

フライラインの力学*

(モデル化および解析)

渡邊鉄也*¹, 田中基八郎*¹

Dynamics of Fly Line (Modelling and Analysis)

Tetsuya WATANABE*² and Kihachiro TANAKA

*² Department of Mechanical Engineering, Saitama University,
225 Shimo-Okubo, 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, the fly-casting process is investigated experimentally. In addition, the system of a fly line and a rod is modeled and calculated.

Key Words: Fly Line, Fly Rod, Fly-Casting, Modelling, Flexible Structure, Multibody Analysis, Casting Experiment

1. 結 言

近年, 日本人の余暇の使い方が充実してきており, 海外からも注目されてきている. ここ数年, 自分の趣味を充実させるために余暇を利用する人が増えてきている. 特にアウトドアは最近の流行となっている. 中でもルアーフィッシングやフライフィッシングなどの外来の釣りを趣味の1つにする人が増えてきている. ルアーフィッシングや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. 特に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, 中でもキャストの占める割合は極めて大きい. キャスティ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方法を探る. 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) 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

本報告では, フライラインの飛び方を実験的に解明するとともに, ロッド-ライン系のモデル化および数値解析を行い, モデル化の妥当性を検証する.

本研究の最終目標は宇宙空間などにおいて, 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

* 原稿受付 2002年5月14日.

* 正員, 埼玉大学工学部(☎338-8570 さいたま市下大久保255).

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

に、ひも状構造物の重さを利用して投げるシステムを構築することにある。また、地球上においても建設現場や作業場における利用も可能であると考えられる。関連する研究として、ハンガーにひもをつけてキャストイングし対象物をつかむタイプのキャストイングマニピュレータに関するもの^{(1), (2)}やテザーロボットに関するもの⁽³⁾があるが、これは投げ釣りやルアーフィッシングなどをモデルに開発されたものである。

本研究ではひも状構造物自体の重さを利用したキャストイングマニピュレーションに関して、フライフィッシングをモデルに研究を行う。現時点ではスポーツ工学、人間工学的観点からのアプローチである。

2. フライフィッシングについて

2.1 フライフィッシングの原理 フライフィッシングは15世紀頃に英国で始まり、現在のようなスタイルになったのは19世紀後半から20世紀始めである⁽⁴⁾。そして、昭和の初期に日本に伝わってきたといわれている。フライはトラウトが捕食するカゲロウ、カワゲラあるいはトビケラなどの水生昆虫を模擬した疑似餌であるため、小さく軽いものである。このような軽量物を飛ばす場合、軽量物自体の重さを利用して飛距離が短い。そこで、ラインの重さを利用して軽量物を飛ばす方法が考え出された。日本古来の漁法としてテンカラがあり、この釣りもラインの重さを利用して毛鉤を投げるが、テンカラの場合、フォールキャスト時にラインを伸ばすことが出来ない点で、フライフィッシングと決定的に異なる。フライラインは当初、鯨のひげや馬の毛で作られており、ラインにはテーパが付けられていなかった。現在のフライラインはフローティングの場合、気泡を含んだビニールで出来ており、飛距離が出るようにテーパが付けられるなど工夫がなされているが、各メーカーによってテーパの付け方や表面のコーティングが異なっている。

フライフィッシングはラインの重さを利用して投げなくてはならないので、ラインを遠くへ飛ばすのは容易ではない。フライラインが簡単に飛ばない理由は2つある。1つは空気抵抗の影響であり、もう1つは飛行中のラインの形状が時間変化するため、ライン全体に力を伝えるのが難しいことである。空気抵抗を減らすにはラインのループをコンパクトにし前面投影面積を小さくすればよい。ラインに力を的確に伝えるにはラインが歪んでいたり、しわが寄っていたりしてはならない。進行方向にまっすぐであり、ループの幅が狭いほどよい。

2.2 ロッド・フライラインの構造

2.2.1 ロッドの構造 図1にロッドの形状を示す。今回用いたロッドはDAIWA製 Phantom Eliminatorで、5本継ぎのものである。ロッドは中空円筒構造で、全長219.7 cm、総重量は61.4 g、密度は1540 kg/m³である。ロッドをリンク構造にモデル化した場合の回転ばね定数を算出するために、図1に示すような寸法を測定した。

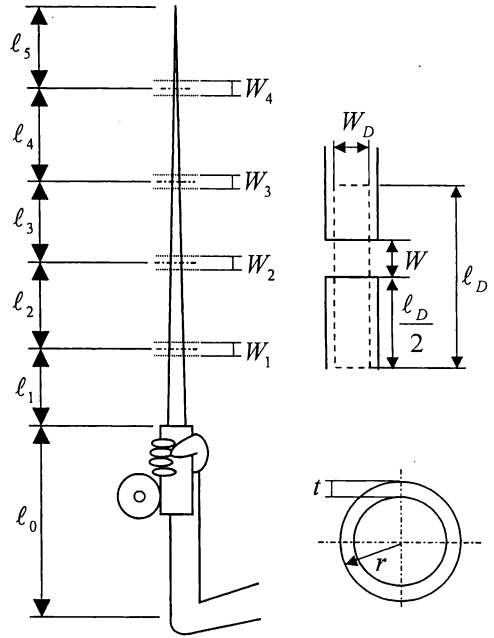


Fig.1 Rod specimen

ロッドは図2のようなリンク形状にモデル化した。ロッドの弾性係数を E 、回転ばね定数を k 、断面2次モーメントを I 、作用するモーメントを T とすると、片持ちはりでは、

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = T \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = Tx + c \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$EI \tan \theta = Tx \quad \dots\dots\dots (3)$$

$x = l$, $\tan \theta = \theta$ とすると

$$T = \frac{EI}{l} \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

のようになる。一方、リンクモデルでは $T = k \cdot \theta$ と表せるので、回転角 θ を等価とすれば回転ばね定数 k は次式で表される。

$$k = \frac{EI}{\ell} \dots\dots\dots (5)$$

次にロッドの形状や載荷時の変位から縦弾性係数を算出すると、 $E=50.9$ Gpaであった。

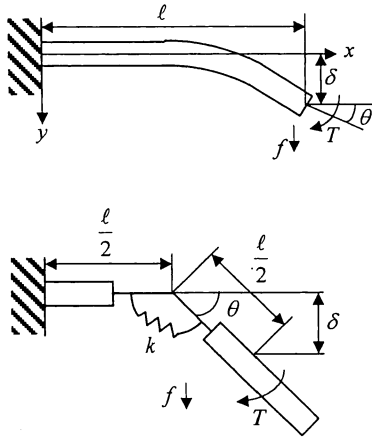


Fig.2 Link model

2・2・2 フライラインの構造 フライラインは水面に浮くタイプ（フローティングライン）と沈むタイプ（シンキングライン）に大別でき、その中間に位置するシンク・ティップやユニフォーム・シンクなどがある⁽⁶⁾。また、ライン形状は代表的なものとして、ダブルテーパー、ウェイトフォワード、シューティングテーパーなどがあり、フィールドや対象魚によって使い分けられる^{(6), (7)}。

1) ダブルテーパー：DT



両端にテーパーがあり、溪流などの比較的短い距離に繊細にフライを落とすのに向いている形状のフライライン。片側の先端が消耗したらもう片側を使えるので経済的である。

2) ウェイトフォワード：WF



ダブルテーパーラインよりも遠投向きで、ラインの重量が前方に集中している。ラインの先端が太くその分重量も大きくなる。ウェイトフォワードラインは用途によって形状の異なるものもいくつかある。

3) シューティングテーパー：ST



ロングキャスト用のフライラインである。形状はウェイトフォワードラインの先端部と同じであるが、後端に径の小さいレベルラインをつないで使用する。

フライラインは AFTMA (American Fishing Tackle Manufactures Association) によって規格化されている。ライン先端 30ft の重さで #0 から #15 までの番号が付けられており、番号が小さいほど重いラインになる。この番号に対応してロッドを選択する。日本の溪流では #3~#5 が良いとされている。

フライラインはコア部とそれを覆うコーティング部の 2 層構造になっており、コア部はナイロンやポリエステル等を編んだものであり、コーティング部は塩化ビニールやポリウレタンなどで、フローティングラインの場合には内部に気泡をもうけ、シンキングラインの場合には、鉛やタングステンを混入させて比重を大きくしている。フローティングラインの場合、比重は 0.7~0.9 程度で、約 0.9 が一般的である。

実験で使用するフライラインは #4 のウェイトフォワード、フローティングラインで 3 M AirCell Supreme, WF4F を用いた。図 3 に一般的な WF ラインの寸法を示す⁽⁶⁾。

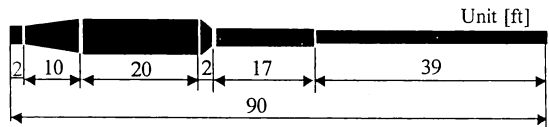


Fig.3 Fly line specimen

フライラインの縦弾性係数をラインの引張り試験から求める。引張り試験の結果は以下ようになった。

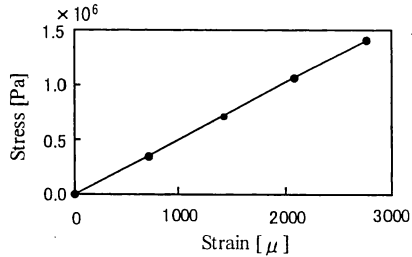


Fig.4 Strain-Stress Curve

試験の結果より、縦弾性係数は $E=0.51$ Gpa であった。

3. ロッドとラインの挙動解析

3・1 キャスティング実験 ロッドとラインの動的挙動を把握するとともに、数値計算における入力データを得るために、ロッドを振った時の角加速度を測定する。キャスト時のラインのループは図 5 (a) のようにロッドティップが直線上を運動するようにす

るとループの幅が狭くなり、空気抵抗が少なくラインコントロールが容易である。これに対し、図5(b)ではループの幅が広がるため、抵抗が大きく、ラインスピードが遅いので、コントロールは困難であるが、ソフトプレゼンテーションが行える。状況によってループ形状を変化させる必要があるが、通常はループ幅が狭くラインスピードが速い図5(a)が望ましいと考えられる^{(8),(9)}。そこで、本実験では、図5(a)のループになるようにラインコントロールを行った。

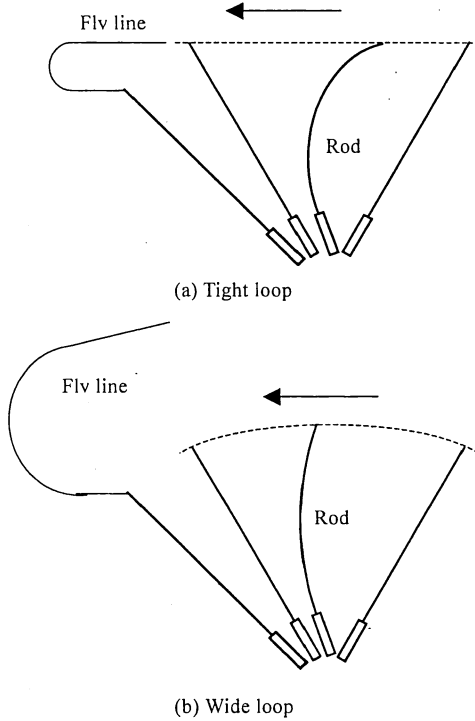


Fig.5 Casting mechanisms

図6に実験装置の概略図を示す。加速度計はロッドの根元に付いている。キャストデータは経験者から採取した。図7にラインの長さ（ロッドティップからライン端までの長さ）が5m、7m、9mにおけるロッド根元の角加速度波形を示す。これらの図はフォルスキャストを繰り返しているときのバック・フォワードキャストの1周期を示したものである。これらの図から、ラインが長くなるにつれて周期が長くなっていることがわかる。これは、フォワードキャストを開始する前にラインが後方に伸びないとラインに与えるエネルギーが少なくなるので、待ち時間を設けているためである。またラインが長くなるほど最大加速度は大きく、鋭い波形になっている。

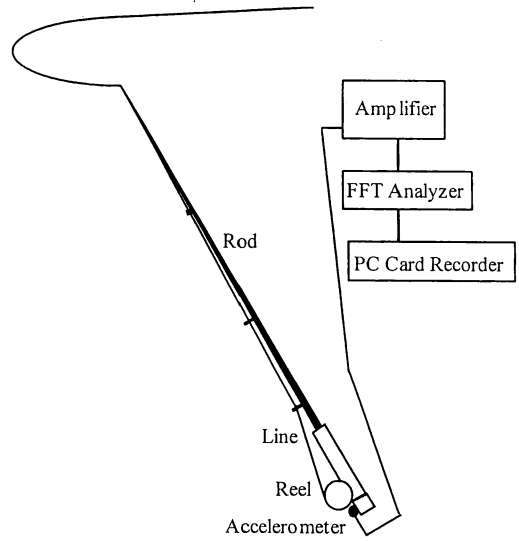


Fig.6 Testing equipment

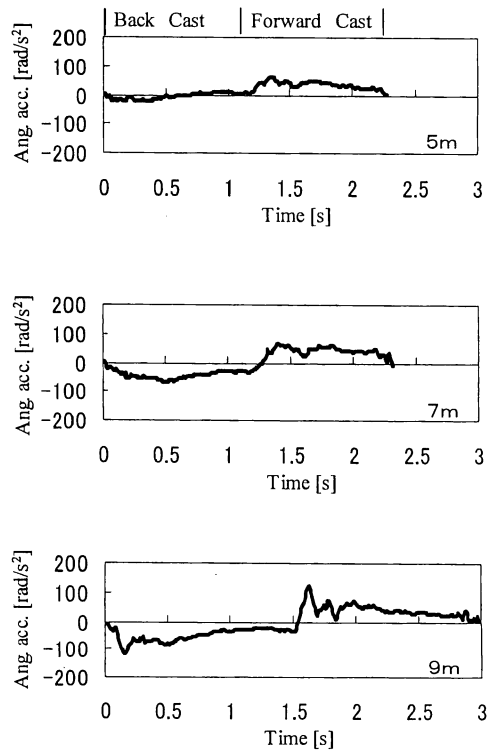


Fig.7 Angular acceleration of rod

3・2 ロッド・ラインのモデル化 ロッドおよびラインは、図8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^{(10)・(13)}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、またラインの伸びや空気抵抗は考慮しない。これらは今後の課題とする。

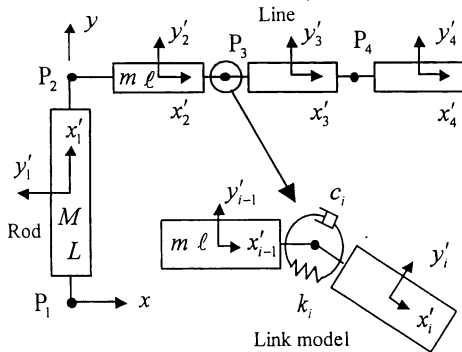


Fig.8 Model of rod and line

図8では、ロッドが1分割、ライン3分割となっているが、実際の計算ではロッドを20分割、ラインを49分割にした。ここで用いる記号を列挙する。

- i : 部材番号(1~n)
- m_i : 部材の質量
- J_i : 部材の慣性モーメント
- k_i : 回転ばね定数
- c_i : 回転減衰係数
- α : ロッドの角加速度
- l_i^L, l_i^R : 部材の長さ(重心から左, 右)
- $l_i = l_i^L + l_i^R$: 部材の長さ
- (x'_i, y'_i, ϕ_i) : 部材座標系

$\frac{\partial \Phi}{\partial q}, \Phi_q$: ヤコビアン

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

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

Q_r, Q_ϕ, Q : 一般化力

i 番目の部材上の重心位置に部材座標系を設け、一般化座標ベクトルは次式のようにする。

$$q = \{x_1, y_1, \phi_1, \dots, x_n, y_n, \phi_n\}^T \quad \dots\dots\dots (6)$$

部材 $i-1$ から部材 i の運動学的な拘束方程式は変位の連続条件から次の式で与えられる。

$$\Phi_{(i-1),i}^K = \begin{cases} x_{i-1} - l_{i-1}^R \cos \phi_{i-1} - x_i + l_i^L \cos \phi_i \\ y_{i-1} - l_{i-1}^R \sin \phi_{i-1} - y_i + l_i^L \sin \phi_i \end{cases} = 0 \quad \dots (7)$$

次に、駆動拘束を考える。ここでは部材1が角加速度 α で回転すると仮定する。 α を積分して求めた角度を $\theta(t)$ とすると、駆動拘束式は次のようになる。

$$\Phi^D = \{0, 0, \phi_1 - \theta(t), 0, \dots, 0\}^T = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって、全拘束式 Φ は次の式となる。

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \Phi^K \\ \Phi^D \end{Bmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

Φ を時間で微分すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_q \dot{q} &= -\Phi_t \equiv v \\ \Phi_q \ddot{q} &= -(\Phi_{qq} \dot{q} \dot{q} - 2\Phi_{q\phi} \dot{q} - \Phi_{\phi\phi} \dot{\phi} \dot{\phi} \equiv \gamma) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

部材 i における質量マトリクスは、

$$m_i = \text{diag}[m_i, m_i, J_i] \quad \dots\dots\dots (11)$$

であり、全質量マトリクスは

$$M = \text{diag}[m_1, m_2, \dots, m_n] \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。各部材間の回転ばねによる復元力、ダンパによる減衰力、および各部材に作用する重力を部材 i に作用する一般化力とすると

$$Q = \{Q_1^T, Q_2^T, \dots, Q_n^T\}^T \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。ここで、剛体が平面上を自由に運動しているとする。重心に座標系を置き重心に力とモーメントが作用するときの運動方程式を考え、その仮想仕事を考えると、

$$\delta q^T [M\ddot{q} - Q] = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。一方、式(9)のロッド・ラインの拘束条件から、

$$\Phi_q \delta q = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

が得られる。式(14)、(15)とラグランジュの乗数ベクトル λ を用いると、

$$[M\ddot{q} - Q]^T \delta q + \lambda^T \Phi_q \delta q = [M\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda - Q]^T \delta q = 0 \quad (16)$$

となる。式(16)が成り立つには

$$M\ddot{q} - Q + \Phi_q^T \lambda = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

でなくてはならない。式(10)と式(17)を連立させると次式のような運動方程式が得られる⁽¹⁴⁾。

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (18)$$

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⁽¹⁴⁾。

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & \Phi_r^T \\ 0 & M_\phi & \Phi_\phi^T \\ \Phi_r & \Phi_\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\phi} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_r \\ Q_\phi \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式(19)から \ddot{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。

$$M^* \ddot{\phi} = Q^* \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$M^* = M_\phi + \Phi_\phi^T (\Phi_r^T)^{-1} M_r \Phi_r^{-1} \Phi_\phi \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$Q^* = Q_\phi - \Phi_\phi^T (\Phi_r^T)^{-1} (Q_r - M_r \Phi_r^{-1} \gamma) \quad \dots\dots\dots (22)$$

式(20)を時間積分して各部材の角速度、角変位を求める。

3・3 シミュレーション結果 数値積分法はRunge-Kutta-Gill法を用い、MATLAB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、角度は実際のキャストイングを参考に水平方向に対して0度にした。サンプリングは実験に合わせて100Hzとし、オーバーサンプリングを100回行っている。1000回の場合と比較したが顕著な差がみられなかったため、100回とした。ロッドは実験と同様のロッドをモデル化

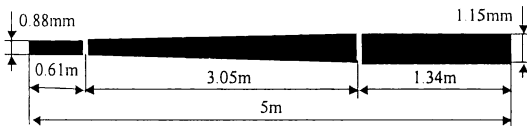


Fig.9 Shape of fly line on simulation

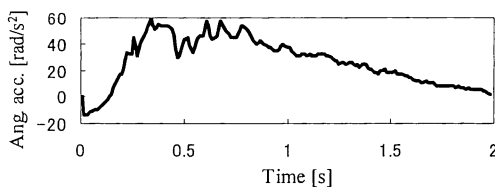


Fig.10 Input acceleration (5m)

し、ラインの寸法は5mの場合図9に示すように実験で用いたラインと同じにしている。比重は実験より0.89であった。

実験では、ひじをテーブルの上に乗せ、ロッド・腕の回転中心を一定にした。腕は剛体としてモデル化している。図10に計算で用いた角加速度波形を示す。この図はラインおよびロッドが停止している状態からバックキャストとフォワードキャストを1回行ったときのフォワードキャストのデータで、ライン5mの場合である。

計算結果の例として、図11にライン5m、7mにおけるロッドおよびラインの軌跡を示す。これらの図は0.05秒ごとのロッド・ラインの形状を時刻歴で示したものである。また、実際のキャストイングにおけるラインの飛行モード(5mの場合)を図12に示す。

計算結果を実験結果と比較すると、ループの大きさが若干異なっている。これは計算におけるロッドの初期角度やたわみ、初期ライン形状が実験と異なっていたためである。また、ラインの伸びや空気抵抗、風の影響なども原因である。

しかし、計算結果はラインのループ形状をおおむねシミュレートできていると考えられる。

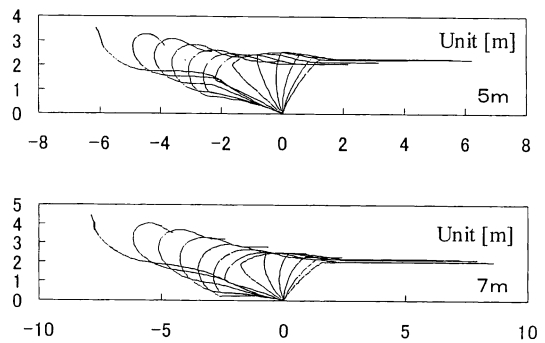


Fig.11 Casting shape of rod and line (Analysis)



Fig.12 Casting shape of rod and line (Experiment)

4. 結 言

本研究で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。

[1]キャストイングの実験より以下の結果が得られた。

- 1) ラインの長さによって加速を加える時間、加速度の大きさ、ラインが伸びるまでの待ち時間の変化がわかった。

[2]剛体リンクモデルを用いた数値解析から以下の結果が得られた。

- 1) ロッド・フライラインの運動学的モデルを作成した。
- 2) ロッド・フライラインの数値シミュレーションを行い、実験結果と比較したところ、計算結果はフライラインの飛行モードを良好にシミュレートしていることがわかった。

参 考 文 献

- (1) 有隅仁・神徳徹雄・小森谷清, キャスティングマニピュレーションに関する研究 (第1報, 可変長のひも状柔軟リンクを有するマニピュレータの提案とそのスイング制御法), 機論, 64-626, C(1998), 162-169.
- (2) 有隅仁・横井一仁・神徳徹雄・小森谷清, キャスティングマニピュレーションに関する研究 (第2報, スイング動作の制御実験とグリッパの投射動作), 機論, 65-639, C(1999), 118-125.
- (3) 能見公博・Dragomir N. NENCHEV・内山勝, キャスティングにおけるテザー宇宙ロボットの運動制御, 機論, 66-647, C (2000), 141-147.
- (4) 椎名重明, 英国のフライフィッシング史, (1999), つり人社
- (5) 増沢信二, フライフィッシング・マニュアル, (2000), 山と溪谷社.
- (6) S・アンダーソン・田渕義雄, フライフィッシング教書, (1984), 晶文社
- (7) FLY FISHING CATALOG 2000, TIEMCO
- (8) Charles Ritz 著, 柴野邦彦訳, A FLY FISHER'S LIFE, (1997), ティムコ
- (9) Mel Krieger 著, 東知憲訳, The Essence of Flycasting, (1995), つり人社.
- (10) Graig A. Spolek, The mechanics of flycasting: The flyline, American Association of Physics Teachers, 54(9), (1986), 832-836.
- (11) J. A. Hoffmann and M. R. Hooper, Fly rod response, Journal of Sound and Vibration 209(3), (1998), 537-541.
- (12) J. A. Hoffmann and Matthew R. Hooper, Fly rod performance and line selection, Proceedings of DETC' 97, 1-8.
- (13) John M. Robson, The physics of fly casting, American Association of Physics Teachers, 58(3), (1990), 234-240.
- (14) 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), 54-59.