

航空機生産工学 目次

はじめに	1
Part.1 日本の航空機産業の発展	
1.1 戦前の日本の航空機	9
1. 揺籃期／9	
2. 模倣期／10	
3. 自立期／11	
1.2 戦後日本の航空機産業	14
1.3 日本の航空機産業の特徴と規模	22
1.4 21世紀の航空機産業	22
Part.2 製造計画	
2.1 コスト見積り手順	25
2.2 コスト見積りと慣熟遞減曲線	29
1. コストの推算／29	
2. 慣熟遞減曲線／33	
3. 累計平均工数と個別工数理論／36	
2.3 民間航空機のコスト見積りと損益分析	39
1. 民間航空機のコスト見積り／39	
2. 民間航空機の損益分析／40	
3. 民間航空機の投下資本利益率と損益判断指標／42	
2.4 製造分割・区分と組立計画	48
2.5 建屋と設備計画	52
2.6 工場配置	53
1. 立地条件／53	
2. 航空機工場の機能とレイアウト／53	
3. 建屋の性能／54	
2.7 日程計画	56
1. 開発日程管理／56	
2. 継続生産日程管理／59	
2.8 工事計画	60
Part.3 航空機構造材料	
3.1 構造材料の要求条件	65
3.2 アルミニウム合金	66
1. アルミニウム合金の種類と特性／66	
2. アルミニウム合金の強さと軽さ／69	
3. 腐食とアルクラッド材／69	
(1) 腐食 (2) アルクラッド材	
4. アルミニウム合金の熱処理／72	
(1) 時効硬化合金と非時効硬化合金 (2) 熱処理の原理	
(3) 熱処理と成形加工プロセス	
5. アルミニウム合金の熱処理設備／75	
(1) 溶体化処理 (焼入れ) 炉 (2) 人工時効炉 (3) 冷蔵庫 (4) 焼入れ歪	
(5) 内部応力と切削歪 (6) グレンフローと応力腐食割れ	

6. 新しいアルミニウム合金の適用／78	
3.3 マグネシウム合金	79
1. マグネシウム合金の特性／79	
2. マグネシウム合金の加工法／79	
3.4 チタン合金	81
1. チタン合金の特性／81	
2. チタン合金の加工法／83	
3.5 鋼	84
1. 鋼の種類と特性／84	
2. 鋼の状態図／85	
3. 高張力鋼の航空機構造への適用／86	
4. 鋼の強度レベル／86	
5. 鋼の性質／87	
(1) 鋼の低温脆性	
(2) 鋼の脱炭と浸炭	
(3) 鋼の表面調整	
(4) 鋼の焼割れと焼入れ歪	
6. 鋼の加工法／91	
7. 鋼の熱処理設備／92	
(1) 焼入れ炉と雰囲気ガス発生装置	
(2) 焼戻し炉	
3.6 ステンレス鋼	93
1. マルテンサイト系ステンレス鋼／93	
2. オーステナイト系ステンレス鋼／93	
3. 析出硬化型ステンレス鋼／94	
3.7 非金属材料	96
1. 高分子材料／96	
(1) シーリングコンパウンド	
(2) アクリル樹脂	
(3) ポリカーボネート, ABS樹脂	
(4) 接着剤	
(5) 塗料	
2. ガラス／100	

Part.4 治工具計画

4.1 治具の目的	101
4.2 治具装備規模と工数低減	102
1. 試作治具／102	
2. 先行生産治具／103	
3. 量産治具／103	
4.3 ツーリングの展開	105
1. ツーリング系列／105	
2. 基本線図／107	
3. 基準面と基準線／111	
4. 部品現図／111	
5. マスターツーリング／114	
6. 線図, 現図作成とツーリング製作の自動化／116	
4.4 治具の概要	117
1. 治具の種類／117	
2. 治具管理／118	

Part.5 板金加工

5.1 板金部品の製造工程	119
5.2 素材と切断	120
5.3 ルータ加工	121
5.4 打抜きと外形加工	123
5.5 曲げと成形加工	124
1. ブレーキプレス曲げ／124	
2. フォーミングローラ曲げ／125	
3. ゴムプレス成形／126	
4. ホイロンプレス成形／128	
5. ストレッチ成形／128	
6. ドロップ成形／132	

7. その他の成形法／132	
(1)ロール式レベラ (2)爆発成形	
(3)スピニング, 玉ローラ, ロール成形 (4)手加工成形	
8. ショットピーン成形とショットピーニング／135	
9. クリップ成形とエッジ成形／138	
10. チューブ曲げ／139	
11. 耐熱鋼の成形加工／140	
(1)熱間ゴムプレス成形 (2)ホットサイジング成形	
(3)その他の熱間成形法と成形型	
12. 超塑性成形と拡散接合／142	
5.6 ケミカルミリング	143
1. ケミミルの特徴／144	
2. ケミミル加工／144	
3. ケミミルの加工品質／146	
4. ケミミル溶液の劣化と再生／147	

Part.6 機械加工

6.1 機械部品の特徴	150
6.2 切削加工	151
1. 被削材の性質／151	
2. 切削の所要動力／153	
3. 撓みと剛性／153	
4. 取付け具／155	
5. 工具材種／155	
6.3 材料と機械加工性	156
6.4 NC (数値制御)と工作機械	157
1. NC (数値制御)／157	
2. 日本のNC開発と発展／157	
3. NC工作機械の加工手順／158	
6.5 同時5軸制御CNC工作機械	159
1. ルールドサーフェス／159	
2. 同時5軸制御NCデータの作成法／160	
3. プロファイラ／163	
4. スキンミラー／163	
5. マシニングセンタ／164	
6.6 機械部品の加工	165
1. アルミニウム合金製主翼後縁支持金具／165	
2. 高張力鋼製フラップキャリッジ支持金具／166	
3. アルミニウム合金製金具類, 長尺と幅広部品の高速加工／168	
(1)高速加工 (2)ルータ加工 (3)ハニカムコア加工	
(4)高速マシニングセンタ加工 (5)高速ストリンガミラー加工	
(6)高速スキンミラー加工	
6.7 はめ合いによる精密組立	171
1. 焼きばめ／171	
2. 冷やしばめ／171	
3. 圧入／172	
4. かしめ／173	

Part.7 金属接着と複合材成形加工

7.1 接着	176
1. 接着の原理／176	
2. 接着力のメカニズム／176	
7.2 金属接着	177
1. 航空機用接着剤の発展／177	
2. 接着接合構造の利点／178	
3. 接着剤と保管管理／179	
(1)金属-金属の接着 (2)金属とハニカムコアの接着	
4. 金属接着工程／181	
(1)仮合わせ (2)接着前処理 (3)プライマ塗布 (4)接着組立	

(5)硬化 (6)仕上げ (7)検査

7.3 複合材成形加工	190
1. 高性能強化繊維と特性	192
2. 高性能樹脂と特性	194
3. 成形加工法	195
4. 複合材成形工程	196
(1)材料の出庫 (2)プリプレグのプリカット (3)レイアップ	
(4)バギング (5)オートクレーブ硬化 (6)2次加工 (7)検査	
5. 接着治具のタイプと特徴	205
6. ウォータージェット加工	206
7. A380の複合材適用	208

Part.8 溶接とろう付け, 特殊加工, 精密鑄造

8.1 溶接法の分類	212
8.2 溶接プロセス	213
1. 溶接組織と溶接歪	213
2. 溶接残留応力	214
3. 溶接欠陥と継手効率	215
4. 溶接検査	216
8.3 代表的な溶接法	216
1. ガス溶接とアーク溶接	216
2. 不活性ガスシールドアーク溶接	217
3. 電子ビーム溶接	218
4. スポット溶接とシーム溶接	220
5. 拡散溶接	220
6. ろう付け	221
(1)銅ろう付け (2)銀ろう付け (3)アルミニウムろう付け	
8.4 特殊加工	222
1. 放電加工	222
2. 電解加工	224
8.5 精密鑄造	225
1. ロストワックス	225
2. ショープロセス	225

Part.9 表面処理と塗装

9.1 表面処理と前処理	227
1. アルミニウム合金の洗浄プロセス	227
2. 接着前処理	228
3. アルミニウム合金の防食処理	229
(1)化成皮膜処理MIL-C-5541 (2)陽極酸化皮膜処理MIL-A-8625	
4. 鋼の防食, 耐摩耗処理	232
(1)カドミウムめっきQQ-P-416 (2)ハードクロムめっきQQ-C-320	
5. 表面処理の検査	234
(1)塩水噴霧試験ASTMB117 (2)カドミウムめっき膜厚試験	
(3)スポット溶接前処理検査	
9.2 塗装	235
1. 塗装の種類と塗料の構成	235
2. 塗装手順	236
(1)塗装前処理と準備作業 (2)塗装設備と器具 (3)塗装	
3. 塗装検査	238
9.3 低公害化表面処理と廃液処理	239
1. 低公害化表面処理	239
(1)前処理 (2)防食処理 (3)塗料 (4)塗装剥離	
2. 廃液処理	241

Part.10 構造組立と艤装, 整備と試験飛行, 定期修理, 品質保証

10.1 構造組立	243
1. 中型旅客機の胴体構造組立/244	
2. 大型旅客機の後部胴体構造組立/245	
3. 中型旅客機の翼構造組立/248	
4. 新しい構造組立/248	
10.2 組立治具	251
10.3 締結 (ファスニング)	256
1. リベットとリベット締結/256	
2. ブラインドファスナと特殊ファスナ/263	
(1) チェリーリベット (2) ハックリベット (3) ハイシアリベット	
(4) ハイロックファスナ (5) ジョーボルト	
3. ボルトとスクリュー/264	
4. ナットとワシャ/266	
5. ヘリカルコイルインサートとロックリング/267	
10.4 ケーブル端子, チューブ, ホース継手組立とスウェーピング	268
1. ケーブル端子/268	
2. チューブ継手/268	
3. ホース継手とエルボ/269	
4. スウェーピング/271	
10.5 主な艤装品	272
1. 動力装備/272	
2. 降着装置/273	
3. 操縦装置/274	
4. 油圧・空気圧系統/274	
5. 空気調和・予圧系統/274	
6. 防水, 除氷・防曇・除雨系統/275	
7. 計器/275	
8. 電気・電子系統/276	
(1) 電気系統 (2) 航空電子システム	
9. 武装装置/278	
10.6 艤装の実際	278
1. 電気・電子艤装/279	
2. 配管艤装/280	
3. 機構部品の取付け, 調整/281	
4. エンジン, 計器, 客室艤装/282	
5. 艤装ライン/282	
6. シェークダウン検査とラインオフ/283	
7. 737型機のMAL導入/283	
10.7 整備と試験飛行	284
1. 整備/284	
2. 整備工場/285	
3. 整備作業/285	
4. 飛行前点検/286	
5. 試験飛行/286	
(1) 開発機の試験飛行 (2) 量産新製機, 修理機の試験飛行	
(3) ヘリコプタの試験飛行	
10.8 定期修理	287
1. 受入検査/288	
(1) ステップ1 (2) ステップ2 (3) ステップ3	
2. 構造修理/288	
3. 機能部品修理/289	
4. 試験飛行/289	
10.9 品質保証	289
1. 航空機製造の品質保証の特徴/291	
2. 製造工程の流れと品質保証活動/292	
3. 品質とコスト/293	

索引	295
----	-----

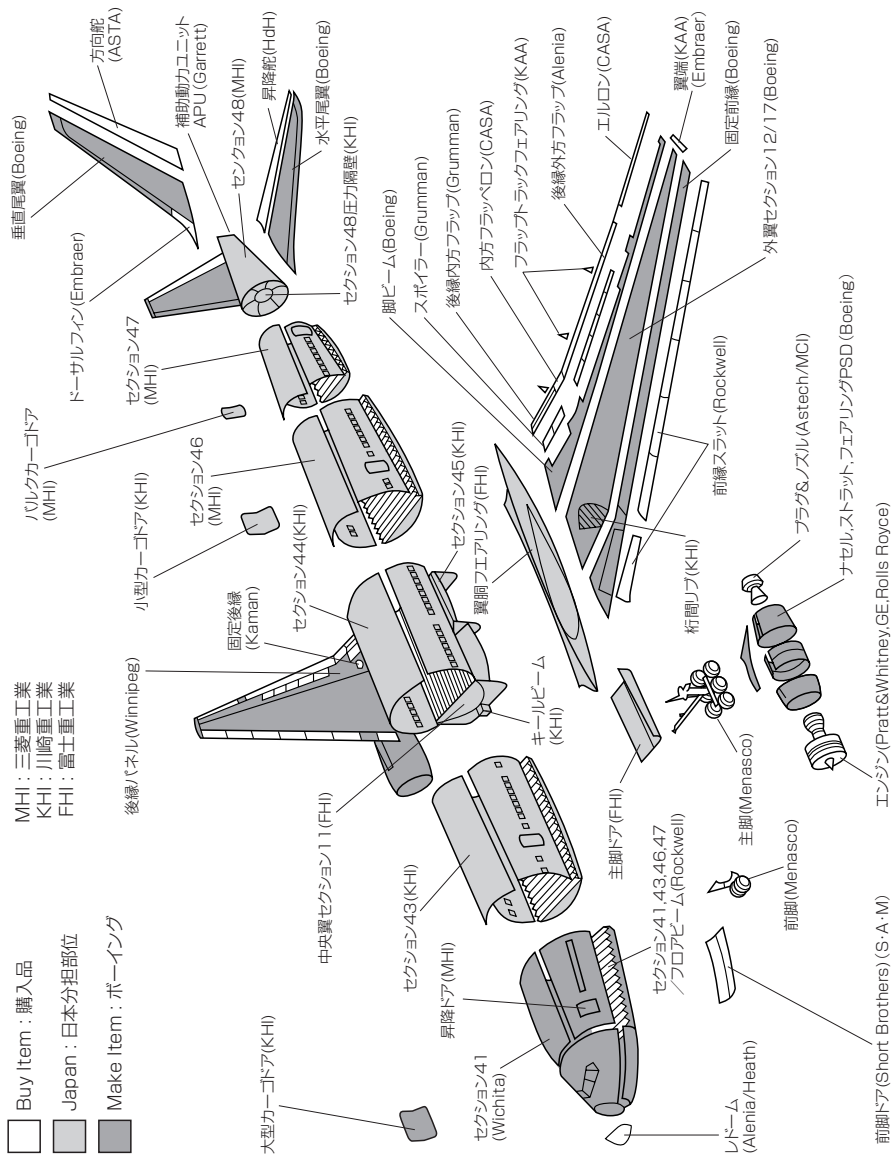


図2.9 航空機の製造分割・区分(777)⁷⁾

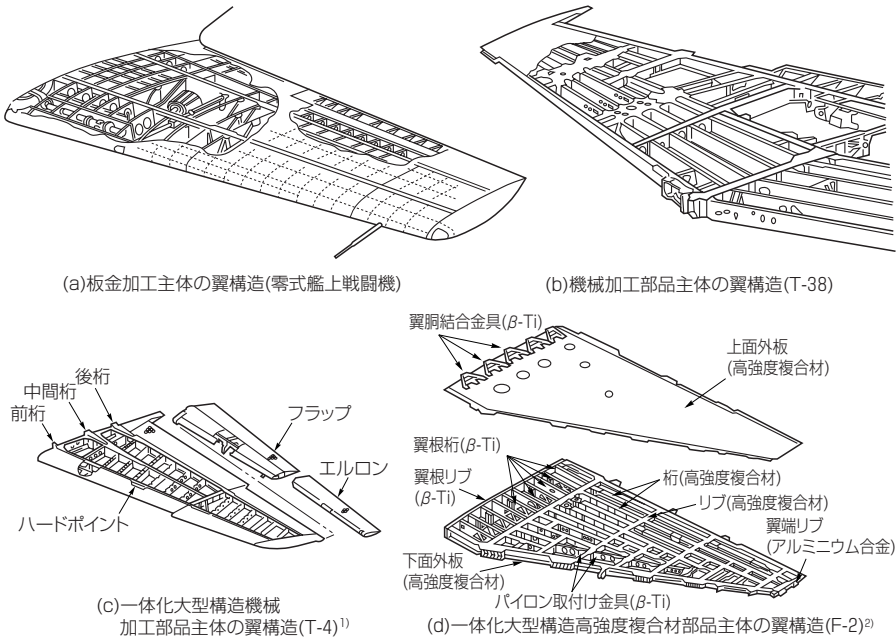


図6.1 主翼構造様式の変遷

び1990年代のF-2戦闘機の主翼構造様式の変遷を示している。

図6.1(a)の零式艦上戦闘機の場合、前後フランジの押出し型材と結合金具類が機械加工、その他はほとんどが板金構造で、国産の超超ジュラルミン(7075)系を初めて桁に採用した。

図6.1(b)のT-38の主翼は後縁部に部分的に板金加工があるが、他はほとんど鍛造材と押出し型材の機械加工部品である。同機は1958年に初飛行後、約1,000機の納入実績を持ち、最も成功した超音速練習機の1つで、日本のT-2高等練習機も同様の構造様式である。

6.1 機械部品の特徴

航空機は、機体構造に数多くの機械加工部品を採用している。通常、この種の部品はコストが高くなり、できるだけ機械加工を避ける設計が一般的である。にもかかわらず航空機に機械加工部品が採用されるのは、高性能化と空気力学的に決められた機体形状という限定されたスペースの中で、大荷重に対して十分な強度を持ち、軽量化できること、さらに機体のライフサイクルコスト上から有利になるためである。

この加工システムでは、1 in. (25.4mm)程度の板厚のCFRPの加工が可能で、アルミニウム合金だけでなく、チタン合金やステンレス鋼など板厚1/2in. (12.7mm)程度までの難削材の板材も加工できる。

7. A380の複合材適用⁽⁴⁾

エアバスA380は、CFRP複合材および「GLARE」(商品名)と呼ぶ先進複合材料を含めて、構造重量比で約40%の複合材を使用している。とくに、民間航空機では世界で初めて中央翼にCFRPを適用し、アルミニウム合金に比較して約1.5tonの重量軽減をはかった。また、この他に垂直尾翼、方向舵、水平尾翼、上方フロアビーム、後方圧力隔壁などに、部分的なGFRPの使用も含め多くのCFRP複合材が使われ、これらのCFRPは樹脂含有量40%のプリプレグを使用している。

A380にCFRPを適用した最重要部位は、胴体と主翼とに結合される中央翼である。このCFRP中央翼は高さ2.5m、容積49m³で、部品板厚は最大45mm、前方、中央および後方の3つの桁、2つの上面パネルと2つの下面パネルで構成され、合計7つのCFRP主要部品から成る。これらの桁やパネルは、コキュア成形法による一体化構造複合材部品として成形加工される。

A380のCFRP中央翼パネルの成形は、あらかじめ切断装置を使用して炭素繊維



写真7.10 ATLによるレイアップ

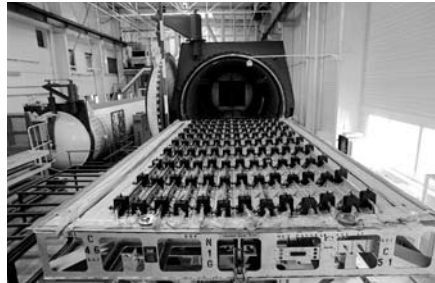


写真7.11 バギング



写真7.12 オートクレーブ硬化



写真7.13 CFRP中央翼パネル



(a) 据置型構造組立治具による組立



(b) ホールtoホール組立法による組立

写真10.2 大型旅客機胴体パネルの治具レス構造組立⁶⁾

最少で済み、比較的簡素な組立治具や移動式の簡素で軽い固定治具で組立でき、コストダウンを実現している（写真10.2）。

一方、構造組立作業の自動化もさらに研究が進み、従来の空圧や油圧によるリベット締結に代わって自動リベッタの技術がさらに進歩している、主翼パネルや桁組立のリベット締結時間を短縮させる電磁リベット締結などが研究、実用化されつつある。この方法は、磁力による反発力を利用したかしめ法で、1回の衝撃で瞬時にかしめができるという利点を持つ（図10.6）。

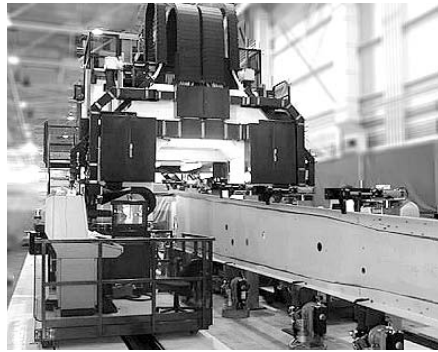


写真10.3 電磁リベッタによる主翼桁自動組立装置

その半面、電磁リベット締結は対向する2基のガンを使用するので、複曲面に対して垂直で常に同軸度を保持する機構を持つ強固なC形フレームガントリータイプ（写真10.3）の構造とするか、各種センサによってそのつどアライメントを検出する方法などが必要で、設備規模が大型化するという問題もある。

また、従来は自動化が困難だった胴体パネル結合作業に、サブ組立した胴体パネルを結合する自動リベッタが開発されている。これは大型航空機の半殻胴体を組み立てるための自動リベッタで、ワークヘッドがリングフレーム上を円周方向に走行して、自動的に穴あけ、締結できる機能がある

写真10.4は、ボーイングC-17輸送機胴体パネル結合部用リベッタである。この大型胴体組立セルは4つのステーション（STA）で構成され、高さ10m、幅20m、長さ約90mある。

最初のSTAは真空カップによる胴体パネル位置決め用ローディング、第2は大型