

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成果報告レポート  
No. 31-7

研究テーマ

高感度磁気非破壊検査による目視不可能な個所の  
損傷の検出についての技術研究開発

研究代表者：岡山大学特任教授	塚田 啓二
共同研究者：大阪大学教授	鎌田 敏郎
関西大学准教授	石川 敏之
大阪大学准教授	廣畑 幹人

令和4年5月

新道路技術会議

# 目次

研究概要.....	3
第1章 はじめに.....	5
1.1 水中部の損傷の検出.....	5
1.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出.....	6
1.3 アンカーボルトの腐食検出.....	6
1.4 溶接部のき裂の検出.....	7
第2章 国内・海外の既存研究状況.....	8
2.1 水中部の損傷の検出.....	8
2.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出.....	8
2.3 アンカーボルトの腐食検出.....	8
2.4 溶接部のき裂の検出.....	9
第3章 検査装置及び検査方法の評価.....	10
3.1 水中部の損傷の検出.....	10
3.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出.....	18
3.3 アンカーボルトの腐食検出.....	27
3.4 溶接部のき裂の検出.....	33
第4章 実験結果から得られた所見.....	40
4.1 水中部の損傷の検出.....	40
4.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出.....	40
4.3 アンカーボルトの腐食検出.....	40
4.4 溶接部のき裂の検出.....	41
第5章 まとめ（今後の道路施策への提案）.....	43
5.1 水中部の損傷の検出.....	43
5.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出.....	43
5.3 アンカーボルトの腐食検出.....	43
5.4 溶接部のき裂の検出.....	43
参考文献.....	44

## 「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 31 年度採択)

## 研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.31-7	高感度磁気非破壊検査による目視不可能な個所の損傷の検出についての技術研究開発	岡山大学 教授 塚田啓二

高感度磁気非破壊検査により目視不可能な個所の鋼部材に生じた腐食、疲労、破断などの損傷や欠損を検出できる技術開発を行う。これらの対象として水中部の鋼矢板など付着生物を除去せずに残存板厚を計測する方法や、照明・標識柱などのコンクリート埋設部の腐食や、塗装下の溶接部の疲労き裂、コンクリート中のアンカーボルトの腐食を検出する検査方法を実現する。

## 1. 研究の背景・目的

高感度な磁気センサと新たな信号解析により、微弱な極低周波磁場を鉄鋼構造物に照射して検出することにより、従来法ではできなかった腐食による減肉や溶接部のき裂などを検査できる検査方法と装置の開発を目指した。この方法を用いて、道路維持管理の際に問題となっていた直接目視ができない水中部の鋼矢板などの腐食や、照明柱・標識柱などの地際下腐食、コンクリート中に埋め込まれたアンカーボルトの腐食、溶接部のき裂検出などに対して、簡便に検査できる方法の確立を目指した。

## 2. 研究内容

検査対象に極低周波の交流磁場を印加して発生する渦電流からの二次的な磁場を高感度な磁気センサで検出する新たな開発した検査方法を用いた。また複数の周波数による磁場スペクトルを取得して周波数変化の応答特性を用いて腐食やき裂等の損傷を解析する手法を開発した。実際の鋼製構造物へ適用するため、各種検査対象に対する検査装置の最適化開発と、性能特性および誤差要因等の明確化を行い検査の適用性の総合評価を行った。検査項目として、次の4つの技術開発を行った。(1)水中部の損傷の検出評価技術：厚い付着生成物などを除去することなく、鋼製橋脚や鋼矢板の気中から海底までの腐食による減肉を検査できる方法の開発、(2)埋設部および閉じ断面の損傷の検出評価技術：道路付帯物の照明・標識柱の地際下腐食を開削することなく短時間で検査できる方法の開発、(3)アンカーボルトの腐食の検出評価技術：コンクリート中に埋め込まれたアンカーボルトの腐食の有無と程度をコンクリート表面から検査できる方法の開発、(4)鋼床版の補剛材等の溶接部の塗装下のき裂をそのままの状態を検査できる方法の開発。

## 3. 研究成果

(1)水中部の損傷の検出評価技術：極低周波渦電流探傷法(ELECT)を用いた水中部の検査装置として、磁気センサプローブの防水と、30 m のケーブル長とすることにより、護岸の鋼矢板は海底まで検査できるようになった。また、付着物が貝などの厚い場合に問題となる磁気センサプローブと鋼材の間の距離であるリフトオフによる検査データの変動を抑えるため、印加コイルの大きさとリフトオフの影響の関係を明らかにした。この知見をもとに、例えば 100 mm×100 mm の磁気センサプローブではリフトオフが 80 mm までは、リフトオフに影響なく付着物の上から検査できるようになった。

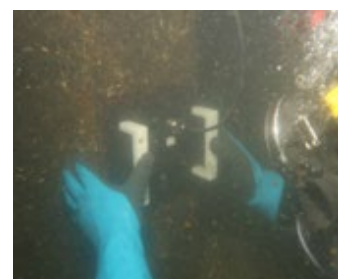


図 1. 大型磁気センサプローブを用いた水中部検査

(2)埋設物や閉じ断面の損傷の検出評価技術：目視が困難な、埋設物や閉じ断面の損傷に対して、損傷の程度による信号強度比の応答特性を明らかにした。ここで、板厚に影響されない腐食評価として検査データの規格化をすることにより、腐食度を表すことができた。また、実際の照明柱・標識柱に対して、掘削することなく著しい損傷の検知が出来ることを示した。道路上での問題となる交通による磁気ノイズの周波数特性を明らかにして、本検査で磁気ノイズに影響されにくい検査周波数を明らかにした。さらに、リブに疲労損傷が発生していた場合でも、ELECT を用いて

スクリーニングできることが明らかにした。

(3) アンカーボルトの腐食検出評価技術：アンカーボルト腐食による断面欠損，および腐食生成物が生じた鋼棒を模擬した解析モデルに対して動磁場解析，および基礎実験を行い，磁気による検査方法の可能性と最適化ができた。さらに，実構造物に適用する計測ヘッドを製作し，励磁コイル，および検出コイルの最適な配置条件の評価を可能とした。

(4) 溶接部のき裂の検出評価技術：本研究項目では，鋼橋に適用される防食塗膜厚さを想定したリフトオフ（1～2 mm）を設けても，溶接部に発生した疲労き裂を明確に検出できる方法を開発した。高感度磁気非破壊検査で得られる信号パターンの特性と整理方法を検討し，溶接継手の検査に適した評価指標を示しスクリーニング検査としての適用性を実証した。



図 2. 地際用センサプローブを用いた標識柱地際下の検査

#### 4. 主な発表論文

- 1) K. Tsukada, M. Hayashi, T. Kawakami, T. Kawakami, S. Adachi, K. Sakai, T. Kiwa, T. Ishikawa, M. M. Saari, K. Hori, K. Hisazumi, T. Tomonaga, Magnetic thickness measurement for various iron steels using magnetic sensor and effect of electromagnetic characteristics, AIP Advances 12, 035109-1-4 (2022)
- 2) 大西泰生, 石川敏之, 塚田啓二：高感度磁気非破壊検査による疲労き裂の検出の試み，構造工学論文集，Vol.67A, pp.479-487 (2021)
- 3) 宮本陽平, 廣畑幹人, 塚田啓二，林実：高感度磁気非破壊検査による溶接部き裂の検出に関する基礎的検討，令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会，I-139 (2021)
- 4) 上杉潤矢, 服部晋一, 寺澤広基, 鎌田敏郎, 塚田啓二：高感度磁気センサを用いた低周波交流磁場応答の位相検波によるコンクリート中アンカーボルトの腐食検出に関する基礎的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.21, p.343-348 (2021)

#### 5. 今後の展望

水中部の損傷の検出評価技術に関しては，潜水士による鋼製橋脚や鋼矢板などの水中の鉄鋼構造物の腐食検査を，ケレン処理なしで迅速に検査できるようになった。さらに次世代の検査方法としての示した機械アームによる完全に陸上部からの検査について，潜水士不足やコストの点から重要であり，継続して開発を進めていく必要があると考える。埋設物や閉じ断面の損傷の検出技術に関しては，掘削することなく標識柱・照明柱の地際下 50 mm 程度の腐食損傷を検査できるようになった。今後，さらなる利便性を高めるために，小型のプローブの開発を進めていく必要があると考える。アンカーボルトの腐食検出に関しては，アンカーボルトを設置したままで腐食長さ 50 mm 程度までの腐食の有無，および腐食範囲が推定できる可能性があることを示した。今後は様々な形状の実構造物に適用可能な検査システムを開発していきたい。溶接部のき裂の検出評価技術に関しては，信号パターンとき裂の長さ，深さなどとの定量的な関係を把握することで，より情報量の多い検査を可能としたい。

#### 6. 道路政策の質の向上への寄与

水中部の損傷の検出評価技術に関しては，現在行われている潜水士によるケレン処理が必要な超音波検査と比較して，同等の検査結果がケレン処理の必要のない磁気検査で得られることを立証できた。埋設物や閉じ断面の損傷の検出技術に関しては，掘削することなく標識柱・照明柱あるいは鋼製橋脚の地際下の腐食損傷を検査できるようになった。このように，本技術により水中部および埋設部の腐食検査スピードが向上し，補修の必要性の判断の容易化と健全性維持の低コスト化が可能となると考える。これらは性能カタログや NETIS 登録を予定しており，広く社会活用できるものとする。また，アンカーボルトや溶接部のき裂の検出評価技術に関しても基本技術は完成したので，構造物の形状に適した装置開発をすることにより，実際の検査方法として展開できるものとする。

#### 7. ホームページ等

特になし

# 第1章 はじめに

## 1.1 水中部の損傷の検出

橋梁の橋脚や港湾における鋼杭や鋼矢板などの鉄鋼構造物は、降雨や満潮・干潮による水位や水流の変化や、またそれとともに流れてくる土砂や樹木などにより損傷が発生するなど、厳しい環境下に置かれている(図 1.1-1)。損傷のなかでも腐食による減肉が経年劣化として問題となる。特に港湾鋼構造物では平均干潮面直下付近の海中での腐食が早く進むことが知られている。現在、減肉検査としては潜水士による超音波検査が標準となっている。超音波が鋼材中を進む速度と反射してくる時間をかけることにより板厚を検査する方法である。超音波検査は対象物に超音波プローブを接触させる必要があるため、対象物の表面の貝や海藻などの付着物を取り除く必要がある。付着物を取り除くケレン処理のため、検査に手間と時間が長くかかる問題があった。また、取り除いた付着物の廃棄処理が必要であり、清流においてはケレン処理による汚染も禁止されている場合もある。ケレン処理は付着物を取り除く際に鋼材自身を削りとり腐食を加速させる事や、板厚の経年変化を調べるために同じ個所をケレン処理続けるとそれ自体が減肉を引き起こす可能性がある。一番知りたい腐食がひどい個所は付着物だけでなく、厚い錆に覆われている場合がある。厚い錆をケレン処理した鋼材の表面は凸凹しているため、超音波検査が困難な場合がある。水位が低い場合、検査個所は水中ではなく気中になる場合があり、この場合では、超音波プローブと鋼材の間に少しでもギャップがあると超音波が伝わらないので、ケレン処理後に音響インピーダンスをマッチングさせるための接触媒体を塗る必要がでてくる。

従来の超音波検査において、対象物に超音波プローブを直接接触させて検査する必要がある方法の改善として、ケレン処理が必要のない超音波検査方法の研究開発が行われている。例えば、鋼板の表面と背面の間で超音波が往復して出てくる多重反射を解析することにより、付着物から離れていても板厚が検

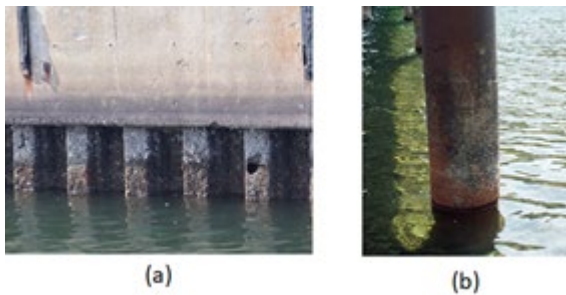


図 1.1-1 水中部の腐食例、(a)港湾鋼矢板、(b)パイルベント橋脚

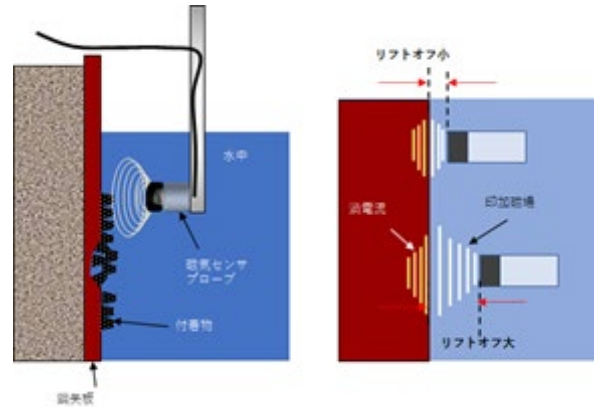


図 1.1-2 水中部検査における課題

査できる方法が報告されている。

板厚検査方法に適用できる非破壊検査には超音波以外、磁気検査方法がある。従来磁気を用いた検査は表面あるいは表層近くの内部傷の検査として、表面探傷法に分類されていた。最近では、厚い金属板の板厚を測定する方法がいくつか開発されてきている。例えば、パルス磁場を印加して検出磁場信号の減衰時間から板厚を推定するパルス渦電流探傷法(PEC)がある。また、報告者らは、パルスではなく数種類の数 Hz からの極低周波を用いた極低周波渦電流探傷法(ELECT)を開発している。この方法は磁気検出器として、従来用いられていたコイルではなく、極低周波から高周波まで一定の感度を持つ磁気抵抗(MR)素子を用いて検出感度を向上させている。

磁気検査法は非接触で検査できる特徴があるので、水中における板厚検査において付着物の上からでも検査できると期待できる。しかし、実際に適用する場合、次の課題が考えられた(図 1.1-2)。

- (1)付着物の厚みにより測定データが変動する可能性。
- (2)錆や貝などの付着物の磁気的な影響。
- (3)超音波検査では測定データから板厚を推定する場合、検査対象の鋼材での音速を知る必要があるのと同じく、磁気検査における各種鋼材の組成、結晶構造などの違いによる電磁気特性の影響。

以上の課題を解決する検査技術の基本的な研究開発のほかに、実際の検査における効率化についても検討した。磁気検査はケレン処理が不要のため検査時間の短縮が可能となる。しかし、検査する潜水士の人手不足が問題になってきている。そのため、手動のプロービングだけでなく、次世代の検査方法として機械アームによる護岸からの検査方法の可能性についても検討をおこなった。本研究開発においては、装置開発とその基礎評価だけでなく、フィールド検査においては、従来行われてきている超音波検査方法との比較試験も行い、総合的な評価も行ったので報告する。



図 1.2-1 照明柱の地際腐食の一例

## 1.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出

鋼構造の損傷の多くは腐食損傷と疲労損傷である。道路付属物である照明柱や標識柱の劣化は、目視不可な地際下の腐食であり、近年、地際下の著しい腐食（図 1.2-1）により倒壊が生じた事例もあり、社会問題になってきている。倒壊による交通事故が多く発生しているため、地際下の腐食の検出法と腐食部の補修法が求められている。一般的に、標識柱・照明柱の詳細点検では、予め特定した弱点部に対して近接目視、必要に応じて打音・触診を含む非破壊調査を検討することとしている。しかし、近接目視では地際の腐食が地表まで広がっている場合は検出できるが、地際下に留まっている場合は見逃してしまう。全ての道路付属物に対して開削による検査では多くの時間と人手が必要とされ、全数検査することは困難であるため、開削しないで地際下の腐食を検査でき、かつ安価な検査方法が強く求められている。

現在は、超音波を使った地表側からの地際下の腐食などの欠陥を検査する方法が開発されている。超音波法は深いところまで検査できる特徴があるが、土やアスファルト、コンクリートなど埋設されている状況に応じて適用性の難易度が違い、コンクリートなど硬く、密着している状態ではノイズが大きくなり判定が困難になる場合がある。一方、磁気的な方法は非接触で検査でき、コンクリートなどは非磁性体なので透明体として、磁気計測に影響しない特徴がある。したがって、本プロジェクトでは地際下腐食検査方法として磁気で検査する方法を開発する。このような地際下腐食は、標識柱・照明柱だけでなく、図 1.2-2 に示すように、道路橋や歩道橋の鋼製橋脚の地際部でも生じている。この箇所でも腐食損傷を検出する際には、基部周辺のコンクリート、アスファルトなどを掘削し、目視あるいは超音波探傷試験による評価が一般的に行われている。しかし、一連の作業を実施するには、時間がかかり、高コストとなるため、掘削前に損傷を検出できる技術が望まれている。鋼製橋脚は、標識柱・照明柱よりも厚



図 1.2-2 鋼製橋脚の地際腐食の一例

板となるため、開発した磁気計測装置を用いた厚板の腐食損傷の検出手法についても検討する。

また、標識柱・照明柱の検査では、腐食だけでなくリブの疲労損傷も対象としている。磁気計測では、疲労き裂を検知することも可能であるため、標識柱・照明柱の検査の際に、リブの疲労損傷を検出する技術についても検討する。

## 1.3 アンカーボルトの腐食検出

アンカーボルトは、様々な付属物をコンクリートに固定するために用いられ、コンクリート中に埋め込まれて使用されるが、長時間の使用の中で雨水の浸入などにより腐食が生じる場合がある。アンカーボルトの腐食についてはこれまであまり事例が報告されてはいないが、高速道路等において鋼製支柱本体や、照明灯具取り付け部などの支柱基部のアンカーボルトにおいて腐食の事例が示されており、潜在的に多くのアンカーボルトに腐食が発生している可能性があると考えられる。腐食したアンカーボルトの事例を図 1.3-1、図 1.3-2 に示す。これらのアンカーボルトでは、ベースプレートとコンクリートの境界面付近で腐食減肉が発生し、耐荷性能の低下が懸念されている。耐荷性能の低下したアンカーボルトは、風による共振や地震などの外的要因によって照明柱などが倒壊する危険性があるため、アンカーボルトの定期的な点検が求められている。

現在、アンカーボルトの検査として目視検査や接触検査、打音検査が行われているが、いずれも官能的な検査方法であるとともに、アンカーボルト部の施工不良や欠陥を対象としており、腐食状況を直接検査する手法ではない。その他の取り組みとして、超音波法があり、超音波をボルト頂部からボルトの軸方向に入射し、その反射エコーでボルトの腐食状況を検出する研究が行われているが、腐食の初期段階におけるネジ山が喪失する程度の腐食では十分な検出精度が得られていないなどの課題がある。

これに対し、磁気的手段を用いた検査手法として過流探傷法があり、鋼材表面の傷の検査に多用されているが、コンクリート中に設置されるアンカーボルトに適用された事例は見当たらない。これは、ア



図 1.3-1 アンカーボルトの腐食例<sup>1)</sup> (道路附属物)



図 1.3-2 アンカーボルトの腐食例 (鉄道附属物)

ンカーボルトの軸方向がコンクリート表面に対し垂直方向に設置されるため、効率よく磁場を入力しにくい構造であることや、ベースプレートやナットなど、磁路に影響する磁性体がボルト周辺に存在することもその一因になっている。しかしながら、微小な磁気計測が可能な高感度磁気センサが非破壊検査分野に導入され、鋼材深部に到達できる低周波において微小な磁気計測が可能な高感度磁気センサが開発されたことから、新たな可能性が示された。

そこで、本研究は極低周波においても感度が高い磁気抵抗素子 (MR) を適用することで、不可視のアンカーボルト埋設部における腐食減肉の検出を簡便に検出することのできる非破壊評価技術を開発することとした。本手法は、高感度磁気センサにより、腐食に伴いアンカーボルト周辺に生じる微小な磁場の変化を、低周波から比較的高周波の帯域まで高感度に検出できる性能を目指しており、コンクリート中に埋め込まれたアンカーボルトの腐食を検出する手法として有効な手段になり得ると考えられたからである。

本研究では、当初 10~300Hz の周波数を用い、丸鋼の一部に断面欠損により腐食を模擬した試験体、および電食により腐食を模擬した試験体を作製し、腐食の有無や、腐食位置が検出できる可能性の検証を試みることにした。また、腐食部の位置と検出信号との間にどのような関係が得られるのかを明らか

にすることとした。具体的には、磁気測定における励磁コイル、磁気センサの効率的な配置を検討した。また、微小な信号の変化を高感度に検出できる位相検波と磁気スペクトルを適用し、腐食の有無や、腐食位置が検出できる可能性を実験的に評価した。

その後、附属物のあるアンカーボルトを模擬した解析モデルにおいて、断面欠損および腐食生成物が電磁場応答に与える影響を渦電流解析により検討するとともに、アンカーボルトの附属物が本手法の腐食評価に与える影響を検討した。また、実構造物に適用可能な計測ヘッドを製作し、励磁コイル、および検出コイルの最適な配置条件の評価を可能とした。

## 1.4 溶接部のき裂の検出

鋼橋の製作では、一般的な接合方法として溶接接合が使用される、現在、鋼橋の高経年化が進行しており、疲労や腐食などの損傷が報告されている。疲労については交通量の増加、大型車両や過積載車両の通行に起因する疲労き裂が数多く発生している。溶接部は疲労き裂の起点となりやすいため、非破壊検査を行い、き裂の検出を行う必要がある。

疲労き裂などの表面欠陥の非破壊検査法として、近接目視、磁粉探傷法などが挙げられる。一般的に近接目視によりき裂やき裂の疑いがある塗膜割れを確認した後、磁粉探傷法などによりき裂の有無や長さを確認する。しかし、塗膜の厚さや状況により、塗膜の剥離やその復旧の必要が生じ、検査箇所が膨大な場合、多大な労力と時間を必要とする。そのため、塗膜上からでも塗膜下のき裂を効率的かつ精度良く検出できる技術があれば、点検の効率化につながる可能性がある。また、内部欠陥の非破壊検査法として超音波探傷法が挙げられ、溶接部内部欠陥の検出に広く用いられているが、探傷結果の評価については検査技術者の技量に左右されやすい面がある。塗膜下の疲労き裂や溶接部内部欠陥の検出に適用できる簡便かつ高精度な非破壊検査が求められており、種々の技術に関する研究、開発が実施されている。

本研究では高感度センサを搭載した検査装置を利用して、鋼橋溶接部の欠陥およびき裂の検出に対する高感度磁気非破壊検査の適用を念頭に一連の基礎的検討を実施した。疲労き裂を導入した面外ガセット溶接継手供試体を用いて、塗膜上からの塗膜下のき裂の検出可否について検討を行った。

## 第2章 国内・海外の既存研究状況

### 2.1 水中部の損傷の検出

水中部、とくに港湾施設における鋼構造物の板厚検査方法では潜水士による超音波厚み計を用いた検査が標準となっている。表面に付着した貝などをケレン処理に取り除く必要があった。ケレン処理には時間がかかるため代表的な個所での計測に限定されていた。ここで腐食は均一でないため、局所的な腐食によるバラツキを抑えるために、多点計測の必要性から「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」では10cm四方内の5点あるいは3点の平均値を検査板厚としていた<sup>2)</sup>。これらのことから検査法として付着物のケレン処理作業の必要性から生じる検査時間と作業性の改善が求められていた。そのため、付着物を取り除かなくても検査できる超音波検査法の改良や、別の手法として磁気検査法の研究開発が行われている。

水中部での板厚を検査する超音波検査装置は、いくつもあるが、鋼材の厚い塗装などの上からは検査できるが貝など付着物を取り除く必要があった。そうした中、特に港湾空港技術研究所にて非接触式肉厚検査装置の研究開発が行われている<sup>3)</sup>。付着物の上から超音波プローブを当て、鋼材の表面および裏面からの多重反射をとらえ板厚を推定するものである。

一方、非接触性計測が特徴である磁気検査法の研究開発が最近活発化している。従来の磁気検査法としての渦電流探傷法(ETC)は、単一周波数の磁場を印加して鋼材に発生する渦電流から生じる2次的な磁場を検出器としてコイルやホール素子で計測する方法である。また、漏洩磁束探傷法(MFL)などは強い直流磁場を鋼材に印加して漏れ出てくる磁束をコイルあるいはホール素子で検出する方法である。報告者らは、MFLにおける印加磁場を交流の弱い磁場にして、検出器として高感度な磁気抵抗素子(MR素子)を用いた不飽和漏洩磁束探傷法(USAC-MFL)を開発して、鋼材の減肉を検知する方法を開発した<sup>4)</sup>。その応用として港湾施設のコンテナクレーンの閉じた構造であるビーム部の内部腐食を表面塗装面から検知できることを発表した<sup>5)</sup>。MFLは正確な板厚を計測するものではなく、減肉の有無と程度をとらえるものであった。正確な板厚検査を計測する方法として、印加磁場を単一周波数ではなくパルス磁場として印加するパルス渦電流探傷法(PEC)が多く研究開発がされている<sup>6)</sup>。この方法は、パルス磁場印加後に発生する2次的磁場の減衰時間を計測する方法である。PECはすでに製品化している会社もあり、例えばEddyfi Technologies社がパイプラインの表面及び裏面の腐食による減肉を検査するPECを販売している。パルスではなく数Hzの極低周波の磁場を印加して、

MRセンサで2次的磁場の位相遅れを検出する方法として、報告者らオリジナルである極低周波渦電流探傷法(ELECT)を報告した<sup>7-9)</sup>。いずれにせよ、これらは気中での鉄鋼構造物の板厚に適用していた。

PECではさらに貝殻などの付着物の上からでも検査可能な水中用としてもINCOTESTをRTD社が製品化して、日本では検査会社がこの装置を使った検査業務を実施し始めた<sup>10,11)</sup>。報告者らはパルス波を使わないELECTをオリジナルな基本技術として気中検査だけでなく、本プロジェクトでは厚い付着物の上から直接検査できる水中用として研究開発した。

### 2.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出

照明柱・標識柱のような鋼管柱での点検では、一般に、地際部を掘削し、損傷が大きな箇所を4点抽出し、超音波板厚計を用いて、残存板厚が計測されている。しかし、著しい腐食損傷の場合、超音波板厚計を用いても正しく残存板厚が計測できない場合もある。また、これまでに、地際部を掘削することなく、超音波法、電磁誘導法を用いた照明柱基部の損傷の評価が行われている。無線加速度計測より、照明柱基部の応力を推定による照明柱の疲労損傷の検出の評価も行われている<sup>12)</sup>。鋼製橋脚に対しては、渦流探傷試験を用いた探傷波形の非線形回析分析を行うことで、地際部から目視計測できない位置の腐食検出や腐食量の推定が行われている<sup>13-15)</sup>。

疲労損傷に対しては、非破壊検査法の一つである、磁気探傷試験(MT)が一般的に利用されている。しかし、鋼橋には塗膜が施されているため、塗膜を除去し、非破壊検査を実施、塗膜の復旧作業を行う必要がある。そのほかに、疲労き裂の調査の効率化を図るために、塗膜の上からの渦流探傷試験(ET)、あるいは表面から検出できない疲労き裂を発見するための超音波探傷試験(UT)による疲労き裂の検出が検討されている。これらの技術は、標識柱・照明柱でも利用可能であるが、地際部の掘削が必要とされる技術である。

### 2.3 アンカーボルトの腐食検出

アンカーボルトの非破壊検査手法として、目視検査、打音検査、ファイバースコープ検査などがある。しかしながら、目視検査や打音検査は簡便な反面、点検作業員の技量が必要とされる。また、ファイバースコープ検査では、ナットの固着を緩め、異物除去に時間を要するなどの課題がある。一方、超音波法を用いたアンカーボルト劣化判定システムSABHC(サーベック)は、ナットを装着したまま、アンカーボルトのねじ山の欠損状況、亀裂の有無を把握することが可能である。検出原理としては、アンカーボルト露出部頂部から超音波探触子を接触させ、ボルト内部に超音波を入射、伝搬させねじ山か





図2.3-1 アンカーボルト劣化判定システム  
SABHC

らの反射エコーから欠損の状況を把握している。(図2.3-1参照)。ただし、超音波を均一に入射するため、専用工具によりアンカーボルトの頭頂部を平坦に研磨する必要があるなど計測前の養生が必要とされる。

磁気抵抗素子 (MR) を用いた非破壊検査装置は、極低周波においても磁気応答特性を調べることができるため、渦流探傷法のような鋼材表面のみならず、内部、裏面の欠陥を検査できる特徴がある。報告者らは塗膜上からの疲労き裂の非破壊検査として、鋼部材の腐食部の検出が非接触で容易に行える極低周波渦電流探傷法 (ELECT) を用いた高感度磁気非破壊検査手法を開発した。この手法は、極低周波の電磁場応答を用いることで道路標識柱の地際部といった深部においても欠陥検出の可能性が示されている。

## 2.4 溶接部のき裂の検出

鋼構造物における溶接部では、疲労き裂の発生、進展が代表的な損傷として知られている。実構造物において、疲労き裂を精度よく効率的に検出する技術に対する要求は大きい。既存のき裂検出技術として、浸透探傷試験、磁粉探傷試験などが一般的に利用されるが、いずれも溶接部の表面を清掃し、浸透液や磁粉を塗布する必要がある。また、検出可能なき裂は基本的に表面に存在するき裂である。さらに、構造物に塗装などが施されている場合は、塗装を除去する必要がある。このような観点から、塗装を除去することなく塗膜下のき裂を検出することの重要性が認識される。塗膜上からでもき裂検出が可能な非破壊検査法として、超音波や放射線を利用する方法があるが、いずれも検査に高い専門性と知識を要し、結果の判別、評価も一般の技術者には容易ではない。

これに対し本研究では、磁気非破壊検査技術である漏洩磁束法と渦電流探傷法を駆使して、溶接部のき裂を塗膜上からでも検出できる方法の構築を行った。鋼橋を想定した防食塗装の厚さを十分に包含す

るリフトオフを設定しても、溶接部のき裂が明確に検出できる評価方法を検討した。また、人工き裂を導入した試験体を利用して、き裂のパターン、深さなどと磁気信号との関係性を明確にし、き裂の検出方法を具体的に提示した。

# 第3章 検査装置及び検査方法の評価

## 3.1 水中部の損傷の検出

### 3.1.1 装置および測定原理

ECT は金属材料に印加コイルにより交流磁場を照射し金属内に渦電流を発生させ、欠陥により変化した渦電流の変化を磁気で計測する。検出した信号の磁場の強度と位相を解析することにより欠陥を検知することができる。ここで、印加した交流磁場は表皮効果により深さ  $z$  に対して指数関数的に減衰する。磁場が  $1/e$  だけ減衰する深さを表皮深さ  $\delta$  として表せ、 $\delta$  は周波数  $f$  と関係していて周波数が高いと浅く、周波数が低いと深くなるのが分かる。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

$f$ : 周波数,  $\mu$ : 透磁率,  $\sigma$ : 導電率

本プロジェクトで開発した ELECT では、検査対象の鋼材の板厚全域に印加磁場が浸透できるように周波数帯域を数 Hz から数 100Hz の極低周波領域で計測している。ここで、周波数を低くすることにより深部に発生した渦電流の強度は弱くなるため、検出器部分には検出限界  $1nT/\sqrt{Hz}$  程度の高感度な MR 素子を用いている。ELECT の磁気センサプローブは、図 3.1-1 に示すように印加コイルと磁気センサを基本としている。印加コイルからの磁場は検査対象だけでなく直接磁気センサにも照射されるので、その分をキャンセルするためにキャンセルコイルを設けてある。磁気センサで捉えた信号は印加磁場と同じ周波数で検波して、同相成分である実数  $x$  成分と、90 度位相がずれた成分である虚数  $y$  成分に分離される。これらベクトル成分である  $x$  成分と  $y$  成分から強度及び位相を得ることもできる。周波数としては複数選択でき、各周波数を時系列的に印加して各周波数の磁場ベクトルが得られる。

フィールド検査装置として開発した ELECT 板厚検査装置は、装置本体をキャリングケースに収納し、磁気センサプローブとパソコンを接続して用いている。磁気センサプローブは樹脂でモールドされて、



図 3.1-1 極低周波渦電流探傷検査装置(ELECT)  
(a) 装置本体, (b)磁気センサプローブ

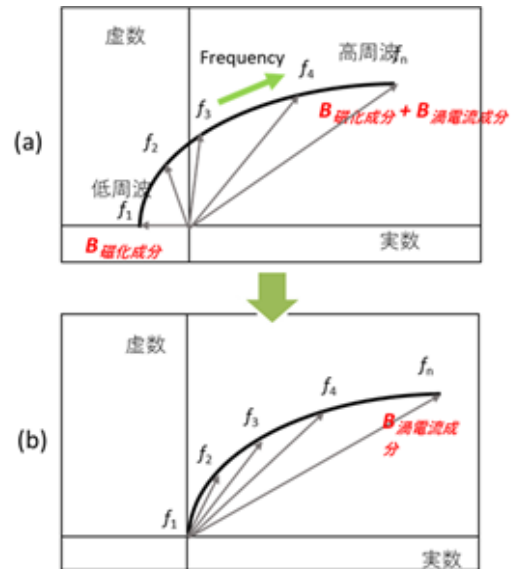


図 3.1-2 磁気スペクトル, (a)元データ, (b)磁化成分を除去した磁気スペクトル

防水構造となっている。ケーブル長は 4.5 m と 30 m の 2 種類あり、用途に応じて使い分け、主に港湾や河川の検査時には陸上あるいは船などに装置を置いてケーブルを垂らして検査することができる。装置本体には印加コイルに所定の周波数の磁場が発生するように電流源が設けられている。電流値は 400mA まで流すことができ、周波数として 1kHz 以下の任意の周波数を 5 種類連続的に発生させることができる。磁気センサからの出力は検波器により、磁場強度と位相のパラメータにして解析を行っている。

磁場ベクトルから板厚を推定する方法として、磁気スペクトル解析法を開発した<sup>7)</sup>。得られた  $x$  成分と  $y$  成分を各周波数でプロットしてトレースしたものが磁気スペクトルである。最も低い周波数 1Hz での磁場ベクトルの信号成分は、検査対象の透磁率に関係した磁化成分が主成分となる。鉄鋼材などは強磁性体なので、磁化成分が大きく  $x$  軸に平行な実数成分となる。周波数を上げていくと渦電流が強くなっていく(図 3.1-2(a))。このため、磁化成分を取り除き渦電流成分だけにするには磁場スペクトルを原点にシフトさせる処理が必要となる。このように処理した磁場スペクトルを図 3.1-2(b)に示す。次に磁場スペクトルの板厚依存性について調べた結果を図 3.1-3 に示す。板厚が厚くなるにつれて時計回りに回転するとともに強度も大きくなり、板厚に依存していることが分かる。この磁場スペクトルの板厚依存性を定量化するために任意の 2 つの周波数を選択して、差ベクトルを求めその位相を使うことにした。ここでは周波数として 20Hz と 1Hz での磁場ベクトルの差ベクトルの位相を用いた。差ベクトルの位相と板厚の関係は相関性が高いので板厚推定するためのキャリブレーションとして用いることができた(図 3.1-4)。

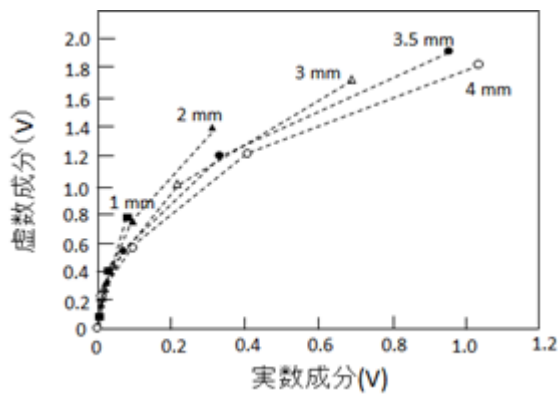


図 3.1-3 磁気スペクトルの板厚依存性

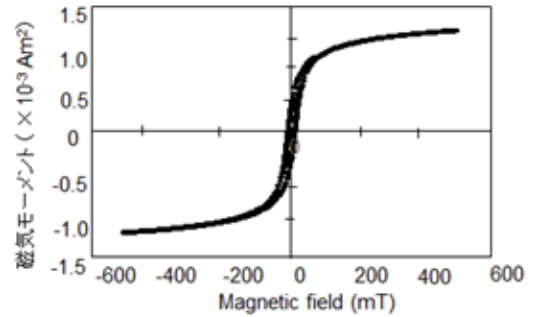


図 3.1-5 鋼の磁化特性(M-H)例

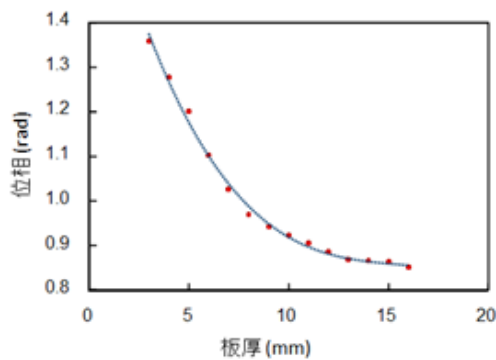


図 3.1-4 板厚推定用キャリブレーション

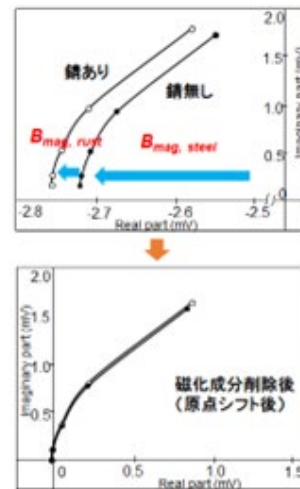


図 3.1-6 錆びの有無による磁場スペクトルの比較

### 3.1.2 錆の影響

腐食した鋼材を検査する場合、いろいろな誤差要因が考えられる。錆の磁気特性が磁気スペクトルに影響すると考えられる。また、錆厚は一定でないため、特に錆がひどい場合では錆以外の母体である鋼材の表面が凸凹している。従って、錆の磁性、表面粗さの影響について調べた。

腐食した鋼材を検査する場合、いろいろな誤差要因が考えられる。錆の磁気特性が磁気スペクトルに影響すると考えられる。また、錆厚は一定でないため、特に錆がひどい場合では錆以外の母体である鋼材の表面が凸凹している。従って、錆の磁性、表面粗さの影響について調べた。

錆の影響について、まず磁化率計を用いて錆の磁化特性(B-M特性)を計測した(図3.1-5)。結果から錆も鋼板と同じ強磁性体特性であることが分かった。錆がある鋼材と錆を除去した後の原点補正する前の磁場スペクトルを比較した(図3.1-6)。錆の磁性により磁場スペクトルがx軸方向にシフトしていることが分かる。これを原点補正すると両者のスペクトルは一致している。これは、錆は導電率が非常に低いので渦電流成分はなく、錆が付いた状態でも原点補正した磁場スペクトルは鋼材のみの磁場スペクトルになることを示している。以上から本磁場スペクトル

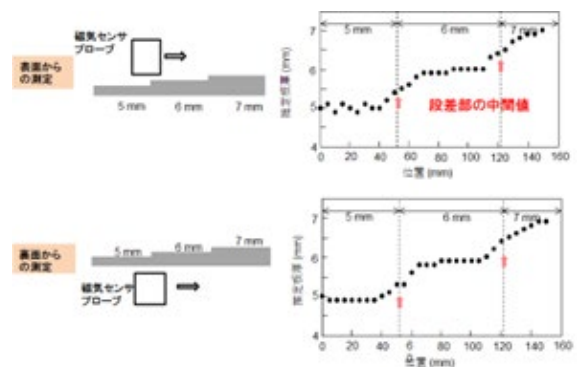


図 3.1-7 段差形状での板厚推定結果

解析法により錆の磁性特性によって影響されない板厚推定が可能であることが分かった<sup>16)</sup>。表面粗さの影響であるが、まず磁気センサプローブがどの範囲の板厚を測定しているかを知る必要がある。このため、1 mmの段差がある階段状の鋼材を使って、スキヤニングして計測データの変化を調べた(図3.1-7)。板厚5 mm、6 mm、7 mmの連続した鋼材をスキヤニングして計測した結果から磁気センサプローブが段差の真ん中に来たときは板厚の中間値が得られることが分かり、中心からずれると磁気センサロー

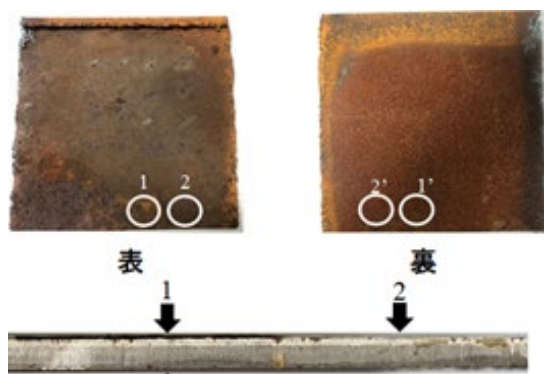


図 3.1-8 錆びた鋼材

表 3.1-1 錆びた鋼材の各種板厚検査結果の比較

測定点	板厚 (mm)			
	1	1'	2	2'
ELECT	5.6	5.6	5.7	5.7
超音波	適用不可	5.7	5.8	5.8
マイクロゲージ (ケレン前)	6.2		5.8	
(ケレン後)	5.6		5.6	

ブのそれぞれの板厚にかかっている面積比で信号が変化していた。また、表面からの測定と裏面からの測定においても同じ結果が得られており、磁気センサプローブの直下の平均板厚が計測されているもの考える。

実際の錆びた鋼板に対して、板厚測定を本 ELECT と超音波とマイクロゲージで比較してみた(図 3.1-8)。鋼板の写真から分かるように 1 の表側の箇所では厚い錆で覆われており、そのままでは超音波では計測できなく、さらにケレン後でも測定できなかった。またマイクロゲージでは錆の板厚までを測定しており、ケレン前では錆の厚みまでを計測しており、6.2 mm と厚い結果がでた(表 3.1-1)。一方、ELECT では錆があっても測定できその板厚結果として 5.6 mm が得られた。ケレン後では 3 つの方法でほぼ同じ結果が得られた。また 2 の箇所では比較的薄い錆であるためその下の凸凹もないため超音波でも計測でき超音波では 5.8 mm, ELECT では 5.7 mm とほぼ同じ結果が得られた。以上の結果から本計測法である ELECT ではケレン処理を必要としないで錆が付いたままで母体の鋼材の板厚を計測できることが分かった。

### 3.1.3 リフトオフの影響

錆や貝などの付着物があると、磁気プローブと検査対象である鋼材との間のリフトオフが大きくなる。リフトオフが大きくなるにつれて印加磁場が広がるため、発生する渦電流も広がってくる。このため、

渦電流が発生させる磁気信号の位相が変化する。従って、本研究ではまずリフトオフを磁気によって計測する方法を開発し、計測時に付着物がどの程度磁気プローブと鋼材の間に入っているか計測時の状態を把握できるようにした。リフトオフを推定する方法として 500Hz 以上の高周波での磁気信号強度を用いた。高周波では、電磁波の鋼材に侵入する深さ、つまり表皮深さが浅くなり測定の板厚に依存しなくなる。一方、磁気信号強度は距離依存性が大きいいため、その強度から、磁気センサプローブと鋼材の距離が推定できる。図 3.1-9 には鋼材として SS400 の板厚 3mm~6mm を用いた時のリフトオフによる磁場強度依存性を示す。図の縦軸はリフトオフがゼロの時の強度を基準とした信号強度比の対数で表している。結果から高周波 1kHz の信号強度を用いることにより、板厚によらないリフトオフ依存性が得られた。

リフトオフにより印加磁場が広がるため、計測値の位相や強度が変化するため補正が必要になるかを確認した。まず印加コイル径の大きさによりこれらの磁場応答特性が違うと考えられるので、基礎実験として大きさの異なるコイル径を作成し、リフトオフ特性を調べた。図 3.1-10 に示す様にコイル径の大きさが 50 mm×50 mm のものと、100 mm×100 mm の面積として 4 倍異なる印加コイルを作成し比較した。これらの印加コイルが作る磁場分布をシミュレーション

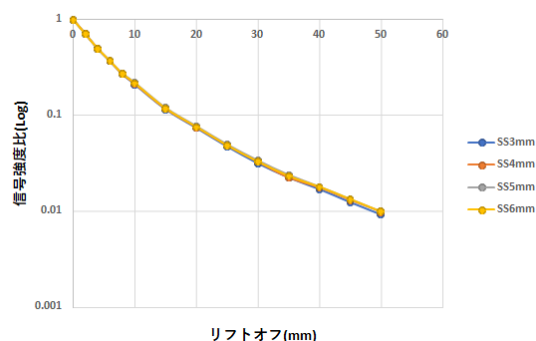


図 3.1-9 各板厚における信号強度のリフトオフ依存性

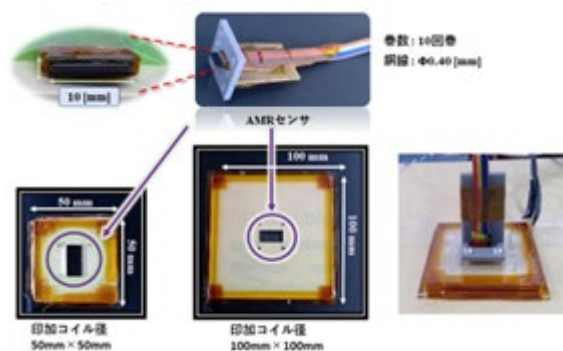


図 3.1-10 基礎実験用径の異なるコイル

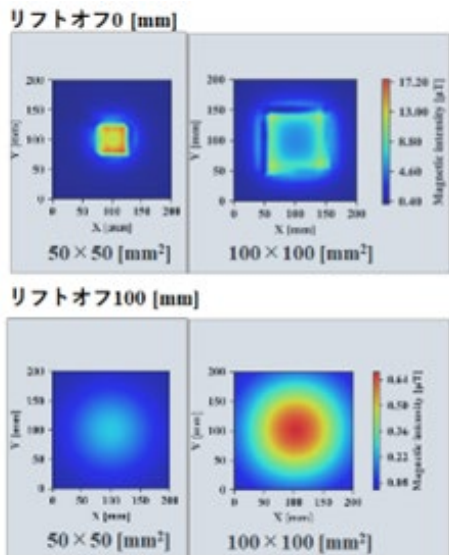


図 3.1-11 リフトオフによる印加磁場分布の変化

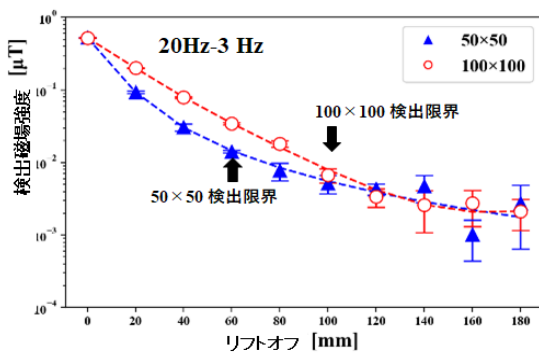


図 3.1-12 コイル径の違いによる検出磁場強度のリフトオフ特性

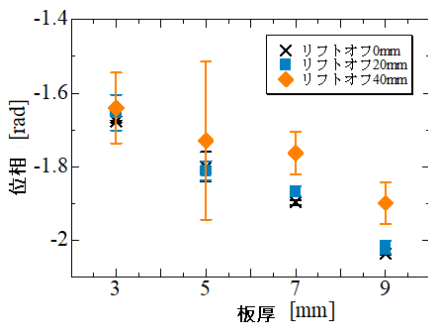


図 3.1-13 50mm 角印加コイルの板厚位相変化

ンと実際の磁気センサを用いて磁場分布を計測した結果を図 3.1-11 に示す。シミュレーションと実際の磁場分布の結果は一致していた。リフトオフ 0mm では、印加コイルのワイヤ直下の磁場が強くなっているの、小さい方の 50 mm×50 mm の印加コイルの方が磁場分布としては均一度が高い。一方、コイル径が大きな 100 mm×100 mm では中心部では弱い磁場分布になっている。しかし、リフトオフが 100

mm になると磁場分布は中心部分が強くなり、中心から離れていくにしたがって、磁場強度が減衰している。ここで、興味ある結果としては、コイル径が大きい方の強度が強く減衰が少ないことが分かる。これらの印加磁場によって発生する渦電流が作る二次的な磁場を検出するので、検出磁場の強度と位相の変化を次に調べた。板厚を推定する周波数の組み合わせとして、周波数 20Hz と 3Hz の差分ベクトルの強度のリフトオフ特性を調べたのが図 3.1-12 である。印加磁場の高周波数での減衰の傾向と同様な変化が得られており、コイル径が大きい方が検出信号の減衰率は小さい。誤差を比較すると、コイル径が 100 mm×100 mm の大きい方の誤差が少ない。誤差が大きくなる直前のリフトオフを限界値とすると、50 mm×50 mm の限界値は 60mm、100 mm×100 mm の限界値は 100 mm となった。

板厚を推定する場合は磁場強度ではなく位相なので、さらに位相のリフトオフ変化を調べた。周波数として 20 Hz と 3 Hz の差動磁場ベクトルの位相を用いた。板厚として 3 mm から 9 mm の SM 材を用いて、位相の板厚依存性のリフトオフ特性を調べた。50 mm×50 mm ではリフトオフが 20 mm までは誤差が少なく、板厚に対して位相変化の関係として線形な関係が得られている (図 3.1-13)。コイル径が大きい 100 mm×100 mm では、リフトオフが 60 mm まで誤差が少なく、板厚に対して直線性のある位相変化が得られている (図 1.1-17)。これによりリフトオフの限界値は 50 mm×50 mm では 20 mm であり、100 mm×100 mm では 60 mm となり、コイル径が大きくなることによりリフトオフ限界値が大きくなることが分かった。

### 3.1.4 水中用磁気センサプローブの開発

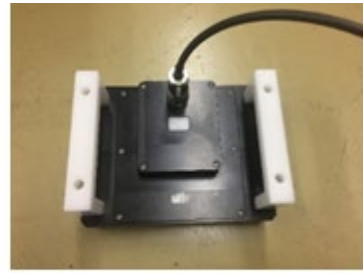
基礎実験の結果をもとに、フィールド検査用として 3 種類の水中用磁気センサプローブを開発した (図 3.1-14)。コイル径 26 mm φ の円形型の小型磁気センサプローブ、コイル径が四角形状の 70 mm×70 mm の中型磁気センサプローブ、同じく四角形状の 100 mm×100 mm の大型磁気センサプローブを開発した。ここで、基礎実験では 50 mm×50 mm と 100 mm×100 mm の比較をしたが、面積が 4 倍と大きく違うので、実際の磁気センサプローブの四角形状のものは面積として約 2 倍違うものとして準備をした。これら大きさの違うものは、検査対象の表面状態で選択して使用することを想定した。磁気計測では表面の粗さのところで示したように、印加コイルの大きさより少し大きめの面積にある領域、つまりフットプリントでの板厚の平均値が得られる。そのため、局所的な板厚を知りたい場合は、小型の磁気センサプローブが良い。しかし、リフトオフ特性が悪いので、付着物が厚い個所では使えない。このため、港湾などの鋼矢板の検査には大型の磁気センサプローブを使うことが望ましく、また広域の板



小型磁気センサプローブ  
印加コイルサイズ：26 mmφ



中型磁気センサプローブ  
印加コイルサイズ：70×70 mm<sup>2</sup>



大型型磁気センサプローブ  
印加コイルサイズ：100×100 mm<sup>2</sup>

図 3.1-14 各種水中用磁気センサプローブ

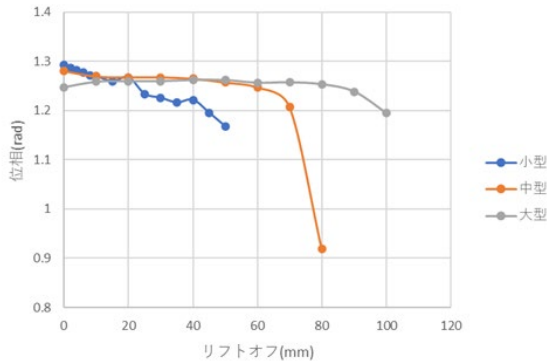


図 3.1-15 各種水中用磁気センサプローブの位相のリフトオフ特性

厚の平均値が得られる特徴もある。これら磁気センサプローブのケーブル長は小型磁気センサプローブでは、4.5 m のものと 30 m の 2 種類製作した。中型および大型の磁気センサプローブでは全て 30 m とした。ケーブルが 4.5 m の場合は磁気センサからの出力を増幅するためのアンプなどの回路は装置側に設け、30 m のものは、信号の劣化が起らないように、磁気センサプローブ側にアンプなどのセンサ用回路を設けた。

3 種類の磁気センサプローブの板厚を推定するために用いる低周波(10Hz-3Hz)での磁場の位相のリフトオフ特性について評価した。図 3.1-15 は各種磁気センサプローブにおける位相のリフトオフ依存性を示している。小型磁気センサプローブはリフトオフ依存性が大きく、リフトオフによる位相補正をしないと正確な板厚が検査できないことになる。また、信号としては 20 mm 程度以上では安定していなかったため、リフトオフ限界は約 20 mm であった。一方、中型磁気センサプローブではリフトオフ 50 mm までは位相が一定値で、60 mm 以上で変化が大きくなった。さらに大型磁気センサプローブではリフトオフ 80 mm まで位相補正が必要なかった。

### 3.1.5 各種鋼材の電磁気特性の影響

鉄鋼材は様々な組成と熱処理、圧延処理などで電磁気特性が異なる。鉄鋼材は強磁性体であるため電

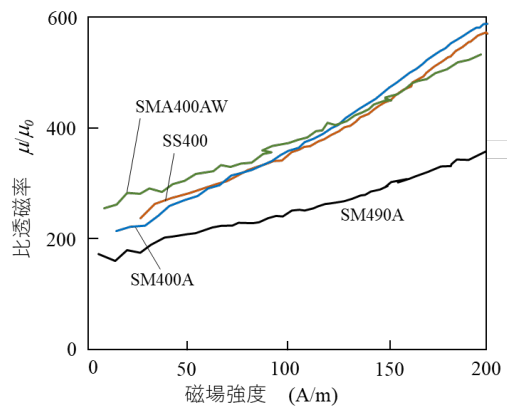


図 3.1-16 各鋼材の初期比透磁率

表 3.1-2 各種鋼材の電気特性

鋼材	抵抗率 (μ <sup>2</sup> m)	導電率 (MS/m)
SS400	0.204	4.91
SM400A	0.171	5.85
SM490	0.245	4.08
SMA400AW	0.220	4.55

磁気特性のうち磁化率は、印加磁場強度により変化する非線形性特性をもっている。このため、各種鋼材を用いた場合での電磁気特性と、それらが板厚推定にどのように影響するかを調べた。ELECT では板厚推定として各周波数での磁場ベクトルの任意の 2 周波数の磁場ベクトルの差分ベクトルの位相から板厚を推定している。このため、位相と板厚の関係を示すキャリブレーションがどのように各種鋼材の電磁気特性と関係しているかを明らかにした。

各種鋼材では透磁率や導電率などの電磁特性が異なっている。このため、4 種類の鋼材を用いてその電磁特性の基礎評価を行った。鋼材として SS400, SS400A, SM490A, SMA400AW を用いた。これらの鋼材の初期磁化曲線から求めた初期比透磁率を図 3.1-16 に示す。SM490A は他の鋼材と比べ比透磁率が低いことが分かる。SMA400AW と SM400A は比較的近い値を持っているが、低磁界と高磁界で逆転して

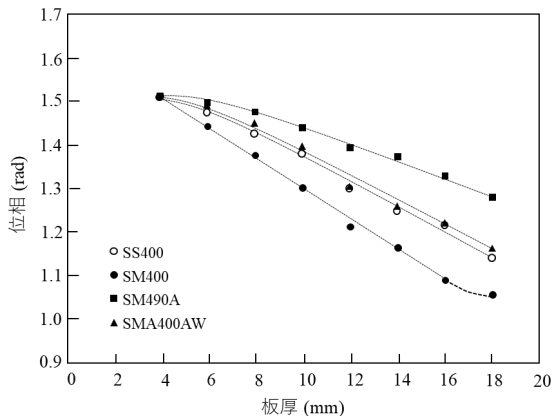


図 3.1-17 各種鋼材による位相と板厚の関係

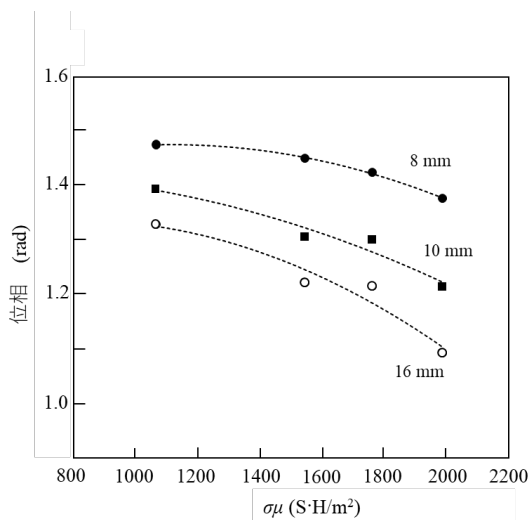


図 3.1-18 各鋼材における  $\sigma\mu$  と位相の関係

いる。磁気プローブの印加磁場は 50 A/m 程度であるため、その印加磁場領域での透磁率の大きさの順番は

$$\text{SMA400AW} > \text{SS400} > \text{SM400A} > \text{SM490A}$$

となった。

電磁特性として重要なパラメータである透磁率の他、導電率がある。導電率の測定は 4 端子法により行った(表 3.1-2)。測定温度は室温、電圧端子間距離は 40mm、測定電流は 2A とした。この結果から、とくに SM400A の導電率が大きく、順番として

$$\text{SM400A} > \text{SS400} > \text{SMA400AW} > \text{SM490A}$$

であった。

板厚推定は 2 つの周波数の信号の差ベクトルを求め、その位相から板厚を推定している。使う周波数として、対象の標準板厚にあった適正な周波数を選ぶと推定板厚の精度が高くなる。差ベクトルの位相と板厚の関係を示したキャリブレーション式を用いることにより実際の板厚を推定することができる。

$$J = \sqrt{2\pi f \sigma \mu H} \cdot e^{-\sqrt{\pi f \sigma \mu z}} \cdot e^{-i(2\pi f t - \sqrt{\pi f \sigma \mu z} + \frac{\pi}{4})}$$

ここで、深さ  $z$  における渦電流分布は下記の式で表せ、指数関数の第 1 項は減衰項を表している。深さ

が深くなるにつれ渦電流は小さくなる。

渦電流の位相は指数関数の第 2 項のところ表せ、これも  $\sigma\mu$  で決定されることが分かる。このため、板厚は位相から推定しているが、鋼材の電磁気特性により位相が変化することが分かる<sup>17)</sup>。

各種鋼材によるキャリブレーションを表したものを図 3.1-17 に示す。SM400 が最も変化つまり感度が高く、SM490A が最も感度が低いことが分かる。また、SS400 と SMA400AW が SS400 と SM490A の中間にあり両者は近い値を示している。ここで、これらのキャリブレーションの違いは何で決定されているかを考えると、先に述べたように各鋼材の電磁気特性の違いと考えられる。各鋼材の印加磁場 50 A/m の時の透磁率  $\sigma$  と導電率  $\mu$ 、およびそれらの積  $\sigma\mu$  は SM400 > SS400 > SMA400AW > SM490A であることが分かる。電磁気特性パラメータと位相の関係を図 3.1-18 に示す。これにより電磁気特性パラメータにより位相が変化していることが分かった。

鋼材により電磁気特性パラメータである  $\sigma\mu$  が異なるので、まず検査の最初には板厚が分かっている個所で計測することにより板厚と位相の関係から  $\sigma\mu$  が分かる。これにより得られた電磁気特性パラメータを適用できるキャリブレーション式を用いることにより、板厚推定精度を上げることができ分かった。このことは板厚検査で一般的に用いられている超音波検査での標準板厚による音速計測をしたうえで、同じ鋼材の板厚を検査する方法と同じで、磁気検査では音速計測の代わりに電磁気特性パラメータを計測することになる。

### 3.1.6 フィールド評価

開発した水中用の ELECT 検査装置のフィールド検査への適用検証として、河川における沈下橋のパイルベント橋脚、港湾における鋼矢板の検査をやってきた。

四万十川は清流であるので、沈下橋の橋脚に付着物が比較的少ないが、図 3.1-19 にあるように腐食が激しく表面の凸凹が大きく超音波による板厚検査が適用できない個所がある問題があった。そこで、付着物が少ないことからリフトオフの問題がないので、小型の磁気センサプローブを用いてケレン処理なしで ELECT 装置を用いた板厚測定が可能か評価を行った。測定としては各橋脚（パイルベント式）で高さ間隔 20cm、周方向 4 ヶ所 (90° 毎) の測定ポイントを設定した。気中部は船の上から、水中は潜水士によりプロービングをした。装置は船に寄せ、乗船者がいずれの場合も計測した。板厚検査結果の一例を表 3.1-3 に示す。他の橋脚も同じ傾向を示し、下流側の方が、全体的に腐食が広がっていた。また、水面近くから下部での腐食が多かった<sup>18)</sup>。

港湾や河口部においては、貝などの付着物が厚くついている。このため大きなリフトオフに対応でき



図 3.1-19 パイルベント橋脚の腐食例と検査風景



ケレン前 ケレン後  
図 3.1-20 ケレン前後の鋼矢板の表面状態

る大型の磁気センサプローブを用いて検査を行った。この検査においては従来実施されていたケレン処理後の超音波検査の結果と比較した。そのため、検査としては、最初に付着物がある状態で磁気検査を行い、その後ケレン処理して超音波および磁気検査を実施した。これにより超音波との比較だけでなく、ケレン処理の有無との比較により高リフトオフでの影響の評価も行った(図 3.1-20)。超音波検査では先に述べたように 10cm 四方内の 5 点の平均値を検査板厚としているので、5 点の各点で 3 回測定して平均値を求めた。また、磁気検査では大型の磁気センサプローブの印加コイルの大きさは 10cm 四方なので、一点で 3 回の平均値を求めた。図 3.1-21 のように潜水士による手動でのプロービングで大阪湾の鋼矢板を検査した。鋼矢板は図 3.1-22 に示す様に凸部、凹部があり両方とも検査した。水深としては、上部工下、L.W.L (朔望平均干潮面)、L.W.L-1m、海底付近の 4 水深を検査した。表 3.1-3 は凸部の L.W.L での測定結果の一例を示している。

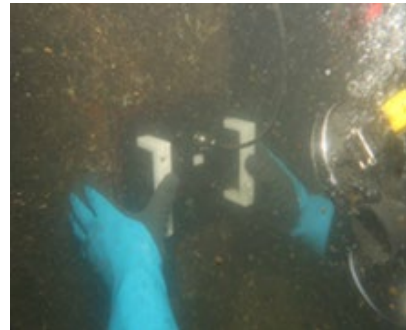


図 3.1-21 潜水士によるプロービング

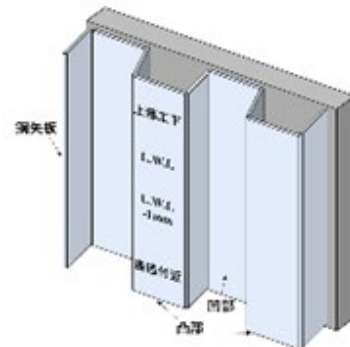


図 3.1-22 鋼矢板構造の簡易図

結果より、超音波での平均板厚は 14.56 mm、磁気検査ではケレン前が 14.73 mm、ケレン後が 14.87 mm とケレン前後での差はほとんどなく、超音波ともほぼ一致していた。また、ケレン前は 8.53 mm、ケレン後のリフトオフが -0.67 mm であり、ケレンにより表面が削れていることが分かる。ここでケレン後の値がマイナス値であるが、特に 1 mm 程度の誤

表 3.1-3 橋脚の板厚検査結果例

P5橋脚	桁受け下面	上流側				下流側				
		1	2	3	4	1	2	3	4	
	2m	10.7	10.7	9.6	10.5	10	11	10.1	10.3	
		2.2	10.2	10.2	9	11	9.3	11	9.6	10.4
		2.4	11.2	10.8	9.5	10.5	9.3	9.5	9.2	10.4
		2.6	11.7	10.4	9	10.1	8.9	9.1	8	9.5
		2.8	9.5	7.9	7.4	8.5	3.4	6.2	7.6	3.9
		3	8.4	6.4	6.7	7.5	4.5	5.5	6.5	4.1
		3.2	7.9	5.1	6.4	8.3	4.1	4.4	6.6	5.1
		3.4	7.1	7.1	5.4	6.9	5.5	7.2	6.4	7
		3.6	8.5	7.7	4	7	6.3	8.5	4.6	7.3
		3.8	6.9	5.9	3.9	5.9	4.9	5.5	4.7	6.3
	4									
	4.2									
	4.4									
	4.6									
	4.8									
	5									



表 3.1-4 鋼矢板の超音波検査と磁気検査の  
板厚測定結果比較

超音波探傷試験					磁気センサプローブ					
探触子No	現有肉厚[mm]				超音波 平均値	測定値 (mm)	測定値			
	1回目	2回目	3回目	平均			1回目	2回目	3回目	平均
1	14.7	14.66	14.62	14.66		非ケレン潜水士				
2	14.47	14.44	14.45	14.45		推定板厚	14.92	14.67	14.6	14.73
3	14.6	14.63	14.51	14.58	14.56	リフトオフ	8.55	8.54	8.5	8.53
4	14.58	14.61	14.62	14.6		ケレン後潜水士				
5	14.62	14.45	14.51	14.53		推定板厚	14.91	14.83	14.89	14.87
備考						リフトオフ	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67

差は本質的でなく問題ないと考え、表面状態のおおよその把握ができているものとする。

### 3.1.7 機械アームによる陸上から検査の試み

本検査法では潜水士による水中検査を基本としているが、将来的には潜水士不足と危険作業の低減により地上からの検査が望ましい。そのため、護岸からアームを伸ばして地上から検査できる検査システムの開発を試みた。中型磁気センサプローブと大型磁気センサプローブ用を取り付けることができる機械アームを製作した。アームの長さは10 mまで伸ばせて、磁気センサプローブを空気シリンダーで押し付ける機構とした。ここで、単に押し付けるだけでは水流の早い個所では安定しないため、鋼矢板と磁気センサプローブの接触を安定化させるように図3.1-23に示す様に凸部では鋼矢板の両側の傾斜部を抱きかかえるように空圧によるシリンダーで密着させ、凹部では両側を押し付けるように密着させる機構を設けた。これにより表面の凸凹に影響されずに安定に検査できるようになった。またこの機械アームは水中の検査状態をモニターするためのカメラと一緒に、濁った海中の場合でも形状を確認できるソナーによる形状モニター装置を取り付けた。これにより、目的の検査個所にアクセスするのが容易になった。先に述べた潜水士による検査と同じ個所を後日、機械アームによる護岸からの検査を試みた。その結果を先に表3.1-4で示した個所との比較を表3.1-5に示す。表から平均値14.75mmと潜水士によるプロービングと同じ結果が得られている。また、他の箇所を含め潜水士による3回の計測誤差が0.43 mm、機械アームによる計測誤差が0.15 mmと安定して計測できていた。まだこの機械式は開発途中であるが、機械により護岸から計測できることを示すことができた。

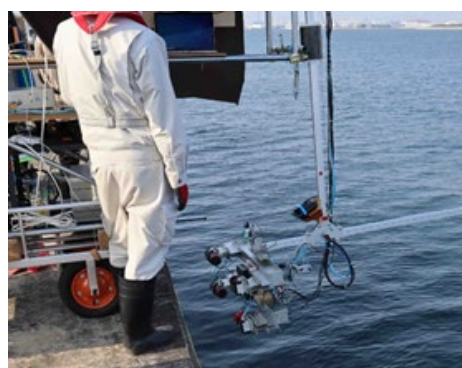


図 3.1-23 機械アームによる護岸からの検査

表 3.1-5 機械アームと潜水士による検査結果の比較

潜水士による検査				
(mm)	測定値			
	1回目	2回目	3回目	平均
非ケレン潜水士				
推定板厚	14.92	14.67	14.6	14.73
リフトオフ	8.55	8.54	8.5	8.53
ケレン後潜水士				
推定板厚	14.91	14.83	14.89	14.87
リフトオフ	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67
機械アームによる護岸からの検査				
	1回目	2回目	3回目	平均
推定板厚	14.71	14.77	14.78	14.75
リフトオフ	30.0	29.6	29.5	29.70

## 3.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出

### 3.2.1 装置および測定原理

埋設物や閉じ断面の損傷の検出のための極低周波電流検査装置の基本構造は、3.1 節で説明した水中部の損傷の検出用の ELECT と同様であり、低周波磁場を印加して鋼部材深部まで渦電流を発生させ、その磁場を高感度の AMR センサで検出している。水中部での減肉検査と異なる点は、水中部ではプローブを検査対象に垂直に当て、直下の減肉を検査しているが、地際下腐食検査では、地際下の減肉を検査するために磁気センサプローブを地下に向けて計測する必要がある。このため、標識柱・照明柱の地際下(40~50 mm 程度)の鋼管部の腐食量とその位置を検出するために、40度傾けた磁気センサを23 mm 離れて2つ設けた地際用プローブ(図 3.2-1, 図 3.2-2)を開発した<sup>19)</sup>。また、3.1 節で説明した水中部の

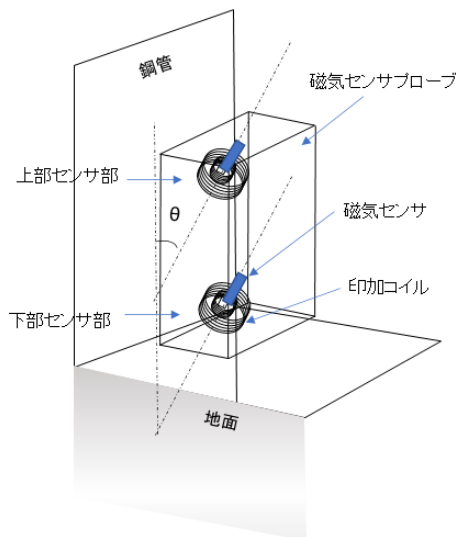


図 3.2-1 地際用プローブの構成

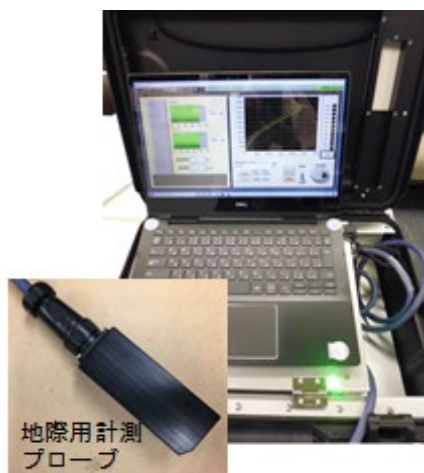


図 3.2-2 ELECT のデバイスと地際用プローブ

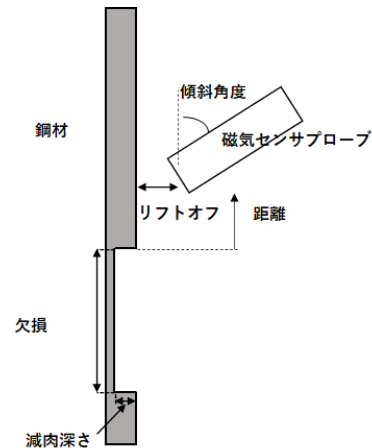


図 3.2-3 基礎応答特性評価法

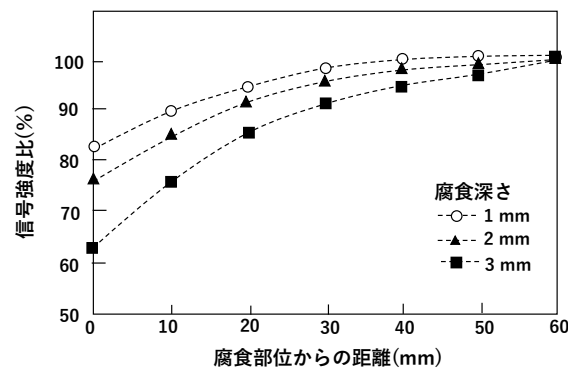


図 3.2-4 腐食率による信号強度変化と距離依存性

損傷の検出用の ELECT とは異なり、複数の入力周波数に対して得られた磁気強度と位相遅れを複素平面上にプロットした磁気スペクトルから、2 つの周波数の差分ベクトルの強度(信号強度)を用いて、板厚の減肉や疲労損傷を評価する。

磁気センサプローブの基礎的な特性として、まず模擬的な腐食試験体を用いて基礎評価した。腐食率の違いと距離による信号変化量の変化をみるために腐食率の異なる鋼材を用いた。この鋼材として板厚 4mm に対して、1~3mm の減肉部を作り、信号変化量を比較した。検査対象の多くは円形などなので、磁気センサプローブから離れる位置関係になるため、リフトオフとして 5mm にして欠損部分からの距離を変化させ信号変化を調べた(図 3.2-3)。周波数 50Hz と 3Hz の磁気信号の差ベクトルの強度を計測した。図 3.2-4 は2つの磁気センサ部のうち下部のところの磁気センサ信号変化量を示している。ここで、強度の標準値として、腐食がないところの信号を 100%としている。横軸は腐食箇所から離れた距離、つまり地表からの深さとして表現している。信号変化量は検出部の角度依存性を持ち例えば 90 度、つまり対象物に垂直に当たった場合では直下の板厚の情報しか得られないため、腐食部から離れるとすぐに腐食による信号減衰が見えなくなる。一方、

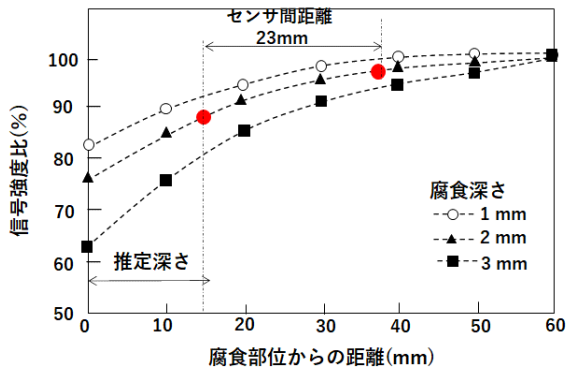


図 3.2-5 腐食率と深さの推定方法

傾斜角度を大きくすることにより、遠い腐食部の信号減衰も見えることになる。しかし、傾斜させることにより信号強度自体が小さくなるため、傾斜角度にも限界がある。このため、本検査装置では傾斜角度は 40 度とした。腐食率が大きいほど信号減衰量も大きいことが分かる。また、距離に応じて、信号変化量が少なくなってくるのも分かる。ここで、磁気センサプローブには、磁気センサ部が 2 つある、それぞれが 23 mm 離れているので、下部の検出器の応答特性は、グラフ上 23 mm だけ軸がずれた特性として得られる。倒壊につながる腐食の位置が地面際部から深さ 40mm 程度までと言われているので、本技術では信号変化として距離 50 mm 程度までの性能が得られており、危険性のある腐食を検知できるものと考えられる。ここで、2 つの検出部を設けた理由は、腐食による信号減衰が距離依存性を持っているため、これを改善するための検査方法として用いた。一つの検出部だけの信号変化量では、腐食の深さ位置が違っても同じ腐食率であっても信号変化量が異なる。たとえば、深い位置にある腐食率の大きな箇所では信号変化量が小さい。一方、浅いところにある腐食率が小さな箇所でも地表に近い位置にある場合では信号変化量が大きい。このため、腐食率が違っても地表からの距離が違う場合、同じ腐食として間違える可能性がある。このため、違いを判別するために、位置をずらした磁気センサ部を 2 つ設けた。先に述べたように、信号応答特性は 23mm ずれているので、ある腐食率に対する信号曲線はどれかの曲線となる。23mm 離れた信号減衰量がどれかの曲線に一致すれば、腐食率が推定でき、さらに地表からの深さが分かることになる。図 3.2-5 に示したように、2 つの磁気センサの信号量をグラフに一致させる方法をとっている。ここで注意しなければならないのは、実際の腐食は試験体とは異なり腐食の表面状態および広がりなどは一様でないので、あくまでも信号変化量はおおよそその腐食の目安であることに注意しなければならない。検査結果としては、地表から簡便に腐食の有無を検知できることが重要であり、正確な腐食状態を把握するためには従来通りの開削作業が必要であり、本検査はあくまでもその

開削作業が必要かどうかの判定に使うものとする。

### 3.2.2 地際下腐食検査における周波数の最適化

地際下腐食検査の検査対象は道路標識や照明柱および鋼製橋脚を対象としている。これらの箇所に対して、検査精度を高めるためには、特に検査個所のすぐ近くを走る自動車などの磁気ノイズの影響の低減が課題とされた。このため、自動車による磁気ノイズを解析し<sup>20)</sup>、磁際下腐食検査における検査精度の向上を進めた。

図 3.2-6 に普通自動車が続して走行した時の磁気雑音の時間変化を示す。磁気ノイズを計測した装置と、車の距離は 2 m 以内であった。磁気成分として 3 軸を示しており、それぞれの成分で磁気信号が変化していることがわかる。図から、自動車ごとに波形が異なっていることがわかる。この原因として自動車自体の構造と大きさ、および走行速度があげられる。地際下腐食検査においては 2 周波数の差ベクトルを用いるために、周波数としては特に走行速度が影響してくると考えられる。図 3.2-7 に走行速度による自動車ノイズの周波数分析をした結果を示す。一般道路での制限速度 40 km/s では周波数 3 Hz 以下の磁気ノイズが発生することが分かった。地際下腐食検査において自動車の磁気ノイズの周波数帯域は、非常に低い数 Hz の帯域であるので、この周波数帯域をさけて測定すれば影響がないことが明らかとなった。

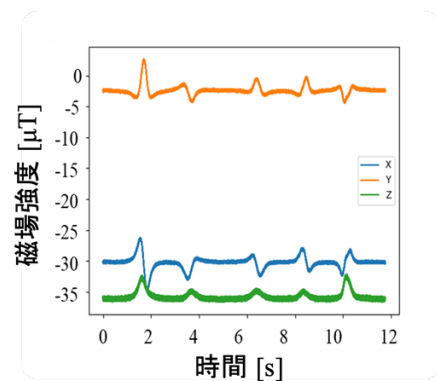


図 3.2-6 自動車ノイズの各成分強度 (5 台通過)

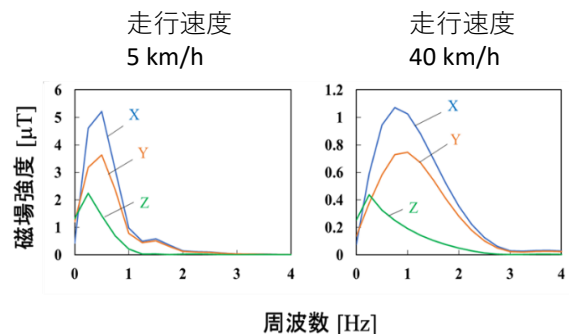


図 3.2-7 自動車ノイズの各速度における周波数成分

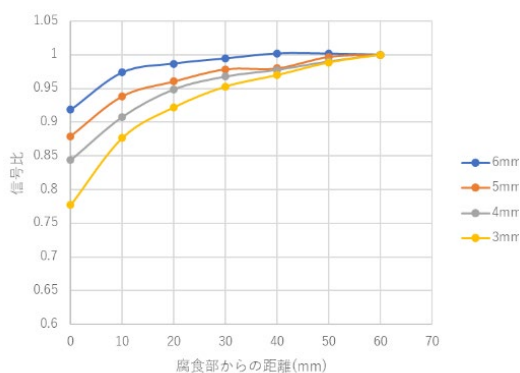


図 3.2-8 各板厚の腐食部からの距離による信号比の変化

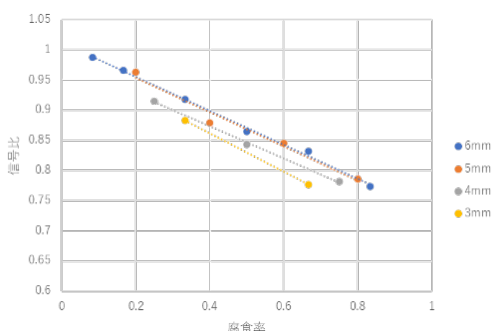


図 3.2-9 各板厚での腐食率に規格化した信号変化比

### 3.2.3 地際下腐食検査における信号の規格化

ELECT では、正常肉厚に対してどの程度減肉しているのか、つまり減肉の深さではなく、減肉率を計測している。このため、検査結果として減肉の深さではなく、減肉の割合である腐食率で表すと板厚によらない信号変化として共通化できる可能性がある。図 3.2-8 には、板厚 3～6mm の鋼材で同じ減肉深さ 2mm の腐食位置からの距離に対する信号変化比 (30Hz・5Hz) を示した。このように板厚の違いにより同じ腐食の深さに対して信号比が異なっている。一方、信号比を腐食率として表すと図 3.2-9 のようになる。この図では、距離 0 mm つまり腐食に一番接近した時の各板厚に対する信号変化比を表している。各信号変化比は腐食率と線形な関係があり、板厚による違いは少ないことがわかる。

腐食率から、腐食の深さを知る方法としては、健全な板厚が分かれば、元の板厚に腐食率を乗じて算出できる。また、正常部の板厚は超音波検査できるので、超音波検査を併用して正常部の板厚に腐食率をかければ算出することができる。以上により、本検査手法を用いて、地際下腐食の有無を掘削なしで簡易検査でき、掘削の必要性がある箇所を選別することができる。また、腐食した個所は表面の凸凹の状態や錆の状況によっては超音波で計測する

ことができない場合が多いので、磁気センサプローブを水中部での損傷の検査方法で用いた小型磁気センサプローブを用いることにより、損傷部の板厚を測定することもできる。

### 3.2.4 鋼管の断面欠損による信号強度の変化

道路照明柱・標識柱の地際下に発生した腐食損傷を検出するための基礎的検討として、鋼管に腐食を模擬した断面欠損の深さを変化させた試験体を用意した(図 3.2-10)。試験体は直径 D117 mm とし、健全部の鋼板板厚は 4.5 mm である。また、超音波探傷試験(UT)で測定した健全部の板厚は平均で 4.46 mm であった。

孔食化を模擬した試験体は、鋼管径の半分を切り取っている。腐食を模擬した試験体では、周方向で一定の欠損量となるように機械加工し、3mm 減肉、2mm 減肉、1mm 減肉した試験体を準備した。欠損長さは 10mm とした。

欠損部の縁を基準( $x=0$ )として、ELECT の地際用プローブを先端の位置  $x$  が 0～50 mm まで、10 mm ごとに 5 mm リフトオフした状態で計測 (印加磁場電流を 200 mA) を行った。ELECT の地際用プローブでは、2 つのセンサが設けられているが、ここでは、プローブの先端側のセンサの値を用いて評価する。

各試験体に対する ELECT の計測結果を図 3.2-11 に示す。図の縦軸は健全部の信号強度  $Z_0$  に対する各位置で得られた信号強度  $Z$  の比、つまり信号強度比  $Z/Z_0$  を示している。横軸は欠損の縁からの距離  $x$  としている。欠損の深さに関わらず、欠損部に近づくことで信号強度比の値が低下していることがわかる。欠損のように損傷が大きい場合は、損傷部縁から離れた位置でも信号強度比が大きく低下している。損傷が小さくなると、信号強度比の変化が小さくなるが、地際部から構造物軸方向に複数点計測を行い、信号強度の変化から、地際下の腐食の検出が可能であることが分かる。



図 3.2-10 欠損を模擬した試験体

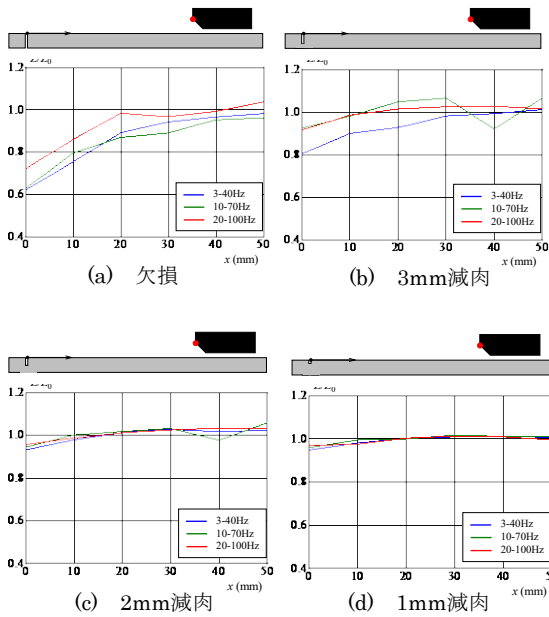


図 3.2-11 信号強度比  $Z/Z_0$  と欠損部縁からの距離との関係

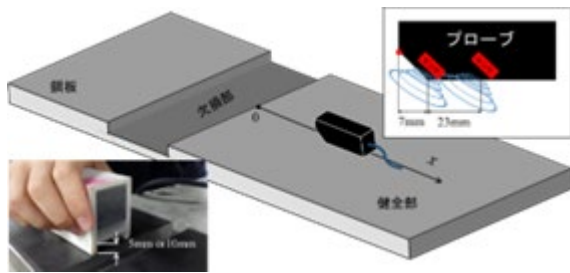


図 3.2-12 厚板鋼板の ELECT の計測方法

### 3.2.5 各種鋼材の電磁気特性の影響

ELECT は、9mm 以下の鋼板に対する損傷の評価を主としているが、道路橋や歩道橋の鋼製橋脚は、12mm 以上の鋼板が利用されている。そこで、道路橋や歩道橋の鋼製橋脚の地際下に生じた腐食による減肉を評価するための検討として、板厚 12mm、19mm の鋼板に腐食を模擬して断面欠損を設けた試験体を用意し ELECT による信号強度の評価を行った。欠損部の残存板厚  $t_d$  を 25%、50%、75%、欠損部の幅を 40mm として、矩形状に機械加工した。ELECT の計測方法を図 3.3-12 に示す。1-3Hz、1-10Hz、3-40Hz の差分の信号強度によって、断面欠損部が検出できるかどうかを評価する。また、リフトオフ量は 5mm、10mm と変化させたが、ここでは 5mm の結果について示す。

板厚 12mm の試験体に対して、地際用プローブの計測で得られた、健全部 ( $x=100\text{mm}$ ) の値で無次元化された信号強度比と、欠損部からの距離  $x$  の関係を図 3.2-13 に示す。図から、板厚が厚い場合は、極低周波を利用することで、板内部まで渦電流を発生させることができるため、断面欠損による信号強

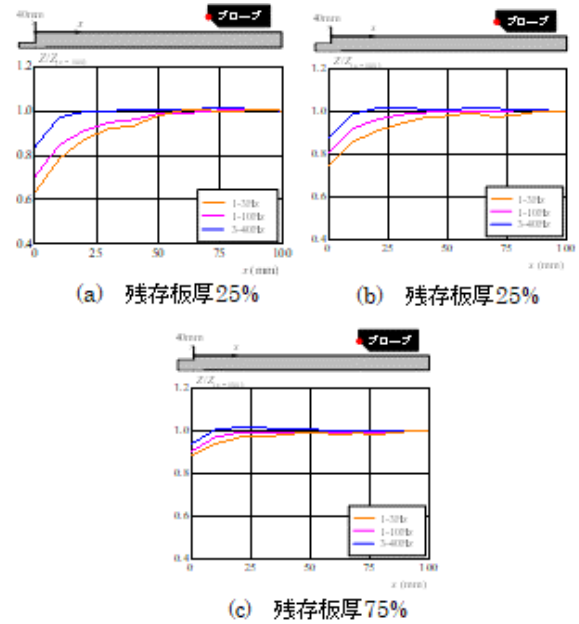


図 3.2-13 信号強度比  $Z/Z_0$  と欠損部縁からの距離との関係

度の低下が明確に表れていることがわかる。断面欠損量が多くなると体積が減少するため、信号強度が低下するためである。残存板厚が 25% の場合、欠損部から 40 mm 離れた位置でも 1-3Hz、1-10 Hz の差分の信号強度比が低下している。残存板厚が 75% の場合でも、断面欠損部から 10mm 程度の位置で、1-3Hz、1-10Hz の差分の信号強度が低下していることがわかる。鋼製橋脚の腐食は、地際から 10~20mm 程度下側で発生していることを考えると、1-3Hz、1-10Hz の差分の信号強度の低下によって、鋼製橋脚の地際下の断面欠損を検出することが可能であると考えられる。

板厚 19mm の試験体に対する結果を図 3.2-14 に示す。板厚 19mm の場合も傾向は同様であった。次に、照明柱・標識柱のように、鋼製橋脚内部にも腐食損傷が発生・進展していると想定した断面欠損の裏側からの ELECT による計測によって、損傷を検出できるかどうかを検討する。欠損部裏面から計測した信号強度比と欠損部からの距離  $x$  の関係を図 3.2-15、図 3.2-16 に示す。これらの図から明らかに、板厚が 12mm の場合、欠損部裏側からの ELECT によっても、残存板厚が 25~50% 程度の場合、1-3Hz あるいは 1-10Hz の差分の信号強度比が 1 よりも低下しているため、断面欠損を検出できているが、残存板厚が 75% の場合、欠損部の近傍であっても、差分の信号強度の変化が見られない。したがって、欠損部裏側からの損傷に対しては、残存板厚が 75% 程度より小さい場合に、ELECT により欠損を検出できると考える。このように、欠損の表裏で異なる結果となるのは、信号強度が鋼材の体積と鋼材までの距離に依存して変化するためである。

板厚が 19mm になると板の裏側の欠損部の検出に対して、残存板厚が 25~50% 程度の場合の 1-

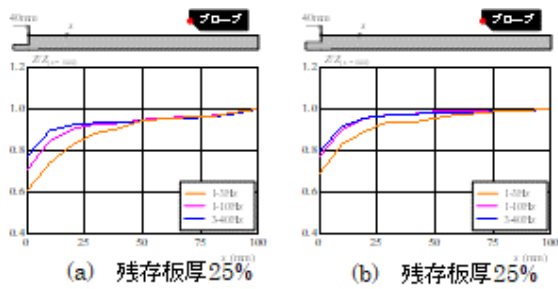


図 3.2-14 信号強度比と欠損部からの距離  $x$  の関係 (板厚 19mm)

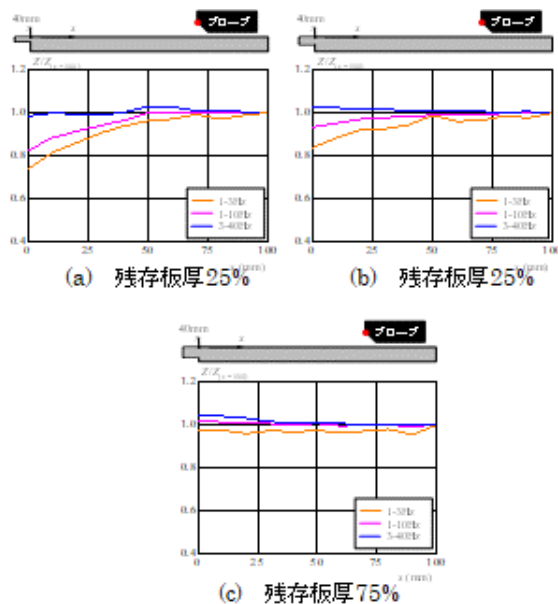


図 3.2-15 欠損裏面からの計測による信号強度比と欠損部からの距離  $x$  の関係 (板厚 12mm)

3Hz の差分の信号強度比が 1 よりも低下していた。したがって、板厚が厚い場合の、閉じ断面内部の腐食に対しては、1-3Hz の極低周波の信号強度比が有効であることがわかる。

### 3.2.6 フィールド評価

これまでに実施した、ELECT による実際の照明柱・標識柱の検査 (45° 毎に 8 ヶ所) として、著しい損傷が発生していた事例に対する計測結果を図 3.2-17 に示す。残存板厚が 50% 以下と判断され、図

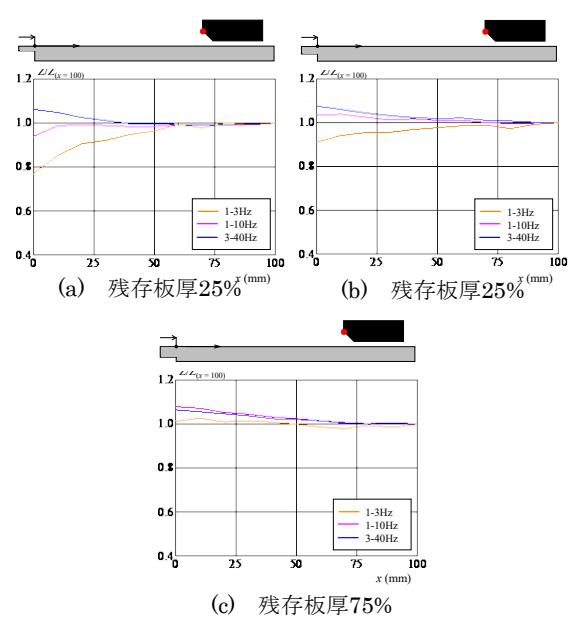
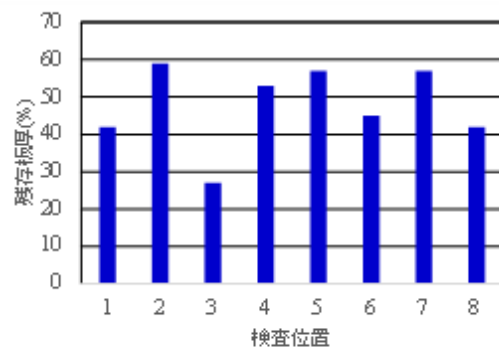


図 3.2-16 欠損裏面からの計測による信号強度比と欠損部からの距離  $x$  の関係 (板厚 19mm)



(a) ELECTによる計測と地際下の腐食状況



(b) ELECTによる計測結果

図 3.2-17 ELECT による標識柱地際下の計測事例

に示すように地際下の腐食が進行していた。このように、ELECT を用いて、実際の標識柱・照明柱の地際下の腐食が検出できた。

平成 30 年に発削調査済みの軽微な損傷に対する照明柱・照明柱 (図 3.2-18) に対しても、超音波検査結果と磁気検査との比較を行った。対象件数として 19 ヶ所を検査 (45° 毎に 8 ヶ所) した。



図 3.2-18 ELECT で計測した照明柱の一例

その結果、15ヶ所/19ヶ所は、超音波検査結果と磁気検査との結果が一致した。磁気検査では健全との判断の箇所に対して、磁気検査では、軽度の腐食と判定された箇所が4ヶ所あった。ただし、掘削の結果、0.1~0.4mm程度の腐食であり、1ヶ所のみ減肉が無かった。このように、ELECTを用いた磁気検査によって、掘削せずに、健全性の判定を行うことができた。

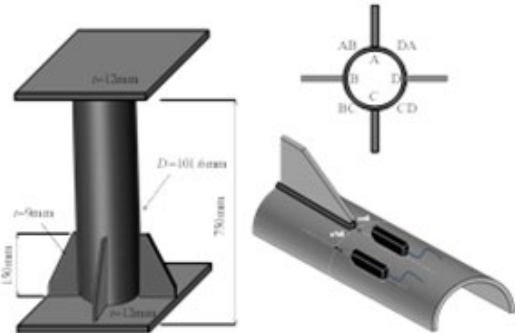
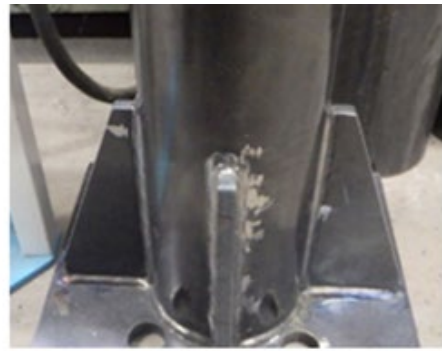


図 3.3-19 試験体と ELECT の計測方法

### 3.2.7 リブの影響

照明柱・標識柱の地際下あるいは地際近傍には、リブが設けられている場合がある。リブの先端が地際下の場合、リブの位置が不明であるため、検査の際にリブの位置で信号強度が異なる場合がある。そこで疲労損傷を検出するための基礎的計測として、照明柱・標識柱を模擬した鋼管にリブを溶接した試験体を用意した(図3.2-19)。鋼管径はD101.6 mm、板厚は3.2 mm、リブの板厚は9 mm、ベースプレートの板厚は12 mmである。図に示すように、溶接止端部の計測をA, B, C, Dとし、溶接リブとリブとの間の計測をAB, BC, CD, DAとする。溶接止端部を基準( $x=0$ ,  $x'=0$ )とし、0~20 mmまで計測を行った。リフトオフ量は5mmとした。地際用プローブでは、センサが2つ設けられているが、ここでは先端のセンサから得られた磁気スペクトルの結果を示す。本章で用いる入力周波数は1~70 Hz(1, 3, 20, 40, 70Hz)とした。また、印加磁場電流を300 mAとした。

リブ先端からの距離に対して、溶接リブとリブの間の鋼部材から得られた信号強度 $Z$ を表3.3-1に示す。表では、各位置で得られた差分ベクトル強度 $Z$ を鋼管の健全部から得られた差分ベクトル強度 $Z_0$ で無次元化している。表に示すように、リブ間の鋼管から得られた、信号強度比は全て1程度となっていることがわかる。

一方、溶接リブ軸方向から得られた信号強度は、溶接止端部( $x=0$ )の信号強度の値が高くなっていることがわかる。これは、リブや溶接の溶着金属の影響である。しかし、リフトオフ量5 mmの場合、リブ

から10mm( $x=10$ )離れても、信号強度比が1より若干高くなっている。リフトオフ量が10mmなど大きくなると、渦電流の範囲が広がるため、リブから離れた位置でも溶着金属の影響で差分ベクトル強度の値がさらに高くなる可能性がある。このように、リブの近傍をELECTで計測した場合は、信号強度が高くなるので、腐食損傷の評価の際には、信号強度が高い位置にはリブの位置である可能性があるので注意が必要である。

表 3.3-1 リブとリブ間の信号強度比

位置	信号強度 $Z/Z_0$		
	$x=0$	$x=10$	$x=20$
A リブ	2.17	0.92	0.99
AB リブ間	0.97	1.02	0.99
B リブ	1.90	1.04	0.99
BC リブ間	1.02	0.99	0.97
C リブ	2.02	1.12	0.97
CD リブ間	1.07	1.05	1.02
D リブ	2.22	1.15	1.02
DA リブ間	1.02	1.04	1.01

### 3.2.8 ELECTによるき裂検出の評価

照明柱・標識柱に取り付けられているリブに対しては、疲労損傷を点検する必要がある。そこでリブ

先端の疲労き裂をELECTによる検出ができるかどうかを明らかにするために、リブの疲労き裂に対応する図3.3-20(a)の面外ガセット溶接継手を用いて、板曲げ疲労試験を実施する。この試験体に疲労き裂を発生・進展させ、各き裂長さに対して、ELECTにより、磁気スペクトルを検出し、信号強度の変化を調べる。面外ガセット溶接継手試験体は、板厚12 mm、幅300 mmの主板(SM490YA)に、板厚12 mm、高さ100 mmのガセットプレート(SM490YA)が、下向きで半自動CO<sub>2</sub>ガスシールドアーク溶接(電流320 A、電圧37 V、速度24.0 cm/min)されている。まわし溶接部では、溶接の継ぎを設けていない。すみ肉溶接は等脚長の6 mmとしている。

本研究では、板曲げ振動疲労試験機を用いて、面外ガセット溶接継手試験体に疲労き裂を発生・進展させながら、ELECTの地際用プローブで計測を行った。溶接止端部近傍(Line-I)、溶接止端部からき裂が離れて進展する主板部(Line-II)の位置に対して地際用計測部プローブを用いたELECTによる疲労き裂の検出の評価を試みた<sup>21)</sup>。

対象とする疲労き裂の長さを図3.2-20(b)に示している。溶接止端部に発生したき裂の大きさを $N_{toe}$ (き裂長さ2mm程度、深さ1mm程度)、疲労き裂が進展し溶接止端を離れて主板に進展した大きさを $N_b$ (き裂長さ30mm程度、深さ7mm程度)、溶接止端から5, 10mm疲労き裂が進展した状態を $N_5$ ,  $N_{10}$ (き裂長さ40, 50mm程度、深さ9, 10mm程度)とした。対象とするき裂は、板曲げを受けて進展するため、疲労き裂は溶接下側に潜り込むように進展し、板厚の0.8倍程度で水平に進展する。本研究では、疲労き裂が $N_{10}$ に達した時点で疲労試験を終了した。

$\Delta\sigma=150\text{N/mm}^2$ ,  $R = -1$ の試験体の溶接止端部(Line-I)近傍に対して、各疲労き裂の長さごとのELECTの計測結果から得られたセンサ1の信号強度 $Z$ と溶接止端からの距離 $x$ との関係を図3.2-21に示す。図の縦軸は、疲労試験前(AW),  $N_{toe}$ ,  $N_b$ ,  $N_5$ および $N_{10}$ の信号強度をそれぞれ $Z_{AW}$ ,  $Z_{N_{toe}}$ ,  $Z_{N_b}$ ,  $Z_{N_5}$ および $Z_{N_{10}}$ とする。この図には、それぞれのき裂長さ毎の信号強度を溶接止端部から40 mm離れた位置( $x = 40$ )から得られた信号強度 $Z(x = 40)$ で無次元化している。また、図の横軸は、溶接止端部からの距離 $x$ を示す。

計測結果より、溶接部( $x=0$ )の信号強度が高くなっていることがわかる。その要因は、溶接部の溶着金属があり金属の体積が多くなるためである。また、溶接止端部から20mmと30mm( $x = 20 \sim 30$ )の信号強度がき裂の有無に関わらず、1以下になっているのは、溶接の引張残留応力の影響であると考えられる。き裂の発生・進展に伴い、入力周波数に関わらず、き裂の進展と残留応力の影響で溶接止端部と10mm( $x = 0, 10$ )の信号強度が低下することがわかる。溶接止端部( $x=0$ )の計測では、溶接止端の形状や溶着金属の影響で信号強度が変化すると考えるので、溶接止端部から10mm( $x=10$ )の信号強度に着目する。

センサ1の溶接止端部から10 mm( $x = 10$ )の信号

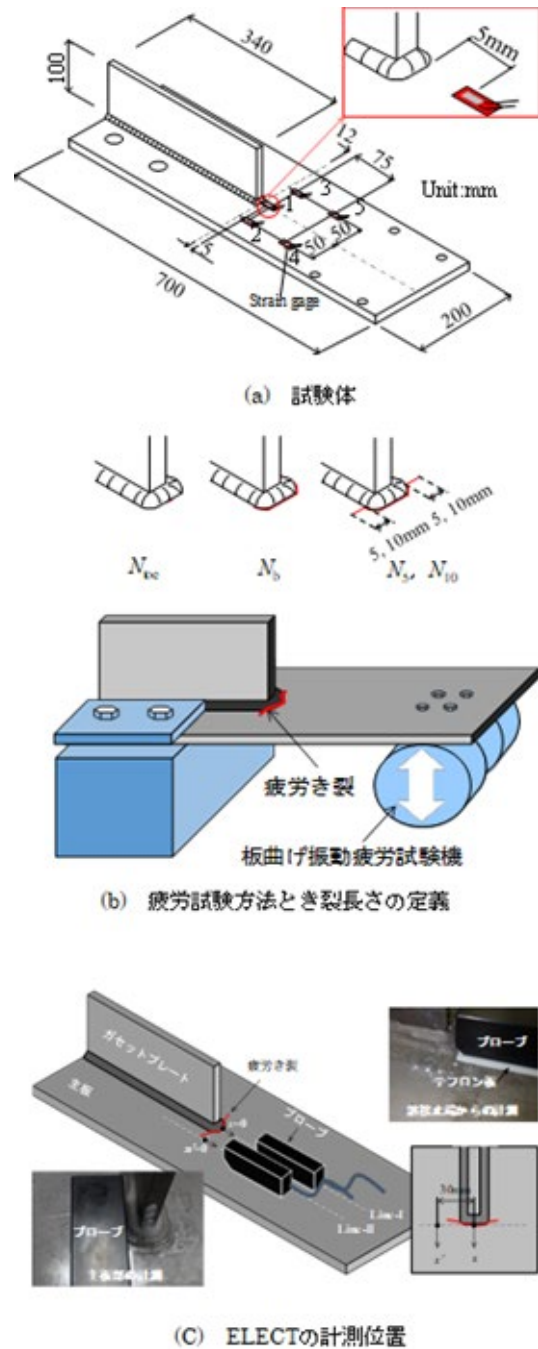


図 3.2-20 面外ガセット溶接継手試験体の疲労試験方法と ELECT の計測位置

強度比  $Z$  と繰返し回数  $N$  との関係を図 3.2-22 に示す。ただし、この図では、各繰返し回数で得られた信号強度  $Z_{(x=10)S1}$  を疲労試験前(AW)の信号強度  $Z_{AW}$  ( $x=10$ )<sub>S1</sub> で除した比  $Z_{(x=10)S1} / Z_{AW(x=10)S1}$  を縦軸に示している。また、溶接止端部から 5 mm の位置に貼り付けたひずみゲージで得られた応力範囲の結果も示す。図に示すように、繰返し回数の増加に伴い、応力範囲の値が  $N_{toe}$  以上から大きく低下しているが、ELECT で計測された信号強度比  $Z_{(x=10)S1} / Z_{AW(x=10)S1}$  の値も低下傾向が見られた。  $N_{10}$  の段階で、信号



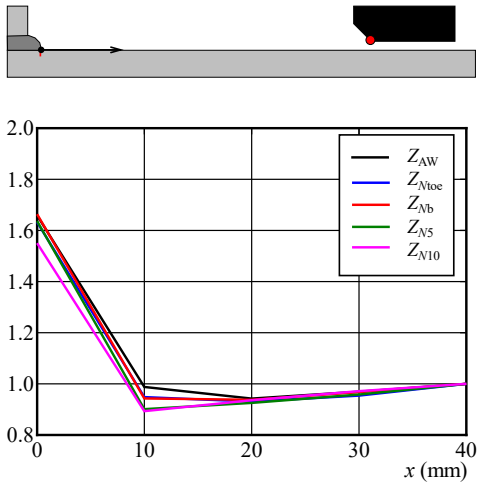


図 3.2-21 信号強度比と距離の関係 (3-40Hz)

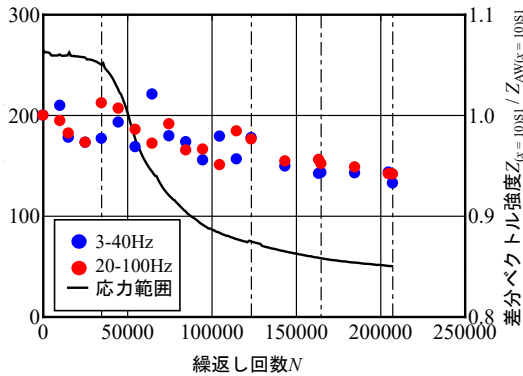


図3.2-22 信号強度比と繰返し回数の関係 (Line-I)

強度比の値が、3-40Hz, 20-100Hzともに0.93になっていた。ただし、他の応力範囲で疲労試験を実施した試験体では、Line-Iの計測によって、図3.2-22のような信号強度比の低下が見られない試験体もあったため、Line-Iの計測では、溶接金属の影響を受けている可能性がある。したがって、溶接止端上に対するELECTによる疲労き裂の検出は困難であると判断した。

次に、き裂が主板部に進展することを想定したELECTの地際用プローブによる主板部の計測を行った(図3.2-20(c)のLine-II)。 $\Delta\sigma=150\text{N/mm}^2$ 、 $R=-1$ の試験体(1体目)の計測(Line-II)の各き裂長さのセンサ1の信号強度 $Z$ と距離 $x'$ との関係を図3.3-23に示す。

図3.2-20(c)に示すように、プローブを試験体の幅方向に溶接止端部から30mm平行移動し、溶接止端部位置( $x'=0$ )を基準に10mm毎に計測を行った。図には、それぞれのき裂長さ毎の信号強度を溶接止端部から40mm( $x'=40$ )離れた位置から得られた信号強度 $Z_{x'=40}$ で除した信号強度比が示されている。図に示すように、入力周波数に関わらず、負の領域

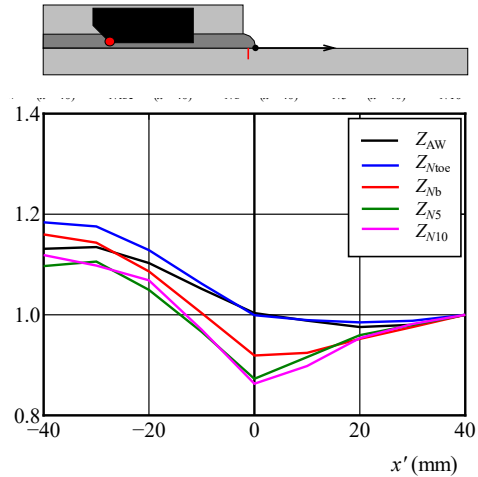


図 3.2-23 信号強度比と距離の関係 (3-40Hz)

( $x'=-40\sim 0$ )の信号強度の値が高くなったのは、Line-Iの溶接止端部( $x=0$ )の計測結果と同様に、溶接の溶着金属とガセットプレートの体積増加の影響である。信号強度比は、疲労試験前(AW)とき裂が $N_{toe}$ では大きな変化が見られなかったが、き裂が $N_b$ 以上になると、溶接部近傍( $x'=-20\sim 20$ )の信号強度比が変化することがわかる。

次に、地際用プローブのセンサ2の信号強度 $Z_{S2}$ と距離 $x'$ との関係を図3.2-24に示す。図に示すように、疲労試験前(AW)とき裂が $N_{toe}$ では大きな変化が見られなかったが、き裂が $N_b$ 以上から溶接止端部から-40mm近傍( $x'=-40\sim 0$ )で信号強度が変化していることがわかる。これは、センサ2はプローブ先端のセンサ1から23mm後ろに設けられており、センサ1の溶接止端部近傍( $x'=-20\sim 20$ )の信号強度 $Z_{S1}$ に相当する。センサ2の計測でも、き裂の進展に伴い、信号強度比が変化することがわかる。

センサ1で、最も信号強度比の変化が見られた $x'=0$ の位置の信号強度 $Z_{S1}$ に着目し、 $x'=0$ の信号強度と $Z_{S1}$ と繰返し回数 $N$ との関係を図3.2-25(a)に示す。図では、各繰返し回数で得られた信号強度 $Z_{x'=0}S1$ を疲労試験前(AW)の信号強度 $Z_{AW(x'=0)}S1$ で除した信号強度比 $Z_{x'=0}S1/Z_{AW(x'=0)}S1$ が示されている。また、溶接止端部から5mmの位置に貼り付けたひずみゲージで得られた応力範囲の結果も図に示している。図に示すように、溶接止端部からの計測結果(Line-I)より、信号強度比の値のばらつきが小さいことがわかる。入力周波数に関わらず、繰返し回数の増加に伴い、 $N_{toe}$ 以上から信号強度比が低下し、 $N_{10}$ の段階で、信号強度比 $Z_{x'=0}S1/Z_{AW(x'=0)}S1$ の値が、3-40Hz, 20-100Hzともに0.9以下になっていた。また、センサ2の $x'=0$ での信号強度比 $Z_{S2}$ と繰返し回数 $N$ との関係

(図3.2-25(b))から、繰返し回数が増加しても、センサ2の信号強度比 $Z_{x'=0}S2/Z_{AW(x'=0)}S2$ の値が大きく変化しないことがわかる。

実構造物の計測の際、疲労き裂の検出のための評価法として、最も変化が見られた $x'=0$ でのセンサ1から得られた信号強度 $Z_{S1}$ をセンサ2から得られた

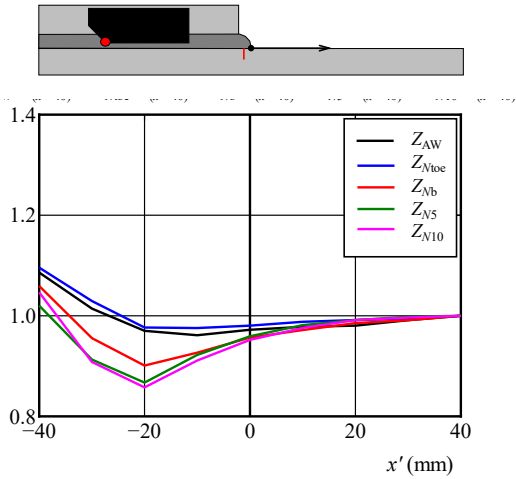
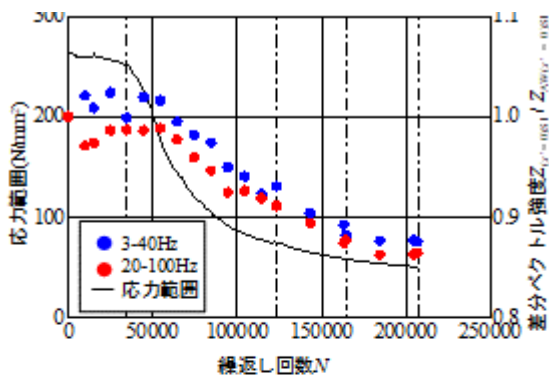
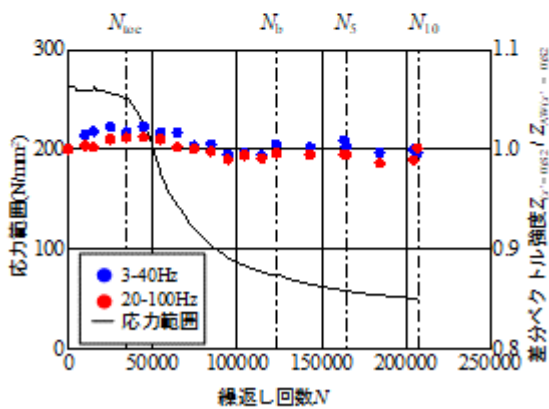


図 3.2-24 センサ 2 の信号強度比と距離の関係 (3-40Hz)



(a) センサ1の信号強度比

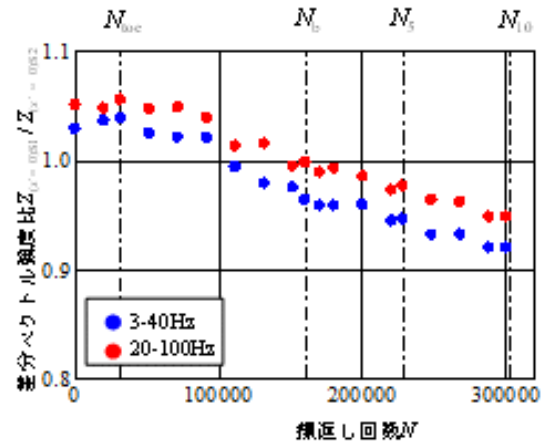


(b) センサ2の信号強度比

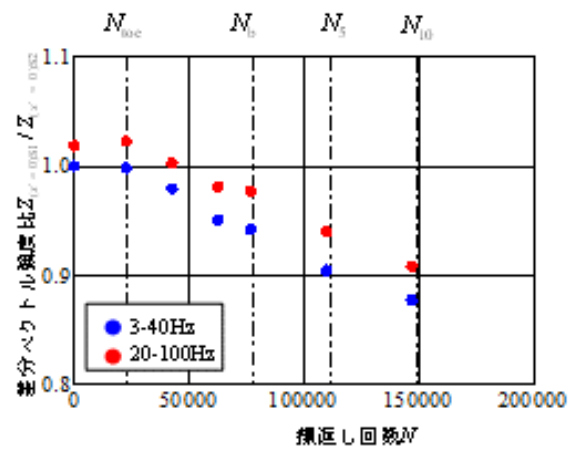
図 3.2-25 信号強度比と繰返し回数  $N$  の関係 (Line-II)

信号強度  $Z_{S2}$  で除した信号強度比  $Z_{(x'=0)S1} / Z_{(x'=0)S2}$  を考える. センサ 2 の  $x'=0$  での信号強度が, 疲労き裂の発生・進展によって変化しなかったため, 基準の信号強度として利用した.

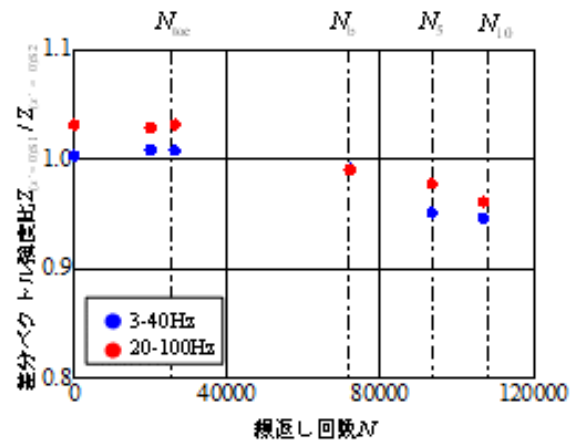
信号強度比  $Z_{(x'=0)S1} / Z_{(x'=0)S2}$  と繰返し回数  $N$  との



(a)  $\Delta\sigma=120\text{N/mm}^2$



(b)  $\Delta\sigma=150\text{N/mm}^2$



(c)  $\Delta\sigma=180\text{N/mm}^2$

図 3.2-26 信号強度比  $Z_{(x'=0)S1} / Z_{(x'=0)S2}$  と繰返し回数  $N$  の関係

関係を図 3.2-26 に示す. この方法では一度の計測で, 信号強度比  $Z_{x'=0}S1 / Z_{x'=0}S2$  が得られるので, 実構造の計測の際の計測時間が省略できる. 図には, いくつかの試験結果を示しているが, 図に示すように, 全ての試験体において, 繰返し回数の増加に伴い, 信号強度比  $Z_{x'=0}S1 / Z_{x'=0}S2$  の値がき裂  $N_{toe}$  以上から低下傾向を示し,  $N_{toe}$  と  $N_b$  間で信号強度比  $Z_{x'=0}S1 / Z_{x'=0}S2$  の値が 1 以下になることがわかる. したがって, 信号強度比  $Z_{x'=0}S1 / Z_{x'=0}S2$  の値が 1 以下となった場合, き裂が  $N_{toe}$  と  $N_b$  間までに進展していると判断することができる. 以上より, Line-II の  $x'=0$  の主板部を ELECT で計測することによって, リブから発生した疲労き裂が検出できると考える.

### 3.3 アンカーボルトの腐食検出

#### 3.3.1 装置および測定原理

コンクリートに埋め込まれたアンカーボルトの腐食検出のための極低周波渦電流検査装置の基本構造は, 水中部の損傷の検出用の ELECT と同様であり, 低周波磁場を印加してアンカーボルト深部まで渦電流を発生させ, その磁場を高感度磁気センサ (MR センサ) で検出している. ただし, アンカーボルトの腐食検査では, ボルト埋設部の減肉を検査するために励磁コイルを空芯コイルとし, アンカーボルト頭部に貫通させる構造とした. すなわち, 検出対象であるアンカーボルト自体をコアとして効率的に磁路を形成している. また, ELECT とは異なり, 複数の入力周波数に対して得られた磁気強度と位相遅れを複素平面上にプロットした磁気スペクトルから, 極低周波 (1Hz) の周波数の差分ベクトルの強度 (信号強度) を用いて, アンカーボルトの腐食状態 (腐食減肉部の長さ) を評価する手法とした.

まず初めに, 磁気測定における励磁コイル, 磁気センサの効率的な配置を検討した. また, 微小な信号の変化を高感度に検出できる位相検波と磁気スペクトルを適用し, 腐食の有無や, 腐食位置が検出できる可能性を実験的に評価した (令和元年度). 次に, 印加周波数 50Hz を基準として 300Hz までを用い, 健全な供試体と断面欠損で腐食を模擬した供試体との間で異なる磁気スペクトルの応答が見られ, 腐食を評価できる可能性があることを明らかにした. また, 電食により腐食を模擬した供試体に本手法を適用し, 腐食の有無, 腐食位置の変化に対して, 磁気スペクトルの差が見られることを明らかにした<sup>22)</sup> (令和2年度). さらに, 1~1000Hz の周波数を用い, 丸鋼の断面欠損範囲を拡大した試験体で評価するとともに, 塩水による乾湿繰り返しによって腐食促進し, 腐食生成物が存在する状態を再現した試験体においても評価を加えた. また, ナット, 座金, ベースプレートなどの附属物が本手法の電磁場応答, および本手法の腐食評価に与える影響を解析的に検討した.

#### 3.3.2 解析による評価

アンカーボルトの腐食検出につき, まず解析により検討を行った. 解析には渦電流解析ソフトウェア (PHOTO-eddy) を使用した. 図3.3-1に解析モデルを示す. 鋼棒の解析モデルは, 全長230mm (突出長100mm, 埋込長130mm), 直径16mmとした. また, 鋼棒の長軸方向をz方向, 半径方向をx方向に設定した. コイルは, 内径24mm, 外径36mm, 全長45mmとした. 解析モデルの空間は, 縦200mm×横200mm×高さ330mmの直方体とし, 鋼棒がモデルの中心となるように配置し, 鋼棒, コイル以外のエレメントは空気層とした. また, 突出長と埋込長の境界面 (以降,

境界面と称す) がコイルの下端と一致するように配置した。解析モデルのケースは、腐食による減肉を再現するために、断面欠損の範囲を境界面から下方に10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mmと10mm刻みに拡大し、欠損深さは2mmとした。また、断面欠損の5ケースに、断面欠損がない健全モデルのケースを加え6ケースとした。コイルの巻き数は実験で使用するコイルと同じ150ターンとし、コイルに印加する電流は正弦波交流電流3Aとした。また、印加周波数は1Hz, 10Hz, 100Hz, 1000Hzの4ケースとした。解析モデルに使用した物性値を表3.3-1に示す。各メッシュのz方向の寸法については、1メッシュ5mmとした。磁束密度の出力点は、コイル下端の鋼棒端部からx方向に20mmの位置とした。

つれて、全ての印加周波数においてz方向の磁束密度 $B_z$ の最大値は低下していることが確認された。また、印加周波数が低周波になるにつれて、健全モデルと断面欠損モデルの差が大きくなることがわかった。これより、印加周波数を低周波に設定することで断面欠損を検出できる可能性があることが示された。

表3.3-1 解析に使用した物性値

構成材料	比透磁率	電気伝導率 (S/m)
鋼棒	$5.0 \times 10^3$	$1.0 \times 10^7$
コイル	1.0	0
空気	1.0	0

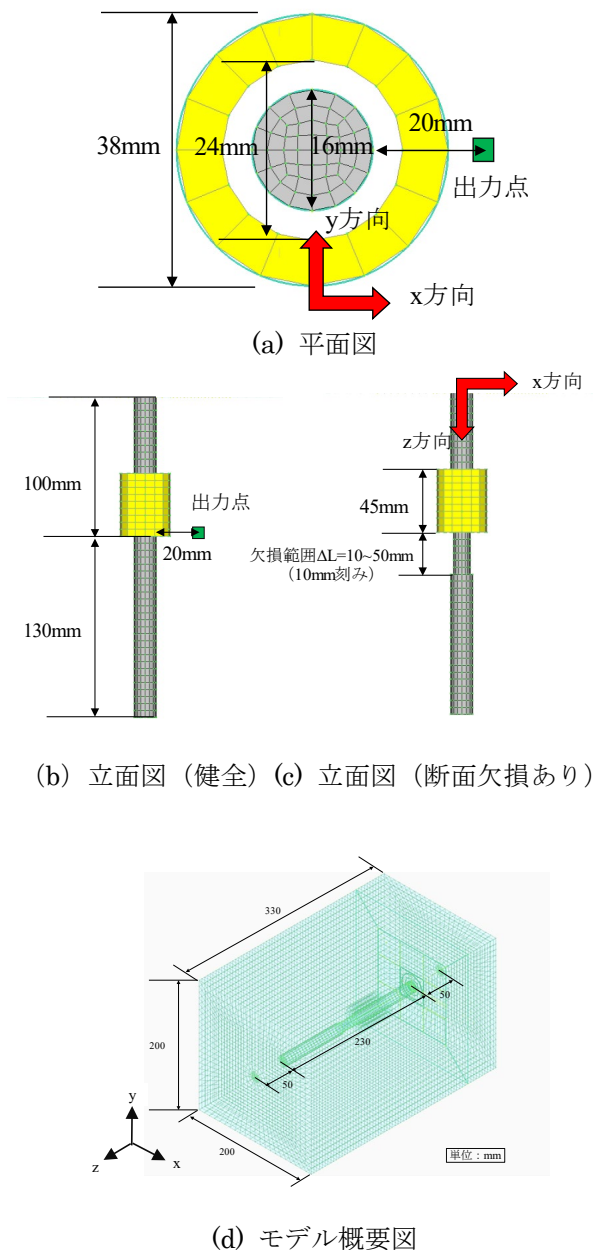


図3.3-1 解析モデルの概要

図3.3-2に印加周波数ごとの各解析モデルの磁束密度の最大値を示す。図より欠損範囲が拡大するに

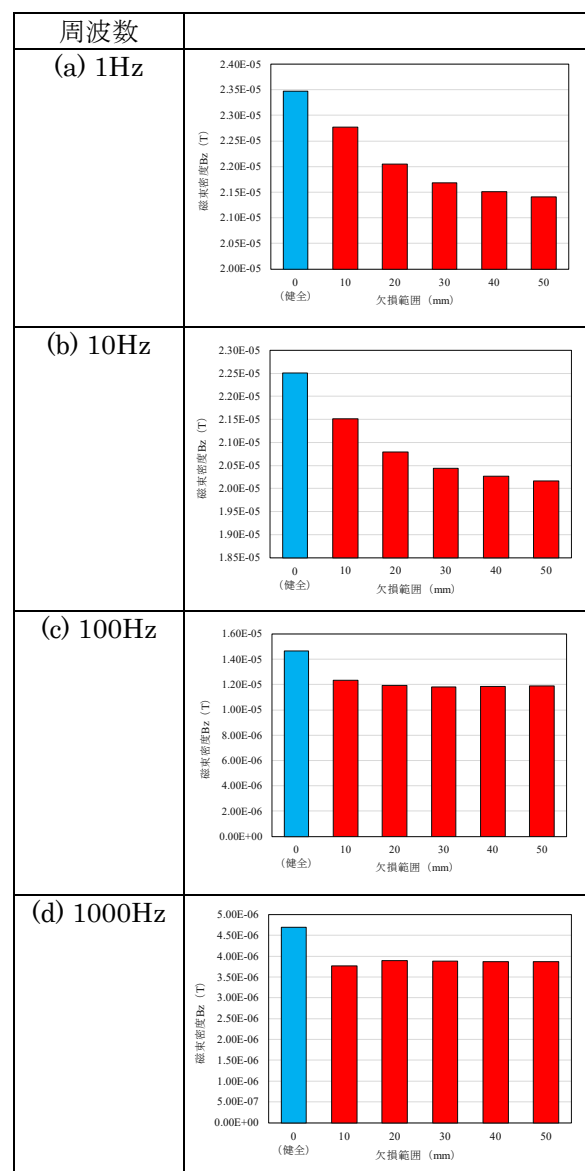


図3.3-2 z方向の磁束密度

### 3.3.3 試験体による評価

#### (1) 断面欠損試験体

試験体は、全長 230mm (突出長 100mm, 埋込長 130mm), 直径 16mm の SGD400-D (磨き材) の引抜き鋼棒を使用した。断面欠損は旋盤にて切削加工を行い、鋼棒の全周を深さ 2mm で欠損させた。突出部と埋込部との境界面を切削開始位置とし、埋込部に向けて 10mm ずつ切削範囲を拡大し、最大切削長さ 50mm の断面欠損試験体を作製した。切削加工を施していない鋼棒を健全とし、断面欠損のある鋼棒と比較することで断面欠損が電磁場応答に与える影響を評価した。図 3.3-3 に試験体の概要を示す。

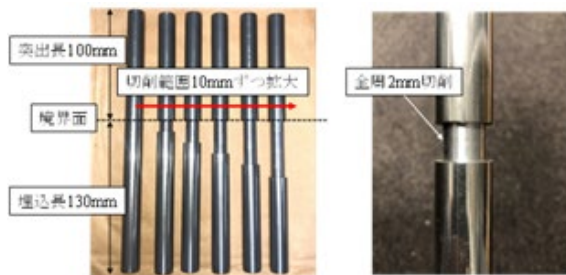


図 3.3-3 断面欠損試験体

#### (2) 促進腐食試験体

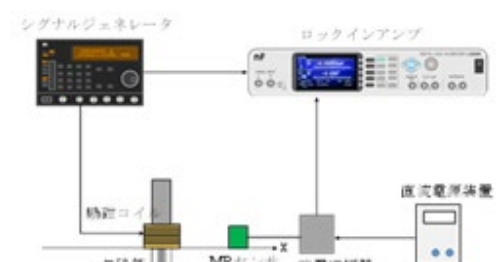
促進腐食試験体は、鋼棒の所定の範囲に塩水による乾湿繰り返し試験を行うことにより模擬した。鋼棒は、断面欠損試験体と同様に、全長 230mm (突出長 100mm, 埋込長 130mm), 直径 16mm の SGD400-D (磨き材) の引抜き鋼棒を使用した。鋼棒上部から 100mm の突出部と埋込部との境界面を腐食開始位置とし、埋込部に向けて 10mm ずつ腐食範囲を拡大し、最大腐食長さ 50mm の腐食試験体を作製した。また、乾湿繰り返し試験を行っていない鋼棒を健全とし、促進腐食試験により腐食生成物が十分に発現した鋼棒と比較することで腐食生成物が電磁場応答に与える影響を評価した。促進腐食試験体の外観を図 3.3-4 に示す。なお、乾湿繰り返し試験は、3%の塩水を注いだ後、25°C に保った室内で 24 時間浸漬させ、その後、48 時間乾燥させるサイクルを 1 サイクルとし、腐食生成物が十分に発現する 15 サイクルまで行った。



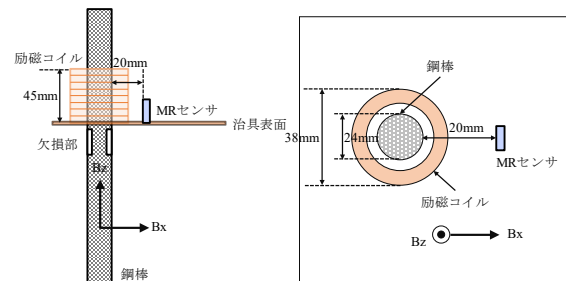
図 3.3-4 促進腐食試験体

### 3.3.4 実験システムと計測概要

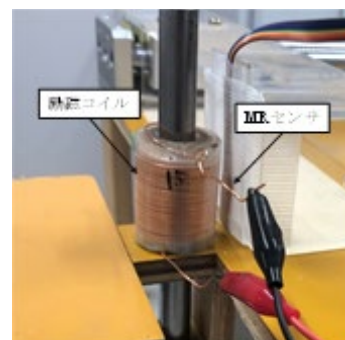
実験で使用した励磁コイルの巻数は 150 ターン、直径  $\phi 18\text{mm}$  の空芯コイルであり、センサは MR センサを使用した。中央の開口部をアンカーボルト頭部に貫通させ設置した。これにより、アンカーボルトに効率よく磁場を入力し、腐食部の検出を感度高く行うことを可能とした。励磁コイルにはシグナルジェネレータより出力した正弦波交流電流を増幅して印加し、同一の信号をロックインアンプにも参照信号として入力した。MR センサからの検出信号は前置アンプで増幅の上、ロックインアンプに入力した。また、MR センサは試験体と垂直な平面内に設置し、リニアスケールにて試験体からの距離を計測した。実験システム、計測配置、および実験状況を図 3.3-5 に示す。



(a) 実験システム



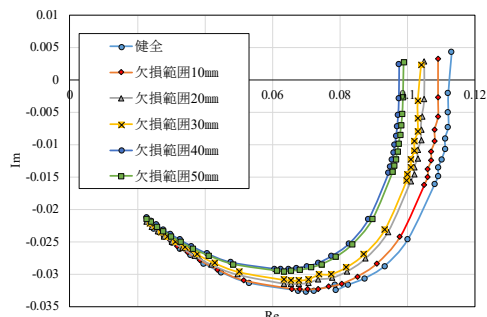
(b) 計測配置



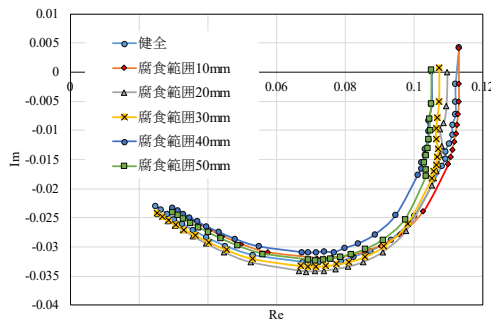
(c) 実験状況

図 3.3-5 実験システムと実験状況

センサ位置をアンカーボルトから 20mm の位置に固定した状態で、アンカーボルトと同軸方向 (z 方向) の MR センサの出力を 1~1000Hz まで計測した。参照信号の同相成分を横軸 (Re) に、直交成分を縦軸 (Im) にプロットし、磁気スペクトルを求めた結果を図 3.3-6 に示す。この図より腐食なし (健全) の試験体に対し、断面欠損、促進腐食試験体の磁気スペクトルは異なる軌跡を示すことがわかった。また、この違いは低周波において顕著に表れることが確認された。このため、1Hz における MR センサの出力値の振幅 (信号強度) に着目し周波数との関係をプロットした (図 3.3-7)。これより、極低周波において腐食を模擬した試験体の信号強度は、腐食長さが大きくなるにつれて健全な試験体との差が大きくなることがわかった。以上より、極低周波 (1Hz) ~ 高周波 (1000Hz) の振幅、および振幅値の変化より腐食範囲を評価できる可能性があることが確認された。

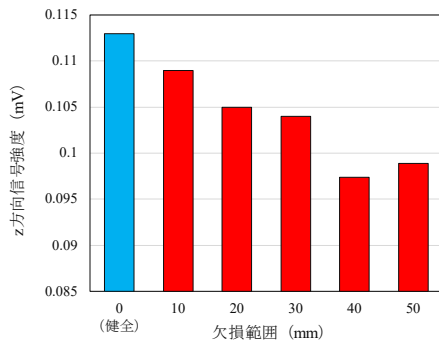


(a) 断面欠損試験体

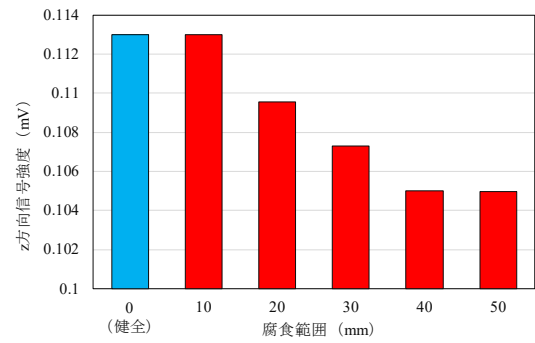


(b) 促進腐食試験体

図 3.3-6 磁気スペクトル



(a) 断面欠損試験体



(b) 促進腐食試験体

図 3.3-7 信号強度 (周波数 1Hz)

解析で得られた磁束密度 (図 3.3-2(a)) と、実験で得られた断面欠損試験体の結果 (図 3.3-7(a)) より、解析、実験ともに、周波数 1Hz における z 方向の磁束密度  $B_z$ 、および信号強度は欠損範囲が拡大するにつれて減少することが確認された。また、低周波になるほど磁束密度  $B_z$ 、および信号強度はより顕著な減少傾向を示したことから、印加周波数 1Hz における健全な鋼棒と比較した断面欠損のある磁束密度  $B_z$ 、および信号強度の減少率を「信号強度減少率」と定義し、評価した。信号強度減少率のグラフを図 3.3-8 に示す。図より、実験と解析の信号強度減少率は概ね一致していることが確認された。欠損範囲が 30mm までであれば、実験と解析の信号強度減少率はほぼ一致するが、欠損範囲が 40mm 以上になると、実験の信号強度減少率は解析よりも大きくなる傾向が得られた要因としては、実験において欠損範囲が拡大すると、断面欠損最下部と励磁コイルの距離が大きくなり、信号強度が解析値より小さくなったためと考えられた。

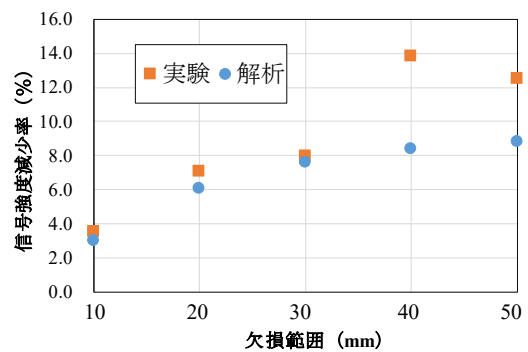


図 3.3-8 信号強度減少率 (周波数 1Hz)

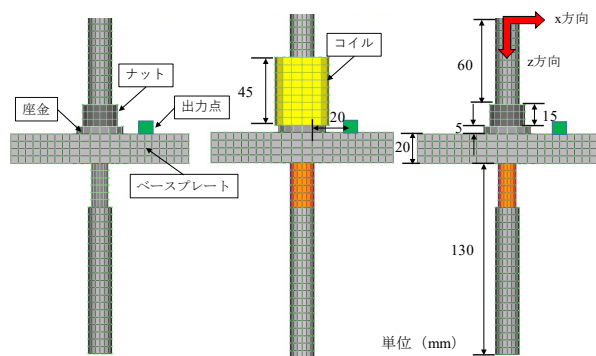
### 3.3.5 アンカーボルトの附属物の影響

実験ではまず、アンカーボルトを模擬した鋼棒の所定の位置に断面欠損と腐食生成物を設け、それらが電磁場応答に与える影響を検討した。しかしながら、アンカーボルトは、ナット、座金、ベースプレートなどの附属物から構成されており、附属物は導体、かつ強磁性体であるため、極低周波渦電流探傷法を行った際の電磁場応答に影響を及ぼすと考えら

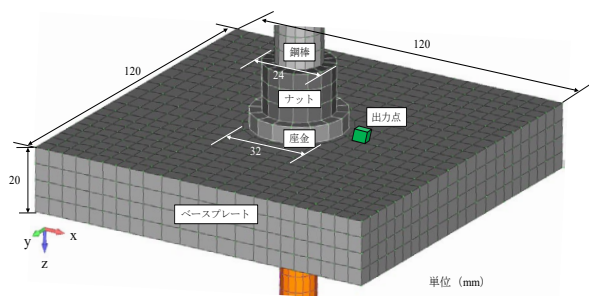
れた。さらに実際の検査においては、ベースプレートを取り外しての計測が困難となるため、励磁コイルやMRセンサの設置位置が制約を受ける可能性がある。そのため、実際の附属物のあるアンカーボルトを模擬した解析モデルに対して低周波の渦電流解析を行い、附属物が本手法の腐食評価に与える影響を解析的に検討した。

解析には動磁場解析ソフトウェア (PHOTO-eddy) を使用し、ナット、座金、ベースプレートのあるアンカーボルトを模擬した解析モデルを作成した。励磁コイル寸法は、内径24mm、外径38mmであり、ナットに締結した状態を模擬した。また、出力点は、鋼棒端部から20mmで、欠陥位置に最も近い位置とした。ナットは、内径16mm、外径24mm、高さ15mmとし、座金は内径18mm、外径32mm、高さ5mmとした。ベースプレートは縦120mm×横120mm×厚さ20mmとし、鋼棒が入る孔の直径は座金と同様に18mmとした。また、解析モデルの種類としては、(a) 断面欠損モデル、(b) 腐食生成物モデル、(c) 断面欠損+腐食生成物モデルの3種類とし、ベースプレート最下部から10mmずつ腐食範囲を拡大させ、腐食範囲最大50mmの5ケースとした。また、(a) 断面欠損モデルは2mmの欠損深さとし、(b) 腐食生成物モデルも腐食層を2mmとした。ただし(c) 断面欠損+腐食生成物モデルは、欠損深さ2mmの断面欠損をした後、腐食厚さ2mmの腐食層を設けた。解析モデルは縦200mm×横200mm×高さ330mmの直方体とし、鋼棒をモデルの中心となる位置に配置した。また、鋼棒、コイル、腐食生成物、附属物 (ナット、座金、ベースプレート) 以外の解析モデル内部のエレメントは空気層とした。

図3.3-9に解析モデルの概要を示す。また、図3.3-10に解析結果を示す。これまでの結果から、極低周波数である1Hzでの電磁場応答が最も欠陥検出に有効であることが示されたため、周波数は1Hzとした。



(a) 断面欠損 (b) 腐食生成物 (c) 断面欠損+腐食生成物



(d) 附属物の外観図

図3.3-9 附属物を有する解析モデルの概要

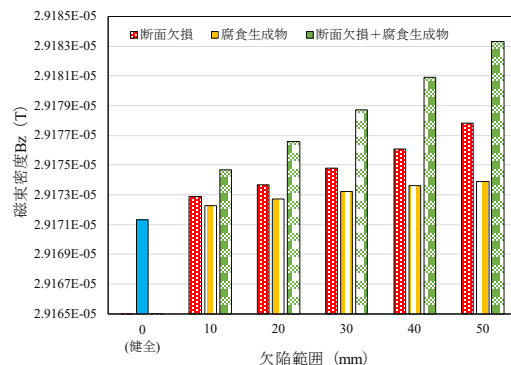


図3.3-10 解析結果 (z方向磁束密度)

図より、欠陥のあるモデルはいずれも健全モデルよりも磁束密度が大きく、欠陥範囲が増加するにつれて、磁束密度は増加する傾向が得られた。また、欠陥の種類としては、断面欠損+腐食生成物モデルの磁束密度が最も大きくなることが確認された。しかしながら、健全モデルと差が生じているものの、磁束密度の差分は非常に小さい値であるため、附属物があるアンカーボルトの腐食や断面欠損を検出するためには、さらに励磁コイルの配置、検出点の配置をパラメータとして検出感度を改善する必要があることがわかった。

附属物ありの磁束密度を、附属物なしの磁束密度で除すことで附属物によるz方向の磁束密度の増加率を算出した。結果を図3.3-11に示す。図より、附属物によるz方向の磁束密度Bzの増加率は、欠陥の種類によらず120%以上となることが確認された。これは、附属物であるベースプレート、ナット、座金に渦電流が流れることから、z方向の磁束密度Bzが増大したためであると考えられる。附属物に流れる渦電流のコンター図を図3.3-12に示す。図より附属物に渦電流が流れることが確認できた。つまり、欠陥の種類にかかわらず、磁束密度Bzは附属物に流れる渦電流によって大きくなったため、附属物なしの電磁場応答の場合と比較して、健全との電磁場応答の差異が小さくなったと考えられる。

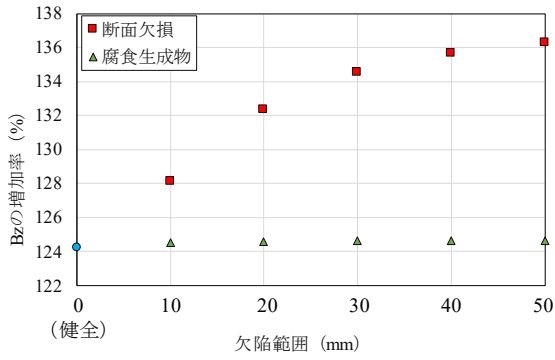
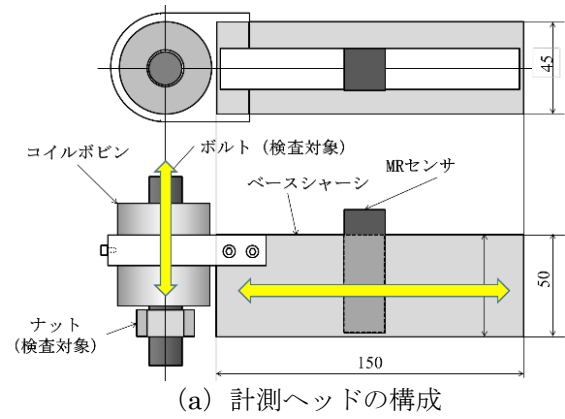


図3.3-11 附属物による磁束密度の増加率 (Bz)



(a) 計測ヘッドの構成

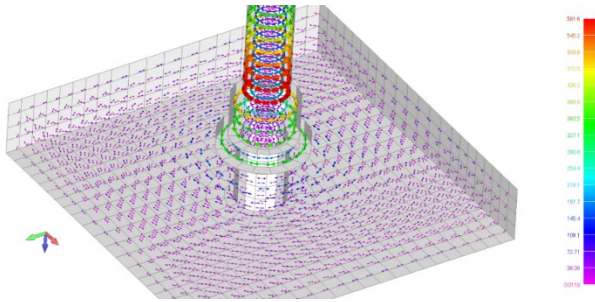


図3.3-12 附属物に流れる渦電流のコンター図 (切削範囲50mm)



(b) 外観

図 3.3-13 実構造物評価用計測ヘッド

### 3.3.6 実構造物における評価

3.3.1～3.3.5にて実施した解析および実験結果に基づき、実構造物への適用へ向けた計測ヘッドの製作を行った。図3.3-13に実構造物評価用計測ヘッドの概要を示す。

励磁コイルは、アンカーボルト頭部に貫通できる構造とし、MRセンサは励磁コイルに対して水平方向に伸展するベースシャーシ上に設置できる構造としている。また、励磁コイルは、耐環境性を考慮したハウジングに内蔵しており、アンカーボルトに貫通後、上下方向にスライドできる構造としている。これにより、ナットが締結されたアンカーボルトに対しても計測が可能である。また、励磁コイルのケーブル接続用のコネクタを装備し、電氣的に安定した計測が可能とした。MRセンサは励磁コイルと同じく耐環境性を考慮したハウジングに内蔵した構造とした。ハウジング内部に2つのMRセンサを直交して配備し、x軸方向、z軸方向が同時に計測できる構造としている。さらに、MRセンサはベースシャーシ上で、x方向にスライドして設置が可能である。これにより、ベースプレートなどの附属物に設置されたアンカーボルトにおいても、センサ位置15mm～50mm程度の可動範囲を確保することが可能である。

今後、実構造物のアンカーボルトを模擬した試験体、および実構造物への適用を図り、本手法の性能評価を進める予定である。



### 3.4 溶接部のき裂の検出

#### 3.4.1 センサプローブと計測システム

本研究では、磁気センサを2つ用いることにより、検出磁場の微分成分を計測する磁気センサプローブを開発した。磁場の印加方法としてはコイルにより渦電流を発生させてき裂の信号をとらえる渦電流探傷法(ETC)と、印加コイルを高透磁率材料であるヨーク材に取り付け、検出部から離れた場所で検査対象の鋼材に磁束を流して、き裂部から漏れ出てくる磁束を検出する漏洩磁束探傷法(Magnetic Flux Leakage: MFL)がある。研究の当初、溶接部のき裂に対して、これら渦電流探傷法と磁束漏洩探傷法のどちらが適しているかを検討した。



図 3.4-1 渦電流探傷法(ETC)の磁気センサプローブと検査風景

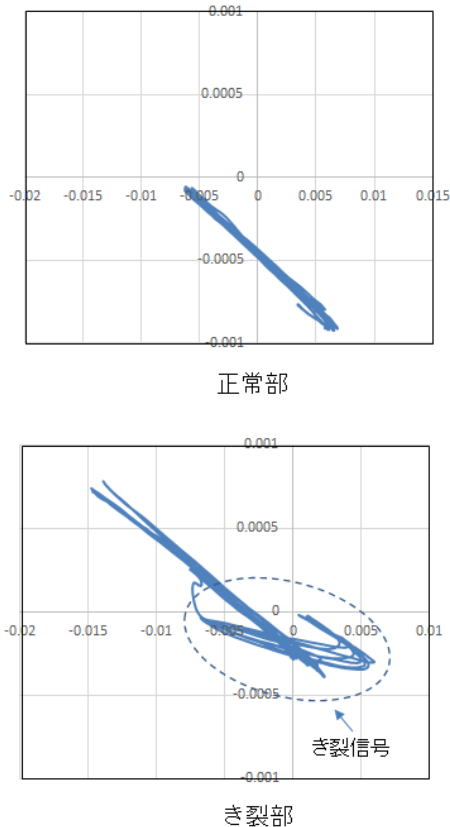


図 3.4-2 正常部およびき裂部での ETC の磁気信号比較

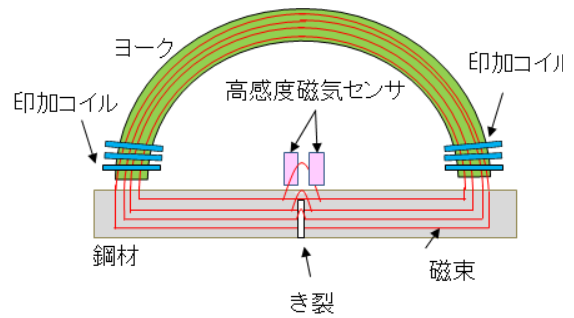


図 3.4-3 不飽和磁束漏洩探傷法(USAC-MFL)の原理

従来の渦電流探傷法の探傷プローブは印加コイルと検出コイルからなる構成を基本としている。検出コイルの代わりに薄膜デバイスである磁気センサを用いると特に小型であることから配置方法やマルチチャンネル化が容易になる特徴があると同時に、低周波磁場により鋼材の透磁率の特性をとらえ、鋼材中での透磁率のバラツキによる磁気ノイズを削減できるなどの特徴がある。このため、本研究開発では印加コイルの中に磁気センサとしてトンネル型磁気抵抗素子(TMR)を2つ配置してその出力差をとるグラジオメーターを用いて、印加コイルにより発生した渦電流による磁場の空間変化をとらえる構成とした(図 3.4-1)<sup>23)</sup>。印加コイルの大きさは  $6\text{mm} \times 2.5\text{mm}$  と小さく、また磁気センサとして約  $3\text{mm}$  離れてコイルの一片の内側に配置している。この2つの磁気センサを用いる構成によりき裂があったときに変化する渦電流の分布の変化による空間的に微小な磁場変化をとらえることができる。

渦電流探傷法による結果の表示としては、実数部に印加磁場と同相の磁場成分を、虚数部では位相が  $90$  度ずれた成分を表したリサージュ波形を用いた(図 3.4-2)。磁気センサプローブを溶接部の上を溶接部上部の板と下の板の間で往復するようになぞると、き裂箇所では正常な溶接部で得られるリサージュ波形とは違うパターンが現れる。このように、き裂信号は明らかに正常部の信号と別の位相成分としてあらわれてくる。

従来の漏洩磁束探傷法はき裂から磁束を漏れ出させるために、印加コイルを取り付けたヨーク材により大きな磁場を鋼材に流し込み磁気飽和させ、漏れ出てきた磁束を計測する方法が一般的である。しかし、鋼材の透磁率は大きいため、磁気飽和させるためには、大きな磁場を印加する必要がある。このため、磁場を作るための電流値を大きくする必要があり、大電力の電源が必要となり、フィールド検査には向かない。一方、磁気飽和させなくても磁束は漏洩してくるが、微弱な磁場信号となる。このため、本研究で開発した漏洩磁束法では磁場検出器として高感度な磁気センサを用い、弱い印加磁場でも検査できる手法として新たな不飽和漏洩磁束探傷法(Unsaturated AC magnetic field-MFL: USAC-

MFL)を開発した(図 3.4-3) 4). 微弱な漏洩磁束の変化を検知するため、先に述べた渦電流探傷法と同様に、磁気センサを2つ用いて、その差動出力を検出する方法をとった。表面き裂は渦電流探傷法と同様にき裂部位のところに大きな強度および位相の信号変化がみられたばかりでなく、表層部内部のき裂も検出することができた。内部き裂検出の場合、超音波検査が有用であるが、表面から数 mm 内部のき裂の場合、超音波では困難な場合が多い、このため、表層部の表面から内部のき裂同様を見る場合には漏洩磁束探傷法が有効であると考え。実際に溶接部のき裂に対して、各種サイズのき裂の条件で比較したところ、若干であるが本 USAC-MFL の方の検出能が高かったので、本章では USAC-MFL のき裂検査結果について報告する。

USAC-MFL の基本特性を評価するために、まず平板状の鋼材のき裂検出用として図 3.4-4 に示す測定システムを用いた。システムとして、電流源、磁場印加コイル、U 字型ヨーク材、2 つの磁気センサからなる、ロックインアンプ、PC、測定サンプル、X-Y 走査ステージで構成されている。グラジオメーターは 2 つの異方性磁気抵抗効果センサ(AMR)を 3 mm 離してヨーク材の中心に配置している。印加コイルで発生した磁束はヨーク材を伝わり、検査対象に伝搬する。ここで、検査対象とヨーク材の間では磁気回路が形成される。磁気回路中にき裂があると磁束はき裂箇所から漏洩してくる。この漏洩磁束をグラジオメーターで検出する。各磁気センサの出力はロックインアンプにより実数成分 X と虚数成分 Y に分離して磁場ベクトルとして測定する。それぞれの磁気センサの磁気ベクトルの差ベクトルを用いて評価した。ここで、測定サンプルとして厚さ 12 mm の平板状の鋼板(SMA490A)上長さ 30 mm × 幅 1 mm × 深さ 2, 5, 7, 9, 12 mm のスリット欠陥を配置したものを用い、欠陥を中心に 1 mm 間隔で 40 mm をラインスキャンして計測した。測定周波数は 1, 5, 10, 20, 50, 100 Hz を用いた。

図 3.4-5 に深さ 7 mm の表面欠陥を単一センサで測定したときの周波数 10 Hz における強度と位相の測定結果を示す。欠陥の信号として中央 20 mm の位置に対してプラス・マイナスの信号変化が表れている。この信号表示の場合では、欠陥位置から離れたところにピークが表れるため、欠陥位置を判定することが難しい。2 つの磁気センサの差分を取るグラジオメーターでの信号を表示したものが図 3.4-6 となる。差ベクトルの強度  $R_d$  と微分位相  $\theta_d$  ともに欠陥位置に一致したピークが得られていることが分かる。

次に欠陥信号の周波数依存性を調べた結果を図 3.4-7 に示す。微分強度と位相ともに周波数に応じてピーク値が変わっていることが分かる。ここで、ピーク値はベースラインからピークまでの値とした。このように周波数の上昇とともに、信号強度及び位相変化量が大きくなっていることが分かる。次に、欠陥深さの依存性を図 3.4-8 に示す。深さが深くな

るにつれて、信号変化量が大きくなっていることが分かる。

USAC-MFL の基本的な特性を評価したので、次には溶接部での評価を行った。磁気センサプローブは溶接部用として、図 3.4-9 に示す様にアングル部に適用できるような形状のヨーク材を用いた。また磁気センサ部は 2 つのフェライトコアでセンサ部分を挟み込む構造にすることで、センサ部分の固定化及び印加磁場のバランスをとった。このセンサプローブを用いて、試験体におけるき裂部上と健全部上に対して計測を行い、き裂の検出性能を評価した。

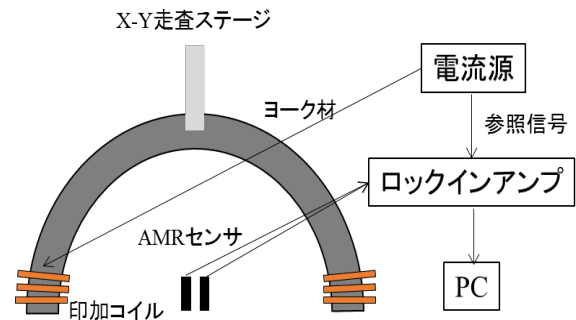


図 3.4-4 USAC-MFL の計測システム

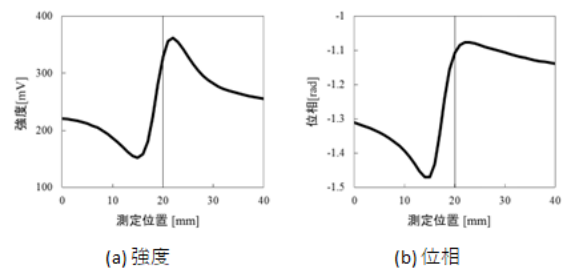


図 3.4-5 単一センサでの信号

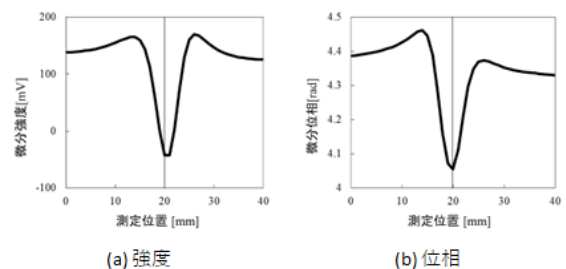
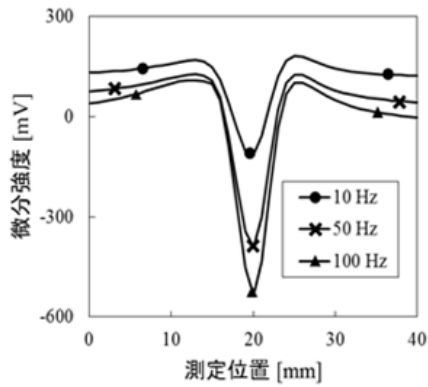
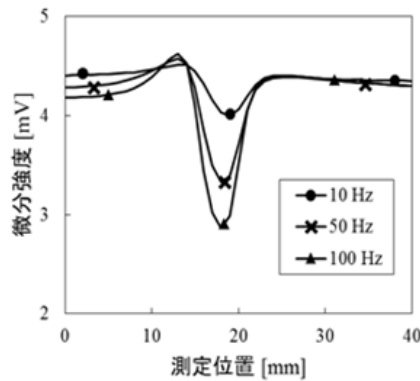


図 3.4-6 2 つの磁気センサによる微分処理後の信号

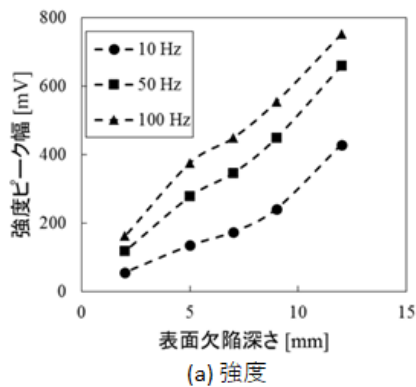


(a) 強度

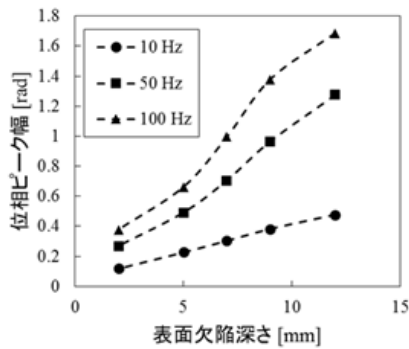


(b) 位相

図 3.4-7 き裂信号の周波数依存性



(a) 強度



(b) 位相

図 3.4-8 き裂信号ピーク値のき裂深さ依存性

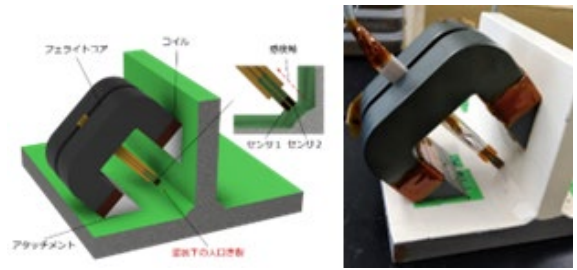


図 3.4-9 プロブの構成

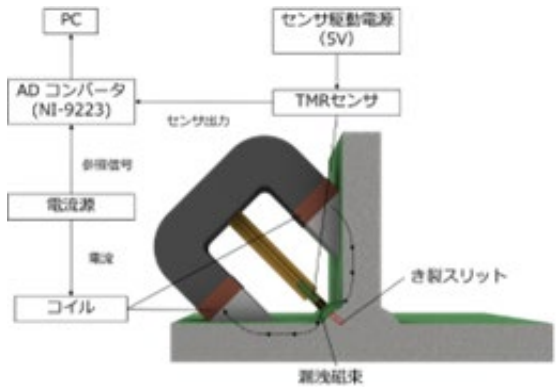


図 3.4-10 計測システムの構成

### 3.4.2 き裂試験体

平成26年に国土交通省中国地方整備局で公募された「上塗り塗装施工したままで可能な溶接部のき裂、劣化調査技術」で使われたものを試験体として用いた。試験体の総数は20体で、き裂の総数は60箇所である。き裂のパラメータとして、長さ3mm～15mm、深さ1mm～5mm、パターン（き裂の箇所）3パターンを変化させ、溶接部に人工的なき裂を導入している。図3.4-11に示される側面側Line Aのき裂（溶接部下部、パターンa）を16箇所、側面側Line Bのき裂（溶接部の上部、パターンb）を19箇所、側面側Line Cのき裂（溶接部の中央、パターンc）を13箇所の合計48箇所である。また、まわし溶接部側では、Line Aのき裂は3箇所、Line Bのき裂は4箇所、Line Cのき裂は5箇所の合計12箇所である。

### 3.4.3 信号解析方法

信号処理の手法は、2つの磁気センサ出力をそれぞれフーリエ変換後に差分することで、印加磁場と同じ周波数成分の実部と虚部からなる差分磁場ベクトル算出した。信号処理をしたデータの一例を図3.4-12に示す。図において、原点からそれぞれの信号までの距離が信号強度に相当する。健全部の信号とき裂部の信号が同一の複素平面上にプロットすると、

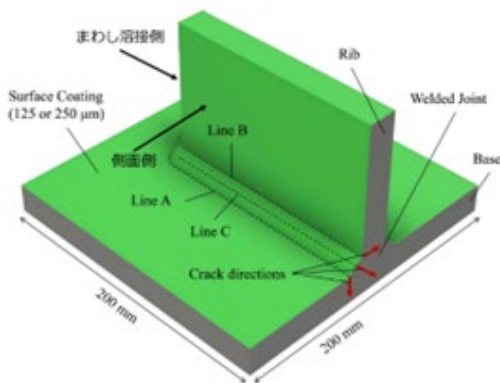
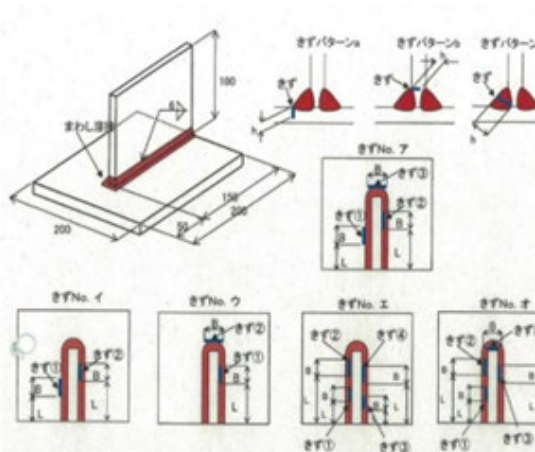


図 3.4-11 き裂試験体

それぞれでクラスタを形成していた。このため、き裂と判別するための信号強度の閾値が求めれば、定量的にき裂と判断できることを表している。

差分磁場ベクトルの信号強度とき裂深さについて図3.4-13に示す。ただし、健全部においてはき裂の深さを0mmとしてプロットしている。き裂の深さと強度に相関がみられ、ある閾値を設定し、閾値以上の個所ではき裂と判定できることを示している。125 μmと250 μmの2種類の膜厚で同様の傾向が得られた。しかし、特に浅いき裂に対しては健全部と同程度の信号強度となる場合がある。このため、き裂を判定するための閾値により、見逃し(FN, False Negative)や誤検知(FP, False Positive)が多くなる可能性がある。そこで、次に説明する混合行列(Confusion Matrix)とROC(Receiver Operating Characteristic)曲線の考え方を導入し、最適な閾値を求めた。

### 3.4.4 き裂判別のための閾値

図 3.4-14 はある閾値による判定結果の例を示している。この閾値によって求められた FN, FP 及び TN(True Negative), TP(True Positive)は、表 3.4-1 の混合行列として整理できる。閾値を変えることにより、混合行列の値も変化していく。閾値を上げていくと、誤検知(FP)は小さくなるが、見逃し(FN)が

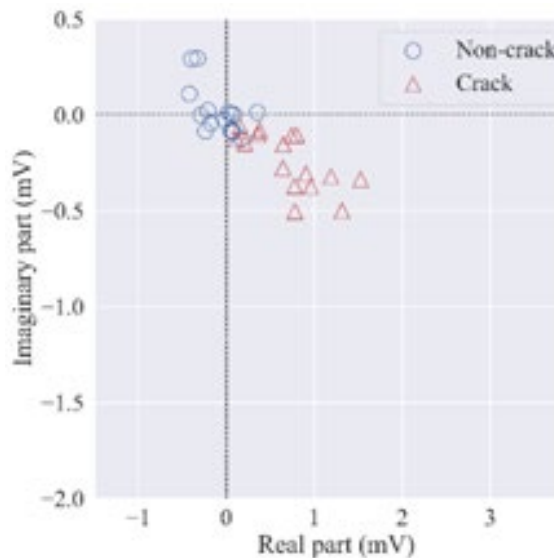


図 3.4-12 健全部とき裂部の差分磁場ベクトル

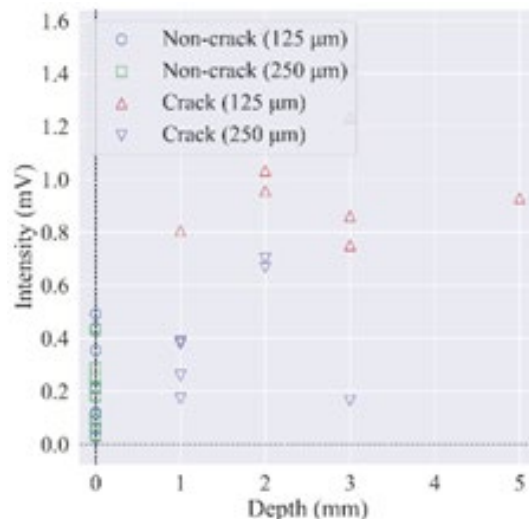


図 3.4-13 差分磁場ベクトルの強度とき裂深さの関係 (側面 Line A)

大きくなる。一方で、閾値を下げると真陽性(TP)は大きくなるが、誤検知(FP)も多くなってしまう。したがって、最適な閾値を選択する必要がある。ここで、混合行列の値を用いて、真陽性率(TPR, True Positive Rate)と偽陽性率(FPR, False Positive Rate)は次の式で表すことができる。

$$\text{True Positive Rate (TPR)} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{False Positive Rate (FPR)} = \frac{FP}{FP + TN}$$

閾値の値を変化させると、TPR と FPR の値も変化する。この TPR を横軸、FPR を縦軸にとり、閾値を変化させプロットしていった曲線が ROC 曲線であ

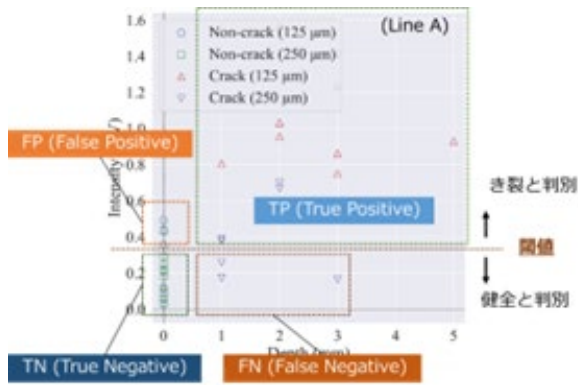


図 3.4-14 閾値による判定結果の例 (側面 Line A)

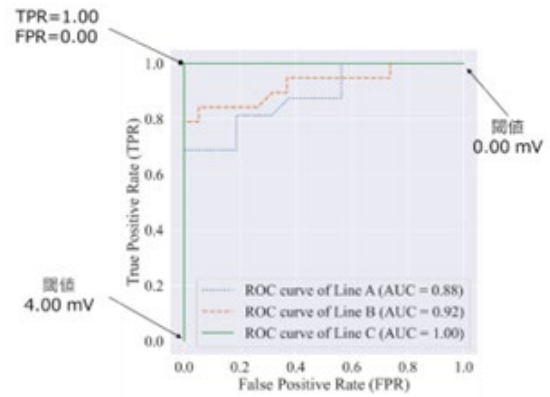


図 3.4-15 ROC 曲線(側面)

表 3.4-1 混合行列

混合行列 Confusion Matrix		判別結果	
		き裂	健全
実際の状態	き裂	TP	FN
	健全	FP	TN

表 3.4-2 各き裂パターンの閾値と TPR 及び FPR(側面)

Line	閾値 (mV)	TPR	FPR
A	0.37	0.81	0.18
B	0.53	0.84	0.05
C	0.34	1.00	0.00

る。図 3.4-15 は閾値を 0.00 mV から 4.00 mV まで変化させ描かれた ROC 曲線(側面)である。プロットされているデータは、試験体側面におけるき裂パターン a(溶接部の下部, Line A), パターン b(溶接部の上部, Line B), パターン c(溶接部の中央, Line C)の 3 通りである。ここで、ROC 曲線下面積(AUC, Area Under the Curve)も性能評価の 1 つの指標であり、1.00 に近いほど高精度である。き裂パターン a, b, c における AUC はそれぞれ 0.88, 0.92, 1.00 であり高精度に近い中精度、または高精度といえる。き裂と判別するための閾値を変化させていき、ROC 曲線を描く途中で、TPR=1.00, FPR=0.00 の点から ROC 曲線との距離が最小となる時の閾値を、最適な閾値として求めることができる。表 3.4-2 は求められた閾値とその時における TPR 及び FPR である。

側面側と同様に、図 3.4-16 にまわし溶接部側の ROC 曲線を示す。また、表 3.4-3 に ROC 曲線により求めた閾値を併せて示す。まわし溶接部では、すべての Line において AUC が 1.00 となった。これは、き裂を正確にすべて検出できたことを示している。

### 3.4.5 健全部の設定方法

上述の通り、き裂のない健全部の信号とき裂部の信号の特性を比較することで、き裂の検出が可能となることを示した。一方、検査の基準となる健全部信号については、その設定方法が十分に検討できていない。そこで、検査の基準となる健全部信号の取得方法の検討を目的に、測定対象の形状や測定位置が信号特性に及ぼす影響を明らかにするための基礎的実験を実施した。

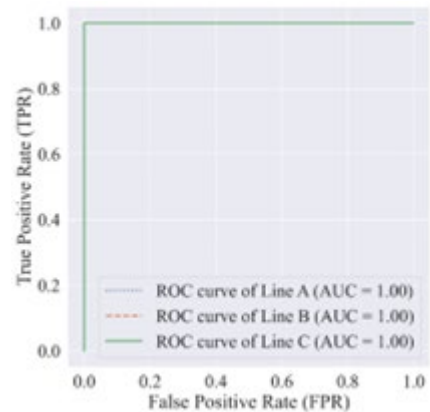


図 3.4-16 ROC 曲線(まわし溶接部)

表 3.4-3 各き裂パターンの閾値と TPR 及び FPR(まわし溶接部)

Line	閾値 (mV)	TPR	FPR
A	0.43	1.00	0.00
B	0.71	1.00	0.00
C	0.28	1.00	0.00

本実験に使用した供試体は図 3.4-11 に示すものと同じである。本実験に使用した測定プローブを図 3.4-17 に示す。ここでは、健全部の基本的な信号特性を得ることのみを目的とし、図 3.4-9 に示すプローブではなく旧式のプローブを用いた。溶接部を挟み込むように、基板に近い下部 Sensor とガセットプレートに近い上部 Sensor の 2 つが搭載されている。2 体の C 塗装系供試体について、印加電流 100 mA、周波数 1~10 Hz まで 1 Hz ずつ変化させ測定を行った。測定位置を図 3.4-18 に示す。き裂から 20 mm、まわし溶接部から 24 mm 離れた直線の部位を健全部（直線部①）として定義した。また、き裂が存在する部位に対し、ガセットプレートを挟む裏側（き裂裏）と、まわし溶接部を測定位置として設定した。直線部①の裏側に位置する直線部②でも測定を行った。測定された信号を複素数に拡張し、信号強度と定義した。位相ずれを含む項を取り出し、複素数平面にプロットする。その結果を各測定条件の 1 Hz の結果でオフセットし、各周波数のプロットと原点との距離を信号強度と定義した。ここでは、周波数 10 Hz を対象に、特定の測定位置における信号強度を基準位置の信号強度で除した「信号強度比」を評価指標とした。各測定位置における信号強度比を図 3.4-19 に示す。信号強度比の基準位置は直線部①としている。直線部②の測定結果として、上部 Sensor では 0.98、下部 Sensor では 0.90 の信号強度比が得られた。直線部どうしの比較であっても、溶接ビードの形状や塗膜厚さのばらつきにより信号強度比には 10%程度の差が生じた。

き裂裏あるいはまわし溶接部の信号強度比は直線部②に比べ大きくなる傾向が確認された。これらの位置は基準信号を設定する健全部として適さない可能性を結果は示唆している表 3.4-4 に示す 4 か所の人工き裂に対し測定を実施した。健全部は直線溶接部で裏側にき裂が存在しない位置に設定した。測定結果を図 3.4-20 に示す。上部 Sensor および下部 Sensor とともに信号強度比は 1.1 以上となった。これは、き裂から発生する漏洩磁束により、き裂部の信号強度が増加したためと考えられる。

本実験の範囲では、所定の条件で健全部を設定し、健全部に対する測定位置の信号強度比の傾向に注目することで、溶接部のき裂が検出できる可能性が示唆される。き裂の深さや長さや信号強度比との定量的関係や、塗膜厚さが信号強度比に及ぼす影響などが、検出精度向上のために必要な今後の検討課題と考える。

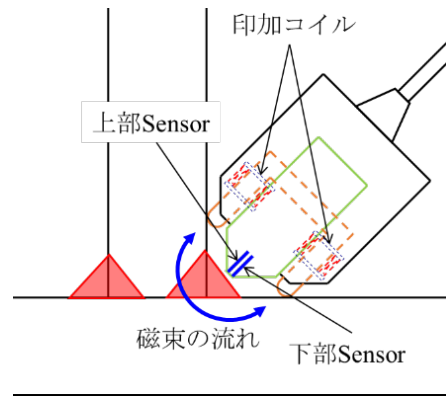


図 3.4-17 測定用プローブ

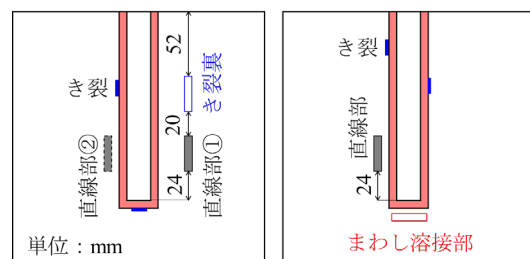


図 3.4-18 測定位置

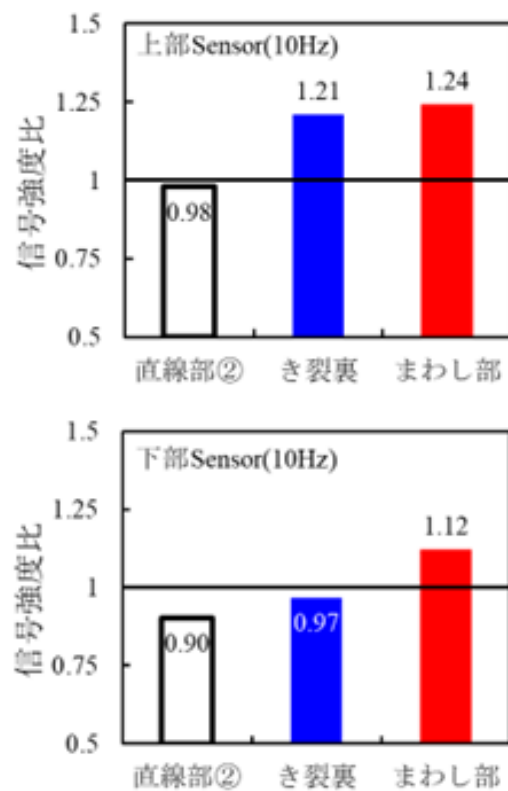






図 3.4-19 測定位置による信号強度比の比較

表 3.4-4 き裂寸法

	No.	き裂深さh (mm)	き裂長さL (mm)	塗装系
	1	1	5	C
	2	1	8	A
	3	2	8	A
	4	3	10	C

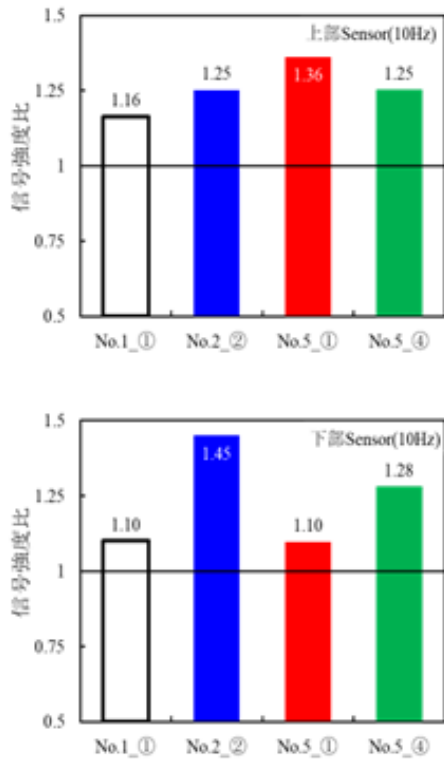


図 3.4-20 測定位置による信号強度比の比較

## 第4章 実験結果から得られた所見

### 4.1 水中部の損傷の検出

ELECT装置の改良としては、磁気センサプローブを防水にすることと、磁気センサプローブと装置本体をつなぐケーブル長を長くすることにより、水中部の損傷の検出において、検査装置自体は陸上部で操作できるようになった。ここで、水中部の検出における本質的な技術課題は、付着物を取り除かなくても迅速な検出ができるようにするため、付着物によって生じる磁気センサプローブと検査対象の鋼構造物との間の距離、つまりリフトオフによる変動の改善が必要であった。リフトオフ変化により印加磁場が広がり、検出信号である磁場の強度と位相が変化することが分かった。この強度と位相変化は印加コイルの大きさを大きくすることにより抑えられることを明らかにした。この知見をもとにコイル径26 mm  $\phi$  の円形型の小型磁気センサプローブ、コイル径が四角形状の70 mm  $\times$  70 mmの中型磁気センサプローブ、同じく四角形状の100 mm  $\times$  100 mmの大型磁気センサプローブを開発した。これらのうち中型及び大型磁気センサプローブにおけるリフトオフがそれぞれ50 mmと80 mmまでは位相が一定で安定していた。また、それ以上のリフトオフでは位相の補正が必要であった。また、磁場強度とリフトオフの関係からリフトオフつまり付着物の厚みもモニターできるようにした。このように印加コイルの大きさと位相の変化の関係を明らかにして、付着物が厚い場合でも板厚を検査でき、同時に検査時の付着物の厚みの状態も検査結果として記録できるようになった。鉄鋼材には多くの種類があり、それぞれの電磁気特性が異なり、同じ鋼材でも熱処理などにより変化する。このため、磁気信号である位相が変化するため、位相から板厚推定するキャリブレーション式が変化する。この位相変化が金属材料の導電率 $\sigma$ と透磁率 $\mu$ の積で決まることを明らかにした。これにより、検査の最初で検査対象の鋼材の $\sigma\mu$ を同じ検査法で測定すれば、検査対象の最適なキャリブレーション式を用いることができることを明らかにした。潜水士によるブロービングの代わりに、陸上部から機械アームを用いて検査する方法も検討して、磁気プローブを安定にすることができたので、検査誤差を少なくできることを明らかにした。

### 4.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出

埋設部や閉じ断面の損傷の検出における実験結果やフィールドテストから得られた所見を以下の通りである。照明柱や標識柱の計測の際の精度確保のために、大きな問題となる自動車の磁気ノイズの影響

の調査を行った。自動車の磁気ノイズの周波数成分を解析することにより、周波数3Hz以下の磁気ノイズが発生することが分かった。地際下腐食検査において自動車の磁気ノイズの周波数帯域は、非常に低い数Hzの帯域であるので、この周波数帯域をさけて測定すれば影響がないことが明らかとなった。標識柱や照明柱の板厚に影響されない腐食評価として検査データの規格化をすることにより、腐食度を表すことができた。これにより、腐食による減肉率を磁気検査で求めることができるとともに、正常部の板厚を従来法によって測定することにより、残存板厚を求めることができるようになった。標識柱や照明柱などの鋼管断面欠損部近傍の信号強度の特性を示し、腐食や欠損による信号強度の違いを明らかにすることができた。鋼製橋脚のような厚板の部材に対しても、腐食による信号強度の低下とその条件を示した。また、厚板の部材であっても腐食裏面から腐食を検出できることを示した。実際の照明柱・標識柱に対する計測を実施し、掘削することなく著しい損傷の検知が出来た。また、軽微な損傷や健全状態に対しては、掘削して超音波検査した結果とほぼ同等の結果が得られた。リブに疲労損傷が発生していた場合でも、ELECTを用いてスクリーニングできる条件を明らかにした。

### 4.3 アンカーボルトの腐食検出

腐食による断面欠損、および腐食生成物を生じた鋼棒を模擬した解析モデルに対して動磁場解析を行い、鋼棒に流れる渦電流や磁束密度などに着目することで、これらが電磁場応答に与える影響を評価した。その後、断面欠損を切削加工により模擬した鋼棒、および塩水による乾湿繰り返し試験により腐食生成物を生じた試験体に対して評価実験を行い、アンカーボルトの長軸方向(z方向)の磁気スペクトルの差異に着目することで、欠陥長さ50mm程度までの腐食の有無、および腐食範囲が推定できる可能性があることを示した。さらに、附属物が本手法の腐食評価に与える影響を検討するため、腐食、あるいは減肉した附属物のあるアンカーボルトを模擬した解析モデルに対して動磁場解析を行い、検出性能上の課題を抽出した。その結果、附属物を流れる渦電流の影響で磁気スペクトルの変化が小さくなり、附属物の影響を低減する励磁コイル、および検出コイルの最適な配置条件の評価をさらに進める必要があることが明らかになった。このため、実構造物に適用する計測ヘッドを製作し、励磁コイル、および検出コイルの最適な配置条件の評価を可能とした。今後、本計測ヘッドを用い、実構造物を模擬した供試体への適用性評価を進めていく。また、これらを性能カタログとして提案し、定期点検として施行していくための点検手順を今後検討していく。



## 4.4 溶接部のき裂の検出

### 4.4.1 き裂検出性能の評価

表 3.4-2 に示される閾値によってき裂判別を行い、き裂検出精度を評価した。き裂検出精度を定量的に示すため、次の式で表される 4 つの指標を用いた。正解率(Accuracy)はすべての検査結果に対して正確に健全かき裂かを判別できた結果の割合を示す。適合率(Precision)はき裂と判別した結果のうち、正しくき裂であると判別した結果の割合を示す。再現率(Recall)は実際にき裂であるもののうち、正しくき裂と判別した結果の割合を示す。特異率(Specification)は実際に健全であるもののうち、正しく健全と判別できた結果の割合を示す。これらの値はすべて 1.00 に近いほど高性能である。

図 4.4-1 は側面のそれぞれのき裂パターンにおける 4 つの評価指標である。どのパターンのき裂においても 0.80 より大きく、検出精度は高いといえる。特にパターン c(溶接部の中央, Line C)においてはすべての評価指標において 1.00 と、すべてのき裂が正確に検出できたことを示している。ただし、まわし溶接のき裂は ROC 曲線における AUC が 1.00 であることから、必然的に 4 つのすべての評価指標で 1.00 となるため、図は省略している。

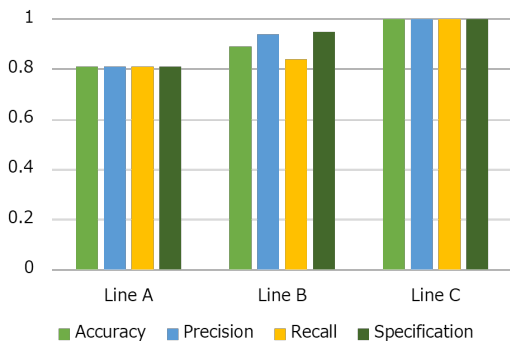


図 4.4-1 各き裂パターンの検出性能評価指標 (側面)

### 4.4.2 検出できなかったき裂

図 4.4-2～図 4.4-4 は、それぞれのき裂パターンにおける信号強度とき裂深さの関係である。同時に、ROC 曲線により求めた閾値を示している。パターン a(図 4.4-2)では深さ 1 mm のき裂が 2 箇所、深さ 3 mm のき裂が 1 箇所検出することができなかった。また、パターン b(図 4.4-3)では、深さ 1 mm のき裂が 2 箇所、深さ 2 mm のき裂が 1 箇所検出することができなかった。一方でパターン c(図 4.4-4)ではすべての深さのき裂を検出することができた。検出ができなかったき裂は、主に 1 mm の深さのものであった。また、浅いき裂を検出するためには、閾値を下げることで、誤検知が多くなるが、見逃しを少なくすることができることが分かった。

また、参考のために、側面の測定結果と同様に、

まわし溶接部側の測定結果と閾値の例を図 4.4-5～図 4.4-7 に示す。ROC 曲線により求めた閾値より、き裂を正確に判別できることを表している。

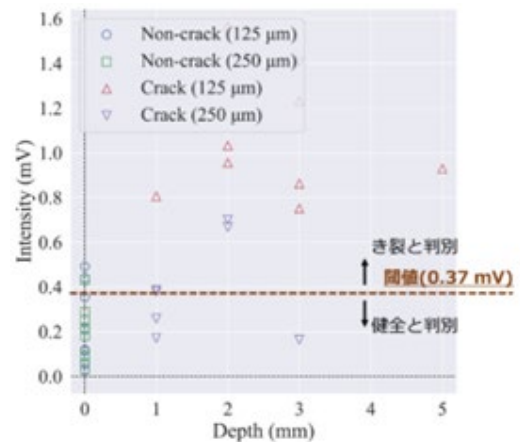


図 4.4-2 ライン A(側面)におけるき裂の深さと強度の関係及び閾値

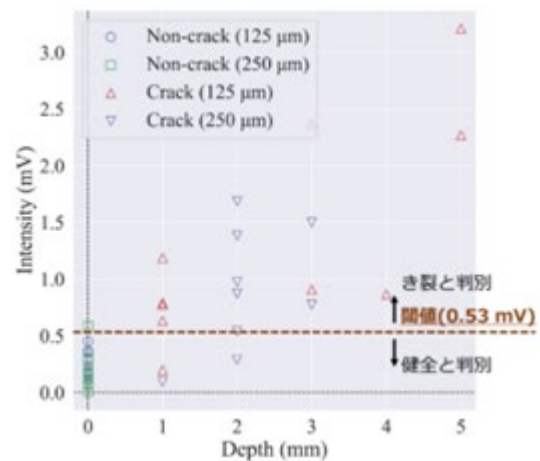


図 4.4-3 ライン B(側面)におけるき裂の深さと強度の関係及び閾値

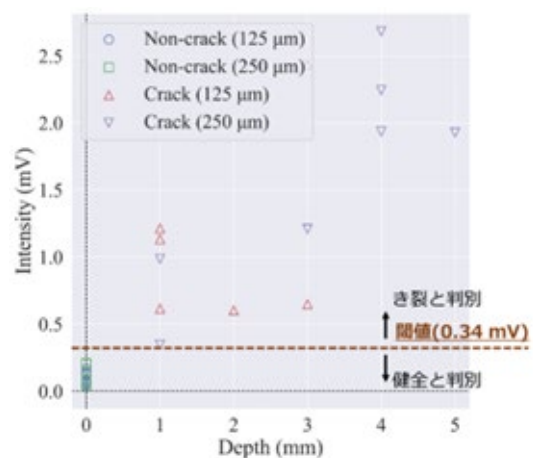


図 4.4-4 ライン C(側面)におけるき裂の深さと強度の関係及び閾値

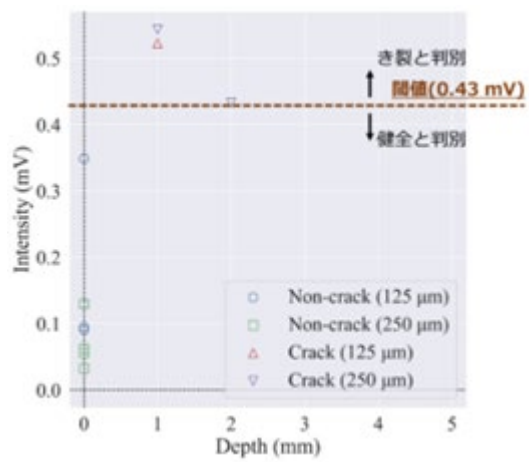


図 4.4-5 ライン A(まわし溶接部)におけるき裂の深さと強度の関係及び閾値

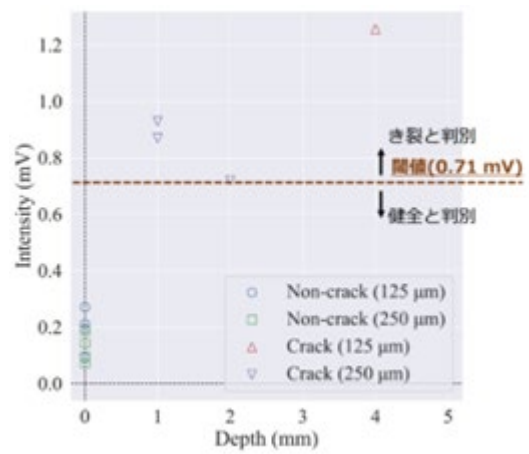


図 4.4-6 ライン B(まわし溶接部)におけるき裂の深さと強度の関係及び閾値

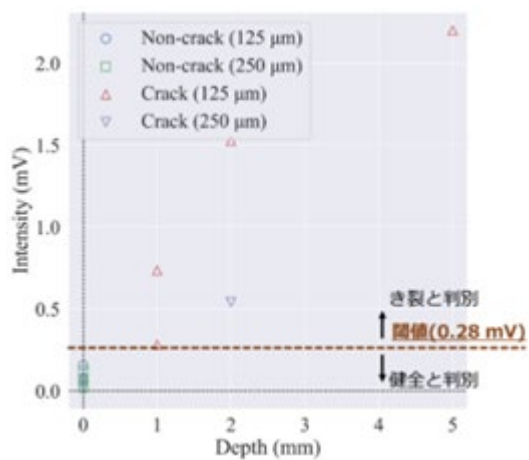


図 4.4-7 ライン C(まわし溶接部)におけるき裂の深さと強度の関係及び閾値

# 第5章 まとめ（今後の道路施策への提案）

## 5.1 水中部の損傷の検出

水中部の鋼構造物の腐食による減肉を、従来おこなわれていた生成物や錆などの付着物を取り除くケレン処理なしに、そのまま検査できる方法を開発することができた。この方法を用いた検査の流れとしては、(1)鋼材の種類によって電磁気特性が異なるために、検査前の準備として超音波あるいはゲージなどにより板厚が分かっているところを磁気検査して、鋼材の電磁気特性を決定する。これより、検出磁場の位相と板厚の関係を示すキャリブレーション式を決定する。この工程は超音波検査での検査対象の鋼材での音速と板厚の関係からキャリブレーションする方法と同様である。(2)検査する鋼材のケレン処理をしないで、そのままの状態での磁気検査を行うことにより、付着物の厚みと推定板厚を決定する。検査時間としては板厚が厚い、例えば20mmの時では低い周波数を使うため、最も長くても一か所1.4秒で3回の平均をとると約4秒程度となる。このため、検査時間は計測時間ではなく、目的箇所への潜水土のプロービングの準備の時間が律速となる。このように多くの時間を要していたケレン処理が不要となるので、大幅な検査時間の短縮と検査費用の低減が期待される。検査形態としては、潜水土と陸上部での装置のオペレーションが基本となる。この方法は令和4年度中に性能カタログやNETIS登録する準備を進めているので、近いうちに港湾や、河川、用水路などの鋼構造物の点検として用いてもらえるように計画している。また、次世代の検査方法として、護岸から磁気センサプローブを設けた機械アームを水中に挿入して目的の箇所を検査する方式も試すことができたので、潜水土なしで完全に陸上から検査できる方法も近い将来に実現できると考える。

## 5.2 埋設物や閉じ断面の損傷の検出

目視が困難な、埋設物や閉じ断面の損傷に対して、自動車の磁気ノイズの影響を受けないELECTの計測基準を明確にした。また、照明柱や標識柱の腐食による断面欠損に対して、損傷の程度による信号強度比の評価を行った。さらに、鋼製橋脚で用いられるような厚板の損傷に対しても、損傷部の表裏からのELECTによる磁気検査による信号強度比の評価を行った。その結果、地際プローブを用いたELECTによる磁気検査によって、損傷が生じた場合に信号強度が低下すること、板厚に影響されない腐食評価として検査データの規格化をすることにより、腐食度を表すことができた。また、実際の実際の照明柱・

標識柱に対して、掘削することなく著しい損傷の検知が出来ることを示した。さらに、リブに疲労損傷が発生していた場合でも、ELECTを用いてスクリーニングできることが明らかになった。

標識柱・照明柱の計測の地際下計測では、開口部の下の空間が狭隘となっている場合があり、開発したELECTの地際用プローブを挿入することができなかった。このような箇所の磁気計測を可能とするために、プローブの小型化が今後必要と考えている。

## 5.3 アンカーボルトの腐食検出

供用中のアンカーボルトの腐食検出を附属物が設置された状態で実施できる方法の基礎評価を行うことができた。また、実構造物での評価のため、実構造物に適用する計測ヘッドを製作し、励磁コイル、および検出コイルの最適な配置条件の評価を可能な構造とした。今後、具体的な構造物を想定した供試体、および実構造物における評価を進めていく。現状では、アンカーボルトの長軸方向(z方向)の磁気スペクトル、および1Hzにおける信号強度の差異に着目することで、欠陥長さ50mm程度までの欠損の有無、および欠損範囲が推定できる可能性があることを明らかにした。

## 5.4 溶接部のき裂の検出

溶接部のき裂を模擬した試験体を製作し、き裂の長さ、深さなどの違いによって、磁気測定応答を把握し、応答の特徴がより顕著に評価できる磁気非破壊計測およびその磁気センサプローブの開発を行った。開発した装置の有効性をフィールド試験において検証した。装置の検出精度、適用範囲などの性能をカタログとしてまとめ上げる流れとなっている。

一般的な溶接部の塗膜下き裂の検出については、本技術の適用性が検証できている。すなわち、塗膜厚さが2mm以下であり、き裂のない健全部位の参照信号を取得できる溶接部に対しては、実際の点検業務への利用が想定される。また、点検業務に本技術を利用するケースを蓄積することでデータを蓄積し、信号パターンとき裂の関係に関する情報を収集することで、本技術の高精度化に資する知見が得られることも期待される。

# 参考文献

- 1) 株式会社ジェイファストウェブサイト(閲覧日2022年4月22日)
- 2) 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, 一般財団法人沿岸技術センター, 2018
- 3) 白井一洋, 平林丈嗣, 松本さゆり, 超音波非接触式肉厚測定装置の計測精度向上と現地試験, 港湾航空技術研究所資料, No.1311, 2015
- 4) K. Tsukada, Y. Majima, Y. Nakamura, T. Yasugi, N. Song, K. Sakai, T. Kiwa, Detection of Inner Cracks in Thick Steel Plates Using Unsaturated AC Magnetic Flux Leakage Testing with a Magnetic Resistance Gradiometer, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, No. 11, 2501305, 2017
- 5) Kenji Sakai, Koji Morita, Yuta Haga, Toshihiko Kiwa, Katsumi Inoue, and Keiji Tsukada, Automatic Scanning System for Back-Side Defect of Steel Structure Using Magnetic Flux Leakage Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, No. 11, pp. 6202103-1-3, 2015
- 6) A. Sophian, G. Tian, and M. Fan, Chin. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review, *J. Mech. Eng.*, 30, 500, 2017
- 7) 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, 2016
- 8) 宋楠楠: 金属構造物の低周波磁気非破壊検査方法の研究開発, 博士論文, 岡山大学, 2017
- 9) Takayuki Hayashi, Hironobu Yamada, Toshihiko Kiwa, 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*, Vol.103, No.7, pp.07E923-1-3, 2008
- 10) 古海寛, 保温材や防食材上からの肉厚測定 (INCOTEST), 検査技術, 日本工業出版, 2005
- 11) 古海寛, 保温材上や防食材上からの肉厚測定-INCOTEST-, 非破壊検査, vol.55, 2006
- 12) 田井政行, 澤田知幸, 下里哲弘, 日和裕介: 無線加速度センサを用いた照明柱の疲労損傷度推定法の提案, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.75, No.1, pp13-20, 2019.
- 13) 細見直史, 山田隆明, 貝沼重信: 地際腐食の非接触・非破壊検査システム—バウンダリーチェッカー—, 建設機械施工, Vol.66, No.7, pp.52-56, 2014.
- 14) 細見直史, 入部孝夫, 貝沼重信, 山田隆明, 永野徹, 片山英資: 鋼部材のコンクリート地際における残存板厚の評価・予測(その1)—地際腐食部の平均腐食深さに基づく残存板厚の推定手法—, 土木学会第68回年次学術講演会概要集, I-220, pp.439-440, 2013
- 15) 入部孝夫, 細見直史, 貝沼重信, 山田隆明, 永野徹, 片山英資: 鋼部材のコンクリート地際における残存板厚の評価・予測(その2)—鋼製橋脚基部の腐食損傷調査と残存板厚の簡易評価と予測—, 土木学会第68回年次学術講演会概要集, I-221, pp.441-442, 2013
- 16) Keiji Tsukada, Shunki Wakabayashi, Minoru Hayashi, Taisuke Saitoh, Takuya Tomioka, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Yozo Fujino, Magnetic measurement of corrosion in a steel structure using extremely low-frequency eddy current testing without surface treatment, Fifth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 2019
- 17) K. Tsukada, M. Hayashi, T. Kawakami, S. Adachi, K. Sakai, T. Kiwa, T. Ishikawa, M. M. Saari, K. Hori, K. Hisazumi, T. Tomonaga, Magnetic thickness measurement for various iron steels using magnetic sensor and effect of electromagnetic characteristics, *AIP Advances*, vol 12, pp. 035109-1-4, 2022
- 18) Pang-jo Chun, Keiji Tsukada, Masahiro Kusumoto, Kazuaki Okubo, Investigation and repair plan for abraded steel bridge piers: case study from Japan, *Forensic Engineering*, Vol. 172, Issue FE1, pp.11-18, 2019
- 19) Keiji Tsukada, Takya Tomioka, Shunki Wakabayashi, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Magnetic Detection of Steel Corrosion at a Buried Position Near the Ground Level Using a Magnetic Resistance Sensor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, 6202104, 2018
- 20) 齊藤大介, 小嵐愛子, 林実, 堺健司, 紀和利彦, 塚田啓二, 自動車により発生する環境磁気雑音の評価, *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, 5, 10-15, 2021
- 21) 大西泰生, 石川敏之, 塚田啓二: 高感度磁気非破壊検査による疲労き裂の検出の試み, 構造工学論文集, Vol.67A, 2021
- 22) 上杉潤矢, 服部晋一, 寺澤広基, 鎌田敏郎, 塚田啓二: 高感度磁気センサを用いた低周波交流磁場応答の位相検波によるコンクリート中アンカーボルトの腐食検出に関する基礎的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.21, p.343-348, 2021
- 23) Keiji Tsukada, Minoru Hayashi, Yoshihiro Nakamura, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, Small eddy current testing sensor probe using tunneling magnetoresistance sensor for detection of cracks in steel structure, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, 202205, 2018

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

成果報告レポート

No.31-7

高感度磁気非破壊検査による目視不可能な個所の損傷の検出  
についての技術研究開発

2022-5