

薄板ステンレスの高精度プレス成形技術の開発

Development of high-precision stamping technology for thin-plate stainless steel

岩内 謙治 (株ニイテック)

Kenji IWAUCHI, Niitech Corporation, 4-2-68 Heiseigahama, Saka-Town, Aki-Gun, Hiroshima Japan

Key Words: Stainless, Stamping, Springback, Technology/measurement

1. まえがき

昨今の自動車のデザイン性向上により、多くのカーメーカーで図1のようなSUSモール（SUS:ステンレス製）が採用されつつある。そのため、SUSモールの製品寸法、外観品質への要求は非常に高くなってきた。

一方でSUSモールは、成型加工において図2のようなスプリングバックが生じ、高難度であるため、図3のようなプレス成型を数回繰り返す多工程（6工程）となり、生産性が悪い。無理な工程短縮は外観を傷つけ易く、従来技術では、外観品質の確保とプレス成型工程の短縮の両立は困難であった。



Fig.1 Window mall for automobiles.

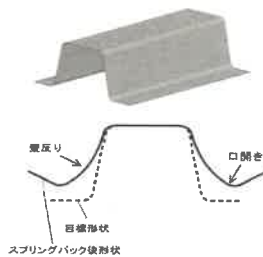


Fig.2 Springback

さらに製品の特長として、製品長が長い均質なプレス成型が困難なこと、また外装部品であるため素材に保護フィルムがあり成型条件の導出が極めて困難であることから、従来は品質を確保するためにも図3に示すように成型プロセスが6工程もあり、効率の悪い成型プロセスであった。

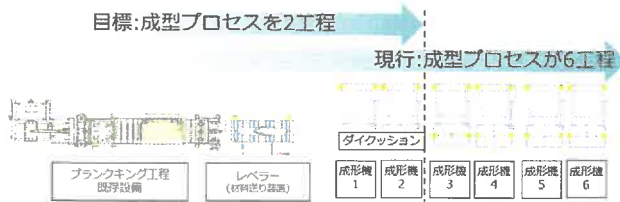


Fig.3 Stamping Process

そこでこのSUSモールの成型プロセスを効率化するために、開発目標を現行の1/3以下とした。これを実現するための重要な開発課題は、成型プロセスの短縮と成形品質の確保の両立である。

2. 課題の解決構想

プレス成型工程の短縮と外観品質の確保の両立を図るために、①SUS 成形の高精度 CAE モデル、②プレス成型の精密制御技術、③外観の 3D 精密計測技術の構築に取り組んだ。すなわち①で成形後の SUS モールの見込み変形量（スプリングバック量、外観不良）の予測で得た最適プレス成形条件で、②プレス成型を精密制御する。ここで外観不良（反り、たわみ）の要因であるダイクッション反発力の精密制御と、形状のばらつき要因である材料送り工程（レベラー）の最適制御を行う。さらにその成型結果の③外観の 3次元的高精度計測で、①SUS 成形 CAE モデルのさらなる高精度を図る、という図 4 に示す成型プロセスを考案した。

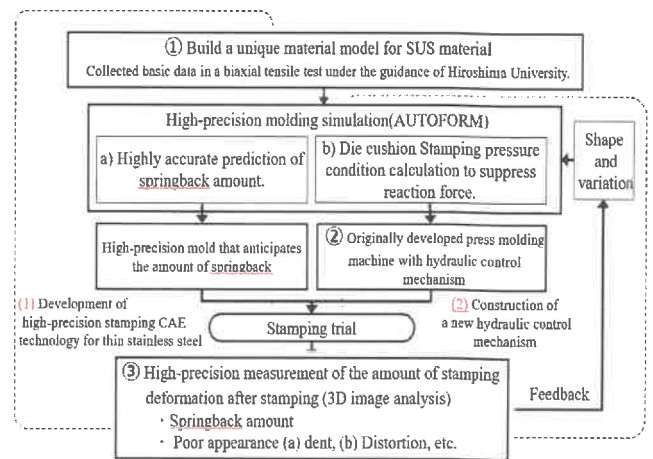


Fig.4 Problem solution concept

この工程を繰り返すことで、外観品質を損なわず、従来の6工程から2工程へ短縮していく独自の最小プレス成型プロセスの実現を狙った。

スプリングバック量の CAE 予測技術については、従来から自動車の車体の高張力鋼板（ハイテン）のプレス成型について、多くの研究、実用例があるが、本技術での SUS モールでは、さらに外観品質との両立を求められるため、単なるプレス成型 CAE 技術の開発だけではなく、プレス成型の精密制御との組み合わせを試みた。

3. スプリングバック量の CAE 高精度化

ステンレスのプレス成型によるスプリングバック量の CAE での予測精度の向上のために、図 5 のような二軸引張試験を行った。異方性曲面を求めるため二軸引張試験は、2 軸引張試験装置を使用し試験装置中央に張り付けた歪ゲージにより計測して求めた。

二軸引張試験は、x 軸と、それに直交する y 軸の二軸を独立に制御して、x, y 軸の荷重 P_x, P_y をフィードバック制御することで(公称)応力一定試験が可能である。

試験片中央に張り付けた二軸ひずみゲージで x, y 方向ひずみを計測応力は P_x, P_y をそれぞれ試験片断面積で除して計算した。

図 6 は、二軸引張試験の試験結果の一例で、これらを使って異方性降伏関数のパラメータを導き出した。さらにこれらの結果から、SUS 材の成形 CAE で使用する材料パラメータを導出した。

図 7 は、左側が材料パラメータが初期値での CAE 結果で、狙いの成形値の緑色の部分に対して大きく変位した、紫、赤色の部分が多い。この変位を小さくするために前述の材料パラメータを使用した。その CAE 結果が右側で、全体に緑色となっているように大きく改善できた。

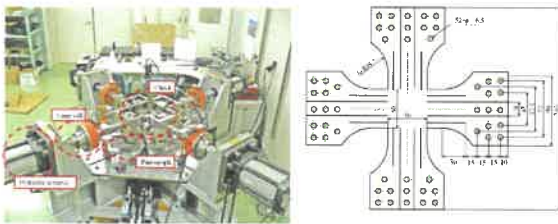


Fig.5 biaxial tensile test

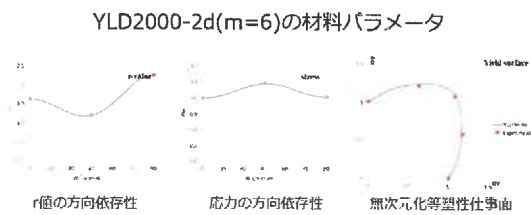


Fig.6 Improved prediction accuracy

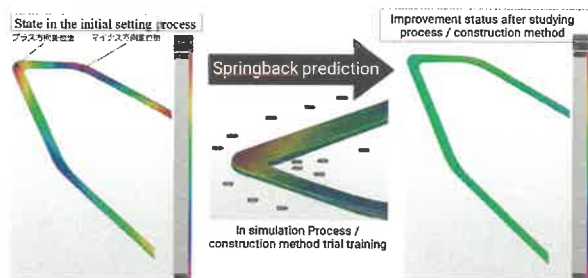


Fig.7 Establishment of high-precision molding simulation

4. 油圧ダイクッション&高精度ロッキング機構

高精度加工を実現及び維持するために、図 8 に示すような独自のプレス加工機を開発した。その特徴はサーボプレス機に搭載した油圧ダイクッションと高精度ロッキング機構である。

この両構造により薄板ステンレス成形加工のスプリングバック抑制による高い寸法精度と複雑形状のでデザイン性を実現した。

大きな構造特徴としては、高油圧の際でもロッキング精度(すなわち下死点でのクッションパット維持精度)が 0.2 mm 以下に抑えることが可能である。

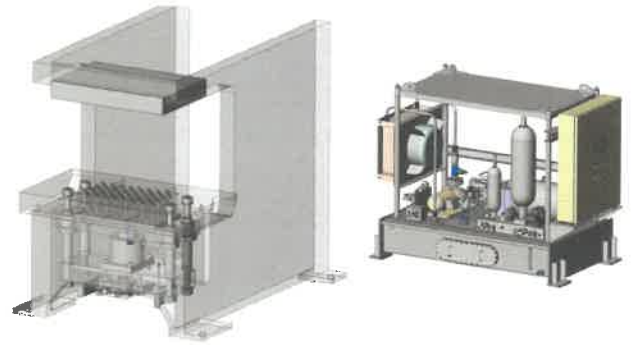


Fig.8 Locking device

5. モール変形量の高精度計測

成形後の SUS モール変形量、すなわちスプリングバック量、外観不良 (a) 反り、(b) たわみ等を、図 9 のように、高精細カメラを使って多角的に撮像して高精度に計測し、3 次元画像解析を行う計測解析システムを構築した。

この計測解析システムにより、SUS モールの外観品質の良否判定を可能にした。

さらにこの計測結果を、CAE のさらなる高精度化や、ダイクッション等の微妙なプレス条件の修正にフィードバックして、成形プロセスの効率化と品質改善を向上させた。

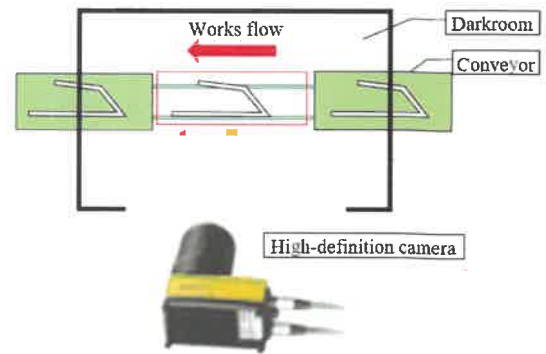


Fig.9 Locking device

6. まとめ

プレス成型工程の短縮と外観品質の確保の両立を図るために、①SUS 成形の高精度 CAE モデル、②プレス成型の精密制御技術、③外観の 3D 精密計測技術を構築した。

また本技術での SUS モールでは、外観品質との両立を、単なるプレス成型 CAE 技術の開発だけでなく、プレス成型の精密制御との組み合わせる工夫を行った。

この工程を繰り返すことで、外観品質を損なわず、従来の 6 工程から 2 工程への短縮が実現でき、独自の最小プレス成型技術を実現した。

制御に強化学習を用いたフィルムシートの厚み制御装置の開発

Development of film sheet thickness control device using reinforcement learning for control

○前西 隆一郎 (㈱日本製鋼所), 仁井 貴文 (㈱日本製鋼所), 田中 蒼麻 (㈱日本製鋼所),

正 金石 暁典 (㈱日本製鋼所), 正 藤井 文武 (山口大学)

Ryuchiro Maenishi*¹, Takafumi Nii*¹, Soma Tanaka*¹, Akinori Kaneishi*¹ and Fumitake Fujii*²

*¹ The Japan Steel Works, Ltd., 1-6-1 Funakoshiminami, Akiku, Hiroshima-city, Hiroshima, 736-8602 Japan

*² Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube-city, Yamaguchi, 755-8611 Japan

Key Words : Film sheet. Thickness control. Reinforcement learning

1. 開発背景

フィルムシート成形プロセスにおいて、厚み精度の向上に対するニーズは非常に高く、厚み制御装置⁽¹⁾が担う役割りは重要性を増している。現在の厚み制御装置はヒートボルト (HB) 方式自動ダイが主流となっているが、それ以前は現場熟練者が自らの経験と観察による勘を頼りにダイボルトの手動調整によって厚み変動を収束させていた。その経験と勘に代表される技術・ノウハウは、隣り合うボルト同士の干渉や調整ボルトから離れた場所への影響も考慮したものであり、一般的な自動制御ではカバーが難しい領域である。当社は、その熟練者の経験と勘の部分の制御の中に再現することを目標として、人工知能 (AI) を用いた制御の開発に取り組み、この度フィルム厚み制御システム J-TAC へ搭載するに至った。本紙ではこの AI 学習型厚み制御システムについて紹介する。

2. システム構成

フィルム厚み制御システムの装置構成例として、二軸延伸フィルムの製造ラインを図 1 に示す。本構成の場合、製造ラインの 2 か所 (延伸前, 延伸後) に設置したセンサから得られたフィルムの厚みデータを入力として、フィルムシート幅方向の厚みが均一になるようにダイのリップ隙間 (図 2) を調整する。リップ隙間は加熱量の変化により伸縮する HB を用いて自動調整を可能としており、このような構造のダイは HB 方式自動ダイとして知られている。この HB ヒータ印加電圧を操作量とし、厚みセンサからの情報 (厚みプロファイルデータ) をフィードバックして制御を行う。本紙では AI 学習型制御を HB 方式自動ダイへ適用とした例について紹介する。

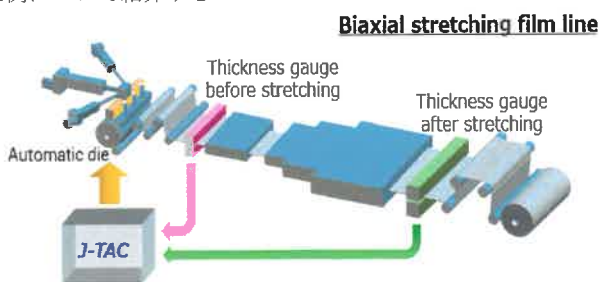


Fig. 1 Film sheet production line configuration diagram

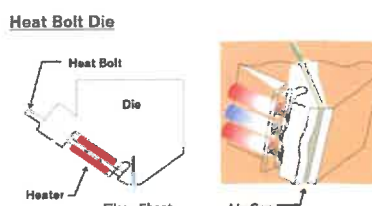


Fig. 2 Structure of heat bolt type automatic die

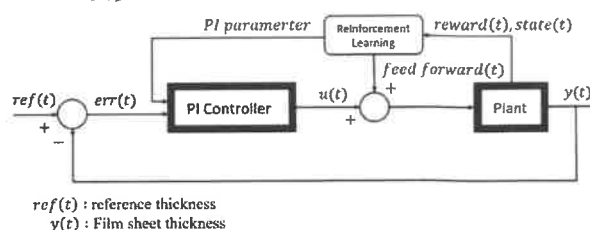
3. 制御方法

3.1 AI 学習型制御

今回開発した AI 学習型制御に採用した強化学習^{(2) (3)}の特徴は、制御を行いながら学習データを蓄積し、そのデータを基に制御出力をリアルタイムで算出、更新することである。一般的な PI 制御など従来の制御の場合、生産する品種によって運転条件などが異なるため品種毎に制御パラメータのゲイン調整等が必要であるが、本システムでは図 3 に示すように、制御を行いながら学習された制御器で生成された制御出力を算出し続けるので、これまでのような煩雑な調整作業が不要となる。また制御開始後に厚み精度が許容範囲内 (収束状態) に至った後も、運転時間を重ねることで学習を続けていきながら、より良い出力を求めて解析するため、さらなる精度の向上が期待出来る。

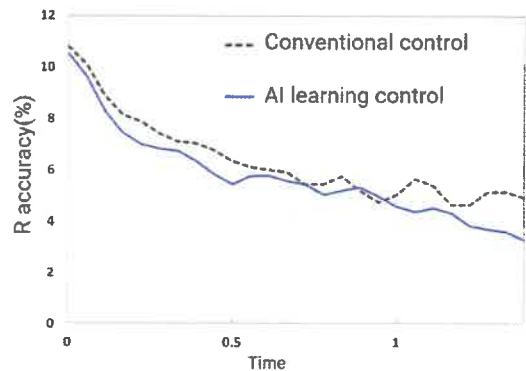
当社フィルムシートテスト装置において実施した AI 学習型制御と従来制御 (PI) の比較検証テスト結果を図 4 に示す。縦軸はフィルムの厚み精度を表す数値であるが、収束時の厚み精度、収束時間共に、AI 学習型制御が従来制御を大きく上回る結果が得られた。また、従来制御では収束精度の改善があるレベルで飽和しているが、AI 学習型制御では運転時間と共に改善傾向が継続することが確認できている。

本システムでは、品種毎に学習データを自動保存し、次の運転の際には前回までの同一品種の学習データを呼び出して制御を開始できるため、使用開始毎に効果を享受でき、使用時間を重ねることによってより安定した品質が得られるシステムが実現できた。



$ref(t)$: reference thickness
 $y(t)$: Film sheet thickness

Fig. 3 Control flow diagram



(normalized with the convergence time of conventional control as 1)
 Fig. 4 Result of thickness accuracy comparison test (in-house equipment)

3.2 学習データ共有化機能

厚み制御の収束をはやくする事をターゲットとして、本システムには学習データ共有化機能を新たに搭載した(図5)。HBヒータの制御は、ダイの横方向に複数設置されたHB各々に対して、各HBに対応したフィルムシート位置の厚みデータを入力としてフィードバック制御を行っている。AI学習型制御では運転時のデータ蓄積が重要であるが、それぞれのHBが独立したシステムである場合、HBを制御して得られた学習データの適用先はそのHB自身に限定されてしまうため、良好な結果を得るために必要な量のデータの蓄積には多くの時間を要する。そこで本システムでは、各HB毎に構築したデータベースに対して、相互に学習データの受け渡しを行う共有化機能を搭載した。これにより、個々のHBで得られた経験を全HBで共有し、運転データの蓄積及びAI学習の効率を飛躍的に向上させることが可能となった。

例えば、あるHBは目標よりも厚い状態から収束させたデータは豊富に持っているが、薄い状態から収束させた学習データを持っていない場合、HBが独立したシステムの場合には、初期厚みが薄い状態から制御を開始すると、そのHBは経験が無い状態からの学習となるため多大な時間を要する。そこで、薄い状態から収束させたデータを豊富に持っている他のHBのデータを活用して制御することにより、学習時間及び収束するまでの時間を大幅に短縮させることが出来る。これにより、制御開始時の厚み分布が前回制御時と異なる場合においても、各HBの経験を活かして学習データを相互補完し、素早く収束させることが出来る。

また、運転初期の状態においても、過去の経験から良好に収束した時のデータを参考に制御することにより、収束時間の改善が期待出来る。

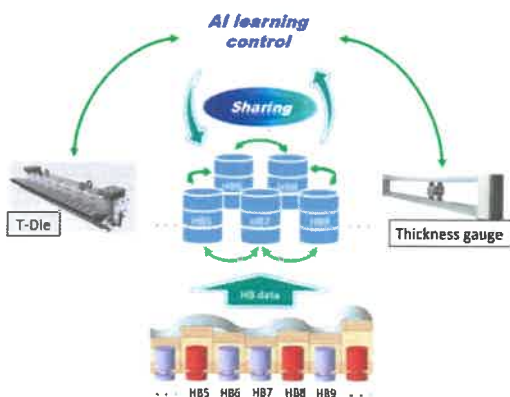


Fig. 5 Learning data sharing function

3.3 干渉対策

厚み制御における課題の一つとして、隣り合ったHBの相互干渉が挙げられる。各HBは対応位置の厚み偏差を参照して制御を行うが、図6に示すように、隣り合うHBで片方は押し方向、もう片方は引き方向という反対方向の動作を行った場合、ダイのリップ隙間は変化せず、厚み偏差は改善しない。

そこで干渉対策を施した本システムでは、それぞれのHBは自身に対応する位置だけではなく、周辺のHBに対応する厚みの変化のデータも参照して学習に取り込むことにより、自身及び周辺のHBを含んだ領域の厚みを考慮した制御を行う。また機械的なリップ変位量に合わせた出力パターンを組み込むことにより、スムーズな制御動作を実現した。

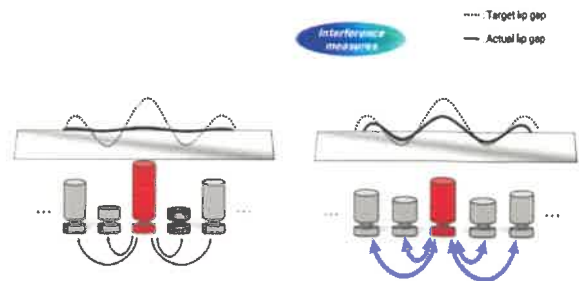


Fig. 6 Interference measures

4. おわりに

この度AI学習型制御技術を搭載したJ-TACを開発し、お客様に提供できるまでに至った。フィルム厚みは様々な外乱要素により影響を受けるため、現状のレベル以上に精度を向上させるにはパラメータの調整を継続的に行う必要があると考えており、このAI学習型厚み制御システムはさらなる製品厚みの精度向上に貢献するものと考えている。

JSWでは、新技術を随時取り入れながらお客様のニーズに応えるべく、今後も引き続き新機能に関する開発を進め、お客様に満足していただける製品を提供し続ける所存である。

参考文献

- (1) 亀岡誠治, 上田和美, 櫻井裕司, フィルムシートの自動厚み制御システム, 日本製鋼所技報, 第50号(1994)
- (2) 三上貞芳, 皆川雅章, 強化学習, 森北出版株式会社(2017), pp. 1-25
- (3) H. Kimura and S. Kobayashi, An analysis of actor-critic algorithms using eligibility traces: Reinforcement learning with imperfect value functions. J. Jpn. Soc. Artif. Intell., Vol. 15 (2000), pp. 267-275.