

電動航空機における電池の役割

The Role of Batteries in Electric Aircraft

西 沢 啓*

Akira Nishizawa

Next Generation Aeronautical Innovation Hub Center
Aeronautical Technology Directorate
JAXA

Abstract

The aircraft has been said to be the last of all vehicles to be forced to rely on the fossil fuels due to severe weight restrictions. In fact, the amount of CO₂ emitted by airplanes takes up about 2% of the world's total anthropogenic emissions. However, even if there is a temporary decrease in transportation demand due to the impact of Covid-19, the demand for air transportation is on the rise in the long term. Because of this outlook, it is feared that the CO₂ emissions from aviation will increase, though for a relatively small level, due to the expansion of electrification and higher efficiency in automotive and other industries. Nowadays, aircraft is not immune to the trend toward electrification, and research and development are conducted all over the world. This review outlines the latest trends in electric aircraft and the role of the batteries.

Key words : electric aircraft, electrified propulsion, lithium-ion batteries, CO₂ reduction

1 はじめに

航空機は質量の制約が厳しいため、あらゆる乗り物の中でも最後まで化石燃料に依存せざるを得ないとも言われてきたことや、航空機が排出するCO₂の量は全世界の人為的排出量のうちわずか2%程度しかいないことから20年前であれば脱化石燃料化のインセンティブはそれほど大きくなかった。しかし、Covid-19の影響による一時的な輸送需要減はあるにしても、長期的には航空輸送需要は増加傾向にあり、

自動車をはじめ他産業における電動化率の拡大や高効率化の進展により、航空機由来のCO₂排出量は相対的に無視できないほど増大することが懸念されている¹。そのため今や航空機も電動化のトレンドと無縁ではなく、世界中で研究開発が行われている状況である。本稿では、電動航空機の最新動向と電池の役割について概説する。

2 電動航空機の動向

2.1 電動航空機の技術動向

本稿では推進系の原動機として電動機（以後、電動モータ）を用いたものを電動航空機 (Electric aircraft)

* 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

と定義する。なお、熱機関と電動モータのハイブリッドも電動航空機を含む。図1に電動航空機の推進システム構成を示す。電力源として二次電池のみを用いる純電動推進システムと、二次電池以外の電力源（内燃機関発電機、燃料電池、それらの組み合わせ等）と組み合わせたハイブリッド電動推進システムに大別できる。ハイブリッド電動推進システムには、電動モータのみがファンを駆動するシリーズハイブリッドと、電動モータと内燃機関の双方がファンを駆動するパラレルハイブリッドの二種類がある。

図2に1990年代以降の有人電動航空機の初飛行年と出力規模及び将来の予測を示す。初期の有人電動航空機はニッケルカドミウム電池や直流（DC）モータを用いており、出力は極めて微弱であった。しかし、2006年にドイツのLange Aviation社が型式証明を取得した電動モータグライダーAntares 20E²は、有人電動航空機としては世界で初めてリチウムイオン電池（SAFT社製VL41M）を採用し、これにより出力規模がそれまでに比べ著しく増加した。このAntares 20E以後、世界各国で電動航空機の開発が盛んになり、その後も出力性能は指数関数的に増加し続けている。これらの中には、水素燃料電池を動力源とするものや、ガソリンエンジンと電動モータのハイブリッドエンジン機等も存在する。さらに、2016年以降は電動の垂直離着陸機（eVTOL）も登場した³。eVTOLは最近特

に世界中で開発が過熱しているが、旅客機電動化によるCO₂削減とは全く異なる価値（Urban Air Mobility）⁴の創出を目指した動きであり、2018年以降における世界各国での電動航空機開発の大多数はeVTOLを対象としたものである。ここ数年大規模な開発投資が行われているため、性能の向上も急速である。

2020年頃を境にして電動航空機は実験機の段階から実用機の段階へ移行しつつある。その主要要因は小型航空機（客席19席以下級）に関するレギュレーションFAR Part-235が2017年に改訂され、電動航空機にも対応できるようになったことと、実験機で培われた主要要素（電動モータ、電力変換器、電池等）の技術成熟度が実用に供するレベルに到達したことによる。

表1に電動航空機の技術動向をまとめる。2000年代以降、電動モータや電力源等の基幹技術が急速に進歩し、性能が飛躍的に向上した。特に、リチウムイオン電池及び、高性能磁石を用いた永久磁石型同期モータの適用が大きく寄与した。これらの基幹技術は自動車電動化の開発が牽引したものであり、今後も電動航空機の基幹技術は自動車技術の寄与を大きく受けることが予想される。

2.2 電動化の意義と課題

図3に既存航空機と純電動航空機の運航コストを比較する。ここ数年の技術進歩が著しく、電動化の効果が顕著に現れるeVTOLを例として、比較対象の既

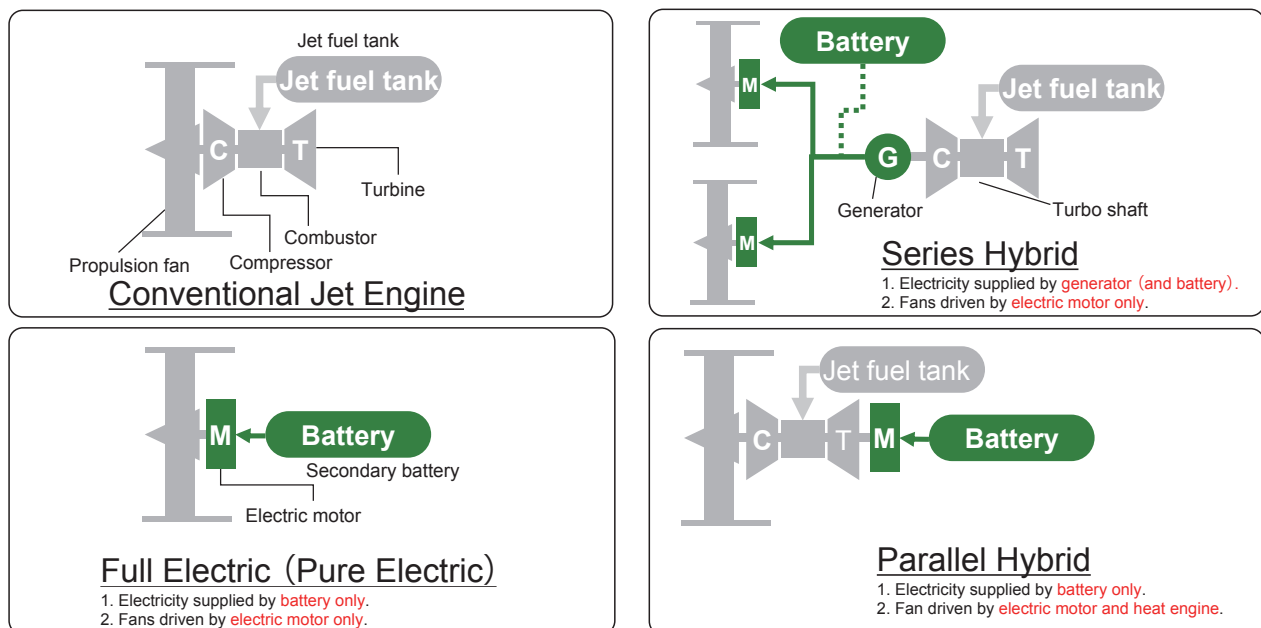


Fig. 1 Propulsion systems of electric aircraft (Note: In these figures, some elements such as reduction gear and power converter are omitted).

存航空機は回転翼機（ヘリコプタ）を例として選んだ。電動化した場合の検討結果から、推進系の電動化によって運航コストの内訳のうち、燃料費や整備費を大幅に削減できる可能性を持っていることがわかる。仮に操縦を自動化してパイロットレスにできればさらに大幅な運航コスト削減を達成できるが、推進系の電動化と操縦の自動化は特に eVTOL において親和性が高い。従って電動化の意義としては、燃費・整備費削減に加えて自動化も期待されることである。固定翼機

の場合は、操縦は舵面の操作によって行われるため、基本的には推進系の電動化と操縦の自動化は独立した技術課題であり、燃費・整備費削減のみが電動化の意義となる。

電気自動車がそうであるように航空機も電動化は航続距離に課題がある。図4に開発中 eVTOL の性能を示す。4 席ヘリコプタ R44 のエンジンを電動推進システムに置換した例があるため、電動化による航続距離の減少幅を直接比較することができ、約 1/10 に短

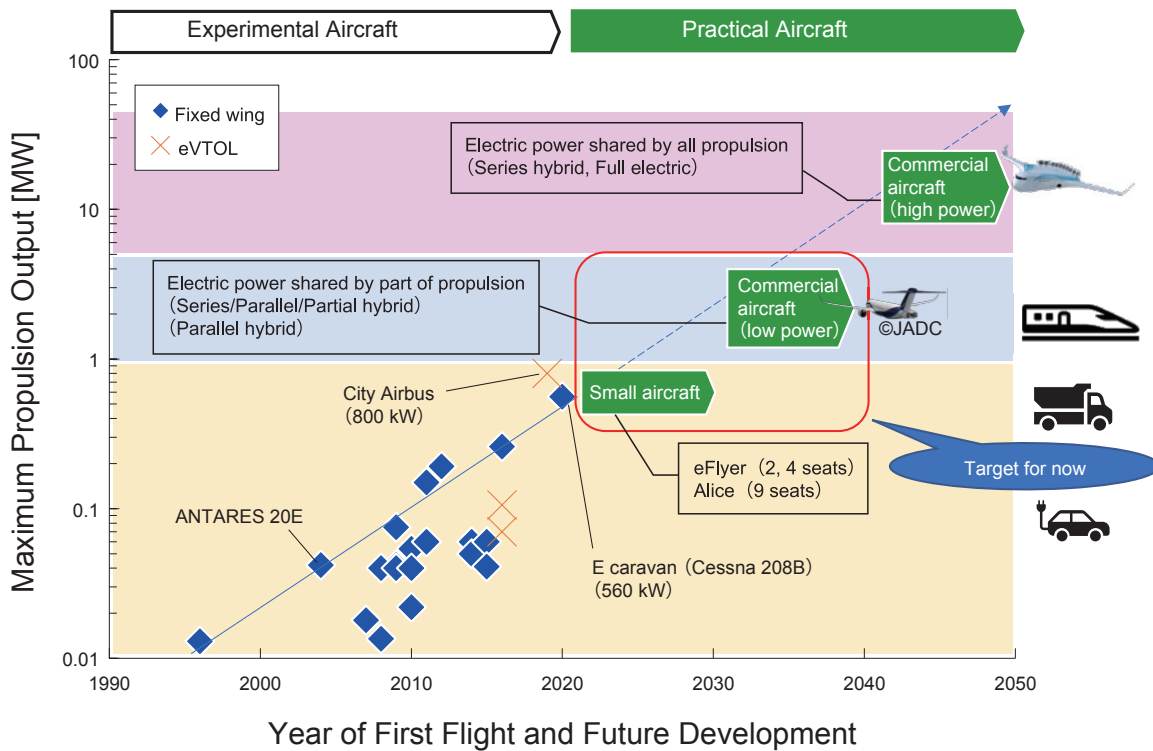


Fig. 2 Progress in output power of electric aircraft and future development.

Table 1 Technological trend in electric aircraft.

Year	1973 ~ 1990	1991 ~ 2000	2001 ~ 2010	2011 ~ 2015	2016 ~ 2020
Seat	1	1	~ 2	~ 4	~ 14
Speed	~ 120 km/h (Ni-Cd) ~ 50 km/h (Solar cell)	~ 100 km/h	~ 250 km/h	~ 330 km/h	342.8 km/h
Range	260 km (Solar cell)	~ 30 km	~ 190 km (Li-Ion)	~ 400 km (Li-Ion)	Unknown
Maximum motor output (total output / aircraft)	~ 10 kW (Ni-Cd) ~ 2.5 kW (Solar cell)	~ 13 kW	~ 92 kW	~ 192 kW	~ 560 kW (Fixed wing, Singleengine) ~ 800 kW (Multi-copter, 8-engine)
Electric Motor	DC motor	DC motor	Permanent magnet synchronous motor (Neodymium magnet)	Permanent magnet synchronous motor (Neodymium magnet)	Permanent magnet synchronous motor (Halbach array)
Power source	Ni-Cd battery Solar cell	Ni-Cd battery	Li-Ion battery, Fuel cell, Solar cell	Li-Ion battery, Fuel cell, Solar cell	Li-Ion battery, Fuel cell, Solar cell
Typical example	MB-E1 (Austria) Solar Challenger (US)	Silent AE-1 (Germany)	ANTARES 20E (Germany) Boeing FC demonstrator (US) Rapid 200FC (Italy) Electric SkySpark (Italy) Solar Impulse 1 HB-SIA (Swiss)	e-Genius (Germany) Taurus G4 (Slovenia, US) Solar Impulse 2 HB-SIB (Swiss) Long-EZ (US) E-Fan (France)	Extra 330LE (Germany) Volocopter 2X (Germany) eFlyer 2 (US) City Airbus (France) E caravan (US)

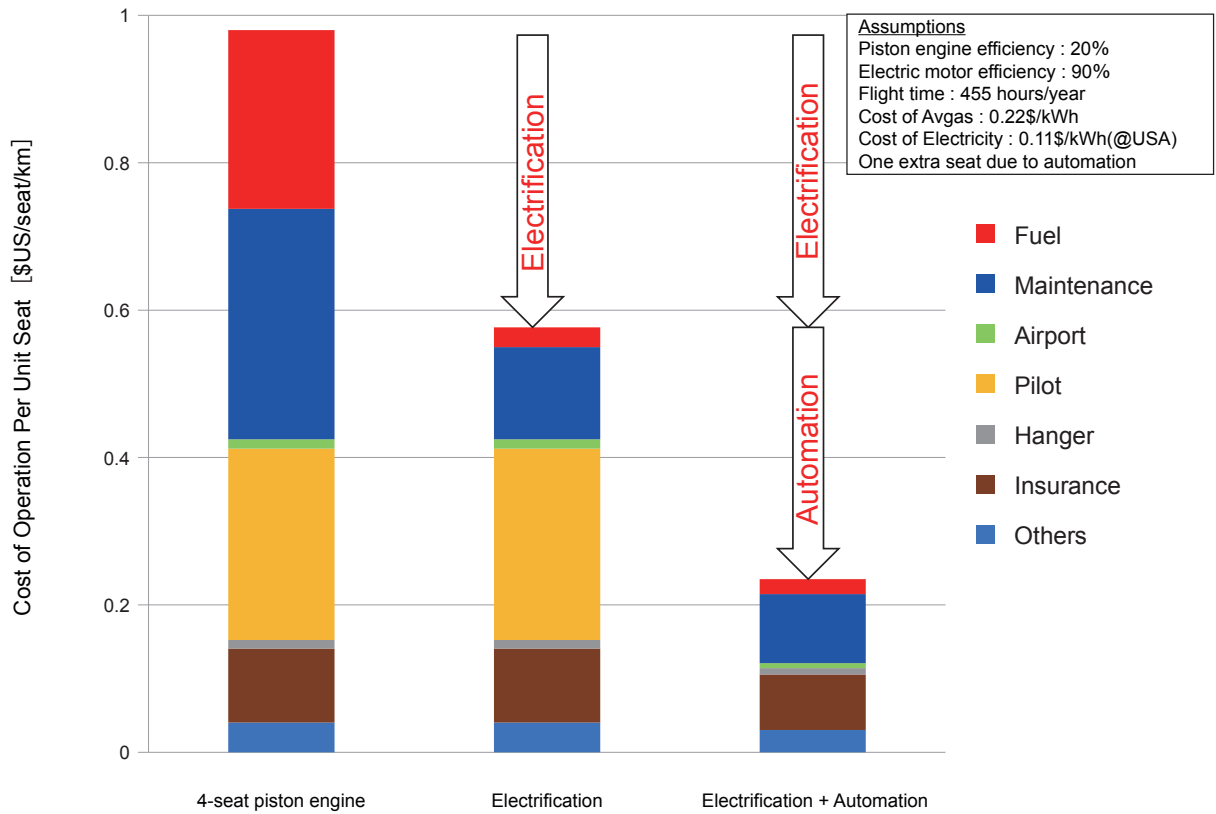


Fig. 3 Effect of electrification and automation on operation cost reduction of rotorcraft.

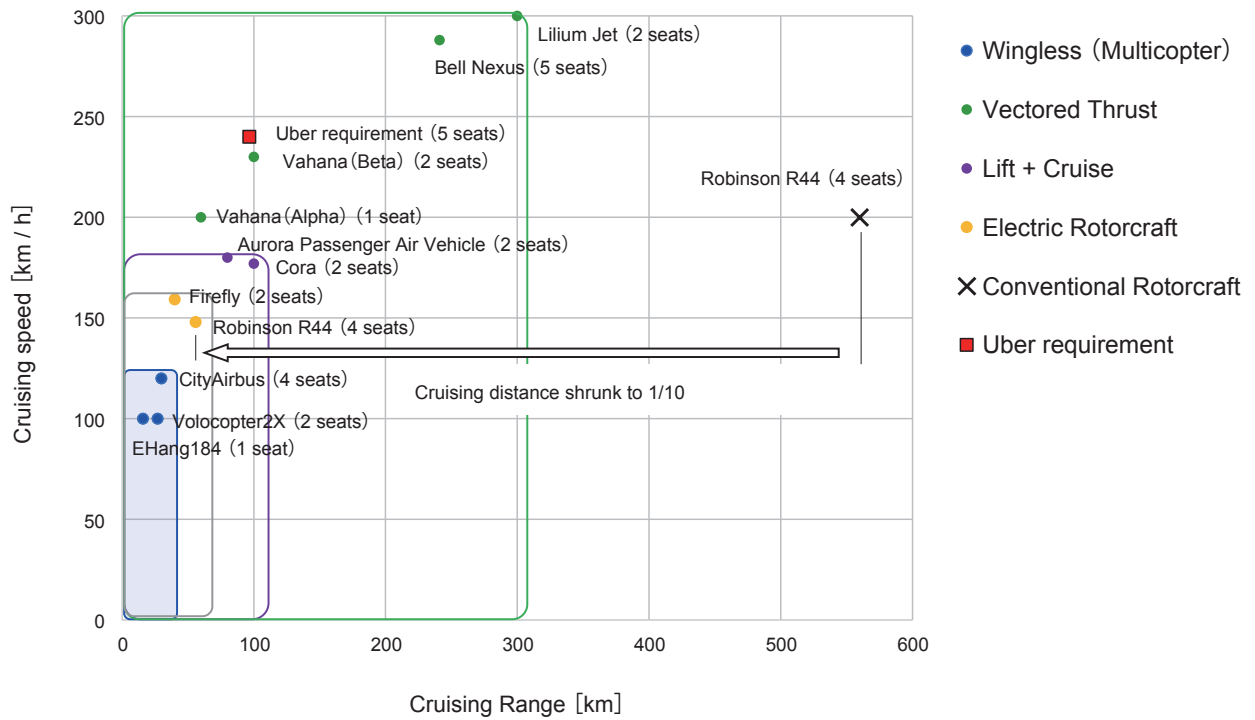


Fig. 4 Comparison of performance of eVTOL currently under development.

縮してしまうことがわかる。eVTOLの中でも特にドローンを大型化したような形態であるマルチコプタ型は、電動化されたヘリコプタよりも航続距離・巡航速度ともに劣る傾向にある。もともとヘリコプタは回転翼が一回転する間にブレードのピッチ角を変化させたり、ブレード回転面を傾けて飛行制御したりするため、機械的に複雑な機構を有するので整備費が嵩むという課題がある。これに対し、電動マルチコプタは機械的に複雑な機構を持たないことが利点であるため、飛行性能とのトレードオフが存在するが、マルチコプタの利点を保有しつつ飛行性能を向上するための新しい形態が、推力偏向 (Vectored Thrust) 型や離着陸時揚力と巡航推力を分離した (Lift + Cruise) 型であり、これらはいずれも巡航中の揚力を発生させるための主翼を有する。VTOLの運航費用が劇的に抑えられれば例えば短距離でも市場は存在するため、用途に応じた各eVTOLの型の棲み分けが今後生じると考えられる。また図3に示すeVTOLに使用されている電池は、現在調達可能でかつ飛行に供されることが可能であるものであるため、エネルギー密度はそれほど大きくなく

パックレベルで150 Wh/kgから200 Wh/kgの間にあると推測される。今後、ポリウムゾーンを獲得するeVTOLの形態がいずれであったとしても、電池性能の向上は航続距離増加に直結するため、商品価値を決める重要な要因になる。

3 電池の役割

3.1 航続距離と電池性能の関係

固定翼航空機における電池のエネルギー密度と航続距離の関係は図5のように表すことができる⁶⁾。eVTOLの場合は形態によって大きく異なるため、ここでは関係式については割愛し、固定翼機の場合のみを例として説明する。航続距離を伸ばす方法としては、エネルギー搭載量を増やす方法とエネルギー消費率を改善する方法の二種類がある。航空機の場合は自動車と異なり、電池のエネルギー搭載量を増やした結果全体の質量が大幅に増えるということは許容できないため、搭載エネルギー量を増やす場合は、全体の質量が増えないように電池のエネルギー密度を向上することが強く要求され

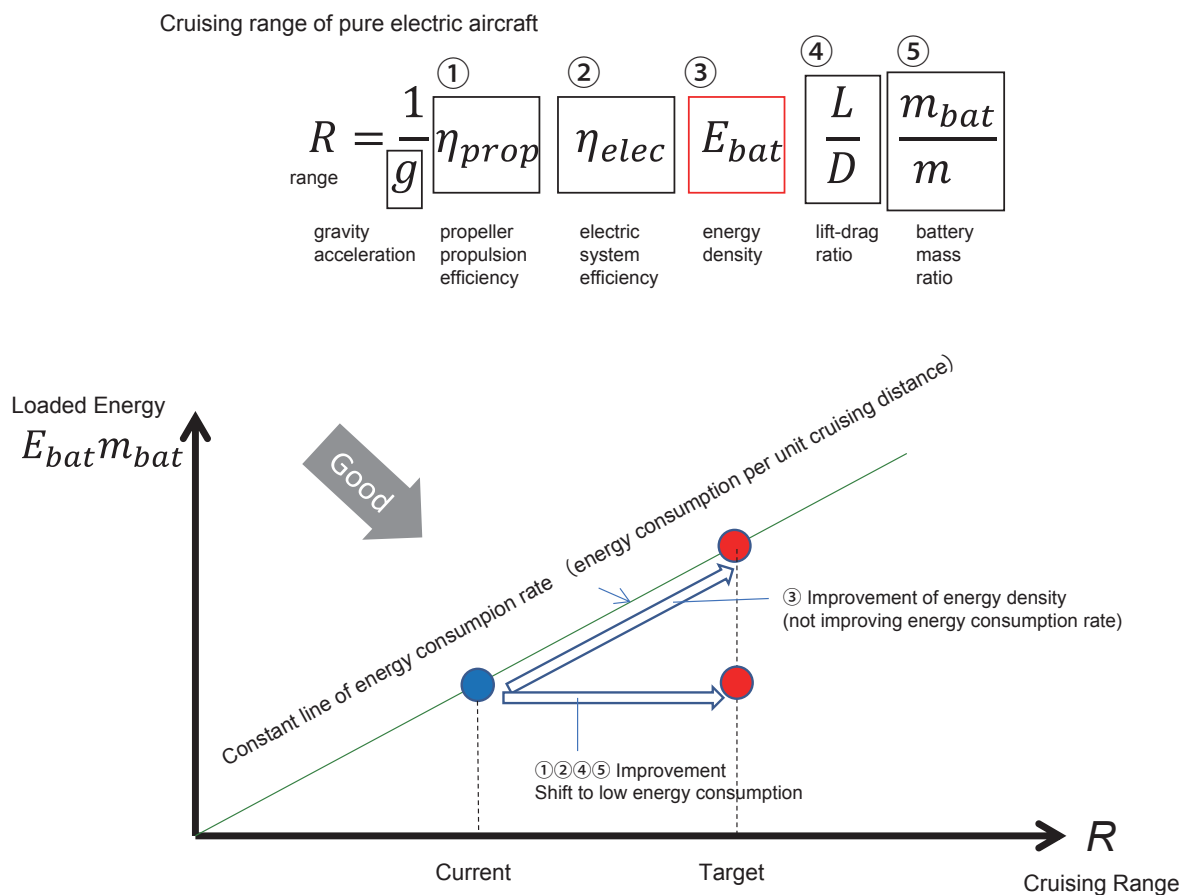


Fig. 5 Measures for cruising range improvement for pure electric aircraft.

る。開発計画期間内に電池のエネルギー密度向上が期待できない場合は、目標の航続距離を達成するためエネルギー消費率を改善するしかない。

図6に純電動航空機における電池のエネルギー密度と航続距離の関係を示す。図に示したTaurus G4はチャンピオンデータの代表例であり、4人乗り相当（2人搭乗＋2人相当のウェイト搭載）のプロペラ機によって400 kmの航続距離を2011年に達成した⁷。この航続距離は実用レベルに近い水準であり、それまでの電動航空機の航続距離（表1）を飛躍的に上回る記録を樹立したが、これは大きな揚抗比（L/D）によってエネルギー消費率を改善したことによるところが大きい。仮に、既存4人乗りプロペラ機の代表であるCessna社Skyhawkの推進システムをTaurus G4と同じエネルギー密度の電池、同じ出力密度と効率の電動モータ及び電力変換器を用いて置換すると、航続距離はわずか50 km程度しか確保できない。例えば電池のエネルギー密度を500 Wh/kgに向上できても航続距離は150 km程度に向上するだけであり依然として実用的ではない。このことから、500 Wh/kgの高性能電池が実現したとしても、既存の化石燃料航空機を基にして単に推進系を置換して電動化するだけでは、実用的な航続距離を確保することは難しいということが予測できる。

Taurus G4は大きな揚抗比を実現するため長い翼幅にしており、地上でのハンドリング性を犠牲にしているが、競技出場のために短期的に開発した一品物であるため、総合的な実用性まではそもそも目指していな

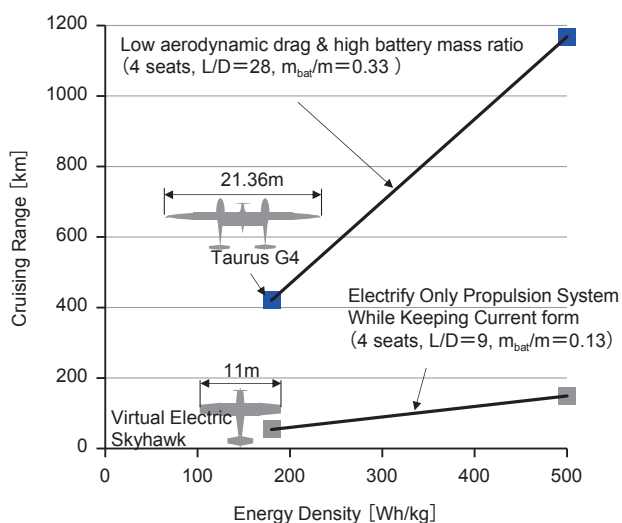


Fig. 6 Relationship between cruising range of pure electric aircraft and battery energy density.

い。実用機としての純電動航空機は、訓練用等の短距離用途を目指して現在開発が進んでおり⁸、従来の航空機並みの航続距離を有する実用電動航空機を実現するには電池のエネルギー密度向上だけでなく、形態そのものを刷新する何らかの工夫が必要である。その代表例はNASAのX-57⁹であり、主翼上に14基の電動プロペラを分散配置することで揚力係数を大きくし、必要な揚力を得るための翼面積が小さくて済むコンセプトを提案している。その結果翼幅を長くしなくても大きな揚抗比を実現でき、電動化でしか実現できない方法、すなわち多発化によって実用的な翼幅と実用的な航続距離の両立を狙っている。電池性能が現状レベルであっても純電動航空機の航続距離を実用レベルに押し上げ、かつ運航コストの大幅な削減も同時に実現する魅力的なコンセプトである。一方、電池のエネルギー密度を大幅に向上するための研究開発も世界各国で進んでおり、最近ではリチウム硫黄電池がセルレベルで450 Wh/kg以上に達するなどの報告¹⁰もあり、実用化されれば1回の充電で日に何度も離着陸するタクシー用途にも適用でき、固定翼機だけでなくeVTOLも含め、電動航空機の市場を大幅に拡大する可能性がある。

3.2 電池の目標と役割

図7に示すように、電池の目標性能¹¹に関しては、適用対象とする機体規模が大きいほど要求するエネルギー密度（パッケレベル）も電圧も大きくなる傾向にある。まだ実験機すら飛行できていない電動旅客機であるが、500 Wh/kg程度が実現するとエンジンのハイブリッド化によって旅客機の離陸上昇時アシスト電力として適用できる可能性が出てくる¹²。また、離陸上昇時の最大出力を電池のエネルギーで補うため、エンジ

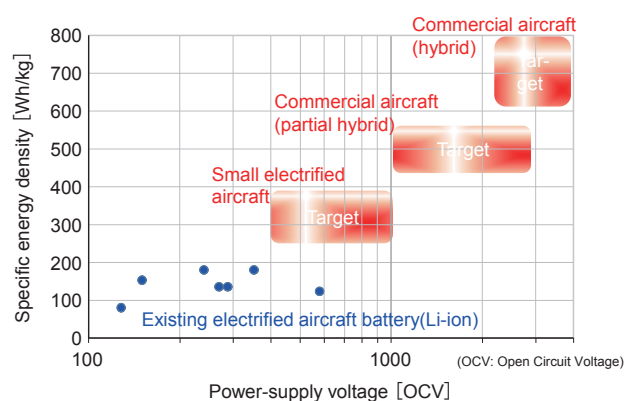


Fig. 7 Target of battery performance applicable to electric aircraft.

ン本体の最大出力を抑えることができ、その結果エンジンコア部の大きさを小さくでき、巡航時のエンジンバイパス比を向上することによる付帯的な燃費削減効果も期待できるとされている¹³。ただし、旅客機用途となると電圧の要求がかなり高いため直列個数が膨大となり、電池の健全性管理システムの役割が非常に重要になる。700～800 Wh/kgの電池パックが実現すると、電動ハイブリッド旅客機だけでなく、純電動旅客機の実現も可能となる。純電動旅客機の場合、航続距離は500 km程度と通常の旅客機の航続距離に比べるとかなり短いものの、EasyJetが提案¹⁴するように短距離便の需要は大きくローカルエリアの輸送網を相当数カバーできる。仮に旅客機の純電動化が実現するとエンジンのビジネスモデルが大きく変わる。純電動方式の場合、通常のエンジンのような高温高圧部が完全に無くなるため、MRO (Maintenance, Repair and Overhaul) 費用を格段に削減できる。

3.3 航空機用電池の技術課題

小型機においても300 Wh/kg以上のエネルギー密度が要求されることから、現状のリチウムイオン電池のエネルギー密度を超える新しい電池素材の研究が必要であることはもちろんであるが、航空用途の場合エネルギー密度に加えて安全性への要求も特に厳しい。現在、旅客機用充電可能リチウムイオン電池の安全性基準はRTCA DO-311¹⁵にて規定されており、熱暴走を意図的に発生させ、筐体でこれを封じ込める、つまり発生した火災やガスが筐体外に出ないように制御する機能の証明が要求されている。この機構は当然電池システム全体の質量を大きくしてしまうので、エネルギー密度と安全性にはトレードオフの関係があることになる。DO-311Aは主推進系のための電池を想定したものではないため、電動航空機の実用化に向け、主推進系用途を想定した電池の新しい規格¹⁶がASTMでの制定を目指して策定中である。

4 おわりに

21世紀になってから電池性能の進歩を基にして電動航空機は急速に進化した。その技術的背景には自動車電動化で培われた電池技術の進歩があったが、現在はCO₂の削減要求という社会的ニーズの高まりから、小型機のみならず旅客機推進系にまで電池適用の期待が集まっている。そのため、航空機用途に需要が限定される程の極端に高い性能の電池が要求されており、いまや航空産業界は自動車用途電池の性能向上を待つ

だけではなく、自らも先端電池の開発を先導すべき位置にいる。2000年代初頭のリチウムイオン電池適用による飛躍的な飛行性能向上の達成から十数年が経過した現在、電動航空機における次のブレークスルーが新しい電池によって達成されることが望まれている。

参考文献

1. WORKING P PER DEVELOPED FOR THE 38th ICAO ASSEMBLY Sept/Oct 2013 "Reducing Emissions from Aviation through Carbon-Neutral Growth from 2020".
2. lange aviation HP, <https://www.lange-aviation.com/en/produkte/antares-20e/>
3. World premier: Volocopter is flying manned! – A step forward in urban mobility, April 2016, <https://press.volocopter.com/index.php/volocopter-is-flying-manned>
4. UBER Elevate, "Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation", October 27, 2016, <https://www.uber.com/elevate.pdf>
5. FAA Small Airplanes Regulations, Policies & Guidance, https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/small_airplanes/small_airplanes_regs/
7. Tine Tomažič et al., "Pipistrel Taurus G4: on Creation and Evolution of the Winning Aeroplane of NASA Green Flight Challenge 2011", *Journal of Mechanical Engineering* **57**(2011)12, 869-878.
8. BYE AEROSPACE HP, <https://bye aerospace.com/electric-airplane/>
9. NASA Armstrong Fact Sheet: NASA X-57 Maxwell, <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-109.html>
10. Oxis Energy HP, <https://oxisenergy.com/>
11. 航空機電動化将来ビジョン ver.1, 2018, http://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/pdf/eclair_vision.pdf
12. G. E. Wroblewski and P.J. Ansell, "Mission Analysis and Emissions for Conventional and Hybrid-Electric Commercial Transport Aircraft", *AIAA Sci Tech*. 2018.
13. W.Lammen1 and J.Vankan, "Energy Optimization of Single Aisle Aircraft with Hybrid Electric Propulsion", *AIAA Sci Tech*. 2020.

14. <https://mediacentre.easyjet.com/story/9802/easyjet-s-partner-wright-electric-progress-into-next-phase-of-development-of-its-electric-aircraft-as-easyjet-looks-to-a-future-where-it-could-establish-electric-flyways-on-key-short-haul-routes>
15. RTCA DO-311 "Minimum Operational Performance Standards for Rechargeable Lithium Batteries and Battery Systems".
16. ASTM WK56255, "New Specification for Design of Electric Propulsion Energy Storage Systems for General Aviation Aircraft".