

航空機の変遷と カーボンニュートラルに向けた展望



西 和哉



川原拓人

CONTENTS

- I 航空機のCO₂排出
- II 航空機の変遷
- III カーボンニュートラルに向けた航空業界・産業の取り組み
- IV 航空機向けの新技术が与えるインパクト
- V まとめ

要約

- 1 航空業界はカーボンニュートラルに向けて新技术適用など大きく分けて四つの活動を掲げている。短中期的（～2035年）には技術的難易度が低い排出量取引やSAF、機体の軽量効率化が推進され、長期的（～50年）にはそれらの取り組みに加え、技術的難易度の高い推進系電動化や水素航空機の実現により、50年のカーボンニュートラル達成を目指す。
- 2 航空機への新技术適用は、運用者である航空会社だけでなく、メーカーや空港インフラへも影響を与える可能性がある。特にメーカーにとっては、装備品変更による脅威もあるが、新技术搭載による新たなビジネスチャンス創出のタイミングでもある。
- 3 新技术搭載に関して、小型機運行の99%は4000km以下の路線であるため、次世代航空機の開発に当たっても4000kmの航続距離が一つの目安となる。
- 4 電動化や水素航空機といった新技术は、これまで日本があまり入り込めていなかった小型機から導入が進むため、日本企業が持つ新技术をアピールし、プレゼンスを高める最大の機会であると考えられる。機会を活かす上では、新技术の基準策定段階から国際標準化団体の議論に積極的に参加することが重要である。

I 航空機のCO₂排出

パリ協定で採択された1.5℃目標の達成に向け、2050年のカーボンニュートラル実現をするために、航空輸送分野においてもさまざまな行動目標が掲げられている。特に、世界の航空会社で構成される業界団体である国際航空運送協会（IATA：International Air Transport Association）といった主要団体や、航空機メーカーなどから構成される航空輸送行動グループ（ATAG：Air Transport Action Group）では、50年の排出量ネットゼロに向け、具体的なマイルストーン・ロードマップを提示している。

本章では、航空輸送が排出するCO₂がどのような状況にあるかを説明する。

1 CO₂排出量全体から見た航空輸送分野の重要性

2020年における全世界でのCO₂排出量は315億tとなっている。そのうち、運輸部門は23%を占める72億tを排出しており、さらにその内訳を見ると、乗用車が41%、トラックが22%と大部分を占め、航空機は8%となっている（この数字は新型コロナウイルスによる航空需要の蒸発が反映されており、19年のデータでは運輸部門のCO₂排出量の12%を占めている。これは乗用車、トラックに次いで三番目に大きな排出要因である）。

また、国内の2020年度の旅客輸送におけるCO₂排出量原単位では、航空機輸送が133（g-CO₂/人km）で自家用乗用車の131（g-CO₂/人km）を抜いている。CO₂排出量原単位の高さから、グローバルで各ステークホルダーからのCO₂排出量の削減圧力も高まっ

ている状況である。

2 成り行きでのCO₂排出量見通し

航空機はエンジンの効率化や機体重量の軽量化により、新型機が出るたびに燃費が格段に向上しており、2019年の座席キロ当たりCO₂排出量は、対1990年比で54%減少している。2019年の航空輸送部門のCO₂排出量は世界全体で約9億tであったが、もし1990年の技術から進歩していなかった場合を考えると、約20億tの排出量となっていた。

航空機1機当たりが排出するCO₂量が減少する一方で、航空需要の高まりにより、運航機材数は1990年の8186機から2019年の2万2270機と、約2.7倍になっている。今後も旅客需要は年率3%程度で成長することが見込まれており、もし現在の技術のまま旅客需要が増加していったとすると、新型コロナウイルスによる成長率の低下を加味しても、50年には世界全体で18億tのCO₂排出量となることが予測されている。これは現在の運輸部門全体の約4分の1に当たる数値である。

3 各国政府と航空業界の動向

そのような状況下で、航空業界では特に欧州を中心に飛び恥（flygskam）など航空機を回避する動きが広がりつつある。フランスの下院では2021年4月に、電車で2時間半以内にアクセス可能な短距離区間の航空路線を禁止する法案が可決されている。またノルウェーでは、空港運営会社が40年までに国内を発着する短距離路線の全便を電動航空機に切り替えると発表しているほか、政府も30年までにSAF（Sustainable Aviation Fuel）の混合割合を30%とすることを発表するなど、政

府機関は航空輸送に対する圧力を高めている。

一方、26社が加盟する世界最大の航空連合であるスターアライアンスは、加盟航空会社による環境対策の一環として、22年8月より鉄道会社であるドイツ鉄道をインターモーダルパートナーに加えることを発表した。これはもともと、ルフトハンザドイツ航空が航空機に加え、ドイツ鉄道の旅客列車を接続便として利用できる制度を提供していたものを、スターアライアンス加盟航空会社も利用できるようになることが含まれている。

スターアライアンスメンバーであるルフトハンザ航空の発表によると、スターアライアンスは今後もこのようなインターモーダルパートナーシップを拡大する予定であり、欧州を中心に、航空会社が航空機にとどまらない適切な移動手段を提供する動きが広がっていくことが示唆される。

II 航空機の変遷

前述のとおり、航空業界では特に最近になってCO₂排出量削減に向けて大きな圧力がかかっているが、航空機製造の主要メーカーは燃費向上・CO₂排出量削減を目指し、新機材開発を継続してきた。本章では、OAG社（英国）の時刻表データを用いて、過去から現在まで、どのように航空機の使われ方が変化し

てきたかを分析するとともに、主要メーカーの機材変遷について説明する。

1 航空機の使われ方の変化

(1) 分析の前提

今回、1999年、2004年、09年、14年、19年、22年のグローバルでの時刻表データを用いて分析を実施した（22年以外の時刻表データは10月1日、22年は4月1日のものを使用）。

分析には、航空業界の各種データを提供するOAG社のものを利用している。時刻表データは基本的に航空会社から提供を受けたものであり、システム上の理由から提供のない航空会社も存在するため、グローバルのカバー率は85～90%程度となっている。

空港の所在地情報は、オープンソースデータであるOur Airportsを用いており、すべての年月について99.5%以上がカバーされている。

機材分類に関しては表1のとおり定義した。なお、ここではコミューター機以上の定期路線航路を取り扱っており、回転翼機の定期路線航路を除外した上で分析を行っている。

(2) 年代×機材分類

図1に、各年代における各機材分類の運行便数を整理したものを示す。総運航便数は年々増加しており、新型コロナウイルス流行前の2019年には1999年の1.4倍に達している。

表1 機材分類

| 分類 | コミューター機 | リージョナル機 | 小型機 | 中型機 | 大型機 |
|-----|--|--|---|---|---|
| 機材例 | <ul style="list-style-type: none"> • Beechcraft 1900 • Cessna 208B • DHC-6 • Embraer 110 • Fairchild Dornier228 etc. | <ul style="list-style-type: none"> • ATR72 • Avro RJ70 / 85 / 100 • Airbus A220 • Bae 146 • DHC8 • Embraer E-90 / 120 • Embraer 175 / 195 etc. | <ul style="list-style-type: none"> • Airbus A319 / 320 / 321 • Boeing B737 • Fokker100 • MD-80 / 90 etc. | <ul style="list-style-type: none"> • Airbus A330 • Airbus A300 / 310 • Boeing B727 • Boeing B757 • Boeing B767 • Boeing B787 • II-96 | <ul style="list-style-type: none"> • Airbus A380 • Airbus A350 • Airbus A340 • Boeing B777 • Boeing B747 |

出所) 各社公表データより作成

グローバルでのRPK（有償旅客キロ）は、01年から19年の間に2.7倍に伸びているが、運航便数自体は1999年比で1.4倍と伸び率が小さい。これは、同じ機材分類でも、座席数が増えていることが影響していると考えられる。詳細は後述するが、たとえば小型機であるB737型機は、第一世代と比較して第四世代で座席数が1.7倍となっている。グローバルでのRPKは新型コロナウイルスの影響を受けつつも、今後も年率3%程度で成長していくことが予測されており、運航便数も増加傾向が続くと考えられる。しかし、旅客需要の伸び率すべてを便数増で吸収するのは航空航路や空港のキャパシティ上難しいことから、今後も小型機を中心にさらなる大型化が進展すると推察される。

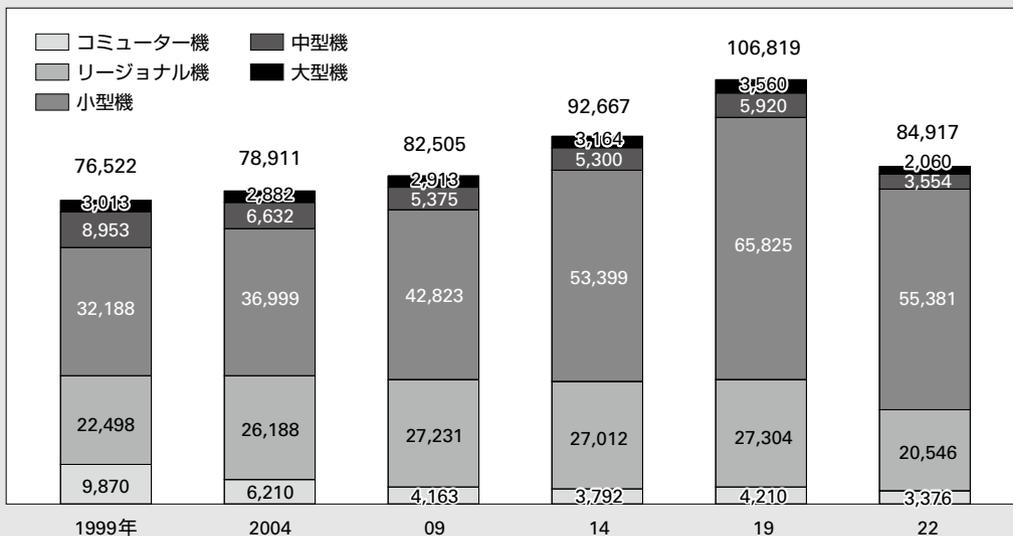
機材ごとの運行便数を見てみると、コンピューター機は1999年をピークに、2019年には約57ポイント減少している。一方で、リージョナル機は約21ポイント増加しており、コンピューター路線では、淘汰と大型化が進んでいると見られる。

運行便数を最も伸ばしている小型機では、19年に1999年の約2倍となる104ポイント増加している一方で、一つ上のセグメントである中型機では、約34ポイント減少している。これは、中型機が長距離化したことと、前述した小型機の大型化が進展したことで、中型機のセグメントを侵食していることが要因として考えられる。

大型機の中でも特に座席数の多いA380やB747は、既に生産中止が発表されており先行きが明るくないものの、一回り下のサイズであるA350などの大型機の便数は、99年から大きなブレがなく、今後も長距離路線を中心に需要が残ると推測される。

最後に、新型コロナウイルスの影響を見てみると、2022年4月時点でも、09年と同程度までしか便数が回復していないことが分かる。特に、19年との比較で影響が大きなセグメントとしては、長距離路線が主な大型機（約42ポイント減）および中型機（約40ポイント減）、地域輸送を担うリージョナル機（約25ポイント減）が挙げられる。

図1 運行便数推移（年代×機材分類）



出所) 各社公表データより作成

(3) 年代×地域分類

図2に、各年代における各地域の運行便数を整理したものを示す。地域については各フライトの出発空港を参照し、国際連合の地理区分であるUN-M49を基に整理している（一部便数が多い地域を分割、少ない地域を合算している）。

北米は米国を中心にグローバルでの最大便数を運行しているものの、2019年には1999年から約19ポイント減少した。これは、コミューター機運航便の減少（約4000便）と中型機運航便の減少（約3000便）が大きく影響している。

一方、中国・香港は2019年の運行便数が1999年の7.6倍と、ほかを圧倒する伸びとなっている。その内訳を見るとほとんどが小型機であり、1999年に1125便だったものが、2019年には1万1369便と約10倍になっている。この市場の急激な成長は航空機製造にも大きな影響を与えており、二大航空機メーカーであるボーイング、エアバスともに最終組み立て拠点を中国に構築するなど、航空機製

造においても、中国の影響力が無視できないものになってきている。

(4) 年代×距離分類

図3に、各年代における距離ごとの運行便数を整理したものを示す。なお、空港間の距離はGCD（Great Circle Distance: 大円距離）であり、実際の飛行経路長とは異なる。

500km以下の超近距離路線は1999年と比較すると2019年は約22ポイント減少している。地域ごとの特性を見ると、北米や欧州などの先進国で便数が大きく減少した一方、南米やアジア、アフリカなどの途上国では便数が増加しており、航空機以外の交通インフラの進化や、各種移動モードのコストパフォーマンスの変化、人々の環境に対する認識の変化が各地域の差分要因として考えられる。

一方で、500km以上の距離はすべての距離区分で運行便数が増加している。その中でも1001~2000kmの路線は約146ポイント増加するなど、特に顕著な伸びを見せている。これは小型機による都市間での移動需要が高まっ

図2 運行便数推移（年代×地域分類）

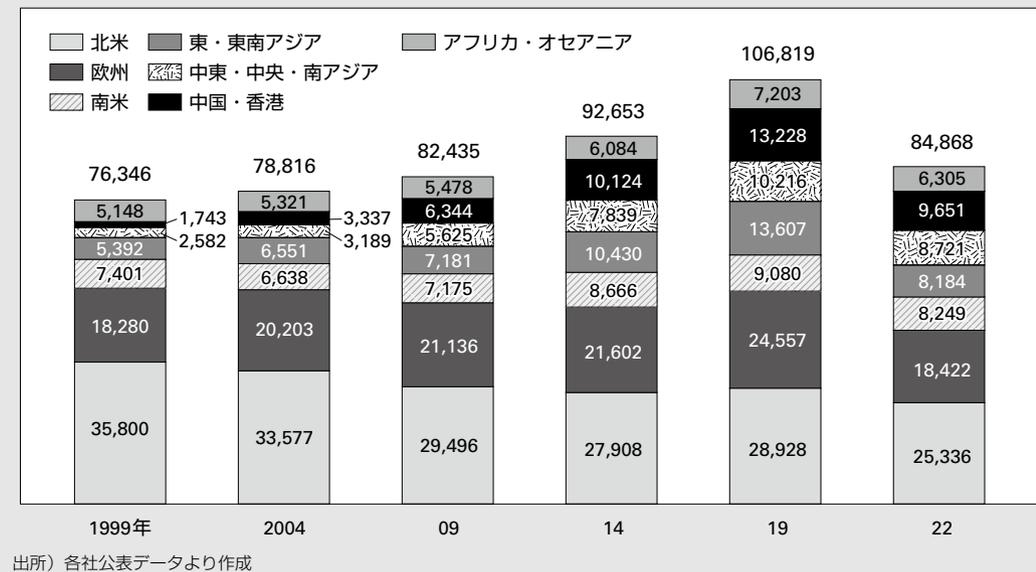
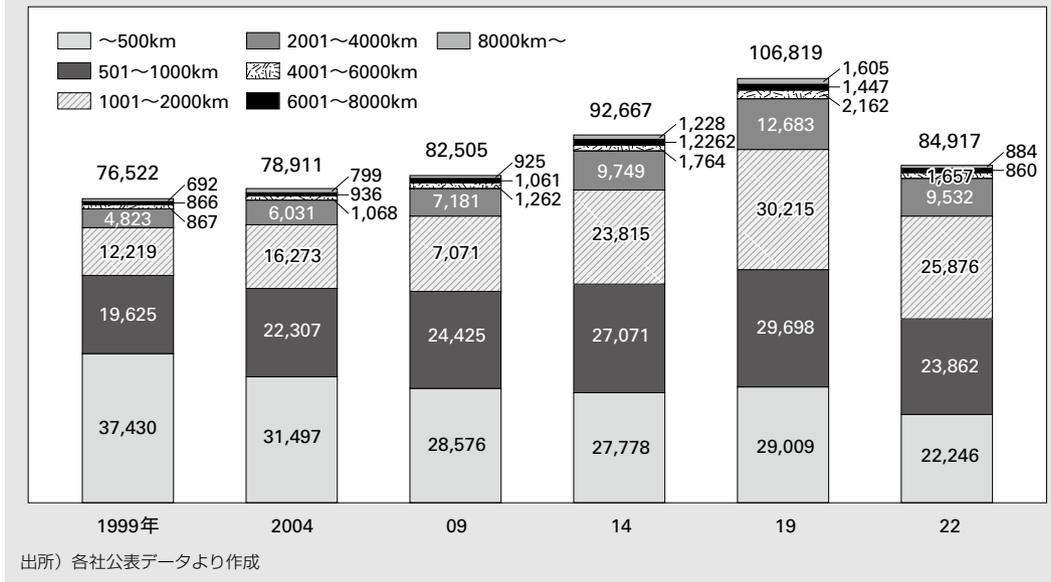


図3 運行便数推移（年代×距離分類）



たことが大きな要因であると考えられ、特に中国・香港（当該距離における小型機運行数が5600便増）や欧州（同4700便増）、中東・中央・南アジア（同2000便増）、東・東南アジア（同1900便増）が成長ドライバーとして挙げられる。

(5) 小型機の距離特性と次世代航空機に求められる航続距離の分析

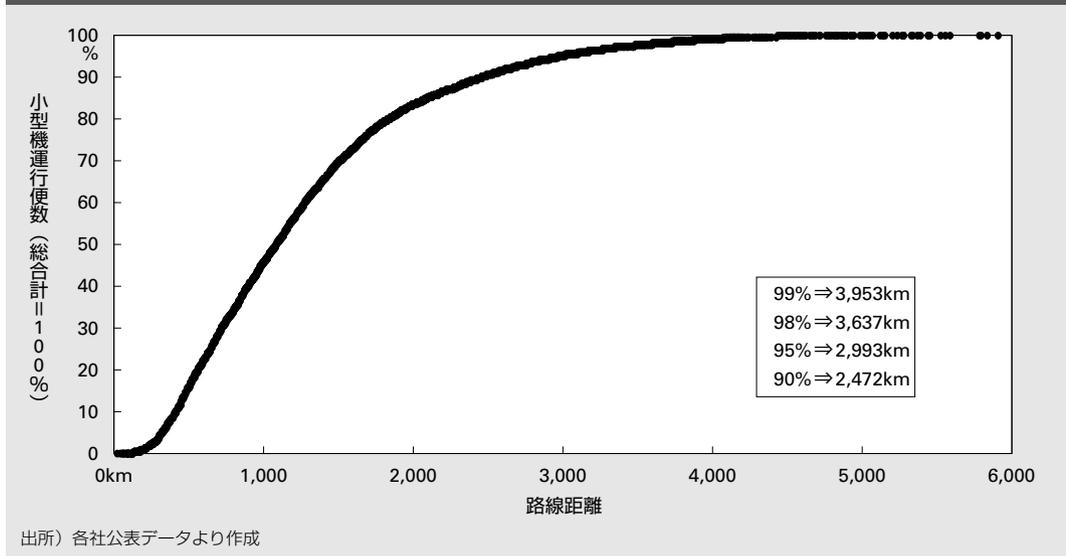
後述する新技術を活用した航空機は、初期は小型機から展開していくと想定される。特に、水素燃料は既存のジェット燃料と比較してエネルギー密度がおよそ4分の1と小さく、既存ジェット燃料とのハイブリッド構造や、水素燃料タンク構造などを変更しなければ、航続距離が大幅に減少することとなる。ここでは、どの程度の航続距離を満たすことができれば航空事業者からの需要を満たせるか、分析を実施した。

図4に2019年の小型機の距離特性を示す。

この図より、小型機の運行便数の90%が2500km以下、95%が3000km以下、98%が3600km以下、99%が4000km以下であることが分かる。4000km以下の代表的な路線としては、アメリカ大陸横断路線であるロサンゼルス-ニューヨーク路線が3972km、欧州横断路線であるマドリード-モスクワ路線が3911km、アジア圏内路線である東京-香港2998kmなどが挙げられる。

現在の小型機はスペック上の航続距離が6000km程度であるが、燃料タンクの構造を変更せず水素燃料を搭載したとすると1500km程度の航続距離となる。1500kmで運航便の70%程度はカバーできるものの、往路・復路ともに水素燃料を供給しなければならず、地方空港でも水素燃料供給インフラが必要となる。水素航空機の黎明期に当たっては、まずハブ空港でのみ水素インフラが構築される可能性が高いため、往路での立ち寄り地となる地方空港では燃料補給をせず運行できること

図4 2019年小型機の運行便数距離特性



を考慮すると、実航続距離としては最低でも3000km、可能であれば4000km以上が望ましい。

片道3000km以上の路線であれば、ある程度設備の整った大都市間輸送であるケースが多いため、燃料補給の問題は地方空港よりも小さいと考えられる。実際に、欧州の航空機メーカーであるエアバス（フランス）が検討している水素航空機「ZEROe」のターボファンタイプは、3700km程度の航続距離を目指すことが公表されている。

2 ボーイングの機材変遷

ここからは、航空機の二大メーカーであるボーイング（米）とエアバスの機材変遷と今後の見通しについて、単通路機と双通路機に分けて説明する。

(1) 単通路機（小型機+B757）

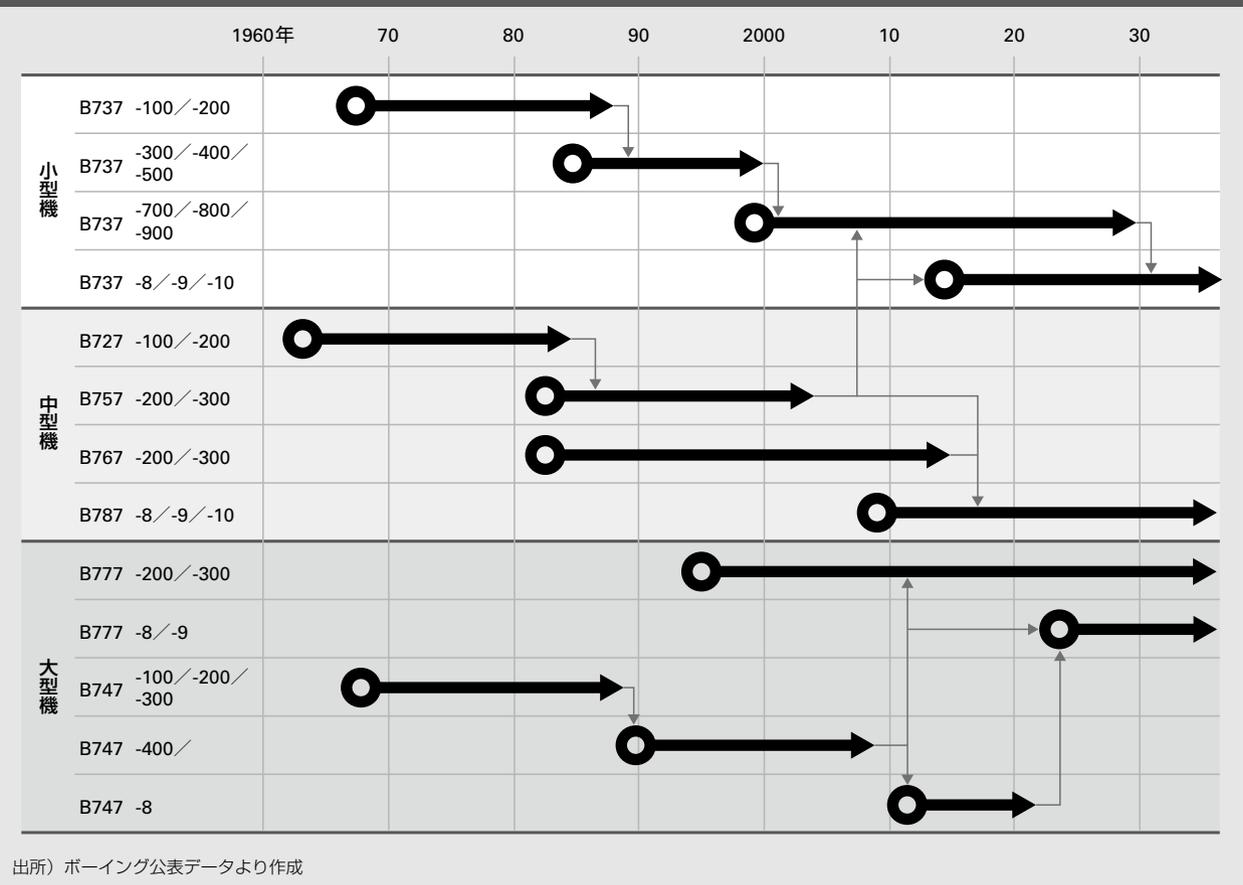
図5に示すとおり、ボーイングの主要な単通路機であるB737型機の第一世代に当たる

B737-100/200型は、1967年に初飛行、68年にルフトハンザ航空にて運用が開始されている。

B737型機は15~20年に一度のペースで新世代機をローンチしており、第二世代のB737クラシック（-300/-400/-500型）、第三世代のB737NG（-700/-800/-900型）、第四世代のB737MAX（-8/-9/-10型）では、第一世代の基本設計をそのままに、各所に新技術を導入しているほか、新型エンジンへの換装、胴体延長を行っている。

その結果、B737型機は徐々に大型化・長距離化しており、第一世代（-200型）では最大座席数が130席、航続距離が4000kmであったのに対し、第二世代（-500型）では145席、4400km、第三世代（-800型）では189席、5665km、第四世代（-9型）では220席、6570kmと、第一世代と比較すると座席数が1.7倍、航続距離が1.6倍まで大型化・長距離化している。これは、現在は生産が終了しているボーイングのもう一つの代表的な単通路

図5 ボーイングの機材変遷



機であるB757型機（-200型）の228席、7222kmと同程度である。

ボーイングはB757型機の後継機としてNMA（New Midsize Airplane）を発表（市場投入は2025年）していたが、20年1月に開発計画の一時中断を発表している。B737型機の第五世代機とNMAがどちらも順調に開発されれば、市場投入時期は2030～40年頃と推測される。しかし、

- ①時期的にも顧客セグメント的にも重複が生じる
- ②B737型機の基本設計から既に50年以上を経過しており、改良の余地が少ない
- ③時刻表データ分析にて言及したとおり、

今後の旅客需要の伸びを増便でのみ賄うことは難しく、さらなる機材の大型化が見込まれる

以上三点の理由から、両者の計画を統合し、基本設計を大きく刷新した、B737とB757の後継機に当たる新たな小・中型機が開発される可能性も、少なからずあると考えられる。

(2) 双通路機（中型機～大型機）

ボーイングの大型機には、多くの航空会社で運行されてきたB747型機と、B777型機が存在する。そのうち、B747型機は2022年内での生産終了が予定されている。これは、エンジン信頼性の向上に伴う双発機の台頭が大

きく影響している。

もともと、民間航空機の安全性確保のために、エンジンが二基の双発航空機は片方のエンジンが停止したとしても安全に着陸できるよう、近傍の空港から60分以上離れたルートを飛行することが許されていなかった。大洋横断飛行などの長距離路線は三発機以上の飛行が必須であり、四発機のB747や三発機のDC-10、L-1011などが活用されていた。

その後、技術が進展しジェットエンジンの信頼性が高まったことにより、ETOPS (Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards) と呼ばれる、従来の規制を緩和する双発機の飛行ルールが制定された。当初はB767やB777などがETOPS-120/180 (近傍空港まで120分/180分に緩和) を取得し、大洋横断路線でも双発機による運行が開始された。現代ではさらにエンジンの信頼性が高まり、ETOPS330/370 (同330分/370分) など、双発機での大洋横断に際して非常にフレキシブルなルートを飛行することが可能となっている。

エンジン数が増えるほど飛行の冗長性は高まるものの、メンテナンス費なども大きくなるため、各航空会社は四発機よりコスト優位性のある双発機へと移行し、22年にB747型機が生産終了予定となった。

3 エアバスの機材変遷

(1) 単通路機 (小型機)

図6に示すとおり、エアバスの小型機であるA320ceo (Current Engine Option) は1987年に初飛行し、88年にエールフランス航空 (仏) にて運航が開始された。その後、A320ceo (最大座席数180席) の長胴型となる

A321ceo (同220席)、単胴型となるA319ceo (同159席)、さらに単胴型となるA318ceo (同107席) など、さまざまな派生をしながらこれまでに合計で約8100機を納入している。

エアバスもボーイングと同じく、基本設計をそのままに各所に新技術を導入しているほか、新型エンジンへの換装、胴体延長を行った後継機であるA320neo (New Engine Option) を2016年から市場投入している。第一世代のceoと同じくA321neo、A319neoの各種派生を発表しており、22年6月時点で既に第一世代の確定受注数を上回る8400機を受注している。

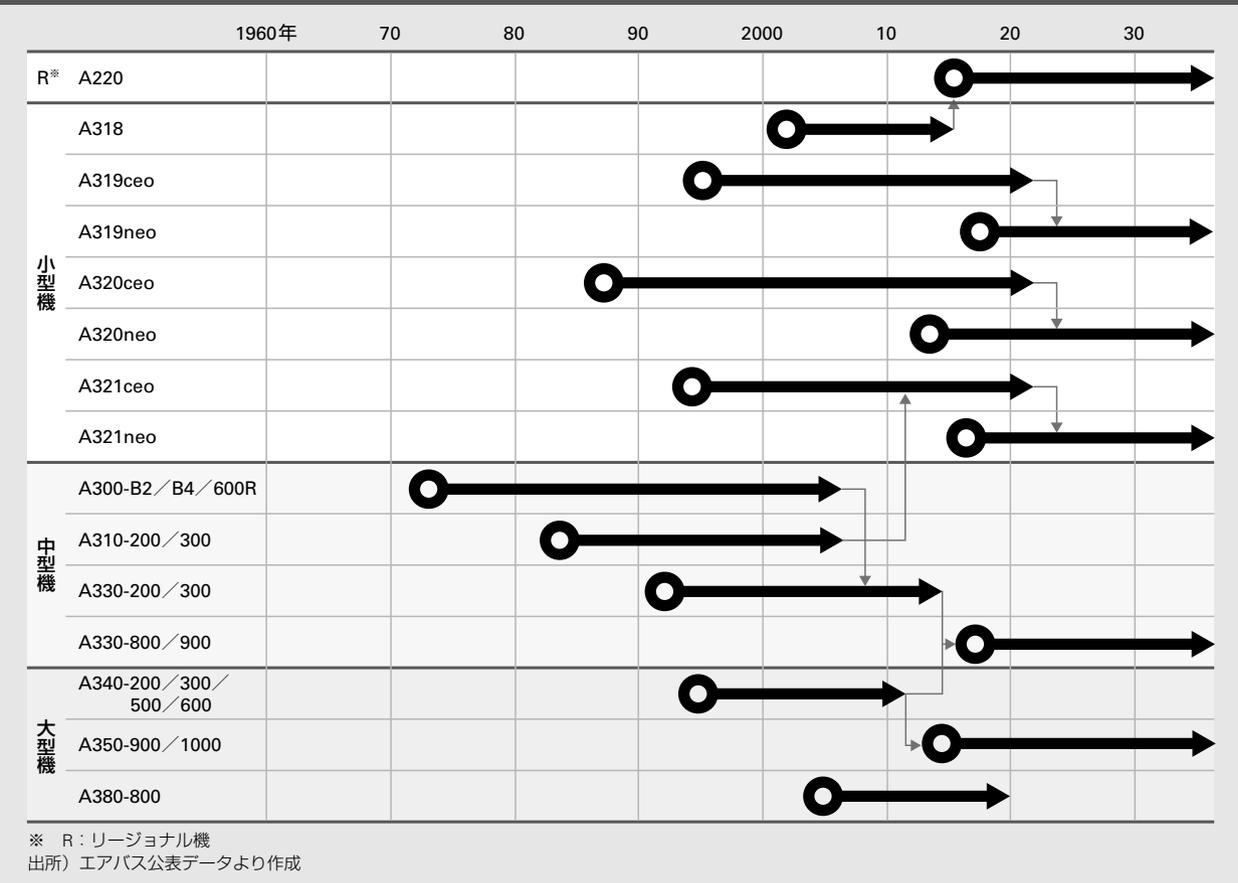
小型機セグメントでは、20年に水素航空機のココンセプト機であるZEROeが発表されており、35年の市場投入を目指し研究開発が進められている。水素航空機の詳細については第IV章にて説明する。

(2) 双通路機 (中型機~大型機)

エアバスの初代大型機であるA340は、ボーイングの大型機であるB777と同時期に市場投入された四発機である。A340はB747と同じく四発機の衰退により2011年に生産が終了し、姉妹機であった双発機のA330、最新機である双発機のA350へのリプレースが進んだ。

総二階建ての超大型機であるA380は、新型コロナウイルスによる旅客需要の蒸発が起こる前の19年に、21年内の生産終了を発表している。A380の特徴はさまざまな新技術が取り入れられていることで、MEA (More Electric Aircraft) を採用した最初の旅客機でもある。A380は舵面のエルロンやスポイラーなどを駆動するアクチュエーターの一部

図6 エアバスの機材変遷



を電気油圧式に置き換えている。電気油圧式のアクチュエーターを用いると、油圧制御用の作動油配管などが不要になることから、軽量化できて燃費向上が実現するほか、整備性も向上する。このような航空機装備品の電動化は、燃料効率・整備効率の向上から今後も進展していくと考えられる。

Ⅲ カーボンニュートラルに向けた航空業界・産業の取り組み

航空業界におけるカーボンニュートラルの方向性は、IATAや国際空港評議会（ACI：Airports Council International）、ATAGが

発行するレポート「Waypoint2050」をベースに議論が行われることが多い。

「Waypoint2050」を含め、IATAの掲げる「Net-Zero Carbon Emissions by 2050」やEUの公的調査研究団体であるCleantechが発行する『Hydrogen-powered aviation』や『Clean Sky 2 Technology Evaluator』では、カーボンニュートラルに向け、市場原理の活用（排出量取引：CORSIA）、管制・空港インフラの改善、持続可能な航空燃料（SAF：Sustainable Aviation Fuel）、水素などの新技術導入、の四点が掲げられている。

「Waypoint2050」では、上記四点の活用度合いを図7で示す五つのシナリオで分類して

いる。いずれのシナリオも中・長期的なSAF活用を筆頭に、新技術・インフラ改善を併用し、2050年のネットゼロを目指すものである。

50年の実質ネットゼロを実現するには、従来の航空機の枠にとらわれない新技術の開発や導入が必要不可欠である。現在、航空機で導入が検討されている新技術は、「既存機体の軽量化」「推進系の電動化」「水素燃料の活用」の三つに大別される。

短期的には、従来の設計を踏襲した機体の軽量化やエンジンの効率化およびSAFの導入により、航空機でのCO₂排出量削減を目指す。また中長期的には、推進系の電動化や水素の活用など、全く新しい技術の導入により排出量のさらなる削減が見込まれる。本章ではそれぞれの技術の最新動向や導入に向けた課題について説明する。

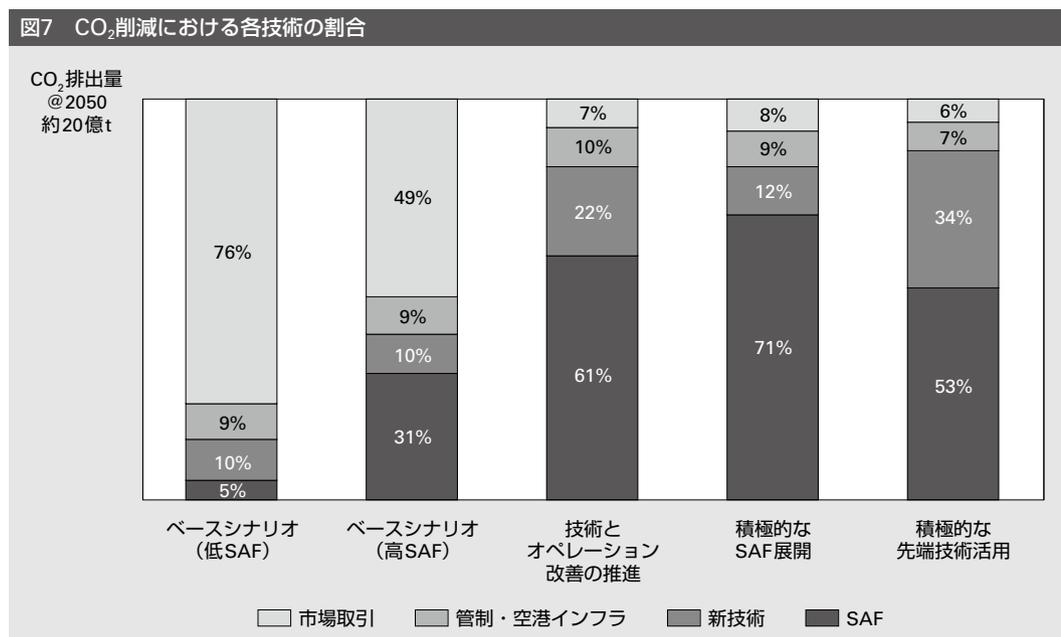
1 排出量取引を活用した カーボンオフセット (CORSA)

航空分野の脱炭素化に向け、国連専門機関の一つであるICAO（国際民間航空機関）の

2013年の総会で、20年以降は総排出量を増加させないことが決議された。しかし、航空分野のCO₂削減は一朝一夕に達成できるものではなく、新技術やSAFの導入などは長期的な活動が必要となる。そのような状況下で20年以降の排出量を短中期的に抑制する施策として、CORSA（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）と呼ばれる市場メカニズムの導入が16年に採択された。

CORSAは20年以降のCO₂排出量抑制を目的としており、20年のCO₂排出量を基準とし、増加分について各運航者がカーボンクレジット購入などの手段によりオフセットを行う。ただし、新型コロナウイルスの影響により、20年のCO₂排出量が極端に減少したことから、20年の値は異常値として排除し、基準値として19年の値を利用することが決定されている（24年以降の基準値は今後正式決定予定）。

CORSAは大きく分けて三つのフェーズで実施され、21-23年のパイロットフェーズ、



24-26年の第一フェーズ、27-35年の第二フェーズに分けられる。パイロットフェーズおよび第一フェーズでは、自発的に参加した国(22年7月時点で日本を含む114カ国)間の航路のみをオフセットの対象としている。第二フェーズでは自発参加国に加え、国際航空部門全体のRTKシェアの9割を超えるまでの国が参加義務国となり、産業界として他に類を見ない規模での取り組みとなる。CORSlAで活用されるクレジットとして、ICAOより八制度の適格排出ユニットが指定されている。

航空会社にとっては運航コストの増加としてCORSlAの影響が表れる。たとえば、A社の19年におけるCO₂排出量が1000万tであり、日本の旅客需要伸び率(年平均成長率2.8%、20-39年)と比例してCO₂排出量が伸びると仮定した場合、35年には1556万tとなり、556万tのオフセット義務が生じる。クレジット価格は使用する制度によって異なり、相対取引であるため今後の見通しは不透明であるが、2000円/tCO₂とした場合、A社は2035年単年で111億円のコスト増となる。

ただし、実際には、燃費性能の高い航空機への置き換えや、SAF利用によるCO₂排出量削減効果などが加味されるため、実際のオフセット義務量は減少すると考えられる。また、オフセット量の計算式について、上記影響の算出に当たっては簡略化したものを用いている(実際にはフェーズごとにオフセット量の計算式が異なる)。

このようなカーボンクレジットによるオフセットは、航空輸送以外にも、製造業などカーボンニュートラル実現の難易度が高い業界で活用が進む可能性もある。その場合、中長期的にはクレジットの上昇も考えられ、さら

なるコスト負担の増加が懸念される。

2 SAFの活用

SAFは、2050年の実質CO₂排出量ゼロを実現する上で避けて通ることのできない技術の一つである。既存のジェット燃料と同等の手順で使用可能であり、取り扱いも比較的容易なため、航空会社も高い期待と関心を寄せている。特に後述する推進機の電動化や水素燃料の活用は、短距離の小型機が主要なターゲットとなる技術であり、長距離のフライトにはSAFの利用が必要不可欠である。

SAFは、世界最大級・民間・非営利の国際標準化・規格設定機関ASTM Internationalの技術文書「D7566」によって、原料や製造方法・既存ジェット燃料との最大混合比率などが明確に規定されており、22年7月時点でAnnex 1~7の計七つの製造方法が認証されている。製造方法や原料に応じて10~50%を従来のジェット燃料と混合させることが可能であり、混合した燃料は通常のジェット燃料と同等に扱われ、空港給油施設などの使用も可能である。20年時点でSAFは全世界で使用される航空燃料のうち0.01%の利用にとどまるが、25年には2%、50年には70~100%まで使用比率を上げることが目標とされている。加えてエンジン大手のロールスロイスでは、トレントエンジンを活用したSAF100%によるジェットエンジンの稼働試験も実施しており、将来的な100%SAFフライトに向けた取り組みも進行している。

他方でSAFには解決すべき点も多く、特に現状では価格や供給量が大きな課題になっている。SAFはまだ大量生産のプロセスに入っているとはいえず、価格は既存燃料

のおおむね五倍程度、製造能力も21年時点で年間6.4万tとなっている。これは年間に使用されるジェット燃料の0.03%程度であり、十分な量とはいえない。加えて既存のジェット燃料と異なり、SAFにはゴムの膨潤性がなくパッキンからの燃料漏れが発生しやすいという問題がある。空港のパイプラインでSAFを運用することに対する空港会社やその他就航航空会社からの反対意見も、今後、課題になる可能性がある。

3 既存機体の軽量効率化

(1) 機体の軽量化

機体の軽量化に最も大きく影響するのが機体構造体の材料変更である。既存の航空機の機体の多くは、アルミニウムを中心とした軽量金属で構成されている。A350やB787などの一部最新鋭機体の大部分では、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）をはじめとした複合材も活用されているが、小型機では翼など一部の構造体での使用に限られている。これは、機体価格が比較的安価である小型機へは高価な複合材の導入が難しいという背景も存在しており、解決策としては安価な複合材の製造方法の確立や、新たな構造の採用による既存金属構造物の軽量化が挙げられる。

加えて、装備品の電動化や小型化も機体の軽量化に一定の影響を与えると考えられる。たとえば、動翼向けアクチュエーターをはじめとした油圧システムを全廃し、電動アクチュエーターに切り替えた場合、機体に張り巡らされた油圧パイプやオイルが完全に不要となり、軽量化につながると考えられる。またMEMS（Micro Electro Mechanical System）を活用した加速度センサーなどの各種センサ

ーや慣性航法装置、共用化した動翼制御チップなどを採用した場合、複数の制御系システムの小型軽量化が可能となり、機体全体の軽量化にも寄与すると考えられる。

(2) エンジンの効率化

ジェットエンジンは、これまでターボファンエンジンのファンを大型化し、バイパス比を大きくすることで効率化を図ってきた。ただし地上とのスペースの問題から、バイパス比は1：12程度が最大といわれており、新たな効率化の手段が必要となっている。そこで近年は、既存の構造のまま技術を高度化し、効率化を図る手法としてギヤードターボファンエンジンの導入やオープンローターシステムなど、新たなエンジンの構造の開発が主に検討されている。

現在、主に使用されているターボファンエンジンは、推進力の大部分をエンジン前方で回転しているファンにより生み出しており、ファンの回転軸はエンジンの低圧軸と共用化されている。ただし低圧軸はあくまでも空気の圧縮に最適な回転数で駆動しており、推進力を得る上で効率的な回転速度でファンが動作しているとはいえない。最新のギヤードターボファンエンジンでは、低圧軸とファンの間にギヤボックスを設置することでファンを常に最適な回転速度で動作させ、エンジンの効率化を図っている。現在はギヤボックスの重量の問題で小型機での採用が中心であり、またエンジンの効率化効果は限定的である。しかし今後、新たな軽量素材の開発により、効率化効果の増大および大型機への適応可能性は高いと考えられる。

またギヤードターボファンエンジンの構造

を活用し、ファンをさらに大型化してエンジン外に配置するオープンローターシステムも同様に開発が進められている。構造自体はターボプロップエンジンに近いが、プロペラ自体に後退角をつけることで、一定以上の回転数に達した際のプロペラ先端で発生する衝撃波の低減を図り、従来のターボプロップ機よりも飛行速度を上げることが可能といわれている。将来的には、複合材で製造した推進用ファンを採用したオープンローター型のエンジンも導入の可能性があるかと推察する。

4 推進系の電動化

(1) 電動推進システムの概要

航空機における推進系の電動化の手法は、「完全電動システム」(図8-A)、「シリーズハイブリッドシステム」(図8-B)、「パラレルハイブリッドシステム」(図8-C)、「シリーズ・パラレルハイブリッドシステム」(図8-D)の主に四種類に大別される。

完全電動システムでは、従来の航空機用ジェットエンジンと燃料タンクを全廃し、代わりに推進用のモーターと大容量バッテリーを使用して飛行する。

シリーズハイブリッドシステムは、推進シ

ステム自体は完全電動システムと同様だが、バッテリーを小型化する代わりに発電専用のエンジンを搭載する。

パラレルハイブリッドシステムでは、完全電動システムと同様に機体に大容量バッテリーを搭載するものの、ジェットエンジンはそのまま搭載した状態で、両方を使用して飛行する。また、飛行方式は大きく三つが想定されており、離陸からバッテリー残量がなくなるまでバッテリーで飛行する方式や、離陸後巡航中にバッテリーへ切り替えて残量がなくなるまで飛行する方式、巡航中に一定の残量を下回った段階でエンジンに切り替え、最後の着陸進入で再度バッテリーに切り替える方式が挙げられる。

シリーズ・パラレルハイブリッドシステムでは、大容量バッテリーは機体へ搭載せず、ジェットエンジンに接続した大電力の発電機

図8-A 完全電動推進システム

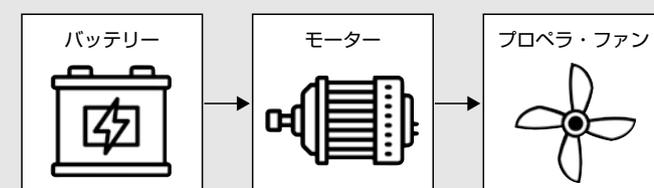


図8-B シリーズハイブリッドシステム

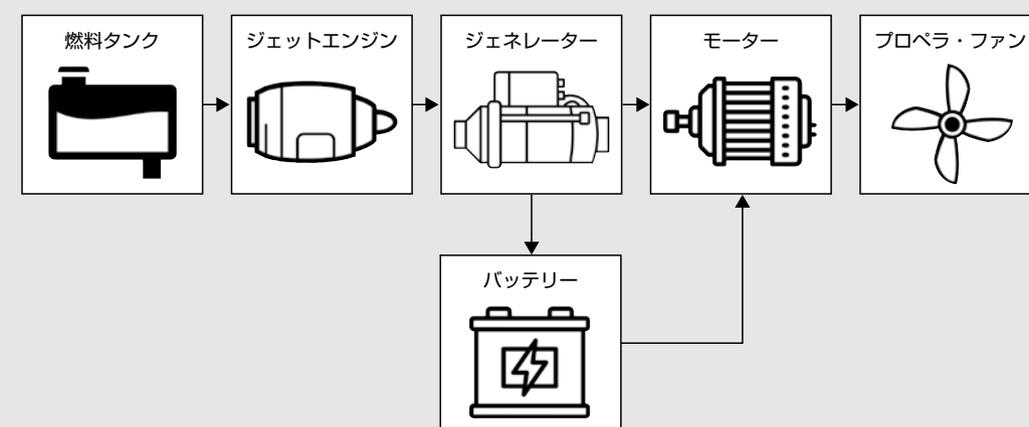


図8-C パラレルハイブリッドシステム

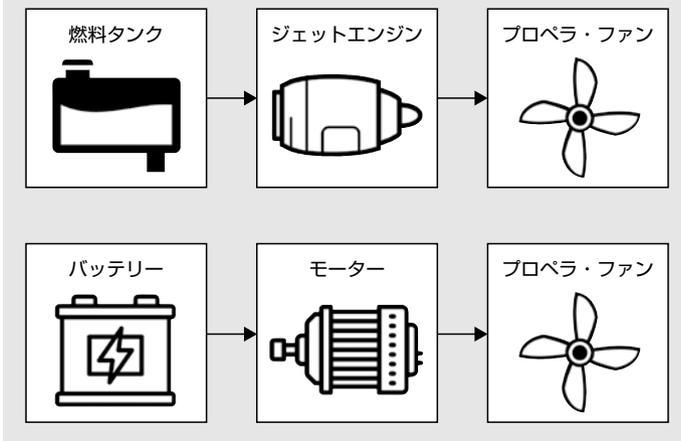
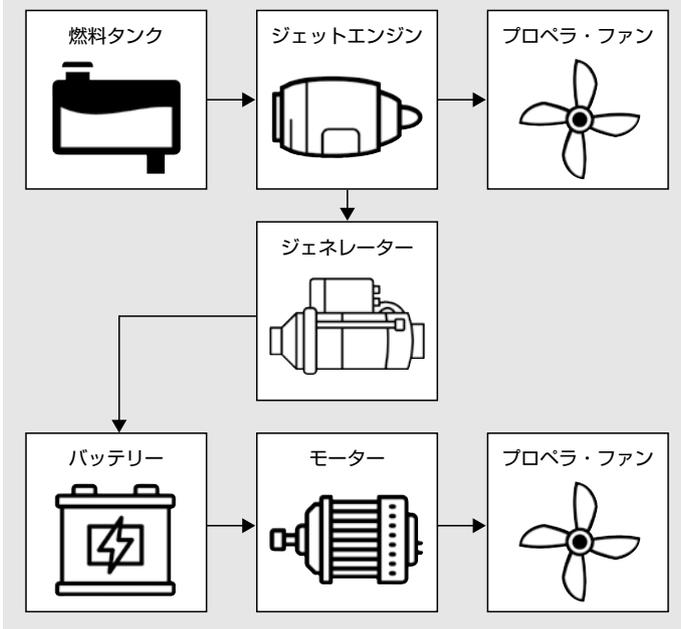


図8-D シリーズ・パラレルハイブリッドシステム



と一部小型のバッテリーから電力を供給する。基本的に飛行は従来のジェットエンジンで行うが、特に離陸時などはエンジンで発電した電気を基にモーターを補助動力として作動させることで、燃費向上など環境負荷の低減を目指す。

(2) 電動推進システムの現状と課題

航空機の推進系を電動化するに当たり、最大の課題はモーターの出力不足とバッテリー容量の不足である。旅客機として使用される航空機の推進系電動化にはMWクラスの軽量かつ大出力モーターが必要不可欠であるが、現状、ニーズを満たすモーターを開発している企業は限られている。また、旅客機クラスの需要を満たす大容量かつ小型軽量のバッテリーも存在せず、推進系を完全電動化した実験航空機は、セスナクラスの単発小型機に限られる。

たとえば航空機用モーターを開発する米国のmagniX社は、自社の航空機向け560kWモーター「magni500」を搭載した完全電動航空機の試験飛行を実施している。ただ、搭載した機体はセスナ社製の単発小型機であり、航続距離も数百kmと極めて短い。また、コミュータークラスの機体向けとして、米国のWright Electric社は0.5MW～4MWまで対応可能な航空機推進システム向けモーターを開発している。このモーターはBAe146のような100席クラスの小型四発機での使用を想定しており、2023年から段階的にエンジンをモーターへ置き換え、26年の商用化を目指して開発が進行している。ただ、こちらの機体も航続距離は700km程度と非常に短く、実用化に向けたハードルは高いと考えられる。

上記のとおり、MWクラスのモーターを主機として活用するには高出力化などさらなる改良が必要であるが、バッテリーと比較すると実用化時期は早いといえる。まずは大容量バッテリーが不要かつ補機として、モーターを活用することが可能なシリーズ・パラレルハイブリッドシステムから航空機へ搭載が始

まると推察される。小型機クラスのハイブリッドシステムにも転用可能なMWクラスの航空機向けモーターについては、欧米の一部メーカーが既に開発を進めており、たとえば前述した米国のWright Electric社以外にもドイツのシーメンスなどが開発している。加えてハイブリッドシステムであれば、空港側でも特別な充電インフラなどは不要であり、また従来のジェットエンジンも搭載していることから冗長性も高いと判断される。それゆえモーターを主機として使用するその他の方式と比較して導入障壁は低いと推察される。実際に「Waypoint2050」では、25年頃にはコミュータークラス、30年頃には小型機クラスの機体で電動推進システムの運用が開始されると予想している。

5 水素燃料の活用

(1) 水素燃料を活用した推進システムの概要

航空機における水素の活用方法は、水素を燃料として直接燃焼させる方式と、燃料電池を活用してバッテリーの代わりとする方式の大きく二つに大別される。

水素を直接燃焼させる推進システムは、主に「水素ピストンエンジン」と「水素ガスタービンエンジン」の二つが検討されている。水素ピストンエンジンは一部の水素エンジンを活用した自動車でも使用されている技術であり、基本的には従来型のピストンエンジンを搭載しているセスナクラスの小型機が対象となる。水素ガスタービンエンジンは、従来のジェットエンジンと同様の機構で、ケロシンが主体のジェット燃料から液体水素へ燃料を変更する。ただ、水素のエネルギー効率は従来のケロシンと比較して4分の1程度と低

く、機体はコミューター機から中型機が主な対象領域となる。

水素燃料電池は完全電動化と同様のシステム構成で、バッテリーを水素燃料電池へ転換し、推進力は電動モーターで供給する。ただ、こちらも完全電動化と同様にモーターの出力や燃料搭載量の観点から、コミューター機や小型機クラスがメインの領域になると考えられる。

加えて、エアバスが2035年の運用開始を目指し開発を進めているZEROeコンセプト機では、水素ガスタービンエンジンと水素燃料電池のハイブリッド推進システムの検討も進められている。

(2) 水素燃料活用の現状と課題

航空機における水素の活用は、電動化と比較して、まだ技術の要素検討段階にある。各文献が2035年頃に初期運用開始を見込んでいるなど、電動航空機と比較して実用化は少し遅い時期になると予想される。水素航空機はエアバスやAerospace Technology Institute社（英）、GKN Aerospace社（英）など、特に欧州勢を中心に積極的な活動を展開している。

ただし前述のとおり、水素航空機の実用化にはまだ高い障壁がある。たとえば、水素をエンジンで活用する際の懸念点には、ガスタービンにおける水素燃料の燃焼技術が確立していないことが挙げられる。通常、ジェットエンジンは気化した燃料を高温高圧の燃焼室へ送り、そこでの燃焼によって発生した高圧ガスにより駆動させたファンと、後方からの排気ガスによって推進力を得ている。しかし、高温高圧で水素を燃焼させた場合、大気

汚染の原因物質の一つである窒素酸化物が副産物として生成されてしまう。加えて水素は着火点の温度管理が極めて難しく、水素100%でのガスタービンエンジンの燃焼技術は確立されていない。発電所などでの運用を見越して開発が進む水素ガスタービンエンジンは、天然ガスなどとの混焼が原則となっている。

また、水素燃料電池にも、エネルギー密度の低さやモーターの推進力不足など、旅客機クラスの機体へ搭載するに当たっての課題がある。加えて、航空機へ水素を搭載する際は、液体化した水素が想定される。それゆえ低温高圧に耐える燃料タンクを新たに開発したり、搭載箇所も従来の翼の中から変更したりする必要があると考えられる。他方で水素は、従来のジェット燃料と比較してエネルギー効率が4分の1と低く、同じエネルギーを捻出するには四倍の燃料を搭載する必要がある。現行の航空機レイアウトではこのスペースの捻出は難しく、ブレンデッドウイングボディなど新たな機体レイアウトの検討が必要と考えられる。これらのことから、航空機における水素の本格的な活用は電動推進システムの技術が確立した後になることが予想される。

IV 航空機向けの新技术が与えるインパクト

前述のとおり、2050年のCO₂実質排出量ゼロに向けて、航空機にはさまざまな新技术の導入が検討されている。ただしそれらの取り組みには、機体の構造や燃料など航空機運用の根幹にかかわる部分の変更も含まれている

ため、空港における運用上の影響や既存サプライヤーを中心としたメーカーへの影響、また航空機の性能によっては航空会社にもメリット・デメリット双方の影響が出るものと考えられる。本章では「空港」「メーカー」「航空会社」の三つの観点から、航空機に全く新しい技術が導入された際の影響について説明する。

1 空港へのインパクト

航空機が新技术や新たな機体構造を採用する場合、空港の支援設備について影響が出る可能性がある。たとえばSAFは従来のJET-A1をはじめとしたジェット燃料と同等の扱いを可能にした状態でのみ、航空機での使用がASTMで認められている。よって、SAFの導入による新たな給油施設やフィルターなどは不要であり、通常の空港給油施設を使うことが可能である。加えて電動航空機においても、シリーズハイブリッド機やシリーズ・パラレルハイブリッド機はバッテリーへの充電が不要であり、空港側の支援設備として特に新しいものは必要ないと考えられる。

他方で、推進系を完全電動化した航空機やパラレルハイブリッドの航空機の場合はバッテリーへの充電が必要であり、空港内に充電設備の設置が不可欠である。また、既存の航空機は給油時間が最大でも一時間半程度と短く、貨物や乗客の積み降ろしと並行して給油を実施しているが、バッテリーへの充電はより長い時間が必要と推定されるため、空港内に別途充電専用のエプロンを整備する必要があると推察される。水素航空機の燃料充填は、ほぼ既存の燃料と変わらない時間で完了できると思われるが、水素用の全く新しい燃

料貯蔵施設および給油施設を整備する必要がある。

加えてブレンデッドウイングボディなどの新たな機体構造を採用した場合、ポーティングブリッジの適応可能性について検討する必要がある。また機体の横幅についても制限が存在し、たとえば羽田空港においては、翼幅65mを超えるICAOのF規格の機体は運用上の制限がかかるため就航が禁止されている。ブレンデッドウイングボディや翼の長い次世代航空機が就航した際には、空港の改修や就航地の制限が必要となる可能性がある。

2 メーカーへのインパクト

航空機の脱炭素化に向けた活動内容のうち、エンジンの効率化や機体の軽量化については既存コンポーネントの改良が中心となり、航空機メーカーへの影響はあまり大きくないと考えられる。他方で、電動化や水素航空機の登場は、既存航空機と比較して装備品の内容や動作手順が大きく変わるため、航空機のサプライチェーンにも少なからず影響が出るものと考えられる。

たとえば、推進系や装備品が電動化した場合、現在機体やエンジンに数多く使用されている油圧パイプに関連する部品は多くが削減され、当該サプライチェーンには脅威になり得ると考える。加えて推進系が完全電動化した航空機や水素燃料電池の航空機搭載が実用化した場合、エンジン内の燃料室も不要となり、エンジン内部のサプライヤーは大部分が淘汰される可能性がある。

他方で電動アクチュエーターをはじめとした電装品や推進用の電動モーターの搭載が本格的に始まった場合、他産業で小型モーター

や大型の大出力モーター、インバーターやコンバーターなどを製造販売している企業には、新たなビジネスチャンスが生まれる可能性も秘めている。ただし、航空機はその他の産業と比較して高い安全性の担保や厳しい基準に合致しなければならない点に注意が必要である。特に推進系の電動化や水素燃料の活用は、直近の数年で技術の標準化や規制の制定が始まった段階であり、明確な基準が存在しない部分も多い。

通常航空機に関連する規制や基準はアメリカ連邦航空局（FAA）や欧州航空安全機関（EASA）が中心となって作成するが、その際の技術的な検討は、SAE Internationalをはじめとした民間標準化団体が策定した技術文書を参照している。基準の策定段階から標準化団体の議論に積極的に参画し最新の情報を収集するとともに、自社技術の標準化議論への差し込みを行うことが、FAAやEASAの規制作成に間接的にかかわることとなり、今後、航空機サプライヤーとして競争力を高める上で重要である。

ただし標準化団体の活動には、自社が保有する情報や技術データの開示などさまざまな貢献が求められ、実際に標準規格を策定するまでにはある程度長期間の活動が必要となる。標準化議論に参画するに当たってのノウハウ蓄積や、検討における実験設備の整備、評価手法の確立など、個社ですべてを網羅することは困難である。日本としては産官学連携による標準化団体での議論で日本企業が不利にならない支援体制を整備するなど、国として標準化活動に取り組むことが重要である。

3 航空会社へのインパクト

航空会社においては、大きく分けて「調達コストの増加」「新たな整備手法の確立」「機体運用方針の再検討」の三つの影響が考えられる。

調達コストに関して、SAFは安定的な供給キャパシティや製造プロセスなどの課題から、現在は従来のジェット燃料と比較しておおむね2～16倍程度の調達価格が想定される。同様に水素航空機についても、現在の水素の調達コストはジェット燃料と比較しておおむね4～5倍程度が想定される。燃料コストの増加に加え、電動航空機についてはエンジン以外にモーターや関連装備が追加されるため、機体調達コストが増加する懸念がある。他方で燃料の消費量や整備に関するコストは従来のジェットエンジンと比較して削減される。

また、電動推進機をはじめとした電動装備品の搭載は整備コストの削減に寄与するが、同時に新たな整備検査手法や点検交換ロジックの確立も必要となる。電動装備品は従来の機械式装備品と比較して整備頻度やコストを削減できるメリットがあるが、従来は可能だった故障の予兆判断が難しくなり、突然故障する「サドンデス」と呼ばれる現象の発生リスクが増大した。特に、安全性や信頼性が重要視される推進機でのサドンデス現象は極めて重大なリスクであり、故障の予兆を把握するための検査手法の確立や予防的な定期交換の実施などが必要不可欠となる。

また機体運用方針について、推進機が電動化した際には航続距離や最大離陸重量の減少が予測されることから、就航路線や機材、搭載貨物量などの再検討が必要となる。加え

て、完全電動推進機の場合、バッテリーの充電時間も運用上加味する必要があり、特に現在空港のターンアラウンドタイムを20分程度に設定していることの多いLCCでは、影響が大きいと推察される。

V まとめ

ここまで述べてきたとおり、航空機は脱炭素化に向けてゆっくりではあるが着実に動き始めている。

新技術の導入という業界の一大変化は、捉え方によって脅威にも機会にもなり得る。電動化や水素航空機などの新技術は、これまで日本としてあまり入り込めていなかった小型機から導入が進んでいくと見込まれており、一大市場である小型機において日本企業が持つ新技術をアピールし、プレゼンスを高めることができる最大の機会であると考えられる。

この機会を活かすためにも、航空機製造関連メーカーは、前述したとおり、新技術の基準策定段階からSAEなどの国際標準化団体の議論に積極的に参加することが重要である。

日本企業を支える中央省庁も国際標準化に向けた支援活動に注力しており、2022年6月には経済産業省および国土交通省を事務局とする、航空機の脱炭素化に向けた新技術官民協議会が設置されている。当協議会は、電動化・水素航空機など、日本企業が持つ優れた環境新技術の社会実装を見据え、日本企業が不利にならない形で、主導的に当該技術に関連する安全基準・国際標準を策定することを目標として設立されたものである。今後、官

民連携による技術の社会実装に向けた研究開発活動、ならびに社会実装に向けた標準化議論の動きが加速していくことが想定される。

著者

西 和哉（にしかずや）

野村総合研究所(NRI)グローバル製造業コンサルティング部自動車産業グループ副主任コンサルタント

専門は先端技術を用いた新事業開発、および自動車・航空機を中心とした製造業にかかわる事業戦略立案・ルール形成戦略など

川原拓人（かわはらたくと）

野村総合研究所（NRI）アーバンイノベーションコンサルティング部モビリティ・ロジスティクスグループコンサルタント

専門は先端技術を用いた新事業開発、および航空機・船舶を中心とした製造業にかかわる事業戦略立案・ルール形成戦略など