

ドローン設計・自作に関する研究 — 中古農薬散布ドローン復旧

山本 淳二, 大瀧颯斗, 冷水悠真

第一工科大学 航空工学部 航空工学科 (〒899-4332 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

Study for Designing and Self Making of Drones - Restoration of a Used Agricultural Spraying Drone

Junji Yamamoto, Hayato Ohtaki, Yushin Hiyamizu

Department of Aeronautical Engineering, Daiichi Institute of Technology

Abstract: In recent years, drones have been increasingly developed and utilized to meet a variety of needs. Our laboratory has also been working on the research, design, building, and operation of a various type of drones, believing that such hands-on activities provide valuable practical education for students of aeronautical engineering. This year, our research focused on restoring a non-flyable, used agricultural spraying drone by replacing and reconfiguring its control system with the open-source Ardupilot. As a result, the goal was achieved, so we report on the activities of this year.

1. はじめに

近年、さまざまなニーズに対応したドローンの開発や活用がますます進んで来ているが、当研究室では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、学生たちに実際に種々ドローン进行設計、自作、飛行させる卒業研究を実施している。これまで、オープンソースである Ardupilot を用いた一般的なクアッドコプターから始まり、VTOL ドローン、はばたきドローンなどを学生とともに試行錯誤しながら自作、飛行させてきた (参考文献(1)~(5))。ゆくゆくは第一工大オリジナルでユニークなドローンを開発、試作したいと考えているが、本年度は第一工大におけるドローン国家資格講習会などでも協力関係にある合同会社シスルナベース殿のご好意により、使用しなくなった農薬散布ドローンを譲り受けたため、これの制御系を Ardupilot に換装、再構成することにより、再び飛べるように復旧することを目標に卒業研究に取り組んだ。

研究を進めるに当たって、これまでの自作機に比べ機体規模も大きく、無人航空機と云えども飛行させるには常に危険が潜んでいるため、安全に細心の注意が必要であるとの認識を持つことにも重点を置いた。結果として農薬散布機構も含めた復旧は成功し、良好に飛行させることができたので、この 1 年間の活動状況について紹介する。

2. 中古農薬散布ドローン概要

2.1 概要

図.1 に復旧する前の中古農薬散布ドローンの外観を示す。すでに使用されていない状態ではあるが大きな損傷はなく、プロペラ、モーター他のメカニカル部品は十分機能するものと思われた。送信機は付属されておらず、取説類もないため、無論このまま飛行はできない。そこで、この農薬散布ドローンのフレームやメカニカルな部品は基本的にそのまま流用し、フライトコントローラーなどの主要な制御系を Ardupilot 対応の部品に換

装して復旧することとした。学生が作業するにあたっては、これまでの自作で培った経験、知識を共有、活用した。



図.1 中古農薬散布ドローン

2.2 分解・清掃

まず、本中古ドローンの分解を行ったが、部品の紛失や損傷を防ぐため、丁寧に作業し部品を空き箱に分けて分類、整理した。実務に使用されていた機体であり、付着物などの汚れもついているため、部品は洗浄用アルコールなどで清掃し、同時に個々の重量も計測していった。



図.2 分解・清掃

3. 復旧検討・セッティング

3.1 機器配置・配線

分解し、各部品を調査した結果、4 個のモーター、ESC (Electrical Speed Controller)は、そのまま使用できることが確認できたため、制御の心臓部であるフライトコントローラーをこれまでの自作でも使い慣れている Ardupilot 対応の PIXHAWK (商品名) に換装することとした。その他の周辺機器である、電源モジュール、受信機、GPS アンテナ、テレメトリーアンテナなどもこれまで使用したものと同等の部品を使用した。図.3 に機器配置、接続を検討した接続図、表.1 に必要な配線、コネクタを整理したものを示す。検討にあたっては、以前自作した小型クアッドコプター実物も見ながら Ardupilot ホームページ (参考情報(6)) を参照し実施した。なお、バッテリー電源の配電盤は、そのまま活用し不要な配線を除去、追加配線をはんだ付けした。図.4 に機器配置、配線状況を示す。

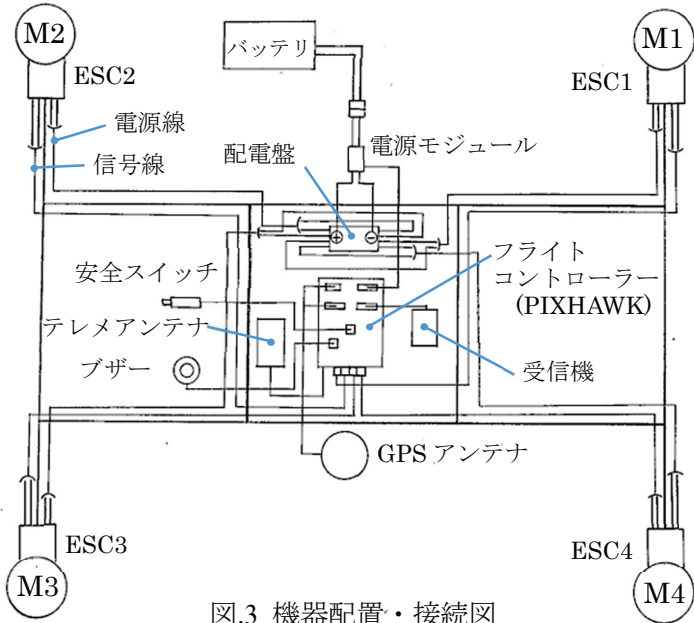


図.3 機器配置・接続図

表.1 配線・コネクタ

	機器 A	機器 B	長さ [cm]	太さ	コネクタ A	コネクタ B	必要作業
①	電源モジュール	電池	8	12AWG	—	XT90めす	Bコネクタ取付け
②	電源モジュール	配電盤	10	12AWG	—	はんだ	配電盤はんだ付け
③	電源モジュール	FC	18	細6線	—	6ピン	—
④	受信機	FC	17	細3線	3ピン	3ピン	—
⑤	ブザー	FC	15	細2線	—	2ピン	—
⑥	スイッチ	FC	15	細3線	—	3ピン	—
⑦	GPSアンテナ	FC	27	細6線	—	6ピン +4ピン	—
⑧	テレメアンテナ	FC	10	細4線	はんだ	6ピン	Bコネクタ取付け

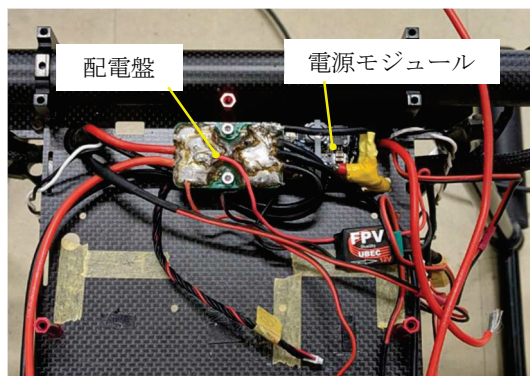
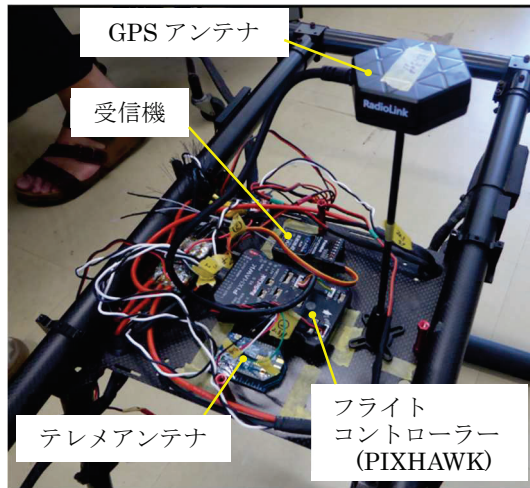


図.4 機器配置・配線状況

3.2 Ardupilot セッティング

Ardupilot で制御される機体は PC 上にインストールされたフリーソフト Mission Planner を GCS (Ground Control Station)として使用し初回セットアップ、飛行前の各種設定をするが今回も基本的に以下の流れで機体のセッティングを実施した。

- ・ファームウェア・インストール
- ・送信機（プロポ）設定・受信機とのバインド
- ・ラジオキャリブレーション
- ・加速度計キャリブレーション
- ・コンパスキャリブレーション
- ・飛行モード設定
- ・モーター作動確認

以前自作したクアッドコプターに比較し、規模が大きいので、機体を各軸にごとに回転させて実施する加速度計キャリブレーションやコンパスキャリブレーションには体力を必要としたが、男子学生が協力して実施した（図.5 参照）。また、バッテリー電圧も 22.2V（6セル）と大きいので、初

回接続時は、ヘルメット、メガネ、手袋等を必ず着用するのに加え、万が一に備えて消火器を近くにおいて接続した。また、ここまでの過程では安全のためプロペラはまだ付けてない状態である。

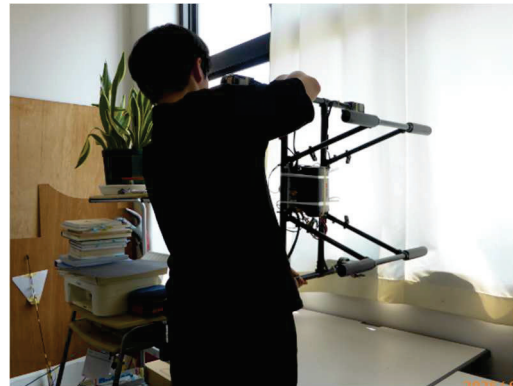


図.5 キャリブレーション状況

4. 作動試験

モーターが正常に回転することが確認できたため、プロペラを取り付けて初めての作動確認を行う上で、不意なドローンの動きや予期せぬ事態に備える必要がある。そこで、ドローンを地上に固縛した上で機体が良好に制御できているかを確認するための地上試験を実施することにした。

4.1 地上試験

地上への固縛は、図.6 に示すように、ベニア板と材木で作成した固縛板を重量のあるウエイトで地面に固定し、それにドローンの脚をタイラップで固定することにより実施した。

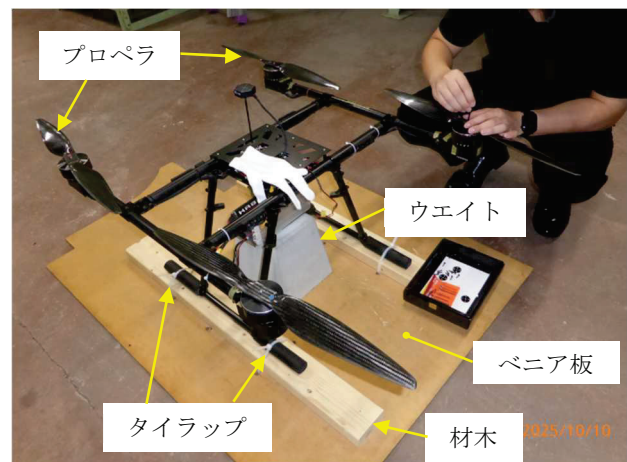


図.6 地上固定状況

地上試験にあたっては、安全第一を徹底するため以下のような手順で実施した。作動前の安全確認は、一般用ドローンの航空局フォームなども参考にし、プロペラなしで作動確認後プロペラを取り付けての作動と順を追って実施した。

- ・周囲の人の有無、プロペラと接触しそうなもの、風で飛びそうなものの有無の確認
- ・バッテリー接続時の異音、発熱等の有無確認
- ・プロペラ取付け等の緩み確認
- ・プロポ通信の異常の有無確認
- ・Mission Planner の接続、エラーの有無確認
- ・グランドランで1分程度運転後、発熱等の異常の有無確認
- ・機体に近づく際、他の人が絶対にプロポを操作しないことの徹底（不意の回転防止）
- ・異常がなければ音や様子を見ながら徐々にスロットルを無理のない範囲で上げる
- ・無理のないスロットルで、細心の注意を払いながら、前後左右ヨーの舵を入れる
- ・以上を1分程度実施し電源を切り、再度異常の有無を確認
- ・異常がなければ、バッテリーをつなぎ同上を5分程度実施する
- ・最終異常有無の確認

図.7 に地上試験の実施状況を示すが、試験の結果、特に異常はなく、プロポ操作により、機体は良好に制御できることが確認できた。

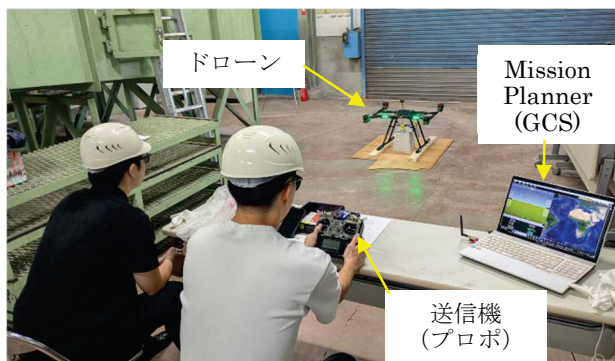


図.7 地上試験実施状況

4.2 飛行試験

無人航空機に関する航空法が 2023 年に施行されて以降、100g を超える無人航空機はすべて機体登録およびリモート ID の搭載が義務つけられているため、本機も国土交通省のドローン情報基盤サービス (DIPS) により機体登録を実施し、市販のリモート ID に機体情報を登録、搭載した (図.8 参照)。



図.8 機体登録

初飛行にあたっては安全第一を念頭に、最初は機体を重量のあるウェイトに 10m 程度のロープで係留し、予期せぬ事態等に備えた。飛行場所は、人口密集地等特定飛行にあたらぬ本学のグラウンドを使用し、DIPS による飛行計画の通報を実施した上で初飛行を試みた。

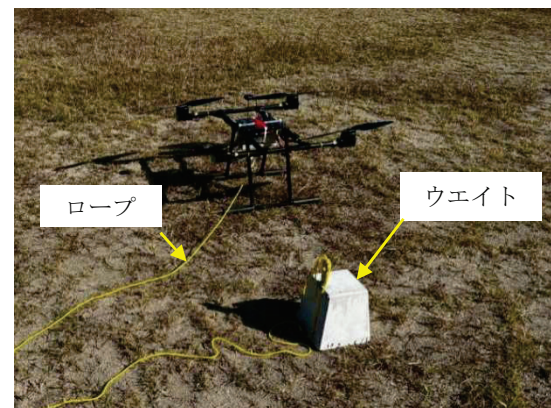


図.9 係留状況

係留飛行した結果、当初 GPS で位置保持しない飛行モード (Stabilize モード) では、多少不安定であったものの、GPS 及び気圧高度計で位置および高度を維持する Loiter モードでは、安定した飛行をすることができた。その後係留を外して飛行し、良好に安定した飛行ができることが確認できた (図.10 参照)。



図.10 初飛行状況

5. 農薬散布装置復旧

農薬散布装置については、基本的に中古の状態の部品をそのまま流用し、送信機の空きスイッチでポンプ・モーターをオン・オフ制御できるように復旧するものとした。

図.11 に示すように、送信機スイッチのオン・オフ信号(PWM¹⁾信号)は受信機を介しフライトコントローラーである PIXHAWK に入力される。PIXHAWK はその PWM 信号 (高/低) をそのまま MAIN7 ポートから図.12 に示す MOSFET²⁾基板に伝え、MOSFET 基板は PWM 高のとき、バッテリー電圧を流し、低のとき電圧を切るオン・オフ制御にてモーターをコントロールする。モーターはブラシレスの 3 相モーターであるため、この MOSFET 基板には電圧オン・オフに加え、バッテリーの直流電流を 3 相電流に変換する ESC (Electrical Speed Controller)の機能も付随されている。

¹⁾ Pulse Width Modulation

²⁾ Metal-oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

入力された PWM 信号を PIXHAWK の MAIN7 ポートからそのまま出力するために、PIXHAWK のパラメータ "Servo7_function" を "1 (pass thru)" に設定した。

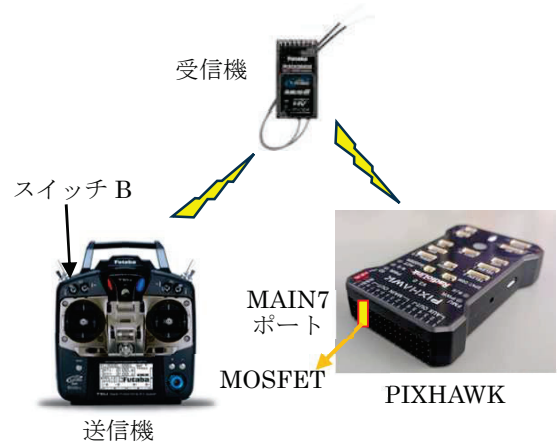


図.11 ポンプ・モーター制御

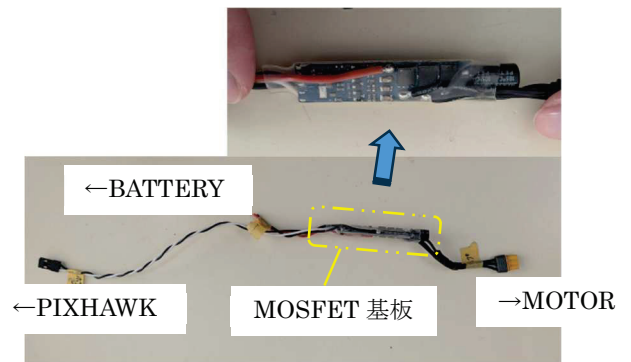


図.12 MOSFET 基板

その他の以下部品の復旧、配管に関しては、現物を見ながらそれぞれの部品の機能を確認、理解しながら組み立て復旧した (図.13 参照)。

- ・樹脂製タンク (容量 5L)
- ・ポンプ・モーター (ブラシレス 3 相モーター)
- ・ブーム (カーボン複合材製)
- ・ノズル (水圧調整ねじ付き)
- ・ビニール・チューブ配管 (分水器含む)

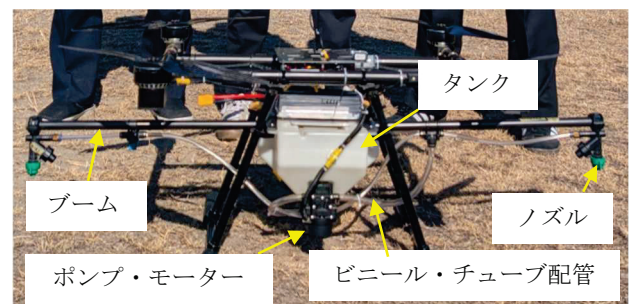


図.13 農薬散布装置

農薬散布装置復旧後、地上で水の散水を試みた。配管の分水器部やノズルの水圧調整ねじなどを試行錯誤しながら何度か調整したところ、左右から良好に散水できることが確認できた（図.14 参照）。



図.14 散水地上確認

6. 飛行試験

6.1 散布なし飛行確認

農薬散布装置も含め復旧が完了したため、まず散布はしない状態で安定した飛行ができるかどうかの飛行確認を行った。最初に水を入れない軽い状態で飛行をこころみたところ、離陸から着陸まで飛行はできたが、プロポでスロットルレバーを操作しない際にも、ときどきモーター出力が変化するなど、初飛行時に Loiter モードで安定して飛行できたときに比較して若干の不安定さが確認された。

次に水を容量の半分弱 2L ほど入れて飛行を試みた。すると離陸直後に意図せぬヨー回転をしたのち、プロポレバーでコントロールしようとしたところ、制御できずに機体が大きくロール回転し、機体は転覆してしまった（図.15 参照）。転覆時、設定しておいたエマージェンシー・モーター・ストップ・スイッチを入れてモーター回転は停止させたが、これによりフレームが一部損傷、GPS アンテナの支柱が折損した。



図.15 機体転覆状況

6.2 トラブルシュート

Ardupilot では、フライトコントローラーで自動的に飛行ログが記録されるため、これを用いて不具合の原因究明を行った。ログは PIXHAWK の Micro SD カードに記録され、これを PC 上の Mission Planner で読み込むことで、任意のパラメータの時歴などを参照することができる。また、飛行中のイベントやエラー情報なども表示される不具合究明の強力なツールである。

今回、転覆時近傍のログを見ると、図.16 に示すように、イベント情報として、EFK_YAW_RESET、エラー情報として、EFK3_IMU0_MAG0_ground_mag_anomaly, yaw re-aligned などが検出されている。EFK (Extended Kalman Filter) は、IMU (Inertial Measurement Unit: 加速度計やジャイロ)、磁気コンパス等の出力を使用して機体姿勢を推定するが、これらの情報から 0 番目の磁気コンパス (MAG0) の出力がなんらかの異常で、EFK がヨー方向の姿勢推定をリセットしたものと考えられる。同図にはプロポでの入力信号(RCIN)と磁気コンパスの出力信号(MAG0)の時歴を示すが、スロットルを徐々に上げる際に、ピッチ、ロール、ヨーはコントロールしてないにもかかわらず、MAG0 の各軸出力(X,Y,Z)が途中で大きく変動したのちリセットされ、その後も信号が安定せず明らかに磁気コンパスに異常が発生している様子が良くわかる。

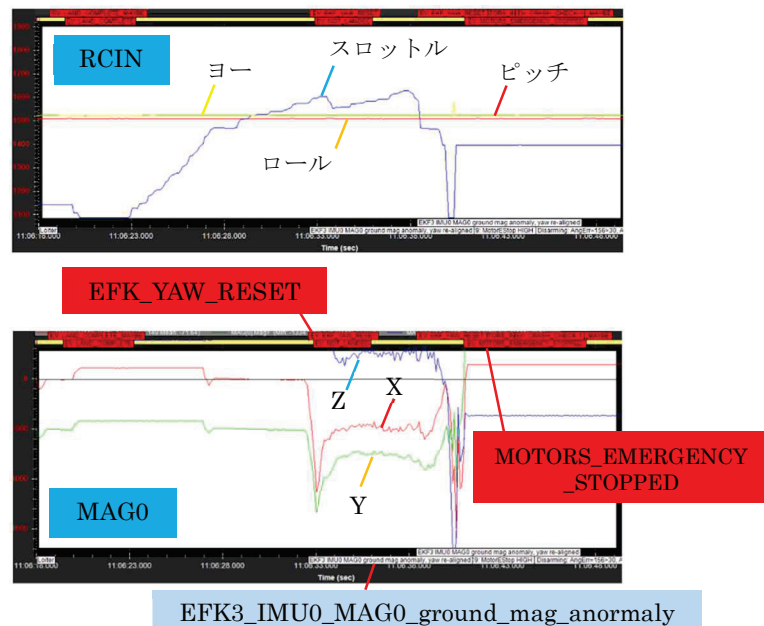


図.16 転覆時近傍のログ

磁気コンパスの不具合要因として、初飛行時との違いを考えたところ、農薬散布装置のポンプ・モーターオン・オフ用の MOSFET 基板の追加の影響があると推定した。図.17 に当初の本基板の取り付け状況を示すが、PIXHAWK 近傍の信号線と絡めて固縛しているため、PIXHAWK 内蔵のコンパスに悪影響を与えている可能性が高いものと判断した。

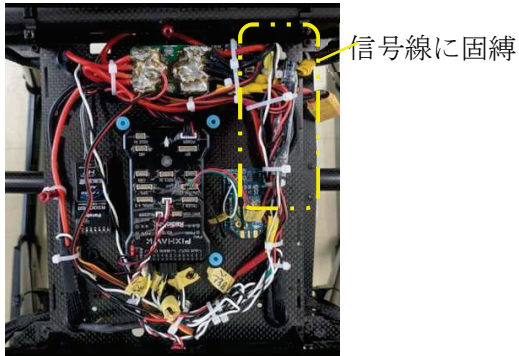


図.17 当初の MOSFET 基板

よって、不具合対策として、本 MOSFET 基板の取り付け位置を改善することと、当初磁気コンパスとして、PIXHAWK 内蔵コンパスを適用する設定としていたが、MOSFET 基板他の機器から距離の離れた GPS アンテナ内蔵の外部コンパスを適用する設定に切り替えることとした。

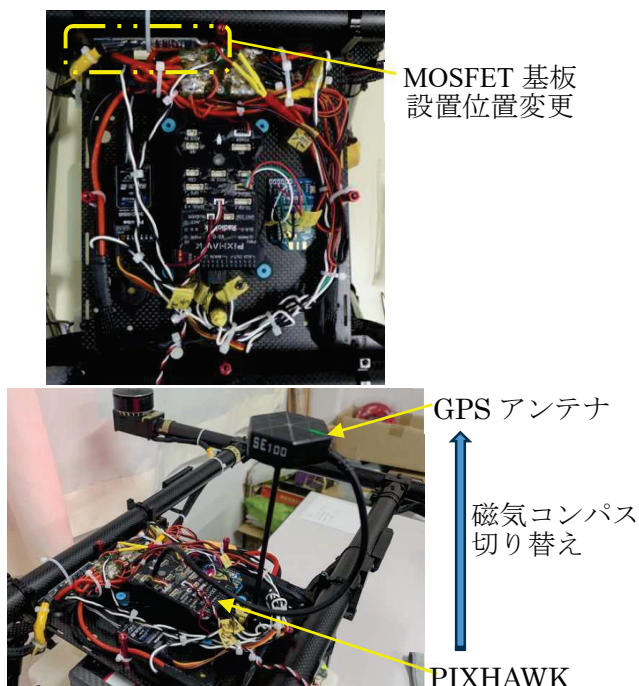


図.18 磁気コンパス不具合対策

また、損傷したフレームはガラス・クロスとエポキシ接着剤で補強、修理した。折損した GPS アンテナ支柱は交換した。

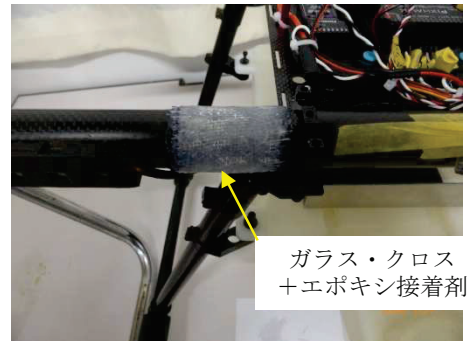


図.19 フレームの修理

6.3 再飛行確認

以上の改善、修理を実施した状態で、タンクが空の状態、2L、5L 弱の状態再度、飛行確認を実施した。その結果、当初の不安定さは解消し、初飛行時と同等の安定した飛行が実施できた。



図.20 再飛行確認

6.4 散布飛行試験

農薬散布も航空法上は物件投下にあたるため、今回水で散布確認を行うにあたって DIPS による飛行許可申請を実施し承認を得た。地上で左右から水が良好に出るように調整した上で、これまで同様、安全に十分注意しながら離陸させた後、プロポのポンプ・モーター用スイッチをオンにしたところ、図.21 に示すように良好に水を散布させながらの飛行を達成した。



図.21 水散布飛行試験

5. まとめ

本年度は、飛行不能状態にあった中古農薬散布ドローンの復旧および飛行の実現を目的とし、その目標を達成できた。また、農薬散布装置も復旧しプロポの空きスイッチを使って飛行中にオン・オフし良好に水を散布することもできた。これらの成果および得られた知見等を以下に記す。

- ・フレーム、モーターなどの正常なメカニカルな部品はそのまま流用し、心臓部であるフライトコントローラー等の制御系を一般に公開されているオープンソースの Ardupilot に換装、適切にセッティングすることで十分に実用的な飛行が可能であることが実証できた。
- ・プロポスイッチでの農薬散布モーターのオン・オフコントロールのセッティング方法は、今後自作で付加機能を追加する際の知見とできる。
- ・Ardupilot の各種パラメータ設定やログ解析における GUI¹⁾操作方法等は、参考情報(6)に詳しいが、それから必要な情報を得て正常に機能させるには、かなりの時間と労力、経験、試行錯誤が必要である。この点に関して今年度初めて対話型 AI を活用した。無論最終的な確からしさの判断や実装しての確認は我々の責務であり、あくまで補助的、支援的ツールとしてとらえる必要があるが、求める具体的情報を素早く調査、検索して提供されるため作業が非常に効率化され、十分有効なツールとなることが確認できた。
- ・地上での固縛試験、初飛行時での係留試験等、常に危険が潜む飛行試験を安全に遂行する意識を育めた。散布装置復旧後の飛行においては予想外に機体が転覆するという事象が起こったが、この際も本来はまず係留飛行すべきであり、確実に段階を踏むことの重要性が再認識できた。
- ・今年度、ドローン自作において調査・検討、設計・製作、各種設定、地上試験、DIPS 許可申請、飛行試験という一連の過程に加えて、予期せぬ不具合に対するトラブルシューティングと改善ということも経験し、工学的な良い実践教育になり得たと考える。

今後、これまでの自作ドローンに加え以上の知見やノウハウも活かし、卒研生たちにとってもチャレンジングでありながらも達成感の得られる第一工大オリジナルドローンを開発、試作したい。

謝辞

今回の研究のベースとなった中古農薬散布ドローンを快く提供いただいた合同会社シスルナベース殿に深く感謝申し上げます。

参考文献および情報

- (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) 山本淳二:”ドローン設計・自作に関する研究 (はばたきドローン試作)”, 第一工科大学研究報告, 第35号, pp. 6-11, (2023)
- (4) 山本淳二, 上西 太陽, 川原 拓斗, 立石 晟日彦:”ドローン設計・自作に関する研究(はばたきドローン試作Ⅱ)”, 第一工科大学研究報告, 第36号, pp. 5-10, (2024)
- (5) 山本淳二, 清水 浩順, 鈴木 壮太, 瀬戸口 諒:”ドローン設計・自作に関する研究(はばたきドローン試作Ⅲ)”, 第一工科大学研究報告, 第37号, pp. 7-13, (2024)
- (6) ”ARDUPILOT Versatile, Trusted, Open”,
<https://ardupilot.org/>

¹⁾ Graphical User interface