論文

工具モデル精度の角筒絞り成形解析に及ぼす影響

浜 孝之* 高村 正人** 牧野内 昭武***

Cristian TEODOSIU*** 宅田 裕彦*

Effect of Tool Modeling Accuracy on Square Cup Deep-Drawing Simulation

Takayuki HAMA*, Masato TAKAMURA**, Akitake MAKINOUCHI***,

Cristian TEODOSIU*** and Hirohiko TAKUDA*

(Received on May 22, 2006)

In this study, the effect of tool modeling accuracy on finite-element simulation of a square cup deep-drawing process is examined. First, the accuracy of tool modeling by a conventional approach, in which polyhedral surfaces are used, is compared with that of an alternative one, in which the quadratic parametric surfaces proposed by Nagata (Nagata patch) are used. It is clear that the Nagata patch yields a much more accurate tool model than the polyhedral surface in terms of tool shape and tool normal vector. Next, the simulations of the square cup deep-drawing process are carried out for various numbers of tool elements. It is clarified that a polyhedral tool with at least 10 patches at the die shoulder is required to carry out appropriate simulations. The simulated result of the Nagata patch tool with two patches at the die shoulder corresponds well to that of the polyhedral tool with more than 10 patches. From this point of view, it is concluded that the number of tool elements can be markedly decreased by using the Nagata patch tool. In the present case, the number of tool elements can be reduced to about 10% that of the polyhedral tool.

Key words: sheet metal forming, numerical analysis, tool modeling accuracy, polyhedral approximation, quadratic polynomial patch, elastic-plastic FEM

1. はじめに

近年、自動車部品を代表とするプレス加工分野では、有限要素法（以下、FEM）解析を核とした板成形デジタル生産システムにより、コスト削減やリードタイムの短縮などに大きな効果をあげている。しかし最近良く指摘されているように、スプリングバックや面ひずみといった形状問題に対する解析精度は不十分であり、さらなる解析技術の発展が望まれている^{1), 2)}。

面ひずみのような10 μ m オーダの不良現象を高精度に予測するには、金型やプレス機械自体のたわみを考慮した解析を行う必要があるとされる¹⁾。最近では金型の弾性変形を考慮した板成形解析も行われている^{3), 4)}。金型の材料接触面は経験的に十分に細かく要素分割する必要がある。金型の弾性変形を考慮するために金型全体をモデル化すると、非常に大規模なモデルとなる可能性があり、離散化などのモデル作成上および計算上大きな問題となる。この問題に対して著者らは、金型全体の変形を材料接触面の節点自由度へ静的に縮退させることによる、線形弾性体（工具）と大変形弾塑性体（板材）の連成接触解析手法を静的陽解法FEMの枠内で開発した⁴⁾。本手法によれば金型全体を計算する手法に比べて非常に効率良く解析することができる。

その一方で、計算時間および工具モデルの規模は金型の材料接触面を構成する工具要素数に大きく依存する。したがってより効率良く解析を遂行するため、できるだけ少ない要素数で十分な工具モデル精度を実現する材料接触面のモデル化技術が求められている。しかし板成形解析に及ぼす工具モデル精度の影響について詳細に検討された例はなく、「妥当な解析を行うには接触面を十分細かくする必要がある」という大雑把な経験的指針しかないのが現状である。

ところで、著者らは最近 Nagata の提案による曲面補間技術⁵⁾（以下、Nagata パッチ）を工具モデルに適用した接触解析技術を開発した⁶⁾。本技術によれば、従来の多面体近似工具モデルを曲面補間することで得られる飛躍的に高精度な工具モデルを用いた接触解析を、頑健かつ高精度に行うことができる。また逆に工具モデル精度が従来の多面体近似工具モデル程度で十分な場合、従来に比べて飛躍的に少ない工具要素数で接触解析を遂行できる可能性がある。

そこで本研究では、できるだけ少ない要素数で十分な精度を有する工具モデルを得ることを目的として、角筒絞り成形における雌型（ダイ）を対象として Nagata パッチの工具要素数低減への有効性を検討する。はじめに角筒絞り成形解析を遂行する上で十分な工具モデル精度を明らかにし、続いて Nagata パッチを適用することでどの程度工具要素数を低減できるかを検討したので、その結果を報告する。

2. 静解析 FEM プログラム STAMP3D

本研究では静的陽解法に基づく弾塑性 FEM プログラム

* 京都大学 大学院エネルギー科学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

** 日産自動車(株) 車両生産技術本部 車両技術開発試作部
〒243-0192 神奈川県厚木市岡津古久 560-2*** (独) 理化学研究所 ものづくり情報技術統合化研究プログラム
〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

STAMP3D⁷⁾を用いる。STAMP3D では updated Lagrangian 形式の仮想仕事の原理に基づいて増分形で定式化されている。速度形の釣り合いは微小時間増分 Δt の間保たれると仮定することで、つぎのように全ての速度形物理量が増分形で置き換えられる。

$$\Delta \dot{\mathbf{i}}_{(j)} = \dot{\mathbf{i}}_{(j)} \Delta t, \quad \Delta \mathbf{f} = \dot{\mathbf{f}} \Delta t, \quad \Delta \mathbf{L} = \dot{\mathbf{L}} \Delta t \quad (1)$$

ただし、 $\dot{\mathbf{i}}_{(j)}$ はキルヒホッフ応力テンソルの Jaumann 速度、 $\mathbf{f}$ は物体に働く表面力ベクトル、 $\mathbf{L}$ は速度勾配テンソルである。増分中の近似的な線形性を保つため、 $r_{\min}$ 法により増分幅を順応的に制御している。

3. 接触問題の取り扱い

3.1 基本定式^{6), 8)}

STAMP3D では、材料節点と工具要素をそれぞれスレーブ節点とマスター要素としたマスター・スレーブ法を採用する。接触に伴う変位拘束にはペナルティ法を採用する。工具と接触していると判定された材料節点の工具面上への投影は以下の理由から行っていない。(1)陽的な時間積分を行っているため、工具面上への投影に伴う不釣り合い力の発生を防ぐ、(2)シェル要素を用いた解析では両面接触の取り扱いが困難であり、材料片面に基づいて工具面上への投影を行うと逆側の面の工具への潜り込みを促進する場合がある。しかし工具が十分な精度でモデル化されていれば、静的陽解法における時間増分幅の微小性から材料節点と工具面上の接触点のずれは無視できる程度と考えられる。

3.2 工具モデリング手法

工具表面を三角形パッチの集合で表現した多面体近似工具⁸⁾(以下、多面体モデル)を用いる。多面体モデルは IGES 形式の CAD データを (株) システムズプランニングで開発された VOBJ Creator により自動メッシュ生成することで作成する。このとき工具節点 k には、節点 k が属する全ての工具要素における法線ベクトルを次式により平均化することで、唯一の単位法線ベクトル $\mathbf{n}^k$ が定義される。

$$\mathbf{n}^k = \sum_m S_m \mathbf{n}_m / \left\| \sum_m S_m \mathbf{n}_m \right\| \quad (2)$$

ただし $\mathbf{n}_m$ は要素 m に対する単位法線ベクトルである。 S_m は要素 m の面積を表し、重み係数として用いている。要素内の任意点での単位法線ベクトル $\mathbf{n}$ は、次式で定義される。

$$\mathbf{n} = \sum_{k=1}^3 N^k \mathbf{n}^k / \left\| \sum_{k=1}^3 N^k \mathbf{n}^k \right\| \quad (3)$$

ただし N^k は三角形一次要素に関する形状関数である。多面体モデルでは工具要素を平面と仮定し、接触探索においても平らな三角形パッチと材料節点の間で探索を行う。法線ベクトルは、式(2)、(3)に示すように必ずしも三角形パッチの向きと整合していないという特徴を有する。多面体モデルによる接触解析の詳細は文献 8)、9)を参照されたい。

多面体モデルにおける三角形パッチを Nagata パッチで置き換えることにより、Nagata パッチモデルを作成する⁶⁾。Nagata パッチは、特別なパラメータを要せずに二次の内挿で元形状への高精度な補間曲面を与える技術であり、実用的な分割数による多面体近似では達成できなかった形状精

度を達成できることが報告されている⁵⁾。また著者らが提案した Nagata パッチを用いた接触解析技術は、反復計算をほとんど要しないため、従来に比べて飛躍的に高精度な工具モデルとの接触解析を、従来と同様に頑健かつ高精度に行うことができるという特長を有する。Nagata パッチおよび Nagata パッチモデルによる接触解析の詳細な定式化については文献 5)、6)を参照されたい。

Nagata パッチモデルでは、各工具節点上で CAD データから計算された厳密な法線ベクトルを定義している。またその表面は、工具節点の位置ベクトルおよび法線ベクトルから計算される二次パラメトリック曲面 (Nagata パッチ)⁵⁾の集合で表現される。要素内の任意点では、Nagata パッチから計算される法線ベクトルを用いることにより、形状と整合した法線ベクトルを定義している。接触探索においても、Nagata パッチと材料節点の間の探索を行っている。

以上のように従来の多面体モデルと Nagata パッチモデルでは、形状だけでなく法線ベクトルの定義方法が異なっている。したがって、本来「工具モデル精度」について検討する場合は、形状精度と法線ベクトル精度のそれぞれについて評価し、個別に検討すべきであろう。しかし従来、工具モデルの作成においては上記のように離散化後の形状から二次的に法線ベクトルを生成する方法¹⁰⁾が一般的であり、法線ベクトル精度そのものに注目することは少なかったと思われる。そこで本報ではこの二つの精度をまとめて「工具モデル精度」と考えることとし、解析精度に与える影響の個別評価は別報に譲ることとする。

4. 角筒絞り成形解析

4.1 解析条件

本研究では、NUMISHEET'93¹¹⁾でベンチマークとして採用された解析モデルを用いる。その模式図を Fig.1 に示す。材料には 150mm × 150mm 板厚 0.78mm の軟鋼板を想定し、変形の対称性を考慮して 1/4 部分のみを 4 節点縮退シェル要素によりモデル化する。材料要素は各方向に 2.5mm ピッチの均等分割とし、総要素数 900 である。材料の機械的性質を Table1 に示す。材料と工具との摩擦には Coulomb 則を採用し、摩擦係数 μ は 0.14 とする。パンチストロークが 40mm に達するまで解析を行う。

4.2 工具モデル精度の評価方法

工具面上の材料流動が大きいダイを対象とし、Fig.1 中の線 A-A 上ダイ肩部のモデル精度に注目する。Nagata は既にさまざまな形状に対して同様の検討を行っているが⁵⁾、本報では実用上重要となる分割数の観点から、形状精度、法線ベクトル精度に及ぼす影響を検討する。線 A-A 上のダイ肩部の任意点における位置ベクトルを $\mathbf{x}$ 、またモデル上で定義される単位法線ベクトルを $\mathbf{V}$ とし、その点での形状誤差 δ_s 、法線ベクトル誤差 δ_n をそれぞれ次式で定義する。

$$\delta_s = (5 - \|\mathbf{x} - \mathbf{o}\|) / 5 \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$\delta_n = \text{sgn}\{\mathbf{t} \cdot (\mathbf{V} - \mathbf{n})\} \|\mathbf{V} - \mathbf{n}\| \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

ただし $\mathbf{o}$ は線 A-A 上ダイ肩部の曲率中心の位置ベクトルである。 $\mathbf{t}$ 、 $\mathbf{n}$ はそれぞれ元形状 (半径 5mm の円弧) における単位接線、法線ベクトルであり、次式を満たす。

Fig.1 Geometries of the tools employed in the simulations

Table 1 Material properties used in the simulations

E MPa	ν ratio	σ_y MPa	F value MPa	n value	ϵ_0	r value
206000	0.3	173	565	0.26	0.0071	1.77

(approximated by $\bar{\sigma} = F(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^p)^n$)

$$n = (x - o) / \|x - o\|, \quad n \times t = e_x \quad (6)$$

ただし e_x は Fig.1 に示す基底ベクトルである。 δ_s および δ_n が小さいほどモデル精度が高いことを示す。

4.3 工具モデル精度の比較

ダイ肩部の分割数を变化させたさまざまな工具モデルを作成し、ダイ肩部の工具モデル精度の比較を行う。Fig.2 にいくつかの離散化例を示す。本報で用いた工具モデルはメッシュ分割がダイ肩に沿って一様ではなく、特に R 止まり近傍で不均一である。そのためダイ肩分割数の定義は容易ではない。本報では周方向の分割線 (Fig.2 中の線 B-B) 上でのダイ肩分割数 n をパラメータとする。Fig.2 の $n=6$ を例として、ダイ肩に沿った形状誤差および法線ベクトル誤差の分布を Fig.3 および Fig.4 に示す。形状誤差の絶対値はモデルによって大きく異なり、多面体モデルでは最大で約 2% の誤差であるのに対して Nagata パッチモデルでは最大でもわずか約 0.02% であった。一方、分布の傾向は、Nagata パッチモデルの場合 Fig.3 から読みとれないものの、両モデルともにメッシュに応じた周期的な分布である。この傾向は分割数が異なる他のモデルでも確認された。

法線ベクトル誤差 (Fig.4) を見ると、Nagata パッチモデルでは形状精度同様、多面体モデルに比べてはるかに高精度な法線ベクトル分布を実現している。多面体モデルではメッシュサイズが変化する部位およびダイ肩端部近傍で大きな誤差が発生している。これはメッシュサイズの変化と R 止まり近傍の曲率変化の影響により、法線ベクトル分布が適切に再現できていないためである。またその分布の傾向は、Nagata パッチモデルでは形状誤差同様メッシュに応じた周期的な分布であったのに対して、多面体モデルでは形状との関連性は見られない。これは前述のように形状と

Fig.2 Enlarged figures of discretized die shoulders at various numbers of division n Fig.3 Shape error distributions at the die shoulder in the case of $n=6$ Fig.4 Normal vector error distributions at the die shoulder in the case of $n=6$

法線ベクトルの間に整合性がないためである。法線ベクトル誤差分布のこの傾向は、分割数が異なる他のモデルでも確認された。この結果より多面体モデルでは法線ベクトル誤差分布の制御は困難であることが示唆される。

Fig.5 Fig.6 に分割数と誤差の最大絶対値の関係を示す。ただし縦軸は対数軸である。Fig.5 における実線は、ダイ肩部を均等に n 分割した理想的な場合の、多面体モデルにおける理論的な最大形状誤差分布であり、次式で与えられる。

$$\delta_s^{ideal} = (1 - \cos(\pi/4n)) \times 100 \quad [\%] \quad (7)$$

これより、Fig.2 に示すような本報で用いた程度の不均等メッシュであれば、多面体モデルにおける最大誤差分布は理論式(7)でおおよそ近似できることが判る。したがって極端に粗密のあるモデルでなければ、多面体モデル肩部の最大形状誤差は式(7)に従えばいいことが示唆される。

Fig.5 で見られるように、分割数の増加に伴い両モデルにおける形状精度の違いは拡大する。この傾向は Nagata の示した結果⁵⁾とも一致する。一方、いずれのモデルでも $n=10$

Fig.5 Relationship between maximum shape error and number of division

Fig.6 Relationship between maximum normal vector error and number of division

を越えた辺りから精度向上の割合は小さくなる。つまり本モデルの場合、形状精度は $n=10$ 程度で収束している。また多面体モデルでの $n=10$ 程度の精度は、Nagata パッチモデルでの $n=2$ 程度の精度と同等であることが判る。法線ベクトル誤差 (Fig.6) においても、形状誤差とおおよそ同じ推移を示している。なお、以上の結果は工具モデルのどの部位においてもほぼ同様の傾向となったことを付記する。

4.4 解析結果の比較

Fig.2 に示した $n=2, 6, 10, 16$ のダイモデル (以下、ダイ 2 などと略記) を用いて、パンチ、ダイ、プランクホルダを多面体近似した場合と、これらを Nagata パッチ近似した場合で成形解析を行った。パンチには肩部を 12 分割したモデルを用いた。Fig.7 にパンチストローク 40mm における最終成形品形状を示す。材料流入量が最も大きい線 O-C に注目して、材料流入量および板厚ひずみ分布に及ぼす工具モデルの影響を検討する。参考のため NUMISHEET'93¹¹⁾ で示された実験結果もあわせて示す。

線 O-C に沿った材料流入量を Fig.8 に示す。多面体モデル、Nagata パッチモデルのいずれの解析結果においても、ダイ肩分割数によるばらつきは非常に小さく、最大で 0.2 ~ 0.3mm 程度の差である。この結果はいずれも実験のばらつきに収まる程度であり、本解析の範囲内では、材料流入量には工具モデル精度の影響は比較的小さいと言える。

一方 Fig.9 に示す線 O-C に沿った板厚ひずみ分布では、多面体モデルの場合にダイ肩分割数によって特に縦壁部でのひずみに明らかな違いが見られる。Fig.9(a) から判るように、ダイ 10, 16 による結果は実験結果と良好に一致しているのに対して、ダイ 2, 6 と分割数が少なくなるほど縦壁部の減肉が小さくなり、実験結果からずれる傾向にある。この結果の違いは、材料のダイ肩部での変形形状に起因して

Fig.7 Definition of the examined cross sections on the deformed profile at punch stroke of 40 mm

Fig.8 Amount of draw-in along line O-C

(a) Results of the polyhedral models

(b) Results of the Nagata patch models

Fig.9 Thickness strain distributions along line O-C

いる。Fig.10(a)に、多面体モデルを用いた場合の Fig.7 中の D-D 断面のダイ肩部における変形形状および理想的なダイ肩部の断面形状をあわせて示す。ここで D-D 断面を示しているのは、D-D 断面では材料とダイ肩部が広範囲に接触しているので接触の影響が明らかなためである。D-D 断面の変形形状はダイ肩分割数によって大きく異なり、分割数が少なくなるほどダイ肩での張りだし量が小さくなっている。この結果より、工具モデル精度が低くなるほど部材全体のダイ肩で受ける変形量が小さくなり、その結果線 O-C 近傍

Fig.10 Deformed profiles at the die shoulder of D-D cross section

の縦壁部においても減肉が小さくなったと考えられる。板厚ひずみ分布で見られる違いは実験のばらつきに収まる程度と見ることもできるが、工具モデルに起因する明らかな解析結果の違いは可能な限り低減させるべきである。

Nagata パッチモデルの場合 (Fig.9(b)), 分割数 n によらず 4 つの解析結果はほぼ一致し、また実験結果とも良好に一致している。Fig.10(b)に示す D-D 断面のダイ肩部における変形形状においても、分割数 n によらず断面はほぼ一致している。Fig.9 では、全ての解析結果でパンチ肩から縦壁に入る部分で実験結果とのずれが生じている。これは材料がパンチになじむ過程で摩擦条件の相違などによって生じたパンチ近傍の材料流動の違いに起因しており、本論文で対象とする工具モデルの影響ではないと考えられる。以上より、工具モデルに Nagata パッチを適用することで、多面体モデルを用いる場合に比べて工具モデルの影響を受けにくい成形解析が遂行できることが明らかとなった。

4.5 考察

Fig.9 より、多面体モデルでは工具モデル精度を向上させるにつれて板厚ひずみ分布が実験結果に近づき、 $n=10, 16$ 程度の精度でほぼ収束する結果が得られた。材料流入量ではモデルによる顕著な違いは見られなかったが、それは材料流入量の絶対値が大きいために差が明確に現れなかったためと考えられる。以上より、本報で対象とした角筒絞り成形では、多面体モデルにおけるダイ 10 以上の工具精度を有すれば工具モデルの影響を受けにくい成形解析が遂行できると考えられる。一方 Nagata パッチモデルでは、ダイ 2 でも多面体モデルのダイ 10 程度の工具モデル精度が得られ、また示した全ての解析結果は多面体モデルにおけるダイ 10, 16 の結果とほぼ一致した。この結果より、多面体モデルにおけるダイ 10 以上の精度を有すれば、解析結果に生じる違いは数値誤差程度にとどまり実用上ほとんど影響ないことが示唆される。以上より Nagata パッチモデルでは多面体モデルに比べて、解析に要する工具精度を実現するための分割数を大幅に低減できることが明らかとなった。ダイモデル全体の要素数を比較すると、多面体モデルで十分な精度と考えられるダイ 10 は 8048 要素であるのに対して、Nagata パッチモデルで十分な精度と考えられるダイ 2 は 753 要素であり、多面体モデルに比べて 10% 以下の要素数に抑えられている。角筒絞りモデルでは、曲率を有する部分がコーナ部のみに限られるため、要素数削減の対象となる部分もその近傍に限られる。しかし工具全体的に曲面を有するより一般的な工具モデルでは、工具全体的に要素数

を削減できるため、その低減効果もより顕著になると考えられる。以上より、工具要素数の低減の観点から Nagata パッチの工具モデルへの適用の有効性を示すことができた。

5. 結 言

本研究では、角筒絞り成形解析を例としてできるだけ少ない要素数で十分なモデル精度を有する工具モデルを得ることを目的に検討を行った。その結果、従来の多面体近似工具では工具肩部を 10 分割以上することにより、また Nagata の提案による補間曲面 (Nagata パッチ) を適用した工具では 2 分割以上することにより、工具モデルの影響を受けにくい解析が遂行できることを示した。また本解析モデルの場合、Nagata パッチを適用することにより工具要素数を従来の 10% 程度に抑えられることを明らかにした。

Nagata パッチモデルにより工具要素数を大幅に低減できることが明らかとなった一方で、本モデルを用いて弾性変形を考慮した連成解析を行うには、工具の変形に伴う法線ベクトルや Nagata パッチの変化の取り扱いや、弾性変形解析に及ぼすメッシュサイズの影響などを検討する必要がある。その詳細は今後の課題である。本報では成形後のスプリングバックをほとんど伴わない角筒絞り成形を対象として検討を行ったが、スプリングバックを伴う成形の場合は、変形中の応力分布へ与える影響などを別途詳細に検討する必要がある。それらの結果は別報で示すこととしたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、(独)理化学研究所 VCAD システム研究プログラムの長田隆博士には貴重な助言を賜った。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高村正人・須長秀行・牧野内昭武：理研シンポジウムものづくり情報技術統合化研究第一回，(2001)，88-95.
- 2) 高村正人・須長秀行・桑原利彦・牧野内昭武：自技会論，35-4(2004)，145-150.
- 3) 薦森秀夫・吉田総仁：塑性と加工，46-532(2005)，55-59.
- 4) 高村正人・大浦賢一・須長秀行・桑原利彦・牧野内昭武・Cristian Teodosiu：塑性と加工，47-540(2006)，64-68.
- 5) Nagata, T.: Comput. Aided Geom. D., 22(2005), 327-347.
- 6) 浜孝之・高村正人・牧野内昭武・Cristian Teodosiu・宅田裕彦：機論 A，72-714(2006)，60-67.
- 7) Banu, M., Takamura, M., Hama, T., Naidim, O., Teodosiu, C. & Makinouchi, A.: J. Mater. Process. Technol., 173-2(2006), 178-184.
- 8) Hama, T., Asakawa, M., Takamura, M., Makinouchi, A. & Teodosiu, C.: JSME Int. J. Ser. A, 48-4(2005), 329-334.
- 9) Hama, T., Asakawa, M., Takamura, M., Makinouchi, A. & Teodosiu, C.: Proc. JSME/ASME Int. Conf. Mater. Process. 2002, 2(2002), 367-372.
- 10) Keum, Y.T., Nakamachi, E., Wagoner, R.H. & Lee, J.K.: Int. J. Numer. Meth. Engng., 30(1990), 1471-1502.
- 11) Makinouchi, A., Nakamachi, E., Onate, E. & Wagoner, R.H., Proc. 2nd NUMISHEET, Isehara, (1993), 623-652.