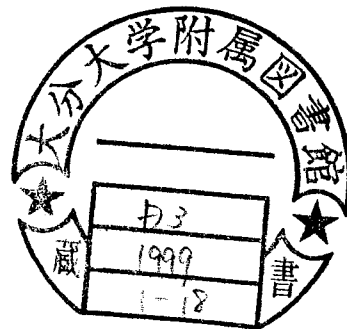


電磁現象を利用した非破壊評価技術に関する研究

大分大学大学院工学研究科
博士後期課程
博士論文



1999年3月

岡 茂 八 郎

目次

第1章 序論	1
第1.1節 本研究の意義と目的	1
第1.2節 従来の研究の到達点と課題	3
第1.3節 本研究の概要	5
第2章 偏位式回転磁束型磁気センサ	8
第2.1節 緒言	8
第2.2節 肉厚軟鋼板裏側欠陥の磁気探傷	10
2.2.1 概要	10
2.2.2 軟鋼板用偏位式磁気センサの構造	10
2.2.3 リサージュ波形による欠陥判定	16
2.2.4 被検査材および実験装置	18
2.2.5 空心蝶型磁気センサの欠陥検出特性	21
2.2.6 U字鉄心型磁気センサの欠陥検出特性	36
第2.3節 偏位式磁気センサのSN比による比較	47
2.3.1 概要	47
2.3.2 肉厚軟鋼板裏側欠陥に対する検出特性の比較	47
2.3.3 SN比の定義	51
2.3.4 X軸信号を使ったSN比の比較	52
2.3.5 軸比 α を使ったSN比の比較	54
第2.4節 肉厚ステンレス板裏側欠陥の磁気探傷	57
2.4.1 概要	57
2.4.2 ステンレス板用偏位式磁気センサの構造	57
2.4.3 被検査材および実験装置	58
2.4.4 鉄心蝶型磁気センサの欠陥検出特性	60
2.4.5 欠陥形状評価指標 δ による欠陥形状の評価	65
第2.5節 結言	68
第3章 差動式回転磁束型磁気センサ	70
第3.1節 緒言	70
第3.2節 肉厚軟鋼板裏側欠陥の磁気探傷	72
3.2.1 概要	72
3.2.2 軟鋼板用差動式磁気センサの構造	72
3.2.3 被検査材および実験装置	76
3.2.4 サーチコイル型磁気センサの欠陥検出特性	79
3.2.5 欠陥評価指標 κ の導入と κ による欠陥評価	90
3.2.6 ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出特性	96
第3.3節 磁気等価回路による解析	105
3.3.1 概要	105
3.3.2 磁気等価回路の導出	105
3.3.3 実験結果との比較	115

3. 3. 4	リフトオフの変化	116
第3. 4節	肉厚ステンレス板裏側欠陥の磁気探傷	117
3. 4. 1	概要	117
3. 4. 2	肉厚ステンレス板用差動式磁気センサの構造	117
3. 4. 3	被検査材および実験装置	117
3. 4. 4	ピックアップコイル型磁気センサの欠陥検出特性	117
3. 4. 5	欠陥形状評価指標 χ の導入と χ による欠陥評価	126
第3. 5節	結言	130
第4章	回転磁束型磁気センサによる欠陥属性の自動推定	132
第4. 1節	緒言	132
第4. 2節	ニューラルネットワークの欠陥属性推定への適用	134
4. 2. 1	概要	134
4. 2. 2	階層型ニューラルネットワーク	134
第4. 3節	軟鋼板裏側欠陥の属性推定	139
4. 3. 1	概要	139
4. 3. 2	欠陥の位置と深さの推定	139
4. 3. 3	欠陥の深さと方向角 ϕ の同時推定	144
第4. 4節	ステンレス板裏側欠陥の形状推定	148
4. 4. 1	概要	148
4. 4. 2	各種データ	148
4. 4. 3	欠陥形状推定	154
第4. 5節	結言	161
第5章	結論	163
第5. 1節	本研究の総括	163
第5. 2節	今後の展望と研究課題	164
謝辞		165
参考文献		166
付録		172

第1章 序論

第1.1節 本研究の意義と目的

原子炉や航空機などの大型構造物や機器に使用されている金属材料（鋼材、ステンレス材、インコネル材、アルミ材など）は、放射線にさらされたり^[1]、大きな繰り返し荷重や衝撃荷重、熱応力などが加わる厳しい環境で使用されている典型的な例である。このような過酷な条件で使用されている金属材料の疲労による機械的特性の悪化や破損、亀裂の発生は、重大な物的災害や人的災害をもたらす可能性が大きい^[1-3]。厳しい環境で使用されている金属材料ほど機器の心臓部で稼働し、重要な役割を担っており、機器の安全に対して特別な位置を占めているとも言える。さらに、これらの構造物や機器の多くが、我々のごく身近なところで稼働しており、高度な安全性の確保が要求されていることも事実である。

一方、「材料が破壊する原因」である疲労がなぜ起こるかについての物理的な理由は、未だに明らかにされていないのが現状である^[4]。しかし、「脆性破壊」や「クリープ破壊」などの現象はよく研究され、その対策も材料の研究などを通してある程度たてられている。例えば、「脆性破壊」は、材料に切欠きがあり、引張応力が存在し、さらに、低温によって延性が減少するなどの条件が揃っているときに発生することが分かっている。そのため、その対策が立てられ「脆性破壊」が原因の事故は減っている。だが、完全になくなっているわけではない。さらに、「腐食」も「材料が破壊する原因」の一つであり、その中でも、腐食環境下で応力が加わっているときに発生する「応力腐食割れ」も大きな問題の一つである。「脆性破壊」や「クリープ破壊」、「応力腐食割れ」などは、当初、材料に極微小な亀裂が生じ、それが進展し最終的には破壊に至ると言うメカニズムで発生する。また、材料特性を評価するための破壊試験によって蓄積した膨大なデータも存在する^[5]。破壊試験は、「静的」なものとして「引張り試験」、「圧縮試験」、「曲げ試験」、「ねじり試験」、「クリープ試験」、「破壊靱性試験」などがあり、動的破壊試験として、「疲労試験」、「衝撃試験」、「腐食応力試験」などがある。これらの試験によって得られたデータは、近年重要性を増している非破壊評価を行う際の重要な基礎データとなる。「脆性破壊」や「クリープ破壊」、「応力腐食割れ」などは、特殊な例外を除いてその進展速度はそれほど速いものでなく、初期の微小な亀裂の段階で発見できれば、破壊検査で得られた膨大なデータを利用してその構造材の寿命の予測が可能であり、構造材や部品の交換などの対策も可能である^[4]。このように破壊のメカニズムを知ることが、非破壊評価技術の中の寿命の推定などの際の強力な武器となる。

従来から、構造材に発生した亀裂、減肉などの欠陥を微小な段階で探知するという目的のために、「非破壊検査」と呼ばれる各種の検査法が各種提案され実施されている。「非破壊検査」とは、①欠陥の有無の判定、②欠陥の位置の特定、③欠陥の種類の種類、④欠陥の大きさの判定、⑤欠陥の形状を明らかにする、ことを言う。さらに、「非破壊評価」とは、「非破壊検査」において行うべきことに⑥破壊力学的取り扱いによって欠陥の有害度を決定し、⑦最終的な合否の判定を行い、⑧安全率や寿命の評価を行うことを加えたものである。非破壊検査は、JISなどで標準化され規格化されたものが、実際の現場で数多く用いられている^[6]。このように、「非破壊検査技術」あ

るいは「非破壊評価技術」は、検査法の精度の向上や破壊力学などの周辺技術の向上により大きく発展している。しかし、検出不能な欠陥がなお存在することや試験法による値のばらつきなどの多くの問題を残している。例えば、構造物の中で特に強度の要求される部分に使用される可能性の高い肉厚金属板の裏側から進行してくる微小欠陥の検出は、非常に困難である。まして、強度の要求される部分に一般的に使用されている肉厚鋼材（強磁性体）の裏側微小欠陥の発見は、大がかりな装置を用いなければ、ほとんど不可能である。さらに、機器を稼働状態のまま保守点検することは、経済的な観点からその要求は大きい、非常に困難な作業である。以上のことから、これらの構造材に発生した亀裂、減肉などの欠陥を微小な段階で探知し、発見された欠陥がその材料の強度や寿命に与える影響を評価することは^[5]事故防止だけでなく、欠陥が発見された部品の交換による寿命の延長という経済的観点からも重要である。さらに、近年の環境や省エネルギーに対する意識の高まりから、より高い安全性の保障や経済性の確保の要求から、欠陥検出素子と同一の面（表面）に存在する欠陥や減肉のみではなく、欠陥検出素子と反対の面（裏面）に存在する欠陥や減肉などを、その有無のみでなく欠陥の正確な位置、形状、深さ、方向などの欠陥属性を明瞭に把握できる高速で精度の高い非破壊評価技術が要求されるようになってきている^[7-8]。

現在よく用いられている非破壊検査法である放射線を使う方法や超音波を使う方法、誘導渦電流を使う方法などにはそれぞれ一長一短がある。放射線を使う方法は、安全性を確保するために非破壊検査を行う技術者に特殊な資格が必要であり、その装置も大型で取り扱いが不便である。さらに、欠陥の評価を自動で行おうとするとコンピュータとの接続に多くの電子機器を必要とするなどの欠点がある。超音波を使う方法は、最近よく改良され、金属材料だけではなく、セラミクスなどの材料に対しても有効な微小欠陥検出方法として活用されている。しかし、探触子（プローブ）との間に音響インピーダンスの整合を取るための接触媒質を必要とするため、広範囲を高速に検査することは原理的に不可能である。また、渦電流探傷法は、非接触で検査速度が速く、試験の結果が電気信号として得られ自動化しやすいなどの利点を持っているが、表皮効果による制限から、肉厚金属板の中や裏側に存在する欠陥に対してほとんど無力である。しかし、この点を改良すれば、プローブ自体に大がかりな装置を必要としない手軽で安価なシステムを構築できる^[7-8]。また、試験結果が電気信号として得られることから、近年、安価で高速大容量となったパーソナルコンピュータと組み合わせれば、ソフトウェア技術の向上と相まって手軽で安価な「非破壊評価システム」を構築できる。このように、「渦電流探傷法」あるいは「磁気を用いる探傷法」は、大きな可能性を秘めている。そこで、高度な非破壊評価技術が要求されている現状から、小型軽量で手軽な渦電流探傷用磁気センサのよさを残しつつ、新たな発想に基づいた金属材料を対象にした非破壊評価用磁気センサを開発することは、大いに意義のあることである。また、磁気センサの開発のみでなく、磁気センサから得られた欠陥検出信号を有効に利用し短時間に欠陥の属性を推定する欠陥属性推定アルゴリズムの開発も同様に意義のあることだと考える。新しい磁気センサと欠陥属性推定アルゴリズムを組み合わせ、人間の勘や経験に頼らない非破壊評価システムの開発が必要である。

よって、本論文では、大分大学榎園教授、宮崎大学長田助手らによって提案された初期型の「回転磁束型磁気センサ」^[9-11]を基にして、従来ほとんど取り上げられなかった肉厚金属板の裏側欠陥を対象とした^[12]新しい「回転磁束型磁気センサ」を提案し、

その欠陥検出機構や欠陥検出特性を明らかにし、その有用性を示すことを主目的とする。回転磁束型磁気センサは、欠陥信号検出法の違いにより^[13-15]偏位式^[16-21]と差動式^[22-26]に分類している。それぞれの方式について適用例を示しその応用範囲を明らかにする。また、回転磁束型磁気センサの大きな特徴である欠陥に関する多くの情報が得られることを利用した各種の欠陥評価用パラメータを提示し^[18, 21, 22, 26]、その適用例を用いてその有効性を示す。さらに、回転磁束型磁気センサとニューラルネットワークを中心に構成した自動欠陥属性推定のための非破壊評価システムを提案し^[27-29]、その有効性を示す。

この研究で得られた成果は、電磁界を用いた非破壊評価技術の適用範囲を広げ、安全性の保障や経済性の確保といった使命を持つ非破壊評価技術の発展に貢献できる。

第1. 2節 従来の研究の到達点と課題

1876年、D. H. Hughers がパルス電流を金属線に流して材質判断に用いたことから渦電流探傷法は始まり、その後、1950年代にF. Forsterによる基礎研究、装置の開発を経てこの技術が本格的に実用化されたといわれている^[30]。現在では、金属材料に対する非破壊検査は、電界や磁界を用いる方法やX線を用いる方法、超音波を用いる方法、AEを用いる方法などが用いられている^[1-2]。この中で、電磁界を用いる方法は、金属内部の誘導渦電流を用いる方法や漏れ磁束を用いる方法がよく知られており、他の方式に比べてセンサの構造が簡単なことや取り扱いが簡便なことから一部実用化されている。特に、渦電流探傷法（Eddy current testing）は、発電所や化学プラントの配管検査などに多用されている。

磁気探傷法は、その手軽さと高速性、さらに、欠陥検出信号のコンピュータを利用した処理の簡便さなどから世界中で精力的に研究されている。日本においては、日本AEM学会が原子力プラントの安全性確保の要求から力を入れて取り組んでいる^[1-3, 31, 32]。日本AEM学会の取り組みは、欠陥を検出するのみでなく疲労の定量的推定をも目指した研究も盛んである。毎年春に開かれる日本AEM学会の定期講演会である「MAGDA コンファレンス」においても、多くの非破壊検査関係の講演が行われている。また、同学会主催の世界的な規模のワークショップの第1回が1996年のイギリス（ロンドン）で始められ[E'NDE]、日本（東京）、イタリア（レッジョカラブリア）、フランス（パリ）と毎年開催されている。さらに、日本応用磁気学会等においても毎年多くの磁気探傷法に関連した論文が発表され、この分野への関心の高さが伺える。IEEEの主催のINTERMAG コンファレンスにおいても、多くの発表が行われている。このような、非破壊検査に関する論文等から現在までのこの分野の研究の動向を「磁気センサ」、「磁気センサの磁界数値解析及び逆問題としての欠陥属性推定」の2つに分けて概観し、現在までの研究の到達点を把握し、この分野に残された課題を明らかにする。

「磁気センサ」は、その目的によって各種のものが各方面から提案されている。その中のいくつかの種類を以下簡単に列挙する。

従来からのパンケーキ型コイルによる渦電流探傷プローブの発展型で、1個のパンケーキ型コイルによって励磁し、プリント配線技術を使ってフレキシブルな基板上に微小ループコイルをアレイ化（4 x 4個、14 mm x 14 mm）した「マイクロECTプローブ」^[33-34]を提案している。被検査材は、弱磁性体であるインコネル600製のSG管で、

厚さ 1.25 mm である。また励磁周波数は、200 kHz である。ミアンダ型コイルを励磁コイルとし、メッシュ型コイルを検出コイルとしたプレーナ型渦電流探傷プローブ^[35]を開発している。メッシュ型コイルの差動特性を利用して、欠陥部以外での出力電圧の減少が計られている。この磁気センサの被検査材は、非磁性の銅板であり、板厚は、1 mm で、励磁周波数は、100 kHz である。また、平行四辺形型の励磁コイルを 6 段接続し、パーマロイ磁性線を内蔵した差動ピックアップコイルと組み合わせた磁気センサを提案している^[36-37]。被検査材は、アルミ板であり、板厚は、1 mm で、励磁周波数は、表側欠陥に対しては、200 kHz、裏側欠陥に対しては、20 kHz である。また、ドーナツ状の励磁コイルと同形状の検出コイルを一直線状に間隔を置いて並べたリモートフィールド型の磁気センサの改良を提案している。この磁気センサは、強磁性体配管に有効な磁気センサであるが、これを非磁性体に適用した例が報告されている^[38-40]。この場合の被検査材は、ステンレスやインコネルの非磁性体であり、板厚は、4 mm で、励磁周波数は、1 kHz である。さらに、大型の石油パイプラインの欠陥探傷のために速度起電力を利用した磁気センサを提案している^[41]。2 相交流を利用して移動磁界を被検査材中に発生し、速度起電力を考慮した磁気センサを磁性体パイプや板を対象に開発している^[42-44]。また、くま取りコイルを用いて移動磁界を生成する磁気センサも開発している^[45]。ここでは、100 Hz 程度の励磁周波数を利用している。さらに、フェライトコアを用いた差動型の磁気センサを多重周波数で励磁し、スペクトル解析を通じて欠陥の属性推定までも行える信号処理システムを備えた非破壊検査システムを開発している^[46]。このシステムは、励磁周波数が広いスペクトルを持っているため、磁性、非磁性を問わず検査対象とできる特徴を持っている。一方、ルーミアのグループは、彼らがフラックスセット型磁気センサと呼んでいるフラックスゲート型磁気センサを非破壊検査用に改造したものを提唱している^[47, 48]。このフラックスセット型磁気センサは、角形ヒステリシスを持つ磁性体コア（パーマロイなど）を持ち、高感度な磁気センサが実現できる可能性のあることが特徴であるが、信号処理系が複雑になる欠点を持っている。さらに、1つのパンケーキ型コイルで励磁し、クローバー型に配置され差動接続された4個のパンケーキ型コイルで欠陥を検出するタイプの磁気センサ^[49]を提案し、欠陥形状の再構成を行っている。また、高温超伝導体 SQUID 素子を非破壊検査に利用している^[50]。SQUID 素子を用いた磁気センサは、高感度であるが周辺装置が大がかりになる欠点がある。また、パンケーキ型励磁コイルと、3 x 3 のアレイ型にホール素子を配置した磁気センサを提案している^[51]。また、ポーランドのグループは、簡単な構造ながら差動型の出力特性を持つ、高感度な磁気センサを開発し、銅やアルミなどの平面板の表裏に存在する欠陥検出を行い成果を上げている。また、ニューラルネットワークと組み合わせた信号処理や磁気回路による磁気センサのシミュレーションでも成果を上げている^[52-54]。さらに、トルクセンサなどに用いられるマイクロ磁気異方性素子を欠陥検出素子に用いた磁気センサを銅箔を対象に開発している。励磁周波数は、100 kHz である。これらの磁気センサを総合的にまとめた論文もあり^[58-59]、現在の日本、あるいは世界の磁気探傷用センサの開発状況がよく把握できる。以上が、現在までに各所で研究開発されている渦電流を主に利用した磁気探傷用センサの主なものである。全体の傾向として、大分大学やアイオワ州立大学のグループを除いて厚さ 1 mm 程度の非磁性体（銅、アルミ、インコネルなど）を対象にしており、励磁周波数も 100 kHz 程度以上と高くなっている。また、欠陥検出素子から得られる信号も単一のものが多く、欠陥検出用コイルのインピーダ

ンスの変化を実部、虚部に分けて捕らえる方式のものが多いことが分かる。

一方、磁気センサの動作を数値解析によって解明し、各種被検査材に対して最適な磁気センサの開発を行ったり、逆問題としての欠陥属性の推定や欠陥形状の再構成に取り組むグループもある。磁気センサの数値解析の方法として、境界要素法を用いる方法^[60]、有限要素法を用いる方法、^[60,61]辺要素有限要素法を用いる方法^[62-65]、有限要素法と境界要素法を組み合わせる方法などがある。これらの、数値解析の方法も2次元から3次元へとコンピュータの発達に伴って進化している。欠陥の属性推定では、ニューラルネットワークを用いる方法^[53-54, 66-67]、遺伝的アルゴリズムを用いる方法^[68-69]、ラプラス変換を導入し境界要素法を用いた逆問題解析による方法^[70]、ファジィ推論を用いる方法^[71-72]、データベースを用いた逆問題解析による方法^[73]、辺要素有限要素法を用いた逆問題解析による方法^[74]、有限要素法と境界要素法を組み合わせる方法^[75-76]、ウェーブレット変換を用いた逆問題解析による方法^[77]、インピーダンストモグラフィと有限要素法、境界要素法を組み合わせる方法^[78]などが提唱され成果が得られている。

以上のように、渦電流探傷法を主とした磁気探傷法は、多くの研究がなされ、あらゆる方向からアプローチされている。しかし、現在、主に研究されている渦電流探傷法は、表面に存在する欠陥の高速で確実な発見に重点が置かれていることが多く、高い周波数の励磁磁界を用いて渦電流の流路変化などに伴うコイルのインピーダンス変化を検出する方式である。そのため、励磁磁界が表皮効果のため被検査材深部にまでは到達せず、検査対象の欠陥は、比較的薄い非磁性金属の表面欠陥に限られている。まして、表皮効果の顕著な軟鋼板などに代表される磁性を持つ金属の内部や裏側に発生した欠陥の検出は、非常に困難である。さらに、実用的な非破壊評価法は、欠陥の有無だけでなくその位置や形状などが定量的に推定できることが望ましいが、従来の渦電流探傷法では、簡単な欠陥検出機構のため欠陥検出信号に含まれる欠陥についての情報が少なく、コンピュータ支援によっても膨大な計算時間を必要とし、短時間での欠陥属性の正確な推定は非常に困難であった。さらに、これらの方法は、欠陥の特定に熟練を必要とすることや定量的なデータを得ることが困難なところからその改良が強く望まれている。

このような現在までの研究の結果をふまえて、電磁界を利用した非破壊評価技術に残された大きな課題の第1は、被検査材（特に、強磁性体。）の板厚の10%以下の自然裏面欠陥を確実に検出することであり、第2は、板厚の10%以下の大きさの裏面欠陥の位置や形状を自動で確実に推定できることである。また、第3に、欠陥探傷が自動的に高速で行なえることなどである。この程度の大きさの欠陥を確実に探傷でき、その属性を把握することができれば、構造物や機器の安全性が保障が容易である。よって、上記の非破壊評価技術への要求を満たすための研究・開発は、意義のあることである。

第1. 3節 本研究の概要

本論文は、全部で5章からなっている。以下に本論文の概要を示す。

第1章は、序論であり、従来の非破壊評価技術分野の研究の到達点や現在の課題等を明らかにし、本研究の意義や目的を明確にする。従来の渦電流探傷法では、肉厚金

属板はその対象とされていなかった点に着目し肉厚金属板裏側欠陥を磁気探傷の対象とすることの意義を明らかにしている。

第2章は、従来の磁気探傷の問題を克服するための一つの方法として新しく開発した3種類の偏位式回転磁束型磁気センサの欠陥検出機構や欠陥検出特性について数値解析や実験を通して明らかにしている。この偏位式回転磁束型磁気センサは、欠陥が存在するかもしれない被検査材表面付近の磁束密度の変化を検出する方式の磁気センサである。一方、磁氣的に大きく性質の異なる軟鋼板を対象とした磁気センサとステンレス板を対象とした磁気センサを同時に比較・検討することは困難なため、肉厚鋼板裏側欠陥を対象にする場合と肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象とする場合に分けて議論している。第2.1節は、偏位式磁気センサの開発意義を示している。第2.2節は、肉厚鋼板裏側欠陥を対象にし、欠陥に関する多くの情報収集を可能とした「3軸サーチコイルを備えた空心励磁式回転磁束型磁気センサ」^[16-18]と強力な印加磁界によって欠陥検出信号の高出力化を可能とした「3軸サーチコイルや2軸ピックアップコイルを備えたU字鉄心励磁式回転磁束型磁気センサ」^[19]についてその設計思想や有効性を示している。さらに、リサーチ波形の軸比 α と傾き角 θ を使用した新しい欠陥評価法を提案し^[16-17]、その利点を示している。第2.3節は、独自に定義したSN比を利用した磁気センサの比較結果を示し^[81-82]、微小欠陥探傷のためには高SN比を持つ磁気センサの開発が必要であることを示している。第2.4節では、肉厚ステンレス板裏側欠陥を対象とし、欠陥形状の判定が可能な「3軸サーチコイルを備えた軟鉄鉄心励磁式回転磁束型磁気センサ」^[20-21]について有用性を明らかにしている。第2.5節は、偏位式磁気センサについて総括する。

第3章は、偏位式とは異なる考え方に基づく差動式回転磁束型磁気センサを提案し、その有用性を明らかにしている。この差動式回転磁束型磁気センサは、欠陥の存在しない被検査材表面と欠陥が存在するかもしれない比較検査材表面の磁束密度の差を検出する方式の磁気センサである。他言すれば、差動式回転磁束型磁気センサは、欠陥の存在しない被検査材表面と欠陥が存在するかもしれない比較検査材表面の磁束密度の差を検出していることから、微分型の磁気センサとも言える。差動式の磁気センサが、微分型だとすれば、第2章で述べる、偏位式回転磁束型磁気センサは、積分型とも言える。

第3.1節では、差動式磁気センサの開発目的と基本的考え方を示す。第3.2節では、高感度で高安定な磁気センサを目指した「3軸差動サーチコイル回転磁束型磁気センサ」^[22,27]について基本構造や欠陥検出機構、欠陥検出特性を示し、その有効性を明らかにする。また、小型軽量の「3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサ」^[23-24]についてもその有効性を示す。さらに、被検査材表面近傍の欠陥による磁束密度の変化をXYZの3軸に分解して検出できる3軸差動サーチコイルの特徴を利用した新しい「欠陥評価指標」を提案し^[22]、その有効性を示している。第3.3節では、磁気センサの欠陥検出特性のシミュレーションの簡易化や時間短縮のために磁気等価回路を用いることを提案し、3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサに適用した例を示し、有効性を示している^[25]。第3.4節では、3軸差動ピックアップコイル回転磁束型磁気センサを肉厚ステンレス板裏側欠陥の形状推定に適用した例を示す^[26]。また、欠陥の形状評価に有効な「欠陥形状評価指標」を新たに提案し、形状推定に効果的であることを示している。第3.5節では、差動式回転磁束型磁気センサを総括している。

第4章では、回転磁束型磁気センサの特徴を利用して欠陥属性推定問題にニューラルネットワークと併用した例を示している^[27-29]。ニューラルネットワークは、以前から逆問題解決の一つの方法として用いられてきたが、磁気センサの欠陥に関する情報収集能力に限界があったため、ごく単純な例のみで成功しているにすぎない。そこで、欠陥から多くの情報が得られる回転磁束型磁気センサとニューラルネットワークを併用したシステムを欠陥属性推定問題に適用した。第4.1節では、ニューラルネットワークを欠陥属性推定問題に適用する意義を示す。第4.2節では、階層型誤差逆伝搬ニューラルネットワーク^[83-84]の構造や学習方法などを示し、欠陥属性推定問題に適用するための方法を示す。第4.3節では、肉厚鋼板裏側欠陥の属性を階層型誤差逆伝搬ニューラルネットワークと回転磁束型磁気センサを用いて自動推定した例を示し^[27-28]、このシステムが有効に働くことを示す。第4.4節では、肉厚ステンレス板裏側欠陥の自動形状推定に適用した例を示す^[29]。また、欠陥属性推定問題においても回転磁束型磁気センサが有用であることを明らかにする。第4.5節では、ニューラルネットワークと回転磁束型磁気センサを併用した欠陥属性自動推定システムについてその有用性を総括する。

第5章では、本研究を総括し、今後の展望を示し、今後の研究課題を明らかにする。ここで、本研究で用いた回転磁束型磁気センサの方式と検査対象、また、それぞれに対応した磁気センサの名称を Fig. 1-1 に示す。

欠陥検出方式	検査対象	センサ名
偏位式	軟鋼板裏側欠陥	- 空心蝶型磁気センサ U字鉄心型磁気センサ
	ステンレス板裏側欠陥	- 鉄心蝶型磁気センサ
差動式	軟鋼板裏側欠陥	- サーチコイル型磁気センサ ピックアップコイル型磁気センサ
	ステンレス板裏側欠陥	- ピックアップコイル型磁気センサ

Fig. 1-1 Signal detection method of the rotational magnetic flux sensor, subject of inspection and sensor names.