

### 3 碎波の波圧について

○中央大学 正員 工博 林 泰 造  
中央大学 准員 服部 昌太郎

要

碎波の波圧につき実験を行って従来の碎波諸公式を検討し、特に碎波の波圧を適当な動圧の表現式の形において求めようとしたものである。

## 記 号

|                                           |                               |
|-------------------------------------------|-------------------------------|
| $\lambda$ : 波 長                           | $g$ : 重力の加速度                  |
| $h$ : 波の半振幅                               | $\rho$ : 水の密度                 |
| $t$ : 時 間                                 | $w$ : 水の単位容積重量                |
| $c_w$ : 波の伝播速度                            | $p$ : 圧力の強さ                   |
| $v_0$ : 水面の水粒子の軌道速度                       | $p_{th}$ : 定常噴流理論による平均圧力の強さ   |
| $K$ : 空気塊に対する仮想質量係数                       | $a$ : 壁面に附着した空気塊面積            |
| $d_1, d_2$ : それぞれ直立壁直前および<br>捨石堤前方の水深     | $D$ : 壁面と碎波との間に挟まれた空気<br>塊の厚さ |
| $c_1, c_2$ : それぞれ水中および壁体中<br>における圧力波の伝播速度 | $U$ : 水の実質部分の移動速度             |

## 直立壁に作用する波圧に関する従来 of 諸公式

### 1. 碎波の公式

碎波の公式として従来知られているものはつぎのようである。

(a) 広井公式

$p = 3 \text{ wh}$  . . . . . ( 1 )

(b) *Minikin* の公式

$$p_{\max} = 102.4 d_1 \left( 1 + \frac{d_1}{d_2} \right) \frac{2h}{\lambda}, \quad (\text{ton, m 系}) \quad (2)$$

## 2. 振動波の波圧の諸公式における動圧の取扱い

碎波の諸公式はいずれも適当な動圧の表現から導かれたものであるが、碎波の公式として知られているもの以外にも動圧を考慮した公式は数多く見られる。こゝでは主として

$$\frac{p_{dyn.}}{w} = f \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

で表わされるような  $p_{dyn}$  を動圧の表現とよび、このような動圧の表現により碎波の公式を含めての各種の波圧の公式を分類するとつぎのようである\*

(a) 動圧の表現式(3) を使用していないもの

Sainflou, Gourret, Benezit, Levi, Antonelli, Lange-Forst, Jacoby, 等.

(b) 動圧の表現式(3) またはそれに類似の式を計算の途中において使用しているもの

| 公 式 の 著 者                     | 計算上の仮定として使用せられている動圧の表現式 **                                           | $\frac{p_{dyn.max}}{w} = f \frac{v^2}{2g}$<br>の f の 値         |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Betz (Germany 1936)           | $p_{dyn.}/w = \frac{1}{g} \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} v$               | $\frac{2}{\frac{c_1}{c_2} + 1} \frac{c_1}{v} = \frac{c_1}{v}$ |
| Bagnold (England 1938)        | $p_{dyn.max}/w = 0.54 \frac{2h}{D} \frac{v^2}{g}$                    | $1.08 \frac{2h}{D}$                                           |
| Minikin (England 1950)        | $p_{max}/w = 200 \frac{d_1}{d_2} \frac{2a}{\lambda} \frac{v_w^2}{g}$ | $400 \frac{d_1}{d_2} \frac{2a}{\lambda}$                      |
| Lira (Chile 1927)             | $p_{dyn.}/w = \frac{2 v_0^2}{g}$                                     | 4                                                             |
| Trenjukhinn (USSR 1926)       | $p_{dyn.} = 0.200 (v_w + v_0)^2$                                     | 3.92 ***                                                      |
| Latham (England - )           | $p_{dyn.max} = 0.125 v_0^2$                                          | 2.45 ***                                                      |
| 広 井 (Japan 1907)              | $p_{dyn.}/w = \frac{v^2}{g}$                                         | 2                                                             |
| Engels (Germany - )           | $p_{dyn.}/w = \frac{v_w^2}{g}$                                       | 2                                                             |
| Richter (USSR - )             | $p_{dyn.}/w = \frac{v_0^2}{g}$                                       | 2                                                             |
| Hansen (Germany 1950)         | $p_{dyn.}/w = \frac{v_w^2}{g}$                                       | 2                                                             |
| Gaillard (USA 1904)           | $p_{dyn.max}/w = 1.80 \frac{(v_w + v_0)^2}{2g}$                      | 1.80                                                          |
| Molitor (USA 1935)            | $p_{dyn.max}/w = 1.80 \frac{(v_w + v_0)^2}{2g}$                      | 1.80                                                          |
| Kandiba-Toukholka (USSR 1926) | $p_{dyn.}/w = 1.6 \frac{v_w^2}{2g}$                                  | 1.6                                                           |

\* 公式の大部分は文献1)によった。

\*\* 有次元数値はすべて ton. m. sec 系による値

\*\*\*  $w = 1.027 \text{ ton/m}^3$  として算出した。

## 動圧の取扱いに関する簡単な理論的予備考察

碎波の及ぼす動圧の厳密な理論的取扱いは困難であると考えられるので、ここでは簡単な理論による予備考察を行う。

直立壁に入射する波の単位時間当りの水実質部分の移動水量（流量）を  $Q$ （図-1(a)）、衝突後の状況を同図（b）のようであるととし、（b）のような状態は少時定常的に継続するものと仮定すれば、壁面の面積  $A$  部分に作用する推力（Thrust） $P$  は定常噴流の理論により

$$P \approx \frac{Q}{g} v$$

従って壁体の面積  $A$  部分の平均圧力はつぎのようになる。

$$p_{th} = \frac{P}{A} \approx \frac{v^2}{g} \quad (4)$$

この際に壁体との間に空気塊が挟まれた場合（図-2）には、空気塊の厚みを  $D$ 、その厚みの変化を  $x$ （縮みを正とする）とすれば

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (5.a)$$

また空気塊の圧縮に伴って移動する水の仮想質量を Bagnold<sup>2)</sup> と同じく  $\rho a K$  とすれば

$$\rho a K \frac{dv}{dt} = -a(p - p_{th}) \quad (5.b)$$

さらに空気塊は断熱変化に従うとして、

$$p = p_{th} \left( \frac{D_{th}}{D} \right)^\gamma \quad (5.c)$$

ただし  $D_{th}$  は  $p_{th}$  の定常圧力下の空気塊の厚み、 $\gamma$  は空気の断熱係数である。

（5.c）において  $D = D_{th} - x$  とおき、 $D_{th} \gg x$  と仮定して右边を  $x$  についてべき級数に展開すれば

$$p = p_{th} \left( 1 + \gamma \frac{x}{D_{th}} + \dots \right) \quad (5.d)$$

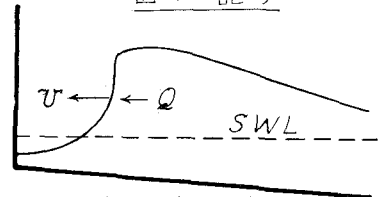
そこで（5.d）と（5.a）とを（5.b）に代入整理すると次式をうる。

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\gamma p_{th}}{\rho K D_{th}} x = 0 \quad (5.e)$$

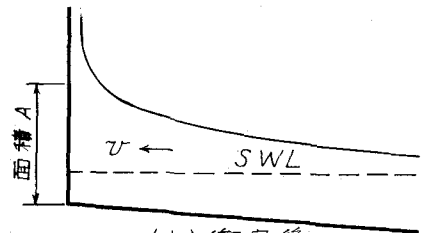
この解は

$$x = A \sin \sqrt{\frac{\gamma p_{th}}{\rho K D_{th}}} t + B \cos \sqrt{\frac{\gamma p_{th}}{\rho K D_{th}}} t \quad (5.f)$$

図-1 記号

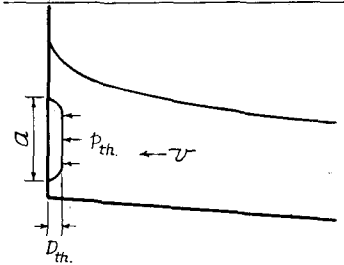


(a) 衝突前



(b) 衝突後

図-2 空気層が挟まれた場合



であり、積分常数  $A, B$  は初期条件により定められる。もし初期条件として

$$t = 0 : \quad v = 0, \quad p = 0 \text{ (大気圧)} \quad (5.g)$$

と仮定すれば、これにより (5.f) と (5.d) とから

$$p = p_{th} - p_{th} \cos \sqrt{\frac{\gamma p_{th}}{\rho K D_{th}}} t \quad (5.h)$$

従って  $p_{max} = 2 p_{th}$

$$\therefore p_{max} \cong \frac{2 v^2}{g}, \quad f \cong 4 \quad (6)$$

となる。

## 実験の装置および方法

### 1. 碎波の実験

実験に使用した水槽は 図-3 のような巾 1 m, 深さ 0.86 m, 長さ 14.03 m の片面ガラス張りの鉄筋コンクリート製矩形断面のもので、木製の滑らかなで勾配 0.088 を透過の斜面

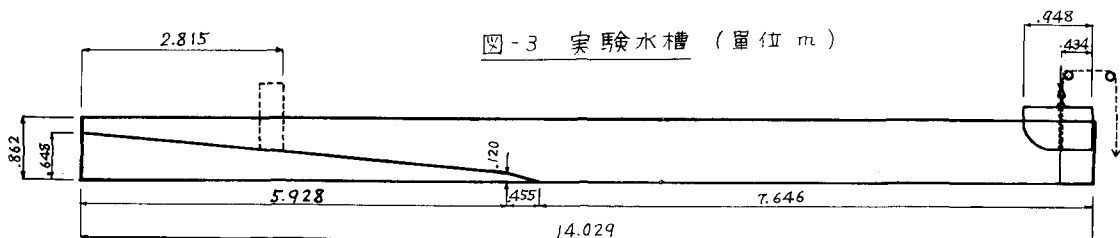


図-3 実験水槽 (単位 m)

上に図示点線で示されるような直立壁を固定し、これに波を入射させてその際の波圧を測定する。

周期的な波における前の波の反射や戻り流れ等の干渉を取除いて純粹に一山の波による動圧の影響を調べるために、波としては孤立波を起動する。孤立波の起動方法は前報<sup>3)</sup>の場合と同じようであって止めの取外しで急落下する巾 99 cm, 長さ 90 cm, 側壁高 60 cm, 浜側の底面に丸みを附した鉄板製フランチャーによる。

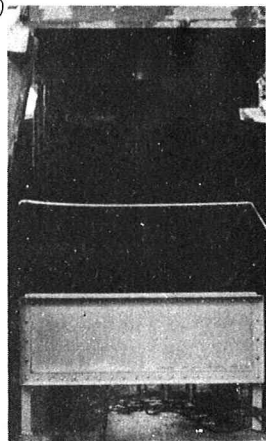
起動された孤立波は傾斜面において碎け波となり直立壁に入射する。その波圧の測定のために直立壁面上に 7 箇の孔をあけて波圧測定箇所とし、それに波圧計を直立壁内側より挿入する。波圧計は直径 84 mm のダイヤフラムを前面に露出した容量  $10 \text{ kg/cm}^2$  の抵抗線式圧計であり、動圧測定器を通して 6 エレメント電磁オシログラフに接続する。また波の直立壁に衝突直前および衝突中の状況を 16 mm Bell-Howell 連続撮影機により公称每秒 64 コマの速さで連続撮影記録し、このフィルムを後にスライドにかけて波高、波の伝播速度等を正確に読みとる。

### 2. 碎波の波圧と比較のための噴流の実験

碎波の波圧と噴流の圧力と比較して検討するため、別に噴流の実験を行う。写真-1 に示すような巾 10.5 cm, 長さ 100 cm, 深さ 30.3 cm, 片面ガラス張りで両端(紙面に

垂直な左右の面)の開いた水路の直上方の内径 12.4 cm の短管の急作動スルース弁の急開放により落下する落下水脈の圧力と碎波の場合と同じく水路底板の下側より挿入した 5 箇の圧力計により測定する。また噴流の底板への衝突状況を 16 mm 連続撮影機で高速度連続撮影し、噴流の底板への衝突直前の速度を後にフィルムの上から正確に読みとる。

写真-1 噴流圧力の実験水路(上方の短管より噴流が落下する)

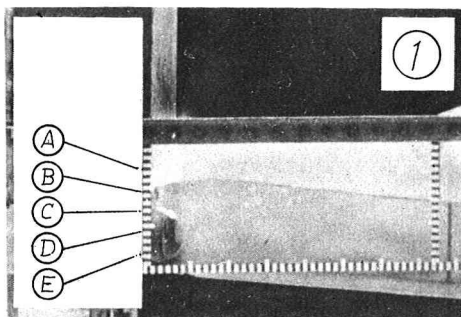


## 実験結果

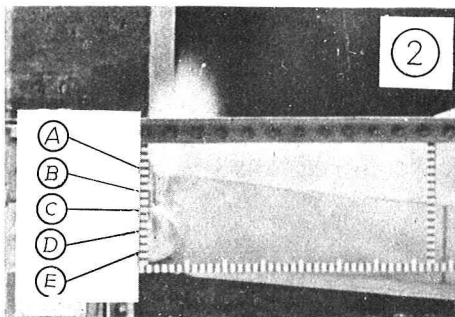
碎波の衝突の状況並びにその際のアシログラフ上の記録の一例は写真-2 および図-4 に示される。

写真-2 碎波の直立壁への衝突状況

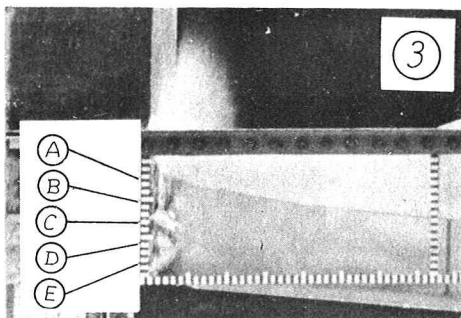
(目盛線の黒および白の各目盛りは 1 cm — 長い白線より長い白線までが 10 cm; 水平な目盛線の上縁が静水面 (SWL); 壁面直前の初めの水深 4 cm; 圧力測定桌—各ゲージ中心桌—はつぎの 5 桌である: ゲージ A, B, C, D, E はそれぞれ SWL 上方 25.50 cm, 19.90 cm, 14.47 cm, 9.00 cm, 3.54 cm )



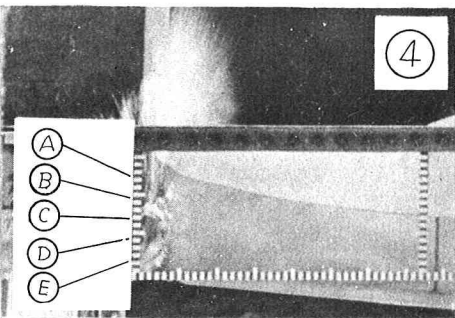
$t = 0.012 \text{ s}$ , 衝突の直前, いずれのゲージもまだ何等の圧力も感じていない。



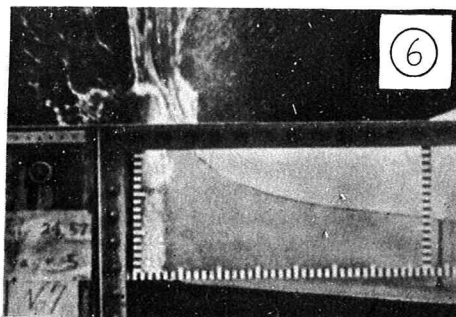
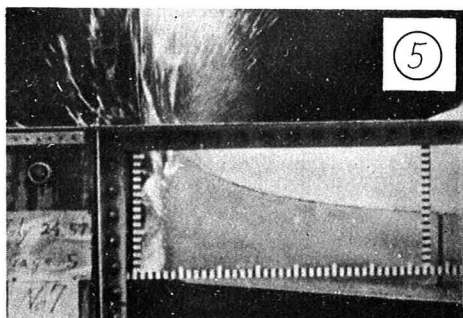
$t = 0.024 \text{ s}$ , ゲージ B に対して衝撃圧が既に作用し終り腰掛部圧力が作用中, ゲージ C にも類似の圧力が作用, ゲージ D, E ではまだ圧力上昇中, ゲージ A は未だに無圧。



$t = 0.037 \text{ s}$ , ゲージ A に圧力作用中, しかしゲージ B, C, D, E においては既に圧力はほとんど消失しつつある。



$t = 0.051 \text{ s}$ , 各ゲージにおける圧力は既にほとんど消失している。

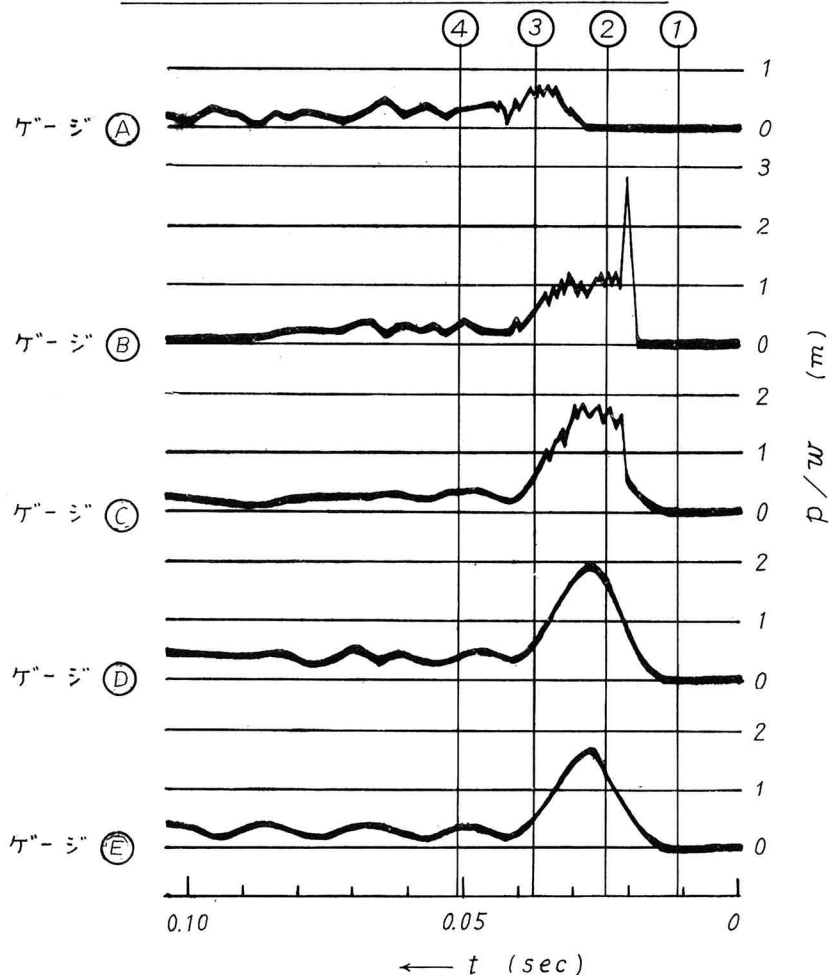


$t = 0.130 \text{ s}$ , 水沫を高く上方に上げてい  
る。各ゲージにおける圧力は既に消失している。

$t = 0.195 \text{ s}$ , 水沫の打上りほとんど終了

オシログラフ上の縦線は各写真撮影した瞬間を示し、縦線上方の丸で囲んだ数字は写真  
2 における同じ数字の写真に対応するものである。ゲージ B は極めて瞬間的な衝撃  
圧の後、や、持続的な圧力を示している。これは Larras の実験<sup>4)</sup> (後出 図-q) におい

図-4 碎波の圧力 (写真-2 に対するもの)



ても認められているところであり、後出噴流の実験 図-7 と比較するとこの持続的な圧力 (Larras が腰掛部圧力と呼んだもの) は定常噴流の推圧力に相当する部分と考えられる。

図-5 は 図-4 の場合の直立壁に沿っての最大圧力分布を図示したものである。図-4 または 図-5 から、衝撃圧の後の腰掛け部圧力は同じ瞬間における他の点の圧力よりむしろ小さいのである。

図-6 碎波の圧力 (写真-3 に対するもの)

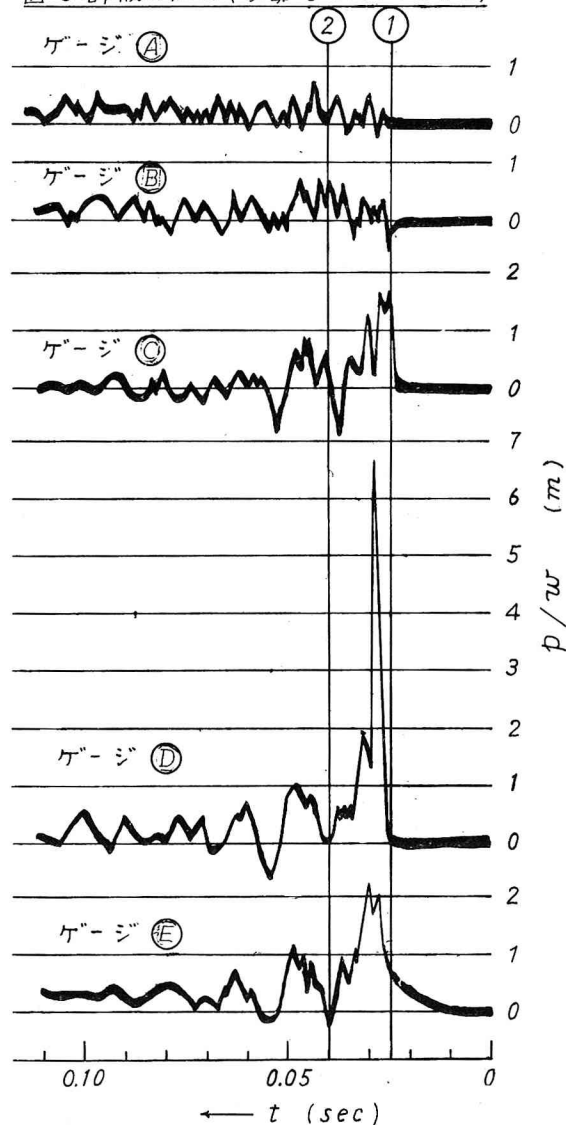
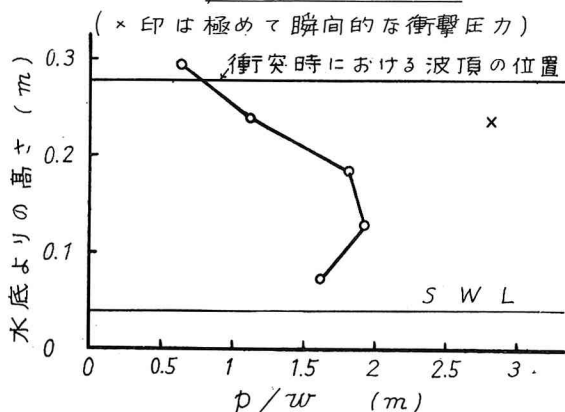


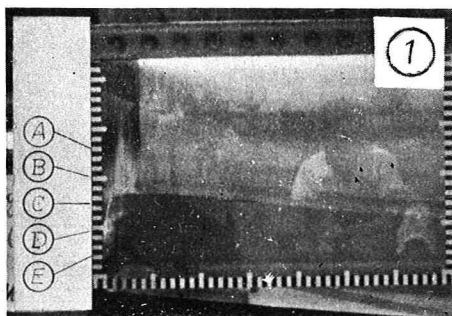
図-5 最高圧力分布



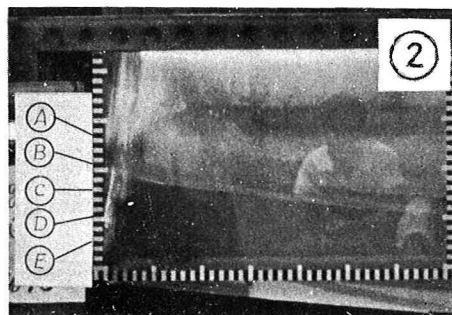
ことが認められる。

写真-3 碎波の直立壁への衝突状況

(前写真と同じく長い白線より長い白線までが 10 cm ; 水平な目盛線の上縁が静水面 ; 壁面直前の初めの水深 3.3 cm ; ゲージ A, B, C, D, E の中心位置はそれぞれ SWL 上方 26.60 cm, 20.90 cm, 15.30 cm, 9.70 cm, 4.50 cm )



$t = 0.025$  s, 衝撃圧発生直前の瞬間



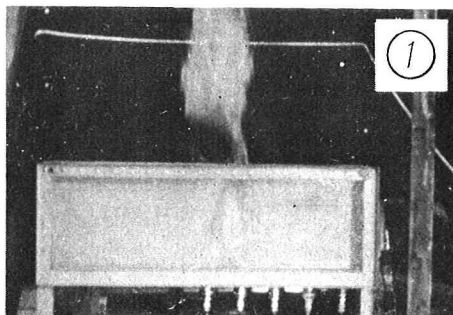
$t = 0.040$  s, 衝撃圧は既に終り、腰掛け部圧力が作用中

写真 2 または 図-4 は碎波が比較的多量の空気塊を捲込んだ場合の実験結果の一例であるが、一方比較的僅かな空気層を直立壁との間に挟んで碎波が直立壁に衝突する場合の実験結果の一例は 図-6 に示される。衝突の瞬間の写真は 写真-3 に示され、オシログラフ上における同じ番号の縦線の瞬間の写真である。この場合には衝撃性が顕著に現われ、直立壁の各所において発生した衝撃波の相互干渉のようなものが認められる。

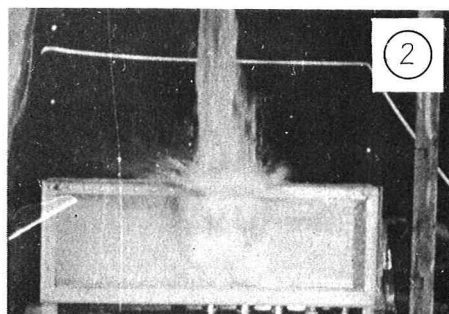
写真-4 および 図-7 は碎波の波圧の実験との比較のために行われた噴流の実験である。

#### 写真-4 噴流の底面への衝突状況

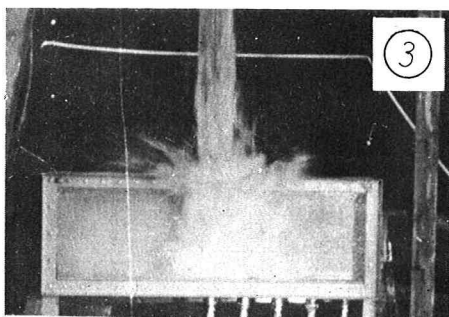
(ゲージ A, B, C, D, E の位置はそれぞれ中心線より 0 cm, 10 cm, 20.5 cm, 30.8 cm, 41.0 cm)



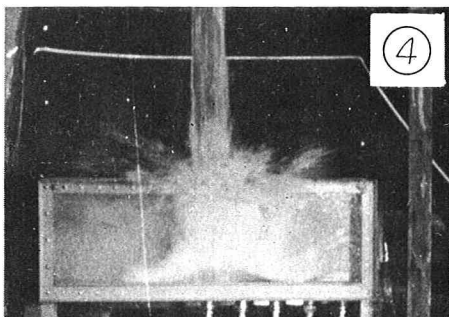
①  $t = 0.012 \text{ sec}$ , 噴流の右端が早く落下しゲージ B に衝突する直前。



②  $t = 0.083 \text{ sec}$ , 噴流本体の前面が底面に衝突しゲージ A に衝撃圧を生ずる直前。



③  $t = 0.108 \text{ sec}$ , ゲージ A への衝撃圧終了の瞬間。



④  $t = 0.132 \text{ sec}$ , ゲージ A の圧力が定常状態(定常噴流の推圧力)に移りつゝある。

図-7 非定流噴流の圧力(写真-4 に対するもの)

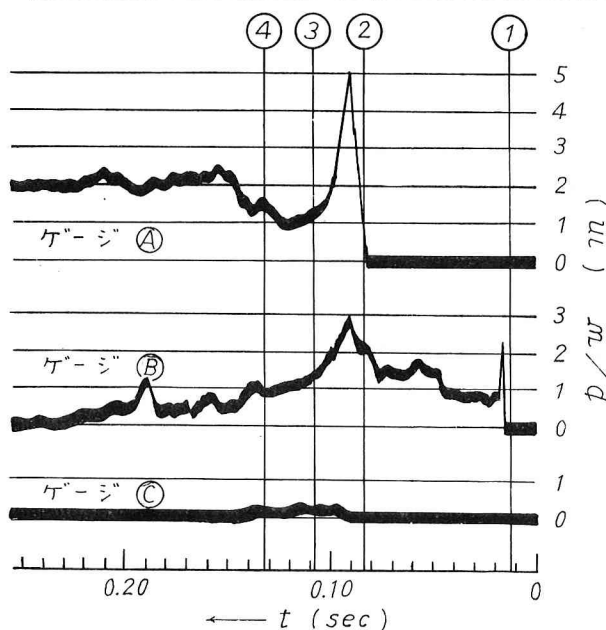


図-8 は波圧の最大値で、直立壁への碎波頂の衝突速度水頭  $v^2/2g$  について図示したものである。同図中には噴流の圧力（瞬向上昇圧力および定常圧力）も記入してある。同図中には比較のために理論式（4）および（6）が示されている。衝撃的な圧力上昇を示すような碎波の圧力は各理論値に比べて数倍の範囲まで変動しているが、衝撃的な圧力上昇を示さないような碎波の波圧は（6）で与えられる理論値に近いものであることが認められる。

## 結 び

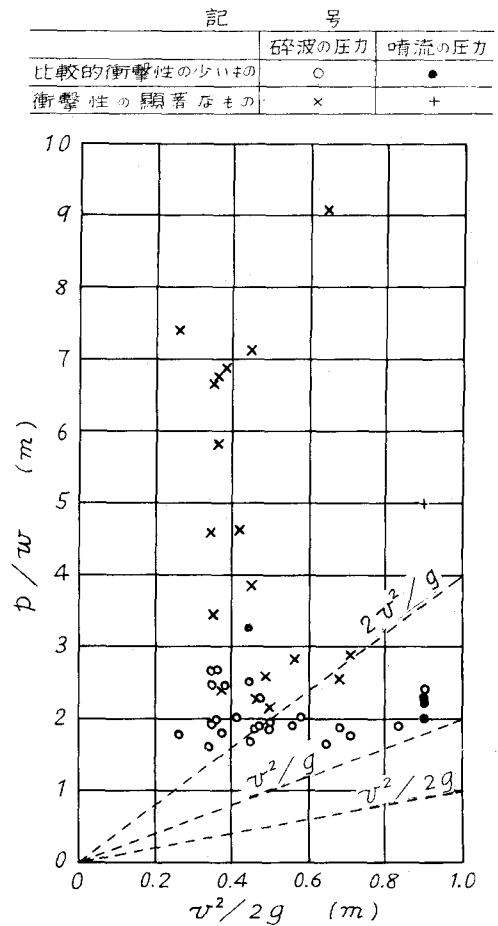
本研究において行われた実験の回数は未だ少く結論を得る段階には到っていないが、直立壁に入射する碎波を（i）極めて衝撃的な圧力上昇を生ずる場合と（ii）比較的滑らかな圧力変化を示す場合とに分類して考えるとき、本研究の範囲内において或る程度次のことが認められると考えられる。

（1）（i）の型式の碎波が発生する極めて瞬時的な上昇圧力は、定常噴流の推力理論に基づいた理論式（4）または（6）の与える値よりもかなり大となる。

（2）（ii）の型式の碎波においては、その波圧は（6）の与えるものに近く、このような型式の碎波の圧力の強さを対象とする限り、Lira および Trenjuckhinn 各公式における動圧の取扱いが最も適当であり、Betz, Bagnold および Minikin は過大、また Latham 以下の各公式における動圧の取扱いは、碎波圧力の強さの取扱いとしては過小の値を与えるものと考えられる。

本研究は一部文部省昭和31年度総合研究費（主任研究者石原藤次郎教授）および昭和32年度試験研究費（主任研究者嶋野貞三教授）の補助によりなされたものである。また本研究の遂行に当り文献等につき御高配をいただいた大阪大学田中清教授および東京大学堀川清司助教授に感謝の意を捧げるとともに、本研究に協力された中央大学水理実験室今井孝林憲吉の両君および当時学生の谷内博才君に深謝致します。

図-8 碎波の圧力と碎波頂の衝突速度との関係



## 引 用 文 献

- 1) Erich Bruns : Berechnung des Wellenstosses auf Molen und Wellenbrecher, *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft*, (Springer), 1951.
- 2) R. A. Bagnold : Interim report on wave-pressure research, *Journal of the Inst. of Civil Eng.* 1938-39.
- 3) 林・服部 : 孤立波の碎波とその波圧について, 土木学会海岸工学講演会講演集, 昭和31年.
- 4) J. Larras : Le deferlement des lames sur les jetées verticales, *Ann. des Ponts et Chaussées*, 1937.
- 5) A. de Rouville, P. Besson, P. Pétry : Etat actuel des études internationales sur les efforts dus aux lames, *Ann. des Ponts et Ch.*, 1938.

[附] 従来の実測波圧形状の一例

図-9 Larras の実験波圧

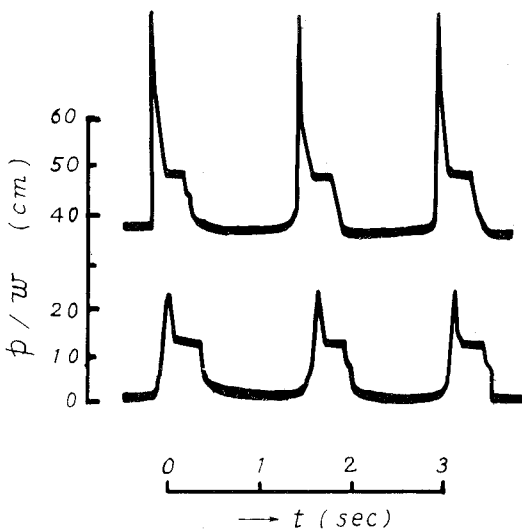


図-10 Dieppe における実測波圧<sup>5)</sup>

