振動境界層理論に基づいた減衰マトリクスにおける 速度分布修正係数の決定方法に関する研究

(縮小マトリクスを用いた構造変更理論の適用)

正員 船木 俊彦* 正員 林 茂弘*
正員 古池 健太**

A Study on a Method to Obtain the Modulus of Velocity Distribution which is the Coefficient of the
Damping Matrix based on the Theory of Periodic Boundary Layer
(Application of Modal Structural Modification Analysis by using Reduced Added Matrixes)

by Toshihiko FUNAKI, *Member* Shigehiro HAYASHI, *Member*
Kenta KOIKE, *Member*

Summary

The outstanding obstacle to estimate vibration level is that the precise damping of fluid and structure can not be estimated because the mechanism of the damping has not been explicated. Recently, the damping matrix based on dissipation energy caused by fluid viscosity is obtained¹⁾, and the damping matrix is expressed more rationally by introducing modulus of velocity distribution β_w as a parameter to estimate the influence of the water depth²⁾. We developed a method to experimentally obtain β_w in the shallow water³⁾. But the method is not applicable to the deep water because of approximation in the shallow water.

In this paper, we propose a method, which can be applied to the deep water, and obtain β_w by using the method. It is known that β_w in the deep water equals 1.0, by comparing experiment with theory of dissipation energy at peak frequency of 2-node vibration³⁾. But, in this paper, β_w is obtained by considering not only a peak but also whole area of the frequency and moreover by using curve fit algorithm through not only one peak but also the whole peak. Concretely, authors incorporate reduced added matrixes into transfer function by means of modal structural modification analysis, and formulate the partial differential iteration method by using the transfer function. The formulation and the results are described.

1. 緒言

船舶の振動レベルを推定する上で最大の障害は、減衰を正確には算定できないことである。これは、船殻構造及び流体による減衰機構が未解明であるが故に生じる問題である。流体による減衰については、振動境界層における散逸エネルギーに着目した理論により等価線形減衰マトリクス $[C_w]$ が導かれている¹⁾。そして、文献²⁾では、速度分布修正係数 β_w を導入すればより合理的に $[C_w]$ を記述することができること、及び、 $[C_w]$ の比例定数となる β_w を水深による影響を総合的に評価するためのパラメータとみなせることが述べられている²⁾。そこでは、パラメータとしての β_w を実験的に決定するために振動応答曲線適合手法の一つである偏分反復法を利用した定式化が行われ、浅水域における β_w が抽出されている。この β_w を用いると浅水域での周波数応答を再現することが可能となる。

文献²⁾では空中での実験データも利用して β_w が求められているが、実船の場合には空中での実験は一般的に不可能である。よって、水深の異なる実験データ(浅水域と深水域)を利用した曲線適合を行なって β_w を求める手法を開発することが必要となる。ところが、文献²⁾の手法では、構造の減衰マトリクス $[C_s]$ よりも流体による付加減衰マトリクス $[C_w]$ による影響の方が格段に大きいという浅水域特有の現象を利用した近似を行なっていたために、深水域では適用できない欠点がある。従って、深水域にも適用できる理論を開発しておく必要がある。

そこで本論文では、深水域にも適用できる曲線適合手法を確立し、その手法を利用して深水域における β_w を実験的に決定することを目的とする。深水域では $\beta_w=1.0$ であることが既に判っているが、これは、2節振動ピーク周波数における散逸エネルギーの実験値と理論値との比較によりその妥当性が示されたものである³⁾。今回は、ピークのみに注目するのではなく周波数帯全域を考慮し、さらに、ひとつのピークだけでなく

* 大阪大学大学院工学研究科

** 大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻

全ピークを通じて曲線適合することにより β_w を抽出することを試みる。具体的には、構造変更理論を利用して伝達関数に付加マトリクス $[M_w]$, $[C_w]$ を組み込み、それを用いた偏分反復法の定式化とその結果について述べることにする。

2. 減衰マトリクス

2.1 速度分布修正係数

船体表面の点 Q における振動境界層の速度ベクトルについて Fig.1 の如く、境界層外端の速度ベクトルを $V_p(Q)$ 、船体表面そのものの速度ベクトルを $V_s(Q)$ とすると、速度分布修正係数 β_w を用いて修正した層内の速度分布 $V_B(Q, z)$ は、

$$\mathbf{v}_B = e^{-(1+i)\beta_w \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} z} (\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_p) + \mathbf{v}_p \quad (1)$$

にて与えられる²⁾。ただし、 z は船体表面からの法線方向距離、 ω は外力の角振動数である。(1)式は、 β_w が 1.0 よりも大きくなるほどに境界層内壁面近傍での速度勾配も大きくなる特徴を有している。これは、 β_w の大小につれて剪断応力および散逸エネルギーが変化することを示しており、この特徴を利用して水深による影響を評価することにする。

Fig.1 Velocity distribution in boundary layer $V_B(Q, z)$

2.2 散逸エネルギー

粘性によって散逸される、単位面積、1 周期あたりの散逸エネルギーの主成分を $E_q(Q)$ とすれば、 $E_q(Q)$ は、

$$E_q = \rho \nu \int_0^{\frac{\omega}{2}} \int_0^{\frac{\omega}{2}} \operatorname{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{v}_B}{\partial z} e^{i\alpha t} \right) \operatorname{Re} \left(\frac{\partial \mathbf{v}_B}{\partial z} e^{i\alpha t} \right) dt dz \quad (2)$$

にて表わされる¹⁾。ここで、被積分関数は $V_B(Q, z)$ の内積によるスカラー関数であ

2.3 等価線形減衰マトリクス

(1)式の修正速度分布を用いて(2)式を計算し、船体表面あるいは水底表面で積分すれば、等価線形減衰マトリクスを得ることができる¹⁾。船体表面での積分から得られる減衰マトリクスを $[C_{SH}]$ とすれば、

$$[C_{SH}] = \rho \nu \beta_w \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} [C_{ps}] \quad (3)$$

を得、 $[C_{ps}]$ は船体表面付近ポテンシャル流場の影響を表わすマトリクスとなる。また、水底表面での積分から得られる減衰マトリクスを $[C_{WB}]$ とすれば、

$$[C_{WB}] = \rho \nu \beta_w \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} [C_{pb}] \quad (4)$$

を得、 $[C_{pb}]$ は水底表面付近ポテンシャル流場の影響を表わすマトリクスとなる。(3)、(4)式の和が全体としての減衰マトリクスとなるものと考え、その和を $[C_w]$ とすると、

$$[C_w] = \beta_w \sqrt{\omega} [C_p] \quad (5)$$

ただし、

$$[C_p] = \rho \nu \sqrt{\frac{1}{2\nu}} ([C_{ps}] + [C_{pb}]) \quad (6)$$

と変形できる²⁾。この β_w を水深による影響を評価するためのパラメータとして採用する。

3. 理論

3.1 伝達関数の定式化

構造単独での運動方程式は、構造の質量、減衰、剛性マトリクスをそれぞれ $[M_s]$, $[C_s]$, $[K_s]$ とおけば、

$$[M_s] \{\ddot{x}_s\} + [C_s] \{\dot{x}_s\} + [K_s] \{x_s\} = \{f_s\} \quad (7)$$

にて与えられ、構造-流体連成振動を表わす運動方程式は、流体による付加質量、減衰、剛性マトリクスをそれぞれ $[M_w]$, $[C_w]$, $[K_w]$ とすれば、

$$[M_s + M_w] \{\ddot{x}\} + [C_s + C_w] \{\dot{x}\} + [K_s + K_w] \{x\} = \{f_s\} \quad (8)$$

にて与えられる。ここに、 $\{x_s\}$ と $\{x\}$ はそれぞれ空中での構造の変位及び流体中での構造の変位であり、 $\{f_s\}$ は構造に作用する外力を表わす。ただし、 $[K_w]$ は非常に小さいものであるから今回は $[0]$ として扱う。

構造のマトリクス $[M_s]$, $[K_s]$ を用いた実固有値解析、あるいは、連成振動を表現する $[M_s + M_w]$, $[K_s]$ を用いた実固有値解析から得られる固有値対角行列と固有モード行列をそれぞれ $[\Omega_s^2]$, $[\Phi_s]$ 、及び $[\Omega^2]$, $[\Phi]$ において、

$$[\Phi_s]^T [M_s] [\Phi_s] = [I] \quad (9)$$

$$[\Phi]^T [M_s + M_w] [\Phi] = [I] \quad (10)$$

なる正規化を施せば、

$$[\Phi_s]^T [K_s] [\Phi_s] = [\Omega_s^2] \quad (11)$$

$$[\Phi]^T [K_s] [\Phi] = [\Omega^2] \quad (12)$$

を得、比例粘性減衰系の仮定により、

$$[\Phi_s]^T [C_s] [\Phi_s] = [c_s] \quad (13)$$

$$[\Phi]^T [C_s + C_w] [\Phi] = [c] \quad (14)$$

なる直交関係を得る。また、(13)式右辺 $[c_s]$ の r 次対角要素を c_{sr} 、同様に、 $[\Omega_s^2]$ の r 次対角要素を Ω_{sr}^2 とすれば、

$$c_{sr} = 2\zeta_{sr}\Omega_{sr} \quad (15)$$

にて構造の r 次モード減衰比 ζ_{sr} が定義される。(14)式右辺「 c 」の r 次対角要素 c_r については、次節で述べることにする。さらに、 $[\Phi_s]$ 、 $[\Phi]$ の r 次固有モードをそれぞれ $\{\phi_{sr}\}$ 、 $\{\phi_r\}$ とおき、 $\{\phi_{sr}\}$ のうち点 i と点 L の成分をそれぞれ ϕ_{sri} 、 ϕ_{srl} 、同様に $\{\phi_r\}$ の点 i と点 L の成分をそれぞれ ϕ_{ri} 、 ϕ_{rL} とすれば、点 L を加振したときの点 i の変位に関する伝達関数は空中の場合、

$$G_{sLi}(\omega) = \sum_{r=1}^M \frac{\phi_{sri}\phi_{srl}}{\Omega_{sr}^2 - \omega^2 + j\omega c_{sr}} \quad (16)$$

となり、流体中では、

$$G_{Li}(\omega) = \sum_{r=1}^M \frac{\phi_{ri}\phi_{rL}}{\Omega_r^2 - \omega^2 + j\omega c_r} \quad (17)$$

で表わされることになる。ただし、 M は採用モード数である。

3.2 流体中モーダルパラメータの定式化

上述の質量マトリクスについて正規化された伝達関数理論式を用いて曲線適合を行なう。ここで、深水域のモーダルパラメータを空中のモーダルパラメータを用いて表現するために、付加マトリクスの $[M_w]$ 及び $[C_w]$ を利用することになる。また、常に正規化条件を満たすように深水域のモーダルパラメータを定式化しておく必要がある。

さて、深水域は空中状態を構造変更したものと考え、変更後(深水域)の固有モード $[\Phi]$ は、変更前(空中)の固有モード $[\Phi_s]$ の線形重ね合わせであるから、

$$[\Phi] = [\Phi_s][U] \quad (18)$$

にて表わされることになる。ここで、深水域での正規化条件(10)式に(18)式を代入すると、

$$[U]^T[\Phi_s]^T[M_s]\Phi_s[U] + [U]^T[\Phi_s]^T[M_w]\Phi_s[U] = [I] \quad (19)$$

となる。さらに、空中での正規化条件(9)式を考慮すると、

$$[U]^T[U] + [U]^T[\Phi_s]^T[M_w]\Phi_s[U] = [I] \quad (20)$$

を得る。上式は、(10)式に示した深水域での正規化条件を空中での固有モード $[\Phi_s]$ 及び係数行列 $[U]$ として付加質量マトリクス $[M_w]$ にて記述したものとなっており、曲線適合時に $[\Phi_s]$ 及び $[U]$ が自由には振る舞えないように課された制約条件となっている。従って、曲線適合では、上式を勘案した制約条件付き最小自乗法あるいは最適化手法を用いるべきである。けれども、それはアルゴリズムを複雑にするため、ここでは以下のように簡便に処理する方法を採用することにする。(18)式右辺を、

$$[\Phi] = [\Phi_s][I][U] \quad (21)$$

と認識し、右辺の「 I 」に(20)式を代入すれば、

$$[\Phi] = [\Phi_s][U]^T\{[I] + [\Phi_s]^T[M_w]\Phi_s\}[U][U] \quad (22)$$

を得る。上式は、正規化条件を埋め込んだ形で深水域固有モード $[\Phi]$ を表現したものとなっている。従って、上式に最小自乗法を適用した場合、正規化条件は近似的にしか満足されない欠点をもつことになるが、アルゴリズムが簡素になって、従来の曲線適合プログラム

の延長上で作業することができる長所をもつこととなる。一方、深水域の r 次固有値 Ω_r は、(12)式に(18)式を代入して整理した、

$$[\Omega^2] = [U]^T[\Omega_s^2][U] \quad (23)$$

の r 次対角要素で与えられ、深水域の r 次モード減衰係数 c_r は、(14)式に(5)、(18)式を代入して整理した、

$$[c] = [U]^T\{2\zeta_s\Omega_s + \beta_w\sqrt{a}[\Phi_s]^T[C_p]\Phi_s\}[U] \quad (24)$$

の r 次対角要素で与えられる。

以上によって、深水域のモーダルパラメータが空中のモーダルパラメータを用いて定式化されたことになり、これらを用いて曲線適合することにする。

3.3 偏分反復法による曲線適合の定式化

偏分反復法による曲線適合の定式化を行なう。これは、振動試験によって得られた伝達関数と理論式とがよく適合するように最小二乗法を繰り返しながら、複数の固有モードのモーダルパラメータを決定してゆく方法である²⁾。

まず深水域について、(17)式の $G_{Li}(\omega)$ を加振試験の結果に合わせ込むための未知数は、実験計測点数を N 個とすれば、 $\phi_{sri} \sim \phi_{srl}$ 及び $u_{ri} \sim u_{rL}$ 、 Ω_{sr} 、 ζ_{sr} 、 β_w の $(MN + M^2 + 2M + 1)$ 個である。これらの未知数をまとめて $\gamma_h (h=1 \sim MN + M^2 + 2M + 1)$ と表現し、その初期値を γ_{he} とすれば、

$$\gamma_h = \gamma_{hs} + \Delta\gamma_h \quad (25)$$

と表わせる。そして、伝達関数 G_{Li} を γ_{hs} のまわりで 1 次項まで Taylor 展開すれば、

$$G_{Li}(\gamma_h, \omega) = G_{Li}(\gamma_{hs}, \omega) + \sum_{h=1}^{MN+M^2+2M+1} \frac{\partial G_{Li}(\gamma_h, \omega)}{\partial \gamma_h} \Delta\gamma_h \quad (26)$$

となる。上式の感度項についてはそれぞれ次式の如く計算される。なお、 $[\Phi]$ に含まれる $[M_w]$ 、 $[c]$ に含まれる $[C_p]$ については実験計測点周りに縮小⁴⁾しておく必要があり、 $[M_w]$ を縮小したものを $[M_0]$ 、 $[C_p]$ を縮小したものを $[C_0]$ とする。 β_w による微分係数は、

$$\frac{\partial G_{Li}(\omega)}{\partial \beta_w} = \sum_{r=1}^M \frac{-\phi_{ri}\phi_{rL} \cdot j\omega c_r'}{(\Omega_r^2 - \omega^2 + j\omega c_r')^2} \quad (27)$$

ただし c_r' は、

$$\frac{\partial [c]}{\partial \beta_w} = \sqrt{\omega} [U]^T [\Phi_s]^T [C_0] [\Phi_s] [U] \quad (28)$$

の r 次対角項である。 ζ_{sr} による微分係数は、

$$\frac{\partial G_{Li}(\omega)}{\partial \zeta_{sr}} = \sum_{k=1}^M \frac{-\phi_{ki}\phi_{kL} \cdot j\omega c_k'}{(\Omega_k^2 - \omega^2 + j\omega c_k')^2} \quad (29)$$

ただし、

$$c_k' = \frac{\partial [c]}{\partial \zeta_{sr}} = [U]^T \frac{\partial [2\zeta_s\Omega_s]}{\partial \zeta_{sr}} [U] = 2\Omega_{sr} u_{rk}^2 \quad (30)$$

である。 Ω_{sr} による微分係数は、

$$\frac{\partial G_{Li}(\omega)}{\partial \Omega_{sr}} = \sum_{k=1}^M \frac{-\phi_{ki}\phi_{kL} \left\{ (\Omega_k^2)' + j\omega c_k' \right\}}{(\Omega_k^2 - \omega^2 + j\omega c_k')^2} \quad (31)$$

ただし,

$$(\Omega_k^2)' = \frac{\partial \Gamma \Omega^2}{\partial \Omega_{sr}} = [U]^T \frac{\partial \Gamma \Omega_s^2}{\partial \Omega_{sr}} [U] = 2u_{rk}^2 \Omega_{sr} \quad (32)$$

$$c_k' = \frac{\partial \Gamma c}{\partial \Omega_{sr}} = [U]^T \frac{\partial \Gamma 2\zeta_s \Omega_s}{\partial \Omega_{sr}} [U] = 2\zeta_{sr} u_{rk}^2 \quad (33)$$

である。[U]のうち r 行 j 列成分を u_{rj} と表わせれば、 u_{rj} による微分係数は、

$$\frac{\partial G_{Li}(\omega)}{\partial u_{rj}} = \frac{\sum_{k=1}^M (\phi_{ki} \phi_{kL})' (\Omega_k^2 - \omega^2 + j\omega c_k) - \phi_{ki} \phi_{kL} \left\{ (\Omega_k^2)' + j\omega c_k' \right\}}{(\Omega_k^2 - \omega^2 + j\omega c_k)^2} \quad (34)$$

ただし,

$$(\phi_{ki} \phi_{kL})' = \phi_{ki} \frac{\partial \phi_{kL}}{\partial u_{rj}} + \phi_{kL} \frac{\partial \phi_{ki}}{\partial u_{rj}} \quad (35)$$

$$(\Omega_k^2)' = \frac{\partial \Gamma \Omega^2}{\partial u_{rj}} = \frac{\partial [U]^T \Gamma \Omega_s^2 [U]}{\partial u_{rj}} = [U]^T \Gamma \Omega_s^2 \frac{\partial [U]}{\partial u_{rj}} \quad (36)$$

c_k' は,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Gamma c}{\partial u_{rj}} &= \left(\frac{\partial [U]^T}{\partial u_{rj}} \right) \{ 2\zeta_s \Omega_s + \beta_w \sqrt{\omega} [\Phi_s]^T [C_0] [\Phi_s] \} [U] \\ &\quad + [U]^T \{ 2\zeta_s \Omega_s + \beta_w \sqrt{\omega} [\Phi_s]^T [C_0] [\Phi_s] \} \left(\frac{\partial [U]}{\partial u_{rj}} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

の k 次対角項である。(35)式右辺 ϕ の u による偏微分について、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial u_{rj}} &= [\Phi_s] \left(\frac{\partial [U]^T}{\partial u_{rj}} \right) \{ I + [\Phi_s]^T [M_0] [\Phi_s] \} [U] [U] \\ &\quad + [\Phi_s] [U]^T \{ I + [\Phi_s]^T [M_0] [\Phi_s] \} \left(\frac{\partial [U]}{\partial u_{rj}} \right) [U] + [U] \left(\frac{\partial [U]}{\partial u_{rj}} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

であるから、 $\partial \phi_{kL} / \partial u_{rj}$ は、(38)式の L 行 k 列成分、同様に $\partial \phi_{ki} / \partial u_{rj}$ は、 i 行 k 列成分で与えられる。また、(36)式右辺は、 $k=j$ にて $2\Omega_{sr}^2 u_{rj}$ 、それ以外はゼロとなる。そして、 r 次固有モード $\{\phi_{sr}\}$ のうち点 j の成分を ϕ_{srj} と表わせれば、 ϕ_{srj} による微分係数は、

$$\frac{\partial G_{Li}(\omega)}{\partial \phi_{srj}} = \frac{\sum_{k=1}^M (\phi_{ki} \phi_{kL})' (\Omega_k^2 - \omega^2 + j\omega c_k) - \phi_{ki} \phi_{kL} \cdot j\omega c_k'}{(\Omega_k^2 - \omega^2 + j\omega c_k)^2} \quad (39)$$

ただし,

$$(\phi_{ki} \phi_{kL})' = \phi_{ki} \frac{\partial \phi_{kL}}{\partial \phi_{srj}} + \phi_{kL} \frac{\partial \phi_{ki}}{\partial \phi_{srj}} \quad (40)$$

c_k' は,

$$\frac{\partial \Gamma c}{\partial \phi_{srj}} = \beta_w \sqrt{\omega} \left\{ [U]^T \left(\frac{\partial [\Phi_s]^T}{\partial \phi_{srj}} \right) [C_0] [\Phi_s] [U] + [U]^T [\Phi_s]^T [C_0] \left(\frac{\partial [\Phi_s]}{\partial \phi_{srj}} \right) [U] \right\} \quad (41)$$

の k 次対角項である。(40)式右辺 ϕ の ϕ_s による偏微分

項について、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi_{srj}} &= \left(\frac{\partial [\Phi_s]}{\partial \phi_{srj}} \right) [U]^T \{ I + [\Phi_s]^T [M_0] [\Phi_s] \} [U] [U] \\ &\quad + [\Phi_s] [U]^T \left\{ \left(\frac{\partial [\Phi_s]^T}{\partial \phi_{srj}} \right) [M_0] [\Phi_s] + [\Phi_s]^T [M_0] \left(\frac{\partial [\Phi_s]}{\partial \phi_{srj}} \right) \right\} [U] [U] \end{aligned} \quad (42)$$

であるから、 $\partial \phi_{kL} / \partial \phi_{srj}$ は(42)式の L 行 k 列成分、同様に $\partial \phi_{ki} / \partial \phi_{srj}$ は、 i 行 k 列成分で与えられる。

一方、空中の伝達関数 $G_{sLi}(\omega)$ に対しては、従来から定式化されているものを用いれば良い。(16)式の $G_{sLi}(\omega)$ を加振試験の結果に合わせ込むための未知数は、 $\phi_{srj} \sim \phi_{sM} \Omega_{sr} \zeta_{sr}$ の $(MN+2M)$ 個である。(26)式に対応する式は、

$$G_{sLi}(\gamma_h, \omega) = G_{sLi}(\gamma_{hs}, \omega) + \sum_{h=1}^{MN+2M} \frac{\partial G_{sLi}(\gamma_h, \omega)}{\partial \gamma_h} \Delta \gamma_h \quad (43)$$

であり、上式の感度項は、 $\zeta_{sr} \Omega_{sr} \phi_{srj}$ による微分係数を含み、それぞれ次式の如く表わされる。

$$\frac{\partial G_{sLi}(\omega)}{\partial \zeta_{sr}} = \frac{-\phi_{srj} \phi_{srL} \cdot j\omega c_{sr}}{(\Omega_{sr}^2 - \omega^2 + j\omega c_{sr})^2} \quad (44)$$

ただし,

$$c_{sr}' = \frac{\partial c_{sr}}{\partial \zeta_{sr}} = 2\Omega_{sr} \quad (45)$$

であり,

$$\frac{\partial G_{sLi}(\omega)}{\partial \Omega_{sr}} = \frac{-\phi_{srj} \phi_{srL} (2\Omega_{sr} + j\omega c_{sr}')}{(\Omega_{sr}^2 - \omega^2 + j\omega c_{sr})^2} \quad (46)$$

ただし,

$$c_{sr}' = \frac{\partial c_{sr}}{\partial \Omega_{sr}} = 2\zeta_{sr} \quad (47)$$

となる。また,

$$\frac{\partial G_{sLi}(\omega)}{\partial \phi_{srj}} = \frac{(\phi_{srj} \phi_{srL})'}{\Omega_{sr}^2 - \omega^2 + j\omega c_{sr}} \quad (48)$$

ただし,

$$(\phi_{srj} \phi_{srL})' = \frac{\partial}{\partial \phi_{srj}} (\phi_{srj} \phi_{srL}) \quad (49)$$

である。(49)式右辺は、 $j=i$ にて ϕ_{srL} 、 $j=L$ にて ϕ_{srj} となり、それ以外ではゼロとなる。

以上によって(26)式及び(43)式右辺の感度項をすべて計算することができるから、(26)式及び(43)式左辺に加振試験の実験値を、同右辺第1項に曲線適合初期値を代入し $\Delta \gamma_h / \gamma_h$ が十分小さくなるまで最小二乗法を繰り返すことにより、モーダルパラメータを求めることができる。

4. 速度分布修正係数の抽出

4.1 実験方法

木製の回転槽円体模型(全幅 $B:100\text{mm}$ 、全長 $L:1100\text{mm}$)

の振動特性を調べるため、加振器による加振実験を行った。空中にて Fig.2 のように模型を吊り下げ、上下方向に船尾加振を行って、その加振力及び応答量を計測した。計測点数は 21 個で、上下方向応答のみ扱った。水中(深水域)についても同様に計測した。なお、いずれの実験においても加振力が一定になるよう制御した。計測設備の概要を Fig.3 に示す。

Fig.2 Experiment in the air

Fig.3 Experimental equipment

4.2 適合結果

各モーダルパラメータを得るために、深水域及び空中における伝達関数を用いて 21 点同時、深水域・空中同時曲線適合を行なう。深水域に対しては $\phi_{sr} \sim \phi_{sn}$ 及び $u_{rl} \sim u_{rm}$, Ω_{sn} , ζ_{sr} , β_w の $(MN+M^2+2M+1)$ 個のパラメータが、空中に対しては $u_{rl} \sim u_{rm}$, β_w を除いた $(MN+2M)$ 個のパラメータが存在することになる。即ち、 $\phi_{sr} \sim \phi_{sn}$, Ω_{sn} , ζ_{sr} は深水域と空中とで共通のパラメータとなるのである。

このようにして行なった同時フィットの結果と計測結果とを比較するために、加振点応答についての周波数応答関数を空中、深水域についてそれぞれ Fig.4, Fig.5 に示す。Fig.5 より、2 節振動(1st ピーク), 3 節振動(2nd ピーク)において振動レベルが低めに適合されている。これは、今回のフィットで得られた β_w の値が 4.49 と、深水域での β_w の理論値 1.0 に比べて大きいため、実際よりも流体による減衰影響が大きく評価されているためである。ここで、深水域における β_w の理論値は、加振点における 2 節振動ピーク周波数における散逸エネルギーの実験値と理論値を比較することにより、1.0 と表わせることの妥当性が示されている³⁾。その際、散逸エネルギーの理論計算には、松浦の撓み形⁹⁾が使われている。ところが本手法では、ピーク周波数だけに注目したも

のではなく、周波数帯全域を考慮したものであり、また、ひとつのピークだけではなく、全ピークを通じてフィットしている。そして、松浦の撓み形で考慮されている回転ベクトルを考慮していない。これらが原因となつて、減衰影響が大きく評価されたものと考えられる。なお、図中の表は、汎用ソフトウェア(Star System)及び本論文の 2 通りの方法で行なった適合結果を比較するために載せている。深水域の場合、汎用ソフトウェアでは $[C_w]$ による影響もモード減衰比 ζ に組み込まれる。

Fig.4 Comparison of responses at force point in the air between experiment and curve fit

Fig.5 Comparison of responses at force point in the deep water between experiment and curve fit

また、加振点以外の応答点についても比較するために、ピーク周波数における振動モードを変位に関する伝達関数の形式にて空中、深水域についてそれぞれ Fig.6, Fig.7 に示した。ただし、位相基準は加振点応答である。同図より、全体的に実験結果を良く再現できていることがわかる。また、周波数応答関数 Fig.4 では 2 節振動

(1st ピーク)において, Fig.5 では 2 節振動(1st ピーク), 3 節振動(2nd ピーク)において加振点振動レベルが低めに適合されていたが, Fig.6, Fig.7 にもその様子が現れている. ところが, 全体的に適合するようパラメータが決定されたため, 全体的には一致していることがわかる.

Fig.6 Comparison of responses at the peak frequency in the air between experiment and curve fit

Fig.7 Comparison of responses at the peak frequency in the deep water between experiment and curve fit

なお, 今回行なった曲線適合により求めた空中でのパラメータ ζ_{sr} , Ω_{sr} の値を文献²⁾で得られた値と比較するため, 一覧表にして Table 1 に示す. これを観察すると, ζ_{sr} が少し異なることがわかる. これは, (24)式に表わされるように β_w と ζ_{sr} が互いに影響を及ぼし合うところに, β_w の値を理論値 1.0 よりも大きめに評価したためであると考えられる.

本手法により深水域での β_w として 1.0 とは異なる値

を得ることになったが, ほぼ実験値を再現することはできた. 以上の結果により, 付加縮小マトリクスを用いた偏分反復法の定式化が妥当であることがわかる.

Table 1 Comparison on modal parameter (ζ_{sr} , Ω_{sr}) between star system and curve fit

Modal parameter	Star system (in the air)	Curve fit ~air and shallow water~ (last paper) ²⁾	Curve fit ~air and deep water~ (this paper)
ζ_{r1}	0.51%	0.55%	0.57%
ζ_{r2}	1.43%	1.38%	1.19%
Ω_{r1}	480Hz	479Hz	479Hz
Ω_{r2}	958Hz	954Hz	955Hz

5. 結言

深水域において適用できる曲線適合手法を提案した.

具体的には, 構造変更理論を用いて付加マトリクス $[M_w]$, $[C_w]$ を組み込んだ深水域伝達関数の理論式およびその感度項を定式化して, 偏分反復型理論を採用した曲線適合手法を確立した. そして, 空中・深水域同時曲線適合を行なうことにより, 定式化の妥当性を示した.

β_w を抽出するにあたり, 今回の論文では, ピーク周波数だけに注目したのではなく周波数帯全域を考慮できる点, 及び, ひとつのピークだけでなく全ピークを通じてフィットできる点において優れている. 深水域の速度分布修正係数 β_w として理論値 1.0 とは異なる値を得ることになったが, 実験値をほぼ再現することはできた. また, 深水域における β_w の値は, 精々 1.0~5.0 であり, 浅水域での値 33.0~34.0²⁾ に比べて小さいものであることが, 改めて確認できた.

今回の検討では制約条件を埋め込んだ形で曲線適合を行ったが, 今後は最適化手法を利用して制約条件を厳密に満足させながら曲線適合を行うよう定式化する必要がある. また, 振動の計測方向を増やし, 回転影響をも加味した検討を行う必要がある.

謝辞

本研究の一部は, 社団法人日本造船工業会内造船学術研究推進機構の研究費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わします.

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 (流体の粘性による散逸エネルギーに基づく減衰マトリクスの定式化), 日本造船学会論文集, 第179号 (1996) pp.253~261
- 2) 船木俊彦, 林茂弘, 古池健太: 振動境界層理論に基づいた減衰マトリクスにおける速度分布修正係数の決定方法に関する研究, 日本造船学会論文集, 第182号 (1997) pp.619~624
- 3) 船木俊彦, 林茂弘: 振動境界層における散逸エネルギーに関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第180号 (1997) pp.491~498
- 4) 船木俊彦, 林茂弘: 縮小付加質量マトリクスにおける観測点の影響に関する研究, 日本造船学会論文集, 第179号 (1996) pp.263~269
- 5) 松浦義一: 貨物船撓み振動の解析, 日本造船学会論文集, 第108号 (1960) pp.255~275