

論 説

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 —

山 崎 文 徳

目 次

- I. はじめに
- II. 民間航空機の階層的市場構造と産業特性
 - 1. 民間航空機の階層的市場構造
 - 2. 民間航空機の産業特性
- III. 航空輸送会社の要求と航空機技術の展開方向
 - 1. 航空輸送会社におけるトータルのコスト抑制要求
 - 2. 航空機技術の新たな展開方向
- IV. 機体メーカーにおける航空機開発・製造の展開
 - 1. 中核技術としての主翼とアメリカの風洞設備
 - 2. 機体の軽量化による運航コストの抑制
 - (1) 新素材開発と複合材料
 - (2) 製造段階における NC 化と一体化構造部品
 - 3. 開発段階におけるコンピュータ利用と開発・製造コストの抑制
 - (1) コンピュータによる設計情報の処理
 - (2) 3 次元 CAD による設計変更件数の削減
- V. おわりに

I. は じ め に

アメリカ航空宇宙産業は、戦争・軍事の物的手段を供給する一方で、人や物の交流、物流を担う民間用の輸送手段を供給し、社会と産業の発展に貢献してきた。アメリカ国内では、2006 年の航空宇宙産業の雇用者数は約 38 万人と自動車産業約 93 万人の 4 割に相当し、貿易収支は自動車が約 1285 億ドルの赤字に対し、航空機は約 471 億ドルの黒字である¹⁾。ソ連が崩壊し、軍事力の存在意義が改めて問われる一方で、民間航空機産業はアメリカ資本主義における重要性を増している。

アメリカ民間航空機産業は、世界市場で圧倒的な国際競争力をもつ。100 座席以上の民間航空機市場では、実質的にボーイングとエアバスが世界の 2 大メーカーであり、ジェットエンジンではアメリカのプラット&ホイットニーと GE、イギリスのロールス・ロイスが世界の 3 大メーカーである。航空機用の制御機器でも、アメリカのハネウェルやロックウェル・コリンズ、パーカー・ハニフィンなどが有力なメーカーである。

1) The Bureau of the Census (2009), pp.617, 794. Table967 と 1267 を参照した。2006 年の輸出額は、民間機が約 644 億ドル、自動車が約 835 億ドルである。

民間航空機産業の競争力に関する従来の研究は、次のように概括できる。国際競争の面から、Newhouse（1982）や Lynn（1995）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を強調した。Dertouzos（1989）は、1980 年代にアメリカの国際競争力が問題になる中で、民間航空機産業は競争力を維持する数少ない産業の 1 つと評価したが、エアバスからの挑戦には警告を発した。クリントン政権で経済諮問委員長を務めた Tyson（1992）は、ハイテク産業保護の視点から、国外からは政府支援を受けたエアバスに挑戦され、国内では軍事調達の削減に苦しむアメリカ航空機産業に対し、産業政策（ターゲティング・ポリシー）をとることを主張した。Newhouse（2007）は、90 年代以降のボーイングとエアバスの国際競争を、多面的に検討している。技術の面からは、Pattillo（1998）や Bilstein（2001）が、航空宇宙産業の軍事、民生、宇宙の部門ごとに機体の技術的変遷を描いている。企業戦略の面から、徳田（1999）は、ボーイングが戦略的提携を通じてコアコンピタンスである価格競争力を獲得したと主張する。青島（1998）は、3 次元 CAD の導入により、ボーイング 777 では日米の開発プロセスが両立できたと言う。サプライヤー構造の面からは、溝田（2005）が、プライム企業・主供給メーカー・部品供給メーカーという多層的なピラミッド構造によって機体やエンジンを生産し、補修部品をグローバル・ネットワークで供給できることがボーイングの競争力に結びついていると指摘する。

以上の先行研究に対し、本稿では、アメリカ民間航空機産業の競争力の源泉を、技術史・技術論的視点から明らかにする。第Ⅱ節では、航空機の技術構成と階層的な産業構造を技術論的に分析し、第Ⅲ節以下で、どのような要求によって航空機産業が成立、発展してきたのかを技術史的に分析する。対象とする時期は、主に 1970 年代以降である。その理由は、航空機技術が、その時期を前後して新たな展開を示し、今日に至るからである。航空機技術の新たな展開を求めたのは航空輸送会社であり、要求に応えたのはボーイングなどの機体メーカーであった。ボーイングは、機体メーカーにとって重要な主翼開発で技術的優位を保ちながら、20 世紀後半に発達した新素材技術やコンピュータ技術、通信技術に支えられ、それらを取り入れることでコスト抑制要求に応え、技術競争力を発揮してきたのである。

なお、本稿では 100 座席以上の民間航空機を扱い、相対的に市場が区別される 100 座席以下の小型機や企業が使用するビジネスジェット、地域間輸送用のリージョナルジェットの考察は割愛する。また、エンジンメーカーや制御機器メーカーにおける技術の展開は別稿で扱う。

Ⅱ．民間航空機の階層的市場構造と産業特性

日本では、自動車や家電の産業研究が多いが、民間航空機産業はそれらと著しく性格が異なる。そのため、民間航空機の独特な市場構造を示し、そこにみられる産業特性を整理する。

1. 民間航空機の階層的市場構造

民間航空機市場は、表 1 のように階層的に形成されてきた。基本的には座席と航続距離ごとに大きく 4 階層の市場が構成されているが、路線ごとの細かな要求を満たすために、原型機を元に座席数や航続距離を増減させた派生型を各メーカーが提供することで、4 階層の市場の中にも階層性がみられる。座席数と航続距離以外にも、航空輸送会社の要求は、湿度の高い路線や砂漠での運航、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。また、開発から 10 ～ 20 年が経過した旧型機を更新する後継機や、原型機の電子機器やエンジン、主翼を改良した発展型が市場ごとに提供される。

90 ～ 200 席クラスの短距離・小型航空機市場は 1960 年代にジェット化され、80 年代以降は旧型機を更新需要に応じるためマクダネル・ダグラスが DC-9 の発展型 MD-80 シリーズを、ボーイングが 737-100/200 の発展型 737-300/400/500/600/700/800/900 を開発してきた。エアバスも A320 を投入して市場に参入し、派生型の A318/319/321 を順次開発した。アメリカ航空規制緩和後の小型航空機需要の拡大により、この市場では多くの派生型・発展型が開発されてきたのである。座席数は、胴体の断面直径と機首方向への長さで決まり、既存機体を元にした機体の長胴化・短胴化（ストレッチ）によって比較的安価に座席数を増減できる。

150 ～ 250 席クラスの中距離・中型航空機市場は、最初にジェット化された市場である。戦後しばらくはダグラスとロッキードが供給するプロペラ機が主流だったが、ジェット化によりボーイング 707 とダグラス DC-8 という競合関係が形成された。1974 年には、エアバスが民間航空機市場に参入し、ヨーロッパ国内路線向けの双発ワイドボディ（広胴）機 A300 を開発した。70 年代には初期の機体の更新時期を迎えていたが、石油ショックが重なり新型機開発が延期され、80 年代前半になってボーイングは客室内が単通路の 757 と 2 通路の 767 を、エアバスは A310 を、いずれも 2 名の運航乗務員編成（以下、2 名編成）でエンジン 2 発の双発機として就航させた。2004 年 4 月に開発が始まった 767 の後継機 787 は、都市間の直行便を想定し、中型ではあるが長距離を飛行できる低燃費機体であり、2009 年 6 月時点で 850 機の受注を得ている。しかし、当初は 2008 年に就航予定であったが、度重なる遅延により 2009 年 9 月の段階でも納入の予定が立っていない。対抗するエアバスは、2006 年に A350XWB の開発を始めた。

小型・中型の航空機市場では既存のプロペラ機がジェット化されたのに対し、250 席以上の大型・超大型航空機市場は、ジェット機の便数増大と空港や航空路の混雑により、1970 年代に創出された²⁾。パンナム航空の要求で開発された初のワイドボディ機ボーイング 747 は、座席数 400 席以上、航続距離 10,000km 以上という長距離・超大型機市場を作り出した。80 年

2) 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）。

代には、最新の電子技術を取り入れて大幅に改修された発展型 747-400 が、2 名編成機として就航した。2007 年にはエアバスが 747 より大型の A380 を就航させ、対するボーイングは 747-400 の更新需要も見込んで、2005 年に 747-400 の発展型 747-8 の開発を始めた。

250 ～ 400 席クラスの中長距離・大型航空機市場は、アメリカン航空の要求によりマクダネル・ダグラス DC-10 とロッキード L-1011 がエンジン 3 発機として開発され、1970 年代前半に形成された。しかし、80 年代に双発機の洋上飛行制限が緩和されると、2 名編成機となった発展型 A300-600 や航続距離延長型 767-300 が、本来は中型機にも関わらず、3 発機より整備コストがかからない双発機の利点を生かして大型機市場を侵食した。最終的には、エンジン開発の遅れの影響もあってロッキードが民間航空機産業から撤退し、マクダネル・ダグラスは 73 年と 79 年の DC-10 墜落事故の影響もありシェアを失い、湾岸戦争後の不況に軍事部門の不振が重なり、97 年にボーイングに吸収合併された。90 年代には、ボーイングが、747 と 767-300 の間の市場を埋めるために 777 を開発し、エアバスは、エンジン基数の違いを除けば胴体断面や主翼が共通の A330 と A340 を開発した。A330 と 777 は 2 名編成双発機として大型機市場に投入された。

航空機メーカーは、航空輸送会社の要求に対して、大きく 4 つに分かれた階層的市場のそれぞれで、条件の異なる多数の路線に対応するため、原型機の派生型・発展型、後継機を次々に投入し、競争してきたのである。

2. 民間航空機の産業特性

航空輸送会社に航空機を販売するため、航空機メーカーは独特の産業構造を形成してきた。

第 1 に、民間航空機産業は、経営や技術の面で軍用機産業や宇宙産業との関係が深く、それらはしばしば航空宇宙産業と一括される。2004 年のアメリカ航空宇宙産業の総販売額は 1051 億ドルであり、内訳は民間機部門 21%、軍用機部門 30%、ミサイル部門 9%、宇宙部門 23% である³⁾。個別企業のレベルでも、航空機やジェットエンジン、ロケット、衛星などを製造する企業は、軍事部門と民生部門を併せ持つものも多く、両者を同じ工場内で製造することもある。2005 年のボーイングの総販売額に占める軍事比率は 51%（兵器販売額 280 億ドル）、ジェットエンジンメーカーのプラット・ホイットニーは 35%（同 33 億ドル）、GE は 2%（同 30 億ドル）である⁴⁾。

航空宇宙産業と一括されることで意味するのは、軍事部門では国家が顧客になり、そこでの技術開発が民生部門より先行することもあるれば、民生部門の足かせにもなるということである。

3) AIA (2006), p.12.

4) SIPRI (2007), pp.376-382. なお、日本の三菱重工業は 9%（兵器販売額 22 億ドル）、川崎重工業が 10%（同 12 億ドル）、三菱電機が 3%（同 10 億ドル）である。

表1 年代別にみた座席数・航続距離ごとの民間航空機市場の構造

	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
長距離・ 超大型航空機 〔400席～〕 〔12,000～ 16,000km〕			747(70)4発/3名 〔724機, 110社〕	747-400(89)4発/2名 〔692機～〕		A380(07)4発/2名 〔200機受注〕 747-8(未)4発/2名
中長距離・ 大型航空機 〔250～400席〕 〔9,500～ 16,000km〕			DC-10(71)3発/3名 〔446機, 51社〕 L-1101(72)3発/3名 〔250機〕		MD-11(90)3発/2名 〔200機〕 777(95)2発/2名 〔792機～〕 A330(94)2発/2名 〔625機～〕 A340(93)4発/2名 〔366機～〕	
中距離・ 中型航空機 〔150～250席〕 〔5,500～ 12,000km〕	707(58)4発/4名 〔1,010機, 70社〕 DC-8(59)4発/4名 〔556機, 39社〕	727(64)3発/3名 〔1,831機, 101社〕	A300(74)2発/3名 〔249機〕	757(83)2発/2名 〔1,049機〕 767(82)2発/2名 〔975機～〕 A310(84)2発/2名 〔255機〕 A300-600(84)2発/2名 〔312機〕		787(未)2発/2名 〔850機受注〕 A350XWB(未) 2発/2名 〔493機受注〕
短距離・ 小型航空機 〔90～200席〕 〔2,500～ 6,000km〕		737(68)2発/2名 〔1,144機, 124社〕 DC-9(65)2発/2名 〔976機, 59社〕		737-300(84)2発/2名 〔1,988機, 152社〕 MD-80(80)2発/2名 〔1,191機〕 A320(88)2発/2名 〔3,931機～〕	737-700(97)2発/2名 〔2,948機～〕 717(99)2発/2名 〔155機〕 MD-90(95)2発/2名 〔116機〕	

注1：表記は〔名称（就航年）搭載エンジン数／運航乗務員編成数〕を示し、その下に2009年6月末現在の生産（受注）機数と発注社数を示す。「～」は生産継続中を示す。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を示す。

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2009年9月現在も未就航である。

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。

出所：青木（2000）。日本航空機開発協会（2008）, VII-29ページ。生産・受注機数（2009年6月末）は日本航空機開発協会（2009）より作成。

似かよった製品を製造する場合や、生産技術や部品、素材という共通性が高いレベルでは、軍事目的で得られた補助金や機械設備が、民間機の開発・製造に利用されることもあれば、その逆もある。民間機部門で赤字が出て、軍事部門で黒字を出すこともあれば、ベトナム戦争後やソ連崩壊後のように軍事調達費が劇的に削減されると、軍事部門が企業経営の足かせになることもある。企業の限られた資金、人材、設備を軍事部門に奪われることで、民間機部門の成長が妨げられることもある。

第2に、民間航空機産業は、自動車の部品点数3万点に対し、300万点に及ぶ部品を供給する広範な裾野産業に支えられた総合的な加工組立産業であり、最終組立工程では、ベルトコンベアを用いた移動組立方式による大量生産ではなく、自動車などに比べて少量が静止組立方式に近い方法で生産される。航空機は、主に機体構造・エンジン・制御機器から構成されるため、製造企業は大きく機体メーカー・エンジンメーカー・制御機器メーカーに分けられ、基本的に

機体メーカーが最終組立を担当する。

部品点数の多さからもわかるように、機体・エンジン・制御機器メーカーは、それぞれ何層にもわたる数多くのサプライヤーから部品を調達する。サプライヤーには、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企業や、素材・原材料を供給する企業が含まれ、必ずしも航空機メーカーのみと取り引きしているわけではない。そのため、他分野で発達した技術が取り入れられたり、航空機分野で発達した技術が他分野に波及することがある。

第 3 に、民間航空機産業は、開発に長い時間と巨額の開発費を投じ、販売後 8 ～ 14 年をかけて 400 ～ 600 機を販売しなければ巨額の赤字を抱え、それをクリアすれば販売するだけ利益が出るハイリスク・ハイリターンの産業である。

開発面では、300 万点の部品を統合することに加え、1 号機を組み立てて飛行試験をする前に、詳細な設計と各種実験を繰り返すために、時間と資金が莫大にかかる。ボーイング 777-200 は、約 5 年で 40 ～ 50 億ドル (4800 ～ 6000 億円) の開発費がかかり、1 機当たり 1 億 1300 万ドル (136 億円) の価格である。エアバス A380 は、約 7 年で 107 億ドル (1 兆 2840 億円) がかり、1 機当たり 2 億ドル (240 億円) の価格である⁵⁾。

販売面では、民間航空機産業の顧客は、一般の消費者ではなく、航空輸送会社という少数に限られたユーザーである。2007 年現在、世界の航空輸送会社数は 729 (不定期運航を含めると 2,562) であり、北米 112 (15.4%)、アジア・太平洋 168 (23.0%)、欧州 183 (25.1%) である。また、世界の運航機数 15,284 機のうち、北米 5,142 (33.6%)、アジア・太平洋 3,542 (23.2%)、欧州 3,602 (23.6%) である⁶⁾。新規参入メーカーは、国内市場だけで 400 ～ 600 機の販売は望めないため、国内市場では実績のある外国企業との競争を強いられ、世界市場でも外国企業との競争に勝たなければ利益を得られない。そのため、100 座席以上の民間航空機は、実質的にボーイングとエアバスにより世界市場が独占されている⁷⁾。

1970 年代以降の機体やエンジン、制御機器の国際共同開発の目的には、得意な技術の補完だけでなく、開発費およびリスクの分散や、共同開発相手国の市場確保、優秀なサプライヤーをライバル企業に奪われないように下請化することも含まれる。

第 4 に、民間航空機メーカーが収益を増大させるには、補修部品の供給・交換やメンテナンスを行うプロダクト・サポート体制が重要である。

5) 日本航空機開発協会 (2008), VII -30 ページ。777 の開発費は 90 年, A380 は 2000 年時点の見積額である。価格は 2008 年 1 月時点のものだが、必ずしも固定的でない。なお、777 の開発費は 1990 年の見積もりでは 40 億ドルであったが、実際には 140 億ドル近くになった (Newhouse, 2007, p.106)。

6) 日本航空機開発協会 (2008), II -15, IV -3 ページ。

7) MIT 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])。超大型機市場を独占する 747 は、1 機 30 ～ 40 億円の粗利をあげるともいわれる (谷川他, 2009, 70 ページ)。

プロダクト・サポートは、まず航空機開発にとって重要である。航空機が就航すれば開発が終わるのではなく、就航後も航空輸送会社の要求や苦情に応えるために改良・改修が続く。とりわけ、定期運航便の遅延・欠航は収益に直結するために定時出発率の高い機体が望まれることから、就航後は初期不良をなるべく速やかに改善しなければならない。

機体メーカーにとってプロダクト・サポートは、数十社の航空輸送会社との取引で損益分岐点を超えて航空機を販売し、さらには当該機だけでなく派生型・発展型や後継機、別の階層の航空機を販売するために重要である。プロダクト・サポートによって、航空機の運航を保証し、顧客の信頼を獲得し、長期的取引が可能になるのである。プロダクト・サポートは顧客との接点でもあり、航空機への要望・改修の窓口であると同時に、新開発機への要求を知るマーケット・リサーチにも役立つ。ボーイングは、世界 8 ヶ所の部品センターに 40 万点の部品を用意し、緊急時には補修部品を受注後 2 時間以内に出荷するサポート体制を整えている⁸⁾。

部品交換率の高い部位を担当するメーカーにとっては、補修部品交換やメンテナンスが収益に直結するため、プロダクト・サポート自体が収益源になる。エンジンメーカーでは、新規に販売するエンジンよりも補修部品販売やメンテナンスが収益の多くを占めることも珍しくない。

Ⅲ. 航空輸送会社の要求と航空機技術の展開方向

前節で概観したように、階層的な市場構造は 1970 年代の半ばまでに形成された。航空機技術に着目すると、その展開方向に変化がみられるのも 70 年代である。以下では、航空輸送会社の要求の変化と、それに応じた航空機技術の新たな展開について述べる。

1. 航空輸送会社におけるトータルのコスト抑制要求

1970 年代までは、航空輸送会社からはより速く、より大量に、より遠くまで輸送できる航空機が求められたが、70 年代以降は航空輸送会社にとってのコスト抑制が主な要求になった。ただし、その重点は時代によって異なる。

第 1 に、1970 年代には、2 度の石油ショックで燃料費が高騰し、その影響を抑えることが求められた。燃料価格は、73 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⁹⁾。そのため、80 年

8) 西頭 (2000), 47 ページ。

9) Newhouse (1982), p.12 (邦訳, 36 ページ)。日本航空宇宙工業会 (2007), 32 ページ。大手航空輸送会社では、営業費用に占める燃料費の割合は、1973 年に 14.2%, 81 年に 30.2% だった (木村, 1985, 138 ページ)。

代前半に開発された767には、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、同じ距離を飛行しても燃料消費量が少なくて済むためである。なお、90年代末まで安定していた燃料価格は、米軍によるアフガニスタン（2001年）とイラク（03年）への軍事攻撃後に急騰し、2005年には1ガロン200セントを超えた。そのため、再び低燃費が求められ、787は低燃費機体として開発されている。

第2に、1970年代末からは、アメリカ航空規制緩和により航空輸送会社間の低価格競争が激しくなり、航空輸送に関わるトータルのコスト抑制が求められた。ここで言うトータルのコストには、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、乗務員の人件費などを含む。

1978年までのアメリカの航空輸送会社は、CAB（Civil Aeronautics Board）の規制政策のもと、価格規制によって同一距離・同一運賃が守られ、参入・退出規制によって新規企業の参入と既存企業の新路線参入が厳しく制限されていた。ところが、78年10月に航空規制緩和法が成立し、81年に路線認可制、83年に運賃認可制が廃止され、85年にCABが解散となった。新たに航空輸送市場に参入した企業が低運賃戦略をとる一方、既存の大手企業は運賃差別化やマイレージサービスで対抗した。また、大手企業は、ハブ・アンド・スポークと呼ばれる路線戦略を取り、単一ハブからの放射状ネットワーク、さらには複数ハブ拠点をつなぐ大規模路線網を形成した。それから、ネットワークを拡大させるために企業提携（アライアンス）が結ばれ、スカイチーム、スターアライアンス、ワンワールドなどの航空連合が形成された。こうして、ハブから広がる短距離路線で、短距離・小型航空機や100席以下のジェット機需要が拡大した。

1990年代前半までに、イースタン航空とパンナム航空の倒産（共に91年）など航空輸送会社の倒産が続出し、M&Aにより企業集中が進んだ。規制緩和前のアメリカでは36社の定期航空会社が存在したが、10年間で233社が参入して196社が消滅し、91年には73社が残っていた。価格競争が激しいため、航空輸送会社は、トータルのコスト抑制を求めたのである。また、メーカーに対して運航コストを抑制した機体開発と航空機価格の値下げを求める一方で、リースによる航空機調達を増やし、2004年にはアメリカ全体でリース機は半分近くに達した¹⁰⁾。

第3に、1980年代半ばから、航空輸送会社の要求に応じなければならないメーカー側の事情、つまり航空機の販売をめぐる国際競争が激化した。表2に示すように、エアバスは80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・大型航空機市場でボーイングの対抗機種をそろえて競争を挑み、2000年以降は納入機数でもボーイングを凌ぐまでになった。

1980年代のエアバスは、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

10) 杉浦（1992），104ページ。リース機の割合は、アメリカン45%，ユナイテッド41%，USエア76%，コンチネンタル65%，サウスウエスト23%，ジェットブルー37%に達した（Newhouse, 2007, p.73）。

に販売先の政府に働きかけるといった手法で、中東からアジアまでシルク・ロード沿いに航空機販売を増やした¹¹⁾。70年代の中東の紛争では、アメリカがイスラエル側に立っており、そうした状況がエアバス機の販売に役立てられた。80年にフランス大統領のジスカールデスタンが中東を訪問した際には、パレスチナを支持するスピーチを何度か行い、その直後にクウェート政府が機種選定の発表をするということもあった。アメリカ市場に対しては、販売実績を優先し、イースタン航空に対して販売前に4機のA300を無償貸与（fly before you buy）し、78年に23機のA300を販売した。販売時には、240席機のA300とイースタンが望んだ170席機との運航コストの差をエアバスが保証するという金融的措置までとった¹²⁾。航空輸送会社にとって、エアバスとの交渉は、ボーイングから譲歩を得るためにも有効であった。

顧客獲得をめぐるのは、アメリカでも賄賂や政府による直接の干渉が行われた。1976年には、アメリカ上院小委員会がロッキードから数カ国に支払われた2400万ドルの賄賂と手数料のリストを公表し、日本ではロッキード事件として前首相が逮捕される事件に発展した。同じ時期、ボーイングも5年間で7000万ドルの手数料を海外取引に関連して支払っていた¹³⁾。

表2 メーカー別の航空機納入機数の推移（2007年末現在）

	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2007
ボーイング	<u>91</u> 36%	<u>172</u> 70%	<u>203</u> 68%	<u>170</u> 57%	<u>299</u> 69%	<u>203</u> 62%	<u>385</u> 62%	<u>207</u> 54%	<u>491</u> 61%	<u>290</u> 43%	<u>441</u> 49%
マクダネル・ダグラス	<u>91</u> 36%	<u>36</u> 15%	<u>84</u> 28%	<u>85</u> 28%	<u>64</u> 15%	<u>82</u> 25%	<u>142</u> 23%	<u>49</u> 13%			
エアバス				<u>9</u> 3%	<u>39</u> 9%	<u>42</u> 13%	<u>95</u> 15%	<u>124</u> 33%	<u>311</u> 39%	<u>378</u> 57%	<u>453</u> 51%
その他	<u>73</u> 29%	<u>38</u> 15%	<u>12</u> 4%	<u>36</u> 12%	<u>32</u> 7%	<u>3</u> 1%					
合計	255	246	299	300	434	330	622	380	802	668	894

注：ボーイングとマクダネル・ダグラスは1997年に合併したため、その後はボーイングに含めている。

出所：日本航空機開発協会（2008）、II-3～II-8ページ。

第4に、1990年代以降は、アジアの経済発展により航空輸送需要が拡大し、アジアとヨーロッパ・アメリカを結ぶ路線の重要性が増した。82年の航空旅客輸送数は、北米3億400万人（40%）、欧州1億3500万人（18%）、アジア・太平洋1億1200万人（15%）であったが、92年にはアジア・太平洋の割合が2割を超え、2007年には北米8億2800万人（37%）、欧州5億7400万人（25%）、アジア・太平洋5億8100万人（26%）となっている¹⁴⁾。

11) Lynn (1995), pp.167-168 (邦訳, 186～187ページ)。リーンはシルクルート（Silk Route）戦略と呼ぶ。

12) Newhouse (1982), p.56 (邦訳, 129～130ページ)。Lynn (1995), pp.128-133 (邦訳, 144～149ページ)。

13) Newhouse (1982), pp.56-59 (邦訳, 131～136ページ)。

14) 日本航空機開発協会（2008）、I-4ページ。

2. 航空機技術の新たな展開方向

20 世紀の産物である航空機は、1970 年代までは大型化・高速化し、航続可能距離を延長させてきた。しかし、民間航空機の超音速飛行は騒音と燃料費の問題から断念され、70 年代半ばまでに音速以下の階層的市場が形成されると、航空機技術は新たな展開方向をみせた。

第 1 に、1970 年代以降の航空機技術は、燃料消費率の改善が求められた。燃料消費率とは、「単位推力 1kg を単位時間 1 時間だけ持続するのに必要な燃料重量 kg」と定義され、値が低いほど効率が良い。燃料消費率は、まず、主翼形状など航空機の空力性能を改良して空気抵抗を減らすことで改善できる。次に、機体重量を軽減すれば、より小さな推力で同じ飛行状態が実現できるため燃料消費量を抑えられる。さらに、ジェットエンジンの改良により燃料消費率は大きく改善される。最後に、電子技術の導入、つまり、個々の制御機器や航空計器、表示盤の電子化と、機器の電子的な連結と統合により重量が軽減された。また、飛行制御や航法にコンピュータを用いれば最適ルートを飛行でき、燃料消費量を抑えられる。安全で確実な飛行をする上でも、電子技術の導入は重要である。

第 2 に、1970 年代には、排出ガス汚染や空港周辺の騒音が世界的に社会問題化しており、飛行規制や騒音・排出ガス規制が強化された。とりわけエンジンは、将来の騒音・排出ガス規制をもクリアすることが開発段階で目指され、環境規制が運航条件に組み込まれた。

第 3 に、1980 年代半ばからは、燃料消費率の改善に加え、航空機購入価格と運航コストを含めたトータルのコストを低く抑える航空機開発が重視されてきた。

まず、2 名の運航乗務員編成が、小型航空機だけでなく中型・大型・超大型航空機まで導入された。従来は、条件を満たさない機体には正副操縦士だけでなく航空機関士を含めた 3 名編成が定められていた。しかし、労働組合の抵抗にも関わらず、アメリカでは 1981 年の大統領特別委員会の容認により、コクピットの表示盤が電子化された 767 や 747-400 が 2 名編成機として就航した。エアバス A300 も当初は 3 名編成だったが、派生型の A300-600 から 2 名編成になった。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¹⁵⁾。

次に、中型・大型航空機が双発化された。エンジン数を 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。ただし、双発機は、1 基でもエンジンが停止すると危険なので、代替飛行場の少ない中長距離の洋上路線を飛行する航空機には、3 基以上のエンジン搭載が義務付けられていた。ところが、1980 年代以降、双発機の洋上飛行規制が緩和され、ボーイングでは 757, 767, 777, エアバスでは A300, A310, A330 が双発機として就航し、アメリカの航空輸送会社による大西洋路線では、95 年に 3～4 発機の運航便数を双発機が上回った¹⁶⁾。

15) 青木 (2004), 71 ページ。

16) 米谷 (2002), 26～27 ページ。

最後に、機体メーカーは1980年代半ばから、ライバル機に対する開発・製造コストの抑制を重視した。ボーイングでは、767（82年就航）は燃料消費率改善のために軽量化が最重要視されたが、777（95年就航）は開発・製造コストの抑制が重視された。90年代のボーイングでは、人員削減、開発・製造における生産性向上、サプライヤーとの契約価格切り下げによりコストが抑制され、その一環に開発・製造コストの抑制が位置づけられた。ボーイングは、エアバスに対抗して政治的手法を強めると同時に、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のである。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¹⁷⁾。

第4に、1990年代から2000年代に、拡大するアジア路線向けの新機種が開発されている。エアバスは、アジアと世界の大都市間を大量輸送するためにA380を投入し、その先の中都市をA320などでつなぐハブ・アンド・スポークを形成しようとしている。A380は、シンガポール航空で初めて就航し、シンガポールとロンドンやシドニー、ドバイといった長距離路線で使用されている。対するボーイングは、成田とニューヨークのような長距離の都市間直行便としても利用できる787を計画し、全日空（ANA）からの確定受注により開発を始めた。エアバスとの戦略の違いの背景には、サウスウエスト航空などの低コスト企業（Low Cost Carrier）が、コストのかかるハブ・アンド・スポークではなく、収益性の高い都市間の直行便（ポイント・トゥ・ポイント）を運航することで収益をあげたことなどがある¹⁸⁾。

なお、ソ連崩壊後は、アメリカ航空宇宙産業が再編され、ボーイングの企業経営にも変化がみられる。1997年のマクダネル・ダグラスとの合併後、ボーイングでは、短期的な株主利益が重視されるようになり、経営目標として「全社純利益7%、各事業部門の営業利益10%以上」が掲げられた¹⁹⁾。そうした中で787では主翼製造までもが外注化された。また、ボーイングは、開発・製造では基本設計や最終組立などシステム統合に集中し、2002年時点で2,000社弱のサプライヤー数を1,200社程度に絞り、メガ・サプライヤーにサブシステムの組立までを任せるようにサプライヤー構造を変化させてきている²⁰⁾。

以上のように、航空機技術は、航空輸送会社の要求に応じて新たな展開をみせた。次節では、こうした展開が、いかにして技術的に実現されたのかを明らかにする。

17) Newhouse (2007), p.125.

18) 塩見 (2006), 155～215 ページ。谷川他 (2009), 70, 97 ページ。

19) 「777 開発の歩み」 編纂委員会 (2003), 243 ページ。

20) 「777 開発の歩み」 編纂委員会 (2003), 248 ページ。

IV. 機体メーカーにおける航空機開発・製造の展開

航空輸送会社からの開発要求に対し、それを技術的に実現するのは航空機メーカーである。

航空機は、技術的・工学的には、機体構造・エンジン・制御機器から成り立つ。企業活動の目的は利潤の獲得であり、航空機メーカーは、競争力と利益の源泉となる中核技術を自社内部で開発、製造することを望む。機体構造には、主翼や尾翼、胴体、窓・扉という構造部材と、シートや床桁材、機内トイレ、娯楽装置のような内装が含まれ、その中核技術は主翼である。エンジンは、ファンブレード、圧縮機、燃焼室、タービンから成り、高温強度が求められるタービンが中核技術である。制御機器は、飛行制御、航法、フライトデッキ、操縦・油圧装置、電源、燃料、降着装置、与圧・空調などから成り、中核技術は飛行制御と航法である。

本節では、機体メーカーのボーイングに着目し、中核技術の競争力を保ちつつ、燃料消費率の改善要求に対して、機体の空気力学的改良と重量軽減に取り組み、トータルのコスト抑制要求に対して、開発・製造コストの抑制に取り組んだことを明らかにする。

1. 中核技術としての主翼とアメリカの風洞設備

主翼は、機体の空気力学的性能を左右し、何より安全性に直結する重要な構成部材である。機体メーカーにとって、時間と費用が莫大にかかる主翼開発は、技術競争力の核心部分でもある。主翼形状は、航空機を上からみた平面形状と、翼を輪切りにみた翼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、左右に直線的ではなく、斜め後方に主翼を伸ばすことで、主翼に直角な流れの速さを小さくし、衝撃波の発生を遅らせ、高速飛行が実現できる。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。

今日の主翼の原型は、ジェット化の初期段階で確立された。そのため、第2次世界大戦にさかのぼり、後退翼の起源を確認する。ジェット機は、何よりも軍事で必要とされた。戦後のアメリカが、戦略爆撃機をいち早く攻撃目標上空に送り込み原爆を投下するためには、ジェット化による高速飛行の実現が必要なのであった。1949年にソ連が原爆開発を成功させると、防空システム SAGE を整備し、飛来する敵爆撃機に対して、急発進・急上昇する要撃戦闘機を開発する上でもジェット化が必要であった。ジェット化への要求は戦時中から存在し、第2次大戦末期のアメリカは、降伏したドイツに調査団を送り、高速飛行における後退翼の有効性を裏づける風洞実験データを発見した。また、NACA (National Advisory Committee for Aeronautics, 航空諮問委員会) でも同じ結論を得られたことで、戦後のアメリカは、ジェット機

開発を成功させられた²¹⁾。

そのころボーイングは、ドイツへ送られた調査団に技術者を送り込んでおり、情報をいち早く入手していた。その後の問題は、最適な後退角の発見であり、それは実験的に確認しなければならなかった。航空機開発では、本格的な飛行試験の前に、空気の一様な流れを人工的に作り、その中に模型を置いて局所的な風速や圧力分布などを測定する風洞実験が不可欠である。ボーイングは、1944年に気流速度マッハ0.975の風洞を他社に先駆けて独自に建設した。そうすることで、風洞実験に競合他社の6倍の時間を費やして戦略爆撃機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。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²²⁾。

主翼形状のもう1つの要素である翼断面形状は、カタログのように番号をつけて戦前から発表されていたNACA翼型が元になった。707の主翼断面は、NACA 6系列（6-series）という低抵抗翼断面を元に開発され、衝撃波が発生すると抵抗が急増した。一方、対抗するDC-8には遷音速翼断面が用いられ、衝撃波が発生しても抵抗が急増しないため、主翼表面の流速をより速くできた。空気力学的性能に優れ、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は、1950年代には旧式になっていたNACA 4桁系列（4-digit series）を元にダグラスが社内開発し、DC-8で実用化したものだった。後には707の主翼も改修されるなど、遷音速翼断面は民間ジェット機の主流になった²³⁾。

本稿で対象とする1970年代以降の主翼も、遷音速翼断面の後退翼という基本形状を受け継いだ。747は、長距離を飛行するため707より高速が要求され、37.5度の後退角でマッハ0.85という高い巡航速度が実現された。80年代には燃料消費率の改善が求められ、遷音速翼断面を改良したスーパークリティカル翼断面を元に757と767の主翼が開発され、後退角には25度と31度が採用され、マッハ0.8が実現された。スーパークリティカル翼断面は、NACAのラングレー研究所で開発され、71年に特許出願されたものである。後退角が大きくなると翼が重く、製造も複雑になるため、この翼断面を採用することで、なるべく小さい後退角で同等のマッハ数を実現できた。777では、長距離飛行を行うため767よりも高速が求められ、スーパークリティカル翼断面が改良され、31.6度の後退角を採用して、マッハ0.83～0.84が実現された²⁴⁾。

21) Irving (1993), pp.75-78 (邦訳, 103～106ページ)。Rodgers (1996), pp.95-98。

22) Rodgers (1996), pp.93-94。Irving (1993), pp.46-48, 88-89, 145 (邦訳, 82～85, 115～116, 182ページ)。久保田 (1994), 3～6ページ。747の主翼開発では、最低でも1万時間以上の風洞実験が必要とされ、短時間で開発するため全米8ヶ所で風洞実験がなされた。

23) Shevell (1985), p.2。久世 (2006), 117, 134ページ。

24) 石川 (1993), 205ページ。木村 (1985), 144ページ。「YX/767開発の歩み」編集委員会 (1985), 354ページ。浅井 (1983), 598ページ。Norris (1996), pp.36-40。高速時に空気抗力が急増し始める速度を臨界マッハ数と言い、それをより高めた翼型がスーパークリティカル翼である。NACAは1958年にNASAに改組され

こうしたアメリカ航空機産業における主翼開発は、国内の豊富な風洞設備に支えられてきた。風洞実験の精度を上げるには、風洞を大型化し、なるべく実物に近い大きさと条件で実験する方が良いが、そうすると風洞の設置費用がかかり、実験も長期化する。風洞実験は、航空機開発で莫大な資金と長い時間が必要になる理由の 1 つなのである。表 3 に示すように、アメリカの風洞設備は、他国に比べて質、量ともに群を抜いており、NASA のエイムズ研究所やラングレー研究所、国防総省が多くを保有する。ボーイングやロッキードなど機体メーカーが自社で風洞を保有することもある。これら風洞は、戦前および 1950 ～ 60 年代に建設されたものが多く、設置から今日まで膨大なデータが蓄積されてきた。50 年代は、米ソが超音速軍用ジェット機開発を競った時期であり、軍事との深い関係もあり、国家予算が風洞設置に投じられてきた。

ボーイングの技術競争力は、早くからの風洞設置といった経営判断に加え、国内に多数設置された風洞設備と、NASA や国防総省、大学における研究蓄積に基礎づけられてきた。同様のことは、ジェットエンジン開発における高空性能試験設備でも指摘できる。

表 3 世界の風洞設備の数（1993 年）

（マッハ数） （測定部寸法）	亜音速風洞 ～1.0 3m以上	遷音速風洞 1.0前後 2m以上	超音速風洞 1～5程度 1m以上	極超音速風洞 5程度～ 0.5m以上	合計
アメリカ	33	12	14	19	78
ヨーロッパ	15	5	4	8	32
ロシア	5	4	3	5	17
日本	3	1	1	1	6
合計	56	22	22	33	133

出所：久保田（1994）、2 ～ 3 ページ。

2. 機体の軽量化による運航コストの抑制

燃料消費率の改善には機体の軽量化も重要であり、そのためには、強度重量比の優れた材料を使用する方法と、一体化構造部品を使用して部品点数を少なくする方法がある。

（1）新素材開発と複合材料

ジェット化以降、航空機材料には、安価で加工しやすいアルミニウム合金が多く使用され、軽くて強度の必要な部分やエンジン低温部にはチタン合金、降着装置やフラップのレール、ボルト類など集中荷重のかかる部分には鋼材、エンジンのタービンなど耐熱性が必要な部分には耐熱合金が使用されてきた。1970 年代以降は新素材開発、とりわけ 2 つ以上の素材を組み合

た。757 と 767 の開発ピーク期には、年間風洞実験時間は 20,000 時間に達し、そのうち 5,000 時間は 1944 年にボーイング自身が設置した遷音速風洞で行われた。767 の主翼の最終形状決定段階では、16,000 時間の風洞実験が行われ、日本の航空宇宙技術研究所の風洞も利用された。

わせた複合材料がアルミニウム合金に代替されてきた。航空機用には、ガラス繊維強化プラスチック（GFRP : Grass Fiber Reinforced Plastic）や炭素繊維強化プラスチック（CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastic）などが用いられ、後者は 90 年代以降に使用量が増えている。

図 1 にボーイング機の機体構造材料構成の変遷を示す。747 では複合材料が 1% にすぎないが、767 では複合材料が 3%（1,530 kg）を占め、CFRP が 2 次構造部材の昇降舵（エレベータ）、方向舵（ラダー）、補助翼（エルロン）に用いられた。777 では、破損すると飛行不能になる 1 次構造部材の垂直尾翼（1,400kg）と水平尾翼（2,900kg）、70 本の床桁材（490kg）などに CFRP が用いられ、複合材料が 11%（9,500kg）を占めた。内装には GFRP や CFRP がさらに 5,000kg 使用された。787 では複合材料が 50% を占め、機体構造で最も重要な主翼を含む 1 次構造部材に CFRP が多用され、1 機当たり約 35,000kg（35 トン）の CFRP が使われる²⁵⁾。図 1 からは、CFRP の割合が増えると共に、接合部分で相性の良いチタン合金の割合も増えていることもわかる。CFRP で一体成形を行えば、劇的に部品点数を削減することもできる。CFRP の利用で先行するエアバスでは、A310-300（1985 年就航）の垂直安定板の表面板と補強桁が CFRP で一体成形され、金属製と比較すると部品点数が 2,072 から 96 に減り、重量が 652kg が 495kg へと 24% 軽減された²⁶⁾。なお、日本では、三菱重工業が、航空自衛隊の戦闘機 F-2 の主翼の上面と下面をそれぞれ一体成形した。

CFRP 利用の起源は軍事にあるが、民間航空機への適用がアメリカで本格化するのには石油ショック以降であり、1975 年には NASA が燃料半減を目的とする ACEE（Aircraft Energy Efficiency）計画を始めた。計画では、エンジンの改良・開発で 5 ～ 20%、軽量複合材料の使用で 10 ～ 20%、層流境界層の制御技術の開発で 10 ～ 20%、空力荷重の制御技術による空力効率の改善で 20 ～ 40% の燃費改善を図り、総合して 50% の効果が目指された。複合材料の使用は、ACEE 計画の中の CPAS（Composite Primary Aircraft Structure）計画で進められ、マクダネル・ダグラスが DC-10、ボーイングが 727 と 737、ロッキードが L-1011 で NASA と契約を結び、民間航空機への適用が拡大した²⁷⁾。

CFRP の原材料には、炭素繊維を製造する段階と、髪の毛のような炭素繊維を一本ずつ並べてエポキシ樹脂で固め、一方向で一層のテープ状のプリプレグと呼ばれる中間基材を製造する段階がある。プリプレグを必要な形状に合わせて重ね合わせ、オートクレーブという釜で加熱・加圧することで、重量当たりの強度・弾性率が鉄の 10 倍で腐食に強い CFRP ができる。

25) 「09 年ものづくり、次代支える力に」『日経産業新聞』2009 年 1 月 1 日付。「YX/767 開発の歩み」編集委員会（1985）、351 ページ。松井（1998）、371 ページ。767 では、CFRP の他にも、ケブラ複合材や炭素・ケブラハイブリッド複合材、GFRP が用いられた。777 では、AFRP（アラミド繊維強化プラスチック）も使用された。

26) 松井（1998）、372 ページ。

27) 松井（1998）、370 ページ。

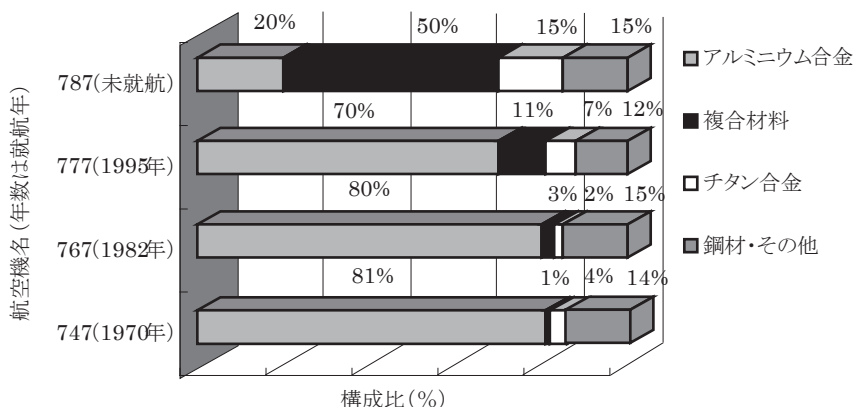


図 1 ボーイング民間航空機の機体構造材料構成の変遷

出所: 747, 767, 777 のデータは今村, 山口 (1995), 214 ページ, Hyatt (1991), p.273 より, 787 のデータは横江 (2007), 25 ページより作成。

冷戦期は、アメリカ国内の軍需も多く、ハーキュレスなどが軍需を中心に事業を拡大させた。レーガン政権期には、軍用機用の炭素繊維の国内調達量を増やす決定がなされて参入企業が増えた。ところが、ソ連崩壊後のブッシュ政権は軍事調達費を大幅に削減し、1990 年代前半には炭素繊維が深刻な供給過剰に陥ったことから、事業の撤退や吸収による企業の集中が進んだ。

他方、日本の東レは、1971 年に世界で初めて商業用炭素繊維の生産を始めてから、釣り竿やゴルフクラブ、テニスラケットといったスポーツ用品向けに事業を拡大し、提携先のユニオン・カーバイドを通じてボーイング 767 と 757 向けにも炭素繊維を提供した。90 年代の統廃合を経て、炭素繊維市場では、2004 年に東レ、東邦テナックス、三菱レイヨンで世界の生産能力シェアを 78% まで高め、その中でも東レが 36% を占めた²⁸⁾。

炭素繊維市場で日本企業が圧倒的なシェアを占める一方で、分業が進んだ欧米では、炭素繊維を購入して中間基材のプリプレグを販売するメーカーが多く、プリプレグ市場はアメリカのヘキセルとサイテックが支配している。ところが、ボーイング機の 1 次構造部材用のプリプレグでは東レのみが認定を受け、777 と 787 の独占供給者になっている。これを契機に、東レはプリプレグ市場でもシェアの拡大を目指している。さらに東レは、2008 年に研究開発拠点のオートモーティブセンターを名古屋市に開設し、自動車向け用途の開拓を狙っている²⁹⁾。

航空機産業は総合的な加工組立産業であり、スポーツ用品など他分野で発達した日本の炭素繊維技術を航空機分野に取り入れることで、ボーイングは技術競争力を高めてきたのである。

28) 青島・河西 (2005a), 青島・河西 (2005b)。2004 年の炭素繊維の生産能力シェアは、PAN (ポリアクリルニトリル) 系炭素繊維のものである。

29) 青島・河西 (2005a), 青島・河西 (2005b)。CFRP の自動車向け利用を拡大させる際の最大の課題は、鉄の数十倍という価格であり、生産コストの削減が重要になってくる。

（2）製造段階における NC 化と一体化構造部品

機体重量を軽減するもう 1 つの方法は、継ぎ目のない一体化構造部品を製造して部品点数を減らし、締結具の重量を削減することである。アルミニウム合金は溶接が困難なので、1 機当たり百万本以上のリベットやボルトで部品や外板が締結される³⁰⁾。大型素材から複雑形状を一体で削り出すために開発されたのが、NC（Numerical Control，数値制御）フライス盤である。

1952 年 3 月、米空軍の支援を受けた MIT サーボ機構研究所が 3 軸制御 NC フライス盤を開発すると、空軍は 105 台の 3 軸連続制御スキนมイラーおよびプロファイルミラーを 6200 万ドルで契約し、航空機メーカーの工場に設置した³¹⁾。これらは、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）の加工に用いられる。55 年には、航空宇宙工業会（AIA：Aerospace Industries Association）の進言により、空軍は 3500 万ドルを投じて約 100 台の NC フライス盤を発注した。この大部分は、ベッド長 12 m クラスの輪郭制御スキนมイラーで、1 台約 50 万ドルのものもあった。56 年には、空軍が 600 台以上の NC 工作機械を発注した。NC 工作機械は、空軍の支援を受けて航空機産業で普及し、57 年中頃までに大半の航空機メーカーが利用するようになり、58 年までに数社が在来機から NC 機への切り換えを計画していた³²⁾。

当初、NC 機の数値制御に必要な NC テープは手作業で作られていたが、1959 年に MIT が、米空軍の支援を受けて 107 語からなる APT（Automatically Programmed Tool）を開発した。それによって、NC 工作機械のプログラミング速度が増し、リードタイムを短縮し、精密なテープを作成できるようになった³³⁾。

一体化構造部品を製造するには、大型素材の供給が必要である。航空機生産における機械加工の切削量は非常に多く、加工前の板材、型材、鍛造材と成形品の重量比は、アルミニウム合金で 6 対 1，チタン合金で 9 対 1 といわれる³⁴⁾。朝鮮戦争では、米空軍の F-86 主力ジェット戦闘機の主翼を、ワンブロックの金属塊を削りこんだ一体化構造部品とすることが緊急課題となっていた。そこで、1951～58 年に空軍のヘビー・プレス計画にアルコアなど 8 社が参加し、航空機用大型素材の製造能力が高められた。計画前には 1 万 8,000 トン鍛造プレスと 5,500 トン押出しプレスがアメリカで最大だったが、最低でも 4 億ドルが投じられ、4 基の 5 万トン鍛造プレスと 7 基の 1 万 4,000 トン押出しプレスが作られた³⁵⁾。

こうした軍の支援により、航空機用大型素材を用いた一体化構造部品の製造が、民間機製

30) 日経メカニカル編集部（1993），10 ページ。

31) 河邑（1995），87 ページ。

32) ニュースダイジェスト社国際部（1987），A-140 ページ。

33) ニュースダイジェスト社国際部（1987），A-141 ページ。

34) 原田（1984），15 ページ。

35) DoD-NASA-DoT（1972），Appendix 4, pp.10-11. 久世（2006），146 ページ。河邑（1995），86～87 ページ。

造でも可能になった。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は航空機でも一番大きく厚い外板が張られる。707（1958 年就航）では、主翼の付根から翼端までの 3 ヲ所で桁間外板がリベットなどで継がれていたが、727（64 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³⁶⁾。このような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³⁷⁾。

燃料消費率改善が最優先された 767 では、軽量化のために、より複雑な加工がなされた。727（1964 年就航）は内側形状が比較的簡単なので胴体外板は 3 軸スキンミラーで加工できたが、767（82 年就航）は形状が複雑なので 5 軸スキンミラーが必要であった。5 軸とは、X、Y、Z の各軸方向の動きに、そのうちの 2 軸周りの回転軸 a、b の動きを加えたものであり、角度が連続的に変化するねじれた面も容易かつ効率的に加工できる。767 の胴体外板は、乗降扉の周辺部分やフレームの取付部など強度の必要な部分のみを肉厚で残し、必要ないところは格子状に切削して余肉をとって軽量化するという複雑な曲面加工が行われた。スキンミラーで加工できない複雑なものや薄板は、アルミニウム合金を化学的に腐食させて厚さを変えるケミカルミリングがなされた³⁸⁾。今日の機体メーカーでも、一般的に 5 軸制御 NC 工作機械が保有されている。

767 開発では、「Light is Right（軽いことは良いこと）」というスローガンが作られ、1 図面当たり 85g 軽くして、機体当たり 1,360 kg の軽量化が目標とされた。開発に参加した高石征男（三菱重工業名古屋航空機製作所〔当時〕）は、「私どもが作る場合は、あまり削らない方がコストの点でいいという考え方をするんですが、彼ら（ボーイング——筆者注）はそうではなく、所要の強度以上を持たないように徹底的にぜい肉を削る」と回想し、澤田勝之（日本航空機開発協会〔当時〕）は、「1 ポンドの重量軽減のために、100 ドルくらいまでコストが上がってもよいという指数があったような気がします。それがだんだん設計が終了に近づいてきて、もっとウエイトを落とさなければいけないという段階になりますと、1 ポンド落とすのに 150 ドルくらいまでコストが上がってもよい——というような指示書が出てきましたね」という³⁹⁾。

こうして、767 開発では少なくとも 999kg の重量が軽減された。複合材料は 1,530 kg 使用

36) 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。

37) 1960 年代半ばに使用された桁フライス盤のベッドの長さは、大型航空機用で 18 ～ 26m，さらに 91m のものも存在した（ASTME, 1964, p.295〔邦訳，273 ページ〕）。

38) 原田（1984），15 ～ 16 ページ。「YX/767 開発の歩み」編集委員会（1985），364 ページ。日経メカニカル編集部（1993），14 ページ。航空技術編集部（1993），11 ページ。ケミカルミリングにより，1 時間当たり約 1mm 溶かされ，マスキングにより部分的に板厚を変えられる。

39) 「YX/767 開発の歩み」編集委員会（1985），450 ～ 451 ページ。重量軽減のアイデアが採用されると，記念品が贈呈された。

されて 567 kg 軽減され、新アルミニウム合金により 295kg が軽減された。また、従来よりも頭部の小さいブライレス・リベットの使用により、1 本当たり 0.5g の軽減で合計 120kg (24 万本) が軽減され、従来の丸頭リベットの周囲を削り取ったリデュースド・ヘッド・リベットの使用により、1 本当たり 0.05g の軽減で合計 17kg (34 万本) の重量軽減が期待された⁴⁰⁾。原型機である 767-200 の機体重量は約 81 トン、乗員・乗客・貨物・燃料などを加えた最大離陸重量は約 136 トンであるため、素材開発と加工方法の改良で、少なくとも 0.7 ～ 1.2% の重量が軽減されたことがわかる。構造質量が 1% 軽くなると、926km を 1 年間に 3,000 時間飛行した場合、燃費は 1 機・1 年間で 14,000US ガロン (53kl, 45 トン) が節約できるという試算もあり、767 における重量軽減の効果は少なくなかった⁴¹⁾。現実には、部品点数の削減や複雑形状加工などにより、767 における重量の軽減効果はこれよりも大きい。

航空機製造における 3 軸制御および 5 軸制御 NC フライス盤の利用は、生産過程における工作機械の制御にコンピュータが用いられることで可能になった。1960 年代には開発されていたこれらの技術が、コンピュータの発達と共に小型化、高性能化し、80 年代の 767 製造では、複雑形状加工と機体の軽量化に役立てられた。さらに、設計・開発におけるコンピュータの利用も進むことで、設計・開発・製造が一括してコンピュータ処理されることになった。

3. 開発段階におけるコンピュータ利用と開発・製造コストの抑制

前項で扱った製造段階におけるコンピュータ利用に対し、以下では、開発段階におけるコンピュータの利用に着目する。767 開発ではマスター・ディメンジョン (MD: Master Dimension) が本格利用され、777 開発では 3 次元 CAD (Computer-Aided Design) が導入された。なお、具体例には、国際共同開発相手である日本メーカーの事例を取り上げる。

(1) コンピュータによる設計情報の処理—— 767 開発 (1970 年代末～80 年代初頭) ——

航空機の外形は、空気抵抗が小さくなるように滑らかな曲面形状で形成される。従来の設計では、機体外形を温度伸縮の少ない透明材料 (マイラーシート) に実物大で描いた線図 (ロフト) で表現し、そこから実物大の石膏モデル (マスターモデル) を作って機体外形の基準にした。たとえば、機首方向から一定間隔で描いた外形をアルミ板に転写、切断し、機体の外形状に組み立て、アルミ板の間に石膏を流し込んで表面を滑らかに仕上げれば、機首の石膏モデルができる。しかし、これでは外形の作図に高度の熟練と長い時間が必要であり、石膏モデルの製作に

40) 「YX/767 開発の歩み」編集委員会 (1985), 351 ～ 352, 372 ～ 373 ページ。352 ページには、ブライレスリベットの使用で 1 機当たり 113 kg, リデュースドヘッド・リベットの使用で 1 機当たり 23 kg の重量を軽減できたという記述もあるが、372 ページの記述からはリベット本数もわかるため、本論では 372 ページを参考にした。なお、767 ではチタンボルトが 1 機で 6 万本近く使用された。

41) 松井 (1998), 372 ページ。

も時間とコストがかかるだけでなく、外形に変更が生じると修正に同じだけの労力が必要になる⁴²⁾。

767 開発では、MD(マスター・ディメンジョン)が用いられ、石膏モデルが不要になった。MD は、航空機の外形をコンピュータ内の数式で表現し、コンピュータ処理で取り出される機体の外形線上の点列座標データ (MD データ) が、設計と生産に共通のマスター・データになった。生産では、MD データを NC プログラミング用ソフト APT で NC データに変換して、機体外形を NC 加工できた。設計では、(2 次元) CAD に MD データを送ることで、図面を機械作画できた。ボーイングは、727、737、747 で機体形状を MD 化した実績と経験があり、初の国際共同開発になる 767 で、日本とイタリアとの間で機体形状の設計情報を一元的に管理し、設計変更などを迅速に伝えるために、MD の全面的な適用を決定したのであった⁴³⁾。

共同開発を行う機体メーカーがシアトルに集まって基本設計を行なった後、日本で実施された詳細設計では、当時のコンピュータ技術と通信技術が利用された。

第 1 に、767 開発に参加するすべての企業は MD で管理され、MD のマスター・データは、東京のセンチュリーリサーチセンター (CRC) が所有するスーパーコンピュータ CDC6600 に組み込まれた。そこから機体メーカー 3 社が端末を設置し、自社に必要な外形情報を MD データとして取り出した。なお、1982 年に 767 の日本側設計がボーイングに移行されると、日本に設置された MD のシステムもボーイングに返却された⁴⁴⁾。

第 2 に、静強度や疲労強度などの構造解析は、全機を一体にした有限要素法で行われ、この計算にも CDC のスーパーコンピュータが用いられた。さかのぼれば、構造設計が複雑になった後退翼設計からコンピュータは利用されていた。直線翼と異なり、後退翼は、上下に変動するだけでなく振じれてしまい、衝撃波の発生を遅らせるために薄い翼型を採用したことにより、非常にたわみやすい。そのため、後退翼は、単純で膨大な計算をこなすコンピュータの発達に助けられ、複雑な翼構造を小さく分けた要素ごとに計算する有限要素法で設計された⁴⁵⁾。胴体などの詳細設計を担当した日本でも、三菱重工業は広島製作所の CDC6600 を利用し、川崎重工業と富士重工業は CRC のコンピュータと端末を通信回線で結んで利用した。

第 3 に、ボーイングは、部品情報を管理する部品表システムを一元的に管理したため、機体メーカー各社は日本においた端末機器 (IV Phase ミニコン) を介し、通信回線を利用してシアトルの IBM コンピュータに部品リストデータを入力した。日本では、国際規模でのデータ通信用回線使用としては他に先駆けたもので、日本電信電話公社 (現 NTT) および国際電信電

42) 「YX/767 開発の歩み」編集委員会 (1985), 395 ページ。

43) 原田 (1984) 18 ~ 19 ページ。「YX/767 開発の歩み」編集委員会 (1985), 395 ~ 396 ページ。

44) 「YX/767 開発の歩み」編集委員会 (1985), 396 ~ 398, 401 ~ 402 ページ。三菱重工業や川崎重工業は、1974 年に 747SP のフラップ生産を受注し、ボーイングの支給する MD データによる生産を経験した。

45) 鈴木 (2000), 45 ページ。

話（現 KDDI）と調整の末に、国際回線が利用された⁴⁶⁾。

以上のように、コンピュータ技術と通信技術の利用により、設計段階における設計情報のコンピュータ処理と、国際間での部品情報のデータ通信が実現された。

（2）3次元 CAD による設計変更件数の削減—— 777 開発（1990 年代）——

1990 年代の 777 開発では、ボーイングは開発・製造コストの抑制を迫られ、80 年代よりも発達したコンピュータやソフトウェア、通信技術を利用した。

777 開発に先立つボーイング社内の研究では、767 開発までの製造コストの 50% 以上が設計変更、設計ミスとそれに伴う修正などに起因していたことがわかった。たとえば、767 では、ドアの設計だけで 13,000 件以上の設計ミスや設計変更があり、6400 万ドルが設計変更に使われた⁴⁷⁾。777 計画の総責任者ミュラリ（A.R. Mulally）は、1986 年頃から、「ボーイングは今まで良い仕事をやってきた。しかしもっとコンペティターに差をつけるため、さらに安い、さらに良い機体をつくりたい」と考えていた⁴⁸⁾。既存機種のコスト分析からは、767 開発における設計変更と設計ミスが、日本メーカーの方が少なかったこともわかり、ボーイングはコストダウンを可能にする日本メーカーの生産方法（Japanese Way）を学ぶため、幹部や生産技術者を、航空機分野だけでなく、日本の造船や自動車、二輪車、工作機械分野に派遣した⁴⁹⁾。777 開発でボーイングは、当初から開発・製造コストの抑制を重視していたのである。

ボーイングが（2次元）CAD を導入したのは 1978 年であり、767 の支柱設計などに利用された。その経験をふまえ、86 年に導入されたのが、3次元 CAD ソフトの CATIA（Computer Aided Three-dimensional Interactive Application）であった。CATIA は、フランスのダッソーが、ミラージュ戦闘機開発のため 80 年代初頭までに開発したソフトウェアである。従来の開発では、ボーイングは、配管・配線などのシステム設計や組立・整備性の確認のために 3 回にわたってモックアップ（実物大模型）を製造しており、この方法では、時間と費用がかかる上、一度作ると変更が難しいという欠点があった。そこで、CATIA を利用すれば、コンピュータ上で 3 次元モデルが設計でき、それを専用共有ファイルへ蓄積すれば、コンピュータの中にデジタル・モックアップを描き出し、部品間の位置関係や干渉等の不具合をチェックできた。こうして、

46) 「YX/767 開発の歩み」編纂委員会（1985）、400～401 ページ。

47) Sabbagh（1996）, pp.90-91.

48) 金丸（1996）、562 ページ。

49) 「777 開発の歩み」編纂委員会（2003）、141～143 ページ。2005 年にマックナーニ（W. J. McNeerney, Jr.）がボーイングの会長・社長兼 CEO に就任してからはリーン生産方式が徹底され、737 を組み立てるレントン工場（ワシントン州）や、787 の主翼を組み立てる三菱重工業大江工場（愛知県）には、ムービングラインが導入された。レントン工場では、組立中の航空機をのせたトランスポーター（運搬台）が 1 分間に 5cm 動き、導入前は 1 機の組み立てに 22 日を要したが、06 年 5 月に 11 日、08 年に 8 日間に減らすことが目標とされた（航空情報編集部、2007、89 ページ、上原、2006、46～48 ページ）。ムービングラインの導入は、01 年から 747 の組み立てなどで始められた（Smith, 2001, pp.24-25）。

従来のモックアップが不要になったばかりでなく、設計変更が激減した。デジタル・モックアップという CATIA の利点を最大限生かすには、頻繁な設計変更を適時反映させて、最新の状態を管理・共有しなければならないため、設計に参加する各社は統一して CATIA を導入し、2 ヶ月に 1 回のバージョンアップを同時に行い、常に同じバージョンレベルに CATIA を管理・設定する必要があった⁵⁰⁾。MD と同じく、CATIA は、国際共同開発の技術的基礎という側面ももっていたのである。

ところが、CATIA 導入に伴う初期負担は極めて大きく、当初は技術的限界にも悩まされた。

第 1 に、通信回線の問題があった。通信技術は、部品表システムに加えて設計データをデジタルで交換できる水準に達していた。日本では、中部電力の情報システムを開発・運用する名古屋のコンピュータ・テクノロジー・インテグレイタ (以下 CTI) のネットワークシステムが利用され、ボーイングと CTI、CTI と日本の機体メーカーが専用回線を介して IBM コンピュータで結ばれ、1991 年 10 月に CTI の開発用データセンターの運用が始まった⁵¹⁾。当時の通信回線料は月当たり 240 万円程度と高額であり、検討の末、ピーク時 128KB の回線を 2 本にした通信回線を、太平洋経由とアラスカ経由の両方で使用した。2 本の回線を利用した理由は、断絶リスクの回避であり、現実には地震でアラスカ経由の断線、台風で太平洋経由の断線が数度生じた。日本国内では、高額であった NTT 回線の利用を避け、CTI と機体メーカーが 64KB の通信回線で結ばれた。しかし、当時の通信技術は、CATIA データをやり取りするには能力が十分でなかった。たとえば、日本での CATIA の運用が 92 年 5 月に始まり、ボーイングから最初に送られた約 4,000 の 3 次元 CATIA モデルの受信には約 10 日間がかかった⁵²⁾。

第 2 に、CATIA を利用するコンピュータの能力が不足した。シアトルでの基本設計は、1990 年 10 月から 92 年 3 月まで行われ、91 年 7 ～ 8 月のピーク時には 8 台の大型 IBM コンピュータですら能力が不足して反応が遅くなり、部品相互の干渉チェックではシステム・ダウンが頻繁に起こった。92 年 4 月から 93 年 3 月までの日本における詳細設計でも同様の問題が生じた。三菱重工業では、CATIA の端末台数が設計者の 60 ～ 70% と不足し、「前代未聞の設計の二直 24 時間運営」が 8 ヶ月続いた。川崎重工業では、IBM のメインフレームの容量が不足し、「通常キーを押してから 1 秒以内の反応時間が数十秒から数分かかるようになった」。

50) Sabbagh (1996), p.62. 「777 開発の歩み」編集委員会 (2003), 105, 107, 114 ページ。アメリカにおける航空機開発への 3 次元 CAD の利用は、ノースロップの B-2 ステルス爆撃機開発が最初であり、その手法がボーイングに引き継がれたという指摘もある。B-2 では、ワイヤーフレームという骨組みだけの 3 次元モデルだったが、777 で使用された CATIA では、現実的なソリッドモデルが利用できた (鈴木, 2000, 48 ページ)。1993 年、ボーイングは次世代システムに CATIA バージョン 4 を選び、96 年に IBM とダッソーとの間で、5 年で数百万ドルという CAD/CAM 契約としては最大のライセンス協定を結んだ (Bradley, 1996, p28)。

51) 株式会社中電シーティーアイ (当時の CTI) ホームページより (<http://www.cti.co.jp/company/enkaku.html>, 2009 年 9 月 3 日)。

52) 「777 開発の歩み」編集委員会 (2003), 110 ～ 112, 115 ページ。

また、CATIA 専用の緊急電源を設けていなかったため、停電に備えて工場内に雷予報担当をおき、停電が予想されると一斉にデータのセーブが始まった。富士重工業では、CATIA の反応速度の遅さからメインフレームを増強し、負担の大きい干涉チェックは夜間に実施された⁵³⁾。

こうした技術的問題を抱えながらも、ボーイングの民間航空機開発では、従来の 2 次元の図面が 3 次元のデジタル・データに置き換えられ、「上流の設計部門から下流の工場、さらに外注工場をも巻き込んで生産システム全体に及んだ」。CATIA 導入の成果は初号機が完成してから表われ、三菱重工業では初号機の設計不具合が 767 の 2 分の 1、2 号機以降は 10 分の 1 以下に減った⁵⁴⁾。CATIA 導入によって設計変更が減少したことは、納期を短縮する上でも有効であり、ボーイングの技術競争力に結実した。

設計段階に導入された CATIA は、生産技術と結合して製造コストの抑制にも役立った。とくに、自動車や家電産業と比べて遅れている組立の自動化を進めた。川崎重工業の担当した胴体パネルでは、17 枚の外板で約 5 万 4,000 本の打鉋が必要であり、従来は熱膨張の影響を抑えるため複雑な組立治工具を用いた。外板の治工具は、数千万～数億円と高額で、保管場所にも悩まされた。そこで、CATIA を利用すると、個々の部品に基準孔を開けて、プラモデルのように部品同士での位置決めができた。それに加え、 -15°C から $+70^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度を変化させて孔間の膨大な寸法変化データを入手して NC 装置のソフトウェアに反映させたことと、高精度の孔開け加工ができたことにより、治具なし組立（ホール・ツー・ホール）と自動リベッターが実現した⁵⁵⁾。

MD や CATIA の利用は、NC フライス盤同様に、コンピュータの発達に依存した。1960 年代以降のコンピュータは階層的に発達してきた。メインフレームと称される大型コンピュータは、IBM などが開発し、複雑な計算や高速・高性能処理に利用されてきた。60 年代半ばには、64 年に開発された CDC6600 のようなスーパーコンピュータの系譜が生まれる一方で、それとは逆に、デジタル・イクイップメントが 65 年に開発したミニコンピュータ（ミニコン）PDP-8 のように、メインフレームの性能や速度をある程度限定して経済的なコンピュータを開発する流れも生まれた。PDP-8 の基本素子には IC が用いられ、NC 工作機械を制御する NC 装置にはコンピュータが内蔵できるようになった。71 年にはインテルがマイクロプロセッサを開発し、コンピュータの低価格化、小型化、高性能化を進める決定的な役割を果たした⁵⁶⁾。

53) 「777 開発の歩み」編纂委員会（2003），119，128，137 ページ。

54) 「777 開発の歩み」編纂委員会（2003），120，130～131 ページ。

55) 「777 開発の歩み」編纂委員会（2003），131 ページ。日経メカニカル編集部（1993），10，13 ページ。ボーイングは、工場全体を一定温度に保って温度補正の問題を解決した。

56) 河邑（2000），288～301 ページ。

航空機産業は、コンピュータの高い計算・処理能力を利用した単純で膨大な繰り返し計算や、設計情報のコンピュータ処理、グラフィック機能を利用した 3 次元の図面作成・処理、複雑な機械加工のコンピュータ制御など、開発と製造のさまざまなレベルでコンピュータを利用してきたのである。また、データ通信の実現や海底ケーブルの利用、通信速度の向上と大容量化によって、遠隔地での共同開発を実現する技術的基礎が形成された。ソフトウェアの技術も発達し、現在では、自動車や家電産業をはじめ、多くの産業分野で CATIA が使用されている。

777 開発では航空輸送会社にとってのトータル・コストの抑制が優先され、その一環として CATIA が導入され、開発・製造コストの抑制が試みられた。設計ピーク時には技術的問題がみられたものの、開発・製造段階におけるボーイングの技術競争力は、コンピュータ技術や通信技術を利用し、取り入れたことによって強化されたのである。

V. お わ り に

したがって、アメリカ民間航空機産業における機体メーカーの技術競争力は、中核技術である主翼の開発に不可欠な風洞設備での国家支援を受け続け、新素材開発やコンピュータ技術、通信技術を航空機開発・製造に取り入れることで発揮されてきたと指摘できる。

1970 年代以降、航空輸送会社からは、石油ショックによる燃料費高騰や航空規制緩和後の航空輸送会社間の低価格競争により、トータルのコスト抑制が要求された。さらに、80 年代後半からのエアバスの市場シェア拡大によって航空機の販売競争が激化し、機体メーカーにとっては、航空輸送会社の要求に応えなければ、市場シェアを低下させかねない状況が生じた。

しかしながら、航空機開発への要求が存在しても、技術的に可能でなければ実現されない。航空機技術の新たな展開は、開発・製造のレベルで実現されたのであった。石油ショック後の燃料消費率の改善要求に対して、機体メーカーは、機体の空力性能改良と機体重量の軽減に取り組んだ。

機体メーカーにとっての中核技術は主翼であり、その開発能力においてボーイングは優れた技術競争力を有している。主翼開発の要である風洞設備は、機体メーカーが自社で保有するだけでなく、NASA や国防総省、大学が多くを保有している。航空機の開発時に国内の風洞設備を利用できることと、研究機関における研究・実験の蓄積は、アメリカの機体メーカーの技術競争力を支えてきたのである。本来的に、主翼には優れた空力性能が求められるため、燃料消費率改善という課題に対しても、ジェット化初期からの技術展開の延長上で主翼のさらなる改良が実現された。

機体重量は、複合材料をはじめとする素材開発によって軽減された。とりわけ、777 から 787 にかけて CFRP の使用量が急増している。CFRP は、優れた素材であるが高価であるため市場がそれほど大きくなく、アメリカではもっぱら軍用に、日本ではスポーツ用品に利用さ

れてきた。ソ連崩壊後は、原料である炭素繊維市場の大半が日本メーカーに占められており、航空機産業以外で成長した外国の技術を取り入れることで、航空機技術の新たな展開は実現された。NC フライス盤の開発と一体化構造部品の製造も、機体の軽量化に役立った。767 開発では、5 軸制御 NC フライス盤によって機械加工がコンピュータ制御され、余肉が最大限取り除かれた。CFRP を用いた一体成形部品も、部品点数を減らすのに有効であった。

1980 年代後半には、運航コストに加え、航空機購入価格の値下げが求められた。航空機の価格はさまざまな要因によって決まるが、必要な時にはカタログ価格からの大幅な値下げができるように、機体メーカーは開発・製造コストを抑える取り組みを進めた。

航空機設計では、767 開発における MD の本格導入で石膏モデルが廃止され、設計情報をコンピュータ処理して、設計や生産に役立てられるようになった。777 開発では、設計に 3 次元 CATIA が導入されてデジタル・モックアップが実現され、実物大のモックアップが廃止されると共に、初期段階の設計変更が大幅に減少した。MD や CATIA は、国際共同開発の技術的基礎であると同時に、開発・製造コストの抑制にも用いられ、ボーイングの技術競争力を高めた。

こうした航空機開発・製造過程における技術展開は、コンピュータ技術や通信技術に基礎づけられた。CATIA の導入時には、コンピュータの能力不足や、設計技術者の不足、通信技術の容量不足や速度が問題になったものの、最終的には設計変更件数の削減により開発・製造コストは抑制された。民間航空機産業は総合的な加工組立産業であり、20 世紀後半に顕著な展開をみせた新素材技術やコンピュータ技術、通信技術を取り入れたことで新たな展開を実現したのである。

本稿が残した課題としては、まず、エンジンメーカーや制御機器メーカーにおける 1970 年代以降の取り組みを明らかにすることが挙げられる。機体・エンジン・制御機器メーカーそれぞれの技術展開を明らかにすることで、アメリカ民間航空機産業の技術競争力をより包括的に解明できるからである。たとえば、燃料消費率を改善する上で、ジェットエンジンは極めて大きな影響を与えた。

その上で、機体・エンジン・制御機器メーカーを含めたサプライヤー構造を明らかにすることが 2 つ目の課題である。アメリカ民間航空機産業の技術競争力は、総合的な加工組立産業の階層的な開発・生産構造を分析することで、その全容が明らかになるのである。1990 年代以降のボーイングは、マーケット・リサーチと開発機種決定、主翼を含めた基本的な設計・開発、機体の最終組立、型式証明取得、プロダクト・サポートを重視し、787 では中核技術である主翼を日本メーカーに外注化し、「システム・インテグレーター」を志向している。製造工程の多くを外注化しながら、ボーイングが国際競争力をいかにして保持しようとしているかを理解する上でも、サプライヤー構造の分析は重要な課題である。

参考文献

- AIA , Aerospace Industries Association of America (2006) *Aerospace Facts and Figures*, Los Angeles : Aero Publishers.
- ASTME , American Society of Tool and Manufacturing Engineers (1964) *Tooling for aircraft and missile manufacture*, New York : McGraw-Hill (半田邦夫, 佐々木健次訳『航空機&ロケットの生産技術』大河出版, 1996 年)。
- Bilstein, Roger E. (2001) *The Enterprise of Flight : the American aviation and aerospace industry*, Washington, D.C. : Smithsonian Institution Press.
- Bradley, Gale (1996) "Design software," *Electronic News*, Vol. 42 Issue 2144, November 25, p.28.
- 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)。
- DoD-NASA-DoT (1972) *R&D Contribution to Aviation Progress (PAD CAP)*, ASD TR 72-3073, Volume II , Appendix 4.
- Hyatt, Michael V. and Sven E. Axter (1991) "Aluminium Alloy Development for Subsonic and Supersonic Aircraft," in *Science and Engineering of Light Metals (RASLEM91)* edited by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda, The Japan Institute of Light Metals, Oct-1991, pp.273-280.
- 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)。
- Norris, Guy (1996) *Boeing 777*, Osceola, WI: Motorbooks International.
- Pattillo, Donald M. (1998) *Pushing the envelope: the American aircraft industry*, Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Rodgers, Eugene (1996) *Flying high : the story of Boeing and the rise of the jetliner industry*, New York : Atlantic Monthly Press.
- Sabbagh, Karl (1996) *21st century jet : the making and marketing of the Boeing 777*, New York : Scribner.
- Shevell, R. S. (1985) "Aerodynamic bugs : Can CFD spray them away?," in *AIAA 3rd Applied Aerodynamics Conference, October 14-16*, AIAA-1985-4067, pp1-11.
- SIPRI, Stockholm International Peace Research Institute (2007) *SIPRI yearbook : world armaments and disarmament*, Stockholm : Almqvist & Wiksell.
- (1990) *SIPRI yearbook : world armaments and disarmament*, Stockholm : Almqvist & Wiksell.
- Smith, Bruce A. (2001) "Boeing Eyes Moving Line To Reduce 747 Costs," *Aviation Week & Space Technology*, Vol. 155 Issue 7, August 13, pp.24-25.
- Sutter, Joe (2006) *747 : creating the world's first jumbo jet and other adventures from a life in aviation*, New York : Smithsonian : Collins (堀千恵子訳『747 : ジャンボをつくった男, 日経 BP 社, 2008 年)。

The Bureau of the Census (2009) *Statistical Abstract of the United States*, Washington, D.C. : U.S. Government Printing Office.

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）。

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。

青島矢一・河西壮夫（2005a）『東レ（1）東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発』IIR Case Study CASE # 05-03，一橋大学イノベーション研究センター。

———（2005b）『東レ（2）東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発』IIR Case Study CASE # 05-04，一橋大学イノベーション研究センター。

青島矢一（1998）『『日本型』製品開発プロセスとコンカレント・エンジニアリング——ボーイング 777 開発プロセスとの比較——』『一橋論叢』120 巻 5 号，10 月，711～735 ページ。

浅井圭介（1983）「最近の米国風洞事情」『日本航空宇宙学会誌』31 巻 358 号，11 月，597～606 ページ。

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。

今村次男・山口泰弘（1994）「航空機構造用複合材料の進展」『日本航空宇宙学会誌』43 巻 495 号，4 月，213～223 ページ。

上原太郎（2006）「巻き返しの研究 米ボーイング 現場重視で社風刷新」『日経ビジネス』1343 号，5 月 29 日，46～49 ページ。

金丸允明（1996）「ボーイング 777 の国際共同開発：よりよい開発プロセスの確立を目指して」『日本機械学会誌』99 巻 932 号，7 月 5 日，562～565 ページ。

河邑肇（2000）「NC 装置メーカーの技術革新と工作機械の価格競争力：CNC 装置の発達における階層性・非代替性と連鎖性」『商學論叢』41 巻 4 号，3 月，269～308 ページ。

———（1995）「NC 工作機械の発達における日本の特質—アメリカとの対比において—」『経営研究（大阪市立大学経営学会）』，第 46 巻第 3 号（通号 255 号），11 月，75～103 ページ。

木村秀政（1985）「航空機における省エネルギー」『日本航空宇宙学会誌』33 巻 375 号，3 月，138～146 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。

久保田弘敏（1994）「諸外国の風洞整備状況」『日本航空宇宙学会誌』42 巻 480 号，2～11 ページ。

航空技術編集部（1993）「日本における B777 の製造」『航空技術』464 号，11 月，3～21 ページ。

航空情報編集部（2007）「ボーイング 787-- 名古屋の 3 工場」『航空情報』766 号，7 月，86～89 ページ。

米谷豪恭（2002）「特集 ETOPS の歴史とエアラインの取り組み」『航空技術』573 号，12 月，23～29 ページ。

西頭恒明（2000）「ケーススタディ ボーイング『超・製造業』へ急旋回——サービス強化，外注も進め主翼は三菱製に」『日経ビジネス』1058 号，9 月 18 日，44～49 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。

杉浦一機（1992）『日本の空は誰のもののか：「航空規制緩和」をはばむ元凶』中央書院。

鈴木真二（2000）「航空機の形を科学する（7）コンピューターが変える航空機設計」『航空情報』677 号，6 月，44～49 ページ。

谷川一巳・山崎明夫他（2009）「We Love Airbus 第 3 弾 超大型機への執念とこれから」『航空情報』790 号，7 月，67～101 ページ。

徳田昭雄（1999）「ボーイングの経営戦略と戦略的提携 -- 戦略的提携を通じたコア・コンピタンスの獲得」『立命館経営学』37 巻 6 号（通号 218 号），3 月，123～140 ページ。

「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。

日経メカニカル編集部(1993)「生産コスト削減目指す B777」『日経メカニカル』, 8 月 9 日, 8 ～ 26 ページ。

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。

日本航空機開発協会（2009）「民間旅客機受注・納入状況（2009 年 6 月）」(<http://www.jadc.or.jp/odrs0906.pdf>, 2009 年 8 月 11 日)。

—————（2008）『平成 19 年度 民間航空機関連データ集』(<http://www.jadc.or.jp/jadcddata.htm>, 2009 年 8 月 11 日)。

ニュースダイジェスト社国際部（1987）「米国の NC 工作機械発達史（特集：日本の NC 工作機械 30 年の歩み Part4）」『月刊・生産財マーケティング』, 3 月, A-138 ～ A-145 ページ。

原田武人（1984）「航空機部品の NC 機械加工」『航空技術』352 号, 7 月, 14 ～ 20 ページ。

松井醇一（1998）「炭素繊維の話（その 9）炭素繊維複合材料の航空機への利用」『強化プラスチック』44 巻 9 号, 9 月, 368 ～ 375 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。

溝田誠吾（2005）「民間航空機産業のグローバル『多層』ネットワーク」『専修大学社会科学研究所月報』499 号, 1 月 20 日, 1 ～ 35 ページ。

横江年彦（2007）「5 軸加工機『VARIAXIS730-5X』, 『VORTEX815/120-2』によるチタン合金の高能率加工」『機械と工具』51 巻 5 号, 5 月, 22 ～ 25 ページ。

「YX/767 開発の歩み」編纂委員会（1985）『YX/767 開発の歩み』航空宇宙問題調査会。