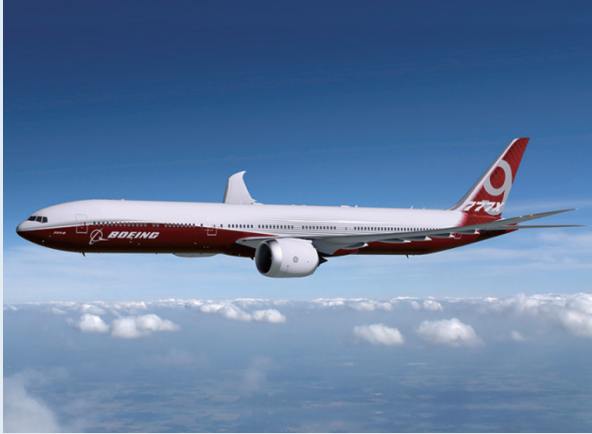


最新鋭大型旅客機「ボーイング777X」 State-of-the-Art Large Commercial Aircraft Boeing 777X



山下博司①*	Hiroshi Yamashita
伊藤慎太郎②**	Shintaro Ito
牧野太郎③	Taro Makino
松井秀司④	Shuji Matsui
矢野史宗⑤	Fuminori Yano

ジェット旅客機の運航機数の堅調な増加が見込まれる中、旅客数の多い路線や長距離路線を中心に「ボーイング777」の後継機となる「ボーイング777X」の需要が期待されており、その開発プログラムが2013年11月にローンチされ2020年の運行を目指している。

当社は設計の初期段階から国際共同開発に参画し、自動設計ツールの導入や組立用ロボットの適用拡大など、低コスト化と自動化に取り組んでいる。

As the number of jetliners is expected to steadily increase, the demand for the Boeing 777X, the successor to the Boeing 777, is expected mainly in crowded and long-distance airline routes. Boeing launched the 777X development program in November 2013 and plans to bring it into service in 2020.

We have participated in this joint international development from an early stage of design and worked on cost reduction and automation, for example, by deploying an automated design tool or enhancing the application range of assembly robots.

まえがき

民間航空機の長期需要予測によると、今後20年で年平均伸び率4.6%の航空旅客輸送量の増加により、ジェット旅客機の運航機数も堅調な増加が見込まれている¹⁾。

1 背景

当社が1990年代に国際共同開発に参画した双発旅客機のベストセラーである「ボーイング777」(777)は、空港混雑や燃油費の長期的な上昇の中、旅客数の多い路線や長距離路線を中心に需要が期待されており、販売競争力を向上するために後継機となる「ボーイング777X」(777X)の開発プログラムが2013年11月にローンチされた。

2 開発計画

「777X」の国際共同開発に対して、当社も図1に示すように従来と同等の製造担当部位について参画を行った。

この機体開発に先立ち、2013年度からボーイング社との共同研究として先進的なアルミ胴体構造の実現に向けて、胴体構造の主要部品を対象として材料・構造・生産技術に関する技術開発を行い、実際の製造設備に反映している。

機体開発においては、「777」の派生型機開発と同様に米国のボーイング社に設けられた開発チームの一員としての

設計解析に加えて、プログラムレベルと呼ばれる全機レベルの作業にも携わった。2015年9月から2017年6月の間に30名程度の技術者が共同開発に参画した。

当初の計画では米国にて設計の完遂を予定していたが、製造性の改善や設計データの品質向上のため、日本においても並行して設計を行うこととなり、30名程度の設計チームを編成して対応した。この日本における設計は、今までの共同開発での経験を生かした高いレベルのコミュニケーションと設計技術により、全体的な開発スケジュールに貢献してボーイング社からも高い評価を受けた。

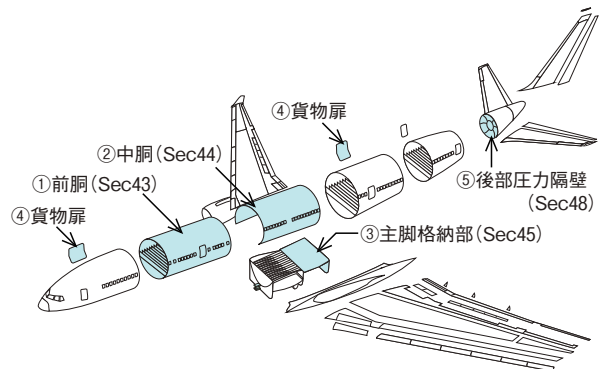


図1 「ボーイング777X」の製造担当部位
Fig. 1 Production workpackage in Boeing 777X

8 ①③ 航空宇宙システムカンパニー 民間航空機プロジェクト本部 民間航空機設計部
② 航空宇宙システムカンパニー 民間航空機プロジェクト本部 民間航空機計画部
④⑤ 航空宇宙システムカンパニー 民間航空機プロジェクト本部 民間航空機生産技術部

* 技術士 (航空・宇宙部門)
** 技術士 (機械部門)

3 機体概要

「777X」には座席数の多い「ボーイング777-9」(777-9)と航続距離の長い「ボーイング777-8」(777-8)の2機種がある。ボーイング社は最初にルフトハンザドイツ航空から「777-9」の発注を受けて開発を開始した。

(1) 主要諸元

「777-9」は、現行の「ボーイング777-300ER」(777-300ER)の派生型として胴体延長している。標準の座席数は400席を超え、航続距離は14,075km(7,600海里)である。主翼構造は空力性能向上のためこれまでのアルミ合金の代わりに複合材を採用しており、翼長を延長した一方で空港の利用制限幅内に収まるように翼端を折り畳み式とした。エンジンには新型のゼネラル・エレクトリック社(GE社)製を採用し、現行機より20%の燃費向上を図っている。主要諸元の比較を表1に示す。また、図2に示すように内装はLED照明や大型客室窓を用いるとともに湿度増加を図った最新様式にしている。

表1 「777-9」と「777-300ER」の諸元
Table 1 Specifications of the 777-9 and the 777-300ER

機体	「777-9」	「777-300ER」
座席数	414席	396席
航続距離 [km(海里)]	14,075 (7,600)	13,649 (7,370)
全長 [m]	76.7	73.9
全幅 [m]	71.8 (駐機時64.8)	64.8
全高 [m]	19.5	18.5
エンジン	「GE9X」	「GE90-115BL」

表2 「777-9」と「777-300ER」の担当部位(前胴・中胴)の主要構造
Table 2 Major structure of workpackage (forward and mid fuselages) in the 777-9 and the 777-300ER

機体	「777-9」	「777-300ER」
乗降扉位置	前胴の中央	前胴の前方
標準座席配置	横10列	横9列
キャビン与圧 [kPa(psi)]	62 (9.0)	59 (8.6)
客室窓高さ [mm(in)]	441 (17.36)	390 (15.36)
胴体外板材料	AL2524/AL2029	AL2524/AL2024



図2 「777X」の内装イメージ
Fig. 2 Interior image of the 777X

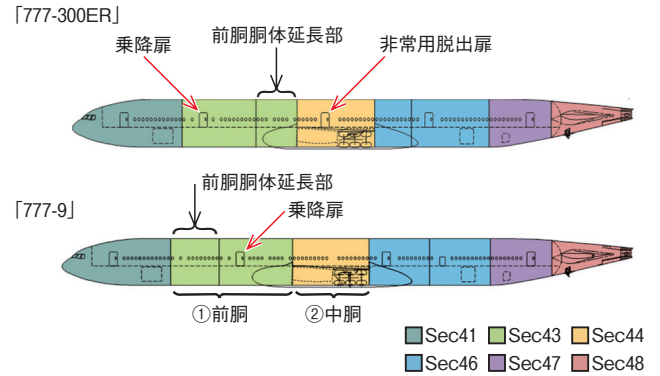


図3 胴体延長部の変更概要
Fig. 3 Overview of change to the fuselage extension

(2) 担当部位の主要構造変更

「777-9」では図3に示すように前胴胴体延長部を前胴(Sec43)の機首側に設けたことで、乗降扉の位置が現行機のように前方に偏らなくなっている。このように、乗降扉の位置が機体中央部の乗客から近くなったため、緊急脱出²⁾用に設けていた中胴(Sec44)部の非常用脱出扉を撤廃して重量とコストを削減させている。

また、座席配置については横10列を標準とするためキャビン幅を拡大することとし、キャビンの側方フレームを板金から機械加工の一体化部品とするなどして、現行機より側方フレームを片舷最大42mm(1.65in)低くした。

その他、キャビン与圧の向上や客室窓の大型化などによりキャビン環境を「787」と同様に向上させたり、胴体下面の一部の外板に耐腐食性材料(AL2029)を適用するなど、信頼性・整備性を向上させている。担当部位である前胴・中胴の主要構造の比較を表2に示す。

4 「777X」設計・生産における課題

(1) 設計

「777X」は販売競争力向上のため、その胴体構造は現行機の基本構造様式を踏襲しつつも、仕様変更に伴う設計変更に加え、コスト・重量最適化のためにほとんどの主構造部品の再設計が必要であった。このため限られた日程と予算の中で、多数のモデルと図面の作成が求められた。また、自動化の適用拡大のために、ツールクリアランスの確保など、ロボットや工作機械などの生産設備の仕様を早い段階で設計に反映することが求められた。

(2) 生産

「777X」の生産においては、ボーイング社の最終組立への対応と側方フレーム一体化への対応のため高精度化が必要であった。

(i) ボーイング社の最終組立への対応

ボーイング社は図4に示すように、胴体最終組立ライン



図4 ロボットを駆使した最終組立(ボーイング社内)
Fig. 4 Final assembly using robots (at Boeing)

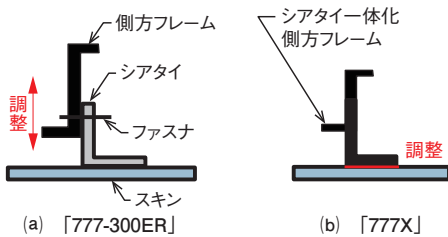


図5 側方フレーム一体化
Fig. 5 Integrated side frame

についてロボットを駆使した治具レス組立工法に刷新する決定を行った。これにより、従来の治工具基準の工法から、当社担当のパネルに穿孔された基準孔を使った工法に転換された。この基準孔の精度が悪いと、ボーイング社の最終組立工程において設計通りに組立ができずに各種調整作業が発生してしまうことになる。これは計画生産の阻害要因となるため、パネルの基準孔精度を上げる必要があった。

(ii) 側方フレーム一体化対応

図5(a)に示すように、現行の「777-300ER」は板金で部品製作された側方フレームをシアタイという構造部材を介して胴体外板に締結する構造様式のため、フレームやスキンそのもののバラツキもシアタイで吸収できる。一方、同図(b)に示すように「777X」においてはシアタイも含めた機械加工の一体化部品となり、胴体外板に側方フレームを直接取付ける構造に変更になった。このため、部品精度が悪いと組立工程において隙間を埋める作業が膨大になる可能性があるため、精度を向上する必要があった。

また、さらなる生産性の効率化を目指して、従来型の組立専用設備の活用のみではなく、ロボットの開発も含めて自動化の拡大を図ることとした。

5 取り組み

(1) 設計

設計における作業効率化のため、CADソフトであるCATIA V5のリレーショナル・デザインやプログラミング機能を用いた自動設計ツールを胴体の主要構造を対象に

幅広く適用した。リレーショナル・デザインとは部品寸法値を変更すると追従して3D形状が自動的に修正されるなどのCADソフトの機能である。これらにより、部品の3Dモデルのみならず、3Dモデルを元にして2D図面も一部自動作成した。自動設計ツールは、設計要求・適用材料・生産設備をあらかじめ考慮して部品の形状や締結位置を決定することもできる。これにより、小人数かつ短期間で多数の部品を一定の品質で設計することが可能となった。

また、部品接合部の穿孔と気密/防食のために部品間に合わせ面シールを施した締結部位において、穿孔時に発生するバリや弾性のあるシールの介在による強度低下を許容できないことがある。このような場合には生産技術部門と調整して、穿孔方法・締結順位・部品保持の方法・場所などの詳細な製造情報を製造図面や工程指示書に規定した。

(2) 生産

(i) 高精度化

高精度化の取り組みとして部品加工中の温度管理の厳格化を行った。従来は加工直前の温度環境に応じて生産設備の動作プログラムの補正を行っていたが、加工途中の温度変化に追従できないため、1日にわたる加工の中で寒暖差の大きい場合には部品精度にわずかな差を生む原因となることがあった。「777X」では、大物構造部材である側方フレームの機械加工および10mを超える胴体外板パネルやストリンガのサブ組立作業において、温度補正による外乱を排除して設計標準温度で加工できるようにした。また、胴体外板パネルにおいては、設計通りに加工するために図6に示す高精度アクチュエータを装備した外板保持具を製作し、基準孔の高精度穿孔を実現した。

部品の高精度化施策に加えて、パネルの最終組立を図7(a)に示す従来の縦置きから同図(b)に示す横置きに変更

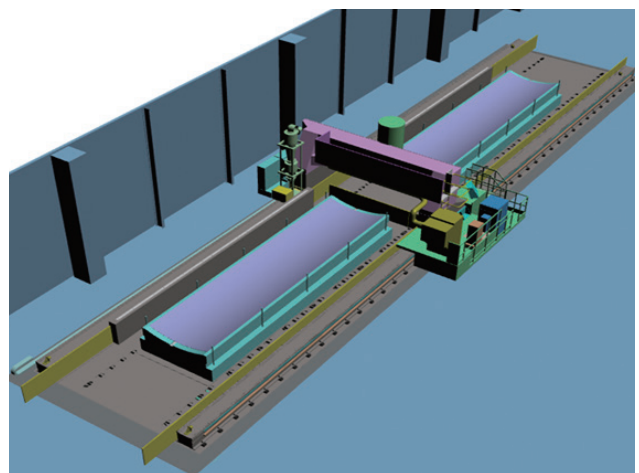
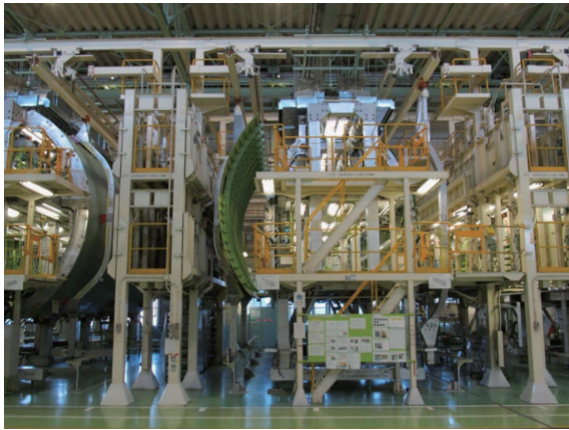
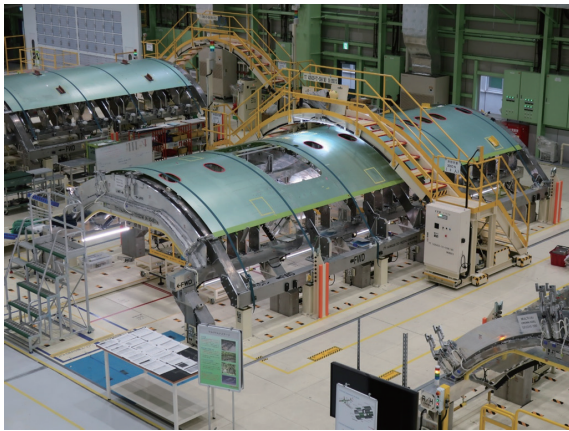


図6 高精度アクチュエータを装備した基準孔穿孔システム
Fig. 6 Coordination hole drilling system with a high precision actuator



(a) 縦置き



(b) 横置き

図7 最終組立治具
Fig.7 Final assembly jig



図8 リベッターによる自動化拡大
Fig.8 Enhancement of automation using a riveting machine

し、胴体外板パネル内面を治工具基準に対し安定して均一にならわせ、設計通りのパネル内面を構築することを可能にした。

(ii) 自動化の拡大

最終組立において、従来は人手で取付けを行っていた作

業の自動化を実現した。パネルブライス作業に加えて機械加工一体化フレームの取付けやドア周辺構造の取付け作業を、図8に示すようなりベッターにより自動化した。

自動化拡大の一環としてロボットと設備・治工具を組み合わせた新たな工法も導入した。従来のドリルテンプレートと汎用パワーフィード・ドリルを組み合わせた工法を見直し、高剛性ロボットによる大口径穿孔やリベッターとロボットを組み合わせたサブ組立作業を実現した。また、高剛性ロボットと大型治工具を組み合わせ、従来できなかった多台持ち作業を実現した。

あ と が き

2018年2月に名古屋第一工場より「777-9」初号機の出荷を完了した。今後、2019年の初飛行を経て型式証明を取得し、2020年にボーイング社よりエアラインへの引き渡しが始まる予定である。「777X」は2018年1月末時点で340機の受注を獲得している。

現在、派生型である「777-8」の開発を進めているが、「777-9」の作業を通して得られた経験から、さらなる効率化や改善を進めるべく、ボーイング社と連携をとりながら開発を進めて行く。

最後に、「777X」の技術開発において、ご指導・ご支援をいただいた(公財)航空機国際共同開発促進基金、および(一財)日本航空機開発協会に感謝の意を示す。

参 考 文 献

- 1) 日本航空機開発協会:民間航空機に関する市場予測 2017-2036, pp.26 (2017)
- 2) FAR Part 121 Sec. 121.291: Demonstration of emergency evacuation procedures



山下 博 司



伊藤 慎太郎



牧野 太 郎



松井 秀 司



矢野 史 宗