

# リモートフィールド渦流探傷法によるダクティル鑄鉄管の 老朽度診断手法に関する基礎的研究

栗 田 亨

積水化学工業株式会社

河 部 俊 英

株式会社シーエックスアール

鎌 田 敏 郎

大阪大学 大学院

小 島 賢 一 郎

積水化学工業株式会社

平 原 孝 保

株式会社シーエックスアール

内 田 慎 哉

大阪大学 大学院

**要旨：** 現在、地中に埋設された水道管路施設に対して、その老朽度（管外面腐食等）を非開削で効率良く適確に診断する手法は未だ確立されていない状況にある。今後、老朽管路の増加が見込まれるわが国においては、管路の状態をできるかぎり定量的に非開削・非破壊で評価できる手法の開発が急務となっている。このため、本研究においては、水道用ダクティル鑄鉄管についてリモートフィールド渦流探傷法に着目し、その適用の可能性について基礎的研究を行い、本法が、水道用ダクティル鑄鉄管の老朽度診断に適用可能であるとの結果を得た。

**キーワード：** 管路診断、ダクティル鑄鉄管、土壤腐食、予防保全

**分類項目：** 腐食と防食 (070403)、管理用機器 (070407)、施設診断 (070409)、ダクティル鑄鉄管 (090103)

## 1. はじめに

現在、地中に埋設された水道管路は、全国で約60万kmという膨大な量に達している。これらの中で、高度経済成長期に大量に布設された管路は、埋設後30年～40年が経過しており、更新対象となるものの割合が急激に大きくなる事態が見込まれる。そのため、埋設された管路の状態を、できるかぎり非開削・非破壊で定量的に評価できる方法の開発が急務となっている。

本研究では、鋼製及びダクティル鑄鉄製ガス本管の老朽度評価法として実績のあるリモートフィールド渦流探傷法<sup>1) 2)</sup>に着目し、本手法による水道用ダクティル鑄鉄管の老朽度診断の可能性について基礎的研究を行った。

## 2. リモートフィールド渦流探傷法の原理

磁性管の検査手法としてリモートフィールド

渦流探傷法（**Remote Field Eddy Current Testing**：RFEC法とする。）があるが、その歴史は比較的新しい。RFEC法は1950年代に開発されたものであり、1951年、McLeanにより米国特許が取得されている。磁性管の検査として用いられたのは、シェル石油が1958年に油田掘削用リグパイプに、適用したのが最初である。

本格的な研究開発が行われるようになったのは1970年代後半からであり、T.R.Schmidt<sup>3)</sup>により研究報告がなされてから以降である。

従来から行われている渦流探傷法は、交流を流したコイルを試験体に配置し、試験体に渦電流を発生させる。この際、試験体にきずが存在すると、電磁誘導によりコイルのインピーダンスが変化する現象を利用し、きずの検出を行う方法で、主に、銅合金等の非磁性管の検査<sup>4)</sup>に適用されている。

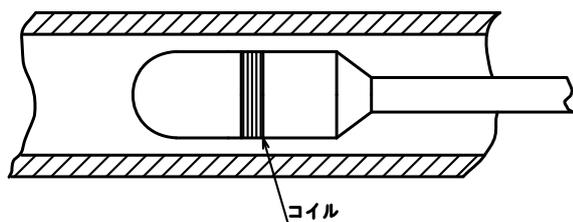


図-1 従来の渦流探傷法（単一コイルの場合）

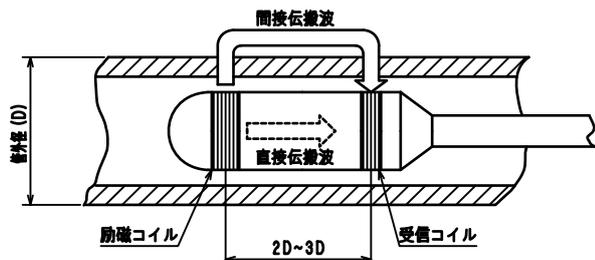


図-2 リモートフィールド渦流探傷法の原理図

一方、ダクタイル鋳鉄管は、いわゆる磁性管であり、管の磁気特性、特に透磁率が大きく、さらにそのバラツキが大きいことから、従来の渦流探傷法では、磁気ノイズと呼ばれる雑音が大きく、事実上、適用は困難であるものと考えられる。

これに対し、RFEC法は、図-2に示すように、管内に検査対象とする管に磁場を与えるための励磁コイルと管肉厚部を通過してきた電磁エネルギーを受信するための受信コイルを管外径(D)の2~3倍程度離して配置し<sup>1)</sup>、励磁コイルに数十~数百Hzの低い周波数の交流電力を供給し、これにより発生した磁場からの信号を受信コイルにより受信する。励磁コイルに供給する交流電力の周波数が低いため、透磁率の影響を受けにくく、磁気ノイズが発生しないことから、磁性管の探傷が可能となる。

図-2において、電磁エネルギーの流れの第一の経路は、励磁コイルにより励起されたエネルギーが受信コイルに向かって流れる経路で直接伝搬波と呼ばれる。この経路による伝搬では、励磁コイルと受信コイルとの距離が管径の2~3倍程度離れているため、受信コイルに到達する前に電磁エネルギーはほとんど減衰してしまい、受信コイルでは検出されない。従来から行われている渦流

探傷法では、この直接伝搬波が支配的となるリーモトフィールドと呼ばれる領域を利用している。

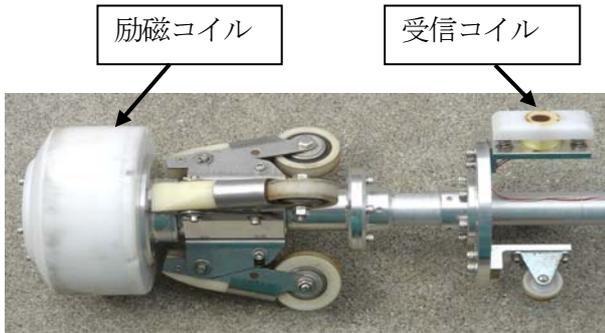
一方、第二の経路として、励磁コイルにより励起された磁場が、管肉厚を透過した後、管外面にそって形成され、管外径の2~3倍程度離れた位置で、ふたたび管肉厚を透過し、管内部に戻ってくる経路がある。この経路をたどる電磁エネルギーの流れは間接伝搬波と呼ばれ、この現象を生ずる領域をリーモトフィールドという。間接伝搬波は、管肉厚を2度通過しているため、励磁コイルに印加された交流に比べて位相に遅れが生じており、この位相の遅れ量(位相差)から管の肉厚情報を知ることができる。この際、受信コイル近傍に腐食等のきずが存在すると、きずのない部分(健全部)に比べて、位相の遅れ量が小さくなり、健全部との位相差からきず深さを知ることができる。

### 3. 実験機器

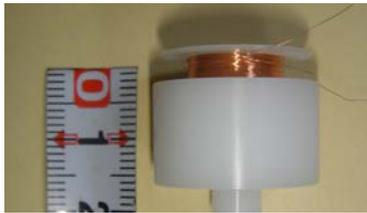
#### 3.1 実験用試験片及びセンサ

水道用ダクタイル鋳鉄管へのRFEC法の適用の基礎検討を行うに当たり、実験用のダクタイル鋳鉄管として、呼び径150mm、1種(公称肉厚7.5mm)のエポキシ粉体塗装管及びモルタルライニング管を使用した。RFEC法は、基本的には渦流探傷法であり、受信コイルと管内壁との距離(リフトオフと言う)が受信信号強度に影響を及ぼす可能性が考えられると共に、内面の処理方法により探傷条件に差が生ずる可能性があると考えられたためである。各々の管には、管外面腐食に相当する「人工きず」として深さの異なる(管肉厚の30%T, 50%T, 70%T, 90%T)20φ平底穴を機械加工により付与し、実験用試験片とした。

実験用センサは、図-3に示すように、励磁-受信コイル間距離、及び受信コイルのリフトオフを可変できる構造とし、受信コイルには、円筒型受信コイルを採用した。また、管に対して有水状態で調査する場合を想定し、励磁コイル、受信コイルともに防水構造とした。



a) 実験用センサ外観 (受信1チャンネル)



b) 円筒型受信コイル

図-3 実験用センサ及び受信コイル

### 3. 2 探傷結果に影響を及ぼす因子

RFEC法において、探傷結果に影響を及ぼす要因として、励磁コイル-受信コイル間距離、探傷周波数及び励磁電圧が挙げられる。

また、分割型受信コイルにより、同一断面を一度の走査で診断するためには、一つの受信コイルできずを検出可能な範囲がどれくらいかを把握する必要はある。

本検討においては、上記の項目について検討を行った。なお、実験に使用した各コイルの線径、巻数等のコイル要素については、予備実験の結果を基に、表-1に示す要素とした。

表-1 実験用センサコイル要素

	外径(mm)	線径(mm)	巻数
励磁コイル	110	0.4	2000
受信コイル	18	0.07	1400

(注) 外径は、ボビン外径を示す。

### 3. 3 探傷信号の評価方法

探傷信号は、すべて受信信号を同期検波することで得られる2つの信号成分 ( $A \sin \phi$  /  $A \cos \phi$ ) により評価した。

円筒型受信コイルにより得られる受信コイルをベクトル平面で表示すると、図-4のようになる。

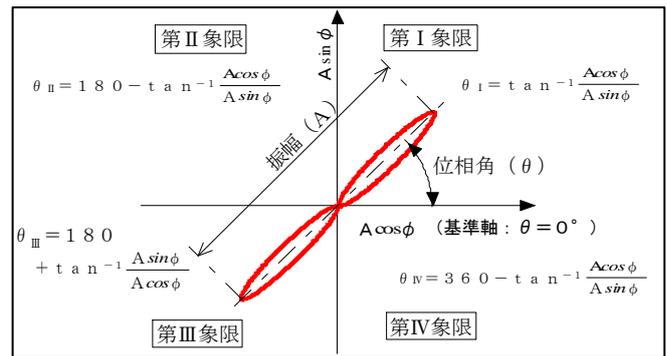


図-4 探傷信号の評価方法

この際、横軸は、励磁信号と同位相の制御信号で同期検波した基準軸 ( $A \cos \phi$ ) であり、縦軸は90度異なる制御信号で同期検波した結果得られる信号成分  $A \sin \phi$  である。

また、きずによる位相角 ( $\theta$ ) は、基準軸とのなす角度で定義される。この際、振幅 ( $A$ ) は、スカラー量で表され、各信号との関係から (1) 式で表される値となる。

$$A = \sqrt{(A \sin \phi)^2 + (A \cos \phi)^2} \quad (1)$$

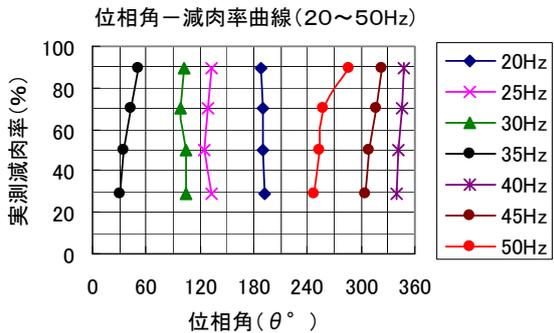
本検討では、上記の位相角 ( $\theta$ )、振幅 ( $A$ ) を指標とし、以下の実験・検討を行った。

## 4. 実験方法及び検討結果

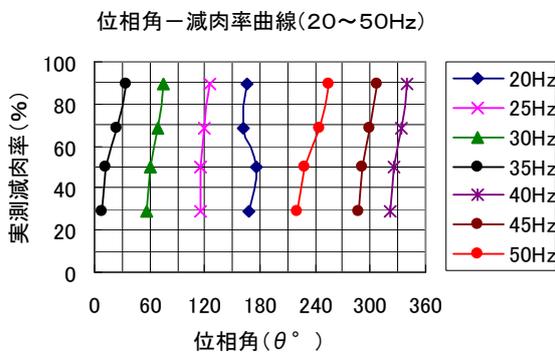
### 4. 1 探傷周波数の検討

探傷周波数の検討においては、予備実験の結果に基づき、励磁電圧 40Vp-p、励磁-受信コイル間距離 2.5D、探傷速度 3m/分とし、電源周波数近傍の周波数を除く 20Hz~95Hz の範囲で可変した。

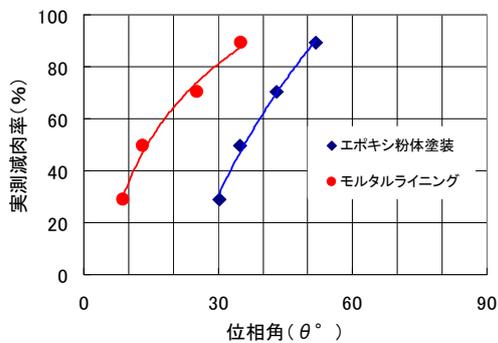
試験片に付与した人工きずの実測減肉率と位相角 ( $\theta$ ) との関係を図-5に示す。試験周波数 35Hz において、図-5 c) に示すように、エポキシ粉体塗装管、モルタルライニング管共に、実測減肉率と位相角との間にきず深さを評価する上で最も良好な相関関係が認められた。しかしながら、エポキシ粉体塗装管とモルタルライニング管では、同じ傾向を示すものの、きず深さに対する位相角の値そのものは異なる結果となった。この原因として、鋳鉄管の磁気特性 (主として透磁率) の違いが影響しているものと考えられる。



a) 150mm エポキシ粉体塗装管



b) 150mm モルタルライニング管

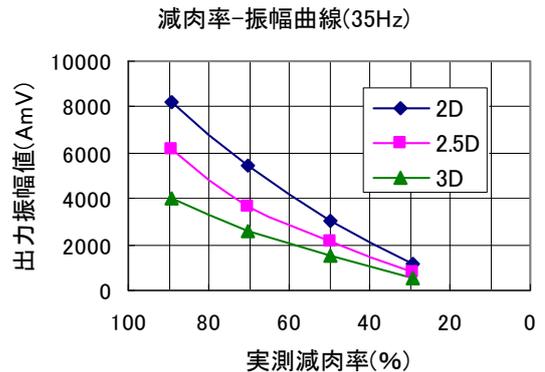


c) 35Hzにおける実測減肉率と位相角  
図-5 実測減肉率と位相角の関係の例

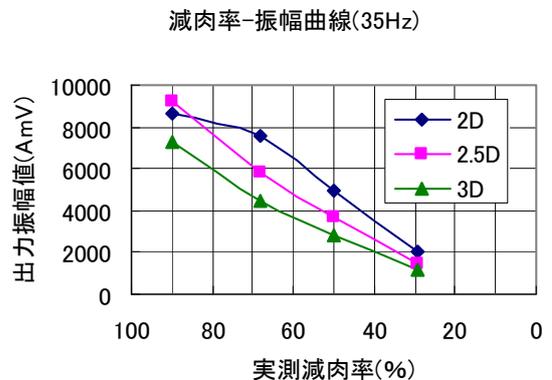
#### 4. 2 Tr-Re間距離の影響

前4. 1項の結果から、探傷周波数を35Hzとし、励磁-受信コイル間距離を2D、2.5D、3Dと変化させた場合の結果を図-6に示す。

エポキシ粉体塗装管では、励磁-受信コイル間距離の増加、減肉率の減少に伴い、出力振幅値は減少している。一方、モルタルライニング管では、励磁-受信コイル間距離を2Dとした場合、減肉率90%の場合で出力振幅の低下が認められた。



a) エポキシ粉体塗装管



b) モルタルライニング管

図-6 励磁-受信コイル間距離に対する振幅

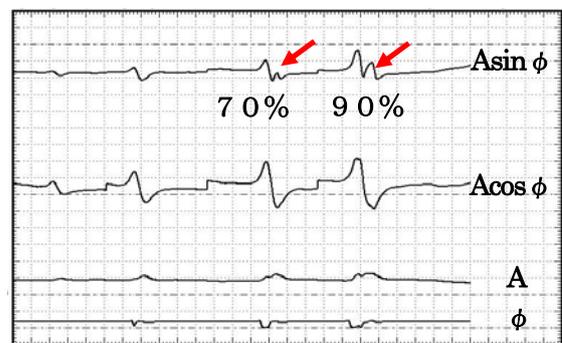


図-7 モルタルライニング管探傷データ  
(励磁-受信コイル間距離 2D)

図7において、90%及び70%の探傷波形に乱れが生じており、励磁-受信コイル間距離が短く、きず体積が大きいため、受信信号が回路内で飽和し、正常に同期検波が行えず、出力信号にひずみを生じたためと考えられた。きず深さを推定する場合、探傷の結果得られる信号レベルは、高い方が好ましく、安定した波形が得られる必要がある。回路内部での信号の飽和を避ける必要があることから、励磁-受信コイル間距離として、2.5Dを

採用することとした。

### 4.3 きずカバー領域の検討

本研究においては、ダクタイル鋳鉄管の探傷を行うにあたり、半径方向の電磁エネルギーを検出できる円筒型コイルを受信コイルとして採用している。一度の走査で管全周をカバーしようとする、複数の受信コイルを同一円周上に配置する必要がある。このためには、1つのコイルで検出可能な範囲を把握し、配置すべき受信コイル数を求める必要がある。本項では、1つの受信コイルで検出可能な範囲(きずカバー範囲とする。)を種々の人工きずによる出力振幅値を基に求めることとした。

今、1つの受信コイルのコイル中心をきずが通過した場合を基準とし、このときの振幅出力を $A_0$ とする。検出コイルの中心と、人工きずの中心軸とのズレ量を $\Delta r$  (mm)とし、2つの受信コイル $RC_1$ 、 $RC_2$ の中央を人工きずの中心が通過すると仮定すると、

$$A_0 \leq A_{C1} + A_{C2} \quad (2)$$

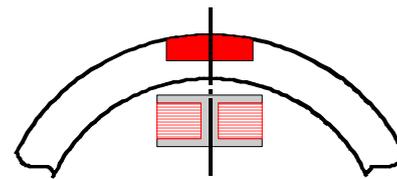
(但し、 $A_{C1}$ 、 $A_{C2}$ は、 $RC_1$ 、 $RC_2$ の振幅出力)

の関係が成立すれば、2つの受信コイル $RC_1$ 、 $RC_2$ の出力を加算処理することで、きず中心を通過した場合と同義と考えられる。すなわち、人工きず中心軸直下を1つの受信コイルが $\Delta r$ ずれて通過したとき、その出力が-6dB(きず直下を通過する場合の1/2)以上であればよいと考えられる。

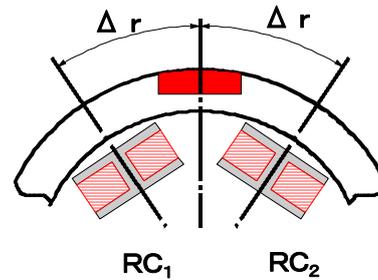
$$20 \times (\log_{10} 0.5) \doteq -6 \text{ [dB]} \quad (3)$$

エポキシ粉体塗装管、モルタルライニング管各々について $\Delta r$ を変化させ、きずカバー領域の測定を行った結果を図-9に示した。

相対感度の低下量を6dB許容するものとする、それぞれの管で許容されるズレ量( $\Delta r$ )は、14mm、18mmとなり、角度に換算すると、20度、27度となり、各コイルの配置角度を20度とすれば、一度の走査で管全面の診断が可能となる。

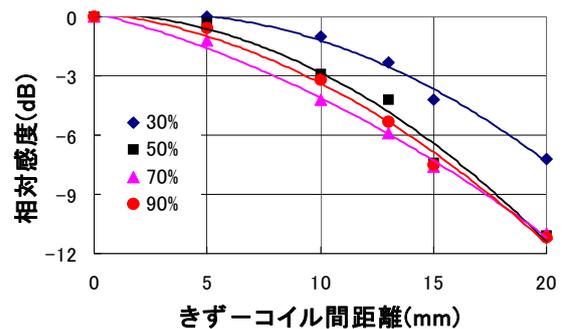


a) きず直下を通過する場合

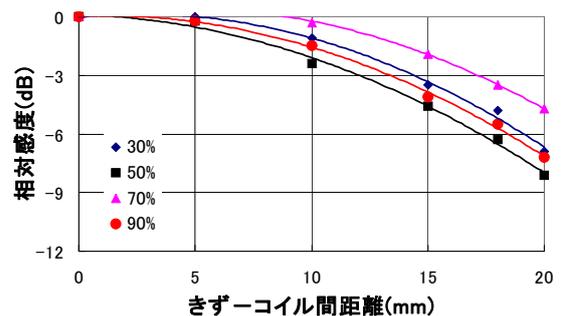


b)  $\Delta r$ のズレを伴う場合

図-8 きずカバー領域



a) エポキシ粉体塗装管



b) モルタルライニング管

図-9 きずカバー領域の測定結果

よって、必要な受信コイル数は18コイルとなる。

### 4.4 探傷条件等の検討結果

前項までの実験結果から、ダクタイル鋳鉄管の診断を行うためのRFECセンサの条件を表-2に示す条件とすれば、エポキシ粉体塗装管、モルタ

ルライニング管共に同一のセンサにより開口径 20φ、減肉率 30%以上の体積を有するきずであれば、一度の走査できずの検出、減肉率の推定が可能となると考えられる。

表-2 探傷条件等の検討結果

項目	条件
励磁-受信コイル間距離	2.5D
探傷周波数	35Hz
励磁電圧	40V <sub>p-p</sub>
受信コイル	円筒型 18 コイル

### 5. 有水状態での診断を想定した水圧試験

RFEC 法により、有水状態で管路診断を行う場合を想定し、防水性の検討を行った。

励磁コイル部は、管内径に対し、ある程度までは小さい径のコイルが使用可能であることから、Oリング等により、設計段階で防水処理が可能な構造にできる。しかしながら、受信コイル部は、管内壁との距離（以下、リフトオフとする。）が大きくなると、受信信号のレベルが低下し、振幅出力信号が小さくなり、きずの検出ができなくなる可能性がある。本項では、リフトオフに対する出力振幅値の低下量を実験により求め、受信コイル防水のためのリフトオフの検討を行うと共に、簡易的な水圧試験装置（設計耐圧 1.0MPa）を製作し、0.0MPaから0.7MPaまで水圧を変化させ、防水方法の適、不適の検討を行った。

#### 5.1 許容リフトオフの検討

受信コイル部を防水するためには、受信コイルと管内壁との距離を持たせ、防水処理のためのスペースを確保する必要がある。リフトオフ 0mm の場合を基準とし、リフトオフ増加に伴う相対的な出力信号の低下を求めた結果を図-10 に示す。

例えば、防水処理のためのスペースを 3mm とした場合、リフトオフに対する振幅の出力低下は -3dB となり、リフトオフ 0mm の場合の約 70% の出力振幅が得られることとなる。

$$-3[\text{dB}] = 20 \times (\log_{10} A)$$

$$\therefore A \doteq 0.7 \quad (4)$$

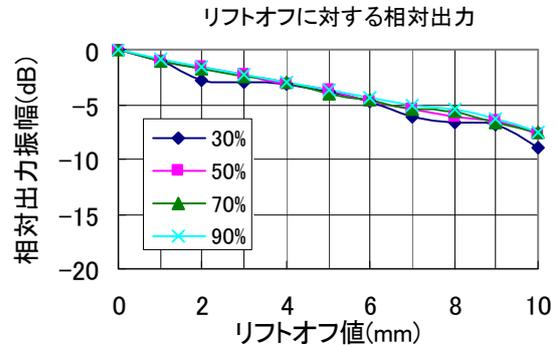


図-10 リフトオフに対する相対出力の低下

#### 5.2 水圧試験

水圧試験においては、図-11 に示す試験容器を製作し、40Hz、40V<sub>p-p</sub> の条件で、0.0MPa～0.7MPaまで0.1MPaピッチで水圧を変化させた。この際、設定した圧力で1時間保持し、励磁信号/受信信号をシンクロスコープでモニタした。また、各圧力で試験開始時、終了時、及び試験開始後約 30 分経過した時点で診断装置からの出力信号を記録した。なお、圧力保持時間は、電気機器の防水等級 7<sup>5)</sup> の保持時間が 30 分であることから、2倍の1時間とした。

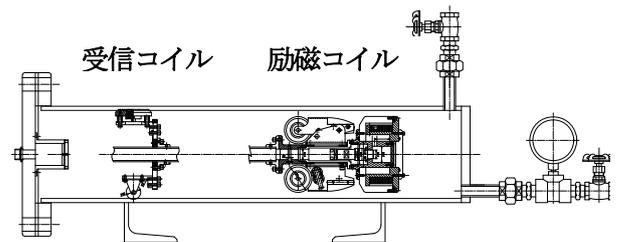


図-11 水圧試験

図-12 に、水圧 0.7MPa、1 時間経過時の励磁/受信波形を示す。いずれの波形においても、ひずみ、ノイズ等は認められず、防水性の確保が確認されたため、有水状態での診断の可能性が見込めると考えられる。

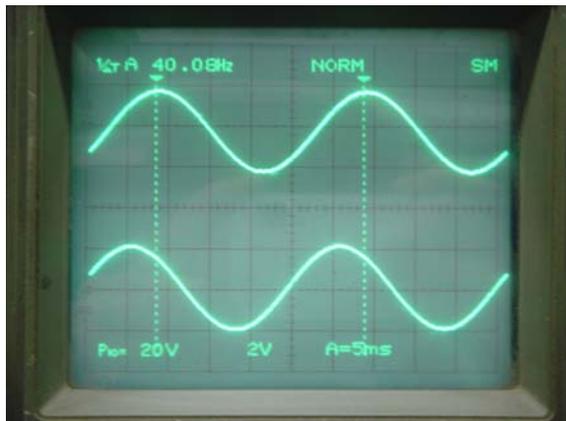


図-12 0.7MP aにおける励磁／受信波形

## 6. 結語

水道用ダクタイル鋳鉄管を対象に、RFEC法を適用した診断装置の基礎的研究を行った。その結果、エポキシ粉体塗装管、モルタルライニング管共に、開口径 20φ、減肉率 30%以上の体積を有するきずであれば、一度の走査できずの検出、減肉率の推定が可能であり、有水状態での診断の可能性が見込めるものと判断した。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば、社団法人日本非破壊検査協会編  
新 非破壊検査便覧、pp.438-449 (1992)
- 2) 細原他 金属管探傷装置及び金属管探傷方法、  
特許第 3428734 号 (2003)
- 3) T.R.Schmidt , The Remote Field Eddy Current  
Inspection Technique , Materials Evaluation, Vol.42,  
No.2, pp.225-230 (1984)
- 4) 例えば、社団法人日本非破壊検査協会編  
渦流探傷試験Ⅱ、pp.115-122 (1995)
- 5) JIS C 0920 「電気機械器具及び配線材料の防水  
試験通則」