

二方向波実験による長周期漂流力近似解法の検証

織田 幸伸*・小林 昭男**

1. 緒 言

渡海橋建設工事に代表される海洋工事の海域は、外洋に面した多方向波浪場であり、作業船は図-1に示すように、大型構造物の近傍に係留された状態で用いられる。作業船と構造物間の距離及び係留ラインを安全かつ合理的に設計するためには、多方向波中の長周期動揺解析を精度良く行う必要がある。長周期動揺の要因である長周期漂流力を多方向波浪場で解析するには、方向スペクトルにおける成分波の周波数間の干渉に加えて、方向間の干渉を考慮するため非常に複雑であり、実務的な幾つかの近似解法が提案されている(竹沢ら, 1989; Kim ら, 1989; 井上ら, 1992)。この近似解法は、周波数間の干渉に関しては、いわゆる Newman 近似(Newman, 1974)を用い、方向間の干渉に関しては、各々の方向成分波の定常漂流力を用いている。周波数及び方向に関する近似を行えば、解析の労力は著しく減少するが、その一方で、動揺量を小さめに評価する指摘(宮島ら, 1993; Chen, 1994)がある。また、本論の研究対象、すなわち、浮体近傍に構造物が存在する場合には、長周期漂流力が周波数により大きく変化する場合があります(織田ら, 1994)、Newman 近似の誤差が大きくなる要因(Faltinsen, 1990)と一致するため、前述の近似方法の適用性を議論する必要がある。そこで本研究では、海洋工事を想定した係留浮体の多方向波中長周期漂流力に関して、周波数及び方向間の近似の妥当性を数値解析及び模型実験により検討し、長周期動揺解析に対する適応性を論じる。

2. 模型実験

実験は、実際の渡海橋基礎工事を想定し、円筒型橋脚(以後、構造物と呼ぶ)の背後にバージ作業船(以後、浮体と呼ぶ)が8本の係留チェーンによって係留されている状態を想定して行った。浮体模型(長さ150×幅40×高さ20 cm)と、構造物模型(直径73 cm)の配置は、構造物間の流体力学的相互作用を考察するため、構造物と浮体間の距離 l をパラメータにし、 $l=\infty, 20, 30$ cm とした。

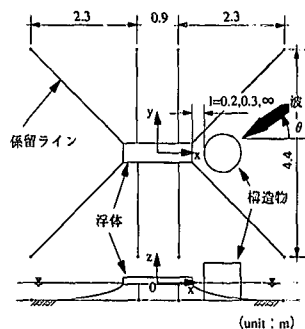


図-1 模型配置と座標系

ここで、 $l=\infty$ とは、構造物のない場合を示す。水深は80 cm, 浮体喫水は5 cm であり、模型の配置と座標系は、図-1に示す通りである。また、波強制力は、浮体を計測台車に三分力計を介して固定して計測した。実験に用いた入射波は、方向間及び周波数間の干渉を中心に論じるため、多方向不規則波の構成要素としてもっとも基本的な、一方向及び二方向の二成分波とした。

3. 数値解析

(1) 長周期漂流力

長周期漂流力 $F^{(2)}$ は、Pinkster (1980)の示した近流場法の圧力積分により求める。 i 方向の周波数 ω_i の波と、 j 方向の周波数 ω_j の波の干渉によって誘起される漂流力 $F_{ikl}^{(2)}$ は、次式のように表される。

$$F_{ikl}^{(2)} = -\frac{\rho g}{4} \int_{C_w} \eta_{ik}^{(1)} \eta_{jl}^{(1)*} dC_w + \frac{\rho}{4} \iint_{S_0} \nabla \phi_{ik}^{(1)} \nabla \phi_{jl}^{(1)*} n dS \\ + \frac{i\rho\omega_{ij}}{4} \iint_{S_0} x_{ik}^{(1)} \nabla \phi_{jl}^{(1)*} n dS + \frac{m\omega_{ik}^2}{2} (x_{ik}^{(1)} \times x_{jk}^{(1)*}) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、二次のポテンシャルの影響は省略した(Faltinsen ら, 1979)。ここで、 η_R : 一次波面上昇量、 n : 外向き法線ベクトル、 ϕ : 速度ポテンシャル、 C_w : 水線、 x_c : 浮体重心の変位、 x_R : 浮体の回転ベクトルをそれぞれ表す。また、 $(^{(1)})$ は線形解析によって得られた変量であることを示している。なお、線形解析には、三次元特異点分布法を用いた。

* 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所 海洋水理研究室

** 正会員 工博 大成建設(株)技術研究所 海洋水理研究室

多方向不規則波の場合、入射波に対して、この $F_{ijk}^{(2)}$ を、方向、周波数全ての組み合わせについて足し合わせを行うことにより、その長周期漂流力を求めることが出来る。これにより求められた、漂流力の計算結果をここでは厳正解と呼ぶこととし、以下に示す近似解法と比較する。ただし、厳正解の精度については、実験値との比較により検討した結果を後に示す。

(2) 長周期漂流力の近似解法

上述の厳正解を求める方法は、周波数間の干渉と、方向間の干渉を考慮するため、非常に複雑であり、実際の計算時間も多大になる。従って、なんらかの近似によって漂流力を表すことが出来れば、計算に必要な労力は著しく減少し、実務上、有効な解析方法となりうる。長周期漂流力の近似式としては、一方向波に対する近似式として、Newman 近似がよく知られている。これは、 ω_i と ω_j の波による長周期漂流力 $F_{ijk}^{(2)}$ を、規則波中の定常漂流力の平均 $(F_{ijk}^{(2)} + F_{jik}^{(2)})/2$ によって近似するものあり、入射波が狭帯域のスペクトルを持つときに、良い近似結果を示すことが分かっている (Faltinsen ら, 1979)。ここでは、この近似式を参考に、多方向波浪場に対する以下のような近似式を検討する。

まず、周波数間の干渉を近似し、方向間の干渉のみを考慮すると、近似式は次式で表せる (Kim ら, 1989)。

$$F_{ijk}^{(2)} = \frac{1}{2} (F_{iikl}^{(2)} + F_{jjkl}^{(2)}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

逆に、周波数間の干渉を考慮したまま、方向間の干渉を近似すると、近似式は次式で表せる。

$$F_{ijk}^{(2)} = \frac{1}{2} (F_{ijkk}^{(2)} + F_{ijll}^{(2)}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

次に上述の周波数間と方向間の両方の近似仮定を用いると、式 (2) および (3) より、次式が得られる。

$$F_{ijk}^{(2)} = \frac{1}{4} (F_{iikl}^{(2)} + F_{jjll}^{(2)} + F_{jjkk}^{(2)} + F_{iikl}^{(2)}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

これらの近似式を用いて数値計算を行う際にも、式 (1) を用いる。ただし、厳正解とは異なり、例えば式 (2) ならば、式 (1) の各成分のうち $k=l$ の場合のみを計算し、その結果を用いて漂流力を近似計算する。ここで、式 (1)～(4) による数値計算の計算時間について簡単に比較する。入射波が多方向不規則波である時、周波数、入射方向に関する分割数をそれぞれ m 、 n とすると、 $F^{(2)}$ の計算要素数は、表一1 のようになる。これによれば、周波数や入射方向の分割数を増やすと、式 (1) による計算時間は、式 (4) に比較して、その 2 乗に比例して増

表一1 近似式の計算要素数

計算式	式 (1)	式 (2)	式 (3)	式 (4)
要素数	$m^2 \times n^2$	$m \times n^2$	$m^2 \times n$	$m \times n$

加する。従って、これらの近似式の精度が補償されるならば、長周期動揺解析手法として、有効な手段となる。

4. 計算結果及び実験結果

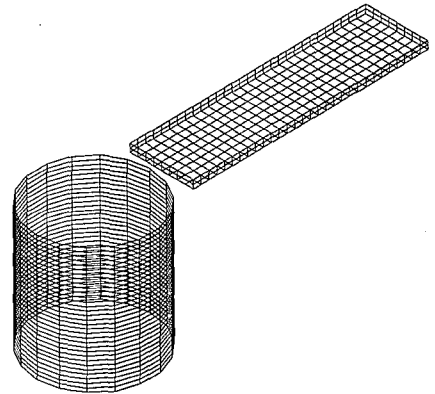
近似式による解析結果の妥当性を検討するため、厳正解の精度を実験値との比較により確認し、その後、厳正解と近似計算結果を比較する。

(1) 線形計算の精度

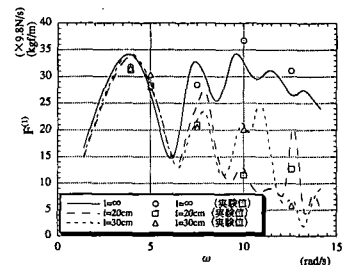
三次元特異点分布法による数値計算に用いた計算格子を図一2に示す。漂流力計算には、線形のポテンシャルや動揺応答の計算結果を用いるため、線形波強制力、流体力等の計算精度が計算結果に大きく影響してくる。図一3は、線形波強制力のサージ方向の計算結果と実験結果である。両者はよく一致しており、一次のポテンシャルの計算結果の精度は妥当であることが示された。

(2) 長周期漂流力の厳正解

図一4に、式 (1) によるサージ方向の漂流力の厳正解と、それに対する実験結果を示す。なお、以後の漂流力の計算結果は、実験結果と比較するために、一部を除いて、浮体を固定した状態、すなわち、動揺の効果を含まない条件での結果を示す。図一4は、 $\theta=0$ から入射する一方向波と、 x 軸に対して対称に $\theta=\pm 15$ 度または $\theta=\pm 30$ 度から入射してくる二方向波についての結果で



図一2 計算格子



図一3 線形波強制力 (サージ方向)

ある。 x 軸に $(\omega_i + \omega_j)/2$ をとり、 $\omega_i - \omega_j = 0, 1.0, 2.0$ (rad/s) の三種類について、それぞれ計算結果と実験結果を比較した。 $\omega_i - \omega_j = 0$ の定常漂流力の長周期側で、実験値が計算値から大きく外れる場合があるものの、その他の部分では、良く一致している。定常漂流力は、計測した力の平均値として得られるが、計測誤差を含み易く、計算結果と実験結果が一致し難いものと考えられる。

$\omega_i - \omega_j$ の違いによる影響は、主に長周期側にその違いが現れており、この領域は、入射波の波長 L の x 軸への投影長 $L^* = L \cos \theta$ が、浮体長よりも長くなることに相当している。その領域では、構造物による影響もほとんど現れていないことが分かる。 $\omega_i - \omega_j$ の違いによる影響は、後述する Newman 近似の精度にも大きく関わるが、入射波波長がこれに大きく関与していると考えられる。

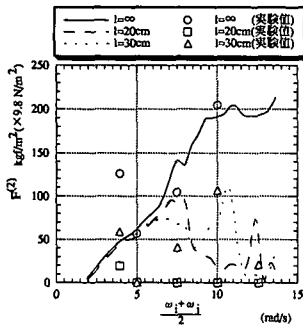
また、構造物の有無による影響は、主に短周期側に現

れ、構造物の背後に浮体を設置すると、浮体に働く漂流力は小さくなる。ただし、例えば図の (a) における $l = 30$ cm の 10.5 rad/s 付近や、 $l = 20$ cm の 12.5 rad/s 付近に、漂流力の大きくなる部分が、計算値、実験値ともに見られる。このとき、構造物浮体間距離 l は、入射波の波長のおよそ整数倍となっており、前述の浮体長の場合と同様、波長と構造物・浮体間の距離が、漂流力の大きさを支配する一つのパラメタとなっている。

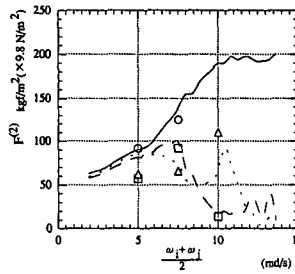
(3) 近似計算結果 (一方向二成分波)

式 (2)~(4) の 3 種類の近似式について、厳正解と比較検討することにより、その精度を検討する。

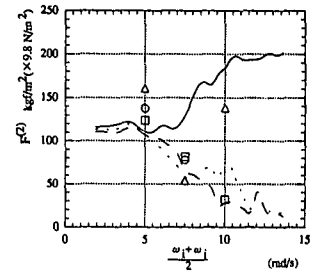
図-5 は、 $\theta = 0$ の方向から入射する、一方向二成分波の長周期漂流力の計算結果を、サージ方向について示したものであり、横軸に $(\omega_i + \omega_j)/2$ をとり、 $\omega_i - \omega_j$ をパラメタとして示している。ただし、式 (2)~(4) の近似式は、一方向波の場合には同じ結果を示すため、図中に



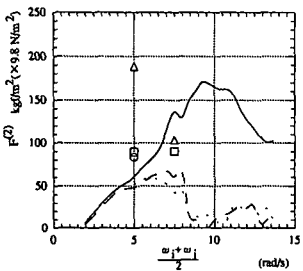
(a) $\omega_i - \omega_j = 0$ rad/s, 入射角 ± 0 度



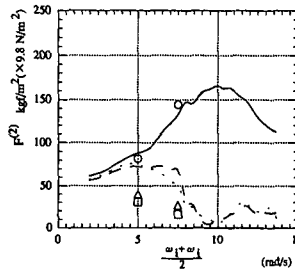
(b) $\omega_i - \omega_j = 1.0$ rad/s, 入射角 ± 0 度



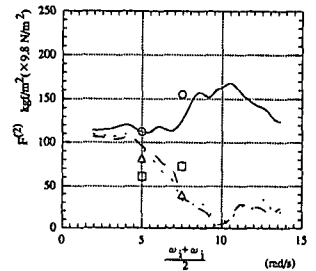
(c) $\omega_i - \omega_j = 2.0$ rad/s, 入射角 ± 0 度



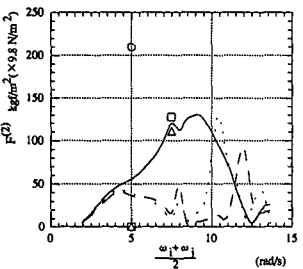
(d) $\omega_i - \omega_j = 0$ rad/s, 入射角 ± 15 度



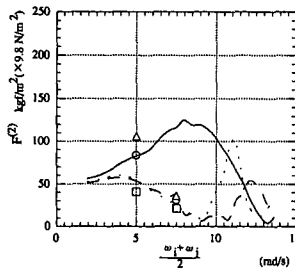
(e) $\omega_i - \omega_j = 1.0$ rad/s, 入射角 ± 15 度



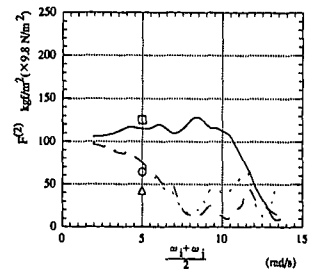
(f) $\omega_i - \omega_j = 2.0$ rad/s, 入射角 ± 15 度



(g) $\omega_i - \omega_j = 0$ rad/s, 入射角 ± 30 度



(h) $\omega_i - \omega_j = 1.0$ rad/s, 入射角 ± 30 度



(i) $\omega_i - \omega_j = 2.0$ rad/s, 入射角 ± 30 度

図-4 漂流力の計算結果と実験結果

は、式(4)として近似計算結果を一つだけ示した。なお、図の(c)には、(a)と同じ条件で、浮体の動揺を考慮した場合の結果を示している。

$(\omega_i + \omega_j)/2$ が 7.0 rad/s よりも高周波数側では、 $\omega_i - \omega_j$ や l の値に関わらず、厳正解と近似解はよく一致している。しかし、それよりも低周波数側では、 $\omega_i - \omega_j$ が

大きくなるほど、両者の値は離れることがわかる。ここでは、近似式は、式(1)の $i=j$ の結果のみを用いて、それ以外の値を近似しているが、高周波数側では、 $\omega_i - \omega_j$ の値による漂流力の変化はそれほど小さくなく、そのため近似式によって比較的精度良く近似できている。しかしながら、低周波領域では、 $\omega_i - \omega_j$ が大きくなると、漂

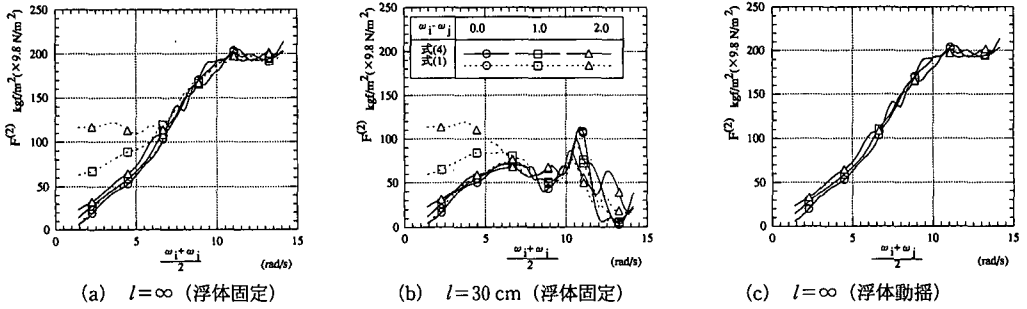


図-5 漂流力の近似結果 (一方向二成分波, 入射角 0 度)

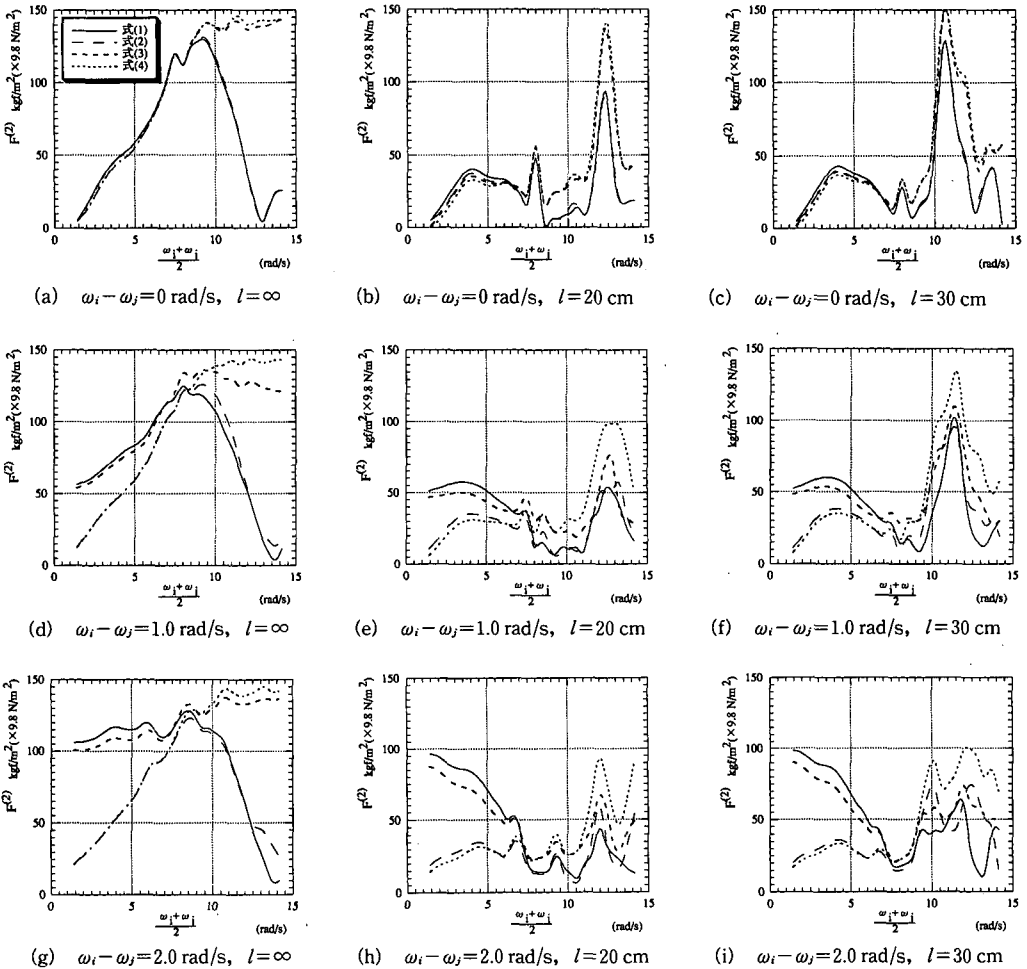


図-6 漂流力の近似結果 (二方向二成分波, 入射角 ± 30 度)

流力が大きくなる傾向にあり、そのため近似精度が悪くなる。ただし、(c)の図を見ると、浮体が動揺する場合には、この傾向は弱められ、Newman 近似の結果は厳正解の結果に近付くことが分かる。以上のことから、入射波が一方向波と考えられる場合には、周期の短い入射波に対して、近似式はよい結果を与えるが、比較的長周期の波に関しては、近似精度が悪く、実際の値よりも小さい結果となる。7.0 rad/s という値は、今回対象とした構造物の実スケールに直すと、およそ周期 10 秒の波となり、高波浪時にはそれよりも長周期の波が、入射波として来襲することが充分考えられる。従って、このような場合には、近似式の適用には注意が必要である。

(4) 近似計算結果(二方向二成分波)

多方向不規則波の長周期漂流力解析の基礎となる、二方向二成分波について、近似式の計算結果を厳正解と比較する。図-6 は、 $\theta = \pm 30$ 度の方向から、それぞれ ω_i , ω_j の波が入射したときの、サージ方向の漂流力を示した結果である。これらの図を見ると、一方向波の場合と同じく、 $(\omega_i + \omega_j)/2$ がおよそ 7 rad/s よりも高周波数側と低周波数側で、違った特徴を示している。

低周波数領域では、式(3)による、周波数間の干渉を考慮し、方向間の近似のみ行った計算結果が、厳正解を精度良く近似している。また、周波数間の近似を行った式(2)および(4)による計算結果は、厳正解とは乖離しながらも、互いに近接している。これは、漂流力は、入射波の周期が長く、波長が長くなると、波の入射角間の干渉の影響は小さくなり、周波数間の影響が支配的となる傾向を示している。また、式(3)の周波数間の干渉を考慮しない近似計算をすると、その漂流力の計算結果は小さくなり、この傾向は、一方向波の場合と同じである。

一方、周波数の高い領域では、式(2)による近似が、比較的良く厳正解を再現しているが、式(3)および(4)による計算結果は、概ね、厳正解よりも大きな値を示している。一般に、Newman 近似は、漂流力を小さく評価するが、方向間の干渉を近似すると、漂流力を大きく評価し、これらの特性は互いに相反するものである。

次に、構造物と浮体間の距離 l の影響を考える。周波数の低い場合には、構造物の有無によって漂流力の大きさは変化するが、近似解の適合の度合は、あまり変化しない。図-6(i)を見ると、周波数が高く、波長が短い場合には、周波数によって厳正解は複雑に変動している。これは、前述したように、 l と波長の x 方向への投影長さの関係によって、漂流力が大きく変動するためと考えられるが、近似式は、この厳正解の結果を忠実に表現出

来ていない。従って、波長が構造物浮体間の距離と比較して短い場合には、近似精度は悪くとなると考えられる。

5. 結 言

本研究で得られた、長周期漂流力の近似解に関する主な結論を、以下に示す。

1) 入射波が一方向波の場合、近似式は短周期の波に対してよい結果を与える。

2) 長周期の波では、周波数間の干渉の影響が大きく、方向間の近似のみを行った式(3)が、よい結果を与える。

3) 短周期の波に対しては、式(2)がよい近似結果を示し、方向間の干渉を考慮しない場合には、厳正解よりも大きな値を与える。

4) 浮体が構造物の近傍にある場合、波長が構造物浮体間の距離に比較して短くなると、近似式の精度は落ちる。

以上の様に、近似式を用いて漂流力を計算する場合には、入射波の周期や、波向き、構造物の大きさなどによって、厳正解、近似解の使い分けをする必要がある。

参 考 文 献

- 井上義行・薛 為一 (1992): 方向スペクトル波中の変動漂流力と長周期運動に関する数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第 172 号, pp. 27-34.
- 織田幸伸・小林昭男・増田光一 (1994): 大型海洋構造物近傍における係留作業船の長周期動揺特性, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 936-940.
- 竹沢誠二・小林顕太郎 (1989): 方向スペクトル波中における海洋構造物の応答—その 2 非線形応答—, 日本造船学会論文集, 第 166 号, pp. 139-150.
- 宮島省吾・趙 孝済・前田久明 (1993): 浮遊海洋構造物の長周期動揺特性に対する方向波の影響について(第一報), 日本造船学会論文集, 第 173 号, pp. 161-168.
- Chen, X. B. (1994): Approximation on the quadratic transfer function of low-frequency loads, Proceedings of 7th International BOSS Conference, pp. 289-302.
- Faltinsen, O. M. and A. E. Loken (1979): Slow drift oscillations of a ship in irregular waves, Applied Ocean Research, Vol. 1, No.1, pp. 21-31.
- Faltinsen, O. M. (1990): Sea loads on ships and offshore structures, Cambridge University Press publications.
- Kim, M. H. and DICK, K. P. Yue (1989): Slowly-varying wave drift forces in short-crested irregular seas, Applied Ocean Research, Vol. 11, No. 1, pp. 2-18.
- Newman, J. N. (1974): Second-order, slowly-varying forces on vessels in irregular wave, Proceedings of International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in waves, pp. 193-197.
- Pinkster, J. A. (1980): Low frequency second order wave exciting forces on floating structures, NSMB publications, No. 650, pp. 19-37.