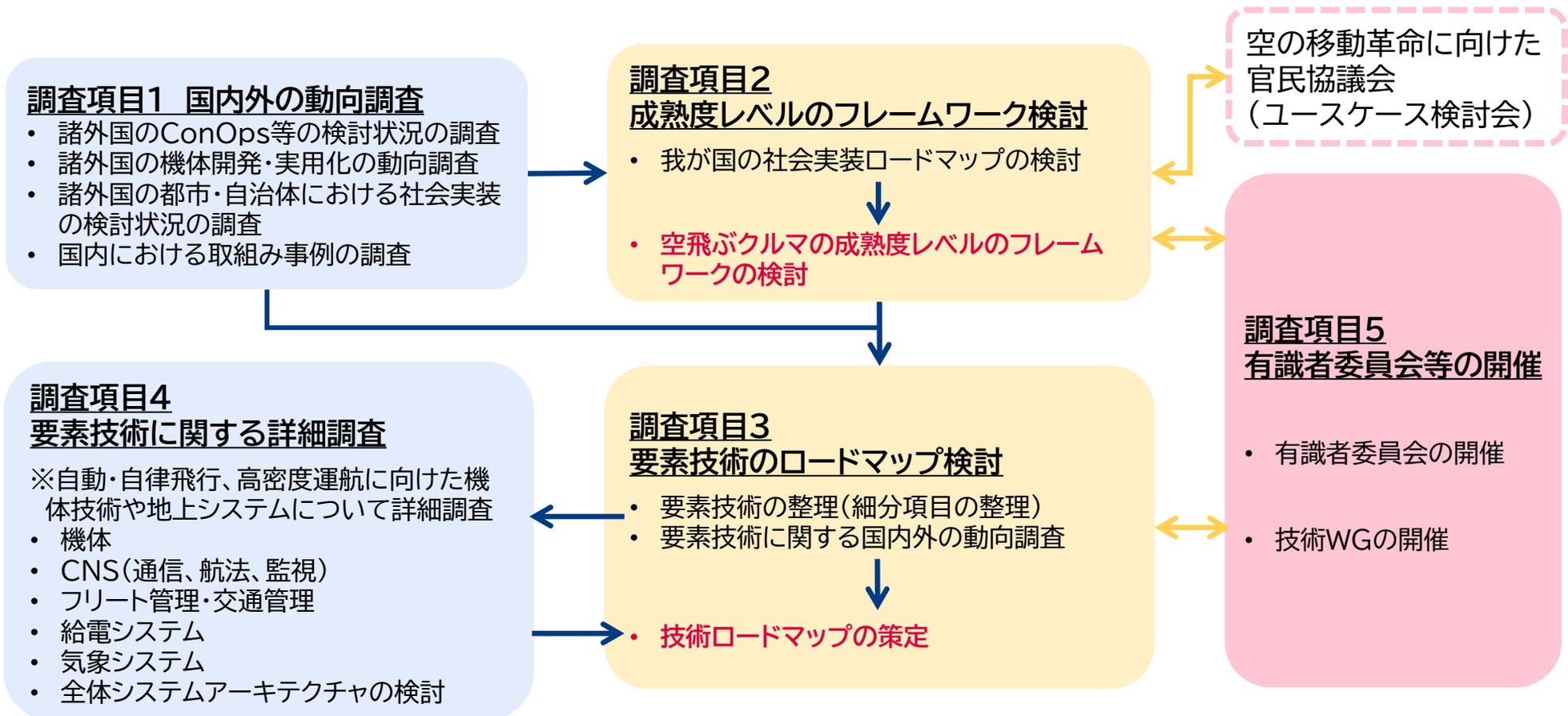


「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の 実現プロジェクト／空飛ぶクルマの先導調査研究」 成果報告会

テーマ③ 空飛ぶクルマの社会実装に向けた要素技術調査

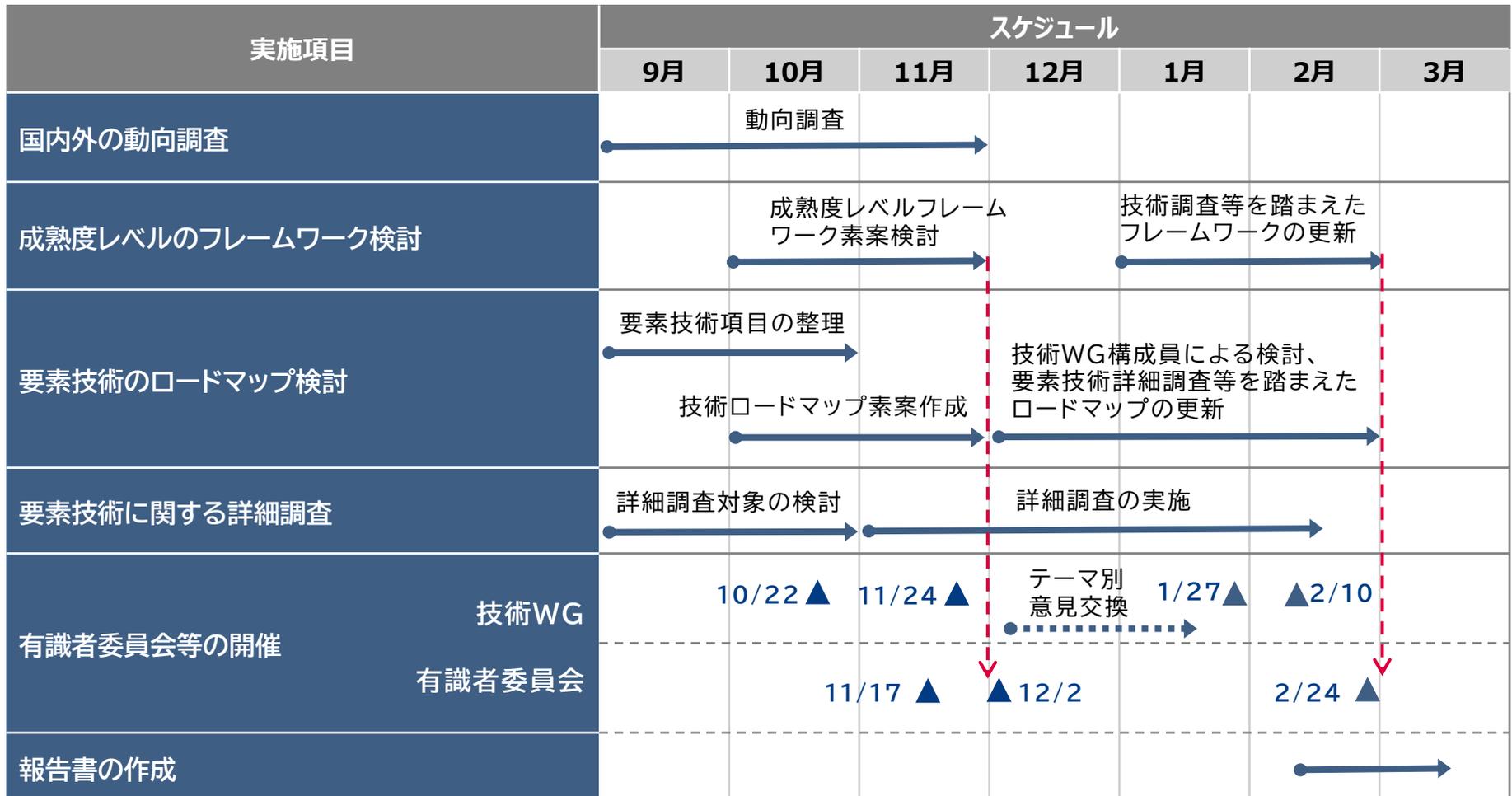
目的と実施概要

空飛ぶクルマの将来的な社会実装に向け、官民協議会のユースケース検討会の状況などを踏まえ、日本における空飛ぶクルマの成熟度レベルのフレームワークを策定する。その結果を踏まえ、将来の自動・自律飛行、高密度運航の実現に向けた要素技術を整理すると共に、各成熟度レベルにおける各要素技術の要求値を検討し、技術ロードマップとして取りまとめる。



スケジュール

11月までに成熟度レベルのフレームワーク、要素技術のロードマップの素案を作成。その後、技術WGにおける検討や要素技術に関する詳細調査の結果を踏まえて更新し、2月末に取りまとめた。



NASA Vision ConOps—UAM Maturity Levels

2020年5月、NASAはUAMエコシステムの成熟度を6つのレベルに整理。整理の観点は以下の3つ。

- ① **トラフィック密度**
- ② **運航の複雑性**(主要UAM空港における潜在的な最大キャパシティー、気象への耐性、UAM空港の分布・数、他の機体タイプ(有人機・UAS)との統合、運航の統合等の要因による組み合わせ)
- ③ **自動化への依存度**(UAMシステム内の自動化システムの責任範囲)

UML-1	機体認証試験における最終ステージであり、制限された環境下で運航の実証実験を実施 プロトタイプ機による機体認証に係る試験や運航の実証試験;将来の空域運航管理に係る手順・技術面のイノベーション(UTMインスパイア等);コミュニティー/市場のデモやデータ収集
UML-2	補助的な自動運航管理機能を用い、低レベルの密度・複雑性で商用運航を実施 型式認証の取得;Part 135の事業者認定の取得;好条件の気象や制度環境下での限定的なマーケット;都市部周辺での小規模なUAMネットワーク;UTMの構築と管制空域内での自己管理型の運航をサポートするUAMルートの設定
UML-3	安全確保のための包括的な自動運航管理機能を用い、低密度で中レベルの複雑な商用運航を実施 都市部の中心に運航が拡大;スケーラブルで悪天候に対応した運航のための、UTMにインスパイアされたATM、CNSI、C2および自動化機能を含む、高度な空域管理機能の実証;スケーラブルで悪天候に対応した運航;少数の高キャパシティー空港;都市環境に準拠した騒音レベル;モデルとなるローカル制度
UML-4	協調型・応答型の自動運航管理機能を用い、中レベルの密度・複雑性で商用運航を実施 100の同時運航;近接するハイスループット空港を含む拡大ネットワーク;多数のUTMインスパイアATMサービスの出現;Simplified Aircraft Operation;視界の悪い環境での運航
UML-5	高度に統合された自動化ネットワークを用い、高レベルの密度・複雑性で商用運航を実施 1000の同時運航;大規模・高度に分散したネットワーク;高密度UTMインスパイアのATM;自律・遠隔操縦飛行の機体;フリーとマネジメント;アイシング対応を含む高度な耐気象環境、大量生産
UML-6	システムワイドな自動最適化機能を用い、ユビキタスに運航を実施 10,000の同時運航;アドホックな着陸地点;郊外での運航環境に準拠した騒音レベル;個人所有が可能;社会の期待(Expectation)の成熟

(参考)UMLにおける自動化レベルの定義

Human-within-the-Loop (HWTL)	<ul style="list-style-type: none"> 人間が常時オートメーション(システム)を直接的にコントロールする。
Human-on-the-Loop (HOTL)	<ul style="list-style-type: none"> 人間がオートメーション(システム)を監督的にコントロールする。 人間が積極的にシステムのモニタリングを行い、必要OR望ましいと考えられる場合にフルコントロールをとることができる。
Human-over-the-Loop (HOVTL)	<ul style="list-style-type: none"> 人間は、オートメーション(システム)により、アクションを起こすよう通知OR関与される。 人間は受動的にシステムのモニタリングを行い、必要が生じた際に、どのようなアクションが必要かについて自動で通知される。 人間は、調停のできない例外事態、もしくはエスカレーションルールの一環として、オートメーションにより関与させられる。
Assistive	<ul style="list-style-type: none"> 自動化レベルは低く、統合も限定的で、運航の安全に対しては人間が全責任を負う。
Comprehensive safety assurance level	<ul style="list-style-type: none"> 運航の安全にとって重要なモニタリング機能やシステム内の多岐にわたる特定ハザードの軽減のための介入措置(地上への衝突防止、トラフィックの衝突防止等)を提供し、システムの安全性を著しく強化するが、運航の安全はまだ人間が全責任を負う。
Collaborative and responsible automation level	<ul style="list-style-type: none"> 人間による監視や自動化機能の不具合に対する対応が不要になるほどの自動化機能のレベルが担保されているレベル。 システムにおける人間の技能要件は、上記自動化機能のケーパビリティに基づく再定義が想定される。 ただし、本レベルにおいても、システムの安全性とレジリエンスを担保するにあたって、人間による全体の監督が引き続き必要であり、機体に搭乗している場合においても、搭乗していない場合においても、パイロットは一对一で個別機体の監督を行うことが求められる。
Highly-integrated automated networks	<ul style="list-style-type: none"> リアルタイムの人間の関与が必要ないレベル。 運航の性能や効率は人間による受動的な監督や介入により改善される可能性があるが、安全確保の観点では必要ではない。
System-wide optimization	<ul style="list-style-type: none"> 人間による監督も介入も必要なく、安全のみならず効率の観点でシステムが運用される。

欧州SESAR AMU-LEDプロジェクト-UAMの展開イメージ

2021年3月、SESARは、初期的なU-spaceサービスが実装された環境下でUAMが運航される将来をターゲットとした展開イメージを整理。整理の観点は、**運航の複雑性、アクター、空域構成・有人機との統合、U-space/UAMサービス、制度・規格、インフラ・技術**

要素	短期(~2025)	中期(2025~2030)	長期(2030~)
運航の複雑性	<ul style="list-style-type: none"> VLOS&第三者目視外飛行のスタンダードシナリオ (Specificカテゴリー) Standard Performing Vehicles (SPVs) 低密度運航、低リスクロケーション 準自動運航 (HWTL※) 	<ul style="list-style-type: none"> SPVの都市部目視外飛行におけるHOTL※ 一対複数のフリート運航 認証済みHigh Performing Vehicle (HPV): 操縦士が搭乗してのエアタクシー運航やカーゴ物流 中密度運航 エアタクシーの自動化レベルは有人ヘリと同等 	<ul style="list-style-type: none"> 高密度・複雑シナリオ 遠隔操縦もしくは自律型HPV (HOVTL※)
アクター	<ul style="list-style-type: none"> USSP及び共通情報サービスプロバイダ (CIP) オペレータ/機長 (PIC) ANSP 国家及び地方政府 	<ul style="list-style-type: none"> HPVの運航管理のための認定USSP パーティポートオペレータ フリートマネージャー 	<ul style="list-style-type: none"> 統合的な空域管理のための CIS/USSP/ANSPの発展
空域構成、有人機との統合	<ul style="list-style-type: none"> U-space空域 動的空域制限 他機体はU-space内で電子的に認知 空域分離 	<ul style="list-style-type: none"> 提供されるサービスに基づき空域をXYZに区分 HPVにはトランジションコリドーも設定 パーティポートから/への動的空域制限 空域分離/部分的な統合 	<ul style="list-style-type: none"> フリールート/完全統合 全機体を送受信を行う (V2V DAA)
U-space/UAMサービス	<ul style="list-style-type: none"> CISサービス (航空情報) 登録、ネットワークID 空域把握 (一時制限等) 飛行許可 トラフィック情報 (無人&有人機) 気象情報 (オブショナル) 遵守モニタリング (オブショナル) 	<ul style="list-style-type: none"> トラッキング&サーベイランス 動的ジオフェンシング 初期的な戦術的衝突回避 運航計画のプロセッシング/リスク評価支援 緊急時管理 ナビゲーション&通信情報 ATCとの手順面でのインターフェース HPVのための新サービス (パーティポート管理等) 	<ul style="list-style-type: none"> 動的キャパシティ制限 戦術的衝突回避 ATCとの共同的なインターフェース 高度に自動化された運航管理
制度・規格	<ul style="list-style-type: none"> EU規則2019/945&947 EU規則2020/639&1058 U-spaceに関する新EU規則 EU規則2019/947における新スタンダードシナリオ UAS&VTOLに対する新CS・SC 短期のサービス規格 USS間、USS-ATM間の互換性に関する技術基準 	<ul style="list-style-type: none"> Certifiedカテゴリーのための新規制 追加的なカテゴリー・サービス・アクターを統合するための新規制 自動飛行を行うUAS&VTOLのためのSC 中長期のサービス規格 SPV・HPVの統合のための安全評価手順の発展 ATCのU-spaceとのインターフェースを確保するためのATMフレームワークの更新 (SWIM等の通信プロトコル含む) 	<ul style="list-style-type: none"> U-spaceのための標準規格フレームワークの完成 ATC-U-spaceインターフェースの制度化 V2V DAAのための制度 自動飛行を行うUAS&VTOLのためのCS
インフラ・技術	<ul style="list-style-type: none"> 既存のCNSインフラの活用 新CNSインフラの初期導入 (例、5G等) 	<ul style="list-style-type: none"> HPVのための既存のヘリコプター・空港インフラの活用 特定の地上インフラ (パーティポート等) の初期導入 パーティポート周辺における特定CNSインフラの整備 コネクテッドカー等他のインフラの潜在的な活用 	<ul style="list-style-type: none"> 都市部での地上インフラの統合

※機体の自動化レベルは、Human within the Loop→Human on the Loop→Human over the loopの3段階で進むと整理されている。

成熟度レベルのフレームワークの検討方針(1/2)

● 検討の目的

- 多様な空飛ぶクルマの社会実装を実現するために必要な技術の成熟段階を、「成熟度レベルのフレームワーク」として整理。
- 空飛ぶクルマの技術開発の現状把握や今後の目標設定を行う際に、機体や装備品、周辺システムといった様々な技術領域を包含する統一的な“ものさし”として活用。

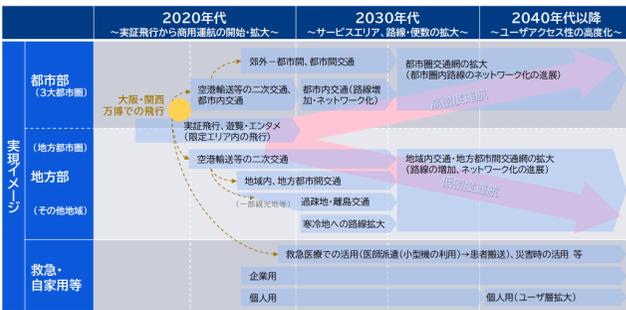
● 検討方針

- 諸外国の検討成果を踏まえて検討。特にNASAで開発されたUAM Maturity Levels(UML)を参考とし、UMLとの整合性を考慮。
 - 自動化の進展、運航の複雑性、運航頻度等の複数の観点により、6段階の成熟度レベルを定義。
- 我が国における空飛ぶクルマの社会実装検討への適用性を考慮。特に、都市部、地方部、離島・過疎地の代表的なユースケースの特性や技術要求を考慮したフレームワークを検討。
 - ユースケースに共通の基本要素、3つのユースケース毎の要素、の組合せにより、成熟度レベルのフレームワークを設定。
- 各成熟度レベルの実現時期については設定しない。また、要素技術ロードマップ検討に資する前提条件として整理。

成熟度レベルのフレームワークの検討方針(2/2)

空の移動革命に向けた官民協議会
ユースケース検討会で検討された、
我が国の中長期的なユースケース

- 3大都市(エアタクシー・2次交通等)
- 地方都市(地方都市間交通等)
- その他地域(離島・過疎地交通等)



<成熟度レベルのフレームワーク>

成熟度レベル		1	2	3	4	5	6
共通要素	自動化 空域利用 離着陸場所	低 低 DID外	低 低 DID外	中 中 DID内	中 中高 DID内	高 高 DID内	高 高 DID内
3大都市ユース ケースの要素	運航密度 ポート 運航環境	低 低 低	低 低 中	低 中 中	中 中 中高	高 高 中高	最高 最高 中高
地方都市ユース ケースの要素	運航密度 ポート 運航環境	低 低 低	低 低 中	低 低 高	低 中 高	中 中 最高	中 中 最高
離島・過疎地ユース ケースの要素	運航密度 ポート 運航環境	低 低 低	低 低 中	低 低 高	低 低 高	低 中 最高	低 中 最高

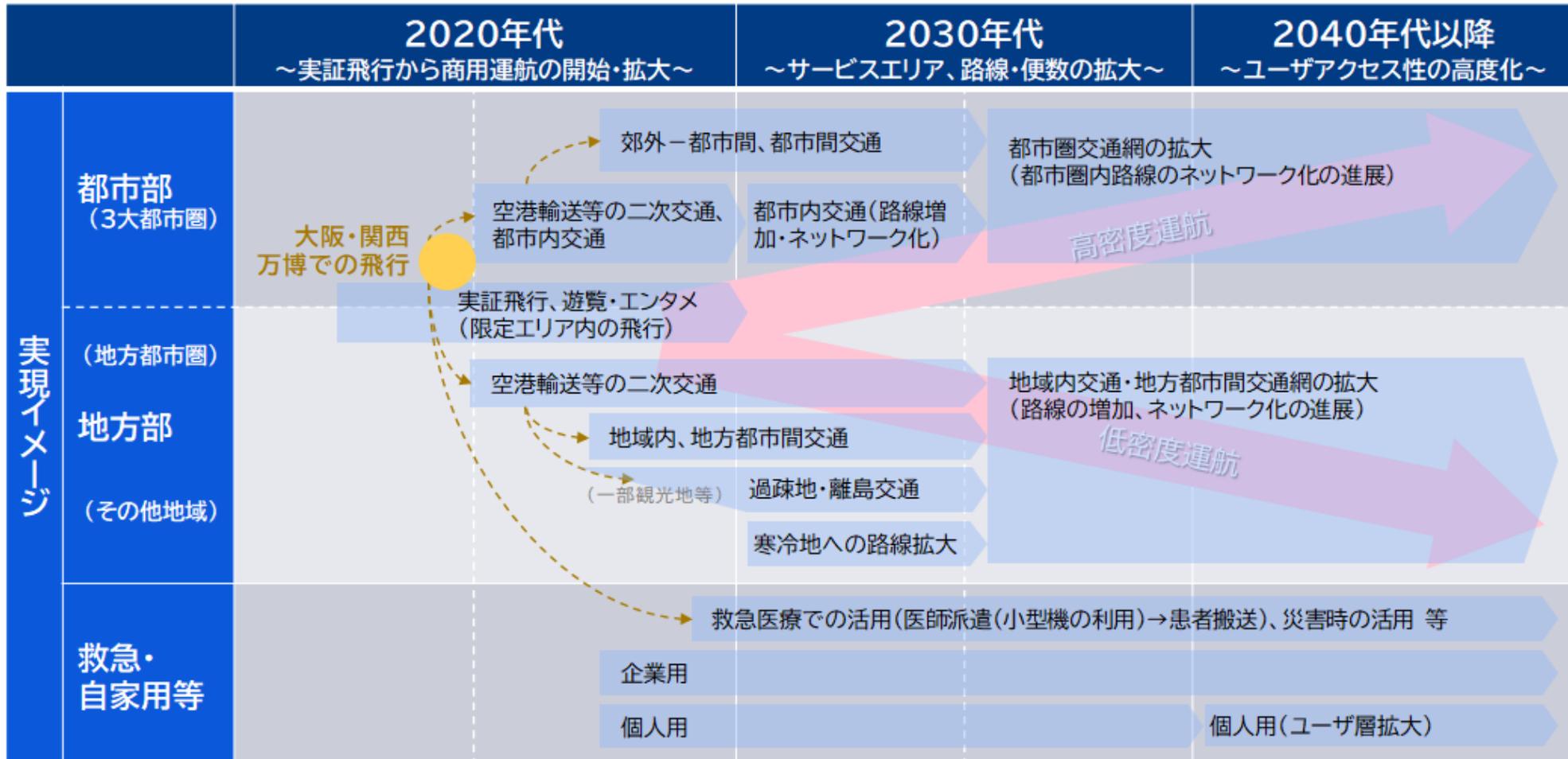
成熟度レベルを実現するための
要素技術の要求値と技術方式

<要素技術のロードマップ>

成熟度レベル		1	2	3	4	5	6
機体	機体仕様 自動化機能...	...	...	...	...	...	...
動力	出力密度...	...	...	...	...	...	...
通信	通信速度...	...	...	...	...	...	...
...

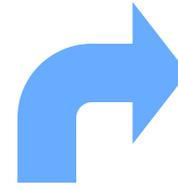
空飛ぶクルマの中長期的な実現イメージ

- 空の移動革命に向けた官民協議会「ユースケース検討会」において、中長期的な実現イメージを検討。
- 都市部(3大都市圏)、地方部(地方都市圏、その他地域)のニーズや特性に応じたユースケースが展開。



成熟度レベルに対応した実現イメージ

成熟度レベルの向上により、運航に対する人の関与が低減し、特に都市部では運航密度が向上。より身近な、日常生活に近い場所における利用が進展。



成熟度レベル6のイメージ

- 人の関与が不要な自律飛行が可能となり、自由な空の移動が実現
- 住宅近隣など、身近な場所からいつでも空飛ぶクルマの利用が可能
- 旅客輸送サービスに加え、個人による自家用機の利用も進展



成熟度レベル4のイメージ

- 都市部での高密度な運航の実現、空飛ぶクルマ専用区域の飛行
- 自動化が進展し、パイロットは搭乗せず遠隔から監視・制御
- ビル屋上に離着陸場が多数設置、大規模空港にも効率的に乗り入れ



成熟度レベル2のイメージ

成熟度レベルの基本要素

成熟度レベル		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
自動化の進展	人の関与の程度	Human within the loop		Human on the loop		Human over the loop	
	機上パイロットの有無	–	Assistive	Comprehensive safety assurance	Collaborative and responsible automation	Highly-integrated automated networks	System-wide optimization
空域利用の進展	気象状態	VMC限定	VMC中心(一部緩和)	IMC相当			
	空域利用	<ul style="list-style-type: none"> 空域分離された限定エリア内の運航 	<ul style="list-style-type: none"> 従来方式・手順(VFR)を原則、一部修正 ATMとの通信は従来通り 	<ul style="list-style-type: none"> 従来方式・手順(IMC対応可)を原則、一部修正 サービスプロバイダによる運航調整の導入 	<ul style="list-style-type: none"> サービスプロバイダによるATM・UTMとの連携と交通管理の開始 高リスク空域への効率的な進入 	<ul style="list-style-type: none"> ATM・UTMとの高度な連携 自動化された交通管理・空域管理 	<ul style="list-style-type: none"> 他の航空機、無人航空機等との自律的なコンフリクト解消
離着陸場所の進展	人口密集地外(既存ヘリポート等、港湾部への新規設置等)	人口密集地外(既存ヘリポート等、港湾部や観光地への新規設置等)	人口密集地内(ユーザの集まる交通・観光拠点等への拡大、建物屋上を含む)	人口密集地内(商業・オフィスエリア等への拡大)	人口密集地内(ユーザの多い居住エリア内の拠点等、日常生活圏への拡大)	人口密集地内(住宅地近隣を含め、日常生活圏への統合)	
機体価格		高		中(製造効率化↓ + 高機能化↑)		低	最低(大衆化へ)
安全性(TLS)		–	VFR機/GAと同等程度以上(段階的に向上)				

エアタクシー/2次交通(主に3大都市)の要素

成熟度レベル	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
概要	<ul style="list-style-type: none"> 都市沿岸部等、限定エリアでの実証飛行 	<ul style="list-style-type: none"> 少数の2地点間路線における低頻度の商用運航 	<ul style="list-style-type: none"> 路線数の増加、長距離化・ネットワーク化 定時性・就航率の向上 ビル屋上ポートの増加 	<ul style="list-style-type: none"> 既存の大規模空港への効率的な運航 路線密度・運航頻度の増加 システムの自動化レベル向上 大人数乗り機体の利用 	<ul style="list-style-type: none"> 商業地を中心にポート数の増加と一部の居住エリアへの導入によるユーザアクセス性の向上 	<ul style="list-style-type: none"> 住宅近隣を含めたポート数の更なる増加とユーザアクセス性の向上
運航密度	低			中	高	最高
ポート	数	少	中		高	最高
	容量	低	中(一部高)		高	
運航サービス価格	—	高	中	低(大衆化へ)		
飛行環境	移動距離	短	中		中(一部長)	
	環境条件	(VMCでの運航)	(VMC中心での運航)	IMC相当での運航、運航条件の拡大(夜間飛行等)	運航条件の拡大(凍結気象状態等)	

エアタクシー/2次交通(全国の地方都市)の要素

成熟度レベル		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
概要		<ul style="list-style-type: none"> 限定エリアでの実証飛行 	<ul style="list-style-type: none"> 少数の2地点間路線における低頻度の商用運航 	<ul style="list-style-type: none"> 路線数の増加、長距離化・ネットワーク化 定時性・就航率の向上 ビル屋上ポートの増加 自家用機の導入 	<ul style="list-style-type: none"> 既存の大規模空港への効率的な運航 導入地域の増加 システムの自動化レベル向上 	<ul style="list-style-type: none"> 商業地を中心にポート数の増加と一部の居住エリアへの導入によるユーザアクセス性の向上 自家用機の本格運用 	<ul style="list-style-type: none"> 住宅近隣を含めたポート数の増加とユーザアクセス性の向上 自動車との統合型機体の運用
運航密度		低				中	
ポート	数	少			中		
	容量	低			中(一部高)		
	無人運用	-			無人化		
運航サービス価格		-	高	中		低(大衆化へ)	
飛行環境	移動距離	短	中	長		超長	
	環境条件	(VMCでの運航)	(VMC中心での運航)	IMC相当での運航、運航条件の拡大(凍結気象状態等)			

※青字は「エアタクシー/2次交通(主に3大都市)」と異なる箇所

離島・過疎地交通の要素

成熟度レベル		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
概要		<ul style="list-style-type: none"> 限定エリアでの実証飛行 	<ul style="list-style-type: none"> 少数の2地点間路線における低頻度の商用運航 	<ul style="list-style-type: none"> 路線数の増加、長距離化・ネットワーク化 定時性・就航率の確保 自家用機の導入 	<ul style="list-style-type: none"> 導入地域の増加、長距離化 システムの自動化レベル向上 	<ul style="list-style-type: none"> 住宅近隣を含めた居住エリアへのポート導入によるユーザアクセス性の向上 自家用機の本格運用 自動車との統合型機体の運用 	
運航密度		低					
ポート	数	少				中	
	容量	低				中(一部高)	
	無人運用	—				無人化	
運航サービス価格		—	高	中 (社会インフラコスト維持低減を考慮したサービス価格低減)		低 (他地域を含めたトータルコスト低減によるサービス価格低減)	
飛行環境	移動距離	短	中	長		超長	
	環境条件	(VMCでの運航)	(VMC中心での運航)	IMC相当での運航、運航条件の拡大(凍結気象状態等)			

※青字は「エアタクシー/2次交通(主に3大都市)」と異なる箇所

成熟度レベルに対応した運航イメージ

飛行環境

成熟度レベル	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
空域	<ul style="list-style-type: none"> 非管制区域 	<ul style="list-style-type: none"> 非管制区域／管制区域 コリドー(空港周辺のみ) 	<ul style="list-style-type: none"> 非管制区域／管制区域 コリドー(ルート全体) 	<ul style="list-style-type: none"> “空飛ぶクルマ飛行区域”(コリドーが一定空域に拡大) 非管制区域／管制区域 	<ul style="list-style-type: none"> 主に“空飛ぶクルマ飛行区域” 	
VFR機/UASとの混在	予め空域分離	VFR機やUASと混在	コリドー内はVFR機含め一定ルールに基づき飛行、UASとはPSUを通じ調整済			

エアタクシー/2次交通(主に3大都市)に関する運航イメージ

成熟度レベル	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
就航率	60～80%	80～90%	90～95%	95～99%	99%超	
離着陸頻度	30～60分間隔	5～15分間隔	2～5分間隔	1～2分間隔	1分間隔以下	
運航規模(機体数)	エリアで1～2機	都市圏で十数機	都市圏で数十～百機	都市圏で数百～千機	都市圏で千～数千機	都市圏で数千～数万機
移動距離	～10km程度	～50km程度		～80km程度		

地方都市間交通/2次交通(全国の地方都市)、離島・過疎地交通に関する運航イメージ

成熟度レベル	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
就航率	60～80%	80～90%	90～95%	95～99%	99%超	
離着陸頻度	30～60分間隔			15～30分間隔	15分間隔以下	
運航規模(機体数)	エリアで1～2機	エリアで数機	エリアで数十機	エリアで数十機～百機	エリアで百～百数十機	エリアで百数十以上
移動距離	～10km程度	～50km程度	～100km程度		～200km程度	

要素技術のロードマップ策定の前提条件

- 空飛ぶクルマの“成熟度レベル”に対する要素技術の要求値を整理する。
- 各成熟度レベルにおける要素技術のTRLは、実証段階の成熟度レベル1を除き、TRL9を前提とする。
- 安全性等の認証については、各成熟度レベルにおいて、各要素技術は、認証を取得可能な技術レベルが実現されていることを前提とする。

※TRL:Technology readiness levels

要素技術の整理

技術項目		整理対象の技術・方式例
機体		Multirotor、Tiltrotor
動力		モータ、ギヤ、インバータ、冷却機構
電源	蓄電	LiB、Advanced LiB、Beyond LiB
	発電	燃料電池、エンジン発電機
装備品	CNS装備品	通信、航法、監視
	FMS	—
	制御システム	—
	DAA(衝突回避)	協調方式、非協調方式、対地接近
	クラッシュワージネス	座席、フローティング、姿勢安定・降下率低減
製造技術	構造材料	熱硬化材／熱可塑性材、オートクレーブ／プレス成形
	アセンブリ技術	ファスナー、熱可塑性・熱硬化、溶着
CNS (通信・航法・監視)	通信	航空通信、衛星通信、HAPS、セルラー、RFネットワーク、C帯(航空移動)
	航法	GNSS、SBAS/GBAS、PNT、RFビーコン、地形・地上構造物データベース
	監視	二次レーダ、一次レーダ、マルチラテレーション、IRセンサ、音響センサ
地上システム	交通管理システム	交通流管理、ポート管制、空域管制
	フリート管理システム	飛行計画、情報管理、フライトウォッチ、スケジュール管理
	給電システム	コンダクティブ充電、電池交換充電、非接触充電
	気象システム	情報(視程、雲底、風、雨、CB)、情報ソース(観測、予測)、情報連携
	3Dマップ	情報(動的データ、仮想データ、障害物情報、地図情報)

機体のロードマップ

- 成熟度レベル4以降は移動距離の延伸(非常時対応を含む)や乗客数の増加への対応を考慮。
- 成熟度に対応した自動化レベルの定義を踏まえてパイロットタスクの自動化レベルを整理。

機体要求仕様(概略)		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
マルチロータ	座席数	2人	2人	5人	←	←	←
	航続距離	10km	50km	100km	←	←	←
ティルトロータ	座席数	—	5人	5人	5人/16人	5人/16人	5人/16人
	航続距離	—	50km	100km	200km	400km	600km

自動化機能	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
テクニカルスキル	Secondary	Primary	Primary	FA	FA	FA
周辺監視・回避	—	Secondary	Primary	Primary	FA	FA
航法	Secondary	Secondary	Primary	FA	FA	FA
機体システム管理	Secondary	Secondary	Primary	Primary	FA	FA
飛行計画	—	Secondary	Primary	Primary	FA	FA
運航判断	—	—	Secondary	Primary	FA	FA
離着陸判断・操作	Secondary	Secondary	Primary	Primary	FA	FA
緊急操作手順	—	Secondary	Secondary	Primary	FA	FA
飛行前確認	—	—	—	Secondary	Primary	FA
通信	—	—	Secondary	Primary	Primary	FA
離着陸手順(管制とのやり取り)	—	—	Secondary	Primary	Primary	FA
乗客管理	—	—	Secondary	Primary	FA	FA

動力のロードマップ

- 各成熟度レベルの機体要求仕様に対応した動力性能の一例を、機体方式毎に整理。
- 出力密度@短期、はフェイルセーフを想定しフェイル時のホバリング時間(120秒)を念頭に設定。
- フェイル時の短期出力への対応、発熱に対する冷却機構の検討が技術課題。

マルチロータ例(18ロータ想定)		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
要求値	出力密度(kW/kg) @短期	2.0	3.5	4.8	←	←	←
	出力密度(kW/kg) @定格	1.2	2.1	2.9	←	←	←
	システムの平均効率(%)	90	90	95	←	←	←
	寿命(作動時間)	350	1,250	5,000	←	←	←
方式	モータ	(ラジアル)	(ラジアル/ アキシヤル)	(アキシヤル)	←	←	←
	インバータ	(Si)	(SiC)	(SiC)	←	←	←
	冷却機構	(水冷/空冷)	(水冷/空冷)	(空冷)	←	←	←

ティルトロータ例(6ロータ想定)		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
要求値	出力密度(kW/kg) @短期	—	4.0	4.2	5.3	7.8	8.6
	出力密度(kW/kg) @定格	—	1.3	1.4	1.7	2.6	2.8
	システムの平均効率(%)	—	90	90	95	95	95
	寿命(作動時間)	—	1,000	3,500	5,000	10,000	50,000
方式	モータ	—	(アキシヤル)	(アキシヤル)	(アキシヤル)	(アキシヤル)	(アキシヤル)
	インバータ	—	(SiC)	(SiC)	(SiC)	(SiC)	(SiC)
	冷却機構	—	(空冷)	(空冷)	(空冷)	(空冷)	(空冷)

電源のロードマップ

- 成熟度レベルごとの機体要求仕様に対応した電源性能を整理。但し、容量密度と出力密度、サイクル寿命はトレードオフとなる点に留意が必要。
- フル電動による成熟度レベル4の実現にはBeyond LiB(Li-S、Li-Air等)の開発が必要。
- 成熟度レベル5, 6の要求値は、現状ではバッテリーによる対応の見込みは立たず、発電機と組み合わせたハイブリッド方式が想定※。

		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6		
要求値	容量密度(Wh/kg)	200	300	400	550	1,000※	1,500※		
	出力密度(W/kg)	400	600	1,000	1,500	2,000※	2,500※		
	サイクル寿命(回)	500	500	1,000	1,500	2,000※	4,000※		
方式	給電方式	フル電動 (容量密度重視)	○	○	○	○	—		
		ハイブリッド (出力密度重視)	—		○	○	○	○	
	電源種類	蓄電	Current LiB		Advanced LiB	Beyond LiB	—		
		発電	—		燃料電池・エンジン発電機				
	材料	正極材料	金属酸化物系					—	
		負極材料	炭素系材料	炭素系材料+ シリコン系材料	シリコン系材料	金属Liなど	—		
BMS		充電率の最適化(SOC)							

※レベル5及び6については、機体の航続距離や乗員数の要求が高度に設定されていることに留意。
全てのユースケースに対して当該要求を満足する必要はない。

装備品のロードマップ

- 機体におけるパイロットタスクの自動化進展に対応し、交通管理・フリート管理に求められる基本機能と機体装備品への機能要求を整理。
- 本整理をもとに、別途、CNS装備品や制御システム、FMS、DAAへの要求を整理。

		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
基本機能	人間の関与の方式	オンボードパイロット		リモートパイロット		自律機のモニタリング	
	提供情報の種類	他機動態情報共有	他機インテント情報共有		空域インテント情報共有		
	提供情報の位置づけ	アドバイザリ情報			安全を担保する情報		
	経路変更	マニュアル	システムから提案		自動	空域全体を考慮した協調的な判断	
装備品への機能要求	オンボード	VFR機パイロットへの動態情報提供	VFR機パイロットヘインテントを含めた情報提供、自機パイロットヘ経路変更提案		VFR機パイロットヘインテントを含めた情報提供、自機経路の自動変更		
	リモートパイロットステーション(遠隔操縦)	—	—	他のリモートパイロットヘインテントを含めた情報提供、自機リモートパイロットヘ経路変更提案	リモートパイロットヘインテントを含めた情報提供、自機経路の自動変更		
	自律機のモニタリング	—	—	—	—	多数機・新しい飛行方式のモニタリングに対応するパイロットステーション	
	HMI (Human Machine Interface)	シングルパイロットが利用可能なインターフェイス (情報読み取り)		シングルパイロットが利用可能なインターフェイス (情報発信)	安全機能として認証レベルのインターフェイス	多数機・新しい飛行方式のモニタリングに対応するインターフェイス	

クラッシュワージネスのロードマップ

- 事故発生等に伴う社会受容性の変化に伴い、必要となる装備やその基準も変化。
- 技術的には、ステアリングパラシュートの開発がブレークスルーとなる可能性。

		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
機内保護	座席	<ul style="list-style-type: none"> ● 軽量化やプリテンショナー等の装備による拘束機能(シートベルト)の高度化 体型や体重に応じた最適な衝撃緩和実現 					
	フローティング	<ul style="list-style-type: none"> ● 軽量化、コンパクト化 など 					
	姿勢安定・降下率低減 (オートローテーション・冗長化)	<ul style="list-style-type: none"> ● システムの信頼性向上 など 					
	姿勢安定・降下率低減 (パラシュート)	<ul style="list-style-type: none"> ● 軽量化、低高度開傘、姿勢制御(ステアリングパラシュート)の実現 など (滑空やオートローテーション等の手段を持たない機体については代替手段として) 					
機内保護 (認証外)	機内エアバック	<ul style="list-style-type: none"> ● 社会受容性によっては装備義務化 					
	外部エアバック	—		<ul style="list-style-type: none"> ● 社会受容性によっては装備義務化 			
	第三者への警報装置	—		<ul style="list-style-type: none"> ● 社会受容性によっては装備義務化 			

製造技術のロードマップ

- 成熟度レベル3までは、既存の航空機で用いられる熱硬化素材が中心であり、オートクレープ成型が主流。
- 成熟度レベル4あたりから、冷凍庫が不要、成形時間が短い(プレス成型)、リサイクル性が高いといった利点を有する熱可塑性材料が適用され、プレス成型による大幅な成形時間の短縮が期待。
- 熱可塑性材料の使用に伴い、レベル5あたりから溶着等の技術を中心とするより効率的なアセンブリ技術の適用が実施される可能性がある。

構造材料		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
要求値	素材	既存航空機用熱硬化材活用	弾性率・強度向上(約20%)	速硬化性熱硬化材	熱可塑性適用	高弾性・高強度熱可塑性	主:熱可塑性 副:熱硬化材
	積層手法	ハンドレイアップ		AFP(熱硬化)		AFP(熱可塑性)	
	成形時間	6時間		4時間	2時間以下	1時間以下	0.5時間以下
	成形手法	オートクレープ			プレス成型		大型プレス成型

アセンブリ技術		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
要求値	素材	100(指数・基準)		90		80	60
	成形手法	ファスナー			熱可塑性・熱硬化	溶着(熱可塑性)	

通信のロードマップ

- 成熟度レベル1～2はパイロットが搭乗、VFR方式による運航を前提、航空無線をプライマリで使用。
- 成熟度レベル3以降は、遠隔操縦やモニタリングに必要なデータリンクの常時接続が必要。
- 高度数100mから3,000m程度の低高度空域で利用可能な通信網の整備が必要。様々な目的への対応、広帯域通信と信頼性確保の双方の要件の実現手段が課題。

通信		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6	
要求値	通信速度	実時間遠隔操縦情報(映像)	—	—	—	10Mbps		
		遠隔操縦情報	—	—	30bps			
		動態情報	100bps				1kbps	
		経路情報、飛行計画	—	—	30kbps			
		緊急通信(映像含む)	—	—	10Mbps			
		運航環境情報(映像含む)	1Mbps					
		その他一般(映像含む)	10Mbps					
	遅延時間	実時間遠隔操縦情報(映像)	—	—	10ms			
		遠隔操縦情報	—	—	36s			
		動態情報	—	—	36s	3.6s		
		経路情報、飛行計画	—	—	1s			
		緊急通信(映像含む)	—	—	10s			
運航環境情報(映像含む)		—	—	1s				
方式	通信方式	航空通信 LEO(L帯)			← LEO、GEO、HAPS			
		— —	セルラーネットワーク、L5G/LTEサイドリンク、RFネットワーク C帯(航空移動)					

航法、監視のロードマップ

- 成熟度レベル1～2はパイロット搭乗によるVFR方式が前提。航法装置、監視装置とも、従来のVFRに使用する装備を使用。
- 成熟度レベル4以降、フライト数の増大に対応する航法精度・安全性等の向上に対応した航法装置、都市等飛行域全域の監視を可能とする監視装置を搭載。

航法		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
要求値	位置精度 (接地点近傍)	50m				10 m	1 m
	更新頻度/遅延時間 (接地点近傍)	6 s		3.6 s		0.36 s	0.036 s
方式	航法方式	VFR	← GNSS	←			
		—	GNSS+SBAS	←			
		—	—	←			
		—	—	GNSS+GBAS、GNSS+PNT			
		—	—	RFビーコン、RFネットワーク、搭載レーダ 地形データベース、地上構造物データベース			
監視		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
要求値	監視精度	—	—	100 m			
	リアルタイム性	—	—	1 s			
	監視情報	—	—	位置 ID ステータス			
	監視数(密度)	—	—	0.3 /km ²	1 /km ²	10 /km ²	100 /km ²
方式	従属監視(地上)	ADS-B/1090ES			ADS-B/UAT		
	独立監視	(二次レーダ)		←			
		—	一次レーダ、マルチラテレーション、IRセンサ、音響センサ				

交通管理、フリート管理のロードマップ

- レベル3より飛行計画の自動調整、離着陸順位設定や誘導、レベル4よりオンデマンド対応や自動化領域の拡大、レベル5・6では接近探査・代替経路作成等の機能の機体側への移管、自家用機増加への対応等を実施。
- PSUとオペレータのI/F、オペレータ要件、他のVFR機とのI/F、といった運航ルールの立案が必要。

		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6	
交通管理	交通流管理	—	タイムスケジュール管理、飛行計画、軌道管理、飛行計画干渉判定、代替案策定、飛行計画調整、空域管理、コリドー管理、ATM調整、ステークホルダ間情報共有					
		—	—	交通流予測、低高度NOTAM管理、UTM調整				
	ポート管制	—	気象観測・通報、運用状態監視・共有、ポート容量管理、離着陸指示、飛行監視、軌道管理、接近探査、空地通信、緊急対応、不審飛行体の進入監視、ATM調整					
		—	—	ポートNOTAM管理、駐機パッド・離着陸パッド管理、離着陸順位設定、軌道生成・アサイン、離着陸誘導、回避案作成、UTM調整		—	離着陸を含む飛行計画調整、リモートタワー、離着陸管制の自動化	<ul style="list-style-type: none"> • 便数増加への対応 • 自動化レベルの向上 • 取り扱う情報項目増加への対応
	空域管制	—	飛行監視、軌道管理、飛行計画調整、将来接近探査、接近探査、空地通信、気象情報管理、緊急対応、不審飛行体の進入監視、ATM調整					
		—	—	機上・地上間軌道連携、予実誤差自動調整、回避案作成、コリドー監視、UTM調整			—		空域管制の自動化
—		—	—	—				
フリート管理	飛行計画	飛行計画作成(便数規模拡大)						
		—	飛行計画調整					
		—	—	飛行計画を低高度管制へ提出				
	情報管理	個別情報(機体性能、カンパニーNOTAM)、気象情報、NOTAM、AIP、AIC、地図地形情報、ポート情報						
		—	悪天情報、障害物情報		—			
	フライトウォッチ	飛行監視(同時飛行規模の拡大)						
		—	運航機体のステータス管理、インフライト機体情報モニタ、機体との通信、情報提供					
	スケジュール管理	—	—				飛行監視の自動化、予兆監視	
—		管理便数の拡大、ダイヤ・スケジュール管理・共有・調整、使用機材管理、運航情報の共有			—			
—	—	—	スケジュール管理の自動化、オンデマンドの増加対応、自家用受託					

給電システムのロードマップ

- 機体や電源の要求仕様をもとに、成熟度レベル毎の離着陸頻度を実現する充電設備の仕様を整理。本資料ではコンダクティブ充電方式を示す。(その他、電池交換充電方式、非接触充電方式も検討)
- 受電・充電器スペースは電源容量と共に増加。電源容量に対する設備規模の小型化が課題。

コンダクティブ充電方式		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6
大規模 ポート	駐機パッド数	1	2	4	6	10	
	充電時間	28分	28分	18分	10分	12分※	58分※
	受電電圧	高圧(6.6kV)		特高(22kV)		特高(77kV)	
	充電出力(kW/台)	244kW/台	407kW/台	1,013kW/台	1,206kW/台	1,610kW/台	1,554kW/台
	電源容量(kVA)	286kVA	952kVA	4,741kVA	8,463kVA	18,830kVA	18,173kVA
	給電方法	手差し	ロボットアーム				
	受電スペース(m ²)	20.0m ²	20.0m ²	90.0m ²		130.0m ²	
	充電器スペース(m ²)	5.9m ²	17.2m ²	74.5m ²	130.9m ²	285.1m ²	275.8m ²
	充電器台数	1	2	4	6	10	
小規模 ポート	駐機パッド数	1					
	充電時間	28分	28分	18分	12分	19分※	88分※
	受電電圧	高圧(6.6kV)					
	充電出力(kW/台)	244kW/台	407kW/台	1,013kW/台	1,005kW/台	1,017kW/台	1,024kW/台
	電源容量(kVA)	286kVA	476kVA	1,185kVA	1,175kVA	1,189kVA	1,198kVA
	給電方法	手差し	ロボットアーム				
	受電スペース(m ²)	0.0m ²					
	充電器スペース(m ²)	5.9m ²	8.6m ²	18.6m ²	18.5m ²	18.7m ²	18.8m ²
	充電器台数	1					

※レベル1～3は5人乗りマルチロータ、レベル4～5は5人乗りチルトロータ、レベル6は16人乗りチルトロータを前提。
 ※受電設備の規模・コストの現実性から、電源容量20,000kVAが上限となるよう駐機時間を補正。

気象システムのロードマップ

- 成熟度レベル1-2は、操縦士が搭乗、VFR方式による運航が前提。現在の航空機使用事業向けと同等の気象情報の項目/更新頻度/粒度を提供。
- 成熟度レベル3以降は、機上パイロット無しの機体(遠隔操縦、遠隔監視、自律飛行等を含む)でIMC下での飛行、人口密集地内、オフィスビルや住宅街等複雑地形、高密度運航への対応が必要。
- 高品質な運航環境作りとして、観測は地上気象インフラの配備と低高度運航に特化したレーダー、解析/予測は高解像メッシュに移行。
- 機体からの観測情報を飛行機体間で共有する仕組み、各種気象情報の実況解析値、Ku帯以上の気象レーダ、低層雲観測用レーダ、落雷可能性予測、等の開発が必要。

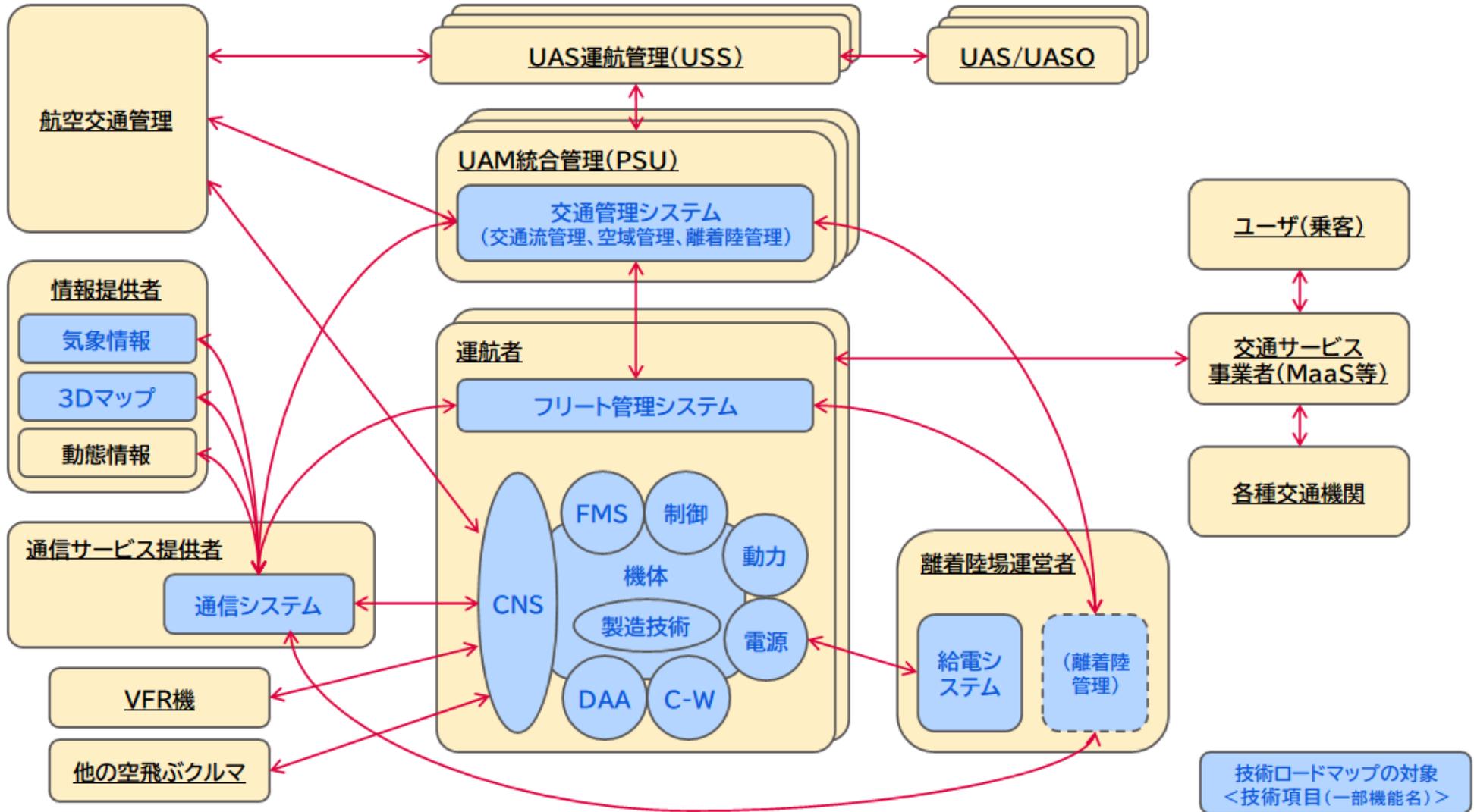
		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6	
要求値	情報項目	視程	管制圏、圏外により5km/1.5km		≧550m	≧350m	≧50m	—
		雲底	1000FT		200FT	100FT	—	
		風	機体の耐風性による			20-25KT		
		雨	—		Light -Moderate			
		CB(含む雷)	操縦士による回避判断		地上で回避判断		システムによる自動回避判断	
	システム要件	情報粒度(エリア)	5-1km		250-100m	100-50m	50-5m	
		情報粒度(時間)	60-30分更新		10-5分更新	1分更新	10秒以下	
		情報更新頻度	0-600m		0-3,000m			

3Dマップのロードマップ

- 成熟度レベル1～3では、操縦者が運航の安全性を向上するための地図情報が必要。
- 成熟度レベル4以降では、ユーザー利便性・快適性・運航の効率性確認のための地図情報が追加。

3Dマップ		レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	レベル5	レベル6	
要求値	情報項目	動的データ:空中リスク	固定翼機、ヘリコプター、無人航空機の動態情報			他モビリティとの接続情報	乱気流等快適性に繋がる情報	
		動的データ:地上リスク	—	—	歩行者(携帯GPS情報)	他モビリティとの接続情報		
		仮想データ	—	コリドー等の空域情報				
		障害物情報:地上リスク	—	建造物・電線等の詳細情報				
		地図情報:地上リスク	2D地図情報は従来のものから変更なし					
地図情報の形式	従来の地図情報形式				機上搭載用の地図形式			
	—				建造物情報の拡充と空間IDの活用			

ステークホルダと技術・システム(例)(成熟度レベル4)



まとめと今後の課題

<まとめ>

- 空飛ぶクルマの実証段階から、運航の自律化・高密度化が進み、ユーザが“いつでも・どこでも利用可能なモビリティ”となる段階まで、6段階の成熟度レベルのフレームワークを定義。
- 各成熟度レベルを実現するための、空飛ぶクルマの要素技術の進展を、ロードマップとして整理。

<今後の技術課題>

● レベル2を達成するための課題

- 耐空証明・型式証明の取得
- 基本的な操縦スキルの自動化機能の実装、フェイル時を想定した安全機能や動力の出力向上等
- 既存技術を活用した安全運航のための装備品・周辺システム(CNS、交通管理、気象、給電等)の構築

● レベル4を達成するための課題

- 機体の高度な自動化技術の開発(制御:Fully Automated、認知・判断:Primaryレベル)
- フリート管理・交通管理システムの自動化技術の開発(Secondaryレベル)
- 自動化された機体・交通管理システムを協調的に運用するためのCNSや情報提供機能等の技術開発・インフラ整備(複数方式の組合せによるカバレッジ確保、信頼性・安定性確保 等)

● 技術実証の推進

- 成熟度レベルに応じ、必要な機体、装備品、周辺システム等を統合した飛行実証、システム実証の推進

未来を問い続け、変革を先駆ける

MRI 三菱総合研究所