

農業用ドローンを用いた「土佐文旦」、 ポンカンおよびユズの病害虫防除体系の確立

谷大地*・谷本佑・中平龍介

Establishment of a Pest Management System on ‘Tosa-buntan’, Ponkan and Yuzu
Using Agricultural Drones

Daichi TANI, Yuu TANIMOTO and Ryusuke NAKAHIRA

要 約

農業用ドローン（以下、ドローン）を用いた「土佐文旦」、ポンカンおよびユズの病害虫防除体系を確立するため、散布方法を検討し、防除効果を検証するとともに労力削減効果を明らかにした。

1. 散布方法の違いによる液滴付着率については、「土佐文旦」において噴霧液滴サイズ(100 μ m および 285 μ m)、飛行速度(2.0m/s および 5.0m/s) および 10a 当たりの散布液量(10L および 15L)の違いによる差はみられなかった。また、ユズにおいて散布高度(樹冠上端から 1.0, 2.0, 4.0 および 6.0m) および飛行方法(巡回飛行、スピン飛行、直線飛行(片道) および直線飛行(往復))の違いによる差はみられなかった。一方、散布所要時間については、直線飛行(片道および往復)が、巡回飛行およびスピン飛行より短かった。
2. ドローン散布による防除により、黒点病の発病は「土佐文旦」およびユズにおいて人力散布と同程度であったが、ポンカンではやや劣る結果となった。貯蔵病害の発生はポンカンおよびユズにおいて人力散布と同程度であったが、ユズでは灰色かび病およびチャノキイロアザミウマの被害果の発生割合が人力散布より高かった。
3. 10a 当たりの農業散布時間は、ドローン散布が人力散布より 89%減少した。

キーワード:病害虫防除, ドローン散布, 飛行方法, 省力化

はじめに

高知県では温暖な気候を利用して、多くのカンキツ類が栽培されている。そのうち、「土佐文旦」(*Citrus maxima*)およびユズ(*Citrus junos*)は国内で最も栽培面積が大きく、ポンカン(*Citrus poonensis*)も全国3位の産地を形成している⁸⁾。しかし、いずれの品目とも生産者の高齢化および一経営体当たりの栽培面積の増加が進んでおり⁹⁾、防除作業が過重となっている。

農業用ドローン(以下、ドローン)は水稻を中心に導入されており、果樹の病害虫防除においても省力化が期待されている。しかし、ウンシュウミカン、水稻および綿ではドローンを用いた農業散布方法を検討した報告^{5,6,10)}はあるが、カンキツ類の中でも

樹体が大きい「土佐文旦」や、平坦地ではウンシュウミカンよりも樹体が大きくなるポンカンおよびユズについての報告はない。また、カンキツ類においてドローン散布による病害虫防除効果を総合的に検討した事例や、労力削減効果を検討した事例もみられない。

そこで本報告では、高知県の特産カンキツである「土佐文旦」、ポンカンおよびユズにおけるドローンの飛行方法を検討し、効果的な農業散布方法を明らかにした。また、ドローン散布を主体とした病害虫防除を実施し、防除効果および労力削減効果を明らかにしたので報告する。

なお、本研究の実施に当たり、入交アグリーン株式会社、バイ

* 現幡多農業振興センター

エルクロップサイエンス株式会社および果樹試験場の職員から多大なる協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

材料および方法

試験 1. ドローンによる散布方法の検討

1) 噴霧液滴サイズ、飛行速度および散布液量の検討

果樹試験場内(高知市朝倉, 以下, 場内)植栽の「土佐文旦」(26 年生, 平均樹高 2.9m, 平均樹幅 3.6m, 植栽密度 4.0×4.5m(56 樹/10a), 3 本主枝の開心自然形)を 3 樹供試した。2021 年 4 月 26 日に, 樹冠中心から 0.5m および 1.0m の地点に高さ約 3.0m の支柱を 1 樹当たり 2 本ずつ設置した。感水試験紙(syngenta 社製(サイズ 26mm×76mm)), 以下, 感水紙)は, 感水面を上向きにして地表から 1.0m および 2.0m の高さに, 地表面に対して水平に支柱 1 本当たり 2 枚ずつ設置した(図 1, 写真 1)。ドローンは P30(XAG 社製)を使用し, 表 1 に示すように噴霧液滴サイズ(ドローンの 4 つの回転翼の直下にある薬液噴出口に取り付けられた回転アトマイザーから噴霧される液滴サイズ), 飛行速度および散布液量をそれぞれ違い, 図 1 で示すように調査樹 3 樹の両側に平行して隣接する列を含めた計 9 樹に対し樹冠上端から約 1.0m の上空から水を散布した。ドローンの飛行方法は, 樹冠上部を時計回りに 1 周して旋回しながら散布する旋回飛行とした。その後, 感水紙面に付着した液滴の付着跡から画像処理ソフト ImageJ (<https://imagej.net/ij/>)により付着面積を測定した。なお, 液滴付着率は角川らの報告²⁾を参考に, 付着面積を NTSC 加重平均法で 8-bit グレースケール画像に変換し, 自動 2 値化した値に補正係数 0.7411 を乗じた値とした。

2) 散布高度の検討

場内植栽のユズ(25 年生, 植栽密度 3.0×4.0m(83 樹/10a), 平均樹高 3.2m, 平均樹幅 3.3m, 3 本主枝の開心自然形)を 3 樹供試した。2021 年 9 月 6 日に, 試験 1-1)と同様の位置に感水紙を設置した。ドローンは P30 を使用し, 表 2 に示すように樹冠上端から約 1.0, 2.0, 4.0 および 6.0m の上空から水を散布しながら旋回飛行した。その後, 試験 1-1)と同様の方法で液滴付着率を算出した。

3) 飛行方法の検討

場内植栽のユズ(26 年生, 植栽密度 3.0×4.0m(83 樹/10a), 平均樹高 2.8m, 平均樹幅 4.0m, 3 本主枝の開心自然形)を 3 樹供試した。2022 年 9 月 9 日に, 試験 1-1)と同様の位置に感水紙を設置した。4 種類の飛行方法(表 3, 図 2, ①旋回飛行:試験 1-1)と同様の飛行方法, ②スピン飛行:樹冠上部で時計回りに 2 周自転しながら散布する飛行方法, ③直線飛行(片道):樹冠上の中心部を

結ぶ直線上を一方方向に移動しながら散布する飛行方法, ④直線飛行(往復):樹冠上の中心部を結ぶ直線に対して左右に 0.5m ずつ離れた地点を直線上に往復散布する飛行方法。)によりドローンを飛行させながら水を散布し, 試験 1-1)

と同様の方法で液滴付着率を算出した。また, ドローンの離陸から着陸までの所用時間および人力散布の開始から終了までの所要時間を計測し, 10a 当たりの散布所用時間(植栽密度 83 樹/10a)に換算した。なお, 本研究の噴霧液滴サイズおよび飛行速度は, 散布液量を 15L/10a となるよう設定した。

4) 統計解析

試験 1)~3)は, Kruskal-Wallis 検定により, 散布方法を比較した。エクセル統計 4.07(社会情報サービス社製)を用いて統計解析を行った。

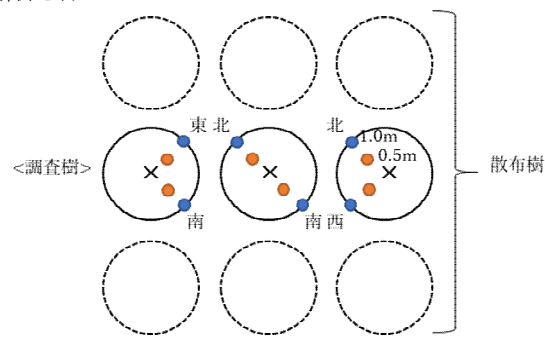


図1 支柱の設置地点

×: 樹冠中心

○: 樹冠中心から 0.5m の地点に設置した支柱

●: 樹冠中心から 1.0m の地点に設置した支柱

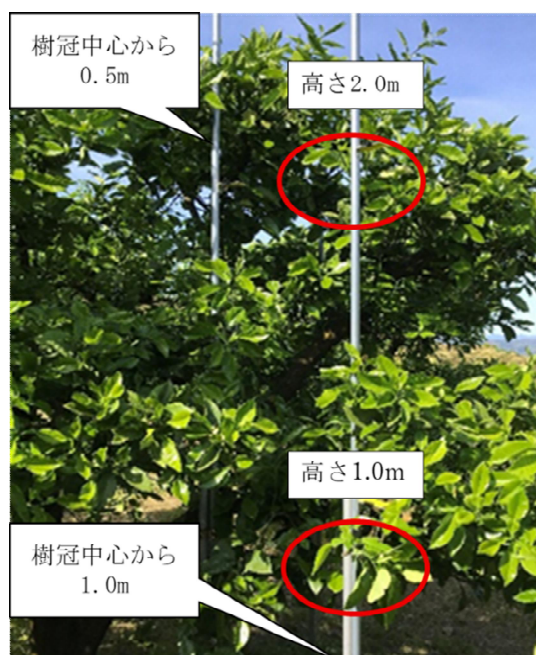


写真1 支柱への感水紙の設置方法

表1 噴霧液滴サイズ，飛行速度および散布液量の処理概要

試験区	飛行方法	噴霧液滴サイズ (μm)	飛行速度 (m/s)	散布液量 (L/10a)	散布液量 (mL/s) ^{y)}	樹冠上端からの距離 (散布高度) (m)
①	旋回飛行 ^{z)}	100	2.0	10	17.9	1.0
②		100	2.0	15	26.8	
③		100	5.0	10	17.9	
④		285	2.0	10	17.9	

z) 樹冠上部を時計周りに1周して旋回しながら散布する飛行方法。

y) 散布液量(mL/s)は，植栽密度56本/10aとして，旋回時間を10秒/樹と仮定した。

表2 散布高度の処理概要

試験区	飛行方法	噴霧液滴サイズ (μm)	飛行速度 (m/s)	散布液量 (L/10a)	散布液量 (mL/s) ^{y)}	樹冠上端からの距離 (散布高度) (m)
①	旋回飛行 ^{z)}	100	2.0	10	12.0	1.0
②						2.0
③						4.0
④						6.0

z) 樹冠上部を時計周りに1周して旋回しながら散布する飛行方法。

y) 散布液量(mL/s)は，植栽密度56本/10aとして，旋回時間を10秒/樹と仮定した。

表3 飛行方法の処理概要

試験区	飛行方法 ^{z)}	噴霧液滴サイズ (μm)	飛行速度 (m/s)	散布液量 (L/10a)
①	旋回飛行	100	2.0	15
②	スピン飛行	100	2.0	
③	直線飛行(片道)	105	1.0	
④	直線飛行(往復)	105	1.0	

z) 旋回飛行：樹冠上部を時計周りに1周して旋回しながら散布する飛行方法。

スピン飛行：樹冠上部で2周自転しながら散布する飛行方法。

直線飛行(片道)：樹冠上の中心部を結ぶ直線上を一方向に移動しながら散布する飛行方法。

直線飛行(往復)：樹冠上の中心部を結ぶ直線に対して左右に0.5mずつ離れた地点を直線上に往復散布する飛行方法。

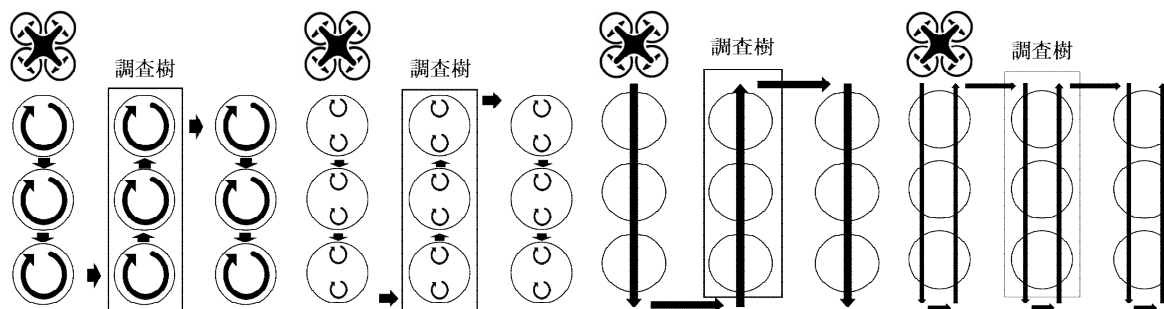


図2 飛行方法(左から，旋回飛行，スピン飛行，直線飛行(片道)，直線飛行(往復))

○：散布樹， →：散布経路

試験 2. 露地カンキツにおけるドローンを主体とした防除体系の検討

1) 「土佐文旦」(2021 年度)

場内植栽の「土佐文旦」(26 年生, 栽植密度 4.0×4.5m(56 樹/10a), 平均樹高 3.0m, 平均樹幅 4.3m, 3 本主枝の開心自然形)を 6 樹供試した。ドローン散布区と人力散布区(慣行)を設け, 表 4 のとおり農薬を散布し, 黒点病に対する防除効果を検討した。ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 飛行高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。人力散布区はマルチスプレーヤー(MRS60H-350-1, 株式会社丸山製作所製)にホースをつなぎ, スプレーノズルを用いて 1 樹ごとに 1 周しながら 3.6~12.5L/樹を散布した。

2) ポンカン(2022 年度)

場内植栽のポンカン「徳村系」(36 年生, 栽植密度 4.0×4.0m(63 樹/10a), 平均樹高 2.8m, 平均樹幅 4.0m, 3 本主枝の開心自然形)を 6 樹供試した。ドローン散布区と人力散布区(慣行)を設け, 表 5 のとおり農薬を散布し, 黒点病および貯蔵病害(緑かび病および青かび病)に対する防除効果を検討した。ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。人力散布区はマルチスプレーヤーにホースをつなぎ, スプレーノズルを用いて 1 樹ごとに 1 周しながら 6.7~11.1L/樹を散布した。

3) ユズ(2023 年度)

場内植栽のユズ(27 年生, 栽植密度 3.0×4.0m(83 樹/10a), 平均樹高 2.5m, 平均樹幅 3.0m, 3 本主枝の開心自然形)を 6 樹供試した。ドローン散布区と人力散布区(慣行)を設け, 表 6 のとおり農薬を散布し, 黒点病および貯蔵病害(緑かび病および青かび病)に対する防除効果を検討した。また収穫果実を出荷規格の等級比率および落等要因毎に分類した。ドローンの飛行方法は, 畝を直線上に往復飛行する設定(図 2, 直線飛行(往復))とし, 高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 105 μ m, 飛行速度を 1.0m/s とした。人力散布区はマルチスプレーヤーにホースをつなぎ, スプレーノズルを用いて 1 樹ごとに 1 周しながら 5.1~8.4L/樹を散布した。

4) 調査項目

(1) 黒点病

「土佐文旦」は, 2021 年 12 月 14 日に収穫した果実のうち M 級以上の全果(平均 168 果/樹), ポンカンは 2022 年 12 月 19 日に収穫した 2L 級の果実のうち 100 果/樹, ユズは 2023 年 10 月 31 日に収穫した果実のうち 100 果/樹について, 黒点病を発病指数別(指数 0: 病斑が見られない, 指数 1: 病斑が散見される, 指数 3: 病斑が果面の 1/4 以下に分布する, 指数 5: 病斑が果面の 1/4~1/2 に分布する, 指数 7: 病斑が果面の 1/2 以上に分布する(日本植物防疫協会調査法(果樹(病害))のかんきつ黒点病))に評価し(写真 2), 発病率および発病度を算出した。

表 4 「土佐文旦」の黒点病に対する防除薬剤の使用履歴²⁾(2021)

散布日	農薬名	ドローン散布			人力散布		
		希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)	希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)
6月15日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
7月 5日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
7月28日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
8月24日	マンゼブ水和剤	5	4	800	600	600	1,000
9月22日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	50	15	300	1,500	600	400

2) 希釈倍数, 散布量は 2022 年 12 月 1 日時点での登録内容に準じた。また, ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 飛行高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。

表 5 ポンカンの黒点病および貯蔵病害に対する防除薬剤の使用履歴²⁾(2022)

散布日	農薬名	対象病害虫	ドローン散布			人力散布		
			希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)	希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)
5月23日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	420	700
6月10日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	700	1,167
6月30日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	700	1,167
7月28日	マンゼブ水和剤	黒点病	5	4	800	600	700	1,167
9月14日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	黒点病	50	15	300	1,500	700	467
12月 2日	チオファネートメチル水和剤	貯蔵病害	30	10	333	2,000	525	263

2) 希釈倍数, 散布量は 2023 年 10 月 27 日時点での登録内容に準じた。また, ドローンの飛行方法は巡回飛行とし, 高度を樹冠上端から上空約 2.0m, 噴霧液滴サイズを 100 μ m, 飛行速度を 2.0m/s とした。

表6 ユズの病害虫に対する防除薬剤の使用履歴^{a)}(2023)

散布日	農薬名	対象病害虫	ドローン散布			人力散布		
			希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)	希釈倍数	散布量 (L/10a)	薬液投下量 (g, mL/10a)
5月 1日	クロチアニジン水溶液	訪花害虫	48	15	313	2,000	664	332
	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	灰色かび病	50	15	300	1,500	664	443
5月24日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	398	664
6月14日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	664	1,107
	イミダクロプリド・エチプロール水和剤 ^{y)}	チャノキイロアザミウマ	100	16	160	2,000	664	332
7月 6日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	664	1,107
7月27日	マンゼブ水和剤	黒点病	20	16	800	600	664	1,107
8月16日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	黒点病	50	15	300	1,500	664	443
	イミダクロプリド・エチプロール水和剤 ^{y)}	チャノキイロアザミウマ	50	15	300	2,000	664	332
9月 7日	テブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤	黒点病	50	15	300	1,500	700	467
10月27日	チオファネートメチル水和剤	貯蔵病害	30	10	333	2,000	420	210

z) 希釈倍数、散布量は2023年10月27日時点での登録内容に準じた。また、ドローンの飛行方法は、畝を直線上に往復飛行する設定（直線飛行(往復)）とし、高度を樹冠上端から上空約2.0m、噴霧液滴サイズを105 μ m、飛行速度を1.0m/sとした。

y) 2025年6月時点で登録失効。



写真2 黒点病発病指数別の果実

(2) 貯蔵病害

ポンカンは、2022年12月19日に収穫した2L級の果実のうち60果/樹を供試し、2022年12月22日に長さ約15mのコンクリート斜面(傾斜角度10°)で2回転がして果実表面を傷つけた後、直ちにコンテナ(内寸:約985(横)×約535(縦)×約200mm(高さ))に15果ずつ並べた。発病を促すためにコンテナをポリエチレン袋(容量45L, 厚み0.015mm)に入れ、袋の口を折り曲げ、場内の貯蔵庫内で常温貯蔵した(袋内平均温度7.4℃および平均湿度92.3%)。貯蔵開始27日後(2023年1月18日)に貯蔵病害(緑かび病および青かび病)の発病果数を調査し、腐敗果率を算出した。ユズは、2023年11月1日に収穫果実のうち30果/樹を長さ約10mのコンクリート斜面(傾斜角度10°)で1回転がして果実表面を傷つけた後、直ちにコンテナに15果ずつ並べた。発病を促すためにコンテナをポリエチレン袋(容量45L, 厚み0.015mm)に入れ、袋の口を折り曲げ、場内の貯蔵庫内で常温貯蔵した(袋内平均温度12.0℃および平均湿度94.1%)。貯蔵開始56日後(2023年12月27日)に貯蔵病害(緑かび病および青かび病)の発病果数を調査し、腐敗果率を算出した。

(3) 等級比率

2023年10月31日に収穫した果実のうち100果/樹を「ユズ出荷規格表」(高知県農業協同組合営農販売事業本部)に準じて「平箱」, 「ユズ5kg」(旧冬至)および「加工用」の3つの等級(「平箱」, 「ユズ5kg」, 「加工用」の順に等級が高い)に分類した。また, 「ユズ5kg」および「加工用」への落等原因を果皮障害の種類(灰色かび病, 訪花害虫, 黒点病, チャノキイロアザミウマおよびスレ果)に応じて分類した。

5) 統計解析

ユズの収穫果実における等級比率は χ^2 検定, ユズの落等原因はMann-WhitneyのU検定により, ドローン散布と人力散布を比較した。エクセル統計4.07(社会情報サービス社製)を用いて統計解析を行った。

試験3. ドローンによる露地カンキツの防除体系における防除作業時間削減効果の検討

場内植栽のユズ(27年生, 植栽密度3.0×4.0m(83樹/10a), 平均樹高2.8m, 平均樹幅4.0m, 3本主枝の開心自然形)を10樹供試

した。ドローンの離陸から着陸までの時間と人力散布の散布開始から終了までの時間を各5回ずつ計測し、その平均時間を10a相当に変換した。ドローンの飛行経路は畝を直線上に往復飛行する設定(直線飛行(往復))とし、高度を樹冠上端約2.0m、速度を1.0m/s、噴霧液滴サイズを105 μ mとした。人力散布区はマルチスプレーヤーにホースをつなぎ、スプレーノズルを用いて、1樹ごとに1周しながら十分量散布した(図3)。

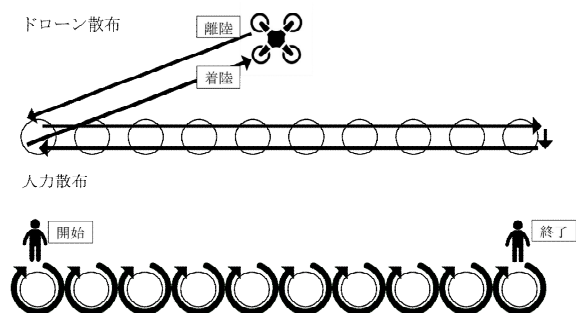


図3 散布経路 (上：ドローン散布, 下：人力散布)

結 果

試験1. ドローンによる散布方法の検討

1) 噴霧液滴サイズ、飛行速度および散布液量の検討

噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区①)と噴霧液滴サイズ285 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区④)の結果から、噴霧液滴サイズの違いによる液滴付着率に差はみられなかった。噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区①)と噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度5.0m/s、散布液量10L/10a(試験区③)の結果から、飛

行速度の違いによる液滴付着率に差はみられなかった。噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量10L/10a(試験区①)と噴霧液滴サイズ100 μ m、飛行速度2.0m/s、散布液量15L/10a(試験区②)の結果から、散布液量の違いによる液滴付着率に差はみられなかった(図4)。

2) 散布高度の検討

樹冠上端から約1.0、2.0、4.0および6.0mのいずれの散布でも液滴付着率に差はみられなかった(図5)。

3) 飛行方法の検討

いずれの飛行方法の散布においても液滴付着率に差はみられなかった(図6)。一方で、直線飛行(片道および往復)にかかる散布時間は、旋回飛行およびスピニング飛行に比べて短かった(表7)。

試験2. 露地カンキツにおけるドローンを主体とした防除体系の効果の検討

1) 黒点病

ドローン散布による「土佐文旦」およびユズの黒点病の発病率および発病度は、人力散布と同程度であった。一方、ポンカンにおいてはドローン散布での発病率および発病度がやや高かった(表8)。

2) 貯蔵病害

ドローン散布によるポンカンおよびユズの貯蔵病害の発生は、人力散布と同程度に抑えられた(表9)。

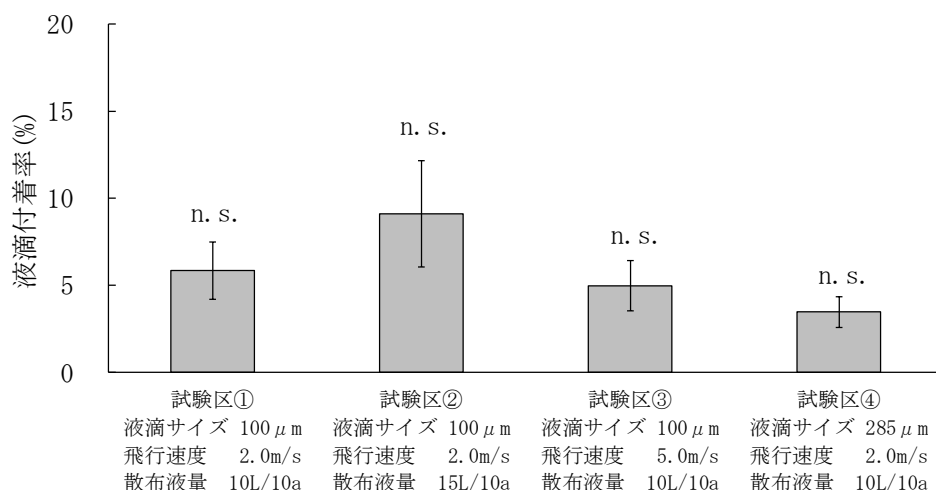


図4 噴霧液滴サイズ、飛行速度および散布液量の違いによる液滴付着率(「土佐文旦」)

注1) Kruskal-Wallis 検定により、n. s. は有意差なし。

2) 図中のエラーバーは、標準誤差(SE)を示す。

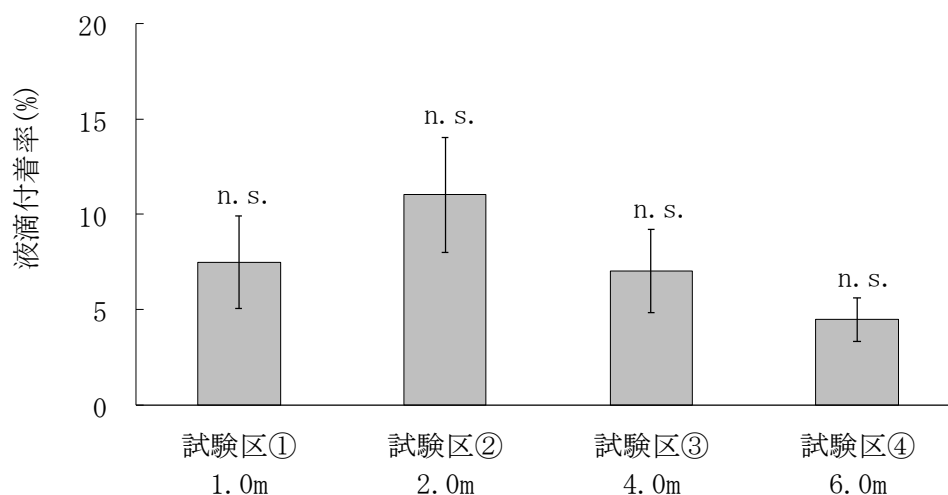


図5 樹冠上端からの距離の違いによる液滴付着率(ユズ)

注1) Kruskal-Wallis 検定により, n. s. は有意差なし。

2) 図中のエラーバーは, 標準誤差(SE)を示す。

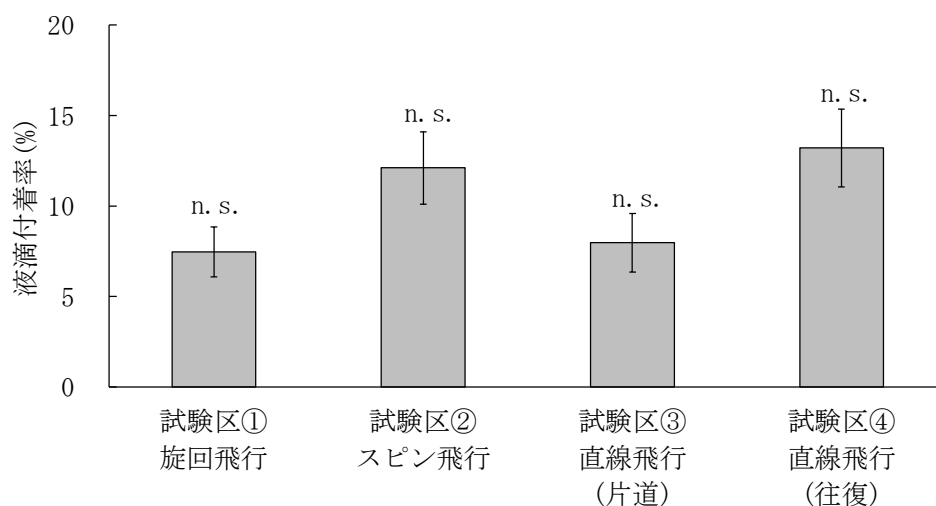


図6 飛行方法の違いによる液滴付着率(ユズ)

注1) Kruskal-Wallis 検定により, n. s. は有意差なし。

2) 図中のエラーバーは, 標準誤差(SE)を示す。

表7 飛行方法の違いによる散布所用時間

飛行方法	散布時間 ^{z)} (分)	割合 ^{y)} (%)
旋回飛行	28.1	100.0
スピン飛行	44.7	159.0
直線飛行(片道)	15.1	53.6
直線飛行(往復)	22.3	79.2

z) 83 本/10a に換算した散布時間. バッテリーや農薬の交換時間は含まない。

y) 旋回モードの散布時間を 100% としたときのそれぞれの飛行時間の割合。

表8 「土佐文旦」、ポンカンおよびユズの収穫果実における黒点病の発病指数別の果実割合

品目	散布方法	連制	調査 果数	発病指数別果数 ^{z)}					発病果率 (%)	発病度 ^{y)}
				0	1	3	5	7		
土佐文旦	ドローン	I	221	7	161	53	0	0	96.8	20.7
		II	158	27	116	11	3	1	82.9	15.5
		III	164	15	144	4	1	0	90.9	14.0
		平均	181	16.3	140.0	22.7	1.33	0.33	90.2	16.7
	人力	I	149	30	117	2	0	0	79.9	11.8
		II	135	30	100	5	0	0	77.8	12.2
		III	182	10	147	23	2	0	94.5	17.7
		平均	155	23.3	121.0	10.0	0.67	0.0	84.0	13.9
ポンカン	ドローン	I	100	93	7	0	0	0	7.0	1.0
		II	100	95	5	0	0	0	5.0	0.7
		III	100	83	16	1	0	0	17.0	2.7
		平均	100	90.3	9.3	0.3	0.0	0.0	9.7	1.5
	人力	I	100	98	2	0	0	0	2.0	0.3
		II	100	100	0	0	0	0	0.0	0.0
		III	100	99	1	0	0	0	1.0	0.1
		平均	100	99.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1
ユズ	ドローン	I	100	59	41	0	0	0	41.0	5.9
		II	100	41	57	1	1	0	59.0	9.3
		III	100	42	57	1	0	0	58.0	8.6
		平均	100	47.3	51.7	0.7	0.3	0.0	52.7	7.9
	人力	I	100	36	63	1	0	0	64.0	9.4
		II	100	38	62	0	0	0	62.0	8.9
		III	100	75	25	0	0	0	25.0	3.6
		平均	100	49.7	50.0	0.3	0.0	0.0	50.3	7.3

z) 調査基準は、日本植物防疫協会の調査法に準じた。

発病指数：0;病斑なし, 1;病斑が散見される, 3;病斑が果面の1/4以下に分布する, 5;病斑が果面の1/4~1/2に分布する

7;病斑が果面の1/2以上に分布する

y) 発病度 = 調査果数 × Σ(程度別発病果数 × 指数) / (調査果数 × 7)

表9 ポンカンおよびユズの収穫果実における腐敗果率

品目	散布方法	連制	調査 果数	累計 腐敗果数 ^{z)}	腐敗果率 (%)
ポンカン	ドローン	I	60	46	76.7
		II	60	37	61.7
		III	60	44	73.3
		平均	60	42.0	70.6
	人力	I	60	41	68.3
		II	60	38	63.3
		III	60	41	68.3
		平均	60	40.0	66.7
ユズ	ドローン	I	30	11	36.7
		II	30	29	96.7
		III	30	27	90.0
		平均	30	22.3	74.4
	人力	I	30	15	50.0
		II	30	17	56.7
		III	30	19	63.3
		平均	30	17.0	56.7

z) ポンカンは貯蔵開始27日後、ユズは貯蔵開始56日後の青かび病と緑かび病を合計した腐敗果実発生数を示す。

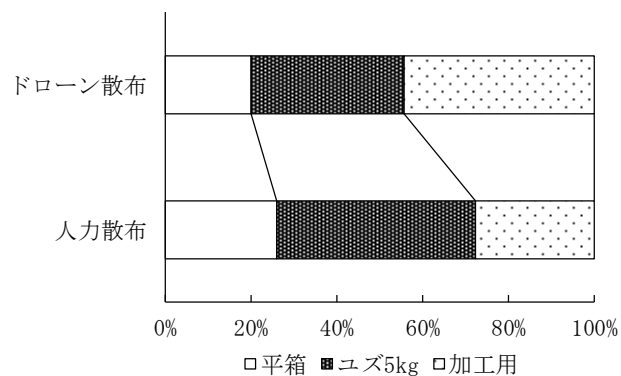


図7 ユズの収穫果実における等級比率(2023)

注1) 「ユズ出荷規格表」(高知県農業協同組合営農販売事業本部)に準じて分類した。

2) χ^2 検定により、ドローン散布と人力散布の等級比率に有意差なし。

表10 ユズの「ユズ5kg」（旧冬至）および「加工用」果実への落等原因(2023)

落等原因	散布方法	連制	調査果数	落等果実数
灰色かび病	ドローン	I	100	9
		II	100	8
		III	100	9
		平均	100	8.7
	人力	I	100	9
		II	100	0
		III	100	3
		平均	100	4.0
	有意差			n. s.
訪花害虫	ドローン	I	100	13
		II	100	11
		III	100	18
		平均	100	14.0
	人力	I	100	12
		II	100	13
		III	100	12
		平均	100	12.3
	有意差			n. s.
黒点病	ドローン	I	100	0
		II	100	2
		III	100	3
		平均	100	1.7
	人力	I	100	29
		II	100	42
		III	100	2
		平均	100	24.3
	有意差			*
チャノキイロアザミウマ	ドローン	I	100	14
		II	100	6
		III	100	9
		平均	100	9.7
	人力	I	100	0
		II	100	0
		III	100	2
		平均	100	0.7
	有意差			*
スレ	ドローン	I	100	1
		II	100	5
		III	100	3
		平均	100	3.0
	人力	I	100	7
		II	100	10
		III	100	8
		平均	100	8.3
	有意差			*

注1) Mann-Whitney 検定により*は5%水準で有意差あり, n. s. は有意差なし.

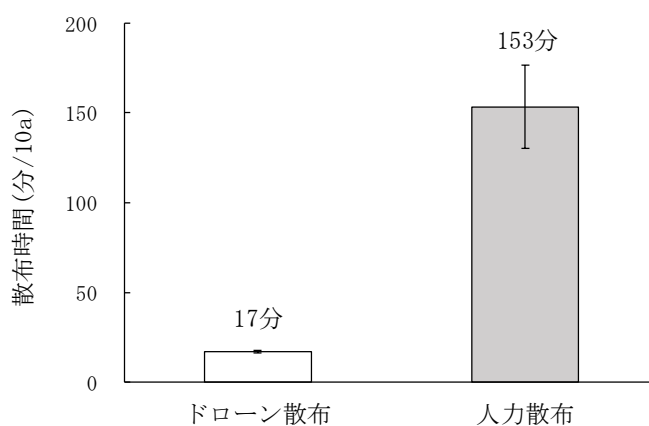


図8 ドローン散布と人力散布における10a当たりの散布所要時間

注) 図中のエラーバーは標準偏差を示す.

3) 等級比率

ドローン散布によるユズの等級比率は、人力散布と同程度であった(図 7)。また、ドローン散布による主な落等原因は、チャノキイロアザミウマの前期被害であった。また、ドローン散布によるスレ果の増加はみられなかった(表 10)。

試験 3. ドローンによる露地カンキツの防除体系における労力軽減効果の検討

ドローンによる 10a 当たりの農薬散布時間は、人力散布と比較して 89%減少した(図 8)。

考 察

まず、「土佐文旦」でドローン散布における、噴霧液滴サイズ、飛行速度および 10a 当たりの散布量を違えて比較し、最適な散布方法を検討した。いずれの試験においても有意な差はみられなかったが、噴霧液滴サイズ 100 μ m、飛行速度 2.0m/s、10a 当たりの散布量 15L の散布では、他の散布設定と比較して液滴付着率が高い傾向がみられた。Yan et al. (2023)¹¹⁾は、平均樹高 2.6m、平均樹高 2.9m のカンキツ類(品種の記載なし)に対するドローン散布において、散布量を 60L/ha から 120L/ha に増加させると、樹冠内の液滴落下数および葉面上の液滴被覆面積率が大幅に向上したと報告しており、本研究の結果においても散布量は異なるものの同様の傾向を示した。噴霧液滴サイズについては、100 μ m と比較して 285 μ m では液滴付着率が低い傾向がみられた。増井ら(2021)⁷⁾は、ウンシュウミカン「青島温州」(20 年生、開心自然形)のドローン散布において、散布粒径(噴霧液滴サイズ)が 100~195 μ m の範囲では粒径が小さいほど、樹冠内に設置した感水紙の液滴被覆面積率が高くなったと報告している。本研究でも噴霧液滴サイズが大きい場合、風の影響を受けず液滴が真下に落下することにより、樹全体への液滴付着率が低下する傾向がみられたと考えられた。一方で、噴霧液滴サイズが小さい場合、風やダウンウォッシュの影響を受けやすく液滴が飛散し、樹全体への液滴付着率が高くなる傾向がみられたと考えられた。なお、ポンカンやユズも平坦地では樹体が大きくなりやすく、薬液の付着は同様の傾向になると考えられた。

ユズでの散布高度検討では、散布高度による液滴付着率の差はみられなかったが、Ranabhat et al. (2025)の綿等での報告⁹⁾と同様に樹冠上端から約 2.0m の上空からの散布が他の散布高度と比較すると高くなる傾向がみられた。一方で、樹冠から約 1.0m の上空からの地点での散布では、散布幅が狭くなり樹冠上部の枝葉に液滴が遮られたこと、また、約 4.0m 以上の上空からの散布では、液滴の拡散や風の影響を受けやすくなったことで液滴付着率が低くなる傾向がみられたと考えられ

た。以上により、散布高度は樹体特性よりも環境条件に影響される傾向が強いと考えられるため、葉や樹体の大きさに関係なく「土佐文旦」およびポンカンにおいても同様の結果になると考えられた。

飛行方法の検討においても、飛行方法による差はみられなかったが、直線飛行(往復)およびスピン飛行での散布が他の飛行方法と比較して液滴付着率が高い傾向であり、これは直線飛行(往復)より螺旋飛行(本研究における旋回飛行)が薬液の被覆面積率が高くなったとする増井ら(2021)の報告⁷⁾と異なった。増井ら(2021)の報告⁷⁾では、散布液量 10L/10a、飛行速度 1.5m/s で散布しているが、本研究では散布液量を 15L/10a、飛行速度を旋回飛行およびスピン飛行では 2.0m/s、直線飛行(片道および往復)では 1.0m/s としており、散布液量 15L/10a で散布するためには機体の設定上、直線飛行では飛行速度が遅くなるため液滴付着率が高くなる傾向がみられたと考えられた。スピン飛行では、旋回飛行より 1 樹当たりにかかる散布時間が長くなったため、液滴付着率が高くなる傾向がみられたと考えられた。また、直線飛行(片道および往復)にかかる散布時間は、旋回飛行やスピン飛行と比較して短かった。これは、旋回飛行およびスピン飛行では散布開始および終了時にホバリングするため、ホバリング回数が直線飛行に比べて多くなったと考えられた。したがって、直線飛行(往復)が同じ散布時間で最も多くの面積を散布でき、防除効果を最大限発揮できると考えられた。飛行方法に関しても樹体特性より環境条件やドローンの機体条件に影響される傾向が強いと考えられるため、「土佐文旦」およびポンカンでも、薬液の付着は同様の結果になると考えられた。

次に、ドローン散布を主体とした防除を実施し、防除効果および労力削減効果を評価した。熊本ら(2021)⁴⁾はウンシュウミカンの黒点病防除において、ドローン散布と人力散布でマンゼブ水和剤を 4 回ずつ散布して防除効果を比較した結果、ドローン防除では防除効果が低くなったと報告している。本研究においても、ポンカンで防除効果がやや劣る結果となったが、ユズおよび「土佐文旦」では同等であった。ポンカンにおいてもドローン散布では発病指数 0 の果実が全体の 90.3%であったことから、実用性はあると考えられた。

ユズにおいて、灰色かび病や訪花害虫による防除効果も人力散布と同等であった。これは、開花期間において葉が十分に展葉しておらず、樹冠内部に空間があり薬液が付着しやすく適期防除により人力散布と同等の防除効果が得られると考えられた。また、クロチアニジン水溶剤およびテブコナゾール・トリフロキシストロビン水和剤は浸透移行性があり、灰色かび病や訪花害虫に対して十分な効果が発揮されたと考えられた。さらに、ドローン散布によるスレ果の増加もなかった。生

産者からは、ユズの枝梢のトゲによってドローンの風圧によるスレ果の発生が懸念されているが、自然風と比べてドローンによるダウンウォッシュは一時的であったため、スレ果が少なかったと考えられた。

ポンカンおよびユズにおいて、貯蔵病害による腐敗果の発生割合も人力散布と同等であった。これは、チオファネートメチル水和剤の浸透移行性により、十分な防除効果が発揮されたと考えられた。なお、本研究において貯蔵病害の発生割合がドローン、人力散布とも60%を超えているが、これは、日本植物防疫協会調査法のかんきつ貯蔵病害(付傷試験)に準じて実施したため、付傷処理により貯蔵病害が発生しやすい条件であったことを考慮する必要がある。

よって、ドローンを利用した防除で人力散布と同等の防除効果が得られたため、ドローンを主体とした防除体系は、「土佐文旦」、ポンカンおよびユズでも実用性があると考えられた。一方、ユズの収穫果実における等級比率の調査より、チャノキイロアザミウマの被害は、ドローン散布で多い傾向が示唆された。これは、ドローン散布では1樹当たりの散布量が人力散布に比べて少なく、また、試験1の結果から1樹内で散布ムラがあり(データ略)、農薬が害虫に対して直接かからなかったため被害が多くなる可能性が考えられた。同様にハダニ類やカイガラムシ類でも、ナンにおいて薬液付着率の低下によりナミハダニ雌成虫の死虫率が低下した報告¹⁾もあるため、散布ムラがあると防除効果が不安定となることが懸念される。そのため、これらの害虫を対象とした防除は、人力散布で補完する必要があると推察された。

最後に、労力軽減効果について、病害虫防除にかかる散布時間を人力散布と比較した。その結果、ドローン散布では人力散布よりも散布時間を約90%削減できた。ただし、今回算出した散布時間は、ユズ11樹を用いたドローンの離陸から着陸までの時間と、人力散布の散布開始から終了までの時間を計測し、10a相当に変換したものである。本研究を実施したほ場は直線上に樹が植わっており、途中で障害物のない平坦なほ場であった。生産現場では様々な条件があるため、ドローンの飛行経路や障害物の有無により散布時間が変動することに留意する必要がある。

以上より、「土佐文旦」、ポンカンおよびユズにおけるドローン散布による樹体への液滴付着率および病害虫に対する防除効果が明らかとなった。ドローン散布により一定の防除効果は期待できるが、一部の病害虫では人力散布と比較して効果がやや劣った。カンキツ類は樹形が立体的であり、ドローンによる上空からの散布では、樹体内部や下部および葉裏への液滴付着率が低くなると考えられる。なお、今回使用したP30は2025年7月現在、製造が中止されており、後継機種はP40

となっている。

利益相反の有無

本研究の一部は、バイエルクロップサイエンス株式会社より研究費を受け共同で実施した。また、一部の試験について、入交アグリーン株式会社と共同で実施した。本研究の内容および結論に影響はない。

引用文献

- 1) 飯塚亮・嶋田綾・坂本彩・加藤綾奈・山口修平(2018). 東京都のナンにおけるナミハダニ黄緑型の薬剤感受性と葉の巻きによる薬液付着量の低下が死虫率に及ぼす影響. 関東東山病害虫研究会報. 第65集. PP. 139-143.
- 2) 角川修・深山大介・荒木琢也(2008). 感水紙を用いた茶園における農薬散布時のドリフトの評価. 茶研報. 106: 21-38.
- 3) 高知県農業振興部(2025). 高知県農業の動向(令和7年度). PP. 8-16.
- 4) 熊本昌平・衛藤夏葉・武田知明(2021). ドローンを用いたマンゼブ水和剤散布によるウンシュウミカンにおけるカンキツ黒点病に対する防除効果. 和歌山県農林水研報 9: 47-54.
- 5) Lou, Z., F. Xin, X. Han, Y. Lan, T. Duan and W. Fu(2018). Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9). 187.
- 6) 増井伸一・山根俊・土田祐大・村田裕行・加藤光弘(2020). 無人航空機を用いた少量散布によるカンキツ樹冠内の液滴の付着特性. 関東東山病害虫研究会報第67集: 87-89.
- 7) 増井伸一・村田裕行・土田祐大・加藤光弘・小林泉・猪俣敏一(2021). マルチローター式無人航空機による薬剤散布時の飛行経路と散布粒径がカンキツ樹冠内における液滴の付着性に及ぼす影響. 関西病虫研報 (63): 27-32.
- 8) 農林水産省. 特産果樹生産動態等調査. 令和4年産.
- 9) Ranabhat, S. and R. Price(2025). Effects of flight heights and nozzle types on spray characteristics of unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer in common field crops. *AgriEngineering*. 7(2). 22.
- 10) 齋田直哉・山崎裕子・松倉開成(2021). 水稻栽培における農業用ドローンによる空中散布精度. 四国支報. 58: 8-9.
- 11) Yan, Y., Y. Lan, G. Wang, M. Hussain, H. Wang, X. Yu, C. Shan, B. Wang and C. Song(2023). Evaluation of the deposition and distribution of spray droplets in citrus orchards by plant protection drones. *Front.*

Plant Sci., 14:1303669.

Summary

This study investigated different drone-spraying methods to establish a disease and pest control system for Tosa buntan (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.), ponkan (*Citrus reticulata* Blanco), and yuzu (*Citrus junos* Sieb. ex Tanaka). This study evaluated the efficacy of these methods and quantified their labor-saving effects.

1. No differences in droplet adhesion rates for Tosa buntan were observed with respect to spray droplet size (100 or 285 μm), flight speed (2.0 or 5.0 m/s), or spray volume per 10 ares (10 or 15 L). Similarly, no differences in droplet adhesion rates for yuzu were observed with respect to spray height (1.0, 2.0, 4.0, or 6.0 m above the canopy) or flight method (circular, spin, straight one-way, or straight flight round-trip). Straight flights (one-way and round-trip) required less spraying time than circular or spin flights.

2. Disease control using drone spraying resulted in an incidence of citrus melanose comparable to that achieved via manual spraying for Tosa buntan and yuzu, but a slightly lower incidence in ponkan. The incidence of citrus storage diseases in ponkan and yuzu following drone spraying was comparable to that following manual spraying. Conversely, pest control using drone spraying in yuzu resulted in a higher proportion of fruits damaged by gray mold and yellow tea thrips compared with manual spraying.

3. The time required to apply pesticides per 10 ares was reduced by 89% with drone spraying compared with manual spraying.

Key words: Pest and disease control, drone spraying, flight methods, labor-saving