

フ ラ イ ラ イ ン の 力 学*
(手首固定条件におけるロッド・ラインのモデル化)渡 邊 鉄 也*¹, 田 中 基 八 郎*¹, 細 矢 直 基*¹Dynamics of a Fly Line
(Modelling a Rod and a Line with Fixed Wrist)Tetsuya WATANABE*², Kihachiro TANAKA and Naoki HOSOYA*² Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

This study uses experimental and computational analysis to investigate the dynamic behavior of a fly line. Fly-casting is one of the most significant issues in fly-fishing. In order to cast a lightweight fly, the weight of a fly line is utilized. Fling speed, the casting process and the loop shape of the line while in flight are important for the proper presentation of flies. Moreover, the shape of a fly line is also important for a long cast or controlled cast. In this paper, a rod and a line are modelled and calculated in the case of wrist fixed.

Key Words: Fly Line, Fly Rod, Fly-casting, Flexible Structure, Casting Experiment

1. 結 言

フライフィッシングは従来の日本のフィッシングスタイルとは異なる点でスポーツの1つとして位置づけられてきている。現在は日本の釣りもスポーツの一つとして考えられており、スポーツフィッシングという言葉もある。フライフィッシングではラインの重さで疑似餌となるフライを飛ばすという独特な方法をとっているため、フライフィッシングを行う上でキャストイングはマスターしなくてはならない事項である。フライフィッシングはキャストイング、メンディング、リトリーピング、ヒットイング、ランディングなど、さまざまな要素によって構成されているが、中でもキャストイングの占める割合は極めて大きい。キャストイングをするに当たりフライラインの動きを如何にすべきかということがとても大切なことである。しかし、フライラインは柔軟なひも状の構造物であるため、その運動は複雑なものとなり、現象の把握やモデル化などが困難である。そこで、スポーツ工学、人間工学の観点から最適なキャストイング方法を明らかにする。また、ロッドやラインなどの柔軟構造物の動的な実験

を行う場合、その測定方法が難しい。そこで、動的挙動を正確に測定する方法も同時に確立することを目的としている。

本研究の目的を下記に列挙する。

- 1) ロッド、ラインなど、柔軟大変形構造物の運動を測定する方法の確立
- 2) ロッド、フライラインの運動の観測およびその挙動の解明
- 3) ロッド・ラインのモデル化および妥当性検証
- 4) ロッドの最適剛性、ラインの最適形状の推定

筆者らは過去の研究において、フライラインのキャストイング実験を行い、腕、ロッドの角度や角速度、あるいはロッド先端、ラインループ先端の軌跡や速度の特徴を明らかにしてきた。フライラインあるいはひも状構造物の動的挙動に関する研究にはさまざまなものがあるが⁽¹⁾⁻⁽¹¹⁾、実験を含めたモデル化の妥当性は検証されていない。そこで、本報告では、キャストイングの基本運動として、手首を固定した条件でロッド・ラインのモデル化および数値解析を行い、その妥当性を検証する。前報⁽¹²⁾では、数値解析において、空気抵抗を考慮しておらず、また、軌跡や速度を実験と比較していない。そこで、ここではロッド先端あるいはラ

* 原稿受付 2003年3月3日。

*¹ 正員、埼玉大学工学部(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。

E-mail: watanabe@mech.saitama-u.ac.jp

インループ先端の軌道および速度などを実験結果と比較検討する。

本研究の最終目標は、軽量構造物を空間的に距離のある位置に正確に配置するために、ひも状構造物の重さを利用して投げるキャスティングマニピュレーションシステムを構築することにある。現時点ではスポーツ工学、人間工学的観点からフライフィッシングをモデルに研究を行う。

2. ロッドとラインのモデル化

2.1 タックル フライフィッシングでは、図1に示すロッド、リール、ライン、リーダー、ティペット、フライをタックルと呼ぶ。これら以外はギアと呼ぶ。実験および解析では、リーダー、ティペット、フライを除いたタックルを用いた。

2.2 ロッド・ラインのモデル化 ロッドおよびラインは、図2に示すように、剛体要素を回転ばねと回転減衰要素で結合したモデルで近似した。過去の研究⁽¹⁾⁻⁽¹¹⁾では、ラインを弾性体として扱ったものや、剛体要素を用いたものがあるが、回転ばねや減衰を考慮していない、あるいは剛体を集中質点として考えて慣性モーメントを考慮していない。そこで、本研究では、回転ばね、慣性モーメントを考慮したモデルを構築する。ただし、ここではロッドは回転運動のみとし、またラインの伸びは考慮しない。これらは今後の課題とする。図2では、ロッドが3分割、ライン4分割となっているが、実際の計算ではロッドを20分割、ラインは約10cmごとの要素に分割した。

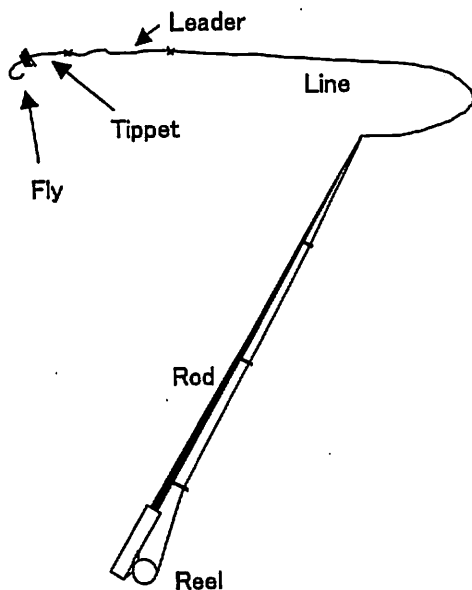


Fig.1 Tackle

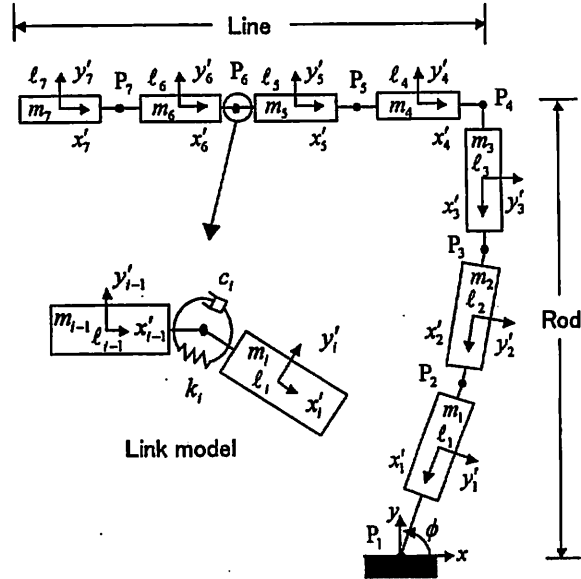


Fig.2 Model of rod and line

運動方程式は次のようになる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Q} \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad \text{..... (1)}$$

この運動方程式を並進方向ベクトルと回転方向ベクトルに関して分離することにより、次式が得られる⁽¹³⁾。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_r & 0 & \Phi_r^T \\ 0 & \mathbf{M}_\phi & \Phi_\phi^T \\ \Phi_r & \Phi_\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\phi} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{Q}_r \\ \mathbf{Q}_\phi \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad \text{..... (2)}$$

式(2)から $\ddot{\mathbf{r}}$ 、 λ を消去することにより $\ddot{\phi}$ のみの方程式に縮約させる。縮約した式は次のようになる。

$$\mathbf{M}^* \ddot{\phi} = \mathbf{Q}^* \quad \text{..... (3)}$$

$$\mathbf{M}^* = \mathbf{M}_\phi + \Phi_\phi^T (\Phi_\phi^T)^{-1} \mathbf{M}_r \Phi_\phi^{-1} \Phi_\phi \quad \text{..... (4)}$$

$$\mathbf{Q}^* = \mathbf{Q}_\phi - \Phi_\phi^T (\Phi_\phi^T)^{-1} (\mathbf{Q}_r - \mathbf{M}_r \Phi_r^{-1} \gamma) \quad \text{..... (5)}$$

式(3)を時間積分して各部材の角速度、角変位を求める。ここで、

\mathbf{M} : 質量行列

\mathbf{q} : 一般化座標行列

Φ_q : ヤコビアン

λ : ラグランジュ乗数ベクトル

$\mathbf{Q}_r, \mathbf{Q}_\phi, \mathbf{Q}$: 一般化力

$\mathbf{r} = \{x_1 \ y_1 \ \dots \ x_n \ y_n\}^T$: 並進方向ベクトル

$\phi = \{\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n\}^T$: 回転方向ベクトル

$\gamma = \Phi_q \ddot{\mathbf{q}}$

である。

2・3 空気抵抗について 空気抵抗は各要素に空気が衝突すると考え、式(6)を用いてレイノルズ(Re)を算出する。ここで、 ν は空気の動粘度で25℃のときの値 $15.4 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ を用いた。 V は各要素の速度、 D はラインの直径とした。

$$\text{Re} = \frac{DV}{\nu} \quad \dots\dots\dots (6)$$

要素の角速度とx方向、y方向の速度の関係は、式(7)により表すことができ、式(7)を用いて並進方向速度を算出した。また、式(8)により並進方向座標を得ることができる。

$$\Phi_r \{\dot{r}\} + \Phi_\theta \{\dot{\theta}\} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\{r\} = -\Phi_r^{-1} [T] \Phi_\theta \{1\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

$$[T] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & \\ -1 & 0 & & \\ & & 0 & 1 \\ & & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (9)$$

次に、抵抗係数(C_D)とレイノルズ数(Re)の関係は、ラインを円柱と仮定し、実験値⁽¹⁴⁾を区分近似して得られた図3を用いた。抵抗係数と空気抵抗力の関係は式(10)のように表される。また、図4に示す要素の速度方向と要素軸方向の関係から、要素に作用するx方向、y方向の力は式(11)となる。これらの力を一般化力として、式(2)に代入する。

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= C_D \frac{1}{2} \rho V^2 \ell D \sin \varphi \\ F_x &= -F \cos \theta \\ F_y &= -F \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

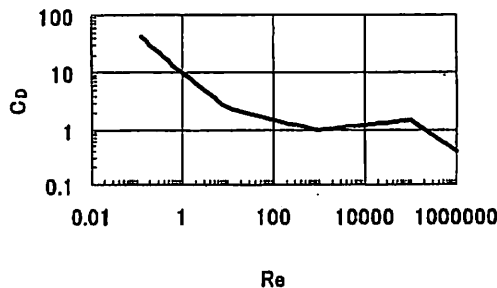


Fig.3 Drag coefficient respected to Reynolds number

2・4 ロッドの回転角度および解析について 筆者らが行った過去のキャストイング実験では、基本運動として手首を固定した条件で実験を行っていたことと、計算を簡便にすることを考慮し、数値シミュレーションでは、ロッドの回転角を入力とした解析を行う。ラインの長さは実験と同様に5m、7m、9mの3種類とした。実験で得られた画像から算出したロッドの回転角はサンプリングが30Hzであり、また、画像の分解能による誤差が多分に含まれている。実験からロッドの回転角には再現性があることがわかっているの、ここでは多項式により実験データの近似曲線を求めた。多項式は決定係数(R2)が0.98以上となる最低次数の式とした。ラインが5mの場合は4次式でR2=0.991、7mの場合は5次式でR2=0.991、9mの場合は5次式でR2=0.989である。図5に5mと9mの場合のロッド回転角を示す。

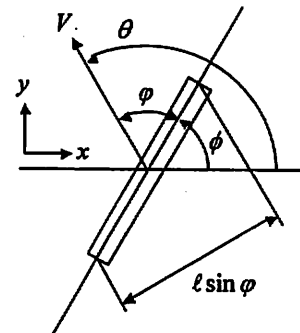
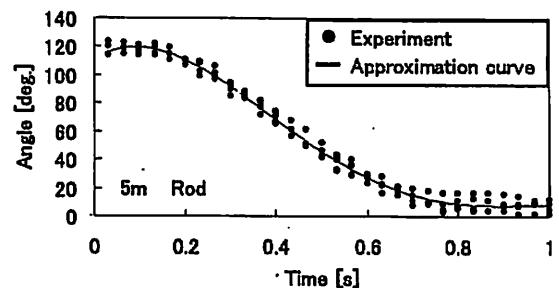
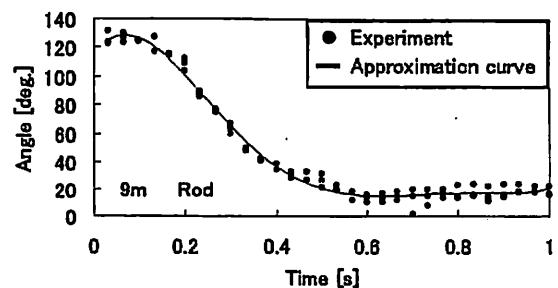


Fig.4 Direction of velocity



(a) Line length 5m



(b) Line length 9m

Fig.5 Input angle for calculation

数値積分は Runge-Kutta-Gill 法により計算を行った。ここでは、バックキャストにおいて、ラインが一直線になった状態を初期状態とし、水平方向に対して0度にした。サンプリングは100Hzとし、オーバーサンプリングを100回行っている。ロッドは実験と同様のロッドをモデル化し、ラインの寸法も実験で用いたラインと同じにしている。比重は実験より0.902であった。ライン長さが5mの場合にはラインの初期状態による挙動の差も検討した。

3. ロッドとラインの挙動解析

3.1 飛行形状

3.1.1 シミュレーション結果 図6、図7にそれぞれライン長さ5mと9mにおける飛行形状を示す。これらの図は0.1秒ごとに描いたものであり、0.9秒間の挙動を示している。図6は空気抵抗を考慮した場合で図7は空気抵抗を考慮しない場合である。空気抵抗を考慮しない場合には0.9秒間でラインが伸びていないのに対し、空気抵抗を考慮しない場合には完全に伸びきってターンオーバーしていることがわかる。また、空気抵抗を考慮しない場合には9mにおいてラインが上昇していることがわかる。

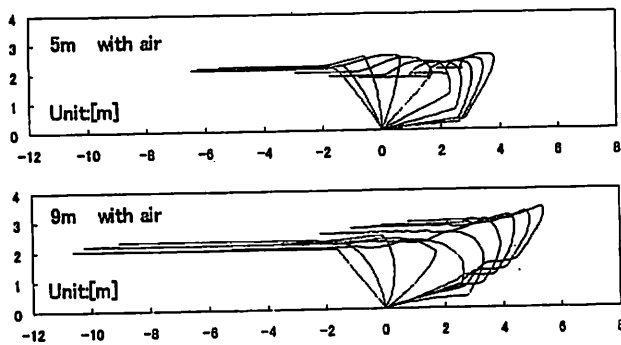


Fig.6 Rod and line shape in flight with air

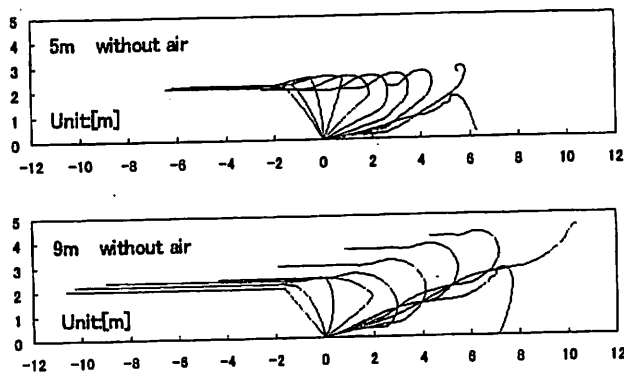
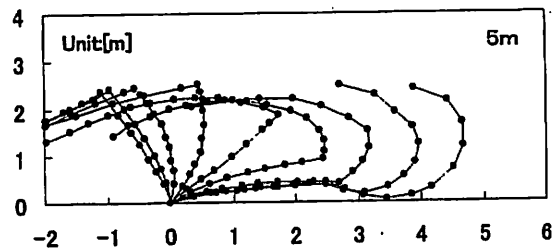


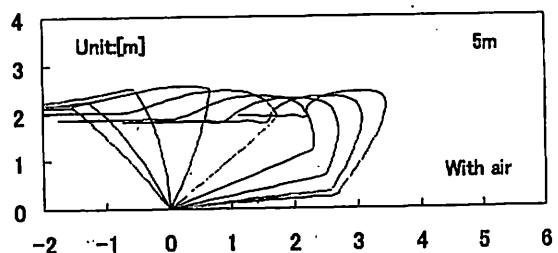
Fig.7 Rod and line shape in flight without air

3.1.2 実験結果との比較 図8にライン長さ5mの場合の実験結果と解析結果を示す。(a)は実験結果、(b)は空気抵抗を考慮した場合の解析結果、(c)は空気抵抗を考慮しない場合の解析結果であり、0.1秒ごとの軌跡を示している。0.3秒(左から4番目)のロッドの実験結果と解析結果を比較すると、実験結果の変形量の方が大きく、弧を描いていることがわかる。これは、シミュレーションではロッドの回転運動のみを入力していたためにロッドの回転速度が実験に比べて遅かったことによる。実験では腕とロッドが相対回転速度しないように手首を固定していたが、実際には若干の相対速度が生じてしまったことによる誤差である。

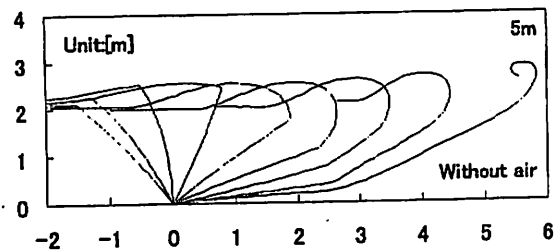
ラインの挙動に注目すると、上記の理由により、空気抵抗を考慮した場合の計算結果は解析結果に比べると誤差が生じているが、ループを描いており、良好な結果が得られている。空気抵抗を考慮しない場合には、ラインの運動量が大きく、実験結果とは一致しない。したがって、シミュレーションにおける入力データについて検討する必要があるが、本研究で用いた、各要素に空気抵抗を考慮したモデルは比較的妥当である。



(a) Results from experiment



(b) Results from analysis with air



(c) Results from analysis without air

Fig.8 Comparison between experiment and analysis

3・2 ロッド先端・ループ先端の挙動 ロッドおよびループの先端の挙動について、実験結果と解析結果の比較を行う。図9、図10にそれぞれライン長さ5m、9mの場合の結果を示す。黒点が解析結果で、実線が実験結果である。実験結果は3回の実験の平均値を用いている。(a)はロッド先端、ループ先端の軌跡、(b)はx方向速度、(c)はy方向速度である。

まず、ライン長さ5mの場合のロッド先端の挙動に注目すると、軌跡とx方向速度の解析結果は実験結果と良好に一致していることがわかる。しかし、y方向速度は解析の方が大きい。次にライン長さ9mの場合に注目すると、x方向の速度は良好に一致しているが、ロッド先端の軌跡は解析の方が大きく、弧を描いている。また、y方向速度は解析結果の方が大きい。以上の結果から、3・1節で述べた理由により、解析では

ロッドの変形量が小さいため、ロッド先端の軌跡の回転半径が小さくなり、y方向速度に差が生じてしまい、y方向速度が実験結果と良好には一致しない。しかし、ロッド先端の挙動は本研究で用いたモデルで良くシミュレートできている。

次に、ループ先端に注目すると、軌跡は一致しない。これは、ループ形状が異なることによる。しかし、x方向速度、y方向速度は比較的良好に一致している。

実験結果と解析結果の誤差を定量的に評価するために、ロッド先端速度およびループ先端速度の絶対値の誤差を求めた。図11、図12にそれぞれ空気抵抗を考慮した場合と考慮しない場合の速度誤差を示す。図11に注目すると、ラインが長くなるにつれてロッド先端の速度誤差は大きくなっているが20%以下の誤差である。ループ先端の速度誤差はラインが長くなる

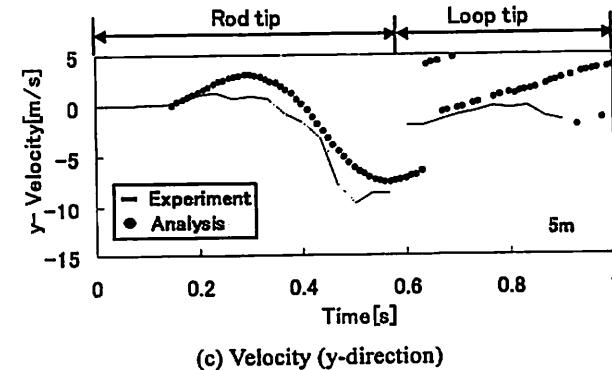
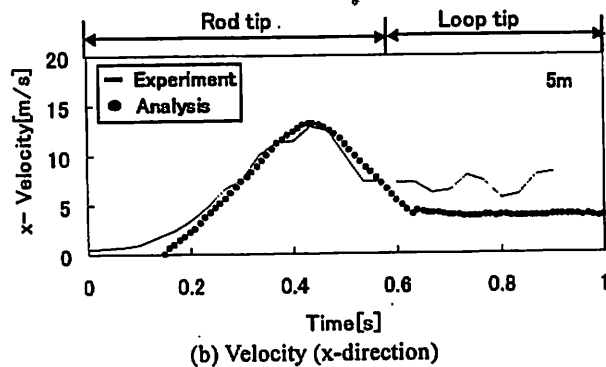
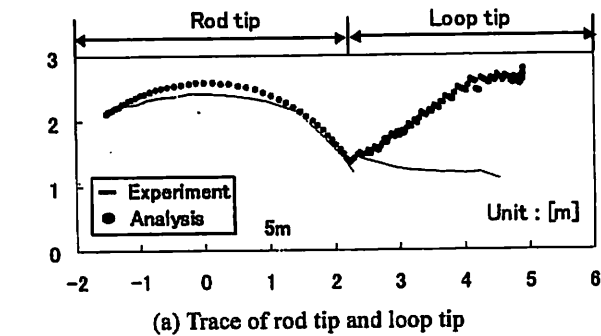


Fig.9 Rod tip and loop tip with air (5m)

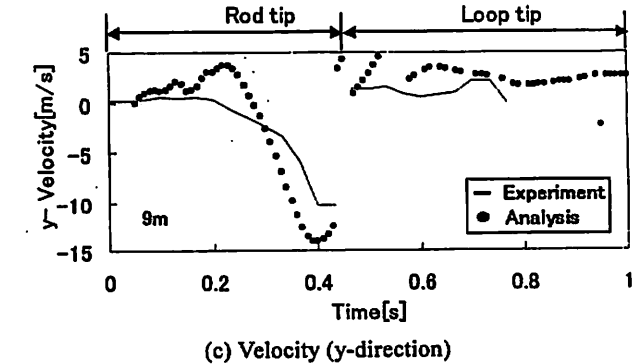
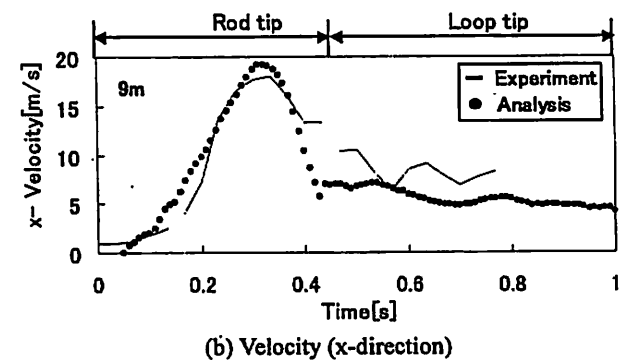
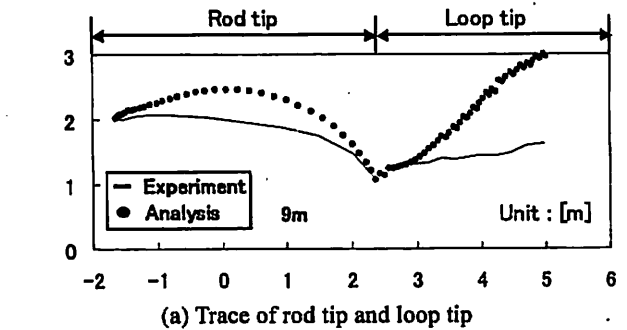


Fig.10 Rod tip and loop tip with air (5m)

につれて小さくなる傾向にあるが、40%以下の誤差となっている。これに対し、図12の空気抵抗を考慮しない場合には、ループ先端の誤差は40%を超えており90%近い誤差も生じている。また、ラインの長さによる特徴も見られない。しかし、ロッド先端ではラインが長くなるにつれて誤差は大きくなっており、空気抵抗を考慮した場合と同様の傾向が見られる。また、誤差も空気抵抗を考慮した場合と同程度であった。

以上の結果から、空気抵抗を考慮したモデルは、考慮しないモデルに比べると妥当であることがわかる。

3・3 ライン初期形状による挙動 ここでは、ライン長さ5mの場合について、フォワードキャスト開始時におけるライン形状の違いによる挙動の変化を明らかにする。ただし、実際のフォワードキャスト開始時にはラインに速度が生じているが、ここではその速度は考慮していない。

3・3・1 飛行形状 ラインの初期形状として、図13に示すような4種類の形状を用いた。図13は0.1秒ごとの解析結果を示している。実験では、No.4の初期形状が最も近いものとなっている。図13(d)のNo.4に注目すると、他の図に比べてループ形状が丸

みを帯びており、実験結果と比較すると最も近い形状となった。

3・3・2 ロッド先端・ループ先端の挙動 3・2節と同様にロッド先端およびループ先端の挙動について、軌跡、x方向速度、y方向速度の実験結果と解析結果を比較し、空気抵抗を考慮した場合と考慮しない場合の実験結果との誤差を求めた。図14、図15にそれぞれ空気抵抗を考慮した場合と考慮しない場合の速度誤差を示す。

図14に注目すると、ロッド先端、ループ先端の速度誤差は40%以下であり、ライン初期形状による顕著な差は見られない。ループ先端の誤差はNo.2が最小で、27.9%であり、ロッド先端の誤差はNo.3が最小であり、10.0%であった。しかし、図13のループ形状を考慮すると、No.4が最も実験に近い結果が得られると考えられる。

図15に注目すると、ロッド先端、ループ先端の速度誤差は大きく、解析では空気抵抗を考慮する必要があることがわかる。

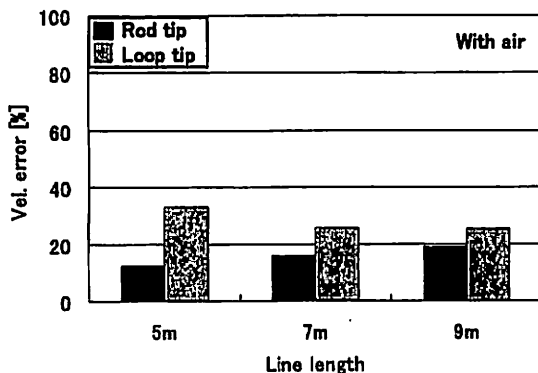


Fig.11 Velocity error (with air)

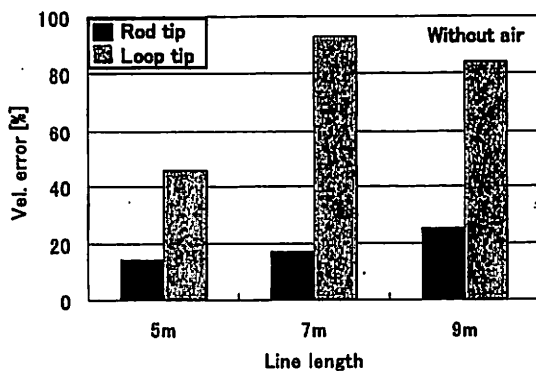
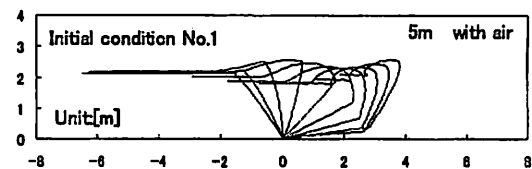
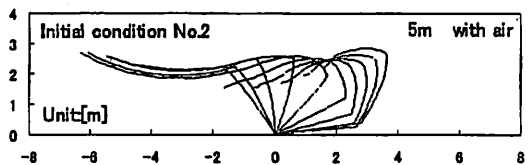


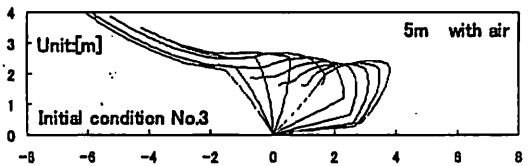
Fig.12 Velocity error (without air)



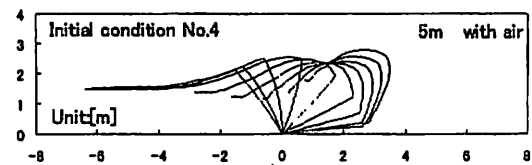
(a) Condition No.1



(b) Condition No.2



(c) Condition No.3



(d) Condition No.4

Fig.13 Rod and line shape respected to initial condition

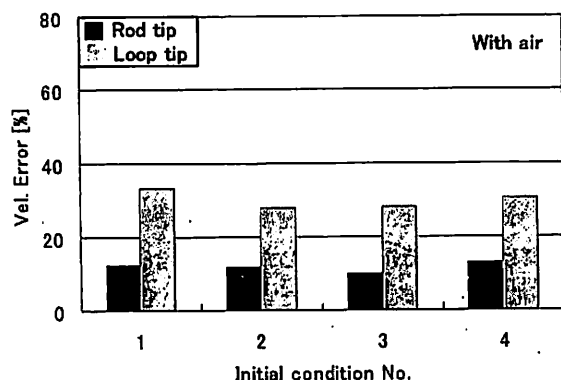


Fig.14 Velocity error (with air)

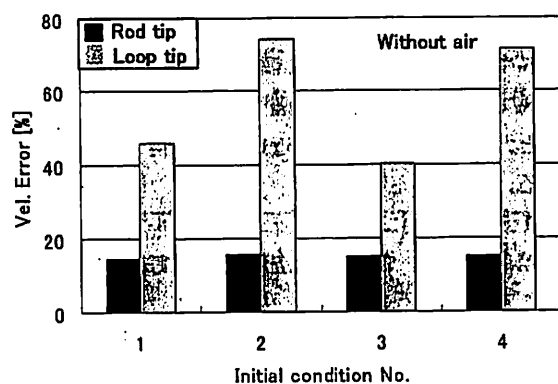


Fig.15 Velocity error (without air)

4. 結 言

本研究はフライラインのキャストイングについて人間工学、スポーツ工学の観点から実験的・解析的な検討を行った。本報告では、キャストイングの基本運動として、手首を固定した条件でのロッド・ラインのモデル化および数値解析を行い、以下の結果が得られた。

- 1) 剛体リンクモデルの各要素に空気抵抗を考慮したモデルを構築した。
- 2) キャスティング実験の画像データから、シミュレーションで用いる入力データを求めた。
- 3) ラインの飛行形状、ロッド先端の軌跡および速度、ラインループ先端の速度の解析結果を実験結果と比較したところ、本研究で用いたモデルは実験結果を良好にシミュレートしていることがわかった。
- 4) フォワードキャスト開始時におけるライン初期形状による挙動の違いを明らかにした。

参 考 文 献

- (1) Graig A. Spolek, The mechanics of flycasting: The flyline, American Association of Physics Teachers, 54(9), (1986), 832-836.
- (2) John M. Robson, The physics of fly casting, American Association of Physics Teachers, 58(3), (1990), 234-240.
- (3) Christopher T. Howell, Numerical analysis of 2-D nonlinear cable equations with applications to Low-Tension Problems, International Journal of Offshore and Engineering, 2-2, (1992), 110-113.
- (4) J.J. Burgess, Bending stiffness in a simulation of undersea cable deployment, International Journal of Offshore and Engineering, 3-3, (1993), 197-204.
- (5) M.S. Triantafyllou and C.T. Howell, Dynamic response of cables under negative tension: an ill-posed problem, Journal of sound and vibration, 173(4), (1994), 433-447.
- (6) J.A. Hoffmann and Matthew R. Hooper, Fly rod performance and line selection, Proceedings of DETC'97, 1-8.
- (7) J.A. Hoffmann and M.R. Hooper, Fly rod response, Journal of Sound and Vibration 209(3), (1998), 537-541.
- (8) S. Lingard, Note on the aerodynamics of a flyline, Am. J. Phys., 56-8, (1998), 756-757.
- (9) M.A. Hendry and M. Hubbard, Dynamic finite element simulation of fly casting and its potential use in fly rod design, The engineering of SPORT, Research, Development and Innovation, (2000), Blackwell Science.
- (10) C. Gatti-Bono and N.C. Perkins, Physical and numerical modeling of the dynamic behavior of a fly line, Journal of sound and vibration, 225(3), (2001), 555-577.
- (11) M.A. Hendry and M. Hubbard, Effect of rod taper on fly casting performance, The engineering of SPORT4, (2002), Blackwell publishing.
- (12) 渡邊鉄也・田中基八郎, フライラインの力学 (モデル化および解析), 機論, 69-680, C(2003), 1065-1071.
- (13) 杉山博之・小林信之, マルチボディダイナミクスを用いたスパゲティプロブレムの解析, 機論, 65-631, C(1999), 910-915.
- (14) 空気機械工学便覧, (1979), コロナ社