

査読論文

民間航空機の市場構造の変化と技術展開

山崎 文徳*

要 旨

本稿では、民間航空機の技術的構成と4層・2期に区分される市場構造を技術論的に分析し、航空輸送会社からの社会的要求にもとづいて航空機メーカーが技術開発を行い、市場構造が形成され、変化してきたことを明らかにする。第1期（1970年代まで）の航空機市場では、主翼やエンジンの開発によって航空機の高速度・大型化と大量輸送が実現された。ところが、第2期（80年代以降）には第1期と異なる性能が社会的に求められた。航空自由化により航空輸送会社の競争環境が変化し、トータル・コストの抑制が求められたのである。そのために、エンジンの大推力化による双発化と、電子的な飛行制御システムによる自動化が実現された。

キーワード

技術開発, ジェットエンジン, 飛行制御, 航空自由化, 航空輸送, ボーイング, エアバス

1. はじめに
2. 民間航空機市場の基本構造の形成——1970年代までの高速度・大型化——
 - (1) 民間航空機市場の4層区分
 - (2) 第1期の民間航空機市場の形成と航空機メーカーの参入
 - (3) 高速度・大型化を実現した機体・エンジンの技術開発
3. 航空自由化後の航空需要とトータル・コストの抑制要求
 - (1) 欧米の小型機需要とアジアの大型機需要
 - (2) 欧米の航空自由化と東アジアの経済成長
 - (3) 航空自由化とトータル・コストの抑制要求
4. 民間航空機市場の更新と構造変化——1980年代以降の双発化・自動化——
 - (1) 第2期の民間航空機市場の形成
 - (2) 航空機メーカーの淘汰と集約
 - (3) 双発化・自動化を実現したエンジン・制御システム
5. おわりに

* 執筆者：山崎文徳

機関/役職：立命館大学経営学部／非常勤講師

機関住所：〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1

E-mail：yamazakif@hotmail.com

1. はじめに

戦後世界の航空需要は一貫して増大し、全世界で旅客数は約23億人、航空輸送会社は2,362社(定期会社は729社)、ジェット機の運航数は約1万3,000機に達する。それに対して、100座席以上の民間航空機を供給するメーカーは、実質的にボーイング(The Boeing Company)とエアバス(Airbus SAS)の2社に限られている¹⁾。なぜ、民間航空機市場はわずか2社によって支配されるようになったのであろうか。航空輸送会社の航空機メーカーに対する基本的要求は、航空機材の提供である。そこで本稿では、ジェット化以降、一貫して国際競争で優位に立ってきたボーイングを中心とするアメリカ民間航空機産業の技術競争力の源泉を明らかにするために、航空機技術の開発・生産に着目する。

従来の航空機産業研究では、Newhouse(1982)は、1960~70年代の大型・超大型機開発における機体メーカーとエンジンメーカーの関係を詳細に分析している。Lynn(1995)は、アメリカの航空機産業に対して、欧州の航空機産業が挑戦を繰り返し、エアバスがボーイングに対抗する存在になったことを明らかにしている。Newhouse(2007)は、航空輸送市場の動向をふまえて、80年代以降のボーイングとエアバスの対抗関係を明らかにしている。LynnやNewhouseの研究では、航空機メーカーが、激しい国際競争を勝ち抜くために、ライバル企業への揺さぶりや強引な販売手法をとり、自国政府を巻き込んだ販売戦略を展開していることが強調されている。Bilstein(2001)は、航空機の歴史の変遷と開発・製造における国際分業の進展を分析している。市場構造を分析するものとして、Tyson(1992)は、市場構造を機体サイズで大きく2層(狭胴機と広胴機)に分け、機材更新の面から2期に時代区分している。ただし、「劇的な技術革新は、1978年から始まった商業用ジェット機の歴史の第2期には起きなかった」と評価し²⁾、80年代以降の技術開発をそれほど重視しない。航空機技術からみた時代区分としては、機体とエンジンに着目して70年代までが第1世代から第3世代までに区分されたり³⁾、制御システムに着目する青山幹雄編(2001)のように80年代以降がデジタル世代と区分されることがある⁴⁾。

本稿では、民間航空機の市場構造を技術論的に分析し、航空輸送会社からの社会的要求に応えるために航空機メーカーが技術開発を行い、それによって市場が形成されてきたことを明らかにする。ここでいう技術論的とは、航空機技術の発達要因として、開発・生産の担い手である航空機メーカーの製品・生産・素材における技術水準という技術的要因と、顧客である航空輸送会社からの市場の要求や航空規制、安全・環境対策のような社会的要因の両面から分析することを意味する。航空機メーカーという場合、航空機の技術的構成の観点からは機体メーカー・エンジンメーカー・制御機器メーカーや、機能横断的な素材・原材料メーカーが含まれる。サプライヤー構造の観点からは、鋳造・鍛造・成形・板金・プレス・溶接・切削など基礎的汎用技術を担うサプライヤーや、ソフトウェアを開発するサプライヤーが含まれ、基本的

には機体メーカーが最終組立を行う。広範な裾野産業を抱える航空機産業であるが、機体構造では主翼、エンジンではタービン、制御システムでは飛行制御システムが中核技術であり、航空機メーカーの技術競争力にとって、それらの開発・製造能力が重要な要素になる。本稿ではこうした視点を基軸に据えて分析を行う。なお、市場構造の分析では、民間航空機市場を機体サイズごとに4層に区分し、機材更新の面から2期に時代区分する。機体を基準に市場を区分する理由は、航空輸送会社にとって民間航空機は輸送手段であり、機体構造（胴体）の大きさが収益に直結するためである。

以下では、まず第2節で、第1期の民間航空機市場が、高速化・大型化を実現するために、機体やエンジンの技術開発によって1970年代までに形成されたことを明らかにする。第3節では、80年代以降の第2期の民間航空機の発達を求めた社会的要因として航空需要を分析する。第4節では、第2期の航空機が、トータル・コストの抑制を求められ、大推力エンジン開発によって双発化が、飛行制御システムの電子化によって自動化が実現されたことを明らかにする⁵⁾。

2. 民間航空機市場の基本構造の形成——1970年代までの高速化・大型化——

本節では、1970年代までに形成された4層に区分される航空機市場を分析する。この時期の民間航空機の開発目標は高速化・大型化であり、以下ではそれを実現した機体とエンジンの技術開発に着目する。

(1) 民間航空機市場の4層区分

民間航空機の輸送手段としての本質的機能は、旅客や貨物を収容する機体構造にある。そこで、本稿では機体サイズを基準に4層に区分される民間航空機市場を分析する。

航空輸送会社の求める航空機材は多種多様であるが、すべてオーダーメイドの航空機を提供することは、機材の設計・機能からすると適切ではない。そこで、表1に示すように、航空機メーカーは航空需要を4層に区分し、座席数や貨物積載量を規定する機体の大きさごとに、小型・中型・大型・超大型に分類される機材を提供してきた。また、機体の大きな航空機を推進するためには、推力の大きなエンジンが必要であることから、航空機市場に対応して推力ごとにエンジン市場も形成されている。座席数は、2クラス、3クラスに分かれる国際線と国内線では異なり、同じ機体でも航空輸送会社によって異なるために明確な区別は難しいが、本稿では100席級の狭胴小型機、200席級の狭胴中型機、250席級の広胴中型機、300席級の広胴大型機、400席級の広胴超大型機に区別しておく。技術の発達は製品のレベルと製造のレベルで考えられ、民間航空機市場が4層に形成されたことは製品のレベルの技術発達と捉えられる。つまり、標準的な4類型の航空機という市場設計がなされたのである。

航空機の機体の大きさは、基本的には胴体の断面直径と機体の全長によって決まる。航空機の胴体断面は、円形やダルマ型に作られる。その理由は、1万メートル以上の高空を飛行しても、客室内の気圧を高度2,400m程度に保つために、胴体外板が内外の圧力差に耐えられるように強度をもたせるためである⁶⁾。

胴体上層に配置される座席の数は、基本的には胴体の断面直径と通路の本数で決まり、機体の全長によって増減する。客室内通路が単通路の航空機は狭胴(ナローボディ)機と呼ばれ、横方向に座席が5~6列配置される。搭乗客の移動の便利さや、定員の乗客が90秒以内に安全に脱出できるという運航条件から、狭胴機の場合、通路を挟んで横方向に2列・3列か3列・3列という配置が一般的である。客室内通路が2通路の場合は広胴(ワイドボディ)機と呼ばれ、横方向に7~10列の座席が配置される。7列の場合は2列・3列・2列、8列の場合は2列・4列・2列、9列の場合は3列・3列・3列や2列・5列・2列、10列の場合は3列・4列・3列という配置が一般的である。

貨物輸送の観点からは、胴体上層に座席を配置し、下層に貨物コンテナを積み込む。1960年代末には、道路、鉄道、船舶に共通する標準コンテナの国際基準が作られ、高さともどもに2.44m(8フィート)と断面サイズが決められた。こうすることで、積荷を入れ替えずにコンテナを効率的に移し替えられるようになった。747の開発時には、航空輸送でも標準コンテナを扱えるように、胴体下層の貨物倉に2個のコンテナを横並びで収納できるように胴体断面が設計された⁷⁾。座席列数と通路数を決めて、円形の断面を採用し、コンテナの収納も考慮すると、必然的に航空機の胴体断面は決まってくる。

ボーイング機の場合、狭胴中型機の707と727、757、狭胴小型機の737は胴体断面がすべて同じであり、最初に作られた707がその後の狭胴機の原型機ということもできる。また、ボーイング最初の広胴機である747はあまりにも巨大であったために、新たにワシントン州のエバレット(Everett)に最終組立工場が建設された。

一方、エアバスは、A300の開発時に、当時の長距離国際線で運用されていた747と同じく2個のコンテナを横並びで収納できるように胴体断面が設計された。747で欧州に到着した旅客が、国内線や短距離国際線のA300に乗り継ぐ際に、貨物コンテナの積み替えをスムーズにすることで、待ち時間を少なくできるようにしたのである。この後、A310、A330、A340の胴体断面は、A300と同じものが用いられた⁸⁾。

航空機は、技術的には機体構造・エンジン・制御システムから構成され、それらの改良によって派生型や発展型が開発される。

機体構造に関しては、主翼改良や胴体の長胴化・短胴化によって派生型が生まれる。根本的に座席数を変えるには胴体直径を変更すればよいが、その場合には主翼やエンジン、重量バランスなども変更しなければならないので、派生型にとどまらず新開発機となる。したがって、比較的安価に座席数を増減させるためには、原型機の胴体断面を変えずに、航空機全体の重心

表1 民間航空機とエンジンの市場構造と飛行制御システム

(機体サイズ)		第1期		第2期		
		1950~60年代	1970年代	1980年代	1990年代~	
機体	広胴超大型機 [400席級]		4発/3名 10列 (70)747 [724機]	4発/2名 10列 (70)747-400 [692機~]	4発/2名 10列 (07)A380 [200機受注] 4発/2名 10列 (未)747-8	
	広胴大型機 [300席級]		3発/3名 9列 (72)L-1011 [250機] 3発/3名 9列 (71)DC-10 [446機]		4発/2名 8列 (93)A340 [366機~] 2発/2名 8列 (94)A330 [625機~] 3発/2名 9列 (90)MD-11 [200機] 2発/2名 9列 (95)777 [792機~]	
	広胴中型機 狭胴中型機 [200席級]	4発/3名 6列 (59)DC-8 [556機] 4発/3名 6列 (58)707 [1,010機] 3発/3名 6列 (64)727 [1,831機]	2発/3名 8列 (74)A300 [249機]	2発/2名 8列 (84)A300-600 [312機] 2発/2名 8列 (84)A310 [255機] 2発/2名 7列 (82)767 [975機~] 2発/2名 6列 (83)757 [1,049機]	2発/2名 8列 (未)A350XWB [493機受注] 2発/2名 8列 (未)787 [850機受注]	
	狭胴小型機 [100席級]	2発/2-3名 6列 (68)737 [1,144機] 2発/2名 5列 (65)DC-9 [976機]		2発/2名 6列 (84)737-300 [1,988機] 2発/2名 5列 (80)MD-80 [1,191機] 2発/2名 5列 (88)A320 [3,931機~]	2発/2名 6列 (97)737-700 [2,948機~] 2発/2名 5列 (95)MD-90 [271機]	
(推力クラス)		第1期		第2期		
エンジン	広胴	大型 双発	30,000~ 50,000kg 以上	大型3~4発 : 在来型747, DC-10, L-1011, A300	大型3~4発 : 747-400, MD-11 中型双発 : 767, A300-600, A310	GE CF6-80E1 (92), GE90 (95) PW PW4084/4168 (94) RR Trent700/800 (93) 大型双発 : 777, A330
		大型 3 4 発	20,000~ 30,000kg	GE CF6-6/50 (71) PW JT9D (70) RR RB211-22/524 (72)	GE CF6-80C2 (85) PW PW4050/4460 (86), JT9D7R4 RR RB211-524G/H (88)	RR Trent500 大型4発 : A340
	狭胴	双発	10,000~ 20,000kg	727, 737-100, DC-9	RR RB211-535 (81) PW PW2000 (83) CFM56-3/5/7 (84) IAE V2500 (88)	中型双発 : 757 小型 : 737-300/700, A320, MD-90
		3 4 発	6,000~ 10,000kg	PW JT8D (63) PW TF33(軍)/JT3D (59) PW J57(軍)/JT3 (58)	CFM56-2 (79) B-52(軍), KC-135(軍), 707, DC-8	PW JT8D-209 (80) 小型 : MD-80
飛行制御システム	飛行管理システム		性能管理システム (PMS)	飛行管理システム (FMS)	統合飛行管理システム (AIMS) 完全FBW化	
	検知装置 (航法)		慣性航法システム (INS) 機械式ジャイロ	慣性基準システム (IRS) レーザジャイロ		
	表示装置 (運航乗務員数)	機械式 3名	集合計器 2~3名	カラー-CRT 2名	カラー-LCD 2名	

注1: 表記は「搭載エンジン基数/運航乗務員編成数 座席列数 (就航年) 機種名」を示し、その下に2009年6月末現在の生産 (受注) 機数を示す (「-」は生産継続中)。DCはダグラス、MDはマクダネル・ダグラス、Lはロッキード、Aはエアバス、その他はボーイング機である。エンジンメーカーは、P&WはPW、Rolls-RoyceはRRと表記している。CFM インターナショナルはGEとフランスのSNECMAの合弁である。IAEはP&W、日本航空機エンジン協会 (JAEC)、RR、MTU (独) から構成される。

注2: 航続距離と座席数による区分は厳密なものではなく、原型機を元にした派生型には、区分をはみ出すものもある。

注3: 新たな方針の下で新技術を取り入れて開発された派生型 (発展型) 機は、原型機と区別し、最初に就航した派生型機のデータを示す。1960年代の737は-100/200、80年代は-300/400/500、90年代は-600/700/800/900である。70年代の747は-100/200/300である。70年代のA300はB2/B4型、80年代のA320は-600/600Rである。A320の派生型であるA318/319/321は90年代以降に就航したが、A320にまとめて示している。787と747-8、A350XWBは2010年8月現在も未就航である。717はMD90の短胴型機であるため、MD90にまとめて記載している。

注4: BAeとエアロスペースのコンコルドは、1976年に就航し、20機が生産された。

注5: アンダーラインを引いているエンジンはターボジェットエンジン及び低バイパス比ターボファンエンジン (バイパス比2未満)、それ以外は高バイパス比ターボファンエンジン (バイパス比4以上)。A340は広胴大型4発機である。

出所: 青木 (2000)、日本航空機開発協会 (2008)、Ⅲ-29ページ、生産・受注機数は日本航空機開発協会 (2009)、青山 (2001)、3ページより筆者作成。

を考慮して長胴化するか、短胴化すればよい⁹⁾。また、主翼改良により機体の空力性能が改善されれば、低燃費運航や高速化が実現される。エンジンに関しては、低燃費性能や推力増大、騒音や排出ガス削減を目的として、就航時に搭載した原型エンジンの改修や、新エンジンへの換装がなされる¹⁰⁾。制御システムに関しては、とくに1980年代以降の第2期は、機械式から電子式への代替が進んだ。飛行制御システムの電子化では、操縦室を含めて大幅な改良が必要になり、機体構造が同じでも運航乗務員編成数や燃費といった航空機の性能を変化させる。そのため、原型機を元に飛行制御システムを電子化させた747-400のような機材は、派生型ではなく発展型と表現することもできる。

このように、原型機を元にした派生型・発展型が用意されることによって、4層に区分される航空機市場はさらに細分化される。各路線に最適な座席数・航続距離という基本的要求に加え、航空輸送会社の要求は、燃費、人件費、整備費など運航コストや航空機購入価格、湿度の高い路線や砂漠での運航といった特殊的条件への対応や座席の配置方法など多岐にわたり、それらに応じることが航空機メーカーには求められる。さまざまな要求に応えるために、航空機メーカーは、原型機を元に座席数や航続距離を増減させた派生型・発展型を提供しており、最終的な引渡しでは、さらなるカスタマイズやオプションをつけることもある。

以上のように、量的に増大する航空需要に対して、民間航空機市場は航空機メーカーによって4層に区分された。

(2) 第1期の民間航空機市場の形成と航空機メーカーの参入

4層に区分される民間航空機市場は、製品寿命と機材更新の観点から、第1期と第2期に区別される。1950年代末から70年代半ばまでに開発された民間航空機は、4層に区分される第1期の航空機市場を形成した。購入から10~20年が経過すると機材は老朽化するので、後継機材が求められる。その頃には、第1期の原型機は旧式化していたので、新たな技術を取り入れた後継機が4層のそれぞれで開発され、第2期の航空機市場が形成されたのである。第1期の原型機は、機械式の飛行制御システムであることや、燃費が悪く騒音・排出ガス規制をクリアできないエンジンを搭載しているという点で、旧式化していたのである。本節では、まず第1期の航空機市場について分析する。

第1期の航空機市場では、高速化・大型化が追求された結果、航空需要が増大し、大量輸送の時代が訪れた¹¹⁾。航空需要は戦後一貫して増大しており、他産業と比べて航空輸送産業は高度成長を続けてきた。1960年代には、高速化により、機材の1日当たりの輸送距離と時間当たりの輸送量が増した。70年代には、大型化により、一度の輸送量が増えるため輸送量当たりのコストの削減につながり、運航コストが抑制された。これらが運賃の低減につながることで、航空需要が増大したのである。

第1期の航空機市場は、既存のプロペラ機市場との関係から、前半と後半に分けられる。第

1期前半の1950～60年代には、それまで運航されていたプロペラ機がジェット機に代替され、まずは狭胴中型機市場（707、727とDC-8）が、続いて狭胴小型機市場（737とDC-9）がジェット化された。第1期後半として区分する70年代には、従来は存在しなかった広胴超大型機市場（747）と広胴大型機市場（DC-10とL-1011）が新たに創出された。

機体メーカーに関しては、戦後直後の民間用プロペラ機市場の2大メーカーは、ダグラス（The Douglas Aircraft Company）とロッキード（Lockheed Corporation）であった。ところが、ボーイングが民間用ジェット機開発に乗り出すと、ダグラスが対抗機材を開発したのに対して、ロッキードはプロペラ機にこだわり、第1期後半によく参入を果たした。

一方、欧州では第1期後半に、英仏共同（BACとシュド）で超音速旅客機コンコルドが開発されたが、燃費と騒音の問題から生産機数は20機にとどまった。また、アメリカ企業に対抗するために、フランス（アエロスパシアル）とドイツ（DASA）が1970年にエアバスを設立し、後にスペイン（CASA）やイギリス（BAEシステムズ）も加わった。エアバスは広胴中型機A300を74年に開発し、第2期にシェアを拡大させた¹²⁾。

エンジンメーカーに関しては、第1期前半の民間航空機用ジェットエンジンのほとんどがP&W（Pratt & Whitney）から提供された。ところが、第1期後半には、それまで軍用エンジンを供給していたGE（General Electric Company）とRR（Rolls-Royce plc）が新たに民間市場に参入した。

P&Wは、すでにJT3DやJT8Dなどのエンジンを提供していたことに加え、超大型機747用のJT9Dエンジン開発の負担が大きく、開発時期の重なるDC-10やL-1011、A300といった広胴機用の大型エンジンを開発する余裕はなかった。そのため、機体メーカーはRRとGEにエンジン開発を求めた。当時のGEは、軍用エンジンで独占的な地位を築いており、大型エンジン開発でも先行していた。米空軍の大型輸送機C-5A用のTF39エンジンで得た経験や蓄積が、CF6エンジン開発に生かされ、ほとんどのDC-10とA300に採用された。一方でRRは、新素材を取り入れたRB211エンジンを提案し、ロッキードとL-1011用エンジンの独占契約を結んだ。ロッキードには、欧州で航空機を販売するために欧州製エンジンの搭載が得策であるという判断もあった¹³⁾。

第1期後半にはエンジンメーカーの競争環境も変化し、P&Wの独占が崩れた。第1期前半の新型機は特定のエンジンしか搭載できないように設計され、多くはP&Wのエンジンが搭載された。しかし、ボーイングが747開発でP&WだけでなくGEにもエンジン開発を求めてからは、多くの新型機が異なるメーカーのエンジンを搭載できるように設計され、航空輸送会社がエンジンを選択できるようになった¹⁴⁾。機体メーカーの狙いは、エンジンメーカー間の競争を促すことで性能を向上させ、同時に価格を抑えることにあった。そのため、JT9D、CF6、RB211というエンジンは、A300、DC-10、L-1011、747といった広胴機にそれぞれ採用された。こうして、搭載エンジンの選択は、機体メーカーではなく航空輸送会社に委ねられるように

なった。

4層に区分される民間航空機市場は、機体メーカーとエンジンメーカーが相次いで参入し、競うように新製品を開発することで形成されたのである。その中で、第1期の機体メーカーではボーイングとロッキード、マクダネル・ダグラス (McDonnell Douglas Corporation)、エンジンメーカーではP&W、GE、RRという競争関係が形成された。

(3) 高速化・大型化を実現した機体・エンジンの技術開発

第1期の航空機の開発目標は、高速化・大型化の実現にあった。そこで技術的画期をなしたのは、主翼開発とジェットエンジン開発であった。

①高速化の実現——ジェットエンジンの導入と主翼開発——

高速化は、推力を生み出すジェットエンジンの導入と、音速に近づいても空気抵抗の増大を抑える主翼の開発によって実現された。

第1に、高速化は、軍用に開発されたジェットエンジンの民間転用によって実現された。

プロペラ機の場合、ブレード(羽根)が高速回転しながら前進し、相対速度が音速に近づくとプロペラの能力が一気に低下するので、それ以上の高速化は物理的に不可能になる。ところが、ジェットエンジンにはそのような制限がなく、機体形状を改良すれば、音速以上も実現可能である。

1950年代までは、軍事の分野でジェットエンジン開発が先行し、民間用に転用された。朝鮮戦争では、GEのJ47エンジン(3万6,500基生産)が、B-47やB-36などの爆撃機やF-86戦闘機に搭載された。ソ連との軍事的対立の中で、原爆を搭載する戦略爆撃機にも長距離高速飛行が求められると、エンジンの燃費改善が迫られた。この要求に対して、P&WのJT3エンジンは、圧縮機の性能改善により燃費を改善した。JT3は、J57として米空軍の超音速戦闘機や戦略爆撃機B-52に採用され、経済性が重要になる民間機でも707やDC-8に採用された¹⁵⁾。

第2に、高速化は、音速付近での飛行を可能にする機体形状、とりわけ空力性能の優れた主翼開発によって実現された。

主翼の空力性能は、平面形状と断面形状によって決まる。主翼の平面形状は、ジェット化により直線翼から後退翼へ移行した。飛行速度が音速に近づくと衝撃波が発生して飛行が困難になるが、主翼を左右に直線的ではなく斜め後方に伸ばし、主翼に直角な流れの速さを小さくして衝撃波の発生を遅らせることで、高速飛行が可能になるのである。ボーイングは、米軍が敗戦国のドイツで入手したデータや、自らの風洞実験の結果から、戦略爆撃機B-47の後退角を35度に決め、支柱(パイロン)でエンジンを主翼に懸架する吊り下げ式エンジン搭載法を採用した¹⁶⁾。この35度の後退翼と吊り下げ式のエンジン搭載法は、ボーイング初の民間ジェット機707にも用いられた。

主翼の翼断面形状は、NACA（National Advisory Committee for Aeronautics：航空諮問委員会）が、カタログのように番号をつけて戦前から発表していたNACA翼型を元に開発された。ダグラスは、空力性能に優れ、超音速流と音速以下の亜音速流が翼面に共存できる遷音速翼断面を開発し、DC-8に採用した。当初は、別の翼型が採用された707でも改修がなされるなど、遷音速翼断面はその後の主翼開発の基礎になった。

こうして、ダグラスのプロペラ機DC-7Cが巡航速度550km/hに対して、ジェット機DC-8は900km/h以上と高速化が実現された。株式会社日本航空の例では、東京－ホノルル－サンフランシスコの所要時間は、DC-7Cが「実飛行時間は冬期で約19時間、夏期で約21時間」に対して、DC-8は1960年8月の初運航を14時間半で目的地に到達した（経由時間を含める）¹⁷⁾。

こうして開発された主翼の製造に用いられたのがNC（Numerical Control：数値制御）フライス盤である。

NCフライス盤は米空軍の支援を受けて軍用に開発された。米空軍のF-86戦闘機の主翼は、いくつかの部品をリベットでとめて製造されており、重量の軽減と高速化の技術的制約条件となっていた。そこで、ワンブロックの金属塊から、曲面や捻れ面を含む複雑形状を削りこんで一体化構造部品を製造できるNCフライス盤が開発された。1952年に、MITサーボ機構研究所が開発した3軸制御NCフライス盤は、素材から薄肉の構造物を削り出すフライス盤であり、胴体や翼の外板（スキン）の加工に用いられたのである。NCフライス盤は、民間用ジェット機が開発される50年代末には、航空機産業に普及していた。

ジェット機の主翼は、高速でのフラッタ（振動を伴う空力弾性不安定現象）を避けるために高いねじり剛性（ねじりに対する変形しにくさ）が必要になり、薄翼のために外板を厚くしてねじり剛性を確保しなければならない。707（1958年就航）では、主翼付根近くに厚板を張り、翼端にかけて薄くなるように、付根から翼端まで3ヵ所で桁間外板をリベットなどで継いでいた。翼の付根から翼端に伸びる構成部材を桁（スパー）と呼び、主翼の前桁と後桁の間に張られるのが桁間外板であり、航空機でも一番大きく厚い外板である¹⁸⁾。

しかし、太く厚い構造部材を継ぐには、継ぎ手の重量や工作の手間がかかり、運用中の疲労強度や点検、保守の問題が生じる。そこで、727（1964年就航）では、主翼の付根から翼端まで継ぎ目なしの設計になり、747（70年就航）では主翼外板の長さは32mに達した¹⁹⁾。このように形状が複雑で大型の一体化構造部品の製造に、NCフライス盤が用いられたのである。

なお、高速化にともなって、飛行制御の部分的な自動化が実現された。ジェット化により速度はプロペラ機の約2倍に達し、わずかな動翼の変化によって姿勢が大きく変化し、安定性が低下した。プロペラ機の時代は、操縦士の操縦操作によって安定性が保たれたが、常に姿勢を補正することは操縦士の負担を大きくする。そこで、航空機の揺れを検出して補正するために、速度変化時や音速付近での飛行で機首下げを補正する自動トリムや、横揺れしながら機首を振るダッチロールを防止するためのダンパが開発された²⁰⁾。

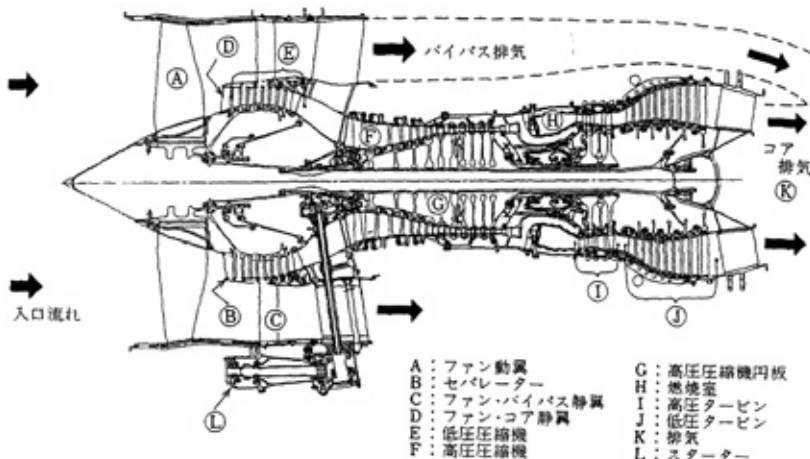
この後も、新型機開発では新たな主翼開発に膨大な時間と資金が必要になるが、基本的な形状は初期の航空機の延長線上で展開されている。

②大型化の実現——大推力エンジンの開発——

第1期後半には機体の大型化が求められ、巨大な機体を推進できる大推力の大型エンジンが求められた。第1期前半の狭胴中型機707の最大離陸重量は151.3トンであったが、第1期後半の広胴超大型機747は333.4トンと2倍以上である。単純に考えれば、707と747のエンジン基数は同じなので、各エンジンには2倍以上の推力が求められる。実際には、707のJT3C-6エンジンの推力6,123kgに対して、747のJT9D-3Aは20,412kgと3倍以上の推力が与えられた²¹⁾。プロペラは構造や機能上の特性から大型化には実用上の限界があったが、ジェットエンジンにはそのような限界がなく、推力を高められたのである²²⁾。

エンジン推力は、高バイパス比ターボファンエンジン開発によって増大した。ターボファンエンジンは、図1のように、ターボジェットエンジンの前に直径の大きなファンを取り付け、エンジン全体を巨大なケースで覆ったような構造をしている。ここで、エンジン中心部を通過するコア排気と、外側を通過するバイパス排気の割合をバイパス比という。総推力は空気流量とジェット排気速度の積となるので、ファンを大きくしてバイパス比を高くすると大量に空気を吸収でき、総推力が増大する。さらに、バイパス比を高くするほどコア排気とバイパス排気が混ざって、ジェット排気速度が音速以下で運航される機体速度に近づき、ジェット排気によって効率的に機体を推進できるのである。

図1 ターボファンエンジンの構造



注：この図は IAE の V2500型エンジンの断面図である。

出所：吉中 (1994), 14ページ。

高バイパス比ターボファンエンジンは、第1期後半の大型・超大型機用に開発された。まず

必要になる巨大なファンブレード開発には、鳥などの衝突に耐えられるだけの強度が求められた。そこで、GEとP&Wは、ファンブレードの素材にチタン合金を用いた。GEは、すでに米空軍向けにTF39エンジン（バイパス比8）を開発しており、バイパス比がそれよりも低い4.4とされたCF6エンジンの開発で、技術的蓄積を存分に生かすことができた²³⁾。両社に対してRRは、L-1011用にRB211エンジン（バイパス比4.4）を開発した。当初、ファンブレードの素材には、炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastic）が採用され、チタン合金よりも約226kgの重量を軽減できた。ところが、鳥の吸い込み実験でファンブレードの強度に問題が発覚し、チタン製ブレードに取り換えざるをえなくなった²⁴⁾。

高バイパス化実現のためには、エンジン・コア部分のタービンブレード開発が、より重要な技術的課題であった。コア排気は、推力を発生させると同時に、タービンを回転させてファンや圧縮機の駆動動力を提供する。そのため、バイパス比を大きくして大型ファンを回転させるためには、タービンでより大きな駆動動力を生み出すことが求められた。それに加えて、超大型機747用のJT9Dエンジンを開発していたP&Wは、機体重量の増加に苦しめられた。747は、開発が進むにつれて予定重量が増加し、1965年12月には重量249トンの予定が、18ヵ月後には80トンもオーバーしていた。開発期限が限られた上に、予定よりも大きな推力が求められたために、P&Wはエンジン設計を変えずに当初よりも大推力を得なければならなくなった²⁵⁾。バイパス比を変えずに推力を増すためにも、P&Wはコア排気の推力増大に力を注いだ。

コア部分の推力を増すためには燃料流量を増やせばよいが、そのためには高温ガスを浴びて高速回転するタービンブレードに、さらなる高温高強度が必要になる。そこで、高温高強度のタービンブレードを求めて、新たな素材と製造方法が導入された。

素材の面では耐熱合金が開発された。図2に軍用エンジン素材の変遷を示す。戦闘機用と民間用のエンジンでは、必ずしも同じ素材が使われない。しかし、軍用では、より早く新素材が導入され、その後に民間用で取り入れられることが多く、民間用エンジン素材の変遷を類推できる。図2より、初期のエンジン素材にはアルミニウム合金や鋼材が用いられたが、1960～70年代にはファンや圧縮機などの低温部にはチタン合金が、高温部には耐熱合金であるニッケル合金が使用されるようになったことがわかる²⁶⁾。

製造方法の面では、耐熱性を高めるために、精密鑄造により空冷タービンが開発された。従来の精密鍛造で加工されたニッケル合金は変形が困難であることから、精密鑄造を利用してタービンブレードが中空に成形され、相対的に低温の圧縮空気をブレード内部に流すことで冷却が可能になったのである。

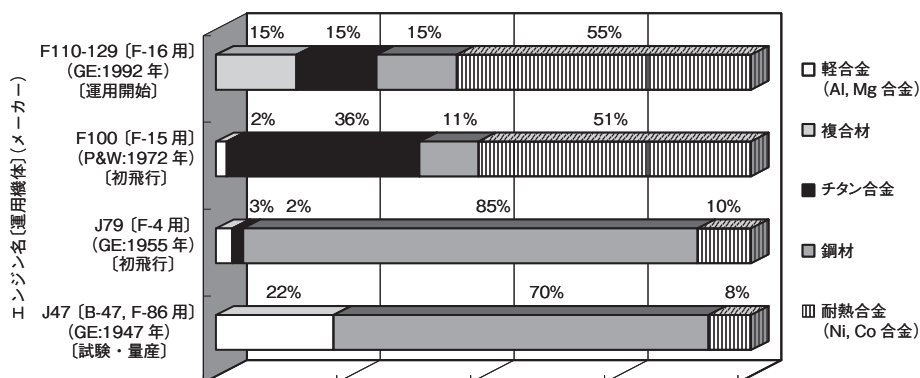
また、精密鑄造により耐熱合金の結晶構造を操作することで、耐熱性が改善された。高温での金属破壊のほとんどは、金属の原子配列の向きが乱れた領域である結晶粒界に沿って発生する。そこで、破壊の原因を取り除いた一方向凝固ブレードや単結晶ブレードが開発された。一方向凝固ブレードは、遠心力のかかる外方向への結晶粒界を少なくすることで高温強度が高め

られた。その製法は、セラミック製の鋳型に溶湯を注ぎ、徐々に炉から引きだすことにより結晶を一方方向の柱状に凝固成長させるというものである。単結晶ブレードは、一方方向凝固ブレードでは外方向に結晶が何層にも成長するのに対して、一方方向凝固ブレードの製造装置に豚の尻尾のようなセクタを取り付けることで、1つの結晶を選択して、ブレード全体を一様の結晶質に製造したものである²⁷⁾。

P&Wでは、1960年代にユナイテッド・テクノロジーズ・リサーチ・センターで一方方向凝固ブレードが開発され、高温強度が約30度高められた。このブレードは、P&W1422合金を用いて70年からJT9Dエンジンで実用化された。P&Wでは、単結晶ブレードの研究も行われ、P&W1480合金を用いて、戦闘機用のF100エンジンやJT9Dエンジンで実用化された²⁸⁾。

以上のように、第1期の高速化・大型化は、主翼開発とジェットエンジン開発及び高バイパス比ターボファンエンジンの開発によって実現された。また、それらは、機体メーカーにおけるNCフライス盤を用いた主翼加工や、エンジンメーカーによる精密鋳造によるタービンブレード開発といった生産技術によって支えられた。

図2 ジェットエンジン材料の変遷



出所：「応用機械工学」編集部編（1981）、136ページ及び服部・正木（1995）、207ページより筆者作成。初飛行・運用開始年などは、GE ホームページ (<http://www.geae.com/engines/military/index.html> [2010年6月30日]) や Gunston (1997) より。

3. 航空自由化後の航空需要とトータル・コストの抑制要求

本節では、第2期の航空機の技術発達を方向づけた社会的要因である航空需要の性格を分析する。第1期に続いて、第2期も航空需要は量的に増大した。その要因として、東アジアの経済成長と欧米を中心とした航空自由化があげられる。このうち、前者は主に長距離路線で運航される大型機需要をもたらし、後者は多くの小型機需要をもたらした。また、航空自由化はそれ以前と異なる航空機開発をもたらす要因になった。

(1) 欧米の小型機需要とアジアの大型機需要

まず、航空輸送実績の歴史的変遷を概観し、航空需要の地域特性を明らかにする。

1980年代以降も航空需要の増大は目覚しく、表2に示すように、1990～2008年の欧州国際線需要とアジア太平洋の国際線・国内線需要、1980～2000年の北米国内線需要は、それ以前と比べて10年の増加量がとくに大きくなっている。

航空需要が量的に増大するだけでなく、その市場構成も、地域構成と国内線・国際線の比率構成が変化してきた。

第1に、世界の航空需要を牽引する地域が、北米の一極集中という状況から、欧州とアジア太平洋を加えた3地域に広がった。とりわけ、北米とアジア太平洋は対照的な変遷をみせている。全体に占める旅客需要が、1960年代に10%未満だったアジアが2000年代には30%近くに迫る一方で、60年代に60%以上を占めていた北米が2000年代には30%程度にまで減少した。

表2 航空輸送実績の推移（定期輸送）

旅客輸送実績（10億人 km）							貨物輸送実績（10億トン km）										
	北米		欧州 （ソ連除く）		アジア 太平洋		他	合計		北米		欧州 （ソ連除く）		アジア 太平洋		他	合計
（国際線・国内線合計）									（国際線・国内線合計）								
1960	69	63%	24	22%	7	7%	9	109	1960	1	55%	1	24%	0.2	9%	0.3	2
際	14	13%	20	18%	3	3%	4	41	際	0.4	17%	0.4	20%	0.1	4%	0.1	1
内	55	50%	4	4%	4	4%	5	69	内	1	38%	0.1	4%	0.1	5%	0.2	1
1970	226	49%	85	19%	38	8%	33	460	1970	6	53%	3	29%	1	9%	1	10
際	46	10%	72	16%	19	4%	23	162	際	2	18%	3	27%	1	7%	1	6
内	180	39%	13	3%	20	4%	9	297	内	4	34%	0.1	1%	0.2	2%	0.2	4
1980	445	41%	205	19%	160	15%	118	1,089	1980	9	31%	8	28%	6	19%	4	29
際	99	9%	175	16%	105	10%	78	466	際	4	13%	6	21%	5	17%	3	20
内	346	32%	30	3%	55	5%	40	622	内	5	18%	0.3	1%	1	2%	0.5	9
1990	783	41%	350	18%	344	18%	176	1,894	1990	16	27%	17	30%	16	28%	6	59
際	221	12%	296	16%	236	12%	123	893	際	9	15%	17	29%	15	25%	6	46
内	562	30%	54	3%	108	6%	53	1,001	内	8	13%	0.4	1%	2	3%	1	12
2000	1,177	39%	762	25%	733	24%	302	3,018	2000	32	27%	34	29%	40	34%	11	118
際	355	12%	662	22%	519	17%	225	1,779	際	20	17%	33	28%	36	31%	10	101
内	822	27%	100	3%	215	7%	77	1,239	内	11	10%	0.5	0%	3	3%	1	17
2008	1,386	32%	1,151	27%	1,150	27%	526	4,283	2008	41	26%	39	25%	56	36%	19	156
際	454	11%	1,046	24%	697	16%	413	2,639	際	24	15%	39	25%	50	32%	17	131
内	932	22%	105	2%	453	11%	113	1,644	内	17	11%	1	0%	6	4%	1	25

注1：旅客1名を1 km 輸送すると1旅客キロ、貨物1トンを1 km 輸送すると貨物1トン km という。
 注2：「際」は国際路線、「内」は国内路線の略である。それぞれ、国際・国内路線全体に対する割合を示す。
 注3：不定期輸送は含めていないが、例えば2005年は旅客輸送189億人 km、貨物輸送50億トン kmであった。
 注4：2008年の欧州のデータは、同年の欧州全体から2006年のロシア（旧ソ連）のデータを引いて産出した。
 出所：日本航空（2009）、28～29ページ。日本航空（1997）、26～27ページ。
 日本航空（1987）、26～27ページ。日本航空（1979）、36～41ページ。

第2に、世界の航空旅客需要は、かつては国内線旅客需要が国際線需要を上回ったが、1992年以降は逆転して国際線需要が上回っている²⁹⁾。

北米では、国際線旅客需要と国内線需要の比率が2対8程度であったが、1990年代以降は国内線が相対的に縮小して3対7に変化している。また、世界全体の旅客需要に占める北米国内線は、60年の50%から2008年には22%にまで落ち込んでいる。ただし、北米国内線需要の絶対数は増え続けており、北米の航空需要が国内線に牽引されていることに変わりはない。

表3 民間航空機の地域別・メーカー別納入機数の推移

	狭胴小型機				狭胴・広胴中型機				広胴大型機				広胴超大型機				全体				
	北米	欧州	ア	計	北米	欧州	ア	計	北米	欧州	ア	計	北米	欧州	ア	計	北米	欧州	ア	他	計
第1期(1958~79年)																					
Boeing	289	112	71	623	1,760	313	174	2,497					164	110	90	414	2,213	535	335	451	3,534
Douglas	513	278	83	932	366	118	50	556	155	76	44	299					1,034	472	177	104	1,787
合計	802	390	154	1,555	2,126	431	224	3,053	155	76	44	299	164	110	90	414	3,247	1,007	512	555	5,321
	52%	25%	10%	100%	70%	14%	7%	100%	52%	25%	15%	100%	40%	27%	22%	100%	61%	19%	10%	10%	100%
第2期(1980~99年)																					
Boeing	1,363	897	472	2,874	1,194	346	298	1,993	69	36	103	239	116	208	430	813	2,742	1,487	1,303	387	5,919
Douglas	689	411	167	1,330					160	72	73	339					849	483	240	97	1,669
Airbus	428	381	197	1,099	180	214	231	742	43	103	108	289	651	698	536	245	2,130				
合計	2,480	1,689	836	5,303	1,374	560	529	2,735	272	211	284	867	116	208	430	813	4,242	2,668	2,079	729	9,718
	47%	32%	16%	100%	50%	20%	19%	100%	31%	24%	33%	100%	14%	26%	53%	100%	44%	27%	21%	8%	100%
合計(1958~99年)																					
Boeing	1,652	1,009	543	3,497	2,954	659	472	4,490	69	36	103	239	280	318	520	1,227	4,955	2,022	1,638	838	9,453
	47%	29%	16%	100%	66%	15%	11%	100%	29%	15%	43%	100%	23%	26%	42%	100%	52%	21%	17%	9%	100%
Douglas	1,202	689	250	2,262	366	118	50	556	315	148	117	638					1,883	955	417	201	3,456
	53%	30%	11%	100%					49%	23%	18%	100%					54%	28%	12%	6%	100%
Airbus	428	381	197	1,099	180	214	231	742	43	103	108	289					651	698	536	245	2,130
	39%	35%	18%	100%	24%	29%	31%	100%	15%	36%	37%	100%					31%	33%	25%	12%	100%
合計	3,282	2,079	990	6,858	3,500	991	753	5,788	427	287	328	1,166	280	318	520	1,227	7,489	3,675	2,591	1,284	15,039
	48%	30%	14%	100%	60%	17%	13%	100%	37%	25%	28%	100%	23%	26%	42%	100%	50%	24%	17%	9%	100%

注1：地域の略号で、「ア」はアジア太平洋を示す。Douglasは、McDonnell Douglasであり、1997年にBoeingに吸収合併された。

注2：小型・中型・大型・超大型機の地域別表示では「その他」の地域は省略し、合計欄にまとめている。

注3：ボーイング及びマクダネル・ダグラスは1999年9月30日、エアバスは99年10月31日時点のデータである。

エアバスの元データは時期区分がなく、74年に就航したA300の80年までの納入数はそれほど多くないので、

すべて80年以降の納入として表示している。ロッキードL-1011は上記に含んでいないが、生産機数は250機である。

出所：青木(2000)、328-331、337~341ページより筆者作成。

欧州では、もともと多くを占める国際線旅客需要が1990年代半ばからとくに増大し、2008年には国際線と国内線の比率が9対1になった。世界全体に占める欧州国際線の割合も、16%から20%強に増えている。欧州の航空需要は、歴史的に国際線に牽引されており、90年代以降はその傾向を強めている。

アジア太平洋では、国際線旅客需要と国内線需要の比率が1970年代前半に逆転し、2000年には7対3になった。2000年代は911同時多発テロや新型肺炎SARSの影響もあって国際線需要が伸び悩む一方で、国内線が順調に成長した。したがって、アジア太平洋の航空需要は、国際線と国内線の両方に牽引されている。

次に、航空機材の納入実績から航空輸送市場を分析する。表3は、民間航空機の地域別納入機数の推移を示しており、航空機材からみた航空輸送市場の特徴を示している。

機体の大きさに着目すると、第1期から第2期にかけて納入機数は、全体では5,321機から9,718機と約1.6倍に増えているが、小型機が1,555機から5,303機と3.4倍に増える一方で、中型機は3,053機から2,735機に減少した³⁰⁾。

地域別にみると、欧米では小型化の傾向が顕著である。北米に納入された7,489機のうち、中型機(3,500機)と小型機(3,282機)で約91%を占める。しかし、第1期から第2期に中型機の納入機数が2,126機から1,374機に減少したのに対して、小型機は802機から2,480機と3.1倍に増えている。つまり、第1期に導入された707や727、DC-8などの中型機の一定数は、第2期には小型機に代替されたのである³¹⁾。また、欧州でも小型機が数多く納入され、第1期の390機から第2期の1,689機と4.3倍に伸びている。

一方、アジア太平洋では、1980年代以降も多くの大型・超大型機が納入されており、欧米と対照的である。小型機も増えているが、欧米に比べて著しく少ない。90年代には720機の大型機の37%（265機）、472機の超大型機747の55%（261機）がアジア太平洋向けとなった。

以上により、第2期に航空需要が増大した3地域のうち、北米国内線と欧州国際線では短距離路線で運用される小型機材が多く求められ、アジア太平洋の国内線及び国際線では中長距離路線を運航する大型・超大型機材が求められたことがわかる。

（2）欧米の航空自由化と東アジアの経済成長

1980年代以降は、主に欧米で進められた航空自由化（航空規制緩和）と、東アジアの急成長によって航空需要が増大した。

欧米では、航空自由化によって、航空輸送会社間の低価格競争が激しくなり、新たな需要が掘り起こされた。

1970年代までの国際航空輸送は、シカゴ・バミューダ体制に支配されていた。これは、路線（乗り入れ地点）や運輸権（当事国間輸送や以遠権）、輸送力（便数、機材）、参入企業数、運賃設定方式などの国際線の航空権益が、二国間で均衡するように取り決められた競争制限的なものだった。70年代に石油価格高騰や世界的な経済不況により航空需要が低迷すると、イギリスなどアメリカ以外の国は輸送力のさらなる規制を望んだ。それに対して、多数の航空機を保有して複数の国際線運航企業を擁するアメリカでは、競争制限的な体制への反発が広がり、アメリカ政府は航空自由化を図るために政策を転換させた³²⁾。こうして、アメリカ政府は国際的にはオープンスカイ政策を推進し、国内では78年に航空規制緩和法を成立させた。

アメリカ国内では、参入と運賃に関する規制が撤廃されたことにより、多数の新規企業が参入した。アメリカでは1978年に29社の航空輸送会社が存在したが、88年までに137社が参入し、激しい競争の末に91年には66社が生き残った³³⁾。新規参入企業は、低い人件費とサービスの簡略化によって低価格競争を行い、運賃を低く抑えることで、それまでは航空輸送を利用しなかった所得階層の顧客を、新たな需要として掘り起こした。

続いて、欧州では1990年代に域内の航空自由化が進んだ。かつてのEEC（欧州経済共同体）では、欧州域内の経済発展のために、鉄道、道路、河川運航などの交通政策で統一政策がとられた。しかし、航空分野では競争制限的なシカゴ・バミューダ体制ののっとり、域内での統一政策はとられなかった。ところが、航空自由化後にアメリカ国内で航空需要が増大したことを背景に、欧州域内でも90年代に航空自由化が段階的に進められ、97年からはEU（欧州連合）加盟国内の域内航空が完全自由化された。また、92年にオランダ政府がアメリカ政府とオープンスカイ協定を結んでから、二国間のレベルで国際的な航空自由化が進められている³⁴⁾。

前項で分析したように、欧米では1980年代以降に多くの小型機が導入されたが、その理由は航空自由化後の路線網の展開にある。航空自由化後の大手航空輸送会社は、ハブ・アンド・ス

ボーク型の路線網を構築し、アメリカでは全域をカバーできるように複数のハブ空港が配置された。ハブ空港は、地方の小さな需要を集めると同時に、複数ハブ拠点をつなぐ大規模路線網の結節点として機能した。さらに大手企業は、国際路線では外国の大手企業とのグローバルアライアンスを形成し、国内路線ではローカル企業との関係を深めた³⁵⁾。また、航空自由化後には、特定の小型機を用いた低価格競争でLCC (Low Cost Carrier: 低コスト航空輸送会社) が成長した。2005年には、サウスウエスト航空は737のみを424機、ジェットブルー航空はA320のみを73機保有していた³⁶⁾。欧州でも、ロンドンやパリ、フランクフルト、アムステルダムを中心に複雑な路線網が形成された³⁷⁾。こうして、ハブ空港から広がる短距離路線が増えるにしたがい、地方の需要は小型機の多頻度運航によって吸収されるようになり、100席級の狭胴小型機やそれ以下のリージョナル・ジェット機などが大量に求められたのである。

一方で、アジアの航空需要は、東アジア経済の急成長によって増大した。東アジアは、欧米向けの生産拠点として先進国の多国籍企業が展開し、しばしば域内の複数国を横断するように生産体制が整備され、多国籍企業の企業内国際分業に組み込まれた。それにともない域内・域外貿易が活性化され、航空需要が増大したのである。また、東アジア各国では、国民経済の成長ともなってレジャー旅客も増大した³⁸⁾。

アジアで大型・超大型機が多く導入された理由は、地理的・地域的要因から説明できる。

東アジア・欧州・北米を結ぶ域外国際線についてみると、欧米において最も重要な国際線は欧州・北米路線であり、ロンドン－ニューヨーク間は5,600km程度である。それに対して、東アジアにおいては欧米との国際線が重要であり、東京－ニューヨーク(アジア・北米路線)や東京－ロンドン路線(アジア・欧州路線)は、いずれも10,000km以上の長距離洋上路線である。さらに東アジアでは、国内線需要よりも国際線需要の割合が多い地域や航空輸送会社が見られる。シンガポール航空やキャセイ・パシフィック(香港)は国内線が存在せず、欧米行き長距離線が相対的に重要視されているために、保有機材のほぼ100%が大型機以上である。韓国も、1970年代半ばから国際線の割合が80～95%で推移している。

域内国際線については、東京と香港、シンガポールを中心に形成されてきた東アジア域内の路線網は、海洋に隔てられ、オーストラリアを含めると南北に細長く6,000～8,000kmもの範囲にまたがる。それに対して、北米では1,000～4,000km、欧州でも1,000～3,000km程度の円状の範囲内に主要都市が収まる³⁹⁾。

第2期の欧米とアジアでは、ともに航空需要が量的に増大したが、航空政策や地理的・地域的要因の違いから、導入機材は対照的な傾向がみられたのである。

(3) 航空自由化とトータル・コストの抑制要求

航空自由化は、航空輸送会社の競争環境を変化させ、第1期と異なる航空機が求められる原因になった。具体的な要求内容は5点にまとめられる。

第1に、石油ショックを契機とする燃料価格高騰により、航空輸送会社からは燃料消費率に優れた航空機が求められた。燃料価格は、1973年の1ガロン11セントから次第に高くなり、79年のイラン革命後に急騰してから80年代半ばまで1ガロン100セント前後で推移し、80年代後半から90年代末まで60セント前後と相対的に低値で安定した。この間に、航空輸送会社の直接運航コストに占める燃料費は、約20%（73年）から40%（81年）近くに増えた⁴⁰。この問題に対応するために、80年代前半に就航した767やA310では、燃料消費率の改善が最優先された。燃料消費率が低くなれば、同じ距離でも燃料消費量が少なくて済み、燃料費を節約できるからである。燃費低減のために、主翼などの空力性能改善、機体の重量軽減、エンジンの燃費改善、電子的な飛行制御による低燃費運航がなされた。なお、低燃費化はジェット化以降、一貫して追求され、段階的に改善されているので、必ずしも第2期に特有の課題とはいえない。また、石油価格の変動に大きく影響されるので、必ずしも第2期の一貫した特徴でもない。

第2に、1978年のアメリカ航空規制緩和以降、欧米を中心に航空輸送会社の低価格競争が激化し、運航乗務員の人件費の抑制が求められた。従来、小型機を含めてほとんどの民間航空機には正副操縦士に航空機関士を加えた3名の運航乗務員編成（以下、3名編成）が定められたが、アメリカの航空輸送会社からの要求に応じて、80年代に767や747-400が2名編成機として就航した。最終的には第2期の民間航空機は、小型機から中型・大型・超大型機まですべてが2名編成機となった。エアバスによれば、2名編成により運航コストを8%下げられる⁴¹。2名編成の導入を後押ししたのが、飛行制御システムの電子化による自動化の進展であった。

第3に、エンジン整備費の抑制が求められ、第2期の中型・大型機の多くがエンジン双発機として開発された。エンジン基数を3～4基から2基に減らせば、整備コストや代替品保有数を少なくできる。

大型エンジンの開発は、同時に騒音対策にもなった。航空機の騒音はジェット速度の8乗に比例するので、バイパス比を高めてジェット排気速度を遅くするほど低騒音になるからである。1970年代の騒音・排ガスの社会問題化を受けてICAO（International Civil Aviation Organization：国際民間航空機関）が規制を強化したことにより、騒音・排ガス規制が新たな運航条件となったことも、エンジン大型化をもたらした要因なのである。ただし、燃焼室の改良など排ガス対策は独自の対策が必要であった。

第4に、1980年代半ばから、航空輸送会社によって航空機購入価格の値下げが求められた。航空自由化後の低価格競争は既存の大手企業の経営をも悪化させ、航空輸送会社は、運航コストだけでなく航空機購入価格も含めたコストの抑制を求めたのであった。

第5に、航空機販売をめぐる航空機メーカー間の競争が激化したことで、航空機メーカーは航空輸送会社の要求に対して、より積極的に対応する必要が生じた。とくに、エアバスは1980年代後半から市場シェアを拡大させ、90年代には小型・中型・大型機市場で対抗機種をそろえてボーイングに競争を挑んだ。エアバスは、機体価格の極端な値下げや独特の金融的措置、本国

政府が直接的に販売先の政府に働きかけるという手法をとった。ボーイングもそれに対抗すると同時に、機体価格を値下げしても利益を得られるように、開発・製造コストを抑制せざるを得なくなった⁴²⁾。777開発では設計段階で3次元CADの導入や、組立の自動化にも取り組んだ。また、ボーイングは開発費やリスク分散のために国際共同開発を進め、コスト抑制のために内製範囲を縮小してシステム・インテグレーションを進めた。

以上のように、1980年代以降の航空機開発には、トータル・コストの抑制が求められた。ここでいうトータル・コストには、航空機購入価格と運航コストを含み、運航コストには燃料費、整備費や部品交換費、メンテナンス費用、乗務員の人件費などを含む。それを実現するための技術的課題は自動化・双発化であった。

4. 民間航空機市場の更新と構造変化——1980年代以降の双発化・自動化——

第2期の民間航空機市場は、10~20年程度の製品寿命を迎えた第1期の機材が更新されて、1980年代から形成された。ただし、単なる更新が求められたのではなく、航空輸送会社と航空機メーカー双方の競争環境が変化してトータル・コストの抑制が求められたことにより、4層に区分される市場それぞれで新たな後継機が開発され、市場構造が変化した。

(1) 第2期の民間航空機市場の形成

第2期の航空機市場は、機材特性としては、エンジン双発化と2名編成運航の導入が共通した傾向である。地域特性としては、小型機は主に欧米で、大型・超大型機は主にアジアで求められ、そのことが派生の仕方に影響している。

小型機市場では、第1期に競合したボーイング(737)とマクダネル・ダグラス(DC-9, MD-80/90)に、エアバス(A320)が新たに参入することで三つ巴の競争関係が形成された。この市場では、航空輸送会社の求める路線に最適な座席数の機材を提供するために、長胴化・短胴化を繰り返して多くの派生型が開発された。中型・大型機とは異なり、基本的には第1期の原型機を元に、同じ胴体断面を用いた第2期の派生型・発展型が開発され、名称も原型機のシリーズ名を踏襲している。また、長胴化・短胴化だけでなく、大推力・低燃費エンジンへの換装や、電子式の飛行制御システムが導入されて派生型が開発された。なお、小型機のエンジンは第1期から双発であり、部分的に行われていた2名編成運航は、第2期にはすべての小型機に導入された。

一般に民間航空機は、販売後8~14年をかけて400~600機を販売することで損益分岐点に達するとされ⁴³⁾、その場合は年産28~75機が量産規模である。その意味では、小型機市場では派生型のレベルでも量産が達成されている。それを支えるのが欧米の小型機需要なのである。表1に示したように、2009年6月までにシリーズ全体では737の生産機数は6,080機、A320は

3,931機に達しており、単純に派生型の数で割っても1つの派生型で600~900機が生産されていることになる。

中型機市場では、第1期の3名編成・4発機（707とDC-8）が第2期には2名編成・双発機（757, 767, A300-600, A310）に代替され、大型機市場では3名編成・3発機（DC-10とL-1011）が2名編成の双発機（777とA330）と4発機（A340）に代替された。超大型機市場では、3名編成の在来型747に電子式の飛行制御システムが取り入れられて2名編成の747-400となり、第2期も単独市場が維持されている。ただし、2007年にエアバスがA380を超大型機市場に投入しており、動向が注目される⁴⁴⁾。

座席数を増減させるために長胴化・短胴化を繰り返して派生する小型機に対して、中型・大型機の派生型は、中長距離路線で運航できる航続距離延長型が多いのが特徴である。航空機の最大航続距離は、燃料積載量や燃費、空力性能によって決まる。このうち燃料積載量は機体の大きさに比例することから、基本的には4層区分する市場構造の上層の機体ほど航続性能が優れている。しかし、第2期には、長胴化で燃料タンクを増設したり、燃費効率の優れたエンジンが開発されることで、機体サイズで下層に位置する航空機の航続距離延長型が、上層の航空機と競合するようになった。

1980年代に中距離路線における双発機の洋上運航規制が緩和されると、2名編成機となった発展型A300-600や767-200ER（Extended Range）、767-300ER、A300-600R、A310-300のような航続距離延長型が、東アジア域内路線や欧州・北米路線のような中距離洋上路線に積極的に導入された。それらは、本来は中型機であるが、整備コストで優位をもつ双発機の利点を生かして大型3~4発機市場を侵食した。さらに、90年代に長距離路線における双発機の洋上運航規制が緩和されると、777-200ERや777-300ER、A330-300、A340-500/600といった大型機の航続距離延長型が、アジア・欧州間やアジア・北米間といった長距離路線で運航されるようになった。こうして第2期の大型機は、第1期の大型機だけでなく、第2期の超大型機をも代替するようになった。これらの大型機は最新型の低燃費エンジンを搭載しており、燃料価格が高騰した2001年以降は代替がより顕著にみられる。

以上のように、第2期の航空機市場では、全4層で2名編成が導入され、747やA380、A340を除いてエンジン双発化が実現されている。また、欧米で求められる小型機が座席数増減のために短胴化・長胴化を繰り返すのに対して、中型・大型機では航続距離延長型が生み出され、中長距離路線で上層の旧型機や3~4発機を代替している。

(2) 航空機メーカーの淘汰と集約

第2期には、機体・エンジン・制御機器の各レベルで、更新需要をめぐって各メーカーが開発・生産・販売を競った結果、航空機メーカーの淘汰と集約が進んだ。

機体メーカーのレベルでは、第2期にロッキードとマクダネル・ダグラスが民間機市場から

脱落した。その理由として、両社が大型機市場で十分な成功を収められなかったことを指摘できる。まず、第1期後半の広胴大型・超大型機(747, DC-10, L-1011)の中では、最初に開発された747が最も多く売れ、在来型747だけでも724機が生産された。多くの航空輸送会社にとって、747は運航路線に対して大きすぎる機体であったが、同じ路線で競合する他社への対抗や、会社の象徴的存在として導入するという理由で、747の導入が競われた。一方、L-1011とDC-10は、747よりも開発が1~2年遅かったために、本来であれば獲得できたかもしれない顧客を失った。次に、それほど大きな需要が残されていない大型機市場に2社が参入し、どちらも開発を断念しなかったことが双方に痛手だった。さらに、第2期には航続距離延長型の双発中型機が大型機市場を侵食した。その結果、L-1011は250機、DC-10は446機の生産数にとどまり、それぞれ損益分岐点に達しなかった⁴⁵⁾。

個別の要因としては、1960年代末のロッキードは、RRと契約したL-1011用エンジン開発の遅れと開発コストの膨張に加えて、軍用大型輸送機C-5Aの開発でも資金不足に陥っていた。71年には、政府から2億5000万ドルの債務保証が認められることで、ようやく銀行団の追加融資を受けられた。こうして、収益を悪化させたL-1011は81年に生産が中止され、ロッキードは25億ドルの損失を抱えて民間機市場から撤退した⁴⁶⁾。マクダネル・ダグラスは、73年と79年のDC-10墜落事故が、シェア拡大の痛手になった。さらに、軍事ビジネスに慣れていた旧マクダネルが経営陣の中心だったために、大型機DC-10に続いて、新たな中型機を開発するというリスクの高い決断ができなかった。ソ連崩壊後は軍事部門の不振が重なり、97年に同社はボーイングに吸収合併された⁴⁷⁾。

一方のボーイングとエアバスは、市場の隙間を見つけ、適切な機材を適切な時期に確実に開発したことで、シェアを維持・拡大できた。その結果、全4層でエアバスとボーイングの競合関係が形成され、1994年に続いて2001年から5年連続で、エアバスはボーイングの納入機数を上回るまでの存在になった。なお、本国政府の直接的・間接的支援を長年にわたって受けてきたことも、両者が市場でシェアを拡大できた理由である。とくにボーイングなどのアメリカ企業は、軍事を媒介とした支援を受けてきた⁴⁸⁾。

エンジンメーカーのレベルでは、第1期後半に続いて3社が競合している。P&Wに対してRRやGEが民間市場でシェアを拡大させる転機は、第1期後半の大型機用エンジン開発にあった。この開発が、第2期の中型機や大型機用エンジンの技術的基礎になったのである。RRは、RB211エンジン開発の遅れが原因で1971年に破産、国有化されたが、ロッキードやイギリス政府の支援を受けてRB211を完成させてからは販売を重ねた。GEのCF6エンジンは、ほとんどのA300とDC-10に採用された。P&Wを退けてGEのCF6がA300に搭載された理由は、フランス企業であるスネクマ(Snecma S. A.)が25%の生産分担をしていたことであった⁴⁹⁾。さらに、GEとスネクマが共同開発したCFM56エンジンは、第2期の小型機737に独占供給されることになり、大きな利益をGEにもたらした。もう一方の小型機A320をめぐる

は、P&WとRRに加えて日本（三菱重工業、川崎重工業、IHI）やドイツ（MTU エアロエンジンズ）のエンジンメーカーが共同開発したV2500エンジンが、CFM56と競合している。欧州企業とのつながりを生かして欧州向けの販売の足がかりを築いたことは、ジェットエンジン市場のシェアでGEがP&Wを逆転する要因になった。

制御機器メーカーのレベルでは、電子化が進むにつれて従来の機械式の制御機器メーカーがシェアを失い、電子化に対応できた既存メーカーや新規メーカーがシェアを拡大させている。また、システムの電子化と統合が進むことでシステムが一体的に供給されるようになり、供給の独占も進んでいる。飛行制御システムでは、アメリカのロックウェル・コリンズ（Rockwell Collins, Inc.）やハネウェル（Honeywell International, Inc.）、フランスのタレス（Thales S.A.）が有力なシステム・サプライヤーである。

以上のように、機体・エンジン・制御システムのそれぞれで激しい競争が行われ、少数企業によって市場が独占される傾向がみられる。

（3）双発化・自動化を実現したエンジン・制御システム

第2期の航空機開発では、トータル・コストの抑制が求められ、機体・エンジン・制御システムのそれぞれで技術開発が行われた。その中でも、自動化を実現した飛行制御システムの電子化と、双発化を実現した大推力エンジンの開発が重要である。ただし、双発化の場合は双発機の洋上運航規制、自動化の場合は運航乗務員規制という社会的制約条件が存在した。そのため、以下では第2期の技術開発を、技術的要因と社会的要因の両面から分析する。

①双発化の実現——大推力エンジンと双発機の洋上運航規制緩和——

双発化実現のためには、まず、エンジンのさらなる大推力化が必要であった。

第1期後半に開発された747は、機体サイズこそ超大型であるが、エンジンは4基搭載されているので、第2期に開発される双発機の方が、エンジン1基あたりの推力を大きくしなければならなかった。表1に示したように、第2期の中型双発機には、第1期後半に大型・超大型機用が開発された大型エンジンJT9D、CF6、RB211の推力増大型が提供された。さらに大型双発機向けには、GEがGE90、P&WがPW4000、RRがTrent700/800というバイパス比が5以上で推力30,000kg以上の超高バイパス比ターボファンエンジンを開発した。

双発化実現のためには、技術的条件だけでなく、双発機の洋上運航規制緩和という社会的条件が必要であった。規制緩和が、さらなる技術開発の条件だったのである。

双発機は、3～4発機に比べて1基のエンジン停止がもたらす危険が大きいため、着陸可能な代替飛行場から飛行時間が60分の範囲内を飛行しなければならない。この60分ルールは、FAA（Federal Aviation Administration：アメリカ連邦航空局）によって1953年に定められた。ここでは、「個別に認可を取得すれば、その適用が一部緩和される」という定めもあった。代

替飛行場から60分を超えた範囲を運航することを **ETOPS (Extended-range Twin-engine OperationS)** と呼ぶ⁵⁰⁾。

当初はすべての民間航空機に60分ルールが適用されたが、3発機の727(1964年に就航)が適用除外とされ、代替飛行場の少ない中長距離洋上路線でエンジン3発以上の航空機が用いられるようになった。エンジン整備費の点では双発機が経済的だが、60分ルールのもとでの双発機運航は、とくに洋上では、海岸線に沿うような迂回航路をとらねばならない。そもそも、第1期前半には巨大な機体を2基のエンジンで推進できるだけの大推力エンジンは存在しなかった。そのため、第1期の中型以上の機体には3~4基のエンジンが搭載された。

ところが、第1期後半に推力20,000kg級の大推力エンジンが開発されると、中型機以上でも双発化の実現可能性が出てきた。そうすると、航空輸送会社は3~4発機を双発機に代替することを望み、航空当局に対して双発機の洋上運航規制緩和を求めた。その結果、**FAA**は双発機の洋上運航規制を1985年に緩和し、条件をクリアすれば代替飛行場から60分の範囲内の運航という制限を、120分に拡張できるようにした。こうして、双発機による洋上運航は、まず北米・欧州路線(大西洋横断)や東アジア域内といった中距離国際路線で実現された。たとえば、ニューヨーク-ロンドン路線(5,564km)では、4発機(707や747)から双発機(767や777, A300, A310)への代替が進み、双発機運航比率は、90年の2.3%から、95年には37.6%、2000年には51.1%と過半数を占めるに至った⁵¹⁾。規制緩和はアメリカ以外の国にも広がり、東アジア域内の6,000km程度の中距離洋上路線でも双発機が運航されるようになった⁵²⁾。

1990年代には、アジア・北米路線のような6,000km以上の長距離洋上路線でも双発機が求められた。その背景には、東アジアの経済発展にともなう航空需要の増大があった。長距離洋上路線における双発機運航のためにはさらなる規制緩和が必要であり、**FAA**は88年12月に180分ルールを定めた。大型双発機777に至っては、ニューヨーク-ロンドンや東京-シドニーのような長距離路線で、開発で先を越されたMD-11やA330/340から顧客を奪うために、就航と同時に180分ルールで運航することが目指された。本来であれば、一定の運航実績がなければ**ETOPS**は認められないが、94年に**FAA**が**ETOPS**の早期取得(**Early ETOPS**)を認めたことにより、ユナイテッド航空の777は95年5月の就航と同時に180分ルールが認められた⁵³⁾。

こうして、アジア・北米間やアジア・欧州間という長距離路線でも双発機運航が可能になった。日本航空の場合、2000年の段階では、東京・ロンドン路線(9,587km)や東京・パリ路線(9,713km)、東京・ニューヨーク路線(10,811km)といった長距離路線では超大型4発機747-400の運航が主であったが、2009年までに大型双発機777が運航の中心になっている⁵⁴⁾。

さらに、シンガポール-ロサンゼルスのような長距離路線では207分ルールが求められた。その理由は、シンガポール航空が、シンガポール-ロサンゼルス路線の直行便の運航機材として1998年5月に大型4発機A340-500を選んだことにあった。この路線で最短距離をとる場合は、180ルールのもとでも代替飛行場が少なく、火山の噴火や悪天候によりそれらが閉鎖されると

運航が中止されることが懸念された。そのため、洋上運航規制を受けない4発機が有利と考えられたのであった⁵⁵⁾。シンガポール航空からの受注競争に敗れたボーイングは、航続距離延長型の777-200ER/300ERの開発延期を余儀なくされた。そこで、4発機に対抗して受注を得るために、ボーイングはETOPSの15%（27分）延長を求め、それに応じたFAAが2000年3月に207分ルールを制定した。

以上のように、第1期後半から続く大推力エンジンの開発という技術的条件に加えて、双発機の洋上運航規制緩和という社会的条件によって、中長距離路線で3～4発機が双発機に代替されるようになったのである。

②自動化の実現——飛行制御システムの電子化——

次に、自動化を実現した飛行制御システムの電子化について述べる。

航空機の飛行制御には3段階のレベルがある。まず、飛行制御には、姿勢の制御により安定性を保ちながら、操縦士の操縦操作を適切に制御するという安定性・操縦性制御の段階がある。これは、ジェット化直後に自動化された。次に、ある区間の飛行経路で姿勢や推力を制御して速度や方向を一定に保つ誘導制御の段階があり、これが自動化されてオートパイロット（Autopilot）やオートスロットル（Autothrottle）が実現された。最後に、飛行計画にもとづいて目的地と飛行ルートを設定し、飛行ルートに沿って飛行するよう誘導の指示を出すという航法制御の段階があり、これが電子化されて自動運航（Auto Flight）が実現された。3段階の飛行制御は、いずれも3次元の姿勢制御によって行われるので、電子化されるとそれぞれが連動して制御されるようになった⁵⁶⁾。

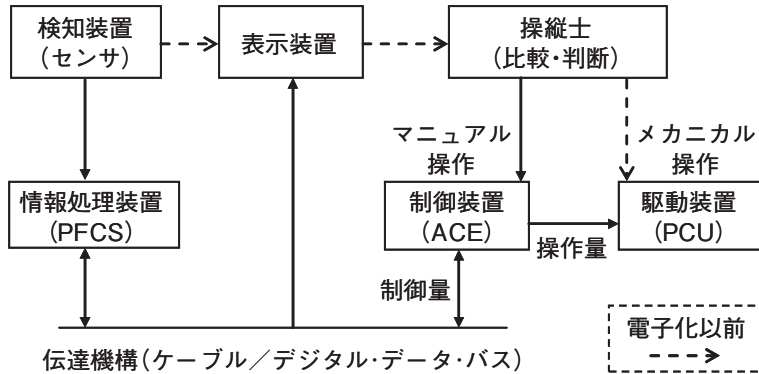
機能別にみると、機内の飛行制御システムは、情報の検知装置（センサ）、それを表示する表示装置、操作を伝える伝達機構（ケーブル）、物理的に飛行制御を行う駆動装置（Power Control Unit : PCU）から構成される。これら個々の装置が電子化されるとともに、新たに情報処理装置（Primary Flight Computer System : PFCS）や駆動装置の制御装置（Actuator Control Electronics : ACE）が導入され、最終的には全体が電子化された。図3に、777をもとにした飛行制御システムの問題を示す。

飛行制御システムの電子化の第1は、検知装置の電子化である。

検知装置は、航空機にとって目や耳の役割を果たす。主に検知装置は、飛行計器（速度や高度、姿勢など）と航法計器（現在の位置や針路、方位など）、エンジン計器（回転数や圧力比、排気ガス温度、燃料流量など）から構成される。従来のアナログ方式では、信号ごとに発信源から受信部に専用の伝送ラインが必要であり、検知装置と表示装置が1対1で対応した。そのため、情報量を増やすと重量も増加した。また、処理が機器ごとに完結するために各機器を統合できず、総合的判断は操縦士に委ねられた⁵⁷⁾。こうした個々のアナログ式検知装置は次第に電子化された。飛行計器の場合はADC（Air Data Computer）が接続され、データを測定・

補正し、アナログデータがデジタルデータに変換された。また、機械部品の介在が減り、精度や応答性が改善された。

図3 電子式飛行制御システムの概念図



出所：青山（2001），39ページ及び久木田（1992）より筆者作成。

第1期後半には、航法が抜本的に変革され、INS（Inertial Navigation System：慣性航法システム）が747で導入された。それまでの天測航法などとは異なり、INSは飛行中の位置を正確に把握し、地上の航行援助施設に頼らない自律航法を実現し、航法士を不要にした⁵⁸⁾。INSでは、検知された加速度が航法計算コンピュータで2回積分されることで飛行距離が求められ、検知した飛行方向に距離を加算すれば出発地からの相対的な現在位置が求められた。その情報を飛行制御コンピュータと連結することで、PMS（Performance Management System：性能管理システム）という初期段階の自動運航が実現された⁵⁹⁾。したがって、航法計器の電子化は、従来の機能の単なる電子化ではなく、新技術の導入として第1期後半に始まった。

INSの技術的課題は、方向の正確な測定であり、そのために、あらゆる向きに対する絶対的な基準点を自分の中にもたせねばならなかった。そこで、地球に対して常に水平を保つジンバル（gimbal）を利用したプラットフォームに、姿勢検知装置と加速度計が乗せられた。姿勢検知装置には、コマ軸の方向が一定であることを応用するジャイロコンパスが用いられた。このプラットフォーム式INSは、機械的で複雑な機構であったために、信頼性に劣り、重量が大きく高価であることが欠点だった⁶⁰⁾。

そこで開発されたのが、ストラップダウン式INSであった。この方式では姿勢検知装置に角速度を検知するレーザージャイロが用いられ、検出された加速度と角速度からコンピュータの高速処理によって仮想水平面への座標変換を行い、自機の正確な移動量と方位を算出した。そのため、ジンバルが不要になり、機械的な可動部分がなくなったことで信頼性が高くなり、小型化も可能になった。この方式は1950年代から考案されていたが、高速処理を実現できるコ

ンピュータの発達が不可欠であったために、ボーイングでは767（82年就航）で実現された。こうして、検知された情報を用いた航法の計算と制御が電子的に処理されるようになった。

飛行制御システムの電子化の第2は、表示装置の電子化である。表示装置は、検知装置に対応して飛行計器、航法計器、エンジン計器という計器群から構成される。航空機の大型化は計器数の増加をもたらし、重要な情報を間違いなく読み取るには、計器数が多く、機種によって配置が異なることが問題であった。そこで、707や727では、複数の計器を統合した集合計器（integrated instrument）が採用され、計器の配列方式が統一された⁶¹⁾。

第2期の中型機767やA310では、多数の計器が6個のCRT（Cathode Ray Tube）ディスプレイ、つまりブラウン管に集約された。統一された配列方式を踏襲して、主要飛行表示盤と航法表示盤、エンジン・警報表示盤が、正副操縦士用に1対ずつ用意され、重要な情報が優先的に電子表示されるようになった。その結果、在来型747の計器132個に対して、電子化された747-400では計器が13個（CRTディスプレイ6個とスタンバイ計器4個、時計2個）に減少した⁶²⁾さらに、777で取り入れられたLCD（Liquid Crystal Display）、つまり液晶ディスプレイは、視認性や明るさ、輝度、薄さ、消費電力でCRTよりも優れ、冷却装置が不要で、磁場の影響を受けないという利点がある。

表示装置の電子化は、運航乗務員編成の削減をもたらした。1960年代からアメリカの航空輸送会社は、従来の3名編成機で2名編成を認めるようFAAに求めていた。それに対してALPA（Air Line Pilots Association：航空乗員組合）は、2名編成運航では安全性などに問題があるとして反対した。この対立は、81年の大統領特別委員会の乗務員編成数特別委員会（President's Task Force on Aircraft Crew Complement）の報告により決着させられた。報告では、「ALPAは3人目（航空機関士）の主な任務を、離着陸時の支援や空路の監視によって2名の操縦士のワークロード（仕事量）を軽減することと考えるが、航空機メーカーといくつかの航空輸送会社は、技術がすでに操縦士のワークロードを軽減していると論じる」と、両者の主張を確認した上で、結論部分で後者の立場を採用し、「航空機システムの観点からは、デジタル・アヴィオニクスやCRTディスプレイの広範な採用により冗長性と信頼性、改善された情報内容が得られるために、757や767、A310の安全水準は、現代機よりも高くなる」と評価し、表示装置の電子化を根拠として航空機関士を排した2名編成運航が認められた⁶³⁾。自動化の社会的制約条件は、技術開発を根拠に、政治的力関係によって取り除かれたのである。

飛行制御システムの電子化の第3は、伝達機構（ケーブル）の電子化である。

電子化以前の飛行制御では、操縦士が計器類を確認して操縦桿やペダルを手動で操作し、ケーブルを介して機械的に力を伝え、油圧装置によって動翼を制御していた。伝達機構の電子化によって、電線として利用するケーブルを介して電子信号が伝えられ、動翼を動かす際にデジタル情報がアナログ情報に変換されて駆動装置を制御するようになった。この方式は、制御情報を電子的に伝達するという意味からFBW（Fly By Wire）と呼ばれる。FBWは、エアバ

スのA320(1988年就航)で初めて本格的に導入され、ボーイングが777(95年就航)で続いた。伝達機構が電子化されると、「時分割多重の手法で同じ伝送ラインを使用し、多くの情報信号」を送れるようになったので⁶⁴⁾、FBWは機体の軽量化にも役立った。

第4に、情報処理装置、すなわちコンピュータが導入され、伝達機構(ケーブル)を介することで飛行制御システムが全体として電子化された。

高性能のコンピュータが利用できるようになると、ハードウェアを共通化できるようになり、ソフトウェアの組み込み方で異なる機能を発揮することも可能になった。各構成要素間でデジタル情報の通信を行い、情報処理装置が飛行制御の判断を自動で行えるようになり、飛行制御システムが全体として電子化・自動化されたのである。

こうして実現された電子的な飛行制御は、自動運航を可能にした。操縦士は、事前に出発地、目的地、ルート、途中の経過地点(ウェイポイント)を飛行計画にもとづいて機内コンピュータに入力しておけば、自動運航できるようになったのである。また、気象状況や燃料消費に伴う航空機の重量変化などを考慮し、燃料消費を抑えた最適ルートの運航も実現されている。自動化の進展により、操縦士にとっては、航空機の操縦よりも、運航の監視・管理が重要になってきたといえる。

電子的な飛行制御の実現により、航空機の設計方式も改良され、重量軽減に役立った。電子化以前の設計では、空力、エンジン、構造の3分野で機体の形状が決定され、飛行制御は基本設計が確立した後に付け加えられた。その時代には、迎角(流れに対する傾き)が増大したら機首が自動的に下がるように、機体重心が空力中心よりも前方に置かれていた。しかし、こうすると釣合い飛行状態で水平尾翼が負の揚力を発生させるので、安定性を確保するために尾翼面積を大きくしなければならなかった。ところが、電子的な飛行制御を前提にした777では、従来よりも重心位置を後退させてわざと不安定な状態をつくり、飛行制御によって運航中に安定性を確保するように設計された。これによって、水平尾翼を小さくして重量や抵抗を軽減することができ、燃費改善や機体製造コストの抑制も可能になった⁶⁵⁾。

以上のように、飛行制御システムの電子化は、個々の装置の電子化と情報処理装置の導入、伝達機構の電子化によって全体が電子化された。こうした自動化の過程で、運航乗務員編成数が削減され、低燃費運航を行う飛行制御が可能になり、トータル・コストの抑制が実現されたのである。

5. おわりに

本稿の課題は、アメリカ民間航空機産業の技術競争力の源泉を明らかにするために、民間航空機の技術的構成と市場構造を技術論的に分析し、航空輸送会社からの社会的要求に応えるために市場構造が変化してきたこと、そして市場の変化に対応した技術開発を航空機メーカーが

行なってきたことを明らかにすることであった。以下に、結論を4点で要約する。

第1に、量的に増大する航空需要に対して、航空機メーカーは市場を4層に区分した。民間航空機の市場構造は、機体の大きさにしたがって小型・中型・大型・超大型機の4層に区分される。この区分は、基本的には胴体断面と機体全長に規定される技術的な区分である。4層の市場は、原型機を元に派生型や発展型が開発されることで、さらに細分化される。航空機市場は、時代的には2期に区分される。1970年代までに第1期の航空機市場が形成され、その頃には最初の原型機の開発から10～20年が経過していた。そのため、4層のそれぞれで後継機や発展型が求められ、80年代以降に第2期の航空機市場が形成された。

第2に、第1期の航空機市場では、航空機の高速度化・大型化の実現により大量輸送の時代がもたらされた。それを技術的に実現したのは、機体メーカーの主翼開発と、エンジンメーカーのジェットエンジン開発であった。第1期前半の高速度化は、軍用のジェットエンジンを民間転用し、空力性能に優れた主翼を開発することで実現された。第1期後半の大型化は、巨大な機体を推進できるだけの大型・大推力エンジンの開発によって実現された。これらを支えた生産技術が、主翼製造に用いられたNCフライス盤や、高温高強度のタービンプレードを製造した精密鋳造法であった。

第1期に燃料コストや騒音問題から超音速機開発が商業的に失敗すると、第2期にはそれ以上の高速度化は求められず、民間航空機は最も経済的なマッハ0.8～0.9で運航されるようになった。機体の大きさも一定の限界に達したために、高速度化・大型化という第1期の設計思想にもとづく航空機開発は一定の到達に達した。

第3に、第2期の航空機市場を形成する航空機には、第1期とは異なる性能が社会的に求められた。航空機の技術発達は、1980年代以降は停滞していると評されることもあるが、その認識は誤っており、第2期には航空機技術の発達方向が変化したのである。その背景には、航空自由化の影響により航空輸送会社にとっての競争環境が変化し、トータル・コストの抑制につながる自動化やエンジン双発化、機体購入価格の値下げが求められたことがある。航空輸送会社にとってのコストの抑制という面では第1期と第2期で連続している。しかし、航空機の設計思想には違いがみられ、第1期には高速度化・大型化であったのに対して、第2期には自動化や双発化が重視されたのである。

また、第2期の航空機に対する要求には地域特性がみられる。小型機の発達は、北米国内線と欧州域内国際線との関係が強く、座席数増減のために長胴化・短胴化を繰り返す派生型が多く生み出された。大型機の発達は、東アジアの域内・域外国際線との関係が強く、航続距離延長型が多く生み出された。

第4に、第2期の自動化・双発化という要求を技術的に実現したのは、飛行制御システムの電子化と大型・大推力エンジンの開発であった。このうち後者は、第1期の延長にある技術開発に加えて、双発機の洋上運航規制緩和という社会的要因によって実現された。一方で自動化

は、運航乗務員規制の緩和という社会的条件に加えて、飛行制御システムの電子化という技術的条件によって実現された。検知装置と表示装置が電子化されるとともに、情報処理装置が導入され、電子的な伝達機構がそれぞれを連結することで、飛行制御システムは全体として電子化された。それによって、軽量化や最適ルート飛行による低燃費運航、2名編成運航が実現されたのである。

したがって、本研究が民間航空機産業研究においてもつ独自性は、2期・4層に区分される市場構造という整理と、その技術的な成立根拠を明らかにしたことである。筆者は本稿の最初に、民間航空機市場がボーイングとエアバスの2社によって実質的に支配されていると指摘した。その技術競争力は、4層に区分される航空機市場を設計し、航空輸送会社の求めに応じた航空機を技術的に提供できたことに求められるのである。

註

- 1) 日本航空 (2009), 20~21, 84~85ページ。日本航空機開発協会 (2008), II-13, IV-3 ページ。旅客数は2008年の ICAO のデータ, 運航機数 (100座席以上, 2003年) と航空輸送会社数 (07年) は日本航空機開発協会のデータである。
- 2) Tyson (1992), p.176 (邦訳, 260ページ)。
- 3) たとえば石川 (1993)。
- 4) 青山編 (2001), 2~4 ページ。
- 5) なお、本稿では100座席以上の民間航空機を扱い、100座席以下の小型機やビジネスジェット、リージョナルジェットの考察は、相対的に市場が区別されるために、本稿の課題としない。
- 6) 「応用機械工学」編集部編 (1981), 79~81, 95~97ページ。
- 7) Irving (1993), pp.210-211 (邦訳, 270ページ)。
- 8) 石川 (1993), 177ページ。
- 9) 機体全長は、空港の能力や、離陸時の引き起こしで胴体下面と地表との間隔が十分に保たれるという構造上の条件に制限される。機体が大きくなれば最大離陸重量も大きくなることから、機体サイズは空港の滑走路長にも制限される。三重隙間の高揚力装置 (フラップ) が採用された中型機727は、滑走路長が1,500m 程度でも運航可能であったために、地方空港を利用する多くの航空輸送会社に導入された。また、超大型機 A380の場合は、翼幅が約80m (261フィート) であり、運航するためには空港の改修が必要である (Newhouse, 2007, p.162)。
- 10) その際には、エンジンの重量が変わるので主翼設計や重量バランスの改修が必要である。
- 11) 1956年に大西洋線の航空旅客数が汽船旅客数を上回った (Bilstein, 2001, p.139)。
- 12) 2000年にアエロスパシアル・マトラ (仏), DASA, CASA が統合されて EADS (European Aeronautic Defence and Space Company) となり、その旅客機部門がエアバスとなった。この他にも第1期前半には、デハビラント (英, 114機のコメット) や BAC (英, 230機の1-11),

シュド (仏, 279機のカラベル) やコンベア (米, 65機の CV880) もジェット機市場に参入したが, いずれも支配的な地位を築けなかった. なお, BAE システムズは, ホーカー・シドレーや BAC などが統合して77年に設立された BAe が前身企業であり, アエロスパシアルはシュドが前身企業である.

- 13) Newhouse (1982), pp.125, 185 (邦訳, 285~286, 419ページ).
- 14) Newhouse (1982), p.186 (邦訳, 421ページ).
- 15) ターボジェットエンジンは, 圧縮機 (コンプレッサー), 燃焼室, タービン, 排気ノズルから構成される. 前方から吸い込んだ空気は, 圧縮機で圧縮され, 燃料噴射により燃焼室で高温高圧ガスとなり, タービンを通過しながら膨張し, 排気ノズルで大気圧まで膨張し, 高速の噴流となって航空機を推進させる. 圧力比とは, 圧縮機入口と出口の空気圧力の比率であり, それが大きいくほどエンジンの熱効率を高め, 燃費改善に役立てられ, 航続性能の改善につながるのである. JT3では, まず, 初期の遠心式圧縮機ではなく, 空気が軸方向に進む軸流式圧縮機が採用され, 圧縮機の段数が合計16段とされた. 基本的には, この段数を増やすほど圧力比が高くなる. 次に, 各段で最適回転数を与えるために, 9段の低圧圧縮機と7段の高圧圧縮機に分ける2軸式とされた. さらに, 圧縮機の素材に鋼材が用いられることで, 当時としては画期的な11~13.8という圧力比が実現された.
- 16) 主翼の前縁が機体の中心線に直角な方向となす角を後退角という.
- 17) 日本航空株式会社広報部 (2002), 「DC-7C 型1番機, 太平洋線に就航」の項. 国土交通省 (1980), 41~42ページ.
- 18) 久世 (2006), 146ページ.
- 19) 松田 (1978), 39~40ページ. 翼の付根から翼端方向には継ぎ目がないが, 安全性の問題から, 前桁から後桁に向かう方向の外板は何枚かに分けられた.
- 20) 青山 (2001), 35~36ページ.
- 21) 国土交通省 (1980), 41~44ページ. "U.S. Gas Turbin Engines," Aviation Week and Space Technologies, March 9, 1970, p.139.
- 22) 「応用機械工学」編集部編 (1981), 20ページ. プロペラエンジンの限界は1基あたり4,000馬力だが, 747が0.87の巡航速度で飛行している時は, 4基で8万8,000馬力であった.
- 23) Gunston (1997), pp.192, 196 (邦訳, 271~272, 278ページ).
- 24) Newhouse (1982), p.174 (邦訳, 394~395ページ). Gunston (2006), pp.200-201 (邦訳, 181~183ページ).
- 25) Newhouse (1982), p.164 (邦訳, 373ページ).
- 26) チタン合金は, 400°Cまでは強度低下が小さく, 耐食性にも優れている.
- 27) 服部・正木 (1995), 24ページ.
- 28) 塩入 (1992), 215ページ.

- 29) 旅客輸送実績は、有償旅客数と各飛行区間の大圏距離（地球表面に描いた大円に沿う最短距離）を乗じた有償旅客キロ（単位：人 km）で示している。2008年の世界の旅客数23億人のうち、国際線9億人、国内線14億人であるが、国際線は国内線よりも距離が長いので、旅客キロでみると両者の数値は逆転している。航空輸送では、運賃やコストが飛行距離によって変わるので、旅客キロが用いられることが多い。なお、「国内線」は各国の国内需要の合計であり、「国際線」は地域内及び地域間の国際線需要である（日本航空編，2009，27ページ）。
- 30) 日本航空機開発協会（2008），II-3～II-8ページ。
- 31) アメリカの航空輸送会社は、グループとしてみると、100席以下のリージョナルジェット機やビジネスジェット機も多数保有している。2005年には、アメリカン航空グループは359機、ユナイテッド航空グループは129機、デルタ航空グループは424機を保有している。（千田他，2006，122～128ページ）。
- 32) 河原（2010），143～146ページ。
- 33) 塩見（2006），169ページ。イースタン航空とパンナム航空は1991年に倒産し、TWAは2001年にアメリカン航空に吸収合併され、2010年1月にはノースウエスト航空がデルタ航空と経営統合した。
- 34) 戸崎（1995），79～84ページ。吉田・高橋（2002），182～183ページ。ANA総合研究所編（2008），51～52ページ。東アジアでも、アメリカ政府と各国がオープンスカイ協定を結ぶことで航空自由化が進んでいる（河原，2010）。
- 35) 1990年代半ばからは大西洋（北米・欧州）路線の航空需要を囲い込むために、2000年代にはアジア諸国をも巻き込んでグローバルアライアンスが形成された。その結果、デルタ航空・ノースウエスト航空とエールフランス・KLMオランダ航空、大韓航空、中国南方航空などが加盟するスカイチーム、ユナイテッド航空・コンチネンタル航空、ルフトハンザ、シンガポール航空・タイ国際航空・全日本空輸・中国国際航空などが加盟するスターアライアンス、アメリカン航空、ブリティッシュ・エアウェイズ、キャセイ・パシフィック航空・カンタス航空・日本航空などが加盟するワンワールドが形成された。
- 36) 千田他（2006），122～128ページ。
- 37) 千田他（2004），5ページ。
- 38) 航空輸送には派生需要という特徴があり、移動そのものが目的ではなく、商品流通や人の交流、観光などの他の目的を達成する際に派生して需要が発生する。表2に示すように、アジア太平洋の航空貨物需要は、全体に占める割合が旅客輸送の場合よりも大きく、1990年に北米を、93年に欧州を追い抜いてからは、世界最大の貨物需要を抱えている。ただし、世界全体では、旅客輸送が輸送量の7～8割、営業収支の8～9割を占めており、航空機開発では既存の旅客機を転用して貨物機を開発することが多いので、本稿では基本的に旅客機を対象に検討している（日本航空編，2009，21，68～69ページ）。

- 39) 空港の利用制限も、東アジアで大型機の保有が多い理由として指摘できる。北東アジアでは、1960～70年代の日本の大阪国際空港（伊丹空港）における騒音問題や、成田国際空港や東京国際空港（羽田空港）のような混雑空港で発着枠が制限されてきた。大型機は、運航頻度が限られる空港でも、少ない離着陸回数で多くの輸送を行うことができる。そのため、日本の空港を多く使用する韓国企業でも、多くの大型機材が保有されている。日本の特殊的要因として、日米貿易不均衡解消を目的としたアメリカからの政治的圧力により、高額の大型機材購入が促進されたという面もある。
- 40) Newhouse (1982), p.12 (邦訳, 36ページ). 日本航空宇宙工業会 (2007), 32ページ.
- 41) 青木 (2004), 71ページ.
- 42) Newhouse (2007), p.125. ボーイングは、1994年頃からエアバスに価格競争を挑み、平均値下げ幅をそれ以前の10%から18～20%に上げ、時には30%にまでした。
- 43) MITの研究によれば、新型機が損益分岐点に達するには、400～500機を10～14年で販売しなければならず、タイソンによれば、少なくとも8年間（開発期間を含めると12年間）かけて約600機を販売しなければならない (Dertouzos, 1989, p.203 [邦訳, 283ページ] および Tyson, 1992, p.165 [邦訳, 243～244ページ])。)
- 44) 本稿で在来型747と呼ぶ3名編成の747は、航空業界ではクラシック・ジャンボとも呼ばれている。なお、2004年4月に開発が始まった767の後継中型機787やA380は、現時点では十分に分析できるだけの販売がなされていないので、本稿ではとりあえず第2期に含めている。
- 45) Newhouse (1982), pp.160, 165-166 (邦訳, 363, 375～376ページ)。
- 46) Newhouse (1982), pp.176-182 (邦訳, 398～412ページ). Newhouse (2007), p.x.
- 47) Newhouse (1982), pp.96-99, 196 (邦訳, 213～220, 445ページ). ベトナム戦争期にDC-8とDC-9の大量受注を受けたダグラスは、資材や熟練工が軍事優先とされたために納期を守ることができずに経営状態を悪化させ、1967年に戦闘機メーカーのマクダネル (The McDonnell Aircraft Corporation) と合併した (Newhouse, 1982, p.134 [邦訳, 303～305])。DC-10の後継機MD-11は、3発機であったことに加え、深刻な事故の発生により2000年代にはほとんど旅客輸送に使用されていない。
- 48) エアバスは、150億ドルの政府貸付を受け取ってきたと批判されている (Lynn, 1995, pp.167-168 [邦訳, 186～187ページ])。それに対してEU側は、1992年以来、ボーイングが連邦政府（研究助成）と国際共同開発相手国の日本政府から230億ドルの助成を受けたとして批判している (Newhouse, 2007, p.53)。
- 49) Gunston (1997), p.196 (邦訳, 278ページ). Newhouse (1982), p.192 (邦訳, 436ページ)。
- 50) 米谷 (2002), 23ページ. 桜井 (1994), 62ページ. ETOPSはExtended Range Operation with Twin-engine Airplanesと表現されることもある。戦前のアメリカでは100マイル・ルールが存在し、飛行予定の航空路上では、100マイル（約160km）以内に着陸可能な場所がなければ

ばいけなかった。

- 51) ICAO (2002) 及び各年度版より。なお、このデータは自主申告にもとづく ICAO の統計であり、申告されなかった航空輸送会社の運航は含まれていない。
- 52) 1986年11月には ICAO (国際民間航空機関) が第6 附属書「航空機の運航」を改訂し、フランス (DGAC, CTC20) やイギリス (CAA, CAP513) も追随し、日本 (運輸省航空局) でも89年6月に120分ルールが定められた (中田, 1999, 9 ページ)。
- 53) ETOPS 運航が認められるには、一定の運航実績が必要であり、それは機体 (Design Approval) と航空輸送会社 (Operational Approval) に関する要件を満たさねばならない。つまり、当該機のエンジンの信頼性が、エンジン飛行時間 (= 飛行時間×装着エンジン数) や世界平均エンジン飛行中停止率 (IFSDR: In-Flight Shut Down Rate) によって実証されることと、当該機による航空輸送会社の運航経験や運航・整備体制が実証されることによって ETOPS 運航が認められていた。777では、運航前に条件をクリアするため、機体要件は ETOPS 運航経験の教訓を設計・開発段階で組み込んで設計し、エンジンの作動試験や飛行試験を追加で行うことで、航空輸送会社要件は、他の型式の飛行機の ETOPS 運航実績を代用することで、ETOPS 取得期間を短縮 (Accelerated ETOPS) させた。
- 54) 国土交通省 (2009) 及び国土交通省 (2000)。
- 55) 原田 (1998), 41ページ。
- 56) 青山 (2001), 35~37ページ。
- 57) 久木田 (1992), 50ページ。久木田 (1984), 8 ページ。
- 58) 戦後のプロペラ機の時代には、長距離洋上運航を行う民間航空機の運航乗務員編成は5名が標準とされた。機長と副操縦士に加えて、航空機関士 (flight engineer), 航法士 (navigator), 通信士 (radio operator) が基本的な編成であった。このうち、通信技術の発達により1950年代半ばに通信士が不要になり、INS が導入されると航法士が不要になった。
- 59) 操縦士は、飛行前に操縦室内の入力装置 (CDU: Control Display Unit) で電波灯台 (VOR/DME) など途中経路の位置を入力した。初期の自動運航には入力量に制限があった。
- 60) MIT が開発し、1953年に B-29でテストされた航空機用 INS は1,260kg もあった (現在は20kg程度) (青山, 2001, 46ページ)。プラットフォーム式 INS は高価であり、80年代前半には、約6,000機の民間ジェット機の約80%は INS を装備していなかった (相原, 1984, 28ページ)。
- 61) 配列方式はベーシック T 方式に統一された。正副操縦士の正面に、人工水平儀などの姿勢指示計器を中心に、速度計を左、高度計を右に、そして方向指示計器を下に置かれた。
- 62) 月刊エアライン (1997), 52ページ。必要な情報だけを知らせ、必要のないときには表示しないという「ダーク・コックピット」の考え方を採用したことで、ライト類も555個から171個に激減した。スイッチは284個から181個、チェックリストは98項目から38項目に減らされた。CRT ディスプレイは A320や A310, 767, 747-400にも用いられた。

- 63) The President's Task Force (1981), pp.8, 33.
- 64) 久木田 (1984), 8 ページ.
- 65) 越智・金井 (1996), 458~459ページ. 飛行時に機内燃料を移送することで, 重心位置を適切な範囲に制御することもできる.

参考文献

- Bilstein, Roger E. (2001) *The Enterprise of Flight : the American aviation and aerospace industry*, Washington, D.C. : Smithsonian Institution Press.
- Dertouzos, Michael L., et al. (1989) *Made in America : regaining the productive edge*, Cambridge, Mass. : MIT Press (依田直也訳『Made in America アメリカ再生のための米日欧産業比較』草思社, 1990年).
- Gunston, Bill (2006) *World encyclopaedia of aero engines : from the Wright brothers to the present day*, 5th ed., the United Kingdom, Sutton Publishing Limited (見森昭・川村忠男訳『世界の航空エンジン (第3版)』グランプリ出版, 1996年).
- (1997) *The development of Jet And Turbine Aero Engines*, Patrick Stephens Limited (高井岩男監修・訳『ジェット&ガスタービン・エンジン その技術と変遷』酣燈社 (別冊航空情報), 1997年).
- ICAO, International Civil Aviation Organization (2002), *Traffic by flight stage*, International Civil Aviation Organization. 及び各年度版.
- Irving, Clive (1993) *Wide-body : the triumph of the 747*, New York : W. Morrow (手島尚訳『ボーイング747を創った男たち——ワイドボディの奇跡』講談社, 2000年).
- Lynn, Matthew (1995) *Birds of prey : Boeing vs. Airbus : a battle for the skies*, London : William Heinemann (清谷信一監訳, 平岡護, ユール洋子訳『ボーイング vs エアバス : 旅客機メーカーの栄光と挫折』アリアドネ企画, 2000年).
- Newhouse, John (2007) *Boeing versus Airbus : the inside story of the greatest international competition in business*, New York : A.A. Knopf.
- (1982) *The sporty game*, New York : Knopf (航空機産業研究グループ訳『スポーティーゲーム : 国際ビジネス戦争の内幕』学生社, 1988年).
- The President's Task Force on Aircraft Crew Complement, John L. McClucas, Chairman (1981) *Report of the President's Task Force on Aircraft Crew Complement*, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce.
- Tyson, Laura D'Andrea (1992) *Who's Bashing Whom? : Trade Conflict in High-technology Industries*, Washington, DC : Institute for International Economics (竹中平蔵監訳, 阿部司訳『誰が誰を叩いているのか : 戦略的管理貿易は, アメリカの正しい選択?』ダイヤモンド社,

- 1993年).
- 相原哲夫 (1984)「多重センサ (特集 輸送機における飛行制御とセンサ)」『日本航空宇宙学会誌』第32巻第369号, 10月, 567~573ページ.
- 青木謙知 (2004)『ボーイング vs エアバス: 2大旅客機メーカーの仁義なき戦い』イカロス出版.
——— (2000)『旅客機年鑑2000-2001』イカロス出版.
- 青山幹雄編, 青山幹雄・猪塚貞行・菅野照美・斎藤謙一郎著 (2001)『航空とIT技術』共立出版.
- ANA 総合研究所編 (2008)『航空産業入門: オープンスカイ政策からマイレージの仕組みまで』東洋経済新報社.
- 石川潤一 (1993)『旅客機発達物語: 民間旅客機のルーツから最新鋭機まで』グリーンアロー出版社.
- 「応用機械工学」編集部編 (1981)『航空機と設計技術』大河出版.
- 越智徳昌・金井喜美雄 (1996)「アクティブ飛行制御技術とアドバンスト制御」『計測と制御』第35巻第6号, 457~466ページ.
- 河原葵 (2010)「アメリカのオープンスカイ戦略と日本」『経済』第176号, 5月, 143~154ページ.
- 久木田実守 (1992)「次世代航空機の制御技術の動向」『航海』第112号, 6月25日, 49~59ページ.
——— (1984)「輸送機の飛行制御とセンサ (特集: 輸送機における飛行制御とセンサ)」『日本航空宇宙学会誌』第32巻第369号, 10月, 544~552ページ.
- 久世紳二 (2006)『形とスピードで見る旅客機の開発史: ライト以前から超大型機・超音速機まで』日本航空技術協.
- 月刊エアライン (1997)『ザ・コックピット』イカロス出版.
- 国土交通省 (運輸省) 航空局監修 (2009)『数字でみる航空』航空振興財団.
- 塩入淳平 (1992)「エンジン材料の研究とその進歩」『日本航空宇宙学会誌』第40巻第459号, 4月, 214~219ページ.
- 塩見英治 (2006)『米国航空政策の研究: 規制政策と規制緩和の展開』文眞堂.
- 千田奈津子・石倉智樹・杉村佳寿・石井正樹 (2006)「エアラインの保有航空機材特性」『国土技術政策総合研究所資料』第315号, 6月, 1~49ページ.
- 千田奈津子・杉村佳寿・石倉智樹・石井正樹・深澤清尊 (2004)「80年代以降の欧州航空ネットワークの変遷に関する分析」『国土技術政策総合研究所資料』第190号, 9月, 1~36ページ.
- 戸崎肇 (1995)『航空の規制緩和』勁草書房.
- 「777開発の歩み」編纂委員会, 株式会社インター・イメージ編集 (2003)『777開発の歩み』民間航空機株式会社.
- 日本航空宇宙工業会 (2007)『平成19年版 世界の航空宇宙工業』日本航空宇宙工業会.
- 日本航空株式会社広報部デジタルアーカイブ・プロジェクト編纂 (2002)『JAL グループ50年の航跡』日本航空.
- 日本航空機開発協会 (2008)『平成19年度 民間航空機関連データ集』(<http://www.jadc.or.jp/>)

- [jadccdata.htm](#), 2009年8月11日).
- 日本航空統計調査室編（2009）『航空統計要覧 2009年度』日本航空協会.
—————（2002）『航空統計要覧 1995-96年度』日本航空協会.
—————（1997）『航空統計要覧 1995-96年度』日本航空協会.
—————（1987）『航空統計要覧 1986-87年度』日本航空協会.
—————（1979）『航空統計要覧 1978-79年度』日本航空協会.
- 服部博・正木彰樹（1995）「航空・宇宙エンジン用材料開発の動向」『日本航空宇宙学会誌』第43巻第495号，4月，204～212 ページ.
- 原田哲夫（1998）「エアバス社の現状と将来展望」『航空情報』8月，36～47ページ.
- 松田均（1978）「ボーイングの革新技術」『月刊航空ジャーナル』62巻（臨時増刊ボーイングエアライナー），5月，26～42ページ.
- 山崎文徳（2009）「アメリカ民間航空機産業における航空機技術の新たな展開：1970年代以降のコスト抑制要求と機体メーカーの開発・製造」『立命館経営学』第48巻第4号，11月，217～244 ページ.
- 吉田茂・高橋望（2002）『新版 国際交通論』世界思想社.
- 吉中司（1994）『エンジンはジェットだ！』オーム社.

Changes in the Market Structure of Commercial Aircraft and Technological Development

Fuminori Yamazaki *

Abstract

The technical construction of commercial aircraft and the market structure of the industry are analyzed from the angle of the economics and history of technology in this paper. The market structure has changed to respond to social requests from airlines. On the other hand, aircraft manufacturers have pursued technical development which corresponds to a change in the market.

First, the market structure of the commercial aircraft is divided into four layers – the small, the medium, the large, and the extraordinarily large firms. And the market is divided into two periods, the first period lasted until the 1970s and the second period started from the 1980s. Second, mass transportation was caused by the speed-up and enlargement of the first period. Speed-up was achieved by the development of the jet engine and the sweptback wing. Enlargement was achieved by the large engine which promotes a huge fuselage. NC Milling Machine was used for the production of sweptback wings. Precision casting turbine blades with high strength under high temperature were used for large engines. Third, a different airplane performance was desired socially in the second period. The competitive environment was changed by the liberalization of air transportation, and airlines requested restraints on the total cost to the aircraft manufacturers. The second period's remarkable technical development produced larger engines and the computerization of flight control. Sensors and indicators were computerized, computers were introduced, and electric wires were used to connect them (Fly by Wire). The Flight Control System was computerized overall. Fuel-efficient navigation by weight saving and the most suitable route flight and a two-man cockpit crew were achieved.

Keywords

jet engine, flight control, liberalization of air transportation, Boeing, Airbus

* Correspondence to : Fuminori Yamazaki
Lecturer / Faculty of Business Administration, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu-city, Shiga 525-8577 JAPAN
E-mail : yamazakif@hotmail.com