

空飛ぶクルマ

空のモビリティ革命に向けた開発最前線

監修 中野 冠

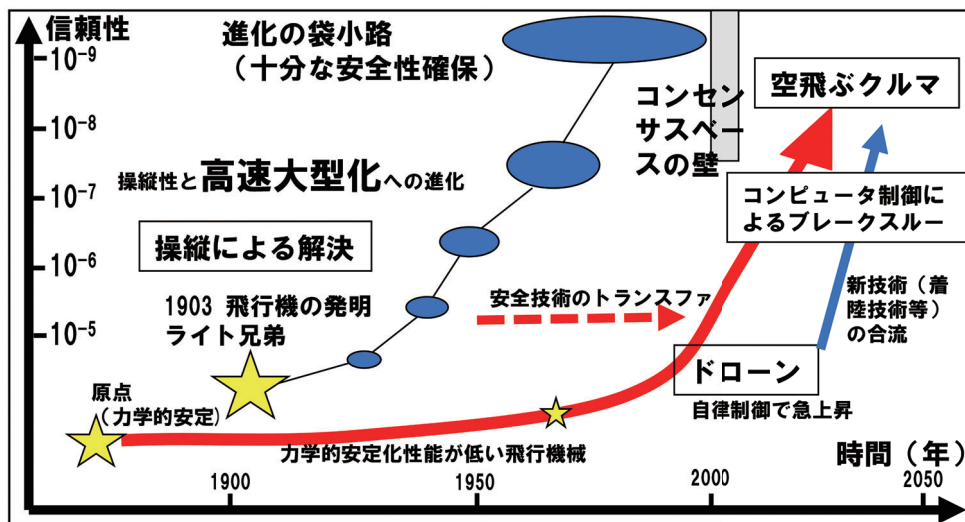


図7 コンピュータ制御による安定性を有する飛行機の実用化をもたらすドローン技術 (p.16)

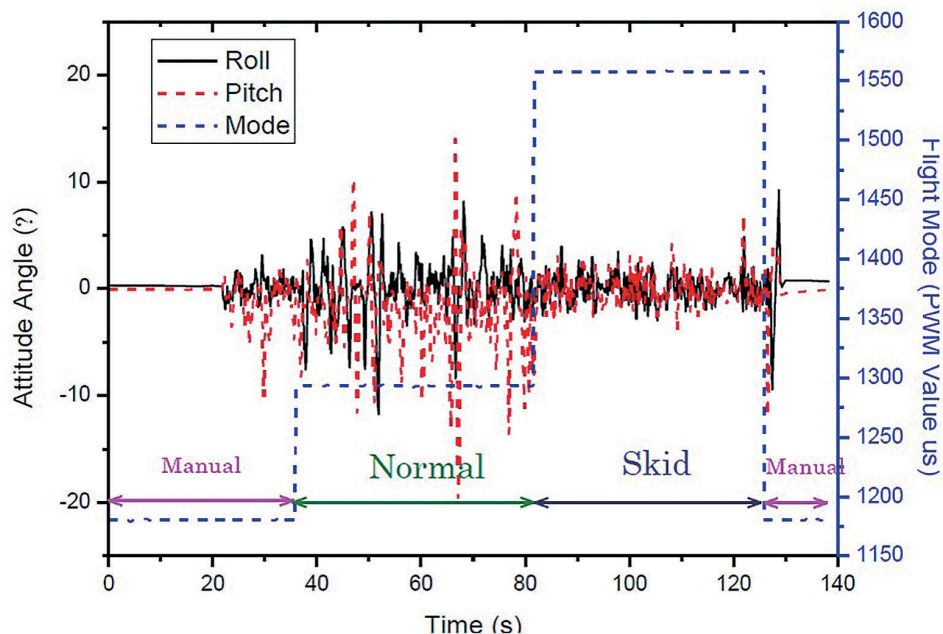


図11 外乱ありでの往復移動時の機体姿勢 (p.33)

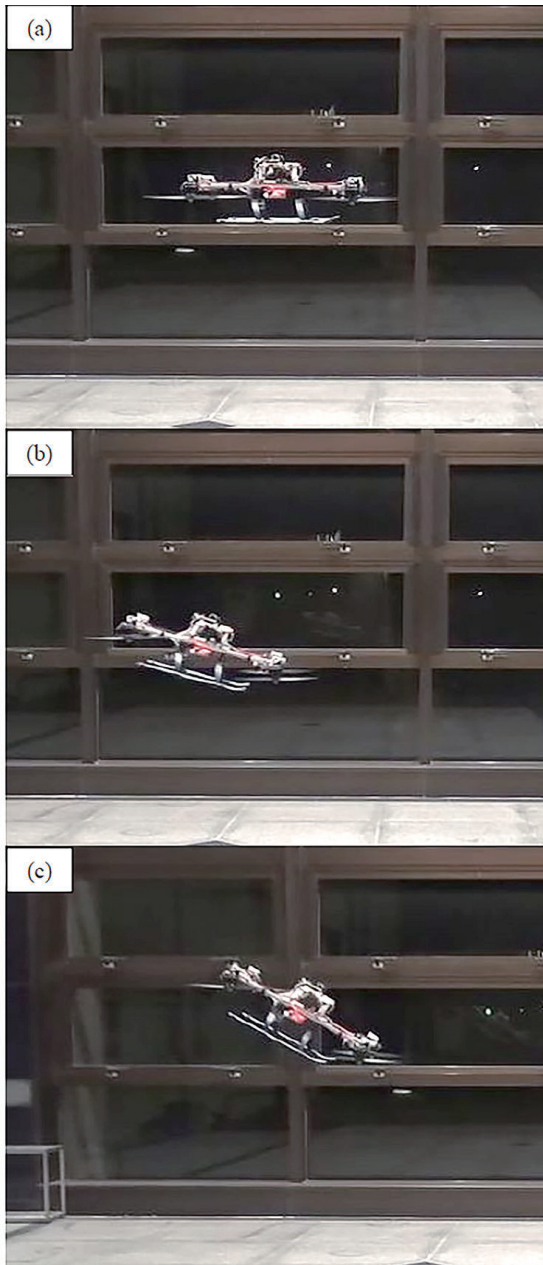


図 19 ティルト機構を用いた任意姿勢ホバリングと姿勢の変化(p.37)

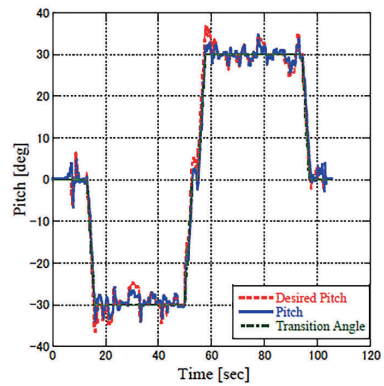


Fig. 17. Pitch angle response.

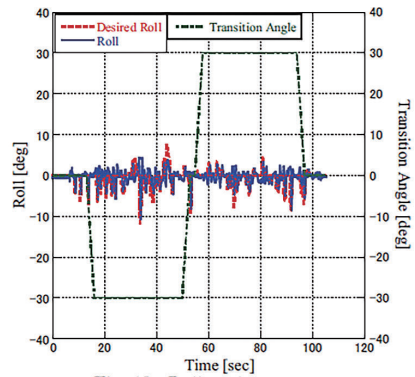
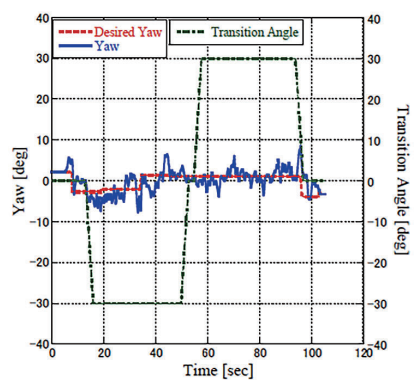


Fig. 18. Roll angle response.



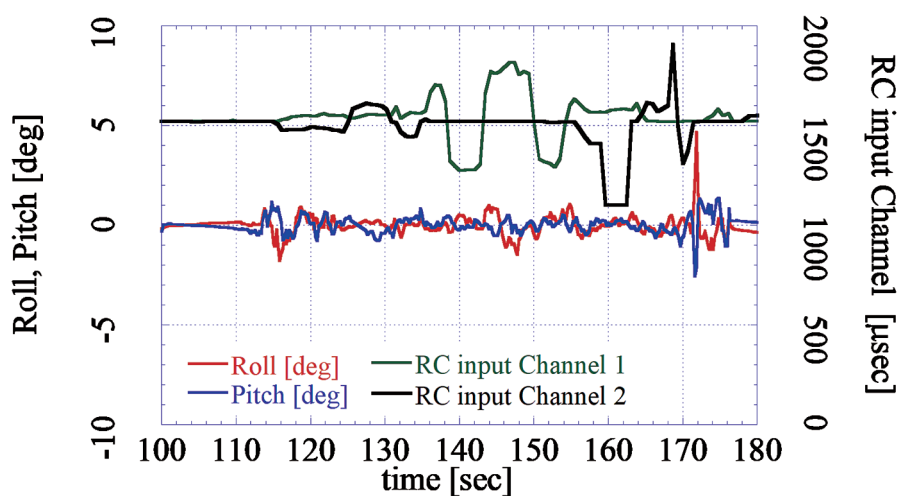


図 30 ベーンによる移動時の機体傾斜 (p.42)

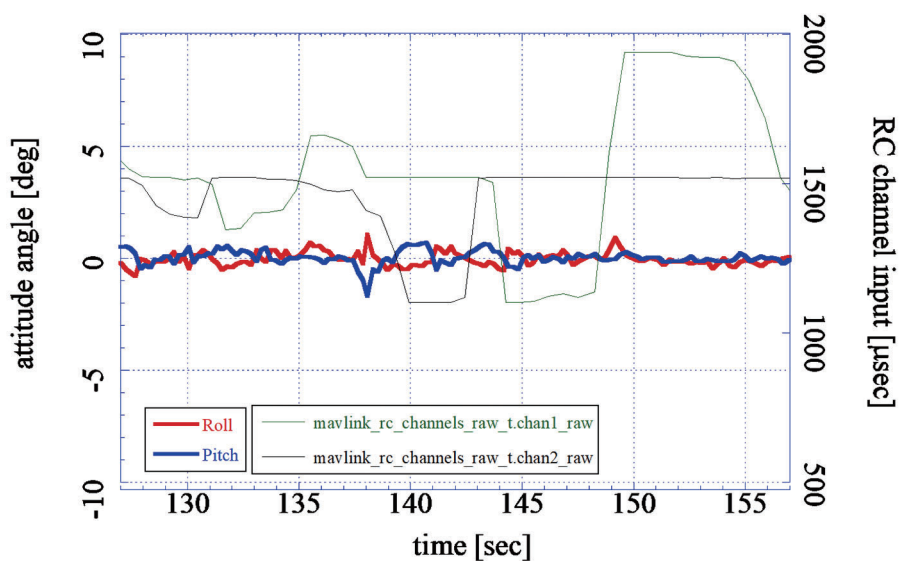


図 32 ベーンによる移動時の機体傾斜(重心を下げた場合) (p.43)

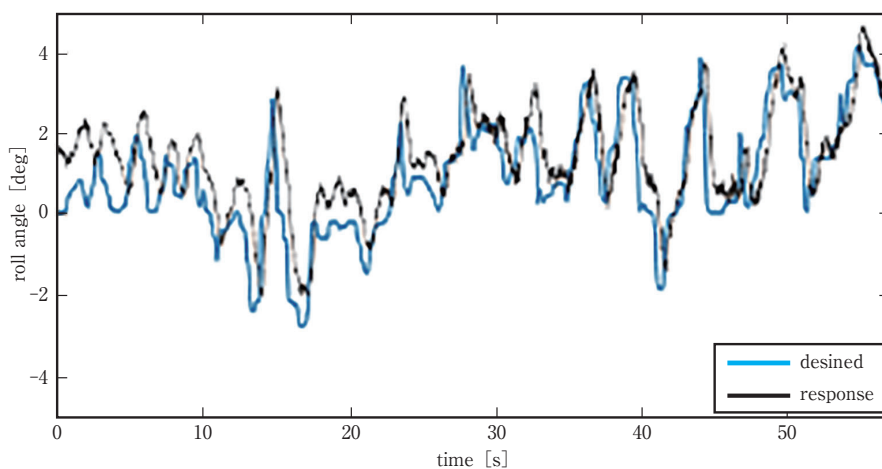


図9 roll 姿勢角応答 (p.51)

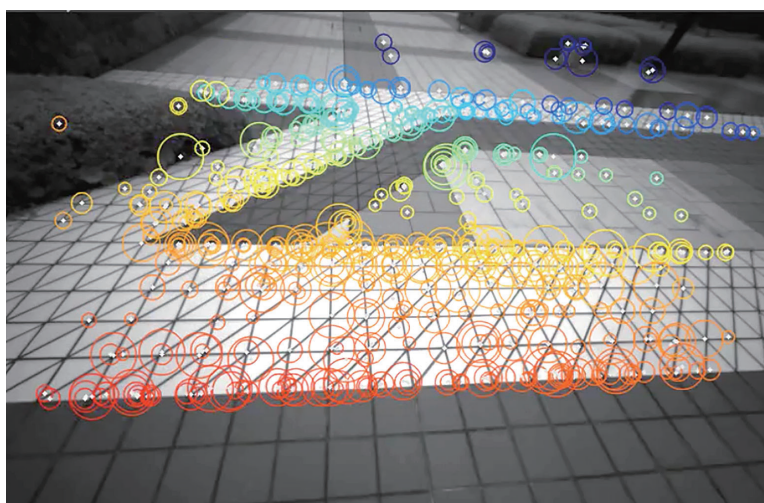


図1 特徴点を抽出した画像 (p.54)



図3 特徴点マップ(p.55)

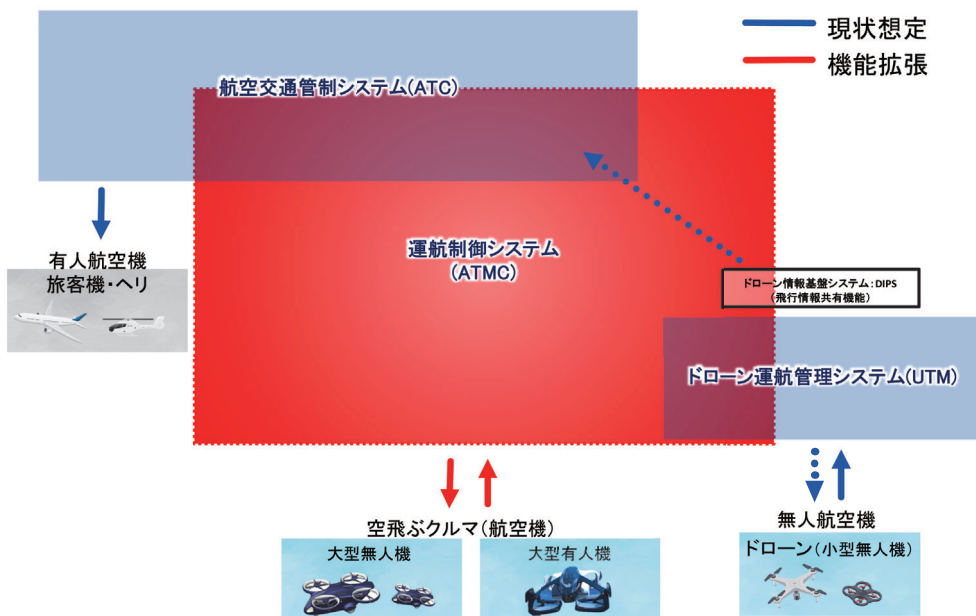


図5 ATMC システムの実現イメージ(p.65)

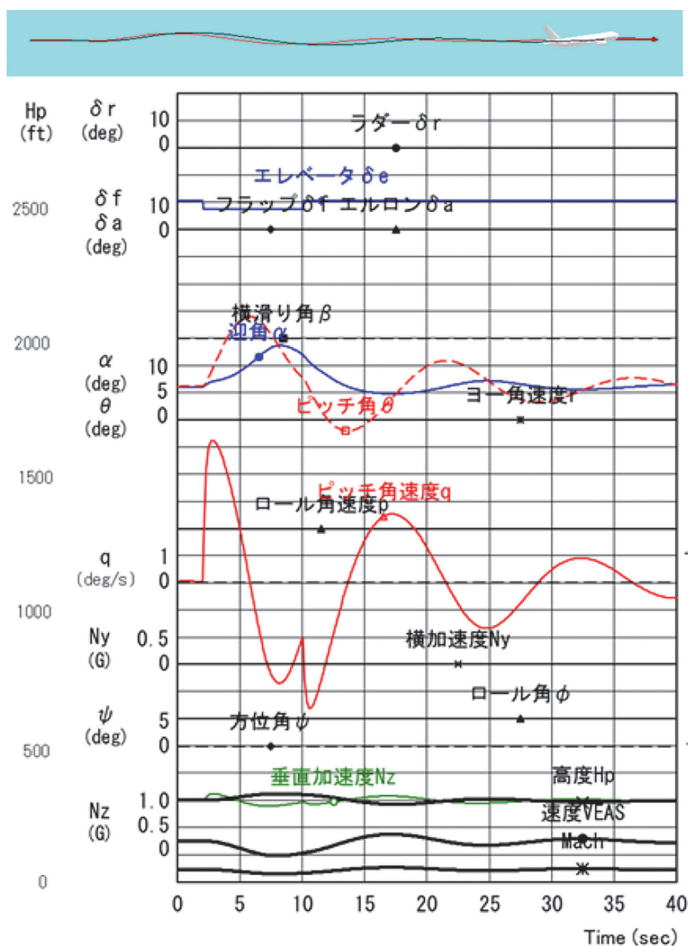


図9 水平飛行時のシミュレーション図 (p.84)

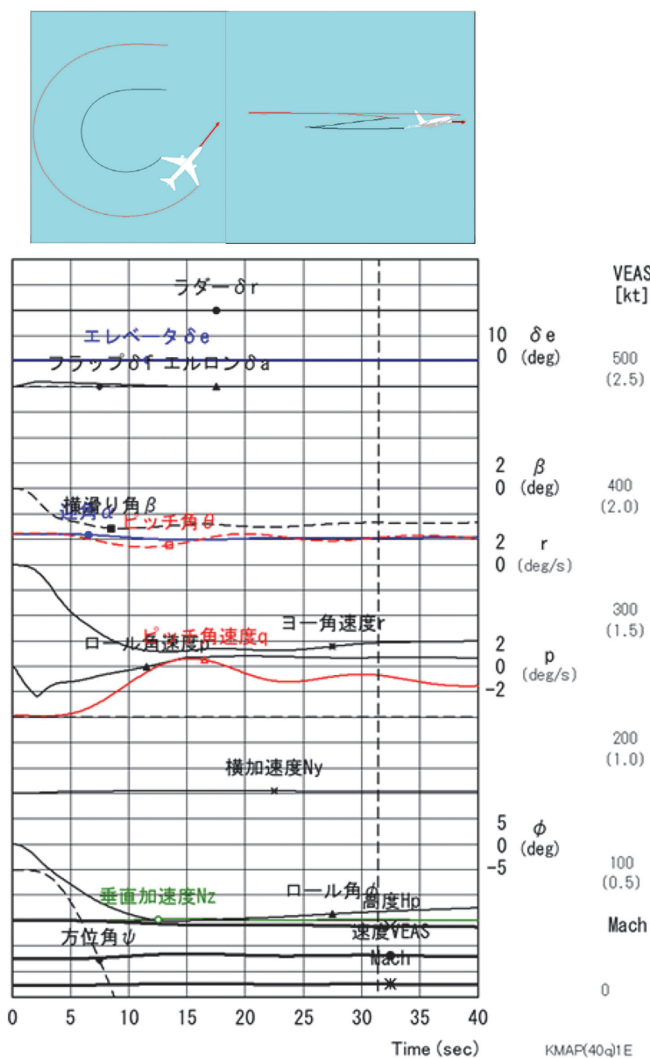


図 10 旋回飛行時のシミュレーション図 (p.85)

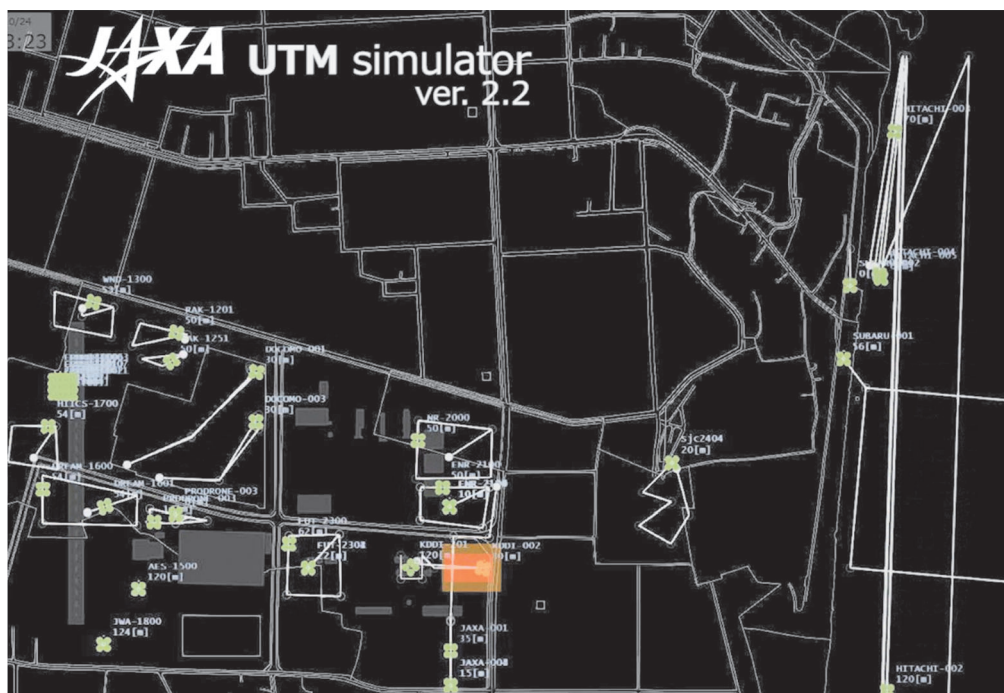


図 8 UTM シミュレータによる飛行計画の事前評価 (p.101)

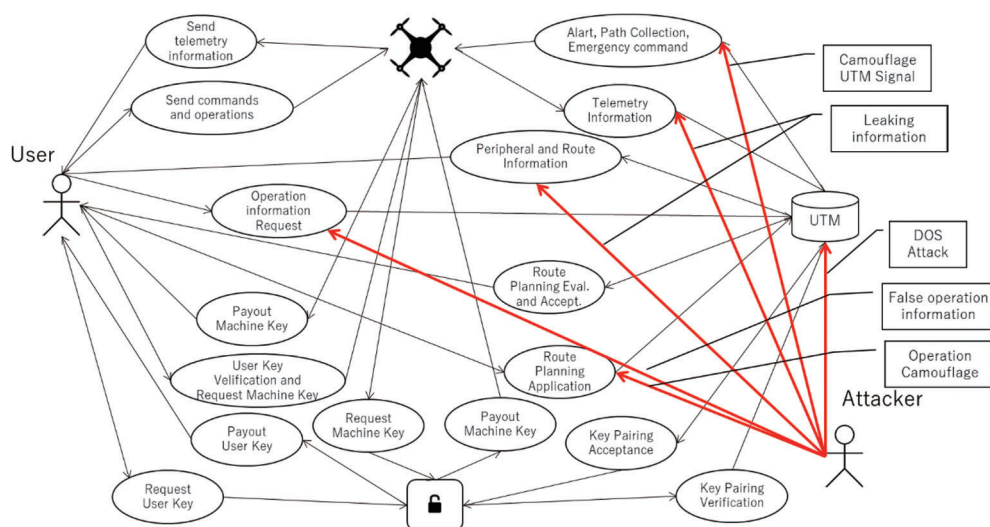


図 3 UTM のユースケース：中央集権的な UTM を想定 (p.107)

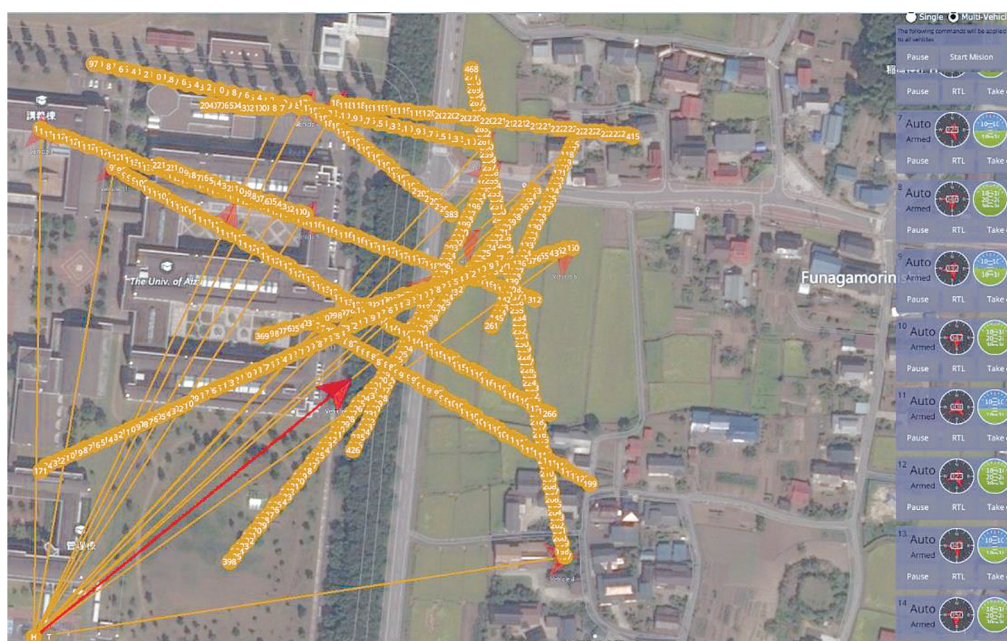


図5 ブロックチェーン予約システムを用いたシミュレーションの可視化(p.109)

All robots direction Potential field from blue circle All robots direction Potential field from blue circle

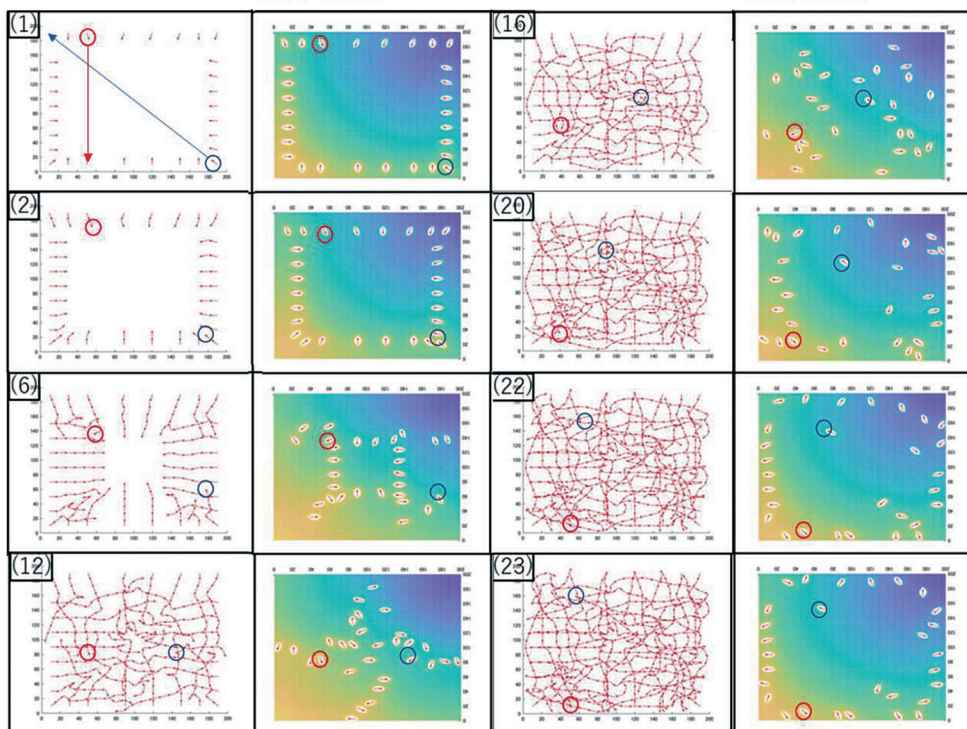
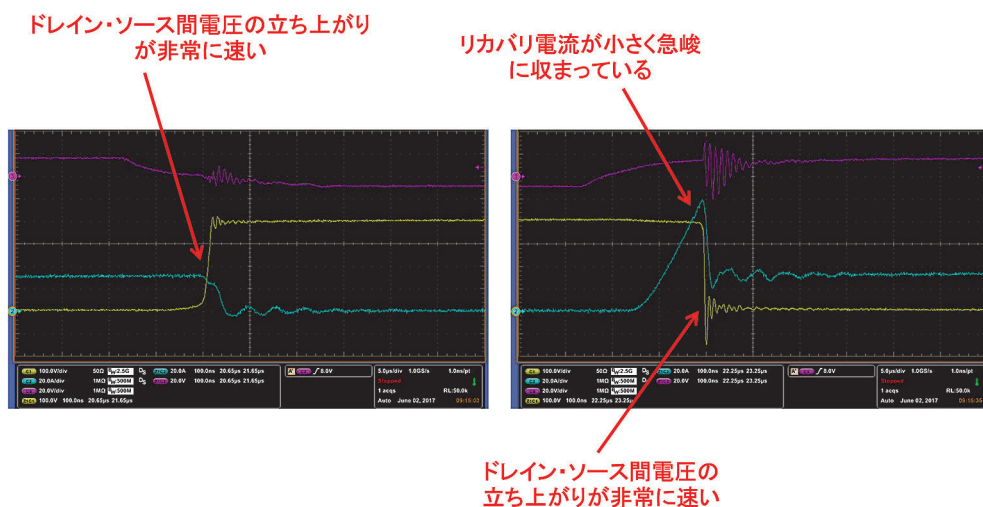


図6 位置情報を相互に与えた場合におけるポテンシャル場を用いた複数機体経路混在時の自律的な衝突回避の例 (p.110)



(a) ターンオフ波形(上 :20 V/div, 中 :100 V/div, 下 : 20 A/div, time :100 ns/div) (b) ターンオン波形(上 :20 V/div, 中 :100 V/div, 下 : 20 A/div, time :100 ns/div)

図5 Si MOS-FET (FMW60N059S2FDHF) のスイッチング電圧電流波形 (p.151)

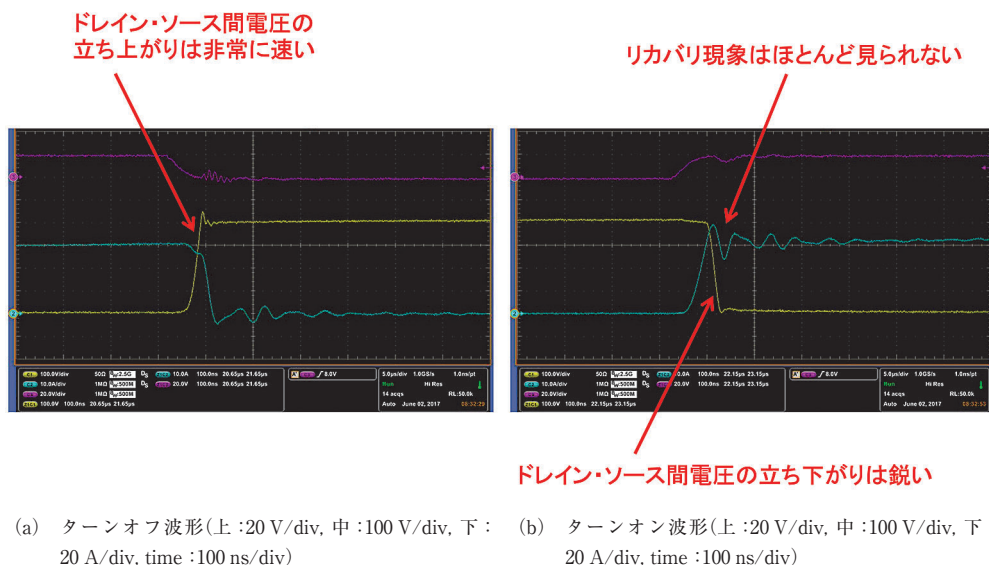


図6 SiC MOS-FET (SCT3030AL) のスイッチング電圧電流波形 (p.151)

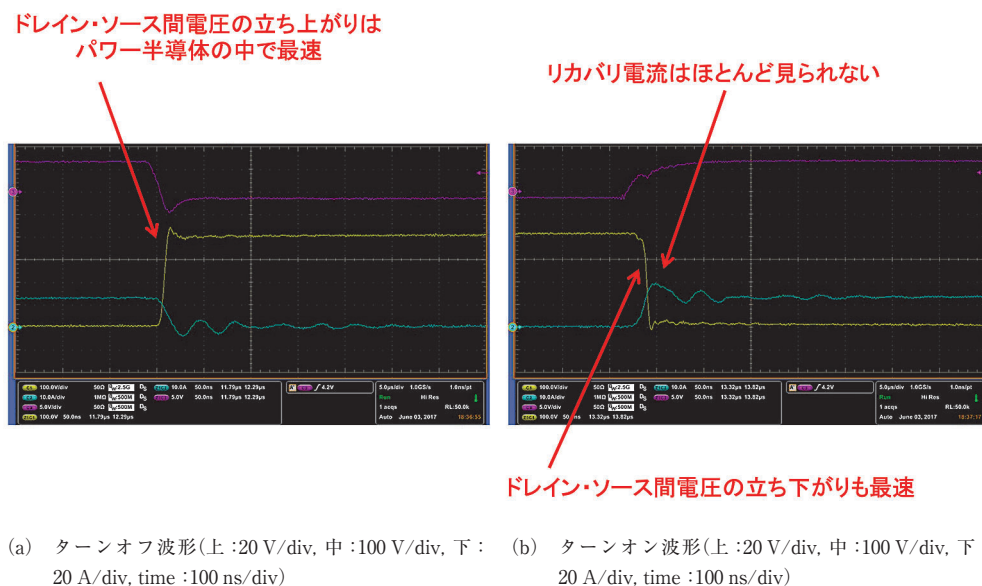


図7 GaN HEMT (GS66508B) のスイッチング電圧電流波形 (p.152)



図 10 階段から落下させても壊れることのない「SUSYM コンセプトタイヤ」(p.191)

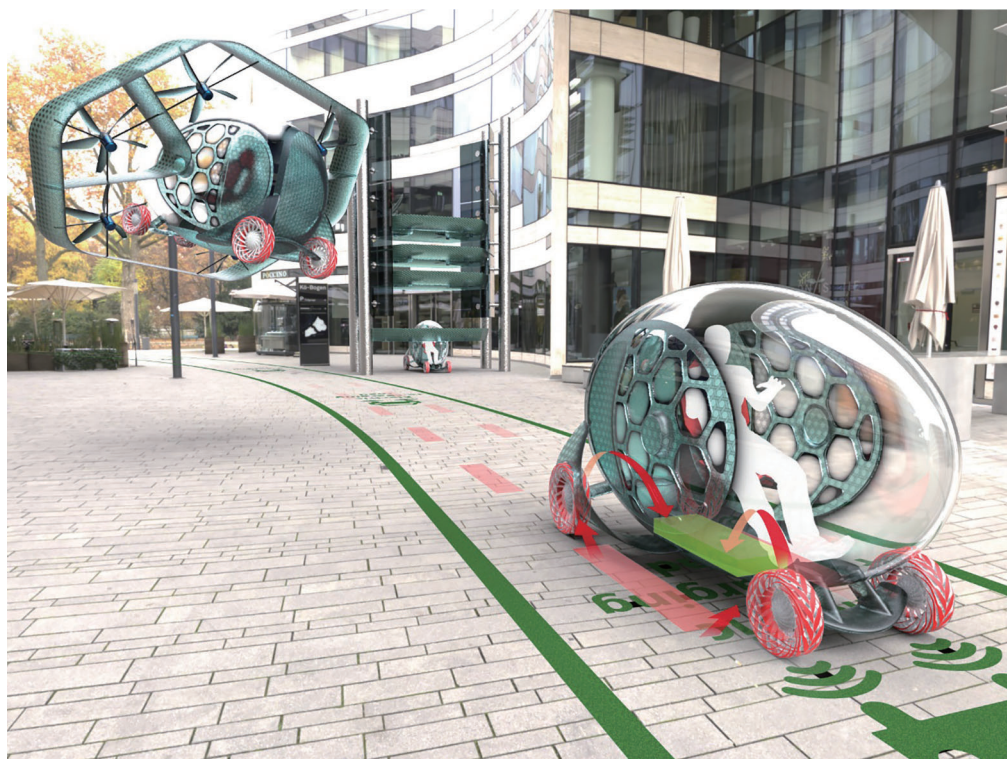


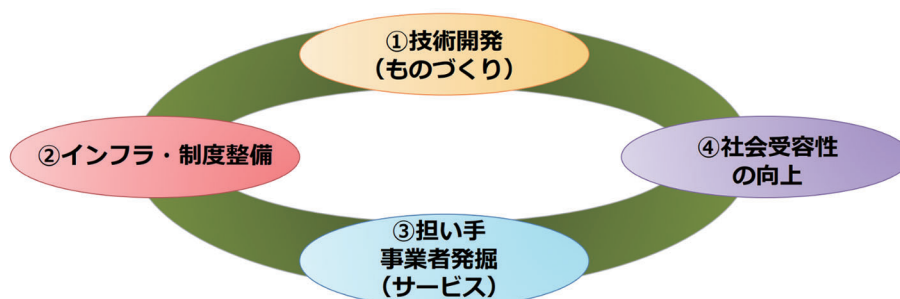
図 11 「SUSYM」が可能とする「空飛ぶクルマが創る近未来社会」(イメージ) (p.192)



図5 2020年8月に世界初披露した有人試作機「SD-03」(p.249)

“空飛ぶクルマ”の課題

- 世界に先駆けた“空飛ぶクルマ”の実現のためには、電動化や自動化等の①**技術開発**、実証を通じた運航管理や耐空証明等の②**インフラ・制度整備**や、社会実装を担う③**担い手事業者発掘**、国民の“空飛ぶクルマ”に対する理解度向上(④**社会受容性向上**)が主な課題。



<以下、想定される個別論点>

- ものづくり：これまで自動車産業や電機産業で培った要素技術（ハイブリッド、バッテリー、モーター）や高度な生産技術を活用できないか。例えば、完全電動化へのステップとして内燃機関とのハイブリッド技術が必要となった際には、一定の優位性があるのではないか。
- インフラ・制度整備：離発着場や通信等のインフラ整備に加え、制度については競争領域と協調領域を分け、協調領域については国が主導して各国の規制当局や標準化団体と連携していくべきではないか。
- サービス：日本では、都市内よりも災害時や離島・中山間地域にニーズがあるのではないか。仮に海外市場のポテンシャルが大きい場合には、まず海外市場での参画を狙い、その後日本市場への逆輸入を図る方法もあるのではないか。
- その他：技術開発や実証等について、国内や国内事業者のみに限らず、海外や海外の知見を積極的に活用すべきではないか。

図6 製造業を巡る現状と政策課題 (p.250)

監修者・執筆者一覧

掲載順・敬称略

【監修者】

中野 冠 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 教授

【執筆者】

中野 冠 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 教授
 岩田 拓也 国立研究開発法人産業技術総合研究所情報・人間工学領域インダストリアル
 CPS 研究センターフィールドロボティクス研究チーム 主任研究員
 鈴木 真二 東京大学名誉教授／東京大学未来ビジョン研究センター 特任教授
 三輪 昌史 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 准教授
 山下 敏明 日本電気株式会社ナショナルセキュリティ・ソリューション事業部 シニアエ
 キスパート
 岡田 浩二 日本電気株式会社ナショナルセキュリティ・ソリューション事業部 事業部長
 井上 翔介 株式会社自律制御システム研究所 (ACSL) カスタマーリレーション
 ディレクター
 北村 圭一 横浜国立大学大学院工学研究院 准教授
 嶋 英志 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門次世代航空イノベー
 ションハブ 特任担当役
 棚橋 美治 中部大学工学部 教授
 原田 賢哉 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構航空技術部門次世代航空イノベーショ
 ンハブ ハブマネージャ/ 無人航空機技術チーム長
 矢口 勇一 会津大学コンピュータ理工学部 准教授
 秋本 修 一般財団法人総合研究奨励会日本無人機運行管理コンソーシアム 事務局長
 中村 裕子 東京大学大学院工学系研究科 特任准教授
 石塚 康治 株式会社デンソーEcoMobilityシステム開発部 部長
 三戸 信二 株式会社デンソーモータ先行開発部 室長
 山本 真義 名古屋大学未来材料・システム研究所 教授
 金村 聖志 東京都立大学都市環境学部 教授
 橋本 真一 中部大学工学部 教授
 デビッド・ザンジグ グッドイヤー・タイヤ・マネジメント・カンパニー(上海)アジアパシフィック
 地区製品開発 副社長
 会田昭二郎 株式会社ブリヂストン先端技術担当 フェロー

山本 剛 東北大学大学院工学研究科 准教授

竹田 博貴 株式会社 UACJ R & Dセンター第二開発部 主査

箕田 正 株式会社 UACJ R & Dセンター第一研究部 主幹

和田 友孝 関西大学システム理工学部 准教授

経済産業省製造産業局次世代空モビリティ政策室空飛ぶクルマ担当

国土交通省航空局安全部安全企画課空飛ぶクルマ担当

三重県雇用経済部創業支援・ICT推進課

福澤 知浩 株式会社 SkyDrive 代表取締役

森本 高広 スカイリンクテクノロジーズ株式会社 代表取締役

手塚 究 株式会社 AirX 代表取締役

久根崎将人 日本航空株式会社事業創造戦略部モビリティグループ グループ長

名武 大智 株式会社野村総合研究所ICT メディア・サービス産業コンサルティング部
主任コンサルタント

瀬戸口美織 株式会社野村総合研究所ICT メディア・サービス産業コンサルティング部
コンサルタント

目 次

序 論 空飛ぶクルマ開発の現状と未来

中野 冠

1. はじめに	3
2. 「空飛ぶクルマ」に期待されること	4
3. 空飛ぶクルマの課題	5
4. 空飛ぶクルマの未来	7
5. おわりに	9

第1編 ドローン技術からの空飛ぶクルマ開発へ

総論1 ドローン技術の空飛ぶクルマへの応用展開の現状

岩田 拓也

1. はじめに	13
2. 飛行機械開発の歴史	13
3. ドローン技術から空飛ぶクルマへ	16

総論2 垂直離着陸機の歴史と原理

鈴木 真二

1. はじめに	19
2. ヘリコプターの歴史	19
3. ヘリコプターの原理	22
4. ヘリコプターと空飛ぶクルマの比較	24
5. おわりに	26

第1章 車体制御技術

第1節 推力偏向による姿勢制御

三輪 昌史

1. はじめに	29
2. ティルトロータ方式の推力偏向	30
3. 可変ノズルを用いた推力偏向	38

4. ペーンを用いた推力偏向	39
5. まとめ	42
第2節 空飛ぶクルマ向け飛行制御ユニットの開発	山下 敏明 / 岡田 浩二
1. 大型電動無人実証機の概要	45
2. 飛行制御ユニットの構成 1 : モータおよびモータドライバ	46
3. フライトコントローラ部	47
4. 無人実証機の位置姿勢制御系の構成	48
5. 姿勢ダイナミクスモデル $P(s)$ ペースの制御系設計	49
6. 姿勢角推定系(姿勢角更新値の導出)	49
7. 屋内飛行試験場	50
8. 飛行試験結果	50

第2章 自律飛行・通信システム

第1節 非 GPS 環境で自律飛行を実現する技術	井上 翔介
1. 空飛ぶクルマに要求される飛行環境	53
2. 非 GPS 環境での自律飛行技術	53
第2節 “統合的”管理基盤の構築	岡田 浩二 / 山下 敏明
1. はじめに	59
2. ATC/UTM の現状整理と ATMC への期待(無線システム構築の観点から)	59
3. ユースケース分析	61
4. 自動運用を可能とするロバストな通信システム	63
5. 「空飛ぶクルマ」向け ATMC の提案と課題	64

第3章 車体設計技術

第1節 空気力学による空飛ぶクルマ設計	北村 圭一 / 嶋 英志
1. 空気力学とは	67
2. 空力設計とは	69
3. 空気力学の設計への活用例	70
4. 空飛ぶクルマ設計に向けた現状と展望	72
第2節 ティルトウィング方式無人航空機の構想設計	棚橋 美治
1. はじめに	77
2. ティルトウィング方式無人航空機の機体構想	77
3. 今後の技術課題および展望	88

第4章 運行・管制システム

第1節 運航管理システム(UTM)の開発

原田 賢哉

1. はじめに	91
2. 米国の取り組み	91
3. 欧州の取り組み	93
4. 日本の取り組み	95

第2節 無人航空管制システムの開発

矢口 勇一

1. 緒言	103
2. 無人航空管制に必要な概念と機能	104
3. 無人航空管制のユースケースとセキュリティ	107
4. 自律分散型航空管制システム	108
5. まとめ	111

第3節 電波の運用と調整

秋本 修

1. ロボット革命と電波	113
2. 空の産業革命と電波	114
3. 空の移動革命と電波	119

第5章 機体安全認証(耐空証明, 型式証明)

鈴木 真二 / 中村 裕子

1. はじめに	123
2. 「耐空証明」「型式証明」とは	123
3. 認証における新たな動向	125
4. 無人航空機, 空飛ぶクルマの型式証明	127
5. 世界の動向	128
6. おわりに	129

第2編 自動車技術からの空飛ぶクルマ開発へ

総論 自動車技術の空飛ぶクルマへの応用展開の現状

石塚 康治

1. モビリティ社会の変化	133
2. 「空飛ぶクルマ」に求められる技術	134

第1章 動力系開発

第1節 空飛ぶクルマ向けモータ開発	三戸 信二
1. はじめに	139
2. クルマ用モータと空用モータの違い	139
3. おわりに	145
第2節 次世代パワー半導体の開発と空飛ぶクルマへの適用	山本 真義
1. はじめに	147
2. 次世代パワー半導体の種類と空飛ぶクルマへの適用効果	148
3. 空飛ぶクルマのモデリング技術	153
4. まとめ	155

第2章 動力源開発

第1節 全固体電池の開発と空飛ぶクルマ向け電池開発の現状	金村 聖志
1. はじめに	157
2. 革新電池	157
3. 硫化物系固体電解質を用いた固体電池	159
4. 酸化物系固体電解質を用いた固体電池	160
5. コンポジット固体電解質を用いた固体電池	162
6. おわりに	163
第2節 固体酸化物形燃料電池の開発と空飛ぶクルマへの転用の可能性	橋本 真一
1. 固体酸化物形燃料電池(SOFC)の特徴とこれまでの移動体への応用検討例	165
2. 航空機電動推進動力用電源の観点から見た SOFC	169
3. 軽量 SOFC の材料開発	171
4. SOFC の電動航空機への適用と空飛ぶクルマへの転用の可能性	176

第3章 タイヤ開発

第1節 グッドイヤーコンセプトタイヤ「AERO(エアロ)」	デビッド・ザンジグ
1. はじめに	181
2. タイヤとその未来を考える	182
3. グッドイヤーAERO を構成している要素	182
4. 総 括	184
第2節 革新素材「SUSYM™(サシム)」で描く近未来タイヤ像	会田 昭二郎
1. はじめに	185
2. 革新素材「SUSYM(サシム)」とは	186
3. 「SUSYM コンセプトタイヤ」	189

4. おわりに	191
---------------	-----

第4章 車体軽量化のための素材開発

第1節 CFRPの軽量化へのアプローチ	山本 剛
1. はじめに	193
2. CFRPの種類	193
3. CFRPの軽量化へのアプローチ	194
4. 将来展望	198
第2節 アルミニウム	竹田 博貴 / 箕田 正
1. 自動車用アルミニウム材料の特徴	201
2. 航空機用アルミニウム材料の特徴	205
3. 空飛ぶクルマへのアルミニウム材料適用に関する今後の展望	209

第5章 空飛ぶクルマへのITS無線通信システムの適用	和田 友孝
1. ITS無線通信システムの概要	211
2. 各国の動向	212
3. ITS無線通信システムの分類	214
4. ITS無線通信技術の空飛ぶクルマへの応用	218
5. おわりに	220

第3編 国内外の開発状況

第1章 官の取り組み

第1節 経済産業省 / 国土交通省の取り組み	経済産業省製造産業局 / 国土交通省航空局
1. はじめに	225
2. 経済産業省の取り組み	225
3. 国土交通省の取り組み	225
4. 国がめざす未来の交通網像について	227
第2節 三重県の取り組み	三重県雇用経済部創業支援・ICT推進課
1. 三重県概略	229
2. “日本の縮図”三重県が抱える地域課題	230
3. 三重県における空飛ぶクルマ活用構想	231
4. 「空飛ぶクルマ」を活用した将来ビジョン	234
5. 三重県が迎える未来スケジュール	236

第3節 福島ロボットテストフィールドの取り組み	秋本 修
1. 福島ロボットテストフィールド(福島 RTF)	239
2. 空飛ぶクルマへの取り組み	242
3. 今後の課題	243

第2章 空飛ぶクルマ関連企業の取り組み

第1節 SkyDrive の取り組み	福澤 知浩
1. エアモビリティの背景	245
2. 株式会社 SkyDrive における空飛ぶクルマ開発	246
3. サービス開発について	248
4. エアモビリティ事業開始への課題	249
5. 今後の展望	250
6. おわりに	251

第2節 スカイリンクテクノロジーズの取り組み	森本 高広
1. スカイリンクテクノロジーズについて	253
2. 機体開発	254
3. ロードマップ	257

第3節 AirX の取り組み	手塚 究
1. AirX とは	259
2. エアモビリティのエコシステム概観	260
3. ヘリコプターなどのエアモビリティ業界について	261
4. 事 例	263
5. eVTOL, 空飛ぶクルマの活用について	265
6. 空飛ぶクルマの普及の課題	267
7. おわりに	268

第4節 「次世代モビリティ」分野の事業創造	久根崎 将人
1. はじめに	269
2. JAL における新規事業	269
3. 空飛ぶクルマの将来構想	270
4. 空飛ぶクルマ事業の関連取り組み	273
5. おわりに	274

第3章 空飛ぶクルマ海外企業の取り組み	名武 大智 / 瀬戸口 美織
1. はじめに	277
2. 各企業の開発状況	278

※本書に記載されている会社名、製品名、サービス名は各社の登録商標または商標です。なお、必ずしも商標表示(®、TM)を付記していません。

序 論

空飛ぶクルマ開発の現状と未来

慶應義塾大学 中野 冠

1. はじめに

「空飛ぶクルマ」のコンセプトを提案したり、機体を開発する動きが世界中で加速しており、我が国でも 2018 年 12 月に政府により 2020 年代に実現を図るためのロードマップが発表された¹⁾。

そこでは SF で見るような地上を走る車が空も飛ぶという空陸両用車という意味の「空飛ぶ車」ではなく、大衆的な空の乗り物という意味で「空飛ぶクルマ」とされている。空陸両用車は 20 世紀に入って長い間研究されてきた²⁾が、道路における衝突安全を確保しながら、また我が国の道路幅の制約のなかで、空を飛ぶのは技術的に難しい。「空飛ぶクルマ」が実現される当初は、映画のように自由気ままに空中に航路を取ることができず 3 次元の仮想的な道路が設定され、衝突を避けるために航行経路と通過時刻を事前に登録する必要があるだろう。現在ドミナントデザイン³⁾の 1 つになるだろうと考えられるのは、電動垂直離着陸機 (eVTOL: electric Vertical Takeoff and Landing Aircraft) である²⁾。それでは、垂直離着陸するヘリコプターが存在するのになぜ今「空飛ぶクルマ」特に eVTOL が求められているのだろうか？ この点を [2.] で簡単に説明する。また、アメリカ航空宇宙学会 (AIAA: The American Institute of Aeronautics and Astronautics)⁴⁾においては、「空飛ぶクルマ」は都市航空交通 UAM (Urban Air Mobility) として知られている。日本の大学では、ドローンの研究に比べて空飛ぶクルマ (有人機) の研究は少ない。大学において、人が乗るような大きな機体を試作することは予算的に難しく、また教育としても学生に実習させるにはドローンの方が使いやすいからである。機体の制御方法などは、ドローンと空飛ぶクルマは類似性が高い。そこで、本書第 1 編は空飛ぶクルマにも応用できるドローン技術を詳細に説明している。一方、ドローンと空飛ぶクルマは用途が異なるので、機体やインフラの技術も異なる面がある。これらの相違を [2.] で説明する。

[3.] は、実現のための課題を述べる。課題は多くあるが、もっとも重要だと筆者が考える「安全性」、「騒音」、「運航率」、「バッテリー」についてその課題を紹介する。特に「騒音」、「運航率」は、現状のヘリコプターの課題でもある。

「空飛ぶクルマ」は自動操縦が期待されており、小型航空機の電動化の期待もある。自動車における自動運転に関わるセンサ、バッテリー、モータなどの技術が空にも使えるのではないかと期待されている。しかし、「空飛ぶクルマ」は、自動操縦になっても地上スタッフの増加やセンサなどの機材コストが増え、総コストはそれほど低減されない可能性がある。このため、運航機数を増やして 1 台当たりの運航管理費用の効率化を図るとともに、自動車で大量生産される製品を活用して機体コストを低減することが求められる。この話題について、[4.] で紹介する。なお、本書第 2 編では自動車技術の空への応用について詳細に述べられる。

「空飛ぶクルマ」の技術に課題があるなかで、どのような用途から実現するだろうか？ [4.] では、「空飛ぶクルマ」の未来をユースケースに照らし合わせて私見を述べる。自治体などで行われている将来における実現に向けた取り組みについては、本書第 3 編で詳細に紹介される。

2. 「空飛ぶクルマ」に期待されること

2.1 空飛ぶクルマとヘリコプター

Uber⁵⁾などの企業が、都市におけるエアタクシー事業の実現を目指している。ヘリコプターでエアタクシー事業はできないだろうか？ 図1に見るように、フィリピンではヘリコプターを用いたチャータービジネスとして Air taxi という言葉が一般に使われている⁶⁾。しかし、ヘリコプターの利用は事前に予約するチャーターが中心で、価格も高い。我が国では一般にビジネスや2次交通でヘリコプターをチャーターすると約40万円かかるといわれる(慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科附属空飛ぶクルマラボ(以下空飛ぶクルマラボ)⁷⁾の複数運航会社へのヒアリングによる)。空飛ぶクルマラボの試算によれば既存ヘリコプターであるロビンソン R22⁸⁾と現在開発中のフル電動の eVTOL 機 Volocopter⁹⁾(図2)の機体価格は大きく変わらないと思われる。一方、運航コストとしてヘリコプターの燃料代は eVTOL の電気代より高く、また内燃機関の点検が必要で、ブレードなど交換部品がヘリコプターの方が高くと予想される。また、ヘリコプターの操縦は両手両足を使うため熟練が必要で訓練費が高く、「空飛ぶクルマ」はジョイスティックなど比較的簡便であると期待されている。これは、「空飛ぶクルマ」が普及した際のパイロット不足の軽減に効果があると考えられる。

2.2 空飛ぶクルマとドローン

ドローンは、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicles (UAV))の一種である。無人航空機は、アフガニスタンやイラクなどの軍事で使われたり、ホビーとして使われたりしているが、民生用の業務としては、主に空撮、測量、農薬散布、物の運搬などに使われている。もし人の運搬に使われれば、「空飛ぶクルマ」ということができるだろう。技術や機能には、ドローンと共通なものと「空飛ぶクルマ」に独自のものがある。共通点としては

- ① 飛行制御、自動運転、静粛性、軽量化などの機体技術
- ② 運航管理、管制、空間情報管理などの運航インフラ
- ③ サイバーセキュリティ対策やテロ対策など安全に関するインフラ

などがある。



図1 AirTaxi 社⁶⁾のヘリコプター
フィリピンセブ島において著者撮影



図2 Volocopter 社の空飛ぶクルマ
シンガポールにおいて
空飛ぶクルマラボメンバー撮影

空飛ぶクルマに独自の点は、

- ① 認証，人が乗るので安全性の基準がより厳しいこと
- ② 飛行の確実性(運航率)，ビジネスで使われる際は運航率が重要であること
- ③ 重量(空飛ぶクルマにおける電動化に壁)
- ④ 乗員の快適性，人が乗るので一般に騒音対策がより必要なこと
- ⑤ 意匠デザインが重要であること

などがある。

3. 空飛ぶクルマの課題

3.1 安全性

安全性は最も重要であり、墜落して乗員や地上の人々の命に損害を与えてはいけない。通常の eVTOL は、複数枚の回転翼を持っており、1つが故障しても制御不能になることはないと期待される。しかし、2011 年の東北大震災を思い起こせば、動力がすべて失われる事故も考えておく必要がある。万が一の際、翼を持つ一般の航空機は滑空することができ、ヘリコプターはオートローテーション機能が備わっている。翼を持たず、回転翼のサイズが小さいマルチローター型の機体では、パラシュートとエアバッグなどで搭乗者の人命を守ることが求められる。地上の人家に損害を与えないためには、例えばパラシュートを制御する技術が必要になる。

3.2 騒 音

ヘリコプターでは、エンジン音もあるが、主回転翼の音が最も大きいといわれる。一般に、回転翼先端速度が速いほど音が高く大きくなる。したがって、eVTOL ではヘリコプターに比べて回転翼のサイズが小さく翼先端速度は高速なので、音は高く大きくなる。翼先端速度をできるだけ低速にするため回転翼の面積を大きくすると、機体のサイズが大きくなり広い離着陸場を必要とするので、使い勝手が悪くなる。空飛ぶクルマラボでは、このトレードオフに着目した機体設計の研究も行っている¹⁰⁾(図 3)。前出の Volocopter は、18 枚の回転翼を持つことによって 1 枚のローターにかかる重量を分散させて翼先端の回転速度を抑える構造になっている。高い周波数の音は空気中で減衰しやすいので、空中高いところを飛行すれば人間には聞こえにくくなる。一方、「空飛ぶクルマ」の利便性を考えればより人家に近いところで離着陸することが望まれるので、騒音の問題は深刻である。一般にヘリコプターの騒音は 110 db 程度と言われ、騒音の大きさが半分になっても 10 db 下がる程度である。環境基準は 85 db なので、その差は大きい。Volocopter の White paper¹¹⁾では、着陸時地上 30 m の高さで 76 dB と述べられている。なお、都内のタクシー利用者が 1 万円以上使う場合は 9 割以上夜間であり¹²⁾、さらなる騒音の低減技術が切に望まれる。

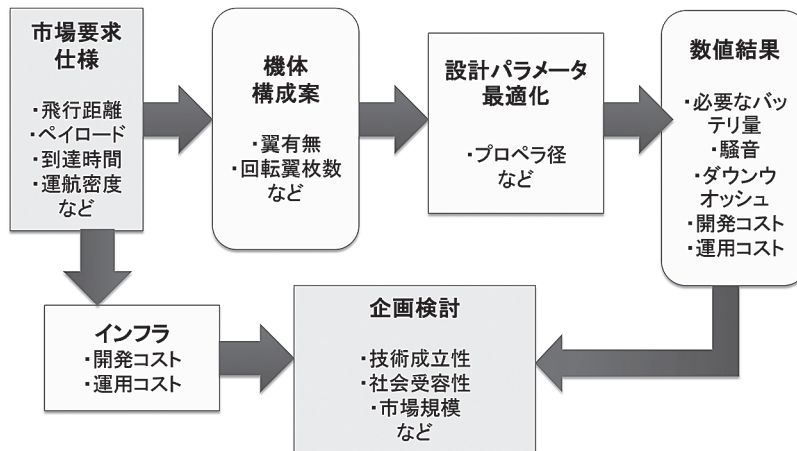


図3 eVTOL 設計シミュレーションモデル

3.3 運航率

ヘリコプターがビジネス用途に一般的とならない理由の1つは、運航率すなわち就航率(実際に運行した便数を本来飛ぶ予定だった便数で割った数字)が十分に高くないからである。強風や悪視界などの気象条件により、運航ができなくなる。出張の際には事前に他の交通手段を想定しておく必要があり、旅行会社が観光パックに入れるのを好まない。我が国では、過去に10以上のヘリコプター・コミューター(2地点間の旅客輸送)が開設または試験的に運航されたが、その多くが就航率の低さや悪気象条件下での事故の発生などで廃止されている²⁾。有視界飛行方式(VFR: Visual Flight Rules)から計器飛行方式(IFR: Instrument Flight Rules)に変更するのも1つの方法であるが、IFRは高度が高く設定されかつ管制に従うので雲を臨機応変に避けづらいなどのルールの問題、機体や離着陸場に高額な設備を必要とする、管制のスケラビリティの問題などから、「空飛ぶクルマ」においては必ずしも現行の計器飛行方式の方がよいといえない。気象情報のリアルタイム提供、自動操縦技術や運航管理などの技術の向上が求められる。

3.4 バッテリー

バッテリーの性能として、安全性、重量エネルギー密度、サイクル劣化性能などが重要である。バッテリーが発火することは避けなければならない。電動航空機のバッテリーでは、自動車で重視される体積エネルギー密度よりも重量エネルギー密度が重要となる。現状のバッテリー性能では、航続距離が短く、ペイロードが小さい。例えば、前出のVolocopter社 Velocityは、その製品紹介⁹⁾によればペイロード200kgで航続距離は35kmである。図3のシミュレータを用いて計算したところでは、最大離陸重量650kgのチルトウィングタイプ²⁾の機体が高度300mを時速150km/hで15分飛ぶためには、バッテリーシステムで234Wh/kgの重量エネルギー密度(セルレベルで334Wh/kg)が必要とされる¹⁰⁾。NEDO電池ロードマップ¹³⁾によれば、2020年はセルレベルのエネルギー密度で250Wh/kgであるが、2030年には500Wh/kgと推定されている。2030年には機体の軽量化も進むと考えられるので、バッテリーの余裕を残すことを

考慮しても 2030 年にはフル電動の eVTOL の実現が可能と考えられる。

別の問題は、現状のバッテリー性能ではバッテリーの劣化のため頻繁にバッテリー交換が必要なため、運航コストが高くなることである。2030 年には、バッテリーの性能向上によって改善することが期待されている¹⁴⁾。本書第 2 編で、全固体電池の開発状況や機体軽量化について解説が行われる。

4. 空飛ぶクルマの未来

4.1 空飛ぶクルマの用途

「空飛ぶクルマ」は、個人用にもタクシーなどの交通サービスにも使用できる(図 4)。個人用は、自家用と会社所有が考えられる。筆者らが行った高級外車ディーラーへのヒアリングによれば、現在我が国で 2,000 万円以上の高級輸入自動車の購入層は、9 割がオーナー会社、1 割が個人である。一方、オンデマンドのエアタクシーはもっとも期待される用途である。地方都市間交通にもエアタクシーが期待される。地方の活性化としてテレワーク、二地域居住などを推進するために役立つ可能性がある。MaaS(Mobility as a Service)を地方において実現するためには、公共機関の運行頻度が少ないので、無人自動車と空飛ぶクルマが必要とされるだろう。公共的用途としては、災害救助や救命救急医療すなわちドクターヘリの補助あるいは代替が期待される。また、地下鉄やバスのように比較的大人数を決められた停留所に運ぶエアメトロという用途も考えられる。地方における持続可能な社会形成のために離島交通や過疎地交通あるいは、医師派遣などの用途が考えられる。これらのユースケースの詳細については、文献 2 に詳しいので、詳細は割愛する。

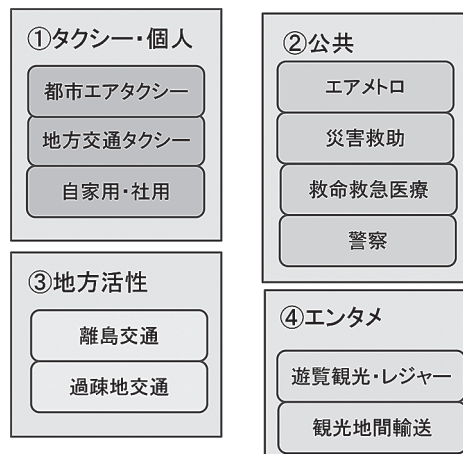


図 4 用途

4.2 事業性評価

図5に空飛ぶクルマラボで行っている事業性推定モデルを示す。まず、現地の交通データとヒアリングによって、潜在需要を推定して機体とインフラに関する要件を明らかにする。それらの要件から、機体とインフラの設計を行い、開発コスト、運航コスト、騒音・ダウンウォッシュなどを出力として得る¹⁰⁾。次に、コストから運賃を推定し、騒音レベルとヒアリングから社会受容性を明らかにする。それらのデータと競合交通機関のデータを基に、空飛ぶクルマの需要を推定する。この需要予測値と機体、運航、インフラ企業のコストからそれぞれの事業性を推定する。

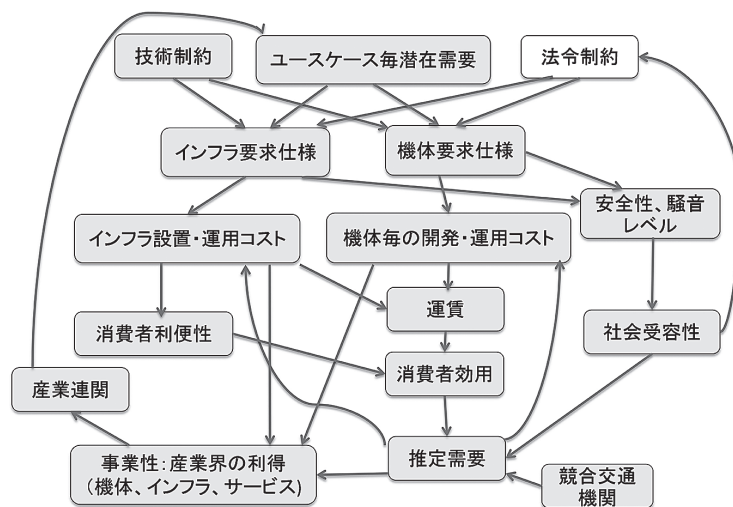


図5 事業性推定モデル

4.3 自動車技術を空へ

電気自動車のモータやバッテリー技術、自動運転に関わるLiDAR(Light Detection and Ranging)などの距離計測技術が重要になる。自動車の自動操縦においては、歩行者や自転車などシステムに登録されていない障害物が存在し、またすでに自動操縦ではない自動車が併存する状態で、安全性を担保することは容易ではない。一方、これから実現する「空飛ぶクルマ」ではすべての機体の運航計画を登録させるなどの手段を取ることによって、自動化は比較的容易と考えられる。離着陸時の位置情報と制御の精度、風雨や雲など気象情報取得のリアルタイム性、夜間時の情報取得の信頼性が問題となる(図6)。

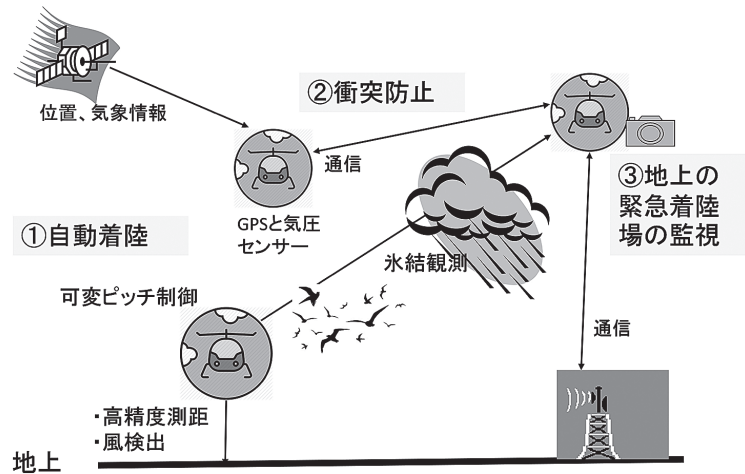


図6 自動運転に必要な計測技術

5. おわりに

「空飛ぶクルマ」は1つの大きな産業セクターを生み出す可能性があり、技術者にとって夢のある開発テーマである。しかし、技術革新だけでなく、社会システムとしてのルール作りや用途開発を含めた包括的なシステムデザインが必要である。標準化などへの国の関与とともに、オープンイノベーションとして多くの企業が参入することを期待したい¹⁵⁾。

文 献

- 1) 経済産業省：空の移動革命に向けたロードマップ，
https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181220007/20181220007_01.pdf, (2018年，2020年3月7日確認)。
- 2) 空飛ぶクルマラボ：空飛ぶクルマのしくみ 技術×サービスのシステムデザインが導く移動革命，中野冠監修，日刊工業新聞社，1-160 (2019)。
- 3) J. M. Utterback and F. F. Suarez: Innovation, competition, and industry, *Research Policy*, **22**, 1 (1993)。
- 4) The American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA): Driving Aerospace Solutions for Global Challenges, the Proceedings of AIAA SciTech Conference, 1-214 (2020)。
- 5) Uber Technologies Inc; Uber Elevate, <https://www.uber.com/info/elevate/> (2020年3月7日確認)
- 6) AirTaxi.ph; <https://airtaxi.ph/#home> (2020年3月7日確認)
- 7) 空飛ぶクルマラボ(代表：中野冠)： <https://nakano.sdm.keio.ac.jp/> (2020年3月7日確認)
- 8) Wikipedia：ロビンソン R22,
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%83%93%E3%83%B3%E3%82%BD%E3%83%B3_R22
(2020年2月23日確認)
- 9) Volocopter GmbH; <https://www.volocopter.com/en/> (2020年3月7日確認)
- 10) 三原裕介，中野冠：空飛ぶクルマの持続可能な最適設計，日本航宇宇宙学会第57回飛行機シンポジウム，山口県下関海峡メッセ (2019)。

- 11) Volocopter GmbH: Whitepaper: Pioneering the Urban Air Taxi Revolution,
<https://press.volocopter.com/index.php/volocopter-publishes-white-paper-on-urban-air-mobility>
(2020年3月8日確認).
- 12) J. Budiman: Design of the Numbers of Vertiports and Air Taxis for Business Realization of On-Demand Air Mobility in Tokyo, 應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科修士論文 (2019).
- 13) 新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO): 二次電池技術開発ロードマップ 2013,
<https://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf> (2020年3月8日確認)
- 14) Pawnlada Payuhavorakulchai: Cost Analysis of eVTOL Configuration Design for Air Ambulance in Japan, 應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科修士論文 (2019).
- 15) 中野冠: 空飛ぶ車のシステムデザイン, 研究開発リーダー, **15**, (3), 1 (2018).

この先をご覧いただくには、パスワードが必要です。

制限つきPDFで全ページをご覧いただけます。
(制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など)

- ・ PDFの閲覧

「パスワード」と「専用のビューア」（無料）が必要です。
費用は一切かかりません。

※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

- ・ パスワード ※電子試読ページよりお申込みください

<https://www.nts-book.com/ntsの電子試読>

ページ下部にお申込みフォームがあります。

右のQRコードからも
電子試読ページにアクセス
いただけます。



- ・ ビューアのダウンロード

PDFは、株式会社スカイコムの SkyPDF Viewer（無償のPDFビューア）をダウンロードしてご覧いただけます。

※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションではご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：

<https://www.skycom.jp/free/>

索引

英数・記号	
2 次遅れ系	49
2.4GHz 帯 (ISM バンド)	218
2000 系 (Al-Cu 系) 合金	203
3 D プリント	190
3GPP	217
3 R	191
4 発型ダクトファンクアッドコプター	40
5G 移動通信システム	220
5000 系合金	202
6000 系合金	202
7000 系合金	203
AID	215
airframe	45
= エアフレーム	
Air Taxi	277
AI 高速処理	64
AMS	205
APU	168
= 補助電源	
ARP	125
ASL	215
BASA	126
= 相互承認協定	
Bluetooth	218
CASE	133
C _D A	69
CFD	68
= 数値流体力学	
CFRP	45, 143
CFRTP	189
= 熱可塑性炭素繊維強化樹脂	
CSMA/CA	214
DER	126
Detect and Avoid	106
Device to Device (D2D) 通信	217
DIPS	60
Distributed electric propulsion : DEP	279
DO-178B	125
DRESS	59
D-SEND	70
DSRC	215
= 狭域通信	
EASA	125
EUROCAE	125
eVTOL (electric Vertical-Take-Off-and-Landing)	3, 26, 46, 72, 127, 135, 139, 277
eVTOL 機	177
= 電動垂直離着陸機	
eVTOL 型	279
EV 用レンジエクステンダー	169
FAA	24, 65, 124
FAR	124
FIMS	98
Framework Programme	212
FTD 燃料	170
Grand Challenge	212
H 型ティルトロータ機	34, 36
ICAO	65, 123
= 国際民間航空機関	
IEC	213
= 国際電気標準会議	
IEEE802.11p	214
IFR	6, 59
= 計器飛行方式	
IntelliDrive	212
IPM	143
ISO	213
= 国際標準化機構	
ITS	211
ITS 無線通信技術	219
ITU	213
= 国際電気通信連合	
IVC-RVC 層	216
JAXA 航空技術イノベーションチャレンジ	173
JTC1	213
= 合同専門家会議	
Ko-HAF	213
Laser SLAM	57

LiDAR	8
Li 全固体電池	170
LPWA	219
LTE V2X	217
MaaS (Mobility as a Service)	7, 133, 270
MG	139
MME	217
MMPDS	205
Navier-Stokes 方程式	68
Ni-YSZ サーマット(セラミックスと金属のコンポジット材)多孔質支持基板	166
ODA	126
OFDM	214
OSI 参照モデル	216
PEFC, PEM	165
= 固体高分子形燃料電池	
PEFC と SOFC の単セルにおける電流密度 - 電圧 (I-V) 特性	167
P-GW	218
PI 制御系	49
P.P.K.P	254
= パーソナルブレン開発プロジェクト	
RFID タグ	218
RPAS	127
RPASP	64
RRA	208
RTCA	125
SAE	125
SDSP	98
Sense and Avoid	106
S-GW	217
SOFC	165
= 固体酸化物形燃料電池	
SOFC 軽量化のアプローチ	171
SOFC の移動体への応用検討事例	168
SPM	143
STOL 性	177
= 短距離離着陸性	
Ti 系合金	174
UAM	127, 285
UAS	103
UASSP	98, 105
= UAS サービスプロバイダ	
Uber	19
U-Spce	93
UTM(UAS Traffic Management)	91, 105
VFR	6
= 有視界飛行方式	

Visual SLAM	54
VTOL (Vertical Take-Off and Landing)	29, 77, 135, 277
Wi-SUN	219
X-57Maxwell プロジェクト	169

あ行

アウターパネル	201
アドホック通信型	211
アルミシールドケース	47
アルミトラス	50
アルミニウム	201
安全性	5
安定性・操縦性	78
硫黄による架橋(加硫)	185
イオン	
液体	162
導電率	174
位置・姿勢制御系	48
位置制御	13
イプシロンロケット	70
インナーパネル	201
インナロータ方式モータ	46
インバータ	135
インフラ整備	65
インフラ通信型	211
運航管理	59
機能	60, 98
システム	59, 91
統合機能	60, 98
運行情報管理	105
運航制御	59
運航制御システム	63
運航率	6
運用時間	62
運用調整	115
エアタクシー	7, 270
エアフレーム	45
= airframe	
エアメトロ	7
エアモビリティ	245, 269
エアレス構造	183
衛星通信	220
エチレン	186
エネファーム	165
エネルギー	
吸収材	204

変換デバイスの効率	170
変換デバイスの重量出力密度	170
密度	137, 157
遠隔操作	127
エンジン式	254
円板荷重	22
オートジャイロ	19
オートローテーション	24, 26, 129
オイラー角	84
横風安定性	77
応力腐食割れ	207
応力腐食割れしきい応力	207
大型電動無人実証機	45
大阪万博	257
押出フィルム成形	189
オスプレイ	247
オンデマンド運航	128

か行

カーゴドローン	251
カーボンブラック	185
回転翼機	71, 124
界面導電率	175
革新電池	157
拡張カルマンフィルタ	48
可視化材料	187
舵効き	83
過時効	207
ガスタービンエンジン	21
火星飛行機	71
可塑性	160
可塑性固体電解質材料	161
型式証明	26, 123
活性化過電圧	167
ガドリニウム触媒	186
可変ノズル	38
可変プロペラ	256
加硫促進剤	187
完全自律飛行(型)	282, 283
完全電動	278
官民協議会	65
ギア駆動	141
機体間(V2V)通信	106
機体搭載機器	65
機体認証	280
機体認証システム	105
救助活動	62

狭域通信	215
= DSRC	
共重合触媒	186
共焼結	166
金属支持形 SOFC	166
クアッドコプター	30
空域監視装置	241
空気力学	67
空力	
設計	69
騒音	69
デバイス	71
空陸両用車	3
クラッシュウォーシネス	129
クラッド	207
計器飛行方式	6, 59
= IFR	
傾斜機能材料	188
携帯ネットワーク	63
軽量化	139
ケロシン	170
研究開発クラスター	239
コアーシエル構造	159
光学センシング	183
高強度	143
航空	
管制	59
管制システム	104
機製造事業許可	254
交通管制	103
交通管制システム	59
法	124
高出力アクチュエータ	46
高出力密度化	171
合成ゴム	185
高セル電圧化	171
構造部材	201
航続距離	176
高速飛行	256
高電流密度作動化	171
合同専門家会議	213
= JTC1	
高トルク密度	139
抗力	69
国際電気通信連合	213
= ITU	
国際電気標準会議	213
= IEC	

国際標準化機構	213
= ISC	
国際民間航空機関 ICAO	123
故障率	140
固体間接触	160
固体高分子形燃料電池	165
= PEFC, PEM	
固体酸化物形燃料電池	165
= SOFC	
固定翼	254
固定翼型	280
固定翼機	26
コンボジット系固体電解質	162

さ行

サービスプロバイダ	105
= UASSP	
サイジング	79
再生・修復性	188
最大トルク	142
最適化設計	70
作製技術	163
サステナブルマテリアル	190
酸化物系固体電解質	158
三元合金	208
残留応力	208
時間応答	51
磁気回路	143
磁気推進力	183
自己位置推定手法	49
磁石	136
姿勢安定性	52
失速迎角	72
自動	
運転	213
操縦	26
飛行	127
社会受容性	26
車載 APU	168
車車間	216
車車間通信	211
車両－歩行者間通信	211
集中制御	61
重量エネルギー密度	170
重量出力密度	167
樹脂高分子複合体	186
出力密度	157

循環型社会	191
巡航速度	176
焼結	160
上昇率	83
情報提供機能	98
諸元策定	77
ショックマウント機構	47
自律分散型	104
シンガス	170
信頼性	140
水素吸蔵合金	170
垂直離着陸型	278
垂直離着陸機	19
垂直離陸	254
水平尾翼面積比	79
水平尾翼容積比	79
推力重量比	79
推力偏向(装置)	29, 39
数値流体力学	68
= CFD	
スキッドモード	32, 33, 38
ステレオ SLAM	56
ストリング	205
ストレッチャストreinマーク	202
スライディング・メッシュ	72
スワッシュプレート	23
成型	159
精密位置決め技術	17
絶縁設計	139
接触抵抗	174
セル性能向上	172
セル電圧を低下させる要因	172
センサネットワーク	218
全体最適化	63, 64
ソーラーカー	71
騒音	5, 62
騒音レベル	24
相互承認協定	126
= BASA	
操縦免許	128
組織認証	126
空飛ぶクルマ	24, 67, 225, 245, 269
空の移動革命	253
に向けた官民協議会	225, 245
に向けた構想発表会	225

た行	
耐 SCC 性	207
大規模災害	61
耐空証明	123, 285
耐空性改善通報	124
耐空性審査要領	123
大出力軽量アクチュエータ	45
耐衝撃試験	189
体積エネルギー密度	170
耐突き刺し性	187
ダイレクト駆動	141
ダウンウォッシュ	62
ダクトファン	38, 40
多段化	173
単眼 SLAM	56
炭素析出抑制効果	174
炭素繊維	193
炭素繊維強化プラスチック	193
短距離離着陸性	177
＝STOL	
蓄電池モジュール	163
中央集中制御	63
中距離帯	253
中空押出型材	208
超々ジュラルミン	205
追従性	51
低温耐衝撃性	188
ティルトウイング	255
ティルト機構	30, 34
ティルトロータ(機)	30, 32, 81
電気化学反応界面	158
電極反応活性	175
伝達関数	49
電池の設計	163
電動化	277
電動垂直離着陸機	3, 269
＝eVTOL	
天然ゴム	185
電波環境モデル	120
動安定微係数	83
同時運用	64
同時最適化	64
島嶼部	61
動態管理	97
都市航空交通 UAM	3
塗装焼付硬化性	202
ドローン	67, 104, 218, 245, 269

ドローン情報基盤システム	60
な行	
ナショナルセンター	239
日本無人機運行管理(JUTM)コンソーシアム	95
熱可塑性	
エラストマー	187
炭素繊維強化樹脂	189
＝CFRTP	
マトリクス樹脂	194
熱硬化性マトリクス樹脂	194
熱修復	188
熱伝導率	143
燃料極支持形	166
燃料電池	
スタックの効率	173
単セルの効率	172
の移動体への応用	167
ノーマルモード	32, 33, 38
は行	
パーソルブレン開発プロジェクト	254
＝P.P.K.P	
バードストライク	128
配合ゴム	185
ハイブリッド自動車	136
ハイブリッド電気推進	129
破断伸び	187
バッテリー	6, 24, 127, 135
発電所での発電効率	170
パワーデバイス	136
ハンドオーバー	120
光 MOD(Metal Organic Deposition)法	167
非管制空域	60
引裂き強度	186
比強度・比弾性率	193
非空気入りタイヤ	190
飛行	
機	124
計画管理	97
試験(場)	50
制御ユニット	45
性能	83
ピッチ	84
引張破断強度	187
標準化団体	125

ヒンジ機構	23
風洞実験	68
フェライト系ステンレス合金	174
複合材料	143
福島イノベーション・コースト構想	239
浮上試験	50
ブタジエン	186
部分最適化手法	64
部分放電電圧	139
フライトコントローラ	47
フライトレコーダー	128
フライバイワイヤー	129
ブレード・ディスク理論	72
フレーム	205
プロセス保証	125
ブロックチェーン技術	108
プロトン導電性セラミックスによる燃料電池(PCFC)	173
分極抵抗	172
分散型推進装置	128
分散協調管理	61, 63
ベークハード性	202
ペーン	39, 40
ヘミング	201
ヘリコプター	19, 67
補助電源	168
＝APU	
ボディパネル	201
ホバー	22
ボロコプター2X	24

ま行

マツハ数	67
マルチ	
コプター型	280
モータル・デザイン	183
モータルモビリティサービス	278
無人	
移動体画像伝送システム	114
航空管制システム	104
航空機	218
無線 LAN (Wi-Fi)	218
無操縦者航空機	127
メタン	170
モータ	135
モータドライバ	46

モーフィング	88
目視外飛行	127
モデルベース PID 制御	48
モノコック構造	45

や行

有機ハイドライド	170
有限体積法	68
有視界飛行方式	6, 59
＝VFR	
誘導抗力	70
ヨー	84
揚抗比	83
揚力	69

ら行

落下受止め装置	16
リジニングマーク	203
リチウムイオン電池	157
離着陸場所	63
硫化物系固体電解質	158
流体力学	67
旅客機用の APU	169
冷却方式	140
レイノルズ数	67, 83
連続式耐空証明	124
連続定格駆動	142
ロータ	127, 135
ハブ機構	24
ヘッド	23
ロール	84
路車間	216
路車間通信	216
ロボット	
新戦略	113
テストフィールド	249
・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 (DRESS プロジェクト)	95
用電波利用システム	113
路路間通信	216

わ行

ワイヤレス給電	191
---------	-----

空飛ぶクルマ

空のモビリティ革命に向けた開発最前線

発行日	2020年10月12日 初版第一刷発行
監修者	中野 冠
発行者	吉田 隆
発行所	株式会社 エヌ・ティー・エス 〒102-0091 東京都千代田区北の丸公園 2-1 科学技術館 2階 TEL.03-5224-5430 http://www.nts-book.co.jp
印刷・製本	倉敷印刷株式会社

ISBN978-4-86043-678-0

©2020 中野 冠他.

落丁・乱丁本はお取り替えいたします。無断複写・転写を禁じます。定価はケースに表示しております。
本書の内容に関し追加・訂正情報が生じた場合は、(株)エヌ・ティー・エスホームページにて掲載いたします。
※ ホームページを閲覧する環境のない方は、当社営業部(03-5224-5430)へお問い合わせください。



関連図書

	書籍名	発刊日	体 裁	本体価格
1	人と共生する AI 革命 ～活用事例からみる生活・産業・社会の未来展望～	2019年	B5 480頁	48,000円
2	電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電	2019年	B5 492頁	50,000円
3	飛躍するドローン ～マルチ回転翼型無人航空機の開発と応用研究、海外動向、リスク対策まで～	2016年	B5 380頁	45,000円
4	自動車のマルチマテリアル戦略 ～材料別戦略から異材接合、成形加工、表面処理技術まで～	2017年	B5 384頁	45,000円
5	自動車の軽量化テクノロジー ～材料・成形・接合・強度・燃費・電費性能の向上を目指して～	2014年	B5 342頁	37,000円
6	自動車オートパイロット開発最前線 ～要素技術開発から社会インフラ整備まで～	2014年	B5 340頁	37,000円
7	電気自動車の最新制御技術	2011年	B5 272頁	37,800円
8	次世代永久磁石の開発最前線 ～磁性の解明から構造解析、省・脱レアアース磁石、モータ応用まで～	2019年	B5 356頁	45,000円
9	CFRP の成形・加工・リサイクル技術最前線 ～生活用具から産業用途まで適用拡大を背景として～	2015年	B5 388頁	40,000円
10	革新的燃焼技術による高効率内燃機関開発最前線	2015年	B5 420頁	45,000円
11	オーグメンテッド・ヒューマン ～AI と人体科学の融合による人機一体、究極の IF が創る未来～	2018年	B5 512頁	48,000円
12	人と協働するロボット革命最前線 ～基盤技術から用途、デザイン、利用者心理、ISO13482、安全対策まで～	2016年	B5 342頁	42,000円
13	クリーンディーゼル開発の要素技術動向	2008年	B5 448頁	35,000円
14	水素利用技術集成 Vol.5 ～水素ステーション・設備の安全性～	2018年	B5 242頁	38,000円
15	ポストリチウムに向けた革新的二次電池の材料開発	2018年	B5 372頁	42,000円
16	モータの騒音・振動とその低減対策	2011年	B5 460頁	38,000円
17	高性能リチウムイオン電池開発最前線 ～5V 級正極材料開発の現状と高エネルギー密度化への挑戦～	2013年	B5 342頁	42,000円
18	スマート農業 ～自動走行、ロボット技術、ICT・AI の利活用からデータ連携まで～	2019年	B5 444頁	45,000円
19	三次元画像センシングの新展開 ～リアルタイム・高精度に向けた要素技術から産業応用まで～	2015年	B5 402頁	39,000円
20	Excel による生体信号解析 ～心電図、脈波、血圧～	2020年	B5 120頁	18,000円
21	超伝導現象と高温超伝導体	2013年	B5 530頁	45,000円
22	ヒューマンエラーの理論と対策	2018年	B5 334頁	42,000円

本体価格には消費税は含まれておりません。