

多方向不規則波・変動風作用下における複数プラントの 動揺と非線形係留力の予測

池 野 正 明*・鹿 島 遼 一**

1. はじめに

本研究では、より現実的な浮揚式発電所の設計問題に対応できる波浪動揺評価手法を確立するため、これまで開発してきた解析モデル(池野ら, 1990; 1992a; 1992c)をさらに改良・統合することにより、多方向不規則波・変動風作用下における非線形係留力の特性を考慮した複数プラントの動揺解析法を開発し水理模型実験により解析手法を構成する各部分モデルの適合性を検証する。ついで、厳しい設定外力条件下における荒天時のプラント動揺量と係留力を本解析手法により評価する。

2. 浮体の動揺シミュレーション手法

図-1のように座標を定義して、不規則波浪中における複数浮体の動揺問題を扱う運動方程式は、Cummins (1962) や Oortmerssen (1976) が用いた時間領域の運動方程式を、浮体間の相互干渉を考慮して拡張すると、式(1)のように表わすことができる。

$$M_{jp} \ddot{x}_{jp}(t) + \sum_{p=1}^{Np} \sum_{j=1}^6 \{ a_{jpj'p'}(\infty) \ddot{x}_{j'p'}(t) + \int_0^t L_{jpj'p'}(t-\tau) \cdot \ddot{x}_{j'p'}(\tau) d\tau + C_{jpj'p'} \dot{x}_{j'p'}(t) \} + d_{jp} |\dot{x}_{jp}(t)| \dot{x}_{jp}(t) + R_{jp}(t) = f_{jp}(t) \quad (j=1 \sim 6, p=1 \sim Np) \quad \dots (1)$$

ここで、 t は時間、 f は周波数、 x_{jp} は浮体の運動変位の時系列であり、添え字 p は p 番目の浮体を表わし、添え字 j および j' は $1 \sim 6$ が各々 surge, sway, heave, roll, pitch, yaw に関する量である。 $\cdot$ と $\ddot{\cdot}$ は t に関する 1 階、2 階微分を表す。 M_{jp} は浮体の質量および慣性モーメント、 $C_{jpj'p'}$ は静的復元力係数、 R_{jp} は係留力、 d_{jp} は抗力係数、 $a_{jpj'p'}(\infty)$ は $f \rightarrow \infty$ における付加質量、 f_{jp} は波浪外力(波強制力)、 $L_{jpj'p'}$ は時間 $t-\tau$ における遅延関数である。 $L_{jpj'p'}$ は周波数領域での f における造波減衰係数 $b_{jpj'p'}(f)$ を用いて次のように表される。

$$L_{jpj'p'}(t) = 4 \int_0^\infty b_{jpj'p'}(f) \cdot \cos 2\pi f t df \quad \dots (2)$$

式(1)中で、外力波の波向情報は波強制力 f_{jp} のみに反映される。多方向不規則波による波強制力を、周波数

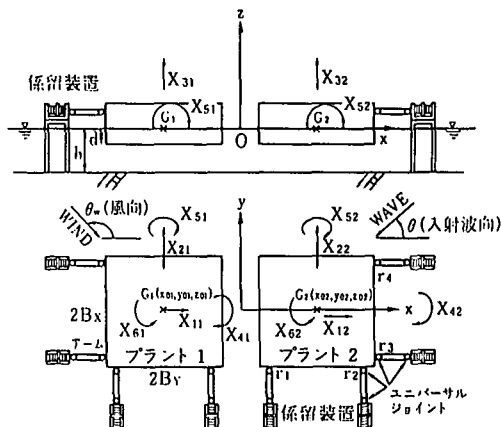


図-1 複数プラントの6自由度運動と座標系の定義(2基の場合)

と波向の異なる成分波の重ね合わせとして式(3)のように合成して算定する。成分波の合成法としては、比較的少ない成分数で効率よく妥当な解を得るため、シングルサンメーション法を用いる(池野, 1992a)。

$$f_{jp}(t) = \sum_j \sum_\theta F_{jp}(f, \theta) \cdot \cos(2\pi f t + \epsilon(f, \theta) + \psi_{jp}(f, \theta)) \quad (j=1 \sim 6, p=1 \sim Np) \quad \dots (3)$$

ここに、 $F_{jp}(f, \theta)$ および $\psi_{jp}(f, \theta)$ は周波数 f 、波向 θ の波強制力成分に対応する振幅および原点における水位変動に対する位相差であり、 $\epsilon(f, \theta)$ は $0 \sim 2\pi$ の間の一様乱数で定義される f, θ 成分の水位変動の初期位相である。本研究では、入射波の周波数スペクトルには Bretschneider-光易型スペクトルを用い、方向分布関数には光易型方向関数を用いる。さらに、係留水域に反射率の高い防波堤や護岸境界が存在する場合には、係留水域境界からの1次および2次反射波を対象に、直接浮体に作用する外力波との位相遅れと反射率を考慮した多方向波として式(3)の波強制力に追加する。

なお、紙面の都合上詳細説明は割愛するが、式(1)～式(3)中の $a_{jpj'p'}(f)$ 、 $b_{jpj'p'}(f)$ および $F_{jp}(f, \theta)$ および $\psi_{jp}(f, \theta)$ は、複数浮体の境界値問題を同時に満足するようにグ

* 正会員 工博 (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 我孫子研究所 参事

リーンの積分方程式を解くことにより計算する (池野・鹿島, 1993)。

つぎに、風圧合力 $P^w(t)$ は、船舶の風荷重の設計に準じて、次式を用いて計算する (上田, 1984; 沿岸開発技術研究センター編, 1991)。

$$P^w(t) = 1/2 \cdot \rho_a \cdot C_w (U + u(t))^2 \cdot (A_x \cos^2 \theta_w + A_y \sin^2 \theta_w) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ρ_a は空気密度 ($\rho_a = 1.23 \text{ kg/m}^3$)、 C_w は風抗力係数、 θ_w は風向および風圧合力の作用方向角である。

A_x および A_y はプラントの受風部分の x 軸および y 軸に直角な平面への投影面積である。 U は平均風速である。 $u(t)$ は変動風速成分であり、Davenport 型スペクトルを用いて逆フーリエ変換により計算する。本研究では、バージと同じ平面寸法で静水面上 30 m の高さの建て屋に鉛直分布が一樣な風速が水平方向に作用するとして風圧力を計算する。よって、プラントに風が作用する場合には、浮体の運動方程式 (1) 中の右辺に、風圧力の各運動方向成分 f_{pw} を追加して時刻歴解析を行う。係留力 R_{jp} は後で詳しく述べる防舷材反力の顕著な非線形性を考慮してモデル化する。

なお、本解析モデルは波漂流力等の非線形外力を取り込むこともできるが、その変動周期は波の周期に比べて長く、本研究で対象とする剛な係留系やプラントの固有周期から大きく外れており波強制力に比べて無視できる。

時刻 t における浮体の運動方程式 (1) を、複数プラント動揺の連成を考慮して、時間刻み Δt 毎に直接数値積分することにより、次の時刻 $t + \Delta t$ における 6 自由度運動を計算する。数値積分には Newmark- β 法を用いる。

3. 水理模型実験

長さ 35 m、幅 45 m、深さ 1.1 m の平面水槽と 48 枚の造波板から成る多方向不規則波造波装置を有する外洋施設波浪実験設備を用いて模型実験を実施した。模型縮尺は、フルードの相似則に従い 1/100 とした。浮体模型は箱型で平面寸法 142 cm × 142 cm、喫水 11.6 cm、設置水深 24 cm である。

著者らは既に係留系が線形な場合の計算手法を開発し 2 基プラント動揺の運動位相を含めた詳細な模型実験によりその妥当性を検証している (池野・鹿島, 1992c)。本研究では、係留系の非線形性が顕著な場合の動揺特性の検証に主眼を置き単一プラントを対象とした模型実験を行う。

浮揚式発電プラントではドルフィンリンク方式を想定している。この係留方式では、プラントの揺れを介して係留装置に作用する波・風荷重などの衝撃力を緩和する

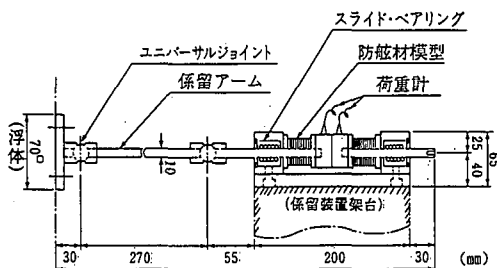


図-2 防舷材模型と荷重計の取付状況

ことを目的として、定反力型のゴム製防舷材が緩衝工として用いられる。図-2 に、ドルフィンリンク係留装置への防舷材模型と荷重計の取り付け状況を示す。防舷材模型は、設計に用いる定反力型防舷材の荷重・変位特性を模擬して、シリコンゴムで製作した。また、設計に用いる防舷材の 10 % 歪時割線剛性で反力・変位特性を線形化したバネ定数を有するコイルバネによる係留浮体の動揺実験も比較のため実施した。プラントへの入射波向は、模型の設置角度を変化させることにより対処した。

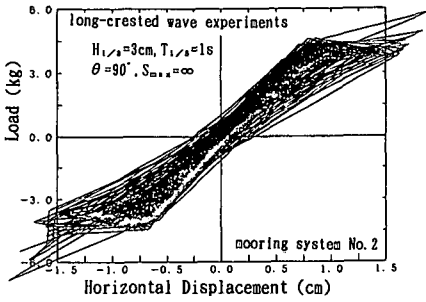
実験波は、規則波、一方向不規則波および多方向不規則波を用いた。規則波実験では、防舷材の反力・変位特性が非線形領域まで達する場合と達しない場合とを比較するため、周期を水平運動の共振周期付近の 0.9 ~ 1.1 s とし波高を 0.5 cm ~ 5.0 cm とした。不規則波実験では、有義波高を 3 cm、有義波周期を 1 s とし、光型型方向関数の方向集中度パラメータの最大値 S_{max} の値を 10、50 および ∞ (一方向不規則波) とした。

6 台のレーザ変位計を浮体に配置し、6 地点の変位データから剛体としての座標変換により浮体重心位置における 6 自由度運動成分を算出した (池野, 1992a)。1 チャンネル当りの実験データは、規則波実験では 0.02 s 刻みで 1024 個、不規則波実験では 0.05 s 刻みで 8192 個 (入射波 400 波分に相当) 計測した。

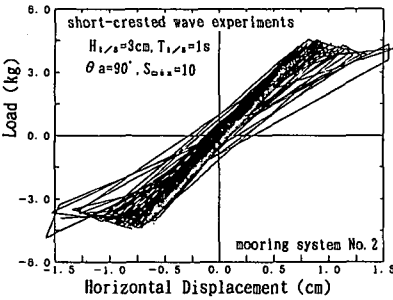
4. 多方向不規則波による 3 次元動揺量と非線形係留力特性

図-3(a) と (b) は、有義波高 3 cm、有義波周期 1 s、主波向 90° (プラントに直角入射) の一方向不規則波と $S_{max} = 10$ の多方向不規則波が作用する場合について、入射波進行方向の係留装置に取り付けた模擬防舷材反力の動的履歴曲線を比較したものである。防舷材反力と変形の履歴は、図-3 に示すように、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。

防舷材の最大変形量と最大係留力について、図 (a) と (b) を比較すると、防舷材の変形方向に入射波のエネル



(a) 一方向不規則波



(b) 多方向不規則波 $S_{max}=10$

図-3 不規則波が作用する場合の防舷材模型反力の動的履歴特性

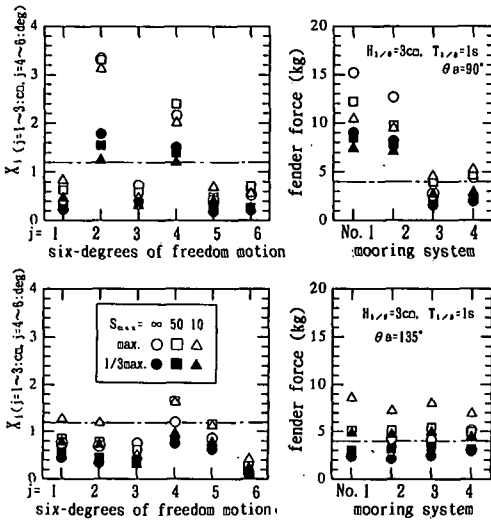


図-4 主波向きを変化させた場合の6自由度動揺量と係留装置4基の係留力の比較

させた場合の模型実験による6自由度運動と係留装置4基の係留力のゼロアップクロス法による最大値と1/3最大値を比較したものである。図中丸印が一方向不規則波、四角および三角印が多方向不規則波 ($S_{max}=50$ および 10) に対応している。防舷材反力は、図-3で示したように、防舷材の圧縮変形が0.6 cm (至 20%) で定反力領域に入るため、プラントの水平運動 X_1 あるいは X_2 の両振幅が1.2 cm、防舷材に加わる荷重の両振幅が4 kgを越えると非線形性の影響が現れる。図-4によると、プラントに直入射となる主波向き 90° の場合、一方向・多方向波とも水平動揺量 X_2 の1/3最大値が1.2 cm以上である。また、出合波となる X_2 と X_4 の動揺量と係留装置1と2の係留力に注目すると、最大値、1/3最大値とも一方向不規則波の方が上回っている。一方、プラントに斜め入射となる主波向き 135° の場合には、動揺量6成分と係留装置4基の係留力について多方向不規則波の方が上回っている。

5. 実験結果と計算結果との比較検討

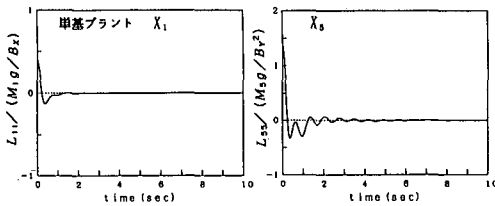
図-5(a)に、再現計算に用いる単一プラントの X_1 と X_5 に対応する遅延関数の代表例を示す。図中の縦軸の遅延関数は質量やプラント長さなどで無次元化して表示している。浮体の運動方程式(1)中の抗力係数 d_p は、設計に用いる防舷材の10%歪時割線剛性で反力・変位特性を線形化したバネ定数を有するコイルバネによる係留浮体の時刻歴解析結果が一方向不規則波実験により求めた伝達関数のピーク値に一致するように同定した。その他の計算条件の詳細は池野・鹿島(1993)を参照されたい。

また、図-3に示した非線形係留力の変形量に応じた線形バネ合成モデルとして前述の運動方程式(1)中の R_p に反映させる必要がある。そこで、係留力を2種類のバネ定数の合成バネでモデル化した。初期バネ定数 K_1 を4.0 kg/cm、反力が降伏し始める変形量 H_1 を0.6 cm (20%歪)、定反力領域のバネ定数 K_2 を0 kg/cm、防舷材が破壊し始める変形量 H_2 を1.5 cm (50%歪)に設定した。また、破壊変形量 H_2 を安全率1.2で割った値1.3 cm (42%歪)を防舷材の許容変形量(許容歪)に設定し設計基準の対象とした。

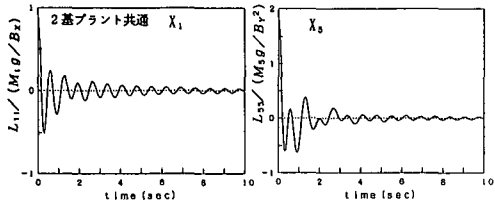
図-6は、水平運動の固有周期に近い周期1sの場合の3種類の入射波向の規則波について、入射波の波高とプラントの水平運動 X_2 の両振幅との関係を示したものである。図中、黒塗り印は時刻歴解析法による計算結果、白ぬき印は実験結果であり、丸印が波向 90° 、三角印が 112.5° 、四角印が 135° の場合である。波向 90° の場合の実験結果○は、 X_2 に対して出合波となるため非線形係留力の影響が顕著に現れており、 X_2 の両振幅が1.2 cmを越えると、水平動揺量が急激に増大している。次に、波向

ギヤが集中する一方向不規則波の方が、入射波エネルギーに方向分散性を有する多方向不規則波よりも若干大きい。紙面の都合上図面は割愛するが、本研究で対象とする防舷材の剛性が強く水平運動の固有周期は1sとなる。このため、係岸船舶について知られている周期10s程度の長周期動揺は励起されていない。

図-4は、プラントに作用する波浪の主波向きを変化

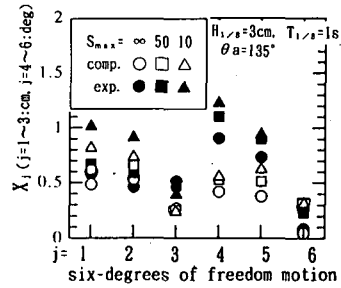


(a) 単一プラントの場合



(b) 2基プラントの場合

図一5 遅延関数の代表例



図一7 不規則波が斜め入射する場合の6自由度動揺量の1/10最大値の計算値と実験値

向不規則波 ($S_{max}=50$ および 10) に対応している。図一7によると、roll X_4 の値が実験値を下回るものの、方向分散性がプラントの6自由度成分に及ぼす影響を十分再現していると判断できる。

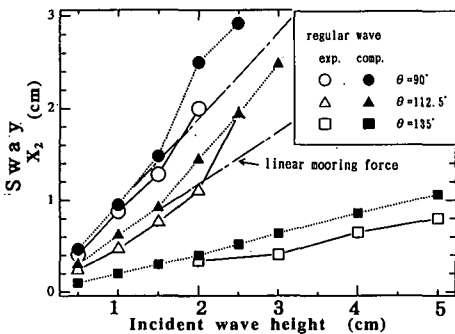
6. 波・風作用下における2基プラントの3次元動揺量と係留力の予測

(1) 計算条件

配置間隔 35 m に並置された浮揚式発電所 2 基を対象として、本解析手法により、波・風作用下における荒天時動揺量と係留力を検討する。外力条件は、平均風速 70 m/s、ガスト率 1.4 の変動風 U_1 と設計波クラスの外洋波が外郭防波堤により遮蔽された後に係留水域へ侵入し直接プラントに作用する場合の複合外力条件を設定する。

係留水域は、現時点ではその一部が開閉する場合と外郭施設により完全に閉鎖される場合とが有り得る。たとえば、完全に閉鎖されたとしてもマウンド部等からの透過波は係留水域への侵入を阻止できない。このため、外洋で 10 数 m 程度の波が外郭防波堤に作用した場合、係留水域内へは有義波高 1 m 程度は容易に侵入しプラントに直接作用することになる。係留水域への侵入波としては、多方向不規則波 W_1 (有義波高 2 m, 有義波周期 10 s, $S_{max}=10$) と一方向不規則波 W_2 (有義波高 1 m, 有義波周期 15 s, $S_{max}=\infty$) を設定し水域境界では多重反射しないものとする。また、前述の風圧力の計算式 (4) 中の風抗力係数 C_w は、矩形浮体に関する清宮 (1980) の研究を参考にして 1.2 とする。

ここでは、2 基プラントを対象とするため、浮体の運動方程式 (1) に取り込む波強制力と遅延関数には、2 浮体間の相互干渉効果を考慮している。図一5(b)に、2 基プラントの場合の X_1 と X_5 に対応する遅延関数の代表例を示す。6 自由度運動成分のうち、お互いに向かい合った運動方向となるプラント配列方向の水平変位 X_1 とそれに直行する水平軸回りの回転運動 X_5 に対応する遅延関数は、プラント間の多重反射波による相互干渉の影響を強く受ける (池野・鹿島, 1992c)。このため、単



図一6 入射波高と波向きを変化させた場合の X_2 の両振幅の計算値と実験値

112.5° の場合の実験結果 Δ では、プラントに直角に入射する場合ほど非線形係留力の影響は現れていないが、図中の一点鎖線で示す線形バネ係留の場合よりも水平動揺量が若干増大している。また、波向 135° の場合の実験結果 $\square$ は、本実験の入射波諸元の範囲で波高を増加させても、防舷材の変形が定反力領域まで達しなかったため線形バネ係留の場合と同様の特性を示している。なお、プラントの 6 自由度運動のうち水平運動以外の動揺成分は、波高や波向を同様に変化させても、線形バネ係留の場合と顕著な差異は生じず、計算結果と実験結果はよく一致した。

3 種類の波向に対応した時刻歴解析による計算結果は、実験結果のこれらの特性を精度よく再現していると判断できる。

つぎに、図一7 は、有義波高 3 cm, 有義波周期 1 s, 主波向 135° の不規則波が作用する場合の動揺 6 自由度成分の 1/10 最大値を計算結果と実験結果とで比較したものである。図中、白ぬき印が計算値、黒塗り印が実験値であり、丸印が一方向不規則波、四角および三角印が多

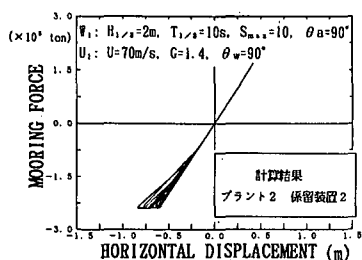


図-8 波・風作用下における係留力履歴の計算結果

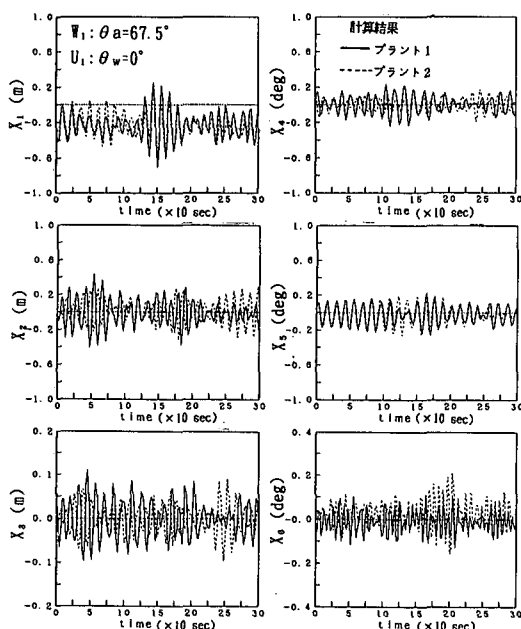


図-9 波・風作用下における2基プラントの動揺時系列の計算例

一プラントの場合の前出の図-5(a)と比較すると、図中の縦軸の値が2倍程度に増大している。図には示していないが、遅延関数の影響時間も20秒と長くなった。 X_1 と X_6 以外の運動成分に対応する遅延関数は、単一プラントの場合と顕著な差は生じていない。

(2) 予測結果と考察

図-8は、 W_1 主波向 90° 、 U_1 風向 90° の場合の外力作用方向の係留装置の防舷材反力・変位の履歴曲線である。また、図-9は、 W_1 波向 67.5° 、 U_1 風向 0° の場合の2基プラントの $X_1 \sim X_6$ の時系列のうち防舷材の変形が最大値を示す付近の時系列を出力したものである。図中、実線がプラント1、破線がプラント2に対応する。波向きと風向きを様々組み合わせた設定外力で検討した結果、外力条件に対する動揺量と係留力の最大値は波浪と風が同一方向から作用した場合に生じ、その場合でも防舷材変形量が1.3m(許容歪42%)以下、heaveが ± 0.5 m以

下、roll, pitch, yawが $\pm 1^\circ$ 以下となった。従って、設定した外力条件下では、浮揚式発電所の波浪外力に対する技術的成立性は高いと判断できる。

7. 結 論

以上、本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 遅延関数を用いた3次元時刻歴解析法は、規則波、一方向不規則波および多方向不規則波がプラントに斜めに作用する場合の動揺現象を十分再現できる。

(2) 浮体を複数並列した場合には、6自由度運動成分のうち、お互いに向かい合った運動方向となるプラント配列方向の水平変位と、それに直行する水平軸回りの回転運動には、浮体運動間の相互干渉効果が顕著に現れる。このため、この運動成分に対応する遅延関数と波強制力は、この影響を考慮して算定する必要がある。

(3) 係留水域への侵入波の有義波高が1m、風速が70m/s程度の複合外力が同一方向からプラントに作用しても、係留装置の防舷材の変形量が許容歪以下、heaveが ± 0.5 m以下、roll, pitch, yawが $\pm 1^\circ$ 以下となり、浮揚式発電所の波浪外力に対する技術的成立性は高い。

今後は、非線形性が強い津波等の長周期波作用下における浮体構造物の挙動を精度よく予測できる手法の開発とその設計法に取り組んでいく予定である。

参 考 文 献

- 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—, 電力中央研究所報告, 研究報告 U90039.
- 池野正明 (1992a): 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2—多方向不規則波浪場における3次元動揺解析手法の開発—, 電力中央研究所報告, 研究報告 U92023.
- 池野正明・丸山康樹・平口博丸・鹿島遼一 (1992b): 方向分散性を有する波浪による箱型係留浮体の動揺に関する研究, 土木学会論文集, 第447号/II-19, pp. 65-74.
- 池野正明・鹿島遼一 (1992c): 多方向不規則波による2基プラント動揺の相互干渉, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 806-810.
- 池野正明・鹿島遼一 (1993): 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3—複数浮体間の相互干渉を考慮した3次元動揺解析手法—, 電力中央研究所報告, 研究報告 U92043.
- 上田 茂 (1984): 係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技術資料, No. 504, 372 p.
- 沿岸開発技術研究センター編 (1991): 浮体構造物技術マニュアル, 115 p.
- 清宮 理 (1980): 海上風の性質とそれによる矩形浮体の動揺解析, 港湾技術研究所報告, 第19巻, 第2号, pp. 115-167.
- Cummins, W. E. (1962): The impulse response function and ship motions, Schiffstechnik, Bd. 9, Heft 47, pp. 101-109.
- Oortmerssen, G. van (1976): The motions of a moored ship in waves, N. S. M. B. Publication, No. 510, 138 p.