

暴露サンプルを用いた防食塗膜下の 劣化部検知手法の開発

DEVELOPMENT OF DETECTIVE METHOD FOR DEGRADATION UNDER PAINT FILM USING EXPOSURE SAMPLE

田中友博¹・川上哲太郎²
Tomohiro TANAKA and Tetsutaro KAWAKAMI

¹ 学生会員 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)

² 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋建設工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)

The purpose of this study is to develop of detective method for degradation under paint film using exposure sample. Fundamental experiments for development of nondestructive evaluation method by using characteristics on propagation of low-frequency waves in coating thin plate were carried out. The proposed detective method applied distribution of response of deflection amplitude at degradation part and no degradation part in coating thin plate model to low-frequency incident wave.

The distinct responses of deflection amplitude at degradation part and no degradation part were obtained although using low-frequency waves. The results of the experiments show that it is possible to detect for degradation in coating thin plate by proposed nondestructive evaluation method.

Key Words : *Paint film, Degradation, Exposure sample, Nondestructive evaluation method, Coating thin plate*

1. 序論

鋼製の海洋構造物は、陸上鋼構造物に比べ厳しい環境下に置かれており、構造物の安全上特に厳格な維持管理が要求される。鋼製海洋構造物の安全性確保において最も注意を払わなければならない点は、構造部材としての金属が錆や腐食により劣化を起し、十分な耐力を保持できなくなることである。この鋼製構造部材の劣化を防ぐために、鋼製の海洋構造物の海水中や海底土中では電気防食が使用されており、また気中部や飛沫帯では塗膜防食を施すことが一般的である。しかしながら、この塗膜防食は図-1 に示すように、年数の経過に伴い防食塗膜自体が劣化し、剥離や下地金属に錆や腐食が発生することがよく知られている。そのため、構造物の維持管理上適切な期間で再塗装を施し、安全性の確保と長寿命化を図ることとなる。そのためには、防食塗膜及び下地金属の劣化を的確に評価し、適切なメンテナンス時期を決定しなければならない。

現状では、防食塗膜の劣化評価は、そのほとんどが目視検査による全数調査であり、この評価手法では、構造物の大型化や多様化に伴い人的労力

や経済性に問題があると考えられる。また、目視検査では、防食塗膜下の下地金属における初期の劣化を発見することは困難である。

そこで本研究では、目視検査による全数調査に変わり、効率的かつ簡便的であるとともに、防食塗膜下の下地金属の劣化も評価可能な調査手法の開発を目指し、維持管理対象構造物の各所に塗膜防食を施した平板暴露サンプルを設置し、これら平板暴露サンプルの劣化評価から、構造物全体の防食塗膜の劣化評価を行うことを考えた。本論文では、この暴露サンプル評価法の基礎的研究として、平板暴露サンプルにおける防食塗膜下の劣化部を簡便的に検知することを目的とし、平板の低周波波動伝播特性を用いた非破壊評価法の開発を試みたものである。

一般的に、目視検査で捉えることのできない欠陥の非破壊評価法としては、X線検査や超音波探傷法などがある¹⁾。これらの評価法は特殊な機材や技術が必要であることなどを考慮して著者は、これらの評価法に比べて精密性は低くても、効率的かつ簡便的で広範囲な検査が可能な一次的評価法の開発を考え、比較的low周波の波動伝播特性に着目し、劣化部を有する無塗装の薄肉平板を用いた数値シミュレーション及びモデル実験を行って

きた 2), 3), 4). その結果, 平板構造において低周波の波動伝播特性を用いた非破壊評価法は, 欠陥検知に有効であるとの結論が得られた.

本研究では, これらの結果に基づき, 防食塗膜下に劣化部を有する平板をモデル化し, 低周波波動の伝播特性の把握, 及び非破壊評価法としての可能性を実験的に確認し, さらに, 実際の非破壊評価法を想定した計測実験により, 本研究で提案した評価法の有用性を検討するものである.

2. 実験方法

(1) 実験モデル

実験では, 平板暴露サンプルにおいて図-1 に示すように下地金属が劣化することを想定し, 防食塗膜下に劣化部を有する平板モデルを制作した.

本実験で使用した防食塗膜下に劣化部を有する平板モデルを図-2, 図-3 に示す. 図-2 に示す平板モデル A は, 低周波波動の伝播特性を明らかにするために, 劣化部を強調したモデルとなっており, 一辺 400(mm), 厚さ 0.5(mm)の正方形鋼板の中心部に, 直径 $a=20$ (mm)の円孔を開削し, その中にポリエチレンを挿入した後, 平板両面に塗膜をモデル化した PP (ポリプロピレン) シートを接着し製作した.

図-3 に示す平板モデル B は, 平板モデル A の劣化部が平板を貫通している極端な状態であるこ

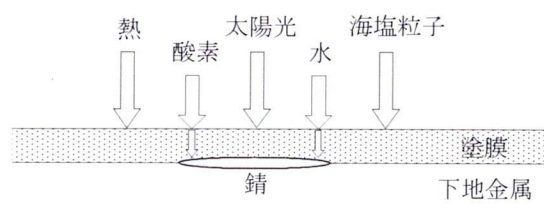


図-1 一般的な塗膜の劣化状態

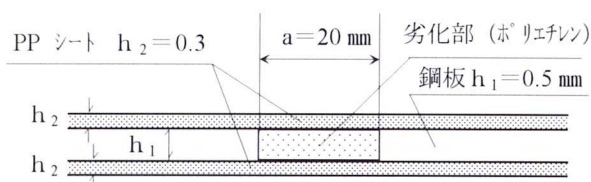


図-2 防食塗膜下に劣化部を有する平板モデル A

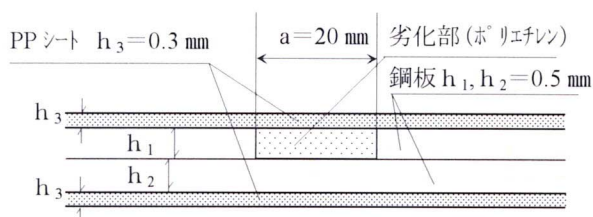


図-3 防食塗膜下に劣化部を有する平板モデル B

とを考慮して, 補足実験のために製作したものであり, 劣化部の深さが鋼板厚の 1/2 となるよう, 鋼板 2 枚を完全に接着して劣化部をモデル化した.

(2) 実験装置

本実験で使用した防食塗膜下の劣化部検知のための計測装置を写真-1 に示す. 本実験では, 振動波源として piezoelectric セラミック振動子 (PZT 振動子) を使用し, 平板の動的たわみを CCD レーザー変位計で計測する. また, 平板モデルは, 外寸法 500×500 (mm)の低反発ウレタンマットの上に設置して計測を行った. 写真-2 は, 計測の主要部である, 動的たわみ計測点 (CCD レーザー変位計) と振動波源 (PZT 振動子) 付近を拡大したものである. さらに, 表-1 に本実験に用いた計測機器の仕様を示す.

表-1 計測機材の仕様

器具名	型名	仕様
CCD レーザー変位計	LK-G30	分解能 $0.05 \mu m$
PZT 振動子	E-PZT03	周波数特性 120Hz-25kHz

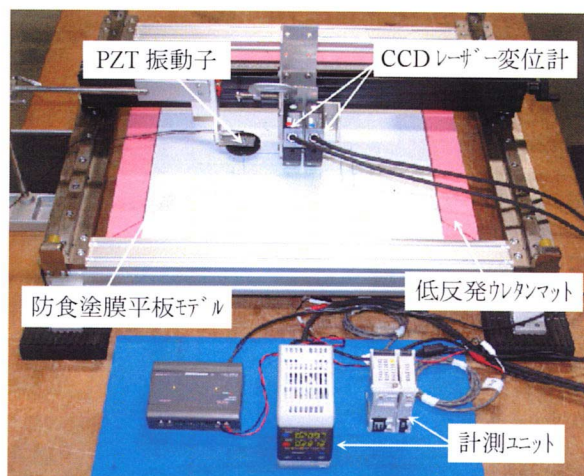


写真-1 計測装置構成

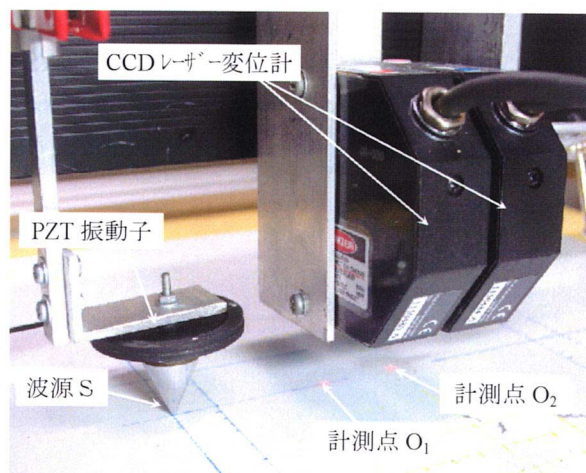


写真-2 計測点と波源

(3) 計測方法

a) 計測法 1

平板モデルに存在する劣化部を既知として、図-4に示すように波源 S と計測点 O_1, O_2 が一直線になるように設置し、計測点 O_1, O_2 が共に健全部である健全部計測線と、計測点 O_1 が健全部で O_2 が劣化部中心にある劣化部計測線の2測線を設定して計測を行った。また、計測に用いた入射波は、所要の周波数で PZT 振動子を 0.3 秒間振動させて発生させ、計測点での波形を計測した。

b) 計測法 2

平板モデルに存在する劣化部を未知として、実際の劣化部検知における計測法を想定して実験を行った。実験の便宜上、図-5に示すように劣化部中心点を計測点 O_2 が通過するような状態を再現し、波源と計測点を所定の間隔で平行移動させながら、計測法 1 と同様の方法で平板の動的たわみ振幅の計測を行った。

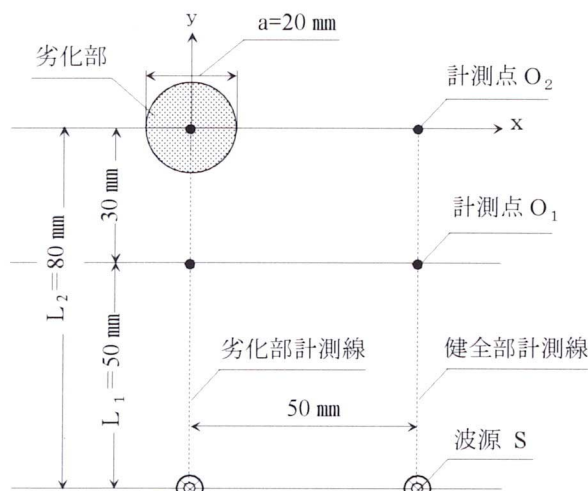


図-4 劣化部検知のための計測法 1

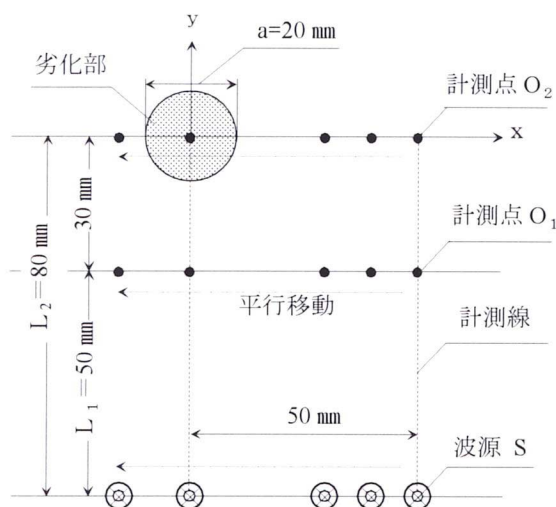


図-5 劣化部検知のための計測法 2

(4) 実験ケース

実験ケース及び実験条件を表-2に示す。実験1は、比較的広い範囲の入射波周波数を用いて、防食塗膜下に劣化部を有する平板における、波動伝播特性の把握を目的に行ったものである。

実験2は、劣化部を強調したモデルを使用し、本研究で提案した低周波波動を用いた劣化部評価手法の可能性を確認することを目的に行ったものである。

実験3では、標準的な劣化部を有するモデルを用いて、本研究で提案した防食塗膜下の劣化部評価手法の有用性及び実用性に関する基礎的検討を行った。

表-2 実験ケース及び実験条件

実験ケース	平板モデル	計測方法	入射波周波
実験1	モデルA	計測法1	200Hz ↓ 1000Hz (100Hz 毎)
実験2	モデルA	計測法2	300Hz 400Hz 500Hz 600Hz
実験3	モデルB	計測法2	

3. 実験結果及び考察

(1) 実験 1

実験結果としての計測波形の例を示す。図-6に入射波周波数 400Hz、健全部計測線（図-4 参照）における、健全部 O_1 及び O_2 での動的たわみの計測波形を示す。上部の図が、実際の計測波形であり、下部の図は、動的たわみの1波目付近を拡大したものである。本研究では、平板の端部境界からの反射波や劣化部と他境界との多重散乱などの影響を考慮し、動的たわみの1波目の振幅を計測値とした。

図より、健全部 O_1 でのたわみ振幅 u_1 に比べ、健全部 O_2 でのたわみ振幅 u_2 が少し小さくなっていることがわかる。このたわみ振幅の減少は、波源と計測点 O_1, O_2 の3点間において、特別な減衰要因が存在しないことから、単純な距離減衰によるものと考えられる。

同じく入射波周波数 400Hz、劣化部計測線（図-4 参照）における健全部 O_1 及び劣化部 O_2 での動的たわみの計測波形を図-7に示す。これより、健全部 O_1 でのたわみ振幅 u_1 に比べ、劣化部 O_2 のたわみ振幅 u_2 が小さくなっていることがわかる。しかしながら、この振幅の減少は、図-6に示した健全部計測線での振幅の減少分に比べ、約 20%大きいことが分かる。このたわみ振幅の減少は、前述の距離減衰分に加え、劣化部における波動の散乱影響を受けたことによるものと考えられる。

そこで、入射波周波数とたわみ振幅の減少との

関係を明らかにするために、入射波波長 L を劣化部の直径 a で無次元化した L/a と、 O_2 のたわみ振幅 u_2 と O_1 のたわみ振幅 u_1 との振幅比 u_2/u_1 を定義し、計測結果を整理する。なお、本実験で用いた入射波波長 L は、実測値によるものである。

図-8 は、縦軸を振幅比 u_2/u_1 、横軸を無次元化入射波波長 L/a として、全ての入射波周波数における劣化部、健全部両計測線での計測結果を整理したものである。

これより、全体的傾向として、全ての L/a で健全部計測線での振幅比に比べ、劣化部計測線での振幅比が小さくなっており、その差は、 L/a が小さくなるほど大きくなる傾向がみられる。しかしながら、 L/a が 5.0 以下 (700Hz 以上) では、劣化部及び健全部計測線での振幅比にばらつきがみられ、計測値の安定性に欠けていると考えられる。 L/a が 5.0 以上 (600Hz 以下) では、計測値は安定しており、劣化部と健全部計測線との振幅比の

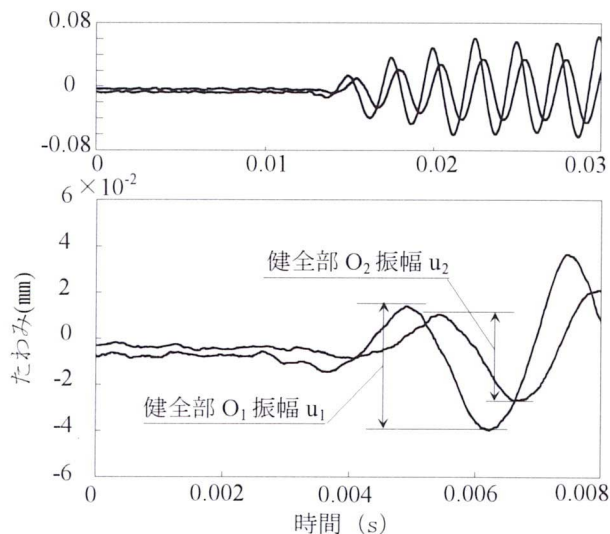


図-6 健全部計測線における動的たわみ波形の計測例 (入射波周波数 400Hz)

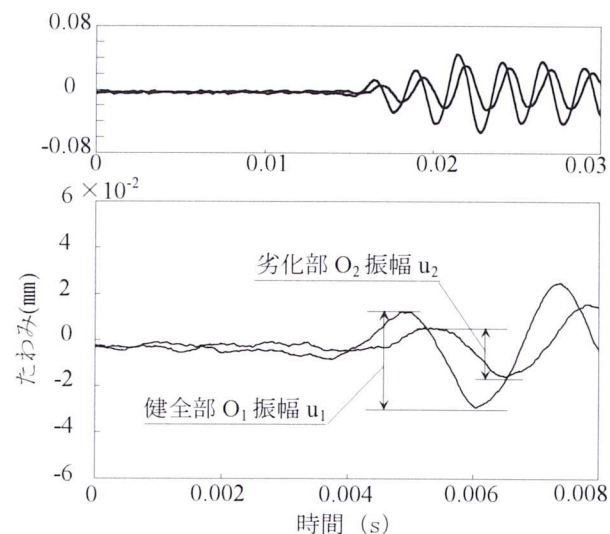


図-7 劣化部計測線における動的たわみ波形の計測例 (入射波周波数 400Hz)

差、すなわち劣化部の影響による振幅比減少分は、約 15%~25%となっている。

以上のことより、200Hz~600Hz 程度の比較的低周波の波動伝播特性を用いても、防食塗膜下の劣化部を検知できる可能性が示唆されているものと考えられる。また、 $L/a=5.0$ として、本実験で用いた最高周波数 1000Hz の波の波長より、計測値のばらつきを考慮しなければ、代表寸法が約 1cm 程度の劣化部を検知することが可能であるとえられるが、今後詳細な検討を行う必要がある。

(2) 実験 2

実験 2 では、実験 1 の劣化部を既知として検討した結果より、比較的低周波の入射波周波数 300Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz ($L/a=5\sim10$) を用いて、実際の劣化部検知を想定した計測法 2 による計測を行った。ここで、本来劣化部は未知であるが実験の便宜上、計測点 O_2 が劣化部の中心を通過する状態を再現して検討をおこなう。

図-9, 10 に、計測波形の例を示す。図-9 は、計測線が劣化部中心より右方向に 50(mm) の位置にあるときの、入射波周波数 500Hz の計測波形である。また、図-10 は、同様の入射波周波数で計測線が劣化部の中心位置にあるときの計測波形である。両図を比較してみると、振幅 u_1 に対し振幅 u_2 の減衰は、図-10 の場合の方が大きくなっていることがわかる。実際の劣化部検知において計測線位置の違いにより、振幅 u_1 , u_2 の計測値に変化が出現することは、定常的な距離減衰以外に、劣化部の存在を示す減衰が現れているものといえる。

以上の結果から、劣化部の存在をより明らかにするために、振幅比 u_2/u_1 の計測線位置 x に対する分布を図-11, 12 に示す。図-11 は、入射波周波数 500Hz における振幅比分布であり、図-12 は、入射波周波数 300~600Hz における平均の振幅比の分布を示したものである。

図-11 より、全体的に見て振幅比の分布は 0.8

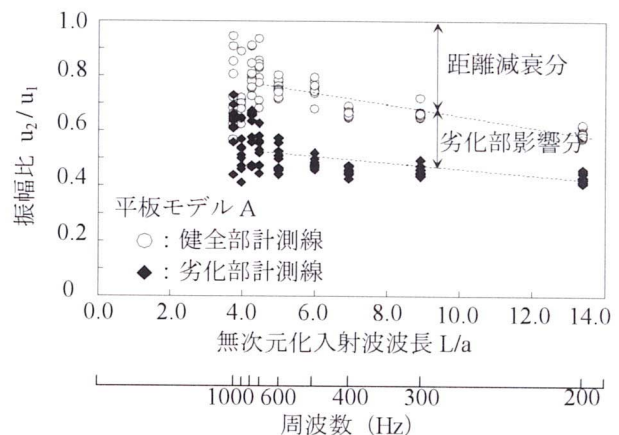


図-8 劣化部及び健全部計測線における振幅比と無次元化入射波波長の関係

前後と 0.5 前後の 2 つの領域に分かれている。実験 1 の結果から、計測点 O_1, O_2 共に健全部にある場合の振幅比は、0.8 前後の値となることが示されており、さらに、計測点 O_2 が劣化部内にある場合の振幅比は、0.5 前後となることが明らかになっている。このことより、この図に表れている振幅比 0.8 前後の領域には劣化部は存在せず、振幅比 0.5 前後の領域に劣化部が存在していると判断できる。また、図中に平板モデルの劣化部範囲(直径 20(mm), $x=\pm 10$ (mm))を破線で示してみると、振幅比 0.5 前後の範囲が明確に実際の劣化部の領域内にあり、上述の結果と完全に一致している。

次に、図-12 に示した入射波周波数と振幅比分布の関係より、いずれの周波数においても、劣化部と健全部では、振幅比に明らかな差異が現れていることがわかる。しかし、300Hz, 400Hz における劣化部の振幅比は、約 0.6 程度であるのに対し、500Hz, 600Hz では約 0.5 とより小さくなっており、劣化部の存在をより明確にとらえているものと考え

えられる。このことから、入射波周波数が高くなるにつれ、健全部と劣化部での振幅比に大きく差が現れ鋭敏性が高くなっている事がわかる。

以上のことより、本研究で提案した低周波波動を用いた劣化部評価手法による、防食塗膜下の劣化部検知の可能性が示されたものと考えられる。

(3) 実験 3

ここでは、平板モデル B を用いて実験 2 と同様の計測を行った。図-13, 14 に、計測波形の例を示す。図-13 は、計測線が劣化部中心より右方向に 50(mm)の位置にあるときの、入射波周波数 500Hz の計測波形である。また、図-14 は、同様の入射波周波数で計測線が劣化部の中心位置にあるときの計測波形である。

両図より、両者とも振幅 u_1 に比べ振幅 u_2 が小さくなっていることがわかる。さらに、この計測波形も実験 2 と同様に、計測線が劣化部中心位置にある場合(図-14)の方が、振幅比 u_2/u_1 が小さくなっていることがわかる。しかしながら、前節の実験 2 における、図-9, 10 の計測結果ほどの減衰が現れているとはいえない。

そこで、前節と同様に入射波周波数 300Hz ~ 600Hz での平均の振幅比の分布を図-15 に示す。

図より、全体的な傾向を見てみると、いずれの周波数においても、健全部での振幅比に比べて、劣化部での振幅比が、図-12 に比べて顕著ではないが若干低い分布を示している。

以上のことから、劣化部の大きさを明確に特定

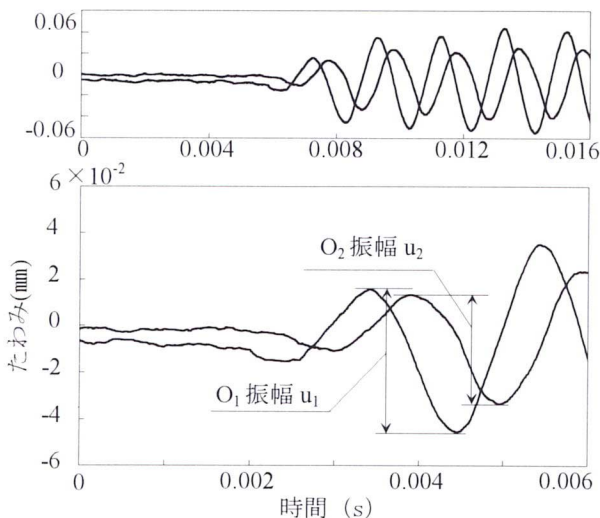


図-9 $x=50$ mmにおける動的たわみ波形の計測例
(実験 2, 入射波周波数 500Hz)

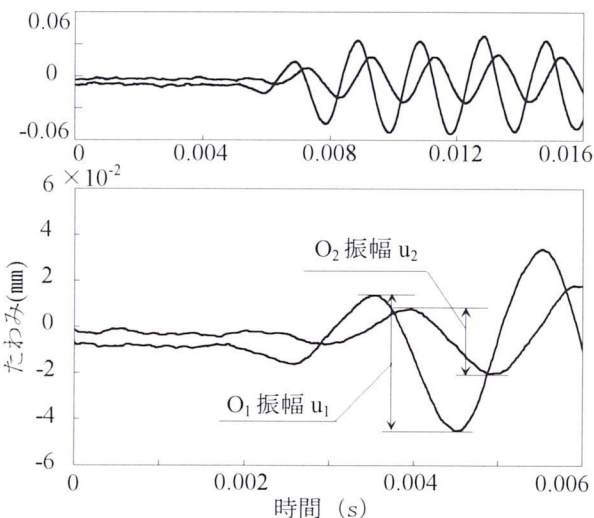


図-10 $x=0$ mmにおける動的たわみ波形の計測例
(実験 2, 入射波周波数 500Hz)

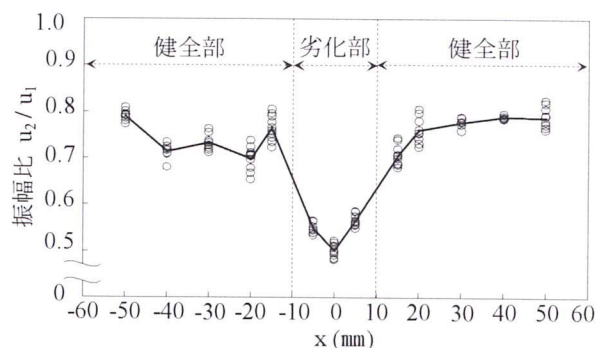


図-11 各計測点 x における振幅比分布
(入射波周波数 500Hz)

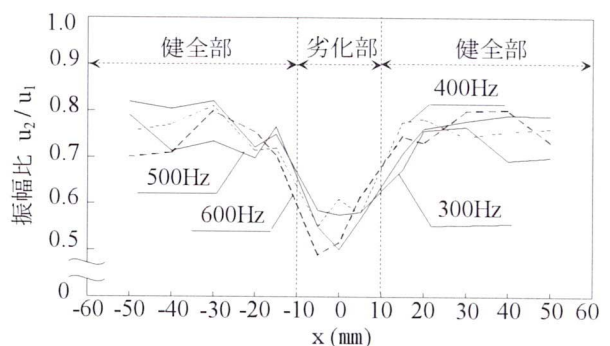


図-12 入射波周波数と振幅比分布の関係 (実験 2)

することは困難であると考えられるが、劣化部の存在は確認する事が平板モデルBにおいても可能であると考えられ、実際の防食塗膜下の劣化部検知に対する可能性が示唆されたものと考えられる。

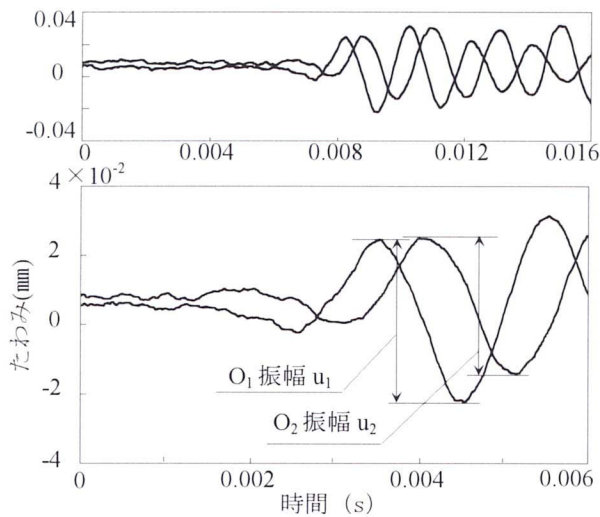


図-13 $x=50$ mmにおける動的たわみ波形の計測例
(実験3, 入射波周波数 500Hz)

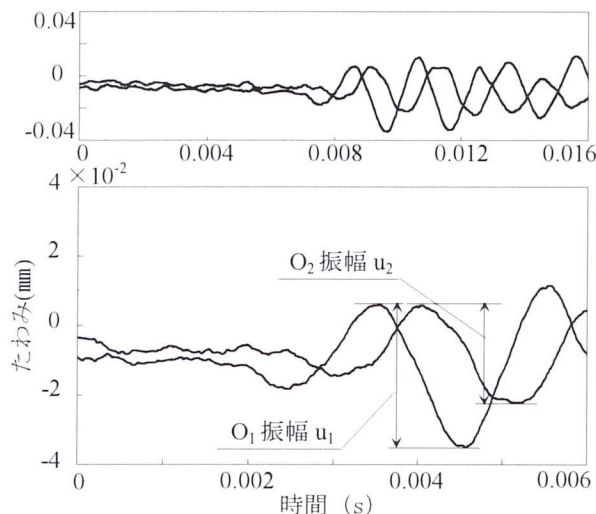


図-14 $x=0$ mmにおける動的たわみ波形の計測例
(実験3, 入射波周波数 500Hz)

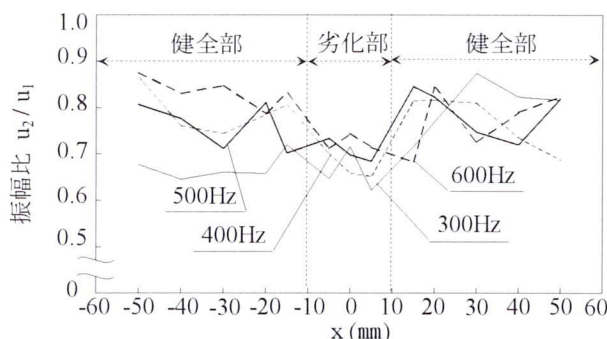


図-15 入射波周波数と振幅比分布の関係 (実験3)

4. 結論

本研究は、防食塗膜下の劣化部検知のための簡便の手法として、平板の低周波波動伝播特性を用いた非破壊評価法の開発を試みたものであり、本研究で得られた結論は、以下のとおりである。

- ①比較的低周波の波動伝播特性を用いて、防食塗膜下の劣化部を簡便的に検知できる可能性が示された。
- ②平板モデルAの場合、低周波波動を利用して防食塗膜下の劣化部を検知するためには、入射波波長 L と劣化部の代表寸法 a との比 L/a が5～6程度の入射波を用いることが適当であると考えられる。
- ③防食塗膜下の劣化部の劣化深さが深くなるにつれて、劣化部での振幅比と健全部での振幅比との差は大きくなる傾向が示された。

今後の課題として、劣化部の劣化深さと振幅比との関係について、さらに詳細なモデル実験を行い、本検知手法による検知限界劣化深さを特定することや、実際の暴露試験サンプルを用いて、本検知手法の適応性を検討することなどがあげられる。また、結論②に示した劣化部の代表寸法 a を管理基準値と定義し、適切な管理基準値設定の検討を行うことも必要であると考えられる。

参考文献

- 1) (社) 日本非破壊検査協会 編, 新非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, pp.45-205, pp.226-336, 1992.10.
- 2) 川上哲太郎, 草加英之: 薄肉平板の動的応答特性を利用した劣化損傷部検知法に関する数値解析的検証, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 207-214, 2005. 8.
- 3) 川上哲太郎, 草加秀幸 他: 異種材料領域を有する薄肉平板の動的応答特性を利用した非破壊評価手法の検証, 「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部, 第3巻第3号, pp. 23-30, 2006. 3.
- 4) 川上哲太郎, 草加英之: 動的応答特性を利用した平板の損傷検知手法に関する実験的研究, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006. 9.