

ニューラルネットワークを用いた船体撓み振動の予測

奥本泰久*, 河村健太郎*

Estimation of Hull Vibration Using Neural Network

Yasuhisa OKUMOTO*, Kentaro KAWAMURA

Synopsis

Ships often vibrate due to the excitation of propeller, main engine, etc. The severe case is the flexural vibration of the whole body as a hull girder system by resonance with such excitation forces. When the natural frequency of the hull girder vibration harmonizes with the excitation force, the heavy vibration occurs by the resonance, resulting the defects of structural members and also unpleasantness for the crew on board. Though there is the difficulty of the prediction of the natural frequencies, the accurate estimation is essential to avoid the resonance in early design stage. There have been two methods to predict the natural frequencies until now: using a simple formula combined with the past measurements, and using FEM (Finite Element Method) analysis of the whole ship body model. The former has less accuracy, and the latter needs high engineering skill and much computer time, then this research applied a new method in mid-point between two, using the neural network. The calculation focused on a conventional crude oil tanker as an example. As a result, the estimated frequencies agreed well with the measurement data, either the sample (teaching) data or arbitrary ship data. By this, anyone can easily estimate the frequencies.

Keywords: Hull vibration, Natural frequency, Neural network, Prediction, Resonance

1. 緒言

船体全体のたわみ振動は、その次数（船体の場合は節数と呼ぶ）に応じて無数のモードがあり、プロペラや主機からの外力がこの振動数に一致すれば共振し、過大な振動が発生する。そのため、設計段階で船体たわみ振動の固有振動数を正確に予測することが必要不可欠である。固有振動予測法は現在、①簡易算式と計測データを組み合わせた簡易推定法、②船体全体をモデル化した有限要素法（FEM）解析、が行われているが、①では予測精度に、②では解析時間や専門性に、それぞれ難点がある。したがってここでは両者の中間を狙い、制御・予測の分野で多用されているニューラルネットワークを用いて船体たわみ振動の固有振動数の推定を行った。

本研究では過去に船体振動の計測を行って得られた結果を元に固有振動数に影響を与えるパラメータを無次元化し、それをニューラルネットワークの教師データとし学習を行った。振動予測を行う船の種類は単底構造のタンカーとしている。

これにより教師データ以外の任意の船舶での振動予測ができるようになり、毎回有限要素法などによる詳細計算をする必要がなくなる。また、専門的な知識をあまり必要とせず誰でも簡単に計算できる利点がある。

2. はりのたわみ振動

等断面を有するはりの横振動の固有円振動数は次式で表される¹⁾。

$$\omega = n^2 \sqrt{\frac{gEI}{w}} \quad (1)$$

g : 重力加速度

E : ヤング率

I : 断面二次モーメント

w : 単位体積重量

ここで、 n は微分方程式の係数であり、これを

$$\alpha = nI$$

と置き、固有振動数 (Hz) を f と書けば

* 近畿大学工学部知能機械工学科

Department of Intelligent Mechanical Engineering, School of Engineering, Kinki University

$$f = \frac{\alpha^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{gEI}{w}} \quad (2)$$

α は端部の支持条件および次数によって与えられる係数となる。Table 1に一例を示す²⁾。

Table 1 Flexural vibration of beam

端部条件	モード	α
固定-固定		$r = 1, 2, 3$ $\alpha = 4.730, 7.853, 10.996$
支持-支持		$\alpha = \pi, 2\pi, 3\pi$
自由-自由		$\alpha = 4.730, 7.853, 10.996$

船体は下向きの自重+荷重成分と上向きの浮力で釣り合っており、端部の拘束はないため、両端が自由である。このときの、固有値方程式は

$$\cos \alpha \cosh \alpha = 1$$

となり、 α は下記値をとる。

$$\alpha_1 = 4.730$$

$$\alpha_2 = 7.853$$

$$\alpha_3 = 10.996$$

ここで、はりの断面がバランスガーダーの場合の I の近似値を求める。フェースの厚さが薄い場合、フェース間距離と全深さは近似的に等しい。記号を Fig.1 のようにとると

$$I = \frac{td_w^3}{12} + 2A_f \left(\frac{d_w + t_f}{2} \right)^2 + 2 \left(\frac{b_f t_f^3}{12} \right) \quad (3)$$

(3)式の第1項はウェブの、第2項はフェースの断面二次モーメントである。第3項は、フェースの中性軸と全体の中性軸が異なっているために、フェース自身のローカルな断面二次モーメントを加えたものである。ここで、フェースの板厚 t_f がウェブの深さ d_w に比べ

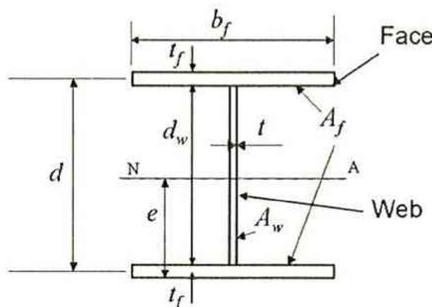


Fig.1 Cross section of balanced girder

充分小さいと仮定すれば $dw=d, t_f^3=0$ 。したがって

$$I = \frac{td^3}{12} + 2A_f \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \frac{d^2}{2} \left(A_f + \frac{A_w}{6} \right) \quad (4)$$

3. 船体のたわみ振動

構造物の固有振動数と起振力の振動数が一致すると共振状態となり構造物は激しく振動する。船体は通常の航行状態では共振を外す必要があるため、新しい船を設計する場合、船体の固有振動数を事前に正確に推定することが大切である。船体のたわみ振動はその節数(はり振動の次数に対応)に応じて無数にあるが、今回は2節から6節までの予測とした。Fig.2に2節から6節の振動モードを示す³⁾。

船体は不均一の荷重を受ける一種の変断面はりと考えられるから、固有振動数は(2)式の変形と考えられる。ここで使われているパラメータ g, E は一定と考えられるため、 l, I と w である。 l は船の長さ L, I は船体中央平行部を箱形構造と考えるとバランスガーダーとして(4)式で近似されるため、Fig.3を参照すれば、 B と D が主要なパラメータとなる。また、 w は船体重量で、これは排水量 Δ である。ただし、船体は水中に浮かんでおり、船体に接する海水と一緒に振動する(これを付加水質量という)ため、この影響は L, B の他に喫水 d が影響する。したがって固有振動数推定に必要なパラメータは L : 全長、 B : 全幅、 D : 深さ、 Δ : 排水量、 d : 喫水である。

はりの振動の場合、次数が高くなると曲げ振動に加えて、せん断による振動が影響する。このため、断面のせん断断面積 A_s を考慮することが望ましい。したがって、全パラメータは、以下となる。

$$L, B, D, d, \Delta, A_s$$

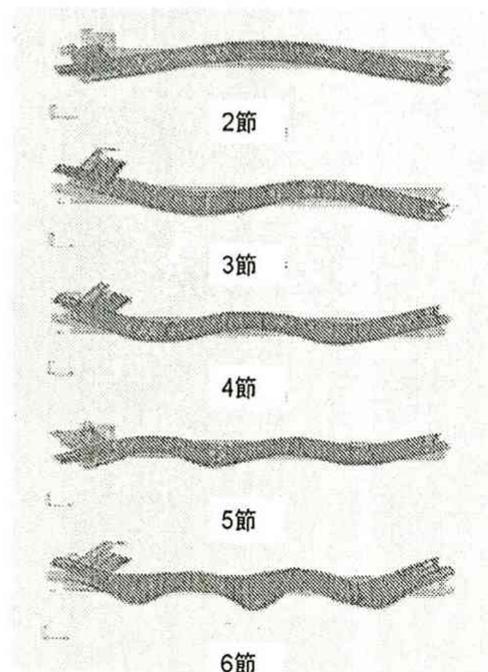


Fig.2 Vibration mode

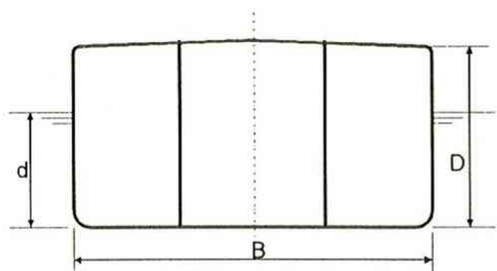


Fig.3 Transverse section of tanker

現在行われている近似式は幾つか公表されているが、例えばタンカーの場合 Todd の式は⁴⁾

$$N_{v2} = 9.42 \times 10^4 \sqrt{\frac{BD^3}{\Delta L^3}} + 28 \quad (5)$$

N_{v2} : 2 節の固有振動数 (cpm)

L : 全長(m), B : 全幅(m), D : 深さ(m)

Δ : 排水量(ton)

$$\frac{N_{vn}}{N_{v2}} = (n-1)\mu_v \quad (6)$$

N_{vn} : n 節の固有振動数 (cpm)

$\mu_v = 1.0$

4. ニューラルネットワークによる推定

ニューラルネットワークは、人間の脳細胞とシナプス結合を数理的にモデル化し、ニューロンを多数結合した神経回路網をモデル化したものである。本研究では、階層型ニューラルネットワークでよく用いられるバックプロパゲーション (誤差逆伝播) 法を用いた。

バックプロパゲーション (BP) 法は、入力層と出力層の間に複数の中層を設けたフィードバック型の階層型ニューラルネットワークで、教師あり学習の代表的方法である。入力パターンが与えられたとき、その出力とあるべき出力との誤差を減らすように、後方から各ユニットの層間結合荷重を修正していく^{5), 6)}。

ここでは、過去の計測データを元に、9 ケースの固有振動実測値と船体振動に影響を及ぼすパラメータをニューラルネットワークの教師データとした。また、ニューラルネットワークでは、教師データとして 0-1 の値を扱うのが一般的なので、教師データを最大値 0.8、最小値 0.2 として無次元化した。

振動モードの 2 節から 6 節の 5 つを出力する BP ネットワークモデルを Fig.4 に示す。入力は前述のごとく $L, B, D, \Delta, d, I, As$ の 7 ユニットとした。中間層は 2 層とし、2 層目を 15、3 層目を 10 ユニット、出力層は振動モードが 2 節から 6 節の 5 ユニットとした。

ニューラルネットワークのプログラムを作成し、学習を繰り返すことで徐々に教師データと計算値の誤差を小さくすることができた。学習の結果、2, 4, 6 節の 3 ケースを Fig.5 に示す。両者はよく一致しており、学習の効果が表れている。

教師データ(オリジナル)と学習後のデータが一致するのはそのように学習させたためで、ある意味では当然である。そこで、ここで得られたニューラルネットワークのプログラムを使って、入力の異なる任意のデ

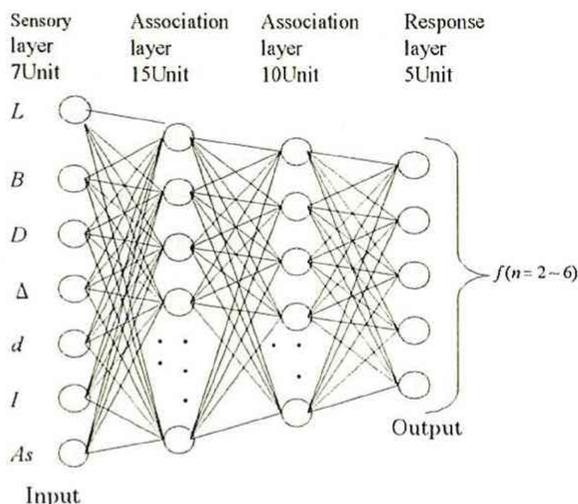
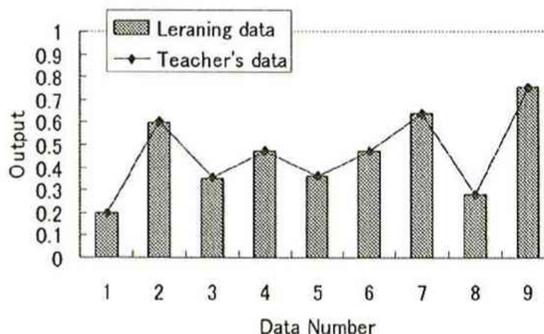
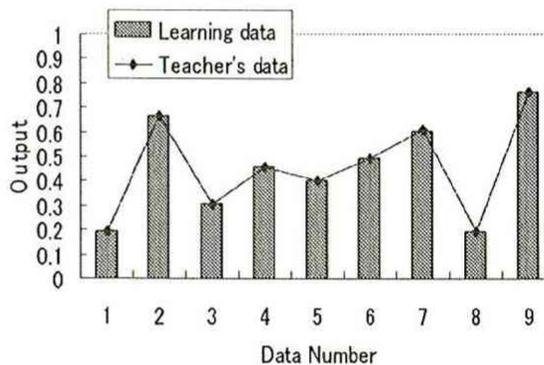


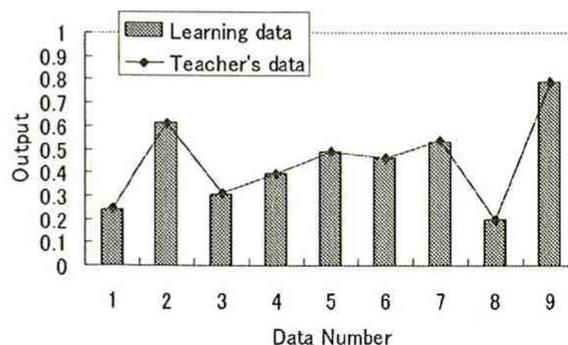
Fig.4 Model of back propagation network



(a) 2-Node



(b) 4-Node



(c) 6-Node

Fig.5 Comparison between original data and learned data

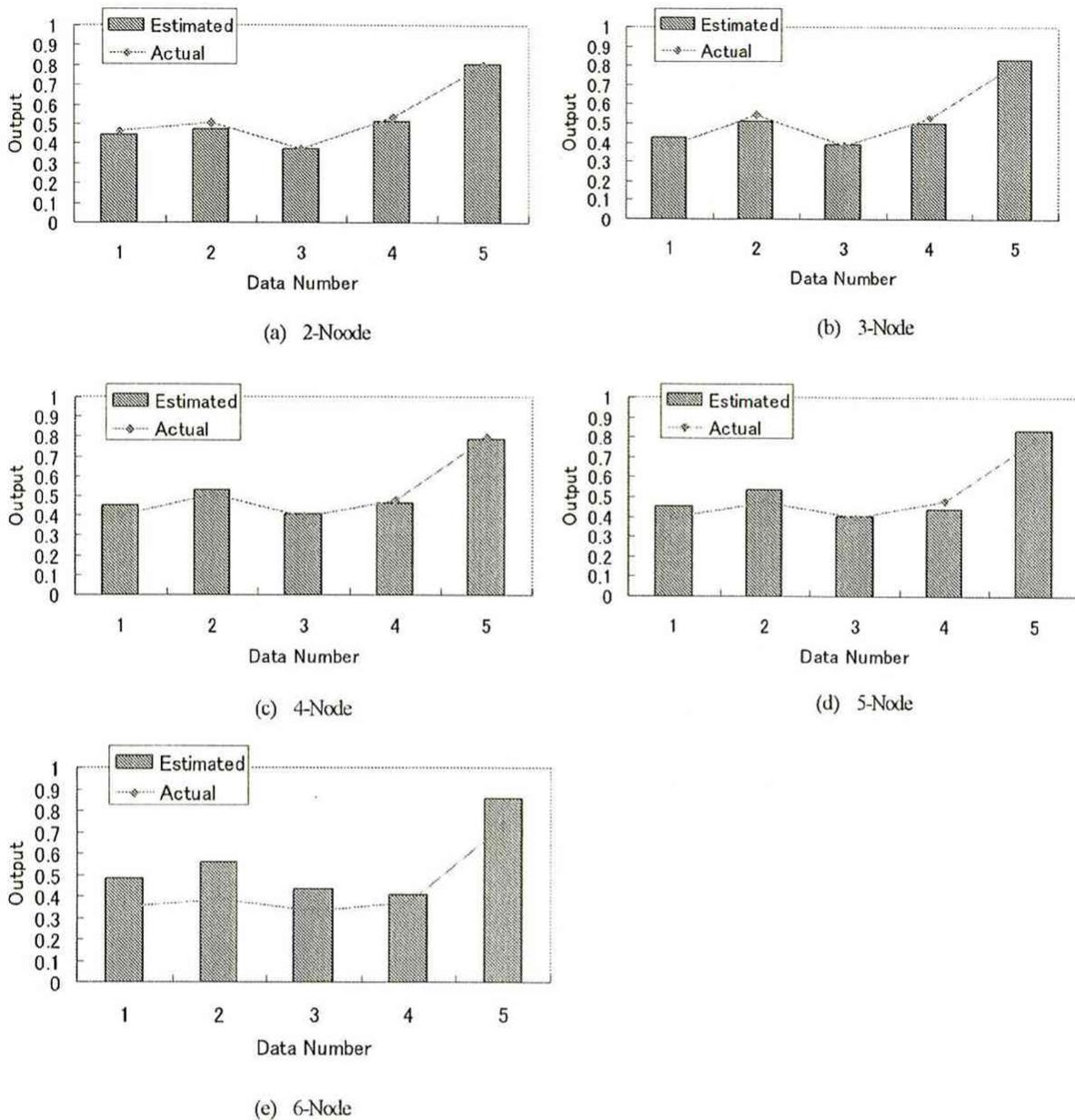


Fig.6 Accuracy for arbitrary data

ータに対して得られる振動数の一致度を確認するため、前記の9ケース以外の任意の入力に対する振動数を計算した。結果をFig.6に示す。これによれば高次になる程誤差が広がっているが低次では比較的良い精度で計算されているのが分かる。実船では低次ほど重要度が増すため、実用上はほぼ満足のできる結果と言える。

5. 結 言

- (1) 船体振動について、計測から得られたデータを基にニューラルネットワークでプログラムを作成し予測したところ、良い精度で出力値が得られた。
- (2) 精度を確認するために教師データ以外で固有振動数の予測をしたところ、5節までは比較的良い精度であった。6節ではやや誤差が大きくなった。

- (3) 実用上重要な節数の小さいケースでは問題なく予測でき、ニューラルネットワークによる固有振動数の予測は実用上有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 小堀 誠：機械振動入門，丸善，pp.194-197.
- 2) 国枝：実用機械振動学，理工学社，pp.168.
- 3) 古野弘志：浅水影響を考慮した船体振動に関する検討（その一），西部造船会 技術研究会 構造部会，2007.
- 4) 日本海事協会：船舶振動設計指針，pp.39-40，昭和56年.
- 5) 甘利，向殿：ニューロとファジィ，倍風館，pp.55-58，1994.
- 6) 吉富：ニューラルネットワーク，朝倉書店，pp.31，2002.