

# ドローン設計・自作に関する研究 (はばたきドローン試作)

山本 淳二

第一工科大学 航空工学部 航空工学科(〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

## Study for Designing and Self Making of Drones (Trial making of an ornithopter drone)

Junji Yamamoto

Department of Aeronautical Engineering, Daiichi Institute of Technology

Abstract: With the remarkable growth of drone market recent years, it has become relatively easy to purchase drone components. At the same time, it can be expected that designing, making, and flying a drone will be a good practical education for students studying aerospace engineering. In this year, a student proposed to study an ornithopter drone which fly beautifully as a bird or a butterfly. Therefor we decided to study, design, make and fly our original ornithopter drone. In this report, we show the progress and results of our activity in this year.

### 1. はじめに

近年、ドローン関連技術の発展は著しく、多くの企業や研究機関が、それぞれ特色のあるドローンの研究・開発、また活用方法の研究、実践に積極的に取り組んでいる。また、2022年12月からは、レベル4飛行(有人地帯での目視外飛行)実現に向けた国土交通省による新たな機体認証制度や無人航空機操縦者技能証明制度も施行されるなど、法体制も順次整備されて来ている。

本航空工学科でもドローンに関連する研究を種々実施しているが、当研究室では参考文献(1)/(2)で述べたように、航空工学を学ぶ学生に対する、良い実践教育に成り得るとの考えから、学生たちに実際にドローンを設計、自作、飛行させる卒業研究を実施しており、ユニークな第一工大オリジナルドローンの設計・製造も目指している。そこで今年度は学生からの提案を受け、はばたきドローンを設計・試作することとした。また、同時に昨年度までに作成した VTOL<sup>1</sup>型ドローンについては飛行訓練の場所が限られることから、人

が少なく安全な海岸での飛行(参考情報(5)に示される特定飛行に該当しない飛行)を可能にするために、水上でも離着水できるような機体を改修することにした。水上化改修については、フロート取付けと機体の水密化が最大のポイントであったが、図.1のように、ある程度水上に離着水しても不具合なく飛行できる機体に改修できた。



図.1 水上化改修した VTOL 型ドローン

以下、本論では主にはばたきドローンに関する検討・設計・試作状況等について紹介、報告する。

<sup>1</sup>VTOL: Vertical Take-off and Landing aircraft  
(垂直離着陸機)

## 2. はばたきドローン試作の目的・目標

一般にドローンは、複数のプロペラを回転させて飛行するため、その形状は基本的に画一化される傾向があるのに対し、鳥や蝶のはばたきは自然で美しい。このような自然で美しい飛行ができるはばたきドローンを自作してみたいと言うのが学生と設定した単純な研究の目的である。よって本年度の目標として、まずは実際にモーターではばたき機をはばたかせ、ある程度飛行できるものを試作することを目標とした。

なお、はばたきドローンには、プロペラ方式のドローンに対し、静粛性や安全性の利点があるため、それを活かした活用も考えられ、種々研究も進められている。

## 3. ゴム動力による試作機作成、比較

モーターによるはばたきドローンを検討する前段として、はばたき機の基本を理解する意味でも、まずゴム動力によるはばたき機を以下のようにその1、その2、その3と3種類試作し、種々比較検討した。それらの状況により、設計・製造するはばたきドローンを決定することとした。

### 3.1 ゴム動力機試作

#### (その1)

市販はばたき機や、参考文献(3)により野中式として紹介されているはばたき機の機構を参考に図.2のような試作その1(ゴム動力)を作成した。これは、左右翼に関節はなく単純に上下にはばたく機構である。

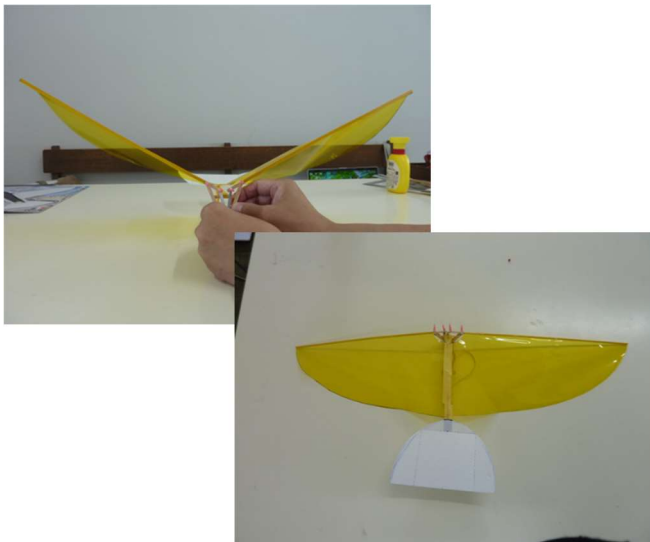


図.2 その1 (ゴム動力)

#### (その2)

参考情報(4)に紹介されている、市川式はばたき機は、左右翼を関節で内翼と外翼の動きに位相差を設け、鳥のはばたきのように動かす機構である。鳥は翼を打ち下げる際は、揚力が自重を支える方向に作用するが、打ち上げる場合は、自重を支えるのと反対方向の力を出すため不利になる。よって翼を打ち上げる際には手首から先(外翼)を折り曲げてその不利を減らすのであるが、その2は、その方式を採用して試作した。図.3にその2の完成状況を示す。

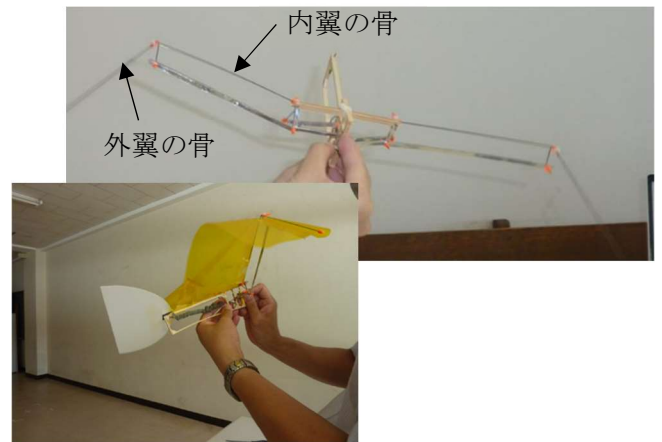


図.3 その2 (ゴム動力)

#### (その3)

その2の市川式では、内翼と外翼との位相差を $45^\circ$ とするのが重要との説明が参考情報(4)で示されている。しかしながら位相差を $90^\circ$ とした方が一方の翼が上がりきって上死点となり動きが最小になった際、他方の翼は動きが最大となるため、 $90^\circ$ の効率の方がさらに良いのではないかとの疑問が生じたため、それを検証するために、位相差 $90^\circ$ のその3を試作した。その完成状況を図.4に示す。

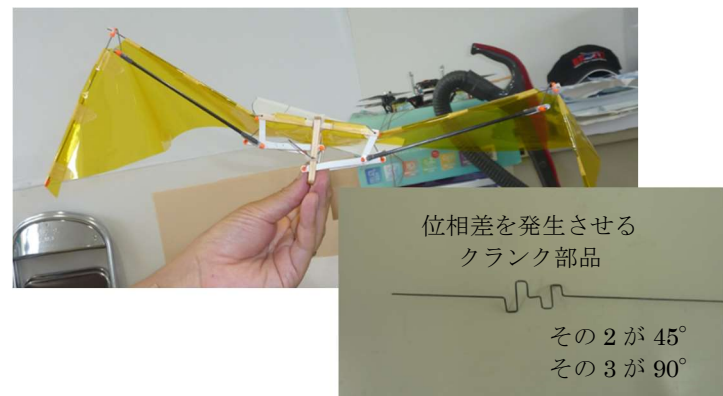


図.4 その3 (ゴム動力)

### 3.2 ゴム動力試作機の比較

これら 3 種類をそれぞれ飛行させるとともに、重量、はばたき周波数（必要トルクは周波数より推定）、推力等を簡易に計測し比較した。また動力無しの滑空性についても確認した。

周波数や推力については、採用予定のモーターと 3S(11.1V)の電池にてはばたくことができるよう機体を改修し測定した。(電池他は地上に置き、機体とは銅線でつないだ状態)

周波数については、タコメータを使用または、スローモーション動画を撮り、はばたき数を時間で割ることにより計測した。推力については、図.5のように、それぞれの機体を糸でつるし、モーターのよるはばたき開始後の距離と時間をスローモーション動画で計測し、加速度を計算、それに機体の質量をかけて計算した ( $F = m a$ )。精度も低く、誤差も大きい、3 者の簡易的な比較はできると考えた。



図.5 推力測定状況

表.1にそれぞれの測定結果の比較を示す。重量、必要トルク、推力、滑空性に優先度を設定、高い順に重み係数をつけて、総合評価の点数を付けた。表からわかるように、位相差が  $90^\circ$  であるその3が一番劣る結果となった。これは、上死点と下死点が完全に補完されることより必要トルクはやはり一番小さい結果とはなったが、推力がほとんど出ない結果となったためである。つまりはばたき自体に使うエネルギー効率は良いが、内翼と外翼の動きの位相が推力を上手く出す位相になっていないためであることがわかった。推力を十分出すにはうち下げ時に翼をしっかり開き自重を支える方向の力と推力を得て、打ち上げ時には自重を支える方向とは逆方向となる不利な力を出さないよう外翼をうまく下方向に折り曲げる必要があり、その動きを実現する位相差がその2の  $45^\circ$  になると言うことが実験を通して確認できた。またこれが鳥のはばたきにも近い動きとなっていると考えられる。

ゴム動力による飛行状態については、その3は推力が出ないため、ほとんど飛ばず、その1とその2では、やはり重量の軽いその1の方が 10m 弱と良く飛んだ。ただし、推力と必要トルクの優先度を高くした結果、総合結果の一番良いその2をベースに、モーターによるはばたきドローン(はばたき機その4)を設計・製作することとした。

表.1 ゴム動力羽ばたき機 機構方式による比較

◎:最良...3点  
○:良...2点  
△:劣る...1点

条件等	重み係数	その1	その2	その3
機構方式	-	野中式	市川式	市川式を位相差 $90^\circ$ に変更
機構の特徴/ エネルギー効率	-	単純なはばたき式(関節なし) 上:下死点で空転状態(上下の変位が小さくなる)となり動力エネルギーの伝達効率は悪い	とりのはばたきを模したはばたき式 (位相差 $45^\circ$ ) 内翼と外翼の位相差を $45^\circ$ とすることにより、一方が空転状態に入り出すと同時に他方は変位が大きいフェーズに入るため伝達効率の低下を補いあえる	とりのはばたきを模したはばたき式 (位相差 $90^\circ$ ) エネルギー効率の悪い上死点、下死点が完全に $90^\circ$ ずれるため $45^\circ$ より上手く補完しあえる可能性があると考えた
重量	2	19.9gf	35.2gf	35.1gf
必要トルク	3	大 (2.9Hz)	中 (3.7Hz)	小 (4.1Hz)
推力	4	1.94gf	2.20gf (フィルム補強後)	0.28gf (フィルム補強なし)
滑空性確認	1	3.63m/s (5.00m/1.38s)	7.2m/s (フィルム補強後6.30m/0.88s)	3.48m/s (フィルム補強無4.35m/1.25s)
総合評価	-	おもに機構がシンプルで重量に優れるが必要トルクが大きくモーターの負荷が大きくなる	重量的にその1より劣るが、必要トルクが小さく、推力もある程度出るので、これを採用する	必要トルクが小さいが、推力がほとんど出ない



## 4. はばたきドローンの設計・製造

### 4.1 サイジング

その2 (ゴム動力) をベースに、採用予定のモーター、電池、ESC、受信機等の重さから、機体重量を推定し、はばたきの推力による前進速度で、この重量を浮かせるだけに十分な翼面積をまず設定した。以下に計算過程、結果を示す。

#### 【仮定】

- ・推定重量：150[gf]
- ・速度  $v$ ：7.2[m/s]・・・その2の滑空速度から
- ・主翼スパン：0.96[m]
- ・ルートコード長：0.18[m]
- ・主翼面積:0.119[m<sup>2</sup>]
- ・揚力係数  $C_L=1.0$

#### 【揚力計算】

揚力： $L=1/2\rho v^2 C_L S$

空気密度  $\rho=1.225[\text{kg}/\text{m}^3]$  とし、上で過程した値を入れると、

揚力  $L=385[\text{gf}]$

となり、 $C_L$  や  $v$  が多少小さくても妥当な揚力が出ると考え、上で過程した主翼スパン、ルートコード長、主翼面積を採用することとした。

尾翼については、実際の鳥アジサシの尾翼形状から、上底 0.08[m]、下底 0.2[m]、高さ 0.1m の台形状とした。

### 4.2 設計

その2 (ゴム動力) をベースに、4.1 項サイジングの結果を反映し、概略の形状、構成、部品形状等をポンチ絵レベルで作成したのち、部品表を作成、3D-CADにてモデル化、図面化した。図.6に3D-モデルを示す。主翼の補強材の入れ方はその2で検討、推力増加に効果のあったものである。モーションスタディにより、はばたきの動きも確認した。

材料はその2と同等であり、胴体には  $2 \times 4\text{mm}$  ヒノキ材、クランクや主翼の骨には、 $\phi 1\text{mm}$  ピアノ線、リンク機構には  $1\text{mm}$  アルミ板、主翼のフィルムには、ラジコン機の主翼等に貼る薄く軽量のカバーリングフィルム、補強材は  $3 \times 0.5\text{mm}$  の

カーボン材、尾翼には  $1\text{mm}$  スチレンフォームなどを使用することとした。

なお、モーターは安価な Akozon ロングシャフトモーター(商品名)、12V、減速機つきで無負荷時 400RPM(6.7Hz) のブラシモーターである。ESC(Electrical Speed Controller)は、やはり安価な自動車模型用の 20A ブラシモーター用のものである。受信機および送信機(プロポ)は参考文献(2)で紹介したラジコン機に用いたものを用いた。使用するモーターの個数であるが、主翼スパン長は、その2の約 1.45 倍である。参考文献(3)によると、はばたきに必要の主翼付け根のヒンジ周りのモーメントはスパン長の 5 乗に比例する。よってモーターのトルク不足対応のため、モーターは 2 個とし、市販の模型用ギアを使用したギアボックスを作成し 2 個のモーター出力を 1 軸に合わせてはばたきの動力とする方式を取った。

また、尾翼はプロポからの信号をサーボモーターが受けて左右にロールし旋回できる機構とした。

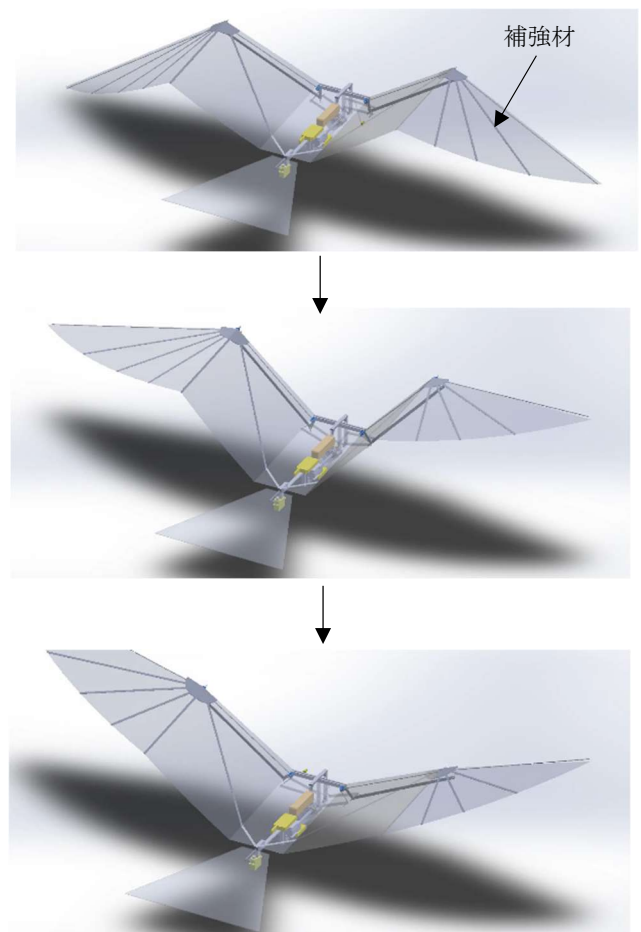


図.6 3D-モデル

(卒業研究の一環で学生が作成)

## 4.3 製造

### 4.1 当初設計

作成した CAD 図面から部品図を作成し、それに基づいて各部品を作成し組み立てた。

当初設計の完成状態を図.7に示す。この状態で、電源を入れ、送信機（プロポ）のスロットルを上げモーターを回転させたところ、数度ははばたくものの途中で止まる事象が発生した。原因は図.8に示すようなモーターを2個用のギアボックスでの不具合であった。滑りやかみ合いに関して数度の微調整を試みたものの、手作業によるギアボックス組立て作業の精度があがらず、結果上手くはばたくことができなかった。



図.7 当初設計での完成状態

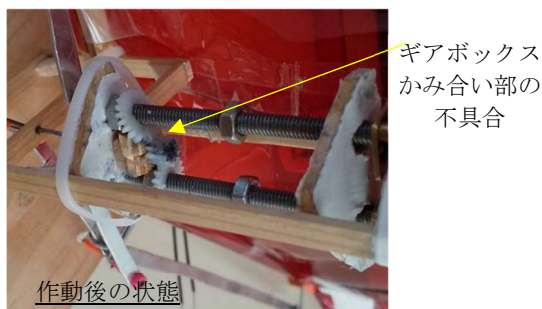
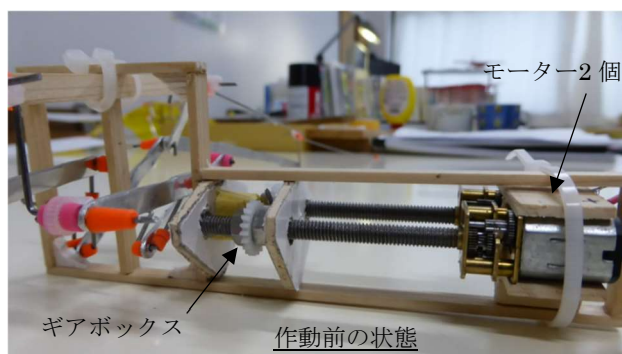


図.8 ギアボックス不具合

### 4.2 設計変更

当初、主翼スパン長が大きく、トルク不足を懸念してモーターを2個としたが、上手く作動させることができなかったため、トルク不足の懸念はあるものの、モーターを1個に変更して試すこととした。図.9に設計変更後のモーター部他の状況を示す。モーターは1個でギアボックスを無くしたシンプルな形状とした。

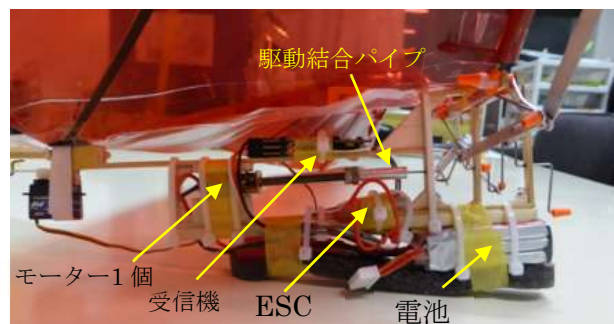


図.9 設計変更後（モーター1個）

結果として、モーター1個で上手くはばたくことができた。はばたきに必要の主翼付け根のヒンジ周りのモーメントやモーターの定格トルク等もある程度検討はしていたが、さらに精度を高め実測等で実際の値を把握しておく必要性を感じた。

## 5. 飛行確認

### 5.1 滑空確認

飛行確認に先立ち、まず現機体形状で滑空できるかの確認を行った。機体をできるだけ壊すのをさけるためモーター、電池、ESC等をつけていない軽い状態で、CG及び尾翼の角度を調整しながら滑空性を確認した。図.10に示すように、良好に滑空することが確認できた。滑空速度を上げれば、完成重量でも滑空できる見通しが得られた。

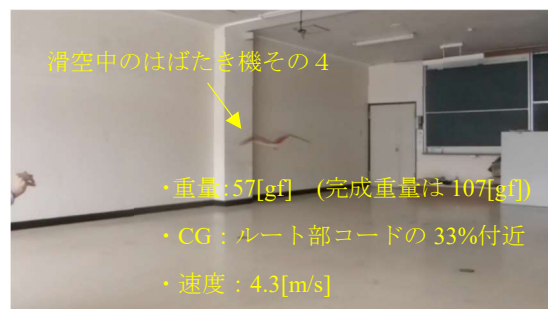


図.10 滑空確認

## 5.2 はばたき確認

図.11 に設計変更（モーター1個化）後のはばたき状況を示す。良好にはばたき、送信機（プロポ）のスロットルによるはばたき周波数の増減も可能であることが確認できた。周波数、推力をその2と同様の方法で計測した結果も合わせて図.11に示す。

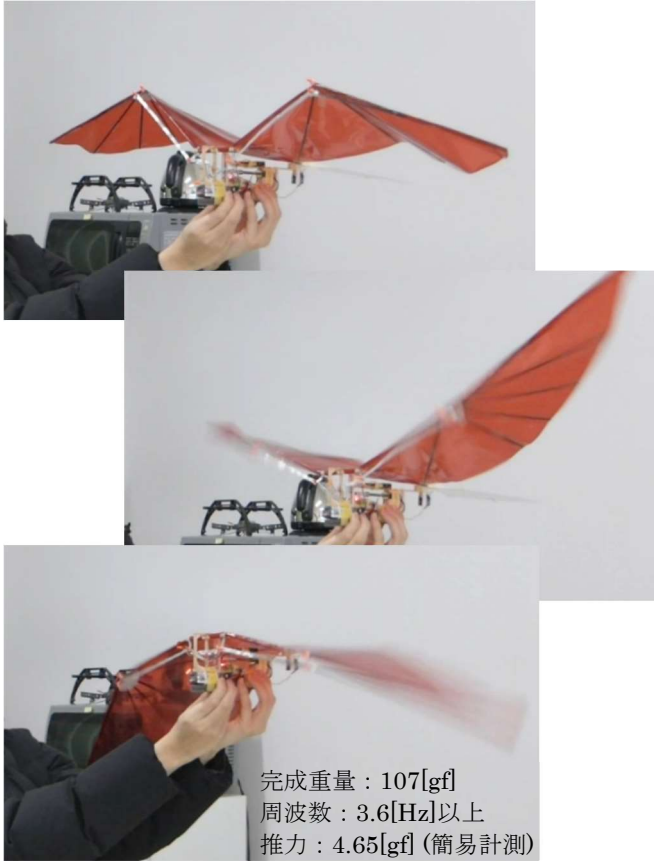


図.11 はばたき確認状況

## 5.3 飛行確認

図.12 に初回の飛行確認状況を示す。直線的に10m程度であるが、はばたきながら飛行することができた。

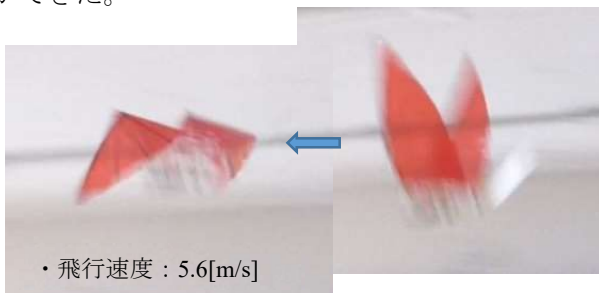


図.12 飛行確認状況

## 6. まとめ

### 6.1 今年度成果

今年度、一から始めたはばたきドローンの研究であったが、自作により鳥のようなはばたきを実現し、短い距離ながらある程度飛行できるところまで来ることができた。種々工学的知見が得られたこともさることながら、進むたびに都度出てくる課題に対して一つ一つしっかり向き合って対応できたことを、これから社会に出て行く学生も意義深く感じてくれたようである。

### 6.2 今後の予定

今後、はばたき機をさらに長時間、制御しながら飛ばせるようにするため、以下のような検討を進めることを考えている。

- ・風洞試験にて、はばたき機その4のはばたき時および滑空時の揚力、推力、抗力等の定量的データを取得する。
- ・そのデータより、はばたき機その4の改善点を検討、設計変更、製作、飛行確認を行う。
- ・VTOL型ドローンやはばたきドローン等から得られた知見等も活かし、ユニークな第一工大オリジナルドローンの開発を目指す。

### 謝辞

何事にも前向きに卒業研究に取り組んでくれた、2名の本年度卒論生に大変感謝いたします。

### 参考文献及び情報

- (1) 山本淳二：“ドローン設計・自作に関する研究”，第一工業大学研究報告，第33号，pp.1-8，(2021)
- (2) 山本淳二：“ドローン設計・自作に関する研究（VTOL型ドローン試作）”，第一工科大学研究報告，第34号，pp.1-6，(2022)
- (3) 東昭一：“模型飛行機と風の科学” 電波実験社
- (4) “市川式羽ばたき飛行機（メカニズムの紹介）”  
<https://www.youtube.com/watch?v=Joht8NTiuSE>
- (5) 国土交通省 HP：“無人航空機の飛行許可・承認手続き”

<https://www.mlit.go.jp/koku>

[/koku\\_fr10\\_000042.html](https://www.mlit.go.jp/koku_fr10_000042.html)