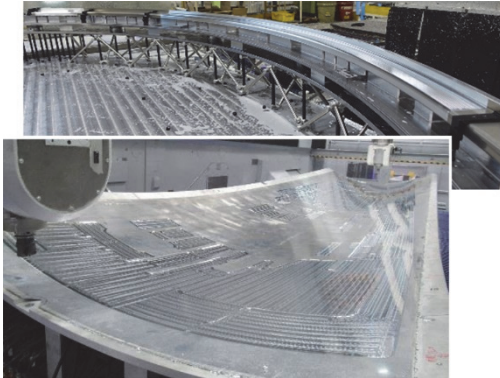


航空機部品の軽量化と環境負荷削減： ケミカルミーリングから高精度機械加工への移行

Realizing Lighter Aircraft Parts with Reducing Environmental Impacts:
Change the Manufacturing Process from Chemical-milling to High-precision Machining



藤井 和慶^{*1}
Kazuyoshi Fujii

江藤 潤^{*2}
Jun Eto

田中 利幸^{*3}
Toshiyuki Tanaka

橋野 高明^{*3}
Takaaki Hashino

航空機アルミニウム合金製部品のスキンやフレームの軽量化で用いられるケミカルミーリング法は、環境負荷の課題があり撤廃が望まれている。そのため、三菱重工業株式会社では、ケミカルミーリング法に替わる新たな環境対応型高精度機械加工法を開発してきた。開発した加工法を2017年より生産しているBoeing社の777Xシリーズに適用開始し、最新鋭の貨物機777-8Fでは、機械加工への全面移行を完遂した。本報では、持続可能な航空機製造の実現のために開発したMAG加工法とその効果について報告する。

1. はじめに

2020年以来の民間航空機の生産機数は、COVID-19の影響を受け、非常に大きな落込みを記録した。しかし、ワクチンの普及と共に旅客需要は回復し、航空機需要もそれに併せて回復に向かっており、中長期的にはさらに力強く成長すると予測されている⁽¹⁾。

三菱重工業株式会社(以下、当社)の民間機事業は、今後の需要回復期においてお客様からの受注を拡大すべく、競合サプライヤに対してより魅力ある製品を提供することが必須であると考えている。また近年、地球環境保全への高まりにより、化学物質管理に関するREACH規制など環境対策への取り組みが重要となっており、航空機生産は、魅力ある製品を生み出すことに加え、これまで以上の環境対策の実行と成果が求められている。

当社はBoeing社のTier1サプライヤとして、世界最大の双発機777Xの後部胴体の生産を担っている。その重要基幹部品であるアルミニウム合金製の外板(スキン)や周方向の構造部材(フレーム)といった板金加工部品では、軽量化のために、強アルカリ性の液体に部品を浸漬し、素材面を溶解して削るケミカルミーリング法が採用されてきた。この手法は、多くの実績があり板厚加工精度に対する信頼性は高い一方で、大量の化学薬液の廃液処理など環境負荷が高いことや、処理前後の付随作業が多いことが課題であった。そのためケミカルミーリング撤廃が望まれてきたが、成形後の寸法精度のバラつきが大きい板金部品に対して、従来の機械加工法では加工不可能であり、有効な代替工法がなかった。

そこで当社は、これらの課題を解決するために、2012年より、環境負荷の低い機械加工法への転換を決心し新技術の開発に着手した。そして2017年より生産を開始した777Xシリーズの旅客機である777-9はスキンへ^{(2), (3)}、そして2025年より生産を開始した最新鋭の貨物機777-8Fでは、スキンに加えてフレームにも本技術を展開し、ケミカルミーリングが必要であった全部品の機

*1 民間機セグメント 技術第一部 主席技師

*2 民間機セグメント 工作部 博士(工学)

*3 民間機セグメント 工作部

械加工化への移行を完遂した。

本報では、ケミカルミーリングに代わる先進的な環境対応型高精度機械加工法として当社が開発した、MAG (Mitsubishi Advanced Green) 加工法とその効果について報告する。

2. 対象とする部品の概要

777X の胴体は、高強度アルミニウム合金材料を用いたモノコック構造が採用されている。当社が担当している後部胴体は、図 1(a)に示すように大きく 3 つのセクション(以下、SEC), SEC46, 47, 48 がある。各 SEC は複数のパネルで構成されており、特に SEC47, 48 のパネルはダブルコンターと呼ばれる 2 方向の曲率変化をもった複雑な曲面形状を有する。本報の MAG 加工法が対象とする部品はパネルを構成するスキンとフレームである。

図 1(b)に示すダブルコンタースキンは、素材厚さ数ミリに対して、幅 2m×長さ 9m になる世界最大クラスの大型スキン材を用いた板金加工部品である。曲率半径が後方へ行くほど小さくなっており、ストレッチ成形と呼ぶ専用の成形金型を使って成形を行う。成形後のスキン内面には、フレームなどの構造部材との結合部に応じて、軽量化のために複数のポケット板厚加工が必要となる。

図 1(c)に示すフレームは、コイル材を複雑断面かつ長手方向に湾曲に成形した、最大部品長が 6m 近い大型の板金加工部品である。剛性を向上させるために Z 型の断面を有しており、ロール成形で Z 断面とおおよその周方向の曲率形状へ加工した後、必要に応じてストレッチ成形により必要とするコンター形状へ成形する。フレームもスキン同様に軽量化のポケット加工が必要とされ、急峻な Z 形状の断面変化に沿って板厚加工が必要となる。

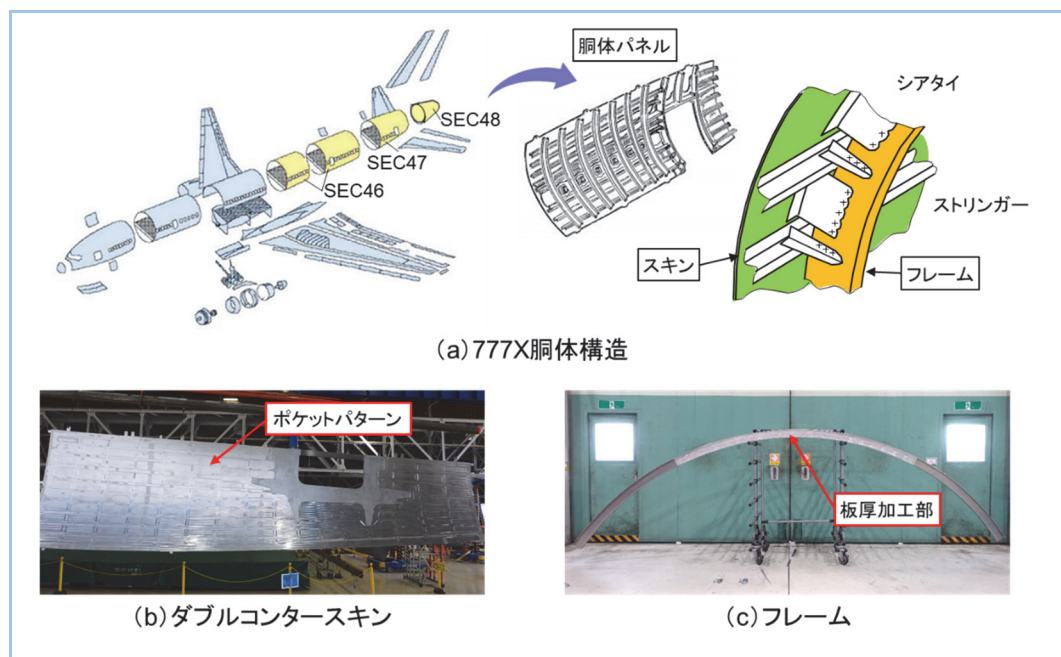


図1 777X の胴体構造及び MAG 加工対象のダブルコンタースキンとフレームの荷姿

3. ケミカルミーリング工程の課題と解決策

ケミカルミーリング法は 1953 年に考案され、これまで世界中の航空機メーカーで用いられてきた一般的な手法である⁽⁴⁾。ケミカルミーリング工程及び複数回のエッチング処理中のスキンの外観を図 2 に示す。工程は、薄板を板金加工によって複雑な形状に成形した後、①保護剤の密着性を高めるアルカリ洗浄、②非加工部をエッチングから保護するための保護剤塗布、③加工パターンに合わせて保護剤に切込みを入れるレーザスクライプ、④強アルカリ性の薬液で金属を溶解するエッチングによってポケット板厚加工を施す。複数の段差を持つポケット形状では、③スクライプ

工程で行った切込みを使って、被加工部のみ保護剤を剥がしながら複数回のエッチング工程でポケット形状を加工する。

ケミカルミーリングの利点は、板厚加工が必要な面のみの保護剤を剥離し、加工面を露出させ一定時間アルカリ液に浸漬する作業を繰り返すことで、複雑な形状を加工することができる点である。加えて、アルカリ液への浸漬時間で板厚精度をコントロールできるため、形状によらず安定した高精度加工を一度に広範囲に実施できる点もある。

一方で、使用後の強アルカリ液の処理及びエッチングによって生じた生成物は、環境への負荷が高く処理費がかかることや、ガス炊きボイラで大量のエネルギーを使用する高温処理プロセスであるため CO₂ 排出量が多くなるといった、環境面での課題がある。また、大型ケミカルミーリング処理槽や大型レーザスクライブ機などの設備面での制約から、1 回の処理数が限定されてしまう。このため部品の加工リードタイムは長期間となり、緊急補用品の場合など、お客様へのタイムリーな部品供給は難しかった。

ケミカルミーリングから高精度機械加工への移行は、軽量かつ高精度な付加価値の高い部品を、環境負荷の低い生産ラインを使ってタイムリーに供給することができるため、航空機 OEM やエアラインのお客様が享受できるメリットは大きい。しかし、その実現には、寸法精度のバラつきが大きく、複雑形状を持つ板金部品に高精度な機械加工を施す必要があった。そこで当社では、この相反する課題を解決するために、新工具や高精度形状測定技術、及びその測定結果に基づく補正技術など様々な開発を行い、これらを高度に組み合わせた高精度機械加工法 (MAG 加工法) を開発、実用してきた。後章では、スキン及びフレームの機械加工化のために開発した技術の概要について述べる。

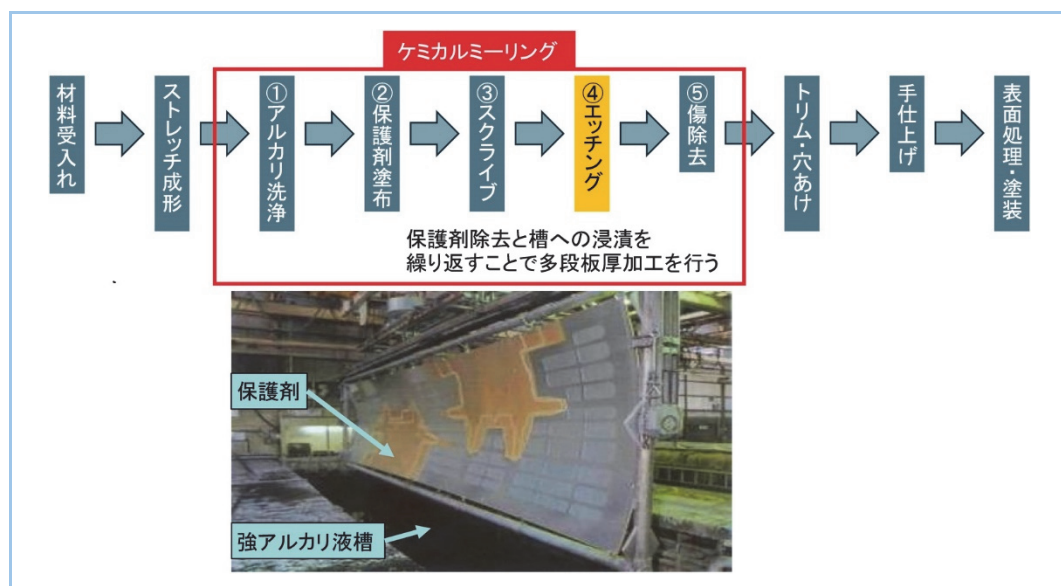


図2 ケミカルミーリング工程と処理中のスキン外観

4. スキン MAG 加工法の開発

4.1 スキン MAG 加工法の概要と開発課題

ダブルコンタースキンは全面にポケットが配置されており、ポケットは組み付く部品に応じた複雑な形状と板厚のパターンを持っている。ポケット形状の特徴として、図3に示すように、板厚変化部を繋ぐテーパや、スキン折れ目のキンクがあり、また疲労強度低減のためポケット外周部にフィレットを設ける必要がある。

スキン MAG 加工は、ストレッチ成形された複曲面形状のスキンを、形状ごとに製作したバキューム機能を備えた機械加工用治具に位置決めを行い、バキュームで真空吸着保持する。この状態で、大型の縦型5軸NC機械加工機へ投入し、高精度なポケット板厚加工、穴あけ加工、外周

形状のトリム加工を段取り替えなく、1回で加工する工法である。

この加工法の確立に向けては、大きく二つの課題を克服する必要があった。最初の課題は、加工が必要なポケット形状が複雑な複曲面形状を有しているにも関わらず、技術要求から疲労強度を向上させるために従来の要求面粗度の 1/4 という極めて高い表面性状を機械加工によって得る必要があったことである。2 つ目の課題は、板金部品の成形ごとに生ずる寸法精度のバラつきにより、吸着されたスキンに僅かなうねりがある状態でも、要求されるコンマ数ミリの板厚要求精度を確保する必要があることであった。

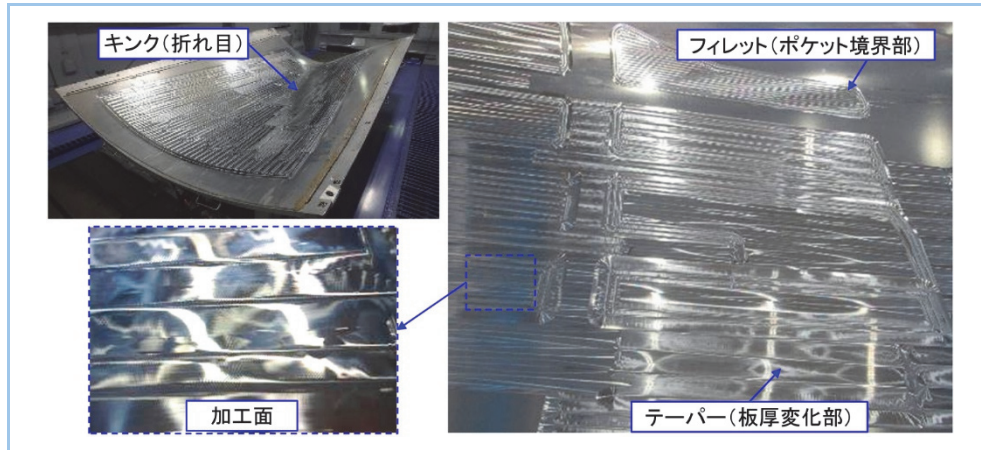


図3 ダブルコンタースキンの MAG 加工面と部品形状

4.2 大径工具レンズカッターの開発

複曲面を持ったポケット形状を、通常のエンドミルやフライス工具の刃底のフラットな面で加工すると、加工面には鋸型のヘムステッチと呼ばれる加工パス間の段差が生じる。そのヘムステッチの山高さ(Peak to Valley height 以下、PV)は、機体の要求仕様から最大高さが規定されている。これを低く抑えようとする、小径工具を使用して隣り合うパスとの間隔(Step Over 以下、SO)を小さくする必要があり、結果として膨大な加工パス数による加工時間の長大化を招いてしまう。そこで当社では、図 4 に示す、工具底面にポケットの複曲面形状に最適になるようなレンズ R と呼ぶ形状を設けたレンズカッター⁽⁵⁾を開発し、工具の大径化を実現した。これにより複曲面でも PV 値を要求内に抑えつつ、SO 値を最大化させることができるため加工時間を短縮できる。また、レンズカッターの刃先には、高い面粗度要求を達成するために、ロウ付けされた焼結ダイヤモンド(Polycrystalline Diamond 以下、PCD)を採用した。PCD はその硬さから鋭利な刃先を維持できるため、9m×2m の大型スキンを全面に渡って高い面粗度を確保しつつ加工することができる。ただし、PCD は工具製作時に刃先端に数ミクロンの僅かな凹凸が生じるだけで、加工面は劇的に悪化するため、製作段階での緻密な生産管理が重要となる。

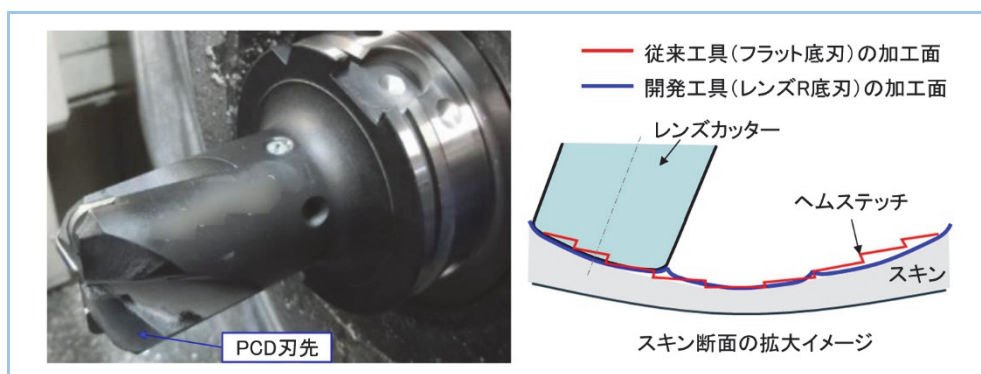


図4 MAG 加工用レンズカッターと加工面

4.3 成形形状などのバラつきによる治具と材料のギャップ対策

先述したように、MAG 加工法の最大の課題は、要求する板厚加工精度に対して板金部品のバラつきが大きいことである。そのため、従来は荒加工を行った後、板厚を計測し切込みを補正して仕上げ加工を行う 2 回加工を標準加工法として運用してきた。しかし、レンズカッターを使ってもなお 2 回加工を行うと、1 回当たりの加工時間が大きいと工数は単純に倍増してしまい十分な生産性を確保できなかった。このバラつきを低減させるために、スキン成形後の形状をスプリングバック解析により予測し、金型に見込みを加えて形状精度の高精度化を行った。しかし、これを行っても板厚加工精度を確保するには十分ではなかった。この原因として、素材板厚や特性の微妙な変化による影響で成形精度が僅かにバラつき、加工ごとのスキンと治具間のギャップに影響を与えていることが想定された。

そこで、スキンの治具吸着後で加工前に、スキンの板厚及び素材上面位置を計測することにより、スキン裏面と治具間のギャップを高精度に計測し、これを板厚切込み量に反映させることができる補正手法:超音波リニア補正技術を開発した(図 5)。加工機ヘッドに取り付けた高精度超音波センサによって、スキン板厚のバラつきを計測、そしてスキン上面の位置をタッチプローブによって計測することによって、裏面のギャップを高精度に計測している。このデータを基に、最適な板厚切込み量を算出し、決められたエリアごとに切込み量を補正した NC プログラムを自動生成し加工を行っている。しかし、隣り合うエリア間で補正量の差分による段差、ミスマッチが問題となった。そこで、隣り合うエリアの補正量を線形的(リニア)に変化させる 3 次元リニア補正技術を開発し、ミスマッチ防止を図った。

この超音波リニア補正技術を採用したことで、荒加工が削減され仕上げ加工のみとなり、高品質なスキンを短いリードタイムで供給できる生産システムを構築した。

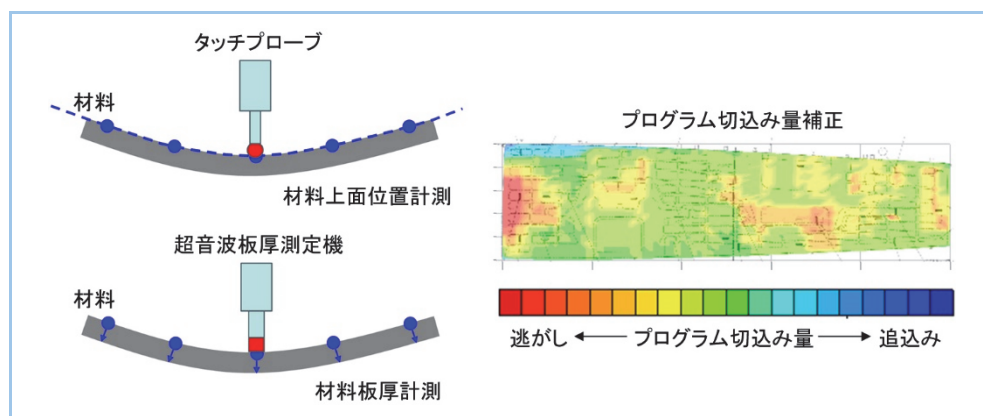


図5 超音波リニア補正プロセス

5. フレーム MAG 加工法の開発

5.1 フレーム MAG 加工法の概要と開発課題

フレームのポケット形状の特徴として、図 6(a)に示すように、急峻な内・外側の曲げ R 部を含む Z 型断面全体が板厚加工部であることに加えて、平面部には部品取付けのためのパッドアップやポケット境界部には応力集中を防ぐためのフレットが設けられる。さらに数十本に及ぶフレームは機体形状及び強度要求に応じて断面形状、コンター形状、ポケット形状がすべて異なっている。形状誤差としては、図 6(b)に示すように平面部や側面部と曲げ R 部といった断面の形状誤差と、コンター形状の成形量に応じた長手方向の形状誤差を持っている。

このフレームを機械加工化するためには、Z 型断面及び長手方向の複合的な形状誤差に倣ってミクロンオーダーで工具軌跡を制御する必要がある。従来の機械加工法では NC プログラムによって決められた形状を“削り出す”ことしかできないため、形状誤差を持つフレームに対して決められたポケット形状を“削り込む”加工は不可能であった。先述したスキン MAG 加工法の補正方法

だけでは、急峻で 3 次元的な形状誤差を持つフレームには対応できない。

そこで、フレーム全体の 3 次元形状誤差を把握し、その形状に倣って工具軌跡を 3 次元的に追従しながら高速高精度に加工するフレーム MAG 加工法⁽⁶⁾を開発した。

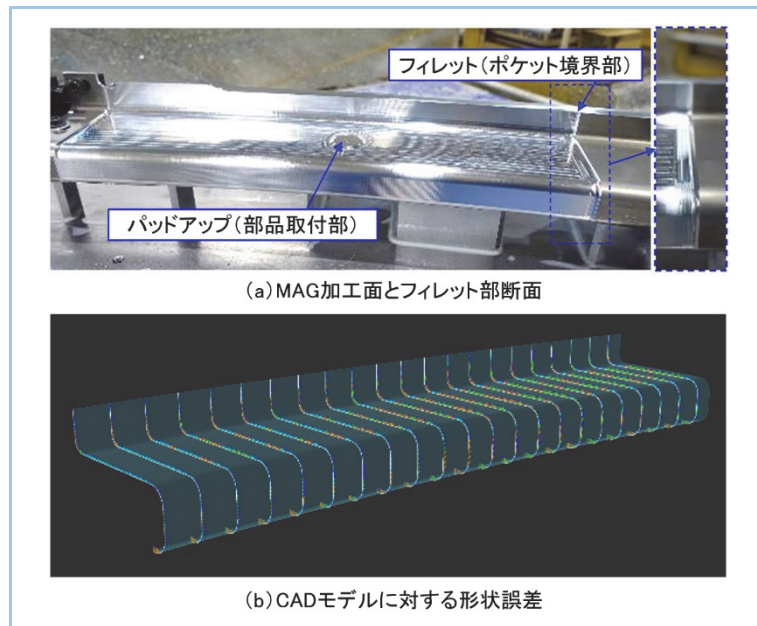


図6 フレームの MAG 加工面と部品形状

5.2 フレーム MAG 加工法の要素技術

フレーム MAG 加工法の実現のために、まず、図 7 に示すフレーム用に特化した機械加工用治具、切削工具などの要素技術を開発した。

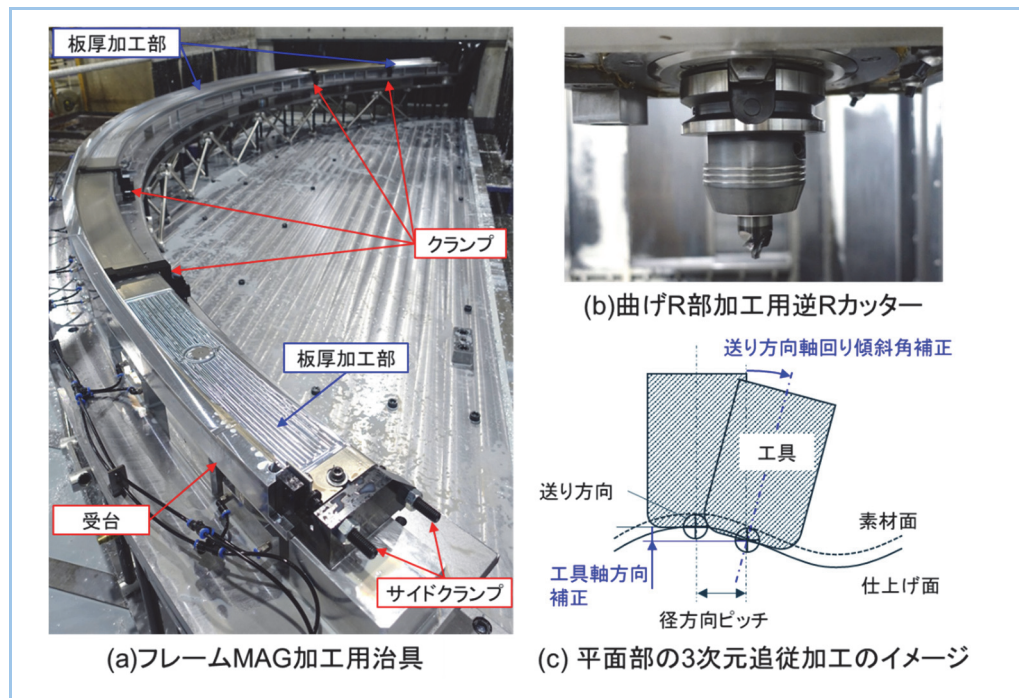


図7 フレーム MAG 加工の要素技術

図 7(a)はフレームを最少のクランプで保持できる治具構造を示す。フレームのような低剛性の長尺部品を保持する場合、従来の多数のクランプで抑え込む方法では十分にフレームを治具に矯正し保持することができない。またレーザ計測・機械加工においてクランプが干渉してしまう。そこで本治具は、両側に設けられた周方向に荷重を付与できる機構を設けている。これを使って、治具に押し付けることにより、レーザ計測やポケット板厚加工時にセンサや工具がフレームに干

渉することなく高精度な保持ができるようになった。

次に、図 7(b)は専用開発した切削工具の一例として、外側の曲げ R 部用の逆 R カッターを示す。これらは、曲げ R 部の曲率半径の誤差を考慮しつつ、最小の加工パスで良好な加工面の創成が可能になるよう工具形状が最適化されている。

5.3 3次元追従加工法実現のための高精度スキャン技術とデジタル補正技術

前述の要素技術を使っても板厚公差以上の形状誤差があるため、高速高精度な加工を実現することはできない。そのため、フレーム MAG 加工法実現で最も重要な技術として、フレーム形状を高精度に把握し、加工ごとに変化する形状に対応できる 3 次元追従加工法の開発が必須であった。

図 7(c)は 3 次元追従加工技術のうち、平面部の 3 次元追従加工のイメージを示す。平面部の形状に倣って工具軸方向だけでなく送り方向軸回りの工具傾斜角度を同時制御することで、板厚加工精度を満足しながら径方向ピッチ間のミスマッチを防止することができ、形状に追従しつつ良好な加工面の創成が可能となる。

開発した部品形状の高精度スキャン技術とデジタル補正技術によるフレーム MAG 加工プロセスの流れを図 8 に示す。まず①加工機主軸に取り付けたラインレーザセンサを用いて、加工機上でフレーム形状を高速かつ高精度にスキャンする。従来の接触式(プローブ)計測では計測点数が不十分であり、また加工機外に設置した 3D スキャナを使用した場合は機械座標との位置の関連が取れず測定精度が大幅に低下する。開発した 3 次元形状スキャン技術により機械座標値と計測値の高速同期データが取得可能となる。次に、②複数角度のスキャンデータを処理して部品表面のサーフェイス生成し、③それらを結合し実際の部品形状を機械座標系上で高精度にデジタル化(メッシュモデル化)する。そして、④生成したモデルに対して、あらかじめ設定した加工パスを 3 次元的に補正する。最後に、⑤加工パスを結合し補正された NC プログラムとして出力することで、部品形状に追従する 3 次元追従加工が可能となる。

本技術によって加工対象のデジタルツインを構築できるため、生成した追従加工パスを加工シミュレーション上で検証することも可能となる。これにより、フレーム MAG 加工法の開発段階において 3 次元追従加工法の開発時間を大幅に短縮することができた。

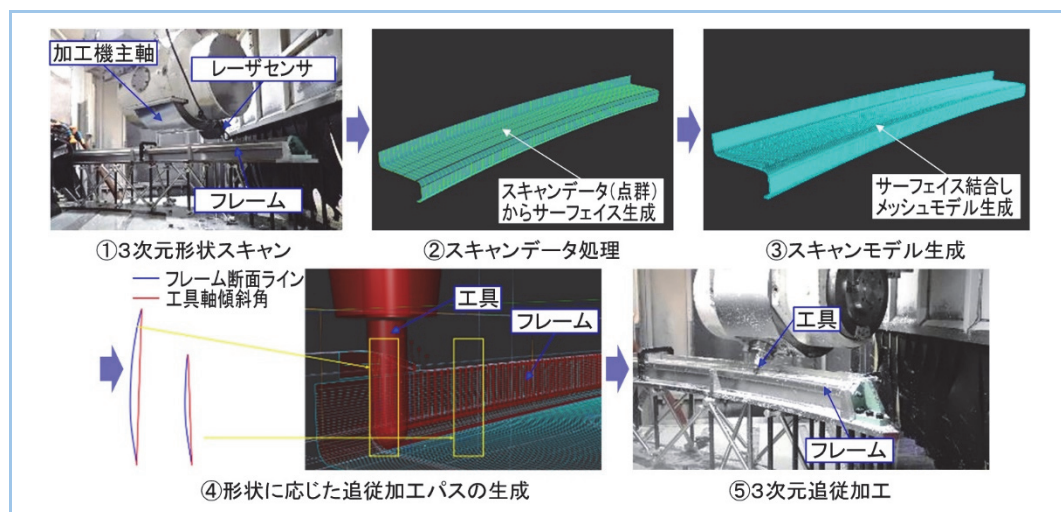


図8 フレーム MAG 加工プロセス

6. まとめ

今回開発した MAG 加工法は、当社独自の補正技術により仕上げ加工のみでスキンやフレーム全面を仕上げるため、高能率であることに加え、補正された最適加工パスによりパス間や工具間のミスマッチの少ない高品質な加工面を実現できる。また、機械加工化したことによりケミカルミ

ーリングでは不可能であった、ポケットやフィレット、テーパー形状の加工が実現できることから、航空機胴体に要求される高い疲労強度を維持しつつ軽量の部品を実現することができる。さらに板厚加工と同時に、組立工程で必要とする高精度な位置決め基準穴と部品外周形状を加工できるため、部品を高精度化でき、今後適用拡大が進む組立工程の自動化も容易となる。

近年の航空機構造は、複合材部品が主流になりつつあるが、この MAG 加工法を活用することで、アルミニウム構造部品でも非常に安価で更に軽量、高精度なスキン、フレームを次世代航空機に向けて提案することが可能となる。

MAG 加工法は Boeing 社より適用認可を順次取得し、777X シリーズの最新鋭の貨物機である 777-8F で全面適用したことにより、生産時における強アルカリ液の使用量はゼロ化された。引き続き 777X の旅客機である 777-9 ヘフレーム MAG 加工技術の適用を行い、777X シリーズでの強アルカリ液の完全ゼロ化を 2026 年までに完了させる予定である。

最後に、2012 年より開発を開始した本スキン／フレーム MAG 加工法には、長年に渡り様々な関係者にご協力いただきました。特に、エンジニアリング面では株式会社アットロボティクス、株式会社シーアールイー、工具開発の面では、株式会社井高を通じて様々な工具メーカからご支援を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 民間航空機に関する市場予測 2024-2043, 日本航空機開発協会 (2024)
- (2) 上妻慎司ほか, 航空機板金スキンの板厚加工におけるケミカルミーリングレス化の実現, 第 60 回飛行機シンポジウム論文集 (2022), ROMBUNNO.3B06
- (3) 江藤潤ほか, 精密工学の最前線, 精密工学会誌 88 巻 1 号 (2022)p.1~4
- (4) 肝付兼博, 航空機におけるケミカルミーリング加工法, 日本航空宇宙学会誌 第 20 巻 217 号 (1972)
- (5) 特許第 7114508 号 出願人 三菱重工業株式会社, エンドミルの生産方法及び切削加工方法
- (6) 特許第 7424589 号 出願人 三菱重工業株式会社, 株式会社アットロボティクス, 加工方法