

樹脂複合鋼板の材料設計への有限要素法 シミュレーションの応用

橋本浩二*・江嶋瑞男*・滝田道夫*・牧野内昭武*²

Application of Finite Element Simulation to Material Design of Steel-plastic Laminated Sheets

Koji HASHIMOTO, Mizuo EJIMA, Michio TAKITA and Akitake MAKINOUCI

Synopsis :

Elastic-plastic finite element method has been applied to the bending process of steel-plastic laminated sheets. It is confirmed that the forming defects such as deformed geometries, which are often found in bending process of steel-plastic laminated sheets, can be simulated, for different kinds of core resins and different thickness compositions of skin sheets, exactly by using this simulation method.

Computational results show some important aspects of material design, by which deformed geometries of steel-plastic laminated sheets are expected to be eliminated. The findings obtained here are as follows ;

(1) Deformed geometries of bending process can be eliminated by raising the yield strength or plasticity coefficient of resin. However, this may be accompanied by the thickness reduction of outer skin sheets, resulting in a fracture.

(2) Deformed geometries can be decreased by increasing the thickness ratio of inner and outer steel sheets. This method is more effective when thinner skin steel sheet is used for outer side.

(3) The effect of using steel sheets with different yield strength for inner and outer sheets is smaller than those of using wide die opening and using skin sheets of different thickness for inner and outer sheets.

Key words : composite material ; simulation ; press forming ; bending ; shapes ; elastic-plastic finite element method ; steel-plastic laminated sheet.

1. 緒 言

制振性や軽量化といった特徴を持つ樹脂複合鋼板は、二枚の表皮鋼板層と芯材樹脂層からなる三層構造をとっている。従って、曲げ成形のように板厚方向に応力勾配を生じる場合には、剪断変形量が鋼板層と芯材樹脂層で大きく異なってしまい、カモメ状フランジ折れ曲がり¹⁾や端部ずれなど特有の不良現象を生じる。

これら成形不良に関しては、伊藤らが全歪み理論による簡易解析²⁾で、ずれ量と不良現象の発生を芯材樹脂の強度と工具条件との関係によって説明している。また、広瀬らは背圧曲げ方法やしごき曲げ方法³⁾などの新加工法を提案している。だが、利用者側の一番の関心は成形条件(ポンチ R とダイス幅)と材料の選択方法であろう。

残念ながら、これに関してはダイス幅拡大の提案⁴⁾と、鋼板板厚・強度比での整理¹⁾が報告されているぐらいで十分な技術データは公表されていない。なぜならば、成形不良の発生が複合鋼板の種類・構成や工具条件で異なるため、樹脂の種類や板厚構成比を含めた一般的な成形指標を掲示することが難しいためである。結果として、新しい樹脂が開発されると、個々の成形に最適な成形条件を、その都度実験により求めることとなる。従って、現在の樹脂複合鋼板に最適な加工条件を検討する時の効率向上はもとより、加工に適した芯材樹脂の開発指針を絞り込む場合にも、正確な計算シミュレーションの導入が不可欠である。

そこで著者らは、樹脂複合鋼板の材料設計(芯材樹脂特性や板厚構成比など)および利用加工上の問題(ダイ

昭和 62 年 10 月 本会講演大会にて発表 昭和 63 年 12 月 8 日 受付 (Received Dec. 8, 1988)

* 新日本製鉄(株)薄板研究センター (Sheet & Coil Research Lab., Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagami-hara 229)

*² 理化学研究所 工博 (The Institute of Physical and Chemical Research)

ス幅など)に弾塑性有限要素法を適用し、曲げ成形に適した芯材樹脂特性を求めめるための計算実験、および表皮鋼板の板厚構成・材質による改善効果についてシミュレーションを試みた。その結果得られた2、3の知見について報告する。

2. 実験方法およびシミュレーション方法

2.1 シミュレーションに用いたプログラムとその特徴

用いた弾塑性有限要素法プログラムは、山田・横内によって開発された EPIC-IV プログラム⁵⁾を有限変形が扱えるように Update Lagrangian 定式に基づいて書き直したものである。境界値問題を構成する基礎式は①つりあい式

$$\frac{\partial \dot{S}_{ji}}{\partial x_j} + \dot{b}_i = 0 \dots\dots\dots (1)$$

②境界条件式

$$\dot{t}_i = \dot{S}_{ji} n_j \text{ (} S_i \text{ 上で)}, \dot{v}_i = v_i \text{ (} S_v \text{ 上で)} \dots\dots\dots (2)$$

そして③弾塑性構成式(等方性を仮定して Prandtl-Reuss の式を有限変形に拡張した J_2 流れ則を適用)

[負荷および中立負荷]

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\delta_{im} \delta_{jn} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{mn} - \frac{3 \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \sigma'_{ij} \sigma'_{mn}}{2 \bar{\sigma}^2 \left(\frac{2}{3} H' + \frac{E}{1+\nu} \right)} \right] D_{mn}$$

[弾性及び除荷]

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\delta_{im} \delta_{jn} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{mn} \right] D_{mn} \dots\dots (3)$$

よりなっており、曲げに関する特殊な仮定を用いていない⁶⁾。

ここで、 S_{ij} ; 第1種 Piola-Kirchhoff 応力、 x_j ; 粒子の位置座標、 b_i ; 物体力、 t_i ; 公称表面力、 V_i ; 粒子の速度、 n_i ; 境界面上の外向き法線、 σ_{ij} ; 真応力、 σ'_{ij} ; 偏差応力、 E ; ヤング率、 ν ; ポアソン比、 H' ; 加工硬化率、 $\bar{\sigma}$; 相当応力、 δ_{ij} ; クロネッカのデルタ、であることを表す。

本プログラムは、

(1) 曲げの解析に通常採用される Kirchhoff-love の仮定⁷⁾を用いていないため、剪断変形を伴う“複層鋼板の曲げ加工”にも対応できる⁸⁾⁹⁾。

(2) 成形の進行につれて変化する材料と工具との接触状態を計算の中で自動的に決定するアルゴリズムを採用しており、力学的に正確な境界条件がステップごとに与えられる。

などの特徴を有する。要素には定ひずみの三角形要素を用い、方程式の解法には共役傾斜法を用いている。また、計算の簡略化のためにダイス肩部の R は小さいものとし、工具との摩擦は無い(完全潤滑)としている。

弾塑性構成式における加工硬化式の近似に関しては、表皮鋼板の場合には真応力-対数ひずみ関係を引張試験の結果から求め、 n 乗硬化式に近似して用いている。一方、問題となるのは芯材に用いた樹脂の構成式の表し方であるが、ここでは暫定的に J_2 流れ則を用いて表皮鋼板と全く同等に扱うこととした。そして、樹脂の温度・速度依存性を無視して、常温での引張試験から求めた降伏応力・破断応力を、すでに報告されている樹脂の真応力-真ひずみの関係式¹⁰⁾に代入して加工硬化式を定めた。また、接着界面については変形がどんなに進んでも剝離は生じないものとしている。

2.2 供試材及び工具条件

本プログラムを用いた計算結果の検証実験には、軽量ラミネート鋼板と制振鋼板を想定して、板厚 0.20~0.50 mm の極軟深絞り用鋼板4種類を、芯材樹脂の熱可塑性樹脂(ポリプロピレン樹脂とポリエステル樹脂)で接着した試料を用いた。試料は、おのおのの表皮鋼板を脱脂したあと、予加熱した芯材樹脂を挟み、ホットプレス(190°C, 1.0 MPa, 5 min)によって加熱圧着して製作した。各試料の板厚構成・機械的特性および剪断接着強度を Table 1 に示す。

差厚の効果を確認する実験には、板厚比を大きく取るためにトータル板厚は約 4 mm とし、表皮鋼板にはなるべく同一強度となるように熱延鋼板と冷延鋼板を選んで用い、高温域で制振性能を発揮する樹脂を用いて、上

Table 1. Mechanical properties and bonding strength under shear of tested materials.

Composition (mm) (Steel/resin/steel)	Polypropylene core resin					Polyester core resin				
	0.2% YP (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	n value 5~15%	B. S. S.* (MPa)	0.2% YP (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	n value 5~15%	B. S. S.* (MPa)
(0.20/0.60/0.20)	104.9	142.2	40	0.14	—	132.4	168.7	38	0.15	3.50
(0.27/0.46/0.27)	121.6	174.6	43	0.17	—	140.2	195.2	42	0.18	3.39
(0.32/0.36/0.32)	147.1	234.4	44	0.20	—	144.2	226.5	42	0.20	4.76
(0.50/0.10/0.50)	127.5	238.3	48	0.23	18.60	149.1	276.5	47	0.23	7.85

* B. S. S.=Bonding Strength of Shear

Table 2. Thickness compositions and bonding strength under shear of tested materials.

No.	Total thickness (mm)	Thickness ratio of skin steel sheets	Composition (steel/resin/steel)	B. S. S.* (MPa)
A	4.05	1:1	2.0/0.05/2.0	24.17
B	3.55	1:2	1.2/0.05/2.3	28.77
C	3.45	1:3	0.8/0.05/2.6	24.35
D	3.85	1:5	0.6/0.05/3.2	≧19.54
E	3.65	1:8	0.4/0.05/3.2	≧13.63

* B. S. S.=Bonding strength of shear

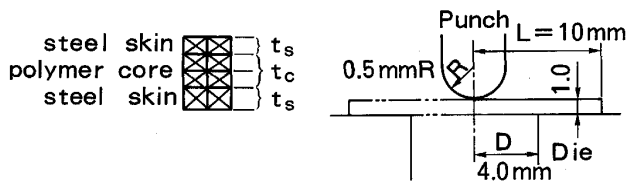


Fig. 1. Finite element mesh and set-up tool condition used in the simulation.

記と同じ条件で製作した試料 A~E を用いた。各試料の板厚構成比と接着強度を Table 2 に示す。

曲げ成形実験は、5 t インストロン型引張試験機を用いた三点曲げと、35 t プレスブレーキを用いた V 曲げの二種類について行った。実験には、計算条件と同じになるように Fig. 1 に示すようなポンチ先端半径 0.5 mm、ダイス幅 8.0 mm の三点曲げ治具を用い、試験片 (20 × 20 mm) に防錆油塗布のままの状態での 90° 曲げ成形を行った。一方、差厚効果の実験では、試料の板厚が厚くて荷重が大きくなるので、ポンチ先端半径 1.0 mm、ダイス幅 12, 18, 25 mm の V 曲げ工具を用い、試験片 (100 × 50 mm) に防錆油塗布のままの状態での 90° 曲げ成形を行った。なお、V 曲げの 90° の条件だしは、同一板厚の熱延鋼板を用いて行った。

3. 結果と考察

3.1 計算結果の実験による検証

本プログラムを計算機実験に用いても十分な精度が保証できるか否かを検証するため、以下の条件でシミュレーションを行い、実際の実験データと比較してみた。計算に用いた複合鋼板の板厚構成・芯材樹脂は実験に用いたものに準じ、材料定数には表皮鋼板や樹脂単体の引張試験より求めた Table 3 に示す加工硬化式を用いた。工具条件は実験条件と同じく、Fig. 1 に示すような三点曲げ工具を想定し、90° まで完全潤滑の条件で曲げ成形シミュレーションを行った。

各試料での計算結果と実験結果を対比させたものを Photo. 1 に示す。この結果より、ポリアステル樹脂では端部ずれが、ポリプロピレン樹脂ではフランジ折れ曲

Table 3. Material constants used for the calculation.

Material	Stress-plastic strain relation	Young's modulus (MPa)
1. Steel	$\bar{\sigma} = 532.5(0.02 + \bar{\epsilon}_p)^{0.195}$	206 000
2. Polypropylene	$\bar{\sigma} = 29.4(0.1 + \bar{\epsilon}_p)^{2.0} + 27.65$	980
3. Polyester	$\bar{\sigma} = 1.18(0.5 + \bar{\epsilon}_p)^{1.2} + 2.45$	98

がりが正確にシミュレートできていることがわかる。ただ、ポリプロピレン樹脂で 0.50 mm 表皮鋼板の場合のみ実験結果と違った計算結果となった。これは、芯材樹脂層が薄くなると同じずれ量に対する樹脂層の剪断ひずみは大きくなるため、実成形では芯材樹脂の強度が足りなくて曲げ中心部近傍で樹脂の剥離もしくは破断が起きているためと考えられる。

従って本プログラムは、樹脂層の破断や剥離の考慮などはできないものの、樹脂や板厚構成が変化した場合でも、樹脂複合鋼板の曲げ成形を十分正確にシミュレートできることがわかった。

3.2 曲げ変形挙動に対する芯材物性の影響

前節において、本プログラムが板厚構成・芯材樹脂を変えた樹脂複合鋼板にも十分適用可能であることを示した。ここでは、今後芯材樹脂を開発するにあたり、どの材料因子によって成形性にどれだけ影響が生じるかを検討するために、芯材樹脂のある特性値のみ大きく変えた曲げ成形シミュレーションを行い、形状凍結性・板厚減少について検討してみた。

計算を行うにあたり使用した試料及び工具の条件は、Fig. 1 において $t_s = 0.3$ mm, $t_c = 0.4$ mm, $L = 20$ mm, $D = 7.2$ mm, $P_R = 1.0$ mm R とした。注目した芯材樹脂の特性値は、Swift 型の n 乗加工硬化式 $\bar{\sigma} = C(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}_p)^n + A$ の塑性係数 (C 値), n 値, ヤング率, そして定数項 A 値 (≒降伏強度) の 4 特性値である。この時、各特性値ともポリプロピレン樹脂の値を標準値とし、注目した特性値のみ通常の樹脂が取りうる範囲内で値を大きく振った (Table 4)。

注目した特性値ごとに、計算で求めた 90° 曲げ加工時の樹脂複合鋼板の折れ曲がり状態を Fig. 2 に示す。図

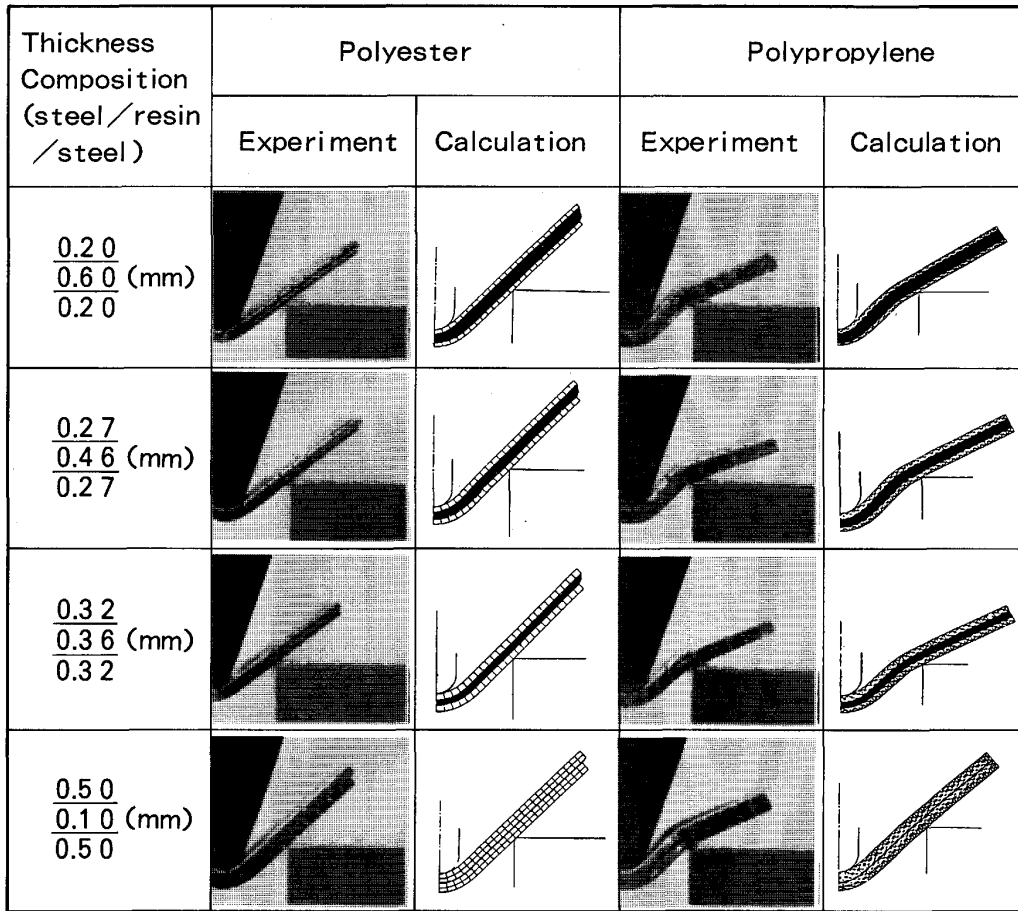


Photo. 1. Comparison of deformed geometries in bending process of the steel-plastic laminated sheets obtained by experiment and calculation.

Table 4. Characteristic values of steel sheet and imaginary resins used in the calculation.

(Steel) $\sigma = 533.3 (0.015 + \bar{\epsilon}_p)^{0.195} + 0.0$

$E = 205.9 \text{ GPa}$ $Y_P = 237.3 \text{ MPa}$

(Imaginary resin) $\sigma = C(0.1 + \bar{\epsilon}_p)^n + A$

$E = E$ $Y_P = Y_P$

	(1)	(2) Polypropylene	(3)
① C Value	0.98	29.4	127.5
② A Value (MPa)	9.6	27.7	107.9
③ n Value	1.5	2.0	2.5
④ E (MPa)	294	980	2940

Standard value (Polypropylene)

$\sigma_{pp} = 29.4 (0.10 + \bar{\epsilon}_p)^{2.0} + 27.7$

$E = 980 \text{ MPa}$

$Y_P = 27.9 \text{ MPa}$

中、板厚方向の中心部2層は樹脂層を表している。この結果より、曲げ成形性の改善には樹脂特性のA値・C値を上げてやればよいことがわかる。なお、n値の効果はヤング率と同様にほとんどなかった。

芯材樹脂の特性値に関しては、由田¹¹⁾が“ $\tau_{0.2}$ の大きい樹脂が成形性に有利である”と報告している。すなわち、従来の成形性と樹脂接着強度との関係は、剪断接着強度の最大値で評価されていたが、実際の成形では樹脂

層が剝離(もしくは破断)するところまでいかないため、剪断変形の割合小さな時点での変形抵抗力、例えばヤング率などが成形性にとっては重要であると述べている。

しかし、今回の計算結果ではヤング率単独の効果はほとんど認められなかった。これは、計算では降伏応力とヤング率の効果を Fig. 2 で独立に扱っているのに対して、実際の樹脂ではヤング率の増大に伴い降伏応力も増大するので、実験結果はヤング率の見掛け上の効果を示

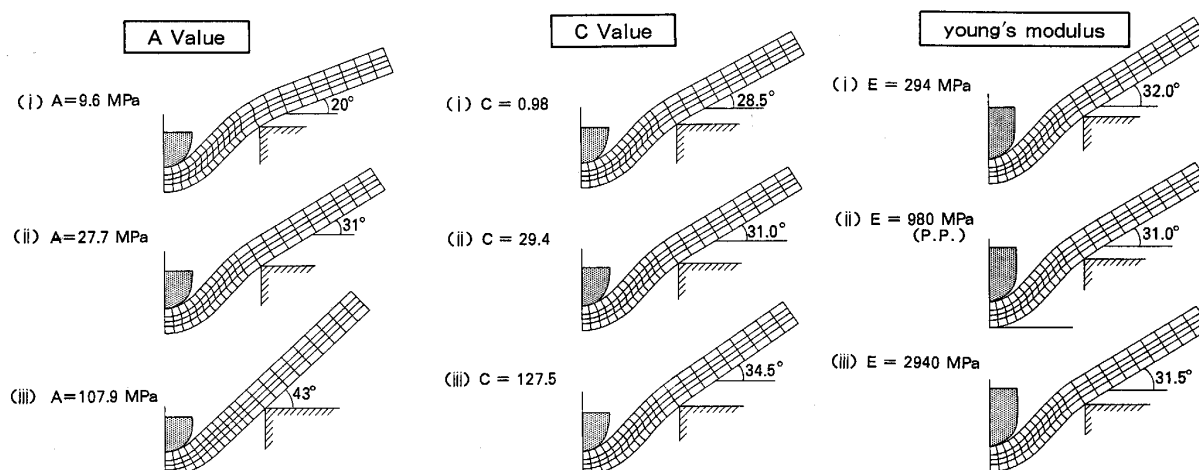


Fig. 2. Influence of material constants of core resins on the deformed geometries in bending process of steel-plastic laminated sheets (calculated results).

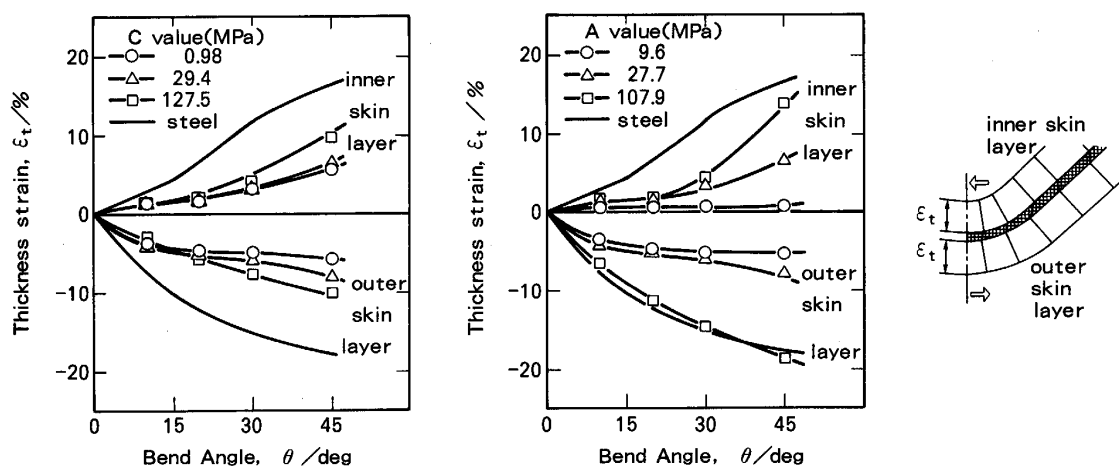


Fig. 3. Relationship between the bent line angle θ and the thickness strain at the center of bent portion.

しているにすぎない。従って、芯材樹脂の特性値で本当に効果があるのはヤング率そのものの向上ではなく、樹脂強度（特に降伏強度）の向上であるといえる。

次に、密着曲げなどで問題となる曲げ中心部の破断（板厚減少）に関して、成形性の改善に効果があると考えられる A 値と C 値について検討した結果を Fig. 3 に示す。図より、A 値・C 値とも値が大きくなると外側表皮鋼板の板厚減少が単一鋼板の場合に近づくことがわかる。この場合、単一鋼板では最外表の部分が板厚減少を起こしても内側の鋼板が補足するが、樹脂複合鋼板の場合には各層が単独に板厚減少を起こすため内側層の寄与がなく、最外層の板厚減少はそのまま破断に至る。従って、A 値・C 値の向上は Fig. 2 に示すように形状性を良くするが、逆に Fig. 3 のように板厚減少による破断の危険性が増すので十分注意しなければならない。

3.3 曲げ成形挙動に対する板厚構成比の影響

樹脂複合鋼板の、表皮鋼板板厚構成比による成形不良対策の効果を見るために、本プログラムによる曲げ成形シミュレーションの結果と、実際にプレスプレーキで突き曲げした実験結果とを比較してみた。実験にはポリエステル系の高温用樹脂を用いて調整した Table 2 に示す試料 A~E を用いた。実験用金型はポンチ先端半径 1.0 mm、ダイス幅 12, 18, 25 mm で、試験片サイズは 50×100 mm とし、シミュレーションの工具条件は実験での条件に準じた。

Fig. 4 はダイス幅 12 mm の場合の結果である。この場合は成形条件が厳しいので、表皮鋼板板厚に差をつけても折れ曲がり完全に消去できない。しかし、実験結果と計算結果は良い一致を示しており、曲げ外側が薄い鋼板となるようにすれば効果が大きいことも正確にシ

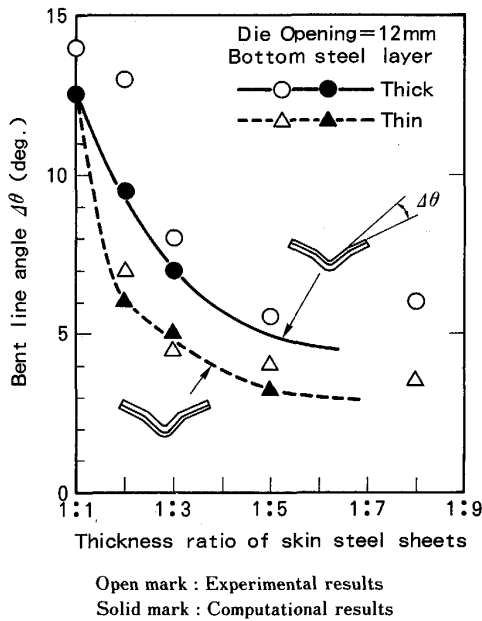


Fig. 4. Effect of the thickness ratio of inner and outer steel sheets on the bent line angle θ .

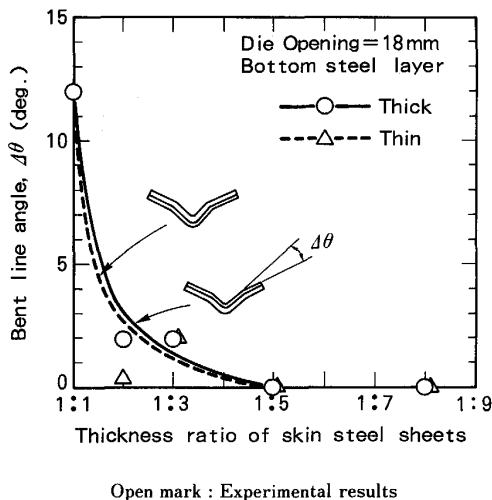


Fig. 5. Effect of the thickness ratio of inner and outer steel sheets on the bent line angle θ .

ミュレートできている。この差厚効果に方向性があるのは、薄い鋼板が曲げ外側にくると、外側鋼板の伸びによって樹脂層の剪断変形が減少するのに対して、薄い鋼板が曲げ内側にくると、鋼板の圧縮変形が起こりにくいため、樹脂層の剪断変形がそれほど減少しないことによると考えられる。Fig. 5はダイス幅18mmの実験結果であるが、この場合は板厚比が1:3~1:5の間で折れ曲がり角度がゼロになることがわかる。また、ダイス幅25mmの場合は、ここでは結果を図示していないが、成形条件が緩いので1:1の場合でもさほど折れ曲がりを生じなかった。

今回の成形条件は、折れ曲がり不良を生じさせるため

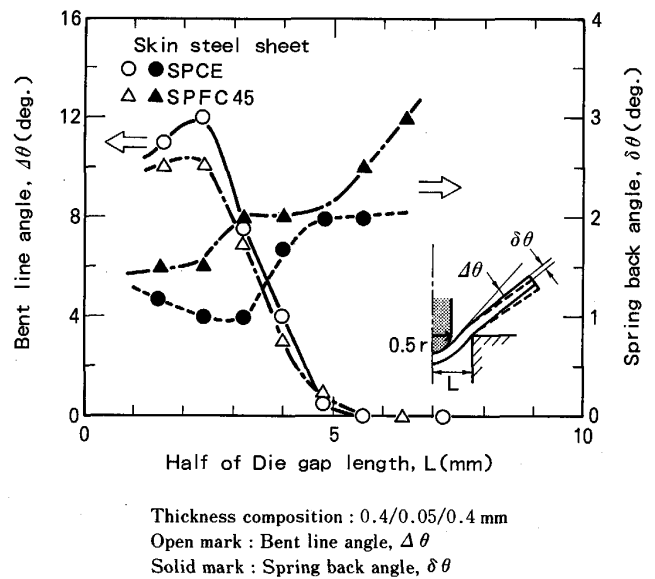


Fig. 6. Effect of the kind of skin steel sheets and die opening on the bent line angle θ and spring back angle $\delta\theta$ obtained from calculation.

一般に推奨されている「板厚の8倍」のダイス幅より狭い値を使用した。しかし、樹脂複合鋼板の板厚が1.6mm、0.8mmと薄くなると、成形不良の生じる条件はまた違った状態となる。Fig. 6は、0.4mmの厚さの軟質鋼板と高強度鋼板を高温用制振鋼板の表皮に用いたとき、90°曲げで生じる折れ曲がり角度とスプリングバック角度を計算で求めた結果を示している。この図より、この板厚では折れ曲がり不良は板厚の10倍のダイス幅でようやく解消することがわかる。よって、樹脂複合鋼板の全厚が薄い場合には、通常の加工法にダイス幅の拡大や表皮鋼板の差厚化などを、折れ曲がり対策として加える必要がある。

3.4 曲げ成形挙動に対する鋼板材質の影響

Fig. 7は、3.3節で計算に用いた1:1の板厚構成で、表皮鋼板の降伏強度の組合せを変えた時の、折れ曲がりに対する異材質化の効果をシミュレートした結果を示している。片側の表皮鋼板のYPを200MPa一定とし、もう一方の表皮鋼板のYPを200~360MPaまで変化させ、横軸には両表皮鋼板の降伏応力の比を、縦軸には折れ曲がり角度をとった。このシミュレーション結果より、異材質化による効果はダイス側表皮鋼板の強度比を増加させた場合に認められるものの、ポンチ側表皮鋼板の強度比を増加した場合は逆に形状が悪くなることがわかる。異材質化による対策は表皮鋼板の差厚化と同じ効果を狙ったものであるが、結果的にはポンチ側表皮鋼板を厚くする差厚の対策法とは逆の、ポンチ側軟質化が有効となった。その原因及び機構については現在考察中で

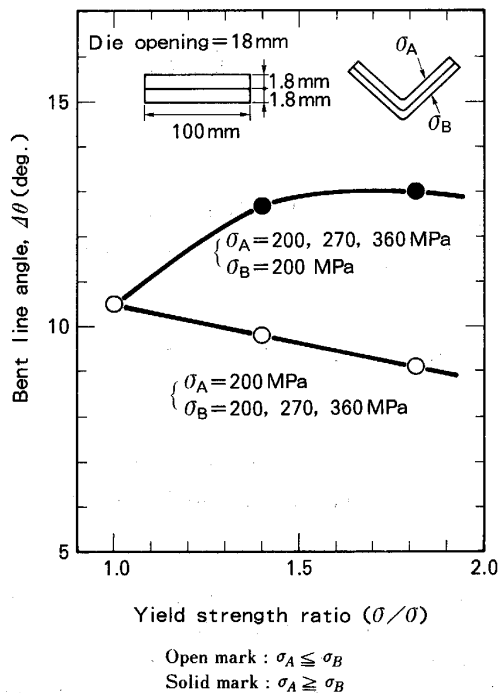


Fig. 7. Effect of the yield strength ratio of inner and outer steel sheets on the bent line angle θ (computational results).

ある。

以上の結果より、曲げ成形不良対策は芯材樹脂の改善とともに、二枚の表皮鋼板の板厚構成比と鋼板材質の組合せが有効であることがわかった。ただし、最適な表皮鋼板の組合せは、樹脂の種類や厚さ、工具条件で異なってくるので、実際の材料の板厚構成や加工方法など個々の事例に対しては、弾塑性有限要素法シミュレーションによって曲げ成形不良状態および予防策を予測する方が効率的であろう。

4. 結 言

弾塑性有限要素法シミュレーションを樹脂複合鋼板の

曲げ成形に適用し、制振鋼板から軽量ラミネート鋼板まで、樹脂の種類・板厚構成を変えても複合鋼板特有の成形不良をかなり精度良くシミュレートできることを確認した。これにより、単一鋼板はもとより、板厚方向に極端な材質変化を有する材料の曲げ成形に至るまで、成形条件に沿った曲げ成形シミュレーションが可能となった。また、このプログラムを用いた計算機実験により、曲げ成形性の向上に有効な以下の材料設計指針を得た。

(1) 端部ずれの抑制や形状性の向上には、樹脂の降伏強度もしくは塑性係数の増大が有効である。ただし、これら形状性の向上策は曲げ中心部の板厚減少を伴うので、割れに対する注意が必要である。

(2) 表皮鋼板の板厚構成比を大きくすることにより、折れ曲がりを防ぐことが可能である。また、ダイス側を薄い方の表皮鋼板として成形すると、差厚の効果がより大きくなる。

(3) 表皮鋼板の異材質化は、ダイス側表皮鋼板の強度比を増加させた場合に認められるものの、差厚化やダイス幅拡張による効果に比べてわずかである。

文 献

- 1) 由田征二：塑性と加工，26 (1985)，p. 394
- 2) 伊藤耿一，佐川武俊：第 38 回塑加連講論 (1987)，p. 221
- 3) 広瀬洋三，小嶋正康：第 38 回塑加連講論 (1987)，p. 397
- 4) 柚島善之：素形材，27 (1986) 11，p. 10
- 5) 山田嘉昭，横内康人：有限要素法による弾塑性解析プログラミング EPIC-IV 解説 (1981) [培風館]
- 6) 牧野内昭武：塑性と加工，27 (1986)，p. 301
- 7) R. Hill 著，鷺津久一郎他訳：塑性学 (1954)，p. 283 [培風館]
- 8) 牧野内昭武，小川秀夫：第 37 回塑加連講論 (1986)，p. 387
- 9) 牧野内昭武，吉田 茂，橋本浩二，小川秀夫，平林義啓，真下義雄：第 38 回塑加連講論 (1987)，p. 217
- 10) 牧野内昭武：塑性と加工，14 (1973)，p. 110
- 11) 由田征二，中村清治：鉄と鋼，72 (1986)，S1619，S1620