

# 種々の断面欠損鋼板に対するパルス渦電流板厚測定法で 得られる検出信号の特徴に関する研究

Study on output signals from the pulsed eddy current testing on steel plates with thickness loss of various shapes

安藤聡一郎\*, 北根安雄†, 西島悠太\*\*, 伊藤義人\*\*\*, 中野裕二郎\*\*\*\*

Soichiro Ando, Yasuo Kitane, Yuta Nishijima, Yoshito Itoh, Yujiro Nakano

\*名古屋大学大学院博士前期課程, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

†Ph.D, 名古屋大学大学院准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*工修, 西日本旅客鉄道(株)神戸保線区兵庫管理室(〒652-0897 神戸市兵庫区駅南通 5 丁目 5-2)

\*\*\*工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

\*\*\*\*工修, 有限会社ティティエス(〒675-8511 兵庫県加古川市野口町長砂 881)

Thickness measurement is essential to precise condition assessment of steel structures. In this research, the pulsed eddy current (PEC) thickness measurement method is studied, which can measure thickness without the surface treatment. The applicable limit of PEC is examined by measuring the thickness of specimens with various types of thickness loss and performing a finite element method for thickness-reduced steel plates of different types. As a result, it is found that to measure the reduced thickness of a small pitting is difficult, but to measure the average thickness is possible when thickness reduction is spread in a wider area. In addition, a measuring range of PEC and the effect of specimen's shape on measured thickness values are identified.

*Key Words: thickness measurement, pulsed eddy current, corrosion*

キーワード: 板厚測定, パルス渦電流, 腐食

## 1. 序論

### 1.1 背景

我が国では, 高度経済成長期に社会インフラが大規模に整備されたことにより, 現在整備後 50 年を経過したインフラが年々加速度的に増加しており, それら老朽化したインフラ施設の更新や維持管理が急務となっている。

土木鋼構造物においては, その寿命を支配する代表的劣化要因の疲労と腐食を点検・モニタリングによって把握し, その結果を健全性診断および将来の劣化の予測に使用し, 適切な対策を施すことが求められる。

鋼構造物の板厚測定に注目すると, 現在広く普及している方法が超音波測定法 (UT) である。UT は鋼材表面に当てたプローブから発せられた超音波が, 測定対象物の裏面で反射し, プローブに戻るまでの時間 (伝播時間) が超音波の通過する距離に比例するという関係を利用して板厚を測定する手法である。UT は理想的な測定環境下であれば精度よく板厚を計測できる。その一方で鋼材

表面の腐食生成物や海洋性付着物また表面凹凸に影響を受けやすいため, 精度良く測定するためには表面処理を施し, 平滑な鋼材表面にプローブを押し当てて計測する必要がある, 作業効率の悪さから対象構造物全体を測定するには多大な労力が必要である。この UT に比較して, 表面処理の必要がないため作業効率の点で有利である板厚測定手法が, 本研究で着目するパルス渦電流板厚測定法 (Pulsed Eddy Current Test, 以降 PEC と呼ぶ) である。

### 1.2 パルス渦電流板厚測定法 (PEC)

一般に広く渦電流を使用した非破壊試験として知られているのが渦電流探傷試験 (ET) であるが, ET が欠陥での渦電流の乱れを利用してクラックなどの欠陥の有無を発見するのに対して, PEC はパルス電流によって励起された渦電流の継続時間を板厚に換算する測定方法である。PEC はプローブから発せられる磁界の変化によって励起した鋼板内の渦電流の時間的変化を, この渦電流によって発生する磁界を検出することで板厚を測定する。

† 連絡著者/Corresponding author

E-mail: ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

鋼板の電磁気的性質が一樣であれば板厚が推定可能であり、導電性をもたない鋼の腐食生成物や海洋性付着物などの表面の付着物や塗膜であれば、測定結果に影響を与えないため、表面処理を行わずに測定することができる。そのため表面処理にかかる時間を削減でき、効率よく短時間で大量の測定を行うことができる。現在では、プラント内の配管設備や船舶等の腐食調査において、主にスクリーニングとして使用されている例がある<sup>1),2),3)</sup>。

### (1) PEC の原理

PEC は図-1 に示すような渦電流の浸透現象を利用した板厚測定法である。測定器は、測定対象にあてるプローブと呼ばれるセンサーと測定した板厚を記録するデータロガーの2つの要素から成り立っている。プローブは、渦電流を磁性体（鋼板）に誘起する励磁コイルと、鋼板からの信号を捉える検出コイルの2つで構成される。まずパルス波形の電流が励磁コイルに入力され、プローブから鋼板に向かって磁界が発生する。その後電流が遮断されると、急激な磁界変化により電磁誘導に則って磁性体（鋼板）表面に渦電流が発生し、図-1 に示すように時間の経過とともに渦電流が板厚方向に浸透する。そして渦電流が鋼板裏面に達すると急激に拡散減衰する。この電圧が急激に減少する点までの時間を渦電流の継続時間  $\tau$  という。 $\tau$  は、式(1)のように表される。

$$\tau = \mu \sigma d^2 \quad (1)$$

ここで、 $d$  は被測定物の板厚、 $\sigma$  は被測定物の電気伝導率、 $\mu$  は被測定物の透磁率である。

PEC では UT のように板厚の絶対値を測定するのではなく、基準板厚に対する相対値が得られる。板厚が既知である基準点での継続時間と測定点の継続時間を用いて板厚に換算する。測定点の板厚は式(2)で与えられる。

$$d = d_{ref} \sqrt{\frac{\tau}{\tau_{ref}}} \quad (2)$$

ここで、 $d$  は測定点の板厚、 $d_{ref}$  は基準点の板厚、 $\tau$  は測定点の渦電流継続時間、 $\tau_{ref}$  は基準点の渦電流継続時間である。

### (2) PEC の特徴

#### 1) 測定値

PEC で測定できる板厚は、フットプリントと呼ばれる測定範囲の中にある鋼材の板厚の平均値であることが経験的に知られており<sup>4)</sup>、図-2 に示すようにフットプリントは例えば錆厚、塗膜厚や海洋性付着物などに代表されるプローブと鋼板表面までの距離（リフトオフ）と鋼板厚を足し合わせた距離  $L_a$  を直径に持つ円と同程度であるとされている。そのため図-3 に示すような孔食のような局所的な腐食では、板厚の平均化により、その孔食の深さを測定値から読み取ることは難しい。減肉が一樣でない鋼材でも同様のことがいえる。また、フットプリントの大きさはリフトオフの大きさに依存するため、局

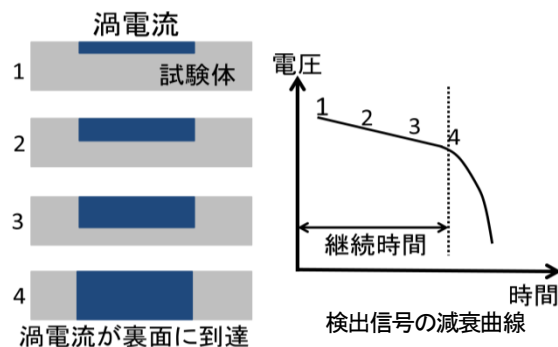


図-1 電流の浸透現象

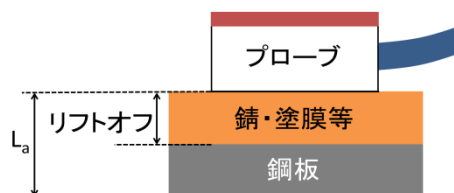


図-2 リフトオフの定義

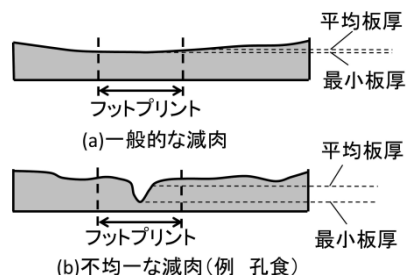


図-3 減肉の影響

所的な板厚をより正確に捉えるためには、リフトオフがなるべく小さい方が望ましい。図-3(a)に示すような腐食が比較的一様に発生している鋼材では、平均的な板厚と板厚の最小値とはあまり差がない。しかし、図-3(b)に示す孔食のように、一部で不均一に腐食が進展していると、板厚平滑化により板厚の最小値と平均板厚との差が大きくなる。

#### 2) 運用性

2011 年に行った港湾鋼構造物に対する PEC の適用実験において、UT では測定箇所一点あたり 20~30 分かかったのに対して、PEC では測定箇所一点あたり 15~30 秒程度であった<sup>5)</sup>。PEC は表面処理が必要ないため、UT に比べて一点あたりの板厚測定の作業時間は短く、効率良く大量の点の板厚評価が可能である。

#### 3) 磁性

PEC は、基準点における渦電流継続時間と測定点における渦電流継続時間の比を板厚に換算して測定点の板厚を測定するため、基準点と測定点の磁性が異なると正確な測定結果が得られない。例えば熱加工を施した部分（溶接部、焼き入れ加工部）などは熱加工されていない部分とは磁性が異なり、正確な測定ができない。したがって、基準点と測定点で磁性を同じにするために、同じ部材内で基準点と測定点を選定することが望ましい。



た。プローブの向きは Line-1 が上向き、Line-2 が下向きとし、プローブ頭側が供試体端部を向くように統一した。また、プローブ下面から鋼板下面までの距離  $L_a$  は、全ての供試体の測定で 30mm と 50mm の 2 ケースとした。

## (2) 供試体 B

図-6(c)と(d)にプローブの向きと測定位置を示す。腐食領域（腐食ピットφ10mm×144 個、φ20mm×36 個、φ40mm×9 個、各々120mm×120mm）について、測定箇所はφ10×144 では縦横に 5mm 間隔で 9 点、φ20×36 では縦横に 5mm 間隔で 25 点、φ40×9 では縦横に 10mm 間隔で 25 点とした。基準点は供試体右下無加工部の右端から 160mm、下端から 145mm の位置に設けた。また、プローブの下面から鋼板下面までの距離  $L_a$  は、全ての供試体の測定で 30mm と 50mm の 2 ケースとした。

## (3) 供試体 C

図-6(e)と(f)にプローブの向きと測定位置を示す。無加工部（12mm）である領域①について、領域中心を通る横線 Line-C-1、縦線 Line-C-2 の上を鋼板の端から 10mm 間隔で測定した。領域②（10mm）、領域③（8mm）、領域④（6mm）については、中心及び中心から上下左右に 30mm 間隔で 2 点ずつ、領域 1 つ当たり 9 点測定した。プローブの向きは一定（プローブ上側が常に供試体外側を向く）である。基準点は領域①の測定線交差部とした。領域②③④の基準点も領域①と同じものを用いた。

## 2.3 測定結果

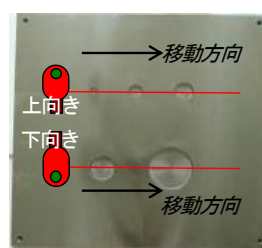
測定結果のうち、プローブの下面から鋼板下面までの距離  $L_a$  が 30mm の測定結果を中心に以下にまとめる。

### (1) 供試体 A

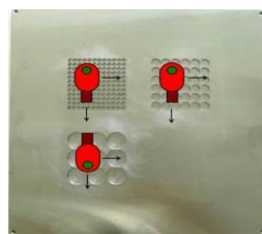
表-1 に  $L_a=30\text{mm}$  の場合の供試体 A のピット中心における測定値と経験値との差を示す。ここで、経験値とはプローブ下面から鋼板裏面までの距離  $L_a$  を直径とする範囲（フットプリント）における板厚の平均値である。 $L_a=30\text{mm}$  の場合は、φ30mm の円の範囲内の板厚の平均値を算出し、これを経験値として示した。また、 $L_a=30\text{mm}$  の場合の A-8 供試体の板厚測定結果を図-7 に示す。すべての供試体で、腐食ピットの直径が小さいと測定値の変化は小さいが、直径が 20mm 程度以上であると腐食ピットの存在を捉えることができている。一方で、経験値との誤差を比較すると、腐食ピットが深くなるほど、著しく測定値と乖離するため、今回フットプリントとした φ30 の円領域よりも、より大きな測定範囲が真のフットプリントではないかと推定される。

### (2) 供試体 B

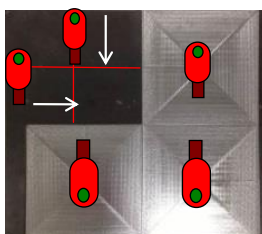
表-2 に  $L_a=30\text{mm}$  の場合の供試体 B の減肉領域中心における測定値と経験値との差を示す。表中の経験値は供試体 A と同様の方法で算出した。供試体 A と比較して、供試体 B の結果では孔食が深くなっても大きく理論値と乖離せず、経験値との差は約 1mm 以内で測定できることが明らかとなった。



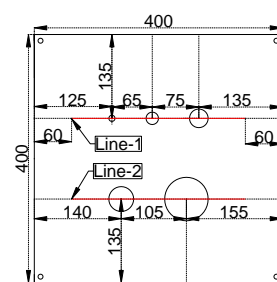
(a)プローブの向き及び移動方向(供試体 A)



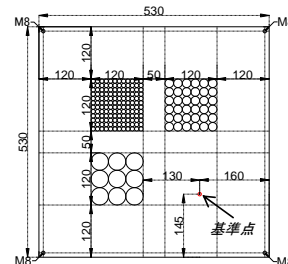
(c)プローブの向き及び移動方向(供試体 B)



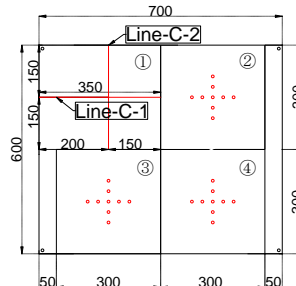
(e)プローブの向き及び移動方向(供試体 C)



(b)測定線位置(供試体 A)



(d)基準点位置(供試体 B)



(f)測定位置(供試体 C)

図-6 供試体測定方法（単位:mm）

表-1 供試体 A のピット中心における測定結果(mm)

供試体	減肉部 ①:φ10	減肉部 ②:φ20	減肉部 ③:φ30	減肉部 ④:φ40	減肉部 ⑤:φ70
A-2	12.0 (+ 1.43)	11.8 (+ 5.94)	11.5 (+ 14.9)	11.4 (+ 14.5)	10.6 (+ 5.80)
A-4	11.5 (- 1.89)	11.6 (+ 12.4)	11.1 (+ 38.5)	10.5 (+ 30.9)	9.65 (+ 20.6)
A-8	12.0 (+ 7.73)	11.3 (+ 34.1)	10.4 (+ 161)	9.64 (+ 141)	8.31 (+ 108)
A-12	11.4 (+ 7.03)	10.6 (+ 58.1)	8.70 (×)	7.52 (×)	—

注1) : ( ) は、経験値からの誤差  $e$  (単位 : %)

$$e = (t_m - t_e) / t_e \times 100 \quad (t_m: \text{測定値}, t_e: \text{経験値})$$

注2) : (×) は経験値が 0(mm)であったため誤差算出不可能

### (3) 供試体 C

供試体 C の Line-C-1 及び line-C-2 の測定結果を図-8 に示す。Line-C-1 では、 $L_a=30\text{mm}$  の場合、供試体の左端部から 90mm の位置までは端部の影響を受けており板厚が小さく評価されているが、左端部から 100~190mm までは測定値が約 12mm で一定となっている。しかし、基準点である左端から 200mm 以上では測定値が増加しており、領域境界部の影響を受けていると考えられる。

UT 測定値からもそのような傾向が若干見られたが、0.01～0.05mm 程度であった。左端部から 300mm の位置からは減少しており、領域②の影響であると考えられる。

Line-C-2 では、 $L_a=30\text{mm}$  の場合、供試体の上端部から 80mm の位置までは端部の影響を受けており板厚が小さく評価されているが、上端部から 90～150mm (領域①中央) までは測定値が約 12mm で一定となっている。プローブが端部に近いと、渦電流の発生領域が変わるため、電圧減衰曲線が影響を受ける。そのため中央より下側では、上側と異なりフラットな部分が見られず、下に向かって板厚は減少傾向にあり、領域③との境界部の影響であると考えられる。

これらの結果より、今回使用したプローブの磁界の影響範囲は、鋼板端部に対してはプローブ中心から 100mm 程度、板厚急変の境界部に対してはプローブ中心から 150mm 程度であると考えられる。

## 2.4 まとめ

人工的に腐食ピット加工した供試体を用いた PEC 測定で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 単一ピット形状の減肉は、減肉の存在を捉えられるがその減肉量を正確に捉えられない。
- 2) フットプリントの大きさは、プローブ下面から鋼板裏面までの距離  $L_a$  を直径とする範囲より大きい。
- 3) 複数ピット形状の減肉では、経験的なフットプリントで求めた経験値に近い板厚値が得られる。
- 4) 端部の影響を受ける範囲は、プローブ中心から 100mm 程度であった。

## 3. 有限要素法による PEC シミュレーション

PEC 測定の解析的な適用性の検討は、小坂ら<sup>6)</sup>や程ら<sup>7)</sup>などが行ったが、いずれも平らな板に対して検討が行われた。また、van den Berg<sup>8)</sup>は表面に正方形の孔食のある板に対する解析的検討を行った。本章では動磁場過渡応答解析を用いて、既往の研究では明らかにされていない様々な形状の断面欠損鋼板に対して PEC を適用した際、実際に渦電流や磁界がどのように分布しているか、実際の渦電流の浸透現象と電圧減衰曲線にどのような関係があるかを究明する。特に電圧減衰曲線から得られる渦電流継続時間と断面欠損形状との関係を調べ、実構造物での適用範囲を検討する。

### 3.1 解析条件

解析ソフトとして、電磁界解析ソフトウェア PHOTO-Series<sup>9)</sup>の動磁界・過渡応答解析モジュール EDDY を用いた。本解析では、基礎方程式であるマクスウェルの方程式に、要素の材料特性として、比透磁率および電気伝導率を与え、これを有限要素法で解いている。解析モデルは図-9 に示すように、鋼板、コイル、空気

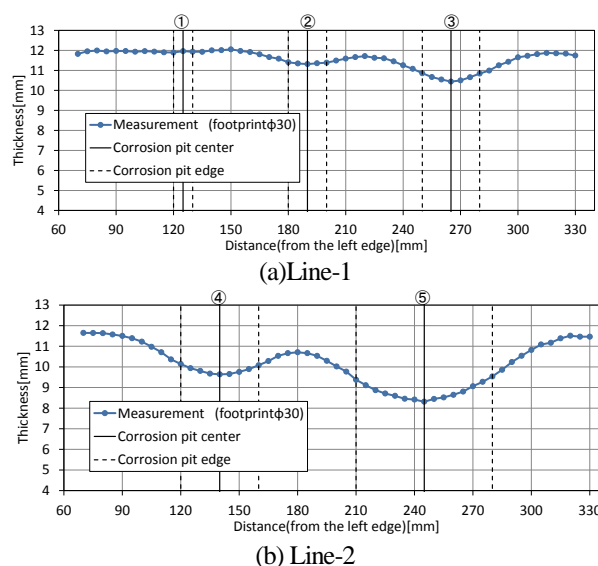


図-7 A-8 測定結果

表-2 供試体 B の減肉部中心における測定結果(mm)

供試体	減肉部 $\phi 10 \times 144$	減肉部 $\phi 20 \times 36$	減肉部 $\phi 40 \times 9$
B-2	10.6 (- 1.51)	10.6 (+ 0.94)	10.9 (+ 6.10)
B-4	8.85 (- 3.89)	8.93 (+ 1.31)	8.70 (+ 5.66)
B-8	4.68 (- 22.5)	5.10 (- 4.90)	5.32 (+ 23.9)

注：( ) は、経験値からの誤差  $e$  (単位：%)

$$e = (t_m - t_e) / t_e \times 100 \quad (t_m: \text{測定値}, t_e: \text{経験値})$$

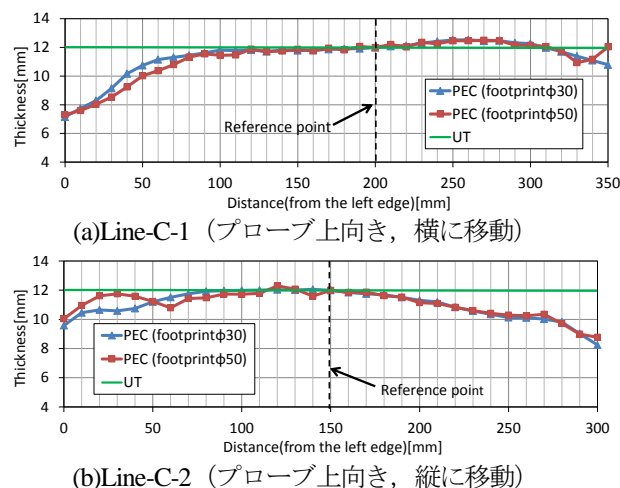


図-8 供試体 C 領域①測定結果

層からなる。要素数は最小のモデル(Model2-5)で約 19 万要素、最大のモデル(Model8-6)で約 98 万要素である。空気層のメッシュは、プローブ周辺及びプローブと鋼板との間で一辺約 5mm 立方体となっている。コイルモデルは文献8)の PEC シミュレーションの解析モデルを参考にし、励磁コイルは  $\phi 50\text{mm}$ 、検出コイルは一辺 25mm とした (図-10 参照)。すべてのモデルにおいてプローブの下面から鋼板の裏面までの距離  $L_a$  が 30mm となるよう

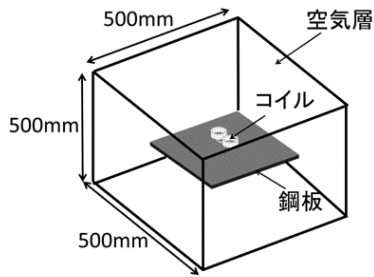


図-9 全体モデル

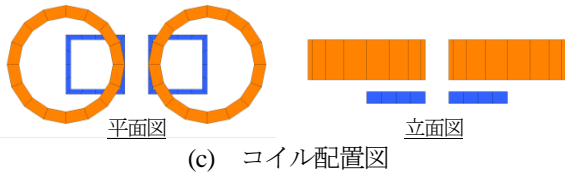
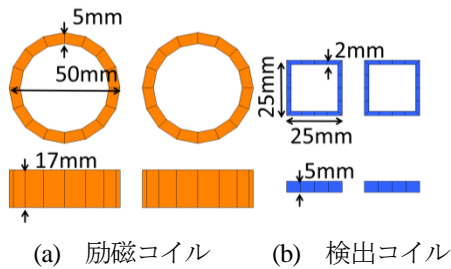


図-10 コイル概要

にコイルを配置した。鋼板の比透磁率は 200，電気伝導率は $6.7 \times 10^6$  [S/m]を使用した。励磁コイルに流す電流は，2つのコイルで電流方向が逆になるようにした。励磁コイルと検出コイルは2つずつあるが，2つのコイルで同時に励磁あるいは検出を行う。

### 3.2 解析モデル

図-11 に解析モデルを示す。また，表-3 に各解析モデルの概要を示す。鋼板モデルは，平板状の Model1，平板に単一のピット状減肉を設けた Model2，平板に複数のピット状減肉を設けた Model3，測定値と測定範囲について検討を行うための板厚が一樣勾配で減少している一方向テーパ状のモデル (Model4-1)，谷状の減肉が施されたモデル (Model4-2)，すり鉢状の減肉が施されたモデル (Model4-3)，一様腐食面として二重正弦波状の表面形状を持つモデル (Model5)，ピット状の孔食が測定結果に与える影響を検討するモデル (Model6)，鋼板端部の影響を検討するモデル (Model7)，鋼板の曲率の影響を検討するモデル (Model8)，実際の腐食面を再現したモデル (Model9) の9種類のモデルに対して解析を行った。

Model1 は平らな表面を持つ鋼板モデルで板厚が 12，10，8，6，4mm の5種類とした。

Model2 は鋼板中心に円形のピット減肉を持つモデルで，ピット直径が 10，20，30，40，70，100，200mm の7種類とし，プローブを鋼板中心に設置し解析を行った。また，実験との比較のため， $\phi 40$  のモデルはコイルを鋼板中心から 20mm と 70mm 移動させた場合， $\phi 70$  のモデ

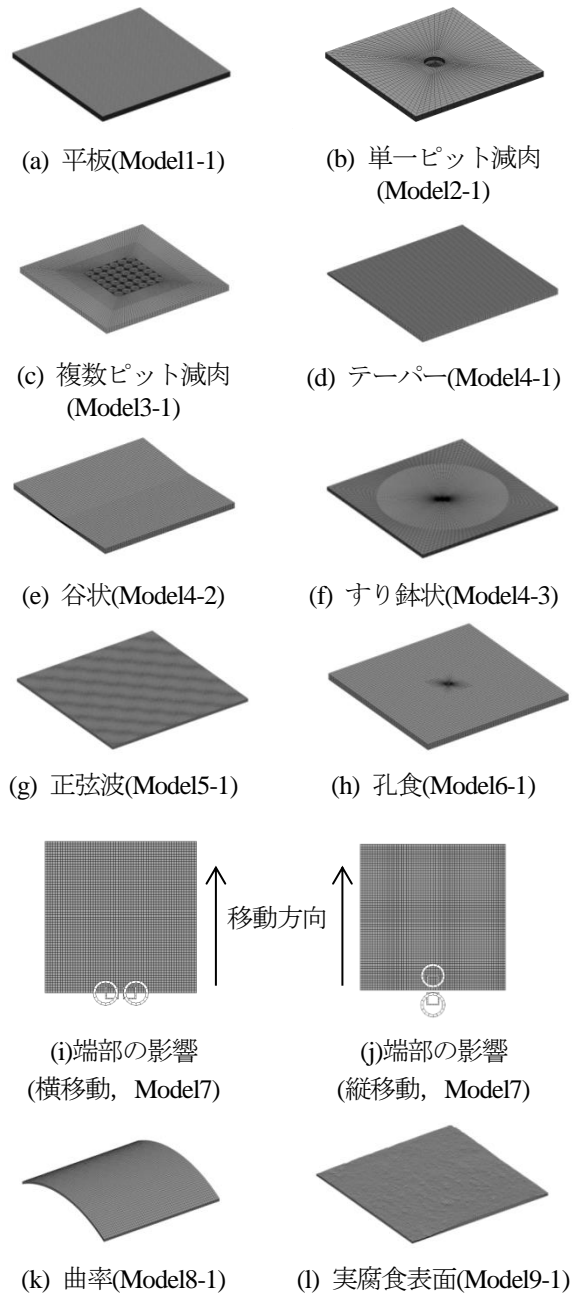


図-11 解析モデル

ルではコイルを鋼板中心から 35mm と 85mm 移動させた場合についても解析を行った。

Model3 は円形のピット減肉を複数持つモデルで，120mm x 120mm の領域に  $\phi 20$ mm のピットが 36 個の場合と， $\phi 40$ mm のピットが 9 個の場合の2種類とし，さらにピット減肉量を 4mm と 8mm の2種類として，合計4種類とした。

Model4-1 は，表面が一樣の勾配になっており傾きは一方方向のみとし，奥行き方向には一定の板厚となっている。最小板厚が 4mm，最大板厚が 12mm とした。Model4-2 は谷状の減肉加工が施されており，鋼板の中心線に向かって一樣勾配で板厚が減少しているモデルである。板厚が最小である中心部において板厚 4mm，最大である端部

表-3 モデル概要

(a)平板(Model1)

モデル	板厚 (mm)
Model1-1	12
Model1-2	10
Model1-3	8.0
Model1-4	6.0
Model1-5	4.0

(b)単一ピット減肉(Model2)

モデル	板厚 (mm)	ピット 寸法(mm)	ピット 深さ (mm)
Model2-1	12	φ10	8
Model2-2		φ20	
Model2-3		φ30	
Model2-4		φ40	
Model2-5		φ70	

(c)複数ピット減肉(Model3)

モデル	板厚 (mm)	ピット寸法 (mm)	ピット個数 (mm)	ピット深さ (mm)
Model3-1	12	20	36	4
Model3-2				8
Model3-3		40	9	4
Model3-4				8

(d)テーパー，谷状，すり鉢状(Model4)

モデル	表面形状	板厚(mm)	
		最小	最大
Model4-1	一様勾配	4	12
Model4-2	谷状		
Model4-3	すり鉢状		

(e)正弦波(Model5)

モデル	波長(mm)	振幅(mm)	最大板厚(mm)
Model5-1	60	1	12
Model5-2	30	1	
Model5-3	20	1	
Model5-4	10	1	
Model5-5	30	2	
Model5-6	10 と 60	1	
Model5-7	20 と 60	2	

(f)孔食(Model6)

モデル	ピット寸 法(mm)	板厚 (mm)
Model6-1	φ10	12
Model6-2	φ20	
Model6-3	φ30	
Model6-4	φ40	

(g)曲率(Model8)

モデル	曲率半径 (mm)	板厚 (mm)
Model8-1	300	6
Model8-2	200	
Model8-3	150	
Model8-4	100	
Model8-5	50	
Model8-6	37.5	

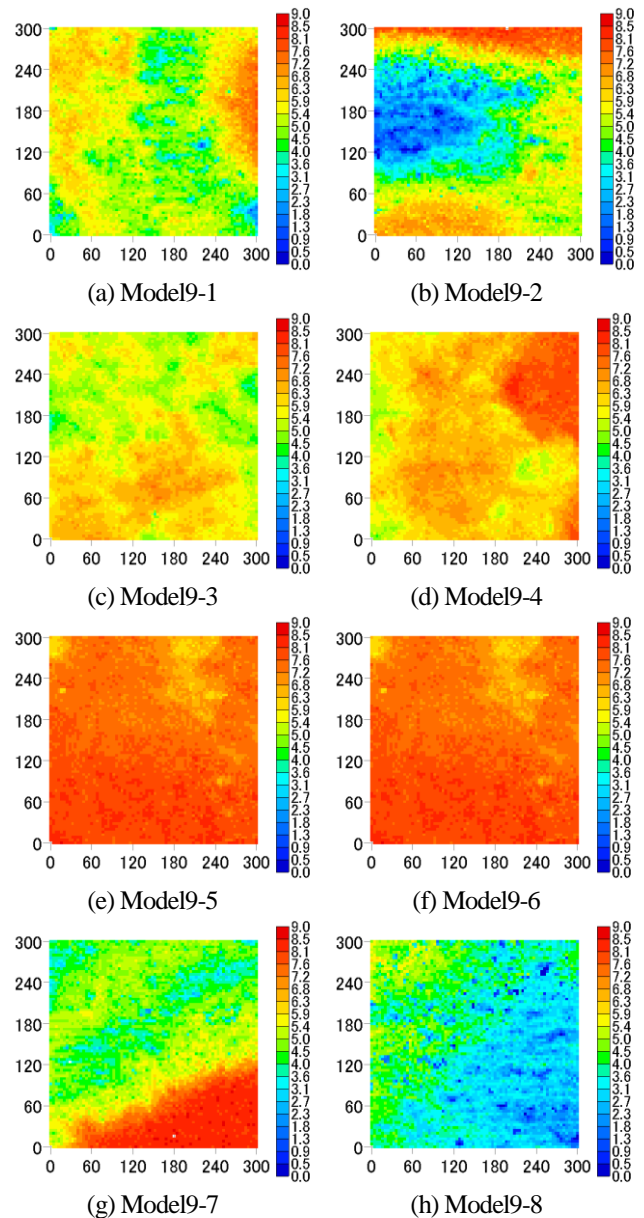


図-12 Model9 板厚分布 (単位: mm)

において板厚が 12mm となっている。Model4-1 と 4-2 の鋼板の大きさは 300mm×300mm とした。Model4-3 はすり鉢状の減肉を持つモデルであり、減肉部の直径が 400mm、最大板厚が 12mm、最小板厚が 4mm とした。鋼板の大きさは 500mm×500mm とした。

Model5 は板厚の平均値をすべて 6mm とし、表-3(e)に示すように振幅や波長が異なる 5 種類を考慮した。正弦波形状は鋼板の縦横で同じ波長の波を重ね合わせて作成したが、Model5-6 と 5-7 については縦横で異なる波長の波を重ね合わせて作成した。

Model6 では、すべて元厚 12mm で、円形の孔食を 1 つ板の中央に配置した。孔食深さは 12mm である。孔食の直径は 10, 20, 30, 40mm の 4 種類とした。

次に、Model7 は厚さ 12mm の平板を用いて、鋼板端部とプローブの中心線が一致している点を基準 (0mm) として、鋼板端部の影響を見るため、端部から鋼板中

央に向かう方向に 0, 25, 50, 75, 100mm の 5 例解析を行った。また、プローブを縦とした場合と横にした場合の 2 つの場合について解析を行った。

Model8 では、曲率半径の影響を見るため、曲率半径が 32.5mm から 300mm までのモデルを作成した。曲率半径が 300mm のモデルを Model8-1, 200mm のモデルを Model8-2, 150mm のモデルを Model8-3, 100mm のモデルを Model8-4, 50mm のモデルを Model8-5, 37.5mm のモデルを Model8-6 とした。Model8-1 は円周の 16.7%, Model8-2 は円周の 27.0% をモデル化し、Model8-3 および Model8-4 は鋼管の 1/2, Model8-5 及び Model8-6 は鋼管をフルモデルで作成した。Model8 の軸方向の長さはすべて 300mm とした。

最後に Model9 は、約 19 年間海洋暴露された無防食スパイラル鋼管杭（直径 406.4mm, 長さ 1200mm, 初期板厚 9mm）の京都大学による板厚計測データ<sup>10)</sup>を用いて腐食表面を作成した。板厚データは、飛沫帯の DL+2700~+3900 から採取された供試体 No.1 と No.5 と、干満帯の DL+500~+1700 から採取された供試体 No.2, 海中部の DL-1500~2700 から採取された供試体 No.3 の 4 例を用いた。各供試体の板厚データのうち、300×300mm の範囲のデータを 2 箇所取り出し、平板として解析モデルを作成した。供試体 No.1 のデータから Model9-1 と 9-2, 試体 No.2 から Model9-3 と 9-4, 供試体 No.3 から Model9-5 と 9-6, 供試体 No.5 から Model9-7 と 9-8 を作成した。Model9 の板厚分布は図-12 に示す。

### 3.3 解析結果と考察

#### (1) 平板モデル (Model1)

図-13 にパルス電流遮断時を  $t=0(s)$  としたときの Model1 における検出コイルの電圧の時刻歴を示し、表-4 に電圧減衰曲線から得られた渦電流継続時間と、それを用いて式(2)から計算された板厚の計算結果を示す。ここでは、板厚計算の基準として Model1-1 の曲線を使用した。本論文では板厚計算の基準として使用する曲線を基準曲線と呼ぶこととする。ここで減衰開始点（渦電流継続時間）の決定方法概要を図-14 に示す。減衰開始点は式(3)を初めて満たす時間  $t$  を減衰開始点  $\tau$  とした。

$$V_a(t)/V_b(t) \leq 0.8 \quad (3)$$

ここで、 $V_a(t)$  は電圧減衰曲線の時間  $t$  での電圧、 $V_b(t)$  は電圧減衰曲線の初期直線部の近似直線による時間  $t$  での電圧である。表-4 から、板厚が小さくなるほど電圧の減衰が早くなっていることがわかる。解析により得られた板厚の解析結果と実験結果を比較すると、誤差が 3.7% 未満と良い精度で評価できており、平板のようなモデルではこの解析法で PEC が精度良く再現できているといえる。なお、平板 4mm (Model1-5) については実験データがないため実験値との比較はできないが、モデル板厚と比べてみるとその誤差は 8.8% 以内で評価できている。また、図-15 に Model1-1 の電流遮断後  $t=0.001(s)$  後の鋼板

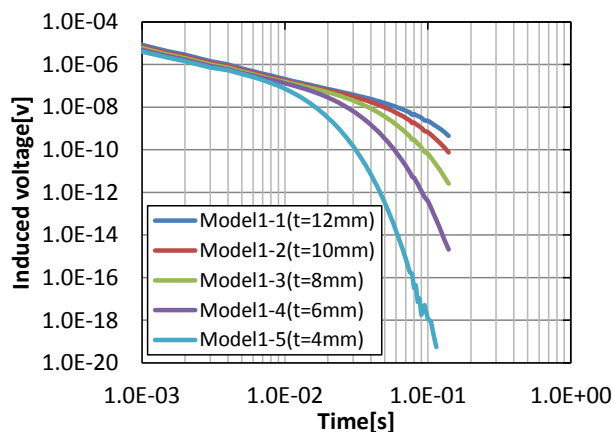


図-13 電圧減衰曲線(Model1: 平板)

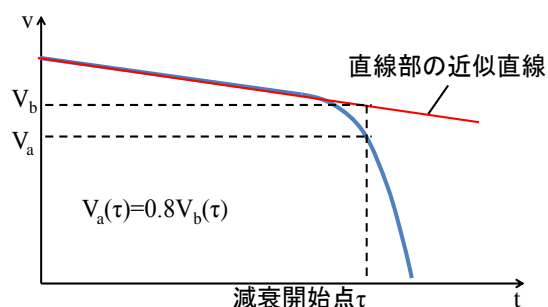


図-14 減衰開始点

表-4 解析結果(Model1: 平板)

Model	減衰開始点 (s)	得られた 板厚(mm)	実験値 (mm)
Model1-1 (t=12mm)	0.06266	12.0	基準
Model1-2 (t=10mm)	0.04284	9.92	10.1
Model1-3 (t=8mm)	0.02774	7.98	8.20
Model1-4 (t=6mm)	0.01631	6.12	5.90
Model1-5 (t=4mm)	0.00822	4.35	

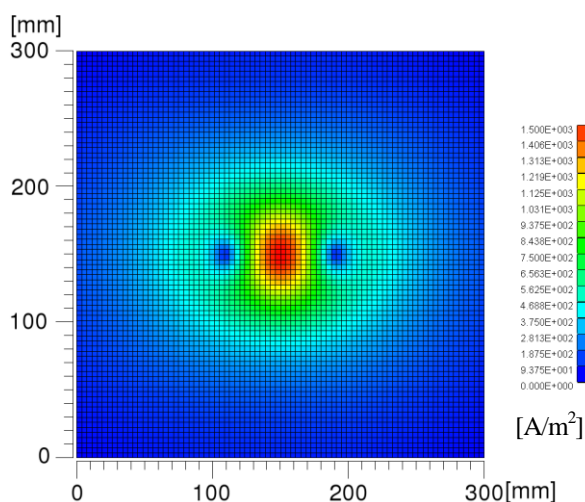


図-15 電流遮断後  $t=0.001(s)$  後の鋼板表面の渦電流分布(Model1-1)

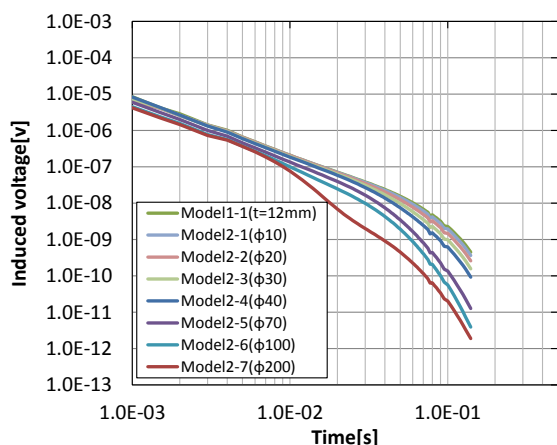
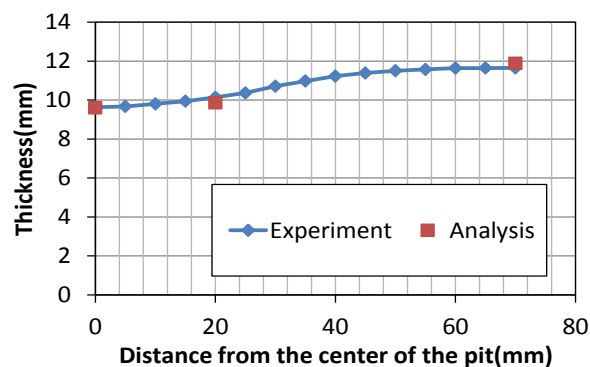


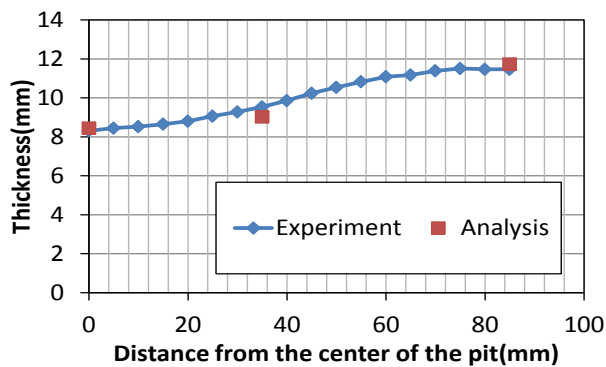
図-16 電圧減衰曲線(Model2：単一ピット減肉)

表-5 解析結果(Model2：単一ピット減肉)

Model	減衰開始 点 (s)	板厚(mm)		減肉部 の板厚 (mm)
		解析値	実験値	
Model1-1 (平板 t=12mm)	0.06266	基準 (12mm)		
Model2-1(φ10)	0.06159	11.9	12.0	4
Model2-2(φ20)	0.04998	10.7	11.3	4
Model2-3(φ30)	0.04272	9.91	10.4	4
Model2-4(φ40)	0.04006	9.59	9.65	4
Model2-5(φ70)	0.03107	8.45	8.45	4
Model2-6(φ100)	0.02595	7.72		4
Model2-7(φ200)	0.00999	4.79		4



(a) Model2-4 (φ40mm)



(b) Model2-5 (φ70mm)

図-17 板厚とプローブ位置の関係

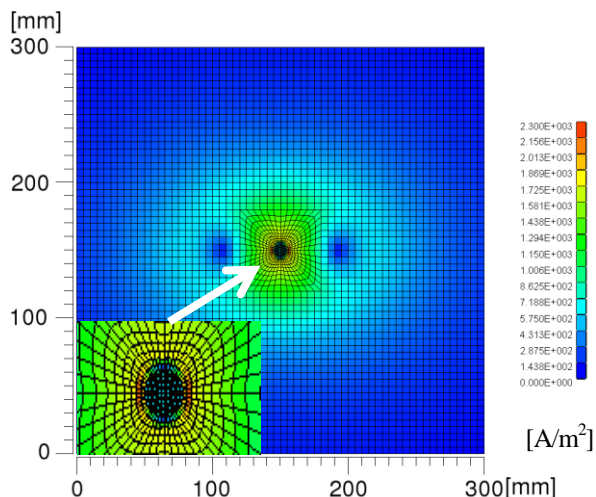


図-18 電流遮断後  $t=0.001(s)$  後の鋼板表面の渦電流分布(Model2-1)

表面の渦電流分布を示す。本研究で使用したプローブは、励磁コイルが2つ内包するプローブである。コイル内を流れる電流の方向はそれぞれで異なる方向にしているため、対応する渦電流も異なる方向で発生する。その結果、中心付近で渦電流が強め合うため、鋼板に発生する渦電流は図-15のように鋼板中心付近で強く発生する。

## (2) 単一ピット減肉モデル(Model2)

図-16 にパルス電流遮断時を  $t=0(s)$  としたときの Model2 における検出コイルにおける電圧の時刻歴および基準曲線(Model1-1)を示し、表-5 に電圧減衰曲線から得られた渦電流継続時間と、また、それを用いて式(2)から計算された板厚の計算結果を示す。なお、表-5 はプローブを鋼板中心に設置し解析した場合のみを示した。また、図-17(a)に Model2-4 におけるプローブ位置と板厚の関係を示す。また、図-17(b)に Model2-5 におけるプローブ位置と板厚の関係を示す。また、Model2-1 の電流遮断後 0.001 秒後の鋼板表面の渦電流分布を図-18 に示す。図-17 に示す通り、非常に良い精度で一致する実験結果と解析結果が得られている。減肉部の板厚と比較すると、ピット寸法が大きくなるほど、解析値が減肉部の板厚と近くなっており、これは発生する渦電流分布に占める減肉部の面積が大きくなるためであると考えられる。

図-16 の Model2-7 の曲線は、他のモデルと異なり一様に減衰していない。これは発生する渦電流が減肉部に集中した結果、減肉部の減衰開始点と健全部の減衰開始点が明確に表れ、減肉部の減衰による電圧降下が先に生じ、減肉部の渦電流が減衰しきった後、健全部の減衰が開始するためにこのような曲線となったと考えられる。

## (3) 複数ピット減肉モデル(Model3)

図-19 にパルス電流遮断時を  $t=0(s)$  としたときの Model3 における検出コイルにおける電圧の時刻歴を示し、表-6 に電圧減衰曲線から得られた渦電流継続時間と、それを用いて式(2)から計算された板厚の計算結果を

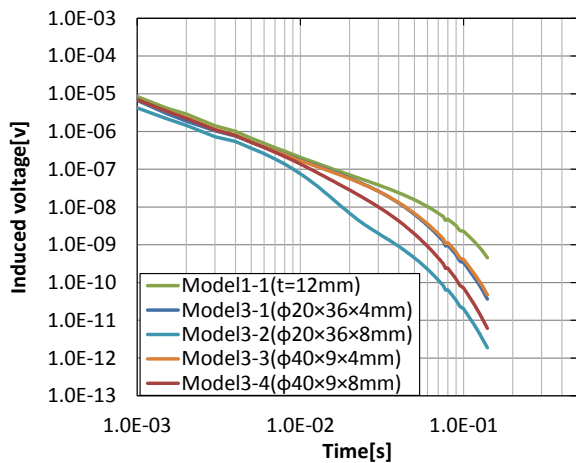


図-19 電圧減衰曲線(Model3：複数ピット減肉)

表-6 解析結果(Model3：複数ピット減肉)

Model	減衰開始点 (s)	板厚(mm)		減肉部の 板厚(mm)
		解析値	実験値	
Model1-1 (平板 t=12mm)	0.06266	基準 (12mm)		
Model3-1 (φ20 × 36, 4mm 減肉)	0.03305	8.72	9.02	8
Model3-2 (φ20 × 36, 8mm 減肉)	0.01074	4.97	5.16	4
Model3-3 (φ40 × 9, 4mm 減肉)	0.03558	9.04	8.70	8
Model3-4 (φ40 × 9, 8mm 減肉)	0.01168	5.18	5.32	4

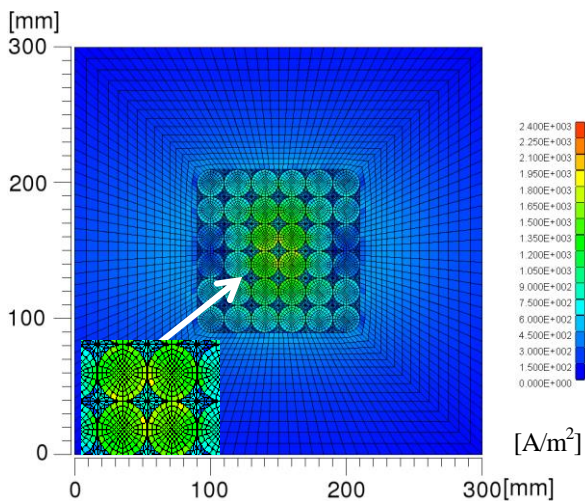


図-20 電流遮断後  $t=0.001$ (s)後の鋼板表面の渦電流分布(Model3-1)

示す。また、Model3-1 の電流遮断後 0.001 秒後の鋼板表面の渦電流分布を図-20 に示す。解析で得られた板厚は、実験値と比較すると 4% 以内の誤差で評価できている。また、減肉部の板厚と解析値及び実験値を比較すると、ほぼ一致する。これは、Model2 において議論したように、渦電流分布に占める減肉部の面積が大きくなったためであると考えられる。以上より、本解析手法で、複数ピットが存在するような複雑な表面形状の場合でも、PEC に

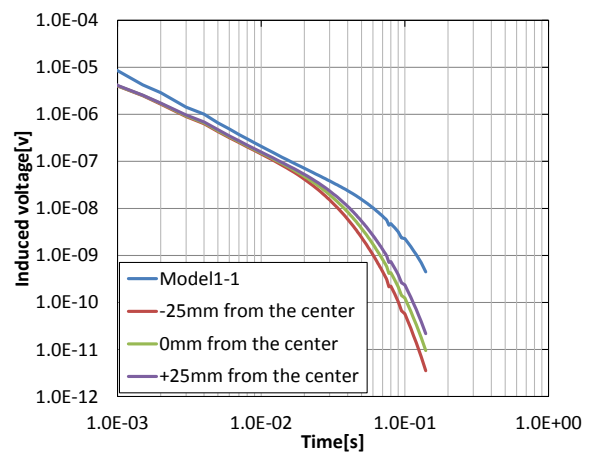


図-21 電圧減衰曲線(Model4-1：一方向テーパ)

表-7 解析結果(Model4-1：一方向テーパ)

Model	解析結果		測定範囲内の 平均板厚(mm)
	減衰開始点(s)	板厚(mm)	
Model1-1 (平板 t=12mm)	0.06266	基準 (12mm)	
コイルの 位置	-25mm	0.02335	7.33
	0mm	0.02799	8.02
	+25mm	0.03127	8.48

よる板厚測定をほぼ再現できていると判断できる。

#### (4) 測定範囲と板厚の関係(Model4)

図-21 に 3 種のコイル位置の Model4-1 の解析結果および基準曲線(Model1-1)を示す。また、解析より得られた電圧減衰曲線に基づいた板厚の計算結果を表-7 に示す。Model4-1 では 1 方向テーパであるため、フットプリントを円や楕円と仮定すると、測定範囲の大きさに限らず、フットプリントの板厚平均値は必ずプローブの中心直下の板厚になる。そのためコイルが勾配方向に移動すれば、測定範囲の平均板厚は増減する。表-7 から、解析から得られた板厚は経験値と比較して、すべて誤差 2.2% 以内で評価できている。PEC では測定範囲内の平均板厚が測定されていることが明らかとなった。

図-22 に Model4-2, Model4-3 の解析による電圧減衰曲線結果及び基準曲線(Model1-1)を示す。また、表-8 に 12mm の平板を基準にした板厚の計算結果と、経験則による板厚値、解析結果の板厚を平均板厚とするための測定範囲の寸法を示す。

経験則による板厚値とは、プローブ下面から鋼板裏面までの距離  $L_a$  を直径とする範囲の板厚平均値であり、解析では  $L_a=30\text{mm}$  であることから、測定範囲を  $\phi 30\text{mm}$  の円と仮定してその範囲の板厚の平均値を算出した。また、解析結果から得られた板厚を平均板厚とするように逆算したフットプリントは、経験則で想定している円形と、渦電流分布形状が最も強く渦電流が発生する領域が楕円形に広がっていることから楕円を仮定した。楕円の長径と短径の比は、 $L_a=30\text{mm}$  で 12mm 厚の平板の解析で、電

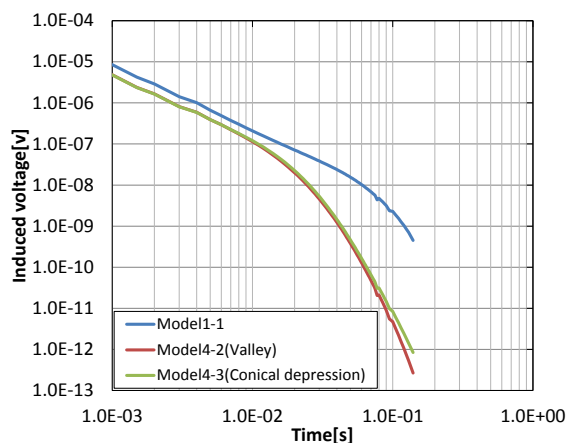


図-22 電圧減衰曲線(Model4-2, Model4-3)

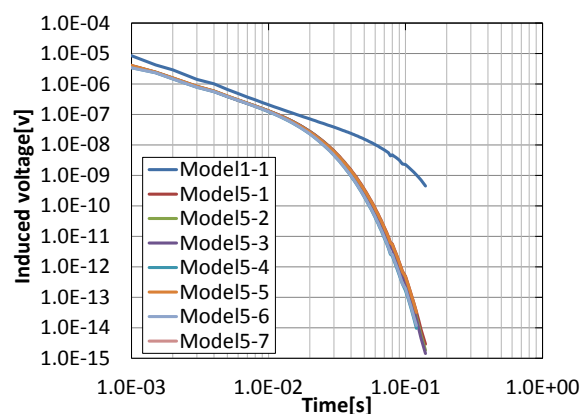


図-24 電圧減衰曲線(Model5：正弦波)

表-8 解析結果(Model4-2, Model4-3)

Model	解析結果		経験則による板厚 (mm)	解析結果から求めた測定範囲(mm)		
	減衰開始点(s)	板厚 (mm)		円 (直径)	楕円 (長径)	楕円 (短径)
Model1-1 (平板 t=12mm)	0.06266	基準 (12mm)				
Model4-2 (谷状)	0.01096	5.02	4.34	91	63.1	45.1
Model4-3 (すり鉢状)	0.01266	5.39	4.40	102	61.1	42.8

表-9 解析結果(Model5：正弦波)

Model	減衰開始点(s)	得られた板厚(mm)
Model1-1 (Plate t=12mm)	0.06266	基準 (12mm)
Model5-1 (波長 60mm, 振幅 1mm)	0.01468	5.81
Model5-2 (波長 30mm, 振幅 1mm)	0.01430	5.73
Model5-3 (波長 20mm, 振幅 1mm)	0.01423	5.72
Model5-4 (波長 10mm, 振幅 1mm)	0.01422	5.72
Model5-5 (波長 30mm, 振幅 2mm)	0.01520	5.91
Model5-6 (波長 60mm と 20mm, 振幅 1mm)	0.01410	5.69
Model5-7 (波長 60mm と 10mm, 振幅 1mm)	0.01428	5.73

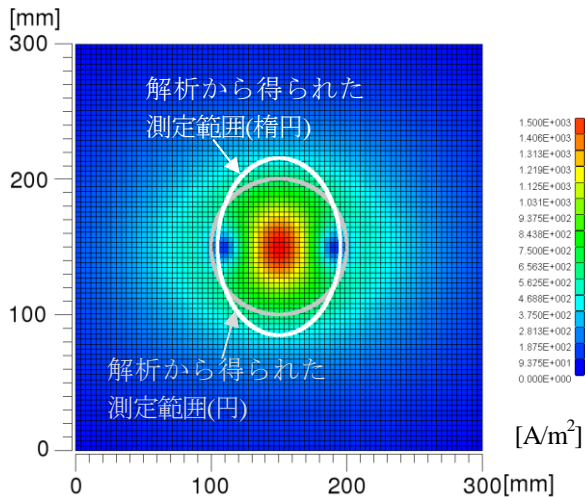


図-23 電流遮断後 t=0.001(s)後の鋼板表面の渦電流分布(Model1-1)

流遮断後の鋼板表面の渦電流分布 (図-23 参照) のコンター図上で渦電流が強く発生する楕円領域(コンター図上で赤および黄色の部分) の長径と短径の比を求め、測定範囲 (フットプリント) の計算に使用した。

Model4-2 と Model4-3 では経験則による板厚値と解析結果が大きく異なっており、経験則によるフットプリントが実際のフットプリントと大きく異なっていることを示している。解析結果の板厚を得るようにフットプリン

ト形状を円または楕円として逆算したフットプリントの大きさと比較すると、その寸法が Model4-2 と Model4-3 で概ね一致する。時間解析で得られた測定範囲は円と仮定するとおよそ直径 100mm、楕円と仮定すると長径 65mm 短径 45mm の境界内の領域を測定範囲とする板厚の平均値が得られていることが明らかとなった。

#### (5) 正弦波モデル(Model5)

図-24 に二重正弦波の表面形状をもつ Model5 の解析結果と、基準曲線(Model1-1)を示す。また、表-9 に解析結果から得られた板厚を示す。Model5 のすべてのモデルの電圧減衰曲線の結果がほぼ重なっている。板厚の解析結果は、平均値の 6mm から約 4% の誤差に収まっており、今回用いた正弦波形状程度の腐食表面でも、測定範囲内の板厚の平均値が PEC により得られることが明らかとなった。

#### (6) 孔食モデル(Model6)

図-25 に Model6 の解析により得られた電圧減衰曲線結果と、基準曲線(Model1-1)を示す。表-10 に電圧減衰曲線から得られた板厚を解析値として示す。また、Model6-1 の電流遮断後 0.001 秒後の鋼板表面の渦電流分布を図-26 に示す。解析値と実験値を比較すると、最大で誤差約 6% であり、良い精度で実際の測定結果を再現できている。

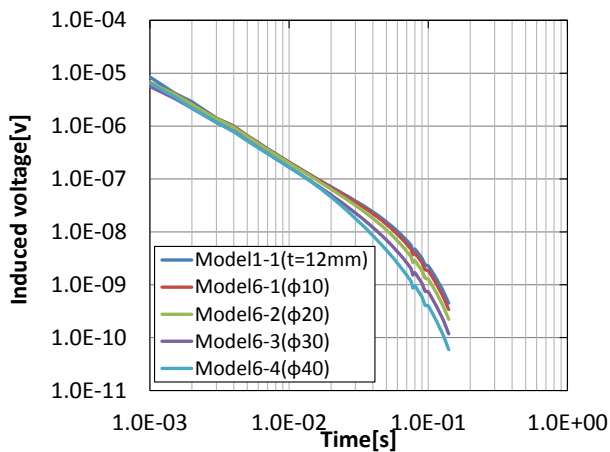


図-25 電圧減衰曲線(Model6 : 孔食)

表-10 解析結果(Model6 : 孔食)

Model	解析結果		実験値 (mm)	測定範囲内 の平均板厚 (mm)
	減衰開始点 (s)	板厚(mm)		
Model1-1 (平板 t=12mm)	0.06266	基準 (12mm)		
Model6-1(φ10)	0.05420	11.2	11.4	11.9
Model6-2(φ20)	0.04353	10.0	10.6	11.6
Model6-3(φ30)	0.02934	8.21	8.70	11.1
Model6-4(φ40)	0.02236	7.17	7.50	10.4

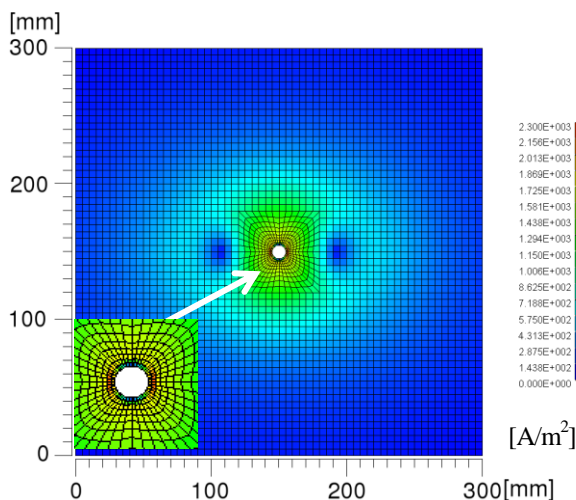


図-26 電流遮断後 t=0.001(s)後の鋼板表面の渦電流分布(Model6-1)

孔食のように板厚が全くない欠損の場合でも、渦電流の継続時間は短くなることが判明した。また、孔食寸法が大きくなるにつれて、解析結果から計算される板厚は小さくなる。一方で、Model4において算出したフットプリント内の平均板厚と解析値は大きく異なっているが、これは、図-26に示したように、渦電流分布がコイル直下中央部に集中して発生するため、中央部に孔食が存在すると鋼材がその部分にないことになり、解析結果への影響が大きいためと考えられる。

## (7) 端部の影響(Model7)

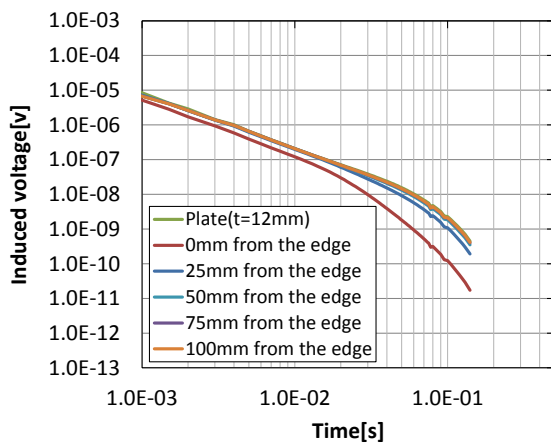
図-27に解析で得られたModel7の電圧減衰曲線結果と、基準曲線(Model1-1)を示す。また、図-28に、鋼板端部からのコイルの位置を横軸に取り、その位置で得られた解析結果による板厚との関係を示す。さらに、フットプリントを円または楕円としたときの平均板厚値、また、2.3(3)で示した実験結果を合わせて示す。

解析と実験ともに、鋼板端部にプローブが近づくと、計測される板厚が小さくなっている。これは端部に近いほど渦電流が発生している範囲が小さくなるためであると考えられる。プローブを横移動させた場合と縦移動させた場合のどちらの場合においても、解析値は実験値と非常によく一致していることがわかり、解析により端部の影響が正確に表現されていることがわかった。また、フットプリント内の板厚平均値と実験結果とを比較するとコイルを横移動させた場合においては、よく一致しているが、縦移動の場合は、鋼板端部近傍において、フットプリント内の平均板厚が、実験結果より大幅に小さくなっている。この理由として、板端部における渦電流の集中が考えられる。

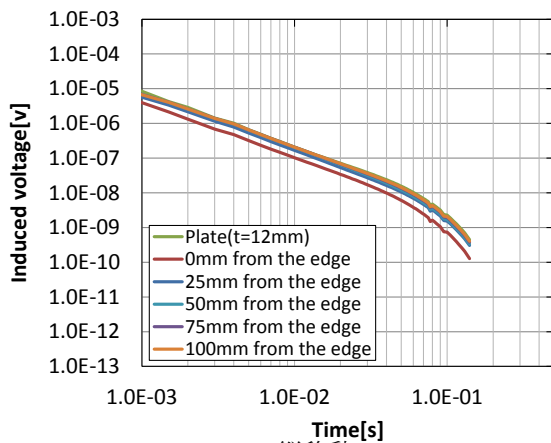
図-28から、横方向、縦方向ともに100mm程度プローブを離すことで端部の影響がかなり小さくなり、鋼板本来の板厚である12mmとほぼ同じ板厚を得られることがわかった。したがって、実測定で、端部の影響を除外するためには、プローブから部材端部までの距離を最低でも上下左右に100mm程度離す必要がある。今回は鋼板裏面からプローブ下端までの距離が30mmとなるように測定を行ったが、鋼板からプローブまでの距離が大きくなれば、さらにフットプリントは大きくなるため、端部の影響を受けない測定を行うためには、今回の結果よりもより大きな距離を端部から離す必要があると考えられる。

## (8) 曲率半径(Model8)

図-29にModel8の解析より得られた電圧減衰曲線結果と、基準曲線となる平板(板厚6mm)の電圧減衰曲線を合わせて示す。また、表-11に電圧減衰曲線から計算された板厚の結果を示す。Model8では、曲率の影響で、プローブから離れるにしたがってプローブ直下よりリフトオフ(プローブからの距離)が増大していく。そのため放射される磁場が小さくなるため、渦電流により発生する磁場も平板で得られる磁場の分布よりも曲面に沿って小さくなる。その結果、極微小ではあるが、検出コイルで得られる誘導電圧が減少しているが、今回対象としたモデルでは、曲率による測定板厚の減少はほぼ見られなかった。ゆえに、今回のコイルモデルであれば曲率半径が37.5mm以上であれば曲率の影響は非常に小さいことが明らかとなり、例えば港湾鋼構造物の鋼管杭や道路橋の円形断面鋼製橋脚などへの適用は問題ないといえる。

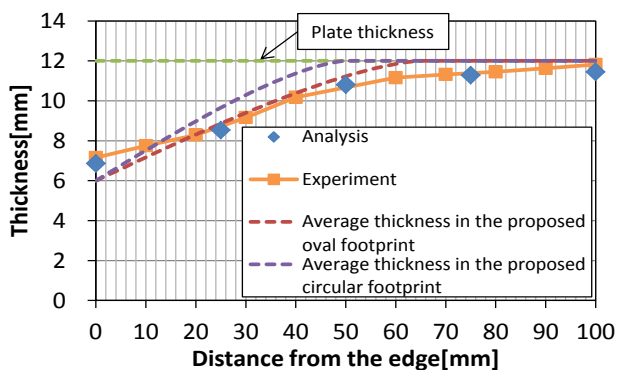


(a)横移動

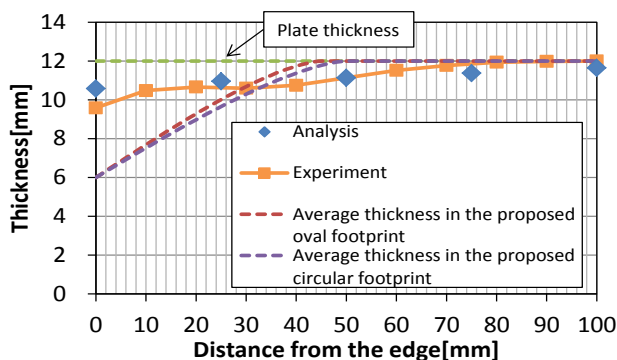


(b)縦移動

図-27 電圧減衰曲線 (Model7: 端部の影響)



(a)横移動



(b)縦移動

図-28 板厚と端部からの距離の関係

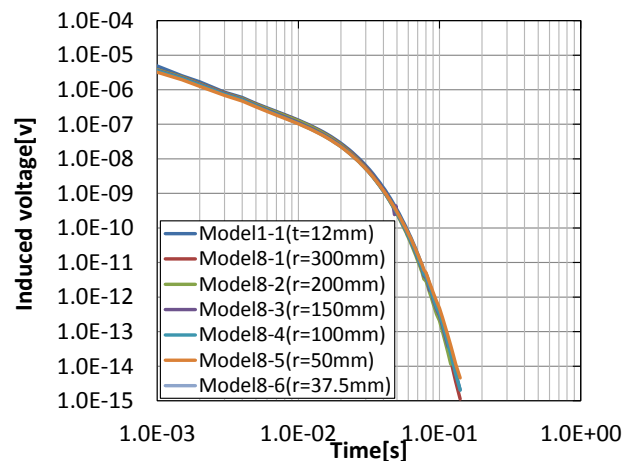


図-29 電圧減衰曲線(Model8: 曲率の影響)

表-11 解析結果(Model8: 曲率の影響)

Model	減衰開始点(s)	板厚(mm)
Model1-4(平板 t=6mm)	0.01631	基準(6mm)
Model8-1(r=300mm)	0.01576	5.90
Model8-2(r=200mm)	0.01566	5.88
Model8-3(r=150mm)	0.01505	5.76
Model8-4(r=100mm)	0.01492	5.74
Model8-5(r=50.0mm)	0.01514	5.78
Model8-6(r=37.5mm)	0.01522	5.80

#### (9) 実腐食表面モデル(Model9)

図-30 に Model9 の解析で得られた電圧減衰曲線結果と、基準点となる 12mm の平板の電圧減衰曲線を合わせて示す。また、表-12 に電圧減衰曲線から得られた板厚の計算結果と理論値を示す。飛沫帯、干満帯、海中部すべてのモデルで、測定範囲内の平均板厚が良い精度で捉えられている。板厚の解析値とフットプリント内の板厚平均値を比較すると、想定するフットプリントの形状に関わらず精度良く評価できており、解析値とフットプリント内の平均板厚の誤差は最大で 0.33mm、相対誤差約 9%であった。したがって、今回モデルに使用した海洋曝露された鋼管杭の飛沫帯程度の激しい腐食凹凸形状であっても、PEC によって平均板厚が測定可能である。

#### 4. 結論

本研究では、パルス渦電流板厚測定法 (PEC) に着目し、様々な断面欠損が生じた鋼板に対し、実測定と有限要素法を用いた動磁場過渡応答解析による PEC シミュレーションを実施し、様々な断面欠損に対する PEC 検出信号の特徴と、PEC 板厚測定の腐食した鋼構造物に対する適用性を検討した。

- 1) 孔食などの板厚が急激に変化する場合を除き、PEC で測定される板厚は測定範囲 (フットプリント) 内の平均板厚であることを明らかにした。

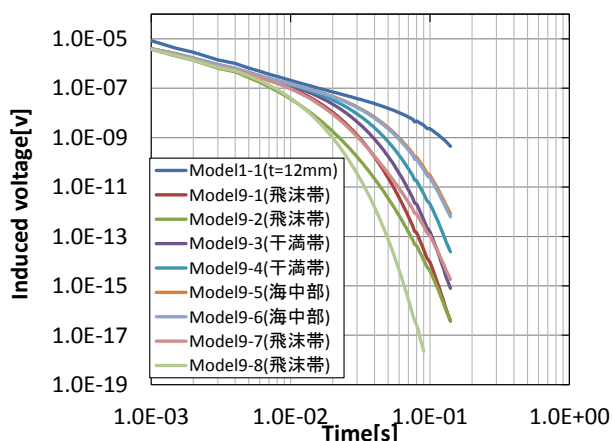


図-30 電圧減衰曲線(Model9：実腐食表面)

表-12 解析結果(Model9：実腐食表面)

Model	解析結果		鋼板全体の平均板厚 (mm)	測定範囲内の平均板厚 (mm)	
	減衰開始点(s)	板厚 (mm)		円	楕円
Model1-1 (平板 t=12mm)	0.06266	基準 (12mm)			
Model9-1(飛沫帯)	0.00931	4.63	5.25	4.70	4.75
Model9-2(飛沫帯)	0.00473	3.30	4.65	3.10	3.13
Model9-3(干満帯)	0.01391	5.65	5.66	5.81	5.85
Model9-4(干満帯)	0.01885	6.58	6.46	6.45	6.48
Model9-5(海中部)	0.02499	7.58	7.47	7.63	7.63
Model9-6(海中部)	0.02458	7.52	7.52	7.53	7.55
Model9-7(飛沫帯)	0.00881	4.50	5.47	4.62	4.65
Model9-8(飛沫帯)	0.00587	3.67	3.46	3.40	3.34

- 従来フットプリントとされていたプローブ下面から鋼板裏面までの距離を直径に持つ円の領域よりも大きな範囲をフットプリントとする方が、測定結果および解析結果を説明する上で合理的であることが判明した。
- PECで測定できない例として、孔食やサイズの小さい腐食ピットなどの局所的な減肉は、その減肉深さを測定することが困難であり、また、フットプリントの平均板厚を捉えることも難しい。ただし、今回使用したプローブのサイズでは、 $\phi 20\text{mm}$  程度以上であれば測定結果から板厚が減少していることは捉えられる。
- 鋼板端部の影響をみるための Model7 の解析結果から本研究で想定したプローブの場合、プローブ中心と鋼板端部までの距離を上下左右に 100mm 以上確保することで端部によって渦電流の大きさが制限されるのを防ぎ、端部の影響のない正確な板厚を測定可能である。
- 本研究で想定したプローブの場合、曲率半径が 37.5mm 程度の鋼管であれば、測定結果に曲率の影響はほとんどない。実際に測定する際は、リフトオフの変化による影響を少なくするため、鋼管軸方向にプローブの長

軸を合わせると良い。

- PEC では、鋼管杭の飛沫帯、干満帯、海中部などのすべての部位においてフットプリントの平均板厚を測定することが可能であり、今回検討した腐食鋼板では、フットプリント内の平均板厚からの誤差が最大で 9% 程度であった。

## 謝辞

本研究の一部は、一般社団法人日本鉄鋼連盟 2014 年度「鋼構造研究・教育助成事業」の助成をもとに行われたものである。ここに記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- Robers, M.A. and Scottini R.: Pulsed eddy current in corrosion detection, Proceedings of the 8th European Conference on Nondestructive Testing, Barcelona, Spain, 2002.
- Lozev, M.G., Smith, R.W., and Grimmet, B.B.: Evaluation of methods for detecting and monitoring of corrosion damage in risers, Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of ASME, Vol. 127, pp. 244-254, 2005.
- Crouzen, P. and Munns, I.: Pulsed eddy current corrosion monitoring in refineries and oil production facilities – experience at Shell, Proceedings of the 9th European Conference on Nondestructive Testing, Berlin, Germany, 2006.
- SHELL Global Solutions: PEC Training guide, 2004.
- 北根安雄, 西島悠太, 伊藤義人, 中野裕二郎: 港湾鋼構造物におけるパルス渦電流板厚測定の適用可能性の検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.943-949, 2013.
- 小坂大吾, 橋本光男: 鋼板厚さ測定におけるパルス渦電流試験の解析と実験からの検討, 非破壊検査, 日本非破壊検査協会, Vol. 63, No. 5, pp. 245-250, 2014.
- 程 衛英, 古村一朗: パルス渦電流試験法による減厚評価のシミュレーション解析, 溶接・非破壊技術センタ, 技術レビュー, Vol.7, pp. 18-24, 2011.
- van den Berg, S.: Modelling and Inversion of Pulsed Eddy Current Data, Delft University Press, The Netherlands, 2003.
- PHOTON: PHOTO-Series MAG/EDDY/ MOTION Command Reference, 2014.
- 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 杉浦邦征, 永田和寿, 岡 扶樹: 海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1103-1110, 2005.

(2015 年 9 月 25 日受付)

(2016 年 2 月 1 日受理)