研究論文

プレス成形シミュレーションの高精度化に向けた引張試験方法に関する研究

片山　聡*　櫻井　貴文*

Research on tensile test methods for improving the accuracy of sheet metal forming simulation

KATAYAMA Satoshi* and SAKURAI Takafumi*

抄　　録

プレス成形シミュレーションの高精度化を目的に，材料の塑性ひずみ比の測定方法について検証した。検証には有限要素法による引張試験シミュレーションを使用し，試験片形状や標点距離が塑性ひずみの測定精度に与える影響を確認した。また，デジタル画像相関法による実測も試みた。その結果，塑性ひずみ比を精度よく測定するためには，試験片平行部の均一ひずみ領域内で長さや幅の変化量を測定する必要があることがわかった。均一ひずみ領域を得るためには，試験片平行部の長さと幅の比を大きくすることが有効であり，また均一ひずみ領域を得にくい材料においては，標点距離を短く設定することや測定点を増やすことで，塑性ひずみ比の測定精度を向上できることがわかった。

1.　緒　　言

プレス成形シミュレーションはコンピュータ上に構築した仮想環境でプレス成形を行い，金型形状や加工方法の妥当性を検証する技術である。シミュレーションの予測精度には様々な因子が影響するが[1)]，材料モデルの正確さは特に重要な因子となっている[2)]。そのため，近年のプレス成形シミュレーションでは，吉田 6 次降伏関数や吉田－上森モデルといった高次の材料モデルを使用する例が増えている[3) 4) 5)]。ただし，これらの材料モデルを使用するためには，二軸引張試験や面内反転試験など，通常の引張試験とは異なる装置やジグを用いた材料試験を実施する必要があり[6)]，中小企業が自社データを整備することの障壁となっている。

この問題を解決するため，当所では令和 3 年度に ESI 製材料パラメータ同定ソフトウェア ESI Mat-Wizard を導入した[7)]。本ソフトウェアでは 3 方向（0，45，90°）の引張試験データから各種の降伏関数や硬化則のパラメータを同定することが可能である。必要とされる引張試験データは各方向の降伏応力と塑性ひずみ比（以降，r 値と称す）となっている。同定精度を上げるため，試験データには正確性が求められるが，引張試験方法には試験片形状や特性値の算出方法など，いくつかの条件が存在するため，実施においてはそれら違いを正しく理解しておく必要がある。そこで本研究では，パラメータ同定に必要とされる r 値の算出において，引張試験方法の違いがどのような影響を与えるか調査した。検証には有限要素法による引張試験シミュレーションを用いた。

* 下越技術支援センター

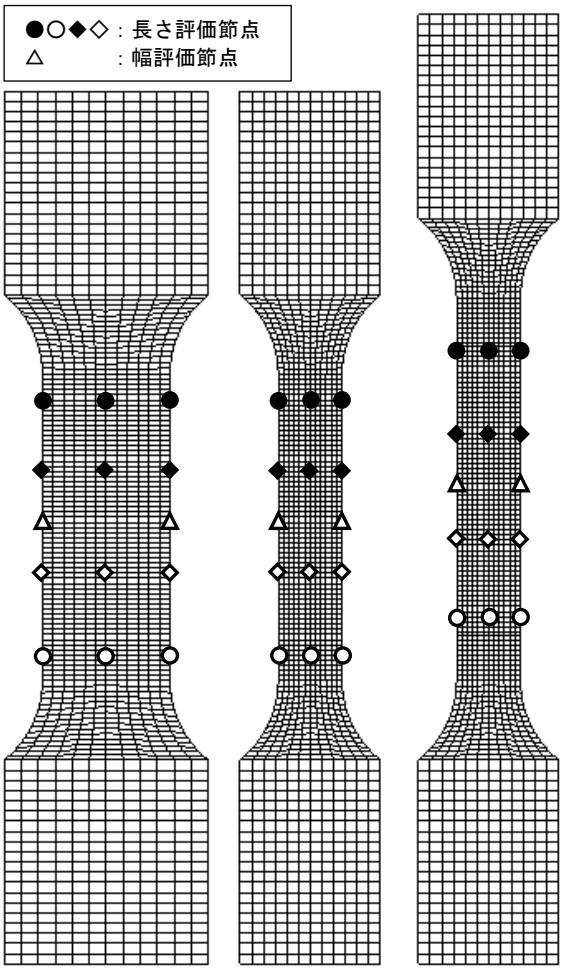
2.　引張試験シミュレーション

2.1　シミュレーション条件

（株）JSOL 製プレス成形シミュレーションシステム JSTAMP/NV の計算ソルバ LS-DYNA R13（倍精度版）を用いて，引張試験シミュレーションを実施した。試験片形状は JIS Z 2254:2021「薄板金属材料の塑性ひずみ比試験方法」を参考に，JIS Z 2241 の 5 号（試験片①）および 13B 号試験片とした。13B 号試験片では平行部長さを 60mm（試験片②）と 75mm（試験片③）に

設定した。試験片の材質は JSTAMP/NV の材料データベースより，440 ハイテンおよび 980 ハイテンを選択した。ただし，データベースの材料モデルでは面内異方性を設定できなかったため，設定可能な材料モデルに変更した。試験片の有限要素モデルを図 1 に示す。要素形状は低次四角形要素（シェル要素）とし，積分定式は Belytschko-Wong-Chiang 型，板厚方向の積分点数は 5 点とした。

シミュレーションにおいて，試験ストロークはつかみ部に結合した剛体ブロックに与え，試験力は試験片と剛体ブロックの接触反力とした。標点距離（長さ）と幅の変化量は，図 1 に示す節点の移動量から算出した。r 値の算出方法は JIS Z 2254:の試験方法 1 および 3 に従った。



(1) 試験片①　(2) 試験片②　(3) 試験片③

図 1　試験片の有限要素モデル（板厚 1㎜）

2.2　シミュレーション結果

シミュレーションで得られた各試験片の一様伸び限界（最大応力を記録した際の工学ひずみ）を表 1 に示す。JIS Z 2254 では体積一定則を基本則としているため，r 値算出に使用できる引張試験データは一様伸び限界までとなる。一様伸び限界は試験片形状でわずかに異なり，試験片①では標点距離の影響が他の試験片形状よりも大きくなった。

表 1　一様伸び限界（単位：%）

材質	試験片	標点距離	
		20mm	50mm
440 ハイテン	①	20.2	18.0
	②	20.2	19.1
	③	19.6	19.3
980 ハイテン	①	5.3	4.5
	②	5.1	4.8
	③	5.2	5.0

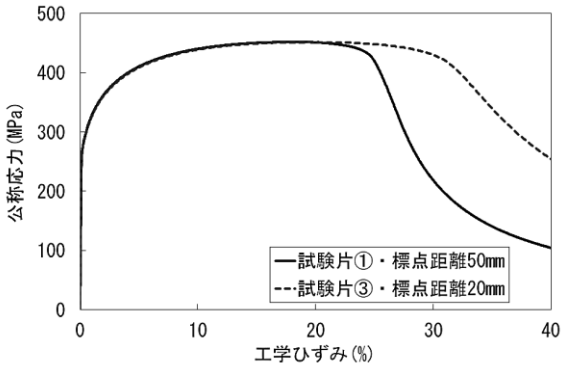
試験片①（標点距離 50mm）と試験片③（標点距離 20mm）の公称応力－工学ひずみ曲線を図 2 に示す。一様伸び以降の挙動が異なっており，試験片③（標点距離 20mm）のほうが伸びが大きくなっているが，これは標点距離が短いほど，標点距離内に占める局所ひずみ領域の割合が増え，ひずみを大きく算出するためである。近年では一様伸び以降の材料特性評価に関する研究も行われているが [8]，一般的な方法では延性を過大評価することになるため，破断ひずみの評価には，JIS Z 2241 に準拠した標点距離で評価することが推奨される。

JIS Z 2254:2021 の「試験方法 3　単一点による方法（以降，単一点法と称す）」を用いた r 値の算出結果を図 3，4 に，「評価方法 3　回帰による方法（以降，回帰法と称す）」による r 値の算出結果を表 2 に示す。なお，回帰法における長さ方向の真塑性ひずみ適用範囲は，440 ハイテンでは 5～10%，980 ハイテンでは 1～3% とした。これらの図表より，試験片③を用いた場合には材質や標点距離，算出方法によらず，

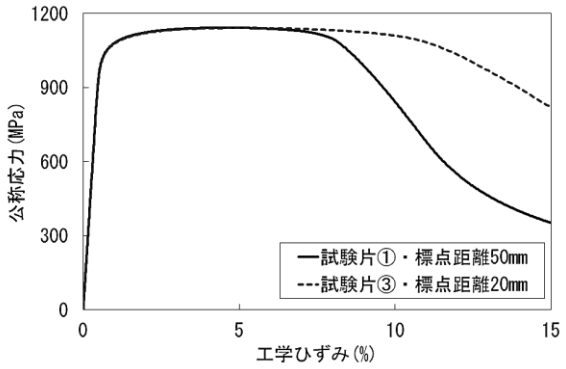
材料モデルの設定値に近い r 値が得られることがわかる。一方，試験片①では長さ方向の真塑性ひずみの増加に伴って r 値も増加しており，単一点法では r 値を一定値として評価するのが困難であった。また，回帰法においても試験片①では材料モデルの設定値から大きく外れた。この傾向は標点距離 50mm および 980 ハイテンで顕著であった。また，単一点法において r 値がほぼ一定値を示す条件であっても，一様伸び限界近傍で r 値が増加する傾向が見られた。

LS-DYNA の材料モデルの中には，r 値を塑性ひずみに依存する特性値として入力できるものがある。本材料モデルで使用した r 値は一定であるが，試験片①の結果からは r 値に塑性ひずみ依存性があるように見えるため，モデル作成の際には注意が必要である。

980 ハイテンの試験片①および③に対し，試験方法 1 を用いて r 値を算出した結果を図 5 に示す。試験方法 3（単一点法）とは異なり，長さ方向の真塑性ひずみによる r 値の変動が抑えられており，標点距離 20mm では低ひずみ領域

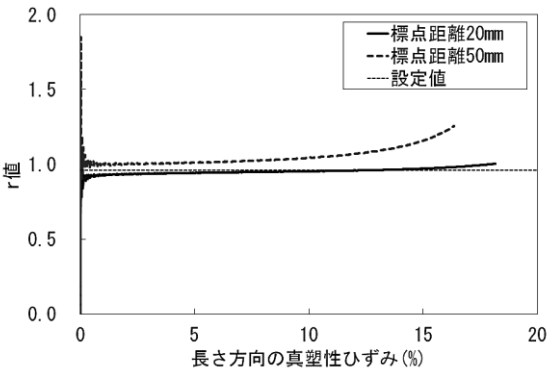


(1) 440 ハイテン

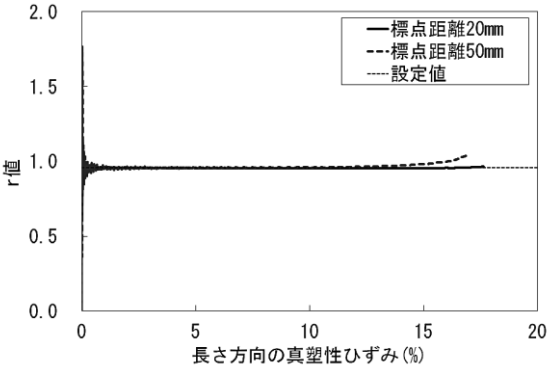


(2) 980 ハイテン

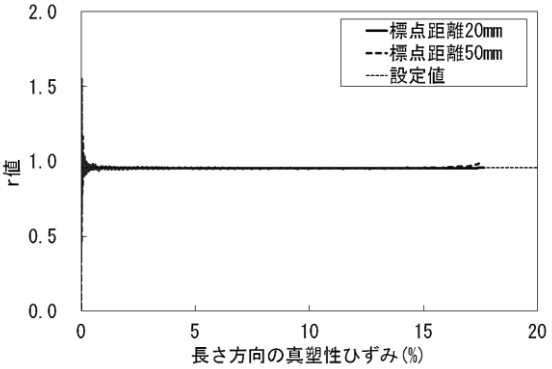
図 2　公称応力－工学ひずみ曲線



(1) 試験片①



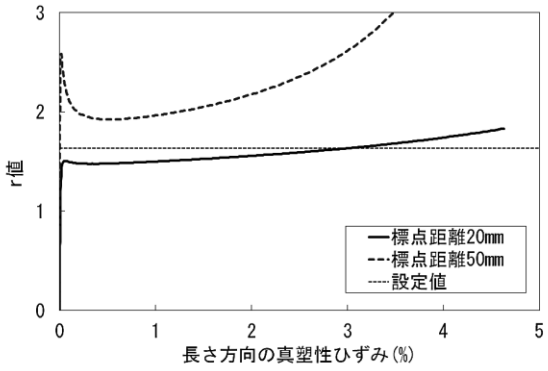
(2) 試験片②



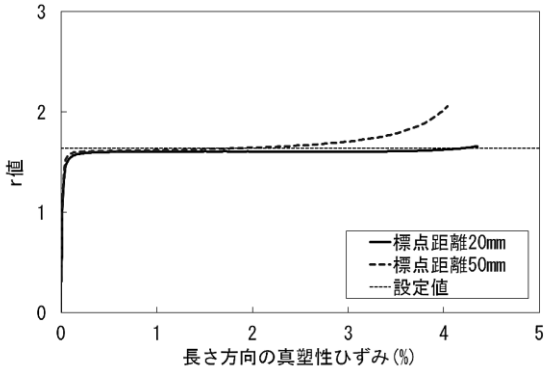
(3) 試験片③

図 3　試験方法 3(単一点法)の結果
(440 ハイテン)

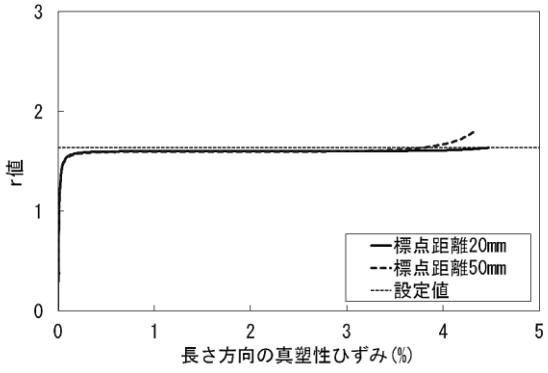
から材料モデルの設定値に近い r 値が得られていることがわかる。一方，標点距離 50mm では設定値に近い値は得られなかった。値としては図 4(1)と異なり，標点距離 20mm よりも低くなった。



(1)試験片①



(2)試験片②



(3)試験片③

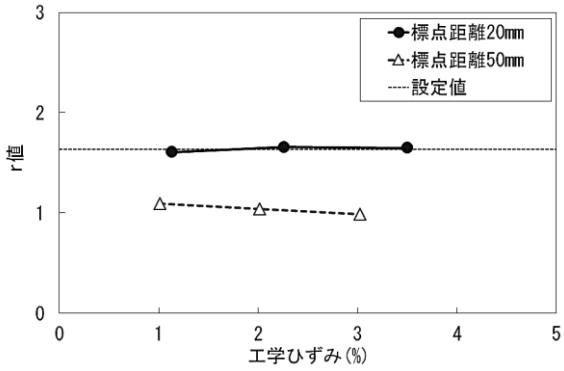
図 4　試験方法 3(単一点法)の結果(980 ハイテン)

2.3　試験片平行部のひずみ分布の確認

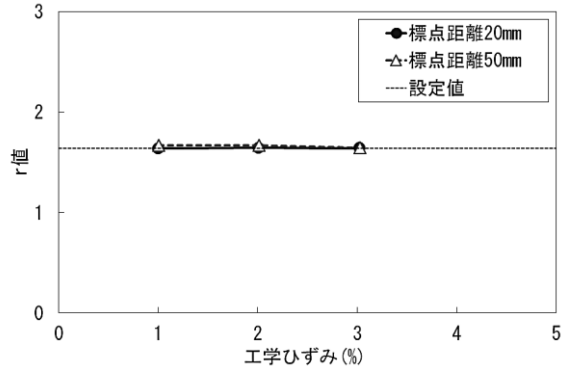
r 値の算出に際し，試験ストロークと伸び方向ひずみ（長さ方向変化量）の関係を調べたところ，試験片①では標点距離による違いが確認された（図 6）。伸びひずみの違いは r 値の算出結果に大きな影響を及ぼすため，その原因について調査した。

表 2　回帰法で算出した r 値

材質	試験片	標点距離(mm)	
		20	50
440 ハイテン (r 値：0.959)	①	0.949	1.028
	②	0.955	0.959
	③	0.955	0.954
980 ハイテン (r 値：1.637)	①	1.579	2.300
	②	1.606	1.662
	③	1.604	1.599



(1)試験片①

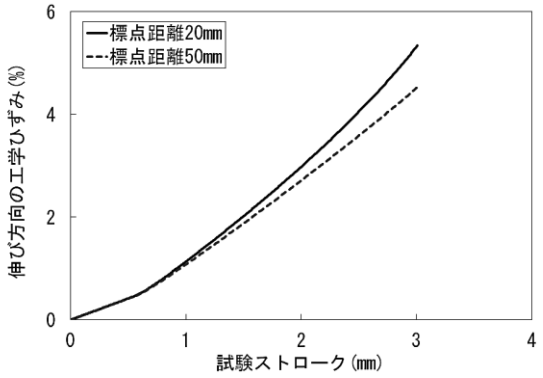


(2)試験片③

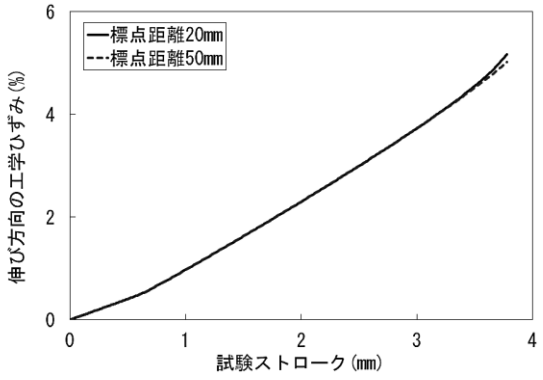
図 5　試験方法 1 の結果(980 ハイテン)

980 ハイテンの各試験片において，伸び方向ひずみが 3%（標点距離 50mm 基準）に達した際の相当ひずみ分布を図 7 に示す。試験片によって平行部のひずみ分布が異なっており，試験片①では標点距離 20mm から 50mm にかけてひずみの変化量が大きく，不均一な分布となっていることがわかる。また，標点距離 50mm における幅方向のひずみ分布も異なっていることがわかる。図 6 にはこれらの差が現れたものと考えられる。試験片②の平行部長さは試験片①と同じ 60mm であるが，ひずみ分布の不均一さは試験片①よりも低減しており，標点距離 20mm 内ではほぼ均一となっていることがわかる。試験片③は標点距離 50mm 内でほぼ均一なひずみ分布となっていることがわかる。

440 ハイテンにおける試験片①の相当ひずみ分布を図 8 に示す。ひずみの不均一さは 980 ハイテンよりも小さくなっており，伸び方向ひずみが 10%に達した際のひずみ分布は，標点距離 20mm 内でほぼ均一となっていることがわかる。

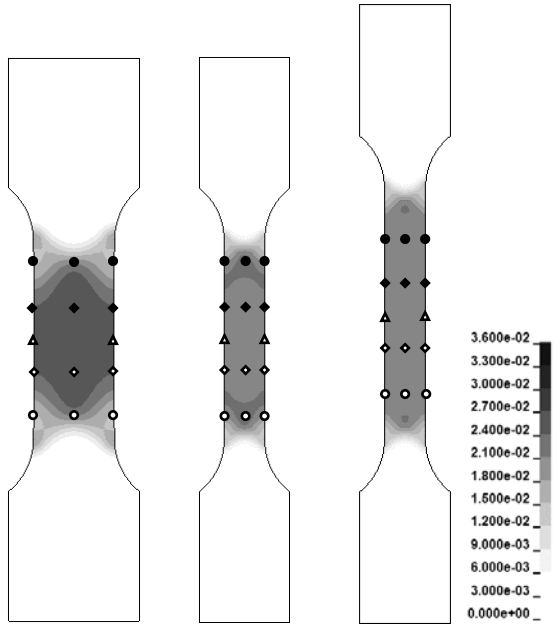


(1) 試験片①



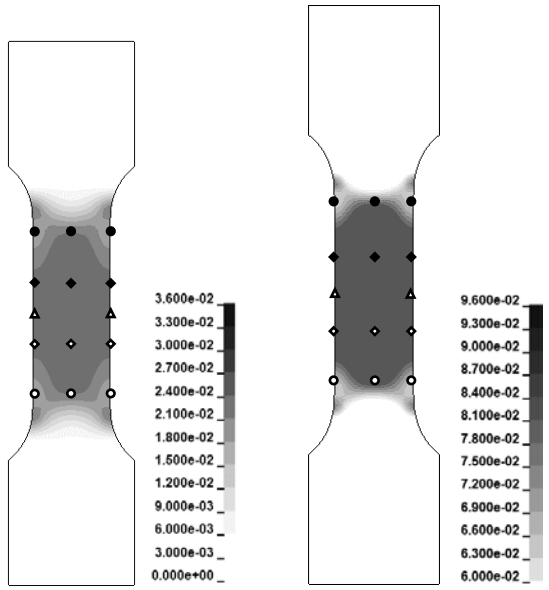
(2) 試験片③

図 6　標点距離による伸びひずみの違い
(980 ハイテン)



(1) 試験片①　(2) 試験片②　(3) 試験片③

図 7　980 ハイテンの相当ひずみ分布
(伸び方向ひずみ 3%到達時)



(1) 伸び方向ひずみ 3%　(2) 伸び方向ひずみ 10%

図 8　440 ハイテンの相当ひずみ分布
(試験片①)

図 4，7 および表 2 より，試験片平行部のひずみ分布と r 値の測定精度には関係性があり，標点間のひずみ分布が均一であるほど r 値を正しく測定できていることがわかる。図 7 より，ひずみ分布を均一にするには，平行部における長さと幅の比が大きい試験片を用いることが有効であると考えられる。また，標点距離を短くすることも，均一ひずみ範囲内で r 値を測定するのに有効であると考えられる。

今回実施した引張シミュレーション（試験方法 3）ではビデオ伸び幅計の使用を想定し，幅方向の変形量を試験片の平行部中央 1 点で評価した。これを試験方法 1 と同様に，標点上の幅変形量を加えた 3 点平均で評価した場合に r 値の算出結果が変化するか確認した。

3 点の平均値を用いて回帰法により算出した r 値を表 3 に示す。表 2 に示す r 値よりも全体的に材料モデルの設定値に近くなっていることがわかる。単位点法による 980 ハイテン（試験片①）の算出結果を図 9 に示す。数値，傾向とも試験方法 1 の結果（図 5(1)）とほぼ一致しており，標点距離 20mm における r 値の測定精度が向上していることがわかる。5 号試験片など，平行部の長さと幅の比が小さい試験片を用いる場合には，標点距離を短くし，幅を標点位置を含む 3 点で評価することで，r 値の測定精度を改善できる可能性があるといえる。

表 3　幅変形量を 3 点で評価した場合の r 値

材質	試験片	標点距離(mm)	
		20	50
440 ハイテン（r 値：0.959）	①	0.951	0.937
	②	0.957	0.956
	③	0.957	0.957
980 ハイテン（r 値：1.637）	①	1.509	1.193
	②	1.628	1.624
	③	1.630	1.629

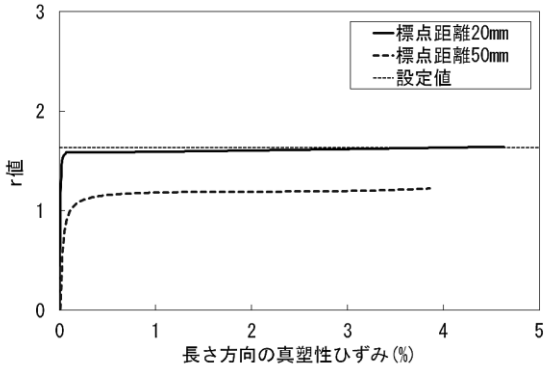
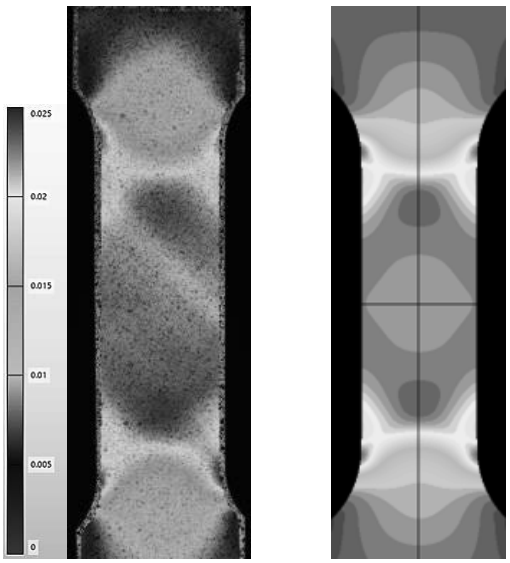


図 9　幅変形量を 3 点で評価した場合の r 値（単位点法：980 ハイテン，試験片①）

2.4　DIC による平行部のひずみ分布測定

引張試験シミュレーションで得られたひずみ分布が実際の引張試験においても発生するか，MatchID 製デジタル画像相関法(DIC)システム MattchID 2022.0 と(株)島津製作所製万能材料試験機 AG-100kNG-M1 を用いた引張試験により確認した。供試材には超ハイテンを使用し，試験片形状は 5 号試験片とした。

伸び方向ひずみ（標点距離 50mm 基準）が 3%に達した際の相当ひずみ分布を図 10 に示す。計測されたひずみ分布はシミュレーション結果とよく一致しており，実際の試験片においても平行部に不均一ひずみが発生することがわかる。図 11 に DIC による変形量測定データを用いた r 値の算出結果（単一点法）を示す。供試材の一様伸び限界が 10%程度と，シミュレーションで使用した 980 ハイテンよりも延性に富んでいたため図 5(1)ほどの差とはならなかったが，標点距離による違いが現れていることがわかる。幅方向の評価点数を変えた場合の r 値算出結果（標点距離 50mm）を図 12 に示す。シミュレーション結果（図 9）と同様に，実際の測定においても幅方向の測定点数を増やすことで r 値が安定することがわかった。当所が所有する(株)島津製作所製ビデオ式非接触伸び幅計 TRViewX では複数個所の幅寸法を同時に測定できないが，DIC では任意箇所の測定が行えるため，素材形状の制約により試験片の長さと幅の比を大きくとれない場合や供試材が低延性材料の場合のひずみ計測に適しているといえる。



(1) DIC　　(2)シミュレーション

図 10　伸び方向ひずみが 3%に達した際の相当ひずみ分布

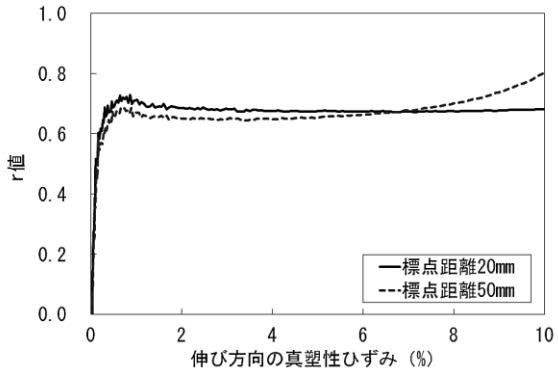


図 11　単一点法による r 値の算出結果（試験片①）

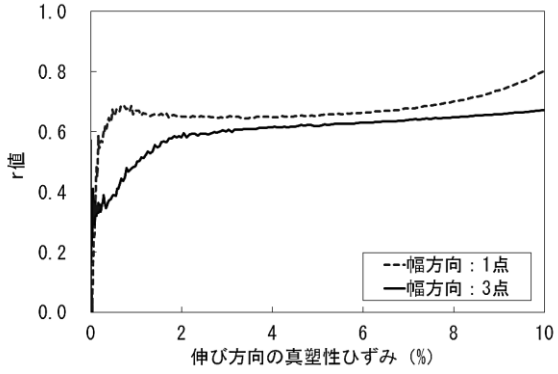


図 12　幅方向測定点数の影響（試験片①・標点距離 50mm）

3.　円筒絞り成形シミュレーションにおける r 値の影響

今回算出した r 値が円筒絞り成形シミュレーション結果に与える影響について確認した。材質は 980 ハイテンとし，材料モデル作成のため，新たに 45°および 90°方向の引張試験シミュレーションを実施した。得られた r 値を表 4 に示す。90°方向は他の方向ほど，材料データベース値から外れなかった。これらの値より，ESI Mat-Wizard を用いて Hill'48 型材料モデルを作成した。Hill'48 型モデルに対する近似精度を表 5 に，材料角度と一軸降伏応力比の関係を図 13 に示す。Hill'48 型の材料モデルから作成された材料モデルであるが，試験片①（標点距離 50mm）では近似精度が低くなった。

表 4　引張シミュレーションで得られた r 値

モデル名	材料角度(°)		
	0	45	90
材料データベース	1.637	1.580	0.720
試験片①（標点距離 50mm）	2.300	2.259	0.783
試験片③（標点距離 20mm）	1.604	1.554	0.712

表 5　Hill'48 降伏関数に対する近似精度

モデル名	近似精度(%)
試験片①（標点距離 50mm）	86.9
試験片③（標点距離 20mm）	94.2

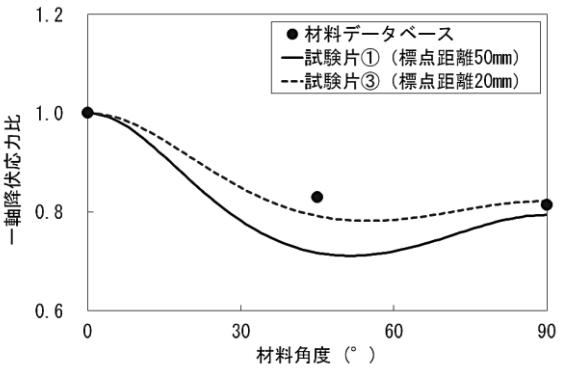


図 13　材料角度と一軸降伏応力比の関係

円筒絞りシミュレーションでは板厚減少率と円筒端面の高さ（図 14）を比較した。結果を表 6，図 15 に示す。試験片③（標点距離 20mm）はデータベースの結果とほぼ一致したが，試験片①（標点距離 50mm）では面内異方性が強く現れた。1～2%程度の差ではあるが，材料特性を取得する引張試験方法がシミュレーション結果に影響を与えることを確認することができた。

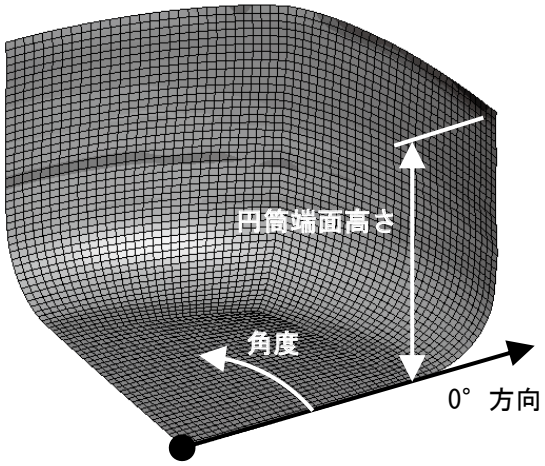


図 14　円筒端面高さの評価座標

表 6　シミュレーション結果（板厚減少率：%）

モデル名	最小値	最大値
材料データベース	-29.5	21.1
試験片① （標点距離 50mm）	-27.1	21.9
試験片③ （標点距離 20mm）	-29.7	21.0

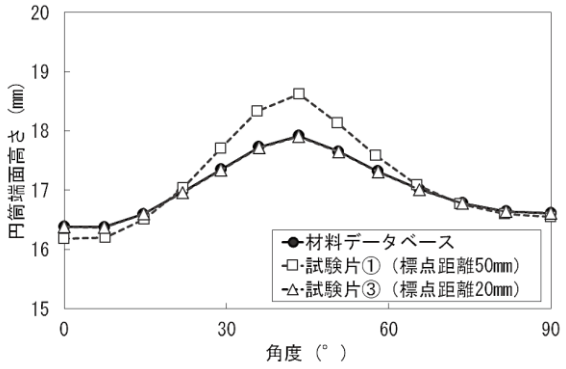


図 15　円筒端面高さの違い

4. 結　　言

本研究では，塑性ひずみ比の測定方法を引張試験シミュレーションにより検証し，以下の知見を得た。

(1) r 値を測定する際の試験片形状は，平行部のひずみを標点距離内で均一とするため，長さと幅の比を大きくとることが推奨される。

(2) 標点距離は，試験片平行部における不均一ひずみの影響を受けないよう，短く設定することが推奨される。

(3) 幅方向の変形量は，標点内の複数箇所で測定することが推奨される。多点測定にはデジタル画像相関法が適している。

参考文献

1) 浜, “プレス成形シミュレーションを支える解析要素技術の基礎”, 塑性と加工, Vol.51, No.598 (2010-11), pp.1017-1022.

2) 桑原, “穴広げ成形シミュレーションの解析精度に及ぼす材料モデルの影響”, ぷらすとす, Vol.3, No.31 (2020-7), pp.388-394.

3) 蔦森ほか, “任意セグメント型スプライン降伏関数による穴広げ成形の解析”, 塑性と加工, Vol.60, No.699 (2019-4), pp.115-120.

4) 箱山ほか, “異方性材料のモデリング”, ぷらすとす, Vol.4, No.41 (2021-5), pp.316-321.

5) 平本ほか, “車体軽量化に寄与する自動車用ハイテン利用技術の動向と展望”, JFE 技報, No.41 (2018-2), pp.6-13.

6) 小川, “アルミニウム合金板の成形シミュレーション技術”, 軽金属, Vol.65, No.11 (2015), pp.549-553.

7) 本田ほか, “加工技術への機械学習適用に関する調査研究”, 工業技術研究報告書, No.52 (2022), pp.80-83.

8) 村田, “名古屋市工業研究所における塑性加工分野の取り組み”, ぷらすとす, Vol.3, No.35 (2020), pp.682-686.