

# 回転弾性棒による塑性加工のFEM数値成形制御

理化学研究所 素形材工学研究室

栗山慎鋒

(平成6年度研究開発助成 AF-94020)

キーワード：有限要素法，成形シミュレーション，ペナルティ法

## 1. 研究の目的と背景

塑性加工の成形シミュレーションに有限要素法(FEM)が用いられ、計算機の性能向上により数値シミュレートが可能になった。特に計算機ワークステーション・パーソナルコンピュータの出現により、計算機の専有使用ができ、長時間の計算が可能となった。著者は塑性加工の要である金型工具に着目し、被加工材は工具に沿って3次元曲面に成形されると考え、計算方法と工具表示方法に関し、次の様にプログラムを開発改良する。

(1) 工具との接触・非接触は一般に節点変位量を指定するペナルティ法で制御している。そこで回転可能な高剛性の弾性棒で制御すると、解析方法はペナルティ法であるが、変位量だけでなく回転も同時に制御できる。即ち工具の曲面に沿って成形制御でき、反復解法なら計算時間も短縮できる。

(2) 成形過程を工具の動きと設計時のCADから考察する。工具の形状は非常に簡単であるが、工具の動きが3次元に複雑に動く場合や回転する場合が多々ある。この様な問題に対して工具の面形状を微小な三角形や四角形の集合体として表示すると膨大なデータ量となり、また工具が回転および2次元以上の運動する場合、工具との接触を判定するのに多大の計算時間を費やす。そこで工具形状を平面を含む数種の単純な2次元曲面で表示すると、CADのデータがそのまま使用でき、計算時間も短縮できる。

(3) 工具を(2)で述べた2次元曲面表示法で記述すると、形状は同じであるが寸法を変化させた工具データが簡単にでき、かつ寸法を変数として扱え、最適化問題に適用できる。

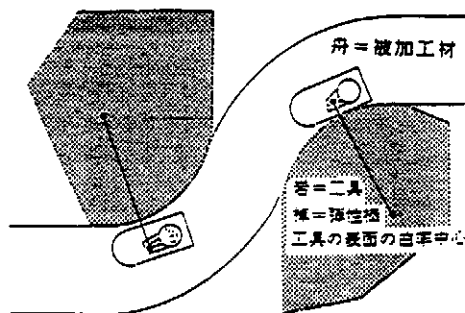


図1 弾性棒による成形制御の原理

以上の考え方に従って、工具との接触を回転可能な一本の弾性棒で数値制御する方法を提案し、反復解法による有限要素法プログラム(FDSolid)を開発する。

工具面は平面・円柱面・球面・円錐面・ドーナツ面の5種類に分割表示する。まず工具が一方向に移動するプレス成形に適用する。平面・円柱面で表示されるハット曲げ成形と、球面・ドーナツ面・平面・円柱面で表示される球頭ポンチの深絞り成形と、円錐面・平面・円柱面・球面・ドーナツ面で表示される円錐ポンチ穴抜き成形とを解析する。次に工具が回転運動する加工成形に適用し、円柱面・ドーナツ面で表示するマンドレルミルの圧延成形を解析する。

## 2. 弾性棒による成形制御

塑性加工における成形には一般に金型工具が使用され、素材は工具に沿って3次元曲面に成形される。これを有限要素法でシミュレートするには<sup>1-4)</sup>、工具に対する素材の接触・非接触で制御して解析する。汎用FEMプログラムMARCでは<sup>5)</sup>、節点における素材と工具の垂直距離によって接触を判定し、ペナルティ法で制御する。NIKEでは<sup>6)</sup>工具と素材要素間に8本の高剛性の弾性棒を挿入し、4本の弾性棒は垂直方向の接触・非接触を制御し、他の4本は接線方向の摩擦を計算する。それに対し著者は<sup>7)</sup>一本の高剛性の弾性棒を工具の曲率中心に挿入して、接触と摩擦を制御する方法を提案した。高剛性の弾性棒を使用するのでペナルティ法に属するが、著者の方法は回転可能な棒要素である。

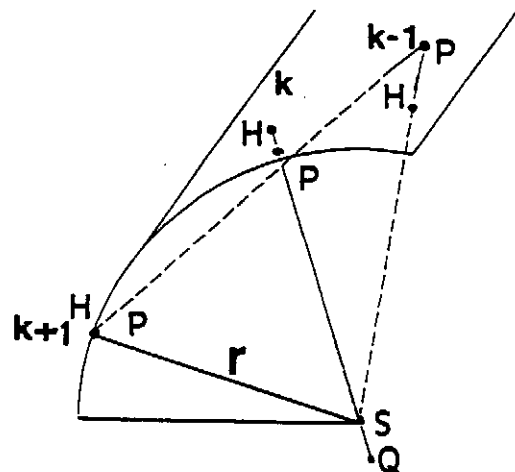


図2 一本の高剛性弾性棒による数値成形制御

一本の弾性棒で制御する方法の原理は、川下りの船の操作に似ている(図1)。船が急流で岩に近づくとき、竿を岩に当てて衝突しないように船を回転させる。これと同様に素材が工具に接触すると、素材の方から工具の曲率中心に高剛性の弾性棒を一本挿入する。この弾性棒によって素材を回転させ工具内部に侵入させない<sup>7)</sup>。

弾性棒で工具との接触を制御する方法を説明する。図2に示すように、増分ステップ  $k-1$  回目に工具の外部にあった素材の節点  $P_{k-1}$  が、ステップ  $k$  回目に工具内に侵入した場合を考察する。素材の節点  $P_k$  から工具の曲率中心  $S$  に直線を引き、工具面との交点を  $H_k$  とする。節点  $P_k$  が交点  $H_k$  より工具内部にある場合、曲率半径  $r$  に相当する長さの弾性棒を節点  $P_k$  から点  $S$  に挿入する。棒の他端を  $Q$  とする。  $Q$  点に工具内に侵入してい

る距離  $H_k P_k$  を変位量として与えて次ステップ  $k+1$  を解析する。棒の端  $Q$  は  $S$  点に戻り、他端  $P$  は工具表面近傍  $H_{k+1}$  に移動する。この方法を繰り返して素材を工具表面に沿って成形加工する<sup>7)</sup>。

### 3. 工具の記述と接触判定

開発したプログラムの特徴を以下に示す。

- (1) 工具表面の形状は三角形または四角形の平面・円柱面・円錐面・球面・ドーナツ面で分割表示する(図3)。節3.1に記載する<sup>7)</sup>。
- (2) 各工具面要素は3個または4個の平面壁で囲む。被加工材の節点の位置が囲まれた平面壁の中にある時、被加工材はその曲面要素と接触すると判定する(図4)。節3.2に記載する<sup>8)</sup>。

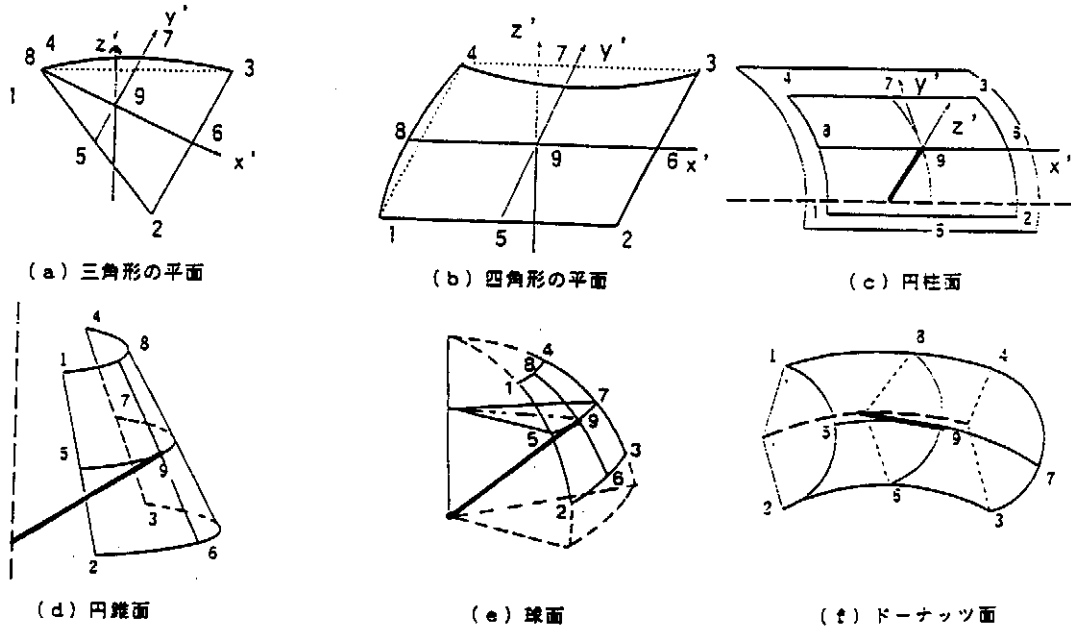


図3 分割された面要素

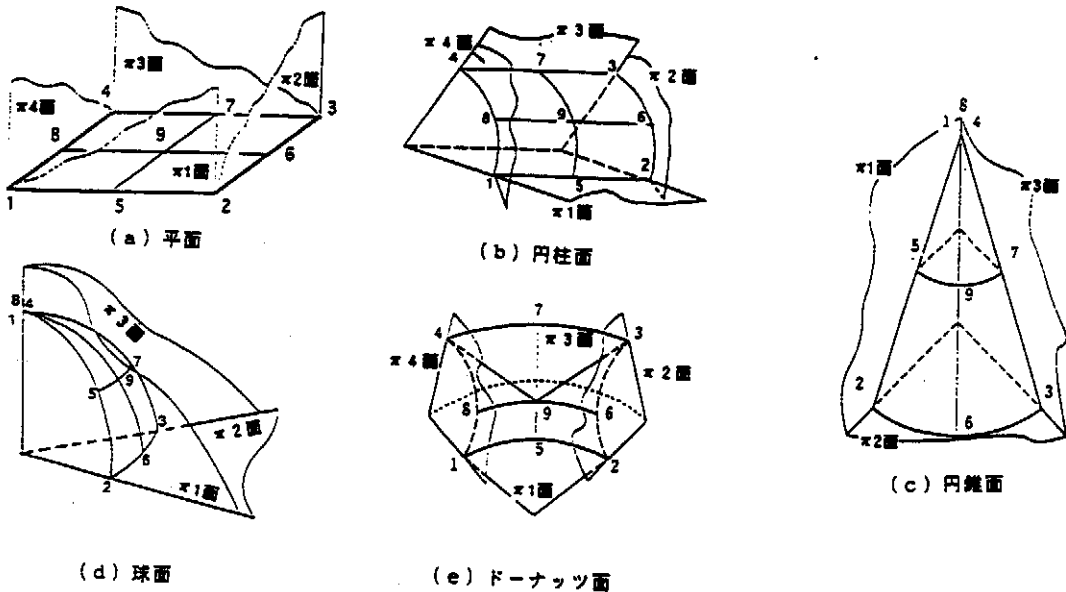


図4 接触領域を定義する平面壁

- (3) (2)で述べた平面壁の外に幅 2mm 程度の「のりしろ」を設け、「のりしろ」以内の拡張した領域を工具要素との接触可能範囲とする(図5)。節 3.3 に記載する<sup>8)</sup>。
- (4) 接触可能な面が数面ある場合、工具面と被加工材の接触交角を求め、交角の小さい方を優先選択して、接触工具面と判定する(図6)。節 3.4 に記載する<sup>9)</sup>。
- (5) 工具用弾性棒は工具面に対して、常に垂直性を保持させながら、工具表面に沿って移動回転させる。詳細は文献 10) を参照のこと。
- (6) 弾性棒の長さ、方向、軸力、縮み量、そして変位量は工具面形状によって異なる。そこで弾性棒はステップ毎に新しく補正した弾性棒に取り替える。詳細は文献 10) を参照のこと。

### 3.1 工具面の要素分割

工具表面の形状を記述する為、多数の面要素に分割する<sup>7, 8)</sup>。いま面要素をアイソパラメトリックス等で表示すると、接触点は工具面上を移動するから増分ステップ毎に接触点および曲率中心を計算しなければならず、計算時間がかかる。そこで工具の表面を平面・円柱面・球面・円錐面・ドーナツ面で分割表示する。それぞれの面の曲率中心は面の形状を決定した時点で確定しており、それを面の形状特性値として記憶させておけば、計算時間が短縮される。

工具の表面を平面(図3(a), (b))・円柱面(図3(c))・円錐面(図3(d))・球面(図3(e))・ドーナツ面(図3(f))の5種類の面形状に分割する。各面要素は9節点で表示する。平面が他の曲面と交差するとき、切断面は曲線になる故、平面は図3(a)と(b)に示すように辺が円弧で表示される場合も使用できる。要素形状はどの曲面でも原則的には三角形でも四角形でも使用できる。一つの曲面要素で記述できる範囲は角度で 180 度以内で、形状は半円柱面、半割円錐面、半球面、4分の1ドーナツ面までである。

各曲面形状における曲率半径を図3に太実線で、曲率中心の位置を太点線で示す。これらの半径と位置の情報および分割要素面の局所座標(x', y', z)を記憶させる。なお円錐面は曲率半径が線形に変化する球面の集合体と考える。球面と円錐面では局所座標は使用せず、全体座

標で表示する。ドーナツ面は曲率中心の位置が半径一定の円弧上にある円柱面の集合体と考え、局所座標 y は図3(f)に示す面(5-9-7)の法線方向と決めるが、x' と z' は接触位置が確定した後に決定する。

### 3.2 工具面要素との接触判定

面要素には図4に示すように、要素を囲む3または4個の平面壁を設定する<sup>8)</sup>。被加工材の節点から面要素に垂線または曲率中心に直線を引き、曲面との交点を求める。交点が壁である4個のπ平面に対しすべて負の時、交点はその曲面領域内にあり、接触すると判定する。1個でも正の時曲面領域外にあり、接触しないと判定する。このように平面壁の方向をあらかじめ決定して記憶させておく。

### 3.3 互いに工具面が接する近傍領域の接触

二つの面が交差する近傍で、被加工材が工具内に少し侵入した場合の接触判定を考察する<sup>8)</sup>。2工具面が図5(a)のように凸になっている場合、侵入点 P から両面に垂線を下ろすと、両垂線の足 H<sub>1</sub> と H<sub>2</sub> はともに平面壁の中であり、両面と接触することとなる。この時は交線 LL に近い方 H<sub>1</sub> を接触点および接触面と判定する。2工具面が図5(b)のように凹になっている場合、図5(a)と同様両面に垂線を下ろすと、平面壁の外にあり両面と接触しない。これを避ける為図5(c)に示すように、壁の外側に幅 2mm 程度の「のりしろ」を設け、この拡張した「のりしろ」以内の領域を工具との接触範囲とする。

### 3.4 接触面の選択

接触可能な数面から一個の接触面を選択する<sup>9)</sup>。これには工具と被加工材の面の方向を用いて決定する。被加

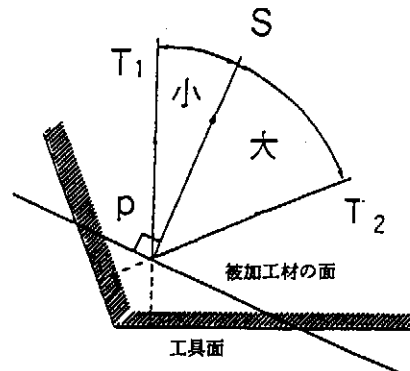


図6 接触面の選択決定

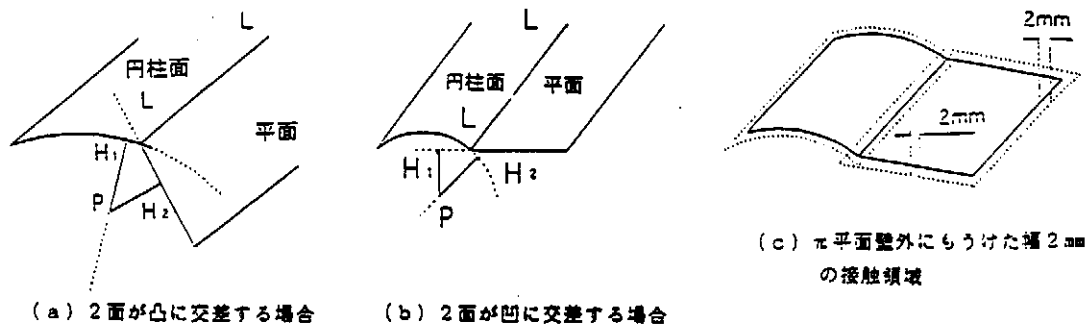


図5 面が交差する近傍の接触判定

工材の節点 P が図 6 に示すように、工具内に侵入している場合、節点 P から被加工材の面に法線 PS と工具面に垂線  $PT_1, PT_2, \dots$  を立てる。素材の節点 P は、次ステップの解析で工具外に押し戻され、工具面に沿って移動することになるので、接触可能な複数の工具面と被加工材との接触交角を求め、交角が小さい方を優先選択して、接触工具面と判定する。

#### 4. 自動要素分割プログラムの開発

試験片である被加工材は、まず微小固体要素に分割し、その後工具と接触する可能性がある面には工具用弾性棒を付加する。この開発した自動要素分割コードを TOOL と名付け、手順を以下に示す<sup>3, 12)</sup>。

- (1) 2次元平面として要素を分割する (図 7(a))。
- (2) 節点を減らす為要素を結合する (図 7(b))。
- (3) 試験片は板であるから 3次元に積層する。
- (4) 表面に弾性棒を付加する (図 7(c))。

#### 5. 成形シミュレーション

有限要素法汎用プログラムに著者が開発した接触制御コードを組み込み、FEM プログラム FDSolid と名付ける。計算機にはワークステーション SUN と DEC (理化学研究所) を使用する。

被加工材である素材の材料特性値は鋼材を想定して、弾性係数  $E=21000\text{kg/mm}^2$ 、降伏応力  $\sigma_y=28.0\text{kg/mm}^2$ 、線形加工硬化係数  $E_p=60.0\text{kg/mm}^2$ 、ポアソン比  $\nu=0.3$  とし、線形加工硬化型で近似する。工具用弾性棒の剛性は  $50 \times E\text{ kg/mm}^2$  である。

##### 5.1 ハット曲げ成形

ハット曲げ成形<sup>9)</sup>に必要な工具の断面形状を図 8 (a) に示す。成形加工の対称性より、右半分を解析する。板材の形状は幅 10mm、長さ 40mm、厚さ 1mm の短冊状で図 8(b) に示す。これを 2層で 40 個の 3次元固体要素(16 節点表示)に分割し、各節点に工具用弾性棒(2 節点表示)を設け、上下両面で計 170 本である。面 AB 上の節点是对称性より、x 方向の移動を固定する。

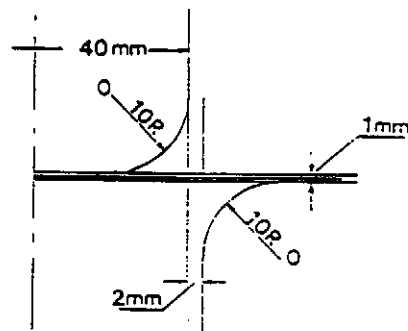
ポンチ幅は 40mm、ポンチとダイスの肩 R は 10mm、ポンチとダイスのクリアランスは 2mm とする。ブランクホルダーとダイスの間隔は 1mm で、成形中一定と仮

定する。工具を面要素で分割表示すると、最小の分割要素数は 8 個で、平面が 6 個で、円柱面が 2 個である。

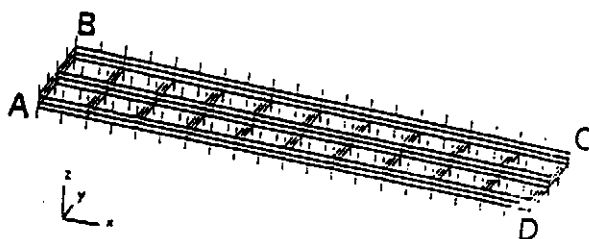
成形高さが  $H=18.8\text{mm}$  時の解析結果を図 8 (c) に示す。計算に要したステップ数は 186 回で、計算時間は 1 時間半程度である。

##### 5.2 球頭ポンチによる深絞り成形

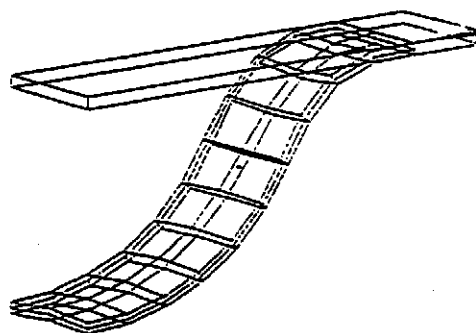
球頭ポンチ深絞り成形<sup>11)</sup>の工具の形状および要素分割図を図 9 (a) に示す。成形加工の対称性より工具と試



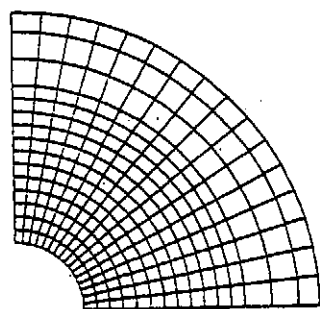
(a) 工具の寸法と要素分割



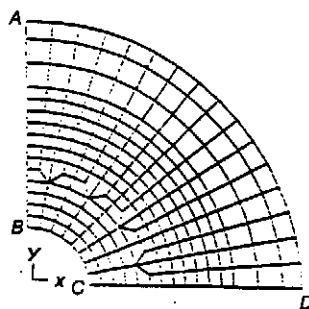
(b) 鋼板の要素分割



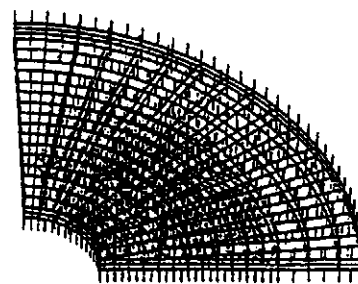
(c) 成形高さ 18.8mm における曲げ変形  
図 8 ハット曲げ成形



(a) 平面要素の分割



(b) 要素の結合



(c) 弾性棒の付加

図 7 要素の自動分割と弾性棒の付加

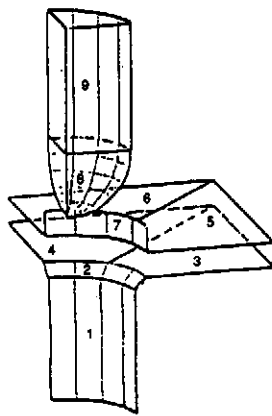
試験片は四分の一を解析する。ダイスは平面2個・ドーナツ面1個・円柱面1個で、ポンチは円柱面1個・球面1個で、ブランクホルダーは平面2個・ドーナツ面1個で表示する。

試験片の形状は、幅42mm長さ42mm厚さ1mmの正方形板で図9(b)に示す。これを2層392個の3次元固体要素に分割し、工具用弾性棒は1290本、節点総数は3225である。対称性より面AB上のx方向と面BC上のy方向の移動を固定する。ポンチの直径は50mmφである。

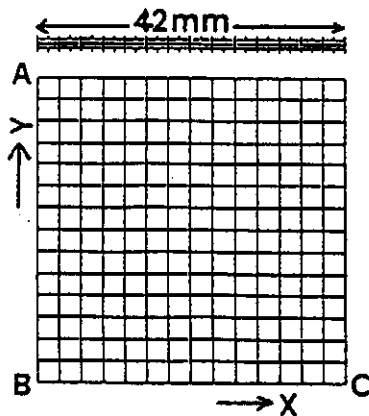
成形高さがH=17.7mm時の解析結果を図9(c)に示す。計算時間は2時間程度である。

### 5.3 円錐ポンチによる穴抜き成形

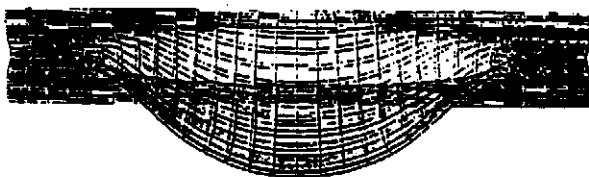
円錐ポンチ穴抜き成形<sup>12)</sup>の工具の形状および要素分割図を図10(a)に示す。成形加工の対称性より四分の一を解析する。試験片の形状は、図7より内径20mmφ、



(a) 工具の要素分割



(b) 鋼板の要素分割



(c) 成形高さ17.7mmにおける変形

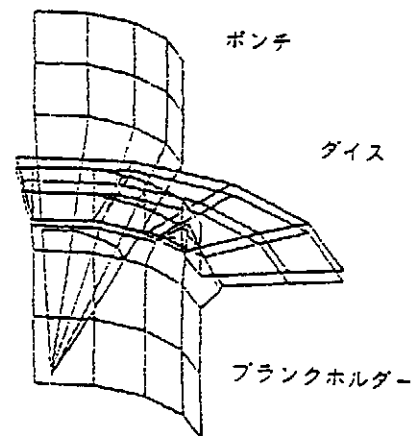
図9 球頭ポンチによる深絞り成形

外径90mmφ、厚さ4mmの扇形板である。素板を2層400個の3次元固体要素に分割し、各節点に工具用弾性棒1310本を設ける。ポンチ、ダイス、ブランクホルダーを曲面要素で分割表示する。平面が2個、円柱面が3個、ドーナツ面が1個、円錐面が1個である。対称性より図7(b)に示す面AB上のx方向と面CD上のy方向の移動を固定する。

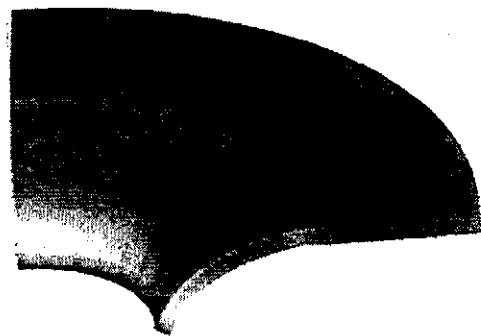
成形高さがH=25.5mm、穴抜き率λ=0.8の時の解析結果を図10(b)に示す。計算に要したステップ数は549回で、計算時間は4時間程度である。

### 5.4 マンドレミルによる圧延

節5.1から5.3に述べた成形にはまだ摩擦の項が考慮されていない。そこで摩擦が扱えるプログラムに開発し、工具ロールに代表される摩擦による駆動型回転成形を解析する。扱う問題は3ロール式マンドレミルによる円管の圧延成形である(図11)。3ロール式マンドレミルの概略図および寸法を図11(a)に、工具および被加工材の形状と要素分割図を図11(b)と(c)に示す。成形加工の対称性より工具と試験片は手前半分を解析する。試験片の形状は、図(b)より内径71.1mmφ、外径89.1mmφ、厚さ9mmの円管である。円管を2層540個の3次元固体要素に分割し、各節点に工具用弾性棒1754本を設ける。工具は図(b)よりローラ1は2個のドーナツ面で、ローラ2は4個のドーナツ面で、マンドレルバー3は1個の円柱面に表示する。対称性より図11(b)



(a) 工具の要素分割

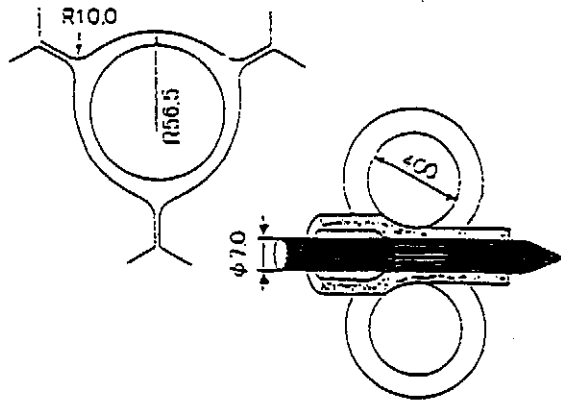


(b) 穴抜き率λ=0.8における変形

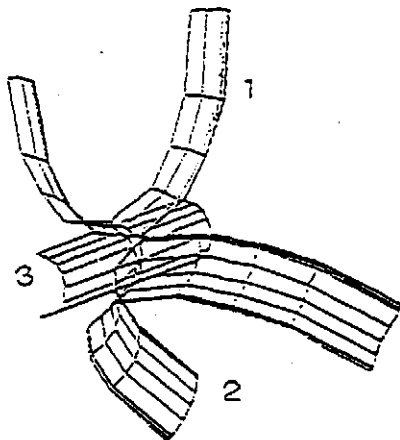
図10 円錐ポンチによる穴抜き成形

に示す面 AB と CD 上の円周方向の移動は固定する。

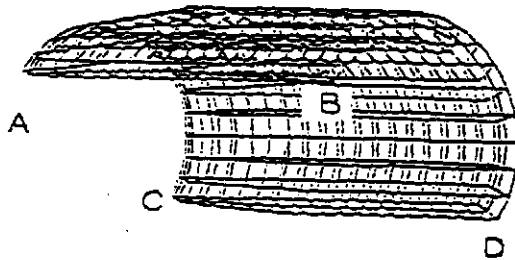
摩擦係数を  $\mu=0.15$  とし、現在解析中であるが、結果の一部を図 11(d)に示す。試験片全面を圧延するのに



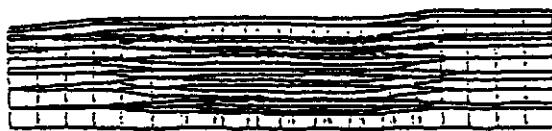
(a) 工具の寸法



(b) 工具の要素分割



(c) 円管の要素分割



(d) 距離 101.8mm 間を圧延した時の変形

図 11 マンドレルミルによる円管の圧延成形

要したステップ数は 400 回で、計算時間は 5 時間半程度である。

## 6. まとめ

塑性加工の成形シミュレーションに弾塑性有限要素法を適用する方法を研究している。数値加工成形に設計時の CAD のデータが直接利用できるような、そして計算時間が短縮できるように、弾性棒で成形を制御する方法を提案し、工具面を 5 種類の 2 次曲面で表示して、一本の回転可能な弾性棒で数値成形制御する FEM プログラムを開発した。これを用いて工具が一方方向に移動するプレス成形、即ち工具面形状が平面・円柱面・球面・円錐面・ドーナツ面に表示される薄板のハット曲げ成形、球頭ポンチ深絞り成形、厚板の円錐ポンチ穴引き成形を、また工具が回転する駆動型回転成形、即ち円柱面・ドーナツ面に表示される厚肉円管の 3 ロール式マンドレルミルの圧延成形を解析した。

今後は摩擦の導入を完全なものにした後、加熱または摩擦熱によって温度が変化したときにも解析でき、しかも最初は反復解法で計算し、解が収束しなくなると直接解法に変更して解析する併用有限要素法プログラムを開発する。

ここに本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成によるものであることを記し、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) O. C. Zienkiewicz : The Finite Element Method. McGraw-Hill
- 2) K. J. Bathe : Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall.
- 3) 栗山慎鋒 : 第 42 回塑加連講論 (1991, 札幌), 243.
- 4) 横内康人 : 塑性と加工, 34-392(1993), 977.
- 5) MARC CONTACT 機能による大変形接触解析, 金属成形加工等を対象として, 日本マーク, (1989, 11), 2.2.
- 6) NIKE3D, 剪断摩擦考慮型スライドーボイド型インターフェイス, ユーザーマニュアル, 日本総合研究所, (1978.12), 3.
- 7) 栗山慎鋒 : 平 6 塑加春講論 (1994, 習志野), 741.
- 8) 栗山慎鋒 : 第 45 回塑加連講論 (1994, 熊本), 727.
- 9) 栗山慎鋒 : 平 7 塑加春講論 (1995, 調布), 355.
- 10) 栗山慎鋒 : 第 46 回塑加連講論 (1995, 千葉), 47.
- 11) 栗山慎鋒 : 平 8 塑加春講論 (1996, 名古屋), 168.
- 12) 栗山慎鋒 : 平 9 塑加春講論 (1997, 町田), 217.