

(解説)

# 超高強度鋼板の成形荷重低減コンセプト

林田康宏\*<sup>1</sup>・山本伸一\*<sup>1</sup>・岩本翔太\*<sup>2</sup>

## Reduction of Press Load for Ultra-High Strength Steel Sheet

Yasuhiro HAYASHIDA・Shinichi YAMAMOTO・Shota IWAMOTO

### 要旨

自動車の車体骨格部品の高強度化に伴い、成形荷重増加が問題となりつつある。今般、センターピラーアウターを想定し、下死点近傍での成形荷重増加を抑制する工法を検討した。

センターピラーアウター上部を模擬した小型金型を用い、実験と数値解析による上記工法の効果検証を行った。上下金型の間隙を適切に制御すれば、成形荷重を低減でき、しわや寸法精度への影響も軽減できることが判った。

### Abstract

The increase in the strength of automotive body frame parts has been raising concerns about increased press load. A recent study, assuming a center-pillar outer panel, includes a method for suppressing the increase in press load near the bottom dead center. Experimental and numerical verifications have been conducted using small dies simulating the upper part of a center-pillar outer panel to clarify the effectiveness of the above method. It has been found that appropriate control of the clearance between the upper and lower dies can reduce the press load and also mitigate the issues concerning wrinkles and dimensional accuracy.

### 検索用キーワード

超高強度鋼板, プレス成形, 荷重, クリアランス, しわ, 寸法精度

まえがき = 近年の環境や安心・安全な社会への意識の高まりにより、自動車車体にはさらなる軽量化と安全性が求められている<sup>1),2)</sup>。車体骨格部品への引張強さ980 MPaを越える超高強度鋼板、いわゆる超ハイテン鋼板の適用拡大はその有力な対策のひとつである<sup>3),4)</sup>。

いっぽう、自動車骨格向け超ハイテン鋼板の実用化において、割れ・しわ・寸法精度悪化など成形不良が課題となるだけでなく、高い素板強度により成形荷重が増加するため、成形中の金型損傷や金型変形も無視できなくなる<sup>5),6)</sup>。また、成形荷重増加はプレス機械に負担をかけるため、プレス機のサイズや設置面積の拡大、高剛性機種への変更を招くこともあり得る<sup>7)</sup>。

プレス中の成形荷重は、素板強度および成形にとまない発生する副次的な力（摩擦力など）に依存する。これまでに、成形性向上効果だけでなく、温間・熱間成形による変形抵抗低下<sup>8)</sup>やプレスモーション制御による潤滑油再流入<sup>9)</sup>などに起因する荷重低減効果も報告されているが、それぞれ専用の設備導入が必要となる。

本報告では、超ハイテン鋼板の車体骨格部品へ典型的な適用部品である、センターピラーアウターの一部を対象に、上下金型の適切なクリアランス制御により下死点近傍での成形荷重増加を抑制可能な工法コンセプトを見出し、小型模擬金型を用いた実験や数値解析で効果を検証した結果を述べる。

## 1. 超ハイテン鋼板成形の荷重増加メカニズムと低減コンセプト

### 1.1 荷重増加のメカニズム

センターピラーアウターは自動車車体の側面衝突安全性に対して要となる部品であり、冷延超ハイテン鋼板やホットスタンピング用鋼板が広く適用されている。超ハイテン鋼板のプレス成形荷重の特徴を調査するため、センターピラーアウターの典型的なモデル形状を対象に、ドロー（絞り）工程の成形荷重の数値解析を行った。超ハイテン鋼板の成形では寸法精度確保を目的に、下死点近傍で素板に張力や決め押しを追加する事例<sup>10)</sup>もあるが、上記解析は加工力を追加しない前提で実施した。

センターピラー上部に1180 MPa級超ハイテン鋼板を適用した成形解析の結果、図1に示すように、下死点まで残り1 mmの時点から成形荷重が指数関数的に急増することが確認された。ここで、図2に示すように成形品を複数の領域に分割して荷重分布を調査すると、荷重急増期にはセンターピラーアウターのT字部（とくに上部A）に顕著なしわが発生するとともに、分担荷重が大きく増加していた。一般に、図中A領域のようなT字成形の天板部には、材料余りに起因した成形しわが発生しやすい。下死点近傍で上下型間の間隙が小さくなるほど、上記しわを形成する材料が受ける面内圧縮力は大

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 ソリューション技術センター \*<sup>2</sup> 技術開発本部 ソリューション技術センター（現 人事労政部）

きくなり、この力はしわ高さを増す方向に働く<sup>11)</sup>。したがって、しわを潰しながら下死点まで成形するには、この面内圧縮力の影響を上回る大きな面圧が必要になる。

## 1.2 成形荷重低減のコンセプト

通常、プレス成形において所望の部品形状を得るためには、下死点まで成形する必要がある。いっぽう、下死点近傍における上記成形荷重の急増は、プレスに過大負荷をかけるとともに、場合によってはプレス能力を超過する可能性もある。そこで、成形領域をT字領域とその他の領域に分割し、ドロー工程では荷重急増の主領域である前者を下死点まで成形し、その後のフォーム（曲げ）工程では後者を下死点までリストライク成形し、大きな荷重発生タイミングを分散する2工程成形法を考案した。

図3に概要を示す。下型が分割され、各工程で特定の領域のみ完全に押下される。それ以外の領域では、下

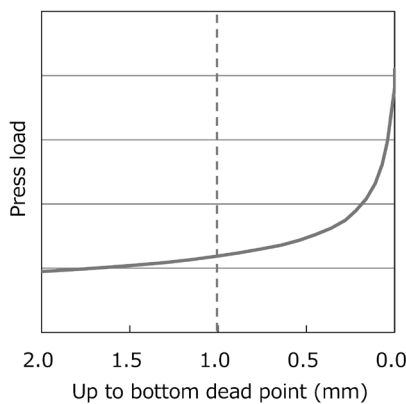


図1 プレス時の成形荷重曲線  
Fig.1 Press load curve in forming

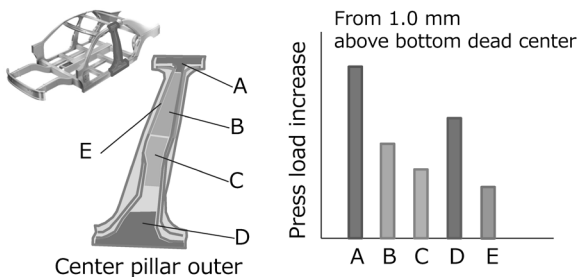


図2 成形各領域の荷重分担  
Fig.2 Load sharing in each area of the formed part

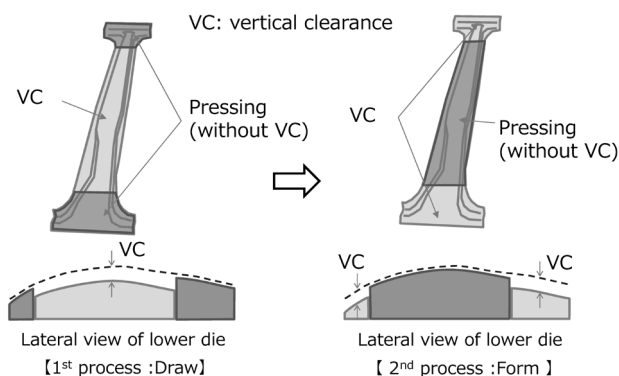


図3 荷重低減工程の概略図  
Fig.3 Schematic illustration of load reduction process

死点に対向する上下型がプレス方向に一定量の間隙（図中でVC: Vertical clearanceと表記）を保ち、完全に押下されない。図1が示唆するように、下死点近傍で上下型間隙を設けてプレス押下量を減少させると、T字部のしわ成長を促進させる面内圧縮力も減少する<sup>11)</sup>ので、押下に必要な面圧は間隙なしのときより減少する。いっぽう、上下型間隙が過剰になると、金型面による素板拘束が働かず、完全押下領域から間隙設定領域への材料流入などにより、成形しわが成長し、寸法精度が悪化するおそれがある。したがって、全体成形荷重の低減と成形不良の極小化を両立できる最適な上下型間隙の抽出が課題となる。

そこで、上下型間隙が荷重低減やしわ、寸法精度に及ぼす影響とメカニズムを、小型模擬金型を用いた実験や数値解析で調査した。

## 2. 実験方法および数値解析方法

図4に示すように、センターピラーアウトターの上部T字構造を模擬した小型（270 mm×210 mm）の試験金型を作製し、部分的に上下型間隙を設定することによる荷重低減効果および、しわ・寸法精度への影響を調査した。図中の破線位置で下型を①～④領域に分割し、金型底部に敷いたシムにより、特定金型を相対的に上昇/下降させて上下型間隙を調整した。このとき、間隙の影響を明確にするため、②領域の形状は下死点近傍で材料余りによる成形しわが発生しやすい形状とした。なお、④領域はブランクを保持するために常に押下した。

上記の小型試験金型を300トン級メカニカルプレスに組み込み、板厚1.4 mmの1180 MPa級鋼板を用いて、ドロー（1工程目、しわ押さえ力82 kN）、同じ金型でしわ押さえを外したフォーム（2工程目）の成形試験を行った。1-2工程間でトリミングは実施していない。図5に分割型の上下型間隙の設定領域と設定値を示す。1工程目でしわが発生しやすい②領域を先行して押下し、①、③領域に間隙を設けた。2工程目では領域を反転させ、①、③領域を完全に押下し、製品稜線を成形するいっぽうで、②領域には間隙を設けた。図中の表に示すように、各工程の間隙量を0.0 mm（最小、従来成形まま）から0.8 mmまで変化させた4ケースを実施した。条件の単純化を狙い、各ケースでの間隙量は両工程で同一とした。ダイセットとスライドの間に設置した4個のロードセルで金型全領域の荷重を測定し、成形品は3次元形状測定機でしわ形状および寸法精度を測定した。

上記実験と並行して、成形荷重低減のメカニズム調査

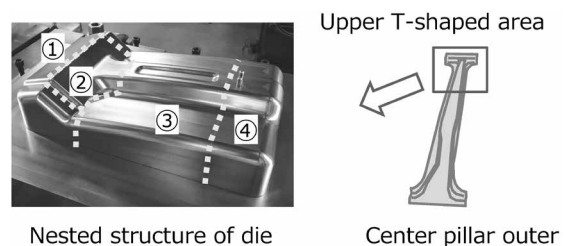
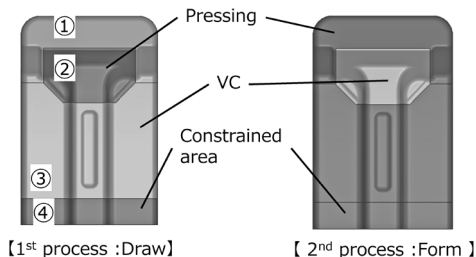


図4 小型試験金型  
Fig.4 Small test die set

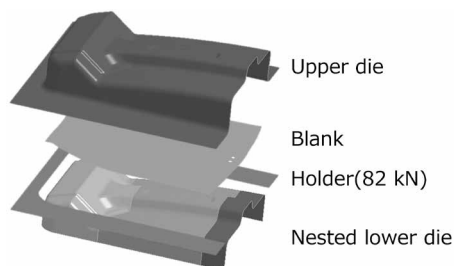
のため、有限要素法による数値解析 (FEA) を行った。小型試験金型を **図 6** に示すように解析モデル化し、メカニズム検討用に比較的大きな間隙量 (両工程とも 1.0 mm) を設定したケースを追加した。



Die clearance in each process (mm)

Test No.	Draw(1 <sup>st</sup> ) Region①③	Form(2 <sup>nd</sup> ) Region②
1	0.0	0.0
2	0.2	0.2
3	0.5	0.5
4	0.8	0.8

**図 5** 上下型間隙の設定条件  
**Fig.5** Conditions for upper-lower die clearance



**図 6** 小型金型の有限要素解析モデル  
**Fig.6** FE-analysis model for small test die set

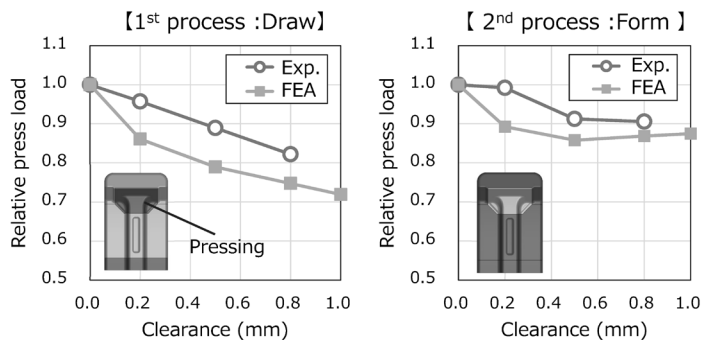
### 3. 実験結果および数値解析結果

**図 7** に各工程で上下型間隙を設けたときの成形荷重の低減効果を、実験および数値解析で比較した結果を示す。荷重は間隙なしの条件に対する相対的な値で示した。各工程とも、上下型間隙が大きくなるほど、しわ潰し反力が弱まり、例えば 0.8 mm の間隙設定で 1 工程目の成形荷重実験値が 18%、2 工程目が同じく 9% 低減している。

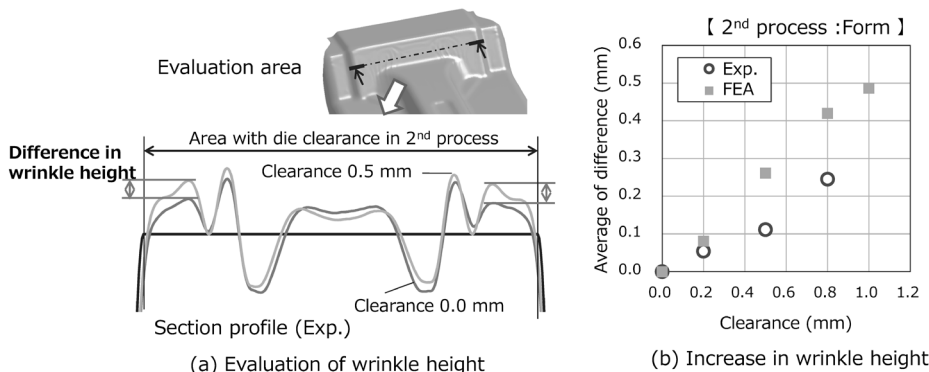
いっぽう、上下型間隙付与により懸念された成形しわや寸法精度への影響を実験および数値解析結果をもとに調査した。

しわ高さの評価は成形荷重の主要発生域であり、2 工程目で上下型間隙を設ける領域を対象とした。**図 8 (a)** に、小型試験の 2 工程目除荷後の当該領域を横断する線分上の成形品プロファイルの比較結果を示す。間隙を設定すると、中央部には大きな形状変化はないが、評価域両端で間隙なしとの乖離量が大きくなり、しわが高くなる傾向を示している。今回評価したすべてのケースで同様の傾向が得られた。**図 8 (b)** に、上記の乖離量が大きくなる評価域両端の平均と間隙量との関係を示す。上下型間隙が大きくなると、2 工程目除荷後のしわ高さは徐々に大きくなるが、例えば 0.5 mm の間隙量でしわ高さ実測値が 0.11 mm、0.8 mm の間隙量で同じく 0.25 mm と、比較的低位のしわ高さ増加にとどまっていることがわかる。

小型試験において、上下型間隙量 0.5 mm および 0.8 mm の条件で成形した 2 工程目除荷後の成形品の 3 次元形状測定結果を **図 9** に示す。間隙なしの成形品の



**図 7** 上下型間隙による荷重低減  
**Fig.7** Load reduction by upper-lower die clearance



**図 8** しわ高さの比較結果  
**Fig.8** Comparison of wrinkle height



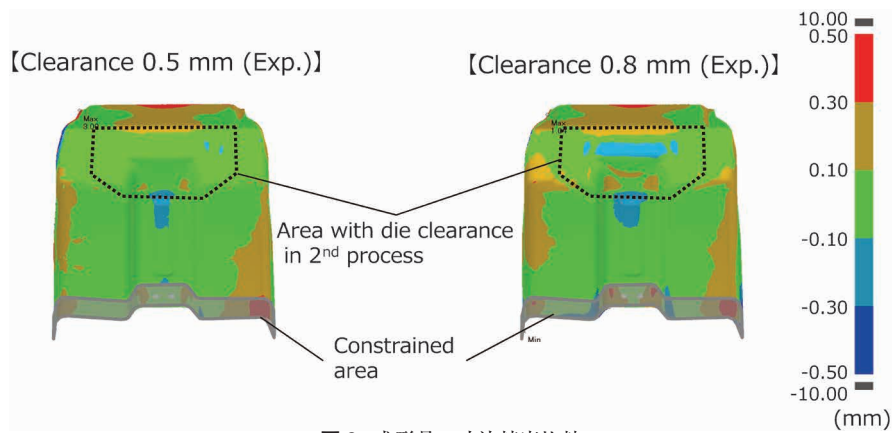


図9 成形品の寸法精度比較  
Fig.9 Comparison of part dimensional accuracy

それにベストフィットし、乖離量の大小を寸法精度の指標として比較した結果である。図中で面の外側法線方向を正の値として表示している。実験において、図示しなかった間隙量0.2 mmのケースも含め、乖離量は間隙の増加とともに拡大傾向にあるが概ね±0.3 mm以下であり、乖離量の極端な悪化は見られなかった。また、図示しないが数値解析においても実験と同様の傾向を示した。ただし、乖離量の絶対値は若干増加した。

#### 4. 考察

前章で述べた実験と数値解析により、1工程目で成形しわの発生領域を中心に押下し、2工程目で当該領域に上下型間隙を設け、その他の領域を押下加工する工法に、最大成形荷重を低減する一定の効果があることがわかった。これは図2で示したように、成形荷重は金型稜線だけでなく平面が分担する割合も大きいと考えられる。また、実験結果と数値解析結果を比較すると、同じ上下型間隙での荷重低減効果は実験結果のほうが小さくなった反面、評価領域のしわ高さは低くなった。このことから、数値解析結果には実験結果と比べて定量的な差異が残るが、定性的には傾向を良く表しており、現象解明や考察に活用できる。

本章では、本検討工法の1工程目で成形した領域（T字部）が、2工程目において上下型間隙を設けても、周辺領域の成形から大きく影響を受けない理由について、数値解析結果をもとに考察する。図8（b）に示すように、仮に上下型間隙量を0.0～1.0 mmの範囲で変化させたとき、2工程目除荷後においてしわ評価領域（図9の破線で囲った領域）のしわ高さは間隙量とともに増加し、1.0 mmのときに最大値を示す。いっぽう、間隙量1.0 mmの成形品全体でみると（図10参照）、本来しわが出やすいT字部（評価領域）内の乖離量は上下型間隙に比べて比較的小さい。

この現象を詳細に検討するため、当該部の1-2工程間の形状を比較した。1章で述べたように、過剰な間隙は金型面による素板拘束を弱め、間隙設定領域に成形しわを促進する材料流入や面内圧縮力の増加をもたらす可能性がある。図11に間隙量1.0 mmのときの、評価領域近

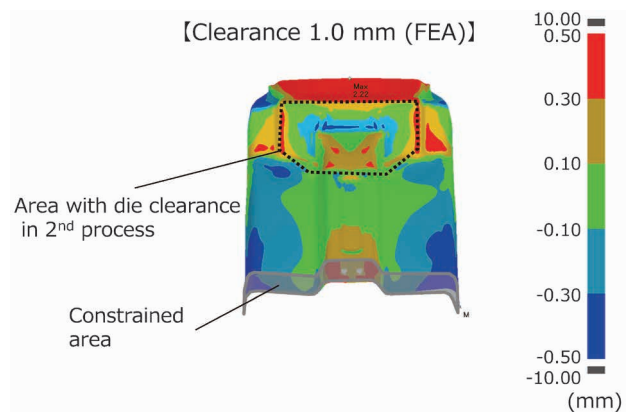


図10 間隙1.0 mmのときの寸法精度解析結果  
Fig.10 Results of dimensional accuracy analysis with 1.0 mm die clearance

傍を含む各工程除荷後の形状計算値を比較した結果を示す。図から2工程目において、評価領域周辺は1-2工程間の上下型間隙の差に応じて変形しているが、評価領域では1.0 mmの上下型間隙量により成形タイミングが遅れ、先行する評価領域周辺の材料余りを吸収しているにもかかわらず、評価領域両端を除いて面外への大きな形状変化は発生していない。

そこで、2工程目における、評価領域端部～周辺部の成形品幅方向メタルフローを調査した。間隙量なしおよび1.0 mmのときの解析結果を図12に示す。成形品中央へ向かうメタルフローを負の値で表示した。図から上下型間隙がある場合、2工程目の成形にともない、評価領域周辺部ではT字部方向にメタルフローが発生するが、T字部は金型面による材料拘束が強く、1.0 mmの間隙量でも評価領域内部に向かうメタルフローがほぼ発生せず、周辺部の成形の影響をほとんど受けていないことがわかる。したがって、図8に示すように、この領域では2工程目で間隙を設定してもしわ高さの増加がおきにくく、あらたなしわ潰し荷重や寸法精度の悪化も発生しにくい。

すなわち、本検討の条件では図7、図8に示すように0.5～0.8 mmの上下型間隙量を設定すれば、成形荷重の低減と成形不良の極小化の両立が可能と考えられる。

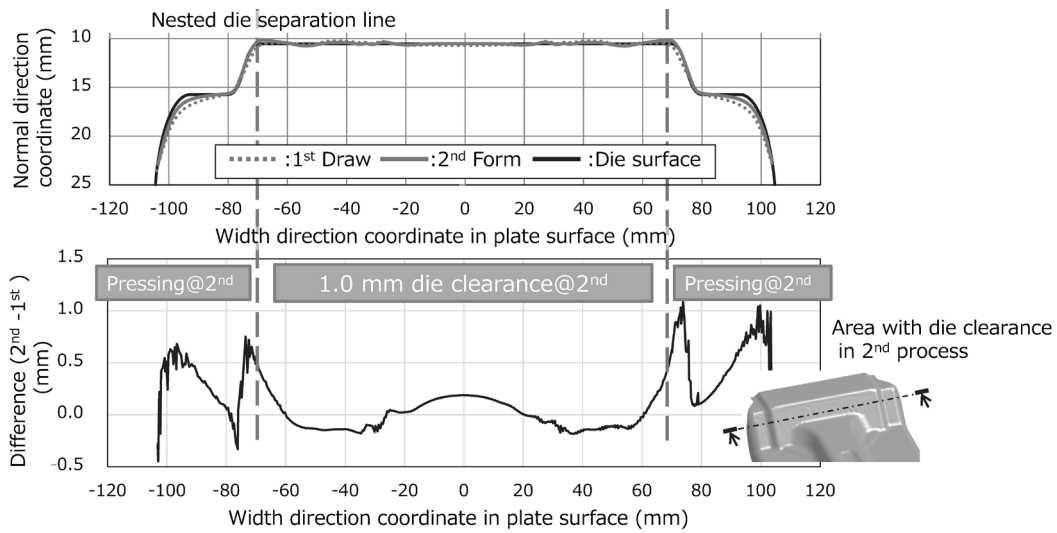


図11 成形品の寸法精度比較  
Fig.11 Comparison of part dimensional accuracy

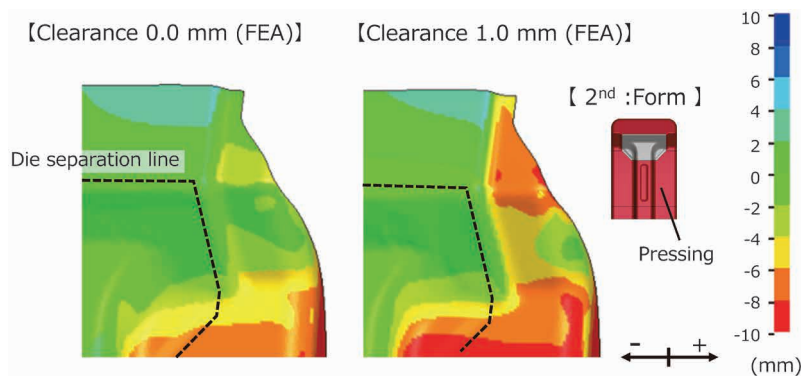


図12 評価領域周辺部の幅方向メタルフロー  
Fig.12 Metal flow analysis in width direction around evaluation area

むすび=本報告では、センターピラーアウターの上部を対象に、成形荷重急増の主要因を分析した結果にもとづき荷重発生タイミングを分散させることで、成形荷重を低減可能な2工程成形法のコンセプトを提案した。さらに、小型金型試験と数値解析で上記検討工法の効果を検証した。その結果、各工程で適切な上下型間隙を設定しつつ、1工程目で金型面による材料拘束が強く、荷重急増の主要因となるしわ潰し領域を下死点まで成形し、2工程目でその他の領域を下死点まで交互に成形することで、成形荷重抑制と成形不良極小化の両立が可能と結論づけた。本検討の実験条件において、通常成形品（間隙量ゼロ）からのしわ高さ・形状乖離量を0.3 mm以内にするには、上下型間隙量を0.8 mm以下にすることで達成でき、このときの荷重低減効果は1工程目が18%、2工程目が9%であった。

住みよい環境や安心・安全な社会を目指し、自動車車体の軽量化と安全性への要求は引き続き高いレベルにある。その有力な対策である超ハイテン鋼板を使いこなすために、本報告が工法検討の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 梶原 桂. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.13-16.
- 2) 内藤純也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.53-57.
- 3) 村上俊夫. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.28-32.
- 4) 内海幸博ほか. R&D神戸製鋼技報. 2017, Vol.66, No.2, p.3-7.
- 5) 赤澤浩一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2024, Vol.72, No.2, p.68-73.
- 6) 黒瀬雅詞. ぶらすとす. 2020, Vol.3, No.27, p.146-150.
- 7) 鈴木利彦. プレス技術. 2015, Vol.53, No.5, p.48-51.
- 8) 小嶋啓達. 塑性と加工. 2005, Vol.46, No.534, p.595-599.
- 9) 玉井良清ほか. 塑性と加工. 2010, Vol.51, No.592, p.450-454.
- 10) 吉田 亨ほか. 新日鉄技報. 2003, No.378, p.25-29.
- 11) 中川威雄ほか. 薄板のプレス加工. 実教出版, 1977, p.109-110.