

加工シミュレーションモデルの精度向上

Accuracy Improvement of Machining-simulation Model

米 本 修

要 約 多くの CAD/CAM システムで加工シミュレーションモデルとして採用されている「Dexel モデル」は精度と計算時間・データ量がトレードオフの関係にあり、実用化に際して運用や適用範囲が限定されるという課題を抱えている。

今回、筆者らは加工シミュレーションモデルのライフサイクルとして存在する「未加工の状態」と「加工中および加工後の状態」の二つの状態に着目し、そこで生じる Dexel モデルの精度課題を解決した。

「未加工の状態」に対しては、データ量・計算時間への影響を最小限に抑えた「補完的な Dexel」を導入することで、「加工中および加工後の状態」に対しては、「工具による加工の瞬間を Dexel の情報に記憶させる」ことで大幅な精度向上を実現した。

Abstract The “Dexel model”, which is used as a Machining-Simulation model in many CAD/CAM systems, has fundamental problems that there is a trade-off relationship between accuracy and the amount of computation time and data size. As a result, its operation or application in practical use is limited.

In this study, we focused on the two states that exist in the life cycle of a Machining-Simulation model, “unmachined state” and “states during and after machining”, to solve the fundamental accuracy problem of the Dexel model.

For “unmachined state”, we introduced a “complementary Dexel” that minimizes the impact on the amount of data and calculation time, and for “states during and after machining”, we achieved a significant improvement in accuracy by “storing the moment of machining by the tool in the Dexel information”.

1. は じ め に

ドイツの Industry 4.0 を筆頭に、スマートファクトリや、顧客のニーズに合わせたカスタマイズ製品を大量生産と同等のコスト・効率で生産するマスカスタマイゼーションを実現する取り組みが各国で行われている。それらの中核をなすのがフィジカル空間をサイバー空間に構築し、最適解を求め、フィジカル空間にフィードバックするサイバーフィジカルシステム（CPS）である。フィジカル空間とサイバー空間のブリッジとして「IoT」があり、サイバー空間上で最適解を求めるために「AI」、「シミュレーション」と呼ばれる技術が活用される。

筆者がこれまで取り組んできた CAD/CAM および機械加工の領域においても IoT や AI、シミュレーションの活用が盛んに論じられている。CAD/CAM とは製品を設計・製造するためのシステムである。目的とする製品形状の設計を CAD で行い、被削材である素材から製品を削りだすための段取りや工具軌跡（高速回転する工具で素材を順次削る際に辿る軌跡）を CAM で算出する。CAM の出力情報を入力情報にしてフィジカル空間の工作機械を動かす。この際、機械加工時に起きる現象をサイバー空間上で再現するのが「加工シミュレーション」である（以降、本文中は加工 sim と表記）。

日本ユニシス株式会社が提供する CAD/CAM システム、CADmeister の加工 sim 機能は表現モデル上の精度課題を抱えている。今回、筆者らは、加工 sim の表現モデルの精度を二つの新手法により向上させることに成功した。本稿で説明する。

本稿の構成は次の通りである。2 章では加工 sim の概要と従来の課題について、3 章では今回考案した二つの新手法の内容について、4 章では適用結果について、5 章でまとめと今後について述べる。

2. 加工シミュレーションの課題

CADmeister の加工 sim の目的は、CAM で設計された加工の段取りと、算出された工具軌跡の加工上で重大な「問題の検知」、ムリ・ムダのない工具軌跡の「最適化」である。「問題の検知」とは、ぶつかってはいけないものとの衝突（これは干渉と呼ばれ、素材のみならず機械や工具の破損につながる致命的な問題である）の検知（図 1(a)）である。「最適化」とは工具にかかる負荷（工具の破損や加工品質に影響する）の低減（図 1(b)）や、逆に空振りしている（削っていない）工具軌跡のカット（図 1(c)）である。いずれも時々刻々と削られ変化する素材（以降、素材モデルと表記）をシミュレートしながら算出するので、「素材モデル」が加工 sim の中心となる。本章では素材モデルの概要と現状の課題について述べる。

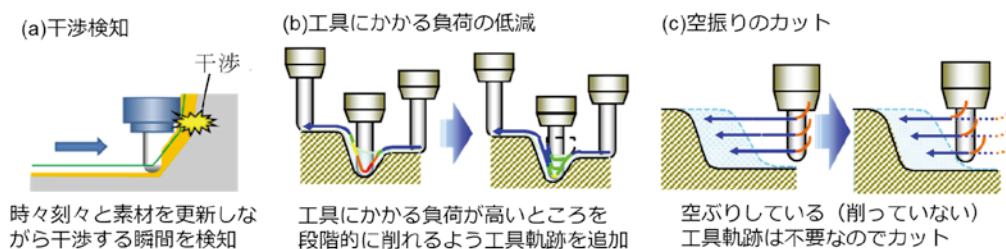


図 1 加工 sim 機能の例

2.1 素材モデル表現（3 方向 Dixel モデル）

素材モデルを表現するには、「加工による形状の変形コストが小さく」、「素材形状をできるだけ高精度に表現でき」、「データ量が少ない」モデル表現が求められる。CAD モデルや 3 角形の集合で形状を表現する STL データでは、その要件を満たすことができず、そのままでは素材モデルの表現に使えない。素材モデルの表現形式として基準平面上に格子を等間隔に設定し、格子を通過する平行な直線（XY 平面を基準平面とすると Z 軸に平行な直線）と形状の表面との交点で表現される「針」によって立体を表現する Dixel モデル（図 2）がよく知られており、多くのシステムで利用されている。

工具による切削は、各針の長さの変更操作であり、計算コストは小さい。また針の長さは実数値（浮動小数点）として表現できるため、格子上における形状の表現精度は高い。データ量は格子幅（以降、ピッチと表記）の二乗に反比例（ピッチを半分にするとデータ量は 4 倍になる）し、適切なピッチを設定することで実用的な精度を実現できる。

3 方向 Dixel モデルは Dixel モデルを 3 方向の針に拡張したものである。各方向の針で相互補完することで形状をより精度よく表現できる。またデータ量は Dixel モデルの 3 倍である。3 方向 Dixel モデルによる形状表現と工具による切削の表現を図 3 に示す。CADmeister では

素材モデルの表現モデルとして3方向Doxelモデルを採用している^[1]。また、針間の隙間を埋めるためにMarching Cubes法^[2]に基づいて隣り合う針の交点を結んだ面で表面を表現する(図3中)。

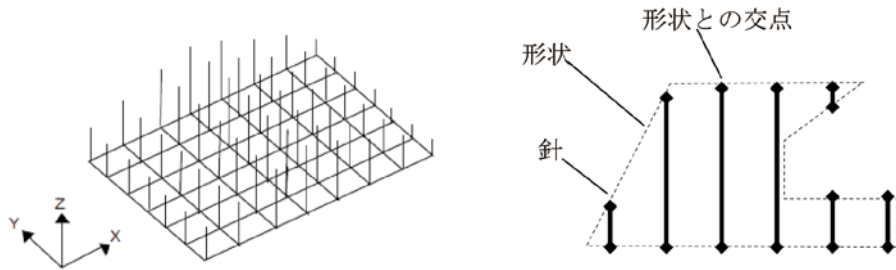


図2 Doxel表現

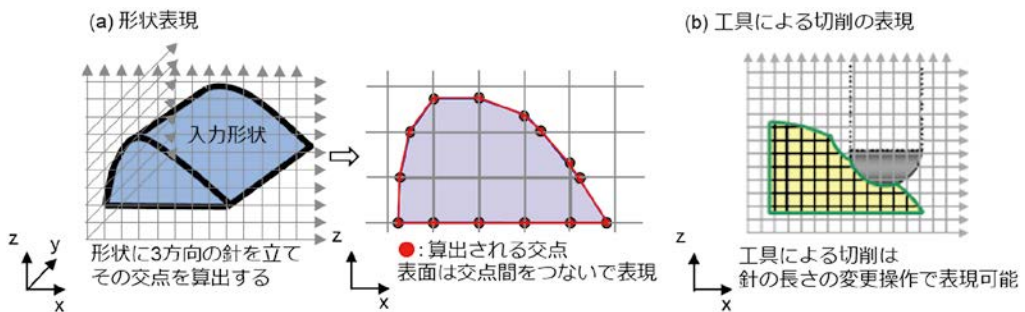


図3 3方向Doxelモデルの形状表現と切削表現

2.2 3方向Doxelモデルの課題

3方向Doxelモデルは、形状がなめらかに変化する場合には精度よく形状を表現できるが、針の間隔で構成される格子(以降、cubeと表記)内に含まれる角部(凸角や凹角)の表現精度が出ないことが課題である(図4)。この課題が表面化する場合を、素材モデルのライフサイクルとして存在する「未加工の状態」と「加工中および加工後の状態」それぞれについて、2.2.1項と2.2.2項で述べる。また、それらによって生じる運用や適用範囲が限定される課題について2.2.3項で述べる。

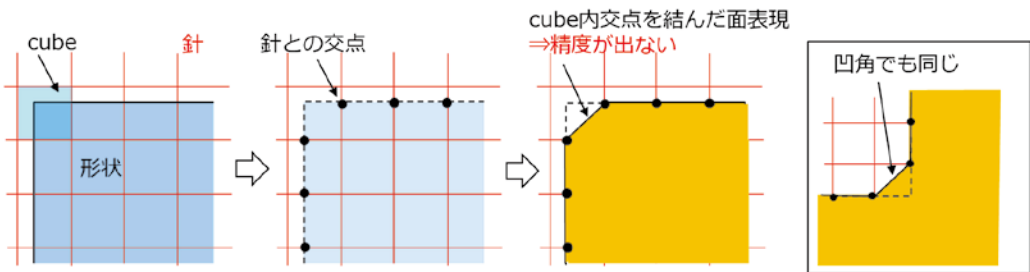


図4 角部で精度が出ない

2.2.1 初期素材モデルの角部で精度が出ない

未加工の状態を表す「初期素材モデル」は、2.1節で述べたように CAD モデルや実際に加工される素材を計測して作成される STL データを入力に、3 方向に針を立てて作成する。入力形状に凸や凹の角部が含まれる場合、2.2 節図 4 のように精度が不足する課題が発生する。

2.2.2 切削後素材モデルで精度が出ない

機械加工で素材を削る役割を果たす切削工具は、先端に刃がついており高速回転することで素材を切削する。切削工具はその用途によって様々なタイプがある。代表的な例として、先端の半球部に刃がついた「ボール工具」や円柱先端に刃がついた「フラット工具」がある。切削後形状は工具形状が転写されるのが正しい表現（図 5(a), (b)の緑部）であるが 3 方向 Dixel モデルでは工具形状と針の交点を結んだ表現となってしまう（図 5(c)）。

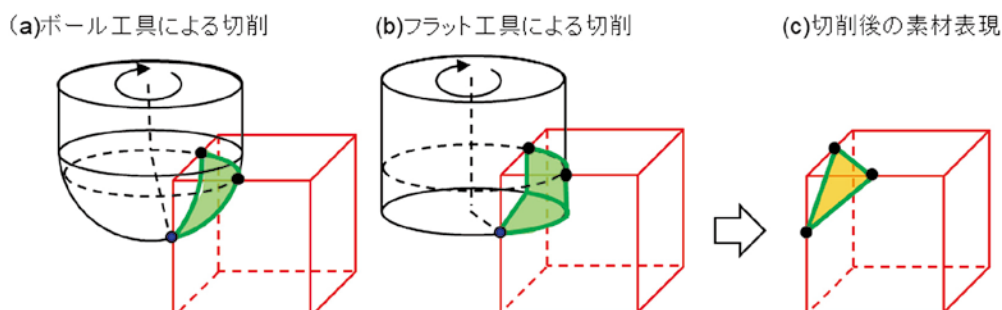


図 5 工具による切削と切削後の素材表現

2.2.3 運用および適用範囲が限定される

局所的な（具体的には cube 内の）形状変化の大きさによって精度は変わってくる。金型の形状を例に考えると、金型製品部は形状変化が小さい（なめらかに変化する）ため精度よく表現できる（図 6(a)）。一方、金型構造部では局所的形状変化の大きい角部が多く含まれ精度課題に直面する（図 6(b)）。

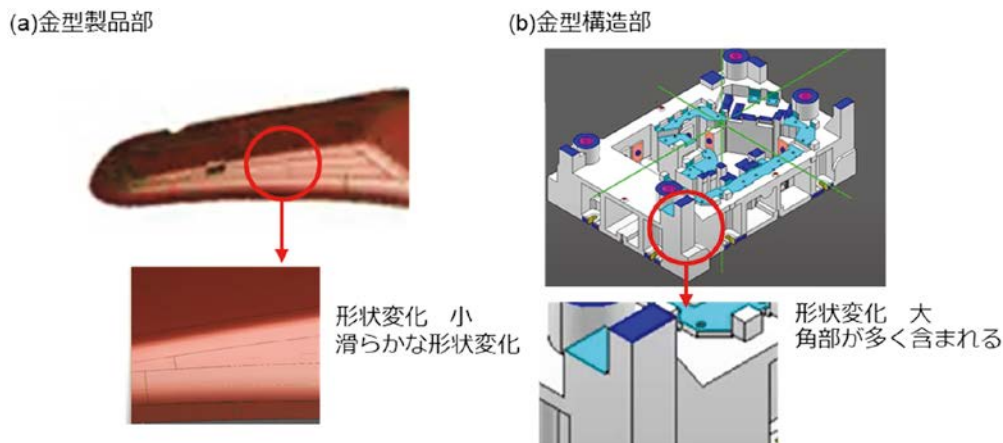


図 6 金型製品部と金型構造部の形状

ピッチを p とすると理論的な最大誤差は構成される立方体 cube の対角線の半分なので $\frac{\sqrt{3}}{2}p$ となる。金型製品部ではほとんどの箇所ですべて以上の精度が出せるにも関わらず、ユーザーとしては理論上の最大誤差を見込んだ運用をせざるを得ない。具体的には「実際は干渉しないにも関わらず、最大誤差以上近づいたら干渉と見なす」「最大誤差があっても問題ないラフな加工にしか使わない」などのように運用している。

機械加工では最初は大きな工具で粗く多くの量を削る「粗取り」から、最終的には小さい工具で少ない量を削る「仕上げ」まで実施するが、加工 sim はラフな加工である「粗取り」にしか適用できないなど、適用範囲が限定されてしまう。また金型構造部では本課題が顕著に出てきてしまうので、加工 sim の利用は「加工の順番に間違いがないかの検証」などに留めざるを得ない。

3. 課題解決のための手法

Dexel モデルはその最大誤差がピッチに依存するため、精度を上げるにはピッチを小さくする。そうすると針の数が増え、計算時間・データ量が増大してしまう。

今回、筆者らは Dexel モデルの精度課題を計算時間・データ量の増大を最低限に抑えた上で解決するための手法を用意し、CADmeister の素材モデルに実装した。2.2 節で述べた素材モデルのライフサイクルでの「未加工の状態」と「加工中および加工後の状態」の課題に対し、それぞれの解決手法について本章で述べる。

3.1 初期素材モデルの角部表現

Dexel モデルの表面は 2.1 節で述べたように Marching Cubes 法に基づいて表現される。Marching Cubes 法で局所的な形状変化が大きい箇所ですべて精度が出ない課題に対して、形状変化の大きいエッジ部を検出してその部分を再現する Extended Marching Cubes 法^[3]や Dual Contouring 法^[4]が知られており、それらと同様なアプローチを Dexel で行う。

まず、局所的な形状変化が大きく（以降、劇的变化と表記）精度が出ない箇所を検出する。図 7 に劇的变化の例を説明する。針を $Z_0, Z_1, Z_2 \dots$ (Z 方向の第 0 番目の針、等の意味) と呼称するとして、(a) では Z_0 針には元形状との交点はなく、 Z_1 針には交点があるような場合、これを Z_0 と Z_1 間に「劇的变化がある」と検出する (X_2, X_3 間でも同様のことが言える)。また (b) では Z_0, Z_1 でともに交点はあるが、元形状から得られる交点の法線ベクトルの方向が大きく異なる場合も、ある閾値（ユーザー定義可能な角度変化量）をもって劇的变化の有

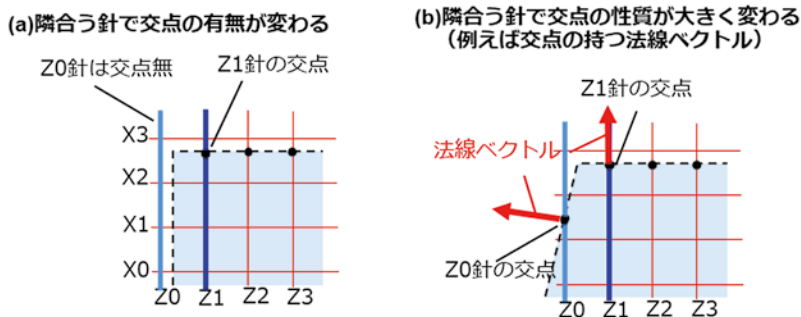


図 7 劇的变化の検出

無を検出する。

さて、隣り合う針間で劇的変化を検出したら、次はその針の間の角部を探索する。隣り合う針間の真ん中に補完の針（同様に Dixel モデルの針形式で表現できる）を立て、探索アルゴリズムとして二分法を用いて、劇的変化の有無を指標に角部を通る補完針を算出する（図 8 (a)）。ピッチを p 、二分法の回数を n とすると精度は $\frac{p}{2^n}$ となる。（図 8(b)）。

角部を通る補完針が算出できたら、次はそれを使って表面を表現する。3 方向 Dixel モデルの表面表現は、Marching Cubes 法を応用したアルゴリズムにより行う。表面は cube 辺上の交点分布（基本的には交点間を結ぶ）に応じて表現するが、補完針は cube 面上に算出されるため、従来の方法を cube 面上交点にも対応できるよう拡張した（図 9）。

以上により初期素材モデルの角部表現が可能になり、最大誤差は二分法の回数で規定できるようになった。データ量・計算時間については、劇的変化がある針間にはのみ補完針を 1 本発生させるだけなので、大きな増加にはならない。実際のデータを用いて計測したデータ量・計算時間については 4 章で述べる。本手法により、従来大きく損なわれていた凸角や凹角の精度を向上することができる（図 10）。

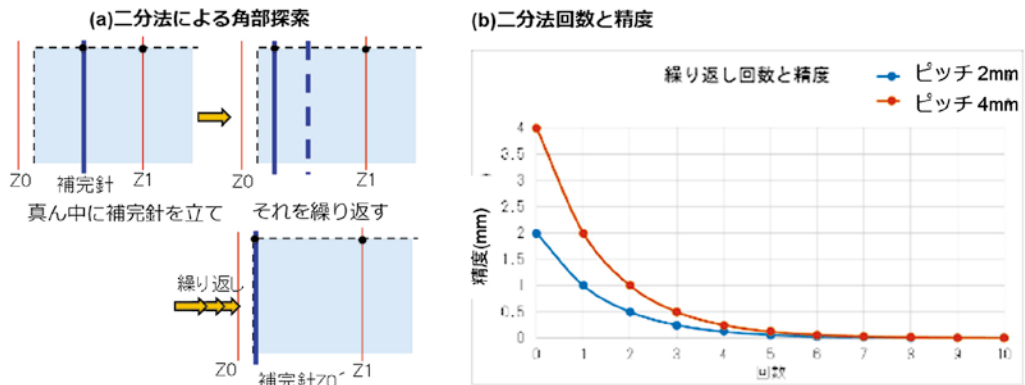


図 8 二分法による角部探索

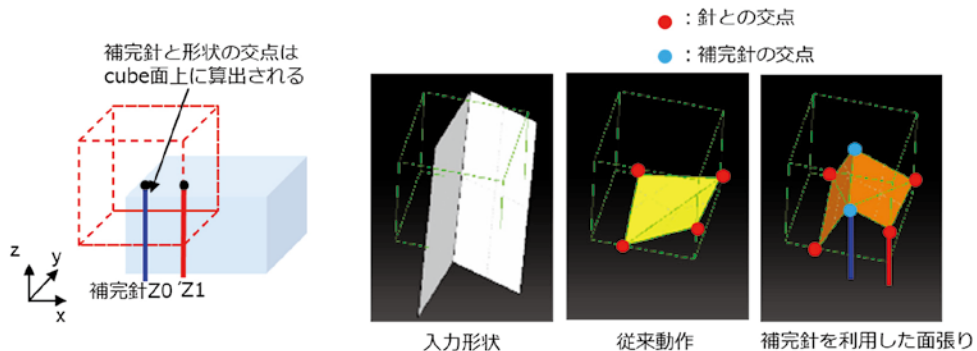


図 9 補完針を利用した表面表現

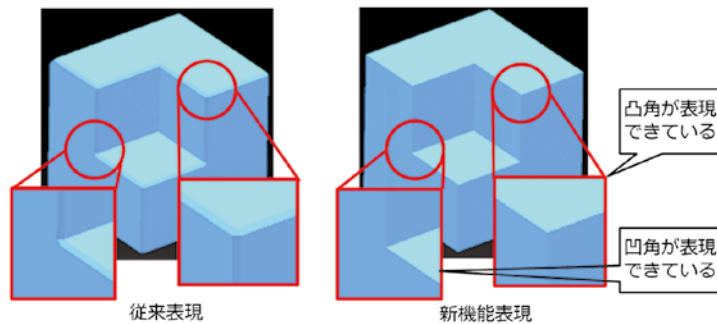


図 10 初期素材の従来表現と新機能表現

3.2 切削後素材モデルの工具切削面表現

工具による切削はある瞬間で「工具が針群を刈り取る」素材モデルの切削更新を繰り返すことで実現している。刈り取ることで、針上には工具との交点が発生する（図 11）。ここで、針上の交点にその瞬間に削られた工具の情報を覚えておくことで、工具の切削面が切削後に再現できると考えた。図 12 の例のように、針の交点 x_1 , x_2 , x_3 はいずれも「工具中心位置 C で工具情報 index が N の工具で削られた」という情報を付加してやればよい。工具のタイプや寸法や姿勢（加工軸）の情報は別管理にしておくことで、針の交点に付加する情報はわずかで済む。情報を付加するための計算コストについては素材モデルの切削更新と同時に工具情報を埋め込めばよく、そのコストは小さい。データ量についても交点情報への工具中心位置と工具 index の追加と、別管理の工具のタイプや寸法や姿勢の情報の追加のみで増加はほぼない。

cube 単位の表面表現（3.1 節参照）の際に、針の交点を持つ工具中心と工具情報を参照して cube 内に工具表面（の転写）を表現してやればよい。ただし、曲面である工具表面の転写をなめらかに表現するには多くの三角形を要するので、切削後の素材全体を表現（例えば全体表示）するのは計算コストが大きい（図 13）。そのため、干渉検査など詳細な検査のときのみ、工具情報を用いた表面表現を行う（図 14）。

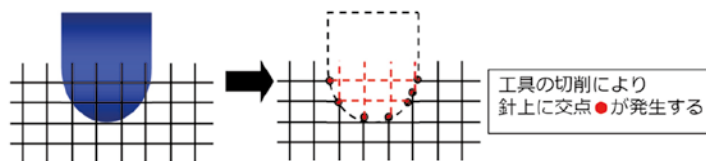


図 11 ある瞬間の工具による針の切削

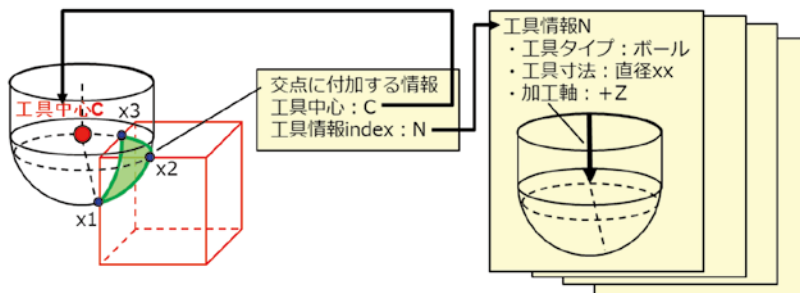


図 12 針の交点に工具情報を付加

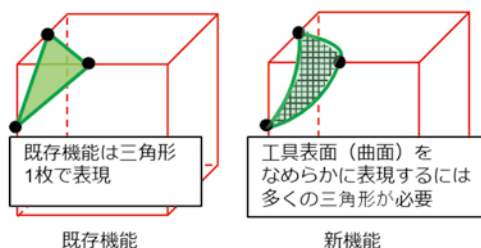


図 13 工具表面の表現コスト

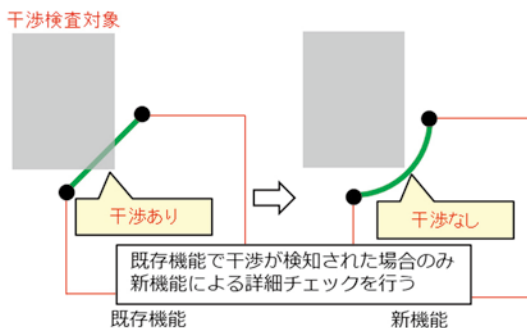


図 14 工具表面表現の段階的利用

3.3 CADmeister の加工シミュレーション機能とデータの関係

CADmeister の加工 sim 機能とデータの関係を図 15 に示す。「初期素材作成」によって素材モデルと角部に発生する補完針情報を作成する（3.1 節参照）。「工具による切削」では、切削工具の情報を出力するとともに、素材モデルの切削更新と同時に針の交点に工具中心位置と工具情報を参照可能な index を付加する（3.2 節参照）。「表示」や「干渉検査」といった機能は既存の素材モデルに加え、それを補完する補完針情報と工具情報を参照することで、高精度な素材表現を利用できる。また、既存機能への影響を考え、補完情報や工具情報は独立して管理している。それらを参照する/しないを制御できるようにしており、参照しないのであれば既存機能の動作は全く変わらないようにしている。

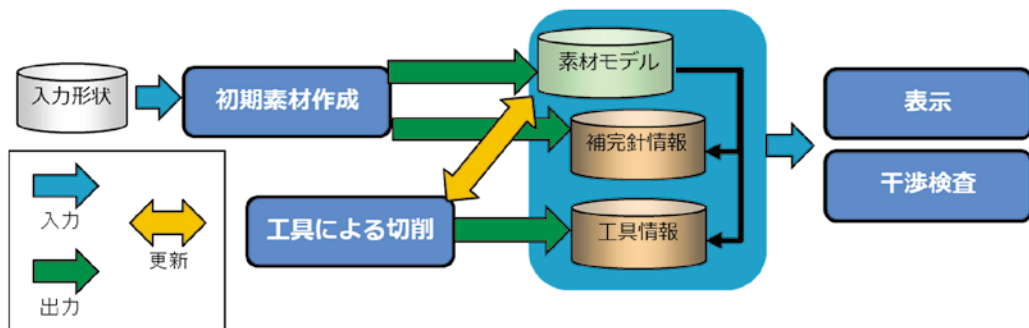


図 15 CADmeister の加工 sim 機能とデータの関係

4. 適用結果

従来機能で最も課題が表面化する金型構造部のデータに、3章で示した二つの手法を適用し評価を行った。データサイズを表1に、評価マシンスペックを表2に示す。本章では、3章で示した二つの手法を適用した状態を新機能、適用せず従来のままの状態を既存機能と呼称する。

表1 評価データ

データ	データサイズ (mm)		
	X	Y	Z
金型構造部	4445	2080	682

表2 評価マシンスペック

評価マシン	
CPU :	Intel Xeon W3565 @ 3.20GHz
Mem :	4GB
GA :	NVIDIA Quadro 600

4.1 初期素材モデルの作成

初期素材モデルの作成機能について、既存機能と新機能の比較結果を表3に示す。条件としてピッチ 4mm、新機能の二分法回数を5回としている。新機能の計算時間は既存機能の4.8倍になったが、初期素材モデルは加工データに対し1回しか作らず、その時間も13分程度であり、ユーザー運用上問題にならないレベルである。表示データ作成時間は1.1倍、データ量は1.4倍と微増で問題ないレベルである。

表3 初期素材モデルの角部表現

初期素材 作成	条 件		結 果						
	ピッチ (mm)	二分法回数 (回)	計算時間 (分)		表示データ作成時間 (分)		データ量 (MB)		
	4.0	5	既存機能	新機能	既存機能	新機能	既存機能	新機能	
			2.7	13.1	2.0	2.3	85.7	素材モデル	補完針情報
								85.7	31.1
								116.8	
	増加倍率 (新機能/既存機能)		4.8		1.1		1.4		

4.2 工具による切削と干渉検査

工具情報を埋め込む処理及び、工具切削面表現を利用する干渉検査の評価を実施するために、「工具による切削」と「干渉検査」を同時に実行する機能（素材切削シミュレーションと呼ばれる）で評価を実施した。なお4.1節の初期素材モデルの角部表現機能で作成した素材モデルを入力素材にしているため、干渉検査は角部表現に対しても行っている。既存機能と新機能の結果を表4に示す。既存機能からの増分は「工具情報の埋込」と「新機能表現での干渉検査」だが、計算時間もデータ量もその増加は1.2倍、1.4倍と実用上全く問題ない。

表 4 工具による切削と干渉検査

工具による 初削と干渉検査		結 果					
		計算時間（分）		データ量（MB）			
		既存機能	新機能	既存機能	新機能		
					素材モデル	補完針情報	工具情報
					83.7	31.1	0.001
	7.6	9.0	83.7	114.8			
増加倍率 （新機能/既存機能）	1.2		1.4				

表 4 の評価データでは干渉は発生しないが、新機能による効果確認のために、あえて干渉を発生させた (図 16)。既存機能では角部が表現できないため本来検知すべき干渉を見逃してしまう。一方、新機能では角部の表現精度が向上するため、意図通り干渉を検知することができた。

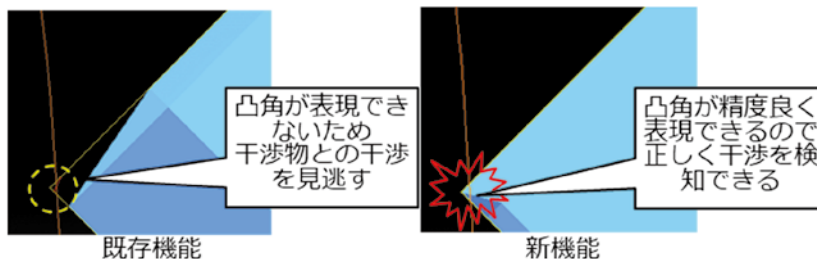


図 16 新機能による干渉検査

4.3 精度とデータ量

既存機能では従来はピッチ≒精度であり、ピッチを小さくするとデータ量・計算時間が膨大になる。保証すべき精度を 4mm → 0.125mm にしたいと考える。このときの既存機能と新機能の精度とデータ量・計算時間の比較を表 5 に示す。既存機能ではピッチを 0.125mm にしなければならず、その場合、針の数が 1024 倍になる。これを表 4 で示したデータによる加工 sim 計算で予測すると、計算時間が 7782 分 (5.4 日)、データ量が 85709MB (84GB) となり実

表 5 精度とデータ量・計算時間

	既存機能		新機能
ピッチ (mm)	4.0	0.125	4.0
二分法回数	—		5
精度 (mm)	4.0	0.125	0.125
データ量・計算時間比 ^(※)	1.0	1024	1.4
表 4 の加工 sim 計算 (分)	7.6	7782	9.0
表 4 の加工 sim データ量 (MB)	83.7	85709	114.8

(※) 既存機能でピッチ 4mm の結果を 1 としたときの加工 sim 計算に関わるデータ量・計算時間の比

用上、非現実的な値となる。一方、新機能ではピッチは4mmのままであり、補完針を含めた針の数は1.4倍程度の増加で、目的の計算精度を得ることができる。

5. お わ り に

今回考案・実装した新手法により、ピッチを小さくするとデータ量・計算時間が膨大になるというDexelモデルの根源的な課題に対し、実用的な計算時間・データ量で加工simの精度向上を果たした。

今回の機能はCADmeisterの加工sim機能の一部にしか実装されていないため、他の加工sim機能へ横展開し適用範囲の拡大を目指す。さらに、今回の新素材モデル表現を基盤としたこれまでにないアプリケーションへの応用が期待できる。素材モデルの精度が良くなることで、素材と最終形状（製品）の差分である「残素材領域」の精度が向上する。「残素材領域」を利用した仕上げ加工など、革新的なCAM機能への足掛かりになることが期待される。

フィジカル空間をサイバー空間で正確にシミュレートできる技術が今後重要となってくる。機械加工分野においてその役割を果たす「加工sim」および「素材モデル」の重要性は高まってきている。今回の新手法による精度向上は大きな意味を持ち、さらに新たな取り組みの加速化に寄与するものと考えている。

最後に、執筆にあたり様々な形でご協力して頂いた方々への感謝の意を表して、本稿の結びとしたい。

-
- 参考文献** [1] 米本修 “加工トラブル防止と高効率高品位加工を実現する『加工シミュレーション』” ユニシス技報, 日本ユニシス, Vol.36, No.3, 通巻130号, 2016年12月
 [2] W. E. Lorensen and H. E. Cline, “Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm”, Computer. Graphics, V 21, No 4, 1987
 [3] Kobbelt, L. P., Botsch, M., Schancke, U. and Seidel, H. P. “Feature-Sensitive Surface Extraction from Volume Data”, Proc. SIGGRAPH, pp.57-66 (2001)
 [4] Tao, J., Losasso, F., Schaefer, S. and Warren, J. “Dual contouring of hermite data”, Proc. SIGGRAPH, Vol.211, No.3, pp.339-346 (2002)

執筆者紹介 米 本 修 (Osamu Yonemoto)

2008年日本ユニシス(株)入社。入社時よりCAD/CAMシステム開発、加工シミュレーション機能・基盤開発に従事。2021年より自動走行シミュレーター開発兼務。

