

屋内空間におけるドローンの活用に関する検証

山越 靖之*, 木田 哲夫*, 湯浅 弘章*

概 要

地下街等の屋内空間で発生した爆破テロ等の意図的災害やNBC災害での消防活動において、ドローンを遠隔操作で進入させ、情報収集や環境測定を行うことができれば、消防隊員の二次災害のリスクの低減及び活動の効率化に寄与すると考えられる。しかし、屋内空間でドローンを活用するための知見が十分ではない。このことから、本検証では、市販ドローンを使用し、飛行性能、耐熱性能、ガス検知機能などについて検証し、現状での使用可否について判断するとともに、屋内空間の運用に必要な機体の機能について提言した。

1 はじめに

当庁では、消防活動において屋外空間では既にドローンが活用されている。一方、屋内空間では、機体の位置制御にGPSセンサを使用する市販品は、メーカーユーザーマニュアルでGPS電波が届く屋外での使用を前提としており、屋内空間で使用した場合、「GPSセンサによる機体の位置制御が機能しない」、「操縦電波が建物壁等に遮られ到達し難い」、「ドローンの機体の向きを検出するために搭載している電子コンパスが、建物内の金属製の部材などによる磁気干渉で正常に機能しなくなる」、「ドローンを目視して操縦できず、ドローンに搭載したカメラの伝送映像をモニタ画面で確認しながらの操縦となる」、「壁や収容物等の障害物に接触し、墜落するおそれがある」等との理由から未だ活用されていない状況である。

地下街等の屋内空間で発生した爆破テロ等の意図的災害やNBC災害において、ドローンを遠隔操作で進入させ、情報収集や環境測定を行うことができれば、消防隊員の二次災害のリスクの低減及び活動の効率化に寄与すると考えられる。しかし、屋内空間で災害現場までドローンを接近及び活用するための知見及びドローンの直下に生じる下降気流（以下「ダウンウォッシュ」という。）による空気擾乱が漏えいガス検知に及ぼす影響についての知見が十分ではない。

また、最近の市販ドローンの価格に対する性能面の向上を考慮すると、消防資器材として特注品を製作するよりも、ユーザーとしてニーズに見合った市販品を比較・検討する方が有利であると考えられる。

このことから、本検証では、市販ドローンを使用し、屋内空間での飛行性能、不測の事態の際の耐熱性能、ダ

ウンウォッシュの影響を考慮したガス検知性能などについて検証し、現状での使用可否について判断するとともに、屋内空間の運用に必要な機体の機能について提言した。

2 実験期間

平成30年10月から平成31年3月まで

3 実験項目と実験場所

- (1) 飛行性能に関する実験（明星大学青梅校舎）
- (2) 耐熱性に関する実験（東京消防庁多摩総合防災施設）
- (3) ダウンウォッシュの影響に関する実験（消防技術安全所燃焼実験棟及び総合実験室）

4 実験機材等

- (1) 検証した市販ドローン





実験で使用した機体を表1に示す。実験では、大きさや機能の異なる機種を選定し、全ての機体にプロペラガードを装着した。

- (2) 検証した資器材

実験で使用した資器材を表2に示す。

* 装備安全課

表1 市販ドローン

<p>製品A</p>  <p>重さ：80 g センサ：位置画像</p>	<p>製品B</p>  <p>重さ：300 g センサ：位置画像、GPS</p>
<p>製品C</p>  <p>重さ：900 g センサ：位置画像、GPS、障害物回避</p>	<p>製品D</p>  <p>重さ：1400 g センサ：位置画像、GPS、障害物回避</p>

注1) 位置画像センサ：ビジョンポジショニングセンサ。機体の水平方向の制御のために連続的に変化した画像の変化を読み取るセンサのこと。

注2) 障害物回避センサ：障害物との衝突回避のために赤外線等により障害物までの距離を計測するセンサのこと。

表2 検証した資器材

<p>電波中継器</p>  <p>WiFi電波の中継器。写真はモバイルバッテリーと接続。</p>	<p>ガス測定器</p>  <p>重量約360 g。試料ガスを吸引し分析する。</p>
<p>ゴーグル</p>  <p>ヘッドマウントディスプレイ。操縦者の眼前に操作画面が表示される。</p>	<p>照明装置</p>  <p>LEDライトで機体の下方及び前方を照らす。</p>

5 屋内空間の飛行性能に関する実験

(1) 目的

屋内でのドローンの活用に必要な要素・機能について、飛行性能に係る部分を確認する。

(2) 確認項目

確認項目を以下に示す。なお、飛行可能範囲とは、屋外の操縦者から屋内のドローンが最も離れた際の飛行経路の距離である。

ア 障害物回避センサの有効性（実験1）

イ 照明装置の有効性（実験2）

ウ 飛行可能範囲（実験3）

(3) 障害物回避センサの有効性（実験1）




ア 実験方法

障害物回避センサ機能を有する機体（製品C及び製品D）を使用し、それぞれ障害物回避センサを表3のとおり設定した状態で表4に示す箇所を飛行させる。

表3 障害物回避センサの設定条件

	センサ有効の場合	センサ無効の場合
製品C	上下前後左右が有効	上下のみ有効
製品D	下前後左右が有効	下のみ有効

表4 飛行箇所

<p>扉（幅80cm）</p> 	<p>屋内階段（幅140cm）</p> 
<p>通路（幅230cm）</p> 	<p>棚（間隔110cm）</p> 

イ 実験結果

製品C及び製品Dの前後左右の障害物回避センサ機能を有効または無効にして飛行した結果について表5に示す。障害物回避センサが作動し、機体が制動した場合は、モニタ画面に「制動中。スティックを中心に戻してください。」と表示され、それ以上の操作が不能となる。実験では、製品C、D共に、前後左右の障害物回避センサを有効とした場合は継続飛行ができなくなった。一方、前後左右の障害物回避センサを無効とした場合、上下の障害物回避センサが有効であるにも関わらず、障害物回避センサが作動し機体が制動することはなかった。

表5 実験結果

飛行箇所	センサ有効	センサ無効
扉	扉の手前で制動し、扉通過不可	扉通過可能
屋内階段	階段踊場で制動し、階段通過不可	階段通過可能
通路	通路内で制動し、移動不可	通路内移動可能
ラック	ラック手前で制動し、通り抜け不可	ラック間隙通過可能

ウ 考察

障害物回避センサ機能は、ドローンから一定の距離及び角度の範囲内で障害物を検知し、障害物に近づいた場合には一定の距離で機体が制動する。衝突を回避させるセンサが、通路、階段、開口部といった狭所を通過する

以前に機体を制動させてしまうため、本実験では屋内空間を飛行する際、前後左右の障害物回避センサを無効化する必要があった。一方、上下の障害物回避センサは、狭所を通過する際に機体を制動させることはなく、天井面及び床面との接触回避に有効に機能した。今後の技術進歩により、機体が制動する位置を調整するなど、狭所通過の際にセンサの効果を抑えることができれば、有効に活用できると考えられる。

また、実験では、開口部や壁面などに機体が接触することがあったがプロペラ等に大きな損傷は確認できなかったことから、障害物回避センサが無効であってもプロペラガードを装着することで、接触による損傷防止には効果があると考えられる。

(4) 照明装置の有効性 (実験 2)

ア 実験方法

照明の入切機能を有する機体 (製品 C) を使用し、建物内の暗室 (照度: 0.2~0.4 [lx]) 内でホバリング飛行させた際の照明の効果を確認する。

イ 実験結果

製品 C の照明機能を有効または無効にした場合について表 6 に示す。照明機能は、位置画像センサや伝送映像に非常に有効に作用した。

表 6 実験結果

照明有効	照明無効
位置画像センサが機能し、ホバリング静止可能	位置画像センサが機能せず、ホバリング静止不可
照らした箇所を伝送映像で確認可能	周囲の状況を伝送映像で確認不可

ウ 考察

建物に遮られて GPS 電波を受信できない屋内空間において、目視外飛行でホバリング静止させるためには、少なくとも位置画像センサ機能が必要であると考えられる。位置画像センサに必要な照度である 15 [lx] が照明機能により確保できれば、ホバリング静止させることが可能となり、また、周囲を照らすことで伝送映像から周囲の状況を把握することが可能になる。一方、位置画像センサに必要な照度が確保できない場合は、ホバリング静止せず目視外飛行は不可能になってしまう。屋内空間では、昼間であっても太陽光による照度が十分でない場合があるため、ドローンには照明機能は必要であると考えられる。

(5) 飛行可能範囲 (実験 3)

ア 実験方法

表 1 に示すドローンを屋外の操縦者がモニター映像を頼りに屋内空間の予め決められた経路を飛行させた際の飛行可能範囲を確認する。

また、製品 A については中継器の有無について比較する。なお、製品 C 及び製品 D についてはゴーグルを使用し、操作感の違いについても比較する。

7) 飛行可能範囲の確認における共通事項

a 飛行について

操縦位置は、建物の出入口付近とし、目的位置まで到達した時点または操縦困難となった時点で実験終了とする。4 種類の屋内空間を想定して選定した建物を表 7 に示す。また、各飛行場所における飛行ルートを図 1~図 5 に示す。飛行ルートについては、到達した位置までの距離 (操縦者から最も離れた場所までの距離)、扉の数 (通過する扉の数)、階層の数 (進入する階層の数)、障害物の数 (通過する金属柵、鉄骨等の数) により、機体性能が比較できるように設定した。

屋内空間ごとの比較項目及び飛行ルート概要を表 8 に示す。

表 7 想定した屋内空間

① 倉庫	② 地下通路
	
地上2階建、鉄筋コンクリート造	地上1階建、鉄骨造
③ 複層階建物	④ コンサート会場
	
地上4階建、鉄筋コンクリート造	地上1階建、鉄骨鉄筋コンクリート造

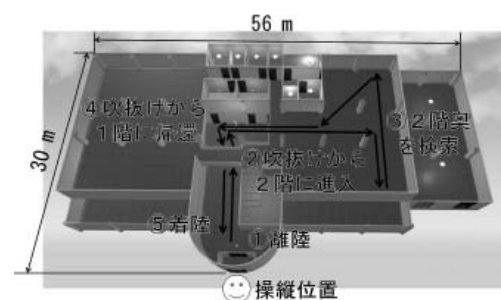


図 1 ①-1 倉庫

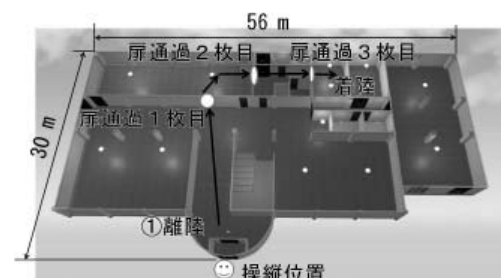


図 2 ①-2 倉庫

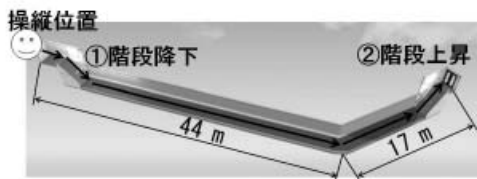


図3 ②地下通路

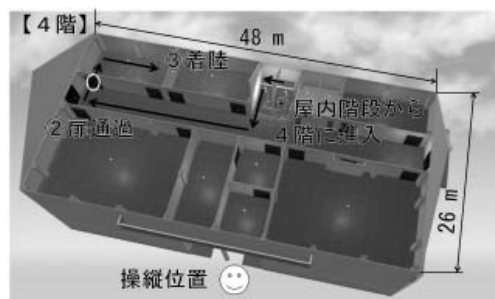
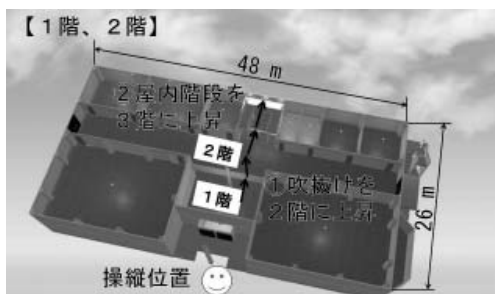


図4 ③複層階建物

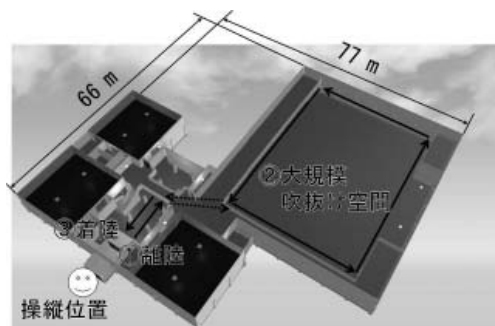


図5 ④コンサート会場

表8 屋内空間ごとの比較項目

屋内空間	比較項目	飛行ルート概要
①-1 倉庫	距離 階層 障害物	吹抜けから2階に進入し、金属棚の間隙を通過、2階奥を確認し、帰還する。
①-2 倉庫	扉の数	合計3枚の扉から順次室内に進入し、着陸する。
② 地下通路	距離 障害物	扉から通路内に進入し、通路奥まで確認し、帰還する。
③ 複層階建物	距離 階層	吹抜けから2階に進入後、屋内階段を通過し、4階奥の部屋で着陸する。
④ コンサート会場	距離	入口から進入し、大規模吹き抜け空間を一周して帰還する。

b 機体設定

各機体設定を表9に示す。

実験では、前5(3)の結果より、前後左右の障害物回避センサは狭所通過に支障があることから無効とした。

表9 機体設定

ドローン	機体設定内容
製品A	・下方位置画像センサを有効
製品B	・カメラ ISO を自動にする。 ・下方位置画像センサを有効
製品C	・カメラ ISO を自動にする。 ・下方位置画像センサ及び上下方障害物回避センサを有効 ・前後左右方向障害物回避センサを無効
製品D	・カメラ ISO を自動にする。 ・下方位置画像センサ及び下方障害物回避センサを有効 ・前後左右方向障害物回避センサを無効

1) 実験条件

各機体等の実験条件を表10に示す。また、表10中のラベルについて表11に内容を示す。表10中の記載は実験名であり、例えば、「A②中内」は、製品Aを使用し飛行ルート②を飛行させ、電波中継器を使用しないで飛行させた場合に電波が途絶した位置に中継器を設置することを示す。

なお、電波中継器は、表1中では製品Aのみ使用可能であり、ガス測定器及びゴーグルは、表1中では製品C及び製品Dのみ搭載及び使用可能である。

表10 実験条件

機体等	飛行ルート				
	①-1	①-2	②	③	④
製品A	A①-1	A①-2	A②	A③	A④
製品B	B①-1	B①-2	B②	B③	B④
製品C	C①-1	C①-2	C②	C③	C④
製品D	D①-1	D①-2	D②	D③	D④
製品A 中継器外	A①-1 中外	A①-2 中外	A② 中外	A③ 中外	A④ 中外
製品A 中継器内	A①-1 中内	A①-2 中内	A② 中内	A③ 中内	A④ 中内
製品C ガス測定器	C①-1 ガス	C①-2 ガス	C② ガス	C③ ガス	C④ ガス
製品D ガス測定器	D①-1 ガス	D①-2 ガス	D② ガス	D③ ガス	D④ ガス

表11 表10中のラベルについて

ラベル	内容
中継器外	電波中継器を操縦位置に設置する。
中継器内	電波中継器は、電波中継器を使用しないで飛行させた場合に電波が途絶した位置に設置する。
ガス測定器	ガス測定器を機体上部に搭載させる。
①-1	図1に示す飛行ルート
①-2	図2に示す飛行ルート
②	図3に示す飛行ルート
③	図4に示す飛行ルート
④	図5に示す飛行ルート

イ 実験結果

7) 各実験の飛行可能範囲を図6に示す。

飛行可能範囲は、製品C > 製品D > 製品B > 製品Aの順となった。また、製品Aでは電波中継器の使用で飛行可能範囲が増加した。

a 製品A

機体のみ（電波中継器なし）の場合、各屋内空間での飛行可能な距離は、10m前後であった。また、移動可能な階層は1階層であり、通過可能な扉は1枚であった。

電波中継器を操縦位置に設置した場合、各屋内空間での飛行可能な距離は電波中継器なしの場合と比較し全体的に増加した。特に、地下通路想定での増加が顕著であった。また、移動可能な階層は1階層であり、通過可能な扉は2枚であった。

電波中継器を屋内の電波中継器を使用しない場合に電波が途絶した位置に設置した場合、各屋内空間での飛行可能な距離は、電波中継器を操縦位置に設置した場合と比較し全体的に増加した。特に、地下通路想定及びコンサート会場想定での増加が顕著であった。また、移動可能な階層は3階層であった。通過可能な扉は3枚まで確認した。

b 製品B

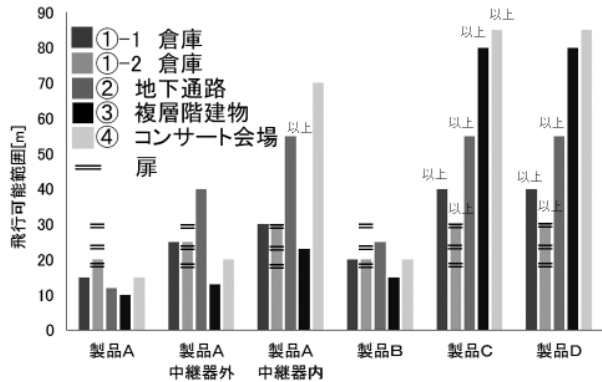
各屋内空間での飛行可能な距離は、20m前後であった。また、移動可能な階層は1階層であり、通過可能な扉は1枚であった。

c 製品C

各屋内空間において、操縦困難とならずに目的位置まで到達した。また、ゴーグル使用及び測定器搭載によって、飛行可能範囲に違いは見られなかった。

d 製品D

各屋内空間において、操縦困難とならずに目的位置まで到達した。複層階建物想定及びコンサート会場想定では、目的位置と飛行限界位置が一致した。また、ゴーグル使用及び測定器搭載によって、飛行可能範囲に違いは見られなかった。



注) グラフ中、目的位置まで飛行到達した場合は、「以上」と表記する。

図6 飛行可能範囲

1) 各実験においては、飛行中に様々なエラー表示が確認された。製品ごとの飛行中のエラー表示とその時の状況を表12に示す。また、表12中の「表示No.」に対応するエラー表示確認位置を図7に示す。

「信号干渉」、「コンパスエラー」、「磁気干渉」は、電子コンパスの異常、またはその可能性を示しており、鉄骨造の地下通路において露出した鉄骨柱の付近を飛行させた際に確認された。

「周辺が暗い」、「位置画像センサ無効」は、位置画像センサの無効化、またはその可能性を示しており、屋内階段入口の薄暗い箇所を飛行させた際に確認された。

「信号が弱い」は、操縦電波が到達し難くなり始めたことを示しており、カメラの伝送映像が遅延し始めた際に確認された。

表12 製品ごとの飛行中のエラー表示等

製品	表示No.	エラー表示	状況
A	A-干	信号干渉	露出した鉄骨柱の付近を飛行
	A-暗	周辺が暗い 位置画像 センサ無効	屋内階段などの薄暗い箇所等
	A-弱	信号が弱い	電波が到達し難く、モニター画面では伝送映像の遅延が発生
B	B-弱	信号が弱い	電波が到達し難く、モニター画面では伝送映像の遅延が発生
	B-コ	コンパス エラー	露出した鉄骨柱の付近を飛行
C	C	表示なし	
D	D-弱	信号が弱い	電波が到達し難く、モニター画面では伝送映像の遅延が発生
	D-コ	コンパス エラー	露出した鉄骨柱の付近を飛行
	D-干	磁気干渉	露出した鉄骨柱の付近を飛行

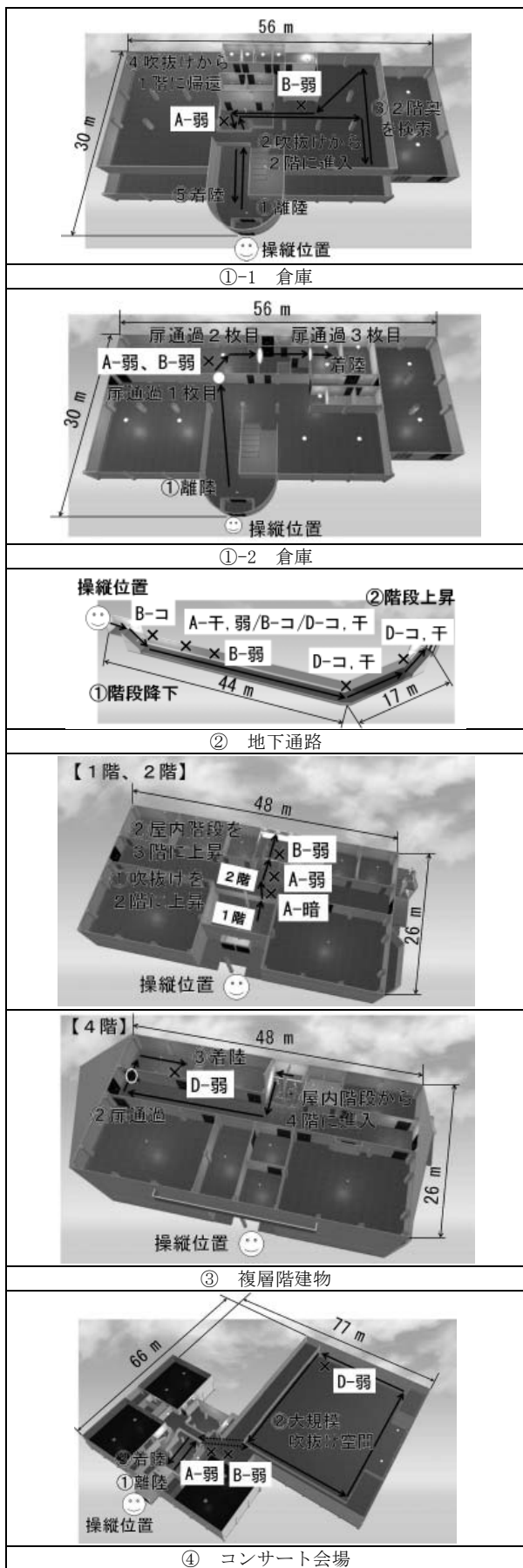


図7 エラー表示時の飛行位置

ウ 考察

ア) 機種

a 製品A

製品Aは、機体の大きさから扉等の障害物の通過には有利であるが、電波中継器なしの場合、飛行可能範囲が狭いため、操縦者から約10m先、一階層先、一扉先といった場所の情報収集での活用が考えられる。

また、電波中継器は、操縦者位置に設置する場合でも飛行可能範囲が拡大するため、活用すべきと考える。

b 製品B

製品Bは、製品Aにおける電波中継器なしの場合と同様、機体の大きさから扉等の障害物の通過には有利であるが飛行可能範囲が小さいため、操縦者から約20m先、一階層先、一扉先といった場所の情報収集での活用が考えられる。

c 製品C

製品Cは、大きさ的には扉等の障害物を通過するには空間的余裕が少ないが、最も飛行可能範囲が大きく、照明機能があり暗所における対応が可能なことから、最も実用可能な機種と考えられる。

d 製品D

製品Dは、製品Cと同様に大きさ的には扉等の障害物を通過するには空間的余裕が少ないが、飛行可能範囲が大きいことから、実用可能と考えられる。

イ) エラー表示について

a 信号の微弱等

各製品において、映像電波よりも先に操縦電波が途絶することはなかったが、屋内空間では、カメラ映像による目視外飛行のため、伝送映像に遅れが生じた地点は、飛行継続不能となる。操縦者は、信号の微弱等のメッセージが表示された場合、直ちに信号の受信環境が良い位置まで移動させ、信号を回復させるべきと考える。

b コンパスエラー、磁気干渉等

ドローンは、機体の向きを検出するために電子コンパスを搭載しており、付近に金属などがあると電子コンパスが正常に機能せず、暴走・墜落事故につながるおそれがある。ユーザーマニュアルでも金属製の建造物はコンパス精度に影響を及ぼす旨が記載されている。本実験空間では、建物内の太い鉄骨の柱付近を飛行させた際、顕著に表示された。操縦者は、コンパスエラーが表示された場合、その場所に留まらず、直ちに磁気干渉がない位置までドローンを移動させるべきと考える。

ウ) 中継器について

製品Aの飛行可能範囲は、中継器を使用しない場合は他の製品と比較し最も小さい結果となった。中継器を操縦者付近に設置することで、製品Bと同程度の飛行可能範囲に拡大した。また、中継器を屋内空間に設置することができれば更なる飛行可能範囲の拡大が見込まれることが分かった。例えば、ドローンで二次災害のおそれがないことを確認した後に隊員が進入して中継器を設置す

るといった使用方法については、今後検討が必要になると考える。中継器を使用する際は、設定のため若干の手間やモバイルバッテリーなどの電源を必要とするが有効な手段であると考えられる。

エ) ゴーグルについて

ゴーグルは、眼前に操縦モニタと同じ映像が表示させるものである。飛行可能範囲、エラー表示位置は、ゴーグルの使用の有無に影響されることはなかったが、操作者からは、「集中できる」といった良い面と「画面が近くて気分が悪くなる」といった悪い面の両方の使用感が得られた。もし、ゴーグルを災害現場で使用する場合は、補助者を配置するなど、操縦者の周囲の安全管理に配慮する必要があると考えられる。

カ) 測定器の搭載について

本来、ドローンに測定器等を搭載させる場合は機体ごとの最大離陸重量の範囲内とする必要がある。製品C及び製品Dについては、機器を追加搭載しての使用が想定されていないため仕様書上でも記載がなく、本実験で最大離陸重量の範囲内となっていたかは不明である。しかし、この程度の市販ドローンに測定器を搭載させた状態で飛行させても操縦不能等にはならず、屋内空間において一定の範囲を飛行できることが分かったことから、災害現場においても飛行性能上は活用できる見込みは得られたと考えられる。なお、本実験で使用した測定器は、測定データをリアルタイムで電波送信する機能がないため、搭載して飛行可能か否かについてのみ確認を行った。

6 耐熱性に関する実験

(1) 目的

大規模な屋内空間で発生した火災での運用を想定し、意図せずに火炎に近づいてしまう等の不測の事態がドローンに与える影響を確認するため、火炎によるドローンの受熱実験を行い、ドローンが受熱した際の挙動や損傷状況を確認する。

(2) 確認項目

- ア 飛行への影響
- イ 映像伝送への影響

(3) 機体等

ア 使用機体

表1中の製品A及び製品Dを使用した。

イ 機体設定

機体設定は、表9中の製品A及び製品Dに準じた設定とした。

(4) 測定

ア 測定項目等

測定項目を表13に示す。

表13 測定項目

測定項目	測定機器
飛行位置の雰囲気温度	K熱電対、素線径0.16mm
機体位置の放射受熱量	熱流束計、0~100kW/m ²
機体の温度	熱画像カメラ

イ 飛行位置及び測定位置

ドローンの飛行位置及び測定機器等の配置を図8及び図9に示す。

ドローンの飛行位置及び測定位置は、火皿 (0.81 m²) から水平距離0.5m、床面から2.0mとした。

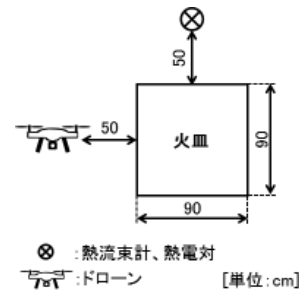


図8 測定機器等の配置(平面図)

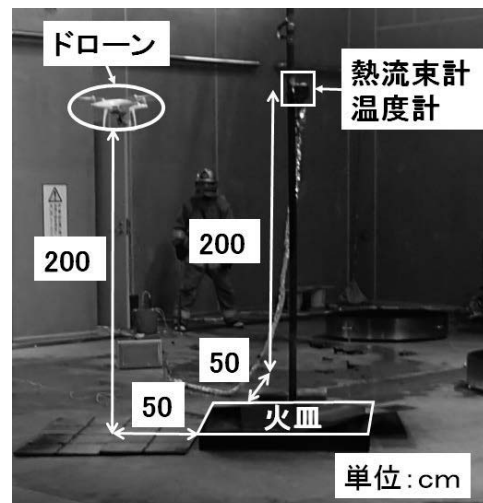


図9 測定機器等の配置

(5) 実験方法

ア 実験手順

実験手順を表14に示す。

表14 実験手順

手順	内容
①	ドローンを飛行位置でホバリングさせる。
②	火皿の燃料(ヘプタン)に着火する。
③	燃焼中は、ホバリングを継続させる。 ドローンの落下・暴走、または火皿が鎮火した時点で、測定終了。飛行位置がずれたらその都度修正する。

イ 実験条件

実験条件を表 15 に示す。

表 15 実験条件

実験	機体	ヘプタン [L]	受熱時間 [秒]
実験 D-9	製品D	9	180
実験 D-16	製品D	16	300
実験 A-9	製品A	9	180

(6) 実験結果

実験状況を写真 1 に示す。また、各実験の結果概要を表 16、各実験時の温度、受熱量を表 17 に示す。製品Dは、火皿が鎮火するまで飛行し、その後着陸できることが確認できた。一方、製品Aは、20 秒間ホバリングし、接炎した際に墜落した。

各実験において、離陸から着陸または墜落までの間に、操縦電波異常、映像伝送異常、バッテリー異常の発生は見られなかった。

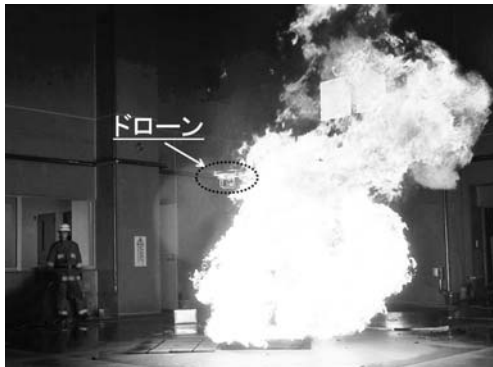
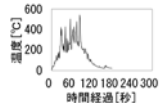
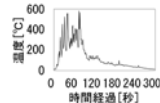
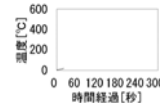
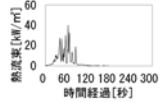
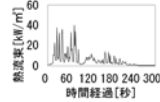
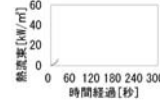


写真 1 実験状況 (実験 D-9)

表 16 実験結果概要

	実験 D-9	実験 D-16	実験 A-9
結果	3 分間ホバリング後、着陸	5 分間ホバリング後、着陸	20 秒間ホバリング後、墜落
主な損傷状況	プロペラ前縁の翼端側が溶融し黒く変色	プロペラ前縁の翼端側が溶融し黒く変色	プロペラ翼端、プロペラガードが溶融
特記事項	接炎した途端、飛行高度が急に低下したが、自動で元の高度に回復した。	接炎した途端、飛行高度が急に低下したが、自動で元の高度に回復した。	接炎した途端、飛行高度が急に低下したが、自動で床面に墜落した。

表 17 各実験時の温度及び受熱量

	実験 D-9	実験 D-16	実験 A-9
雰囲気温度	 最高：544℃ 平均：155℃	 最高：585℃ 平均：122℃	 最高：19℃ 平均：8.7℃
放射受熱量	 最高：40kW/m ² 平均：4.2kW/m ²	 最高：40kW/m ² 平均：5.4kW/m ²	 最高：6.4kW/m ² 平均：2.3kW/m ²
機体温度	着火 150 秒後 最高：35.9℃ 平均：22.6℃	着火 270 秒後 最高：59.6℃ 平均：40.3℃	
	接炎直後 着火 43 秒後 最高：120℃※ 平均：74℃	接炎直後 着火 194 秒後 最高：82.1℃ 平均：65.4℃	接炎直後 着火 20 秒後 最高：63.2℃ 平均：45.6℃

(7) 考察

ドローンは、強い上昇気流にさらされると揚力を失い墜落するおそれが生じる^リ。

実験では、ドローンがホバリング中に高温の熱気流と接触し揚力が急激に低下したことで、製品Aは墜落となり、製品Dは一時的に急激な高度低下となったと考えられる。

製品Aについては、着火 20 秒後に接炎した途端に墜落したことから、接炎などの不測の事態への対応力はほぼないと考えられる。

製品Dについては、何度も接炎しながらホバリングを継続でき、着陸動作にも異常がみられなかった。ダウンウォッシュにより火炎を傾かせていたことも飛行が継続できた一因と考えられる。よって、ある程度の接炎などの不測の事態に対しては、飛行継続が見込め、退避等の対応が可能であると考えられる。

7 ダウンウォッシュの影響に関する実験

(1) 目的

ドローンのダウンウォッシュが搭載した測定器によるガス測定への影響を確認するため、ダウンウォッシュの風速測定や測定器の数値への影響を確認する。

(2) 確認項目

- ア ダウンウォッシュの風速分布
- イ ガス測定への影響

(3) 機体等

- ア 使用機体

実験は、表 1 中の製品Dを使用した。

イ 機体設定

機体設定は、表 9 中の製品A及び製品Dに準じた設定とした。

(4) 測定及び実験

ア 測定項目等

測定項目	測定機器
風速	3次元超音波風速計
CO濃度	ガス濃度計

イ 飛行位置及び測定位置

ア) ダウンウォッシュの風速分布測定

測定は、表 18 に示す 6 か所とした。表 18 中のラベルの位置を図 10 に示す。測定状況について図 11 に示す。

表 18 測定位置

測定 No.	測定位置
測定 1	ドローンの真下、50cm
測定 2	ドローンから水平方向に 50cm、鉛直方向に 50cm の位置
測定 3	ドローンから水平方向に 100 cm、鉛直方向に 50cm の位置
測定 4	ドローンの真下、100 cm
測定 5	ドローンから水平方向に 50cm、鉛直方向に 100 cm の位置
測定 6	ドローンから水平方向に 100 cm、鉛直方向に 100 cm の位置

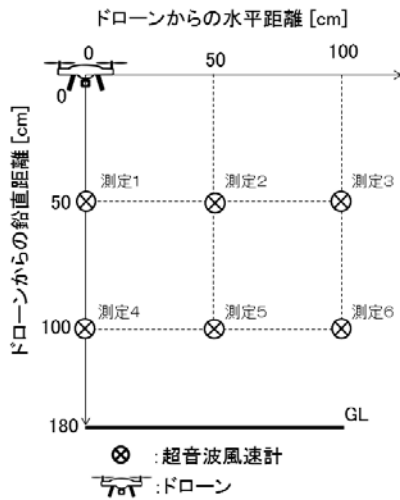


図 10 表 18 中のラベルの位置

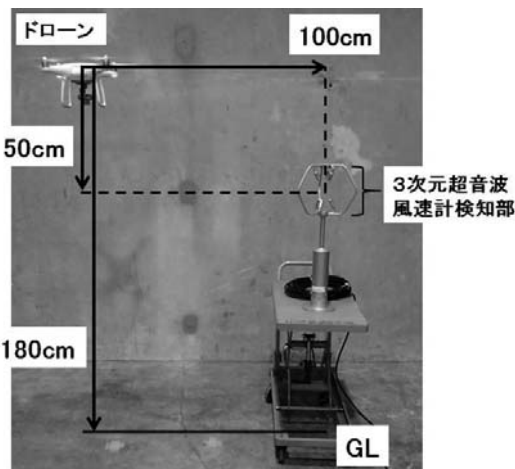


図 11 測定状況 (測定 3)

イ) ガス検知への影響

ドローン及び測定器等の配置を図 12、測定状況を図 13 に示す。ガス測定器は、ガス吸入口がガス噴出口から 1 cm の位置になるよう設置した。また、漏えいガスとして、ガスボンベ中の一酸化炭素 (0.5%) をガス流量計で 0.5[L/min] に調整し、ガス噴出口から漏えいさせた。その状態で、ドローンをガス噴出口の上部または下部 15cm の位置で 2 分間ホバリングさせた際のガス濃度を確認した。

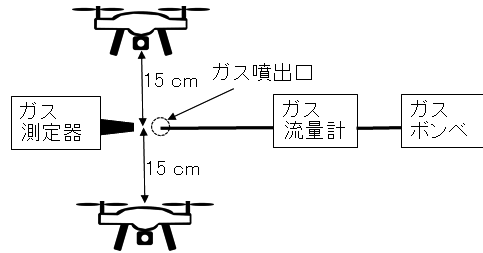


図 12 測定器等の配置

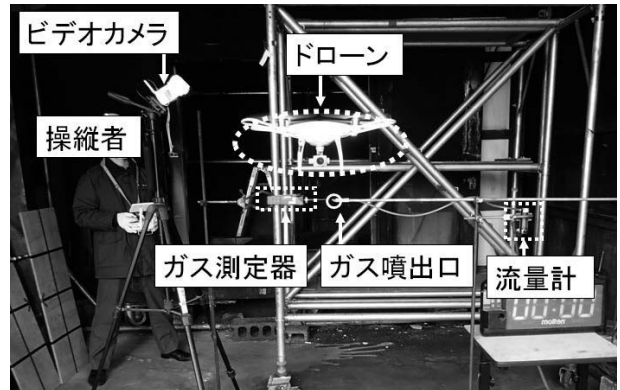


図 13 測定状況

(5) 実験結果

ア) ダウンウォッシュの風速分布

ダウンウォッシュの風速分布を図 14 に示す。なお、風速値には、収録間隔を 4 fps とした場合の 10 秒間の平均値を用いた。

風速は、特にドローンの真下の鉛直下向き方向で大きく、ドローンから離れるに従い小さくなった。

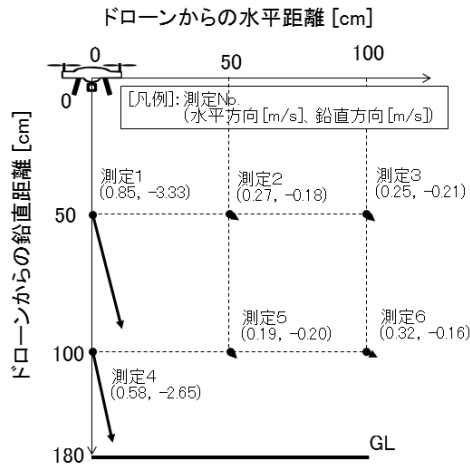


図 14 ダウンウォッシュの風速分布

イ ガス検知への影響

飛行位置ごとの飛行開始前及び飛行開始2分経過時点の一酸化炭素濃度について、表 19 に示す。

飛行位置がガス噴出口上部及び下部の両方において、一酸化炭素濃度は、飛行開始前は約 40ppm から 100ppm であったが、飛行開始から 2分経過時点では 0 ppm となった。

表 19 飛行位置ごとの一酸化炭素濃度

飛行位置	飛行開始前	飛行開始から 2分経過時点
ガス噴出口上部	約 40ppm	0 ppm
ガス噴出口下部	約 100ppm	0 ppm

(6) 考察

ダウンウォッシュによる空気の流れは、特にドローンの真下について大きく、水平方向及び鉛直方向に 1 m 離れた位置でも観測された。実験環境上、外気の流入により飛行開始前の一酸化炭素濃度に差が生じてはいるが、ガス測定器の一酸化炭素濃度については、飛行位置がガス噴出口上部及び下部 15cm の両方において、ドローンが近づくことで低下し、値がゼロを示した。屋内での運用を考えると、それ以上に吸入口と本体を離すことは現実的ではないと考えられる。このことから、ドローンに搭載したガス測定器で局所的な少量のガス漏れを検知することは困難であると考えられる。

8 まとめ

本検証では、屋内空間でドローンを活用する際に必要な機体設定等について把握することができた。また、ガス検知については課題が残るものの、製品によっては目的位置まで飛行することができたこと、不測の事態に遭遇した場合でもすぐに暴走・墜落しないことが確認できたことより、情報収集については市販ドローンでも実用レベルでの活用ができると考えられる。

また、災害現場でドローンが不測の事態に遭遇した際には墜落・損傷のおそれがあり、任務を継続するためには、複数の機体を用意して不測の事態に備える必要がある。その場合、金額が高価な機体ではなく、必要な性能を有する安価な市販機体が有利である。

実験の結果、屋内空間で活用するためにドローンに最低限必要な性能は、安定して画面のみで操縦できること及び目的位置まで飛行できることであり、そのために以下の性能が最低限必要であると考えられる。

- ・ 操作時以外は、ホバリング静止できること。
- ・ 機体動作と映像伝送に遅延（ずれ）がないこと。
- ・ 伝送映像で機体周囲の状況が確認できること。
- ・ 機体と障害物との距離が確認できること。
- ・ 無線電波が途絶しにくいこと。
- ・ 障害物と接触しないこと。
- ・ 開口部、通路等の狭所を通過できること。
- ・ 照明装置の使用などで暗所でも飛行できること。
- ・ 高価でない（コストが低い）こと。

これより、消防活動において屋内空間の運用に必要な機体の機能は、今現在の市販ドローンの技術においては、以下の通りであると提言する。

- ・ 位置画像センサによる位置制御
- ・ リアルタイム映像伝送
- ・ 広角カメラ
- ・ 搭載カメラの向きを上下左右方向に操作する機能
- ・ 障害物回避機能（上下方向）
- ・ 機体前方及び機体下部の照明機能
- ・ プロペラガード
- ・ 電波中継器

一方、今現在の市販ドローンでは存在しないが、今後活用が見込める機能として、屋内に可燃性ガスが充満している可能性を考慮し、ドローンが起爆のきっかけにならないために必要な防爆性能が挙げられる。

また、機体と障害物との距離計測機能については、実験で使用した障害物回避センサ機能を有する機体には既に存在するが、前後左右の障害物回避センサ機能の無効設定に伴い、モニタ画面上には一部表示されなくなってしまった。障害物回避センサの設定に関わらずに操縦者が障害物との距離を確認できるような改良が挙げられる。

9 おわりに

GPS電波が届かない、狭い、障害物、暗所、目視外飛行、といった操縦者に不利の条件が重なる屋内空間では、各種センサに依存した機体位置制御を行うことが必須であり、完全なマニュアル操縦では、すぐに飛行困難となり任務を遂行させることはできなくなる。

よって、操縦者には、安定して画面情報のみを頼りに目的位置まで操縦するため、「映像電波等を途絶させることがないよう管理する能力」、「各種センサを機能させることができる飛行場所か否かを適切に判断する能力」、

「エラーメッセージ等のセンサ情報の管理能力」、「モニタ画面のガイド（縦横斜めのグリッド線）などを目安に、周囲の障害物との距離間隔を把握し、飛行ルートของ安全性を確認した上で狭所を通過する空間把握能力及び狭所通過能力」が必要であると考ええる。

10 謝辞

本検証にあたり、工学院大学の村上正浩教授より多くの貴重な知見を賜りました。また、明星大学から施設の提供をいただいたことに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 必携ドローン活用ガイド：内山庄一郎編著、東京法令出版、p. 63

Study on the Utilization of Drones in Indoor Spaces

Yasuyuki YAMAKOSHI*, Tetsuo KIDA*, Hiroaki YUASA*

Abstract

At times of intentional disaster, including bombing terrorism that occurs in indoor spaces (e.g., underground malls) or nuclear, biological, and chemical (NBC) disasters, the ability to enter the disaster sites with a drone remotely and collect information or measure the environment could contribute to risk reduction of secondary disaster caused to firefighters and to the streamlining of their activities. However, there has not been enough established knowledge to approach and utilize drones in indoor spaces, especially in regard to disaster sites. Accordingly, we used an inexpensive commercially available drone in this study to verify its performance, including its flight performance, heat resistance performance, and gas detection function.

As a result, we judged about the practical use by the current state and proposed about the necessary function to practical use in door spaces.

*Equipment Safety Section