

要 旨

自動車部品への高強度鋼板の導入にともない、成型品のスプリングバック量も増大しており、予めスプリングバックを見込んだ金型形状を作り、これを防止することが求められている。しかし従来の見込み形状生成手法では、スプリングバック量が大きい場合、成型誤差を十分に抑えこめる形状が作成できない。そこで本研究では、メッシュの稜線長の不変条件を満たした幾何演算に基づく成型金型のスプリングバック見込形状を近似的に生成できるアルゴリズムを新たに提案する。

1. はじめに

近年の自動車部品には、軽量化と強度保持のため、数100MPa~1GPaの引張強さをもつ高張力鋼板の成型品が導入されている。これに伴い、プレス成型品のスプリングバック量（弾性変形分の回復）も著しく増加し、その防止対策が重要となっている。スプリングバック防止対策には様々な方法があるが[1]、その1つとして予めスプリングバック後の成型品形状をCAEで推定し、プレス金型表面をスプリングバックの反対方向にオフセットした「見込形状」に合わせて作成する方法が製造コストの観点からよく用いられている。その際、成型品基準形状とスプリングバック推定形状から、金型の見込形状を近似的に推定する幾何演算が必要となるが、従来の見込形状推定手法は[1,2]演算アルゴリズムが単純すぎ、スプリングバック量が大きい場合、見込形状金型で作られた成型品の成型誤差が許容値を超える問題が起きている。

そこで、本研究では、比較的単純な幾何演算で、かつ従来の手法に比べ成型誤差をより減少できるプレス成型金型のスプリングバック見込形状の近似的生成アルゴリズムを新たに提案し、その有効性をプレス成型シミュレーションならびに金型による実成型で検証することを目的とする。

2. 従来手法の問題点および提案手法の特徴

本研究では、成型品基準形状、スプリングバック後成型品形状、ならびに金型スプリングバック見込形状、のいずれも同一位相の3角形メッシュモデルとして表現されているものとする。従来の見込形状推定手法[1,2]では、図1のように、基準形状上の点 p_j^0 と対応するスプリングバック後形状上の点 p_j^{SBi} の間の変位ベクトル $d_j^i = p_j^{SBi} - p_j^0$ とし、見込形状上の点 p_j^{CPI} は、 p_j^0 を d_j^i の逆方向にオフセットし $p_j^{CPI} = p_j^0 - d_j^i$ として推定している。しかしこの推定手法では、成型時に中立面の長さが一定である性質は保てず、変位 d_j^i が増加すると長さ誤差も増加してしまう。これに対し本研究で提案する見込形状は、長さ一定の幾何拘束を近似的に保ちながら、スプリングバック見込形状を生成できることが特徴である。

3. 提案する見込形状近似的生成アルゴリズム

提案するアルゴリズムの概要を図2に示す。このアルゴリズムは、シミュレーションによるスプリングバック解析を一回だけ行い見込形状を生成する簡易手法と、解析を複数回行い高精度な見込形状を行う詳細手法の2つに分かれる。

3.1 1回のスプリングバック解析結果に基づく見込形状生成

説明簡略化のため、まず2次元でアルゴリズムを説明する。この手法は図3に示すように、スプリングバック変位がゼロのメッシュ頂点 $p_0^0 (= p_0^{SB1} = p_0^{CPI})$ を開始基準点とし、見込形状メッシュ p_j^{CPI} を $j=1, 2, \dots$ と逐次的に導出する方法である。

図3のように、基準形状頂点の p_j^0 に発生するスプリングバック変位 d_j^i が、直前の点 p_{j-1}^0 のスプリングバック変位ベクトル d_{j-1}^i 分の平行移動と、直前のスプリングバック点 p_{j-1}^{SB1} 周

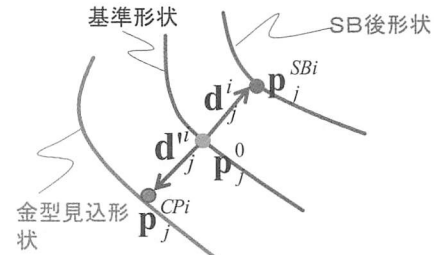


図1 従来のスプリングバック補正の概念

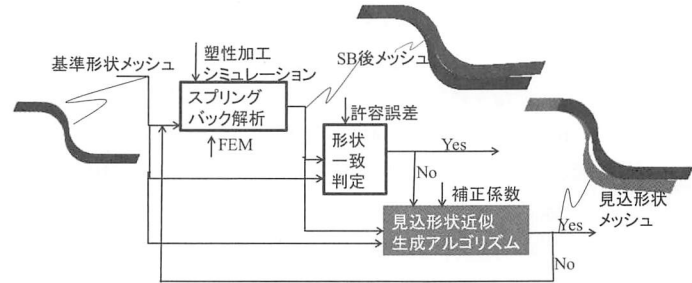


図2 提案するアルゴリズムの概要

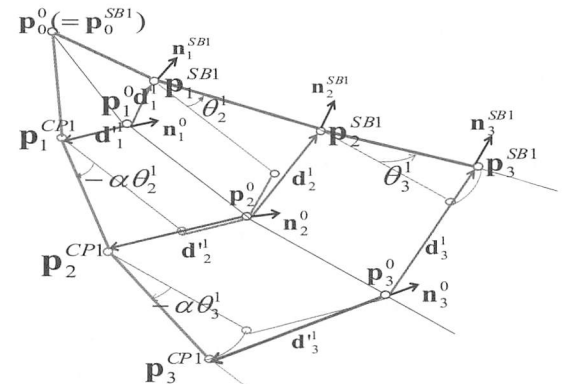


図3 基準、スプリングバック後、見込形状の全体モデル

のベクトル $(p_j^0 - p_{j-1}^0)$ を回転 $R(\theta_j^1)$ したものの合成で表現できると仮定すると、式(1)が成立する。ここで p_j^{SB1} は、 p_j^0 に対応するスプリングバック頂点である。また θ_j^1 は、基準メッシュ頂点の法線ベクトル n_j^0 とスプリングバック後メッシュ頂点の法線ベクトル n_j^{SB1} のなす角として算出できる。

$$p_j^{SB1} = R(\theta_j^1) \{ p_j^0 - p_{j-1}^0 \} + p_{j-1}^{SB1} \quad (1)$$

基準形状とスプリングバック形状間の変位を式(1)のように解釈し、かつ基準形状とスプリングバック形状間でメッシュ稜線長が不変である仮定する。こうすると、 p_j^0 に対する見込形状メッシュ上の頂点位置 p_j^{CPI} を求める補正ベクトル $d_j^1 (= p_j^{CPI} - p_j^0)$ は、 p_{j-1}^0 に対する補正ベクトル d_{j-1}^1 分の平行移動と、 p_{j-1}^{CPI} 周りの逆回転 $R(-\theta_j^1)$ の合成変換に等しいと考えられる。さらに、従来の逆オフセット型見込形状推定手法で、変位ベクトル d_j^i を $-\beta (> 1.0)$ 倍し $p_j^{CPI} = p_j^0 - \beta d_j^i$ で見込形状を作成すると、成型誤差が少なくなることが実験的に知られている[2]。そこで本手法でも、稜線長不変条件を保ち、逆回転の回転角を $\alpha (> 1.0)$ 倍し見込形状を作成することとした。

この α を補正係数と名付ける。従って、見込形状のメッシュ頂点 \mathbf{p}_j^{CPI} は、式(2)(3)で求められる。

$$\mathbf{p}_0^{CPI} = \mathbf{p}_0^0 \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_j^{CPI} = \mathbf{R}(-\alpha\theta_j^i) \{ \mathbf{p}_j^0 - \mathbf{p}_{j-1}^0 \} + \mathbf{p}_{j-1}^{CPI} \quad (3)$$

実際の 3 次元メッシュに対する見込形状メッシュは、以下の手順で導出する。①基準形状とスプリングバック形状メッシュの対応頂点において、変位がゼロの拘束点集合を発見する。②拘束点集合を、初期補正済み頂点集合とする。③補正済み頂点集合に含まれ、その 1 近傍頂点が未補正頂点集合に含まれる基準形状頂点において、式(3)を用いて見込形状頂点の候補点 \mathbf{p}_j^{CPI} を算出する。④上記の未補正 1 近傍頂点は通常複数あるため、それら候補点の重心点を、その未補正頂点の見込形状頂点 \mathbf{p}_j^{CPI} と定め、この頂点を補正済み頂点に更新する。⑤上記③④を、未補正頂点なくなるまで繰り返す。ここで θ_j^i は基準メッシュの頂点の法線ベクトルとスプリングバック後の頂点の法線ベクトルから算出される。

3.2 複数スプリングバック解析結果に基づく見込形状生成

3.1 のような 1 回のスプリングバック解析のみに基づく見込形状生成では、成型誤差が必ずしも許容値以内に収まらない場合がある。そこで、見込形状に対するスプリングバック解析と見込形状修正処理を、スプリングバック形状と基準形状との誤差が許容値以内に収まるまで繰り返し、高精度な見込形状生成を行う方法を提案する。

この生成手法では、2 回目以降の見込形状生成は、基本的に 3.1 と同様の計算で行うが、その基準形状は直前に生成された見込形状に変える。従って、 i 回目に生成される見込形状の頂点 \mathbf{p}_j^{CPI} は、 $i-1$ 回目に生成された見込形状の頂点 \mathbf{p}_j^{CPI-1} から、以下の式(4)で生成される。ここで θ_j^i は、基準メッシュ頂点の法線ベクトル \mathbf{n}_j^0 と、 $i-1$ 回目の見込形状からスプリングバックしたメッシュ頂点 \mathbf{p}_j^{SBI} の法線ベクトル \mathbf{n}_j^{SBI} のなす角である。

$$\mathbf{p}_j^{CPI} = \mathbf{R}(-\alpha\theta_j^i) \{ \mathbf{p}_j^0 - \mathbf{p}_{j-1}^0 \} + \mathbf{p}_{j-1}^{CPI-1} \quad (4)$$

4. 解析結果と精度比較評価

図 4 に示す 590Mpa 級の高強度鋼板の S 字曲げを対象に、1 回のスプリングバック解析結果に基づく見込形状生成を、補正係数 $\alpha=1.2, 1.5$ で行い、さらに見込形状に対しスプリングバック解析を行い推定された成型誤差分布を図 5 に示す。またスプリングバック解析を 2 回実施し、1 回目の補正係数 1.2、2 回目の補正係数 1.0、1.2 として見込形状を推定し、同様に推定した成型誤差分布を図 6 に示す。なおスプリングバック解析ソフトウェアには Q-sheet (静的陽解法) を用いた。

図 5 より、見込なしの場合、基準形状とスプリングバック後形状間での最大誤差は 11.7mm、平均誤差は 6.07mm である。これに対し、 $\alpha=1.5$ の見込形状からの成型誤差は、最大誤差 8.0mm、平均誤差 3.79mm、 $\alpha=1.2$ では、最大誤差 5.2mm、平均誤差 2.5mm となり、見込により成型誤差を減少可能であることが分かる。また図 6 より、1 回目 $\alpha=1.2$ 、2 回目 $\alpha=1.0$ でスプリングバック解析を 2 回実施して見込形状を作成した場合の成型誤差は、最大 0.8mm、平均 0.42mm となり、スプリングバック後の断面形状も基準形状とほとんど一致していることから、本提案手法は、高精度な成型金型の見込形状生成が可能であることがわかる。

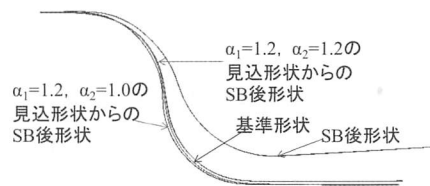


図 4 CAE によるスプリングバック解析結果

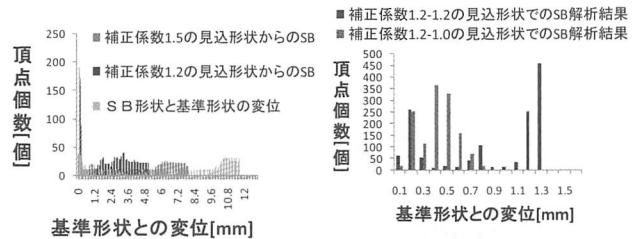


図 5 (左図) 基準形状と 1 回目の補正形状との変位と頂点個数の分布図

図 6 (右図) 基準形状と 2 回目の補正形状の変位と頂点個数の分布図

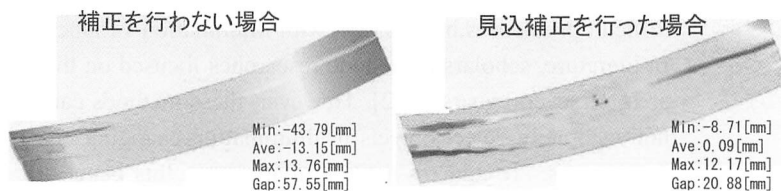


図 7 実成型における解析結果

5. 実製品での精度比較評価

図 7 に示す 980Mpa 級の高強度鋼板を材料とする自動車部品の CAD データに対し、提案手法により $\alpha=1.0$ で見込形状生成を行い、その見込形状で実際のプレス金型を製作してトライ成型を行った。また見込を行わない金型での成型も同時に行った。目標の最大誤差は 7mm である。図 7 のとおり見込を行わない金型での最大成型誤差は 58mm であったのに対し、見込を行った金型による最大誤差は 21mm にまで抑え込むことができた。また成型品の周長変化誤差も、従来の見込形状生成法[2]に比べ少ないことが分かった。今回、目標誤差以内にスプリングバックを抑えることは出来なかったが、スプリングバックを 2 回以上行う見込形状推定方法により、目標成型誤差は達成可能と思われる。

6. おわりに

メッシュ稜線長の不変条件を満たす、スプリングバック補正の見込形状を近似的に簡単に生成できる新たなアルゴリズムを提案し、スプリングバック解析シミュレーションならびに実成型の結果から、高精度な金型見込形状生成が可能であることを示した。

参考文献

- [1]山口文雄：プレス加工の工程設計，日刊工業新聞社 (2007)。
- [2]笹原孝利：CAE によるプレス金型のスプリングバック見込み形状の最適化，塑性と加工 (日本塑性加工学会誌)，46(534)，pp.63-67 (2005)。
- [3]R.Linbeck, J.Huetink et al：The development of a finite elements based springback compensation tool for sheet metal products, *Journal of Materials Processing Technology*, 169, pp.115-125 (2005)。