ルアーキャスティングの力学 *

渡 邊 鉄 也**

Dynamics of Lure Casting

Tetsuya WATANABE

Fly-fishing and lure fishing have been positioned as sports deliberately different from the traditional Japanese fishing-style. In the case of lure fishing, casting is the element which anglers must master in order to cast a lure at an appropriate position. Lure fishing constitutes various elements, for example, casting, reeling, hooking and landing, but the importance that casting holds is extremely large. This study uses experimental and computational analysis to investigate the dynamic behavior of lure casting. The casting process and the timing of the line leaves are important for the proper presentation of lure. Moreover, the shape of a rod before the lure released is important for a long cast or controlled cast. However, it is difficult to grasp the phenomenon or to make a numerical model. Therefore, the most suitable casting method will be clarified from the viewpoint of sports engineering and human dynamics. In this paper, the system of rod and lure is modeled, and the behavior of the rod and the flying distance of a lure are calculated in the case that line tension is considered. The difference of the behavior and flying distance with line tension is investigated. And suitable timing that angler releases the line is clarified. Moreover, hang length of lure is investigated and proper length is obtained.

Key words: lure, casting, modeling, dynamic behavior, line tension

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おり、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。ルアーフィッシングでは、疑似餌となるルアーの重さを利用してキャストするため、目標地にルアーを正確に配置するには熟練が必要となる。ルアー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。キャスト、リーリング、フッキング、ランディングであり、最も重要な要素はキャストである。キャストにはさまざまなものがあるが¹⁾、本研究では最も基本となる「オーバーヘッドキャスト」に注目する。

キャストでは、ルアーの重さを利用すると同時にロッドの弾性変形による復元力を利用している。また、ラインが離れるタイミングが重要となる。過去の研究では、ルアーの潜行運動に関する研究²⁾³⁾やキャストシミュレーションに関する研究⁴⁾⁵⁾がなされているがオーバーヘッドキャストのモデル化や現象の解明はなされていない。そこで、本研究では、ルアーキャストのモデル化を行うとともに、さまざまなパラメータを変化させたときの解析を行う。

2. 腕の運動を考慮したキャスト実験

2.1 タックル

ルアーフィッシングのタックル(道具)は図1に示すように、「リール」、「ロッド」、「ライン」、「ルアー」の4要素で構成されている。本研究で用いたロッドは Wizz TROUT MASTER ST Classic 50 で、2本継ぎのものである。ロッドは中空円筒構造で、全長 152.4 cm、総重量は 62g、密度は 1375 kg/m³ である。ロ

ッドのアクションにはさまざまなものがあるが¹⁾、実験で用いるロッドは「バットアクション」で「ウルトラライト」である。

ルアーは大別して6種類あり、フィールド(釣り場)や対象魚によって使い分けられている。本研究では、キャストに注目していることから、木片をルアーの代わりに用いることとした。ロッドの仕様において、キャストウェイトが 0.8g ~ 3.5g、ラインは 2~4lb であることから、木片は直径 20mm、長さ 19mm の中実円筒形とし、金具を含めて 3.4g とした。また、ラインは TORAY の Solaroam 4lb を用いた。

リールは大別して3種類あるが、本研究では一般的に用いられているスピニングリールを用いた。

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、ルアーをキャスト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バット部に設置した。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。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。

ルアーをキャストするとき、まず、人差指でラインを押さえ、図 2①のように後方に振りかぶってから前方にロッドを振る動作をする。図 2②のように前方に振るときにラインを放すとルアーは前方に飛んでいく。したがって、ラインを放す時間が重要となる。ラインを放す時間を正確に把握するためにロッド先端のガイドに電極を設置し、ルアーがガイドに接触しているときに電流が流れるようにした。これにより、ルアーがガイドから離れる瞬間を把握することができ、ラインを放すタイミングを考慮したシミュレーションが可能となる。図 3 に手首の角速度の時刻歴波形と電極電圧の時刻歴波形の一例を示す。この図から、手首の角速度が最大になる付近でルアーが離れていることがわかる。9回の実験結果から、ルアーを放す時間は、手首の角速度のピーク時間から約±0.03秒の間であった。

*原稿受付 平成 19 年 10 月 9 日

**正 会 員 埼玉大学(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

2.3 上腕・前腕・手首の運動

図4に上腕, 前腕, 手首の時刻歴角速度を示す. 約0.9秒以前はロッドを後方に振りかぶった状態であり, 0.9秒以降は前方に振っている状態を示している. この図から, 最大角速度の発生する時間は上腕, 前腕, 手首の順であり, この順番でキャスティング動作が行われていることがわかる. また, 最大角速度も手首>前腕>上腕の関係があることがわかる.

Fig.1 Tackle

Fig.2 Casting

Fig.3 Time history

Fig.4 Angular velocity

3. キャスティングモデル

3.1 腕, ロッド, ルアーのモデル化

腕およびロッド, ルアーは図5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. 本研究では, フィールドにおける実際のキャスティングをシミュレートするために, 腕の運動を考慮した3入力モデルを構築する. ただし, ロッドは回転運動のみとした. 図5では, ロッドが4分割となっているが, 実際の計算ではロッドを約10cmごとの要素に分割した.

ここで用いる記号を列挙する.

i : 要素番号(1~n)

m_i : 要素の質量

J_i : 要素の慣性モーメント

k_i : 回転ばね定数

c_i : 回転減衰係数

ℓ_i^L, ℓ_i^R : 要素の長さ (重心から左, 右)

$\ell_i = \ell_i^L + \ell_i^R$: 要素の長さ

(x_i, y_i, ϕ_i) : 要素座標系

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

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

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

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

i 番目の要素上の重心位置に要素座標系を設け, 一般化座標ベクトルは次式のようにする.

$$\mathbf{q} = \{x_1, y_1, \phi_1, \dots, x_n, y_n, \phi_n\}^T \quad (1)$$

要素 $i-1$ から要素 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.

$$\Phi_{(i-1)i}^K = \begin{Bmatrix} x_{i-1} - \ell_{i-1}^R \cos \phi_{i-1} - x_i + \ell_i^L \cos \phi_i \\ y_{i-1} - \ell_{i-1}^R \sin \phi_{i-1} - y_i + \ell_i^L \sin \phi_i \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2)$$

全拘束式 Φ は次の式となる.

$$\Phi = \{\Phi^K\} = \mathbf{0} \quad (3)$$

Φ を時間で微分すると次式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} \Phi_q \dot{q} &= -\Phi_r \equiv v \\ \Phi_q \ddot{q} &= -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{qr} \dot{q} - \Phi_{rr} \equiv \gamma \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

要素 における質量マトリクスは,

$$m_i = \text{diag}[m_i \quad m_i \quad J_i] \quad (5)$$

であり, 全質量マトリクスは

$$M = \text{diag}[m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_n] \quad (6)$$

となる. 各要素間の回転ばね (ばね定数 k_i) による復元力, ダンパ (減衰係数 c_i) による減衰力, および各要素に作用する重力を要素 に作用する一般化力とすると

$$Q = \{Q_1^T \quad Q_2^T \quad \dots \quad Q_n^T\}^T \quad (7)$$

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,

$$\delta q^T [M\ddot{q} - Q] = 0 \quad (8)$$

となる. 一方, 式(3)の拘束条件から,

$$\Phi_q \delta q = 0 \quad (9)$$

が得られる. 式(8), (9)とラグランジュの乗数ベクトル λ を用いると,

$$[M\ddot{q} - Q]^T \delta q + \lambda^T \Phi_q \delta q = [M\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda - Q]^T \delta q = 0 \quad (10)$$

となる. 式(10)が成り立つには

$$M\ddot{q} - Q + \Phi_q^T \lambda = 0 \quad (11)$$

でなくてはならない. 式(9)と式(10)を連立させると次式のような運動方程式が得られる.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (12)$$

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.

$$\begin{bmatrix} M_r & 0 & \Phi_r^T \\ 0 & M_\phi & \Phi_\phi^T \\ \Phi_r & \Phi_\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\phi} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_r \\ Q_\phi \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)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⁹⁾.

$$M^* \ddot{\phi} = Q^* \quad (14)$$

$$M^* = M_\phi + \Phi_\phi^T (\Phi_r^T)^{-1} M_r \Phi_r^{-1} \Phi_\phi \quad (15)$$

$$Q^* = Q_\phi - \Phi_\phi^T (\Phi_r^T)^{-1} (Q_r - M_r \Phi_r^{-1} \gamma) \quad (16)$$

式(14)を時間積分して各要素の角速度, 角変位を求める. 入力実験から得られた角速度およびその積分値と微分値である角度と角加速度とした. ルアーは軸方向に飛行するものとし, 空気による抵抗を考慮したモデルとした. 空気抵抗係数は円柱軸方向に作用する抵抗として 0.84 とした.

ロッドの縦弾性係数は静的な荷重試験結果から 75GPa とした. 図 6 に, ロッド先端に 0.19N と 0.42N の力を作用させたときの

ロッドの形状を示す. 実験および解析モデルはほぼ等しい形状を示している. 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.

シミュレーションでは, ルアーがロッドから離れた後に, ルアーとロッドの運動を独立に計算した. ルアーにラインの張力が作用しない場合には空気抵抗のみが作用するようにした. また, ラインの張力が作用する場合には, ルアーの運動方向と逆方向に抵抗力が作用するようにした.

被験者により肩の高さが異なるため, シミュレーションでは肩の位置を原点とした. 飛距離は, シミュレーション結果の y 座標に肩の高さを加算し, y 座標の値が負になる直前の x 座標の絶対値とした. また, 腕の長さは被験者を測定して得られた値を用いた. 腕は駆動拘束するため, 剛性や減衰は考慮していない.

Fig.5 Casting model

(a) Load 0.19N

(b) Load 0.42N

Fig.6 Rod shape at static load

3.2 腕の角速度モデル

実験から得られた角速度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、角速度以外に角度と角加速度も必要であり、実験から得られた角速度を積分、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とした。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。角速度は式(17)で近似することとした。

$$v(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\beta_3^{(i)}}{\sqrt{2\pi\beta_2^{(i)}}} \exp\left(-\frac{(t-\beta_1^{(i)})^2}{2\beta_2^{(i)}}\right) \quad (17)$$

式(17)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。式(17)の n は 10 とし、最小二乗法を用いて実験データに式(17)を適合させた。

図 7, 図 8, 図 9 に実験結果と式(17)を用いて近似した時刻歴角速度を示す。これらの図は、それぞれ上腕、前腕、手首の角速度を示す。これらの図から、式(17)を用いて近似した角速度は実験結果と良好に一致しており、この数式モデルはキャスティングにおける腕の角速度を近似する上で妥当であることがわかる。

3.3 ラインの影響が無い場合の解析

3.1 節に示したモデルが妥当であるか検証するため、ここではルアーの飛距離に注目して実験結果と解析結果を比較する。

ルアーにはラインが接続されているため、ルアー飛行時にはリールおよびガイドとラインの摩擦により、ルアーにはラインの張力が作用している。しかし、モデル化の妥当性を検証するため、まず、ラインの影響が無い場合について実験と解析の比較を行う。実験では、ラインを指で把持する位置で切断し、ルアーが飛行しているときに、ラインには張力が作用しないようにした。図 10 に実験で得られたルアーの飛距離とシミュレーション結果を比較した図を示す。図の横軸は実験での飛距離で縦軸はシミュレーションでの飛距離である。図の●は被験者 A で○は被験者 B の結果である。実験とシミュレーションが一致している場合には図の直線上にプロットされる。この図から、シミュレーション結果は実験結果を良好にシミュレートできており、本研究で用いたモデルでルアーキャスティングを適切にシミュレートできることがわかった。

3.4 ラインの影響を考慮した解析

実際のキャスティングでは、ルアーにラインの張力が作用しているため、ここでは、張力を考慮した解析を行う。ラインをキャスティング時と同じ速度で引いた時の反力を測定したところ、速度により変化はあるが、ほぼ 0.02[N]であった。そこで、ルアーがロッドから離れた後に、簡易的に 0.02[N]の力がルアーの飛行方向と逆向きに作用するようにしてシミュレーションした。図 11 に実験とシミュレーションの比較を示す。図の●は被験者 A で○は被験者 B である。この図から、簡易的に張力を一定にしたシミュレーション結果は実験結果と良好に一致しており、ラインの影響を考慮した解析も可能であることがわかった。

Fig.7 Approximation angular velocity of upper arm

Fig.8 Approximation angular velocity of forearm

Fig.9 Approximation angular velocity of wrist

Fig.10 Casting distance (Without line)

Fig.11 Casting distance (With line)

4. キャスティング挙動解析

キャスティングに関するパラメータとして、ラインの有無、ルアーを離すタイミング、たらしの長さに注目し、それぞれのパラメータによる挙動の違いをシミュレーションにより検討する。たらしとは図1に示したように、ロッド先端とルアー間のライン長さである。

4.1 ラインの有無による比較

通常、ルアーにはラインが接続されており、キャスト時には、リールおよびガイドとの摩擦により飛距離が減少する。そこで、ここではラインが飛距離におよぼす影響を調査する。図12にラインの有無によるシミュレーション結果の一例を示す。これは、図5のモデルの計算結果のy座標に肩の高さを加算した図である。(a)は被験者A、(b)は被験者Bのロッドおよびルアーの軌跡である。図中の○はラインが無い場合、*はラインが有る場合である。これらの図から、ラインがあると飛距離が短くなることがわかる。

4.2 ルアーを離すタイミングによる比較

ルアーを離すタイミングにより飛距離が大きく異なる。ここでは、タイミングと飛距離の関係を検討する。角速度が最大となる時間を基準として ± 0.04 秒の間にルアーを離したときの飛距離を計算した。図13にその結果の一例を示す。図の横軸は、実験において手首の最大角速度が生じた時間からルアーを離すまでの時間、縦軸は飛距離である。図中の曲線はシミュレーション結果であり、 -0.04 秒から 0.04 秒まで、 0.002 秒きざみにルアーを離すタイミングを変化させて計算した結果である。図中の●は実験結果であり、(a)は被験者A、(b)は被験者Bの場合である。(a)では0秒のときに飛距離が長く、(b)では -0.012 秒のときに飛距離が長いことがわかる。図14に飛距離とルアーを離すタイミングを示す。(a)は実験結果である。(b)はシミュレーション結果であり、最大飛距離が生じたときのルアーを離すタイミングを横軸にし、最大飛距離を縦軸にしてプロットした図である。(a)から、実験ではルアーを離すタイミングは ± 0.03 秒に分布している。(b)のシミュレーション結果でも、最大飛距離が生じるタイミングは ± 0.03 秒に分布している。したがって、実際のキャスティングでは、ほぼ適切なタイミングでルアーを離していることがわかった。

Fig.12 Flying behavior of lure

4.3 たらしの長さによる比較

実験では、ルアーを離すタイミングを計測するために、ルアーをガイドに接触させた状態からキャストしているが、実際には図1に示したように、ルアーがガイドに接触しない状態でキャストするのが一般的である。そこで、たらしの長さによる飛距離の違いを検討する。図15に、たらしの長さによる飛距離を示す。これは、4回の実験から得られた角速度を入力とし、たらしの長さを変化させてシミュレーションした結果であり、●, ○, ▲, △が各解析結果、曲線は解析結果の近似曲線である。入力角速度は実験データを用い、ルアーを離すタイミングも実験値とした。ここでは、最大飛距離が生じるたらしの長さを調べるため、たらしの長さを変化させたときの最大飛距離で除した値をプロットした。(a)は被験者Aの場合で、(b)は被験者Bの場合である。これらの図から、飛距離が最大となるたらしの長さがわかり、被験者Aは約16cm、被験者Bは約10cmであった。実際のフィールドでは、たらしの長さは10~20cm程度である。したがって、シミュレーションからも、たらしの長さは10~20cmが適切であることがわかった。

Fig.13 Distance respected to release time

Fig.14 Maximum distance respected to release time

Fig.15 Hang length

5. 結 言

本研究では、実際のフィッシングフィールドでのルアーキャスティングを考え、上腕、前腕、手首の運動を考慮したモデル化を行った。実験およびシミュレーションから、本研究の範囲内において以下の結果が得られた。

- (1) 最大角速度は手首、前腕、上腕の順に大きい。
- (2) 最大角速度が生じる時間は上腕、前腕、手首の順である。
- (3) ロッドおよびルアーのモデル化を行った。
- (4) 上腕、前腕、手首の運動を考慮した解析を行った結果、ロッドおよびルアーの運動をシミュレートできた。
- (5) ラインの張力を 0.02N として行ったシミュレーション結果は実験結果と良好に一致した。
- (6) ラインの有無による飛距離の違いを検討した。
- (7) ルアーを離すタイミングについて検討した結果、手首の最大速度が生じる時間の ± 0.03 秒の間にルアーを離すと飛距離が伸びることがわかった。
- (8) たらしの長さについて検討した結果、10~20cm が適切であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 奥山 文弥：ルアーフィッシングマニュアル，山と溪谷社，(1997)
- 2) 臺田 望，他：クランクベイトのダイドアイの位置による潜行深度の変化，日本水産学会誌，**65**，5(1999)839。
- 3) 三木 智宏，他：リップ付きハードルアーのボディ形状と潜行運動，日本水産学会誌，**67**，1(2001)49。
- 4) 有隅 仁，他：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），日本機械学会論文集（C編），**64**，626(1998)162。
- 5) 西田 俊勝，他：擬似テザーキャスティング制動制御の数値実験，日本機械学会講演論文集，No.045-2(I)，(2004)131。
- 6) E.J.Haug, Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Taiga Shuppan,(1996)203。
- 7) 杉山 博之，他：マルチボディーダイナミクスを用いたスパゲティプロブレムの解析，日本機械学会論文集（C編），**65**，631(1999)54。