

アーバンエアモビリティの安全利用に向けた都市風環境に関する 10 の視点

Ten Perspectives on Urban Wind Environments for the Safe Utilization of Urban Air Mobility

菊本 英紀 (Hideki Kikumoto)^{a*}, 林 超 (Chao Lin)^a, 賈 鴻源 (Hongyuan Jia)^a,
岩渕 まひろ (Mahiro Iwabuchi)^b

^a 東京大学生産技術研究所 (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

^b 東京大学大学院工学系研究科 (School of Engineering, the University of Tokyo)

* 東京都目黒区駒場 4-6-1, Email: kkmt@iis.u-tokyo.ac.jp

抄録 (Abstract)

アーバンエアモビリティ (UAM: Urban Air Mobility) の発展には、都市の風環境を正しく理解し、安全な飛行運用を確立する必要がある。本論文では、UAM と都市風環境の係りを主だった 10 の観点に整理し、その要点や技術発展、研究動向をまとめる。都市内の建物や構造物が生み出す風速の変動や乱流が UAM の飛行安定性に与える影響を整理し、気流予測や都市設計による風環境の制御方法を考察する。さらに、数値流体・気象解析、風洞実験、観測技術などを活用した都市気流の評価手法や、機械学習を用いた新たな予測技術の可能性についても議論する。また、建物配置や形状などの工夫による風環境の緩和・最適化、飛行ルート設計、風以外の都市環境影響、安全規制の整備など、UAM 運用に向けた課題と対策を提示する。

Urban Air Mobility (UAM) development requires a precise understanding of urban wind environments and the establishment of safe flight operations. This paper organizes the relationship between UAM and urban wind environments into ten key perspectives, summarizing essential points, technological advancements, and research trends. It examines the effects of wind speed fluctuations and turbulence generated by buildings and structures in urban areas on the flight stability of UAM while also exploring methods for airflow prediction and wind environment control through urban design. Furthermore, it discusses evaluation techniques for urban airflow using numerical fluid and meteorological analysis, wind tunnel experiments, and observational technologies, as well as the potential of new predictive methods leveraging machine learning. Additionally, the paper presents challenges and countermeasures for UAM operations, including the mitigation and optimization of wind conditions through building layout and design, flight route planning, the influence of non-wind urban environmental factors, and establishing safety regulations.

キーワード (Keywords)

エアモビリティ, ドローン, 風環境, 都市気流, 安全性, 環境影響, 建築設計, 都市計画

Air Mobility, Drones, Wind Environment, Urban Airflow, Safety, Environmental Impact, Architectural Design, Urban Planning

1 アーバンエアモビリティ (UAM) とは何か？

アーバンエアモビリティ (UAM: Urban Air Mobility) とは、都市部や郊外での高度な航空輸送 (AAM: Advanced Air Mobility) を表す概念である[1]。UAM では、電動またはエンジンとのハイブリッドの航空機などを活用し、人や物資を都市内や都市間で輸送することで、地上の交通混雑を回避しながら効率的な移動手段を提供することを目指す。UAM では、効率的かつ迅速、そして環境負荷の小さい都市交通・輸送ネットワークの構築が目指されており、滑走路不要の垂直離着陸機 (VTOL: Vertical Take-Off and Landing aircraft) やドローンなどを利用して、主に短距離から中距離の低空域での運用が想定されている。また、基本的にパイロット不在 (自動運転) であり、オンデマンド運航などの高効率で利便性の高い航空輸送が志向されている[1, 2]。

UAM に関連して国内外で様々な技術開発や社会環境整備が行われている。米国では、NASA (National Aeronautics and Space Administration) が Advanced Air Mobility Missionなどを掲げ、特に都市部や地方における空飛ぶクルマやドローンなど、次世代の航空輸送システムを開発・実現するための取り組みを行っている[3]。また、連邦航空局 (FAA: Federal Aviation Administration) が、UAM の運航に必要な安全基準や規制を策定しており、低高度空域での運用に関する UTM (Unmanned Aircraft System Traffic Management) システムの開発などが NASA やその他の連邦機関や産業界との協力のもと進められている[4]。また、欧州では、欧州航空安全庁 (EASA: European Union Aviation Safety Agency) が、UAM の社会受容性に関する調査などを行うとともに、商業運航に向けた規制フレームワークの構築を進めている[1]。中国では、低空経済 (Low-altitude Economy) という国家戦略とも密接に結びつけられ、政策支援や民間企業の積極的な開発により UAM が急速な進展を見せている[5]。ここで低空経済とは、地上から 1000 m 以下の低高度空域を活用して、民間の有人・無人航空機による人や物資の輸送などによって、関連分野の経済的融合発展を創出する構想を指す。また、日本国内においても、経済産業省と国土交通省が「空の移動革命に向けた官民協議会」を立ち上げるとともに「空の移動革命に向けたロードマップ」を策定するなどして、官民協働のもと UAM に係る開発が進められている[6]。特に国内では、都市部の移動効率の向上や離島・山間部での新しい移動手段の提供、災害時の救急搬送や迅速な物資輸送などでの期待が高く、2025 年に開催される大阪・関西万博での空飛ぶタクシーの実証計画を契機として、2030 年頃からの都市での旅客輸送の本格化が目指されている。

UAM で活用される航空機の中でも特にドローンとは、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) を含む飛行するロボットの呼称の一種である。ドローンにおいても一般的に操縦者 (パイロット) は搭乗させず、遠隔操作や自律的な制御による飛行が行われる。近年、ドローンは空撮や物資輸送などにおいて急速に活用が進んでいる。また、ドローン技術を人員輸送サイズの乗り物にも適用したエアモビリティ (いわゆる空飛ぶタクシーなど) に関する開発も精力的に進められており[2]、運行システムを含めたこれらを包括して UAM と呼ぶようになってきている。

ドローンは、プラットフォームや利用目的によってその構成が多岐に渡り、様々なパラメータに基づく異なる分類がある[7]。飛行形態としては、固定翼 (fixed wing) , 回転翼 (rotary wing) , ダクトファン (duct fan) , これらのハイブリッドなどがある[8]。主に固定翼タイプでのサイズ

(wing span) や重量での分類としては、最大で $10^1 \text{ m} \cdot 10^3 \text{ kg}$ 程度のものから、最小で $10^{-3} \text{ m} \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ 程度のものまでが開発されている。大きい方から順に、Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Micro Unmanned Air Vehicle (μ UAV), Micro Air Vehicle (MAV), Nano Air Vehicle (NAV), Pico Air Vehicle (PAV), Smart Dust (SD)などと呼ばれることがある[7]。

最近では、特に複数のプロペラを持つマルチローター（回転翼）タイプのドローンの普及が進んでいる。同タイプのドローンでは、それぞれのローターの回転数を調整することで揚力や推力を制御し、移動や上昇・下降・方向転換を行う[9]。安定した飛行とホバリング（空中での静止）が可能なドローンの用途は多岐にわたっており、空撮、測量、監視、点検や物流、農業、災害救助、エンターテインメントなど様々な分野で活用されている。ただし、ドローンは比較的小型で軽量の機体が多く、外部の風や乱流に大きく影響されうる。ドローンは、その飛行能力や既存の航空機の経路との分離などから、低高度空域を主な飛行ルートとし、また、ビルの屋上や駐車場、物流拠点に設置されるバーティポート（vertiport）と呼ばれるような離発着場を利用するなど、建物やその他都市構造物や障害物等の付近を多く飛行することが想定される。よって、特に建物等周辺の風の乱れによって飛行が不安定になる可能性がある[10-12]。風速自体あるいはその変化が大きい場合には、ローターによる姿勢調整にも限界があり、制御が困難になることが懸念される[13]。詳しくは第3節も参照されたい。

ドローンは、機体フレームおよびプロペラ、モーター、バッテリー、飛行制御装置（ジャイロ・加速度センサー）、カメラ、受信・送信機、GPS (Global Positioning System)、その他の各種センサーなどの基本部品から構成される。また、遠隔操作や予め指定された経路、あるいは自律的な判断による経路を飛行するよう制御するためのシステム・ソフトウェアが搭載されている。これらにより精密な操作やデータの収集が可能となっている。個々の基本部品・システムの高精度化や低価格化がドローンの普及を後押ししているとともに、近年では、人工知能（AI: Artificial Intelligence）や機械学習を用いた高度な自律飛行技術も開発されており、ますます多様な分野での活用が期待されている[8]。

2 なぜ UAM が必要とされているのか？

UAM は、都市化の進展に伴う多様な課題に対応し、持続可能で効率的な都市環境の実現に重要な役割を果たすと期待されている[8, 14]。その必要性を以下に主たる観点から整理する。

a. 都市の高密度化への対応と空間利用効率の向上

都市人口および都市人口率が世界で上昇を続けているが[15]、都市部では人口・建物密度の上昇により、交通混雑やインフラの過負荷が深刻化している。UAM では、地上交通に依存せず、道路や鉄道といった大規模なインフラの建設スペースを必要としないため、従来の空間的な制約を超えた移動手段を提供することが期待される[16, 17]。これにより、既存の交通ネットワークの負担を軽減し、土地利用を最適化するなどして柔軟な都市開発を促進できるものと期待される。

b. 都市のサステナビリティとレジリエンスの向上

UAM は、eVTOL（電動垂直離着陸機, electric VTOL）の導入により、人や物資を迅速かつ効率

的に輸送する手段を提供する。いわゆるラストワンマイルでのドローンの活用などによって、従来の輸送手段に比べて二酸化炭素排出量を削減する効果が期待され、都市や地球環境への負荷を軽減できる可能性がある[18-20]。また、災害時には、道路・鉄道網が寸断されたとしても、それら地上交通に依存しない迅速な対応を可能とし、都市のレジリエンス（回復力）の強化にも寄与しうる（図1）[21]。

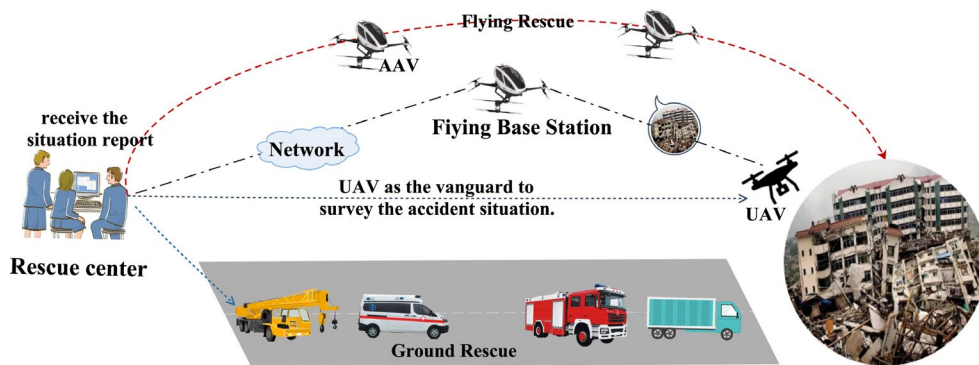


図1. 災害時の UAV を活用した救助活動のイメージ ([21]より転載)

c. インフラ管理と環境モニタリングの効率化・高度化

UAM あるいは UAS (Unmanned Aerial System) は、都市インフラの維持管理や環境モニタリングにおいても新たな手段を提供する[8, 22]。ドローン等の UAV には、光学系としては、高解像度可視光カメラ、マルチスペクトルカメラ、ハイパースペクトルカメラ、赤外線画像カメラなどが搭載される[8, 23]。また、風速・風向、気温、湿度などの気象センサーや、化学物質を検知するセンサー、物体や地形の距離や形状を測定する LiDAR などが搭載されることもある。これらを活用することで、例えば、建物や橋梁等インフラ[24]、樹木などの形状・位置把握・点検、建築物の熱的性能把握（図2）[25-27]などを迅速かつ安全に実施でき、建設資材などの輸送の効率化も図ることができる。また、空中からのモニタリングにより、大気中あるいは地表・建物表面付近における風況[28, 29]、大気汚染物質や温室効果ガスなどの空気中の化学物質[30, 31]、ヒートアイランド現象などを含む気温・表面温度・熱環境[32, 33]などを的確に把握し、都市環境の保全をより高度化することが期待される。

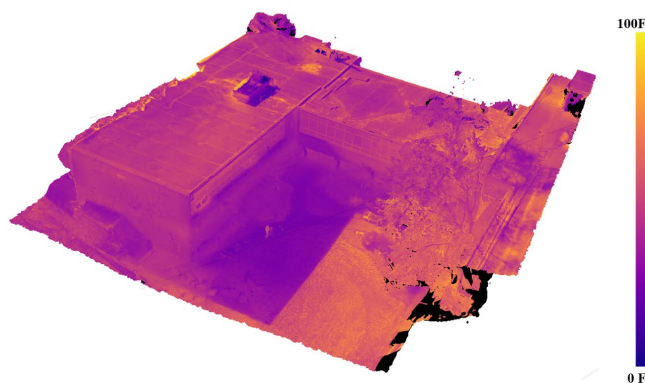


図2. ドローンに搭載された赤外線画像カメラにより得られた建物表面温度 ([26]より転載)

d. 経済成長と技術革新への寄与

UAM は、新たな産業やビジネスモデルを創出することで、経済成長を促進する可能性を秘めている。航空機の製造やインフラの整備、運用システムの構築など、UAM には多くの分野が関連する。UAM に関わる開発は、これら多くの分野の発展を牽引するだけでなく、スマートシティ実現の一環として技術革新を推進することが期待される。また、エンターテインメントや商業利用の分野では、イベント撮影やプロモーション活動などへの応用により、新たな経済市場を開拓する手段としても注目されている[14]。

3 UAM に気流はどのような影響を与えるか？

UAM では主にローター型または固定翼型航空機が用いられ、大気境界層内の低高度で運用されるため、都市部の建物、インフラ、樹木によって生成される強いせん断気流や突風の影響を受ける。気流が UAM に与える影響は、風速（相対速度の大きさ）、風向、乱流など気流の物理特性から考察される[11]。既往研究[34-36]では、ローターや翼の動力学に対する気流の影響が議論されているが、UAM の飛行安定性（計画経路と姿勢の維持など）に対する気流の影響は、必ずしもまだ定量的には評価されていない。また、UAM は、ある空間におけるラグランジュ粒子と見なせるような移動を行うため、その周囲の気流による影響しか受けない。そこで、以下の気流の影響に関する議論では、オイラー的視点ではなくラグランジュ的視点に基づく局所的な気流特性に着目する。

UAM と気流との相対速度は対気速度と呼ばれる。固定翼無人航空機（FWUA: Fixed-Wing Unmanned Aircraft）は、重力に大きな対気速度による揚力で対抗するため高速で前進し続ける必要がある。一方で、ドローンが風から受ける抵抗は対気速度に比例する[11]。特にローターが高回転数で動作している際には、対気速度が飛行安定性に大きな影響を及ぼす。逆風での飛行の場合、相対的な風向が飛行方向と反対になるため、ドローンは風による抵抗に抗うために負のピッチ（前傾）姿勢を取る必要がある。したがって、特に強風時には、ドローンは大きなピッチ角を持つため危険な姿勢に陥る可能性が高い。

また、風向が局所的に急激に変化するとせん断気流領域が生じ、通過する UAM の力のつり合いが突如崩れる。水平方向では、横風によるせん断は UAM のヨー角やピッチ角を変化させ、計画された飛行経路から UAM を押し出す可能性がある。FWUA の揚力は対気速度によって生成されるため、向かい風と追い風の間で風向が急に変わると、揚力も大幅に振動し、計画飛行経路から垂直方向に逸脱するようなことが発生する。一方で、既往の風洞実験[11]によれば、水平方向のせん断よりも上昇気流や下降気流がドローンの安定性により深刻な影響を及ぼす。その要因としては、上昇または下降気流がローターの気流流入比を変化させ、それにより推力出力が変化するためと考えられる。

都市部において風や乱流は幅広い長さや時間スケールで生成されている（図 3）[37]。UAM の飛行安定性には、UAM の幅ぐらいの波長までの広い周波数範囲を持つ乱流の影響を考慮する必要がある[11]。小型 UAM の飛行状況を考察するために、高周波の乱流を生成して空力特性を再

現・予測することが重要であるが、乱流の影響はUAM全体で均一であると仮定できることも多い。さらに、軽量の小型UAMは大きな渦に運ばれる可能性もあり、その飛行状態は乱流のスペクトルと似た特性を示す。一方、大型UAMは主に低周波の乱流構造に影響される。強い乱流に対しても、大型UAMは計画された飛行経路を維持する力を十分に持っている。しかし、その広い翼幅によってローターや翼が異なる渦に影響されるため、不均一で複雑な空力特性が生じることもある。

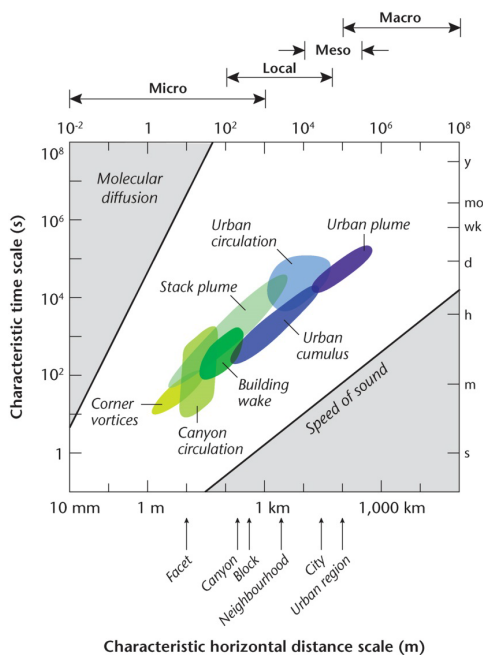


図3. 都市気候・気流を構成する現象の時空間スケール ([37]より転載)

上述の経路逸脱と姿勢変化以外にも、UAMに対する気流の影響として考慮すべき点がいくつかある。まず、UAMは計画飛行経路を維持するため、多大なエネルギーを消費して風による負荷に打ち克つ必要がある。そこで、強い乱流中ではUAMは多量のエネルギーを急速に消費し、そのバッテリーの持続時間が短縮される。また、ドローンの垂直離着陸は一般的に屋上プラットフォームで行われると予想されるが、ドローンは屋上で形成される強い離流層を通過しなければならない。一方、FWUAは離着陸に滑走路を必要とするため、空間に制約の多い都市部に滑走路を構築するのは難しい。また、FWUAの離着陸時に風向も考慮する必要がある。追い風は揚力を低下させ離着陸の操作をより危険にする。さらに、UAMの位置情報や軌道追跡はGPSシステムに基づいて行われるのが一般的であるが、電波の遮蔽物が多い都市空間において風によりUAMがわずかに移動することで、GPSが正確な位置を追跡するのが困難になる場合もある。

4 UAMの安全な飛行における危険因子は何か？

都市部では建物や地形の影響で大気境界層の流れが複雑に変化している[38]。この都市境界層流は高度ごとの風速や風向のばらつきを引き起こし、飛行の安定性に影響を与える重要な要因となる。特に、風速の急激な勾配（シアー、せん断）や乱流が発生しやすいため、飛行制御シス

テムには高度な対応が求められる[39]。また、都市特有のヒートアイランド現象が上昇気流や乱流を強化することもあり、安全な飛行ルートの設定に影響する[40]。

高密度な建物配置は、建物周辺の気流を大きく乱す。建物の風上側では風速が増加し、風下側でははく離流による渦が形成される[41]。このようなはく離流は、飛行中の急激な姿勢変化や制御困難を引き起こすリスクにつながる（図 4）。特に、建物群に挟まれた狭い飛行ルートでは建物間の風速の変動が大きく、安全な飛行の計画には詳細な気流予測が不可欠である[42]。また、都市部の高層ビルは上空の強い風を地表近くまで引き下ろす吹き降ろし現象（いわゆるビル風）を引き起こし、地表近くでは予測が難しい局所的な突風が発生する[43]。こうした突風は離着陸時の安定性に大きな影響を与えるため、離着陸場の設計段階で定量的な評価が必要である。加えて、吹き降ろしの発生頻度や規模はビルの形状や配置に依存するため、都市・建物設計との整合性を考慮した飛行計画の策定が求められる[44]。

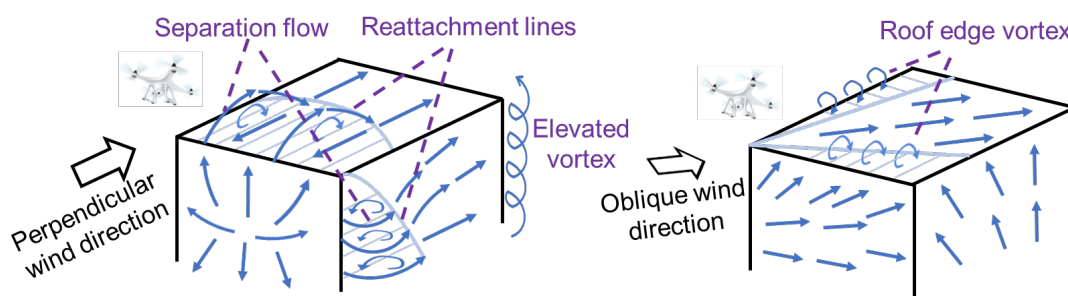


図 4. 建物屋上周辺に形成される特徴的な気流分布のイメージ
(建物に正対する風向と斜めからの風向)

高密度な市街地では地面レベルでのスペースが限られているため、ビルの屋上空間に UAM の離着陸場を設置することが考えられる[45]。しかし、屋上空間は空調等の設備機器や太陽光発電設備などの設置により、利用可能なスペースが限られている。また、ビルによるはく離流などの影響で、屋上での風環境も複雑である[46-48]。加えて、設備の配置により局所的な乱流や熱風が発生し、飛行の安定性に影響を与える可能性がある[49]。さらに、UAM は従来のヘリコプターより軽量に設計されるので、離着陸する際により風に影響されやすいと考えられる。したがって、屋上での風速データの蓄積が UAM の運航安全基準の策定には重要である。また、既存設備との共存を考慮した UAM の離着陸場の設計が求められる。

また、都市部には高压電線や看板などの小物体が高密度に存在し、飛行経路の安全性を脅かす要因となる[50]。しかし、これらの小物体は目視やセンサーでの検出が難しいため、飛行計画中に詳細なマッピングを行う必要がある。さらに、小物体近くの気流には局所的な乱流が生じ、飛行の安定性を損なう可能性がある。したがって、高精度の障害物検知技術や自律飛行制御技術の開発が求められる。

5 UAM 安全飛行のため都市気流はどのように予測・評価できるか？

UAM の安全かつ効率的な飛行を実現するためには、複雑な都市空間における空気流動を適切

に把握し、飛行経路や制御アルゴリズムに反映することが必要である。都市空気流動のモデル化には現地観測 (Field measurement)、縮尺実験 (Scaled-model experiment) および数値流体解析 (Computational Fluid Dynamics simulation, CFD simulation) が広く用いられている。縮尺実験と数値流体解析を行う際に、気象条件と都市・建物の情報が必要となる。気象条件の取得については、従来、既往地上気象が主となっていたが、近年はドップラーライダー(Doppler Lidar)やドローンに搭載されたセンサーによる大気境界層気流の測定も活用されている。また、既往の都市建物の情報は、平面的な地図情報が主となっていたが、近年は3次元の建物形状データベースの利用が増えている。しかし、従来の建築分野での実測、実験または数値解析は歩行者高さでの風速や建物表面での風圧に着目したものが多く、UAMの安全飛行のための物理量を測定した事例はまだ少ない。つまり、複雑な市街地における3次元的な風環境データベースの構築が求められている。

現地観測は、実際の都市環境における空気流動の特性を把握するための基本的なアプローチである。固定型センサー、リモートセンシング技術や移動型センサーを用いて、風速、風向、温度、湿度などの気象データが収集される[46]。高層の気象塔や建築物に取り付けられた固定型センサーは長期間にわたる時系列の気象データを連続的に収集でき、特定の地点での風環境の変動を詳細に把握することが可能である。ただし、設置地点が限られるため、都市全体の風の状況を網羅することが難しい。特に、建物周りの複雑な乱流の把握には向いていない。また、ドップラーライダーなどリモートセンシング技術は高さごとの風速分布や乱流構造を測定でき、都市大気境界層内での乱流構造の解析に有用である[51]。ただし、依然として装置が高価なため設置地点が限られ、これもまた、建物周りの複雑な気流把握には向いていない。一方、ドローンに搭載されたセンサーなど移動型センサーは建物周りの流れ場の空間分布を短期間で測定できる。ただし、観測時の環境条件(風速、突風)が測定結果に影響を与える場合がある[52]。

風洞実験や水風洞実験などの縮尺実験は、都市空間内での風の挙動を詳細に再現できる。スケールは異なるが実際の流体を使用するため、建物密集地帯での局所的な乱流や風速変化を精密に再現できる[53]。風洞では制御された環境条件での解析が可能であり、体系的な解析に適している。ただし、実スケールでの風の挙動を忠実に再現するため、風洞と実スケールとの相似性を保つ必要がある。この相似性には、幾何学的相似性、運動学的相似性、時間的相似性や力学的相似性などが挙げられる[54]。流速の代表的な測定手法には、熱線風速計(Hot Wire Anemometry, HWA)やレーザードップラー流速計測(Laser Doppler Velocimetry, LDV)などがあり、点計測であるが時間分解能が高く、乱流構造の時間特徴を捉えるのに有用である[55]。しかし、HWAとLDVは同時に多くても数点しか計測できないため、複雑な乱流の空間分布に関する情報が限られてしまう[53, 56]。一方、微小粒子の動きを高速度カメラで撮影する粒子画像流速計測(Particle Image Velocimetry, PIV)は瞬間的な流速分布を広範囲で取得できるため、時間だけでなく空間的な観点からも非定常な流体现象の解析に適している[57]。

数値流体解析(CFD解析)は、無人機の都市飛行計画における最も柔軟かつ流れ場の時空間

構造に対して詳細な解析手法である。CFD 解析を用いることで、都市全体から特定エリアの細部まで、空気流動を解析することが可能である[58, 59]。特に、高層ビル間における風のはく離や循環域の生成を予測し、これらが UAM に与える影響を評価できる。ただし、CFD 解析は現地観測データや風洞実験結果の補完に役立つ一方で、境界条件の設定や解析モデルの精度が結果に直結する点が課題となる。また、計算資源に制限されるため、計算領域のサイズには限界があり、上流からの風のプロファイル（鉛直分布）を完全には再現できない[60]。したがって、適切な流入風の風速・温度の鉛直分布および乱流特徴量の設定が市街地での乱流現象の再現には重要である[61, 62]。また、都市ではヒートアイランド現象のような非等温環境での気流形成も重要であり、建物表面や地面からの熱放射・吸収を正確にモデル化することが浮力効果や温度分布の評価に不可欠である[63]。

CFD 解析において、解析モデルは乱流や非定常現象の取り扱い方法を決定し、物理的妥当性や結果の精度に大きく影響を与える。都市気流を解析する際には、RANS（Reynolds-Averaged Navier–Stokes）モデルや LES（Large-Eddy Simulation）が代表的な乱流モデルとして用いられる[64, 65]。RANS モデルでは、乱流変動をアンサンブル平均化し、未知量となる乱流応力等の効果を方程式系として閉じるために、乱流エネルギーや乱流エネルギー消散率などの補助方程式を使用する。比較的計算負荷が小さいため、都市スケールの解析に適し、平均的な流れの傾向を把握できるが、都市の複雑な乱流現象を適切に再現するには精度が不十分となることも多い。一方、LES では、乱流の大きな渦は直接解像して再現し、小さな渦についてはその効果をモデルで近似する。高い時間・空間解像度で非定常解析を行うため、都市気流を代表する乱流の時間的変動を精度よく再現できる[66, 67]。LES は、乱流構造のメカニズムを解明することに適しているが、大規模解析には RANS よりも極めて大きな計算リソースが求められる。UAM のリアルタイム制御システムへの CFD 解析の応用には、計算時間の短縮と解析精度の両立が鍵となる。

6 建築・都市設計によって UAM 安全飛行のために気流をどのように制御できるか？

安全な UAM の飛行環境および離着陸場を整備するため、市街地の建物による突風や急激な空間方向への速度変化を緩和する必要がある。それには、建物形状や配置の最適化を行うとともに、防風フェンスや樹木の利用も有効な対策と考えられる。

建物形状の適切な設計は、安全な風環境の確保に大きな役割を果たす。特に、角ばった形状や直線的な壁面は風のはく離を引き起こしやすく、建物周辺に強い乱流や渦を生じさせる可能性がある。一方で、建物の角を丸めることや流線形の建物形状を採用することで、風の流れを滑らかにし、はく離流や強い乱流の発生を抑制できる[56]。また、階段状のファサードデザインは風のエネルギーを分散させ、風の加速や吹き降ろしの発生を抑えられる。

安全な風環境を実現するためには、単一の建物の設計だけでなく、建物間の相互作用も考慮することが重要である。建物間の狭い通路では、ベンチュリ効果と呼ばれる風速の増加や空間的な急激な変化が生じる[42]。そのため、建物群の配置を考慮し、風が無理なく流れるような通路や空間を設ける工夫が必要である。建物間の距離や配置を適切に調整することで後流域を制御できる。高低差を持つ建物の配置は、風の分散を促進し、都市の風の通り道を制御できる。ただ

し、局所的な平均風速の増加が抑えられると同時に乱流が大きくなる恐れがある[68]。

防風フェンスは建物上部や周辺で発生するはく離現象による加速や隣接する建物による吹き降ろし現象を緩和する効果がある[69, 70]。開孔を持つフェンスは、ソリッドな（無開孔の）フェンスより渦の規模を抑え、突風のリスクを軽減する。また、ソリッドなフェンスは、フェンスの高さ以下では風速の小さい流れ場を実現できるものの、フェンス高さ付近での風速の空間勾配が極めて大きく小型飛行機の離着陸安定性に影響を及ぼす可能性がある[56]。さらに、フェンスの高さや開孔率を適切に設計することで、風の流れをうまく制御し、UAMの離着陸場に適した風環境を整備できるものと思われる。

都市空間における樹木の配置は、特に地面付近での風環境の改善に寄与する[71]。適度な密度の樹木を配置することで、自然な防風壁として機能させることができる[72]。ただし、樹木の高さや枝葉の密度が、風の減速効果に大きく影響する。高木は高層建物周辺のはく離流や吹き降ろしを減衰させる。低木や生け垣は歩行者レベルの風速を低減し、地面近くの快適な風環境を提供するのに用いられる[73]。ただし、樹木の種類や配置が不適切である場合、気流が樹木の間を通過する際に乱流を生じさせ、結果として風環境が悪化する可能性がある[74]。そこで、樹木を適度な間隔でまとまった形で配置することで、乱流を抑制し、一定方向の風を緩やかに制御するなどの配慮が求められる[75, 76]。

7 都市風環境における UAM の飛行経路はどのように最適化できるか？

都市気流における UAM の飛行経路を最適化する際には、いくつかの課題に対応する必要がある。まず、基本的な要素である飛行距離が、飛行時間とエネルギー消費量の支配的な決定要因である。従来の検討では、UAM の空力特性を無視し、ルートのお最適化を幾何問題に変換して解き、建物等に衝突しない経路の中で最短距離のルートを選択するものも多い[77]。

しかし、UAM の空力特性は複雑であり、第 3 節で議論したように、周辺の気流と高度に相互影響している。したがって、飛行経路における風による影響やリスクを考えることも重要と言える[78]。空力特性に基づいた飛行経路の最適化は、突風などによる墜落事故を避け、風負荷に対抗するためのエネルギー消費量を減少させる効果を実現できる。特に UAM が大規模に運用されるようになると、気流情報などに基づき UAM の飛行状態を模擬してエネルギー消費量を推定することが運用コストなどの観点からも重要になると予想される。

また、建物によって生じる気流は、必ずしも UAM にとって悪影響を与えるだけではない。例えば、建物周りの上昇気流にのった滑空（ソアリング効果）などを活用すると、UAM のエネルギー消費量を効果的に削減できることが既往研究によって報告されている[79]。その他にも、エネルギー消費量に着目した最適化はバッテリー寿命を延長し、長時間の運航を実現する利点ももたらす。一度の飛行で複数の目的地がある場合、同手法では各目的地に近い充電所での UAM の給電を事前に計画することで、出発点に頻繁に戻ることを避け燃料・蓄電量による制約を緩和することができる[80]。

そして、時々刻々変化する気象条件下での都市気流の不安定性に対応するため、UAM は動的な飛行経路の再計算機能を備える必要がある。飛行中に雷や嵐などの危険な気象状況に遭う可

能性もあるほか、人間、機械、動物など予期しない障害物が飛行経路上に出現する事態も発生しうる。したがって、UAMに係る安全を確保するために経路の柔軟かつ高速な再計算機能が不可欠である。

不安定な気流や予期できない状況の影響を軽減するための他の方法の一つは、土地利用情報を活用した経路の最適化である。UAMの飛行経路を高速道路や鉄道などの既存インフラの経路と整合させると、予期しない障害物の量を減らし、比較的事前に想定しうる風の通り道を利用できると期待される。また、飛行経路を計画する際には、土地利用情報は、禁止区域（政府機関、空港周辺など）や危険区域（高密度の高層ビル地帯など）に関する情報も提供できる。さらに、都市計画などにに基づき、民間航空システムで使用されているものと類似したUAM用の飛行回廊を制定することも有効な方策であると言える。

最後に、飛行経路の最適化は、UAMが周囲の環境に及ぼす影響を考えなければならない。燃料型のUAMから排出される温室効果ガスや汚染物質は気流によって都市に拡散し、環境に与える損害は無視できない。近年の研究では、温室効果ガスの排出を最小化するための最適化手法を提案しているものもある[19, 81]。

8 UAM 安全飛行のためにリアルタイムでの気流情報はどのように取得できるか？

都市の気流は極めて複雑なため、都市空間すべてにおける風速変動を含む詳細な乱流情報をリアルタイムに取得するのは、これまでの技術ではほぼ不可能と言える。また、UAMの安全かつ効率的な飛行を保証するために都市気流情報をどの程度まで取り入れるか、最も重要な情報は何かなどの問題に対してもまだ答えが得られていない。したがって、ここでは、現時点における都市空間での気流分布のリアルタイムな予測を目的とした既往研究を整理する。将来の実際的な応用では、それらの手法の一部は多くの改善が必要であったり、複数の手法を同時に適用する必要があるものとも考える。

統計量から乱流変動を生成する古典的な手法の一つとするスペクトル法として Von Karman モデルや Dryden モデルがある[82]。これらの手法では、乱流の統計特性がパラメータ化され、代数方程式で表現される。しかし、同手法では乱流が等方的であると仮定されており、建物のような人工構造物によって生成される異方性が強い乱流構造を正確にモデル化できない。そのため、同手法は大気境界層の上部における乱流場を生成することには高精度に適用できるが、都市空間内の気流のシミュレーションへの適用には課題があると言える。

構造物周りの流れ場を予測するための代表的な手法は数値流体解析（CFD）モデルである。数十年を超える発展を経て、多数の CFD モデルやそれに係る手法が提案され、多くの成果が挙げられてきた。CFD の中でも乱流モデルに係る部分については、従来、都市気流解析の分野では RANS や LES が多く用いられているが、これらについては第 5 節を参照されたい。しかし、それらの手法の特性を考慮すると、計算精度や速度にそれぞれ一長一短があり、ともにそのままでは都市部の気流分布のリアルタイムな予測には適用するのが困難であると言える。したがって、既往研究では、以下のようなハイブリッドモデルも提案されている。

URANS (Unsteady RANS)モデルでは、RANS 方程式を用いつつもアンサンブル平均項の時間変

化を陽に計算で捉え、建物周りの支配的な渦構造を解析できるよう工夫したものである。しかし、根本的には、多くの乱流成分がモデル化されているがゆえの予測精度の制約も多い[83]。DES (Detached Eddy Simulation)モデルは、壁面近傍で RANS のように、壁面から離れると LES のように挙動するよう設計されており、壁面付近で比較的粗い計算格子を用いることによって計算コストの削減を目指す[84]。しかし、LES 領域で粗い計算格子に起因する数値不安定性が生じやすいという課題がある。また、PANS (Partially Averaged Navier–Stokes)モデルでは、Navier–Stokes 方程式に解析側で指定するスケールの平均フィルターを加え、DNS (Direct Numerical Simulation)と RANS とのハイブリッドのような解析を実現する。同手法は計算格子サイズに応じて DNS または URANS のように振る舞うよう調整できる[85]。ただし、これらのハイブリッドモデルは依然としてコストと性能を必ずしも両立できないという共通の課題を有している。計算効率にはまだ大きな改善余地があり、リアルタイムな計算を実現するには克服すべき課題が多く残っている。

CFD 計算において最も時間を要するステップは圧力・速度連成アルゴリズムの計算である。そのプロセスを加速する方法として、セミラグランジュスキームに基づき圧力場を補正する FFD (Fast Fluid Dynamics)が提案されている[86]。これまでも、FFD と都市形状情報データや GPU (Graphics Processing Unit)による並列計算と組み合わせ、都市気流分布を高速に推定するシステムなどが開発されている[87]。また、建物による強い乱流を正確に予測するため、いくつかの修正版の FFD スキームも提案され、それらの都市気流に対する適用性が比較検討された [88]。その他にも、離散格子上でのボルツマン方程式に基づいた格子ボルツマン法(LBM, Lattice Boltzmann Method)も提案されている。LBM では、全領域で同時に圧力と速度を連成するような計算が必要でなく、局所的な粒子の運動解析のみによって流体の振る舞い模擬するため、並列計算に対する親和性がよく、都市気流解析でも高い計算効率を示している[89, 90]。

一方で、近年、気象分野では数値気象予測 (NWP, Numerical Weather Prediction) の結果を数キロメートルからヘクトメートルのスケールにダウンスケールする試みが行われている[91]。統計的ダウンスケーリング手法[92]では、地域気象とグローバル気象との統計関係を用いて、グローバル気象モデル (Global Climate Model, GCM) の結果をダウンスケーリングする。一方で、力学的ダウンスケーリング手法[93-97]では、GCM の結果を初期条件および境界条件として用い、局所気象モデルを使って高解像度の気象データを生成する。また、データ同化 [98, 99] や畳み込みニューラルネットワーク [100-102]、生成的敵対ネットワーク (GAN, Generative Adversarial Network) [103]などデータ駆動型の手法も提案されている。それらの手法は 100 m 程度の解像度での推定を実現するため、都市における複雑な気流特性を効率的に再現する有力なアプローチとして近年注目されている。

さらに、NWP データに依らずに、機械学習手法を用い、建物の形状情報や離散的なセンサー計測、境界条件などに基づいて都市気流を直接に予測する試みも様々に行われている。データ駆動型モデルは高精度な数値解析結果や計測データを学習して、建物周りの平均流や乱流特性を予測する方法として使われている。その中でも、GAN は訓練データの統計特性を学び、真値と

近い統計量を持つ非定常時系列データを生成できる。都市気流解析における GAN の成果は[104-106]などに報告されている。しかし、上記の手法は大量の訓練データが必要であるため、信頼度が高いデータの不足などの課題が残っている。一方で、物理情報ニューラルネットワーク (PINN: Physics-Informed Neural Network) は、データのみならず Navier-Stokes 方程式などの物理法則からも学習できるため、高品質かつ大量なデータを必要とする AI モデル訓練の要件を緩和する[107]。PINN は、異なる風向条件で建物周辺の平均気流 [108]や、UAM 用の垂直離着陸場 (vertiport) 上空の流れ場[109]を推定するために利用されている。また、多くの機械学習手法では指定された幾何空間における一定の解像度で (メッシュ) データ間のマッピングを学習するが、FNO (Fourier Neural Operator)は関数空間の演算子を学習する。同手法は数値解析の解像度に依存せず長距離の物理相関性を容易に学習できるため、流体解析問題が効率的に解けると期待されている[110, 111]。

最後に、現地計測もまたリアルタイムの気流情報を取得するための重要な方法である。数値解析に比べて計測データの空間解像度は低い、CFD 解析の境界条件や、数値解析手法の検証データ、および機械学習モデルの訓練データを提供するなどの役割を果たす。また、風速観測の分野でもリモートセンシング技術の開発や応用が進んでいる。なかでもドップラーライダーは、広範囲かつ高高度の風速プロファイルを比較的高い空間解像度で測定するために使用されている。ドップラーライダーによる長期の観測データも蓄積されてきており、その計測結果は都市風環境解析の基盤としても利用されはじめている[51, 112, 113]。また、近年、風速等の計測センサーがより安価かつ小型化し、また耐久性も向上することなどに伴って、都市内にセンサーネットワークを効率に配置して多数な計測データを収集することが可能になりつつある[114]。その他にも、ドローン自身に風速センサーを搭載することで、モバイルセンシングシステムを構築する取り組みも行われている[29]。また、必ずしも風速センサーを備えなくとも、風の影響を受け飛行するドローンから逆にその場の風の状況が推定できれば、多数のドローンからリアルタイムに気流情報を高密度で取得し、またその情報からドローンの飛行をより効率的に制御するというような良いフィードバックループを確立することも期待される。

9 UAM が風以外の都市環境に与える影響は？

都市環境における UAM の運用には、風環境のほかにも様々な影響や課題が考えられる。都市環境の中で安全かつ有効に UAM を利用するためには、これらを理解し対策を講じることも重要である。本節では、UAM が都市環境にもたらすと考えられる主な 6 つの影響について説明する。

a. 安全性への影響

日本では、2015 年に首相官邸にドローンが墜落した事件を機にドローンの規制が強化されるようになった。ドローンは、航空法や地方自治体によって設定された飛行禁止区域や、飛行区域を問わずに順守すべきルールに則って飛行させる必要がある。現在、都市部の多くは人口集中地区にあたるため、飛行禁止区域に指定されている。しかし、Advanced Air Mobility in JAPAN 2021 の空の移動革命ロードマップ[115]によれば、2030 年には都市部における物流・旅客輸送として

の UAM の社会実装が目指されており、市街地や住宅の上空も飛行可能な法の整備が進められている。ドローンの飛行台数が増加することで、上空での衝突リスクが増すと考えられる。そのため、目的地まで安全な経路を選択するドローンの飛行経路計画について研究が行われてきた。建物をはじめとする静的な障害物と航空機やほかの無人航空機のような動的な障害物の両方を考慮し、衝突を回避するためのアルゴリズムが開発されている。制御通りの飛行する場合でも、乗っ取りによる衝突や墜落の危険性があるため、不正操作対策も必要である[116]。

b. 騒音の影響

ドローンの飛行台数が増加することで、騒音問題を引き起こす可能性がある。航空法によれば、150 m 以下の上空、建物や人からの距離が 30 m 以上離れた場所で飛行する必要がある。ある程度人から距離があるが、ドローンから発せられる音が聞こえなくなる距離ではない。そのため、ドローンが飛行時に発生するノイズを低減するための研究が行われている[117-120]。また、速く移動する車よりもドローンが上空を行き来する際の音の方がよりうるさいと感じやすいという報告もある[121]。一方でドローンがほぼ無音で飛行することができるようになれば、スパイ行為や悪用目的でドローンを使用することが容易になる。ドローンが音を発することでドローンの存在に気づくことができ、生活における安全性や安心を担保することができるという側面も考えられる。

c. プライバシーへの影響

ドローンの低価格化などによりその入手が益々容易になりつつある。ドローンは、そのほとんどがカメラ機能を備えているため、従来想定されていない位置からの撮影も容易に可能となり、プライバシー侵害などの脅威が高まっている。海外では著名人のプライベートが晒される事件も発生するなど、国内外で盗撮を含むドローンに関わる犯罪が増加している[122-125]。総務省のガイドラインでは、撮影時に被撮影者の同意を得ることを前提とし、同意が困難な場合には住宅地を避ける、プライバシー侵害の可能性がある撮影映像等にぼかしを入れるなど、撮影態様への配慮が推奨されている[126]。しかし、規制に従っていても、意図せず個人の生活を撮影してしまうリスクがあり、多くの場合、操縦者のモラルに委ねられているのが現状である。

d. 通信への影響

現在商業的に使用されているドローンは、多くの場合、2.4 GHz 帯や 5.7~5.8 GHz 帯の周波数を利用して地上と通信を行う。特に 2.4 GHz は Wi-Fi や Bluetooth など、都市部で広く使われる通信手段と重複するため、通信の混雑や干渉を引き起こす可能性がある[127]。都市部においてドローンが多数飛行する状況になれば、制御信号の遅延等が発生する恐れがある。

e. サステナビリティへの影響

UAM の普及は、都市環境に対してプラスとマイナスの両面で影響を与える可能性がある。従来のトラックのみの配送に比べて、ドローンとトラックを組み合わせた配送は、エネルギー効率が高く、二酸化炭素排出量を削減できる可能性がある[18, 19, 128]。この配送方法の導入により、交通渋滞の緩和や配達時間の短縮も期待できる。しかし、大規模に導入が進んだ場合、ドローン本体の生産やバッテリー廃棄による環境負荷が増加するリスクもある。

f. UAM 運用におけるインフラへの依存と脆弱性

物流や移動手段として UAM が普及するに伴い、運用を支えるインフラへの依存がさらに高まることが予想される。ドローンは気象条件に大きく左右されるため、天候が悪い日には運行が制限される。その結果、物流や移動の利便性が損なわれ、遅延や混乱が生じる恐れがある。そのため、UAM の導入には、気象の変化や災害時にもロバストに対応可能な運用体制の整備が重要である。例えば、ドローンと自動車や鉄道を併用するハイブリッド型の運送方法や、気象や風環境の情報をリアルタイムで運行可能であるかを判断するシステムの導入が必要とされる。

10 都市環境の観点から UAM 利用のための規制をどのように整備すべきか？

都市空間における安全な UAM 利用を実現するためには、適切な規制や法律の制定が不可欠である。ここまでの節で述べたように、都市風環境は、UAM の飛行経路、設計、安全性に密接に関わる。また、その利便性とリスクの双方における社会的影響の大きさから、必要となる規制は科学的根拠と実践的知見の双方に基づく必要がある。本節では、これまでの議論を締めくくるとともに、都市風環境と UAM 安全利用の調和を目指した規制の方向性をまとめる。

a. 科学的根拠に基づく規制の制定

都市の風環境は複雑であり、建物や地形が風の流れに大きな影響を与える。特に、都市部では乱流やビル風がドローンの飛行に危険をもたらす可能性がある。そのため、規制は風洞実験や数値流体解析、ドローンの飛行シミュレーションなどのデータに基づいて設計される必要がある[129, 130]。具体的には、風速や乱流強度の限界値を設定し、その範囲内でのドローン運用を推奨する指針を作成することが重要である。また、都市の風環境に関するデータベースの構築や長期的なモニタリングを行う仕組みも整備し、事前あるいはリアルタイムにドローンの飛行が危険となる領域を判定できるようなシステムの構築も必要と思われる。

b. 地域特性を考慮した柔軟な規制

都市ごとに異なる地形や気象条件、建物の密集度などを適切に考慮し、地域や都市の特性に応じた規制を設ける必要がある[131]。例えば、都心の高層ビルが密集する地域では、建物間で生じる強風や乱流の影響を軽減するために低高度飛行を制限する一方で、郊外や公園、河川敷などでは緩和された規制を適用するなどの柔軟性が求められると思われる。

c. 社会的受容性とステークホルダーの参加

UAM 利活用のあり方や規制の制定にあたっては、住民や事業者（製造業者、運用者）、自治体関係者、専門家など、幅広いステークホルダーの意見を取り入れ、社会受容性を高めることが重要である[132]。特に、ドローン利用による騒音やプライバシーへの影響、風環境がもたらす安全リスクについて、住民の理解を深めるための説明会やパブリックコメントの募集などの実施が必要と思われる。ただし一方で、事業者にとって過度な負担となり、UAM 利用に伴う便益や機会の損失を生じないように、規制の現実的な適用可能性を検討することも必要である。

d. 技術の進展に応じた規制の更新

UAM や都市風環境に関わる技術、研究、社会的状況は急速に変化・進展しており、それに伴い必要な規制も変化する。固定的な規制ではなく、技術革新に柔軟に対応できる枠組みを構築す

る必要がある。例えば、都市風環境やドローン飛行の詳細なシミュレーションなどを活用した新技術の試験的適用を許容する仕組みを設けることが考えられる。また、新しいデータや知見を迅速に反映するための定期的なレビュー体制を整備することが求められる。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人大林財団 2023 年度研究助成（研究代表者：菊本英紀）および JSPS 科研費 24K17398 の助成の支援を受けて行われた。記して謝意を表す。

用語定義

AAM	Advanced Air Mobility
AI	Artificial Intelligence
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FFD	Fast Fluid Dynamics
FNO	Fourier Neural Operator
FWUA	Fixed-Wing Unmanned Aircraft
GAN	Generative Adversarial Network
GCM	Global Climate Model
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
LBM	Lattice Boltzmann Method
LES	Large Eddy Simulation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NWP	Numerical Weather Prediction
PANS	Partially Averaged Navier–Stokes
PINN	Physics-Informed Neural Network
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes
UAM	Urban Air Mobility
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
URANS	Unsteady RANS
UTM	Unmanned Aircraft System Traffic Management
VTOL	Vertical Take-Off and Landing aircraft

参考文献

- [1] EASA, Urban air mobility. <https://www.easa.europa.eu/en/what-is-uam>. (Accessed 01-20 2025).
- [2] 御法川, 白井, 水野, アーバンエアモビリティ ～身近な空の新たな活用に向けて～, 次世代移動体技術誌 1(1) (2020) 54-61.
- [3] NASA, Advanced Air Mobility Mission. <https://www.nasa.gov/mission/aam/>. (Accessed 01-20 2025).
- [4] FAA, Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM). https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/traffic_management. (Accessed 01-20 2025).
- [5] Xinhua, China's low-altitude economy soars at high speed, 2024. <https://english.news.cn/20241218/d336b2057b9545378f3df907fbc1bc4b/c.html>. (Accessed 02-12 2025).
- [6] 国土交通省, 空の移動革命に向けた官民協議会. https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk2_000007.html. (Accessed 01-21 2025).
- [7] M. Hassanalain, A. Abdelkefi, Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, *Progress in Aerospace Sciences* 91 (2017) 99-131.
- [8] N. Bayomi, J.E. Fernandez, Eyes in the Sky: Drones Applications in the Built Environment under Climate Change Challenges, *Drones* 7(10) (2023) 637.
- [9] B. Davoudi, E. Taheri, K. Duraisamy, B. Jayaraman, I. Kolmanovsky, Quad-Rotor Flight Simulation in Realistic Atmospheric Conditions, *AIAA Journal* 58(5) (2020) 1992-2004.
- [10] H. Barber, A. Wall, I. Tabachnick, RPAS operator guidance and safety assurance tools for the urban environment: phase II, Laboratory Technical Report (National Research Council of Canada. Aerospace Research Centre. Aerodynamics Laboratory; no. LTR-AL-2022-0010, National Research Council of Canada. Aerospace Research Centre
National Research Council of Canada. Aerospace, 2022.
- [11] H. Barber, A. Wall, S. Kumar, R. McKercher, RPAS operator guidance and safety assurance tools for the urban environment: phase III, Laboratory Technical Report (National Research Council of Canada. Aerospace Research Centre. Aerodynamics Laboratory; no. LTR-AL-2023-0011, National Research Council of Canada. Aerospace Research Centre
National Research Council of Canada. Aerospace, 2023.
- [12] H. Barber, A. Wall, C. National Research Council of Canada. Aerospace Research, Urban airflow: what drone pilots need to know, Laboratory Technical Report (National Research Council of Canada. Aerospace. Aerodynamics Laboratory); no. LTR-AL-2020-0075, National Research Council of Canada. Aerospace, 2021.
- [13] A. Mohamed, M. Marino, S. Watkins, J. Jaworski, A. Jones, Gusts Encountered by Flying Vehicles in Proximity to Buildings, *Drones* 7(1) (2022) 22.
- [14] C. Purtell, S.-J. Hong, B. Hiatt, Bibliometric analysis on advanced air mobility and drones, *Journal of Air Transport Management* 116 (2024) 102569.
- [15] U. Nations, World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, United Nations, 2019.

- [16] R. Berger, Urban air mobility: The rise of a new mode of transportation, 2018.
- [17] NASA, Urban Air Mobility (UAM) Market Study, NASA, 2018.
- [18] A. Goodchild, J. Toy, Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO₂ emissions in the delivery service industry, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 61 (2018) 58-67.
- [19] W.-C. Chiang, Y. Li, J. Shang, T.L. Urban, Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization, *Applied Energy* 242 (2019) 1164-1175.
- [20] T. Ezaki, K. Fujitsuka, N. Imura, K. Nishinari, Drone-based vertical delivery system for high-rise buildings: Multiple drones vs. a single elevator, *Communications in Transportation Research* 4 (2024) 100130.
- [21] L. Wang, X. Deng, J. Gui, P. Jiang, F. Zeng, S. Wan, A review of Urban Air Mobility-enabled Intelligent Transportation Systems: Mechanisms, applications and challenges, *Journal of Systems Architecture* 141 (2023) 102902.
- [22] G. Tmušić, S. Manfreda, H. Aasen, M.R. James, G. Gonçalves, E. Ben-Dor, A. Brook, M. Polinova, J.J. Arranz, J. Mészáros, R. Zhuang, K. Johansen, Y. Malbeteau, I.P. de Lima, C. Davids, S. Herban, M.F. McCabe, Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring, *Remote Sensing* 12(6) (2020) 1001.
- [23] H. Yao, R. Qin, X. Chen, Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications—A Review, *Remote Sensing* 11(12) (2019) 1443.
- [24] J. Seo, L. Duque, J. Wacker, Drone-enabled bridge inspection methodology and application, *Automation in Construction* 94 (2018) 112-126.
- [25] N. Bayomi, S. Nagpal, T. Rakha, J.E. Fernandez, Building envelope modeling calibration using aerial thermography, *Energy and Buildings* 233 (2021) 110648.
- [26] T. Rakha, Y. El Masri, K. Chen, P. De Wilde, 3D drone-based time-lapse thermography: a case study of roof vulnerability characterization using photogrammetry and performance simulation implications, *Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA*, 2021.
- [27] T. Rakha, A. Gorodetsky, Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones, *Automation in Construction* 93 (2018) 252-264.
- [28] B. Huang, J. Liu, Z. Li, X. Wang, X. Liu, J. Dong, Q. Cai, O. Pu, T. Bao, Prediction and visualization of 3D wake field of a rectangular high-rise building in tropical island cities based on UAV measurements, *Building and Environment* 267 (2025) 112218.
- [29] W. Thielicke, W. Hübert, U. Müller, M. Eggert, P. Wilhelm, Towards accurate and practical drone-based wind measurements with an ultrasonic anemometer, *Atmospheric Measurement Techniques* 14(2) (2021) 1303-1318.
- [30] J. Burgues, S. Marco, Environmental chemical sensing using small drones: A review, *Sci Total Environ* 748 (2020) 141172.

- [31] J.T. Shaw, A. Shah, H. Yong, G. Allen, Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: a review, *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 379(2210) (2021) 20200450.
- [32] Y. Ishida, M. Fujiyama, H. Kobayashi, Estimation of Longwave Radiation Intensity Emitted from Urban Obstacles in Each Direction Using Drone-Based Photogrammetry, *Remote Sensing* 16(21) (2024) 4017.
- [33] J. Naughton, W. McDonald, Evaluating the Variability of Urban Land Surface Temperatures Using Drone Observations, *Remote Sensing* 11(14) (2019) 1722.
- [34] J. Ye, J. Wang, P. Lv, Mutual Aerodynamic Interference Mechanism Analysis of an “X” Configuration Quadcopter, *Aerospace* 8(11) (2021) 349.
- [35] J. Ye, J. Wang, T. Song, Z. Wu, P. Tang, Nonlinear Modeling the Quadcopter Considering the Aerodynamic Interaction, *IEEE Access* 9 (2021) 134716-134732.
- [36] N.L. Oo, D. Zhao, M. Sellier, X. Liu, Experimental investigation on turbulence effects on unsteady aerodynamics performances of two horizontally placed small-size UAV rotors, *Aerospace Science and Technology* 141 (2023) 108535.
- [37] T.R. Oke, G. Mills, A. Christen, J.A. Voogt, *Urban Climates*, 2017.
- [38] S. Yang, L. Wang, T. Stathopoulos, A.M. Marey, Urban microclimate and its impact on built environment – A review, *Building and Environment* 238 (2023) 110334.
- [39] H. Barber, A. Wall, G.L. Larose, S. Schajnoha, RPAS operations in urban airflow: Efficient modelling of representative wind speed variations along a flight path through a flow field with changing turbulence characteristics, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 247 (2024) 105702.
- [40] S.-J. Mei, J.-T. Hu, D. Liu, F.-Y. Zhao, Y. Li, H.-Q. Wang, Thermal buoyancy driven canyon airflows inside the compact urban blocks saturated with very weak synoptic wind: Plume merging mechanism, *Building and Environment* 131 (2018) 32-43.
- [41] H. Yeo, S. Lee, Impact of heterogeneous building arrangement on local turbulence escalation, *Building and Environment* 236 (2023) 110217.
- [42] B. Blocken, P. Moonen, T. Stathopoulos, J. Carmeliet, Numerical Study on the Existence of the Venturi Effect in Passages between Perpendicular Buildings, *Journal of Engineering Mechanics* 134(12) (2008) 1021-1028.
- [43] W. Wang, T. Okaze, Statistical analysis of low-occurrence strong wind speeds at the pedestrian level around a simplified building based on the Weibull distribution, *Building and Environment* 209 (2022) 108644.
- [44] M.A. bin Zainol, W. Wang, N. Ikegaya, Similarity of the low-occurrence wind profiles within urban turbulent boundary layers of uniform and non-uniform height block arrays, *Building and Environment* 267 (2025) 112138.
- [45] S. Rajendran, S. Srinivas, Air taxi service for urban mobility: A critical review of recent developments, future challenges, and opportunities, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*

143 (2020) 102090.

[46] Q. Zou, Z. Li, X. Zeng, C. Wang, F. Zou, The analysis of characteristics of wind field on roof based on field measurement, *Energy and Buildings* 240 (2021) 110877.

[47] H. Kawai, Local peak pressure and conical vortex on building, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90(4-5) (2002) 251-263.

[48] Q. Zou, Z.N. Li, F. Zou, X. Zeng, C. Wang, Y.Y. Pan, A study on the characteristics of roof wind field by wind tunnel test, *Journal of Building Engineering* 43 (2021) 103155.

[49] A. Gupta, T. Stathopoulos, P. Saathoff, Wind tunnel investigation of the downwash effect of a rooftop structure on plume dispersion, *Atmospheric Environment* 46 (2012) 496-507.

[50] Y. Masuyama, Y. Uematsu, O. Nakamura, Y. Okuda, Characteristics of local wind forces on the edges of signboards installed on the rooftops of buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 206 (2020) 104299.

[51] H. Kikumoto, R. Ooka, H. Sugawara, J. Lim, Observational study of power-law approximation of wind profiles within an urban boundary layer for various wind conditions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 164 (2017) 13-21.

[52] K. Sasaki, M. Inoue, T. Shimura, M. Iguchi, In Situ, Rotor-Based Drone Measurement of Wind Vector and Aerosol Concentration in Volcanic Areas, *Atmosphere* 12(3) (2021) 376.

[53] Y. Tominaga, M. Shirzadi, Wind tunnel measurement of three-dimensional turbulent flow structures around a building group: Impact of high-rise buildings on pedestrian wind environment, *Building and Environment* 206 (2021) 108389.

[54] W.H. Snyder, Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology, *Boundary-Layer Meteorology* 3(1) (1972) 113-134.

[55] B. Blocken, T. Stathopoulos, J.P.A.J. van Beeck, Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment, *Building and Environment* 100 (2016) 50-81.

[56] A.S. Dar, G. Armengol Barcos, F. Porté-Agel, An experimental investigation of a roof-mounted horizontal-axis wind turbine in an idealized urban environment, *Renewable Energy* 193 (2022) 1049-1061.

[57] R. Kellnerová, L. Kukačka, K. Jurčáková, V. Uruba, Z. Jaňour, PIV measurement of turbulent flow within a street canyon: Detection of coherent motion, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104-106 (2012) 302-313.

[58] B. Blocken, C. Gualtieri, Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics, *Environmental Modelling & Software* 33 (2012) 1-22.

[59] Y. Tominaga, CFD simulations of turbulent flow and dispersion in built environment: A perspective review, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 249 (2024) 105741.

[60] S. Liu, W. Pan, X. Zhao, H. Zhang, X. Cheng, Z. Long, Q. Chen, Influence of surrounding buildings

- on wind flow around a building predicted by CFD simulations, *Building and Environment* 140 (2018) 1-10.
- [61] Y. Tominaga, A. Mochida, R. Yoshie, H. Kataoka, T. Nozu, M. Yoshikawa, T. Shirasawa, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96(10-11) (2008) 1749-1761.
- [62] Y. Li, W. Wang, T. Okaze, Evaluation of polyhedral mesh performance for large-eddy simulations of flow around an isolated building within an unstable boundary layer, *Building and Environment* 235 (2023) 110207.
- [63] Y. Zhao, L.W. Chew, A. Kubilay, J. Carmeliet, Isothermal and non-isothermal flow in street canyons: A review from theoretical, experimental and numerical perspectives, *Building and Environment* 184 (2020) 107163.
- [64] B. Blocken, LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion?, *Building Simulation* 11(5) (2018) 821-870.
- [65] 日本建築学会, 都市の風環境予測のための CFD ガイドブック, 日本建築学会 2020.
- [66] M. Saeedi, B.-C. Wang, Large-eddy simulation of turbulent flow and dispersion over a matrix of wall-mounted cubes, *Physics of Fluids* 27(11) (2015) 115104.
- [67] T. Okaze, H. Kikumoto, H. Ono, M. Imano, N. Ikegaya, T. Hasama, K. Nakao, T. Kishida, Y. Tabata, K. Nakajima, R. Yoshie, Y. Tominaga, Large-eddy simulation of flow around an isolated building: A step-by-step analysis of influencing factors on turbulent statistics, *Building and Environment* 202 (2021) 108021.
- [68] A. Abd Razak, A. Hagishima, N. Ikegaya, J. Tanimoto, Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment, *Building and Environment* 59 (2013) 56-65.
- [69] G.-n. Dong, T.-g. Chen, C.-j. Ren, K. Wang, Wind tunnel investigation of wind reduction effect under porous fences protection, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 232 (2023) 105250.
- [70] A.O. Mahgoub, S. Ghani, Numerical and experimental investigation of utilizing the porous media model for windbreaks CFD simulation, *Sustainable Cities and Society* 65 (2021) 102648.
- [71] V. Pappa, D. Bouris, W. Theurer, C. Gromke, A wind tunnel study of aerodynamic effects of façade and roof greening on air exchange from a cubic building, *Building and Environment* 231 (2023) 110023.
- [72] R. Buccolieri, J.-L. Santiago, E. Rivas, B. Sanchez, Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects, *Urban Forestry & Urban Greening* 31 (2018) 212-220.
- [73] C. Lin, R. Ooka, H. Kikumoto, C. Flageul, Y. Kim, Y. Wang, A. Maison, Y. Zhang, K. Sartelet, Large-eddy simulations on pollutant reduction effects of road-center hedge and solid barriers in an idealized street canyon, *Building and Environment* 241 (2023) 110464.
- [74] Y.-d. Huang, M.-z. Li, S.-q. Ren, M.-j. Wang, P.-y. Cui, Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon, *Building and Environment* 165 (2019) 106385.

- [75] C. Gromke, B. Ruck, Pollutant Concentrations in Street Canyons of Different Aspect Ratio with Avenues of Trees for Various Wind Directions, *Boundary-Layer Meteorology* 144(1) (2012) 41-64.
- [76] S. Fellini, M. Marro, A.V. Del Ponte, M. Barulli, L. Soulhac, L. Ridolfi, P. Salizzoni, High resolution wind-tunnel investigation about the effect of street trees on pollutant concentration and street canyon ventilation, *Building and Environment* 226 (2022) 109763.
- [77] C. YongBo, M. YueSong, Y. JianQiao, S. XiaoLong, X. Nuo, Three-dimensional unmanned aerial vehicle path planning using modified wolf pack search algorithm, *Neurocomputing* 266 (2017) 445-457.
- [78] S. Kataoka, S. Suzuki, A Study on Path Planning for Autonomous Drones Considering Wind Risk, *日本ロボット学会誌* 40(10) (2022) 915-923.
- [79] C. White, E.W. Lim, S. Watkins, A. Mohamed, M. Thompson, A feasibility study of micro air vehicles soaring tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 103 (2012) 41-49.
- [80] K. Sundar, S. Rathinam, Algorithms for Routing an Unmanned Aerial Vehicle in the Presence of Refueling Depots, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 11(1) (2014) 287-294.
- [81] W.P. Coutinho, M. Battarra, J. Fliege, The unmanned aerial vehicle routing and trajectory optimisation problem, a taxonomic review, *Computers & Industrial Engineering* 120 (2018) 116-128.
- [82] T.R. Beal, Digital simulation of atmospheric turbulence for Dryden and von Karman models, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 16(1) (1993) 132-138.
- [83] Y. Tominaga, Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 142 (2015) 93-103.
- [84] J. Liu, J. Niu, C.M. Mak, Q. Xia, Detached eddy simulation of pedestrian-level wind and gust around an elevated building, *Building and Environment* 125 (2017) 168-179.
- [85] H. Jia, H. Kikumoto, Partially averaged Navier-Stokes simulation of flow around an isolated building model with a 1:1:2 shape, *Building and Environment* 223 (2022) 109506.
- [86] J. Stam, *Stable Fluids*, Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (1999) 121-128.
- [87] M. Mortezaadeh, L.L. Wang, M. Albettar, S. Yang, CityFFD – City fast fluid dynamics for urban microclimate simulations on graphics processing units, *Urban Climate* 41 (2022) 101063.
- [88] R. Li, Z. Liu, Y. Zhao, Y. Wu, J. Niu, L. Wang, N. Gao, Fast fluid dynamics simulation of airflow around a single bluff body under different turbulence models and discretization schemes, *Building and Environment* 219 (2022) 109235.
- [89] M. Han, R. Ooka, H. Kikumoto, Validation of lattice Boltzmann method-based large-eddy simulation applied to wind flow around single 1:1:2 building model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 206 (2020) 104277.
- [90] N.H. Ahmad, A. Inagaki, M. Kanda, N. Onodera, T. Aoki, Large-Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area Using the Lattice Boltzmann Method, *Boundary-Layer Meteorology* 163(3) (2017) 447-

467.

- [91] H.W. Lean, N.E. Theeuwes, M. Baldauf, J. Barkmeijer, G. Bessardon, L. Blunn, J. Bojarova, I.A. Boutle, P.A. Clark, M. Demuzere, P. Dueben, I.L. Frogner, S. de Haan, D. Harrison, C.v. Heerwaarden, R. Honnert, A. Lock, C. Marsigli, V. Masson, A. McCabe, M.v. Reeuwijk, N. Roberts, P. Siebesma, P. Smolíková, X. Yang, The hectometric modelling challenge: Gaps in the current state of the art and ways forward towards the implementation of 100 - m scale weather and climate models, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 150(765) (2024) 4671-4708.
- [92] R. Wilby, S. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton, L. Mearns, Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, 2004.
- [93] H. Kikumoto, R. Ooka, Y. Arima, T. Yamanaka, Study on the future weather data considering the global and local climate change for building energy simulation, *Sustainable Cities and Society* 14 (2015) 404-413.
- [94] S. Iizuka, Y. Xuan, C. Takatori, H. Nakaura, A. Hashizume, Environmental impact assessment of introducing compact city models by downscaling simulations, *Sustainable Cities and Society* 63 (2020) 102424.
- [95] S. Iizuka, Future environmental assessment and urban planning by downscaling simulations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 181 (2018) 69-78.
- [96] M. Tewari, H. Kusaka, F. Chen, W.J. Coirier, S. Kim, A.A. Wyszogrodzki, T.T. Warner, Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion, *Atmospheric Research* 96(4) (2010) 656-664.
- [97] H. Kusaka, R. Ikeda, T. Sato, S. Iizuka, T. Boku, Development of a Multi - Scale Meteorological Large - Eddy Simulation Model for Urban Thermal Environmental Studies: The “City - LES” Model Version 2.0, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 16(10) (2024) e2024MS004367.
- [98] R.J. Davy, M.J. Woods, C.J. Russell, P.A. Coppin, Statistical Downscaling of Wind Variability from Meteorological Fields, *Boundary-Layer Meteorology* 135(1) (2010) 161-175.
- [99] X. Wang, C. Hu, H. Kikumoto, H. Jia, K. Nakao, R. Ooka, Data extension of high-resolution wind speed database by fusing meteorological observation and local objective analysis data with POD-LSE, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 252 (2024) 105812.
- [100] Y. Yasuda, R. Onishi, K. Matsuda, Super-resolution of three-dimensional temperature and velocity for building-resolving urban micrometeorology using physics-guided convolutional neural networks with image inpainting techniques, *Building and Environment* 243 (2023) 110613.
- [101] E. Rocha Rodrigues, I. Oliveira, R. Cunha, M. Netto, DeepDownscale: A Deep Learning Strategy for High-Resolution Weather Forecast, 2018 IEEE 14th International Conference on e-Science (e-Science), 2018, pp. 415-422.
- [102] K. Höhlein, M. Kern, T. Hewson, R. Westermann, A comparative study of convolutional neural network models for wind field downscaling, *Meteorological Applications* 27(6) (2020) e1961.
- [103] O. Miralles, D. Steinfeld, O. Martius, A.C. Davison, Downscaling of Historical Wind Fields over

Switzerland Using Generative Adversarial Networks, *Artificial Intelligence for the Earth Systems* 1(4) (2022) e220018.

[104] B. Zhang, R. Ooka, H. Kikumoto, C. Hu, T.K.T. Tse, Towards real-time prediction of velocity field around a building using generative adversarial networks based on the surface pressure from sparse sensor networks, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 231 (2022) 105243.

[105] H. Gao, G. Hu, D. Zhang, W. Jiang, K.T. Tse, B.R. Noack, SiGAN: A 3D sensor importance deep generative model for urban wind flow field monitoring, *Building and Environment* 262 (2024) 111787.

[106] C. Hu, H. Kikumoto, B. Zhang, H. Jia, Fast estimation of airflow distribution in an urban model using generative adversarial networks with limited sensing data☆, *Building and Environment* 249 (2024) 111120.

[107] M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis, Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics* 378 (2019) 686-707.

[108] C. Hu, H. Jia, C. Lin, C. Wei, Y. Wang, H. Kikumoto, Efficient Analysis of Airflow Distribution Under Multiple Wind Directions Using a Physics-Informed Neural Network: Mean Flow Around Two-Dimensional Isolated Building, (2024).

[109] C. Hou, L. Marra, G.Y.C. Maceda, P. Jiang, J. Chen, Y. Liu, G. Hu, J. Chen, A. Ianiro, S. Discetti, A. Meilán-Vila, B.R. Noack, Machine-learned flow estimation with sparse data -- exemplified for the rooftop of a UAV vertiport, (2024).

[110] Z. Li, N. Kovachki, K. Azizzadenesheli, B. Liu, K. Bhattacharya, A. Stuart, A. Anandkumar, Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations, *arXiv* (2021) 2010.08895.

[111] W. Peng, S. Qin, S. Yang, J. Wang, X. Liu, L. Wang, Fourier neural operator for real-time simulation of 3D dynamic urban microclimate, *Building and Environment* 248 (2024) 111063.

[112] C.W. Kent, S. Grimmond, J. Barlow, D. Gatey, S. Kotthaus, F. Lindberg, C.H. Halios, Evaluation of Urban Local-Scale Aerodynamic Parameters: Implications for the Vertical Profile of Wind Speed and for Source Areas, *Boundary Layer Meteorol* 164(2) (2017) 183-213.

[113] 佐々木, 松井, ドップラーライダー観測による東京都心部の高高度風況把握, *風工学研究論文集* 26 (2020) 17-24.

[114] H. Jia, C. Hu, H. Kikumoto, Effects of sensor configuration optimization on airflow estimation in urban environment: A case study with a building group model, *Sustainable Cities and Society* 98 (2023) 104840.

[115] 国土交通省, *Advanced Air Mobility in JAPAN 2021*, 2021.

[116] M.J. Boyle, *The Race for Drones*, *Orbis* 59(1) (2015) 76-94.

[117] G. Sinibaldi, L. Marino, Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV, *Applied Acoustics* 74(1) (2013) 79-88.

[118] Y. Yang, Y. Liu, H. Hu, X. Liu, Y. Wang, E.J.G. Arcondoulis, Z. Li, Experimental study on noise reduction of a wavy multi-copter rotor, *Applied Acoustics* 165 (2020) 107311.

- [119] D. Cawthorne, P.M. Juhl, Designing for Calmness: Early Investigations into Drone Noise Pollution Management, 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2022, pp. 839-848.
- [120] E. Shima, J. Sun, H. Liu, K. Yonezawa, H. Kaneko, Aeroacoustics, Psychoacoustics, and Aerodynamic Characteristics of Innovative Looped Propellers Using Catenary Curves, 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2024), 2024.
- [121] A.W. Christian, R. Cabell, Initial Investigation into the Psychoacoustic Properties of Small Unmanned Aerial System Noise, 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2017.
- [122] R. Clarke, Understanding the drone epidemic, *Computer Law & Security Review* 30(3) (2014) 230-246.
- [123] J. Nicoll, T. Hunt, Woman comes eye to eye with camouflaged drone peeping in her bedroom window, *The Sydney Morning Herald*, 2018.
- [124] ロボティア編集部, 英警察の内部資料「英国でドローンを使った犯罪が急増中」, 2016. <https://robo-teer-tokyo.com/archives/5453/2>. (Accessed 02-14 2025).
- [125] 神戸新聞 NEXT, ドローンで露天風呂盗撮か 女性客不安、県内で摘発事例なし, 神戸新聞 NEXT, 2021.
- [126] 総務省, ドローンによる撮影映像等のインターネット上での取り扱いに係るガイドライン, 2015.
- [127] I. Shayea, P. Dushi, M. Banafaa, R.A. Rashid, S. Ali, M.A. Sarijari, Y.I. Daradkeh, H. Mohamad, Handover Management for Drones in Future Mobile Networks-A Survey, *Sensors (Basel)* 22(17) (2022) 6424.
- [128] L.D.P. Pugliese, F. Guerriero, G. Macrina, Using drones for parcels delivery process, *Procedia Manufacturing* 42 (2020) 488-497.
- [129] D.S. Nithya, G. Quaranta, V. Muscarello, M. Liang, Review of Wind Flow Modelling in Urban Environments to Support the Development of Urban Air Mobility, *Drones* 8(4) (2024) 147.
- [130] S. Giersch, O. El Guernaoui, S. Raasch, M. Sauer, M. Palomar, Atmospheric flow simulation strategies to assess turbulent wind conditions for safe drone operations in urban environments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 229 (2022) 105136.
- [131] M. Gianfelice, H. Aboshosha, T. Ghazal, Real-time Wind Predictions for Safe Drone Flights in Toronto, *Results in Engineering* 15 (2022) 100534.
- [132] EASA, Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe, European Union Aviation Safety Agency, 2021.