

図4.13 等風速線図 (1994.2-1999.2)

5. 内航船の船体応答推定法

5.1 はじめに

長期予測法で満載喫水線を評価する場合、入力データの一つとして船体応答関数の整理を行う必要性がある。また、甲板荷重の実用的な推定手法の開発のために船体運動と甲板荷重の関係を把握する必要があると考えられる。

波浪中の船体応答推定法のひとつに Strip 法がある。その妥当性については、これまでに数多く検討されており、実用的には有効な推定法であることがわかっている。しかしながら、内航タンカーのように頻りに甲板が冠水するような船舶への適用例は少なく、その妥当性について論じたものはほとんどない。

そこで、内航船の代表的な船型の一つである内航タンカーについて規則波中実験を行い、船体応答推定法の妥当性について検討を行った。同時に、波高や船速が海水打ち込みに及ぼす影響を調べるために波高波長比及びフルード数をパラメータとして甲板荷重等の計測を行った。

一方、海水打ち込みに対して波高、船速だけでなく、船首高さやフレアといった船首部水線面上形状も影響を及ぼすことが考えられる。そこで、もう一つの代表的な船型である内航貨物船について同じく規則波中実験を行い、船首部水線面上形状の違いが船体応答及び海水打ち込みに及ぼす影響について検討を行った。

さらに、甲板荷重の長期予測手法を開発することを目的として不規則波中実験を行った。これらの検討事項について以下に報告する。

5.2 実験方法

実験は、三鷹船舶第一試験水槽（角水槽、 $80 \times 80 \times 4.5\text{m}$ ）において行った。使用した模型は、内航タンカー（749GT 型、 $L_{pp}=72\text{m}$ ）の木製相似模型（縮率:1/18）及び内航貨物船（699GT 型、 $L_{pp}=78.5\text{m}$ ）の木製相似模型（縮率:約 1/19）である。内航貨物船は母船型（Type1）、母船型から乾舷を低くした船型（Type2）、フレア形状をふくらませた船型（Type3）の3種類の船型を用いた。この際、縦慣動半径及び喫水線は同じになるよう留意した。内航タンカーの主要目を表 5.1 に、Body plan を図 5.1 にそれぞれ示す。内航貨物船の主要目を表 5.2 に、Type1 から Type3 の Body plan を図 5.2 及び図 5.3 に各々示す。実線が母船型（Type1）、点線が各々母船型から変化させた船型（Type2、Type3）を表す。

縦揺れ、上下加速度、前後加速度の計測は光ファイバージャイロ及びジャイロアクセルロメーターを用

いた。両加速度は、重心位置等の補正を行った後に動揺変位に換算した。船首相対水位変動を計測するために、船首に容量式相対水位計を取り付けた。また、船体中央部の相対水位変動を計測するために S.S. 61/2 にも容量式相対水位計を取り付けた。

甲板上では、甲板上水位分布と甲板荷重及び水圧の計測を行った。計測装置の配置を図 5.4 及び図 5.5 に示す。参考までに喫水及び船首高さを実船スケールで同じく図中に示す。船首楼甲板に作用する甲板荷重を計測するために、船首楼甲板全面を主船体から分離し、甲板下に検力計を取り付けた。なお、船首楼甲板及び取り付け治具による慣性力の影響を極力押さえるため、これらの軽量化に留意した。解析の際は、検力計と同じ位置で計測した加速度計データを用いて治具による慣性力を取り除いた。また、模型船内部への防水のため甲板と主船体の間にシリコンを注入したが、これによる減衰力等の影響はないことを確認した。この際、分離した船首楼甲板の面積は内航タンカー 0.158m^2 で、内航貨物船で 0.114m^2 である。

局所的な荷重についても調べるために船首楼甲板上で上下方向水圧の計測も行った。内航タンカー模型の水圧計測は船首付近でセンターライン上の 4 点（F.P. の前方 120mm と 70mm 及び後方 50mm と 120mm 、以下それぞれ P_A 、 P_B 、 P_C 、 P_D ）で行った。内航貨物船は F.P. の前方 50mm （以下 P_1 ）及び後方 50mm （以下 P_2 ）でセンターライン上の 2 点に水圧計を取り付けて計測した。こちらについても同じく図 5.4 及び図 5.5 中に示す。

また、船首楼甲板上での水位分布を計測するために、F.P. から S.S. 9 までの 1/4S.S. 毎に容量式水位計を配置した。この水位計により各 S.S. での平均水位がわかる。甲板水量は、これらを船長方向に積分することで求めた。

これらの計測データは模型船上に搭載したテレメータ装置で計測室に送信し、A/D 変換を行った。また、甲板荷重及び水圧は、高い周波数応答が予想されたため、模型船上に搭載した A/D 変換器で直接記録する方法を採用した。さらに、甲板上の打ち込みの様子を観測するため模型船上にビデオカメラを取り付けた。

5.2.1 規則波中実験

模型船を無線操縦により規則波中で自由航走させ、船体運動、相対水位変動、甲板上水位分布、甲板荷重及び甲板水圧を計測した。これにより、どのような場合に海水打ち込みが発生し、その際にどの程度の荷重及び水圧が甲板に作用するかを調べた。波との出会い方位は船首部の打ち込みが最も激しいと考えられる正面向波中（ $\chi=180^\circ$ ）及び斜め向波中（ χ

=150°)、船体中央部の打ち込みが最も激しいと考えられる横波 ($\chi=90^\circ$) で行った。

内航タンカーは $Fn=0.1$ 、 $H/\lambda=1/30$ を基本にして、船速と波高波長比をパラメタとした。内航貨物船は $Fn=0.17$ を基本に波高波長比をパラメタとした。実海域で海水打ち込みが発生するような状況では、自然減速や意識的減速により船速が低下するはずであるが、ここでは各パラメタの影響を調べるのが目的であるので、モーター回転数ではなく船速を一定とした。また、波長船長比は $\lambda/L=0.5\sim 2.0$ の範囲で変化させ、海水打ち込みが発生する波長船長比で波高波長比や船速を変えて詳細な計測を行った。

5.2.2 不規則波中実験

内航タンカー及び内航貨物船模型について、不規則波中での船体運動、船首相対水位変動、甲板水上水位分布、甲板荷重及び甲板水圧を計測した。波のスペクトルは ISSC スペクトルを用いた。内航タンカーについては平均船速を $Fn=0.1$ とし、正面向波中において平均波周期 $T=1.459\text{sec}$ 、有義波高 $H_{1/3}=0.174\text{m}$ の条件で計測した。内航貨物船については平均船速を $Fn=0.17$ とし、正面向波中において平均波周期 $T=1.537\text{sec}$ 、有義波高 $H_{1/3}=0.193\text{m}$ の条件で母船型 (Type1) 及びフレアをふくらませたもの (Type3) について計測した。

これら波周期及び有義波高は、ともに波傾斜が約 $1/19$ となるように設定したものである。前述した日本近海の波浪データを用いて調べたところ、日本近海での平均的な波高波長比は約 $1/25$ から $1/35$ であったが、海水打ち込みについて検討を行うことが所期の目的であったため、現実に発生しうる海象の中で厳しい条件を設定した。出会い波数は、それぞれ 400 波で、信号は初めに 400 波の長さのものをつくり、それを 20 程度に分割して各航走で用いた。

5.3 規則波中実験結果

5.3.1 船体運動及び相対水位変動

内航タンカーの波高波長比 $H/\lambda=1/30$ 、 $Fn=0.1$ の場合の船体運動を、図 5.6 から図 5.8 にそれぞれ示す。実験値は計測波形を Fourier 解析して求めた出会い周波数成分の振幅であり、縦揺れは波傾斜、上下揺、前後揺は波振幅で各々無次元化した値である。横軸には波長船長比 λ/L を示す。図中の実線は、Strip 法 (NSM) による計算値である。波長が長くなると若干実験値の方が計算値よりも過大になるが概ねよい一致を示している。本実験の船型は、船体中央部の乾舷が低いので水が乗り上げやすいという特徴があり、実験でもほとんどの実験状態で中央部が冠水していたが、strip 法のような線形計算でも実用

上問題はないと考えられる。

同様に内航タンカーの船首相対水位の振幅を図 5.9 及び図 5.10 に示す。実線は NSM による計算値で、Dynamic Swell up 成分も含んだものである。また、比較のために、Bow Top の高さを波振幅で無次元化した値 f' も同図中に示した。相対水位振幅が f' より上であれば打ち込みが発生することになる。ただし、打ち込み限界を精度良く推定するためには、図中の実験値および計算値に含まれていない Static Swell up 成分も考慮しておく必要がある。そこで、実験に先立って行った平水中航走試験の計測値からその成分 hs を求め、Bow Top 高さの低下と見なして補正したもの ($f'-hs$) を同図中に点線で示す。

実験では $\lambda/L=1.0\sim 2.0$ の間で打ち込みが観測されており、船首相対水位の実験値と $f'-hs$ との大小関係に一致していることがわかる。このケースでは船首相対水位に計算値を用いた場合も概ね一致しているが、Bow top がもう少し高くなると打ち込みの発生する波長範囲をやや過大評価することが予想される。この点を改良するには、非線形性が大きくなる大振幅船体運動の計算手法の精度向上が必要となると考えられるが、今後の課題としたい。

また、内航タンカーの横波中 ($\chi=90^\circ$) での船体中央部相対水位の振幅を図 5.11 に示す。相対水位と乾舷の関係調べるため、乾舷の値を同図中に点線で示す。実験ではほとんどの波長船長比で中央部が冠水していたが、計算値と実験値のはよく一致しており、strip 法のような線形計算でも実用上問題はないと考えられる。

内航貨物船の正面向波 ($\chi=180^\circ$) 及び斜め向波中 ($\chi=150^\circ$) での母船型 (Type1)、乾舷高さを低くした船型 (Type2)、フレアをふくらませた船型 (Type3) の縦揺れ及び上下揺の計測値をそれぞれ図 5.12 から図 5.15 に示す。船首相対水位変動についても同様に計測値をまとめて図 5.16 及び図 5.17 に示す。計測値は計測波形をフーリエ解析して求めた出会い周波数成分の振幅であり、縦揺れは波傾斜、上下揺及び船首相対水位変動は波振幅で各々無次元化した値である。横軸には波高波長比 H/λ を示す。

これらの結果から、Type2 の計測値が他の船型に比べて若干小さい値を示すが、全般的に船型の違いによる差異はないといえる。この結果は、Lloyd et. al.¹⁰⁾、高木ら¹¹⁾の研究とも一致している。

船が大振幅動揺した場合、水線面上の形状の違いにより、船首が沈下した際の復原力が変わるので、これらの違いは運動及び相対水位変動に影響を及ぼすはずであるが、今回の実験結果を見ると、極端に形状を変えない限り、船首部水線面上の違いは、縦運動にそれほど影響を及ぼさないと考えられる。

また、波高波長比が大きくなるにつれてどの船型

についても無次元値が小さくなっている。後述するように、打ち込みによって生じる甲板荷重等は、船首相対水位との相関が強い事がわかっている。従って、船首相対水位の微少な差異が甲板荷重等の推定値に大きく影響を及ぼすため、船首相対水位はできる限り正確に見積もらなければならない。よって甲板荷重等を推定する際の入力である船首相対水位の精度向上を図る必要があると考えられる。こちらについては今後の課題としたい。

5.3.2 甲板荷重及び甲板水位

海水打ち込みに影響を及ぼすものとして、船速、波高、船首高さやフレア、ナックル及び甲板形状などの船型要素等が考えられる。ここでは、内航タンカーの実験結果から、波高と船速が甲板上水位や甲板荷重に及ぼす影響を調べた。また、内航貨物船の実験結果から、船首高さ及びフレアが甲板上水位や甲板荷重に及ぼす影響について同じく調べた。

はじめに計測波形の一例を図 5.18 に示す。甲板水位の時系列から、急激に水が流入していることや甲板荷重と水圧が衝撃波形になっていることがわかる。竹沢ら¹²⁾は甲板水圧の波形を主に振動型と非振動型に分け、各々について推定方法の検討を行っている。ここでは、計測波形の6割が振動波形であることが報告されているが、今回計測を行った水圧は大部分が非振動型であった。

(1) 波高及び船速が甲板荷重等に及ぼす影響

内航タンカー模型を用いて、波高の影響について調べるため $\lambda/L=1.0, 1.25, 1.5$ の場合について波高波長比を変えて計測を行った。図 5.19 から図 5.22 に横軸に波高波長比をとった際の、甲板荷重及び水圧を示す。縦軸は、甲板荷重及び水圧のピーク値の平均値である。値は実船スケールに換算した値を示す。すべての λ/L に関して、波高波長比が大きくなるにつれて荷重及び水圧は大きくなることわかる。同様に横軸に船速をとった際の変化を図 5.23 から図 5.25 に示す。すべての λ/L に関して、船速が大きくなるにつれて水量、荷重及び水圧各々大きくなるが、その傾向は打ち込みの激しい $\lambda/L=1.25$ において顕著である。この事から、これら甲板上の諸量と波高及び船速の相関はかなり強いと考えられる。

(2) 船首高さ及びフレア形状が甲板荷重等に及ぼす影響

図 5.26 から図 5.29 に船速一定 ($F_n=0.17$) で波高波長比を変化させて計測した正面波中での甲板荷重及び甲板水圧のピーク値を実船換算して記号で示す。乾舷を低くした Type2 と他の 2 船型の船首高さは 30mm しか違わないため、その差が顕著ではないもの

の、全体的に他の 2 船型に比べて Type2 の計測値が大きくなっており、甲板荷重等が船首高さに影響を受けやすいことがわかる。ただし、甲板水圧 P1 の $\lambda/L=1.2$ で、波高波長比が大きい場合に Type2 の計測値が他の 2 船型よりも小さい値を取る場合がある。図 5.16 にも示すように、これらの場合には船首相対水位変動の計測値は Type2 の方が他の 2 船型よりも小さくなっている。その結果、船首高さが低いことによる影響が船首相対水位変動の差異と相殺しているものと考えられる。

フレア形状の異なる Type1 と Type3 の結果を比較すると、形状の違いによる打ち込み荷重等の差異はほとんど見られない。フレアやナックルといった船型要素が打ち込みに及ぼす影響について調べたこれまでの研究¹⁰⁾¹¹⁾¹³⁾¹⁴⁾においても極端に形状を変えない限り運動及び甲板水量等には大きな影響を与えないといわれており、甲板荷重等を直接計測して比較した本研究の結果も同様のものとなった。実際の船においては、フレアスラミング等の制約からあまり極端にフレアをつけないとされており、現実的なフレア形状ではその差異が海水打ち込みにあまり影響を及ぼさないと考えられる。

5.4 不規則波中実験結果

図 5.30 及び図 5.31 に内航タンカーの不規則波中実験で計測した甲板荷重及び甲板水圧のピーク値の分布を示す。横軸には甲板荷重及び水圧を実船換算した値で、縦軸には出会い波数に対する超過確率を対数軸で表す。図 5.31 の甲板水圧は、船首楼甲板のセンターライン上の 4 点 (F.P. の前方 120mm と 70mm 及び後方 50mm と 120mm : $P_A \sim P_D$) に取り付けられた水圧計で計測した結果を各々表す。ビデオカメラでの観察結果によると、甲板水は主として船首近傍から流入し、船幅方向に広がりながら船体後方に流れていく。そのため、 P_A から P_D に行くに従って甲板水圧の値は小さくなっていくはずであるが、 P_D では P_C よりも大きい値が計測されている。かなり激しい打ち込みが発生した時には、船首近傍のみならずブルワーク端の S.S. 91/2 以降の舷側からも流入があり、これらの甲板水は船首から流入した水とぶつかる挙動を見せた。そのため、S.S. 91/2 近傍ではその前方に比べて水位が高くなる場合があり、 P_D が P_C より大きい値をとる原因になっていると考えられる。

図 5.32 から図 5.34 には内航貨物船の不規則波中実験で計測した甲板荷重及び甲板水圧 (P1 及び P2) のピーク値を実船換算した値を示す。横軸には荷重、水量及び水圧、縦軸には出会い波数に対する超過確率を対数軸で表す。規則波中実験での結果同様、母船型 (Type1) とフレアをふくらませたもの (Type3) で有意な差は見られない。これらの結果からも、極

端に形状を変えない限り、フレア形状の違いは甲板荷重等にあまり影響を及ぼさないと考えられる。

5.5 まとめ

内航タンカー及び内航貨物船模型を用いて波浪中実験を行い、船体運動、船首相対水位、甲板荷重及び甲板水圧の計測を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 内航タンカーのように船体中央部に水が乗り上げる船型についてもStrip法により船体運動等の推定が行えることがわかった。
- (2) Static Swell up 成分を考慮することで、船首相対水位と Bow top height の大小関係から海水打込みの有無を判別することができる。
- (3) フレア形状の違いが船体運動や甲板荷重等に及ぼす影響は、形状を極端に変化させない限り、余り大きくない。
- (4) 船首高さの違いは甲板冠水に直接影響を及ぼすため、甲板荷重等に及ぼす影響は比較的大きい。

表 5.1 内航タンカーの主要目

	Ship	Model
Lpp(m)	72	4
B(m)	11.5	0.638
D(m)	5.3	0.292
d(m)	4.7	0.263
Bow top height(m)	2.45	0.136
GM(m)	1.4	0.076
Cb	0.7	0.7
Displacement(ton)	2720	0.466

表 5.2 内航貨物船の主要目

	Ship	Model (Type1&3)	Model (Type2)
Lpp(m)	78.5	4.1	4.1
B(m)	12.8	0.669	0.669
D(m)	7.8	0.407	0.278
d(m)	4.52	0.236	0.236
Bow top height(m)	3.78	0.198	0.168
GM(m)	1.97	0.086	0.096
Cb	0.671	0.671	0.671
Displacement(ton)	3136	0.447	0.447

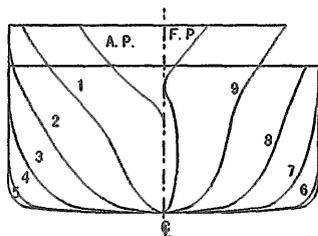


図 5.1 Body plan(内航タンカー)

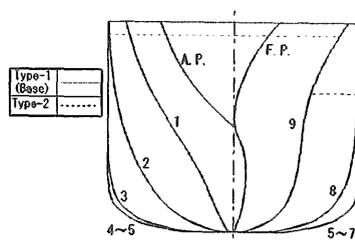


図 5.2 Body Plan (内航貨物船、Type1&2)

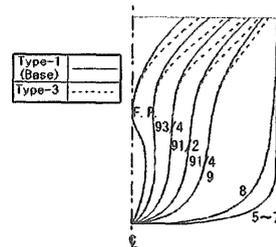


図 5.3 Body Plan (内航貨物船、Type1&3)

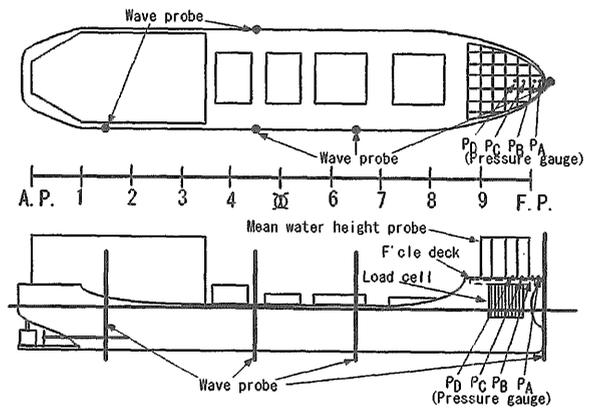


図 5.4 計測装置配置図。(内航タンカー)

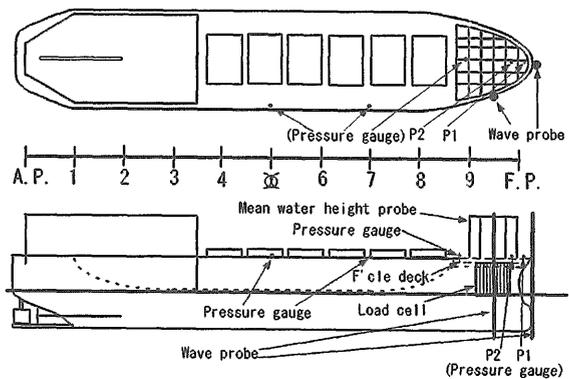


図5.5 計測装置配置図。(内航貨物船)

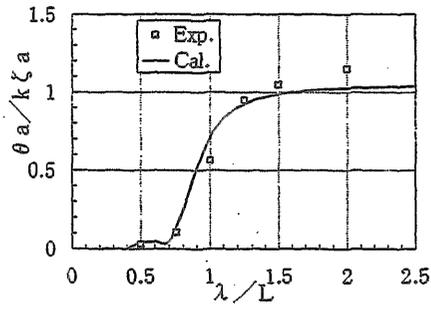


図 5.6 縦揺れの周波数応答関数
(内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $Fn=0.1$)

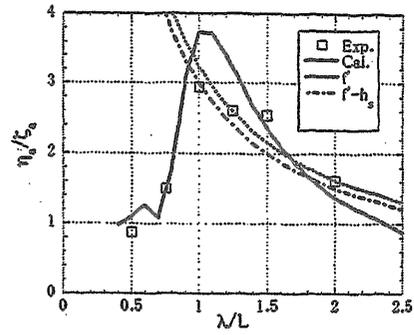


図 5.9 船首相対水位の周波数応答関数
(内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $Fn=0.1$)

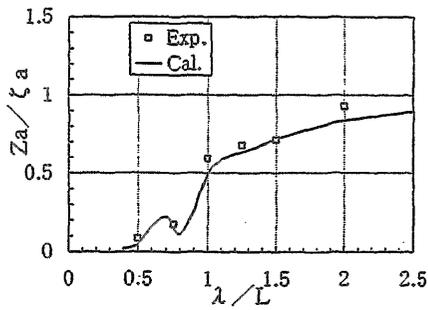


図 5.7 上下揺れの周波数応答関数
(内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $Fn=0.1$)

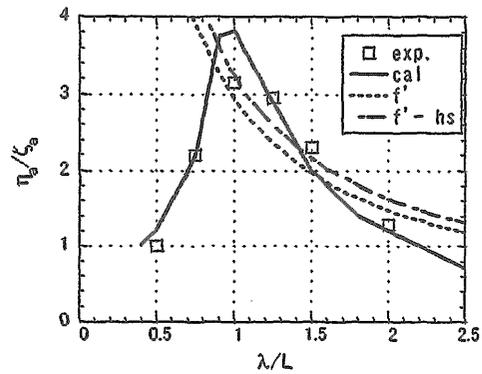


図 5.10 船首相対水位の周波数応答関数
(内航タンカー、 $\chi=150^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $Fn=0.1$)

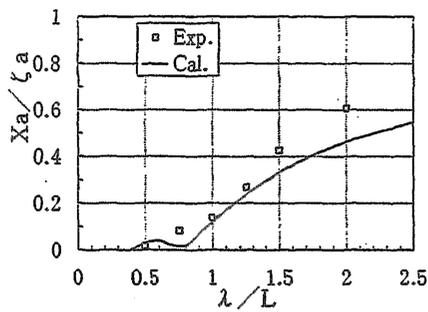


図 5.8 前後揺れの周波数応答関数
(内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $Fn=0.1$)

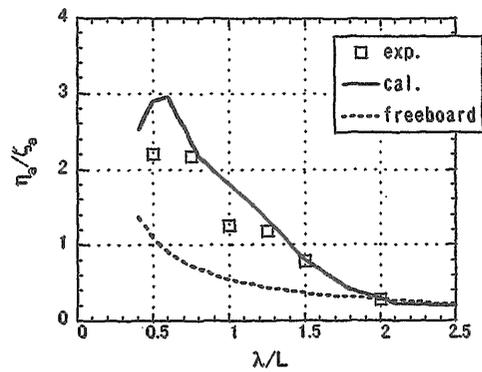


図 5.11 船体中央部相対水位の周波数応答関数
(内航タンカー、 $\chi=90^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $Fn=0.1$)

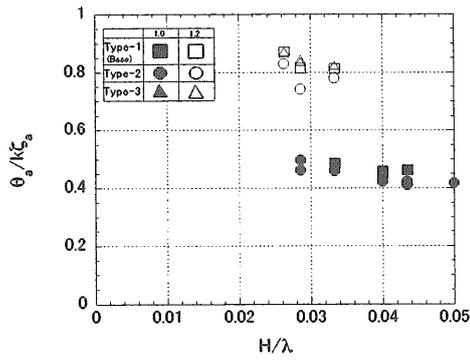


図 5.12 縦揺れの波高影響 (内航貨物船, $\chi = 180^\circ$, $Fn=0.17$)

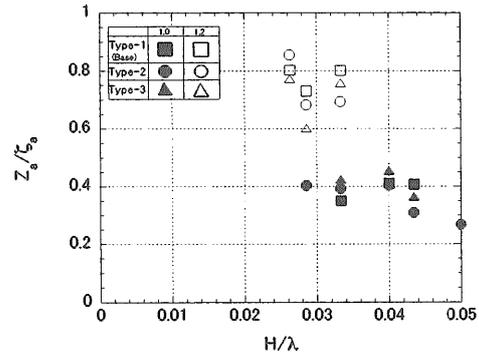


図 5.15 上下揺れの波高影響 (内航貨物船, $\chi = 150^\circ$, $Fn=0.17$)

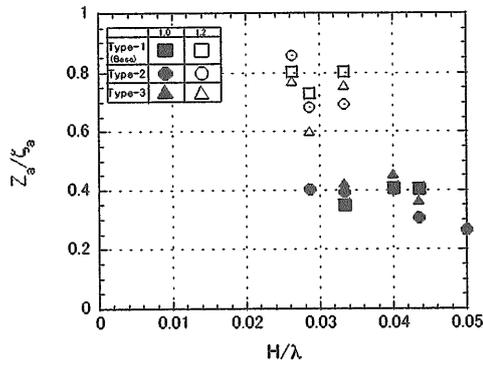


図 5.13 上下揺れの波高影響 (内航貨物船, $\chi = 180^\circ$, $Fn=0.17$)

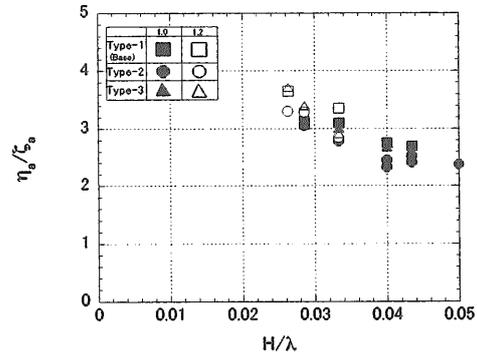


図 5.16 船首相対水位の波高影響 (内航貨物船, $\chi = 180^\circ$, $Fn=0.17$)

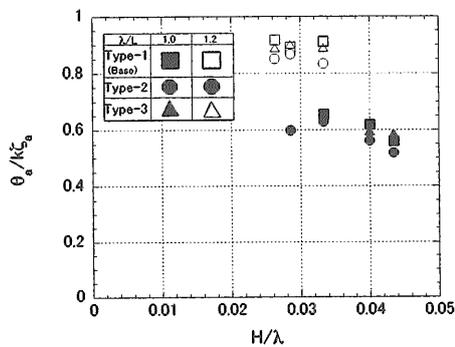


図 5.14 縦揺れの波高影響 (内航貨物船, $\chi = 150^\circ$, $Fn=0.17$)

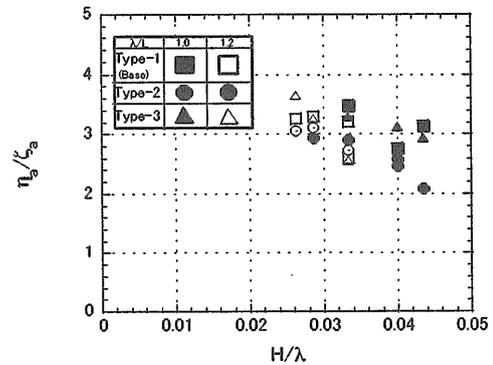


図 5.17 船首相対水位の波高影響 (内航貨物船, $\chi = 150^\circ$, $Fn=0.17$)

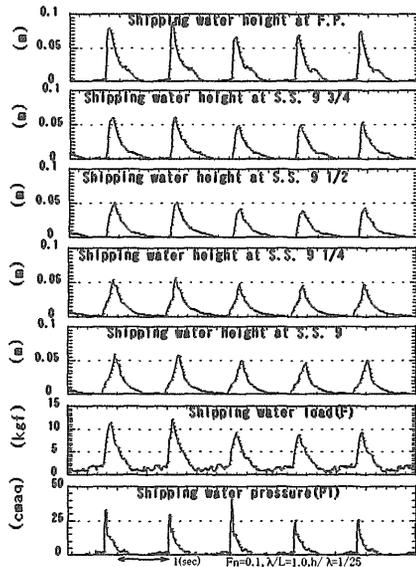


図 5.18 甲板上水位分布、甲板荷重、甲板水圧の時系列の一例 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.1$ 、 $H/\lambda=1/25$ 、 $\lambda/L=1.0$)

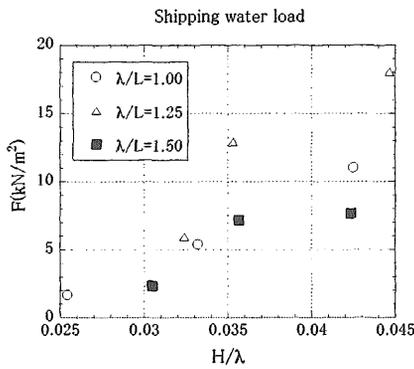


図 5.19 甲板荷重の波高影響 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.1$)

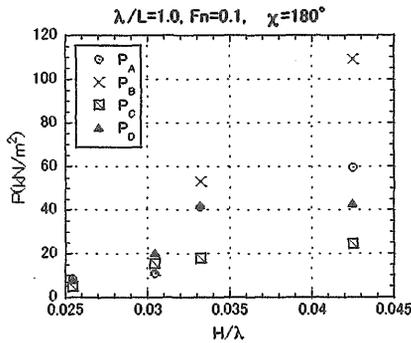


図 5.20 甲板水圧の波高影響 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.1$ 、 $\lambda/L=1.0$)

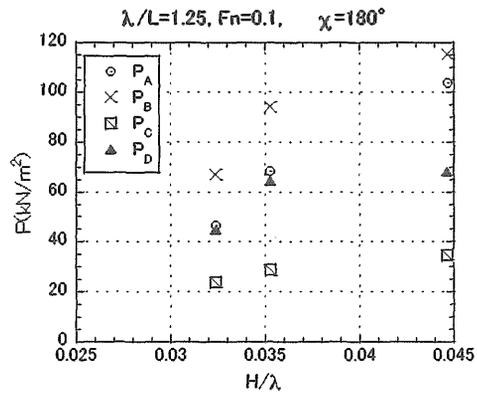


図 5.21 甲板水圧の波高影響 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.1$ 、 $\lambda/L=1.25$)

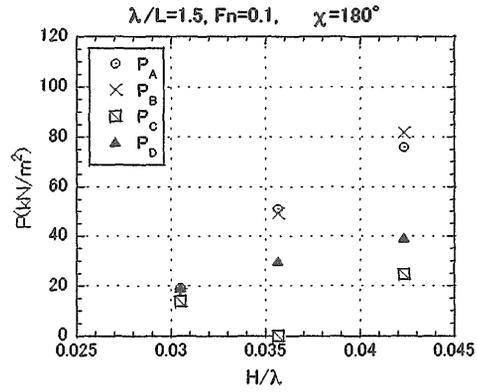


図 5.22 甲板水圧の波高影響 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.1$ 、 $\lambda/L=1.5$)

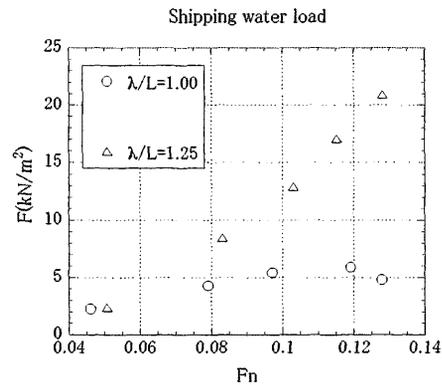


図 5.23 甲板荷重の船速影響 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$)

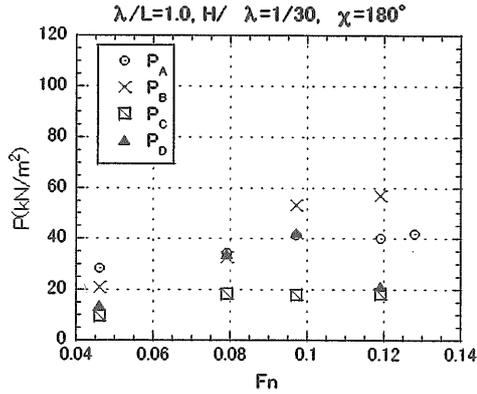


図 5.24 甲板水圧の船速影響 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $\lambda/L=1.0$)

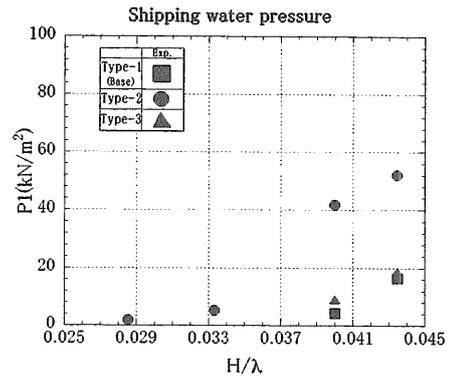


図 5.27 甲板水圧の波高影響 (内航貨物船、P1、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.17$ 、 $\lambda/L=1.0$)

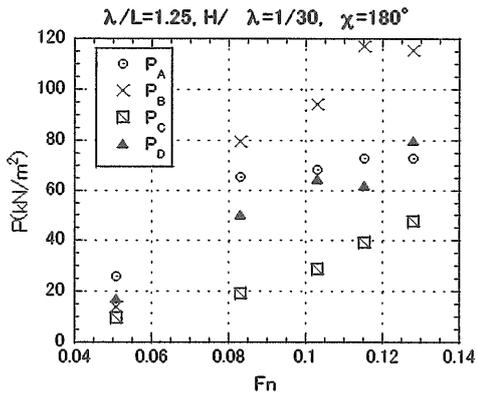


図 5.25 甲板水圧の船速影響 (内航タンカー、 $\chi=180^\circ$ 、 $H/\lambda=1/30$ 、 $\lambda/L=1.25$)

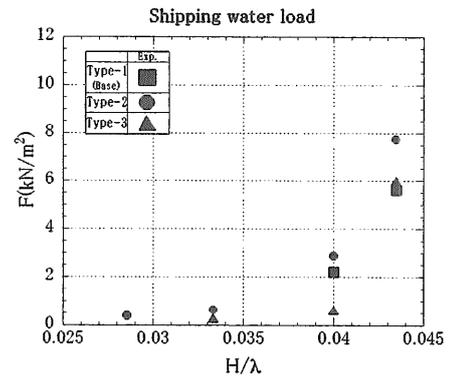


図 5.28 甲板荷重の波高影響 (内航貨物船、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.17$ 、 $\lambda/L=1.2$)

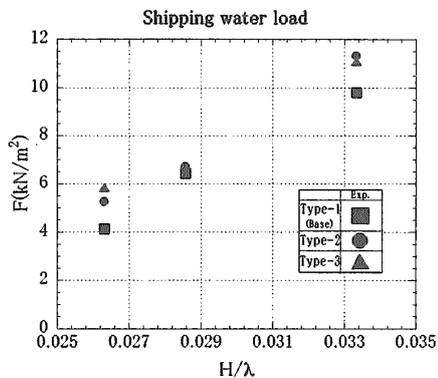


図 5.26 甲板荷重の波高影響 (内航貨物船、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.17$ 、 $\lambda/L=1.0$)

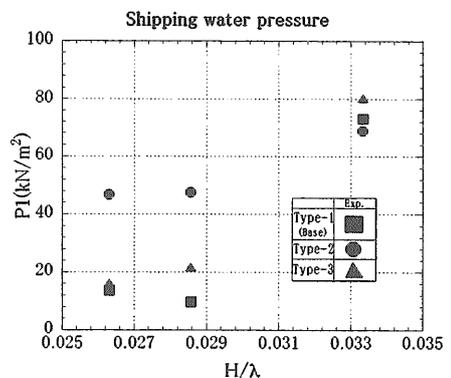


図 5.29 甲板水圧の波高影響 (内航貨物船、P1、 $\chi=180^\circ$ 、 $F_n=0.17$ 、 $\lambda/L=1.2$)

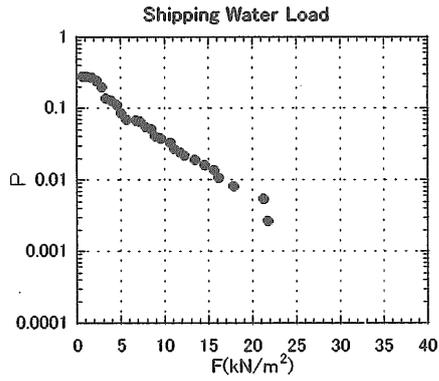


図 5.30 甲板荷重の超過確率 (内航タンカー)

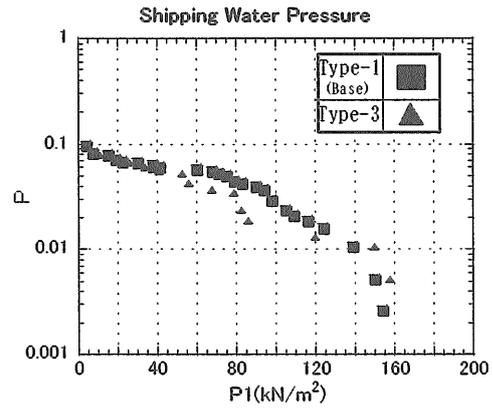


図 5.33 甲板水圧の超過確率 (内航貨物船, P1)

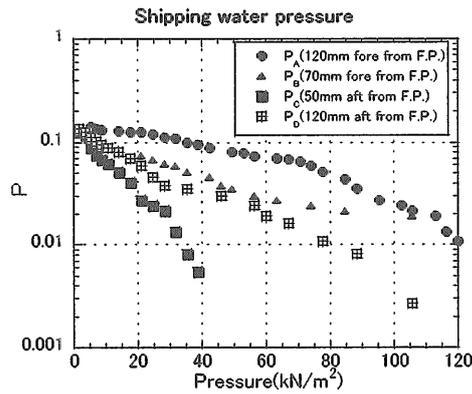


図 5.31 甲板水圧の超過確率 (内航タンカー)

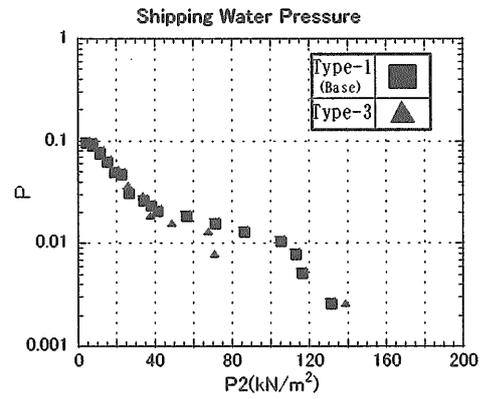


図 5.34 甲板水圧の超過確率 (内航貨物船, P2)

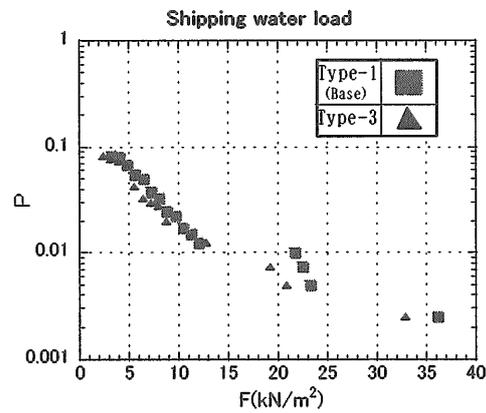


図 5.32 甲板荷重の超過確率 (内航貨物船)