

パターン認識技術を利用したプレス成形不具合発生回避システムの研究開発

鳥取大学 大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻
助教 上原一剛
(平成 21 年度奨励研究助成 AF-2009032)

キーワード：プレス成形，パターン認識，数値シミュレーション

1. 研究の目的と背景

自動車の低燃費化を図る塑性加工上の重要な技術開発の一つとして，車体用プレス鋼板の高強度鋼板化が挙げられる．高強度鋼板はスプリングバックが大きいため，熟練技術者の経験と勘に大きく依存する部分が多く，試打ちや金型修正といった試行錯誤に要する時間的・経済的損失が製品の高強度鋼板化の阻害要因の一つとなっていた．最近では，プレス成形シミュレーションで高強度鋼板のプレス成形の工程設計を合理化する試みが進められている^{1)~10)}が，様々な態様で起こりうるプレス成形の不具合を数値シミュレーション上でどのように定量的に把握するかは未解決の部分が多い．

本研究の目的は，最近提案されたパターン認識技術の一つである MT システム(マハラノビス・タグチシステム)を用いて，数値シミュレーション上でプレス成形の不具合の定量化と，その不具合を回避する工程設計の指針を得るシステムの構築である．

MT システムは，正常な集団から単位空間を定義し，それを判断基準にして，多くの情報を統合した判断尺度であるマハラノビスの距離で単位空間からの離れ具合を定量的に評価する方法である．これまで MT システムは，病態の診断や自動車部品の外観検査に用いられてきた^{11)~14)}．しかし，プレス成形不具合の診断に適用した事例はほとんどない．

この MT システムを用いることにより，従来のように鋼板の板厚減少率といった単一の評価指標を用いたプレス成形工程評価ではなく，しわやそりのように定量的評価が難しい様々な不具合も MT システムによる定量化ができる可能性がある．本研究では，プレス成形工程評価に MT システムを適用することがその工程設計の不具合の検出に寄与できるかどうかを，簡易モデルを用いた数値シミュレーションで検討した．

2. 研究方法

パターン認識技術の一つである MT システムを用いた

プレス成形不具合の定量化とその不具合を回避する工程設計指針を得るシステムの構築を目的に，下記のとおり研究を実施した．

1) マハラノビスの距離の計算手法の検討

本研究では，プレス成形の不具合の定量化に MT システムを適用してその有用性を検証するための基礎として，現在までに提案されているいくつかのマハラノビスの距離の計算方法の中でプレス成形不具合の定量化に適した計算方法の検討を行った．

MT システムでは，座標系の原点に相当する単位空間中心からのマハラノビスの距離によってプレス成形の不具合を定量的に評価する．ここでは，材料の割れやしわといった不具合の発生を定量的に評価するのに有効な単位空間および単位空間中心からのマハラノビスの距離をどのように決めればよいかを，引張試験の数値シミュレーション結果から検討した．

2) プレス成形工程設計における MT システム適用の有用性検証

板状ブランクをパンチでダイ穴に押し込むことで底の付いた容器を成形するカップ型深絞り品のプレス成形シミュレーションを行って，1) で検討した MT システムによる割れなどの成形不具合の検出可能性について検討した．また，1) で検討したマハラノビスの距離の計算手法に基づいて，プレス成形の不具合発生を回避を行うためのアルゴリズムの検討を行った．

3. 研究成果

3.1 マハラノビスの距離の計算手法の検討

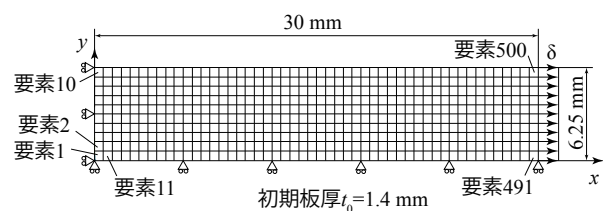


図1 引張試験片の簡易モデル

プレス成形の不具合は、成形中に材料が受けるひずみの状態が関係している。本研究ではまず、単軸ひずみ状態でマハラノビスの距離による不具合検出の可能性を明らかにするために、単軸引張試験の数値シミュレーションを行い、引張試験片のひずみ状態とマハラノビスの距離の関係を調べた。

マハラノビスの距離の指標となる単位空間は正常状態のメンバーの集団で形成される。ここでは、一様伸びの試験片のひずみ状態から単位空間を形成し、その単位空間中心からのマハラノビスの距離で局部伸びの検出が可能かどうかを数値シミュレーション結果に基づいて検討した。

図1は、簡易モデルによるマハラノビスの距離の計算手法の検討に用いた試験片の解析モデルを示す。試験片形状は、JIS Z 2201の13号B試験片を参考にして平行部のみをモデル化した。本解析モデルの標点間距離は60mmとし、幾何学的対称性を考慮した1/4モデルとした。対称境界では対称境界面に対する垂直な変位を拘束するとともに、対称境界面上に存在する節点の回転の自由度を拘束した。引張試験の数値シミュレーションには、市販の動的陽解法有限要素解析ソフトウェアを用い、試験片伸びが100%になるまで強制変位を与えた。なお、本解析モデルの要素は四角形とし、その要素数は500であった。

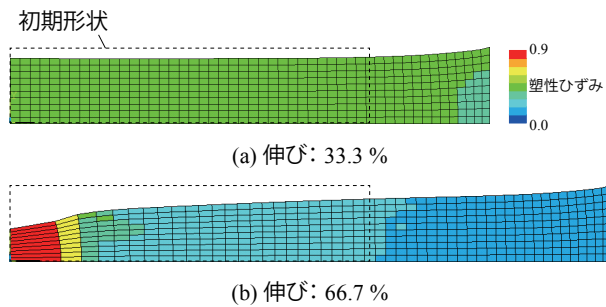


図2 引張試験片のひずみ分布 (SPCC)

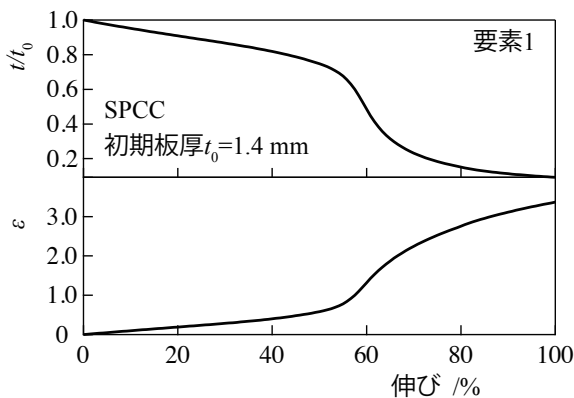


図3 引張試験片の板厚とひずみの解析結果

表1 単位空間のメンバーと項目

メンバー	伸び /%	ひずみ				線形式 L_i , 有効除数 r
		要素1	要素2	...	要素500	
1	8.3	x_{11}	x_{12}	...	x_{1500}	L_1
2	16.7	x_{21}	x_{22}	...	x_{2500}	L_2
3	25.0	x_{31}	x_{32}	...	x_{3500}	L_3
4	33.3	x_{41}	x_{42}	...	x_{4500}	L_4
5	41.7	x_{51}	x_{52}	...	x_{5500}	L_5
平均値		\bar{x}_1	\bar{x}_2	...	\bar{x}_{500}	r

た。また、引張試験片はSPCC製とし、数値シミュレーションに先立って実施したインストロン型引張試験機を用いた単軸引張試験結果から求めた物性値を使用した。材料モデルには n 乗硬化則を用いた。

図2と図3はそれぞれ、簡易モデルの相当塑性ひずみ分布と板厚 t および相当塑性ひずみ ϵ の変化を示す。このモデルでは試験片伸びが50%を超えると板厚は急激に減少し、試験片中央部に局部伸びが発生した。

ここで、この引張試験の数値シミュレーション結果に基づいて、MTシステムのT法(3)¹⁵⁾を用いて単位空間を形成する。T法(3)は、評価項目の物理量を標準SN比 η と比例定数である感度 β に情報を圧縮してパターン認識を行うMTシステムの一つの方法であり、多重共線性の問題が発生しないために汎用性が高い。そこで、表1に示すように、伸びが8.3、16.7、25.0、33.5、41.7%における全要素の相当塑性ひずみの計算結果をそれぞれ単位空間のメンバーとし、この5つのメンバーから単位空間を定義した。なお、表1中の要素の番号は図1中に示した要素番号である。

まず、単位空間の各メンバーの感度 β と標準SN比 η をメンバー i に対して次式で求めた。

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n}(x_{1j} + x_{2j} + \dots + x_{nj}) \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

$$L_i = \bar{x}_1 x_{i1} + \bar{x}_2 x_{i2} + \dots + \bar{x}_k x_{ik} \quad (2)$$

$$r = \bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2 + \dots + \bar{x}_k^2 \quad (3)$$

$$S_{Ti} = x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + \dots + x_{ik}^2 \quad (4)$$

$$S_{\beta i} = \frac{L_i^2}{r} \quad (5)$$

$$\beta_i = \frac{L_i}{r} \quad (6)$$

$$\eta_i = \frac{k-1}{S_{Ti} - S_{\beta i}} \quad (7)$$

ここで、 n はメンバー数、 k は項目数である。表2は、単位空間の各メンバーの β と η の計算結果を示す。

表2 感度, 標準 SN 比, マハラノビスの距離

メンバー	感度 β	標準SN比 η	距離 D
1	0.358	11759.0	0.00426
2	0.697	4996.7	0.00219
3	1.016	5782.0	0.00095
4	1.320	25601.2	0.00525
5	1.608	802.3	0.00558

さらに, 式 (6) と式 (7) で求めた各メンバーの β と η から単位空間のマハラノビスの距離 D は次式で求めた.

$$Y_{i1} = \beta_i, Y_{i2} = \frac{1}{\sqrt{\eta_i}} \quad (8)$$

$$\bar{Y}_1 = \frac{1}{n}(Y_{11} + Y_{21} + \dots + Y_{n1}) \quad (9)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{1}{n}(Y_{12} + Y_{22} + \dots + Y_{n2}) \quad (10)$$

$$V_{11} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{i1} - \bar{Y}_1)^2 \quad (11)$$

$$V_{12} = V_{21} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{i1} - \bar{Y}_1)(Y_{i2} - \bar{Y}_2) \quad (12)$$

$$V_{22} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_{i2} - \bar{Y}_2)^2 \quad (13)$$

$$D_i^2 = \frac{1}{2} [V_{22}(Y_{i1} - \bar{Y}_1)^2 - V_{21}(Y_{i1} - \bar{Y}_1)(Y_{i2} - \bar{Y}_2) - V_{12}(Y_{i1} - \bar{Y}_1)(Y_{i2} - \bar{Y}_2) + V_{11}(Y_{i2} - \bar{Y}_2)^2] \quad (14)$$

$$D_i = \sqrt{D_i^2} \quad (15)$$

表2中に D の計算結果も示した. 単位空間のマハラノビスの距離 D の平均値は 0.00364 であった.

次に, 引張試験片の局部伸びの進展とマハラノビスの距離の関係を調べるため, 表3に示した, 試験片伸びが 50% 以上の評価対象メンバーのマハラノビスの距離を次式で求めた.

$$L'_i = \bar{x}_1 x'_{i1} + \bar{x}_2 x'_{i2} + \dots + \bar{x}_k x'_{ik} \quad (16)$$

$$S'_{Ti} = x'^2_{i1} + x'^2_{i2} + \dots + x'^2_{ik} \quad (17)$$

$$S'_{\beta i} = \frac{L'^2_i}{r} \quad (18)$$

$$\beta'_i = \frac{L'_i}{r} \quad (19)$$

$$\eta'_i = \frac{k-1}{S'_{Ti} - S'_{\beta i}} \quad (20)$$

$$Y'_{1i} = \beta'_i, Y'_{2i} = \frac{1}{\sqrt{\eta'_i}} \quad (21)$$

$$D'^2_i = \frac{1}{2} [V_{22}(Y'_{1i} - \bar{Y}'_1)^2 - V_{21}(Y'_{1i} - \bar{Y}'_1)(Y'_{2i} - \bar{Y}'_2) - V_{12}(Y'_{1i} - \bar{Y}'_1)(Y'_{2i} - \bar{Y}'_2) + V_{11}(Y'_{2i} - \bar{Y}'_2)^2] \quad (22)$$

$$D'_i = \sqrt{D'^2_i} \quad (23)$$

ここで, 平均値 $\bar{x}_j (j=1, 2, \dots, k)$, 有効除数 r , V_{11} , V_{12} , V_{22} はそれぞれ, 式 (1), 式 (3) と式 (11) ~ (13) で求めた

表3 評価対象のメンバーと項目

メンバー	伸び / %	ひずみ				線形式 L , 有効除数 r
		要素1	要素2	...	要素500	
1	50.0	x'_{11}	x'_{12}	...	x'_{1500}	L'_1
2	58.3	x'_{21}	x'_{22}	...	x'_{2500}	L'_2
3	66.7	x'_{31}	x'_{32}	...	x'_{3500}	L'_3
4	75.0	x'_{41}	x'_{42}	...	x'_{4500}	L'_4
5	83.3	x'_{51}	x'_{52}	...	x'_{5500}	L'_5
6	91.7	x'_{61}	x'_{62}	...	x'_{6500}	L'_6
7	100.0	x'_{71}	x'_{72}	...	x'_{7500}	L'_7

値である.

図4は, 表3に示した評価対象メンバーのマハラノビスの距離 D の計算結果を示す. D は単位空間の領域でほぼ一定値をとったが, 試験片伸びが 50 ~ 100% ではその伸びの増大に伴って D は増大した. この結果から, 単位空間を均一な単軸引張ひずみの状態から T 法 (3) で定義すれば, 試験片の局部伸びの検出が可能であることを示唆する.

3.2 カップ型深絞り品への適用

3.1節では, MT システムの T 法 (3) を用いて各要素の

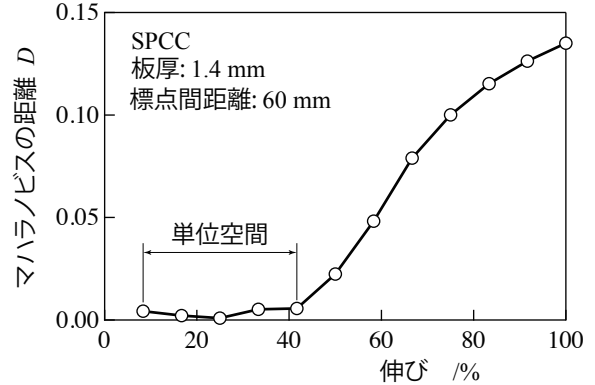


図4 マハラノビスの距離に及ぼす試験片伸びの影響

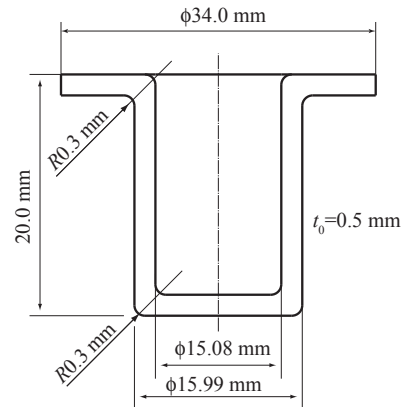


図5 カップ型深絞り品の形状と寸法

表 4 工程設計パラメータ

工程	工程設計パラメータ	Romanowskiの 実験式から求めた 工程設計 パラメータの値
1	パンチ径 D_1 mm	24.49
	ダイ径 d_1 mm	25.65
	パンチ肩半径 r_{p1} mm	3.5
	ダイ肩半径 r_{d1} mm	3.5
	絞り高さ h_1 mm	12.0
	クリアランス c mm	0.58

ひずみ状態からマハラノビスの距離を求めることによって試験片の局部伸びの検出可能性を明らかにした。ここでは、T法(3)による成形状態の評価をカップ型深絞り成形の評価に適用し、マハラノビスの距離の評価で不具合の検出が可能かどうか検討した。

図5は、3.1節で述べたマハラノビスの距離による成形評価の有用性を検討するために用いたカップ型深絞り品の形状と寸法を示す。なお、成形前のブランク径は49mmとした。

表4は、図5のカップ型深絞り品に対してRomanowskiの実験式¹⁶⁾で求めた工程設計パラメータの値を示す。この製品は絞り比が3.1であるため、Romanowskiの実験式では4工程必要であるが、本研究ではその第1工程のみ

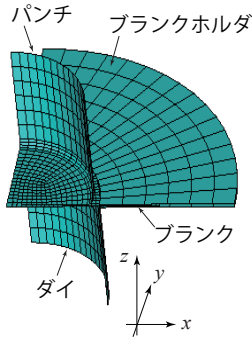


図6 カップ型深絞りの解析モデル

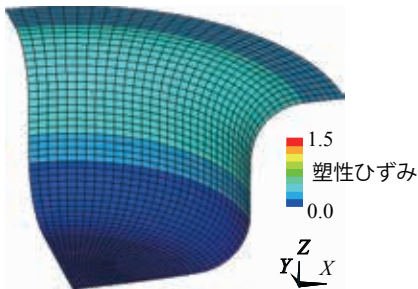


図7 単位空間のブランクの塑性ひずみ分布 (クリアランス: 0.58 mm, パンチストローク: 12 mm)

に着目してマハラノビスの距離による評価の有用性を検討した。

図6は、カップ型深絞りの解析モデルを示す。幾何学的対称性を考慮して1/4モデルとした。対称境界では対称境界面に対する垂直な変位を拘束するとともに、対称境界面上に存在する節点の回転の自由度を拘束した。プレス成形シミュレーションには市販の動的陽解法有限要素解析ソフトウェアを用いた。ブランクはSPCC製とし、3.1節の解析と同じ材料物性値を用いた。ただし、ブランクの板厚は0.5mm、ブランクホルダによるブランクの押さえ力は1.0kNとした。

以下、図5のカップ型深絞りの第1工程のプレス成形を対象に、マハラノビスの距離による評価の進め方を述べる。

図7は、表4に示した成形条件でのプレス成形シミュレーション結果をブランクの相当塑性ひずみ分布で示す。成形後のブランクのひずみ状態から判断すれば、表4に示した条件では正常に成形できている。この成形条件でのひずみ状態を正常な集団と仮定し、パンチストロークを12分割した各パンチストロークにおける相当塑性ひずみ分布をメンバーとして単位空間を定義した。3.1節の場合と同様、各メンバーの項目はブランク全要素の相当塑

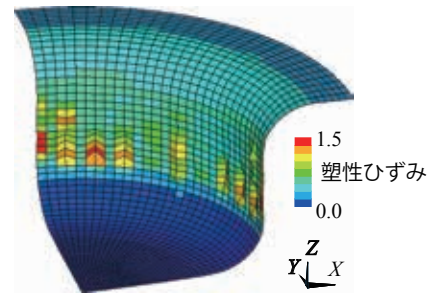


図8 評価対象のブランク塑性ひずみ分布 (クリアランス: 0.28 mm, パンチストローク: 12 mm)

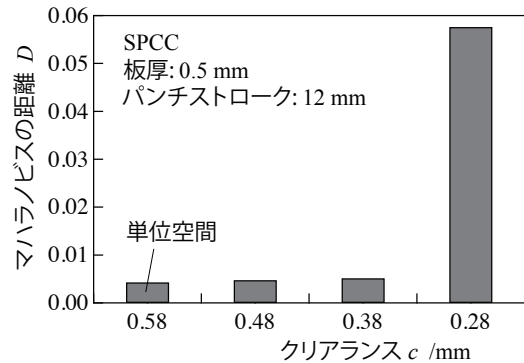


図9 マハラノビスの距離に及ぼすクリアランスの影響

性ひずみとした。なお、本解析モデルでは各メンバーの項目数は 1875 であった。

ここで、表 4 のプレス成形条件の解析結果から定義した単位空間に基づいてプレス成形不具合の検出可能性を検討するため、クリアランス c が表 4 に示した値より小さい 0.28, 0.38, 0.48 mm の 3 種類でプレス成形シミュレーションを実施した。なお、クリアランスはパンチ径を変更して調整した。

図 8 に示したように、 c が最も小さかった 0.28 mm ではカップ側壁部の相当塑性ひずみが大きくなって成形は正常には行われなかったが、その他の条件ではこのような現象は見られなかった。

図 9 は、クリアランス c を 0.28, 0.38, 0.48 mm とした場合のマハラノビスの距離 D を 3.1 節に示した方法で計算した結果を示す。不具合が発生した $c=0.28$ mm では D は単位空間のそれに比べて 13.4 倍になった。

4. 結論

パターン認識技術の一つである MT システムを用いて、数値シミュレーション上でプレス成形の不具合の定量化と、その不具合を回避する工程設計の指針を得るシステムを構築するため、プレス成形工程評価に MT システムを適用することがその工程設計の不具合の検出に寄与できるかどうかを、簡易モデルを用いた数値シミュレーションで検討した。その結果、正常にプレス成形できた場合のひずみの状態で定義した単位空間を用いれば、成形不具合の発生によってマハラノビスの距離は増大した。このことから、評価対象のひずみ分布に基づいてマハラノビスの距離を計算することは、プレス成形不具合を回避するための工程設計の指針を得る一つの方法になりうる。また、本研究で提案した MT システムによる方法を活用すれば、様々な項目についての評価をマハラノビスの距離という一つの指標で評価できる可能性がある。

謝 辞

本研究は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成 21 年度奨励研究助成の支援を受けて行われたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 浜孝之：塑性と加工，**51**-598(2010)，1017-1022.
- 2) 上森武：塑性と加工，**51**-598(2010)，1023-1027.
- 3) 上森武・倉光徹・三登悠司：塑性と加工，**50**-576(2009)，39-43.
- 4) 守屋岳志・桑原利彦・木村星香・高橋進：塑性と加工，**51**-588(2010)，43-49.
- 5) 桑原利彦・橋本一真・飯塚栄治・Jeong-Whan Yoon：塑性と加工，**50**-585(2009)，925-930.
- 6) 橋本一真・桑原利彦・飯塚栄治：ふえらむ，**15**-9(2010)，557-563.
- 7) 守屋岳志・高橋進・桑原利彦：塑性と加工，**49**-574(2008)，1081-1085.
- 8) 仲町英治・本田正・中易秀敏・片山傳生・中村康範：塑性と加工，**39**-446(1998)，247-251.
- 9) 笹原孝利：塑性と加工，**46**-534 (2005)，607-611.
- 10) 小川貴久：塑性と加工，**35**-404(1994)，1065-1070.
- 11) 兼高達貳：マハラノビスの距離の応用例（特殊健康診断の事例），標準化と品質管理，**40**-10(1987)，57-64.
- 12) 中島尚登ほか：MT システムによる難治性肝疾患の評価－MTA 法による病態の診断，品質工学，**14**-6(2006)，47-56.
- 13) 芝野広志：MTS を活用した企業の利益予測，品質工学，**10**-3(2002)，96-102.
- 14) 手島昌一・板東友則・金丹：マハラノビス・タグチ・システム法を適応した外観検査技術の研究，品質工学，**5**-5(1997)，38-45.
- 15) 手島昌一・長谷川良子：入門 MT システム，日科技連，(2008)，80-87.
- 16) 日本塑性加工学会編：塑性加工便覧，(2006)，480-492.