

津波による小型船舶の漂流特性と その衝突力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF DRIFTING BOATS DUE TO TSUNAMI AND THEIR COLLISION FORCES

水谷法美¹・宇佐美敦浩²・小池竜²

Norimi MIZUTANI, Atsuhiro USAMI and Toru KOIKE

¹正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

There are high possibilities in the near future that great earthquakes occur and large-scale tsunamis attack Japan. In fishing ports facing on the ocean where a large number of fishing boats are moored, these boats would be littered in the ports, or drifting boats would collide with back-yard-structures, if such a tsunami attacks, like an event actually happened at Hokkaido in 1993. This is one of major concerns for tsunami countermeasures in fishing ports.

To predict and reduce these damages, it is absolutely indispensable to know the behavior of drifting boats and their collision forces. In the present study, hydraulic experiment was performed to investigate behavior of a boat and collision forces, as well as properties of tsunami. Based on a series of experiments, it is revealed that boats tend to be drifted keeping initial angle. Moreover, under higher incident wave conditions, the drifting velocity is influenced by the initial direction of boats than the height of draft.

Key Words : *Tsunami, run-up, fishing boat, pleasure boat, drifting behavior, collision force*

1. 緒言

東海、東南海・南海地震などの巨大地震の発生が叫ばれて久しい。ひとたびこのような地震が発生すると、その激しい揺れによる広範囲な被害とともに、津波の発生によって沿岸域に甚大な被害をもたらされることも指摘されている。津波による具体的な被害例としては、溺死などの人的被害や構造物などの浸水・損壊被害のような一次被害の他に、津波による漂流物の構造物への衝突や流出のような二次被害も挙げられる。特に漁港や港湾などにおいては、船舶やコンテナ・自動車などが漂流する可能性があり、背後の陸上構造物への衝突被害を甚大化させることが懸念される。1993年に発生した北海道南西沖地震では多くの漁船が港内で沈没、流出もしくは破損するといった被害が発生し¹⁾、これらの被害発生確率は港内津波遡上高と大きな関係性があると報告されている²⁾。また、衝突・漂流被害は、長期間にわたり港の機能を消失させることにもなり、震災後の円滑な復旧に対しても支障をきたす可能性が高い。そのため、これらの被害を予測し、被害の軽減策を検討することは、今後の防災計画に、極めて重要であり、急務の課題であると言える。

津波による漂流物の研究はこれまでもいくつか行われてきている。松富³⁾や池野・田中⁴⁾は木材を

対象に衝突力を実験結果に基づいて研究しており、水谷ら^{5), 6)}はエプロン上に遡上した津波によるコンテナの漂流特性や津波力・衝突力に関して実験を行い、漂流衝突力の算定式を提案している。また、タンカーが津波により陸上に打ち上げられる場合を対象に、藤井ら⁷⁾や池谷ら⁸⁾が実験や数値解析を行って検討している。河田ら⁹⁾はさらに広い観点から船舶被害を検討している。しかし、吃水が小さいために比較的エプロン上に打ち上げられやすく、結果として被害の拡大が予想される漁船やプレジャーボートなどの小型船舶の津波来襲時の挙動についてはあまり研究がなされておらず、その漂流特性などは未解明の点が多く残されている。

本研究では、港内に停泊している小型船舶を想定した水理模型実験を行い、津波による小型船舶の挙動や陸上を漂流した船舶が背後の構造物に衝突した場合の衝突力について考究する。

2. 水理模型実験

(1) 実験装置

水理模型実験を片面ガラス張り二次元造波水路(長さ30m, 幅0.7m, 深さ0.9m)を使用して行った。

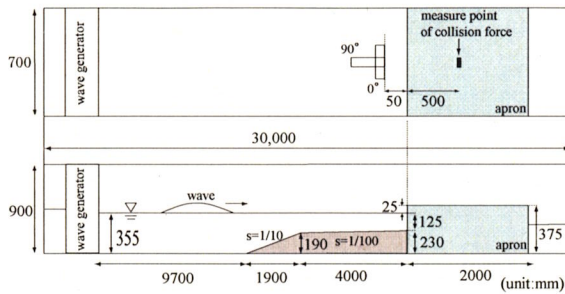
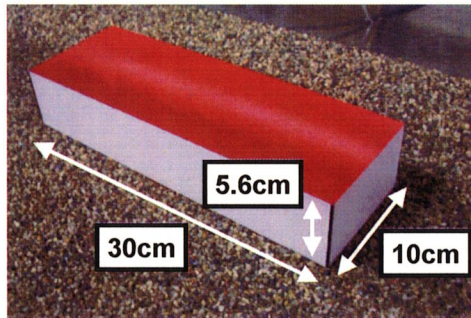


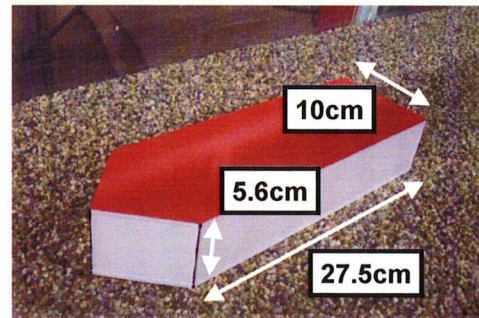
図-1 実験装置の概略図

表-1 船舶模型の諸元

	G1-L	G2-L	G1-S	G2-S
長さ(cm)	30		15	
幅(cm)	10		5	
高さ(cm)	5.6		2.7	
重量(N)	1.24	3.51	0.22	0.44
喫水(cm)	0.42	1.19	0.30	0.60



(a) 舳先なし（基本形）



(b) 舳先あり

写真-1 船舶模型（Large）

図-1に示すように水槽内に傾斜海底地形（勾配1/10と1/100の複合断面）と陸上部の模型を設置し、護岸前面に船舶模型を設置し、造波水槽の一端にある最大ストローク1.5mのピストン型造波板により波を生起させた。なお、実験縮尺は1/40とし、護岸前面水深を12.5cm、岸壁の天端高を2.5cmとした。

(2) 船舶模型と船舶初期設置位置

船舶模型はアクリル製の中空箱形を基本形とし、大きさが約2倍異なる二種類の模型（LとS）を作製した。さらにそれぞれの大きさの模型に対して板厚を変えることにより重量を変化させ、喫水の異なる二種類の模型（G1とG2）を作製し、計4種類の模型を実験で使用した（写真-1、表-1参照）。また、比較のため舳先を持つ模型も別途使用し、形状の違いによる挙動の差を検討した。なお、舳先の有無によらず体積は同じになるようにした。

船舶の初期設置位置を図-1のように岸壁前面から5cmを基本とし、船首尾方向が岸壁に対して平行（parallel, 0度）の場合と直角（perpendicular, 90度）の場合の二通りに対して実験を行い、護岸への打ち上げ時における挙動の違いを比較した。さらには、初期設置位置の違いによる船舶の打ち上げの有無を検討するため、初期設置位置が岸壁前面から30cmの場合も対象に実験を行った。

(3) 入射条件と計測項目

入射波は押波初動の長周期波であり、沖波波高(H)を2.6cm～9.1cm、周期(T；造波板を押し出す時間で

定義)を7.5s～12.5sで変化させた。なお、比較のため孤立波による実験も行った。

エプロンに入射する波の特性を把握するため、護岸前面水域において電気容量式水位計（KENEK製、CHT6-30）を使用して入射波の計測を行い、また、エプロン上で、電気容量式水位計（同上）による遡上水位の計測、プロペラ流速計（篠塚製作所製SV-3W）による遡上波の流速の計測も併せて行った。さらに、実験中はエプロン上を上方から、護岸近傍を側方からそれぞれ高速ビデオカメラ（DITECT製HAS-500）とビデオカメラ（SONY製、DCR-PC109）により撮影し、船舶の挙動の解析を行った。解析では、画像から船舶の漂流軌跡と漂流速度を求めた。また、アクリル製の板に歪みゲージを貼り付けたキャンチレバー型の受圧板を製作し、漂流した船舶を受圧板に衝突させたときの衝突力の計測を行った。衝突力の計測は、受圧板を護岸前面からエプロン上50cmの位置に設置して実施し、解析では船舶が受圧板に対してまっすぐに衝突した場合のみを対象とした。

3. 結果と考察

(1) 打ち上げと漂流特性

ビデオ撮影により得られた船舶が陸上に打ち上がる瞬間の様子を写真-2に例示する。船舶は、入射波がエプロン上へ遡上し始めた後にやや遅れてから入射波に押し出されるようにして護岸へ打ち上がる現象が確認できた。このような護岸へ打ち上がる過程は、船舶の初期設置方向や位置、入射波高の大小に

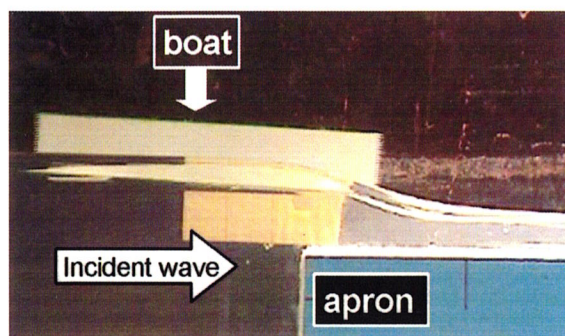


写真-2 船舶の打ち上げの様子例

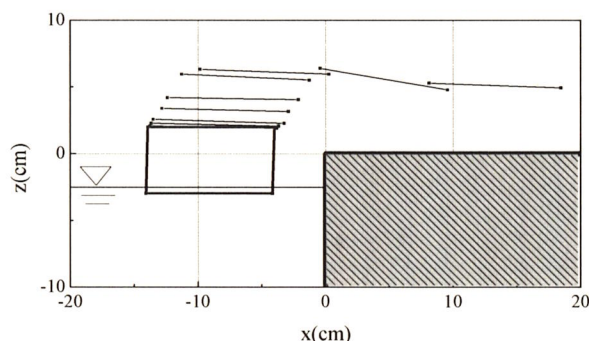


図-2 船舶の漂流軌跡の例（側面図）
（parallel, G1-L）

より異なる傾向があるため、以下にこれらの条件について考察する。

図-2 と図-3 に、護岸へ打ち上がる船舶の軌跡を0.2 秒毎に示したものを例示する。ともに、初期位置では船舶模型の4 辺を示しているが、移動中については、図が煩雑になるため、船首尾方向が岸壁に対して平行の場合の図-2 では船舶上面を、船首尾方向が岸壁に対して直角の場合の図-3 では岸側の側面のみを実線で示してある。

図-2 のように、船舶を護岸と平行に設置した場合、船舶は来襲波の水位上昇にともない鉛直上方へゆっくり上昇するとともに護岸へ接近し、船舶の岸側側面が護岸前面と一致するあたりで横方向の移動速度が急激に増加し、エプロン上を漂流し始める様子がわかる。それに対して、護岸に対して直角に船舶模型を設置した場合（図-3）、鉛直上方への移動量よりも波進行方向への移動量が卓越し、その結果、船舶の前面下部が護岸に衝突しやすいことが明らかとなった。この現象が起きた場合、船舶は護岸に衝突した後にやや沖へ戻され、その後、連続して作用する入射波の影響により、波よりも遅れて陸上へ打ち上がる様子が確認された。これは、船舶を護岸と直角に設置した場合には、船首と船尾（図-1 中における船舶左端）の波長に対する距離が相対的に大きくなるため、船尾が傾斜した波面に早い段階で押される。そのため、波進行方向の移動が鉛直方向への上昇に比べて相対的に早い段階で生じるため、船舶が護岸に衝突しやすいと考えられる。この現象は吃水の大きいG2において顕著に認められており、上記の

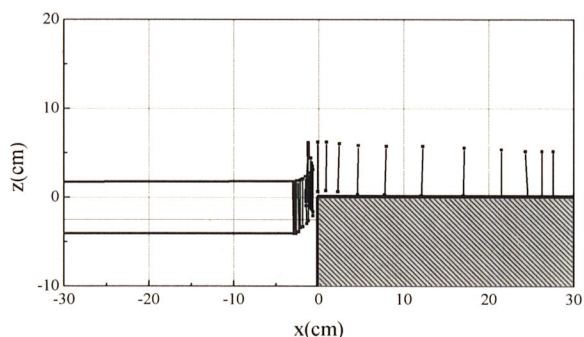
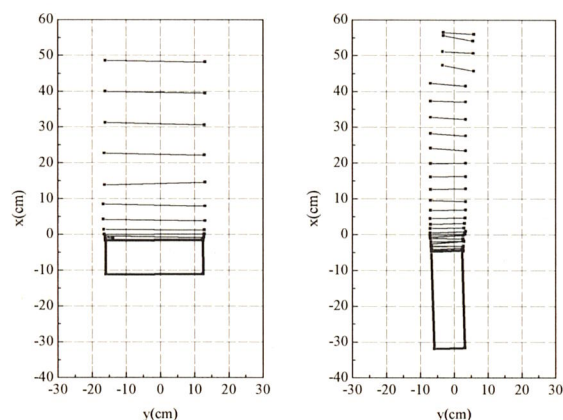


図-3 船舶の漂流軌跡の例（側面図）
（perpendicular, G2-L）



(a) parallel, G1-L

(b) perpendicular, G2-L

図-4 船舶の漂流軌跡の例（平面図）

現象は吃水が大きいほど生じやすいことが指摘できる。なお、入射波の作用時間が比較的小さい場合には、船舶は陸上へ打ち上らず、護岸前面水域を浮遊する場合も確認された。

本研究では作用波として主に長周期波を採用したが、孤立波を作用させた場合、波の作用時間が長周期波に比べ短いため、特に船舶を岸壁と直角に設置した場合に両者の挙動に差異が確認された。すなわち、孤立波では峰高の大きな場合であっても、水位の上下動にともなう船舶の上下動は生じるが、その間に入射波が船舶の下を通過してしまうため、船舶は陸上に打ち上がりにくいことが確認された。したがって、船舶の挙動のような実験においては、津波を孤立波で模擬すると打上げ現象を過小評価する可能性があることが明らかとなった。

つぎに、エプロン上方からのビデオ撮影に基づく船舶の漂流挙動について考察する。図-4 は、図-2 と図-3 と同様に、0.2 秒毎の船舶の軌跡（船舶の岸側の側面）を示した図である。なお、x 軸の原点は護岸前面とし、陸側を正とした。

漂流時の船舶の挙動は、入射波の進行方向と護岸が直角であるため、遡上水位がある程度大きければ、全般的に初期の角度を保ちながら漂流する傾向があることが判明した。漂流中にエプロン上の遡上水位が低下すると、エプロン上面と船舶底面が接触し、

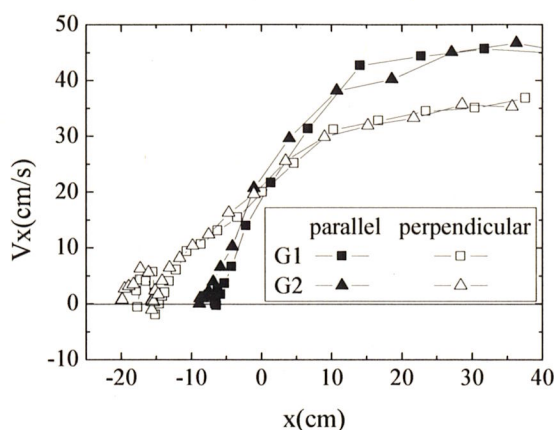


図-5 船舶の漂流速度（入射波高の大きい場合）

摩擦力が生じるため、減速するが、船舶底面の接触は必ずしも均一に生じず、一部分のみで接触が起これば、図-4(b)の $x=45\text{cm}$ あたりにみられるように、船舶は斜め方向に漂流することも確認された。

なお、本実験では、舳先の有る船舶模型（写真-1(b)）を使用した実験も行ったが、船舶模型を護岸に対して直角・平行のいずれの条件で設置した場合でも、舳先の無い船舶模型と、漂流挙動・漂流速度ともに有意な差は見られなかった。一方、底面の接触は吃水に依存するため、底面形状が実際の船舶に近い、水上を自航可能な市販の船舶模型を用いて同様の実験を行った結果、初期設置方向が平行の場合、船尾側に比べ船首側の移動量が大きく、船舶が回転しながら漂流する現象が見られた。これは船首側が軽く、船舶の重心位置が中央より船尾側に存在するためであり、また、船尾側の吃水は船首側よりも大きくエプロン上に着底しやすいことが起因していると考えられる。したがって、吃水は漂流挙動に重要な物理量であると言え、吃水の小さい模型を使用した本実験の漂流距離は、実現象よりも大きい傾向（危険側の想定）にあると考えられる。

(2) 漂流速度

ついで船舶の漂流速度（ V_x ）について考察する。漂流速度はエプロン上方から撮影したビデオ画像から0.2秒毎の重心位置を求め、この重心位置の漂流速度として求めた。本実験結果から、入射波高の大小によって、エプロン上における船舶の漂流速度を大きく2つのパターンに分類できることが判明した。以下にその詳細について記述する。

入射波高が比較的大きい場合、図-5に例示するように吃水（重量）によらず、船舶の初期設置方向により漂流速度が大きく異なることが明らかとなった。これは以下の大きく二つの原因によると考えられる。まず、船舶を護岸と平行に設置した場合、船舶に作用する流体力が直角に設置した場合に比べ大きく、加速度が大きくなったことが原因の1つであると考えられる。もう一つの原因は入射波の作用と船舶の

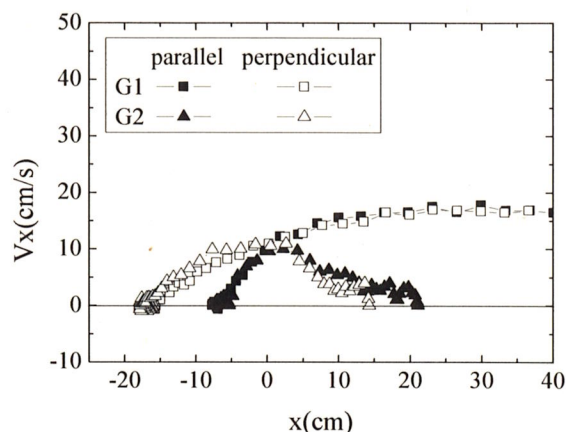


図-6 船舶の漂流速度（入射波高の小さい場合）

打上げとの時間差であるが、この点については後述する。なお、同図で、船舶を護岸と直角に設置した場合、 $x=-15\text{cm}$ 付近で減速し、一時的に負値となっているが、これは既述したように、船首下部が護岸に衝突した際に、船舶が一時的に沖側に戻されることによる。

一方、入射波高が比較的小さい場合は、図-6に例示したように、船舶に作用する流体力が小さいため、漂流速度は船舶の初期設置方向よりも船舶の吃水（重量）に大きく依存することが明らかとなった。すなわち、船体の重量が大きく、吃水の大きい場合（G2）は護岸に打ち上がった直後に減速し始め、漂流距離が短くなる傾向が顕著に認められた。また、陸上に打ち上がることなく、護岸前面水域での水位降下や護岸からの反射波の影響により、船舶が沖側に流され浮遊する現象も多く認められている。

ところで、両図から、船舶の初期設置方向や吃水に関わらず、入射波の条件が同じ場合ならば、船舶の重心が護岸前面（ $x=0\text{cm}$ ）を通過する際の船舶の漂流速度はほぼ等しくなることが指摘できる。この機構については、現段階では明らかではなく、今後検討をしていく予定である。

また、船舶の漂流速度は、遡上距離がある程度長くなるとほぼ一定値を保持し、その後、水位の低下とともに減速する傾向のあることが確認された。

図-7はプロペラ流速計を用いて計測した $x=50\text{cm}$ における底面上での遡上流速の最大値（ u ）と船舶模型が同地点を通過する際の漂流速度（ V_x ）を示した図である。なお、図-5と図-6では図示されていないが、 $x=50\text{cm}$ での漂流速度は上述した一定値とほぼ一致している。また、図中の点線は $V_x = 1/2u$ の関係式を示している。

同図から明らかなように、船舶の漂流速度は遡上流速と比例関係にあるものの、遡上流速に比べると小さく、その値は、 $V_x = 1/2u$ の関係でほぼ近似できる。コンテナの場合、軽量なものはほぼ遡上流速で漂流することが報告されている⁵⁾が、船舶の場合、軽量なものは下部の流れが通過するため、作用波力

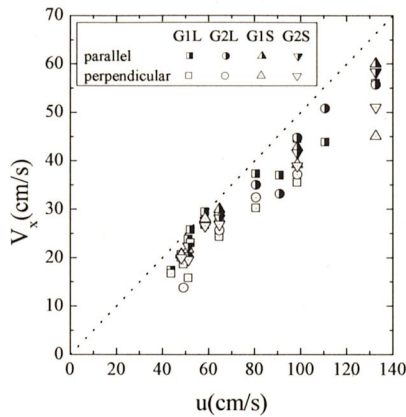


図-7 最大遡上流速と船舶の漂流速度の関係

が小さいことがコンテナとの差の一原因と考えられる。

(3) 船舶の挙動におよぼす離岸距離の効果

以上、船舶の初期設置位置が護岸近傍の場合について考察してきたが、つぎに護岸からやや遠方に設置した場合の船舶の挙動について述べる。図-8は初期設置位置が護岸より約30cm沖側の場合(重心位置は $x = -45\text{cm}$)における漂流速度の変化を示したものである(ただし、漂流速度が既述の図の場合と比べ小さかったためプロットは0.4秒毎とした)。この場合、波が作用すると船舶はゆっくり岸側へ移動するが、その移動速度は入射波の波速に比べ小さく、そのため、移動開始後に護岸からの反射波の影響を受けて減速する様子が確認できる($x = -35 \sim -25\text{cm}$)。このとき、船舶の漂流速度がゼロまで達すると護岸に打ち上がることなく、護岸前面水域を浮遊するか沖合へ流されるが、岸向きの速度を持ち続けると、図示した場合のように護岸へ打ち上がることもある。この場合、反射波の影響もあり、波の入射から船舶の陸上への打ち上げまでに若干の時間の経過があるため、船舶が打ち上がった時点でエプロン上の遡上水位は低下し始めており、船舶の漂流速度は、船舶を護岸近傍に設置した場合に比べて小さくなるとともに、遡上距離も短くなることが明らかとなった。

このように、入射波の遡上と船舶の陸上への打ち上げとの間に時間差が生じると、船舶が陸上へ打ち上がった時点でのエプロン上の遡上水位に差が生じ、時間差が大きいと水位の低下のため漂流速度は小さくなる。この機構は、図-5の結果に関するもう一つの原因でもあったと考えられる。すなわち、図-5に示したように、船舶を護岸に対して直角に設置した場合、船首下部が護岸に衝突して減速されるため、船舶がエプロンに打ち上げられるタイミングが遅れる。このため、エプロン上に打ち上がった時点で遡上水位が低下し始めているため、漂流速度が小さくなったと考えられる。

(4) 漂流衝突力

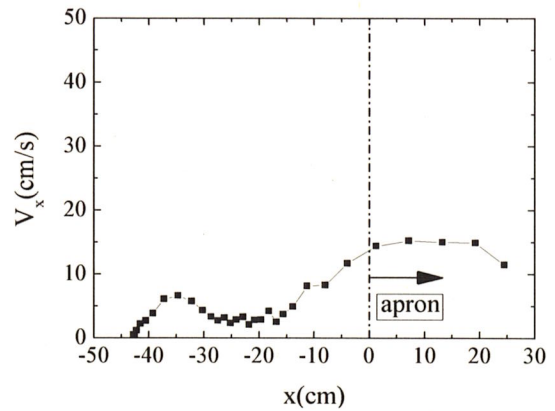


図-8 船舶の漂流速度の関係 (perpendicular)

本研究では、漂流した船舶が背後の構造物に及ぼす影響を検討するため、歪みゲージを貼付した受圧板を構造物として模擬し、衝突力を計測した。なお、衝突力の計測に際しては、船舶の初期設置位置が護岸近傍の場合のみ行った。

水谷ら^{5), 6)}は津波により漂流したコンテナの衝突力を算定するにあたり、コンテナが受圧板に衝突する際、コンテナ背面に存在する入射波の水塊も一体となって同じ速度で移動し、受圧板に衝突した後は運動量がゼロになると仮定し、次のような算定式を提案している。

$$f_m = \alpha \rho_w \eta_m B_c V_x'^2 + \left(\frac{W' V_x'}{g dt} \right) \quad (1)$$

ここで、 α ：打上係数、 ρ_w ：水の密度、 η_m ：最大遡上水位、 B_c ：コンテナ幅、 V_x' ：コンテナの漂流速度、 W' ：コンテナの重量、 g ：重力加速度、 dt ：衝突作用時間である。

本実験では、コンテナよりかなり重量の小さい船舶を対象としており、浮いた状態で漂流・衝突する傾向が確認されるとともに、船舶背面における入射波の打上げも比較的小さいことが実験での目視観測から確認されたため、式(1)で $\alpha = 1$ とした。また、船舶と受圧板の衝突の際、船舶が受圧板から跳ね返る現象が見られたため、コンテナの場合の仮定のように運動量はゼロにならないと考えられる。したがって、危険側を想定し、本実験での衝突を完全弾性衝突と考え、衝突直後の速度は衝突直前の速度と等しいと仮定して以下の式を用いることとした。

$$f_m = 2\alpha D B_s V_x^2 + 2 \left(\frac{W V_x}{g dt} \right) \quad (2)$$

ここで、 D ：吃水、 B_s ：船舶幅(船舶移動方向への投影幅)、 V_x ：船舶の漂流速度、 W ：船舶の重量である。なお、船舶の漂流速度(V_x)は受圧板がない場合に受圧板設置位置($x = 50\text{cm}$)を通過したときの重心速度とした。また、式(2)において第一項を付加質量による力、第二項を船舶質量による力と呼ぶ。

式(2)を用いて衝突力を算定した結果、水谷ら^{5), 6)}がコンテナに対して指摘している結果と大きく異なる。

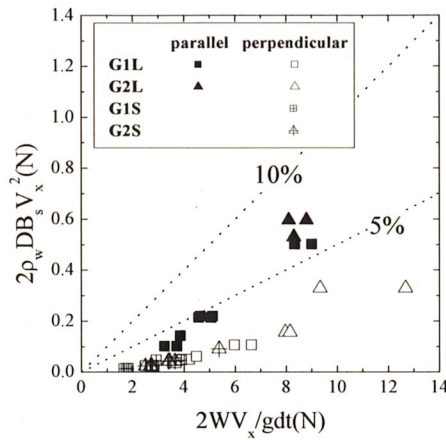


図-9 付加質量の影響

り、付加質量による力が極めて小さいことが明らかとなった(図-9 参照)。これは、船舶の比重がコンテナに比べ小さく、また、初期設置位置が水上にあり、漂流も浮上した状態であることに起因していると考えられる。したがって、本研究では、付加質量による力を無視し、船舶の質量による力のみを考慮した算定式(3)を用いて計算を行った。

$$f_m = 2 \left(\frac{WV_x}{gdt} \right) \quad (3)$$

式(3)による計算値と実験値の関係を図-10 に示す。同図から明らかなように、体積の小さい模型(S)では計算値と実験値はほぼ一致しており、式(3)は良好な結果を与えているが、体積の大きい模型(L)の場合、実験値が計算値を上回る場合が多い。これは、式(3)は完全弾性衝突を仮定しているが、船舶重量が大きくなると、受圧板の変形も大きくなり、非線形性の影響も大きくなることや、吃水が大きくなると付加質量の影響も相対的に大きくなることなどが原因として挙げられるが、これらの点については、今後更に定量的に検討し、モデルを改良する必要がある。

4. 結言

本研究では、護岸前面に停泊した小型船舶に津波が来襲した場合を想定し、陸上へ打ち上げられる船舶を主に取り扱い、打上げが生じる条件やその過程について考察するとともに、エプロン上を漂流する船舶の挙動特性ならびに、その衝突力について検討を行った。以下に本研究の結論を要約する。

- 1) 陸上への船舶の打上げ状況は船舶の初期設置方向により異なり、護岸と直角に船舶を設置した場合には護岸へ衝突しやすくなる。
- 2) 船舶の漂流速度は、入射波高の大きい場合、吃水の大小よりも船舶の初期設置方向に依存する傾向があるが、入射波高の小さい場合は吃水の大小に依存する傾向のあることが示された。
- 3) 漂流した船舶の衝突力には、コンテナの場合と

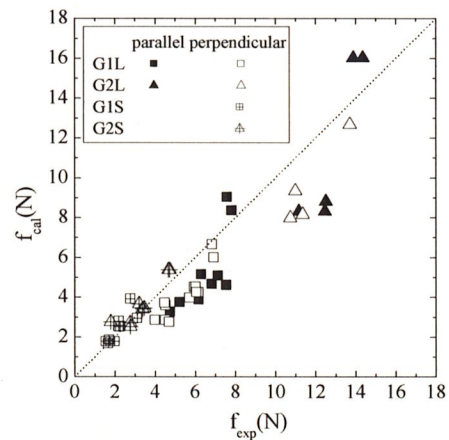


図-10 衝突力の実験値と計算値の比較

異なり、比較的付加質量の影響は小さい。

- 4) 小型船舶の漂流衝突力は付加質量を無視した算定式で予測可能である。ただし、提案した衝突力算定式は実験値を過小評価する傾向もあり、今後の改良が必要である。

謝辞：本研究を実施するにあたり(財)漁港漁場漁村技術研究所より研究助成を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 明田定満, 谷野賢二, 水野雄三, 佐藤仁, 寺内啓: 港湾漁港施設による津波被害の低減効果について, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1176-1180, 1994.
- 2) 山本正昭, 中山哲蔵, 坂井淳, 三橋宏次: 日本海中部地震津波による漁港内の漁船被害, 海岸工学論文集, 第 32 巻, pp. 460-464, 1985.
- 3) 松富英夫: 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.111-127, 1999.
- 4) 池野正明, 田中寛好: 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 721-725, 2003.
- 5) 水谷法美, 高木祐介, 白石和睦, 宮島正悟, 富田孝史: エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 741-745, 2005.
- 6) 水谷法美, 白石和睦, 宇佐美敦浩, 宮島正悟, 富田孝史: エプロン上のコンテナへの津波の作用と漂流衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 791-795, 2006.
- 7) 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 朝倉良介, 入谷剛, 柳沢賢: 津波による漂流物の移動に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp. 127-132, 2005.
- 8) 池谷毅, 稲垣聡, 朝倉良介, 福山貴子, 藤井直樹, 大森政則, 武田智吉, 柳沢賢: 津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 276-280, 2006.
- 9) 河田恵昭, 新名恭仁, 原田賢治, 鈴木進吾: 津波による船舶被害の評価手法の提案, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 316-320, 2004.