

小型無人航空機（ドローン）について

ヤマハ発動機株式会社 ソリューション事業本部 UMS 事業推進部 開発部

1. はじめに

産業用無人ヘリコプターによる散布は、水稲防除を中心に発展してきており、日本国内での水稲防除の4割以上を担うまでに成長してきた。しかし、米の生産量は減少の傾向が続いており、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が3枚以上のローターを持つ無人機の形で、撮影用等の小型タイプ（数百g）から農業用などの大型タイプ（5~30 kg）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、我々の生活に着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生活をより豊かにしてくれることが期待されている。

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、発展途上であり、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、「一般ユーザが期待どお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

長年の実績がある産業用無人ヘリコプター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 24.9 kg 以下 (55 lb 未満) で、1 ha 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



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	粒剤散布装置
液剤散布装置名称	SP1-10	GR1-10
最大タンク容量 (L)	10L	10L
吐出方式	ノズル方式 (2 個)	インペラー式
散布幅 (m)	4	5 [除草剤 (1kg 粒剤) 使用時]

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。

(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。無人ヘリコプター（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。

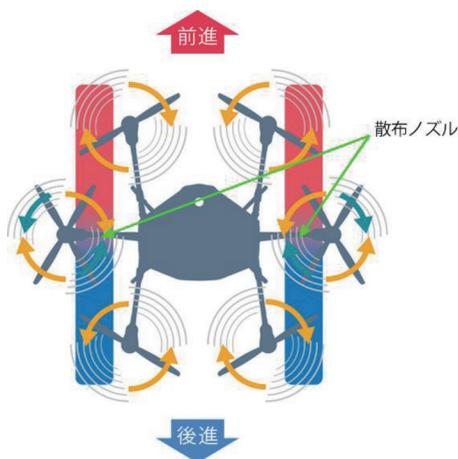


図2 ローターレイアウト

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れるレイアウトを採用することで、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ーで実績がある速度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。

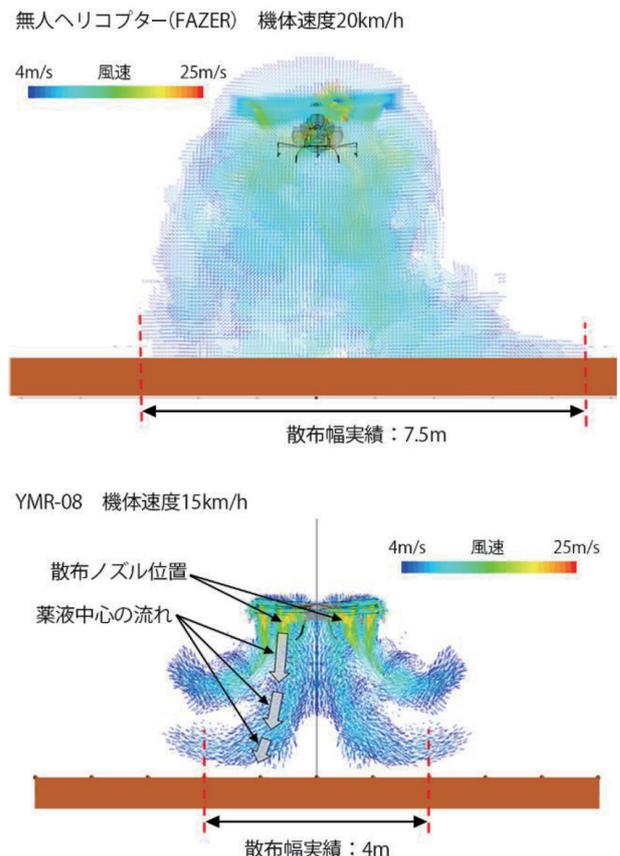


図3 無人ヘリコプターFAZERとYMR-08 ダウンウォッシュ比較解析

(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、1人で容易に運搬できることを重視し、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) 信頼性

信頼性については、図1および表1を参照。詳細開発内容を要素ごとに示すことは今回は割愛する。

(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やを考慮しながら、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(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. 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。無人ヘリコプターは、機体自体が大きく、また熟練オペレーターが多いこともあり、オペレーターの狙い位置から数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、無人ヘリコプター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ーから熟練オペレーターまで、様々なスキルのオペレーター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種からオペレーターが選択することができる。これによりオペレーターの操縦舵を極力減らし、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せられず、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ーでも難しい。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、オペレーター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。

5. 散布装置開発技術

(1) 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4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の必要がなく、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(7.5 km/h)から高速域(20 km/h)まで、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

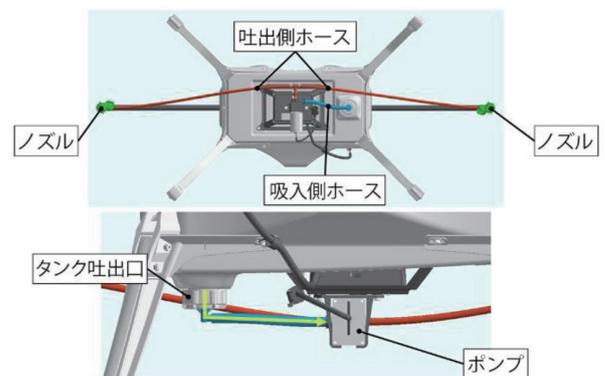


図4. 液剤散布装置

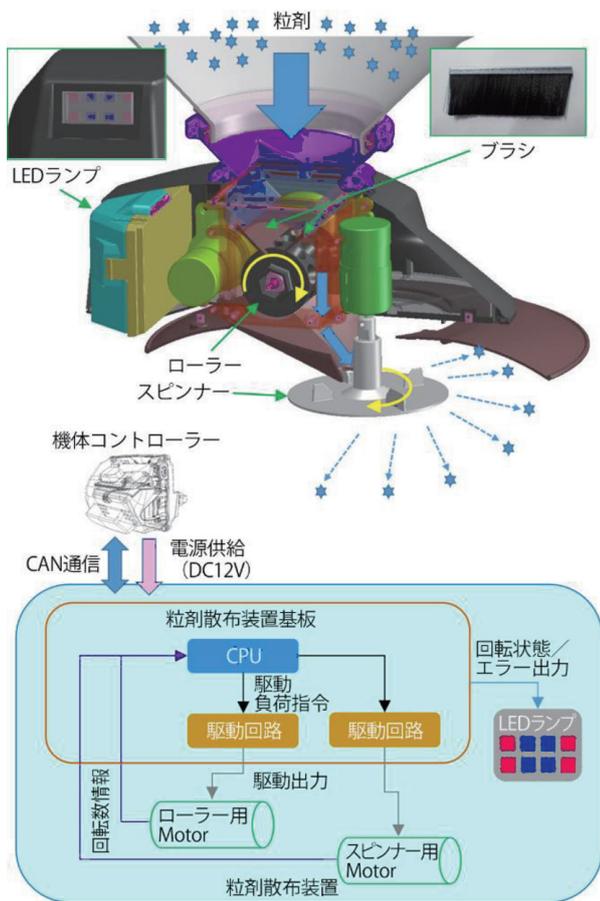


図5 GR1-10 構造

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、10 L 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。

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。

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に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、引きずりや引っ掛かりを防止する機能を持たせた。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



図6 ローラー種別写真

方視認性が向上するだけでなく、持ち手にもなるなど運用面での機能を有している。

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。

(2) 粒剤散布装置 (GR1-10)

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。以下にその特長を記す。

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5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6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5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、フィンの形状を変えることにより、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のLEDランプ（図5）も搭載した。

6. 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。「期待どおりに使えるということはどういうことか」をユーザの視点に立って考え抜いた。その結果、産業用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。