

## フライラインの力学\*

### (リバウンドを考慮した解析)

渡邊鉄也<sup>\*1</sup>, 清野竜二<sup>\*2</sup>, 田中基八郎<sup>\*1</sup>

## Dynamics of a Fly Line (Effect of the Rebound)

Tetsuya WATANABE<sup>\*3</sup>, Ryuji SEINO and Kihachiro TANAKA

<sup>\*3</sup> Division of Mechanical Engineering and Science, Saitama University,  
255 Shimo-Okubo, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Lure fishing and fly-fishing have been positioned as sports deliberately different from the traditional Japanese fishing-style. In the case of fly-fishing, casting is the element which anglers must master in order to cast a fly, done so by using the weight of a line. This study uses experimental and computational analysis to investigate the dynamic behavior of a fly line. Fly-fishing constitutes various elements, but the importance that casting holds is extremely large. 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. However, it is difficult to grasp the phenomenon or to make a numerical model because a fly line is an object of flexible string. Therefore, the most suitable casting method will be clarified from the viewpoint of sports engineering and human dynamics. In addition, measuring an angler performing movements with a flexible object such as a rod or a line is difficult. So establishing a method to measure the dynamic behavior precisely is also one of the purposes of this study. The rebound phenomenon occurs in the casting process. In this paper, the effect of rebound is investigated analytically.

**Key Words:** Fly Line, Fly Rod, Fly-casting, Rebound, Casting System

### 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。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。キャストで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とされている。したがって、キャスト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、本研究は、スポーツ工学、人間工学的な観点からキャストにおけるライン挙動を明らかにすることを目標としている。

筆者らは、フライキャストにおいて、リバウンド現象が生じることを実験的に発見した。また、フライフィッシングの専門誌<sup>(1)</sup>においてもリバウンド現象について記述がなされている。これは、キャスト後にロッドの角速度が再度増加する現象である。ここでは、特にリバウンドに着目し、数値シミュレー

\* 原稿受付 2006年6月2日。

<sup>\*1</sup> 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科(☎338-8570 さいたま市下大久保255)。

<sup>\*2</sup> 埼玉大学大学院理工学研究科。

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

ションから現象およびキャストイングへの影響などを明らかにする。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はさまざまあるが<sup>(2)-(12)</sup>、リバウンド現象の検討はなされていないのが現状である。

## 2. ロッドとラインのモデル

**2・1 ロッド・ラインの構造** 本研究で用いたロッドは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219.7cm、総重量は61.4g、密度は1540kg/m<sup>3</sup>である。フライフィッシングのタックルは図1に示すように、リール、ロッド、ライン、リーダ、ティペット、フライの6要素で構成されている。

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<sup>(13)</sup>。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<sup>(13),(14)</sup>。数値シミュレーションで使用するフライラインは実験<sup>(15)</sup>と同様に、#5のダブルテーパー、フローティングラインで3M Ultra<sup>3</sup>, DT5Fを用いた。ラインの比重は0.902。テーパーの最も太い部分の直径が1.15mm、最も細い部分の直径が0.88mmである。図2に一般的なDTラインの寸法を示す<sup>(14)</sup>。

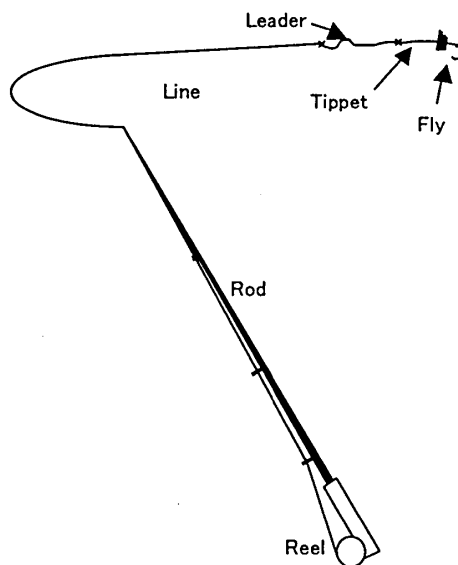


Fig.1 Tackle

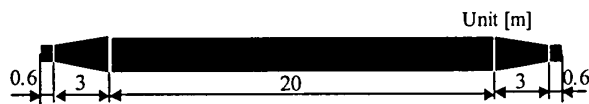


Fig.2 Fly line specimen (DT line)

**2・2 ロッド・ラインのモデル化** ロッドおよびラインは、図3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<sup>(2)-(12)</sup>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、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。ここでは、過去の研究<sup>(15)(16)</sup>においてキャストイング実験と数値シミュレーションの比較検討により妥当性が確認されたモデルを用いる。図3では、ロッドが3分割、ラインが3分割となっているが、実際の計算ではロッドを20分割、ラインは約10cmごとの要素に分割した。ロッドおよびラインの縦弾性係数は過去の研究<sup>(15)</sup>に基づき、それぞれ51Gpa、0.05Gpaとした。各要素の減衰係数は実験により求めることが困難であるため、ここでは微小な値として10<sup>-6</sup>[Nms/rad]を用いた。

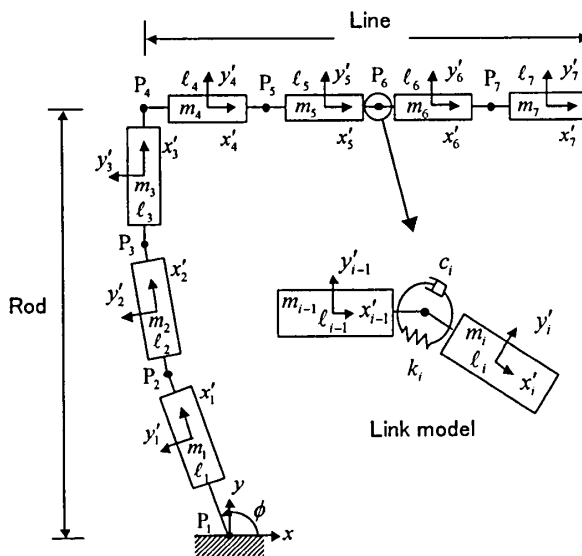


Fig.3 Model of rod and line

また、ラインの長さは5mとした。

運動方程式は次のようになる<sup>(17)</sup>。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

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<sup>(15)</sup>。

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

式(2)から $\ddot{\mathbf{r}}$ 、 $\lambda$ 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。

$$\mathbf{M}'\ddot{\phi} = \mathbf{Q}' \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\mathbf{M}' = \mathbf{M}_\phi + \Phi_\phi^T(\Phi_r^T)^{-1}\mathbf{M}_r\Phi_r^{-1}\Phi_\phi \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\mathbf{Q}' = \mathbf{Q}_\phi - \Phi_\phi^T(\Phi_r^T)^{-1}(\mathbf{Q}_r - \mathbf{M}_r\Phi_r^{-1}\gamma) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(3)を時間積分して各部材の角速度、角度を求める。ここで、

- $\mathbf{M}$  : 質量行列
- $\mathbf{q} = \{\mathbf{r}^T \ \phi^T\}^T$  : 一般化座標行列
- $\Phi$  : 運動学的拘束式
- $\Phi_q$  : ヤコビアン
- $\lambda$  : 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。数値シミュレーションでは、ロッドのグリップ側の端である要素1を実験から得られた時刻歴角度で駆動拘束した。

2・3 空気抵抗について 筆者らの過去の研究<sup>(16)</sup>

において、空気抵抗は各要素に空気が衝突すると考え、要素ごとのレイノルズ数を算出し、抵抗係数を求め、一般化力として運動方程式に代入していた。ここでは、円柱に作用する空気抵抗を仮定し、 $x$ 方向、 $y$ 方向の分力を求めており、要素が軸方向に飛行した場合には空気抵抗が作用していなかった。そこで、本研究では、空気抵抗 (Form drag) と表面摩擦 (Skin friction) を考慮する。また、過去の研究<sup>(18)</sup>より、レイノルズ数は約600~1000であることから、抵抗係数は約1で

ある。そこで数値解析において抵抗係数は一定値とする。図4に要素の速度方向と要素座標の分速度の関係を示す。要素座標における空気抵抗と表面摩擦は式(6)のように表され、全体座標における力は式(7)となる。これらの力を一般化力として式(2)に代入する。

$$\begin{cases} F'_x = -C_{DR} \frac{1}{2} \rho v_x'^2 l d \pi \text{sign}(v'_x) \\ F'_y = -C_{DN} \frac{1}{2} \rho v_y'^2 l d \text{sign}(v'_y) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F'_x \\ F'_y \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

- $C_{DR}$  : 表面摩擦における係数
- $C_{DN}$  : 空気抵抗における係数
- $\rho$  : 要素の密度
- $l$  : 要素の長さ
- $d$  : 要素の直径
- sign : 符号関数

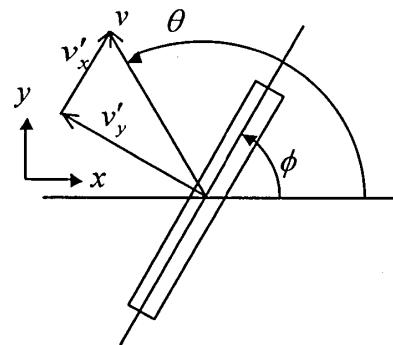


Fig.4 Direction of velocity

3. ロッドとラインの挙動解析

3・1 表面摩擦による挙動の違い 表面摩擦の係数は小さく、0.05 付近であると言われている。そこで、表面摩擦係数による比較を行った。図5は、横軸および縦軸を長さ[m]にして0.1秒ごとのロッドおよびラインの形状を描いたものである。これらの図から、表面摩擦係数 $C_{DR}$ が0.06の場合にラインの乱れが少ないことから、今後の数値シミュレーションでは、 $C_{DR} = 0.06$ を用いることとする。

**3・2 リバウンド現象** 図6にフォワードキャストしたときの角速度波形と角加速度波形を示す。角速度の時刻歴波形にはピークが2つあることがわかる。1つめのピークはキャスト中の最大角速度を示しており、2つめのピークはキャスト後に生じている。角加速度波形に注目すると、負の最大加速度が生じている時刻でロッドの振りを意識的に停止させる。この部位をロッドストップと呼ぶ。

その後、ロッド、腕、ラインの慣性により角速度は正の値となっているが減少する。その後、角速度が増加しピークを迎えて減少している。この現象をリバウンドと呼ぶ。図7はキャスト中の状態を示したものであるが、ロッドストップの時にロッドは変形しており、その後リバウンド現象が生じている。この現象はラインやロッドの慣性力、空気抵抗によりロッドが変形し、その復元力が腕に作用して生じる運動である。

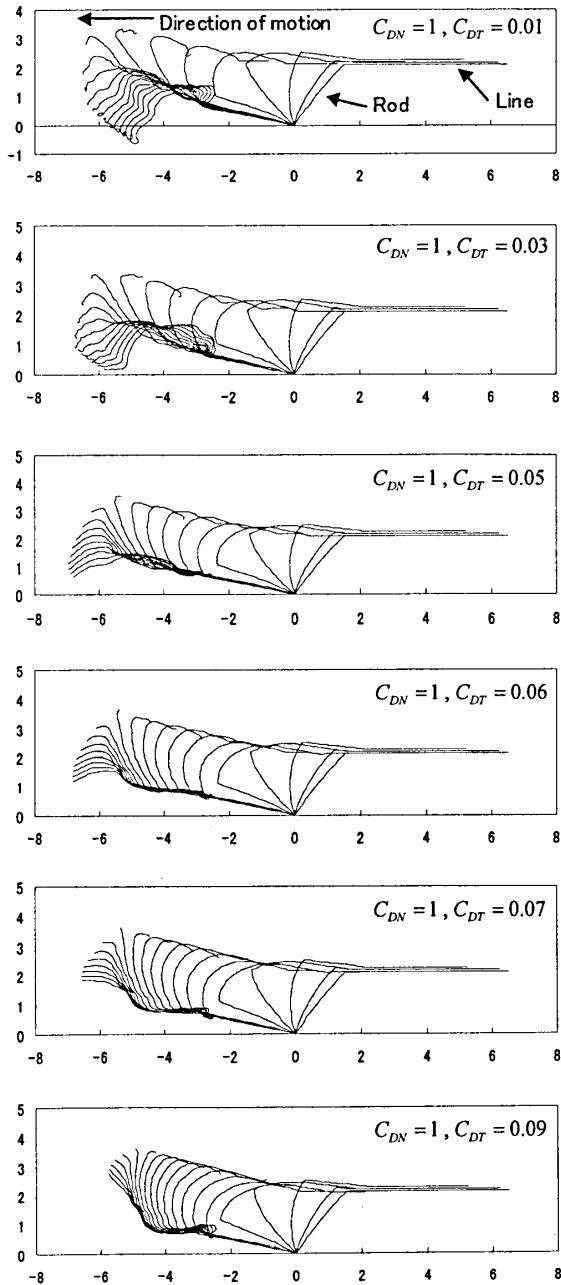


Fig.5 Behavior of rod and line with respect to  $C_{DR}$

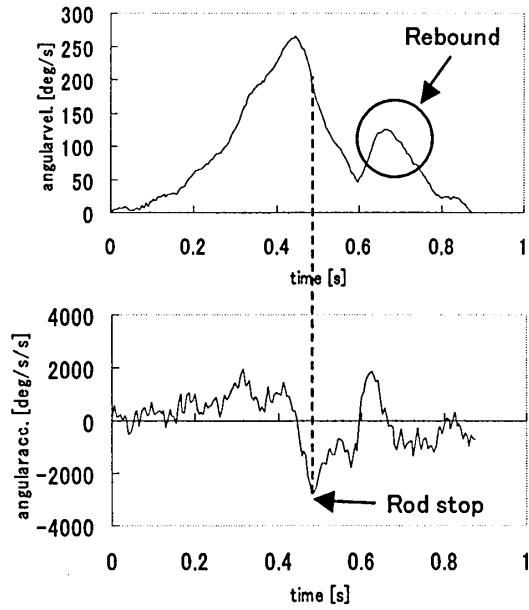


Fig.6 Rebound

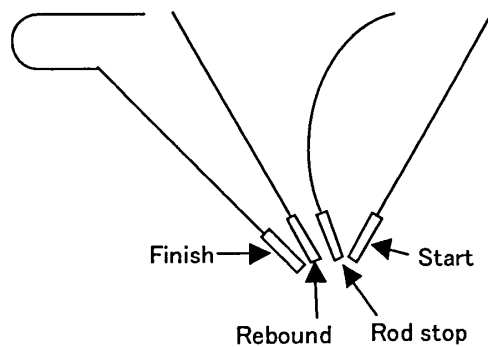


Fig.7 Casting condition

**3・3 ラインテーパによる違い** フライラインはターンオーバーしやすいようにテーパが付けれられているが、テーパの形状によるラインの飛行状態に関する研究はなされていない。そこで、ここでは図8に示す5種類のテーパ形状について数値シミュレーションを行った。図の左がロッド側、右がフライ側である。No.1が通常使用されているラインのテーパ形状である。図9はシミュレーションで使用した入力角速度であり、実験により得られた角速度データからノイズを除去して平滑化したものである。したがって、リバウンドが考慮されている。図10にテーパによるラインの飛行形状を示す。これらの図の横軸および縦軸は長さ[m]であり、0.1秒ごとのラインおよびロッドの形状を示したものである。キャスト後にロッドの残留振動が大きいと、ラインが波打ち、ラインコントロールに影響を及ぼすため、残留振動が小さいテーパが良いことになる。残留振動が最も小さいのはNo.1であり、通常用いられているラインのテーパ形状が良いことがわかった。

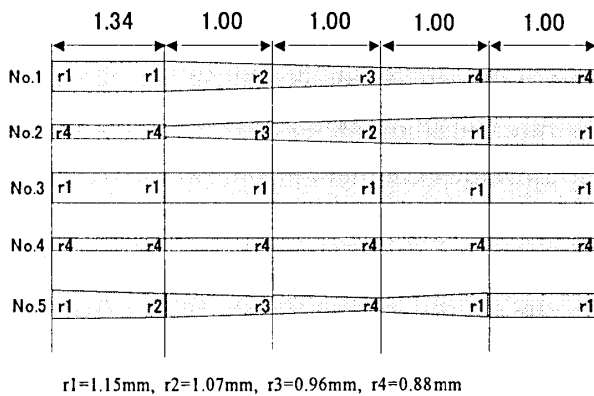


Fig.8 Line taper

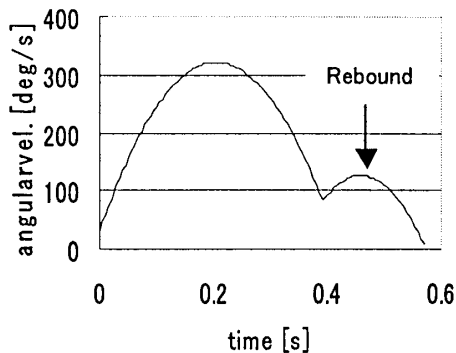


Fig.9 Angular velocity of rod

**3・4 ライン初期形状による比較** フォワードキャストを行なう直前のラインの形状により、キャスト後の飛行形状がどのように異なるか調査した。入力角速度は図9と同じにした。図11にラインの初期形状による飛行形状の比較図を示す。横軸および縦軸は長さ[m]である。No.1やNo.4はループの幅が広がるため、一般的にラインコントロールが困難で、飛行距離が短い。したがって、フォワードキャスト開始時にラインがロッドの先端より低い位置にあると、ループの幅が広くなり、飛行距離が短くなる。これに対し、ラインがロッド先端より高い位置にあると、ループ幅が狭く飛行距離が長く、コントロールがしやすい。そこで、ラインがロッド先端より高い位置となる、No.2, No.3, No.5, No.6を比較するとNo.2とNo.6はライン先端が湾曲しており、飛行形状としては好ましくない。No.3とNo.5を比較すると、No.3の方がループ幅が広い。したがって、ラインの初期形状はNo.5に近くなるのが好ましいことがわかる。

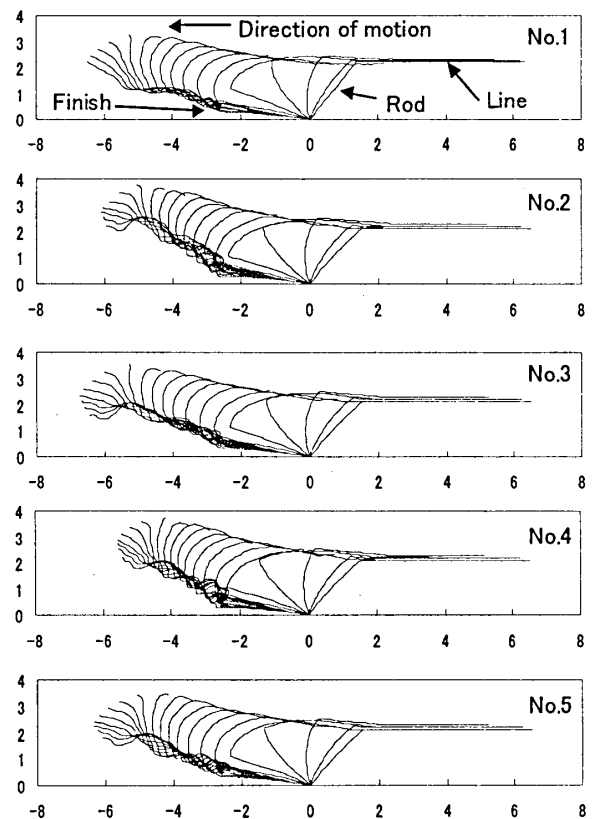


Fig.10 Behavior with respect to taper

**3・5 リバウンドによる比較** ここでは、リバウンドの効果について検討する。図12にリバウンドが無い場合のロッド、ラインの挙動を示す。(a)は飛行形状、(b)は0.2秒後および0.46秒後にロッドおよびラインに作用している力であり、線の長さが大きさを示している。0.46秒後はキャスト終了時である。図13はリバウンドが有る場合の挙動である。図12(a)、図13(a)を比較すると、リバウンドが有る場合の方がロッドの残留振動が少なく、ラインの乱れが少ないことがわかる。また(b)に注目すると、0.2秒後に作用している力

は等しい。これに対し、0.46秒後ではリバウンドが有る場合、ロッドおよびラインに作用する力は大きく、また、前方に向いていることがわかる。以上のことから、リバウンドが有ると、キャスト後のロッドの残留振動が低減するとともに、運動方向に作用する力が働く効果があることがわかる。

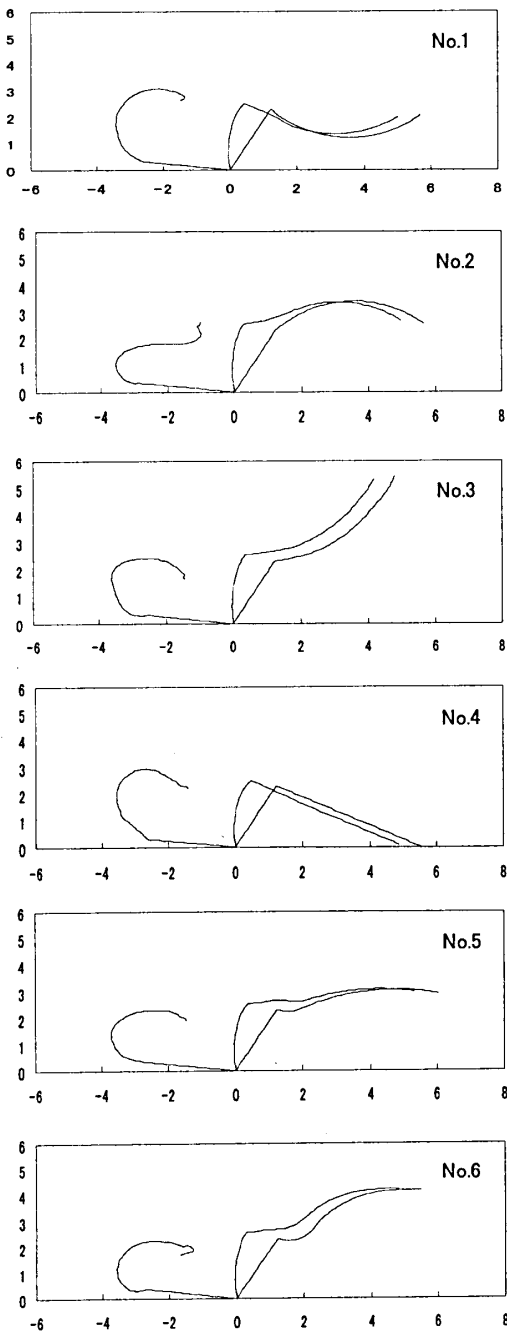
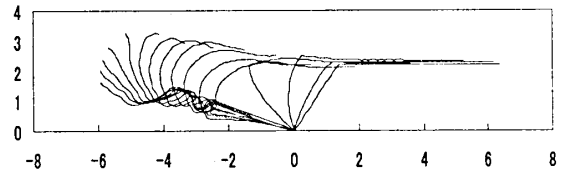
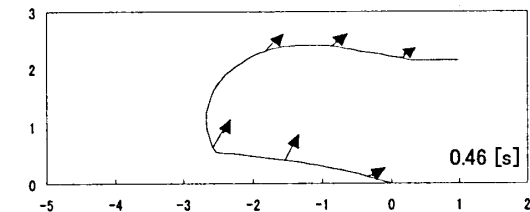
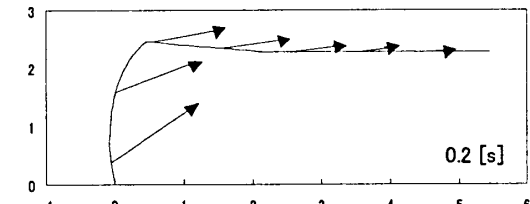


Fig.11 Initial line shape

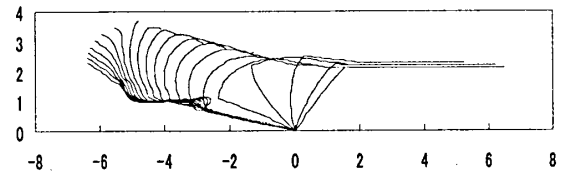


(a) Time history behavior

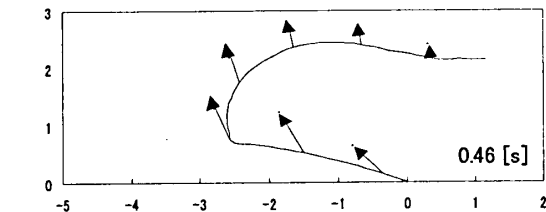
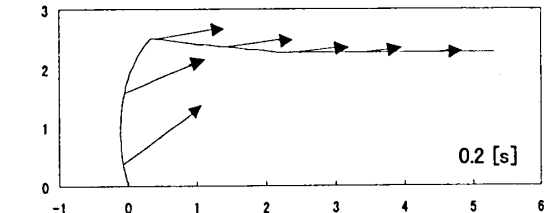


(b) Force acting on rod and line

Fig.12 Behavior of rod and line without rebound



(a) Time history behavior



(b) Force acting on rod and line

Fig.13 Behavior of rod and line with rebound

## 4. 結 言

フライキャストにおいて、リバウンド現象が生じることを発見した。これは、キャスト後にロッドの角速度が再度増加する現象である。本研究では、特にリバウンドに着目して数値シミュレーションを行い、リバウンドの効果について検討した。本研究の範囲内において以下の結果が得られた。

- (1) フライラインのテーパはロッド側が太く、フライ側が細いのが良い。
- (2) フォワードキャスト開始時におけるライン初期形状は No.5 が良い。
- (3) リバウンドは、キャスト後のロッドの残留振動を低減する効果がある。
- (4) リバウンドにより、ラインに運動方向に作用する力が作用する。

## 参 考 文 献

- (1) N.Perkins and B.Richards, Understanding your casting stroke, FLY FISHERMAN, Dec.2003,(2003),pp.34-37.
- (2) Graig A. Spolek, The mechanics of flycasting: The flyline, *American Association of Physics Teachers*, 54(9),(1986),832-836.
- (3) John M. Robson, The physics of fly casting, *American Association of Physics Teachers*,58(3), (1990),234-240.
- (4) 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.
- (5) J.J.Burgess, Bending stiffness in a simulation of undersea cable deployment, *International Journal of Offshore and Engineering*, 3-3,(1993),197-204.
- (6) 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.
- (7) J.A.Hoffmann and Matthew R.Hooper, Fly rod performance and line selection, *Proceedings of DETC'97*, 1-8.
- (8) J.A.Hoffmann and M.R.Hooper, Fly rod response, *Journal of Sound and Vibration* 209(3),(1998), 537-541.
- (9) S.Lingard, Note on the aerodynamics of a flyline, *Am.J.Phys*, 56-8, (1998),756-757.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) M.A.Hendry and M.Hubbard, Effect of rod taper on fly casting performance, *The engineering of SPORT4*, (2002), Blackwell publishing.
- (13) Masuzawa,S.,Fly fishing manual,(2000), *Yama-kei Publishers co.,Ltd.*
- (14) S.Anderson,Tabuchi,Y.,Fly fishing text,(1984), *Shobunsya*.
- (15) Watanabe,T., Tanaka,K., Dynamics of Fly line -Modelling and analysis-, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.69, No.680(2003),pp.229-235.
- (16) Watanabe,T., Tanaka,K., Dynamics of Fly Line -Modelling a rod and a line with fixed wrist-, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.70, No.690(2004), pp.516-522.
- (17) E.J.Haug, Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Taiga Shuppan,(1996),pp.203.
- (18) Watanabe,T., Tanaka,K., Dynamics of Fly Line -Casting experiment with fixed wrist-, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.70, No.690(2004),pp.508-515.