

風洞内フリーフライトによるエアモビリティの耐風性評価技術

Wind Resistance Evaluation Technology for Air Mobility Utilizing Free Flight in Wind Tunnel



杉山 真人*1
Sadato Sugiyama

竹山 孝行*1
Takayuki Takeyama

中村 洋介*2
Yosuke Nakamura

高田 惇史*2
Atsushi Takata

四條 利久磨*3
Rikuma Shijo

インフラ点検、測量、農薬散布等の様々なサービス事業で活用されているドローン、eVTOL (Electric Vertical Take Off and Landing aircraft)、無人航空機といったエアモビリティは、目視外飛行による荷物配送を可能とする法整備が進められており、今後、更なる市場拡大が予想される。三菱重工業株式会社(以下、当社)総合研究所では、機体メーカーの機体開発やサービスプロバイダの耐風検証に貢献するため、風洞内でエアモビリティを飛行させたフリーフライトによる耐風評価技術を開発している。本報では、フリーフライト試験用に開発した装置の概要、機体開発で必要となる基本的な耐風性能評価の事例及び、機体の使用環境を模擬しユーザの事前トレーニングを可能にするインフラ点検の事前検証の事例を紹介する。

1. はじめに

エアモビリティは、崖や土砂崩れ現場のような人が入れない場所を安全に測量したり、足場設置などの事前準備が必要になる建物の外壁検査の点検コストを大幅に短縮したり、広大な土地の農作物の生育状況に応じた肥料、農薬散布を無人で行うなど、幅広い分野で業務の効率化に貢献している。当社でも自律無人機によるパイプラインパトロールの自動化⁽¹⁾やドローンを使用したダム・発電所周辺の現地保安業務⁽²⁾の取組みを進めている。ドローンを用いたサービス市場、機体市場を含めた国内のドローン関連市場規模は 2022 年度 3086 億円に対して、2028 年度には 9000 億円を超過する予測がある⁽³⁾。このように更なる成長が期待されるドローン市場に対して、当社総合研究所では、機体メーカーの機体開発やサービスプロバイダの耐風検証に貢献するため、風洞内でエアモビリティを飛行させたフリーフライトによる耐風性能を評価する技術を開発している。本報では、はじめに無人航空機で必要になる飛行ルールと耐風性能評価項目を整理し、次にエアモビリティの風洞内フリーフライトによる耐風性評価を実現するために開発した飛行安全性を高める装置や突風などの自然環境を模擬する装置を紹介する。その後、小型ドローンを使用した耐風性能評価の実例として、機体開発に必要となる、“ペイロードー飛行時間性能”、“耐風性能”、“離着陸性能”の評価事例及び、ドローンを用いた橋梁の点検サービスを想定し風路内に橋桁の部分模型を模擬した“インフラ点検の事前検証”の事例を紹介する。

2. 無人航空機の耐風性評価の必要性について

2.1 無人航空機に必要となる飛行ルール

無人航空機を安全に運用するためのルールとして、①機体に関するルール、②飛行禁止空域

*1 総合研究所 流体研究部 主席研究員

*2 総合研究所 流体研究部

*3 総合研究所 流体研究部 室長 工博 技術士(建設部門)

に関するルール，③飛行方法に関するルールがある⁽⁴⁾。①に関しては，航空法第 11 章の規制対象となる機体に関して，“飛行機，回転翼航空機，滑空機，飛行船であつて構造上人が乗ることができないもののうち，遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるもの(100g 未満の重量(機体本体の重量とバッテリーの重量の合計)のものを除く)”との記載がある。②に関しては，“空港等の周辺”，“150m 以上の上空”，“人口集中地区”等では飛行の許可が必要になる。③に関しては，“夜間での飛行”，“目視外での飛行”，“物件の投下”等を伴う飛行では，技能証明を受けたものが機体認証を受けた無人航空機を飛行させる場合を除き，地方航空局長の認可が必要になる。上述のようなルールの中で，無人航空機の更なる用途拡大に向けて，2022 年 12 月に国土交通省は，有人地帯(第三者上空)での補助者なし目視外飛行(レベル4飛行)に対する新制度をスタートさせた⁽⁵⁾。その中で，使用者が所有する機体に対して第一種機体認証，メーカ等が設計・製造する量産機に対して第一種型式認証を取得することが求められている。

2.2 無人航空機における耐風性能評価項目

レベル4飛行を実現するための無人航空機の型式認証では，運用概念を明確化し，安全性，信頼性を飛行試験等により証明する必要がある。具体的な試験内容に関しては，国土交通省と協議して決定する必要があるが，試験方法の参考になる指針として，経済産業省と国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が公表した“無人航空機性能評価手順書”(以下，手順書)⁽⁶⁾がある。手順書は，諸外国の規制文書や標準規格等に基づき，無人航空機が目視外・第三者上空飛行を行うための安全性・信頼性の性能評価基準を設定し，試験方法，試験設備・機器を取りまとめたものであり，手順書により，無人航空機の性能を統一的に評価し，開発や，導入検討の際の判断材料にすることを狙っている。また，手順書は無人航空機の性能を細かくランク分けしており，今後のエアモビリティの性能指標になると考えられる。表1に手順書に規定されている性能評価項目と当社総合研究所が所有する風洞設備の適合性に関する評価結果を示す。当社風洞設備は手順書に規定される基本的な性能評価項目をカバーしており，土木，建築分野の自然風(大気境界層乱流)を模擬するために使用してきた変動風発生装置を活用することで，突風下での飛行安定性を評価できる特徴を有する。

表1 手順書に規定される耐風性能評価と当社風洞設備の適合性について

対象	用途	性能評価項目	試験方法	風洞		風洞適合性
				定常風	突風	
目視内及び目視外飛行編	共通	ペイロード飛行時間性能	搭載ペイロードと風速(飛行速度)をパラメータに，1分間ホバリングさせ，その際の電流値，電圧値を測定し航続時間を推定する	●	—	○
		耐風性能	a.一定風速の横風をあてた一定時間(5分程度)飛行， b.突風(10m/s/s変化)の横風をあてた飛行を行い，飛行安定性から横風を許容できるか判定する	●	●	◎
	物流	積載性能 長距離飛行性能及び積載性能	搭載ペイロードと風速(飛行速度)をパラメータに，1分間ホバリングさせ，その際の電流値，電圧値を測定し航続距離を推定する	●	—	○
		離着陸性能 基本離着陸性能 狭隘空間における離着陸性能	風速をパラメータに(最大10m/s)，着陸，離陸を行い，最大逸脱距離を計測する 天井面，壁面，離発着場を再現した狭隘空間に離発着させ，壁面との干渉を評価する	●	—	○
第三者上空飛行編	第三者上空飛行	飛行安定性	固定模型に対して，姿勢角をパラメータに風洞による一定風速に対する空気抵抗係数を計測する	●	—	○
		誘導精度	自律飛行によりホバーで位置決めしている機体の飛行位置とモーションキャプチャ位置の差分を評価する	●	●	◎
		落下時の接触防止	機体に垂直下方から風速を与え，落下時の姿勢特性(終端速度，姿勢安定の有無)を計測する	●	—	○

◎変動風発生装置を活用することで対応可能である。○当社風洞で対応可能である。

3. 風洞設備概要

3.1 風洞設備

当社総合研究所長崎地区にある大型汎用風洞設備の仕様を図1に示す。本風洞の特徴として、①世界最大級 30m² の測定部断面積を持つとともに吹き出し口を 90° 回転することで幅 10m 又は、高さ 10m の風路として使用可能であること、②開放型風路にすることで大型の点検対象や壁・天井を風路内に模擬することが可能であること、③変動風発生装置により様々な自然風を模擬することが可能であること、が挙げられる。

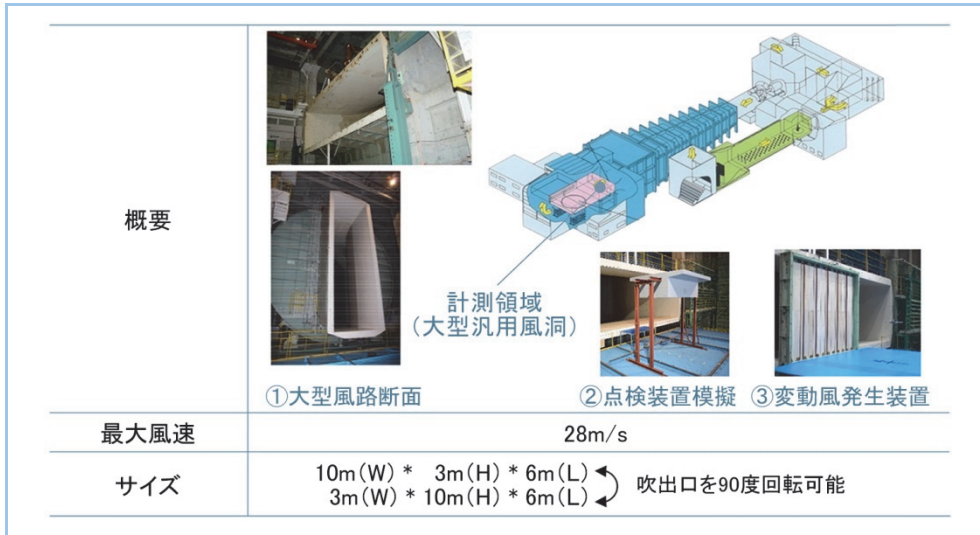


図1 風洞設備仕様

3.2 フリーフライト試験用装置

(1) 安全装置

機体が制御不能となった場合に機体が落下するのを防止するためのテザーシステムと、テザーが破断した場合に備え機体やプロペラ等の飛散物捕獲のための防球ネットを設置した。安全装置の概要を図2に示す。テザーシステムは、落下防止用のワイヤを機体に取り付け、飛行状態にあわせてワイヤの長さを電動ウインチで調整するシステムであり、衝撃荷重にも耐えられるようにスプリングダンパを取り付けている。また、防球ネットは飛行領域境界側面と下流面の3面を囲い込むように設置している。



図2 安全装置(左:テザーシステム, 右:防球ネット)

(2) 計測装置

挙動計測は、図3に示すように計測目的に応じて①画像解析ソフトウェアと②トータルステーションを使用する。前者はビデオカメラで撮影した動画のドローン LED 発光部を検出し、画像内のピクセル移動量を距離に換算するソフトである。画像の撮影条件による検出誤差、レンズ

ひずみによるピクセル移動量の補正方法等により誤差が発生する可能性があり、本報では異なる気流条件の相対評価を実施した耐風性能評価に使用した。後者は測量機器の一つであり、プリズムをドローンに取り付け、機器本体から射出するレーザーでプリズムまでの距離と角度を計測する装置である。機器本体とプリズム間の距離が6mであると鉛直、水平距離が0.1mmの精度で求めることが可能であり、手順書のランク付けで定量的な変位量の評価が必要となる離着陸性能に使用した。

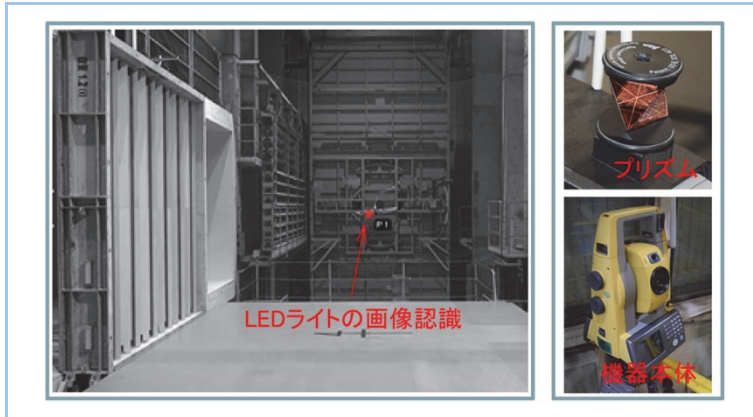


図3 挙動計測方法(左:画像解析ソフト, 右:トータルステーション
<https://www.iwasakinet.co.jp/rental/ts/ps/>)

(3) 変動風発生装置

エアモビリティの耐風性能検証に要求される、変動風(乱流や突風)として表2を想定した。具体的な境界層乱流の目標値は建築物荷重指針⁽⁷⁾の乱れ強さ、スケールより設定し、突風の目標値は手順書のランクより設定した。

なお、境界層乱流に関しては既存装置で再現実績があり、また、急激な横風に関しては通常の開放型風路内にドローンを侵入させることで再現可能であるため、本報では既存装置を改修することで突風を再現した検証事例を示す。

表2 耐風性評価で想定される風環境

気流の種類	気流のイメージ	目標値	
UAV Flying in still air – Cruise flight	一様流 (手順書の耐風性能試験に相当)	流速↑ 時間→ 	
Air moving around steady UAV – Boundary layer turbulence	境界層乱流	流速↑ 時間→ 	①山岳地帯(粗度区分Ⅳ) ②平地(粗度区分Ⅱ～Ⅲ) ③海上(粗度区分0～Ⅰ) 建築物荷重指針の乱れ強さ、スケールより設定
UAV moving from still air to strong lateral flow	急激な横風(手順書で規定されていた風のないところから風のあるエリアへの侵入試験に相当)	流速↑ 時間→ 	
UAV facing unexpected gust – Momentary change of wind flow	突風 (手順書の突風試験に相当)	流速↑ 時間→ 	手順書のランクより設定

変動風発生装置は、平板が開閉することで主流方向流速を変動させる可動翼列装置である。本装置は自然風を模擬することを目的として製作されたものであるため、エアモビリティ用の突風条件を再現可能かCFD(Computational Fluid Dynamics: 数値流体解析)を用いて事前検証した。図4に示すように可動翼列を風路中央に設置すると全閉時は可動翼列下流域がほぼ無風状態と

なり、平板を全開させると風速が 10m/s まで約1秒で上昇する突風現象を再現できることを確認した。また、風路端部に可動翼列を設置すると、全開時に風速 10m/s の定常風が、全閉時に 15m/s まで約1秒で上昇する突風現象を再現できることが確認された。本報では、風路中央に変動風発生装置を配置して無風時からの突風を再現したフリーフライト試験を紹介する。

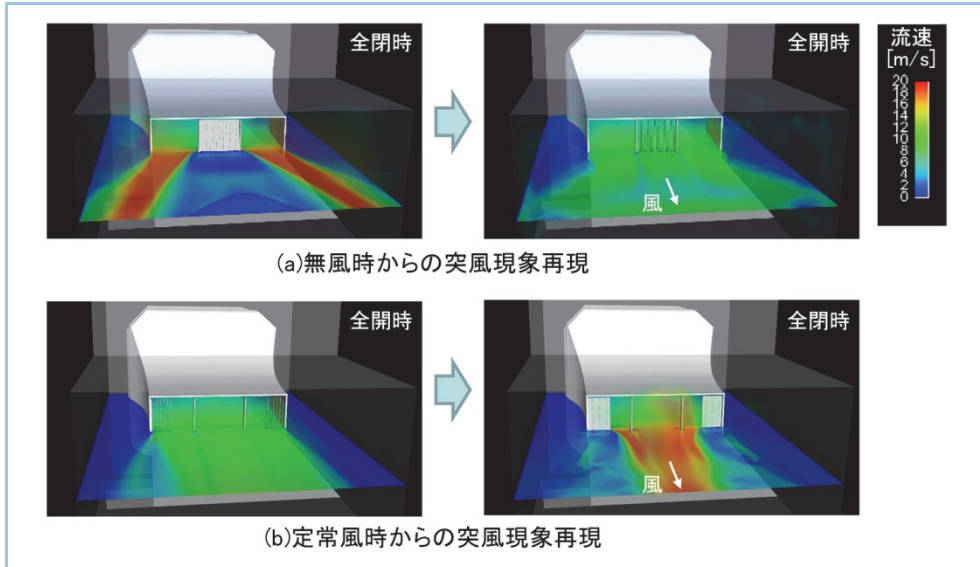


図4 突風再現検証結果

4. 機体耐風性評価事例

4.1 性能評価

機体サイズ 180mm×250mm×80mm、機体重量 600g 程度の市販されている撮影用ドローンをデモ機として用いて、手順書に準じた性能評価試験を実施した。

(1) ペイロードー飛行時間性能

図5に示すように、テザー取付治具に 0.1kg 単位で錘を搭載してペイロードや風洞風速（飛行速度）を変えた飛行試験により飛行時間（飛行可能距離）を評価した。ペイロードが大きくなるほどバッテリー消費速度が速く、飛行可能な時間が短くなることが分かる。このように、飛行速度とペイロードの関係を整理することで、気象条件等を加味した実運用時の移動可能範囲を見積もることが可能になる。

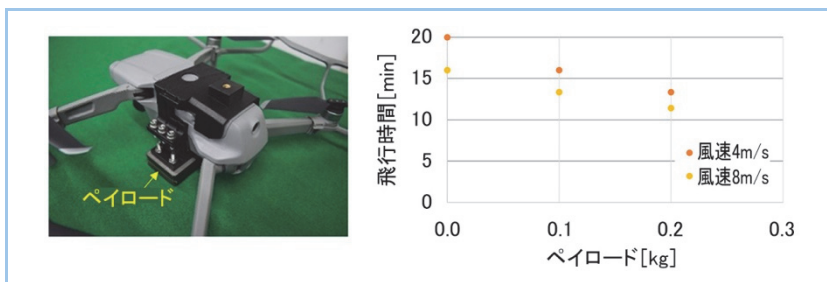


図5 ペイロードー飛行性能

(2) 耐風性能

飛行時に定常風あるいは突風が作用した時の飛行安定性を評価した。図6に定常な向かい風条件と突風条件でドローンをホバリングした時の挙動を示す。定常風では風速 5~10m/s に対して安定した飛行をしていることが分かる。一方、突風では風速が高くなると主流方向への移動量が大きくなり、10m/s の突風では 1m 程度機体が流されテザーが張られた状態になる飛行ケースが目視で確認された。このように、機体を損傷することなく飛行可能な限界風速を評価することが可能である。

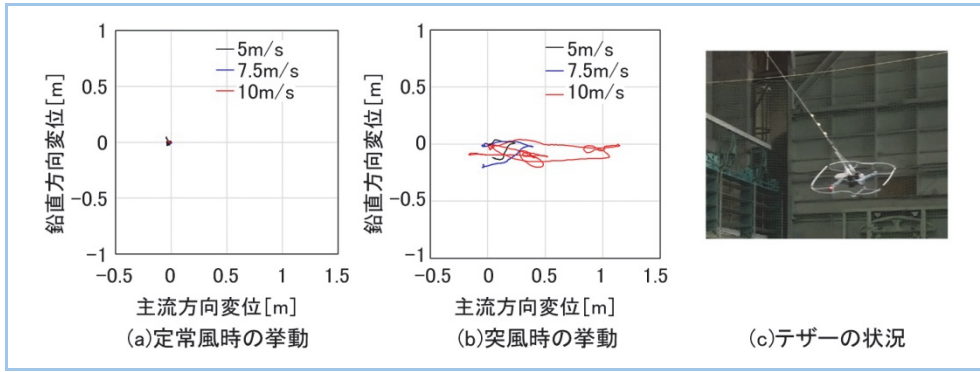


図6 耐風性能

(3) 離着陸性能

手順書の離着陸性能には、①基本離着陸性能、②狭あい空間における離着陸性能の2種類があり、本報でも2種類の離着陸性能を評価した。

① 基本離着陸性能

開放空間において外乱が与えられた状態でも安全かつ正確に離着陸できるかを離着陸半径によって評価した。図7にドローンの挙動の一例を示す。ある風速下では半径1.99m以内での離着陸が可能であることが確認され、手順書の評価基準ランク5相当になることが示された。

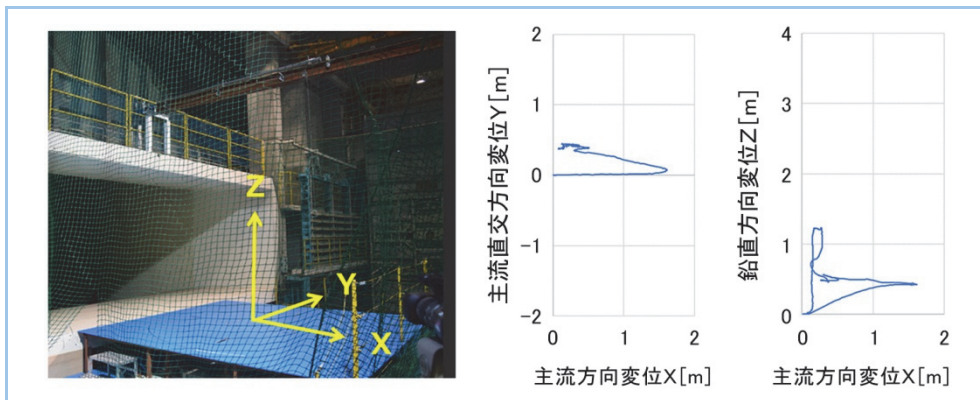


図7 基本離着陸性能

② 狭あい空間における離着陸性能

壁と天井が近接した住宅地域内にある離着陸ポートで離着陸できるかを壁、天井までの距離で評価した。図8に手順書の性能評価基準の最高ランク6である壁までの距離を1m、天井高さを2mと近接させた無風時のドローンの挙動を示す。ドローンは近接した壁、天井を迂回して離着陸できることが確認された。また、壁面近傍で機体を飛行させたところ、地面と壁のコーナ付近において機体が壁に吸い寄せられて挙動が不安定になる事象が確認され、狭あい空間の離着陸時に注意が必要になることが明らかとなった。

以上の評価により、場所ごとに離着陸が安全にできる運用条件(気象、ルート等)の検討が可能である。

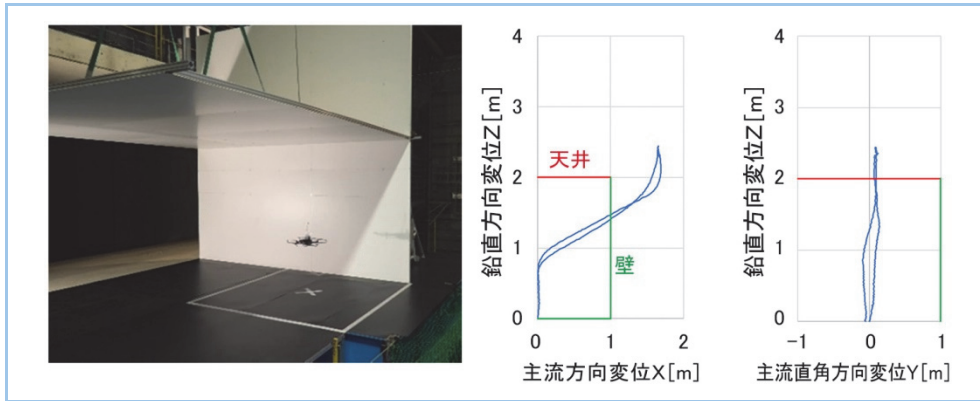


図8 狭あい空間における離着陸性能

4.2 インフラ点検の事前検証

ドローンを用いた橋梁の点検サービスを想定し、風路内に橋桁の部分模型を設置し、橋桁の側面に検査要求である0.2mmの亀裂を模擬した事前検証例を図9に示す。

流れ方向 500mm ピッチ、鉛直方向 250mm ピッチの格子座標上に機体をホバリングさせ、安定性を目視及び、補助操作の必要要否で検証した結果と橋梁周りの CFD による流速分布を重ねたところ、上流域では 250mm までドローンを橋桁に近接しても問題ないが、橋桁下方、下流域では、橋桁の上流下端(左下端)から剥離する流れにより、流速が急激に変化する領域(剥離せん断層)とその内側で、機体が不安定になることが分かる。また、機体搭載カメラで撮影し、亀裂を判別可能である領域を特定した結果、橋桁下流側面の亀裂を確認するためには、上流側から剥離せん断層の外側をアプローチするのが望ましいことが明らかとなった。このように、ドローンによる点検の事前検証により、検査対象の目標ホバリング位置と安全に近づくための飛行ルートの検証やパイロットのトレーニングが可能になる。

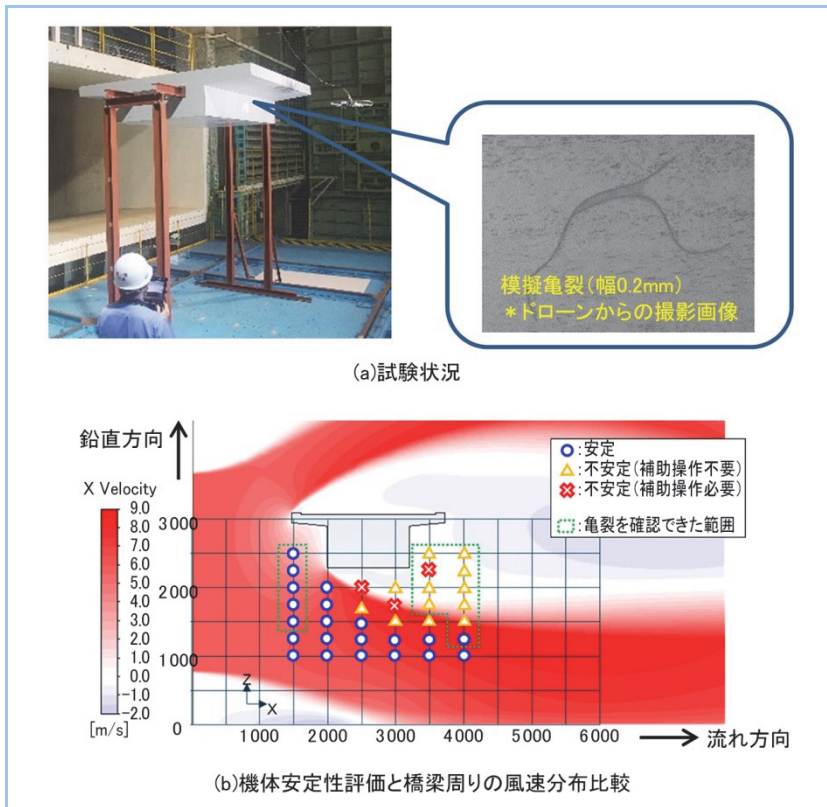


図9 インフラ点検の事前検証

4.3 エアモビリティ耐風性評価フロー

フリーフライトによるエアモビリティの耐風性評価技術を確立したことで、**図 10** に示すように、CFD を使用した機体運用地域の風環境予測、風洞設備内で実際の風環境、点検対象の再現、機体性能評価までを支援することが可能となった。

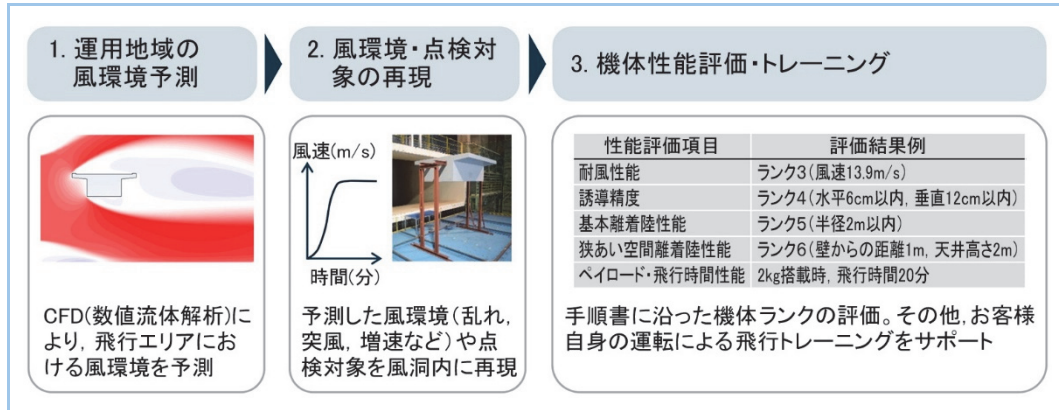


図 10 エアモビリティ耐風性評価フロー

5. まとめ

ドローン, eVTOL, 無人航空機等のエアモビリティの耐風性評価を実現するための技術開発とドローンを用いた機体性能評価事例, 橋梁の点検サービスを想定したインフラ事前検証事例を紹介した。本技術, 設備を使用することで, 機体開発時の機体認証, 型式認証取得のための性能評価試験やサービス事業の事前検証, オペレータのトレーニング, 運用条件の決定などに活用できることを示した。エアモビリティを活用したサービス事業は, 実証実験段階である物流, 警備分野等への展開が進むことが予想され, それに伴いエアモビリティに求められるニーズや規則が新たに求められることが予想される。今後も機体開発, サービス事業の動向に注目しながらエアモビリティの耐風性評価技術を展開していく所存である。

参考文献

- (1) 三菱重工業, 三菱重工ニュースリリース, <https://www.mhi.com/jp/news/22122202.html>
- (2) 三菱重工業, 三菱重工ニュースリリース, <https://www.mhi.com/jp/news/23033101.html>
- (3) インプレス総合研究所, ドローンビジネス調査報告書 2023, <https://research.impress.co.jp/report/list/drone/501642>
- (4) 国土交通省, 無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行ルール https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html
- (5) 国土交通省, 無人航空機レベル4ポータルサイト <https://www.mlit.go.jp/koku/level4/index.html>
- (6) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 無人航空機性能評価手順書 Ver1.0 (目視内および目視外飛行編), 2020, p.32~37
- (7) 日本建築学会, 建築物荷重指針(2015), 丸善, p.27