

大型浮体構造物の破損部位広域特定法に関する基礎的研究

正員 中 田 諭 志* 正員 鈴 木 英 之**

Wide-range and Short-term Damage Detection of a Large Floating Structure

by Satoshi Nakada, *Member* Hideyuki Suzuki, *Member*

Summary

Realization of a large floating structure is considered to be effective for ocean space utilization in Japan. As examples of ocean space utilization, floating airport, container terminal and offshore wind farm are proposed and there are many researches for its realization. To realize the large scale floating structure, an establishment of maintenance technology after construction is important as well as comprehension of elastic response characteristics and structural response characteristics. Identification of damaged area in a short time is meaningful when the large scale structure is damaged in-service. Therefore, it is significant to establish a wide-range damage detection method which can comprehend a structural health of vast region.

In the present study, a new method of damage detection of large floating structure is proposed based on elastic wave tomography. To verify and confirm the availability of the proposed method, basic model experiment and numerical simulation were carried out with flat plate. Then the same approach was carried out with box model consisting of flat plate and the damage was detected successfully.

1. 結 言

大型浮体構造物の利用は、わが国の有する広大な海洋空間を利用するための有効な手法としてこれまでに多数の検討がなされている。その主な検討例は、沖合空港¹⁾やコンテナターミナル、さらに近年では風力発電に代表される洋上のエネルギー生産や備蓄基地といったものであり、今後も本格的な実現が期待される。大型浮体構造物の実現に向けては、波浪中の動揺特性および構造特性の把握や洋上接合などの建造技術の確立、環境影響評価などが挙げられるが、100年近くもの供用期間も考慮すれば、これらの取り組みに加えて建造後の維持管理技術や維持管理計画も重要な課題である。

その中でも大規模な災害などにより大型浮体構造物に大規模な破損が生じた場合は、いかに短い時間で破損箇所を特定できるかが重要であり、このためには広大な領域の健全性を巨視的な視点で効率的に把握する広域検査手法の確立が重要となる。既存の広域検査手法に関する研究としては、

AE（アコースティック・エミッション）センサや光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマニタリング^{2),3)}、また橋梁の分野などでは振動計測により得られるモード特性の変化から破損箇所の推定を行う手法⁴⁾等が挙げられる。AEセンサや光ファイバセンサを用いたヘルスマニタリングは破損箇所の発生をリアルタイムに検出することが可能であり、センサを広範囲に配置することで大域的な検査が実施できる利点を有している。また光ファイバセンサについてはスマートストラクチャ実現のための有力な手段として盛んな研究⁵⁾も行われている。しかしながら、大型構造物への適用を考えた場合はセンサ数の増加に伴うコストの増加も懸念される。また、モード特性の変化から破損箇所を推定する手法についても信頼性向上のために高次モードまで計測を行うにはセンサを空間的に密に配置する必要があり、ヘルスマニタリングと同様にコストの問題や精度の確保といった課題が挙げられる。

そこで本論文では、事故発生時などに浮体を短時間で広範囲にわたって検査できる手法を確立するために、海域調査や物理探査の分野で用いられているトモグラフィ技術^{6)・10)}を参考にした手法¹¹⁾を考案し検討を行った。本手法は、構造物内部に入力した弾性波の破損前後での伝播の変化から破損箇所の推定を行うものであり、弾性波の伝播の情報から検査対象の内部状態を把握する点で既存のトモグラフィ技術に近い手法であるといえる。

* 三井造船株式会社 玉野事業所 艦船設計部

** 東京大学大学院 工学系研究科 環境海洋工学専攻

本論文の目的は、上記の手法を確立するための基礎的な検討として、構造物内を伝播する弾性波の伝播経路算出と破損前後の計測波形の比較から破損箇所を推定するアルゴリズムを構築し、手法の成立性に関して検討を行うことである。手法の成立性に関する検討を行うために、最も基礎的な形状として平板構造物を対象とした検討を行い、さらに手法の汎用性について検討するために、平板で構成された立体形状である箱型構造物に適用して検討を行った。計測波形についてはFEM解析による数値計算と模型実験による計測を行った。

2. 弾性波トモグラフィによる破損検出

2.1 検出法の概要

本論文で提案する短時間広域破損検出法は、既存のトモグラフィ技術を参考にしてパルス状の弾性波を入力することで構造物の内部状態を把握し、破損箇所の推定を行うものである。ここで、推定を行う際に必要となるデータは、1)健全時と破損時の受信波形データ、2)健全時のパルス受信時刻と各経路が通過する検査領域上にあるセルを音線理論に基づくシミュレーションより求めたものである。ここで、セルとは検査面上を任意分割した領域とする。これらのデータから破損箇所の影響を受けたと見なせる伝播経路の抽出を行い、複数経路の結果を集積することで最終的に破損箇所の特定を行うのが本手法の概要である。以上の流れをFig.1に示す。

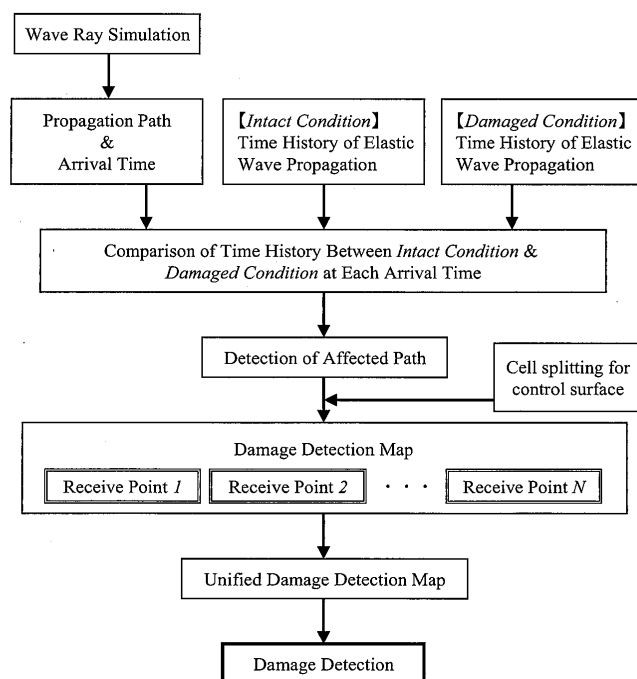


Fig.1 Flowchart of damage detection.

上記の概要をより具体的に説明するために、平板構造物を

対象として破損箇所の影響を受けた経路の抽出までの例を挙げる。まず、構造物に入力したパルス状弾性波のある受信点において検出した健全時と破損時における計測波形の概念図をFig.2(a)に示す。次に、シミュレーションにより求めた伝播経路をFig.2(c)に、信号の到達時刻をFig.2(b)に示す。ここで、各経路の到達時刻は健全時のものである。続いて、Fig.2(d)のように(a)と(b)の対応をとった後に、各到達時刻で健全時と破損時の振幅を比較することで破損箇所の影響を受けたと見なせる伝播経路の抽出を行う。

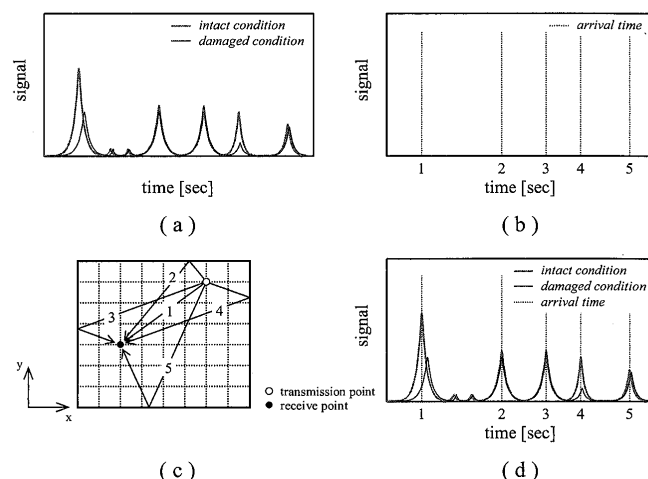


Fig.2 Conceptual sketches of time series of intact & damaged condition, arrival time and propagation paths.

2.2 弾性波の伝播経路算出

実体波や表面波などの固体中を伝播する種々の弾性波のうち、本論文では疎密波(縦波)とせん断波(横波)の2種類の実体波を考慮し、波動の伝播を高周波近似に基づく音線理論により記述する。さらに、実体波が構造物の境界で反射や屈折をくり返す際に生じる疎密波とせん断波のモード分解も考慮することで、構造物内部を伝播する弾性波の伝播経路を算出する。ここで、モード分解の際の疎密波とせん断波の伝播速度の関係は(1)式に示すSnellの法則に従う。また、材料は均質であるとし、構造物内を伝播する弾性波の速度は一定とすることで経路ごとの到達時刻を算出する。ここに、薄板中における疎密波とせん断波の伝播速度 C_P 、 C_S はヤング率 E 、せん断弾性係数 G 、ポアソン比 ν 、密度 ρ より以下の(2)式と(3)式で与えられる。

$$\frac{C_P}{\sin \alpha} = \frac{C_S}{\sin \beta} \quad (1)$$

$$C_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\nu^2}} \quad (2)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

2.3 破損箇所の推定法

2.2 節で示した伝播経路算出の結果と受信点で破損前後に得られる受信波形の結果を用いて破損箇所の推定を行うアルゴリズムについて記述する。受信パルスの各到達時刻において健全時と破損時の波形を比較し、破損時の値が健全時の何%変化したかによって正常、異常の判定を行う。いま、送受信点のペアの総数を N 、各ペアについて得られる伝播経路の総数を N_{Pi} ($i=1,2,\dots,N$) とし、到達時刻ごとの健全時の振幅を A_{Iij} ($j=1,2,\dots,N_{Pi}$)、同様に破損時の振幅を A_{Dij} としたときに、判定値 J_{ij} [%] を次式で定義する。

$$J_{ij} = \frac{A_{Iij} - A_{Dij}}{A_{Iij}} \times 100 \quad (4)$$

さらに、判定の際に基準となる値を判定基準値 J_s [%] とし、破損箇所の影響により到達しない、または到達時刻の遅れる弾性波については破損時の振幅が健全時の振幅よりも小さくなると考え J_s は正の値とする。

全ての判定値 J_{ij} について、 J_{ij} がこの基準値 J_s を超える場合は異常と判定し、超えなければ正常と判定する。この処理を受信点で得られる全ての経路について繰り返し行い、異常と判定された弾性波の経路には検査領域内で任意分割されたセルのうち、その経路が横切る全てのセルに均等に破損の度合いを示す値を割り当てる。ここで、各経路が通過するセルの個数を N_{Cij} とし、経路ごとの N_{Cij} 個の通過セルの番号を M_{ijk} ($k=1,2,\dots,N_{Cij}$) とする。

異常と判定された際にセルに割り当てられる値は、到達時刻の早い経路ほどより正確な情報を有していると考え、各経路の距離 D_{ij} の逆数とすることで重み付けを行い、正常と判定された場合は割り当てられる値をゼロとする。各セルに割り当てられる値を C_{ijl} ($l=M_{ij1}, M_{ij2}, \dots, M_{ijN_{Cij}}$) とすると、 C_{ijl} は次式で与えられる。

$$C_{ijl} = \begin{cases} 1/D_{ij} & (J_{ij} \geq J_s) \\ 0 & (J_{ij} < J_s) \end{cases} \quad (5)$$

これらの正常、異常の判定を全ての到達時刻について行った後に、セルごとに各値の和をとり一つの送受信点のペアに対するセルごとの値を算出する。ここで、セルの総数を M とすると、各セルの経路ごとの値の和 V_{im} ($m=1,2,\dots,M$) は次式で与えられる。

$$V_{im} = \sum_{j=1}^{N_{Pi}} C_{ijm} \quad (6)$$

さらに、考慮する全てのペアについて値の和をとることで、最終的なセルの破損の可能性に関する値 V_m を算出する。

$$V_m = \sum_{i=1}^N V_{im} \quad (7)$$

以上が、本論文で提案する推定アルゴリズムの概要であり、これらの流れをまとめたものを Fig.3 に示す。

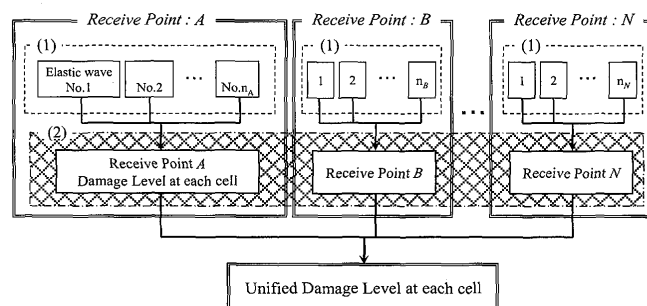


Fig.3 Flowchart of damage level calculation.

本手法ではさらに、値の範囲をより絞り込むことを目的として、伝播経路ごとに割り当てられた値の和をとる際に、異常と判定した弾性波の個数と正常と判定した個数を用いて多数決型の判定を行うアルゴリズムの改良を行った。すなわち、各セルの値について異常と判定した個数の方が多い場合のみ和の値を残し、正常と判定した個数の方が多い場合は和の値をゼロに当て直す。これより値の和をとる際に個々の弾性波の判定結果が値として残ってしまう問題を解決できると考えられる。さらに、ペアごとの結果を合わせる際にも多数決型の判定を行うことで、破損の可能性のある範囲をより絞り込む。

3. 平板構造物の破損箇所推定

3.1 検討モデル

本論文で提案する破損箇所推定手法の成立性を確認するために、ここではまず Fig.4 に示す平板構造物を対象とした検討を行う。モデルの材質にはアクリルを用い、材料特性および式(2)、(3)より算出される疎密波とせん断波の伝播速度を Table 1 に示す。弾性波を入力する送信点はモデルの端部境界上に1箇所、受信点は Fig.4 に示す位置に No.1 から No.4 までの4箇所を設置する。また、破損箇所は Fig.4 中の斜線で囲まれた領域に穴が開いた場合を想定し、送信点で面内方向に入力される弾性波は時間長さ 0.1[msec] のパルスとする。受信点における波形の計測には、数値計算による検討時は Mises 応力を出力とし、模型実験による検討時はセンサの感度上の問題から加速度の計測を行った。

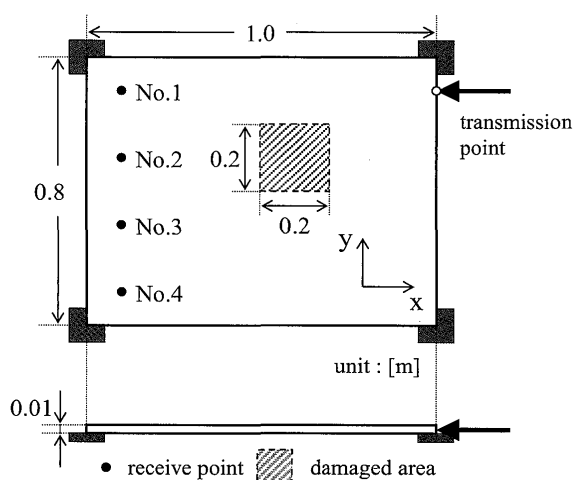


Fig.4 Flat plate model.

Table 1 Material properties & elastic wave velocities.

material	Acrylic	
Young's modulus	E [N/m ²]	3.16×10^9
shear modulus of elasticity	G [N/m ²]	1.12×10^9
Poisson's ratio	ν	0.35
density	ρ [kg/m ³]	1180.3
P wave velocity	C_P [m/sec]	1746.7
S wave velocity	C_S [m/sec]	995.8

3.2 伝播経路算出結果

平板構造物内を伝播する弾性波を音線理論より算出し、各セルを通過する伝播経路の個数をまとめた結果を Fig.5 に示す。ここで、分割セルのサイズは 5[cm]×5[cm]とし、長さ方向に 20 分割、幅方向に 16 分割の計 320 分割とした。Fig.5 は Fig.4 に示す 1 箇所の送信点と 4 箇所の受信点を用いた結果であり、上から最短経路のみを考慮した場合、最短経路と境界における反射回数を 1 回まで考慮した場合、最短経路と境界における反射回数を 2 回まで考慮した場合の通過セルの分布を示す。これらの結果より、境界における反射回数を増やすことで各経路が通過するセルの分布範囲は広がり、経路の総数も増えることが確認できる。さらに、境界における反射回数を 2 回まで考慮することで、設置した 4 箇所の受信点で検査領域である平板内を広範囲にわたってカバーできており、送信点近傍を除けば領域内の情報を偏りなく得られていることがわかる。

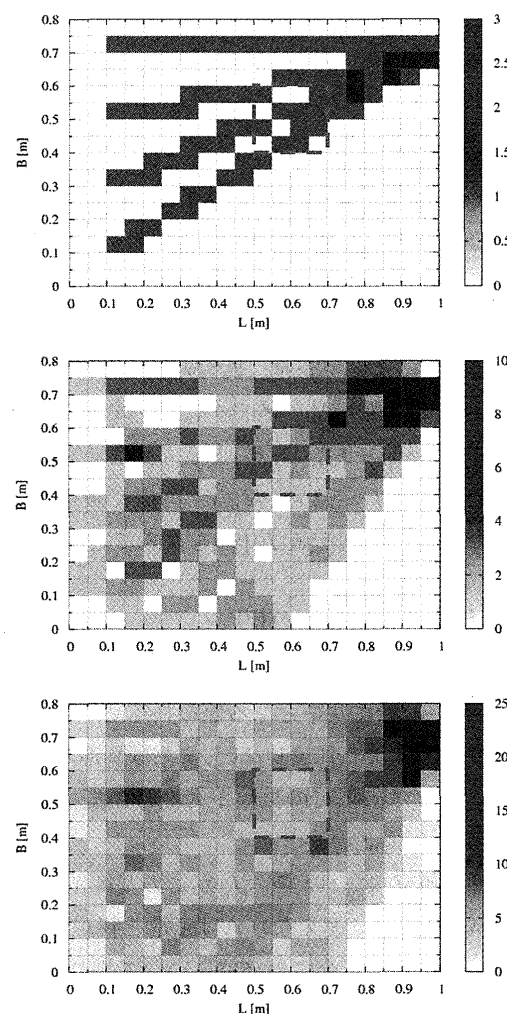


Fig.5 Distributions of passing cells.

3.3 数値計算による検討

受信点で計測される波形は、有限要素解析による数値計算結果と模型実験による計測結果を用いて検討を行った。ここではまず、手法の基本的な成立性を確認することを目的として数値計算より得られる波形を用いて破損箇所の推定を行った結果について示す。ここで、計算には汎用の有限要素解析ツールである NASTRAN を使用し、過渡応答解析を行った。また、健全時と破損時における計算結果の出力は各受信点における Mises 応力とした。要素の選定やメッシュ分割数などの計算条件については、計算精度と計算負荷に関する検討を行った上で決定し、結果を Table 2 に示す。

Fig.6 は受信点 No.3 における計算結果であり、グラフ中に示す到達時刻は 2.2 節に示す式より算出した結果である。これより、特に到達時刻の早い弾性波について健全時の波形のピークと到達時刻が良く一致しており、音線理論に基づく波動伝播の記述が妥当であることが確認できる。ここで、到達時刻の最も早い第 1 波に着目すると、破損時は第 1 波の到達が遅れていることから、第 1 波の到達時刻で健全時と破損時の振幅に顕著な差が生じる結果となっている。しかしながら、

到達時刻が遅くなるにつれて波形はより複雑なものとなっており、破損箇所の影響を受けたかの判定が困難になると考えられるため、2.3 節で C_{ij} に行った重み付けが有効に機能すると考えられる。

数値計算結果を用いて破損箇所の推定を行った結果を Fig.7 に示す。ここで、判定基準値 J_s は 70[%] とした。Fig.7 より、想定した破損箇所内とその近傍の 1 箇所のみ値を持つ結果が得られており、数値計算ベースで提案手法の成立性を確認することができる。

Table 2 Calculation condition of plate model for FEM analysis.

Element	Shell
Number of node (Intact Condition)	8181
(Damaged Condition)	7820
Number of element (Intact Condition)	8000
(Damaged Condition)	7600
Time step [sec]	5.0×10^{-6}
Number of step	6000

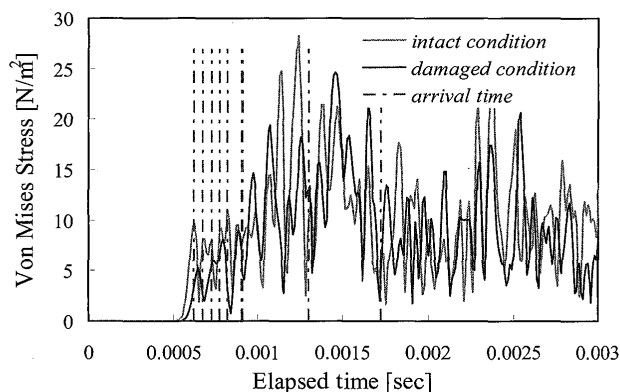


Fig.6 Time series of elastic wave propagation at No.3 (FEM data, plate model).

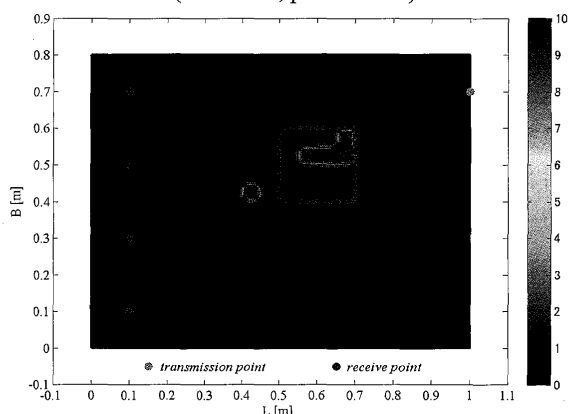


Fig.7 Damage detection map based on FEM data (plate model).

3.4 模型実験による検討

数値計算結果に基づく検討より提案手法の成立性が確認されたことを受け、ここでは実構造にも適用が可能であるかを検討するため模型実験より計測された波形を用いて破損箇所の推定を行った結果を示す。検討の対象とするモデルは

数値計算と同じく Fig.4 とし、送信点も同じ位置とする。ただし、受信点における出力は x 方向加速度とし、センサには ㈱村田製作所の面実装タイプショックセンサ PKGS-00LD-R を使用した。ここで、計測できる加速度が 1 方向のみであったため、数値計算の場合と比較すると得られる情報量は少なくなってしまうことから、模型実験の際は No.1 から No.4 の中間に 3 箇所の受信点を追加し、計 7 箇所として計測を行った。波形の測定には YOKOGAWA のデジタルオシロスコープ DL750 を使い、サンプリング周波数を 5[MHz]、データ数を 10010 個として計測を行った。また、送信点における弾性パルス波の入力には直進式のリニアサーボモータを用いた装置を作成し、入力信号は PC より信号の時間長さを制御した。モータの接触時間は送信点近傍に設置したセンサより求めた結果、数値計算と同じオーダーの 0.1215[msec] であった。本実験における計測システムの概念図を Fig.8 に示す。

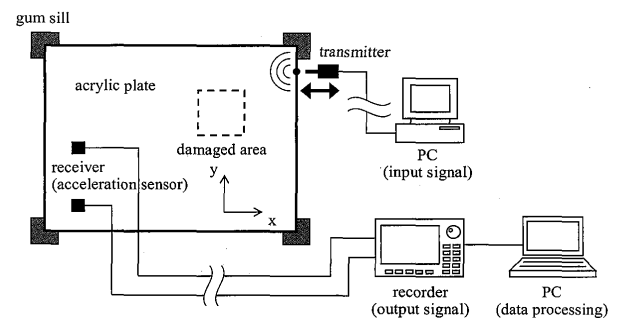


Fig.8 Measurement system in plate model experiment.

Fig.9 は本実験より得られた受信点 No.3 における計測結果である。実験では長周期のノイズと見なせる成分が存在したため、フィルタリングによりこれを除去し、到達時刻については送信点近傍に設けた受信点に到達する第 1 波の時刻を基準とした。また、入力装置位置のわずかなずれなどの原因により入力される弾性波の振幅が異なることも考えられたため、送信点近傍に設置した受信点の第 1 波の振幅で全ての結果の標準化を行った。到達時刻の算出は実験結果より求めた縦波の速度を用い、その値は 2295.0 [m/sec] であった。この値は、薄板中の理論値である Table 1 の 1746.7[m/sec] と比較すると大きく異なる結果となったが、立体中を伝播する縦波の理論値である 2072.9[m/sec] に近い結果となっており、この原因としてはモデルの材料特性の測定に誤差が生じたこと、および薄板の理論式では板厚は十分薄いと見なしたが、その前提が成り立たなかったことが考えられる。ただし、Fig.9 の結果では特に第 3 波までの結果で健全時の波形のピークと到達時刻が良く一致しており、破損時は第 1 波の到達時刻が遅れる結果となっている。

模型実験より計測された波形を用いて破損箇所の推定を

行った結果を Fig.10 に示す。Fig.10 は数値計算による推定結果である Fig.7 と比較すると、値をもつ範囲が広がっているものの、破損箇所内で最も高い値が生じる結果となっており、模型実験をベースにした検討結果でも提案手法の妥当性を確認することができる。

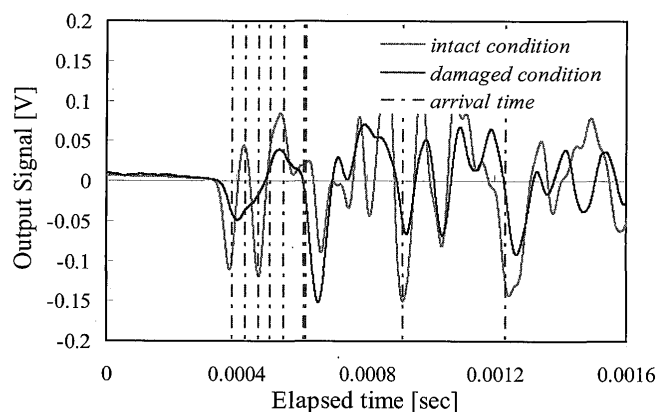


Fig.9 Time series of elastic wave propagation at No.3 (experiment data, plate model).

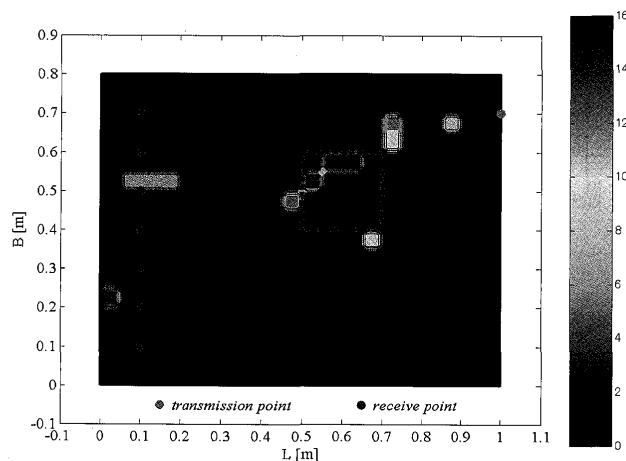


Fig.10 Damage detection map based on experiment data (plate model).

4. 立体構造物の破損箇所推定

4.1 検討モデル

平板構造物を対象とした検討より提案手法の基本的な成立性が確認されたことを受け、ここでは手法の汎用性について検討するため平板で構成されたより複雑な形状である立体構造物について検討を行う。ここで、検討の対象とするモデルは6枚の平板で構成された箱型形状とし、Fig.11 にモデルの全体図と展開図を示す。Fig.11 に示す箱型モデルでは面積の最も大きな面が平板モデルと同じ寸法になるようにし、モデルの材質も平板モデルと同じ材料特性をもつアクリルを使用する。送信点は2つの面の間の境界上に設け、直行する2面の片側に面内方向の荷重を入力する。また、受信点はモデルの各面に1箇所ずつ配置し、計6箇所の受信点を用い

て波形の計測を行う。

立体構造物における検討の流れはほぼ平板構造物のときと同様であり、まず数値計算による検討から手法の成立性を検討し、続いて実構造への適用を検討するために模型実験による検討を行う。ここで、受信点における波形の計測や破損箇所の推定アルゴリズムについては、平板構造物検討時と同じであるが、伝播経路算出については面内方向への反射に加えて面から面への屈折も考慮する点に違いが生じる。

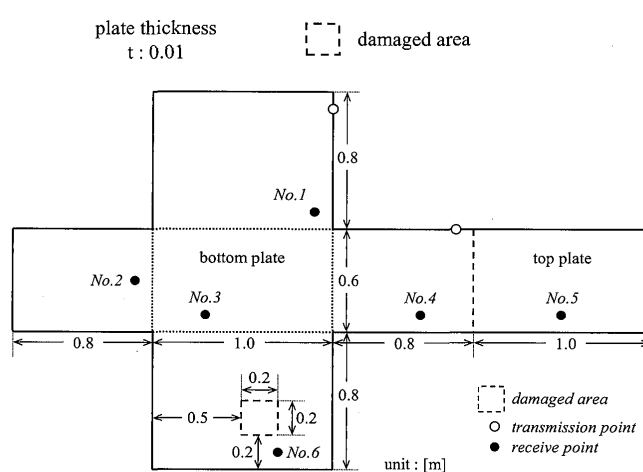
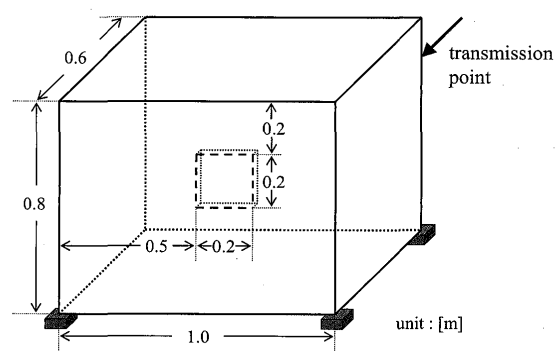


Fig.11 Box model (overall view & expansion plan).

4.2 破損箇所推定結果

箱型構造物におけるパルス波の伝播を有限要素解析より算出した結果を Fig.12 に示す。Fig.12 は Fig.11 中の受信点 No.4 における結果であり、要素の選定やメッシュサイズ等の計算条件は3章検討時と同じである。Fig.12 より、特に第3波までの到達時刻と健全時の波形のピークがよく一致しており、立体形状についても音線理論に基づく波動伝播の妥当性を確認することができる。ただし、平板構造物の結果と比較すると全体的に健全時と破損時の振幅の相違は小さくなっており、これは立体形状においては異なる経路を辿って受信点に到達する伝播経路のうち同じ時刻に到達する経路が複数存在するため、破損箇所より受ける影響が相対的に小さくなったためであると考えられる。

各受信点における計算結果を用いて破損箇所の推定を行

った結果を Fig.13 に示す。Fig.13 より、破損箇所が存在する面内で特に高い値が生じており、また破損箇所内で最も高い値となっていることから箱型形状についても数値計算ベースで破損箇所の推定が効果的に行われていることが確認できる。

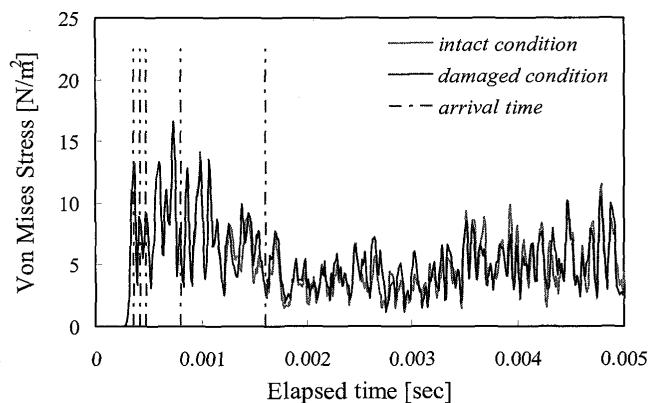


Fig.12 Time series of elastic wave propagation at No.4 (FEM data, box model).

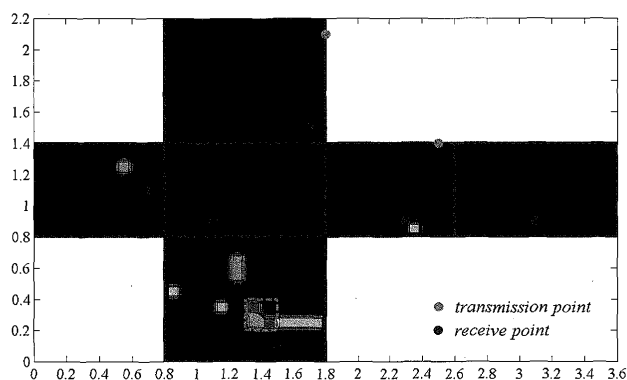


Fig.13 Damage detection map based on FEM data (box model).

続いて、模型実験により得られる波形を用いて破損箇所の推定を行った結果を Fig.14 に示す。ここで、実験結果において模型の上面と下面に設置した受信点 No.3 と No.5 に計測データの不具合が見られたため、予備として設置した受信点の中から 2 箇所を選び、計 6 箇所として破損箇所の推定を行った。実験における計測システムおよび計測項目は平板の検討時と同じとした。Fig.14 より、実験結果に基づく破損箇所の推定結果についても Fig.13 の数値計算結果に基づく推定結果と比較すると精度は落ちているものの、破線で囲まれた破損箇所内で最も高い値が生じる結果となっており、以上のことから平板で構成された立体構造物についても提案手法による破損箇所の推定の妥当性が確認できる。

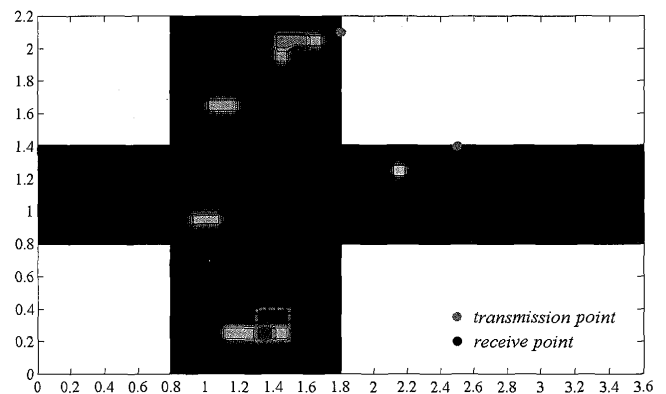


Fig.14 Damage detection map based on experiment data (box model).

5. 検出精度に関する考察

5.1 弾性波の波長と破損箇所のサイズについて

Fig.4 に示す平板構造物を対象として、入力する弾性波の波長と検出が可能な破損箇所のサイズに関する検討を行う。ここで、検討は数値計算に基づく破損箇所の推定を行い、2種類の弾性波の波長に対して破損箇所のサイズを変更したときの検出精度について考察を加える。定量的な評価を行うために、変更する破損箇所の各サイズについて破損箇所の位置を面内の 15 箇所に変更し、その時の検出結果をまとめる。ここで、破損箇所の形状は正方形とし、変更する破損箇所のサイズの個数は 0.1[m] から 0.2[m] までの間で 10 個とする。変更する破損箇所のサイズと中心点の位置をまとめたものを Table 3 に示す。また、検出精度については検出可否の判断の際の基準を設けることは困難であるが、ここでは破損箇所内の値の最大値が検査領域全体の値の最大値の 50% 以上であれば検出できたものと設定し、サイズごとに変更する 15 箇所の位置での検出できた個数の割合を求める。さらに、パルス幅 (波長の 1/2) を 2 種類設定し、3 章検討時のパルス幅 0.18[m] のときの結果を Case1、パルス幅を短くした 0.14[m] のときの結果を Case2 とする。

このときの破損箇所のサイズと検出可能であった個数の割合をプロットしたものが Fig.15 である。Fig.15 の横軸は破損箇所のサイズを弾性波のパルス幅で無次元化した結果であり、これより破損箇所のサイズが入力する弾性波のパルス幅と同程度以上であれば精度の良い推定が可能であることが確認できる。さらに、本手法を用いた破損箇所の検出においては検査の対象とするサイズに合わせて入力する弾性波のパルス幅を適切に選定することも重要な項目であることがわかる。

Table 3 Changes of damage size & center position.

parameter	
damage size (length & width) [m]	0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20
center position (x,y) [m]	(0.3,0.5), (0.4,0.5), (0.5,0.5), (0.6,0.5), (0.7,0.5) (0.3,0.6), (0.4,0.6), (0.5,0.6), (0.6,0.6), (0.7,0.6) (0.3,0.7), (0.4,0.7), (0.5,0.7), (0.6,0.7), (0.7,0.7)

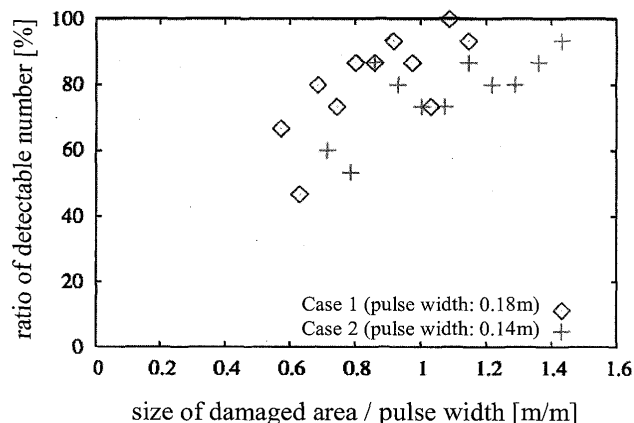


Fig.15 Ratio of detectable number at each damage size.

5. 結 言

本論文は大型浮体構造物の短時間広域破損検査手法として既存のトモグラフィ技術を参考にした手法を提案し、数値計算と模型実験による検討からその成立性に関する検討を行った。以下に得られた知見についてまとめる。

- 1) 境界における反射や屈折、さらにはその際に生じる疎密波とせん断波のモード分解も考慮することで、少ない受信点で検査領域内を広範囲にわたって検査できることを確認した。
- 2) 高周波近似に基づく音線理論を用いて健全時におけるパルス波の到達時刻を算出し、各到達時刻において健全時と破損時の振幅を比較した後に破損箇所の影響を受けたと見なせる伝播経路の抽出を行い、各結果を集積することで破損箇所の推定を行うアルゴリズムを提案した。
- 3) 基礎的な形状である平板を対象とし、提案手法の成立性に関して検討を行った結果、FEM解析による数値計算と模型実験の双方で破損箇所の推定が効果的に行えることを確認した。さらに、手法の汎用性の確認を目的として平板で構成された立体形状についても検討を行い、精度の良い推定結果を得た。
- 4) 平板構造物を対象とし、入力される弾性波の波長と破損箇所のサイズの関係について数値計算による検討を行った結果、提案手法で検出が可能な破損箇所

のサイズは入力する弾性波のパルス幅と同程度かそれ以上であることを示し、検出の対象とするサイズに合わせて入力する弾性波の波長を選定することが重要であることも確認した。

今後は実用化に向けた取り組みとて、より雑音の多い環境下での使用を想定し受信点に到達する弾性波をより正確に分離すること、すなわち SN 比向上のための信号処理技術の導入や計測される波形の方向性を考慮すること、および送受信点の最適配置に関する検討などが課題に挙げられる。

参 考 文 献

- 1) 加戸正治, 井上俊司, 笹島洋, 福岡哲二: 羽田空港再拡張プロジェクトの取り組みと今後の展望, 第18回海洋工学シンポジウム, 2005
- 2) 岩井邦夫: 大型構造物の AE オンラインモニタリング法, 非破壊検査, 第44巻, 第1号, pp.38-43, 1995
- 3) 影山和郎, 村山英晶: 光ファイバセンサによる構造モニタリング: 非破壊検査, 第50巻, 第9号, pp.595-600, 2001
- 4) 阿部雅人: 橋梁のヘルスマニタリング, 非破壊検査, 第52巻, 第4号, pp.178-181, 2003
- 5) 影山和郎, 金原勲, 鈴木敏夫, 大沢勇, 島村太郎: スマートストラクチャ概念の船体構造への適用に関する基礎研究(第1報, 光ファイバセンサによる変位と損傷の検出方法の検討), 日本造船学会論文集, 第178号, pp.583-591, 1995
- 6) W. Munk and C. Wunsch: Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring, Deep-Sea research, 26, 1979
- 7) R. C. Spindel: OCEAN ACOUSTIC TOMOGRAPHY, Proceedings of the 1st International Symposium on Ocean Acoustic Tomography, 1997
- 8) 中埜岩男: 海洋音響トモグラフィ, 日本音響学会誌, 52巻, 11号, pp.915-919, 1996
- 9) K. Sassa: Suggested Methods for Seismic Testing Within and Between Boreholes, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.6, pp.447-472, 1988
- 10) 佐々宏一, 南光宣和, 渋谷隆雄: 弾性波を利用する岩盤監視, 日本鉱業会誌, 98巻, 1135号, 927~931頁, 1982
- 11) 中田諭志, 鈴木英之: 弾性波トモグラフィによる海洋構造物の損傷箇所検出, Proceedings of Techno-Ocean 2006 / 19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, 2006