

ドローンを用いた補修材吹付け

二村憲太郎*1・井上靖雄*2・長谷川忠大*3・伊代田岳史*4

1. はじめに

近年、無人航空機（以下、ドローン）は小型化された高感度のカメラ、高出力のバッテリー、フライトコントローラと呼ばれる高性能のコンピュータおよび衛星測位システム（Global Navigation Satellite System 以下、GNSS）による自己位置推定機能を装備することで、自由に3次元空間を移動し撮影できるようになった。これらは主にスマートフォンに使用されている技術を応用し、カメラ機能を使うことで今まで見ることが困難であった俯瞰画像や映像を容易に撮影できることから急速に普及が進んだ。さらにドローンはインターネットと繋がることで、メーカーはユーザーの利用方法を即時に捉え、開発に生かすことでドローンの性能向上のみならず多岐に渡って利用できるような性能になってきた。これが、さまざまな分野の産業における利活用への期待として現れている。農業分野においては田畑への農薬噴霧に始まる精密農業への進化へと期待されている。土木分野においては橋梁等の点検や測量への利用があるが、測量への利用はすでに普及段階に入っている。また、インフラの点検の観点からは送電線の確認も始まろうとしている。これはディープラーニングを組み合わせることで、さらに効率的な劣化部分の検出をすることができるようになる。人口が密集する都市部での利用が主となる建築分野では、ビル等の点検・調査の研究やルール作りが進められている。物流分野では、ラストワンマイルとして問題となっている集配所から各家庭までの宅配物流での切り札、さらには地震、津波および火災等災害時後の調査等におけるドローンの活用が期待されている。近年では、パッセンジャードローンと呼ばれる人を運ぶドローンも研究されており、数年後には実現する見通しである。このようにドローンの普及は想像以上に早く、「ダブルドッグイヤー（犬の一生は短く、人間の7倍速いことの例え。その例えの2倍ということ）」¹⁾と例えられるほどの速度で技術革新が進んでいる。

2. 建設業へのドローンの適用

2.1 建設業におけるドローンの活用の予測

建設分野において、2018年度の我が国の点検におけるドローンの市場規模は43億円であるが、2020年度では349億円と予測され農業分野を抜いて最大となり、2024年度には1500億円に迫るとしたデータがある²⁾。このことから、建設分野での市場においてドローンは無視できない技術となる。一方、我が国は少子化現象および人口の高齢化の影響から慢性的な労働者不足にあり、建設業においても生産性向上へ貢献する技術が求められている。しかし、建設現場においては「きつい」、「汚い」、「危険」のローマ字の頭文字を取り3Kと略され、これが建設業への就業を敬遠される大きな要因となっている。この結果、建設現場は農業分野に次いで高齢化が進行している。就業を敬遠される要因のひとつである「危険」とは、主に建設現場における事故を指すが、死亡事故数は低下傾向にあるものの、全ての分野において建設産業での事故が最も多いことは統計を取り始めて現在まで変わらない。このような背景から生産年齢層は建設現場を「危険」と認知し、労働者不足を招くひとつの原因と考えられる。ここで建設現場での死亡事故数の内訳を調査すると、高所からの墜落事故が建設産業における事故全体の4割以上を占めることが図-1より分かる。

墜落・転落事故を低減するためには、高所での人による作業を減らすことが解決に繋がる。今回、当社および芝浦工業大学長谷川研究室ではドローンを活用して生産性の向上および墜落・転落作業を無くすことを目的として高所での塗布作業をする吹付け機能を搭載したドローン（以下、吹付けドローン）の研究・開発を進めている

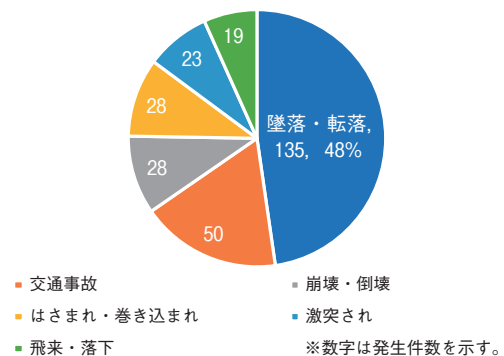


図-1 H29 死亡・死傷事故労働災害発生状況³⁾

*1 にむら・けんたろう／西武建設(株) 課長
 *2 いのうえ・やすお／西武建設(株) 部長
 *3 はせがわ・ただひろ／芝浦工業大学 教授
 *4 いよだ・たけし／芝浦工業大学 教授 (正会員)

表-1 現在普及しているドローンと建設業に利用するドローンの条件の比較

優先順位	現在普及しているドローンの基準	建設業におけるドローンの条件
1	①安定性	①安全性
2	②接触防止	②耐久性
3	③操縦性	③操作性

のでここに報告する。

2.2 建設業におけるドローンの条件

ここに建設業におけるドローンの機体の条件と現在一般に普及しているドローンの基準を比較した私見を表-1に示す。

現在普及しているドローンの基準は、主に画像もしくは映像の撮影を目的としていることから飛行時の①安定性が求められてきた。これは画像認識による自己位置推定技術やジンバル*の電子制御化が進んだことから伺える。②接触防止に関しては、どちらかという対人・対物への安全性の観点からというより、むしろ軽量化を図ったため耐久性を犠牲にした機体を物理的に接触させない処置という意味合いが強いと考えられる。③操縦性に関しては市場拡大の視点から、ラジコンを趣味とする人たちの持つ高度な操縦技術を、誰でも操作できるレベルまで簡易なものにする必要があったためであると考えられる。一方、建設業においては①安全性が最上位となる。これは対人・対物への接触のほか、操作不良や操作不能状態に陥った場合に、現場の敷地外へフライアウトし、ビル等への激突やバッテリー切れなどにより落下などが挙げられる。このため建設業の安全に合ったルール作りも進んでいる⁴⁾。また、②耐久性も現場で使用する際には重要な要素となる。耐水、耐塵、耐衝撃のみならず全天候であることも今後求められるであろう。さらに、簡易に補修ができるという点も重要となる。今後、移動式クレーンなどの重機や測量機器、電動ノコギリ等と同様、目的のための道具となると私は考える。そのため、③操作性に関してはドローンの目的を遂行するために簡易のみならずフェールセーフ等安全装置が確実に機能する操作性が求められる。このように、現在普及しているドローンと建設業で使用するためのドローンは全く異なる観点からの性能が要求される。つまり、これまでのドローンはホビーのであるが、建設業でのドローンは電動工具として過酷な使用に耐え、安全に目的を遂行する必要がある。そのためには建設業を熟知した者がドローンの開発を進める必要がある。

3. 吹付けドローンの開発

3.1 開発の経緯と意義

吹付けドローンは2015年から開発を始めた。当初、

* ジンバル：カメラ等搭載機器にドローンから発生する振動の影響を軽減し、移動時や風により機体が傾斜しても常時カメラの姿勢を安定させる機器のこと。

コンクリート構造物の高い所へコンクリート表面含浸材を塗布するのにドローンを適用できないか、という発想からスタートした。この発想は次の理由で意義があると考えられる。例えば橋梁を、ドローンを利用して点検し、不具合等が見つかった場合、不具合を補修するために結局足場を組み立てることになると、点検において、省力化を目的としてドローンを利用する意味が薄らいでしまう。この課題は現在も解決されていないため、しばしばドローンを利用するうえでの根本として議論される。この解決のためにドローンの利用方法の次の段階として補修まで実行するドローンが求められる。

3.2 類似技術の調査

吹付け機能を付与したドローンもしくは類似性の強いドローンを調査した。農業における農薬噴霧をするドローンは1980年代から日本が先がけて開発しており、現在隆盛を極めつつある。2015～17年当時はホビーの延長として防虫スプレーを搭載し、吹き付ける程度のドローンがあった。建設業に使用する吹き付けるタイプのドローンは当機を除き皆無であった。2018年に入り、ビルの外壁清掃を目的としたドローンや、中国におけるドローンの展示会（2018 深圳国際無人機展覧会）では消防用のドローンなどがコンセプト機として出展され始めた⁵⁾。産業利用の進展と共に、ドローンによる吹付けのニーズも高まっている。

3.3 吹付け材料の種類と適用性

吹付けドローンでは、以下のものが吹付け材料として該当する。

①塗料

②コンクリート表面含浸材等塗布系の補修材もしくは補修の補助材

③その他

①の塗料の場合、多くはムラ無く塗布することに加え美観が求められ、かつ周辺への塗料の飛散対策が必要となる。マスキングテープを貼るなどの作業を考えた場合、ここにドローンでは難しい工程が生じることから、現時点においてドローンを利用する価値は考えづらい。そのため、吹付けムラおよび飛散が許容される条件でのみ吹付けドローンの使用が考えられる。②のコンクリート表面含浸材に関して、材料の多くは無色もしくは無色に近いものが多数を占める。そのため一様に吹き付けられることが求められるが、美観に関しては塗料ほど厳しくないことが多い。なお、これについては、「6. コンクリート表面含浸材への適用」において詳述する。③その他は、洗浄や除草剤散布、農業分野での活用を考えているが、今回は建設業から外れることから詳述は控える。

3.4 吹付けドローンを使用する条件

ここでは、吹付けドローンを使用する場合に必要な手続き等を記す。吹付けドローンを屋内もしくは遮蔽された空間で使用する場合は、特に申請等手続きは必要ない。

表-2 吹付けドローン プロトタイプの詳細と性能

機体番号	製造 (年・月)	飛行可能高度 (m)	吹付け量 (kg)	機体サイズ (縦×横) (m)	配置構成	
					バッテリー	塗布材料
SCSD-001	2015・12	10	2	1.0×1.0	有線給電	搭載
SCSD-002	2017・12	150 ^{*1}	4	1.5×1.5	搭載	搭載
SCSD-003	2018・12	10	2	1.2×1.2	有線給電	搭載
SCSD-004	2019・4	10	25 ^{*2}	1.3×1.0	有線給電	地上からポンプアップ供給

※1 航空法の上限による。 ※2 タンク容量による施工途中で材料の補給が可能。



写真-1 吹付けドローン (SCSD-002) 外観



写真-2 専用実験施設

屋外で使用する場合は国土交通省航空局に届け出て承認をされなければならない。これは航空法第 132 条の 2 における、「人又は物件から 30 m 以上の距離を確保できない飛行及び危険物の輸送又は物件投下を行う飛行」に該当するためである。この申請時に使用材料の安全データシート (SDS) の添付を求められる。そこで可燃性、毒性等が無いことを確認される。吹付けドローンの保険に関しては、一般のドローンと同じであり、義務では無いが加入することが望ましい。

3.5 吹付けドローンのプロトタイプ

これまで開発に使用した機体は 4 機ある。この機体は全てカスタムメイドであり、様々な国内メーカーと作製した。4 機に共通する部分は、フライトコントローラと飛行制御プログラムであり、飛行制御プログラムは ArduPilot とした。ArduPilot とはドローンを飛ばすための制御プログラムであり、パソコン上でドローンを管制等制御することができる。このプログラムはオープンソースのコード体系で誰でも利用できる。表-2 に 4 機の概要を示す。

吹付けドローンの構成は一般のドローンに加えてノズル等吹付け機能を搭載する必要がある。次に塗布材料を入れたタンク、材料を圧送するポンプおよびバッテリーの搭載の有無である。搭載しない場合、地上にタンクおよびポンプを配置しホースによる配管から、塗布材料を供給する。バッテリーは地上に配置し、有線で給電する。結論から述べると、実験レベルでは塗布材料を搭載しても問題は無いが、作業性を考えた場合、塗布材料は地上配置したほうが良い。ただし、この場合、高度が高くなるに従い配管も延長される。そのため、配管および管内の塗布材料の重量が増すことからドローンの揚重能力が飛行高度と関連する。SCSD-001, 003 および 004 においては 10 m を使用高度とした。高度の制限を外すために

はバッテリーおよび塗布材料を搭載しなければならない。この機体が写真-1 に示す SCSD-002 である。この機体は大型化し、一般の車両で運搬する限界のサイズとなった。

3.6 吹付けドローン専用実験施設

吹付けドローンを研究・開発するうえで実験施設を作製した。前述のとおりドローンの飛行はネット等により覆われた施設内であれば国土交通省航空局へ届け出を要しない。写真-2 に実験施設の外観を示す。実験施設は防護ネットの内部に幅 10 m、高さ 6 m のコンクリート構造物を据えた。現在もここを使用し吹付けドローンに関する様々なデータを取得している。

4. 遮蔽空間での作業性改善への取り組み

ドローンは GNSS を使用し、プログラミングを施すことで自律航行が可能となる。しかし、吹付け施工をする場合は、ノズル先端から対象となる構造物へ 1.5~2.0 m まで接近して作業することから、GNSS より発信される電波が遮断され使用できない環境 (以下、非 GNSS 環境) が想定される。そのため非 GNSS 環境での安定した飛行の確保が吹付けドローンの課題となる。この課題を解決するための開発計画をステップにした。図-2 にステップを示す。

図-2 の技術レベル 1 はマニュアル操縦である。マニュアル操縦とは、パイロットがドローンを目視で手動操作する。この方法は、現在市場に流通しているドローンと同等の技術レベルとなる。ドローンに衝突防止センサを搭載したものも存在するが、現在の構造物の点検等への適用状況を鑑みると、まだパイロットの経験と技量に依存している。また、既往の研究よりパイロットの特性 (性格、資質、その日の体調など) によってもドローンの操縦に大きく影響することが分かっている⁶⁾。技術レベル 2 は距離の可視化によるパイロットへのサポート技

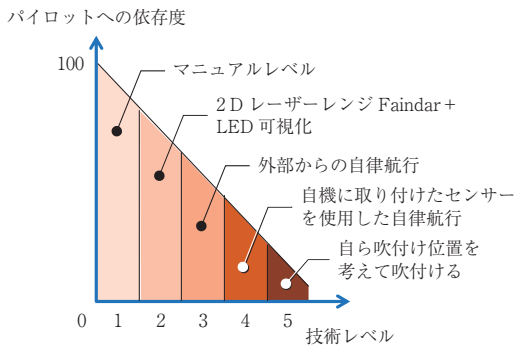


図-2 非 GNSS 環境での自律飛行技術レベルステップ

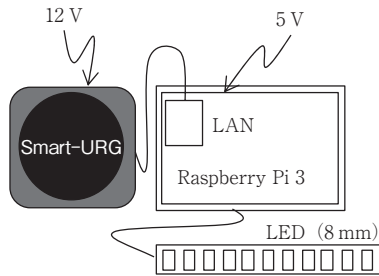


図-3 センサ、マイコン、LED 構成図

術である。これはパイロットが操作するが、吹付け施工等を目的とした専用のセンサを搭載したものである。技術レベル3はドローンの機体操縦をコンピュータが主導し操縦する。パイロットは吹付け等作業に集中し、緊急時は操作をマニュアルに戻す。技術レベル4はドローンに搭載したセンサ等を活用して、パイロットが操作せずあらかじめ設定した航路を自律飛行し目的の位置で吹付け等作業をすることを想定する。技術レベル5はドローンに搭載したカメラ、センサ等によりコンクリートの劣化部等を自動抽出し必要量を吹き付けることを想定する。以上5ステップを吹付けドローンの開発に設定した。

4.1 測域センサによる吹付けドローンと対象との距離の見える化

図-2に示すレベル2のパイロットサポート技術の概要と結果を以下に示す⁷⁾。研究・開発の目的は、最適吹付け距離での安定した飛行を実現するためである。これはコンクリート表面含浸材等液体を一樣に吹き付けて施工するために必要な対策である。同システムは、測域センサを機体中央下部に搭載し、機体後方に配置したLEDにより対象構造物との距離を表示する。LED表示により距離をパイロットの目測から瞬間的に判断できる色覚に変更することで視認性を向上させた。また、パイロットの心的負担も軽減した。測域センサは国産の2D Laser Range Finder (Smart-URG)を採用した。図-3に構成概要を示す。LEDの点灯パターンを写真-3に示す。なお、点灯方法は自由に設定できる。

4.2 外部誘導式自律飛行の適用実験

レベル3はレベル2のパイロットサポート技術の結果を満足し、かつ非GNSS環境でドローンの機体操縦をコ

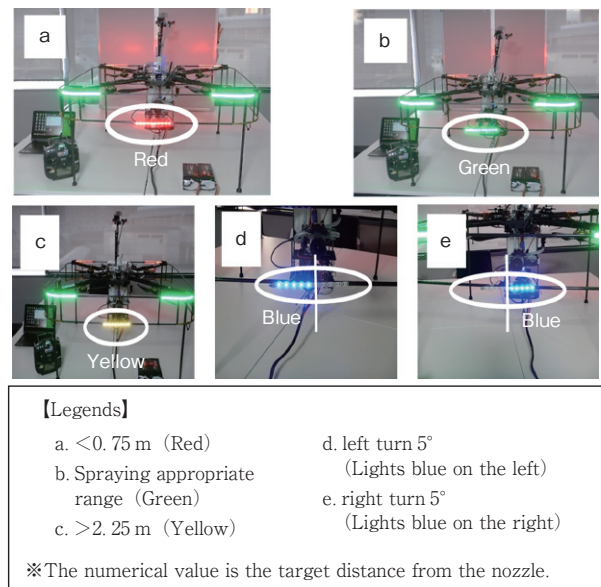


写真-3 LED点灯パターン例

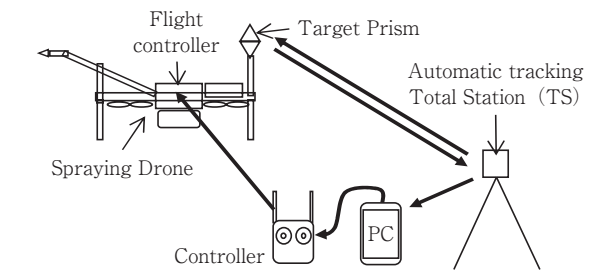


図-4 概要図

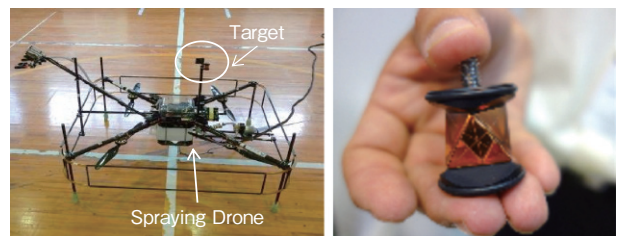


写真-4 吹付けドローン (SCSD-001) 外観とターゲットプリズム

ンピュータが主導し操縦することを目標とした。今回、レベル3として外部誘導式自律飛行を選択し検証した。外部誘導式自律飛行は、ドローンに取り付けたターゲットプリズムを自動追尾式トータルステーション（以下、TS）で視準してドローンの位置を3次元座標として把握し、目標座標と現在座標の差分をPCで計算する。計算結果を移動指示としてコントローラからドローン本体のフライトコントローラへ送信することでドローン进行操作するシステムである。このシステムの概要図を図-4、ドローンにターゲットプリズムを取り付けた状態の機体およびターゲットプリズムを写真-4、TSを写真-5に示す。

外部誘導式自律飛行による吹付け実験結果を以下に示す。吹付けドローンを飛行させターゲットに水を吹き付け、ターゲットに付着した水の重量を計測した。実験の概要を図-5、実験の状況を写真-6に示す。



写真-5 自動追尾トータルステーション

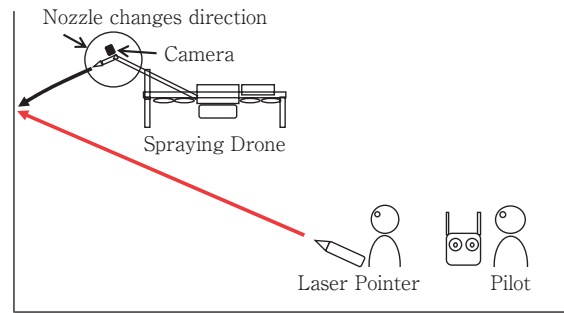


図-7 レーザーポインタ視準ノズルシステムの概要

施すことで、現在の SCSD-004 の段階となった。改良した事例を以下に示す。

5.1 レーザーポインタ視準ノズル

レーザーポインタにより指示した位置に自動でノズルが向く機能の研究を芝浦工業大学長谷川研究室で取り組んでおり基礎実験に成功している⁸⁾。図-7にレーザーポインタ視準ノズルシステムの概要を示す。これにより機体が揺動したとしてもノズルは狙った箇所を吹くことが可能となる。

5.2 ノズルのジンバル化

ドローンは移動する際に機体を傾けなければならない。この時にノズルも連動することから狙った吹付け位置を大きく逸脱してしまう。そこでノズルをカメラと同様にジンバル化することで、機体とノズルの挙動を別体とすることができた。

6. コンクリート表面含浸材への適用

実験初期において吹付けドローンによりすべての面にムラ無く設計量を塗布するためには、設計塗布量の3～5倍の材料を必要とした^{9),10)}。現在ノズル部分の改良は加えているものの、材料を設計塗布量以上に消費することは否めない。これはミスト状に噴霧するとダウンウォッシュにより拡散してしまうことから水流状に吹き付けなければならないことによる。つまり、水流状に吹き付けた場合、ムラが生じ、そのムラを修正するために幾度も吹き付けることにより塗布量が増大する。現時点ではコンクリート面の濡れ具合を目視で確認する以外に無いが、これから実績を積み重ねデータを集積し最適な方法を模索する予定である。以下に現在までに使用したコンクリート表面含浸材の一覧を表-3に示す。

液体材料を吹付けドローンに適用する場合、吹付けドローンへの跳ね返りによる自機への付着を考慮しなければならない。そのため、付着後直ちにウェスなどで除去、もしくは洗浄しなければならないが、取りきれなかったコンクリート表面含浸材が石質化し性能低下を引き起こす懸念があるため注意が必要である。けい酸塩系に関しては低温時に凝結するものがあつた。これは石質化した微細な粒子がノズルの内部を材料が通過する際に堆積し閉塞を起こす原因となる。飛行時は気流によりドローン

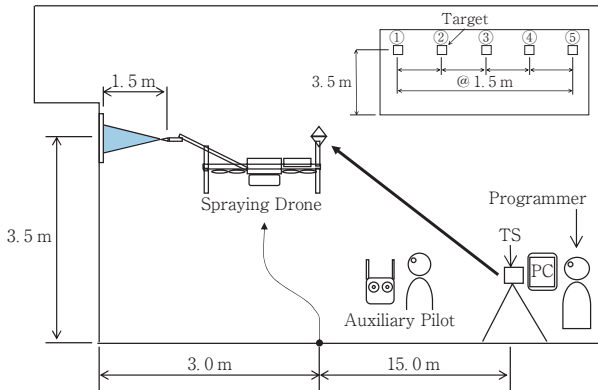


図-5 吹付け実験の概要図

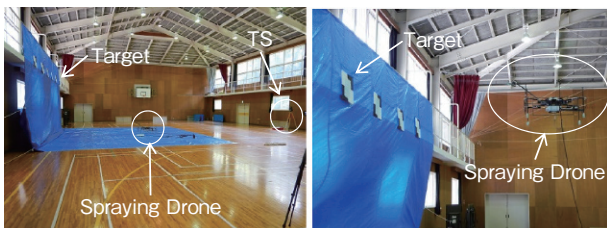


写真-6 吹付け実験全景 (左)、ターゲットに臨む (右)

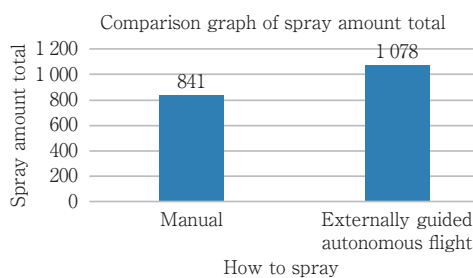


図-6 マニュアル操作と外部誘導式自律飛行の吹付け量合計の比較

図-6はマニュアル操縦と外部誘導式自律飛行それぞれで吹き付けた量の合計を棒グラフに示した結果である。外部誘導式自律飛行はマニュアル操縦と比較し2割程度高い数値を示した。また、パイロットは監視に徹していたため心的負担は軽減した。なお、この実験は(株)ジツタの協力を得て実施した。この技術は同社が特許を取得している。その他、レベル3に関してはTSを使用せず Visual SLAM を機体に搭載し自己位置を把握しながら飛行する技術などがある。

5. その他各種改良実験

開発は SCSD-001 に始まり、実験を繰り返し、改良を

の機体周囲の雰囲気温度を低下させることからけい酸塩系の材料を冬季に使用する際は可使温度を確認する必要がある。

表-3 これまでに吹付けドローンで塗布した
コンクリート表面含浸材の種類

No.	製品	特徴
1	A	・けい酸塩系 ・2回塗り（設計塗布量 120 g/m ² ×2回） ・吹付け機械の必要能力 660 g/min
2	B	・けい酸塩系 ・1回塗り（設計塗布量 0.2 l/m ² ） ・1分以内に2回塗り
3	C1	・けい酸塩系（2液混合タイプ） ・1回塗り（設計塗布量 250 g/m ² ）
	C2	・特徴はC1と同じ ・塗布時は青色、紫外線を浴びると無色化



写真-7 吹付けドローン (SCSD-004) 外観



写真-8 自在ノズル (左), ポンプおよびバッテリー台車 (右)

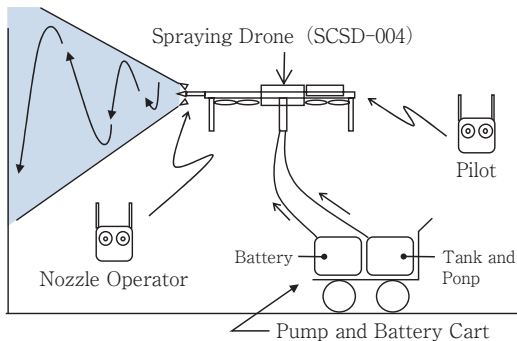


図-8 吹付けドローン (SCSD-004 [serα]) 概要図

表-4 使用実績

No.	件名 (場所)	年・月
1	県道49号線トンネル側壁補強材塗布工事 (福島県)	2017・3
2	ビニールハウス遮熱材塗布業務 (群馬県)	2017・9

7. プロトタイプ4号機の紹介

最新のプロトタイプ機 (SCSD-004) をここに紹介する。この機体の特徴はバッテリー、吹付け材料を地上に配置することで、時間、作業量の制約を大幅に緩和した。ただし、前述のとおりケーブルおよびホースの重量が増すため、高さ10mまでの適用となる。また、防水性、耐久性を向上させた。耐久性に関しては、地上から1mの位置から1回垂直落下させて、故障が生じないことを確認した。飛行とノズルの操作を分離した。ノズルを前方上下左右60°可動する。これを自在ノズルと称している。これは例えると水流で文字を描くことが可能となった。ただしデメリットとしてパイロット、ノズルオペレーターおよびポンプ操作者の最低3名が必要となる点である。写真-7に外観、写真-8に自在ノズルおよび台車、図-8に概要図を示す。

8. 実績

2019.5現在、実験以外の吹付けドローンの使用実績はほぼ無い。これは品質面で保証ができないためであり、ほとんどを実験レベルでの運用としている。これまでの使用実績を2件、表-4に示す。

9. おわりに

今後の研究・開発の予定として、SCSD-003および004において非GNSS環境での飛行レベル3~4を実験する。また、SCSD-004にレーザーポインタ視準ノズルを搭載する予定である。吹付け材料に関しては、様々な材料の使用性を確認し、適用可能な材料の選定と吹付け方法を規定する。なお、SCSD-004は耐久性等基礎実験を繰り返し、フィードバックを得た後、プロダクトモデルを量産し市場への投入を検討する。

参考文献

- 1) 高城 剛：空飛ぶロボットは黒猫の夢を見るか？, 集英社, 2016. 3
- 2) 野波健蔵：日本と世界のドローン産業の現状を紹介し社会実装がどこまで来ているのか何が課題かを考察する, 第5回国際ドローン展特別講演, 2019. 5
- 3) 厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課：平成29年における労働災害発生状況（確定）, 2018
- 4) (一社)日本建築ドローン協会：建築物へのドローン活用のための安全マニュアル, 2018. 9
- 5) 石田晃啓：中国におけるドローンの活用事例, 第3回建築×ドローンシンポジウム, 2019. 5
- 6) 二村憲太郎・植本敬大・宮内博之・山岸直樹：実大実験棟を活用したドローンによる点検の有効性の検証とドローンによる点検方法の確立のための実験の報告, 日本建築学会技術報告集, 2019. 2
- 7) 小島賢太・長谷川忠大・安孫子聡子・油田信一・二村憲太郎：UAV操縦支援のためのミラー付測域センサを用いた3次元位置提示システムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018. 3
- 8) 小田木俊介・長谷川忠大・油田信一・二村憲太郎：補修剤吹付けドローンの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2018. 3
- 9) 渡邊晋也・佐川洋亮・谷倉 泉・野島昭二：塗布量が異なる各種シラン系表面含浸材の初期性能とコンクリート表面の性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 10) T. Iyoda, K. Nimura, T. Hasegawa : Establishment of spraying repair technology for concrete structures using drone, Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering, 2018