研究論文

決め押し加工シミュレーション技術の開発

櫻井　貴文*　片山　聡*　田村　信*

Development of Computer Simulation Technology for Bottoming

SAKURAI Takafumi*, KATAYAMA Satoshi* and TAMURA Makoto*

抄　　録

シェル要素を用いた決め押し加工シミュレーションの精度向上を目的に，LS-DYNA の新型シェル要素とリスタート機能を用いたシミュレーション技術を開発した。新型および従来型シェル要素定式の切り替えを用いた V 曲げおよびハット曲げの決め押し加工シミュレーションを行い，開発したシミュレーション技術の有効性を確認した。また，曲げ試験の結果との比較を行い，実際のプレス加工に適用可能であることを示した。

1.　緒　　言

プレス成形におけるスプリングバックを抑制する加工技術の一つとして，決め押し加工が用いられている[1),2)]。これをプレス成形シミュレーションで計算しようとした場合，一般的に用いられるシェル要素では板厚方向の応力を考慮できないため，決め押し加工の効果を予測することはできない。また，シェル要素をソリッド要素に置き換えて計算した事例もあるが，計算時間が膨大となるほか，要素細分化や材料モデルの汎用性にも問題を抱えているため，現実的な手法ではない[3)]。

2009年よりLSTC社製動的陽解法有限要素法ソフトウェアLS-DYNAに搭載されたシェル要素の新型要素定式（ELFORM=26）は板厚方向の応力を考慮できるものの，面内方向応力への応答が過敏であり，しわの予測精度が著しく低いという課題を抱えている[4)]。

そこで本研究ではLS-DYNAのリスタート機能を用いた要素定式の切り替えにより，シェル要素にて精度良く決め押し効果を予測できるシミュレーション手法を開発し，実験との比較検討を行った。

＊　研究開発センター

2.　決め押し加工シミュレーション

2.1　シミュレーションの流れ

決め押し加工シミュレーションの流れを図 1 に示す。実際の加工では曲げ・決め押し・スプリングバックが一連の工程（現象）となっているが，シミュレーションではそれぞれの工程（現象）ごとに一旦シミュレーションを終了させる。決め押し加工の前後で要素定式を変更し，ソフトウェアのリスタート機能を用いて前工程を引き継いで計算を行い，一連の決め押し加工シミュレーションとする。

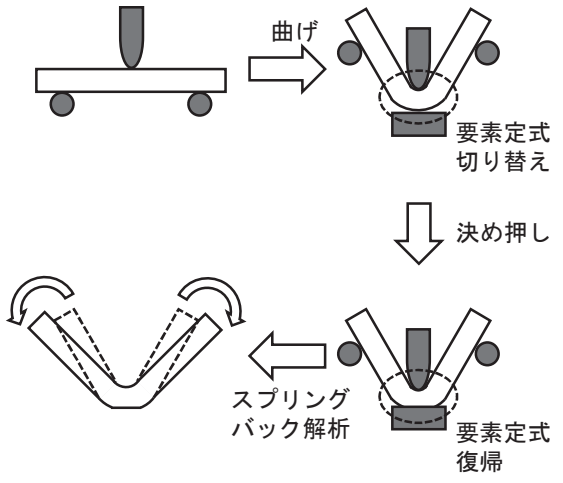


図 1　シミュレーションの流れ

本研究では，プリポストソフトウェアとして LSTC 社製 LS-PrePost 4.1 を，一連の決め押し加工シミュレーションソフトウェアとして LSTC 社製動的陽解法有限要素法ソフトウェア LS-DYNA を用いた。

2.2　有限要素モデルと要素定式

3 次元モデル（シェル）と，比較のため 2 次元モデル（平面ひずみ）でシミュレーションを行った。3 次元モデル（シェル）については，ELFORM=16（完全積分要素，以下 F16）と ELFORM=26（板厚方向の応力を考慮できる完全積分要素，以下 F26）の 2 種類の要素定式を用いて計算を行った。F16 は計算が高速であるが，板厚方向の応力を考慮できないため板を潰すような現象を扱うことができない。一方，F26 は板厚方向の応力を考慮できるため板を潰すような現象を扱うことができるが，しわの予測精度が著しく低いことと，F16 に比べて計算速度が遅いという短所がある。

2.3　材料モデル

金型はすべて剛体とし，試験片は異方性を考慮しない等方性弾塑性体とした。試験片は，SPCC（公称板厚 1.0mm）および SUS304（公称板厚 1.0mm）の 2 種類を用いた。これらの材料について，比較実験で使用する板材を圧延方向に対して 0° の方向に JIS Z 2241 による 13B 号試験片を採取し，（株）島津製作所製万能材料試験機 AG-250kNI を用いて引張試験を行った。この結果を基に，材料特性を表 1 のように設定した。

2.4　接触モデル

接触面はすべて面－面型接触とし，静摩擦係数および動摩擦係数ともに 0.15 とした。他はソフトウェアのデフォルトとし，特殊なオプションは加えていない。

2.5　計算方法

2 次元モデルと 3 次元モデルそれぞれのシミュレーション方法を図 2 に示す。一般的なシミュレーションでは計算途中で要素定式を変更しないが，本研究では計算途中で要素定式の変更

表 1　材料特性

	SPCC	SUS304
質量密度　(kg/m^3)	7850	7850
ヤング率　(GPa)	200	200
ポアソン比	0.3	0.3
降伏応力　(MPa)	260	320
接線係数　(MPa)	680	1200

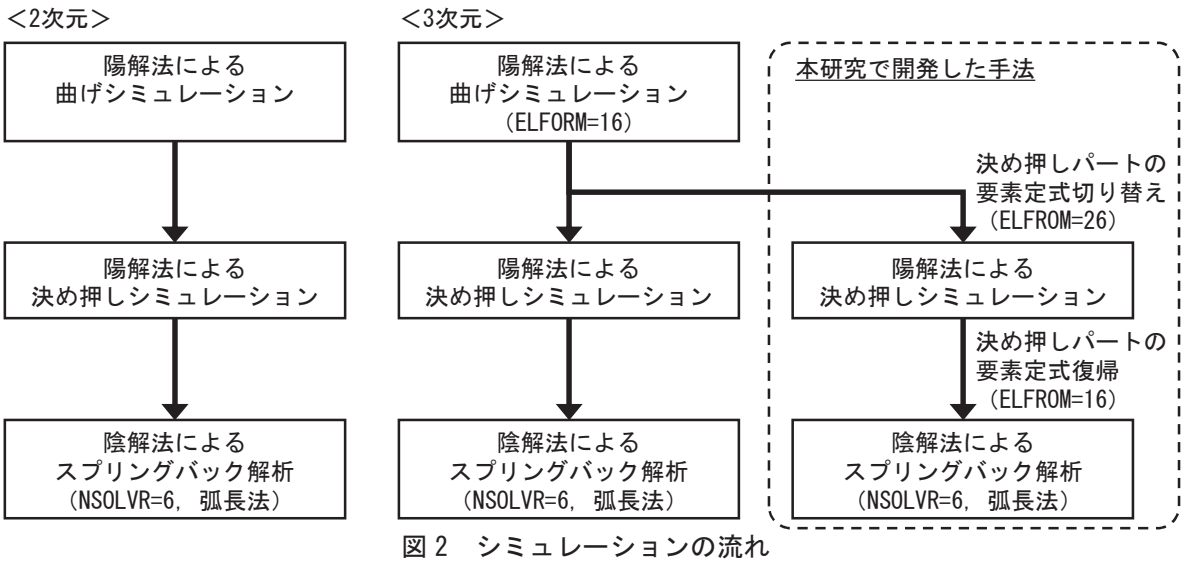


図 2　シミュレーションの流れ

と復帰を行う。まず，第 1 工程として試験片の曲げシミュレーションを行う。第 1 工程終了時に出力されるリスタートファイルを引き継いだうえで要素定式を F26 に変更し，第 2 工程の決め押し加工シミュレーションを行う。第 2 工程終了時には，出力されるリスタートファイルをファイルを引き継いだうえで要素定式を F16 に復帰し，スプリングバック解析を行う。この手法を用いることにより，一般的には相反する高速性と計算精度を両立させることができる。V 曲げの決め押し加工シミュレーションについて，F16 の計算時間を 1 とした場合の各モデルの計算速度比を図 3 に示す（値が小さいほど計算速度が速い）。

3. 曲げ

3.1 V 曲げシミュレーション

2 次元モデルの計算モデルを図 4 に，3 次元モデルの計算モデルを図 5 に示す。形状の対称性を考慮し，2 次元モデルは 1/2 モデルとし，3 次元モデルは 1/4 モデルとした。試験片（フルモデル寸法）は，幅 20mm×長さ 100mm×厚さ 1.0mm の一様形状とした。なお，3 次元モデルについて，決め押し加工により応力がかかる部分は，ほかの部分よりもメッシュサイズを小さくした。

図 6 に決め押し工程でのパンチストロークと板厚の比較を示す。2 次元モデルはパンチストロークと板厚が近い値を示しており，板厚減少が適切に計算されている。一方で，3 次元モデ

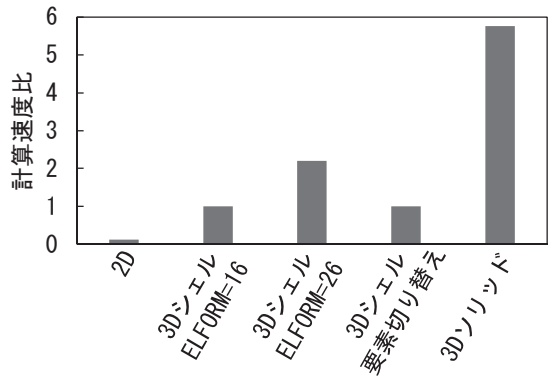


図 3　計算速度の比較

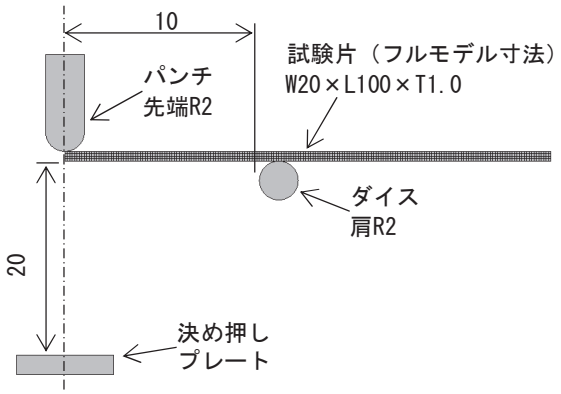


図 4　計算モデル（2 次元）

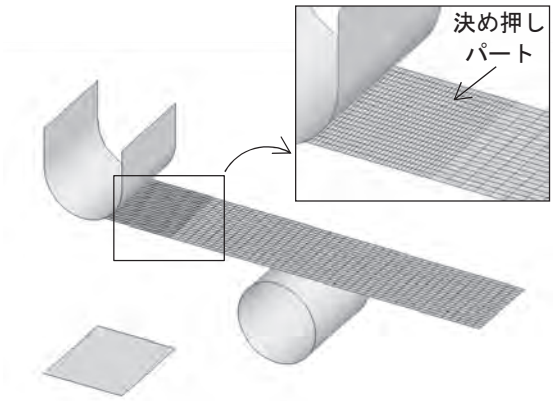
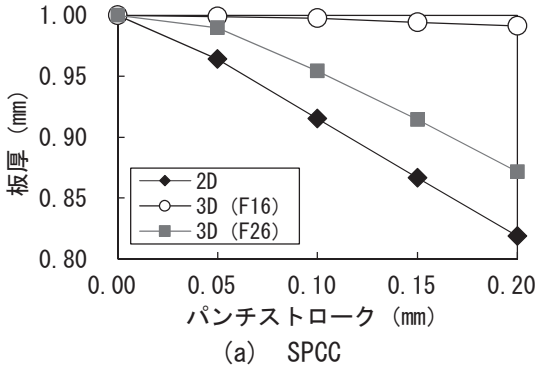
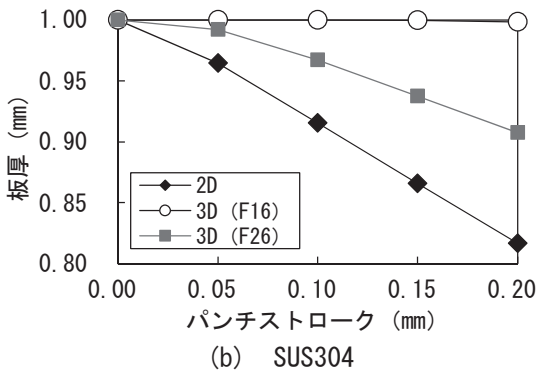


図 5　計算モデル（3 次元）



(a)　SPCC



(b)　SUS304

図 6　パンチストロークと板厚の比較

ル（F16）はパンチストロークが大きくなっても板厚の変化は微小であり，板厚減少が適切に計算されていない。3 次元モデル（F26）はストロークの半分程度の板厚変化となっている。

図 7 にパンチストロークと曲げ角度の比較を示す。2 次元モデルおよび 3 次元モデル（F26）はパンチストロークが大きくなると曲げ角度が狭くなっており，決め押し加工の効果が計算されている。両者の間には差異が見られるが，板厚減少量（＝決め押し加工量）が異なるためと考えられる。一方で，3 次元モデル（F16）は曲げ角度が狭くなっておらず，決め押し加工を適切に計算できていない。

3.2　V 曲げ実験

V 曲げ実験について，図 8 に実験の様子と試験後の試験片を示す。実験ジグは計算モデルと同じ寸法で製作し，万能材料試験機に取り付けて実験を行った。

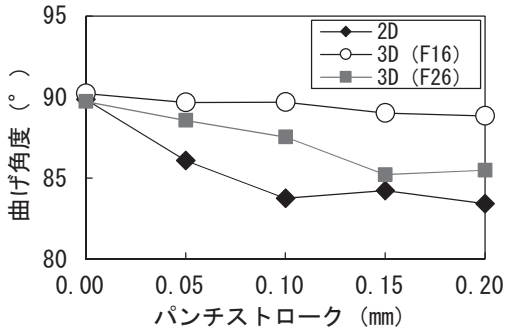
3.3　結果の比較

図 9 に決め押し加工シミュレーションおよび実験における板厚減少量と曲げ角度の比較を示す。3 次元モデル（F16）は板厚減少が計算されていないため，比較対象から除いた。3 次元モデル（F26）で計算された曲げ角度は 2 次元モデルや実験値と近い値となっている（最大誤差 0.7°）。このことから，3 次元モデル（F26）は決め押し加工シミュレーションに適用できると考えられる。

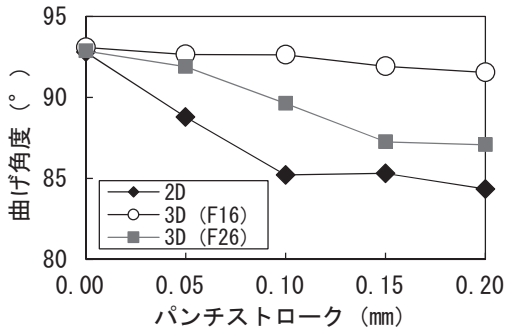
4.　ハット曲げ

4.1　ハット曲げシミュレーション

2 次元モデルの計算モデルを図 10 に，3 次元モデルの計算モデルを図 11 に示す。形状の対称性を考慮し，2 次元モデルは 1/2 モデルとし，3 次元モデルは 1/4 モデルとした。試験片（フルモデル寸法）は，幅 20mm×長さ 100mm×厚さ 1.0mm の一様形状とした。板押さえは一定のすきま量（0.1mm）を与え，試験片に張力

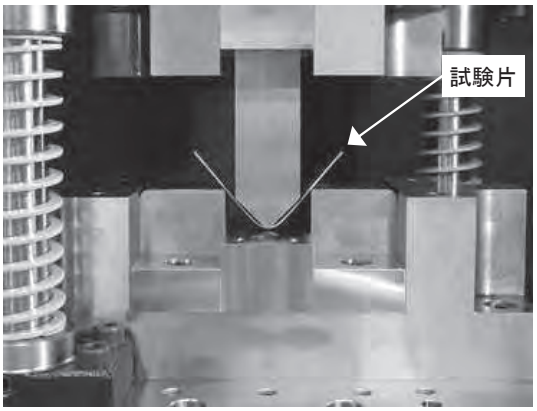


(a)　SPCC

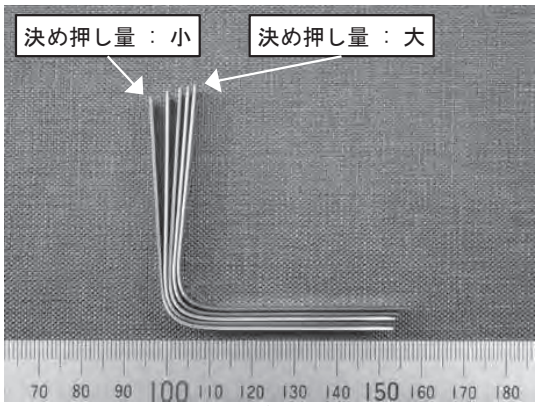


(b)　SUS304

図 7　パンチストロークと曲げ角度の比較

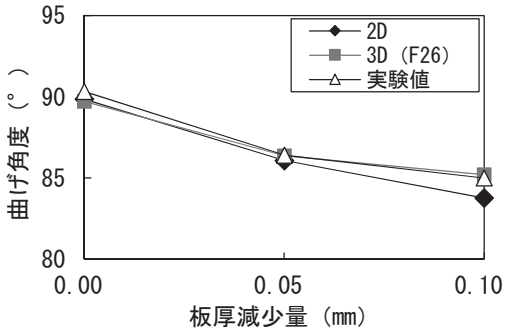


(a)V 曲げ実験の様子

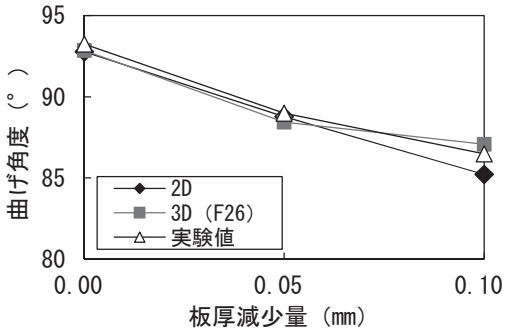


(b)　V 曲げ後の試験片

図 8　V 曲げ実験

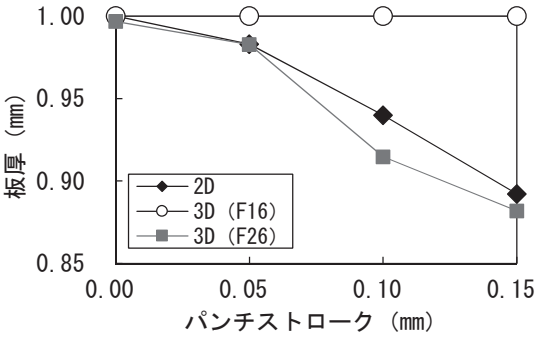


(a)　SPCC

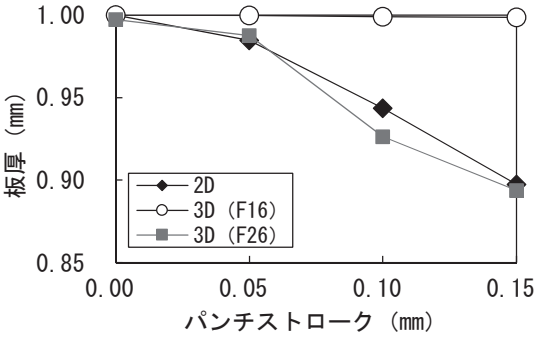


(b)　SUS304

図 9　板厚減少量と曲げ角度の比較



(a)　SPCC



(b)　SUS304

図 12　パンチストロークと板厚の比較

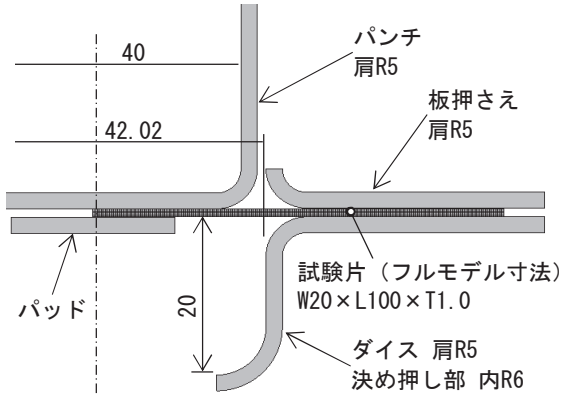


図 10　計算モデル（2 次元）

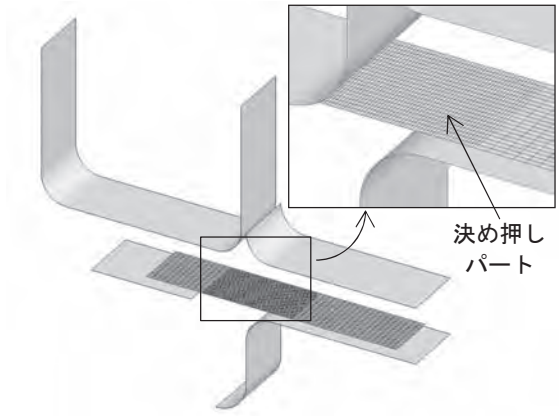
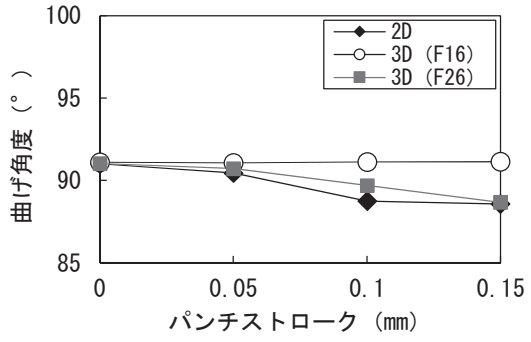


図 11　計算モデル（3 次元）

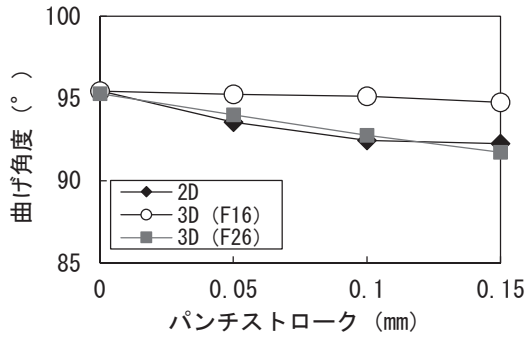
が生じないようにした。また，パッドの押し付け力は 200N とした。なお，3 次元モデルについて，決め押し加工により応力がかかる部分は，ほかの部分よりもメッシュサイズを小さくした。

図 12 に決め押し工程でのパンチストロークと板厚の比較を示す。2 次元モデルおよび 3D モデル（F26）はパンチストロークが大きくなるにつれて板厚が減少している。先述の V 曲げと比較すると，圧縮された材料が移動する場所（すきま）が少ないため要素の食い込みが生じており，板厚減少量はパンチストロークよりも小さな値となっている。一方で，3 次元モデル（F16）はパンチストロークが大きくなっても板厚の変化は微小であり，板厚減少が適切に計算されていない。

図 13 にパンチストロークと曲げ角度の比較を示す。2 次元モデルおよび 3 次元モデル（F26）はパンチストロークが大きくなると曲げ角度が狭くなっており，決め押し加工の効果が計算されている。両者の間には差異が見られ

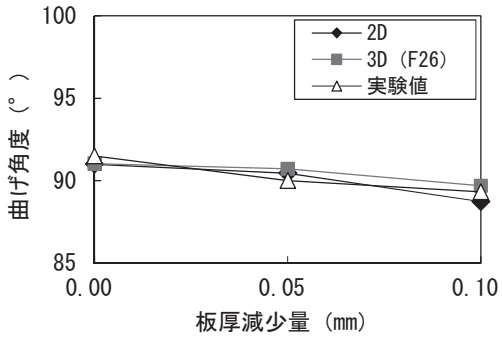


(a)　SPCC

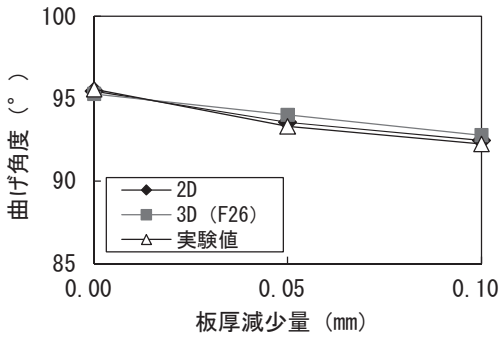


(b)　SUS304

図 13　パンチストロークと曲げ角度の比較

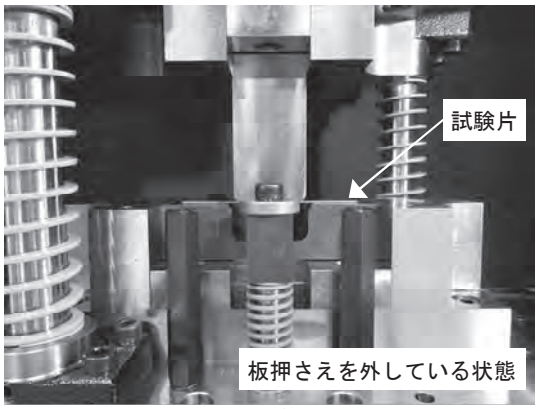


(a)　SPCC

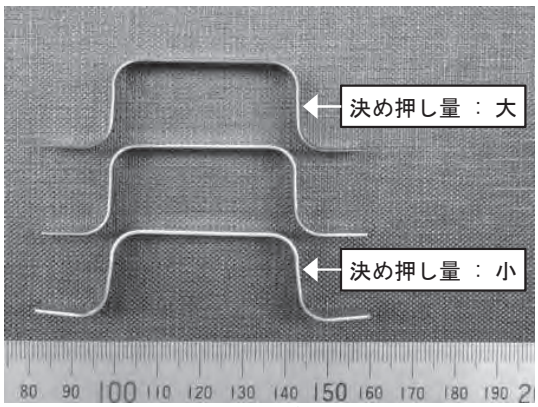


(b)　SUS304

図 15　パンチストロークと板厚の比較



(a)ハット曲げ実験の様子



(b)　ハット曲げ後の試験片

図 14　ハット曲げ実験

るが，板厚減少量（＝決め押し加工量）が異なるためと考えられる。一方で，3 次元モデル（F16）は曲げ角度が狭くなっておらず，決め押し加工を適切に計算できていない。

4.2　ハット曲げ実験

ハット曲げ実験について，図 14 に実験の様子と試験後の試験片を示す。実験ジグは計算モデルと同じ寸法で製作し，万能材料試験機に取り付けて実験を行った。

4.3　結果の比較

図 15 に決め押し加工シミュレーションおよび実験による板厚減少量と曲げ角度の比較を示す。3 次元モデル（F16）は板厚減少が計算されていないため，比較対象から除いた。3 次元モデル（F26）で計算された曲げ角度は 2 次元モデルや実験値と近い値となっている（最大誤差 0.5°）。このことから，3 次元モデル（F26）は決め押し加工シミュレーションに適用できると考えられる。

5. 結　　言

（1）LS-DYNA のリスタート機能を用い，要素定式の切り替えと復帰を行う決め押し加工シミュレーション技術を開発した。

（2）V 曲げの決め押し加工シミュレーションと実験を行い，開発したシミュレーション技術が 2 次元モデル（平面ひずみ）や実験値と近い値となることを確認した。

（3）ハット曲げの決め押し加工シミュレーションと実験を行い，開発したシミュレーション技術が 2 次元モデル（平面ひずみ）や実験値と近い値となることを確認した。

参考文献

1）岩谷二郎，“高強度鋼板の実用化のためのプレス成形技術”，神戸製鋼技報，Vol.52，No.3，2002，pp.23-27.

2）吉田亨ら，“高強度鋼板の形状凍結性改善技術”，新日鉄技報，No.378，2007，pp.25-29.

3）小川孝行，“高張力鋼板のプレス加工における決め押しがスプリングバック抑制に及ぼす効果”，広島大学学位論文（博士（工学）），2011，pp.32-66.

4）www.lancemore.jp/report/report_006.html