

圧力分布の可視化技術で見えてきたもの

(株)アデック 久野拓律*

プレス加工のデジタル化とは何のため？はサーボプレスが開発されて以来のテーマである。1つの解は生産性の向上である。ようやく次の解は環境負荷軽減のためだと勉強させられた。成形荷重の軽減はCO₂排出量の軽減につながり、それは量産できることに気づいた。これを紹介する。

令和3年度に機械システム振興協会の事業として「プレス加工におけるデジタルトランスフォーメーション(DX)に関する戦略策定」が議論され、デジタル化、DX化の最終目標は次世代生産技術による価値創造である。と位置づけ、SDGs、カーボンニュートラルなどに対応した新技術の開発のために、プレス加工の特殊性に起因する各種課題を克服するのに、デジタル化技術が間違いなく強力なツールとなる。と紹介されている。実際、プレス加工がSDGs、カーボンニュートラルにどのようなデジタルツールを利用して取り組むのか？は非常に興味深いテーマであると感じる。

しかし、このテーマに取り組もうとすると、どこから手を付ければいいのかわからなくなるので手っ取り早くカイゼン活動のコストダウン結果をCO₂排出量削減結果に換算してみても？と考えた。つまりコストダウン＝CO₂排出量削減である。また、その排出削減量が自分が使用する1日の電気使用量の何時間分に該当するかを計算するとよ

りその効果が身近に感じるのではないかと考え、パネル1枚のプレス加工に費やす電気使用量が我々が家庭の生活で使用する電気使用量の何時間分に当たるかを考えてみた。

ここではプレス加工のみ（製鉄やコイルの運送、スクラップは除く）に使用されるCO₂排出量を考えてみる。

例えば1000kNの絞り加工を100mm深さ絞ったときのパネル1枚あたりにかけたエネルギーは $1000\text{kN} \times 100\text{mm} = 100,000\text{kN} \cdot \text{mm} = 100,000\text{N} \cdot \text{m} = 100\text{kJ}$ となり、 $1\text{kJ} = 1/3600\text{kWh}$ なのでパネル1枚あたりの電気使用量は $100\text{kJ} \times 1/3600\text{kWh/kJ} = 0.028\text{kWh}$ となる。ここで、東京電力エナジーパートナー(株)が公開している2020年度のCO₂排出係数は $0.441\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ とのことであるので、 $0.028\text{kWh} \times 0.441\text{kg-CO}_2/\text{kWh} = 0.0123\text{kg-CO}_2$ と計算できる。これは我々の過程で使用する電気使用量の何時間分だろうか？

CO₂排出量の換算法は電気の場合、1kWhを発電させるために排出されたCO₂量とあり、環境省の「2017年度の家庭のエネルギー事情をしる」調査によると1世帯が1年間に消費した電気は4,322kWhとある（実際はその他にもガスや灯油をエネルギーとして使用している）。よって電気だけのCO₂排出量は $4322\text{kWh} \times 0.441\text{kg-CO}_2/\text{kWh} = 1906\text{kg-CO}_2$ となり、1世帯あたりが年間1.9tものCO₂を排出していると考えるとびっくりする。また総務省統計局による2005年の1世帯当たりの平均人数は2.6人なので、人1人が1日

* (きゅうの たくのり)：代表取締役
〒252-0314 神奈川県相模原市緑区下九沢 1511-8
TEL：070-5450-9149 FAX：042-713-1585

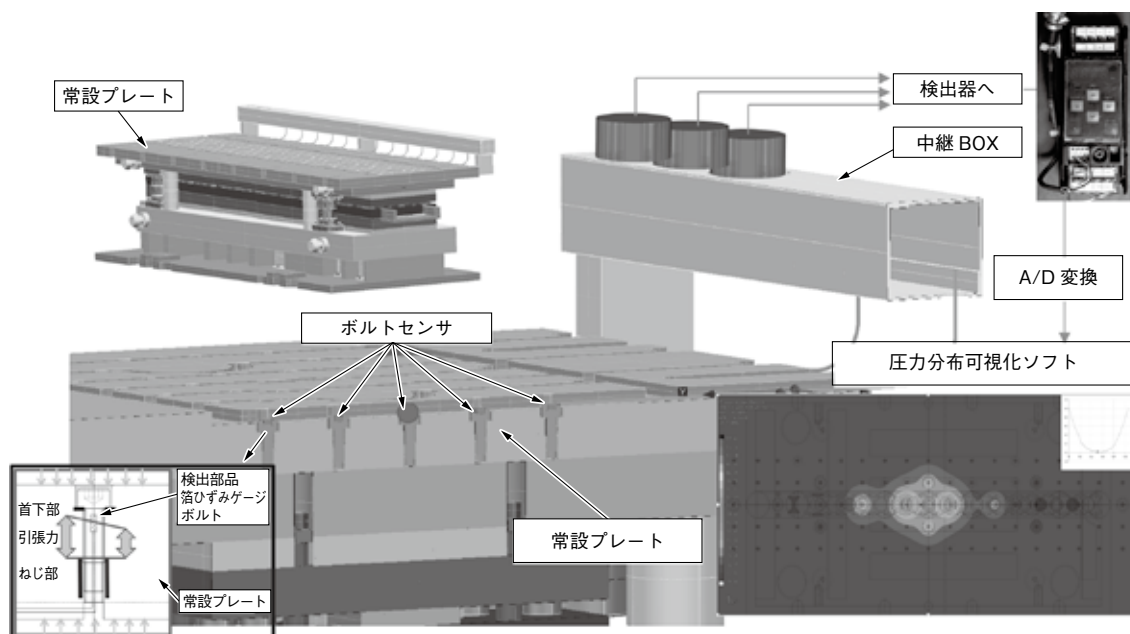


図1 圧力検出の方法とPDPSの構成

当たりに排出しているCO₂量に換算すると1906/2.6/365 = 2kg-CO₂/（人・1日）となり、家庭で使用する1人当たりの1日（24時間）の電気使用量は2kgのCO₂を排出していることになる。（仕事時間や通勤時間や総エネルギーを換算すると6kg-CO₂/（人・1日）という数字もネット上では確認できるが、ここでは出展のはっきりしている家庭での電気使用量 = 2kg-CO₂/（人・1日）を使用する）

ここからパネル1枚のプレス加工に費やす電気使用量（0.0123kg-CO₂）はおおよそ1人が家庭で使用する電気使用量の9分相当ということが計算できる。そう考えると型修正を何度も行う、非効率なトライで多くのパネルを無駄にするということは、いかにエネルギーの無駄使いなのかが肌で感じる。よっていかにして効率的なトライを行い、金型を玉成させるか？はコスト面でも環境負荷面でも大事な課題で、ここにどうやってデジタルツールを利用するか？は今後の地球温暖化にブレーキをかけるキーポイントになる。と感じている。

本稿ではCO₂削減のため圧力分布をデジタル化する手法は非常に有効なツールであることを事例と共に報告し、「無駄な荷重削減の量産効果」

という新たな価値に気づいたので紹介する。

圧力検出プレートシステム ～Pressure_Detection_Plate_System : PDPS

プレス金型の圧力分布計測の要件は、①大面積、②高圧力（数MPa～数百MPa）、③プレスに過負荷が生じてでも壊れない。④時系列観察があげられ、実質このようなシステムは存在しなかった。

本技術のポイントは（a）受圧部と計測部を分割し、（b）計測部構造をボルト締結とし、（c）ボルト軸力の緩み方向のひずみを物理量に変換したことにある。

圧力分布の検出方法は、図1（プレススライド側に設置している想定）の左下図に示すように、ボルトの軸力が計測できるようにひずみゲージが貼られたボルトセンサをプレス成形荷重と同じ方向にプレート内に複数締結しておくシンプルな構造である。図2を使用し、圧力検出の仕組みを説明する。このグラフは縦軸がボルトセンサのひずみ、横軸が外力となっている。まずプレートにボルトセンサを締付けると、

1. 締付けの外力が働くので、
2. ボルトの伸びが発生する。それにより、
3. ボルトセンサのひずみが引張側に増加する。

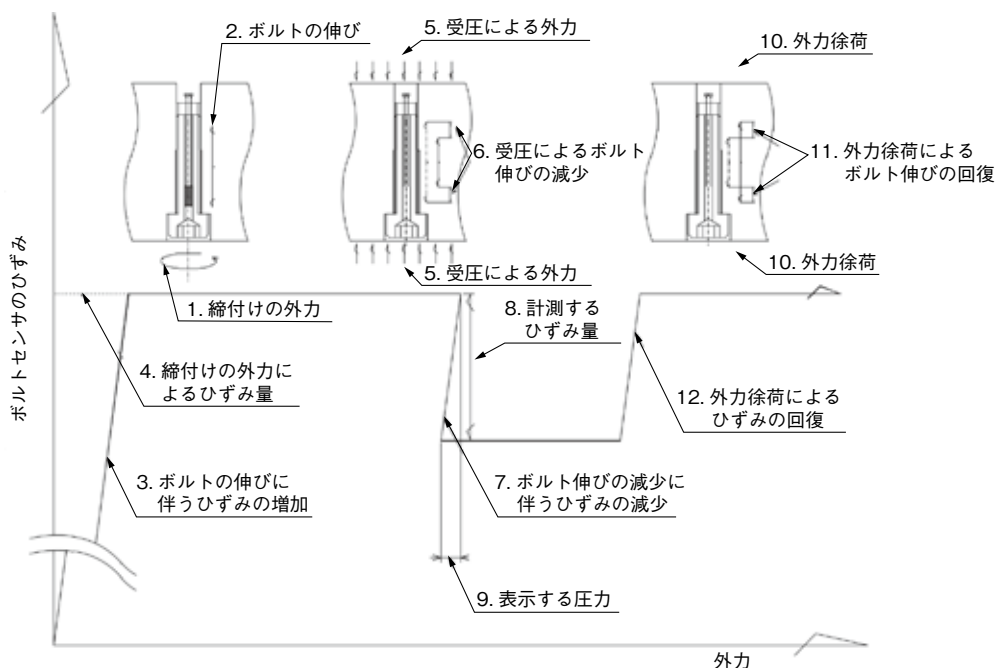


図2 圧力検出の仕組み

用している
ので時系列
で可逆的に
計測できる。
かつ、受圧
箇所（常設
プレート）
と圧力検出
箇所（ボル
トセンサ）
とが区分け
されている
ため大面積
への対応が
簡単で、圧
縮強度は常
設プレート
材質で選択
できるので
数百 MPa

そのときの締め付けトルクによって、

4. 初期ひずみ量は異なる。ここで圧力検出の準備状態となる。プレートに圧力がかかると、
 5. 外力がプレートに負荷され、ボルトセンサは2.で発生したボルトの伸び量が、
 6. 減少する。その際ボルトセンサのひずみも、
 7. 緩み方向に減少し、この減少したひずみ量を、
 8. 計測し、
 9. あらかじめ校正した圧力として表示する。
- その後、
10. プレートの外力が徐荷されると
 11. ボルトの伸びが回復し、2.の状態の伸び量と等価となるので、
 12. ボルトセンサのひずみも回復する。というサイクルで圧力変動が取得できる。3.のボルトの伸びに伴うひずみの増加の傾きは基本的に一定なので、4.最初にボルトを締め付けるトルクを一定にしなくても、また、外気温など環境の変化により、締め付け外力によるひずみ量の値が変わっても8.計測するひずみ量は変わらないという特徴がある。

このように圧力検出にはボルトの弾性変形を使

まで問題ない。また、プレスマシンにオーバーロードのような想定外の荷重がかかった場合でも常設プレートが塑性変形しない限り、圧力検出箇所は保護されるという特徴もある。

このプレートを使用したシステムを圧力検出プレートシステムと呼び、英名の頭文字を取ってPDPSと呼んでいる。PDPSはプレスマシンのスライドやボルスタに作用する圧力分布を時々刻々と金型図面上にマッピングすることができるシステムで、トライの効率化、成形不具合の自動検出、製品のトレーサビリティ、金型やプレスマシンの経年変化確認などへの利用が期待されている。加えて将来は取得されている膨大なデータとAIを組み合わせ、金型不具合の予兆診断、金型寿命や最適メンテ時期の予測などの提案ができるシステムを目指している。

本システムの構成を改めて図1で説明する。本システムは主に常設プレート、ボルトセンサ、中継BOX、検出器、圧力分布可視化ソフトで構成されている。金型に荷重が加わるとボルトセンサにひずみが生じ、そのひずみを検出器（株理研計器奈良製作所製荷重監視装置 NEW SELBER SL）がキャッチし、検出器はひずみ量をキャリブレーション

ションにて設定した圧力に変換し、正常成形の場合は圧力値のアウトプットのみを行い、異常成形の場合は圧力値とプレスマシンへの異常信号をアウトプットする。

その結果、プレスマシンは非常停止し、アウトプットさ

れた圧力値はPCに取り込まれ、PCではCAD上に金型図面とセンサ位置を対比させた時々刻々の圧力分布情報をマッピングする（UEL(株)製CADmeister IoT-Visualization）。これにより現場にいらなくても不具合状況が確認でき、マッピングされた情報により素早く現場へ対策を指示することも可能となるシステムである。

パネル成形金型におけるプレス機差確認

A社と型玉成時のトライ効率化に取り組んでいる事例を紹介する。

図3はA社製金型で、金型大きさが約1000×

パネル成形金型を用いたプレス機差確認：トライプレス（TD）と量産プレス（TR）

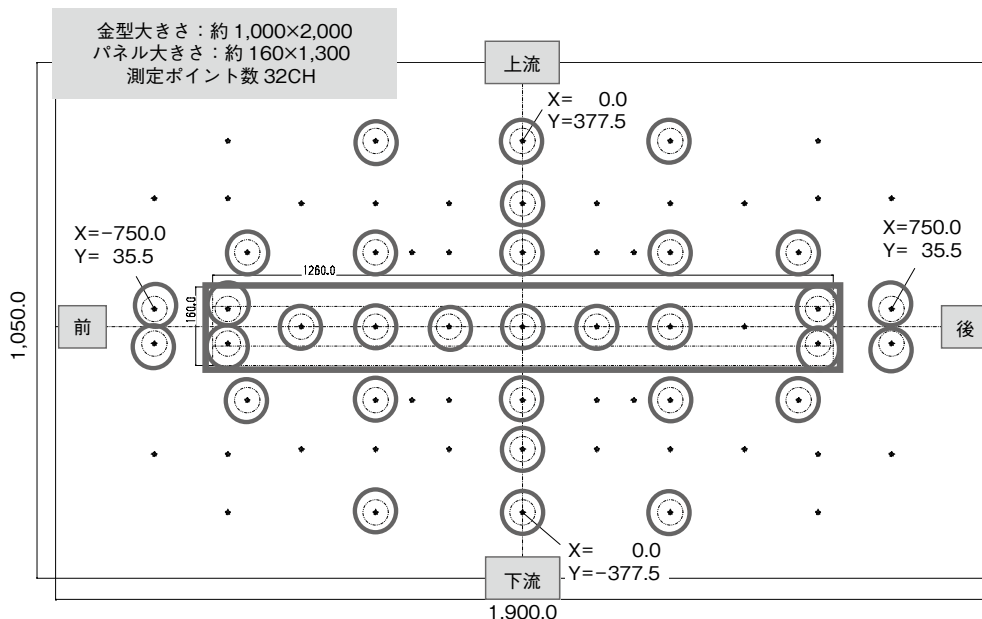


図3 金型、製品大きさとセンサ位置

2000、パネル大きさが約160×1300で図中の○で囲った32カ所にボルトセンサが設置してあり、圧力分布の検出が可能となっている。

この金型は既に量産プレスマシンで金型玉成が終了しており、量産している金型であって、トライプレスマシンとの機差の影響を大きく受けた金型である。この金型をトライプレスマシン（タンデム）と量産プレスマシン（トランスファ）の双方に載せ、同じ荷重をかけたときの下死点での荷重分布を図4に示す。左が量産プレスマシンで右がトライプレスマシンである。一目瞭然と量産プレスマシンは金型全域に圧力分布がほぼ均等にかかっているのが確認できるが、トライプレスマ

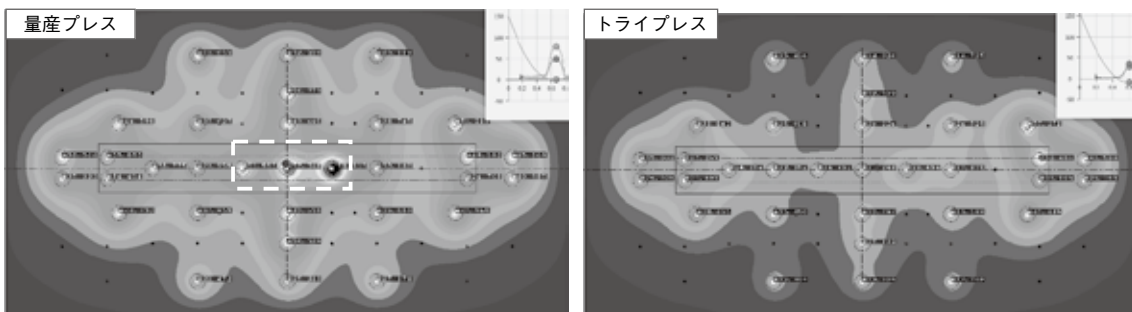


図4 プレス機差による圧力分布差

量産金型玉成までの TRY フロー

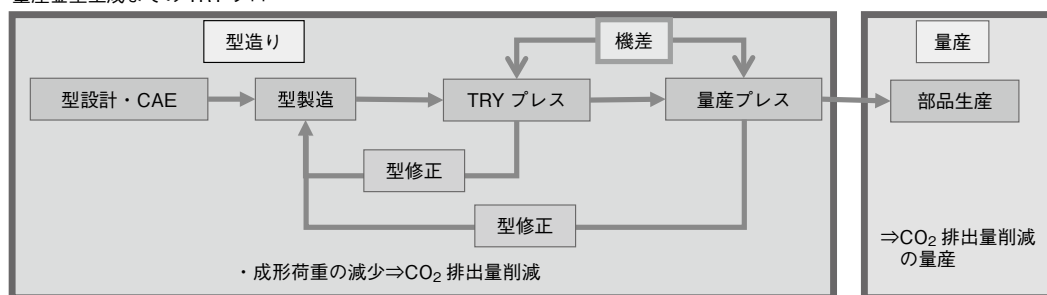


図5 型造りから量産までの工程フロー

シンにおいてはプレスマシン中心の圧力が低いことが分かった。この工程は製品精度を決める工程のため、胴突き成形と呼ばれ、下死点にて製品に上下型の全面を当てる必要があるが、トライプレスマシンの中央部の金型は当たりが弱いことが分り、これがプレスマシンの機差としてパネルに表れているのが確認できた。

CO₂ 排出量削減の量産効果

本技術を遂行するにつれ、前節で紹介したように成形圧力分布の可視化が可能となり、機差が確認できた。この結果以外に「無駄な荷重削減の量産効果」という新たな価値の気づきがあった。これは我々の産業界にとっての寄与度は非常に高いと感じ、以下に説明する。

図5に型造りから量産までの工程フローを示す。本図は型造りから量産までにおいてCO₂排出量削減効果とコストダウン効果の双方同時に行えるテーマをピックアップしている。型修正の工数が減ることはCO₂排出削減効果に寄与するので型造りにおいては前節で前述してきたように機差による型修正回数を減少させることが有効である。

加えて、ここでこのフロー全体を観ると、型造りにおいて型修正時に成形荷重を下げることであればそれはCO₂排出削減につながり、その排出削減効果は量産において量産効果として環境に大きく寄与できることに気づく。今までは同じ製品を成形するのに30,000kNプレスマシンを使用し、21,000kNで製造するのと20,000kNで製造するので製品価値は同じであった。しかし、今後は環境負荷を考慮した成形を行う必要があり、毎

年CO₂排出量の削減を行う必要がある。低荷重で成形した製品ほど、低エネルギー成形であり、CO₂排出量が少ないので環境に優しい。という新たな価値に気づいた。

しかし、成形荷重を下げるということができるのであろうか？今までの成形荷重とは、良品パネルが取れたときのプレスマシン荷重を正としてきた。ここで、良品が取れる荷重の決め方を考えてみた。主に最大荷重がかかる胴突き成形の場合、型全面を当てる必要があるが、プレスマシンと金型の成形設備には成形荷重による弾性変形が生じるので、この弾性変形が生じた状態で設計者の意図となる形状を金型に造形する必要がある、これが難しく、型修正回数の増加につながっている。

この造形結果の評価は、金型に光明丹と呼ばれるすり合わせ作業時に用いられるペーストを塗り、プレス成形の結果、光明丹が製品に均一に付着していることで確認しており、定量的な評価はできていなかった。この定性評価で製品精度がOKとなった段階で型玉成は終了であり、これを良品が取れる成形荷重としていた。つまり、金型が製品に強く当たっていても分かりづらく、無駄な成形荷重を負荷していてもわからなかった。

ここで、改めて図4の量産中の圧力分布を確認してみると中央の点線で囲った3箇所は他の場所に比較し、圧力が高いことがわかる。特に右側は点線で囲った周辺が35MPa程度であるのにここのみ78MPaと極端に高い。おそらくこの場所の金型が最も凸部分となっており、ここを支点として金型を変形させ、下死点で金型全面が当たっているものと推定できる。

このようにこのPDPSを使用することで、型造りの段階で適正な圧力分布となる調整が可能と

なるので、無駄な荷重を使うことなく、適正な荷重で量産できる可能性がある。これは PDPS を使用しないで調整した金型の荷重と異なるはずなので、その差分が CO₂ 排出削減割合として評価でき、量産効果として積み上げられる。このように同じ製品でも PDPS を使用することで最適エネルギー成形製品として付加価値をつけることができる可能性を見出した。

☆

☆

PDPS を使うことで圧力分布をデジタル化し、定量評価できるようになった。これにより、型修正回数の削減が確立されれば、コストダウンを行いながら、CO₂ 排出量を削減できるのではないかと期待している。また新たな気づきとして、PDPS を用い、型造り段階で最適な成形荷重に型調整すれば、「無駄な荷重削減の量産効果」という新たな価値を創造することができ、DX への期待が高まる。