

負角自動解消機能の開発

The Function Development for Automatic Undercut Resolution

守 屋 怜

要 約 自動車の燃費性能向上, 衝突安全性向上を目的として, 車体部品への高張力鋼板 (High Tensile Strength Steel: ハイテン) の適用拡大が進められている。ハイテン材は普通鋼板と比べプレス加工後の弾性回復 (スプリングバック) が大きいため, 大きな見込みを必要とする。しかし, 大きな見込みを加えるとプレス金型形状がプレス方向に対し垂直未満の角度の部分「負角箇所」を持ってしまう場合があり, 絞り工程ではプレス成形が難しくなる。このため, 顧客から「負角箇所の自動解消機能を作れないか」との要望が挙がっていた。

これに応えるため, 弾性変形解析技術と補間変形技術を用いて, CAD 形状から負角箇所を自動的に検出, 解消する機能を開発した。依頼元が本機能を評価した結果, 作業時間を従来の 10 分の 1 に短縮する効果が得られた。

Abstract Use of High Tensile Strength Steel to carbody component has been promoted in the automobile industry for the purpose of improvement of the both fuel efficiency and safety in car collision. This material requires large compensation for spring back in press forming process because elastic recovery after pressing is larger than ordinary steel plate. But, when large compensation is applied, the die shape sometimes has undercut portion against the press direction, which must be avoided in press forming such as drawing process. Therefore, automatic function for undercut resolution has been wanted from engineers in press die industry.

In order to address this requirement, we have developed a new function to detect and resolve undercut portion in CAD model by using elastic deformation analysis and interpolating shape deformation techniques. The result of the evaluation performed by the requester showed that the working time was reduced by 90% compared to before.

1. はじめに

自動車の燃費性能向上, 衝突安全性向上を目的として, 車体部品への高張力鋼板 (High Tensile Strength Steel: ハイテン) の適応拡大が進められている。ハイテン材は普通鋼板と比べプレス加工後の弾性回復 (スプリングバック) 量が大きいため, 大きな見込み量を必要とする。しかし, 大きな見込みを加えるとプレス金型形状がプレス方向に対し垂直未満の角度の部分「負角箇所」を持ってしまう場合があり, 絞り工程ではプレス成形が難しくなる。この場合, 形状の負角を解消して絞り加工可能な状態に修正し, 複数工程を経て最終形状を得ることを考えなくてはならない。従来は非常に多くの工数をかけて手作業で見込み形状を修正し, 負角の解消を行っていた。「負角箇所の自動解消機能を作れないか」との要望が顧客から挙がったのは, このような背景によるものである。

本論文では顧客の要望に応えるべく CADmeister^{*1} 上に開発した, 負角の発生した見込み形状から自動的に負角部分を発見, 解消する機能について報告する。

2章では、負角箇所が発生原因である、プレス成形における鋼板の弾性回復現象と、これに対処する見込みと呼ばれる工程について説明し、従来どのように負角箇所に対処してきたのか述べる。3章では、負角箇所の見込みと修正を自動的に行う機能*2について述べる。4章では、機能に対する評価結果を報告し、5章では残された課題について述べる。

2. 負角の発生と対処

この章では、プレス成形において発生する鋼板の弾性回復現象、これに対処するため行われる見込みと呼ばれる作業と負角箇所の関係について説明した後、従来どのように負角箇所に対処してきたのかを述べる。

2.1 スプリングバックと見込み

金属板を金型ではさみ、圧力を加えると、曲げ部分で金属版の表裏に圧縮応力と引っ張り応力が発生し、圧力が取り除かれた（上型と下型が離れた）後にこの応力による戻り（弾性回復）が発生する。この現象を「スプリングバック」と呼ぶ（図1）。

このため、圧力が取り除かれた後に目的の形状を得るには、あらかじめスプリングバックを見込んだ金型を作成し、スプリングバック後に目的の形状になるようにしなければならない。スプリングバックを見込んだ形状を作成する作業を「見込み」と呼ぶ（図2）。

スプリングバックの予測は盛んに研究されており^[1]、経験に基づく推測から各種解析ソフトウェアの利用まで数多くの方法がある。

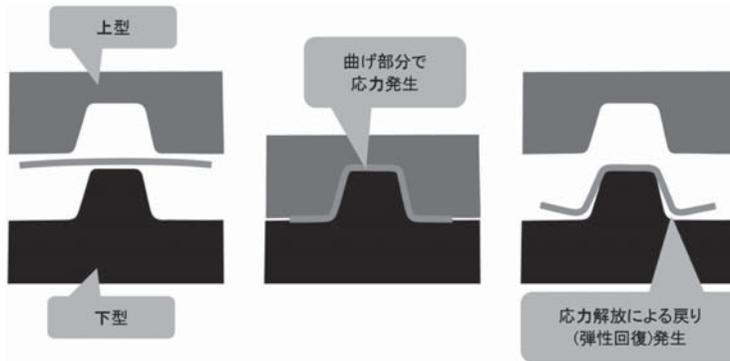


図1 スプリングバックの発生メカニズム

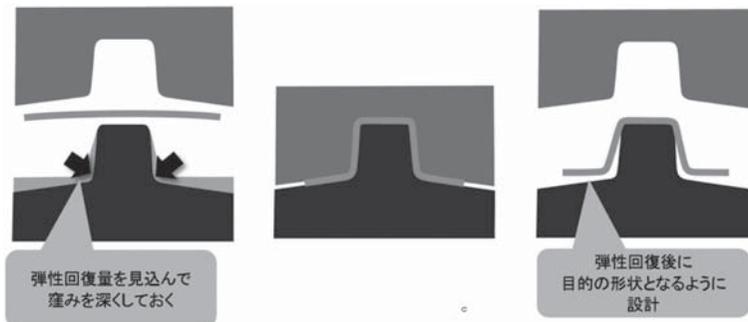


図2 スプリングバックと見込みの関連

2.2 負角の発生

仮に、何らかの予測手段によりスプリングバックを見込んだ形状が作成できたと仮定する。この形状を見込み形状と呼ぶ。すると次に課題となるのは、見込み形状から作成した金型はプレス成形可能かどうか、という問題である。プレス成形は上型と下型で金属板を挟んで成形する方法であるから、上型と下型は引き抜ける形でなければならない。金型を引き抜けなくしてしまうような形状部分のことを負角箇所と呼ぶ(図3)。見込み形状に負角箇所が存在すると、単純な絞り加工機では成形できなくなる。

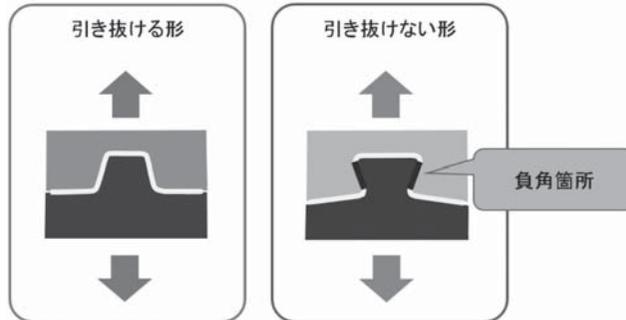


図3 形状と負角箇所

2.3 負角解消作業

見込み結果を活かしつつ成形可能な金型を作成するためには、見込み形状から負角箇所を取り除く必要がある。また同時に、負角の発生している箇所以外の形状特徴や見込み結果を損なわないように修正しなくてはならない。そのため、この作業は極めて複雑かつ手数を要するものとなる。この作業を負角解消作業と呼ぶ。

負角解消作業は高度なモデリング技能を要求するものであるため、負角解消作業にかかる工数の削減は見込み工程における課題の一つとなっていた。

3. 負角自動解消機能

この章では、見込み形状から負角箇所を自動的に取り除く方法について述べる。アイデアの骨子は、形状を単純な要素の連結集合(有限要素)に変換し、負角となっている要素を何らかの回転軸を求めて回転させ、負角を解消していくことである。このとき、回転させたくない部分は固定しておく必要がある。二次元平面上の曲線を見込み形状の断面線に見立てて考えると、曲線を折れ線近似し、プレス方向から見て最も手前にある要素から順に回転させ、かつ回転後は固定するようにして負角を解消していくと、全体の負角を解消できると推察できる(図4)。

4). ポイントとなるのは、以下の点である。

- A) CAD (Computer Aided Design) 形状をどのようにして有限要素に変換するのか。
- B) どのようにして負角となっている箇所を検出するのか。
- C) 負角となっている箇所を回転させて負角解消した場合に、周辺への影響をどのようにして求めるのか。
- D) 負角解消前後の有限要素からどのようにCAD形状を変形するのか。

C) は二次元平面上の曲線で考えた場合、回転させる要素と同じ回転をプレス方向奥側に隣接する要素列に適用することで実現できるが、三次元空間では立体的に要素が連結しているため、そう簡単ではない。

それぞれ、以下の方法により実現した。

- A) CAD 形状を三角形集合に分割。
- B) 各三角形の法線とプレス方向の成す角から負角となっている三角形を検出。
- C) 負角となっている三角形を回転により負角解消するために必要な頂点変位と固定頂点を条件とした連立方程式を解き、周辺要素の変位量を求める（弾性変形解析）。
- D) B-Spline 関数を利用した変形により CAD 形状を変形。

弾性変形解析を利用した CAD 面の変形については谷本^[2]が各三角形頂点の変位から推定する方法で実現しているが、この方法は三角形がゆがんでいる場合や各頂点における変位量差が大きな場合に面品質が悪化する問題を抱えていた。

このため、筆者が開発した機能では Free-Form Deformation (FFD) と呼ばれる B-Spline 関数を利用した形状変形^[3]を利用した。上記 A) ~ D) について、以降、それぞれ 3.1 節、3.2 節、3.4 節 ~ 3.5 節、3.7 節で詳細を説明する。

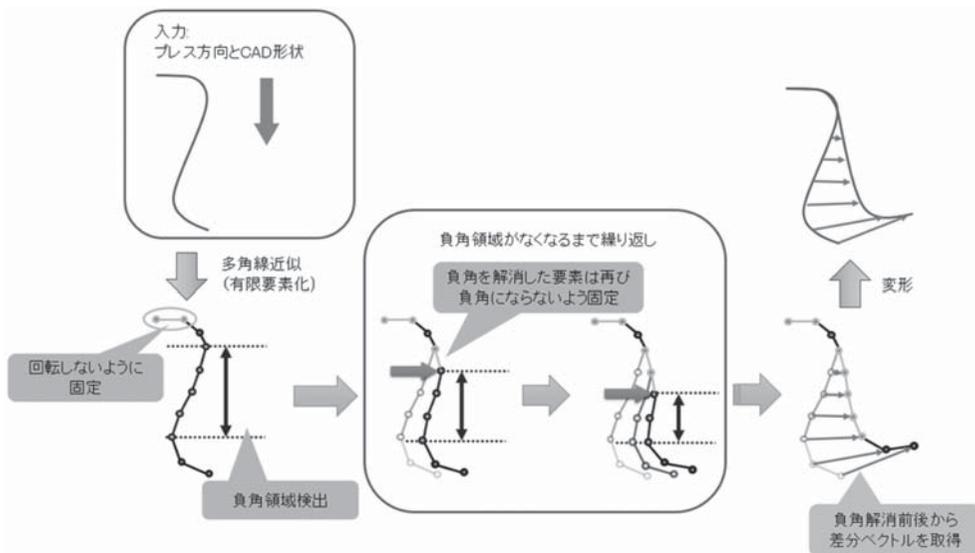


図4 負角解消計算の流れ

3.1 CAD 形状の三角形分割

見込み形状を CAD 形状（連続体表現）のまま扱い、負角箇所の検出や変形解析をすることは容易ではないため、CAD 形状を有限個の三角形の連結集合に変換する（図5）。これは FEM（有限要素法）で使われる要素集合の一種である。FEM で使われる要素は主として四角形または三角形が一般的であるが、今回は三角形を用いることにした。三角形であれば、向き付き法線を頂点の並びから求めることができ、各三角形の傾きを調べることで負角箇所の検出ができるためである。分割で得られた三角形を要素と呼ぶ。

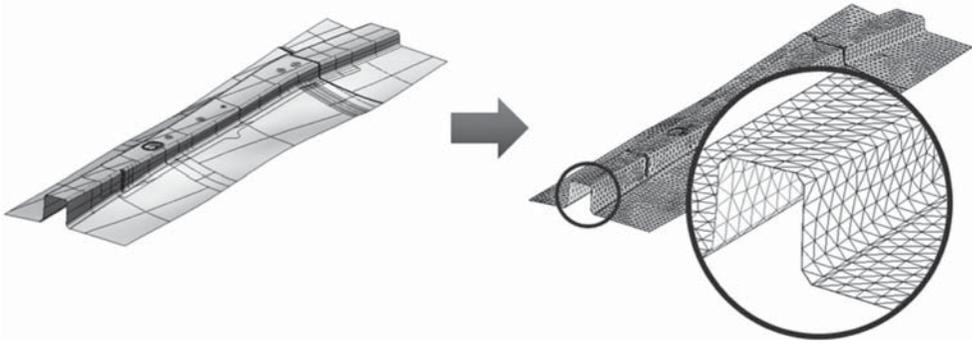


図5 形状の三角形分割

3.2 負角要素の検出

要素集合 S に含まれる頂点を $v_i (i=1..n)$, 要素を $e_j (j=1..m)$ とし, e_j の単位法線ベクトルを n_j とする. n_j と単位プレス方向ベクトル p から, 要素の傾き φ_j は以下の式で求められる (図6).

$$\varphi_j = \arccos(n_j \cdot p) - \frac{\pi}{2}$$

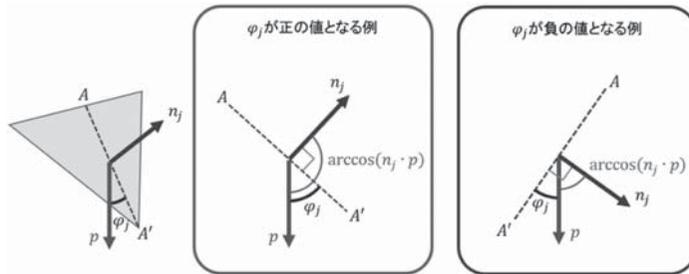


図6 要素断面 A-A' における φ_j 計算式の図説

負角判定角度 θ が顧客から指示されたとすると, $\varphi_j < \theta$ のとき要素 e_j は負角要素であると判定できる.

3.3 負角解消対象要素の選択

要素集合 S のうち, 負角と判定された要素の集合を U とする. U に含まれる要素から, プレス方向から見て最も手前にある要素を選び出し, 順次負角解消していく. 1回のイテレーションで負角解消する要素集合を T とする. 以下では T の選出方法について説明する. 説明のため, プレス方向に対する頂点の「高さ」 h を定義する. 頂点 v_i の高さを h_i とし, h_i を以下の式で定義する. この値はプレス方向が紙面下側に向かう方向の場合, 紙面上側に向かうに従い小さくなるような値である.

$$h_i = p \cdot v_i$$

T の選出方法は, 以下の通り.

U に含まれる要素の頂点集合から, 最小の高さ h_{min} を持つ頂点 v_{hmin} を選び, これを最初の基準点 v_{base} とする (図7-手順1). U に含まれ, v_{base} に隣接する頂点 $v_{neighbor}$ のうち, h_{base} とある閾値 ϵ 以内で一致する高さを持つ頂点がある場合 (図7-手順2), その頂点を次の

v_{base} とする (図7-手順3). 各頂点を同様の方法で辿って得られた頂点集合を T_v とし, T_v に含まれる頂点いずれかを要素内で最小の高さを持つ頂点とする要素の集合を T とする (図7-手順4). 実行イメージを図8に示す.

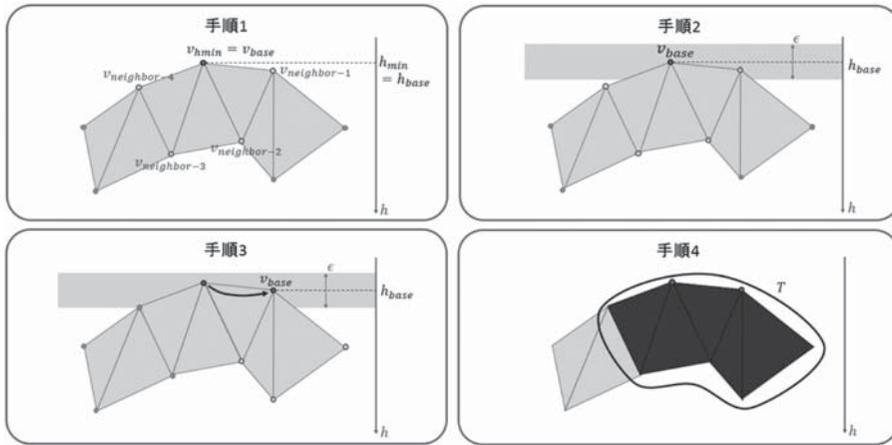


図7 T の選出方法

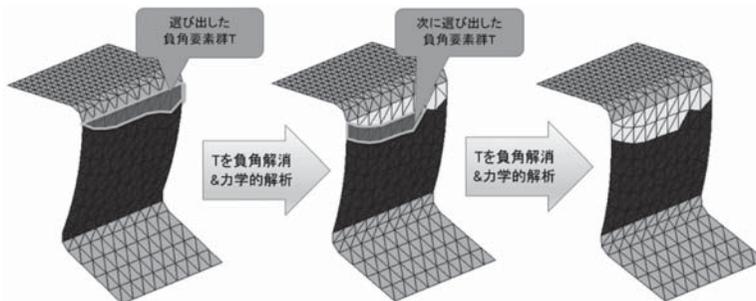


図8 実行イメージ

この方法は同一高さにある負角要素を同時に負角解消することを狙ったものであり, 要素一つ一つを負角解消する方法に比べ効率の面で優れていることから採用した.

3.4 負角解消に必要な変位量の計算

選び出した要素群を負角解消するために必要な変位量を, 選び出した要素毎に求める. 3章冒頭に示したアイデアに沿い, 要素から回転基準点と回転軸を求め, 負角が解消する回転後の要素位置を求める. 要素の回転前後差分から要素に属す頂点の変位を求め, これと固定条件を解析条件として弾性変形解析を行う. なお, 同一頂点に複数の変位が求めた場合は, 一番大きな変位を採用するようにした.

要素の回転基準点 (回転軸の通過点) と回転軸は要素から次のようにして求める.

- 1) 回転基準点は要素内で最小の高さを持つ頂点に定める
 - 2) 回転軸は要素辺のうち, プレス方向に対し最も垂直に近い辺と同方向に定める
- 本節では, この方法を採用した理由を説明する.

3.4.1 回転基準点の求め方

回転基準点を要素内で最小の高さを持つ頂点位置に置くと、要素に繋がる要素群のうち、より小さな高さを持つ要素が再び負角になる可能性を排除でき、順次負角解消する条件を満たすことができる。例えば要素内に回転基準点を置いた場合、固定箇所との位置関係によっては負角解消済みの要素が再び負角要素になってしまう可能性がある。すると順に負角解消していく処理が収束しなくなってしまう可能性があるため、望ましくない(図9)。



図9 回転基準点位置の考察

3.4.2 回転軸の求め方

回転軸を要素辺から選び取ることで、回転軸を安定して求めることができる。また、回転軸をプレス方向垂直に求める方法と比較して、形状に沿った回転を求めることができる。

図10は回転軸をプレス方向垂直にとる場合を左、要素辺方向からとる場合を右に示した図である。回転前を破線の三角形、回転後を実線の塗りつぶし三角形で示している。要素辺方向からとる方法の方が隣接要素と共有している頂点位置が離れにくく、形状に沿った自然な変形が実現できるであろうことが確認できる。

ただし、選ばれた回転軸がプレス方向に対し平行に近い場合、回転量を正しく求めることができず、負角が解消できない可能性がある。この問題を避けるため、回転軸がプレス方向に対し平行に近くなってしまう場合は、回転軸成分からプレス方向成分を取り除くことで、回転軸計算の安定性を向上させた。

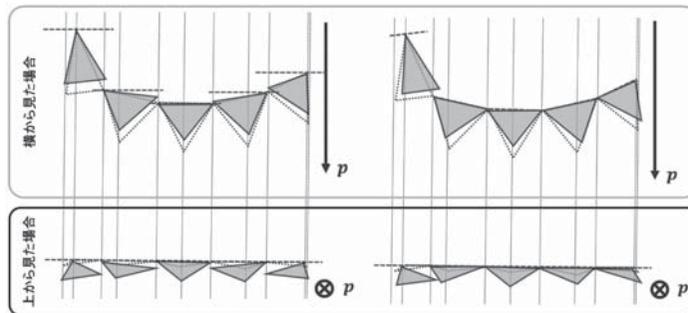


図10 回転軸をプレス方向垂直にとる場合(左)と要素辺方向からとる場合(右)

3.4.3 細長い要素への対応

以上の方法により求められる変位量は、三角形のプレス方向に対する長さ按比例して大きく

なる。このため、不確かな回転軸でプレス方向に細長い三角形を回転させると、不自然な変形を招き、計算結果が安定しない問題があった。また、プレス方向に対する長さが極端に短い“つぶれた”三角形を回転させた場合も、隣接三角形が大きい場合に隣接三角形がつぶれた三角形の回転に引きずられてプレス方向に対して平行に近い回転をしてしまい、負角を発生させてしまう問題が生じた。

経験的に、細長い要素は以上のような問題を引き起こして形状を暴れさせてしまうことが多かったため、以下の式で求められる比（アスペクト比）が0.1以下の三角形は負角解消処理の対象としない（ U に含めない）ことにした。

$$\frac{\eta}{l_{max}}$$

ここで、 l_{max} は要素3辺の中で最大のエッジ長を指し、 η は最大エッジ長を持つ辺を底辺とした場合の要素の高さである（図11）。

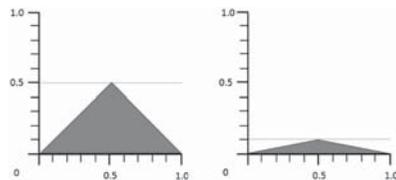


図11 l_{max} を1.0とした場合の $\eta=0.5$ 、 $\eta=0.1$ の三角形の例

3.5 弾性変形解析

求められた変位量が、回転対象要素の周辺にどのような影響を与えるのかを弾性変形解析により求める。弾性変形解析時には変位ベクトルや固定点といった拘束条件のほか、与えるパラメータとしてヤング率 E とポアソン比 ν 、板厚 t を設定しなければならないが、鉄板を想定しているためそれぞれ $E=2.1 \times 10^{11}$ 、 $\nu=0.3$ 、 $t=5mm$ とした。

3.6 収束計算

弾性変形解析の結果、少なくとも一つ以上の要素の負角が解消されたことになる。隣接する他の要素の負角も解消された可能性があるため、再度各要素のプレス方向に対して成す角を求めなおし、 $U=\emptyset$ となるまで3.2節から3.5節までの処理を繰り返す。

3.7 多面体データから形状への反映

有限要素に含まれる各頂点の負角解消前後の変位から、どのように変形すれば負角が解消できるか求まったことになる。このことは、頂点変位を滑らかに補間できるならば、曲面を変形できるということを示している。このような条件の変形方法にはB-Spline関数を利用するもの^[3]、RBF（放射基底関数）を利用するもの^[4]など、さまざまなものがあるが、今回はB-Spline関数を利用するもの（FFD）を用いた。

4. 効果と検証

負角自動解消機能の評価のため、評価用の単純なデータ（ a と呼ぶ）と、実在の製品データ（ β 、 γ と呼ぶ）で各種評価を行った。テストデータの形状を図12に示す。

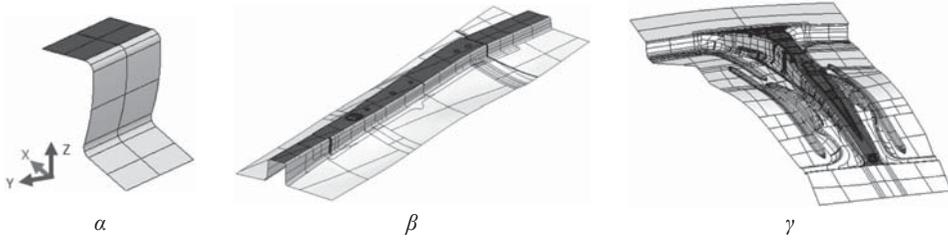


図 12 テストデータ

4.1 実行条件

図 12 中にそれぞれ濃灰色で示される位置の要素を固定要素とし、プレス方向を -Z 方向、 $\theta=0$ として実行した。

4.2 負角解消結果形状の評価

結果形状から負角箇所がなくなっているか検査した。結果を表 1 に示す。1 行目が負角解消前の形状から負角箇所を検出した結果である。薄灰色で示されている部分が検出された負角箇所である。2 行目が本稿で提案する手法により負角解消した後の形状から負角箇所を検出した結果である。薄灰色で示されている部分が解消し切れなかった負角箇所である。3 行目は負角解消前後で同一箇所の断面がどのように変化したか比較するための図である。薄灰線が負角解消前、濃灰線が負角解消後の形状の断面線となっている。断面から、負角解消に伴って形状の端部が持ち上がるかたちで、自然な変形を実現できていることが分かる。

表 1 負角解消結果表

	データ α	データ β	データ γ
負角解消前			
負角解消後			
断面線比較			

データ α では、形状から完全に負角を取り除くことができた。データ β 、 γ では、当初、部分的に負角箇所が残ったが、負角箇所をより細かい三角形に分割して実行することで解決でき

た. データ β の実行結果を図 13 に示す. 残っていた負角箇所 (薄灰色部分) が消滅していることがわかる.



図 13 データ β で三角形分割を細かくして実行した結果

4.3 負角解消結果形状の評価

負角解消処理にかかる処理時間について評価する. 実行環境は Windows7 64bit 版で, CPU は Intel Core i7 960 (3.2GHz), 12GB のメモリを積んだマシンである. 表 2 は負角解消解析 (3.2 節 - 3.5 節で説明した処理) にかかる時間と, 面変形 (3.7 節で説明した処理) にかかる時間を分けて記録したものである. β と γ について, 形状の大きさの差はそれほどなく, 負角解消解析にかかる時間もほぼ等しいが, 面変形にかかる時間に大きな差が出ている. これは β が 174 構成面しか持たないのに対し, γ は 1,356 構成面あり, 単純に面数が多いため処理時間がかかったと推測できる.

表 2 負角解消処理にかかる時間 (単位は秒)

	データ α	データ β	データ γ
負角解消解析	2.02	53.85	55.96
面変形	2.85	34.35	86.46
合計	4.87	88.2	142.42

4.4 顧客による評価

本機能開発の要望元であるプレス金型メーカー T 社に実業務データを用いて試行していただいた. 結果, 従来 5 時間かかっていた負角解消作業時間を 30 分に短縮することができたとの評価を受けた. これは本機能により 10 倍の効率改善効果があったことを示している.

5. 課題

考案した機能には, 主に二つの課題がある.

1) 固定拘束位置の制約

プレス方向に対し最も高い位置にある三角形から負角を解消していくというロジックのため, 固定拘束がプレス方向に対し低い位置にある場合, 良い形状が得られない場合がある. この問題は, 固定拘束箇所近傍から負角を解消していくことで改善可能と見られる.

2) 円筒など対称形状の負角解消

円筒や円錐など, 左右対称に変形されるべき形状は, 変位が対称に求まらないこと, 弾性解析を利用することによる偏りの発生などにより, 正しい結果が得られない場合が多

い。それぞれの図説を図 14 に示す。この問題は力学的解析を用いて負角解消結果を得ていることに起因する。このため他の変形手法を用いることで改善の可能性がある。



図 14 固定拘束により不自然な形状になる例と対称形状の負角解消ケースの例

6. おわりに

今回開発した機能を利用することにより、熟練の作業者が修正した結果と遜色ない負角解消後形状を自動で、かつ短時間で得ることができるようになった。今回開発した機能は CADmeister 開発の過程で培った弾性変形解析技術、および変形技術の上に成り立つ機能である。今後もこれら要素技術の改善・研究を続け、課題を解決し、顧客に役立つ機能を持つ製品を提供し続けるよう努めていく。

最後に、本開発業務および本稿執筆でご指導いただいた皆様に感謝いたします。

-
- * 1 CADmeister は、日本ユニシス・エクセリューションズ株式会社が開発した国産唯一の 3 次元統合 CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design/Manufacturing/Engineering) システムである。CADmeister は、日本ユニシス・エクセリューションズ(株)の登録商標である。
 - * 2 負角箇所の見直しと修正を自動的に行う機能について特許出願済み (特願 2015-007405)。

- 参考文献**
- [1] 吉田亨, 上西朗弘, 磯貝栄志, 佐藤浩一, 米村繁, “高強度鋼板のスプリングバック予測精度向上のための材料モデル”, 新日鉄技報, 新日鐵住金, No. 392, 2012 年 3 月。
 - [2] 谷本茂樹 “曲面の力学的変形とその応用”, ユニシス技報, 日本ユニシス, Vol. 30 No. 1, 通巻 104 号, 2008 年 6 月。
 - [3] T. Sederberg and S. Parry, “Free-Form Deformation of Solid Geometric Models” ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '86 Proceedings), vol. 20, 1986, pp. 151-160.
 - [4] Mario Botsch, Leif Kobbelt, “Real-Time Shape Editing using Radial Basis Functions”, EUROGRAPHICS 2005, Volume 24 (2005), Number 3.

執筆者紹介 守屋 怜 (Satoshi Moriya)

2010 年日本ユニシス・エクセリューションズ(株)入社。自社開発 3 次元統合 CAD/CAM システムの形状処理機能の開発、見込み変形機能の開発に従事。2014 年 4 月より理化学研究所客員研究員。

