

最適化技術を活用した自動車向けプレス金型設計の効率化

Application of Optimization Techniques to Automate the Structural Design of Automotive Press Dies

山本 雄介^{*1} 加賀谷 俊樹^{*1} 千賀 大嗣^{*1} 小倉 夏樹^{*2}
 Yusuke Yamamoto Toshiki Kagaya Daishi Senga Natsuki Ogura

*1 ダイエンジニアリングセンター *2 (株)豊田中央研究所 イノベティブ研究部門

要旨 自動車向けプレス金型構造設計のより高度な自動化を目指し、機械学習と最適化技術を活用。過去設計データを基にした類似型選定、多目的最適化による複数部品配置、単目的最適化を用いた部品詳細設計により、設計作業の効率化と高い設計品質を実現した。

キーワード: 多目的最適化、単目的最適化、自動化、プレス金型、構造設計

Abstract Aiming for more advanced automation in the design of press dies, machine learning and optimization techniques were applied. The process incorporates similar model selection from historical design data, multi-objective optimization for component arrangement, and single-objective optimization for detailed component design, enabling enhanced efficiency and superior design quality.

Keywords: multi-objective optimization, single-objective optimization, automation, press dies, design

1 はじめに

自動車産業において、個性的で魅力的なデザインの実現が市場競争力を左右するなか、その具現化に必要なプレス金型は年々複雑化しており、市場への早期導入の難易度を一層高めている。この課題に対応するため、設計現場では3D CADを基盤とした設計モデルの寸法や形状をパラメータ(数値)として定義し、変更していくパラメトリック設計が普及しており、設計ルールや制約条件を部品の3Dモデルに取り込むことで、寸法変更や設計改良の効率性と柔軟性を大幅に向上させることが可能となった。また、さらにルールベースでのモデル作成作業や品質チェックの自動化を進めてきた(図1)。しかしながら、これらの技術のみでは、設計者の知識や経験に依存する部品間の調整の完全な自動化には限界があり、この領域が効率化のボトルネックとなっていた。一方、近年急速に進展している機械学習や最適化技術は、こうした未解決の課題への有効なアプローチを提供する可能性がある。本稿では、これらの技術を金型設計へ応用し、経験則に基づく工程の自動化を目指すことで、設計品質の向上と設計効率化の両立を図り、設計技術の革新に寄与することを目的とする。

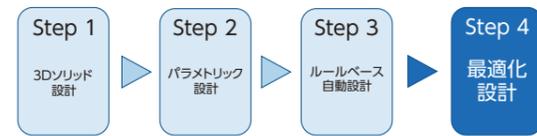


図1 プレス金型設計効率化の4ステップ
 Fig.1 Four Stages of Press Die Design Efficiency Improvement

1.1 自動車外板パネル製造工程

自動車外板パネルの製造では、生産効率を向上させるため、素材の搬送と複数工程の連続自動加工が行われる。その工程は主に「絞工程」「抜工程」「曲工程」の3つに分けられ、それぞれに高いデザイン性と成形精度を両立させる高品質なプレス金型が求められる。絞工程では鋼板の立体成形、抜工程では余剰部分の切断、曲工程では寸法や形状出しの最終成形が行われる。1つの金型には数百の仕様や部品が適用され車種・生産工場ごとに都度設計を行っている(図2[1])。



図2 自動車外板パネルの製造工程
 Fig.2 Manufacturing Process of Automotive Outer Panels

今回の設計効率化の対象としている「抜工程」は、主に上下型本体と、カム、パッド、鋼材の3つの主要構造部品によって構成される(図3)。他の工程に比べて部品点数が多く加工部位が車種ごとに变化しやすいため、配置調整が複雑となり設計者の経験に依存する部分が多いことが課題となっている。

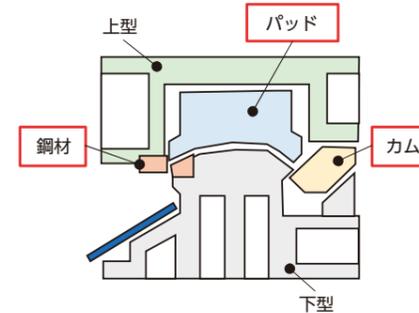


図3 プレス金型抜工程の主要構造部品
 Fig.3 Primary Components for the Press Die Trimming Process

1.2 金型設計手順と効率化のアプローチ

プレス金型の設計は主に「過去類似型の選定」「構想図(基本設計)」「正式図(詳細設計)」の3つの手順に分けられる。過去の類似型設計データを選定し、活用することにより設計自由度を適切に絞り込み、過去の暗黙知や設計経験を構想図設計に生かすことが可能となる。また、構想図と正式図と最適化設計の関係は図4[2]ようになっており、以下に手順ごとの効率化のアプローチ方法を示す。

1) 類似型の選定

はじめに過去の設計実績から類似した金型を選定する際には、機械学習を用いて過去の設計データやパラメータを分析し、最も近い設計3Dデータを特定する。これにより、各設計者の記憶に頼っていた設計開始データ選定が効率化され、より最適な出発点を提供することが可能となる。

2) 構想図の作成

次に基本構成部品配置を設計する構想図作成においては、設計自由度や考慮すべき目的関数が多岐にわたるため、多目的最適化手法を活用し、自動化を進める。

3) 正式図の作成

最後に詳細な寸法や仕様を設計する正式図作成では、自由度や目的関数が減少するため、単一の最適解が求められる単目的最適化技術を活用し、自動化を進める。

本稿では、これら3つの設計手順について図3で記載したカム、パッド、鋼材の3つの主要構造部品の設計効率化への具体的な技術アプローチを個別に述べる。

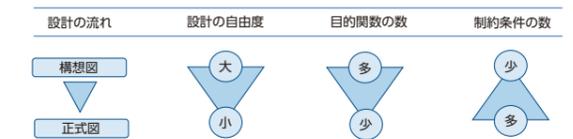


図4 設計の流れと最適化設計の関係[2]
 Fig.4 Relationship Between the Design Flow and Optimized Design

2 類似型の選定(カム)への機械学習の活用

2.1 カムと過去設計データの概要

カムは、プレス機の上下運動を斜め方向の運動に変換する主要構造部品である。カムは加工方向や大きさが多岐にわたり、多数の構成部品の個数や形式の変化、および機能を満足させるための部品間干渉の回避をとまうため、多様なバリエーションが発生している(図5)。



図5 主要構造部品「カム」の代表例
 Fig.5 Typical Variations of the Press Die Component: "Cam"

過去15年以上にわたり、カム設計におけるパラメトリック設計手法は広く定着しており、設計パラメータを含めた一定数のカム設計データの実績が蓄積されている。今回、この豊富な設計実績を基に、高類似度の過去データを自動選定する仕組みの構築を目指した。

2.2 類似型の自動選定アルゴリズムの作成

今回の取り組みでは、以下の開発ステップを通じて類似型特定アルゴリズムを構築した。

1) 過去実績のデータベース作成

過去の設計データからカムの各パラメータを抽出し、データベース化する作業を実施した。このプロセスではCAD付随のプログラム機能(以下、CADVBA)を活用し、1カム当たり約400を超えるパラメータ抽出を自動化するシステムを構築。これにより、効率的なデータ蓄積と管理が可能となり、汎用性の高いデータベースを形成することができた。

2) 類似型特定アルゴリズムの作成

まず、設計パラメータへ与える影響度が高いと思われる“設計前時点で知り得る情報”(以下、設計前情報)を、ベテラン設計者へのヒアリングを通じて“カム加工長さ”など7項目抽出した。次に、過去実績データベースを基に統計的手法や機械学習などで分析し、設計前情報の精査および重要度を定量的に定義した。そして、これらの設計前情報から類似度を算出する独自のモデルを構築した。

さらに、CADVBAを活用することで、設計者がCAD上から起動できるツールとして開発した。新規設計対象の設計前情報を選択/入力すると過去実績データベースを自動で探索。類似度の最も高い過去データを特定し設計パラメータを3Dモデルへ自動的に反映するという一連の仕組みを開発した(図6)。



図6 類似型自動選定アルゴリズムの概要
Fig.6 Outline of the Similar-Type Auto-Selection Algorithm

2.3 結果

開発した類似型自動選定システムを実際に運用した結果、設計者が手動で最後まで設計したカムの設計パラメータと、システムによって引用されたカムの設計パラメータを比較すると、一致率85%という高水準となった(図7)。この結果から、本システムを活用することで、類似型の特定が迅速化され、初期段階から高い完成度のデータに基づいて設計を進めることが可能となり、設計効率

化に大きく寄与することが示された。

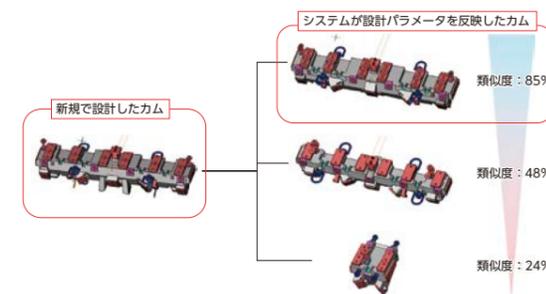


図7 「カム」類似型自動選定結果
Fig.7 Results of Automatic Similarity-Based Selection for "Cam"

3 構想図(パッド)複数部品配置への多目的最適化の活用

3.1 パッド構造と設計内容の概要

パッドは、加工刃がパネルを切断する前にパネルを押さえ込む役割を担っている主要構造部品である。パッドは複数の構成部品で構成されており、それぞれが適切な配置位置を取り合う構造となっている。そのため、部品間の位置調整には多くの設計工数がかかることが課題となっている。

構成部品のなかでも、以下の3部品がとくに重要な役割を果たしている：

- 1) ウレタン：パネル全体を均一に押さえる役割を担う。
- 2) スライドプレート：パッドと上型間で摺動を行い、円滑な動作と位置決めを実現する。
- 3) サイドピン：パッドの落下防止とストローク管理を担う。

本稿では、これら3部品を対象に、多目的最適化技術を活用した配置調整の自動化を試みる(図8)。

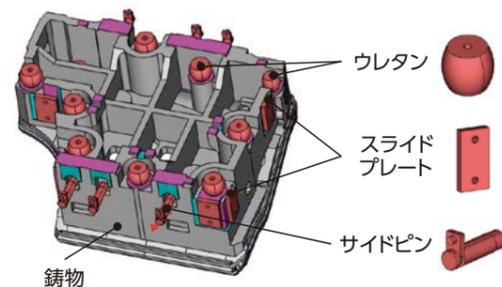


図8 主要構造部品「パッド」の構成部品
Fig.8. Principal Structural Units of the Press Die Component: "Pad"

3.2 設計変数と定式化

まず、各部品の機能と設計要件を定量的に整理し、3部品以外の部品と干渉が発生しない配置可能なエリアを決定する。次に、3部品の機能が最大限発揮される配置を目的関数として数式を定義し、配置可能エリア内のXY座標を探索するような最適化を部品ごとに実施した。その結果、3部品同士の最適配置は競合することがわかった(図9)。しかし、これらの部品間の優先順位はプレス設備仕様やパネル形状、金型の全体構成など多くの要素によって複雑に分岐するため、同一の計算プロセスで自動化することが難しい。そこで、今回は多目的最適化による自動探索を活用することで、3部品が互いに成立し、かつ、優先順位の多様な解を複数算出する方法を採用した(図10)。

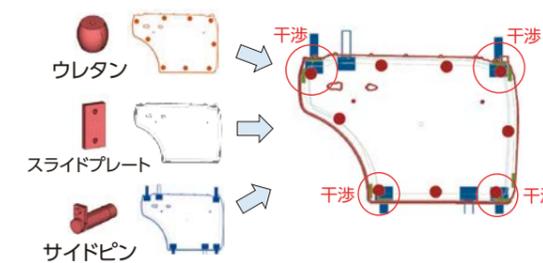


図9 構成3部品の単目的最適化結果
Fig.9 Single-Objective Optimization Results for Principal Structural Units

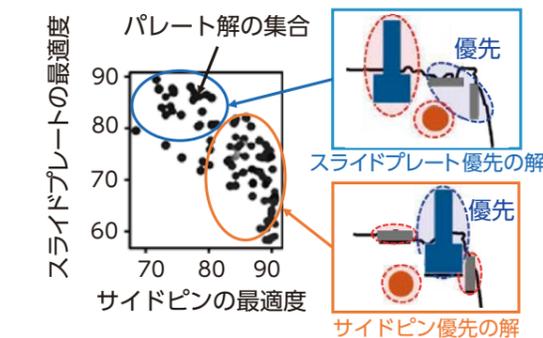


図10 構成部品の多目的最適化結果
Fig.10 Multi-Objective Optimization Results for Principal Structural Units

3.3 パレット解の層別

多目的最適化アルゴリズムによってパレット最適解の集合は約1,400件が得られた。このなかから設計者が最適な解を選定することは困難であり、設計作業の負担が増加することが想定される。そこで、今回の取り組みではこれらパレット解の層

別を行い、設計者が効率的に候補を選定できる仕組みを構築した。

具体的には、各パレット解における部品座標に対して階層的クラスタリングを実施することで、部品座標が近い類似解を集約し約5件程度まで選択肢を絞れるような仕組みとした(図11)。

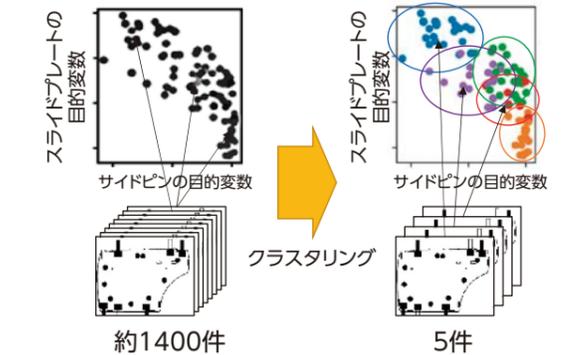


図11 パレット解のクラスタリング結果
Fig.11 Cluster Analysis of Pareto Solutions

さらに、ここまでのPythonの処理とCADVBAを連携させることで、設計者が容易に使用できるようにCAD上から起動できるツールとして開発した。設計者は必要事項をCAD上で選択/入力するだけで自動で多目的最適化が実行され、クラスタリングされた少数の選択肢から適した解を選択、その結果がCADモデルへ反映される。このツールにより、従来設計者が実施していた試行錯誤プロセスを削減し、設計品質の安定化も可能となった。

3.4 結果

開発したツールを実際のパッド設計に適用したところ、パッド設計工数を従来比で24%削減することが確認できた(図12)。また、ツールで出力された部品配置と設計者が手動で設計した配置を比較した結果、目的関数をよりよく再現した配置で部品配置される場合もあり、より高い設計品質が実現できた。

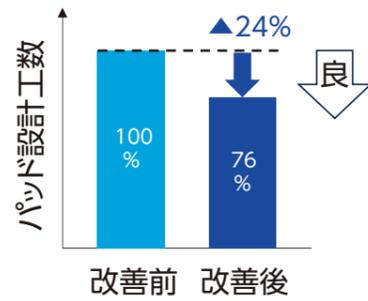


図12 「パッド」自動最適化設計の設計工数効果
Fig.12 Design Labor Efficiency Effect of Optimized Automated Design for "Pad"

4 正式図(鋼材)部品詳細設計への単目的最適化の活用

4.1 鋼材の概要

鋼材は、金型の保全性や加工成立性を確保し、強度が懸念される箇所用いられる局所的な高強度部品であり、「締付け」「位置決め」「切刃」の機能を有する。配置場所と形状や数の都度変化は、設計作業の煩雑化による工数増加を引き起こしている(図13)。

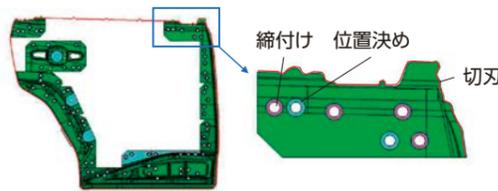


図13 主要構造部品「鋼材」の概要
Fig.13 Description of the Press Die Structural Component: "Cutting Steel"

4.2 鋼材設計フロー

鋼材の設計工程は、4つのフローに分かれる。

①鋼材配置決め

製品の外形形状に合わせて鋼材の平面的なサイズやレイアウトを決定する。鋼材1つの最大サイズや分割位置などの制約を厳守する必要がある。

②締付け個数決め

鋼材の平面サイズに基づき、既定の設計規格を適用することで締付けの個数を一意に決定する。

③締付け配置決め

締付けを平面的に配置し、締付け間のピッチや鋼材端からの最小距離など制約を満たしながら最適な位置を割り出す。

④作りこみ

①②③で決めた平面配置を元に、鋼材の三次元的な形状を作りこんでいく。

④は従来のパラメトリック設計により効率化が進んでおり、今回は、鋼材設計フロー①②③の自動化を目指す(図14)。

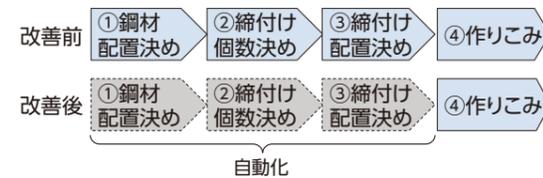


図14 「鋼材」の改善前後の設計フロー
Fig.14 Design Flow Before and After Refinement of "Cutting Steel"

4.3 設計変数と定式化

まずは、既存の鋼材設計要領の整理と、過去の設計データ分析から設計者が持つ暗黙知を抽出した。それらを数式化し、画像処理も活用することで数式では表現しにくい形状特性も加味した計算式を作成した。この計算式を使い①②はルールベースで構築できたが、③は①②の結果とパネル形状などにより複雑な分岐が生じるため、今回は最適化技術による自動探索を採用した。具体的には、鋼材形状の内側に締付け配置可能エリアを設定し、このエリア内で締付け同士を結んでできる図形の面積が最大となる締付け配置を探索している。これにより、「鋼材全体に満遍なく締付けを配置したい」という設計者の感覚と合致する締付け配置が高効率で実現できた(図15)。

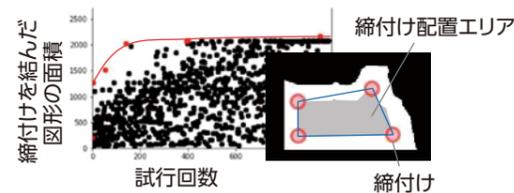


図15. 締付け穴配置の単目的最適化結果
Fig.15 Results of Single-Objective Optimization of Bolt Hole Layout

さらに、ここまでのPythonの処理とCADVBAを連携させることで、設計者が容易に使用できるようにCAD上から起動できるツールとして開発した。設計者は必要事項をCAD上で選択/入力すると①②③の処理が実行され、④のパラメトリック設計に反映される。

4.4 結果

以上の自動化プロセスにより、鋼材設計工数を従来比55%削減する成果を得た(図16)。また自動化により作業の再現性が向上したことで、設計者ごとの品質ばらつきが収束し、設計の信頼性が向上している。

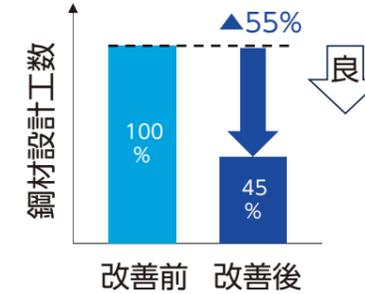


図16. 「鋼材」自動最適化設計の設計工数効果
Fig.16 Design Labor Efficiency Effect of Optimized Automated Design for "Cutting Steel"

5 まとめ

従来の自動車向け外板プレス抜型の設計では、過去車種の類似型選定や部品間の配置調整など設計者の経験則に依存している部分が多くあった。しかし、今回の機械学習と最適化技術および画像処理技術のCAD連携により、多くの暗黙知を形式知化することができ、設計の効率化および設計品質の安定と向上につながった。この成果は、(株)豊田中央研究所との共同研究による成果であり、その多大な貢献に深く感謝の意を表す。引き続き本技術のさらなる拡張を通じ、設計技術向上を目指して取り組んでいく。

参考文献

- [1] <https://japanforming.com/> ホワイトボディの組み立てとジグソーパズル/
- [2] 北山哲士, "工学系のための最適設計法-機械学習を活用した理論と実践-" (2021)

著者紹介

