

博士論文

各種鋼構造物に対応した
磁気非破壊検査システムの開発

Development of magnetic non-destructive
testing system for various steel structures

2022年3月

林 実

岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科

目次

1	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	4
1.3	本論文の構成	4
2	磁気センサと計測システム	7
2.1	磁気センサ	7
2.2	磁気センサを用いた非破壊検査	9
2.3	磁気信号の解析手法	14
2.4	ロックインアンプによる交流信号の同期検波	16
2.5	ADC による交流信号の検波	17
2.6	計測プログラムとパラメータの設定	20
3	複雑形状の鋼構造物と細部の検査	23
3.1	渦電流探傷法の適用と課題	23
3.2	複雑な鋼構造物の例（鋼床版）	25
3.3	差動型 ECT 探傷センサプローブ	25
3.4	計測システム構成と計測	27
3.5	シミュレーションによる渦電流と磁場分布	29
3.6	鋼プレートのき裂に対する測定結果	31
3.7	差分ベクトルによるリサージュ波形	36
3.8	複雑な構造物に生じたき裂に対する計測	42
3.9	結論	45
4	コンクリート中の鉄筋破断検出	48
4.1	コンクリート構造物の鉄筋検査	48

4.2	鉄筋破断検出用のセンサアレイプローブ	49
4.3	計測結果と磁場信号の解析	52
4.4	センサアレイによる漏洩磁場の画像化	55
4.5	結論	59
5	溶接部塗装下のき裂検査	60
5.1	鋼構造物溶接部のき裂検査	60
5.2	橋梁におけるき裂の発生箇所の例	62
5.3	塗装された T 字溶接接合サンプル	63
5.4	溶接部用のセンサプローブ	65
5.5	信号処理及び測定信号の解析	67
5.6	混合行列と ROC 曲線による閾値決定とき裂判別	75
5.7	センサプローブの性能評価	78
5.8	結論	80
6	結論	81
6.1	本研究で得られた成果	81
	謝辞	84
	参考文献	86
	研究業績	95

序論

インフラ施設の老朽化が世界中で問題となっている。特に日本では、耐用年数の目安とされる 50 年を超えるインフラ施設が急増している。このため、インフラの老朽化による問題が急激に顕在化していくことが予想される。老朽化による崩落や倒壊事故を未然に防ぐためには、インフラ施設を定期的に検査することによって適切に維持管理及び更新していく必要がある。インフラ施設の中でも鋼構造物は身近に多数存在する。このため鋼構造物に対する効率的な検査技術が求められている。

§ 1.1 研究背景

道路や橋梁における崩落事故の発生など、インフラ施設の老朽化が世界中で問題となっている。近年の大きな事故では、2007 年にアメリカのミネソタ州で発生したミネアポリス高速道路のミシシッピ川橋崩落事故 [1] や、2018 年にイタリア北部ジェノバで発生したモランディ橋 [2] の崩落事故がある。インフラ施設の耐用年数は約 50 年と言われているが [3]、ミシシッピ川橋やモランディ橋は崩落当時、建設後運用から 50 年以上が経過しており、メンテナンスが必要とされていた。さらにインフラ施設の老朽化は、都市建設が急速に進む開発途上国においても潜在的な課題である。

特に日本国において、インフラ施設の老朽化は早急に取り組む必要がある課題である。日本国におけるインフラ施設の多くは 1960 年代の高度経済成長期を皮切りに 2000 年までの期間に集中的に整備された。このため、今後 20 年でインフラ施設の耐用年数とされる建設後 50 年を超える施設の割合が加速度的に増加していくことが見込まれている。国土交通省の調査によると、例えば道路橋、河川管理施設において 2033 年までに 6 割以上の施設が建設から 50 年を経過するとされている [4]。従って、インフラの老朽化という問

題が急激に顕在化していくことが予想される。そこで、インフラ施設を適切に維持管理、更新することで安全性を確保し、倒壊や崩落事故を未然に防ぐことが求められている。

インフラ施設の事故を未然に防ぐための維持管理や更新は安全性確保の他に、経済的な観点からもメリットが大きい。国土交通省の推計によると、インフラ施設の機能や性能に不具合が生じてから修繕等の対策を講じる「事後保全」にかかる費用は2023年は1年間で7.6兆円から8.5兆円、2048年には10.9兆円から12.3兆円とされている [5]。日本国の令和3年度当初予算における一般会計歳出額のうち公共事業関係費の金額は6兆695億円である [6]。つまり、公共事業関係費を全てインフラの維持管理・更新に当てても足りず、2048年にはさらに2倍程度必要という費用の大きさである。そこで、施設の機能や性能に不具合が発生する前に、修繕等の対策を講じる「予防保全」の考えが有効であると考えられている。「予防保全」の考えに従いインフラの維持管理・更新を行った場合、2023年は1年間で5.5兆円から6.0兆円、2048年には5.9兆円から6.5兆円であり、「事後保全」よりも合計3割以上抑えられると推計されている [5]。従って、インフラ施設を適切に検査し、不具合が起こる前にメンテナンスを施すことで、インフラの長寿命化が求められている [7]。しかし一方で、「予防保全」のために、インフラ施設の検査を行うための人手や技術者の不足が深刻な問題である。例えば、日本国における道路橋だけでも96万橋（内建設年度不明が約23万橋）と非常に数多く存在する [4]。適切に検査やメンテナンスされること無しに危険な状態のまま放置されているものも少なくない。以上のように、維持管理・更新にかかる費用や検査技術者の不足の観点から、安価で効率的に運用中のインフラ施設を検査できる非破壊検査法が必要とされている。

インフラ施設の中でも鉄鋼構造物は身近に数多く存在する。身近な鉄鋼構造物を挙げれば、鉄道レールや鋼橋、標識柱や照明中、歩道橋や橋梁、漁港施設などがあげられる。さらに、石油や天然ガスのプラントや輸送管など様々なインフラ施設に鋼材料が多く用いられている。これらの構造物は、老朽化による腐食や疲労によるき裂といった欠陥が問題となっている [8-11]。このため、鋼構造物の非破壊検査技術は非常に重要である。

現状の鋼構造物に対する検査は通常、非破壊検査の1つである目視検査 (Visual Testing) によって行われる。目視検査は最も手早く検査ができる一般的な手法である。しかし一方

で、検査技術者の経験や技量により検査結果が大きく左右されることが多い。また当然のことであるが、目視できない箇所に対しては検査が不可能である。目視検査の他の検査手法としては、超音波検査 (UT, Ultrasonic Testing) と磁粉探傷検査 (MT, Magnetic Particle Testing) が現場で多く用いられている。UT は超音波を試験対象に入射すると欠陥によって反射波が発生する。そこで欠陥による反射波を計測することで欠陥を検出する手法である。MT は検査箇所を強力な磁化器により磁化させながら蛍光磁粉を吹き付けることで欠陥に磁粉を吸着させる。次に、ブラックライトで検査箇所を照らし、欠陥模様を浮き上がらせるという手法である。しかし、構造物の多くは景観や構造物自体の保護のための塗装や、コンクリートといった障害物に覆われていることが多い。また、屋外に長年放置されていることから、錆や汚れが付着している構造物がほとんどである。UT の場合、超音波を伝えるために対象物との完全な接着が必要であることから、汚れにより検査ができない場合がある。また、塗膜の厚さがエコーに影響を与えることから、正確な評価ができない場合がある [12]。さらに、超音波検査において表面から深さ 5 mm 程度の領域は不感帯 (デッドゾーン) と呼ばれ、表面近傍の検査が困難な領域である [13,14]。以上のように、UT を用いた鋼構造物の検査は制限が大きい。MT の場合においても、塗装などの障害物の除去や復旧が必要であり [15]、この工程に多くの時間が取られているのが現状である。

そこで、磁場を用いた検査方法である渦電流探傷法 (ECT, Eddy Current Testing) と漏洩磁束法 (MFL, Magnetic Flux Leakage) がある。ECT や MFL などの磁気を用いた検査手法は、検査対象との接触が必要がない。このため、塗装やコンクリート、錆や汚れなどといった障害物の上からでも適用が可能である。また、高速で利用できる点もメリットの 1 つである。適用例としては、天然ガスや石油の貯蔵タンクや輸送管といった形状が比較的単純な鋼構造物の検査に用いられている。しかし従来の磁気探傷プローブは大きさや形状などの制約から、鋼構造物の端部や溶接部などの形状が複雑である箇所に対しては適用が難しかった。さらに強磁性体である鋼構造物は磁気ノイズの影響が大きく、磁気探傷法の適用が難しいという課題があった。

§ 1.2 研究目的

本研究の目的は、老朽化が進むインフラ施設を効率的に検査するための非破壊検査装置及び計測システムを開発することである。特に、コンクリートや塗装、錆や汚れといった障害物の影響を受けない磁場を用いる。磁場を応用し各種鋼構造物の形状や検査箇所最適化した磁気探傷センサプローブ、計測ソフトウェア及び信号の解析手法を開発することで、形状が特殊な鋼構造物や箇所に対して迅速な検査を可能にすることである。

§ 1.3 本論文の構成

本論文の第1章「序論」では、世界中で問題となっているインフラ施設の老朽化という社会課題に対して、「予防保全」の考えに従い適切に検査とメンテナンスをしていくことで、インフラ施設を高寿命化していく必要性について述べた。インフラの中でも鋼構造物は身近に数多く存在し、老朽化が進んでいくことから、鋼構造物を効率的に検査できる技術が求められていることについて述べた。

第2章「磁気センサと計測システム」では、磁気センサの種類と特徴、アプリケーションについて述べる。特に近年では、薄膜生成技術の発展により磁気センサの小型で高感度な磁気センサが実用化されている。様々な磁気センサが開発される中、磁気を用いた非破壊検査法にも応用されるなど用途が広がっている。そこで、磁気センサの磁気非破壊検査法への応用例について述べる。また、本研究では磁気センサによる出力信号の周波数解析を行っている。そこで、特定の周波数の信号を取り出すための、交流の検波手法及び信号処理手法について解説する。そして、本研究で用いた計測プログラムについてについて解説する。

第3章「複雑な形状の鋼構造物の細部の検査」では、著者らが開発したマイクロデバイスを用いたECTプローブについて述べる。ピックアップコイルは従来のECTのき裂検出に対して広く使われている。しかし、従来のECTでは鋼の透磁率の不均一性に起因する磁気ノイズの影響により、き裂信号の判別が困難である場合があった。また、構造物の

端部や溶接部といった細部や凹凸のある個所に対して適用が難しかった。そこで、磁気ノイズを軽減し細部の検査に対応するために、従来から用いられるピックアップコイルの代わりに、マイクロサイズのトンネル磁気抵抗素子 (TMR, Tunnel Magneto Resistance) を用いて小型の差動型 ECT プローブを開発した。本プローブにより計測した磁気信号を解析したところ、単一コイル内に設置した2つの TMR センサの差動検出により磁気ノイズを軽減できることが分かった。また、構造物細部の探傷検査の際に想定されるリフトオフ (センサプローブと構造物との距離) 変動によって発生するの中から、差分パラメータのリサージュ波形を用いてき裂信号の抽出する手法を検討した。

第4章「コンクリート上からの鉄筋破断の検出」では、異形鉄筋の破断を検出するための磁気探傷センサアレイプローブについて述べる。鉄筋コンクリート構造物において、コンクリートの引張応力を補強するために使われている。従って、コンクリート中の鉄筋の破断は、構造物自体の強度に影響するため検査する必要がある。しかし、コンクリート中の鉄筋を検査するためには、コンクリートを取り崩し鉄筋を目視できる状態にする「はつり出し」を行う必要があった。はつり出しによる検査は構造物に対してダメージが大きく、コンクリートの復旧も時間がかかる作業工程である。そこで、コンクリートの影響を受けない磁場を用いることで、コンクリート上から鉄筋破断を検出する手法が検討されている。しかし従来の磁気手法は、コンクリート上からの高リフトオフでの検査であることから、十分な磁気信号を検出するためには強力な磁化器が必要であった。また、単一のセンサによる計測では、コンクリート上からの見えない鉄筋に沿った広範囲のスキャンングが必要であった。そこで、従来の磁気手法と比べて省電力で検査が可能な不飽和交流漏洩磁束法 (USAC-MFL, Unsaturated AC magnetic flux leakage) を用いて、広範囲の磁場分布が計測可能な磁気探傷センサアレイプローブを開発した。開発したセンサプローブを用いて、高リフトオフ状況下で鉄筋破断の信号を計測解析し、コンクリート中の鉄筋破断をコンクリート上から手早く検出できる手法について検討した。

第5章「塗装上された鋼構造物溶接部のき裂検査」では、鋼構造物の疲労によって生じた溶接部のき裂を塗装上から検出するための磁気センサプローブについて述べる。橋梁や道路の鋼床版などの鋼構造物の溶接部に生じたき裂は広がり大きくなりやすく、早期に発

見ることが重要である。しかし、鋼構造物の多くは構造物自体及び景観保護のために塗布された塗装の除去が必要である。したがって、一般的に用いられている UT と MT では塗装の除去と復旧が必要であり、検査に時間を要していた。磁気を用いた手法である漏洩磁束法は塗装上からでも検査が可能であるが、溶接部といった形状が複雑であるものに対しては適用が難しい。また、透磁率の不均一性を軽減するために検査箇所を磁気飽和させる手法がとられている。このため、数テスラオーダーの非常に強い磁場を印加するための電源が必要であった。そこで省電力で検査可能な USAC-MFL を用いて、鋼構造物の溶接部形状に適合した磁気センサプローブを開発した。また、T 字型の溶接サンプルに対して計測を行い、き裂の検出性能を評価した。

磁気センサと計測システム

本章では、磁気センサと計測システムについて述べる。磁気センサは電化製品や輸送機など身の回りのあらゆるものに使われているなど、現代社会において不可欠なデバイスである。特に近年では、成膜技術の進歩により磁気センサの小型化と高感度化が進み、そのアプリケーションも広がっている。そこで磁気センサの種類及びアプリケーションについて述べる。また、磁気を用いた非破壊検査手法の原理を解説し、磁気計測システム及び基本的な信号の解析手法について述べる。

§ 2.1 磁気センサ

磁気センサは目には見えない磁場の大きさや方向を検知し電気信号（電圧や抵抗値）へ変換するデバイスである。磁気センサは電化製品や自動車といった日常生活の身近なところ [16–18] から、あらゆるものがインターネットに繋がる IoT(Internet of things) [19], 宇宙機や航空機 [20] といった最先端の科学技術まで使用され、現代社会における重要なデバイスの1つである。筆者の研究においても、磁気センサの非破壊検査への応用を検討している。そこで本章では、磁気センサの種類や特徴、及びアプリケーションについて述べる。

2.1.1 磁気センサの種類とアプリケーション

磁気センサはサーチコイル、超伝導量子干渉計 (SUQID, Superconductivity quantum interference device), 磁気抵抗 (MR, Magneto resistive) センサなど様々な種類が存在する。また、特に近年では薄膜生成技術や材料開発が進み、ホール素子、磁気インピーダンス (MI, Magneto Impedance) 素子、磁気抵抗 (MR, Magneto Resistive) 素子を利用した小型で高感度な磁気センサが実用化され、安定的な生産が可能となった [21, 22]。この

ため、ニーズに合わせた様々な磁気センサの製作や応用が広がっている [16]。磁気センサはこのように様々な種類があり、種類によって、感度やダイナミックレンジ、周波数特性が異なる (図 2.1, 図 2.2)。従って、磁気信号を計測するためには、計測したい磁気信号の特徴を考慮し適切な磁気センサを選択する必要がある。そこで、本節では代表的な磁気センサをピックアップし、特徴やアプリケーションについて述べる。

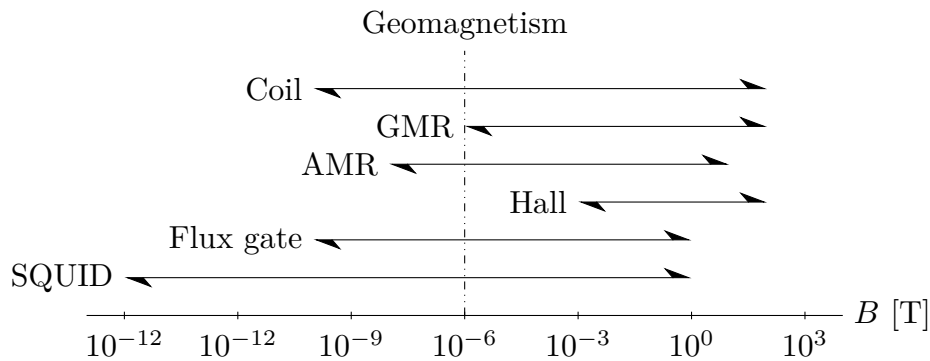


図 2.1 磁気センサの種類と感度

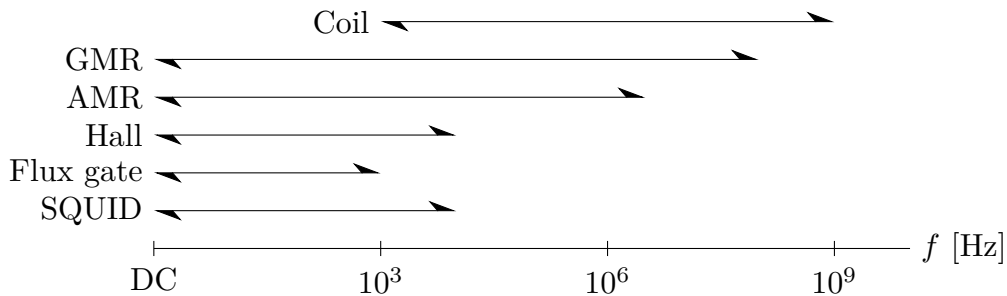


図 2.2 磁気センサの種類と周波数帯域

コイルは、最も原始的な磁気センサであり、M. Faraday の電磁誘導現象により発展した、導線を渦巻き状に巻いたものである。コイルは高周波領域において特に感度が高いことから、現代においても、MHz(メガヘルツ)帯域の高周波の磁場を用いる MRI(Magnetic Resonance Imaging)などに使用されている [23,24]。しかし、ファラデーマクスウェルの式に示される通り、低周波では感度が低くなる。このため、低周波の磁場に対しては適用が限られている。

SQUID は最も感度の高い磁気センサであり、液体窒素や液体ヘリウムを用いて超伝導下で利用する。感度としては $fT(10^{-15} \text{ T})$ オーダーの非常に小さい磁場を検出することができる。このため、宇宙マイクロ波の計測といった天文学分野 [25]、地磁気の計測といった地質学 [26]、さらに、バイオテクノロジー [27] や量子コンピューティングといった分野にも研究や応用が進んでいる。

近年では、薄膜生成技術の発展により、MR 素子を用いたセンサの高感度化及び小型化が進んでいる。MR 素子は磁界によって抵抗値が変化するもので、種類としては AMR(Anisotropic magneto resistive)、GMR(Giant magneto resistive)、TMR(Tunnel magneto resistive) 素子が挙げられる。SQUID と比較して感度が低いものの、 $nT(10^{-9} \text{ T})$ オーダーの磁場を検出できるなどホール素子と比較して高感度である。AMR 素子は磁気エンコーダやビデオテープレコーダの位置検出に利用されていた。GMR 素子は HDD(Hard disk drive) といった磁気記憶装置の読み取りヘッドに数多く使用されている [28]。近年では、スピントロニクス発展により、さらに小型化や高感度化が期待される TMR センサが用いられている [29,30]。

§ 2.2 磁気センサを用いた非破壊検査

磁気センサの小型化及び高感度化が進む中、様々な分野において磁気センサのアプリケーションも広がっている。非破壊検査においても磁気を用いた手法である渦電流探傷法 (ECT, Eddy current testing) 及び漏洩磁束法 (MFL, Magnetic leakage flux) に対して磁気センサが適用されている [31]。そこで本章では、磁気を応用した非破壊検査技術であるの ECT 及び MFL 原理について述べる。また、磁気を用いた非破壊検査手法に対する磁気センサの適用について述べる。

2.2.1 渦電流探傷法 (ECT, Eddy current testing)

ECT は金属産業において、銅、鉄、アルミニウムといった導電性材料に対して品質を保障するために広く使われている非破壊検査技術の 1 つである [32–34]。天然ガスや石油

の輸送管 [35], 電力発電施設 [36–38], 航空機 [39,40], 鉄道 [41] といったエネルギーや航空, 輸送産業においても応用され発展してきた。ECT は検査対象との接触の必要がなく, 高速で計測できる利点がある。例えば, 鉄道レールの検査においては列車の車体に ECT 装置を取り付け, 時速 70 km 以上で列車を走行しながらの計測が可能である [42]。

ここで, ECT の原理を説明する。コイルに交流電流を流すと交流磁場が発生し, このコイルを導電性の試験体に近づけると, 試験体内部に渦電流が発生する。試験体にき裂などの欠陥があると, 渦電流は欠陥を避けて流れるため, 渦電流分布が変化する。この変化をコイルや磁気センサなどで捉えることにより欠陥が検出できる。

渦電流探傷法についての定性的な説明を図 2.3 に示す。コイルに流す電流を I として, 1 次磁場を H_1 とすると, アンペールの法則より以下の関係が成立する。

$$\text{rot}H_1 = I \quad (2.1)$$

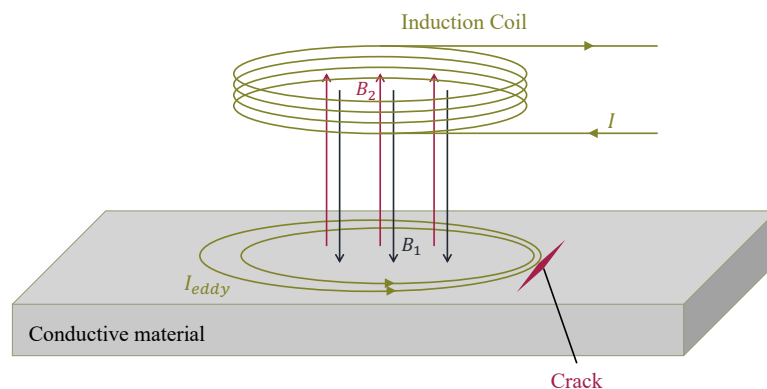


図 2.3 渦電流探傷法の原理

ただし, 一般的に渦電流探傷法に用いる周波数は数 kHz 以上であるため変位電流は無視できる。コイルによって生じる磁束密度 B_1 と磁場 H_1 は透磁率 μ によって結び付けられる。

$$B_1 = \mu H_1 \quad (2.2)$$

コイルに交流電流を流しながら導電性の試験体に近づけると, ファラデー・マクスウェ

ル電磁誘導の方程式より、磁束密度 B_1 により、試験体内で以下の式を満たす電位勾配 E_1 が発生する。

$$\text{rot}E_1 = -\frac{\partial B_1}{\partial t} \quad (2.3)$$

この電位勾配 E_1 によって渦電流 I_{eddy} が生じる。渦電流 I_{eddy} と E_1 は試験体のインピーダンス Z により結び付けられる。

$$I_{eddy} = \frac{E_1}{Z} \quad (2.4)$$

この渦電流 I_{eddy} により 1 次磁場 H_1 を打ち消す方向に 2 次磁場 H_2 が発生し、この関係はアンペールの法則により結び付けられる。

$$\text{rot}H_2 = I_{eddy} \quad (2.5)$$

2 次磁場 H_2 は空気中に磁束密度 B_2 を発生させ、透磁率 μ により結び付けられる。

$$B_2 = \mu H_2 \quad (2.6)$$

この磁束密度 B_2 をピックアップコイルまたは磁気センサにより計測する。試験体内に欠陥がある場合、渦電流 I_{eddy} の分布が変化し、 I_{eddy} によって発生する 2 次的な磁場の磁束密度 B_2 も変化する。従って、 B_2 の変化を計測することで検査対象に生じた欠陥を検出することができる。本研究では、周波数帯域や空間解像度、そしてより柔軟に探傷プローブを構成できることを考慮し、磁気センサを活用した。磁気センサにより検出した信号を交流検波により周波数解析を行なった。

2.2.2 漏洩磁束法 (MFL, Magnetic flux leakage)

MFL は ECT と同様に、石油や天然ガスの輸送管の検査に用いられる最も一般的な非破壊検査手法の 1 つである [43–47]。輸送管以外にも吊り橋を支えるワイヤーケーブルなどにも用いることができる [48]。構造物の磁化を利用した手法であることから、強磁性体材料から出来た構造物に適用が限られる点において ECT とは異なる。

図 2.4 は MFL の原理を示している。鋼材といった強磁性体の検査対象を強力な電磁石または永久磁石によって検査箇所を磁化させる。欠陥があるとそこから磁場が漏洩する。この欠陥による漏洩磁束を磁気センサなどによって計測することで、欠陥を発見することが可能であり、MFL を用いて強磁性体の構造物が検査できる。

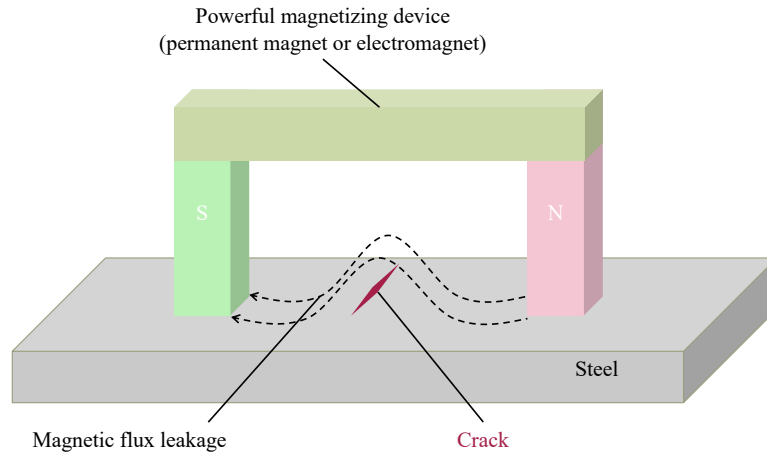


図 2.4 漏洩磁束探傷法の原理

しかし、検査箇所を磁化させるための磁場強度に制約がある。これは、強磁性体の構造物内で透磁率の不均一性が生じている可能性があるからである。透磁率が不均一性であると、その箇所から欠陥による漏洩磁束と似た信号が発生し、欠陥の誤検知や見逃しを招く原因となる。そこで、透磁率の不均一性を軽減するためには検査箇所に対して非常に強い磁場を印加し、磁気飽和させるという手段がとられている。

ここで、磁気飽和により透磁率の不均一性が軽減できる理由について述べる。強磁性体における磁化 M と外部磁界 H は磁化率 χ_m によって結びつけられる。

$$M = \chi_m H \quad (2.7)$$

磁性体の磁化は式 2.7 と真空の磁化の和で与えられ、磁性体の透磁率を μ_m は式 2.9 で表すことができる。

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi_m)H \quad (2.8)$$

$$\mu_m = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (2.9)$$

図 2.5 は強磁性体における磁化特性である $M - H$ 曲線と、初期磁化特性中における磁化率 χ_m の変化を示している。このように磁性体の磁化率 χ_m は外部磁場 H に依存して変化する。また、強磁性体であることから外部磁場 H を印加したのち、大きさを 0 にしても磁化が残る。さらに、磁化率 χ_m は材料により値が異なる。以上が、透磁率の不均一性が発生する主な理由である。透磁率の不均一性に起因するノイズは MFL だけでなく、ECT においても影響が大きく問題となっている。

MFL において、透磁率の不均一性を軽減するためには、強力な磁化器を用いて検査箇所を磁気飽和させるという手段がとられている。磁気飽和させることにより、磁化率 χ_m 及び透磁率 μ_m が一定となる。従って、透磁率の不均一性に起因する欠陥の擬似信号を軽減することができる。しかし、鋼構造物を磁気飽和させるためには、数 T オーダーの非常に強い磁場が必要である。数 T の磁場を発生させるためには、電磁石によっては数 10 A(アンペア) といった即死レベルの大電流を流す必要があり、大電流を流すためには kW(キロワット) クラスの大きな電源が必要である。このため、装置の大きさや安全管理が検査現場での負担となっている。

そこで、本研究では飽和領域の非常に大きな直流磁場の代わりに、不飽和領域を超えない範囲の小さな交流磁場を印加する手法である不飽和交流漏洩磁束法 (USAC-MFL, Unsaturated AC magnetic flux leakage) を用いた。USAC-MFL は電力も数 W(ワット) 程度であることからモバイルバッテリー程度の電源で駆動できる。従って、従来の MFL を比較して装置を小型軽量化が可能である。また、ヒステリシス曲線における初期直特性中の線形領域を超えない小さな交流磁場を用いている。このため、鋼構造物の磁化の影響を受けにくいことが特徴である。小さな交流磁場を高感度な磁気センサにより検出し、交流検波による周波数解析を行なった。

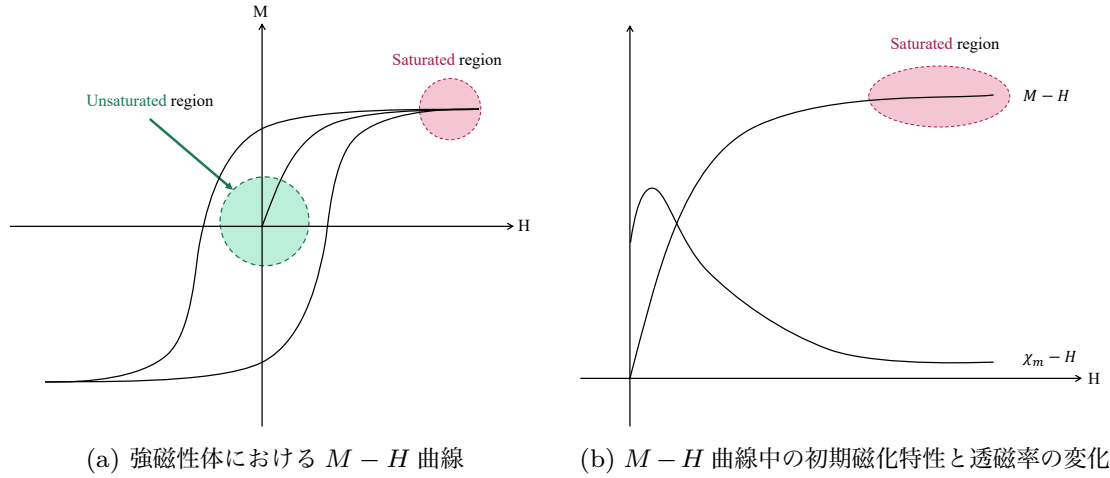


図 2.5 ヒステリシス曲線と透磁率の変化

§ 2.3 磁気信号の解析手法

磁気センサからの出力信号は、ロックインアンプ (Lock-in amplifier) による同期検波、または ADC (Analog-to-digital converter) によって記録された信号のフーリエ変換 (Fourier transform) によって、様々な雑音が混じり合った信号の中から、特定の周波数を持った信号を取り出すことができる。ロックインアンプ及び ADC によるデータ取得及び信号処理方法については次の節で述べる。ここでは、特定の周波数を持った信号を取り出した後の信号解析の手法について解説する。

磁気センサにより観測される特定の周波数の交流信号 V_{out} は以下の式 2.10 の通り、振幅 I_{rms} 、位相ずれ θ を持った正弦波として表すことができる。欠陥による磁気信号の変化は、振幅 I_{rms} 及び位相ずれ θ に対して現れる。

$$V_{out}(t) = I_{rms} \cos(\omega t + \theta) \quad (2.10)$$

この交流信号は以下の式 2.11 のように複素信号へと拡張することができる。ただし、 j は虚数単位である。

$$\begin{aligned} V_{out}(t) &= \Re[I_{rms} \cos(\omega t + \theta) + j I_{rms} \sin(\omega t + \theta)] \\ &= \Re[I_{rms} e^{j\theta} \cdot e^{j\omega t}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

$e^{j\omega t}$ は特定の周波数を持った交流成分であり、周期的であることから議論しなくて良い。欠陥による強度及び位相ずれは $I_{rms} e^{j\theta}$ の項に現れる。そこで、 $I_{rms} e^{j\theta}$ の項を展開

することで、観測される交流信号を複素信号としてベクトル表示できる (式 2.12 及び図 2.6)。欠陥による信号変化は図 2.6 に表されるベクトルの軌跡 (リサーチ曲線) の変化としても表すことができる。

$$\dot{V}_{out} = I_{rms} e^{j\theta} = I_{rms} (\cos \theta + j \sin \theta) \quad (2.12)$$

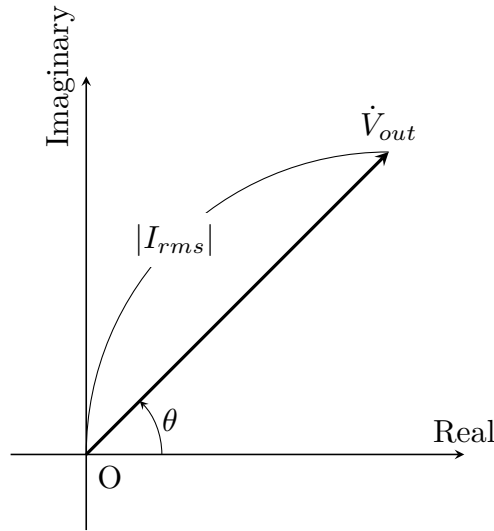


図 2.6 複素信号のベクトル図

また、本研究では複数の磁気センサを用いていることから、式 2.13 及び図 2.7 に示される通り、差分信号ベクトルを算出できる。ただし、2つのセンサ出力信号ベクトルはそれぞれ \dot{V}_{out1} , \dot{V}_{out2} , 差分ベクトルは \dot{V}_{diff} である。このように出力の差分を算出することで、各センサに共通するノイズ成分を打ち消すほか、空間的な磁場変化を計測することができる。

$$\dot{V}_{diff} = \dot{V}_{out2} - \dot{V}_{out1} \quad (2.13)$$

本研究では、式 2.12 に示される強度と位相 (あるいは実部と虚部) 及び図 2.7 に示される複素数信号の差分ベクトルのリサーチ曲線を用いて、欠陥による信号変化を解析した。

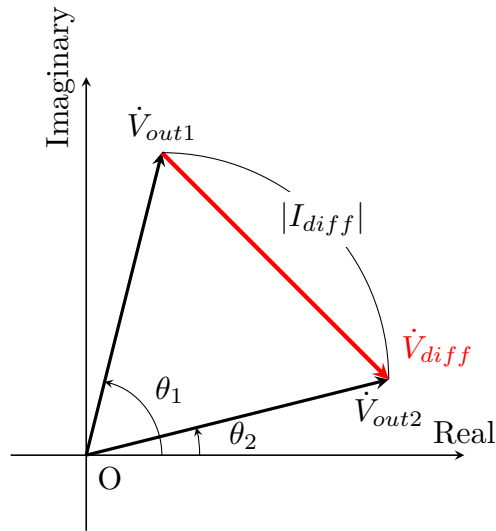


図 2.7 2つの複素信号ベクトルの差分ベクトル図

§ 2.4 ロックインアンプによる交流信号の同期検波

ロックインアンプを用いて磁気センサの電圧出力を同期検波することにより，式 2.12 に表される，特定周波数の信号を複素数のベクトルとして取り出すことができる。ロックインアンプは過渡現象の分光研究，中間生成物の分析といった高速応答信号や微弱信号の計測などに用いられている [49]。この節では，ロックインアンプによる検波の原理を述べる。

図 2.8 はロックインアンプによる同期検波のフローチャートを示している。ロックインアンプは磁気センサの信号 $V_s(t)$ から，参照信号 $V_{ref}(t)$ と同じ周波数と位相の信号をロックして拾い出すことができる。

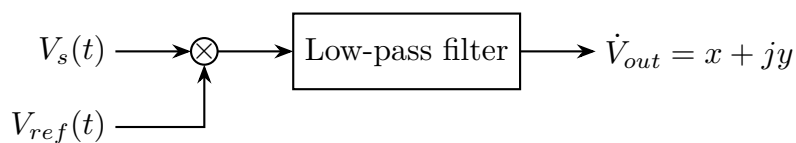


図 2.8 ロックインアンプによる同期検波のフローチャート

磁気センサの出力信号に測定したい周波数の成分の信号 $V_s(t) = I \cos(\omega t + \theta)$ が含ま

れるとする。参照信号 $V_{ref}(t) = \sqrt{2}e^{-j\omega_{ref}t}$ と乗算する。

$$\begin{aligned}
 V_s(t) \times V_{ref}(t) &= I \cos(\omega t + \theta) \times \sqrt{2}e^{-j\omega_{ref}t} \\
 &= \sqrt{2}I[\cos(\omega t + \theta) \cos(-\omega_{ref}t) + j \cos(\omega t + \theta) \sin(-\omega_{ref}t)] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}I[\cos(\omega t + \theta + \omega_{ref}t) + \cos(\omega t + \theta - \omega_{ref}t) \\
 &\quad + j \sin(\omega t + \theta - \omega_{ref}t) - j \sin(\omega t + \theta + \omega_{ref}t)] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}I[e^{-j(\omega+\omega_{ref})t+j\theta} + e^{j(\omega-\omega_{ref})t+j\theta}]
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

ここで、測定信号の周波数と同じ周波数を持ったリファレンス信号を乗算したとすると $\omega = \omega_{ref}$ であるため、乗算後の信号は以下の式 2.15 のとおり計算できる。

$$\begin{aligned}
 V_s(t) \times V_{ref}(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}I[e^{-j(\omega+\omega_{ref})t+j\theta} + e^{j(\omega-\omega_{ref})t+j\theta}] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}}I[e^{-2\omega t+\theta} + e^{j\theta}]
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

式 2.15 において、 $e^{-2\omega t+\theta}$ は測定信号の 2 倍の周波数を持った高周波成分であり、 $e^{j\theta}$ は直流成分である。ローパスフィルタにより、高周波成分である $e^{-2\omega t+\theta}$ の項を取り除き、直流成分である $e^{j\theta}$ を取り出すことができる。よって、ロックインアンプによる検波後の信号は、以下の式 2.16 となり、特定の周波数の信号を複素数のベクトルとして取り出すことができる。これがロックインアンプによる同期検波の原理である。

$$\dot{V}_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}}Ie^{j\theta} = I_{rms}(\cos \theta + j \sin \theta) \tag{2.16}$$

§ 2.5 ADCによる交流信号の検波

磁気センサによって得られた交流信号は、ロックインアンプによって同期検波する手法の他に、ADC(Analog-to-digital converter)によってサンプリングを行った後、フーリエ変換(Fourier transform)により、ロックインアンプによる同期検波と同様に、特定の周波数の信号を取り出すことができる。そこで、まずフーリエ変換について説明する。

2.5.1 フーリエ変換

フーリエ変換とはデータ解析手法の1つで、以下の式 2.17 で示されるように、時間領域の波形 $f(t)$ を周波数領域 $F(\omega)$ のスペクトルに変換することができる。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.17)$$

しかし、実際の計測形においてアナログ信号をサンプリングすることにより、デジタル信号に変換される。デジタル信号は時間的に離散化された数値であることから、アナログ信号に対するフーリエ変換とは異なる点がある。そこで、サンプリングにより離散化された信号の周波数スペクトルを求める手法として離散フーリエ変換 (DFT, Discrete Fourier transform) がある。サンプリングによって N 個のデータが得られ、得られたデータを $g(k), k = 1, 2, \dots, N - 1$ とすれば、 $g(k)$ の離散フーリエ変換は次式となる。ただし、 $n = 1, 2, \dots, N - 1$ とし、 $G(n)$ は N を基本周期とする周期関数である。

$$G(n) = \sum_{k=0}^{N-1} g(k)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (2.18)$$

DFT を用いることで、離散的なデジタル信号を周波数スペクトル解析することができる。しかし、サンプル数 N の増加により、コンピュータによる演算時間が膨大になる可能性がある。これは、サンプル数 N の信号の全スペクトルを計算するためには N^2 回の複素乗算を実行しなければならないからである。従って、サンプル数 N が増大するに従って、演算時間は急激に増加する。そこで、DFT の演算時間を短縮する効率的なアルゴリズムが 1965 年に Cooley と Tukey によって提案されている [50]。そのアルゴリズムは高速フーリエ変換 (FFT, fast Fourier transform) と呼ばれ、サンプル数 N のデータに対する演算回数が $N \log_2 N$ と N^2 と比べて大幅に削減できることから、様々なプログラミング言語で記述され、配布されている。本研究では、フーリエ変換によるスペクトル解析を行う際には、National Instruments 社が提供しているプログラミング言語である Labview 上で配布されている FFT の関数を用いている。

ここで、ADC によるサンプリングを行うことで連続的なアナログ信号を離散的なデジタル信号に変換している。また、離散的なデジタル信号を FFT するため、FFT 後の周波

数スペクトルの位相や周波数といったパラメータも離散的になる。そこで、ADCによりサンプリングを行いFFTにより周波数解析を行う際には、以下の事柄に注意する必要がある。次の小節ではこれらの事柄について説明する。

1. サンプリングレート
2. 離散フーリエ変換に用いるサンプル数

2.5.2 サンプリングレート

磁気センサにより電圧に変換された磁場信号は、ADCを通してデジタル信号に変換し記録することができる。このように時間的に連続な信号を離散的な信号として変換する操作を標本化(サンプリング)という。しかし、サンプリングにより離散信号へ変換を行うときには、標本化周波数(サンプリングレート)に注意しなければならない。図2.9において、実線ので表される波形は計測したい連続な信号、実線上の点はサンプリングによって得られた離散信号、点線ので表される波形は離散信号から再生した信号をそれぞれ示している。このようにサンプリングレートが不足していると、実戦で示される連続な信号の周波数 f とは異なる周波数の信号が再生されるエイリアスが生じる。エイリアスを生じさせないためには、標本化定理によりサンプリングレートは少なくとも、測定したい周波数の2倍の周波数でサンプリングする必要がある。

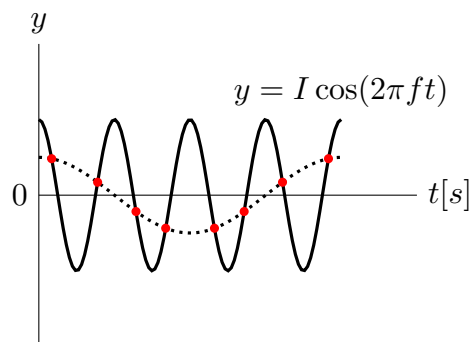


図 2.9 不十分なサンプリングによって生じるエイリアス

また、本研究では式 2.12 に示される通り、位相の変化を計測する必要があることから、位相の解像度も重要である。位相の解像度 $d\theta$ は測定信号の周波数 f 、サンプリングレ

トを f_s とすると、以下の式 2.19 の通りになる。従って、周波数解像度を高くするためには、周波数を低くするかサンプリングレートを高くする必要がある。

$$d\theta = \frac{2\pi f}{f_s} [\text{rad}] \quad (2.19)$$

2.5.3 離散フーリエ変換に用いるサンプル数

離散フーリエ変換によって特定の信号の周波数の信号を得る場合は、サンプリングレートとサンプル数に注意する必要がある。これは、周波数分解能 df とサンプル数 N 及びサンプリングレート f_s は以下の式 2.20 の関係があるからである。つまり、周波数分解能を高めるためには、サンプリングレートを低くするか、サンプル数を大きくする必要がある。しかし、サンプリングレートを低くすると式 2.19 の通り、位相解像度が悪くなる。また、サンプル数を大きくすると、そのサンプル数を取るのに必要な時間 dt (式 2.21) が長くなり、時間的な解像度が低くなる。このように、周波数の解像度と時間の解像度はトレードオフの関係である。さらに、時間波形の変化を正確に捉えるためには、サンプル数の中に少なくとも 1 周期以上の波形が入っている必要がある。以上のことを考慮して、サンプリングレート及びサンプル数を決める必要がある。

$$df = \frac{f_s}{N} \quad (2.20)$$

$$dt = \frac{1}{df} = \frac{N}{f_s} \quad (2.21)$$

§ 2.6 計測プログラムとパラメータの設定

2.6.1 測定プログラムの設計

前節で述べたサンプリング及び FFT を行う際に注意する事柄を踏まえ、ADC による計測プログラムを実装した。図 2.10 はデータ取得のためのサンプリンググループである。欠陥によって変化が起こる強度 $I_{rms}(t)$ と欠陥による位相ずれ $\theta(t)$ を含んだセンサ出力

$V_s(t) = I_{rms} \cos(\omega t + \theta)$ 及び、欠陥による位相ずれのないリファレンス信号 $V_{ref}(t)$ を同時に ACD へ入力及びサンプリングを行い、FFT による信号処理を行なった。FFT により特定の周波数成分を複素信号ベクトルとして取得できる。

強度 $I_{rms}(t)$ に関しては FFT 後の複素信号の絶対値をそのまま出力した。位相に関しては、FFT 後のセンサ出力の位相 $\theta + \theta_{ref}$ からリファレンス信号の位相 θ_{ref} を差し引いて出力した。ただし、 θ_{ref} はサンプリングによって生じた位相ずれである。サンプリングにより位相ずれ θ_{ref} が起こる理由は、サンプリンググループの開始時刻とセンサ出力の周期波形の開始点 (位相が 0 の点) が同期されていないためである。このため、サンプリンググループの開始時におけるセンサ出力の周期波形の位相ずれが欠陥による位相ずれ $\theta(t)$ と一緒に出力されてしまうことになる。

そこで、リファレンス信号も同時にサンプリング及び FFT を行うと、サンプリングによる位相ずれがセンサ出力とリファレンス信号で同じ値となる。従って、FFT 後のセンサ出力の位相とリファレンス信号の位相を差し引くことで、サンプリングによって生じた位相ずれを打ち消し、欠陥による位相ずれ $\theta(t)$ のみを取り出すことができる。

通常、周期波形の位相が 0 の時間と同時にトリガ信号を入力し、そのトリガ信号の立ち上がりとサンプリングの開始点を同期することが多い。しかし、このようにトリガ信号と同期させサンプリングを行うと、サンプリンググループ間で時間的なラグが生じてしまい、そのラグ間に起こった信号変化を見落としてしまう可能性がある。そこで、トリガ信号によって同期を行わずに連続でサンプリング及び図 2.10 のように処理することで、サンプリングの開始点と周期波形の開始点の非同期により起こった位相ずれを解消している。

2.6.2 サンプリングレートとサンプル数の設定

サンプリングレートは標本化定理により、計測した周波数の最低でも 2 倍以上としなくてはならない。より高精度に計測を行うためには、位相解像度 (式 2.19) や時間的な解像度 (式 2.21) からもサンプリングレートは高いほど良い。そこで、本研究にて ADC によりデータ取得を行うために、サンプリングレートが 1 MHz まで対応した ADC である NI-9223(National Instruments 製) を用いた。NI-9223 を用いて計測を行う場合は、基本

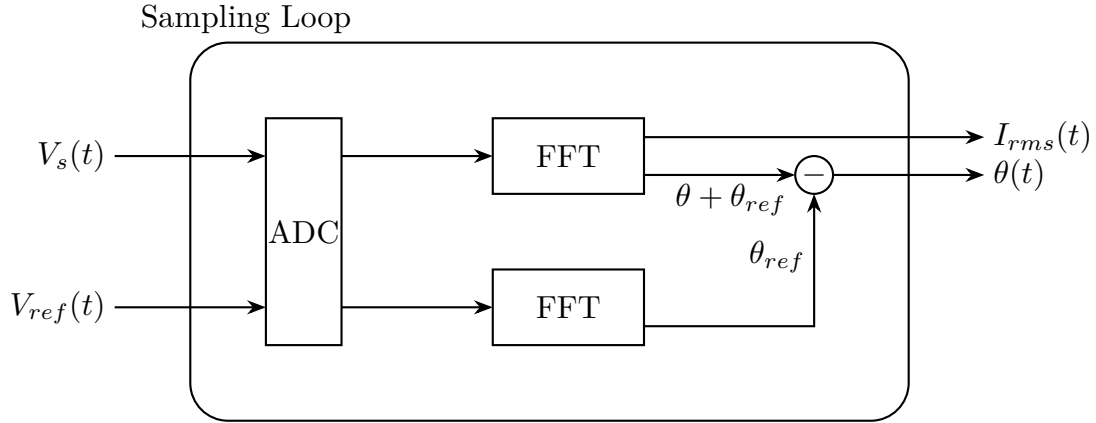


図 2.10 ADC によるデータ取得のフローチャート

的にサンプリングレートは 1 MHz とした。

次にサンプル数を設定した。式 2.20 に示されるように、サンプル数 N とサンプリングレート f_s の兼ね合いによって周波数の解像度が異なる。従って、計測したい信号の周波数が周波数解像度 df の整数倍になるように設定する必要がある。本研究で用いる磁場の周波数は 10 Hz 程度の極低周波数から 1 kHz 程度の高周波数まで想定している。そこで、低周波である場合 $N = 500000$ 、高周波である場合 $N = 10000$ 程度のサンプル数を設定した。

ここで、サンプル数が $N = 500000$ である場合、周波数解像度は $df = 1000000/500000 = 2$ Hz、 $N = 10000$ である場合の周波数解像度は $df = 1000000/10000 = 100$ Hz となり、計測した周波数である 10 Hz 及び 1 kHz はそれぞれ、周波数解像度である 2 Hz 及び 100 Hz の整数倍の周波数である。また、設定したサンプル数だけ取得に必要な時間 dt は式 2.21 により、それぞれ 0.5 秒、0.01 秒となる。従って、10 Hz を 0.5 秒間のサンプリングであれば 5 周期分の波形、1 kHz を 0.01 秒間のサンプリングであれば 10 周期分の波形がそれぞれ記録され、FFT かけられることになる。

複雑形状の鋼構造物と細部の検査

本章では鋼構造物の細部を検査するために開発した小型 ECT プローブとき裂信号の抽出手法について述べる。マイクロサイズのトンネル磁気抵抗素子を用いることで、長辺 8 mm 以下の長方形型の単一印加コイル内に 2 つの磁気センサを搭載した差動型の小型 ECT 探傷センサプローブを開発した。また、差分信号を用いて、ECT の検査で問題となる磁気ノイズの特性を解析し、き裂信号の抽出手法を開発した。本手法を用いて、道路などに用いられる鋼床版の模擬サンプルに対して計測を行い有効性を示した。

§ 3.1 渦電流探傷法の適用と課題

サーチコイルによる渦電流探傷検査 (ECT) は、アルミニウムやカーボンといった導電性構造物のき裂を検出するために広く用いられている技術である [40, 51, 52]。しかし、一般的な ECT プローブは形状やサイズが、構造物の検査箇所の複雑な形状に適合せず検査が困難な場合がある。例えば、高速道路などに利用される鋼床版において、U 字型のリブとデッキプレートの溶接部は、上を通過する車両の振動によって疲労き裂が発生しやすい。しかし鋼床版は単純な平板や輸送管とは異なり、U 字型のリブが何列も連なった構造をしていることから、ECT による検査が難しい。また、非磁性体材料ではなく強磁性体である鋼構造物であることから、鋼の不均一な透磁率に起因する磁気ノイズからき裂信号を識別することが難しい。これは、強磁性体からの ECT による磁気信号は磁化の成分を多く含むが、構造物自体の磁化によってもき裂と似た信号が発生するからである。従って、複雑な構造物や細部を検査できる小型のプローブ及び、真のき裂信号を抽出するために磁場信号の解析手法が求められている。

近年、従来から用いられてきたサーチコイルの代わりに磁気センサを用いた非破壊検査

法が報告されている [31, 53, 54]。このように、磁気センサを用いることには2つの大きな利点がある。1つ目は、広い範囲の周波数を一定の感度で検出することができる。磁気センサの広い周波数レンジという利点を活用し、内部まで浸透する低周波の磁場によって、表面き裂だけでなく内部の欠陥を検出できる非破壊技術が報告されている [55–57]。2つ目は、磁気センサの小型及び高感度化が進んでいることから、空間的にも高分解能で磁束密度を高感度に検出することができる。また、単一の磁気センサではなく、複数の磁気センサを用いたグラジオメータにすることで局所的な磁束の空間分布を測定することができる。我々の研究においても、この利点を活用し、磁気センサのグラジオメータで得られる差分パラメータによって、磁気ノイズを低減できることが実証した [58]。また、マイクロデバイスを用いることで、小型の差動型 ECT 磁気探傷プローブを開発した。開発したプローブを用いて、強磁性体である鋼平板に対して計測及び基礎的な磁気特性を解析し、き裂が検出可能であることを示した [59]。

プローブの小型化によって複雑な形状の構造物や細部の検査に対応できる。センサプローブと構造物との距離（リフトオフ）の変動が原因で起こる信号の変動によって、き裂の信号の判別が難しいことが課題である。特に、細部の検査においては手動でのセンサプローブの走査によりリフトオフの変動が起こり易い。さらに、鋼構造物の表面には凹凸が生じていることもあり、溶接部はビードにより特に凹凸が激しい。一般的に ECT においてリフトオフ変動に対する信号変化は重要な課題であり、リフトオフの影響を補正するためのデータ処理方法やアプローチが提案されている [60–62]。しかし、複雑な鋼構造物や細部に対する実際の検査を想定した方法がなかった。

そこで本章では、複雑な構造物の検査の際に生じると想定される信号変化を解析し、き裂信号を抽出する手法について検討する。まず、差動型の小型プローブの印加コイル内の磁界と平板に発生する渦電流のシミュレーションを行い、リフトオフによる信号の変動を確認した。そして、センサプローブを垂直および傾斜させた状態で鋼プレートに対して計測を行い、き裂信号の基本特性とリフトオフの変動の影響を解析した。

従来の ECT において、計測した信号を示すために、単一のセンサ出力の変化から生じる実部と虚部を表示するリサージュ曲線を用いるのが一般的である。しかし、単一のセン

サのパラメータを用いたリサージュ曲線は、磁気ノイズやリフトオフ信号の影響を受けやすい [63]。

そこで、磁気ノイズを低減し、き裂信号とリフトオフ変動信号を識別するために、差動型 ECT 磁気探傷センサプローブを用いて差分パラメータを取得し、得られた差分パラメータのリサージュ曲線を用いて、き裂信号の抽出手法を提案した。

また、渦電流は式 2.1 から 2.6 に示される通り周波数に依存する。従って、周波数によりき裂信号を含んだ磁気信号が変化すると考えられる。そこで、磁気信号の周波数依存性を測定し、き裂信号を抽出するための最適な周波数を検討した。開発したリサージュ曲線を用いたき裂信号の抽出方法を用いて、鋼床版を模倣したサンプルの溶接部に対して計測を行い有効性を示した。

§ 3.2 複雑な鋼構造物の例（鋼床版）

図 3.1 は鋼床版の実際の写真である。鋼床版はデッキプレートに U リブが連なった構造である。U リブとデッキプレート及び横リブは溶接されている。デッキプレートの上を車両が通過するため、振動により溶接部は特にき裂が発生しやすい。このため、このような複雑な形状を検査できるような小型のセンサプローブ及びき裂信号の抽出手法が求められる。

§ 3.3 差動型 ECT 探傷センサプローブ

3.3.1 センサプローブの外観

図 3.2 にマイクロデバイスにより構成した差動型 ECT 探傷プローブを示す。センサプローブは、印加コイルと 2 つのトンネル磁気抵抗 (TMR, Tunnel Magneto Resistive) センサで構成されている。印加コイルは 60 回巻き、断面積 2.5 mm × 6.0 mm の長方形であり、2 つの TMR センサをコイルの長辺に設置した。全体の大きさも直径 10 mm 以下と小型のセンサプローブである。

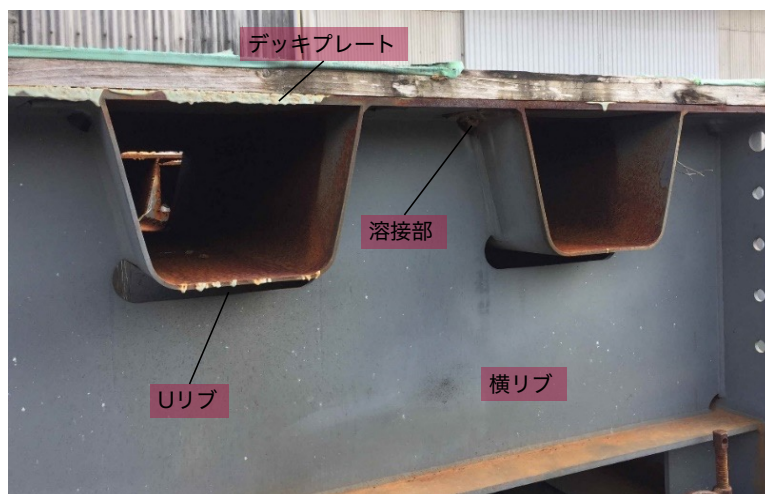


図 3.1 鋼床版の構造

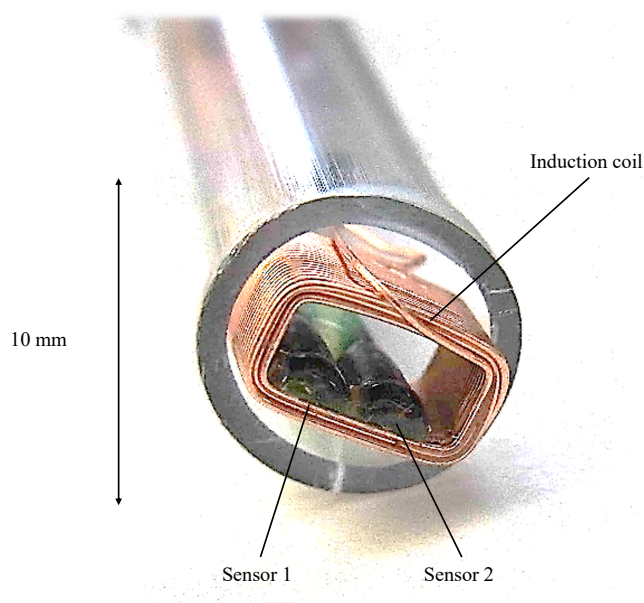


図 3.2 2つの TMR センサを搭載した差動型 ECT 探傷プローブ

3.3.2 マイクロサイズの TMR センサ

センサプローブに搭載した TMR センサの外観と回路図を図 3.3 に示す。TMR 素子は $0.5 \mu\text{m}$ と非常に小型なものである。また、回路としては高感度素子と低感度素子で V_{cc} を分圧したハーフブリッジ型の回路となっている。高感度素子と低感度素子を用いる理由は、同じ温度特性を持った素子を用いて V_{cc} を分圧することにより、温度による感度のば

らつきを軽減している。また、TMR センサの感度を図 3.4 に示す。本来 TMR 素子は、磁場に対する出力の特性が偶関数となる。このため、そのまま使用すると負の信号でも正の信号でも大きさが同じであれば同じ出力となってしまう。そこで、内臓磁石により 500 μT 程度のバイアスを磁場をかけ、線形領域で利用できるようにした。図 3.4 では、およそ -500 μT から +500 μT までが線形領域となっており、このレンジの磁場を測定できる。また、この線形領域における感度は 0.57 V/mT であった。

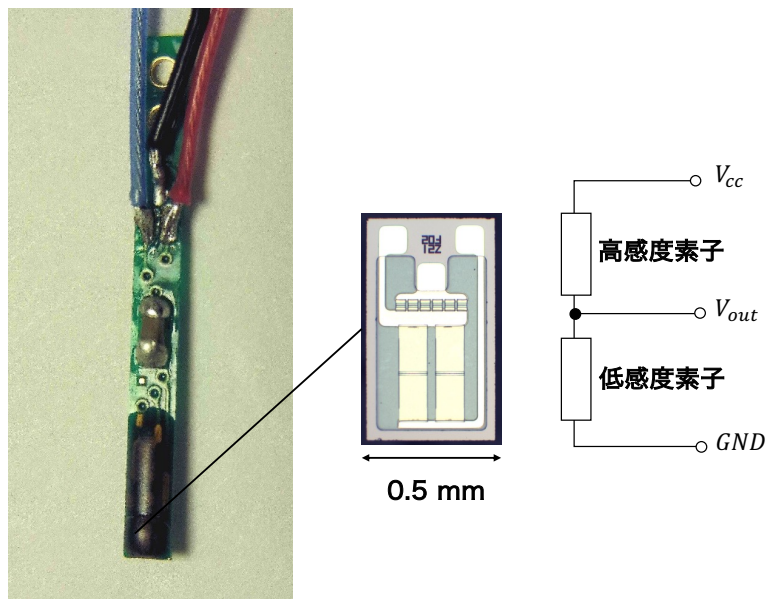


図 3.3 TMR センサの外観と回路図

§ 3.4 計測システム構成と計測

3.4.1 鋼プレートサンプル

リフトオフ変動による基礎的な信号変化を測定するために、7 mm \times 200 mm \times 200 mm の鋼プレート (図 3.5) を用意した。鋼プレートの試験サンプルは厚さ 7 mm で、材質は鋼構造物に多い SS400 とした。鋼プレートサンプル上に、き裂を想定した 8 種類のスリット (長さ 20 mm, 深さ 0.5 mm から 7.0 mm (7 mm はサンプルを貫通)) を入れた。

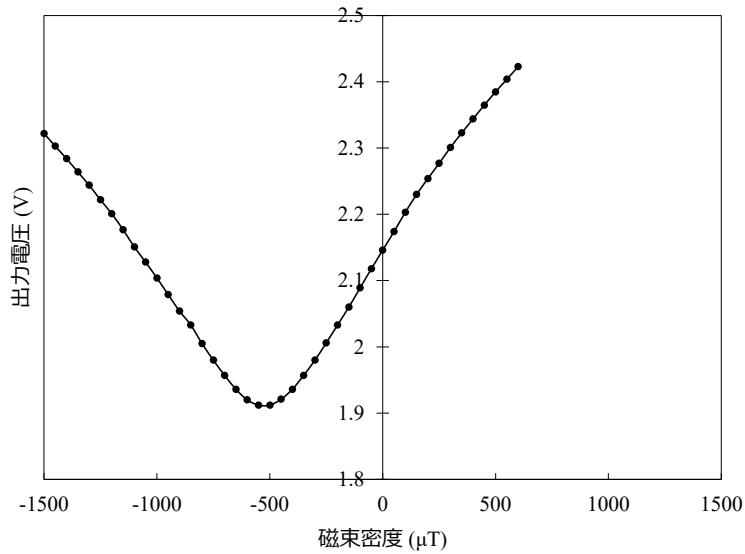


図 3.4 TMR センサの基礎特性

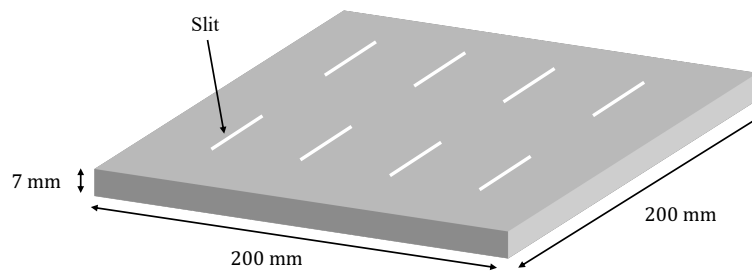


図 3.5 人工き裂を入れた鋼プレート

3.4.2 計測システム構成

計測システムは、図 3.6 に示す通り、TMR センサを駆動させるための電圧源、ファンクションジェネレータ、センサープローブ、ロックインアンプ、PC、XYZ ステージで構成した。TMR センサは 5 V の電圧源で駆動し、印加コイルはファンクションジェネレータで 200 Hz から 5 kHz の周波数で $2 V_{p-p}$ の正弦波電圧を印加して動作させた。センサープローブを深さ 7 mm のスリットに対して、0.1 mm 間隔で鋼プレートに対して垂直に直線走査を行なった。

実際の構造物は、表面の凹凸や塗料で覆われていることが予想される。また、複雑な構造物では、手作業によるセンサープローブの走査が必要である。このため、センサープローブ

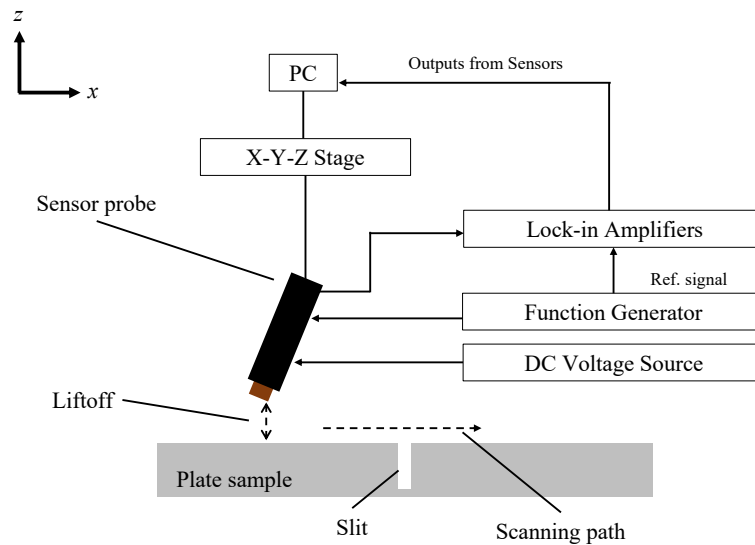


図 3.6 プローブを傾けた場合の走査方法と計測システム

と検査対象物との距離であるリフトオフが変動することが予想される。従って、リフトオフ変動による信号変化を解析するために、リフトオフを 0.1 mm から 0.9 mm まで変化させそれぞれ計測した。センサプローブの傾きによっても信号変化が予想される。従って、センサプローブをプレートに対する法線から 5 度傾けて、それぞれのリフトオフにおいて直線走査を行った。TMR センサからの信号は、ロックインアンプを通して実数成分と虚数成分の複素数信号ベクトルとして取得し、コンピュータで信号解析を行った。

§ 3.5 シミュレーションによる渦電流と磁場分布

基本的な磁気応答の評価とリフトオフの異なるき裂信号の強度を見積もるために、市販の有限要素法のソフトウェアパッケージ JMAG Designer を用いて、鋼プレート (SS400) 表面の渦電流分布と印加コイル内の磁場をシミュレーションした。

3.5.1 シミュレーションモデル

図 3.7 に示すように、深さ 7 mm のスリット付き鋼プレートの中央に、コイル内部に空気領域を持つ印加コイルを配置した。印加コイルの抵抗は 1Ω とした。鋼プレートとコイ

ルとのリフトオフは 0.0 mm と 1.0 mm の 2 通りのシミュレーションを行なった。シミュレーションには、JSOL から提供された SS400 の代表的な透磁率と導電率を使用した。シミュレーションは、印加磁場が非常に弱いため、線形領域である初期磁化曲線で計算されている。有限要素解析のために、各要素は 0.4 mm のメッシュに分割した。印加コイルに正弦波電圧 $2 V_{p-p}$ 、周波数は 1 kHz を設定した。

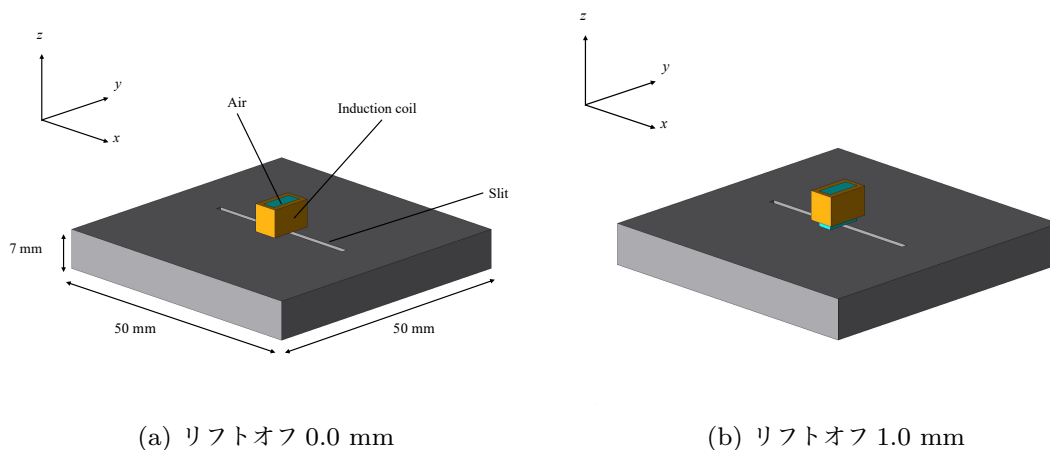


図 3.7 鋼プレートと印加コイルによるシミュレーションモデル

3.5.2 シミュレーション結果

図 3.8 はシミュレーションによる鋼プレート内で発生した渦電流分布である。渦電流は印加コイルの形状に沿って発生すると考えられる。しかし、渦電流の流れはスリットによって遮られ、スリットにより渦電流が 2 つに分けられ、2 つの渦電流がスリットとは反対側の縁に沿って流れている。リフトオフ 1.0 mm の渦電流密度は、リフトオフ 0.0 mm の電流密度に比べて半分程度に減衰している。これは、渦電流による磁束の強さが、リフトオフにより大きく変動してしまうことを示している。

図 3.9 は、シミュレーションモデルのワイヤースケルトン (図 3.9a) と直線 P-P' によりカットしたモデルの断面図 (図 3.9b) である。そして図 3.10 は、リフトオフ 0.0 mm (図 3.10a) 及び 1.0 mm (図 3.10b) における磁束密度分布を図 3.9a に示した断面でシミュレーションした結果である。

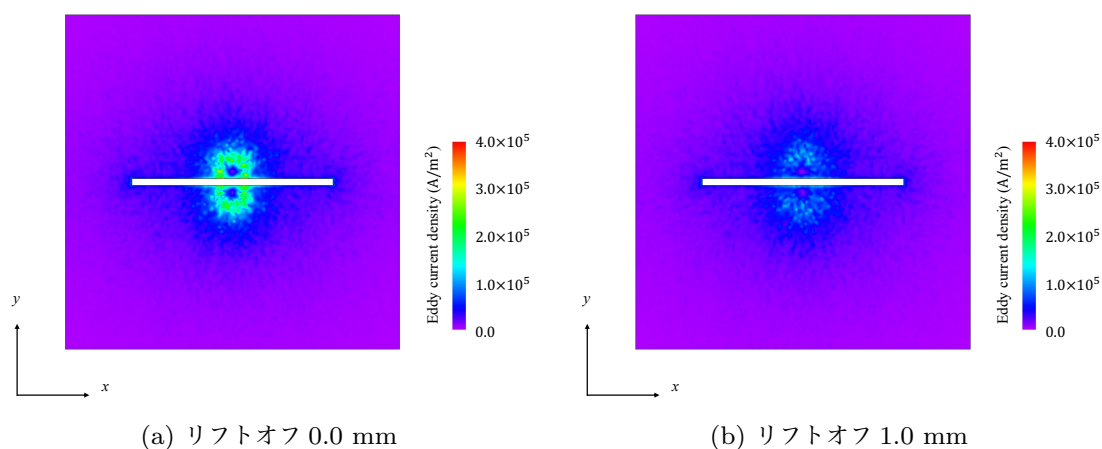


図 3.8 シミュレーションによる鋼プレート内の渦電流分布

図 3.8 に示されるシミュレーション結果より、スリット内には渦電流は流れなかった。そのため、図 3.10 のコイル内の磁束密度分布はスリット上は局所的に弱くなり、ベクトルの強度と勾配が変化した。この結果より、印加コイル内に設置した磁気センサをスリット上に置ことで、局所的な信号の変化を測定することができると考えられる。1.0 mm リフトオフの磁気ベクトルの強度は、0.0 mm リフトオフの磁気ベクトルの強度と比べて減衰している。しかし、印加コイルの下部中央で磁気ベクトルの強度及び方向が変化していることから、リフトオフを 1.0 mm に上げてもしき裂信号は得られると考えられる。また、シミュレーション結果より、コイル内に現れるき裂による微小な磁束変化を測定するためには、マイクロサイズの TMR センサが適していることが分かる。

§ 3.6 鋼プレートのき裂に対する測定結果

3.6.1 単一センサの出力信号の解析

3.11 は、深さ 7 mm のスリットに対して、独立した 2 つの TMR センサ出力を用いてロックインアンプで出力信号の磁気ベクトルを求め、磁気ベクトルの実部と虚部の信号の変化を示したものである。スリットの位置は Position = 10 mm である。このデータは、周波数 1 kHz で 0.1 mm と 0.9 mm のリフトオフで垂直方向に直線走査することで得ら

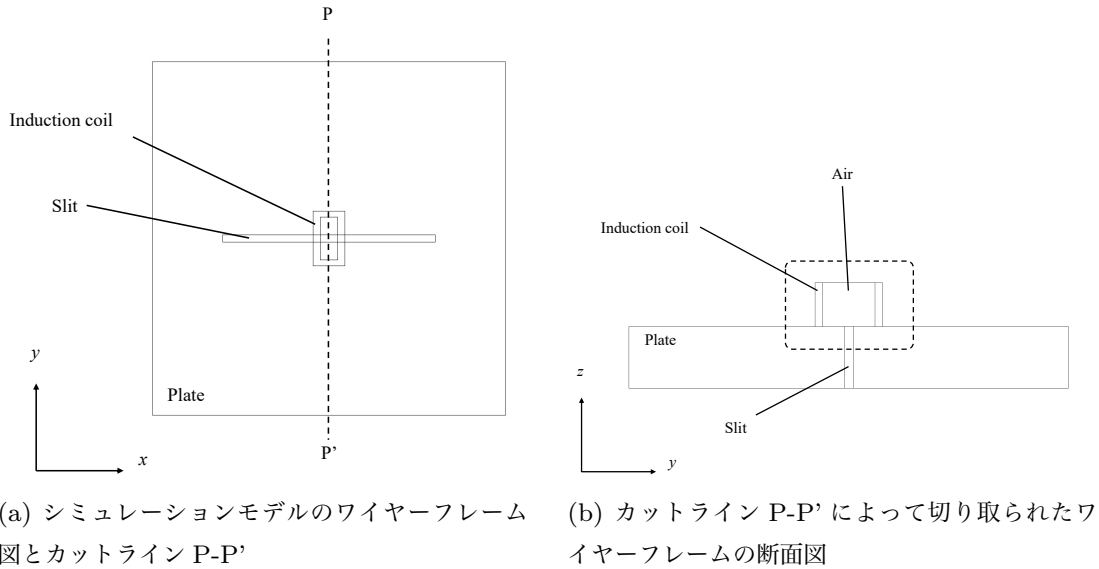


図 3.9 シミュレーションモデルのワイヤーフレーム図及びカットライン P-P' により切り取られたシミュレーションモデルの断面図

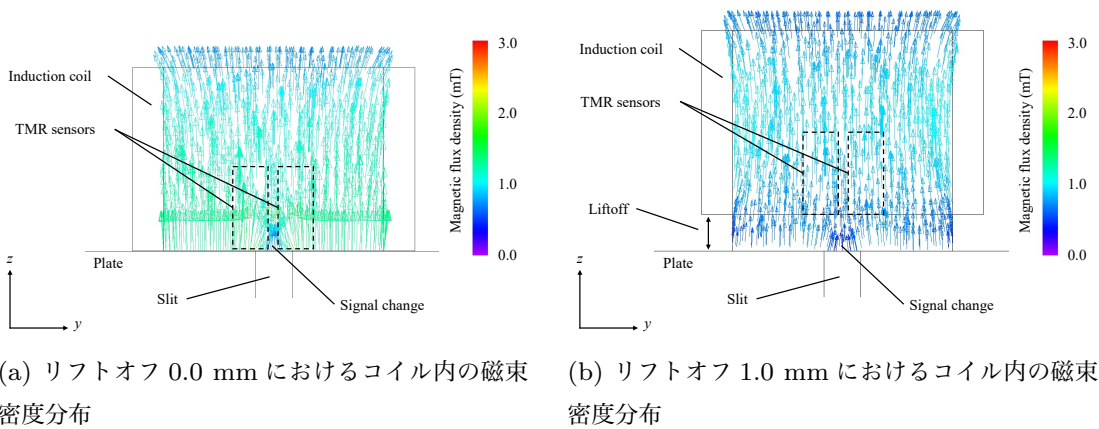


図 3.10 各リフトオフにおけるコイル内の磁束密度分布のシミュレーション結果

れたものである。強磁性体の磁化信号は、渦電流信号に比べて大きい。そのため、渦電流信号の位相変化が現れる虚数部に対して、磁化信号による影響が大きい実数部の変化量が大きくなった。各図でき裂スリットによるピークが観察された。しかし、各測定データにおいて、き裂スリット両側の健全部におけるのベースラインが一致していない。これは透磁率の不均一性などの磁気ノイズが原因と考えられる。また、リフトオフの変動によっても両センサのベースラインがずれている。これらのベースラインの変動により、き裂によ

る信号変化が埋もれてしまうことを示唆している。

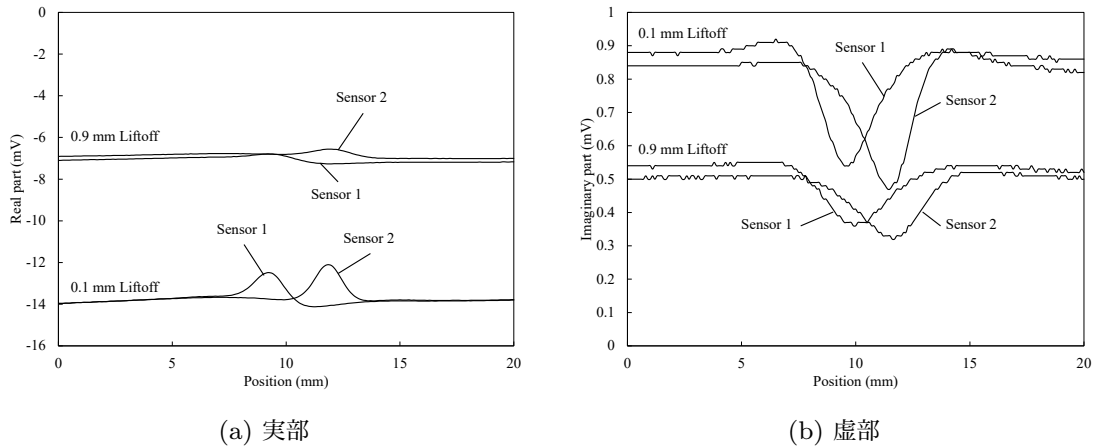


図 3.11 鋼プレート深さ 7 mm スリット上でのリフトオフ 0.1 mm 及び 0.9 mm における信号変化

3.6.2 2つのセンサの差ベクトルによる解析

そこで、2つの TMR センサ出力の差ベクトルを求める。差ベクトルはセンサ 1 の複素数信号ベクトル S_1 とセンサ 2 の複素数信号ベクトル S_2 の差分 $S_2 - S_1$ である。図 3.12 は 2つのセンサにより得られた差ベクトルの実部 (3.12a) と虚部 (3.12b) である。2つのセンサの差分を取ることで、き裂前後ベースラインがフラットになり、リフトオフの変動に関わらずベースラインがほぼ等しくなることがわかった。従って、磁気ノイズやリフトオフの変動の影響を低減するためには、2チャンネルセンサの差ベクトルがき裂信号の抽出に有効であると考えられる。

3.6.3 センサプローブが傾いていた場合におけるリフトオフ変動の影響

リフトオフ変動影響は2つのセンサの差分により軽減できることがわかった。しかし、リフトオフ変動の影響が無視できない場合が考えられる。それは、センサープローブがサンプル表面に対して垂直でない場合、サンプルからそれぞれのセンサまでのリフトオフが異なるため、2つのセンサのベースラインのずれが同じにならないことが予想される。従って、センサープローブが傾いている場合、差分ベクトルはリフトオフのばらつきに

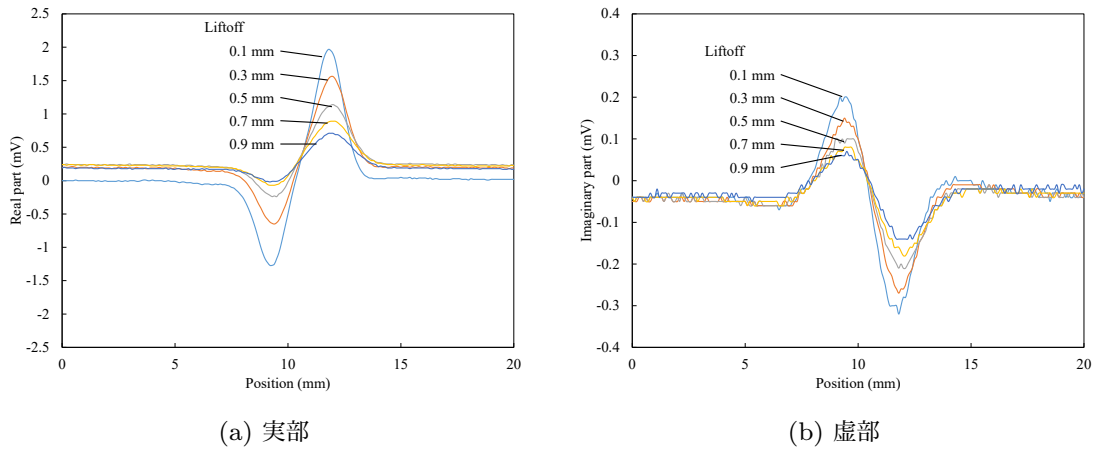


図 3.12 鋼プレート深さ 7 mm スリット上における各リフトオフでの差ベクトル信号変化

影響される。図 3.13 は、センサプローブを 5 度傾けたときの差分ベクトルのリフトオフ依存性を示している。リフトオフが大きくなるにつれて、各微分パラメータのベースラインはゼロにシフトし、ピーク値は減少することがわかった。この結果は、差分パラメータがリフトオフの変動に影響される可能性を示唆している。しかし、実部ベースラインのシフトは虚部ベースラインのシフトに比べ大きい。これは、リフトオフの変動により信号が変動した場合、差分ベクトルのリサージ曲線が主に X 軸方向に現れることを意味する。従って、き裂信号は異なる方向に現れると推測される。

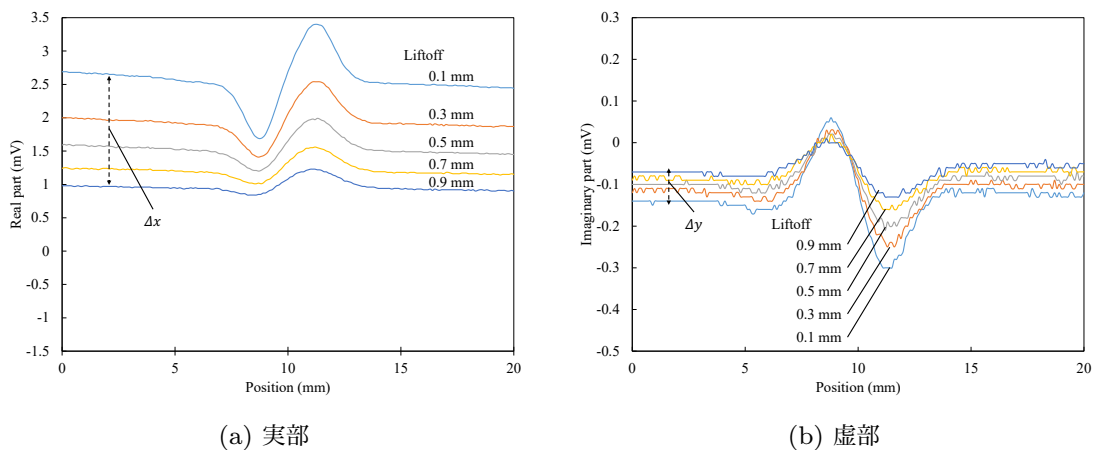


図 3.13 鋼プレート深さ 7 mm スリット上においてセンサプローブが傾いていた場合の各リフトオフでの差ベクトル信号変化

リフトオフ変動によるを算出するために、図 3.13 におけるベースラインのリフトオフによる変動分を、実部に対して Δx 、虚部に対して Δy と定義した。従って、リフトオフ変動のリサージュ波形における勾配は以下の式 3.1 で求めることができる。

$$\theta_{liftoff} = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3.1)$$

また、き裂信号のリサージュ曲線における勾配 θ_{crack} は、図 3.13 に示される差ベクトル信号の虚部のピーク値を実部のピーク値で割ることで求めることができる。図 3.14 は図 3.13 にて各リフトオフの信号のからピーク値を抽出したものである。

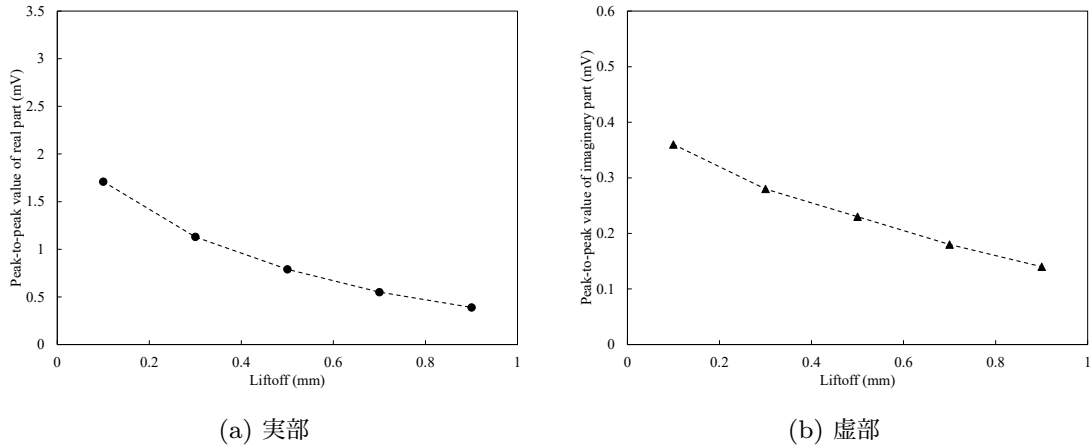


図 3.14 鋼プレート深さ 7 mm スリット上においてセンサプローブが傾いていた場合の各リフトオフでの差ベクトル信号変化のピーク値

図 3.15 は、き裂信号と式 3.1 によって算出したリフトオフ信号の勾配を表している。いずれのリフトオフにおいても、 θ_{crack} は $\theta_{liftoff}$ 比べて十分に大きい。この結果は、差分ベクトルのリサージュ曲線において、き裂信号がリフトオフ信号と異なる方向に現れていることを示唆している。次節では、差分ベクトルのリサージュ曲線について述べる。

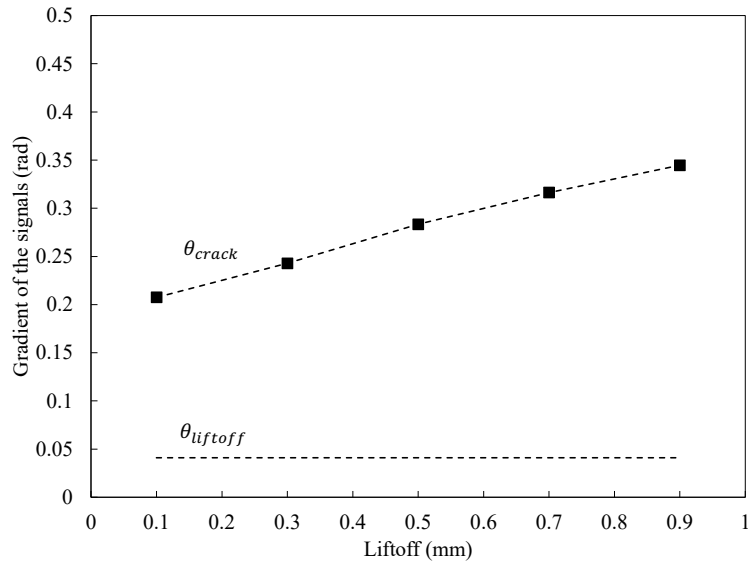


図 3.15 き裂スリットによる信号変化をリフトオフ変動による差分ベクトルの勾配の比較

§ 3.7 差分ベクトルによるリサージュ波形

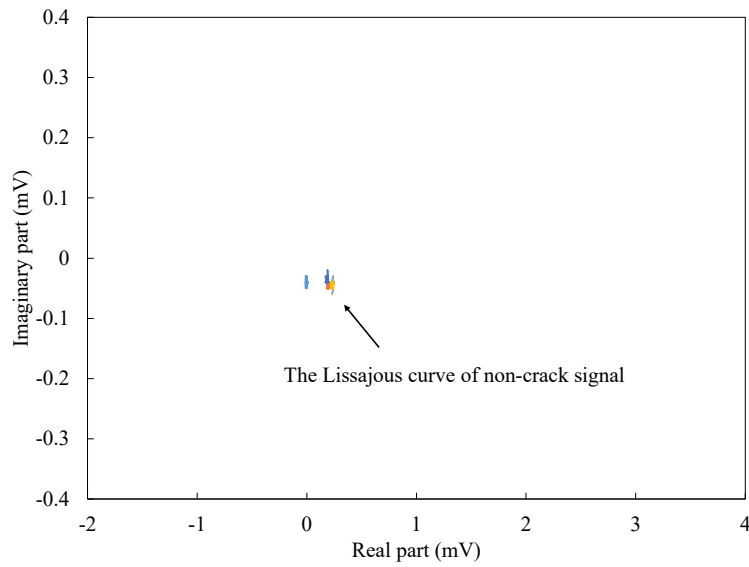
本節では、プローブの傾きによるリフトオフの変動に影響されない、き裂による信号変化の抽出法を検討した。その結果、2つのセンサの差分パラメータを用いることで、磁気ノイズやリフトオフの影響を低減できることを示した。また、差動パラメータがリフトオフの影響を受けても、き裂信号とリフトオフ信号のリサージュ曲線は違いを示すと想定される。

3.7.1 センサプローブが検査対象に対して垂直ある場合

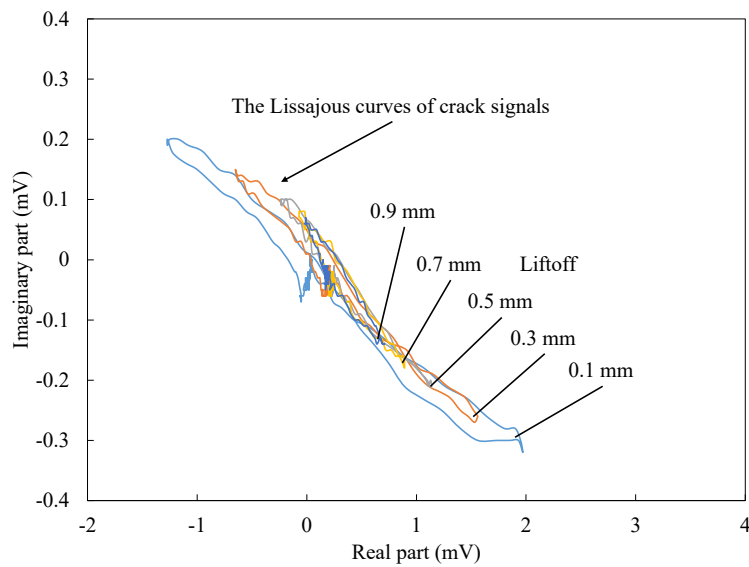
図 3.16 は、0.1 mm から 0.9 mm の間でリフトオフを変化させた差分ベクトルのリサージュ曲線を示している。ただし、センサープローブのコイルへの印加電圧の周波数は周波数 1 kHz で、センサープローブは鋼プレートの面に対して垂直を保ったままき裂に対してラインスキャンした。

センサープローブが平らな鋼板に対して垂直な場合、健全領域の信号はほぼ原点となる (図 3.16a)。また、き裂上でのリサージュ曲線においても、各リフトオフでリサージュ曲線がシフトすることなく重なって現れた (図 3.16b)。この結果は、差分パラメータによってリフトオフのばらつきの影響を低減できたことを示している。このように、センサプ

ローブが網プレートの面に対して垂直である場合、リサージュ曲線によりき裂信号を容易に抽出することができた。



(a) 健全部



(b) き裂部

図 3.16 各リフトオフにおいて測定した健全部信号とき裂信号のリサージュ曲線 (センサプローブが鋼プレート面に対して垂直である場合)

3.7.2 センサプローブが検査対象に対して傾いていた場合

一方、センサープローブが鋼プレートの面に対して垂直ではなく傾いている時、健全部分の信号は点線矢印のように主に実軸からのなす角 $\theta_{liftoff}$ の方向にシフトしている (図 3.17)。しかし、 $\theta_{liftoff}$ とは異なる、実軸とのなす角 θ_{crack} 方向にき裂信号が観測された (図 3.17b)。この結果は、傾いたプローブのリフトオフ変動により信号が変動しても、リサージュ曲線を用いてき裂信号を識別できることを示唆している。

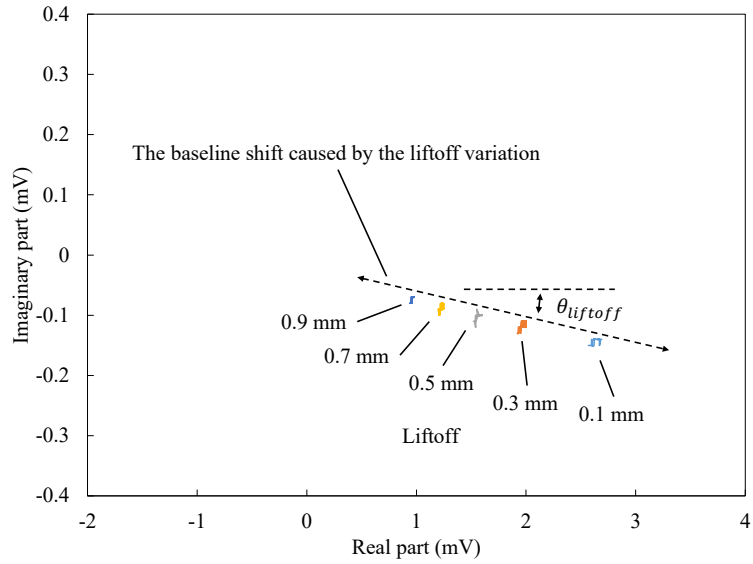
ここで、リサージュ曲線においてき裂信号の現れる方向 θ_{crack} とリフトオフによる信号変化の方向 $\theta_{liftoff}$ は、印加磁界の周波数に依存することが予想される。そこで、次の節では、き裂及びリフトオフによるリサージュ曲線の方向についての周波数依存性について考察する。

3.7.3 き裂信号の周波数依存性

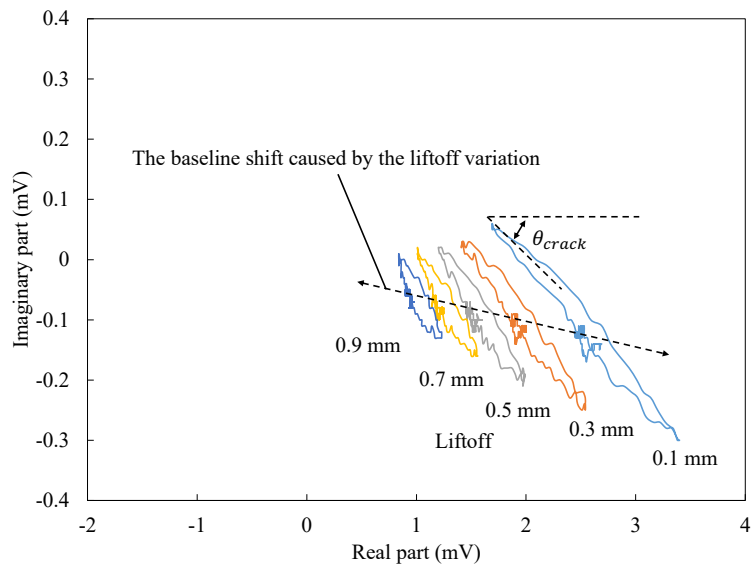
図 3.18 は、センサープローブを鋼プレートの面と垂直である場合の、200Hz から 5kHz の周波数における差分パラメータのピーク値を示している。各リフトオフのピーク値に関して、周波数が高くなると実部が減少し、虚部が増加することが確認された。実部が虚部に比べてリフトオフの影響を受けやすいことを考慮すると、き裂信号の識別には高周波が適していると考えられる。

図 3.19 はセンサープローブが鋼プレート面の法線方向から 5 度傾いた場合のき裂による信号変化のピーク値を示している。高周波ほど実数部が減少し虚数部が増加するという、センサープローブが垂直である場合と同様の傾向が得られた。センサープローブが鋼プレート面に対して垂直である場合のピーク値に対して、傾いている場合のピーク値は実部虚部共に減少し、半分程度の値となっている。しかし、実数部と虚数部共に同様の減少であることから、き裂信号のリサージュ曲線における勾配 θ_{crack} も同程度の値となると考えられる。

図 3.20 は、センサープローブが垂直である場合と傾いた場合の、リサージュ曲線におけるき裂信号の勾配 θ_{crack} を示したものである。垂直ラインスキャンと傾斜ラインスキャンでは、ほとんど差がないことがわかる。これはリサージュ曲線上において、センサープ



(a) 健全部



(b) き裂部

図 3.17 各リフトオフにおいて測定した健全部信号とき裂信号のリサーチ曲線 (センサプローブが鋼プレート面の法線方向から 5 度傾いていた時)

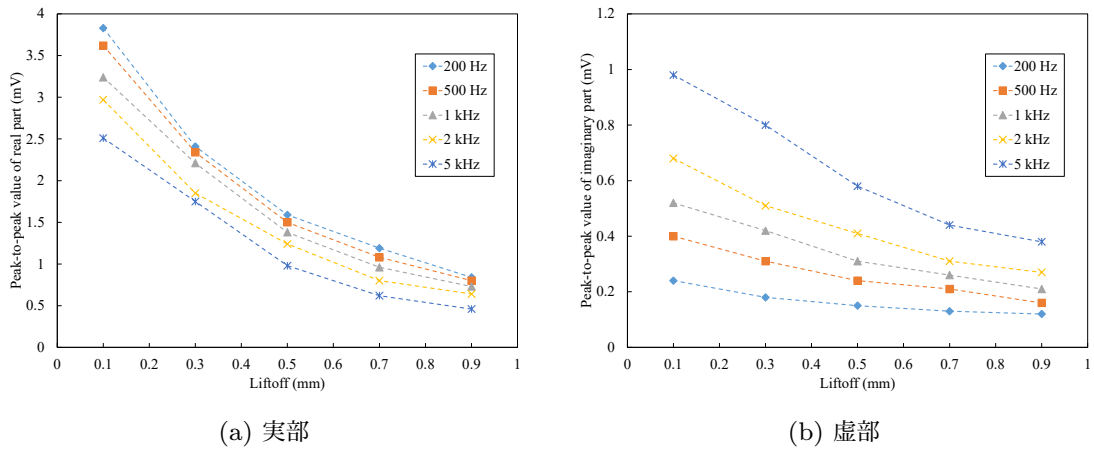


図 3.18 鋼プレート深さ 7 mm スリット上における各リフトオフでの差ベクトル信号変化のピーク値の周波数依存性 (センサプローブが鋼プレート面に対して垂直である場合)

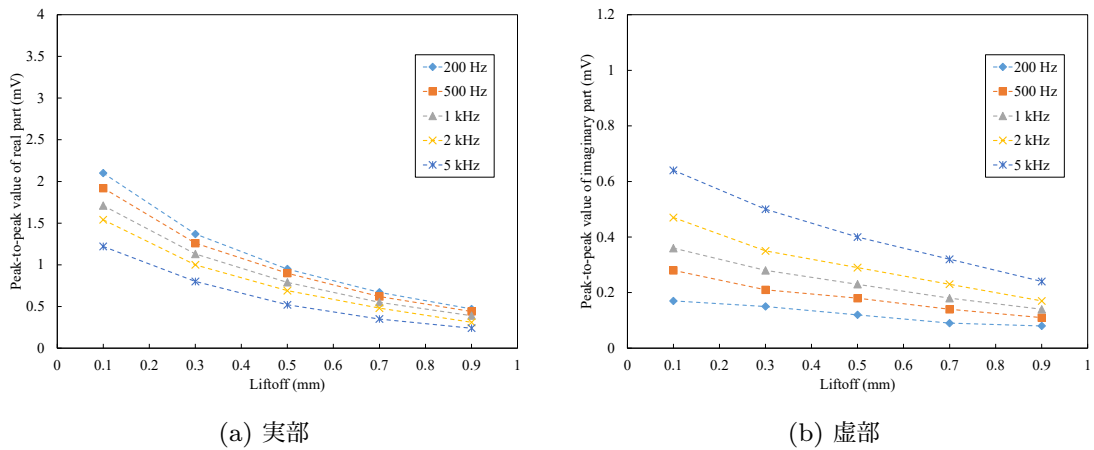
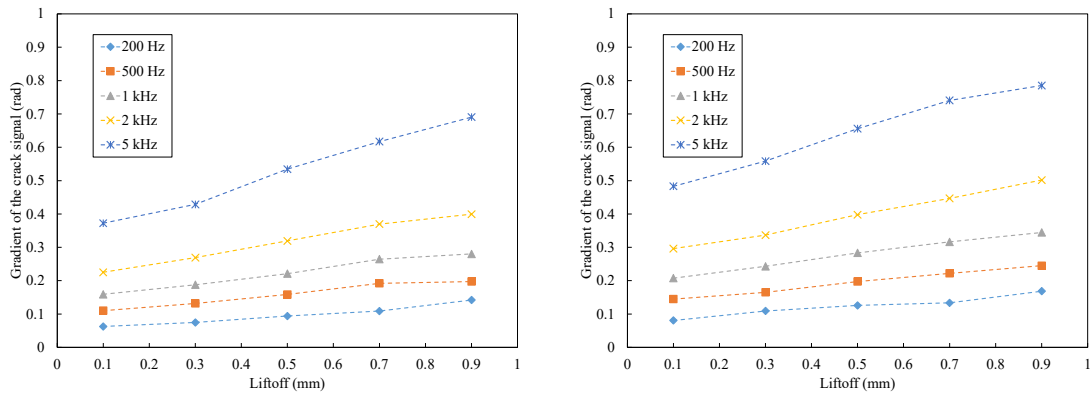


図 3.19 鋼プレート深さ 7 mm スリット上における各リフトオフでの差ベクトル信号変化のピーク値の周波数依存性 (センサプローブが鋼プレート面の法線方向から 5 度傾いた場合)

ローブの傾きに関係なく一定の方向にき裂信号が現れることを意味する。

また、周波数が高くなるにつれて勾配が大きくなっていることがわかった。この結果より、周波数が高いほどき裂信号と傾斜プローブのリフトオフ変動による信号変化の違いが明確になり、き裂信号とリフトオフによる信号変化を容易に区別できるようになると考えられる。



(a) センサプローブが鋼プレート面に対して垂直である場合

(b) センサプローブが鋼プレート面の法線方向から5度傾いた時

図 3.20 鋼プレート深さ 7 mm スリット上における各リフトオフでの差ベクトルによるリサージュ波形勾配の周波数依存性

図 3.20 より、高周波によりき裂によるリサージュ曲線における勾配 θ_{crack} が大きくなることがわかった。しかし、周波数が高くなるとリフトオフ信号のリサージュ曲線における勾配 $\theta_{liftoff}$ も同様に大きくなり、き裂信号の抽出が困難になることも考えられる。そこで、これらの影響を確認するため、図 3.21 にき裂信号の勾配 θ_{crack} とリフトオフ信号の勾配 $\theta_{liftoff}$ との差分勾配 $\theta_{crack} - \theta_{liftoff}$ を各周波数に対して示す。

図 3.21 に示される通り、高周波においても、リサージュ曲線におけるリフトオフ信号の勾配に対してき裂信号の勾配は十分大きく、識別が可能であることがわかった。200 Hz から 5 kHz の周波数範囲内では、5 kHz での差分勾配が最大となった。この結果は、複雑な構造物の検査時にセンサプローブの手走査によるリフトオフのばらつきが発生しても、リサージュ曲線を用いてき裂信号を明確に抽出できることを示唆している。以上の解析を踏まえ、次節では複雑な構造物のサンプルを計測し、き裂信号を抽出できることを実証する。

§ 3.8 複雑な構造物に生じたき裂に対する計測

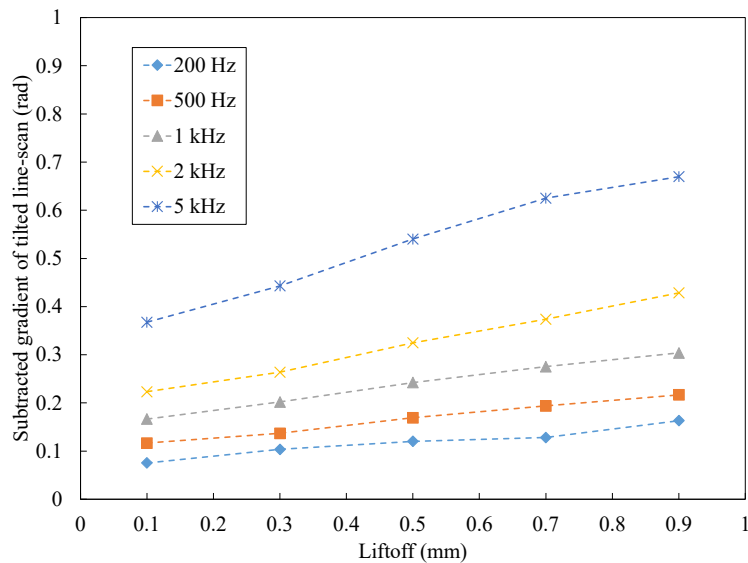


図 3.21 200 Hz から 5 kHz の周波数レンジにて、リサーチ曲線におけるき裂による勾配 θ_{crack} からリフトオフ変動による勾配 $\theta_{liftoff}$ を差し引いた差分勾配

3.8.1 鋼床版の模倣サンプル

差分ベクトルのリサーチ曲線によるき裂信号の抽出手法が有効であることを実証するために、複雑な形状の構造物の1つである鋼床版のUリブとデッキプレートの溶接部を模倣したサンプル(図 3.22)を用意した。鋼床版の模倣サンプルは溶接部に長さ 10 mm, 20 mm, 30 mm (すべてリブ側に貫通)の異なる深さのスリット状の人工き裂3種類を入れたものである。

3.8.2 計測システムとプローブの走査方法

図 3.23 は、鋼床版サンプルの溶接部のき裂の位置と走査経路を示したものである。き裂は溶接部に沿って発生しやすいことがよく知られている。そこで放電加工により、長さの異なる3つの人工き裂(10 mm, 20 mm, 30 mm)を溶接部に沿って作製した。き裂は厚さ 6 mm のリブと溶接部を貫通させた。き裂の幅は 1 mm である。センサープローブに 1 kHz から 5 kHz の周波数で $2 V_{p-p}$ の正弦波電圧を印加し、各き裂および健全領域の経路に沿ってセンサープローブを走査した。

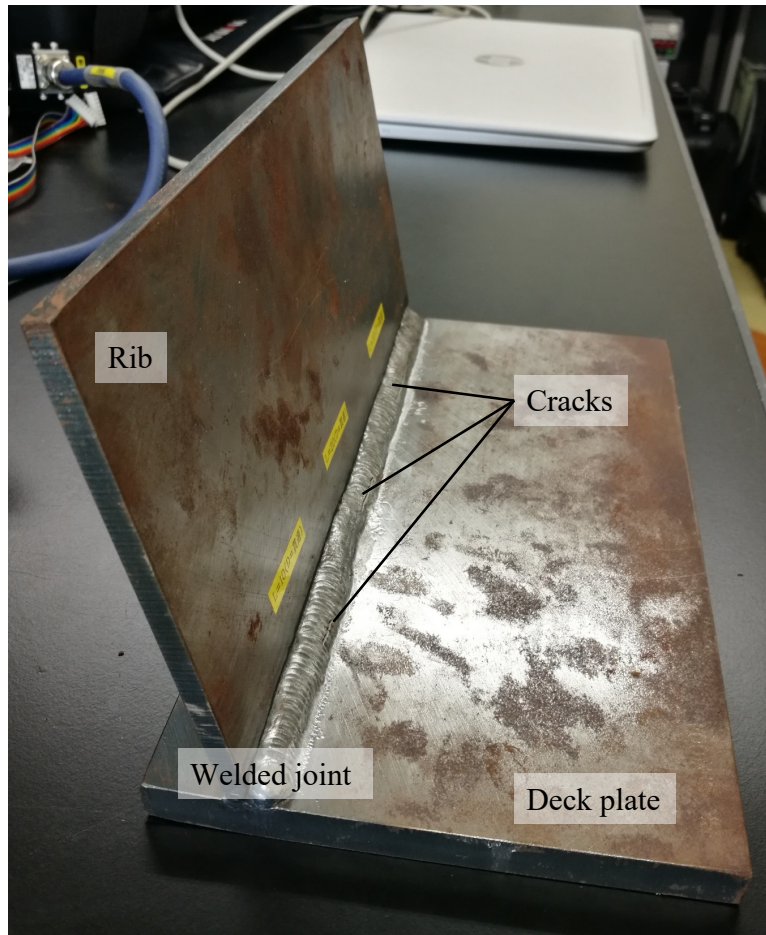


図 3.22 人工き裂を入れた鋼床版溶接部の模倣サンプルの写真

3.8.3 健全部におけるリサージ波形

図 3.24 から図 3.27 はそれぞれ、健全領域及び、長さ 10 mm, 20 mm, 30 mm のき裂に対する走査における差分ベクトルのリサージ曲線である。図 3.24 は健全領域を走査した時のリサージ曲線であり、リフトオフ変動による信号変化のみ現れている。従って、リサージ曲線は $\theta_{liftoff}$ の方向のみの直線的に描かれ、周波数が高くなるにつれて勾配が大きくなった。また、この直線を基準としてき裂信号の抽出をすることができる。

3.8.4 き裂部におけるリサージ波形

一方で、き裂領域におけるリサージ曲線は図 3.25 から図 3.27 のように描かれた。この結果より、き裂信号はリフトオフ信号とは異なる方向に現れていることがわかる。した

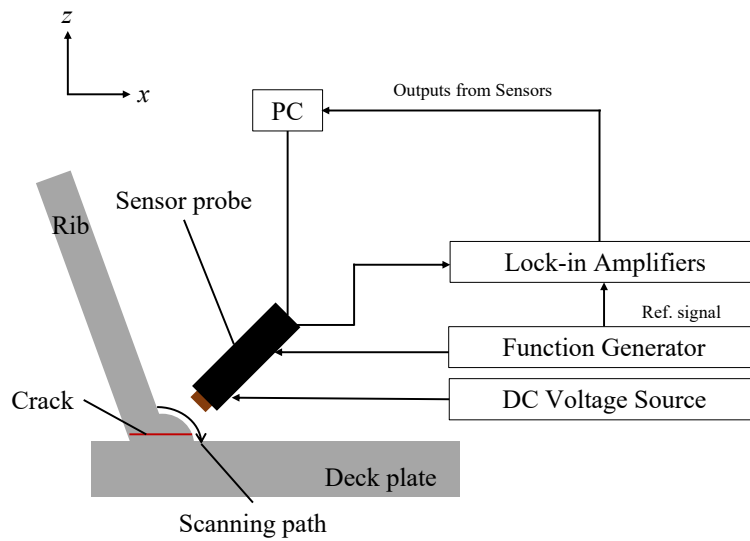


図 3.23 鈹床版の溶接サンプルに対する走査方法

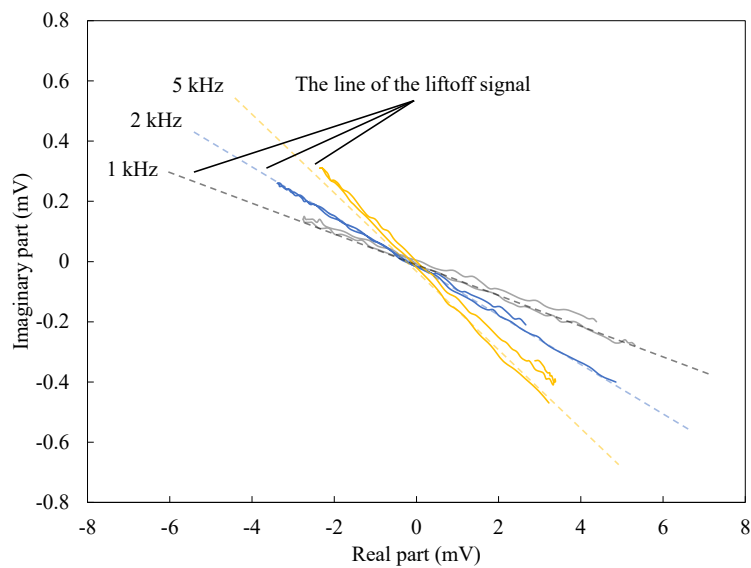


図 3.24 溶接部の健全部に対してセンサプローブを走査した場合のリサージュ曲線

がって、リサージュ曲線を用いて、き裂信号とリフトオフ信号の識別が可能であった。ここで、き裂の長さが 30 mm のリサージュ曲線 (図 3.27) は 10 mm 及び 20 mm のものと比較して、リサージュ曲線によって囲まれる領域に面積が極端に大きい。一方で、リフトオフ信号の基準線からの膨らみはほぼ一定である。従って、き裂の長さによる依存性は確

認できなかった。これは、印加コイルの一辺の長さよりもき裂の長さが十分に大きい。また、印加コイルに沿って渦電流が流れ、その局所的な信号変化をマイクロサイズの TMR センサによって計測している。このためき裂の長さによる信号変化は同等であり、リサーチ曲線によって囲まれる領域の面積の違いは、リフトオフ変動の大きさの違いによるものだと考えられる、

以上の結果より、リフトオフ変動による信号変化を健全領域にて最初に測定し基準線を設定することで、き裂に起因する信号変化を検出することができた。このため、本手法は複雑な鋼構造物の検査にも有用であることがわかった。

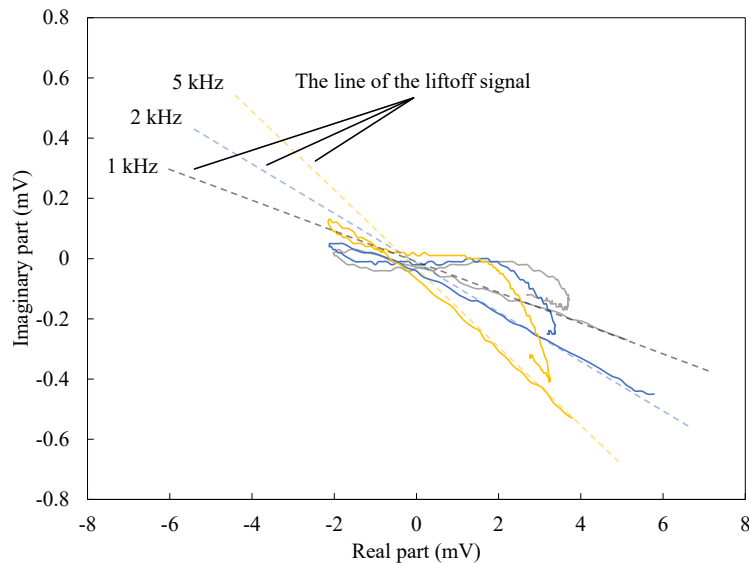


図 3.25 溶接部の長さ 10 mm のき裂スリットに対してセンサプローブを走査した場合のリサーチ曲線

§ 3.9 結論

形状が複雑な構造物に対して ECT を適用するために、差動パラメータによるリサーチ曲線によるき裂信号の抽出法を開発した。2 チャンネル TMR センサを用いた小型に差動センサープローブでき裂信号が得られること、差分パラメータによりリフトオフ信号

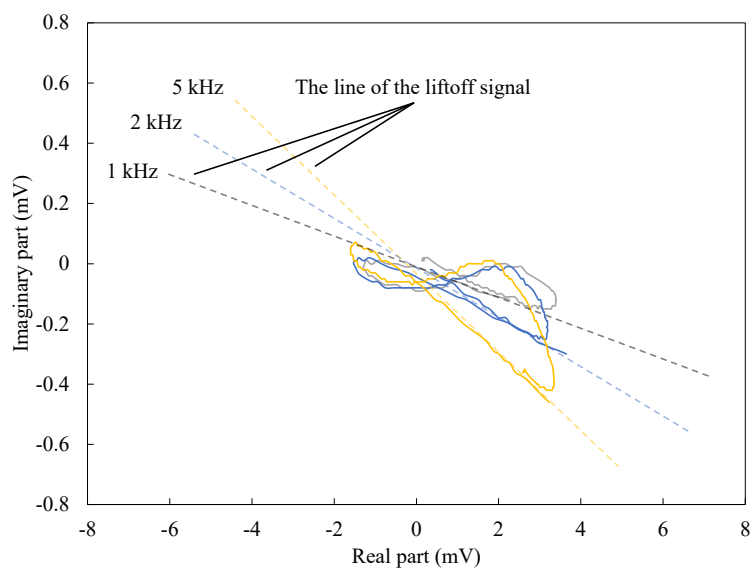


図 3.26 溶接部の長さ 20 mm のき裂スリットに対してセンサプローブを走査した場合のリサージュ曲線

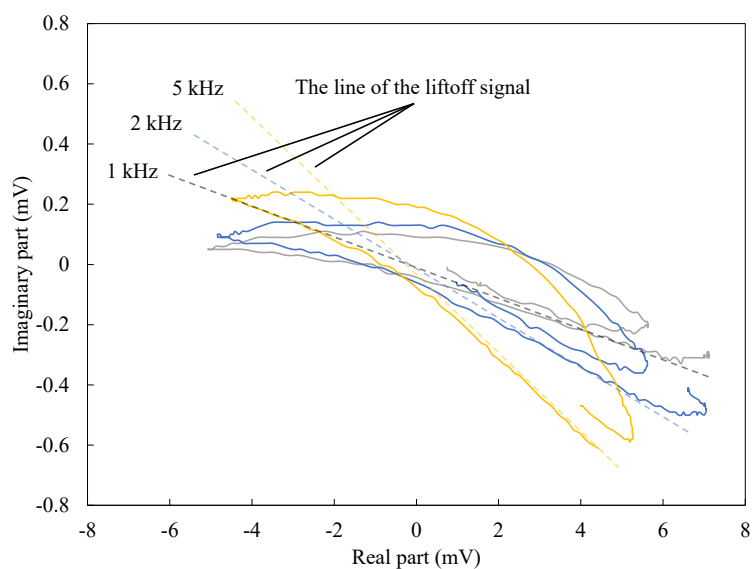


図 3.27 溶接部の長さ 30 mm のき裂スリットに対してセンサプローブを走査した場合のリサージュ曲線

の影響を低減できることをシミュレーションと測定により示した。また、差動パラメータによるリサージュ曲線は、複雑な構造を持つプローブで発生するき裂信号とリフトオフ信号を明確に区別することができた。したがって、この抽出手法は、本研究で測定した溶接部だけでなく、他の形状が複雑な鋼構造物や細部の検査にも適用でき、き裂を検出できると考えられる。

■ コンクリート中の鉄筋破断検出

本章では鉄筋コンクリート構造物においてコンクリート中で発生した鉄筋破断を検出する手法について述べる。コンクリート上から検査を行うために、MFLの原理を用いた鉄筋破断検出用のセンサアレイプローブを開発した。センサアレイにより得られた磁場分布を解析し、1方向の走査のみで鉄筋破断による漏洩信号の2次元画像化ができることを示した。また、破断信号は100 mmの高リフトオフでも確認できた。さらに、従来のMFLで用いられている直流磁場の代わりに交流磁場を用いることで、センサアレイによる位相パラメータを計測した。位相パラメータにより鉄筋破断の度合いの判別や、漏洩信号画像の高コントラスト化が可能であることを示した。

§ 4.1 コンクリート構造物の鉄筋検査

異形鉄筋はコンクリートの引張応力の弱点を補い、橋やビルといった構造物の堅牢性を高めるために幅広く使われている。しかし構造物の老朽化により、コンクリート中で鉄筋の破断が起こる可能性がある [64,65]。破断は構造物の耐久性に直接関係するため、コンクリート中の鉄筋の状態は、構造物の健全性確保のための留意点の1つである。一般的に鉄筋を検査するためには、コンクリートを取り崩し鉄筋を目視できる状態にする「はつり出し」が必要である。しかし、鉄筋のはつり出しによる破壊検査は構造物へのダメージが大きいため、多くの鉄筋を検査することは不可能である。また、はつり出しによってコンクリートを取り除き目視検査を行った後は、コンクリートの復旧作業も必要である。コンクリートの除去や復旧の作業工程は検査技術者に対して大きな負担となっている。このため、コンクリート上から鉄筋を検査できる非破壊検査手法が必要である。

構造物の内部を検査するための非破壊検査法は様々なものがある。超音波法やX線透

過法は構造物の内部を検査するために最も多く使われる方法である [66–69]。しかし、超音波法は多孔質であるコンクリートへの適用は難しい。また、X線検査は安全性の問題に加えて、検査対象を放射線源と受信器との間に挟む必要があることから、構造物の形状、位置などにより制限される。従って、鉄筋コンクリート構造物を検査できない場合が多く、鉄筋の破断を検出できる実用的な手法はほとんど報告されていない。

一方で、磁気を用いた非破壊検査法はコンクリートの影響を受けず、様々な構造物の形状に対応することが出来る。鉄筋の破断を検出できる磁気を用いた手法として、漏洩磁束法を用いた手法が報告されている [70–73]。実用化例としては、コニカミノルタ社が商品化している橋梁の PC 鋼材の破断検査技術である SenrigaN などが挙げられ [74]、原理的には鉄筋にも応用が可能である。これらの手法は、鉄筋を磁化し、鉄筋からの漏洩磁束を測定することによって破断を検出する方法である。しかし、鉄筋を覆うコンクリートの厚さは、鉄筋の腐食を防ぐために 20 mm 以上で、60 mm を超える箇所もある。従って、このようなコンクリート上からの高リフトオフでの検査のため、鉄筋を十分に磁化するための強力な磁化器が必要である。また、一般的に 1 つのセンサやコイルが使用されるため、漏洩信号の測定には見えない鉄筋に沿った広範囲のスキャンングが必要であった。

そこで本章では、不飽和漏洩磁束法 (USAC-MFL) と磁気センサアレイによる破断検出のための手法を提案する。鉄筋の形状に対応させたセンサプローブを開発し、高リフトオフでの鉄筋破断による漏洩信号の検出を行った。また、磁場信号の計測には磁気センサアレイを用いることで、広範囲の漏洩磁場分布を明らかにし、鉄筋破断による漏洩信号の画像化を行った。

§ 4.2 鉄筋破断検出用のセンサアレイプローブ

4.2.1 センサプローブの外観

図 4.1 は鉄筋破断検出用のセンサアレイプローブである。センサプローブは、磁気ヨーク（電磁鋼板）と印加コイル（0.5 ϕ 、200 回巻）から成る磁場を印加するための電磁石と、欠陥信号の画像化のために、20 mm 間隔で設置した 6 個の異方性磁気抵抗 (AMR,

anisotropic magneto resistive) センサアレイ (Honeywell HMC1001) から構成した。

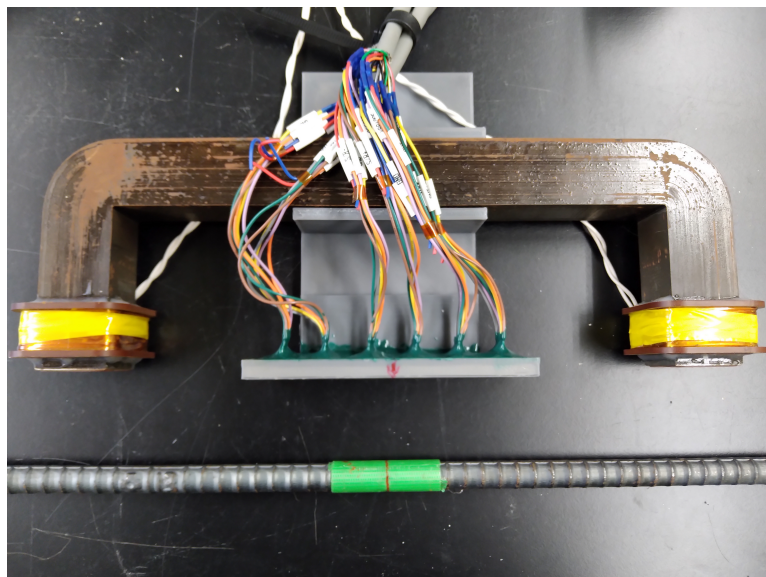


図 4.1 鉄筋破断検出用の磁気センサアレイプローブ

4.2.2 計測システム構成

図 4.2 は計測システム構成である。ファンクションジェネレータと電流源により 20 Hz から 200 Hz, 2.0 A_{p-p} の交流電流を印加コイルに流し、鉄筋と電磁石による磁気回路を形成した。鉄筋の欠陥上からの Z 方向の漏洩磁束の分布を AMR センサアレイによって検出し、センサ回路と AD コンバータ (NI-9223, National Instruments 製) を通してセンサ出力を PC に取り込んだ。取り込んだ信号を、FFT を用いて複素を信号を解析した。この計測を D13(直径 12 mm から 13 mm), 長さ 910 mm の異形鉄筋で切断 (破断) または半分まで切り込み (半分き裂) を入れた 2 種類の欠陥サンプル上の欠陥上 (欠陥はセンサ 3 と 4 の間) で行った。リフトオフは 20 mm から 100 mm まで変化させ、破断サンプル, 半分き裂が表側にある場合, 裏側にある場合についてのそれぞれに対して計測を行った。また, 欠陥信号の画像化をするために, 図 4.3 に示す通り鉄筋上を Y 軸方向へ 200 mm(10 mm 刻み) でセンサプローブを走査し, 100 mm×200 mm の範囲の磁場分布を磁気センサアレイにより計測した。

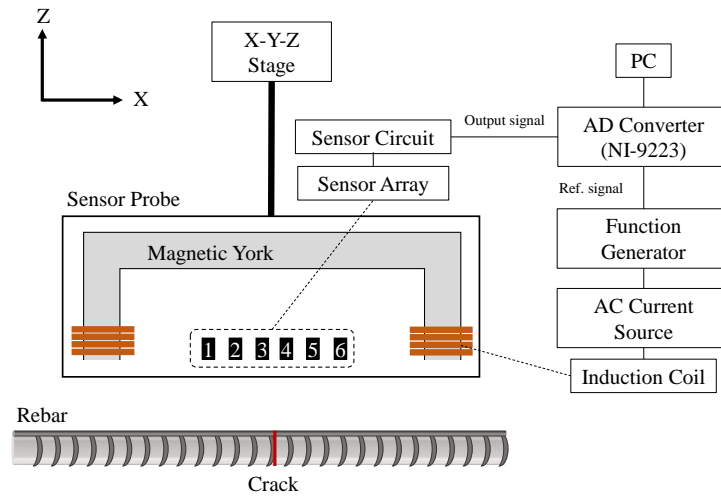


図 4.2 センサプローブと計測システム構成

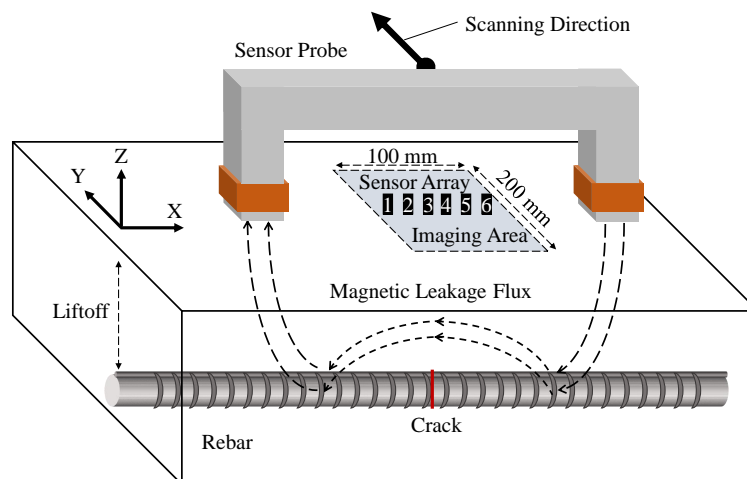


図 4.3 センサプローブの走査方法

§ 4.3 計測結果と磁場信号の解析

4.3.1 鉄筋上における磁場の空間分布

破断による漏洩磁束を確認するため、空气中、健全な鉄筋上、破断した鉄筋上でのそれぞれの磁場分布を比較する。図 4.4 は周波数 20 Hz、リフトオフ 40 mm で磁気センサアレイによって計測した磁場分布である。図 4.4a は計測信号の実部であり、印加磁場と同位相の信号である。空气中の磁場分布における負と正の信号は、健全な鉄筋からも観測されるため、それぞれのコイルから直接入る信号だと考えられる。

健全な鉄筋上における測定された磁場分布のピーク値 (センサ 1 とセンサ 6 の差) は、空气中での磁場分布のピーク値と比べて小さくなった。これはコイルから直接センサの方向に流れていた磁束が、鉄筋を通るようになったからだと考えられる。そして破断があると磁束が漏洩するため、健全な鉄筋と比べて磁場分布のピーク値が大きくなっている。図 4.4b に示される信号の虚部は、主に位相遅れのある渦電流による信号であると考えられる。空气中において渦電流による信号はほぼ確認できなかった。健全な鉄筋上においては、鉄筋で発生した渦電流が発生させる磁場分布が測定された。破断がある場合、健全な鉄筋と比べて磁場分布が小さくなっている。これは、印加磁場を打ち消す向きに、鉄筋の周に沿った渦電流も発生する。このため、印加磁場とは逆向きの磁束が漏洩し、跳ね返る磁場を打ち消すからだと考えられる。以上より、健全な鉄筋と欠陥のある鉄筋とで磁場分布の変化を測定することが出来た。従って、健全な鉄筋での磁場信号をリファレンス信号として差し引くことで、破断による漏洩信号を抽出できる。

コンクリート中の鉄筋は完全に破断しているものの他に、き裂が生じているものもあると想定される。図 4.5 は破断した場合、半なき裂が表側にある場合、裏側にある場合における漏洩磁束信号である。破断による漏洩信号より小さくなるが、半分のき裂が生じた場合においても漏洩信号を測定することができた。また、き裂部分の位置による違いはほぼ見られず、裏側にある場合でも漏洩信号を確認することが出来た。

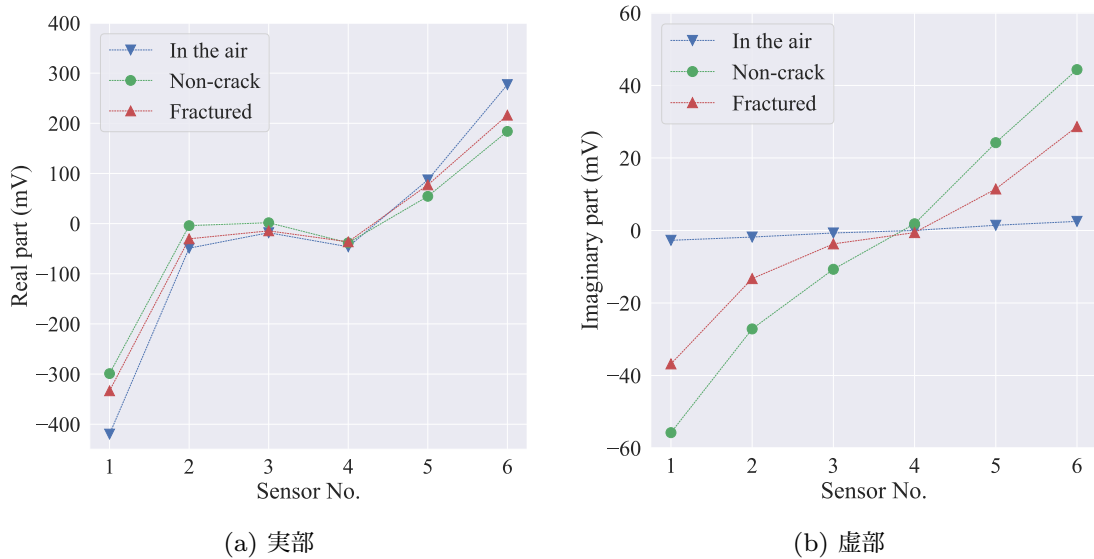


図 4.4 周波数 20 Hz, リフトオフ 40 mm においてセンサアレイによって測定した磁場分布

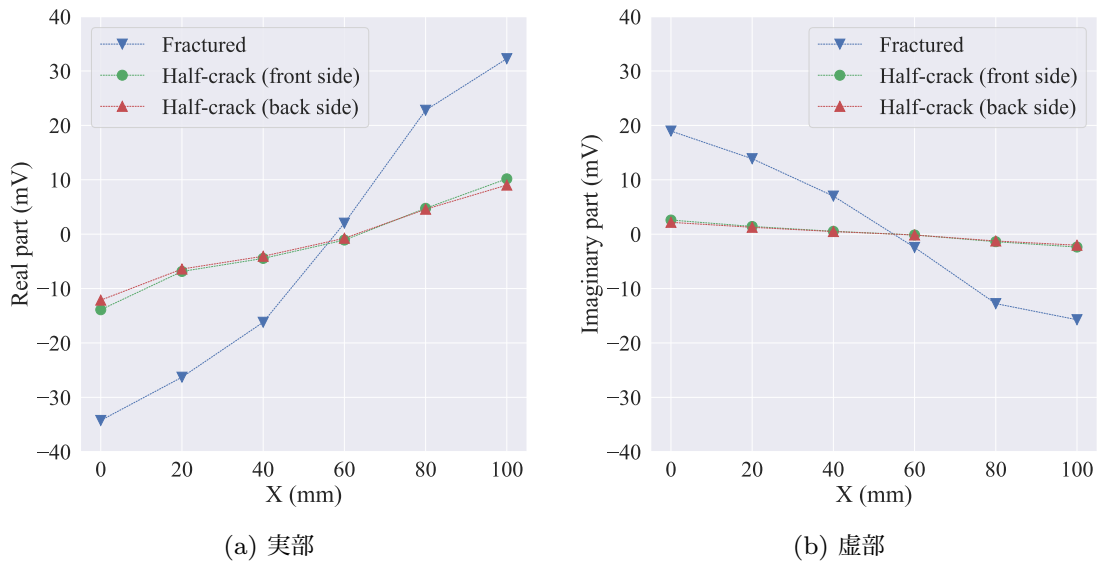


図 4.5 周波数 20 Hz, リフトオフ 40 mm における破断及びき裂による漏洩磁束の分布

4.3.2 高リフトオフでの破断信号の検出限界

鉄筋のかぶり深さが大きい場合もあるため、高リフトオフでの検査が可能でなければならない。破断鉄筋上において、リフトオフ変化による漏洩信号のピーク値 (センサ 1 とセンサ 6 の差分) の変化を図 4.6 に示す。ただし、周波数は 20 Hz である。漏洩信号

の強度はリフトオフが大きくなるにつれ小さくなるが、実部虚部共にリフトオフ 100 mm においても漏洩信号が確認できた。

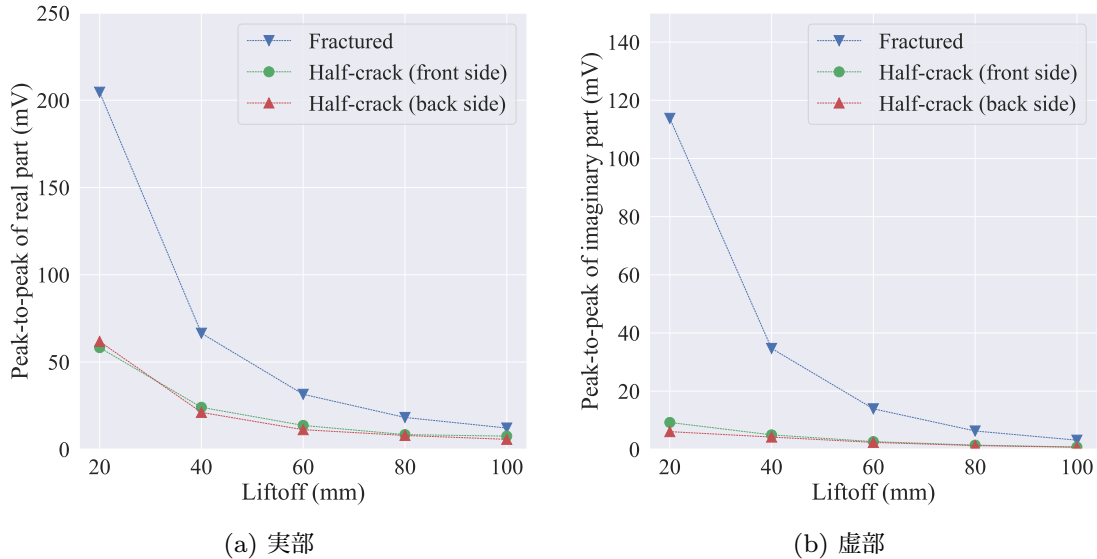


図 4.6 周波数 20 Hz における破断またはき裂による漏洩磁束の分布

4.3.3 破断による漏洩磁場の周波数依存性

USAC-MFL は交流磁場を用いているため、位相遅れの無い磁化信号の他に、位相遅れのある渦電流によって生じた磁気信号も測定している。渦電流は周波数に依存する性質を持ち、表皮効果による影響を受ける。このため欠陥による漏洩磁場信号も周波数により変化すると考えられる。最適な周波数は欠陥による漏洩信号が実数部と虚数部共に最大となる周波数である。従って、実数部と虚数部のそれぞれのピーク値（センサ 1 とセンサ 6 の差）の合成を以下の式に定義する。

$$\text{combined peak value} = \sqrt{(\text{peak value of real part})^2 + (\text{peak value of imaginary part})^2} \quad (4.1)$$

図 4.7 に式 4.1 によって得られた各周波数におけるピーク値の合成を示す。ピーク値の合成は 20 Hz で最大となることから、測定した周波数範囲内では 20 Hz が最適である。また、コイルのインピーダンスは周波数が大きくなるにつれて大きくなることから、電力

の観点からも低周波が良いと考えられる。

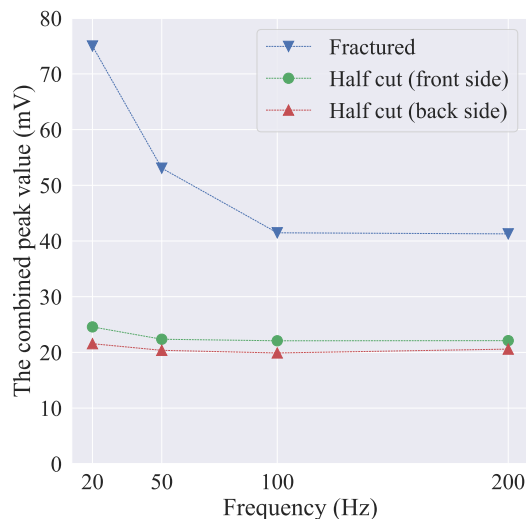


図 4.7 リフトオフ 40 mm における破断及びき裂による漏洩磁束の周波数依存性

§ 4.4 センサアレイによる漏洩磁場の画像化

4.4.1 漏洩信号の画像化

図 4.8 及び図 4.9 は磁気センサアレイによるイメージング画像と破断した鉄筋上での磁場分布である。ただし、周波数は 20 Hz、リフトオフ 40 mm であり、鉄筋は Y=100 mm のポジションである。健全な鉄筋での信号をリファレンス信号として差し引くことで、1 方向の走査のみで欠陥からの漏洩磁束による信号変化を画像化することが出来た。

4.4.2 センサアレイによる位相パラメータ

また、USAC-MFL は位相遅れの無い磁化信号と、位相遅れのある渦電流による信号を検出している。従って、測定信号は実部と虚部に分けられる。そこで、図 4.8 及び図 4.9 に示される Δx と Δy を用いて、以下の式 4.2 により位相を算出しすることができる。

$$\theta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4.2)$$

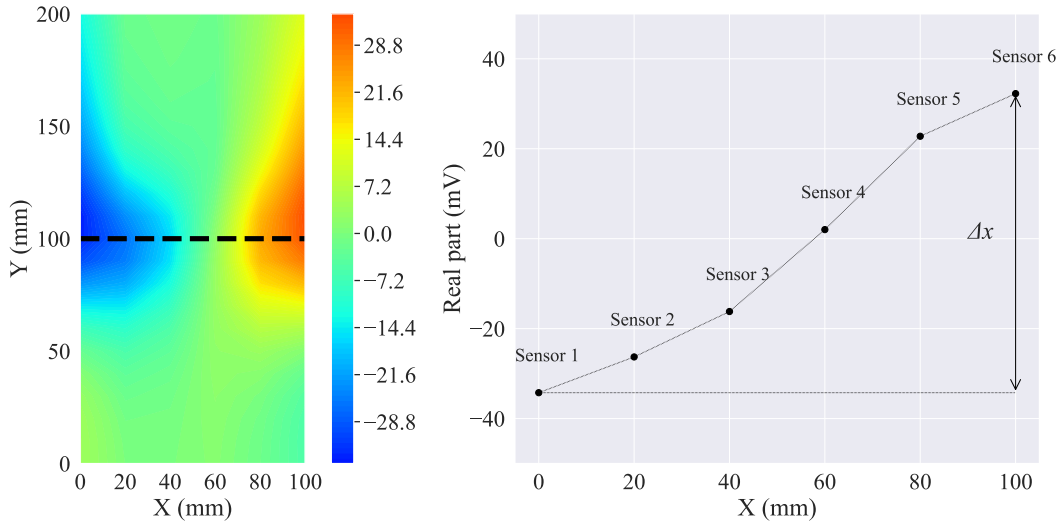


図 4.8 センサアレイにより得られた欠陥による漏洩信号の実部画像

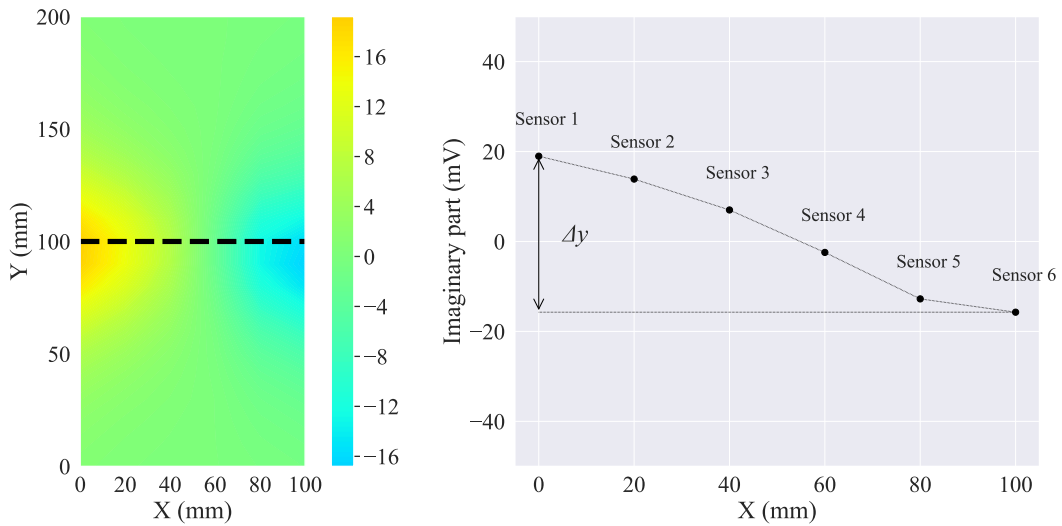


図 4.9 センサアレイにより得られた欠陥による漏洩信号の虚部画像

図 4.10 は式 4.2 により算出された位相とリフトオフの関係である。完全に破断した鉄筋では 0.5 rad 前後である一方で、半分までのき裂が入った鉄筋では 0.2 rad と小さい。このため位相の値により、鉄筋が完全に破断しているかどうかの判別が可能であると考えられる。

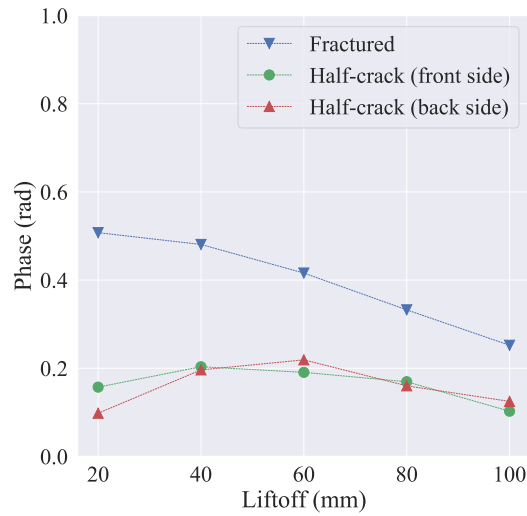


図 4.10 式 4.2 により得られた位相とリフトオフの特性

4.4.3 位相パラメータによる画像の高コントラスト化

また、式 4.2 により算出した位相を用いて、式 4.3 により、図 4.11 のように各磁気信号の位相を進めることにより、欠陥信号を強調することが出来る。ただし B は 1 方向の走査により得られた各点と各センサで測定された複素信号の行列である。

$$B_{adv} = B \times e^{j\theta} \quad (4.3)$$

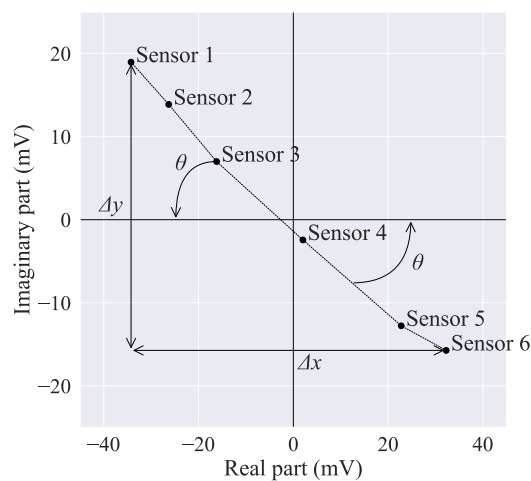


図 4.11 周波数 20 Hz, リフトオフ 40 mm にて測定した破断した鉄筋上での磁場分布と位相進行

図 4.12 および式 4.13 は式 4.3 により位相を進め生成した実部と虚部の画像及び、それぞれの鉄筋上 ($Y=100$ mm) での磁場分布である。実部においては位相を進めると信号が 10 mV 程度大きくなる一方で、虚部の強度はほぼ 0 mV になっている。これは適切な位相を進めることで、実部と虚部に分かれていた信号を合成し強調できたと考えられる。

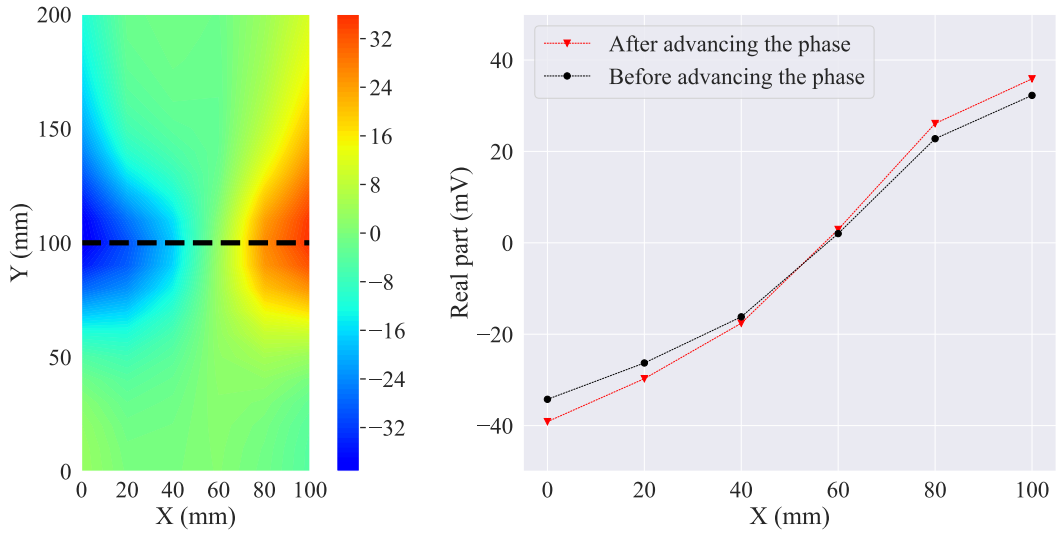


図 4.12 センサアレイにより得られた欠陥による漏洩信号の実部画像

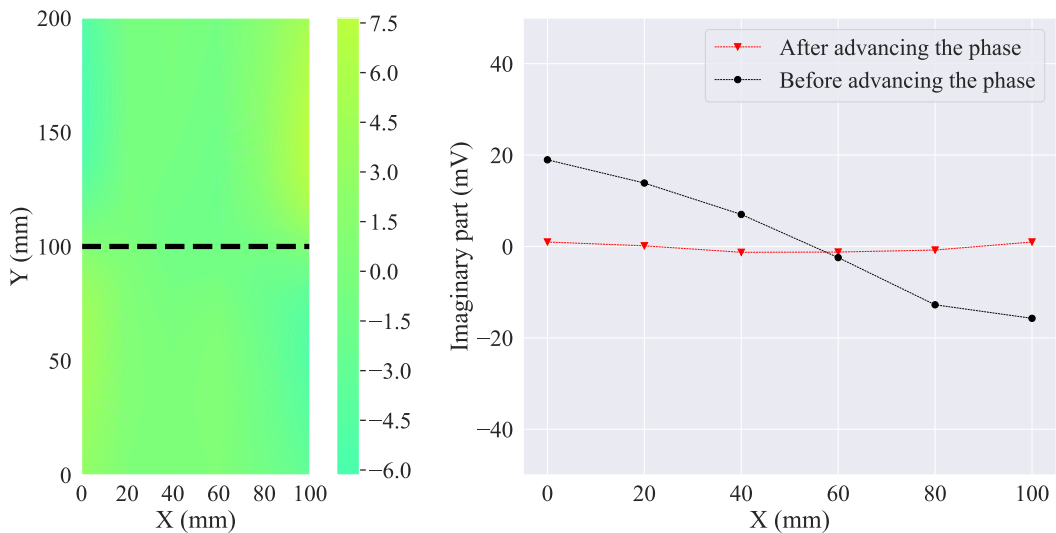


図 4.13 センサアレイにより得られた欠陥による漏洩信号の虚部画像

§ 4.5 結論

本章ではコンクリート中の鉄筋破断を検出するために、磁気センサアレイによるプローブを開発し、破断による磁束漏洩信号の検出とイメージングを行なった。破断及びき裂による漏洩信号の分布を、高リフトオフでの状況下においても磁気センサアレイにより計測及び画像化することができた。また、漏洩磁束は磁気センサアレイにより計測された適切な位相により強調することができた。

磁気を用いた手法によって、これまでコンクリートを取り崩して鉄筋を「はつり出す」工程と復旧の作業無しに検査が可能である。また、本章で用いた USAC-MLF は低電力で使用が可能である。さらに、磁気センサアレイによる広範囲の磁場分布の計測が可能であり、1方向の走査のみで漏洩信号の画像化が可能である。従って、鉄筋コンクリート構造物における鉄筋検査の効率化が期待できる。

溶接部塗装下のき裂検査

本章では塗装された鋼構造物の溶接部に発生したき裂を早期に検出するための手法について述べる。橋梁や鋼床版では T 字型に溶接された構造がしばしば散見される。そこで、T 字型の構造物に対応させた溶接部のき裂検出用の探傷センサプローブを開発した。初期の浅いき裂は磁気信号の強度として小さく見逃しの可能性がある。そこで、開発したセンサプローブの性能を、受信者動作特性 (ROC, Receiver operating characteristic) 曲線と混合行列を用いて評価した。評価した結果、数 mm の浅いき裂でも検出することができた。また、き裂判定の閾値を下げることで見逃しを少なくできることがわかった。

§ 5.1 鋼構造物溶接部のき裂検査

橋梁や道路の鋼床版といった鋼構造物における溶接部は応力が集中し、疲労によるき裂が発生しやすい箇所である。溶接部に生じた疲労き裂はいったん発生するとそこから大きく広がり、構造物の倒壊のリスクが高くなる。このため、溶接部を重点的に検査し、疲労き裂を早期に発見することが重要である [75–78]。

鋼構造物に生じたき裂を検出するためには、目視検査 (VT, Visual testing) をはじめ、磁粉探傷検査 (MT, Magnetic particle testing) と超音波検査 (UT, Ultrasonic testing) が最も多く行われる [79,80]。しかし、鋼構造物は構造物自体や景観保護のために塗装が施されている。鋼構造物内でき裂が発生すると、塗装も同時にひび割れることが多い。従って、VT では鋼構造物自体に発生したき裂か、単なる塗装割れなのか判断することができない。また、MT を塗装上から適用すると、塗装割れ自体に蛍光磁粉が溜まるため、VT と同様に鋼構造物自体に発生したき裂であるのか判別が不可能である。そこで MT を用いる場合、次のような検査工程が必要である。1. 塗装を除去する。2. 強力な磁化器によ

て検査箇所を磁化させると同時に蛍光磁粉スプレーを吹き付ける。3. 余分な蛍光磁粉を除去し、ブラックライトで照らしながらき裂に付着した蛍光磁粉のパターンを観察する。4. 検査箇所を洗浄した後、塗装を復旧する。このように、多くの検査工程が必要であり現場での大きな負担となっている。UT の場合、塗装によりエコーが減衰することから、正確な診断ができない場合がある。また、検査対象の表面から 5 mm 程度の深さの領域は不感帯（デッドゾーン）と呼ばれ、UT による検査が困難な領域である。従って、鋼構造物の溶接部の表面に現れたき裂を UT を使って検出することが難しい。従って、塗装上からそのままき裂を検出できる手法が求められている。

渦電流探傷法 (ECT) や漏洩磁束法 (MFL) といった磁気的手法は塗装上からでも検査が可能である。これらの手法は天然ガスや石油の輸送パイプラインや貯蔵タンクなど、鋼構造物のき裂を検出するために頻繁に用いられている [51,81-83]。しかし、平板や円柱などの形状が単純なものではなく、橋梁や鋼床版によく散見される T 字や U 字の構造物の溶接部のような形状が特殊なものに対しては適用が難しい。特殊な形状であることに加えて、鋼構造物は強磁性体であり、透磁率の不均一性による磁気ノイズに大きく影響をうける。そこで、透磁率の不均一性を軽減するために、検査箇所に大きな直流磁場を印加し磁気飽和させるという手法がとられている [84,85]。しかし、構造物を磁気飽和させるためには数 T(テスラ) オーダーの非常に大きな磁場を印加する必要がある。数 T の磁場を印加するためには数 10 A(アンペア) オーダーの電流を流す必要があり、kW (キロワット) クラスの大きな電源を必要とする。

そこで本章では、塗装上から鋼構造物の溶接部に生じたき裂を検出するために、不飽和漏洩磁束法 (USAC-MFL) を用いて、T 字型の鋼構造物の溶接部形状に対応させたセンサプローブを開発した。USAC-MFL は MFL の 1 つであり、従来の手法で用いられる大きな直流磁場の代わりに、鋼材の初期直特性の線形領域を超えない範囲の小さな交流磁場を用いる手法である。小さな交流磁場を用いていることから、数十 W クラスのモバイルバッテリー程度の電力で用いることができる。また、鋼構造物の磁化の影響を受けにくいことも特徴である。我々の研究グループでも、本手法を用いて省電力かつ高感度に鋼板や鉄筋の欠陥を検出できることを示している [58,86]。開発したセンサプローブの性能評価

するために、塗装が施されき裂スリットの入った溶接サンプルを用意した。深さの異なるき裂スリットとき裂の無い健全な箇所に対して計測し、漏洩磁束信号を解析した。き裂によっては信号強度として小さく、見逃し (FN, False negative) や誤検知 (FP, False positive) の可能性がある。このため、FN や FP を最小化することが求められる。そこで解析した信号を基に、混合行列と ROC 曲線 (Receiver operating characteristic curve) により、き裂を判別するための適切な閾値を求め、き裂の検出性能を評価した。

§ 5.2 橋梁におけるき裂の発生箇所の例

図 5.1 は岡山県倉敷市にある倉敷川橋（下り）の写真（2020 年 11 月撮影）である。本橋梁は 1962 年完工であり、50 年以上運用されてきたものである。倉敷川橋はアーチ橋で、吊材によって橋桁を支える構造をしており、吊材はガセットプレートを通して橋桁と溶接されている（図 5.2）。このような溶接部は応力が集中する箇所であり、橋を通過する車両の振動によって疲労き裂が発生しやすい。このため、VT 及び MT による定期的な検査が行われている。



図 5.1 倉敷川橋の写真（2020 年 11 月撮影）

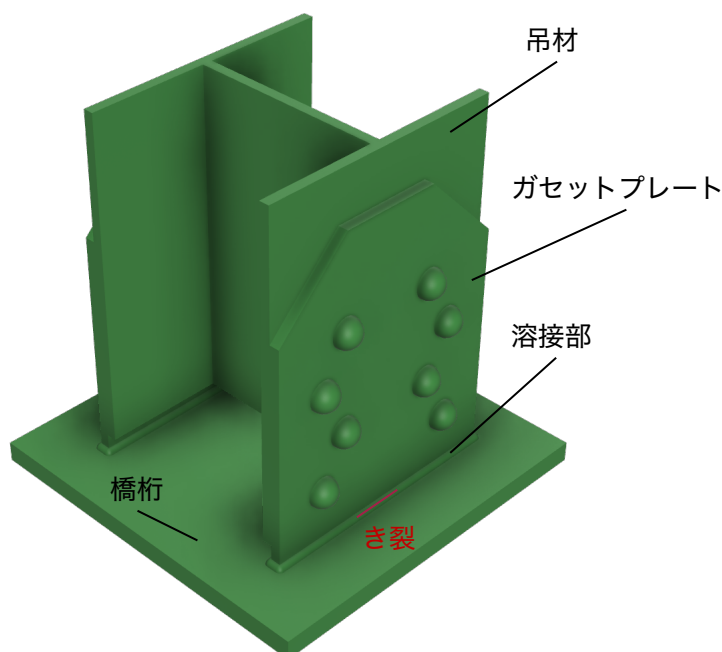


図 5.2 橋梁におけるき裂発生箇所の周辺構成

§ 5.3 塗装された T 字溶接接合サンプル

溶接サンプルは橋梁などでよく散見される T 字型の構造物を模倣したものを用意した。ベースプレート (200 mm × 200 mm × 19 mm) とリブ (100 mm × 150 mm × 19 mm) が T 字型に溶接されたものである。塗装の厚さは 125 μm と 250 μm の 2 種類であり、それぞれの塗装の厚さのサンプルを 10 個ずつ、合計 20 個用意した (図 5.3)。

き裂の発生の仕方として、溶接部の下部 (Line A) に生じ、ベース側に広がっていくもの、溶接部の上部 (Line B) に生じてリブ側に広がっていくもの、溶接部中央 (Line C) に生じて奥に広がっていくものが考えられる。従って、それぞれの Line に対して様々な深さのき裂を作った。き裂の深さは 1 mm から 5 mm で、側面は溶接部の Line A に対して 16 箇所、Line B に対して 19 箇所、Line C に対して 13 箇所の合計 48 箇所である。また、まわし溶接部のき裂は、Line A に 3 箇所、Line B には 4 箇所、Line C には 5 箇所の合計 12 箇所とした。側面の溶接部及びまわし溶接のそれぞれの Line で、き裂上及び健

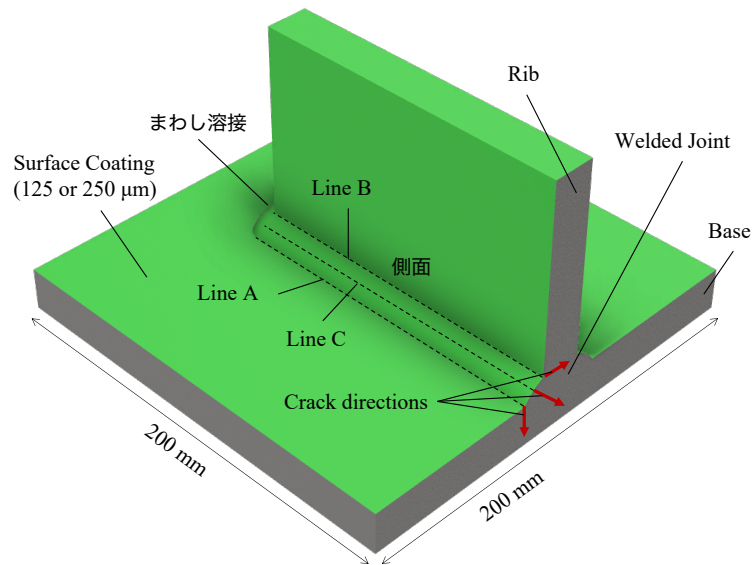


図 5.3 塗装された溶接サンプル

全部での信号を計測した。

なお、塗装の種類としては鋼道路橋塗装用塗料標準 (2014) に示される、A-5 塗装系 (塗装厚さ 125 μm) と C-5 塗装系 (塗装厚さ 250 μm) のサンプルをそれぞれ 10 個ずつ用意した。

5.3.1 A-5 塗装系

塗装厚さが 125 μm のサンプルは A-5 塗装系である。A-5 塗装系は、塗装前に「長ばく形エッチングプライマー」を 15 μm の塗布を行ない、35 μm の下塗りとして「鉛・クロムフリーさび止めペイント」をそれぞれ 2 回スプレーで塗装する。下塗りの乾燥後、「長油性フタル酸樹脂塗料中塗」を 30 μm 及び「長油性フタル酸樹脂塗料上塗」を 25 μm 、はけローラーで塗装したものである。これらの塗装により、125 μm の塗装厚さ (プライマーを除く) を最低限確保している (図 5.4)。

5.3.2 C-5 塗装系

塗装厚さが 250 μm のサンプルは C-5 塗装系である。C-5 塗装系は、塗装前に「無機ジンクリッチプライマー」を 15 μm の塗布を行ない、防食下地として「無機ジンクリッチ

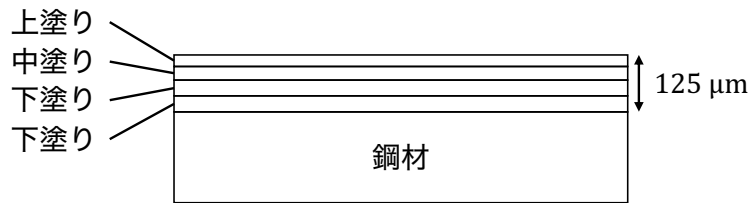


図 5.4 A-5 塗装系における塗膜構成

ペイント」を $75\ \mu\text{m}$ スプレーにて塗布する。プライマー及び防食下地の上に「エポキシ樹脂塗料下塗 A, B」を下塗りとして $120\ \mu\text{m}$ 、中塗りとして「ふっ素樹脂塗料用中塗」を $30\ \mu\text{m}$ 、上塗りとして「ふっ素樹脂塗料上塗」を $25\ \mu\text{m}$ スプレーにて塗布したものである。このため、塗装の厚さ（プライマーを除く） $250\ \mu\text{m}$ を最低限確保している（図 5.5）。

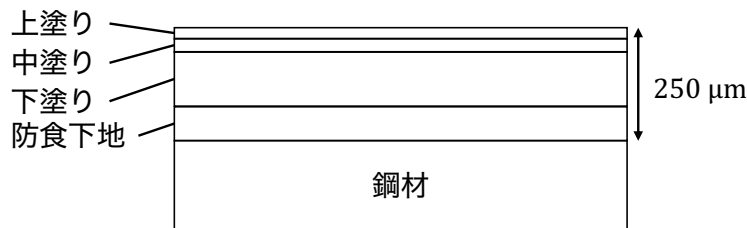


図 5.5 C-5 塗装系における塗膜構成

§ 5.4 溶接部用のセンサプローブ

センサプローブは 2 つのフェライトコア、2 つのコイル (25 回巻)、TMR(Tunnel magneto resistance) センサで構成した (図 5.6 及び 5.7)。計測システムは電流源、AD コンバータ (NI-9223, National Instruments 製)、DC 電源、PC から構成した。2 つのコイルにそれぞれ逆位相の交流電流 ($1\ \text{kHz}$, $200\ \text{mA}_{\text{p-p}}$) を印加し、溶接サンプルのリブ、ベースプレート、ヨークにより磁気回路を形成した。それぞれのラインにおいて、き裂上と健全部上での漏洩磁束を 2 つの TMR センサにより計測し、AD コンバータにより収録し FFT(Fast Fourier transform) 後の信号を解析した (図 5.8)。

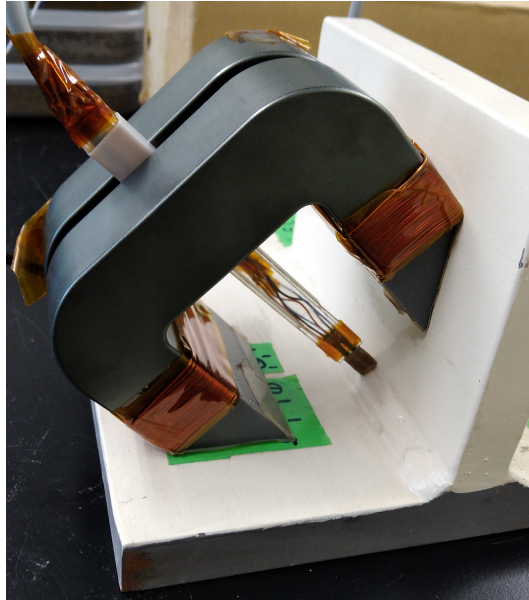


図 5.6 溶接部形状に対応させたセンサプローブの写真と塗装された T 字型溶接サンプル

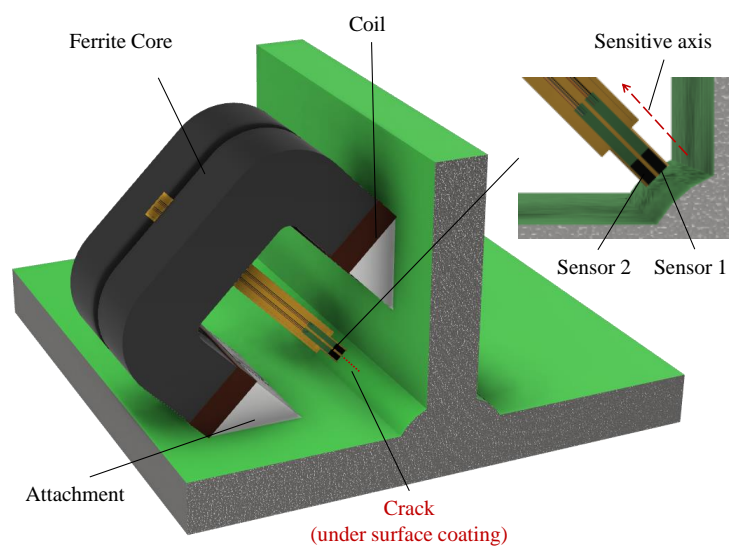


図 5.7 溶接部形状に対応させたセンサプローブの構成

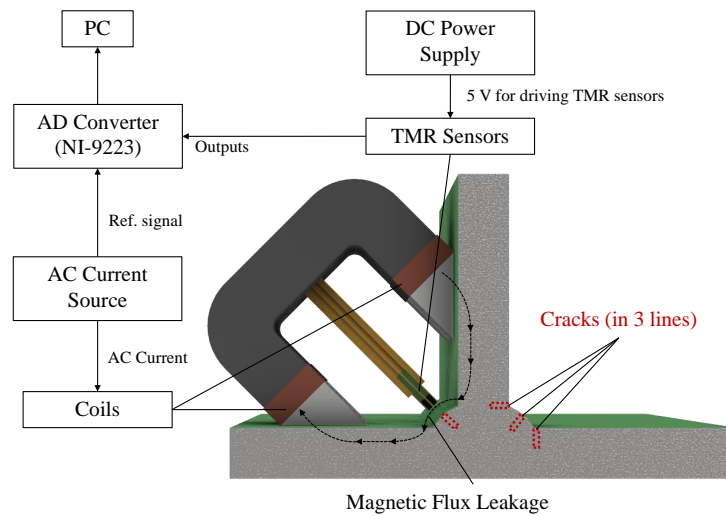


図 5.8 溶接部形状に対応させたセンサプローブと計測システム

§ 5.5 信号処理及び測定信号の解析

5.5.1 単一のセンサによって計測された磁場信号

図 5.9 から図 5.14 は側面の溶接部及びまわし溶接部の各ラインにおいて健全部とき裂上でそれぞれ計測された FFT 後の信号である。交流磁場を印加しているため、計測される漏洩磁場も交流信号である。このため、実軸と虚軸の複素平面上にプロットすることができる。原点からの距離が強度に相当する。この状態では健全部の信号とき裂の信号の判別がつかない。そこで、2つの TMR センサの出力差分を行う。

5.5.2 2つのセンサによる差分信号

図 5.15a, から図 5.17a 及び図 5.18a から図 5.20a は、側面の溶接部とまわし溶接部におけるそれぞれの Line での 2つの TMR センサによる差分信号である。差分を取ることによって、健全部での信号とき裂での信号がそれぞれ、複素平面上でクラスタを形成しており、健全部とき裂による漏洩信号の強度（原点からの距離）の差が表れていることが分かる。このため、き裂と判別するための閾値が求めれば、定量的にき裂を検出できると考えられ

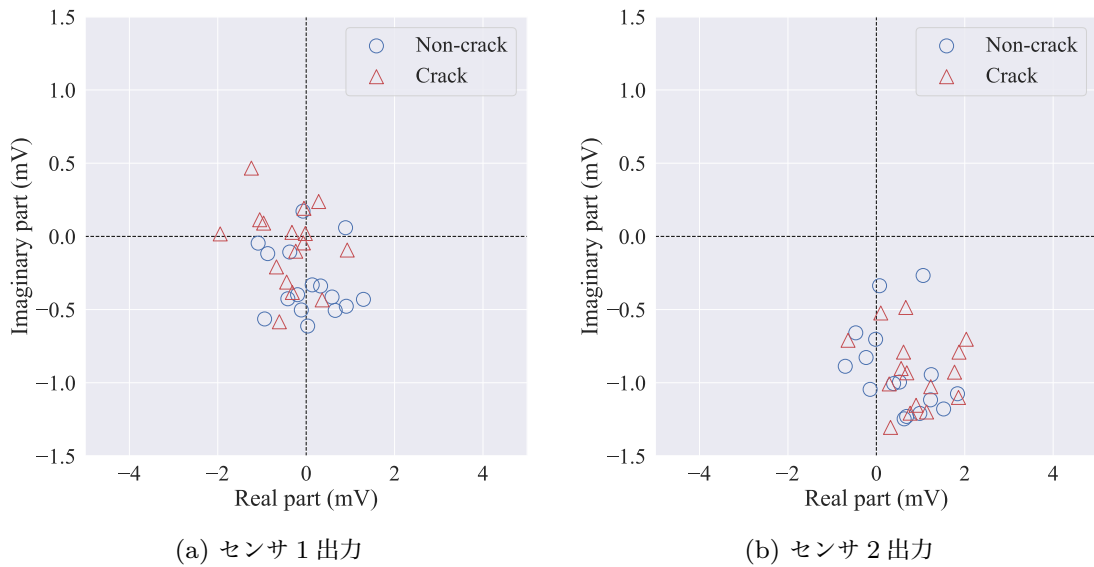


図 5.9 側面の溶接部 Line A における FFT 後のセンサの出力

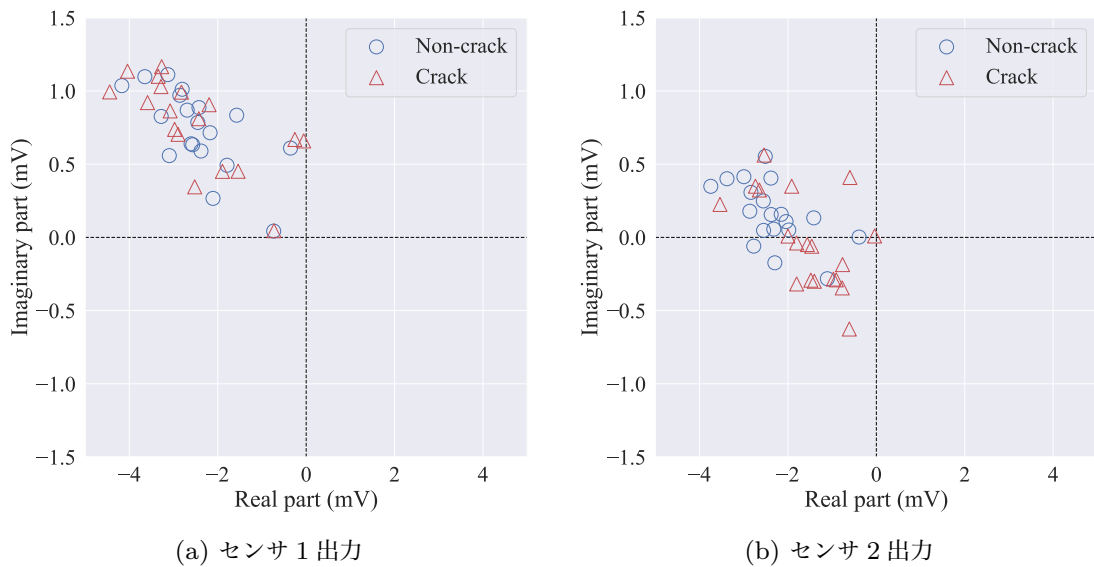


図 5.10 側面の溶接部 Line B における FFT 後のセンサの出力

る。健全部とき裂部で強度差が現れる理由は次の通りである。き裂によって漏洩する磁束は、湧き上がる側と吸い込む側の2つの極性を持っている。このため、き裂上に2つのセンサを置くと、片方のセンサからは正の信号、もう片方のセンサでは負の信号が計測される。したがって、2つのセンサの差分をとることで、き裂による漏洩信号を強調できたと

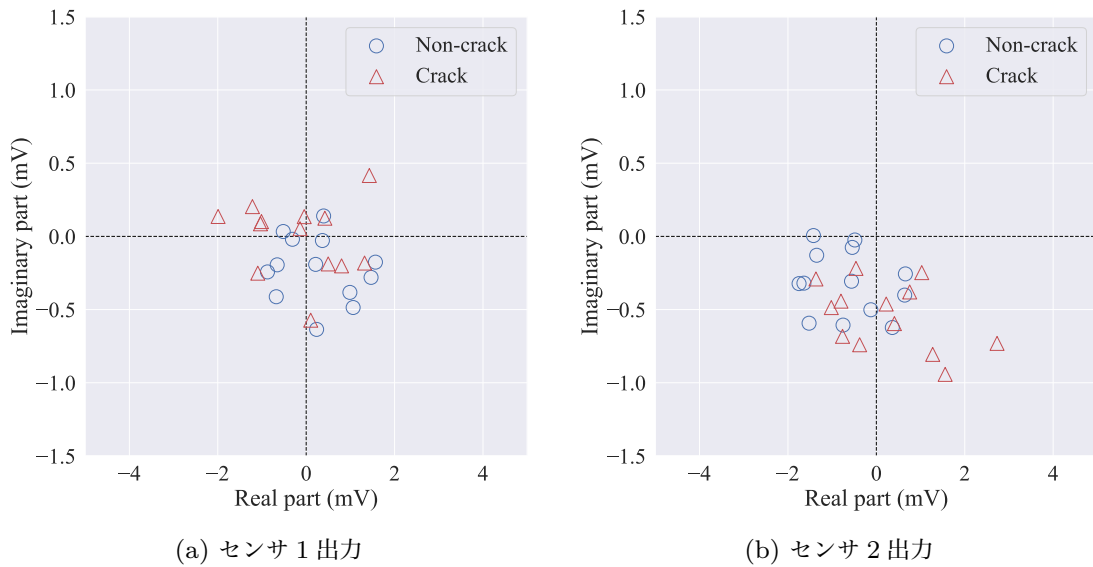


図 5.11 側面の溶接部 Line C における FFT 後のセンサの出力

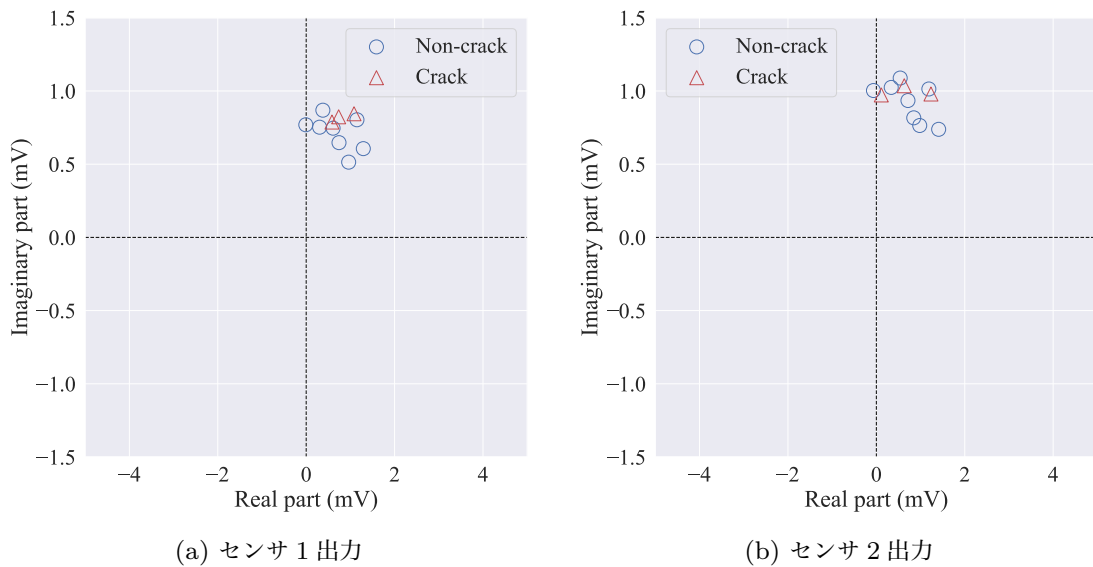


図 5.12 まわし溶接部 Line A における FFT 後のセンサの出力

考えられる。

また、健全部の信号は完全に原点ではなく、健全部であっても漏洩信号が計測されている。これは、溶接部表面の凹凸や、ベースと溶接部またはリブと溶接部の隙間といった、形状の不規則性によるものだと考えられる。そこで、き裂による漏洩信号と比較を行うた

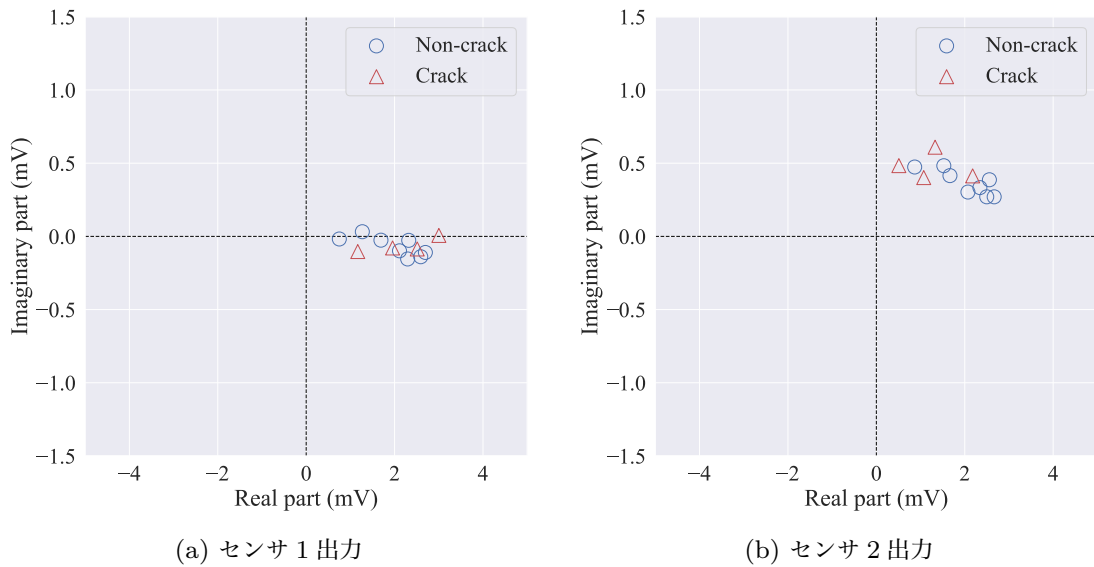


図 5.13 まわし溶接部 Line B における FFT 後のセンサの出力

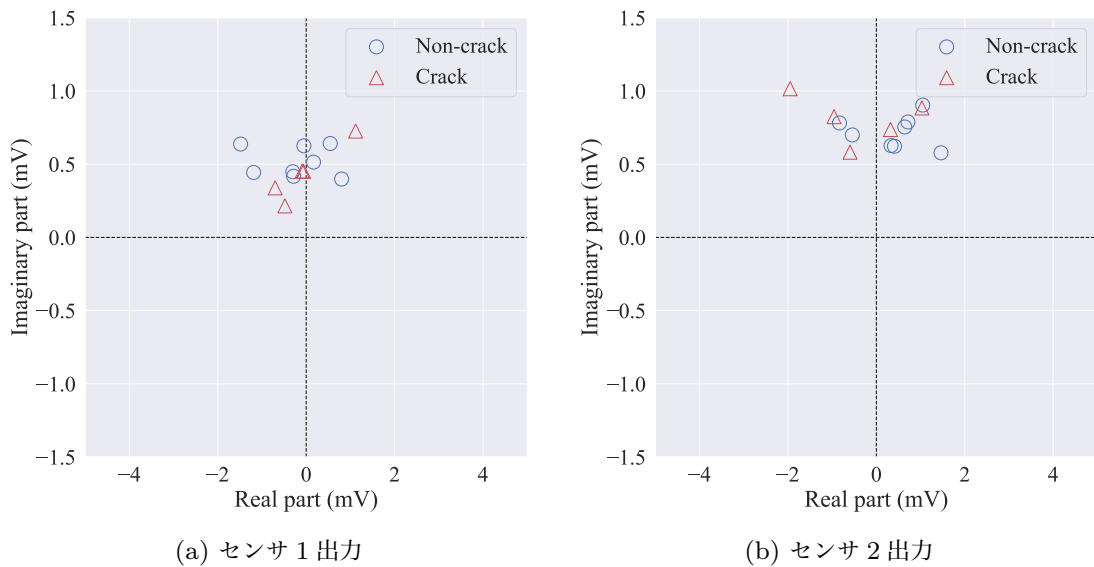
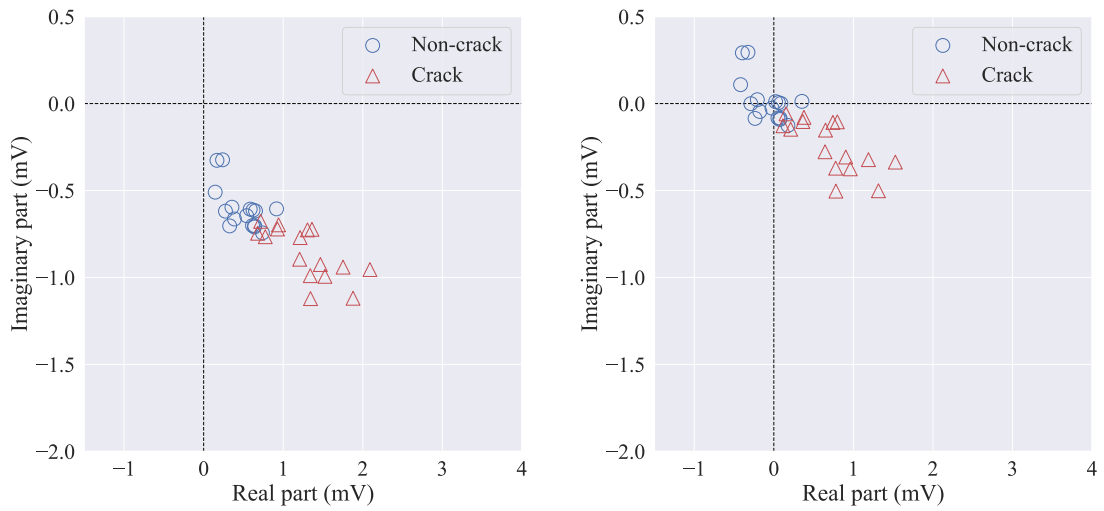


図 5.14 まわし溶接部 Line C における FFT 後のセンサの出力

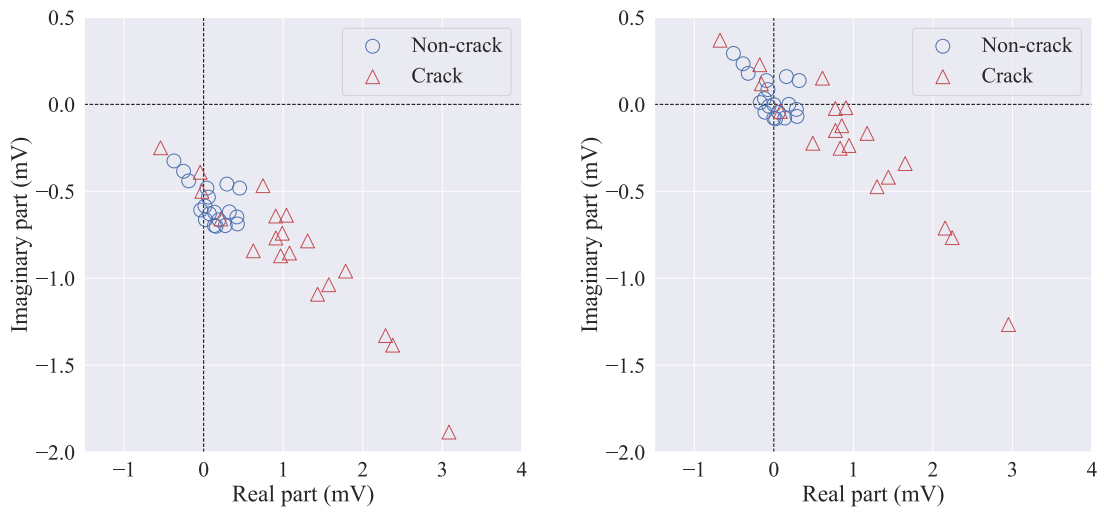
めに、同一ラインにおける健全部信号の中央値を各信号から差し引いた。中央値を差し引くことで、健全部の信号群が原点近傍へシフトする(図 5.15b から図 5.20b)。この状態における信号強度(原点からの距離)を用いて、き裂信号の解析を行った。



(a) オフセット除去前の差分信号

(b) オフセット除去後の差分信号

図 5.15 側面の溶接部 Line A における FFT 後のセンサの出力差分信号



(a) オフセット除去前の差分信号

(b) オフセット除去後の差分信号

図 5.16 側面の溶接部 Line B における FFT 後のセンサの出力差分信号

5.5.3 き裂深さと信号強度の依存性

図 5.21 から図 5.23 は側面及びまわし溶接部の各ラインにおけるき裂の深さと信号強度の関係である。ただし、健全部において計測された信号は深さ 0 mm としてプロットした。Line A, B, C におけるき裂深さと信号強度における相関係数は、側面の溶接部ではそ

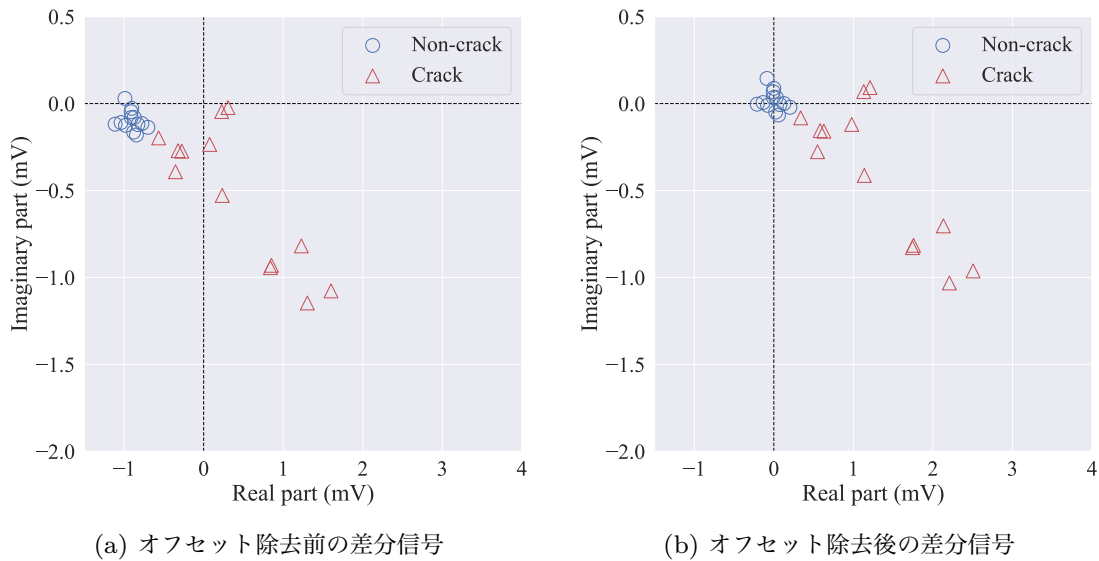


図 5.17 側面の溶接部 Line C における FFT 後のセンサの出力差分信号

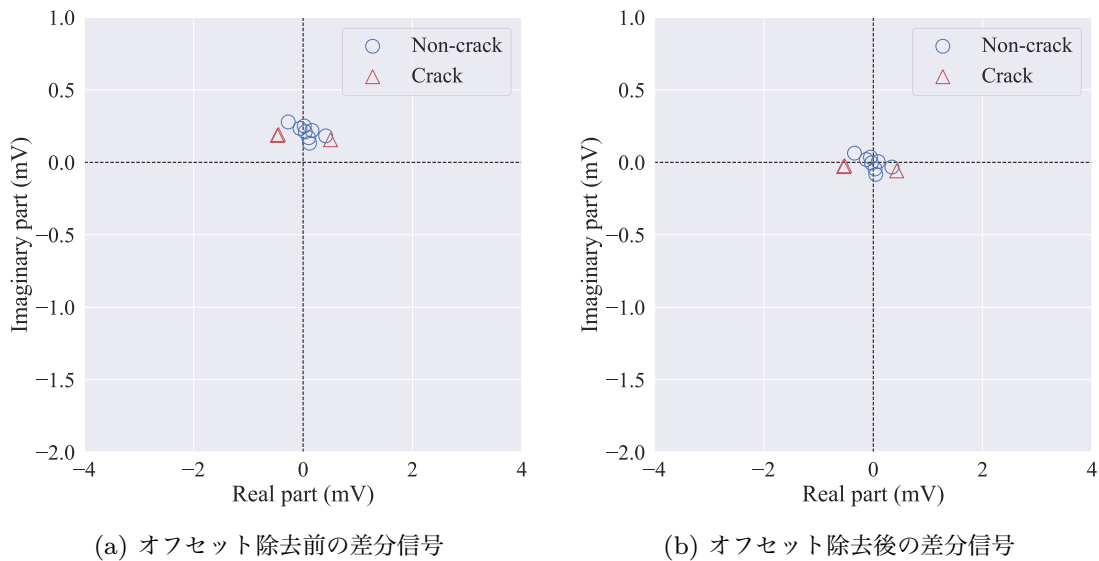
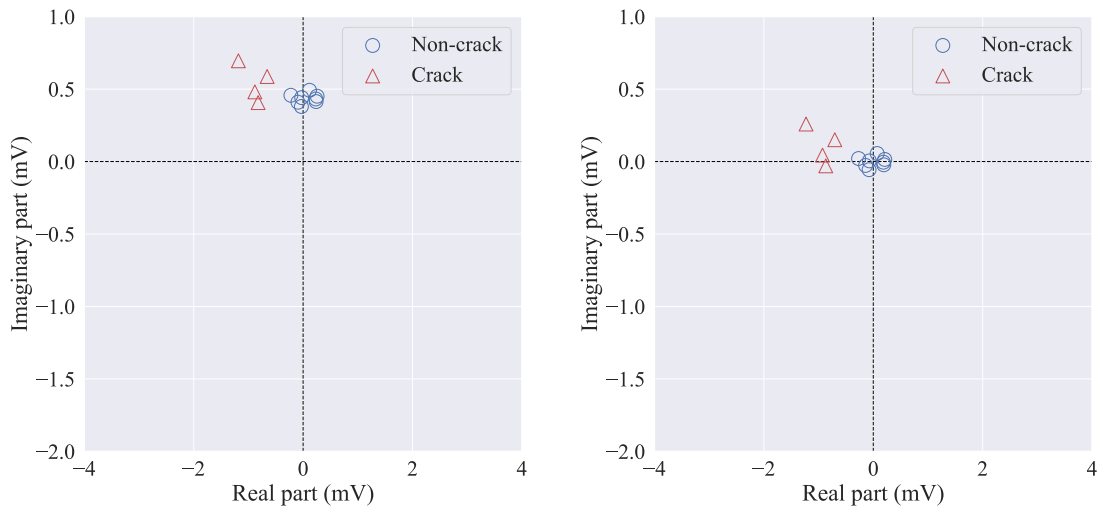


図 5.18 まわし溶接部 Line A における FFT 後のセンサの出力差分信号

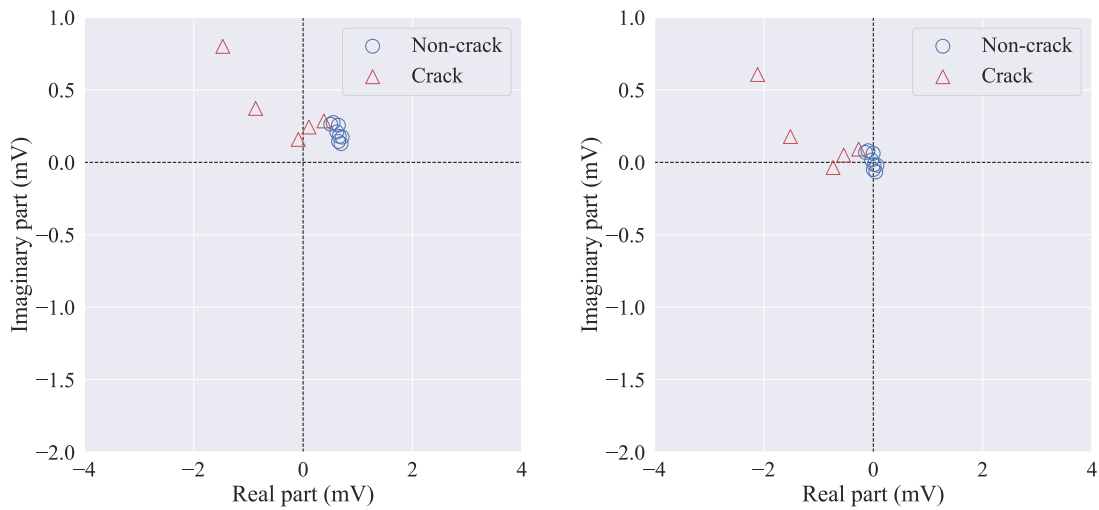
それぞれ 0.71, 0.83, 0.89 だった。まわし溶接部においても, 0.72, 0.88, 0.94 となり, 強い相関を示した。き裂が深くなるにつれて信号強度も大きくなっていることから, 適当な信号強度を閾値として, その閾値よりも信号強度が大きい箇所はき裂があると判別できる。また, 塗装の厚さ $125\ \mu\text{m}$ と $250\ \mu\text{m}$ 両方において同様の傾向が得られた。



(a) オフセット除去前の差分信号

(b) オフセット除去後の差分信号

図 5.19 まわし溶接部 Line B における FFT 後のセンサの出力差分信号



(a) オフセット除去前の差分信号

(b) オフセット除去後の差分信号

図 5.20 まわし溶接部 Line C における FFT 後のセンサの出力差分信号

しかし、主に深さが 1 mm と 2 mm の浅いき裂においては健全部の信号強度と同程度のものであり、き裂と判別するため信号強度の閾値によっては、き裂の誤検知や見逃しが多くなる可能性がある。従って、真陽性率 (TPR, True positive rate) を最大化し、偽陽性率 (FPR, False positive rate) を最小化するために、適切な閾値を設定する必要がある。

る。そこで、真陽性 (TP, True positive), 偽陽性 (FP, False positive), 真陰性 (TN, True negative), 偽陰性 (FN, False negative) からなる混合行列により、真陽性率 TPR と偽陽性率 FPR を求め、受信者動作特性 (ROC, Receiver Operating Characteristic) 曲線により、適切な閾値を求めた。

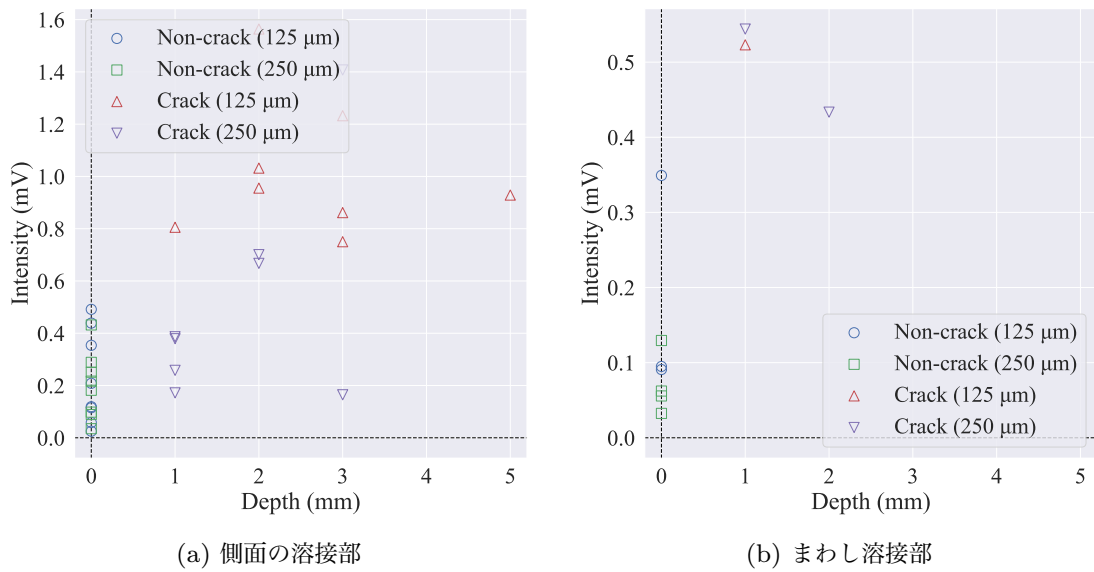


図 5.21 Line A におけるき裂の深さと信号強度の関係

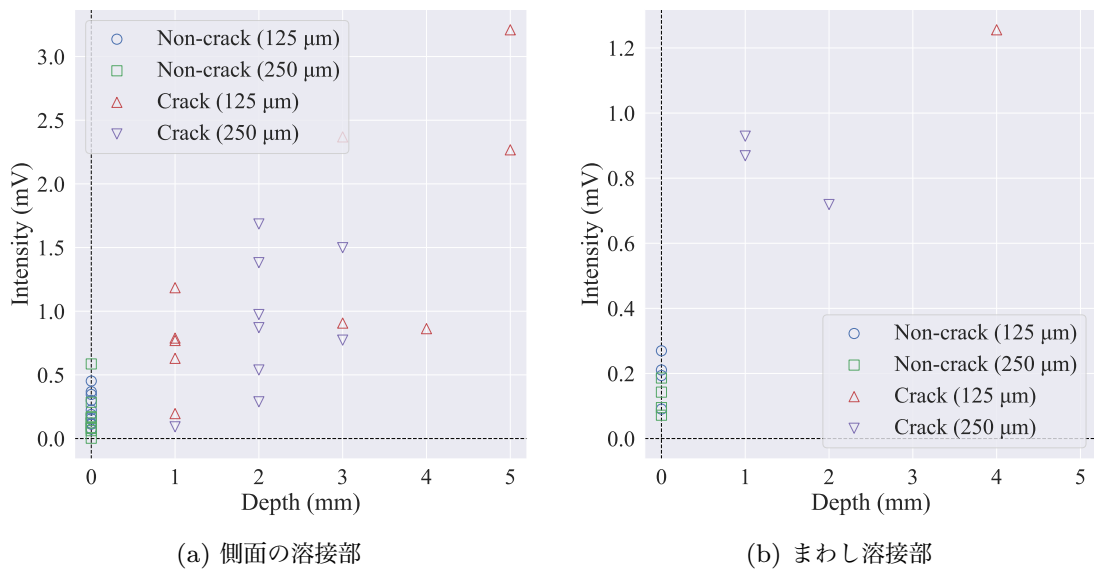


図 5.22 Line B におけるき裂の深さと信号強度の関係

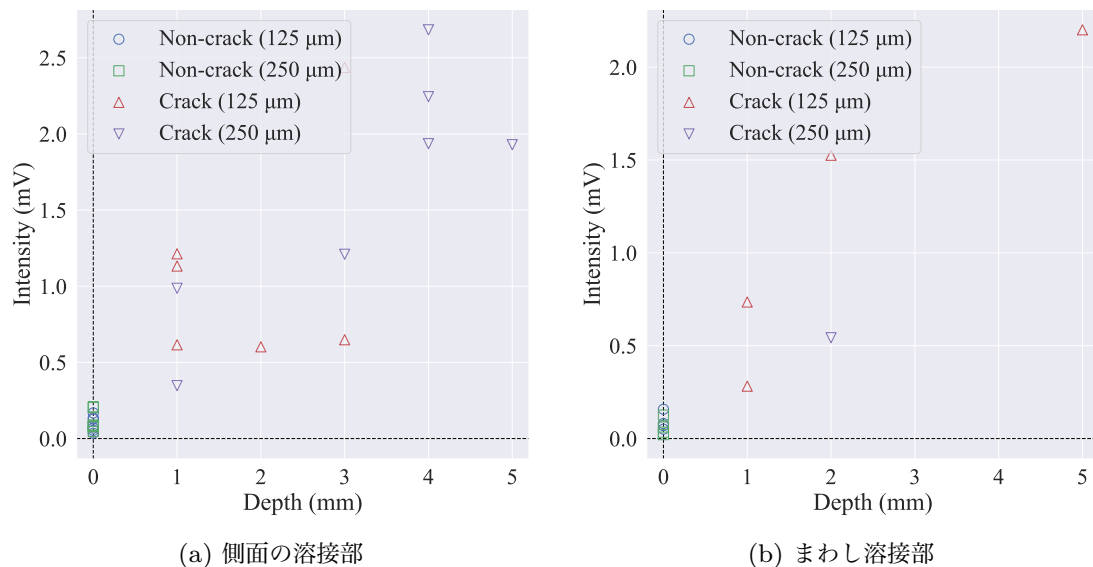


図 5.23 Line C におけるき裂の深さと信号強度の関係

§ 5.6 混合行列と ROC 曲線による閾値決定とき裂判別

5.6.1 混合行列 (Confusion matrix)

まず混合行列 (Confusion matrix) について説明する。図 5.24 は側面の溶接部 Line A の測定結果に対して、適当な閾値によってき裂判定を行なった結果である。閾値より大きい箇所をき裂、小さい箇所は健全と判別した。判定結果は、真陽性 (TP, True positive), 偽陽性 (FP, False positive), 真陰性 (TN, True negative), 偽陰性 (FN, False negative) の 4 通りに分けられる。この判定結果を表 5.1 にまとめたものが混合行列である。ここで、閾値を上げていくと FP は少なくなるが、TP も同様に少なくなる。また閾値を下げていくと TP は多くなるが、FP も多くなってしまふ。そこで、TP と TN を最大化し、FP と FN を最小化するような適切な閾値決定が必要である。そこで、ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic curve) を用いて閾値を決定した。

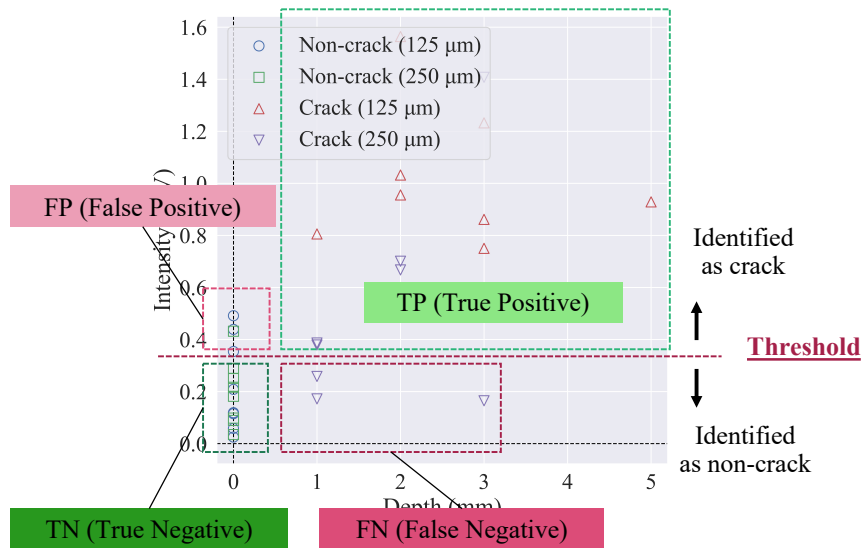


図 5.24 側面の溶接部 Line A におけるき裂の判定結果の例

表 5.1 混合行列 (Confusion Matrix)

Confusion Matrix		Prediction Class	
		Crack	Non-crack
Actual Class	Crack	TP	FN
	Non-crack	FP	TN

5.6.2 ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic Curve)

ここで、ROC 曲線について説明する。ROC 曲線は、真陽性率 (TPR, True positive rate) と偽陽性率 (FPR, False positive rate) を軸に取り描かれた曲線である。TPR 及び FPR は表 5.1 の値を用いて、それぞれ式 5.1 及び式 5.2 で求めることができる。陽性と判別するための閾値を変化させると、混合行列の TP, FP, TN, FN が変化し、TPR と FPR も変化していく。そこで、TPR と FPR を座標平面上にプロットしたものが ROC 曲線である。

$$\text{TPR} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5.1)$$

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \quad (5.2)$$

5.6.3 閾値の決定

図 5.25 は図 5.21 から 5.23 において、き裂と判別する閾値を 0.0 mV から 4.0 mV まで変化させ得られた ROC 曲線である。AUC(Area under the curve) は性能の良さを表す 1 つの指標である。AUC が 1.0 であるときは完全にき裂か健全かの分類が可能、0.5 であるときは完全にランダムな分類であり、き裂か健全かの分類が全く出来ていないことを示す。図 5.25a における AUC は Line A, Line B, Line C でそれぞれ 0.88, 0.92, 1.00 であり、側面の溶接部におけるき裂の検出性能として高精度といえる。また、図 5.25b の AUC はすべて 1.00 であった。これは、まわし溶接部のき裂はすべて正確に検出できたことを示している。

き裂と判別するための閾値は、TPR が可能な限り 1.00 に近く、かつ FPR が可能な限り 0.00 に近い必要がある。そこで、図 5.25 において TPR=1.0, FPR=0.0 から ROC 曲線との距離が最小となるような閾値を求めた。表 5.2 及び表 5.3 は TPR=1.0, FPR=0.0 から Line A, Line B, Line C の ROC 曲線との距離が最小になった時におけるそれぞれの閾値である。側面の溶接部における Line A, Line B, Line C に対するき裂判別のための閾値はそれぞれ 0.37, 0.53, 0.34 となった。同様に、まわし溶接部におけるき裂判別のための閾値はそれぞれ 0.43, 0.71, 0.28 となった。これらの閾値より信号強度が大きい場合はき裂と判別、信号強度が閾値より小さい場合は健全と判別し、開発したセンサプローブのき裂検出性能を評価した。

表 5.2 側面の溶接部のそれぞれの Line において求められた閾値及びその時における TPR と FPR

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

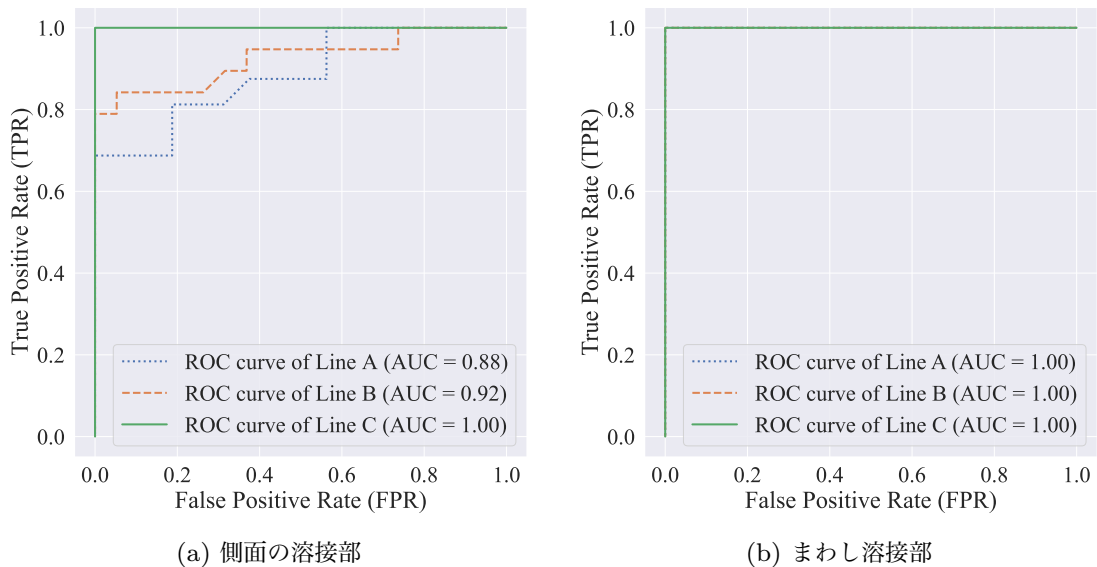


図 5.25 それぞれの Line における ROC 曲線と AUC(Area under the curve)

表 5.3 まわし溶接部のそれぞれの Line において求められた閾値及びその時における TPR と FPR

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

§ 5.7 センサプローブの性能評価

5.7.1 性能評価のための指標

開発したセンサプローブの性能を定量的に評価するために、評価指標として以下の式に示される、正解率 (Accuracy), 適合率 (Precision), 再現率 (Recall), 特異率 (Specification) の値を用いた。Accuracy はすべての判定結果に対して、正確に健全かき裂かを判別できた割合である (式 5.3)。Precision はき裂を判定したもののうち、実際にき裂であるものの

割合である (式 5.4)。Recall は実際にき裂があるもののうち、き裂をどれだけ検出できたかを表す (式 5.5)。Specification は Recall の逆で、実際に健全であるもののうち、正しく健全と評価出来た割合である (式 5.6)。いずれの値も 1.0 に近づくほど検出性能が高いといえる。

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (5.3)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5.4)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5.5)$$

$$\text{Specification} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (5.6)$$

5.7.2 評価結果

表 5.4 は、ROC 曲線を用いて求めた閾値によって得られた混合行列を基に算出した評価指標である。表 5.4 に示される通り、ライン C のき裂に対する評価指標はすべて 1 と、ライン A 及びライン B よりも検出性能が高かった。これは次の理由が考えられる。ライン C のき裂は溶接部の中央に位置しており、漏洩磁束がき裂の前後で対称でありバランスが取れている。従って、ライン C のき裂に関しては、バランスの取れた極性が逆の漏洩信号を 2 つのセンサでそれぞれ検出し差分される。一方で、ライン A 及びライン B のき裂は、それぞれベースと溶接部の間、リブと溶接部の間に位置している。このため、き裂前後の漏洩磁束が非対称である。このため、ライン C のき裂と比較して、検出性能が劣っている結果になったと考えられる。

それぞれのラインにおいて評価指標に差があるものの、すべての評価指標の値は 0.8 以上と、き裂の検出性能として高精度といえる。特に、Line C においてはすべての評価指標で 1.0 と、すべてのき裂を検出することができた。また、表 5.5 に示される通り、まわし溶接部では、すべての評価指標において 1.00、全てのき裂を正しく判別することができたことを示している。側面の溶接部 Line A 及び Line B においてはすべてのき裂を検出できなかったが、図 5.21a から図 5.23a 及び、表 5.4 の各 Line の閾値より、検出できなかった

たき裂は深さ 1 mm や 2 mm と浅いものであることが分かる。より浅いき裂に対応させるためには、閾値を下げることで誤検知は多くなるが、Recall を高めることが出来る。

表 5.4 側面の溶接部におけるき裂検出性能評価

Line	Accuracy	Precision	Recall	Specification
A	0.81	0.81	0.81	0.81
B	0.89	0.94	0.84	0.95
C	1.00	1.00	1.00	1.00

表 5.5 まわし溶接部におけるき裂検出性能評価

Line	Accuracy	Precision	Recall	Specification
A	1.00	1.00	1.00	1.00
B	1.00	1.00	1.00	1.00
C	1.00	1.00	1.00	1.00

§ 5.8 結論

本研究では、溶接部に生じたき裂を塗装の上から検出できるセンサプローブを開発した。橋梁などで散見される T 字の形状に溶接し、その溶接部に各種模擬的なき裂をほどこしたサンプルを用意した。開発したセンサプローブを用いてサンプルに対して計測を行い、き裂の検出性能を評価した。ROC 曲線により求めた閾値を用いて、性能評価を行なったところ、全ての指標において 0.8 以上、特に溶接部上の箇所 (Line C) のき裂に対しては 1.0 と非常に良好な結果を得ることができた。本手法は不飽和漏洩磁束法を用いているため省電力であり、装置も小型化が可能である。また、塗装の除去や復旧といった検査工程が不必要であり、検査箇所にあてるだけで浅いき裂の有無が判別できる。従って迅速な検査を可能にし、溶接部に生じたき裂の早期発見が期待できると考えられる。

結論

インフラ施設の老朽化が急速に進む中、身の回りに多く存在する鋼構造物を効率よく検査できる非破壊検査手法が求められている。そこで本研究では、非接触で手早く用いることができる ECT（渦電流探傷法, Eddy Current Testing）と MFL（漏洩磁束法, Magnetic Leakage Flux）の原理を応用した非破壊検査システムを開発した。鋼構造物の形状や検査箇所に適した 3 種類の探傷プローブを開発し、磁場信号の計測系と解析手法の開発に取り組み、欠陥信号の抽出や強調、判別ができる手法を検討した。本章では研究の成果をまとめ、本論文の結論とする。

§ 6.1 本研究で得られた成果

6.1.1 鋼構造物の細部を非接触で検査できる小型の差動 ECT 探傷センサプローブ

鋼構造物の端部や溶接部といった細部の検査には小型のセンサプローブが望まれることから、「差動型 ECT 探傷センサプローブ」を開発した。本プローブは長辺が 8 mm 以下の長方形型単一コイル内にマイクロサイズの磁気センサを 2 つ搭載した小型の ECT センサプローブである。2 つの磁気センサの差分信号を用いることで、ノイズの軽減及びき裂信号の抽出手法を開発した。本プローブ及びき裂信号の抽出手法は、鋼造物表面の凹凸による距離変動の影響が大きい検査箇所にも適用することができることを示した。本手法により、鋼構造物の詳細な検査が可能である。

6.1.2 コンクリート中の鉄筋破断を検出できる MFL 探傷センサプローブ

鉄筋コンクリート構造物はコンクリート内での鉄筋破断が問題となっている。現状の検査では、鉄筋を覆っているコンクリートを取り除き、鉄筋が見える状態にする「はつり出

し」後に目視検査が一般的である。しかし、鉄筋をはつり出す作業は非常に労力のいる工程であり構造物へのダメージも大きい。また、コンクリートの復旧作業も時間がかかる工程である。そこで、コンクリート上から鉄筋破断の検出を行うために「鉄筋検査用 MFL センサアレイプローブ」を開発した。本プローブは鉄筋などの棒状の鋼構造物に対応させた磁気ヨーク及び磁気センサアレイによる MFL センサプローブである。磁気センサをアレイ型にすることで、広範囲の磁場分布を短時間で計測でき、1 方向の走査のみで磁場信号の 2 次元画像化が可能であることを示した。また、従来から MFL に用いられている直流磁場の代わりに交流磁場を用いることで、磁気センサアレイによる位相パラメータを計測した。位相パラメータにより、漏洩信号画像の高コントラスト化や、鉄筋破断の度合いの判別が可能であることを示した。本手法は 100 mm の高リフトオフからでも漏洩磁場信号の検出が可能であるなど、コンクリートの除去や復旧作業の必要がなく、迅速な鉄筋検査が可能である。

6.1.3 鋼構造物溶接部のき裂を塗装上から検出できる MFL 探傷センサプローブ

橋梁や鋼床版では T 字型に溶接された構造が散見される。T 字型の構造物において、特に溶接部はき裂が発生しやすく、1 度き裂が発生すると広がり進行し易いことから早期発見が必要である。しかし、橋梁などの鋼構造物は、構造物自体や景観保護のために塗装が施されているものがほとんどである。従って、一般的な検査手法である MT(磁粉探傷法, Magnetic Particle Testing) では塗装の離脱と復旧が必要であり、この工程が検査の多くを閉めている。そこで、塗装上から溶接部のき裂を高感度に検出するために、T 字形の構造物の溶接部に適合した「溶接部用 MFL センサプローブ」を開発した。塗装下の浅いき裂は信号強度として小さく、誤検知や見逃しの可能性がある。そこで、受信者動作特性 (ROC, Receiver Operating Characteristic) 曲線と混合行列によってき裂判別のための適切な閾値を求めた。開発したセンサプローブを用いて、橋梁の塗装で主に用いられる塗装厚さ A-5 塗装系 (塗装厚さ 125 μm) と C-5 塗装系 (塗装厚さ 250 μm) のサンプルを計測し、閾値によってき裂判別を行なった。その結果、数 mm 程度の浅いき裂でも塗装上から高精度に検出することができた。また、き裂判別のための閾値を下げることで見

逃しを少なくすることができることが分かった。本手法は、モバイルバッテリー程度の電力で使用することができ、装置も小型軽量化が可能である。このため、鋼構造物の効率的な検査が可能である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究室配属から博士前期課程、そして博士後期課程まで、熱心なご指導ご鞭撻を賜りました、岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科名誉教授、塚田啓二先生に深く御礼申し上げます。私の博士進学も快く承諾して頂きました。さらに、ご退官されてからも特任教授として惜しみの無いサポートのおかげで、研究生活が非常に充実したものとなり、博士論文も書き上げることが出来ました。

私の指導教官を引き継いでくださった同研究科准教授、堺健司先生に心より御礼申し上げます。研究についてのアドバイスや困りごとの相談など、いつでも対応して下さいました。また、論文の指導や英語の添削など、非常に心強いサポートをして頂きました。誠にありがとうございました。

同研究科教授、紀和利彦先生に心より感謝申し上げます。塚田先生がご退官された後、研究室の長として研究室の大学院生、学部生を率いてこられました。別の研究テーマではありましたが、私の副指導教官を担当していただき、研究に対しても的確な指摘やアドバイスを頂くなど、大変お世話になりました。

同研究科、インタフェースシステム学研究室准教授、亀川哲志先生に心より感謝申し上げます。私の副指導教官を担当していただきました。誠にありがとうございました。

同研究科助教、王璿先生に心より感謝申し上げます。2年間でしたが、同じ研究室で活動できたことを嬉しく思います。

大阪大学大学院工学研究科准教授の廣畑幹人先生、同研究科の宮本陽平様、関西大学環境都市工学部准教授の石川俊之先生に心より感謝申し上げます。構造工学や環境工学の観点から、貴重なご意見やご指摘を頂きました。

そして、研究室の皆様にご心よりお礼申し上げます。先輩の方々、Dr. Feroz, 同じ非破壊検査という同じテーマを研究していた同輩の若林俊輝氏、神原匠氏、後輩の齋藤大介氏、小部寛人氏、川上太聖氏、足立祥哉氏、山川智揮氏、安藤雄人氏にご心より感謝申し上げます。研究室に配属されてから5年間という長い間ではありましたが、先生方、そして研究室の皆様のおかげで私の研究生活はとても充実したものとなり、一瞬で過ぎ去ってしまったように感じます。

最後に、私を見守り支えてくださった私の両親に、そして最愛の妻に感謝の言葉を述べさせていただきます。誠に有難うございました。

2022年1月 林実

参考文献

- [1] N Subramanian. I-35W mississippi river bridge failure-is it a wake up call. *Indian Concrete Journal*, Vol. 82, No. 2, pp. 29–38, 2008.
- [2] Janusz Rymsza. Causes of the collapse of the polcevera viaduct in genoa, italy. *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 17, 2021.
- [3] 貝戸清之, 阿部允, 藤野陽三. 実測データに基づく構造物の劣化予測. 土木学会論文集, No. 744, pp. 29–38, 2003.
- [4] 国土交通省. 社会資本の老朽化の現状と将来. https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html (最終アクセス日:2021年10月27日) .
- [5] 国土交通省. 国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計. https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01_01.html (最終アクセス日:2021年10月27日) .
- [6] 国税庁. 財政のしくみと役割. <https://www.nta.go.jp/taxes/kids/hatten/page03.htm> (最終アクセス日:2021年10月27日) .
- [7] 山形豊, 木村嘉富, 須長秀行. 社会インフラストラクチャーの予防保全と非破壊検査技術. 精密工学会誌, Vol. 78, No. 1, pp. 44–48, 2012.
- [8] 池田学, 谷村幸裕. 鉄道構造物 (主として鋼橋) のメンテナンスの現状と最近の取り組み. 材料と環境, Vol. 65, No. 7, pp. 287–291, 2016.
- [9] 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇. 鋼橋の腐食事例調査とその分析. 土木学会論文集, Vol. I-54, No. 668, pp. 299–311, 2001.
- [10] 名取暢. 3 鋼橋の疲労損傷とその点検・検査. 溶接学会誌, Vol. 65, No. 2, pp. 143–146, 1996.
- [11] 吉田倫夫, 山本邦弘, 福田孝晴, 奥野正洋, 佐貫哲朗, 国立謙治, 川瀬義行, 前園優一, 大槇正紀, 橋本牧. 漁港施設の鋼構造物に関する老朽化診断と保全対策鋼材防食工法, 鋼材補修・補強工法, 大規模改修. 日本水産工学会誌, Vol. 52, No. 1, pp. 45–53, 2015.

- [12] 前田正広, 平澤英幸, 吉川孝男. 超音波探傷試験の反射エコー高さに及ぼす塗膜厚さの影響. 非破壊検査, Vol. 61, No. 9, pp. 480–487, 2012.
- [13] 葭田雄二郎, 榊原俊夫. 複合材料の非破壊検査—4. 超音波. 日本複合材料学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 111–115, 1984.
- [14] 山本英爾. 2-3 非破壊検査. テレビジョン学会誌, Vol. 35, No. 1, pp. 22–26, 1981.
- [15] 加藤光昭. 磁粉探傷試験及び浸透探傷試験適用時の留意点 (その 3). 溶接学会誌, Vol. 54, No. 3, pp. 149–153, 1985.
- [16] J. Lenz and S. Edelstein. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 631–649, 2006.
- [17] 山川真一, 天谷賢治. 薄膜磁気センサを用いた磁場分布のナノ分解能再構成法. 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 6, pp. 597–602, 2006.
- [18] 脇若弘之. 車両制御のための磁気センサ技術. 精密工学会誌, Vol. 84, No. 9, pp. 769–772, 2018.
- [19] 岡田一朗. IoT を支える磁気センサ~ ホール素子の周辺技術の発展と最近のセンサ. 電気学会誌, Vol. 139, No. 1, pp. 18–21, 2019.
- [20] 橋本樹明, 久保田孝. 宇宙機のセンサ技術. 映像情報メディア学会誌, Vol. 57, No. 10, pp. 1230–1234, 2003.
- [21] 柴崎一郎. 薄膜ホール素子の開発とセンサ応用. 電気学会論文誌 E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol. 119, No. 8-9, pp. 405–410, 1999.
- [22] 脇若弘之. 磁気センサ技術の変遷. 電気学会誌, Vol. 124, No. 1, pp. 36–39, 2004.
- [23] 門澤秀一, 荒木力. MRI の原理. 日本乳癌検診学会誌, Vol. 4, No. 3, pp. 185–196, 1995.
- [24] 久保均, 根本彩香, 右近直之, 石井士朗, 菅原茂耕, 伊藤浩. PET/MRI 装置の原理と検査法. 計測と制御, Vol. 58, No. 7, pp. 535–540, 2019.
- [25] PL Richards. Bolometric detectors for measurements of the cosmic microwave background. *Journal of superconductivity*, Vol. 17, No. 5, pp. 545–550, 2004.
- [26] Hans-Georg Meyer, R Stolz, A Chwala, and M Schulz. SQUID technology for

- geophysical exploration. *Physica Status Solidi (c)*, Vol. 2, No. 5, pp. 1504–1509, 2005.
- [27] Saburo Tanaka, Zarina Aspanut, Hirofumi Kurita, Chika Toriyabe, Yoshimi Hatukade, and Shinji Katsura. Bio-application of high-Tc SQUID magnetic sensor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 300, No. 1, pp. e315–e319, 2006.
- [28] 脇若弘之. GMR センサの特性とその応用. 日本応用磁気学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 825–833, 2004.
- [29] 湯浅新治. TMR 効果の中核としたスピントロニクス応用の進展. 応用物理, Vol. 82, No. 3, pp. 196–197, 2013.
- [30] 南和希, 小山恵史. バイアス磁石を内蔵した TMR 型磁気センサの開発. 電気製鋼, Vol. 88, No. 2, p. 72, 2017.
- [31] Helena G. Ramos and A. Lopes Ribeiro. Present and future impact of magnetic sensors in NDE. *Procedia Engineering*, Vol. 86, pp. 406–419, 2014. Structural Integrity.
- [32] 星川洋. 渦流探傷試験技術. 鋳物, Vol. 65, No. 12, pp. 921–927, 1993.
- [33] David Mercier, Jacky Lesage, Xavier Decoopman, and Didier Chicot. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. *NDT & E International*, Vol. 39, No. 8, pp. 652–660, 2006.
- [34] Ladislav Janousek, Klara Capova, Noritaka Yusa, and Kenzo Miya. Multiprobe inspection for enhancing sizing ability in eddy current nondestructive testing. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 6, pp. 1618–1621, 2008.
- [35] Damhuji Rifai, Ahmed N Abdalla, Ramdan Razali, Kharudin Ali, and Moneer A Faraj. An eddy current testing platform system for pipe defect inspection based on an optimized eddy current technique probe design. *Sensors*, Vol. 17, No. 3, p. 579, 2017.
- [36] F Förster. Sensitive eddy-current testing of tubes for defects on the inner and

- outer surfaces. *Non-Destructive Testing*, Vol. 7, No. 1, pp. 28–36, 1974.
- [37] H. Fukutomi, T. Takagi, and M. Nishikawa. Remote field eddy current technique applied to non-magnetic steam generator tubes. *NDT & E International*, Vol. 34, No. 1, pp. 17–23, 2001.
- [38] Haoyu Huang, Nozomu Sakurai, Toshiyuki Takagi, and Tetsuya Uchimoto. Design of an eddy-current array probe for crack sizing in steam generator tubes. *NDT & E International*, Vol. 36, No. 7, pp. 515–522, 2003.
- [39] Maxim Morozov, Guglielmo Rubinacci, Antonello Tamburrino, and Salvatore Ventre. Numerical models of volumetric insulating cracks in eddy-current testing with experimental validation. *IEEE transactions on magnetics*, Vol. 42, No. 5, pp. 1568–1576, 2006.
- [40] Natheer Alatawneh, Peter Ross Underhill, and Thomas W Krause. Low-frequency eddy-current testing for detection of subsurface cracks in cf-188 stub flange. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 1568–1575, 2017.
- [41] Zenglu Song, Tsutomu Yamada, Hideki Shitara, and Yasushi Takemura. Detection of damage and crack in railhead by using eddy current testing. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol. 2011, , 2011.
- [42] Rainer Pohl, Anton Erhard, H-J Montag, H-M Thomas, and Hermann Wüstenberg. NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection. *NDT & E International*, Vol. 37, No. 2, pp. 89–94, 2004.
- [43] K Mandal and DL Atherton. A study of magnetic flux-leakage signals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 31, No. 22, p. 3211, 1998.
- [44] ZD Wang, Y Gu, and YS Wang. A review of three magnetic ndt technologies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 4, pp. 382–388, 2012.
- [45] M.D Pandey. Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines. *NDT & E International*, Vol. 31, No. 5, pp. 349–358, 1998.

- [46] Muhammad Afzal and Satish Udpa. Advanced signal processing of magnetic flux leakage data obtained from seamless gas pipeline. *NDT & E International*, Vol. 35, No. 7, pp. 449–457, 2002.
- [47] K Hwang, S Mandayam, SS Udpa, L Udpa, W Lord, and M Atzal. Characterization of gas pipeline inspection signals using wavelet basis function neural networks. *NDT & E International*, Vol. 33, No. 8, pp. 531–545, 2000.
- [48] R Christen, A Bergamini, and M Motavalli. Influence of steel wrapping on magneto-inductive testing of the main cables of suspension bridges. *NDT & E International*, Vol. 42, No. 1, pp. 22–27, 2009.
- [49] 竹内延夫. ロックインアンプとその応用. 計測と制御, Vol. 9, No. 7, pp. 511–518, 1970.
- [50] James W Cooley and John W Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of computation*, Vol. 19, No. 90, pp. 297–301, 1965.
- [51] Javier García-Martín, Jaime Gómez-Gil, and Ernesto Vázquez-Sánchez. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, Vol. 11, No. 3, pp. 2525–2565, 2011.
- [52] Ruzlaini Ghoni, Mahmood Dollah, Aizat Sulaiman, and Fadhil Mamat Ibrahim. Defect characterization based on eddy current technique: Technical review. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 6, p. 182496, 2014.
- [53] Damhuji Rifai, Ahmed N Abdalla, Kharudin Ali, and Ramdan Razali. Giant magnetoresistance sensors: A review on structures and non-destructive eddy current testing applications. *Sensors*, Vol. 16, No. 3, p. 298, 2016.
- [54] Joseph Bailey, Nicholas Long, and Arvid Hunze. Eddy current testing with giant magnetoresistance (gmr) sensors and a pipe-encircling excitation for evaluation of corrosion under insulation. *Sensors*, Vol. 17, No. 10, p. 2229, 2017.
- [55] K. Tsukada, T. Kiwa, T. Kawata, and Y. Ishihara. Low-frequency eddy current

- imaging using mr sensor detecting tangential magnetic field components for non-destructive evaluation. *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 42, No. 10, pp. 3315–3317, 2006.
- [56] O. Hesse and Serhii Pankratiev. Usage of magnetic field sensors for low frequency eddy current testing. *Measurement Science Review*, Vol. 5, pp. 86–93, 06 2005.
- [57] Keiji Tsukada, Mitsuteru Yoshioka, Yoshihiko Kawasaki, and 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, No. 4, pp. 323–328, 2010.
- [58] Keiji Tsukada, Yatsuse Majima, Yoshihiro Nakamura, Takuya Yasugi, Nannan Song, Kenji Sakai, and Toshihiko Kiwa. Detection of inner cracks in thick steel plates using unsaturated AC magnetic flux leakage testing with a magnetic resistance gradiometer. *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 53, No. 11, pp. 1–5, 2017.
- [59] Keiji Tsukada, Minoru Hayashi, Yoshihiro Nakamura, Kenji Sakai, and Toshihiko Kiwa. Small eddy current testing sensor probe using a tunneling magnetoresistance sensor to detect cracks in steel structures. *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 54, No. 11, pp. 1–5, 2018.
- [60] A Lopes Ribeiro, Francisco Alegria, Octavian A Postolache, and Helena Maria Geirinhas Ramos. Liftoff correction based on the spatial spectral behavior of eddy-current images. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 59, No. 5, pp. 1362–1367, 2010.
- [61] Mingyang Lu, Wenqian Zhu, Liyuan Yin, Anthony J Peyton, Wuliang Yin, and Zhigang Qu. Reducing the lift-off effect on permeability measurement for magnetic plates from multifrequency induction data. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 67, No. 1, pp. 167–174, 2017.
- [62] Marco Ricci, Giuseppe Silipigni, Luigi Ferrigno, Marco Laracca, Ibukun D Ade-

- wale, and Gui Yun Tian. Evaluation of the lift-off robustness of eddy current imaging techniques. *NDT & E International*, Vol. 85, pp. 43–52, 2017.
- [63] Gianni D’Angelo, Marco Laracca, Salvatore Rampone, and Giovanni Betta. Fast eddy current testing defect classification using lissajous figures. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 67, No. 4, pp. 821–830, 2018.
- [64] Toyoaki Miyagawa, Kaoru Seto, Kazunori Sasaki, Yasuhiro Mikata, Kazuhiro Kuzume, and Toshikazu Minami. Fracture of reinforcing steels in concrete structures damaged by alkali-silica reaction. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 3, pp. 339–355, 2006.
- [65] Joe Padovan and Jin Jae. FE modeling of expansive oxide induced fracture of rebar reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 6, pp. 797–812, 1997.
- [66] D.M McCann and M.C Forde. Review of ndt methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT & E International*, Vol. 34, No. 2, pp. 71–84, 2001.
- [67] Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singh Bhadauria, and Saleem Akhtar. Review of nondestructive testing methods for condition monitoring of concrete structures. *Journal of Construction Engineering*, Vol. 2013, No. 2008, pp. 1–11, 2013.
- [68] Sangwook Lee, Niko Kalos, and Do Hyoung Shin. Non-destructive testing methods in the us for bridge inspection and maintenance. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 1322–1331, 2014.
- [69] Bruce W Drinkwater and Paul D Wilcox. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review. *NDT & E International*, Vol. 39, No. 7, pp. 525–541, 2006.
- [70] Jon Makar and Richard Desnoyers. Magnetic field techniques for the inspection of steel under concrete cover. *NDT & E International*, Vol. 34, No. 7, pp. 445–456, 2001.
- [71] H Scheel and B Hillemeier. Capacity of the remanent magnetism method to

- detect fractures of steel in tendons embedded in prestressed concrete. *NDT & E International*, Vol. 30, No. 4, pp. 211–216, 1997.
- [72] Jürgen Mietz and Joachim Fischer. Evaluation of ndt methods for detection of prestressing steel damage at post-tensioned concrete structures. *Materials and Corrosion*, Vol. 58, No. 10, pp. 789–794, 2007.
- [73] Muhamad Arif Ihsan Mohd Noor Sam, Zhenhu Jin, Mikihiko Oogane, and Yasuo Ando. Investigation of a magnetic tunnel junction based sensor for the detection of defects in reinforced concrete at high lift-off. *Sensors*, Vol. 19, No. 21, p. 4718, 2019.
- [74] コニカミノルタ株式会社. SenriqaN. <https://bic.konicaminolta.jp/hihakai/> (最終アクセス日:2022年1月10日) .
- [75] X. W. Ye, Y. H. Su, and J. P. Han. A state-of-the-art review on fatigue life assessment of steel bridges. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, p. 956473, Feb 2014.
- [76] Boris Fuštar, Ivan Lukačević, and Darko Dujmović. Review of fatigue assessment methods for welded steel structures. *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2018, p. 3597356, Apr 2018.
- [77] Reza Haghani, Mohammad Al-Emrani, and Mohsen Heshmati. Fatigue-prone details in steel bridges. *Buildings*, Vol. 2, No. 4, pp. 456–476, 2012.
- [78] Guozheng Kang and Huiliang Luo. Review on fatigue life prediction models of welded joint. *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 36, No. 3, pp. 701–726, Jun 2020.
- [79] V. A. Barkhatov. Development of methods of ultrasonic nondestructive testing of welded joints. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 39, No. 1, pp. 23–47, Jan 2003.
- [80] Sangwook Lee, Niko Kalos, and Do Hyoung Shin. Non-destructive testing methods in the u.s. for bridge inspection and maintenance. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 1322–1331, Jun 2014.

- [81] Yanhua Sun and Yihua Kang. Magnetic mechanisms of magnetic flux leakage nondestructive testing. *Applied Physics Letters*, Vol. 103, No. 18, p. 184104, Oct 2013.
- [82] Yan Shi, Chao Zhang, Rui Li, Maolin Cai, and Guanwei Jia. Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection. *Sensors*, Vol. 15, No. 12, pp. 31036–31055, 2015.
- [83] Ashley Laurent Pullen, Peter C. Charlton, Neil R. Pearson, and Nicola J. Whitehead. Magnetic flux leakage scanning velocities for tank floor inspection. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 9, pp. 1–8, 2018.
- [84] Jianbo Wu, Wenqiang Wu, Erlong Li, and Yihua Kang. Magnetic flux leakage course of inner defects and its detectable depth. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 34, No. 1, p. 63, Jun 2021.
- [85] Erlong Li, Jianbo Wu, Junzhen Zhu, and Yihua Kang. Quantitative evaluation of buried defects in ferromagnetic steels using DC magnetization-based eddy current array testing. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 56, No. 9, pp. 1–11, 2020.
- [86] Minoru Hayashi, Taisei Kawakami, Taisuke Saito, Kenji Sakai, Toshihiko Kiwa, and Keiji Tsukada. Imaging of defect signal of reinforcing steel bar at high lift-off using a magnetic sensor array by unsaturated AC magnetic flux leakage testing. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 57, No. 2, pp. 1–4, 2021.

研究業績

学術論文

1. K. Tsukada, M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai, and T. Kiwa, “Small Eddy Current Testing Sensor Probe Using a Tunneling Magnetoresistance Sensor to Detect Cracks in Steel Structures” , *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No. 11, 6202205, 2018
2. M. Hayashi, T. Saito, Y. Nakamura, K. Sakai, T. Kiwa, I. Tanikura, K. Tsukada, “Extraction Method of Crack Signal for Inspection of Complicated Steel Structures Using A Dual-Channel Magnetic Sensor” , *Sensors*, Vol. 19, No. 13, 3001, 2019
3. M. Hayashi, T. Kawakami, T. Saito, K. Sakai, T. Kiwa, and K. Tsukada, “Imaging of Defect Signal of Reinforcing Steel Bar at High Lift-Off Using a Magnetic Sensor Array by Unsaturated AC Magnetic Flux Leakage Testing” , *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 57, No. 2, 6500204, 2021
4. 齋藤大介, 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”, 日本磁気学会論文集特集号, 5巻1号, pp. 10-15, 2021
5. K. Tsukada, M. Hayashi, T. Kawakami, S. Adachi, K. Sakai, T. Kiwa, T. Ishikawa, M. Saari, K. Hori, K. Hisazumi, T. Tominaga, ”Magnetic thickness measurement for various iron steels using magnetic sensor and effect of electromagnetic characteristics”, *AIP Advances*, Vol. 12, No. 3, 035109, 2022
6. M. Hayashi, T. Kawakami, S. Adachi, Y. Miyamoto, J. Wang, K. Sakai, T. Kiwa, K. Tsukada, T. Ishikawa, M. Hirohata, ”Crack Detection for Welded Joint with Surface Coating Using Unsaturated AC Magnetic Flux Leakage”, *IEEE Transactions on Magnetics*, (To be published)

学会プロシーディング

1. K. Tsukada, Y. Majima, Y. Nakamura, M. Hayashi, K. Sakai, T. Kiwa, T. Sakashita, M. Seki and T. Furukawa, “Nondestructive evaluation of defects in welded sections of rails via unsaturated AC magnetic flux leakage measurements with a gradiometer” , Proceedings of the 12th ECNDT, 2018 (Peer-reviewed)
2. M. Hayashi, Y. Nakamura, Kenji Sakai, T. Kiwa, I. Tanikura, and K. Tsukada, “Detection Method Using a Dual-channel Magnetic Sensor for Steel Cracks in Complicated Structures” , Proceedings of the 7th APWSHM, 2018
3. K. Tsukada, S. Wakabayashi, M. Hayashi, T. Saitoh, T. Tomioka, K. Sakai, T. Kiwa, and Y. Fujino, “Magnetic measurement of corrosion in a steel structure using extremely low-frequency eddy current testing without surface treatment” , Proceedings of the SMAR 2019, 2019 (Peer-reviewed)
4. S. Wakabayashi, M. Hayashi, T. Saitoh, K. Sakai, T. Kiwa, and K. Tsukada, “Optimizaition of Inclined Angle Magnetic Sensor Probe to Improve Detection Performance of Corrosion near the Ground using Extremely Low-frequency Eddy Current Testing” , Proceedings of NDT in Progress 2019, 2019
5. 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の未溶着およびき裂の検出実験” , 鋼構造年次論文報告集, 第 29 巻, 11 月, 2021 (Peer-reviewed)

国際学会発表

1. K. Tsukada, M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai, and T. Kiwa, “Small Eddy Current Testing Sensor Probe Using a Tunneling Magnetoresistance Sensor to Detect Cracks in Steel Structures” , INTERMAG2018, Singapore, Apr., 2018

2. K. Tsukada, Y. Majima, Y. Nakamura, M. Hayashi, K. Sakai, T. Kiwa, T. Sakashita, M. Seki and T. Furukawa, “Nondestructive evaluation of defects in welded sections of rails via unsaturated AC magnetic flux leakage measurements with a gradiometer” , The 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, June, 2018
3. M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai, T. Kiwa, I. Tanikura, and K. Tsukada, “Detection Method Using a Dual-channel Magnetic Sensor for Steel Cracks in Complicated Structures” , The 7th APWSHM, Hong Kong, China, Nov., 2018
4. K. Tsukada, S. Wakabayashi, M. Hayashi, T. Saitoh, T. Tomioka, K. Sakai, T. Kiwa, and Y. Fujino, “Magnetic measurement of corrosion in a steel structure using extremely low-frequency eddy current testing without surface treatment” , SMAR 2019, Potsdam, Germany, Aug., 2019
5. S. Wakabayashi, M. Hayashi, T. Saitoh, K. Sakai, T. Kiwa, and K. Tsukada, “Optimization in the detection performance of extremely low-frequency eddy current testing for application to various shapes of corrosion defects in the actual social infrastructure” , Xth INTERNATIONAL WORKSHOP NDT in Progress, Prague, Czech Republic, Oct., 2019
6. T. Saitoh, A. Koarashi, M. Hayashi, S. Wakabayashi, K. Sakai, T. Kiwa, and K. Tsukada, “Evaluation of Environmental Magnetic Noise Caused by Automobile” , TICEAS 2020, Guam, USA, Feb., 2020
7. M. Hayashi, T. Kawakami, T. Saito, K. Sakai, T. Kiwa, K. Tsukada, “Imaging of Crack Signal of Reinforcing Steel Bar in Concrete Using a Magnetic Sensor Array by Unsaturated AC Magnetic Flux Leakage Testing,” Intermag 2020, Montreal, Canada, May, 2020
8. T. Saito, M. Hayashi, K. Sakai, T. Kiwa, and K. Tsukada, “Effects of lift-off and sensor tilt on the thickness measurement of steel materials using magnetic nondestructive evaluation” , 2020 ISNST, online, Nov., 2020
9. T. Kawakami, S. Adachi, M. Hayashi, J. Wang, K. Sakai, T. Kiwa, T.

- Ishikawa, K. Tsukada, "Frequency Optimization of Magnetic Nondestructive Evaluation for Steel Structures at a Buried Position Near the Ground Level", PIERS 2021, online, Nov., 2021
10. K. Shigaki, M. Hayashi, J. Wang, K. Sakai, T. Kiwa, K. Tsukada, T. Ohnawa, "Thickness Evaluation of High Manganese Steel Used for the Crossing of Railroad Switch Using Extremely Low Frequency Eddy Current Testing", PIERS 2021, online, Nov., 2021
11. K. Tsukada, M. Hayashi, T. Kawakami, S. Adachi, K. Sakai, T. Kiwa, T. Ishikawa, M. Saari, K. Hori, K. Hisazumi, T. Tominaga, "Magnetic thickness measurement for various iron steels using magnetic sensor and effect of electromagnetic characteristics", 2022 Joint MMM-INTERMAG, New Orleans, USA, Jan., 2022
12. M. Hayashi, T. Kawakami, S. Adachi, Y. Miyamoto, J. Wang, K. Sakai, T. Kiwa, K. Tsukada, T. Ishikawa, M. Hirohata, "Crack Detection for Welded Joint with Surface Coating Using Unsaturated AC Magnetic Flux Leakage", 2022 Joint MMM-INTERMAG, New Orleans, USA, Jan., 2022

国内学会発表

1. 林実, 中村喜浩, 堺健司, 紀和利彦, 塚田啓二, "TMR センサを用いた鉄鋼材の亀裂検出", 第 21 回 磁粉・浸透・目視部門/電磁気応用部門/漏れ試験部門 合同シンポジウム, 京都, 2018 年 3 月
2. 林実, 齊藤大介, 中村喜浩, 堺健司, 紀和利彦, 塚田啓二, "不飽和交流漏洩磁束法による鉄鋼構造物の亀裂検出と表示方法", 平成 30 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 広島, 2018 年 10 月
3. 林実, 中村喜浩, 堺健司, 紀和利彦, 塚田啓二, "マルチチャンネル磁気抵抗セン

- サを用いた鉄鋼構造物の亀裂検出”，第 42 回日本磁気学会学術講演会，東京，2018 年 9 月
4. **林実**，齊藤大介，中村喜浩，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“不飽和交流漏洩磁束法による鉄鋼構造物の溶接部欠陥信号の判別”，第 22 回磁粉・浸透・目視部門/電磁気応用部門/漏れ試験部門 合同シンポジウム，宮城，2019 年 3 月
 5. 齊藤大介，**林実**，中村喜浩，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“不飽和交流漏洩磁束法を用いた鉄鋼構造物の亀裂形状の推定”，平成 31 年電気学会全国大会，北海道，2019 年 3 月
 6. **林実**，齊藤大介，中村喜浩，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“不飽和交流漏洩磁束法による鉄鋼構造物の溶接部欠陥信号の判別”，2019 年度非破壊検査総合シンポジウム，東京，2019 年 6 月
 7. 齊藤大介，**林実**，若林俊輝，富岡卓哉，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“極低周波渦電流探傷法を用いた腐食度の高い鉄鋼構造物の減肉測定”，日本非破壊検査協会，2019 年度秋季講演大会，広島，2019 年 11 月
 8. **林実**，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“グラジオメータを用いた不飽和漏洩磁束法によるロングレールの非破壊検査”，2020 年電気学会全国大会，東京，2020 年 3 月
 9. 齊藤大介，小嵐愛子，**林実**，若林俊輝，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“磁気計測における自動車の環境雑音の影響評価”，2020 年電気学会全国大会，東京，2020 年 3 月
 10. 川上太聖，**林実**，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“漏洩磁束探傷法による異形鉄筋の腐食検出”，第 32 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム，岐阜，2020 年 5 月
 11. 川上太聖，**林実**，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“不飽和交流漏洩磁束法を用いた異形鉄筋の腐食信号検出における鉄筋-センサ間の距離の影響”，2020 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会，Online，2020 年 10 月
 12. 齊藤大介，小嵐愛子，**林実**，若林俊輝，堺健司，紀和利彦，塚田啓二，“多種多様な自動車の磁気ノイズの特性評価”，第 44 回日本磁気学会学術講演会，Online，2020

年 12 月

13. 川上太聖, 足立祥哉, **林実**, 王璉, 堺健司, 紀和利彦, 塚田啓二, “鉄鋼材の高リフトオフ非破壊検査用磁気センサプローブの開発”, 令和 3 年電気学会全国大会, Online, 2021 年 3 月
14. 足立祥哉, 川上太聖, **林実**, 王璉, 紀和利彦, 塚田啓二, 堺健司 “高リフトオフにおける板厚判別に向けた渦電流探傷法の印加磁場の最適化”, 第 33 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 群馬, 2021 年 5 月
15. 山川智揮, 志垣一也, **林実**, 王璉, 紀和利彦, 塚田啓二, 堺健司, “渦電流探傷法を用いた溶射皮膜厚測定法の開発”, 第 33 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 群馬, 2021 年 5 月
16. 志垣一也, **林実**, 王璉, 紀和利彦, 堺健司, 大縄登史男, 塚田啓二, “極低周波渦電流探傷法を用いたマンガクロッシング材の板厚評価”, 第 33 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 群馬, 2021 年 5 月
17. 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未溶着の検出に関する基礎的検討”, 土木学会関西支部 年次学術講演会, Online, 2021 年 5 月
18. 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”, 土木学会全国大会 第 76 回年次学術講演会, Online, 2021 年 9 月
19. 足立祥哉, 川上太聖, **林実**, 王璉, 堺健司, 紀和利彦, 石川敏之, 塚田啓二, “磁気を用いた板厚検査のための印加磁場分布の改善によるリフトオフ影響の低減”, 第 72 回電気・情報関連学会中国支部連合大会, Online, 2021 年 10 月
20. 川上太聖, 足立祥哉, **林実**, 王璉, 堺健司, 紀和利彦, 石川敏之, 塚田啓二, “極低周波渦電流探傷法による道路付属設備の地際腐食の板厚に依存しない評価方法”, 第 72 回電気・情報関連学会中国支部連合大会, Online, 2021 年 10 月
21. 川上太聖, 足立祥哉, **林実**, 王璉, 堺健司, 紀和利彦, 石川敏之, 塚田啓二, “磁気測定を用いた鉄鋼構造物の地際下腐食評価における周波数最適化”, 日本非破壊検査協

会 2021 年度秋季講演大会, Online, 2021 年 11 月

22. 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の未溶着およびき裂の検出実験”, 鋼構造シンポジウム, Online, 2021 年 11 月