

第 2 章 非破壊検査による埋込部・遮蔽部の点 検・診断技術

第2章 非破壊検査による埋込部・遮蔽部の点検・診断技術

2.1	構造物内視装置の開発	2-1
2.1.1	はじめに	2-1
2.1.2	マイクロワームロボットの構成	2-5
2.1.3	運動性能評価	2-10
2.1.4	マイクロロボット新機構型の開発	2-12
2.1.5	ワイヤレスレーザーマウスによる位置同定システムの開発	2-15
2.1.6	鋼箱桁モデル内部の試験点検	2-24
2.1.7	まとめ（構造物内視装置の開発）	2-27
2.2	渦流探傷法による腐食損傷の検出	2-28
2.2.1	研究の対象	2-28
2.2.2	研究の構成	2-28
2.2.3	数値シミュレーションを用いた基礎検討	2-28
2.2.4	渦流探傷システム	2-29
2.2.5	基礎検討用数値シミュレーション—解析条件	2-33
2.2.6	基礎検討用数値シミュレーション—解析結果	2-36
2.2.7	基礎検討用数値シミュレーション—まとめ	2-47
2.2.8	実部材を対象とした数値シミュレーション—はじめに	2-48
2.2.9	実部材を対象とした数値シミュレーション—解析モデル	2-48
2.2.10	実部材を対象とした数値シミュレーション—解析結果	2-50
2.2.11	実部材を対象とした数値シミュレーション—まとめ	2-55
2.2.12	欠陥探傷の基礎的実験—はじめに	2-56
2.2.13	欠陥探傷の基礎的実験—実験方法	2-56
2.2.14	欠陥探傷の基礎的実験—幅が異なるスリット状損傷検出の実験結果	2-61
2.2.15	欠陥探傷の基礎的実験—深さが異なるスリット状損傷検出の実験結果	2-67
2.2.16	欠陥探傷の基礎的実験—腐食損傷検出に関する実験結果	2-68
2.2.17	欠陥探傷の基礎的実験—まとめ	2-73
2.2.18	実部材を対象とした渦流探傷試験—はじめに	2-74
2.2.19	実部材を対象とした渦流探傷試験—対象とした試験体	2-74
2.2.20	実部材を対象とした渦流探傷試験—実験方法及び実験結果	2-75
2.2.21	実部材を対象とした渦流探傷試験—まとめ	2-82
2.2.22	まとめ	2-83
2.3	超音波フェーズドアレイによる減肉状況把握	2-84
2.3.1	研究の対象	2-84

2.3.2. 研究の目的	2-84
2.3.3. 既往の研究のまとめ	2-84
2.3.4 超音波探傷システム	2-88
2.3.5 三次元的画像化手法	2-92
2.3.6 まとめ（超音波探傷システムおよび三次元画像化手法）	2-93
2.3.7 腐食損傷を対象とした超音波探傷	2-94
2.3.8 探傷領域の選定	2-94
2.3.9 Linear Phased Array による超音波探傷	2-94
2.3.10 ステアリングを利用したバックエコーの検出高度化	2-99
2.3.11 各種探傷方法の比較検討と超音波探傷手法の結果	2-101
2.3.12 まとめ	2-101
参考文献	2-102

2.1 構造物内視装置の開発

2.1.1 はじめに

鋼橋において鋼部材の腐食は、鋼橋の安全性や耐久性を低下させる重大な損傷形式である。鋼部材に発生する腐食は長期間に徐々に進行する劣化現象であり、雨水の滞水や塩分の付着などにより局所的な腐食の発生や鋼部材の板厚が減少する。また、海塩粒子や凍結防止剤に用いられる塩化ナトリウムなどの塩分が付着するような環境や結露の生じやすい、あるいは湿気のこもりやすい環境などに置かれた鋼橋では、部材全体に腐食が進行する可能性がある。

過去に架け換え工事を実施した鋼道路橋について、その更新理由を調査した報告¹⁾(図-2.1.1)によると、道路線形工事や河川改修などの改良工事、幅員不足や交通混雑などの機能上の問題が大半を占めるものの、上部構造の損傷が直接的な原因である事例が12.3%を占めており、次いで耐荷力不足が6.7%である。そして上部構造物の損傷の原因別(図-1)では、鋼材の腐食が49.2%と半分近くを占めていることから、鋼道路橋の架け換え理由において腐食は大きな要因である。局所的な腐食については、腐食部分を補修し、性能を回復・向上させることが可能であるが、全体的に腐食が進行し、特に主要部材の腐食が著しい場合には修復のための補修が広範囲となり、経済的負担が大きくなる。

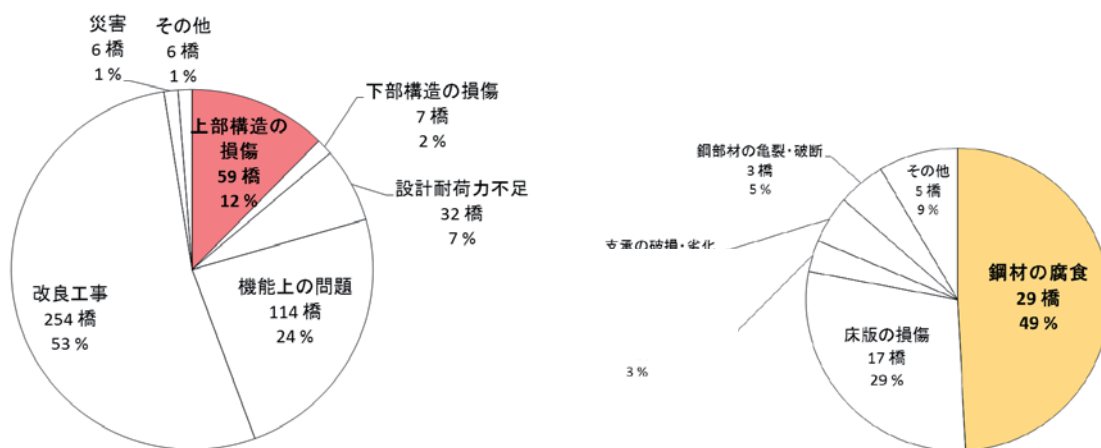


図-2.1.1 鋼道路橋の架け替え理由・上部構造の損傷原因

2007年6月に一般国道23号木曾川大橋のトラス橋斜材の破断が発見され、大規模な補修作業が行われた(図-2.1.2)。破断の直接的な原因は鋼トラス斜材の腐食損傷であるが、その腐食がコンクリートに直接埋め込まれている箇所が発生していたため目視による点検では発見できず、その結果腐食が進行して破断に至った。

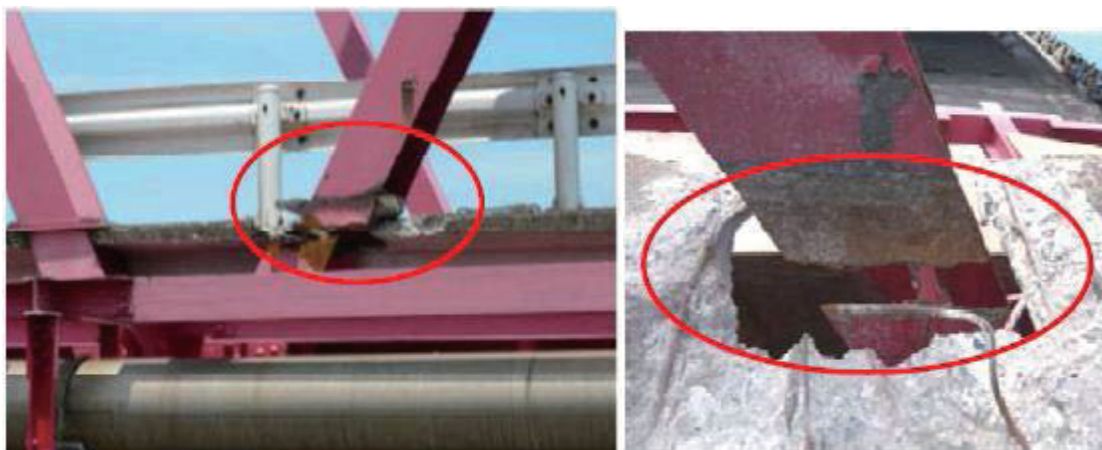
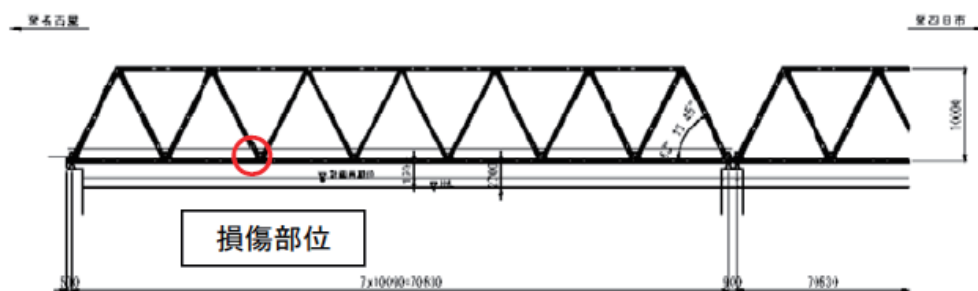


図-2.1.2 木曽川大橋 損傷部位詳細

この報告を受け、鋼部材がコンクリートに直接埋め込まれている部位を中心に各地の橋梁で緊急点検が行われた結果、2007年に竹中停車場線筒井大橋と一般国道7号本荘大橋で実施された点検においても、トラス斜材のコンクリート埋め込み部で腐食損傷や腐食損傷が原因の破断が発見された²⁾(図-2.1.3、図-2.1.4)。



図-2.1.3 筒井大橋 トラス斜材コンクリート埋め込み部の腐食損傷

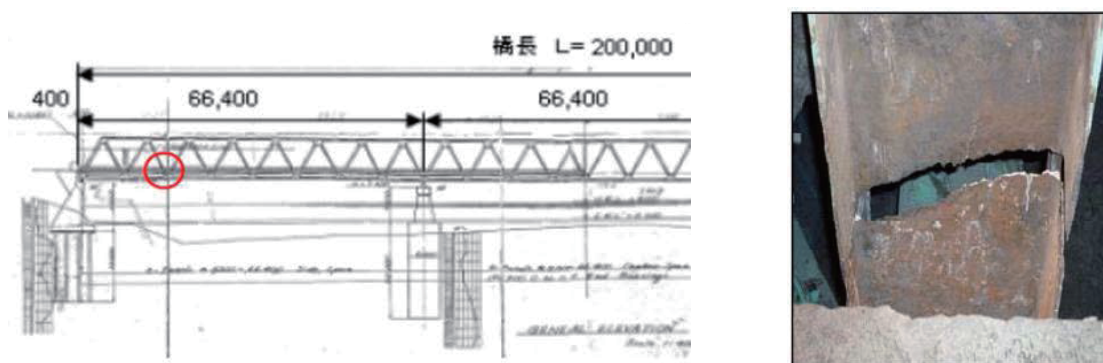


図-2.1.4 本荘大橋 損傷部位詳細

また、一般国道 51 号成田橋で実施された点検において、腐食損傷は見られなかったものの、亀裂状の損傷が発見された³⁾。成田橋は 1981 年に供用を開始した単弦ローゼ桁形式の橋梁であり、アーチと補剛桁を結ぶ鉛直材はデッキプレート上に打設された 325mm 厚のコンクリートに埋め込まれている。このうち支間中央の鉛直材取り付け部のコンクリートを除去して調査したところ、鉛直材と鋼床版との貫通部の溶接部位から 4 箇所の亀裂が発見された(図-2.1.5)。

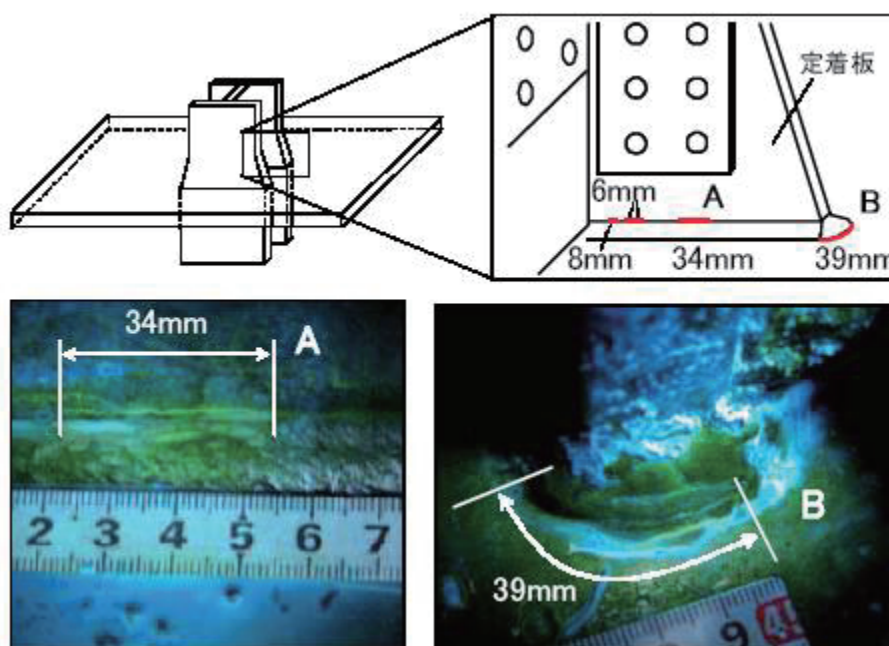


図-2.1.5 成田橋 亀裂詳細

このような鋼トラス斜材のコンクリート埋め込み部や鋼トラス橋格点部等の狭隘部、鋼箱桁の閉断面内部などの目視点検が困難な箇所や、高所での目視点検作業は維持管理を継続するために多大なコストと労力を現状必要とし、このための設備や人員の確保も容易ではない。その結果、木曽川大橋や筒井大橋、本荘大橋、成田橋の報告のように損傷劣化がある程度進行してから問題が顕在化し、大規模な事後対策を施すことにつながっている。

したがって、これらの異常やその予兆を通常点検によりの確に捉え、損傷がまだ軽微なうちに適切な対策を施すことにより更新時期の延長、ひいてはライフサイクルコストの低減を図ることができる。よって、限られた予算内で効率的かつ効果的な橋梁の維持管理を行うためには、大規模な点検設備や多数の検査要員を必要とせずに近接目視相当の点検が可能な技術を早急に開発することが望ましく、このような技術は通常点検をより一般的なものとする上でも極めて有益である。

本研究では、鋼橋の狭隘部や閉断面内部などの目視困難な構造部位の点検を可能とするマイクロロボットの開発を目的とした。多くの鋼橋では **M22** 以上のボルトが使用されているため、マイクロロボットが直径 **22mm** 程度の穴を通過可能ならば、鋼橋への影響を抑えつつ、密閉された閉断面内部の点検も可能である。したがって、開発するロボットは **M22** ボルト穴から侵入可能であることを一つの目標とした。

また、このマイクロロボットは平面部材だけでなく斜材や部材上面、腐食や凹凸のある表面上であっても走行できることが望ましい。したがって、**M22** ボルト穴に侵入できるというサイズ制限の中で、以上の環境を走行・点検できることも目標である。

さらに、閉断面内部での損傷を発見した場合に、損傷箇所を特定可能である必要がある。なお、閉断面部材内部は、ファイバースコープにより点検する場合があるが、映像を通して損傷を発見したとしても、損傷位置を特定することができない。

したがって、本研究で開発するマイクロロボットのコンセプトを以下のように定める。

- 1). 従来の点検ロボットでは接近不可能な鋼橋狭隘部の点検を行えること。
- 2). **M22** ボルト穴から侵入可能で鋼箱桁内部の点検が可能であること。
- 3). 斜材や部材上面、腐食や凹凸のある表面上でも自走可能であること
- 4). 損傷位置を特定可能であること。

2.1.2 マイクロワームロボットの構成

本研究において開発したマイクロロボットは、鋼板表面に沿って走行するベースユニット、対象部位を視準する CCD カメラを装着したカメラユニット、ベースユニットの動作を制御するコントロールユニットとエア動力と電力を供給するパワーユニットで構成される(図-2.1.6)。ベースユニットとカメラユニットはいずれも有線による制御で、検査員は作業環境の良い場所から鋼橋点検ロボットをコントロールユニットで操作し、着目部の動画・静止画像をリアルタイムでモニタリングすることができる。

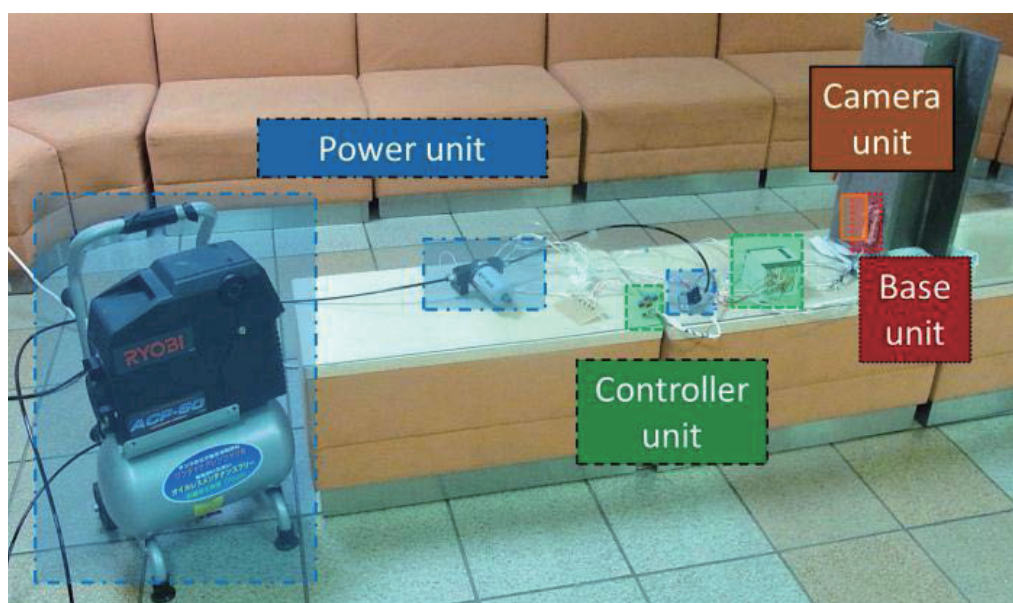


図-2.1.6 ロボット構成

1) ベースユニット

ベースユニットの概要を図-2.1.7、表-2.1.1 に示す。今後の拡張機能を考慮して、ベースユニット中間点で折畳める設計としたことにより M22 ボルト孔から箱桁閉断面内部へ侵入する時は真直ぐの状態での侵入させ、箱桁閉断面内部で折り畳むだけで点検作業を行う形体に変形できるようにした。平行する頭部の電磁石を接続する板のねじは着脱可能となっており、片端の頭部の板を外し、ヒンジ状態になっているもう片端側を軸として真直ぐの状態とし、内部では折り畳める構造としている。なお、本研究の実験においては、内部へ侵入後の状態でベースユニットの試験を行った。

ベースユニットは頭部、腹部とそれらを繋ぐ 1 つの関節部からなる。頭部と腹部には (W)15mm×(H)15mm の電磁石を、吸着面を下向きとして頭部と腹部にそれぞれ 4 つ並べている。この電磁石は改良前よりも強い電磁力を発揮する。

腹部には (W)6mm×(H)11mm×(L)26mm のエアシリンダを 2 つ配置している。エアシリンダの稼動棒はそれぞれ進行方向に 13mm だけ伸縮し、稼動棒が関節部となっている。なお、アルミフレームの加工の他にエアシリンダと配管接続部品の加工も行い、可能な限りベースユニットを小型化している。

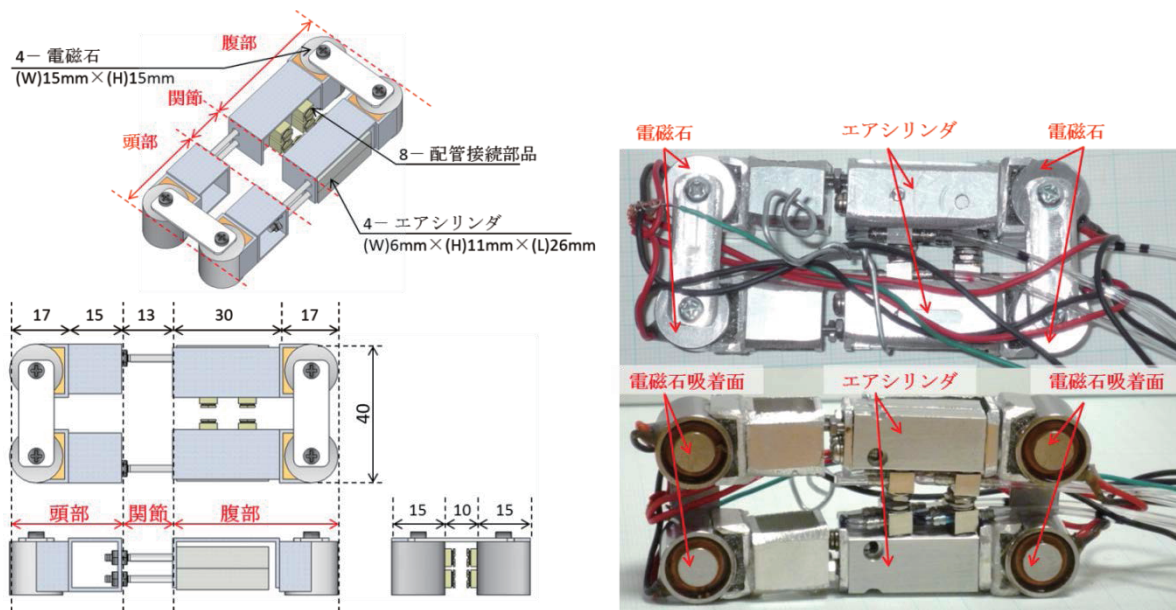


図-2.1.7 ベースユニット

表-2.1.1 ベースユニット仕様

走行速度		80cm/min
寸法		(W)40mm×(H)18mm×(L)92mm
重量		132g
電磁石	寸法	(D)15mm×(H)15mm
	重量	7g
	吸着力	30N/35DCV
エアシリンダ	作動形式	複動型
	ピストンロッド径	2mm
	ストローク	10mm
	寸法	(W)6mm×(H)11mm×(L)26mm
	重量	6.6g
	保障耐圧力	1.05MPa
	給油	不要
	配管接続口径	M3

2) カメラユニット

既往の研究では、カメラユニットとしてエンドスコープが使用されていたが、エンドスコープの総重量は480gと重かった。したがって、ベースユニットがエンドスコープを装備した場合に、ベースユニットが部材上面を走行できないなどの影響を及ぼす。

以上の理由により、カメラユニットを 3g の CCD カメラに変更した。カメラユニットの

基本性能を表-2.1.2 に示す。CCD カメラには、白色 LED 照明も搭載されているため鋼トラス橋格点部などの狭隘部、鋼箱桁の閉断面内部のような外部から光が届かない箇所の点検が容易で、かつ静止画像・動画像の撮影も可能である。使用時は PC の USB ポートにカメラの端子を接続し操作する。

表-2.1.2 カメラユニット仕様

画素数	32万画素
LED	白色LED8灯
画角	55度 (f4.6mm相当)
電源	DC5V/200mA
外径寸法	14(φ)×15(奥行) mm/ 3g
動作温度	0～45度
重量	3g

3) コントロールユニット

コントロールユニットの概要を表-2.1.3 に示す。コントロールユニットはプログラマブルロジックコントローラ、電気回路とコントローラからなる。ここで、プログラマブルロジックコントローラとは、中央演算処理装置と記憶素子を内蔵した制御装置であり、ロボットや操作盤に設置したセンサやスイッチ等様々な入力機器からの入力信号を入力回路で取り込み、あらかじめプログラムされた条件で出力回路を ON/OFF することで電磁弁や電磁石等様々な出力機器を制御する装置である。プログラムはハンディプログラマーを用いて作成し、プログラマブルコントローラに転送できる。プログラム言語はラダープログラムという専用の言語を使用しており、これによりシーケンス制御プログラムを作成する。なおシーケンス制御とは、あらかじめ定められた順序に従って、制御の各段階を進めて行く制御のことである。

表-2.1.3 コントロールユニット仕様

演算制御方式		ストアードプログラム繰り返し演算方式
入出力制御方式		一括処理方式、入出力カリフレッシュ命令
プログラム言語		リレーシンボル方式+ステップラダー方式
メモリ容量		8kステップEEPROM内蔵
命令の種類		シーケンス命令:27個
		ステップラダー命令:2個
		応用命令:89種
演算処理速度	基本命令	0.55～0.7 μ s/命令
	応用命令	3.7～数100 μ s/命令
入出力	DC入力	14点
	リレー出力	10点
重量		450g

4) パワーユニット

パワーユニットの概要を表-2.1.4 に示す。パワーユニットはエアシリンダを動かすための装置で、エアコンプレッサ、エアフィルタ、電磁弁で構成され、各々はナイロンチューブとウレタンチューブで接続されている。

表-2.1.4 パワーユニット仕様

エアコンプレッサ	電源	単相100ACV
	無負荷回転量	1450/min
	モーター出力	750W
	使用最高圧力	0.78MPa
	吐出エア量	60ℓ/min
	エアタンク容量	10ℓ
	寸法	(W)330mm × (H)650mm × (L)355mm
	重量	19.8kg
エアフィルタ	配管接続口径	Rc1/4
	ろ過度	5μm
	保障耐圧力	1.47MPa
	ドレン貯容量	55cc
	重量	330g
	材質	亜鉛ダイキャスト
	ドレンコック	スクリー式
電磁弁	ポジション数	2ポジション
	ポート数	5ポート
	弁機能	シングルソレノイド
	重量	42g
	作動方式	内部パイロット型
	配管接続口径	M3 × 0.5
	給油	不要
	保障耐圧力	1.05MPa
	応答時間	ON時:4ms, OFF時:8ms
	使用電圧範囲	24±10%DCV
	電流値	52mA

5) 動作システム

開発したマイクロロボットの動作システムを図-2.1.8 に示す。本ロボットのベースユニットはエアシリンダと電磁石の ON と OFF のみで前進・後退・左回転・右回転が可能である極めてシンプルな動作を特徴としている。前進動作は①待機状態、②頭部前進、③腹部前進の3ステップで行われる。①待機状態はコントローラの移動ボタンが押されていない状態であり、頭部と腹部すべての電磁石が ON(吸着)、エアシリンダは OFF(縮んでいる)状態である。コントローラの前進移動ボタンが押されると前進動作が開始される。②頭部前進では頭部の電磁石が一旦 OFF になり、同時にエアシリンダも ON 状態になることで関節が伸び、頭部が前進する。その後頭部の電磁石が再び ON になり吸着する。③腹部後

退では腹部の電磁石が一旦 OFF になると同時にエアシリンダも OFF 状態になることで関節が縮み、腹部も前進する。その後腹部の電磁石が再び ON となり前進動作が完了、待機状態になる。後退動作は前進動作を逆順に行う。左回転動作は 6 つのステップから成り(図-2.1.9)、①頭部と腹部すべての電磁石が ON、エアシリンダは OFF の待機状態の後、②頭部電磁石が OFF、同時に左右のエアシリンダが ON 状態になり関節が伸びる。③右のエアシリンダを OFF にして頭部を右に振った後、頭部電磁石を ON に戻す。④腹部電磁石を OFF にして頭部右エアシリンダを ON、左エアシリンダを OFF 状態に切り替えて腹部を左に振ったのち、腹部電磁石を ON にする。⑤頭部電磁石を OFF にして、左右エアシリンダを ON 状態にして関節を伸ばしたのち、⑥左右エアシリンダを縮め、頭部電磁石を ON にして左回転動作が完了、待機状態となる。以上の動作をプログラマブルロジックコントローラ上にプログラム化する。

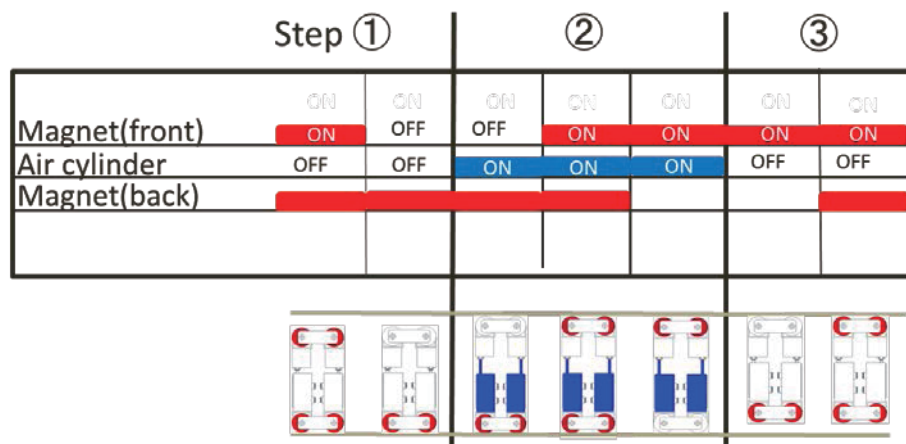


図-2.1.8 前進動作

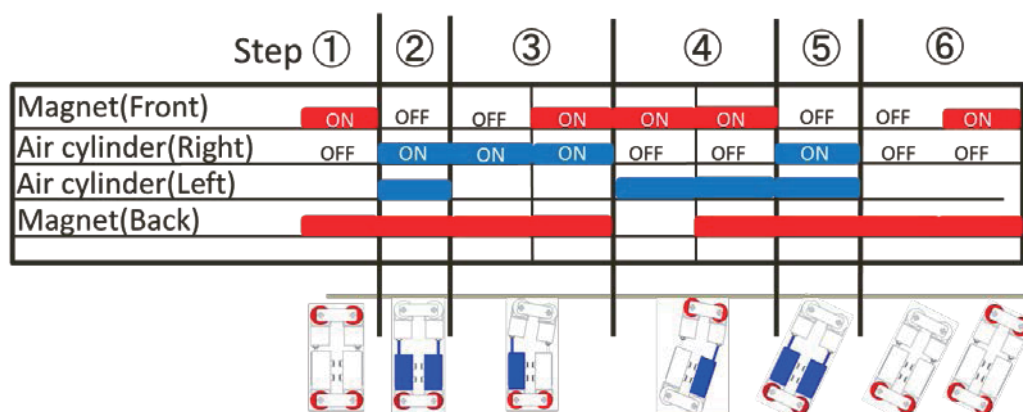


図-2.1.9 回転動作

2.1.3 運動性能評価

1) 走行試験

平面・斜面上で走行試験を行い、運動性能を評価する。平面上では、100mm 直進後の水平方向への誤差を測定し、直進性能を評価する。斜面上では、鋼壁面角度をパラメータとして、それぞれの角度で前進、後退、右回転、左回転動作が可能かを確認する。

(1) 平面上での直進走行試験

格子が書かれた鋼板上で直進させ、進行方向と垂直方向への誤差を測定した。鋼板の板厚は 16mm であり、鋼板表面は黒皮素地の状態である。誤差率の平均値は 5.5% となった。誤差率が高くなった原因としては、電磁石の不足によりエアシリンダの伸縮時に電磁石が滑ってしまい、直進動作をするたびにロボットが傾いて行ったためだと思われる。

(2) 斜面での走行試験

図-2.1.10 に示すように、鋼壁面角度をパラメータとして、それぞれの角度で前進、後退、右回転、左回転動作が可能かを確認した。鋼板の板厚は 16mm であり、鋼板表面は黒皮素地の状態である。試験結果より、 0° ～ 150° の壁面において動作は十分可能であることを確認した。しかし、 180° の壁面においては、ベースユニットが壁面から落下した。この原因は、エアシリンダの伸縮時にベースユニットの頭部が鋼面から数 mm 離れた状態となることが考えられる(図-2.1.10)。

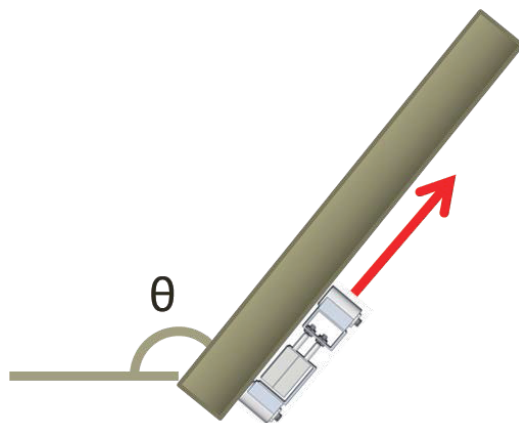


図-2.1.10 斜面での走行試験

(3) 動作システム改善による運動性向上

180° の壁面において、エアシリンダの伸縮時にベースユニットの頭部が鋼面から数 mm 離れた状態となるのを防ぐために、動作システムを改良した(図-2.1.11)。新動作システムの特徴としては、エアシリンダの伸縮時に電磁石 3 つを ON にしたことである。こうすることで、エアシリンダの伸縮時に前方電磁石や後方電磁石が鋼面から離れるのを防いだ。

改良動作システムで斜面走行試験を行った結果、 180° の壁面において、落下せずに走行

可能であった。さらに、同システムで直進走行試験を行ったところ誤差率が 2.3%となった。動作システム改良前と比較して、誤差率は 3.2%低下した。誤差率が低下した理由は、3 個の電磁石が ON となることで、エアシリンダの伸縮時に電磁石が滑るのを防いだためだと考える。

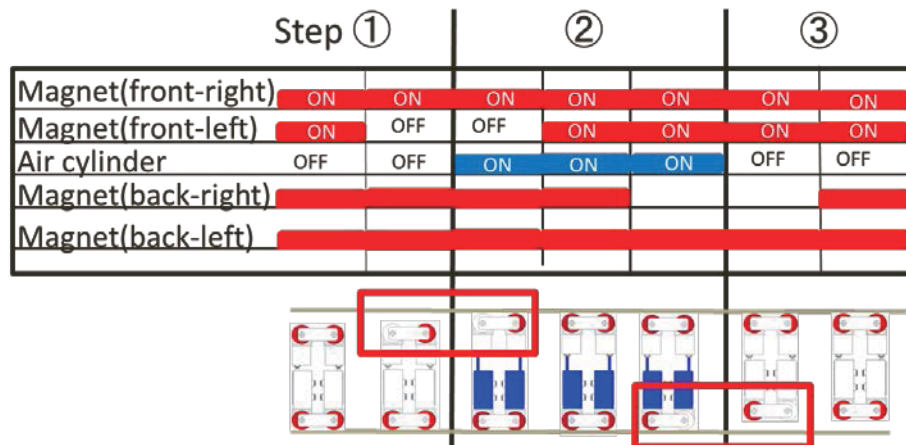


図-2.1.11 動作システムの改良

2) 考察

マイクロロボットの運動性能評価を行った。直進走行試験では誤差率が5.5%となり、斜面での走行試験では0°~150°までの斜面で走行が可能となった。

運動性能を高めるために、動作システムを改良し、直進走行試験では誤差率が 2.3%となり、斜面での走行試験では 0°~180°までの斜面で走行が可能となった。電磁石の吸着試験を行い、非磁性体厚さが 0.3mm 以下の場合に走行可能であることが明らかになった。

2.1.4 マイクロロボット新機構型の開発

前章でマイクロロボット（以下、プロトタイプ）は、非磁性体の厚さが 0.3mm 以下で走行可能であることが明らかになった。しかし、新設の道路・鉄道橋の内面塗装厚さは 0.25mm であるため⁹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾、数年後には腐食などにより非磁性体厚さが 0.3mm 以上になることが予想される。したがって、腐食が進行した表面上ではプロトタイプが走行するのは難しいと考えられる。あらゆる表面でも走行するというコンセプトを満たすためにも、プロトタイプを改良する必要があると言える。

本章では、マイクロロボットの適用範囲を広げるために、マイクロロボット新機構型を開発した。また、開発した新機構型で走行試験を行い、運動性能評価を行う。さらに、新機構型が吸着可能な非磁性体厚さを明らかにする。

1) 改良点

(1) 電磁石の改良

プロトタイプは非磁性体厚さである GAP が 0.3mm 以下で走行可能であることが前章で明らかになった。より大きな GAP に対応するために、吸着力の大きな電磁石に改良した。改良前の電磁石のコイル直流抵抗は 650Ω であったのに対して、改良電磁石のコイル直流抵抗は 200Ω となっている。

改良電磁石でも前章と同様の吸着試験を行った。24V 電圧下での、旧電磁石と改良電磁石の吸着力の比較を図-2.1.12 に示す。旧電磁石と比較して改良電磁石の吸着力が上昇しているのがわかる。なお、旧電磁石では 35V 電圧下でも使用可能であったが、改良電磁石は 35V 電圧下での発熱が大きいために、24V 電圧での使用が推奨される。

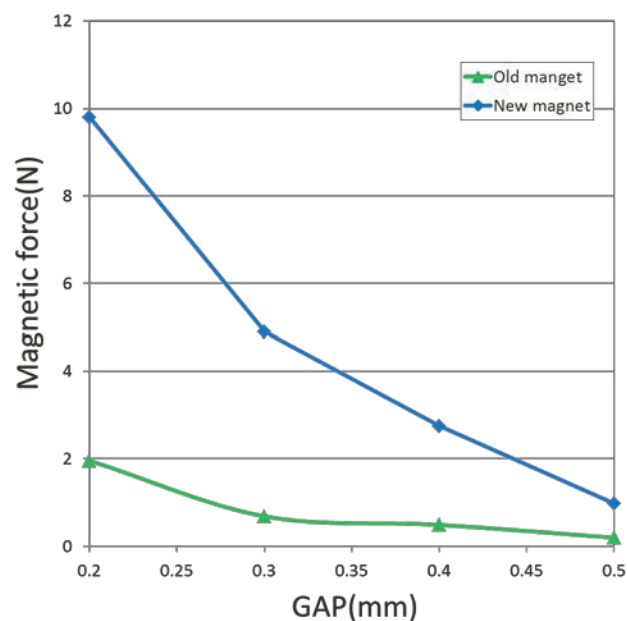


図-2.1.12 旧電磁石と新電磁石との比較

(2) 動作システム

開発したマイクロロボット新機構型の動作システムを図-2.1.13、図-2.1.14に示す。電磁石の個数が増えたものの、動作システムはプロトタイプとほぼ同等である。前進動作は①待機状態、②頭部前進、③腹部前進の3ステップで行われる。①待機状態はコントローラの移動ボタンが押されていない状態であり、頭部と腹部すべての電磁石がON(吸着)、エアシリンダはOFF(縮んでいる)状態である。コントローラの前進移動ボタンが押されると前進動作が開始される。②頭部前進では頭部の電磁石がONのまま、同時にエアシリンダもON状態になることで関節が伸び、頭部が前進する。③腹部前進では最高峰の電磁石2個がONのままエアシリンダもOFF状態になることで関節が縮み、腹部も前進する。その後腹部の電磁石4個が再びONとなり前進動作が完了、待機状態になる。後退動作は前進動作を逆順に行う。

左回転動作は6つのステップから成り、①頭部と腹部すべての電磁石がON、エアシリンダはOFFの待機状態の後、②頭部電磁石がONの状態、同時に左右のエアシリンダがON状態になり関節が伸びる。③右のエアシリンダ、頭部右の電磁石をOFFにして頭部を右に振った後、頭部電磁石をONに戻す。④腹部右の電磁石をOFFにして右エアシリンダをON、左エアシリンダをOFF状態に切り替えて腹部を左に振ったのち、腹部電磁石をONにする。⑤頭部右の電磁石をONにして、左右エアシリンダをON状態にして関節を伸ばしたのち、⑥頭部右の電磁石がONのまま左右エアシリンダを縮め、左回転動作が完了、待機状態となる。以上の動作をプログラマブルロジックコントローラ上にプログラム化する。

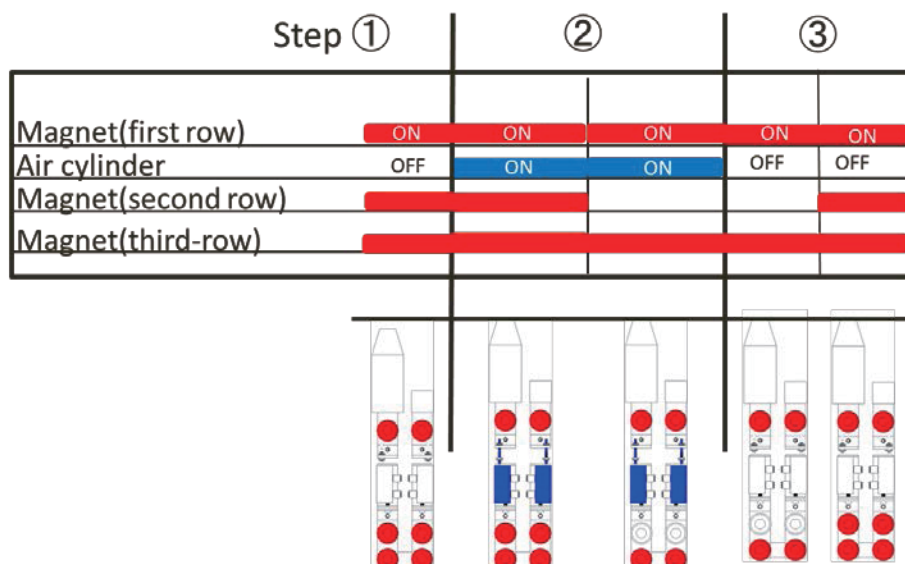


図-2.1.13 前進動作（新機構型）

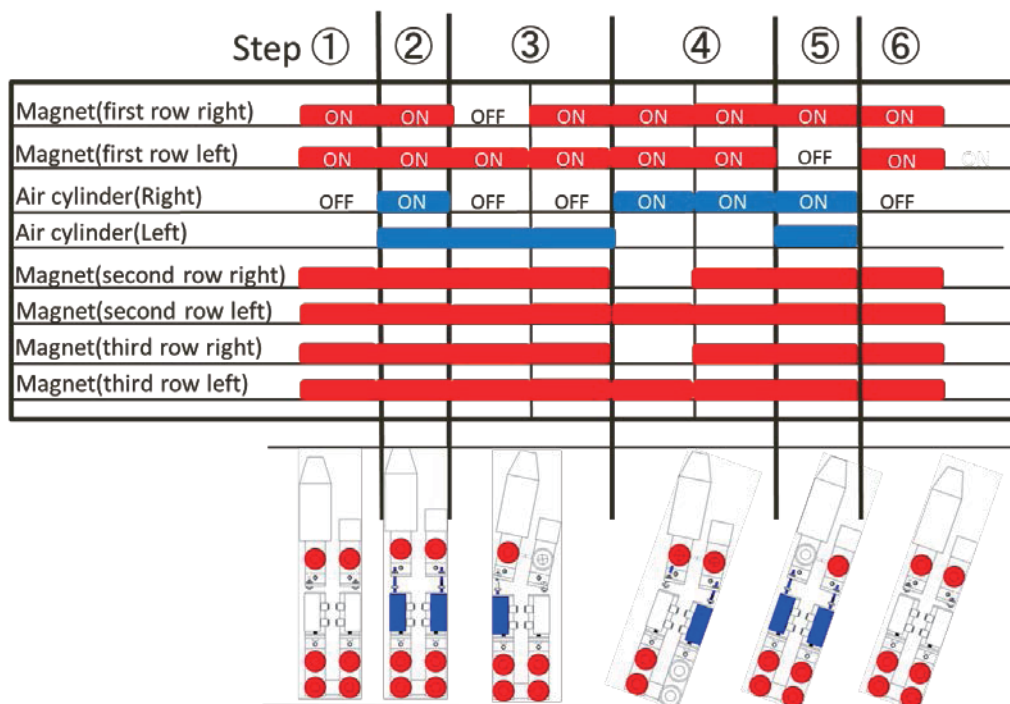


図-2.1.14 回転動作（新機構型）

2) 新機構型の運動性能評価

プロトタイプ同様に、マイクロロボット新機構型の走行試験を行った。走行試験の方法は3章で行ったものと同じである。直進走行試験では、誤差率が1.2%となった。プロトタイプと比較すると、誤差率が1.1%低下した。

斜面走行試験を行った結果、180°壁面において、落下せずに走行可能であった。以上より、新機構型はあらゆる角度の鋼材に対応可能であることが確認できた。

2.1.5 ワイヤレスレーザーマウスによる位置同定システムの開発

マイクロロボットが損傷位置を特定するためには、自己の位置を推定する機能が必要である。移動ロボットの位置推定方法は、ロータリーエンコーダで車輪の回転量を計測する方法や、CCD カメラでランドマークを計測するなど、様々な手法がある²⁰⁾²¹⁾。また、関森らは、複数の光学マウスセンサを用いてロボットの移動量を直接走行面から読み取る方法を提案してきた¹⁷⁾¹⁸⁾。しかし、本研究で使用するロボットには M22 ボルト穴から侵入するというサイズ制約があるため、上述の各手法を利用することはできない。

したがって本章では、1 個の小型レーザーマウスセンサをロボットに装備し、位置同定を行う手法を提案する。

1) レーザーマウスセンサの概要

レーザーマウスセンサは、レーザーとイメージセンサによって x 軸方向、y 軸方向の移動量を読み取る。マウス走行面にレーザーを照射し、その部分の状態をイメージセンサが「模様」として読み取る。読み取った模様のパターンは保持され、模様の変化をキャプチャし続けることで、x 軸方向、y 軸方向の移動量を算出する。

レーザーセンサは、光学式マウスで使われている LED に比べて 20 倍高いコントラストで走行面をキャプチャできる。LED から発せられる可視光では、光沢のある平面などを照射すると乱反射を起こしやすかったが、レーザー光は均一な方向に進むために乱反射が起らず、イメージセンサが走行面の「模様」を精緻に捉えることが可能である。

本研究で使用したレーザーマウスセンサの仕様を表 2.1.5 に示す。

表-2.1.5 ワイヤレスレーザーマウス仕様

インターフェース	USB
充電方法	Micro USB経由
充電時間	1~2時間
連続動作時間	24時間
通信可能範囲	最大約10m(オープンスペース)
無線方式	2.4GHz RF方式
レーザー分解能	1600dpi
重量	13g

2) レーザーマウスセンサによる位置同定の基本式

床面にワールド座標系(X, Y)の原点を、レーザー噴出口にマウス座標系(x', y')の原点を配置する。図-2.1.15 のように、マウス座標系がワールド座標系に対して傾いている時、レーザーマウスセンサが測定した移動量 dx', dy' はワールド座標上の移動量 dX, dY と一致しない。その理由は、1 個のレーザーマウスセンサでは、ワールド座標系に対してマウス座標系がどの程度回転しているかを計測できないためである。したがって本節では、回転量やワールド座標系上の移動量を、1 個のレーザーマウスセンサで算出するための基本式を示す。

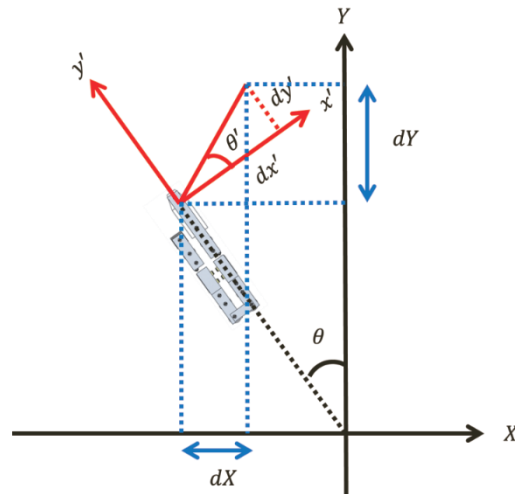


図-2.1.15 ワールド座標系に対して傾いたマウス座標系

ロボットが回転動作を行うとき、中心を軸に回転しているとは限らないが、図-2.1.16 のように前方のマウスが dx' 移動したときは、後方のマウスは前方のマウスとは逆方向に dx' 移動すると仮定する。

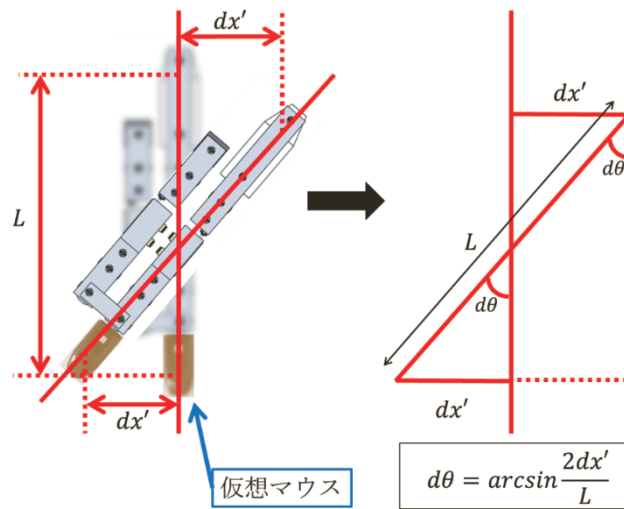


図-2.1.16 仮想マウスによる回転量の検出

後方のマウスは実際には存在しない“仮想”マウスである。レーザー噴出口から仮想レーザー噴出口までの距離 L は既知である。したがって、ロボットの回転量 $d\theta$ は次式のように表せる。

$$d\theta = \arcsin \frac{2dx'}{L} \quad (1)$$

センサで計測される移動量 (dx', dy') とロボットの移動量 (dX, dY) との関係は次式で表せる。

$$dX = \sqrt{dx'^2 + dy'^2} \cos(\theta' + \theta) \quad (2)$$

$$dY = \sqrt{dx'^2 + dy'^2} \sin(\theta' + \theta) \quad (3)$$

ここに

$$\theta' = \arctan \frac{dy'}{dx'} \quad (4)$$

である。したがって、ワールド座標系におけるロボットの位置・姿勢 (X_t, Y_t, θ_t) は

$$X_t = X_{t-1} + dX \quad (5)$$

$$Y_t = Y_{t-1} + dY \quad (6)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + d\theta \quad (7)$$

となる。

3) 位置同定システムの構成

マウスの移動量 dx' , dy' は、PC 上でのカーソル移動量から算出する。PC 画面に移動量測定用のウィンドウを表示させ、ウィンドウ上をカーソルが動くことによりマウス移動量を計測する。このウィンドウは、カーソルがウィンドウ外に飛び出さないような仕様となっている。マウスの移動量が大きい場合には、カーソルがウィンドウ外に飛び出さずに、ウィンドウ中央に戻ってくるようになっている。

このマウス移動量 dx' , dy' からワールド座標系におけるロボットの位置を把握するために、基礎式が書かれたプログラムによりデータ処理を行う、データ処理後、ワールド座標系におけるロボットの軌道を表示する。

4) 位置同定精度の検証

本手法の有効性を検証するために、レーザーマウスセンサ単体による位置同定・基礎試験を行った。基礎試験は紙面上で行い、レーザーマウスは”直進”、”回転”、”直進と回転の組み合わせ”の3パターンの動作をする。そして、マウスの移動軌跡と上述の基礎式による位置同定結果とを比較する。

さらに、PC 上のカーソルスピードによる位置同定精度の差異も検証する。カーソルスピードを上げると分解能が高くなるため、低速のカーソルと比較して精度が上昇すると予想した。PC 上のカーソルスピードはマウスプロパティで変更できる。もっとも遅いカーソルスピードを **SPEED1**、もっとも速いカーソルスピードを **SPEED11** とする。本試験の位置同定では、**SPEED1** と **SPEED11** の2つで行う。

(1) pixel・mm 関係の算出

マウスの直進実験を行う前に、画面上の距離(pixel)と、走行面上の距離(mm)との関係を調べる必要がある。pixel 単位を mm 単位に変換するための定数は、 x' 方向と y' 方向それぞれで算出する。

直進、並進はリニアアクチュエータを使い、レーザーマウスを一定速度で 100mm 移動させた (図-2.1.17)。レーザーマウスの両脇には鋼材が置いてあり、レーザーマウスが横にぶれないようになっている。

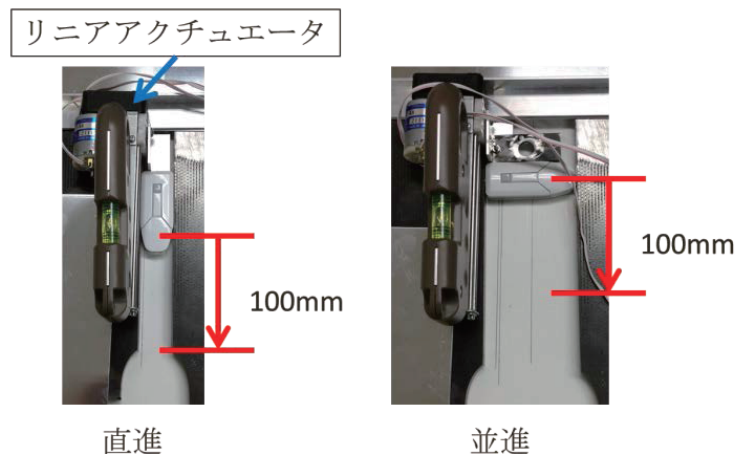


図-2.1.17 直進・並進実験状況

表-2.1.6 にレーザーマウスを 100 mm直進させた後のカーソル移動量(pixel)の総和を示す。この移動量は上述の基礎式を使って計算した値ではない。Ratio はレーザーマウス移動量 100mm をカーソル移動量(pixel)で除したものであり、計測された pixel 数を mm に変換するための定数である。今後はこの Ratio を使って、カーソル移動量(pixel)をワールド座標系における $dY(mm)$ に変換する。

また、表-2.1.7 にマウスを 100 mm並進させた後のカーソル移動量(pixel)の総和を示す。この移動量は上述の基礎式を使って計算した値ではない。Ratio はマウス移動量 100mm をカーソル移動量(pixel)で除したものであり、計測された pixel 数を mm に変換するための定数である。今後はこの Ratio を使って、カーソル移動量(pixel)をワールド座標系における $dX(mm)$ に変換する。

表-2.1.6 カーソルの移動量の総和（100mm 直進時）

		x' (Pixel)	y' (Pixel)	Ratio (mm/pixel)
SPEED 1	No.1	0	106	0.9434
	No.2	0	103	0.9709
SPEED 11	No.1	-1	11881	0.008417
	No.2	-90	11916	0.008392

表-2.1.7 カーソルの移動量の総和（100mm 並進時）

		x' (Pixel)	y' (Pixel)	Ratio (mm/pixel)
SPEED 1	No.1	111	0	0.9009
	No.2	103	0	0.9709
SPEED 11	No.1	11675	-100	0.008565
	No.2	11031	24	0.0090654

(2) 直進実験

リニアアクチュエータでレーザーマウスを 100mm 直進させたときの軌跡を、上述の基礎式をもちいて算出した(図-2.1.18)。(X,Y) = (0,0)からスタートし、図-2.1.18 に示すゴール座標まで移動した。表-2.1.6にあるように、SPEED11 では x' 方向への移動量も検出されているために、SPEED11 の軌跡が振動している。しかし、SPEED1,11 とともに精度よくレーザーマウスの直進軌跡を再現している。

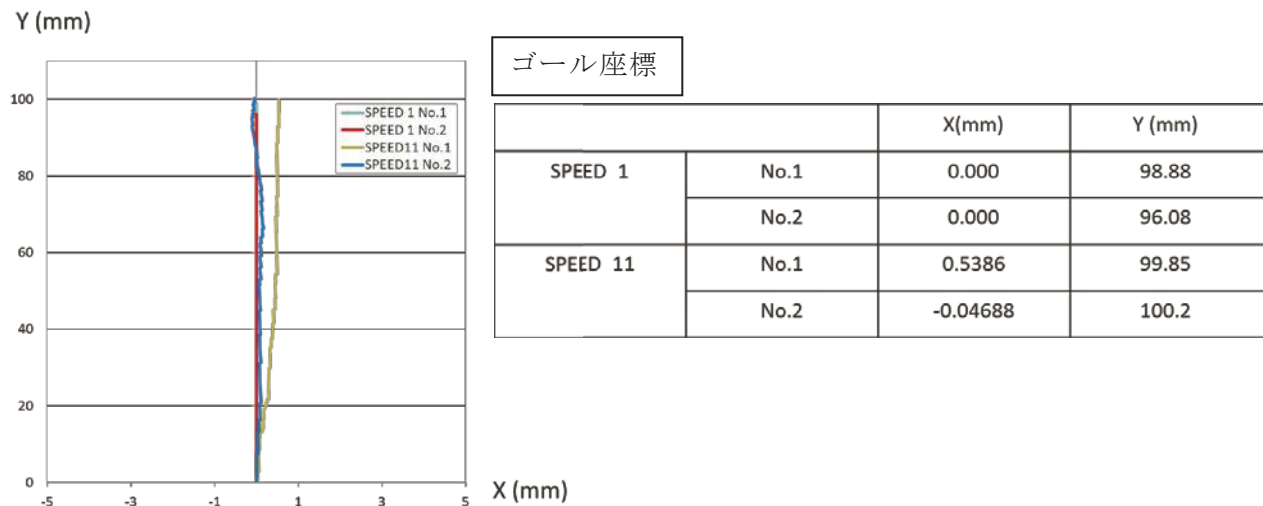


図-2.1.18 位置同定結果（直進実験）

(3) 回転実験

中央に穴が開いた鋼材片にレーザーマウスを取り付け、その孔にボルトを通すことで、手でレーザーマウスが正確に円を描くようにした（図-2.1.19）。この時、マウス座標系はワールド座標系に対して逐次回転している。したがって、基礎式を用いなければレーザーマウスは回転量を計測できないはずである。

(X,Y) = (0,0)からスタートしてからゴールまでの位置同定による軌跡を図-2.1.19 に示す。

SPEED1,11 とともに精度よくレーザーマウスの回転軌跡を再現しており、基礎式を用いることでマウスの回転量を検出できるようになった。

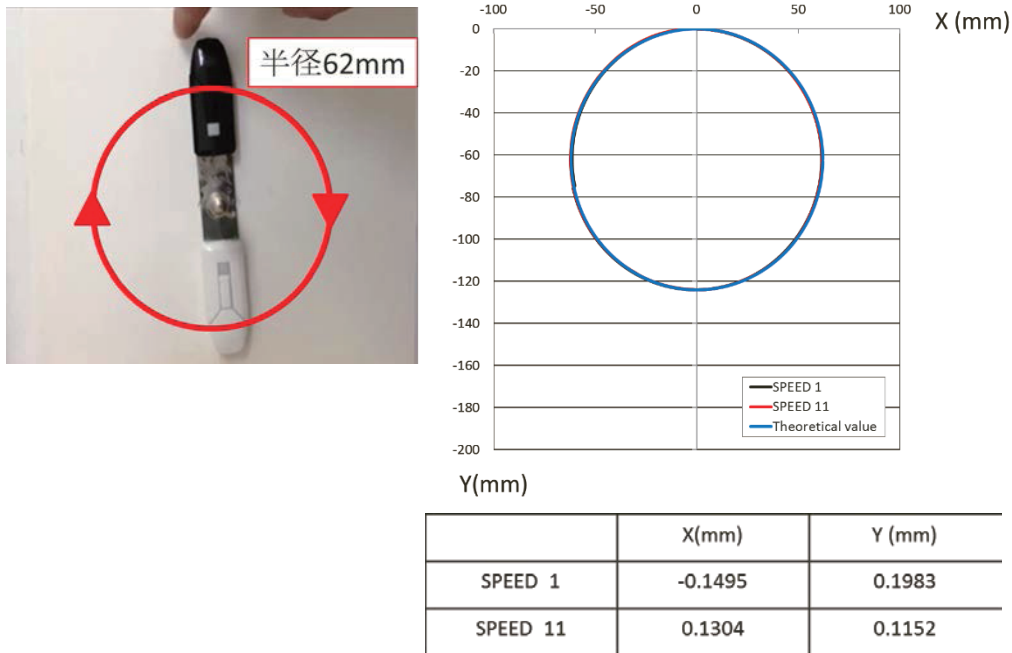


図-2.1.19 位置同定結果（回転実験）

(4) 直進・回転実験

直進・回転の組み合わせ実験は、紙面上のラインに沿って、レーザーマウスを手動で移動させた。図-2.1.20にあるように、 $(X,Y) = (0,0)$ からレーザーマウスはスタートし、直進・回転・直進の動作を行いゴールする。

$(X,Y) = (0,0)$ からスタートしてからゴールまでの位置同定による軌跡及び通過点とゴールの座標を図-2.1.21に示す。

SPEED1,11ともに誤差が大きくなった理由は、マウスを手動で動かしたために、レーザーマウスが微細な振動をし、センサが誤計測したためだと思われる。

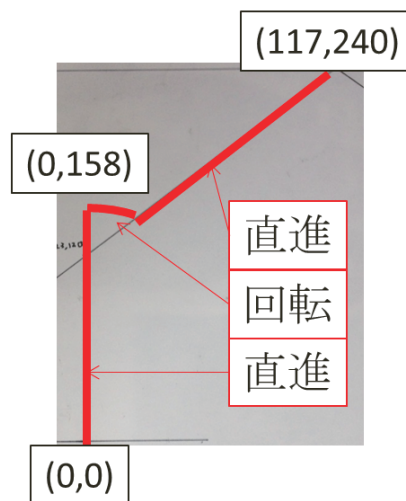
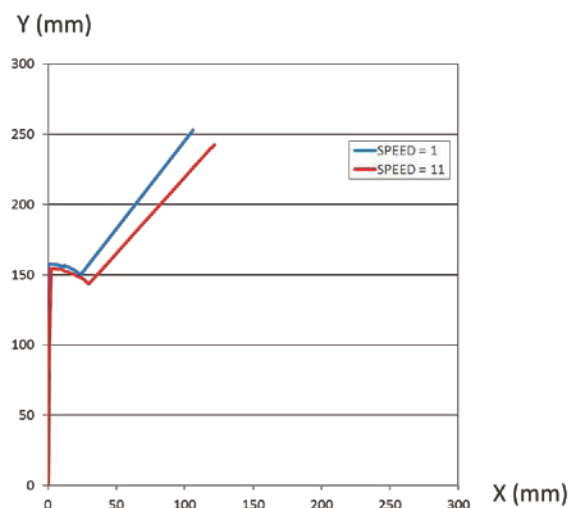


図-2.1.20 直進・回転組み合わせ実験



通過点座標

	X(mm)	Y (mm)
真値	0.000	158.0
SPEED =1	0.000	157.6
SPEED =11	2.165	154.5

ゴール座標

	X(mm)	Y (mm)
真値	117.0	240.0
SPEED 1	105.4	252.0
SPEED 11	121.7	242.5

図-2.1.21 位置同定結果（回転・直進組み合わせ）

5) レーザーマウスセンサをロボットに実装して実験

レーザーマウスをマイクロロボット新機構型に固定し、実際にマイクロロボットの位置同定ができるか検証する。マイクロロボットを紙が貼られた鋼材上で走行させ、マイクロロボットの実軌道と位置同定による軌道を比較する。マイクロロボットに対しレーザーマウスが回転しないよう、レーザーマウスの2点をM3ボルトで固定している（図-2.1.22）。また、マウスと走行面との間に距離が生じないようにしてある。マウスが走行面に接地していなければ、距離を測定できないためである。

なお、本節でのカーソルスピードはSPEED1のみである。エアシリンダーの伸縮速度が高いため、SPEED11のカーソルはウィンドウ外に出てしまうからである。

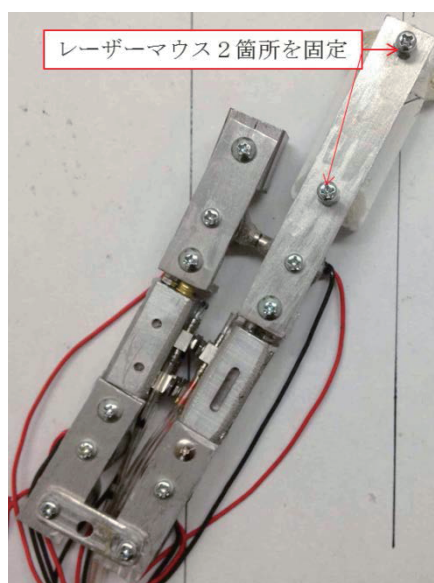


図-2.1.22 レーザーマウス固定

(1) 直進実験

マイクロロボット新機構型が直進した時の移動軌跡と、位置同定により算出した軌跡及びゴールの座標を図-2.1.23 に示す。位置同定による移動軌跡が振動しているのは、マイクロロボットの振動をレーザーマウスが検知しているためである。また、マイクロロボットが本体中心を軸に回転しているという仮定による誤差も考えられる。

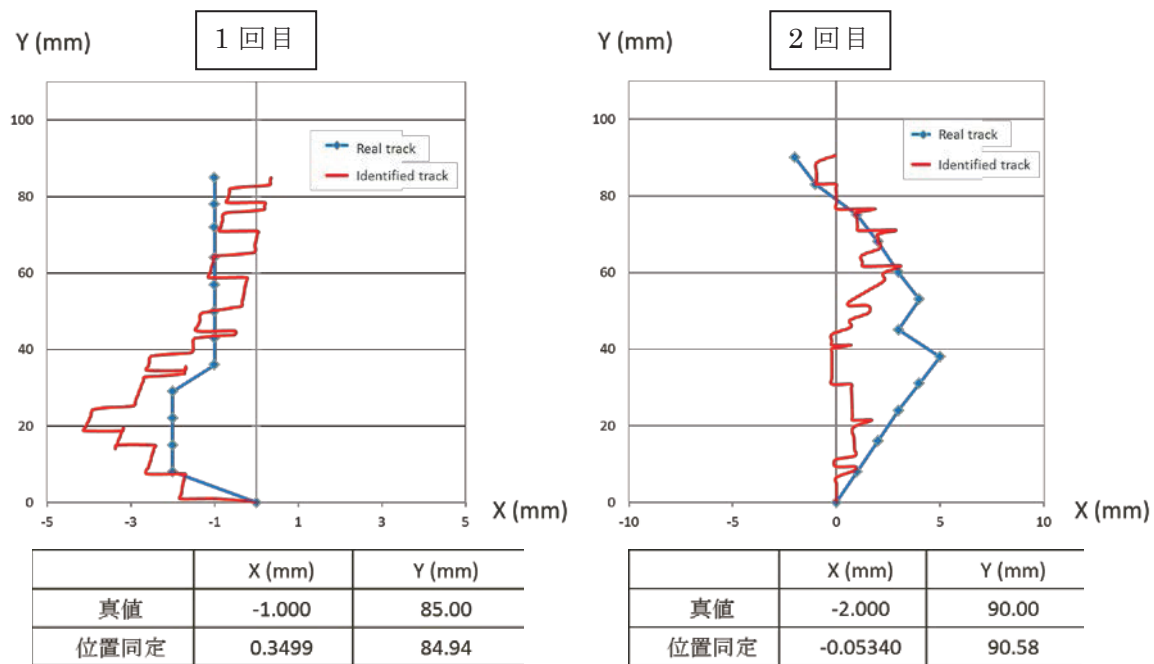


図-2.1.23 ロボット実軌道と位置同定による軌跡（直進実験）

(2) 回転実験

マイクロロボット新機構型が約 90° 回転した時の移動軌跡と、位置同定により算出した軌跡及びゴールの座標を図-2.1.24 に示す。位置同定による移動軌跡が振動しているのは、マイクロロボットの振動をレーザーマウスが検知しているためである。

直進実験よりも誤差が大きくなってしまった理由は、ロボットが1回の回転動作を終えるまでにエアシリンダーを3回伸縮しているためだと考える。なお、直進動作はエアシリンダーの伸縮1回で動作を終えている。

また、マイクロロボットが本体中心を軸に回転しているという仮定による誤差も考えられる。回転動作での位置同定精度を高めるためにも、回転動作をよりシンプルな動きに改善する必要がある。

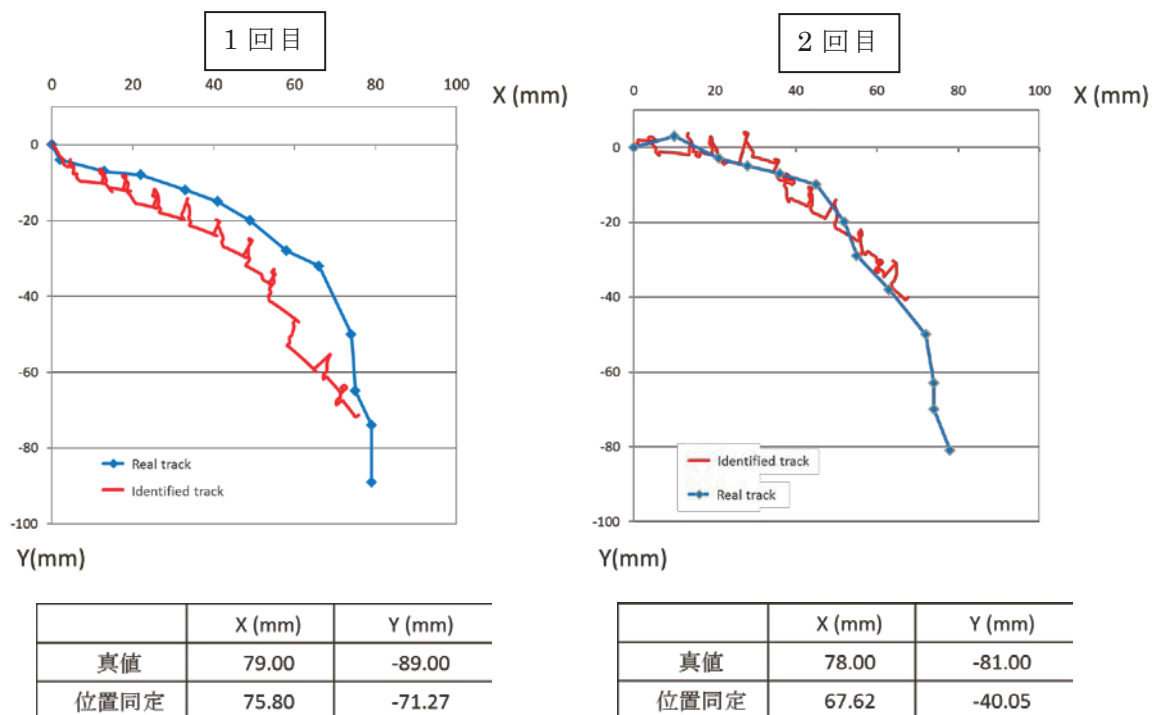


図-2.1.24 ロボット実軌道と位置同定による軌跡（回転実験）

6) 考察

1 個のワイヤレスレーザーマウスによる位置同定を提案した。基礎式を用いて、レーザーマウスの回転量やワールド座標系におけるレーザーマウスの位置を把握できた。回転動作に関しては、エアシリンダーの伸縮回数が多いと、誤差が大きくなる可能性がある。回転動作においてエアシリンダーの動作回数を減らすことは課題である。

2.1.6 鋼箱桁モデル内部の試験点検

本章では、鋼箱桁モデル（図-2.1.25）内部でマイクロロボット新機構型による点検を行い、マイクロロボットの実用性を検証する。検証する項目としては、新機構型の運動性と CCD カメラやレーザーマウスによる位置同定の機能性である。まず、錆が発生している表面（図-2.1.14）でマイクロロボット新機構型が直進・回転・後退動作を行うことが可能か確認する。また、CCD カメラにより部材内部の映像を取得し、映像が示す箇所をレーザーマウスにより特定する。



図-2.1.25 箱桁モデル

1) 実験状況

本試験体は外寸約(W)200×(H)200×(L)500mm、板厚はすべて 16mm である。ダイヤフラムには直径 50mm の小さい孔が開いており、この孔からマイクロロボットを侵入させる。

2) 運動性能の検証

ケーブルによる張力がマイクロロボットに働き、直進の命令をしているにも関わらず、斜め方向に走行していた。しかし、錆が発生している走行面でも電磁石は吸着し、直進・回転・後退動作を行うことができた。

3) CCD カメラデータの検証

本試験では、CCDカメラとInfraredカメラ2つのカメラを使用した。図-2.1.26に示すのがCCDカメラにより取得した部材内部画像である。錆が発生している状況が把握でき、壁面に接近した場合でも画像を取得することができた。

図-2.1.27に示すのがInfraredカメラにより取得した部材内部画像である。白い部分が錆である。画像はモノトーンであるが、壁面の凹凸を確認できる。



図-2.1.26 CCD カメラにより取得した画像

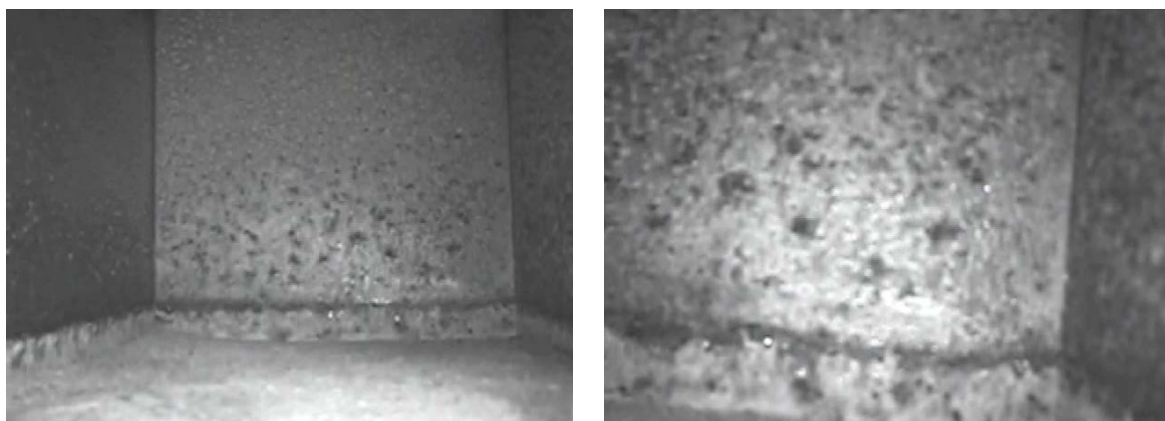


図-2.1.27 Infrared カメラにより取得した画像

4) 位置同定データの検証

Infrared カメラにより取得した部材内部の映像と、レーザーマウスによる位置同定結果を比較することで、位置同定の実用性を示す。マイクロロボットはスタート後、部材内部を走行し点検し、再度侵入地点まで戻ってくる。

マイクロロボットがスタートする地点をワールド座標系の原点とする。この時点ではマウス座標系とワールド座標系の原点は一致している。ロボット移動後に、マウス座標系がワールド座標系に対し回転してくる。

撮影した画像と、座標値・ロボットの角度・カメラの画角から特定した撮影範囲との比較を図-2.1.28 に示す。なお、Infrared カメラの画角は 55° である。

図-2.1.28 より、位置同定により特定した撮影範囲と、画像に写っている壁面の範囲がある程度一致しているのがわかる。

再度同様の試験を行った。試験結果を図-2.1.29 に示す。2 回目の試験でも、位置同定により特定した撮影範囲と、画像に写っている壁面の範囲がある程度一致しているのがわかる。

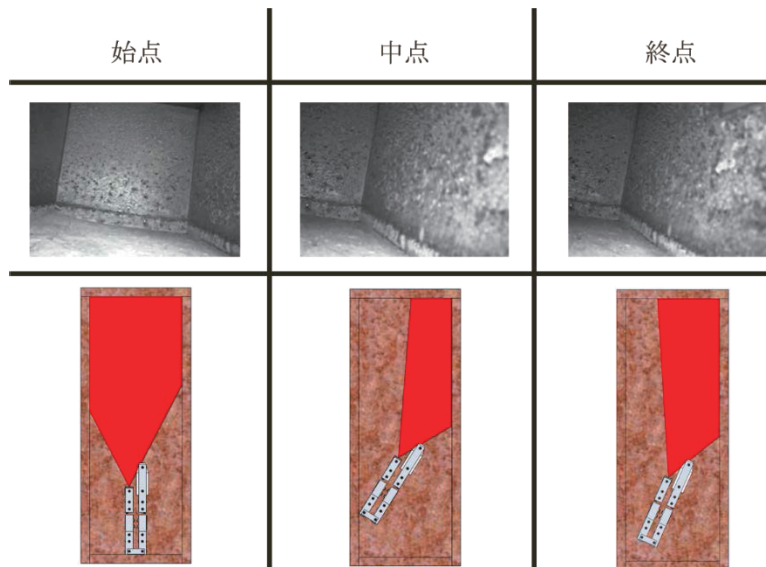


図-2.1.28 撮影画像とロボットの姿勢との比較（1回目）

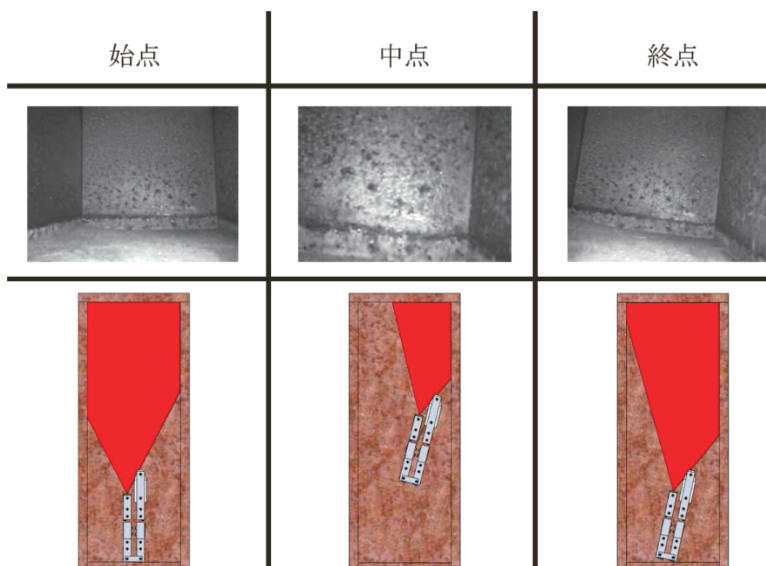


図-2.1.29 撮影画像とロボットの姿勢との比較（2回目）

前章にて、ロボットにレーザーマウスを実装し、紙面上で位置同定試験を行ったが、誤差が出ていた。本試験では走行面に錆が発生しているため、マウスが誤計測をし、誤差が前章より大きくなっている可能性がある。通常、レーザーマウスは屋内で使用される機器である。

また、スタート地点がワールド座標系の原点となるため、ロボットをスタートさせる際に、ロボットが部材軸に対して傾いていると、位置同定による軌道と実軌道との間に誤差が生まれる。箱部材侵入後に、ロボットが部材軸と並行になっていることを正確に把握するのは困難である。

より精度が高い位置同定を行うためには、上記の課題を解決する必要がある。しかしながら、ファイバースコープでは不可能な位置同定が、本研究で開発したマイクロロボットで可能となったことを示した。

5) 考察

箱部材内部にマイクロロボット新機構型を侵入させ、内部点検を行った。部材内部底面には錆が発生していたが、直進・回転・後退動作を行うことができた。また、CCD カメラ、Infrared カメラで部材内部の腐食状況を確認できた。そして、位置同定により特定した撮影範囲と、画像に写っている壁面の範囲がある程度一致していたことから、位置同定システムの有効性を示した。

2.1.7 まとめ（構造物内視装置の開発）

以下に2.1章の結論を述べる。

- 電磁石とエアシリンダを用いたシンプルな動作システムを開発し、これまで困難とされていた鋼橋狭隘部や鋼箱桁内部にM22ボルト穴から侵入できる橋梁点検ロボットを開発した。
- プロトタイプの運動性能評価を行い、直進走行試験では誤差率が5.5%、斜面での走行試験では0°~150°までの斜面で走行が可能となった。さらに運動性能を高めるために、動作システムを改良し、直進走行試験では誤差率が2.3%となり、斜面での走行試験では0°~180°までの斜面で走行が可能となった。電磁石の吸着試験を行い、プロトタイプは非磁性体厚さが0.3mm以下の表面で走行可能であることが明らかになった。
- 適用範囲を広げる目的で、マイクロロボット新機構型を開発した。走行試験を行った結果、直進走行試験では誤差率が1.2%、斜面走行試験では0°~180°までの斜面で走行が可能となった。さらに、新機構型は非磁性体厚さが0.5mm以下の表面で走行可能であることが明らかになった。
- 1個のワイヤレスレーザーマウスによる位置同定システムを開発した。基礎試験を行った結果、基礎式によりレーザーマウスの回転量やワールド座標系におけるレーザーマウスの位置を把握できることが分かった。マイクロロボットにレーザーマウスを実装した場合には、ある程度の誤差は生じるものの、位置同定が行える可能性を示した。ただし回転動作のエアシリンダー回数が多い場合は誤差が大きくなる可能性があり、この点は改善の余地がある。
- 箱部材内部にマイクロロボット新機構型を侵入させ、内部点検を行った。部材内部底面には錆が発生していたが、直進・回転・後退動作を行うことができた。また、CCD カメラ、Infrared カメラで部材内部の腐食状況を確認できた。そして、位置同定により特定した撮影範囲と、画像に写っている壁面の範囲がある程度一致していたことから、位置同定システムの有効性を示した。

鋼箱桁内部に M22 ボルト穴から侵入後、CCD カメラにより内部を点検でき、撮影位置を特定できる鋼橋点検用マイクロロボットを開発した。今後の展望として、床面から壁面へ移動できることと、位置同定の精度を上げることが必要になってくると考えている。

2.2 渦流探傷法による腐食損傷の検出

2.2.1 研究の対象

直接目視では確認できないコンクリートに埋め込まれた部分で発生する腐食を、早期に検出することが可能な技術を早急に開発することが求められており、新しい技術によってより簡易で高度な点検が可能になると期待されている。目視観察の困難な場所の鋼構造物の欠陥検出のためには、さまざまな非破壊検査手法が有効であるように考えられてきた。特に超音波探傷法は今までにも、鋼構造物の欠陥の定量的な評価を行う優れた手法とされてきたが、今回の対象のようにコンクリートという非磁性体内部の損傷検出には適していない。それに対して渦流探傷法は磁場の変化により欠陥の検出を行うため、非磁性体が存在していても内部損傷を検出することができると期待される。以上より、本研究でその方法の確立を試みるに至った。

本研究では、目視観察の難しいコンクリートに埋め込まれた鋼部材の腐食を検知するための、渦流探傷法を用いた検出方法の確立およびその際の渦流探傷用プローブの条件の提案を目的とした。具体的には、まず損傷による欠陥の形状、寸法の影響を考慮した基礎解析と実部材を対象とした解析によって、腐食損傷の検出に適した渦流探傷の条件を検討した。その上で実際に探傷を行い、基礎実験及び実部材を対象とした実験によってコンクリート埋め込み部の腐食損傷を中心とした鋼材の損傷検出手法を提案した。

2.2.2 研究の構成

本研究の構成を以下に示す。

2.2.3～2.2.7 では、基礎モデルを用いた数値シミュレーションによる渦流探傷法の性質の確認と損傷検出に適した条件の検討を行った。

2.2.8～2.2.11 では、実部材を対象としたモデルを用いた数値シミュレーションを行い、実際に対象とする部位の損傷検出において効果的なパラメータを検討した。

2.2.12～2.2.17 では、基礎試験体を用いた基礎実験を行い、第2章で得られた解析結果の妥当性の確認を行うとともに、探傷プローブのパラメータを変えることで損傷検出に効果的なプローブの条件を提案した。

2.2.18～2.2.21 では、実部材を対象とした試験体を用いて探傷実験を行い、2.2.17で提案した手法を用いてコンクリート埋め込み部の腐食損傷検出を行った。

2.2.22 では、本研究の結論を述べた。

2.2.3 数値シミュレーションを用いた基礎検討

本章では平板に各種欠陥を導入した基礎モデルを作成し、数値シミュレーションによって渦流探傷の性質、特性について基礎検討を行った。損傷の大きさ、コイルと損傷の位置関係、コイルの周波数をパラメータとして変化させ、それぞれ数値シミュレーションにより検出されるインピーダンスの値を比較した。本章では渦流探傷システムの理論について簡単に説明するとともに、基礎モデルの数値シミュレーションによって得られ

た結果から、腐食探傷に必要な条件を提案した。

2.2.4 渦流探傷システム

ここでは、本研究で扱う渦流探傷システムについて簡単に説明するとともに、評価を行うために用いるインピーダンスの算出方法及びその評価法について述べる。

1) 渦電流に関わる様々な法則

まず、渦電流がどういったものであるのかについて説明するために、渦電流に関わる様々な法則を紹介したい。

1820 年、エルステッドが行った研究をもとにしてアンペールは、導線に電流を流すとその周りで磁場が発生するという現象をアンペールの法則としてまとめた。エルステッドの実験では直流電流を導線に流していたのに対し、現在の渦流探傷法では交流電流が用いられているという違いはあるが、渦電流はまさにこの現象を利用したものである。図-2.2.1 に示すように、アンペールの発見は、無限に長い直線導線に電流を流したとき、電流の周りには同心円状で右ねじ方向の磁場ができるというものであった。これは右ねじの法則と呼ばれ、それと合わせて次のような式(2.2.1)が成り立つ。この時の I は電流、 r は電流との距離、 H は磁場の大きさを表している。

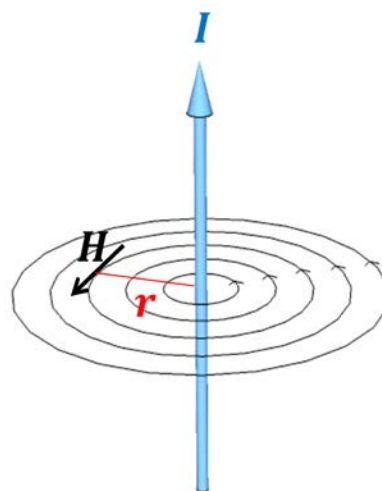


図-2.2.1 右ねじの法則イメージ図

$$2\pi rH = I \quad (2.2.1)$$

渦電流の仕組みを説明するのに次に大切な法則は、1831 年に発見されたファラデーの法則である。ファラデーは、電気を通す物体を磁場の中で動かしたり導電体のまわりで磁場を変化させたりすると、導電体に電流が流れることを発見した。例えば、ソレノイドコイルを貫く磁界に変化があった時のコイルの誘導起電力は式(2.2.2)で表すことができる。この時の N はコイルの巻き数である。 ϕ は磁束を表しており、磁界の中で磁界に垂直な面の断面積と磁束密度の積をとったものである。

$$V = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2.2)$$

また、同時期にヘンリーも同様の発見をしており、電磁誘導の大きさを示すインダクタンスの単位が彼の名前になっている。

更に、このファラデーの法則の式(2.2.2)を見ると右辺にはマイナスがついている。これは、磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力が発生することを意味しており、これはレンツの法則と呼ばれる。

これまでに述べた現象をもとに渦電流というものの説明できる。

2) 渦電流の仕組み

ここで、渦電流の仕組みについて説明する。

コイルを置き、そこに磁石を近づけると、コイルに影響する磁束は強まるため、それを妨げる方向にコイルが磁束を発生させようと電流が流れる。この様子を図-2.2.2 に示す。この時、直流電流の流れているコイルを近づけても同じような現象が起こる。これらの場合、どちらも磁束を発生させているものが導体に近づいているが、磁束を発生させているものが動かず、対象の導体に磁束を発生させることができる。それは図-2.2.3 のように交流電流が流れているコイルを設置する場合である。交流電流が流れることにより、そのコイルが出す磁束は時々刻々と変化するようになる。即ちこの場合には、磁束を発生させているものを動かさずとも、対象のコイルはその変化を妨げる向きに磁束を発生させようと電流を流し続ける。渦流探傷法においても、このようにコイルに交流電流を流すことにより、探触子を動かさずに検査をすることができる。さて、これまでは対象がコイルである場合を考えて説明してきたが、この対象となっているコイルが導体である時、今までの対象のコイルに流れる電流の代わりに導体の表面に流れる電流が渦電流である。その図を図-2.2.4 に示す。

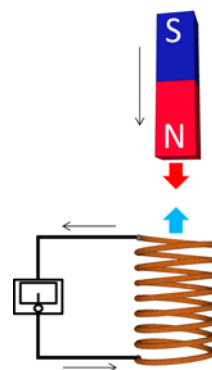


図-2.2.2 磁石が近づいた時のコイルの挙動

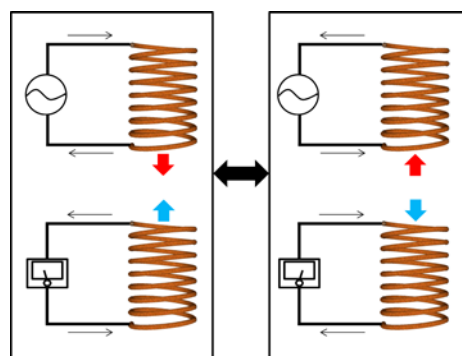


図-2.2.3 交流電流の流れるコイル
に対するコイルの挙動

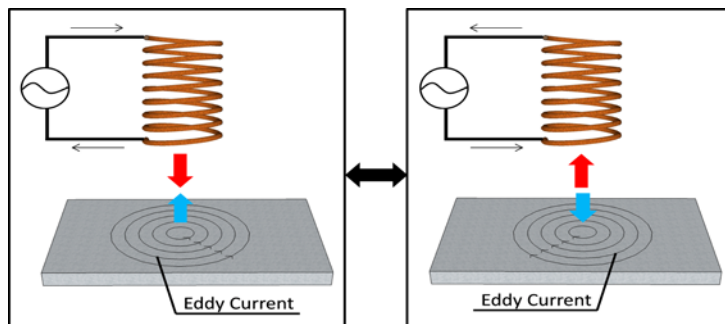


図-2.2.4 渦電流の発生メカニズム

渦電流は一般に、コイルに流す電流の周波数 f と、対象となる導体の材料から決まる 2 つの値、比透磁率 μ および電気伝導率 σ から浸透深さ δ が求められる。浸透深さとは渦電流が導体の中にもぐりこむ深さのことであり、表面での渦電流の大きさの $1/e$ (約 37%) になる深さのことをいう。一般に、強磁性体は比透磁率および電気伝導率が大きいために浸透深さは小さくなるといわれている。また、その式は式(2.2.3)で表される。渦電流が深さ方向に浸透するイメージ図を図-2.2.5 に示す。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (m) \quad (2.2.3)$$

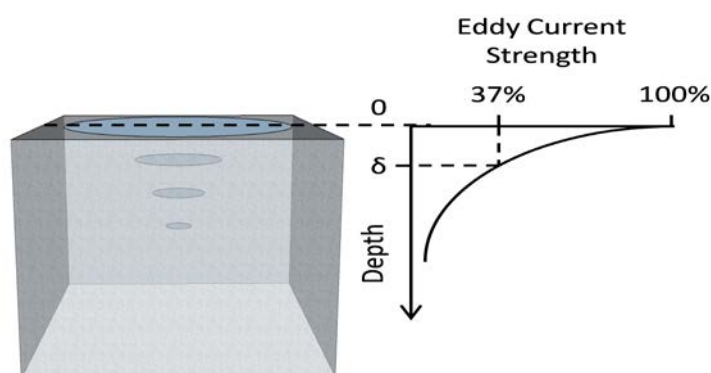


図-2.2.5 渦電流の浸透深さイメージ図

3) 渦流探傷法の仕組み

渦流探傷法は、渦電流探傷法とも言われ、英語では Eddy Current Testing と言い、ET や ECT と表記されることが多い。渦流探傷法では交流電流をプローブコイルに流すことにより導体に影響する磁束を常に変化させ、導体にはそれを妨げようとする方向に渦電流が流れる。この時、導体の表面に亀裂や減肉がなく健全な場合には、渦電流は真円に近い形を描いて流れるが、表面に亀裂が存在する場合には図-2.2.6 に示すように渦電流の流れが変わり、これがインピーダンスの変化として現れる。

ここでインピーダンスについても簡単に説明したい。渦流探傷法で用いるプローブコイルは、コイルが抵抗と自己インダクタンスからなる回路と考えることができるため、その回路は図-

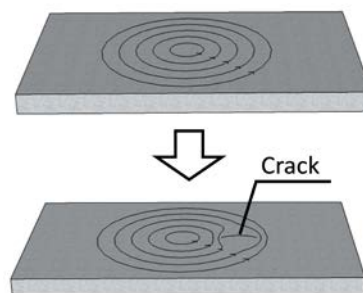


図-2.2.6 亀裂の存在による渦電流の変化

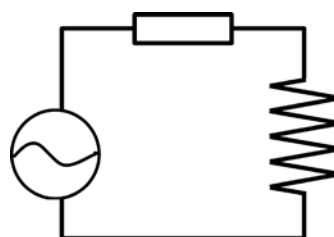


図-2.2.7 プローブコイルの回路図

2.2.7 のようになる。抵抗 R にかかる電圧を v_R 、自己インダクタンス L にかかる電圧を v_L とすると、電源電圧 v との関係は式(2.2.4)のように表すことができる。

$$v = v_R + v_L \quad (2.2.4)$$

また、自己インダクタンスにかかる電圧は、電流が自己インダクタンスの自己誘導による起電力 e と逆向きになるため、式(2.2.5)が成り立つ。

$$e = -L \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (2.2.5)$$

式(2.2.4)および式(2.2.5)より、電源電圧は式(2.2.6)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} v &= I_m R \sin \omega t + I_m \omega L \cos \omega t \\ &= I_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

また、この時の I_m は電流の振幅、 ω は角周波数である。また、電圧の位相推移 ϕ は式(2.2.7)のように表せる。

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (2.2.7)$$

ここで式(2.2.6)を変形すると式(2.2.8)のように書くことができ、更に式(2.2.9)のように置くと式(2.2.10)のようになる。

$$v = V_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2.8)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.2.9)$$

$$V_m = Z I_m \quad (2.2.10)$$

この式(2.2.9)で表した Z がインピーダンスであり、位相推移 ϕ は $0 \sim \pi/2$ の間の値を取りえることがわかる。この式(2.2.9)の関係を図-2.2.8 に示す。これらのことからわかるように、インピーダンスと位相推移の変化はすなわちコイルにかかる電圧の変化と言うことができ、この変化を見ることで亀裂や減肉など、健全な面とは異なった形状になっていることがわかる。

また、オイラーの公式より、複素数 $j = \sqrt{-1}$ を用いて交流及び電源電圧を表すと、

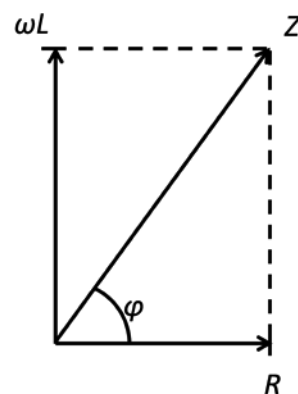


図-2.2.8 インピーダンスと電気抵抗値との関係

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t \quad (2.2.11)$$

$$v = |z| I_m e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (2.2.12)$$

と表記できるため、電圧位相を実部 V_r と虚部 V_i で表すと、

$$V_r = V_m \cos \varphi \quad (2.2.13)$$

$$V_i = V_m \sin \varphi \quad (2.2.14)$$

と書ける。本研究での解析結果や実験結果は実際には Z と ϕ ではなく V_r 、 V_i 、 V_m 及び ϕ を用いて評価している。

2.2.5 基礎検討用数値シミュレーション—解析条件

本研究での数値シミュレーションのために、解析ソフト PHOTO-EDDY を使用した。PHOTO-EDDY はある時間の場の解析を FEM で、時間軸の解析は差分法で解いている。ビオ=サバル則などの式を用いて計算されており、いくつかの論文によりその確からしさが示されてきている。

1) 解析モデル

ここでは、実際に作成した解析モデルの形状や与えた材料特性、コイルの形状について説明したい。

2) 解析モデルに用いた材料特性及びモデル形状

本章では渦流探傷法の特性を調べるため、平板に各種条件を考慮した基礎モデルを作成した。モデルは、平板鋼材の中心にプローブを上置した状態のハーフモデルを作成した。本研究で用いる解析が電磁場解析であることから、解析モデルの作成には鋼材、空気、コンクリートが必要になる。それぞれの材料特性について、表-2.2.1 にまとめた。なお磁性体について、非線形磁化特性を考慮した場合と線形磁化特性のみで解析を行った場合でインピーダンス値の差は 0.1% 以内に収まり、かつ大小関係の変化も見られなかったため、全ての解析に線形磁化特性を用いて進めることとする。

表-2.2.1 解析に用いた材料特性

	比透磁率(μ / μ_0)	電気伝導率($1/\rho$)
鋼材	5000	6.67×10^6
鋼材(腐食部分)	1	0.01
空気	1	1
コンクリート	1	0.01

基礎モデルを作成する際、磁場の強さが最大値から 1% 以上低下するように鋼材寸法を設計した。また厚さについては、実際に対象とした試験体と同じ 20 mm とした。空気もすべて含めたモデルの 2 を図-2.2.9 に、空気のみ取り除いた図を図-2.2.10 に示す。空気を含めたモデルの全ての境界面に対称境界条件を入れた。この条件の入れられた点において磁場が平行になるようになっている。モデルの接点数と要素数に関してはモデ

ルによって異なるが、接点数が 40531~157606、要素数が 36816~146416 となった。

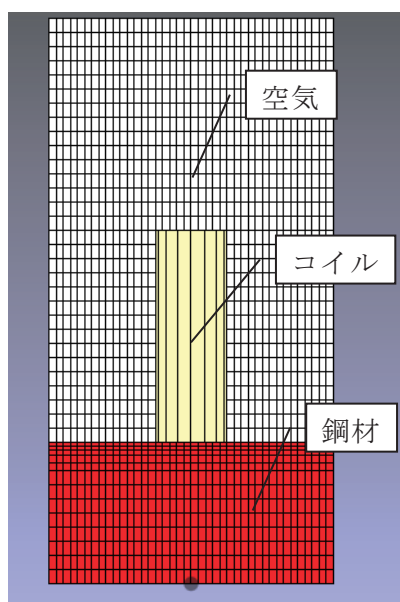


図-2.2.9 基礎モデル全体図

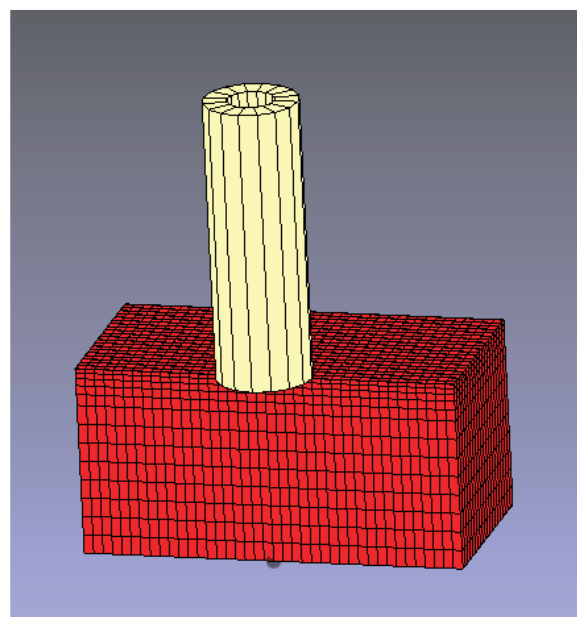


図-2.2.10 空気を除いた基礎モデル図

3) パラメータ

本研究では、いくつかのパラメータを変化させたときに得られるインピーダンス値の変化を調べた。プローブ形状については、渦流探傷用プローブには様々な形状があるが、本研究では図-2.2.11 に示す円筒形プローブに絞って解析を行った。

変化させたパラメータを以下に示す。

① 損傷深さ

損傷深さを 0mm ~ 1mm まで 0.1mm ピッチで、1mm ~ 2mm まで 0.5mm ピッチで変化させた。励磁電流の周波数を 10 Hz としたときの浸透深さが確実に 1mm より小さくなるため、1mm までの損傷は細かいピッチで、その後 2mm までは大まかなピッチで解析を行うこととした。具体的な損傷箇所は図-2.2.12 に示す。

② 損傷幅

損傷の幅について、4mm 及び 2mm で解析を行った。それぞれの損傷部を図-2.2.13 に示す。



図-2.2.11 円筒形プローブ

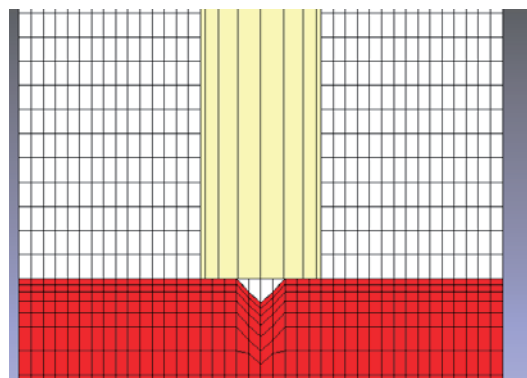


図-2.2.12 損傷作成位置

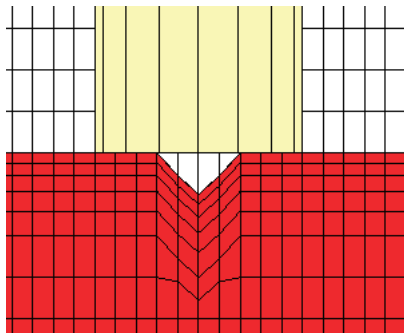


図-2. 2. 13 (a) 損傷幅 4mm

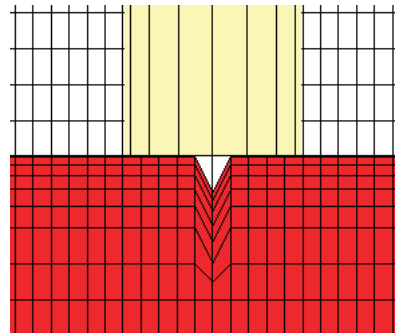


図-2. 2. 13 (b) 損傷幅 2mm

③ コンクリート深さ

コンクリート深さを 0mm、1mm、2mm～10mm まで 2mm ピッチ、10mm～50mm まで 10mm ピッチで変化させた。今回対象としている試験体がコンクリートと鋼材が斜めに交わる形状であるので、0mm 付近については細かいピッチで、10mm 以降については大まかなピッチで解析を行った。具体的なコンクリート作成時のモデルを図-2. 2. 14 に示す。

④ 損傷とプローブの位置関係

プローブの位置を固定し、損傷の位置を中心から 1mm ピッチで変化させた(図-2.2.15)。これにより、プローブがどの位置にあるとき最も損傷を検知できるのか調べた。

⑤ 迎磁電流の周波数

迎磁電流の周波数は、実際実験で用いたプローブの周波数帯域を考慮し、100Hz、1kHz、10kHz、100kHz で変化させて解析を行った。

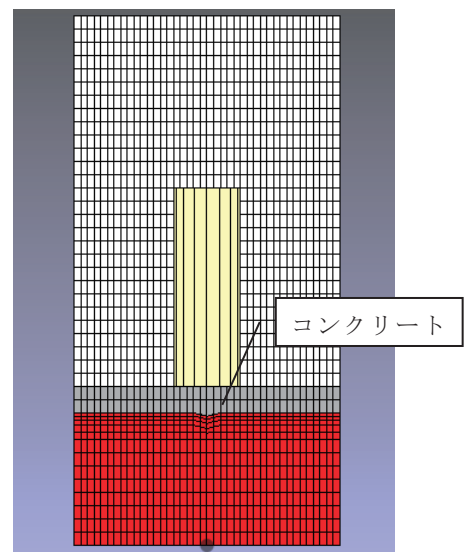


図-2. 2. 14 コンクリート作成時のモデル
(コンクリート深さ 4mm)

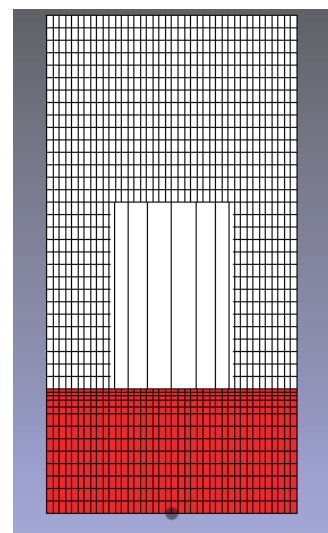


図-2. 2. 15 損傷位置の中心位置からの変化

2.2.6 基礎検討用数値シミュレーション—解析結果

以上に述べたように解析を行い、結果を示す。

1) メッシュの大きさ及び損傷形状による影響

それぞれの解析結果を比較する前に、最小メッシュの大きさ及び損傷形状について検討する。メッシュの大きさは、幅方向に 1mm と 0.4mm の二つについて調べた。また、0.4mm メッシュについて、損傷底面の形状を 2 種類作成した。それぞれのメッシュについて、コンクリート深さ 0mm、損傷幅 4mm の条件で損傷深さ 0mm、0.5mm、1mm、1.5mm、2mm について解析を行い、結果を比較した。それぞれのモデル形状は図-2.2.16 から図-2.2.18 に示す。解析結果を図-2.2.19 に示す。

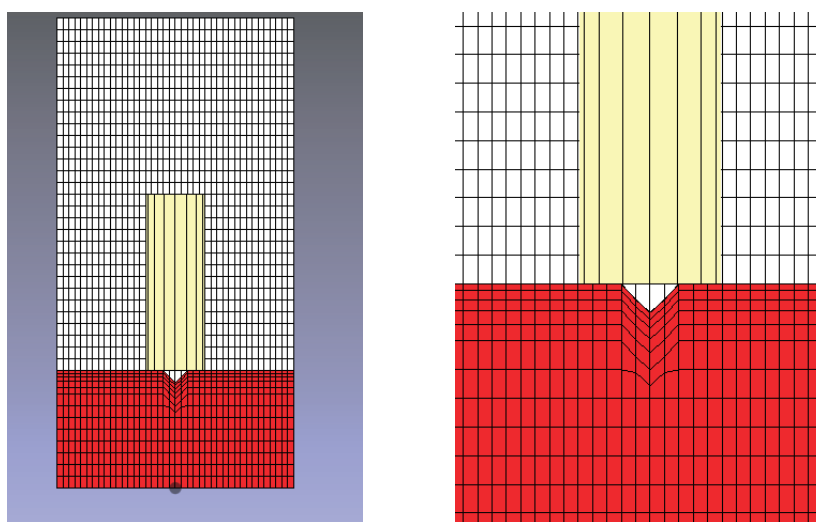


図-2.2.16 メッシュ大きさ 1mm

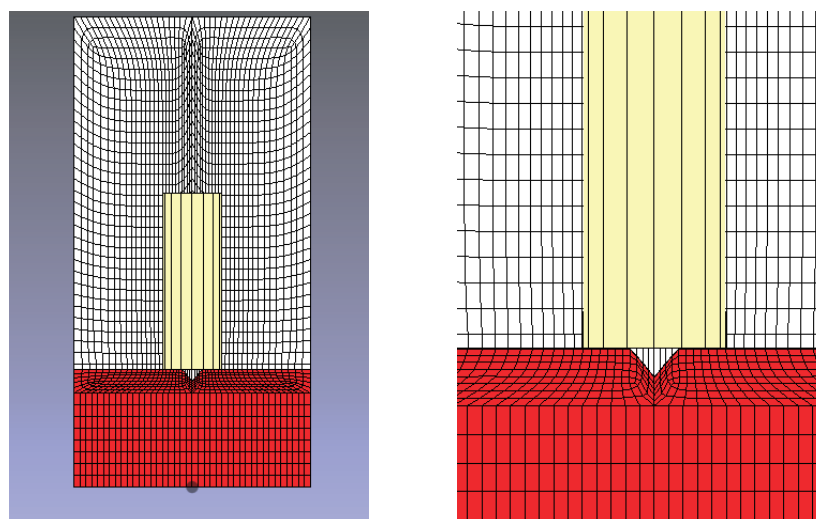


図-2.2.17 メッシュ大きさ 0.4mm

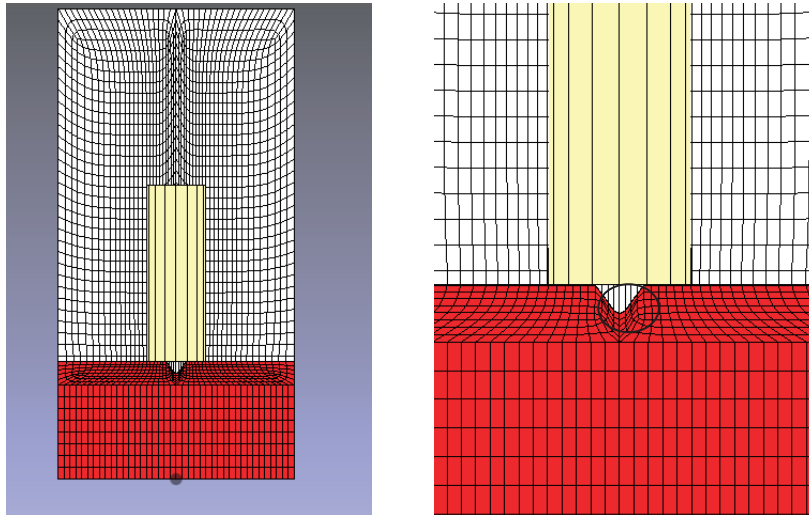


図-2.2.18 メッシュ大きさ 0.4mm、底面を滑らかとした場合

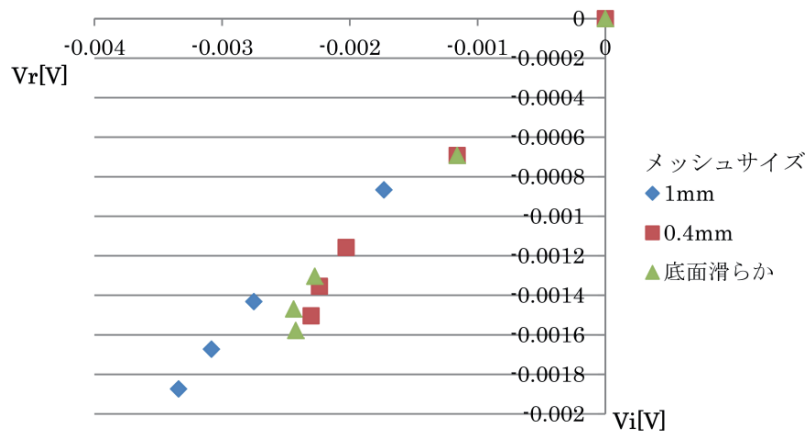


図-2.2.19 メッシュ大きさ、形状による比較

なお、実際の探傷では損傷がない場合の $V_{\text{測}}$ を 0 として計算するため、本研究の解析結果も損傷がない時の結果の値を 0 点に置きグラフを作成した。また、横軸が電圧の実数部 V_r 、縦軸が虚数部 V_i となっている。図-2.2.19 中のプロットは全て、深さが浅いものから深くなるにつれて、電圧変化が大きくなっており、損傷深さ 0mm が原点にあり、順に 0.5mm、1mm、1.5mm、2mm を示している。

損傷メッシュを細かくした場合、粗いものに比べ過小評価している結果となった。しかし、損傷深さによる大小関係に変化がないことから、基礎解析ではメッシュの大きさを 1mm とした。また、損傷底面を滑らかにした場合、鋭敏にした場合とほぼ解析結果に差は見られなかった。これは、渦流探傷法において渦電流は鋼材表面を伝播するため、深さ方向の形状より表面付近の情報が支配的であるためと考えられる。このことから、以降の解析では底面が尖ったものを損傷形状として設定し、解析を行った。

2) 損傷深さとコンクリート深さの関係

パラメータ③に示す各コンクリート深さについて、損傷幅 4mm において損傷深さをパラメータ①に示すように変化させた時の解析結果を図-2.2.20 から図-2.2.30 に示す。

このとき、メッシュ大きさの比較時と同様損傷がない場合の結果の値を 0 点に置いてグラフを作成した。また、代表としてコンクリート深さ 0mm、損傷深さ 2mm の時の磁場のコンター図を図-2.2.31 に示す。全体的な傾向として、損傷深さが大きくなるほど得られる V_m の値は 0 点から離れていくことがわかった。なお、図-2.2.20 に示されるコンクリート深さ 0mm の場合においてはプロットが重なっているケースがあるが、やはり損傷深さが大きいほど、 V_m が大きい傾向にある。またコンクリート深さが大きくなるに従って軌跡が緩やかな曲線を描いており、位相 ϕ が変化していることが分かる。コンクリート深さ 1mm の場合位相変化は 3.8 度であったのに対し、50mm の場合 50.6 度もの位相変化が見られた。また、各々の結果を同じグラフにプロットしたものを図-2.2.32 に示す。コンクリート深さが大きくなるに従って損傷深さによる電圧変化が小さくなっており、コンクリート深さ 50mm では得られる V_m の値は 0.002%以下となる。これは損傷による影響よりも、コンクリートによるリフトオフ効果が卓越していることが原因であると考えられる。

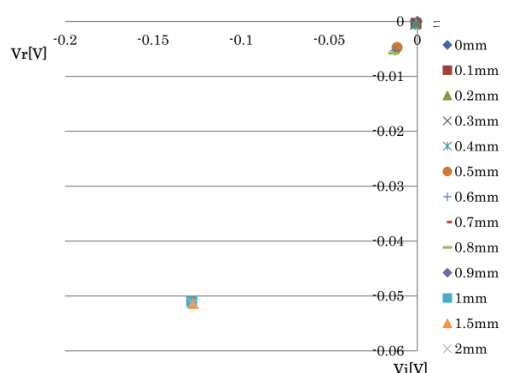


図-2.2.20 解析結果(コンクリート深さ 0mm)

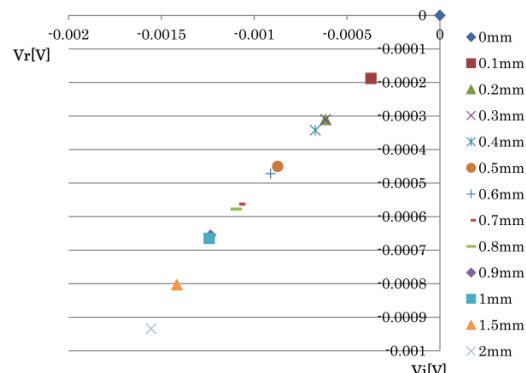


図 2.2.-21 解析結果(コンクリート深さ 1mm)

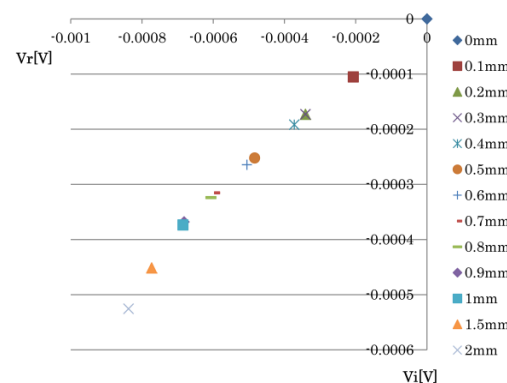


図-2.2.22 解析結果(コンクリート深さ 2mm)

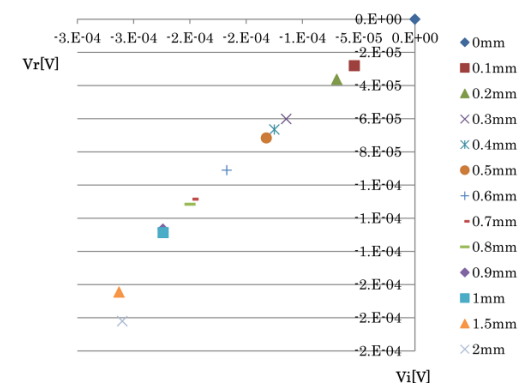


図-2.2.23 解析結果(コンクリート深さ 4mm)

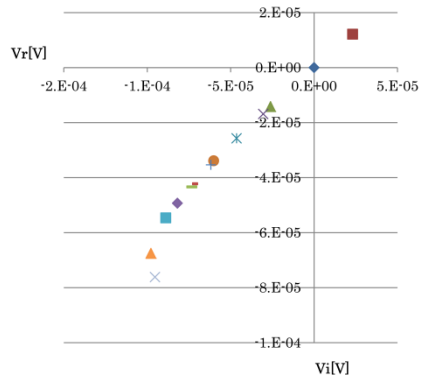


図-2.2.24 解析結果(コンクリート深さ 6mm)

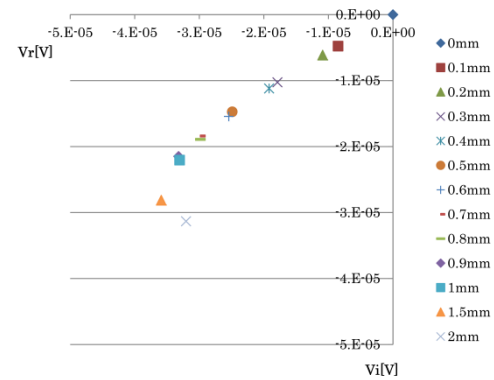


図-2.2.25 解析結果(コンクリート深さ 8mm)

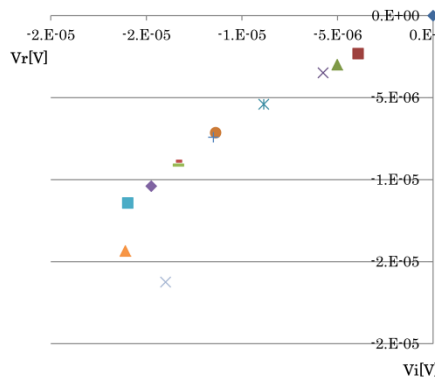


図-2.2.26 解析結果(コンクリート深さ 10mm)

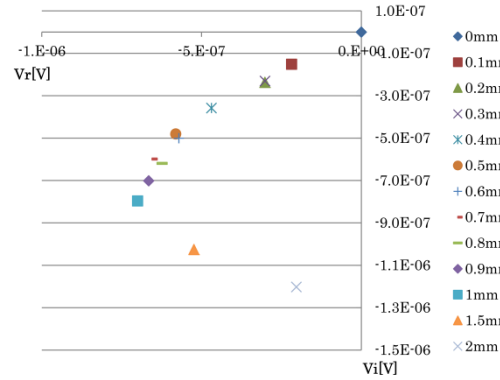


図-2.2.27 解析結果(コンクリート深さ 20mm)

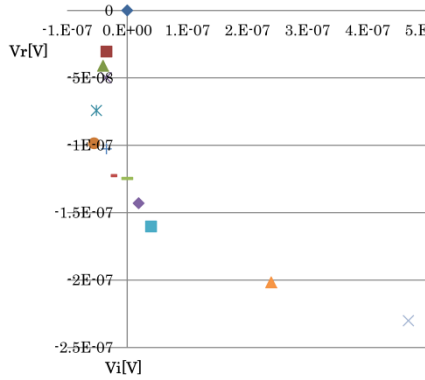


図-2.2.28 解析結果(コンクリート深さ 30mm)

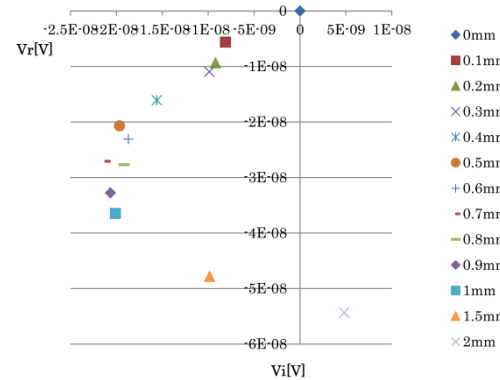


図-2.2.29 解析結果(コンクリート深さ 40mm)

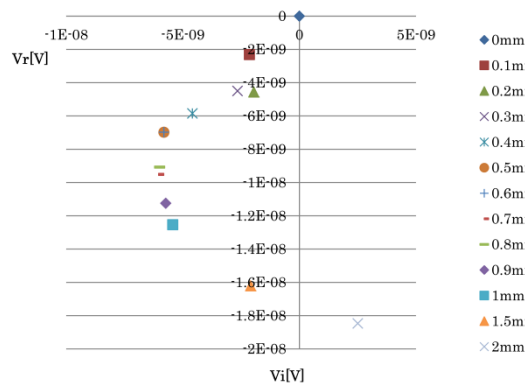


図-2.2.30 解析結果(コンクリート深さ 50mm)

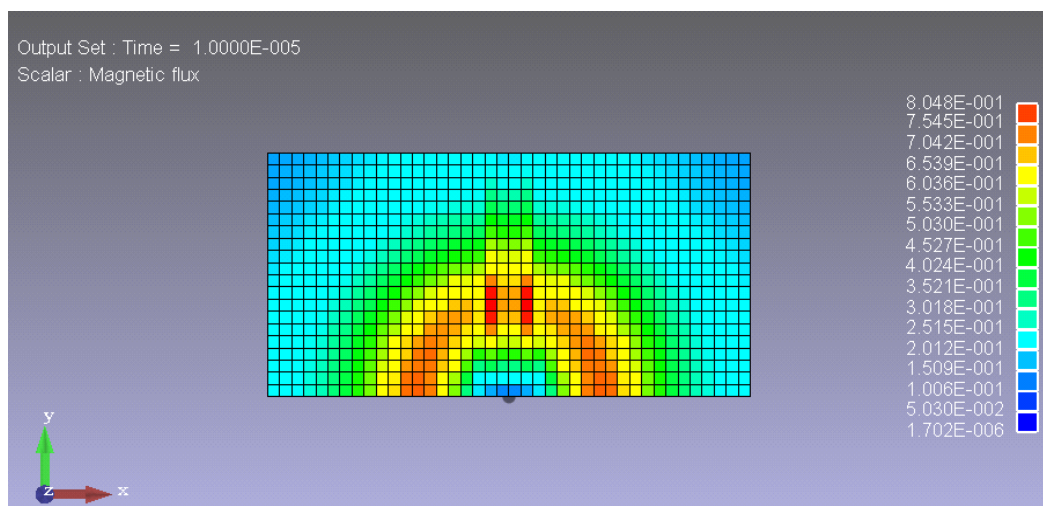


図-2.2.31 解析結果コンター図

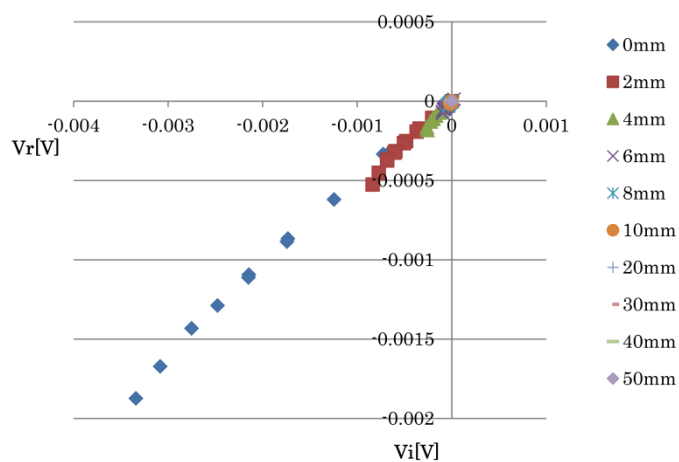


図-2.2.32 コンクリート深さ毎の解析結果

また、損傷深さ 0.5mm、1mm、1.5mm、2mm についてコンクリート深さを変化させた時の解析結果を図-2.2.33 から図-2.2.36 に示す。また、直線近似した近似曲線及び式を示す。どのグラフにおいても直線式はほぼ一致しており、リフトオフ効果が確認できた。

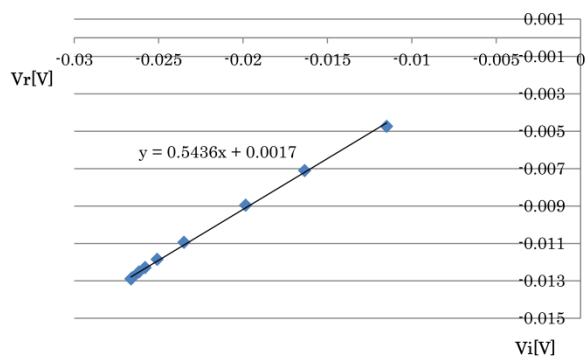


図-2.2.33 解析結果(損傷深さ 0.5mm)

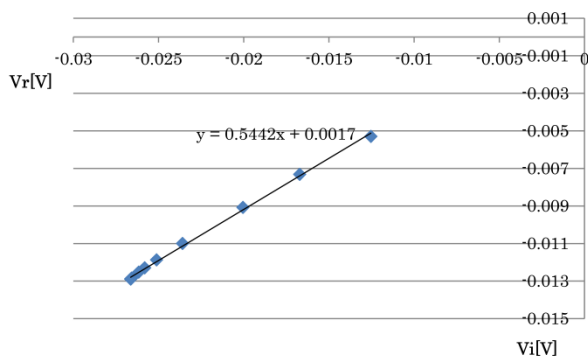


図-2.2.34 解析結果(損傷深さ 1mm)

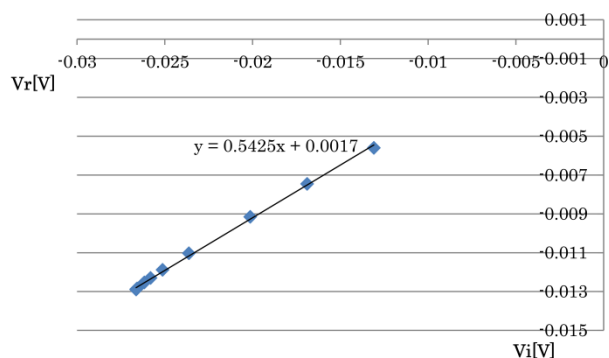


図-2.2.35 解析結果(損傷深さ 1.5mm)

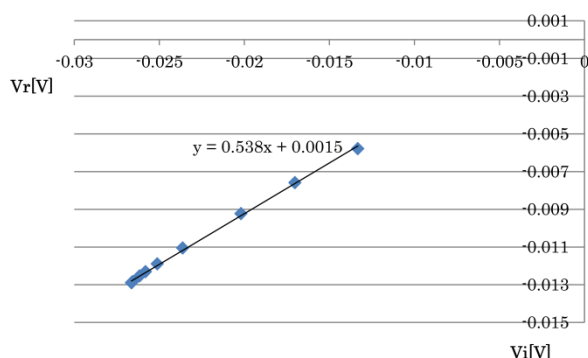


図-2.2.36 解析結果(損傷深さ 2mm)

3) 損傷幅による影響

パラメータ②とする損傷幅について、損傷幅 2mm とした時の解析を損傷深さ 0.5mm、1mm、1.5mm、2mm において行った。この時コンクリート深さは 0mm、6mm、10mm、30mm、50mm において行った。2-5-1 と同様、各コンクリート深さについて損傷深さを变化させたときの電圧変化を、損傷幅 2mm と 4mm で比較してグラフにしたものを図-2.2.37 から図-2.2.41 に示す。図-2.2.37 はプロットが重なっており、2mm の場合は、ほぼゼロ値付近に位置している。全体傾向として、4mm の場合に比べ損傷幅が 2mm の場合得られる V_m の変化は小さくなっており、例えばコンクリート深さ 10mm の場合でみれば最も電圧が高いプロットは損傷深さ 2mm のときであり、損傷幅が 4mm に関しては、 V_m が 2.16×10^{-5} に対し、損傷幅が 2mm の場合は 8.58×10^{-6} であり(図-2.2.39)、40%程度に下がっている。これは、 V_m 低下の要因が損傷部の体積によるものであるからであると考えられる。また、損傷幅が変化すると損傷深さ検知に伴う位相は反時計回りに遷移した。表層部の影響が非常に強い渦流探傷において、表層部の損傷面積は大きく影響することが分かった。

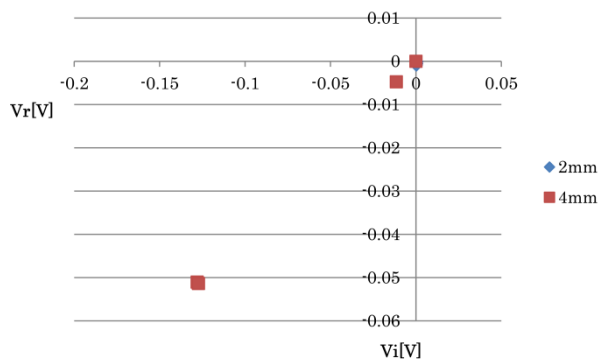


図-2.2.37 損傷幅の影響
(コンクリート深さ 0mm)

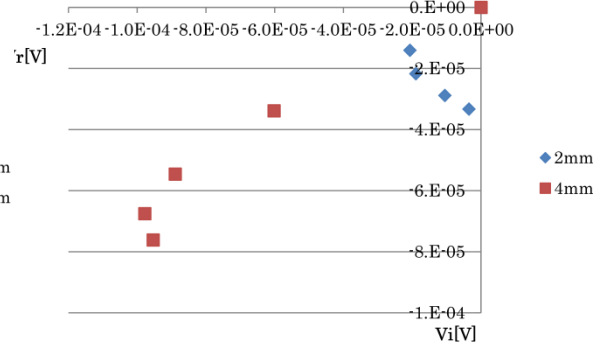


図-2.2.38 損傷幅の影響
(コンクリート深さ 6mm)

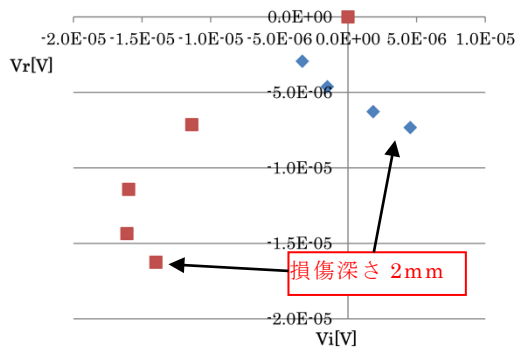


図-2.2.39 損傷幅の影響
(コンクリート深さ 10mm)

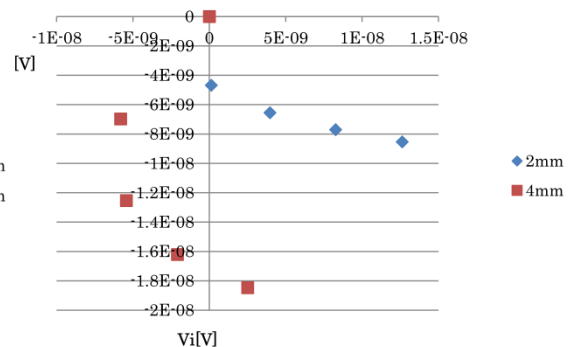


図-2.2.40 損傷幅の影響
(コンクリート深さ 50mm)

4) 損傷位置による影響

パラメータ④に示す損傷箇所とプローブの位置関係について調べた結果を図-2.2.41に示す。グラフより、損傷位置を変えると V_m はほぼ直線で変化していることが分かる。解析結果より、損傷がない場合に比べ最も変化があったのが、損傷がプローブの中心にある場合で、これは損傷と渦電流がちょうど直角に交わるため、 V_m が最も変化したと考えられる。

また、コイルの外側に損傷がある場合、どの程度検知できるのかを調べた。モデルは図-2.2.42に示す。また、損傷が中心にある場合の結果と比較した図を図-2.2.43に示す。損傷が外側にある場合、損傷の有無で最大 0.05%程度の変化しか見られず、これは損傷がプローブ中央にある場合と比較して 1.7%程度である。実際の探傷においてプローブ直下になく損傷を検出したい場合、ノイズを除去する等の作業を行い、欠陥情報のみを精密に検知しなければならないことが分かる。また、本研究で対象とした試験体において、腐食損傷を検出するにはコンクリートの上部から探傷する方法(図-2.2.44)と、腐食損傷に隣接した位置から探傷する方法(図-2.2.45)が考えられるが、解析結果より、コンクリート上部から探傷する方法が検出できる可能性が高いと考えられる。

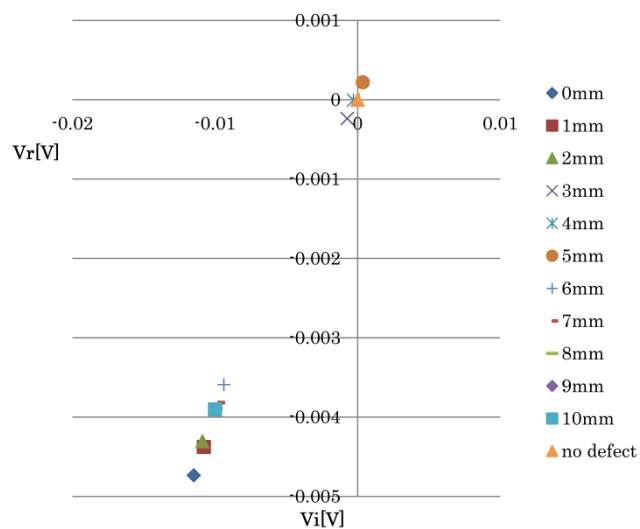


図-2. 2. 41 損傷とプローブの位置関係

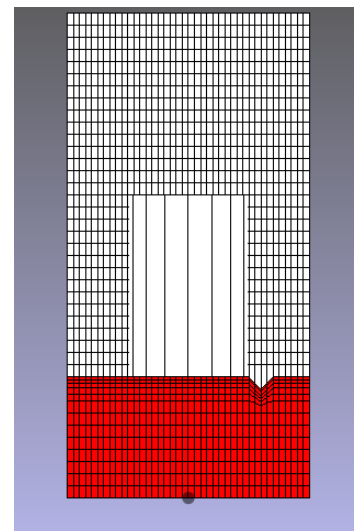


図-2. 2. 42 損傷がプローブの外側にあるモデル (defect2mm-side)

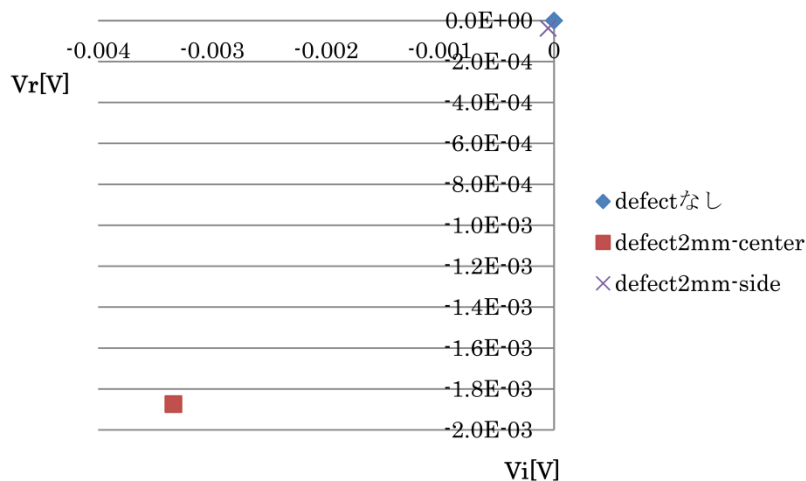


図-2. 2. 43 損傷がプローブの外側にある時の解析結果

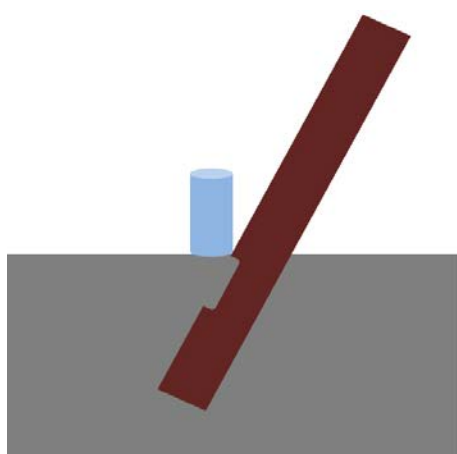


図-2. 2. 44 defect 上部から探傷する方法

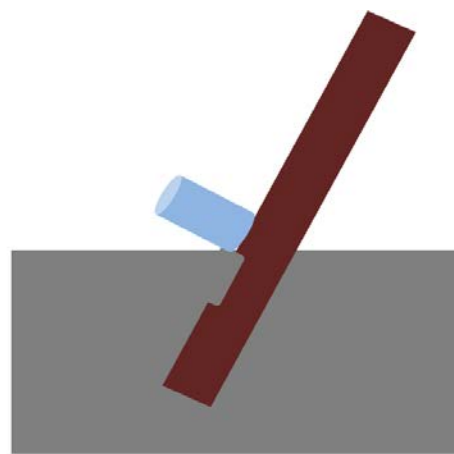


図-2. 2. 45 defect 横から探傷する方法

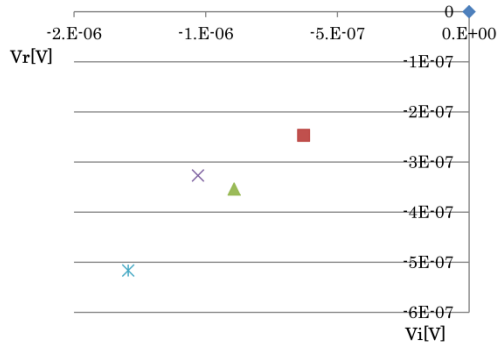


図-2.2.46 周波数による影響(100Hz)

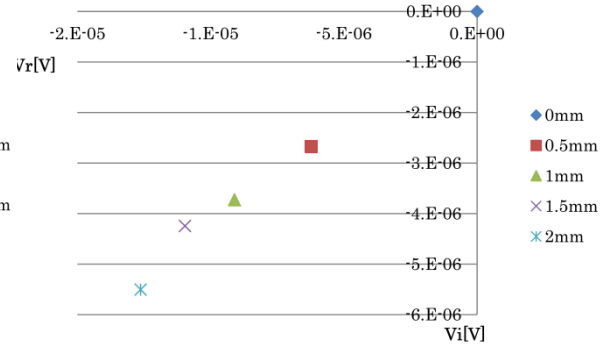


図-2.2.47 周波数による影響(1kHz)

5) 迎磁電流の周波数による影響

パラメータ⑤に示す迎磁電流の周波数を変化させた場合において、解析を行った。それぞれの周波数においてコンクリート深さ 2mm、損傷深さ 0mm、0.5mm、1mm、1.5mm、2mm について解析を行った。解析結果を図-2.2.46 から図-2.2.49 に示す。結果から、周波数のオーダーが 1 下がると、 V_m のオーダーも 1 下がっていることが分かる。

また、100kHz と 100Hz の解析について、図-2.2.50 に示すように鋼材上面、つまりプローブが接地している面と、側面から見た磁場のコンター図を図-2.2.51 から図-2.2.54 に示す。上面図を比べると、電場の分布に差はあまり見られないが、電場の強さは 100kHz のとき最大 1.5A/m、100Hz では最大 0.09A/m と高周波数の方が大きくなっている。しかし、側面図を比べると、100kHz の場合は電場が表層部に集中しほとんど深さ方向に伝播されていない。対して 100Hz の場合は深さ方向に電場が伝播されており、少なくとも 2mm は電場が垂直方向に伝播されていることが分かる。

さらに、それぞれの周波数について、損傷深さが 0.5mm 下がるごとに V_m が変化する割合をグラフに表したものを図-2.2.55 に示す。100kHz 及び 10kHz の高周波数の場合、0mm から 0.5mm に変化したときに最も変化分が大きい、つまり最も磁場が下がっており、損傷が深くなるにつれ変化分の割合が小さくなっていく。しかし、1.5mm 及び 2mm の場合、1mm から 1.5mm までは高周波数のときと傾向は似ているが、1.5mm から 2mm の間で大きく V_m 値が変化している。これは、周波数による浸透深さによるものと考えられる。高周波数の場合浸透深さが浅いため、表面付近の損傷の条件が支配的となる。対して低周波数の場合浸透深さが深いため、磁場が深さ方向に潜り込む。1.5mm から 2mm の間での変化は、浸透深さが 1.5mm から 2mm の間にあり、電流が潜り込むことのできる深さを超えたため大きく変化したと考えられる。このことから、深さ方向の探傷を行いたい場合、周波数を変化させることで浸透深さを利用して検出することが可能であると考えられる。

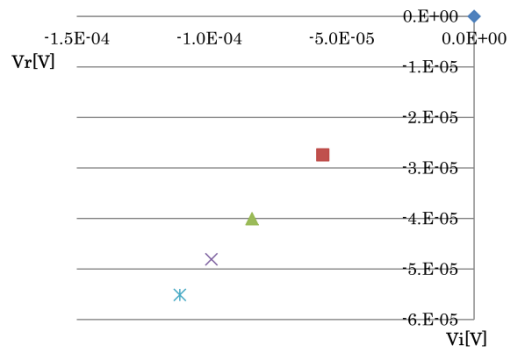


図-2. 2. 48 周波数による影響 (10kHz)

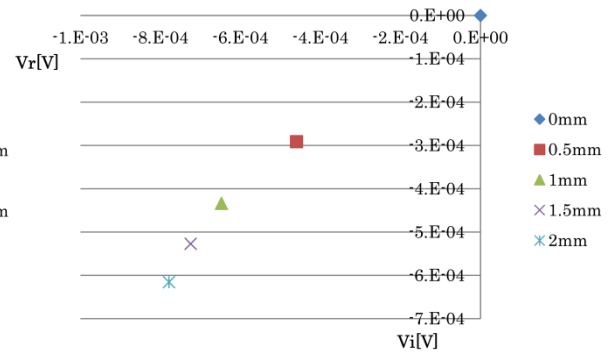


図 2-49 周波数による影響
(100kHz)

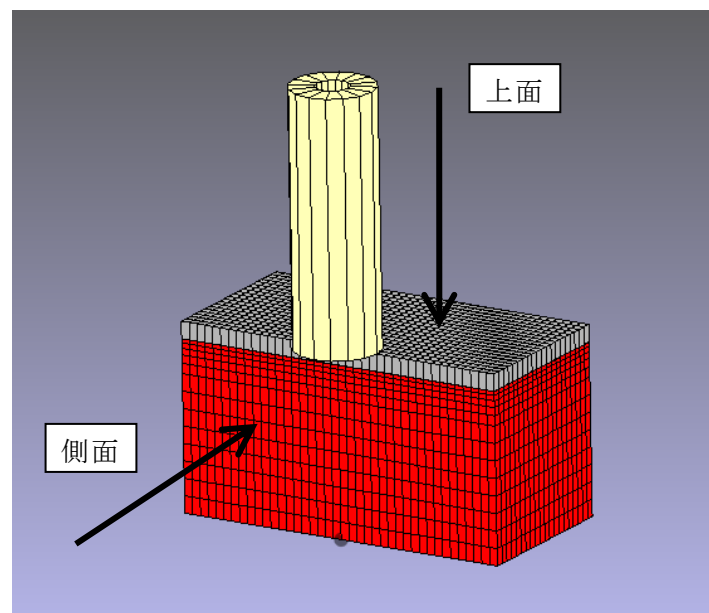


図-2. 2. 50 モデルの上面及び側面

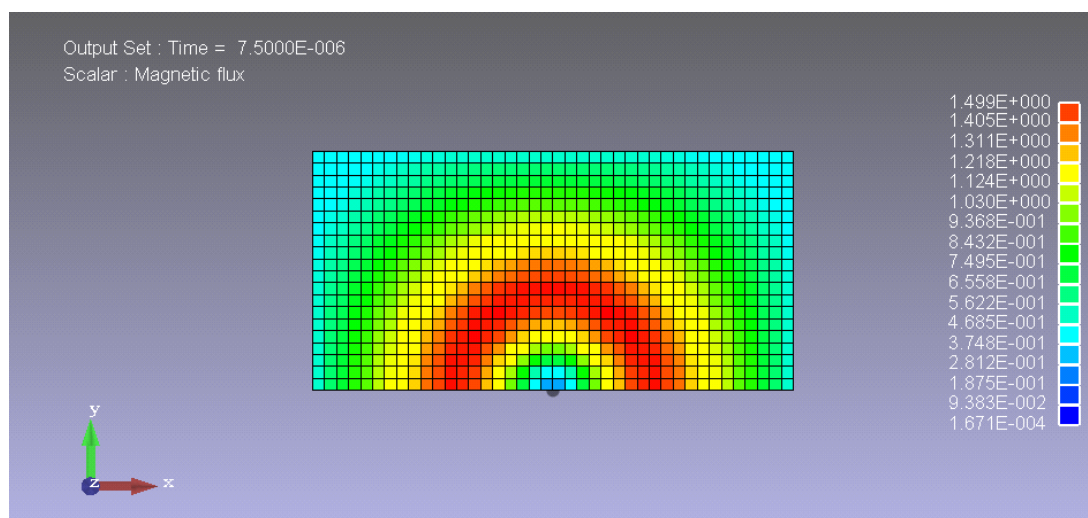


図-2. 2. 51 上面コンター図 (100kHz)

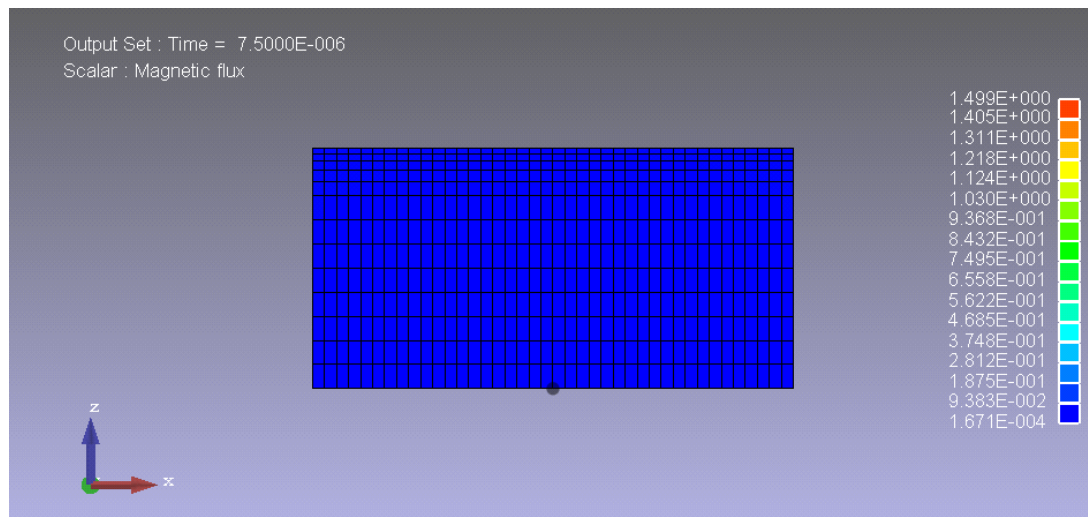


図-2. 2. 52 側面コンター図 (100kHz)

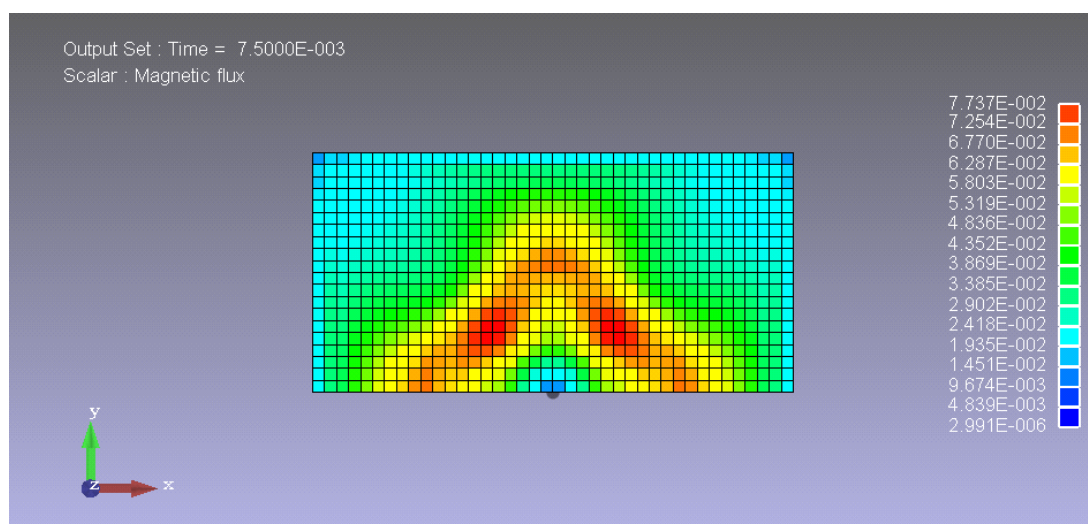


図-2. 2. 53 上面コンター図 (100Hz)

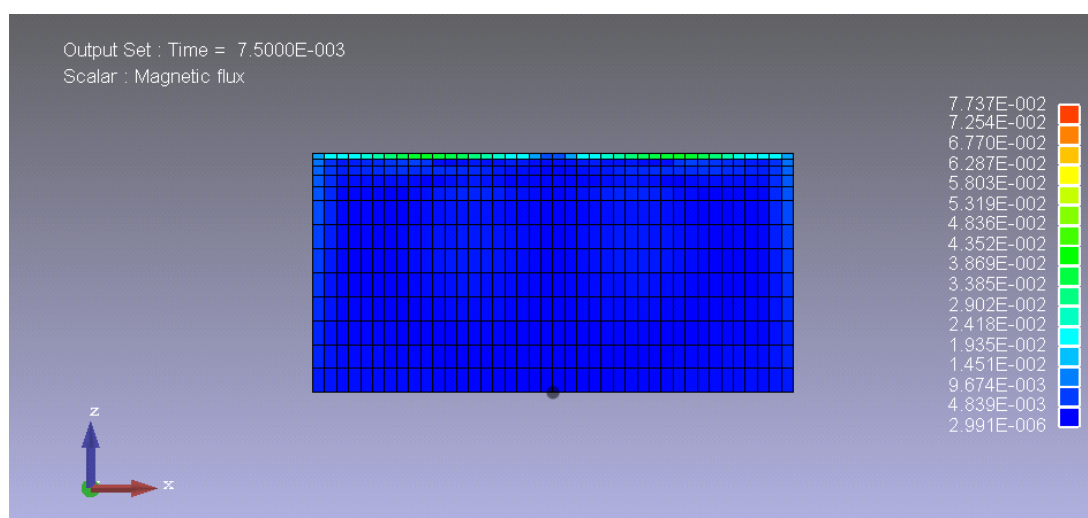


図-2. 2. 54 側面コンター図 (100Hz)

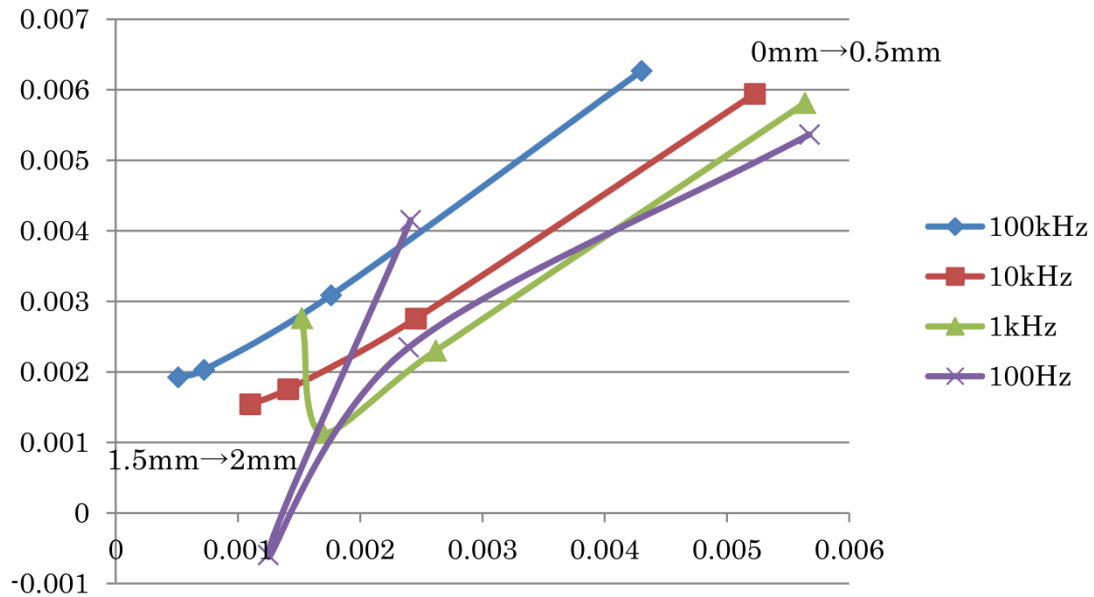


図-2.2.55 各損傷深さの変化分

2.2.7 基礎検討用数値シミュレーション—まとめ

数値シミュレーションを用いた基礎検討のまとめを以下に示す。

- 1) コンクリート深さを 50mm まで変化させたとき、得られる V_m の値は 0.002% 以下にまで減少する。また、位相はコンクリート深さ 50mm の場合で 50.6 度と、深さが大きくなるに従って損傷による位相変化が大きくなる。
- 2) 解析によってリフトオフ効果を確認することができた。
- 3) 損傷の幅を 4mm から 2mm に変化させたとき、得られる V_m の値は 40% まで下がるとともに、位相は反時計まわりに遷移することが明らかになった。
- 4) 損傷を計測する際、最も検出しやすいのは損傷がプローブの中央にある場合であることが明らかになった。
- 5) 高周波数の場合、低周波数に比べて得られる V_m の値は約 2 オーダー大きくなるが、深さ方向の情報を得るには周波数を 100kHz から 100Hz まで変化させ、浸透深さの変化を利用して探傷できることを提案した。

2.2.8 実部材を対象とした数値シミュレーション—はじめに

本節では実構造物を模した試験体を対象とし、その試験体のモデルを作成して数値シミュレーションを行った。損傷の大きさや位置を変えて解析を行うことで、探傷条件による V_m の変化を調べる。また、周波数を変えることで、探傷に最適なコイルの条件についても考察する。

2.2.9 実部材を対象とした数値シミュレーション—解析モデル

ここでは、実際使用した解析モデルの形状について説明する。

本研究で対象とした形状は、図-2.2.56 に示すように鋼材のコンクリート埋め込み部である。この形状を踏まえ、ウェブ面に着目してハーフモデルを作成した。作成したモデルを図-2.2.57 に示す。材料特性については、第2章で用いたものと同じ値を用いた。また、損傷部付近のメッシュの大きさは約 0.8mm である。実際の腐食はコンクリートのほぼ表層部に発生するため、損傷はコンクリート表面より図-2.2.58 に示すように作成した。

また、以下をパラメータとして用いた。



図-2.2.56 対象とした試験体

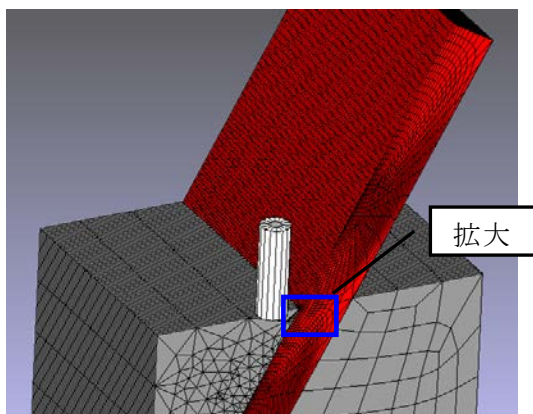


図-2.2.57 解析モデル

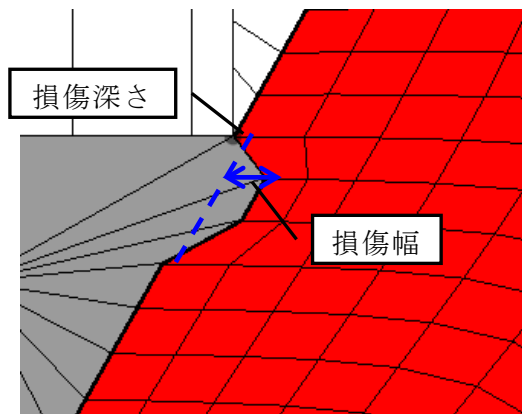


図-2.2.58 損傷部拡大図

① 損傷深さ

鋼材表面より、0mm から 1.5 mm の損傷を 0.5mm ごとに作成した。

② 損傷幅

実際の腐食の場合、この幅は腐食の浸透深さとも言い換えられるため、非常に重要なパラメータである。本研究では、図-2.2.59 に示すように幅を 1.6mm、2.4mm、3.2mm と設定した。

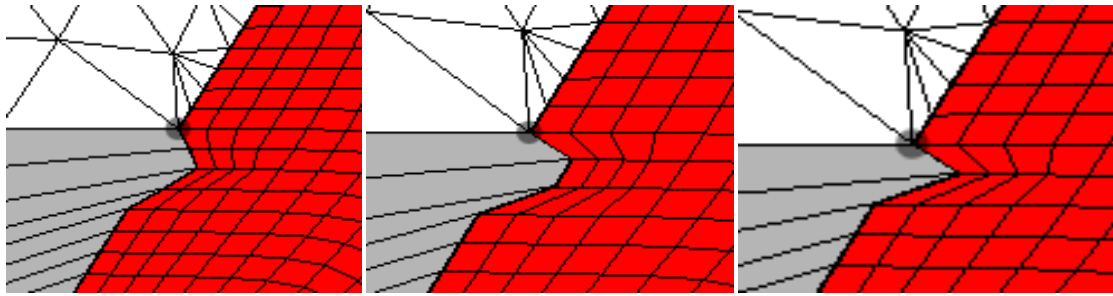


図-2.2.59 (a) 損傷幅 3.2mm 図-2.2.59 (b) 損傷幅 2.4mm 図-2.2.59 (c) 損傷幅 1.6mm
図-2.2.59 損傷部拡大図 2

③ コンクリート表面からの深さ

実際の腐食はコンクリート表面近傍から発生する可能性が高い。そこで本研究では図-2.2.60 に示すように、深さを 0mm 及び 0.8mm に設定して解析を行った。

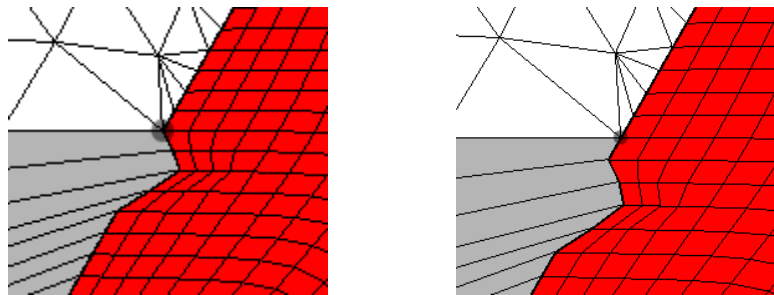


図-2.2.60 (a) 損傷深さ 0mm 図-2.2.60 (b) 損傷深さ 0.8mm
図-2.2.60 損傷部拡大図 3

④ 周波数

周波数は実際の探傷と同様に、1kHz 及び 10kHz と変化させた。

2.2.10 実部材を対象とした数値シミュレーション—解析結果

2.2.9 で示したモデルを用いて解析を行い、結果を示す。

1) 損傷深さによる影響

パラメータ①に示す通り、損傷深さを変化させて解析を行った。代表として損傷深さ 1.5mm、幅 3.2mm の時の磁場のコンター図を図-2.2.61 に示す。得られた解析結果を図-2.3.7 に示す。なお、インピーダンス値の挙動の確認のためこの解析のみ 0.1mm から 0.5mm まで 0.1mm ピッチで損傷深さを取って解析を行っている。平板上に損傷がある基礎解析との違いは、位相が途中で大きく変化することである。例えば損傷幅 1.6mm 場合、51.6 度変化している。これはコンクリート深さが大きい時にも見られた現象であり、リフトオフによる磁場の減衰の影響ではないかと考えられる。よって実際の腐食探傷の場合も損傷深さによって位相が変化するのではないかと考えられる。

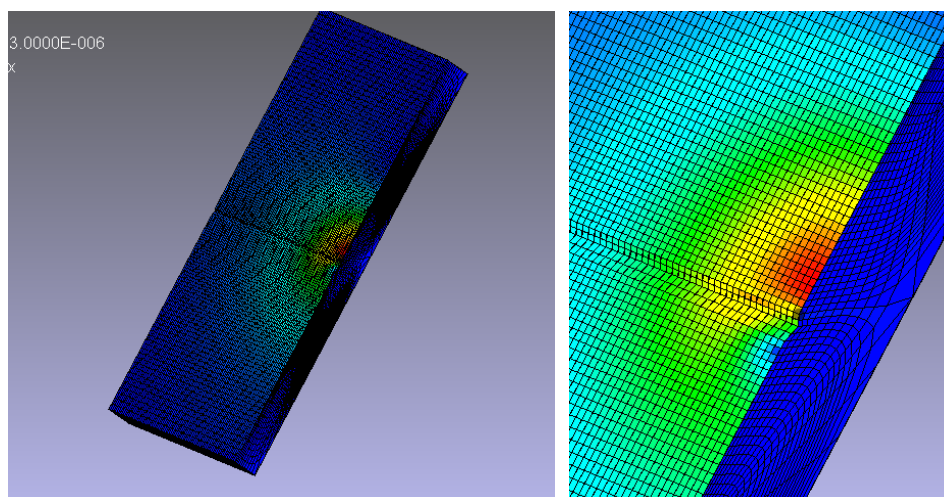


図-2.2.61 (a) 全体図

図-2.2.61 (b) 拡大図

図-2.2.61 解析結果コンター図

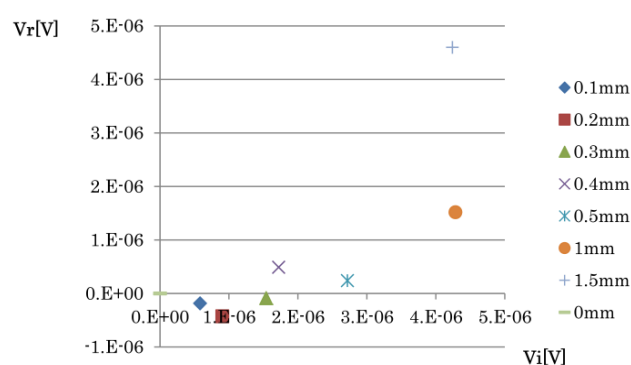


図-2.2.62 解析結果 (損傷幅 3.2mm)

2) 損傷幅による影響

パラメータ②に示す通りに損傷幅を変化させて解析を行った。

解析結果を図-2.2.63 から図-2.2.65 に示す。それぞれの解析結果は幅によって位相や遷移する軌跡が明らかに異なる。損傷幅が広い程腐食深さが深く、変化する断面積は大きい。渦電流の浸透深さは 1mm 程度であるので、ある程度の幅以上になると得られる V_m は損傷による影響を受けにくくなる。また、損傷幅が狭い程変化する断面積は狭くなる。これらの要素の影響により、このような結果になったと考えられる。よって、実際の探傷の場合、コンクリート表面からの腐食の深さに関しては位相の変化ではなく得られるインピーダンス値で比較した方がよいと考えられる。

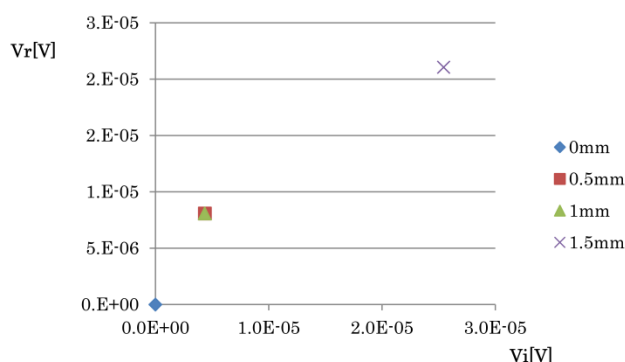


図-2.2.63 解析結果（損傷幅 2.4mm）

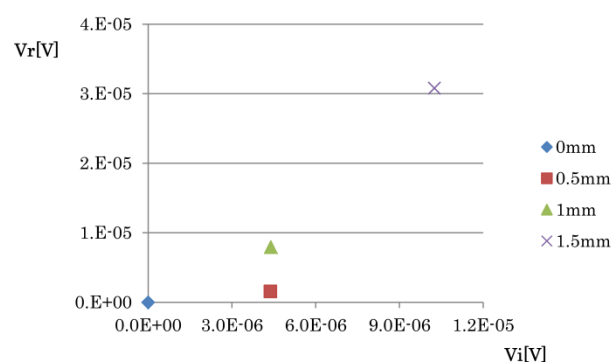


図-2.2.64 解析結果（損傷幅 6mm）

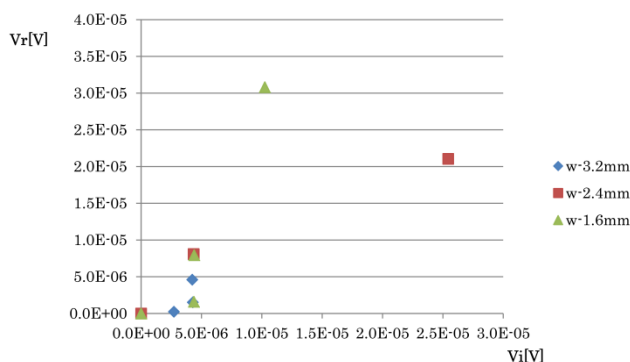


図-2.2.65 損傷幅による影響

3) コンクリート表面からの深さによる影響

パラメータ③に示す通りにコンクリート表面からの深さを変化させ解析を行った。深さ 0.8mm の結果を表層に損傷がある場合の結果を比較したグラフを図-2.2.66 から図-2.2.68 に示す。それぞれの結果において、表面からの深さが変化することでリフトオフによる V_m の大きさの変化があることに加え、位相が大きく変化している。このことから、損傷位置の表面からの深さが変化すると、それに伴って位相も変化することが分かった。

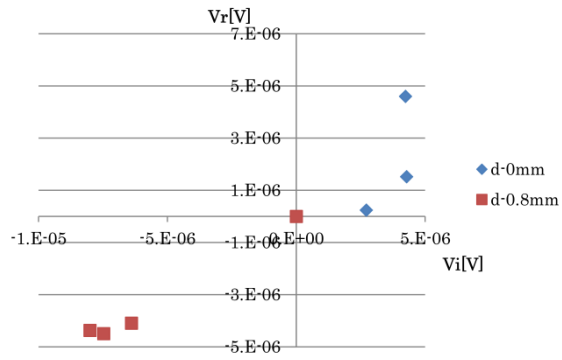


図-2.2.66 解析結果（損傷幅 3.2mm）

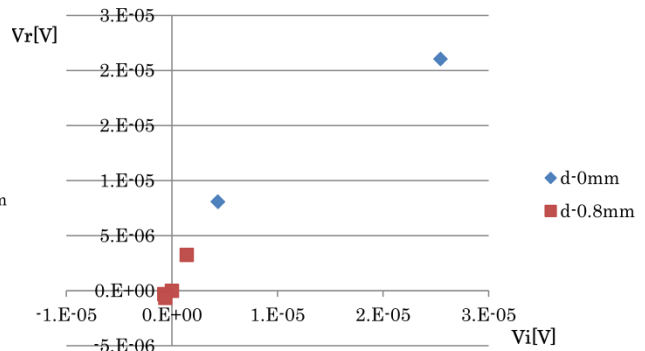


図-2.2.67 解析結果（損傷幅 2.4mm）

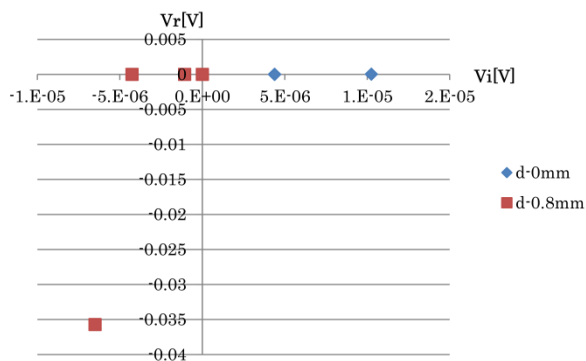


図-2.2.68 解析結果（損傷幅 1.6mm）

4) 励磁電流の周波数による影響

パラメータ④に示す通りに周波数を変化させ解析を行った。損傷深さ 0.5mm において、10kHz と 1kHz でのそれぞれの損傷幅の解析結果を図-2.2.69 から図-2.2.71 に示す。

基礎解析の場合と同様、周波数が下がるに従い、得られる V_m の変化も小さくなる。また周波数の変化により位相変化も多少見られた。

また、図-2.2.72 から図-2.2.75 にそれぞれの周波数において、表層における磁場分布と表層から 0.05mm 下の磁場分布を比較した。10kHz の場合、1kHz に比べ表層に強い磁場が発生しているが、0.05mm 下では磁場分布は 1kHz よりも低くなっていることが分かる。斜材解析の場合、周波数による深さ方向の影響が平板解析よりも強く出ており、実験においても周波数を変化させることでより正確に深さ方向の情報を得ることができると考えられる。

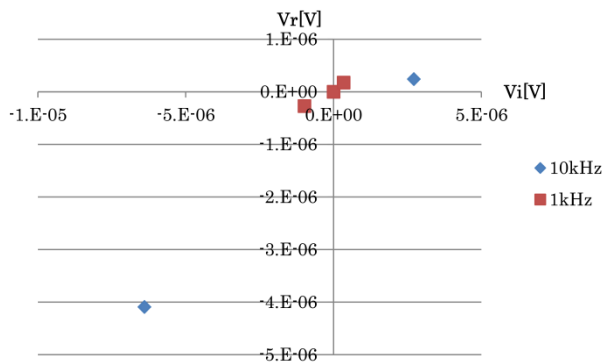


図-2. 2. 69 周波数による影響（損傷幅 3. 2mm）

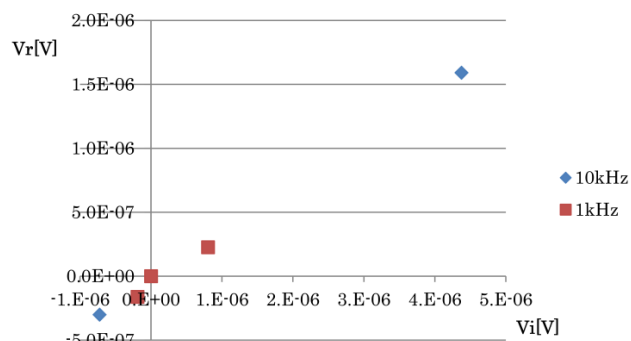


図-2. 2. 70 周波数による影響（損傷幅 2. 4mm）

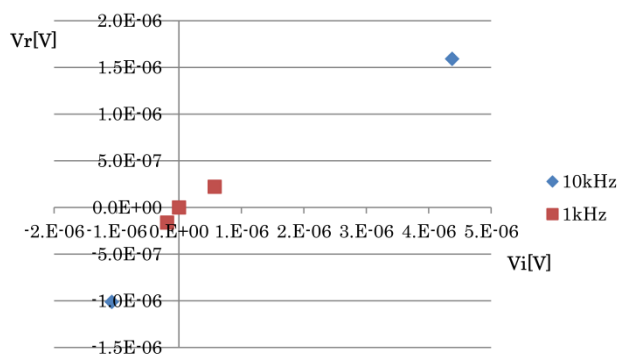


図-2. 2. 71 周波数による影響（損傷幅 1. 6mm）

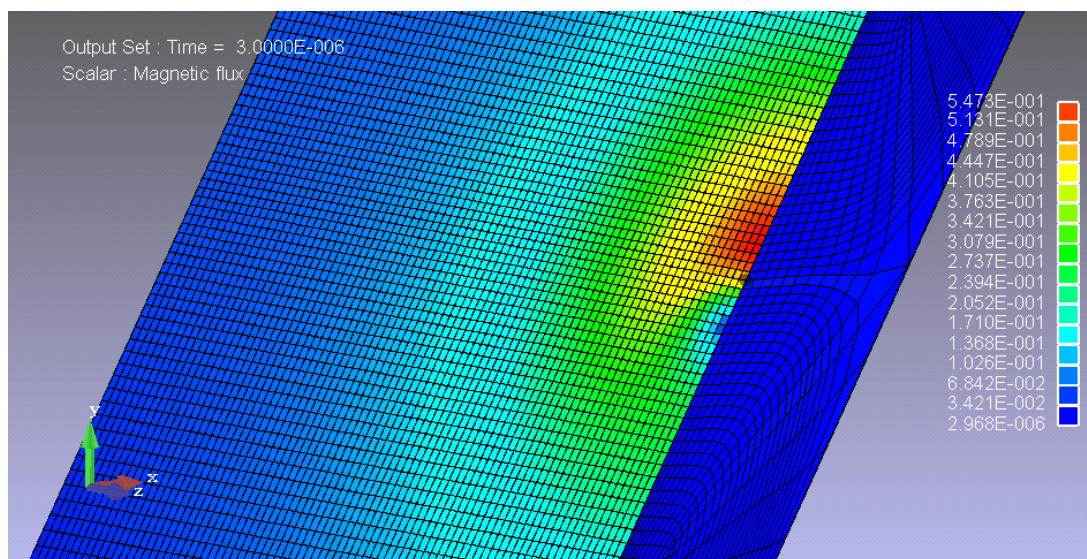


図-2. 2. 72 周波数による影響（10kHz 表層）

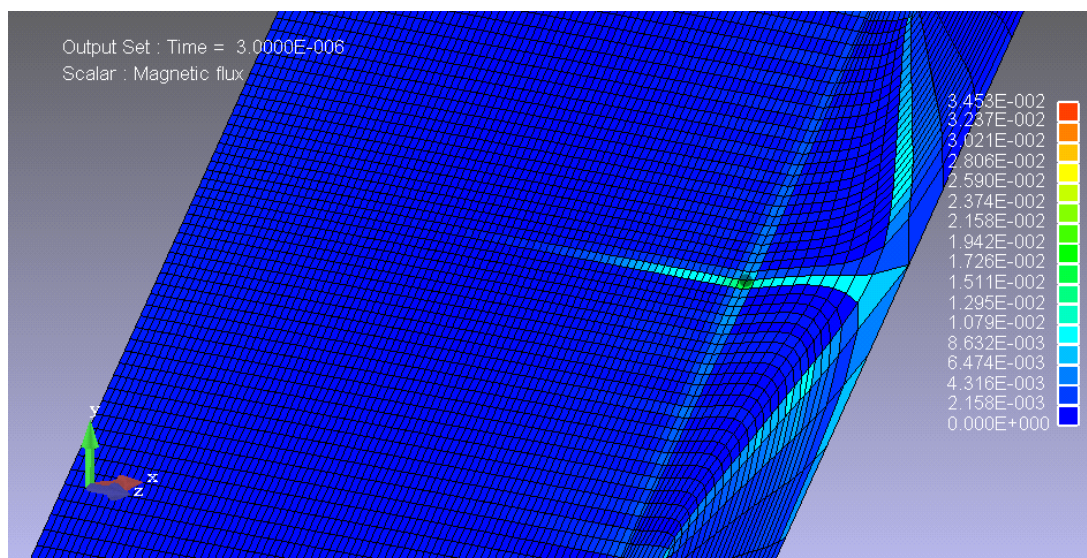


図-2. 2. 73 周波数による影響 (10kHz 表層より 0.05mm 下)

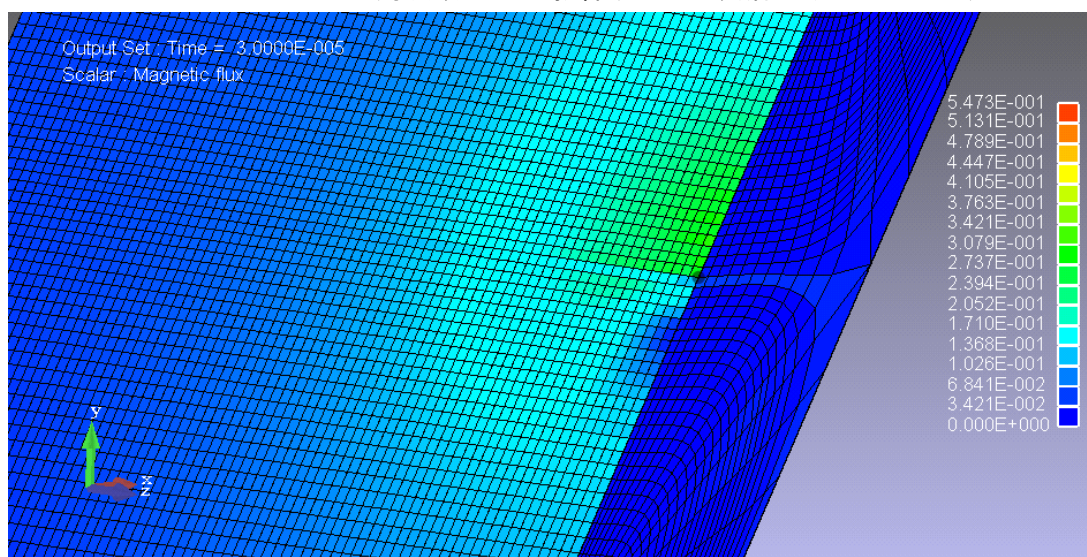


図-2. 2. 74 周波数による影響 (1kHz 表層)

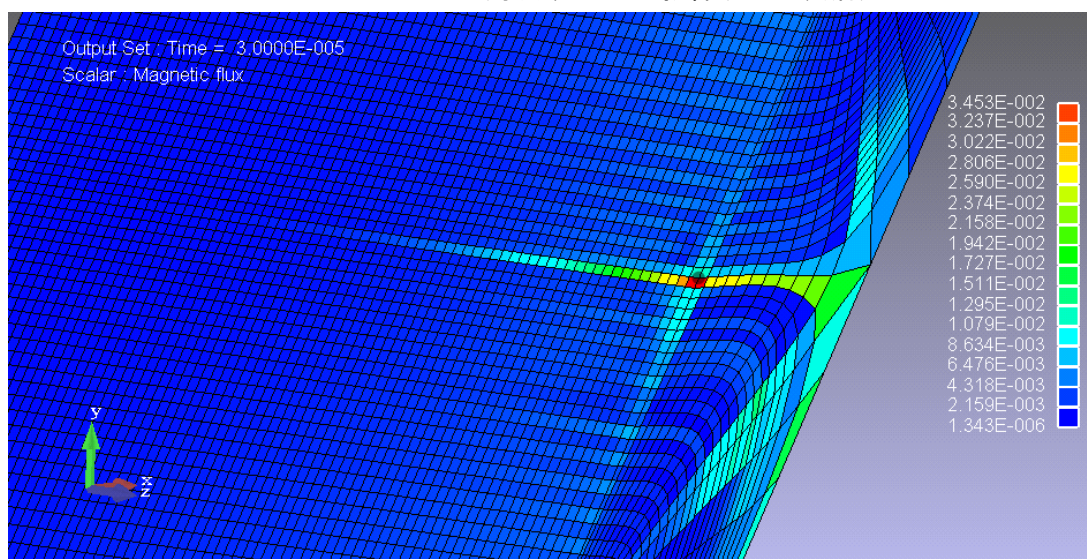


図-2. 2. 75 周波数による影響 (1kHz 表層より 0.05mm 下)

2.2.11 実部材を対象とした数値シミュレーション—まとめ

実部材を対象とした数値シミュレーションのまとめを以下に示す。

- 1) 損傷深さが大きくなると V_m の値が変化し、損傷深さを 2mm まで変化させたとき最大で 7.0 倍程度の変化が得られた。また、位相の変化も見られ、損傷幅 1.6mm の場合で 51.6 度変化することが明らかになった。
- 2) 損傷幅を 3.2mm から 1.6mm に変化させたとき 5.2 倍程度変化する。そのため、実際の探傷においてはコンクリート表面からの腐食損傷幅の情報はインピーダンス値の変化として現れると考えられる。
- 3) コンクリート表面からの損傷深さが変化すると、位相が変化することが明らかになった。
- 4) 周波数が 10kHz から 1kHz に変化すると、得られる V_m の値は 3.3%程度に低下する。しかし、周波数が低い方が深さ方向に磁場が浸透する減衰が小さく、周波数を変化させることで腐食損傷深さを得ることができるとを提案した。

2.2.12 欠陥探傷の基礎的実験—はじめに

本章では解析結果をふまえ、基礎試験体を用いて渦流探傷による損傷検出について検討を行った。その際リニアアクチュエータによる新しい探傷法の考案により、実験データからの損傷形状の同定を試みた。また、プローブの大きさ・数を変化させ、いくつかの走査方法を試みることで、腐食損傷及びスリット状の損傷で最も損傷検出に適した探傷条件を提案した。

2.2.13 欠陥探傷の基礎的実験—実験方法

本研究では、斜材のコンクリート埋込部の探傷を対象としている。対象の試験体の探傷を行う前に、基礎試験体を用いて基礎的実験を行った。ここでは、基礎的実験の実験方法について説明する。

1) 基礎試験体

ここでは、本研究で用いた基礎試験体について説明する。

今回用いた基礎試験体を図-2.2.76 から図-2.2.78 に示す。図-2.2.76 の試験体は幅 0.8mm、1.0mm、1.2mm、1.4mm のスリット状の欠陥が入ったものである。深さはどのスリットも 2 mmである。図-2.2.77 の試験体は幅 0.16mm、深さ 0.2mm、0.5mm、1mm のスリット状欠陥が入ったものである。図-2.4.3 の試験体は、図-2.2.76 の試験体と同じ寸法だが中心部の上半分が腐食しており、下半分は健全面だが両端と 1.5mm の板厚差がある。この三つの試験体を用いて基礎実験を行った。



図-2.2.76(a) 幅方向を変化させた基礎試験体（写真）

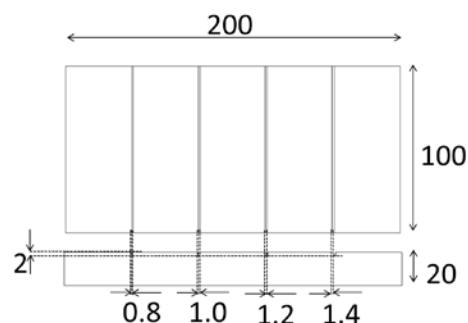


図-2.2.76(b) 幅方向を変化させた基礎試験体（寸法）



図-2. 2. 77 (a) 深さ方向を変化させた基礎試験体
(写真)

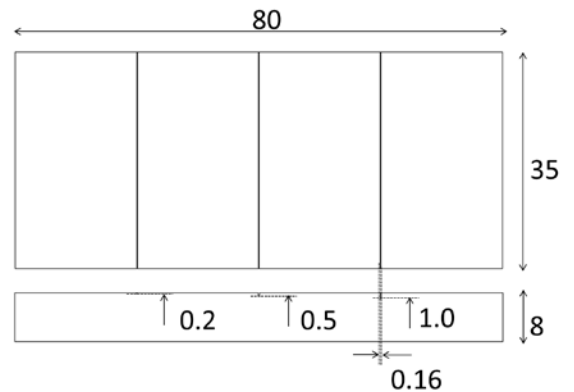


図-2. 2. 77 (b) 深さ方向を変化させた基礎試験体
(寸法)



図-2. 2. 78 (a) 腐食試験体 (写真)

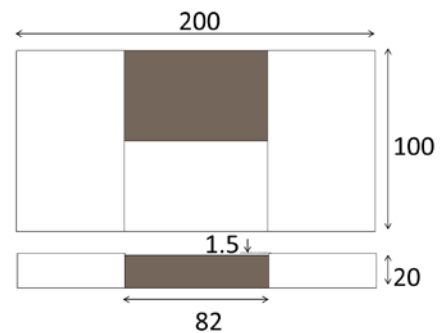


図-2. 2. 78 (b) 腐食試験体 (寸法)

2) 実験装置

実験装置は図-2.2.79 に示す eddyfi の Ectane である。励磁電圧、周波数は変化させることができ、最大 8 個までのプローブを接続することができる。プローブの出力できる周波数の範囲はコイルの大きさによって決まっており、本研究で使用したプローブのスペックを表-2.2.2 に示す。また大及び中サイズのプローブについては、X 線検査により内部構造を知ることができた。それぞれのプローブの X 線検査で得られた投影図を図-2.2.80 に示す。投影図で分かるように、プローブは上下二つのコイルから作られている。それぞれのコイルの間及び周りにシールドを設置することによって、互いの磁場が影響を及ぼさないようになっていると同時に磁場がプローブの直下に集中するように作られている。上下のコイル共に励磁もデータ取得も行うが、上



図-2. 2. 79 Ectane

のシールドに囲まれたコイルは下のコイルで得られたデータからノイズやドリフトを取り除くためにリファレンスとして働く。

また、本研究ではコンクリート埋め込み部という不可視な場所の探傷を目的としているため、探傷によって得られたデータから損傷の位置同定を計算によって行うことが必要である。位置同定を行うためには、プローブを等速に直進させることが必要である。そこで、図-2.2.81 のようなリニアアクチュエータを用いた補助器具を考案し、今回の探傷で用いた。アクチュエータは毎秒 12.6mm で並行に動く。

なお、Ectane から出力できる値はインピーダンスで、解析結果の V_r に当たるレジスタンス Re と虚数部 V_i に当たるリアクタンス Im をそれぞれ取ることができる。

表-2.2.2 各プローブのスペック

	大	中	小
直径(mm)	23.7	11.1	7
巻き数	302	240	—
ワイヤー太さ(mm)	4.8	2.8	—
周波数帯(kHz)	0.08-60	0.3-100	1-100
コイルサイズ(mm)	16.4	8.2	—



図-2.2.80(a) X線検査によるプローブ内部(大)

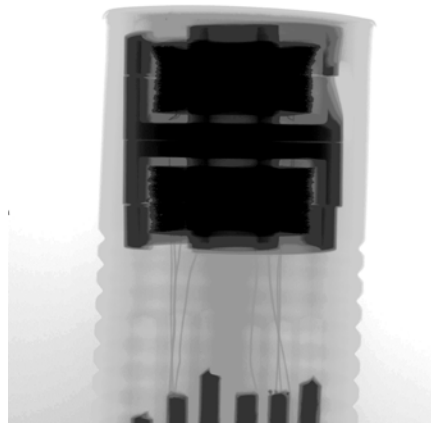


図-2.2.80(b) X線検査によるプローブ内部(小)



図-2.2.81 プローブ走査補助器具

3) 実験手順

実験の様子を図-2.2.82 に示す。実験の手順としては、まず亀裂のない平面にプローブを設置し、その点で零点を取る。その後、基礎試験体の上でプローブを走査し、欠陥部を通過したときのインピーダンス変化を調べた。

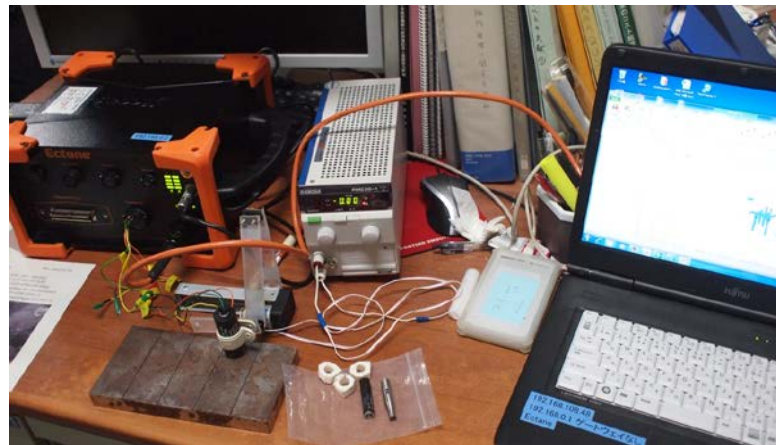


図-2.2.82 基礎実験の様子

4) 実験パラメータ

実験を行う際、いくつか実験条件を変えて実験を行った。ここではそのパラメータを示す。

- プローブの大きさ

本研究では、4-2-2 で述べたように3種類のプローブを用意した。これらのプローブを用いて大きさによる探傷性能を比較した。

- プローブ数

本研究では、図-2.2.83 のように複数プローブを同時走査することで、損傷の正確な位置同定を試みた。複数プローブで同時にデータ取得を行うことで、図-2.2.84 のように一度の探傷で損傷位置の特定を行いやすくなる。そのため、基礎実験では図-2.2.85 のようにプローブを3つ用いて、1プローブで励磁を行い、左

右のプロブでデータ取得を行った。
 以上を踏まえ、基礎探傷実験を行った。

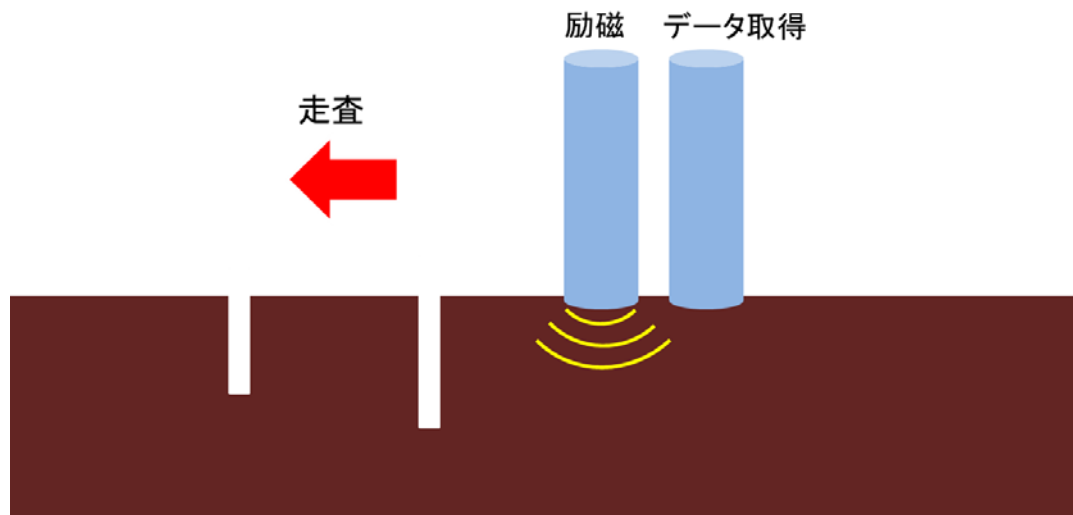


図-2.2.83 励磁プローブとデータ取得プローブを分離した時の図

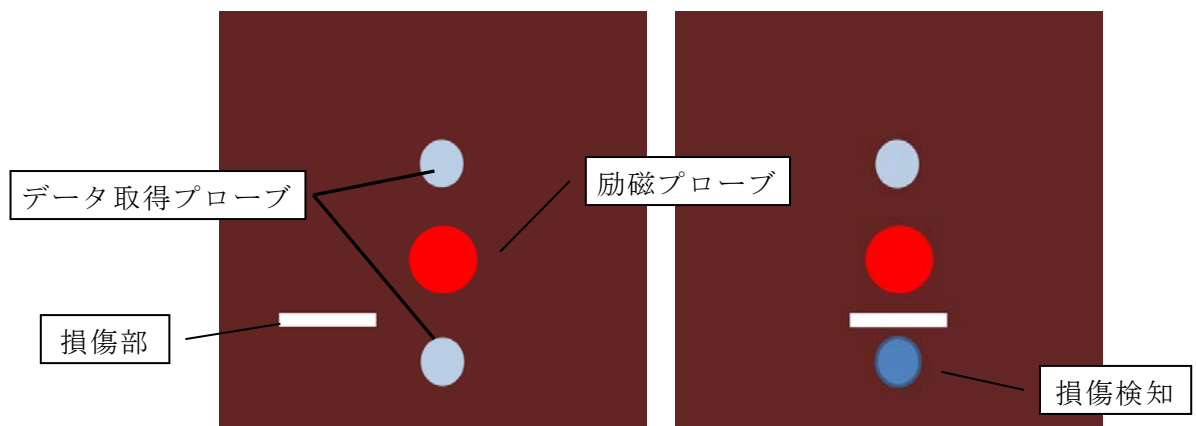


図-2.2.84 (a) 励磁プローブとデータ取得プローブを分離した時の損傷検知イメージ図



図-2. 2. 84 (b) 励磁プローブとデータ取得プローブ

2.2.14 欠陥探傷の基礎的実験—幅が異なるスリット状損傷検出の実験結果

2.2.13 で説明した条件の下で行った実験結果を示す。

1) プローブ大きさによる影響

2.2.13 4)のパラメータに述べる通り、3種類の大きさのプローブでの周波数 10kHz の探傷結果を示す。まず、中プローブの探傷結果及び、各スリット欠陥の位置でのインピーダンスの軌跡を図-2.2.85 から図-2.2.95 に示す。

全体的な傾向として、インピーダンス変化は欠陥の始点と終点をプローブが通過する際に2回生じる。このときインピーダンスは8の字を描くような変化を見せる。それ以外の平常時のインピーダンス値は直線上になる。これはリフトオフ効果のためである。

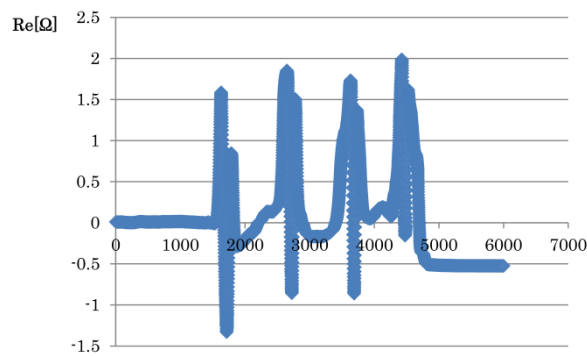


図-2. 2. 85 プローブ（中）レジスタンス Re

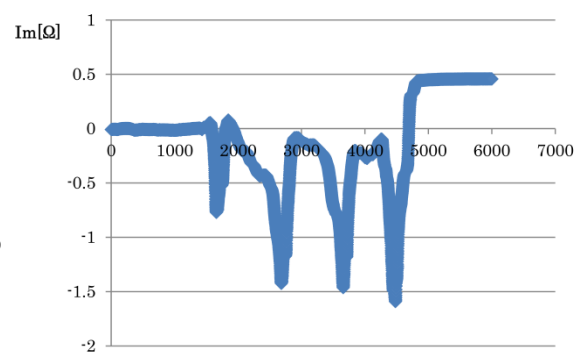


図-2. 2. 86 プローブ（中）リアクタンス Im

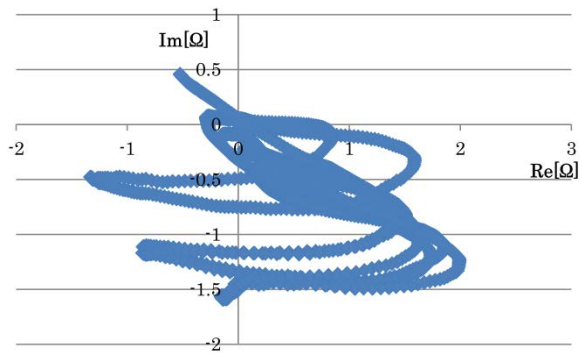


図-2.2.87 プローブ（中）インピーダンス

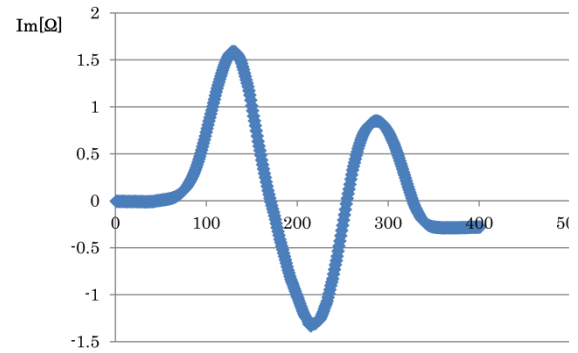


図-2.2.88 プローブ（中） Im
(defect=0.8mm)

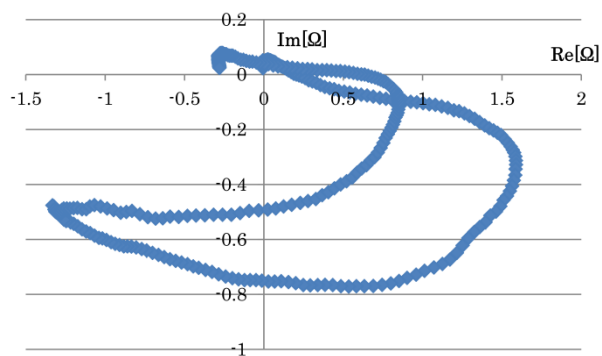


図-2.2.89 プローブ（中）インピーダンス
(defect=1.4mm)

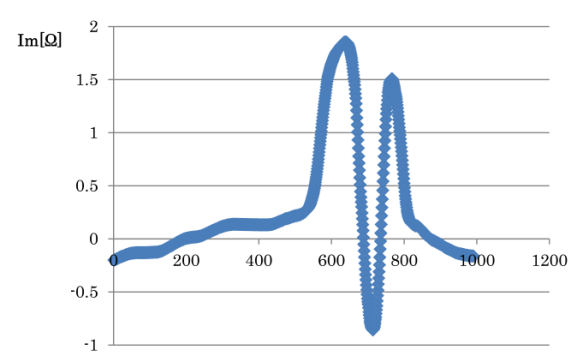


図-2.2.90 プローブ（中） Im
(defect=1.2mm)

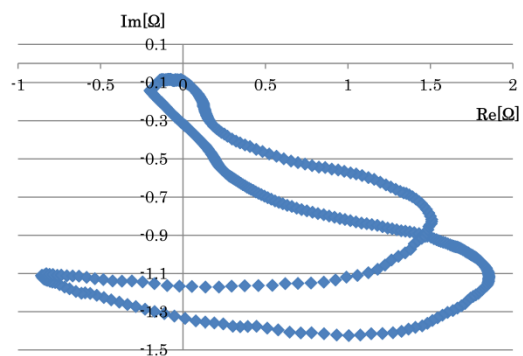


図-2.2.91 プローブ（中）インピーダンス
(defect=1.2mm)

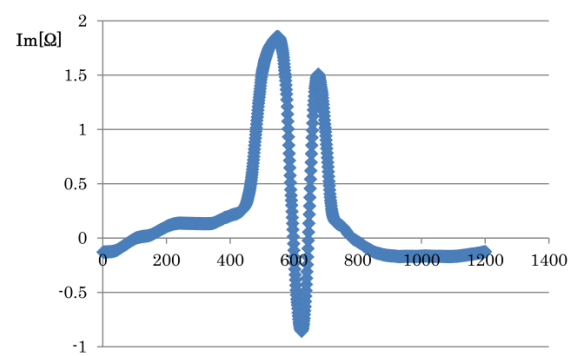


図-2.2.92 プローブ（中） Im
(defect=1.0mm)

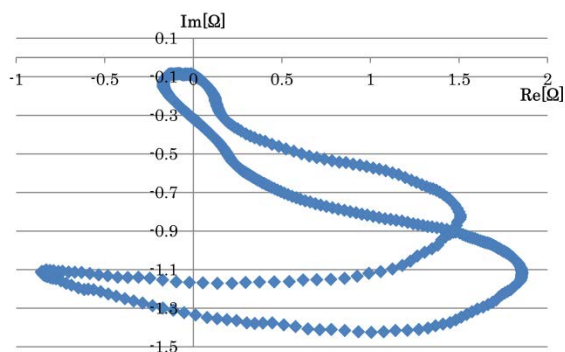


図-2.2.93 プローブ（中）インピーダンス
(defect=1.0mm)

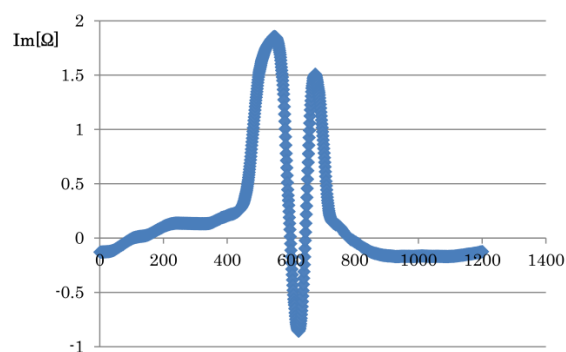


図-2.2.94 プローブ（中） Im
(defect=0.8mm)

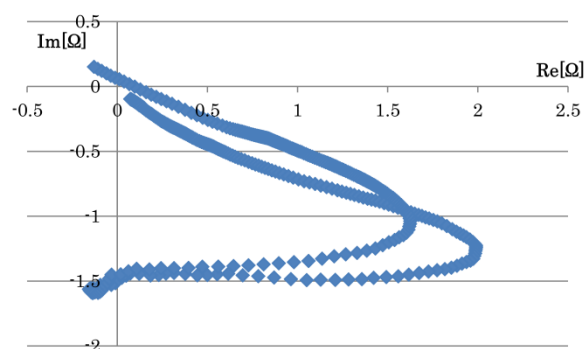


図-2.2.95 プローブ（中）インピーダンス (defect=0.8mm)

また、それぞれの大きさのプローブのインピーダンス値を図-2.2.96 から図-2.2.99 に示す。この時、欠陥通過時に得られたインピーダンス値のうち絶対値が最大のものをその欠陥サイズで得られたインピーダンス値とした。それぞれ得られた値から、プローブ大きさにより各々位相が異なることを確認した。今回用いたスリット状の欠陥は比較的大きいものであったため、どのプローブでも検出が確認できた。しかし、小プローブ及び中プローブではインピーダンス変化が 20%程度であったのに対し、大プローブでは 30%以上の変化があった。これは、大プローブの方が広く強力に磁化できることから得られた結果である。以上より、スリット検出の際は 23mm プローブを用いることが適していると考えられる。

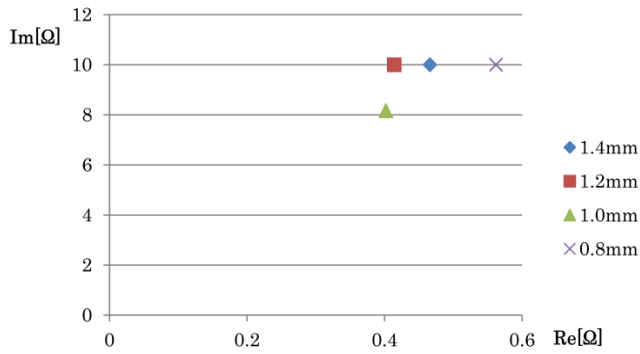


図-2. 2. 96 プローブ（小）インピーダンス

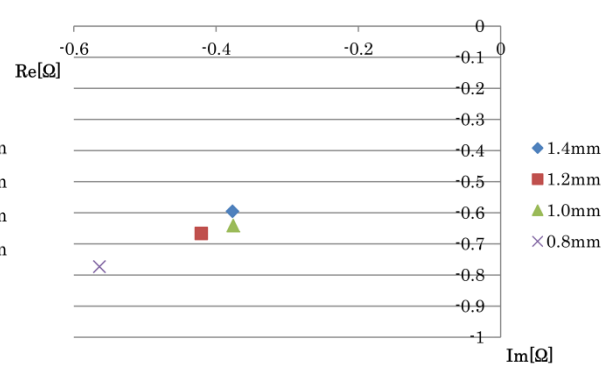


図-2. 2. 97 プローブ（中）インピーダンス

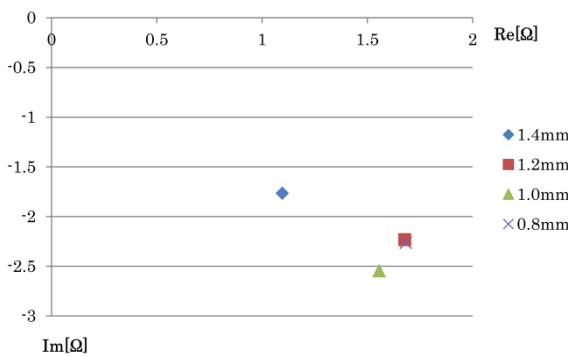


図-2. 2. 98 プローブ（大）インピーダンス

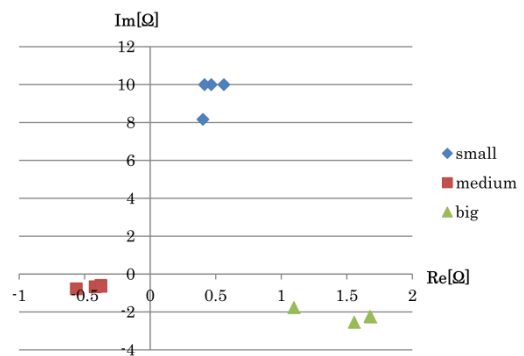


図-2. 2. 99 各プローブ大きさでのインピーダンス値

2) アクチュエータによる探傷

2.2.13 2)で述べたように、本研究では欠陥の位置同定のため、リニアアクチュエータを用いて探傷を行った。その結果を図-2.4.25 から図-2.4.27 に示す。なお、アクチュエータは 10 cmであるため、欠陥幅 1.2mm 及び 1.0mm の 2 か所分の探傷を行った。それぞれの欠陥幅を通過した時のインピーダンス値を図-2.2.100 から図-2.2.106 に示す。

実験結果より、アクチュエータを用いた場合、上下方向に固定する力が弱いため手で探傷する場合に比べデータに細かい乱れが生じてしまっているが、アクチュエータを用いての探傷を行うことが可能であることは確認できた。アクチュエータを用いた時に得られたデータから損傷幅を計算した結果と実際の損傷幅を比較した結果を表-2.2.3 に示す。得られた結果として、ほぼ実際の損傷幅を検知できていることが分かった。より正確なデータを得るには、底面とプローブの引っかかりによるアクチュエータの速度の変化を低減することや、プローブの重さによるアクチュエータの速度の変化を正確に計測することで実現できると考えられる。

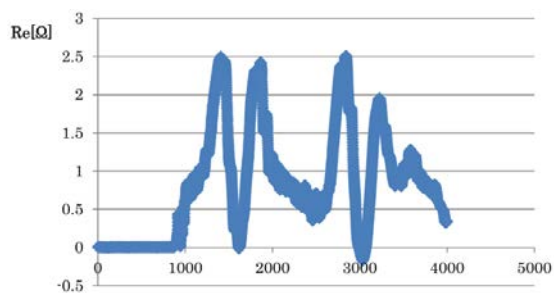


図-2.2.100 プローブ（大）アクチュエータを用いた時の探傷結果（ Re ）

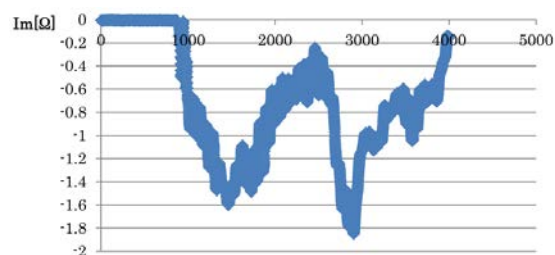


図-2.2.101 プローブ（大）アクチュエータを用いた時の探傷結果（ Im ）

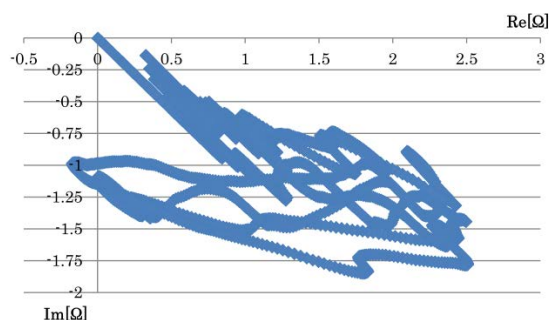


図-2.2.102 プローブ（大）アクチュエータを用いた時の探傷結果

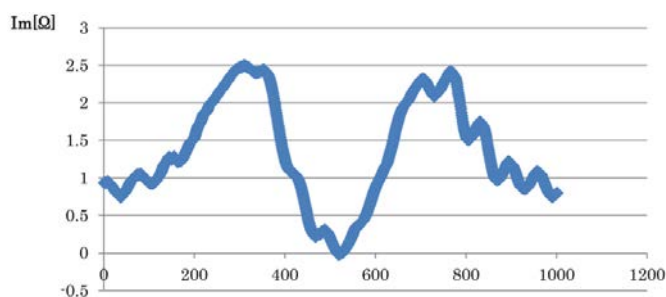


図-2.2.103 プローブ（大）アクチュエータを用いた時の探傷結果（1.2mm・ Im ）

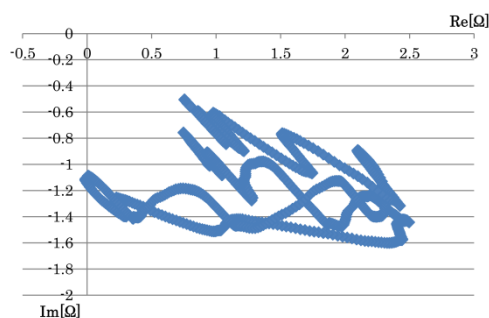


図-2.2.104 プローブ（大）アクチュエータを用いた時の探傷結果（1.2mm）

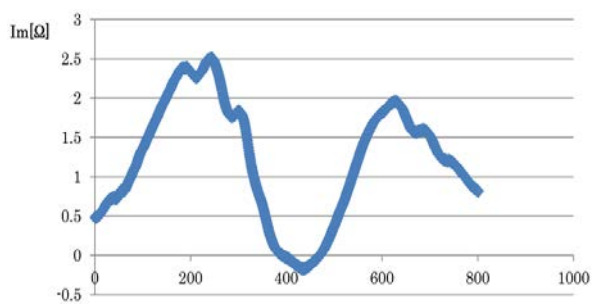


図-2.2.105 プローブ（大）アクチュエータを用いた時の探傷結果（1.0mm・ Im ）

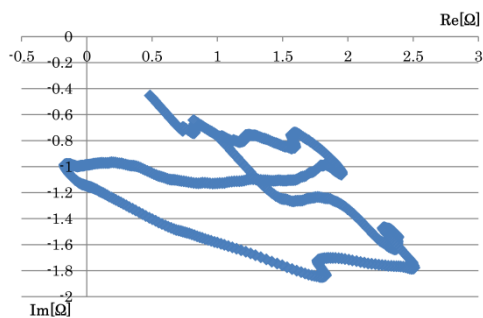


図-2.2.106 プローブ（大）アクチュエータを用いた時の探傷結果（1.0mm）

表-2.2.3 データ値と真値の比較

データから求めた損傷幅(mm)	実際の損傷幅(mm)
0.8	1.0
1.0	1.2

3) 励磁プローブとデータ取得プローブを別にした探傷による実験結果

2.2.13 4)で説明した励磁プローブとデータ取得プローブを分けて探傷を行った。その際、励磁プローブを最も強力に磁場を発生させることのできる大プローブ、データ取得プローブを狭い範囲で詳細なデータを取得できる小プローブとした。実験の方法を図-2.4.32 に示す。スリット状欠陥の上を、プローブを 45 度に傾けて右方向に走査し、得られたデータから損傷位置の同定を試みた。プローブを傾けた際の両データ取得プローブの距離は 6.6mm である。



図-2.2.107 3 プローブでの探傷方法

実験結果を図-2.2.108 及び図-2.2.109 に示す。得られた結果より、プローブの移動に伴って始めに前プローブが損傷を検知し、その後、後プローブが損傷を検知していることが分かる。今回の実験では、探傷検知に伴うタイムラグは 0.94 秒であり、距離にすると約 5mm である。このことから、実際のプローブ間の距離を測定できているといえ、本手法の有効性を示すことができた。

この手法は特にスリット状の欠陥に有効であり、このような手法を用いることで疲労亀裂のような部分的に発生したクラックの早期発見ができることが期待されることが考えられる。

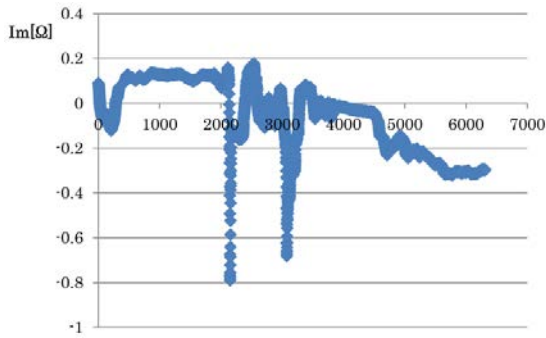


図-2.2.108 前プローブから得られたリアクタンス値

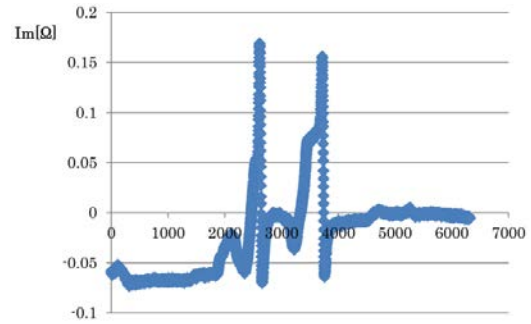


図-2.2.109 後プローブから得られたリアクタンス値

2.2.15 欠陥探傷の基礎的実験—深さが異なるスリット状損傷検出の実験結果

渦流探傷試験は表層部の欠陥は精度よく検出できるが、渦電流は深さ方向に指数関数的に減衰していくため、欠陥の深さを検出することは困難である。そこで、図-2.2.77に示した試験体を用いて、深さ方向の情報をどのように得るか検討した。

まず、中プローブを用いた探傷結果を図-2.2.110 から図-2.2.112 に示す。図-2.2.111 より、 Im は欠陥を検出できているが、図-2.2.110 から Re ではドリフトが強く、損傷部を確認できない。そこで、横軸部について線形近似を用いてドリフト処理を行った。ドリフト処理後のデータを図-2.2.113 に示す。処理によって、欠陥通過時のインピーダンス変化が見てとれるようになった。更に、各欠陥通過時のインピーダンス値の最大値を取り、プロットしたグラフを図-2.2.114 に示す。欠陥深さが大きくなるにしたがって、インピーダンス値の変化が大きくなり、深さを検出することができた。

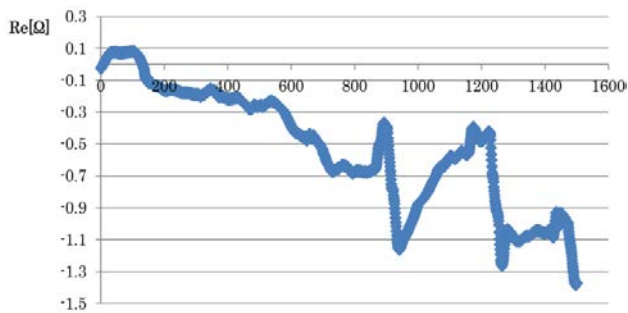


図-2.2.110 深さ方向に変化する試験体を用いたインピーダンス変化 (Re)

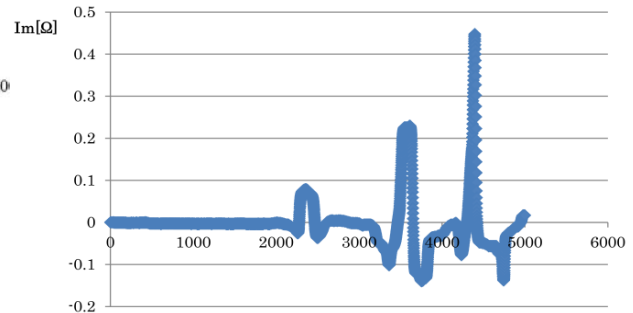


図 2.2.111 深さ方向に変化する試験体を用いたインピーダンス変化 (Im)

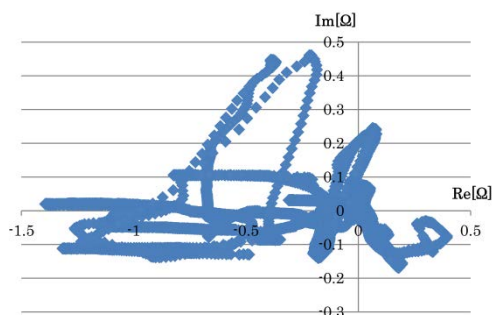


図-2.2.112 深さ方向に変化する試験体を用いたインピーダンス変化

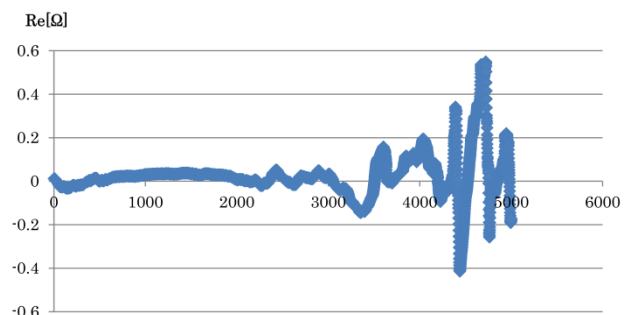


図-2.2.113 ドリフト処理後 (Re)

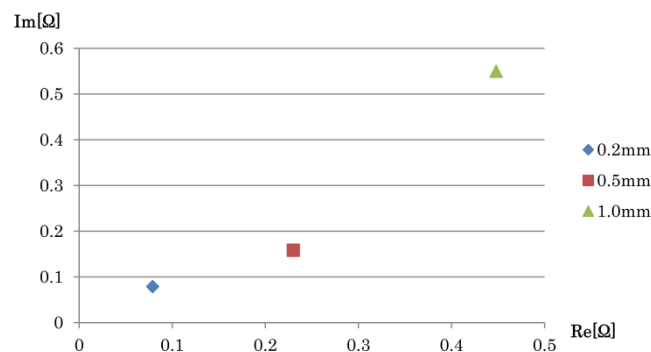


図-2.2.114 深さ方向探傷結果

2.2.16 欠陥探傷の基礎的実験—腐食損傷検出に関する実験結果

1) コイル径による影響

図-2.2.78 で示した腐食試験体について、探傷実験を行った。腐食試験体の上から厚さ 1.6mm のプラスチック板を重ね、その上からアクチュエータを用いて探傷を行った。なお、上半分が腐食面、下半分が健全な面であるため、両方のデータを取得し比較することで腐食損傷検出を試みた。

励磁電流周波数 1kHz で大プローブで探傷したときの探傷結果を図-2.2.115 から図-

2.2.120 に示す。また、健全面と腐食面を比較したグラフを、大プローブと中プローブで探傷したときについて図-2.2.121 から図-2.2.126 に示す。更に、それぞれのプローブ大きさで得られたインピーダンス値の変化を表-2.2.4 及び表-2.2.5 に示す。

腐食面はスリット状の欠陥とは違い、損傷幅が大きくある程度一様に損傷面が広がっていることから、インピーダンス値としてはリフトオフ効果と同様の変化を見せると考えられる。実際のデータからも、腐食面で得られたインピーダンス値は健全面よりも小さくなり、腐食減肉によるリフトオフを確認することができた。しかし、完全に線形にインピーダンス値が減少している訳ではなく、多少の位相のずれがあることから分かるように、実際には単純なリフトオフではなく、腐食による表面の凹凸により多少位相のずれが見られる。この現象より、実際の探傷でも単純な板厚減少と区別することができると考えられる。

大きさの比較では、大プローブで得られたインピーダンス値の変化は中プローブのおよそ 4.9 倍であったことから 23mm プローブでの探傷が腐食損傷において適していると考えられる。

2) 励磁電流の周波数による影響

腐食損傷検出において、励磁電流の周波数による影響を調べるため、10kHz での探傷実験を行った。それぞれのプローブについて実験結果を図-2.2.127 から図-2.2.132 に示す。また、インピーダンス値の絶対値の最大値を表-2.2.6 及び表-2.2.7 に示す。

傾向としては 4-5-1 で得られた結果と同様、リフトオフのように同位相でのインピーダンス値の減衰が見られた。また、4-5-1 で得られた結果と併せ、健全部のインピーダンス値を 0 点としたときの腐食によるインピーダンス値の変化を図-2.2.133 に示す。この図より、腐食損傷によるインピーダンス値の変化が最も見られたのが 10kHz の大プローブであり、1kHz の中プローブで得られたインピーダンス値変化の 20 倍もの変化が見られた。理由としては、強く磁化できるためプラスチックや空気のリフトオフ効果を受けにくく、非磁性体の下にある損傷を検知できたと考えられる。このことから、第 5 章の実験では大プローブ、10kHz の励磁電流で行うのがよいと分かった。

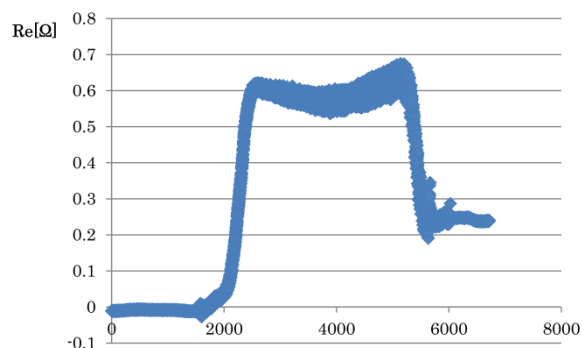


図-2.2.115 健全面データ (Re): プローブ大

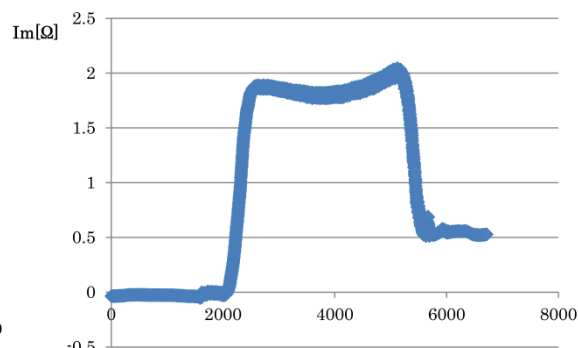


図-2.2.116 健全面データ (Im): プローブ大

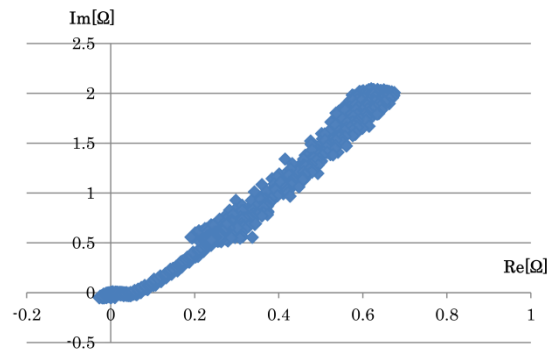


図-2.2.117 健全面データ：プローブ大

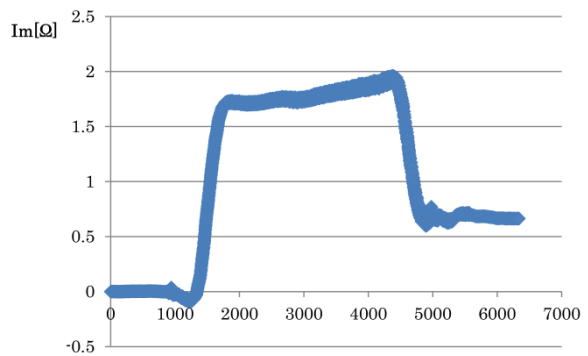
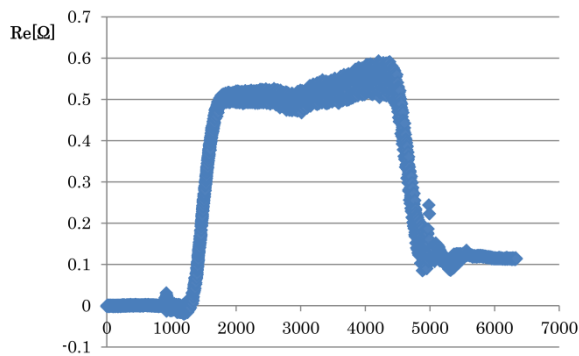


図-2.2.118 腐食面データ (Re)：プローブ大

図-2.2.119 腐食面データ (Im)：プローブ大

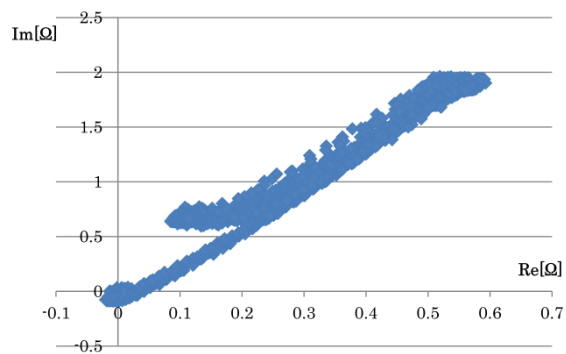


図-2.2.120 腐食面データ：プローブ大

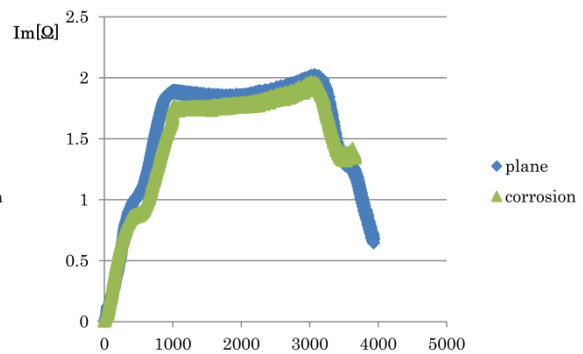
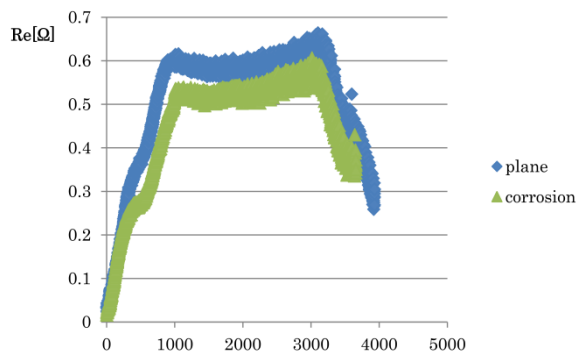


図-2.2.121 データ比較 (Re)：プローブ大

図-2.2.122 データ比較 (Im)：プローブ大

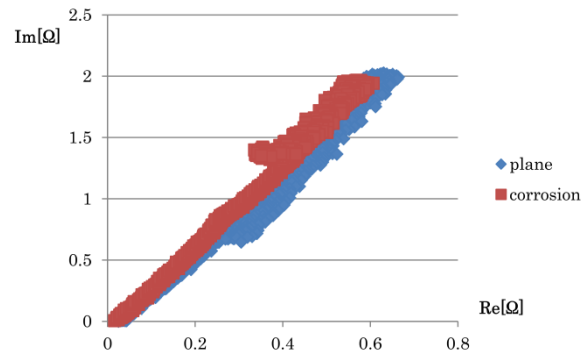


図-2. 2. 123 データ比較：プローブ大

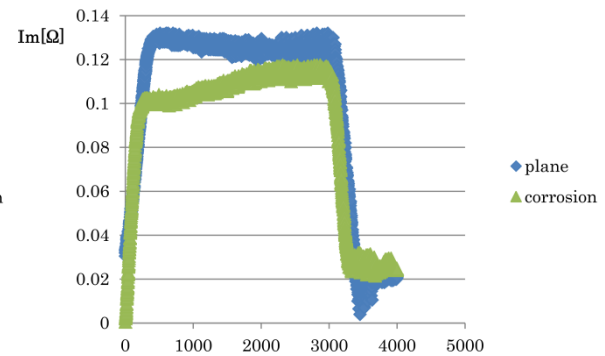
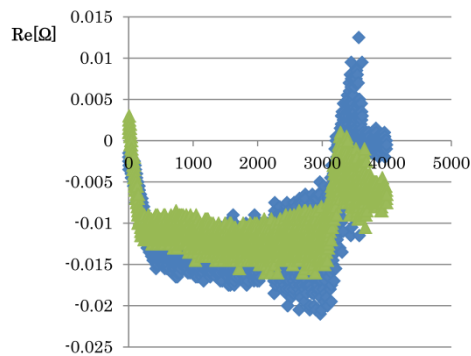


図-2. 2. 124 データ比較 (Re)：プローブ中 図-2. 2. 125 データ比較 (Im)：プローブ中

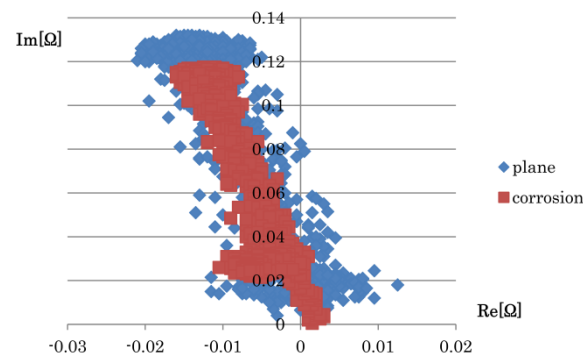


図-2. 2. 126 データ比較：プローブ中

表-2. 2. 4 インピーダンス値の変化（プローブ大）

	健全面	腐食面
Re	2.026	1.9675
Im	0.664	0.6065

表-2. 2. 5 インピーダンス値の変化（プローブ中）

	健全面	腐食面
Re	0.132	0.1175
Im	-0.021	-0.016

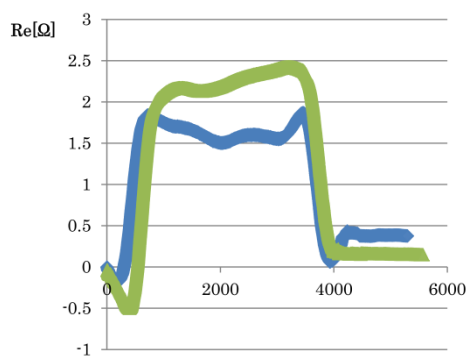


図-2. 2. 127 データ比較 (Re) : プローブ大

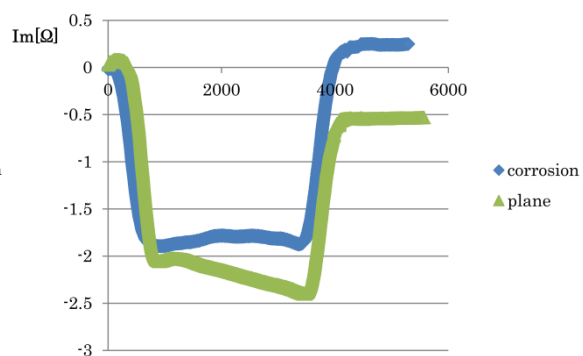


図-2. 2. 128 データ比較 (Im) : プローブ大

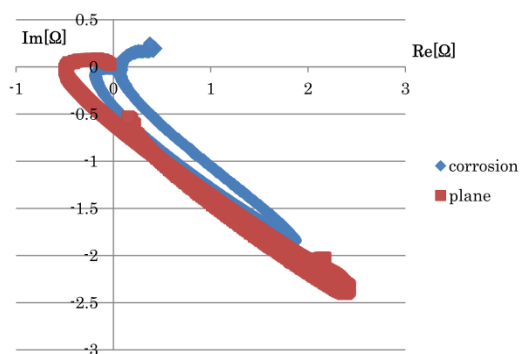


図-2. 2. 129 データ比較 : プローブ大

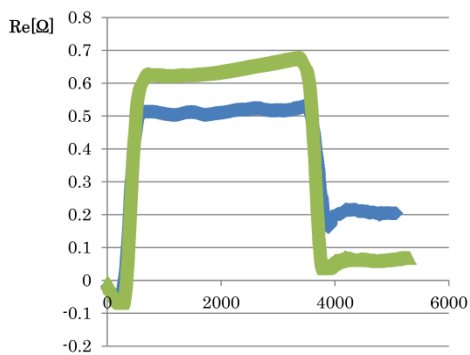


図-2. 2. 130 データ比較 (Re) : プローブ中

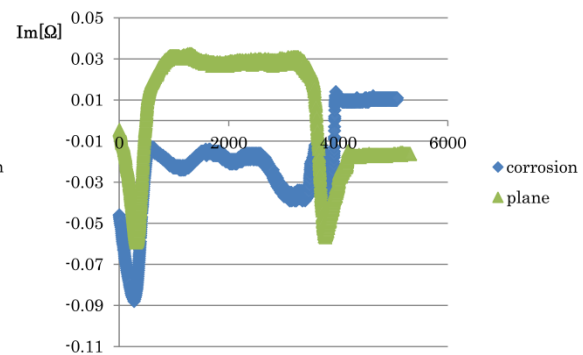


図-2. 2. 131 データ比較 (Im) : プローブ中

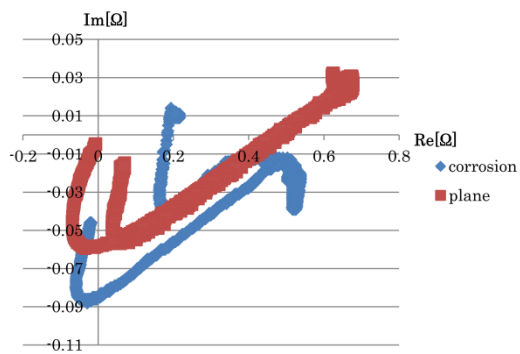


図-2. 2. 132 データ比較 : プローブ中

表-2.2.6 インピーダンス値の変化（大プローブ）

	健全面	腐食面
縦軸	-2.4025	-1.8975
横軸	2.427	1.8705

表-2.2.7 インピーダンス値の変化（中プローブ）

	健全面	腐食面
縦軸	-0.0595	-0.088
横軸	0.678	0.5385

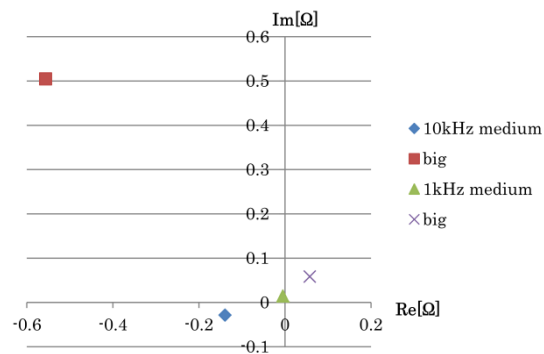


図-2.2.133 各プローブのインピーダンス値の変化の比較

2.2.17 欠陥探傷の基礎的実験—まとめ

まとめ（欠陥探傷の基礎的実験）を以下に示す。

- アクチュエータを用いた欠陥幅の探傷実験により、欠陥幅を同定することができた。
- 励磁プローブに対していくつかのデータ取得プローブを用いて探傷を行うことで、欠陥位置をより正確に検知することができた。
- 欠陥深さの検出に関して、データのドリフト処理後に最大インピーダンス値を得ることで検知できた。
- 腐食損傷に関して、大きいプローブでかつ高周波数のとき腐食を検知しやすいことが明らかになった。

2.2.18 実部材を対象とした渦流探傷試験—はじめに

本章では実構造物を模した試験体を対象とし、実際に渦流探傷試験を行った。

2.2.1~2.2.17 で検討した渦流探傷試験の性質や探傷条件を利用し、探傷方向等を変えることでコンクリート埋込部の腐食損傷検出を試みた。

2.2.19 実部材を対象とした渦流探傷試験—対象とした試験体

ここでは、実際探傷した試験体の形状について説明する。

本研究で対象とした形状及び部位は、図-2.2.134 に示すように鋼材のコンクリート埋め込み部である。目視による確認では、腐食による損傷が発生しているかどうかは確認できない。この試験体と、同じ形状で腐食が発生していない試験体(図-2.2.135)を用意し、それぞれ比較することで腐食損傷の検出を行った。



図-2. 2. 134 対象とした腐食試験体



図-2. 2. 135 比較用試験体

2.2.20 実部材を対象とした渦流探傷試験—実験方法及び実験結果

欠陥探傷の基礎的実験（2.2.12）と同様にいくつかの手法を用いて探傷を行った。

2.2.12 章の基礎実験の結果より、プローブは最も大きい 23.7mm 径のものを用了。探傷方法及び得られた結果を以下に示す。

1) 腐食損傷検出の確認

まず、目視で腐食が確認できる箇所では探傷を行い、腐食損傷が渦流にどのような影響を与えるのか観察した。鋼材ウェブ面のうち、腐食が見られない上部と腐食損傷が確認されている下部でそれぞれ探傷を行い比較することで、腐食損傷の信号を観察した。走査方法は、中心点を始点として左右に動かしている。探傷の様子を図-2.2.136 及び図-2.2.137 に示す。なお探傷は、厚さ 3 mm のプラスチック板を敷いて行った。

上部のインピーダンス値変化を図-2.2.138 及び図-2.2.139 に示す。また下部のインピーダンス値及びレジスタンスとリアクタンスを図-2.2.140 及び図-2.2.141 に示す。上部のインピーダンス値はほぼ直線上にあり、リフトオフ効果のみで損傷は検出されていない。一方下部で取得したデータはリフトオフとは離れたプロットがあることが分かる。中心部から左右に走査するそれぞれの過程でのデータを比較した図を図-2.2.142 から図-2.2.149 に示す。下部のデータを見ると、それぞれリフトオフ直線から離れほぼ同様の挙動を示している箇所があり、その箇所に腐食損傷があると考えられる。実際の試験体において、左側のフランジ面から 4.5cm、右側のフランジ面から 4cm は腐食による表層の剥離が見られた。それぞれのデータより、左側ではフランジ面より 1.36cm から 4.76cm、右側ではフランジ面より 1.7cm から 4.1cm の位置にインピーダンス値の変化があった。このことから、フランジ面近くではフランジの影響が強く腐食によるインピーダンス値の変化の取得は難しいが、中心付近ではある程度の精度で腐食の検出ができた。

2) 探傷領域に対し水平に走査する方法

この手法は、プローブを左右に走査させ、インピーダンス値の変化を観察する。腐食や亀裂など、一様でない損傷が内部に存在する場合に有効であると考えられる。実験の様子を図-2.2.150 に示す。

まず、手動で探傷した場合の実験結果を図-2.2.151 から図-2.2.162 に示す。中央で 0 点を取り、それぞれ中央から左右に走査した時のインピーダンス値を、腐食していない試験体と対象の試験体で比較した。水平に走査する手法は一度に探傷領域のデータを取得できるが、両端でフランジ面の影響が大きく出てしまうため、単純な比較による損傷検出が難しい。しかし、5-3-3 のような垂直方向での探傷を併せることで、より正確に損傷位置を計測することができると考えられる。

3) 探傷領域に対し垂直に走査させる方法

走査方法を表した図を図-2.2.163 に示す。この手法は、損傷の影響がない程度に鋼材から離れた場所でキャリブレーションを取り、その時のインピーダンス値からの変化を観察することで損傷を検出する。また、板厚 10mm のプラスチック板を用いて探傷位置から 10mm 上の位置で同様に探傷を行い、結果を比較した。実験の様子を図-

2.2.164 及び図-2.2.165 に示す。

実験結果を図-2.2.166 から図-2.2.169 に示す。また、探傷箇所から 10mm リフトオフの状態での探傷結果を図-2.2.169 から図-2.2.171 に示す。10 mm リフトオフした箇所には腐食が見られ、損傷がない状態のデータと比較することができる。コンクリート面のデータとプラスチック板上のデータのうち、それぞれ値が急激に変化している部分が鋼材の影響を受けてインピーダンスが変化しているので、その部分のみを取り出して往復でそれぞれ比較したグラフを図-2.2.172 及び図-2.2.173 に示す。プラスチック上のデータはインピーダンス値の変化に加え、位相変化が見られる。これは腐食損傷による変化と考えられる。コンクリート上にあるデータは往路、復路共にインピーダンス値が大きく低下しているが、位相に変化は見られなかった。インピーダンス値の変化は周辺の腐食によるリフトオフの影響と考えられるが、位相の変化がほとんどみられなかったことから、コンクリート埋め込み部に腐食が発生している可能性は低く、発生していたとしてもごく僅かの板厚減少であると考えられる。



図-2. 2. 136 腐食検出確認 (上部)



図-2. 2. 137 腐食検出確認 (下部)

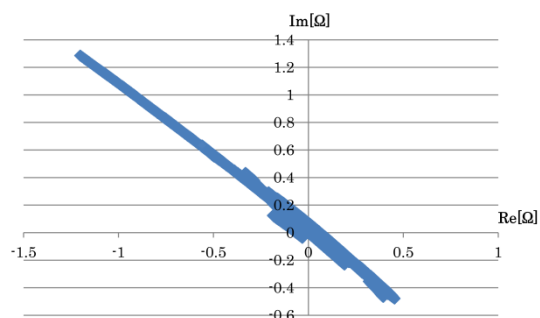


図-2. 2. 138 探傷結果 (上部)

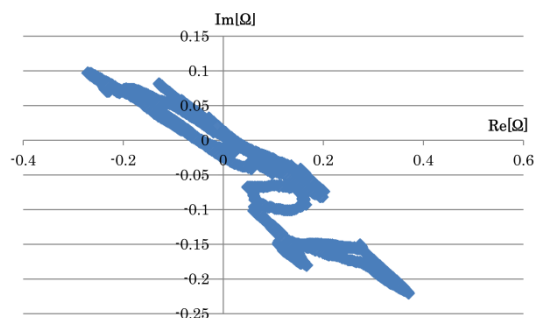


図-2. 2. 139 探傷結果 (下部)

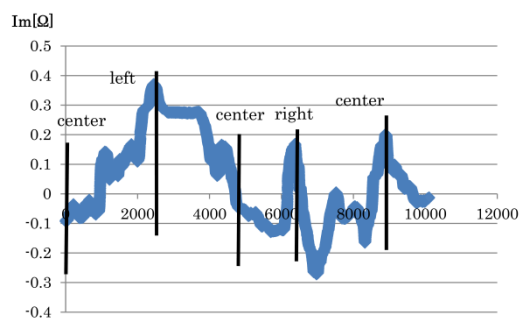


図-2. 2. 140 探傷結果 (下部 : Im)

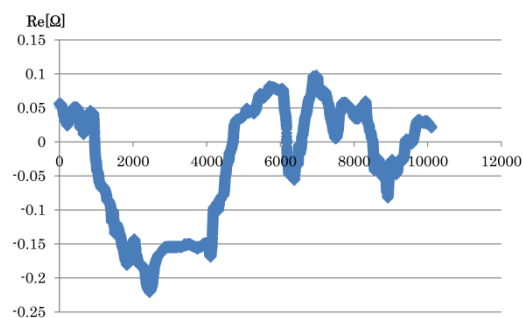


図-2. 2. 141 探傷結果 (下部 : Re)

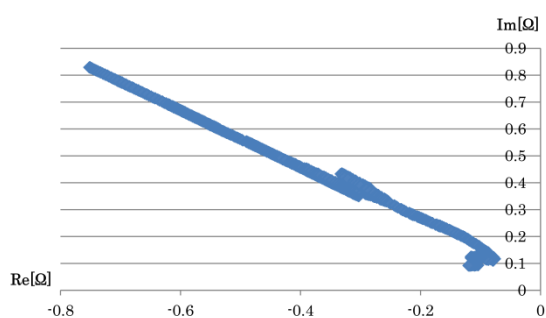


図-2. 2. 142 中心部から左 (上部)

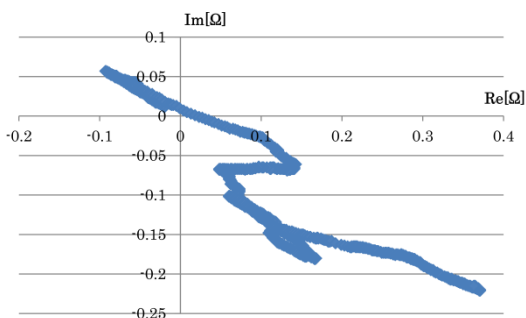


図-2. 2. 143 中心部から左 (下部)

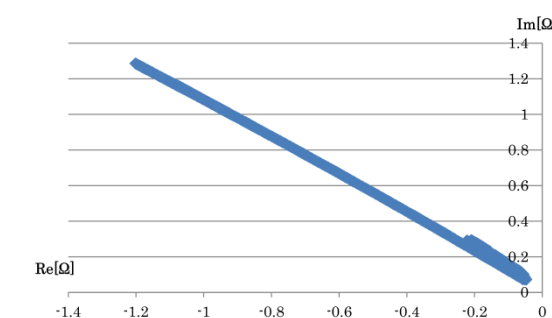


図-2. 2. 144 左から中心部 (上部)

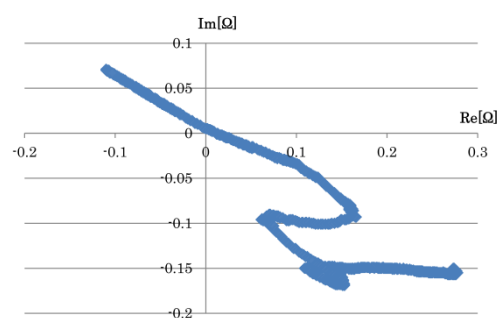


図-2. 2. 145 左から中心部 (下部)

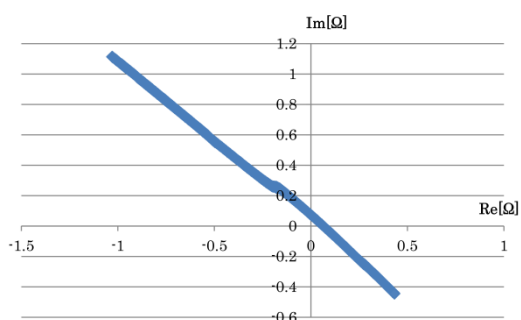


図-2. 2. 146 中心部から右 (上部)

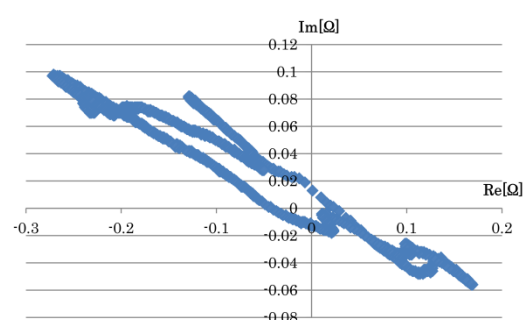


図-2. 2. 147 中心部から右 (下部)

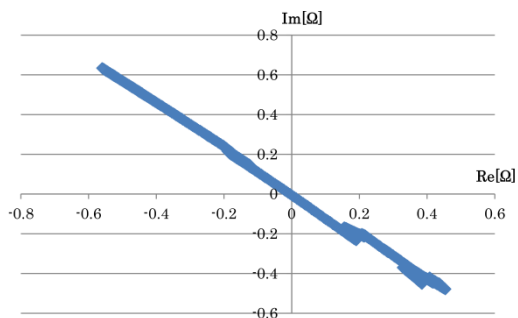


図-2. 2. 148 右から中心部（上部）

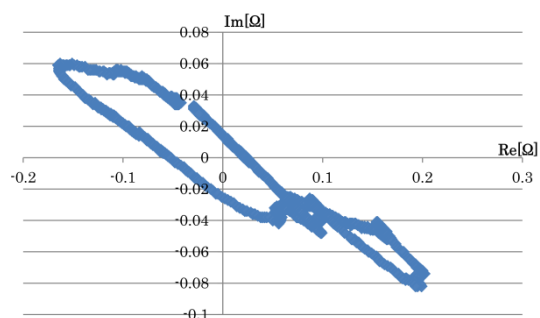


図-2. 2. 149 右から中心部（下部）



図-2. 2. 150 水平走査した実験の様子

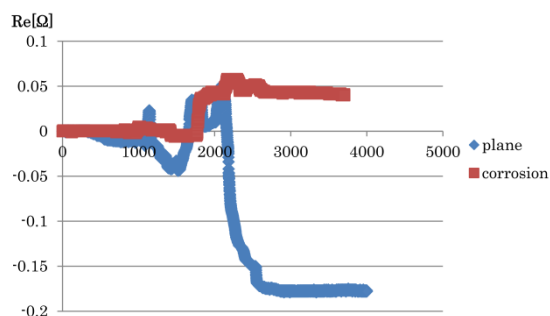


図-2. 2. 151 2 データの比較（中央から左： Re ）

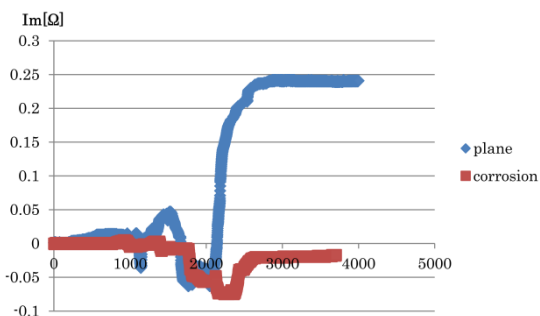


図-2. 2. 152 2 データの比較（中央から左： Im ）

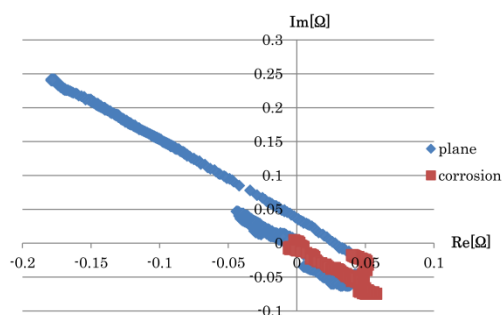


図-2. 2. 153 2 データの比較（中央から左）

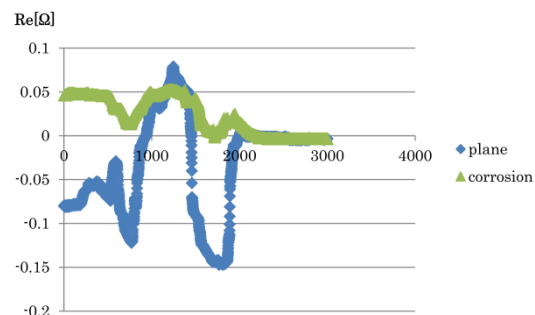


図-2. 2. 154 2 データの比較（左から中央： Re ）

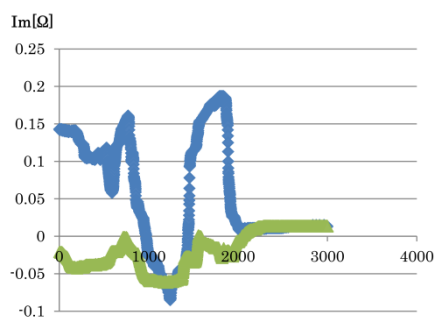


図-2. 2. 155 2 データの比較 (左から中央 : Im)

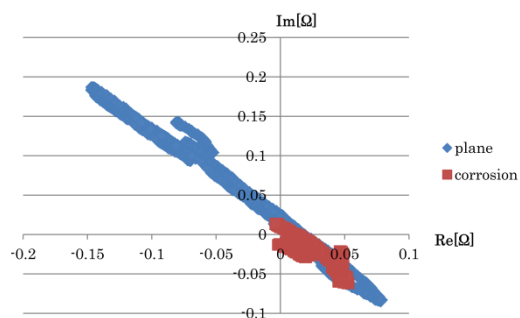


図-2. 2. 156 2 データの比較 (左から中央)

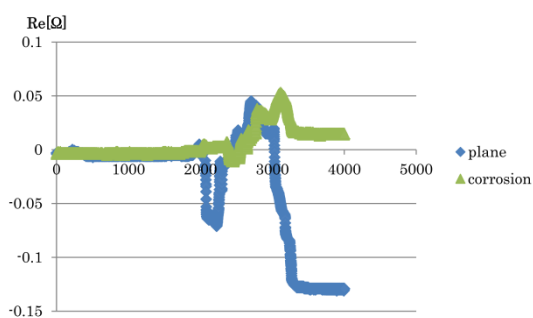


図-2. 2. 157 2 データの比較 (中央から右 : Re)

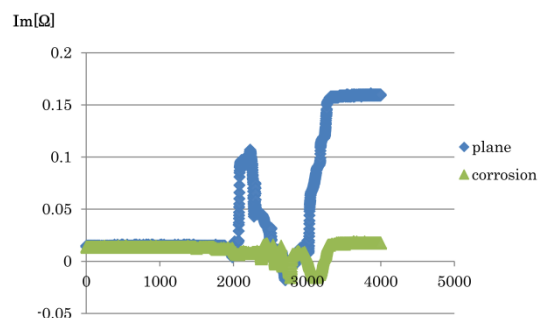


図-2. 2. 158 2 データの比較 (中央から右 : Im)

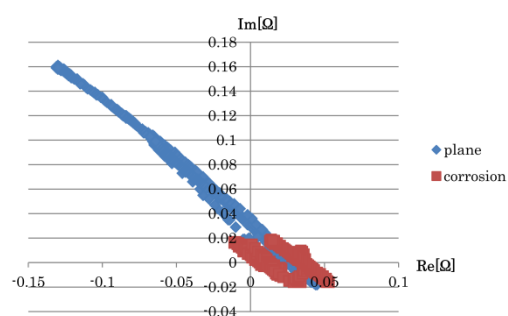


図-2. 2. 159 2 データの比較 (中央から右)

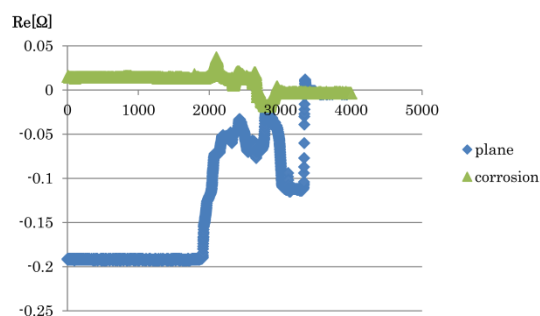


図-2. 2. 160 2 データの比較 (右から中央 : Re)

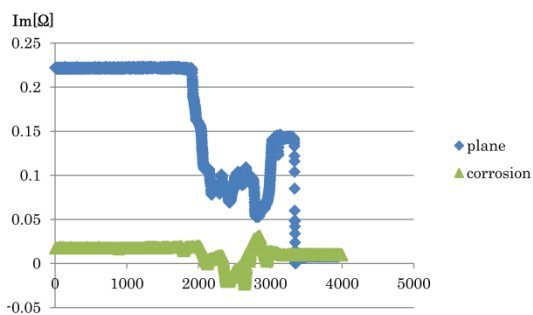


図-2. 2. 161 2 データの比較 (右から中央 : Im)

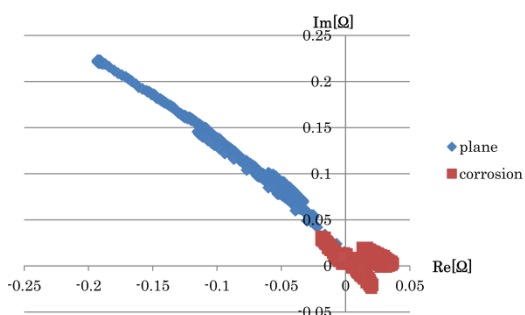


図-2. 2. 162 2 データの比較 (右から中央)

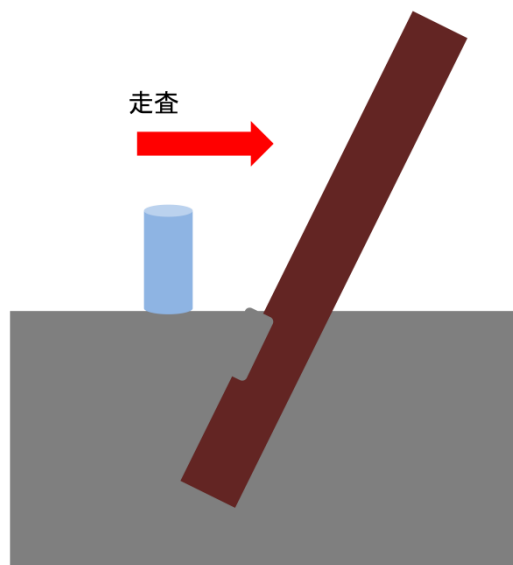


図-2. 2. 163 垂直に走査させる場合



図-2. 2. 164 実験の様子



図-2. 2. 165 10 mmプラスチック板の上での探傷の様子

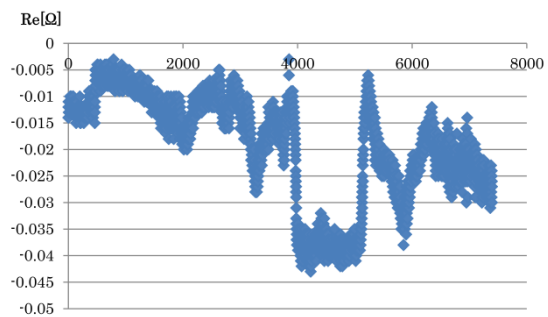


図-2. 2. 166 実験結果 (Re)

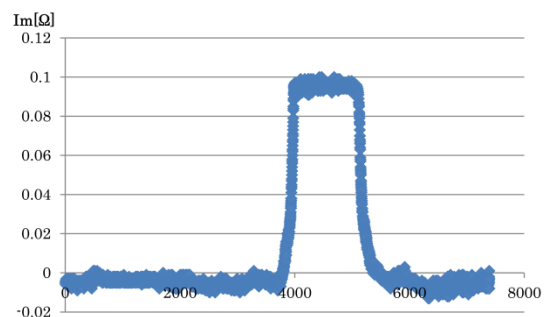


図-2. 2. 167 実験結果 (Im)

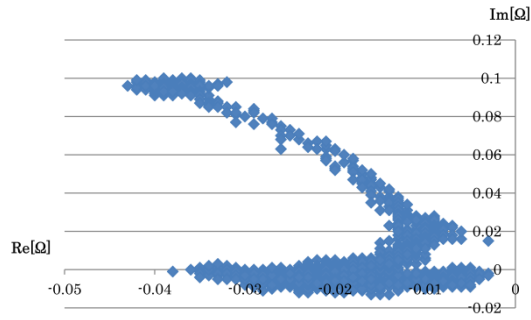


図-2. 2. 168 実験結果

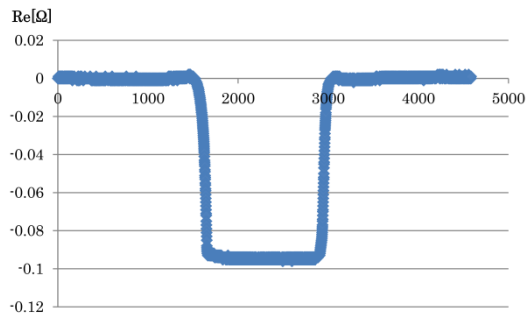


図-2. 2. 169 10 mm リフトオフ実験結果 (Re)

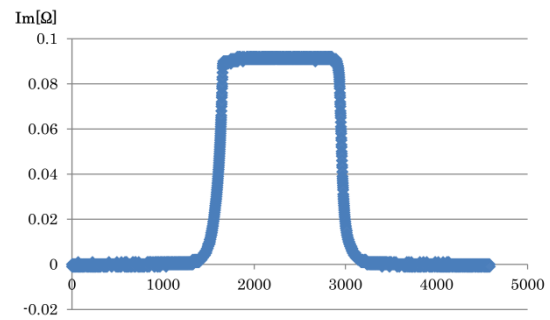


図-2. 2. 170 10 mm リフトオフ実験結果 (Im)

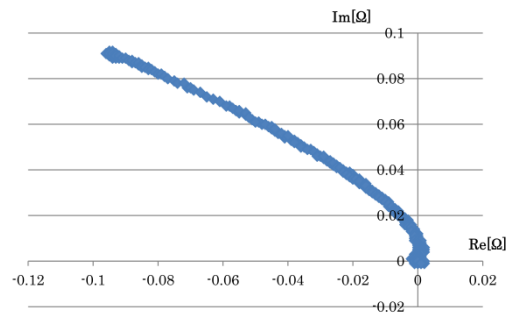


図-2. 2. 171 10 mm リフトオフ実験結果

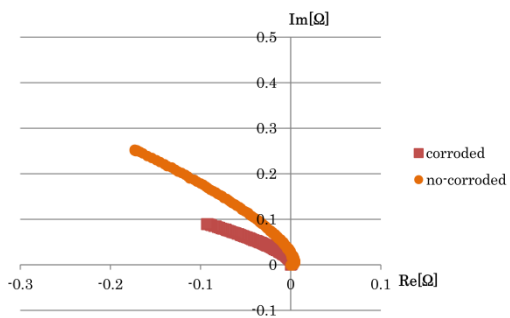


図-2. 2. 172 比較データ (プラスチック上)

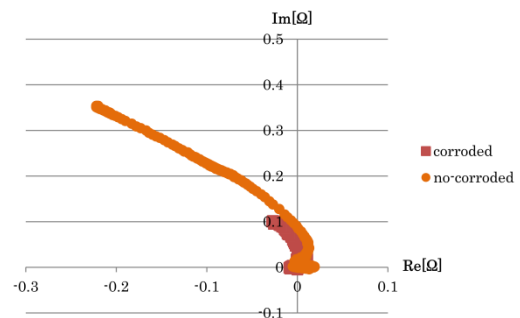


図-2. 2. 173 比較データ (コンクリート上)

2.2.21 実部材を対象とした渦流探傷試験—まとめ

実部材を対象とした渦流探傷試験のまとめを以下に示す。

- 1) 平板における腐食損傷検出において、フランジから離れた領域では腐食損傷によるインピーダンス値の変化を検知することに成功した。
- 2) 探傷領域に対し垂直に探傷する手法により、腐食が見られない部分と比較することで、腐食の有無を検知することに成功した。
- 3) 2の手法に加え、腐食が発生している可能性の高い箇所には探傷領域に対し平行に走査して探傷を行うことにより、より精密な腐食の位置検出が可能になることが期待される。

2.2.22 まとめ

2.2 章では、目視点検困難な鋼部材コンクリート埋込部を対象として、渦流探傷により腐食損傷を検出する手法について検討した。まず基礎解析により円柱形プローブを用いた渦流探傷法の性質を確認した。更にコンクリート埋め込み部の腐食損傷を対象とした解析を行い、探傷に最適な条件を提案した。基礎的実験においては、スリット状欠陥の損傷形状の同定を試みるとともに、腐食損傷検出に適したコイルの条件を提案した。更に対象とした試験体での探傷実験を行い、コンクリート埋め込み部における腐食損傷検出を行い、検出に適した探傷条件を提案した。

2.2 章の結論を以下に示す。

- 1) 数値シミュレーションにより、コンクリート深さが、損傷深さの変化によるインピーダンス値の軌跡に影響を与えることを確認した。
- 2) 数値シミュレーションにより、浸透深さの違いから、周波数を変化させることで損傷深さを得ることができることを確認した。
- 3) 数値シミュレーションにより、コンクリート埋め込み部の損傷において、腐食損傷幅が変化するとインピーダンス値が大きく変化すること、また腐食損傷深さが変化するとインピーダンス位相が変化することが明らかになった。
- 4) 数値シミュレーションにより、コンクリート埋め込み部においても、周波数の変化により損傷深さを得ることが可能であることが明らかになった。
- 5) 実験により、アクチュエータを使用したプローブ走査補助器具、及びデータのドリフト処理により、平板のスリット状欠陥の形状を実験より正確に得ることに成功した。
- 6) 実験により、励磁プローブに対し複数のデータ取得プローブを用いて探傷を行うことで、欠陥位置を正確に検知できる手法を提示した。
- 7) 実験により、腐食損傷に関して、23mm のプローブ径でかつ周波数 10kHz において検知しやすいことが明らかになった。
- 8) 実験により、基礎実験から得られた条件を用いてコンクリート埋め込み部の探傷実験を行い、コンクリート内部の腐食検出の可能性を提示した。
- 9) 実験により、探傷領域に対し垂直方向から探傷を行うことで、正確な腐食損傷位置の同定が可能であることを示した。

以上より、渦流探傷法を用いてコンクリート埋め込み部の腐食損傷の位置同定が可能になった。

2.3 超音波フェーズドアレイによる減肉状況把握

2.3.1. 研究の対象

長期間の供用を要求される土木構造物にとって、損傷レベルを非破壊検査によって評価していくことは、公共性を担う土木工学の重要な役割のひとつである。一方、橋梁上部構造の損傷による架け替えにおいて、腐食による架け替えが全体の 26%にも上っている⁹⁾。そのため、腐食の非破壊検査による損傷の早期発見は不可欠なものである。

本研究で適用する Phased Array は、その特徴から機械的操作や欠陥の位置や形状に合わせた探触子を選定する必要が少なくなるため、その探傷精度の信頼性の改善が期待できる。Linear Phased Array では一方向に走査するつまり一方向の機械的走査することにより三次元的画像を構成することができる。しかし、より精度よく測定するためにはさらに機械的走査をより少なくすることが求められる。そこで Planar Phased Array が開発された。これにより、三次元空間内の任意の点に対して三次元的な超音波の送受信を行なうことが可能となり、板状の試験体に人工的に設けた面状欠陥を 3 次元的に検出および画像化することに成功した。

これらを踏まえると、本研究の対象とする腐食は面的に存在しており、三次元的に複雑な形状であることがわかる。また、実構造物において腐食する可能性のある箇所は限られており、そのため比較的狭い範囲で正確に腐食減厚を探傷することが必要となる。更に、日本工業規格(JIS)では Phased Array システムを使用した効率化がなされていないとともに、超音波の問題としては Phased Array の有効な三次元的可視化が提案されていない。つまり、超音波探傷の効率化、Phased Array の三次元画像化手法および内部欠陥の検出の必要性がある。

2.3.2. 研究の目的

本研究では、Linear Phased Array を用いて腐食面の欠陥形状を考慮して超音波探傷を行うことによって、三次元的損傷の検出が行える超音波探傷手法を構築すると共に、平均的な腐食減厚を測定する手法を構築する。本年度は、特に、これらの三次元画像化手法について高度化することを目指した。

2.3.3. 既往の研究のまとめ

1) 超音波探傷による溶接欠陥と疲労亀裂の評価

超音波探傷では、欠陥の存在・位置・寸法・形状を正確に評価することが求められており、探傷精度の向上を目的とした数多くの研究が行われてきた。藤盛ら¹⁰⁾は、6dB ドロップ法をはじめとした欠陥推定方法をいくつか提案し、それらを細かく分類した。加藤ら¹¹⁾は、端部ピークエコー法が表面亀裂や部分溶込み溶接の施工管理に有用であることを示し、小野沢ら¹²⁾は欠陥面の粗さ、方向性による影響を補正した方法を提案している。石井ら¹³⁾は、超音波斜角探傷による溶接欠陥高さの測定方法について、一探触子法、二探触子法、端部エコー法、また、探触子の種類、波の種類について、各種の方法を統計的にまとめている。名取¹⁴⁾らは、欠陥形状推定方法に対し、我が国における統一された規格整備の必要性から探傷方法や推定手順についてまとめている。さらに、三木ら¹⁵⁾、白旗

ら¹⁶⁾¹⁷⁾は、面状欠陥を見落とさないための探傷条件として、周波数 2MHz 程度、入射角 65 度程度、探傷した全波形を記録することを提案した。

以上のような探傷法による探傷精度向上に関する研究の他にも、取得波形の処理による探傷精度の向上に関して研究が行われてきた。奥山ら¹⁸⁾は最大エントロピー法を導入したデコンボリューション処理により、ノッチの幅を正確に推定している。デコンボリューション処理とは送信波形を参照することにより受信波形をインパルス状の波に近づける処理である。高橋ら¹⁹⁾は回折トモグラフィを超音波に適用している。トモグラフィは医学分野で X 線にて用いられる再構成法である。

劉ら²⁰⁾²¹⁾は端部エコーに着目し、数値シミュレーションと実験により端部エコーの発生メカニズムや端部エコーの特性と欠陥先端形状との関係を明らかにしている。また、山口²²⁾らは、疲労亀裂の開閉挙動によって亀裂先端からの端部エコーの高さが変化する現象に着目し、疲労亀裂と溶接欠陥とを分離する手法を提案した。

2) 超音波探傷の自動化

詳細な超音波探傷結果を得るためには、数多くのデータを取得しなければならないことは上述したとおりである。また、接触探触子では接触圧や媒質の厚さによってもエコーにばらつきが生じるため、探傷精度は低下する。水浸探触子を用いる水浸法の場合ではこのような不具合は生じないが、既設構造物や大きな部材への適用は困難である。

そこで試験時間の短縮、探傷精度の向上の為に超音波探傷を自動化することが重要となる。松本ら²³⁾は超音波自動探傷装置による自動探傷を鋼製橋脚の現場溶接部に対し実用化した。土屋ら²⁴⁾は全波形記録型の自動探傷装置を開発し、問題とされていた再現性、検出性を改善している。また、三木ら²⁵⁾は、現在実用されている探傷システムの性能を確認し、検出率は板厚に大きく依存すること、隣接傷も考慮し自動探傷システムを改善する必要があることを示している。

このように自動探傷装置による超音波探傷が実用化されているが、この方法は探触子を走査するので、媒質の厚さによる誤差を含み、時間も要する。これに対し、走査を行わず多くのデータを取得する方法としてタンデムアレイ探触子を使用する研究も行われている。アレイ探触子とは同じ特性を持つ複数の探触子を配置し一体化したものであり、探触子を同時に扱うことにより走査と同じ効果を得るものである。三木・白旗ら²⁶⁾は、送受信を切り替えられる斜角探触子 10 個を一行に配置した 10 連タンデムアレイ探触子を提案し、走査なしに 100 通り（送信 10 通り×受信 10 通り）のデータを取得し画像を再構成することに成功した。また、出野ら²⁷⁾は斜角探触子を縦に 5 個、横に 3 個配置したマルチタンデムアレイ探触子を提案し、走査なしに 225 通り（送信 15 通り×受信 15 通り）の三次元的に反射するエコーを取得し三次元的な画像再構成を可能とした。高橋ら²⁸⁾は垂直探触子を縦に 4 個、横に 4 個配置したピッチキャッチタンデムアレイ探触子を開発し、同様に 256 通りのデータを走査なしに取得し、隅角部の未溶着部における溶接欠陥の三次元的な画像再構成に成功した。

3) 欠陥画像の再構築法

従来、超音波探傷の画像表示方法は A-scan, B-scan, C-scan が用いられてきた。これら B-scan および C-scan は瀬戸大橋の自動超音波探傷システムに導入され、欠陥形状の判定に採用された²⁹⁾。B-scan・C-scan の導入により、記録性および客観性は改善されたが、破壊力学を用いて鋼構造物の疲労寿命や破壊強度を評価することを考慮に入れると、精度に関しては十分とは言えない。また、これらの手法は超音波の伝播を線と仮定しているのに対し、実現象において超音波は広がりを持つことから、近年では開口合成の手法を超音波探傷に用いることが試みられている。開口合成法とは、反射源からのエコー高さを伝播時間と探触子位置を考慮しながら重ね合わせることで欠陥画像を再構築する手法である。

三木・白旗ら²⁶⁾、出野ら²⁷⁾はタンデムアレイ探触子を用いた開口合成を行い、一度に多くのデータを取得でき、探触子位置の管理が容易であるタンデムアレイ探触子を用いた場合、開口合成による欠陥画像の再構築が効果的であることを確認した。

4) Phased Array に関する研究

医療の分野では、実用化されている Phased Array 探触子とは、通常の探触子が一つの振動子で構成されているのに対し、Phased Array 探触子は独立に駆動できる複数の小さな振動子から構成されている。アレイ要素と呼ばれるこれらの振動子を電子的な制御により適当な時間差をつけて駆動させれば、様々な方向や位置に超音波を放射することができる。これは、瞬時に広範囲をカバーした探傷が可能であることを意味し、非常に効率的である。

Phased Array 探触子では、各アレイ要素から発生する互いに位相差を持った波動を重ね合わせることで様々な入射ビームを形成する。そのため、どのような入射ビームが得られるかは波動伝播問題として解析することができる。Wooh ら³⁰⁾はアレイ探触子からの波動場を線波源からの円筒波の重ね合わせとして解析し、グレーティングローブの発生条件やアレイ要素の数および配置間隔が入射ビーム幅に与える影響などを調べている。また、Cardone ら³¹⁾は、アレイ要素の駆動方法を最適化することで、ビーム幅を絞ることや望んだビームパターンに近づけることができることを示している。藤原ら³²⁾は固体中を伝播する縦波を利用した Phased Array 探触子を対象とし、数値シミュレーションによりその入射ビーム形成メカニズムについて調べ、探触子の設計変数を決定する手法を提案した。Narongsak ら³³⁾は、振動子を 1 次元的に配置した Phased Array 探触子を開発し、実際に鋼材に適用させ、欠陥を画像化することでその有効性を示した。平林³⁴⁾は Phased Array 探触子を複数個用いて、受信側探触子に指向性が見られることを検証し、送信と受信を分けて探傷してより高精度な欠陥の検出および形状の画像化をすることで有効性を示した。

5) 超音波探傷の 3 次元化

上記のような探傷機材では、2 次元平面内に超音波を送信することはできても、3 次元空間内の任

意の点に超音波を送信することは不可能である。そこで、勝山³⁵⁾は 2 次元的に振動子を配置した Planer Phased Array 探触子を開発し、小さな人工欠陥の位置および形状を詳細に画像化することで有効性を示した。また、玉井³⁶⁾は、鋼材底面に超音波を鏡面反射させる探傷経路を提案し、2 次元的に振動子を配置した Planer Phased Array 探触子を用いて、面状の人工欠陥の 3 次元的な画像化を行なった。東³⁷⁾は、Planer Phased Array 探触子を複数個用いて、送受信を別々の探触子で行い、人工面状欠陥の 3 次元形状を高精度で画像化することを可能とした。大西³⁸⁾は、Phased Array 探触子を用いてある程度進展した亀裂を精度よく探傷することを可能とした。窪田³⁹⁾は、各 Phased Array 探触子において最も効果的な欠陥探傷方法を提案し、それらを用いた高精度な三次元画像化を可能にした。

6) 非破壊検査による腐食探傷

今回対象とする腐食損傷の非破壊検査による測定に関しては、従来様々な研究が行われてきた。櫛田ら⁴⁰⁾は、RC 高架橋で発生したコンクリートの浮き箇所と健全箇所の熱容量の違いによる温度差を利用し、赤外線カメラを用いた「熱画像による高架橋コンクリート剥離検知手法」を開発した。そして、高架橋の通常目視検査及び至近からの打音検査で確認された浮き箇所について赤外線カメラで検知できること、目視検査では確認できない鉄筋の腐食による浮き箇所についても、赤外線カメラで概ね検知できることを示した。小川ら⁴¹⁾は、吊橋ハンガーロープの腐食度評価として、全磁束法を改良し、ある断面の腐食量の絶対値を広範囲で評価できるようになった。名取ら⁴²⁾は、腐食による鋼道路橋損傷の事例を収集整理し、部材の片側から裏面の腐食を検知する非破壊検査として、超音波探傷による板厚計測について検討し、有効な手段であることを確認した。

2.3.4 超音波探傷システム

本章では、本研究に適用した超音波探傷システムについて紹介するとともに、本研究に用いた三次元的画像化手法について説明する。まず、超音波探傷に用いる機器および Phased Array 超音波探触子の概要・特性について述べる。次に、Phased Array に用いる画像化方法を三段階に分けて説明し、本研究結果に用いた画像化手法について説明する。

ここでは、本研究に用いた超音波探傷システムを紹介して、それぞれについて使用した機器の説明、使用した超音波探触子および特性について述べる。

1) Phased Array システム

超音波探傷に用いた Phased Array システムを図-2.3.1 に示す。このシステムは、超音波探触子である各 Phased Array(Phased Array の種類・概要および特性は、2-3-3 の 4)、5)で言及)と、探触子に適切な遅延時間でパルスを送受信するパルスジェネレータのオリンパス製 TomoScan FOCUS LT、探傷条件を設定して適切な遅延時間・探傷角度等を計算するとともに、それをパルスジェネレータに送信・制御して、A-Scan の波形データを取得してその得られた波形を分析する PC から成り立っている。

まず本研究で用いたパルスジェネレータについて詳しく説明すると、送受信とも最大 64 の振動素子を同時に振動させて図-2.3.1 のように 64 個の波形を合成して一つの波形を得ることができ、適用できる遅延時間は送受信共に 1nsec ステップとなっている。

次に本研究で用いた PC について詳しく説明すると、送信・受信の遅延時間・探傷方向(角度)はもちろんのこと後に述べる三次元画像化については、すべて PC にインストールしてある MATLAB にてプログラミングを行うことで計算および波形処理を行っている。また、パルスジェネレータの制御はオリンパス製 TomoView を用いて、先に述べた MATLAB で作成した遅延時間・探傷方向(角度)のファイルを読み込ませて探傷を行い、その後全波形の A-Scan データを出力させた。

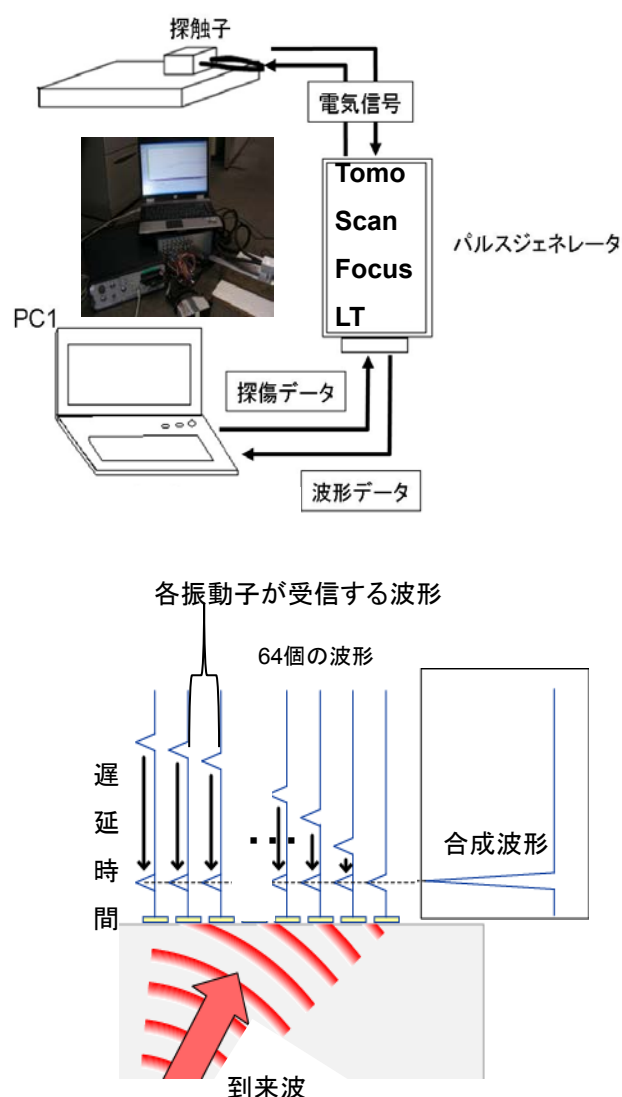


図-2.3.1 Phased Array探傷システム（上）と
64個の受信波形を1つの波形に変換する
概念図（下）

ここで、Phased Array システムを用いて放射できる波のパターンの代表例を、図-2.3.2・図-2.3.3・図-2.3.4 に示す。それぞれの図について説明すると、図-2.3.2 では等間隔に並んでいる振動子に対して同時にパルスを送信した際の図であり、探触子からは試験面に対して垂直な波が放射されており、図-2.3.3 では振動子に対して線形な遅延時間を与えたパルスを送信した際の図であり、任意の方向に超音波の波を放射している。これら 2 つの放射パターンは、方向性のある波を送信するため **Steering** と呼ばれている。この手法により Phased Array 探触子は、任意の斜角を持つ 1 つの斜角探触子と見なすことができる。一方で図-2.3.4 では試験体の任意の位置からそれぞれの振動子までの距離を考慮することで、それぞれの振動子と任意の位置までの距離に応じた遅延時間を与えたパルスを各振動子に送信した図である。この放射パターンは、任意の点に対して超音波を収束させることができることから、**Focusing** と呼ばれている。以下の説明では、**Focusing** を利用した場合のみに限定して説明を行う。

2) Linear Phased Array

図-2.3.5 に外観を示すように、直線状に 64 個の振動子を等間隔に配置したものである。この探触子は、振動子の幅が 0.55mm でありそれを振動子の中心間隔 0.59mm となるように設計されている。ここで、この探触子の代表的な振動子特性を図-2.3.6 に示す。図の左列が受信波形の時刻暦であり、右列がその波の FFT 結果である。この結果からわかるように、この探触子の中心周波数は約 5MHz であり、波長は 1.18mm となる。

尚、Phased Array のもう一つの種類である Planer Phased Array については、今回は用いないので割愛する。

超音波探傷をする際、ビーム路程に応じてエコー高さが減衰する (図-2.3.7)。そこで、探傷前にビーム路程に応じてどの程度エコー高さが戻ってくるのかキャリブレーションを行う必要がある。本来、Phased Array の場合は任意のビーム角度に Focusing できるため、ビーム角度によってフォー

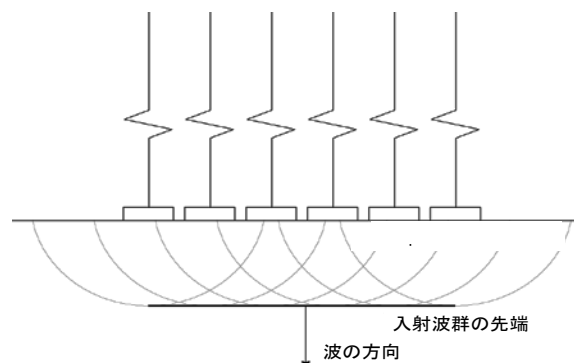


図-2.3.2 垂直方向への超音波の送信（ステアリング）

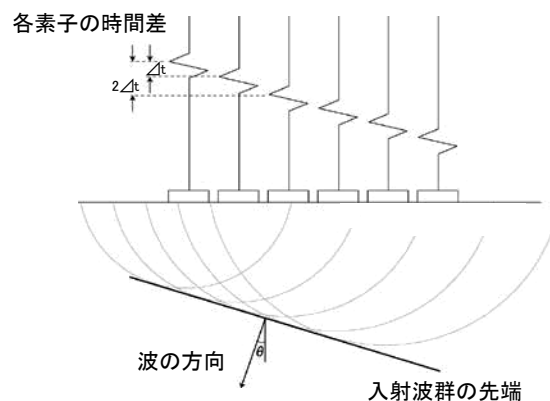


図-2.3.3 任意方向への超音波の送信（ステアリング）

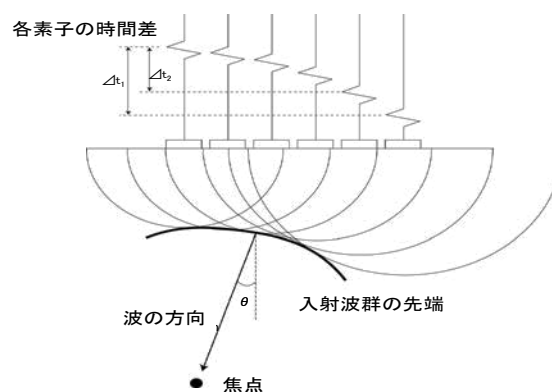


図-2.3.4 任意位置への超音波の送信（フォーカシング）

カスできる割合が変化する可能性がある（図-2.3.8）。そのため、ビーム路程とエコー高さの関係およびビーム角度とエコー高さの関係の二つを考慮してキャリブレーションを行う必要がある。しかし、今回の測定方法では、板厚測定により垂直探傷のみ行っているため、キャリブレーション方法として、図-2.3.9のような試験体を用いて垂直にキャリブレーションを取り、ビーム路程とエコー高さの関係を計算する方法を採用した。キャリブレーション結果は図-2.3.10に示す。このキャリブレーション結果を元に、DACを計算し、エコー高さの補正を行った。

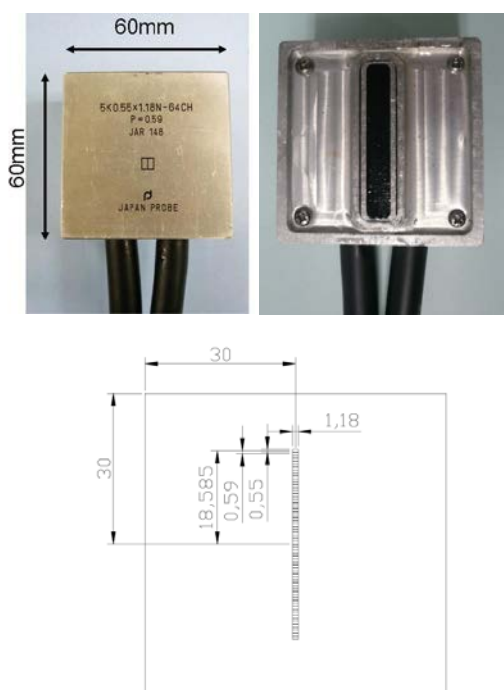


図-2.3.5 64ch Linear Phased Array

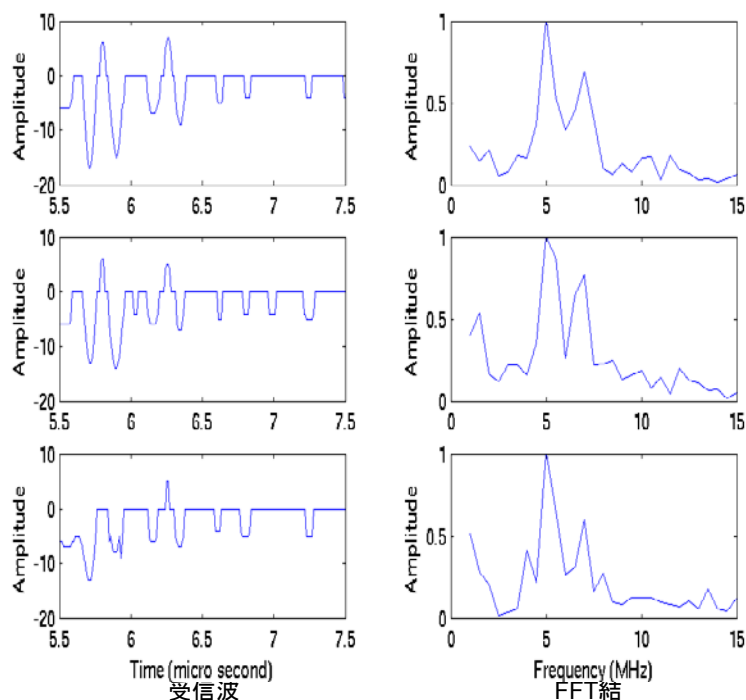


図-2.3.6 64ch Linear Phased Arrayの代表的な振動子特性

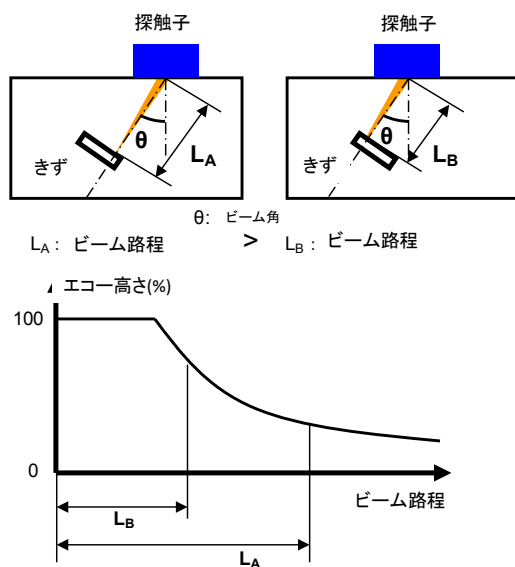


図-2.3.7 ビーム路程とエコー高さの関係

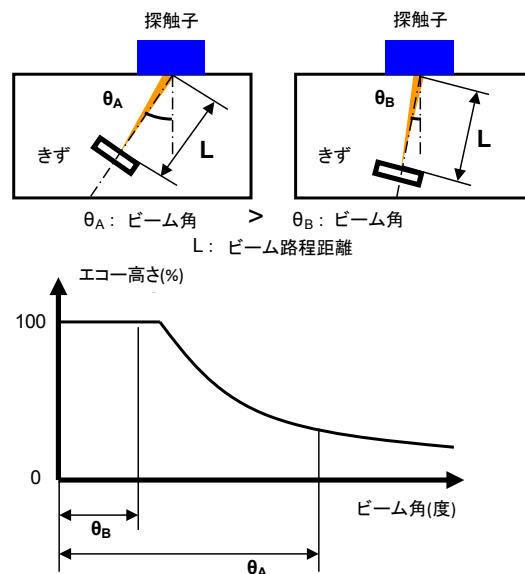


図-2.3.8 ビーム角度とエコー高さの関係

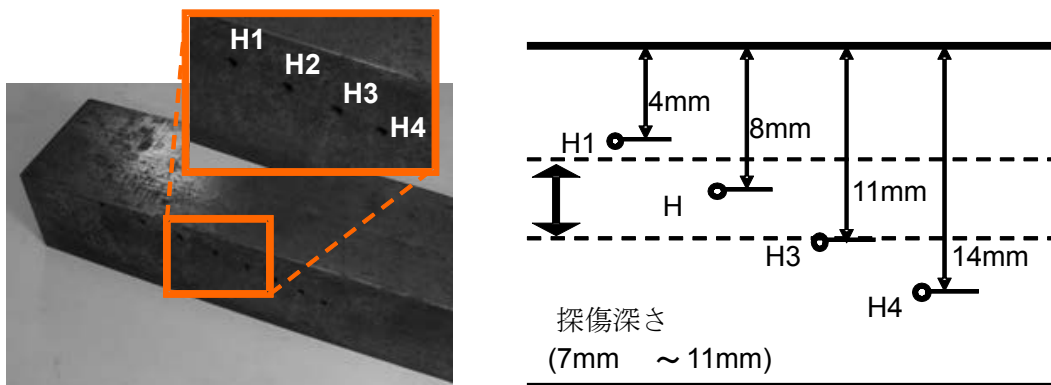


図-2.3.9 キャリブレーションに用いた試験片

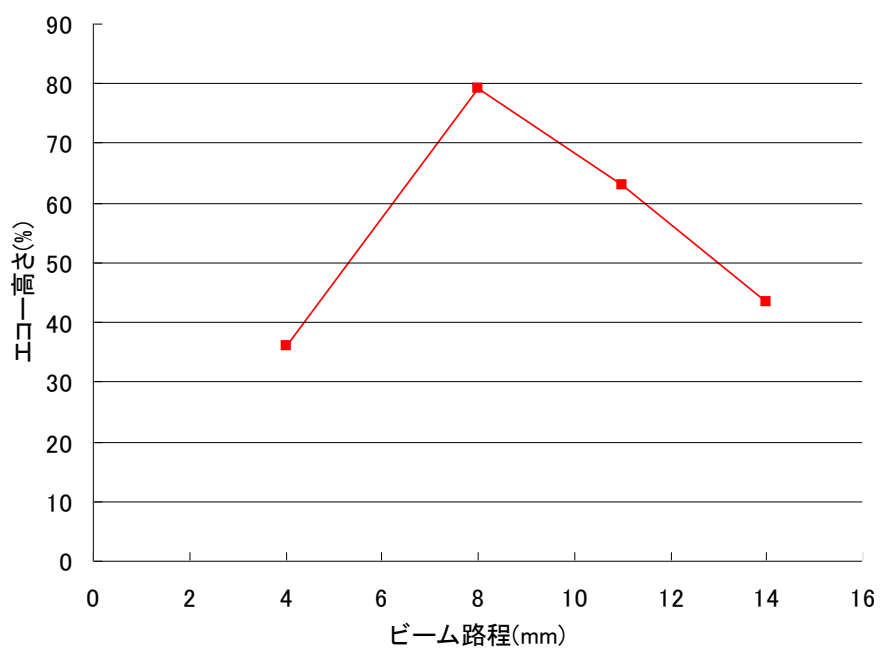


図-2.3.10 キャリブレーション結果

2.3.5 三次元的画像化手法

ここでは、Phased Array について三次元画像化手法を三段階に分けて説明する。初めに Phased Array の構成領域の概念および遅延時間算出方法について説明を行う。次に、探傷によって得られた時間とエコー高さの関係からそれぞれの格子点のエコー高さを抽出する手法について説明を行う。そして最後に、構成領域の格子点のエコー高さを三次元的画像にする手法について説明し、現在用いられている画像化手法と比較を行う。

,

1) Phased Array の構成領域設定と遅延時間計算手法

まず、図-2.3.11 のように試験体の探傷を行いたい領域を設定して、格子点間隔を定める。本研究では、格子点間隔を 0.58mm とした。格子点間隔の設定は、一般的に振動子波長の半分とされている。本研究で用いる振動子波長は 1.18mm であるので、格子点間隔の設定は妥当性があるといえる。尚、本研究では Linear Phased Array のみを用いているので、一回の探傷における構成領域は 2 次元となる。

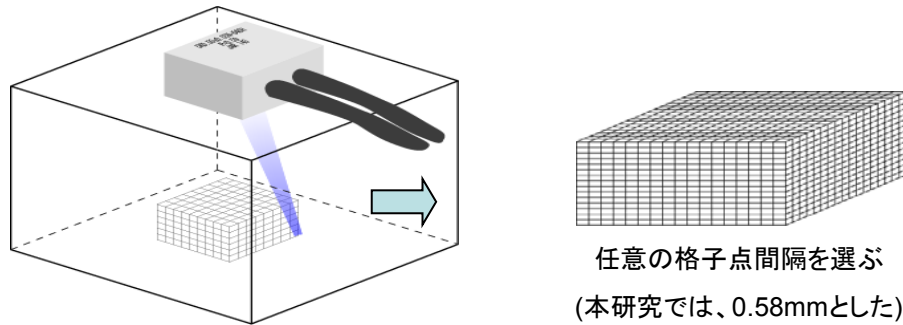


図-2.3.11 構成領域の設定

次に、各振動子から試験体内の探傷する任意の点つまり格子点までの距離を計算する。各振動子の座標を (X'_i, Y'_i, Z'_i) ($i=1$ to 64) として格子点を (X, Y, Z) とすると、求める距離 L'_i は次式で表される。ここで、 t は送信を意味する Transmitter の頭文字であり、受信を意味する Receiver の r と区別するためのものである。

$$L'_i = \sqrt{(X'_i - X)^2 + (Y'_i - Y)^2 + (Z'_i - Z)^2}$$

次に、その距離を鋼材中の超音波の伝播速度で除すことで、各振動子から格子点までの伝播時間を求める。

$$t'_i = \frac{L'_i}{v}$$

上式で算出された各振動子から格子点までの伝播時間のうち最大のものを $t'_{\max}$ として、次式によって各振動子に与える遅延時間を求めることができる。ただし、本研究で用いたパルスジェネレータは伝達時間とエコー高さの関係を得る場合、格子点までの伝播時間のうち最大のもの $t'_{\max}$ を振動子の中心から格子点までの伝播時間となるように計算され出力されるため、次に述べるエコー高さの抽

出においては、すべて振動子から格子点までの伝達時間を利用して計算を行っている。

$$\Delta t_i' = t_{\max}' - t_i'$$

また、受信の概念も同様であり、各変数の受信子の位置を (X_i', Y_i', Z_i') から (X_i'', Y_i'', Z_i'') に置き換えることで各受信子に与えるべき遅延時間を求めることができる。

ここまで述べたステップを格子点数繰り返し行い、それぞれの格子点における各振動子の遅延時間を計算する。

2) Phased Array のエコー高さ抽出手法

上記の方法で得られた遅延時間を利用して、格子点に **Focusing** して得られたエコー高さとビーム路程（伝播速度で除すことで伝達時間となる）の関係よりそれぞれの格子点のエコー高さを抽出する手法を説明する。以下にエコー抽出する手順を示し、具体的に説明が必要な箇所については、手順の後に示す。

<Ⅰ> 2-3-1 で述べた手法により振動子中心から格子点までの遅延時間を算出する。

<Ⅱ> キャリブレーションより得られた路程とエコー高さを利用して平面内で線形補間して路程および角度によってエコー高さの補正を行い、その高さによって DAC の値を計算する。

<Ⅲ> 探傷で得たエコー高さに DAC をかけて、格子点のエコー高さとする。

手順<Ⅲ>であるが、キャリブレーションについて説明したようにエコー高さは、ビーム路程とビーム角度によって変化する。したがって、キャリブレーションを利用して、線形近似することでエコー高さを算出して、ビーム路程に関係なく 100%のエコーが測定できるように DAC をかけた。以上の手法をすべての格子点で行うことで、格子点ごとのエコー高さを得た。

3) Phased Array の三次元画像化手法

ここでは、上記の手法で得られた格子点のエコー高さのデータを用いて本研究に使用した画像化手法を説明する。

まず一つ目は、図-2.3.12 に示すようなコンター図である。これは、医療の分野では、MRI(核磁気共鳴画像法)を利用するときに生体内の情報を画像化したものを目にするが、それと同様のように画像化したものである。本研究では、取得したバックエコー高さとビーム路程の関係を示し、コンター図としてまとめた。

そして二つ目は、プローブ位置と最大エコー高さを得る時のビーム路程の関係をプロットし、面的に凹凸を示した 3 次元図である。

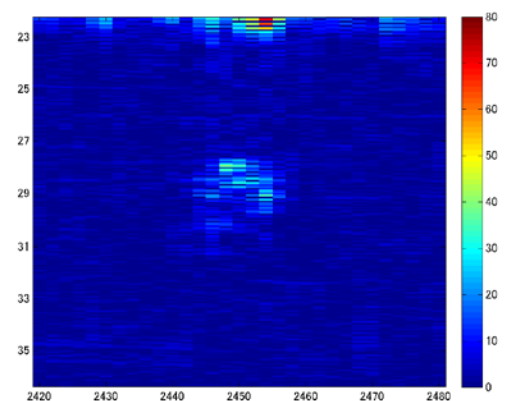


図-2.3.12 コンター図

2.3.6 まとめ（超音波探傷システムおよび三次元画像化手法）

本章では、本研究に用いた超音波探傷システムについて紹介し、本研究に用いた三次元的画像化手

法について説明した。まず超音波探傷に用いる機器および Phased Array 超音波探触子の概要・特性について紹介し、キャリブレーションを行った。次に、Phased Array に用いる画像化方法を三段階に分けて説明し、コンター図、及び面的凹凸を示した図による三次元的画像化手法について説明した。

2.3.7 腐食損傷を対象とした超音波探傷

ここでは、腐食試験体を対象として 64ch Linear Phased Array を用いて超音波探傷を行い、超音波探傷によって腐食減厚を測定できる手法の確立を図る。実際に試験体に与えられた腐食損傷を、Linear Phased Array を用いていくつかの手法で超音波探傷を行い、各種検討を行うとともに、腐食減厚を対象とした最適な測定手法について検討する。

2.3.8 探傷領域の選定

本研究で使用する試験体は、295mm 四方の図-2.3.13 に示す板試験体である。この試験体のうち、150mm×15mm の領域を探傷領域として設定した。尚、予めノギスによる平均板厚測定を 5mm 四方で行った結果、平均板厚は 8.48mm となった。

2.3.9 Linear Phased Array による超音波探傷

2.3.8 で述べた試験体について、Linear Phased Array による探傷を行う。通常の板厚測定の原理を応用し、測定を行った。腐食面は、凹凸がみられ、反射波が散乱することが考えられるので、バックエコー以外のノイズを除去し、かつ強いエコーを得ることを目的として、今回の測定を行った。

ここでは、図-2.3.14 に示すように 64ch のうちいくつかのグループに振動素子を分け、それぞれ垂直探傷を行い最も腐食減厚測定に適した探傷方法を提案する。素子数が多いほど、一度に探傷できる領域が広くとれるため、アレイの移動と設置の手間が減り、点検の効率化に寄与できる。よって現状の最大素子数を有する 64ch の Linear Array を適用した。

次に、フォーカス深さを変化させ、バックエコーの変化を測定する。その後、以上の結果をふまえ探傷を行い、最終的に腐食面の 3 次元化を行う。

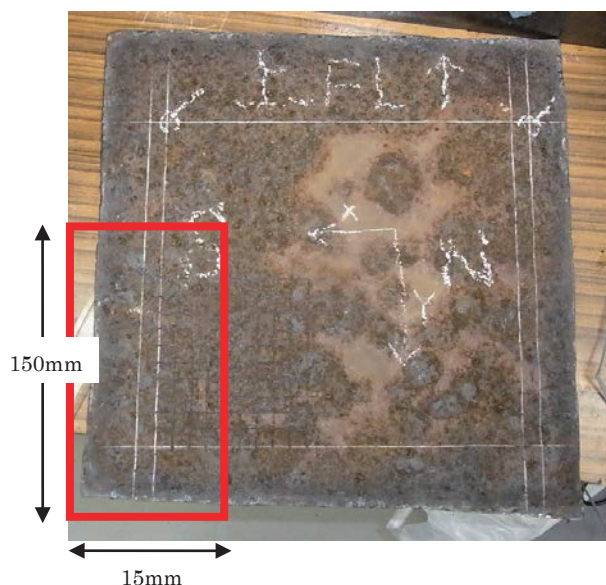


図-2.3.13 腐食試験体及び探傷領域

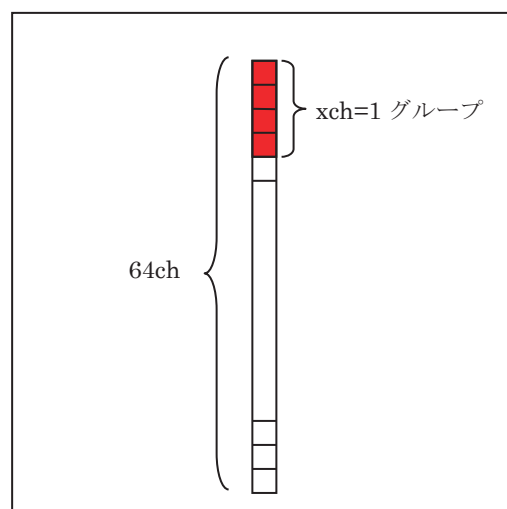


図-2.3.14 Linear Phased Array の
振動素子グループ分け

1) 探傷方法の選定

まず、Linear Phased Array の各振動素子をグループに分け、それぞれ探傷を行った結果から 16ch を 1 グループとし、垂直探傷を行うこととした。

2) フォーカス深さを变化させた時のバックエコーの変化

腐食面は凹凸があるため、通常の板厚測定と異なり、一定のフォーカス深さでは取得したいエコー高さが得られない可能性がある。そこで、プローブを定位置に設置し、フォーカス深さを 7mm から 11mm まで 0.1mm 毎に変化させ、その際のバックエコーの変化を測定した。そして、実験結果をコンター図及び最大エコー高さとビーム路程の関係で提示する。

まず、1mm 毎のコンター図を図-2.3.15 から図-2.3.19 に示す。また、Linear Phased Array の振動素子と平行に軸をとり、フォーカスを変化させた時の最大エコー高さを軸方向に 5mm 毎に計算し、図-2.3.20 から図-2.7.13 に示す。図-2.3.15 から図-2.3.19 より、いずれのフォーカス深さでもある程度のバックエコーは取得できていることが分かる。図-2.3.20 から図-2.3.25 を見ると、フォーカス深さによって最大エコー高さは、最大 20.0% の誤差があり、探傷の際にはフォーカス深さを変える必要があることが分かる。

以上より、探傷の際には、閾値を設けて一定のフォーカス深さで探傷する方法ではなく、各点でフォーカス深さを変え、最も強いバックエコーが返ってきたときのビーム路程を腐食板厚とする。

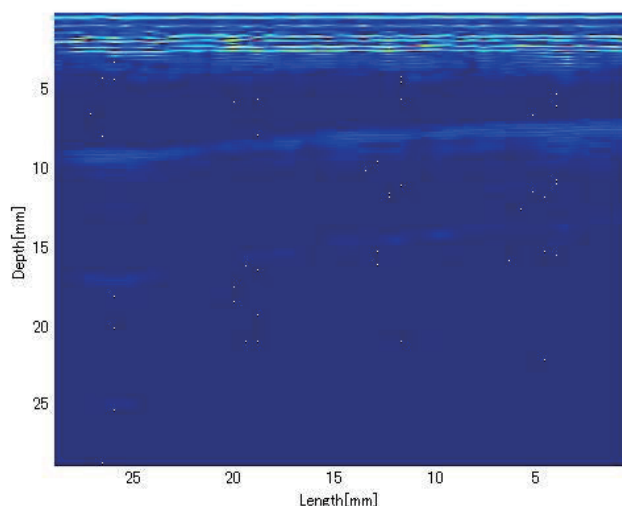


図-2.3.15 7mmfocus 時コンター図

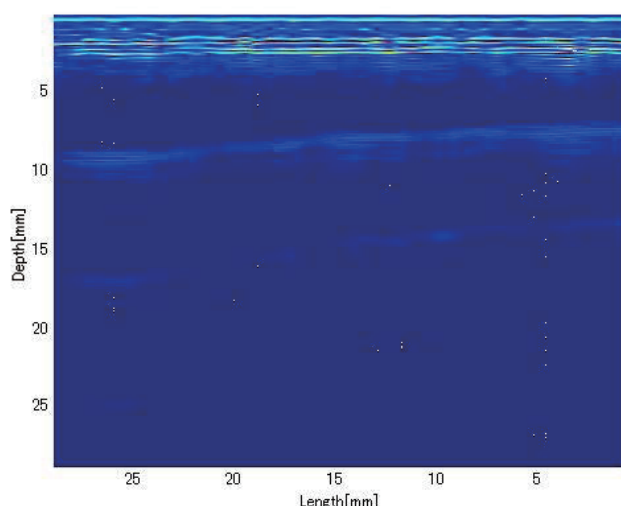


図-2.3.16 8mmfocus 時コンター図

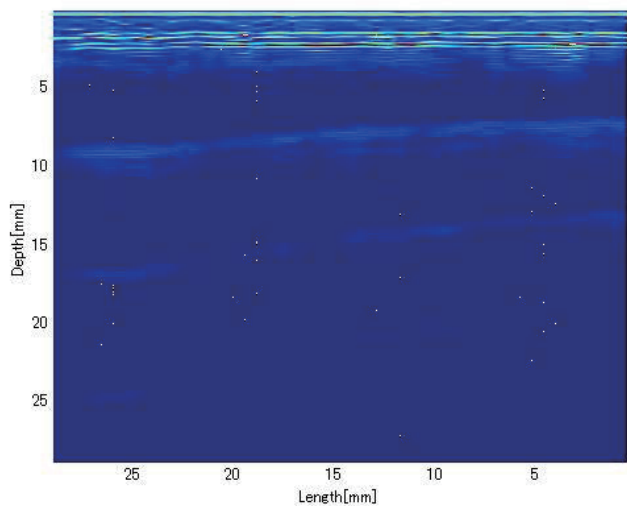


図-2.3.17 9mmfocus 時コンター図

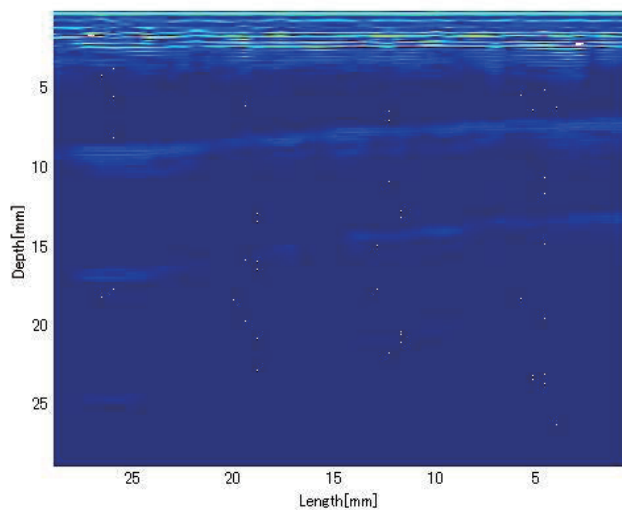


図-2.3.18 10mmfocus 時コンター図

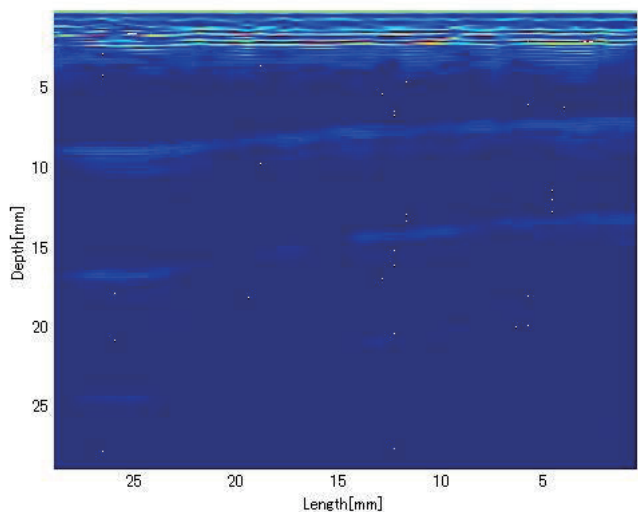


図-2.3.19 11mmfocus 時コンター図

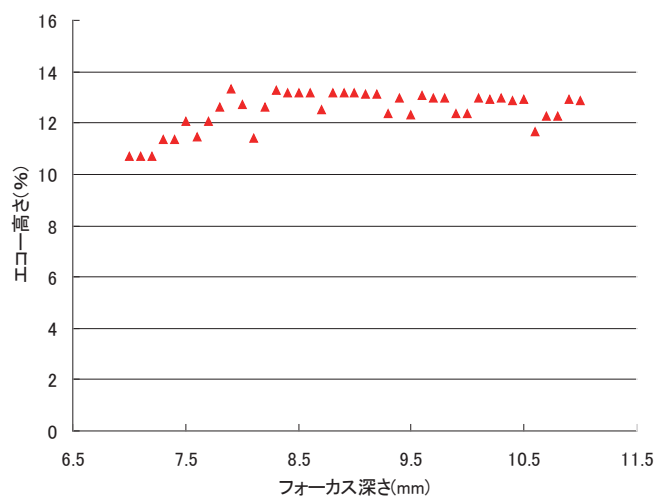


図-2.3.20 最大エコー高さと
フォーカス深さの関係(0mm)

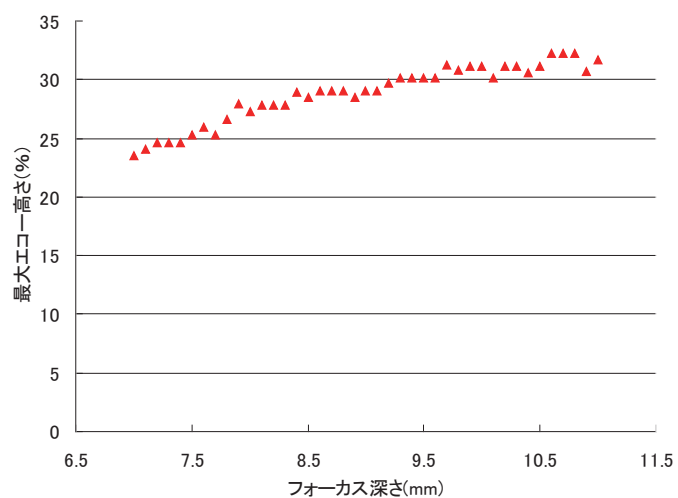


図-2.3.21 最大エコー高さと
フォーカス深さの関係(5mm)

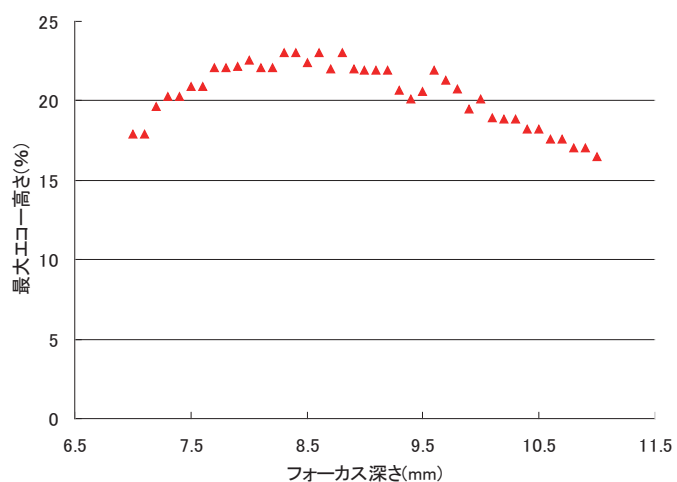


図-2.3.22 最大エコー高さと
フォーカス深さの関係(10mm)

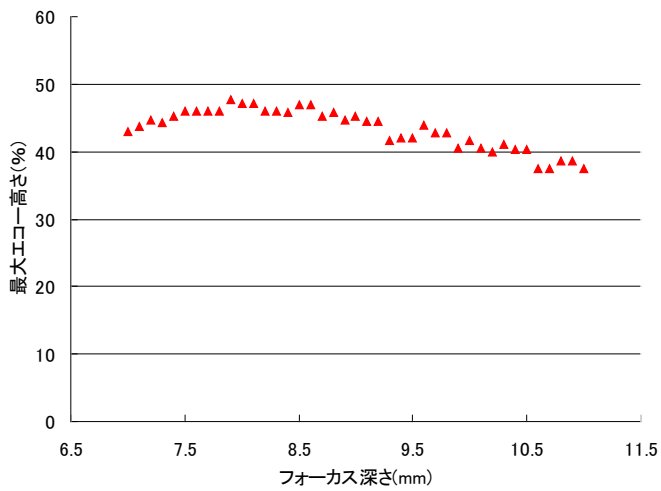


図-2. 2. 23 最大エコー高さと
フォーカス深さの関係 (15mm)

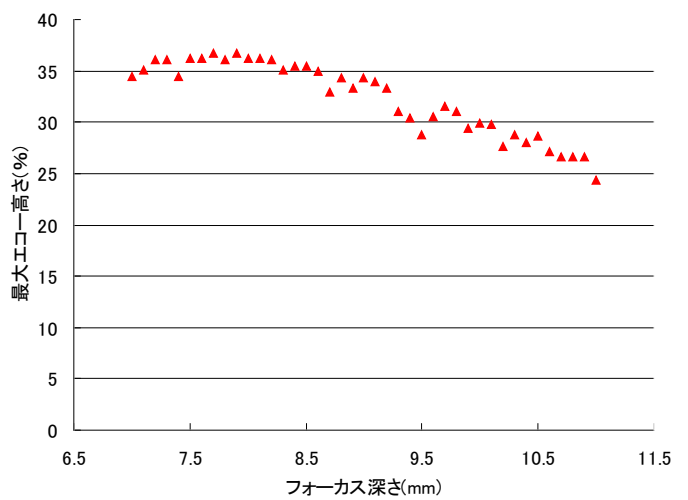


図-2. 3. 24 最大エコー高さと
フォーカス深さの関係 (20mm)

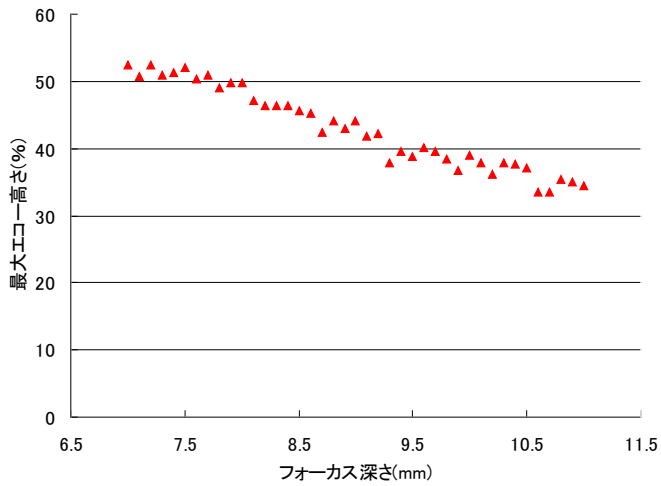


図-2. 3. 25 最大エコー高さと
フォーカス深さの関係 (25mm)

3) ラインフォーカスによる超音波探傷

前述した 1)、2)の結果を踏まえた上で、ラインフォーカスによる探傷を行う。探傷方法は以下の通りである。

1. 図-2.3.13 で示した探傷領域について、図-2.3.26 に示すように 3 本のラインで 2 次元的探傷を行う。
2. 図-2.3.27 に示すように、Linear Phased Array の全 64ch のうち、16ch を 1 グループとし、49 グループの波を垂直に出すことによって探傷を行う。
3. 各測定位置で、0.5mm 毎にフォーカス深さを変化させ、最も強いバックエコーが得られた時のビーム路程をその地点の腐食板厚とする。

また、得られた2次元探傷結果をy方向に平行に配置することで、3次元画像化した。得られた結果は図-2.3.28に示す。

また、探傷による平均板厚は8.18mmとなった。実平均板厚との誤差は3.5%であり、この誤差は各送信波の散乱に因ると考えられる。

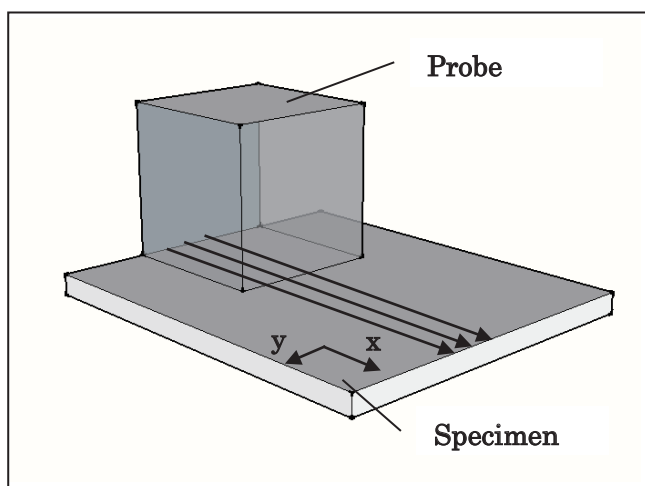


図-2.3.26 走査方向

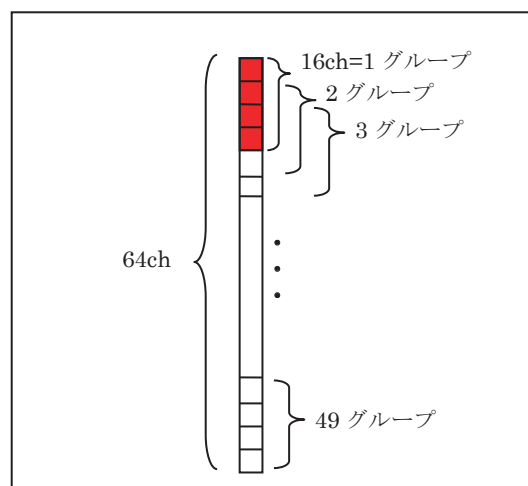


図-2.3.27 グループの設定

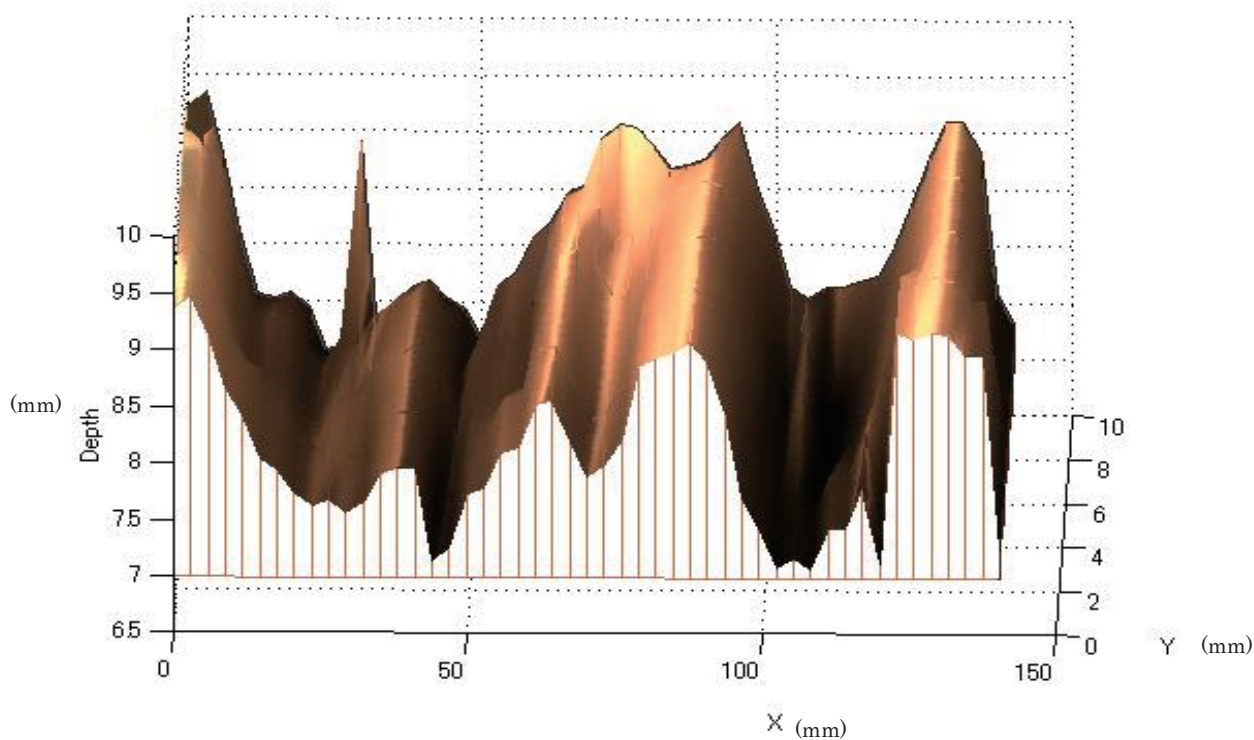


図-2.3.28 腐食面の3次元画像

2.3.10 ステアリングを利用したバックエコーの検出高度化

腐食損傷を受けた鋼板は、表面が平面ではなく、場所により角度の異なる傾斜した表面となっている。そのため、バックエコーを垂直探傷する方法では、反射波を十分に捉えきれない可能性がある。そこで、本研究では、Linear Phased Array のもうひとつの特徴であるステアリングを利用して、傾斜した表面に対応し、より精度良くバックエコーを捉えることを考えた（図-2.3.29）。

上記検討と同じく、腐食損傷を受けた橋梁から取り出した図-2.3.30 に示す供試体を対象として検討を行う。本研究では、供試体の両端部付近、中央の 3 断面で計測を行い、ノギスによる計測と求められた平均板厚を比較する（図-2.3.31）。

図-2.3.32 に垂直探傷（傾斜 0° ）した場合と $\pm 10^{\circ}$ ステアリングした場合のバックエコー強さについて比較する。傾斜 0° 、 $\pm 5^{\circ}$ 、 $\pm 15^{\circ}$ 等複数の角度でステアリングした際のバックエコーの最大値をプロットしたものが図-2.3.33 である。表面が欠損している場合、バックエコー強さが低下する傾向がある。図-2.3.34 が縦軸深さとしてバックエコー位置を表したものであり、場所場所で傾斜が変わっている状況が見て取れる。

供試体の 3 断面について、このような探傷方法で得た平均板厚と、ノギスにより得た平均板厚を比較したものを表-2.3.1 に示す。この表から分かるように、ステアリングにより、欠損による表面形状、表面傾斜に追随し、より精度良く板厚分布、損傷形状を取得することができている。2-3-9 の検討と比べても、誤差は 1% 程度以下と著しく向上している。

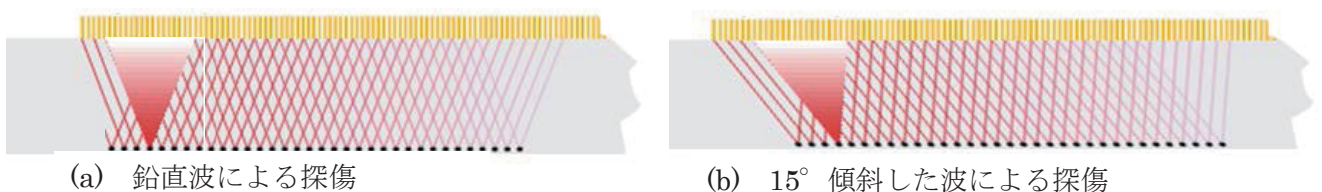


図-2.3.29 傾斜した波による探傷



図-2.3.30 対象とする腐食供試体

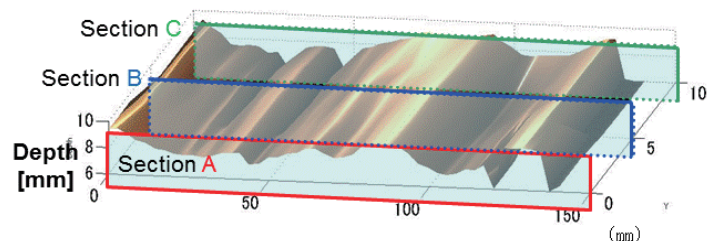
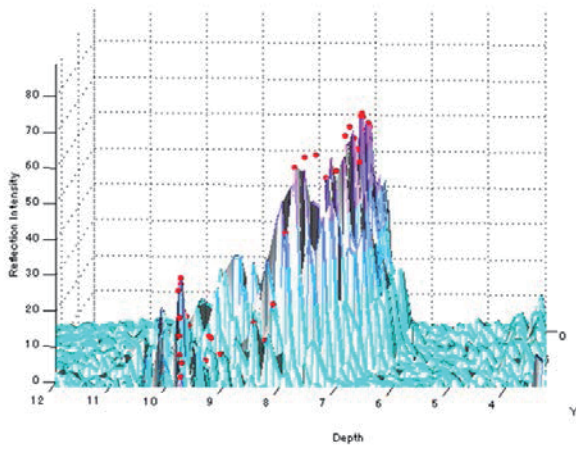
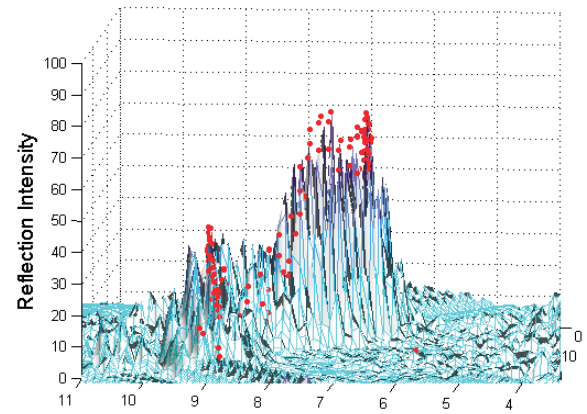


図-2.3.31 評価する断面



(a) 鉛直波による探傷



(b) $-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$
ステアリングさせた波による探傷

図-2.3.32 傾斜した波による探傷の結果例（バックエコー強さ）

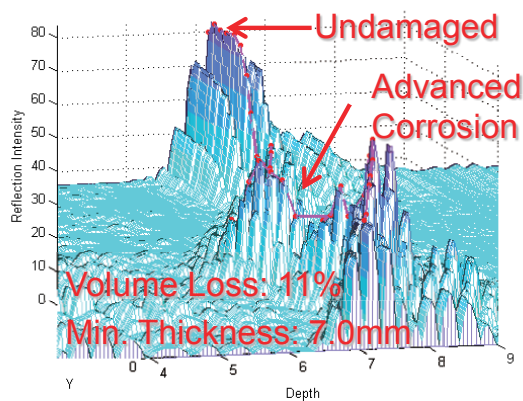


図-2.3.33 複数角度の波の結果を
組み合わせた探傷（バックエコー強さ）

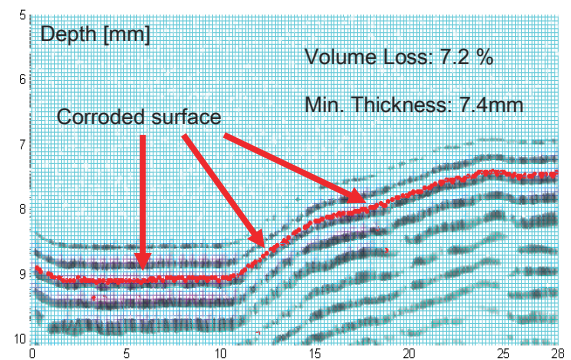


図-2.3.34 複数角度の波の
結果を組み合わせた探傷（板厚評価）

表-2.3.1 複数角度の波の結果を組み合わせた探傷の精度検討

Scanning Section	UT Linear Ph. Array Measurements [mm]	Vernier Caliper Measurements [mm]	Error
A	8.12	8.15	0.40%
B	8.05	7.95	1.20%
C	8	8.02	0.10%
Average	8.06	8.04	0.57%

2.3.11 各種探傷方法の比較検討と超音波探傷手法の結果

以上を踏まえ、以下のことが結果として得られた。

1. Linear Phased Array を用いてラインフォーカスにて探傷を行う場合、16ch を 1 グループとして波を送受信することで、最も効率的に腐食面を探傷できる。
2. フォーカス深さを変化させた場合、最大エコー高さで最大 20.0%の誤差がある。
3. Linear Phased Array 探触子のうち 16ch を 1 グループとし、0.5mm 毎のフォーカス深さのうち最大のバックエコーを取得した時のビーム路程を腐食板厚とすると、3.5%の誤差で腐食板厚を測定することができる。
4. ステアリングにより複数の角度で探傷し表面形状変化に追従する形で測定を行った場合、3. の場合よりもより精度が高まり、1%程度以下の誤差で平均板厚を求めることができる。

2.3.12 まとめ

2.3 章の成果を以下に示す。

・ Linear Phased Array を用いてラインフォーカスで腐食板厚測定を行う場合、以下の手法を用いると精度よく測定を行うことができる。

1. Linear Phased Array の 64ch のうち、16ch を 1 グループとし、49 グループの波で垂直に探傷を行う。
2. 0.5mm 毎にフォーカス深さを変化させ、最も強いバックエコーが得られた時のビーム路程をその地点の腐食板厚とする。
3. さらにステアリングによる複数角度の波による探傷を行うことにより、より精度よく腐食板厚を得ることができる。

・ Linear Phased Array で取得した 2 次元探傷結果を平行に配置し、補間することで、腐食面の 3 次元画像化ができる。

参考文献

- 1) 玉越 隆史, 大久保 雅憲, 市川 明広, 武田 達也: 橋梁の架け替えに関する調査結果、国土技術政策総合研究所資料, No.444, 2008
- 2) 国土交通省 : 鋼橋 (上部構造) の損傷事例、道路橋の重大損傷 —最近の事例—, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf, 2009
- 3) 三木 千壽, 鈴木 啓悟, 小野 潔, 柳沼 安俊: 疲労損傷の疑いのある橋梁の応力測定、土木学会論文集, Vol. 66, No. 3, 337-350, 2010
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 鋼橋編、2002
- 5) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧、2005.
- 6) 運輸省鉄道局、鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物, 2009.
- 7) 関森大介・宮崎文夫: 複数の光学マウスセンサを用いた移動ロボットのデッドレコニング, 計測自動制御学会論文集 Vol. 41, No. 10, 775/782 (2005)
- 8) 関森大介・宮崎文夫: 複数の光学マウスセンサ値とシンプルな俯瞰カメラ情報を用いた屋内移動ロボットの自己位置推定, 日本機械学会論文集 (C 編) 71 巻 712 号 (2005-12)
- 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 No. 668, 299-311, 2001
- 10) 藤盛 紀明: 鋼溶接部の超音波斜角探傷における欠陥寸法の推定方法について, 非破壊検査, Vol.21, No.12, pp.728-738, 1972/05.
- 11) 加藤 巧, 桜井 善茂, 村松 民久: 超音波探傷による欠陥高さの測定について, 非破壊検査, Vol.26, No.5, pp.320-323, 1977/05
- 12) 小野沢 元久, 石井 勇五郎: 超音波探傷による欠陥高さの測定実験 —有効ビーム幅法—, 非破壊検査, Vol.26, No.5, pp.224-230, 1977/05.
- 13) 石井 勇五郎, 藤盛 紀明: 超音波探傷斜角法による欠陥高さ測定方法概論, 非破壊検査, Vol.26, No.5, pp.309-315, 1977/05.
- 14) 名取 孝夫: 鋼溶接部の超音波探傷試験に傷の形状の推定に関する提案, 非破壊検査, Vol.40, No.10, pp.679-688, 1991/10.
- 15) 三木 千壽, 白旗 弘実, 塩崎 克: 厚板突合せ溶接部に存在する面状欠陥の超音波非破壊検査評価に対する基礎的検討, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.323-332, 1998/07.
- 16) 白旗 弘実, 三木 千壽: 突合せ溶接表面近傍に位置する面状欠陥検出のための超音波探傷斜角法, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.279-291, 1999/04.
- 17) 白旗 弘実, 三木 千壽: 超音波非破壊試験による面状欠陥検出精度向上の試み, 東工大土木工学科研究報告, No.59, 1999.
- 18) 奥山 裕一, 三木 千壽: ディコンボリューション処理による超音波探傷試験の時間分解能向上の試み, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp.77-83, 1997/01.
- 19) 高橋 政則, 三木 千壽, 劉 銘崇: 超音波回折トモグラフィの鋼部材の超音波探傷試験への適応の試み, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.93-99, 1994/07.

- 20) 劉 銘崇, 三木 千壽: 鋼構造部材を対象とした超音波探傷試験の高精度化に関する基礎的研究, 学位論文, 1995.
- 21) 劉 銘崇, 三木 千壽: シャープな欠陥からの超音波端部エコーの発生挙動とその特性, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.109-116, 1995/10.
- 22) 山口 亮太: 超音波探傷による溶接欠陥と疲労き裂の識別, 東京工業大学理工学研究科土木工学専攻修士論文, 2002/02
- 23) 松本 雅治, 南莊 敦, 杉山 守久: 鋼製橋脚現場溶接継手の超音波自動探傷検査, 橋梁と基礎, Vol.28, No.6, pp.25-27, 1994/06.
- 24) 土屋 憲一郎, 川畑 篤敬: 橋梁における超音波自動探傷装置の開発, 鋼構造論文集, Vol.7, No.26, pp.1-12, 200/06
- 25) 三木 千壽, 西川 和廣, 白旗 弘実, 高橋 実: 鋼橋溶接部の非破壊検査のための超音波自動探傷システムの性能確認, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.103-117, 2003/04.
- 26) 三木 千壽, 白旗 弘実, 西田 朱里, 柳沼 安俊: タンデムアレイ探触子による突合せ溶接継手の超音波非破壊検査特性, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.131-142, 2000/07.
- 27) 出野 麻由子: 超音波探傷による溶接欠陥の三次元画像構成法の開発, 東京工業大学総合理工学研究科人間環境システム専攻修士論文, 2003/02.
- 28) 高橋 和也: ピッチキャッチアレイ探触子による高精度超音波探傷, 東京工業大学工学部土木工学科卒業論文, 2004/02.
- 29) 三木 千壽, 田中 靖資, 奥川 敦志: 瀬戸大橋トラス弦材角溶接部の非破壊検査に対する確立および破壊力学手法を用いた評価, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.511-520, 1991/03.
- 30) Shi-Chang Wooh, Yijun Shi: Optimum beam steering of linear phased arrays, Wave Motion, Vol.29, 245-265, 1999.
- 31) Giovanni Cardone, Gabriella Cincotti, Paola Gori, and Massimo Pappalardo, Member IEEE, Optimization of Wide-Band Linear Arrays, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol.48, No.4, 943-952, 2001.
- 32) 藤原 昌之, 木本 和志, 廣瀬 壮一: 入射場の放射パターンを用いるリニアアレイ探触子の設計変数決定法, 応用力学論文集, Vol.6, 2003/08.
- 33) Narongsak Rattanasuwannachart: Development of highly accurate ultrasonic testing systems for flaw detection in steel members, Tokyo Institute of Technology department of civil engineering, The department of civil engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of DOCTOR OF ENGINEERING. 2005/10.
- 34) 平林 雅也: マルチフェイズドアレイを用いた欠陥検出の高精度化, 東京工業大学理工学研究科土木工学専攻修士論文, 2006/03
- 35) 勝山 真規: フェイズドアレイ超音波探傷と三次元画像構成法による欠陥検出の高精度化, 東京工業大学理工学研究科土木工学専攻修士論文, 2005/02.
- 36) 玉井 誠司: Planar Phased Array 超音波探傷による 3 次元欠陥検出の高精度化, 東京工業大学

工学部土木工学卒業論文, 2007/03

- 37) 東 壮哉 : Phased Array3 次元超音波探傷に関する研究, 東京工業大学工学部土木工学科卒業論文, 2008/02
- 38) 大西 良平 : 鋼製橋脚隅角部の溶接欠陥と疲労亀裂の三次元的超音波探傷, 東京工業大学工学部土木工学科修士論文, 2009/02
- 39) 窪田 拓実 : 超音波探傷による首溶接部の三次元的損傷検出, 東京工業大学工学部土木工学科修士論文, 2010/02
- 40) 櫟田 正人, 宮下 浩明, 松田 好史, 村田 一郎 ; 鉄筋コンクリートラーメン高架橋における劣化度調査, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 2002/09
- 41) 小川 和也, 前田 喜宏, 明石 良男, 守谷 敏之 : 吊橋ハンガーロープの非破壊検査, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 2002/09