

高強度材料の形状凍結性に係わる 高精度曲げ加工技術の開発

茨城大学 工学部 システム工学科
講師 西野創一郎
(平成13年度奨励研究助成 AF-2001024)

キーワード：曲げ加工，スプリングバック，形状凍結性予測

1. 緒言

現在，自動車車体においては，環境問題への対応から軽量化が求められ，また一方ではオフセット衝突や側面衝突の安全性向上による重量増加が避けられない状況にある⁽¹⁾⁽²⁾。

これら相反する課題に対し，従来の設計手法や生産技術／設備が活用でき，コスト上昇を最小限に押さえられる対応策として，骨格部材への高張力鋼板の使用が進められてきている⁽³⁾。しかし，高張力鋼板の活用には多くの課題（加工機械能力，形状寸法精度，成形性，溶接性，塗装性等）がある。特に，加工機械能力は現有設備を使用できないと，新規設備投資が必要となる。また，各成形部の弾性回復により発生する形状寸法精度不良を事前に予測することは非常に困難である。

本研究では，高張力鋼板の適用で顕在化する形状寸法精度不良，中でも最も基本的な課題でありながら，現状は予測困難であるスプリングバック⁽⁴⁾⁽⁵⁾に対し，三点V曲げ試験結果とFEMで求められた弾性ひずみを組み合わせることにより，高精度にスプリングバックを予測するシステムの構築を目指す。これによりスプリングバック見込み量の標準化が可能となり，試行錯誤にて行っている金型への見込み量の補正時間と費用の大幅な削減が実現される。

なお，スプリングバックへの影響因子として，曲げ加工の基本項目である（1）被加工材の機械的特性（降伏応力・引張強さ・伸び・n値）と板厚，（2）曲げ部の曲率半径，及び（3）曲げ角度を取り上げる。

2. 形状凍結性の評価

2.1 供試材とその選定理由

本研究では，汎用性の高い評価を目的として，供試材に様々な素材と板厚を用いた。特に，引張強さおよび組織の相違に注目し，DP鋼（A～E材），TRIP鋼（F～H材），強度の異なる高張力鋼（I～L材），軟鋼（M，N材）の14種類の鋼板を用いた。また，比較のために非鉄金属（Al&Mg合金板材：O，P材）の評価も行った。

それぞれの鋼板の機械的特性値を表1に示す。DP鋼は軟質相（フェライト）と硬質相（マルテンサイト），またTRIP鋼はフェライト+ベイナイト+マルテンサイトで構成される複合組織となっている。他は単相組織鋼および非鉄金属である。試験片は長さ150mm，幅30mmの板材である。試験片作成にあたって150mmをロール方向と一致させた。

2.2 形状凍結性の評価方法とその定義

試験方法は，試験片をパンチ頭部とダイ肩部の三点で支持しながら加工する，いわゆる，自由曲げ（エアベンディング）方式V曲げを採用した。その理由は，型と試験片との摩擦や型による拘束といった寸法精度に影響を及ぼす因子を除去して，被加工材が本来有する形状凍結性を把握することを目的とするためである。しかも，この方式を用いることにより，曲げ角度毎にテスト型を製作する必要がなく，パンチの押し込み量で曲げ角の調整が可能となる。反面，試験片の剛性により，実際の曲げ角と設定角が一致しない。これを補正するために，曲げテストの下死点にて写真撮影を行い，これを測定して実際の曲げ角を算出した。

Table 1 Material properties

	Dual Phase Steel								
	A	B	C	D	E	F	G	H	
	DP1180	DP980	DP780	DP590	DP590	TRIP780	TRIP590	TRIP590	
Thickness of sheet (mm)	1.6	1.6	1.4	1.6	1.4	1.2	1.6	1.4	
Young's modulus (MPa)	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	
Yield stress (MPa)	1061	910	446	327	346	361	424	420	
Tensile stress (MPa)	1207	1080	858	592	515	832	613	681	
Work-hardening exponent	0.1	0.1	0.25	0.18	0.21	0.17	0.21	0.19	
Elongation (%)	5.3	6.7	10	27	16	32	38	23	
	Single Phase Steel							Al	Mg
	I	J	K	L	M	N	O	P	
	HT590	HT590	HT490	HT440	SPCE	SPCE	A5052	AZ31	
Thickness of sheet (mm)	1.6	1.0	1.6	1.6	1.6	0.7	1.6	1.6	
Young's modulus (MPa)	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	6.2×10^4	3.8×10^4	
Yield stress (MPa)	427	439	333	338	153	158	85 _J	180 _J	
Tensile stress (MPa)	607	628	502	480	308	306	183	262	
Work-hardening exponent	0.15	0.42	0.16	0.16	0.25	0.25	0.29	0.13	
Elongation (%)	28	25	31	32	49	47	8.7	5.5	

1) 0.2% Proof stress [MPa]

一方、一般に行われている曲げ加工は加圧曲げ（ボトムング曲げ）であるから、曲げ角 90 度で加圧部長さ 20mm（一般的金型拘束寸法）の曲げ型を製作し、本試験法との比較確認も行った。

それぞれの曲げ試験では同一試験を 3 回行い（ $n=3$ ）、その平均値を求めて実験データとした。なお、加圧曲げ試験では板厚 1.6mm の試験片に統一して実験を行った。今回の試験は 3 種類（ $\theta_1=60$ 度、90 度、120 度）の曲げ角と、2 種類のパンチ先端曲率半径（ $R=2$ mm, 20mm）にて行った。なお、本試験における曲げ角は加工量の大きさを示している。すなわち、曲げ角が大きいほど厳しい加工条件となる。また、図 1 に示すように、曲げ加工後の弾性回復量（ $\Delta\theta$ ：スプリングバック量）を形状凍結性の指標とする。すなわち、スプリングバック量が少ない場合は形状凍結性が良好であると解釈する。評価試験にはプレスブレーキ（加圧能力：245KN）を使用した。

2. 3 実験結果および考察

図 2 に試験結果（曲げ角とスプリングバック量の関係）の一部を示す。すべてのデータはパンチ $R=2$ の金型を用いた結果である。パンチ R が異なっても形状凍結性の傾向は同等であったため、パンチ金型 $R=20$ におけるデータはここでは省略する。

図 2 (a) は組織による相異 (b) は引張り強さと板厚による相異 (c) は組織、引張り強さ及び非鉄金属による相異を示している。これらの結果より材質・組織・板厚・曲げ角によりスプリングバック量が変化することが示されており、本試験にて採用した三点自由 V 曲げ試験により、材料が本来有している形状凍結性の評価が可能であると考えられる。

3. 実験・解析ハイブリッド評価システムの構築

3. 1 評価パラメータの設定

次に、曲げ試験で分離・抽出された多数のパラメータ（例えば材料種類・板厚・曲げ角度・パンチ先端曲率半径など）を、形状凍結性に関する独立した一つの評価パラメータとして「素材内部に生じる相当弾性ひずみの総和」を検討する。スプリングバックは、曲げ加工時に素材内部に生じた弾性ひずみが除荷時に開放されることにより発生する。ただし、曲げ加工では素材断面に応力勾配が生じるため場所によって弾性ひずみ量は異なる。しかし、図 3 の模式図に示したように微小部分の弾性ひずみは各部分のスプリングバック量に関係していることから、すべての弾性ひずみを加算す

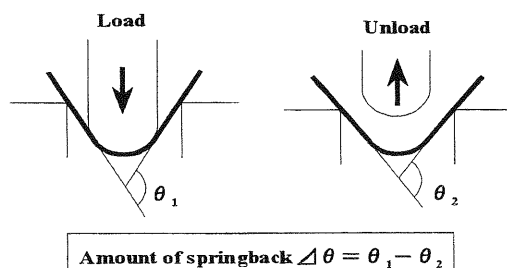
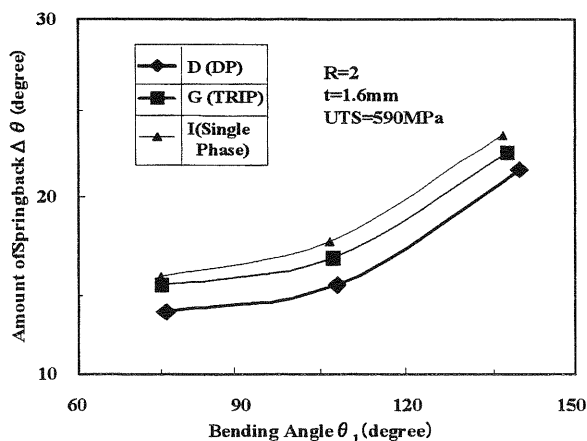


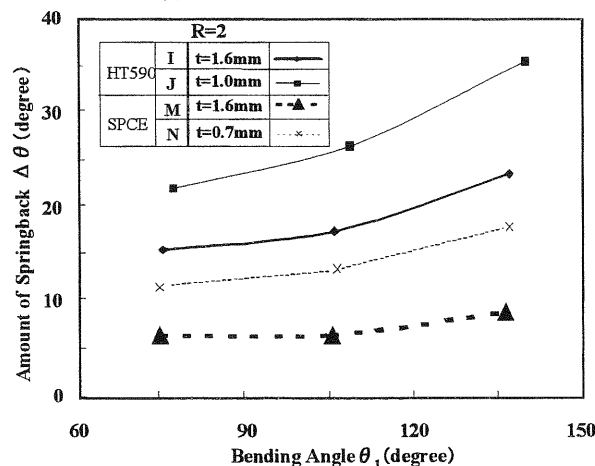
Fig. 1 Definition of Springback

れば素材全体のスプリングバック特性を予測することができる。ここで用いている相当弾性ひずみとは、相当塑性ひずみの定義式におけるすべての塑性ひずみ成分を弾性ひずみ成分に置き換えて算出したひずみ量と定義する。

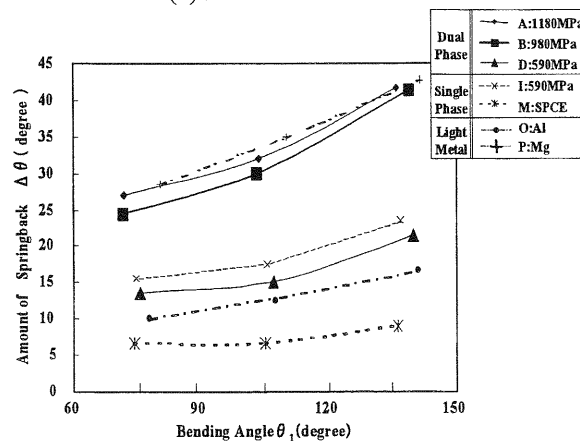
また、「不均一曲げの理論」⁽¹⁰⁾で述べられているように V 曲げの曲げ部と平坦部の境界に生じているせん断変形を考慮することにより精度の高い解析結果が得られる。したがって、曲げ部および平坦部のひずみ総和を用いることにより、スプリングバック量との精度の高い相関が期待される。永井ら⁽¹⁰⁾は、この平坦部の変形を考慮することによって、より精度の高い解析結果が得られると報告している。



(a) Effect of Microstructure



(b) Effect of Thickness



(c) Effect of Tensile Strength

Fig. 2 Experimental results of bending for sheet metal

以上の考察をもとに、V 曲げ試験と同一条件を用いて、板厚の相異に対応するため、相当弾性ひずみの総和を試験片の断面積で除した弾性ひずみ率として求めた。

3. 2 解析モデルと相当弾性ひずみ率

全てのケースとも4 節点平面ひずみ要素の等方性材料で、要素数は600 要素、節点数は 755 個の解析モデルにて相当弾性ひずみ率を求めた。また、解析には汎用弾塑性解析ソフト MSC-MARC を用いて、大変形・大ひずみを考慮したアップデート・ラグランジェ法により計算を行った。その際に、型のパンチ・ダイは剛体とした。変形体である被加工材の機械的特性は、実験で用いた材料の機械的特性値(表 1) を入力した。なお、型と被加工材間の摩擦は無いものとし、加工条件は形状凍結性評価試験と同様とした。

3. 3 実験結果と解析結果のハイブリッド化

V 曲げ試験のスプリングバック量を縦軸に、解析での相当弾性ひずみ率を横軸にプロットしたものを図4に示す。この図から明らかなように、スプリングバック量と相当弾性ひずみ率という両因子の間に線形関係が成立している。これにより被加工材の種類及び曲げ条件に影響されことなく統一評価することが可能となる。

3. 4 実験・解析ハイブリッド評価システム

本研究で提案する実験・解析評価ハイブリッドシステムの特徴は、実験から得られたスプリングバック量を縦軸に、FEM 解析による可視化から得られた相当弾性ひずみ率を横軸にとって得られる線形関係グラフを用いて、新たに計画する被加工材の種類/曲げ曲率半径/曲げ角度をもとに求まる相当弾性ひずみ率により、スプリングバック量を高精度に予測できることである。

FEM 解析にて V 曲げのような自由度の高い成形で高精度な結果を得るためには、要素の細分化や構成方程式の見直しなど複雑な解析手法が必要となる。その上多くの解析時間を必要とする。これに対し、本研究では容易に導入することができる汎用解析ソフトを用いて、高精度かつ短時間にスプリングバック量が求められる。

次に、図5に加圧力49kNにて行った加圧曲げでのスプリングバック量と相当弾性ひずみ率との関係を図4の自由曲げでの結果と比較して示す。本図より、加圧曲げにおいてもスプリングバック量と相当弾性ひずみ率に線形関係が成立していることが理解される。このことより本研究における評価パラメータが加圧曲げにも適用できることがわか

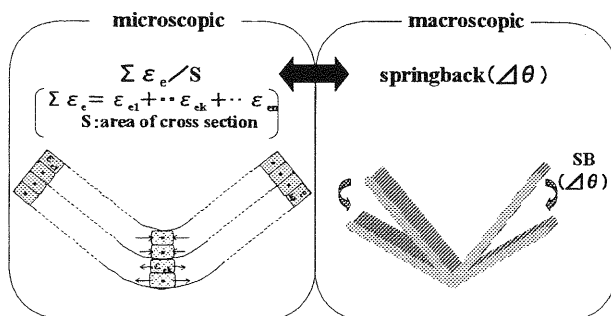


Fig. 3 Relationship between shape freezing property and elastic strain in material on bending process

る。なお、自由曲げの結果と一致しないが、これは加圧過程における多軸応力状態の影響を受けたためと考えられる。

また、加圧曲げを行うことにより、スプリングバック量を少なくさせることが可能である。しかし、加圧曲げを行うためには大きな成形荷重が必要であり、被加工材が高張力鋼板化されることにより、更に大きな成形荷重が必要となる。このことは現在使用されているプレス機械では能力不足となり、十分な成形荷重を加えた加圧曲げ加工ができなくなる可能性を示している。

この対応策として、能力の大きな機械を使用すれば良いが、設備の更新等が必要となり、現実的には困難である。加圧曲げで問題となる機械能力不足に対して、本研究で得られた自由曲げでのスプリングバック評価システムを用いて、スプリングバック量の見込み量を決定し、自由曲げを行うことにより、従来行ってきた加圧曲げにより遙かに小さい成形荷重で高精度な曲げ加工が可能となる。また自由曲げ以上の能力を持ったプレス機械の場合には、その能力に応じてスプリングバックの見込み量を小さくすることにより、被加工材のバラツキや加工条件の経時変化等に対してより安定した成形加工が可能となる。

4. 結 言

形状凍結性を高精度で評価する新しい手法として、実験結果と FEM シミュレーションのハイブリッド化の研究により得られた結果を以下に示す。

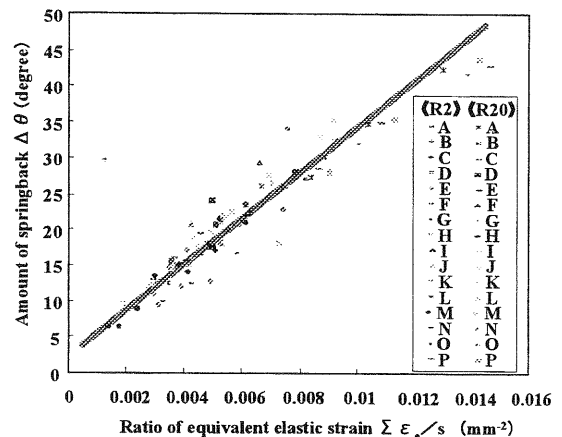


Fig.4 Springback evaluation by ratio of elastic strain

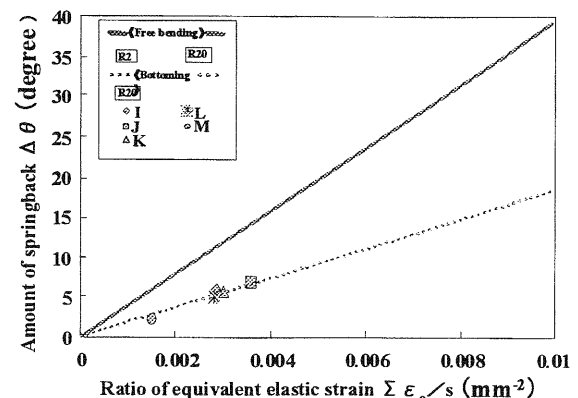


Fig. 5 Springback evaluation of free bending and bottoming bending

(1) V曲げ試験結果をもとに、曲げ加工に係わる形状凍結性の評価を行うことにより、被加工材の種類や加工条件に左右されない、被加工材が本来有する形状凍結性を評価することができた。

(2) シミュレーションで求めた被加工材における相当弾性ひずみ率は、被加工材種類及び加工条件に左右されない形状凍結性評価指標の有効なパラメータとして使用可能である。

(3) 曲げ試験により得られた「スプリングバック量」と汎用成形シミュレーションより求められた「相当弾性ひずみ率」をハイブリット化することにより、被加工材の種類及び曲げ条件に関係なく、この2個のファクター間で線形の相関関係が得られた。しかも、この関係は自由曲げ及び加圧曲げ双方に適用することが可能である。

(4) 以上の得られた評価システムを活用することにより、「被加工材の板材種類」と「曲げ成形部の形状」の設計仕様が決定され、使用されるプレス機械が選定されれば、精度の高いスプリングバック量の予測が可能となる。これにより、現在軽量化と安全性向上を目的に、骨格部材への採用が大幅に増加して製造現場にて大きな問題となっている高張力鋼板の成形型への高精度なスプリングバックの見込みが可能となる。また従来統一評価されていないため、個人差の大きなスプリングバックの見込み量の統一化と、試行錯誤で行われていた見込み量の修正を削減することが可能となり、大幅な時間と費用の削減が実現される。

本研究の遂行にあたり、天田金属加工機械技術振興財団の支援を受けたことに対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 上玉利恒夫：自動車技術，**53**-11，(1999)，4-9.
- 2) 林央：塑性と加工，**35**-404，(1999)，1087-1092.
- 3) 秋末始・羽田隆司：金属，**65**-4，(1995)，286-295.
- 4) 桑原利彦・関則夫・高橋進：塑性と加工，**38**-437，(1997)，582-586.
- 5) 森本秀夫・牧野内昭武：同上，**37**-431，(1996)，1334-1339.
- 6) Chou IN・Hung C：Int. J. Mach. Tools Manuf. Des. Appl.，**39**-3，(1999)，517-536.
- 7) Zhang Z T・Lee D：SAE，**26**-29，(1996)，49-59.
- 8) 蔦森秀夫・岩田徳利・鈴木直守・金子光司・加藤亨・松居正夫：51 回塑加連講論，(2000)，111-114.
- 9) 上森武・岡田達夫・吉田総仁：同上，(2000)，115-116.
- 10) 永井康友：塑性と加工，**24**-272，(1983)，948-953.