

### 30-7 電動推進航空機の最新動向

#### 1. はじめに

航空機は重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。また航空機が排出する CO<sub>2</sub> の量は全世界の人為的排出量のうちわずかに2%程度しかない。しかし、今後の航空輸送需要は 20 年間で約 2.4 倍に増加することと、自動車をはじめ他産業における電動化率の拡大や効率化の進展により、航空機由来の CO<sub>2</sub> 排出量は地球規模でも無視できないほどその寄与が増大することが懸念され始めている<sup>1)</sup>。いま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、電動推進航空機技術の最新動向について概説する。

#### 2. 電動推進航空機とは

現用の航空機は原油由来の燃料を用いているが、昨今は航空用燃料に対しても多様化が模索されている<sup>2)</sup>。そのため、化石燃料を搭載しないか、または、その使用量を従来に比べ著しく減少させるような新技術を導入した脱化石燃料航空機(図 1)<sup>2)</sup>に対する関心が世界的にも高まりつつある。脱化石燃料航空機のうち推進器の原動機として電動機(以後、電動モータ)を用いたものが電動推進航空機(Electric powered aircraft)または電動航空機(Electric aircraft)と定義される。なお、熱機関と電動モータのハイブリッドも電動推進航空機に含まれる。

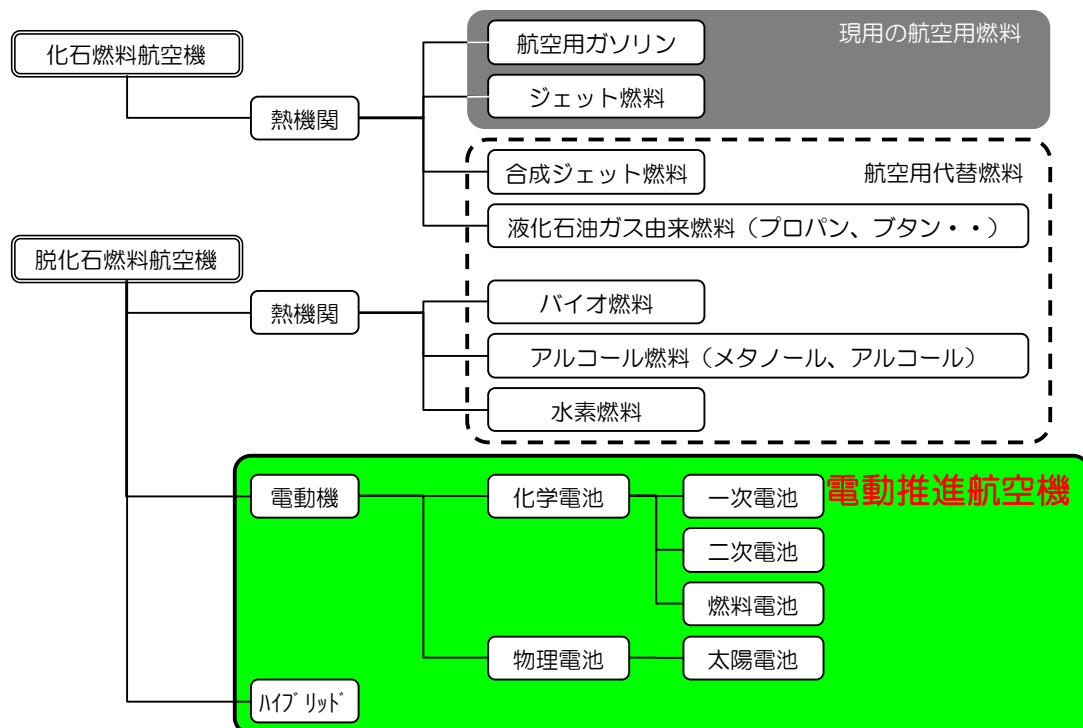


図 1 電動推進航空機の位置づけ<sup>2)</sup>

図が小さく読みにくい場合は、必要に応じて拡大して見てください。拡大に耐えられる解像度にしてあります。

### 3. 電動推進航空機の技術動向

図 2 に電動推進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 2 種類がある。純電動推進システムの構成は電気自動車のパワートレイン（動力伝達系統）とほとんど同じで、駆動対象が車輪の代わりにファンとなっているだけである。実際、2000 年以降の電動推進航空機の動向において、自動車産業における電動化技術の果たしてきた役割は非常に大きい。

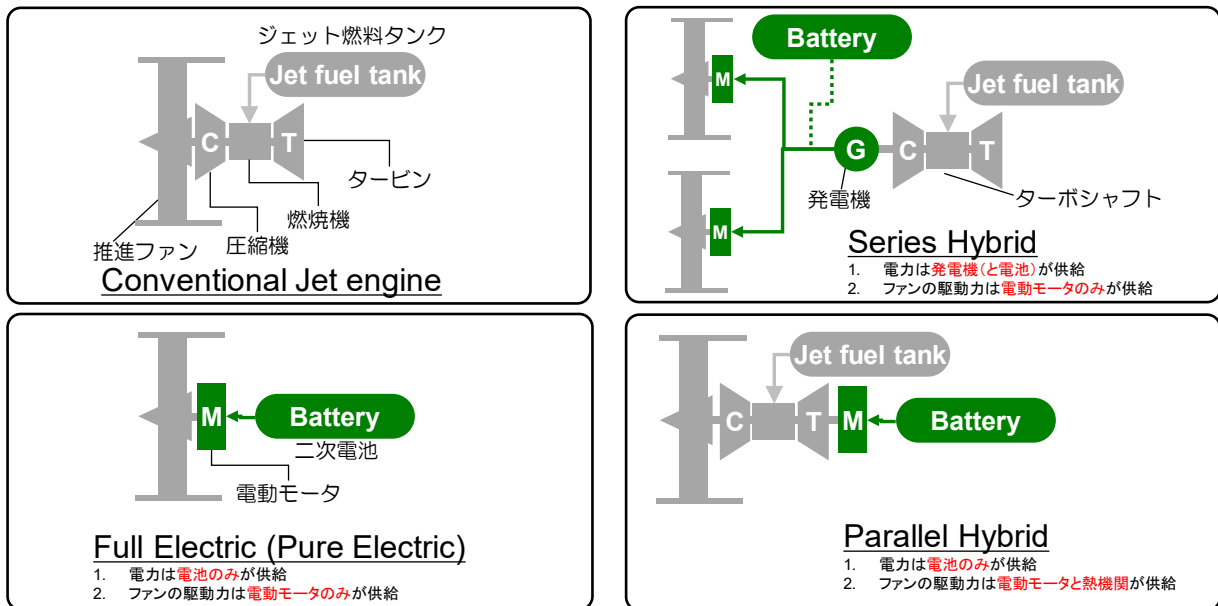


図 2 電動推進システムの構成（注：減速機や電力変換器等、一部の構成要素は省略）

図 3 に 1990 年代以降の有人電動推進航空機の出力規模と初飛行年の関係及び世界各国における将来の構想を示す。初期の有人電動推進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。その後も現在まで、電動推進航空機の規模は 1～4 人乗り程度の小規模なものに限られているが、ここ 10 年程度の進歩の速さは注目すべき点である。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 20E は、有人飛行機としては世界で初めてリチウムイオン電池を採用し、これにより規模も出力もそれまでに比べ著しく増加した。この Antares 20E 以後、世界各国で電動推進航空機の開発が盛んになり、性能が著しく進歩した。それらの中には、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。2016 年以降は電動の垂直離着陸機（eVTOL）も登場した<sup>3)</sup>。eVTOL は最近特に世界中で開発が過熱しているが、旅客機電動化に向かう技術の動向とは全く異なる価値（Urban Air Mobility）<sup>4)</sup>の創出を目指した動きであり、ここでは紙面の都合上詳細については割愛するが、2018 年時点における世界各国での電動推進航空機開発の大多数は eVTOL を目指したものである。

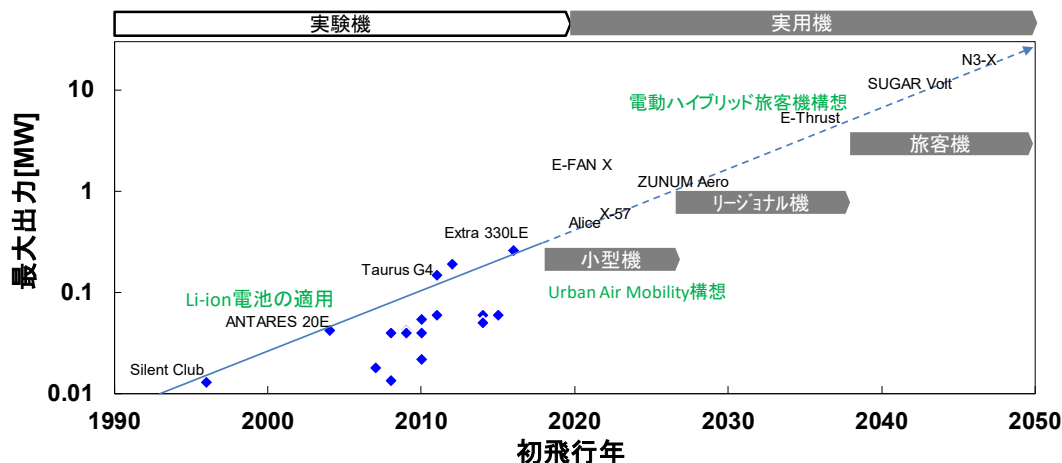


図3 電動推進航空機の進歩

表1に電動推進航空機の技術動向をまとめる。1990年代までは出力が小さいため、小規模な機体を低速で飛行させるしかなかった。しかし、基幹技術（電動モータ、パワーエレクトロニクス、電力源）の進歩により、2000年代以降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形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、今後も電動推進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。

表1 電動推進航空機の技術動向

年代	1973～1990	1991～2000	2001～2010	2011～2015	2016～
乗員	1人	1人	～2人	～4人	記録更新なし(2018.3月時点)
速度	～120km/h (Ni-Cd) ～50km/h (太陽電池)	～100km/h	～250km/h	～330km/h	342.8 km/h
距離	～260km (太陽電池)	～30km	～190km (Li-Ion) ～750km (燃料電池)	～400km (Li-Ion)	記録更新なし(2018.3月時点)
モータ最大出力	～10kW (Ni-Cd) ～2.5kW (太陽電池)	～13kW	～92kW	～192kW	～260kW
電動モータ	DCモータ	DCモータ	永久磁石形同期モータ(ネオジウム磁石)	永久磁石形同期モータ(ネオジウム磁石)	永久磁石形同期モータ(Halbach array)
電力源	Ni-Cd電池 太陽電池	Ni-Cd電池	Li-Ion電池、燃料電池、太陽電池	Li-Ion電池、燃料電池、太陽電池	Li-Ion電池、燃料電池、太陽電池
代表例	MB-E1(オーストリア) Solar Challenger(米)	Silent AE-1(ドイツ)	ANTARES 20E(ドイツ) Boeing FC demonstrator(米) Rapid200FC(イタリア) electric SkySpark(イタリア) Solar Impulse1 HB-SIA(スイス)	e-Genius(ドイツ) Taurus G4(スロベニア、米) Solar Impulse2 HB-SIB(スイス) Long-EZ(米) E-Fan(フランス)	Extra 330LE(ドイツ) E-Fan1.2(フランス) Volocopter 2X(ドイツ) Ehang184(中国)

#### 4. 電動推進航空機の利点と課題

##### 4.1 電動推進航空機の利点

電動推進航空機の最も大きな利点は、燃料費や整備費等の運航に係るコスト削減効果である。ただし、そのメカニズムや効果の大きさは適用対象と電動推進システム方式によってかなり異なる。電動化によって最も燃費削減の恩恵を受ける可能性が高いのはガソリンエンジンを搭載した小型のプロペラ機である。その理由は、完全な電動化（純電動化）ができるので整備費を大幅に削減可能なこと、電動推進システムに置換されるガソリンエンジンの効率が電動モータは無論のこと自動車用エンジンに比べても相当低いので改善幅が大きいこと、航空用ガソリン燃料の価格が自動車用ガソリン燃料の価格に比べて割高である等、

電動化の費用削減効果を大きくする要因が多数存在することによる。図 4 に従来のガソリンエンジン航空機を電動化した場合における、運航コスト削減量の試算例<sup>5)</sup>を示す。電動化によってエネルギー費と整備費が劇的に低下し、トータルでも 40%近いコスト削減が期待できる。

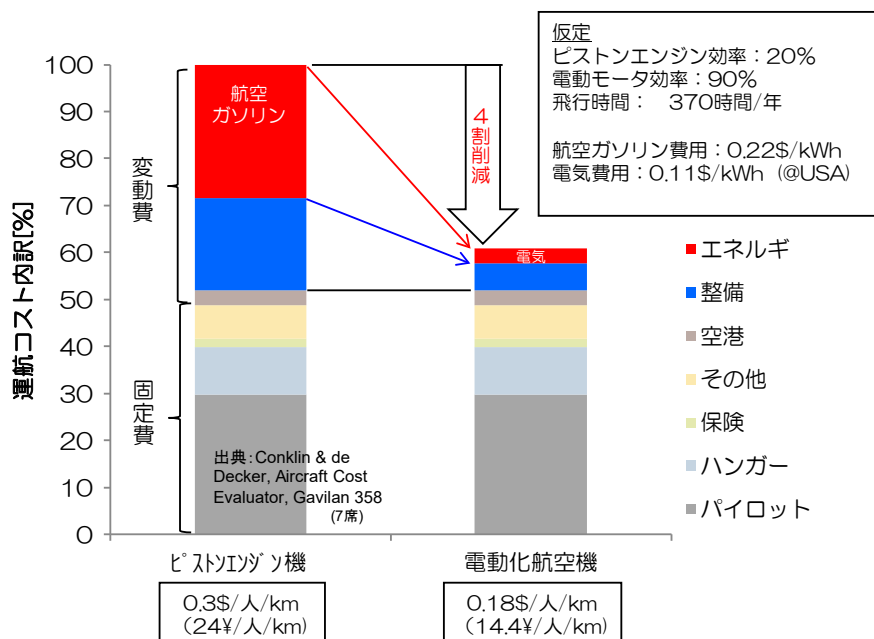


図 4 電動化による運航コストの削減<sup>5)</sup> (7 席級のピストンエンジン機を電動化)

一方、旅客機のエンジンを電動化する場合、電池のみで実用的な航続距離を確保することが将来技術でも困難であることが予想されるため、ハイブリッド方式が主力となる。特に図 2 におけるシリーズハイブリッド方式は電池が無くても成立する方式であるため、技術的リスクが比較的小さい。ただし、小型機における純電動方式とは燃費削減のメカニズムが異なり、電動ファンの高いレイアウト自由度を活用して、機体表面の遅い流れをエンジンで吸い込む BLI(Boundary Layer Ingestion)によって空力抵抗低減を狙うか、または多発化によってファンの総面積を拡大し、推進効率向上を狙うかのいずれかである。いずれにしても、発電機、パワーエレクトロニクス、配線、電動モータ等によるエネルギーロスが加算されるため熱効率自体は従来のガスタービンエンジン単体の場合に比べて低下せざるを得ない。従って、劇的に燃費が削減されるわけではなく、数%~十数%削減される程度である。また、ガスタービンエンジンを用いるので整備費削減に直結するとは限らない。それでも旅客機の場合、燃費が数%以上も削減されることには価値があるため、検討の対象になっている。

#### 4.2 電動推進航空機の課題

小型航空機の場合と旅客機の場合では課題も異なるため、それぞれについて記述する。小型航空機は純電動化が技術的には成立可能なため、電動モータやパワーエレクトロニクスにはほとんど課題はなく、現状の技術でも実用レベルであるのに対し、電池だけはまだ単位質量当たりには有するエネルギー量、すなわちエネルギー密度が十分ではない。図 5 に電池のエネルギー密度と航続距離の関係を示す。TaurusG4<sup>6)</sup>の航続距離は 2010 年時点における実績

値であるから、4人乗り小型機の航続距離としては当時でも実用レベルに近い。これに対し、既存の4人乗り小型航空機のエンジンを電動推進システムに換装するだけの改造を行うと、燃料重量の分だけしか電池を搭載できないので、航続距離はせいぜい数十kmに留まる。全く同じエネルギー密度でも航続距離が著しく異なるのは、揚抗比(L/D)と電池重量比(電池重量  $W_{bat}$  と離陸重量  $W_{TO}$  の比)が大きく異なるためである。従って、従来通りの機体形態のまま電動推進システムを適用するならば、電池のエネルギー密度を大幅に向上することが技術課題であるし、機体の形態を大幅に刷新するならばそれ自体が技術課題である。特に後者に関しては、L/Dを向上するために翼幅を長くすることが有効ではあるが地上におけるハンドリング性能を損なってしまう。これに対する一つの解として、例えば、NASAが進めているX-57プロジェクト<sup>7)</sup>では主翼にプロペラを多発分散配置することにより揚力係数を向上し、その分翼弦長を減らすことで主翼面積を減らす結果、高いアスペクト比を実現している。このように、電動推進の高い設計自由度を活用すると電池のエネルギー密度向上を待たずとも航続距離の問題を解決できる可能性がある。

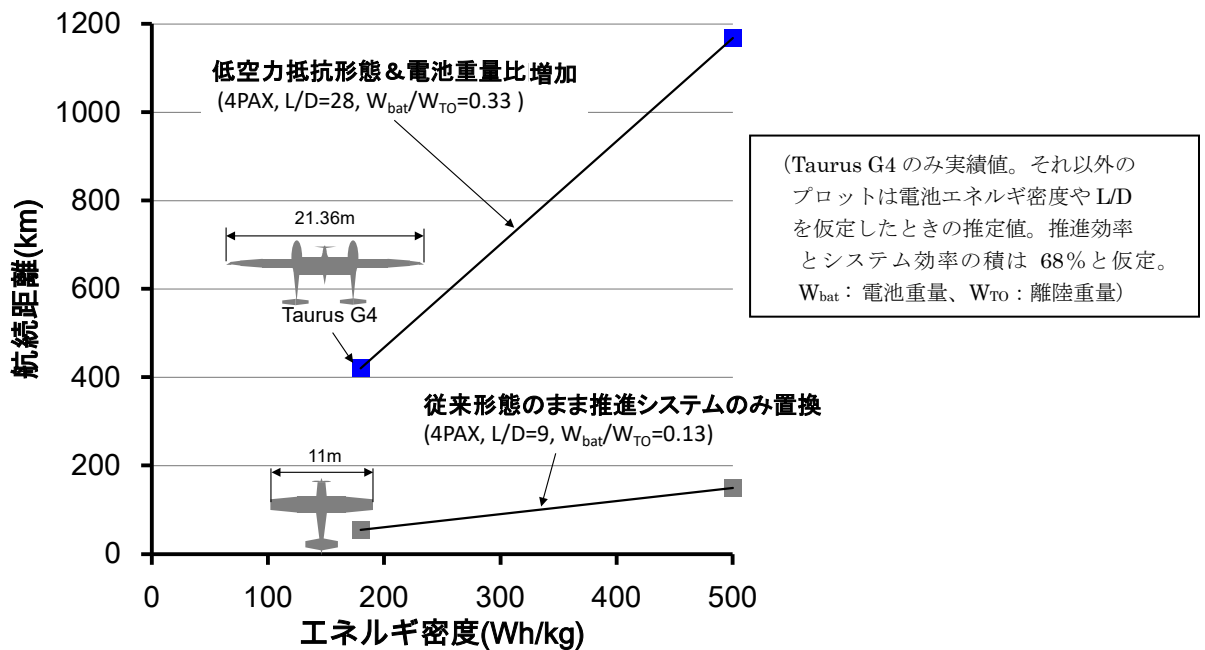


図5 純電動推進航空機における電池のエネルギー密度と航続距離の関係

旅客機における電動推進の課題は、明らかに電動モータやパワーエレクトロニクスของ重量を軽減すること、すなわち推進系の出力密度を向上することである。これは、ガスタービンエンジンとのハイブリッドシステムの構成を選択する結果の必然であり、特にシリーズハイブリッドの場合は発電機、コンバータ、インバータ、電動モータのように従来のガスタービンエンジンに追加される電動化要素の数も多く、電動推進システムが分担する出力も大きいため重量増へのインパクトが大きい。NASAが提案している胴体尾部のBLIを可能とするSTARC-ABL構想<sup>8)</sup>では、電動モータやパワーエレクトロニクスに要求される出力密度は10kW/kg以上であり、現在の電動モータの出力密度を2倍以上向上しなければならない。

旅客機電動化のもう一つの重要な課題は、高高度環境への適応である。高度 1 万 m では気圧が地上の 1/4、放射線量は地上の 100 倍になり、前者においてはコロナ放電による絶縁破壊が、後者ではシングルイベント発生による半導体の破壊が問題になる。しかも両者ともに、電圧が向上する程リスクが高くなる。旅客機は出力が大きく必然的に高電圧が要求され、電動モータやパワーエレクトロニクスにとっては他の産業では遭遇しない程の過酷な環境となるため、自動車電動化技術の延長線上には解がない可能性がある。

## 5. 電動推進航空機の将来構想

現在進行中、または提案されている電動推進航空機の将来構想について具体例を紹介する。小型の航空機においては、イスラエルの EVIATION 社が 9 客席の純電動航空機 Alice<sup>9)</sup>を提案しており、2020 年代前半の EIS(Entry into service)を目指している。巡航速度 260 knots、航続距離 650 miles を目標とし、翼端と胴体尾部に計 3 個の 260kW 電動プロペラを備え、電動推進ならではの空力的な性能向上も狙っている。

Boeing 社の出資を受ける米国の ZUNUMAero 社<sup>10)</sup>は、12 客席の電動ハイブリッドコンピュータを提案しており、2022 年の EIS を目指している。ローンチカスタムとして既に JetSuite 社が名乗りを上げており、ガスタービンエンジンの供給元 Safran 社と連携して開発を進める予定である。

Airbus グループは、Rolls-Royce 社および Siemens 社と連携し、100 席級の電動ハイブリッドリージョナル旅客機 E-Thrust<sup>11)</sup>の構想を提案している。シリーズハイブリッド方式で翼根部に分散配置した電動ファンによる BLI 等の空力性能向上を目指したものであり、現在の旅客機電動化動向の牽引役でもある。また、E-Thrust に向かう途中の技術実証機として E-Fan X を 2020 年に飛行実証する計画がある<sup>12)</sup>。BAE-146 (4 発リージョナルジェット機)のエンジンの一部を 2MW 級電動ファンに換装するとともに、発電機や電池等も胴体内に実装し、高高度における高電圧技術実証を目指している。

日本国内においても、2018 年には JAXA、航空系企業、電機系企業、経産省を中心に航空機電動化コンソーシアムが設立された。コンソーシアムの将来ビジョン<sup>13)</sup>では、2020 年代の小型電動航空機や MEA(More Electric Aircraft)技術を皮切りとして、2030 年代以降旅客機のエンジンにも電動化技術の適用を開始し、2050 年代には明確に CO<sub>2</sub>削減に寄与すること、およびその技術ロードマップが、目指すべき方向性として示された。また、同じく 2018 年に経産省と国交省の共催により「空の移動革命に向けた官民協議会」が発足し、民間事業者の意向を取り入れる形で eVTOL に関するロードマップ<sup>14)</sup>も取りまとめられた。国内の動向も官民挙げて活発になっておきており、技術面、制度面、事業面全てにおいて今後の展開が期待される場所である。

## 6. まとめ

電動推進航空機が最近注目を集めている理由は大きく二つあり、一つ目は eVTOL が成立し始めたことにより UAM (Urban Air Mobility) の実現性が出てきたこと、二つ目は旅客機でも電動推進化に可能性が出てきたことである。これら二つはここ数年の新しい動向である。本稿は特に後者に注目して概説したが、両社は全く別々の動向ではなく、技術的にもプレイヤー的にも重複しながら世界的に大きな期待と投資を集めている状況である。今後も各社重要なマイルストーンを設定しており、旅客機に向かう長期的な技術開発といえど



も、短中期的な技術動向が将来に与える影響は大きいと考えられ、電動推進航空機分野へ今後の参入を検討している機関にとっては、業界の動向が増々重要になってきている。

#### 参考資料

- 1) WORKING PAPER DEVELOPED FOR THE 38<sup>th</sup> ICAO ASSEMBLY Sept/Oct 2013  
“Reducing Emissions from Aviation through Carbon-Neutral Growth from 2020”
- 2) 岡井敬一・西沢啓：「えあろすペーす ABC 基礎・応用編 脱化石燃料航空機」, 日本航空宇宙学会誌 2010 年 10 月号
- 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) 西沢啓：「電動化航空機の動向と JAXA における研究開発の概要」, 航空プログラムシンポジウム 2012, pp.105
- 6) 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
- 7) NASA Armstrong Fact Sheet: NASA X-57 Maxwell, <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-109.html>
- 8) Jason Welstead et al., “Overview of the NASA STARC-ABL (Rev. B) Advanced Concept”, One Boeing NASA Electric Aircraft Workshop; 22 Mar. 2017; Washington, DC, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170005612.pdf>
- 9) EVIATION, Alice Commuter, <https://www.eviation.co/alice/>
- 10) ZUNUM Aero WEB site, <https://zunum.aero/>
- 11) AIRBUS Group, “E-Thrust Electrical distributed propulsion system concept for lower fuel consumption, fewer emissions and less noise”, <http://company.airbus.com/news-media/media~item=2efe334d-1141-403c-8449-1b7180c8e7fa~.html#>
- 12) AIRBUS Newsroom, “Airbus, Rolls-Royce, and Siemens team up for electric future Partnership launches E-Fan X hybrid-electric flight demonstrator”, 28 November 2017, <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/11/airbus--rolls-royce--and-siemens-team-up-for-electric-future-par.html>
- 13) 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](http://www.aero.jaxa.jp/about/hub/eclair/pdf/eclair_vision.pdf)
- 14) 空の移動革命に向けたロードマップ, 2018 [http://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181220007/20181220007\\_01.pdf](http://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181220007/20181220007_01.pdf)