

片翼竹とんぼの飛行についての研究

静岡県立科学技術高等学校

自然科学部 2年 村田柊人 湯本和希 鈴木繁杜

1 動機

我々はインターネットで「ASCII ビジネスの“おもしろ新入社員研修！TDKの「竹とんぼ」合宿って何？」」というサイトで竹とんぼの羽根につけるおもりの位置を変化させることで、多様な飛行パターンを実現できるという報告を見つけた。詳細は載っていなかったのですが、どのような飛行が実現したかまではわからなかったが、これは竹とんぼのモーメントの変化が影響しているためだと説明されていた。そこで、竹とんぼの片側の羽根を切断してもおもりの位置を変化させたときと同じような働きが起こるのではないかと考え、図1のように羽根の片側が切断されている片翼竹とんぼを製作した。実際に飛ばすと羽根の長さが短くなるほど安定して飛行できなくなったが、竹とんぼの軸の下端に養生テープを数周巻くと少し飛ばしやすくなることに気がついた。そこで、飛行が不安定な片翼竹とんぼに何か工夫を加えることで、片翼竹とんぼをより安定して飛ばすことができるかもしれないと考えた。



図1 片翼を切断した羽根

2 予備実験

(1) 目的

切断する羽根の長さごとに軸の下端におもりをつけていないときとつけているときの二パターンで飛行の安定性がどれほど変化するかを調べる。

(2) 準備物 市販の竹とんぼ（羽根 15.5cm、軸 16.8cm）、養生テープ

(3) 実験方法

軸に片翼を1cmから6cmまで1cmずつカットした羽根を付け替え、軸の下端におもりをつけていない状態と、つけている状態の二パターンで竹とんぼを飛行させて飛行の様子を観察する。

(4) 結果

安定した飛行をしたものを○、不安定な飛行をしたものを△、飛行しなかったものを×として、3段階で評価を行い、表1にまとめた。羽根を切断するほど飛行の安定性は低下するが、おもりをつけることで飛行の安定性は向上していた。また、片翼竹とんぼにはある点（振動中心）を支点にして円を描くようにぶれて飛行する特徴があることが分かった（図2）。

表1 予備実験の実験結果

	テープなし	テープあり
1cmカット	○	○
2cmカット	○	○
3cmカット	△	○
4cmカット	×	△
5cmカット	×	△
6cmカット	×	△

(5) 考察

片翼竹とんぼの形状の変化が振動中心などの飛行特徴に影響を与え、飛行の安定性が変化するのではないかと考えた。

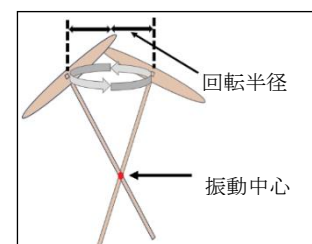


図2 振動中心と回転半径

3 目的

竹とんぼの形状に対する飛行特徴を解析し、片翼の欠けた竹とんぼが飛行できる条件を見つける。

4 実験方法

(1) 実験準備

図1に示した6種類の羽根を長さ28.5cm(6.201g)の菜箸と16.8cm(1.909g)の市販の軸の2種類を軸として実験に使用する。おもりには養生テープを使用し、軸の下部に巻く(幅5cm、5周巻きで質量0.294g)。竹とんぼの射出は練習を積んだ研究員のうちの一人が担当する。

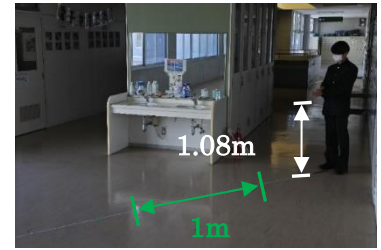


図3 実験の様子

(2) 飛行の安定性の評価

飛行の安定性を確かめるために、図3のようにメジャーを1mずつテープで固定し、各竹とんぼを15回ずつ正面に向かって飛ばし、着地点からの距離と中心線からのずれを測定する。射出時の手の高さは1.08mに固定して実験を行った。飛行距離を前進性能、竹とんぼの着地点が正面からずれた幅を軌道性能として評価する。それぞれの最大値を7m、180°とした。

(3) 片翼竹とんぼの動きの記録

ハイスピードカメラ(Nicon1 デジタルカメラ)を射出する位置の方向に対して真横になるように設置する。カメラでの撮影を開始した直後に竹とんぼを発射位置となるべく同じ位置で上昇して落ちるようにして飛ばし、300fpsの設定で撮影する。撮影した動画は動画解析ソフト(aviutl)を用いて、竹とんぼの羽根と軸の接合部(赤点)、軸の下端(緑点)の2点の位置及び軸(黄線)を1/300秒ごとに記録した(図4)。記録した図を印刷し、方眼トレーシングペーパーを使って座標に直した。

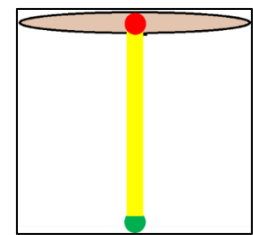


図4 マーカーのつけ方

(4) データ処理

ア 振動中心の求め方

撮影したデータを使って振動中心を求める。振動中心を求める方法は図5のように軸を十等分し、それぞれの位置を計算で求め、軌跡をグラフに表した。グラフが最もなめらかな曲線となっている位置を振動中心とした。すなわち、図5の場合羽と軸の接合部から6番目を振動中心とすることになる。

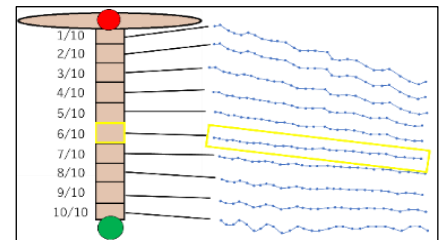


図5 各点の移動の軌跡

イ 回転半径の求め方

求めた振動中心の座標を使い、各時間における竹とんぼの振動中心を始点の位置に集め(図6)、ぶれの様子を示した。ぶれの様子から二等辺三角形をとり、その底辺をぶれ幅として回転半径を求めた。

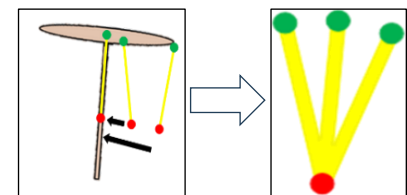


図6 回転半径の求め方

(5) 重心の測定

重心の測定では、初めに羽根を手の上に置き、手を閉じて重心の位置を大まかに求める。その後に細い棒の上に羽根をのせ、より正確な重心の位置を決めた(図7)。片翼を切断した羽根、軸、重りの質量を測定し、それぞれの重心の位置を測定した。軸の重心の位置を $G_2(0, 0)$ とし、羽根の重心の座標 $G_1(x, y)$ を求め、竹とんぼ全体の重心(G)を(式①)を使って算出した。



図7 重心の測定の様子

$$G_x = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (\text{式①})$$

x_1 : 羽根の x 座標

x_2 : 軸の x 座標

x_3 : 重りの x 座標

m_1 : 羽根の質量

m_2 : 軸の質量

m_3 : おもりの質量

5 性能評価の結果と考察

(1) 前進性能の評価の結果

羽根が短くなるほど飛距離は減少する。1 cm カットはおもりがなければカットなしとほぼ同じ距離を飛ぶ。2 cm から 3 cm カットは重くなると飛距離が減少する。4 cm、5 cm カットはおもりを付けると飛距離が増加する。6 cm カットは菜箸の軸で一番飛距離が大きくなる。

(2) 前進性能についての考察

ア 飛距離の変化の傾向

図 8 に羽根ごとの飛距離平均をまとめた。おもりを付けたり、軸が長くなるなどして質量が大きくなると 0 cm から 3 cm カットの飛距離が減少した。4 cm、5 cm カットはおもりが付くと飛距離が増えた。棒を長くすると 6 cm カットは飛距離が少し増えた。ここから 4 cm、5 cm カットは市販+おもりが効果があり 6 cm カットには軸を長くすることが効果的である可能性が見えてきた。

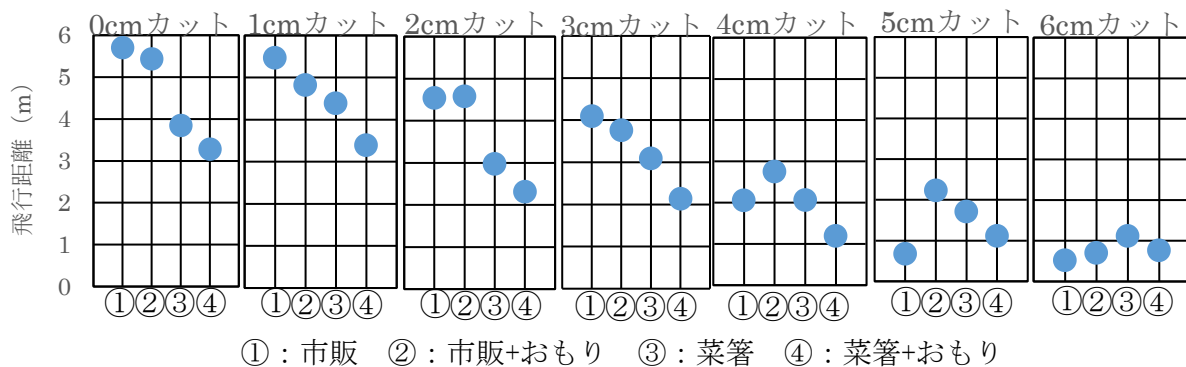


図 8 羽根ごとの飛行距離平均

イ 水平投射との比較及び揚力の変化

飛んだ距離を水平投射の飛距離と比べ、羽根としての効果が出ているのか確かめる。水平投射の初速度 v_0 は、撮影した動画を基に、竹とんぼが掌で加速している距離 d と竹とんぼを持っている状態から射出するまでの時間 Δt を測定し、加速度を求める(式②)ことで得られる(式③)。竹とんぼの落下時間 t_1 は高さ h から同様に求まるので、水平投射時の竹とんぼの初速度 v_0 を使って飛距離 l_1 を求めた(式④)。実測値を代入して求めると、竹とんぼが揚力を持たずに投げ出された時の飛距離は約 53 cm となる。

次に揚力を導出する。軸を変えることで質量が変化し、揚力に対する重力が変化する。そのため落下の加速度が増減し、滞空時間が変化することで飛距離が変化すると考えられる。ここで飛距離から落下加速度を求め、揚力を概算する。各竹とんぼの飛距離と求めた初速度 v_0 から飛行時間 t_2 を逆算し(式⑥)、式⑦より竹とんぼが落下する時の加速度 a' を求める。揚力を f として運動方程式を立てると式⑧となり、式変形によって f が求まる(式⑨)。図 9 に各軸における揚力を、図 10 には各羽根における揚力をグラフにまとめた。

まず羽根の長さが変わる影響を見てみる。市販では 4 cm カットまではカット長が増えるに従って揚力は小さくなっていくが、5 cm、6 cm カットで大きく揚力が低下している。市販の軸におもりを付けた軸では 6 cm カットはある程度の揚力を得ているが、6 cm カットの揚力はとても小さい。菜箸では 6 cm カットも揚力を得ている。

$$d = \frac{1}{2} a \Delta t^2 \text{ より}$$

加速度 a は

$$a = \frac{2d}{\Delta t^2} \text{ 式②}$$

$$v_0 = a \Delta t \text{ 式③}$$

$$l_1 = v_0 t_1 \text{ 式④}$$

$$h = \frac{1}{2} a' t_2^2 \text{ 式⑤}$$

$$t_2 = \frac{l_2}{v_0} \text{ 式⑥}$$

加速度 a は

$$a' = \frac{2h}{t_2^2} \text{ 式⑦}$$

となる

$$m a' = m g - f \text{ 式⑧ より}$$

揚力は

$$f = m(g - a') \text{ 式⑨ となる}$$

各羽根で見ると1 cm から3 cm カットまではわずかに減少するもののほぼ同じ揚力を得ていることから、飛距離の減少は質量の増加に頼るものと考えられる。一方で5 cm、6 cm カットでは市販の軸で急激に揚力が減少しているため、質量以外の要因が関わっていると考えられる。

揚力は翼面積に比例するため、カット長が増えるほど徐々に飛行距離が小さくなると考えられる。そのため、図9における0 cmカットから3 cmカットへと揚力が減っていくのは納得できる。市販の5 cm、6 cm カット、市販におもりを付けた軸の6 cm カットでは揚力がとても小さくなっている。揚力は流体に対する速度の2乗にも比例することから、5 cm、6 cm カットでは羽根が回転する速度が出ていないのではないかと考えられる。速度が出ない理由は安定した回転が得られないからではないだろうか。また、6 cm カットでは逆向きの揚力を得ているように見える。これは姿勢が不安定なため射出方向が下向きになっているかもしれない。

$$揚力L=C_L \frac{\rho V^2}{2} S$$

S : 翼面積

V : 速度

ρ : 流体の密度

C_L : 揚力係数

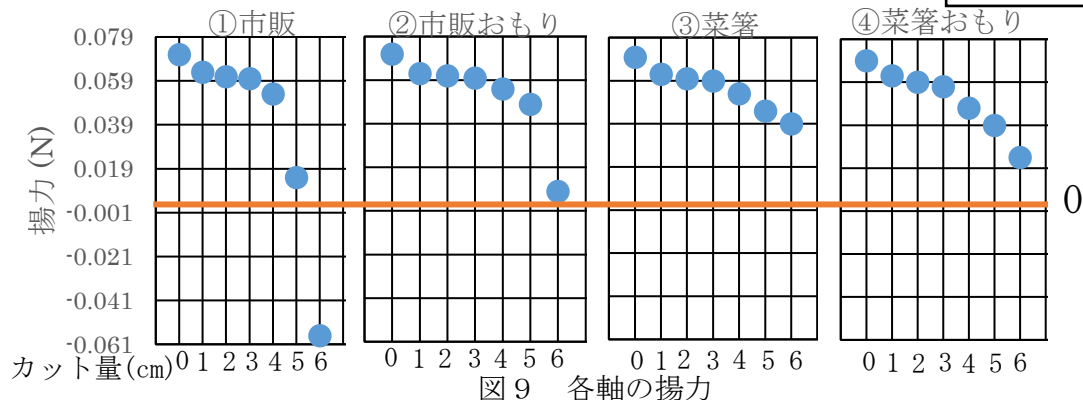


図9 各軸の揚力

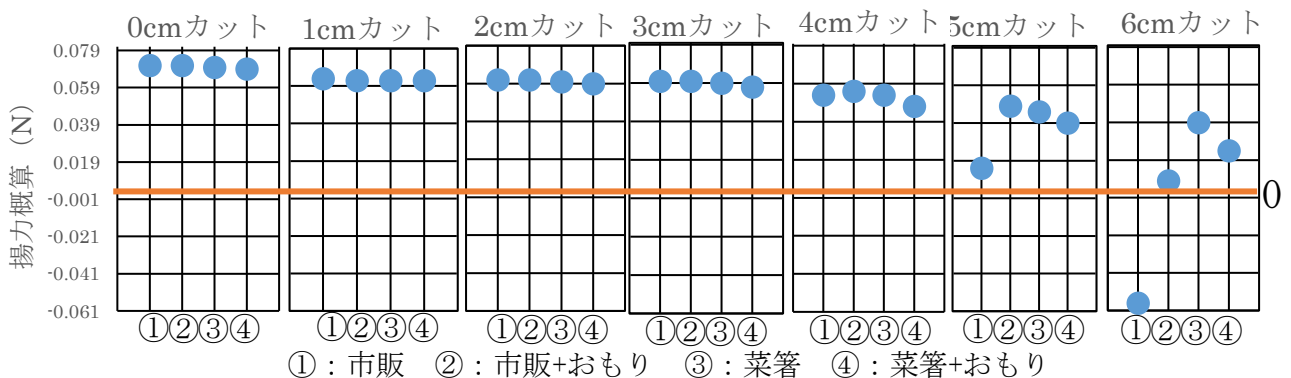


図10 各羽根の揚力

(3) 軌道性能の評価の結果

ずれ幅は菜箸おもりではカットする羽根の長くなるほど小さくなっていったが、それ以外の軸では羽根の長さによって大きく変化することはなかった。角度は市販の時では5 cm、6 cm カットで大きく乱れていたが、おもりを付けることで5 cm カットの乱れは小さくなった。菜箸の時ではおもりありでもなしでも市販のものより乱れが小さかったが、菜箸おもりは菜箸よりも乱れが大きかった。

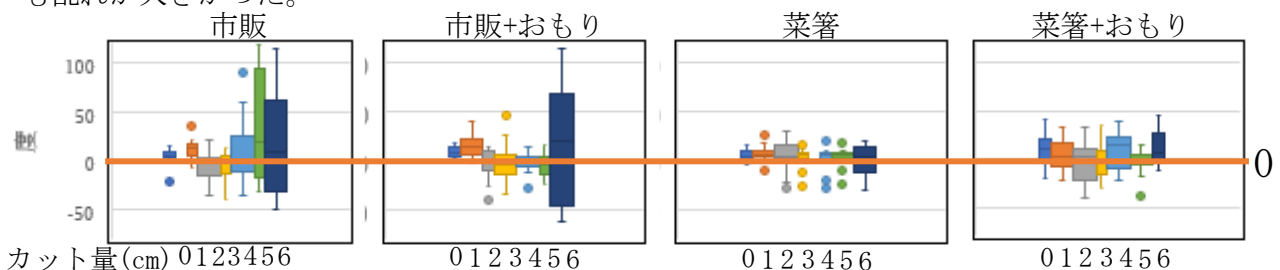


図11 各軸のずれの角度

6 振動中心と回転半径 結果と考察

(1) 振動中心の位置と回転半径の結果

各実験における、羽根の重心、竹とんぼ全体の重心、軸の重心、回転半径、振動中心、回転軸を図12から図13に示す。各マークの説明を図中に示した。図中の分数は振動中心の位置を示す。

ア 市販の軸の結果

振動中心は1 cmカットでは上部に位置しているが2 cmカットから6 cmカットでは軸の中心部付近に位置した。回転半径は1 cm から3 cm カットでは羽根の重心とほとんど同じになった。4 cmカットから6 cmカットでは羽根の重心の外側に位置し、軸が大きくぶれていることがわかる。

イ 市販の軸におもりを付けた軸の結果

振動中心は2 cm カットから5 cm カットでは軸の中心部に位置し、1 cm カットでは比較的軸の上部に、6 cm カットでは下端付近に位置した。回転半径は1 cm、2 cm カットでは羽根の重心とほとんど同じ位置になり、3 cm カットから6 cm カットでは羽根の重心の内側に位置した。また、市販の軸と比べてぶれが減少している。

ウ 菜箸の結果

振動中心は1 cm から3 cm カットでは軸の中心より少し下側、4 cm から6 cm カットでは軸下端から軸の長さ1/4程度の所に位置した。回転半径は全体を通して羽根の重心よりも外側に位置しており、1 cm、3 cm カットでは大きく外側にずれていた。

エ 菜箸におもりを付けた軸の結果

振動中心は2 cm カットでは軸の上部に位置し、1 cm カット、3 cm カットから6 cm カットでは軸の下部あたりに位置した。回転半径は4 cm カット以外では羽根の重心付近かそれより内側に位置したが、4 cm カットではとても大きくなっていった。

(2) 考察

飛行が安定している1 cm、2 cm カットでは回転半径が軸の中心に近いものが多く、おもりをつけると1 cm、2 cm カット以外の竹とんぼも回転半径が軸の中心に近づいているため、おもりをつけるとさらに回転半径が小さくなる。振動中心が軸の重心よりも下側にあり、回転半径が羽根の重心より内側に来ているときに飛行の安定性は向上する傾向にある。

3 cm カットは解析してみるとかなりぶれているようにも見えるが飛行は安定しているため、ぶれながらも揚力が維持できているということに驚く。

性能評価で飛行距離の向上が見られたところに注目してみる。4 cm、5 cm カットでは市販+おもりが6 cm カットでは菜箸が最も飛行した。図14に4 cm、5 cm カットの市販と市販+おもり、6 cm カットの市販と菜箸の図を並べてその違いを探す。

まず、4 cm、5 cm カットの市販と市販+おもりを比べる。飛行距離が最も向上した市販おもりは市販と比べて振動中心が軸の重心より下に移動し、回転半径は羽根の重心より内側に移動している。このことより回転が安定して飛行距離が伸びたと考えられる。

6 cm カットでは市販+おもりではなく菜箸の方が、飛行距離が最も向上した。市販+おもりも菜箸も市販と比べて振動中心が軸の重心より下に移動し、回転半径は羽根の重心より内側に移動しているが、市販+おもりの方が飛行しなかったのは、振動中心が下側に行き過ぎたためだと考えられる。

つまり、竹とんぼの上部のぶれのほうが下部のぶれよりも大きいのである。4 cm、5 cm、6 cm の最も飛行した竹とんぼは振動中心が軸の重心のやや下側に位置していたので6 cmの市販+おもりほど上部と下部のぶれに差がないことがわかる。

このことから竹とんぼの形状によって揚力が変化しやすい羽根を装着しているときは振動中心が軸の重心よりやや下側に位置し、回転半径が羽根の重心より内側に位置していると飛行が安定すると考えた。また羽根に応じて安定させる重りの質量や、長さがあると考えた。

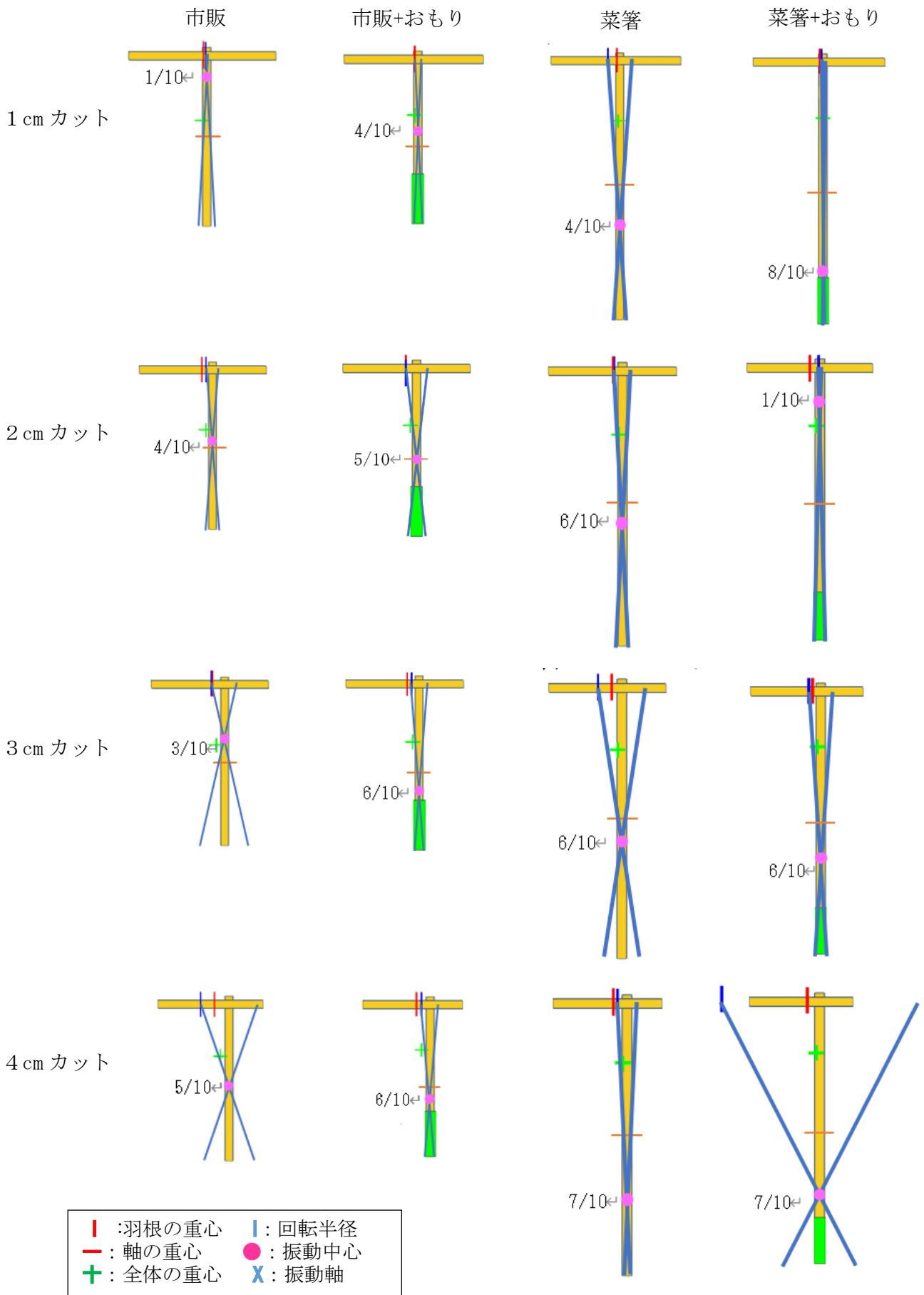


図 12 振動中心と回転半径の結果（1 cm カットから 4 cm カット）

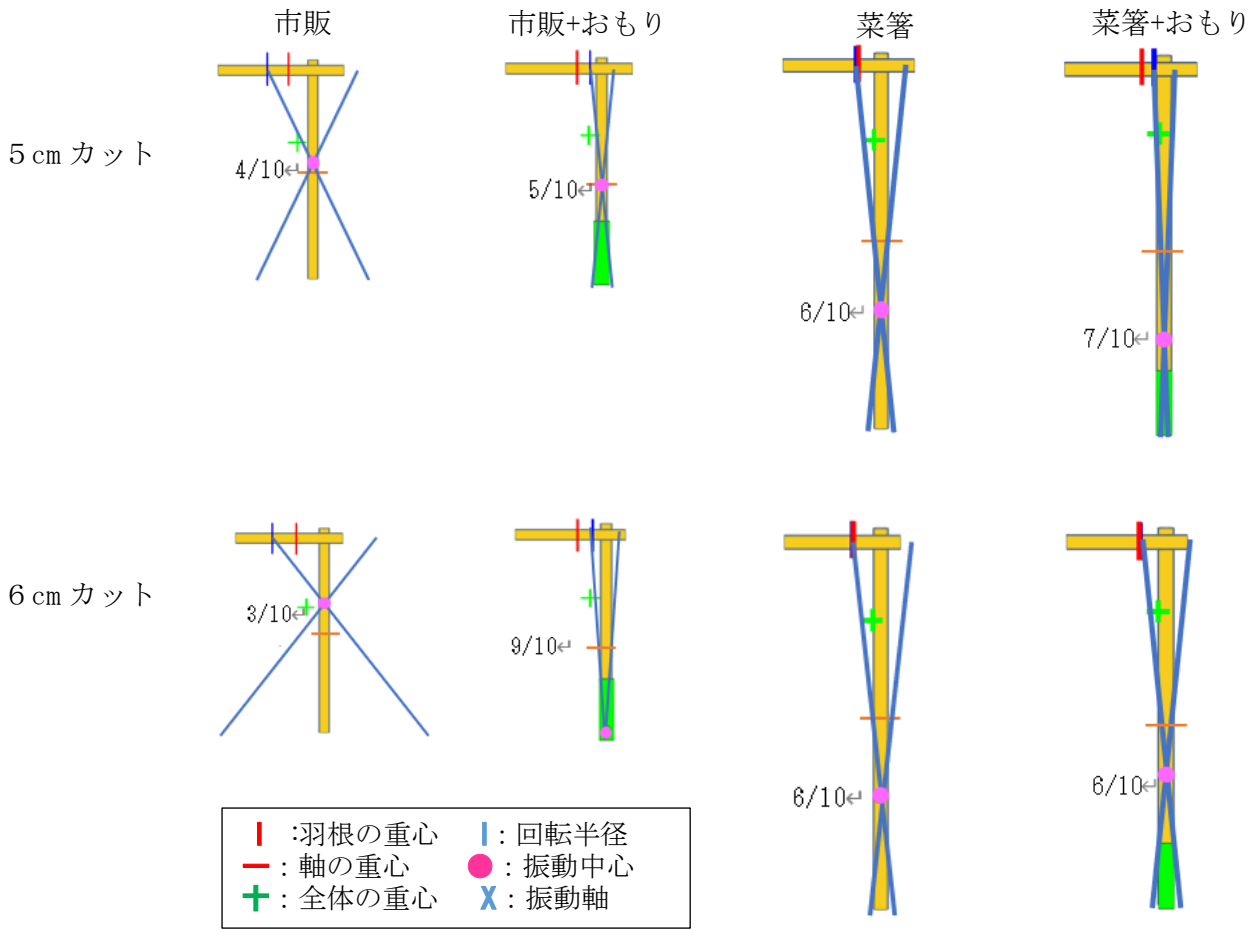


図 13 振動中心と回転半径の結果 (5 cm カットから 6 cm カット)

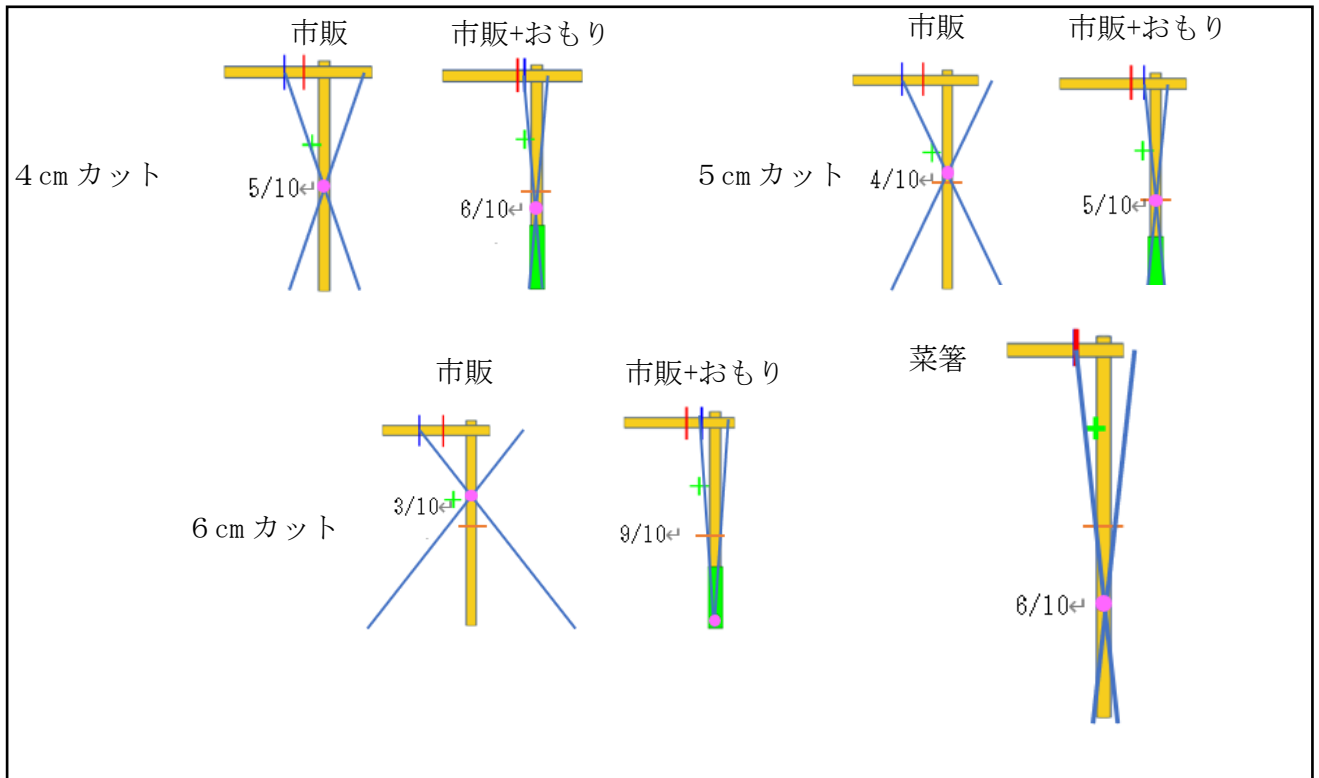


図 14 4 cm、5 cm、6 cm カットの比較図

7 まとめと今後の課題

竹とんぼの片翼を1 cm ずつカットしたら飛行しないと考えていたが、飛行性能の評価結果から1 cm から3 cm カットまでは市販品と同じようによく飛んだ。一方で4 cm から6 cm カットの場合は飛行距離が減少していて市販品のものとは違った飛行となった。しかし、軸を長くしたり、おもりをつけたりすることで飛行距離が伸び、軌道性能も向上したことから飛行の安定性が向上し、市販品の竹とんぼの飛び方に近づいたと言える。

また、揚力に着目してみると羽根の面積が小さくなるにしたがって、揚力は減少していたが、5 cm、6 cm カットではそれ以上の揚力の減少をみせた。1 cm から3 cm カットの羽根では軸の違いに対して揚力がほとんど変化していなかった。そのため、1 cm から3 cm カットでの飛行距離の減少には重さのみが関係していることがわかった。

また、運動解析からは4 cm、5 cm カットでは市販+おもりが最も飛行した。これには市販の竹とんぼよりも振動中心が軸の下部、回転半径が軸の中心に近くに移動したという共通点があった。6 cm カットでは市販+おもりではなく菜箸の方が、最も飛行した。市販+おもりと菜箸の時の振動中心がほとんど同じことから、振動中心より下部の軸がぶれを打ち消す役割を果たした可能性がある。

我々は振動中心と回転半径の移動は竹とんぼにおもりをつけたり、軸を長くしたりすることによってぶれの大きさが変化し、上部のぶれと下部のぶれが打ち消されるから飛行が安定するのではないかと考えた。

この仮説を確認するために今後は4 cm から6 cm カットの竹とんぼの軸の長さを変えて同様の実験を行い、竹とんぼと上側のぶれと下側のぶれを見比べていきたい。また、これ以外にも飛行の安定性を向上させる条件がある可能性もあるため、振動中心や回転半径以外の要素にも注意して実験を行っていきたい。

8 参考文献

ASCII ビジネス “おもしろ新入社員研修！TDK の「竹とんぼ」合宿って何？” キャリアピックアップ(2008-04-11) <https://ascii.jp/elem/000/000/124/124581/>, (2023-9-15)