

# 潮流中の係留鎖に働く動的流体力

Hydrodynamic force acting on mooring chain in current

高 岩 千 人\*・木 下 健\*

Kazuhito TAKAIWA and Takeshi KINOSHITA

## 1. 緒 言

弛緩係留による復元力と動的反力に関しては、懸垂線理論に微小変位を考えた島田<sup>1)</sup>らの線形理論があり、実験結果をよく説明することが知られている。

本報では、島田らの理論を、単位長さ当りの付加質量係数、抗力係数が変化しないと仮定して潮流時に拡張し実験値との比較からその有効性を確認する。

## 2. 理 論

係留点  $(x_0, y_0; l_0)$  が潮流中で微小振幅  $\xi_0$  で  $\xi = \xi_0 \sin \omega t$  なる上下または左右方向で振動したとき、係留ラインに働く法線および接線方向の単位長さ当りの慣性力成分と抗力成分の和は

$$\begin{aligned} \frac{dF_n}{dt} &= (1 + m_n \frac{\rho_w}{\rho_c}) \frac{w_a}{g} \bar{r}_{n0} \dot{\xi} \\ &+ \frac{1}{2} \rho_w D_0 C_{Dn} \bar{r}_{n0} |U \cos \theta - \bar{r}_{n0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \dot{\xi} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dF_t}{dt} &= (1 + m_t \frac{\rho_w}{\rho_c}) \frac{w_a}{g} \bar{r}_{t0} \dot{\xi} \\ &+ \frac{1}{2} \rho_w D_0 C_{Dt} \bar{r}_{t0} |U \sin \theta - \bar{r}_{t0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \dot{\xi} \end{aligned} \quad (2)$$

で表される。ここで

$$\begin{aligned} \bar{r}_{n0} &= \frac{r_0}{\xi_0} \sin(\alpha - \theta), \bar{r}_{t0} = \frac{r_0}{\xi_0} \cos(\alpha - \theta) \\ r_0 &= \xi_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\xi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\xi}\right)^2}, \theta = \tan^{-1}\left(\frac{l-b}{a}\right), \\ \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \end{aligned}$$

である。ただし、 $\rho_w, \rho_c$  は水または係留ラインの密度、 $w_a$ 、 $w_w$  は空中または水中での係留ラインの単位長さ重量、 $U$  は潮流速度、 $\omega$  は角周波数、 $D_0$  は等価円断面の直径、 $g$  は重力加速度である。また、 $a, b$  は係留ラインの長さ  $(l_0)$ 、係留点までの水平または垂直距離  $(x_0, y_0)$  によって懸垂線理論より定まる定数である<sup>1)</sup>。  $m_n, m_t, C_{Dn}, C_{Dt}$  は係留ラインの法線または、接線方向の付加質量係数、抗

力係数であり、ここでは文献<sup>2)</sup>より  $m_n = 1.87, m_t = 1.87, C_{Dn} = 2.20, C_{Dt} = 0.37$  とした。(1), (2) 式中の絶対値の中の  $U$  の付いた項が潮流の影響を示している。

$\Delta x, \Delta y$  は、 $x, y$  方向の微小増分値で

$$\Delta x = \left( \sinh^{-1} A - \frac{A}{\sqrt{1+A^2}} \right) \Delta a - \left( \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} - 1 \right) \Delta b \quad (3)$$

$$\Delta y = \left( \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} - 1 \right) \Delta a - \frac{A}{\sqrt{1+A^2}} \Delta b \quad (4)$$

$$A = \frac{l-b}{a}$$

となる。上下揺れ、あるいは前後揺れに基づく  $a$  および  $b$  の微小増分  $\Delta a, \Delta b$  はそれぞれ、

$$\Delta a = \frac{\cosh B_0 - 1}{2 - 2 \cosh B_0 + B_0 \sinh B_0} \xi \quad (5)$$

$$\Delta b = \frac{\sinh B_0 - B_0 \cosh B_0}{2 - 2 \cosh B_0 + B_0 \sinh B_0} \xi \quad (6)$$

$$\Delta a = \frac{\sinh B_0}{2 - 2 \cosh B_0 + B_0 \sinh B_0} \xi \quad (7)$$

$$\Delta b = \frac{1 - \cosh B_0}{2 - 2 \cosh B_0 + B_0 \sinh B_0} \xi \quad (8)$$

$$B_0 = \frac{x_0 - b}{a}$$

で表せる。

(1), (2) 式中の第 2 項は周期  $T$  の調和振動を考えるとき、エネルギー等価法により

$$\begin{aligned} &|U \cos \theta - \bar{r}_{n0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \dot{\xi} \\ &\doteq \frac{1}{T} \int_0^T |U \cos \theta - \bar{r}_{n0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \sin^2 \omega t dt \dot{\xi} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &|U \sin \theta - \bar{r}_{t0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \dot{\xi} \\ &\doteq \frac{1}{T} \int_0^T |U \sin \theta - \bar{r}_{t0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \sin^2 \omega t dt \dot{\xi} \end{aligned} \quad (10)$$

で近似できる。

係留ラインの傾き  $\theta$  を考慮して(1), (2) 式を積分すると係留ラインに作用する  $x$  および  $y$  方向の慣性力成分と抗力成分の和が求まる。よって  $j$  方向に揺らした時の  $x, y$  方向の見掛け質量、抗力および復元力は次式で示される。

\* 東京大学生産研究技術研究所 第 2 部

研究速報

$$m_{yj} = \frac{w_a l_0}{g} \left[ (1+m_n) \int_b^{l_0} \bar{r}_{n0} \cos \theta dl + (1+m_t) \int_b^{l_0} \bar{r}_{t0} \sin \theta dl \right] \quad (11)$$

$$m_{xj} = \frac{a}{l_0 - b} m_{yj} \quad (12)$$

$$d_{yj} = \frac{1}{2} \rho_w D_0 \left[ C_{an} \frac{2}{T} \int_b^{l_0} \int_0^T \bar{r}_{n0} \cos \theta |U \cos \theta - \bar{r}_{n0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \sin^2 \omega t dt dl + C_{at} \frac{2}{T} \int_b^{l_0} \int_0^T \bar{r}_{t0} \sin \theta |U \sin \theta - \bar{r}_{t0} \omega \xi_0 \sin \omega t| \sin^2 \omega t dt dl \right] \quad (13)$$

$$d_{xj} = \frac{a}{l_0 - b} d_{yj} \quad (14)$$

$$k_{xj} = w_w \Delta a \quad (15)$$

$$k_{yj} = -w_w \Delta b \quad (16)$$

以上の各項より  $i$  方向の張力  $T_{ij}$  は

$$T_{ij} = m_{ij} \ddot{\xi}_j + d_{ij} \dot{\xi}_j + k_{ij} \xi_j \quad (17)$$

となる。

3. 強制動揺実験

実験は、東京大学生産技術研究所千葉実験場風路付造波回流水槽(長さ 23700 mm, 幅 1800 mm, 深さ 950 mm)

で行った。係留鎖は、等価円断面直径  $D_0=4.24$ mm, 全長  $l_0=5590$  mm, 空中での単位長さ重量  $w_a=0.23$  kg/m のスチール製のものを用いた。強制動揺の振幅は、 $\xi_0=20 \sim 50$  mm, 周期は  $T=0.7 \sim 1.5$  sec とした。潮流は順流または逆流それぞれについて潮流速度を 3 通り変化させた。係留点  $(x_0, y_0; l_0)$  は  $x_0=5335$  mm,  $y_0=1000$  mm, の位置で、流速の計測点は水面下 100 mm で係留ラインより 200 mm はなした位置とした。

4. 実験結果および数値計算の比較

計測した  $i$  方向の係留ラインの張力  $F_{ij}$  と変位  $X_j$  を  $A/D$  変換しさらに次式によりフーリエ級数展開した。

$$F_{ij} = \sum_{K=1}^N (F_{C_{ijk}} \cos K\omega t + F_{S_{ijk}} \sin K\omega t) \quad (18)$$

$$X_j = \sum_{K=1}^N (X_{C_{jk}} \cos K\omega t + X_{S_{jk}} \sin K\omega t) \quad (19)$$

$i, j=1, 2$  (前後, 上下)

実験結果の表示は次式のように付加質量と復元力 (以後便宜的に付加質量と呼ぶ) を示す実数部と減衰力を示す虚数部によって表す。

$$\frac{k_{ij}}{\omega^2} - m_{ij} = \frac{1}{\omega^2} \text{Re} \left[ \frac{F_{C_{ij1}} - iF_{S_{ij1}}}{X_{C_{j1}} - iX_{S_{j1}}} \right] \quad (20)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{\omega} \text{Im} \left[ \frac{F_{C_{ij1}} - iF_{S_{ij1}}}{X_{C_{j1}} - iX_{S_{j1}}} \right] \quad (21)$$

$i, j=1, 2$

Fig. 1 は、静水または、潮流中で水平距離を変化させた場合の静的復元力から求まる  $x, y$  方向の張力の合力である。順流中で張力が増加し逆流中で減少する傾向を示すがその差は小さい。

Table 1 は、Fig. 2~13 の実験点を説明したものである。Fig. 2~5 は、(20)式による付加質量解析結果であり図中実線で示した理論値は、(11)(12)式によるものである。また点は強制動揺装置の振幅を一定にし周期を手動で変化したトランジェント強制動揺の解析結果である。潮流の影響はみられず振幅、潮流方向、潮流速度などの影響もほとんど見られない。また、データは Fig. 4 に若干ばらつきがみられるが、他はトランジェントを含め良くまとまっている。理論値と実験値との比較も Fig. 5 に若干の差が見られるが他はよく一致している。

Fig. 6~9 は、(21)式による減衰力の解析結果を強制動揺速度  $\omega \xi_0$  で除した値である。理論値は静水中における値で(13)式中の  $U=0$  としたものである。付加質量と異なりここでは潮流、振幅の影響が大きくみられる。

Fig. 10~13 は、減衰力に対する潮流速度と強制動揺の振幅の影響をみるため(21)式を潮流速度  $U$  で除した値を縦軸に示し横軸には潮流速度  $U$  と強制動揺の最大速度  $(2\pi\xi_0)/T$  の比をとった。Fig. 2~5 と同様にトランジェント強制動揺による実験値を点で示す。なお、トラン

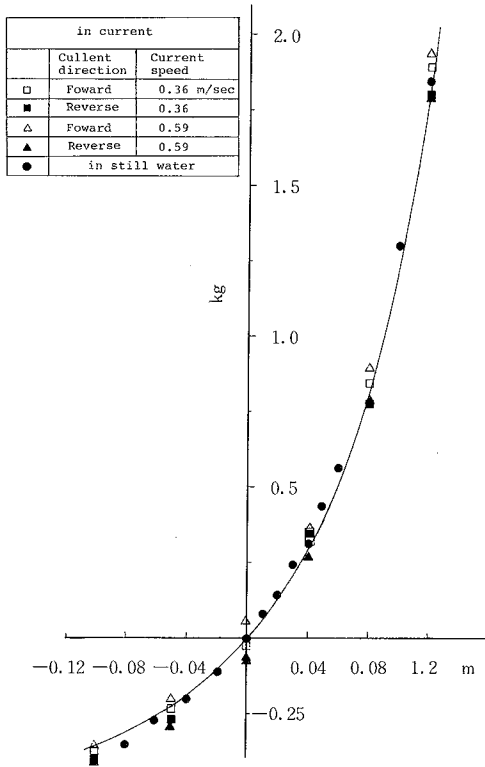


Fig. 1 Static tension vs. displacement in current or still water

研究速報  
 ジェント動揺の振幅はフーリエ解析すると各周期で異なった値として得られるが、横軸における振幅  $\xi_0$  は強制動揺の振幅とした。理論値は (13) (14) 式によるものである。Fig. 10~13 の結果を実験値と理論値に関して比較すると、まず全体的には両者は良く一致している。さらに詳しくみると、Fig. 10, 11 に比べ Fig. 12, 13 にばらつきが多くみられるがこれは、上下揺れの強制揺れの方が左右揺れに比べ懸垂線を仮定した本手法の適合度が劣るためである。また、これらの結果で  $UT/(2\pi\xi_0)=1$  近傍で値がばらついているがこれは、渦放出の様子が複雑になり抗力係数の値が変化するためであると思われる。

5. 結 言

静水または潮流中で係留鎖を強制動揺し本論で示した理論計算と比較することにより、以下に示す結論を得た。

- 1) 潮流中での静的張力の増加分は今回使用したチェーンでは小さい。
- 2) 付加質量については、潮流または運動振幅による影響はほとんどみられず、また計算結果と実験結果とはほぼ一致した。
- 3) 減衰力は、潮流の影響がみられ、本論が示した理論で推定可能であることがわかった。すなわち、潮流速度が動揺速度より大きくなると減衰力は潮流速度に比例して増大する。長周期運動の推定には減衰力

(Table 1)

in current			
	Motion Amplitude	Cullent Direction	Current Speed
◇	2 cm	Foward	0.16 m/sec
□	2	Foward	0.16
△	2	Foward	0.36
⊗	sway 5 heave 4	Foward	0.36
⊙	sway 5 heave 4	Foward	0.59
×	sway 5 heave 4	Foward	0.59
+	2	Reverse	0.17
⊗	2	Reverse	0.17
⊗	2	Reverse	0.38
⊗	sway 5 heave 4	Reverse	0.38
*	sway 5 heave 4	Reverse	0.59
☆	sway 5 heave 4	Reverse	0.59

in still water		
●	5 cm	sway
○	3	sway
●	2	sway
○	4	heave
●	2	heave

の効果が大きいのでこうした潮流の影響も考慮する必要があると推測される。  
 最後に本報の実験において、協力して頂いた本所市川本浩技官と鈴木文博技官に感謝いたします。  
 (1986年1月16日受理)

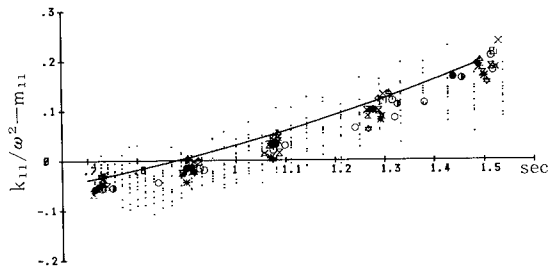


Fig. 2 Added mass of forced sway motion (X-direction)

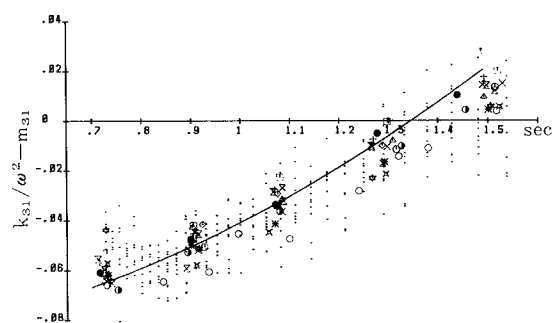


Fig. 3 Added mass of forced sway motion (Y-direction)

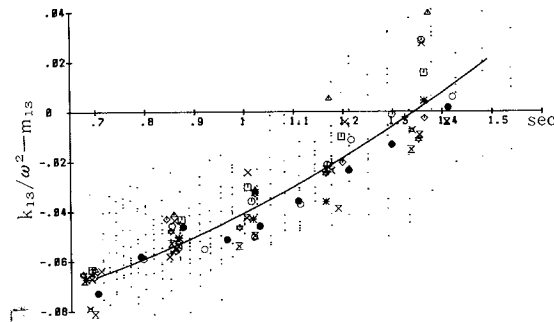


Fig. 4 Added mass of forced heave motion (X-direction)

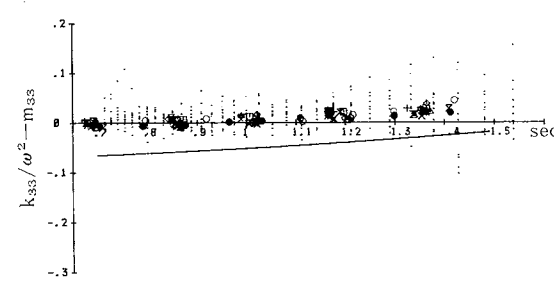


Fig. 5 Added mass of forced heave motion (Y-direction)

研究速報

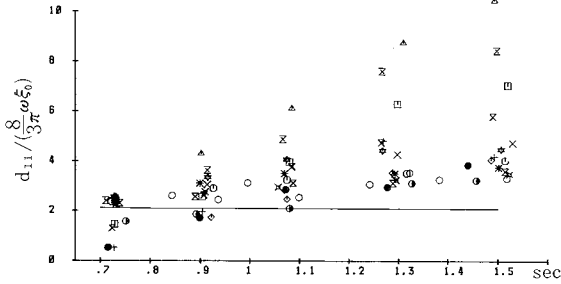


Fig. 6 Damping of forced sway motion (X-direction)

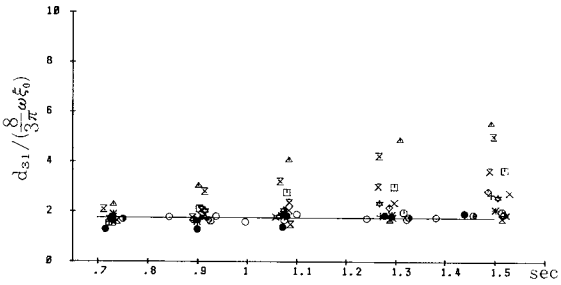


Fig. 7 Damping of forced sway motion (Y-direction)

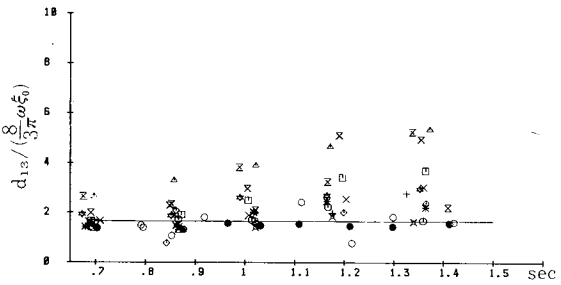


Fig. 8 Damping of forced heave motion (X-direction)

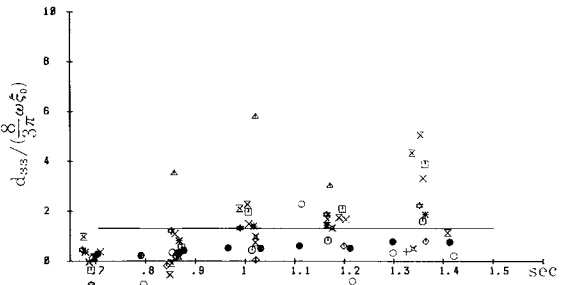


Fig. 9 Damping of forced heave motion (Y-direction)

参考文献

- 1) 島田潔他：係留ラインの張力に対する動的影響について，西部造船学会報，第60号，(1980)
- 2) 安藤定雄：索鎖の流体力(その1，部分模型)，西部造船学会報，第50号，(1975)

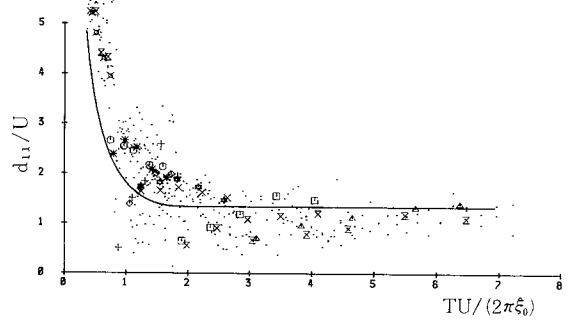


Fig. 10 Effect of velocity of current and oscillation on damping of forced sway motion (X-direction)

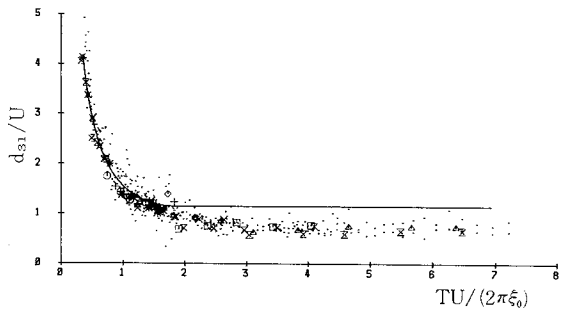


Fig. 11 Effect of velocity of current and oscillation on damping of forced sway motion (Y-direction)

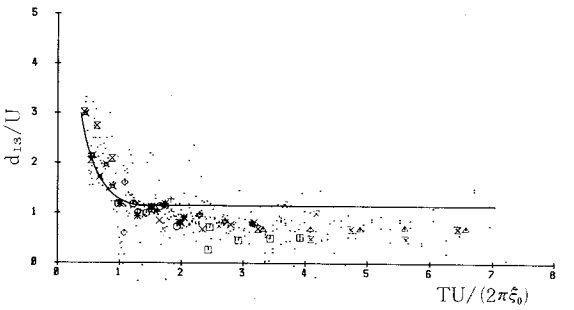


Fig. 12 Effect of velocity of current and oscillation on damping of forced heave motion (X-direction)

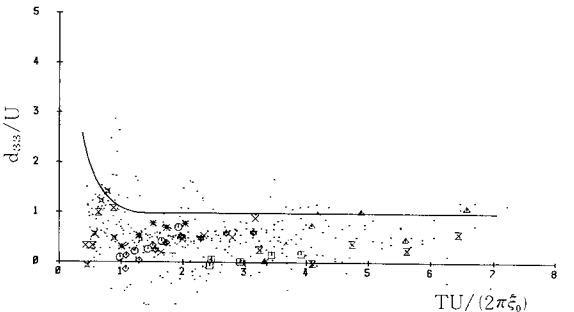


Fig. 13 Effect of velocity of current and oscillation on damping of forced heave motion (Y-direction)