

曲面の力学的変形とその応用

Physical Deformation of Surface Model and its Application

谷本茂樹

要約 鋼板のプレス加工では、加工前の形状に戻ろうとする弾性変形が発生する。そのため、金型形状に、弾性変形の発生をあらかじめ見込むよう補正する必要がある。見込み作業では、CADモデル上の何点かに指示された移動量をもとにモデル全体を変形する。従来の変形方法は、変形量の補間計算に数式をあてはめていたため、鋼板の変形としてはあり得ない形状を作ることもあった。CADモデルの変形が鋼板の弾性変形に近い結果になることが適切であると考え、鋼板の変形をシミュレーションし、その結果をもとにCADモデルを変形するシステムを開発した。また、この考え方を、曲面CADモデルにあいた穴を埋める機能や、部分的な測定データに曲面CADモデルを押し当てるよう変形する機能にも適用した。

Abstract The steel plate can spring back due to its elasticity after pressing. Therefore, the die shape needs to be compensated for anticipating the elastic deformation. In the compensation process, the whole of CAD model is deformed based on displacements given at some points on the CAD model. Conventional methods have applied the numerical formula to interpolation of displacements, but it might often create unrealistic shapes for the steel plate deformation. We assumed that the deformation of CAD model was appropriate for approximating the elastic deformation of the steel plate. Therefore we developed a system that would simulate the elastic deformation, and deformed the CAD model based on the simulation results. Furthermore we applied this idea to the surface-hole filling and the CAD model fitting to partially-measured data.

1. はじめに

自動車の車体などの製造に用いられている、鋼板を曲げて形を作る成型法にプレス加工がある。プレス加工は、上下の金型の間に鋼板をはさみ、強く締めつけることで、金型に彫られた形を鋼板に転写する加工法である。プレス加工すると、鋼板がプレス前の形状に戻ろうとするスプリングバックと呼ばれる弾性変形が発生する。そのため、金型の形状を設計する際に、作成したい製品と同じ形を作るのではなく、スプリングバックした後に求める製品形状と一致するよう、あらかじめスプリングバックによる戻りを金型に見込んでおく。

このプレス金型への成形性見込みでは、金型表面のいくつかの点の変形量を決めて、金型全体の変形を行うことが多い。そのため、曲面CADモデル上のいくつかの点に移動指示することにより、鋼板の変形をシミュレーションして、モデル全体を変形する機能を開発した。本論文では、開発の背景と変形アルゴリズムを説明する。また、この考え方を応用して、穴を埋める面の作成機能や、部分的な測定データに曲面CADモデルを押し当て変形する機能を開発したので、これらの機能についても説明する。

2. プレス金型の成形性見込み

スプリングバックによる戻り量を金型に見込むために、スプリングバックの発生する方向と逆側に、金型表面を適正量変形させる（図1）。しかし、スプリングバック後の鋼板形状が製品形状と一致するように見込み変形量を推定することは非常に難しい。金型を作り、試作プレスをしてみると、試作品と製品CADモデルの間に違いが生じることが多い。この差異をもとに、金型CADモデルに対して見込み量の補正を行い、再度試作プレスを行うというサイクルを何度も繰り返す（図2）。

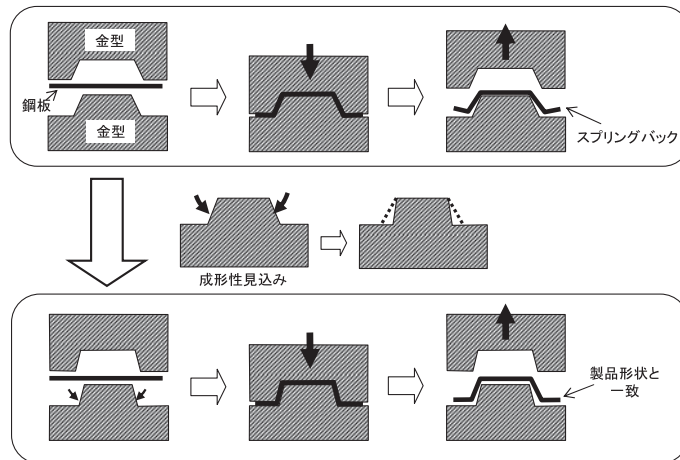


図1 スプリングバックと成形性見込み

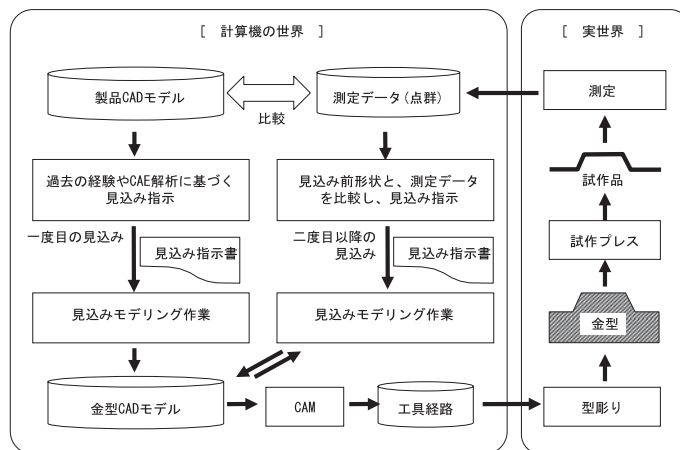
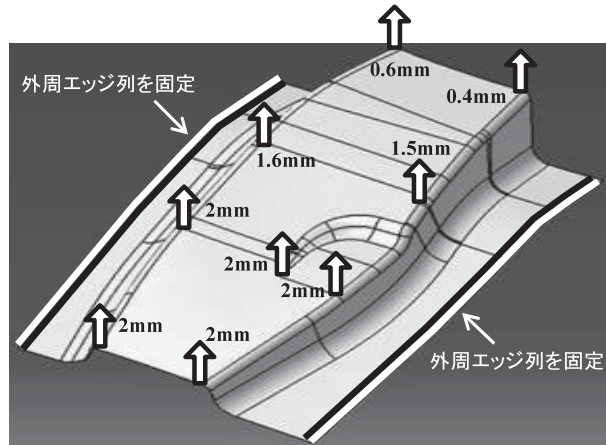


図2 成形性見込みの作業工程

一度目の見込みでは、類似製品への過去の見込みの経験や、CAE解析の結果に基づき、設計者がCADモデル上のいくつかの点に対して、移動方向と移動量を決め（図3）、見込み指示書を作成する。見込み指示書に従い、製品CADモデルに見込み量を織り込んだ金型形状をCADシステムで作成する。二度目以降の見込み工程では、試作品を測定器で計測し、測定データと製品CADモデルを比較する。測定データと製品CADモデルが許容値以内で一致すれ

ば、戻り量の見込みが適切に行われたと判断できる。差異がある場合には、金型への見込み量の反映が適切でないことになり、見込み設計者は、測定データと製品 CAD モデルの差異をもとに、金型 CAD モデルの形状補正を検討し、見込み指示書を作成する。一度目の見込みと同様に、見込み指示書をもとに、金型 CAD モデルに変形が施される。



両端を固定し、中央の数点をリフトする例

図3 見込み指示の例

最近では、自動車の軽量化のために、ハイテン材と呼ばれる強度が高く薄い鋼材が用いられている。ハイテン材は、プレス加工後の弾性戻りが大きいため、適切な見込みを行うことがさらに難しくなり、前述の見込み補正サイクルを多く繰り返すことになる。自動車の開発期間短縮が求められている状況下で、見込み作業は自動車開発のボトルネックの一つであり、見込み作業の期間短縮が重要になっている。そのため、繰り返し回数の削減と、繰り返す補正作業の効率化が求められる。繰り返し回数の削減には、見込み量を予測する CAE 技術の向上や、過去の見込みデータの蓄積と有効利用が期待される。作業の効率化には、見込み指示書に基づく形状修正作業に多くの時間が費やされているため、形状修正作業の期間短縮が必要である。

本開発では、見込み指示書に基づく見込み変形操作をイメージして、CAD モデル上のいくつかの点を移動指示することにより、CAD モデルを鋼板のように変形する機能を実現した。

3. 既存アルゴリズムの課題

CAD データの見込み変形には、前述のように CAD モデル上の複数の点に移動指示することにより、CAD モデル全体を変形する機能が求められる。この機能で重要なのは、指示点間の移動ベクトルの補間処理である。補間の問題を単純化するために、線の変形で説明する。図4は、線の両端を固定し、中央の2点をリフトする変形の例である。計算機の仮想的なモデリング空間では、無限の変形パターンを作ることができる。従来の CAD システムでは、移動ベクトルの変化に、直線/放物線/スプライン曲線などの数式を当てはめて補間していた。このような補間方法による CAD モデルの変形は、金属の伸びの限度を超えた表面積の増減や、人工的な曲がりの発生という金属の弾性変形としてはあり得ない結果を作り出すこともある。求める形状にならない場合、CAD 操作者は、見込み指示に従って、構成面を少しずつ取り出して

変形処理したり、構成面を再作成するなどの回避操作を行っている。

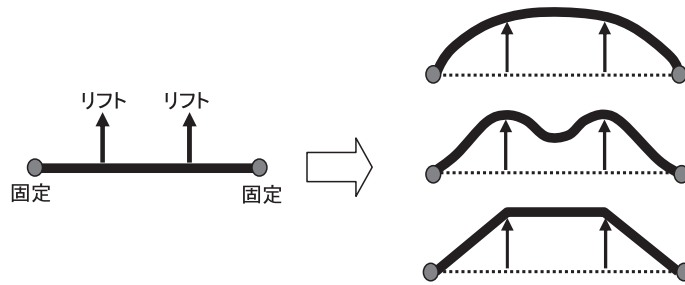


図4 線のリフト

4. 新しい発想

前章で述べた「金属のような弾性変形」という課題を解決するために、CADの曲面変形を物理現象として捉え、CADモデル上の変形量を力学的に決定しようという着想を得た。CAE技術を利用すると、実世界の金属の弾性変形を計算機でシミュレーションできる。また、シミュレーション結果をもとにCADモデルを変形する機能は、日本ユニシスグループのDynavista^{*1}やCADmeister^{*2}で「ねじれ見込み」機能として提供されている^{[1][2]}。このシミュレーションとCAD変形機能を組み合わせ、一連の処理を自動化することにより、通常のCAD機能と同様の操作性で、鋼板の弾性変形をシミュレーションするCADモデルの変形機能を実現できる。

CADとCAEは、ソフトウェアもデータ表現も異なり、操作者まで異なることもある。しかし設計業務では、CADとCAEは密接に関係している。たとえばCADシステムには、簡単なCAE解析を行う機能や、CAEの解析結果を利用する機能が開発されてきた。これらの機能は、CAEをCADの外部のシステムとして位置づけ、CADとCAEを連携させている。本論文で述べる機能は、CAD操作者にCAEを使うことを意識させず、CAEシミュレータをCADシステムの一部として内包し、自動実行するところに新規性がある。

5. 実装

前章で述べたように、鋼板の弾性変形をCAEシミュレーションし、その結果を使ってCADモデルを変形する。この処理は、図5のように3モジュールで構成する。

- ① CAEを利用するために、CADモデルから、CAEシミュレータが扱う有限要素モデル(FEMモデル)を作成する。
- ② FEMモデルのいくつかの節点に強制変位を与え、鋼板の弾性変形をシミュレーションすることにより、FEMモデル全体を変形する。
- ③ 変形前のFEMモデルと変形後のFEMモデルの差異を、変形対象のCADモデルに反映させて変形後のCADモデルを作成する。

ソフトウェアの実装では、②に外付けのCAEソルバを、③にDynavistaの「ねじれ見込み」コマンドを利用した。開発したシステムの入力は、変形対象のCADモデルと、変形指示(点や線と、その位置での移動方向、移動量)であり、出力は変形後のCADモデルである。

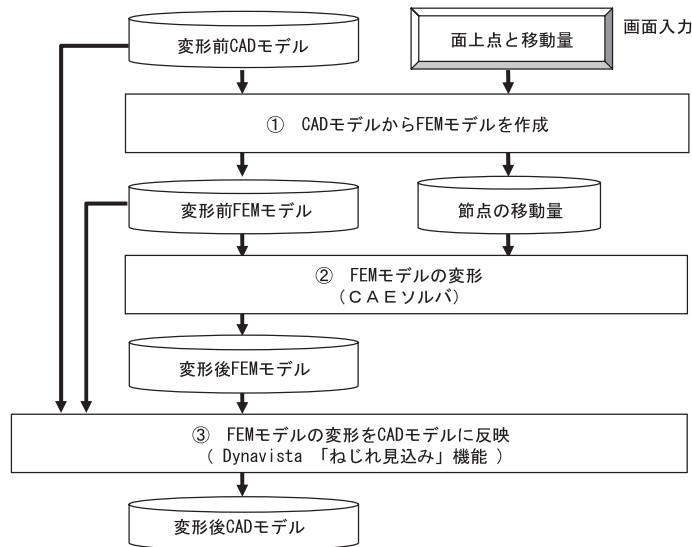


図5 モジュール構成と処理の流れ

5.1 FEM作成

CADの曲面は、高次多項式等で表現するが、有限要素法でシミュレーションするためには、面形状をFEM（シェル）モデルと呼ばれる三角形や四角形の集まりで表現する必要がある。FEMモデルの個々の三角形や四角形を要素、要素の頂点を節点という。

本開発では、精度よくシミュレーションするために、次の点を考慮したうえで、曲面CADモデルを三角形の集まりに近似した。

- ・ 要素には、大きさのそろった正三角形に近いことが求められる。
- ・ 変形指示されたCADモデル上の位置に節点を作る必要がある。

5.2 FEMモデル変形

いくつかの節点の変位（移動）をもとに、鋼板の弾性変形をシミュレーションし、FEMモデル全体の変形を行う。有限要素法の静解析では、

$$[K] \{x\} = \{F\}$$

という力のつりあいの連立一次方程式が成立する。

[K] は、剛性マトリックスで、板厚やヤング率、ポアソン比などの材料の特性、要素と節点の関係、節点座標値などから計算する。

{x} は、節点ごとの変位ベクトルである。ベクトル {x} の成分は、節点ごとの3軸の変位量と3軸回りの回転量であり、成分数は節点数の6倍になる。

{F} は、節点ごとの外力のベクトルである。

今回の解析では、指示した節点に移動量（強制変位）を与え、外力は与えない。したがって、{x} の成分の中で、移動指示した節点にはその変位ベクトルの成分が入り、指示していない節点には解くべき未知の変位ベクトルが入る。{F} の成分では、移動量を指示した節点に対応する成分には動かすために必要な外力が未知数として入り、その他の節点に対応する成分にはゼロが入る。

この連立一次方程式を解き、すべての節点の変位ベクトルを求める。なお、ヤング率などの材料特性は、金属の種類を変えても、強制変位のみを与えている限り変形状に影響を与えない。

5.3 CAD モデル変形

前節のシミュレーションの結果、すべての節点の変位ベクトルが計算された。言い換えると、CAD モデルの面上に、三角形群の頂点の移動ベクトルが得られたことになる。この離散的な移動ベクトルをもとに、CAD モデルを変形する。本節では、Dynavista ねじれ見込みに実装されている CAD モデルを変形するための重要な要素技術について説明する。

1) 移動ベクトルの三角形内の補間

三角形頂点での離散的な移動ベクトルから、CAD モデル上の任意の位置の移動ベクトルを決めるには、

- ① 求める位置から最近の三角形を探し、
- ② 最近三角形の頂点の移動ベクトルを補間する。

以下、②の補間計算について説明する。

CAD モデル上の点 Q の最近点を三角形上に点 P として求める。三角形の頂点を P_1 、 P_2 、 P_3 とし、各頂点での移動ベクトルを D_1 、 D_2 、 D_3 とする。重心座標により、 $\triangle PP_2P_3$ 、 $\triangle PP_3P_1$ 、 $\triangle PP_1P_2$ の比をウエイトに、 D_1 、 D_2 、 D_3 をブレンドして P の移動ベクトルを求め、このベクトルを点 Q の移動ベクトルとする (図 6(a))。単純に移動ベクトルを按分すると、図 6(b) のように加算前のベクトルと比較してベクトル長が短くなるため、ベクトル長の補正を行う。

また、三角形の内部の面の膨らみを、周りの三角形から推定する研究^[3]も行われている。本開発でも膨らみの新しい推定方法に取り組んでいる。周りの三角形を利用すると、構成面の境界付近では、周りの三角形が、隣接する構成面に乗ることもある。この場合、移動ベクトルが隣接面形状の影響を受け、面質悪化の原因にもなるため、三角形頂点の属す構成面の情報を考慮し移動ベクトルを推定している。

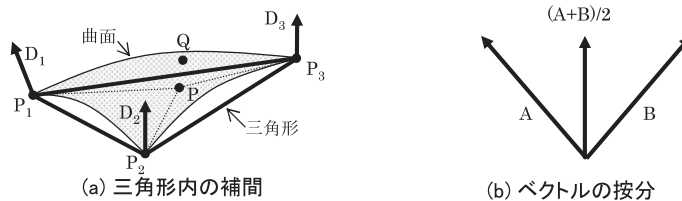


図 6 移動ベクトルの補間

2) 曲面式の変更

曲面 CAD モデルは、構成面をつなぎ合わせて作られている。構成面は、四辺形の基底面を閉曲線列 (境界線列) で切り取った部分面として表現される (図 7(a))。したがって、構成面を変形するには、基底面を変形する必要があるが、FEM モデル作成のために三角形分割し移動ベクトルが得られているのは、境界線の内側の部分だけであり、境界線の外側の基底面の領域は、どのように変化するか情報がない (図 7(b))。そのため、境界線内側の基底面上点の

移動ベクトルから、境界線外側の基底面上点の移動ベクトルを推定する必要がある。

また、変形前の面の性質を、変形後も保持するために、変形後の FEM メッシュの位置情報から基底面を再作成するのではなく、元の基底面の制御点（曲面形状を制御する点）を直接、最適な位置に移動させて変形後の曲面にする。必要があれば、基底面の曲がり方の表現力を高めるために、制御点を追加するが、前述のように試作プレスと再見込み処理が繰り返し行われるため、制御点の追加を最小限に抑制しデータ量の増加を防いでいる。

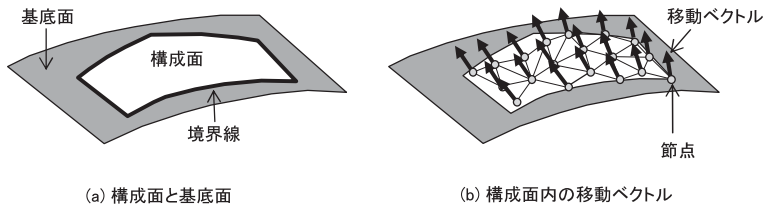


図7 構成面と基底面

3) フィレットの考慮

フィレットに対しては、変形前と同じ半径値を持つことや、隣接面と滑らかに接続することが求められる。そのため、CAD モデルから、フィレットやフィレット合流部を抽出し、変形前のフィレットの半径値を使ってフィレットを再作成するという処理を自動的に行っている。フィレットの再作成を行う場合と行わない場合の半径値の違いを図8に示す。

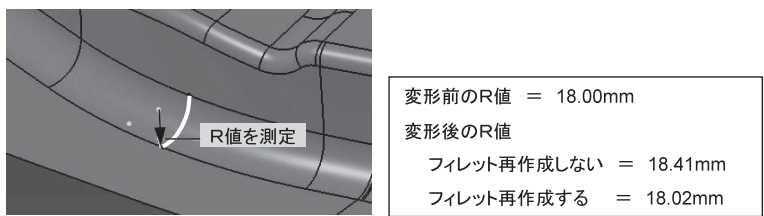


図8 フィレット再作成の例

6. 評価

ピラーの変形例を図9に示す。CAD モデルの右端を固定し、左端の2点を10mm リフトする例である。2.4GHz の PC で、実行時間は4分（シミュレーション1分、面変形3分）である。また、CAD モデルのデータサイズは、変形前が14.1MB、変形後が14.4MB と、ほとんど変わらない。表面積は、変形前が283,01mm²、変形後が283,05mm²である。また、設計者による試用では、鋼板の変形という考え方がわかりやすく、面質もいと好評を得た。

このように、鋼板の変形をシミュレーションして、CAD モデルを変形するという方法が有効であると確認できた。また、力学的変形を使用すると、見込み指示する点数を従来よりも減らし、シミュレータに指示点間の補間を委ねられるので、見込み方案の設計工数の削減や、設計者の技能の違いによる見込み品質の差の軽減の効果も期待できる。

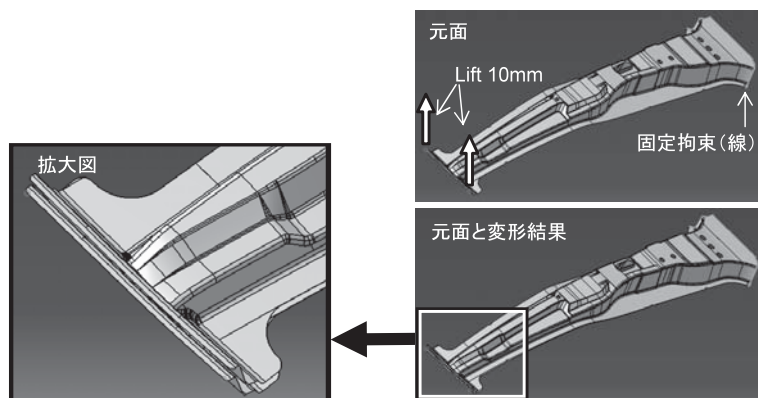


図9 力学的変形実行例

7. 応用

説明してきた力学的変形の考え方を応用して、曲面 CAD モデルにあいた穴を埋める機能^{[4][5]}や、部分的な測定データに曲面 CAD モデルを押し当て変形する機能を開発した。これらの機能について説明する。

7.1 穴を埋める面

プレス加工の絞り金型作成のために、製品 CAD データにあいている穴を埋める必要がある。1 面に開いた穴 (図 10(a)) であれば、面の基底面を利用して、穴を埋めることができる。複数面に開いた穴 (図 10(b)) の場合、従来の CAD システムでは、製品面の穴境界線を通し、穴周辺の面に滑らかに接続するという条件から、穴を埋める面の曲面式を算出している。しかし、このように曲面式を算出すると、穴境界線では接続条件を満たすが、穴の内部の形状作成は CAD システムの曲面作成アルゴリズムに委ねられているため、設計者の意図した形状にならないことが少なくない。望ましい形状が得られない場合、周辺面の延長、トリム、補間面の作成など多くの操作を組み合わせ、穴を埋める面を作成している。

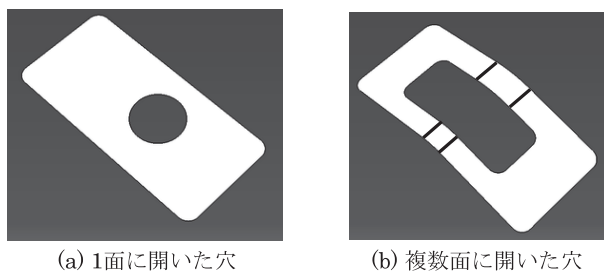


図10 複合面の穴

プレス金型の穴を埋める面として、どのような形状が適切であるかを検討した。作成する面は、プレス成型に適した形状であることが求められるため、プレス成型と同じように、平らな鋼板を製品の穴周辺に押し当てた時に作られる形状が適切であるという結論に至った (図 11)。鋼板の変形形状は、次のように力学的変形を応用して求める (図 12)。

- ① 穴よりも少し大きな鋼板形状を、平面状の曲面として作成する。
- ② ①の平面状の曲面のFEMモデルを作成する。
- ③ FEMモデルを製品CADモデルに押し当てる。すなわち、節点を平面に垂直な方向に製品CADモデルに投影する。穴の外側に位置する節点は、製品面上に位置が決まり、穴の内側の節点は、位置が決まらない。
- ④ 穴の外側の節点に、節点から投影点に至るベクトルを強制変位として与え、力学的変形のCAEソルバにより変形後のFEMモデルを求める。力学的変形では、操作者が入力していた面上点の移動量を、システムが自動的に算出する。
- ⑤ 変形前と変形後のFEMモデルの節点の差分を、①の平面状の曲面に反映させる。
- ⑥ ⑤で作られる面を穴外周線でトリムして、穴埋め面にする。

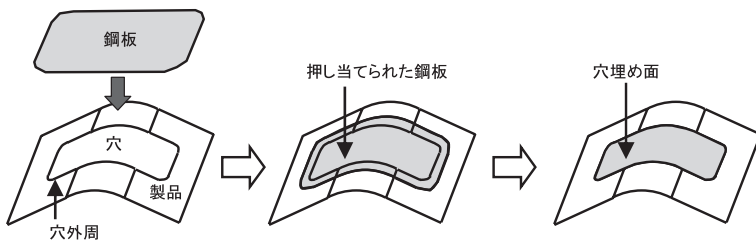


図 11 鋼板の押し当て

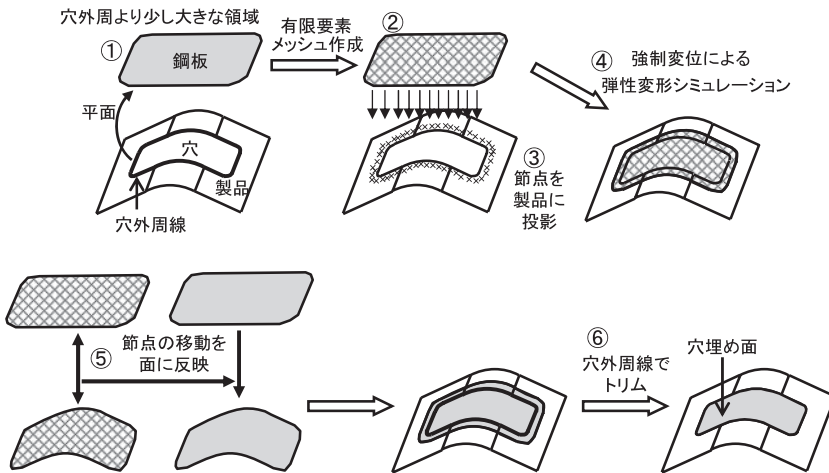


図 12 穴埋め手順

図 13(a)は、自動車のバックドアの窓を、この力学的変形を応用したシステムで埋めた例である。既存のCADシステムの穴埋め機能で作成すると、図 13(b)のように望ましくない膨らみが生じていた。

従来の穴埋め面作成では、作成される面の形状を設計者は予測できず、作られる面の品質にも満足できないことが多かった。力学的変形を応用した機能により、簡単な操作で望ましい穴を埋める面を作成することができる。

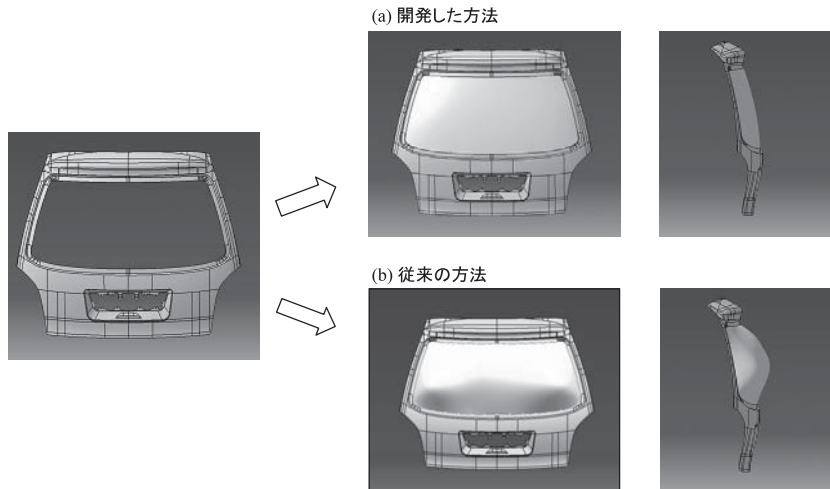


図 13 穴埋めの実行例

7.2 部分的な点群に対する押し当て変形

金型の破損に対応する目的や、海外の工場に国内と同じ金型を送る目的のために、金型 NC データから何度も型彫りすることがある。一方で、工作機械で切削した後の金型への人手による微修正を、金型の CAD モデルに反映する必要がある。そのために、微修正後の金型を測定器で計測し、測定データと一致するように CAD データを自動変形する。この変形機能も、Dynavista や CADmeister のねじれ見込みコマンドで提供している。

微修正反映工程の課題の一つに、測定データの領域が CAD モデルの領域より小さい場合の対応がある。この測定データの領域不足は、ダイフェース CAD モデルより絞り金型実物のダイフェースが小さい場合や、絞り金型に空気抜き穴を作ること、第 2 工程以降の金型では製品形状の一部だけを作ることなどの理由により生じる。従来の CAD システムでは、測定データが存在しない位置の CAD モデルの変形量を、前節の穴埋めと同様、測定データが存在する部分の変形量をもとに、数式の当てはめなどにより算出していた。そのため、点群外周付近や点群の存在しない領域で面質の悪化や、望ましくない変形結果を作り出していた。

力学的変形を応用することにより、測定データの存在する位置の変形量を強制変位として、CAD モデル全体を変形できる。以下①～④と図 14 にて手順を説明する。図 15 は変形の例である。

- ① 金型 CAD モデルから、FEM モデルを作成する。
- ② ①の FEM モデルの各節点で、測定データ上に対応点を求める。(たとえば、節点での面法線と点群データとの交点を求める。) 対応点が得られれば、節点から対応点に至るベクトルを、その節点の変位ベクトルとする。測定データの存在する領域では、変位ベクトルが決まり、測定データが存在しない領域では変位ベクトルを求められない。
- ③ 力学的変形の CAE ソルバで、①の FEM モデルに、②で得られた節点の変位ベクトルを強制変位として作用させることにより、測定データが存在しない領域の変位ベクトルを求める。
- ④ FEM メッシュの各節点の変位量に応じて、CAD モデルを変形する。

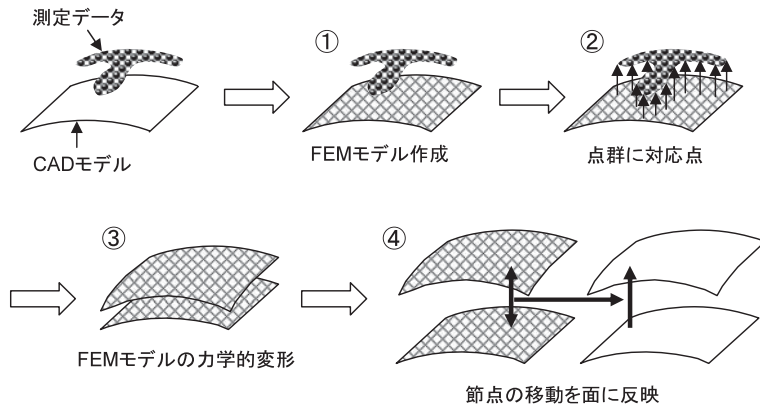


図 14 点群不足の変形

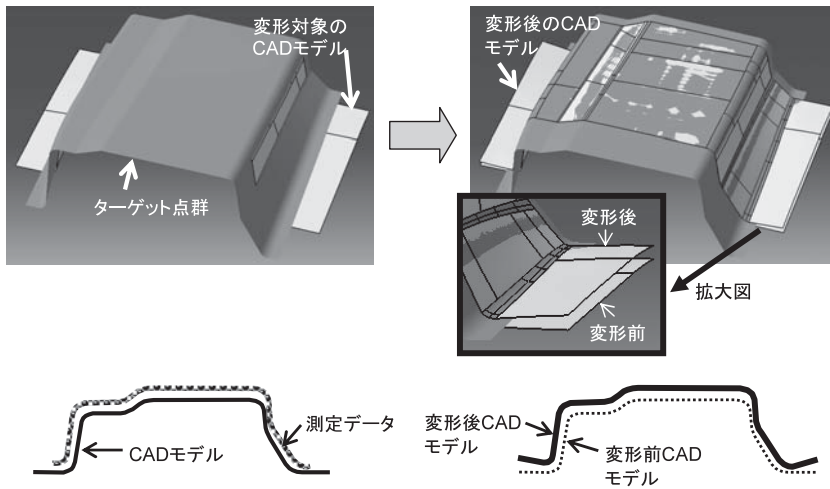


図 15 点群不足の変形の実行例

8. おわりに

従来のCAD機能で、面上点の移動指示から鋼板の弾性変形を見込むと、金属の変形としてあり得ない表面積の増減や、面質の劣化、データ量の増加などの問題が生じていた。従来のCAD機能が、変形指示した位置の間を、人為的に設定した数式により補間していた、実世界の金属の弾性変形にあう形状変形を行えなかったためである。筆者らは、鋼板の弾性変形をCAE技術によって力学的にシミュレーションし、算出した変位ベクトルをCADの変形に利用する方法を考案した。またこの考え方は、スプリングバックの見込み処理だけではなく、穴埋め面作成など例を示したように広く応用できる。

この手法は、CAEをCADの形状変形エンジンとして利用する点で、従来のCADシステムの限界を超え、CAD/CAEの密結合システムへの発展の可能性を示す画期的なアプローチであると考えられる。

* 1 Dynavistaは、製品設計から金型設計、製造にいたる全プロセスをトータルに支援する

- CAD/CAM システムである。Dynavista は、日本ユニシス株式会社の登録商標である。
- * 2 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 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式会社の登録商標である。

- 参考文献**
- [1] 中邨博之, 武井宏将, 「高品質な見込み変形機能の開発」, 型技術, 型技術協会, Vol.23 No.14, 2008 年 12 月, P36 ~ 37
 - [2] 谷本茂樹, 下期和敏, 松原達也, 「ポリゴンデータを中核とした CAD/CAM/CAE のあり方」, 型技術, 型技術協会, Vol.24 No.9, 2009 年 8 月, P23-27
 - [3] 長田隆, 「G1 長田パッチの精度検証」, VCAD System Research, VCAD システム研究会, 2008 年, P64-68
 - [4] 谷本茂樹, 中邨博之, 武井宏将, 「CAE 技術を利用する穴を埋める面の作成」, 型技術, 型技術協会, Vol.24 No.13, 2009 年 12 月, P90 ~ 91
 - [5] 谷本茂樹, 中邨博之, 武井宏将, 「CAE 技術を利用した穴埋め面作成機能開発」, 精密工学会春季大会予稿集, 精密工学会 (CD-ROM), 2010 年 3 月, 講演番号 B37

執筆者紹介 谷本茂樹 (Shigeki Tanimoto)

1977 年日本ユニバック(株)入社。形状処理を中心に、特定顧客向け CAD システムの受託開発に従事。また、CADCEUS, Dynavista のシステム設計、プロジェクトマネジメントを担当。2010 年 4 月、日本ユニシス・エクセリューションズ(株)に出向。

