釣り仕掛けアニメーションのための 抗力係数の同定と過渡的糸挙動の再現*

山 邊 茂 之** 熊 本 博 光*** 西 原 修†

Identification of Drag Coefficient for Animating Dynamic Behavior of Fishing Tackles

Shigeyuki YAMABE, Hiromitsu KUMAMOTO and Osamu NISHIHARA

This paper considers a simple fishing tackle consisting of a line segment and a submerged sinker at the bottom end. A preliminary experiment confirms that, for a inclined cylinder, the fluid drag acts along a direction normal to the cylinder axis. This property is used to derive a differential equation describing steady-state line shapes when the aerial top end is tagged in a stepwise way. A drag coefficient is then determined through a comparison of calculated and actual shapes at a steady state. A multi-link model using the drag coefficient can yield good predictions of unsteady-state line shapes observed during the tagging experiments. Another type of unsteady-state shape response is also calculated to illustrate a good performance of the proposed animation method.

Key words: fishing tackle animation, line shapes, drag coefficient, multi-link model

1. 序 論

多くの人が釣りを趣味にしており、さまざまな仕掛けが考案され用いられているが、水中での仕掛けの動きが視認できないこともあり、浮き、道糸、ハリス、ガン玉といった構成要素の種類、サイズ、配置など、どのような仕掛けがよいのか諸説紛々である。

著者らは前報¹⁾で、棒浮き釣りの仕掛けを対象とし、浮きと水中での糸挙動のアニメーション化を試みた。糸の大変形をも取り扱い可能にするため、多自由度剛体リンク機構で糸部分をモデル化し、3重対角行列の下3角化に基づき、計算量がリンク数に比例する数値解法アルゴリズムを与え、簡明性と計算量の観点から、従来法より優れていることを示した。また、アニメーションの一例を与え、仕掛けの評価やアタリの識別練習などへの応用を示唆した。

しかしながら前報では、糸部分が受ける流体抗力の決定に際しては、名目的な抗力係数を採用しており、仕掛け挙動の再現精度については不明であった。この種のアニメーションの今後の展開を考えると、現時点において、流体抗力を定量的に明らかにしておくことが重要であると考えられる。

そこで本稿では、釣糸の下部に錘を付けただけの単純な構成を考え、下端を静止水中におき、空中にある上端を水平移動させるという曳航実験から抗力係数を決定する。この実験においては、流水中に傾斜した円柱が受ける抗力が問題となることから、まず2節において、傾斜円柱に対して予備実験を行い、曳航実験装置の妥当性の検証と、以降の理論展開の指針を得る。3節では、曳航実験における定常状態での水中の糸形状に対し、それを記述するための微分方程式を導き、未知パラメータの同定問題として抗力係数を決定する。4節では、得ら

れた抗力係数に基づいて前報のアルゴリズムを適用し、曳航実験において上端の速度を静止状態からステップ的に変化させ、得られた過渡的な糸形状に対し、計算による再現可能性を検証する。5節では、曳航実験とは微妙に異なる流速下での場合について、アニメーション結果を示し、本手法の有効性の一端を明らかにする。

2. 予 備 実 験

次の3節では、水平方向の流れに対し傾斜して置かれた径 ϕ [m]、長さ l [m]の円柱が受ける流体抗力が問題となる。これに関してHoerner²⁾は、1917年から1951年にかけて行われた合計4件の実験結果を、次のように要約している：

- (1) 流体抗力は傾斜円柱軸の垂直方向に作用し、軸方向の抗力は無視してよい。
- (2) 軸の垂直方向に作用する抗力 F [N]は、水平流速 v [m/s]の円柱軸垂直成分 $v \cos \Theta$ に起因するものと考えてよく、抗力係数としては、水平流速に円柱が垂直に置かれた場合の係数 C_D を用いればよい。

$$F = C_D \frac{\rho}{2} (v \cos \Theta)^2 \phi l \quad (1)$$

ここに、 Θ [rad]は垂直方向と円柱のなす角、 $\rho = 1000$ [kg/m³]は水の密度である。

上式を確認するため、径が2[mm]、5[mm]、8[mm]、長さ200[mm]のアルミ製と真鍮製の円柱を用い、微小なフックを上端に設けて糸を結び、図1に示すように、空中にある糸の上端を水平方向に v [m/s]で移動させ、水中で曳航する。糸の径を165[μm]と十分に細くするので、それにかかる抗力は無視できるとする。水平の移動速度を0.05[m/s]から0.5[m/s]まで0.05[m/s]刻みの総計10通りに変化させ、定常状態における角度 Θ を計測した。定常状態における上端の移動速度は、静止した傾斜円柱に向かう水平流速と見なしてよい。

* 原稿受付 平成 17 年 3 月 28 日

** 学生会員 京都大学大学院 (京都市左京区吉田本町)

*** 正 会 員 京都大学大学院

† 京都大学大学院

Fig. 1 Preliminary experiment

Fig. 2 Experiment results and drag coefficient

図1において、円柱軸の垂直方向の力の釣り合いは次である。

$$C_D \frac{\rho}{2} (v \cos \Theta)^2 \phi l = G \sin \Theta \quad (2)$$

ここで、 G [N] は円柱に作用する下向きの力であり、重力と浮力の合力で既知である。

材質が2種類、径が3種類、移動速度が10種類の計60通りについて曳航実験を行ったが、そのうちの46通りに対し、角度 Θ を正の定常値として測定することができた。残りの14通りは、定常状態に達しなかったか、角度が微小で正確な測定が不能であった。

実験で得られた $G \sin \Theta$ を縦座標に、 $\rho(v \cos \Theta)^2 \phi l / 2$ を横座標にプロットすると図2を得る。実験点はほぼ直線状に分布し、原点を通る回帰直線の傾き0.83は、式(2)における抗力係数 C_D に対応する。

周知のことであるが、 ν を水の動粘性係数 [m^2/s] とすると、レイノルズ数 Re は次式で定義される無次元量である。

$$Re = \frac{\phi v}{\nu} \quad (3)$$

この予備実験における円柱のレイノルズ数は、 10^3 前後の領域にあるので、得られた垂直円柱の抗力係数 $C_D = 0.83$ は、文献²⁾などに紹介されている有限長さ円柱の抗力係数とほぼ一致する。図2から比較的良好な回帰直線が得られ、その傾きが従来の抗力係数と一致したことは、本稿で用いる曳航実験装置の妥当性の傍証になっている。

次節では、傾斜円柱の抗力に関し、円柱軸の垂直方向に抗力が働くという Hoerner の考え方に基づき、定常状態での糸の形状の微分方程式を導く。

Fig. 3 Line shape portion at stationary state

3. 定常状態での糸形状からの抗力係数の決定

流れのある水中におかれた糸の定常状態での形状を記述するため、微分方程式を導いておく。

3.1 微小部分に作用する力

本節では、釣糸の下端に錘を付けただけの単純な仕掛けを考え、これを水中におき、空中にある糸の上端を矩形パルスの加速度で、数百ミリ秒程度の短時間だけ加速した後、一定速度 v [m/s] を保ちながら右方向に水平移動させ、糸の形状が定常状態になった場合を考える。図3に仕掛けの一部を示す。

下端の錘から上方向に測った糸の長さを s 、糸の全長を L とすると、水平移動する糸の上端は $s = L$ に対応する。釣糸の径を ϕ [m]、断面積を $A = \pi \phi^2 / 4$ [m^2]、重力加速度を $g = 9.81$ [m/s^2] とする。フロロカーボン製の釣糸を用いるので、糸の密度は $\sigma = 1780$ [kg/m^3] となる。鉛直下方を X 軸に、水平右方向を Y 軸にとる。

水中の点 s における糸の微小長さ部分 ds を考える。点 s での糸の接線への X 軸からの角度を $\theta(s)$ とする。なお、角度は反時計回りが正である。 $\theta(s)$ から点 $s + ds$ での角度 $\theta(s + ds)$ への増分を $d\theta(s)$ と記す。微小部分 ds には、下方向に重力と浮力の合力 αds 、下側から張力 $T(s)$ 、上側から張力 $T(s) + dT(s)$ が作用する。

微小部分を長さ ds の円柱と見なすと、2節で述べたように、円柱軸に垂直に流体抗力 βds が作用することになり、これは次のように表現できる。

$$\beta ds = C_D \frac{\rho}{2} (v \cos \theta)^2 \phi ds \quad (4)$$

すなわち、パラメータ $\beta(s)$ は流れに垂直な円柱に対する抗力係数 C_D と角度 $\theta(s)$ から、次のように決定できる。

$$\beta = C_D \frac{\rho}{2} (v \cos \theta)^2 \phi \quad (5)$$

ここで、微小円柱の場合の抗力係数 C_D として、予備実験で得られた係数0.83を用いることは適当でない。釣糸のような径が細い場合、レイノルズ数は 10^1 から 10^2 の値となり、予備実験の場合よりも小さく、レイノルズ数のわずかな変化で抗力係数が変化するという、いわゆる低レイノルズ数領域にあるからである。また、糸を微小円柱に分解するので、それが湾曲しながら接続する場合には、どのような抗力係数が適当であるかも明らかでない。そこで、曳航実験を行い、定常

Table 1 Line diameters for experiment

Size	$\phi[\mu\text{m}]$	Size	$\phi[\mu\text{m}]$
0.2	74	2.0	235
0.3	90	3.0	285
0.6	135	4.0	330
1.0	165		

状態時の糸形状と微分方程式の解を比較し、形状誤差が小さくなるように抗力係数 C_D を定める。

3.2 微分方程式

3.2.1 微小部分の釣り合い

微小部分 ds の水平、鉛直方向の力の釣り合いは次式となる。なお、記法を簡単にするため、変数 s を省略する。

$$T \sin \theta + \beta ds \cos \theta = (T + dT) \sin(\theta + d\theta) \quad (6)$$

$$T \cos \theta + \alpha ds = (T + dT) \cos(\theta + d\theta) + \beta ds \sin \theta \quad (7)$$

点 θ での Taylor 展開から、 $\sin(\theta + d\theta) = \sin \theta + (\cos \theta)d\theta$ 、 $\cos(\theta + d\theta) = \cos \theta - (\sin \theta)d\theta$ となるので、上式に代入し、2 次の微小項を無視して $d\theta dT = 0$ とすると、次を得る。

$$\beta ds \cos \theta = T(\cos \theta)d\theta + dT \sin \theta \quad (8)$$

$$(\alpha - \beta \sin \theta)ds = -T(\sin \theta)d\theta + dT \cos \theta \quad (9)$$

これらから、次の連立微分方程式を得る。ドットは長さ s に関する微分を表す。

$$\dot{\theta} = \frac{1}{T}(-\alpha \sin \theta + \beta) \quad (10)$$

$$\dot{T} = \alpha \cos \theta \quad (11)$$

3.2.2 鍾部分の釣り合いと初期条件

鉛製の球型鍾の径を $d[\text{m}]$ 、断面積を $S = \pi d^2/4$ 、体積を $V = \pi d^3/6$ 、密度を $\sigma_0 = 11300 [\text{kg/m}^3]$ とする。下向きに働く力を $F_{X,0}$ とすると、これは重力と浮力の合力である。

$$F_{X,0} = (V\sigma_0)g - (V\rho)g \quad (12)$$

周知のように、球の抗力係数は $C_{D,0} = 0.47$ としてよく、流れ方向に鍾に作用する力 $F_{Y,0}$ は次となる。

$$F_{Y,0} = C_{D,0} \frac{\rho}{2} v^2 S \quad (13)$$

これらの力が下端における糸の張力 $T(0)$ と釣り合う。

$$T(0) = (F_{X,0}^2 + F_{Y,0}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

下端における角度 $\theta(0)$ は次となる。

$$\theta(0) = \arctan \left(\frac{F_{Y,0}}{F_{X,0}} \right) \quad (15)$$

式 (14)、(15) が微分方程式を解く際の $s = 0$ における初期条件となる。

3.3 曳航実験による抗力係数 C_D の推定

上端から下端の鍾までの釣糸の長さを $L = 600[\text{mm}]$ とし、静止時には $400[\text{mm}]$ の部分を水没させる。下端の鍾の重さは $3.6[\text{g}]$ である。対象とした釣糸の径を表1に要約する。

微分方程式の解と曳航実験での仕掛けの糸形状が合うように C_D を決定する。図4に照合結果の一例を示すが、ほぼ完全に一致させることができた。

Fig. 4 Experimental and calculated line shapes

Fig. 5 Relation between Re and C_D

釣糸の径ごとに、流速 $0.2[\text{m/s}]$ 、 $0.3[\text{m/s}]$ 、 $0.4[\text{m/s}]$ でのレイノルズ数と抗力係数の関係を示したものを図5にまとめる。釣糸の径が細くなるにつれて、糸周りの粘性が増し、流速が同じでもレイノルズ数が低下する。径が $74[\mu\text{m}]$ と $90[\mu\text{m}]$ の糸の場合、もともと小さかったレイノルズ数が、流速の低下でさらに減少し、抗力係数が急激に増加する。一方、径が太くなるにつれ、流速の違いによる抗力係数の変化は小さくなる。数千といわれる臨界レイノルズ数を超えると、円柱の抗力係数はほぼ一定値となることが知られているが、図5はこのレイノルズ数に到達するまでの、抗力係数の漸近的变化が現われている。

$135[\mu\text{m}]$ 以下の3つの径を第1グループ、 $165[\mu\text{m}]$ 以上の4つの径を第2グループとし、グループごとにレイノルズ数の負のべき乗で、図5の実験点を近似する。式(16)がグループ1の場合、式(17)がグループ2の場合であり、これらの曲線を図5中にそれぞれ曲線(1)と(2)として示す。なお、曲線(2)は1号以上の糸を対象としており、海釣り用としてよく用いられる釣糸の場合である：

$$C_D = 3.7434 Re^{-0.1776} \quad : \text{グループ 1} \quad (16)$$

$$C_D = 4.4123 Re^{-0.2027} \quad : \text{グループ 2} \quad (17)$$

式(3)を用いて、径と流速で表現すると次式となる：

$$C_D = \frac{0.3221}{(\phi v)^{0.1776}} \quad : \text{グループ 1} \quad (18)$$

$$C_D = \frac{0.2684}{(\phi v)^{0.2027}} \quad : \text{グループ 2} \quad (19)$$

Table 2 Threefold diagonal coefficient matrix for determination of $f_h, \ddot{p}_{h,x}$

	1	2	3	4	...	...	$2n-1$	$2n$	Known Values
	f_1	$\ddot{p}_{1,x}$	f_2	$\ddot{p}_{2,x}$	...	...	f_n	$\ddot{p}_{n,x}$	
1	0	1							Given
2	1	m_1	$-C_2$						$m_1 l \omega_1^2 + F_{1,x}$
3		$-C_2 m_1$	$-S_2^2$	m_1					$-C_2 m_1 l \omega_1^2 + S_2 F_{1,y}$
4			1	m_2	$-C_3$				$m_2 l \omega_2^2 + F_{2,x}$
...				...	...	...			...
...					...	...	...		...
$2n-1$						$-C_n m_{n-1}$	$-S_n^2$	m_{n-1}	$-C_n m_{n-1} l \omega_{n-1}^2 + S_n F_{n-1,y}$
$2n$							1	m_n	$m_n l \omega_n^2 + F_{n,x}$

Fig. 6 Multi-link mechanism model of line tackle

4. 多自由度剛体リンク機構による糸のモデル化

本節では定常ではなくて過渡状態を考え、前節で求めた抗力係数に基づいた場合の、糸形状の再現可能性を検証する。曳航実験は前節と同様であり、最初は静止していた糸の上端に関し、その水平方向加速度の時間変化は既知とする。過渡的な糸形状の算出には、著者らの多自由度リンク機構によるアルゴリズムを用いる¹⁾。糸の上端に浮きが接続しているのではなく、今回は上端が既知の加速度で移動する点が異なっている。

4.1 仕掛けのモデル化

過渡状態の形状の決定法を明らかにするため、図6に示す多自由度剛体リンク機構によるアルゴリズムを要約しておく。

長さ L の糸部分を n 個の長さ $l \equiv L/n$ のリンクに等分割する。図6は $n=4$ の場合である。各リンクは剛体であり、その質量はリンクの終端に質点として集中させる。下端の錘とリンクの質量もリンク下端に集中させる。リンク間の関節は滑らかとする。

絶対座標系の X 軸と Y 軸は前節と同様である。 h 番目の剛体リンク h の長さ方向の単位ベクトルを i_h 、それと垂直な反

時計回りのベクトルを j_h と記す。

ニュートンの運動方程式は、表2に示すような $2n \times 2n$ の3重対角行列に整理できる。表中の f_h は、リンク h が上側に及ぼす内力である。質量をリンク下端に集中させているので、リンクの重心周りの慣性モーメントは零であり、しかも関節は滑らかであるので、図6に示すように、内力は局所単位ベクトル i_h 、すなわちリンク方向と平行になる。

リンク h 始端加速度の i_h 方向成分を $\ddot{p}_{h,x}$ とする。未知数は $f_h, h=1, \dots, n$ と $\ddot{p}_{h,x}, h=2, \dots, n$ の $2n-1$ 個である。始点加速度 $\ddot{p}_{1,x}$ は、行1に示すように、上端の絶対加速度の i_1 方向成分として既知である。

リンク $h-1$ から h への角度を θ_h と記す。ただし、 θ_1 は鉛直下方からの角度とする。これらの相対角の正弦と余弦が表2中の S_h と C_h である：

$$S_h \equiv \sin \theta_h, \quad C_h \equiv \cos \theta_h \quad (20)$$

同表において、リンク h の角速度が ω_h 、下端に集中させた質量が m_h である。リンク h への外力は下端の質点部分に作用するものとし、局所単位ベクトル i_h 方向成分を $F_{h,x}$ 、 j_h 方向成分を $F_{h,y}$ と記す。これらの外力は、質点の重力、リンクと錘の体積に起因する浮力、流体抗力からなる。

これまでの節と同様、流体とリンクとの相対速度のリンク垂直成分の関数として、リンクの垂直方向にのみ抗力が作用する。なお、後述する実験においては、簡単のため、リンク h 下端で計算したものを、リンク h の相対速度の代表値として用いる。リンク長 l を十分小さくすると、質量をリンク下端に集中させ、相対速度を下端のもので代表させても、定常状態の糸形状も含めて、良好な結果が得られる。

未知数 $f_h, h=1, \dots, n$ と $\ddot{p}_{h,x}, h=2, \dots, n$ が求まれば、残る未知数である加速度 $\ddot{p}_{h,y}, h=2, \dots, n$ と角加速度 $\dot{\omega}_h, h=1, \dots, n$ は次式から求まる¹⁾。ここに、 $\ddot{p}_{h,y}$ はリンク h 始端加速度の j_h 方向成分である。なお、リンク1始端の $\ddot{p}_{1,y}$ は既知である。

$$\ddot{p}_{h,y} = \frac{S_h f_{h-1} - S_h F_{h-1,x} + C_h F_{h-1,y}}{m_{h-1}}, \quad h \geq 2 \quad (21)$$

$$\dot{\omega}_h = \frac{S_{h+1} f_{h+1} + F_{h,y} - m_h \ddot{p}_{h,y}}{m_h l}, \quad h \geq 1 \quad (22)$$

Fig. 7 Comparison of experiment with calculation

4.2 3重対角行列の下3角化

加速度 $\ddot{p}_{h,x}$, $h \geq 1$ が内力 f_h で表現でき, この内力 f_h , $h \geq 2$ が $\ddot{p}_{h-1,x}$ で表現できれば, 表 2 において, m_{n-1} , $-C_3$, m_1 , $-C_2$ のセルが零となり, 行 2 以下を下 3 角化できる. 式で書くと次のようになる.

$$\ddot{p}_{h,x} = \alpha_h(-f_h + \gamma_h), \quad h = n, \dots, 1 \quad (23)$$

$$f_h = \beta_h(-C_h \ddot{p}_{h-1,x} + \delta_h), \quad h = n, \dots, 2 \quad (24)$$

初期条件としての係数 α_n と γ_n は, 行 $2n$ から次である.

$$\alpha_n = \frac{1}{m_n} \quad (25)$$

$$\gamma_n = m_n l \omega_n^2 + F_{n,x} \quad (26)$$

一般に, α_h と γ_h が与えられれば, β_h , δ_h は次から求まる.

$$\beta_h = \frac{m_{h-1}}{m_{h-1} \alpha_h + S_h^2} \quad (27)$$

$$\delta_h = C_h l \omega_{h-1}^2 + \alpha_h \gamma_h - \frac{S_h F_{h-1,y}}{m_{h-1}} \quad (28)$$

また, β_h と δ_h が判明すれば, α_{h-1} と γ_{h-1} は以下となる.

$$\alpha_{h-1} = \frac{1}{m_{h-1} + C_h^2 \beta_h} \quad (29)$$

$$\gamma_{h-1} = m_{h-1} l \omega_{h-1}^2 + C_h \beta_h \delta_h + F_{h-1,x} \quad (30)$$

上記を繰り返すと, 最終的には α_1 と γ_1 まで求まり, 既知の $\ddot{p}_{1,x}$ から, f_1 が判明する:

$$f_1 = -\left(\frac{\ddot{p}_{1,x}}{\alpha_1}\right) + \gamma_1 \quad (31)$$

一方, 式 (24) で $\ddot{p}_{1,x}$ が既知であるので, f_2 が判明し, 式 (23) から $\ddot{p}_{2,x}$ が判り, 最終的には f_n と $\ddot{p}_{n,x}$ まで既知となる. 式 (21) と (22) から他の加速度も得られる. これらの加速度から, 微小時間後の速度と位置情報が計算でき, 表 2 の右辺として新たな値が判明する. このようにして, 糸形状の過渡応答が逐次求まる.

4.3 曳航実験結果

ここでは 3.3 節と同じ長さ 600[mm] で, 静止時に 400[mm] が水没する釣糸を用いた. 錘も同じで 3.6[g] である. 糸の径としては 330[μm] を取り上げ, リンク総数を $n = 30$ とした. 初期時刻 $t = 0.0$ [s] で静止していた上端を, 0.98[m/s²] の加速度で 0.306[s] だけ加速させ, 速さ 0.3[m/s] に到達したのち, その速度を維持する.

図 7 は時刻 $t = 0.0$ [s], 0.3[s], 0.6[s], 0.9[s], 1.2[s], 1.5[s], 2.0[s], 3.0[s] の時点で, 曳航実験と計算結果とを比較した結果である. 水面を水平の実線で示す. 縦線の間隔は 50[mm] に相当する.

糸の抗力係数としては, 径が 330[μm] であるので, 式 (19) を用いた. 定常状態に達するまでは, 水中にある糸の位置によって相対流速が異なるので, 各リンクごとに相対速度を求めて, 抗力係数を決定している.

時刻 $t = 0.3$ では, 糸の上端は Y 方向に移動するが, 下端の錘はほとんど動いていない. 時刻 $t = 0.6$ で, 錘も Y 方向に動き出すが, 糸の形状はまだ直線に近い. 時刻 $t = 0.9$ で, 水中の糸が湾曲し始める. 時刻 $t = 1.5$ では, 空中の糸は直線状だが, 水中では湾曲が大きくなり, 時刻 $t = 3.0$ ではほぼ定常状態に達する. 過渡および定常状態において, 糸形状の実験結

Fig. 8 Line shape animation results

果と計算結果は合致しており、3.3節で求めた抗力係数と、それに基づく多自由度リンク機構モデルの有効性を示している。

5. アニメーションの一例

本稿の計算法の有効性の一端を示すため、曳航実験ではなく、水平流速下で上端を固定した場合を考え、水中での仕掛けの変形過程を視覚化する。結果を図8に示す。上端を固定する代わりに、水平流速を $0.3[\text{m/s}]$ とした以外は4節と同様である。なお、視認の都合上、糸の径は実際より拡大して図示している。水平の線は水面に相当する。

前節の過渡状態においては、仕掛けの下端に行くほど相対速度と抗力は減少したが、本節では、初期時刻近辺において、糸と錘に大きな抗力がかかる。まず $t = 0.1$ では、水中で糸が弧を描き、時刻 $t = 0.2$ でさらに糸が膨らむ。時刻 $t = 0.3$ で、錘も移動し始め、時刻 $t = 0.4$ にかけて糸の湾曲は小さくなる。時刻 $t = 0.5$ 付近から徐々に錘が持ち上げられ、時刻 $t = 0.8$ で水中の糸が再び湾曲し始める。この湾曲はそれ以降顕著になり、時刻 $t = 3.0$ でほぼ定常状態に達する。そこでの糸形状は、前節の曳航実験の場合の定常状態と一致する。

6. 結 言

- (1) 予備実験により、傾斜円柱の軸の垂直方向に流体抗力が作用することを確認し、これに基づいて定常状態における糸形状を記述するための微分方程式を導出した。
- (2) 定常状態での糸形状の曳航実験結果と計算結果を比較することにより、低レイノルズ数領域での抗力係数を実験的に求め、糸径と相対流速からの抗力係数の決定を可能にした。
- (3) 上記の抗力係数と多自由度剛体リンク機構モデルを用いて、過渡状態における糸形状を計算し、曳航実験結果を精度よく再現できることを示した。
- (4) 有効性の一端を示すため、上端固定で一定水平流速の場合の計算結果を示し、糸挙動を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 熊本, 西原, 平岡: 棒浮き釣りの力学解析とアニメーション, 精密工学会誌, **68**,5(2002)681.
- 2) Sighard F.Hoerner: FLUID-DYNAMIC DRAG, New Jersey,(1958).