

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

無人固定翼機の将来性能に関する潜在ニーズの調査研究

Investigation Research on Potential Needs for Future Performance of Unmanned Fixed-Wing Aircraft

山田 健翔, 内山 貴啓, 加藤 裕之, 上野 真

YAMADA Kento, UCHIYAMA Takahiro, KATO Hiroyuki and UENO Makoto

2021年1月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

1. はじめに	1
2. 調査範囲と評価手法	2
3. 結果と考察	3
3.1. 輸送機械ごとの積載量—航続距離グラフと潜在ニーズ	3
3.2. 電動バッテリーによる航続距離の限界	4
4. まとめ	6
参考文献	6

無人固定翼機の将来性能に関する潜在ニーズの調査研究

山田 健翔^{*1}, 内山 貴啓^{*2}, 加藤 裕之^{*2}, 上野 真^{*1}

Investigation Research on Potential Needs for Future Performance of Unmanned Fixed-Wing Aircraft

YAMADA Kento^{*1}, UCHIYAMA Takahiro^{*2}, KATO Hiroyuki^{*2}, UENO Makoto^{*1}

ABSTRACT

With the recent increase in the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), data on overall transportation equipment in terms of payload and cruising range were compiled to clarify the performance of unmanned aerial vehicles expected in the future. As a result, a niche was identified for payloads between 1[kg] and 500[kg] and for ranges between 100[km] and 1000[km]. It was suggested that this area of transport is suitable for UAVs and will be a performance requirement for future aircraft development. The range of a fixed-wing aircraft powered by an electric battery was calculated, and it was suggested that the current aerodynamic performance of the electric fixed-wing UAVs would be limited by the increase in battery weight before the above range was achieved. These considerations suggest that aerodynamic performance research will be just as important for future electric fixed-wing UAVs to achieve performance within the vacuum region as it is for electric vehicles in comparison to internal combustion engines.

Keywords: Unmanned aircraft, Performance estimation, Fixed wing, Cruise range, Payload

概要

近年の無人航空機の利用拡大に伴い、将来的に見込まれる無人航空機の性能を明らかにするために、積載量及び航続距離の観点から輸送機械全般のデータをまとめた。結果、積載量 1[kg]以上 500[kg]以下、航続距離 100[km]以上 1000[km]以下の範囲に空白領域が確認された。この領域の輸送は無人航空機に適性があり、将来開発される機体の性能要求になると示唆された。また、動力を電動バッテリーとした固定翼機の航続距離を計算し、現状の電動固定翼 UAV の空力性能では上記の領域を達成する前に、バッテリーの増量に対して航続距離に限界が出てくることが示唆された。以上から、電動固定翼 UAV が将来的に空白領域内の性能を達成するには、電気自動車において内燃機関車に比して空力性能が重要視されているのと同様に、空力性能の研究が重要となるという考察を得た。

1. はじめに

近年、無人航空機（又はドローン）は社会利用が急速に拡大している。無人航空機の国内市場規模は 2020 年現在 1932 億円と見込まれ、2025 年には約 3.3 倍の 6427 億円に成長すると予想されている¹⁶⁾。現状目にする範囲では無人航空機といえば回転翼機であるマルチコプターがほとんどである。マルチコプターの性能は航続距離などの面に限界があり、今後は用途に合わせて固定翼 UAV の利用が拡大していくと考えられるが、将来的に見込まれる無人航空機の性能は定量的に定まっていない。

そこで本稿では、輸送機械全般について積載量及び航続距離のデータをまとめ、無人航空機が輸送を担う上での将来的な立ち位置を明らかにする。次いで、動力を電動バッテリーとした現状の固定翼 UAV の性能の限界と技術的に研究が必要となる項目について考察する。

* 2020 年 12 月 2 日受付 (Received December 2, 2020)

^{*1} 航空技術部門 数値解析技術研究ユニット (Numerical Simulation Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

^{*2} 航空技術部門 空力技術研究ユニット (Aerodynamics Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

2. 調査範囲と評価手法

本稿では、輸送機械ごとの積載量と輸送距離の調査を行った。調査した輸送機械の一覧とデータ数を表 1 に示す。以下に輸送機械ごとの参考にしたデータについて述べる。

船舶については外航船と内航船の二種類について調査した。外航船は積載量の違いごとにマースク社のトリプル E 級マジスティック・マースク³⁰⁾、E 級エマ・マースク³¹⁾、CMA CGM マルコ・ポーロ⁹⁾、春日丸²⁶⁾の 4 種類のコンテナ船を参考にし、輸送距離は各船が就航している航路（パナマ運河又はスエズ運河経由アジア欧州航路）の距離を用いた。内航船は商船三井の所有する RORO 船「ぶぜん」³⁸⁾の諸元と平成 21 年度の国土技術政策総合研究所資料の内航 RORO 貨物船の統計データとして記載されている積載量及び輸送距離の最小値と最大値を用いた²⁴⁾。

航空機は貨物機、輸送機、攻撃機について調査を行った。貨物機については MD-11 Freighter⁵⁾、B777F²⁹⁾、Embraer 190¹⁴⁾、B747-400ERF⁶⁾の積載量と航続距離を参考にした。輸送機は自衛隊の装備品として公表されている C-130H¹⁹⁾、C-1²⁰⁾、C-2²¹⁾とアメリカ空軍のファクトシートによって性能が公表されている CV-22⁴¹⁾の積載量と航続距離を参考にした。攻撃機も同じくファクトシートから A-10⁴⁰⁾の性能を参考にした。

軽航空機は近年自動化及び電動化が積極的に試みられていることから調査の対象とし、Cessna Skyhawk⁸⁾及び Cessna Caravan⁷⁾の二機を参考にした。Reliable Robotics 社³⁶⁾はこれらの無人飛行に成功しており、MagniX 社³²⁾は Cessna Caravan を電動化し今年 6 月初飛行に成功している。電動化された機体 eCaravan の性能はデータがなかったため、今回の集計には含まれていない。

ヘリコプターは、輸送機と同様に自衛隊によって性能が公表されている CH-47J²²⁾、エアバス社によって性能が公表されている EC135¹⁾、EC225²⁾、ベル社によって性能が公表されている Bell429⁴⁾の 4 機を参考とした。

鉄道は貨物列車について調査を行い、JR 貨物の CSR 報告書³³⁾から平均輸送距離と輸送能力を引用した。

自動車は小型、中型、大型トラック及びトレーラーに加え、軽自動車 EV と乗用車を 1 ケースずつ選出した。トラック及びトレーラーについては、国土交通省によるトラック輸送状況の実態調査²⁴⁾より平均輸送距離のデータを引用し、積載量は小型トラック、中型トラック、大型トラック、トレーラーについてそれぞれ、2[t]、4[t]、10[t]、40[t]とした。軽自動車 EV については、商用 EV として実証走行試験が行われたダイハツ ハイゼットカーゴベースの試験車両¹⁰⁾の最大積載量と走行可能距離を参考にした。乗用車についてはトヨタ ハイエースを参考に積載量 1[t]、輸送距離を 100[km]と仮定した。

バイクについても二種類調査を行った。一つはロジクエストの提供するバイク便²⁶⁾及び自転車便²⁷⁾を参考に、サービスとしての積載制限と最大輸送距離を引用した。もう一つはビジネス用電動二輪車として開発されたホンダ BENLY e:シリーズ¹⁷⁾の最大積載量及び実現走行距離を参考にした。

マルチコプターについては一般向けの小型マルチコプターをはじめ、農業用大型マルチコプター DJI Agras T20¹¹⁾及び Urban Air Mobility 向けのマルチコプター EHang 216¹²⁾など合計 9 機の諸元を参考にした。

表 1 調査を行った輸送機械の一覧と参照データ数

輸送機械	データ数
船舶	9
航空機	10
ヘリコプター	4
鉄道	1
自動車	6
バイク・自転車	4
マルチコプター	9
UAV	7

UAV は本稿では固定翼 UAV を指し、軍事用 UAV 及び民間用 UAV の二種類について調査を行った。軍事用 UAV は米軍のファクトシートによって性能が公表されている MQ-1 Predator⁴²⁾、MQ-9 Reaper⁴³⁾と、Elbeit Systems HermesTM 90¹³⁾の 3 機の諸元を参考にした。民間用 UAV はサウサンプトン大学の UAV チームによって開発された Windracer ULTRA⁴⁴⁾の目標値、Wingcopter 社の Wingcopter 178 Heavy Lift⁴⁵⁾、senseFly 社の eBee classic³⁷⁾、Zipline 社の Medical drone⁴⁷⁾の公表値の計 4 機の諸元を参考にした。

3. 結果と考察

3.1. 輸送機械ごとの積載量—航続距離グラフと潜在ニーズ

図 1 に集計したデータの両対数グラフを示す。2020 年 10 月時点で、無人航空機による輸送ビジネスは社会実装を控えた実証段階である。そのため、図 1 からマルチコプターと固定翼 UAV を除くと、航空機とそれ以外（船舶、鉄道、自動車、バイク）について積載量と輸送距離の関係は一線を画している。特に航空機以外のグループには直線的な関係が見て取れ、これは非航空輸送ビジネスとして成立しているグループと考えられる。航空輸送のグループは、非航空輸送グループよりグラフでいうと“上”の領域に存在する。これは同じ輸送距離に対して積載量が小さいことを意味するが、この領域で航空輸送のビジネスが成立しているのには理由がある。それは、航空輸送が同程度の積載量である船舶輸送に対して速さや輸送品質（振動の少なさなど）の面で優れている点である¹⁸⁾。

無人航空機のグループを図 1 に戻すと、マルチコプターのグループは性能的に非航空輸送ビジネスの領域に重なっている。一方で固定翼 UAV のグループはマルチコプターに近いものと航空機に近いものの二種類があり、前者は電動バッテリーにより推進する固定翼機（電動固定翼 UAV）である。この領域では近年マルチコプターとハイブリッドした機体（WingCopter⁴⁵⁾ など）も開発されており、マルチコプターと同様に垂直離着陸が可能で、固定翼がある分航続距離が伸びるというメリットがあるため、設計手法に関する研究も進められている⁴⁴⁾領域である。後者は化石燃料による内燃機関を用いた固定翼機（内燃固定翼 UAV）である。内燃固定翼 UAV の性能は軽航空機の性能と非常に近い。このことから、軽航空機に対して無人化³⁵⁾が実現しつつあるのは性能的な観点からも妥当であり、近い将来これらの軽航空機が無人機の一部に組み込まれることは想像に難くない。したがって本稿では、マルチコプター、UAV 及び軽航空機が多く存在する積載量 1000[kg]以下で輸送距離を伸ばした航続距離 1000[km]以下の領域は地上輸送手段に対して航空機の特性を生かした優位性のある領域であると考えられる。

また、軽航空機は電動化^{32,35)}も進められているが、元の機体と電動機の関係性は内燃固定翼 UAV と電動固定翼 UAV の関係性に似てくると考えている。現状内燃固定翼 UAV と電動固定翼 UAV の性能の間にはギャップが存在し、これは航空機の電動化においても顕在化する問題である。電動バッテリーによる性能の限界については後述するが、現状では航続距離が内燃機関推進に比べ劣ってしまう。今後の無人機研究開発の流れとしては、このギャップを埋めるためにバッテリーの性能向上を追求するだけでなく、抵抗低減などの空力性能に関わる研究も重要になると考えている。特に空力性能については電気自動車においても、長時間の一定速走行ではエネルギー回生の機会が少なくなること、70[km/h]以上の速度では転がり抵抗より空力抵抗が支配的になることなどの理由から、優先して研究すべき最重要項目となっている³⁾。よって、無人航空機の電動化においても同様に、空力性能の追究は将来的に最重要項目となると考える。

本稿では電動固定翼 UAV と内燃固定翼 UAV の間のギャップを積載量 1[kg]~500[kg] 輸送距離 100[km]~1000[km]と定める。世界ドローン総覧³³⁾においても今後の無人機開発の方向性が述べられているが、本領域にはその内の「大型・高速化」で提唱されている「飛行 2 時間、ペイロード 100[kg]、速度 200[km/h]」も含まれている。上記の航空輸送の利点に鑑みて、この空白領域は航空機の陸上輸送に対する優位性に従って無人航空機が将来占めると予想しており、特に高い巡航性能を持てる固定翼機に適性があると考えている。以降この領域における航空輸送を小型航空輸送と呼ぶ。本稿ではこの領域を設計技術的ニッチとして捉えているが、なぜニッチになっているのかについては技術的な要因だけで決まるものではないので、市場要因等その他の要素を勘案しながら今後も検討する必要がある。

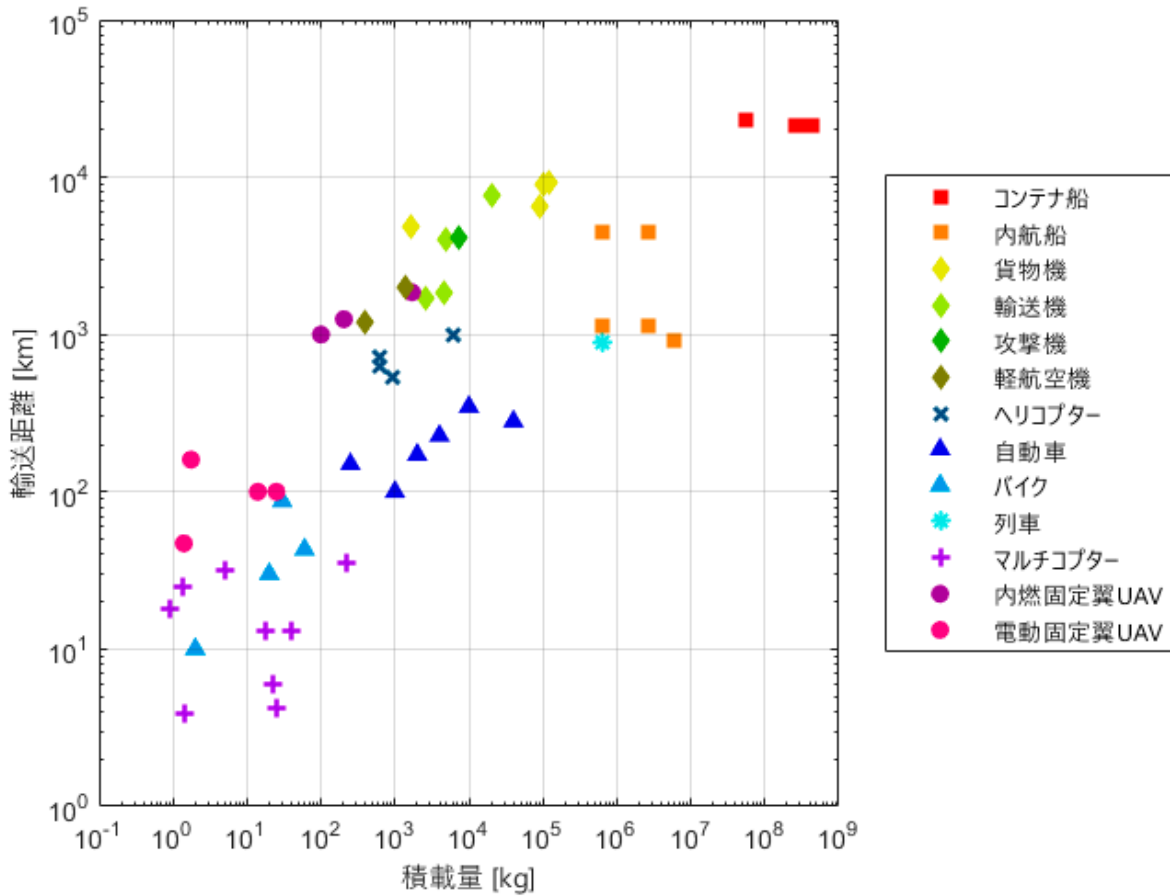


図 1 様々な輸送機械の積載量と輸送距離の関係

3.2. 電動バッテリーによる航続距離の限界

ここでは小型航空輸送の空白領域から技術課題を探るために、現状の電動固定翼 UAV の揚抗比を推定し、小型航空輸送に対する現状機体の性能限界を見積もる。現状では内燃機関を用いた方が輸送性能は高いが、ICAO により航空機の CO₂ 排出量基準が新設された²³⁾下での環境適合性や使い勝手の観点から航空機の電動化は促進されており、本稿でも電動機に主眼を置いている。

電動航空機の飛行性能は、簡易的に以下の式で見積もられる¹⁵⁾。

$$R = E^* \frac{W_{batt}}{W_{total}} \frac{1}{g} \frac{L}{D} \eta_{total} \quad (1)$$

R [m]は航続距離、 E^* [J/kg]はバッテリーの重量当たりのエネルギー、 W_{batt} [kg]はバッテリー重量、 W_{total} [kg]は機体のバッテリーを含む総重量、 g [m/s²]は重量加速度、 L/D は機体揚抗比、 η_{total} はモーターの電源から回転への変換効率、プロペラ効率などを含んだトータルでの推進効率を表す。本稿では参照機体として WingCopter⁴⁵⁾の L/D を簡易的に推定した。 $W_{batt} = 6.4$ [kg]、 $E^* = 0.56$ [MJ/kg]¹¹⁾、 $\eta_{total} = 0.8$ ¹⁵⁾など計算に必要な諸元を設定し式(1)に代入すると、機体揚抗比は $L/D = 4.79$ と推定された。計算に使用した諸元と計算結果を表 2 に示す。

表 2 WingCopter⁴⁵⁾の揚抗比推算結果と推算に使用した諸元

項目	値
R [m]	100×10^3
E^* [J/kg]	0.56×10^6
W_{batt} [kg]	6.4
W_{total} [kg]	14
g [m/s ²]	9.8
η_{total}	0.8
L/D	4.79

推定した揚抗比と式(1)から①航続距離 R [m]および積載量(ここでは機体自重とペイロードの合計値) $W_{total} - W_{batt}$ [kg]を独立変数, W_{batt} [kg]を従属変数として, 性能曲線を図 1 に重ねてプロットする. また, ②1回の飛行に要するバッテリー充電費用との関係を可視化するため, $E^*W_{batt}ER$ [JPY]が一定の線を同時にプロットする. ここで ER [JPY/kWh]とは Electricity Rate の略で, 1[kWh]あたりの電気料金を指している. 今回は東京電力の電気料金表³⁸⁾を参考に, $ER=25$ [JPY/kWh]と設定した. ①および②について図 1 に追加した結果を図 2 に示す.

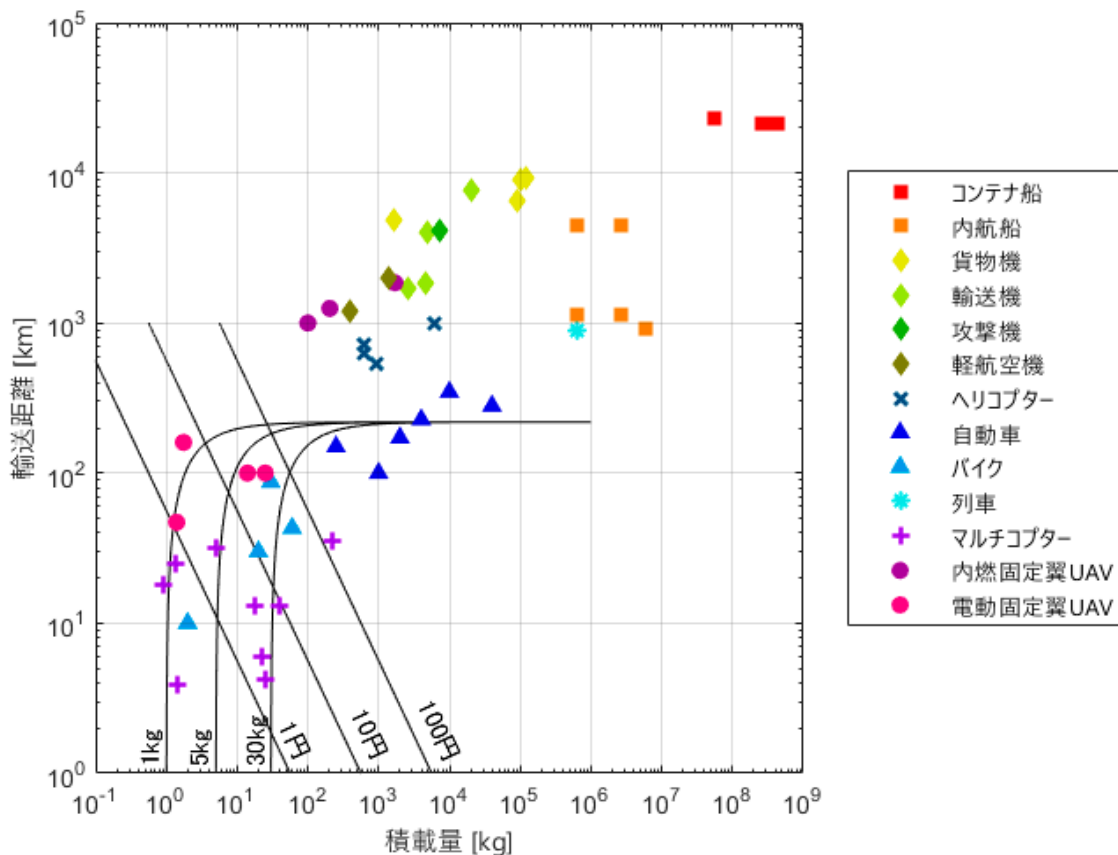


図 2 現状の UAV の機体性能が満たせる飛行領域と 1 回の飛行の充電コスト

曲線と直線が 3 本ずつ追加されている. 曲線は $W_{total} - W_{batt}$ [kg]が一定の曲線であり, それぞれ 1[kg], 5[kg], 30[kg]を表している. もし現状の固定翼 UAV およびバッテリーの性能でペイロードをこれだけ確保したいならば, この曲線よりも右下の領域で飛行する必要があることを意味している. また積載量が大きくなっていくと, 輸送距離が 200[km]のあたりで 3 本の曲線が重なってくる

ことがわかる。これはバッテリー容量を増やしても重量増分で打ち消され、航続距離が伸びなくなること示しており、現状の固定翼 UAV とバッテリーが達成できる航続距離の限界を表している。式(1)でいうと、 W_{batt}/W_{total} が1に限りなく近づいている状態である。一方右肩下がりの3本の直線は $E \cdot W_{batt} ER [PY]$ が一定の直線であり、それぞれ1回あたりのフライトに要する充電コストが1円、10円、100円の直線である。この直線はグラフの右上に向かうほど、つまり輸送距離や積載量が大きくなるほど、バッテリーが大型化することにより1回のフライトに必要な充電料金が大きくなることを示している。

なお、曲線と直線の交点は重量あたりの充電コストを表している。例えば $W_{total} - W_{batt} = 1[\text{kg}]$ の曲線と $E \cdot W_{batt} ER = 1[\text{PY}]$ の直線の交点は、合計1[kg]の機体とペイロードを、交点に対応する輸送距離だけ運ぶのに1円の充電コストが発生することを意味する。輸送距離が長くなるほど1[kg]運ぶのに必要な充電コストは増えていくが、特に航続距離の限界が近づいてくると、充電コストの増加が著しく、性能限界近くで飛行することは好ましくないことが示唆される。

以上から、前述の小型航空輸送の目指す範囲を飛行するのに現状の電動固定翼 UAV の飛行性能及びバッテリー性能では十分でないと思われた。本稿で推定された揚抗比 $L/D=4.79$ は、性能が公開されている同程度のバッテリー性能や教科書に記載されている一般的な効率係数を仮定しているため多少の誤差は存在すると考えられるが、大型旅客機やグライダーが達成している20程度の揚抗比に比べかなり小さい値である。これは機体の汎用性を考えて現状のマルチコプターと同程度のサイズの固定翼が用いられていることなどから、空力性能が犠牲になっていると考えられる。したがって、将来的な無人航空機の研究開発は、空力性能の改善が最重要項目の一つになると予想される。バッテリー性能の改善のみならず、機体の空力性能に改善がもたらされれば航空輸送の特性を生かした大きな市場の開拓が期待される。

4. まとめ

本稿では無人航空機に優位性のある性能の領域について調査し、以下の二点が明らかになった。

まず、様々な輸送機械の積載量と航続距離について両対数グラフにプロットしたところ、トラックや自動車、バイクによる地上輸送と船舶による海上輸送は一つの直線上に乗っているように見られることがわかり、これを非航空輸送のグループと定義した。航空輸送はこのグループの直線の“上”に離れて存在しており、速度や振動の小ささといった航空輸送の優位性はこの領域での航空輸送ビジネスを成立させていると考えられた。マルチコプターはその性能の限界から現状ではバイクによる輸送サービスの範囲を置き換えることが限界であり、それ以上の性能を得るには固定翼を用いる必要があると示唆された。一方固定翼 UAV にはマルチコプター寄りと航空機寄りの二種類が存在しており、その間の積載量1[kg]~500[kg]航続距離100[km]~1000[km]は空白となっていた。航空輸送の特性を考慮すると、この領域は将来無人航空輸送の主たる市場を形成する領域と予想され、本稿ではこの領域の航空輸送を小型航空輸送と定義した。

次いで、環境などの観点から今後主流となるであろう電動固定翼 UAV について、現状の電動固定翼 UAV の性能を推定し、電動航空機の航続距離の式からバッテリーの増量に対して航続距離が頭打ちになることが示された。また、その特性から輸送距離に対する充電コストも見合わなくなることが示され、現状の電動機では固定翼であっても本稿が提案する小型航空輸送市場の性能は満たさない。したがって、機体の空力性能及びバッテリー性能の向上が小型航空輸送市場成立のカギとなることが示唆された。特に空力性能については電気自動車においても最重要項目であることから、電動固定翼 UAV の空力性能は今後追究されるべき項目になると考えられる。

参考文献

- (1) Airbus, “H135,” <http://www.airbushelicopters.co.jp/products/ec135-p2e-t2e/>. [2020/10/9].
- (2) Airbus, “H225,” <http://www.airbushelicopters.co.jp/products/ec225-lp/>. [2020/10/9].
- (3) Audi, “Audi e-tron prototype : エアロダイナミクス,” https://www.audi-press.jp/press-releases/PressKit/e-tron/PressKit_information_Audi_e-

- tron_Aerodynamics_FIX_JPN.pdf. [2020/10/28].
- (4) Bell, “BELL 429,” <https://www.bellflight.com/products/bell-429>. [2020/10/9].
 - (5) Boeing, “MD-11 Aircraft Performance for Airport Planning,” <https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/md11.pdf>. [2020/10/9].
 - (6) Boeing, “747 型機情報,” <https://www.boeing.jp/ヒシネス部門-紹介/ホーインク民間航空機部門/747型の概要/747型機情報.page>. [2020/9/30].
 - (7) Cessna, “Cessna Caravan,” <https://cessna.txtav.com/en/turboprop/caravan>. [2020/11/19]
 - (8) Cessna, “Cessna Skyhawk,” <https://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-skyhawk>. [2020/11/19]
 - (9) CMA CGM, “CMA CGM MARCO POLO,” <https://www.cmacgm-group.com/en/group/at-a-glance/fleet/ships/9454436/cma-cgm-marco-polo>. [2020/11/19].
 - (10) ダイハツ, “滋賀県、大分県の実証試験へ車両提供 軽商用電気自動車の実証走行試験の実施について,” <https://www.daihatsu.com/jp/news/2012/kv07110000000hok.html>. [2020/9/30].
 - (11) DJI, “Agras T20 日本版,” <https://www.dji.com/jp/t20/specs>. [2020/9/30].
 - (12) EHang, “EHang AAV The Era of Urbain Air Mobility is Coming,” <https://www.ehang.com/ehangaav>. [2020/9/30].
 - (13) Elbeit Systems of Australia, “Hermes(TM) 90- Close Range, long endurance,” <https://www.elbitsystems.com.au/uas-hermes-90-close-range-long-endurance/>. [2020/10/9].
 - (14) Embraer, “E190,” <https://www.embraercommercialaviation.com/commercial-jets/e190/>. [2020/10/9].
 - (15) L. Ferrier, “Math on the Musk Electric Jet,” <https://lochief.wordpress.com/2015/08/04/how-the-musk-electric-jet-works/>. [2020/10/12].
 - (16) 春原久徳, 青山祐介, “ドローンビジネス調査報告書 2020,” 株式会社インプレス, 2020.
 - (17) ホンダ, “ニュースリリース,” <https://www.honda.co.jp/news/2019/2191219-benly.html>. [2020/9/30].
 - (18) 一般社団法人日本海事検定協会 (検査第一サービスセンター), “平成 28 年度報告書 航空輸送による加速度の測定,” 2016.
 - (19) 航空自衛隊, “主要装備 C-130H,” <https://www.mod.go.jp/asdf/equipment/yusouki/C-130H/index.html>. [2020/10/9].
 - (20) 航空自衛隊, “主要装備 C-1,” <https://www.mod.go.jp/asdf/equipment/yusouki/C-1/index.html>. [2020/10/9].
 - (21) 航空自衛隊, “主要装備 C-2,” <https://www.mod.go.jp/asdf/equipment/yusouki/C-2/index.html>. [2020/10/9].
 - (22) 航空自衛隊, “主要装備 CH-47J,” <https://www.mod.go.jp/asdf/equipment/yusouki/CH-47J/index.html>. [2020/10/9].
 - (23) 国土交通省航空機検査制度等検討小委員会, “航空機の安全確保と取り巻く環境の変化,” <https://www.mlit.go.jp/common/001226033.pdf>. [2020/11/27]
 - (24) 国土交通省国土技術政策総合研究所, “国土技術政策総合研究所資料 No. 494,” 国土交通省, 2009.
 - (25) 国土交通省, “トラック輸送状況の実態調査結果 (全体版),” <https://www.mlit.go.jp/common/001128767.pdf>. [2020/9/30].
 - (26) 小林幹弘, “コンテナ船建造に関わって,” 『航跡』 船匠 (たくみ) たちから次代への伝言, 関西造船協会, pp. 233-242, 2002.
 - (27) ロジクエスト, “配送方法・特急便 (バイク便),” <https://spot.logiquest.co.jp/delivery/super/>. [2020/9/30].
 - (28) ロジクエスト, “配送方法・自転車便,” <https://spot.logiquest.co.jp/delivery/bicycle/>. [2020/9/30].
 - (29) Lufthansa Cargo, “Our B777Fs: The world’s most environmentally friendly freighters,” <https://lufthansa-cargo.com/fleet-uids/fleet/b777f>. [2020/10/9].
 - (30) Maersk, “Schedules VESSEL INFORMATION - MAJESTIC MAERSK,” <https://www.maersk.com/schedules/#vesselSchedules?vesselCode=1HM>. [2020/10/9].
 - (31) Maersk, “Schedules VESSEL INFORMATION - EMMA MAERSK,” <https://www.maersk.com/schedules/#vesselSchedules?vesselCode=766>. [2020/10/9].

- (32) MagniX, “Connecting communities: All Electric. No Fuel. No Emissions. Less Noise.”
<https://magnix.aero/>. [2020/11/19]
- (33) 日本貨物鉄道株式会社, “JR 貨物 CSR 報告書 2016 2017,” 日本貨物鉄道株式会社, 2017.
- (34) 日経 BP クリーンテック研究所 テクノアソシエーツ 調査, “世界ドローン総覧: 航続距離、ペイロード、世界 173 モデル分析による普及シナリオと規制の動き,” 日経 BP 社, 2015.
- (35) 西沢啓, 小林宙, 飯島朋子, 山崎宏二, 奥山政広, 田頭剛, 平野義鎮, 吉村彰紀, 進藤重美, 岡井敬一, “航空機用電動推進システム技術の飛行実証,” 日本航空宇宙学会誌, 65, pp. 196-200, 2017.
- (36) Reliable Robotics, “We believe aircraft should fly themselves.”
<https://reliable.co/about/>. [2020/11/19]
- (37) senseFly, “Compare,”
<https://www.sensefly.com/drones/compare-drones/>. [2020/9/30].
- (38) 商船三井フェリー, “船舶一覧,”
<https://www.sunflower.co.jp/corporate/vessellist/index.shtml>. [2020/9/30].
- (39) 東京電力エナジーパートナー.
<https://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/old01.html>. [2020/10/12].
- (40) U.S. Air Force, “A-10 Thunderbolt II,”
<https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104490/a-10-thunderbolt-ii/>. [2020/11/27]
- (41) U.S. Air Force, “CV-22 Osprey,”
<https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104531/cv-22-osprey/>. [2020/10/9].
- (42) U.S. Air Force, “MQ-9 Reaper,”
<https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104470/mq-9-reaper/>. [2020/10/9].
- (43) U.S. Air Force, “MQ-1B Predator,”
<https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104469/mq-1b-predator/>. [2020/10/9].
- (44) Windracers, “Press release,” <https://www.windracers.org/blog/uav-press-release>. [2020/9/30].
- (45) Wingcopter, “Technology,”
https://wingcopter.com/wp-content/uploads/2020/03/Specsheet_Wingcopter_178HL-2.pdf.
[2020/9/30].
- (46) L. Xu, T. Du, M. Foshey, B. Li, B. Zhu, A. Schulz, and W. Matusik, “Learning to fly: computational controller design for hybrid UAVs with reinforcement learning,” ACM Transaction on Graphics, Vol. 38, No.4, 2019.
- (47) Zipline, “How It Works,” <https://flyzipline.com/how-it-works/>. [2020/11/20].

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-20-003
JAXA Research and Development Memorandum

無人固定翼機の将来性能に関する潜在ニーズの調査研究
Investigation Research on Potential Needs for Future Performance
of Unmanned Fixed-Wing Aircraft

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>
発行日 2021年1月22日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

