

ローラーを用いた鋼板の塑性加工による曲面成形技術に関する研究

永田正道*

A Study on the Curved Surface Molding Technology by the Plasticity Processing of the Steel Sheet Using the Roller Masamichi Nagata

本研究ではステンレス鋼板のローラーを用いたR形状の曲げ加工について、ローラーサイズの違いやスプリングバック量等を考慮した加工条件の推定方法の検討を行った。加工実験による成形形状の測定結果やCAEによる解析結果から、一般的な曲げ加工のスプリングバック量に関する“弾塑性材”及び“加工硬化材”の理論式の組み合わせで、その推定が行える可能性があることを確認した。

1. 緒言

飲料水の缶、圧力容器やダクト、鉄道車輛や自動車のボディなどの曲面を有する金属加工品の多くは、塑性加工を用いて、曲面成形が行われている^{1),2)}。曲面成形では、所望の曲面を得るために加工面の曲率を制御することが重要となるが、加工後に発生するスプリングバックの影響によって安定した曲面の成形を行うことが困難となる²⁾。

塑性加工におけるスプリングバック推定に関する研究は、アルミ、ステンレスなど種々の材料で行われているが、加工力、材質、板厚などの条件が相互に作用するため、それらの影響を総合的に考慮した加工技術は未だ確立されていない³⁾⁻⁵⁾。

そこで本研究では、県内での生産量が多く、加工品を手掛ける中小企業も多いステンレスの薄板（板厚3mm以下）を対象として、塑性加工の中でも比較的単純なローラーを用いたR形状の曲げ加工（以下、R曲げ加工）について、曲面成形技術の確立を目指し研究を行った。本報告では加工実験の結果やCAEによるシミュレーション結果から、ローラーサイズの違いやスプリングバック量等を考慮して確立した加工条件の推定方法について報告する。

2. R曲げ加工の加工実験

ローラーを用いたR曲げ加工の加工現象を確認するため実験装置を試作、加工実験を行い、R形状成形に要するトルクと曲げ角度の関係や、加工後の試料形状を評価した。

2・1 実験装置

R曲げ加工の実験装置（以下、実験装置）として、図1に示す県内企業で行われている手動でのR曲げ加工法を参考にして、設計及び試作を行った。図1に示すように、実験装置は大小2種類のローラーで構成されており、ハンドルを介してローラー大の中心基準でローラー小を回転させることで、ステンレス鋼板をローラー大の曲率に沿うように2つのローラー間に挟み込み、R曲げ加工が行える仕組みとなっている。

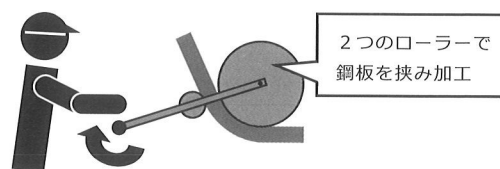


図1 手動によるR曲げ加工

図2に設計した実験装置の3次元CADモデルを、図3に試作した実験装置の外観を示す。図2に示すように、曲げ半径サイズの基準となるローラー大の直径はφ100mm(曲げ半径50mm)とし、その表面には、加工時の試料との摩擦を低減するため、無電解ニッケルめっきを施した。ローラー大の中心軸と同軸上にトルク計及びロータリーエンコーダーを配置し、加工時のトルク量とハンドルの回転角度の計測が行える構造とした。また、加工時に同程度の曲げ角度を再現するため、ローラー小の回転量を一定とするストップ金具を設置した。（図3参照）

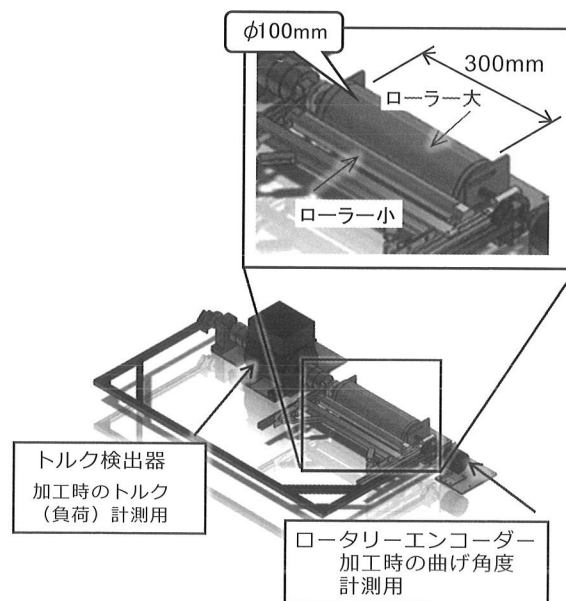


図2 実験装置の3次元モデル

* 企業支援部加工技術グループ

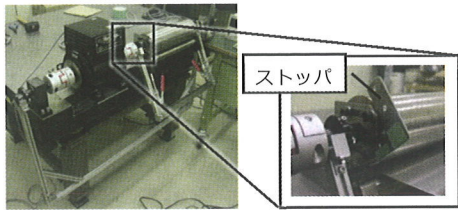
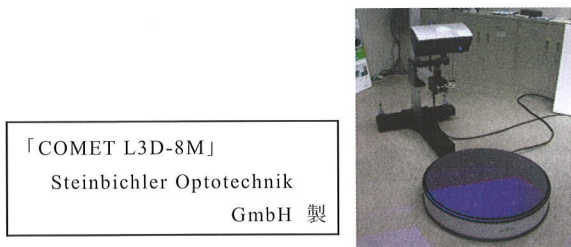


図3 実験装置の外観

2・2 実験方法

実験用の試料には 300×300mm の 2B 仕上げ SUS304 平板 (t0.5mm, t1.0mm) を使用した。各板厚について、曲げ角度 30°, 60°, 90° の条件で R 曲げ加工を行い、加工時のトルク及び曲げ角度の変化をトルク検出器及びロータリーエンコーダーで計測した。各センサからアナログ出力した電圧信号を A/D 変換機能の有するアンプを介して増幅・変換し、デジタルデータとしてノート PC に記録した。

また、加工後の R サイズやスプリングバック量を確認するため、実験後の試料形状の測定を行った。形状測定には三次元デジタイザー「COMET L3D-8M」(Steinbichler Optotechnik GmbH 製) を使用した。図 4 に三次元デジタイザーの概要を示す。測定した試料形状の大量点群データから、R 部の最小二乗円筒面と、平坦部の最小二乗平面を抽出し、円筒半径を“加工後の R 寸法”，平面間の角度を“除荷後 (スプリングバック後) の角度”として、それぞれ算出を行った。(図 5 参照)



項目	仕様
光源	青色 LED
解像度	800 万画素
使用レンズ	測定範囲: 565×425×350mm 測定精度: 0.040mm
回転テーブル	サイズ: φ800mm, 耐荷重: 150kgf

図4 三次元デジタイザーの概要

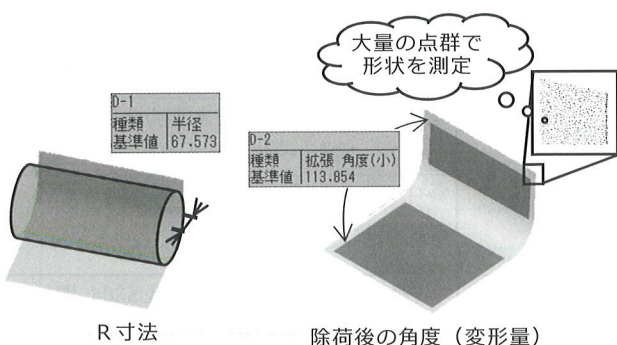


図5 三次元デジタイザーによる測定例

図 6 に、曲げ角度とスプリングバック量の関係を示す。図 6 より曲げ角度 θ から、スプリングバック量 $\Delta\theta$ を除いたものを、除荷後の角度 (変形量) θ^* と表記する。以降、各角度を図 6 の表記で示すこととする。

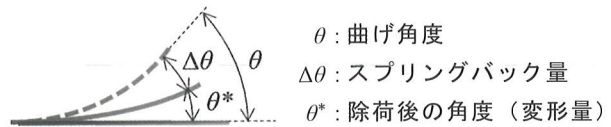


図6 曲げ角度とスプリングバック量の結果

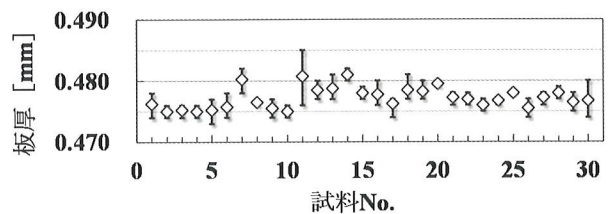
2・3 実験結果

2・3・1 試料の板厚測定

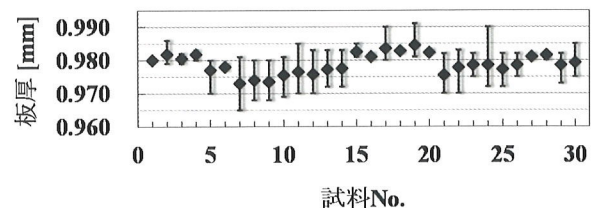
実験に先立ち、マイクロメーターを用いて各試料の板厚のばらつきを計測した。板の端部から 20mm 程度の付近を 4 か所測定し、平均と板厚差 (最大, 最小) を確認した。図 7 にその測定結果を示す。図 7 より、t0.5mm, t1.0mm と平均板厚は規格値よりもやや薄く、標準偏差は μm オーダーであった。また、個々の試料で 4 か所の板厚差が最も大きいものは、t1.0mm で 0.018mm, t0.5mm で 0.009mm 程度であり、JIS G4305 に規定される公差内に収まっていた。

2・3・2 R 曲げ加工の曲げ角度およびトルク測定

図 8 に実験での θ とトルクの関係を示す。実験を複数回繰り返し、 θ に対するトルク変化に大きな違いがなかったため、代表的な線図を示している。図 8 より、どちらの板厚でも θ -トルクの関係に、 θ の違いによる大きな差異はなく、ほぼ同様な傾向を示した。それぞれ、最大トルクは t0.5mm で約 10N・m, t1.0mm で約 30N・m であった。これより、板厚計測で確認した程度のばらつきであれば、 θ に依らずほぼ一定のトルク量で加工が行われると考えることができる。



(a) t0.5mm (平均: 0.477mm, 標準偏差: 0.002mm)



(b) t1.0mm (平均: 0.979mm, 標準偏差: 0.005mm)

図7 試料の板厚測定結果

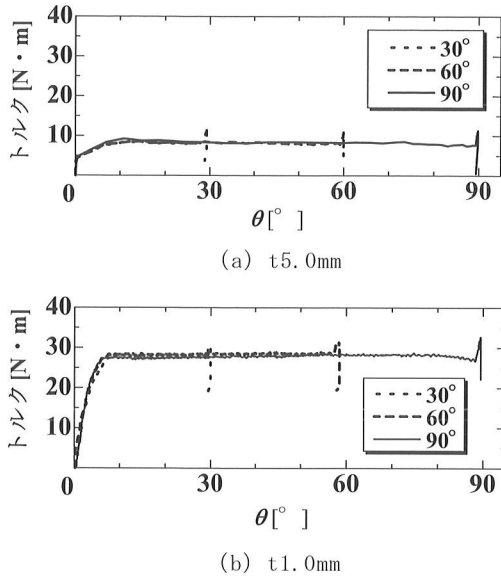


図8 θ とトルクの関係 (曲げRサイズ 50mm)

2・3・3 R曲げ加工後の試料形状の測定

図9及び図10に、試料形状計測の結果得られた、 θ に対するR寸法及び変形量 (θ^*) の関係を示す。

図9より、どちらの板厚でも θ が 60° 以上でR寸法は、ほぼ一定の値を示していることが分かる。また、図10より、 $t1.0\text{mm}$ で多少のばらつきはあるものの、 θ に対する θ^* の変化は概ね直線的な関係にあることが分かる。

以上のことから、ステンレス薄板のR曲げ加工に関するスプリングバック量や仕上がりR寸法は、板厚及び曲げRサイズの条件で決まってくるものと推察される。

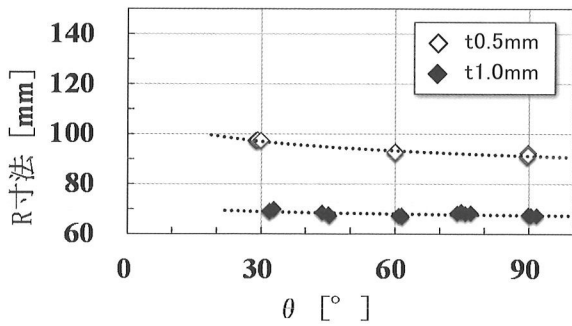


図9 θ とR寸法の関係 (曲げRサイズ 50mm)

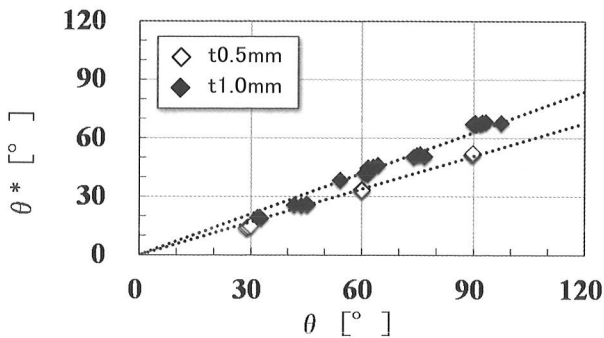


図10 θ と θ^* の関係 (曲げRサイズ 50mm)

3. CAEによる加工現象の解析

実験装置によるR曲げ加工の加工現象について、より詳細な分析を行うため、CAEを用いた有限要素法による数値シミュレーションを実施した。

3・1 解析条件

図11に解析モデルのイメージを示す。解析モデルは、ローラー軸方向には均一の変形状態になると仮定し、要素タイプとして2次元要素(4節点の平面ひずみ要素)を使用した。解析上、実験装置での加工現象を再現するため、2つのローラー間に配置されたステンレス平板に対して、ローラー小をローラー大の中心基準で 90° 回転させた後、元の位置に戻す状態の弾塑性解析を行った。

表1にその解析条件を示す。解析には汎用非線形有限要素解析ソフト「MSC.Marc」(MSC社製)を使用した。自ローラーの軸方向に沿って均一な変形状態になると仮定し、2次元の平面要素で解析モデルを構築した。ステンレス平板の材料特性として材料非線形性を考慮すると共に、ステンレス平板についてローラーや実験装置のテーブル間との摩擦を考慮した接触条件を設定した。また、R曲げによるステンレス平板の大きな変形状態に対応するため、大変形理論を考慮した解析とした。

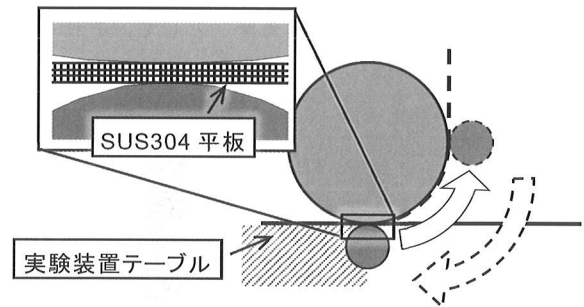


図11 解析モデル

表1 解析条件

項目	内容	
ソフトウェア	MSC.Marc Mentat2003 MSC.Marc 2003	
材料特性	弾性特性	ヤング率: 194700[MPa] ポアソン比: 0.3
	塑性特性	定義式: $\sigma = 1258.79\epsilon^{0.516}$
要素タイプ	変形体: 4節点 平面ひずみ要素	
境界条件	試料の突き当て部分で水平方向変位拘束 ローラー小はローラー大の中心基準で回転	
接触条件	各ローラー及びテーブル-試料間で定義 摩擦係数: ・対ローラー...0.001 (無電解ニッケルめっき-SUS304 間) ・対テーブル...0.2(鋼-SUS304 間)	
その他	大変形を考慮	

3・2 解析結果

図 12 に実験及び解析で得られた θ とトルクの関係 ($t=1.0\text{mm}$, $\theta = 90^\circ$) を比較したものを示す。図 12 より、実験と解析結果は概ね一致する傾向を示しており、解析が実験での加工現象を良く再現できていると考えられる。この結果を踏まえて、 θ に対する R 寸法及び θ^* の変化について、実験と解析結果の比較を行った。図 13 及び図 14 にそれらの結果を示す。図 13 及び 14 より、R 寸法及び θ^* ともに、実験結果と良く一致した傾向を示していることから、ステンレス薄板の R 曲げ加工に関しては、シミュレーションによって加工後の形状を推定可能であると考えられることができる。

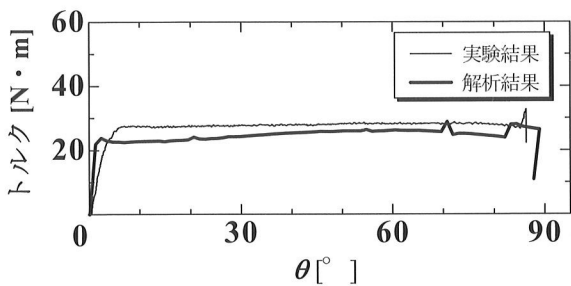


図 12 θ とトルクの関係 ($t=1.0\text{mm}$, $\theta = 90^\circ$)

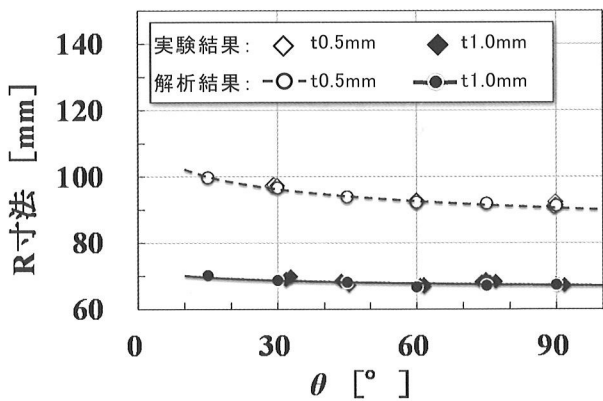


図 13 実験結果と解析結果の比較 (θ - R 寸法関係)

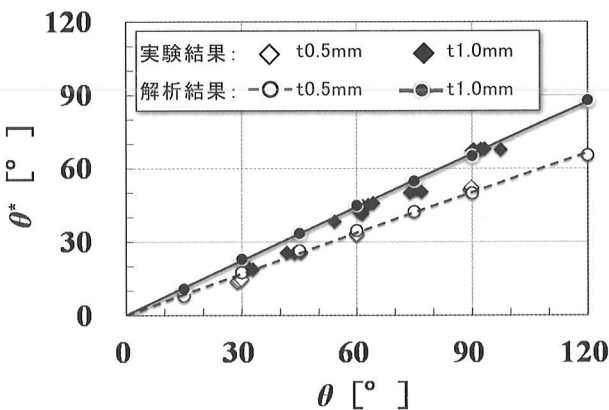


図 14 実験結果と解析結果の比較 (θ - θ^* 関係)

4. R 曲げ加工条件の推定

CAE によるシミュレーションを用いることで、ステンレス薄板の R 曲げ加工の結果を推定可能であることは確認できた。この結果を踏まえて、より簡易に加工条件の推定を行う方法として、スプリングバック量の理論式の活用について検討を行った。

4・1 スプリングバック量の理論式

塑性力学で板曲げのスプリングバック量を推定するための理論式として、代表的な以下の 2 式がある¹⁾⁻³⁾。

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = 3 \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{Y R}{E t} \right)^2 \right\} \frac{Y R}{E t} \dots \dots \dots (1)$$

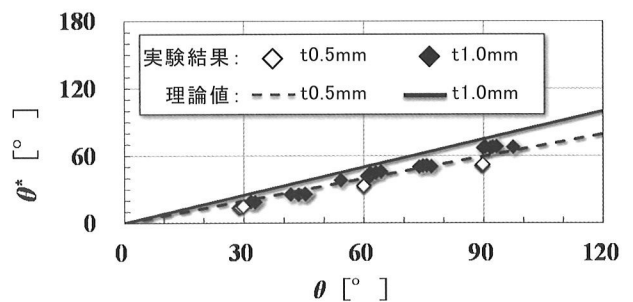
$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{3}{(n+2)E} \left(\frac{2R}{t} \right)^{1-n} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{1-n} \dots \dots \dots (2)$$

- $\Delta\theta$: スプリングバック量
- θ : 曲げ角度
- R : 曲げ半径
- t : 板厚
- Y : 降伏応力
- E : ヤング率
- F : 塑性係数
- n : 加工硬化指数

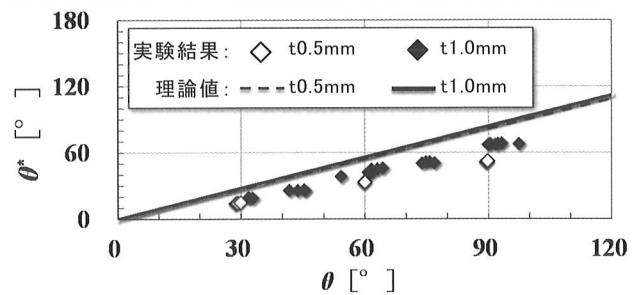
式(1)は板厚 5mm を超える厚板鋼板などで用いられる弾塑性材の材料モデルを元に導出された理論式で、式(2)は焼きなまされた金属などで用いられる n 乗硬化則に基づく加工硬化材の材料モデル $\sigma = F\varepsilon^n$ を元に導出された理論式である。

4・2 実験結果と理論値の比較

理論式と加工実験の結果を比較するため、式(1)及び(2)の理論値から算出した θ^* と、実験後の試料形状から計測した θ^* の比較を行った。図 15 にその結果を示す。



(a) 弾塑性材



(b) 加工硬化材

図 15 実験結果と理論値の比較 (θ - θ^* 関係)

図 15 より, どちらの理論値も実験結果に比べて θ^* が大きい, すなわち, スプリングバック量が過少評価となっていることから, これら単一の理論式では, ステンレス薄板の R 曲げ加工に関するスプリングバック量の推定が困難であると考えられる.

どちら理論式もスプリングバック量が過少評価であったことから, これら 2 つの理論値の和を算出した θ^* について, 再度, 実験結果の θ^* との比較を行った. その結果を図 16 に示す. 図 16 より, 2 つの理論値の和を取ることによって, 実験結果と良く一致した傾向となることが分かる.

以上のことから, “弾塑性材” 及び “加工硬化材” に関するスプリングバック量の理論式の和により, ステンレス薄板の R 曲げ加工におけるスプリングバック量の推定が行えるものと考えられる.

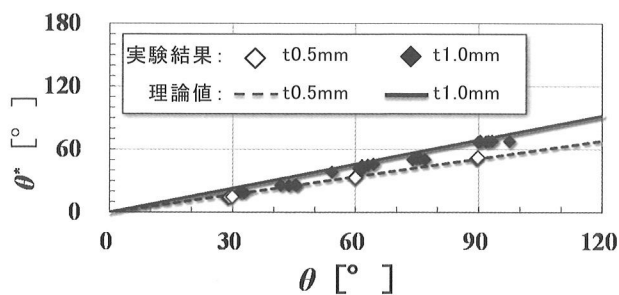


図 16 実験結果と理論値 [弾塑性材 + 加工硬化材] の比較 ($\theta - \theta^*$ 関係)

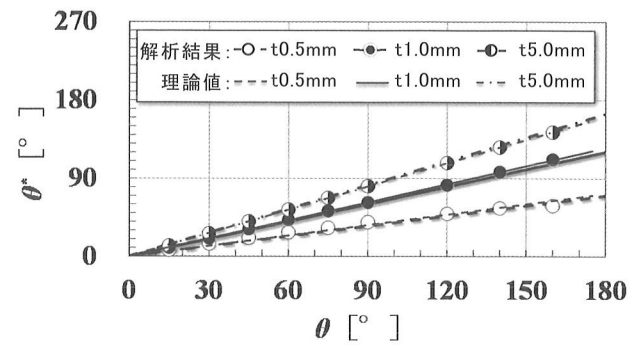
4・3 任意サイズでのスプリングバック量の推定

実験を行った曲げ R サイズ 50mm や試料の板厚 (t0.5mm 及び 1.0mm) 以外の条件でも, 考案したスプリングバック量の推定方法が適用可能か確認するため, 実験結果と良好な対応関係にあった CAE によるシミュレーションを用いて検証を行った. 図 17 に曲げ R サイズ及び板厚の違いによる $\theta - \theta^*$ の関係を示す. 図 17 より, 解析結果と理論値は良く一致していることが分かる. このことから, ステンレス薄板の R 曲げ加工に対して考案手法を用いることにより, 比較的簡便にスプリングバック量を予め推定できる可能性があると考えられる.

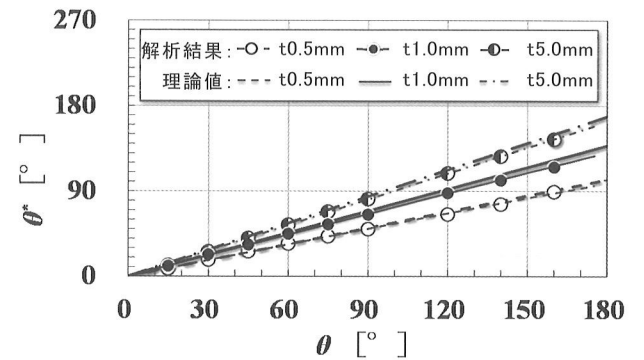
5. 結 言

本研究では, ステンレス鋼板のローラーを用いた R 曲げ加工に関して加工実験や CAE によるシミュレーションを行い, ローラーサイズの違いやスプリングバック量等を考慮した加工条件の推定方法の検討を行った. 得られた知見を以下に示す.

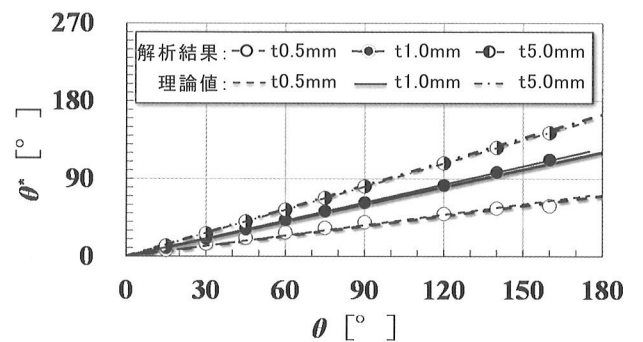
- 1) 実験結果と CAE の解析結果が良く一致したことから, シミュレーションで, R 曲げ加工後の形状を推定可能なことを確認した.
- 2) ステンレス薄板のスプリングバック量については, 板曲げに関するスプリングバック量の 2 つの理論式 (“弾塑性材” 及び “加工硬化材”) の和で, 推定が行えることを確認した.



(a) 曲げ R サイズ 37.5mm



(b) 曲げ R サイズ 50mm



(c) 曲げ R サイズ 75mm

図 17 解析結果と理論値の比較 (曲げ R サイズ及び板厚の違いによる $\theta - \theta^*$ 関係)

参考文献

- 1) (社) 日本塑性加工学会: 例題で学ぶはじめての塑性力学, 森北出版, p. 1-85 (2009).
- 2) 長田修次, 柳本潤: 基礎からわかる塑性加工 (改訂版), コロナ社, p. 3-13, p. 17-23, p. 72-88 (2013).
- 3) 吉田総仁: 弾塑性力学の基礎, 共立出版, p. 111-135 (1997).
- 4) 早川邦夫, 澤野賢太郎, 今井保介, 久保田義弘, 難波保夫, 中村保: ステンレス鋼板におけるヤング率の塑性ひずみ依存性の異方性がスプリングバック解析精度に与える影響, 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌) 52 (610), p. 53-58 (2011).
- 5) 内海能亜, 吉田昌史, 坂木修次: アルミ合金押出型材の曲げ加工に関する研究—均等曲げによるスプリングバックについて—, 埼玉大学紀要 教育学部 60 (1), p. 119-124 (2011).