

B06 電気自動車技術の進歩と電動化航空機の将来

○西沢啓, 小林宙, 岡井敬一 (宇宙航空研究開発機構), 藤本博志 (東京大学)

Progress of Electric Vehicle Technology and Future of Electric Aircraft

Akira Nishizawa, Hiroshi Kobayashi, Keiichi Okai (JAXA) and Hiroshi Fujimoto(The University of Tokyo)

Key Words : More Electric Aircraft, Fuel Cell System, Propulsion System, Electric Motor, Battery

Abstract

Due to increasing concern about the global warming and recent jumps in oil prices, the R&D of aircraft with pure electric propulsion system has been rapidly expanding recently. This movement depends on the drastic advancement in electric vehicle technologies such as fuel cells, batteries, electric motors and controllers. However, the capability gap between the electric aircraft and conventional aircraft with internal-combustion engine is still large. In this paper the trend of electric aircraft is described and the future views in potentials and challenges of electric aircraft are discussed.

1. はじめに

航空機製造業は一般的に先端知識の集約型産業と言われ、他産業に対する波及効果も高い。実際、複合材を用いたゴルフクラブ等のスポーツ用品、カーナビゲーションシステムやディスクブレーキといった自動車部品も航空機産業から波及した技術である。一方、他産業から航空機へと波及した技術も少なからず存在し、電動化技術はその代表例の一つである。本報告では、最近進歩が著しい電動化航空機に電気自動車技術が果たしてきた役割について概観し、電動化技術のさらなる進歩がもたらす航空機の将来像について述べる。

2. MEA技術の動向

油圧や抽気系統等を電気系統に置き換え、システムを極力電化した航空機をMore Electric Aircraft(MEA)¹⁾と呼ぶ。最近の旅客機はシステムを電動化する傾向が強く、図1に示すように発電容量は最近急激に増加している。MEA技術の主な狙いは、環境負荷及び燃費の低減と運用コストの低減であり、電気デバイスへの置き換えによる効率向上と電気へのシステム一元化による簡素化によってこれらを達成するだけでなく、従来にない新しい機能の追加も可能である。

図2に従来の航空機システムを、図3にMEAのシステム^{2,3,4)}を示す。システム電動化が簡素化につながる事がわかる。Boeing社のB787は最新のMEAであるが、エンジン抽気を廃し、代わりにエンジン軸出力による発電機を大規模化し、客室内与圧及び空調は電気圧縮機を用いている。また防除氷装置や車輪ブレーキが電化されている。これらの結果、B787の電力負荷は従来の旅客機のものとは比べ大幅に増加した⁵⁾。ただし、まだ図3に示すような補助動力装置の電

動化には至っていない。補助動力装置の電力源としては、Boeing社、Airbus社ともに固体酸化物形燃料電池(SOFC)が有力であると見ている^{6,7,8)}。

燃料電池を基幹技術としたMEA技術の導入は、効率改善による燃費低減をもたらすのみならず、航空機に新しい機能を追加する可能性も有している。DLRとAirbus社は空港内の航空機の移動を、牽引車を用いずに、PEFCによる電動前輪で行うシステムの開発を共同で実施している⁹⁾。このシステムはタキシング時の燃料消費と騒音を削減できるのみならず、牽引車が不要なために空港内での航空機運用の柔軟性も向上でき、電動化システムの優位性を示している。

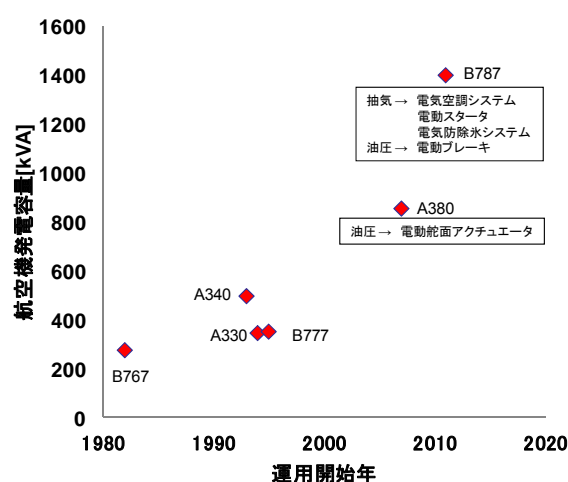


図1 旅客機の発電容量の推移

Airbus社、Boeing社で技術成熟度を向上させるステップの取り方はそれぞれ異なるものの、燃料電池を次世代のMEA技術の基幹技術として捉えている点は

同様である。燃料電池自体は、自動車業界や発電業界でも盛んに開発が行われているが、航空機に搭載する場合には、低圧、低温、振動、傾斜、加速度等、航空機特有の環境に晒される⁷⁾ため、独自の研究開発も必要である。SOFCシステムの重量は通常のカスタマーによる補助動力装置重量の3倍もあるため、SOFC導入による効率改善の効果が、重量増によってほぼ相殺されてしまう程¹⁰⁾であり、燃料電池システムの軽量化は、MEA技術の進展を図る上で最も重要な課題である。

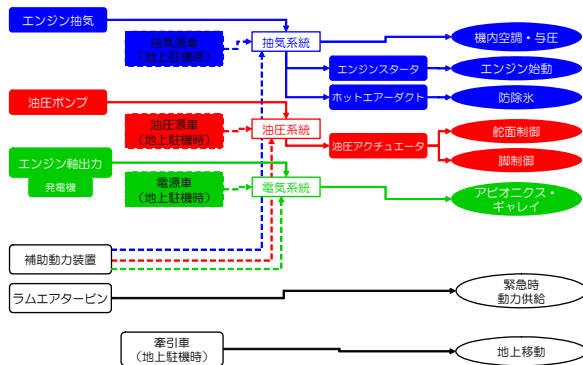


図2 従来型の航空機システム

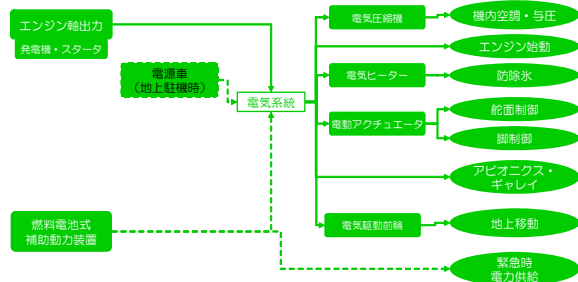


図3 MEA航空機システム

3. 電気自動車技術の動向

MEA技術の進展にとって燃料電池は重要なキー技術であるが、図4の燃料電池関連特許出願数の比較から分かる通り、燃料電池技術の研究開発に関しては、航空機業界よりも自動車業界のほうが積極的に取り組んでいる。

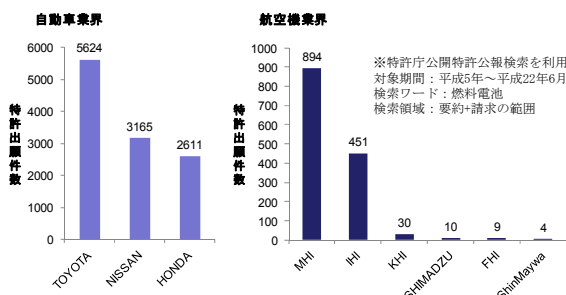


図4 燃料電池関連特許出願数の比較

燃料電池自動車は、トヨタ自動車㈱と本田技研工業㈱の開発によって2002年に登場した。一方、Boeing社が燃料電池を動力源とした電動化航空機によって世界初の有人飛行試験を成功¹¹⁾させたのは2008年である¹¹⁾。燃料電池は電動化の基幹技術の一例であるが、電動化の基幹技術に関しては、航空機よりも環境負荷と市場規模が量的に大きい自動車業界の方が総じて先行している。

自動車の電動化の歴史は意外に古く、19世紀末には内燃機関を動力とした自動車に先駆けて、電気自動車が既に市場を形成していたが、内燃機関の改良が進むにつれ電気自動車は衰退した。その後も1940年代のガソリン不足、1960年代の自動車による大気汚染、1970年代のオイルショック等、その時々時代のニーズに適合する形で、電気自動車が再度脚光を浴びては衰退を繰り返してきた¹²⁾。1990年代以降は、大気汚染や石油資源問題だけでなく地球温暖化問題も加わり、環境意識の高まりが電気自動車開発を急速に後押しし、現在に至っている。1990年代以降の電気自動車がそれまでのものと決定的に違う点は、性能の点で内燃機関自動車に匹敵するようになった¹³⁾ことであり、この進歩は新型電池と永久磁石同期モータの登場によるところが大きい。

1990年代以降の電気自動車の性能向上に大きく寄与した要素技術の代表がLi-Ion 二次電池の発明である。Li-Ion 二次電池によって二次電池の高電圧化・高容量化が初めて可能となった。Li-Ion 二次電池の性能の進歩は著しく、1990年からその後の15年間でエネルギー体積密度は5倍以上にもなっている¹⁰⁾。これは、小型軽量化の要求が著しい携帯電子機器の需要が、この期間で飛躍的に増大したことに対応する。さらに、その後はハイブリッドも含む電気自動車用途の開発がLi-Ion 二次電池の大容量化と大出力化をもたらし、電気自動車の性能を飛躍的に向上させる要因となっただけでなく、後述するように2000年代後半以降の電動化航空機の急激な進歩にも貢献した。

1990年代以降、電池以外では電動モータやその制御技術を担うパワーエレクトロニクスにも特筆すべき進歩があった。1991年当時の東京モーターショーにおいて出展された電気自動車のうち、電動モータのタイプは直流(DC)モータが最も多く、次いで誘導モータ、永久磁石同期(PM)モータの順であった。これが、1997年になるとPMモータ、誘導モータ、DCモータの順に順位が逆転し、さらに1999年にはほとんどがPMモータとなり、誘導モータはごくわずかに、直流モータは姿を消すという状態で、電気自動車に採用されるモータの方式がわずかな期間で完全に様変わりしてしまった¹²⁾。

DCモータはインバータを用いなくても可変速制

御が容易であるという利点を持つものの、ブラシと整流子が消耗するため保守性に劣ることや、これらの機構のため小型軽量化に不向きという短所を持つ。従って、IGBT(Insulated gate bipolar transistor)のようなスイッチング素子の進歩によって大容量のインバータ構築が可能になるにつれ、誘導モータやPMモータなどの交流(AC)モータにとって替わられた。

ACモータでも当初主流であった誘導モータよりも、PMモータの方が永久磁石を用いているため励磁電流を必要とせず効率化に適することから、現在の電気自動車の駆動用モータの主流となっている。その性能向上には、保持力の強いNd-Fe-B系の希土類永久磁石(ネオジウム磁石)の採用が大きく貢献した。

実際、日産自動車㈱の電気自動車用駆動モータ¹⁴⁾を例にとると、1990年代前半の誘導モータ方式に対し、2001年以降のPMモータ方式では同じ出力でありながら質量を1/3以下にまで低減することに成功している。

4. 電動化航空機の動向

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^{15,16)}。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5)¹⁵⁾に対する関心が世界的にも高まりつつある。電動化航空機(Electric aircraft)とは、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(熱機関と電動モータのハイブリッドも含む)と定義する。

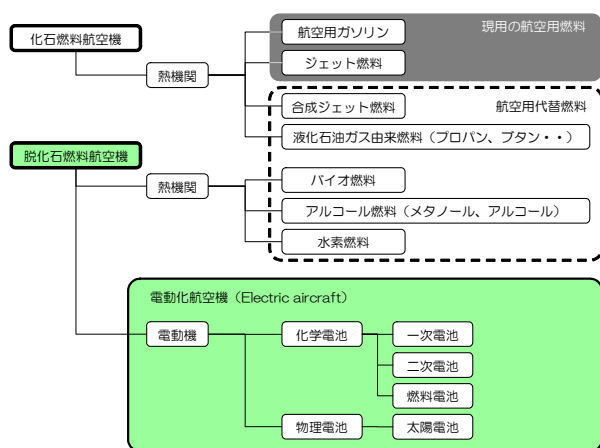


図5 脱化石燃料航空機の種類

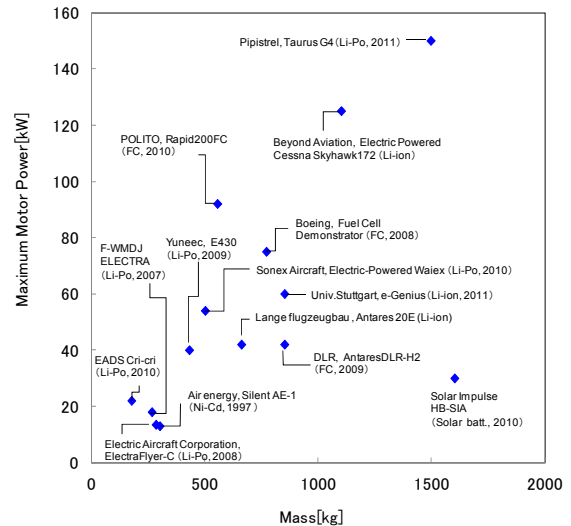


図6 世界の電動化航空機の規模と初飛行年

図6に1990年代後半以降の世界の電動化航空機の規模と初飛行年を示す。電動化航空機の規模は現在のところ1~4人乗り程度の小規模なものに限られている。1997年にNi-Cd電池のみを動力源とした電動モータグライダーSilent AE-1がドイツのAirEnergy社にて開発された¹⁷⁾。これは事業目的で生産された点でそれまでの太陽電池を用いた実験航空機^{18,19)}とは異なり、42dBという画期的低騒音性を実現しているほか、クリーン、安全、高信頼性、メンテナンスフリー等をセールスポイントとし、従来の内燃機関によるモータグライダーに対し、明確な差別化を図ることに成功した。その後、新しいタイプの電力源を持つ有人電動化航空機はすぐには登場しなかったが、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 20E²⁰⁾は、有人航空機としては世界で初めてLi-Ion 二次電池を採用し、これにより規模も出力もSilent AE-1に比べ著しく増えた。

一方、研究用途の実験機としては、Boeing社¹¹⁾、DLR²¹⁾、トリノ工科大学²²⁾が燃料電池による電動化航空機の飛行を成功させている。燃料電池航空機はすぐに市場が拓けるものではないが、二次電池の航続距離不足の欠点を克服できる点と、MEA技術への寄与が期待できる点で重要な意義を持っている。

電動化航空機市場を拓く現実的な手段として、航空機用ハイブリッドエンジンが挙げられる。FlightDesign社²³⁾が開発中のガソリンエンジンと電動モータを組み合わせた電動モータはガソリンエンジンの出力と並列に設置されており、離陸上昇時の出力補助として用いられる。巡航時はガソリンエンジンの余剰出力を用いて二次電池に充電する仕組みであり、特別なインフラは必要なく、性能も従来機以上のものを目指している。また、Diamond Aircraft社

表1 電動化航空機の動向

年代	～1990	1991～2000	2001～2010	2011～
離陸重量	100kg以下	300kg以下	1000kg以下	2600kg以下
乗員	1人	1人	～2人	～4人
速度	～50km/h	～100km/h	～250km/h	～250km/h
距離	～260km	～30km	～190km(Li-Ion) ～750km(燃料電池)	～320km(Li-Ion) 2000km超(燃料電池)
モータ最大出力	～2.5kW	～13kW	～92kW	～145kW
電動モータ	DCモータ	DCモータ	DCブラシレスモータ(ネオジウム磁石)	DCブラシレスモータ(ネオジウム磁石)
電力源	太陽電池	Ni-Cd電池	Li-Ion電池、燃料電池	Li-Ion電池、燃料電池、太陽電池
代表例	Solar Challenger(米)	Silent AE-1 (独)	ANTARES 20E(独), Rapid200FC(伊) electric SkySpark(伊)	e-Genius(独), Taurus G4(米)

ではガソリンエンジンを発電機として用いるシリーズハイブリッドエンジンを搭載した電動モータグライダー²⁴⁾を開発中である。ハイブリッド化は自動車同様、電池の性能が十分なレベルに到達するまでの中間技術として有効であるため、今後の展開が期待される。

表1に電動化航空機の動向をまとめる。1990年代まではほとんど成立性が無く、電力源は太陽電池であり、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、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、Li-Ion電池及びPMモータの一種であるDCブラシレスモータの適用が大きく寄与した。3章で述べたようにこれらの基幹技術は電気自動車の開発が牽引したものであり、今後も電動化航空機の主要な基幹技術は電気自動車技術に大きく依存することが予想される。

5. 電動化航空機の将来

地球温暖化と原油価格の高騰、航空機需要の拡大を背景として、自動車同様、航空機にも低CO₂化・低燃費化の強い要求^{25,26)}がある。電動化技術は航空機の環境適合性能を飛躍的に改善し、新たな機能を付加するキー技術の一つであるが、表1に示したように電動化航空機の性能は飛躍的に進歩してきたものの、内燃機関の航空機と比べると、航続距離やペイロードの点でまだ相当に不利である。航空機は、重量増が性能劣化に与える影響が電気自動車より著しい。そのため、十分な飛行性能を達成できるまで電池も含めたパワートレインの重量を軽減することは、電気自動車よりも技術的に困難である。従って、電動化航空機技術の進歩のためには、電気自動車等の他分野で先導的に開発された技術を効率的に取り込むことと、航空機ならではの技術課題に先行的に着手することが必要である。

航空機ならではの技術課題の一例を次に示す。図7に電動モータのトルク - 回転数特性領域¹²⁾における電気自動車及び電動化航空機の使用頻度を比較した。電気自動車がモータのトルク - 回転数特性の領域を満遍なく使用するのに対し、電動化航空機は巡航と離陸上昇の2点及びその間のみを使用するため、高回転数・低トルク領域や低回転数・高トルク領域は使

用しない。つまり、電気自動車のモータ技術そのまま利用したのでは無駄が多いことが予想される。将来は、電動モータの特性に適合したプロペラ/ファンの在り方、及び、プロペラ/ファンの特性に適合した電動モータの在り方が考慮され、両者の最適なマッチングを図ることによって、航空機に特化した電動推進システムの設計方針が新たに確立されるべきである。

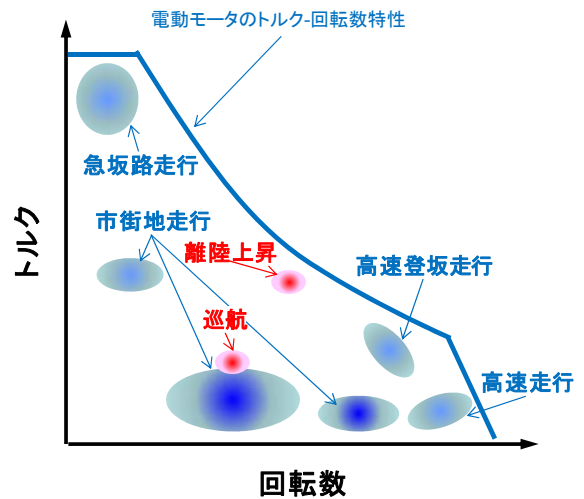


図7 電動モータのトルク - 回転数特性領域における電気自動車（青系色）及び電動化航空機（赤系色）の使用頻度の比較（色の濃い領域が使用頻度が高い）

航空機は大型になるほど、推進系を電動化することが困難になる。実際、現状技術のレベルでは旅客機の電動化は成立しない。しかし、半世紀前と現在の電気自動車の性能が全く異なるのと同様、長期的に見れば将来の旅客機が電動化されるほど、基幹技術が進歩する可能性はゼロではない。その進歩を牽引する要因としては、電気自動車市場の拡大や燃料電池を用いた定置発電システムの普及、電力システム技術を核にしたスマートグリッド社会の実現などが考えられる。

著者らは、大口径で効率的運用が可能な外周駆動ファン^{27,28)}を多数搭載し、その電力供給用としてガスタービンによるコアエンジンを備えた燃料電池 - ガスタービンハイブリッドエンジンシステムを検討している²⁹⁾。図8にその搭載機イメージを示す。

燃料電池等の関連技術の進展とMEA概念の発展を見越して、旅客機の推進系電動化についても長期的視野に立った研究が必要であると考えている。

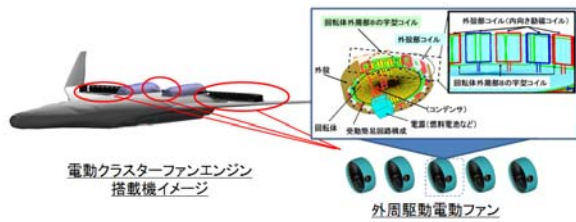


図8 将来電動航空機（旅客機）イメージ

航空機の電動化がもたらす変化についてはいくつかの側面が期待できる。一つは、飛躍的な低燃費化によって、今後20年間で2.7倍の増加と言われる大幅な輸送需要拡大に対しても、環境負荷をこれ以上増加させない技術的な解となることである。また、航空機製造業の立場から見ると、航空機の基幹技術が装備品も含めて劇的に変わることになり、新規参入のビジネスチャンスとも言える。二次電池のみを電力源として成立可能な小型の電動化航空機においては、設計・製造の自由度が格段に向上するだけでなく、維持・運用も容易になることから、エアタクシーのように航空輸送の大衆化をもたらす新しい利用形態が創出される可能性もある。さらに、電気自動車の運動制御技術として注目されているように、電動モータの高速応答特性を活用した制御技術の高度化・高機能化¹⁴⁾を図ることにより、電動化航空機は安全性や利便性においても優位性を持つことが期待できる。

6. おわりに

電動化技術は航空機にとって新しい推進技術であり、低CO₂のみならず、低騒音、低振動、低コスト、メンテナンスフリー等様々な利点が期待できる。旅客機の推進器に適用されるまでには非常に長期的な取り組みと何段階もの技術革新が必要であるが、そのために必要となる要素技術は、着実にMEA技術として旅客機に適用され、進歩していくことが予想される。また、その技術動向は自動車産業と密接に関わり、今後の電気自動車等の市場動向次第で適用可能な要素技術のレベルが急速に向上する可能性もある。国内には電動化航空機技術に必要な不可欠な要素技術に関して強力な企業が多数存在しており、高度な技術で構築された国産の電動化航空機が実現されるポテンシャルも高く、今後、国内においても電動化航空機に対する取り組みが一層活性化することが望まれる。

引用文献

1. Weimer, J.A., "Power Electronics in the More Electric Aircraft", AIAA Paper 2002-0727, 2002
2. 岩嶋淳, "全電気式航空機の動向について", 第47回飛行機シンポジウム講演集, 2009, p.870
3. Breit, J. and Szydlo-Moore, J., "Fuel Cells for Commercial Transport Airplanes Needs and Opportunities", AIAA Paper2007-1390, 2007
4. Wheeler, P., "The More Electric Aircraft-Why Aerospace Needs Power Electronics", 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE, 2009
5. Aerostrategy An Aviation Industry Commentary, "Winds of change-Get Ready for Seven Trends Transforming Civil Aerospace", March 2007
6. Glover, B., "Fuel Cell Opportunity", AIAA/AAAF Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium, 2005
7. Friedrich, K. A., Kallo, J., Schirmer, J. and Schmitthals, G., "Fuel Cell Systems for Aircraft Application", ECS Transactions, 25 (1), 2009, p.193-202
8. Dagged, D., "Commercial Airplanes Fuel Cell APU Overview", SELA Annual Meeting, 2003
9. Woerner, A., "Fuel Cells and Hydrogen for Airborne Applications", NWV-7th National Hydrogen & Fuel Cell Conference, 2009
10. Srinivansan, H., Yamanis, J., Welch, R., Tulyani, S. And Hardin, L., "Solid Oxide Fuel Cell APU Feasibility Study for a Long Range Commercial Aircraft Using UTC ITAPS Approach, Volume I: Aircraft Propulsion and Subsystems Integration Evaluation", NASA/CR-2006-214458/Vol1, 2006
11. Boeing news release, "Boeing Successfully Flies Fuel Cell-Powered Airplane", http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080403a_nr.html, 2008
12. 電気自動車ハンドブック, 丸善(株), 2001
13. 河上清源, 清水浩, 吉田博一, "電気自動車の動向とリチウムイオン電池自動車Elicaの開発", 第43回飛行機シンポジウム講演集, 2005, p.30
14. 堀洋一, 寺谷達夫, 正木良三 編, "自動車用モータ技術", 日刊工業新聞社, 2003
15. 岡井敬一, 西沢啓, "脱化石燃料航空機技術", えあろすペーすABC, 日本航空宇宙学会誌2010年10月号
16. 岡井敬一, 本郷素行, 小林弘明, 田口秀之, 藤原仁志, "航空用代替燃料の動向", 日本航空宇宙学会第42期講演会, 2011

17. <http://www.airenergy.de/AE0899Silent.pdf>
18. Boucher, R.J., "History Of Solar Flight", AIAA Paper 84-1429, 1984
19. A. Noth, "Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight", Phd Thesis, Autonomous Systems Lab, Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), 2008
20. http://www.lange-aviation.com/htm/english/products/antares_20e/antares_20E.html
21. DLR Press releases, "DLR motor glider Antares takes off in Hamburg – powered by a fuel cell", http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-18278/, 2009
22. Romeo, G., Borello, F. and Correa G., "ENFICA-FC: DESIGN, REALIZATION AND FLIGHT TEST OF ALL ELECTRIC 2-SEAT AIRCRAFT POWERED BY FUEL CELLS", 27TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE AERONAUTICAL SCIENCES (ICAS2010), 2010
23. Sigler, D., "Motor and Controller Technology", CAFE Foundation Electric Aircraft Symposium, 2009, p41-42
24. Joint press release by Siemens, Diamond Aircraft and EADS, "World's first serial hybrid electric aircraft to fly at Le Bourget", http://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=en/presspicture/2011/corporate_communication/soaxx201125/soaxx201125-03.htm, 2011
25. Penner, J.E. et al., "Aviation and the Global Atmosphere", IPCC Special Reports on Climate Change , http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/Climate/ipcc/aviation/index.htm, 2001
26. 日原勝也, 岡野まさ子, 鈴木真二, "国際民間航空と地球環境問題～ICAOにおける最近の議論と今後について～", 日本航空宇宙学会誌57巻670号, 2009
27. 岡井敬一, 野村浩司, 田頭剛, 柳良二, "航空機推進用外周駆動ファンに関する実験および解析", 日本航空宇宙学会論文集 第56巻第650号, 2008, p.131
28. Okai, K., Yanagi, R., Tagashira, T. and Nommura, H., "Aircraft Propulsion System", US Patent US7555893, 2009
29. 岡井敬一, "将来の航空機エンジン適用を目指した大口径軽量外周駆動モータ概念", 日本機化学会誌トピックス, 日本機化学会誌2001年11月号, p.917