



電気ポテンシャル法を用いた地中埋設管の欠陥形状推定

小島, 史男

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 12:205-215

(Issue Date)

2008-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81001289>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81001289>



電気ポテンシャル法を用いた地中埋設管 の欠陥形状推定

Shape Identification of Coating Defect in Underground-Pipeline using Electrical Potential Method

小島 史男
Fumio Kojima

概要：道路、発電、交通、上下水道などのインフラ施設の高経年化に伴い、それらの効率的な保守運用が重要な課題となっている。特に地中に埋設されているガス配管のメンテナンスの問題は近年重要な問題となりつつある。電気ポテンシャル法は地中埋設管の傷を調べる非破壊検査法の1つであるが、近接欠陥が存在した場合には波形同士がお互いに影響を及ぼしあい、正しい欠陥情報が得られないという問題がある。本研究では地中埋設管の探傷検査を模擬した実験装置を開発し、正確な傷情報を求める計算手法について考察する。検査システムの数学モデルから有限要素法を用いた数値解析モデルを構築し、研究室での探傷実験より計測した測定波形において欠陥評価を行う。欠陥の大きさと位置を推定する逆問題解析アルゴリズムを提案し、その有効性を検証する。

キーワード：非破壊検査、逆問題解析、欠陥同定、有限要素法

1. はじめに

日本では、狭い国土を有効利用するためにガス管や水道管などは地中に埋設されており、それらは交通量の多い公道上や公共性の高い場所で長期にわたって使用され、高経年化に伴い、腐食など老朽化が進行しているものが数多く存在する。初期に埋設された鋼管に亜鉛メッキを施した白ガス管は埋設から既に数十年が経過し、老朽化の時期を迎えている。このガス管は、埋設後徐々に亜鉛メッキが溶け出し内部の鋼管が腐食するという特性があり、腐食することでガス漏れが発生する恐れがある。1994年の東京都での白ガス管のガス漏れによる爆発・死傷事故をきっかけにガス事業法の技術基準が改正され、1996年から新規埋設部への白ガス管の使用は禁止されている¹⁾²⁾³⁾。しかしながらこれまでに埋設された白ガス管もまだ残されたままとなっており、今後のガス漏れ事故を予防するためには損傷箇所の早期発見・補修が必要不可欠であると言える。ガス管は1[m]程度の短管で構成されており、これに対し補修を行う場合は損傷部分を含む箇所を交換する事になる。しかし一箇所の交換には複雑な法的手続き、埋設部の掘り返し費用などを含めて多額の費用が必要となることから、損傷箇所をあらかじめ正確に予測することは非常に重要である。現在の欠陥位置予測には非破壊検査手法の一つである電気ポテンシャルCT法が用いられている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。これは埋設されたガス管が腐食予防を目的とした絶縁皮膜で覆われていることを利用したものである。図-1は電気ポテンシャル法の概要を示したものである。地中埋設管に電流を流すことで欠陥、つまり絶縁皮膜の破れた箇所から電流が漏れ出す。この漏電は地表面を走査する電位差計により検出できる。検出信号は一般に正弦波のような波形を描くことが知られており、この波形のゼロクロス点、つまり測定された電位の絶対値が等しく逆符号の二点間の中点が欠陥の位置、その振幅の大きさが欠陥の大きさに相当する。しかし、複数の欠陥が近接して存在する場合は互いの傷が影響し合い、測定波形より傷の正確な推定を行うことができない。この問題に対する一般的なアプローチは、地中埋設管の探傷実験施設で計測した地表面電位差の実験結果をもとにシミュレータを構築して解析を行い、地中埋設管探傷検査システムの開発を進めていく方法がとられる。しかしながら、電位差計による検査は技術者の勘と経験に委ねることが多く、十分な精度は期待できないのが現状である。

本研究においては、近接複数欠陥を対象とした検査精度の向上を目的として、埋設管探傷実験において環境条件を一定とした理想モデルより計測した実験結果をもとに解析を行い、環境を一樣とみなした解析領域における探傷検査システムの構築を行う。そのために、まず電気ポテンシャル法による検査過程で起こる物理現象の支配方程式を導出し、有限要素法から数学モデルを構築する。つぎに、表面電位差を計測するために、電気ポテンシャル法を用いた地中埋設管探傷試験を模擬した研究室実験を行う。シミュレーション結果と実験結果を比較し、表面電位差の出力波形における欠陥の位置推定や欠陥形状の大きさに関する感度評価を行う。さらに、欠陥位置と大きさを表す欠陥情報を未知パラメータとしたパラメータ推定問題を定式化することで、逆問題解析計算アルゴリズムを提案する。その有効性についての検証を最後にまとめる。

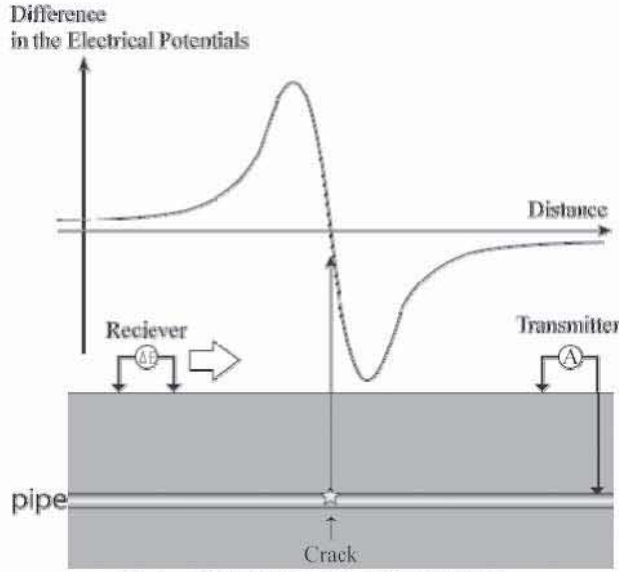


図-1 電気ポテンシャル法概念図

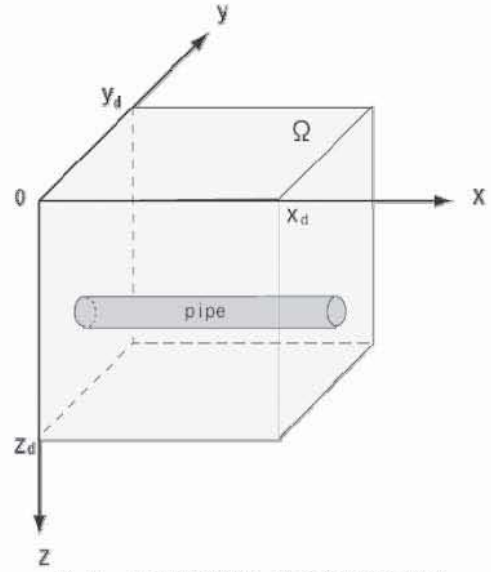


図-2 地中埋設管と検査領域の設定

2. 検査と複数欠陥の数学モデル

地中埋設管は腐食を防ぐための絶縁体塗膜で被われており、その被膜が腐食・損傷しているときに埋設管内部に電流を流すと、その欠陥箇所から電流が漏洩する。図-2 のような埋設管を被う絶縁体被膜の塗膜損傷を欠陥とみなし、その欠陥箇所を電流源とみなす。欠陥部分から流れ出す電流は地中を伝わって地表面にまで伝播し、地表面において距離を固定した二点間の電極により電位差を計測することができる。保守点検を行いたい区域内を移動し、電位差の検出を繰り返す。検出する波形は欠陥に近づくにつれて電位差は大きくなり、前の電極が欠陥真上を越えると減少に転じ、電極間の中点が欠陥の真上に来たとき電位差は0となる。単一欠陥の場合、測定波形は正弦波のような形を描き、波形のゼロクロス点が欠陥位置、振幅の大きさが欠陥の大きさとなることから測定波形から直接欠陥評価を行うことが可能となる。本節では電気ポテンシャル法を用いて欠陥情報である電位分布の抽出方法を示す。解析領域 Ω (図-2) を次のように定義する。

$$\Omega = \{(x, y, z) | 0 < x < x_d, 0 < y < y_d, 0 < z < z_d\} \quad (1)$$

電気ポテンシャル法の基礎方程式はポアソン方程式により以下のように数学的に記述できる⁷⁾⁸⁾。

$$-\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = f \text{ in } \Omega \quad (2)$$

ここで、 σ は導電率、 f は電荷密度をあらわし、具体的には地中埋設管の絶縁体被膜が損傷して埋設管内部を流れる電流が地中に漏れ出す強さを表す電圧をモデル化したものである。すなわち欠陥箇所は電流源となり、電圧の大きさは損傷の大きさを示している。また境界条件としては地表面 S_1 において電流の漏洩がないとして、自然壁を、また有限要素モデル導入のため、検査領域 Ω から十分離れた地表面をのぞく仮想境界 S_2 において吸収壁を設定する。すなわち

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \text{ on } S_1, \quad \phi = 0 \text{ on } S_2 \quad (3)$$

支配方程式(2-3)にガラーキン法を用いて有限要素法を適用する。図-3 はその分割を示している。このとき電気ポテンシャル法の空間3次元の数値解析モデルは以下のように与えられる⁹⁾。

$$Au = b \quad (4)$$

ただし、要素行列、ベクトルは基底関数列 $\{B_i\}$ を用いて

$$[A]_{ij} = \iiint_{\Omega} \sigma \left(\frac{\partial B_j}{\partial x} \frac{\partial B_i}{\partial x} + \frac{\partial B_j}{\partial y} \frac{\partial B_i}{\partial y} + \frac{\partial B_j}{\partial z} \frac{\partial B_i}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (5)$$

$$\{b\}_j = \iiint_{\Omega} f b_j dx dy dz \quad (6)$$

で与えられる。ここで埋設管に関わる分割は図-4 のように与え、埋設管の要素が含む節点の導電率はすべて 0 とする。ところで、埋設管の腐食等により絶縁皮膜がはがれるとその部分から電流が漏洩する。いま埋設管有限要素の各要素電圧ベクトルを以下のように与える。

$$f = \{0, 0, f_1, 0, 0, f_2, 0, \dots, 0, 0, f_i, 0, 0\} \quad (7)$$

ここで、損傷部分の有限要素には非零の電圧を与えて解析を行う。従って非零要素の数が解析領域内の埋設管に存在する傷の数であり、各入力電圧値が個々の傷の大きさに相当する。このようにすると考察の対象とする検査の数学的記述は

$$Au = u(f), \quad y = Cu \quad (8)$$

のような形式をもつ有限要素モデルで与えられる。ここで行列Cは地表面の 2 点間の電位差を求める補間行列である。

3. シミュレーション実験と研究室実験データとの比較

本節では、前節で示した式(8)の有限要素モデルを用いて解析を行う。有限要素の解析領域をそれぞれ

$$0 < x < 1200 \text{ [mm]}, \quad 0 < y < 800 \text{ [mm]}, \quad 0 < z < 160 \text{ [mm]}$$

と設定し、埋設管は y 方向に 400.0[mm]、z 方向に 60.0[mm]の位置で、x 方向に埋設されているものとする。表面電位差の測定方向は埋設管と平行とするために x 方向である。この解析領域を x 方向に 240 分割、y 方向に 160 分割、z 方向に 16 分割の全体で 614400 個の有限要素に分割（節点数 659617）した。また表面電位差を検出する電極間距離は 20.0[mm]とし、図-5 で示すように x 方向に 5.0[mm]間隔で 180 地点での測定点を、同様に y 方向に 30.0[mm]間隔で表面電位差を 6 ラインにおける表面電位差のシミュレーションを実施した。なおシミュレーションで設定したパラメータはあとで検証する研究室実験の環境の寸法に合わせている。解析領域における導電率は一定とし、実験においては水の導電率を仮定している。

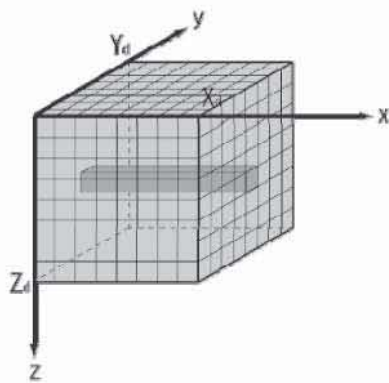


図-3 検査領域の有限要素分割

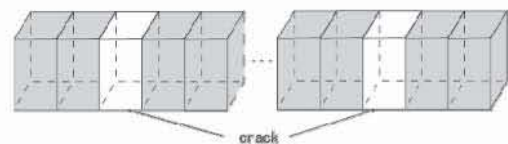


図-4 埋設管における欠陥のモデリング

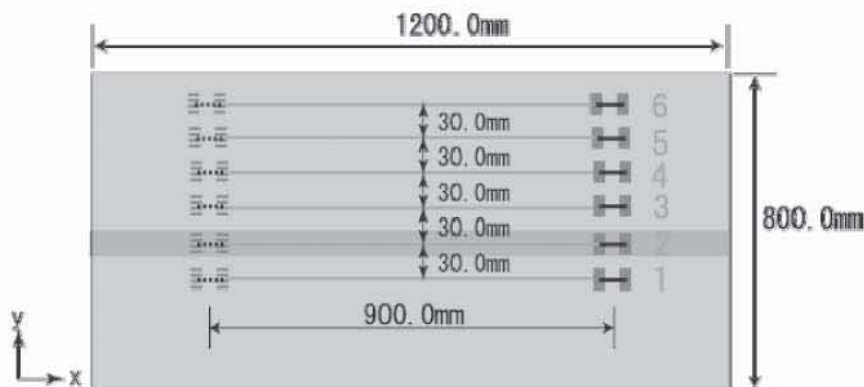


図-5 検査における地表面の測定器走査方向と検査ラインの設定

表-1 順問題解析における欠陥の数、位置および大きさの設定

	欠陥の数	位置(基準点からの距離 [mm])	大きさ(電圧値 [mV])
例-1	1	540	1000
例-2	2	200	1350
		500	268

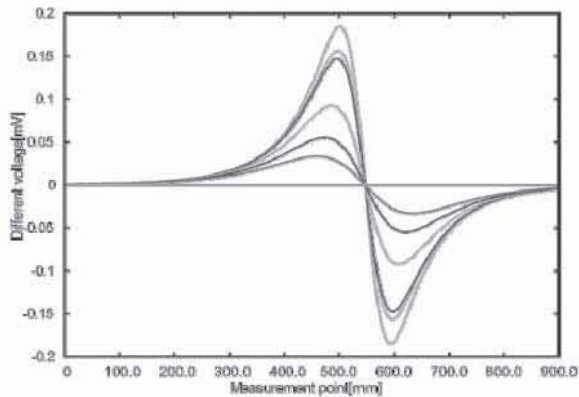


図-6 シミュレーション結果 (例 1 : 単一欠陥)

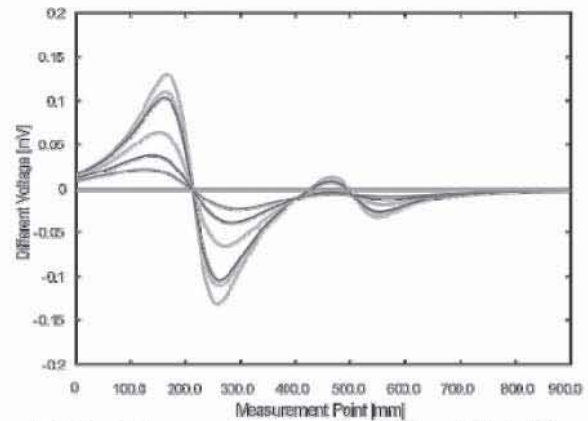


図-7 シミュレーション結果 (例 2 : 複数欠陥)

シミュレーション実験における欠陥の位置と大きさのパラメータ設定を表 1 にあげる。例-1 では単一欠陥時の出力波形について、次に例-2 においては欠陥の大きさが異なる 2 つのきずを仮定した場合のシミュレーション結果を示す。シミュレーション実験の結果を検証するために、電気ポテンシャル法を用いた探傷試験を模した研究室実験を行った。本実験では容器に水道水を満たし、水面を地表面とした。容器は有限要素法で仮定した寸法と同じである。図-8 は実験装置の概略を示したものである。埋設管に生じた欠陥は点電荷と考え、発振器と接続したエナメル線の断面から流れ出る電流源を模擬欠陥とした。図-8 に示すように、二つの電極をロックインアンプと接続し、ロックインアンプの出力値が表面電位差の検出信号となる。実験容器には水が満たされており、水底付近にエナメル線により模した欠陥を水深 60.0 [mm] の深さに設置する。境界面を無限遠とみなすために容器の底面と側面にアルミ板を設置して発振器のアースと接続する。実験容器の境界面を等電位面とすることにより境界面での電流の跳ね返りを抑え、検出する信号にノイズが含まれることを防ぐ。模擬欠陥は発振器から電流を流し、周波数は 23.0 [Hz] とした。図-9 は欠陥の大きさに相当する入力電圧を制御するための回路図を示す。図にあるとおり、回路に 1 [kΩ] の可変抵抗器を 7 個組み込むことで模擬欠陥である電圧値の調節を行った。出力幅は 0 ~ 1.93 [V] とした。実験における検査機器の測定条件と欠陥の設定の概要を図-10 に示す。実際の地中埋設管の深さは既知であり、地表面から約 1200 [mm] の位置に埋設されている。図-10 に示すように、本実験では模擬欠陥は水面から深さ 60.0 [mm] に設定した。すなわち、本研究室実験と実際に地表面で行う地中埋設管探傷試験とのスケール比は 1/20 である。実験における検査機器の測定条件と欠陥の設定の概要を図-10 に示す。実際の地中埋設管の

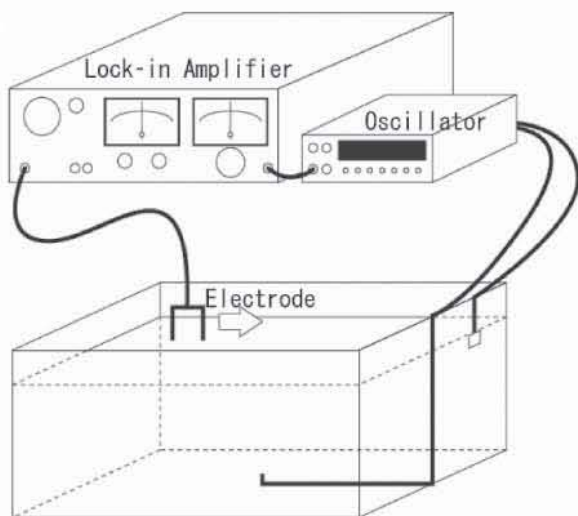


図-8 実験装置の概要

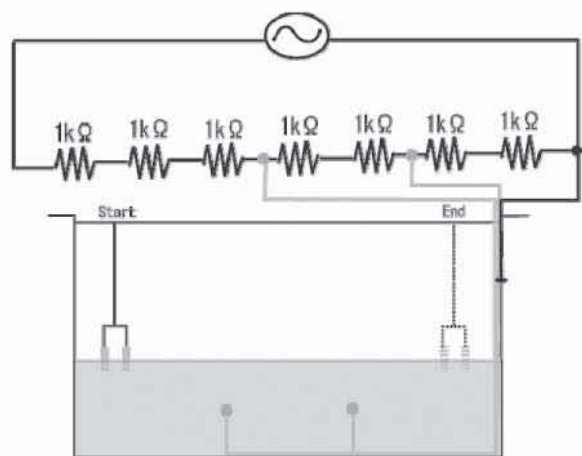


図-9 欠陥の大きさの設定法

深さは既知であり、地表面から約 1200[mm]の位置に埋設されている。測定では、二つの電極を用いて表面電位差の検出を繰り返し行う。表面電位差を検出する電極間距離は 20.0[mm]とした。シミュレーション実験における設定（図-5）と同様の手順で、表面二点間電位差の測定ライン x 方向に 5.0[mm]間隔で 180 地点測定した。同様に y 方向に 30.0[mm]間隔で表面電位差を 6 ライン検出した。測定ライン 2 では埋設管真上の表面電位差を検出していることに相当している。

本実験装置による研究室実験の結果を示し、各測定ラインにおいて実験データと順解析結果の比較を行う。欠陥情報はシミュレーションの設定（表-1）と同じ設定とする。測定結果を図-11 および図-12 に示す。シミュレーション結果と測定結果の両者の比較を図-13 および図-14 にまとめる。欠陥情報が単一欠陥（例 1）のときは順解析結果と実験結果はどちらも正弦波状の波形が欠陥位置でゼロクロスしている（図-13）。地中埋設管の真上を通る測定ライン 2 の信号が最も強く検出され、埋設管上の測定ラインから離れるほど信号が弱くなることから、シミュレーションから検査領域の設定を事前に確認できる可能性がわかった。例題 2 においては大きさの異なる 2 つの欠陥に関してもシミュレーション結果と測定結果が良好に一致しており、提案した有限要素モデルの有効性を示すことができた（図-14）。

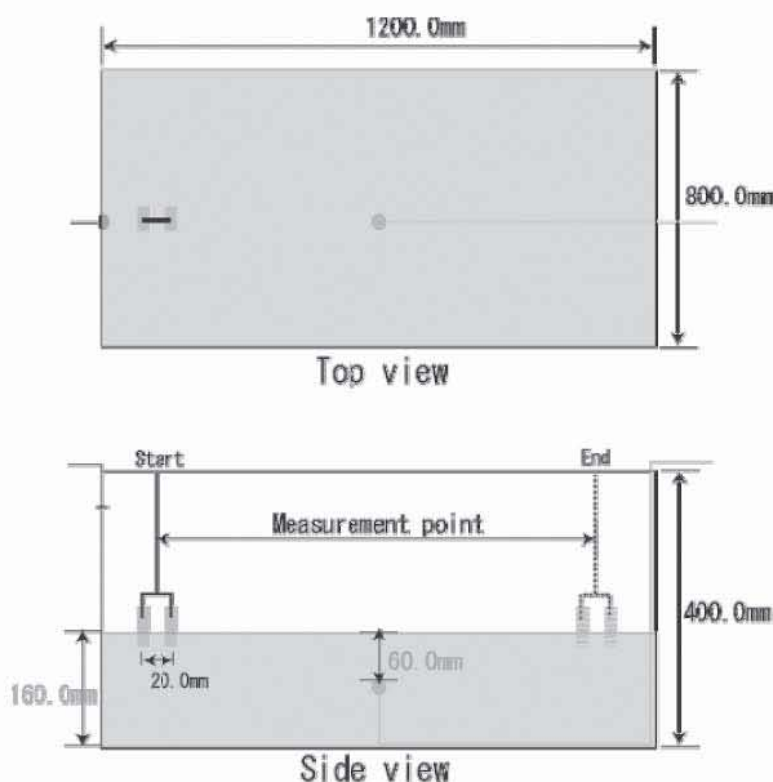


図-10 研究室実験における測定方法の概要

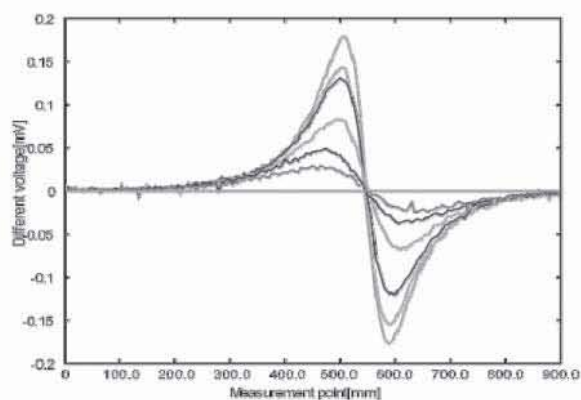


図-11 測定結果（例 1：単一欠陥）

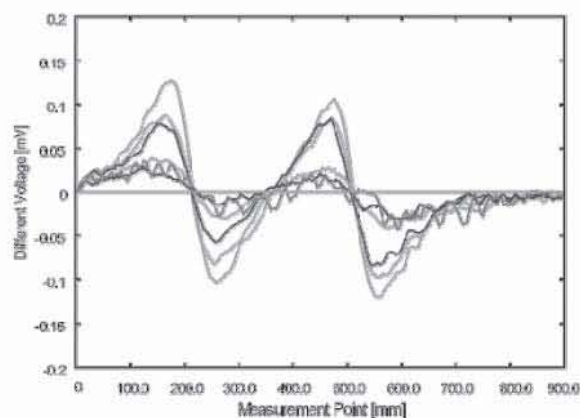
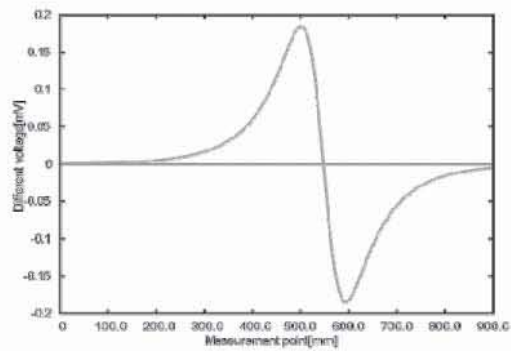
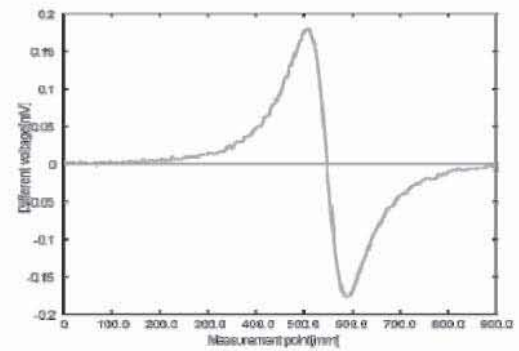


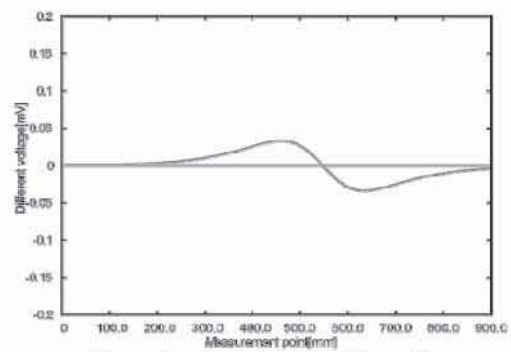
図-12 測定結果（例 2：複数欠陥）



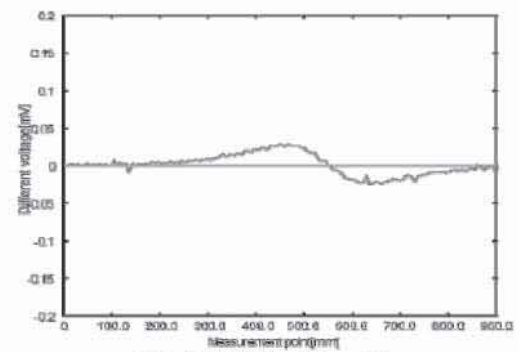
(a) シミュレーション (Line 2)



(b) 測定結果 (Line 2)

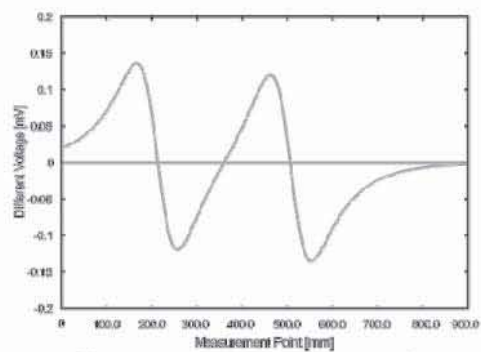


(a) シミュレーション (Line 6)

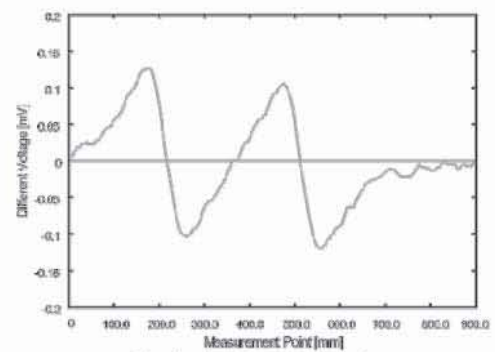


(b) 測定結果 (Line 6)

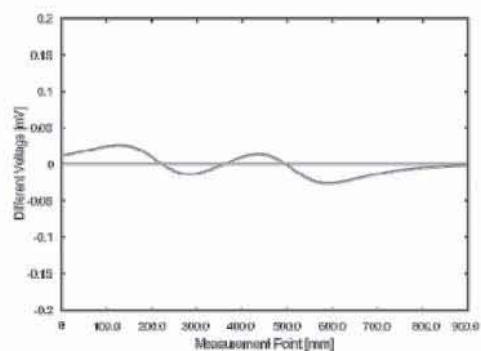
図-13 シミュレーションと実験結果の比較 (例-1 単一欠陥)



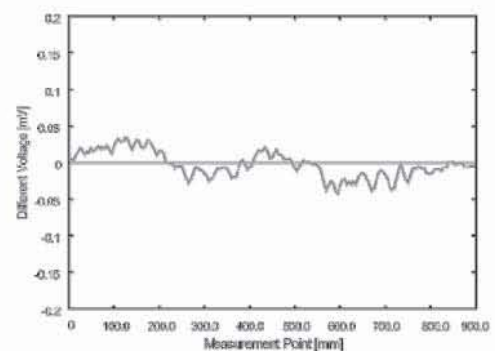
(a) シミュレーション (Line 2)



(b) 測定結果 (Line 2)



(a) シミュレーション (Line 6)



(b) 測定結果 (Line 6)

図-14 シミュレーションと実験結果の比較 (例-2 複数欠陥)

4. 逆問題解析アルゴリズムと計算実験

前節での考察で、埋設管探傷検査において電気ポテンシャル法を用いて検出される表面電位差には欠陥情報が含まれていることがシミュレーション実験、測定実験を通じて明らかとなった。本節では、提案した有限要素モデルと測定システムを用いて埋設管の欠陥位置および大きさを逆問題解析により求める計算手法について考察する。(7)式において欠陥の位置に相当する有限要素にその大きさを与える電圧ベクトル $\mathbf{f}$ を入力とし、欠陥情報を含む表面電位差 $\mathbf{y}$ を(8)式により与えた。本研究における逆問題とは、順解析によりモデル出力 $\{y_j\}_{j=1}^{N_p}$ と研究室実験により計測した実験データ $\{Y_j\}_{j=1}^{N_p}$ から正しい欠陥の位置と大きさを推定することである。すなわち、逆問題解析はモデル出力と実験結果との最小自乗誤差問題

$$\text{Min } J(\mathbf{f}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_p} |y_j(\mathbf{f}) - Y_j|^2 \quad (9)$$

を $\mathbf{f}$ について解くことによって実現する。この問題を解くには、まず測定データから欠陥の個数と欠陥位置の初期推定値および欠陥形状の大きさの初期推定量を与えて、(9)式の最小化を準ニュートン法によって欠陥の大きさに関する推定値を求める。本論文の目的において指摘したように、埋設管に近接複数欠陥が存在する場合、解析領域内の電位分布はすべての欠陥から漏れ出る電流の影響を含んでいるため欠陥同士がお互いに影響しあい、正確な欠陥の情報を得ることができない。また、損傷が小さくて電圧が小さい小欠陥ほど他の傷から受ける影響が大きくなり、逆に損傷が大きい欠陥、つまり電圧が大きければ他の傷から受ける影響は少ないと考えられる。従って解析領域内の埋設管に存在する欠陥の中で最も損傷が大きいと考えられる欠陥を基準にして、次に最初に決めた欠陥の位置推定が適切なものか評価を行う。すなわち、図-15のように電圧を与える要素を1つ横に移動させ、改めて最小化問題(9)を解く。実験結果から予測した欠陥の位置は基準とした大欠陥に引きずられていて、仮定した欠陥の位置は実際よりも大欠陥寄りに予測していると考えられる。そのために欠陥を一要素分横に移動させる方向は、基準とした大欠陥から離れる向きとする。これらの手順によって更新された欠陥の位置から再び電圧 $\mathbf{f}$ の推定を行い、欠陥を一要素分移動した後、(9)式の評価関数 $J(\mathbf{f})$ が増加したら移動をやめ、移動させる前を欠陥位置の最適推定値とする。以上の推定計算アルゴリズムを以下にまとめる。図-16はその流れを示したものである。

[推定計算アルゴリズム]

Step 0: 計測データ $\{Y_j\}_{j=1}^{N_p}$ を用意する。欠陥個数 N_c を定め、それぞれの位置と大きさを表す電圧値の初期推定値 $\{f_j^{(0)}\}_{j=1}^{N_c}$ を設定する。

Step 1: 順解析モデル(8)式を解き、モデル出力値との自乗誤差から準ニュートン法を用いて(9)式の評価関数の最適解を求める。

Step 3: 求めた最適解を用いて、今度は欠陥位置を移動したときのモデル出力を求め、もとの最適評価関数の値と位置を摂動したときの評価関数(8)の値を比較する。評価値が低くなれば、Step 1にもどり、この位置での最適化問題を解く。そうでなければ元の欠陥位置を最適位置として、欠陥の位置および大きさの推定値が求めたとして終了。

逆問題解析では2個の近接複数欠陥の位置および大きさを測定データから推定する実験を行った。種々の実験を行ったが、ここでは近接距離および大きさが異なる2種類の場合の推定結果を以下に報告する。表-2は設定した欠陥位置とその大きさを示している。この設定のもとでの測定データを図-17(a)(例題-3)および図-18(a)(例題-4)に示す。逆問題解析の精度向上には、測定データから推定の初期値を適切に設定する必要がある。初期値の設定に関しては以下の手順に従った。上記のStep 0にあるように、模擬実験装置より得られたデータの逆問題解析を行う前に欠陥情報である位置と大きさの初期値を設定する必要がある。6つの異なるラインでの電位差波形測定から初期値の決定を行う。隣接欠陥が離れている場合、ゼロクロス位置が欠陥位置となる。しかし、近接複数欠陥では欠陥位置とゼロクロス点の位置が異なってくるので欠陥位置の同定がもとより困難である。本研究においては、埋設管からの距離が異なる6つのラインの波形の変曲点から、欠陥位置の初期値を選択する。

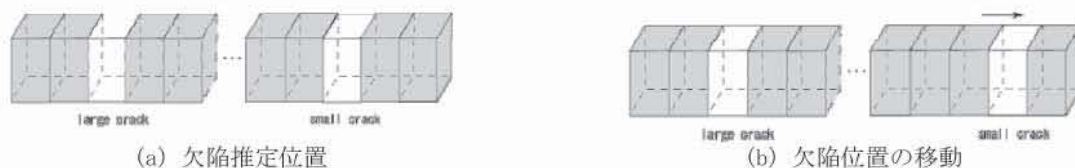


図-15 埋設管の欠陥推定位置の移動

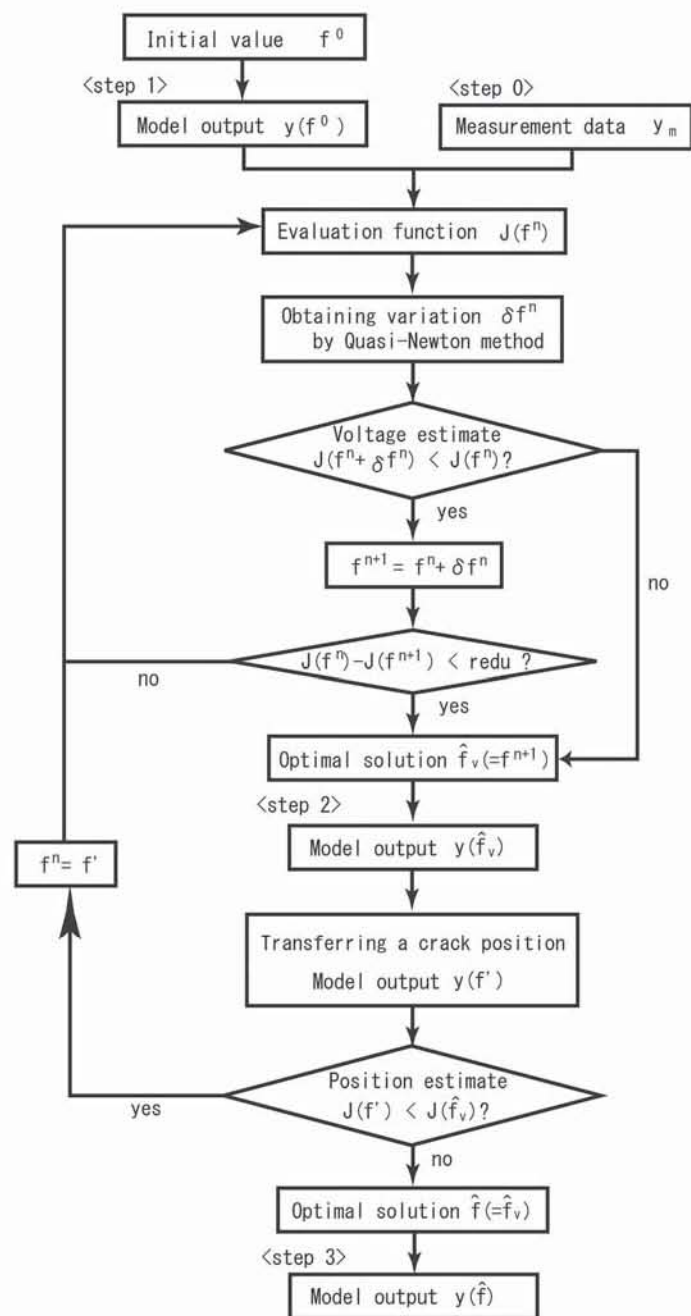


図-16 推定計算アルゴリズム

表-2 逆問題解析シミュレーション実験における欠陥の数、位置および大きさの設定

	欠陥の数	位置(基準点からの距離 [mm])	大きさ(電圧値 [mV])
例-3	2	300	1360
		500	1108
例-4	2	200	1350
		500	268

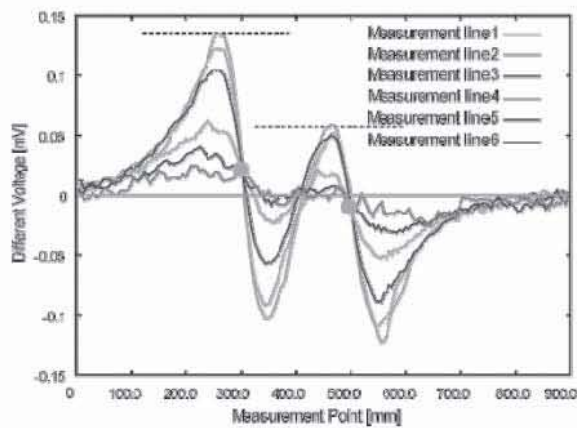
なお欠陥の大きさを表す電圧値の初期値については、測定データの破棄振幅から与えることにする。図-17(a)および図-18(a)におけるマークは近接欠陥における実験データから、この方法により決定した欠陥位置の初期推定である。これらの初期値のもとで、測定データから求めた推定値を表-3および表-4にまとめる。また図-17(b)および図-18(b)は推定値により求めた順解析結果と測定値を比較した結果である。

表-3 逆問題解析推定結果 (例題-3)

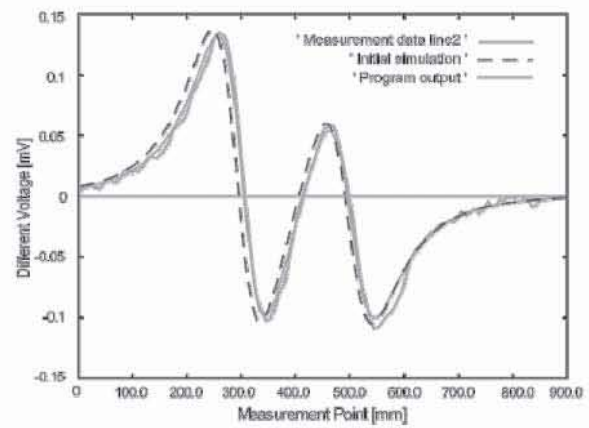
	位置(基準点からの距離 [mm])		大きさ(電圧値 [mV])	
	(1)	(2)	(1)	(2)
初期値	290	485	1850	1350
推定値	300	500	1778	1274
真値	300	500	1360	1108
推定誤差	0	0	418	166

表-4 逆問題解析推定結果 (例題-4)

	位置(基準点からの距離 [mm])		大きさ(電圧値 [mV])	
	(1)	(2)	(1)	(2)
初期値	190	495	2050	650
推定値	205	510	1636	268
真値	200	500	1350	268
推定誤差	5	10	286	0

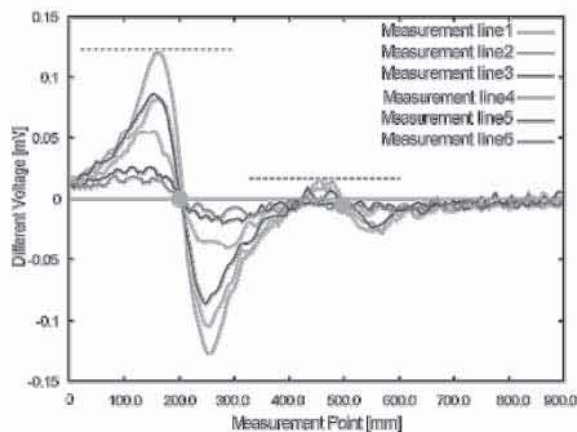


(a) 測定データと位置の初期設定

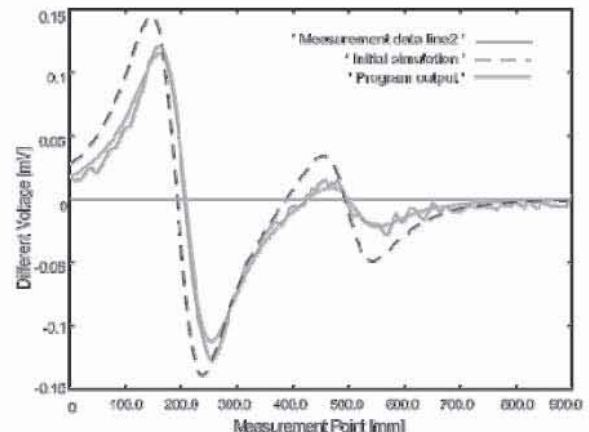


(b) 推定値からのモデル出力との比較

図-17 逆問題解析の結果 (例題-3)



(a) 測定データと位置の初期設定



(b) 推定値からのモデル出力との比較

図-18 逆問題解析の結果 (例題-4)

以上の逆問題解析の実験結果から、欠陥位置の推定誤差は ± 10.0 [mm]以内に収まっていることを確認した。しかしながら、欠陥大きさの推定においては、欠陥の間の距離が300 [mm]離れている例題-4においては、欠陥大きさの推定誤差は ± 300 [mV]にとどまっている。欠陥位置で信号がゼロクロスしないと認められる場合には、何らかの方法で、予測に基づいた設定をする必要である。

5. おわりに

本研究では、保守管理上重要な問題となっている地中埋設管の欠陥同定について考察した。地中埋設管に近接複数欠陥がある場合に波形が干渉し合い欠陥位置やその大きさを測定データから直接評価することが困難である。そこで本研究においては、有限要素法により、欠陥と測定データの関係式を導出し、これに基づく逆問題解析により、高精度な傷パラメータの推定手法を提案した。まず、電気ポテンシャル法による非破壊検査の数学モデルを空間3次元のポアソン方程式により近似し、観測点間の電位差を求める有限要素解析モデルを構築した。入力欠陥の位置・大きさのパラメータ値、出力は表面電位差とした。欠陥位置は埋設管に生じた塗膜損傷箇所とし、欠陥の大きさは埋設管に生じた塗膜損傷が大きいほど多くの電流が流れ出すことから欠陥に与える電圧値の大きさで表した。次に、構築した順解析モデルを基にシミュレーション実験と研究室実験を行い、測定データとの照合により、探傷検査シミュレータの有効性を検証した。さらに、準ニュートン法を用いた欠陥の大きさ推定手法と、近接欠陥の特性を活かした欠陥位置推定手法を提案した。提案した欠陥パラメータ推定手法を用いた計算実験を行い、研究室実験により得られた実験結果と比較し、提案手法の性能を確認した。研究室実験の結果、各実験例における欠陥位置の推定誤差は ± 10.0 [mm]以内、欠陥の大きさに関する推定誤差は ± 300 [mV]となることを示した。研究室実験における地中埋設管とのスケール比が1/20であることから、欠陥位置の推定誤差は地中埋設管探傷における ± 200.0 [mm]に相当する。現場で求められる要求精度は ± 300.0 [mm]といわれていることから、ここで求めた推定精度が十分といえる。ただし、現実の道路における測定では、地層構造や道路の周辺構造物の存在に大きく影響するといわれている。このような環境に関する同定については今後検討していく必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究室所属の大学院生、平林、高岸、OUTHACHACK 君の協力があつたことを記し、深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：エネルギー需要実績，資源エネルギー庁 2004.
- 2) 永井 辰之：埋設配管に対する長距離超音波探傷技術の開発，非破壊検査，Vol. 51, No. 10, pp. 622-627, 2002.
- 3) 卯西 裕之，石川 昌己，大谷 靖弘：ガイド波を用いた配管腐食検査技術，NHK 技報，No.177, pp. 38-42, 2002.
- 4) 庄子 哲雄：電位差法の最近の動向，非破壊検査，Vol. 49, No. 11, pp.759-765, 2000.
- 5) 多田 直哉：電位差法による欠陥および材質の非破壊評価，非破壊検査，Vol. 51, No. 5, pp.259-263, 2002.
- 6) Tada N., Hayashi Y., Kitamura T., and Ohtani R.: Analysis on the applicability of direct current electrical potential method to the detection of damage by multiple small internal cracks, *International Journal of Fracture*, Vol. 85, pp.1-9, 1997.
- 7) 長岡 洋介：電磁気学 I, 岩波書店, pp.26-99, 1982.
- 8) 砂川 重信：物理学要論，倍風館，pp.141-161, 1984.
- 9) 久保 司郎，坂上 隆英，大路 清嗣：機械学会論文集(A編)，Vol. 55, pp.2316-2319, 1989.

POSITIONING ESTIMATION AND SIZING IDENTIFICATION OF COATING DEFECT IN PIPELINE USING ELECTRICAL POTENTIAL METHOD

Fumio Kojima

Abstract

This paper is concerned with a computational method for estimating positioning and sizing of defects in underground pipeline. Suitable maintenance of infrastructures is an important issue for their safety operations. Electrical potential method is one of the conventional nondestructive testing used in such maintenance techniques. In this method, sensors on the road can capture electrical signals leaked from coating defects of pipeline. There have been crucial problems for characterizing signals if there are adjacent corrosions on the pipe. It is difficult to distinguish such multiple defects directly from measurement data affected by various kinds of environmental conditions. One possible method is to construct a numerical model of nondestructive testing method and to consider an inverse algorithm using the numerical scheme in cooperation with measurement data.

In this paper, we propose a computational method for recovering and finding adjacent defects using a mathematical model of the corresponding electrical potential method. First, we summarize outline of underground-pipeline maintenance method using electrical potential method. Based on finite element method related to electrical potential problem, an inverse analysis for the problem is proposed. Secondly, laboratory experiments are performed in the testing environments. The effectiveness of the proposed numerical model is shown with the laboratory experiments. Finally, an inverse algorithm is proposed for estimating position and for sizing of adjacent defects. The proposed algorithms are composed of two steps. One step is to estimate the position of defects and the second step is to characterize the size of defects using Quasi-Newton method. Throughout the computational experiments, the validity of the proposed method is also demonstrated.