

# 加工トラブル防止と高能率高品位加工を実現する 『加工シミュレーション』

## Machining-Simulation for Preventing Troubles in Machining and for Performing High-efficiency and High-quality Machining

米 本 修

**要 約** 加工シミュレーションとは、CAM システムで算出する経路から工作機械での実加工をシミュレートし、干渉や削り込み、削り残しなどの【安心・安全】の問題がないかを検知することを第一の目的とする機能である。日本ユニシスグループが提供する CAD/CAM システム、CADmeister では加工シミュレーション機能を CAM システム上に組み込んでおり、実加工より前の CAM の段階で、より早く【安心・安全】の問題を検知できる。さらに加工シミュレーションを応用し、不要経路の除去、加工負荷を低減する経路追加、最適高さの乗移り動作付加など【高能率・高品位】な加工を実現する最適化機能を提供している。

**Abstract** Machining-Simulation is to simulate the actual machining of machining tool based on the path calculated by CAM system. The primal purpose of this function is to detect safety and security problems such as interaction/interference, excess cutting and incomplete cutting. In CADmeister, a CAD/CAM system which Nihon Unisys Group provides, Machining-Simulation function is programmed within it and enables us to detect the safety and security problems in the CAM stage before the real machining. Furthermore, the system widens the use of Machining-Simulation to provide optimizing function in order to perform high efficiency and high-quality machining such as removing unnecessary path, adding path to reduce machining load and addition of transferring movement at optimal height.

### 1. はじめに

CAM (Computer Aided Manufacturing) とは、CAD (Computer Aided Design) で作成された 3 次元形状データ (以下、製品形状) を削るための工具の軌跡 (以下、経路) を算出し、それを基に工作機械で加工するための制御プログラム (以下、NC データ) を生成するシステムである。工作機械で実際に被削材 (以下、素材) に対し加工を行う前に、

- ・干渉や削り込み、削り残しなどの【安心・安全】\*1 の問題がないことを保証する
- ・【高能率・高品位】\*2 な加工を実現する

ための機能として「加工シミュレーション」がある。

本稿では日本ユニシスグループが提供する CAD/CAM システム、CADmeister の加工シミュレーション機能、およびその中心となる素材モデルについて解説する。2 章では加工シミュレーションの目的と CAM システムにおける位置づけを説明する。3 章ではいくつかの素材モデルの概要、4 章ではその中で様々な加工シミュレーション機能の共通基盤となる VM モデルの考え方について説明する。5 章では実際に CADmeister が提供する各種の加工シミュレーション機能について紹介する。6 章では今後の取り組みについて述べる。

## 2. 加工シミュレーションとは

CAM では大きく分けて、次の作業が行われる。

- ① 加工設計           ：経路を計算するためのデータや条件を設定する
- ② 経路計算           ：加工設計で設定された条件で経路を計算する
- ③ 経路品質保証       ：問題のある経路を発見し修正する
- ④ NC データ出力     ：経路から工作機械が解釈できるデータへ変換する

経路計算で算出された経路に問題があると、実際の加工で、重大なトラブルを起こす危険性がある。代表的な問題として、加工途中における素材と工具の「干渉」や工具の「過負荷」による工作機械・工具の破損、目的である製品形状に対する素材の「削り込み」「削り残し」による加工の失敗・やり直しが挙げられる。

加工シミュレーションとは、上述の経路（NC データ）の問題を、シミュレーションにより検知・修正、さらにはより良い加工のために経路を最適化することを目的としている。

加工シミュレーションの入力は「経路」と「工具」と素材をシステム上で表現する「素材モデル」である。経路上を沿う工具による加工で、時々刻々と変化する素材の加工状況をシミュレーションしながら、種々の問題を検知・修正する。加工シミュレーションの出力は機能によって異なるが、例えば「干渉の検知」や「加工負荷の大きさ」などである。加工シミュレーションで干渉等の問題がない場合は加工後の素材モデルが出力され、それは次の加工工程での加工シミュレーションへ引き継ぐことができる。加工シミュレーションの入出力仕様を定めて実加工に組み込む加工シミュレーションシステムのイメージ図を図1に示す。

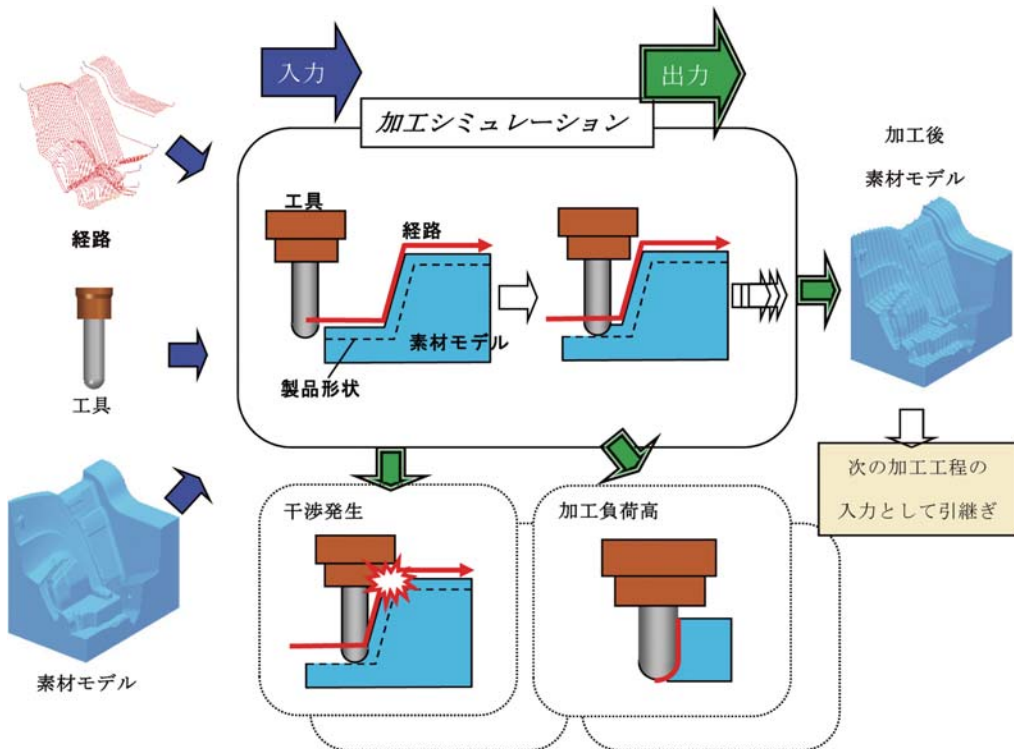


図1 加工シミュレーションシステムのイメージ

手戻りによる工数の損失を少なくするため、実加工における問題は、できるだけ早く検知・修正できることが望ましい。加工シミュレーションシステムは、CAMとは独立した外部システムであることも多いが、CAMシステム内に構築することでより早く（CAMの経路計算や経路品質保証の段階で）問題の検知・修正が可能である。この考えから、CADmeisterではそのシステム上に加工シミュレーション機能を構築している。

### 3. 素材モデル

加工シミュレーションシステムを中心となるのは素材をシステム上で表現する「素材モデル」である。素材モデルは、加工前、加工中、加工後と変化する素材の形状を正確に表現する必要がある。本章では素材モデルの各種の表現方法、およびCADmeisterで採用しているVMモデルについて述べる。

#### 3.1 素材モデル表現方法

CAD/CAMシステムで一般的な立体表現である境界表現（Boundary Representation）は形状を正確に表現することができる。しかし素材モデルとしては不向きである。なぜなら、素材モデルは加工により段々と変化する形状を表現する必要があり、変形操作の計算回数が膨大であるためである。変形の計算コストが大きい境界表現では実用的な時間で加工シミュレーションの実施が難しい。素材モデルをどのようなデータ形式で表現するかは加工シミュレーションにおいて重要であり、その精度や性能を大きく左右する。つまり、素材モデルとしては「加工による形状の変形コストが小さく」かつ「素材形状をできるだけ高精度に表現できる」表現方法が求められる。これら必須要件に加え「データ量をできるだけ小さくする」ことも重要な要件である。本節にて各種の素材モデルの表現方法を紹介する。

##### 3.1.1 CSG 表現

CSG（Constructive Solid Geometry 空間領域構成法）とは、直方体、円柱、角柱、角錐、球、円錐（台）などの単純な基本立体（プリミティブと呼ぶ）の組合せ（和・差・積）で立体を表現する方法である。工具も同様に球や角柱といったプリミティブの組合せで、「工具による加工」は、加工前素材から工具の差演算により表現できるので、変形コストは小さい。しかしながら複雑な形状を表現するためにはプリミティブの要素を小さくする必要があり、その場合、演算回数が増大し、モデルの表示や干渉の検知の計算コストやデータ量が増大してしまう。

##### 3.1.2 Voxel 表現

Voxel 表現は、形状を立方体で分割し表現する。Voxel 表現での加工は、立方体を除去することで容易に実現できる。また特定の座標軸に偏りのない表現のため工具や被加工物の姿勢変化に対応しやすい。しかし、精度を上げるには立方体のサイズを小さくする必要があり、計算コストやデータ量が大きくなる。これらを小さくするためにOctreeによる表現が提案されている<sup>[1]</sup>が、実用上においては依然として計算コストやデータ量の課題が存在する。また立方体による表現であるため、どんなに小さくしても形状表面は滑らかではなく階段状に表現されてしまう（図2）。

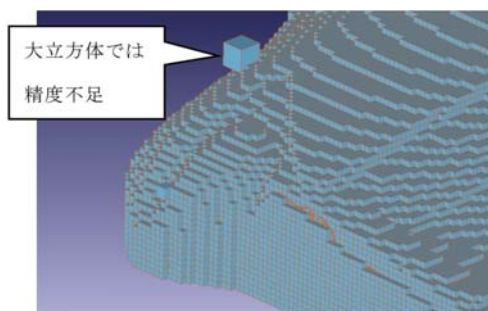


図2 Voxel 表現

### 3.1.3 Dexel 表現

Dexel 表現は 2 次元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方法である（図 3）。

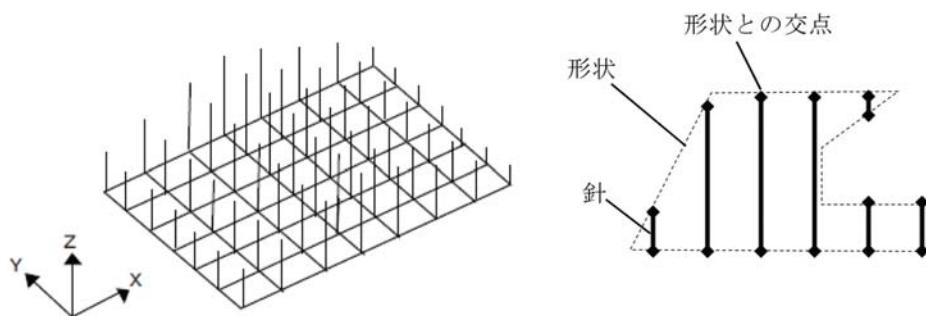


図3 Dexel 表現

工具による加工は、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、格子上的における形状の表現精度は高い。さらにデータ量も Voxel 表現の場合は各立方体の一辺の長さの 3 乗に反比例する（Octree 表現でない場合であるが）のに対し、Dexel 表現の場合には格子幅の 2 乗に反比例するため、少ないデータ量で実用的な精度を実現できる。

しかし特定の軸方向に依存するため、例えば Z 針による表現の場合、XY 方向の精度が低く側面（壁）を精度良く表現できない。そのため素材上面を Z 軸方向の工具で加工する場合には精度よく加工後形状を求めることができるが、プロファイル加工など側面を加工するケース等には不向きである。

### 3.1.4 STL 表現

近年では最新の計測技術を利用した現物融合型デジタルエンジニアリングが提案されており、現物の情報を活用・フィードバックする取り組みが行われている。計測データは 3 角形の集まりで物体表面の形状を表現する STL 表現が主に用いられる。この STL 表現を素材モデルとして使用することが考えられる。工具による加工は各 3 角形と工具との交差計算によって行

われ、工具に包含される3角形は除去され、交差部は工具形状に沿った3角形群を再構築することで求められる。

STL表現は3角形の集合であり、各々の3角形間の結合関係や形状の境界情報などの位相構造は持たない。全ての3角形を対象に工具との交差計算を行うには膨大なコストがかかるため、工具と接触する可能性がある近傍の3角形に絞るためにも位相構造の構築が必須である。しかし、加工により3角形群の再構築が行われるため、位相構造の再構築が必要となり、計算コストが大きい。

### 3.2 VMモデル

3.1節で各種の素材モデルの表現方法を紹介した。どの表現方法も長所・短所があるが、CADmeisterでは、Doxel表現を3方向に拡張した3方向Doxel表現を採用している。これをVMモデル (Virtual Machining Model) と呼称する。VMモデルはDoxel表現の長所を生かし、短所である特定の軸方向へ依存する課題を、3方向の軸による針表現で解決する (図4)。VMモデルの表面表現については4.3節で解説する。

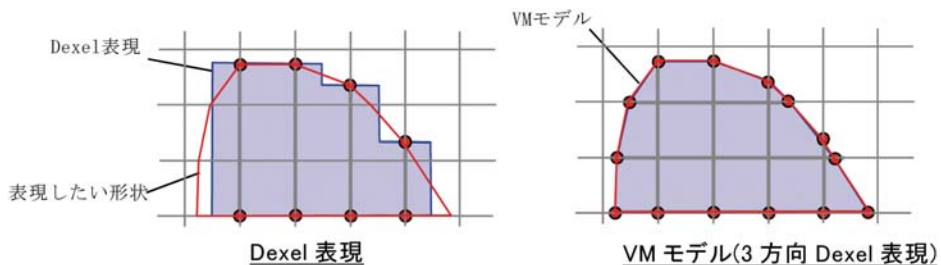


図4 Doxel表現とVMモデル (3方向Doxel表現)

#### 3.2.1 データ形式

X, Y, Zの3方向の針により形状を表現する。3方向のため特定の方向の針の影響を受けず、側面を精度良く表現できる。

形状を表現する針の端点には座標値、法線ベクトル、どの工具で加工されたか、など様々な情報を付加することができる (図5)。

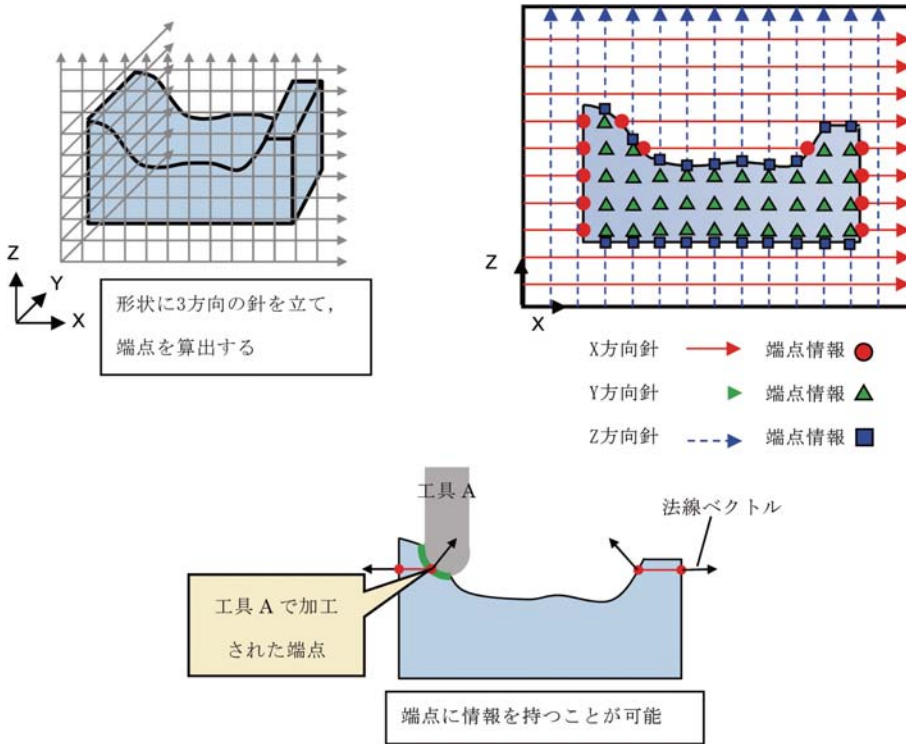


図5 VMモデル

### 3.2.2 データ量

Dexel 表現のおよそ3倍となる。格子幅によるデータ量の影響は Dexel 表現と同じ格子幅の2乗に反比例するため、少ないデータ量で実用的な精度を実現できる。

## 4. 加工シミュレーション機能の基盤となる VM モデル

本章では、次章で述べるあらゆる加工シミュレーション機能の共通基盤となる、VM モデルへの各種の操作について述べる。

### 4.1 初期 VM モデルの作成

加工シミュレーションを行うためには、まず加工前の素材形状を表す初期 VM モデルを作成する必要がある。CAD モデルおよび STL モデル（実際の素材を計測したものなど）を初期 VM モデルの入力として与えることができる。

入力 CAD/STL モデルの形状に対し、均等な格子幅による X、Y、Z の3方向の直線を立て、交点を計算（各針の端点を算出）することで、初期 VM モデルは求められる。交点計算は CAD モデルの場合は3角形に多面体近似することで、STL モデルの場合は各3角形に対しそのまま、「直線×3角形の交点計算」をすることで求められる。さらに各針の端点に球を置き逆オフセットすることで、一定肉厚を付加した VM モデルを作成することが可能である（例えば製品形状の CAD モデルを入力とし初期 VM モデルとして一定肉厚を付加したい場合）。

また CAD/STL モデルが開形状の場合、特定方向にスイープして作成したいというニーズもあるので、これにも対応している。初期 VM モデルの作成イメージを図6に示す。

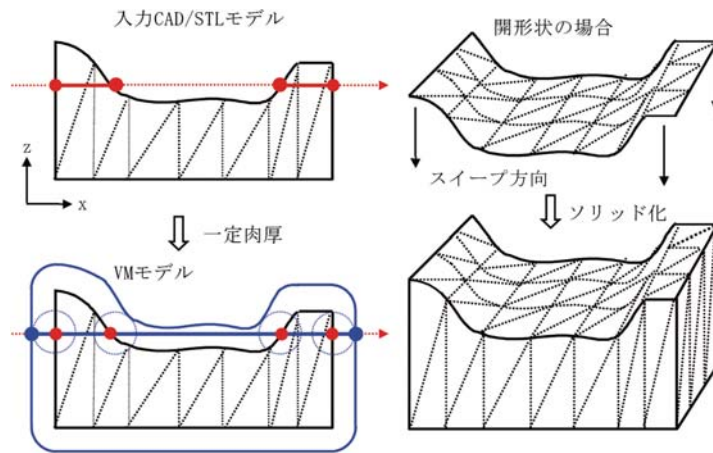


図6 初期 VM モデルの作成

#### 4.2 工具と VM モデルの交点計算

加工シミュレーションは、「経路」、「工具」、「VM モデル」が入力であり、経路を一定の間隔で点分割し、分割された点（以下、分割点）単位に、VM モデルと工具の交点計算を行うことで実現している。交点計算の結果は、次のように解釈する（図7）。

- ・ VM モデルと工具の切削可能部との交点 ⇒加工（交点位置で針の長さを変更）
- ・ VM モデルと工具の切削不可能部との交点 ⇒干渉

工具と VM モデルの交点計算は、工具と交点を持つ可能性のある針全て（針の位置は規定されているのでそれらの特定は容易である）に対し、工具と針の交点計算を行うことで実現している。擬似コードを下記に示す。

経路を点分割

```

for ( 分割点 ) {
    工具との交点を持つ可能性のある針の抽出
    for ( 交点を持つ可能性のある針 ) {
        工具と針の交点計算
        針の交点データ更新や干渉判定など
    }
}

```

工具と針の交点計算は、「工具面と任意直線の交点計算」という問題に帰着する。刃先、ホルダ、アタッチメントまでを含めて工具系と呼称するが、この工具系は3.1.1項で述べたCSG表現の考え方から単純なプリミティブの組合せで近似できる（図8）。

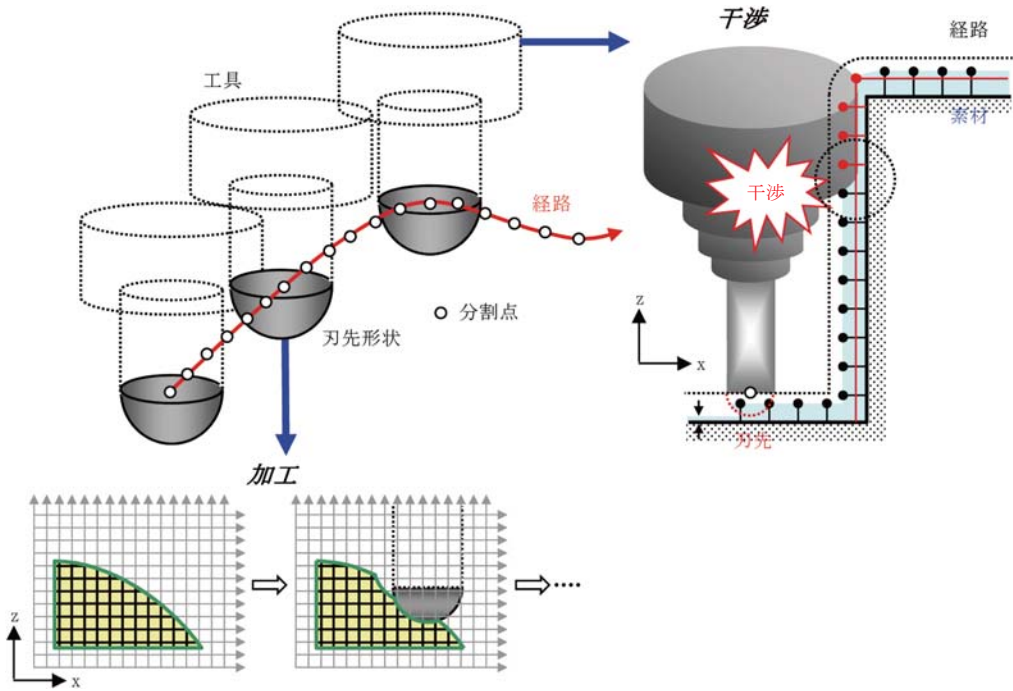


図7 加工シミュレーションにおける加工と干渉

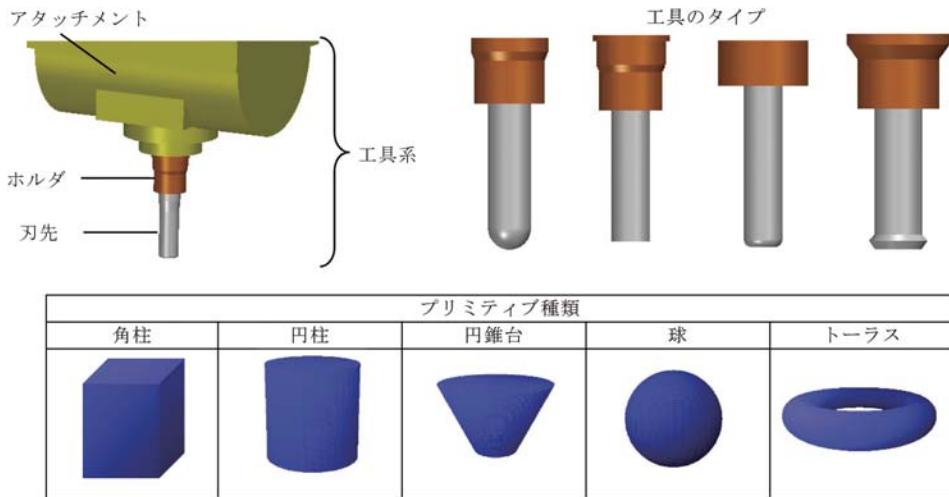


図8 工具系とプリミティブ

これらのプリミティブは1次（角柱，円柱円錐台の上下面），2次（円柱面，円錐面，球面），4次（トーラス面）の方程式で表され，直線の1次方程式と連立させることで解の公式により交点を求めることができる．また交点位置での法線ベクトルも方程式の偏微分により求められる．得られた各プリミティブの交点をマージすることで，針と工具との交点を求めることができる．



### 4.3 VM モデルの表面表現

VM モデルは3方向 Dixel 表現を採用しているが、針をそのまま表示しても、視覚的には分かり辛い。また干渉の判定においても4.2節で述べた針との交点の有無だけでは、針と針の間をすり抜けるケースにおいて、干渉を見逃してしまう(図9)。これらの理由からVMモデルの表面表現が必要となる。

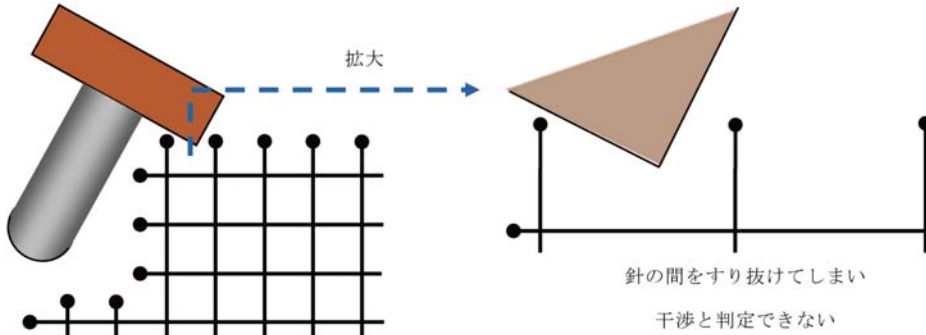


図9 工具の針間のすり抜け

3方向の針により格子幅のCubeが規定できる。Cube内を通過する針の交点から3角形群を抽出することでVMモデルの表面表現を行う。Cubeから3角形(多面体)を抽出する手法として、Marching Cube法<sup>\*3</sup>が広く知られている<sup>[2]</sup>。

オリジナルのMarching Cube法では、対象物表面とCube辺とが交点を持つ場合(針の端点がCube辺上に存在する場合)には、交点はCube辺上に高々1点という制限がある。これに対して、VMモデルでは、辺上に2点までの交点を持つことを許容するよう、制限を緩和した拡張Marching Cube法を用いる(図10)。

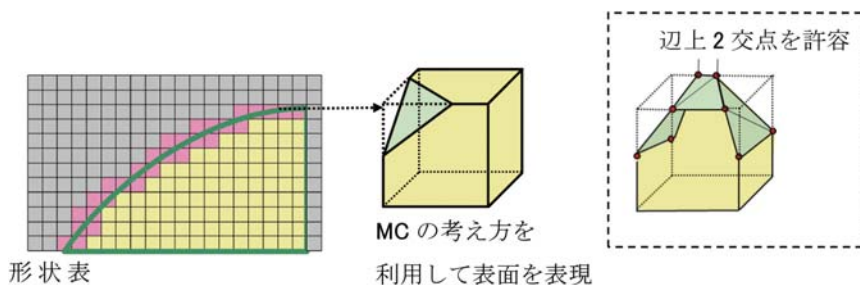


図10 Marching Cube法を応用したVMモデルの表面表現

辺上の交点が3点以上などCube内の交点分布が複雑となるケースでは3角形が抽出できず穴が空いてしまう場合がある。その場合は周辺の3角形群から穴埋めを行うことで補間している(図11)。穴埋めはCADmeisterのSTL\_EDITの穴埋めコマンドのロジックを利用して行っている。以上のようにVMモデルを表面表現し、これを表示および干渉チェックに用いている(図12)。

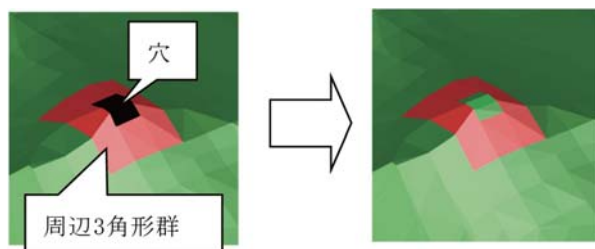


図11 穴埋めによる補間

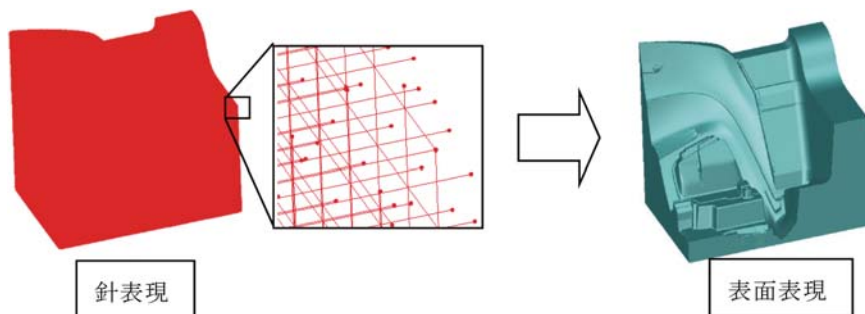


図12 針表現から表面表現への変換

## 5. 加工シミュレーション機能

4章で説明した加工シミュレーション基盤を応用した加工シミュレーション機能について説明する。【安心・安全】を確保するチェック機能および、【高能率・高品位】な加工を実現する経路最適化機能、およびその他【作業工数の削減】に寄与する機能群について説明する。

### 5.1 チェック機能【安心・安全】

加工中における干渉や過負荷、削り残し/削り込みといった致命的な問題を検知する。

#### 5.1.1 素材干渉チェックとホルダ分割

素材を加工しながら干渉をチェックする。同じ工具を同じ位置に置いたときの加工の順番の違いによる素材の残り状況を認識し、干渉の有無を適切に判断できる（図13）。

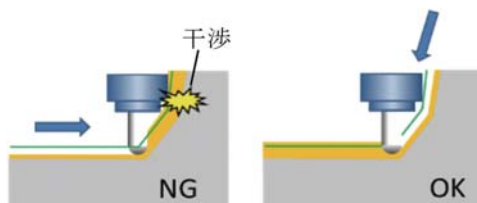


図13 加工の順番の違いによる干渉有無

干渉が発生する場合は、刃具の突き出し長が長い工具に変更することで干渉を回避できる（図14）。突き出し長が短いほど切削抵抗による工具の「たわみ」や「びびり」を抑えられるため、突き出し長の異なる複数の工具を「候補工具」として用意し、干渉しない突き出し長の短い工具から優先して割り当てる「ホルダ分割」機能により、干渉しない加工を実現できる。

候補工具の中で干渉を回避できるものがない場合は、「未割り当て経路」として通知し、候補工具の変更など加工条件の見直しを促す（図 15）。

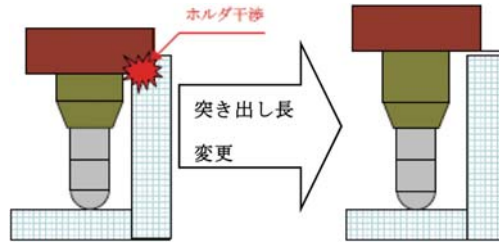


図 14 突き出し長の変更による干渉回避

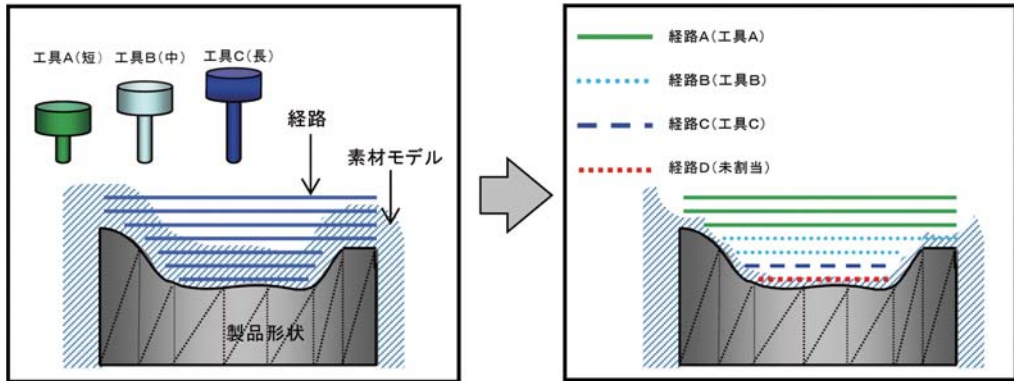


図 15 ホルダ分割

### 5.1.2 加工負荷確認

加工途中に工具にかかる負荷を算出し表示する。加工負荷の指標は切削体積を採用しており、切削体積は加工の瞬間（ある分割点における加工）のVMモデルの針の刈り取りの量から算出している（図 16）。

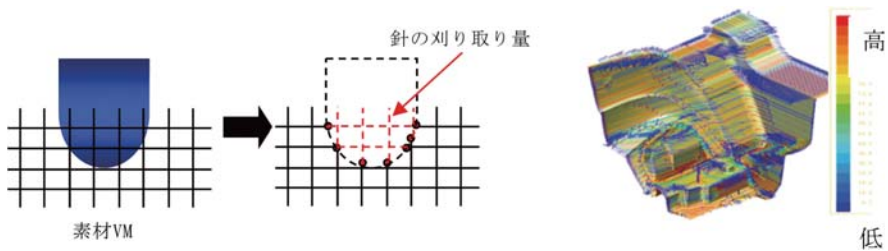


図 16 加工負荷確認

### 5.1.3 削り込み削り残し確認

加工後の素材モデルと製品形状との距離を算出し表示する。4.3 節で述べた素材モデルの表面の各 3 角形の頂点を検査点とし、検査点から製品形状への最短距離を求め、その値を基に各 3 角形に色付けを行う。検査点での製品形状との距離の算出は、製品形状を 3 角形に多面体近似することで「点と 3 角形群の最短距離計算」に帰着する。各検査点における距離計算は独立

に行えるため、マルチスレッドによる並列計算を行うことで処理を高速化している。また距離値は検査点から製品形状へのベクトルおよび最短位置での製品形状の法線ベクトルを指標に符号付で求め、削り込みは負値、削り残しは正值として求める (図 17)。

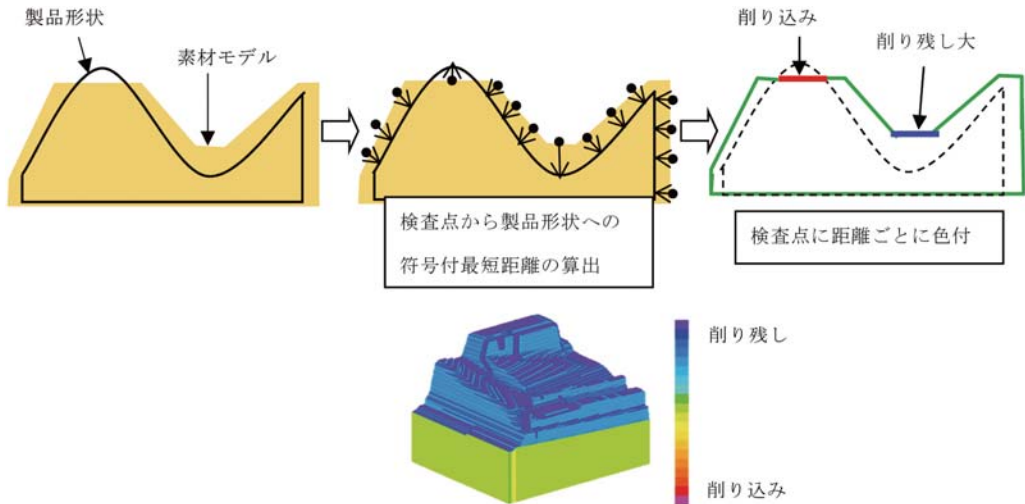


図 17 削り込み削り残し確認

## 5.2 経路最適化機能【高能率・高品位加工】

加工シミュレーションを用いて加工のムリ・ムダを排除した、より良い最適化された経路を作成することを目的とする機能を紹介する。

### 5.2.1 送り速度最適化

5.1.2 項で述べたように、加工シミュレーションにより、加工負荷が求まる。加工負荷が高いと、工具の破損につながるだけでなく、加工面の品質にも悪影響を与える。送り速度最適化では、加工負荷に応じた送り速度の自動調整を行う (図 18)。加工負荷が高い箇所は送り速度を相対的に遅くすることで工具負荷を低減できるが加工時間は増加する。逆に加工負荷が低い箇所は送り速度を相対的に速くすることで加工時間の短縮を見込むことができる。

本機能は外部 CAM にて作成された NC データを CADmeister に取り込み、送り速度を最適化して再 NC 出力する、といった利用法も可能である (加工シミュレーション機能全体でこのような利用法が可能)。実際そのような使い方、粗取り加工の加工時間を 25% 削減し、また工具破損確率を低減させることに成功した (図 19)。

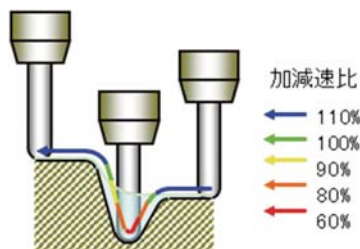


図 18 送り速度最適化

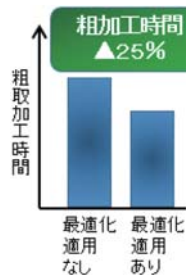


図 19 送り速度最適化適用事例

### 5.2.2 補間パス追加とエアカット削除

加工負荷を指標に、加工負荷が高いところは何回かに分けて加工するように補間パスを追加し、加工負荷を低減する（図 20）。逆に加工負荷が指定された値以下の経路を削除することで無駄な加工動作をなくして加工時間を短縮する（図 21）。

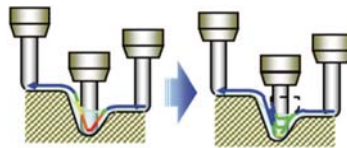


図 20 補間パス作成

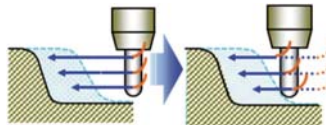


図 21 エアカット削除

### 5.2.3 空中動作最適化

空中動作最適化では、加工を開始する位置へ移動する動作（空中動作）を作成する際、素材モデルに干渉しない高さで求める。本機能以前では、素材と必ず干渉しない高さを推定し、固定高さで上がるような空中動作を作成するしかなかった。本機能により、過剰に上がる空中動作がなくなり、加工時間を短縮できる（図 22）。

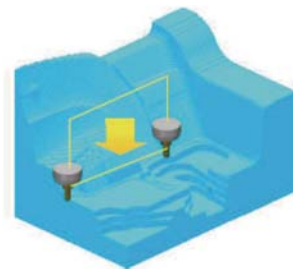


図 22 空中動作最適化

### 5.3 その他機能【作業工数の削減】

加工シミュレーションのその他機能として、作業工数の削減に寄与する機能を紹介する。

#### 5.3.1 工程色別表示

3.2.1項で述べたように、VMモデルの針の端点には、どの加工工程の工具で加工されたかの情報を持つことができる。これを色情報として加工後形状に表示することができる（図23）。これにより、どの加工工程で加工されたのか、各工程で加工されるべきであるが加工されていない箇所がないかの確認や、加工に問題があった場合の加工工程の特定が容易になり、作業効率の向上が期待できる。

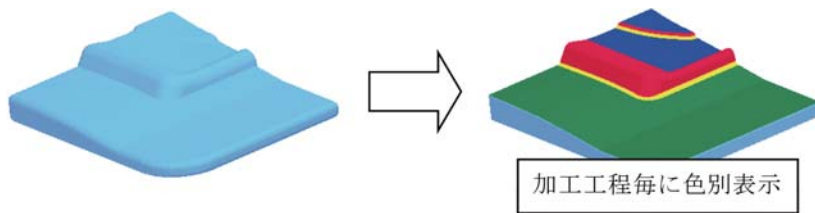


図23 工程色別表示

#### 5.3.2 素材モデルの変更操作（素材モデル追加、素材モデル切取）

加工後の素材モデルに新たに鋼材などを付加したい場合がある。そのようなときに素材モデルの追加が行える（図24）。素材モデルの追加はVMモデルの各針の和演算で実現できる。

一方、素材モデルの不要部をカットしたいという場合もある（素材モデルから経路を算出する高速等高粗加工などの経路計算において、経路を制御したい場合など）。そのようなときは、素材モデルを指示線に沿ってカットする、図25の素材モデル切取が可能である。素材の切取は4.2節で述べた加工シミュレーションと同様の考え方で実現できる。

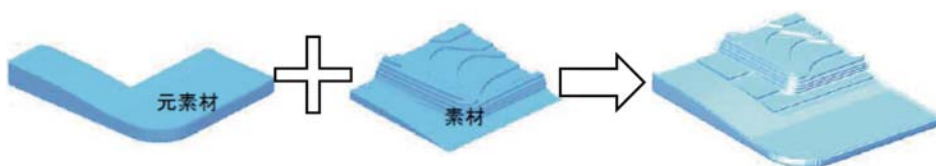


図24 素材モデル追加

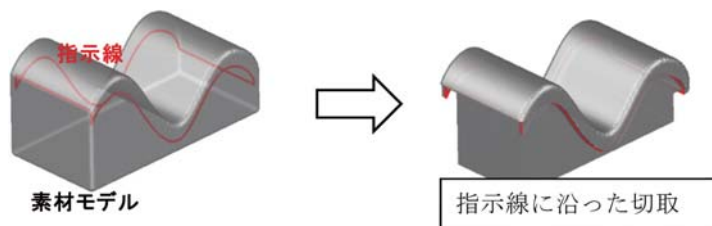


図25 素材モデル切取

## 6. 今後の取り組み

VM モデルの表現形式である 3 方向 Dixel 表現により、特定の軸に非依存となり、側面に対しても精度良い表現が可能であるが、角部（凸角、凹角）においては表面表現の課題が判明している。VM モデルの表面表現は Marching Cube に基礎を置いており、Cube 内の針の端点を結んだ表現となるため、角部に対して真の形状を表現することができない（図 26）。角部の精度を向上させるには、針の格子間隔を小さくする必要があり、それは各種素材モデル操作の計算時間やデータ量とトレードオフの関係にある。そのため計算時間やデータ量は増加しないような精度向上の方法を実現する必要がある。

また計算時間やデータ量に関しても、実用的には運用できているが、モデルサイズが自動車全体など大きいケースや、または精度確保のため針の格子間隔を小さくする必要があるケースにおいては更なる向上が望まれている。

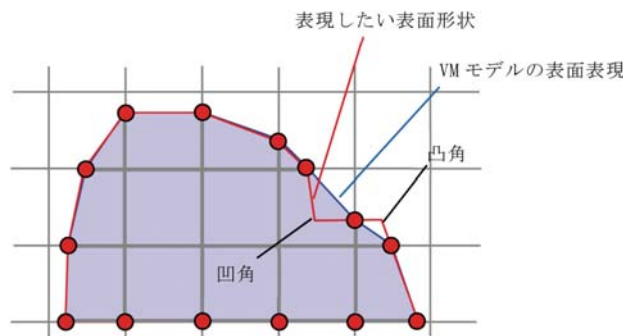


図 26 VM モデルの角部表現の課題

## 7. おわりに

CADmeister ではこれまで解説してきたような加工シミュレーション機能の拡充に重点を置いてきたが、機能的に充実してきたことから、更なる精度・性能の向上を目指していく予定である（6 章で述べた課題に対し、現在、研究活動を実施している）。精度・性能の向上によって、加工シミュレーションがより現実の加工に近づき、更なる【安心・安全】で【高効率・高品位】な加工を実現できると考えている。

最後に、本稿執筆にあたりご協力・ご指導いただいた皆様に深く感謝し、御礼申し上げます。

- \* 1 CAM システムにおける【安心・安全】の定義：  
工具の干渉や工具の破損などの加工トラブルが発生せず、無人加工を実現できること。
- \* 2 CAM システムにおける【高効率・高品位】の定義：  
高効率とは加工の無駄を排除し加工効率の良い経路を作成し加工時間を短縮すること。  
高品位とは加工面の品質を向上させ磨き作業を最小化すること。
- \* 3 Marching Cube 法とは、対象物を単位立方体（Cube）で覆い、対象物表面が各 Cube を通過するパターンを分類して、簡易的に多面体近似（3 角形分割）する手法である。

- 参考文献 [1] 中本圭一, 河野智之, 小山智, 阪口龍彦, 白瀬敬一, ボクセルモデルを用いたヴァーチャルマシニングシミュレータの開発, 精密工学会誌, Vol. 74 (2008) No. 12 P 1308-1312
- [2] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", Computer. Graphics, V 21, No 4, 1987

**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，特に加工シミュレーション機能・基盤開発に従事。

