

### 高速艇の船底衝撃圧の実船計測結果について\*

小柳 雅志郎\*\*, 江口 純 弘\*\*\*  
寺尾 裕\*\*, 内田 守\*\*\*\*  
正会員 元 良 誠 三\*\*

### On the Measurement of Impact Pressure Acting on the Bottom of High Speed Small Craft

By Masashiro KOYANAGI, Sumihiro EGUCHI, Hiroshi TERAO,  
Mamoru UCHIDA, Seizo MOTORA (*Member*)

The impact pressure which occurred upon the bottom of a high speed hard chine deep V form small craft (YAMAHA STR-20HT) running in rough seas was measured. The vertical acceleration at bow and stern and the motion (pitching and rolling) of the craft were also measured.

The full scale experiment was carried out at Imagire just out of the Lake Hamana, that is, the sea of Enshu between 1975 and 1977 by the Japan Craft Inspection Organization.

Concluding remarks of this experiment are as follows,

- (1) Large impact pressures and accelerations were observed in condition of ahead and oblique seas.
- (2) The porpoising occurred in heavy sea, and the maximum pressure (5kg/cm<sup>2</sup>) was recorded at the stern of the craft.
- (3) Smaller the dead rise angle of the surface where the pressure gage is installed becomes larger the impact pressure gets. And these values belong to log-normal distribution as statistical characteristics.
- (4) The maximum expected impact pressure which acts upon a high speed small craft within its life seems to be a function of dead rise angle of the surface where the pressure gage has been attached.

#### 1. 緒 言

日本小型船舶検査機構では昭和50年度から52年度にかけて3ヶ年間にわたり、設計及び操船技術の指針を得るため、高速艇の船底に加わる衝撃水圧に関する研究を行った。この研究は委員会組織で行われ、実船計

測、模型試験、および数値シミュレーションを三つの柱として実施された。このうち、実船試験は日本小型船舶検査機構の職員および委員全員で、模型試験は主として船研で、また数値シミュレーションは主として東大で担当して行った。また実験艇の製作及び実船計測の準備及び計測にはヤマハ発動機船艇部が全面的に協力した。

研究の結果は日本小型船舶検査機構より報告書として出版されており<sup>1),2),3)</sup>、模型実験に関しては、船研<sup>4)</sup>より、またシミュレーションに関しては東大<sup>5)</sup>より、日本造船学会秋季講演会に発表されている。

\*昭和53年11月9日 造船3学会秋季連合大会において講演

\*\*東京大学工学部

\*\*\*東京大学生産技術研究所

\*\*\*\*日本小型船舶検査機構

本論文は、日本小型船舶検査機構より報告書を出した後に解析された実船試験の計測結果を主体とし、上記報告書または論文の補足の意味でまとめたものである。

## 2. 試験艇及び装備

実船実験の使用艇は、各種計測を行うための特殊仕様を満足し、しかも現在最も標準的な船型のハードチャイン・ディープV型であるヤマハ STR-20HT 型モーターボートを試験艇として選定した。

試験艇の主要目、その他を Table 1, Fig. 1 に示す、この試験艇の船底には、Fig. 2 に示すように14ヶ所に水圧計測用の孔をあけ、計測器類は Fig. 3 のように配置し、取り付けには衝撃加速度を緩和させるための計測器台を設け、計器の始動および停止をリモコン装置により、ワンタッチで同時に操作できるようにになっている。このほか、試験海面に着底式波高計等 (Fig. 4) を設置し、試験法も詳細に検討するなど、かなり周到な用意のもとで実船試験が行われた。

Table 1. Particulars of vehicle

項目	主要目等
全長	5.99M
型巾	2.44M
型深	1.24M
船型	ディープV型
航続距離 (4/4にて)	88海里
総トン数	4.8GT
最高速度	35KT
燃料搭載量	150ℓ
主機関	ボルボ・ペンタ A Q200/280 B 200 P S / 4400 rpm
駆動方式	スターンドライブ
定員	5名
資格	小型船舶
航行区域	沿海区域

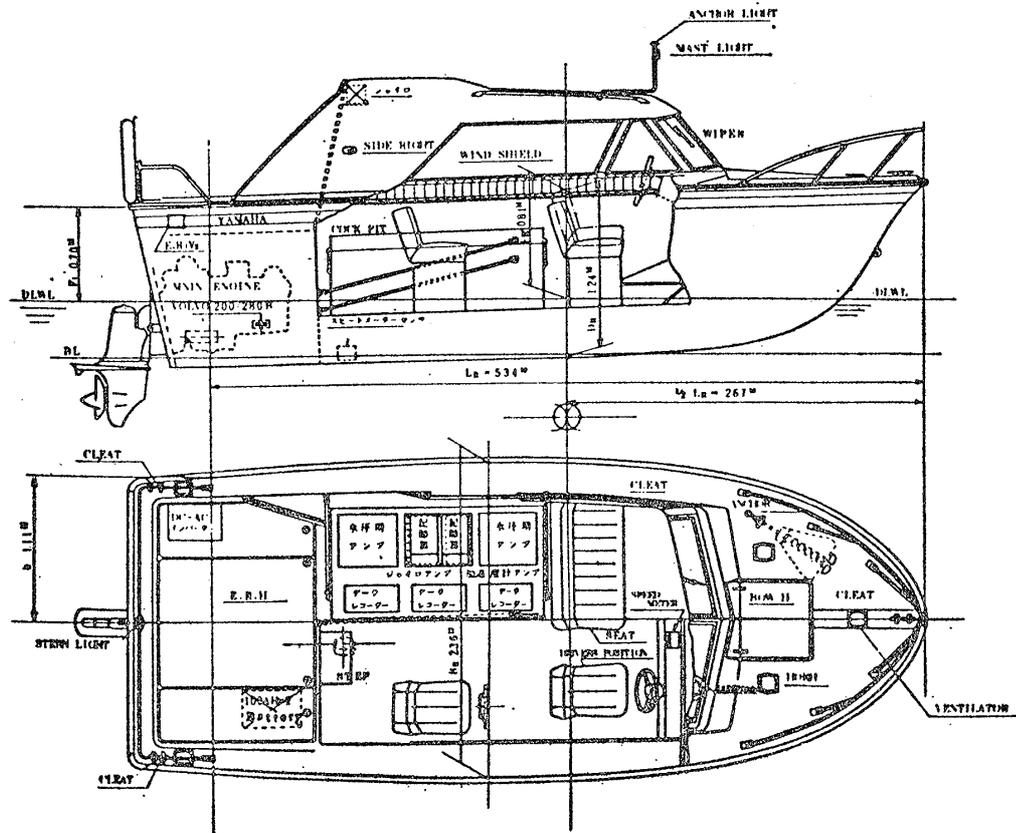
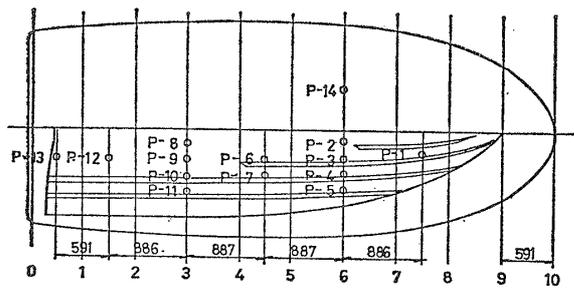
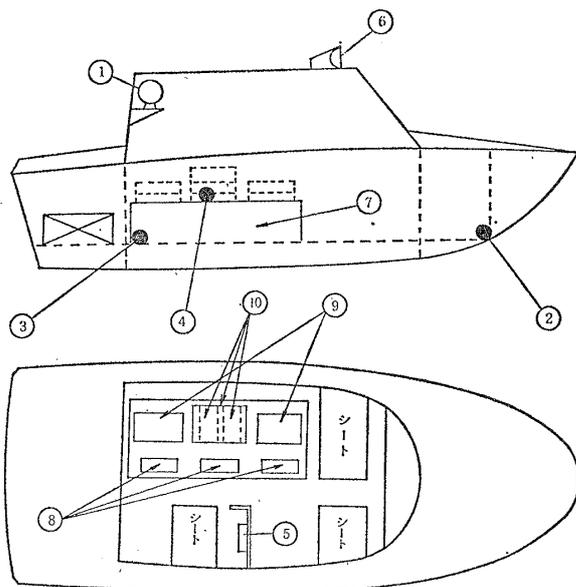


Fig. 1. General arrangement.



センサNo	$\alpha$	センサNo	$\alpha$
1	34.5°	8	19.0°
2	24.5	9	21.3
3	26.5	10	23.0
4	29.0	11	24.2
5	29.3	12	19.8
6	23.0	13	19.5
7	25.0	14	29.0

Fig. 2. Arrangement of pressure gauges and its dead rise angles.



①	ジャイロ
②	加速度計(50G)
③	" (20G)
④	" (5G)
⑤	リモコン装置
⑥	ランプ(同時マーク用)
⑦	計測台
⑧	データレコーダ
⑨	圧力センサ増幅器
⑩	モニター用ラベット及び増幅器

Fig. 3. Arrangement of measurement gauges and apparatuses.

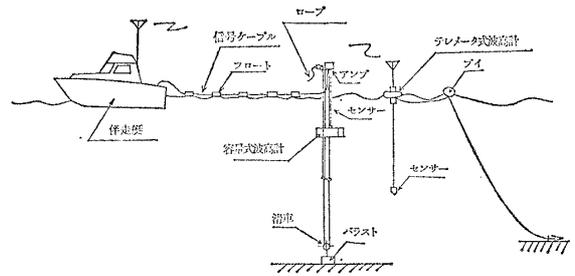


Fig. 4. Measurement of wave with fixed or moored wave meters.

### 3. 試験海域および試験

今回のような数多くの計測器類を使用する実船試験では、事前の準備が試験結果を左右するので万全な機能をもった基地が必要条件となる。この見地から試験海域は、静岡県浜名郡今切沖とシヤマハ発動機新居工場を基地として使用させてもらった。なお、波高計測、一般計測および危険防止のため伴走艇を同行させた。

試験は、波に対する出会角が45°おきで360°までの8ケースを船速を変えて航走(一航走60秒)し、縦揺角、横揺角、船首および船尾における上下加速度、船底衝撃水圧14ヶ所の同時計測を試験艇で、海象状態および航走姿勢の観測を伴走艇で行った。試験回数、期日および海象を Table 2 に示す。

### 4. 計測結果

実船試験は3に述べたように、数多く行われたが、50年度、51年度は計器の故障や、予想外に大きな加速度のため計測器台が破損するなどの故障が相次いで起こり、満足なデータを得ることが出来なかったが、52年度は総ての不具合が調整され順調に計測を行うことができた。特に12月7、8、9日の3日間に亘って行った試験では、理想的な海象に恵まれて貴重なデータを得た。ここではその内解析された数例を挙げてみる。

#### 4.1 高速艇の船底衝撃水圧分布について

規則波中の衝撃圧は発生メカニズムから考えて大別して二つに分けられる<sup>4),5)</sup>。一つは高速航走時の跳躍現象に起因し、船尾より着水することから船尾に大きな衝撃分布をもち、順に船首側に小さい衝撃圧分布をもつもの。他方には船体の跳躍しない場合に船首部にいわゆるスラミングにより衝撃圧が発生し、値は前者に比べ小さいものである。ところが実船実験では、波は不規則波であらゆる方向成分をもつので、シミュレーションや模型実験のように現象が上記のように明確に表われることは期待できないが、実船実験結果よ

Table 2. Sea oonditions

年 度	回 数	期 日	風向風速 (m/sec.)	海 象			
				うねり		風 浪	
				波 長(m)	波 高(m)	波 長(m)	波 高(m)
50	1	11/19	試験艇, 計器類の作動確認試験				
51	2	7/16	計器類の作動確認				
	3	7/17	試験艇の試験状態計測および予備試験				
	4	9/1	SW~W 6~10	—	—	8~12	0.6~0.8
	5	9/2	SW 4	70	0.2~1.4	2~4	0.1~0.3
	6	10/21	W~NW 6~9	70	1.2	7	0.5
	7	10/22	W~SW 1.5~4	50	0.3	1.5~2.8	0.1~0.2
	8	12/2	W 4.8~5.2	—	—	3~5	0.4~0.7
	9	12/3	N~NNE 1~3	—	—	4~7	0.3~0.5
	52	10	7/27	S SW 微風	60	1.0	6
11		9/30	E 2.5~3.5	30~50	0.6~1.2	—	—
12		10/27	SSE~S 1.2~2.2	80	0.8~1.0	15~25	0.4~0.5
13		12/7	— 3	20	0.6	3~5	0.3~0.5
14		12/8	N 9.5~11	—	—	8~15	0.8~1.1
15		12/9	WNW 8.8~11	15~20	0.8~1.0	6~10	0.5~0.8

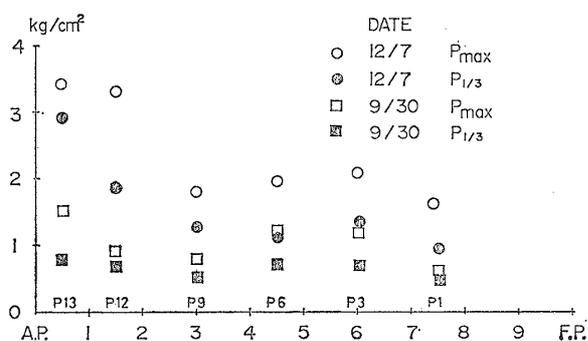


Fig. 5. Example of impact pressure with longitudinal distribution.

り傾向は一応見てとれる. Fig. 5 に正面向い波中における最大衝撃圧 (P<sub>max</sub>) と1/3 最大衝撃圧 (P<sub>1/3</sub>) の分布を, 海象の異なる場合について船長方向の分布にして示す. なお, ここに示したデータのうち 9 月 30 日に比べ 12 月 7 日は海象がシビアで, 実験状態は耐久試験に対応するものである.

12 月 7 日のデータは船体が跳躍運動を行っている場合で, 明らかに衝撃圧は船尾側が大きい. 9 月 30 日の

P<sub>max</sub> も船尾で圧力のピークをもち, やはり跳躍により船尾から着水したことが知れる. しかし 9 月 30 日の P<sub>1/3</sub> の衝撃圧分布はほぼ船長方向に一樣な大きさとなる. これはその時の海象が艇跳躍がおきるか否かの限界に近いから, P<sub>1/3</sub> をとって考えれば圧力分布は跳躍がおこらない時の圧力分布の概形を示していると考えられる. さらに船体横方向の圧力分布は船体が heel していないならば, deep V bottom では最初に着水する船体中心線上に大きな圧力が発生し, 船側方向に圧力を減じながら伝播すると考えられる. 12 月 7 日と 9 月 30 日の結果を ord. 3 と ord. 6 について Fig. 6 に示す. section によって傾向が多少異なり, 全体の dead rise angle の大きい ord. 6 の方が圧力分布の変化が少ないことがわかる. また海象の異なる何回かの実験から得られた主な船体部分での最大衝撃圧を波高や波長をベースに, 向波と斜向波の場合について表わすと Fig. 7 のようになる. この図から波高があまり大きくなっても船速が低下するため衝撃圧はかえって小さくなることや, 船長の 2 倍位の波長の時に大きい衝撃圧が発生していることがわかる.

4. 2 着水姿勢と衝撃圧の関係

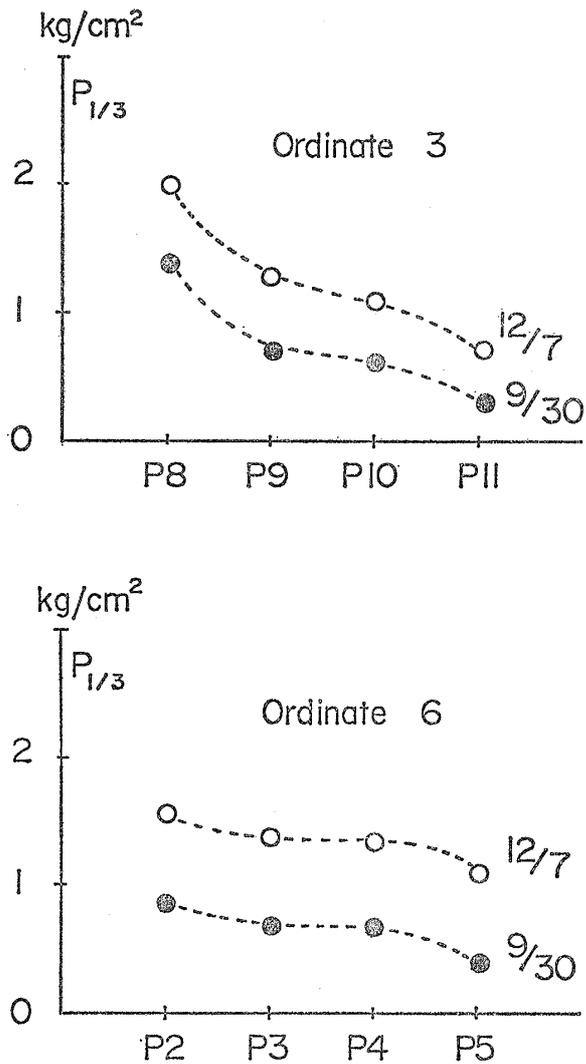


Fig. 6. Example of impact pressure with lateral distribution.

(1) ピッチ角と衝撃圧の関係

着水して各圧力計に衝撃圧が発生した瞬間の艇のピッチ角を読んで衝撃圧との関係を見ると Fig. 8 のようになる。船尾ではピッチ角が頭上げであるほど衝撃圧が大きい傾向がみられるが、これはピッチ角が大きい時の方が大きく跳躍して、接水速度が大きくなるためと考えられる。これに反し、船首ではピッチ角に無関係か、むしろピッチ角が小さい方が衝撃圧が大きい。これは船首部の衝撃圧は艇が跳躍しないでも発生し、したがって跳躍の高さよりもむしろ接水角が影響して小さいピッチ角のときに衝撃圧が大きくなるものと考えられる。

(2) 横傾斜と衝撃圧の関係

横傾斜と衝撃圧の大きさの関係を調べるため、着水時の横傾斜を横軸に衝撃圧をプロットしてみると、Fig. 9 のようになる。これより見て、船の片側だけに着目すればその側に船が傾いた方が衝撃圧が大きく

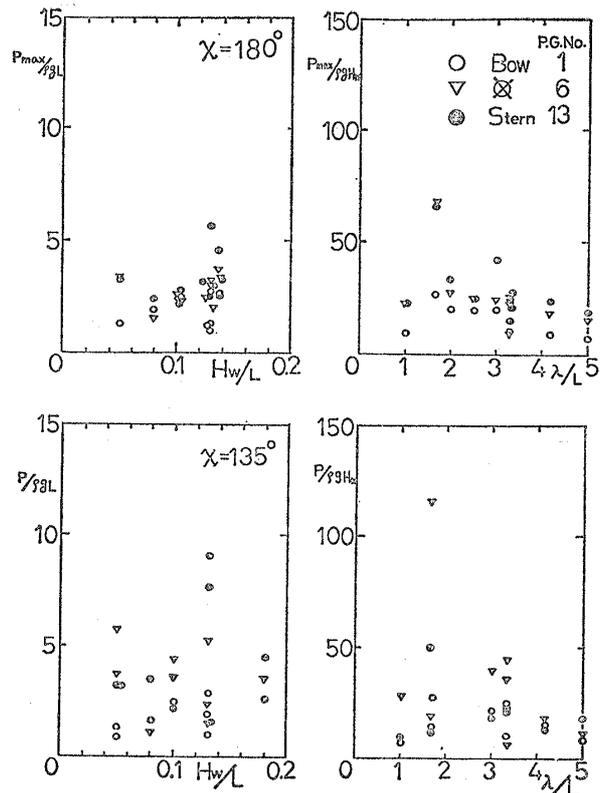


Fig. 7. Maximum impact pressure under various sea condition.

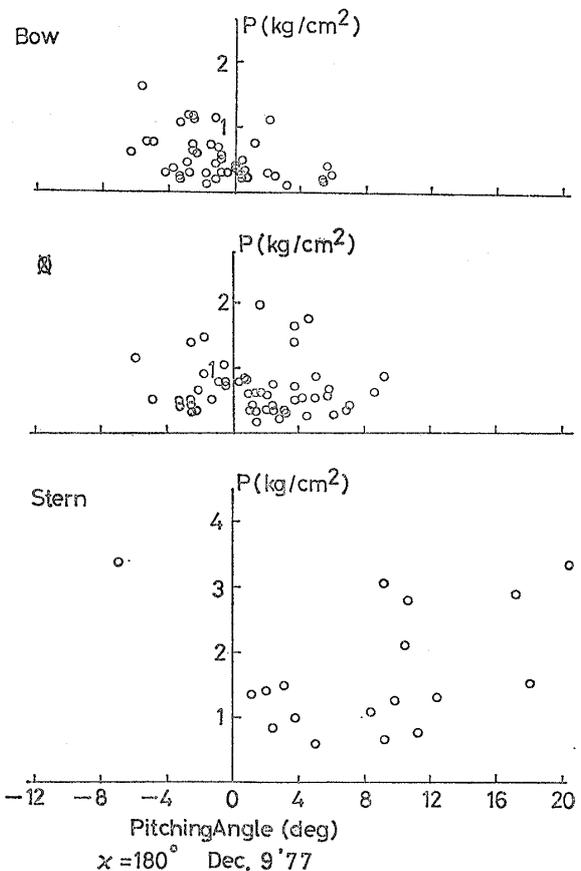


Fig. 8. Pitching angle at a moment of impact pressure appears.

なっている。これは横傾斜によって船底勾配が見かけ上減じ、接水角が小さくなるためと考えられる。(Fig. 10).

(3) 船体の着水姿勢と衝撃圧の関係  
ピッチ角とロール角の総合影響を見るため立体図を

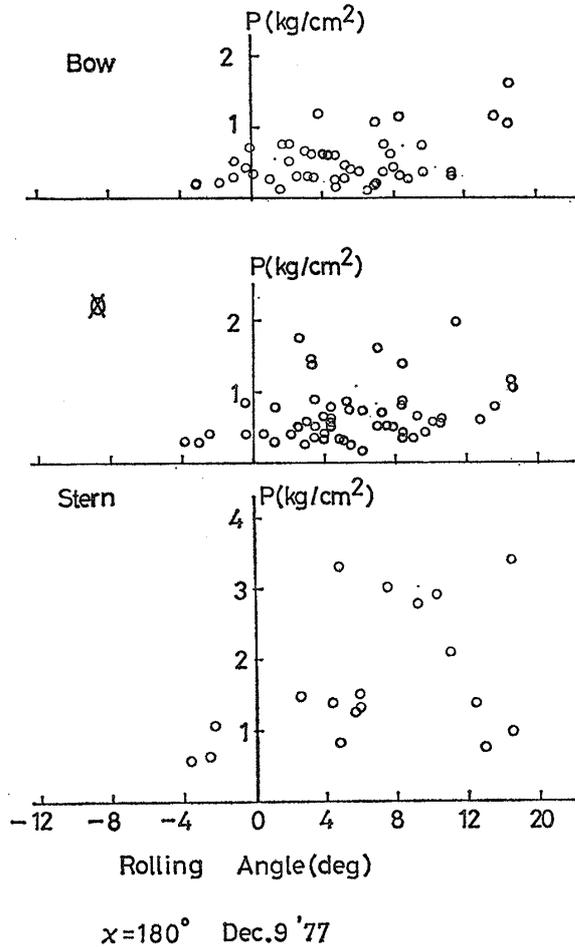


Fig. 9. Rolling angle at a moment of impact pressure appears.

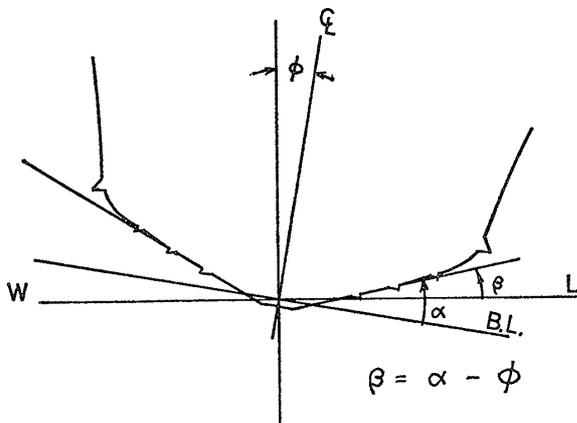


Fig. 10. Definition of tangential angle between water surface and bottom of vehicle.

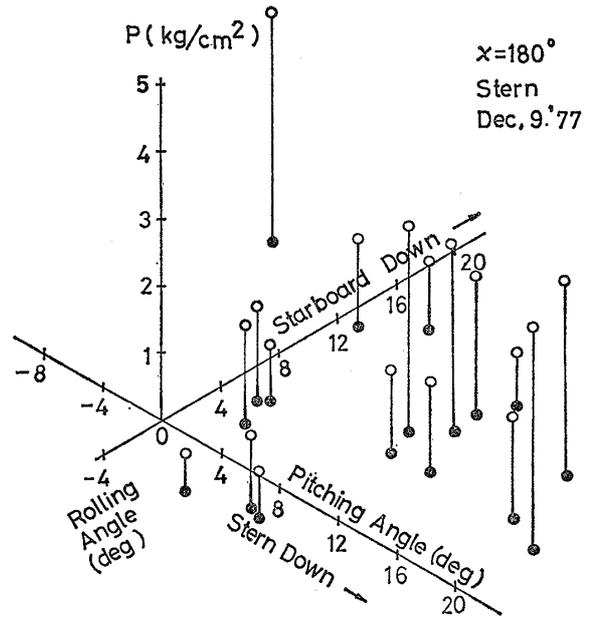


Fig. 11. Asteric view of impact pressure value.

作ってみると Fig. 11 のようになる。これで見ると明らかに pow-up でかつ水圧計のついている側に傾斜して着水したときに大きな衝撃圧を生じていることが判る。なお、反対舷傾斜の場合のデータが少ないのは、運転者の癖で無意識に運転席のある側（水圧計のついている側）に傾けて着水するためと考えられる。

4. 3 実船試験時に発生する衝撃圧分布について

船底に発生する衝撃圧は、竹川<sup>9)</sup> の行った船首衝撃圧の実験解析結果と同様な log-normal 分布をすると考えて統計的解析を行った。

(1) 衝撃圧の分布

船底衝撃圧のピーク値を Pmax とすると、Pmax は log-normal 分布に従うものとする。つまり分布の確率密度関数  $f_p$  が

$$f_p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_p} \exp \left[ -\frac{(x - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2} \right]$$

ここで  $x = \log P_{max}$

$\mu_p$  :  $x$  の平均値

$\sigma_p$  :  $x$  の標準偏差

になると仮定した。

ここである圧力計についての衝撃圧の累積密度関数を片対数紙に書くと Fig. 12 となる。さらに対数正規確率紙に衝撃圧のピーク値を解析した結果をプロットすると Fig. 13, Fig. 14 となる。fitness を、 $\chi^2$  検定で階数  $k=8$  として調べると 90% の信頼性で log-normal 分布と考えてよいことがわかった。

(2) 最大期待値とその分布について

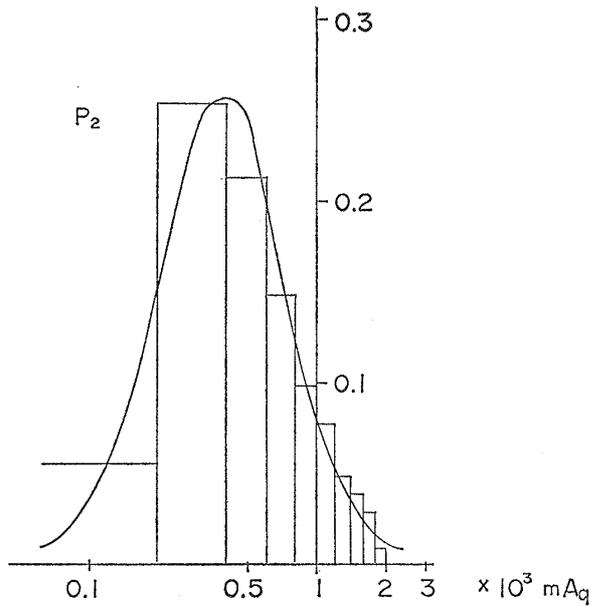


Fig. 12. Example of probability density of impact pressure.

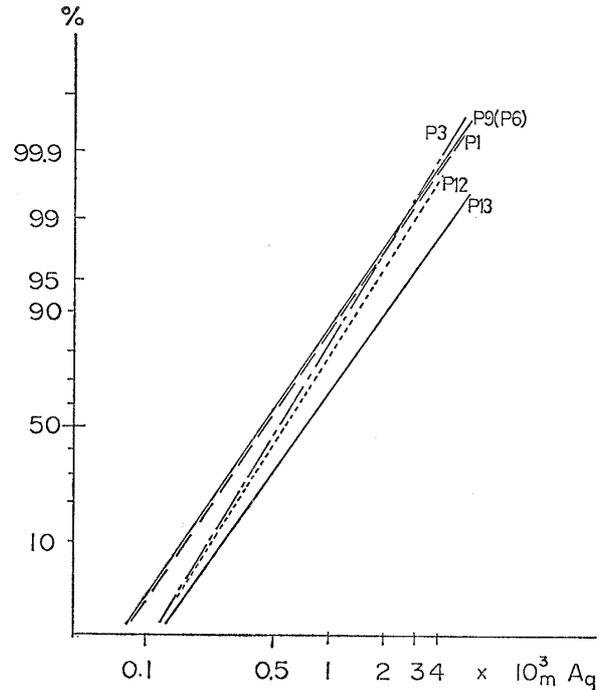


Fig. 14. Cumulative distribution of impact pressure.

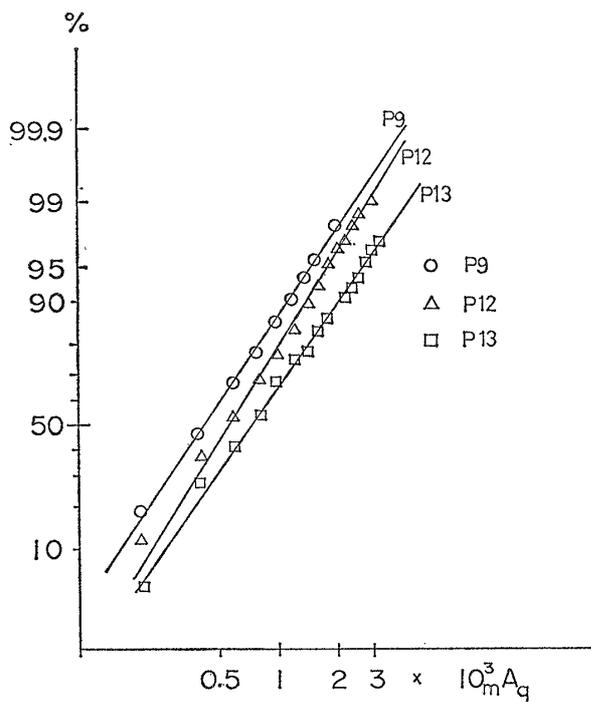


Fig. 13. Cumulative distribution of impact pressure.

(1) の解析により、衝撃圧の分布は短期分布においても log-normal 分布をすればよいことがわかった。

ここで小型高速艇の耐用年数中にうける衝撃圧の最大期待値を求めてみることにする。今、小型高速艇はその耐用年数中に10G以上の加速度に230回程度遭遇するとして設計されているといわれている。今回実験中に10G以上の加速度に遭遇した回数を  $n$  回として、

Table 3. Expected maximum impact pressure

		$N_T=230m/n$	$P_{ex}$
P	1	1812	7.24 kg/cm <sup>2</sup>
	2	2350	6.93
	3	2149	6.49
	6	1734	6.83
	8	1957	9.81
	9	2083	6.98
	12	1266	6.64
	13	1208	11.42

衝撃圧の発生回数を  $m$  回とすれば、 $N_T=230 \cdot m/n$  回の衝撃圧発生に対応する最大期待値を求めればよいことになる。実験期間中  $n=50$  であり  $m$  はそれぞれの水圧計について求められているので Table 3 のように最大期待値  $P_{ex}$  が求まる。ただし、最大期待値は次式により計算される。

$$P_{ex} = \exp \left[ \mu_{im} + \sigma_{im} \sqrt{2} \left[ \log \frac{N_T}{\sqrt{2}} \right]^{1/2} \right]$$

ここで、 $\mu_{im} = \log \mu_p$ ,  $\sigma_{im} = \log \sigma_p$

さらに衝撃圧の最大期待値を対数にとり、船底勾配  $\beta$  とともにグラフに描くと Fig. 15 となって dead rise angle の関数になることがわかる。

設計値としてはこの値は過大評価であるので、別の平均水圧の考え方<sup>3)</sup>により比較的大きい衝撃圧力の発

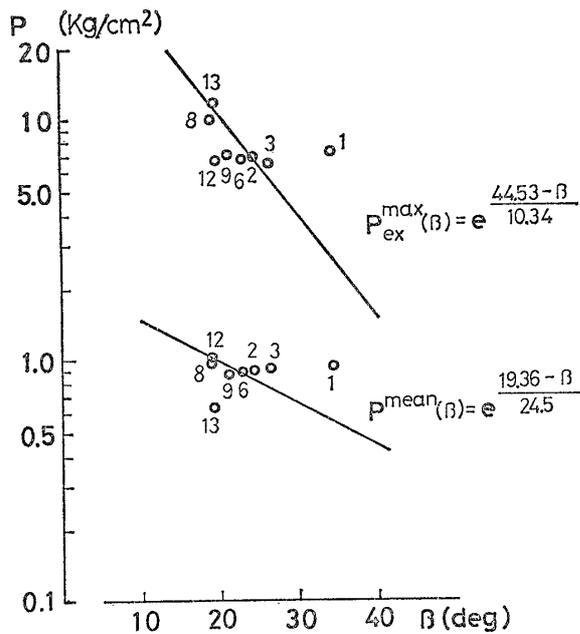


Fig. 15. Distribution of expected max pressure and an example of mean value analysed by mean of space expanded technique.

生した時の例から計算した値を対数にとって Fig. 15 に示す。船首、船尾を除いてほぼ直線関係を示し、この場合については最小二乗法によれば

$$P(\beta) = e^{\frac{19.36 - \beta}{24.5}}$$

で表わされる。

ただし  $\beta = a + b \ln P_{ex}$ ,  $\beta$  in degree,  $a = 19.36$ ,  $b = 24.5$  としたとき  $r^2 = 0.6677$  となる。

このことは、最大期待値、つまり艇の一生のうちで受ける衝撃圧の最大値は、船首、船尾部を除いて dead rise angle の関数になっていることがわかり興味深い。

#### 4. 4 衝撃圧と上下加速度との関係

船底に大きな衝撃圧を生じるような状態では、上下加速度も大きくなり、乗員にとって苦痛となることは経験上わかっているが、今回の計測でも明らかな相関がみられる。Fig. 16 は一航走中に生じた最大加速度と最大衝撃圧の関係を示すもので、一つのプロットが一航走に相当する。これより見て明らかに、大きな衝撃圧が発生するときには大きな加速度を生ずることがわかる。

さらに微視的に衝撃圧の発生状況と加速度の発生の時間的な関係を調べてみると意外なことに気が付く。Fig. 17 に衝撃圧と加速度と艇の姿勢のタイムヒストリーを示す。P 13, P 12, ……は水圧計の記録で Fig. 2 に示したように艇の長手方向に並んでいる。加速度計は fore に 50G, aft に 20G の容量のものを

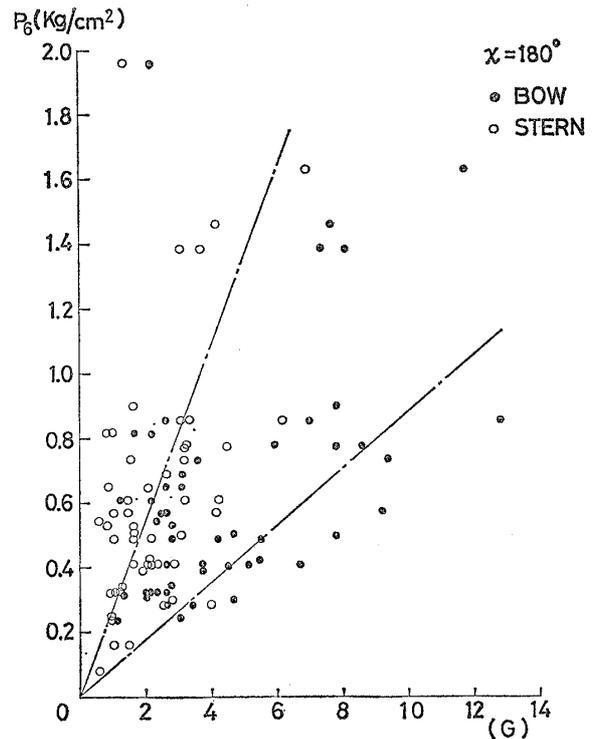


Fig. 16. Correlation between impact pressure and acceleration.

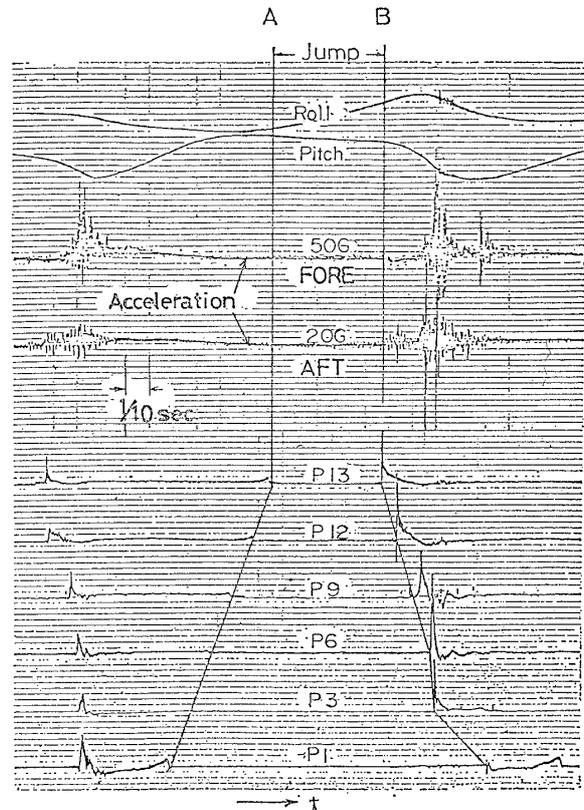


Fig. 17. Typical record of pitch, roll, acceleration and pressure.

取り付けてある。

まず一番船尾にある水圧計 P13 の記録を左から見て行くと小さな山が出ている。これは艇が波から離れる瞬間に水面がここを通過したことを示し、この時点から艇は跳躍して空中を飛び、再び船尾から着水して P13 に大きな衝撃圧を生じる。ところがこの時点では加速度計は前後とも全く加速度を感じていない。艇がさらに没水して一つ前の水圧計 P12 に衝撃圧を生ずる頃になって初めて船尾の加速度計に余り強くない加速度を感じ、船首の加速度計にはむしろやや下向きの弱い加速度が生じている。この時点で艇は船尾を突き上げられて頭下げになるのが pitch の記録から判るが、意外なのはこの時点で加速度が余り大きくないこ

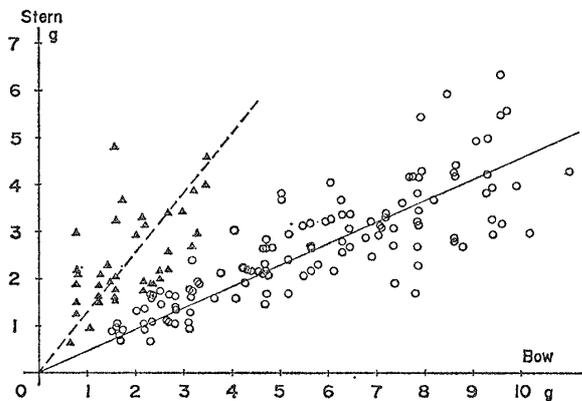


Fig. 18. Two groups of acceleration.

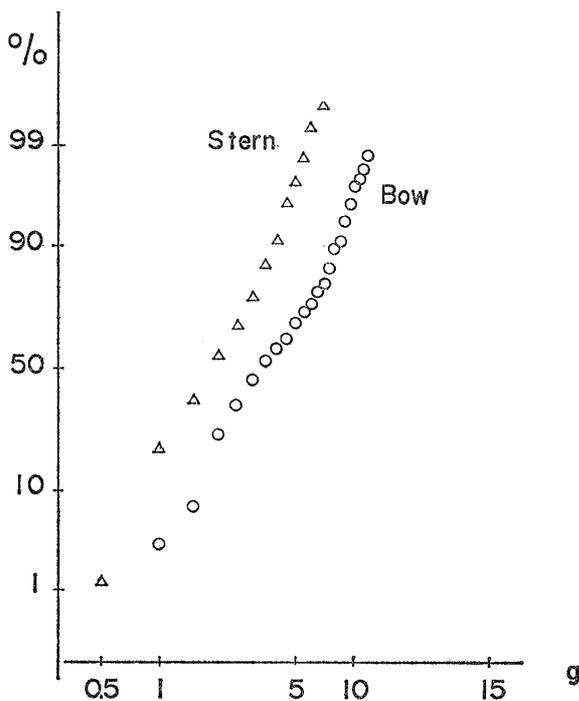


Fig. 19. Cumulative distribution of acceleration.

とである。さらに艇が没水して P9 から P6 (ほぼ  $\times$ ) 位までが水面に接し、大きな衝撃圧を生ずるようになる。船首尾両加速度計とも大きな上向きの加速度を感じ、pitch (及び恐らく heave も) が急激に頭上げに転ずる。

結局、衝撃圧自体はむしろ船尾の P13, P12 あたりが大きくなるが、加速度に影響するのは船体中央部付近の衝撃圧であって受圧面積が広いため、大きな衝撃力となるものと考えられる。

船首部と船尾部の加速度を同じ衝撃圧発生時の値で示すと Fig. 18 のようになり実線と破線とをとり囲むような二つの群に分けてもよさそうである。破線を囲む群は船底全体が同時に着水して前後共ほぼ同程度の加速度が生じた場合として、また実線を囲む群は船尾部が先に着水し、そこを支点として bow down した結果、前部で大きな加速度が生じた場合として考えることができる。船首、船尾各々の加速度について衝撃圧と同様にして対数確率紙に表わしてみると Fig. 19 のようになって log-normal 分布をするようであるが衝撃圧のような一直線上にはのらない。

## 5. 結 言

小型高速艇の船底衝撃に関する実船実験の結果、次のようなことが明らかになった。

(1) 海象が激しく跳躍しやすい場合は衝撃圧力も加速度も大きくなる。

(2) 全般的に dead rise angle が小さい方が大きい衝撃圧を受ける。

(3) Midship より前方では対水角度が小さい方が大きい衝撃圧を受ける。また船尾近傍では着水速度が速いほど大きい衝撃圧を受ける。

(4) 高速艇の船底に働く衝撃圧も大型船の船首波浪衝撃圧と同様、対数正規分布をする。

(5) 小型高速艇の耐用年数中に受ける衝撃圧の最大値はその圧力の発生する圧力計の位置の dead rise angle の関数とみなすことができる。

(6) 船体に働く衝撃加速度は受圧面積がある程度大きくなったとき、すなわち船体中央部付近まで着水したとき大きく現われる。

(7) 船首付近に生ずる大きな加速度は船体そのものが着水したときに生ずる加速度に、pitching 運動による頭下げの加速度が加わる結果、船尾付近より大きくなるものと考えられる。

## 6. 謝 辞

著者らは、実験にあたってその遂行に努力して下さった高速艇船底衝撃研究委員会の委員各位や、日本小

型船舶検査機構の職員の方々，及びヤマハ発動機(株)ボート事業部の関係者に深く御礼申し上げます。

また，初期において委員として実験に参加され，有意義な提案と指導を賜った東京大学生産技術研究所前田久明助教授，及びデータ解析に協力していただいた東京大学石井裕司技官，川村武男技官，鈴木文博技官，岩瀬律雄技官に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 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 (昭51.3)
- 2) 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 (昭52.3)
- 3) 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 (昭53.3)
- 4) 菅井和夫他：高速艇の船底波浪衝撃水圧に関する実験，日本造船学会．昭和53年秋季講演．
- 5) 元良誠三他：高速艇の船底衝撃圧発生メカニズムについて，日本造船学会．昭和53年秋季講演会で講演
- 6) 竹川正夫：不規則波中における船首波浪衝撃圧について，日本造船学会論文集140号 (昭51.5)