

接水防撓パネルの固有振動数推定法に関する研究

— 簡易推定法の導出とニューラルネットワークを用いた推定精度向上について —

正員 古野 弘志* 正員 北村 充**

A Study on Estimating the Natural Frequency for the Stiffened Plate Considering Added Mass Effects
— conventional equation based on the energy method and modification via Neural Network —

by Hiroshi Furuno, *Member* Mitsuru Kitamura, *Member*

Summary

It is well known that many design candidates will be under consideration in optimization processes of ship structures with Genetic Algorithm. Since a Finite Element Analysis requires a lot of computational resources, it is difficult to examine the structural strength of these design candidates. Hence, a simple but accurate method is desired. In this paper, the natural frequency of the stiffened plate in cooperating with added mass effects is under investigation. A conventional equation for estimating the natural frequency is proposed based on the energy method. The Neural Network is also introduced here in order to improve the accuracy of the solution. Good agreement of solutions between the proposed method and Finite Element Method is observed in the numerical example.

1. 緒言

現在まで、著者等は、初期計画時における船体構造最適化に関する研究¹⁻⁷⁾を行ってきた。遺伝的アルゴリズムを適用して船体構造最適化を行う場合、数千、数万ケースに及ぶ強度評価を行う必要があり、その解析時間の観点から有限要素法による強度評価は事実上不可能である。そのため、計算時間が速くかつ比較的推定精度の良い簡易強度評価法の導出が重要となる。

このような研究背景より、本論文では、まず、船体構造解析における接水防撓パネルの固有振動数評価に注目し、エネルギー法による防撓材の面外変形影響を考慮した簡易推定法の導出を検討する。また、本簡易推定法

の結果と有限要素法解析結果を比較することにより、その精度を検証する。ここで、特異点分布法による両面接水パネルの有限要素法解析については、その解析精度に問題があることが報告^{8,9)}されているため、本論文では両面接水パネルの検討は行わない。

本簡易推定法の導出においては、幾つかの仮定が設けられているため、有限要素法の解析結果と比較して、ある程度の誤差を含むことが考えられる。それ故、本研究では、この誤差量を埋めるためにニューラルネットワークの学習能力に着目する。つまり、有限要素法解析結果と簡易推定法による結果との差を学習させることにより、簡易推定法の推定値の修正を試みる。

本論文では、パネル寸法、板厚、スチフナの高さ、付加水質量の状態（空中、片面接水）の変化を考慮した接水防撓パネルの固有振動数を推定する方法を検討する。

2. 簡易推定法の導出

スチフナと桁もしくはパネルブレーカによって区切られた防撓パネルを Fig.1 のようにモデル化する。この

* (株) 名村造船所 船舶海洋事業部 基本設計部
(広島大学大学院 博士課程後期 社会人特別選抜)

** 広島大学 工学部 第四類

とき、スチフナ面材部での変形モードは微小と考えてその面外方向変位を零とし、また、面材のねじれによるエネルギーも微小と仮定して無視できるものとする。

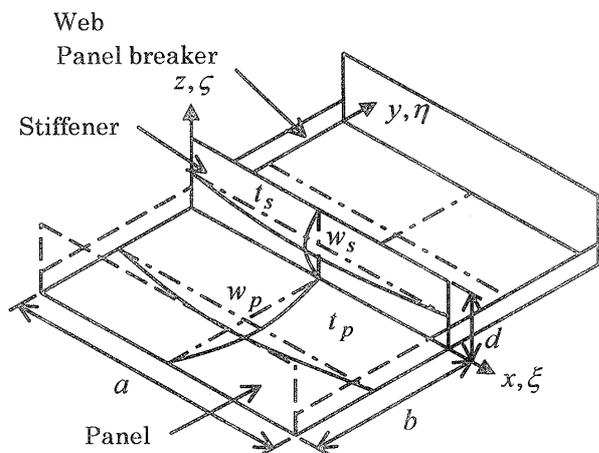


Fig.1 The stiffened plate model

2.1 基本振動モードの仮定

各軸方向とも1半波の振動モードとなると考え、パネルとスチフナウェブの基本撓み関数を次のように仮定する。

・パネル

$$w_{p0}(\xi, \eta) = \sin \pi \xi \left\{ \delta_{p1} \sin \pi \eta + \delta_{p2} \eta(1-\eta) \right\} \quad (1)$$

・スチフナウェブ

$$w_{s0}(\xi, \zeta) = \sin \pi \xi \left\{ \delta_{s1} \sin \pi \zeta + \delta_{s2} (2\zeta - 3\zeta^2 + \zeta^3) \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\delta_{p1}, \delta_{p2}, \delta_{s1}, \delta_{s2}$ は未定撓み係数である。

(1), (2)式より、防撓パネルの振動を次のように仮定する。

・パネル

$$w_p(\xi, \eta) = w_{p0} \cdot \cos \omega t \quad (3)$$

・スチフナウェブ

$$w_s(\xi, \zeta) = w_{s0} \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

ここで、 ω は角振動数である。

2.2 パネルおよびスチフナウェブの連続性

パネルとスチフナの接続部 ($\eta=0, \zeta=0$) において、次の条件が成り立つ。

① 接続部における撓み角の連続条件

$$\frac{1}{b} \frac{\partial w_p}{\partial \eta} = \frac{1}{d} \frac{\partial w_s}{\partial \zeta} \quad (5)$$

② 接続部におけるモーメントの釣り合い条件

$$2D_p \left(\frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \eta^2} + \frac{\nu}{a^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi^2} \right) + D_s \left(\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \zeta^2} + \frac{\nu}{a^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi^2} \right) = 0 \quad (6)$$

ここで、 ν はポアソン比、 D_p, D_s はパネル、スチフナウェブの板の曲げ剛性を表す。

(5), (6)式の条件に、(3), (4)式を代入することにより、

δ_{s1}, δ_{s2} と δ_{p1}, δ_{p2} の関係式を得る。

$$\begin{cases} \delta_{s1} = \alpha_1 \delta_{p1} + \alpha_2 \delta_{p2} \\ \delta_{s2} = \beta_1 \delta_{p1} + \beta_2 \delta_{p2} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{d}{b}, & \alpha_2 = \frac{d}{\pi b} \left(1 + \frac{4}{3} \frac{D_p d}{D_s b} \right) \\ \beta_1 = 0, & \beta_2 = -\frac{2}{3} \frac{D_p}{D_s} \left(\frac{d}{b} \right)^2 \end{cases} \quad (8)$$

2.3 系のエネルギー方程式と固有値解析

系のエネルギー方程式は次のように与えられる。

$$J = U_p + U_s - T_p - T_s = 0 \quad (9)$$

ここで、パネルとスチフナウェブの最大歪エネルギーと最大運動エネルギーは(1), (2), (3), (4)式を用いて次のように与えられる。

・パネルの曲げによる最大歪エネルギー U_p

$$\begin{aligned} U_p &= \frac{D_p}{2} \int_0^a \int_0^b \left[\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi^2} + \frac{1}{b^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \eta^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2(1-\nu)}{a^2 b^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 w_p}{\partial \eta^2} - \frac{\left(\frac{\partial^2 w_p}{\partial \xi \partial \eta} \right)^2}{\left(\frac{\partial \xi \partial \eta}{a b} \right)^2} \right] a b d \xi d \eta \\ &= \frac{D_p}{2} \left\{ \frac{1}{a^4} \left(\frac{\pi^4}{4} \delta_{p1}^2 + 4\pi \delta_{p1} \delta_{p2} + \frac{\pi^4}{60} \delta_{p2}^2 \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{a^2 b^2} \left(\frac{\pi^4}{4} \delta_{p1}^2 + 4\pi \delta_{p1} \delta_{p2} + \frac{\pi^2}{6} \delta_{p2}^2 \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{b^4} \left(\frac{\pi^4}{4} \delta_{p1}^2 + 4\pi \delta_{p1} \delta_{p2} + 2\delta_{p2}^2 \right) \right\} a b \end{aligned} \quad (10)$$

・スチフナウェブの曲げによる最大歪エネルギー U_s

$$\begin{aligned} U_s &= \frac{D_s}{2} \int_0^a \int_0^d \left[\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi^2} + \frac{1}{d^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \zeta^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2(1-\nu)}{a^2 d^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 w_s}{\partial \zeta^2} - \frac{\left(\frac{\partial^2 w_s}{\partial \xi \partial \zeta} \right)^2}{\left(\frac{\partial \xi \partial \zeta}{a d} \right)^2} \right] a d d \xi d \zeta \\ &= \frac{D_s}{2} \left\{ \frac{1}{a^4} \left(\frac{\pi^4}{4} \delta_{s1}^2 + 6\pi \delta_{s1} \delta_{s2} + \frac{4}{105} \pi^4 \delta_{s2}^2 \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{a^2 d^2} \left(\frac{\pi^4}{4} \delta_{s1}^2 + 6\pi \delta_{s1} \delta_{s2} + \frac{2}{5} \pi^2 \delta_{s2}^2 \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{d^4} \left(\frac{\pi^4}{4} \delta_{s1}^2 + 6\pi \delta_{s1} \delta_{s2} + 6\delta_{s2}^2 \right) \right\} a d \end{aligned} \quad (11)$$

・パネルの最大運動エネルギー T_p

$$\begin{aligned} T_p &= \frac{\gamma a b t_p}{2g} \omega^2 \int_0^a \int_0^b w_p^2 d \xi d \eta \\ &= \frac{\gamma a b t_p}{4g} \omega^2 \left(\frac{1}{2} \delta_{p1}^2 + \frac{8}{\pi^3} \delta_{p1} \delta_{p2} + \frac{1}{30} \delta_{p2}^2 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

・スチフナウェブの最大運動エネルギー T_s

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{\gamma a d t_s}{2g} \omega^2 \int \int w_{s,d}^2 d\xi d\zeta \\ &= \frac{\gamma a d t_s}{4g} \omega^2 \left(\frac{1}{2} \delta_{s1}^2 + \frac{12}{\pi^2} \delta_{s1} \delta_{s2} + \frac{8}{105} \delta_{s2}^2 \right) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 g は重力加速度、 γ は構造の重量密度を表す。

(9)式に(10), (11), (12), (13)式を代入すると次のエネルギー方程式を得る。

$$\begin{aligned} J &= \bar{D}_p \cdot \bar{M}_p \left(A_{11} \delta_{p1}^2 + 2A_{12} \delta_{p1} \delta_{p2} + A_{22} \delta_{p2}^2 \right) \\ &\quad + \bar{D}_s \cdot \bar{M}_s \left(B_{11} \delta_{s1}^2 + 2B_{12} \delta_{s1} \delta_{s2} + B_{22} \delta_{s2}^2 \right) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、

$$\bar{D}_p = \frac{D_p}{2a^2 K_p}, \quad \bar{D}_s = \frac{D_s}{2a^2 K_s} \quad (15)$$

$$\bar{M}_p = \frac{\gamma a b t_p}{4g}, \quad \bar{M}_s = \frac{(\gamma a d t_s + M_F)}{4g} \quad (16)$$

$$K_p = \frac{a}{b}, \quad K_s = \frac{a}{d} \quad (17)$$

ここで、(16)式中の M_F はスチフナ面材の質量を示す。

また、(14)式中の A_{11}, A_{12}, A_{22} および B_{11}, B_{12}, B_{22} は係数であり Appendix にまとめて示す。

(7)式の関係式を考慮しながら、(14)式のエネルギー方程式を δ_{p1}, δ_{p2} で一階偏微分する。

$$\frac{\partial J}{\partial \delta_{p1}} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial \delta_{p2}} = 0 \quad (18)$$

(18)式を解き、固有値解析の形に整理すると次の(19)式を得る。

$$\begin{vmatrix} \Phi_{11} - \lambda \Psi_{11} & \Phi_{12} - \lambda \Psi_{12} \\ \Phi_{12} - \lambda \Psi_{12} & \Phi_{22} - \lambda \Psi_{22} \end{vmatrix} = 0 \quad (19)$$

ここで、 $\lambda = \omega^2$ である。また、 $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_{22}$ および $\Psi_{11}, \Psi_{12}, \Psi_{22}$ は係数であり Appendix にまとめて示す。(19)式の条件式を満たす λ が固有値となる。したがって、求める固有振動数 f は次式で与えられる。

$$f = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \quad (20)$$

2.4 付加水質量

構造部材が流体中（接水状態）で振動する場合、その構造の運動エネルギーが流体に伝播し構造部材と共に運動する。これにより、見かけ上運動する流体の質量分だけ、構造部材の質量に付加されることになる。

この付加水質量の影響は非常に大きく、構造部材の固有振動数低下の主たる原因となる。ここでは、付加水質量の影響の考え方を鬼頭の方法¹⁰⁾に倣い、本簡易推定法に考慮することにした。鬼頭の方法¹⁰⁾によれば、片面接水状態における付加水質量は次のように与えられる。

$$\bar{M}_a = \frac{\gamma_w a^2 b}{4g\pi\sqrt{1+K_p^2}} \quad (21)$$

ここで、 γ_w は流体の重量密度を示す。

流体質量が構造質量に付加されると考えれば、(16)式に(21)式を加えれば良いことになる。

$$\bar{M}_p = \frac{\gamma a b t_p}{4g} + \frac{\gamma_w a^2 b}{4g\pi\sqrt{1+K_p^2}} \quad (22)$$

3. 有限要素法解析との比較計算

本解析法の推定精度を検証するために Fig.2 に示すような解析モデルを用い、パネルの板厚とスチフナサイズの異なる6種類の防撓パネルについて、汎用解析コード MSC/NASTRAN による固有値解析を行った。

解析モデルの境界条件は桁位置で支持条件、短辺方向はパネル中央部で対称条件とした。また、本解析では付加水質量の影響を考慮する必要があり、日本造船研究協会第 236 研究部会総合報告書¹¹⁾等で提案されている特異点分布法を適用した。なお、片面接水状態で検討するため、防撓材が付いていない面で接水するものとした。

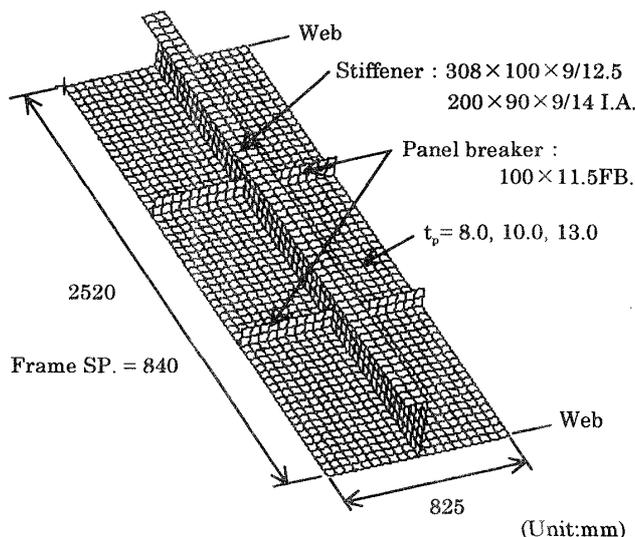
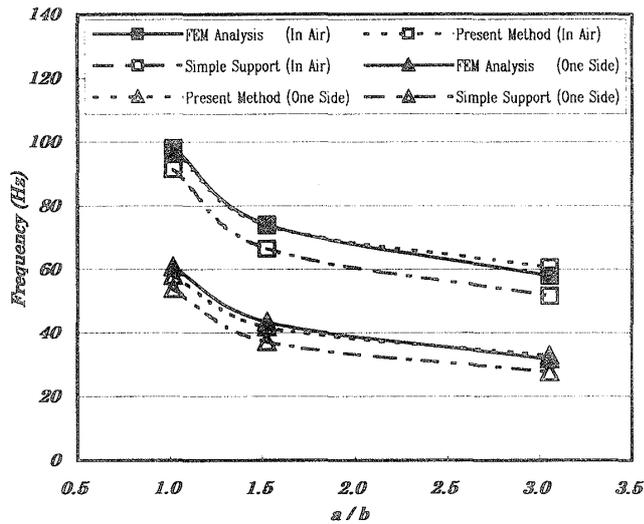


Fig.2 Modeling for FEM analysis

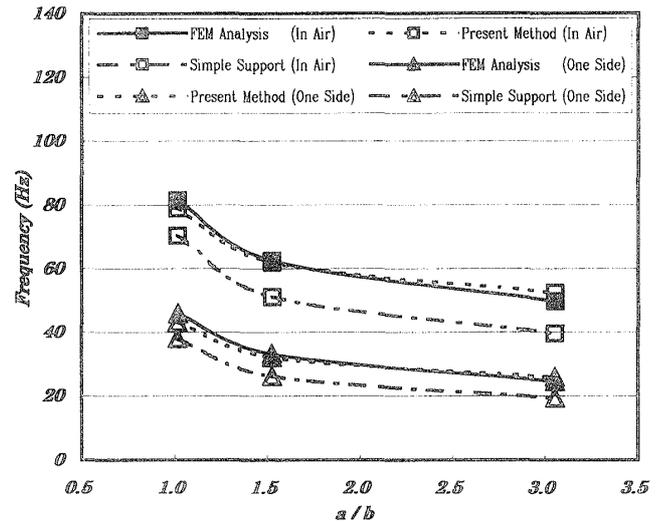
Fig.3 に、各パネル寸法における固有振動数を単純支持パネルの理論解¹²⁾と共に示す。

まず、有限要素法解析結果と単純支持パネルの理論解とを比較すると、スチフナウェブの面外変形の影響から、有限要素法解析結果が単純支持パネルの理論解よりも高い値を示すことが分かる。また、このスチフナウェブの面外変形の影響は、パネルの板厚が小さくなるほど顕著に現れてくる。したがって、実設計現場において、単純支持パネルの理論解を用いることは、安全サイドの評価となるが過大に安全率を取ることになる。

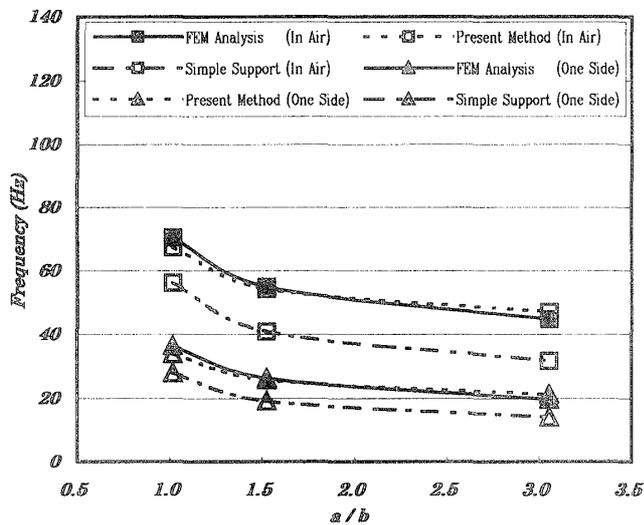
続いて、本簡易推定法と有限要素法解析結果を比較する。本簡易推定法の与える推定結果は、単純支持パネル



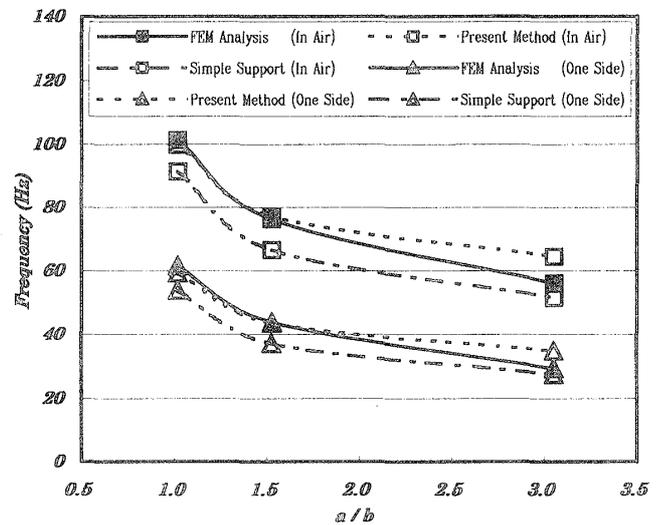
(a) $tp = 13.0 \text{ mm}, d = 308 \text{ mm}$



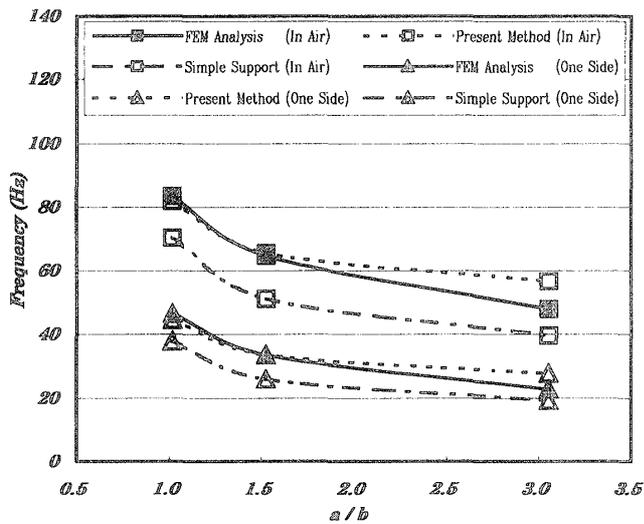
(b) $tp = 10.0 \text{ mm}, d = 308 \text{ mm}$



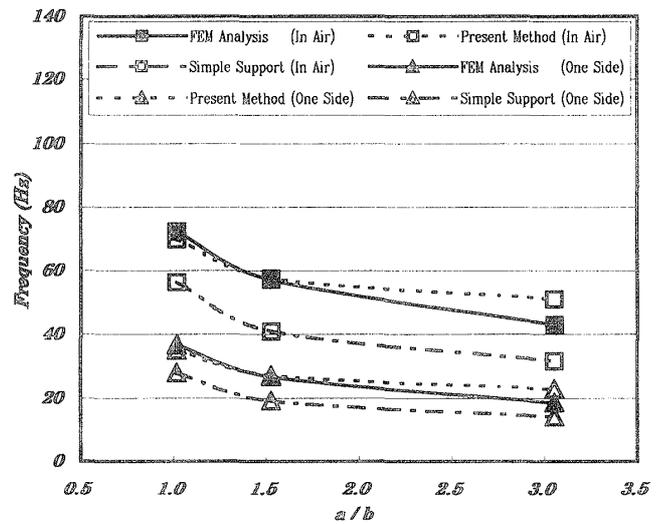
(c) $tp = 8.0 \text{ mm}, d = 308 \text{ mm}$



(d) $tp = 13.0 \text{ mm}, d = 200 \text{ mm}$



(e) $tp = 10.0 \text{ mm}, d = 200 \text{ mm}$



(f) $tp = 8.0 \text{ mm}, d = 200 \text{ mm}$

Fig.3 Comparison of natural frequencies

の理論解よりも有限要素法解析結果と良く一致する。このことにより、本簡易推定法はスチフナウェブの面外変形の影響を考慮できているものと考えられる。ただし、パネルの辺のアスペクト比 a/b が大きくなると、やや有限要素法解析結果との差が大きくなるが、これは2章で定義した仮定が合わなくなり始めるものと考えられる。このことを考慮しても、本簡易推定法の与える推定結果は単純支持パネルの理論解よりも推定精度は高く、初期計画時の構造最適化に本簡易推定法の推定結果を用いることは可能である。

4. ニューラルネットワークを用いた推定精度向上

本簡易推定法より求められた結果は、単純支持パネルの理論解よりも有限要素法解析結果と良く一致する。しかし、本簡易推定法は、幾つかの仮定を設け、エネルギー法を適用して解析的に導いているため、有限要素法解析結果と比較して誤差が大きくなる場合がある。ここでは、この誤差を小さくすることを目的として、ニューラルネットワークの学習能力に注目し、本簡易推定法の結果を有限要素法解析結果に近づけることを試みる。

4.1 簡易推定法と有限要素法解析結果を教示させる方法 (case-1)

本論文で用いるニューラルネットワークの構造を Fig.4 に示す。これは、入力層、中間層、出力層の合計3層のフィードフォワード型ニューラルネットワークであり、バックプロパゲーションアルゴリズムを学習に用いる。また、本論文で用いた各ニューロンは Fig.5 に示すような工学的神経素子モデルを用い、その出力関数を次式で与えた¹³⁾。

$$y = f(s - \theta) \quad (23)$$

$$s = \sum_{n=1}^N w_n x_n \quad (24)$$

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha s}} \quad (25)$$

ここで、 x_n : 入力値, w_n : 結合荷重, θ : 閾値,
 y : 出力値

また、(25)式をシグモイド関数（出力関数）と呼び、その α をゲインと呼ぶ。 α を零に近づけるとシグモイド関数は線形的な関数となり、無限大にしていくと非線形的な関数（階段状関数）となる。

有限要素法解析と本簡易推定法との差を学習させるため、本簡易推定法の推定結果をニューラルネットワークの入力因子へ含めた。入出力パラメータを Table 1 に示すが、接水状態(IP5)の値は、1 : 空中, 2 : 片面接水と定義した。なお、ニューラルネットワークの入力値は0から1までの実数値しかとることが出来ないため、各

パラメータの最大値で除して正規化を行う。

続いて、本簡易推定法の誤差を学習させるため、Table 2 に示す構造寸法の組み合わせにより教示データを作成した。これにより、教示データ数は合計 72 通りとなる。

さらに、ニューラルネットワークでは、中間層のニューロン数、学習回数およびシグモイド関数のゲイン値等を設定する必要があるが、ここでは各パラメータを数ケースに変化させ、最も推定精度の良かった組み合わせを用いることにした。検討の結果、これらのパラメータの値を以下のように設定する。

- ・ 中間層ニューロン数 : 6 個
- ・ 学習回数 : 36000 回
- ・ シグモイド関数のゲイン : 1.0

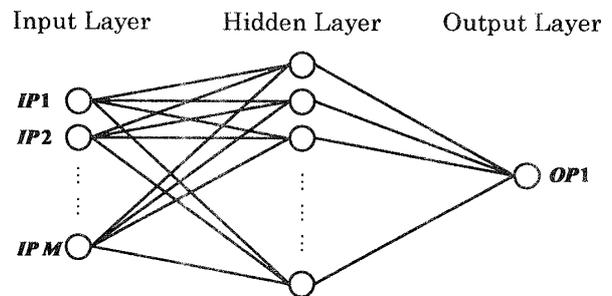


Fig.4 Formation of feed forward Neural Network

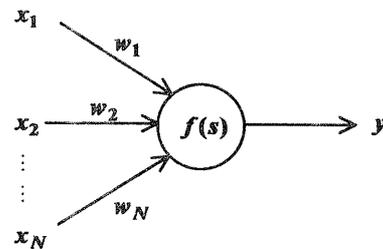


Fig.5 Engineering model of Neuron element

Table 1 Input and output parameters (case-1)

	Parameters
IP 1	Aspect ratio of the panel edge a/b
IP 2	Breadth of the panel b
IP 3	Depth of the stiffener web d
IP 4	Thickness of the panel t_p
IP 5	Added mass condition (1:In air, 2:One side)
IP 6	Results of simplified estimating method
OP 1	Results of FEM analysis

Table 2 Teaching data of Neural Network

	Teaching parameters
a/b	1.0, 1.5, 3.0 (about)
b	825, 950
t_p	8.0, 10.0, 13.0
Stiffener size	200×90×9 / 14 I.A., 308×100×9 / 12.5
Added mass condition	1: In air, 2: One side

(Unit in mm)

4.2 有限要素法解析結果のみを教示させる方法 (case-2)

4.1 節の検討において、教示データを作成するために72通りの有限要素法解析結果を得ている。ここでは、単に有限要素法解析結果のみのデータを用いてニューラルネットワークに学習させ、前回検討した方法との推定精度の比較を行う。

まず、入出力パラメータを Table 3 のように定義する。Table 1 と比較すると入力因子に簡易推定法の推定結果 (IP6) が含まれていない。次に、学習に用いる教示データは前回と同様、Table 2 に示す構造寸法の組み合わせを用い、合計 72 通りの教示データ用いることにした。

さらに、ニューラルネットワークのパラメータ設定についても前回同様、各パラメータを数ケースに変化させ、最も推定精度の良い組み合わせを用いることにした。

- ・ 中間層ニューロン数 : 8 個
- ・ 学習回数 : 36000 回
- ・ シグモイド関数のゲイン : 0.8

Table 3 Input and output parameters (case-2)

	Parameters
IP 1	Aspect ratio of the panel edge a/b
IP 2	Breadth of the panel b
IP 3	Depth of the stiffener web d
IP 4	Thickness of the panel t_p
IP 5	Added mass condition (1: In air, 2: One side)
OP 1	Results of FEM analysis

Table 4 Comparison of error in the modifications via Neural Network

	Maximum error	Average of error	Standard deviation
Case-1	2.88%	0.61%	0.00603
Case-2	4.74%	1.72%	0.01287
Simplified estimating method only	28.88%	6.39%	0.07373

4.3 ニューラルネットワークを用いた簡易推定法の推定精度の比較

4.1 節で検討した簡易推定法による結果と有限要素解析の結果を教示させる方法(case-1)と、4.2 節で検討した有限要素法解析結果のみを教示させる方法(case-2)の推定結果について、Fig.6 ($b=825\text{mm}$), Fig.7 ($b=950\text{mm}$) にまとめて示す。また、各推定法で得られた推定結果の最大誤差、平均誤差および標準偏差を Table 4 に示す。

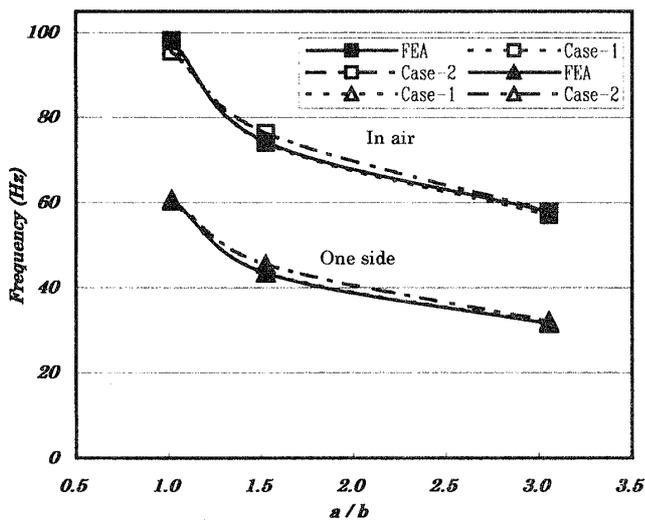
Fig.6 と Fig.7 の結果より、2つの推定法は共に有限要素法解析結果と非常に良く一致しており、簡易推定法単独で推定した結果(Fig.3)よりも推定精度は高いことが分かる。特に、簡易推定法と有限要素解析の結果を教示させる方法(case-1)は、目的としている有限要素解析結果とほとんど同じ数値を与えているため、図中において両者の違いが検出できない。ニューラルネットワークが入力因子に対する推定誤差を学習し、非常に高い精度を持って簡易推定法により得られた結果を修正しているものと考えられる。

一方、有限要素法解析結果のみを教示させる方法(case-2)も全体的に良い精度を持っているが、空中状態において参考としている有限要素解よりも少し高めの固有振動数を推定している。

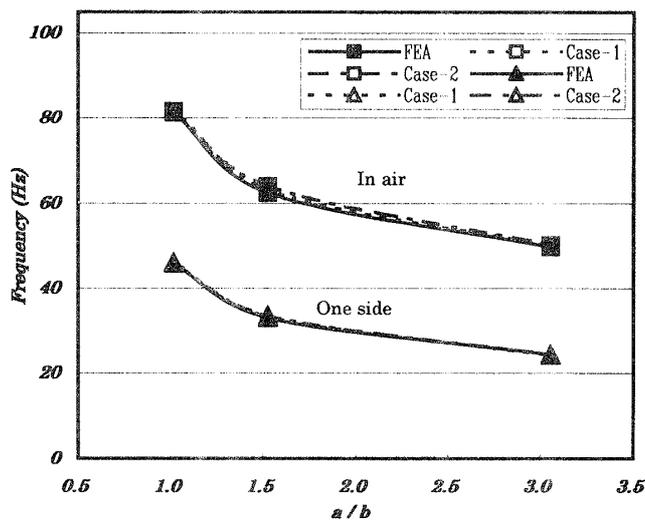
また、Table 4 の比較より、簡易推定法と有限要素法解析結果を教示させる方法(case-1)の方が、有限要素法解析結果のみを教示させる方法(case-2)よりも推定精度が高いことが分かる。前者の平均誤差は1%以下であり、初期計画時の船体構造最適化における接水防撓パネルの固有振動数評価を行うには十分な推定精度を有する。

5. 結 言

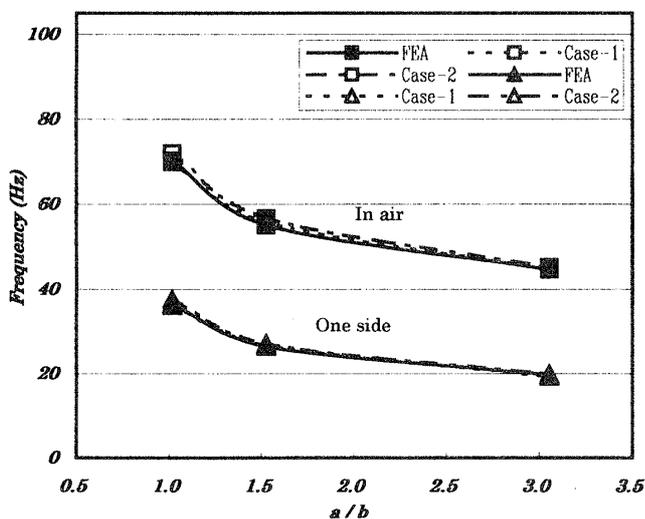
本研究では、初期計画時の船体構造最適化における接水防撓パネルの固有振動数評価を行うことを目的とし、エネルギー法による防撓材の面外変形影響を考慮した簡易推定法を導いた。また、本簡易推定法により得られた解の精度を向上させるため、ニューラルネットワークを用いた修正法についても検討を行った。その結果、次の知見を得ることができた。



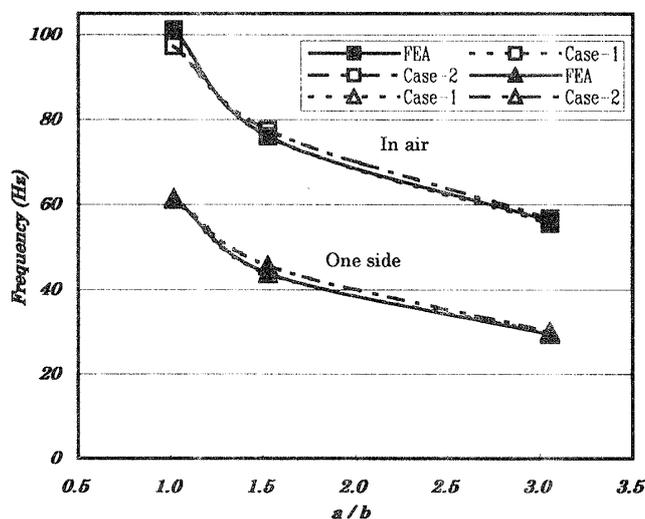
(a) $t_p = 13.0 \text{ mm}$, $d = 308 \text{ mm}$



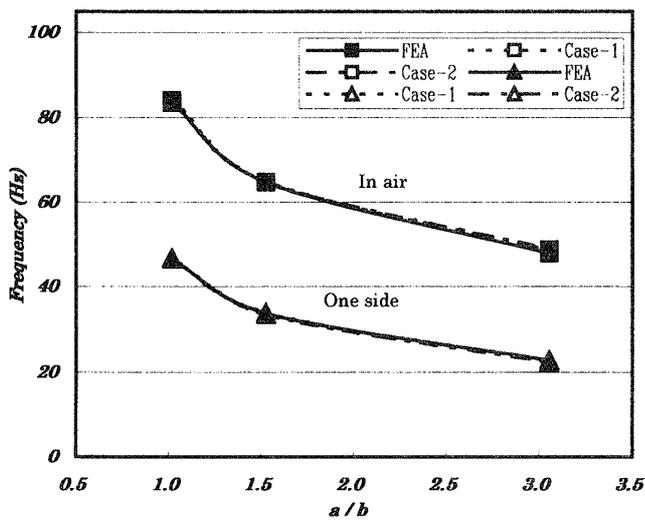
(b) $t_p = 10.0 \text{ mm}$, $d = 308 \text{ mm}$



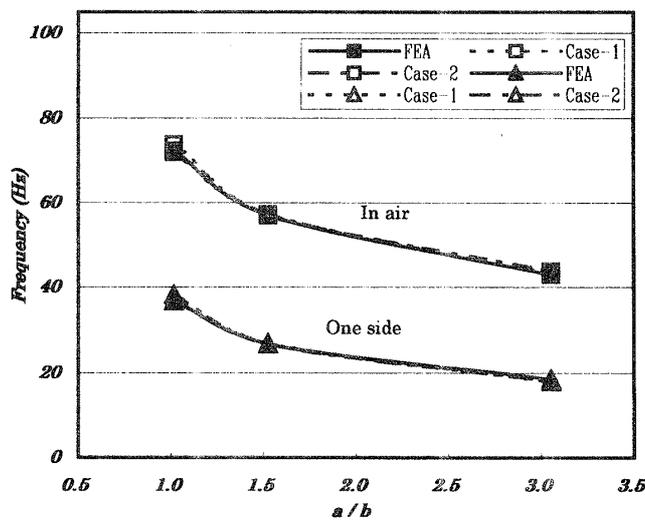
(c) $t_p = 8.0 \text{ mm}$, $d = 308 \text{ mm}$



(d) $t_p = 13.0 \text{ mm}$, $d = 200 \text{ mm}$

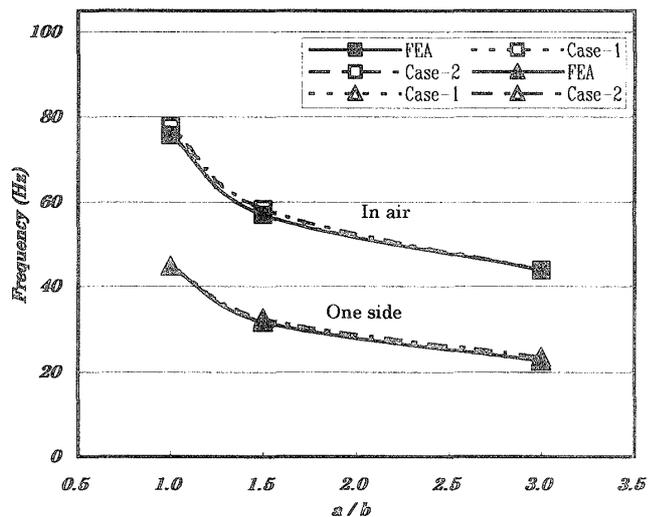


(e) $t_p = 10.0 \text{ mm}$, $d = 200 \text{ mm}$

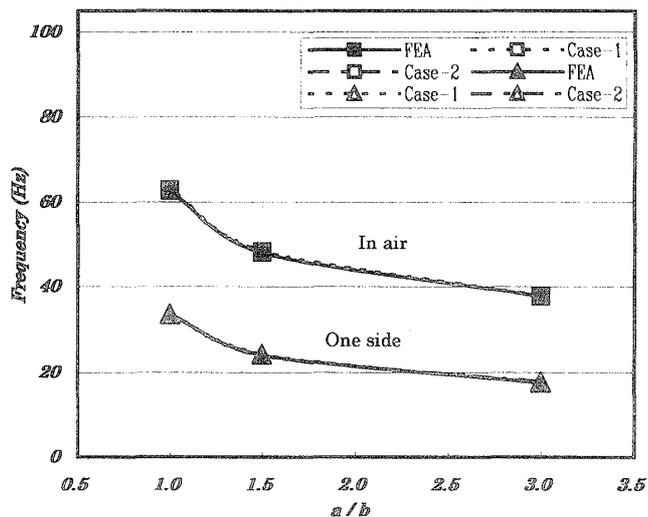


(f) $t_p = 8.0 \text{ mm}$, $d = 200 \text{ mm}$

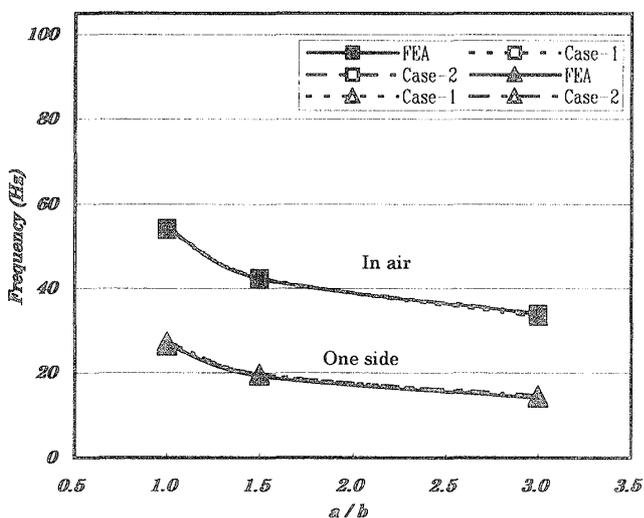
Fig.6 Comparison of natural frequencies ($b = 825 \text{ mm}$)



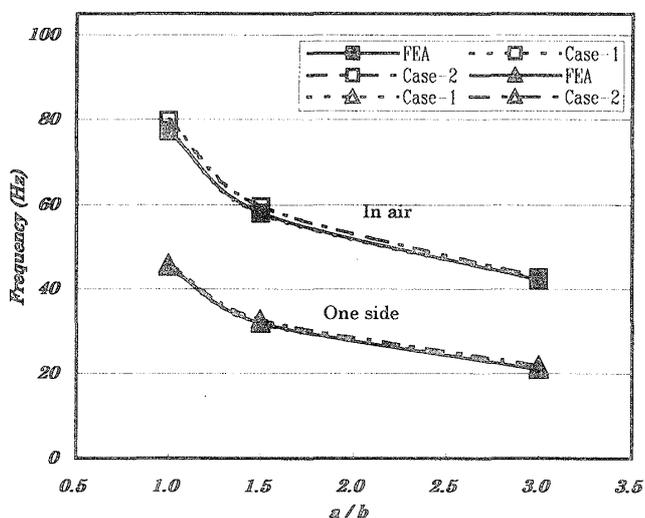
(a) $t_p = 13.0$ mm, $d = 308$ mm



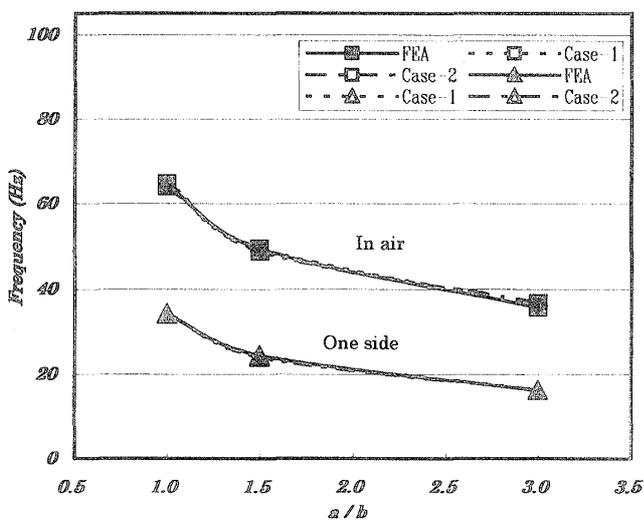
(b) $t_p = 10.0$ mm, $d = 308$ mm



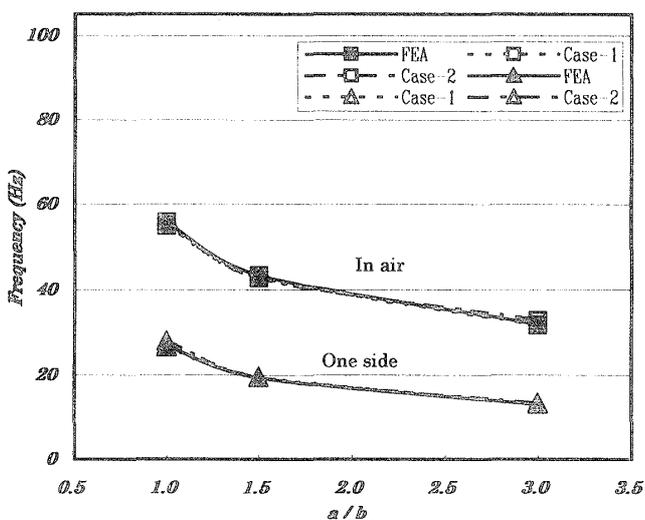
(c) $t_p = 8.0$ mm, $d = 308$ mm



(d) $t_p = 13.0$ mm, $d = 200$ mm



(e) $t_p = 10.0$ mm, $d = 200$ mm



(f) $t_p = 8.0$ mm, $d = 200$ mm

Fig.7 Comparison of natural frequencies ($b = 950$ mm)

- ① 本簡易推定法の推定精度は、単純支持パネルの理論解と比べ、有限要素法解析結果と良く一致し、初期計画時の構造最適化に本簡易推定法の推定結果を用いることは可能であると考えられる。しかしながら、その推定結果にはある程度の推定誤差を含む。
- ② 本簡易推定法により得られた解をさらに向上させるために、ニューラルネットワークの適用を試みた。その結果、有限要素法解析結果と大変良く一致し、推定精度の向上を確認できた。
- ③ ニューラルネットワークの入力因子に簡易推定法の推定結果を含ませて学習させた方が、有限要素法解析結果のみを学習させた場合より推定精度が良い。
- ④ 簡易推定法の計算時間は、プログラム化すれば瞬時に与えられる。このことにより、莫大な繰り返し演算が要求される遺伝的アルゴリズムを用いた船体構造最適化において、接水防撓パネルの固有振動数評価を行うことが可能となった。

参考文献

- 1) 加藤瞭, 李 旗, 池田亮: DOUBLE HULL TANKER の構造初期計画システムの構築, 西部造船会会報, 第 96 号 (1998), pp.163-170
- 2) 李 旗, 古野弘志, 加藤瞭, 白木重忠: DOUBLE HULL TANKER の構造初期計画システムの構築 (その 2 2L.BHD を有する大型タンカーの場合), 西部造船会会報, 第 98 号 (1999), pp.161-167
- 3) 加藤瞭, 李 旗, 古野弘志: バルクキャリアの構造初期計画システムの構築, 西部造船会会報, 第 97 号 (1999), pp.177-185
- 4) 李 旗, 古野弘志, 加藤瞭: バルクキャリアの構造初期計画システムの構築 (その 2 遺伝的アルゴリズムによる重量最適化), 西部造船会会報, 第 99 号 (2000), pp.193-202
- 5) 古野弘志, 加藤瞭, 福島明寿: バルクキャリアの構造初期計画システムの構築 (その 3 二軸圧縮場の座屈評価を考慮した最適設計法), 西部造船会会報, 第 101 号 (2001), 印刷中
- 6) M. Kitamura, F. Yang and H. Nobukawa: Design Optimization of Engine Room of Ship with Dynamic Response Using Genetic Algorithms, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.185 (1999), pp.345-353
- 7) 北村充, 信川寿, カハルディン・ジェノド: コンテナ船の構造最適設計に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 186 号 (1999), pp. 353-360
- 8) R.Zhu, K. Saito: Multiple Domain Boundary

Element Method Applied to Fluid Motions in a Tank with Internal Structure, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.188 (2000), pp.135-141

- 9) 西野宏, 太田和秀, 藤田一誠: 薄板境界要素法による接水振動解析法の研究, 日本造船学会論文集, 第 184 号 (1998), pp. 401-408
- 10) 鬼頭史城: 水中に於て振動する平面板附加質量に就いて, 造船協会雑纂, 第 266 号 (1944), pp.1-10
- 11) 日本造船研究協会第 236 研究部会: 振動予測技術の高度化に関する研究 (平成 11 年度総合報告書)
- 12) 関西造船協会: 造船設計便覧, 第 4 版 (1983)
- 13) 熊沢逸夫: 学習とニューラルネットワーク, 第 1 版 (1998), 森北出版

Appendix

本論文中に示した係数をここにまとめて示す。

$$A_{11} = \frac{1}{M_p} \xi_{11} - \frac{1}{2} \frac{1}{D_p} \omega^2, A_{12} = \frac{1}{M_p} \xi_{12} - \frac{4}{\pi^3} \frac{1}{D_p} \omega^2$$

$$A_{22} = \frac{1}{M_p} \xi_{22} - \frac{1}{30} \frac{1}{D_p} \omega^2$$

$$B_{11} = \frac{1}{M_s} \eta_{11} - \frac{1}{2} \frac{1}{D_s} \omega^2, B_{12} = \frac{1}{M_s} \eta_{12} - \frac{6}{\pi^3} \frac{1}{D_s} \omega^2,$$

$$B_{22} = \frac{1}{M_s} \eta_{22} - \frac{8}{105} \frac{1}{D_s} \omega^2$$

$$\xi_{11} = \frac{\pi^4}{4} (1 + K_p^2)^2, \xi_{12} = 2\pi (1 + K_p^2)^2$$

$$\xi_{22} = \frac{\pi^4}{60} + \frac{\pi^2}{3} K_p^2 + 2K_p^4$$

$$\eta_{11} = \frac{\pi^4}{4} (1 + K_s^2)^2, \eta_{12} = 3\pi (1 + K_s^2)^2$$

$$\eta_{22} = \frac{4\pi^4}{105} + \frac{4\pi^2}{5} K_s^2 + 6K_s^4$$

$$\Phi_{11} = \frac{1}{M_p} \xi_{11} + \Gamma \frac{1}{M_s} (\eta_{11} \alpha_1^2 + 2\eta_{12} \alpha_1 \beta_1 + \eta_{22} \beta_1^2)$$

$$\Phi_{12} = \frac{1}{M_p} \xi_{12} + \Gamma \frac{1}{M_s} \{ \eta_{11} \alpha_1 \alpha_2 + \eta_{12} (\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1) + \eta_{22} \beta_1 \beta_2 \}$$

$$\Phi_{22} = \frac{1}{M_p} \xi_{22} + \Gamma \frac{1}{M_s} (\eta_{11} \alpha_2^2 + 2\eta_{12} \alpha_2 \beta_2 + \eta_{22} \beta_2^2)$$

$$\Psi_{11} = \frac{1}{2} \frac{1}{D_p} + \Gamma \frac{1}{D_s} \left(\frac{1}{2} \alpha_1^2 + \frac{12}{\pi^3} \alpha_1 \beta_1 + \frac{8}{105} \beta_1^2 \right)$$

$$\Psi_{12} = \frac{4}{\pi^3} \frac{1}{D_p} + \Gamma \frac{1}{D_s} \left\{ \frac{1}{2} \alpha_1 \alpha_2 + \frac{6}{\pi^3} (\alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1) + \frac{8}{105} \beta_1 \beta_2 \right\}$$

$$\Psi_{22} = \frac{1}{30} \frac{1}{D_p} + \Gamma \frac{1}{D_s} \left(\frac{1}{2} \alpha_2^2 + \frac{12}{\pi^3} \alpha_2 \beta_2 + \frac{8}{105} \beta_2^2 \right)$$

$$\Gamma = \frac{\bar{D}_s \cdot \bar{M}_s}{\bar{D}_p \cdot \bar{M}_p}$$