

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

空の移動革命 “UAM(アーバンエアモビリティ)”の可能性

2020年9月3日

法政大学大学院
アーバンエアモビリティ研究所
御法川 学

講演内容

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

1. Introduction
2. UAM概説
3. eVTOL開発の状況
4. 法整備の状況
5. eVTOLの概念設計
6. UAM実現に向けて
7. むすび

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



1. Introduction

HUAMご紹介

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

法政大学大学院 特定課題研究所 アーバンエアモビリティ研究所 (HUAM)

法政大学の航空教育研究の一翼を担う形で、2018年6月設置

本研究所のミッション

- ・ **アーバンエアモビリティ社会を実現するための諸課題に対応する情報知識共有**
- ・ **入門航空機 (LSA) のカテゴリー化と安全かつ健全な普及**
- ・ **航空機電動化に関する研究**
- ・ **航空機技術者 (設計開発・整備) 不足、パイロット不足に対応する若手人材育成**
- ・ **次世代航空の法整備や環境醸成**



はじめに

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

いま、かつてない空の環境変革が始まろうとしている

2010年代	ドローン・無人機の商業利用と普及、電動航空機の出現
2020年代	空飛ぶクルマの市販化？
2030年代	電動旅客機の運用開始？
...	

なぜ？

- 都市化 ⇒ 2D交通インフラが限界
- 都市部生活環境の高層化 ⇒ 効率的な3D輸送
- 大規模輸送のリスク
- CO2削減



✓ 比較的低高度、短距離の空を「自動車のように」活用する
「アーバンエアモビリティ（UAM）」が注目されている

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

2. UAM概説

UAMとは

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

NASAによるUAM（Urban Air Mobility）の定義

「小荷物配送などの無人航空機を含む都市部の乗客貨物の航空輸送システム」

UAMの特徴

- パイロット不在（＝自動運転）
- オンデマンド運航
- 滑走路不要の垂直離着陸（VTOL）
- 電動推進

2030年までの市場予測※

- 市場規模 9兆円（日本6500億円）
- 機体数 15万機（日本1万機）

世界中で研究開発と投資が加速中

※デロイトトーマツコンサルティング調べ



2020年度SSDS/JMAC技術講演会

UAMの実現イメージ



UBER Elevate Whitepaperより

UBERのイメージ（サンフランシスコ都市部の移動）

- ⇒ UBER X（タクシー）：55マイルを100分 111ドル（目標31ドル）
- ⇒ UBER Elevate（UAM）：43マイルを15分 129ドル（目標20ドル）

UAMの実現イメージ

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



活発なUAM研究

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



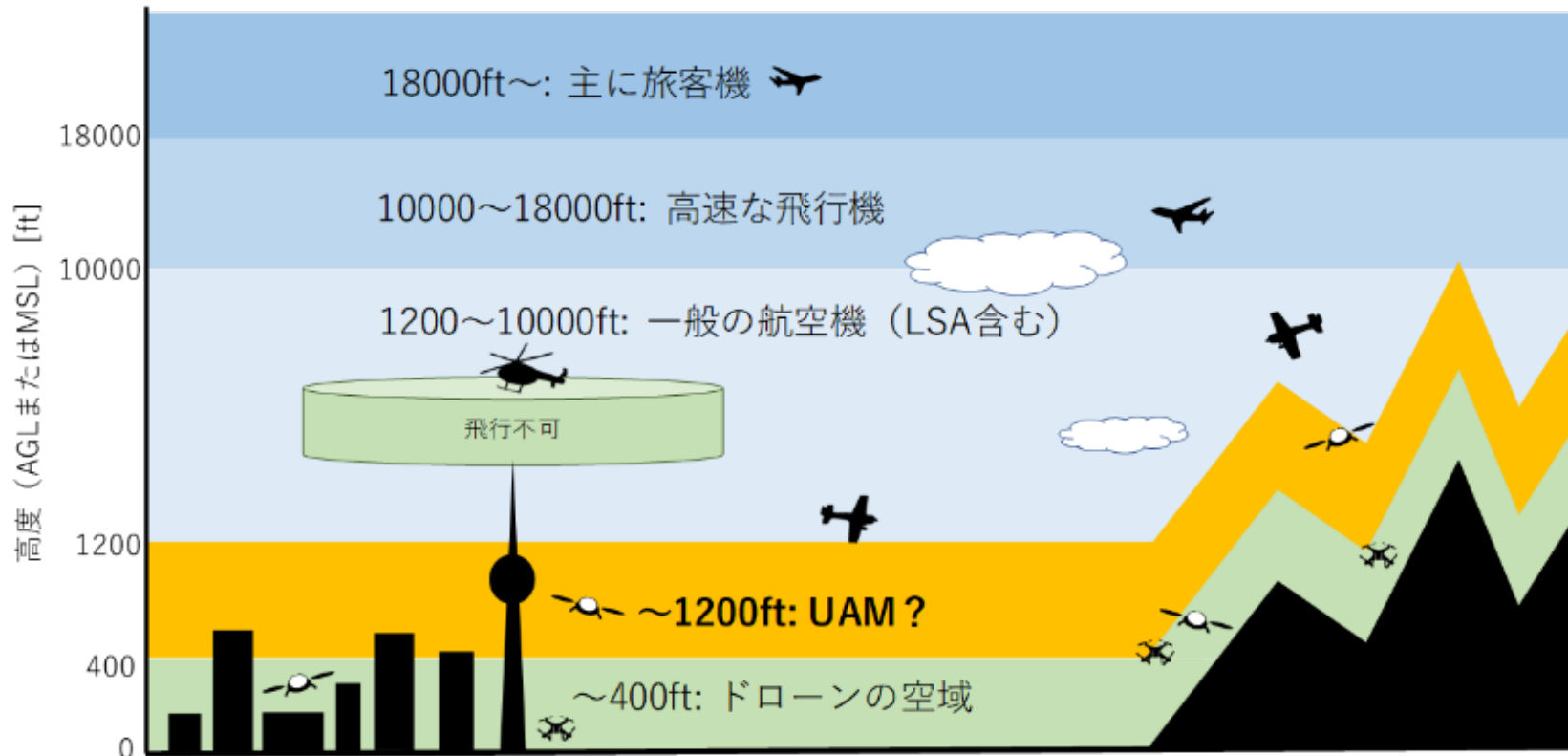
<https://www.airbus.com/newsroom/stories/urban-air-mobility-the-sky-is-yours.html>



<https://www.uber.com/us/en/elevate/uberair/>

UAMが使用する空域

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



- ドローンは、①空港等の周辺上空、②人口集中地区の上空、③高度150m以上の空域については、安全性を確保し許可を受ければ飛行可能。
- 超軽量機 (ULP) は、予め許可を受けた飛行場または場外離着陸場の場周空域 (半径3kmまたは9km) のみ飛行可能。
- ヘリコプターを含む航空機は、人家密集部の最も高い建物から、半径2000ft, 上方1000ftは飛行不可。

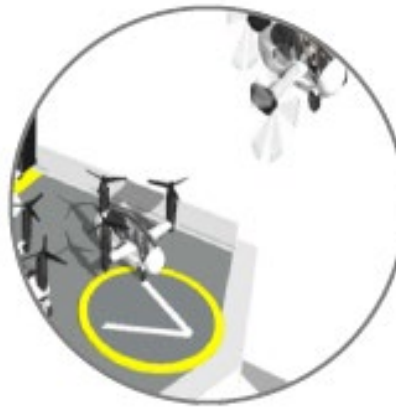
UAMのユースケース

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

NASAによる分類



ケース1
“宅配サービス”
(ドローンによる物流)



ケース2
“エアメトロ”
(定期乗合サービス)



ケース3
“エアタクシー”
(オンデマンド旅客輸送)

要素技術	バッテリー技術、自律飛行技術、検出と回避（LiDAR、カメラビジョンなど）、電気推進、非GPS運航技術 など
必要な法規制	BVLOS（目視外）飛行、耐空性基準、UTM、市街地上空の飛行、高度制限、オペレーター認証、識別、環境制限 など

ケース1 “宅配サービス”

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



コンセプト	流通ハブから専用ポストへのパッケージ（5ポンド未満）の配送。オンラインでの注文が行われ、適時配送ルートに沿って行う。
機体	小型無人航空機（ドローン）
ペイロード	2kg程度
1フライト当たりの距離	周回含めて10マイル以内
運航方法	オーダーを受けたら周回ルートに沿って行う。
インフラ環境	宅配ポスト、流通ハブ、ドッキング/充電ステーション、UTM（無人航空機管制）
競合サービス	有人または無人の地上配送サービス（FedEx、UPS、Amazon Primeなど）、宅配便サービス、AGV（自動運転車）ロッカー、ドロイド
2030年のマイルストーン	2030年に黒字化の可能性。 年500万便、4万機、1便当たりコスト4.2ドル。

ケース2 “エアメトロ”

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



<https://www.michaelswafford.com/nasa-future-vertiport>

コンセプト	地下鉄やバスなどの現在の公共交通機関と同様、決められたルート、定期的な時刻表によって運航される。各都市の交通量の多いエリアに停留所（駅）を設ける。
機体	2～5人乗りの自動運転（パイロットなし）VTOL機
ペイロード	450kg以下
1フライト当たりの距離	10～70マイル
運航方法	決められたルートを時刻表通りに運航する。
インフラ環境	1つの都市部あたり、一度に平均3～6機のVTOLを運航できる駐機場（バーティポート）を最大100～300か所、充電（給油）ステーション、UTM
競合サービス	地下鉄、バス、自転車、ライドシェア、自動運転車（自家用、ハイヤー、またはライドシェア）
2030年のマイルストーン	2028年に黒字化の可能性。 年7.4億人利用、2.3万機、1回当たりコスト30ドル。

ケース3 “エアタクシー”

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



コンセプト	Door to doorのライドシェア、ハイヤーと同様、乗客が希望の場所にVTOLを呼び出し、乗客が指定された駐機場（ビルの屋上など）で乗降する。
機体	2～5人乗りの自動運転（パイロットなし）VTOL機
ペイロード	450kg以下
1フライト当たりの距離	10～70マイル
運航方法	オンデマンド（ルートと時間は毎回異なる）。
インフラ環境	Door to doorサービスを実現するための、建物上または建物の近くの非常に高密度な駐機ポイント（パーティーストップ）、充電（給油）ステーション、UTM
競合サービス	人が運転する自動車および自動運転車（自家用車、ハイヤー、ライドシェア）、通勤電車、地下鉄、バス
2030年のマイルストーン	都市にほぼユビキタス（徒歩3分以内）に駐機スポットを設けると現実的なコストにならない。非常に混雑した都市ではより少ない駐機スポットでもコストに見合う可能性あり。

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



3. eVTOL開発状況

eVTOLの分類と特徴

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

米国のVertical Flight Societyが公開しているeVTOLのサイトによると、現在300機前後のeVTOL機が全世界で開発中。UAMにおいて使用される機体は、

eVTOL (Electric Vertical Takeoff and Landing)

UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

AAV (Advanced Aerial Vehicle)

などと呼ばれている。



基本技術：

- ・複数の電動ファンによる飛行
- ・完全な垂直離着性能
- ・全自動運転（パイロットレスまたはパイロット）
- ・数名程度の旅客を、比較的短距離（100km以下）で輸送

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

eVTOLの基本形態と開発数



個人用（ドローン発展型）
58機種（18%）



マルチコプター型
88機種（27%）



揚力ファン＋推進ファン型
44機種（13%）



推力偏向型
115機種（35%）



電動ヘリコプター
22機種（7%）

Ehang 184&216 (中国)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- 世界で初めて商用eVTOL機体を販売している企業
- 一人乗りと二人乗りがあり、消防用など多用途を提案
- 世界各地でデモフライトや実証実験を行っている
- 集中管理による無人運転

マルチコプター型

Ehang184の仕様

- 8基のモーター
- 16kmのフライト
- 1名乗り
- 130km/h
- 数10機の試作機あり
- 初飛行2016年



Volocopter 2X (EU)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- eVTOL黎明期より開発
- 複数のファンで安全性を確保する設計
- 欧州自動車会社からの多額のファンドを受けている
- シンガポールで世界初のエアタクシー実証試験を実施

マルチコプター型



VC 2Xの仕様

- 18基のモーター
- 30kmのフライト
- 2名乗り
- 100km/h
- 離陸重量450kg
- 初飛行2016年

CityAirbus (EU)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- 実用的な機体性能を検証するための試作機



マルチコプター型

- 100kW x 8基のモーター
- 直径2.8mのプロペラ
- 110kWhバッテリー
- 15分のフライト
- 4名乗り
- 120km/h
- 離陸重量2200kg
- 初飛行2019年

Skydrive SD-03 (日本)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- 日本における空飛ぶクルマ開発のベンチャー企業
- 2020年に有人浮上試験に成功
- 国内の賛助企業・資金調達

マルチコプター型



<https://skydrive2020.com/>

Tetra Aviation (日本)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- 日本のeVTOLベンチャー企業
- Go Fly (1人乗りeVTOLのコンペ) にて優秀賞受賞

マルチコプター型



<https://www.tetra-aviation.com/>

Airbus A³ Vahana (EU/US)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- AirbusがUAMデモンストレーターとして試作した機体



推力偏向型

- 50-100km
- 1-2名乗り
- 200km/h
- 離陸重量815kg
- 初飛行2018年

Bell NEXUS (米国)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- ハイブリッド電動VTOLのコンセプトモデル



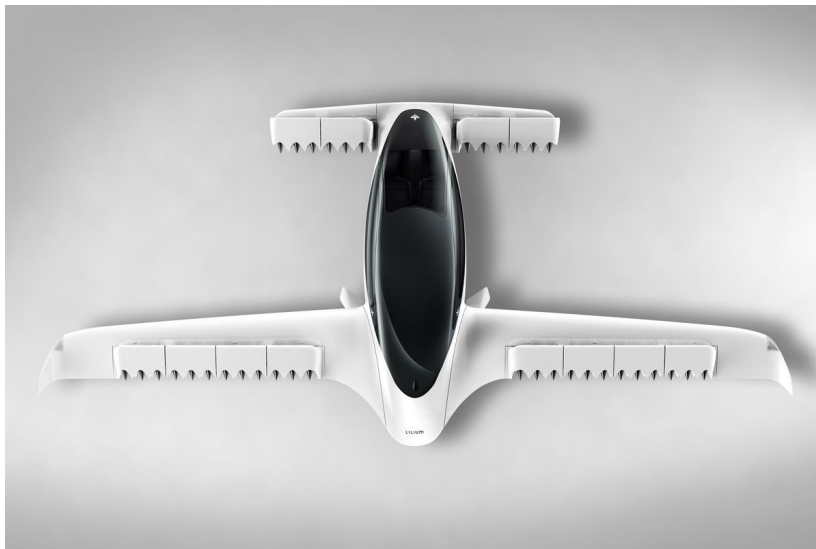
推力偏向型

- 1基のガスタービンエンジンから6つの電動ファンに電源を供給
- 定員5名
- 航続距離240km
- 最大速度288km
- 最大離陸重量2720kg

Lilium Jet (EU)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- 分散型電動推進 (DEP) を用いた推力偏向型eVTOL
- ドイツの学生ベンチャー企業



推力偏向型

- 36基の分散型ファンを翼上に配置 (計320kW)
- 定員2名
- 航続距離300km
- 最大速度300km
- 最大離陸重量640kg
- 初飛行2017年



JOBY S4 (米国)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- 2009年から推力偏向方式の航空機を開発する企業
- UBERが考えるUAMとして「最も完成度が高い」とされる機体
- トヨタが資本参加

推力偏向型

- 6基の推力偏向プロペラを持つ固定翼型の機体
- 定員5名
- 航続距離240km
- 最大速度322km
- 最大離陸重量1815kg
- 初飛行2017年



Boeing PAV (米国)

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

- Lift + Cruise typeと呼ばれるeVTOLの先行例



浮上 + 推進型

- 1基の推進用プロペラと8基の浮上用プロペラで構成
- 定員2名
- 航続距離80km
- 最大速度180km
- 最大離陸重量800kg
- 初飛行2019年

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

WISK Cora (米国)

- eVTOLのベンチャー会社 (Kitty Hawk) とBoeingが立ち上げた新会社
- New Zealandで飛行試験をする計画を発表



浮上 + 推進型

- 1基の推進用プロペラと12基の浮上用プロペラで構成
- 定員2名
- 航続距離100km
- 最大速度180km
- 初飛行2018年

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



4. 法整備の状況

UAMの設計・製造基準

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

UAM (eVTOL)は「航空機」である（世界の共通認識）

耐空証明 ⇒ 安全に飛行できることの証明（車検のようなもの）

型式証明 ⇒ 安全な航空機として開発・量産が行われることの証明

UAMは全く新しい航空機 ⇒ 実現のためにはルール作りが必要。

ベースとなる航空法にあてはまる部分を考慮しつつ、あてはまらない部分を定義する必要がある。

耐空類別	FAA	EASA	JCAB
飛行機	14 CFR Part 23	CS-23	航空法施行規則 付属書・耐空性 審査要領に同様に定義
旅客用飛行機	14 CFR Part 25	CS-25	
回転翼機	14 CFR Part 27	CS-27	
旅客用回転翼機	14 CFR Part 29	CS-29	

FAA: 米国連邦航空局 EASA: 欧州航空安全機関 JCAB: 国土交通省航空局

欧米の状況

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

米国 (FAA)

2017年 14 CFR Part23 の修正

⇒「革新的な技術によって低コストで安全性を高める技術を小型航空機に迅速な適用を促進する」MOC (Means of compliance: 適合性確認方法)を発行。
革新的航空機が「性能ベースで」迅速に認証される道筋を示した。

欧州 (EASA)

2019年 特別要件 (SC) の発行

⇒「小型のVTOL航空機に対する特別条件“SC-VTOL-01:SPECIAL CONDITION Vertical Take-Off and Landing (VTOL)Aircraft”」
機体を2つのクラスに分類して安全基準などを規定した。

製造規格団体

ANSI, ASTM, RTCA, SAEといった製造規格団体が上記権限機関とともにワーキンググループを作って活発に議論をしている。

日本は革新航空機についての法整備は、まだ手付かずの状態。

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

日本の状況

日本は歴史的にも航空に対しては保守的

⇒ 航空機が身近でなく、実運用に慣れていない
UAM開発に関しても周回遅れ

新たな産業創成の可能性

⇒ 2018年「**空の移動革命に向けた官民協議会**」発足
空飛ぶクルマの実現に向けた政府の取り組み開始
実現に向けたロードマップを策定



メンバー)

東京大学、慶應義塾大学、法政大学、JAXA、全航連、日本航空宇宙工業会、Uber Japan、AirX、エアバス・ジャパン、エアモビリティ、ANAホールディングス、オリックス、CARTIVATOR、川崎重工業、自律制御システム研究所、SkyDrive、SUBARU、テトラ・アビエーション、Drone Fund、日本航空、日本電気、プロドローン、ベルヘリコプター、Boeing Japan、ヤマトホールディングス、楽天、経済産業省、国土交通省

https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/air_mobility/index.html

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

空の移動革命に向けたロードマップ

空の移動革命に向けたロードマップ

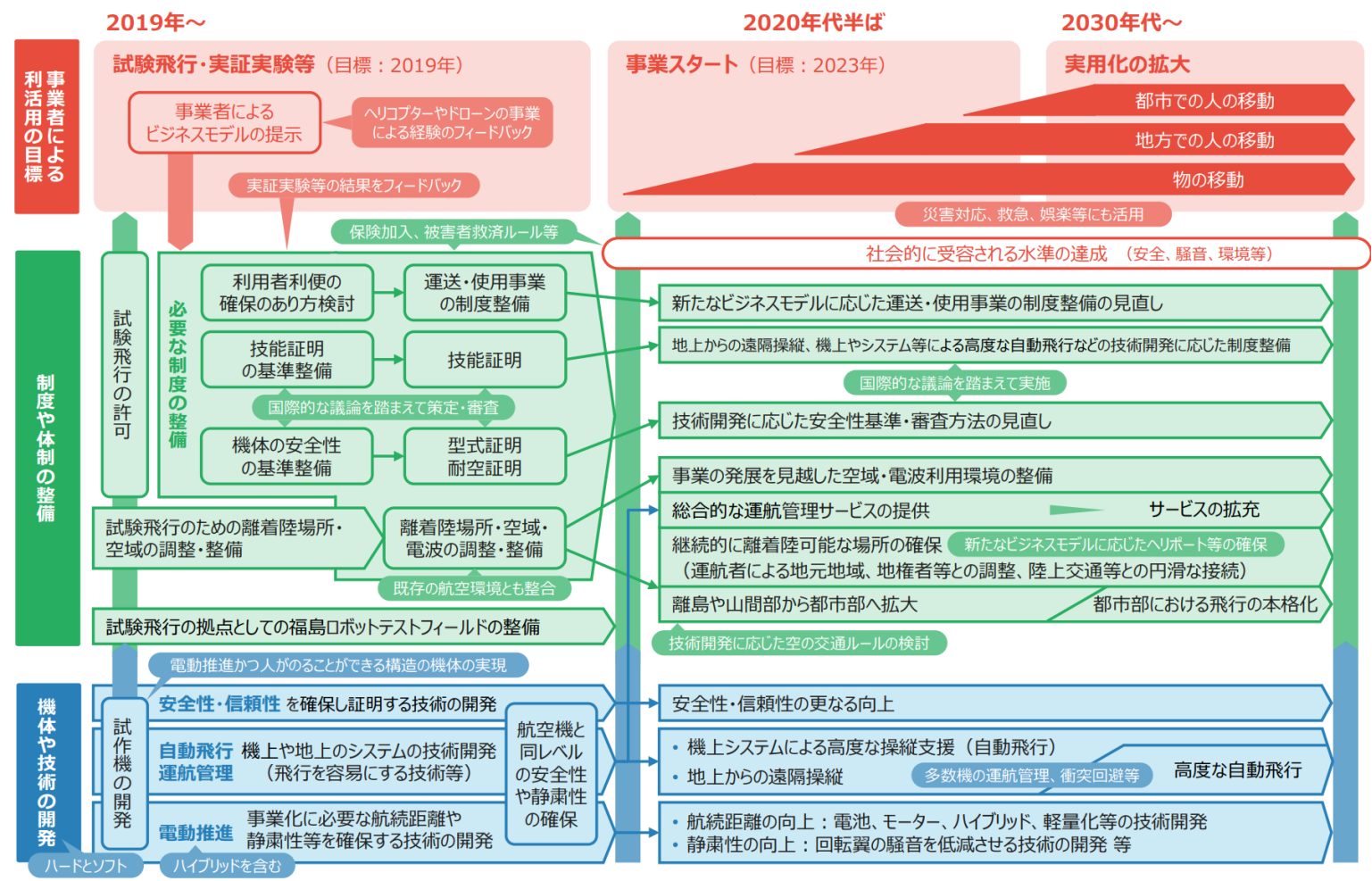
2018年12月20日 空の移動革命に向けた官民協議会

このロードマップは、いわゆる“空飛ぶクルマ”、電動・垂直離着陸型・無操縦者航空機などによる身近で手軽な空の移動手段の実現が、都市や地方における課題の解決につながる可能性に着目し、官民が取り組んでいくべき技術開発や制度整備等についてまとめたものである。
(注)今後、他の輸送機器・機関の開発動向を踏まえ、空の利用に関するグランドデザインが必要になることを留意。

サービス

法体系

技術



2020年度SSDS/JMAC技術講演会



5. eVTOLの設計例

マルチコプター型の仕様検討

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

世界中で開発中のeVTOLは、機体仕様が明確に公開されていない

⇒ 要素技術（モーター・バッテリーなど）が発展途上のため

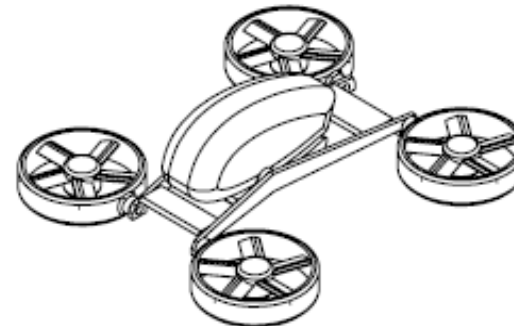
⇒ マルチコプター型eVTOLの基礎検討

eVTOL仕様)

- 機体サイズ： 小型ヘリコプター（Robinson Helicopter R44）と同等
- 最大離陸重量： 1000kg
- ペイロード： 200kg（2名の乗員（77kg×2）と荷物（46kg））
- Li-ionバッテリー： 300kg（54kWh）
- 機体重量： 500kg



**4人乗り
内燃機関**



**2人乗り
電動推進**

ファン構成とモーター出力

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

ファンの空力相似則により、ヘリコプターとeVTOLの構成を比較してみる。
ヘリコプターのローター1個とeVTOLのファンN個の総合推力が等しくなるように、そのときのモーター出力を求める（ファン空力効率は同等とする）。

- 小型ヘリコプター（Robinson R44相当）

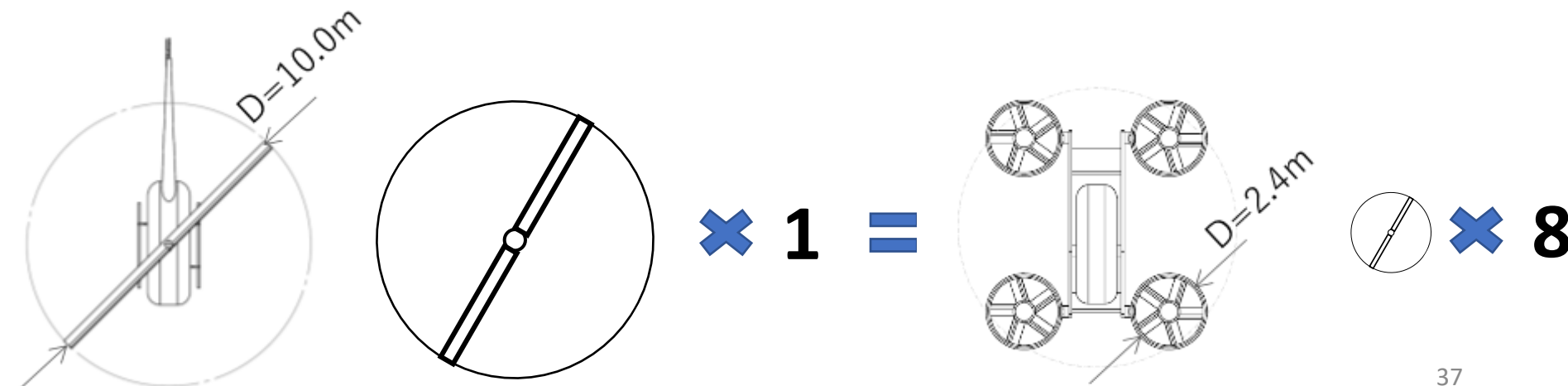
⇒ ローター径10m, 回転数 $N=400\text{rpm}$, モーター 1 基の出力130kW程度

- マルチコプター（MM-18相当）

⇒ ローター径2.45m, 回転数 $N=2400\text{rpm}$, モーター8基の出力190kW程度（**147%**）

54kWhバッテリーでの飛行時間：17分（**10 - 20%**）

ローター周速度上昇による騒音上昇の懸念



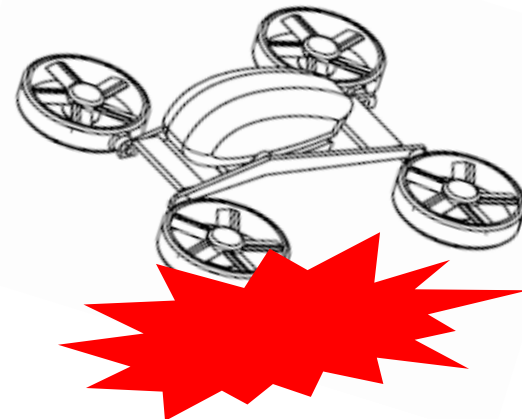
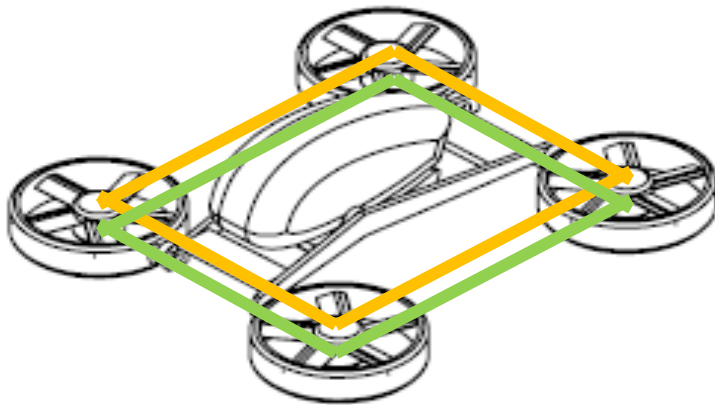
機体構成

原動機不発動（故障）時の安全性について

- ⇒ 飛行機は滑空、ヘリコプターはオートローテーションにより不時着が可能
- ⇒ マルチコプターはシステム冗長性で対応するしかない

対衝突安全性について

- ⇒ 低高度飛行のため、機体パラシュートは効果が少ない
自動車に比べて圧倒的に華奢、衝撃軽減構造を突き詰める必要あり



推力偏向型

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

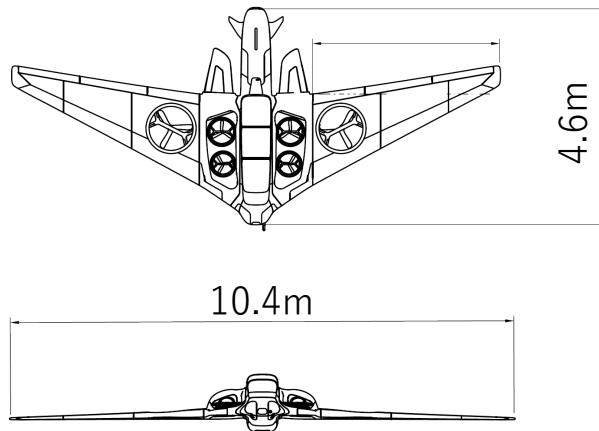
マルチコプター方式の欠点

⇒ 常に自重を支える垂直推力が必要・故障時の安全性が低い

飛行機＋推力偏向型

⇒ 巡行時は翼の揚力により飛行（高速化、エネルギー効率向上）

⇒ より航空機に近い乗り物（設計も）



2020年度SSDS/JMAC技術講演会

電動ヘリコプター型

ヘリコプターの電動化

- ⇒ eVTOLユースケース： 在来のヘリコプターでほとんど実現可能
- ⇒ ヘリコプターの欠点： エミッション、騒音、運航コストなど
- ⇒ 小型ヘリコプターであれば既存技術で電動化可能
- ⇒ eVTOL早期実現の手段として注目



<https://www.uber.com/jp/ja/ride/uber-copter/>



<https://www.tier1engineering.com/>

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



6. UAM実現に向けて

技術的課題

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

バッテリー技術

- ⇒ 重い（バッテリーが機体重量の1/3以上を占める）
危険（発火・爆発のリスク）
コスト

機体技術

- ⇒ ローコスト軽量化（自動車並みのコストで航空機並みの軽量化を）
eVTOL空力設計・電動推進
受動安全（乗客および機外へのインパクト）
型式証明、耐空証明プロセス

運航管理技術（UTM）

- ⇒ 全自動で高密度運航（運航管理＋自律回避）
5G通信、GNSS、非GPSによるポジショニング
オンデマンド運航

環境技術

- ⇒ 騒音低減、ブラスト（排気風）、景観

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

自動車技術との関係

UAM = 航空機 + 自動車 + ドローン + . . . ?

- “CASE”
- 民間主導による設計製造基準 (SAE, ASTM...)
- 軽量化
- 電動化
- 能動安全・受動安全
- エミッション
- NVH
- 自動運転 (オンデマンド) 技術
- Mobility as a Service (MaaS)
-



<https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/release-9a25e30b2d7b554dc8a1273e7f005c30-160201-01-j>

日本の自動車メーカー、部品メーカーには参入機会が十分にあるが . . .

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

騒音振動の観点から

小型ヘリコプター（Robinson R44）の騒音レベル

- ⇒ 高度150mを飛行 81dB(A)
音響パワーレベル 135dB

eVTOLの許容騒音レベル目標（UBER）

- ⇒ 高度250ft（80m）を飛行 67dB(A)
（約8m離れて50km/hで通過するプリウスの騒音と同等）
音響パワーレベル 116dB



騒音評価法

- ⇒ 現在の航空機騒音評価は、空港に離発着する大型機が対象
eVTOLは、自動車のように飛び回り、上空（低空）から放射する騒音
音質の変化（BVI noise パタパタ ⇒ Fan noise ブーン）

騒音規制

- ⇒ 機体の音響パワーによるラベリング、運航規制など
昼夜の変化など

2020年度SSDS/JMAC技術講演会



7. おわりに

まとめ

2020年度SSDS/JMAC技術講演会

UAM = まったく新しい交通機関

- ⇒ 実現にはまだ時間がかかる（2030年は困難？）
空飛ぶクルマ（究極の自動車）になる

UAMは航空機である

- ⇒ 日本は航空機開発は苦手
海外と日本の航空文化の違い

日本にUAMは普及するか

- ⇒ SAM（郊外型）、RAM（レジャー用）などの経験も必要

UAM実現の技術的課題

- ⇒ 電動化はモビリティ分野の共通課題
航空機レベルの安全性
インフラも含めた自動制御
空力騒音・振動



2020年度SSDS/JMAC技術講演会



ご清聴ありがとうございました。