

ドローンの安全を診る

～飛行空力安全性能評価の動向～

産業技術総合研究所 主任研究員

岩田 拓也 *Kakuya Iwata*

労働安全衛生総合研究所 主任研究員

岡部 康平 *Kohei Okabe*

1. はじめに

近年、小型無人航空機（ドローン）を活用する産業分野が増加しており、ドローンの社会実装が進行している。ドローンは1990年代から始まった農業分野の農薬散布を皮切りに、現在では高層建築物の外壁点検まで幅広い分野で活用されている。ドローン導入の効果として、危険作業の代替や、有人機飛行の代替による産業安全への貢献が期待されている。その実現にはドローンの安全技術の更なる研鑽が必要である。そこでドローンの安全性能評価や標準化の動向と飛行空力的安全管理技術の現状を解説する。

2. ドローンの安全性を脅かす風の状況

国土交通省に報告された無人航空機の事故情報を参照すると、2020年度では70件発生している^{1),2)}。ドローンの事故では、風に煽られたり電波が届かなくなったりして、電線や木などにドローンが接触して墜落する事例が多い。ドローン技術の発展は目覚ましいが、安全確保には使用者が風などの気象とドローンの性能の両者を熟知することが必要である。安全管理の品質は、その相互関係を理解することに大きく依存している。回転翼や

バッテリーの状態確認、周囲の監視、咄嗟の回避操作など、操縦者らが現場で担う安全配慮は多いが、風などの気象現象とドローンの性能の両者の相互作用の基礎となる飛行空力的安全管理について解説する。

3. 運用管理制度と飛行安全管理の関係

航空法のドローンに関する運用規定は度重なる改正で大きく変更されており、2022年12月施行の改正では、第三者上空を飛行（有人地帯での補助者なし目視外飛行：レベル4）するための機体の認証制度（型式認証）や操縦者の技能認証制度が整備され³⁾、自動車と類似した運用管理がドローンでもなされるようになった^{4),5)}。注意しなければならないのは、自動車と類似しているのは制度の形であり、安全管理の中身ではないことである。

安全管理の中身で自動車と決定的に異なる点は、自動車は不動の道路上を走行するが、ドローンは動く大気の中に身を置いて飛行する点である。逆を考えるとわかりやすい。自動車が動くムービングベルトの上を走行する乗り物だったとしたら、目的地の方向と逆の方向に走行速度と同じ速度でムービングベルトが動いていたら、目的地にはいつまでたっても到達できず、そのうち燃料が枯渇し停止

する。これは大きなリスクで、レベル4の目視外飛行の大きなハードルの一つである。逆に、目視内飛行では、ムービングベルトがどちらに動いているかを見ながら飛行の安全管理が可能のため、早期から社会が許容するリスクレベルの内側に位置付けることができていた。

実際の旅客航空機分野の安全運航管理では、このリスクアセスメントは、航空管制官やディスペッチャーと呼ばれる運航管理者が担当している。前者は国家公務員で、後者は「航空無線通信士」及び「運航管理者技能検定」などの国家資格をもつ民間人であるが、飛行経路と飛行高度の風向と風速の情報と飛行機材の性能（CONOPS^{※1}）の関係性、目的地空港への到達時間や消費燃料量、空港周辺の離着陸トラフィック量などから、離陸時間や飛行ルート of 航空運航管制や燃料搭載量の決定など重要な運航安全管理を行っている。

上述のムービングベルト問題は、運航管理者の重要な解決課題で、例えば、旅客機の巡航飛行高度である10,000 m 上空では、45 m/s 程度の風速があり⁶⁾、旅客機の巡航速度は、マッハ0.85（約918 km/h、約255 m/s）で飛行するため、追い風と向かい風では新幹線の運行速度（300 km/h）以上の速度差が生

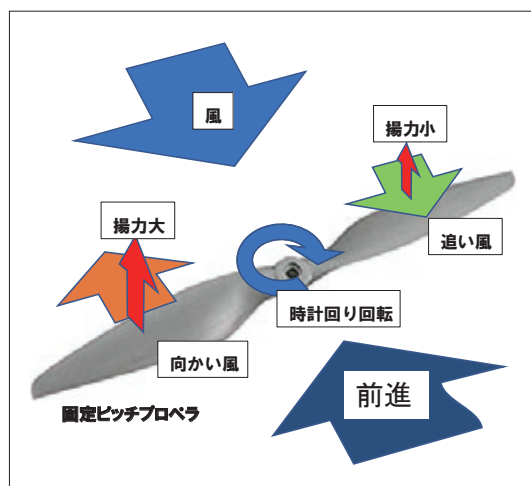
じ、それによって到着時刻も燃料消費量も大きく変化する。ドローンの場合でも同じことが、低速低高度で起こる。

マルチローター型ドローンの場合、最高速度は55 km/h 程度であるが、風速10 m/s の中を飛行すると、追い風では距離20 km を飛行するのに15分もかからないが、向かい風では1時間近くもかかり、通常マルチローターのバッテリー持続時間では飛行できない。向かい風では目的地に到達する前にバッテリー切れを起こして不時着することになる。このような事態は航空機ではディスペッチャーによる安全な飛行計画策定の時点で回避されるのと同様に、ドローンのレベル4飛行の場合は、1等免許保有者による安全な飛行計画の策定などの運航管理により回避される。

今後、より高度な自動化が進むことが予想されるドローンの運航管理システムには、上記の回避を行い目的地まで到達できるかどうかを自動的に計算するために、正確な飛行高度毎の風向、風速、正確なドローンの大気圧と対気速度毎の飛行効率や電力消費率のデータ及び計算アルゴリズムが必要となる。ドローンの運航管理の目的地到達可能性推定の計算だけを取り上げても、ドローンの関数化された性能評価の必要性の高さが分かる。

このため、次にドローンの関数化された性能評価の課題について述べる。ドローンの数値制御に必要なモデル化は、無風環境での前後左右移動の少ないホバリング領域ではほぼ完成している。しかし、前進や左右移動による対気速度の増加や屋外での風による対気速度の増加を含めたモデル化は、**図1**に示すとおりプロペラの半周で追い風、半周で向かい風となるため、揚力中心がプロペラ中心軸からずれるモデルを構築する必要がある。

図1 前進するドローンのモデル化の課題



※1
CONOPS
Concept of Operation:
航空機の運用コンセプト

4. ドローン飛行性能評価の現状と課題

ドローンがホバリングだけでなく安全に目視外レベル4の水平飛行を行うためには、ドローンのプロペラに対気速度が付加された状態での性能評価が必要である。それを行った結果と、それに対する安全管理の基本として現在求められている保護方策（安全対策）とその実施状況について簡単に紹介する。

(1) ドローンの目視外レベル4水平飛行の危険性

目視外レベル4水平飛行ドローンの性能として重要な要素の一つに最高速度がある。これは、前述の通り最高速度が低いと向かい風で前進できなくなり目的地に到達しなくなるからである。屋外でのフリーフライトによる最高速度計測は、高速域では僅かなピッチ角の変化で加速と減速の摂動運動を伴うため高精度な計測は難しい。だが、風洞試験によりそれは可能となる⁷⁾。図2に風洞試験の写真、図3に風洞試験の供試体配置図を示す。ドローンが前進飛行する時に受ける風と同じ風速の風を風洞から受けて、ドローンに発生する力とトルクを計測する。

図3より、空気抵抗力 F_y は、前進するときに受ける空気抵抗の力の向きが正となっている。前進するときの空気抵抗に負けないプロペラ推力が発生している点でドローンは等速運動となるため巡航速度となる。この空気抵抗力とプロペラ前進推力が釣り合った条件でのドローンの機体を浮かせる力が機体重量と釣り合う点が平衡（バランス保持）状態で飛行していただける速度となる。風洞試験にはイームズロボティクス社 E-470というドローンを使用した。

ドローンが前進飛行時にピッチ角を平衡状態にピッチを傾けた場合の最高風洞風速計測

の結果を図4に示す。前進速度を上げるためには最適なピッチ角が存在し、そのピッチ角は速度の増加と共に増加することを示している。この関係式が線形性を持つことから通常ドローンの飛行制御には線形制御が使われている。

ところが、同様に前進飛行時のピッチ角と前進速度がバランスを保った状態で、ピッチ回りの回転トルクを計測したところ、図5のように前進飛行速度にほとんど依存しない約2.5 Nm 程度の回転トルクが発生する現象が観測された。これは、図1に示した前進速度によるプロペラの半周が追い風、半周が向かい風となることによる揚力中心のずれに起因して発生しているトルクと考えられている。この前進速度に依存しない回転トルクは、ドローン固有の値を示していると考えられる。この風洞試験の場合、E-470というドローンの固有値として、約2.5 Nm という一定の頭上げ回転のピッチトルクを発生させているこ

図2 ドローンの風洞試験

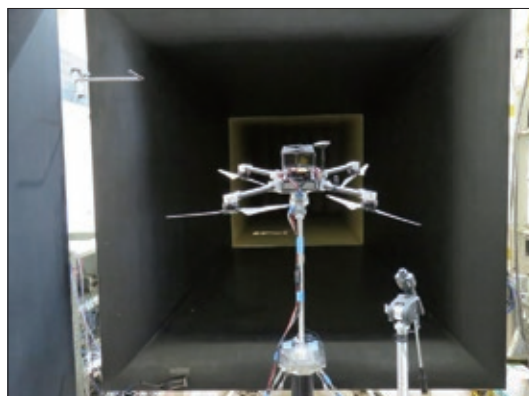
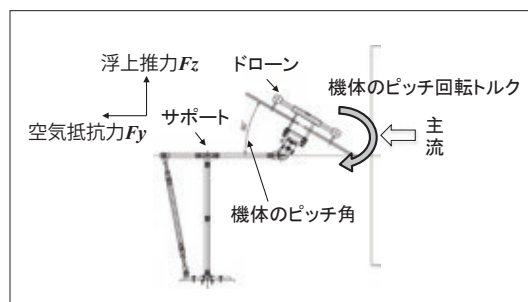


図3 風洞試験におけるドローン配置図



とがわかる。通常は定数なので、線形制御ではオフセットと同じであるために問題なく制御されるが、問題はその制御精度変動幅である。

図6は、耐風時に発生するピッチアップモーメント（機首を上げる力）をドローンの

図4 風洞試験結果（各機体のピッチ角での最高飛行速度）

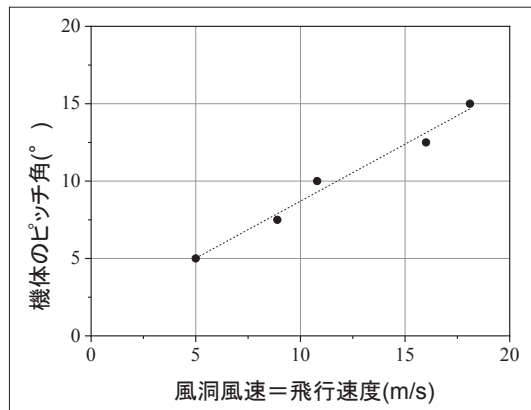


図5 風洞試験結果（飛行速度無依存のピッチ回転トルク）

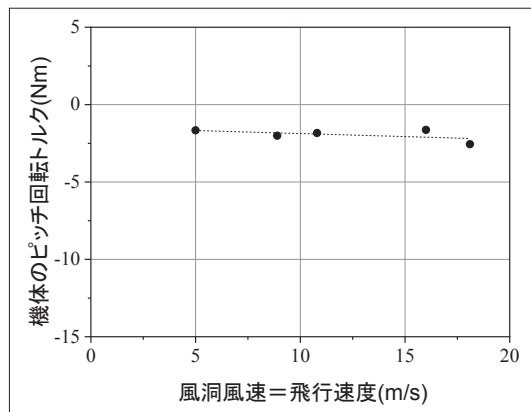
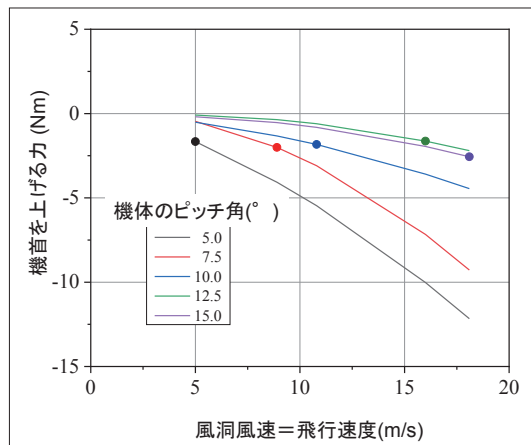


図6 耐風時に発生するピッチアップモーメント



前進ピッチ角ごとにプロットした図である。各ピッチ角の曲線に示した丸印は機体のバランスが取れる状態を示している。前進速度が低い領域では、縦軸のピッチ回転トルクの変動幅が小さいため、制御によるバランス点が少しずれても大きな回転トルクが襲って来ることはないが、15 m/s以上の高速域では、バランス点から少し機体のピッチ角が浅くすれただけで、大きなピッチアップの回転トルクに襲われる。15度のピッチ角で18 m/sで飛行している場合、ピッチ角が一瞬10度減ただけで、バランス時のピッチ制御トルクの約5倍のピッチアップ回転トルクが発生し機体がひっくり返る現象が発生する危険性があることを計測データは示している。バランス点のずれは、機体の飛行制御だけでなく当然気象による外乱に多くの場合起因して発生する。

(2) 使用者の安全対策

使用者は上記の高速水平飛行時に襲われる「突然ひっくり返る危険性」に対策を講じて飛行させなければならない。簡単に言えば、今は経験的に外乱が強い時にスピードを上げない操縦をすることにより安全対策を行っている。ある程度自動化している海外製のドローンもあり、ある速度以上は出ない保護制御機能を持ったドローンが市販されている。しかしそれは外乱などの環境をセンシングしている適応制御ではなく、シーケンシャル制御によるものがほとんどである。また、その保護制御機能は全ての外乱環境に適応するものではなく、あくまで使用者である操縦者の経験と技能による飛行速度制御という安全対策に依存している。今後のドローンの飛行制御の自動化の進行には、風洞試験のような精度の高い運動の計測と、それによる前進飛行時のモデル化が欠かせない要素になる。このことから、リスク評価にはドローンの性能

試験や標準化の確立が安全管理の課題に挙げられる。

5. まとめ

空の産業革命と呼ばれるドローンの急速な社会実装は、技術の進歩と慎重な使用法開拓による安全性の向上との連動でもたらされている。特に、日本では利用者らの団体等による操縦講習や安全教育によって慎重にドローンの活用拡大が進められてきており、今のところ大きな事故は発生しておらず、社会受容性を獲得しつつある。しかし、揺籃期の多くの産業機械と同様に、ドローン技術はまだ前進時のモデル化すらできていない未熟な領域にあり、操縦者の経験や技能に依る安全管理で支えられている。

今後ドローン産業が順調に発展期を迎えられるか否かは、ロバストな自動化に耐えうる高精度なモデル化と制御技術の高度化にかかっている。産業機械の安全確保には隔離の原則と停止の原則の2種類があると言われているが、ドローンは従来空港に隔離されていた航空を人共存環境に引っ張り出した上に、空中での機能停止が落下となるため、原則を近似的に実現する保護方策を考案していかなければならない。そのためには、多くの知見の集積が必要であるが、人間は空を飛ぶ生物ではないため直感的な飛行制御の理解ができず、試行結果の現象の観察から学ぶしかない。飛行機が発明されて1世紀の間、航空技術は多くの冒険的試行を繰り返し安全に関する貴重な知見を得てきた。これが航空の冒険安全文化である。全盛期を迎えた産業機械に、隔離の原則と停止の原則の2種類の原則を徹底するための安全文化があったように、ドローンの技術史にも、冒険安全文化が新しい原則を醸成する流れが求められている。

謝辞

本研究の風洞試験において多大なご尽力を頂いた産業技術総合研究所の阿部裕幸氏に深く感謝申し上げます。また本研究の成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「無人航空機に求められる安全基準策定のための研究開発」によるものである。

参考文献

- 1) 岡部康平, 堀智仁: ドローンの安全を診る~安全管理の動向~, セイフティエンジニアリング, 49 (3), 27-31, 2022.
- 2) 国土交通省: 無人航空機による事故等の情報提供, 2021. https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_ua_houkoku.html
- 3) 国土交通省: 無人航空機登録ハンドブック, 2022. https://www.mlit.go.jp/koku/content/mlit_HB_web_2022.pdf
- 4) 無人航空機の目視外及び第三者上空等での飛行に関する検討会: 無人航空機の目視外及び第三者上空等での飛行に関する検討会とりまとめ, 2022. <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/pdf/siryou24.pdf>
- 5) 岡部, 堀, 岩田, 伊藤: 産業用ドローンの安全管理, 第12回横幹連合コンファレンス予稿集, B-5-3, 2021.
- 6) ITmedia NEWS: 気球の動きと高度, 風速の関係, 2020. https://image.itmedia.co.jp/news/articles/2011/24/koya_baloon3.jpg
- 7) 岩田, 阿部, 岡部, 神村: ドローンサービスの安全と品質を担うドローンケーシングのリスク・ベネフィット最適化, 第13回横幹連合コンファレンス予稿集, D-2-1, 2022.

いわた ● かくや

1998年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所、2008年経済産業省製造産業局産業機械課を経て、2009年から産業技術総合研究所帰任、2022年経済産業省産業標準化表彰 経済産業環境局長賞受賞、現在に至る。次世代型エアモビリティ産業機械の安全設計・安全飛行空力技術研究に従事。工学博士。

おかべ ● こうへい

2004年産業技術総合研究所、2006年東京大学IRT研究機構を経て、2010年から労働安全衛生総合研究所、現在に至る。次世代型産業機械の安全設計・安全管理の研究に従事。情報学博士。