

## ねじり加工を用いた曲面成形技術への弾塑性数値解析手法の適応可能性の検討

村川 収\*・永田正道\*<sup>2</sup>

## Study of Adaptability of the Elastic-plastic Numerical Analysis Approach to a Curved Surface Molding Technology Using a Torsion Processing

Osamu Murakawa and Masamichi Nagata

本研究では塑性加工のひとつであるねじり加工に着目し、CAE ソフトウェアを用いた弾塑性数値解析と試作機を用いた実験とを比較し、加工後の形状推定手法について検討を行った。その結果、加工に要するトルク及び加工後の形状について、実験と解析で比較的良好に一致した結果が得られることを確認した。

## 1. 緒言

塑性加工は材料に降伏応力以上の力を加え変形させて製品を作る手法で、鉄鋼産業や自動車産業などの発展とともに急速に技術開発が進んでおり、金属製品の加工方法として占める割合はきわめて高い<sup>1, 2)</sup>。自由曲面を含む複雑形状の加工が可能で、加工速度も非常に速く材料の歩留まりも良いことから生産性に優れ、製品コストを安く抑えられる。このような塑性加工法のひとつとして、材料の両端をそれぞれ逆方向に回転させて成形するねじり加工がある。曲面成形が容易に行えるため、平板にねじり加工を施した部材は、化学薬品の混合、攪拌、分散や熱交換プロセスなど、様々な分野で使用されている。これらの製品は更なる小型化が求められており、医療分野といった新たな分野への利用拡大も見込まれている。

大きな変形を伴う塑性加工では成形後の形状予測が難しく、要求される精度を得るため、試行錯誤により多大なコストと時間を費やさなければならない。このことから近年では、プレス成形や絞り加工といった塑性加工法に、CAE 解析を適用した形状予測技術に関する研究が自動車業界を中心として盛んに行われている<sup>3, 4)</sup>。しかし、それらの多くは前述したプレスや絞りといった加工法が対象とされており、ねじり加工を対象としたCAE解析の事例は見受けられない。そこで、化学薬品製造プロセスでの利用を想定し、耐食性を有するSUS304を対象として、試作機を用いたねじり加工実験とCAE解析の結果を比較することで、加工条件の設定及び加工後の形状推定へのCAE解析手法の適応の可能性について、検討をすることを本研究の目的とする。

## 2. 実験及び解析方法

## 2・1 ねじり加工実験

## 2・1・1 実験装置及び実験条件

板幅 3mm, 長さ 8.5mm, 板厚 0.3mm の SUS304 製平板の一端を非回転の治具に固定し、他端をサーボモーター(三菱電機(株)製 HC-KFS 43(B))に接続された回転可能な治具に取り付けて 180° のねじり加工を行った。治具間距離は板幅の 1.5 倍(4.5mm)とした。加工に要するトルクは非接触回転

\* 企業支援部設計制御グループ

\* 2 企業支援部加工技術グループ

式トルク変換器(ユニパルス(株)製 UTM-0.3Nm(R))を用いて測定した。ねじり速度は 8rpm とした。ひずみ速度依存性に関する実験については 0.08, 0.8, 8, 80, 800rpm と変えて実験を行った。

## 2・1・2 形状評価方法

形状評価は「試験片長さの減少率」、「試験片幅に対するねじり加工後の直径の減少率」、「ねじり角度 180° からのスプリングバック角度」に着目して評価を行った。減少率は、加工前後の長さの変化の割合と、加工前の板幅に対する直径の割合を算出した。また、スプリングバック角度は、加工後の掴み面のなす角度  $\theta$  をねじり角度(180°)で除したものとした(図 1 参照)。ねじり加工前の試験片形状の幅及び長さはノギス((株)ミツトヨ製 DEGIMATIC CD20)を用いて測定した。ねじり加工後の試験片形状は X 線 CT 装置((株)島津製作所製 inspeXio SMX225CT)を用いて測定した<sup>5, 6)</sup>。

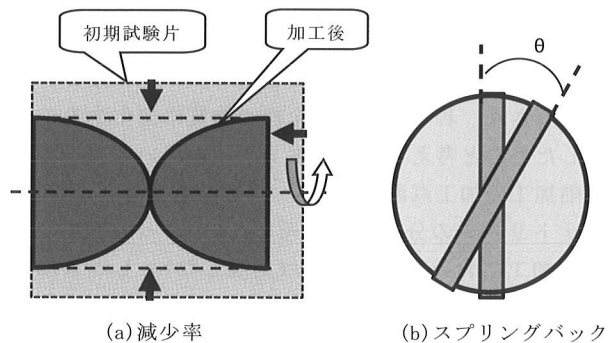


図 1 形状評価項目

## 2・2 弾塑性数値解析

## 2・2・1 材料モデル及び要素タイプ

非線形構造解析ソフトウェア LS-DYNA((米)Livermore Software Technology Corporation 製)を使用し、弾塑性数値解析を行った。材料モデルは、任意の応力ひずみ曲線から多直線近似により塑性領域を定義する多直線近似弾塑性モデルを使用した。入力する応力ひずみ曲線は、万能試験機((株)島津製作所製 UH-1000kNI)を用いて、4号試験片で引張試験を行い得られたものを使用した。解析に使用した材料の物性値を表 1 に示す。

解析モデルのサイズは実験で用いた試験片から治具掴み

表1 材料物性値

密度 [kg/mm <sup>3</sup> ]	8.0 × 10 <sup>-6</sup>
ヤング率 [MPa]	197000
ポアソン比	0.3
降伏応力 (耐力) [MPa]	204

部を除いた 3.0 × 4.5 × 0.3mm (幅 × 長さ × 厚さ) とした。要素タイプは四角形一次シェル要素を使用し、要素サイズは幅方向を 32 分割、長さ方向を 50 分割とした。

2.2.2 境界条件

境界条件を図2に示す。左端は完全拘束とし、右端はモーメントを伝達するため各節点を剛体拘束とした。ねじる際に軸がずれるのを抑制するため、右端中央の節点から X 軸方向に沿った 2 つの節点について、Y, Z 並進及び Y, Z 回転を拘束した。また、解析結果としてモデルが 180° ねじられた形状が得られるような X 軸回りのモーメントを右端中央の節点に定義した。

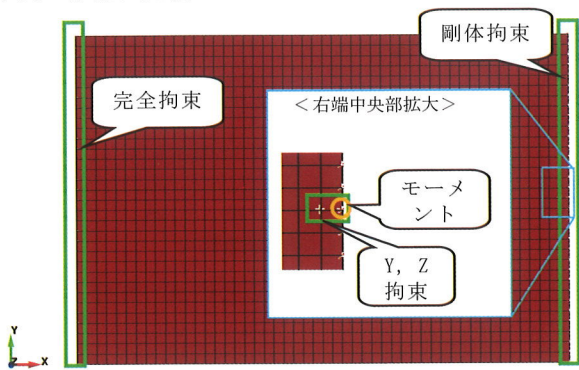


図2 解析モデル及び境界条件

3. 実験・数値解析結果及び考察

3.1 実験結果

3.1.1 ひずみ速度依存性

ねじり速度に対する最大トルクの測定結果を図3に示す。ねじり速度の増加に対してトルクは増加傾向にあるが、その程度は小さい。ひずみ速度の影響がある場合、速度の増加に伴い変形抵抗が増加し<sup>7-9)</sup>、加工に要するトルクは大きくなるが、本実験条件ではひずみ速度依存性がほとんど見られなかった。

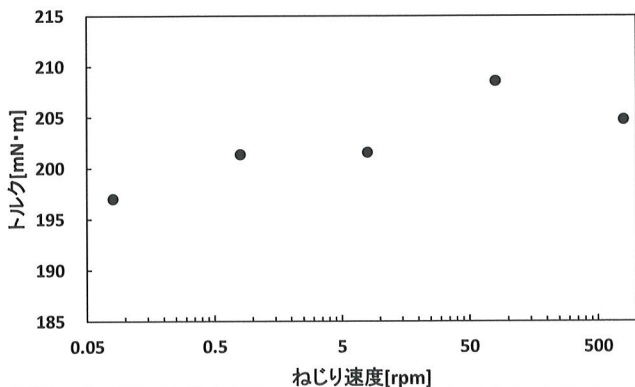
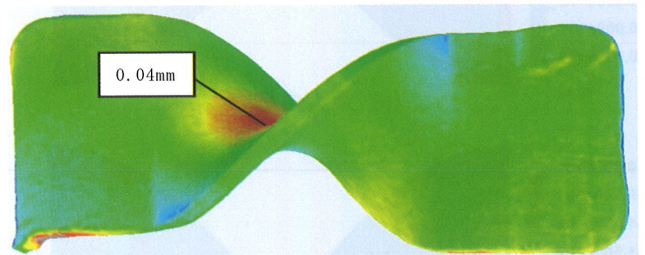


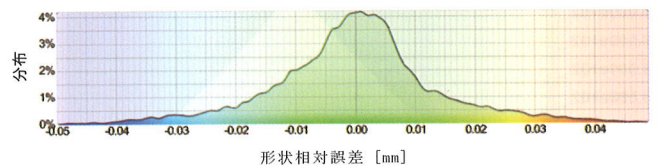
図3 ねじり速度に対する最大トルク

3.1.2 ねじり加工後の形状の再現性

ねじり加工後の形状の再現性を確認するため、加工後の試験片 5 つのうち 1 つを基準とし、他の 4 つの試験片と形状全体の差異を比較した。その結果を図4に示す。形状相対誤差は概ね ±0.02mm 以下で、最も誤差が大きい箇所でも 0.04mm であり、再現性は高いと考えられる。



(a) 各部での形状誤差



(b) 分布割合

図4 加工の繰り返し精度

3.2 解析結果

図5に 180° ねじり加工状態での応力分布を示す。図より幅方向の両端が引張、中央が圧縮の応力を受けていることがわかる。このことから、長さの減少は中央部の圧縮による縮みに起因することがわかった。また引張試験の結果から引張強さを真応力に換算した値はおよそ 1000MPa であったのに対して、破断の基準となるミーゼス応力がそれを下回っている (端部近傍は特異点として評価対象から除く) ことから、破断なく加工が行えると考えられる。

3.3 実験結果と解析結果の比較

3.3.1 加工トルク

図6に実験におけるねじり加工時のトルクを示す。ねじり角度に対するトルクは、実験と解析でよく一致していた。また、図中のねじり角度 10° 前後で示す変曲点は、解析結果における同角度において、塑性ひずみが増大していることから降伏点と考えられる。この変曲点についても、わずかに差はあるものの実験と解析で同様の傾向が確認できた。

ねじり加工終盤 (100° 以降) の差は、境界条件の違いが要因のひとつとして考えられる。解析では掴み部は完全に固定され、軸のずれ等に起因する軸方向への縮みに対する抵抗がなくねじられるのに対し、実験では掴み部は摩擦で固定されており、軸のずれ等によって抵抗が増加したことにより、必要となるトルクの上昇につながったのではないかと推察される。

3.3.2 加工後の形状比較

表2に実験及び解析での加工後の形状における各項目の結果を示す。試験片幅に対する直径の減少率は解析と実験で非常によく一致しているのがわかる。差異が大きかった

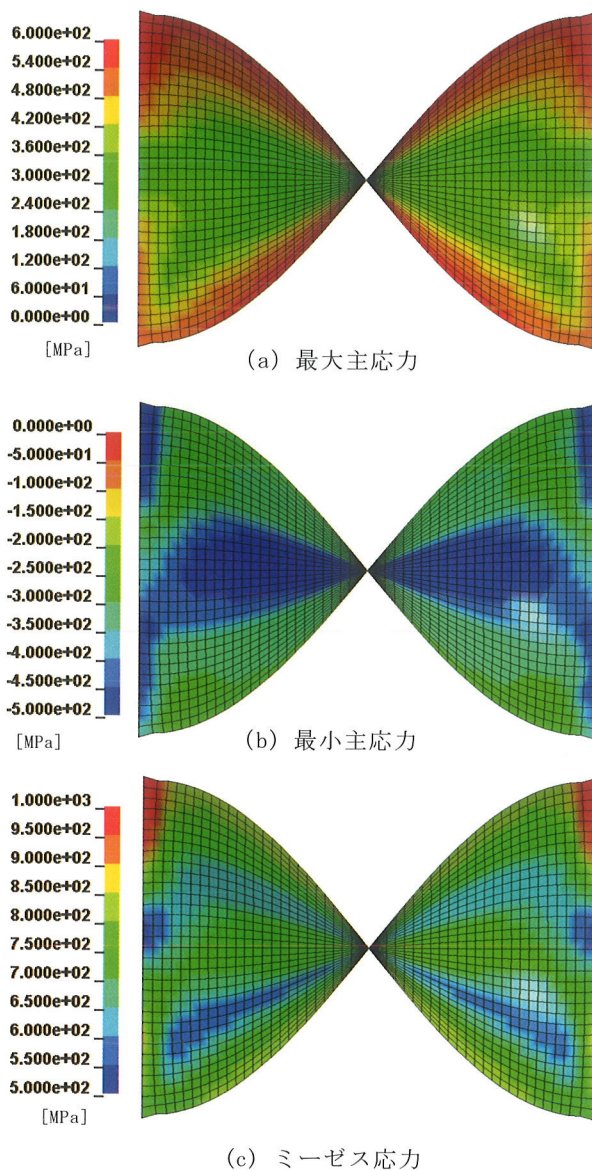


図5 ねじり時の応力分布

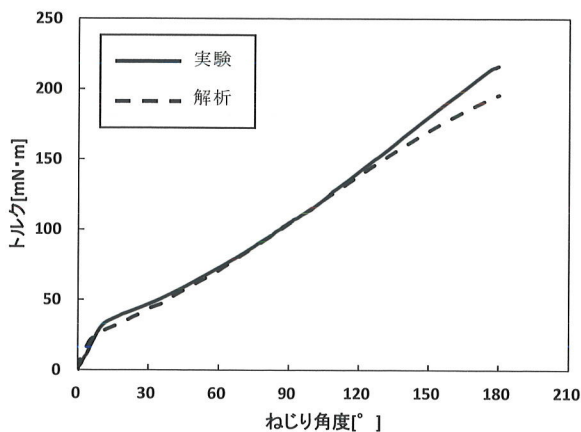


図6 ねじり角度とトルクの関係

表2 加工後の形状比較

測定項目	実験	解析
試験片長さの減少率[%]	7.5	10.8
試験片幅に対する直径の減少率[%]	3.8	3.7
スプリングバック角度[%]	3.2	1.2

試験片長さの減少率と、スプリングバック角度について、差異の生じた要因の検討を行った。

まず、解析で入力する物性値の影響に着目し、検証のための解析を行った。SUS304のように明確な降伏点をもたない材料は、耐力を規定された残留ひずみから読み取る必要があり誤差を含みやすい。それに伴い塑性領域の応力ひずみ線図も誤差を含んだ入力データとなる。そこで、塑性領域の接線の傾きが評価項目に与える影響を確認するため、2直線等方硬化則で塑性域を定義する材料モデルを使用して解析を行った。結果を図7に示す。

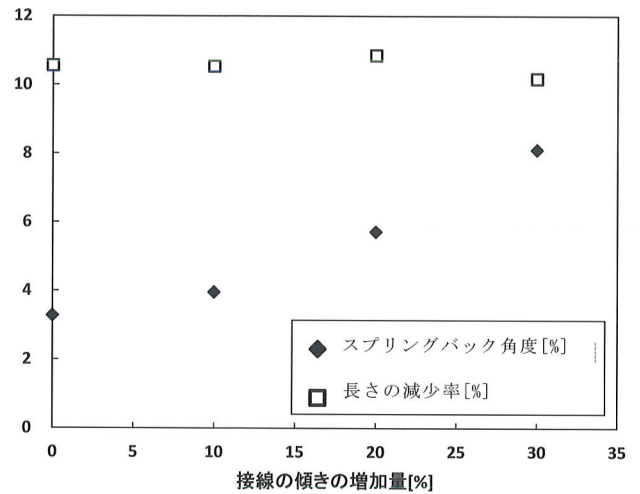


図7 解析で入力する物性値の影響

前述の引張試験の結果から得られた耐力及び接線の傾きを基準(0%)とした。誤差として接線の傾きを10, 20, 30%と増加させた場合に、評価項目に与える影響について確認を行った。塑性領域の接線の傾きが増加するのに伴い、スプリングバック角度が増加した。このことから、スプリングバック角度の誤差の要因については、解析で入力する材料の物性値によるものが大きいと考える。試験片長さの減少率については変化がなかったことから、他の要因が寄与していると推察される。

次に形状測定で生じる誤差について検討を行った。加工実験で用いたものと同一サイズの試験片の長さをビデオプローブ式三次元測定機((米)OGP社製 Smart Scope ZIP300)で測定し、X線CT装置及びノギスで測定した結果と比較した。ビデオプローブ式三次元測定機による測定結果を基準とすると、ノギスは+0.04mm、X線CT装置は-0.06mmで、ノギスとX線CT装置では計0.1mmの差異があった。この差異は減少率に換算すると2%程度の差異にあたり、解析と差異が生じた要因のひとつと考えられる。

#### 4. 結 言

サイズ3.0×8.5×0.3mm(幅×長さ×厚み)のSUS304製平板のねじり加工について、解析による実現象の推定を目的として、実験と解析による結果の比較検討を行った。ねじり加工に要するトルクについては、実験と解析でよく一致しており、解析を用いて加工時のトルクの推定が可能となっ

た。

加工後の形状は、比較的良好一致したが、実験値に比べ解析値の方が、スプリングバック角度は小さく、試験片長さの減少率は大きい結果であった。なお X 線 CT 装置及び CAE 解析にはそれぞれ固有の誤差要因があるため、要求精度によって、前者についてはより精度の高い測定装置の利用、後者については材料の物性値モデルや境界条件の詳細な検討が必要となることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 大塚久哲：基礎弾・塑性力学，共立出版(1985)。
- 2) 葉山益次郎：塑性学と塑性加工，オーム社(1982)。
- 3) 岡田達夫，上森武，吉田総仁：弾塑性 FEM による板材成形時のスプリングバック解析，弓削商船高等専門学校紀要，**20**，pp. 221-224(1998)。
- 4) 新谷隆二，高野昌宏：塑性加工における形状予測技術の研究，石川県工業試験場研究報告，**58**，pp. 5-10，(2008)。
- 5) 大竹豊，鈴木宏正：産業用 X 線 CT スキャナによる高精度 3 次元形状抽出，平成 24 年度理研シンポジウム“計測から始まるエンジニアリングシステム”講演会資料，(2012)。
- 6) 山本紘司，水野和康，島津達哉，児玉英也：X 線 CT を用いた測定寸法の精度評価，あいち産業科学技術総合センター研究報告，pp. 22-25(2014)。
- 7) 土田紀之：TRIP 鋼の高速変形挙動の解明と加工誘起変態の温度・ひずみ速度依存性，大学研究助成技術研究報告，pp. 87-93(2009)。
- 8) 朴鐘皓，神田光晴，土田紀之，友田陽：オーステナイト系ステンレス鋼における変形応力のひずみ速度依存性に及ぼす窒素添加の影響，日本金属学会誌，**69**(10)，pp. 867-873(2005)。
- 9) 富長学，豊岡了，門野博史：低ひずみ速度域における SUS304 ステンレス鋼の特異な変形挙動の全視野観察，日本金属学会誌，**71**(8)，pp. 620-628(2007)。