正員 岡 田 真 三* 正員 角 洋 一**

Experimental Study on the Maximum Pressure and the Duration Time of the Horizontal Water Impact of Flat Plate

by Shinzo Okada, Member Yoichi Sumi, Member

Summary

This paper describes experimental studies on the horizontal impact of flat plates falling onto a still water surface with a trapped air condition. In order to make clear the effects of the mass of falling body, plate breadth, and impact velocity on the maximum impact pressure, we have carried out the experiment of plate breadths of 0.2, 0.4, 0.6 m, in addition to those of 0.25, 0.35 and 0.5 m done in 1983. The results of the data analysis confirmed the following effects;

(1) The maximum pressure rises in proportion to the parameter K_m ,

$$K_m = 1/(1 + M_w/M)$$

where, M is the mass of the falling plate and M_w is its added mass of the water,

(2) The impact duration depends on B/V_0 ,

where, B is the breadth of plate and V_0 is the impact velocity.

Based on these facts, we have developed the following empirical formula to predict the maximum pressure and the impact duration Δt ,

 $P_{\max} = \frac{M_w K_m V_0}{B \varDelta t}$ $M_w = \frac{\pi}{8} \rho_w B^2$ $\frac{1}{\varDelta t} = 0.144 \times 10^3 \left(\frac{V_0}{B}\right)^{0.673}$

where, V_0 in m/s, B in m, Δt in s.

The agreement between experimental and predicted results is remarkably good. The formulae developed including the evaluation of the impact duration are suitable for the design of structures exposed to water impact.

1. はじめに

従来から小型船では水撃荷重が船体強度として支配的で あり,最近では大型船においても高速化によりスラミング 時の強度保証は重要なものとなってきている。船体に作用

* 住友重機械工業株式会社

** 横浜国立大学工学部

原稿受理 平成7年7月 10 日 秋季講演会において講演 平成7年 11 月 16 日, 17 日 する外力の中でスラミングや海水打ち込みのように水撃現 象に依るものは、その空間的分布が問題となること及び短 時間の衝撃現象であることにより、荷重および強度推定が 複雑で、特に水面と衝突する物体の成す角(水撃角 β)が小 さく空気巻き込みの影響がある場合の荷重推定は現在でも 課題として残されている。

水撃現象を2次元的に見た場合の,水撃角βと水撃圧力 との関係をFig.1に示した。Wagner,H^{1),2)}は水面と衝突 する水撃角βが微小であるとして衝突物体の接水面に生 じる圧力分布とその時刻歴を理論的に導いた。Wagner 理 論はその仮定により水撃角が大きい場合は実際よりも大き



日本造船学会論文集 第178 号



な衝撃圧を示すが、βのかなり広い範囲(約20°まで)に適 用可能である。しかしながら、βが小さい領域(例えば4°以 下)では、Wagner 理論では極めて大きな衝撃圧を与え、 β が0°の場合は無限大となるのに対し、実際の圧力は、Fig. 1の Chuang, S. L.³⁾ による測定値にも示されるように,理 論値よりもずっと小さなものが得られている。この理論と の乖離の原因は水面と衝突する物体間に取り込まれた空気 の緩衝作用によるものであると考えられている。この 問題の基礎研究として,円盤の水撃現象については藤田ら4,5 の実験・理論両面からの研究がある。また,2次元問題とし ての平板の水平水面衝撃に関しては、これまでにかなりの 実験と同時に数値計算による推定の試み6,7,8,9 がなされ, また最近では Iwanowski et al.¹⁰⁾の計算がある。しかし, その現象の複雑さにより、数値計算による2次元の平板水 撃現象の一貫した取り扱いは現在のところまだ困難なよう である。また,実験式の試みもされているが3)水撃速度のほ ぼ2 乗に最大衝撃圧が比例すること以外は、落下平板の質 量と幅の影響が明らかでなく、比例定数は各実験により大 きなばらつきを示している。

ここでは、2次元問題の平板水平水撃を扱う。まず、比較のために、Fig.2にWagner型水撃の圧力分布とその時刻 歴、Fig.3とFig.4に今回実験した平板水平水撃圧力の測 定結果の例を示す。Fig.3は圧力の時刻歴であり、Fig.4は 最大圧力が生じた時の圧力分布である(異なる水撃速度 Va



Fig. 2 Pressure distribution and time history by Wagner's Theory ($\beta = 15 \text{ deg.}$)



Fig. 3 The pressure time history on a flat plate at the water surface impact $(B=0.4 \text{ m}, V_0=3.25 \text{ m/s})$



Fig. 4 Pressure distribution of a flat plate at peak of impact (Present experiment; B=0.4 m, $V_0=0.24$ m/s-

3.25 m/s)

の場合を重ねて示した。)。Wagner 型では接水端で鋭い圧 力の peack を取る分布が得られるのに対し,平板水撃では 平板中央に最大圧力が生じ圧力は平らな分布を示す。そこ で,平板水撃の場合,最大圧力と衝撃時間が推定できれば, 強度設計上必要な荷重の概要は把握できると考えられる。

本研究では、1983年に著者らの一人が山本ら⁸⁾と共同で 行った実験に、今回新たに測定値を補強するための実験を 行い、最大圧力に及ぼす3つのパラメータ、水撃速度 Va、落 下平板の質量 M,及び平板幅 B の関係を明らかにし、最大 圧力と衝撃時間の推定式を作成した。推定式と実験値を比 較した結果、Verhagen、J. H. G.⁶⁾の実験を除いて、良い精 度で最大圧力を推定できることが確かめられた。

2. 実 験

Photo 1 に落下水撃試験装置全体を示す。板厚 20 mm の アクリル製の水槽は,幅 2 000 mm,深さ 800 mm,奥行 2 00 mm で,奥行方向には水の流れが一様であることを想定 している(2 次元流れ)。水撃実験を行う被試験体は板厚 20 mm のアクリル製で,剛な落下治具の下部に取り付けら れ,トリガーを開放することにより,落下治具と共にガイ ドレールに沿って水平に水面に自由落下する。実験状態で は,水の水位は約 600 mm,最大落下高さは約 700 mm であ る。

Photo 2 に落下試験平板の一つ (*B*=400 mm)を示す。 1983 年⁸⁾ に行った実験では平板幅 *B*=250 mm, 350 mm, 500 mm であったので,今回は平板の幅の影響を明らかに する目的で *B*=200 mm, 400 mm, 600 mm の 3 種類を用意 した。試験平板の奥行方向の両端には制流板を設けて,水 撃時,平板と水面間の空気流が奥行に対して一様に(2 次元 流)成るように考慮した。各試験平板の奥行は制流板を含 めて 196 mm であり,水槽壁面との平均隙は 2 mm であ



Photo 1 Water Impact Test apparatus



Photo 2 Test plate (B=0.4 m)

Table 1 Test plates and experimental range

Breadth B	Drop Height H	Impact Velocity V ₀	Mass of Dropping Body
600mm	10mm-600mm	0.12m/s-3.25m/s	83.5kg/m
			103.5kg/m 133.5kg/m
400mm	10mm-600mm	0.12m/s-3.25m/s	77.5kg/m
200mm	10mm-600mm	0.12m/s-3.25m/s	68.5kg/m

る。

試験平板に取り付けた圧力計は共和電業製の PS-2 KB で最大計測圧力 2 kgf/cm², 固有周期 20 kHz である。また 使用した動歪み計の測定周波数は 0~10 kHz 以上である。 Table 1 に実験条件をまとめた。

3. データ解析

解析に使用した実験値は 1983 年⁸⁾ に行ったものと今回 得られた測定値を用い,他の著者によるもの^{7),9)} も一般性 を確認するために参照した。解析に使用した数値は Appendix に表としてまとめてある。

2 次元の平板の水平水面衝撃問題は、水撃速度 V₀,落下 質量 M,平板幅 B の 3 つのパラメータで表される。ここで は各パラメータが水撃時の最大圧力と衝撃時間にどのよう 384

日本造船学会論文集 第178号

に影響するかを考察する。

3.1 落下質量の影響

平板の水撃現象の力学的内部構造は複雑であるが、衝撃 前後の運動量保存則は成り立っていることが確認されてい る⁸⁾。衝撃前後の運動量保存則は次の様に表される。

$$MV_{0} = (M + M_{m})V_{1}$$
 (1)

ここで, *M* は落下平板の質量, *V*₀ は水撃速度(衝撃初速 度), *M*_w は平板に作用する水の付加質量, *V*₁ は衝撃後の平 板の速度である。

これから,

$$V_1 = \frac{1}{1 + M_w/M} V_0$$
 (2)

また,平板に作用する力積はその運動量変化に等しいから,

$$\int F dt = d(MV)$$

$$= M(V_0 - V_1)$$

$$= \frac{M_w}{1 + M_w/M} V_0$$

$$= M_w K_m V_0 \qquad (3)$$

$$zz\overline{c}, \ \mathcal{N}\overline{\mathcal{I}}\mathcal{I}-\mathcal{I}\mathcal{K}_m = \frac{1}{1+M_w/M}$$
(4)

を用いた。

水撃時に作用する力積が(3)式で評価できると考え, 衝撃時間を Fig.5 に示すように,実験条件から得られる衝 撃時の運動量変化を最大衝撃力 $p_{max}B$ で割ったもので定 義する。そうすると, Fig.5 で定義された衝撃時間 Δt は,

$$\Delta t = \frac{M_w K_m V_0}{p_{\max} B} \tag{6}$$

のように,実験条件及び最大圧力 pmax の測定値を用いて計



Pressure Time History



Pressure Distribution



Fig. 5 Definition of impact duration Δt

算できる。また,これは次の様にも表現できる。

$$p_{\max} = \frac{M_w K_m V_0}{B \Delta t} \tag{7}$$

衝撃時間 Δt の各パラメータに対する依存性が明らかでは ないが,(7)式から,水撃速度と平板幅が固定されている 場合,もし Δt が平板質量に依存しなければ,本質的に質量 に依存するパラメータは K_m のみとなり,最大圧力は落下 質量に対しては K_m ,言い換えると運動量変化に依存する ことが期待できる。

Fig.6に水撃速度及び平板幅が同じで,落下質量のみを 変化させた場合の Km と最大圧力との関係を示した。(6), (7)式の計算で付加質量は,

$$M_w = \frac{\pi}{8} \rho_w B^2 \tag{8}$$

として評価した。ここで、 pw は水の密度である。

Fig. 6 には今回行った実験の他に Lewison, G. et al.ⁿ の 実験値も同時に示した。これは,最大圧力が K_m に比例する ことを示している。さらに,この関係が成立するものとす ると, $K_m=1$ の時,落下質量が無限大の場合の最大圧力を 与ることになる。

3.2 水撃速度と板幅の影響

次に,最大衝撃力に対する板幅の影響を(6)式で定義 した衝撃時間に関連させて解析する。Fig.7に水撃速度と



Fig. 6 Mass effect on maximum pressures



(6) 式より定義された衝撃時間の関係を示す。板幅 B が 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m は今回の測定値であり, 0.25 m, 0.35 m, 0.5 m は 1983 年⁸⁾ に行った実験の測定値である。Fig. 7 は衝撃時間が水撃速度 V_0 に逆比例し,板幅 B に比例する 傾向があることを示している。このことは Wagner 理論¹⁾ で衝撃時間が $x/V_0(x 接水半幅)$ に比例することと対応し ている。Fig. 8 には Fig. 7 で用いたデータの他に Lewison, G. et al.⁷ 宮本ら⁹⁾ の測定値もプロットし, V_0/B と衝撃時間 間 Δt との関係を示た。多少のばらつきはあるが,衝撃時間

の B/V₀ に対する依存性は明らかで, Fig.8 は衝撃時間が V₀/B の関数で表されることを示している。このことから, 衝撃時間は B/V₀の関数で表されるとして, 衝撃時間の推定 式として次のものを使用した。

$$1/\Delta t = \alpha \left(\frac{V_0}{B}\right)^{\beta} \tag{9}$$

ここで、 α , β は実験定数である。

Fig. 8 にはまた,(9)式の近似曲線を示したが,実験定数 α , β の評価には Fig. 8 でプロットした全てのデータを 用いた。

3.3 推定式

以上の測定値の解析から、以下の推定式が得られた。

$$p_{\max} = \frac{M_{w}K_{m}V_{0}}{B\Delta t}$$
(10)

$$ZZC, M_w = \frac{\pi}{8}\rho_w B^2$$



Fig. 8 Relation between V_0/B and $1/\Delta t$

 $\frac{1}{\varDelta t} = 0.144 \times 10^3 \left(\frac{V_0}{B}\right)^{0.673}$ (11)

(11) 式の定数は、 V₀ (m/s), B (m), Δt(s) の単位に対 するものである。

Fig.9から Fig.12 に上記の式を用いた最大圧力の推定 値と測定値の比較を示す。Fig. 12の Verhagen®の測定値 を除いて,極めて良い一致を示している。今回 Verhagen の実験の検証も目的として、Verhagenと同じ板幅(B= 0.4 m) での実験を行っており、落下質量 M が Verhagen の実験よりも約4倍と大きいにも拘らず、同じ水撃速度で Verhagen は今回の実験値の 2~3 倍の最大圧力を得てい る(Appendixのデータ参照)。このことは、今回の解析で 得られた結果である、板幅と水撃速度が同じ場合、最大圧 力は運動量変化に比例することに合致しない。したがって 本研究の実験解析では B=0.4 m の実験値として今回行っ た測定結果を用いた。Verhagen の測定値と今回解析に用 いた測定値の大きな相違の原因は,Verhagen の実験に用 いた水槽が板幅 B=0.4 m に対して,幅1 m×深さ0.4 m と比較的小さかったことも要因の一つと考えられるが、現 在のところはっきりしない。

最後に、衝撃時間の推定値と今回測定した平板中央部の 圧力の履歴の比較を Fig. 13-a~Fig.13-c に示した。衝撃時 間を定量的にどう評価するかに問題があるが、衝撃時間の



Fig. 9 Predicted maximum pressure and measurement (Present measurement)





Fig. 10 Predicted and measured maximum pressure (Experiment in 1983)







(Experiment by Verhagen, J. H. G.⁶)

オーダーは良く押さえている。これは運動量則が本問題に ついても有効であることを示している。設計的に見ると, 水撃現象のように衝撃的な荷重の場合は,問題としている 構造物の固有周期との関連で衝撃時間の評価は重要であ る。衝撃時間が構造の固有周期に近ければ同調現象が危惧 されるし,逆に最大荷重が大きくても,構造の固有周期よ りも衝撃時間がずっと短い場合は構造応答は小さく強度上 問題とならない場合も考えられるからである。

4. 結 言

本研究では,平板の水平水面衝撃時の衝撃圧力と衝撃時 間の推定を行う目的で,これまでに行われた測定値と新た に行った実験をもとにして推定式を作成し,以下の結論が 得られた。

(1) 平板幅及び水撃速度が同じ条件の場合,最大圧力 は水撃時の運動量変化に比例し,以下の Km の値に比例す る。

$$p_{\max} \propto K_m \equiv \frac{1}{1 + M_w/M}$$

ここで、M は衝撃平板の質量、 M_w はその付加水質量である。

ح





Fig. 13-a Predicted impact duration and measured pressure on center of flat plate (B=0.6 m)



Fig. 13-b Predicted impact duration and measured pressure on center of flat plate (B=0.4 m)



Fig. 13-c Predicted impact duration and measured pressure on center of flat plate (B=0.2 m)

(2) 衝撃時間は B/V₀に依存する。

(3) (1), (2)の関係から以下の最大圧力と衝撃時間に関する次の推定式を得た。

$$p_{\max} = \frac{M_w K_m V_0}{B \varDelta t} \tag{10}$$

$$\mathcal{ZC}, \ M_w = \frac{\pi}{8} \rho_w B^2$$
$$\frac{1}{\Delta t} = 0.144 \times 10^3 \left(\frac{V_0}{B}\right)^{0.673} \tag{11}$$

(11)式の定数は, V₀(m/s), B(m), Δt(s) の単位に対する ものである。

また,上式は $K_m = 1$ の時,Mが無限大,言い換えると水撃 速度が変化しない場合の最大圧力を表す。

(4) 最大圧力の推定値と測定値を比較した結果、Verhagenの測定値を除き、板幅0.2m~3m、及び水撃速度 0.4m/s~5.5m/sの測定値の範囲で極めて良い一致を示 した。ただし、Verhagenの測定値との乖離の原因は不明で ある。

(5) 衝撃時間の推定値と今回行った実験の圧力履歴を 比較した結果,衝撃時間のオーダーは定量的に推定できる ことが確認された。このことは本問題においても,運動量 理論が有効であることを示すものである。

外板が平たく水撃角が0°の場合の構造強度を考える場合,最大荷重のみならず構造の固有周期と衝撃時間の関係

388

が重要である。最大圧力と共に Fig.5 で定義した衝撃時間 Δt の推定式が構造設計のための有用な一つの道具となれ ば幸いである。

本推定式は測定結果を基にしたものであるから適用に当 たっては、解析範囲を外れた場合、注意が必要である。例 えば最大圧力は水の圧縮性により、*Cw*を水中での音速と して *pwCwV*を越えることはない。より広い適用範囲の推 定および圧力の詳細な時間変化に立ち入るためには、実験 および理論面でのさらなる研究が必要であると考える。

もとより、一般の水撃問題には、Wagner 型の水撃現象と 平板水撃の中間領域 ($0^{\circ} < \beta \le 5^{\circ}$)の問題、また、実際の船舶 への適用に際しては、船体と波との相対運動の評価は不可 欠であるし、さらには構造応答と荷重の相互作用の問題等、 なお多くの課題が残されている。

最後に,本研究に関して,有益なご助言を賜った東京大 学大坪英臣教授に感謝致します。

参考文献

- Wagner, H. von: Über die Landung von Seeflugzeigen, Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, Jahrg. 22, 1. Heft (1931), pp. 1-8
- 2) Wagner, H. von: Über Stoß-und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, ZEITS-CHRIFT FÜR ANGEWANTE MATHMATIK UND MECHANIK, Band 22, Heft 4, (1932), pp.

193-215

- 3) Chuang, S.L.: SLAMMING TESTS OF THREE-DIMENSIONAL MODELS IN CALM WATER AND WAVES, DEPARTMENT OF THE NAVY NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER, Report 4095, (Sep. 1973)
- 4) 安藤良夫,藤田譲,山口勇夫:平板の水面衝撃について,造船協会論文集,第90号,(1951),pp.69-75
- 5) 藤田譲:平円板の水面衝撃について(第2報),造船 協会論文集,第94号,(1953), pp. 105-110
- 6) Verhagen, J. H. G.: The Impact of a Flat Plate on a Water Surface, Journal of Ship Research, Vol. 10, No. 1, (1967), pp. 211-223
- Lewison, G. and Maclean, W. M.: On the Cushioning of Water Impact by Entrapped Air, J. Ship. Res., Vol. 11, (1968), pp. 116-130
- 8) 山本善之,大坪英臣,岡田真三,澤田正志,村上貴英:平板の水平水面衝撃の研究,日本造船学会論文集,第153号,(1983),pp.235-242
- 9) 宮本武,谷澤克治:船首部に作用する衝撃荷重について(第1報),日本造船学会論文集,第156号,(1984),pp.297-305
- 10) Iwanowski, B., Fujikubo, M. and Yao, T.: Analysis of Horizontal Water Impact of a Rigid Body with the Air Cushion Effect, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 173, (1993), pp. 293-302

Appendix 解析に使用したデータ

Table A-1	Measured maximum pressures
	(Present experiment)

B=0.2m	M=68.5kg/	m	B=0.4m	M=77.5kg/s	n		B=0.6m		
Mass Ratio <u>Μ</u> ρ _w πB ² /8	Impact Velocity V ₀ (m/s)	Maximum pressure Pmax (kPa)	Mass Ratio <u>Μ</u> ρ _w πB ² /8	Impact Velocity Vo (m/s)	Maximum pressure Pmax (kPa)	Mass M (kg/m)	Mass Ratio <u>M</u>	Impact Velocity V _e	Maximum pressure Pmax (kPa)
	0.42	8		0.42	5			0.42	3
	0.42	10		0.59	11			0.59	6
	0.59	13		0.73	16			0.73	9
	0.59	10		0.84	21			0.84	12
	0.73	16		0.94	24			0.94	13
	0.84	19		1.33	35			1.33	23
	0.94	28		1.63	49			1.63	33
	1.33	47		1.88	57	83.5	0.59	1.88	39
	1.33	47	1.23	2.10	65	Í		2.30	57
4.36	1.63	63		2.30	78		Ì	2.48	67
Í	1.88	84		2.48	82			2.66	78
	2.10	105		2.66	97	1		2.82	82
	2.30	114		2.82	101	[2.97	91
	2.48	140		2.97	109	-		3.11	95
	2.66	159		3.11	116			3.25	101
	2.82	161		3.25	128	103.5	0.73	2.66	89
	2.97	162				133.5	0.94	2.66	101
	3.11	201							
	3.25	213							

Table A-2	Measured maximum pressures
	(Experiment in 1983)

Author	Breadth B (m)	Mass M (kg/m)	Mass Ratio <u>Μ</u> ρ _w πB ² /8	Drop Height H (m)	Impact Velocity V _o (m/s)	Maximum pressure Pmax (kPa)
				0.196	1.96	52
Yamamoto, Y.,				0.363	2.67	78
Ohtsubo, H.,	0.50	53.6	0.55	0.561	3.32	113
Okada, S.,				0.753	3.84	145
Sawada, M.				0.956	4.33	183
and Murakami, T.			1.04	0.200	1.98	69
(1983)*)		49.8		0.399	2.80	114
	0.35			0.582	3.38	160
				0.794	3.95	199
				0.912	4.23	233
				0.195	1.96	72
				0.387	2.76	128
	0.25	46.4	1.89	0.578	3.37	193
				0.746	3.83	237
				0.931	4.27	292

Table A-3 Measured maximum pressures (The data reproduced here were taken from figures.)

A 4 L			Mass	Drop	Impact	Maximum
Author	Breadth	Mass	Ratio	Height	Velocity	pressure
	B	M	<u>M</u>	- <u>H</u>	Ve	Pmax
Tamia C	(<u>m</u>)	(kg/m)	ρ_π B*/8	<u>(m)</u>	(m/s)	(kPa)
Lewison, G.				0.305	2.45	230
α Maclean, W. M.		·		0.610	3.46	414
(1968)		5953	1.63	0.914	4.23	598
(re-produced)	3.05			1.219	4.89	770
				1.512	5.45	1046
		4092	1.12	1.067	4.57	584
		5271	1.44	1.067	4.57	654
Minoreta		7193	1.97	1.067	4.57	748
Miyamoto, 1.				0.057	1.06	26
(100 () ⁹⁾				0.135	1.63	53
(1984)				0.215	2.05	73
(re-produced)	0.50	55	0.56	0.270	2.30	92
				0.360	2.66	113
				0.400	2.80	121
				0.435	2.92	133
Verbauer INC				0.535	3.24	149
vernagen, J.H.G.				0.04	0.89	16
(1907)				0.04	0.89	20
(re-produced)				0.04	0.89	23
				0.07	1.17	29
				0.07	1.17	35
		1		0.07	1.17	44
				0.10	1.40	44
				0.10	1.40	53
	0.4	20	0.32	0.10	1.40	59
		1		0.20	1.98	98
				0.20	1.98	118
		ļ		0.20	1.98	137
	[0.35	2.62	177
				0.35	2.62	216
				0.35	2.62	245
				0.45	2.97	216
	1			0.45	2.97	294
				0.45	2.97	324