

トヨタ自動車における次期CAMの『適用事例』

Application Cases of the Next CAM in Toyota Motor Corporation

平井康夫, 大坪正典, 阿部英弥

要約 トヨタ自動車株式会社は、これまで以上に高品位な金型を低コスト、短期間で製作するためCAM作業の工数削減および高能率・高品位加工を目指し、日本ユニシスの次期CAMをプレス分野に導入し、2015年より適用を開始した。次期CAMはプレス金型全体に対し粗加工から仕上げ加工をするためのCAM機能を有しており、プレス金型の製品部、構造部およびプロファイル部の全ての加工箇所を対象に適用した。

本稿は、それらの加工箇所に対し次期CAMの自動化機能を用いたCAM作業の工数削減事例、および各種加工機能を用いた高能率・高品位加工の事例を紹介する。

Abstract Toyota Motor Corporation launched the Next CAM system to produce the highest quality die with minimum cost and shortest manufacturing lead time. This CAM system has many CAM functionalities which cover all machining process through roughing machining to fine machining process. And these functionalities cover all die area such as die surface area, die structure area and profile area.

In this paper, we describe the use case of man-hour reduced by using automated functionalities and the use case of high performance and quality achieved by using new machining functionalities.

1. はじめに

トヨタ自動車株式会社（以下、トヨタ）の造型部門では良い自動車製品製作のため、常に高品質な金型を低コスト、短期間で製作することを目指している。そのため、金型製作のコア作業であるNC加工において、高能率・高品位加工を実現するとともに、NCデータ作成作業（以下、CAM作業）の工数削減を追求している^[1]。

本稿では、トヨタが従来以上のCAM作業の工数削減と高能率・高品位加工を実現するために導入した日本ユニシス株式会社（以下、日本ユニシス）の次期CAM^{*1}の実用化事例を紹介する。2章でトヨタが新CAMとして次期CAMを導入した理由、3章で新CAMでの工数削減の取り組み、4章で高能率・高品位加工の取り組みについて述べる。5章で今後の取り組みを説明する。

2. 次期CAM導入の経緯

2.1 工数削減と高能率・高品位加工へのアプローチ

トヨタの造型部門の一つであるプレス分野では、これまで種々のCAMシステムを使いCAM作業の工数削減と高能率・高品位加工を目指して改善活動に取り組んできた^[1]。

CAM作業の工数削減アプローチとして、作業手順や加工方法、作業運用の標準化を行い、その標準化された手法をCAMシステムに折り込むことによりCAM作業の自動化を実施してきた。また、自動化できない作業については、作業の手戻りをなくすこと（以下、手戻り防止）

によりムダを省く（トヨタ生産方式^[2]でいう整流化）アプローチを実施してきた。

一方、高能率・高品位加工については、先進的な加工による加工時間の削減や機械加工のリードタイムの短縮、加工機の連続無人運転^{*2}による加工コスト削減、更には手作業による金型磨きをできるだけ省く手磨きレス化等を目指してきた。

2.2 トヨタ新 CAM としての次期 CAM 選定

このような絶え間ないアプローチの中、2008 年秋に発生したりーマンショック、その後の急激な円高や韓国、中国をはじめとするアジア諸国における製造業競争力の向上等により、国内製造業全体でこれまで以上の競争力向上が叫ばれる^[3]中、トヨタにおいても従来以上の原価低減活動が行われ、造型部門においても型費^{*3}低減が課題となった。

このような背景において、従来に増して CAM 作業の工数削減や高能率・高品位加工の必要性が強まったため、新しい CAM システム（以下、新 CAM）の導入検討を行い、以下の選定理由により、日本ユニシスの次期 CAM をトヨタの新 CAM として導入した。

1) CAM 作業の工数削減ができる

トヨタの CAM 作業や運用を踏まえた標準化をベースとする自動化や、CAM 作業の手戻り防止要件をできるだけ折り込むことができ、そのポテンシャルを備えている。

2) 加工の革新が目指せる

CAM システムが標準的に備えている加工機能がトヨタの要求に合うだけでなく、日々の改善活動から発生する先進的な加工をベンダーと共同で開発できる。

3) 一つの CAM システムで統一できる

CAM 作業の運用上の効率を考慮して曲面加工、構造加工、プロファイル加工を一つのシステムで統一できる。

4) 顧客と CAM ベンダーで、Win-Win の関係が構築できる

トヨタと CAM ベンダーが互いに持続的に成長（トヨタは持続的な CAM 作業の工数削減や高能率・高品位加工の実現を、CAM ベンダーは商品力の持続的な強化を）するための関係を構築できる。

2.3 次期 CAM の適用

トヨタのプレス分野における次期 CAM の本番適用は、2015 年 8 月より旧システムからの切替が開始され、2016 年 3 月に完了した。適用範囲はプレス金型の製品部、構造部およびプロファイル部の加工箇所（図 1）全てを対象とし、適用部品はパネルサイド、フェンダーなど、トヨタ元町工場で生産される全てのプレス金型部品に及んだ。

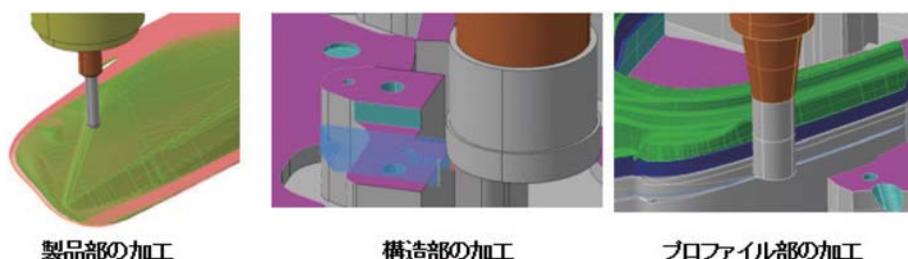


図 1 次期 CAM を適用した加工箇所例

3. CAM 作業の工数削減の取り組み

トヨタは今回の適用において、次期 CAM の自動化および手戻り防止機能のほぼ全てを活用している。本章では、自動化については、構造部の CAM 作業工程の一つである加工設計*4 作業における自動加工設計機能と流用加工設計機能の適用事例を、また、手戻り防止については、製品部の準意匠面に対する等高・平坦仕込み機能の適用事例を紹介する。

3.1 構造部に対する自動化

3.1.1 自動加工設計機能の適用事例

トヨタでは、構造部のポケット、座、壁および穴*5 等ほぼ全ての加工部位に対して自動加工設計を適用している。自動加工設計を適用する上で最も重要になるのが加工技術ファイル、特に自動加工設計のナレッジ*6 である。以下、壁および座に対するナレッジの代表的な考えを述べる。いずれも加工効率や加工精度を考慮した考えである。

- ・可能な限り、大径の短い工具で加工する。
- ・壁加工に対しては、長さが短い工具で加工できる場合は等高加工を行い、長い工具でしか加工できない場合は突き加工を行う（図2）。
- ・座面に対しては、壁がある加工部位はオフセット加工を行い、壁がない場合はスキャン加工を行う。なお、工具のダウン位置が確保できず小径の工具を使わざるを得ない場合はヘリカル加工を行う（図3）。
- ・加工機が保有するアタッチメントを考慮した上で、直軸加工や固定5軸加工によってアタッチメントを使い分ける。例えば傾斜した座面の場合、粗工程では剛性の強い直軸アタッチメントを使い、加工精度が要求される仕上げ工程では固定傾斜アタッチメントやユニバーサルアタッチメントを使うなどしている（図4）。

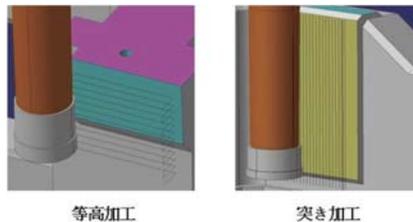


図2 構造/壁加工の事例

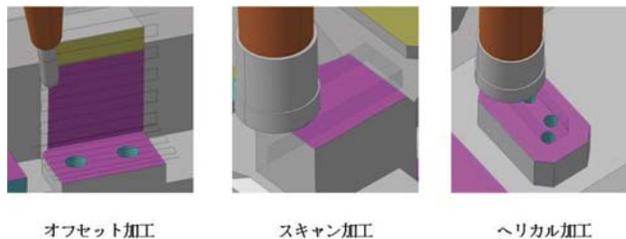


図3 構造/座加工の事例

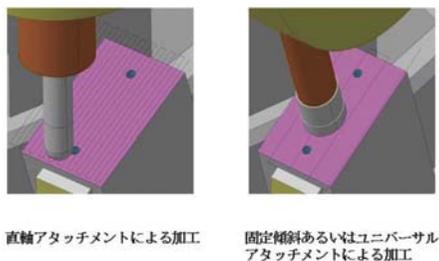


図4 傾斜面に対する構造経路の事例

このような考えの加工技術ファイルを使うことにより干渉レスで加工残りのない効率的な経路が自動で作成できる。自動加工設計の自動決定率として座、壁の加工部位に対しては7割程度、穴においては、ほぼ全ての部位で自動決定できており、自動加工設計機能が構造部のCAM作業工数削減に大きく寄与している。

3.1.2 流用加工設計機能の適用事例

トヨタでは、過去のCAM作業済みデータ（以下、親型）で仕込んだ加工設計の品質をそのまま類似のCAM作業データ（以下、子型）に流用することを狙いリピート型^{*7}などで流用加工設計を適用している（図5）。

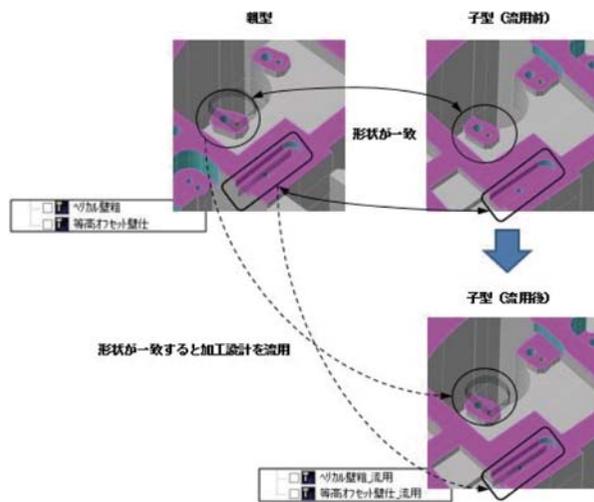


図5 流用加工設計の事例

親型の加工設計作業は、自動加工設計の結果を確認し自動決定できなかった加工部位に対して手作業で加工設計を行っている。流用加工設計の利点は、システムが親型と子型の加工部位の形状の一致性を判断して、同じであれば親型の加工設計の結果をそのまま子型に流用できることである。結果として親型で行った修正作業が子型では不要となり、CAM作業の工数が大幅に削減できる。

国内向けと海外向けのパネルサイドの例では流用率は9割程度となる。新CAMでは前項の自動加工設計と流用加工設計機能の併用により、子型の構造部のCAM作業は親型に対して約50%程度の工数削減を達成できている。

3.2 製品面に対する手戻り防止

トヨタでは従来、製品部の準意匠面には主に面沿い加工を用いてきた。面沿い加工は加工領域線に倣った形状の経路が面上でピッチ一定となるため、カスプ高さ*⁸が均一にできるという長所がある（図6）。

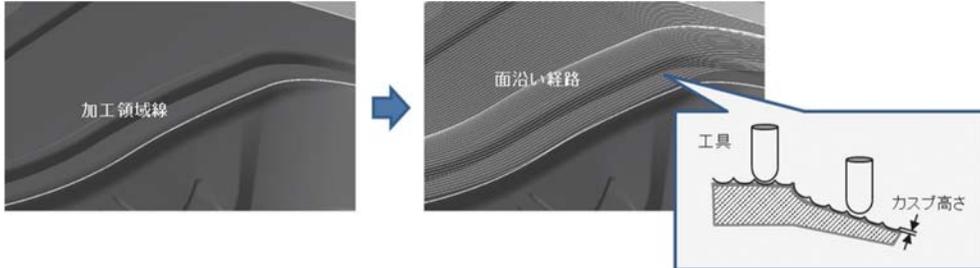


図6 準意匠面に対する面沿い経路

反面、面沿い加工は形状なりに経路を算出するため、加工領域線の定義によっては、形状の起伏（凹凸）による経路の駆け上がりや急激な変化が発生し、加工品質に影響を及ぼすことがある。ユーザはこのような問題を発生させないために、加工領域を定義する際に形状の段差部分で領域を分けるなどの考慮を行うが、経路計算し経路を表示するまでは問題の有無を確認することができない。確認した結果、問題がある場合には、加工領域の再定義から行う必要があり、作業に手戻りが発生していた（図7）。

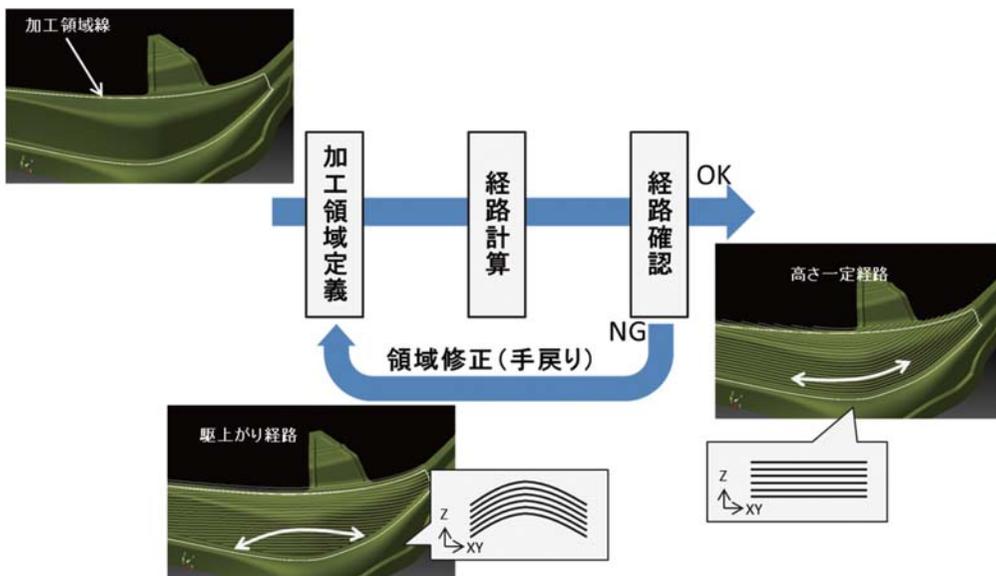


図7 面沿い加工の作業手順

本課題に対応するために、次期 CAM の仕込み機能の適用を開始した。仕込み機能では、最初に傾斜分割計算により、準意匠部全体を等高部領域と平坦部領域に分割する。等高部に対しては等高経路を作成することにより、経路の駆け上がりや急激な変化の問題が回避できる。ま

た分割した領域に対しては仕込み作業により、経路のプレビューを行いながら、領域の分割・併合・削除や領域線の平滑化を行い、加工品質や加工効率を考慮した領域に編集することができるため、経路計算後の手戻りを抑止することができる（図8）。仕込み機能を適用することにより、曲面仕上げ分野におけるCAM作業工数の10%削減を見込んでいる。

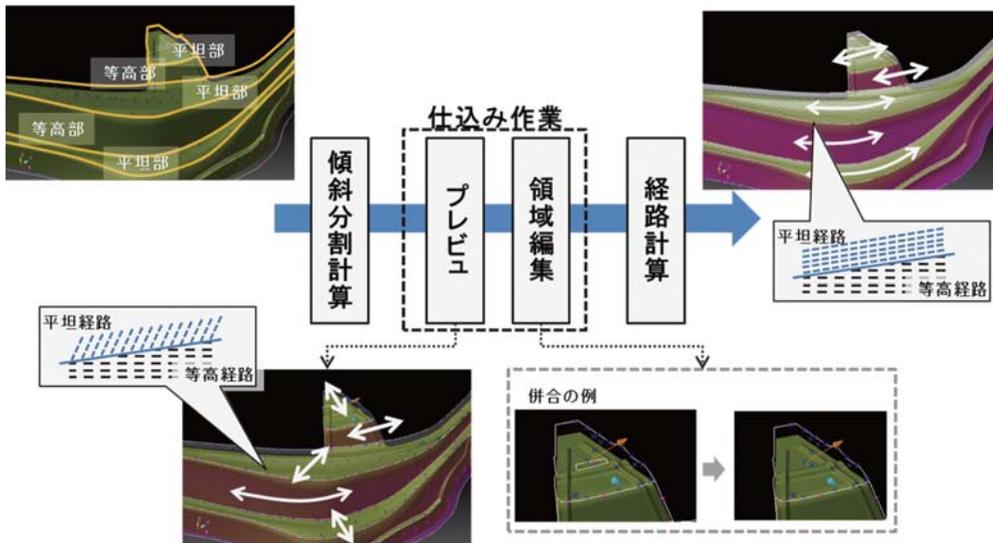


図8 仕込みの作業手順

4. 高能率・高品位加工の取り組み

本章では次期CAMで適用した高能率・高品位加工の取り組み事例を紹介する。

4.1 高能率加工の取り組み（粗取り/仕上げの集約加工）

従来、製品部に対する粗取り加工は、大径ボール工具による面沿い加工を用いて、送り速度を落とし切削量を多くする低速重切削加工を行ってきた。この加工方法の場合、加工機主軸への負荷が大きいため、粗用の加工機と、仕上げ用の加工機を分けていた。その結果、段取り替えが発生し、加工のリードタイムが長くなるという課題があった。また、経路作成時には実際の鋳物よりも取り代を大きめ（安全側）に設定するため、実加工においてはエアカット^{*9}が発生していた。

本課題を解決するため、粗加工の加工法として次期CAMの高速等高粗加工を適用した。高速等高粗加工は、剛性の高いラジラス工具による折れない滑らかな経路が作成できる（図9）。この加工法を利用することで、高速（従来の送り速度指令値に比べ約4倍）かつ加工機への負荷の少ない（従来の切削抵抗に比べ約40%減）粗加工が実現でき、粗加工から仕上げ加工までを同じ段取りで加工することが可能となり、機械加工のリードタイムが削減できた。

また、鋳物を計測したデータを素材モデル（以下、計測素材モデル）として利用することにより、エアカットの少ない最適な経路を作成することができ、加工時間を10%削減することができた。

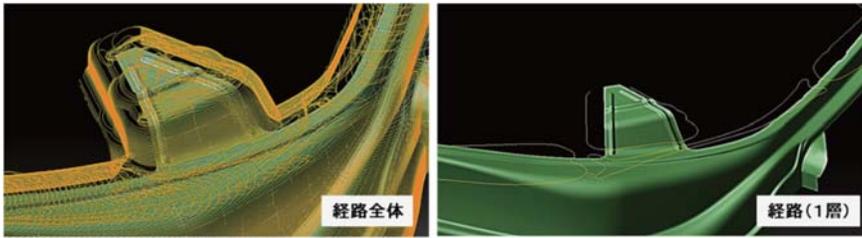


図9 高速等高粗加工の経路

4.2 高能率加工への取り組み（連続無人加工）

トヨタの高能率加工の特徴の一つとして、連続無人加工が挙げられる。連続無人加工を行うためのNCデータに求められる要件は、加工時の有人作業（マニュアル加工やアタッチメント・工具の手動交換等）を無くすことや、加工機が途中停止してしまうような加工トラブルを発生させず安全に加工できることである。

4.2.1 プロファイル部の無人加工

プロファイル部の加工は周辺形状の複雑さもあり、プロファイル部全てを無人で加工する金型メーカーは多くない*10。一方、トヨタでは従来から内製システムを開発し2番逃がし部*11を含め全てのプロファイル部に対しXYZ軸の3D動作のNCデータを作成してきた。プロファイル部の加工方法としては、

- ・直軸加工で短い工具で加工できる場合は、側面加工を行い、長い工具を使用する場合は工具のたわみを考慮して突き加工を行う。
- ・最も長い工具でも届かない箇所にはボール工具を使った固定5軸加工（加工法は突き加工を利用）を行う。
- ・2番逃がし部についても丸駒工具を用いた側面加工あるいは突き加工を行う。

これらの加工方法に対し、市販システムである次期CAMのプロファイル加工を使い全てのプロファイル部に対し3DのNCデータを作成し無人加工を実現している（図10）。

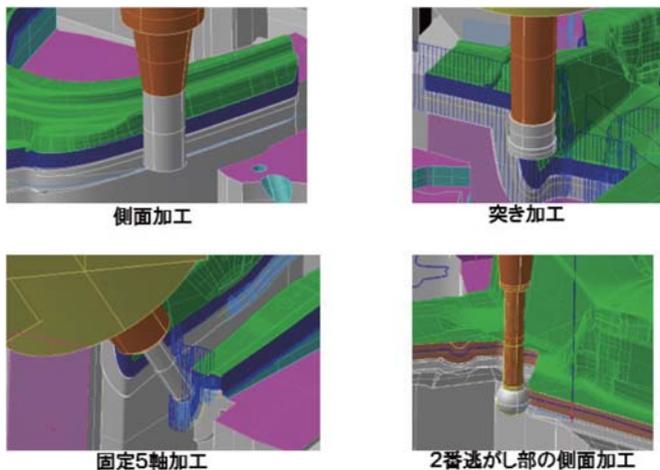


図10 プロファイル加工の適用事例

4.2.2 安心・安全な NC データの作成

安心・安全な NC データ^{*12}を作成するための一般的な CAM 作業のプロセスは、図 11 に示すように NC データ作成後、NC データの検証用システムを用いて検証を行う。本検証を行うため、直前に段取定義^{*13}を行い、アタッチメントの干渉や加工機の可動範囲オーバの有無等の問題を検知する。この作業プロセスの場合、問題が検知されると、問題を折り込んだ工程まで戻って修正を行う。そのため、CAM 作業上の大幅な手戻りとなり、作業工数や作業のリードタイムが大幅な増加となる。

トヨタでは、このような手戻りを発生させない NC データを作成するため、CAM 作業の最初に段取定義を行い、経路算出の直後で経路検証を行う。この作業プロセスを取ることで、安全を確保した NC データの作成を実施している（図 11）。

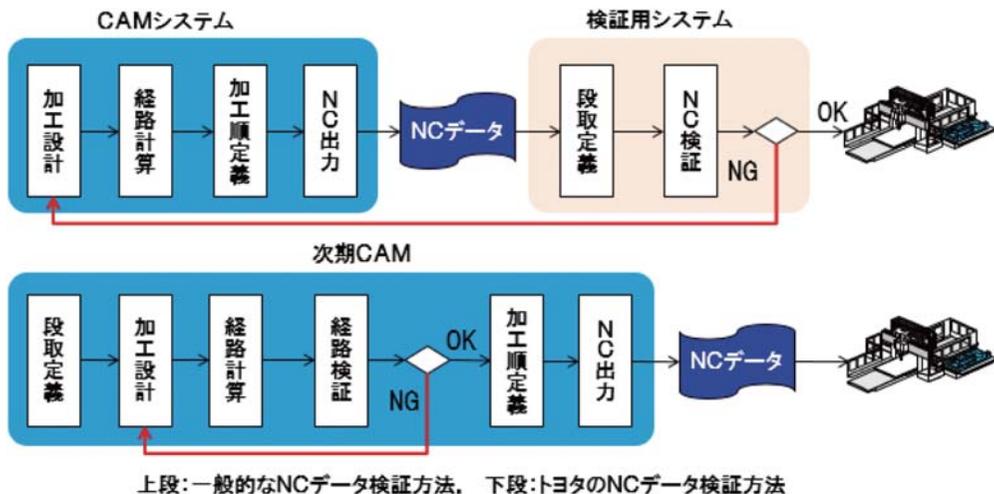


図 11 NC データの検証作業プロセス

本作業プロセスを取る上で CAM システムに求められる機能要件として、CAM 作業に先立ち段取定義ができ、その情報を用いて干渉チェックや可動範囲検査ができることが挙げられる。次期 CAM は、これらの要件を実現できており、連続無人加工用の安全な NC データを効率良く作成できる作業プロセスを可能にしている。

4.3 高品位加工の取り組み

プレス金型の意匠面は自動車の外板部となるところであり、プレス金型の加工部位の中で最も高品位な加工が求められる部位である。

従来、意匠面の仕上げ加工はスキャン加工で実施していた。スキャン加工は走査方向とピッチのみで経路が得られるが、形状なりの加工ができないため、形状が複雑な場合や、形状に傾斜がある場合など、ピッチを一定にするために加工領域を分けている。その結果、加工領域の境界部にはスジが発生することがあり、手磨き作業が必要となっていた（図 12）。

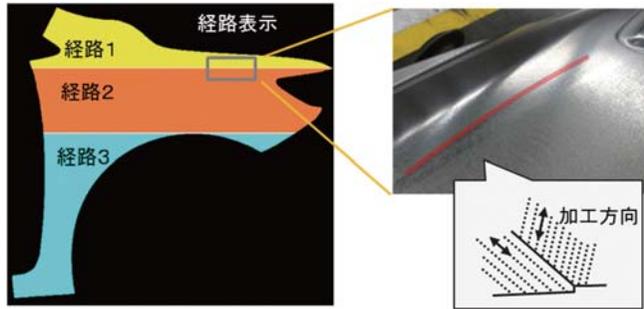


図 12 スキャン加工での加工領域と領域間でのスジ

また1本のスキャン経路内においても、経路の曲率が急変する箇所では経路点間の折れ角度が大きくなり、加工時に減速が発生する。減速が発生すると、工具のたわみ度合いが変化し、カッターマークが発生するため、手磨き作業が必要となっていた。

本課題を解決するため、意匠面の加工に次期 CAM の複合面沿い加工を適用した。複合面沿い加工は、形状の起伏の変化に合わせた複数のガイド線を指示することにより、意匠面全体を1加工領域として定義できるため、加工領域間でのスジが発生しなくなる（図 13）。また経路の曲率を考慮した経路点配置により、経路点間での折れ角度が大きくなるように制御し、加工時の減速を防ぐことで、カッターマーク発生課題を解決した。これらにより、従来に比べ加工面品質は格段に向上しており、手磨き作業を大幅に削減できた。複合面沿い経路の加工後の画像を図 14 に示す。

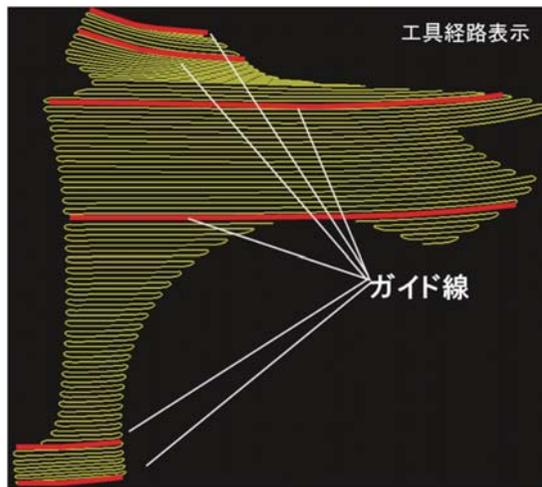


図 13 複合面沿い加工の定義方法



図 14 複合面沿い加工の加工後の画像

4.4 統一されたシステム利用による作業の効率化

3章と4章で、CAM作業の工数削減や高能率・高品位加工の取り組み事例を通して製品部、構造部およびプロファイル部に対する次期CAMの適用を紹介してきた。2.2節で述べたように、トヨタの次期CAM選定理由の一つとして、これらの加工箇所のCAM作業を一つのCAMシステムでやりきることを挙げている。トヨタではCAMシステムを統一することにより以下の効果を期待している。

- ・CAMにとって重要な加工技術ファイルなど、CAMシステムとして必要となる外部ファイルの準備や作業の手順書、CAMシステムの教育などを個別に作成する必要がなくなり、適用までの準備やその後のメンテナンスを簡便にできる。
- ・トヨタでは製品部、構造部、プロファイル部それぞれ専任でCAM作業を行っている。作業者が別の加工箇所を担当する場合、複数のシステムを使いこなす必要がなくなる。
- ・一つのシステムにすることにより導入後のサポート費用やライセンス費用等のランニングコストを抑えることができる。

次期CAMが製品部、構造部およびプロファイル部すべてに適用できたことにより、上記効果を獲得していると考えられる。

5. 今後の取り組み

ここまで次期CAMで実用化してきた事例を紹介したが、トヨタの新CAMとして今後の取り組みについて説明する。

5.1 素材モデルの活用

新CAMの狙いの一つとして計測素材モデルを利用して加工効率の良い経路算出や工具・アタッチメントの干渉レス、加工残りレスを目指している。しかしながら、以下の理由によりまだ十分に活用できていない。

- ・計測技術が不十分で鋳物型の負角部などが正確に計測できない。
- ・鋳物搬入から加工までのリードタイムが短く、CAM作業の開始時に計測素材モデルが間に合わない。

これらの課題を解決できれば、計測素材モデルによる最適経路の算出、干渉検査や加工残り評価といった加工シミュレーションを積極的に活用でき、CAM作業工数の更なる低減と高効率加工に繋がると考えている。

5.2 適用範囲の拡大

2.3 節で述べたように、2016 年 3 月にプレス金型に対する次期 CAM の切替が完了した。2016 年 7 月から鑄造金型の構造加工に対し次期 CAM の適用を開始している。今後はバンパーやインパネ等の樹脂金型への適用も計画し評価を開始している。

樹脂金型は、プレス金型と比べ、形状的な違い（例えば、樹脂製品を冷やすための水穴や樹脂製品を取り出すためのエジェクタピン穴等の穴形状が複雑）や、金型の素材の違い（プレスの鑄物に対し鋼材が使われる）などによる樹脂金型固有の要件がある。

次期 CAM の機能スコープはプレス金型のみならず樹脂金型も対象としており、これら樹脂金型固有の要件に対する機能を概ね備えている。今後は、樹脂金型適用に向けた評価において、プレス適用で得た次期 CAM を使う上でのノウハウを上手く横展開することで、効率的な切替ができると考えている。

6. おわりに

最後に、本事例紹介の執筆にあたり、快く了承して頂き、また情報提供、資料提供して頂いた、トヨタ自動車株式会社の皆様に深くお礼を申し上げます。

-
- * 1 次期 CAM：日本ユニシス・エクセリューションズが提供する CAD/CAM (Computer Aided Design/Manufacturing) システムである CADmeister 上に日本ユニシスが CAM 機能を強化した新たな金型製作ソリューションであり、曲面加工用パッケージ、型構造部加工用パッケージおよびプロファイル加工用パッケージから構成される。
 - * 2 加工機の連続無人運転：加工の段取りを終え、加工し始めると機械オペレータが加工機から離れて無人の状態加工し続ける加工現場の作業形態。加工現場における省人化によるコスト削減を目的としている。
 - * 3 型費：金型を製作するための費用を型費と呼ぶ。人件費や金型を加工するための費用が原価となる。
 - * 4 加工設計：加工部位に対する加工工程とその工具・アタッチメント、切削条件等を決め経路まで作成する作業工程。
 - * 5 ポケット、座、壁および穴：加工部位の形状的な分類名。加工方向から見て直行する平面を座と呼び、加工方向と直行する法線の面を壁と呼ぶ。座面と壁面で構成される加工部位をポケットと呼ぶ。壁面が円柱面あるいは円錐で構成される加工部位を穴と呼ぶ。
 - * 6 ナレッジ：自動加工設計において、加工工程や工具・アタッチメント等を自動決定するための加工技術ファイルに記述する条件式をナレッジと呼ぶ。
 - * 7 リピート型：トヨタでは新規に作成した金型を一部修正したものをリピート型と呼んでいる。例えば、国内向けの車種を海外向けに一部修正した金型が代表的な事例。
 - * 8 カスプ高さ：ボール状（あるいはラジアス状）の刃先により素材を削った後の波形の加工残り部をカスプと呼び、その波の高さをカスプ高さと呼ぶ。
 - * 9 エアカット：経路計算時、システムとしては素材を切削する経路として算出するが、経路計算のロジックや計算モデルと実際の素材との差異等により、実加工時には素材を加工せず空振りする経路をエアカットと呼ぶ。
 - * 10 プロファイル部の加工として、XY 軸の 2D 動作を NC データとして作成し、Z 軸の動きを機械オペレータにより加工する方法が一般的に用いられる。マニュアル加工を伴うため、無人加工ではなく有人加工となる。
 - * 11 2 番逃がし部：板状のプレス製品を切り抜いたとき、不要部分（スクラップ）は金型の下に落下するが、このスクラップが金型の中に詰まらないようにプロファイル面の直下に隙間を作る。この隙間を 2 番逃がし部と呼ぶ。
 - * 12 安心・安全な NC データ：金型と工具・アタッチメントの干渉や加工機の可動範囲オーバーなどによる加工トラブルが発生しない NC データを安心・安全な NC データと呼ぶ。
 - * 13 段取定義：使用する加工機、加工機が保有するアタッチメント、ワークと加工機との位置関係などを定義することを段取定義と呼ぶ。これらの情報を定義することにより加工シミュレーションにおけるアタッチメントとワークとの干渉や工具の軌跡が加工機の XYZ 軸の可動範囲に収まっているかなどの検査が可能となる。

- 参考文献** [1] 牟田芳喜, 金型の高速・高精度加工とCAMシステム, 精密工学会誌 Vol.67, No.3, 2001
- [2] 中山清孝, 秋岡俊彦, トヨタ生産方式の基本的な考え方, 機関誌, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, Vol.42 No.2, 1997年2月号 P61-65
- [3] 経済産業省, ものづくり白書, 経済産業省, 2011年, 2012年

執筆者紹介 平井康夫 (Yasuo Hirai)

1986年日本ユニシス(株)入社, 同年よりCAD/CAMシステム開発に取り組み, 2005年よりトヨタ自動車(株)のシステムサポートに従事しDynavistaCAM, 次期CAMの適用を行う. 現在, 製造システム本部トヨタ統括部エンジニアリング部に所属.



大坪正典 (Masanori Ohtsubo)

1991年中部ソフト・エンジニアリング(株) (2015年日本ユニシス(株)に合併)入社, 同年よりトヨタ自動車(株)のシステムサポートに従事し, 次期CAMの適用を担当. 現在, 製造システム本部トヨタ統括部エンジニアリング部に所属.



阿部英弥 (Hideya Abe)

1990年日本ユニシス(株)入社, 同年よりCAD/CAMシステムの適用サービスに従事. 現在, 製造システム本部トヨタ統括部エンジニアリング部に所属.

