

やり投げにおけるヤリの飛行経路シミュレーション

安田萌*・富樫泰一**

（2016年11月1日受理）

Flight Simulation of Javelin in Javelin Throw

Moe YASUDA* and Taiichi TOGASHI**

(Accepted November 1, 2016)

はじめに

陸上競技のやり投げは、近年日本において競技レベルが向上し、さらなる競技力向上のための研究が進められている。その多くは、投てき者を対象とした研究である（中野ら，2007；田内ら，2012；田内，2014）。投射体としてのヤリの力学的研究として、これまでにヤリの飛行に関する研究はいくつか報告されている（宮口・前田，1987；前田，1996b）が、ほとんどが男子用やりに関する研究であり，女子用やりに着目した研究は多くない。飛行中の女子用やりにかかる空気流体力を推定し，飛行経路のシミュレーションを行うことは選手の競技力向上やそのための指導に貢献できると思われる。

投射された物体（以下，投射体）の運動は，空気流体力を無視した場合，初速度，投射角，投射高の初期3条件で決定され放物運動を行う。しかし，やり投げにおけるやりは，その特異な形状から空気流体力の作用を検討する必要がある。空気中を飛行する投射体には空気流体力が作用し，飛行方向と反対向きに抗力，垂直方向に揚力，重心まわりにモーメント力が作用する。投射体の飛行方向と投射体自体がなす角度を迎え角，投射体と水平面のなす角度を姿勢角と呼び，やりのような形状の物体にかかる空気流体力（図1）は迎え角によって大きく影響を受ける。適当な迎え角によって，より少ない抗力でより大きな揚力を得ることができれば，飛距離を伸ばすことができる。このような状態を「揚抗比が大きい」という。前田（1996b）は，男子用やりにおけるヤリの飛行挙動の研究からやりを投射したときの実際の飛距離は，空気の影響を考えない場合の真空理論値よりも飛距離が大きくなり，飛行経路の中盤から後半にかけて揚抗比が大きくなる傾向にあるとし，このことが飛行後半でヤリの落下を抑え，飛距離増大につながると述べている。また，やりを投射した予備実験から，飛距離の大きい投てきのヤリの飛行経路について，ヤリの飛行経路後半の下降局面

*茨城大学大学院教育学研究科（〒310-8512 水戸市文京 2-1-1；Graduate School of Education, Ibaraki University, Mito 310-8512 Japan）.

**茨城大学教育学部（〒310-8512 水戸市文京 2-1-1；College of Education, Ibaraki University, Mito 310-8512 Japan）.

での迎え角増大が見られた。このことから、揚力と抗力の合力が飛行経路後半でヤリの落下を抑え、飛距離増大につながったと考えられる。安田（2015）は、女子用ヤリに着目し、競技者が投射したヤリの飛行経路、初速度、投射角、姿勢角、長軸まわりの回転数の実測と水槽実験による推定空気流体力の算出から、実際の飛行経路と初期条件のみから導き出される放物線とのずれを説明できるか検討し、シミュレーションを行った。しかし、この実験では水槽実験における迎え角測定範囲が狭かったことや、モーメントとヤリの長軸まわりの回転に伴うジャイロ効果を考慮していないことが課題としてあげられた。

そこで本研究は、（1）回転するヤリの慣性モーメントを測定。（2）模型実験の相似則により、ヤリ水槽実験移動速度を 0.0 ～ 2.0m/sec, 迎え角を 0 ～ 90° と諸条件を設定し、水中での揚力、抗力、モーメントから空気流体力を推定。（3）ヤリ飛行経路のシミュレーションを行うことを目的とした。

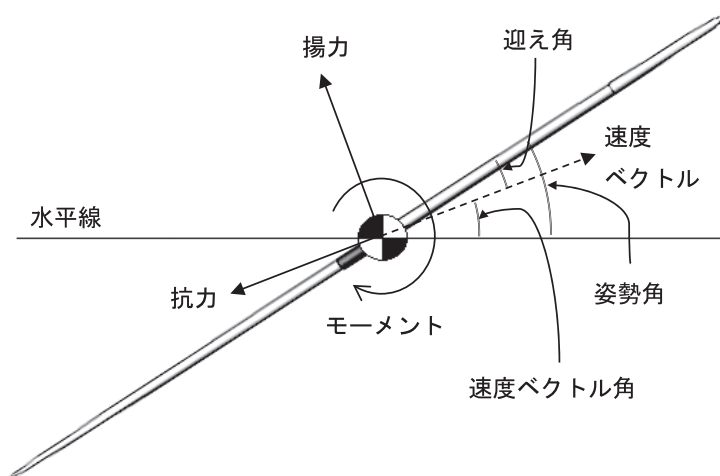


図1 ヤリに関する各定義と飛行中のヤリに作用する空気流体力

方法

1 回転するヤリの慣性モーメント測定

慣性モーメントは、回転のしにくさを表す指標である。重心を通る短軸まわりの慣性モーメント I_S を、長軸まわりに回転させながら、二点吊り法により測定した。ヤリがモータにより回転する仕組みの測定装置にヤリを乗せ、その両端を長さ l の伸びの少ない糸でヤリが水平になるように吊るし、ヤリをわずかにねじって離し、重心が動かないように振動を起こした。このねじり振動の振動数 f (Hz) を測定し、式（1）より短軸まわりの慣性モーメントを計算した。

$$I_S = \frac{mgab}{4\pi^2 f^2 l} \quad \left(\begin{array}{l} m: \text{ヤリの質量}[\text{kg}] \\ g: \text{重力加速度} [\text{m/sec}^2] \\ a: \text{重心から先端の距離}[\text{m}] \\ b: \text{重心から末端の距離}[\text{m}] \end{array} \right) \quad (1)$$

(a) 測定装置

2枚の板でヤリを挟むようにし、ベアリングを用いてヤリを固定した。また、ギヤボックス、モータを取り付け、ヤリがモータによって回転する構造にした。重心はヤリの重心と同じになるように調整した。

(b) 測定条件

DC モーターコントローラーでヤリの回転数を 0 から 50rps まで変化させ、各条件について測定した。

2 水槽実験

水槽実験から得られたデータをもとに、ヤリの揚力、抗力、モーメント力の推定をおこなった。

(a) 測定装置

プールのオーバーフローをガイドレールとし、スムーズに移動できる構造の台車を作製した。その台車に、ヤリ流体力検出ロッドを設置した。進行方向（抗力）とその垂直方向（揚力）、モーメント力測定のために計 6 枚のひずみゲージを貼付した。ひずみアンプ（KYOWA 製 PDC-300A）とデータ収集用ノートパソコンは台車に乗せた。移動速度はデータロガー（Pico Technology DrDAQ）を用いて台車のタイヤ回転数から DC モータを用いて電圧を検出し、速度に変換した。測定に先立ち、ヤリ流体力検出ロッドに抗力、揚力、モーメント力測定方向に既知の荷重とトルクを加え、較正を行った（図 2）。

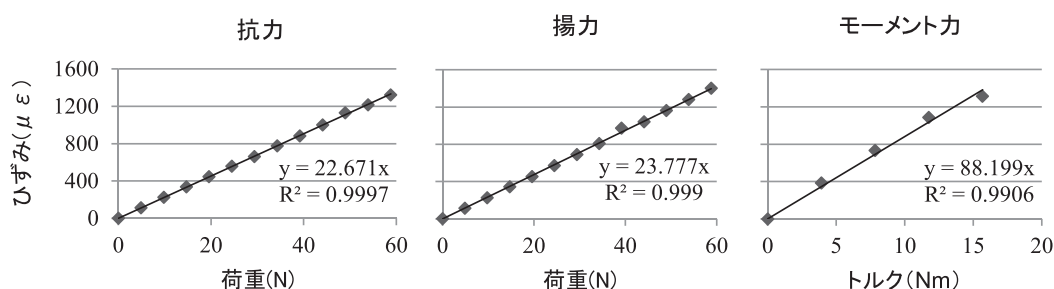


図 2 ヤリ流体力検出ロッド較正

(b) 測定条件

速度は 1 回の測定中に 0.0 から 2.0m/sec に徐々に加速させた。迎え角は 0° から 90° まで 5° ごととした。各条件について、揚力、抗力、モーメント力を測定した。

(c) 模型実験の相似則

空気流体力の推定は、模型実験の相似則を用いて換算し空気中と水中のレイノルズ数を一致させた。

3 飛行経路シミュレーション

初期条件から求めた放物線に推定空気流体力を加え、実際の飛行経路と比較した。

(a) 姿勢角変位

モーメント力（トルク）はヤリが投げ出された瞬間の初速度，迎え角から推定モーメント力を式（2）より算出した。慣性モーメント I_s は投げ出された瞬間のヤリの回転数から求めた。飛行中のヤリの回転数は測定していないため，投げ出された瞬間のヤリの回転数が飛行中不変として適用した。

トルク $T[\text{Nm}] = \text{慣性モーメント } I_s[\text{kgm}^2] \times \text{角加速度 } \alpha [\text{rad/sec}^2]$ より，

$$\alpha = \frac{T}{I_s}$$

$$\text{変位角度}[\text{rad}] = \Delta t \cdot \alpha \quad (2)$$

(b) 飛行経路

ある時間 t_i における揚力 F_L ，抗力 F_D ，トルク T をひとつ前の時間 t_{i-1} の迎え角から求め，初期条件から求めた放物線に空気流体力を加えた X ， Y 座標を求めた。

$$V_{X0} = V_0 \cos \theta_0$$

$$V_{Y0} = V_0 \sin \theta_0 - gt$$

$$F_{DX} = F_D \cos \theta$$

$$F_{DY} = F_D \sin \theta$$

$$F_{LX} = F_L \sin \theta$$

$$F_{LY} = F_L \cos \theta$$

$$V_X = V_{X0} + \frac{F_{LX}}{m} t + F_{DX} t$$

$$V_Y = V_{Y0} + \left(\frac{F_{LY}}{m} t \right) + \left(\frac{F_{DY}}{m} t \right)$$

$$\left(\begin{array}{l} V_0 : \text{初速度}[\text{m/sec}] \\ Y_0 : \text{投射高}[\text{m}] \\ \theta : \text{速度ベクトル角}[\text{deg}] \\ g : \text{重力加速度}[\text{m/sec}^2] \\ t : \text{時間}[\text{sec}] \\ m : \text{ヤリの質量}[\text{kg}] \end{array} \right)$$

$$X = X_0 + V_X t$$

$$Y = Y_0 + V_Y t - \frac{1}{2} g t^2$$

結果と考察**1 回転するヤリの慣性モーメント測定**

実験から得られた回転するヤリの慣性モーメントのデータを図3に示した。やり投げでは，投射時においてヤリの長軸まわりに16から24rpsの回転が起きていることが報告されている。回転するヤリの慣性モーメントは，ヤリの回転数が上がると慣性モーメントも大きくなる傾向を示したが，共振が大きく測定が不可能な範囲があった。

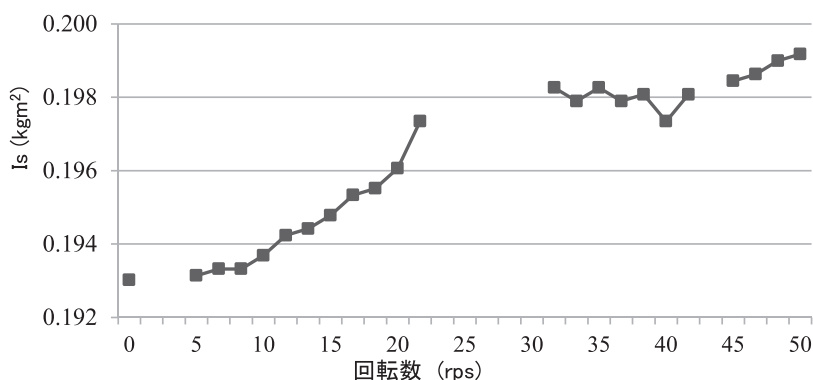


図3 回転するヤリの慣性モーメント

2 水槽実験

水槽実験から得られた推定空気流体力を図4に示した。揚力はいずれの速度においても、迎え角 55° から 65° の間で最大値を取り、その後減少する結果を示した。推定飛行速度が大きいほどその傾向が顕著であった。抗力とモーメント力は迎え角の増加に伴い抗力も増加する傾向を示した。揚力、抗力において瀬尾ら（2011）による円盤投げ用円盤の空力特性に似た傾向を示したが、モーメント力においては異なる結果となった。これはやりが重心から両側に非対称な形状で太さも一定ではないために片側への抵抗が大きかったことが要因であると考えられる。

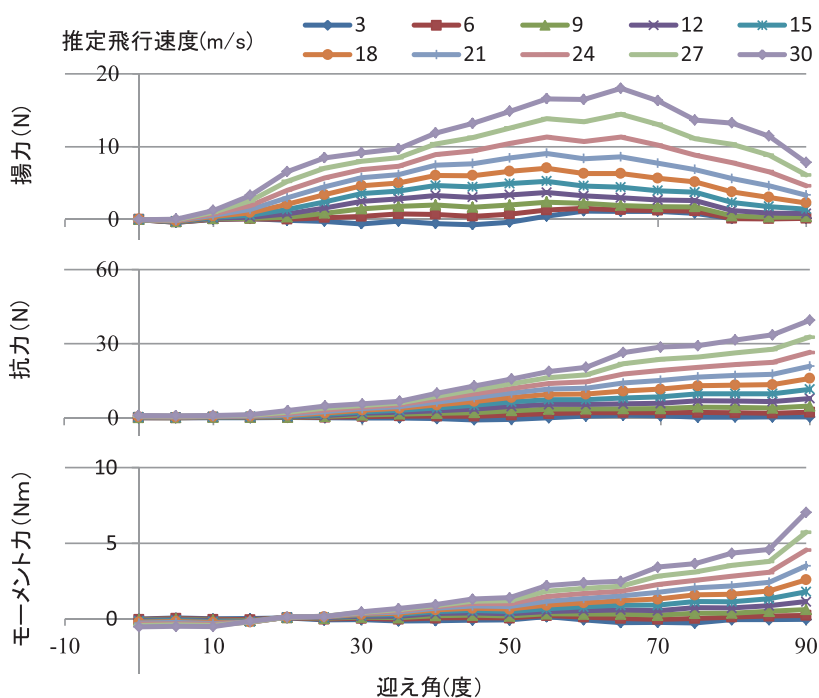


図4 推定空気流体力

3 飛行経路シミュレーション

飛行経路シミュレーションの結果を図5に示した。推定空気流体力から実際の飛行経路に近いシミュレーション結果を得ることができた。しかし、飛行経路中盤から後半にかけて垂直距離において実際の飛行経路とのずれが見られたことから、さらなる検討が必要である。

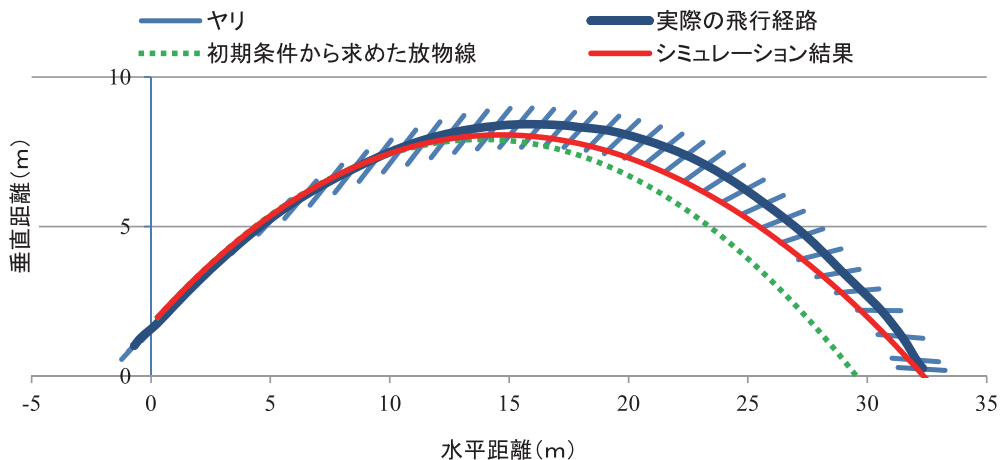


図5 飛行経路のシミュレーション

引用文献

- 深代千之・川本竜史・石毛勇介・若山章信. 2010. スポーツ動作の科学ーバイオメカニクスで読み解く. pp.46-47, 東京大学出版会.
- 石井喜八・西山哲成. 2002. スポーツ動作学入門. pp.83-84, 市村出版.
- Iwan W. Griffiths. 2006. Principles of Biomechanics & Motion Analysis. 石毛勇介・川本竜史. バイオメカニクスと動作分析の原理. pp.258-268, NAP Limited.
- James G. Hay. 1993. The Biomechanics of Sports Techniques 4th Edition. 植屋清見・阿江通良・丸山剛生・吉田康行. スポーツ技術のバイオメカニクス. pp.457-461, Book House HD.
- 小柳玲乃・仰木裕嗣. 2010. 慣性センサを使用したフライングディスクの運動力学推定. 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 91-92.
- 前田正登. 1996a. やり投げにおける競技者ーやり系のダイナミクス. 神戸大学博士論文.
- 前田正登. 1996b. やり投げにおけるやりの飛行挙動. 日本バイオメカニクス学会, 15(3), pp.207-213.
- 馬籠夏子. 2004. 円盤投げの流体力学的研究. 2004 年茨城大学卒業論文.
- 宮口尚義・前田正登. 1987. やり投げにおける飛行の分析. 金沢大学教育学部紀要 教育科学編, 36, 297-309.
- 中野美・大山下・大山圭悟・尾縣貢. 2007. 国内女子やり投競技者の体力特性ー各種跳躍運動の遂行能力と体幹筋力に着目して. 陸上競技研究, 71(4), 37-44.

- R. J. Best and R. M. Bartlett. 1987. Ladies' Javelin: Aerodynamics, Flight Simulation and Biomechanical Considerations. 5 International Symposium on Biomechanics in Sports, 88-103.
- 桜井伸二. 1991. スポーツ科学ライブラリー 5『投げる科学』, pp.52-60, 大修館書店.
- 瀬尾和哉・下山幸治・太田憲・仰木裕嗣. 2011. 円盤投げ用円盤の空力特性と最適投げ出し条件. 日本機械学会シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 11(17), 542-547.
- 田内健二・藤田善也・遠藤俊典. 2012. 男子やり投げにおける投てき動作の評価基準. 日本バイオメカニクス学会, 16(1), pp.2-11.
- 田内健二. 2014. やり投げにおけるバイオメカニクスサポート. 日本バイオメカニクス学会, 18(2), 94-100.
- 山本翔平・山本健太・中嶋智也・板野智昭・関眞佐子. 2013. ターボジャブの空力特性の計測. 日本機械学会論文集 B 編, 79(804), 166-175.
- 安田萌. 2015. やり投げにおけるヤリの流体力学的研究. 2015 年茨城大学卒業論文