

浮揚式発電所の不規則波浪動揺と非線形係留力の特性

池野正明*・平口博丸*・鹿島遼一**

1. はじめに

電力中央研究所では、発電所の立地点選定の自由度を拡大するための1つの方策として、防波堤や護岸で囲まれた水域に発電プラント全体を浮かべる浮揚式海上立地方式に関する立地技術を検討している。この場合、プラントを搭載する浮体の波浪動揺に対する固有周期が波浪の周期と比較的近くなることが予想されるため、著者らは、係留系を線形と仮定した不規則波浪動揺に関する基礎的な検討を行ってきた(池野ら, 1989)。しかしながら、この浮揚式発電所の係留方式としては、係留装置に作用する荷重を低減することを目的として、定反力型の防舷材を用いたドルフィンリンク方式を想定している。したがって、この非線形な防舷材反力の特性を考慮して動揺量や係留力を評価する必要がある。

本研究は、半閉鎖水域に係留された大型浮体の不規則波浪による動揺の断面2次元解析と模型実験を行い、浮体運動の共振周波数付近にエネルギーを有する波浪により、防舷材の変形が非線形領域まで及ぶ場合の浮体の動揺量と係留力の特性について検討したものである。

2. 浮体の不規則波浪動揺解析法

(1) 運動方程式

係留装置からの反力が変位に対して非線形な特性を示す場合は、浮体の動揺量と係留力を運動方程式の時刻歴解析により評価する必要がある。このため、時間領域で定義された運動方程式を Cummins (1962) に従って次のように表す。

$$M_j \ddot{x}_j(t) + \sum_{m=1}^6 \left\{ a_{jm}(\infty) \ddot{x}_m(t) + \int_0^t L_{jm}(t-\tau) \cdot \dot{x}_m(\tau) \cdot d\tau + C_{jm} \cdot x_m(t) \right\} + d_j |\dot{x}_j(t)| \cdot \dot{x}_j(t) + R_j(t) = F_j(t) \quad (j=1 \sim 6) \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 x_j は運動変位であり、添え字 j および m は1~6が各々 sway, surge, heave, pitch, roll, yaw に関する量である。“.”と“..”は t に関

する1階、2階微分を表す。 M_j は浮体の質量および慣性モーメント、 C_{jm} は静的復元力係数、 R_j は係留力、 F_j は波強制力、 $a_{jm}(\infty)$ は角周波数 $\omega \rightarrow \infty$ における定付加質量、 L_{jm} は時間 $t-\tau$ における遅延関数、 d_j は抗力係数である。

(2) 波強制力および造波抵抗力の計算

波強制力および造波抵抗力の周波数応答関数は周波数領域での定常解析により求めた。定常解析手法として、図-1に示すように、 $j=1, 3, 5$ の断面2次元運動を考え、井島ら(1978)の境界要素法を採用し、未知となる速度ポテンシャルを清川ら(1983)に準じて固定浮体による散乱波成分と動揺による発生波成分に分離して解いた。なお、本研究では、浮体背後に護岸などの反射境界がある場合についても検討しており、波強制力と造波抵抗力の計算においては、護岸の反射率に応じた反射波の影響を考慮している。すなわち、グリーンの積分方程式に用いる速度ポテンシャルの境界条件として、次式を用いている。

$$\left. \frac{\partial \phi_l}{\partial x} \right|_{x=-R} = ik \left\{ \frac{1-\gamma e^{i\epsilon}}{1+\gamma e^{i\epsilon}} \phi_l \right|_{x=-R} - \delta_{l4} \cdot \frac{2\gamma e^{i\epsilon}}{1+\gamma e^{i\epsilon}} \phi_0 \right|_{x=-R} \quad (2)$$

ここで、 R は浮体の中心軸と護岸との水平距離、 γ は護岸での任意の反射率、 ϵ は反射波の折り返し位相差、 k は波数 ($\omega^2/g = k \cdot \tanh kh$ の実正根)、 g は重力加速度、 h は水深である。 ϕ は時間項 $e^{i\omega t}$ のを省略した複素ポテンシャルであり、 $l=0$ が入射波成分、 $l=4$ が固定浮体による散乱波成分、 $l=1, 2, 3$ が sway, heave, roll に対応し、単位速度で運動したときの発生波成分である。 δ_{l4} はクロネッカーのデルタ ($l=4$ のとき1、それ以外のとき0)である。つぎに、波強制力の周波数応答関数を不規則な水面変位の時系列から求める複素フーリエ係数と周波数ごとに掛け合わせ、逆フーリエ変換によって、波強制力の時系列を作成した。造波抵抗力については、周波数応答関数を浮体の加速度に比例する成分と速度に比例する成分に分離し、両者の比例乗数として付加質量と造波減衰係数を算出し、造波減衰係数のフーリエ cosine 変換により、単位インパルス速度で浮体

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所水理部

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 水理部主席専門役

が動揺した場合の遅延関数を求めた。

(3) 係留反力のモデル化

浮揚式発電所の係留方式として、図-2 に示すよう

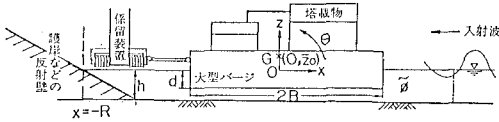


図-1 2次元座標系

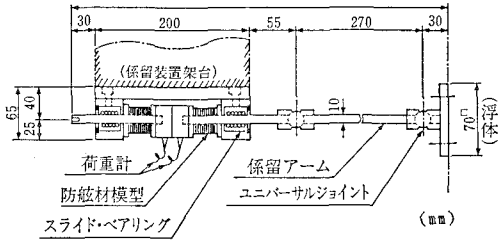


図-2 ドルフィンリンク係留装置の模型

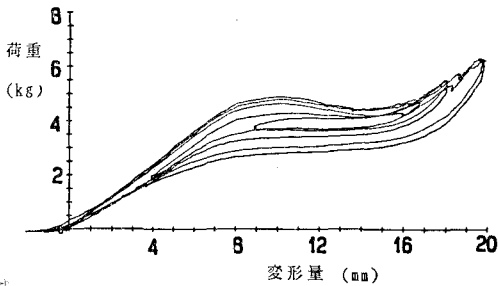


図-3 防舷材模型の静的荷重・変形特性

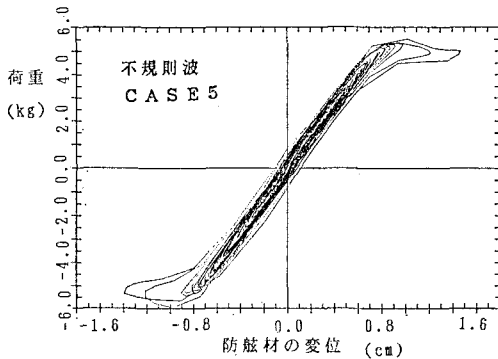


図-4 防舷材模型の動的荷重・変形特性

に、定反力型の防舷材を用いたドルフィンリンク方式を採用している。防舷材模型の静的荷重試験および波浪外力による動的荷重試験の結果を 図-3 および 図-4 に示す。防舷材は顕著な非線形性を有し、一定以上の変形に対して反力が頭打ちとなる定反力特性とヒステリシスによるエネルギー吸収能を有している。防舷材反力のモデル化に関する従来の研究 (上田・白石, 1983 など) では、荷重・変形曲線の最大ヒステリシスを有する性能曲線 (許容変形までの载荷の上限曲線と除荷の下限曲線) を多項式あるいは線形パネの合成により近似している。この場合問題となるのは、許容変形以下の荷重による载荷・除荷反転時の反力の与え方である。図-3 および 図-4 によると、履歴が必ずしも最大ヒステリシスを有する性能曲線上に重ならず、変形量に応じたヒステリシスロスが生じていることがわかる。従来の研究では、反転時の反力として、強制的に载荷上限・除荷下限曲線上の反力を与えているので、実際の反力特性よりも過大なヒステリシスロスを与えている可能性がある。そこで本研究では図-5 のような 3 タイプの線形パネ合成モデルを考え、防舷材反力のモデル化の違いが動揺量と係留力に及ぼす影響を調べた。タイプ 1 は定反力とヒステリシスを模擬した最も単純な従来型である。タイプ 2 は除荷時反力に定反力域変形量に比例したヒステリシスロスを与えたもの、タイプ 3 はタイプ 2 の除荷時反力に線形反力領域までヒステリシスロスを与えたものである (池野ら, 1990)。

3. 水理模型実験

浮揚式発電所の波浪動揺と非線形な係留反力の特徴を位相も含めて詳細に調べるため、2次元造波水路 (長さ 76.5 m, 幅 0.9 m, 深さ 1.2 m) を用いて縮尺 1/100 の断面実験を行った。係留装置は図-2 に示すようなものを奥行き方向に 2 基配置した。浮体模型の諸元を表-1 に示す。定反力型防舷材模型はシリコンゴムで製作した。入射波は、25 種類の規則波と 6 種類の不規則波を対象とした。規則波は、防舷材模型の線形反力領域と定反力領域での浮体の動揺を比較するため、入射波高を 2 cm と 4 cm の 2 種類とした。不規則波は、Bretschneider-光易型スペクトルを用い、有義波周期が水平および回転運動の固有周期に近くなるように設定した。表-2 に入

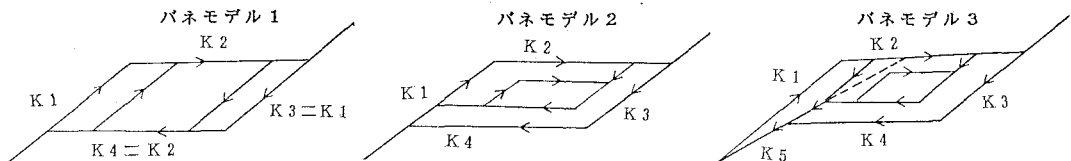


図-5 防舷材反力のモデル化

射波の諸元を示す。浮体を囲む護岸で、波が完全消波される場合の進行波の実験、完全反射される場合の直立壁による重複波の実験および砕石から成る勾配 1/2 (水平長さ 80 cm, 高さ 40 cm) の護岸模型による部分重複波の実験を行った。直立壁による実験では浮体中心軸と直立壁の距離を 141 cm, 221 cm, 271 cm とし、護岸模型による実験では浮体中心軸と護岸斜面の立ち上がり位置との距離を 141 cm とした。浮体の動揺の計測にはレーザ変位計を用い、浮体の 3 点の変位量を同時計測し、座標変換することにより、重心位置での回転、水平、鉛直動揺量および位相差を求めた。また、係留装置に取り付けられた荷重計により防舷材反力を変位量と同時計測した。不規則波の実験では浮体がない状態の浮体前面位置で計測した入射波の時系列と動揺および係留力の時系列が対応するように計測した。計測時のデータ数は 2048, サンプリング周期は規則波 0.01 s, 不規則波 0.04 s である。

4. 計算結果と実験結果の比較検討

(1) 計算条件

波強制力の周波数応答関数および造波抵抗力の付加質量と造波減衰係数の計算では、要素長を計算対象とする成分波の波長の 1/10 以下にすることが望ましい。そこで、図-1 に示す計算領域の境界分割数を 1.2 Hz 以下の 100 成分について 160 分割、1.2~2.4 Hz の 100 成分について 280 分割とした。波強制力の周波数応答関数の計算では、2.4 Hz 以上の高周波数成分は、入射波のエネルギーレベルが低いことから無視した。造波抵抗力の計算では、2.4 Hz 以上の高周波数成分は、指数関数近似により 0 へ漸近させた。なお、成分波の受け持つ周波数幅は、実験データを FFT 解析するときの最小周波数 Δf ($=0.012$ Hz) と等しくなるようにした。岸側での境界条件は、式 (2) において、護岸で波が完全消波する場合には $\gamma=0$ 、直立壁により完全反射する場合には $\gamma=1$ 、 $\epsilon=0$ とした。護岸境界での反射率条件を設定するため、本研究ではあらかじめ勾配 1/2 の消波護岸模型の不規則波反射率測定実験を行っている。護岸反射率を入射分離法により求めると、図-6 のような周波数特性を示す。反射率は、通常波形勾配に依存することが知られているが、本研究で対象とする外力波の波高が比較的小さいことより、護岸反射率の特性が波長のみに依存すると仮定する。護岸反射率の周波数特性を図-6 のように、双曲線で近似し、不規則波の長周期波成分では反射率が高く ($\gamma=0.7$)、短周期波成分では低く ($\gamma=0.2$) なるように境界条件式 (2) 中の γ を周波数毎に変化させた。また、比較のために境界条件として護岸反射率を周波数に関係なく一定とした場合についても検討し、入射波と反射波

表-1 模型浮体の諸元

	模型浮体	想定実機
浮体幅 $2B$	142cm	142m
奥行幅 B'	89cm (水路幅)	142m
喫水 d	15.5cm	15.5m
水深 h	24cm	24m
重心高さ $\bar{x}_0$	静水面上 6.5cm	静水面上 6.5m
質量 M	195.7kg (2.2kg/cm)	3.1×10^4 ton
慣性モーメント I	$36.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ($0.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{cm}$)	$5.9 \times 10^{11} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

() は断面 2 次元解析に用いる単位奥行当りの値である。

表-2 入射波の諸元

	波高 (cm)		周期 (s)		備 考
規則波	2.0, 4.0		0.80~3.00		0.1~0.05s 間隔の25種類
不規則波	$H_{1/3}$	3.1	$T_{1/3}$	1.2	CASE1
		2.5		1.4	CASE2
		2.8		1.5	CASE3
		2.8		1.9	CASE4
		2.9		0.8	CASE5
		2.8		1.1	CASE6

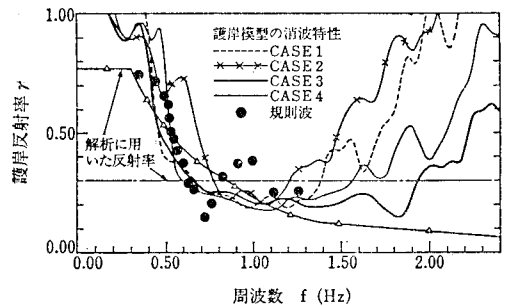


図-6 護岸模型の反射率

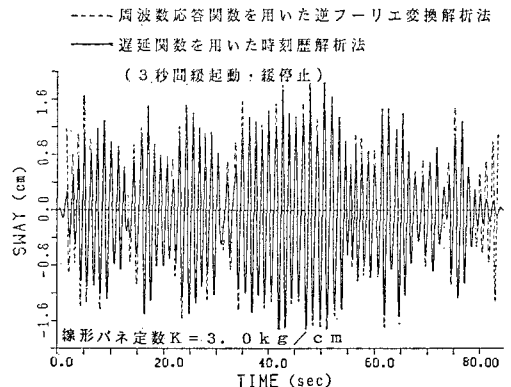


図-7 時刻歴法と逆フーリエ変換法の比較

0次モーメントの比から $\gamma=0.3$ とした。反射波の折り返し位置 (図-1 中, $x=-R$) は, 入射波分離法による位相差の情報から, 護岸斜面と静水面の交点位置とし, $\epsilon=0$ と判断した。浮体の運動方程式 (1) の数値積分には, 浮体の水平, 鉛直および回転運動の連成を考慮して, Newmark- β 法により行い, $\beta=1/6$, 時間刻み 0.04 sec とした。波強制力を運動方程式に取り込む際, 衝撃力となるのを避けるため時系列の始めと終わりの有義波周期の3倍の区間に緩起動と緩停止を施した。

(2) 線形解析による検証

まず, 浮体の運動方程式 (1) を用いた時刻歴解析法の精度を線形動揺解析において検証する。図-7 に不規則波が作用した場合の護岸による反射波の影響を受けない浮体の不規則動揺について前論文 (池野ら, 1989) で示した周波数応答関数による逆フーリエ変換法と時刻歴解析法による計算結果を比較したものである。図-7 によると, 緩起動と緩停止の区間を除いて, 両者に有意な差異は認められず, 時刻歴解析法を線形解析に用いる場合, 周波数応答関数による逆フーリエ変換法と同程度の精度を有すると判断できる。

(3) 防舷材反力モデルの検証

つぎに, 簡単のために, 護岸による反射波の影響を受けない浮体に規則波が作用した場合を対象として, 3タイプの防舷材反力モデルの適用性を検証する。図-8 は入射波高と水平運動振幅の関係を3タイプの防舷材反力モデルを用いて解析した結果と実験結果とで比較したものである。図-8 によると, 定反力域変形量に比例したヒステリシスロスを有する除荷曲線を作り, 除荷時の反力を与えているモデル2を用いた方が, 従来のように強制的に除荷の下限曲線上の反力を与えているモデルよりも実験結果に近くなっている。しかし, 履歴の実験結果を考慮すると, 防舷材模型の線形反力領域でも載荷曲線と除荷曲線とで若干のヒステリシスロスが生じているので, モデル2では, 係留力と水平変位の履歴の再現に限界があることがわかる。そこで, 除荷時反力に線形反力領域でもヒステリシスロスが生じるようにモデル2をモデル3に改良した。図-9 は, 護岸による反射波の影響を受けない浮体に規則波が作用した場合の回転運動に対する水平運動の時間波形のずれを実験結果と反力モデル3を用いた解析結果とで比較したものである。入射波高は, 防舷材模型の変形が線形反力領域内の場合と定反力領域まで及ぶ場合を比較するため, 2 cm と 4 cm の2種類を用いている。線形外力のみが作用する場合は, 入射波高を2倍にすると, 水平, 鉛直, 回転運動間の位相差は同じに保たれ, 運動振幅のみが2倍となるが, 2つの入射波高による浮体の動揺を比較すると, 水平運動と回転運動の位相が防舷材の線形反力変形時には, ほぼ同位

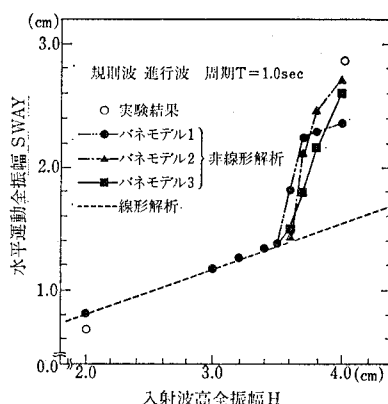


図-8 3タイプの反力モデルを用いた場合の解析結果の比較

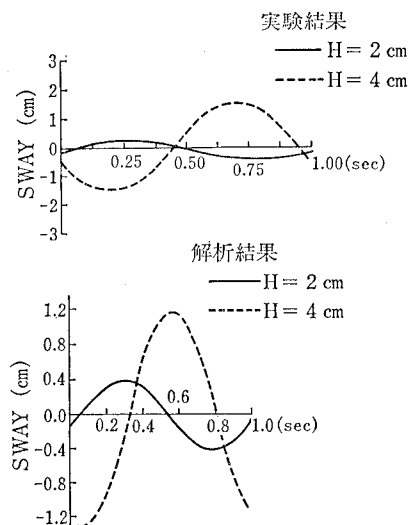


図-9 回転運動に対する水平運動の時間波形 (規則波)

相であるのに対し, 定反力変形時には, 大きな位相差が生じている。また, 水平運動の振幅も, 防舷材の変形が定反力領域に達し, 係留力が頭打ちとなるため, 2倍以上に大きくなっている。解析結果は, このような非線形係留力が浮体の動揺に及ぼす影響をよく表していると判断できる。したがって, 防舷材反力モデルとしては, モデル3が妥当であり, これを用いて不規則波浪に対する解析を行うことにした。

(4) 浮体の不規則波浪動揺と非線形係留力特性

図-10 は, 護岸で波が完全に消波される場合の不規則波による浮体の動揺と係留力の時系列を実験結果と解析結果とで比較したものである。図-10 によると実験結果と解析結果はよく一致しており, 浮体の動揺と係留力を本解析法により精度よく推定できることが判る。図-11 は, 護岸模型前面に設置した浮体に不規則波が作用した場合の動揺と係留力の時系列の実験結果と解析結

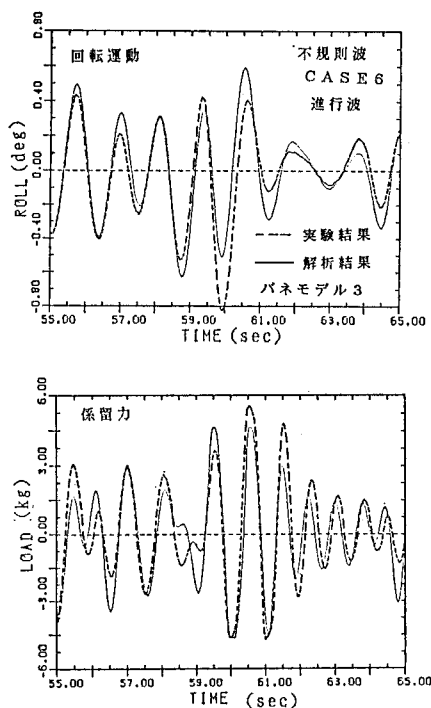


図-10 実験結果と解析結果の比較 (護岸で完全消波)

果を比較したものである。図中、破線が実験結果、実線と点線が解析結果であり、実線が波強制力と造波抵抗力の遅延関数に、図-6 に示した護岸反射率の周波数特性を考慮した場合、点線が護岸反射率を周波数に関係なく一定に与えた場合である。図-11 では、浮体背後への透過波の長周期成分が小さいため、護岸反射率の与え方の違いによる解析結果の差異はほとんど認められないが、透過波が大きくなると反射率の周波数特性を考慮した方が動揺解析の精度が向上すると考えられる。実験結果と解析結果の一致は良好であるが、係留力の時間波形の位相が若干ずれている。この原因としては、護岸境界での反射波の折り返し位置 (図-1 の $x=-R$) が実験では若干岸側へずれていると考えられている。図-11 によると、本解析法により、任意の反射率を有する護岸で波が反射される場合でも、浮体の動揺と係留力を精度よく推定できると判断される。

5. まとめ

本研究により得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- ① 遅延関数を用いた時刻歴法による浮体の不規則波浪動揺の解析結果は、線形外力のみを作用させた場合、周波数応答関数の逆フーリエ変換法による結果とよく

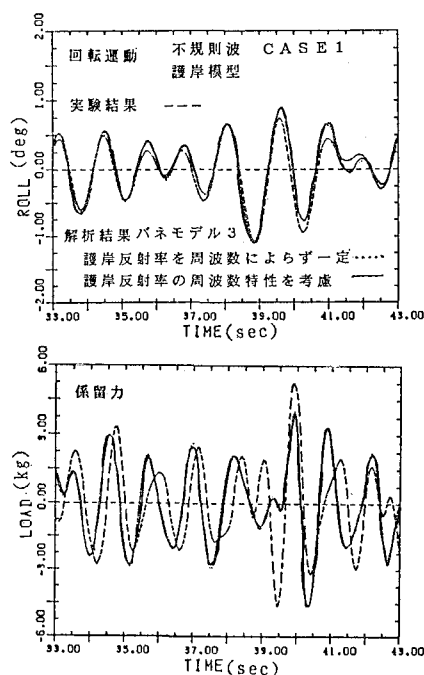


図-11 実験結果と解析結果の比較 (護岸反射を考慮)

一致し、両解析法による有意な差異は認められない。

- ② 半閉鎖水域での造波抵抗力の遅延関数と波強制力の計算に、護岸境界での反射率の特性を考慮した方が、浮体の不規則波浪動揺をより精度よく評価することができる。
- ③ 防舷材模型の静的荷重試験と波浪外力による動的荷重試験の結果を考慮すると、載荷・除荷反転時に定反力域変形量に比例したヒステリシスロスを与える反力モデルの方がより妥当な動揺推定結果が得られる。

参考文献

- 池野正明・平口博丸・鹿島遼一 (1989): 共振周波数成分を含む不規則波による大型浮体の動揺特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 764~768.
- 池野正明・平口博丸・鹿島遼一 (1990): 浮揚式発電所の不規則波浪による動揺と係留の安定性評価—防舷材反力の履歴を考慮した2次元解析手法の開発—, 電中研報告 (印刷中).
- 井島武士・吉田明徳・山本督夫 (1978): 任意断面浮体の2次元係留運動と波の変形, 土木学会論文集, 第202号, pp. 53~63.
- 上田 茂・白石 悟 (1983): 係留船舶の動揺計算法とその評価, 港研報告, 第22巻, 第4号, pp. 181~217.
- 清川哲志・平山彰彦・高梨和光・小林 浩 (1983): ハイブリッド型境界要素法による任意反射率防波堤前面の船体動揺解析, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 450~454.
- Cummins, W. E. (1962): The Impulse Response Function and Ship Motions, Schiffstechnik, Bd. 9, Heft 47, pp. 101~109.