

退役航空機を取り巻く現状と課題

鹿島 茂

本稿では、航空機の残存率曲線を用いて今後の退役機の動向、特に騒音や温室効果ガスの排出に対する規制が機材保有に与える影響と、退役機から発生する複合材料の増加について考察した。国際化による輸送需要の増加、環境面からの規制の強化、レアメタルの確保、複合材料のリサイクルの必要性を受け、増加する退役機のリサイクルに関して組織化・効率化を目指す動きが生じている。我が国の航空機部品メーカーは多面的に生産段階で大きな役割を果たしているが、日本企業のこれらの組織への参画はない。今後の動向を考えると退役機の処理への参画が期待される。

キーワード：退役航空機，ELA，リサイクル，複合材料

1. はじめに

近年、欧米を中心にして航空機のリサイクルが注目を集めている。この背景には以下のような要因がある。

1点目は、退役機数の増加傾向である。この1つの要因は、1970年前後の大量輸送時代の幕開けに生産された多くの航空機がほぼ耐久年数（生産から退役までの年数）を迎えているためである。

2点目は、航空機燃料価格の上昇による航空会社の燃費の良い最新機種への更新である。さらに、騒音や温室効果ガスの排出に対する規制の導入が考えられる。

3点目は、航空機を構成するアルミニウムや鉄鋼などのベースメタル、チタニウムなどのレアメタルの確保が世界的に難しくなるのではとの見通しがあることである。

本稿では、航空機の生産（受注機数・納入機数）、使用（運航機数・保管機数）、廃棄（退役機数）を既存資料を基に整理する。この際既存統計からは直接的には得られない退役機数の推計を残存率の考え方をを用いて行い、今後の退役機数の予測を試みる。さらに、航空機に関して実施された騒音規制を対象に、この規制が生産・保有・運航・退役に与えた影響を残存率の変化から明らかにすることを試み、残存率を用いることが規制の影響を分析する1つの方法として利用できることを示す。さらに、こうした航空機の退役がリサイクルや廃棄物に与える影響を示す。

2. 航空機の生産・使用・廃棄

民間ジェット輸送機を受注機数、納入機数、運航機数、保管機数、および退役機数を既存資料[1][2]を基に求めた。

生産段階の受注・納入機数、運航・保管機数は、既存資料からの集計値を用いる。退役機数については、現在の統計では毎年の運航機数が示されているのみで、退役機数は統計からは得られないため、補注に示した方法を用いて推計した。図1にこれらの結果を示す。

受注機数は、航空旅客や航空貨物の需要量などの経済状況に影響を受ける。2000年の受注機数は、当時過去最高の1,087機を記録した。しかし、2001年9月11日に発生した米同時多発テロの影響を受け、航空旅客が一時的に減少したことから、2001年には前年比で35%減の705機まで減少した。2001～2004年までは、世界で続発したテロ、SARS（重症急性呼吸器症候群）や鳥インフルエンザの疫病の拡大の影響を受け航空旅客が伸び悩み、受注機数も600～700機の

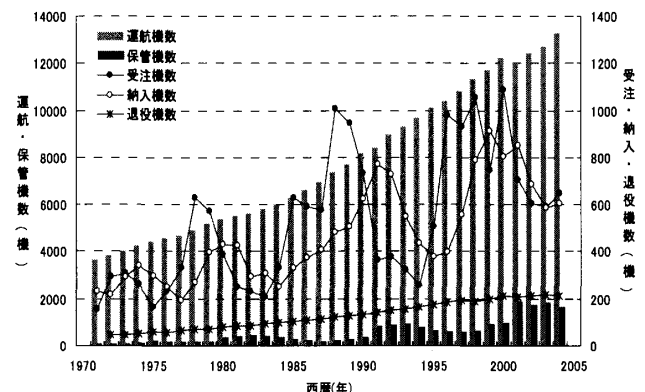


図1 民間ジェット輸送機を受注・納入・退役機数の推移

かしま しげる

中央大学 理工学部都市環境学科

〒112-8551 文京区春H 1-13-27

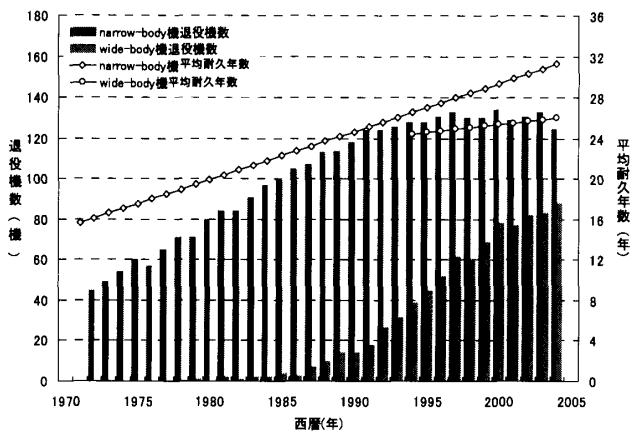


図2 機体分類別の平均耐久年数と退役機数の推移

水準で推移していた。しかし、2005年は2,140機、2006年は2005年比で約4%増加し、2年連続で過去最高を更新するなど2001年以前の水準をはるかに超える水準に回復している。

一方、納入機数は受注機数を2~3年ずらしたものと高い相関を示す。このことから航空機は、受注してから約2~3年程度で納入されていることが考えられる。

世界で運航されている航空機の数、2004年で13,293機であり、前述の米同時多発テロの影響から2001年に若干の減少（前年比で約2%減）が見られるものの、概ね単調に増加してきている。保有機数に占める保管機数の割合も、2001年以前は約5%であったのに対し、2001年以降は10%超と高い水準になっている。

図2に機体分類別の平均耐久年数と退役機数の推計結果を示す。

2004年における退役機数は narrow-body 機が125機、wide-body 機が88機であり、合計213機であった。保有機数に対して約1.5%が退役機となったことになる。2004年以前も年平均約130機、保有機数に対して約1.5%が毎年退役してきた。

また、航空機の平均耐久年数はどちらの機体分類においても毎年延びていることが見て取れる。推計によると、2004年における wide-body 機の平均耐久年数は26.0年であり、narrow-body 機のそれは31.3年であり、約5年の違いが見られる。

3. 騒音や温室効果ガス規制が退役機数へ与える影響

3.1 騒音および温室効果ガスの排出に対する規制 ICAO (International Civil Aviation Organiza-



図3 ICAOによる騒音および温室効果ガスの規制

tion: 国際民間航空機関) による騒音および温室効果ガスに対する規制を図3に示す。

ICAO 理事会で採択された一連の騒音基準は、航空機が開発された時期に応じて基準を強くすることで機材の騒音低下を図るものであり、経年の航空機の運航を制限するものではない。これらは法的拘束力を有するものではないため、運航は ICAO 総会の決議に基づいた各締約国の法律により制限され、これにより騒音基準の実効が図られるという仕組みになっている。

具体的に経年機の運航を制限した例を挙げると、1971年に騒音基準が設定された Chapter 2 基準は、B 727 や B 737, DC-9 を対象とし、一部の締約国（米国、欧州、オーストラリア、日本、カナダ、ニュージーランド、香港、その他）において各国の法律により、1995年から条件付で運航が制限されたことで一定の実効が図られた。

温室効果ガスの排出に対する規制も、自主的な取り組みや排ガス課金、排出権取引を中心として活発に議論されているテーマである。EU では、2005年からすでに実施されている EU ETS (Emission Trading System) に航空会社を含めるということが発表されている[3]。

3.2 騒音基準に対する運航制限導入の影響

規制の影響として Chapter 2 の騒音基準に対する運

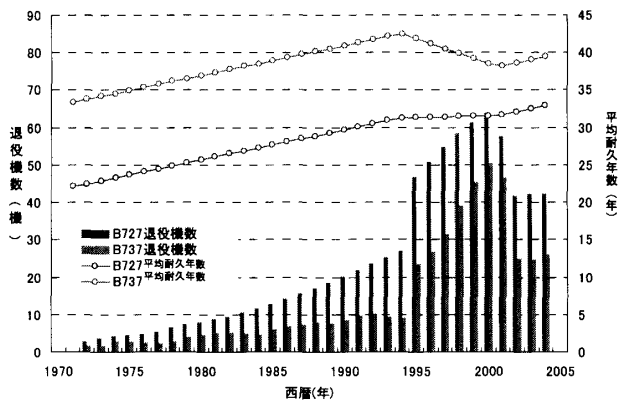


図4 B727とB737における退役機数および平均耐久年数の推移

航制限による影響を考察する。

図4にChapter2該当機種である、B727およびB737の退役機数および平均耐久年数の推計結果を示す。

運航制限が導入された1995年前後でB727およびB737の平均耐久年数の推移の仕方に変化が見られる。

1995年以前の水準で推移した場合と比較すると、2004年においてB727で約2.5年、B737でも約7.2年平均耐久年数が短縮されたと考えられる。

これらの影響の違いは、B727については、ハッシュキットと呼ばれる消音装置を装備することで運航制限へ対応したケースが多いのに対し、B737は、一部ハッシュキットで対応したもの、新たに開発された派生型への機材更新により対応したため、B737の方が、B727に比べてChapter2の騒音基準に対する運航制限の導入により平均耐久年数が短くなったと考えられる。

1995~2004年における年平均の退役機数は、B727は約1.5倍に増加した。一方B737は、退役機数ではB727の方が多いため、運航制限の有無での比率では約2.5倍と大幅に増加した。騒音基準に対する運航制限が導入されたことで、平均耐久年数の伸びの鈍化や減少および退役機数の増加につながったと考えられる。

4. 今後の退役航空機の動向

4.1 退役機数の予測

図5に2005年から2020年までの機体分類別の退役機数の予測結果を示す。

予測結果によると、1989~2004年の16年間における退役機数の合計は、narrow-body機が2,038機、wide-body機が816機であり、合計2,854機、年平均

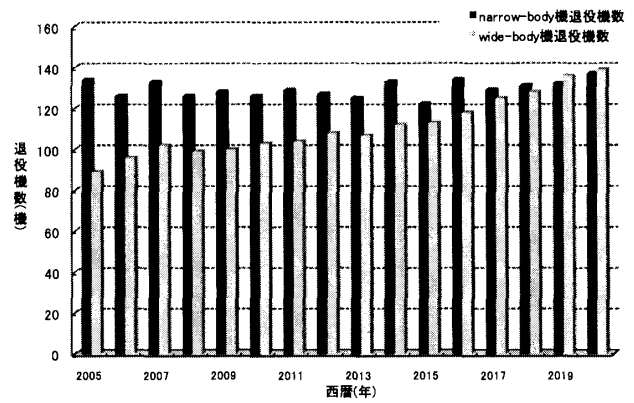


図5 退役機数の推移 (2005~2020年)

均で約180機であったのに対し、2005~2020年の同16年間でnarrow-body機が2,072機、wide-body機が1,779機であり、合計3,851機、年平均で約240機が退役となると予測される。2005~2020年の間では、2004年以前の同期間に比べて、退役機数の合計が約35%増加し、特にwide-body機の退役機数の増加(約2倍)が著しいことが考えられる。

航空機メーカーなどが行った予測でも、BOEING社の予測では、2006~2025年の20年間で8,570機の退役を予測している[4]。財団法人日本航空機開発協会(jadc)の予測でも、同期間で8,003機の退役を予測している[5]。また、AIRBUS社の予測では、BOEING社やjadcによる予測よりも少なく5,561機の退役を予測している[6]。

これらの予測では、年平均で約280~430機の退役が予測されることになる。これらの予測は、小型機も含めた全商用ジェット機についての退役予測であるが、新造機の需要の増加と退役機数の増加傾向という予測がなされている。このように、1970年前後のジェット化の進展以降も続いた航空産業および航空機産業の拡大により、退役機数の増加傾向が加速されることが予測される。

4.2 新たな規制の導入による退役機数の増加

図6にChapter3の騒音基準に対する新たな運航制限の導入を想定し、退役機数の動向に与える影響をシミュレーションした結果を示す。

B747を該当機種とし、2010年以降にB727がChapter2の騒音基準に対する運航制限により受けた影響と同程度の運航制限が導入される場合を想定した。

シミュレーションの結果から、Chapter3の騒音基準に対する運航制限の導入によりB747の年平均の退役機数が、約9%増加することが考えられる。

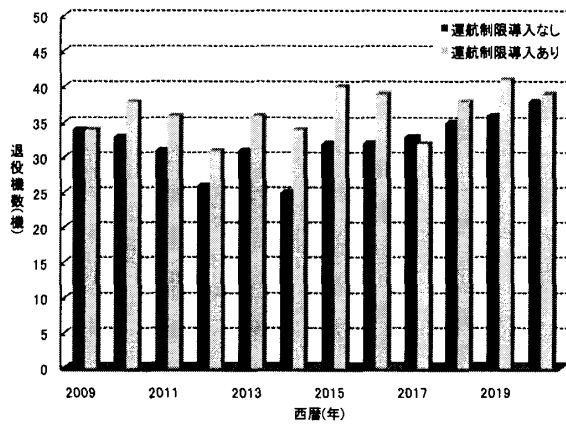


図6 Chapter 3の運航制限導入の影響

温室効果ガスの排出に対する規制に関する運航制限は現在まで行われていないが、原油価格の高騰に伴う航空機燃料価格の上昇を受けた燃費効率の良い機種への機材更新の促進や、ICAOやEUで議論されている自主的な取り組みや排ガス課金、排出権取引などの制度の導入により、燃費効率の劣る機材の退役がより促進されることが考えられ、これらも今後の退役機数の増加に無視できない影響を与えるものと考えられる。

4.3 航空機を構成する材料の変遷

退役機をリサイクル可能な資源という視点から捉え、主にリサイクル技術の確立されていない複合材料に焦点をあて考察を行う。

図7に、BOEING製機材における構成材料の構成比重量を示す[7]。

複合材料は1970年代から航空機に採用されていたがBOEING社の最新機種であるB787において、複合材料が重量比で50%を占めている。技術の蓄積および向上により、耐衝撃性の問題が徐々に解決され、初めてキャビン（胴体部）や主翼に複合材料が使用されたことで複合材料がこれだけ多用された。この複合材料の多用により強度の増大だけでなく、軽量化が図られ最大旅客数も増加し、燃費も同メーカー同クラスのB767に比べ約20%向上したといわれている。

AIRBUS製の機材では、B787と同クラスの航空機のA350では、胴体などの基幹材料としては新開発の合金であるアルミチウム合金が使用されているものの、主翼に複合材料が使用されており、アルミニウムが32%、チタニウムと鉄鋼で計23%、複合材料が39%、その他が6%という構成になっている。また、最新の超大型機であるA380は、A350同様基幹材料はアルミ合金であり約60%を占めているが、次いで複合材料が多く22%占めており、複合材料を多用し

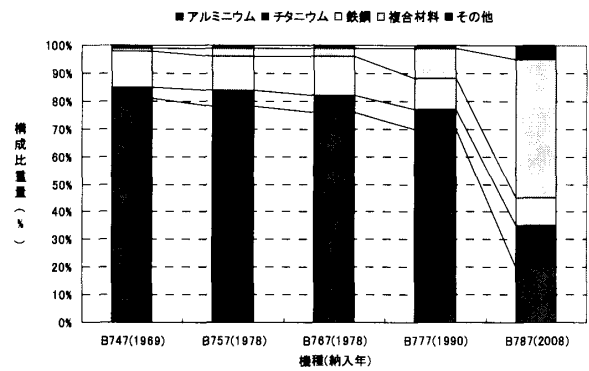


図7 BOEING製機材の退役機数および複合材料量の推移

た航空機が今後も多く生産されることが考えられる。

アルミニウムや複合材料のリサイクルに関する主な特徴は以下の通りである。アルミニウムなど合金の場合は、同じ組成の合金へのリサイクルは、新たに合金を作る必要がなくなるため、積極的に行われている。しかし、複合材料は現在の技術では材料分離の面で困難であるといわれており、使用済み複合材料の処理は埋め立てが一般的である。複合材料を多用した航空機が今後保有・運航され、将来耐久年数を迎え退役機となるときまでに効率的なりサイクル技術を開発する必要がある。複合材料のリサイクル技術に関しては、航空機のリサイクルに限らず、自動車などの他の輸送機器や精密機械部品、電子機器部品でも複合材料が使用され、リサイクル技術が未成熟であることから、これらの分野においても重要かつ注目を集める話題である。

今後退役機から発生する複合材料の量の推移は、退役機数の増加に伴い、2020年では約1,700トンとなることが推計される。これは、2004年に比べ約4倍に相当する量である。

近年複合材料の価格も上昇傾向にあることも勘案するとコストパフォーマンスや環境負荷の観点から実用的なりサイクル技術の確立が急がれる。

航空機には、チタニウムなどの希少金属（レアメタル）も使用されている。退役機数の増加に伴いこれらが発生する量も増加することが考えられ、今後のリサイクルにおいて注目すべきと考える。

5. おわりに

本稿では、既存統計からは直接的には捉えられない退役機数を残存率を用いて推計し、これを用いての平均耐久年数が年々増加していること、規制の影響が平均耐久年数の変化に見られることを示した。さらに、

今後の退役機数の推計を行い、退役機数の増加が今後も継続するのに加え、退役機の処理時に複合材料が急激に増加する可能性を示した。

従来、退役機の処理はアメリカを中心にして、保管・解体・部品回収・廃棄などを関係各社ごとに独自に行ってきた。しかし、近年では退役機の今後の動向や航空機を構成する材料の原料価格の上昇を踏まえ、大手航空機メーカーのBOEING社とAIRBUS社の両社がそれぞれ、AFRA (Aircraft Fleet Recycling Association)、PAMELA (Process for Advanced Management of End-of-Life of Aircraft) と呼ばれる航空機の解体およびリサイクルに関する組織を設立するなど組織的かつ効率的な解体およびリサイクルを目指す動きが生じている。

AFRAとPAMELA両組織の2008年時点での概要を表1に整理した。

しかし、航空機の生産段階において機体構造や機体内部の装備品、航空機を構成する材料など技術面での貢献度の高い日本企業のAFRAやPAMELAへの参画は見られない。

座席やアビオニクス (コックピット内の電子機器)

表1 AFRAとPAMELAの概要[8][9]

	AFRA	PAMELA
設立年次	2006年	2005年
設立目的	航空機の処分を望む顧客への対応の改善	リサイクル技術の情報網の発展
設立企業	Adherent Technologies Air Salvage International Bartin Recycling Group Boeing Chateauroux Air Center Evergreen Air Center Europe Aviation Huron Valley Fritz West Milled Carbon, Ltd Rolls Royce WINGNet	EADS CCR Sogerma SITA Hautes-Pyrenees 県
工場	Château-roux (仏) Evergreen (米)	Tarbes Airport (仏)
処理能力	・150機/年の処理 ・年間25,000tのアルミニウムをリサイクル	・2007~2010年は、年間10機の処理 ・最終的には軍用機も含め年間300機の処理
備考	参画企業数は設立時の11社から12社増え23社となっている。(2007年7月3日現在)	European Commission's LIFE Programの一環として約300万ユーロ規模で開始。

などの装備品のリサイクルに関連して、航空機のMRO (Maintenance Repair Overhaul) 市場は、航空需要の増大に伴い拡大の方向にあり、これらの市場規模も企業体として成立可能性がある。また、近年におけるMRJやHonda jetの開発に見られるように、我が国でもYS-11以来の国産航空機の開発が進展していることから、航空機の生産段階への参画にとどまらず廃棄段階の航空機の処理への日本企業の参画が期待される。

補注

本稿における退役機数および平均耐久年数とは、以下に述べる方法により推計した値を指す。残存率とは退役されず保有され残存している確率である。西暦 t 年において機齢(納入からの経過年数) i 年の航空機 j の残存率を $F_{j,t}(i)$ とする。本稿では残存率 $F_{j,t}(i)$ に下式のロジスチック曲線を仮定して定式化した。

$$F_{j,t}(i) = \frac{1}{1 + \exp(\alpha_{j,1} + \alpha_{j,2} \times t + \alpha_{j,3} \times i + \alpha_{j,4} \times \text{Dammy}_j)}$$

Dammy_j : 規制の対象であるかのダミー変数

$\alpha_{j,1}, \alpha_{j,2}, \alpha_{j,3}, \alpha_{j,4}$: パラメータ

また、騒音や温室効果ガスの排出に対する規制の導入が与える影響を考えるため、航空機が規制の対象となる場合はダミー変数を導入し下式のように設定した。

西暦 t 年における航空機 j の保有機数を $S_{j,t}$ 、納入機数を $D_{j,t}$ とおくと、残存率 $F_{j,t}(i)$ との関係は下式のようになる。

$$S_{j,t} = \sum_{i=0}^{t-T_j} F_{j,t}(i) \times D_{j,t-i}$$

T_j : 航空機 j が初めて納入された西暦年

西暦 t 年における航空機 j の退役機数を $R_{j,t}$ とし、下式から算出した。

$$R_{j,t} = \sum_{i=0}^{t-1} (1 - F_{j,t-i}(i)) \times D_{j,t-i} - \sum_{i=0}^{t-1} (1 - F_{j,(t-1)-i}(i)) \times D_{j,(t-1)-i}$$

つまり、本稿における退役機数とは、エアラインなどの保有・運航主体から外れた航空機を意味する。

また、西暦 t 年における航空機 j の平均耐久年数 $Y_{j,t}$ は、 $F_{j,t}(i)=0.5$ を満たす機齢 i とし、

$$Y_{j,t} = -\frac{\alpha_{j,1} + \alpha_{j,2} \times t + \alpha_{j,4} \times \text{Dammy}_j}{\alpha_{j,3}}$$

により評価する。

各々のパラメータは、機齢別の運航機数という既存の統計データは手に入れることが困難であるため、下

表2 パラメータ推定結果

航空機分類 \ パラメータ	$\alpha_{j,1}$	$\alpha_{j,2}$	$\alpha_{j,3}$	$\alpha_{j,4}$	適合度
narrow-body 機	-3.443	-1.073×10^{-1}	2.268×10^{-1}	-	0.96~1.05
wide-body 機	-8.107	-6.255×10^{-2}	3.932×10^{-1}	-	0.99~1.05
B727	-4.573	-8.441×10^{-2}	2.109×10^{-1}	5.064×10^{-1}	0.97~1.03
B737	-3.143	-3.787×10^{-2}	9.533×10^{-1}	6.746×10^{-1}	0.96~1.01
B747	-1.031×10^{-1}	-7.214×10^{-2}	4.627×10^{-1}	-	0.99~1.05

式のように毎年の航空機 j の保有機数 $S_{j,t}$ に関する誤差の二乗和を最小にするようにパラメータを推定した。

$$\min_{\alpha_{j,1}, \alpha_{j,2}, \alpha_{j,3}, \alpha_{j,4}} \sum_{t=1971}^{2004} (\hat{S}_{j,t} - S_{j,t})^2 = \sum_{t=1971}^{2004} \epsilon_{j,t}^2$$

ここで、 $\hat{S}_{j,t}$ は西暦 t 年における航空機 j の既存統計より得られる実績値の保有機数とする。表2に本稿で用いた分析のパラメータの推定結果を示す。

参考文献

[1] 財団法人日本航空機開発協会 (2006), 平成 17 年度版 民間航空機関連データ集。

[2] 社団法人日本航空宇宙工業会 (2006), 航空宇宙産業データベース。

[3] 財団法人空港環境整備教会・財団法人運輸政策研究機構 国際問題研究所 (2007), 国際航空からの CO2 排出抑制策に関する報告書。

[4] BOEING (2006), Worldwide Market Forecast for Commercial Air Transport 2006-2025.

[5] 財団法人日本航空機開発協会 (2006), 平成 17 年度 小型民間輸送機に関する調査研究。

[6] AIRBUS (2006), Airbus Global Market Forecast 2006-2025.

[7] 財団法人日本航空機開発協会 (2004), 平成 15 年度民間航空機および関連産業に関する調査研究。

[8] Engineering and Physical Sciences Research Council (2007), The Aircraft at End of Life Sector: a Preliminary Study.

[9] A | D | S (2008), SBAC Aviation and Environment Briefing Papers, End of Aircraft Life Initiatives.