

産業用ドローン YMR-08

YMR-08 Industrial Drone

吉原 正典 松村 大祐 米原 慧紀 大西 慎太郎
春田 祐吾 水野 健太 四宮 隆 神田 大

Abstract

Crop spraying utilizing unmanned helicopters has developed principally around rice paddy pest control, now accounting for more than 40% of this work in Japan. However, rice production volume in Japan has been on a long-term downward trend, with traditional large-scale cultivated rice paddies decreasing due to increasingly diversified agriculture and expansion of nearby housing etc. in recent years. At the same time, a wide variety of drones (a general term for UAVs or Unmanned Aerial Vehicles) with three or more rotors are appearing on the market, ranging from compact models (several hundred grams) for photography etc. to large models (5-30 kilograms) for agricultural usage etc. These unmanned aircraft are bringing about what is called the “aerial industrial revolution.” At the very least, still and video photography using drones is becoming a permanent fixture in our lives. Through the convergence in recent years of drone functionality (which has become easily accessible and convenient) and requirements for spraying work in the increasingly-diverse agricultural market (including the ability to cope with small-scale operations, spraying on demand, and high-productivity and expanded usage), drones are anticipated to cause a revolution in agriculture as well, leading to more fulfilling lifestyles for all.

However, agricultural multi-rotor type drones have only been on the market for a few years, and many of them include parts, batteries, etc. more suited for hobby purposes. For the market phase to transition from growth to maturity, it is necessary to offer drones which people find easy to use and deliver performance meeting their expectations. These were the requirements which the development of the YMR-08 drone, SP1-10 liquid spraying accessory unit, and GR1-10 granule spraying accessory unit aimed to satisfy.

1

はじめに

無人ヘリコプタによる散布は、従来から水稲防除を中心に発展してきており、日本での水稲防除の4割以上を担うまでに成長してきた。しかし、日本における米の生産量は減少の傾向を長らく続けており、近年では水稲からの転作による農業の多様化や隣接住宅の増加などにより、従来からの大規模な水稲圃場が変わりつつある。一方、空の産業革命をもたらすと言われているドローン(UAV:Unmanned Aerial Vehicleの

総称)が3枚以上のローターを持つ無人機の形で、撮影用などの小型タイプ(数百グラム)から農業用などの大型タイプ(5～30キログラム)まで多種多様に登場している。少なくともドローンによる撮影映像は、我々の生活に著実に浸透しつつある。この、より身近で簡便になったドローンの性能は、近年多様化が進む農業での散布作業における市場ニーズ(小規模化対応、適時散布、多作・用途拡大など)に合致しており、農業においても革命を起こして我々の生活をより豊かにしてくれることが期待されている。



図1 フィーチャーマップ

表1 主要諸元

機体	
機体名称	YMR-08
最大離陸重量(kg)	24.9 以下
ローター枚数	8
ローター配置	4X+サイド二重反転
フライト時最大全幅 (mm)	2181
フライト時最大全長 (mm)	1923
全高 (mm) ※最大離陸重量目安	669
収納時最小全幅 (mm)	1799
収納時最小全長(mm)	559(フレーム部) 573(スキッド部)
フレーム形式	モノコックシェル
アーム収納形式	ストレート
ローター	
ローター径(inch)	26
ローター形式	ハイブリッドローター
機体電力・バッテリー	
平均消費電力(kW)	2.5
バッテリー定格容量 (Wh)	852
定格電圧 (V)	44.4
サイズ(mm)	L:360 W:149 H:166
バッテリーマネジメントシステム	HBM S-S L1※
※ハイパワーバッテリー用マネジメントシステム	
充電器	
充電時間 (時間)	通常充電: 2.5 急速充電: 1
散布装置	
液剤散布装置	液剤散布装置
液剤散布装置名称	SP1-10
最大タンク容量(L)	10L
吐出方式	ノズル方式(2 個)
散布幅(m)	4
粒剤散布装置	粒剤散布装置
粒剤散布装置名称	GR1-10
最大タンク容量(L)	10L
吐出方式	インペラー式
散布幅(m)	5 [除草剤(1kg 粒剤) 使用時]

しかしながら、農業用マルチロータータイプのドローンは、まだ登場から数年しか経っておらず、ホビー用途向けの部品、電池等を組み合わせたドローンも多い。成長期から成熟期を迎えるためには、一般のユーザーが使い勝手の良さや期待どおりの能力を実感できるようなドローンを提供する必要があ

る。そのような使命をもってドローン本体YMR-08とその付随アプリケーションである液剤散布装置SP1-10、粒剤散布装置GR1-10を開発した。

2 開発コンセプト

スタート時のコンセプトは「電動ドローンで業務効率・品質 No.1」とした。農業用ドローンで先行している中国製を中心としたドローンは、非常に優れた諸元で仕上げられている機体が多い。本開発では前述の開発コンセプトに沿って、それら先行機を上回る諸元をターゲットに設定した。また、「一般ユーザーが期待通りに使えるということはどういうことか」という問いを幾度となく繰り返し、現場で求められる農業用マルチローターの開発を目指した。加えて、ユーザーのニーズにすばやく対応し、利便性を高めるためには今後の拡張性やユニットの交換容易性の確保が必須であるため、それらを考慮した機体構成、システムの実現も同時に目指した。以上より、以下の4項目を開発主眼とした。

①散布品質

長年の実績がある無人ヘリコプタと同等の散布品質が達成できていること(請負での業務遂行が可能)

②機体サイズ・重量

簡易運用が可能な世界標準最大離陸重量24.9kg 以下(55lb未満)で、1ha散布/フライト(薬剤8リットル搭載～散布作業終了)が可能であるパッケージング諸元であること

③信頼性

農業向けツールとして信頼できることはもちろん、先行機に対

して優れた仕様や信頼性を有すること

④拡張性・利便性

今後の拡張性を加味して、様々なアプリケーションが簡単に接続できる機体やシステム仕様であることに加え、補修時の各部のユニット交換が容易であること

図1にフィーチャーマップを、表1に主要諸元を示す。

3 主要素技術開発概要

本章では、前述の開発主眼を達成するための開発内容を説明する。

3-1. 散布品質

空からの散布は、稲の株元近傍まで農薬を均一に届けることが最大の課題となる。無人ヘリコプタ(約100kg:総重量)のように重量があれば、その重量を浮かすための空気量を使って、広い範囲に比較的大きな風を発生させ、株元まで浸透させることが可能である。しかし、その1/4程度の重量のドローンは手軽さと電動を基本としており、重量を大きく上げることは、効率上不可能となる。限られた空気を散布ノズル部に集中する必要があり、その最適な形を追求した結果YMR-08のレイアウトになった。図2にそのレイアウトを示す。

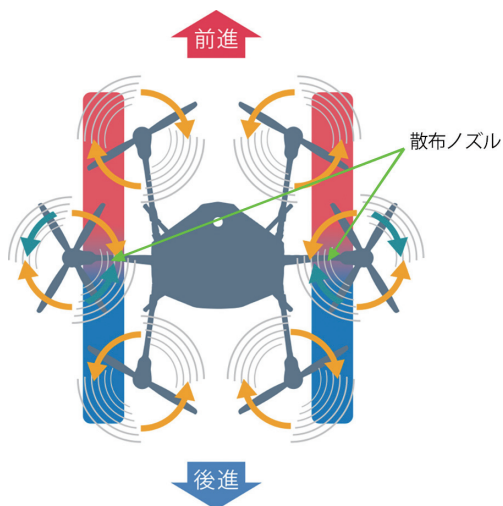
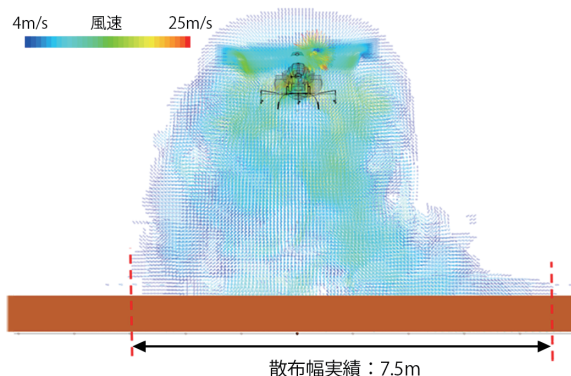


図2 ローターレイアウト

散布ノズル上部に、今回新たに設計した二重反転ローターを採用した。これにより、図3のように局所的に非常に速い流速を作り、機体速度による外乱渦風に負けることなく下方へ加速させ、さらに前後方のローターの連成風により、作物の根本まで均一に薬剤を届けることができる。また、前後飛行でローターの回転方向までの対称性を保ちながら、なるべく広い範囲で幅方向に風を作るレイアウトを採用することで、

無人ヘリコプタ(FAZER) 機体速度20km/h



YMR-08 機体速度15km/h

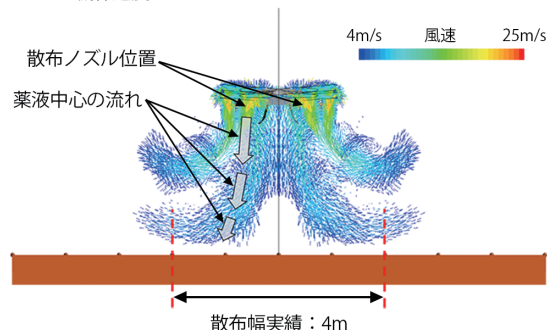


図3 無人ヘリコプタFAZERとYMR-08ダウンウォッシュ比較解析

前後進時どちらでも同じ位置(ノズル付近)のダウンウォッシュ(降下気流)を強くした。ローターの回転方向と機体前進時の速度によって増速された図2に示す赤色の部分で風が強くなり、後進時は青色の部分で強くなる。図3に流動解析結果を示す。現行無人ヘリコプタで実績がある速度20km/h、散布幅7.5mで作ることができる風速を、YMR-08では15km/h、4mの範囲で発生させることができている。

3-2. 機体サイズ・重量

機体サイズおよび重量を検討するうえでは、一人で容易に運搬できることを重視して、サイズは2m程度、運搬時重量(機体重量)は10kg以内に設定した。重量については、フライト時に搭載する薬剤やバッテリーの重量を加えても国際規格を考慮して設定した最大離陸重量24.9kg以下となるように配慮した。仕事効率については、機体全体のサイズが大きければ効率が上がるかというところではなく、ドローンのバッテリーはかなりの大きさが必要となり、その大きな容量を充電する作業自体が電動ドローン運用の最大の負担となっている。機体を効率よく運用でき、1フライトである程度まとまった圃場の散布をしながら、バッテリーのエネルギーも無駄に使わないように最適化した機体サイズ・重量の諸元としている。

3-3. 信頼性

信頼性については、図1および表1と4章以降で詳細な開発内容を要素ごとに示すので参照されたい。

3-4. 拡張性・利便性

拡張性については、今後の農業系アプリケーションの様々な広がり方を考慮しながら、輸送系のベースプラットフォームとして設計した。図1のフィーチャーマップに下部アプリケーションとのハード的な接合部を示す。システム上の接合は4-2.の新電装システムで詳述する。各部のユニットは、図1に示すようにローター、ドライブユニット(モーター)、各アームなど、パーツごとに交換が容易な構造と部品構成になっている。

4 開発技術紹介

4-1. 機体開発

4-1-1. 重量開発の必要性

ドローンのレギュレーションは国によって異なるが、最大離陸重量約25kgを境に信頼性等の性能要求が区切られている国が多いため、本開発では最大離陸重量24.9kg以下をMUSTの目標とした。YMR-08では散布品質の確保のため二重反転ローターを採用しているが、通常のレイアウトに比べて推力効率や重量面ではデメリットとなる。一方で、大径ローターを低回転数で回すのと、小径ローターを高回転数で回すのを比較すると、同じ推力を得るには前者の方が必要なエネルギーの効率が良い。騒音などの観点からも回転するローター先端の速度は小さい方が良く、有効散布幅も広がる効果がある。そのため、YMR-08では他社の同規模の商品よりも大径のローターを採用することで、推力効率の課題に対応した。また、散布品質を確保したうえでの散布効率を検討した結果、目標フライト時間を15分に設定する必要があり、大容量バッ

テリーの搭載が求められた。図4にYMR-08と他社散布マルチローターとの重量配分比較を示す。前述のように散布性能に影響を与える推進ユニットとバッテリーに重量を多く配分するため、それら以外の部品を軽量化にすることが必須であった。次に機体軽量化の手法について記す。

4-1-2. 機体軽量化開発

機体全体の部品構成を検討するにあたり、軽量化を実現するために以下の点を考慮した。

- ・ 部品どうしの締結部は重量増の原因となるため、共通化などにより極力減らす
- ・ 大きな荷重を受ける部分を近くに配置し、補強が必要な部品をまとめる

熱硬化性CFRP一体成形のメインフレームの幅方向をできる限り大きくすることで、大きな推力を受ける左右の二重反転ローターのアームを短くして、メインフレームとの締結部にかかる荷重を抑えた。また、前後ローターのアームとの締結部も二重反転アームとの締結部の近くに配置し、8本のアームとの締結部は全て左右両端に集中させている。これにより、メインフレームにおいて強度を確保する必要がある部分を一部に絞ることができ、また、全体として必要な剛性は、主に両端に上向きの力がかかることによる曲げ剛性とねじり剛性に対するものに絞ることができる。内部にバッテリーを搭載するため、上方に大きな開口が必要で剛性上不利となるが、接合部のない一体構造と開口全周に折り返し形状を設けることで必要な剛性を確保した。また、アーム締結部を左右両端に集中させたことで以下の利点にもつながっている。

- ・ バッテリー交換や薬剤補給をする際のアクセス性向上
- ・ メインフレーム前後に大きな開口を設けたことによるバッテリー冷却性の向上
- ・ メインフレーム後方からの投影面積が大きくなったことによる操縦時の機体姿勢の視認性向上

また、YMR-08では放熱が必要な部分を除いては極力アルミ部品の使用を抑え、代替材料として射出成型が可能な熱可塑性CFRPを積極的に採用した。主に使用した材料は、ポリアミド系のベース樹脂に炭素繊維を30%添加したもので、アーム接合部等の強度や剛性が重要な部品に採用している。本モデルの構造部品の材料別重量比率を図4に示す。樹脂材料の比率は80%に迫り、熱可塑性CFRPだけでもアルミ材料の比率を上回っており、軽量化に大きく貢献している。

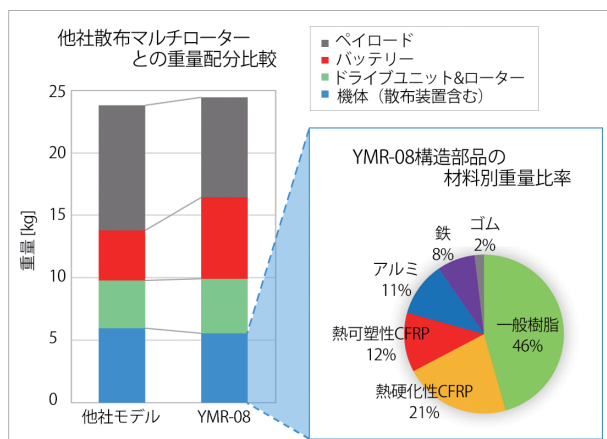


図4 重量配分比較と材質構成比

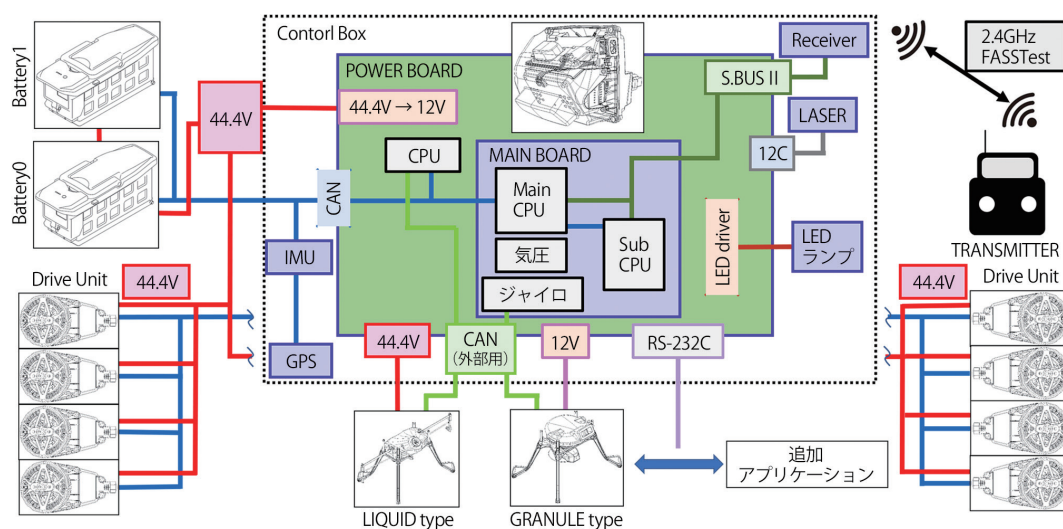


図5 システム(通信、電装ハード)

4-2. 新電装システム

YMR-08のシステムでは主要となるセンサーからの出力や操作スティック情報をメイン、サブの二つのCPUに入力して処理している。これにより万が一メインCPUが故障した場合でも、サブCPUにて機体が暴走しないように冗長性を持たせている。また信頼性については無人ヘリコプタで得られた知見より、実使用に近い項目での信頼性試験を実施することで、より利用状況に沿った信頼性を確保した。図5にシステム構成を示す。

本システムは自動車用通信規格CAN、模型用通信規格S.BUS II 1chで構成される。YMR-08は今後の拡張性を考慮して、汎用インターフェイス(CAN1ch,電源44V,12V)を用意した。汎用インターフェイスは機体のメインシステムとは直接繋がらないように構成することで、外部接続機器の破損等でバスを占拠されても機体の制御には影響しない仕様とした。また、YMR-08では双方向通信とし、機体の状態を送信機にて随時確認できるようにした。これにより機体の状況がリアルタイムで確認できるようになっている。

フライトコントローラーや、慣性計測装置(IMU)、ワーニングランプ等の基板類は全て1つのコントロールボックスに収納した。ケースにはアプリケーション装置用に

- ・ 44V電源/CAN通信
- ・ 12V電源/CAN通信/シリアル通信

の2種類のコネクタを接続でき、取り付ける装置に応じて使用できる。コントロールボックスの蓋に透明の材料を採用し、フレームの後部に配置することで、オペレータからワーニングランプの点灯が確認できるようになっている。IMUへの振動の影響を抑制するため、コントロールボックスは前後のダンパーで支えている(図6)。

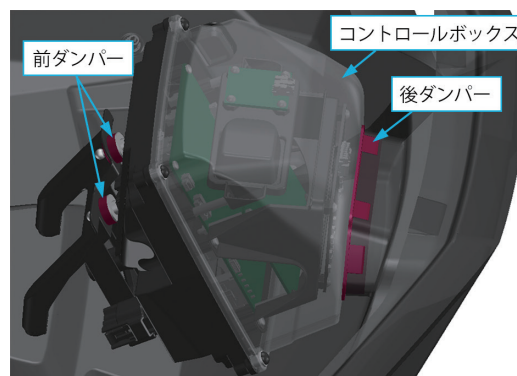


図6 ダンパーマウント

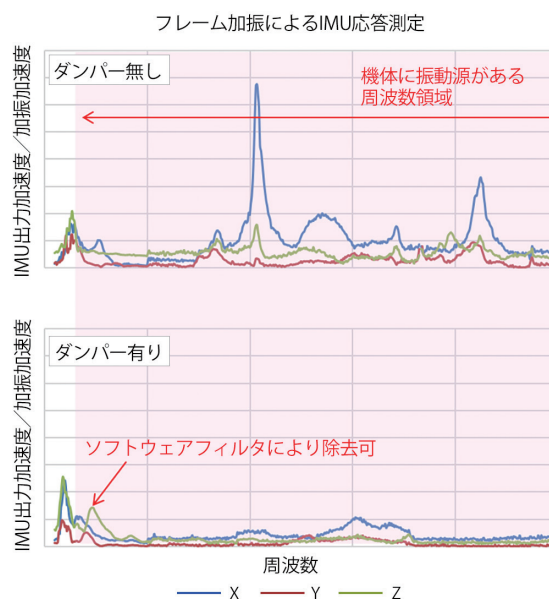


図7 振動伝達特性

機体の主な振動源は8つのローターであり、フライト中はその回転数を個々に変更することにより姿勢を制御しているため、ローターの最小回転数にあたる周波数以上の領域は振動源が存在する領域となる。図7に示すように、振動源のある領域のうち高周波領域に関しては、ダンパーを採用することにより加速度応答が抑えられている。また低周波数側に残っているピークについてはIMUのソフトウェアフィルタにより除去可能で、物理的なダンパーとソフトウェアフィルタにより有害な振動を除去している。

4-3. 新制御システム:YACS-M

(YAMAHA Attitude Control System for Multi)

機体の制御システムは、YMR-08用に新設計した。無人ヘリコプタは、機体自体が大きく、また熟練オペレータが多いこともあり、オペレータの狙い位置から数cm単位でのずれを修正するような小さな舵入力が多い。そのため、無人ヘリコプタの制御システムはそのような小舵にも、機体を操縦する中舵にも、また大舵にもスムーズな機体挙動ができるように「動くこと」に重点を置いた制御性になっている。対してYMR-08は、まだ経験が浅いオペレータから熟練オペレータまで、様々なスキルのオペレータが操縦すると想定されている。したがって、YMR-08の制御システムは、操縦に対しては素直に動き、そしてしっかりと「止まること」に重点を置いた制御性を持たせた。操作モードは、舵入力を速度指令として機体の操縦ができ、スティックを離せばその場で止まる「ノーマルモード」に加え、手放しのまま一定速で直進飛行をしながら散布ができる「クルーズコントロール」、ターン操作自体も不要にして正確に一定間隔で散布できる「ターンアシスト」の3種からオペレータが選択することができる。これによりオペレータの操縦舵を極力減らして、疲労低減と散布精度向上に貢献している。

空散での農薬散布では、推奨する飛行高度がある。高度が低すぎると散布幅が確保できず、農薬が掛かりきらない範囲ができてしまう。逆に高すぎるとダウンウォッシュが活かされず、農薬は作物にかからずドリフト（飛散）してしまう。散布する圃場に傾斜がある場合、推奨している飛行高度を維持することは技量の高いオペレータでも難しい。そこで、YMR-08では「対地高度維持」制御を開発し、新たにモード設定した。この機能により、傾斜や丘陵地でも一定高度で飛行が可能になっている。また、機体高度情報を使用して「着陸アシスト」機能も搭載した。地面との距離によって、適切な下降速度になるように制御（地面に近づくにつれて減速）するため、オペレータは複雑な操縦をしなくても楽に着陸させることができる。

安全機能として、無人ヘリコプタFAZER Rで実績のある、ニューラルネットワーク型の最適判断制御^[1]を採用し、YMR-08に最適になるよう再設計した。各基板どうしが制御情報のほか異常情報も共有し、万が一異常が発生した場合でも最適な処理を選択することで信頼性を高めている。モーター廻りの例を以下に記す。YMR-08が最も稼働する初夏～秋は温度が高く、日差しも強い。機体の安定性を保つための制御をしようとすると、モーターはかなりの周期で加減速を繰り返さなければならないが、上記のような環境下ではモーターの温度が上昇し、最悪の場合は熱による故障を引き起こしてしまう。そこで自己判断によって、故障に至らないようにモーターに対する負荷をコントロールする機能を搭載した。また、もし熱やその他の要因によってモーターが故障した場合には、残りのモーターに推力を分配して姿勢をコントロールすることで、落下による機体の故障を防ぐ制御をおこなう仕様とした。

4-4. ドライブユニット(モーター)

ドライブユニットは、接続端子／ヒートシンクインサート型ケースおよびドライバ基板から構成されている。モーターは軽量化を追及して開放型としているが、農薬付着に対する各 부품の信頼性を高めるため、ベアリングにはセラミックボールを、電磁鋼板には防錆コーティングをそれぞれ採用した。磁気回路は、ローターの振動抑制とトルクアップを狙って36スロット42極の構造とし、ボビン巻による巻数/線径の最適化を行った。また、回転中の空気循環に加えて、内部のフィン構造やケースに内包されたヒートシンク等による熱対策を施すことで、連続出力の維持に貢献している。図8にモーター構造図を示す。空気循環については、上部より空気を吸い込み、外側のコイル部を通して排出するように回転部を設計した。図9にその流体解析結果を示す。

これらによりドライブユニットは、最大2.4Nm/4000rpm、連続出力1.2Nm/2800rpmを460g弱（基板とケーシング込み、モーター単体は260g弱）の重量で達成した。また、開放型アウトローターモーター、防水・放熱・軽量化を同時に達成している。

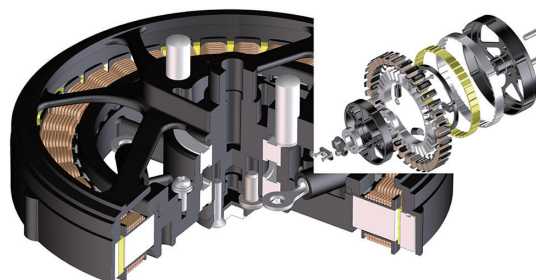


図8 モーター断面

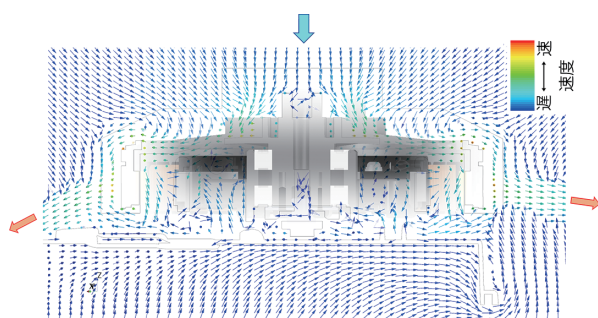


図9 モーター流体解析

4-5. ハイブリッドローター

ローターの空力特性は、モーター・電池の特性と並んで機体のフライト可能時間に直結する重要な設計項目である。本開発では、CFD(数値流体力学解析)を用いてローターサイズ・翼弦長分布・ねじり下げといったローターの設計パラメータの空力特性への影響を確認し、優れた推力効率を持つ翼形状を設計した。YMR-08のホバリング領域においては、同サイズの市場流通品CFRP製ローターと比較して約5%の高効率を達成した。

ローターは高速で回転するため、ドローンの構造の中で最も安全性の確保が必要とされる部分の一つであり、航空法においても大型ドローンのローターは安全性(飛散しにくさ等)にできる限り配慮した構造とすべきである旨が記載されている^[2]。本機体では、CFRP翼の前側に軟質・高靱性樹脂を一体

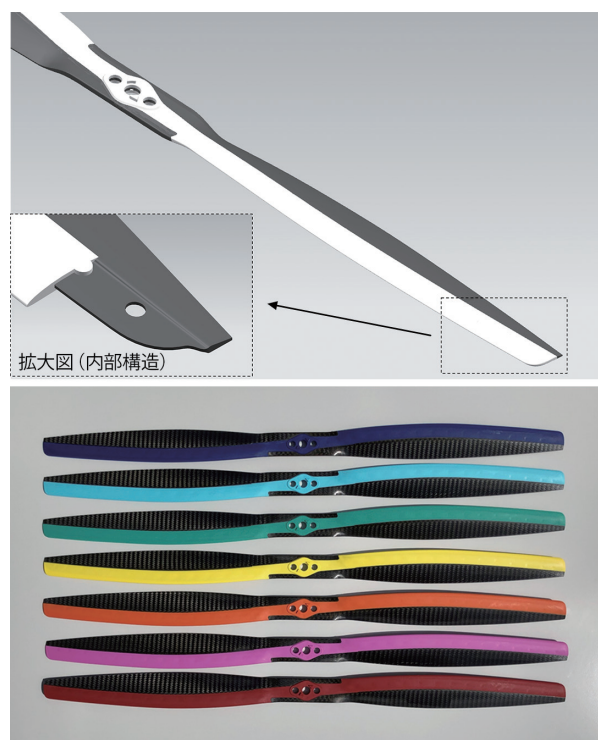


図10 ローター構造およびカラー展開

成形することで、CFRPと樹脂の特性を併せ持つハイブリッド構造のローターを開発した(図10)。高剛性のCFRP部によって翼形の維持に必要な剛性を確保しながら、他の物体と接触した際には軟質・高靱性の前縁部が衝撃を吸収して接触体の損傷レベルを低減する。あわせてローター自身の破損による飛散物の発生率も低減できる。

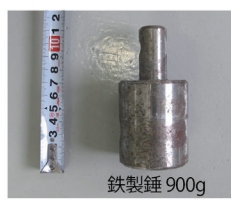
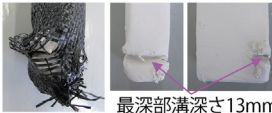
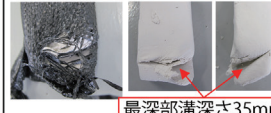
その効果を確認するため、「YMR-08採用のハイブリッドローター」「PA-CF材を射出成形した同形状のローター」「市場流通品CFRP製ローター」を対象に、回転中のローターに試験物体を接触させる試験を実施した。結果は、図11を参照頂きたい。さらに、一般的な(CFRPやカーボン系樹脂のみで構成された)黒色のローターは回転時にとても視認しにくい、ハイブリッドローターの樹脂部は着色可能であるため、回転時もローター面を視認しやすくなっており、安全性向上に貢献している。

4-6. バッテリー

4-6-1. 電池セル

動力源である電池セル(図12)は、軽量かつ高容量であることは容易に想像できるが、ドローン用電池セルには他にも飛行のための要件が必要である。図13にその要件の概要説明グラフを示す。使用を想定した最低残量時でも、最大推力でローターを回せることが必要である。電池セルの放電特性は、ドローンのように大きな電流を放電するとその電圧(限界電圧値)は大きく降下する。ローターが最大限の回転数で回転するために必要な放電電流でも、モーター特性の必要最低電圧を超えていなければならない。これにより想定している搭載物の重量内においては、回転数の維持を保証することができ、強風時でも操作性(風で流されない、最低限の制御性)を失うことはない。さらに、より良い姿勢安定性や高い運動性を確保するためには、各ローターは早い時間で回転数を変化させてローターの推力を上下させ、即座に姿勢を制御しなければならない。そのためには、モーターには過渡的に最大推力よりも大きな電流を流し、大きなトルクでローターの回転数を変化させる必要があり、大きな電流はさらに大きな電圧降下を発生させる。よって、ドローンでは軽量かつ大電池容量(=高い重量エネルギー密度)で高出力特性(=低抵抗特性)に特化した電池セルが必要になる。

信頼して使用するための要件としては、季節を問わず一年を通して動作および安全性を確保する必要がある。先述したように、大きな放電要求と発熱の問題はトレードオフの関係にあり、また正極材/電解液でも電圧・温度性能が変化するた

試験項目 下記試験片を衝突させる	ローター写真 試験前	ハイブリッドローター YMR-08採用品	PA-CF製射出成型品 (カーボンファイバー含有PA製) ※YMR-08同形状	市場流通品CFRP ※同外径サイズローター (≒YMR推力)
				
飛散テスト  鉄製錘 900g	衝突後のローター	 衝撃吸収により低飛散	 先端(=高速)のカーボン部が塊で飛散	 飛散物はあるが、質量が小さく危険度は低い
	衝突時の様子	 変形吸収		 小片
衝撃テスト 紙粘土1/4 土のう袋 試験片	テスト後の試験片	 最深部溝深さ 5mm 前縁部樹脂による低引き裂き性	 最深部溝深さ 13mm	 最深部溝深さ 35mm

試験内容：最大離陸重量フライト時相当の回転数でローターを回転させ横から表中の試験片を一定の速度で接触させる

図11 各種ローター接触テスト結果

め、どのように成立させるかが大きな課題であった。一般的な模型(RC)系の電池セルでは、正極／負極の構造安全マージンを切り詰めたうえで常温での低抵抗特性に特化した電解液を採用することで対応している。これらの電解液には、低沸点特性を持つ電解液が一般的で、複数年の保存耐性、環境温度耐性に課題があり、安定的に長期信頼性を得ることは困難である。また、高い重量エネルギー密度と低抵抗特性の電池セルは自己放電量のバラツキが大きいという課題が潜在しており、多直多並列での長期使用では電池全体としての管理が必要になる。これらの課題に対応するため、YMR-08では、バッテリーの状態を監視するハイパワーバッテリー用マネジメントシステム(HBMS-LS1)を搭載した。本システムについては4-6-3.で説明する。



図12 電池セル写真

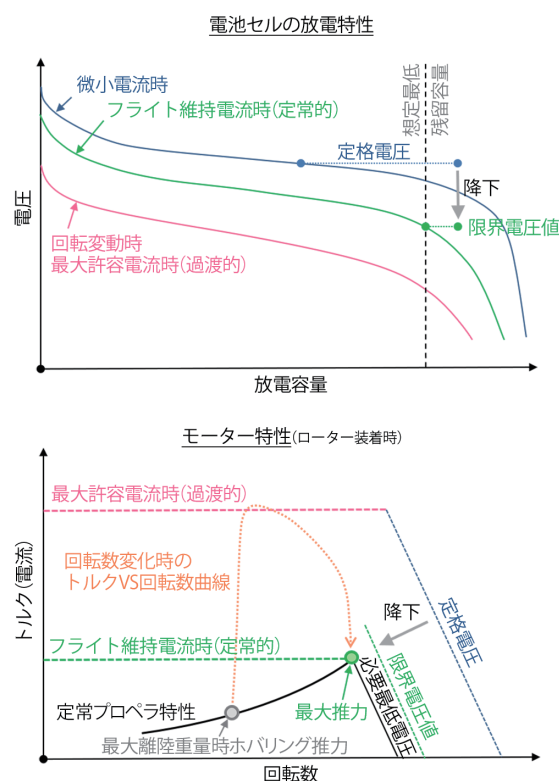


図13 電池セル要求

4-6-2. バッテリーの構成

電池パックはラミネート型リチウムイオン電池(定格 3.7V/4.8Ah)を1並列6直列に配したモジュールを基本として

いる。そのモジュールを4並列で1パック構成とし、電池パックを2直列で機体と接続する。機体接続時には44.4V/19.2Ahとなり、1haの散布作業を十分にこなせるフライト時間/動力性能を確保した。図14に機体装着状態の電池構成図を示す。単位セルの不具合発生に対する信頼性を重視して、以下の3点をレイアウトの基本的な考え方とした。

- ・ 単位セルごとの電圧が監視可能なこと
- ・ 単位セルの容量は大きくならないこと
- ・ 動作中に電力供給が停止しないこと

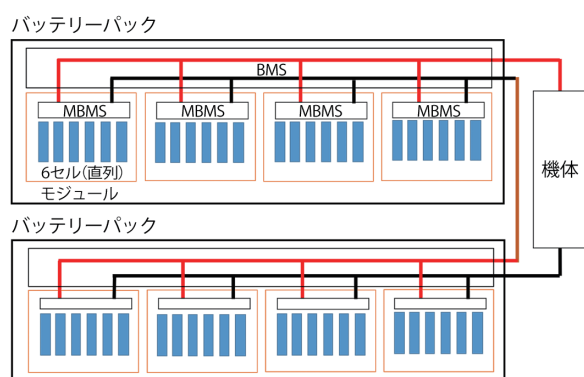


図14 電池構成図

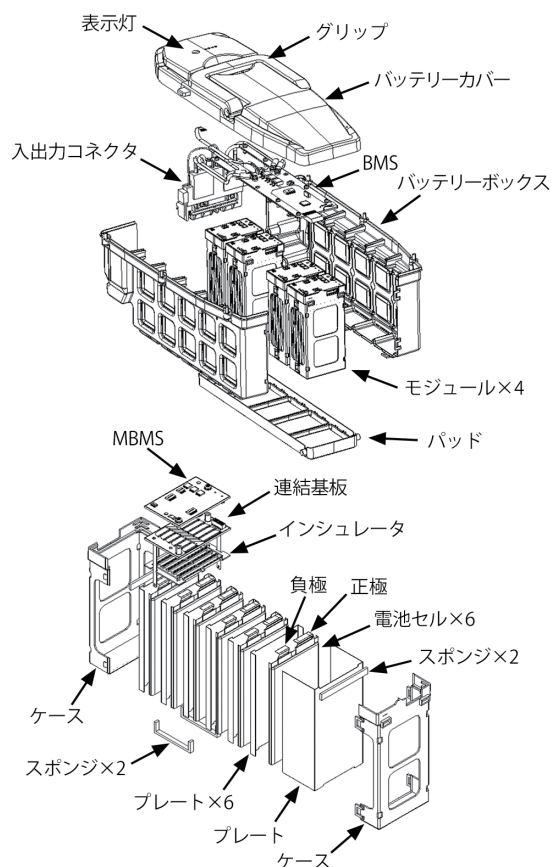


図15 パックおよびモジュール内部の構造

図15はパックおよびモジュール内部の構造図である。モジュールは、振動や衝撃時に図中のインシュレータとケースにより、電池セルタブ（電極）の連結基板とセル本体間で相対的に動かないように固定した。電池セルは、アルミプレートで囲むことでモジュール強度を上げ、外気への放熱性を高めた。また、パックの構成部品は全面で嵌め合わせ構造とすることで強度的な弱点をなくし、軽量で高剛性なケースを実現した。加えて、パック底面に落下衝撃を吸収するための耐衝撃性部品を設けることで、落下によるダメージを減少させ、UN輸送規格38.3（危険物の輸送に関する国際勧告）を満足する仕様とした。なお、機体へのパックの装着はワンタッチ構造になっており、作業の簡素化に貢献している。

4-6-3. ハイパワーバッテリー用マネージメントシステム :HBMS-LS1

本バッテリーはパック情報を統合し、外部通信を行うBMSと内包される4つのモジュールごとに状態情報を持つMBMS（モジュールBMS）で構成され制御している。安全・環境・使用リスクについて分析し、23ステートによる状態管理を行う。図16はその簡易的なフローである。

機体に対しては放電準備、正常放電および5段階のワーニングステートなどによる状態管理の機能を持ち、信頼性の高い運用をサポートしている。それらのステートへの遷移は使用中の温度・容量警告、低温環境や劣化による内部抵抗増加を加味して制御している。また、フライト中に通信異常が発生した場合でも着陸まで放電を継続する。充電器に対しては予備・通常・急速・保管・リフレッシュ充電モードの充放電動作指示をバッテリー側から行い、使用状況に応じてリフレッシュ充電の促しや残量計の補正等を自動で行う。リフレッシュ充電では、モジュール内外の電圧バランスを調整して容量の最適化を行い、定期的に電池内部のメンテナンスができるよう配慮した。また、サービスツールを用いることで、電池内部の診断結果をユーザーへお知らせする機能を搭載した。

4-7. 液剤散布装置 (SP1-10)

液剤散布装置は、タンクの中に充填された薬液が、ポンプを介して両側先端のノズルから吐出される構成である。機体同様、散布装置も軽量化を狙い、樹脂部品を多用しながら最短経路での吐出が可能な配管レイアウトを実現した。図17に液剤散布装置全体図と配管レイアウトを示す。タンクの吐出口からポンプまでの経路を下り勾配にすることによりエア抜きが必要がなく、また薬液を最後まで使い切ることができる利

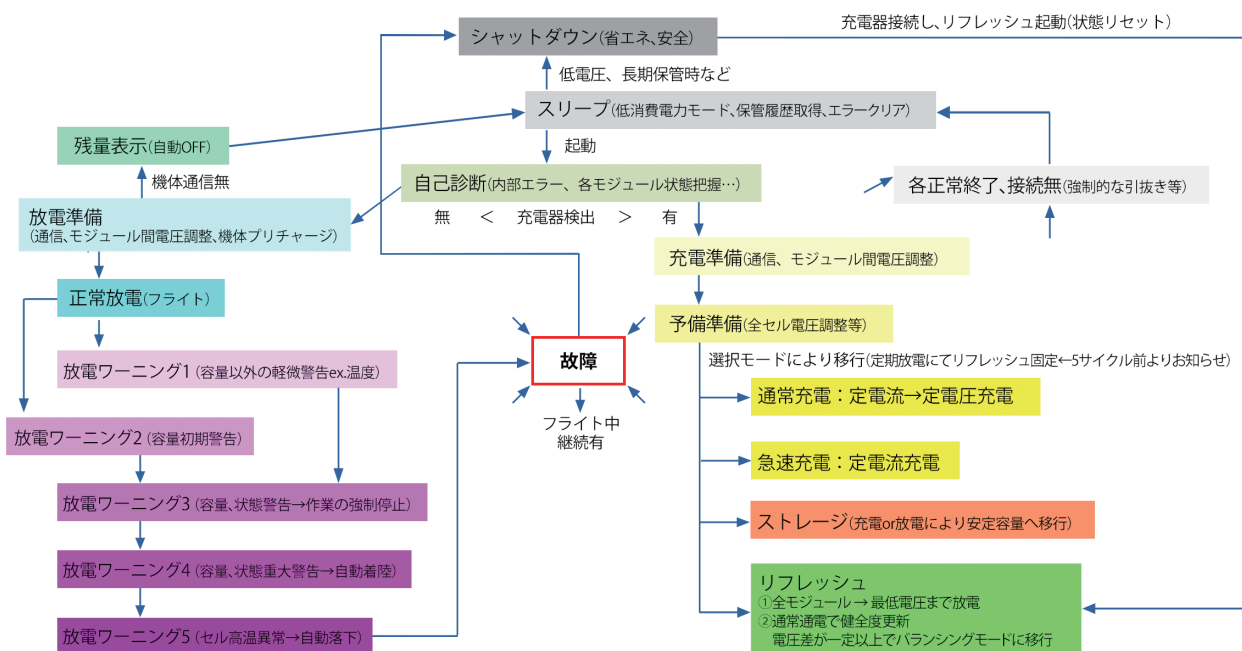


図16 BMSフロー

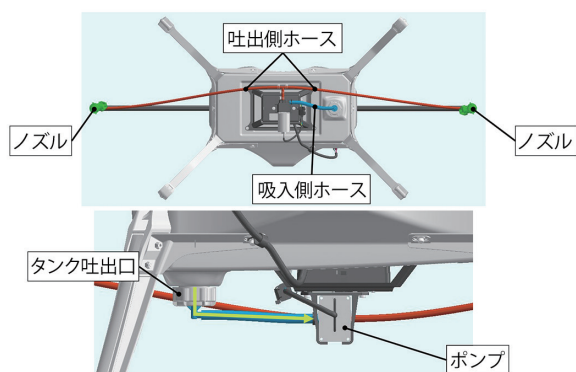


図17 液剤散布装置

便性に優れたレイアウトとなっている。さらに、吐出量についてもドローン特有の低速域(7.5km/h)から高速域(20km/h)までを、ノズル2種で対応できる仕様としたことで利便性に貢献している。

本装置は、上記液剤を散布する機能に加え、機体の降着装置としての機能も有する。部品点数の増加を防ぐため、10Lの容量をもつ液剤タンクにも荷重を支える構造体としての機能をもたせ、タンクにスキッド部品を取り付けるシンプルな構成とした。タンク底部には窪みを設けることで、容量の半分程度の液剤量でもフライト中の姿勢変化により液剤が移動しにくい形状を採用した。これにより、フライト中の重心位置の変化を抑えて、飛行制御への悪影響を防止している。

スキッドは、メインとサポートの2部品で構成し、メインスキッドの材質には、比較的柔軟で靱性と耐摩耗性に優れたポ

リエチレン系、サポートスキッドには剛性に優れた材料を採用した。これにより凹凸のある地面でも4点で接地でき、また、着陸時の衝撃を吸収して他の構造体へのダメージを軽減することができる。図18はそのスキッドの静荷重に対する変位特性のグラフである。スキッド先端が接地してしばらくの変位領域では、凹凸を吸収しながら4点接地を確実にする。さらに大きな変位域では、衝撃を緩和するために定数が変化する特性となっており、着陸速度が速い場合でも大きなエネルギーを吸収することが可能である。メインスキッドには低摩擦係数かつ耐摩耗性に優れた材質を採用することで、作業時の引きずりなどでの扱い性を高めた。また、サポートスキッドは色部品の設定が可能であるため、それにより遠方視認性が向上するだけでなく、形状的にも引っ掛かりを防止し持ち手にもなるなど運用面での機能を有している。

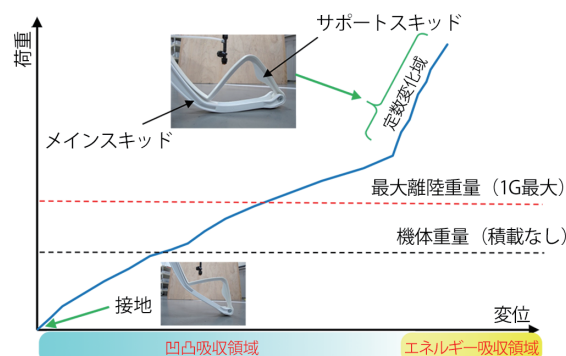


図18 スキッド荷重vs変位特性(実験値)

4-8. 粒剤散布装置 (GR1-10)

他項で説明した部品開発と同様に、粒剤散布装置もほとんどの部品を樹脂化しており、脚部込みで約3kgの重量での構成とした。なお、脚部の基本部品は、液剤散布装置と共通化した。粒剤散布装置GR1-10は、ドローンによる農業分野での使用用途の多様化に合わせ、除草剤の散布だけでなく、多種多様な粒剤に対応できる発展性を持たせた構成とした。以下にその特徴を記す。

基本性能として、粒剤落下の安定化と吐出量の調整が可能なシステムを実現した。図19はその構造図とシステム図である。本装置では、これまでのドローン業界のスタンダードであったシャッター機構は採用せず、モーター回転によりローラーを回すことで粒剤の最下部に積極的に振動を与え、粒剤のトンネル状の空洞化を防ぐ機構を新たに開発した。この機構では、ローラーの回転数を変化させることで粒剤の吐出量を回転数依存の線形特性として制御できるようになっている。フィードバックされた回転数により、負荷によって出力トルクを変化させて指示された回転数を維持する。また、ローラーを交換することで、様々な粒剤に対応可能とした。図20はその代表的なローラー種である。これらのローラーにより、細かい

タイプから荒いタイプまで多種多様な粒剤に対応することができる。図19に示すスピナーの略中央部に粒剤を落下させ、スピナーの回転による遠心力で拡散、落下させている。散布分散性能については、この時の拡散均一性が重要であり、スピナーのフィンを同一形状とせず、異なる形状を組み合わせる仕様としたことで、一方向にピークを持たない均一分散を実現した。

前述の機能ユニット部分については、ワンタッチで取り外し可能な構成とすることで清掃性を高めるとともに、粒剤の通路を防水構造にして各部品（ローラー、ブラシ）の取り外しと交換が容易な構成とした。また、モニターしている回転数と負荷の情報から、粒剤切れや回転不能などの状態をユーザーにお知らせする機能（図19のLEDランプ）も搭載した。



図20 ローラー種別写真

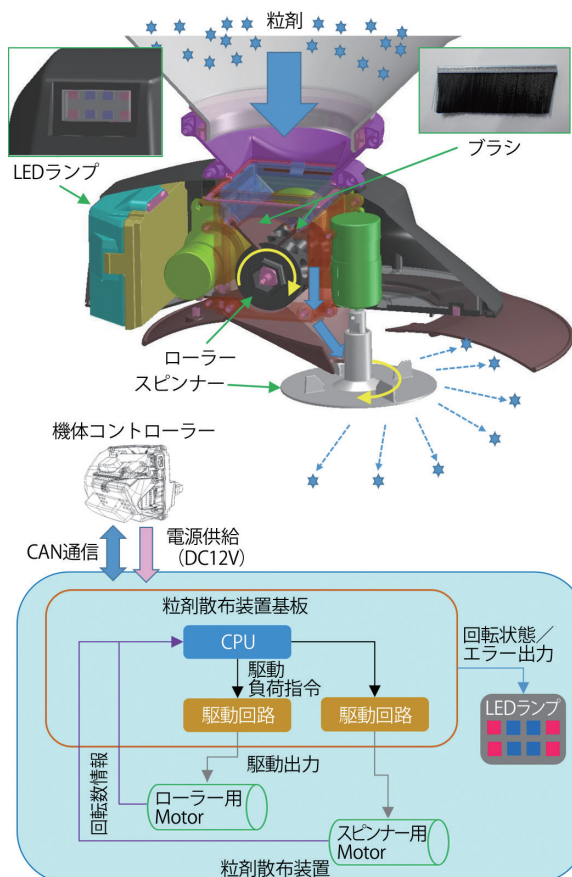


図19 GR1-10構造

5 おわりに

小規模圃場と個人使用をターゲットに産業用ドローン YMR-08を開発した。お手本となる製品がなく、未知の状態からのスタートであった。何度も失敗と挫折を経験し、正解を探しながらの開発の道りは厳しいものであったが、メンバーが一丸となって取り組み、「期待通りに使えるということはどういうことか」をユーザーの視点に立って考え抜いた。その結果、無人ヘリコプタに匹敵する高い散布品質を実現することができた。また、材料から形状、機構にいたるまで徹底した軽量化に取り組み、15分の連続飛行が可能な大容量バッテリーと薬剤8Lを搭載しながら最大離陸重量24.9kg以下を達成することができた。

このYMR-08が、労働負担の大きい散布作業を軽減し、より効率的な農業経営や省人化に貢献できれば幸いである。また、ドローン産業が正しく成長、普及し、社会の役に立ち活躍してくれることを切に願っている。今後もその発展と普及に尽力していく所存である。

■謝辞

本開発において、モーター、電池セル、バッテリーシステム関連の仕様開発で共に時間を掛けて検討して頂いた協力各社の皆様、少量にも関わらず惜しげもなく先端材料を供給することに尽力頂いた材料各社の皆様、前例のないモノ作りにも決して諦めず、時間を掛けて生産可能なレベルまで一緒に歩んでくれた製造各社、アセンブリ各社の皆様にこの場を借りて御礼申し上げます。

■参考文献

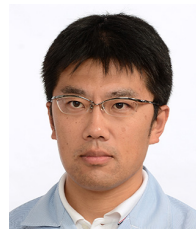
[1]吉原正典、林隼之：産業用無人ヘリコプタ“FAZER”の紹介；ヤマハ発動機技報 2013-12 No.49

[2]国土交通省「無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行ルール」(無人航空機の 飛行に 関する 許可 ・承認 の審査要領)<https://www.mlit.go.jp/common/001254115.pdf>

■著者



吉原 正典
Masanori Yoshihara
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



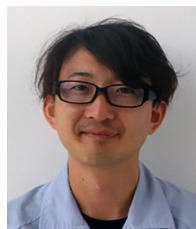
松村 大祐
Daisuke Matsumura
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



米原 慧紀
Keiki Yonehara
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



大西 慎太郎
Shintaro Ohnishi
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



春田 祐吾
Yugo Haruta
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



水野 健太
Kenta Mizuno
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



四宮 隆
Ryu Shinomiya
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部



神田 大
Dai Kanda
ロボティクス事業部
UMS統括部
開発部

■映像ライブラリー

<https://global.yamaha-motor.com/jp/profile/technical/library/mov/55ss06.html>

