

縮小付加質量マトリクスにおける回転ベクトルの 影響に関する研究

—数値解析を援用した回転ベクトル推定法の利用—

正員 林 茂 弘* 正員 木 曾 孝**
正員 満 島 誠*** 正員 鷹 見 賢 司****

A Study on the effect of Rotation Vector upon Reduce Added Mass Matrix
(Utilization of Estimate of Rotation Vector by Use of Numerical Analysis)

by Shigehiro Hayashi, *Member* Takashi Kiso, *Member*
Makoto Mitsushima, *Member* Kenji Takami, *Member*

Summary

For the vibration analysis of floating structures, fluid-structure coupled analysis method which combine the added mass matrix into FEM has been used since many years ago. However, this method has some problems. To solve those problems, reduced added mass matrix method was proposed and this method needed the rotation vector for vibration analysis of higher order modes.

In this paper, the method of extracting rotation vector in experiment is used by MCE (Modal Coordinate Expansion) method. The modal structural modification analysis is done by using the eigenvectors in 6 directions which contain the extracted rotation vector. This calculation is compared with the experiment in water condition, and the importance of eigenvector on fluid-structure coupled vibration analysis is shown.

1. 緒 言

船舶の接水振動を解析するための手法として、境界要素法により定式化された流体領域のマトリクスを有限要素法から導かれた船殻構造のマトリクスに組み込んで計算する方法が広く採用されており、汎用コード(MSC/NASTRAN)にもこの解析手法が装備されている。この方法は流体—構造連成振動解析を行うための常套手段となっており、正確

な解析を行うための唯一ともいえる解析法であるが、幾つかの問題点も指摘されている。その問題点として、船殻構造のモデル化に非常に多くの工数を要すること、また多数の固有値が近接しているために得られた解の判定に手間取る、あるいは設計情報として間違った判断を下してしまいかねないこと等が挙げられる。

これらの問題点は有限要素法を利用するが故に生じるのであるが、視点を変えて、有限要素法を利用せずに実験データだけを用いて振動特性を推定する手法として、縮小付加質量マトリクスを利用した解析方法¹⁾が提案されている。これは、岸壁での実船起振器試験データを利用して洋上での振動特性を推定するものである。この解析方法を用いた場合の高次振動モードにおける固有振動数の推定精度を改善するためには、回転ベクトルを含めねばならないことが検証されている。

一方、流体—構造連成振動解析のもうひとつの問題点として、有限要素解析から得られた空中での固有振動数とそ

* 大阪大学大学院工学研究科

** 川崎重工業(株)

*** 三菱重工業(株) (研究当時 大阪大学大学院)

**** 大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻

原稿受理 平成 11 年 7 月 9 日

秋季講演会において講演 平成 11 年 11 月 18, 19 日

の実験値が一致するにもかかわらず、流体による影響を考慮した連成振動解析ではそれらの乖離が大きくなって空中のときほどには一致しなくなる場合があることも指摘されている²⁾³⁾。その原因は、実構造物の固有ベクトルと有限要素法による固有ベクトル間の若干の差異にあること⁴⁾が検証されている。

以上のことから、回転成分まで考慮に入れた縮小付加質量マトリクスと岸壁での実船起振器試験データとを利用することにより、実船の洋上での振動特性はかなり正確に推定できるものと考えられる。

しかし、実構造物の実験データから得られる固有ベクトルは並進成分だけであり、重要な成分であるはずの回転ベクトルを抽出するには多少の工夫が必要である。文献⁴⁾では、実験により得られた並進方向固有ベクトルに剛体結合の概念を適用した回転ベクトル推定法^{4),5)}を利用している。ところが、実際に剛体結合で回転ベクトルを求める際には、幾つかの問題点も出てくる。その問題点として第1は、複数の並進固有ベクトルから1点の回転ベクトルを抽出する手法であるがために実験点が極端に増加することであり、ひいては実験時間が増加するだけでなく実験にかかるコストも増加することである。第2は、剛体結合を行う計測点同士が遠すぎると精度の良い回転ベクトルを得られず、近すぎると実験の僅かな誤差さえも影響を与えてしまい、精度の良い回転ベクトルを得ることが難しいことである。計測点を近すぎず遠すぎず適切な位置に配置するための法則を見つける必要があるけれども、現段階では未だ開発できていないのである。

ところで、面計測が可能となれば、縮小付加質量マトリクスを利用する必要はなくなり、縮小しない付加質量マトリクスを利用することができる。一方、配置法則を開発することができれば、自動処理によって回転ベクトルを抽出できるようになることから、縮小付加質量マトリクスを利用した解析方法を使うことができる。現状の計測技術ではその両面において幾つかの難点があり、ジレンマに陥った状況にある。ここで面計測の実現可能性が遠いと判断すれば、計測点数の難点があるのは承知の上で、その難点を克服できる計測システムの確立を期待しつつ、縮小付加質量マトリクスを利用することになる。

現状の計測技術を利用することを前提に実船計測データを用いた検証を早期に行うためには、剛体結合に代わる新たな回転ベクトルの推定法が必要となる。そこで、実験でなく数値解析結果を利用する方法について考える。有限要素法解析において梁要素や板要素の場合、回転ベクトルが得られる⁶⁾。この回転ベクトルが利用できるのならば、剛体結合を用いる必要はなくなる。しかし、実験と有限要素解析とで固有ベクトルに誤差が存在する場合があるので、有限要素法そのまゝの回転ベクトルを使用することは固有周波数の劣化を招く恐れがある。そこで、有限要素解析結果のモードを重ね合わせて、実験データに合うように修正する方法(MCE法:モード重畳法)を利用して、回転ベ

クトルを推定⁷⁾⁸⁾する手法を用いることにする。

本論文では、MCE法により、まず模型船の回転ベクトルを推定し、この回転ベクトルと縮小付加質量マトリクスを用いた構造変更解析^{4),9)}結果が、水中実験の固有周波数をよく推定できていることを示す。更に、実船に対してもMCE法を適用し、MCE法が実船に適用可能かどうかの検討も併せて行った。

2. 回転ベクトルの抽出

縮小付加質量マトリクスを用いたモーダル構造変更解析を行うためには、モーダルパラメータに対して回転成分すなわち回転ベクトルが必要になる⁴⁾。

従来のように剛体結合を用いても回転ベクトルは抽出できる^{4),9)}。しかし、幾つかの問題点が指摘されている。その問題点として、第1に観測点のまわりに3点以上の参照点を必要とするので実験時間が極端に増加すること、第2に参照点の配置によって回転ベクトルの値に影響が出るために精度の良い回転ベクトルを得るためには経験を必要とすること、などが挙げられる。

これらの問題点を解決するために、本研究では有限要素解析から得られた回転ベクトルをMCE(Modal Coordinate Expansion)法^{7),8)}によって修正したものを用いる。以下に、その手法について示す。

実験で得られた並進自由度モード $\{\phi_{tr}^X\}$ は、有限要素モデルの並進自由度モード $\{\phi_{tr}^A\}$ の線形和としてモードを重ね合わせる重みである γ_r を用いて次のように表されると仮定する。

$$\begin{aligned}\{\phi_{tr}^X\} &= \{\phi_{t1}^A\}\gamma_1 + \{\phi_{t2}^A\}\gamma_2 + \cdots + \{\phi_{ts}^A\}\gamma_s \\ &= [\phi_t^A]\{\gamma_s\}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで s は重ね合わせるモードの数を表している。

(1)式より測定点数が重ね合わせるモードの数より多い場合には、重ね合わせるモードの重みは

$$\{\gamma_r\} = ([\phi_t^A]^T [\phi_t^A])^{-1} [\phi_t^A]^T \{\phi_{tr}^X\} \quad (2)$$

にて算出できる。重み係数ベクトルが求まれば、回転自由度モードの推定値 $\{\phi_{tr}^X\}$ は有限要素モデルの回転自由度モード $\{\phi_{tr}^A\}$ の線形重ね合わせとして次式のように推定できる。

$$\begin{aligned}\{\phi_{tr}^X\} &= \{\phi_{r1}^A\}\gamma_1 + \{\phi_{r2}^A\}\gamma_2 + \cdots + \{\phi_{rs}^A\}\gamma_s \\ &= [\phi_r^A]\{\gamma_s\}\end{aligned}\quad (3)$$

(3)式より観測点の実験データさえあれば、必要とする回転自由度モードを推定することが可能になる。

3. MCE法を用いた流体-構造連成振動解析

3.1 箱形模型船による検討

Fig.1に示すアクリル箱形模型船を使用してMCE法による回転ベクトルの精度検討を行った。Table.1にその模

型船の仕様を示す。また、Fig.2 に実験計測点配置図を、Fig.3 にMCE 法を用いる上で使用した FEM モデルを示す。



Fig.1 acrylic ship model

Table.1 principal particulars of acrylic ship model

Total length(L)	1.200(m)
Total width(B)	0.140(m)
Total depth(H)	0.070(m)
Modulus of longitudinal elasticity(E)	$4.508 \times 10^9 (\text{N/m}^2)$
Modulus of transverse elasticity(G)	$1.764 \times 10^9 (\text{N/m}^2)$
Ship density(ρ)	$1.190 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$
Fluid density(ρ_w)	$1.000 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$

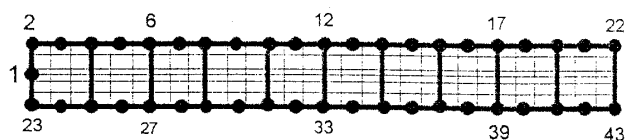


Fig.2 Distribution of measurement point

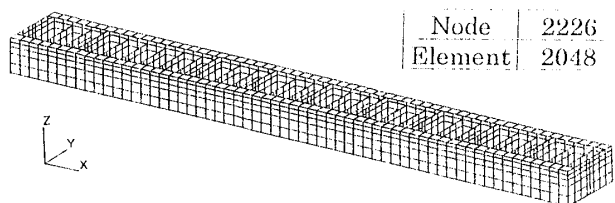


Fig.3 FEM-model (acrylic ship)

Fig.4 に実験で得られた上下方向固有ベクトルと有限要素解析結果との比較を示す。Fig.4 を見ると固有ベクトルに若干の差異が生じているのが判る。そこで、実験データに適合した回転ベクトルを得るために、MCE 法を用いて有限要素解析の固有ベクトルを実験のそれと一致させる。その結果を Fig.5 に示す。

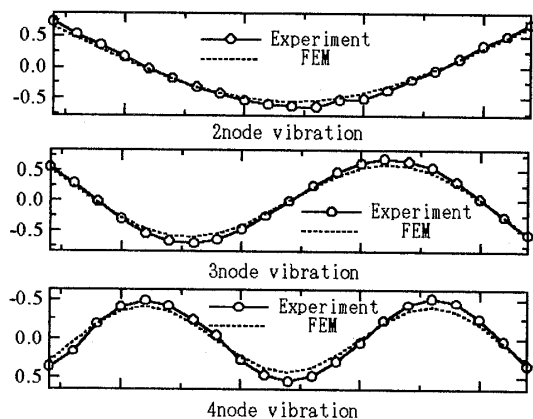


Fig.4 Comparison of eigenvector between experiment and FEM (air condition)

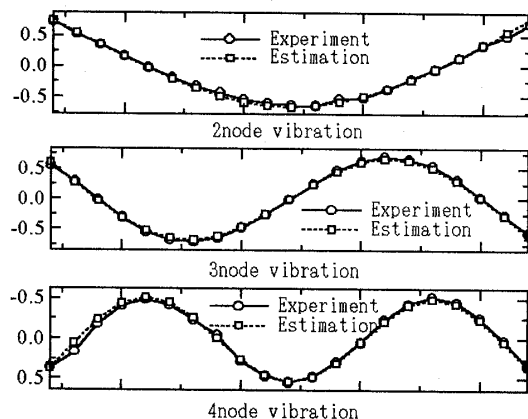


Fig.5 Comparison of eigenvector between estimation by use of MCE method and experiment (air condition)

Fig.5 より固有ベクトルが精度良く表現されているのが判る。そこで、この解析により求めた係数ベクトルを用いて回転ベクトルを推定し、接水状態での固有振動数を予測することにする。MCE 法で推定された回転ベクトルの値が正しいものならば、水中実験で得られた固有振動数と一致するはずである。Table.2 に縮小付加質量マトリクスを用いて構造変更解析を行った結果を、Fig.6 にそのグラフを示す。尚、Fig.6 には比較のために回転自由度を含めずに構造変更解析を行った結果も併せて掲載している。

Table.2 Comparison of natural frequency in the water between Estimation and experiment

	Experiment(Hz)	Estimation(Hz)	Error(%)
2node	45.96	46.42	1.0
3node	125.60	126.23	0.5
4node	249.69	252.96	1.4

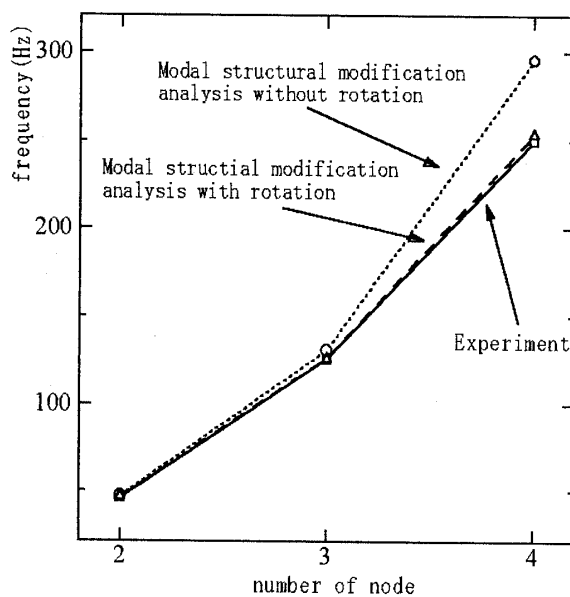


Fig.6 Comparison of natural frequency in the water between Estimation and experiment

Table.2 及び Fig.6 から、回転ベクトルを含めて解析を行った場合には、水中における固有振動数が精度良く予測できているのが判る。以上の検討により、回転ベクトルの値を正しく与えることができており、剛体結合による方法とは違って実験計測点数を増やす必要がないために、実船での検証に適していることがわかる。そして、固有振動数を予測する上で MCE 法が有効な手法であることが確認できた。

3.2 実船への MCE 法の適用

3.2.1 実験データの検証

模型船において MCE 法が適用できることが確認されたので、次に実船に対して MCE 法を適用する。

本研究では、供試データとして川崎重工業コンテナ船の実験データを使用した。Table.3 にコンテナ船の仕様を、Fig.7 に詳細 FEM モデルを示す。MCE 法では Fig.7 の詳細 FEM モデルを用いることとし、実固有値解析した結果を Fig.8 に示す。尚、Fig.8 では 4 節振動モード以降の高次モードだけを図示しているが、その理由は、今回使用する実験データの中に 2, 3 節振動モードが含まれていなかったためであり、解析結果の中に含まれていなかったためではない。

また、実験データとして、洋上及び岸壁での Exciter test(船尾上下方向加振 sweep 起振試験)の結果を用いた。その際の計測点配置は Fig.9 の船尾及び左舷側に黒丸で示された合計 16 点である。

本研究は岸壁実験データを利用して洋上における固有振動数を予測することを主目的としているが、今回用いた岸壁実験のデータは上部構造の振動特性を把握するためのものであったことから主船体の応答レベルが小さく、また起振周波数も高かったため、主船体節振動の固有ベクトルの判別が困難であった。そのため、岸壁実験データだけでは主船体振動モードの判別において確信を得るには至らない部分があった。それに対して洋上での実験データでは、4 節振動以上の高次モードだけではあったが主船体節振動も明確に捉えられていた。

以上の理由から、岸壁実験データを利用して洋上における固有振動数を予測することは諦めて、今回は洋上実験データを利用して岸壁での固有振動数を予測することにした。Fig.10 に洋上における船体上下方向の固有ベクトルと有限要素解析結果との比較を示す。

Table.3 principal particulars of container carrier

Extreme length	280.00(m)
Length between perpendiculars	267.00(m)
Molded breadth	39.80(m)
Molded depth	23.60(m)
Extreme draft(fore)	5.08(m)
Extreme draft(aft)	9.74(m)
Number of 20 feet container	5,250(TEU)

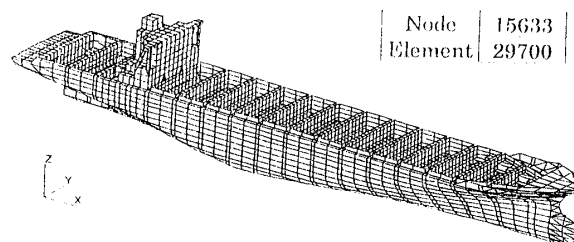


Fig.7 FEM-model (container carrier)

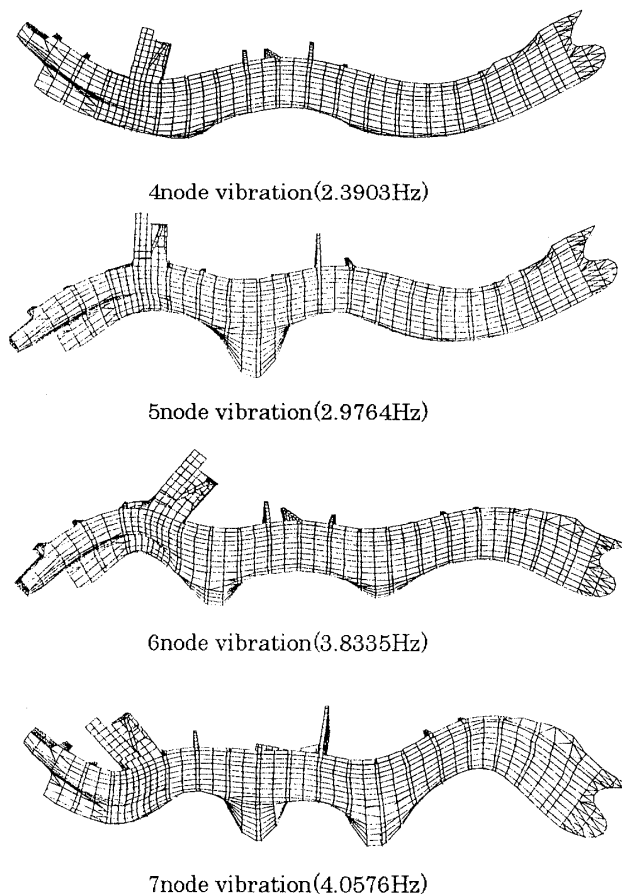


Fig.8 Mode shape using FEM-model

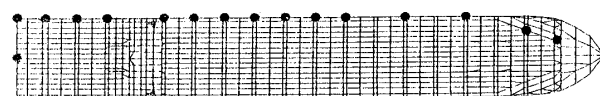


Fig.9 Distribution of measurement point

Fig.10 より実験と FEM ではほぼ同じモードが得られていることから、4 節振動から 7 節振動までの実験データと FEM 解析結果とを用いた MCE 法を利用することによって、洋上における回転自由度モードの推定が可能となることが判る。

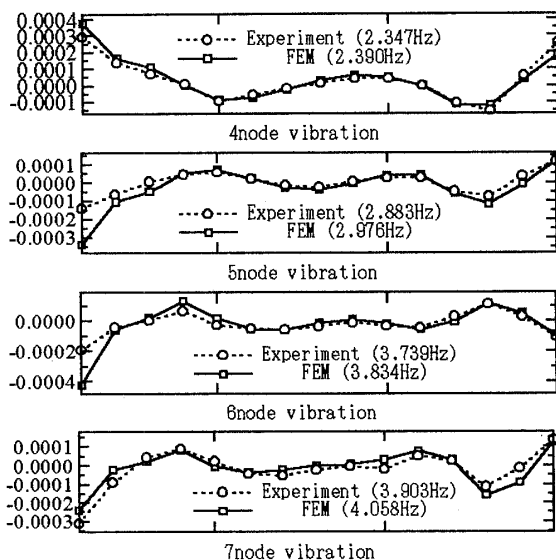


Fig.10 Comparison of eigenvector in the deep water between experiment and FEM

3.2.2 船底振動の取り扱い

本研究においては、縮小付加質量マトリクスを用いた解析対象が実船という巨大な構造物であるため、以下の点に注意しなければならない。

- 1) 実船においては扱う節振動の数が模型船のそれと比べて多く、高次の節振動モードにも対応できる縮小付加質量マトリクスを得るために多くの縮小点を必要とする。
- 2) 模型船とは異なり、船底振動モードと主船体振動モードとはそれぞれ違ったモード (Fig.8 の 6, 7 節振動モード) となっている。そのため、縮小付加質量マトリクスを用いる場合、船底の振動モードを考慮したモデル構造変更解析を行わなければならない。このことから、縮小点を船底では密にとる必要が生じてくる。

しかし、これらの問題点を解決するために縮小点を増やすと、実験での計測点数も増えることとなるので、あまりありがたいとはいえない。そこで本研究では、MCE 法を適用し FEM で得られた固有ベクトルから実験未計測である点の固有ベクトルの推定を行う。以下にその理論について述べる。

既計測点において、実験における並進自由度固有ベクトルが有限要素解析における並進自由度固有ベクトルの線形和で表すことができるとし、既計測点数が重ね合わせるモードの数 (FEM のモードの数) より多い時には、(2) 式で係数ベクトル $\{y_r\}$ を得ることができた。(2) 式で得られた係数ベクトル $\{y_r\}$ は既計測点での実験固有ベクトルを FEM 固有ベクトルの線形和で表した結果得られたものであり、定義からは、この係数ベクトル $\{y_r\}$ は既計測点での実験固有ベクトルのみを表現するために用いられている。しかし、一度係数ベクトル $\{y_r\}$ が決定されたならば、未計測点を含めた FEM 固有ベクトルに $\{y_r\}$ を乗じることにより、未計測

点に対しても実験固有ベクトルに相当するものを得ることができる。即ち、既計測点より求めた係数ベクトル $\{y_r\}$ を用いて未計測点の並進方向固有ベクトルと未計測点の回転ベクトルは (4), (5) 式のように表すことができる。

$$\{\phi_{tr}^x\} = [\phi_t^A] \{y_r\} \quad (4)$$

$$\{\phi_{Rr}^x\} = [\phi_R^A] \{y_r\} \quad (5)$$

$\{\phi_{tr}^x\}$: 未知計測点の並進固有ベクトル

$\{\phi_{Rr}^x\}$: 未知計測点の回転ベクトル

この推定法の利点は、実験データから係数ベクトル $\{y_r\}$ を得ることができたのならば、無数の未計測点のベクトルを推定することができることにある。また、今回検討を行っているコンテナ船の場合、Fig.9 で示した様に実験計測点は主船体の長手方向全体に配置されており、Fig.10 の様に主船体の振動モードを表せていることから、この推定法が適用可能となる。

3.2.3 モーダル構造変更解析

Fig.10 に示す実験計測点における固有ベクトルと、FEM 解析から得られた固有ベクトルを用いて、MCE 法により推定した船体上下方向の固有ベクトル比較図を Fig.11 に示す。Fig.11 において、算出された係数ベクトルを用いて主船体振動モードを表せていることが判る。前述の通り、実験計測点は船体全体にわたって配置されていることから、算出された係数ベクトルと、有限要素解析により得られた船底における固有ベクトルから、実験における船底振動モードを推定できる。Fig.12 に推定する船底の節点の配置を示し、Fig.13 に有限要素解析結果の船底における固有ベクトルと、推定された洋上における船底での固有ベクトルの比較図を示す。

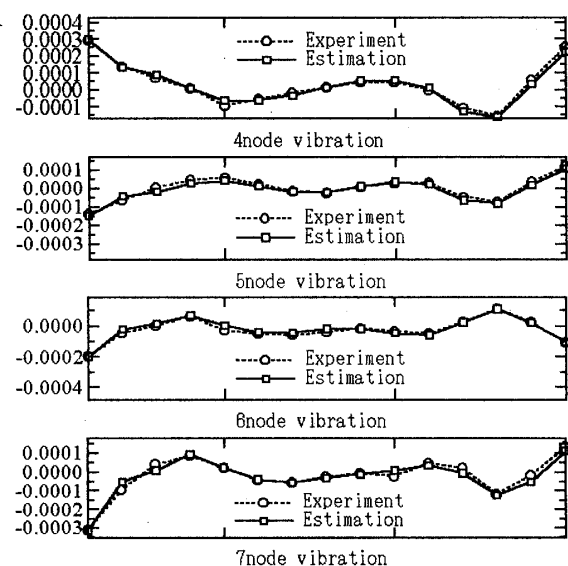


Fig.11 Comparison of eigenvector between estimation by use of MCE method and experiment in the deep water

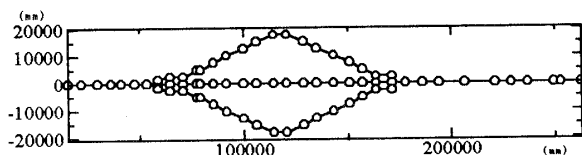


Fig.12 Arrangement of estimated points

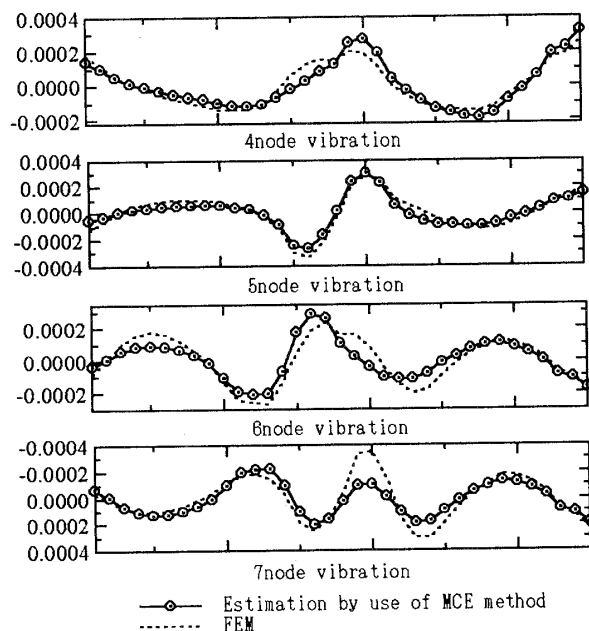


Fig.13 Comparison of bottom mode between estimation by use of MCE method and FEM

Fig.13 は、Fig.12 に示した推定される船底節点のうち船体中心線における結果である。推定された船底振動モードは実験データに合うように推定されたものであるため、FEM 結果とずれが生じているがモードの形は両者ともにほぼ同じ形状になっているといえる。

次に、Fig.12 に示す船底の節点を縮小点とした縮小付加質量マトリクスを用いたモーダル構造変更解析により、洋上実験データから岸壁における固有振動数を実際に推定してみた。その結果として、Fig.14 に構造変更後の固有モードと、推定により得られた固有振動数付近の岸壁における実験固有モードの比較を示す。また、Table4, Fig.15 に推定結果と岸壁における固有振動数の比較を示す。

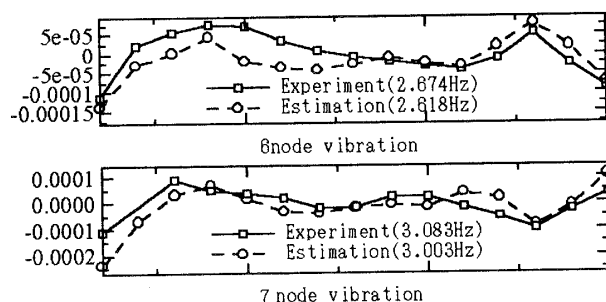


Fig.14 Comparison of eigenvector between experiment in the shallow water and estimation by use of modal structural modification method

Table.4 Comparison of natural frequency in the shallow water between experiment and estimation

	Experiment(Hz)	Estimation(Hz)	Error(%)
4node		1.8938	
5node		1.8945	
6node	2.6741	2.6180	2.1
7node	3.0828	3.0030	2.7

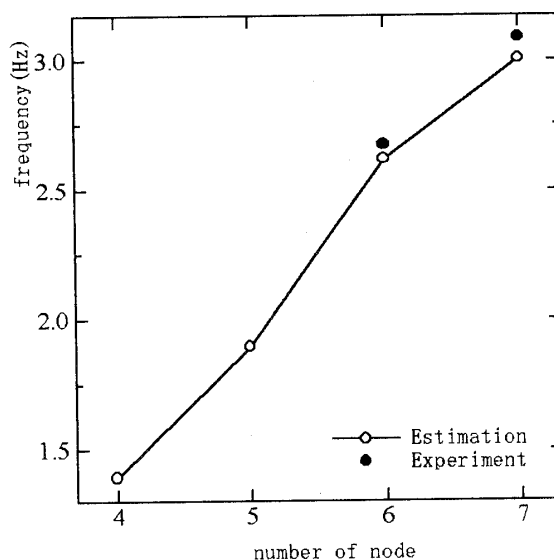


Fig.15 Comparison of natural frequency in the shallow water between experiment and estimation

Fig.14 の構造変更により得られた固有モードと、Fig.11 に示す洋上での固有モードを見比べてみると、モード形状は定倍率の拡張でしか変化していないのが判る。これは、今回は実験データを用いたモーダル構造変更解析の検証であったため、単独のモードを用いて構造変更解析をしたことが原因である。しかし、固有ベクトルのオーダーはほぼ一致しており、また、モードの形状も類似しているのが判る。よって、Fig.14 に示す岸壁実験でのモードが岸壁における 6,7 節振動モードであると判断できる。このようにして、モードの判別が困難であった岸壁実験データの中から 6,7 節振動を確定し、そのときの固有振動数も得ることができた。尚、Fig.14 において岸壁における 4,5 節振動モードを示していないのは岸壁実験データの周波数領域に含まれていなかったためである。

次に、以上の検証により得られた岸壁での 6,7 節振動の固有振動数と、モーダル構造変更解析により得られた固有振動数との比較を Table4, Fig.15 において行ってみると、精度良く予測がなされていることが判る。

以上のことから MCE 法を用いれば、有限要素モデルが必要となるが、回転ベクトルだけでなく未計測点の固有ベクトルも推定することができ、実船においても従来通りの実験計測点数で縮小付加質量マトリクスを用いた固有振動数の予測が可能となることが判る。

4. 結 言

MCE 法を用いて様々な検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) MCE 法で推定された回転ベクトルを用いても接水状態での固有周波数を求めることが可能であり、剛体結合を用いて回転ベクトルを推定するよりも便利である。
- 2) 実験計測点が少ないあるいは局所的な振動が発生するなどの問題に対して、MCE 法を用いたモーダル構造変更解析は対処可能で、巨大な構造物一般への応用が期待できる。
- 3) 本研究においては、固有モードが精度良く得られている洋上実験から岸壁における固有周波数を予測したが、同じ手順によって岸壁から洋上における固有周波数の予測も可能である。従って MCE 法を用いた解析は艀装岸壁状態試験から洋上での固有周波数を得るための手段としても有効であることが予測される。
- 4) 本研究では、実験における手間を省略することを目的として研究を行ってきたが、船底振動を船底面において面計測できるのであれば、有限要素解析に頼ることなく、実験データのみを用いたモーダル構造変更解析により更に正確な解析が可能となることが予測できる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、大阪大学工学部の故船木俊彦教授（平成 10 年 10 月逝去）には、終始有益なご助言を賜りました。ご冥福をお祈りすると共に、厚く感謝の意を表します。また、本研究の一部は、平成 11 年度文部省科学研究費補助金、奨励研究 (A) 10750661 の補助を受けて行われたことを付記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 船木俊彦、林茂弘：船舶の振動レベル推定に関する基礎的研究（実験モーダル解析と境界要素法の結合）、日本造船学会論文集 178 号（1995）p. 363～p. 370
- 2) 松浦義一、松本瓦平、有馬健次、木下篤：水中構造物の振動解析法、日立造船技報第 5 巻第 1 号（1984）p. 38～p. 43
- 3) 松浦義一、松本瓦平、有馬健次、木下篤：船体上下振動と船底振動との連成について、日立造船技報第 45 巻第 4 号（1984）p. 1～p. 12
- 4) 船木俊彦、林茂弘、満島誠：縮小付加質量マトリクスにおける回転ベクトルの影響に関する研究（剛体結合による回転ベクトルの抽出）、日本造船協会論文集第 184 号（1998）p. 493～p. 499
- 5) 船木俊彦、林茂弘、藤川文孝、天野昌祥：振動計測システムノ開発（回転成分の抽出とアニメーションによる振動の可視化）、関西造船協会誌第 229 号（1998）p. 111～p. 117
- 6) 鷺津久一郎、宮本博、山田嘉昭、山本善之、河合忠彦：有限要素法ハンドブック I 基礎編 培風館（1981）p. 104

- 7) 鞍谷文保、岩壺卓三、沖田耕三：数値解析の援用による回転自由度モードの推定、日本機械学会論文集（C 編）61 巻 587 号（1995）p. 2875～p. 2881
- 8) 鞍谷文保、岩壺卓三、沖田耕三：数値解析の援用による回転自由度モードの推定（重ね合わせるモードの選択に関する検討）、日本機械学会論文集（C 編）62 巻 587 号（1996）p. 4205～p. 4211
- 9) 長松昭男：モード解析 培風館（1985）p. 259～p. 260