

## 容器内に設置した浮きと液体からなる振動体の固有周期

## A Natural Period of a Dynamic system consisting of a Float, Fluid and a Vessel

片山拓朗\*, 柏木光博\*\*, 山尾敏孝\*\*\*

Takuro KATAYAMA, Mitsuhiro KASHIWAGI and Toshitaka YAMAO

\*正会員 博士(学術) 崇城大学助教授 工学部環境建設工学科(〒860-0082 熊本市池田4丁目22番1号)

\*\*正会員 工学博士 九州東海大学教授 工学部建築学科(〒862-8652 熊本市渡鹿9丁目1番1号)

\*\*\*正会員 工学博士 熊本大学教授 工学部環境システム工学科(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)

This paper presents a dynamic system consisting of a float, fluid and a vessel for a tuned mass damper, TMD. The mechanism of the system is very simple because of that, the system fills the vessel with fluid, and only floats the float on the fluid. A theoretical formula for a natural period of the dynamic system is derived from Euler's equation of motion with perfect fluid and the float. The natural period of system is related to the fluid density and the cross section and the mass of float mainly, and is related to the cross section of vessel inconsiderably. Some experiments show that the proposed formula of natural period is accurate and useful, and show the damping characteristic of the system.

**Key Words:** natural period, float, fluid, vessel, TMD

## 1. はじめに

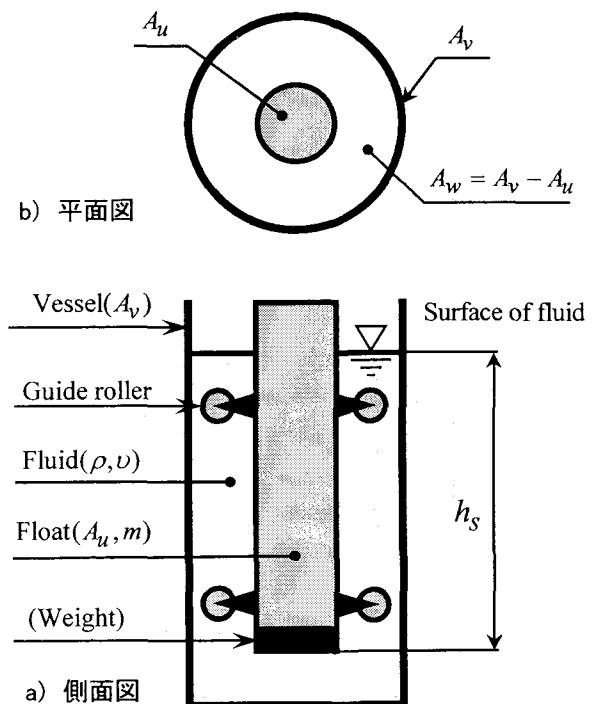
本論文では、長周期の鉛直方向弾性振動が生じる超大型浮体構造物や長周期のスロッシング振動が生じる大型タンクの浮き屋根あるいは長大橋の鉛直弾性振動に対する同調質量型の制振装置 TMD として、図一1に示す容器内に設置した浮きと液体からなる振動体を提案する。

この振動体は容器の中に液体を充填し、その中に浮きを浮かべただけのものであるため、その機構は単純である。この種の振動体については長周期型制振装置の基本構造としての提案がなされている<sup>1)</sup>。ただし、固有周期や減衰定数などの基本的な振動特性についての理論や実験の報告は無く、振動特性について不明な点が多い。

本論文では、提案の振動体の固有周期を、液体を完全流体と仮定するオイラーの運動方程式より導いている。ここでは、振動体の固有周期は液体の密度と浮きの断面積と質量に主に関係し、容器の断面積に僅かに関係すると仮定する。実験により、水と同程度の粘性の流体を用いる場合、提案の固有周期の算定式は精度が高く、使いやすことが分かった。また、実験の過程で確認された提案の振動体の減衰特性を報告する。

図一1に示す浮きと液体は互いに逆位相で上下方向に振動する。ここに、容器の断面積を  $A_v$ 、液体の密度と動粘性係数をそれぞれ  $\rho$  と  $\nu$ 、浮きの断面積と質量をそれぞれ  $A_u$  と  $m$  とする。浮きおよび容器の断面形状は円形とする。断面積は高さ方向に一定とする。浮きは上下方向

のみに運動するものとし、浮きが滑らかに運動できるように浮きの側面にガイドローラーを取り付ける。また、浮き下部には浮力調整用の重りを設置する。重りの質量は浮きの質量  $m$  に含まれる。



図一1 容器内に設置した浮き振動体の概念図

## 2. 固有周期の算定式

### 2.1 無限液面の浮きの固有周期

図—2は無限液面に浮かんだ浮きについて、静止時と自由振動時の相対位置関係を示したものである。図—2—a)は静止時を示し、浮きの喫水を $h_s$ とし、静止液面で浮きに印△を付ける。なお、 $h_s$ を静止喫水と呼ぶ。図—2—b)は自由振動時を示し、浮きは鉛直上方に $u(t)$ 移動した状態を示している。浮きの移動量は静止液面を基準( $u(t)=0$ )とし、鉛直上向きを正( $u(t)>0$ )とする。この時の浮きの喫水は $h(t)=h_s-u(t)$ となる。

静止時の浮き下面の圧力は $p_s = \rho g h_s$ と表される。この状態では浮き自重 $mg$ と浮力 $p_s A_u$ はつり合うので次式が成り立つ。 $g$ は重力加速度とする。

$$\rho g h_s A_u - mg = 0 \quad (1)$$

自由振動時における浮き下面の平均圧力を $\bar{p}_u(t)$ とし、 $\bar{p}_u(t) = \rho g h(t) = \rho g (h_s - u(t))$ と表せるとすると、液体を完全流体としたときの浮きの運動方程式は、

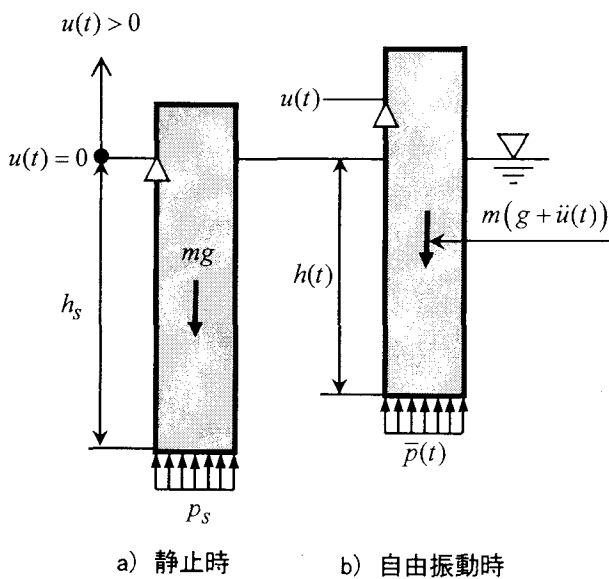
$$\rho g A_u u(t) + m \ddot{u}(t) = 0 \quad (2)$$

と書ける。これより、液体を完全流体とする浮きの固有周期 $T_\infty$ は次式となる。

$$T_\infty = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_\infty}} \quad (3)$$

ここに、 $k_\infty$ は次式で示す浮きの復元力定数である。

$$k_\infty = \rho g A_u \quad (4)$$



図—2 無限液面の浮きの諸元

### 2.2 容器内の浮きの静的復元力に基づく固有周期

図—3—a)は静止した浮きと液面の位置関係を示した図である。液面を印▽で示す。液面の位置で容器に印△を、浮きに印△をつける。浮きの喫水を $h_s$ とする。図—1で示したガイドローラーの図示は省略する。

断面 S1-S1 の液体の圧力は $p_s = \rho g h_s$ と表される。この状態では浮き自重 $mg$ と浮力 $p_s A_u$ はつり合うので(1)式が成り立つ。

図—3—b)は浮きの上端に静止外力 $F$ が作用し、浮きが上昇し、液面が下降した状態を示す。浮きの位置(△印)を $u$ 、液面の位置(▽印)を $w$ とする。ただし、外力が作用しない時の静止液面を基準( $u=w=0$ )として、上向きを正( $u, w>0$ )とする。 $u$ は浮きの移動量、 $w$ は液面の移動量となる。なお、力も上向きを正( $F>0$ )とする。

浮きの喫水を $h$ とすると、

$$h = h_s - u + w \quad (5)$$

と表される。

断面 S2-S2 の液体の圧力は $p = \rho g h$ と表せる。この状態では外力 $F$ と浮きの自重 $mg$ および浮力 $p A_u$ はつり合っているので次式が成り立つ。

$$\rho g h A_u - mg + F = 0 \quad (6)$$

(1)式と(5)式および(6)式より、外力 $F$ と液面の移動量 $w$ および浮きの移動量 $u$ の関係は

$$F = \rho g A_u (u - w) \quad (7)$$

と表される。

ここで、容器内の液体の体積は一定であるから、浮きの移動に伴う体積変化と液面の移動に伴う体積変化は等しく、次式が成り立つ。

$$w A_w + u A_u = 0 \quad (8)$$

ここに、 $A_w$ は $A_v$ より $A_u$ を差し引いた液面の面積である。

(7)式と(8)式より移動量 $w$ を消去すると、浮きに働く力と浮きの移動量の関係式、

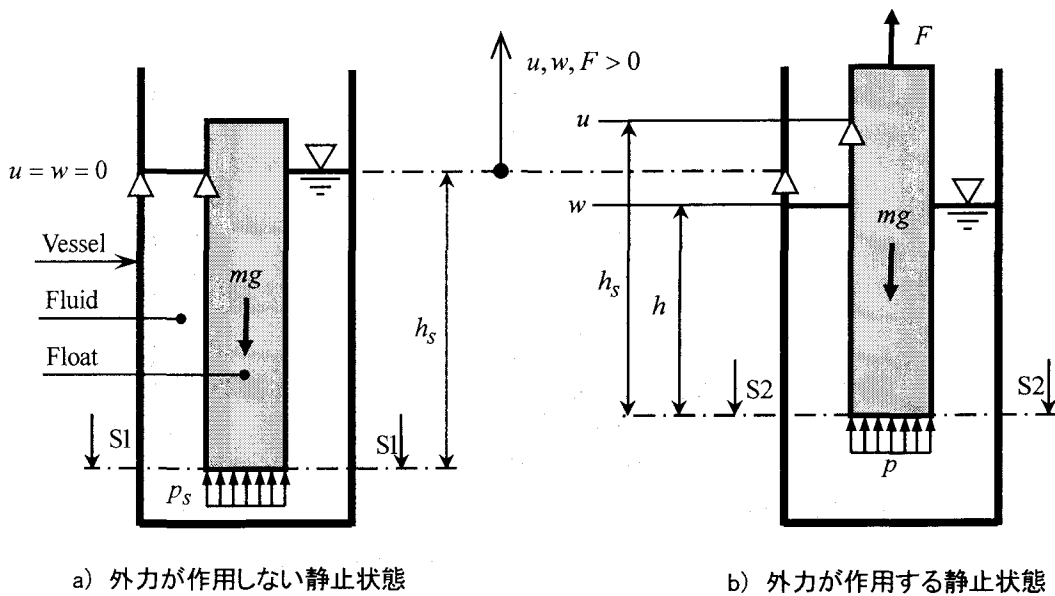
$$F = k u \quad (9)$$

を得る。ここに、 $k$ は次式で示す復元力定数である。

$$k = \frac{A_v}{A_w} k_\infty \quad (10)$$

文献 1)では復元力定数 $k$ を用いた浮きの固有周期算定式、(11)式を紹介している。この算定式は(3)式の無限水面の浮きの固有周期を補正した形となる。

$$T_k = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = T_\infty \times \sqrt{\frac{A_w}{A_v}} \quad (11)$$



図—3 静止状態における浮きに働く力の関係

### 2. 3 容器内の液体と浮きの連性を考慮した固有周期

本項では、液体を完全流体として取り扱い、浮きと液体からなる振動体の固有周期の算定式を導く。

図—4—a)は自由振動時において浮きが上昇し、液面が下降した状態の浮きと液面の位置関係を示した図である。静止時の液面を基準として浮きの位置を  $u(t)$ 、液面の平均高さを  $w(t)$  とする。鉛直上向きを  $u(t)$ 、 $w(t) > 0$  とし、静止時の液面位置では  $u(t) = w(t) = 0$  とする。ここに、 $t$  は時間を表す。振動中の喫水は時間の関数となるので、喫水を  $h(t)$  と表す。

液体を完全流体と仮定しているため、容器内の液面から浮き下面までの液体の流れは一律な鉛直方向の流れであり、液面の動きと連動した流れであると考えられる。また、浮き下面の中心部直下の液体は浮きの動きと連動した鉛直方向の流れと考えられる。浮き下面の  $S$  点から  $U$  点を結ぶ実際の流れは複雑であるが、本論文では完全流体の仮定より、この部分の流れを  $U$  点における浮き下面の鉛直流れと  $W$  点から  $S$  点を通る鉛直流れと滑らかに接続しかつ流線の長さが最小となる流れと仮定する。これより、液体の流れは図中に示す液面の  $W$  点から  $S$  点を通り、浮き底面の  $U$  点を結ぶ点線で示す流線  $WSU$  で代表させる。

自由振動時の浮きに働く力を図示したものを図—4—b)に示す。浮きには重力と慣性力および浮き下面の圧力が作用する。浮き下面の圧力は複雑に分布すると考えられるが、簡略化するため、その平均圧力を  $\bar{p}_u(t)$  とする。以後は時間  $t$  の表記を省略する。

図—4—b)より、浮きに働く力のつり合いは

$$A_u \bar{p}_u - m\ddot{u} - mg = 0 \quad (12)$$

と書ける。 $\ddot{u}$  は加速度とする。

図—4—a)の流線  $WSU$  について、 $W$  点の流速を  $\dot{w}$ 、 $U$  点の流速を  $\dot{u}$  とすると、 $W$  点と  $U$  点のベルヌーイの定理<sup>2)</sup>は

$$\rho g w + \frac{\rho}{2} \dot{w}^2 - \bar{p}_u - \rho g(u - h_s) - \frac{\rho}{2} \dot{u}^2 = \rho \int_W^U \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad (13)$$

と書ける。ここに、 $v$  は流線  $WSU$  上の流速で、 $W$  から  $U$  の方向を正とする。 $s$  は流線に沿う座標軸である。

(13)式の右辺の非定常項を  $S$  点で二つに分割する。

$$\rho \int_W^U \frac{\partial v}{\partial t} ds = \rho \int_W^S \frac{\partial v}{\partial t} ds + \rho \int_S^U \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad (14)$$

ここで、 $W$  点と  $S$  点の間の流れにおいて流速は一定で、その流速を  $v = -\dot{w}$  と仮定すると、(14)式の右辺第 1 項は次式となる。

$$\begin{aligned} \rho \int_W^S \frac{\partial v}{\partial t} ds &= -\rho \int_W^S \ddot{w} ds \\ &= -\rho(h_s - u + w)\ddot{w} \end{aligned} \quad (15)$$

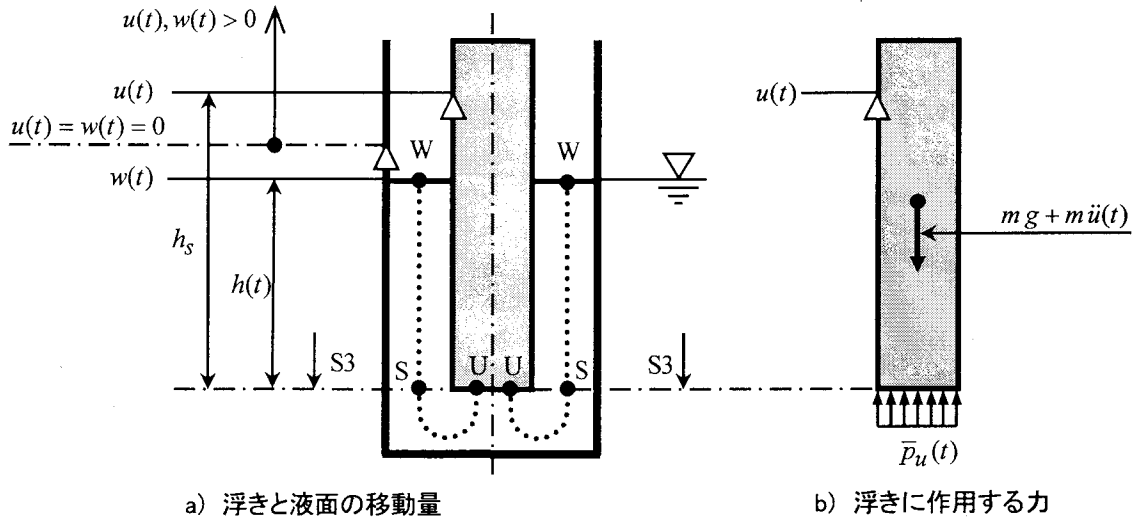
また、 $S$  点から  $U$  までの流速は流線の長さに比例して変化するものと仮定し、 $S$  点での流速を  $v = -\dot{w}$ 、 $U$  での流速を  $v = \dot{u}$ 、 $S$  から  $U$  までの流線の長さを  $B$  とすると、(14)式の右辺第 2 項は次式となる。

$$\begin{aligned} \rho \int_S^U \frac{\partial v}{\partial t} ds &= \rho \int_0^B \left\{ (\ddot{u} + \ddot{w}) \frac{s}{B} - \ddot{w} \right\} ds \\ &= \frac{\rho B}{2} (\ddot{u} - \ddot{w}) \end{aligned} \quad (16)$$

これより、(14)式と(15)式および(16)式を用いて(13)式を整理し、 $\bar{p}_u$  について解くと次式を得る。

$$\bar{p}_u = \rho g(h_s + w - u) + \rho \ddot{w} h_s + \frac{\rho B}{2} (\ddot{w} - \ddot{u}) + \Delta \bar{p}_u \quad (17)$$

ここに、 $\Delta \bar{p}_u$  は(18)式で示す非線形項である。



図—4 自由振動時における液体と浮きの関係

$$\Delta \bar{p}_u = \rho \ddot{w}(w-u) + \frac{\rho}{2} \dot{w}^2 - \frac{\rho}{2} \dot{u}^2 \quad (18)$$

(17)式を(12)式に代入し、(1)式および(1)式から得られる  $m = \rho h_s A_u$  の関係を用いると次式を得る。

$$\rho g A_u (w-u) + \left( m + \frac{\rho B A_u}{2} \right) (\ddot{w} - \ddot{u}) + \Delta \bar{p}_u A_u = 0 \quad (19)$$

次に、液体は完全流体であるため容器内の液体の体積は一定であり、浮きの移動に伴う体積変化と液面の移動に伴う体積変化は等しく、次式が成り立つ。

$$A_u \dot{u} + A_w \dot{w} = 0 \quad (20)$$

(19)式と(20)式を連成させ、非線形項  $\Delta \bar{p}_u$  を省略し、(4)式の関係式  $k_\infty = \rho g A_u$  を用いると次の運動方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} k_\infty & -k_\infty \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_u & A_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m + \Delta m & -m - \Delta m \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{w} \\ \ddot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

ここに、 $\Delta m$  は次式とする。

$$\Delta m = \frac{1}{2} \rho B A_u \quad (22)$$

(21)式より、自由振動時の円固有振動数を  $\omega$  とすると、浮きと液体の振動数方程式は下記となる。

$$\begin{vmatrix} k_\infty - \omega^2 (m + \Delta m) & -k_\infty + \omega^2 (m + \Delta m) \\ i \omega A_w & i \omega A_u \end{vmatrix} = 0 \quad (23)$$

ここに、 $i^2 = -1$  とする。(23)式を展開すると

$$i \omega (A_w + A_u) \{ k_\infty - (m + \Delta m) \omega^2 \} = 0 \quad (24)$$

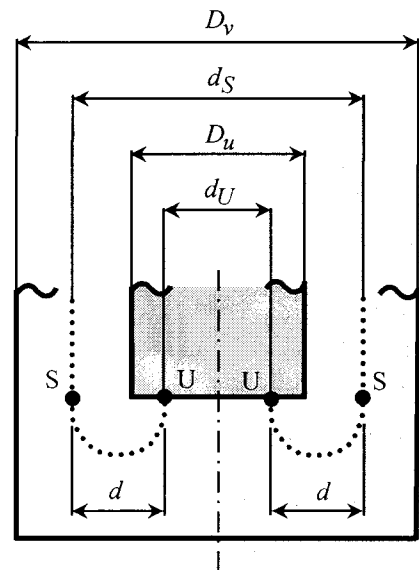
を得る。これより、円固有振動数および固有周期  $T$  は次式となる。

$$\omega = \sqrt{\frac{k_\infty}{m + \Delta m}} \quad (25), \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m + \Delta m}{k_\infty}} \quad (26)$$

なお、(19)式に現れる非線形項  $\Delta \bar{p}_u$  を省略して振動数方程式を構成しているため、(20)式の連続の式は(25)式の円固有振動数に関係していない。

S 点から U 点へ向かう流れは、U 点における浮き下面の鉛直流れと W 点から S 点を通る鉛直流れと滑らかに接続する流れでかつ流線の長さが最小となる流れと仮定している。よって、流線 SU の形状は、図—5に示すような直径  $d$  の半円と仮定する。これより流線 SU の直径を  $d$  として、流線 SU の長さ  $B$  は次式で計算する。

$$B = \frac{\pi}{2} d \quad (27)$$



図—5 浮き下部の流線の形状

直径  $d$  は図—5に示す直径  $d_S$  と直径  $d_U$  より次式で計算する。

$$d = \frac{1}{2}(d_S + d_U) \quad (28)$$

ここに、S 点の位置は断面積  $A_w$  を二分する位置と仮定し、つまり、 $d_S$  は断面積  $A_w$  を二分する直径とし、次式で計算する。

$$d_S = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(D_v^2 + D_u^2)} \quad (29)$$

また、U 点の位置は断面積  $A_u$  を二分する位置と仮定し、つまり、 $d_U$  は断面積  $A_u$  を二分する直径とし、次式で計算する。

$$d_U = \frac{1}{\sqrt{2}} D_u \quad (30)$$

ここに、 $D_v$  は容器の内径、 $D_u$  は浮きの外径である。

### 3. 自由振動実験

#### 3.1 実験装置

容器内に設置した浮きと液体からなる振動体について、提案の固有周期算定式の有効性を検証するため、模型実験を行った。実験装置の概略図を図—6に示す。

浮きはアルミニウム製パイプ（材質 A5052、板厚  $t=3\text{mm}$ ）を加工したもので、外径が 100mm、長さが約 1,000mm である。浮きの質量は 4.1kg、5.1kg、6.1kg とし、質量は浮きの底に鉄粒の重りを入れて調整した。浮きの表面は防食処理のためアルマイト加工を施した。写真1に浮きの外観を示す。

容器には3種類の塩化ビニール製パイプ VU250A、VU200A、VU150A を使用した。容器の高さは約 1,500mm である。写真—2に容器の外観を示す。

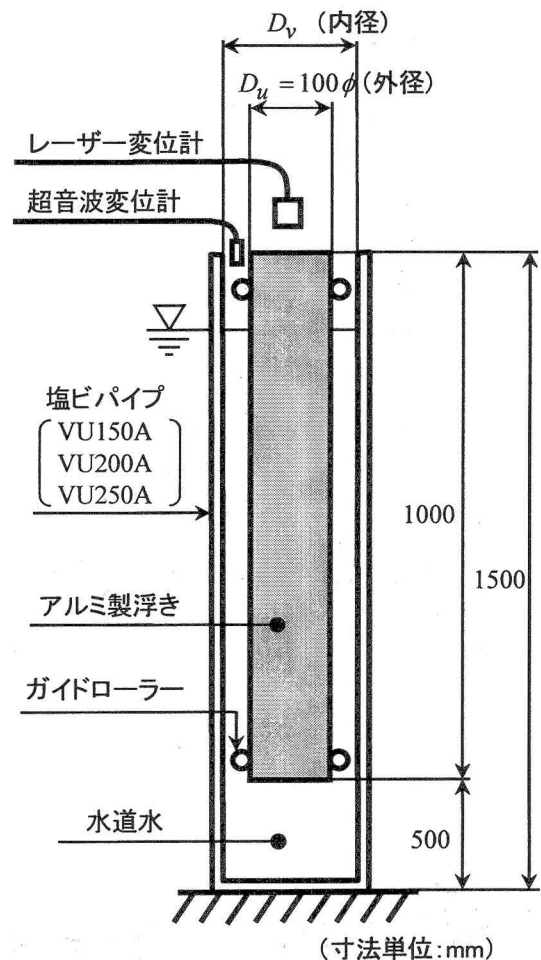
写真—3はガイドローラーの外観である。外形の異なる3種類の容器に対応するため、ガイドローラーの高さを調整できる構造とした。ローラーのベアリングは SUS304 製で滑らかに回転できるものである。

また、浮き先端の形状が固有周期に与える影響を検討するため、写真—4に示す球面型と平面型の2種類の形状を採用した。写真—4—a)は球面型の先端形状、写真—4—b)は平面型の先端形状の外観を示す。浮きの先端は取り外しが可能な構造である。

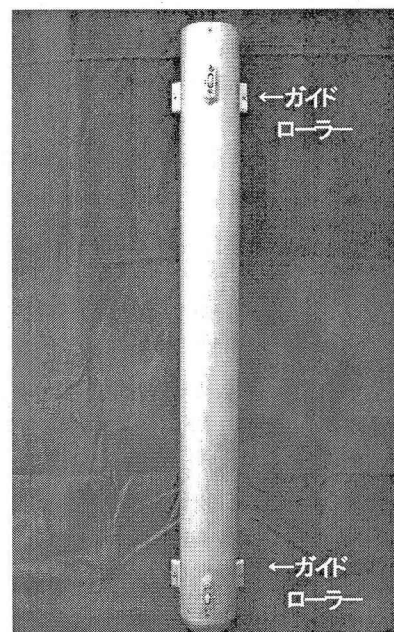
浮きの上面が容器の上面と大体一致するように液体量を調整し、浮きを手で押して振動させ、しばらく時間が経過した後の自由振動を観察する。浮きの移動量はレーザー変位計（測定範囲  $\pm 40\text{mm}$ 、分解能  $16\mu\text{m}$ ）を、液面の移動量は超音波変位計（測定範囲  $\pm 100\text{mm}$ 、分解能  $0.1\text{mm}$ ）を用いて計測した。

液体には水道水（水温  $5^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ ）を用いた。水温

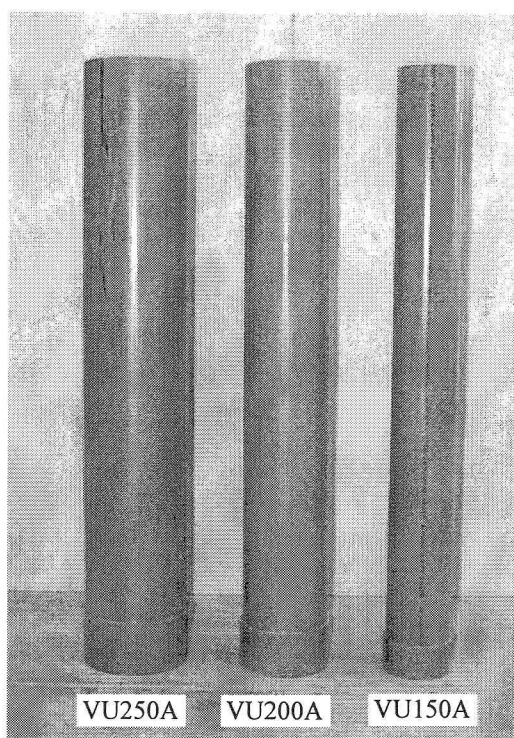
調節は水道水を凍らせた氷により行った。



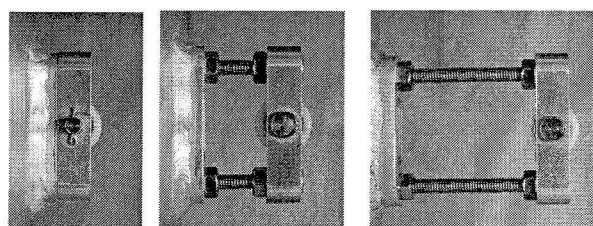
図—6 実験装置概略図



写真—1 アルミ製浮きの外観

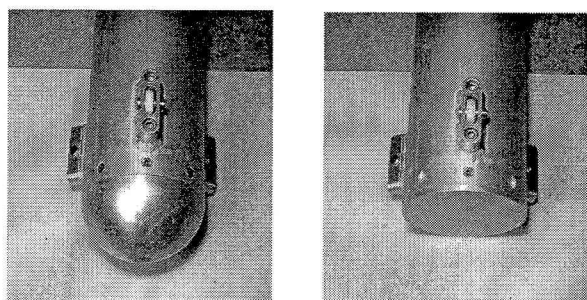


写真—2 塩ビパイプ製容器の外観



a) VU150A 用 b) VU200A 用 c) VU250A 用

写真—3 ガイドローラーの外観



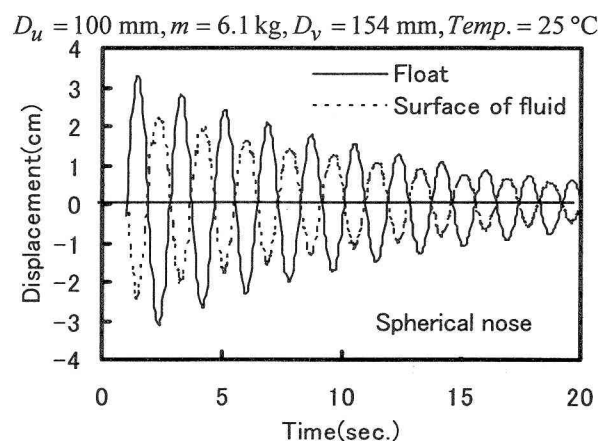
a) 球面型 b) 平面型

写真—4 浮きの先端形状の外観

### 3. 2 自由振動応答曲線

#### (1) 球面先端の浮き

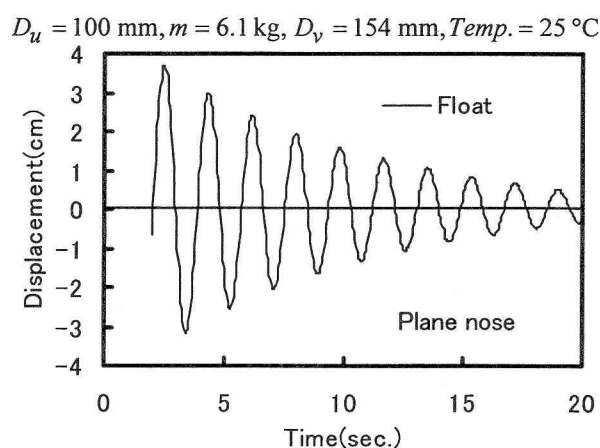
図—7に球面先端の浮きの自由振動における応答曲線の一例を示す。浮きの質量は  $m = 6.1 \text{ kg}$ ，容器の内径は  $D_v = 154 \text{ mm}$  (VU150A)，水温は  $25^\circ\text{C}$  である。浮きと水面は互いに逆位相で振動し，時間の経過と共に振幅が小さくなる様子が確認される。



図—7 球面先端浮きの応答曲線の一例

#### (2) 平面先端の浮き

図—8は平面先端の浮きの自由振動における応答曲線の一例である。実験の条件は図—7と同じである。浮きの振幅は時間の経過と共に小さくなる様子が確認される。図—7と同様に水面は浮きと逆位相で振動しているが，図中での煩雑さを避けるために水面の応答曲線の表記を省略している。



図—8 平面先端浮きの応答曲線の一例

### 3. 3 自由振動の分析方法

提案の固有周期の算定式は，(13)式の基礎式において現れる(18)式で示す非線形項を省略して導かれたものである。この非線形項の影響を検証するためには，固有周

期と振幅の関係を明らかにする必要がある。また、減衰についても同様な観点から検証が必要と考えられる。そこで、計測により得られた  $i$  番目の 1 周期の波形に対して、平均振幅  $\bar{u}_i$  と周期  $T_i$  と対数減衰率  $\delta_i$  をそれぞれ次式で計算し、それらを比較することにより振幅と固有周期および減衰の関係を調べる<sup>3)</sup>。

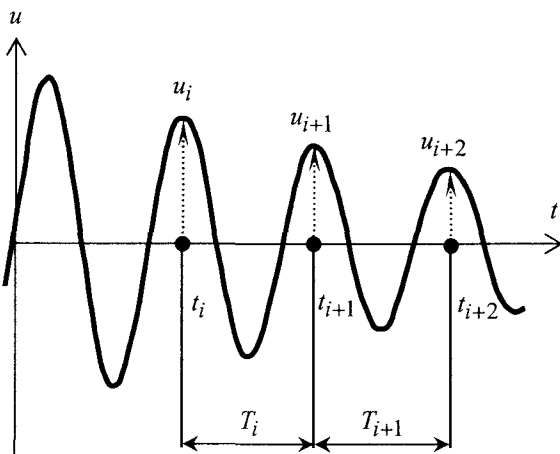
$$\bar{u}_i = \frac{1}{2}(u_i + u_{i+1}) \quad (31)$$

$$T_i = t_{i+1} - t_i \quad (32)$$

$$\delta_i = \log_e \left( \frac{u_i}{u_{i+1}} \right) \quad (33)$$

ここに、 $u_i$  は図—9に示す波形の極大値とし、 $t_i$  は  $u_i$  の時刻とする。

なお、浮きの移動量の計測に用いたレーザー変位計の計測範囲  $\pm 40\text{mm}$  を考慮して、移動量  $\pm 30\text{mm}$  以下の浮きの波形について上記の分析を行う。計測は繰り返し 5 回行うものとする。



図—9 振幅と周期の定義

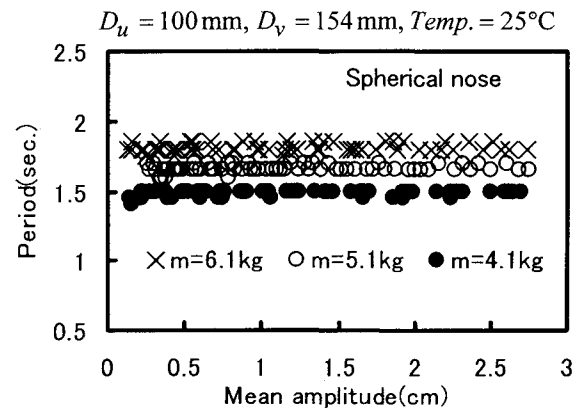
### 3. 4 固有周期

#### (1) 振幅との関係

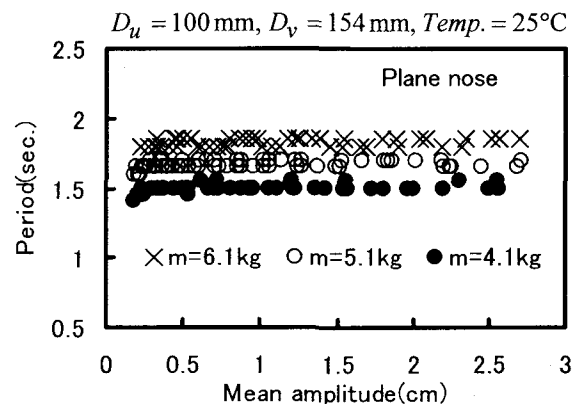
図—10に球面先端浮きの振幅と周期の関係の一例を示す。容器の内径は  $D_v = 154\text{mm}$  (VU150A) で、水温が  $25^\circ\text{C}$  である。質量は  $m = 4.1\text{kg}$ ,  $5.1\text{kg}$ ,  $6.1\text{kg}$  である。質量に関わらず 1 周期の波形の周期は平均振幅に対して一定である。温度を  $5^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$  と変えた場合、容器の内径を  $200\text{mm}$  (VU200A),  $250\text{mm}$  (VU250A) に変えた場合でも同様な結果が得られた。

図—11は平面先端浮きの振幅と周期の関係の一例である。実験の条件は図—10と同じである。図—10と同様に、質量に関わらず 1 周期の波形の周期は平均振幅に対して一定であることが確認できる。容器の内径を変えた場合、温度を変えた場合でも同様な結果が得られた。

これらの実験結果より、実験で使用した水道水の動粘性係数  $(0.9 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$  範囲および振幅が  $30\text{mm}$  以内の場合、提案の振動体の固有周期は浮きの振幅に依存しないと考えられる。また、自由振動時の浮きと液体の運動方程式に対する(18)式で示す非線形項の影響は少ないものと考えられる。



図—10 球面先端浮きの振幅と周期



図—11 平面先端浮きの振幅と周期

#### (2) 計算式の精度

表—1は球面先端の浮きの固有周期について、(26)式の提案式と(11)式で示す文献 1)の算定式および実験値を比較したものである。提案式の誤差は実験値に対して  $-1\%$  程度であるが、(11)式の算定式は  $-10 \sim -30\%$  の誤差がある。表—1は水温  $25^\circ\text{C}$  の例であるが、水温を  $5^\circ\text{C}$  および  $15^\circ\text{C}$  と変えても固有周期に明確な変化は見られず、提案式および(11)式の算定式の誤差も表 1 と同程度であった。

表—2は平面先端の浮きの固有周期を比較したものである。容器の内径は  $D_v = 154\text{mm}$ 、水温は  $25^\circ\text{C}$  である。球面先端に比べて提案法の誤差が僅かに増加しているが、誤差そのものは  $-1 \sim -2\%$  と小さい。

これより、実験の条件の範囲内では、提案の固有周期の算定式は誤差が少なく実用的であるが、文献 1)の方法は誤差が大きく実用的でないと考えられる。なお、表 3 に固有周期の計算に必要な諸量をまとめる。

表—1 球面先端浮きの固有周期と誤差

Temp. = 25°C

| $D_v$<br>(mm) | $m$<br>(kg) | $T_{test}$<br>(sec.) | $T$ , eq.(26) |       | $T_k$ , eq.(11) |       |
|---------------|-------------|----------------------|---------------|-------|-----------------|-------|
|               |             |                      | (sec.)        | error | (sec.)          | error |
| 154           | 4.1         | 1.50                 | 1.48          | -1.3% | 1.10            | -27%  |
|               | 5.1         | 1.66                 | 1.65          | -0.6% | 1.23            | -26%  |
|               | 6.1         | 1.81                 | 1.79          | -1.1% | 1.34            | -26%  |
| 200           | 4.1         | 1.52                 | 1.50          | -1.3% | 1.26            | -17%  |
|               | 5.1         | 1.68                 | 1.66          | -1.2% | 1.40            | -17%  |
|               | 6.1         | 1.82                 | 1.81          | -0.5% | 1.53            | -16%  |
| 250           | 4.1         | 1.52                 | 1.51          | -0.7% | 1.33            | -13%  |
|               | 5.1         | 1.69                 | 1.67          | -1.2% | 1.48            | -12%  |
|               | 6.1         | 1.83                 | 1.82          | -0.5% | 1.62            | -11%  |

表—2 平面先端浮きの固有周期と誤差

Temp. = 25°C

| $D_v$<br>(mm) | $m$<br>(kg) | $T_{test}$<br>(sec.) | $T$ , eq.(26) |       | $T_k$ , eq.(11) |       |
|---------------|-------------|----------------------|---------------|-------|-----------------|-------|
|               |             |                      | (sec.)        | error | (sec.)          | error |
| 154           | 4.1         | 1.50                 | 1.48          | -1.3% | 1.10            | -27%  |
|               | 5.1         | 1.67                 | 1.65          | -1.2% | 1.23            | -26%  |
|               | 6.1         | 1.83                 | 1.79          | -2.2% | 1.34            | -27%  |

表—3 固有周期の計算のための諸量

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, D_u = 100 \text{ mm}$$

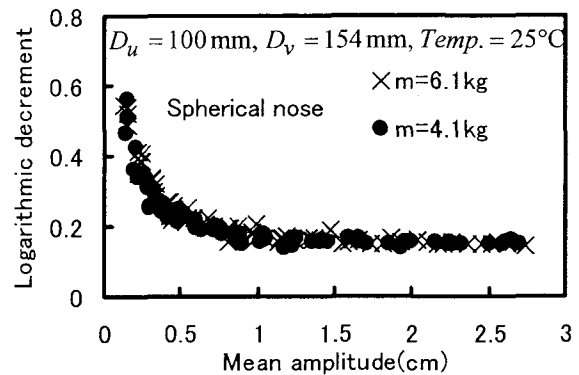
$$A_u = 0.00785 \text{ m}^2, k_{\infty} = 64.98 \text{ N/m}$$

| Vessel                  | VU150A  | VU150A  | VU150A  |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| $D_v$ (m)               | 0.154   | 0.200   | 0.250   |
| $d_U$ (m)               | 0.071   | 0.071   | 0.071   |
| $d_S$ (m)               | 0.130   | 0.158   | 0.190   |
| $d$ (m)                 | 0.030   | 0.044   | 0.060   |
| $B$ (m)                 | 0.046   | 0.069   | 0.094   |
| $\Delta m$ (kg)         | 0.182   | 0.269   | 0.369   |
| $A_v$ (m <sup>2</sup> ) | 0.01862 | 0.03140 | 0.04910 |
| $A_w$ (m <sup>2</sup> ) | 0.01077 | 0.02355 | 0.04125 |
| $k$ (N/m)               | 133.0   | 102.6   | 91.58   |

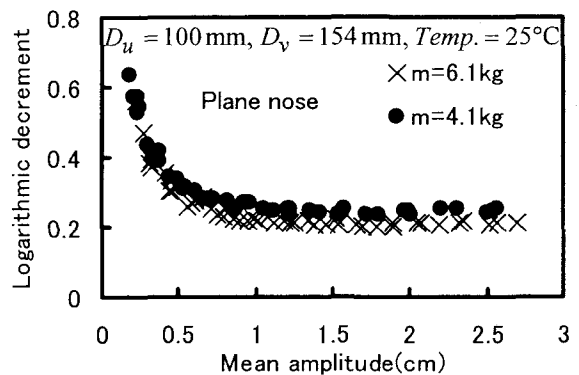
### 3. 5 対数減衰率

図—12と図—13は、球面先端浮きと平面先端浮きにおける振幅と対数減衰率の関係の一例である。先端の形状に関わらず、振幅が小さい時は減衰が大きいが、振幅の増加とともに減衰が小さくなり、一定値に収束することが分かる。対数減衰率の大きさは0.2~0.6程度である。ここで示した例は容器と浮きの直径比が $D_v/D_u = 1.5$ であるが、直径比を2.0, 2.5と変化させても同様な傾向が見られた。実験で得られた対数減衰率0.2~0.6は減衰定数で2~6%となり、水道水を用いた提案の振動体の減衰は小さく、TMDへの応用を考えれば高粘性流体やダッシュポットの原理を用いた減衰増加対策が必要と考えられる。

く、TMDへの応用を考えれば高粘性流体やダッシュポットの原理を用いた減衰増加対策が必要と考えられる。



図—12 球面先端浮きの振幅と対数減衰率



図—13 平面先端浮きの振幅と対数減衰率

## 4. まとめ

本論文では、TMDの一つとして容器内に設置した浮きと液体からなる振動体を提案し、その振動体の固有周期の算定式を、液体を完全流体と仮定する理論により導いた。実験により、水と同程度の粘性の液体を用いる場合、その算定式は2%程度の誤差で固有周期を計算できることが分かった。これより、固有周期に関する基本特性が確認された。

また、実験により、提案の振動体が生ずる基本的な減衰特性を把握することができた。水道水を用いた場合、提案の振動体の減衰は小さく、TMDへの応用を考えれば、減衰増加対策が必要であることが分かった。また、減衰特性を理論的に解明する必要がある。

## 参考文献

- 1) 株式会社熊谷組, 石橋久義: 特許公開平6-109074, 特許庁特許電子図書館, 1994.
- 2) 大西外明: 水理学 I, 森北出版株式会社, pp.54-63, 1998.
- 3) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会: 浮体の流体力学(後編—実験と解析), 成山堂書店, pp.15-20, 2003.

(2004年4月16日受付)