(昭和 53 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

高速艇の船底波浪衝撃水圧に関する模型実験

正員 菅 井 和 夫* 正員 吉 野 泰 平*
 正員 山 本 徳 太 郎* 正員 大 松 重 雄*

Model Tests on Impulsive Water Pressures acting on the Bottom of
 a High-Speed Boat in Waves

by Kazuo Sugai, *Member* Taihei Yoshino, *Member*
 Tokutaro Yamamoto, *Member* Shigeo Ohmatsu, *Member*

Summary

Model tests on impulsive water pressures acting on the bottom of a high-speed boat in waves were carried out including in the case of flying motion over the wave surface. The result was compared with that of the ship tests in seas and a good agreement was shown.

Impulsive water pressures measured by the model tests were analysed by Stavovy and Chuang's method. As the result, it was made clear that the impulsive water pressures acting on the bottom of the high-speed boat can be estimated by Stavovy and Chuang's method, if only the motions in waves can be simulated exactly.

1 緒 言

波浪中における船底衝撃現象の解明は、高速艇の船体構造設計上欠くことのできない重要な課題である。一般の排水量型船舶では、スラミング現象としてよく知られているように、船底に波浪衝撃を受けるのは船首部に限られている。高速艇になると、船首部だけでなく中央部まで船底を露出し、そこにも衝撃水圧を発生する¹⁾。さらに小型高速艇になると、波面から完全に飛び出すような激しい運動をするため、着水時に船底全面に大きな衝撃水圧を受ける。このような跳躍運動をとまなう高速艇の船底波浪衝撃に関しては、まだ十分な解明がなされていない。

高速艇は、船底に発生する揚力を利用して航走するもので、排水量型船舶の挙動がほとんど静水力学的法則に支配されているのに対し、動的な力の占める割合が大きい。また、波浪中の運動は変位が相対的に大きく、しかもこれに衝撃による反力が加わるため非線形性が強い。したがって、運動を予測すること自体かなりむずかしい問題で、まして船底衝撃水圧を予測することは方法すら確立していない。

本論文では、まず、水槽試験により各種波浪、船速の下で船底衝撃水圧がいかなる値を示すかを求め、実船試験結果との比較検討を行なっている。次いで、衝撃水圧

の発生機構を船体と波との刻々の相対運動を基に解明し、跳躍運動をしているときも含めて船底衝撃水圧をいかに推定するかについて考察する。

2 模 型 実 験

2.1 供試模型船

実験に使用した模型船は、Fig. 1 に示すような長さ 5.99m の高速艇の 1.2m 模型である。その船型はハードチャイン、ディープV型といわれるもので、現今のモーターボートとしては最も標準的なものである。実験状態は Table 1 に示すとおりで、実船試験時²⁾の状態に合わせてある。模型船のプロペラは実船よりも直径がやや大き目のものを使用した。実船はスターン・ドライブ方式であるが、模型船は船内モータよりの直接駆動方式にしたため、プロペラ位置は合わせたもののその軸は船底から斜めにある角度をもって露出することになり、した

Table 1 Principal particulars of ship and model

	Ship	Model
Length over all	5.99 m	1200 mm
Breadth Moulded	2.44 m	488.8 mm
Draft d_f	0.375 m	75.1 mm
Draft d_a	0.400 m	80.1 mm
Displacement	2.187 ton	17.58 Kg
Height of Centre of Gravity	0.428 m above B.L.	85.7 mm above B.L.
$\square$ G	0.700 m aft	14.02 mm aft
Longitudinal Radius of Gyr.		0.256 L

* 船舶技術研究所

Fig. 1 Ship model and the arrangement of pressure gauges

がって、推力の方向は実船とはやや異なる。

2.2 実験方法

模型実験は船舶技術研究所の中水槽で行なわれた。高速で船体が波の表面から飛び出すほどの激しい運動をするため、これを自航模型で再現するには特殊なガイド装置を必要とした。使用したガイド装置は東京大学で設計製作されたもので、Fig. 2にその機構を示す。模型船と台車を繋ぐものは断面四角の1本のロッドで、上下に大きなストロークで自由に動けるようになっている。その上端は、2本のガイドレールに沿って前後に自由に移動

できるブロックがあり、これにローラーを介して取付けられている。模型船は、プロペラ回転数を制御することにより速度を調整し、上記ガイドレールの移動範囲内で前後揺しながら台車を自航追跡することにした。

2.3 計測項目

模型実験における計測項目とその方法は下記のとおりである。

船速：台車速度（デジタル設定）と同じ。

波高、波周期（固定点）：水槽側壁において容量式波高計により計測。

波高、波周期（出会波）：台車上で超音波式波高計により計測。

プロペラ回転数：モータ軸取付けの回転計を読み取り。

縦揺れ、上下揺れ、前後揺れ：ガイド装置に取付けてあるポテンシヨ・メータにより計測。

加速度：圧力計 ch. 13 の真上で船底外板に法線方向の加速度をストレインゲージ式の加速度計により計測。

衝撃水圧：ストレインゲージ式の PSL-500 GC 型水圧計により計測。

記録：カセット式データレコーダ（7 ch.）3台を使用。

Fig. 1 に船底における圧力計の配列を示す。合計 14 個の配列は実船実験のそれとまったく同一である。記録はデータレコーダ上に高速送り速度で行ない、これを時間軸 10 倍の低速でレクテグラフ上に再生、解析した。したがって、きわめて短時間の現象である衝撃水圧に対しても記録再生は忠実に行なわれたと考えてよい。

3 実験結果

3.1 記録例

Fig. 3 に出会波、船体運動（縦揺れ、上下揺れ、前後揺れ）、船底衝撃水圧の同時記録例を示す。圧力計の記録波形は、いずれも典型的な衝撃波形を示している。そ

Fig. 2 Mechanics for guiding the ship model

Fig. 3 An example of the record of model tests

の時間的経過は、まず、最初に船尾に衝撃水圧を受け、次いでそれがきわめて短時間の間に船首部に及ぶ。出会う波の記録と対照すると、跳躍後に船尾が着水するのは大凡波の谷付近で、それと同時に船首上げであった船の姿勢が急激な船首下げ運動に移るのがわかる。かくして、規則波中でも縦揺れの記録波形は上下非対称のかなり歪んだものとなる。

なお、以後の解析では模型実験の値も実船に換算して示したものが多いが、これは縮尺にしたがった単純な換算を行なったままで、尺度影響などは考えていない。

3.2 船体運動、跳躍限界

船底波浪衝撃を考える場合にもその基となるものは、やはり、波に対する船体運動の応答特性である。とくに、本艇のように船体が波面から飛び出すようなものにあつては、振幅だけでなく位相関係も重要な役割を果す。一方、高速艇は速度が上昇するとともにしだいに船体が浮上し、かつ船首が持ち上げられて遂には滑走状態となる。

Fig. 4 に平水航走時の船の姿勢を示す。波浪中の縦揺れや上下揺れがこの姿勢を中心に揺れているとは限らないが、ほぼそう考えても誤りはない。Fig. 5, 6 にそれぞれ上下揺れおよび縦揺れの振幅、位相応答を示す。応答波形は歪が大きいものであったため、両振幅をとって解析した。また、波の谷が船体中央きたときを基準にして、

Fig. 4 Elevation and trim of ship model running in calm water

Fig. 5 Heaving response in waves

Fig. 6 Pitching response in waves

それぞれ縦揺れおよび上下揺れの最低値が現われる時点までのおくれを位相差と定義した。高速になるに従い縦揺れ、上下揺れとも同調点はかなり波長の長いところに移ること、振幅比が2.5程度の高い値になることは注目に値する。なお、図中には後述の特異な運動が起こる限界に対応する線が書き入れている。点線より右方が跳躍運動、1点鎖線より右方が非規則的運動をする領域を示す。

ある程度以上の波高では高速域で船体が波面を離れ完全に空中に飛び出すようになる。また、比較的波長が短い領域では船体運動が会合波ごとに規則正しく応答せず、一つおきに大小の運動を繰り返すようなことも起こる。こうした特異な運動が起こる限界線を示したものが Fig. 7 で、実線より上方が跳躍運動、破線より左方が非規則的運動をする領域を示す。

以上で縦運動の大体の様子を掴むことができたが、後述のように船底衝撃水圧を推定するには衝撃瞬間の相対速度や角度を求めるなど、もう少し詳しい運動解析を必要とする。そのため、縦揺れおよび上下揺れの振幅応答

Fig. 7 Criteria for flying and regular motions in waves

Fig. 8 Fourier analyses of pitching and heaving (in the case of ordinary motion in waves)

Fig. 9 Fourier analyses of pitching and heaving (in the case of flying motion in waves)

についてフーリエ解析を行なった。Fig. 8, 9 にそれぞれ船体が波面から飛び出さない場合と飛び出した場合の結果を示す。縦軸には高調波成分 c_n と基本波成分 c_1 の比 c_n/c_1 をとり整理した³⁾。縦揺れ, 上下揺れともに飛び出さない場合に比べ, 飛び出すようになると高調波成分が増えること, および縦揺れの方が上下揺れよりも高調波成分が大きいことがわかる。

3.3 衝撃水圧

船底波浪衝撃水圧は, 波長, 波高, 船速などの条件によって当然変わるが, ここでは規則波中の模型実験計測値から, その様子を調べることにする。Fig. 10 に代表的な波につき衝撃水圧の船の長さ方向の分布が船速によりどのように変わるかを示す。船速が低い間は, 衝撃水圧の分布は船首から中央部にかけてだいたい平坦で, 船尾は水面から出ないためほとんど零に等しい。速度が上がると衝撃水圧の分布形にははっきりした山が現われるようになる。この山の位置は, 最初船首付近にあったものが, 速度の上昇とともに中央部に移り, とくに高速域で船体が波面から飛び出すようになると船尾付近になる。Fig. 11 に同じく衝撃水圧の船の横方向の分布が船速に

Fig. 10 Effect of ship speed upon longitudinal distributions of impact pressures

Fig. 11 Effect of ship speed upon transverse distributions of impact pressures

Fig. 12 Effect of wave length upon longitudinal distributions of impact pressures

Fig. 13 Effect of wave height upon longitudinal distributions of impact pressures

よりどのように変わるかを示す。船底衝撃水圧では船底勾配が一つの支配的要素になるものと考えられる。本艇のようにいわゆるディープV型の横断面形状を有するものでは, 船体中心線に近づくほど衝撃水圧は高くなる傾向にある。もちろん, 船速が高くなるとともに衝撃水圧の値は全体的に高くなっている。

Fig. 12 に衝撃水圧が波長によってどのように変わるかを示す。本艇にとって有意な波は $\lambda/L=2\sim5$ の波長範囲のものであり, この間にあっては波長が多少変わっても衝撃水圧に大きな変化はみられない。比較的大きな衝撃水圧を発生している波長は $\lambda/L=3$ 付近で, 船体が波面から最も飛び出しやすいところに相当している。

Fig. 13 に衝撃水圧の船の長さ方向の分布が波高によりどのように変わるかを示す。波高が低い間は, 衝撃水圧の船の長さ方向の分布は平坦でその値も低い, 波高が高くなって船体が波面から飛び出すようになると, 衝撃水圧の分布は船尾付近に大きな山をもつものとなり, その値も全体的に相当高くなる。衝撃水圧は波高に比例せず, より大きな値を示す。

3.4 実船試験結果との比較

本論文の模型船と同一船型を有する実船の波浪中船底衝撃試験が日本小型船舶検査機構によりすでに実施されている²⁾。Fig. 14~16 に模型船と実船との衝撃水圧計測値の比較を示す。波高, 船速などなるべく条件の近いものを選んだが, 実海面が不規則な波であることもあって正確な比較にはならない。しかしながら, 波長, 波高

Fig. 14 Comparison of longitudinal distributions of impact pressures between ship and model

Fig. 15 Do.

などを卓越した成分波のそれで代表させ、また衝撃水圧としては 1/3 有義値をとると、全体的な値そのものも、また分布形もいずれも模型実験のそれとかなり似かよったものであることがわかる。このことから、模型実験の

Fig. 16 Do.

結果を基に実船の船底波浪衝撃水圧を類推しても大きな誤りはないであろう。

4 実験結果の検討

4.1 衝撃水圧の発生機構

船底波浪衝撃水圧はどのようなメカニズムのもとに発生しているのであろうか。これを調べる手掛りとして、模型実験結果から出会波と船の姿勢の刻々の相対関係を解析したものが Fig. 17 である。上段および中段のアニメーションは、それぞれ同一の波に対して船速が低く波面から船体が飛び出さないもの、および船速が上がって完全に船尾まで飛び出すようになったものを示している。また、下段のアニメーションは、波長がやや短くなって 2

TEST No. 321 (Not Flying)
 $\lambda/L = 35$
 Hw = 0.6m (Ship)
 Vs = 24.1 km/h (Ship)

TEST No. 323 (Flying)
 $\lambda/L = 35$
 Hw = 0.6m (Ship)
 Vs = 40.2 Km/h (Ship)

TEST No. 328
 $\lambda/L = 30$
 Hw = 0.6 (Ship)
 Vs = 40.2 Km/h (Ship)

Fig. 17 Animated diagrams of behavior of ship model in waves

段跳びの状態になったものを示している。図中には、参考のため着水時における船尾付近の衝撃水圧波形が書き入れている。なお、これらのアニメーションでは、波は空間に固定し、船だけを走らせた恰好にしてあるが、実際には波自身も船と反対方向に進行するため、船体の絶対空間に対する跳躍軌跡を考える場合には、これより水平方向にやや縮まったものになることに注意を要する。

さて、これらのアニメーションと Fig. 3 に例示したようなそれぞれの計測記録を対比することにより、向い波中の船底衝撃水圧の発生機構を伺い知ることができる。高速で航走する船体は、波の頂を少し越えたあたりで船尾まで完全に波面から離れ、船首上げの姿勢のまま空中をある時間飛翔した後、ほぼ波の谷付近に船尾から先に着水する。これらの跳躍運動の様子は、波長、船速などの条件によって多少異なるものの、大きな相違はないようである。船体がただ波面に沿って走るものと考え、高速では上向きの慣性力が重力にまさって遂には波面から飛び出すようになるという単純な発想では上述の跳躍運動を説明することはできない。縦揺れや上下揺れの振幅、位相応答を正確に考慮に入れる必要がある。衝撃水圧は着水と同時にまず船尾に発生するが、その後起こるほぼ船尾を中心とした急激な船首下げ運動により、船底全体がほとんど同時に波面を叩くことになるため、その発生個所はきわめて短時間に船尾から船首へと移行する。衝撃水圧の大きさは必ずしも飛び出し高さには比例していない。むしろ、着水時に船首上げ姿勢の大きいものの方が衝撃水圧も大きい。2段跳びの場合も同様で、着水時に船首上げの姿勢が一つおきに大きくなったり小さくなったりしており、それにつれて衝撃水圧も大きくなったり小さくなったりする。したがって、飛び出し高さをもとに自由落下運動を想定し、衝撃水圧を二次元着水衝撃としてとり扱うことには無理がある。衝撃時における船底と波面との相対速度、角度などを正確に求めるべきで、船首上げの大きい姿勢で着水したときの方が衝撃水圧が大きく出るのは、たまたまその状態のとき相対速度が大きくなるためと想像される。

4.2 衝撃水圧の予測

模型実験結果から、船底各点における着水衝撃時の波面に対する相対速度、角度などを正確に求め、これらを基に衝撃水圧の計測値を整理してみた。整理の方法は、Stavovy & Chuang の方法⁴⁾になった。すなわち、船底の水圧 p_i は、考えてい

る受圧面と波面との相対速度の受圧面に垂直な成分を V_{ni} としたとき、これの波面に垂直な成分 V_{ni} に基づく衝撃水圧 p_i と波面に平行な成分 V_{ti} に基づく動圧 p_p の和として、

$$p_i = p_t + p_p$$

$$\text{ここで} \quad \text{Max. } p_t = r \rho V_{ti}^2$$

$$\text{Max. } p_p = \frac{1}{2} \rho V_{ti}^2$$

のごとく表わせるものとする。

模型実験では、船体と波との相対運動が正確に求められているので、これをフーリエ解析することにより受圧面の衝撃の瞬間における V_{ni} を求めることができる。また、受圧面と波面との間の角度関係がすべてわかっているので、この V_{ni} を基に V_{ti} , V_{ti} が求まる。次いで、衝撃水圧の計測値から動圧を差し引いて $\text{Max. } p_t$ を求め、さらに

$$r = \text{Max. } p_t / \rho V_{ti}^2$$

を求める。平水中落下衝撃試験の場合の衝撃速度 V_n は、物体の落下速度 V_v と受圧面と平水面のなす角 β によって、

$$V_n = V_v \cos \beta$$

のごとく表わされる。したがって、衝撃水圧は、

$$\text{Max. } p_t = r_1 \rho V_v^2 = \frac{r_1}{\cos^4 \beta} \rho V_n^2$$

とおかれる。いまの場合、 V_n , β に対応するものがそれぞれ V_{ni} , ξ であるから、

$$r_1 = r \cos^4 \xi$$

という新しい衝撃係数を導入すれば、平水中落下衝撃実験の実験式との対応がつけられる。Fig. 18 は、Stavovy & Chuang の図に今回の模型実験から得られた r_1 の値を重ねてプロットし、比較検討したものである。船

Fig. 18 Comparison of calculated r_1 values obtained from model tests and Stavovy and Chuang's analytical method

Fig. 19 Calculated Impact pressures based on Stavovy and Chuang's analytical method (Longitudinal distribution)

Fig. 20 Do.

Fig. 21 Calculated impact pressures based on Stavovy and Chuang's analytical method (transverse distribution)

型がディープV型でしかも向い波だけに限られていたため、今回の実験点は衝撃角度が比較的大きな範囲にしか現われなかったが、結果は Stavovy & Chuang の三次元半実験式に非常に近いものであった。Fig. 19, 20 は、これとは逆に模型実験で得られた衝撃速度や角度を基に三次元半実験式による r_1 を使って衝撃水圧の船の長さ方向の分布を求めたものである。逆算値は模型実験値よりもやや低目ではあるが、船体中央付近に山ができるなど傾向的にはよく合っている。Fig. 21 は、同様に、衝撃水圧の船の横方向分布を求めたものである。逆算値は、模型実験値よりもかなり低目ではあるが、船体中心線に近づくほど値が高くなるなど傾向的にはよく合っている。これらの図から、船底波浪衝撃水圧は底面と波面

との衝撃速度や角度さえわかれば、Stavovy & Chuang の三次元半実験式による衝撃圧係数 r_1 を使っておおよそ予測できることがわかった。本艇のように船体が波面から完全に飛び出すような激しい運動をするものであっても、平水中落下衝撃実験を基とした衝撃圧係数が使えるということは便利なことである。

5 結 言

高速艇の船底波浪衝撃水圧に関する模型実験を行ない、実船試験結果と比較検討を行なった結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 模型実験による衝撃水圧の計測結果は、傾向も値そのものも実船試験のそれに近い。
- (2) 波長、波高、船速などの条件が変わると衝撃水圧の値や分布形にも変化を生じるが、とくに船体が波面から飛び出すようになるとその様相は一変する。
- (3) 衝撃水圧の船の長さ方向の分布は、船体が波面から飛び出さない間は、割合平坦な分布でその値も低い、飛び出すようになると全体的に値が高くなるとともに船尾寄りに大きな山が現われるようになる。
- (4) 衝撃水圧の船の横方向の分布は、本艇のようにディープV型のものでは、船体中心線に近いほど高い値を示す。
- (5) 船底水圧の値は、船体が波面から飛び出さない間はおよそ動圧に等しいが、飛び出すようになるとそれよりはるかに高い衝撃的な値に変わる。
- (6) 船体が波面から飛び出してから着水衝撃を受けるまでの過程を、出会波と船の姿勢の刻々の相対関係を基に解析すると、衝撃水圧の発生機構を明かにすることができる。
- (7) Stavovy & Chuang の方法に従い、衝撃速度や角度を実験から求め、これを基に整理した衝撃圧係数は、平水中落下衝撃実験から求められた Stavovy & Chuang の三次元半実験式に傾向も値そのものも非常に近い。
- (8) 小型高速艇のように、船体が波面から飛び出すような激しい運動をするものでも、衝撃の瞬間における船体と波面との相対速度や相対角度が予測できれば、上述の三次元半実験式を使って船底波浪衝撃水圧をほぼ推定することができる。

本論文を終るにあたり、終始ご指導、ご教授をいただいた元良委員長をはじめ日本小型船舶検査機構高速艇船底衝撃研究委員会の委員の方々に厚くお礼申し上げるしだいである。また、本論文の実験、解析に労を惜しまなかった船舶技術研究所運動性能部 二村正技官に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 永井 保：高速艇の強度設計に関する研究，船舶用軽金属委員会 (1969)。
 - 2) 高速艇船底衝撃研究委員会：高速艇の波浪中における船底外板への衝撃に関する研究，日本小型船舶検査機構 (1978)。
 - 3) 別所正利ほか：高速艇の規則波中縦運動の研究，造船学会論文集 135 号 (1974)。
 - 4) Stavovy, A.B. and Chuang, S.L. : Analytical Determination of Slamming Pressures for High-Speed Vehicles in Waves, J. of Ship Research, Vol. 20, No. 4 (1976)。
-