

# 高張力鋼板の曲げにおけるスプリングバックに及ぼす引張力の影響

中 哲夫\*・村上 英正\*・橋本 友彰\*\*

## Effect of Stretching Force for Spring Back of High Strength Steel Sheets under Bending

Tetsuo Naka\*, Hidemasa Murakami\*, Tomoaki Hashimoto\*\*

### Abstract

In recent year the improvement of fuel efficiency by reducing automobile body weight are strongly required in the automotive industry. To satisfy these demands, high strength steel sheets are increasingly being used for automobile structure. In the present work, spring back of high strength steel sheets under bending were investigated performing three points bending and three points stretch bending experiments with various punch-radii and two types die span on four types of high strength steel sheets (590-1180MPa). From the experiment, it was found that spring back decreased by increase of the stretch force and decreasing by the punch-radius and increasing die span. To predict spring back on bending point, adopted simple dynamic model. The predicted spring back was in good agreement with the corresponding experimental result.

**Key word:** stretching bending, high strength steel sheets, spring back

### 1. 緒 言

自動車業界では、二酸化炭素の排出削減をはじめとする世界規模の環境保全運動を背景に、自動車の燃費改善を目的とした車体の軽量が進められている。その反面自動車の衝突安全基準は厳格化する傾向にある。車体の軽量化と衝突安全性向上という反する要求性能を満足させるため高張力鋼板（以下ハイテンと記す）を用いた高強度化が急速に進んでいる。そのため、車体重量比で60%を超えるハイテン採用率の自動車も市場に多く出ている<sup>[1]-[2]</sup>。

しかし、ハイテンは軟鋼材に比べ、破断限界が低いことにより割れの発生や、材料の強度が上がるため残留応力が大きくなり成形後の弾性回復による形状・寸法不良が発生しやすくなる。その代表例としてスプリングバックが挙げられる<sup>[3]</sup>。

曲げ加工におけるスプリングバックを軽減させる方法には①曲げ時に引張力を付加する方法、②曲げ後に引張力を加える方法、③曲げ時に圧縮力を付加

する方法、④曲げ後に圧縮力を加える方法などがある<sup>[4]</sup>。このため、ハイテンの成形シミュレーション精度を高めるためには種々の実験を行い、ハイテンの弾塑性挙動を調査することが必要になる。

そこで本研究では、引張強さ590, 780, 980及び1180MPa級のハイテンを用いて、上記①の曲げ時に引張力を付加する引張曲げ成形性に着目した。そして、引張曲げのスプリングバック低減効果を調査するために以下の3種類の曲げ試験を行った。①試験片をダイスの上に置きパンチを押し込む三点自由曲げ（以下自由曲げと記す）。②試験片をダイスとブラックホルダでクリアランスを与えて挟み、引張力を付与しない曲げ（以下単純曲げと記す）。③単純曲げ時に一樣な引張力を加える引張曲げ。これらの曲げ加工、パンチ先端半径 $R_p$ 及びダイス間の距離（以下スパンと記す）がスプリングバック量に与える影響を調査した。そして、これらの実験結果を基に単純な力学モデルを用いてスプリングバック量を解析的に求め、実験値と比較検討を行った。

\*商船学科

\*\*専攻科海上輸送システム工学専攻

## 2. 材料及び実験方法

### 2.1 材料

ハイテンは、一般に熱延鋼板で引張強さ 370MPa 以上、冷延鋼板では 340MPa 以上とされ、熱延鋼板では最高 780MPa、冷延鋼板では 1470MPa 程度のもので製造されている。ハイテンは①固溶体強化、②析出強化、③細粒化強化、④変態組織強化と呼ばれる強化機構を組み合わせることで、目的の強度と加工性に適したものが作られている。そのため、広い強度範囲のハイテンが製造可能である。

Fig.1 はハイテンの引張強さと伸びの関係をまとめたものである。Fig.1 より本研究では強度レベルが広範囲で様々な用途に利用されている、DP 鋼板を供試材として用いた。板強度は 590、780、980 及び 1180MPa の 4 鋼種を用いた。Table 1 に供試材の機械的特性値を示す。試験片形状は Fig.2 に示すように矩形試験片で板厚 1.2mm のものを使用した。ダイスのスパンが 100mm の場合、圧延方向 (Rolling Direction) を 400mm、スパンが 60mm の場合、圧延方向を 360mm とした。また、圧延直角方向 (Transverse Direction) を 50mm とした。ひずみ

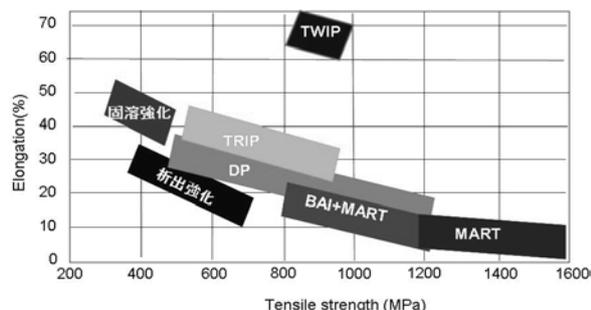


Fig.1 Relation between elongation and tensile strength

Table 1 Mechanical property

Strength (MPa)	590	780	980	1180
Tensile strength (MPa)	630.95	803	998.53	1213
Young's modulus (GPa)	203	205	206	208
Yield stress (MPa)	379	503	710	928
Strength coefficient (MPa)	1033	1270	1553	1826
n-value	0.183	0.158	0.148	0.128

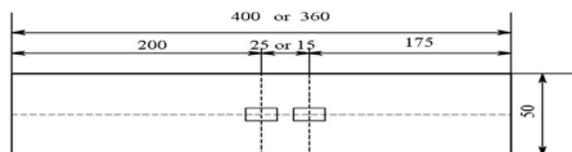


Fig.2 Specimen geometry and strain gauge position

ゲージは試験片中心部に 1 枚 (以下中心部ひずみゲージと記す) 貼った。そして、もう 1 枚を試験時の引張によるひずみを計測するために、スパンが 100mm の場合は中心部ひずみゲージより 25mm ずらした位置 (以下単軸部ひずみゲージと記す) に貼った。スパンが 60mm の場合は中心部ひずみゲージより 25mm ずらした位置に貼った。このひずみゲージは東京測器研究所の塑性域ゲージ YEFLA-5-LA-1 ( $\pm 20\%$  のひずみが測定可能) を用いた。

### 2.2 実験方法

実験は 3 種類の曲げ加工法で行った。Fig.3 は試験片をダイスの上に置き、試験片中心部にパンチを曲げ角度  $90^\circ$  になるまで押し込む三点自由曲げ試験である。Fig.4 は試験片をダイスの上に置き、ダイスとブランクホルダで挟み試験片中心部にパンチを曲げ角度  $90^\circ$  になるまで押し込む単純曲げ試験である。また、摩擦力軽減のためにダイスとブランクホルダの間に潤滑剤としてグリース及び厚さ 0.05mm のテフロンシートを用いて 1.1mm のクリアランスを与えた。なお、引張力は試験片がダイスブランクホルダ間を滑り込み時の摩擦力とダイスコナー部の曲げ戻し力のみである。Fig.5 は引張曲げ試験である。これは単純曲げ試験と同様の状態に試験片をセットする。そして試験片を油圧シリンダーに取り付けたチャックで拘束し引張力を付加しながら、パンチを曲げ角度  $90^\circ$  になるまで押し込む試験である。この時の引張力は供試材の降伏応力の 20%、40%、60% である。また、常に一定の引張力が試験片に加えられるように、引張力は油圧装置のリリーフ弁で調節している。試験装置は、容量 200kN のアムスラー型万能試験機に取り付けた自作の三点曲げ装置を用いた。

実験条件は試験速度を約  $5\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、パンチ先端半径を 2、4 及び 8mm、スパンを 60、100mm とした。ここで、①パンチ部にかかる荷重はパンチ上部に取り付けている自作のロードセルにより測定している。また、②パンチの押し込み量はクロスヘッドの移動量をポテンショメータ (ひずみゲージ型変換器) により計測している。ひずみは Fig.2 に示す

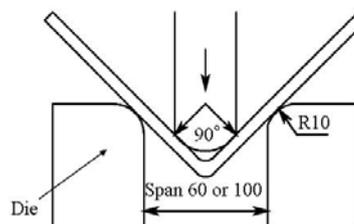


Fig.3 Air bending diagram

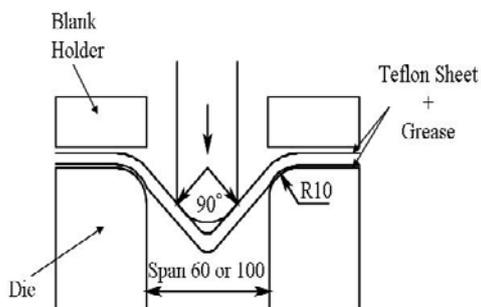


Fig.4 Simple bending diagram

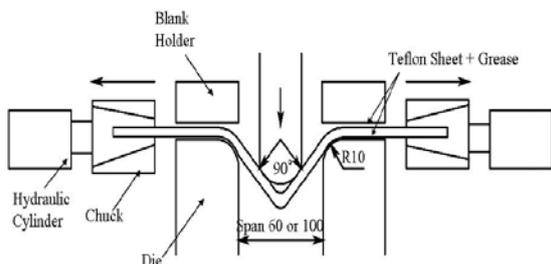


Fig.5 Stretch bending diagram

ように③中心部ひずみゲージと④単軸部ひずみゲージより測定した。これら4つの計測データは、実験時動ひずみアンプを介して自動的にノートパソコンメモリーに収録した。

### 3. 実験結果

本研究では、Fig.2の矩形試験片を用いて自由曲げ、単純曲げ、引張曲げ試験を行いスプリングバック量を調査した。これらすべての曲げ試験ではパンチを試験片が曲げ角度90°になるまで押し込んだ。なお、スプリングバック量は試験後の曲げ角度( $\theta_1$ )をプロトラクターで計測し、曲げ角度は90°であるので次式にて算出する。

$$\Delta\theta = \theta_1 - 90$$

Fig.6はスパン=100mm、試験材料の降伏応力の20%の引張力を加えた曲げにおけるパンチ先端半径 $R_p$ と応力の関係を示している。Fig.7はFig.6と同様の条件におけるパンチ先端半径 $R_p$ と曲げ中心部ひずみの関係を示している。これらの図より、各強度において、パンチ先端半径 $R_p$ が大きくなるほど応力は増加し、曲げ中心部ひずみは減少することが示している。

Fig.8はパンチ先端半径 $R_p=4$ mm、試験材料の降伏応力の20、40、60%の引張力を加えた曲げにおけるスパンと応力の関係を示している。Fig.9はFig.8と同様の条件におけるスパンと曲げ中心部ひずみの

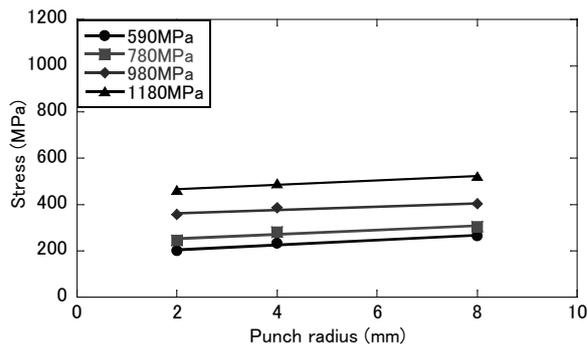


Fig.6 Relation between stress and punch radius (Span=100mm, Y20% stretch bending)

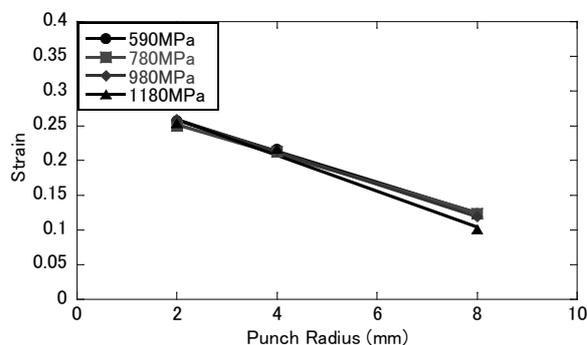


Fig.7 Relation between strain and punch radius (Span=100mm, Y20% stretch bending)

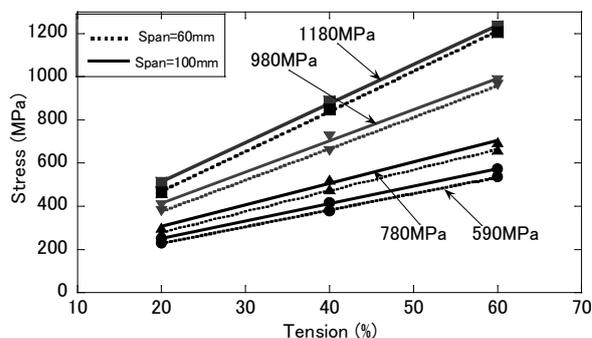
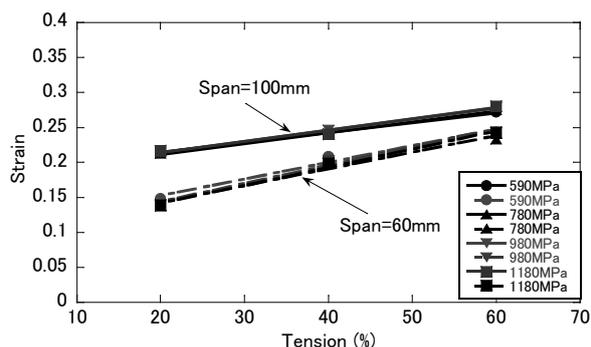


Fig.8 Relation between stress and die span (Stretch bending,  $R_p=4$ mm)

関係を示している。これらの図より、各強度において、スパンが大きければ応力、曲げ中心部ひずみがともに増加することが示された。

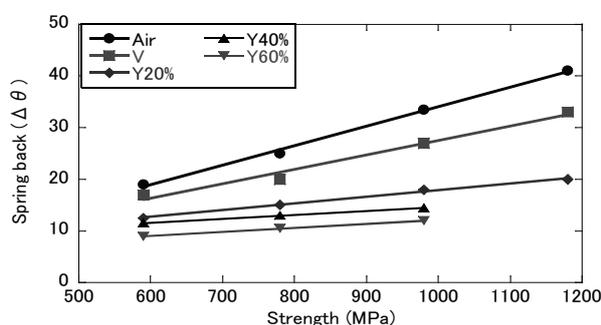
Fig.10, Fig.11及びFig.12はそれぞれパンチ先端半径 $R_p=2, 4$ 及び8mm、スパン=100mmにおける強度とスプリングバック量の関係を示している。ここで、Airは自由曲げ、Vは単純曲げ、Y20%、Y40%及びY60%は引張曲げ(引張力は降伏応力の20,40,60%の力)である。これらの図より強度が増加するにつれて、スプリングバック量が増加すること



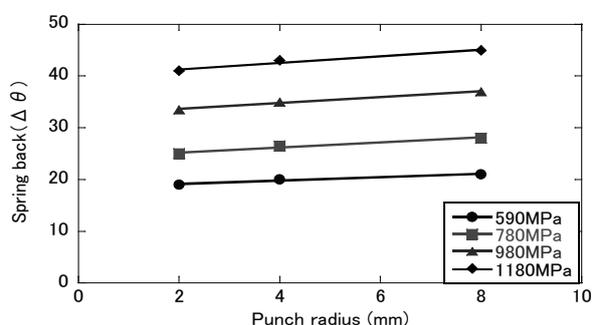
**Fig.9** Relation between strain and die span  
(Stretch bending,  $R_p=4\text{mm}$ )

が示された。また、自由曲げ、単純曲げ、引張曲げの順及び引張曲げにおいては引張力の増加に伴ってスプリングバック量が低減できることが示された。

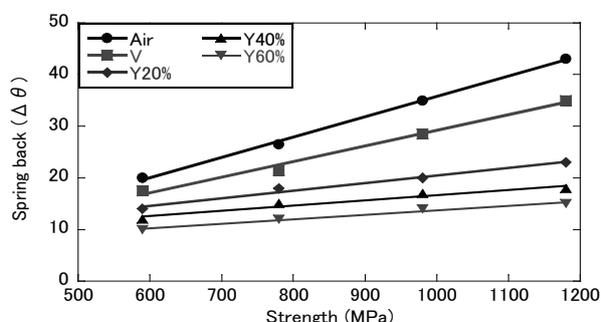
**Fig.13**はAir, **Fig.14**はV, **Fig.15**はY20%, これらの図はスプリングバック量とパンチ先端半径  $R_p$  の関係を示している。それぞれスパン=100mmである。これらの図より、パンチ先端半径  $R_p$  が増加するにしたがいスプリングバック量が増加することが示された。これは、**Fig.7**に示されているようにパンチ先端半径  $R_p$  が増加するにつれて、ひずみが減少するためスプリングバック量が増加すると考えられる。



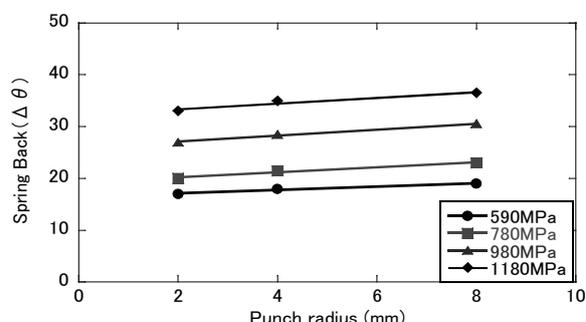
**Fig.10** Relation between spring back and strength  
( $R_p=2\text{mm}$ , Span=100mm)



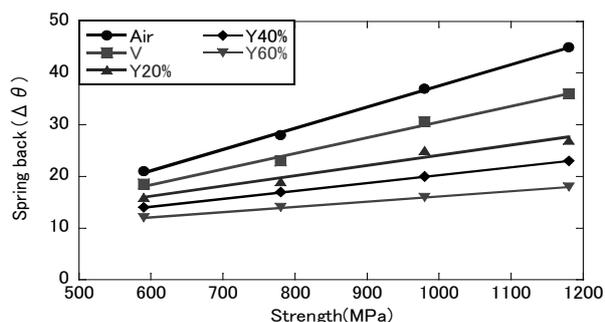
**Fig.13** Relation between spring back and punch radius  
(Air bending, Span=100mm)



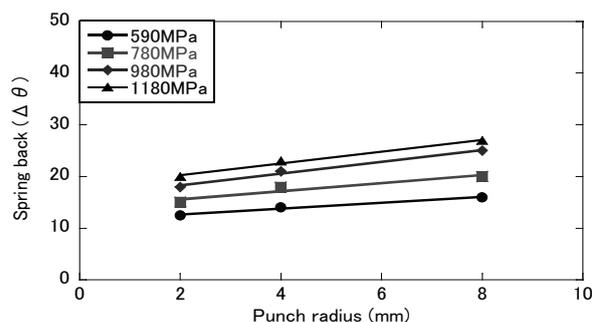
**Fig.11** Relation between spring back and strength  
( $R_p=4\text{mm}$ , Span=100mm)



**Fig.14** Relation between spring back and punch radius  
(V bending, Span=100mm)



**Fig.12** Relation between spring back and strength  
( $R_p=8\text{mm}$ , Span=100mm)



**Fig.15** Relation between spring back and punch radius  
(Y20% stretch bending, Span=100mm)

Fig.16 は Air と V, Fig.17 は引張曲げにおけるスプリングバック量とスパンの関係を示しており, それぞれパンチ先端半径  $R_p=8\text{mm}$  である. これらの図より, スパンが大きければスプリングバックが軽減することが示された.

#### 4. 解析的予測

吉田らは引張曲げの破断限界について Swift の拡散くびれ条件にしたがい最大荷重発生条件より解析的に求める方法を提案している<sup>5)</sup>. この方法は, 板材の曲げ R 部を平面ひずみ変形と仮定し, R 部の板厚  $t$  を算出している. そこで本手法は解の算出を単純化するために以下のことを仮定する.

- ① 曲げ R 部の変形は平面ひずみ状態と仮定し, せん断変形の影響を無視する.
- ② 相当応力-相当ひずみの関係を  $\sigma_{eq} = C \varepsilon_{eq}^n$  の  $n$  乗硬化則でモデル化する.
- ③ 工具-ハイテン材間の摩擦は考慮しない.
- ④ ハイテン材は面内等方性と仮定する.
- ⑤ 断面内の対数ひずみ分布を幾何学形状から算定する.
- ⑥ ハイテンの局所伸びが非常に小さいと考え, Swift の拡散くびれ条件を用いた最大荷重発生条件を破断限界と仮定する.

この手法にて正確な値を求めるには, ひずみ増分理論が適切であるが, その例はいくつか報告されているため, 本研究ではより簡便な全ひずみ理論で検討を行った.

Fig.18 は曲げ R 部の変形過程を示している. 張力  $T=0$  の時に変形形態 OABC となる部分(曲げ角度  $\phi$ ) が, 張力  $T$  を加えると変形形態 OA'B'C' (曲げ角度  $\theta$ ) となるように仮定する.

曲げ内側半径を  $R_i$ , 材料の元の板厚を  $t_0$  とし, 純曲げ時の板厚変化に伴う無ひずみ面 ( $y=0$ ) の移動を無視すれば,  $\varepsilon_0$  は次式のようになる.

$$\varepsilon_0 = \ln \left\{ \frac{(R_i + t)\theta}{(R_i + t_0/2)\phi} \right\} = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_i}{t} (t + p) \quad (1)$$

張力負荷前後の面積一定条件 ( $OABC = OA'B'C'$ ) より, 次式が成り立つ.

$$\frac{\phi \left\{ (R_i + t_0)^2 - R_i^2 \right\}}{2} = \frac{\theta \left\{ (R_i + t)^2 - R_i^2 \right\}}{2} \quad (2)$$

式(1),(2)より

$$\frac{\theta}{\phi} = \frac{1}{2} \frac{2R_i + t_0}{R_i + t} e^{\varepsilon_0} = \frac{2R_i + t_0}{2R_i + t} \frac{t_0}{t} \quad (3)$$

となり, これを整理すると, 次式が得られる.

$$e^{\varepsilon_0} t^2 + 2(R_i e^{\varepsilon_0} - t_0)t - 2R_i t_0 = 0 \quad (4)$$

曲げ R 部の板厚  $t$  は, 正の値であるので, 式(4)から

次式で得られる.

$$t = t_0 e^{-\varepsilon_0} - R_i + \sqrt{R_i^2 + (t_0 e^{-\varepsilon_0})^2} \quad (5)$$

Fig.18 に示すように, 自由曲げにおいて板厚は変化しないと仮定し, ひずみを算出する次式が成り立つ. ここで,  $h$  は曲げ角度  $90^\circ$  時のストロークである.

$$\varepsilon = \frac{t_0/2}{h + (t_0/2)} \quad (6)$$

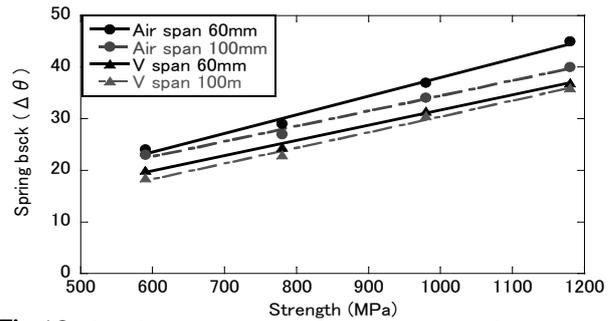


Fig.16 Relation between spring back and die span under Air and V bending ( $R_p=8\text{mm}$ )

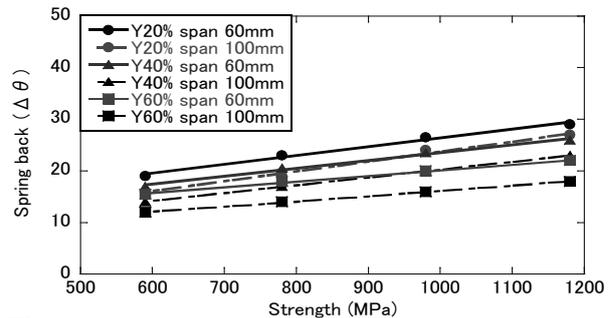


Fig.17 Relation between spring back and die span under stretch bending ( $R_p=8\text{mm}$ )

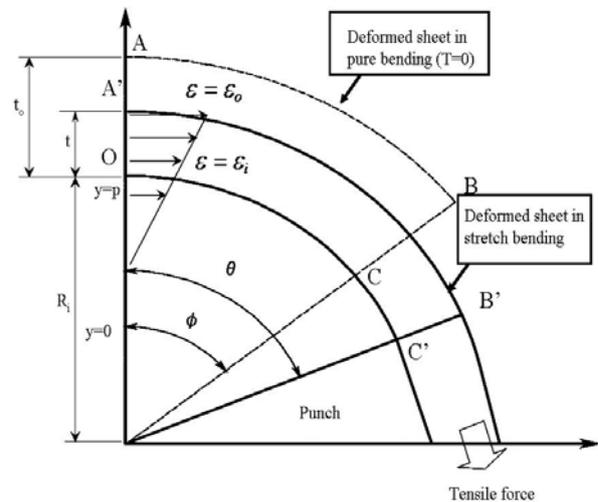


Fig.18 Schematic illustration of deformed sheet in stretch bending

Fig.18 に示すように、単純曲げ及び引張曲げにおいて、引張力が加わることで板厚が変化すると考える。この時、板厚の変化と中立軸の移動量  $y$  を考慮に入れ、次式が成り立つ。なお、 $t$  は式(5)より算出している。

$$\varepsilon = \frac{t/2 + y}{h + (t/2) - y} \quad (7)$$

ひずみ  $\varepsilon$  が算出されれば、曲率  $\kappa$  は次式で得られる。

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{y} \quad (8)$$

そして、曲率半径  $\rho$  は次式となる。

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad (9)$$

式(9)から得られた曲率半径  $\rho$  を次式(10)に代入し、スプリングバックの曲げ角度変化率( $\Delta \theta / \theta$ )が得られる。

$$\frac{\Delta \theta}{\theta} = 3 \left( \frac{Y}{E} \right) \left( \frac{\rho}{t} \right) \quad (10)$$

ここで、 $\Delta \theta$  はスプリングバック量、 $\theta$  は曲げ角度、 $Y$  は降伏応力、 $E$  はヤング率である。式(10)より求めたスプリングバックの曲げ角度変化率( $\Delta \theta / \theta$ )よ

り除荷後  $\theta^*$  が次式より得られる。

$$\theta^* = \Delta \theta + \theta \quad (11)$$

上記の式を用いて、Fig.19 はスパン=60mm、Fig.20 はスパン=100mm、それぞれパンチ先端半径  $R_p=2\text{mm}$  における引張曲げの実験値と解析値の比較結果を示している。同様に Fig.21 はスパン=60mm、Fig.22 はスパン=100mm、それぞれパンチ先端半径  $R_p=4\text{mm}$  における引張曲げの実験値と解析値の比較結果を示している。くわえて、Fig.23 はスパン=60mm、Fig.24 はスパン=100mm、それぞれパンチ先端半径  $R_p=8\text{mm}$  における引張曲げの実験値と解析値の比較結果を示している。これらの図より各々の条件でおおむね実験結果と解析結果が一致することが示された。

### 5. 結言

本研究ではハイテンの引張曲げ成形性に着目し、成形シミュレーション精度向上及びスプリングバック低減のために各強度のハイテンを用いて自由曲げ、単純曲げ、引張曲げ試験を行った。そして、これら

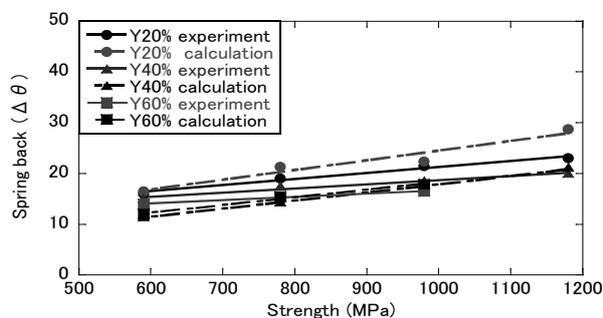


Fig.19 Comparison of spring back between experiment and analytical prediction under stretch bending ( $R_p=2\text{mm}$ , span=60mm)

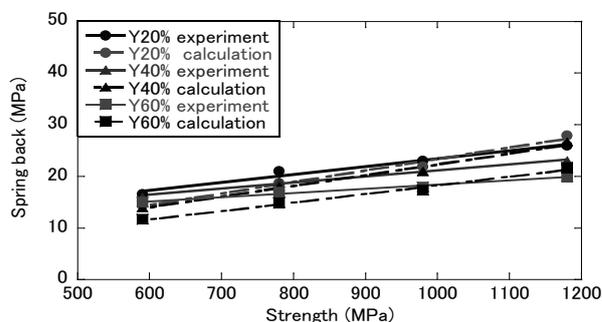


Fig.21 Comparison of spring back between experiment and analytical prediction under stretch bending ( $R_p=4\text{mm}$ , span=60mm)

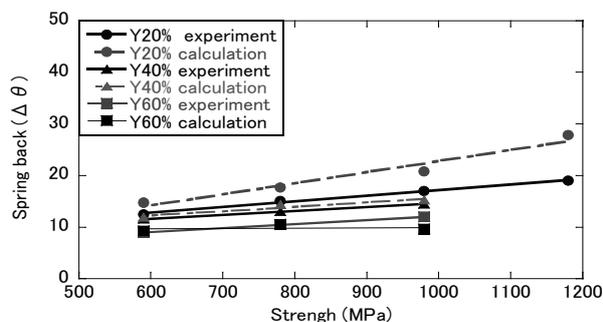


Fig.20 Comparison of spring back between experiment and analytical prediction under stretch bending ( $R_p=2\text{mm}$ , span=100mm)

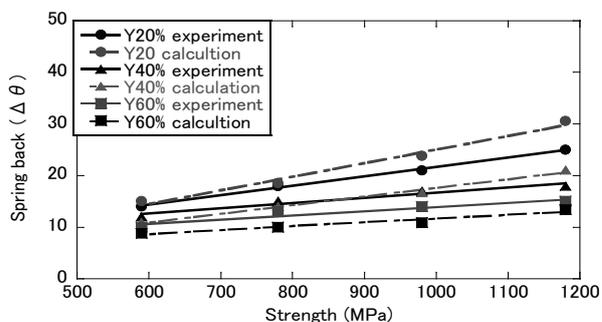
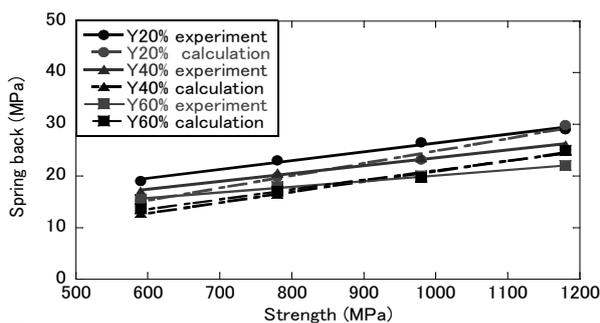
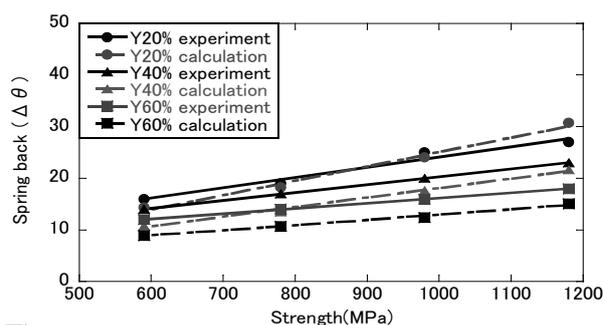


Fig.22 Comparison of spring back between experiment and analytical prediction under stretch bending ( $R_p=4\text{mm}$ , span=100mm)



**Fig.23** Comparison of spring back between experiment and analytical prediction under stretch bending ( $R_p=8\text{mm}$ ,  $\text{span}=60\text{mm}$ )



**Fig.24** Comparison of spring back between experiment and analytical prediction under stretch bending ( $R_p=8\text{mm}$ ,  $\text{span}=100\text{mm}$ )

の曲げ加工法, パンチ先端半径  $R_p$  及びスパンがスプリングバックに与える影響を調査した. また, 単純な力学モデルを用いた解析値と実験値と比較検討を行い, 得られた結果は以下の通りである.

- 1) 引張曲げにおいて引張力が高くなるにつれて, 応力及び曲げ中心部ひずみが増加することが示された.
- 2) 引張曲げにおいて引張力の増加に伴って, スプリングバック量が減少した. よって, 引張力によりスプリングバック量が軽減できることが示された.
- 3) 材料の強度上昇に伴い, スプリングバック量が増加していくことが示された.
- 4) パンチ先端半径  $R_p$  の増加に伴い, スプリングバック量が増加することが示された.
- 5) スパンが大きければスプリングバック量が軽減できることが示された.
- 6) 各条件におけるスプリングバック量の解析方法を提案し, 実験結果と解析結果はおおむね一致し, この手法が有効であることが示された.

### 参考文献

- [1] 玉井良晴ほか: 塑性と加工(2009-12), 50-587, PP1081-1085.
- [2] 林央: 第 283 回塑性加工シンポジウム(2010), PP1-8.
- [3] 上西朗弘ほか: 塑性と加工 46-534, (2005-7), PP102-106.
- [4] 永井康友: 塑性と加工(1997-11), 38-442, PP13-17
- [5] 吉田正敏ほか: 塑性と加工(2005-9), 46-536, PP859-863.