

多方向不規則波による2基プラント動揺の相互干渉

池 野 正 明*, 鹿 島 遼 一**

1. はじめに

浮揚式発電プラントなどの浮体を複数並置して係留する場合、浮体間の相互干渉効果により、単一浮体の場合よりも動揺量が増加する可能性がある。

Oortmerssen (1979) は、規則波を対象とし、3次元特異点分布法を用いた解析と模型実験により、2浮体間の相互干渉効果を検討している。また、久保・斎藤ら(1991)は、岸壁係留浮体についても2浮体の動揺特性を検討している。しかし、実際の海の波は多方向規則波であるため、この波により生じる2浮体の動揺に及ぼす相互干渉効果を適切に評価することが必要である。

本研究では、著者らの単一プラントの計算法(池野ら, 1992a; 1992b)を、2浮体間の相互干渉を考慮した浮体運動の応答関数を用いて拡張することにより、多方向不規則波による2基プラントの動揺計算法を開発し、これと模型実験とにより、プラントの配置間隔と相互干渉効果との関係を明らかにする。

2. 2基プラントの動揺計算法

(1) 2基プラント間の相互干渉を考慮した浮体運動の応答関数の算定法

本研究では、波浪外力と係留力の線形性を仮定して、まず、各成分波による2浮体運動の応答関数を算定する。算定手法は、境界要素法（直接法）による3次元解析法を用い、その詳細は久保・斎藤ら（1991）に譲る。

剛性浮体の 3 次元運動には、図—1 に示すように、6 自由度成分が存在し、 X_{jp} が浮体の運動変位とすると、添え字 j は 1~6 が各々 surge, sway, heave, roll, pitch, yaw に関する量である。また、添え字 p は図—1 に示す 1 と 2 のプラント番号を表す。プラントには、微小振幅波が x 軸の正方向から負の方向に、 x 軸と θ の角をなして入射するものとする。

(2) 多方向不規則波による動揺の計算法

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

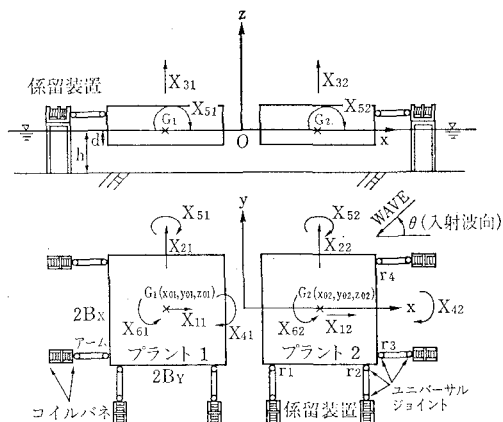


図-1 2基プラントの動揺6成分の定義

数を用いる.

波浪外力と保留力の線形性を仮定した場合、直接運動方程式を時刻歴解析する必要はなく、各成分波の周波数と波向に対応する規則波を作用させて算定した2基プラントの6自由度運動の周波数・波向応答関数と、入射波の複素フーリエ係数とを、位相を考慮してかけ算し、逆フーリエ変換法により合成して、動揺時系列を計算すればよい。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(SS法)を用いる(池野ら, 1992a)。

3. 水理模型実験

(1) 実験設備およびプラント模型

長さ 35 m, 幅 45 m, 深さ 1.1 m の平面水槽と, 48 枚の造波板 (全長 19.2 m) から成る多方向不規則波造波機を有する平面水槽を用いて, 縮尺 1/100 の模型実験を実施した.

プラントの係留方式は、図-1に示すように、ユニバーサルジョイントを有するドルフィンリンク方式による2辺係留とし、係留装置を1辺につき2基配置した。係留装置に用いる防舷材模型として、2種類のパネ定数を有するコイルパネを使用した。プラント模型の諸元を表-1に示す。

実験ケースの制約上から、プラントへの入射角とし

* 正會員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

正會員 工修 (財)電力中央研究所 水理部主席専門役

表-1 模型浮体の諸元 (2基プラント共通)

項 目		模 型	想 定 実 機
寸法（長さ×幅×喫水）		142×142×11.6（cm）	142×142×11.6（m）
全 重 量		233.8kg	233,800ton
静水面上の重心高さ		8.8cm	8.8m
重心回りの 慣性モーメント	I_x	$4.62 \times 10^5 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$	$4.62 \times 10^8 \text{ton} \cdot \text{m}^2$
	I_y	$4.73 \times 10^5 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$	$4.73 \times 10^8 \text{ton} \cdot \text{m}^2$
	I_z	$6.81 \times 10^5 \text{kg} \cdot \text{cm}^2$	$6.81 \times 10^8 \text{ton} \cdot \text{m}^2$
係留装置 1 基当たりの バネ定数		1.3kg/cm	1300ton/m （設計案の1/3）
		4.0kg/cm	4000ton/m （設計案）

て、浮体運動の6自由度成分が全て生じ、解析法の検証に都合のよいものを選定し、プラント模型を造波機に傾けて設置することにし、プラントへの入射角を 112.5° と一定した。また、プラントの配置間隔 (2基の浮体壁面間の距離) を 140 cm とした。

(2) 実験方法および実験条件

実験には、規則波および一方向・多方向不規則波を用いた。2浮体運動の応答関数を検証するための規則波実験では、波高を 1~2 cm 周期を 0.1 s 刻みで 0.8~2.5 s 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, 1.5 s, 2 s とした。造波機への造波信号は SS 法で作成し、512 個の成分波を重ね合わせて造波した。

プラント模型が無い状態で、星型アレーを配置して、実際に造波された波の方向スペクトルを検定し、光易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 ∞ (一方向波) と 3 種類に設定した。

2基プラントの運動位相も含めた検証データを取得するため、プラントの動揺の計測には、12台のレーザ変位計を使用した。1浮体につき6台のレーザ変位計を配置し、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 (G_1 と G_2) における6自由度動揺成分を算出した (池野ら, 1992a)。

実験データは1動揺成分当り、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. 2基プラント動揺の応答関数の特性

(1) 計算条件

浮体運動の周波数・波向応答関数の計算条件の詳細は、単一プラントの場合の報告 (池野ら, 1992a; 1992b) を参照願いたい。単一プラントの動揺解析では、3次元回折理論により得られる造波減衰係数をそのまま用いて応答関数を計算すると、6自由度運動のうち、 X_3 以外の動揺成分では、共振周波数付近の実験結果に対して計

算結果が過大応答だった。これは、解析法が完全流体場のポテンシャル理論に基づいているため、実際には箱型浮体の隅角部に発生する剝離渦や粘性の影響が共振時に無視できなくなることが原因である。2基プラントの場合も同様のことが予想されるため、単一プラントの動揺解析の際に同定した抗力係数を、造波減衰係数の理論値に加えて、応答関数を計算した。

(2) 2浮体運動の応答関数の検証

紙面の都合上、検討に用いる図面は、係留装置のバネ定数が 4 kg/cm と固いバネの場合に限定する。ここでは、解析により得られる動揺の応答関数の振幅と位相の検証に主眼をおいて議論を進める。図-2は、 X_{32} , X_{21} , X_{61} の応答関数の周波数応答倍率について、実験結果と解析結果とで比較したものである。図中、●印は規則波による動揺振幅を入射波高 H で割った実験結果、点線は一方向不規則波実験による動揺の伝達関数 (動揺の周波数スペクトルと模型設置予定地点の入射波の周波数ス

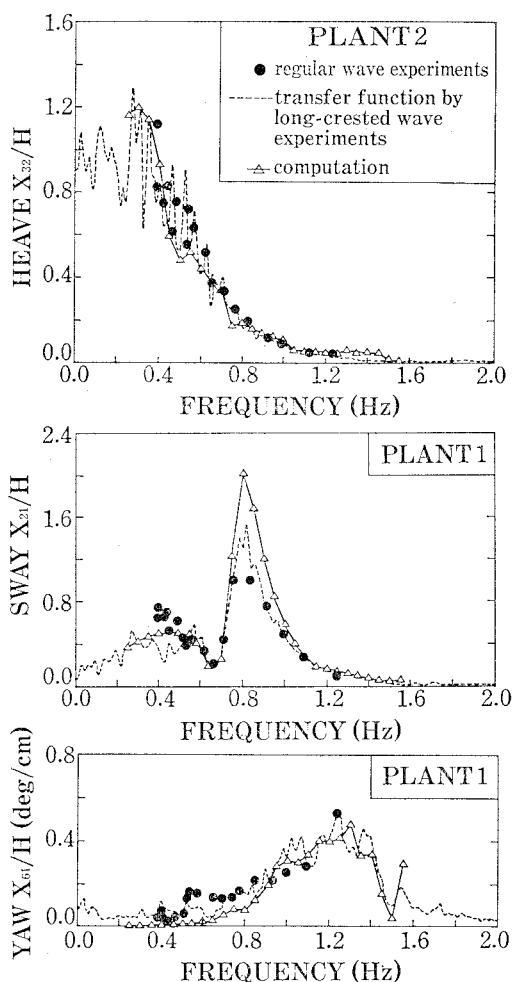


図-2 2基プラント動揺の周波数応答倍率

ベクトルの比の平方根), Δ 印は計算結果である。

規則波による実験結果と一方向不規則波実験による伝達関数とを比較すると両者はよく一致し, 本研究が対象とする波浪条件では, 不規則波による動揺に対し, 規則波成分波による線形重ね合わせが十分成立すると判断できる。実験結果と計算結果とを比較すると, 周波数応答特性は定量的にもよく一致している。図面は省略するが, X_1 と X_5 について, 計算結果は実験結果の周波数応答特性を再現するものの, 共振周波数付近で, 計算結果が若干過大応答になった。 X_1 と X_5 には, 2 プラント間の多重反射波による相互干渉効果が顕著に現れると考えられる。しかし, 実験では, 解析に考慮されていない浮体壁面付近の摩擦等により, 多重反射波が減衰し, 計算結果ほど顕著に相互干渉効果が現れていないと推察される。

図-3 に, X_6 について, プラント1に対するプラント2のフェイズの周波数特性を, 実験結果と解析結果とを比較したものである。図中, $\circ$ 印は規則波による実験結果, 一点鎖線は一方向不規則波実験による動揺のクロススペクトル解析から得られるフェイズ, 点線は計算結果である。規則波と一方向不規則波による実験結果同士を比較すると, 両者はよく一致している。また, 計算結果と実験結果とを比較すると, 位相の周波数特性はよく一致しており, 解析により得られた応答関数の振幅と位相は, 実際の現象をよく再現できると判断される。

(3) 動揺の応答関数に及ぼす相互干渉効果

図-4 に, 2 基プラントの配置間隔を 35 cm (プラント1辺の長さの 1/4 に相当), および単一プラントの場合の X_1 の周波数・波向応答関数の振幅コンター図を示す。また, 図-5 に, X_5 の周波数・波向応答関数の振幅コンター図を示す。

図-4, 図-5 によると, プラントを2基配置した場合には, 単一プラントの場合に見られる共振周波数付近の応答値が増大している。また, 単一プラントの場合に

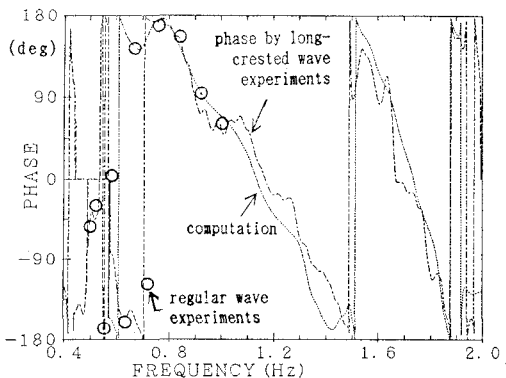


図-3 プラント2のプラント1に対する X_6 のフェイズの周波数応答特性

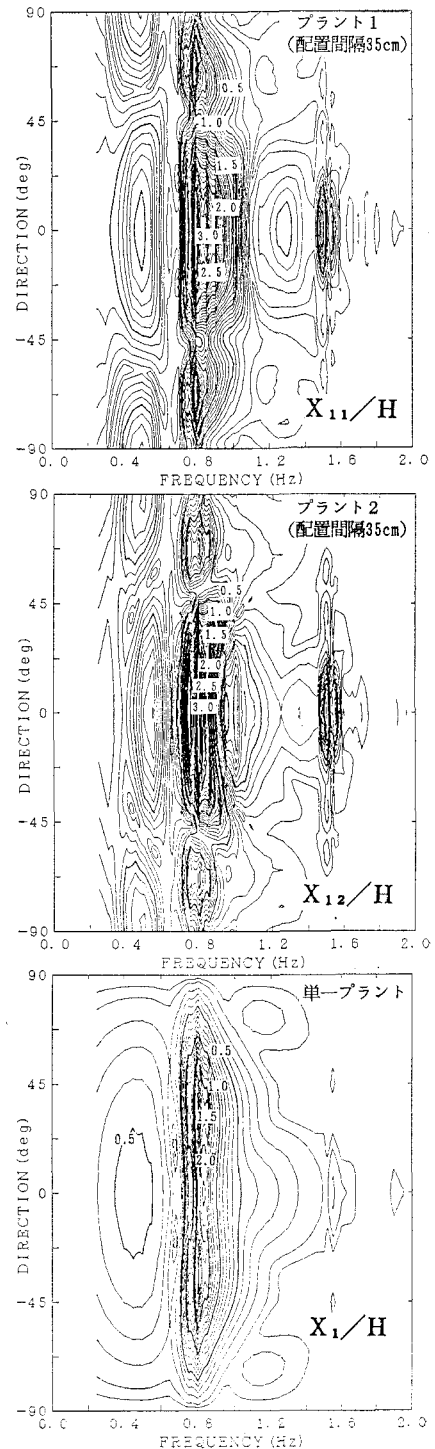
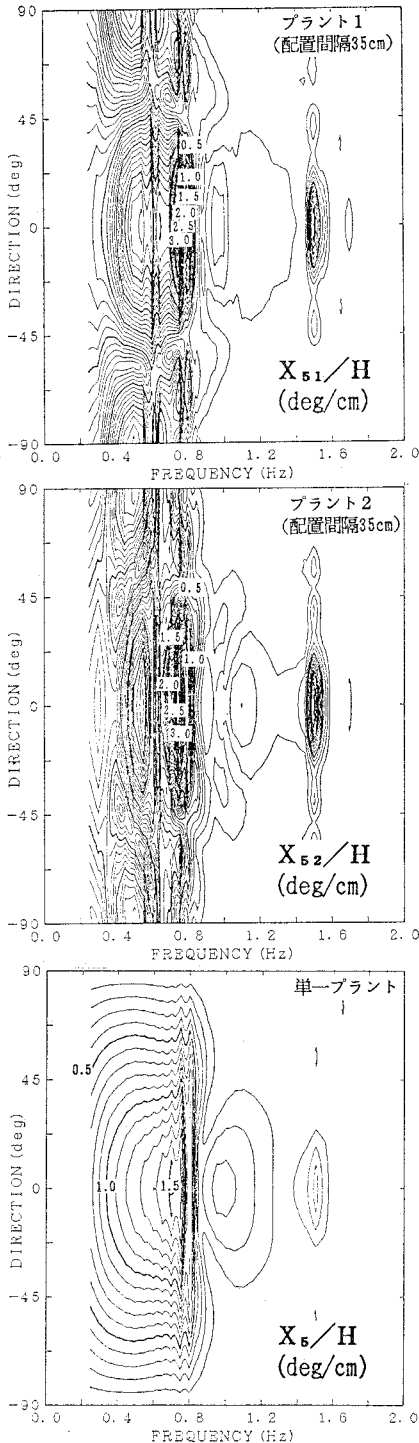


図-4 X_1 の周波数・波向応答関数の振幅コンター図

は見られなかった応答関数の新たなピークが現れている。なお, 図面は省略するが, X_1 と X_5 以外の動揺成分は, プラントを2基配置した場合と単一プラントの場合とで, 応答関数は若干異なるものの, 顕著な差は生じ

図-5 X_s の周波数・波向応答関数の振幅コンター図

ていない。

プラント動揺の相互干渉は、主に2プラント壁面間の多重反射波により引き起こされると考えられる。 X_1 と X_s は、プラント同士互に向かい合った運動方向となる動揺成分であるため、この多重反射波の影響を受け易

く、この場合は2基プラントの動揺量が、単一プラントよりも増大したと推察される。

5. 多方向不規則波による2基プラントの動揺特性

(1) 多方向波による2基プラント動揺の検証

計算条件の詳細は、単一プラントの場合と同様である。ここでは、多方向不規則波による動揺のパワースペクトルや2プラント動揺間のフェイズに関する特性量について、実験結果と本手法による計算結果を比較検討する。

図-6は、有義波高3cm、有義波周期1s、主波向 112.5° の場合、 $S_{max}=10$ の多方向波による X_{21} と X_{42} のパワースペクトルについて、実験結果と計算結果とを比較したものである。図中、実線は、動揺のパワースペクトルの期待値 (expected) (池野ら, 1992a)、点線はSS法による計算結果をFFT解析した結果 (estimated)、一点鎖線は実験結果 (experiments) である。点線の計算結果と一点鎖線の実験結果は、15個の近傍周波数を平均するため、Hanningのスペクトルウィンドウを40回施している。この場合、パワースペクトルの推定値には、期待値の25%の統計誤差が含まれることになるが、計

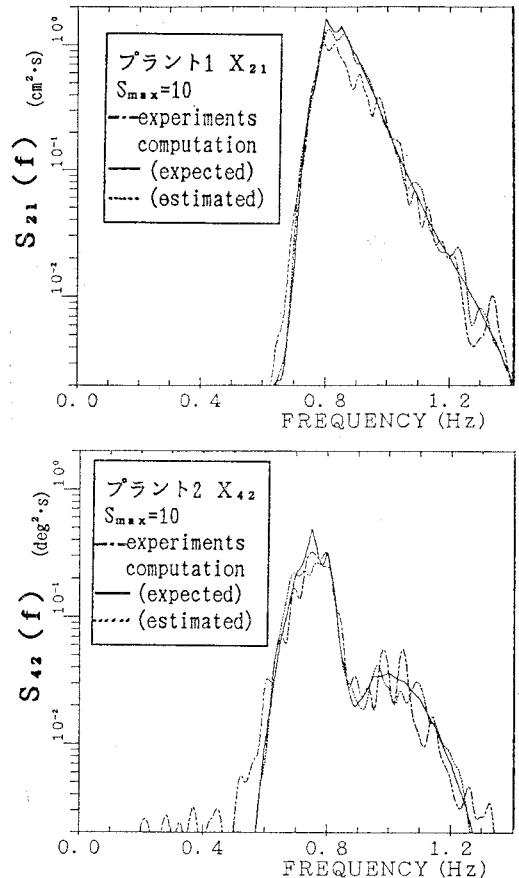


図-6 多方向波による動揺のパワースペクトル

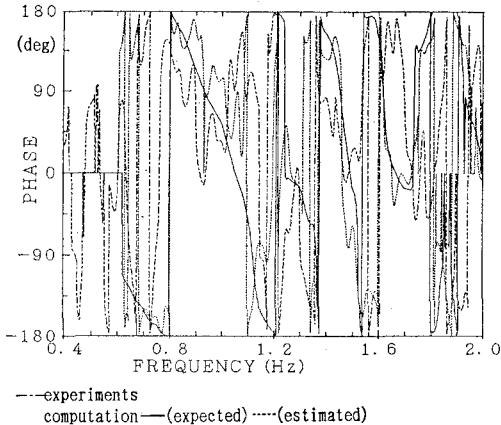


図-7 多方向波によるプラント2のプラント1に対する X_6 のフェイズ

算結果と実験結果との差は統計誤差の範囲内にあると判断され、本手法は多方向波による動揺のパワースペクトルの実験結果をよく再現している。

図-7 は、同様の波浪条件の $S_{max}=10$ の多方向波による X_6 について、プラント2のプラント1に対するフェイズの実験結果と計算結果とを比較したものである。図中、実線は動揺のフェイズの期待値(池野ら, 1992a)、点線はSS法による計算結果をFFT解析した結果、一点鎖線は実験結果である。点線の計算結果と一点鎖線の実験結果は、コスペクトルおよびクオドラチャスペクトルに、Hanningのスペクトルウィンドウを40回施している。推定値には、統計誤差が含まれるものの、本手法は多方向波による動揺のフェイズの実験結果をよく再現していると判断できる。

(2) 不規則波による動揺に及ぼす相互干渉効果

ここでは、単一プラントおよび配置間隔140 cmと35 cmの場合の2基プラントの計算結果について、動揺時系列をゼロアップクロス法により波列解析し、有義値(1/3 最大値)を比較することにより、不規則波による動揺に及ぼす相互干渉効果を検討する。

図-8 は、有義波高3 cm、有義波周期1 s、主波向 90° の不規則波が作用する場合の6自由度運動の有義値の計算結果を比較したものである。この場合の作用波は、2基プラントに対称な入射条件となるため、プラント1とプラント2の動揺量は同一となる。図中、白ぬき印が一方向波($S_{max}=\infty$)、黒塗り印が $S_{max}=10$ の多方向波の場合に対応し、 $\odot$ と $\bullet$ が単一プラント、 $\triangle$ と $\blacktriangle$ が配置間隔140 cmの2基プラント、 $\square$ と $\blacksquare$ が配置間隔35 cmの2基プラントの動揺量を表している。

まず、一方向波が作用する場合について、単一プラントと2基プラントの動揺量を比較すると、2プラント間の多重反射波による相互干渉効果は、プラント同士互いに向かい合った運動方向となる X_1 と X_5 について顕著

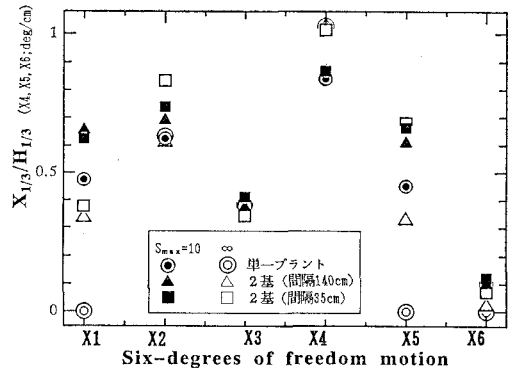


図-8 ゼロアップクロス法による6自由度運動の有義値

に現れ、動揺量が単一プラントよりも増大している。また、配置間隔が小さくなるに従い動揺量が增大している。これに対し、 X_2, X_3, X_4, X_6 の動揺成分は、単一プラントの動揺量と顕著な差は生じていない。つぎに、多方向波が作用する場合について、単一プラントと2基プラントの動揺量を比較すると、一方向波の場合と同様に、2基プラントの X_1 と X_5 の動揺量は、単一プラントよりも増大しているが、一方向波の場合よりも、両者の差が小さくなっている。また、 X_2, X_3, X_4, X_6 の動揺成分は、単一プラントの動揺量と顕著な差は生じていない。図面は省略するが、その他の主波向の入射波が作用する場合も同様の特性を示した。

6. おわりに

2基プラント動揺の相互干渉効果は、6自由度運動のうち、互いに向かい合った運動となるプラント配列方向の水平変位 X_1 とそれに直交する水平軸回りの回転 X_5 について顕著に現れ、動揺量が単基の時よりも増大することが明かとなった。また、提案した2基プラントの動揺計算手法は、実験水槽での動揺現象を精度よく再現できることを示した。

最後に、数値計算には、御電力計算センターの大西浩史氏の協力を得たことを付記して謝意を表する。

参考文献

- 池野正明他 (1992a): 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 (1992b): 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.
- 久保雅義・斎藤勝彦・大音宗昭・芳田利春 (1991): 近接して係留された2浮体の波浪動揺に関する研究, 海岸工学論文集 第33巻, pp. 766-770.
- Oortmerssen, G. Van (1979): Hydrodynamic interaction between two structures, floating in waves Proc. of BOSS, 79 2nd Int. Conf. on Behaviour of Off-Shore Structures, Vol. 1, pp. 339-356.