

7 球形ブイの波による漂流速度について

谷澤克治, 南真紀子

海上技術安全研究所, 東京都三鷹市新川 6-38-1

井本泰司

海上保安庁水路部、東京都中央区築地 5-3-1

1 はじめに

近年、オイルタンカーやケミカルタンカーの荒天海域での折損事故が続発し、重大な海洋汚染を引き起こしている。例えばナホトカ号の事故による山陰地方の油汚染、エリカ号やイエポリサンの事故によるフランス沿岸の油汚染と有害化学物質被害等は、甚大な被害を沿岸地域に及ぼした。このようにタンカー等が荒天に遭遇して損傷すると、積み荷の流出により重大な海洋汚染を引き起こす。さらに、折損した船体が沿岸に漂着すると、沿岸の汚染を拡大する恐れがある。荒天による海難事故を防止するためには船舶の強度評価を厳密にし、基準を満たさない老朽船舶を排除することが肝要であるが、万一事故が発生した際には、迅速な救助活動を行う事が人命救助ならびに環境被害を最小限に留めるために極めて重要である。

海難事故に適切に対処するためには、航行不能な状態に陥った船舶に作用する波漂流力や、漂流姿勢、漂流速度等を正確に推定し、曳船に必要な馬力推定と漂流経路予測を行わなければならない。そこで海上技術安全研究所では平成10年度より特別研究「荒天下における航行不能船舶の漂流防止法等に関する研究」を実施し、波漂流力に及ぼす波高の非線形影響、水深影響、浅海域での海底地形影響等について研究している。また、海上保安庁水路部（以下では水路部と記す）と共同で、波による漂流運動（漂流姿勢、漂流速度、漂流方向、漂流経路等）の推定法を研究している。水路部ではGPS装置を搭載した小型漂流ブイを観測船から投入して、その漂流経路をリモートで計測する実海域実験を実施している。これは水路部が開発・運用している浮体の漂流予測システムの検定と精度向上を目的とした実験である。本システムでは漂流予測に海流・潮流・吹送流を考慮しているが、今のところ波による漂流速度成分は微小として省略されている。しかし、波による漂流速度成分は必ずしも微小ではなく、漂流予測にはこの成分も考慮する必要がある。そこで、本

共同研究では小型漂流ブイの実物を用いて、水槽試験により波漂流速度の計測を実施し、規則波ならびに不規則波中での漂流速度を計測した。また、その解析結果から漂流速度の推定法を開発するための手掛かりを得た。以下にその概要を示す。

2 水槽試験の概要



Weight = 6.35 kg
Natural heave period = 0.70 sec
Natural roll period = 0.59 sec

Fig.1 小型球形漂流ブイ

水槽試験に用いた小型漂流ブイの写真ならびにその主要寸法を Fig.1 に示す。このブイは高さ方向に少し潰れた球形の浮体で、赤道部にあたる箇所に取り付けられたフランジで上下の半球を接合する構造になっている。下半球内部にはGPS受信器、位置通報用無線送信器、バッテリー等を収納し、上半球にはアンテナが納められている他は空洞である。底部に円筒形の足を有し、足の内側に喫水調節用の鉛の重りが取り付けられている。真水に浮いた状態での喫水線はフランジ部のすぐ下で、喫水は184mmである。このブイの浮体としての特性を把握するため動揺周期の計測を試みたところ、減衰が強い事とフランジ部の水面からの出

入りが障害となり厳密な計測が困難であったが、動揺周期の概ねの値は Heave が 0.7sec、Roll が 0.6sec であった。漂流速度はブイが基準線を通過する時間をストップウォッチで計測し、基準線間の平均速度として算出した。基準線は水槽幅方向に糸を引き渡してたもので、造波機から 7.6m の位置を原点とし、そこから波下側に 5m 毎に設けた。計測された平均漂流速度の区間毎の差は小さく、漂流速度は短時間で定常値に収束することが分かった。ただし、短波長の大振幅波中での実験では、砕波により造波機から離れるに従って波高が減少するため、漂流速度も減少する傾向にあった。試験では波高を造波機面の近く (5m の位置) に取り付けられた容量式波高計で計測した。そこで、本報では第一区間の平均速度をもって漂流速度とした。

次に、造波機で発生させた波について述べる。本試験では入射波として規則波と不規則波の両方を発生させ、漂流速度を計測した。水槽の造波機で造波可能な波長レンジは 0.5m から 10m である。Fig.2 に規則波の実験点を縦軸に波高 H_w 、横軸に波長 λ をとって黒丸で示す。図中の直線は波傾斜 1/12 の線で、これを越える点では砕波が発生したと考えると良い。荒天時の実海域では風浪が完全発達し砕波が頻発すると考えられるため、水槽実験においても波傾斜の大きな領域までカバーした。

規則波中での漂流速度を計測しただけでは不規則な実海面での漂流速度の推定には不十分であると考えられる。そこで、不規則波中での漂流速度の計測も実施した。波のパワースペクトルには ISSC スペクトルと呼ばれる Modified Pierson-Moskowitz 型の 2 パラメータスペクトルを用いた。ISSC スペクトルは有義波高 H_V と平均波周期 T_V を用いて

$$\Phi_{\zeta\zeta}(\omega) = \frac{0.11}{2\pi} H_V^2 T_V \left(\frac{T_V \omega}{2\pi}\right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T_V \omega}{2\pi}\right)^{-4} \right\} \quad (1)$$

で与えられる。この式は実海域の波浪スペクトルをモデル化している。水槽内にこの波スペクトルを再現するにはスケールダウンする必要があるので、水槽試験では平均波周期を 0.80sec (波長 1m 相当)、1.13sec (波長 2m 相当)、1.39sec (波長 3m 相当) と変化させて三つのスケールの不規則波を発生させた。平均波高 ($0.625H_V$) との組み合わせは、Fig.2 に白抜ききの四角形で示す通りである。参考の為、Fig.3 に水槽に発生させた平均波周期 1.13sec (波長 2m 相当) の不規則波のスペクトルを示す。

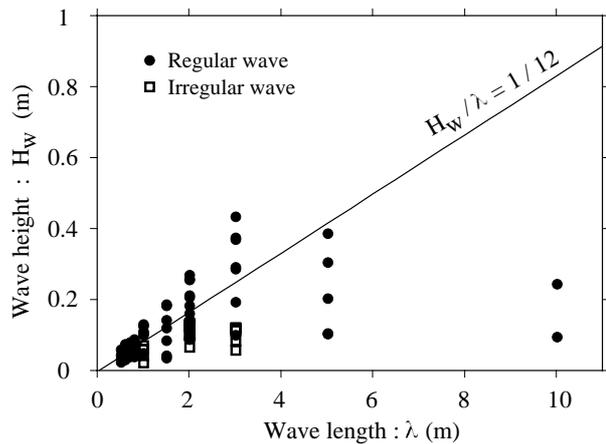


Fig.2 実験に用いた波

注) 不規則波については、波高は平均波高 ($0.625H_V$)、波長は平均波周期に相当する波長である。

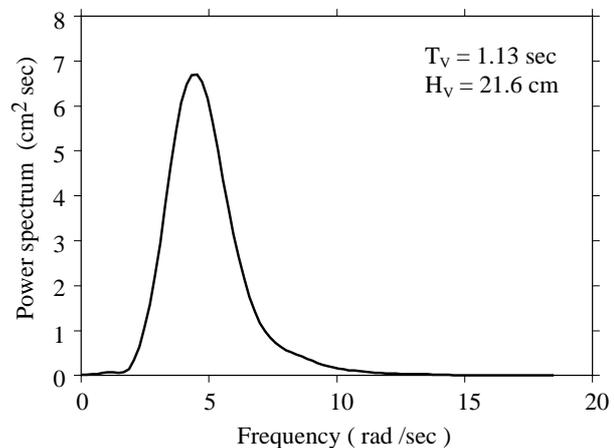


Fig.3 試験に用いた不規則波のスペクトル

3 水槽試験結果

まず、規則波中でのブイの漂流速度 V の計測結果を Fig.4-1, 4-2 に示す。図の横軸は波傾斜、縦軸は無次元化漂流速度 (フルード数, V/\sqrt{Dg}) である。ブイの代表寸法として球殻部の直径 $D = 304mm$ を用いた。図中の実線は実験値の回帰直線で、係数 a はその比例常数である。また、図中の破線は Stokes 波による自由表面での質量輸送速度である。

Fig.4-1 から、短波長域ではブイの漂流速度は概ね波高に比例して増加している事が分かる。また漂流速度は Stokes 波による自由表面の質量輸送速度よりも大きい。質量輸送速度は深さ方向に指数関数的に減少するので、短波長域では質量輸送によるブイの漂流速度成分は破線で示した値よりずっと小さいと考えられ

る。そこで、短波長域ではブイは主に波漂流力によって押し流されて漂流すると推測される。

一方、Fig.4-2 に示す波長 $\lambda = 2.0m \sim 10m$ のより長波長の範囲では、波長が長くなるに連れて、漂流速度が波高の自乗に比例して増加するようになり、 $\lambda = 5.0m$ では Stokes 波による自由表面の質量輸送速度にほぼ近い値になっていることが分かる。波長が長くなるにつれて波漂流力は小さくなるので、長波長域ではブイは波による質量輸送により運ばれると推測される。

このように Fig.4-1,2 に示す計測結果から、波による漂流メカニズムは短波長域と長波長域とでは異なっていることが示唆され、波による漂流速度の推定する

には両方の漂流メカニズムを考慮する必要があると考えられる。漂流速度の推定法については次節で論じることとし、本節では水槽試験で分かった他の事項について報告する。

まず、大波高時の漂流速度についてであるが、Fig.4-1,2 に示すように、波傾斜が $1/12$ 以上の碎波が存在する場合でも波高に対する比例関係が殆ど損なわれない事である。実験前には漂流速度は碎波により大きく影響を受けるものと予測していたが、碎波を伴う大波高中での漂流速度を計測してみると、評点間の平均漂流速度にとっては局所的な碎波はあまり大きな影響を及ぼさないことが分かった。

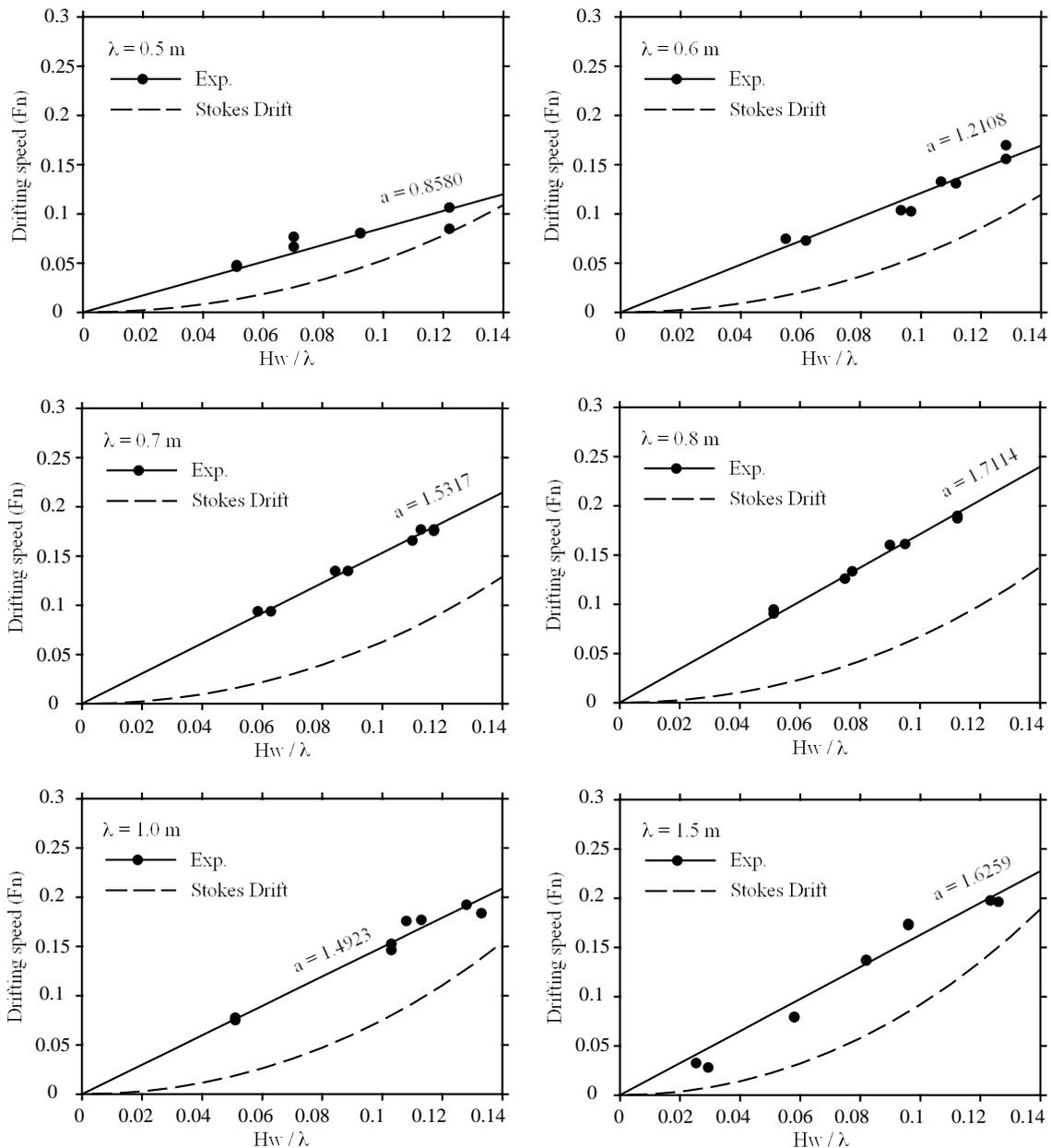


Fig.4-1 規則波中でのブイの漂流速度と波傾斜との関係 ($\lambda = 0.5 \sim 1.5$)

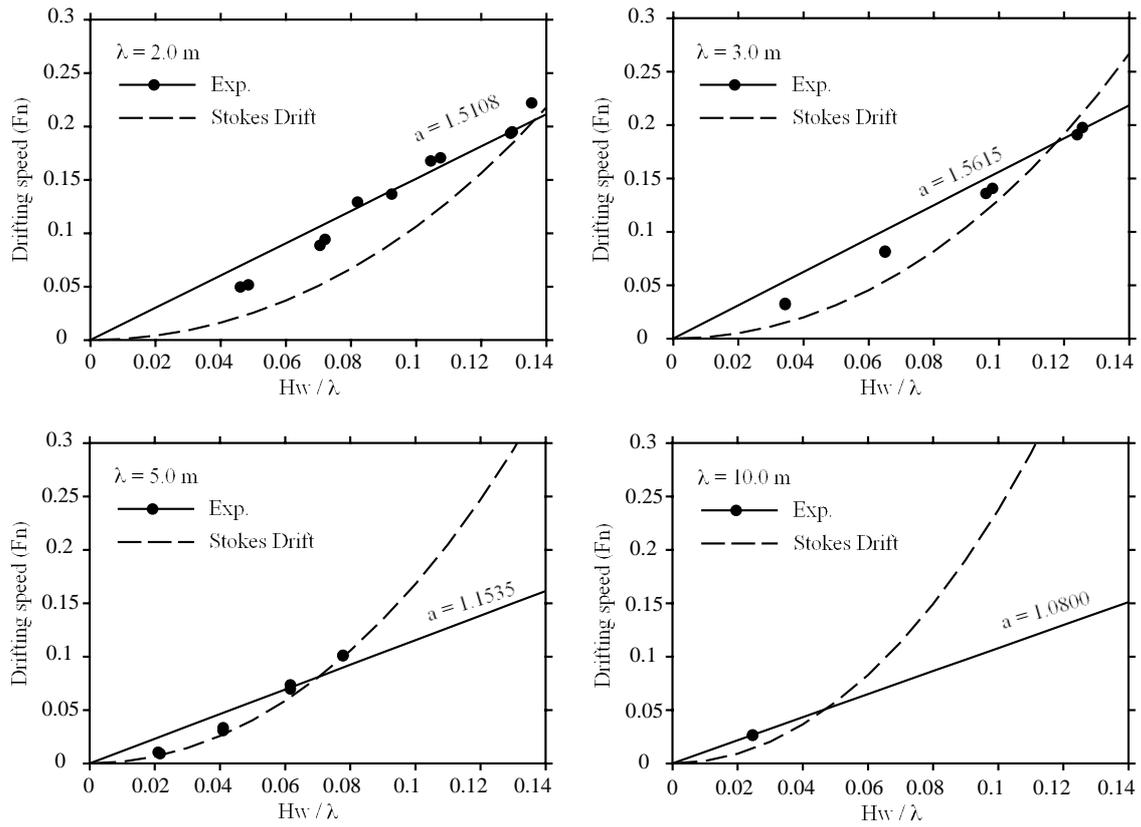


Fig.4-2 規則波中でのブイの漂流速度と波傾斜との関係 ($\lambda = 2.0 \sim 10.0$)

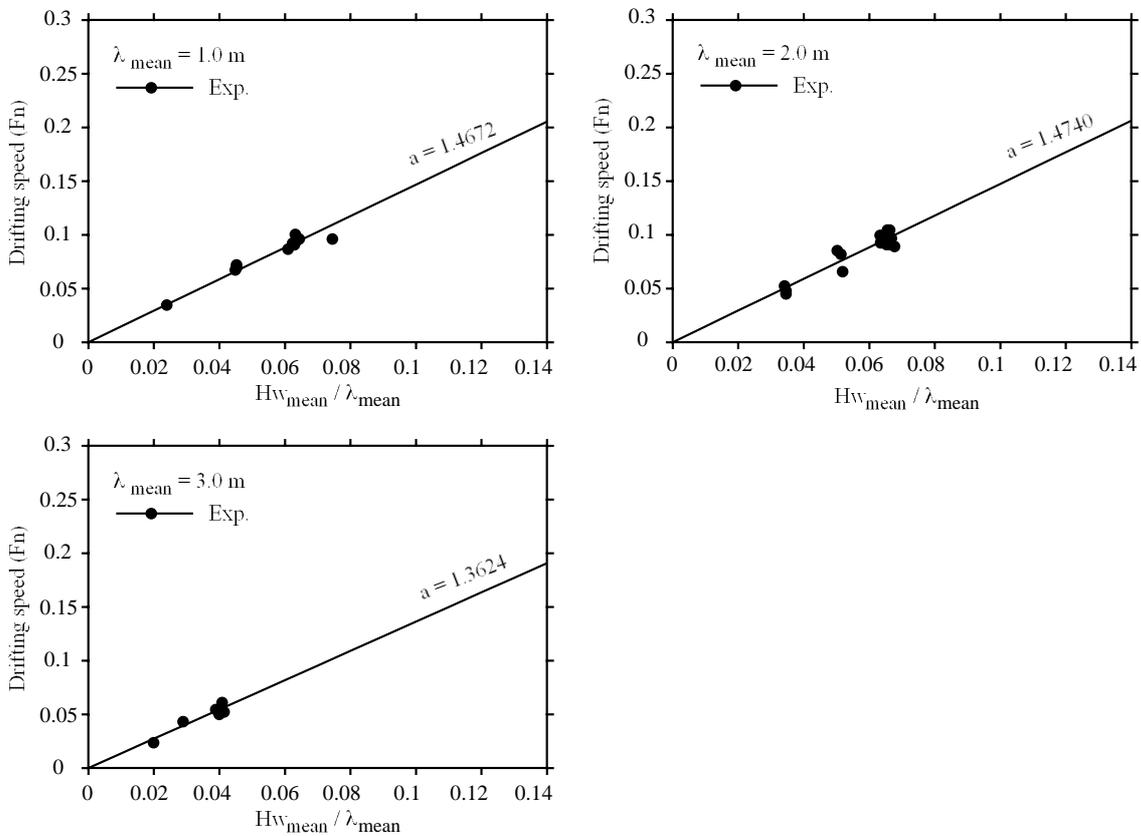


Fig.5 不規則波中でのブイの漂流速度と波傾斜との関係

次に不規則波中での漂流速度の計測結果について報告する。Fig.5は不規則波中でのブイの漂流速度を横軸に平均波傾斜、縦軸にFig.4と同じフルード数をとって示した図である。図から不規則波であっても、漂流速度は概ね平均波高に比例することが分かる。不規則波中の実験では、実験毎に異なる時系列信号を用いて造波している。よってブイが会う不規則波の時系列も実験毎に異なるが、漂流速度は揃っており、再現性の高い計測結果が得られた。

4 波による漂流速度の推定法

4.1 短波長域での漂流速度

前節で述べたように、短波長域では漂流速度は波高に比例する。これは、短波長域では漂流速度が波漂流力と流体抗力との釣り合いで決まるためと考えられる。波漂流力 F_W は波高の自乗に比例し、流体抗力 F_D は漂流速度の自乗に比例する。この関係を式で表すと

$$F_W = \frac{1}{8} \rho g D C_W H_w^2 \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A C_D V^2 \quad (3)$$

と書ける。ここで A はブイの水面下の投影面積、 C_D はブイの抗力係数である。また C_W は無次元化波漂流力で波数の関数である。両者の釣り合いから漂流速度を求めると、

$$\frac{V}{\sqrt{Dg}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_W}{AC_D}} H_w \quad (4)$$

となって漂流速度と波高との比例関係式が得られ、計測結果をうまく説明できる。そこで曳航試験やデータベース等により C_D の値を求め、さらに C_W を理論計算もしくは数値計算等で推定すれば、(4)式で漂流速度の推定が可能であると考えられる。本水槽試験に用いたブイの抗力係数をデータベース⁸⁾から推定して $C_D = 0.9$ とし、無次元化波漂流力を球に働く波漂流力³⁾で近似して漂流速度を推定した結果をFig.6に示す。図中の黒丸はFig.4-1,2に示した回帰直線の係数で、実線は(4)式によるその推定値である。推定値は短波長域で実験結果とよく一致していることが分かる。

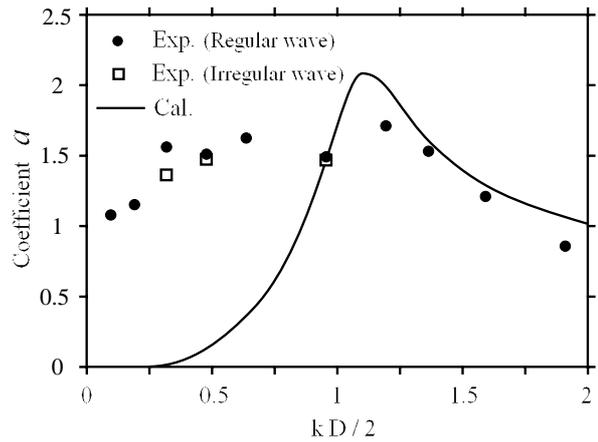


Fig.6 短波長域でのブイの漂流速度

4.2 長波長域での漂流速度

長波長域では波は浮体により殆ど散乱されず全透過するので、浮体に波漂流力は殆ど働かない。よって波漂流は波による質量輸送に起因するものと考えて差し支えないであろう。Stokes波による質量輸送速度 U は波傾斜を $\delta = H_w/\lambda$ として

$$U = c\pi^2\delta^2 e^{2kz}, \quad c^2 = \frac{g}{k} \left(1 + \pi^2\delta^2 + \frac{1}{2}\pi^4\delta^4 \right) \quad (5)$$

で与えられる⁷⁾。ここで c は Stokes 波の位相速度で、この高次項を省略して U をフルード数で表すと

$$\frac{U}{\sqrt{Dg}} = \frac{\pi^2\delta^2 e^{2kz}}{\sqrt{kD}} \quad (6)$$

となる。そこで、Fig.4-2に示した計測値を $b\delta^2 + a\delta$ で2次回帰して求めた2次の係数 b と(7)式で計算した理論値を比較してFig.7に示す。理論値は自由表面 $z=0$ とブイの半径相当の水深 $z=-D/2$ での値をそれぞれ細実線で示した。実験値は概ね両曲線の間挟まれている。そこで、浮体の漂流速度 V は波による質量輸送速度を浮体の投影面で積分して求めた平均速度で近似できると予想して

$$\frac{V}{\sqrt{Dg}} = \frac{\pi^2\delta^2}{A\sqrt{kD}} \int_A e^{2kz} ds \quad (7)$$

で計算すると、Fig.7に示す太実線が得られ、実験結果と良く一致する結果が得られた。

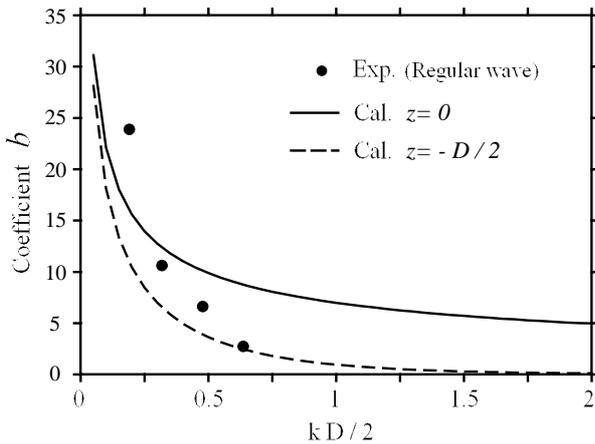


Fig.7 長波長域でのブイの漂流速度

4.3 不規則波中での漂流速度

不規則波中での漂流速度を規則波中での漂流速度と比較するため、不規則波の平均波高と平均波数を規則波の波高と波数に対応させ、Fig.6 に白抜き四角形で示す。この図から不規則波であっても平均波高と平均波数を用いて規則波中での漂流速度と対応させると良い一致を示すことが分かる。よって、実海域の漂流速度の推定には、その平均波高と平均波数を持つ規則波中での漂流速度の推定値を当てはめても良いように思われる。

5 おわりに

本研究により、以下の事項が明らかになった。

- (1) 短波長域においては波漂流力による漂流速度成分が支配的である。漂流速度は波漂流力と流体抗力との釣り合いから決定され、波高に比例して増大する。
- (2) 砕波を伴う大波高中においては、砕波による流れ成分により漂流速度がもっと速いものと予測していたが、それは瞬間的なもので、平均的な漂流速度への影響は予想外に小さいことが分かった。短波長域においては砕波する場合にも漂流速度は概ね波高に比例する。
- (3) 長波長域においては、波の質量輸送速度成分が支配的である。漂流速度は波の質量輸送速度で与えられ、ほぼ波高の自乗に比例して増大する。

- (4) 不規則波中での漂流速度は、平均波高・平均波長を規則波の波長・波高に当てはめることで、規則波による漂流速度の推定値で近似できる。

今回実施した水槽試験では、長波長域での球形ブイの漂流速度が Stokes 波の質量輸送速度でうまく説明できた。これは造波機が Stokes 波に近い性質の波を発生したためと考えられる。Stokes 波は理想流体の有限振幅波であり、現実の粘性流体では条件によっては Stokes 波と質量輸送速度に大きな差があることが指摘されている⁷⁾。実海域に対応した波の質量輸送理論があれば、漂流速度の推定値もより正確になろう。次に、本報告では触れなかったが、中間の波長域では両方の漂流速度成分が混在するものと考えられる。今後は全波長域に適用可能な波による漂流速度の推定法を確立したい。また、不規則波中での漂流速度をさらに厳密に議論するためには、各組成波による浮体の漂流速度の重ね合わせで不規則波中での漂流速度を記述する必要がある。これも方向スペクトルの考慮を含めて今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Maruo,H. : The drift of a body floating on waves, *J.S.R.*, Vol.4, No.3, (1960)
- 2) 野尻信弘, 村山敬一 : 規則波中の 2 次元浮体に働く波漂流力に関する研究, 西部造船協会々報, 第 51 号, (1975)
- 3) 工藤君明, 小林一也 : 三次元物体の波による漂流力 (第 1 報, 第 2 報), 船論, 第 141, 144 号, (1977,1978)
- 4) Tanizawa,K., Minami,M. and Naito,S. : Estimation of wave drift force by numerical wave tank *Proc. 9th ISOPE Conf.*, vol.3, Brest, (1999)
- 5) Tanizawa,K., Minami,M. and Naito,S. : Estimation of wave drift force by numerical wave tank, 2nd Report, *Proc. 10th ISOPE Conf.*, vol.3, Seattle, (2000)
- 6) 谷澤克治, 南真紀子, 沢田博史: 波漂流力に及ぼす水底段差の影響について, 船論, 第 187 号, (2000)
- 7) Kinsman,B.: *Wind Waves, Dover Books on Earth and Science*
- 8) 星野: 学位論文、九州大学,(1997)