内部探傷検査を行う新規手法を提案し、その有用性を示した。ただし、低周波渦電流探傷法を用いた場合、厚い強磁性金属板の内部探傷検査が難しいということが分かり、本章では磁気探傷検査の方法の一つである漏洩磁束探傷法を応用した小信号漏洩磁束探傷検査法により強磁性金属板（鋼板）の内部探傷検査を行う。小信号を用いて漏洩磁束検査法を実行する方法の妥当性を確認するためのシミュレーションを行った。妥当性を確認した後、実測のために用意した内部スリット傷の深さが異なる10 mmの鋼板サンプルを対象物として、提案した渦電流探傷システムを用いて内部傷の探傷検査を行った。さらに、検出した磁場の位相を利用して、対象物の内部構造可視化を行った。

本章では以下の内容について述べる。

6.1 節は、本章の導入部である。

6.2 節では、漏洩磁束検査法の計測原理について説明する。漏洩磁束検査法での対象物内部における磁場分布、空間へ漏洩する磁束の発生及び計測原理などを含めて説明する。

6.3 節では、従来の漏洩磁束検査法では対象物を磁気飽和させるため、大型の装置を必要とし、コストが高く、強磁場・大電流に使用による安全の確保が必要になるなどの問題点を示し、この問題点を解決可能な小信号を利用する漏洩磁束探傷検査システムを提案する。

6.4 節では、有限要素法による小信号漏洩磁束検査妥当性の検討のため作ったシミュレーションモデルを示す。漏洩磁束検査法により、鋼板内部傷の検出計算結果を示す。シミュレーション結果により、提案した検査法の妥当性を議論する。

6.5 節では、実際に作った漏洩磁束検査システムを用いて厚い鋼板の内部探傷検査を行い、検査結果を議論する。

6.6 節は、本章のまとめである。

<6.1> はじめに

本章の研究では、強磁性金属の内部傷の探傷検査を、磁気非破壊検査法を用いて高精度かつ簡易な測定装置・測定手法で実現する事が目的である。漏洩磁束探傷検査は磁気非破壊検査法の一つであり、磁場を用いて非接触、安全に測定でき、計測の自動化がしやすい方法である。ただし、対象物を完全に磁化飽和させるため、大型の装置を用いて、強磁場と大電流を必要とする問題点がある。このような漏洩磁束検査法を用いて対象金属を探傷検査しようとする場合、大型装置の移動、安全性の確保などが難しいので、検査を実施できる範囲が限定されてしまう。漏洩磁束探傷検査法を広く応用するためには、磁化信号を小さくし磁化装置の小型化を実現することが望ましい。本章では、従来の漏洩磁束探傷検査法の改善により、前述の条件下で鋼板の厚板を検査することを提案した。

対象物を完全に磁化飽和させずに、弱い信号を用いて漏洩磁束検査を実行する場合、内部傷から磁束が空間に漏洩できるかを確認するため、シミュレーションを行った。まず、スリット傷ある場合とスリット傷がない場合の表面付近の磁束密度分布を計算し、空間に漏洩する磁束を確認する。次に、スリット傷の深さが一定である場合、高周波から低周波までの磁場を印加して、磁場の表皮効果が小信号漏洩磁束検査法へ与える影響を確認する。その後、印加磁場周波数を固定し、スリット傷の深さが異なる場合のサンプル表面付近の磁束密度分布を計算した。これにより、漏洩した磁束量を用いてスリット傷の深さを判断する可能性を確認する。

また、磁束が実際に空間へ漏洩したことを確認するため、測定点の磁場位相と強度を算出し、内部欠陥による磁場の変化を確認すると共に、磁場の強度と位相の変化量を観測し、位相と強度の適用性を比較した。

さらに、本研究で開発したシステムを用いて、各サンプルのスリット傷部分を中心に、X方向の磁場を測定する。検出磁場信号を画像化し、傷ある部分の磁場信号の変化によって、傷の位置、大きさ、深さなどを解析した。

<6.2> 漏洩磁束探傷検査法

ここでは、本研究で用いた漏洩磁束検査法の歴史、基本探傷原理及び近年の研究状況について述べる⁽⁵⁶⁻⁶¹⁾。

漏洩磁束探傷法は、鉄鋼材料の自動検査を目的として発展してきたもので、対象材を強く磁化飽和させたときに傷から発生する漏洩磁束を磁気センサによって検知する方法である。

漏洩磁束探傷検査法を実施する場合、強磁性体を磁化したときの内部磁束分布を図 6-1 に示す。

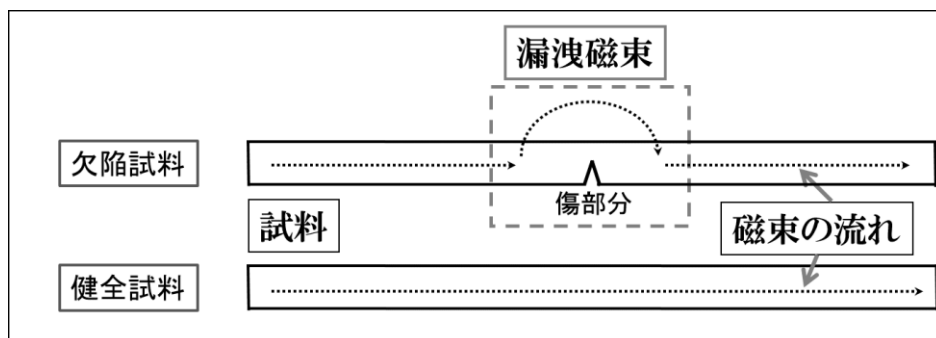


図 6-1 漏洩磁束探傷検査法の原理

磁性体を磁化飽和させた場合、試料内部に磁束が発生する。対象物が健全試料の場合、磁束は試料内を直進する。しかし、試料に欠陥などに起因する透磁率の変化が存在する場合、磁束が迂回するように進路を曲げる。磁束密度が十分大きい場合、図に示しているように、欠陥を避けようとした磁束の一部が強磁性体表面から空間に漏洩する。この対象金属表面から空間に漏洩した磁束を漏洩磁束という。漏洩磁束の検出により、対象物の欠陥を検出する事が出来る。

漏洩磁束検査を実行する場合、対象金属を磁化飽和させる必要がある。薄い

金属を対象とする場合、対象金属は磁化飽和させやすく、強磁場・大電流を必要とせず、検査時における安全性も高い。しかし、鋼板など強磁性金属は建造物や橋梁、船舶などに使用されており、建造物などの安全性を確保するため、薄い鋼板だけでなく、厚い鋼板も広く使われる。しかし、厚い鋼板の健全性を検査する場合、磁化飽和させるために非常に強い磁場が必要となり、磁化用装置が非常に大きくなってしまふ。そのため、工場など特定の環境以外で検査を実施する場合には適用が難しく、コストも高く、安全性の確保も難しくなる。従って、今現在使用している鋼板構造物の常時検査に利用するには難しく、測定システムを小型化し安全で汎用性のある方法が必要となる。

<6.3> 小信号漏洩磁束検査システム

従来の漏洩磁束検査法では対象物を完全に磁化飽和させ、漏洩した磁束を検出する。これは、図 6-2 の金属の磁化曲線に示した①の緑の枠内に示した領域で検査することを表している。

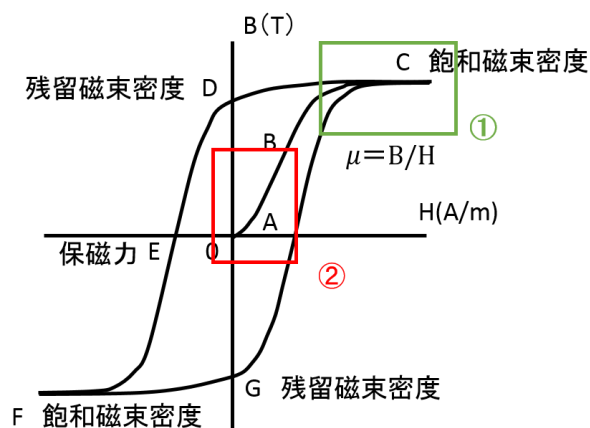


図 6-2 金属の磁化曲線

本研究では対象物を磁化飽和させず、図 6-2 の金属の磁化曲線に示している②の赤い枠内示した領域で探傷を行うことを提案する。この領域では漏洩磁束の強度が弱くなるが、この弱い信号を用いて検査できれば、印加磁場を小さく

でき、磁化用装置の小型化を実現できると考えた。本研究では、磁気飽和させない漏洩磁束検査で内部傷検査法を検討した。

図 6-3 は対象物内部の磁束分布を示す。対象金属を磁気飽和させる場合、対象金属内部の磁束分布は図 6-3 (a)に示しているように、表面から裏面まで磁束は平均的に分布する。一方、対象物を磁化飽和させない場合、磁束の分布は図 6-3 (b)に示したように、表皮効果の影響を受け磁束は対象金属の表面付近に集中し、内部に侵入しにくい。従って、対象物内部を検査するためには低周波磁場を用いて検査する必要がある。

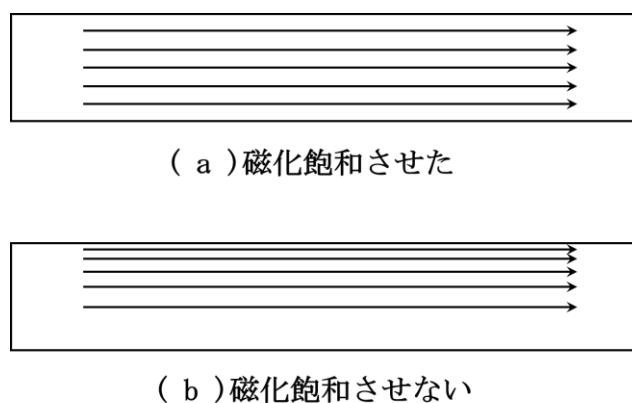


図 6-3 対象物を磁化飽和させたとさせない場合内部磁束分布

低周波の弱い磁場を不飽和領域で印加した場合、傷から漏洩した磁束の強度は飽和領域に比べて小さくなる。そのため、高感度磁気センサで磁場信号を検出する必要がある。そこで本研究では磁場の検出に低周波磁場でも感度の高い磁気センサを使用した。

提案した手法で構築した漏洩磁束検査システムを図 6-4 に示す。測定システムは、印加磁場コイル、フェライトコア、交流電流源、AMR センサ、ファンクションジェネレータ、ロックインアンプ、直流電源、Set/Reset 回路、PC、自動走査ステージ、測定対象から構成される。ファンクションジェネレータは交流電流源とロックインアンプにそれぞれ電流制御信号と参照信号を出力する。電

流源はファンクションジェネレータから出力された制御信号に従い交流電流を印加磁場コイルに印加し交流磁場を発生させる。発生させた交流磁場を測定対象に印加し、導体内部に磁束を発生させる。AMR センサは測定対象から発生した漏洩磁束の測定に用い、ロックインアンプで AMR センサが取得した信号とファンクションジェネレータからの参照信号を比較し、参照信号と同じ周波数成分を持った磁場強度と位相値を算出する。

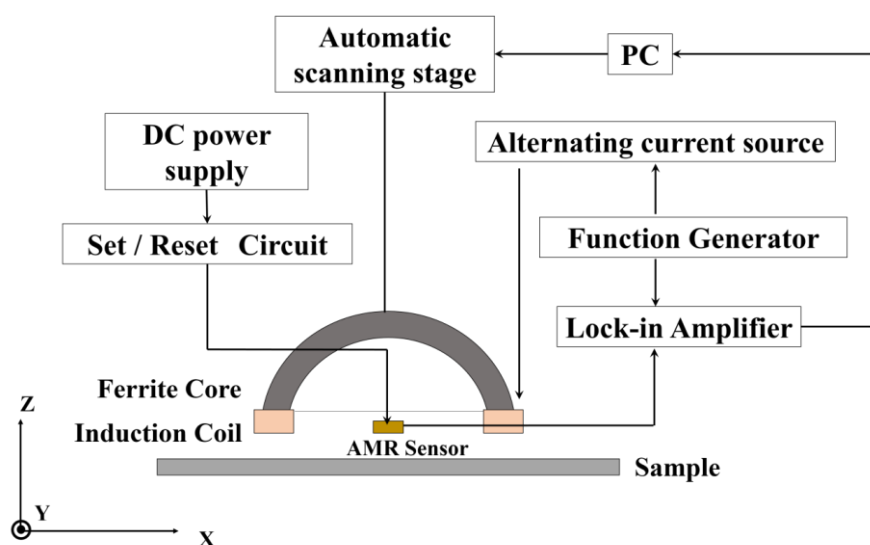


図 6-4 漏洩磁束検査システム

印加磁場コイルは断面が 10 mm×10 mm の半月状フェライトコアの両側に配置した。巻数はそれぞれ 30 回巻で同方向直列に接続した。磁場は Z 方向の磁場を印加し AMR センサを用いて X 方向の漏洩磁束を測定した。

<6.4> 有限要素法による小信号漏洩磁束検査妥当性の検討

開発した測定システムと同様の半月状フェライトコア及びコイルの形状によるシミュレーションモデルを作成した。モデルの詳細を図 6-5 示す。

半月状フェライトコアを解析対象サンプルの中心に設置し、センサは実際のシステムと同じようにフェライトコア両極の中心位置に設定した。解析対象サンプルは面積が 300 mm×120 mm、厚みは 10 mm に設定し、欠陥幅は 1 mm、

欠陥長さは 15 mm, 表面から欠陥の深さ D は 0 mm (貫通傷), 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm と 10 mm (傷なし) と設定した.

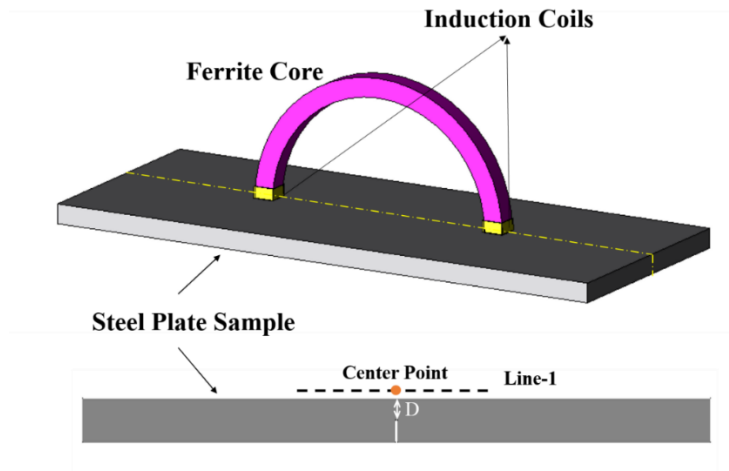


図 6-5 漏洩磁束検査法のシミュレーションモデル

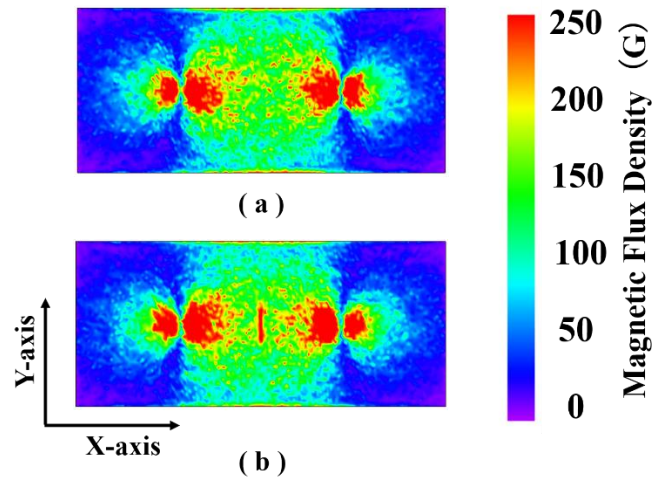


図 6-6 傷の有無によるサンプル表面の磁束密度分布の変化

図 6-6 に傷の存在する場合と傷が存在しない場合のサンプル表面における X 方向の磁束密度の分布を示す. 印加磁場周波数は 100Hz である. 図 6-6 (a) は傷のない健全サンプルの表面磁束密度分布, 図 6-6 (b) は中心部表面から 1mm

下に傷が有るサンプルの表面磁束密度分布を示す。横軸はX方向の測定位置，縦軸はY方向の測定位置である。シミュレーション結果から，傷が有る場合には，傷が存在する位置の金属表面で磁束密度が大きくなることが見られた。これにより提案した低周波小信号漏洩磁束探傷法においても，傷がある場合にその傷に起因して漏洩した磁束が増加すると考えら，提案した方法で鋼板内部傷の検出が可能と考えられる。

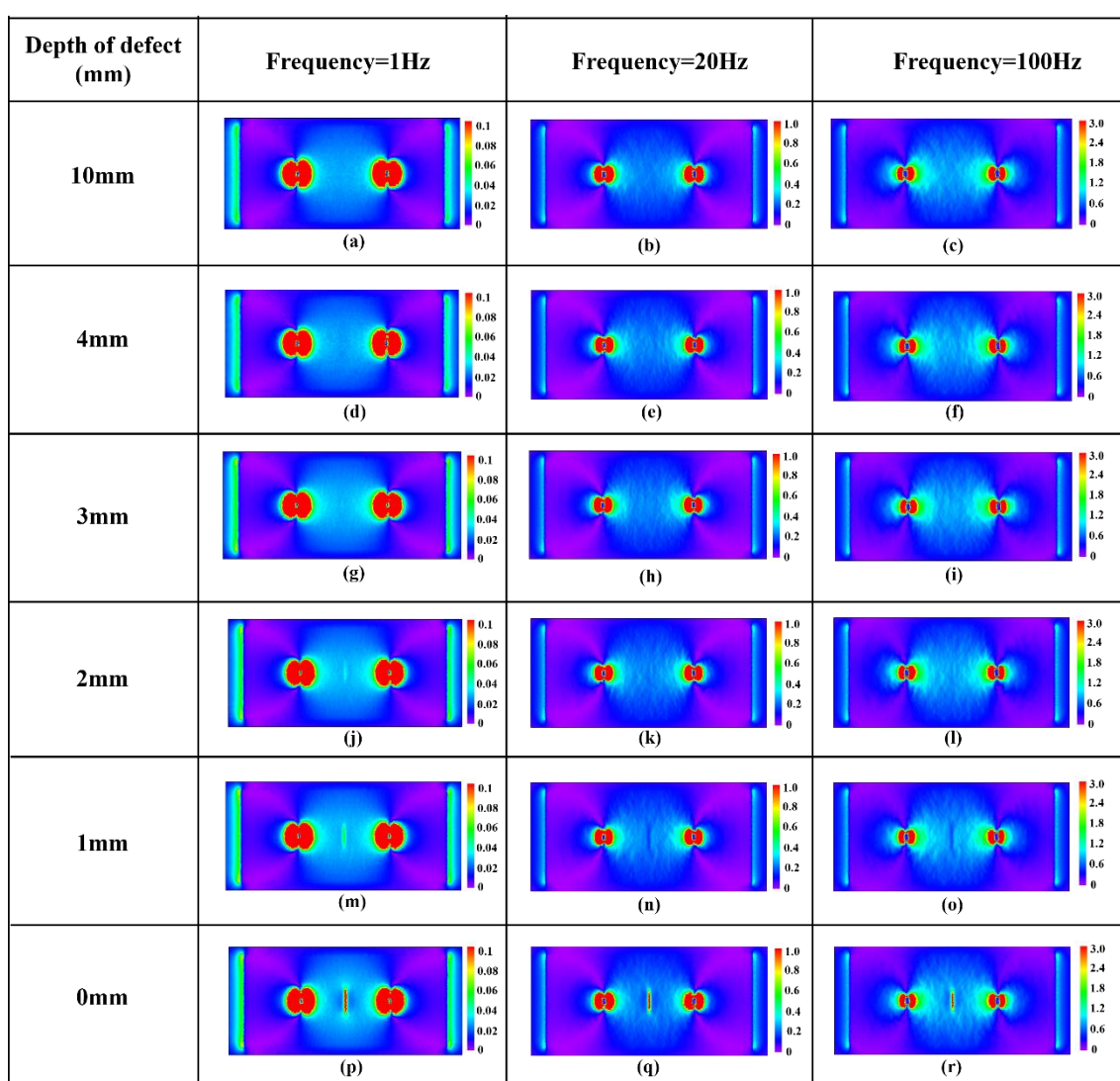


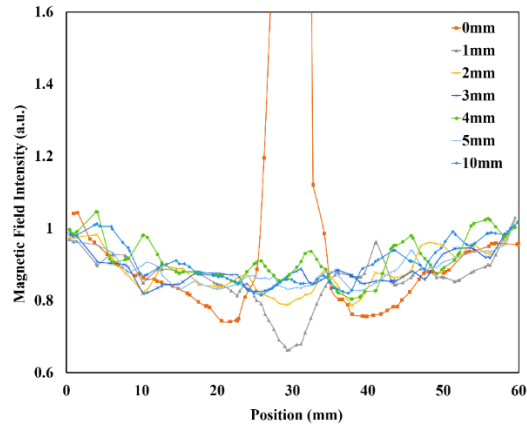
図 6-7 各サンプルに各周波数磁場を印加した場合空間磁束密度分布
(*カラースケールは磁束密度(G)を表わす)

シミュレーションでは印加磁場周波数を 1 Hz, 20 Hz, 100 Hz とした。それぞれのサンプルに各周波数の磁場を印加した場合、表面から 0.5mm 離れた平面の X 成分の磁束密度分布を図 6-7 に示す。図 6-7 には、各列がそれぞれの周波数、各行に表面から傷の深さが異なる画像を示している。

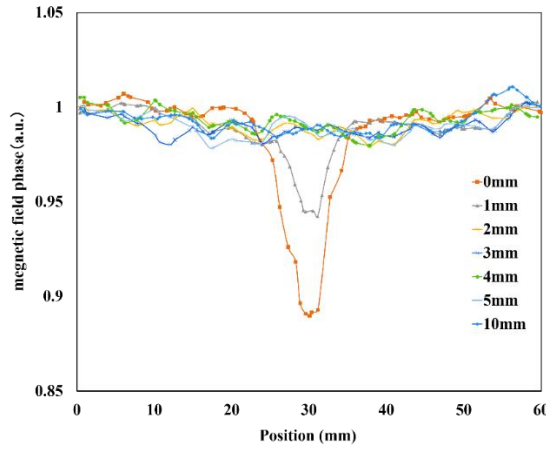
欠陥の深さが一定で印加磁場の周波数を変化させた場合、低周波磁場を印加すると内部欠陥による磁束密度の分布に変化が生じることがシミュレーション結果から見られる。これは表皮効果によるものであり、低周波磁場を印加する漏洩磁束検査法は、対象物の内部欠陥の検出に有効であることが確認できた。

図 6-7 の印加磁場周波数が 1 Hz の場合、図 6-7 (d), (g), (j), (m) 及び (p) と傷が存在しない図 6-7 (a) を比較すると、傷の真上の磁束密度は傷がない場合の結果より大きくなった。これにより傷が存在する場合、漏洩した磁束が増えることが分かる。また、裏面傷の深さに応じて漏洩磁束の強度が異なり、表面付近での磁束密度も異なっていることもわかる。裏面傷が十分深い、つまり表面から浅い位置に傷が存在する場合、表面近傍の傷の存在により空間中に漏洩する磁束量が大きくなり表面付近での磁束密度が大きくなると考えられる。一方、裏面傷の深さが浅い、つまり表面から深い位置に傷が存在する場合、同様に傷による磁束の漏洩が発生するものの、傷が表面から深い位置にあるため、空間に漏洩する磁束量が、表面から浅い位置にある場合と比べて小さくなる、もしくは空間に漏洩しない可能性もある。従って、漏洩する磁束量を比較することで、検出傷の深さ、大きさを判断できる可能性があると考えられる。

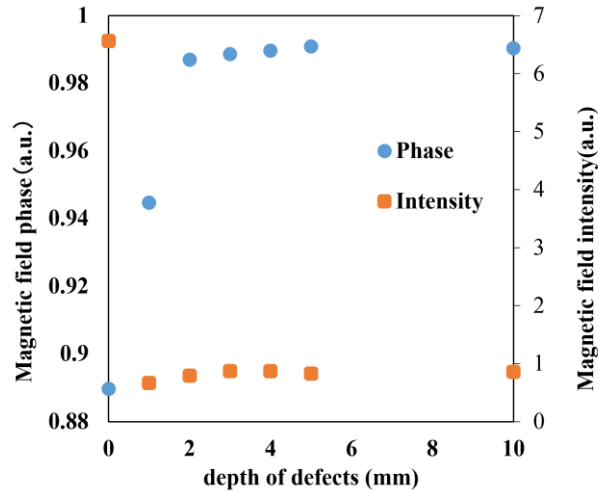
傷の深さと漏洩した磁束の関係を調べるため、印加磁場周波数を 20 Hz とし、図 6-5 の Line-1 において 2 mm 間隔で算出した空間磁場の強度と位相を図 6-8 に示す。図 6-8 (a) は磁場強度、図 6-8 (b) は磁場の位相を示している。分かりやすくするため、Line-1 の両端で計算した値の平均値を算出し、この値で各位置の計算値を規格化した。



(a) 傷深さ異なるサンプルの中心 1 ラインの空間磁場強度



(b) 傷深さ異なるサンプルの中心 1 ラインの空間磁場位相



(c) 傷深さに対する中心点の磁場強度と位相

図 6-8 空間磁場のシミュレーション結果

磁束密度，位相どちらでも内部傷による変化が見られ，対象物にある内部傷により磁束が空間に漏洩したことを確認できた．また，図 6-8 (a)により，対象物に貫通傷がある場合，磁場強度の変化量が大きい，内部欠陥の場合では変化量が少ないことも分かる．一方，図 6-8 (b)により，磁場位相は貫通傷および内部欠陥がある場合の両方で大きく変化し，裏面欠陥の深さに応じて変化量も異なる．磁場位相の変化量と欠陥深さとの相関性を確認するため，深さに対する中心点の磁場位相と強度を図 6-8 (c)にまとめた．図 6-8 (c)より裏面傷の深さと強度もしくは位相の変化量との間に明確な相関性が見られた．但し，磁場の強度が表面近くに傷がある場合に大きく変化するが，表面と傷との距離が大きい場合には磁場の強度の変化量が小さい．一方で，磁場の位相は裏面傷が深くなると変化量が大きいたことが図 6-8 より分かる．そのため，実測結果の解析では磁場の位相を用いて対象物の内部構造の画像化を行った．

<6.5> 開発した漏洩磁束探傷システムを用いた測定結果と考察

対象物スリット傷の位置が表面から 2 mm，4 mm（裏面スリット傷の深さ 8 mm，と 6 mm）の試料を用いて図 6-9 に示した測定範囲で多点計測を行い得られた磁場位相のマッピングを図 6-10 に示す．

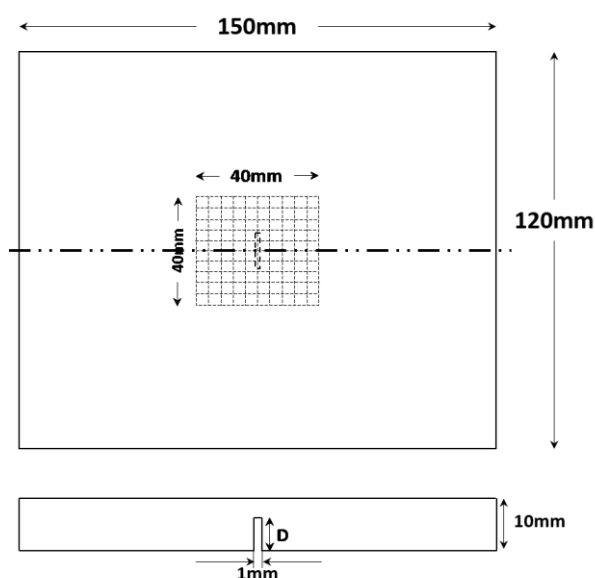


図 6-9 解析対象厚い金属板サンプル

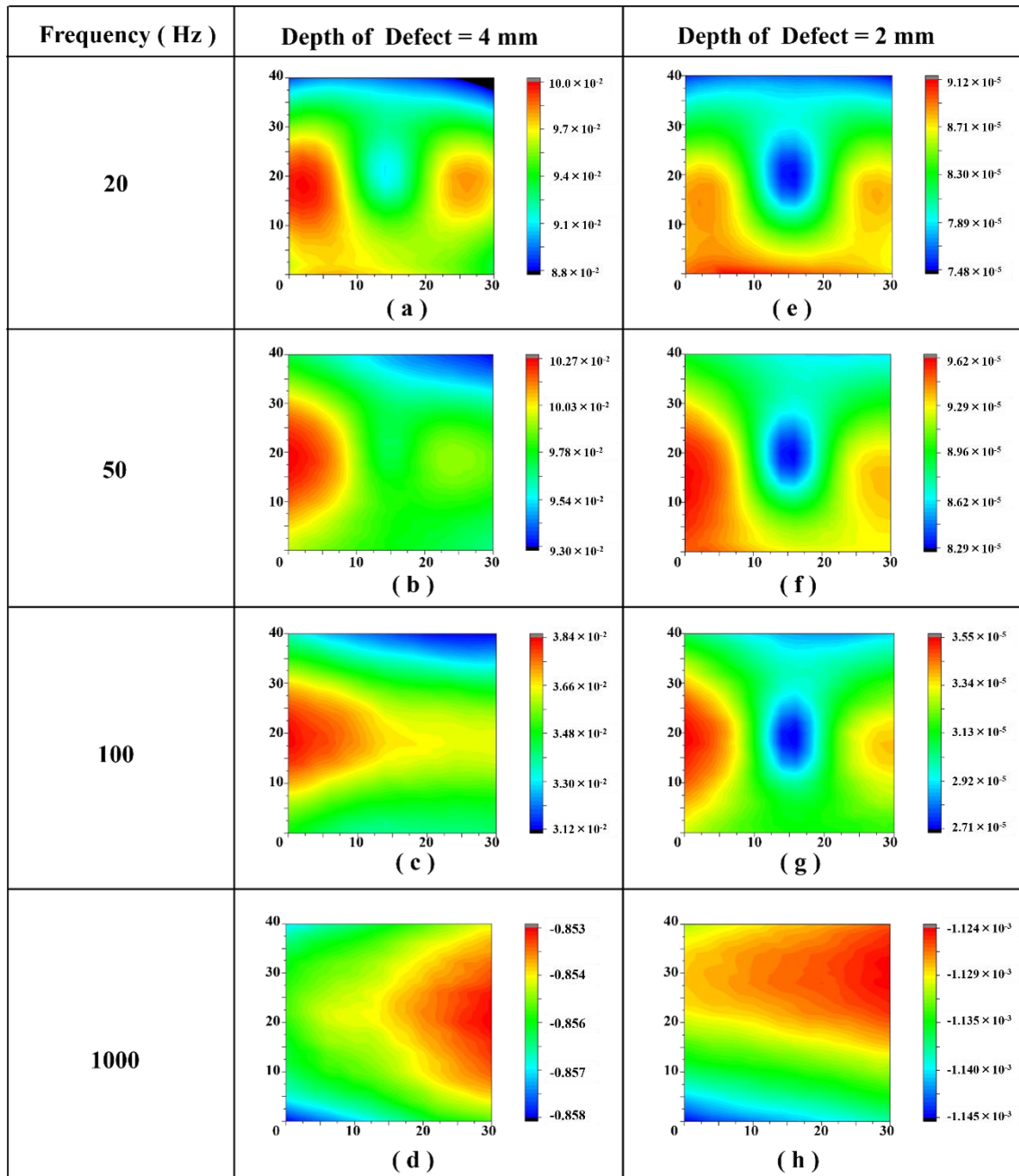


図 6-10 傷の位置異なるサンプルを用いて印加周波数を変化させた場合の
磁場位相の画像化結果.

(* カラースケールは磁場の位相 (rad) を表わす)

印加磁場の周波数は 20 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 1000 Hz である。図 6-10 の結果により、鋼板に傷がある場合、磁束が欠陥を避けようとして、空間に漏洩し、空間磁場の位相にも変化が生じる。印加磁場の周波数が高い場合、磁場の表皮効果により、高周波磁場が金属の表面付近に集中し、金属内部に侵入することができない。そのため、高い周波数で検査する場合、図 6-10 (d), (h) に示しているように内部傷の検出が難しい。印加磁場の周波数に応じて磁場の浸透深さが異なるため、周波数を低くするほど、対象物深部の傷を検出しやすいことが分かった。また画像化した結果から、傷が試料の中心部にあり長細い形状である事が判断でき、サンプルにあるスリット傷と形状が似ていることも分かる。

さらに、周波数が同じで裏面傷の深さが異なると、位相のマッピングが異なることを確認できた。この結果により、傷の深さによって印加磁場周波数を最適化する必要がある。以上の結果より、小信号漏洩磁束探傷検査法で測定した位相マッピングで傷の位置と形状を確認することができた。

<6.6> まとめ

本章では渦電流探傷検査法を用いて厚い強磁性金属板の内部探傷検査が難しいという問題点に対し、本章では磁気探傷検査の方法の一つである、漏洩磁束探傷検査法を強磁性金属板の内部探傷検査を行う事を提案した。

ただし、従来の漏洩磁束検査法は対象物を磁化飽和させるため、大型の装置を用いて、強磁場と大電流が必要である。そのため、漏洩磁束検査法は工場などの環境に限られる。さらに、コストが高く、強磁場と大電流を使用するため安全性は低い。その問題点を解決するため、対象物を完全磁化飽和させず、低周波小信号を利用する漏洩磁束探傷検査システムを提案した。

新たに考案した低周波磁場を用いた小信号漏洩磁束探傷法により鋼板内部傷を検査する方法の検討を行った。

本手法の妥当性を検討するため、有限要素法により鋼板の内部欠陥が存在する場合の漏洩磁束分布を理論的に求めた。シミュレーションでは、様々な周波数の磁場を印加し、裏面傷深さが異なるサンプルの磁束密度分布を計算した。

磁束密度が十分大きくなる場合、磁束が空間に漏洩する事を確認でき、漏洩磁束の影響で空間磁場の位相の変化量と欠陥の深さに関連性があることも確認できた。

また提案手法を実現する計測システムを作製して鋼板の内部傷探傷検査を行った。傷を中心として 40 mm×40 mm の範囲で様々な周波数の磁場を印加し、磁場位相を用いて鋼板内部構造の画像化を行った結果、内部欠陥と相関性のある画像の取得に成功した。さらに空間で検出した磁場データで作成した位相マッピングを用いて、傷の位置、形状及び表面からの深さを判断することが可能と分かった。

第7章 結論

本研究では、金属サンプルを検査対象として、低周波磁場を印加したときの磁気応答を計測するシステムを構築し、特に金属内部の非破壊検査へ応用する際の安定性、利便性などの検討を行うとともに、金属サンプルの磁性に応じた磁気非破壊検査手法の確立について研究を行った。また、本研究では、提案した新規の磁気非破壊検査システムについて、有限要素法（FEM）を用いて提案した計測法の妥当性について理論的な解析によりシステムの評価を行い、その後開発した測定システムを用いて実測を行うことで、提案手法の有用性を示した。本研究では渦電流探傷検査法で検出した磁場の強度がリフトオフの影響を受け、誤差が大きくなる問題に対して、検出した磁場信号の位相を用いて対象物を評価する方法を提案した。検出した磁場の位相を用いて、対象物の内部構造画像化を行い、評価結果を分かりやすく表現する方法を提案した。厚い金属板に対しては、非磁性金属板を対象とする場合、低周波磁場を印加し、内部傷の検出、内部構造の画像化ができることを明らかにした。対象物が強磁性体金属板の場合、渦電流探傷検査では内部傷の検出が原理的に困難であるため、新規の漏洩磁束検査法を用いて解析する事を提案した。この漏洩磁束検査法は、対象物を磁化飽和させず、小信号で漏洩磁束検査を行うものであり、従来の漏洩磁束検査と比較して、測定装置が小型化でき、適用できる対象物も幅広い。小信号漏洩磁束検査法を用いて、10 mm 厚の鋼板の内部傷を測定した結果、内部傷を検出し、内部構造の画像化に成功した。

以下に、得られた研究の成果を要約する。

第3章では、渦電流探傷検査法の問題点の一つであるリフトオフによる影響を説明し、解決法として、検出した磁場強度だけでなく、磁場の位相を用いて対象金属の健全性を評価する手法を提案した。検出磁場の位相を評価パラメータとし使用する場合の妥当性を確認するためのシミュレーションを行った結果、以下のことが明らかになった。

- ✓ 交流磁場を対象金属に印加した場合、金属に渦電流が生成されることを

確認し、有限要素法による解析が正しいことを確認した。

- ✓ 対象金属に比透磁率異なる部分がある場合、生成した渦電流の分布が変わると共に、渦電流から生成された二次磁場の分布も変わったことを確認できた。
- ✓ 測定点で検出した磁場の強度と位相が対象物内部に存在している比透磁率異なる部分で変化することを確認し、比透磁率が異なる内部の構造を検出出来ることが分かった。
- ✓ リフトオフが変化した場合、磁場の強度は大きく変化し、検出した結果に誤差を生じさせたが、磁場の位相はリフトオフの影響が小さく検出した磁場の位相を用いて対象物を評価する方が信頼性高いことを示した。

第4章では、スポット溶接で接合された三層鋼板を対象物として第3章で説明した低周波渦電流探傷検査システムを用いてスポット溶接の健全性を評価した。

- ✓ 提案した渦電流探傷検査システムを用いて検出した磁場の位相を評価パラメータとしてスポット溶接の溶接部を検出できることを確認した。
- ✓ 検出した結果を用いて、スポット溶接の内部構造を画像化することに成功した。
- ✓ リフトオフの影響を確認するため、リフトオフを変化させ、検出した磁場の強度と位相の変化を比較した。磁場の強度はリフトオフの影響を受け、リフトオフがある程度大きくなると対象物の内部構造解析が難しいことを確認した。一方、磁場の位相はリフトオフの影響が小さいため、リフトオフを一定に保つのが難しいスポット溶接の評価でも、検出磁場信号の位相を用いて溶接部の評価が可能であることを示した。
- ✓ 対象物を 1-line でなく、全体的に評価するため、検出した磁場の強度と位相を用いて、対象物の内部 3D 画像化を行った。磁場の強度と位相の内部構造を 3D 画像化した結果を用いて、スポット溶接の品質評価が出来ると示した。

第5章では、低周波渦電流探傷法を広く応用するため、金属板の内部傷評価への適用を検討した。

- ✓ 浸透深さが深い低周波磁場を印加することで、金属の内部傷を検出することが可能であることが分かった。
- ✓ 検出した結果の磁場強度と位相を反映したマッピングを作成した結果、磁場強度は環境の影響を受け内部傷の検出が難しいことが分かった。一方、本研究で提案した位相マッピングを用いることで、金属内部傷の形状及び傷の深さを判断できることが明らかになった。
- ✓ 強磁性金属を対象とする場合、磁場の表皮効果の影響が大きいため、低周波磁場を用いた場合でも磁場が対象物の内部に侵入しにくいいため、低周波渦電流探傷検査法を用いて、厚い強磁性金属を検査することが難しいことを示した。

第6章では渦電流探傷検査法が厚い強磁性金属板の内部探傷検査が難しいという問題点に対して、磁気探傷検査の方法の一つである漏洩磁束探傷検査法を強磁性金属板の内部探傷検査へ適用する事を提案した。新たに考案した低周波磁場を用いた漏洩磁束探傷法により鋼板内部傷を検査する方法の検討を行った。

- ✓ 従来の漏洩磁束検査法は、応用できる環境が限られる、コストが高い、強磁場と大電流を使用するため安全性の確保が必要などの問題点があったが、本研究ではその問題点を解決するため、対象物を完全磁化飽和させず、低周波小信号を利用する漏洩磁束探傷検査システムを提案した。
- ✓ 本手法の妥当性を検討するため、有限要素法により鋼板の内部欠陥が存在する場合の漏洩磁束分布を理論的に求めた。シミュレーションでは、様々な周波数の磁場を印加し、裏面傷深さが異なるサンプルの磁束密度分布を計算した。裏面傷が存在する場合、磁束が空間に漏洩する事を確認でき、漏洩磁束の位相の変化量と欠陥の深さに相関性があることも確認できた。

- ✓ 提案した漏洩磁束探傷法を実現できる計測システムを作製して、実験室環境で鋼板の内部傷探傷検査を行った。傷を中心として 40 mm×40 mm の範囲で様々な周波数の磁場を印加し、磁場位相を用いて鋼板内部構造の画像化を行った結果、内部欠陥と相関性のある画像の取得に成功した。さらに空間で検出した磁場データで作成した位相マッピングを用いて、傷の位置、形状及び表面からの深さを判断することが可能と分かった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、お世話になった方々にこの場を借りて感謝の意を表させていただきます。

本大学大学院自然科学研究科教授の塚田啓二先生におかれましては、本研究をおこなう機会を与えて頂きありがとうございます。常日頃から有益かつ熱心な御指導、御鞭撻を賜りました謹んで御礼申し上げます。

本研究において日々の研究に対する丁寧かつ適切なご指導、鞭撻を賜りました同研究科准教授紀和利彦先生に謹んで感謝申し上げます。

本論文の研究において、平素より研究の細部にわたり適切な御指導、御助言を頂いたこと、測定原理、装置の使用法、ソフトウェアの使用法など丁寧かつ適切な御指導を賜りました同研究科助教堺健司先生に心より感謝申し上げます。

また、日々研究に関する議論を交わし合った研究室の志賀啓秀氏、八杉拓也氏、芳賀勇太氏、馬島八世氏、合田剛士氏に本研究を進めるにあたり御助言、御協力を頂いたことに感謝致します。

お父さんとお母さんにおかれましては、留学している間の支援、理解、そして私の人生のすべての事に心より感謝致します。夫の王永志さん、息子の玉鴻曄くんに日々のサポート、理解、犠牲に感謝いたします。そして、西南米山ロータリークラブの皆さまにこころ、そして生活の面における御支援にもお礼申し上げます。

最後に、ともに研究生活を過ごし、多様な場面で支援してくれた先端医用電子工学研究室各位に心より感謝致します。

参考文献

- (1)川嶋紘一郎, 坂上隆英, 巨陽著:「非破壊検査工学最前線」, 共立出版, 2009
- (2) 社団法人日本非破壊検査協会著, 「非破壊検査シリーズ 非破壊試験概論」, 社団法人日本非破壊検査協会, 1975
- (3) 谷村康行著:「絵とき非破壊検査基礎のきそ」, 日刊工業新聞社, 2013
- (4) 大岡紀一, 相山英明, 井上裕嗣, 緒方隆昌, 木村新一郎, 土屋武雄, 藤岡和俊, 湯山茂徳, 横野泰和著:「詳解非破壊検査ガイドブック」, 日本規格協会, 2013
- (5) 谷腰欣次 著:「センサのすべて」, 株式会社電波新聞社 (1998)
- (6) N. Boaretto, T. M. Centeno: ” Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI”, NDT&E International, Vol.86, pp.7-13, 2017
- (7) J.X. Shao, D. Du, B.H. Chang, H. Shi: ” Automatic weld defect detection based on potential defect tracking in real-time radiographic image sequence”, NDT&E International, Vol.46, pp.14-21, 2012
- (8) O. Zahran, H. Hasban, M. El-Kordy, F.E. Abd El-Samie: ” Automatic weld defect identification from radiographic images”, NDT&E International, Vol.57, pp.26-35, 2013
- (9) S. choi, G. J. Lee, S. J. Hong, K. H. Park, T. Urtnasen, H. K. park: ”Development of a joint space width measurement method based on radiographic hand images”, Computers in biology and Medicine, Vol.41, pp.987-988, 2013
- (10) R. D. Owen: ” Portable linear accelerators for X-ray and electron-beam applications in civil engineering”, NDT&E International, Vol. 31, No. 6, pp. 401–409, 1998
- (11) J.H. Espina-Hernandez, E.Ramirez-Pacheco, F.Caleyo, et al. ” Rapid estimation of artificial near-side crack dimensions in aluminium using a GMR-based eddy current sensor” NDT&E International, Vol.51, pp.94-100, 2012
- (12) H. Ravanbod: ”Application of neuro-fuzzy techniques in oil pipeline ultrasonic

- nondestructive testing ”, NDT & E International, 38, pp. 643–653, 2005
- (13) M. Thornton, L.Han, M.Shergold: “Progress in NDT of resistance spot welding of aluminium using ultrasonic C-scan” , NDT&E International, Vol.48, pp.30-38, 2012
- (14) B. Chassignole, R. El Guerjouma, M.-A. Ploix, T. Fouquet: “Ultrasonic and structural characterization of anisotropic austenitic stainless steel welds: Towards a higher reliability in ultrasonic non-destructive testing” , NDT & E International, Vol.43, pp.273-282, 2010
- (15) R. Raišutis, R. Kažys, E. Žukauskas, L. Mažeika, A. Vladišauskas: “Application of ultrasonic guided waves for non-destructive testing of defective CFRP rods with multiple delaminations” , NDT & E International, Vol.43, pp.416-424, 2010
- (16) F. Tallavo, G. Cascante, M. D. Pandey: “A novel methodology for condition assessment of wood poles using ultrasonic testing” , NDT & E International, Vol.52, pp.149-156, 2012
- (17) C. Zhang, X. Li, Y. Song, X. Han, J. Han: “Evaluating the grain size in curved components using the ultrasonic attenuation method with diffraction correction” , NDT & E International, Vol.84, pp.20-26, 2016
- (18)R. Kažys, R. Raišutis, E. Žukauskas, L. Mažeika, A. Vladišauskas: “Air- coupled ultrasonic testing of CFRP rods by means of guided waves” , Physics Procedia, Vol.3, pp.185-192, 2010
- (19) X. Guirong, G. Xuesong, Q. Yuliang, G. Yan: “Analysis and Innovation for Penetrant Testing for Airplane Parts” NDT&E International 38, 623-626(2005)
- (20) M. Schröder, C. Biedermann, R. Vilbrandt: “On the applicability of dye penetrant tests on vacuum components: Allowed or forbidden?” Fusion Engineering and Design Vol. 88, pp. 1947–1950. 2013
- (21) K. Tsukada, T. Kiwa, T. Kawata, and Y. Ishihara: ”Low-Frequency Eddy Current Imaging Using MR Sensor Detecting Tangential Magnetic Field Components for Nondestructive Evaluation”, IEEE T Magn, Vol.42, No.10, pp.3315-3317, 2006

- (22) Filipe A. Cardoso, Luis S. Rosado, Fernando Franco, et al. "Improved Magnetic Tunnel Junctions Design for the Detection of Superficial Defects by Eddy Currents Testing", IEEE T Magn, Vol.50, No.11, 2014
- (23) P. M, N. R and J. MP: "Rapid flaw depth estimation from squid-based eddy current nondestructive evaluation", NDT & E International, 40, pp. 289–293, 2007
- (24) H. Y, K. A, M. K and T. S: "Detection of micro-flaws on thin copper tubes using squid-ndi system based on eddy current technique", Physica C, 426-431, pp. 1585–1590, 2005
- (25) Kenji Sakai, Kohei Tanaka, Toshihiko Kiwa, Keiji Tsukada: "Current distribution evaluation of dye-sensitized solar cell using HTS-SQUID-based magnetic measurement system", Physica C: Superconductivity and its Applications, Vol, 530, 15 November, pp. 113–116, 2016
- (26) T. Kiwa, S. Maeda, K. Miyake, N. Kataoka, A. Tsukamoto, S. Adachi, K. Tanabe, A. Kandori, K. Tsukada: "Differential conductivity mapping of solar panels using a high-TC superconductor SQUID", Physica C, Vol.271, pp.1238-1241, 2011
- (27) Keiji Tsukada, Toshihiko Kiwa, Hideaki Tahara, Etsuro Miyake, Hironobu Yamada, Akira Tsukamoto, and Akihiko Kandori: "Highly Sensitive Measurement of Moisture Content Using HTS-SQUID", IEEE Trans. Appl. Supercond., VOL. 19, NO. 3, JUNE, 2009
- (28) Keiji Tsukada, Koji Morita, Yasuaki Matsunaga, Kenji Sakai Toshihiko Kiwa: "Hybrid Type HTS-SQUID Magnetometer With Vibrating and Rotating Sample", IEEE Trans. Appl. Supercond., VOL. 26, NO. 3, APRIL, 2016
- (29) Toshihiko Kiwa, Yohei Fukudome, Shingo Miyazaki, Mohd Mawardi Saari, Kenji Sakai, Keiji Tsukada: "Magnetic evaluation of a solar panel using HTS-SQUID", Physica C: Superconductivity, Vol. 494, pp. 195-198, 2013
- (30) Toshihiko Kiwa, Shinogo Miyazaki, Mohd M. Saari, Kenji Sakai, Akira Tsukamoto, Seiji Adachi, Tsunehiro Hato, Keiichi Tanabe, Keiji Tsukada:"

- Visualization of ion transportation in an electrolyte using an HTS-SQUID gradiometer” *Physica C*, 504, pp.84-87, 2014
- (31) D. Tendor and S. S. T: “Giant magnetoresistance-based eddy-current sensor”, *IEEE.Trans. Magn.*, 37, pp. 3831–3838, 2001
- (32) C. V. Dodd and W. E. Deeds: “Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems”, *J. Appl. Phys*, 39, pp. 2829–2838, 1968
- (33) A. Suratkar, A.Y. Sajjadi, K. Mitra, “25 – Non-destructive evaluation (NDE) of composites for marine structures: detecting flaws using infrared thermography (IRT)”, *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, pp. 649–667, 2013
- (34) A. Kylili, P. A. Fokaides, P. Christou, S. A. Kalogirou, “Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review”, *Applied Energy*, Vol. 134, pp. 531–549, 2014
- (35) 近藤みゆき: “近赤外分光法による食品の化学的分析”, *名古屋文理大学紀要* 7, pp. 23-28, 2007
- (36) S. Li, X. Zhang, Y. Shan, D. Su, Q. Ma, R. Wen, J. Li, “Qualitative and quantitative detection of honey adulterated with high-fructose corn syrup and maltose syrup by using near-infrared spectroscopy” *Food Chemistry*, Vol. 218, pp. 231–236, 2017
- (37) Y. Ozaki, W.F. McClure, A.A. Christy: “Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology”, 2006
- (38) A. Sakudo, “Near-infrared spectroscopy for medical applications: Current status and future perspectives” *Clinica Chimica Acta*, Vol. 455, pp. 181–188, 2016
- (39) Z. Li, G. Li, W.J. Yan, L. Lin, “Classification of diabetes and measurement of blood glucose concentration noninvasively using near infrared spectroscopy”, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 67, pp. 574–582, 2014
- (40) 高橋則雄著: 「三次元有限要素法 磁界解析技術の基礎」, 電気学会, 2012
- (41) R. H. Gallagher (川井忠彦監訳): 「有限要素解析の基礎」, 丸善, 1976

- (42) 川井忠彦, 岸正彦:「機械のための有限要素法入門」, オーム社, 1983
- (43) 中田高義, 高橋則雄:「電気工学の有限要素法 (第2版)」, 森北出版, 1986
- (44) J. C. Nedelec: “Mixed Finite Elements in R³”, Numer. Math., Vol. 35, pp. 315-341, 1980
- (45) A. Kameari: “Three Dimensional Eddy Current Calculation Using Edge Elements for Magnetic Vector Potential”, Applied Electromagnetics in Materials, pp. 225-236, 1989
- (46) F. Förster: “Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit wirbelstromverfahren”, Z.Metallk, 43, pp. 163–171, 1952
- (47) 前田 宣喜, 矢川 元基 共著:「非破壊試験の理論」, 丸善プラネット株式会社, 2007
- (48) Jack Blitz: “Eddy Current Testing of Metals”, MATERIALS & DESIGN Vol. 8 No. 6, pp. 340-345, NOVEMBER/DECEMBER 1987
- (49) Toshihiko Kiwa, Tomoaki Kawata, Hironobu Yamada, Keiji Tsukada: ” Fourier-transformed eddy current technique to visualize cross-sections of conductive materials”, NDT&E International , 40, pp. 363-367, 2007
- (50) Keiji Tsukada, Kousuke Miyake, Daichi Harada, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa: ” Magnetic nondestructive test for resistance spot welds using magnetic flux penetration and eddy current methods”, J Nondestruct Eval, 32, pp.286–293,2013
- (51) Toshihiko Kiwa, Takayuki Hayashi, Yoshihiko Kawasaki, Hironobu Yamada, Keiji Tsukada,: ” Magnetic thickness gauge using a Fourier transformed eddy current technique”, NDT&E International , 42, pp. 606-609, 2009
- (52) H. Yamada, T. Hasegawa, Y. Ishihara, T. Kiwa, K. Tsukada: “Difference in the detection limits of flaws in the depths of multi-layered and continuous aluminum plates using low-frequency eddy current testing”, NDT&E International, Vol.41, pp.108-111, 2008

- (53) G. Panaitov, H. –J. Krause, Y. Zhang: “Pulsed eddy current transient technique with hts squid magnetometer for non-destructive evaluation”, *Physica C*, 372-376, pp. 278–281, 2002
- (54) R.S. Edwards, A. Sophian, S. Dixon, G.-Y. Tian, X. Jian: “Dual EMAT and PEC non-contact probe: applications to defect testing”, *NDT & E International*, 39(1), pp. 45–52, 2006
- (55) J. W. Wilson and G. Y. Tian: “Pulsed electromagnetic methods for defect detection and characterisation”, *NDT & E International*, 40, pp. 275–283, 2007
- (56) L. S. Rosado, F. A. Cardoso, S. Cardoso, P. M. Ramos, P. P. Freitas, M. Piedade: “Eddy currents testing probe with magneto-resistive sensors and differential measurement”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 212, pp. 58-67, 2014
- (57) D. Tendor and S. S. T: “Giant magnetoresistance-based eddy-current sensor”, *IEEE Trans. Magn.*, 37, pp. 3831–3838, 2001
- (58) J.H. Espina-Hernandez, E.Ramirez-Pacheco, F.Caleyo, et al.” Rapid estimation of artificial near-side crack dimensions in aluminium using a GMR-based eddy current sensor” , *NDT & E International*, Vol.51, pp.94-100, 2012
- (59)Keiji Tsukada, Mitsuteru Yoshioka, Toshihiko Kiwa, Yoshinobu Hirano, ” A magnetic flux leakage method using a magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation of spot welds” ,*NDT & E International*, Vol.44, pp.101-105, 2011
- (60)Kenji Sakai, Koji Morita, Yuta Haga, Toshihiko Kiwa, Katsumi Inoue, Keiji Tsukada, ” Automatic scanning system for back-side defect of steel structure using magnetic flux leakage method” ,*IEEE Trans. Magn.*, Vol. 51, No. 11, Nov. 2015
- (61) Keiji Tsukada, Mitsuteru Yoshioka, Yoshihiko Kawasaki, Toshihiko Kiwa, ”Detection of back-side pit on a ferrous plate by magnetic flux leakage method with analyzing magnetic field vector” *NDT & E International*, Vol.43, pp.323-328, 2010
- (62) 森泉豊栄：「センサ工学」，昭晃堂, pp. 36–42, 1997

- (63) J. Clarke and A. I. Braginski: “The SQUID Handbook”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004
- (64) M. Hämäläinen, R. Hari, R. J. Ilumoniemi, J. Knuutila and O. V. Lounasmaa: “Magnetoencephalography-theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain”, *Rev. Mod. Phys.*, 65, pp. 413–497, 1993
- (65) T. Lee, C. Kang, K. Yu, J. Kim, K. Kim, H. Kwon, H. Lim, I. Kim, Y. Park and S. Lee: “Characteristics of magnetocardiograms measured using various pickup coil structures”, *Physica C*, 463-465, pp. 1017–1023, 2007
- (66) 谷腰欣司: 「磁気センサとその使い方」, 日刊工業新聞社, pp. 57–63, 1986
- (67) T. Kanno, K. Mohri, T. Yagi, T. Uchiyama, L.P. Shen, “Amorphous Wire MI Micro Sensor Using C-MOS IC Multi-vibrator”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.33, No.5, pp.3353-3355, 1997
- (68) L. V. Panina and K. Mohri: “Magneto-impedance effect in amorphous wires”, *Appl. Phys. Lett.*, 65, 9, pp. 1189–1191, 1994
- (69) K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa and H. Yoshida: “Magneto-inductive effect (mi effect) in amorphous wires”, *IEEE Trans. Magn.*, 28, 5, pp. 3150–3152, 1992
- (70) 牧野雅彦, 「物理探査ハンドブック」, 物理探査学会, 1998
- (71) P. Ripka: “Review of fluxgate sensors”, *Sensors and Actuators A*, 33, pp. 129–141, 1992
- (72) Takayuki Hayashi, Hironobu Yamada, Toshihiko Kiwa, and Keiji Tsukada, Masaji Tamazumi: “Detection of the weak magnetic properties change of stainless-steel welding parts by low frequency magnetic imaging”, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 103, 07E923, 2008
- (73) Takayuki Hayashi, Yoshihiko Kawasaki, Hironobu Yamada, Toshihiko Kiwa, Masaji Tamazumi, Keiji Tsukada: “Magnetic image detection of the stainless-steel welding part inside a multi-layered tube structure”, *NDT&E International*, 42, pp. 308–315, 2009

- (74) Takayuki Hayashi, Yoshihiko Kawasaki, Hironobu Yamada, Toshihiko Kiwa, Masaji Tamazumi, Keiji Tsukada: “Magnetic image detection of the stainless-steel welding part inside”, *NDT&E International*, 42, pp. 308–315, 2009
- (75) G. Musmann, 「Fluxgate Magnetometers for Space Research」, 2010
- (76) S. Groeger, G. Bison, P. Knowles, R. Wynands and A. Weis: “Laser-pumped cesium magnetometers for high-resolution medical and fundamental research”, *Sensors and Actuators A*, 129, pp. 1–5, 2006
- (77) 阿部善右衛門、和田龍彦, “高感度磁気センサの現状”, 計測と制御, 第17巻第9号, pp. 690-696, 1978
- (78) 毛利佳年: 「磁気センサ理工学」, コロナ社, pp. 56–59, 1998
- (79) Y. He , F. Luo , M. Pan , F. Weng , X. Hu , J. Gao , B. Liu “Pulsed eddy current technique for defect detection in aircraft riveted structures”, *NDT&E International* 43,176–181, 2010
- (80) K. Kosmas, C. Sargentis, D. Tsamakis, E. Hristoforou: “Non-destructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 161, pp. 359-362, 2006

業績

<査読付き Proceeding・論文>

- (1) **Nannan Song**, Keisyu Shiga, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Keiji Tsukada: “Development of a Magnetic Phase Map for Analysis of the Internal Structure of a Spot Weld”, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX), pp.302-311, 2016
- (2) Keiji Tsukada, Yuta Haga, Koji Morita, **Nannan Song**, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, and Weiyang Cheng, “Detection of Inner Corrosion of Steel Construction Using Magnetic Resistance Sensor and Magnetic Spectroscopy Analysis”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 52, NO. 7, pp. 1-4, JULY 2016
- (3) **Nannan Song**, Yuta Haga, Tsuyoshi Goda, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Keiji Tsukada, “Detecting Internal Defects of a Steel Plate by Using Low-Frequency Magnetic Flux Leakage Method”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (Accepted)

<国際会議・学会>

- (1) **Song Nannan**, Keisyu Shiga, Yuya Tsukamoto, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Weiyang Cheng, and Keiji Tsukada: “Development of Magnetic Phase Mapping for Analyzing the Internal Structure of the Spot Welding”, Progress In Electromagnetics Research Symposium, 25-28, Aug., 2014, Guangzhou, China
- (2) **Nannan Song**, Keisyu Shiga, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Keiji Tsukada: “Development of a Magnetic Phase Map for Analysis of the Internal Structure of a Spot Weld”, The 20th International Workshop on Electromagnetic NonDestructive Evaluation(ENDE2015) , 21-23, Sep., 2015, Sendai, Japan
- (3) Keisyu Shiga, **Song Nannan**, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Keiji Tsukada: “Inspection and Visualization Method for the Internal Structure of Spot-Welded Three-Steel Sheet Using Eddy Current Testing”, NetWare 2015, The Sixth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, 23-28, Aug., 2015, Venece, Italy

- (4) **Nannan Song**, Yuta Haga, Tsuyoshi Goda, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Keiji Tsukada, “Detecting Internal Defects of a Steel Plate by Using Low-Frequency Magnetic Flux Leakage Method”, 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2017), 13-15, Mar., 2017, Glassboro, New Jersey, USA (予定)

<国内会議・学会>

- (1) **宋 楠楠**, 塚本 有哉, 志賀 啓秀, 原田 大地, 堺 健司, 紀和 利彦, 程 衛英, 塚田 啓二, 「スポット溶接内部構造解析用磁気位相マップの開発」, 平成 25 年度日本非破壊検査協会秋季講演大会, 2013.11.26-27, 広島
- (2) **宋 楠楠**, 塚本 有哉, 志賀 啓秀, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二, 程 衛英, 「スポット溶接内部構造解析用 3D マップの開発」, 平成 26 年度日本非破壊検査協会春季講演大会, 2014.6.3, 東京
- (3) **宋 楠楠**, 志賀 啓秀, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二, 「スポット溶接内部構造解析用 3D マップの開発」, 平成 27 年度非破壊検査総合シンポジウム, 2015.6.2-3, 東京
- (4) **宋 楠楠**, 馬島 八世, 八杉 拓也, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二, 「低周波渦電流探傷法を用いた金属内部欠陥検出法の開発」, 第 40 回日本磁気学会学術講演会, 2016.9.5-8, 金沢
- (5) **宋 楠楠**, 芳賀 勇太, 合田 剛士, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二, 「漏洩磁束探傷検査法を用いた鉄板内部欠陥検出法の開発」, 日本電気学会マグネティックス研究会, 2016.9.20-21, 横浜
- (6) 志賀 啓秀, 塚本 有哉, **宋 楠楠**, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二, 「渦電流探傷検査法を用いたスポット溶接の検査法の開発」, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014.5.22, 盛岡
- (7) 八杉 拓也, 志賀 啓秀, **宋 楠楠**, 堺 健司, 紀和 利彦, 塚田 啓二, 「接線 2 成分磁場合成による電流分布の可視化と欠陥推定への利用」, 平成 27 年度日本非破壊検査協会秋季講演大会, 2015.10.15, 北海道