

## 加工残領域の認識

### Detection of Residual Stock

近藤 道夫

**要約** 近年、金型製作の納期短縮に貢献している高速加工 (High Speed Machining) は、加工機、工具の革新と共に経路算出法 (Tool Path generation) の革新により実現された。切削時における工具の負荷を減らす浅い切り込み切削経路算出は加工後の素材残りをシステムが認識する処理 (Detection of Residual Stock) により可能となった。本稿では CADCEUS 3 DNC の一機能である「自動隅取り加工」で用いられている加工残領域の認識処理を解説する。

**Abstract** The high-speed machining, which strongly contributes to shorten the delivery schedules of die development these years, has been realized by innovations in NC machine and tool system, as well as the tool path generation. The light and constant tool load that is a key issue for high-speed tool movement is enabled by precise automatic recognition of residual stock by CAM systems. This paper is concerned with detection of residual stock utilized in "Automatic Corner Milling" of CADCEUS/3 DNC.

#### 1. はじめに

CADCEUS-CAM の 3 DNC 経路ソルバについては、既に技報 1995 年第 44 号「CAM サブシステム」執筆者：大野順三で述べられている。本稿では近年の高速加工技術に対応する為には必須の技術要件である経路算出時の「加工残領域の自動認識」について述べる。標準的な加工残領域の認識処理紹介後 CADCEUS/3 DNC 独自の認識の工夫を述べ、それが加工機能と組み合わせでどう有効活用されるかを「自動隅取り加工」を事例に述べる。最後に高速加工実現の重要課題である工具負荷均一化を目的に開発した切り込み機能の手法と残課題を述べる。

#### 2. 高速加工とは

高速加工とは従来に比べて高いスピンドル回転・高い工具送り速度を使用することで、加工精度を落とすことなく従来より速く素材を除去する加工である。工具メーカーの NC 工作機械の改良により、早い送り速度 (例：送り速度が 8000 mm/min 以上) による 3 軸加工が実現されている。残し代が少ない (素材残が少ない) 鋳物・型に対して、高速加工の適用による稠密な仕上げ加工を行うことで磨き仕上げの工数も削減される。高速加工の貢献により加工時間短縮、仕上げ時間の短縮が実現し、生産現場での加工効率が向上された。

このように金型製作の納期短縮に貢献している高速加工技術は加工機、剛性の高い工具の革新と共にカッタパス生成 (経路算出) についても従来にない要件を提出した。高速加工においては、工具に懸かる切削負荷 (例えば、1 経路点における切削体積で計量される) が大きいと工具が折れたりする事故や、工具の切削速度が上げられずに加工時間が過大になるという欠陥を招く。

そこで高速加工を実現するためには、加工負荷の小さい経路が求められる。

これは経路算出機能への新たな要求である。

従来の経路算出機能においては削り残しがないこと、工具干渉が無いこと、経路の長さを短くする（加工時間の短縮のため）という目標を設定して、それを満たす経路を出力していた。

(高速加工の為の経路算出要件)

工具の切削負荷を一定にする加工＝工具の単位送り動作(回転・並進)で切削する素材体積が一定となる経路を算出すること

新しい要求への対応策として下記の機能が挙げられた。

(高速加工の為の経路算出の対策)

工具の素材への切り込み量を浅くすることで、一定の切削負荷を保ち、被切削素材の除去も簡単にする経路を算出する。

工具の素材への切り込み量を浅くすることは切削負荷の低減をもたらす発生する熱も減るので、工具寿命も長くなる。小さな切り粉は、スピンドルからのエア噴出しによって捨てられる。ユーザは加工経験から一連の加工工程を定義することで、この浅い切りこみの課題に対処した。

例えば工程の列: 20φで加工→16φで加工→10φで加工→6φで加工→といった順序つけられた加工である。ただしこれは加工工程の定義にかける工数が増えるという問題が生じる。

経路算出機能において、切り込み量の浅い経路を作成する場合は、工具の素材への切り込み量を判定する必要がある。これには、製品形状に残し代をつけた形状(＝素材形状と呼ぶ)が、切削の前後でどう変化するかを認識しなければならない。つまり、素材がどう残っているか(＝加工残領域)をシステムが自動で特定し、それを除去する手法を考える必要があると言える。これは今やCAM分野の重要な技術の一つとなっている。

以降の章では、素材残りを利用した加工の例として、粗加工の繰り返し機能を紹介し、その後、標準的な加工残認識の処理を説明する。

### 3. 素材残りの認識による繰り返し加工

多くのCAD/CAMシステムは、近年、粗加工の繰り返し(re-roughing)機能を搭載している。素材残り認識が粗加工の繰り返し(re-roughing)の核の技術である。加工業者はまず1回目の粗加工を行う。その結果で得られた加工後モデルを新たな素材残り(加工残領域)として後続の経路算出に用いる。加工業者は更に、新たに得られる素材残に応じて経路タイプ(スキャン、渦巻き)を粗取りとして適用してゆく。後続の経路は素材残りを認識して作成されるので、素材残に常に接触している。したがって、無駄なエアカットが削減できて効率のよい経路が得られる。このような粗加工により無駄な中仕上げを省略でき、更なる加工時間の短縮や工具の消耗を防ぐことができる(図1)。(CADCEUS 3 DNCでは等高オフセットの中引き機能が該当する)

第6章で紹介する自動隅取・切り込み機能も、上の加工残領域認識を利用した繰り返し加工を利用している

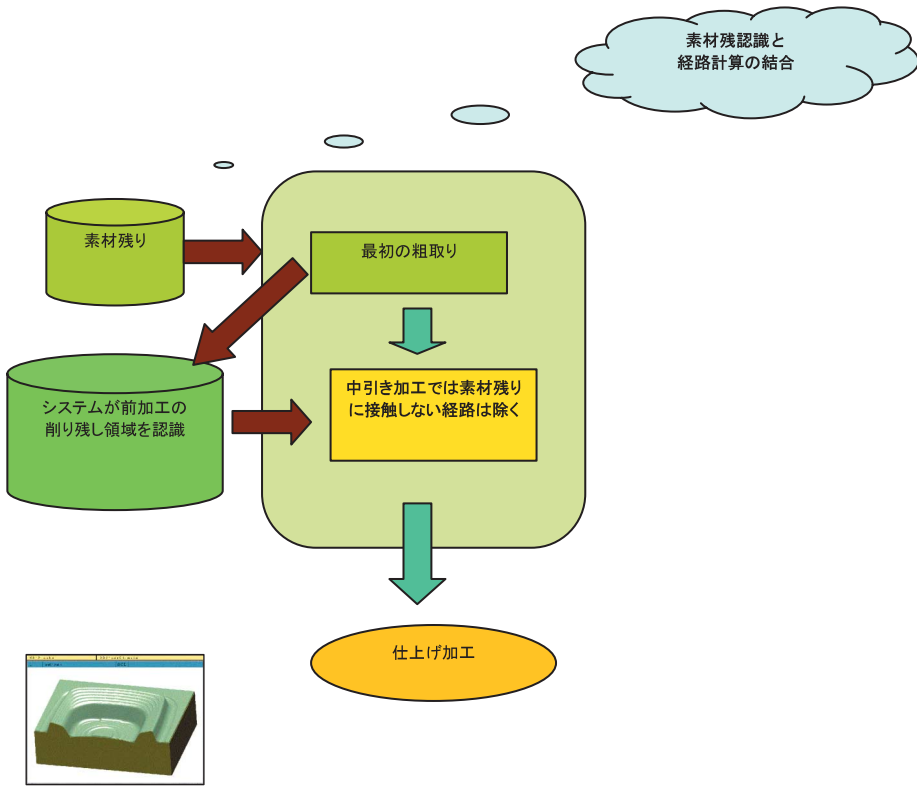


図1 素材残認識に基づく粗加工の精密化

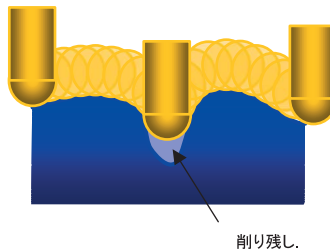


図2 加工残領域

4. 加工残領域の認識 (標準的な処理の紹介)

加工する対象立体 = 被切削立体を素材形状と呼ぶ。工具が経路沿いに移動して切削した後の素材形状を加工残領域 (図2) と呼ぶ。加工残領域の算出は厳密には加工前の初期素材 S1 と、加工する順序に並べた工具  $T_i$  とその経路  $C_i$  の列 ( $T_1-C_1, T_2-C_2, \dots$ ) を与えることにより  
 素材 S1 を工具  $T_1$  が経路  $C_1$  上移動して切削した後に残った加工残 S2 を求め  
 素材 S2 を工具  $T_2$  が経路  $C_2$  上移動して切削した後に残った加工残 S3 を求め  
 繰り返し...

素材  $S_{n-1}$  を工具  $T_{n-1}$  が経路  $C_{n-1}$  で切削した後に残った加工残  $S_n$  を求め  
 といった一連の計算により最終の加工残  $S_n$  が求められる。現実には加工工程定義の時点では正確な前加工系列を全て与えることおよび素材形状を与えることはユーザには受け入れ難い。そこで今回の加工に先立って加工する工具列の最小径工具 = 前工具を指示することで、便宜的

に加工残を計算する。

便宜的というのは前工具の経路が与えられないので、前工具の経路は稠密に製品の上部を覆い尽くすことを仮定する。具体的には加工対象を X 一定の方向に走る経路と Y 一定の方向に走る経路（双方向スキャン経路と呼ぶ）を仮定する。

加工残の標準的な算出は、次のようなステップでおこなわれる。

（以下の標準的な算出法の説明と挿入図は、乾論文より<sup>[2]</sup>引用している）

STEP 1：前工具  $T_{n-1}$  による形状を双方向（X 方向，Y 方向）にスキャンする経路  $C_{n-1}$  を算出する。

STEP 2：前工具  $T_{n-1}$  が経路  $C_{n-1}$  を移動したときできる掃引立体の最下端の面  $S_n$  を算出する。

STEP 3：製品形状の上面と掃引立体の最下端の面  $S_n$  の差が加工残領域である。

各ステップについて、以下で詳細説明する。

〈STEP 1〉

双方向スキャン経路を求めるための代表的な計算法としては、逆オフセット法がよく知られている。ボールエンド工具を球の中心の周りに 180 度回転させた逆形状を考えて、工具中心が常に製品形状の表面に存在するように保ちながら移動させて掃引形状を生成する。（これは計算幾何学ではミンコウスキ変換と呼ばれる）この形状を稠密な点群として近似的に計算するのが逆オフセット法である。茨城大学 乾教授は、グラフィックボードのハードウェア機能の利用で、この処理の高速化を実現している。

逆オフセット法により求められた掃引形状は、工具の先端が製品の表面を滑るときに工具の中心点のなす面と一致する。（この面を「工具経路面」と呼ぶ）また、工具中心が工具経路面の上方に存在するように経路を計算することにより、削り込みを防止できると言える。

〈STEP 2〉

掃引立体の最下面の算出は、工具経路面にそってエンドミルの中心が移動するとき、エンドミルの生成する切削加工後の形状を求めることにより実現できる。この形状は、図 3 に示すように、工具経路面に対して、エンドミルの逆形状を「逆転」させたもの（=もとのエンドミル形状）を用いて、逆オフセット計算することで得られる。つまり、STEP 1 で求めた工具経路面に対して、逆エンドミル形状の逆オフセットを施すことにより、理想的な加工面を得ることができる。このことから、STEP 1 を含め、逆オフセット計算を 2 回繰り返して行うことによって、理想的な加工面を計算できることがわかる。

〈STEP 3〉

加工残領域の算出は、切削加工後の形状を表す立体モデルから、金型の製品モデルを差し引くことでおこなうことができる。立体形状の表現法としては、DEXEL モデルを採用する。DEXEL モデルとは工作物の形状を、Z 軸方向に細長い直方体（DEXEL）の集積により近似表現する手法で、この手法は、モデル間の差演算を高速かつ安定に実現できる。

## 5. 自動隅取り加工

CADCEUS 3 DNC の代表機能の一つが自動隅取り加工である。自動隅取り加工とは、前工程での工具で切削した削り残し部分を、指示された工具（切削工具）で切削する加工法である。

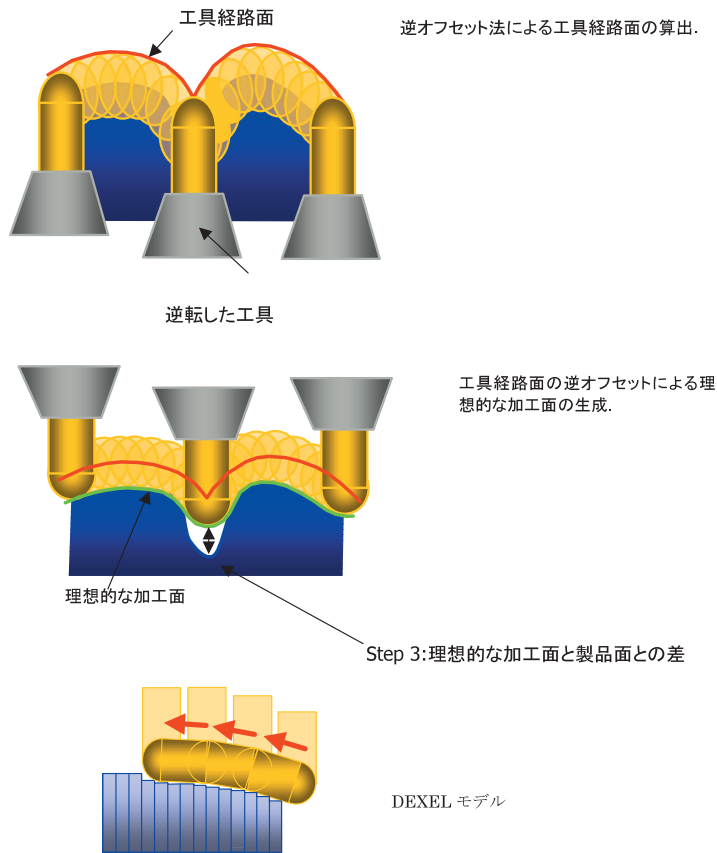


図3 逆オフセット法の二回適用による工具経路面と理想的な加工面の生成.

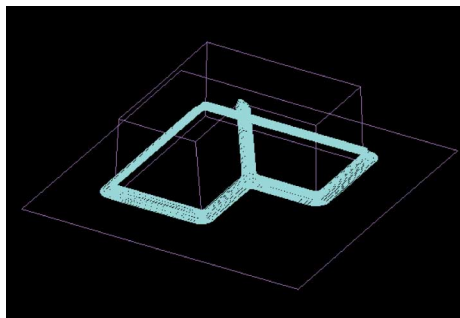


図4 自動隅取り加工の経路

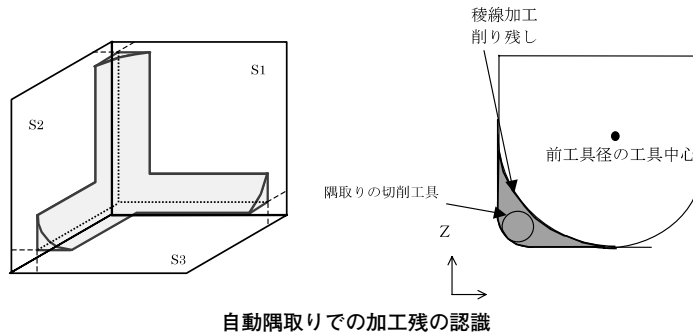
第4章で述べた加工残りを利用する加工法の例である。切削すべき加工箇所を人が指示しないと計算できなかった従来の「隅取り加工」に比べて、人の指示が不要となる自動化の利便性により使用頻度が高い重要機能の一つである。図4で表されるような経路となる。

自動隅取り加工の概要は、はじめに加工残領域を認識して、次にそこへ経路を発生するというものである。

- ① 加工残りの算出=加工領域を前加工する工具の径Dを指示してもらい加工残を算出する。

② ①で見つけた範囲に加工負荷が小さい経路を出力する。指示された一定ピッチで出力する経路を算出する。

2段階処理の①が第4章の問題なので、①に重点を置いた処理説明を行なう。



加工残の算出は標準方式と一部異なる。処理を順次説明する。

### 5.1 前工程の計算モデル作成

前工程での工具でXY双方向のスキャン線を求める(図6)。

STEP 1-1 前工具での双方向(X方向, Y方向)にスキャンする経路 $C_{n-1}$ を算出する。

同一精度でモデルを表現するのに多面体モデルの方がDEXELモデルより少ないデータ量で済むため、逆オフセット法を用いずに製品モデルのオフセット多面体モデルを算出し、工具経路面を算出する。

加工対象形状のオフセット多面体(図5)を、X,Y方向に切断した線(双方向スキャン線) $C_{n-1}$ を求める。スキャン線は標準方式で説明した逆オフセット形状をXZ平面で切断した断面線群とYZ平面で切断したものである。

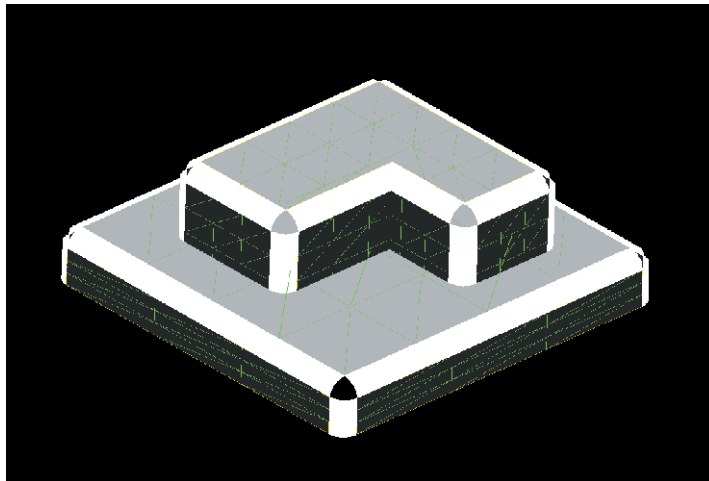


図5 オフセット多面体モデル

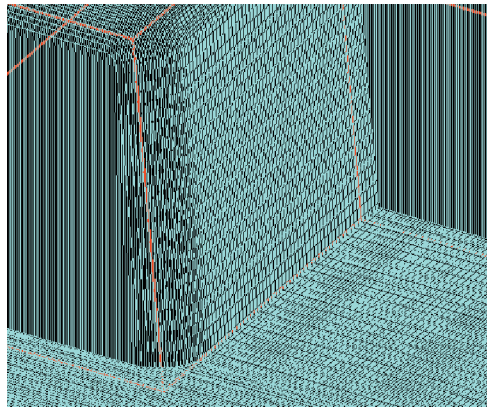


図6 前工程の計算モデル (XY スキャン線)

## 5.2 前工程の稜線作成

STEP 1-2 オフセット多面体を持つオフセット時のガウジ情報よりガウジ点(曲率半径が前工具の工具半径より小さい箇所)を抽出して接続することで凹稜線を作成する(図7).

(スキャン線は製品形状のオフセット形状の断面線であり、オフセット処理時にガウジ箇所をマークすることで曲率半径が小さい箇所を認識する。ガウジ箇所のマークが入った点を凹点と呼ぶ。)凹点を途切れなく分岐を正しく辿ることで得た凹稜線を後述する削り残し領域の認識のためのガイド線とする。

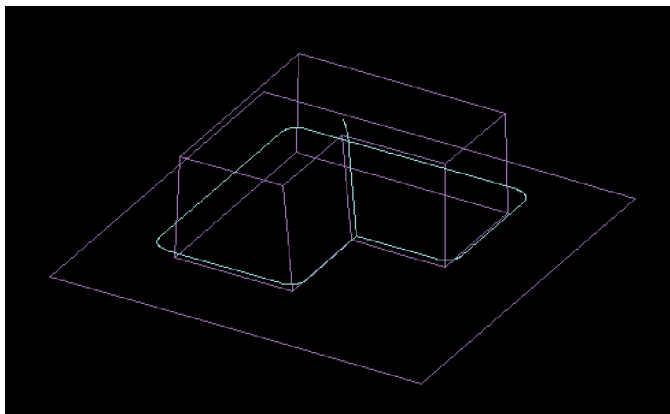


図7 稜線経路

## 5.3 加工後形状折れ線作成

STEP 1-3 前工具の双方向スキャン線上で半径  $R = (\text{前工具半径} - \text{切削工具半径})$  のボール工具を移動させたときの包絡面を求める。

包絡面をスキャン平面で切断した断面図が図8である。この処理が標準方式の2度目の逆オフセット形状算出に相当する。

標準方式との差異は、自動隅取りは素材残データをスキャン線上で表現するため切削工具半径だけオフセットの差があることである。

加工後形状折れ線とは、前工程のスキャン線上で半径  $R$  ( $=$ 大径 $-$ 小径) のボール工具を移動したときにできる包絡面を、スキャン平面で切断した形状である。ここで、大径 $=$ 前工程工具半径、小径 $=$ 切削工具である。加工後形状折れ線を前工程のスキャン線をもとに作成する。

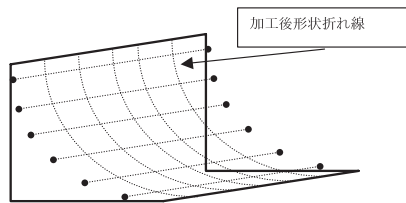
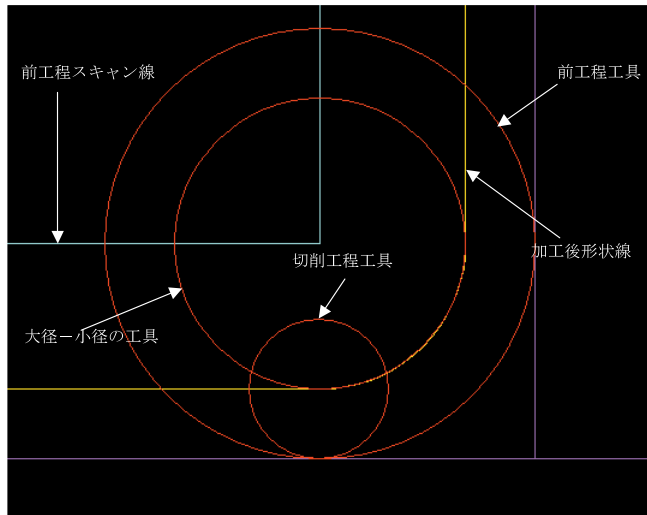


図8 加工後形状折れ線の作成方法

#### 5.4 切削工程の計算モデル作成

切削工具で、XY 両方向のスキャン線を前工程のスキャン線と同一断面で求める (図9)。

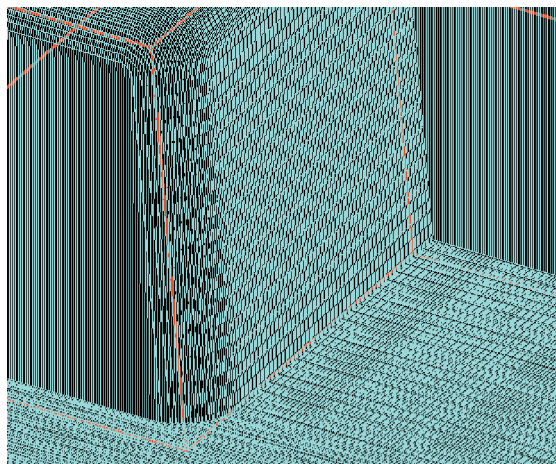


図9 切削工程の計算モデル (XY スキャン線)



### 5.5 削り残し部の作成

加工後形状に対し、前工程の稜線をガイド線として削り残し部を認識する。

削り残し部の認識は、以下の手順でおこなう（図 10）。

- 1) 前工程の稜線沿いに球を転がし、その球に接している加工後形状折線を切り出す。（ここで、球の半径 = 前工程工具半径 - 切削工具半径とする。）
- 2) 切り出された加工後形状折線をもとに、同一断面の切削工程のスキャン折線を切り出す。
- 3) 2) によって求められた折線を削り残し部として登録する。

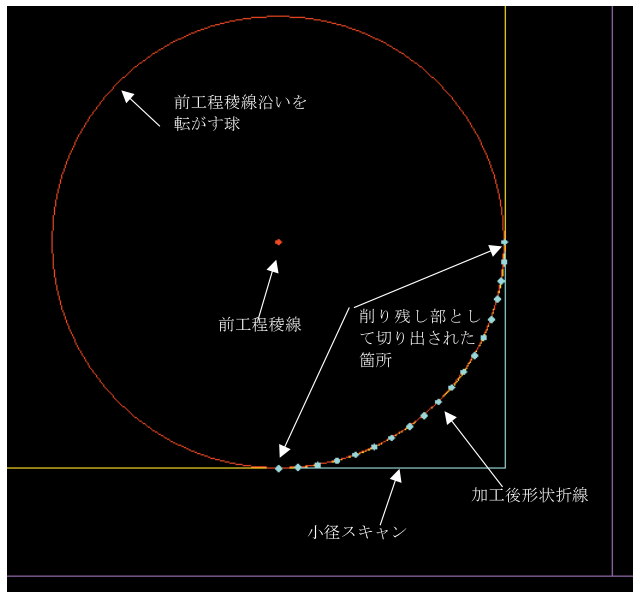


図 10 削り残し部の作成方法

標準方式は形状全体で 2 度目の逆オフセットを行うが自動隅取りでは効率向上のために曲率半径が前工具より小さな凹部を先に抽出して、凹部についてのみ加工後形状 = 素材残を算出する。

### 5.6 削り残し領域作成

5.5 節で切り出された削り残し部を領域単位にまとめ削り残し領域として登録する（図 11）。

こうして得たモデルは素材残モデルそのものではなく、小径工具分オフセットしたモデルである。

素材認識処理は算出法とともに素材データ表現も問題となる。多くは DEXEL 形式といった離散データだが自動隅取りでは双方向の折れ線データの直積ネットで表現している。

### 5.7 隅取り線作成

以下の手順で隅取り線を作成する。

- 1) 削り残し領域単位に削り残し部として切り出された線をそれらの交差情報をもとに外周

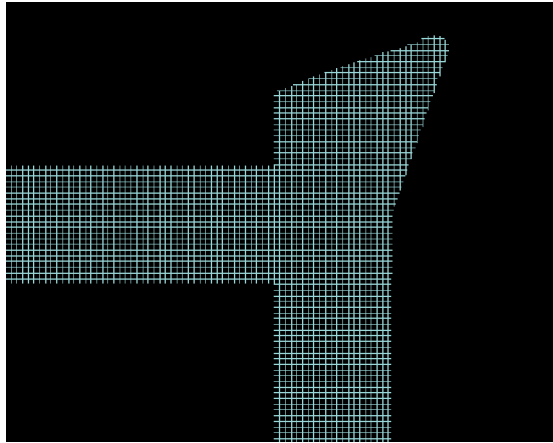


図 11 削り残し領域

をトレースする (図 12).

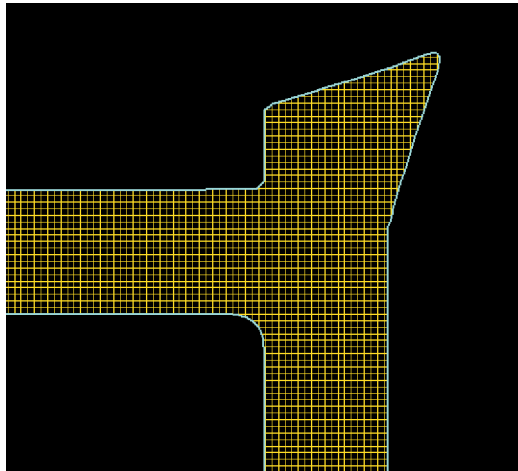


図 12 削り残し領域のトレース処理

2) トレースされた隅取り線沿いに球 (半径 = 指示経路ピッチ) を転がすことにより削り残し部として切り出された線をトリムする (図 13).

・削り残し領域が消滅するまで処理を繰り返す, 隅取り線を作成する (図 14).  
以上が現行の自動隅取りの処理概要である.

## 6. 自動隅取りの切り込み機能

第2章で提出された (高速加工の為の経路算出対策) = 工具の素材への切り込み量を浅くする経路の算出への対応である自動隅取りの切り込み機能について説明する.

現行の自動隅取り加工 (以降「現隅取り」とする) では, 削り残し領域を小径工具で形状に沿って1度に加工している. この場合, 深い溝の加工で工具負荷が大きくなってしまう (図 15).

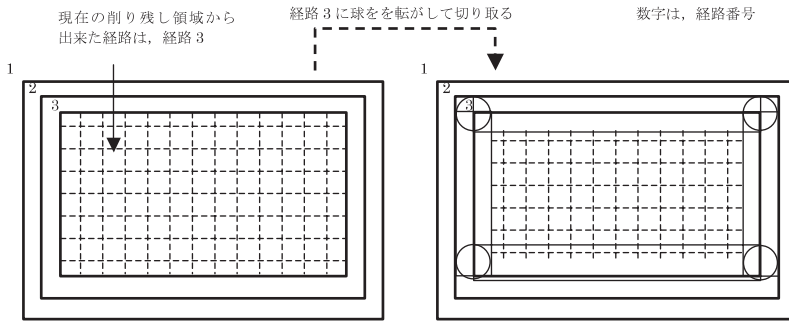


図 13 切り取り処理

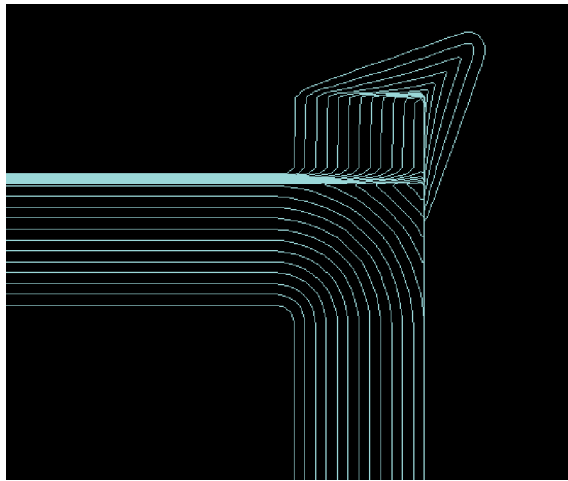


図 14 隅取り線

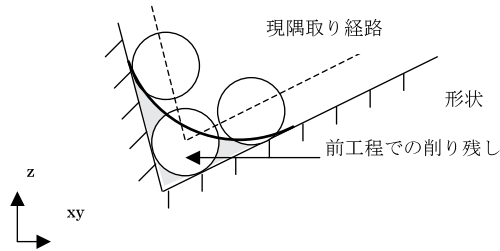


図 15 自動隅取り加工の問題

これを解消するため、基本経路単位で前加工する経路を作成し、その経路で先に加工することで、工具負荷を削減できるようにする（図 16）。ここで前加工経路とは、現隅取りの基本経路を、形状面直方向に一定量だけ移動した経路のことを指す（以降「切り込み経路」とする）。

自動隅取り N 回切り込み機能は大径工具（参照工具）と小径工具（切削工具）の差が大きくても切削負荷をできるだけ軽減して切削するための機能である。

現状の自動隅取りでの出力経路であると切削工具が小さい場合、大径の残し部の切削に非常に負荷がかかるため、一気に小さい工具での切削には不向きであった。

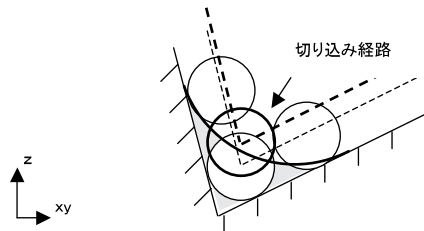


図 16 切り込み経路

そのため小さな工具でも切削できるように、削り残し部を徐々に切り込む経路を作成し、また極力無駄のない経路を出力することにより切削負荷の軽減および加工時間を短縮させるものである。この機能は2章でとり挙げた例：ユーザが一連の加工工程を定義する対処法の代替機能を目指す。工程列：20φで自動隅取り加工→16φで自動隅取り加工→10φで自動隅取り加工→6φで自動隅取り加工といった一連の加工工程を定義する代わりに、前工程工具20φで切削工具6φでのN回切り込み自動隅取りをたった1回だけ定義することで、同等の切り込み加工を実現する。

この機能により加工工程の定義工数を削減する。

以下に無駄なエアカットを生じさせない最適な切り込み回数を決める処理方法を説明する。

### 6.1 切り込み回数の判定方法

現隅取り線に対し、何層切り込みをおこなうかは、断面平面上で判定する。位置により切り込み回数は異なる（図17）。

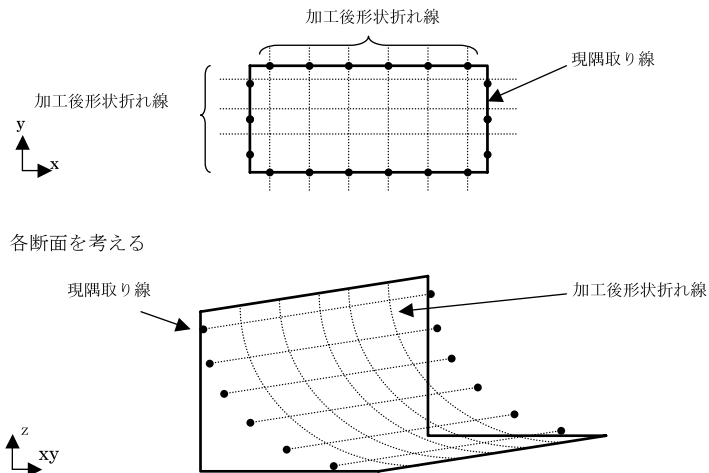


図 17 切り込み回数の判定の断面

現状の自動隅取りで計算切削工具を小さくすることにより、図18のような切り込み経路を作成することができるが、図18の最終切り込み経路上での加工後形状線よりも上部に作成されている経路は無駄な経路となる。N回切り込みではこの無駄な経路を作成せず加工時間の軽減をはかる。

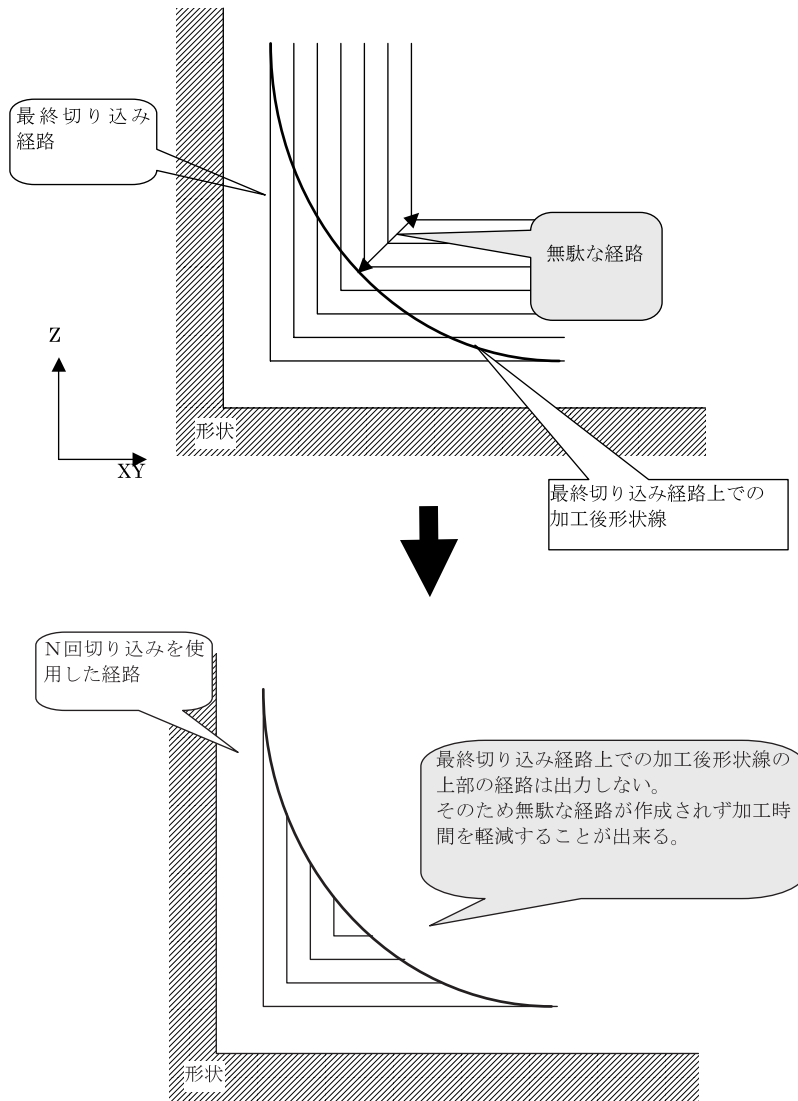


図 18 切り込み経路

計算工具径

N 回切り込みの切削工具径の計算工具径は、切り込み番号から算出する。  
 切り込み番号とは全切り込み経路の Z 上方からの番号とする。

\* 図 19 のような箇所では切り込み番号 1 から 3 までは経路として作成されない。

● N 回切り込みの切削計算工具径の算出方法

$$d = (\text{前工具半径} - \text{指示切削計算工具半径}) / \text{切り込み回数}$$

$$n = \text{切り込み回数} - \text{切り込み番号}$$

$$N \text{ 回切り込みの切削計算工具径} = d * n + \text{指示切削工具計算半径}$$

※最終切り込みでの計算工具半径は n が 0 となるため指示切削工具半径と同値となる。また

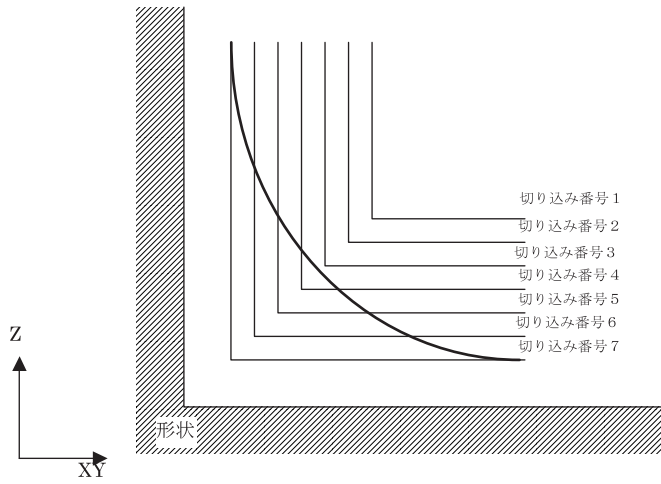


図 19 切り込み経路

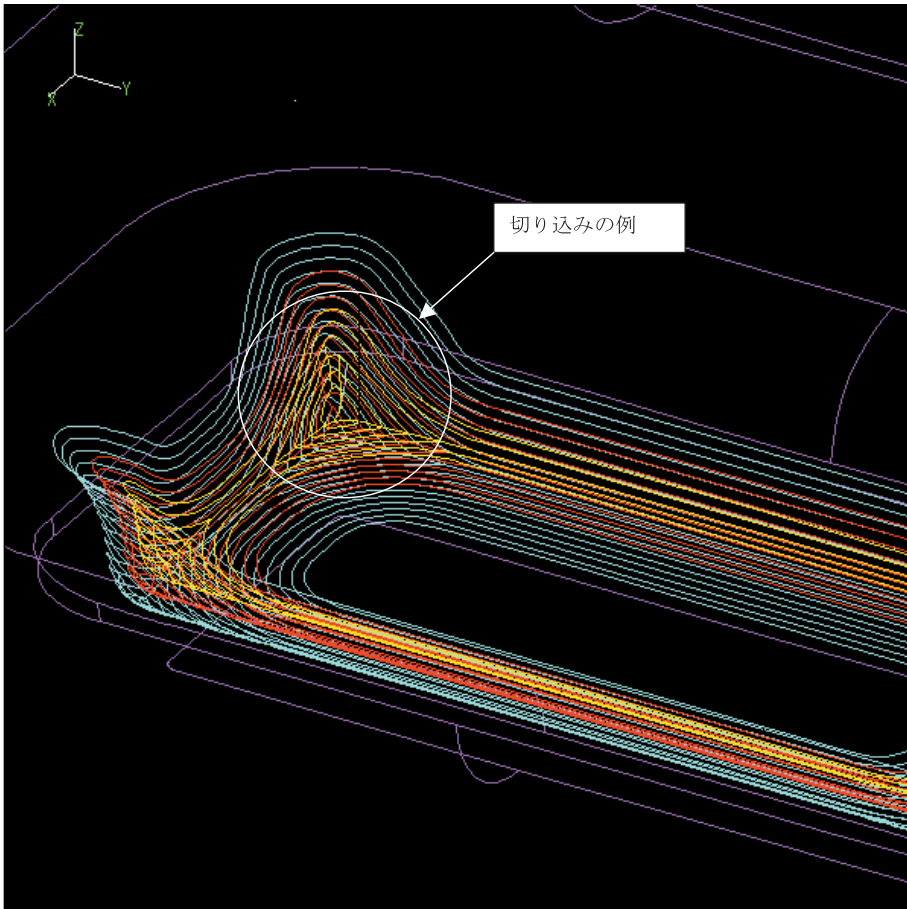


図 20 切り込み経路の作成

N 回切り込み指示なしの通常の自動隅取りの計算とする。  
実際に出力した経路を図 20 に示す。

## 7. 今後の課題について

本稿で紹介した自動隅取りはコーナ形状を想定した切削法であるが，加工残領域の自動認識により溝形状も切削対象となることが多い．溝形状の底付近においては工具の両側に素材が残っていて工具負荷が高くなる場合がある．そのような溝形状に対してはそれに適した切削法が用意されている．

ただし現状は人が形状を判定して切削法を指定するので，課題としてシステムが判定基準を設けて，自動的に切削法を切り替えることが望まれる．

## 8. おわりに

加工残領域の認識は今後とも高精度化と高速処理が望まれる．データ表現も膨大なサイズにならないよう従来の DEXEL 表現から圧縮された表現たとえば曲面式表現といったものが要請される．CADCEUS 3 DNC においても加工シミュレーション技術の改善も視野に入れた改良を図りたい．

謝辞：本稿は 3 DNC 開発メンバ片山，谷戸，富田の協力と論文引用を許可された乾教授に負うところ大である．

- 
- 参考文献** [1] Masatomo Inui 'Fast inverse offset computation using polygon rendering hardware Computer-Aided Design 2003 : 35 P 191-201  
[2] M. Inui and T. Miyashita 'Hollow Shape Extraction Geometric method for assisting process planning of mold machining' The 5 th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning Besançon, France, 9-11 July, 2003

### 執筆者紹介 近藤道夫 (Michio Kondo)

1973 年東京大学理学部数学科卒業．同年日本ユニパック総合研究所(株)入社．2000 年 4 月より CADCEUS 3 DNC システム開発に従事．現在，日本ユニシス・ソフトウェア(株)へ出向中．