

ドローン設計・自作に関する研究 (VTOL型ドローン試作)

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 VTOL 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. Therefore, based on the research results of self-making drones until last year in our laboratory, we designed and made a VTOL drone and conducted flight confirmation. In this report, we show the progress of our trial making of VTOL drone (VTOL#01) 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。

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)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、飛行させる研究を実施している。本年度も昨年度に引き続き、VTOL¹型ドローン実現に向けての研究を行った。VTOL型ドローンは通常の固定翼機にドローンの要素を加えた航空機であり、その実現には従来の航空工学の知識に加え、ドローンを制御する重要な部品であるFC(フライトコントローラー)の設定、プログラミング等のIT(Information Technology)的要素を含めた知識、経験も必要となり、教育的にも良い教材になるのではないかと考えている。

本報告では、当研究室でのVTOL型ドローン試作についての本年度の進捗を紹介、報告する。

2. 改良型ラジコン固定翼機

2.1 昨年度からの改善

参考文献(1)で報告したように、VTOL型ドローンは飛行機モードにおいては、通常の固定翼機として飛行するため、固定翼ラジコン機の特徴を把握することも必須である。よって昨年度、参考情報(2)で設計情報が公開されている実績のあるラジコン機を参考に、主に修理しやすさの観点から軽微な設計変更を加えた機体(RW-1)を自作し、まずラジコン機の定性的な特徴を把握した。本年度、より安定した飛行を実現することを検討した結果、RW-1は参考情報(2)のオリジナルな機体に比較し、以下の点で劣っていることが分かった。

① 水平尾翼容積と垂直尾翼容積が小さい

② 主翼表面素材変更等により重量が重い

また、製作上の精度が良くなく、上反角が設計より小さくなってしまっていた。よって、よりオリ

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

ジナルに近いものに戻り再製作することにした。
図1にRW-1とRW-2の完成状況を示す。

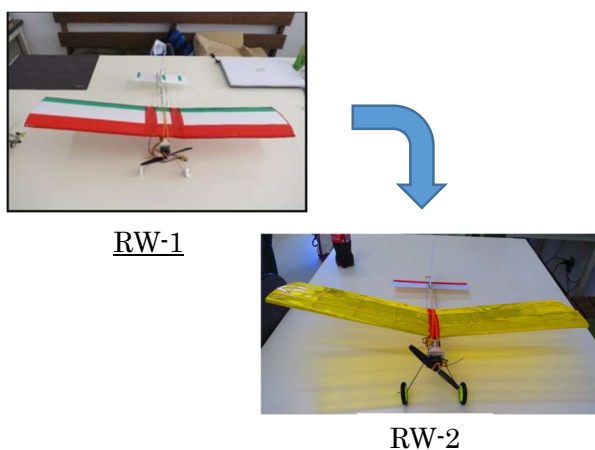


図1. ラジコン固定翼機の改善

2.2 設計・製作

以降のVTOL型ドローン設計のために前段として、参考情報(2)の設計情報をもとに、3D CAD (Solidworks)でモデル化し、3面図・部品表・部品図を作成し、それをベースにバルサ材などを加工し組み立てた。非常に簡単な例ではあるが、ものづくりの基本的な流れを学生は体験した。

2.3 飛行完熟

RW-2を使用し飛行完熟を実施し、昨年度に比べ、狭くて飛ばしにくい体育館でも、かなり安定して飛行させることができるようになった。図2に飛行状況一例を示す。



図2. RW-2 飛行状況

飛行完熟の中で得た知見を以下に示す。一般的な事項ではあるが、学生自らの体験より得た知見である。

- ・単発機の左旋回傾向への対策として、送信機側でもラダーのトリム量を調整する
- ・低速で飛ばすには、エレベータを若干上向きにしてトリムさせる (アップトリム)

- ・尾輪式のため離陸時のまっすぐな滑走が難しいが、最初エレベータを一旦下げ、早めに尾輪を浮かせると、まっすぐ加速し浮きやすい。
- ・浮くまでは脚の抵抗のためスロットルを上げる必要があるが、浮いた後は、そのままでは一気に上昇するので、ゆっくりスロットルを下げる。
- ・水平飛行 (トリム) に入るにはエレベータ調整よりも、スロットルによる速度調整を優先する。
- ・旋回を始めると高度が下がるので、スロットル調整が必要。
- ・急なラダー操作は失速する。

3. VTOL 型ドローン

昨年度までの研究成果および2項でのラジコン固定翼機での経験・知見をベースにVTOL型ドローンの試作にとりかかった。形態は、4枚のVTOLプロペラと1枚の前進プロペラを装備するもっともシンプルなNon Tilt型のVTOL型ドローン (Quadcopter) とし、名称はVTOL#01とした。

3.1 主要諸元設定

まずは、VTOLドローンとして正常に飛行できることを目標とし、ペイロードは考慮せず、さらに製作のしやすさも考慮し、主翼は矩形翼、尾翼形状はRW-1/RW-2の相似形とした。これらをベースに機体主要諸元を以下のように設定した。

3.1.1 重量/巡航速度/主翼面積等

- ・目標重量：約1,200gf
昨年度自作した#4号機ドローン(約700gf)とラジコン機RW-1(約210gf)から設定。
- ・巡航速度：約40km/hr (11.1m/s)
RW-1、RW-2の経験より、まず安全に飛行させるにはこの程度の速度が限界と考えた。
- ・主翼面積： $1.2\text{m} \times 0.24\text{m} = 0.288\text{m}^2$
約40km/hr(11.1m/s)の巡航速度で自重1,200gf程度の揚力が出る面積とした。
- ・主翼翼型：Clerk Y
RW-2と同。(底面が直線で製作容易)
- ・アスペクト比：5
RW-2の4.4と同レベルとした。

- VTOL プロペラ間距離：0.56m
8”プロペラの吹きおろしが主翼にかからない寸度とした。
- 重心位置：主翼 MAC (平均空力翼弦) の 33%程度とし、4 枚の VTOL プロペラの中心を重心に一致させた。

3.1.2 水平尾翼・垂直尾翼面積

ラジコン固定翼機の実績を踏襲し、尾翼容積が RW-2 よりも若干大きい値となるように、水平尾翼・垂直尾翼の面積を決定した。

- 水平尾翼容積：

$$V_H = \frac{S_H \cdot L_H}{S \cdot MAC} = \frac{0.145 \times 0.43 \times 0.55}{0.24 \times 1.2 \times 0.24} = 0.50$$

- 垂直尾翼容積：

$$V_V = \frac{S_V \cdot L_V}{S \cdot \text{翼長}} = \frac{0.155 \times 0.21 \times 0.55}{0.24 \times 1.2 \times 1.2} = 0.052$$

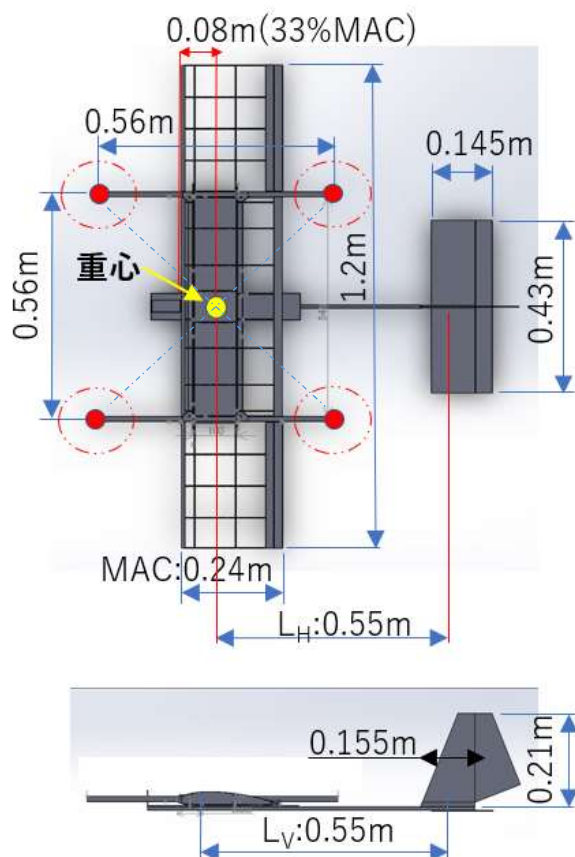


図 3. VTOL#01 主要寸法

3.2 設計

前項での主要諸元をベースに 3D CAD (Solidworks)にてモデル化・3 面図作成・部品図作

成を実施した。

強度的に最も弱いと思われる左右翼取付け部や胴体と主翼の結合部については、簡単な強度検討も実施し、飛行荷重 (10G 程度を想定) に対しては問題ないレベルであることも確認した。

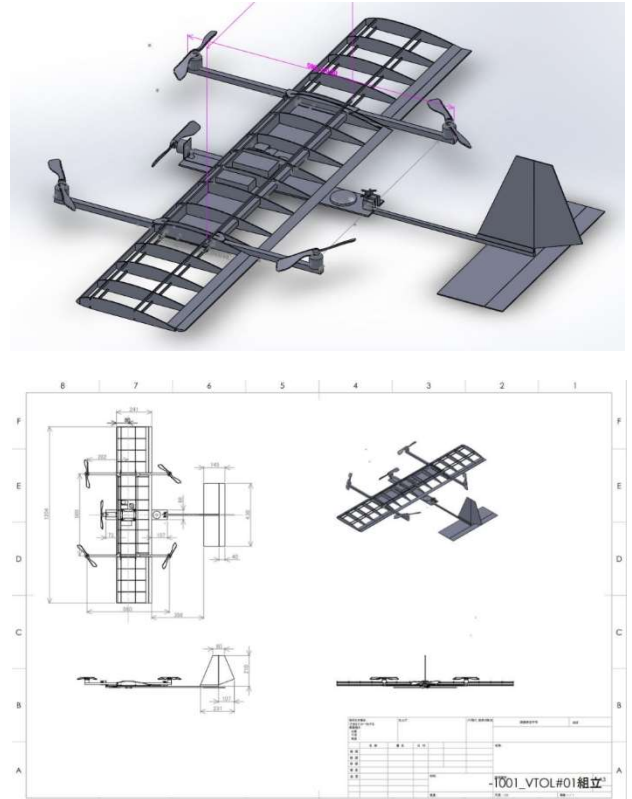


図 4. VTOL#01 3D モデル/3 面図

3.3 製作

製作方法は、基本的には RW-2 を踏襲、バルサ材・ヒノキ材・シナベニヤなどの木材を中心に製作。モーター取付け部等にはアルミ板等、主翼には軽量の熱収縮フィルムを使用した。曲線形状のある部品リブ等の部品は作成した部品図を 1/1 に焼いて型紙を作り切り出して作成した。

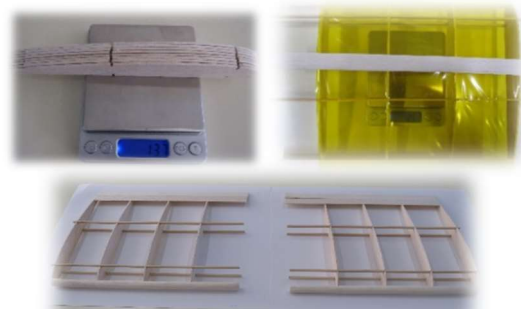


図 5. 部品切り出し/組立て

3.4 FC 等部品搭載/配線/設定

ドローンをコントロールする重要な部品である FC (フライトコントローラー) や ESC (Electric Speed Controller) を含めた部品は、基本的に昨年度、オープンソースプロジェクトである Ardupilot を活用して自作した#4 号機ドローンと同じ部品を使用し、配線等もこの経験を活かした。Ardupilot では通常のドローンのみではなく VTOL 型ドローン(Quadcopter)も固定翼のカテゴリーとしてサポートしており、参考情報(3)に種々詳細な情報を公開している。最初の VTOL 型ドローンを安定して飛行させるにあたり、この実績のある情報を十分に活用した。FC は Pixhawk を使用し、これに PC にインストールした GCS (Ground Control Station) である Mission Planner (M/P) を用いて、VTOL 用のファームウェアをインストールした。

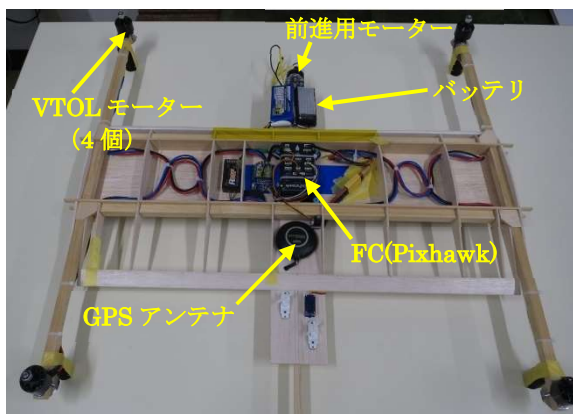


図 6. 部品の搭載/配線

図 6 に機体の中心をなす VTOL 部分に各種部品を搭載/配線した状況を示す。これに左舷、右舷の主翼および尾翼を取り付け、つなぎ部分のフィルムを貼り、プロペラ、バッテリー等を取り付けて完成した。完成状況を図 7 に示す。

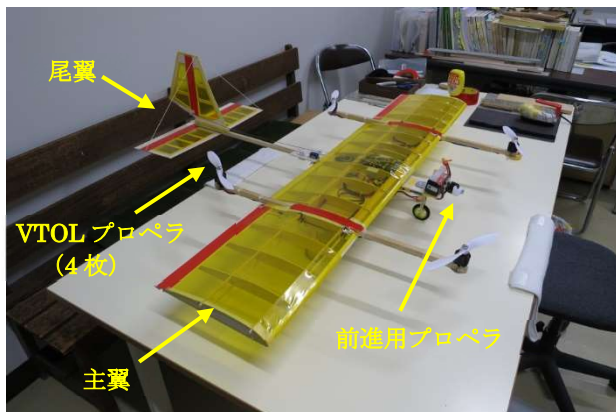


図 7. VTOL#01 完成状態

3.5 VTOL 推力測定

ドローンモードで 4 枚の VTOL プロペラが適正な推力を出せるかの計測を参考文献(1)に示したのと同様な簡易な方法で実施した。すなわち推力が下方に出るようにプロペラを取付け、各プロペラ下方に計量計を置き、スロットルを上げ計量計の目盛りをカメラで撮影、記録した。

その結果、VTOL モーター用に 3S バッテリーを使用したケースでは、推力は 4 つの合計が 1000gf~1200gf 程度と十分ではなかったが、4s バッテリーを使用した場合は、2000gf 程度とホバリングにも十分な推力が得られることが確認できた。

3.6 主翼揚力確認

VTOL 型ドローンは、前進モーターによる前進速度が十分大きくなると主翼が揚力を分担し、飛行機モードとして飛行し VTOL プロペラの推力は不要となる。よってバッテリー消費が抑えられ通常のドローンよりも長距離飛行が可能になる。そこで VTOL#01 を初飛行させる前に、主翼が十分な揚力を発生するかを、VTOL プロペラを外した状態で地上滑走することにより確認した。その結果、主翼は想定程度の速度(40km/hr)で、自重を浮揚させるだけの揚力を発生することを確認できた。

3.7 飛行確認

飛行確認は、参考情報(4)で規定される飛行禁止空域でない場所にて、かつ安全のため機体と地上に置いたウェイトを十分な強度のテグス (以降バンジーテグスと言う) で繋ぐことにより実施した。なお、本年 6 月、航空法改正により無人航空機の登録が義務化されるため、事前登録申請を行い、登録番号を機体に貼付した。

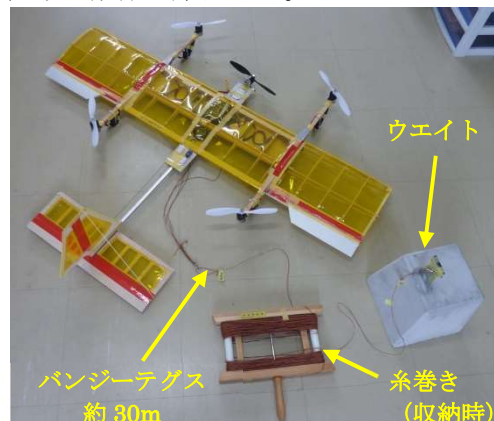


図 8. バンジーテグス

3.7.1 飛行モード切替え

VTOL 型ドローンは、まずドローンモードで離陸、モード切替えスイッチを切り替えた後、前進モーターで前進、加速し飛行機モードへと遷移して行く。着陸時はその逆で飛行機モードからスイッチを切り替え、ドローンモードに戻りホバリング後、着陸する。

ドローンモードでは通常のドローンと同じく、ピッチ・ロール・ヨーの動きは4個のVTOLモーターの回転数の調整でコントロールするのに対して、飛行機モードでは主翼のエルロン、尾翼のエレベータ、ラダーを動かしコントロールする。よってモードスイッチ切替えにより、送信機の左右スティックの役割も変わる。

また、不時の際にはモーターを停止できるエマージェンシー・モーター・ストップを送信機のスイッチに設定した。



図 9. 送信機スイッチ

*飛行モード切替えスイッチ；
 上段：QSTABILIZE モード (通常のドローンモード)
 中断：QHOVER モード (高度・位置保持ドローンモード)
 下段：FBWA モード (一般的な飛行機モード)

3.7.2 ホバリング

事前に安全上の注意事項を再周知し、またバンジーテグス(半径約 30m)により、機体が不意に安全なエリアから出て行かないことを確認したのち、ドローンモードでホバリングを実施した。

結果、#4 号機ドローンに比較して重量が重く、慣性も大きいことから、スティックに対する機体

の反応が緩やかで操縦しやすく、運動性よりもまずは安定した飛行を目標としている点からすると、良好にホバリングできることが確認できた。



図 10. ホバリング状況

3.7.3 飛行機モードへの遷移

続いてモード切替えスイッチを切り替えて、飛行機モードへの遷移を試みた。スイッチを切り替えた後、前進用プロペラが回りはじめると、しばらくして前進をはじめ、徐々に加速する。飛行機モードではスロットルスティックは前進用モーターの回転数を調整するため、スロットルを上げると加速も早くなる。ある程度、直線飛行したところでモードスイッチをドローンモードのQHOVERに戻すと、良好にホバリングに遷移できた。ただし、スイッチを戻した後は、スロットルスティックはVTOLモーターの調整へと切り替わるため、前進速度が速い状態でスイッチを戻した場合一旦上昇する。よってスロットルを落ち着いて調整する等、操縦の注意が必要となる。



図 11. 飛行機モードへの遷移

3.7.4 旋回飛行

次に飛行機モードでの旋回飛行をこころみた。モードスイッチを飛行機モードに切り替えた後、送信機の右スティックを左に倒し、エルロンで左へロールさせる。速度が低い状態では、VTOLプロペラは推力を出すと同時に機体制御の補助も

行うので、機体は比較的容易にロールし旋回に入る。速度がある程度上がると、VTOL モーターの寄与は低くなり、エルロンでのコントロールが主となる。さらに主翼のみで揚力が十分出る速度に達すると VTOL モーターの寄与はなくなる。

操縦の観点では、2.3 項で飛行完熟を実施したように、固定翼ラジコンでは、離陸時は十分な速度を得るまでの滑走が必要であるのと、常に速度が必要であるため、通常のドローンよりも操縦の難易度は高い。今回の VTOL#01 の飛行においては、バンジーテグスを付けた状態であるため、旋回半径約 30m の円内での飛行と言う制約があることもあり、やはり飛行機モードはドローンモードに比較して操縦の難易度が高かった。しかし VTOL 型ドローンは、第一に離陸滑走が不要なこと、また飛行機モードでコントロールが難しくなったと感じた際、ドローンモードに戻して空中静止できるというメリットも大きく、もちろん十分な完熟訓練は必須であるが、通常の固定翼ラジコンよりかなり操縦がしやすい感触を得ることができた。



図 12. 旋回飛行中

なお飛行中の速度・高度・電圧等は、機体と PC の Mission Planner (M/P) を無線通信 (テレメトリー) で繋いで実施した。テレメトリー送受信デバイスとしては、プロポと同じ 24GHz 帯を使用し、日本の技術適合証の取れている Xbee S2C を使用している。図 13 に M/P の飛行中のモニター画面を示す。



図 13. M/P による飛行状況モニター

4. まとめ

4.1 今年度成果

昨年度までの研究成果をベースに、本年度 VTOL 型ドローン(VTOL#01)を設計・試作し、ある程度の飛行確認まで実施することができた。実機製造に対して比べる由もないが、ものづくりの基本的な流れや難しさ、あるいは楽しさを学生は体験できたのではないかと考える。

4.2 今後の予定

今後以下のような予定で VTOL 型を含めたドローンの設計、自作に関する研究を継続したい。

- VTOL#01 の飛行完熟
機体を安全かつ意図通り飛行できるように飛行訓練を継続する。
- Ardupilot を活用した自律飛行検討
- 水上離着水化に関する検討
離島の多い本地域でのドローン活用を検討する一環として、VTOL#01 の水上離着水化を検討。
- ユニークな第一工大オリジナルドローンの開発

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) ”ラジコン飛行機を作ろう”,
<https://horo1929.sakura.ne.jp/index.html#bk00>
- (3) ”ARDUPILOT Versatile, Trusted, Open”,
<https://ardupilot.org/>
- (4) 国土交通省 HP: ”無人航空機 (ドローン・ラジコン機等) の飛行ルール”
https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html