

弾性変形を考慮した浮体の運動方程式における遅延関数法の適用について

みずほリサーチ & テクノロジー株式会社 正会員 ○眞 鍋 尚
みずほリサーチ & テクノロジー株式会社 正会員 坂本大樹

1. はじめに

本論では近年、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の動揺解析に関する検討を行う。浮体動揺における運動方程式の特徴は水中で運動することによる付加質量と造波減衰を考慮し、さらに遅延関数を用いた入射波周期に依存しない不変付加質量を導入することである。また、これまでは浮体は剛体と考え、1 質点系として扱われてきた。

一方、セミサブ形状のような浮体では弾性変形を考慮する必要がある^[1~3]、これを運動方程式に組み込む必要がある。本論では弾性変形を考慮した運動方程式において弾性変形部材の流体力の効果について検討する。

2. 浮体の運動方程式

浮体を 1 質点系の 3 次元運動とした場合の時間領域における運動方程式は次のようになる。

$$(m + M(\infty))\ddot{x} + D\dot{x} + (C + G)x + \int_{-\infty}^t L(t - \tau)\dot{x}(\tau)d\tau = F(t) \quad (1)$$

ここで x は浮体の変位、 m, C, D は浮体の一般化質量、復原力、粘性減衰 Matrix、 G は係留系の剛性 Matrix をそれぞれ表す。また、 $M(\infty), L(t)$ は浮体の不変付加質量および遅延関数であり、それぞれ次式で与えられる。

$$L(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} N(\sigma) \cos \sigma t d\sigma \quad (2)$$

$$M(\infty) = M(\sigma_0) + \frac{1}{\sigma_0} \int_0^{\infty} L(t) \sin \sigma_0 t dt \quad (3)$$

ここで、 $M(\sigma), N(\sigma)$ はそれぞれ波周波数 σ における付加質量と造波減衰係数である。付加質量と造波減衰係数は流体力と呼ばれ Radiation 問題を数値的に解くことによって得られる^[4]。式 (1) では浮体の運動が不規則であるため波周波数に依存しない不変付加質量 $M(\infty)$ と遅延関数 $L(t)$ による減衰を評価している時間領域における運動方程式である。遅延関数 $L(t)$ は久保ら^[5]に従い、高周波数領域において造波減衰係数を周波数の近似を導入し、低周波数側は数値積分、高周波数側は解析的積分を用いて求める。不変付加質量は遅延関数が周期的に収束する関数である性質を考慮し、式 (3) の積

分範囲は 0 から遅延関数有効時間 t_e 範囲までの時間積分として求める。さらに、式 (1) における右辺第 3 項に関しても遅延関数の周期性を考慮して次式のように時間積分範囲を $0 \sim t_e$ とした。

$$\int_{-\infty}^t L(t - \tau)\dot{x}(\tau)d\tau = \int_0^{t_e} L(t - \tau)\dot{x}(\tau)d\tau \quad (4)$$

式 (4) における t は現在求めようとしている時刻 t を表し、この畳み込み積分は現在より過去に時刻 t_e 遡って積分し、減衰項として表している。したがって、Newmark- β 法を用いた時間積分スキームでの各時間 step において上式の畳み込み積分を行う。ただし、本論では台形公式を用いた。

3. 弾性変形を考慮した運動方程式

次に図 1 に示すセミサブ形状の浮体について考える。弾性変形を考慮する部材について図 2 に示すように流体力を求めるモデルと動的解析を行うモデルに分けて考える。したがって、動的解析を行う場合は、各要素の流体力を用いて、要素毎の運動方程式を構築する必要がある。

$$(m_i^e + M_i^e(\infty))\ddot{x}_i^e + D_i\dot{x}_i^e + k_i^e x_i^e + \int_0^{t_e} L_i^e(t - \tau)\dot{x}_i^e(\tau)d\tau = F_i^e(t) \quad (5)$$

ここで、 x_i^e, m_i^e, k_i^e は i 番目梁要素の要素変位、要素質量および要素剛性 Matrix である。さらに $M_i^e(\infty), L_i^e(t)$ は i 番目要素の要素不変付加質量および造波減衰係数を用いて導出した要素遅延関数である。なお、 $F_i^e(t)$ はその要素に作用する動的要素波力である。式 (5) より右辺第 3 項の要素遅延関数に関して時間 t_e 遡る時間積分を行う必要がある。浮体を 1 質点系で考えた場合では各時間 Step で 1 回のみの計算で十分であったが、弾性変形を考慮した場合では、各要素において、要素造波減衰係数および要素速度 $\dot{x}^e$ が異なるため全要素で要素遅延関数に関する積分を行う必要があり、膨大な計算量が生じる。そこで本論では動的解析においてはすべての構造を弾性変形部材とみなさず、従来通りの浮体の運動を剛体運動とみなせる 1 質点系部材と分けて考えるモデルを考えた。図 3 はその一例である。

Key Words: 浮体式洋上風力, 弾性変形, 遅延関数型運動方程式
〒 101-8443 東京都千代田区神田錦町 2-3

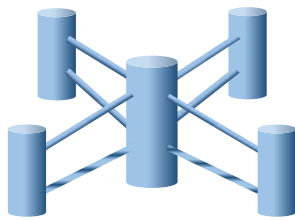


図-1 セミサブ形状の浮体

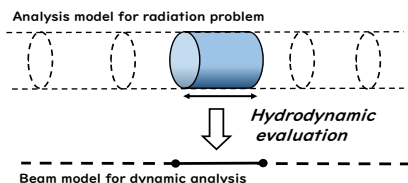


図-2 弾性変形部材のモデル化

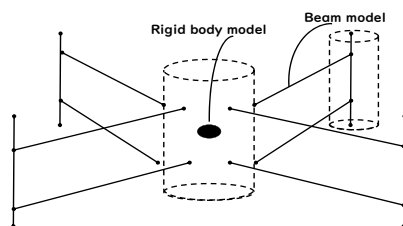


図-3 剛体モデルと弾性変形モデルのハイブリッドモデル

その際の1質点系の運動方程式は(1)に示した通りである。ここにおいても遅延関数による時間積分は行われるが1質点系であるため、大幅に計算量が減少される。



図-4 流体力検証の浮体形状

次に弾性部材の質量および剛性より構成される式(5)において要素不変付加質量と要素遅延関数が及ぼす数値的效果を検討する必要がある。これらを検証するた

め、図4^[6]に示すセミサブの浮体に対し、弾性変形部材の径のみを変化させて得られる要素付加質量と要素造波減衰係数を求め、その影響を調べた。

図5では波向き270度入射の場合のポテンシャルコンター図を示す。

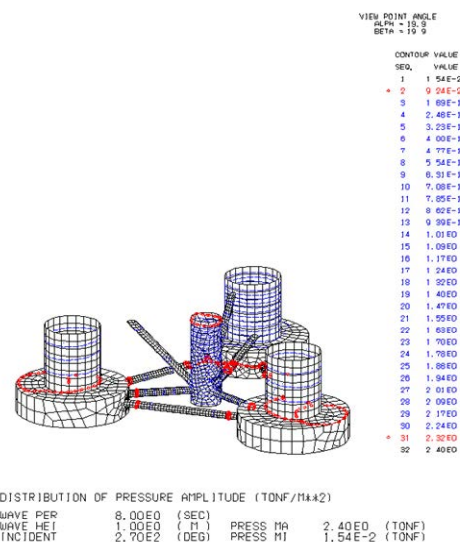


図-5 ポテンシャルコンター図(波向き270度入射)

4. おわりに

本論では弾性変形を考慮した浮体の運動方程式について検討を行った。動的解析モデルでは従来の1質点系モデルと弾性変形モデルを組み合わせた解析モデルを示した。また、弾性変形モデルにおける運動方程式に対する要素不変付加質量と要素遅延関数の影響を検討するため、セミサブ形状の浮体に対し、弾性変形部材の大きさを変化させて、その効果を調べた。

参考文献

- 1) ファムバンフック, 石原孟, セミサブ浮体式洋上風力発電システムの動的応答予測モデルの開発と実験による検証, 土木学会論文集 A, **65**(2009), 601.
- 2) 福王翔, 流体力モデルによセミサブ型浮体式洋上風車の動的応答への影響, 土木学会論文集 A, **75**(2019), I-539.
- 3) 福王翔, 飯島一博, 鈴木英之, ポテンシャル論を使用した浮体式風車支持物の三次元弾性モデルの時刻歴解析, 風力エネルギー利用シンポジウム論文集, **41**(2019), 18.
- 4) 日本造船学会, 浮体の流体力学, 動揺問題の数値計算法, 成山堂書店, 2003.
- 5) 久保雅義, 岡本俊策, 岸壁直前係留浮体の遅延関数を用いた時系列解析の精度向上に関する研究, 海岸工学論文集, **34** (1987), 611.
- 6) A. Robertson, J. Jonkman, M. Masciola, *et al.*, Definition of the Semisubmersible Floating System for Phase II of OC4, NREL(2014).