

油槽壁に働らく荷油の圧力に関する一実験

郷 田 国 夫* 島 田 尚 信* 在 田 正 義*

An Experiment on Hydrodynamic Forces on the Transverse Bulkheads of Oil Tanker in Waves

By

Kunio Goda, Naokoto Shimada and Masayoshi Arita

An experimental investigation of hydrodynamic forces of cargo oil acting on the transverse bulkheads of oil tanker due to ship motions was carried out by a ship model equipped with oil tanks in waves.

The main purpose of this investigation is to examine if the linear superposition principle can be applied or not to the response of hydrodynamic forces of cargo oil on the transverse bulkheads to a seaway.

The ship model was a type of T-2 tanker, which was 4.5 meters in length and equipped with two sets of oil tanks, one at fore body and the other at midship. Dynamic forces on the transverse bulkheads and motions of the self-propelled model in regular and irregular waves are measured.

From these experiments are reached the following conclusions.

- (1) It is found that the linear superposition principle is not applicable to the response of dynamic forces on the transverse bulkheads of oil tanker to a seaway. It seems, however, that this conclusion is premature, because the experiment procedure was not satisfactory enough to accomplish the purpose.
- (2) Either in regular waves or in irregular waves, dynamic forces on the transverse bulkheads are larger at bow than at midship.

1. ま え が き

最近、油槽船は大型化する傾向にもかかわらず、荷油槽長さに関する現在の船級協会規定はその根拠が明らかでない。もし、長さをさらに増大することが可能であれば、重量軽減その他の点において非常に有利であると考えられ、荷油の動的圧力の研究が重要視されるようになった。

今までにも荷油の動的圧力について理論的および模型油槽による実験的研究^{1,2,3)}がいくつか発表されているが、いずれも油槽の長さ l と深さ d の比が1.0の場合であって、それ以上の長大油槽については研究されてい

なかった。

最近になって、日本造船研究協会第74研究部会が再びこの問題を取り上げ、長大油槽における荷油の動的圧力の研究を組織的に行なった。この中で、西牧ら^{4,5)}は長さ l と深さ d の比が1.4から3.8までの油槽模型に規則的な縦揺運動、前後揺運動を与えた場合について、秋田ら⁶⁾は不規則波海面を想定して過渡的な縦揺運動、前後揺運動を与えた場合について、それぞれ圧力分布および実験式を求めており、さらに萩原⁷⁾は南米航路で鉱石船のパラスト・タンクを利用して実船試験を行なっている。

本研究は、このような陸上での動揺実験結果を実船

* 船体構造部

へ応用する参考資料を得ようとして模型船による波浪中実験を行なったものである。油槽模型を搭載した模型船を水槽に起こした、規則波および不規則波の中を航走させて荷油の変動力を計測し、不規則波と荷油の変動力との間に「線型重ね合わせの原理」が成立するか否かを検討した。

2. 実験方法

2.1 模型船と模型油槽

実験に用いた模型船は長さ 4.5 m の T2-SE-A1 タンカの模型で、その主要目は表 1 のとおりである。

模型油槽は図 1 のように内のり寸法で長さ l × 幅 b × 深さ D_T が 766 mm × 220 mm × 350 mm で、深さは船の深さに等しく、長さとの比 $l/D_T=2.185$ は比較のために陸上での動揺試験⁴⁾の l/D_T シリーズ中の一つの値と同じにとった。また、油槽内には制水隔壁およびフレームなどの内部構造物はない。

横置隔壁全面に加わる荷油の変動力を測定するため、隔壁はタンクの側壁および底と分離され、4本のカンチレバで支持されている(写真 1 参照)。隔壁に力が働いたとき、このカンチレバに生じる曲げ応力を計測し力に換算した。

この模型油槽を図 2 のように 2 台、1 台は油槽中

表 1 模型船の主要目

船型	T2-SE-A1 タンカー
垂線間長さ L	4.500 m
幅 B	0.608 m
深さ D	0.351 m
喫水 d	0.268 m
排水量 Δ	543 kg
方形係数 C_b	0.741
浮心位置 (艀前方) lcb	18 mm (0.004 L)
慣性半径 (空气中) κ	0.218 L

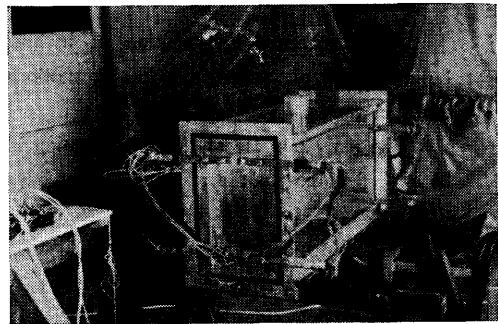


写真 1 油槽外観

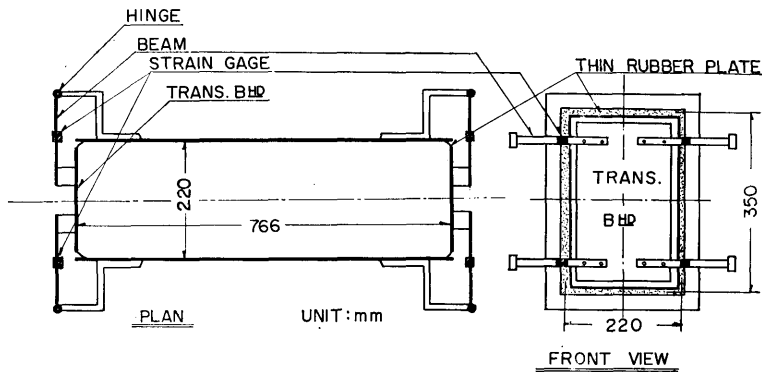


図 1 油槽構造

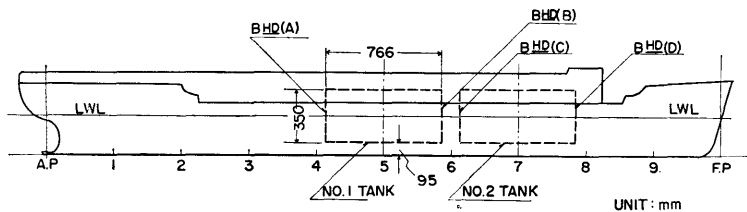


図 2 油槽搭載位置

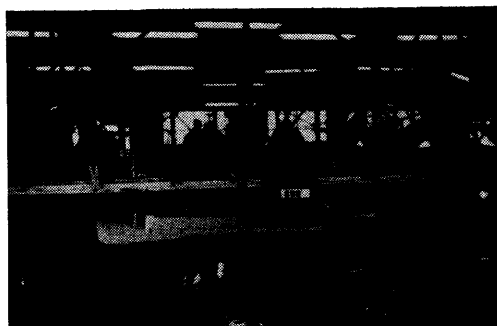


写真 2 規則波中航走時の模型船

心が Midship に、他の 1 台は船首から $0.3L$ の位置に搭載し、それぞれの隔壁を $B_{HD}(A)$, $B_{HD}(B)$, $B_{HD}(C)$, $B_{HD}(D)$ とした。

写真 2 は規則波中を航走している模型船である。

2.3 実験状態

実験は船研船型試験部第一試験水槽（現造船技術センター）で行なった。油槽を搭載した模型船を規則波中および不規則波中を向い波の状態で見航させ、波高、縦揺れ、上下揺れ、前後揺れおよび隔壁に働らく荷油の力を計測した。槽内には油のかわりに水を搭載した。

実験条件は、

規則波

波長 λ : $0.50L$, $0.75L$, $0.92L$, $1.00L$, $1.12L$, $1.25L$, $1.80L$, $2.00L$ の 8 種。正面向い波。

波高 H_w : 10 cm ($H_w/L=1/45$)

不規則波: 長波頂, 正面向い波。

*船速 V_S : 1.11 m/sec ($Fr=0.167$)

*喫水 d : 満載等喫水

*油槽の水深 h : $0.7D_T$

(*印は規則波, 不規則波に共通条件)

油槽の水深は陸上の模型試験⁴⁾において変動力がほぼ最大となる $0.7D_T$ に等しくした。

また油槽内の水が、自由水としてどの程度船体運動に影響するかを調べるため、油槽内の水の重量に等しい固体重量を積んだ場合の実験も若干行なった。

3. 実験結果

荷油槽が動揺したとき隔壁に加わる力は図 3 に示すように油槽が静止時の初期静水圧によるものと、油槽が傾斜することによって増加する傾斜静水圧によるものおよび自由表面の波動によるものの 3 種に分類す

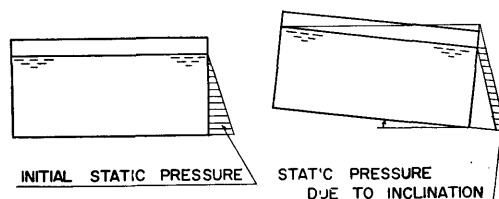


図 3 初期静水圧と傾斜静水圧

ることができる。この内、後の 2 種すなわち、傾斜静水圧と自由表面の波動による圧力の和を動的圧力とし、この圧力 P を隔壁全面にわたって積分した値を変動力 F と定義する。

隔壁の受ける不規則変動力 $F(t)$ は縦揺れによるもの、上下揺れによるものなどの和であると考えられる。そして波、縦揺れ、上下揺れ、変動力などの現象はすべて線型であると仮定すれば「線型重ね合わせの原理」により次式が成り立つ⁸⁾。

$$S_f(\omega) = |H_{fw}(\omega)|^2 \cdot S_w(\omega) \quad \dots\dots (1)$$

$$|H_{fw}(\omega)|^2 = |H_{fp}(\omega) \cdot H_{pw}(\omega) + H_{fh}(\omega) \cdot H_{hw}(\omega) + \dots\dots|^2 \quad \dots\dots (2)$$

ここで、

$S_f(\omega)$: 隔壁に働らく不規則変動力のエネルギースペクトル

$S_w(\omega)$: 波のエネルギースペクトル

$H_{pw}(\omega)$: 縦揺れの波に対する応答関数

$H_{hw}(\omega)$: 上下揺れの波に対する応答関数

$H_{fp}(\omega)$: 隔壁に働らく力の縦揺れに対する応答関数

$H_{fh}(\omega)$: 隔壁に働らく力の上下揺れに対する応答関数

ω : 円周波数

規則波中の実験から $|H_{fw}(\omega)|^2$ を、不規則波中の実験から $S_f(\omega)$ と $S_w(\omega)$ を求め、この $S_f(\omega)$ と、応答関数と波スペクトルの積 $|H_{fw}(\omega)|^2 \cdot S_w(\omega)$ とを比較し「線型重ね合わせの原理」すなわち (1) 式の関係が成り立つかどうかを調べた。

荷油の変動力のオシロ記録例を図 4 に示す。図 4(a) は規則中での記録で、図 4(b) は不規則波中での記録である。

3.1 規則波中

規則波中での実験結果、すなわち応答関数が図 5 である。図 5.1 が縦揺れ、図 5.2 が上下揺れで、 ϕ は縦揺れの片振幅、 Z は上下揺れの片振幅で、破線は油槽に固体重量を積んだ場合の結果である。また、

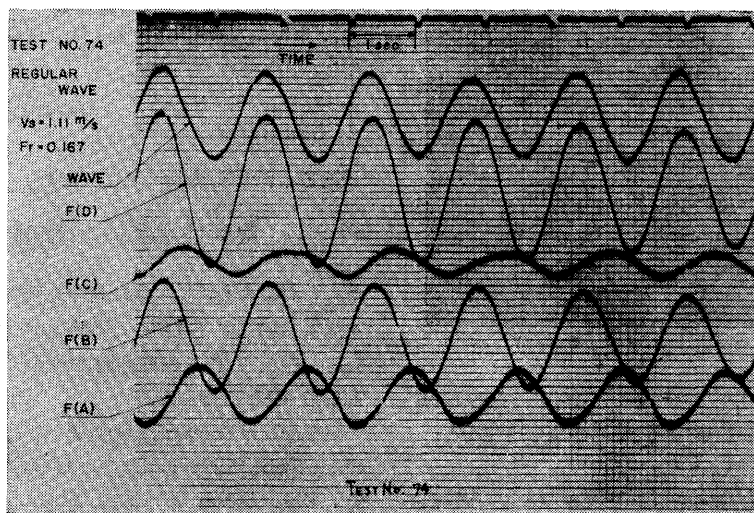


図 4 (a) 規則波中

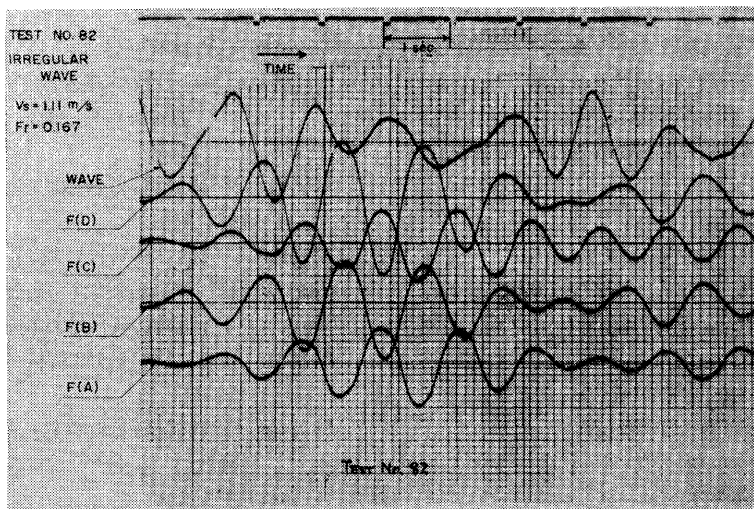


図 4 (b) 不規則波中

図 4 実験記録例

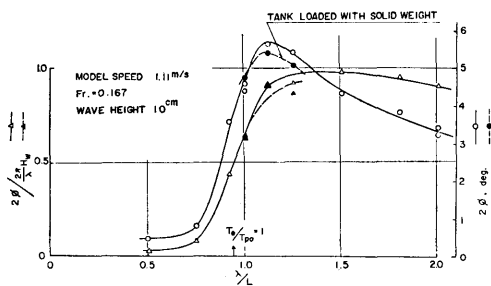


図 5.1 規則波中の縦揺れ

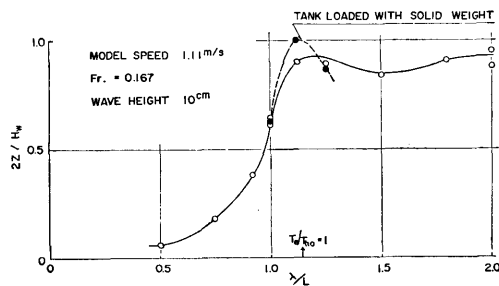


図 5.2 規則波中の上下揺れ

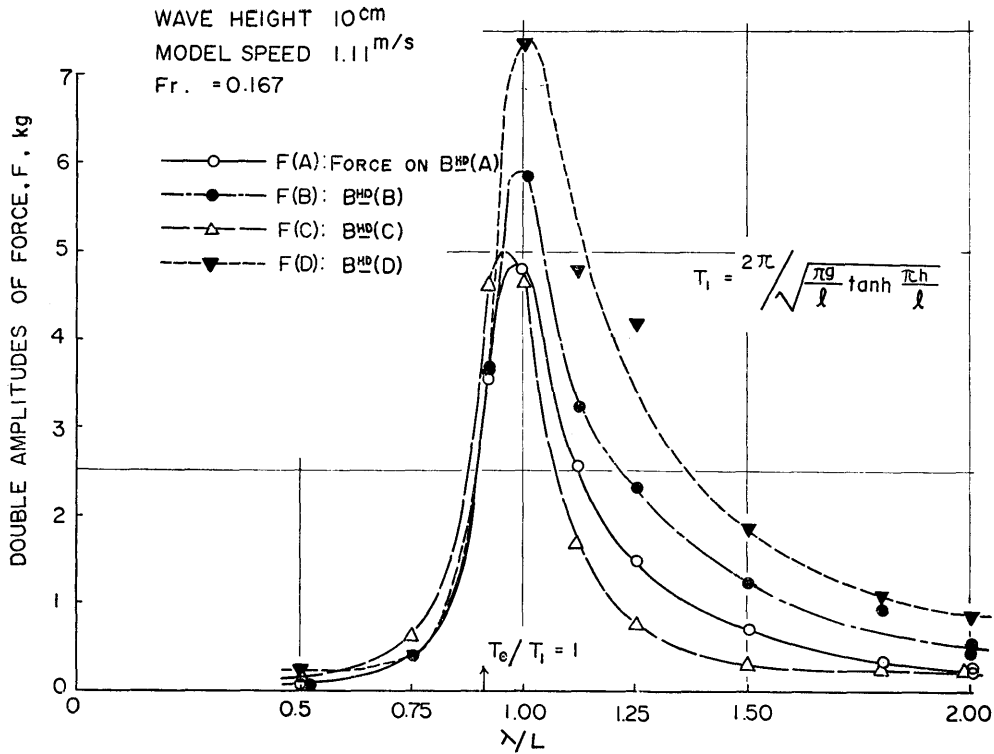


図 5.3 規則波中の荷油の力

T_e は波の出合周期, T_{p0} , T_{h0} はそれぞれ縦揺れ, 上下揺れの固有周期で模型船を自由動揺させて求めた実験値である。図 5.3 は各 BHD に働らく変動力の複振幅で $F(A)$, $F(B)$, $F(C)$, $F(D)$ は BHD (A), (B), (C), (D) に作用する力である。 T_1 は荷油の 1 次固有周期で次式によって計算され, その値は 1.13 秒であった。

$$T_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\pi g}{l} \cdot \tanh \frac{\pi h}{l}}}$$

変動力はいずれの BHD でも同調点 $T_e/T_1=1.0$ の附近で最大値をとり, それより短い波長 ($T_e/T_1 < 1.0$) で急激に減少し, 長い波長 ($T_e/T_1 > 1.0$) に向ってややなだらかに減少する。この傾向は陸上における動揺試験の結果と同じ傾向にある。2つの油槽を比較すると運動振幅の大きい船首部の油槽に大きい力が働らき, それぞれの油槽では前の隔壁に後の隔壁より大きい力が働らいているが, これは上下揺れ, 前後揺れの位相差によるものと考えられる。

この規則波中での実験結果を次節で述べる応答関数

として用いる。

3.2 不規則波中

不規則波, 縦揺れ, 上下揺れおよび隔壁に働らく変動力のコレログラムとそのフーリエ変換であるエネルギースペクトルとを求めると 図 6, 図 7 のようになる。このコレログラム, スペクトル計算に用いたデータ数は 785, 読取間隔は 0.125 秒 (1/8 秒), 最大ラグ数 (ずらしの数) τ は 90 で, ウィンドウは Hanning の W_2 を使用した。 σ^2 は分散でスペクトルの囲む面積に等しい。

スペクトルのうち波スペクトルと応答関数を下段に, 実験から直接求めたスペクトル $S_x(\omega)$ ($x=p, h, f$) と応答関数に波スペクトルを乗じて求めた $|H_{xw}(\omega)|^2 \cdot S_w(\omega)$ を上段に示した。

不規則波中での各隔壁に加わる変動力は, スペクトルの囲む面積に比例するので, それぞれの隔壁を比較すると, 最も大きいのは $F(D)$ で次に $F(B)$ で, $F(A)$, $F(C)$ は小さくなっていて規則波中と同じ結果を得た。

TEST NO. 82
DATA NUMBER 785, LAGS NUMBER 90, SAMPLING TIMES 0.125^{sec}

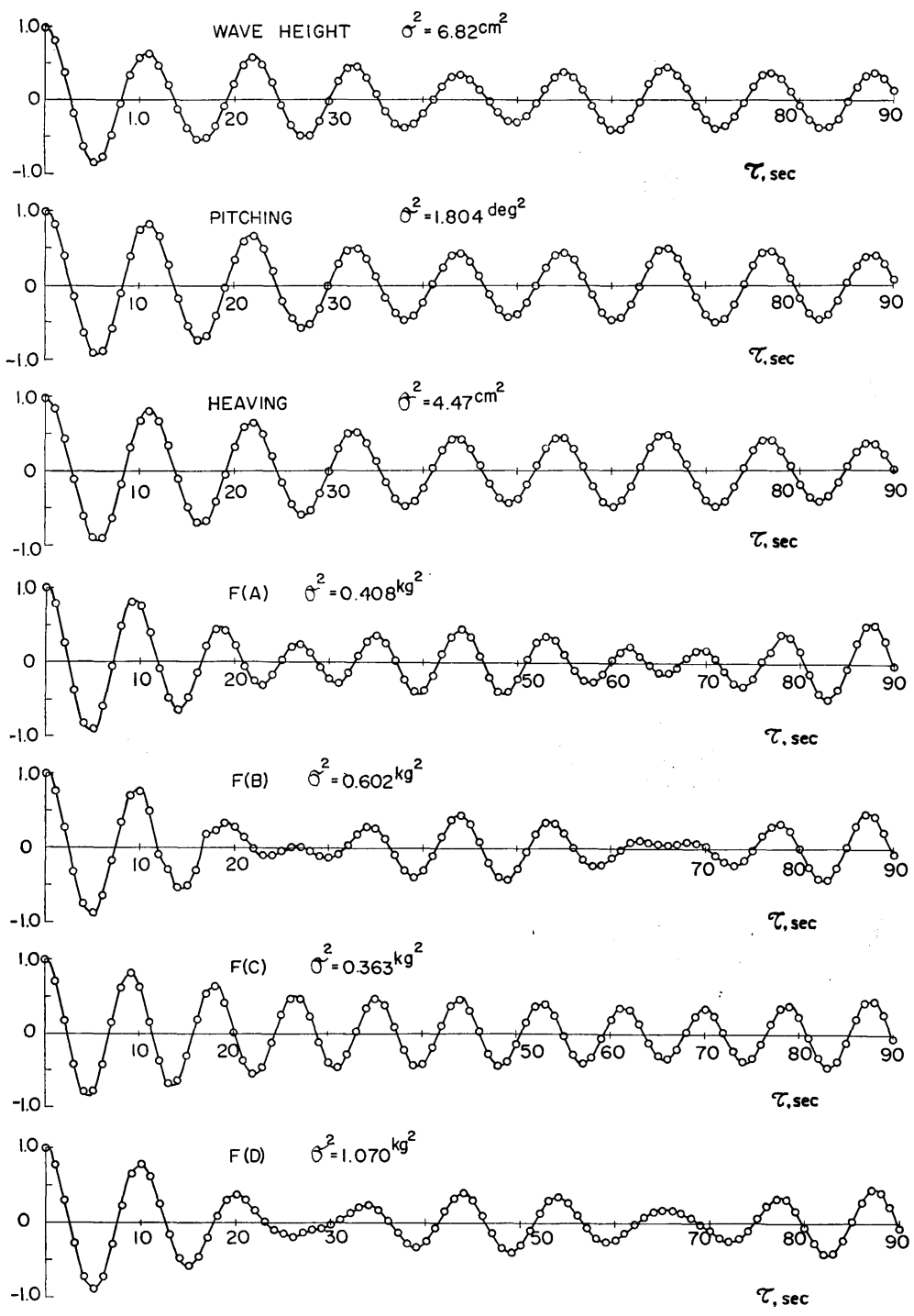


図 6 コレログラム

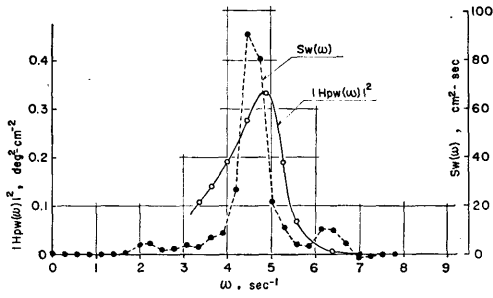
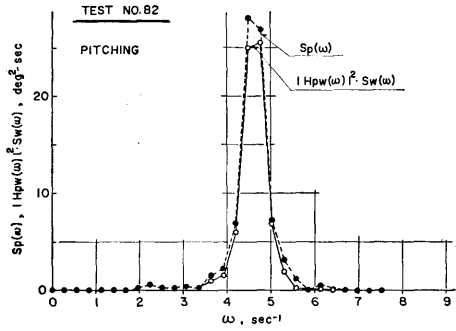


图 7 (1)

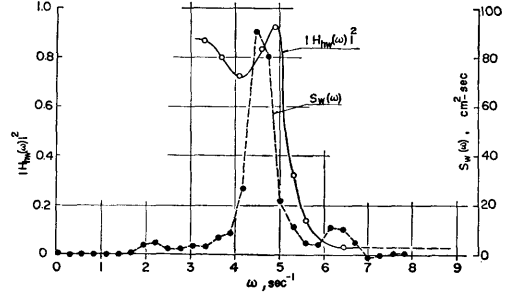
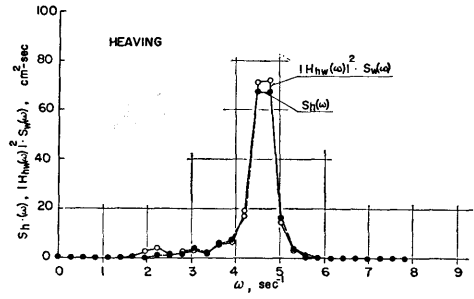


图 7 (2)

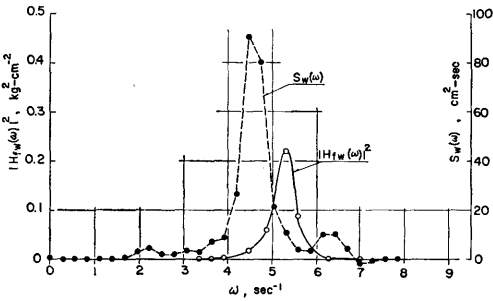
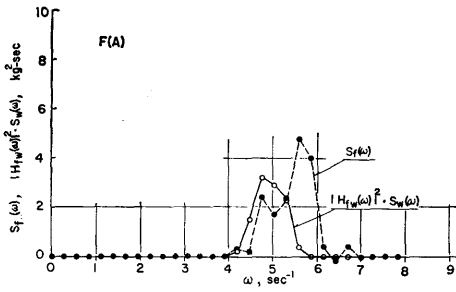


图 7 (3)

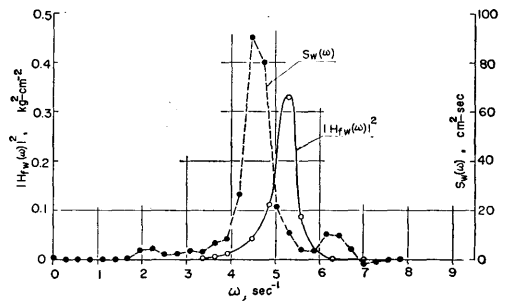
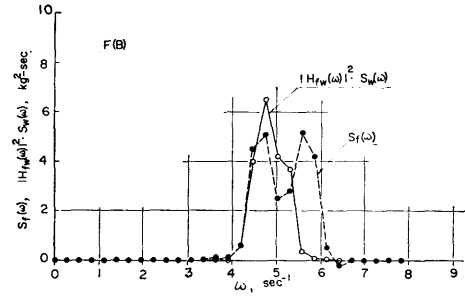


图 7 (4)

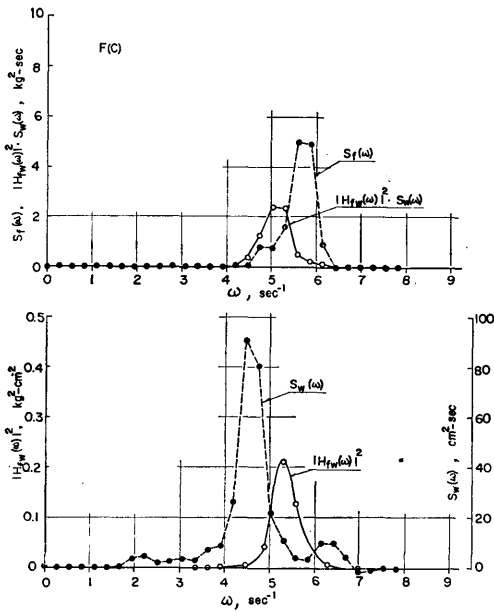


図 7 (5)

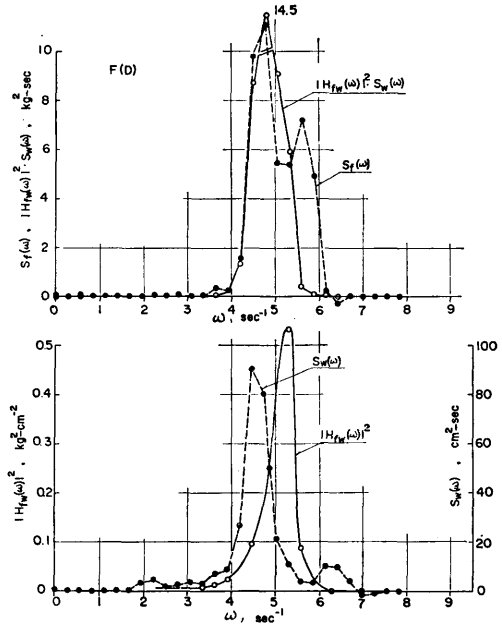


図 7 (6)

図 7 エネルギスペクトル

次に「線型重ね合わせの原理」について考えてみると、縦揺れ、上下揺れに関しては、 $S_x(\omega)$ ($x=p, h$) と $|H_{xw}(\omega)|^2 \cdot S_w(\omega)$ とが極めて良好な一致を示して (1) 式の関係が成立することを証明している。しかし、荷油の力に関してはこのような一致は見られず、(1) 式が成立するとはいい難い。これは、コロログラムの減衰が十分でなく、さらに波スペクトルの帯域幅が狭く応答関数を十分カバーしていない。むしろ波と応答関数が独立に存在している状態で、これが不一致の原因と考えられる。

本実験に用いた造波装置は不規則波発生用に設計されたものでなく、図 7 に示したスペクトル幅が最大限度であった。

この結果だけをもって「線型重ね合わせの原理」は成立しないと断言するのは尚早で、もっと広帯域のスペクトルを持つ不規則波中で実験を行なう必要があろう。しかし、線型理論を適応することは相当困難と考えられる。ことに運動が大きくなれば頂板との衝突、気泡の発生など非線型要素が大きくなり (1) 式の関係は成立しないと考えるべきであろう。

4. 陸上の動揺装置による実験との比較

陸上の動揺装置によって油槽に規則動揺を与えた場

合については「まえがき」で述べたようにいくつかの実験結果があるが、その中で $l/D_T, h/D_T$ が等しい西牧らの実験結果⁴⁾ と比較してみる。

規則波中での模型船による実験では、動揺装置による規則動揺の場合と異なり、油槽は縦揺れと同時に上下揺れ、前後揺れも行なう。上下揺れ、前後揺れの影響は無視できないが、隔壁に働らく荷油の力に対しては、縦揺れの方が大きな影響を与えたと考えられる。そこで、図 5・3 に示した荷油の力を模型船の縦揺れ振幅で割った単位縦揺れ振幅に対する荷油の力の変動振幅と、荷油の力の変動振幅 F を傾斜静水圧 $F_0 = \rho \cdot g \cdot l/2 \cdot \theta \cdot b \cdot h$ (θ は縦揺れの複振幅、 ρ は水の密度、 g は重力の加速度) で割った無次元値 F/F_0 になおして示すと図 8 のようになる。この図の中で折線で結んだものが西牧らの実験結果を同様の値に変換したもので、両者はよく一致している。また西牧らの実験は、動揺中心が油槽中心にあって、模型船の場合の $F(A), F(B)$ に相当し、 $F(B)$ に近い値を示している。

5. 結 論

油槽船の荷油槽壁に作用する荷油の動的圧力を調べるために、油槽模型を搭載した模型船によって波浪中での実験的研究を行なった。そして次の結論を得た。

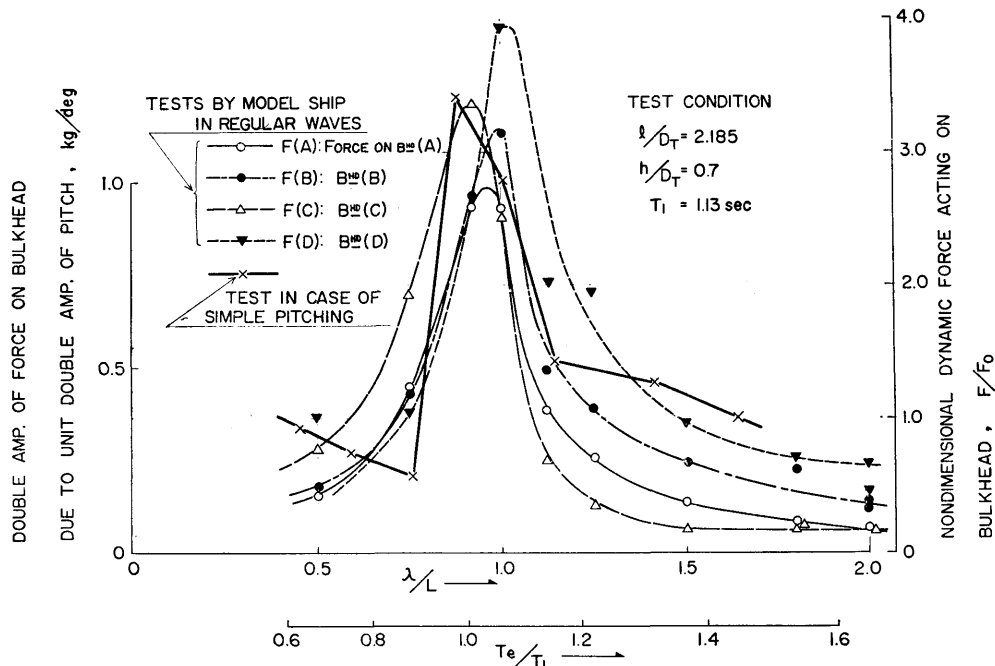


図 8 動揺装置による実験との比較

(1) 規則波中での荷油の変動力は同調点付近で最大値となる。また単位縦揺振幅に対する変動力の振幅あるいは傾斜静水圧で無次元化した値は、陸上での動揺試験結果とよく一致する。

(2) 不規則波中での結果については、不規則波のスペクトルの帯域幅が狭かったため、この実験からは荷油の隔壁に及ぼす力について「線型重ね合わせの原理」が成立するか否か断言することはできない。広帯域のスペクトルをもつ不規則波中で実験を行なう必要がある。

(3) 各油槽を比較すると規則波中、不規則波中とも船首に近い油槽に大きな力が働らく。

謝 辞

本研究は日本造船研究協会第74研究部会が実施した研究の一部として行なったものである。これまで種々の御討論を賜った同研究部会の委員各位に厚くお礼申し上げます。

また、コレログラム、スペクトル計算に際しては当所運動性能部安藤技官から御検討を戴いた。数値計算は原子力船部の電子計算機 NEAC-2203 G を、プログラムは運動性能部で開発されたもの⁹⁾を使用させて戴いた。実験の実施に当っては、旧船型試験部第一水槽の方々には御世話になった。ここに以上の方々へ深く

感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 菱田, 田中, 北村, 林: 槽油が槽構造に与える荷重について, 関西造船協会誌82号, 昭和31年
- 2) 吉識, 山本, 萩原: 船体運動時に荷油によって生ずる動的圧力の研究, 造船協会論文集, 第109号, 昭和36年
- 3) 萩原, 山本: 荷油槽に生ずる衝撃圧力の理論的研究, 造船協会論文集第112号, 昭和37年
- 4) 西牧, 原, 堀, 木下: 長大油槽内の荷油の運動によって生ずる動的荷重について(第1報), 造船協会論文集第119号, 昭和41年
- 5) 西牧, 原, 堀, 木下: 長大油そうにおける荷油の運動および制水隔壁の効果に関する研究(第2報) 造船協会論文集第121号, 昭和42年
- 6) 秋田, 前田, 古田, 北村: 長大油槽における荷油の運動について, 日本造船学会論文集, 第123号, 昭和43年
- 7) 萩原: 長大槽に生ずる動圧の実船計測について, 造船協会論文集第121号, 昭和42年
- 8) 山内: 応答理論と船体運動, 海洋波と船舶に関するシンポジウム, 造船協会, 昭和36年6月
- 9) 山内, 菅井, 安藤: 船舶の耐航性試験データ処理システムについて, 第3回船研研究発表会講演概要, 昭和39年