浮体式洋上風力発電に関する研究　その2　動揺解析

○　東京大学　学生会員　ファ バン フック
東京大学　正会員　石原　孟
清水建設　正会員　大山　巧
東京電力　正会員　福本　幸成

1. はじめに

浮体式洋上風力発電設備においては，浮体の設計に関して浮体の変位量を評価する必要がある．一方，浮体に搭載する風車の設計に関しては浮体から風車の基部加速度応答の評価が不可欠である．浮体式洋上風力発電の経済性を向上させるために，浮体の動揺量や係留に働く力を高精度で評価できる数値解析手法の開発が望れる．

浮体の動揺量を求める数値解析手法[1]としてはモリソン式による方法とグリーン関数による方法がよく用いられている．前者では流体力を水粒子と浮体構造の相対速度で表現できることや，流体の粘性影響を抗力の形で考慮できる特徴を持っている．しかし，モリソン式では構造物による波の変形を無視したため，構造物スケールが波長に比べ十分に小さい場合のみ有効である．一方，後者は，流体の粘性を無視できると仮定し，速度ポテンシャルを用いて境界値問題を解く手法であり，浮体の形状・大きさの影響と浮体による波の変形を考慮することができ，船舶工学や石油開発分野でよく使われているが，本研究で対象となっているセミサブ型の浮体式[2]では動揺における減衰は抗力による効果が支配的であり，通常のグリーン関数法を用いる場合に，動揺量が過大に評価される恐れがある．

そこで，本研究では従来のグリーン関数法により求められる線形流体力に抗力による非線形減衰力を加えることにより，浮体動揺量を精度よく評価できる解析コードを作成し，水理実験の結果と比較することにより，解析コードの予測精度の検討を行った．

2. 数値解析手法

2.1 モリソン式モデル[1),3)]

モリソン式はもともと海底に固定されている鉛直の杭に作用する波浪荷重を評価するために提案された式であり，粘性影響による抗力の成分は造波成分に比べて大きいと仮定している．式(1)は，任意方向を向いた運動する細長部材にも使えるように修正されたモリソン式である．

$$df = \frac{1}{2}\rho C_D D(u-\dot{x})|u-\dot{x}|dl + \rho C_M A\dot{u}dl - \rho(C_M-1)A\ddot{x}dl \quad (1)$$

ここで，dfは部材に作用する単位長さdlにあたりの水平方向波浪荷重，ρは流体密度，C_Dは抗力係数，C_Mは質量係数あるいは慣性力係数，Aは部材面積，$u,\dot{u}$は部材直交方向の水粒子の速度と加速度，$x,\dot{x}$は部材直交方向の速度と加速度である．右辺の第１項は抗力を表す．

2.2 グリーン関数法[1),4),5)]

波浪中で運動している浮体には，粘性の影響を無視した場合に，浮体の変位により生じる静水圧の変化に基づく復元力，浮体の動揺により生じるラディェイション力，浮体が拘束されているとして波が浮体に作用する波強制力などの流体力が作用し，浮体の運動方程式は次式のように表される．

$$\sum_{k=1}^{6}\left[\left(M_{jk}+m_{jk}\right)\ddot{\xi}_k + N_{jk}\dot{\xi}_k + C_{jk}\xi_k\right] + F_{Gj} = E_j \quad (2)$$

ここで，$\xi_k, \dot{\xi}_k, \ddot{\xi}_k$は$k$方向運動の変位，速度，加速度，$M_{jk}$は質量係数あるいは慣性ﾓｰﾒﾝﾄ，$m_{jk}$はラディェイション力による求められる付加質量係数あるいは付加慣性ﾓｰﾒﾝﾄ，N_{jk}はラディェイション力による求められる造波減衰係数，C_{jk}は静水圧による復元力係数，F_{Gj}は係留力，E_jは波強制力であり，jは1～6である．

波強制力は，入射波が浮体によって変形しないと仮定して，動水力を浮体回りに表面積分して得られるフルード・クリロフ力と浮体の存在による変形する成分（ディフラクション力）に分かれてある．線形仮定のもとでこれらの流体力を精度よく推定する方法として発達してきたのがポテンシャル理論による算定法である．流体の非粘性，非圧縮・渦無しを仮定し，速度ポテンシャルΦが存在するものとすれば，Φは連続条件，自由表面条件，底面条件，無限遠方条件と浮体の物体表面条件を満たすように決定される．Φが求まると流体の変動圧力が算定され，物体表面にわたって積分することにより付加質量係数，造波減衰係数と波強制力が算定される．

従来のグリーン関数法で無視した粘性影響を評価するために，本研究ではモリソン式に基づく抗力dF_Dを次式[6)]で近似し，運動方程式(2)の右辺に加えた．

$$dF_D \approx (1/2)\rho C_{DL} D u^* dl \qquad u^* = (u-\dot{x}) \quad (3)$$

キーワード：浮体式洋上風力発電，モリソン式，グリーン関数，抗力，動揺量
連絡先：〒113-8656　東京都文京区弥生 2-11-16　e-mail ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

ここで u^*は部材中心位置での相対速度，D, Δlは部材の径と長さ，C_{DL}は等価線形係数として考慮した．C_{DL}は，文献 6 により規則波の場合は$(8/3\pi)\,C_D\,\mathrm{Max}[u^*]$，不規則波の場合は$(8/\pi)^{1/2}\,C_D\,\mathrm{RMS}[u^*]$と評価し，$\mathrm{Max}[u^*]$(最大相対速度)，$\mathrm{RMS}[u^*]$（標準偏差相対速度）は動揺量に関する繰り返し計算により求めた．

3. 実験よる検証

解析コードの妥当性を検討するために，水理実験で用いられている剛体のセミサブ浮体模型を対象とし，周波数領域 [5]で動揺量解析を行った．計算では水深 1.5m で，3 種類の波高(2cm,4cm と 8cm)と周期 0.3s～3s とした．なお，本手法と通常のグリーン関数と比較するために，抗力を考慮しない解析結果も示した．表 1 に浮体と係留の構造パラメーターを示す．

表 1　浮体構造のパラメーター

質量(kg)	5.54
慣性ﾓｰﾒﾝﾄ*(kgm²)	Ix, Iy=0.8616，Iz=1.73
ﾒﾀｾﾝﾀ高さ GM(m)	0.171
水線面積*(m²)	0.377×10^{-2}
係留本数	4
係留のバネ定数	1.3g/mm/本

図－1，2，3 には各運動モードの動揺振幅，中央浮体の応答加速度，係留張力を波高などで無次元化した結果を示す．各図には抗力を無視した通常のグリーン関数法による結果（$C_D=0$）も示してある．本解析結果は，Surge と Heave については実験値と一致し，Pitch については若干過大に評価していることが分かる．本解析では慣性ﾓｰﾒﾝﾄ，ﾒﾀｾﾝﾀ高さ及び水線面積について計算値を用いており，今後これらの値を計測により再評価する予定である．各運動モードの固有周期は 2.5s～2.7s の範囲にあり，この付近の解析結果には入射波高により大きく異なっており，非線形減衰の効果が明確に現れている．数値解析結果は実験値を良く再現されており，抗力による減衰効果は本手法により正確に評価されていることがわかる．一方，抗力を無視した解析は固有周期付近の応答値を過大に評価していることから，造波減衰に比べて抗力による減衰効果が支配的であることが分かる．

4. まとめ

洋上風力発電のための軽量セミサブ浮体を対象に，動揺解析を行った．通常のｸﾞﾘｰﾝ関数法モデルに加え抗力の影響を考慮した動揺解析では浮体模型を用いた水理実験の結果をよく再現し，造波減衰に比べて抗力による減衰効果が支配的であることが分かった．

参考文献

1) 元良誠三，他：船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店，1997. 2) 嶋田健司，他：浮体式洋上風力発電に関する研究　その3　水理実験，第 61 回土木学会年次学術講演会講演概要集,2006. 3) 日本造船学会，他：半潜水式海洋構造物の構造強度概論 2，日本造船学会誌，第 675，昭和 6 年 5 月,pp.583-587. 4) 清川哲志，大山巧，小林浩：ｸﾞﾘｰﾝ関数法による任意形形状浮体の動揺解析，土木学会論文報告書，第 332 号，1983 年 4 月，pp.55-65. 5) 日本造船学会 海洋工学委員会性能部会編：実践浮体の流体力学　前編－動揺問題の数値計算法，pp.99-158，成山堂書店，2003. 6)日本建築学会：海洋構造物　構造設計指針（浮遊式）・同解説,pp.110-118,1990

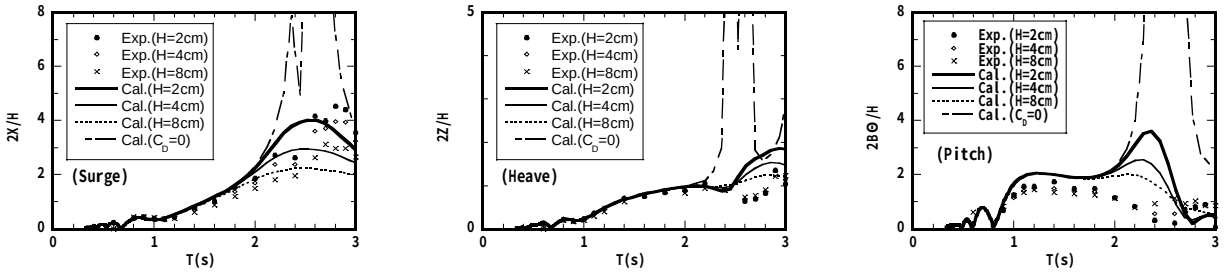


図-1 動揺変位量の周期特性に関する比較

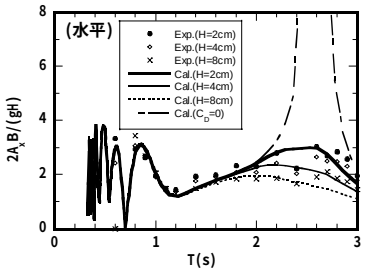
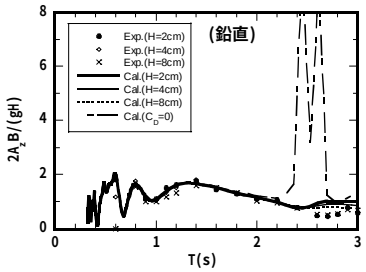


図-2 応答加速度に関する比較



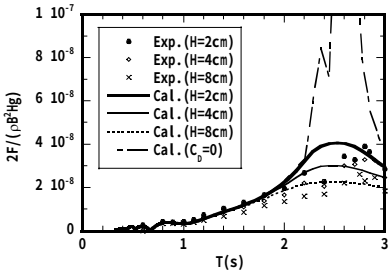


図-3 係留張力に関する比較