

図3.3.16 4ローハル型支持浮体群の左右揺れ減衰係数

験値は粘性減衰力が加わっているの、零になることはない。全体の造波減衰係数が零になる点はいわゆる波無し点であり、上下揺れの場合は浮体を複数にしても新たに波無し点は現われていないが、左右揺れには3体の場合2点現われている。また4体の場合は正確には1点であるが、零に近い点が他に2点存在する。また2体の場合は零に近い点が1点存在している。これらの点では波強制力も零か零に近い値となる。

次に、相互干渉がどのような性質をもっているかを、実験結果および計算結果から考察する。まず、単体に働く流体力（付加質量または減衰係数）を f_1 とする。2体にしたときに各単体に働く流体力 f_2 は、単体の値 f_1 と2体にしたための干渉項 Δf_2 で表わせるものとする。即ち

$$f_2^{(1)} = f_1^{(1)} + \Delta f_2 \quad (3.3.27)$$

3体にしたとき、外側の単体に働く流体力 $f_3^{(2)}$ は、2体の時の値に3体目の干渉項 Δf_3 が加わったものとして、次のように表わせる。

$$f_3^{(2)} = f_1^{(1)} + \Delta f_2 + \Delta f_3 \quad (3.3.28)$$

以下同様にして、1列に n 体並んだ浮体群の、最も端の単体に働く流体力は

$$f_n^{(\frac{n+1}{2})} = f_1^{(1)} + \sum_{i=1}^n \Delta f_i \quad (3.3.29)$$

と表わせる。但し、 $f_n^{()}$ の () は、中央の対称軸から外側に向かって数えた浮体の番号を表わしている。() は整数をとることを意味している。 Δf_n は逆に

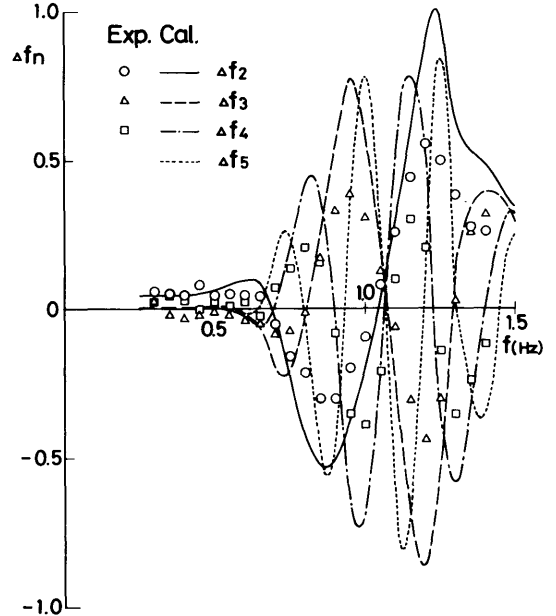


図3.3.17 Δf_n の特性

$$\Delta f_n = f_n^{(\frac{n+1}{2})} - f_n^{(\frac{n}{2})} \quad (3.3.30)$$

と表わせるので、 n 体までの実験値または計算値より、求められる。これは、 n 体めの浮体に加わったとき、端部の単体に働く流体力と、 $(n-1)$ 体ときの端部の単体に働く流体力との差を表わしている。ここで、 n が大きくなったとき Δf_n が小さくなっていく傾向であれば、適当な n まで相互干渉の影響を考慮すればよいことになる。しかしながら、上下揺れ付加質量について Δf_n の特性を実験および計算で求めたものを図3.3.17に示すように、 $n=6$ までの範囲では、 n が大きくなると、ある包絡線の中で周波数に対する変化が激しくなるだけで、小さくなっていく傾向はない。なお、計算値は31要素のもので、極大・極小が強調されすぎているため、実験値の2倍近い値を示しているが、その周波数、零になる周波数などの特性は実験値とよく一致している。次に、3体の場合の中央の単体に働く流体力 $f_3^{(1)}$ は両側から Δf_2 の影響を受けているので、

$$f_3^{(1)} = f_1^{(1)} + 2\Delta f_2 \quad (3.3.31)$$

と表わせるが、厳密にはこの Δf_2 は3体目との相互干渉によって(3.3.27)式の Δf_2 とは異なっている。3体目の存在による影響を Δg_2 とすると

$$f_3^{(1)} = f_1^{(1)} + 2(\Delta f_2 + \Delta g_2) \quad (3.3.32)$$

と表わせる。 Δg_2 は逆に

$$\Delta g_2 = (f_3^{(1)} + f_1^{(1)})/2 - f_2^{(1)} \quad (3.3.33)$$

と表わせるので、3体までの実験値または計算値より求められる。これは、 Δf_n を1次の干渉項とすれば、2次の干渉項とでも呼べるような量である。

次に、4体にした場合に内側に働く1次の干渉項を含んだ流体力は

$$f_4^{(1)} = f_1^{(1)} + 2\Delta f_2 + \Delta f_3 \quad (3.3.34)$$

であるが、2次の干渉項まで含んだ形で表わすと、

$$f_4^{(1)} = f_1^{(1)} + 2(\Delta f_2 + \Delta g_2) + \Delta f_3 + \Delta g_3 \quad (3.3.35)$$

となる。 Δg_3 は4体めが存在することによる影響であり、次式で求められる。

$$\Delta g_3 = f_4^{(1)} - f_3^{(2)} - f_3^{(1)} + f_2^{(1)} \quad (3.3.36)$$

厳密に言えば、 Δg_2 も4体めの存在によって(3.3.32)式の Δg_2 とは異なり、3次の干渉項ともいべき項を考えなければならない。しかしながら、 Δg_2 、 Δg_3 を上下揺れの付加質量係数について、実験値および計算値から求めたところ、 Δf_n とはオーダーが1桁小さい値が得られたので、これから類推すると、3次の干渉項は更にオーダーが小さいと思われるので、今回は2次のオーダーの考察までにとどめた。

2次の干渉項が流体力係数の推定にどの程度影響を与えるかを、上下揺れの付加質量係数について調べた。図3.3.18は、3体までの実験結果から Δf_2 、 Δg_2 、 Δf_3 を求め、4体の各単体および全体に働く付加質量係数を推定して、4体の実験値と比べたものである。黒塗

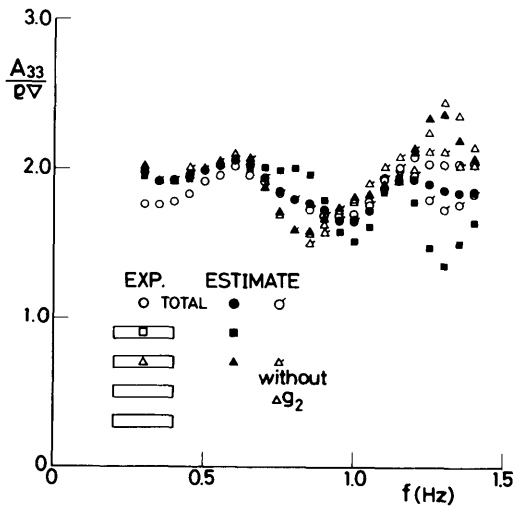


図3.3.18 2次の干渉項の影響

り記号は(3.3.35)式で Δg_3 を省いた値を、○、△は Δg_2 も省き、1次の干渉項のみの値を示している。1.2~1.3Hz付近で多少差があり、 Δg_2 を含めるとより実験値に近づくことがわかる。同じことを31要素の計算値で調べた結果は、実験値より差がなく、実用的には1次の干渉項だけ考えれば十分であろう。

(2) フーティング型支持浮体群

フーティング型支持浮体群については、3行3列の浮体群のみ実験を行ない、順次フーティングを増す系統的实验をしていない。また、ローハル型支持浮体群の場合は、空間的には1次元の干渉であったが、3行3列の場合は2次元的な干渉を考えなければならないので、問題は複雑となる。今回は3行3列の浮体群についての結果のみを示すこととする。

図3.3.19に前後揺れの流体力係数の実験値および計算値の比較を示す。実験値は振幅10mmの場合である。周波数の高いところで実験値の方が大きくなる傾向があるが、実験値と計算値とは非常によい傾向の一致を示している。減衰係数も、粘性の修正が必要ない程良く合っている。いずれも単体の場合とはかなり特性が異なっており、相互干渉効果が大きいことを示している。特に前後方向の中央は干渉効果が大きく、その中央(○)と横(▽)は同じような特性をもっている。前側どうしの2つ(△, □)も同じような特性をもっている。またこれらは、3体のローハル型支持浮体群の左右揺れ流体力係数(図3.3.14)のそれぞれ中央と端部の特性と良く似ている。これらのことは、支持浮体の変位方向に干渉効果が大きく、それと直角の方向には干渉効果が少ないこと、3本のフーティング型支持浮体は、1本のローハル型支持浮体に置き換えたものと同じような効果をもつことを示している。減衰係数にはやはり前後方向の中央の浮体に、大きな負の極小値が現われている。上下揺れの流体力係数を図3.3.20に示す。この場合も、実験値と計算値の傾向は、減衰係数の粘性項を考慮すれば、良く合っているといえる。但し、3.3.2で示した抗力係数と修正法を用いて推定した等価線型減衰係数は、細線で示したが、ローハル型の場合と同様に単体の場合ほど良く合わない。今後究明すべき問題である。上下揺れの場合の干渉効果は、前後揺れの場合ほど大きくない。また、ローハル型支持浮体群と比べても干渉効果および係数そのものも小さい。これは、ローハル型支持浮体のローハル部分が、上下揺れの攪乱源として大きな効果をもっていることを示している。

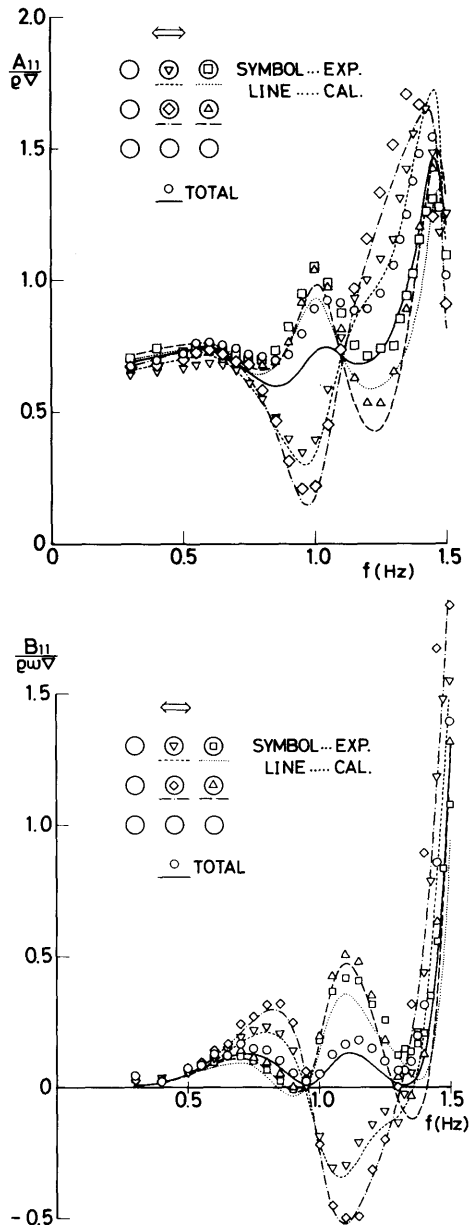


図3.3.19 3×3フーティング型支持浮体群の前後揺れ流体力係数

3.3.4 全体浮体に働く流体力の推定法

想定実機または大型模型のように、多数の支持浮体が配列されている場合は、2次元的な干渉の効果について究明しなければ、全体浮体に働く流体力を推定す

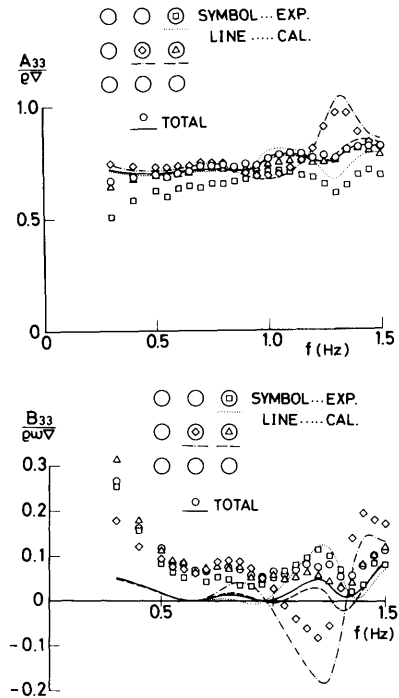


図3.3.20 3×3フーティング型支持浮体群の上下揺れ流体力係数

ることはできない。したがって、ここではローワーハル型支持浮体群による部分模型についての推定を試みることにする。3.3.3.(1)で述べたように、2次の干渉項は影響が小さいとして省くことにすると、 n 体横に並べた支持浮体群に働く流体力は、 n が奇数のとき、次式で表わされる。

$$f_n^{(n)} = n(f_1^{(1)} + \sum_{i=1}^n \frac{2(n-i+1)}{n} \Delta f_n) \quad (3.3.37)$$

ここで、 Δf_n は先に見たように n が大きくなるほど周波数に対する変動が激しくなるので、波強制力において空間的位相によって相殺効果が現われたように、互に相殺されることが期待できる。ちなみに、全体に働く上下揺れの付加質量係数の6体までの計算値を図3.3.21に示すが、4体以上になるとある特性に収束していくような傾向がみられる。 Δf_n の特性は計算により $n=6$ まで求められているが、これを実験結果と比較して実験値に合うような係数を求め、計算で求めた Δf_n にこの係数を掛けたものを改めて Δf_n とした。(3.3.37)式を用いて、 Δf_4 、 Δf_5 および Δf_6 まで加算した結果は、図3.3.22に示すようにあるゾーンの中

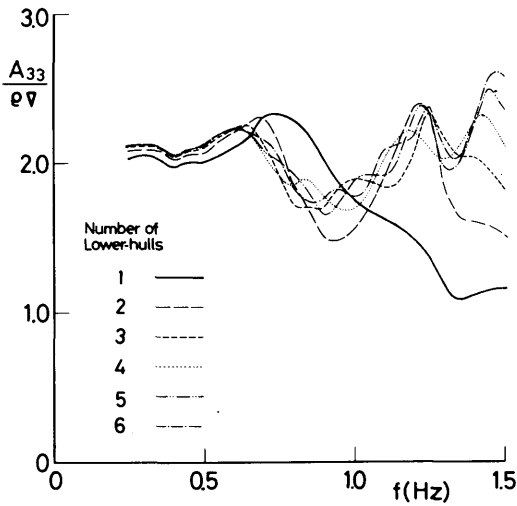


図3.3.21 ローハル型支持浮体群全体の上下揺れ付加質量係数の計算値

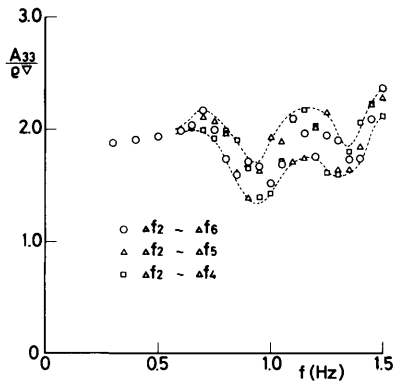


図3.3.22 ローハル型部分模型全体に対する上下揺れ付加質量係数の推定値

に入っており、図3.3.21とよく似た特性をもっている。これが部分模型に対する大略の上下揺れ付加質量係数の推定値である。

以上のように、全体浮体に働く流体力は、計算または実験で干渉項の特性をある程度把握することにより、干渉項の重ね合わせで大略の値を推定することができる。

3.4 船舶係船時の接舷力及び係船力

3.4.1 2次元接舷実験

(1) 支持浮体群背後の透過波高

図3.4.1に示したような底面直径 $D=10\text{cm}$ のフー

ティング型支持浮体模型を二次元水槽（長さ13m、幅1.0m、深さ1.2m）に最大20列（水槽の幅方向に5行）まで間隔 $l=20\text{cm}$ に設置し、透過波高の計測を行った。透過波を計測する波高計は接舷実験の際の係留模型船の中心線、即ち最後尾のフーティングから27cm離れた点とした（図3.4.1参照）。

図3.4.2は入射波高 (H_i) と透過波高 (H_t) の比 (H_t/H_i)、即ち波高減衰率を波周期に対して示したもので、20列のみに対して実測値を示した。10列と5列に対しては実測値の平均値を破線及び一点鎖線で示してある。フーティング型支持浮体の間隔 (l) と波長 (λ) との比 (λ/l) が2倍となる周期付近でいずれの場合も波高が急激に減衰している。

波高減衰率 (H_t/H_i) の値をフーティング型支持浮体列数 (N) に対して示したものが図3.4.3である。この実験は代表的波周期 $T=4, 6, 8$ sec の波で、フーティング型支持浮体列数に対する減衰率の変化をし

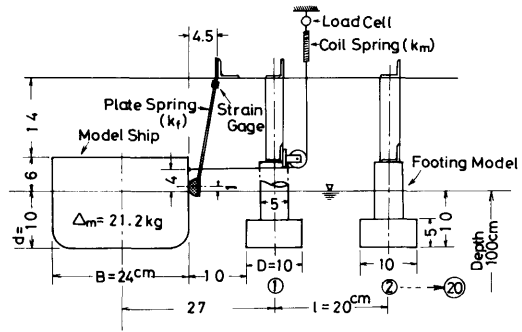


図3.4.1 二次元接舷実験

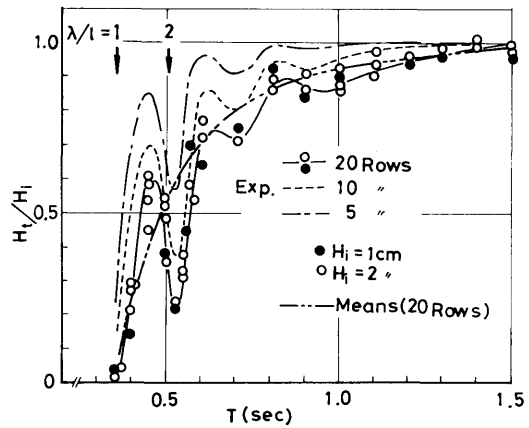


図3.4.2 波周期に対する波高減衰率の変化

らべたものである。これらの実測値から波高減衰率 (H_t/H_i) はフーティング型支持浮体の列数 (N) の指数関係で近似できるので、次式で表わすものとする。

$$\frac{H_t}{H_i} = \exp(-\alpha N) \dots\dots\dots (3.4.1)$$

また、 α の値は波周波数の関数として表わすことができる。図3.4.2において $\lambda/\ell = 2$ 付近の急激な変化を無視して、実測値を平均化して二点鎖線で示したように (一例として N=20列のみを示した。) 変化するものとして α を求めると、図3.4.3の余白に示したように波周波数の4次の曲線で近似できる。

$$\alpha = 0.013(\omega\sqrt{D/g})^4 \dots\dots\dots (3.4.2)$$

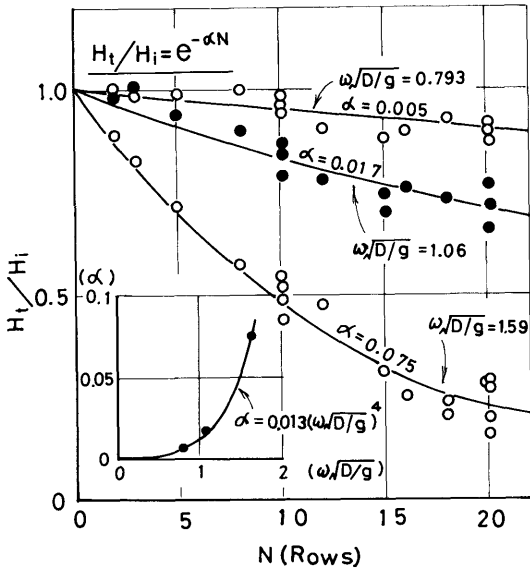


図3.4.3 フーティング型支持浮体の列数に対する波高減衰率

ここで、Dはフーティング型支持浮体の底面の直径である。

(2) 接触力及び係船力

二次元接触実験の概略図を図3.4.1に示した。接触実験におけるフーティング型支持浮体模型の列数は10列及び20列とし、その波上側及び波下側に模型船を係船した状態で実験を行い、両者を比較した。

係留船は二次元模型 (L=98cm, B=24cm, d=10cm, Δ=21.2kg) で、断面形状はルイスフォーム (半幅深さ比 $H_0=1.2$, 断面積係数 $\sigma=0.9$) とした。

防舷材及び係留索模型はいずれも線形ばねとした。防舷材模型には板バネを使用し、それにひずみゲージを貼付し接触力を計測した。係留船の接触点は船体中央で喫水線上1cmの場所とした。係留索模型にはコイルばねを使用した。係留点は船体中央で喫水線上4cmの場所とした。使用した防舷材と係留索模型のばね定数及び実験状態を表3.4.1に示した。

模型船の横揺れは加速度計で、左右揺れはポテンシヨメータで計測した。模型船の横揺れの固有周期は0.99secである。左右揺れの固有周期は防舷材及び係留索模型のばね定数により異なり、接触力がある程度以上になると一定値をとる。その実測値を表3.4.1に併記した。

図3.4.4は模型船をフーティング型支持浮体群の波上側と波下側にそれぞれ係船した場合の接触力と係船力を比較して示した。 F_f 及び F_m はそれぞれ接触力と係船力であり無次元化して示した。また、実験では接触力、係船力は一点で計測しているために、船首と船尾側の二点接触である大型模型実験と比較するために実測値を $1/2$ して示した。この図から、波周波数の高い範囲では、透過波高の減衰が大きいので、波上側と波下側の値の差は大きい、長周期側ではほとんどの波が透過するので両者の差はほとんどないことがわかる。

表3.4.1 二次元接触実験の係船状態

状態	防舷材のばね定数 k_f (kg/cm)	係留索のばね定数 k_m (kg/cm)	初期張力 T_i (g)	左右揺れの同調周期 T_n (sec)
1	0.265	0.0295	20.0	4.2
2	"	0.0590	"	3.7
3	0.606	0.0295	"	4.4
4	"	0.0590	"	3.3
5	"	0.145	"	2.6

また、第一の極大値は横揺れの同調周波数 ($T_n=0.99$ sec) であるが、波周波数が係留船の左右揺れの同調周波数 (表3.4.1参照) の2倍の点 (図3.4.4で $2\omega_y$ と記した場所) で急激に増大する。他の係船状態でも同様の傾向を示すが、左右揺れの同調周波数の3倍及び4倍の点でも極大値が発生する場合もある。図3.4.4の例では実験範囲に入っていないが、当然同調周波数で最大値となる。

図3.4.5はフーティング型支持浮体の列数が20列の場合の実験で、短周期側の透過波高の減衰の大きい範囲での、波上側と波下側の接触力を比較して示したものである。この実験においては波下側係船状態での値 (黒丸印) を密に計測し、図3.4.2に示した $\lambda/l=2$ における急激な波高減衰の影響も示らべた。図中の破線の値は図中の波上側の接触力の値 (丸印) に図3.4.2

に示した波高減衰率 H_t/H_i の値を乗じて求めた値である。これらの値は波下側の値より幾分か大きめの値となっているが、波下側の接触力や係船力は波上側の値と波高減衰率から推定が可能といえる。また、実験は波高1 cm及び2 cmで行ったが、図3.4.6に示すように今回の実験範囲では波高影響は認められなかった。

3.4.2 大型模型に対する接触実験

図3.4.7に大型模型における接触実験の係船場所及び係船法を示した。大型模型は中央部に三個のポンツン型浮体を有しているIII型模型である。大型模型の設置状態は波の入射方向に平行な $\alpha=0^\circ$ と 30° 傾斜させ

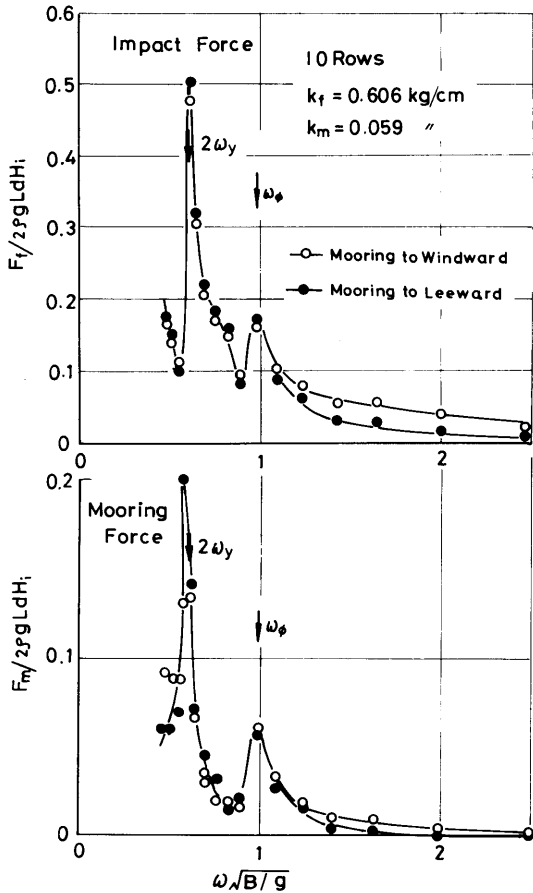


図3.4.4 接触力及び係船力の実測値

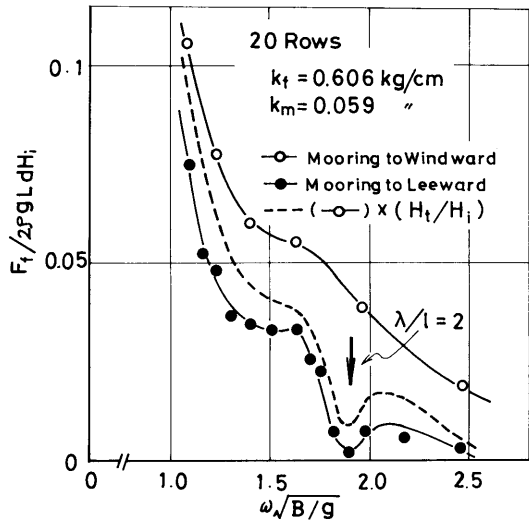


図3.4.5 波下側係船における接触力の推定

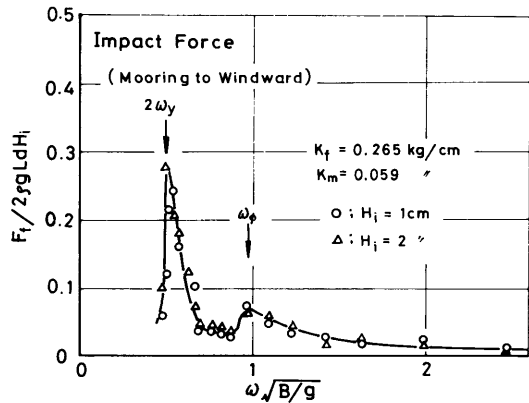


図3.4.6 接触力の波高影響

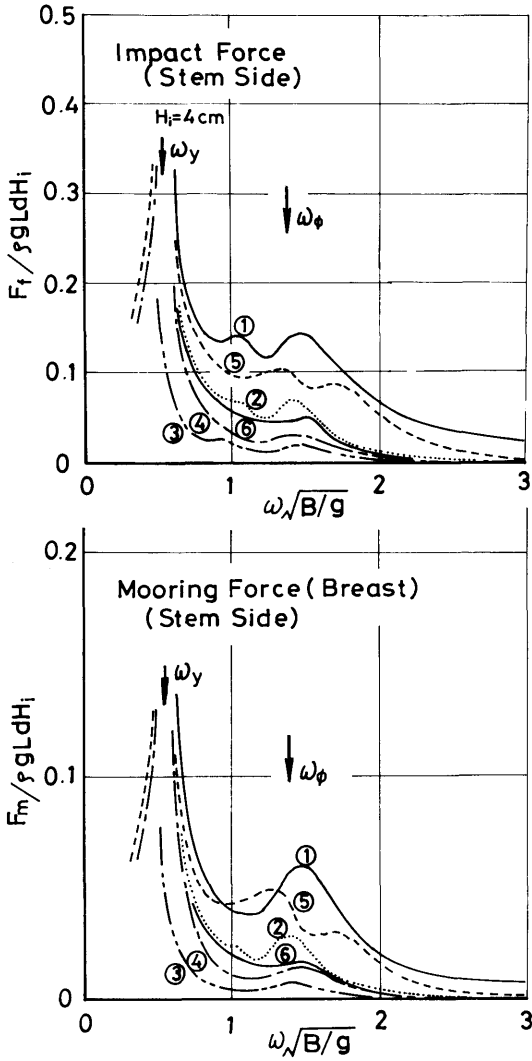


図3.4.8 各係船場所における接舷力と係船力

舷力及び係船力の実測値（いずれも船首側の値）を示した。また、大型模型の設置状態 $\chi = 30^\circ$ における透過波の波高減衰の一例を図3.4.11に示した。大型模型にはフーティング型、ローハル型及びポンツン型支持浮体を組合せて使用しているために、二次元実験におけるフーティング型支持浮体に比較して波高減衰が大きい。そのために、接舷力と係船力はかなり長周期領域まで波上側の値（①及び⑤）と波下側の値（②及び⑥）にひらきがある。

二次元接舷実験と同様に、波上側係船①及び⑤の接

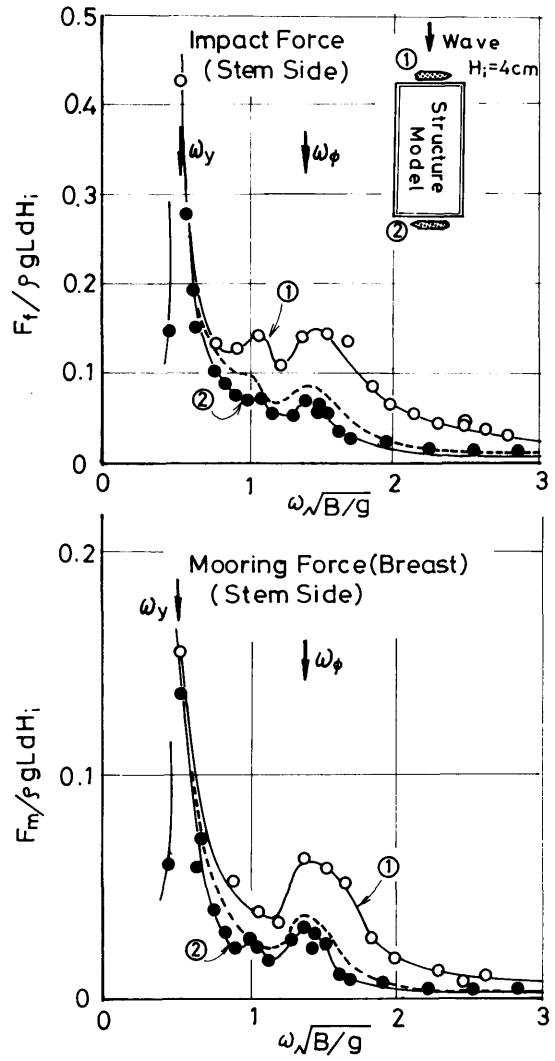


図3.4.9 大型模型背後の接舷力と係船力の推定 ($\chi = 0^\circ$)

舷力と係船力の値（丸印）に、図3.8.11の波高減衰率 (H_t/H_i) を乗じて求めた値を図3.4.9及び図3.4.10に破線で示してある。これらの値はいずれも波下側の値（黒丸印）に比較し幾分大きい値となっている。また、波上側係船における接舷力や係船力は、文献14)のドルフィン係船の場合と比較した場合、係船条件等が異なるために定量的比較はできないが定性的にはよく一致することから、構造物で遮へいされた波下側に係留された船舶の接舷力や係船力は、波上側での値と構造物支持浮体群の波高減衰率を知ることにより、か

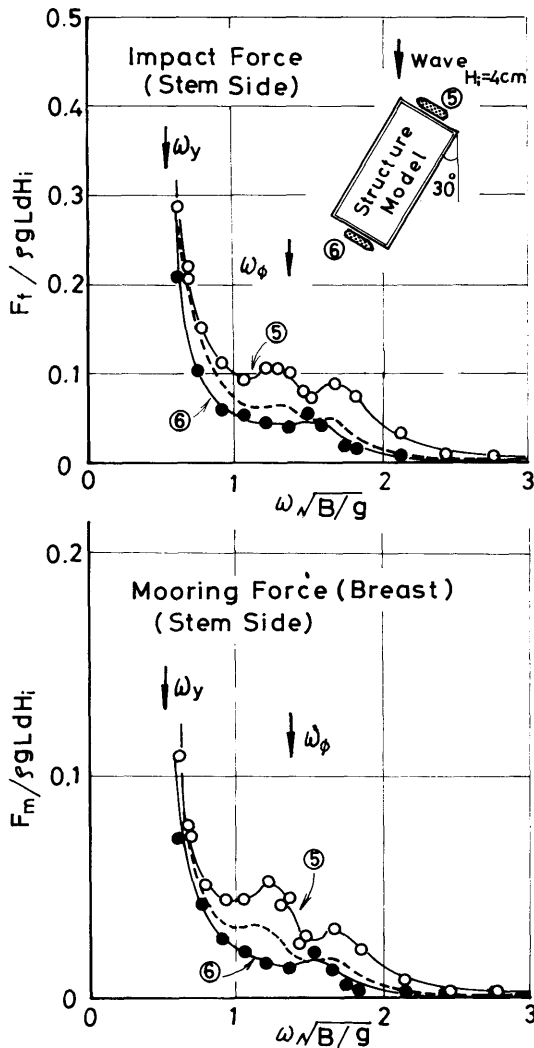


図3.4.10 大型模型背後の接触力と係船力の推定 ($\alpha = 30^\circ$)

なりの精度で推定することができる。

4. 研究成果

本研究において得られた成果をまとめると、以下に示す事柄が挙げられる。

- (1) 浮体に働く波強制力
 - i) 単独支持浮体に働く波強制力は、ローハル型支持浮体を除いて、線形理論計算によって精度よく推定できることが示された。ローハル型支持

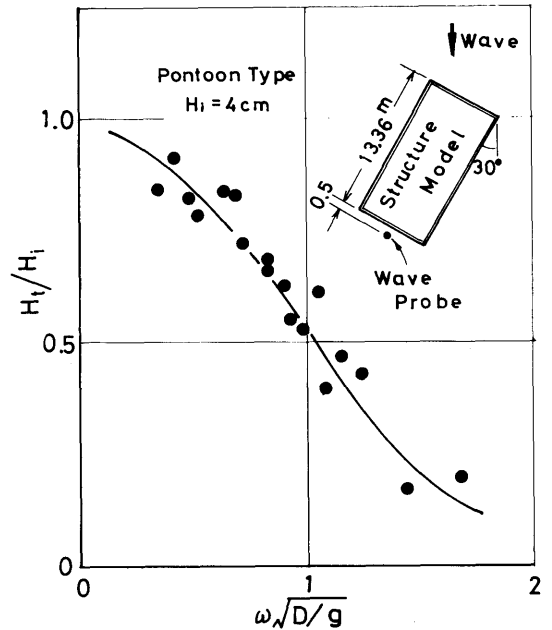


図3.4.11 大型模型 (III型) の波高減衰

浮体に対しては、線形理論の適用可能な条件が $h/\xi_a > 5$ であることを確認したが、設定波高に対する波強制力の推定は今後の課題である。

- ii) 複数支持浮体群の個々の浮体に働く波強制力の特性を、実験および線形理論計算によって、大略把握することができた。支持浮体間の流体力学的相互干渉は、支持浮体の取付け間隔の2倍の波長に対応する周波数付近で最も顕著に現われる。
- iii) 全体浮体に働く波強制力は、空間的な位相差によって個々の支持浮体に働く力が相殺されるので、支持浮体取付間隔に等しい波長に対応する周波数付近以外は極めて小さな値となり、相互干渉効果も見掛け上小さくなる。このため、推定値として位相差のみを考慮して支持浮体に働く波強制力を単純に加算し、その極大値を連ねる包絡線を用いれば、動揺などの推定に対しては安全側の値を与える。また、支持浮体間の波の減衰を考慮すれば、更に実際的な値に近づくことが判明した。

- (2) 浮体に働く風荷重、流れ荷重および波漂流力
 - i) 浮体に働く風荷重は、上部構造物および支持浮体のコラム群に分け、既存の推定手法をやや拡張して用いた結果、かなり良い精度で推定できるこ

とが確認された。

- ii) 浮体に働く流れ荷重は、単独支持浮体に働く抗力を精度良く求めることにより、既存の推定手法の拡張で極めてよい精度の推定ができることが確認された。
 - iii) 浮体に働く波漂流力は、部分模型、大型模型など特定の浮体についての特性が明らかになった。しかしながら、任意の大型浮遊式海洋構造物に働く波漂流力を推定する手法は未だ確立されていないので、今後の課題である。
- (3) 浮体に働く流体力特性
- i) 新しく「動揺流体力計測装置」を製作し、他の計測システムとも合わせて、精度良い流体力計測の実験が可能となった。
 - ii) 単独支持浮体に働く流体力は、線形理論と実験値より求めた抗力係数を用いて、精度良く推定できることが示された。
 - iii) 複数支持浮体群の個々の支持浮体に働く流体力の特性を、実験および線形理論計算により、大略把握することができた。また、相互干渉の特性を明らかにし、1次元の相互干渉の影響を推定する方法を示した。なお、粘性減衰力の相互干渉、2次元の相互干渉については、今後の課題として残される。
 - iv) 1次元の配列の複数支持浮体群に働く全体流体力は、干渉項の重ね合わせで大略推定できることを示した。
 - v) 支持浮体を任意の個数、任意の位置に展開し、3次元特異点分布法により流体力および波強制力を計算するプログラムを開発した。
- (4) 船舶係船時の接触力および係留力

- i) フーティング型支持浮体群を透過する波の波高減衰を推定する実験式を求めた。
- ii) 大型浮遊式海洋構造物へ船舶が接舷する場合の接触力および係船力の特性を明らかにし、構造物で遮へいされた波下側の接触力および係船力は、波上側の値と波高減衰率から推定できることを示した。

5. 結 言

今回実施した支持浮体または支持浮体群の波強制力および流体力に関する系統的な研究により、単独支持浮体に対する精度の良い推定手法が確立され、支持浮体群における流体力学的相互干渉効果の特性も大略解

明されたので、浮体群における個々の浮体および全体浮体に働く波強制力および流体力を推定するための基礎的手法が確立されたといえる。また、大型浮遊式海洋構造物に船舶が接舷する際の接触力および係船力の推定手法も確立された。風荷重および流れ荷重は、既存の手法で精度良く推定できることが確認されたが、波漂流力に関しては、相互干渉効果を含んだ精度の良い推定手法が未だ確立されていないので、早急に開発する必要がある。

参考文献

- 1) 安藤定雄, 大川豊, 上野勲: 浮体工法による海上空港建設に係わる評価のための技術調査研究, 船舶技術研究所報告, 別冊第4号, 1983年3月
- 2) 宝田直之助: 超大型海洋構造物のテクノロジー・アセスメントの一例(その3, その4), 日本造船学会誌No.640 (1982年10月), No.641 (1982年11月)
- 3) 大楠丹: 複数本の鉛直円柱に働く波力について, 日本造船学会論文集 第131号, 1972年6月
- 4) 大楠丹: 多数の浮体で支持された海洋構造物に作用する波力について, 西部造船会会報第51号, 1975年11月
- 5) 大楠丹, 高木幹雄: 双胴船の運動について, 日本造船学会論文集第129号, 1971年6月
- 6) 竹沢誠二, 前田久明, 白木東, 江口純弘: 双胴船に作用する流体力について, 日本造船学会論文集第131号, 1972年6月
- 7) 影本浩, 星野邦弘: 超大型浮遊式海洋構造物の波浪中における諸性能に関する基礎的研究(その1), 船舶技術報告第20巻第5号, 1983年9月
- 8) Faltinsen, O. M., Michelson, F. C.: Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, 1974
- 9) van Oortmerssen, G.: The Motions of a Ship in Shallow Water, Ocean Engineering, Vol. 3, 1976
- 10) 大川豊: ラコム付没水体に働く波強制力について, 船舶技術研究所研究発表会講演集(第40回), 1982年12月
- 11) 岡田功, 伊藤学, 宮田利雄: 耐風構造, 丸善(株), 1977年
- 12) 安藤定雄, 高井隆三, 加藤俊司: 係留方式による係留特性について, 船舶技術研究所研究発表会講

演集（第42回），1983年12月

- 13) 大川豊：半潜水型海洋構造物の波浪中動揺特性について，船舶技術研究所研究発表会講演集（第42回），1983年12月
- 14) 鶴田三郎：ドルフィン係留船舶に働く係留力について，日本航海学会論文集，第65号，1981年5月

15) 安藤定雄，星野邦弘：フーティング型浮体群に働く波強制力について，船舶技術研究所研究発表会講演集（第40回），1982年12月

16) 安藤定雄，影本浩，加藤俊司：要素浮体群に働く波強制力について，船舶技術研究所研究発表会講演集（第42回），1983年12月