

# 平滑底面を有する物体の着水衝撃について

立命館大学理工学部 学生員 山野邦明

立命館大学理工学部 正員 大田淳之

1. はじめに 着水衝撃に関する研究は、Kármán に始まり、多くの研究がなされてきた。そして、その基本的手法は、着水前の物体の持つ運動量が、着水後の物体の運動量と流体に与えられた運動量の和に等しいとして、virtual mass の概念を用いて行なわれた。具体的には、流体を、非粘性・非圧縮性流体とした研究が多く、流体の圧縮性を考慮した研究は、あまり多くない。しかし、Skalak, Feit 等は、図1のような2次元クサビ形物体の着水衝撃について、流体中での音速を  $C$  とし、着水速度を  $V_0$  とし、流体中でも、 $Me = V_0/C \cdot \tan \beta$  が1より大きいときは、流体の圧縮性を考慮しなければならぬとしている。従って、平滑底面を有する物体の着水衝撃についても、圧縮性を考慮する必要があると思われる。そこで、図2に示すような物体について実験を行ない、着水衝撃における流体の圧縮性による効果を検討を行なう。

2. 流体の圧縮性を考慮した着水衝撃 流体は、理想流体で、物体は十分に広い平滑底面をもつ剛体であるとする。着水時を  $t=0$  とし、 $t>0$  における流体の速度  $u$ 、密度  $\rho$  が、それぞれ  $u \ll C$ 、 $\Delta \rho \ll \rho_0$  ( $C$ : 流体中の音速、 $\rho_0$ : 着水前の流体の密度) であるとする。

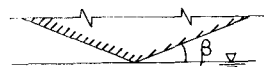


図3のように座標を定義して、速度ポテンシャル  $\phi$  を、 $u = \partial \phi / \partial x$  と定義すると基礎方程式は、次のように表わされる。

$$\text{連続式 } \partial \phi / \partial t + \rho \partial^2 \phi / \partial x^2 = 0 \quad (1), \quad \text{運動方程式 } p = -\rho \partial \phi / \partial t \quad (2)$$

$$\text{状態方程式 } \Delta p = (\partial p / \partial \rho)_s \Delta \rho = c^2 \Delta \rho \quad (3)$$

(1)式, (2)式, (3)式より1次元線型波動方程式を得る。

$$\partial^2 \phi / \partial t^2 - c^2 \partial^2 \phi / \partial x^2 = 0 \quad (4)$$

初期条件, 境界条件は、

$$t \leq 0, \text{ 及び, } x \geq ct \text{ で, } \phi = 0$$

$$\text{物体と流体の境界で, } \partial \phi / \partial x = V(t) \quad (5)$$

ここで、 $V(t)$  は、物体の速度で、

$$V(t) = V_0 - \int_0^t \frac{\rho}{M} dt = V_0 + \int_0^t \frac{\rho}{M} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{x=V_0 t} dt = V_0 - \frac{\rho}{M} \cdot C \cdot \int_0^t \phi'(V_0 t - ct) dt \quad (6)$$

ここで、 $V_0$  は、着水速度、 $M$  は単位面積当りの質量、prime は、 $x-ct$  による微分を表わす。 $V(t) \equiv V_0$  とし、

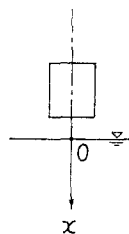
$$V = V_0 + \frac{\rho}{M} \cdot C / (c - V_0) \cdot \phi(V_0 t - ct) \quad (7)$$

よって、(5)式は、

$$\phi'(V_0 t - ct) = V_0 + \frac{\rho}{M} \cdot C / (c - V_0) \cdot \phi(V_0 t - ct) \quad (8)$$

(8)式は、 $t$  の関数であり、任意の  $t$  について恒等的になりたてなければならぬから、 $\phi = \sum_{k=1}^n A_k (x-ct)^k$  とおいて、

図3 座標



KUNIAKI YAMANO, ATUYUKI DAIDO

$$k=0, a_0=0; \quad k \geq 1, \quad a_k = \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{\rho}{M}\right)^{k-1} \cdot (C/C-V_0)^{k-1} \cdot V_0$$

$$\therefore \phi = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{\rho}{M}\right)^{k-1} (C/C-V_0)^{k-1} V_0 (x-ct)^k \quad (9)$$

物体の受ける加速度  $d$ , 及衝撃力  $F$  は, それぞれ

$$d = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{\rho}{M}\right)^k (C/C-V_0)^k \left(\frac{\rho}{M}\right) C V_0 (x-ct)^k \right)$$

$$F = -M \alpha A \quad (11) \quad L(10)$$

と表わされる。ここで  $A$  は物体の断面積である。

3. 実験及び結果. 実験装置を図4に示す。試験体の材料は、アルミニウムで、実験条件は、表1に示す。着水加速度は、無次元化して  $G = d/g$  で表わすと、一般に  $GM/\rho = K V_0^n$ ,  $n=1 \sim 2$  で表わされる。もし、流体力が流体の圧縮によるものであれば<sup>2)</sup>,  $n \approx 1$ ,  $K = C/g$ , 又、流れによるものであれば,  $n=2$ ,  $K = \frac{1}{2} \cdot C_M/g$ , ( $C_M$ : 仮想質量係数) である。  $GM/\rho$  と  $V_0$  との関係を、(10)式及び実験値について図5に示す。図より、実験値は、圧縮性を考慮したときの計算値より小さく、又、実験の範囲を通じて  $G \propto V_0^2$  であり、流体の圧縮性は、無視しうる。これは、物体が弾性体であるため歪みを生じ、事實上、着水速度が  $V_0$  より小さくなり、加速度が計算値より小さくなるからである。又、液が点源から生じると考えると、Skalak, Feit 等のいう typical slope  $\beta'$  が増加することに相当する。そこで、試験体を図1で  $\beta = \beta'$  とした円錐形に等価化<sup>2)</sup>とし、流体を非圧縮性として、仮想質量を用いて解析した結果を図6に示す。加速度は、物体のみかけの比重  $M$  と無次元速度  $F = V_0/\sqrt{g(r+h)}$  を用いて、  $G = 0.46 M^{-1/3} F^2 / \tan \beta$  で表わされる。図より、  $Me = V_0^2 / C \tan \beta$  は、1より小さく、Skalak, Feit によると、流体に圧縮は生じていない。又、  $\beta'$  は、  $\tan \beta' = \text{Const.}/r$  で表わされ、Const. は、物体の弾性的性質によつて定まる定数である。

4. 結論 平滑底面を有する物体の着水衝撃では、物体の弾性を無視し得えな。そして、物体は、  $\tan \beta' = \text{Const.}/r$  なる角度  $\beta'$  をもつクサビ形で近似できる。

|      |               |      |       |      |
|------|---------------|------|-------|------|
| 試験体  | $h$ (m)       | 0.1  | 0.1   | 0.1  |
|      | $r$ (m)       | 0.03 | 0.045 | 0.06 |
| 着水速度 | $V_0$ (m/sec) | 1.98 | 2.97  | 3.96 |

表1. 試験体寸法及び着水速度

参考文献

- 1) Skalak, R. and Feit, D.; J. Eng. for Industry, Vol. 88, No. 3, PP 325 ~ 331 (1966)
- 2) 大同洋文; オ23回水理講演会論文集 PP 289 ~ 294 (1979)

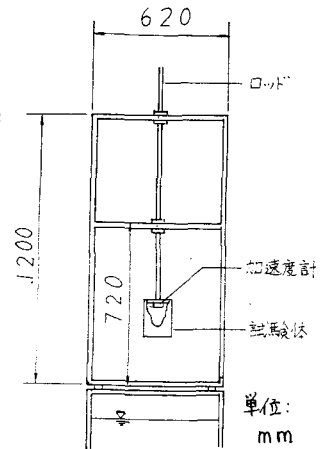


図4 実験装置

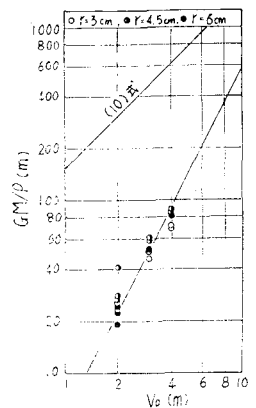


図5  $GM/\rho$  と  $V_0$  との関係

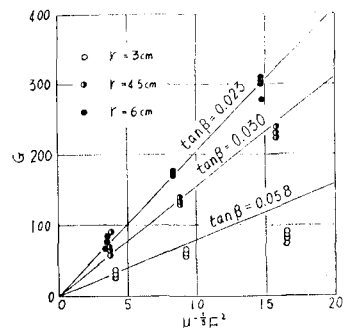


図6  $G$  と  $M^{-1/3} F^2$  の関係及び  $\beta$