

フ ラ イ ラ イ ン の 力 学*
(ダブルホールキャストの検討)渡 邊 鉄 也*¹Dynamics of a Fly Line
(Double Haul Cast)Tetsuya WATANABE*²^{*2} 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. Anglers usually do "double haul cast" in the actual fishing field in order to put a fly for long distance and in order to control the line orbit. "Haul" means pulling the line compulsory. This technique increases the line speed and kinematical energy. Therefore, the line flies long distance. In this paper, the effect of "Haul" is investigated.

Key Words: Fly Line, Fly Rod, Fly-Casting, Arm Motion, Haul

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、本研究はキャストイング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。

筆者らの過去の研究⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾では、リバウンドを考慮した実験および解析を行い、その効果を明らかにする、あるいは、上腕、前腕、手首の運動を考慮した実験および解析を行い、実際のキャストイングを考慮した検討を行ってきた。しかし、より飛距離を伸ばしたり、ラインコントロールを容易にしたりする方法として、

* 原稿受付 2007年10月3日。

^{*1} 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)。

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

通常、ダブルホールキャストが用いられている。過去の研究^{(8)・(18)}では、ダブルホールキャストは全く検討されていないが、キャストイングにおいて非常に重要なテクニックの1つである。そこで、本研究では、ダブルホールキャストでなされているホールに注目し、その効果について検討する。

2. ダブルホールキャスト

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1540 kg/m³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⁽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)}。キャストイング実験で用いるラインは、5番（#5）のダブルテーパー（DT）、フローティングライン（F）で3M製 Ultra³, DT5Fである。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に一般的なダブルテーパーラインの寸法を示す⁽⁷⁾。

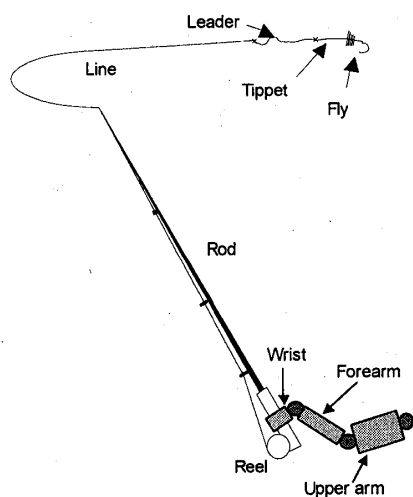


Fig.1 Tackle

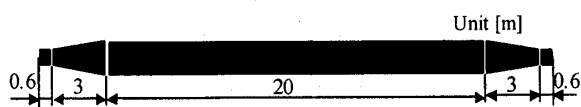


Fig.2 Fly line specimen (DT line)

2.2 キャスティング実験 上腕、前腕、ロッドのグリップ部に角速度計を設置し、フォワードキャストをしたときの時刻歴角速度を測定した。上腕の角速度計は肘から10cm、前腕の角速度計は手首から6cm、ロッドの角速度計は掌中央から6cmに設置した。掌とロッドは相対運動しないものとした。上腕、前腕の長さは25cm、24cm。手首からロッドまでの長さは5cmであった。角速度計はSilicon Sensing Systems製 CRS03-11 (max.±573deg/s)を用いた。風の影響を無くするため、測定は体育館で行い、経験者にキャストしてもらった。また、ラインの挙動を把握するため、リーダ、ティペット、フライは設置しなかった。ラインの長さは測定場所の制限から5m,7m,9mとした。それぞれの長さのキャストイングは3回行った。被験者は直立不動とし、肩、肘、手首の関節のみが運動するようにした。キャストイングの初期条件として、ラインはロッド後方に一直線になるようにし、その状態からキャストイングを開始した。

2.3 ダブルホールキャスト ダブルホールキャストのホール(Haul)とはラインを引くという意味である。バックキャストとフォワードキャストからなる1回のフォルスキャストにおいて、2回ラインを引くため、ダブルホールキャストと呼ばれている。実際のフィッシングフィールドでは、目標とする位置にフライを着地させるため、フォルスキャストにおいて、ラインを伸ばしている。このとき、ホールを行うと、ラインの速度を増加させることができ、よりタイトなループを実現できる。また、フォルスキャスト中にフライを飛ばす方向の修正を容易に行うことができる。したがって、ダブルホールキャストはフライフィッシングを行う上でマスターしなくてはならないテクニックである。

図3にダブルホールキャストの一連の流れを示す。

(1)はバックキャストを行う初期段階である。バックキャストを開始すると同時に、(2)のようにロッドのガイドとリールの間のラインを下方に引く。これにより、ラインの速度が増加する。同時にリールからラインを出すようにする。次にロッドをストップさせ、ラインが後方に飛んでいき、ラインが後方に伸びきる直前に(3)の矢印のようにラインもどす。このとき、リールから出したラインももどすと、ラインが長くなる。また、ロッドストップのときに、リバウンドが大きく生じることが望ましい。次に、(4)のようにラインが後方に伸びきったらフォワードキャストを行う。バックキャストと同様にキャストを始めると同時に(5)のようにラインを下方に引き、(6)のようにロッドをストップさせ、その後ラインをもどす。したがって、これら一連の動

作において、1回のフォールキャストで、2回のホールを行っていることになるので、ダブルホールキャストとなる。本研究で行う実験および解析では、ホールの効果を検討するため、フォワードキャストに注目した。したがって、ホールは1回とする。

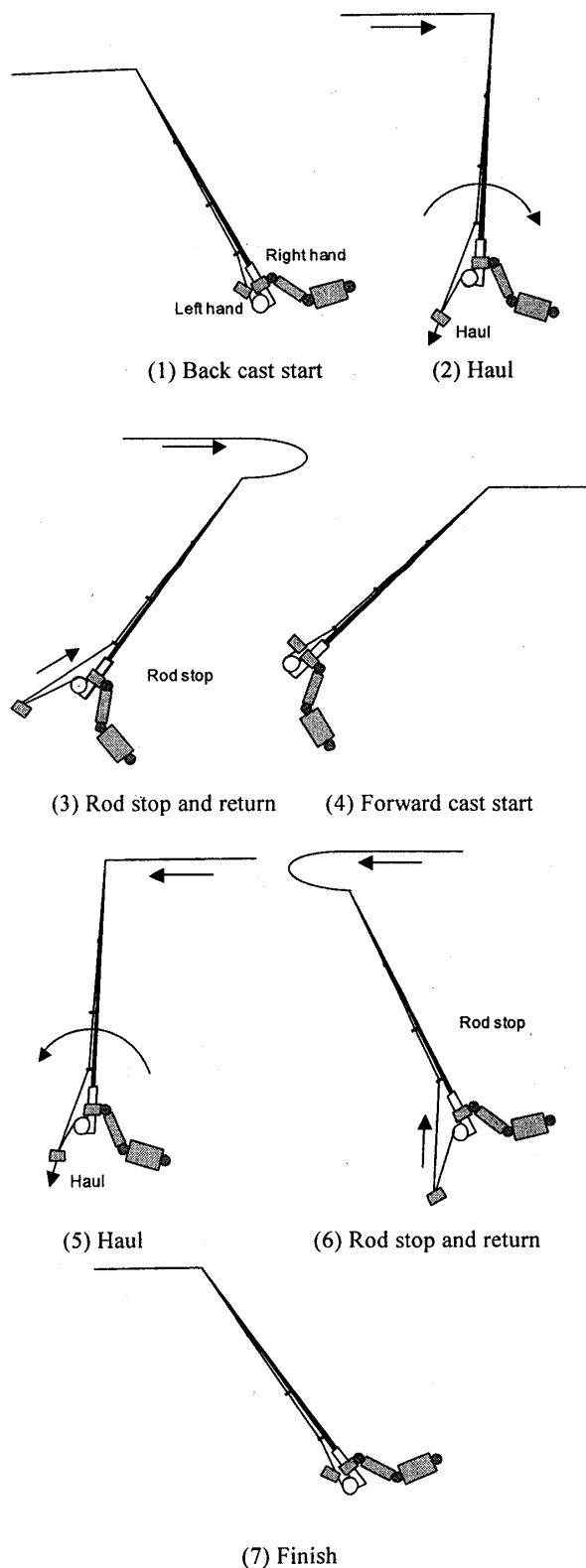


Fig.3 Double haul cast

3. ロッドおよびラインの解析モデル

3・1 シミュレーションモデル 腕およびロッド、ラインは、図4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⁽⁵⁾。図4では、ロッドが4分割、ラインが5分割となっているが、実際の計算ではロッドおよびラインを約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⁽⁵⁾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^{-3} [Nms/rad]を用いた。腕の長さは被験者を測定して得られた値を用いた。

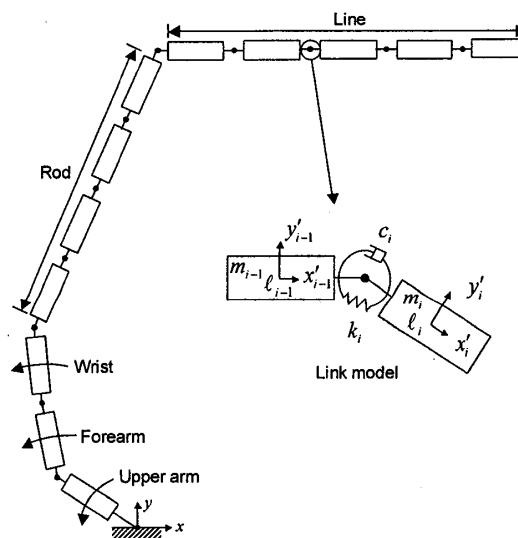


Fig.4 Model of arm, rod and line

運動方程式は次のようになる⁽¹⁹⁾。

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

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。

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

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

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

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

$$\mathbf{Q}^* = \mathbf{Q}_\phi - \mathbf{\Phi}_\phi^T (\mathbf{\Phi}_r^T)^{-1} (\mathbf{Q}_r - \mathbf{M}_r \mathbf{\Phi}_r^{-1} \gamma) \quad \dots\dots\dots (5)$$

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、

M : 質量行列

$q = \{r^T \ \phi^T\}^T$: 一般化座標行列

Φ : 運動学的拘束式

Φ_q : ヤコビアン

λ : ラグランジュ乗数ベクトル

Q_r, Q_ϕ, Q : 一般化力

$r = \{x_1 \ y_1 \ \dots \ x_n \ y_n\}^T$: 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

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

である。数値シミュレーションでは、上腕、前腕、手首を実験から得られた時刻歴角度で駆動拘束した。

3・2 ホール量の測定 解析においてラインを引く長さ（以降、ホール量と称す）を考慮するため、実験において、ホール量を測定した。ラインを引く、あるいは、もどす動作をするため、ラインに作用する軸方向の抵抗は、ラインとロッドのガイドとの接触程度しか生じないようにしなければならない。したがって、ローラやロータリーエンコーダのような装置を用いることはできない。そこで、図5のような装置で測定を行った。

図5(a)は直径11mm、厚さ18mmの硬質プラスチックの中央に直径2mmの穴が空いているもので、ラインはこの穴を通る。ラインは5mm間隔の黒色になっており、穴と通過するときの反射光をフォトトランジスタ(TPS603A)で検出している。光源は赤色高輝度発光ダイオード(25cd)を2個用いた。この装置をロッドグリップ側のガイドに設置した。

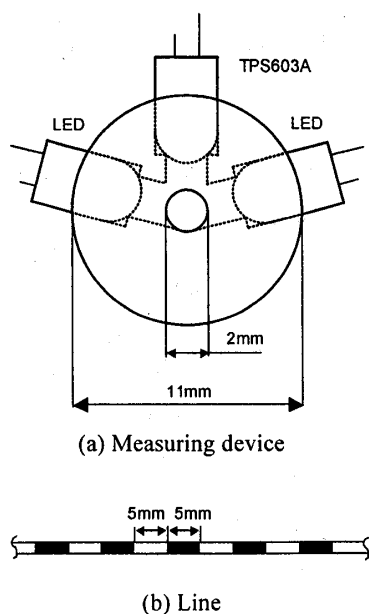


Fig. 5 Measuring apparatus

3・3 腕の角速度およびホール量 実験から得られた角速度やホール量にはノイズや人間による誤差が含まれている。また、シミュレーションを行う上で、角度と角加速度が必要であり、実験データを積分、微分するとノイズや誤差により適切な値が得られない。そこで、時刻歴角速度を数式でモデル化することを試みる。時刻歴角速度を数式で近似できれば、ノイズや誤差の影響を除去することが可能となる。過去の研究⁽⁵⁾では、腕の角速度のみであったが、ここでは、ホール量も数式で近似する。角加速度およびホール量は式(6)で近似することにする⁽⁵⁾。

$$v(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\beta_3^{(i)}}{\sqrt{2\pi\beta_2^{(i)}}} \exp\left(-\frac{(t-\beta_1^{(i)})^2}{2\beta_2^{(i)}}\right) \dots\dots\dots(6)$$

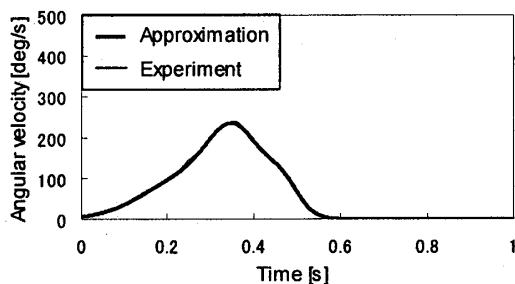
式(6)の β_1 , β_2 , β_3 はそれぞれ、時間のずれ、ピークの鋭さ、最大値を調整するパラメータとなっている。

図6に実験結果と式(6)を用いて近似した時刻歴角速度を示す。ライン長さは9mの場合で、それぞれ、上腕、前腕、手首の角速度およびホール量を示す。これらの図から、式(6)を用いて近似した値は実験結果と良好に一致していることがわかる。

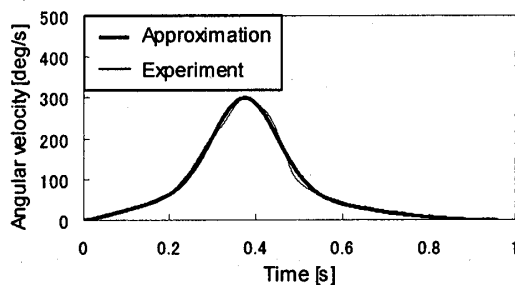
3・4 実験結果と解析結果の比較 図7、図8に実験結果と解析結果の一例を示す。図7はラインの長さが5mの場合で、キャスト開始0.4秒後のロッドおよびラインの形状を示したものである。実験結果はビデオカメラで撮影した画像から求めた。カメラフレームの制限で、ラインが伸びきった状態まで撮影することができず、0.4秒後の形状を比較した。図8はラインの長さが9mの場合で、キャスト開始0.7秒後のロッドおよびライン形状を示したものである。入力の前節で得られた時刻歴角速度およびホール量を用い、ホールが有る場合の実験結果と解析結果を比較している。

両図ともライン先端付近で、実験と解析が一致しておらず、解析結果の方が早く落下している。これは、ラインの初期状態が異なったためと考えられる。すなわち、解析では、ラインは直線に伸びているのに対して、実験ではラインの先端を人間が把持したため、若干のたるみが生じていたことと、人間がラインを離すタイミングが解析とずれていたことによる誤差である。特に、人間がラインを離すタイミングが若干遅いため、ロッドを振り始めた後でラインを離しており、実験では解析に比べて落下が遅かったと考えられる。

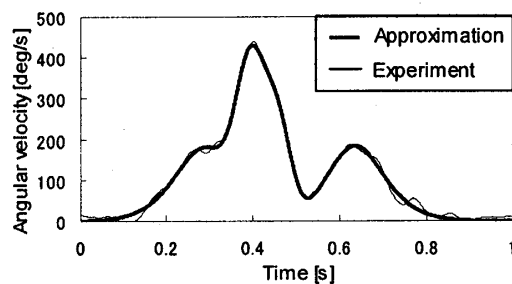
しかし、両図とも、ループの先端の位置は一致していることがわかる。また、全体的なループ形状も似ていることから、本研究で用いた解析モデルは妥当であると考えられる。



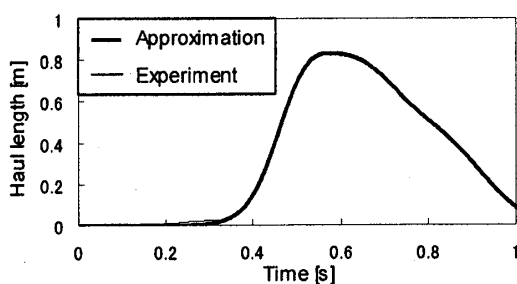
(a) Approximation angular velocity of upper arm



(b) Approximation angular velocity of forearm



(c) Approximation angular velocity of wrist



(d) Approximation haul length

Fig.6 Input data for simulation

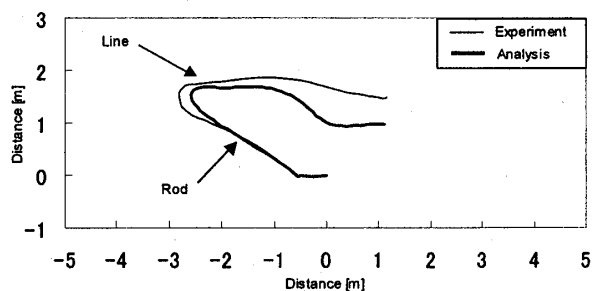


Fig.7 Comparison of behavior (line length 5m)

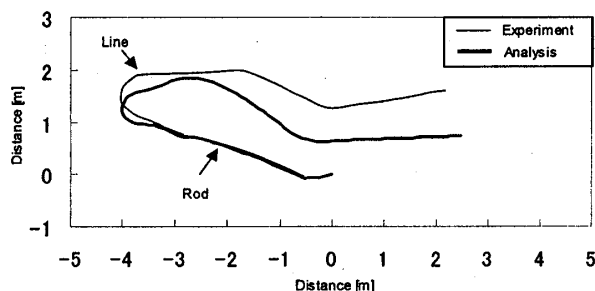


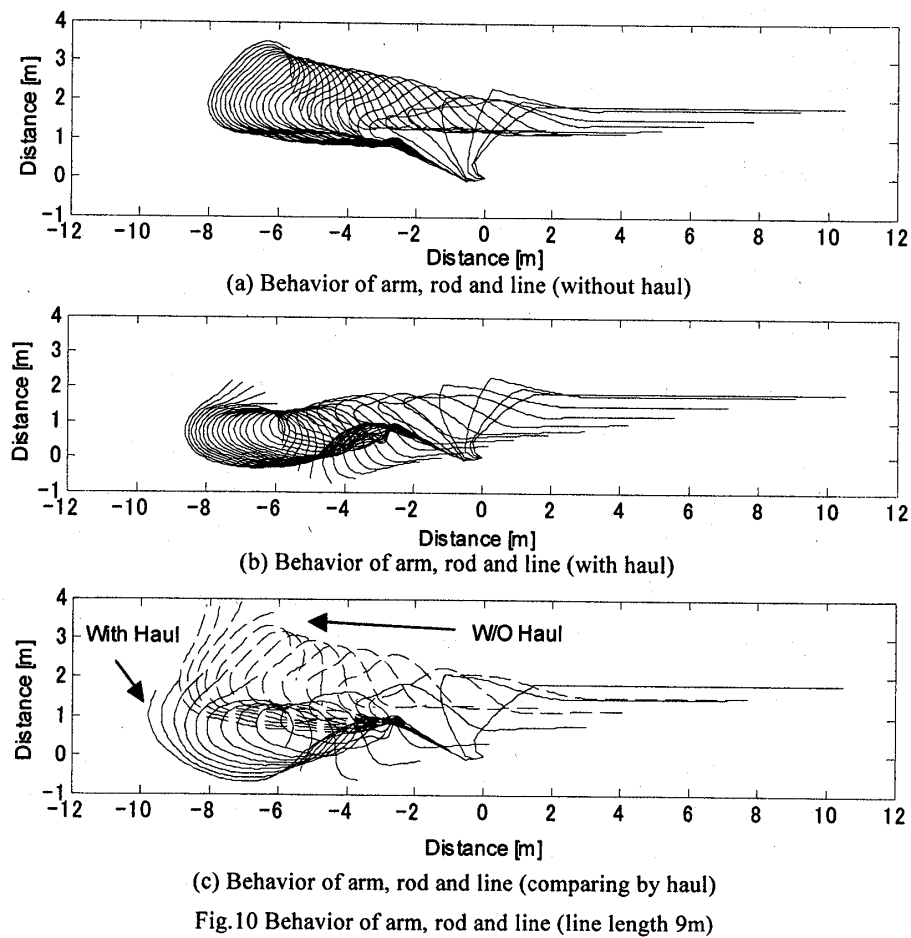
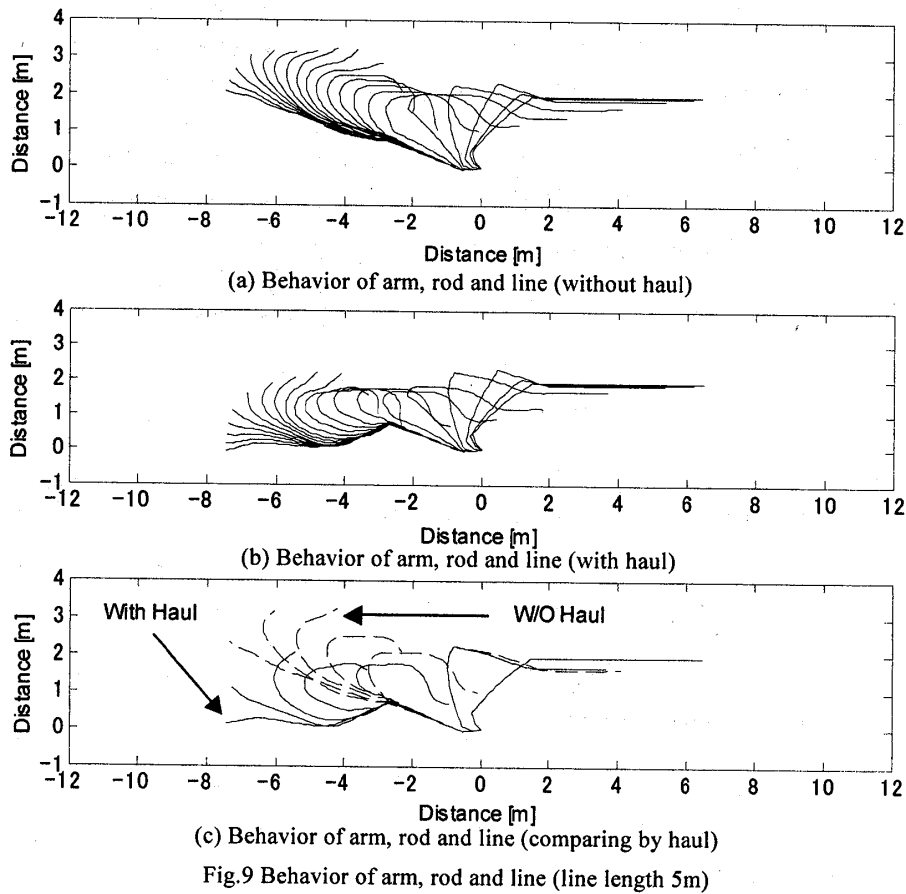
Fig. 8 Comparison of behavior (line length 9m)

4. ホールによる挙動解析

4・1 ホールによる飛行形状の違い 前章で妥当性が検証されたモデルを用い、ホールによる挙動の違いを検討する。図9、図10にそれぞれラインの長さが5m、9mの場合の腕およびロッド、ラインの挙動を示す。(a)はホールが無い場合、(b)はホールがある場合であり、0.1秒ごとに描いたものである。(c)は(a)と(b)を重ねた図であり、0.3秒ごとに描いたものである。(a)と(b)を比較すると、ホールが無い場合には、ラインは斜め上方に飛んでいるのに対し、ホールがある場合には、前方に飛んでいることがわかる。また、ライン先端はホールがある場合の方が先に着地すると考えられる。

また、(c)では、ホールがある場合にループがコンパクトであり、前面投影面積が小さいことがわかる。したがって、空気抵抗が小さく、飛行速度が速くなる。

これらのことから、ホールを行うことによりループをコンパクトにでき、ライン速度を増加させ、ラインコントロールも容易にできることが期待される。



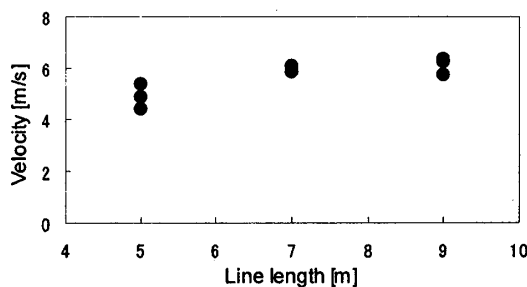
4・2 ホール速度 実験におけるホール速度およびホール量を図 11 に示す。(a)はホール最大速度、(b)はホール量である。これらの図から、ホール最大速度はラインが長くなると速くなる傾向にある。また、ホール量もラインが長くなると増加している。ホール量は被験者の腕の長さにより限界があり、また、ホール最大速度にも限界があるが、ライン長さが 9m まででは増加する傾向にあった。

4・3 ライン先端の最大速度 図 12 にライン先端の最大速度を示す。各ラインの長さ当り 3 回の実験を行っており、No.1～No.3 がそれに対応する。この図から全ての実験において、ホールがある場合の方がライン先端の最大速度が速いことがわかる。

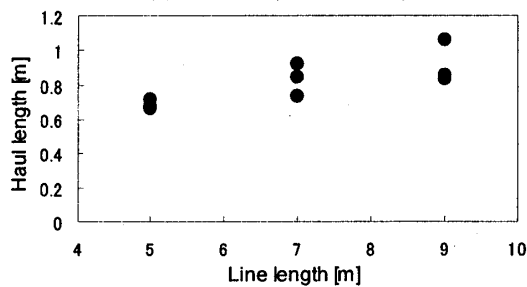
次に図 13 にホールの有無によるライン先端の最大速度の差を示す。最大速度の差は図 11(a)のホール速度とほぼ等しく、先端の最大速度の差はホール速度であることがわかる。

次に図 14 にラインの長さによる最大速度増加率を示す。図の縦軸はホールによる最大速度の増加量をホール無しの最大速度で除した値である。この図から、ラインが長くなるにつれて値は増加していることがわかる。

以上の結果から、ホールを行うとライン速度を増加させることができるとともに、ループをコンパクトにして空気抵抗を低減できることがわかった。また、ホールによるライン先端の速度の増加分はホール速度であることがわかった。したがって、ライン速度を増加させるにはホール速度を増加させれば良いことになる。



(a) Maximum haul velocity



(b) Haul length

Fig.11 Haul velocity and haul length

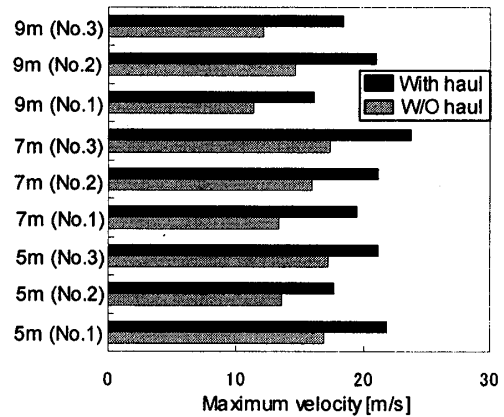


Fig.12 Maximum velocity of line tip

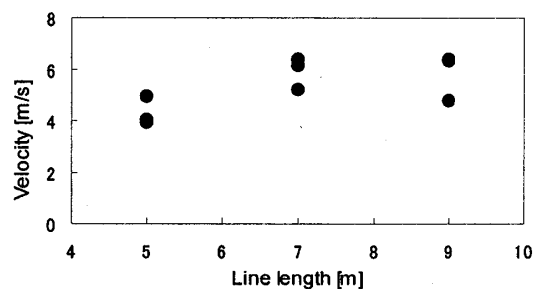


Fig.13 Difference of maximum velocity by haul

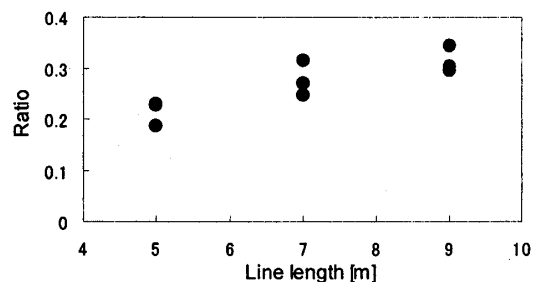


Fig.14 Increase ratio of maximum velocity

5. 結 言

本研究では、実際のフィッシングフィールドでのキャストイングを考え、ダブルホールキャストにおけるホールに注目して実験および解析を行った。本研究の範囲内において以下の結果が得られた。

- (1) ホール量を測定する装置を製作した。
- (2) ホール最大速度はラインが長いほど速い。
- (3) ホール量はラインが長いほど多い。
- (4) ホールを考慮した解析モデルを構築してシミュレーションを行い、実験結果と比較したところ、解析モデルは妥当であることがわかった。
- (5) 妥当性が検証されたモデルを用いて解析を行った。
- (6) ホールを行うとラインのループをコンパクトにできる。

- (7) ホールを行うとラインの速度を増加させることができる。
- (8) ホールによるライン最大速度の増加分はホール速度あり,ライン速度を増加させるにはホール速度を増加すれば良い。

参 考 文 献

- (1)Watanabe,T., Tanaka,K., Dynamics of Fly line -Modelling and analysis-, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.69, No.680(2003),pp.229-235.
- (2)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.
- (3)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.
- (4)Watanabe,T., Seino,R., Dynamics of a Fly Line -Effect of the rebound-, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.73, No.726(2007), pp.37-43.
- (5)Watanabe,T., Ishida,K., Dynamics of a Fly Line -Analysis considering arm motion-, *Trans. of JSME, Series C*, Vol.73, No.733(2007), pp.119-124.
- (6)Masuzawa,S.,Fly fishing manual,(2000), *Yama-kei Publishers co.,Ltd.*
- (7)S.Anderson,Tabuchi,Y.,Fly fishing text,(1984), *Shobunsha.*
- (8)Graig A. Spolek, The mechanics of flycasting: The flyline, *American Association of Physics Teachers*, 54(9),(1986),832-836.
- (9)John M. Robson, The physics of fly casting, *American Association of Physics Teachers*,58(3), (1990),234-240.
- (10)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.
- (11)J.J.Burgess, Bending stiffness in a simulation of undersea cable deployment, *International Journal of Offshore and Engineering*, 3-3,(1993),197-204.
- (12)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.
- (13)J.A.Hoffmann and Matthew R.Hooper, Fly rod performance and line selection, *Proceedings of DETC'97*, 1-8.
- (14)J.A.Hoffmann and M.R.Hooper, Fly rod response, *Journal of Sound and Vibration* 209(3),(1998), 537-541.
- (15)S.Lingard, Note on the aerodynamics of a flyline, *Am.J.Phys*, 56-8, (1998),756-757.
- (16)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.
- (17)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.
- (18)M.A.Hendry and M.Hubbard, Effect of rod taper on fly casting performance, *The engineering of SPORT4*, (2002), Blackwell publishing.
- (19)E.J.Haug, Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, *Taiga Shuppan*,(1996),pp.203.