

遅延関数を考慮した複数浮体の動揺解析について

みずほリサーチ&テクノロジーズ

正会員 ○坂本 大樹

みずほリサーチ&テクノロジーズ

正会員 眞鍋 尚

1. はじめに

近年、再生エネルギーの一環として注目を浴びている浮体式洋上風力発電であるが、その施工時や点検時を考えると浮体本体と作業船を同時に考慮した複数浮体の動揺解析が必要である。

一般に浮体の動揺解析に用いられる運動方程式は周波数一定型運動方程式と遅延関数型運動方程式があるが、周波数一定型運動方程式が周波数領域における運動方程式である一方で、遅延関数型運動方程式は時間領域における運動方程式であり、浮体が動揺することによる流場の周波数無限大に対応する不変付加質量を用い、遅延関数を用いて過去の影響を取り入れていることに特徴がある。

遅延関数型運動方程式では浮体の長周期動揺を含めた計算が可能であるため、単一の浮体に対する浮体動揺の計算では主流となっているが、複数浮体の動揺解析に遅延関数型運動方程式を用いた事例は少ない。そこで本論では、複数浮体における遅延関数型運動方程式を用いた動揺解析事例について紹介し、遅延関数型運動方程式を導入する効果について検討する。

2. 複数浮体における流体力・波力の算出

一般的な浮体動揺計算では、設定した浮体形状に対して、時系列シミュレーションを行う前に、流体力・波力を算出する必要がある。ここでは図1に示すような複数浮体における流体力・波力の算出方法について説明する。

一般に、複数浮体における速度ポテンシャルは以下のようにおくことができる。

$$\phi(x, y, z, t) = \left[\frac{g\xi_0}{\omega} \{ \phi_0(x, y, z) + \phi_d(x, y, z) \} + \sum_{j=1}^6 \frac{gX}{\omega} \phi_{Aj}^r(x, y, z) + \sum_{j=1}^6 \frac{gX}{\omega} \phi_{Bj}^r(x, y, z) \right] e^{-i\omega t} \quad (1)$$

対象とする複数浮体

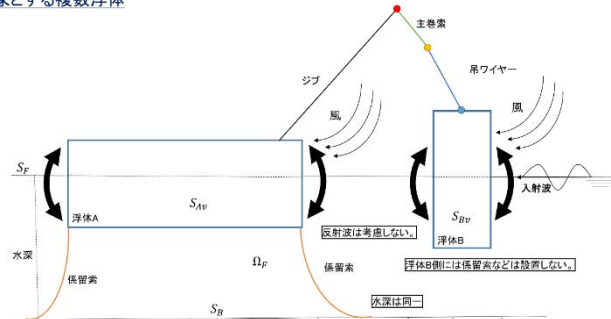


図1 複数浮体イメージ図

ここで、 ϕ_0 : 入射波ポテンシャル、 ϕ_d : 浮体 A, B の diffraction potential、 ϕ_{Aj}^r : 浮体 A における j モード運動の radiation potential、 ϕ_{Bj}^r : 浮体 B における j モード運動の radiation potential であり、 ϕ_0 は以下のように表される。

$$\phi_0(x, y, z) = -\frac{g\eta}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{-ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (2)$$

ϕ_d 、 ϕ_{Aj}^r 、 ϕ_{Bj}^r それぞれについて、自由表面・水底・浮体表面・放射条件に基づき Laplace 方程式を解いたうえで、各浮体に働く流体力波力をそれぞれ求めることになる。浮体 A、浮体 B それぞれに働く波力は式(3)のように表される。

$$\begin{aligned} F_j^A &= -\rho(i\omega) \int_{S_A} (\phi_0 + \phi_d) n_{Aj} ds \\ F_j^B &= -\rho(i\omega) \int_{S_B} (\phi_0 + \phi_d) n_{Bj} ds \end{aligned} \quad (3)$$

また流体力として、浮体 A、浮体 B それぞれの付加質量 M 、減衰係数 M は式(4)、(5)のように表される。なお、添え字の $AiBj$ は B の j モードの揺れが A の i モードの揺れに作用する力を示す。なお i, j は 1~6 の値を取り、6 自由度の運動を示す。

$$\begin{aligned} M_{AIAi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{S_A} \text{Im}(\phi_{Ai}^r) n_{Ai} ds \\ M_{AIBi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{S_A} \text{Im}(\phi_{Bi}^r) n_{Ai} ds \\ M_{BIAi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{S_B} \text{Im}(\phi_{Ai}^r) n_{Bi} ds \\ M_{BIBi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{S_B} \text{Im}(\phi_{Bi}^r) n_{Bi} ds \end{aligned} \quad (4)$$

キーワード 浮体動揺、数値計算、遅延関数、3次元特異点分布法、洋上風力

連絡先 〒101-8443 東京都千代田区神田錦町 2-3

みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社 TEL03-5281-5418

$$\begin{aligned}
N_{AjAi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{SA} \text{Re}(\phi_{Aj}^r) n_{Ai} ds \\
N_{AjBi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{SA} \text{Re}(\phi_{Bj}^r) n_{Ai} ds \\
N_{BjAi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{SB} \text{Re}(\phi_{Aj}^r) n_{Bi} ds \\
N_{BjBi} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{SB} \text{Re}(\phi_{Bj}^r) n_{Bi} ds
\end{aligned} \quad (5)$$

3. 運動方程式

2で求めた流体力・波力を用いて時系列シミュレーションを行う。その際用いられる運動方程式は上述のとおり，周波数一定型運動方程式と遅延関数型運動方程式がある。周波数一定型運動方程式は，式(6)に示すとおりである。

$$\{M_{ij}(\sigma_0) + m_{ii}\} \ddot{x}_i + (N_{ij}(\sigma_0) + D_{ij}) \dot{x}_i + K_{ij} x_i = F_j(t) \quad (6)$$

ここで， m_{ii} ：質量マトリクス， N_{ij} ：造波減衰マトリクス， D_{ij} ：粘性減衰， K_{ij} ：剛性マトリクス， F_j ：浮体に働く外力を示す。

一方，遅延関数型運動方程式は式(7)に示すとおりである。

$$\{M_{ij}(\infty) + m_{ii}\} \ddot{x}_i + \int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{x}_i d\tau + D_{ij} \dot{x}_i + K_{ij} x_i = F_j(t) \quad (7)$$

$$M_{ij}(\infty) = M_{ij}(\sigma_0) + \frac{1}{\sigma_0} \int_0^{\infty} L_{ij}(t) \sin \sigma t d\sigma \quad (8)$$

$$L_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} N_{ij}(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad (9)$$

周波数一定型運動方程式が特定の周波数 σ_0 についての運動方程式となっているのに対して，遅延関数型運動方程式は不変付加質量 $M_{ij}(\infty)$ や遅延関数 $L_{ij}(t)$ を用いることで，全周波数に対する運動方程式となっている。

4. 動揺解析事例

本章では複数浮体に対して，遅延関数型運動方程式を用いて動揺計算を行った例を示す。なお計算は，「船舶・海洋構造物動揺解析システム MIZUHO_MARIS-II」を用いた。

解析対象は，大型船舶と船舶から吊られる吊荷とし，図2に示すとおり形状を設定した。なおここでは船舶および吊荷は矩形として表現し，喫水面以下に計算用のメッシュを作成した図を示している。さらに流体力・波力を算出したうえで，遅延関数型運動方程式を用いて動揺シミュレーションを行った結果を図3に示す。なお流体力・波力の算出は3次元特異点分布法によって行った。

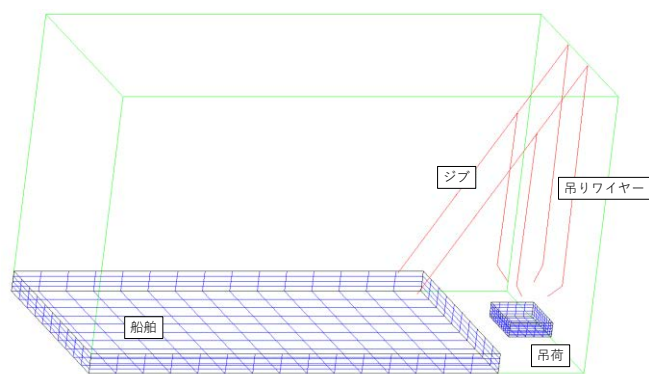


図2 複数浮体形状設定例

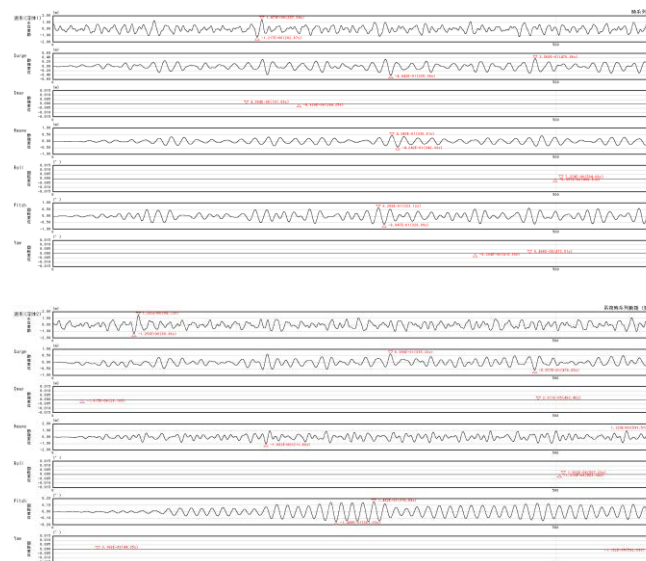


図3 複数浮体動揺計算結果例
(上：船舶 下：吊荷)

5. おわりに

本論文では，複数浮体における遅延関数型運動方程式を用いた場合の動揺計算の流れを整理したうえで，複数浮体の動揺計算事例を紹介した。そのうえで複数浮体の動揺計算に遅延関数型運動方程式を用いることによる効果の検討を行った。

参考文献

- 1) 坂本大樹，吉村英人，眞鍋尚：浮体式洋上風力発電に関わる数値シミュレーションの利用状況とMHRTの取り組み，みずほリサーチ&テクノロジーズ技報，Vol. 2 No. 1(2022)
- 2) 眞鍋尚：遅延関数を用いた浮体の動揺シミュレーション，富士総研技報，第8巻第1号(2003)，116-131
- 3) 船舶・海洋構造物動揺解析システム MIZUHO_MARIS-II： <https://www.mizuho-rt.co.jp/solution/research/digital/construction/maris/index.html>