

強連成サイバーフィジカルシステムに基づく せん断加工プロセスの自律最適化技術の開発

東海国立大学機構岐阜大学 高等研究院 地域連携スマート金型技術研究センター
教授 吉田 佳典

(2021 年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2021001-A2)

キーワード：せん断加工，自律運転最適化，強連成サイバーフィジカルシステム

1. 緒言

せん断加工は、一对の工具を用いて板材に局所的なせん断変形を与え、材料を切断・分離する塑性加工法の一種である。切削加工などの除去加工と比較して材料のロスが少なく、高い歩留まりと生産性を有することから、自動車部品、精密機器、電子機器、さらには産業機器に至るまで、極めて多様な分野において広く採用されている¹⁾。

一般的なせん断加工では、被加工材を板押さえとダイによって固定し、パンチを相対的に移動させることにより切断が進行する²⁾。形成されるせん断加工部端面は、だれ、せん断面、破断面およびバリから構成される³⁾。このうち、だれ、破断面およびバリは特殊な用途を除き、製品性能を低下させる要因であるため、一般的には欠陥とみなされる^{4),5)}。

加工面の性状は、工具間クリアランス、材料の機械的的特性や板厚、パンチおよびダイの刃先形状、さらには加工速度や潤滑条件といった多岐にわたる要素に依存する。特に工具間クリアランスは、加工精度や表面品質に直接的かつ大きな影響を及ぼす支配的因子の一つであり、これまでに各種金属板に対する適正值が実験的・経験的に提示されている⁶⁾。しかし、加工条件がわずかに変化しても加工面の状態は敏感に変化するため、実際の製造現場では目的とする製品品質に応じて最適な操作条件を慎重に選定する必要がある。このため、金型形状やクリアランスが加工面に及ぼす影響を明らかにするための基礎実験や実機試験が

数多く実施されてきた^{7),8)}。

もっとも、操作条件の最終的な決定は依然として熟練技術者の知識と経験に強く依存しているのが現状である。すなわち、これまでの知見は暗黙知として個人に蓄積されており、体系的な方法論として共有・活用することが難しいという課題が存在する。

本研究では、このような課題に対処するため、最適化アルゴリズムと金型およびプレス機をリアルタイムに連携させ、加工条件の調整と品質評価を自律的に繰り返す強連成サイバーフィジカルシステムを構築した。本システムは、せん断加工におけるだれ高さを最小化することを目的として、工具間クリアランスと加工速度の最適値を自律的に探索する機能を有している。さらに、最適化の過程で取得された多数の実験データを解析することで、クリアランスおよび加工速度がだれ高さに及ぼす影響を定量的に評価し、操作条件の選定に資する知見を得ることを試みた。

2. 強連成サイバーフィジカルシステムと最適化

2.1 強連成サイバーフィジカルシステム

本研究で構築した強連成サイバーフィジカルシステム(Strongly-coupled Cyber Physical System, SCPS)とは、物理空間に存在する金型および加工機と、サイバー空間における最適化アルゴリズムとを緊密に連携させることにより、加工条件と製品品質の最適な組み合わせを自律的に導出する仕組みである(図1)。SCPSは、物理空間での試行実験

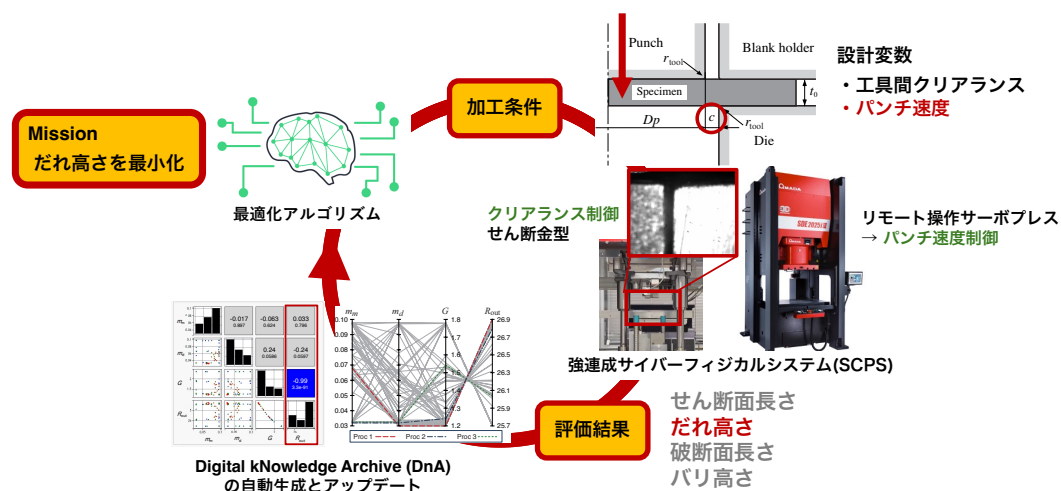


図1 強連成サイバーフィジカルシステムの概念図

や実生産を自律的に実施し、その結果として得られる製品品質の評価をサイバー空間へフィードバックする。この情報は最適化問題、すなわち目的関数の最小化あるいは最大化として数理的に扱われ、加工条件を逐次更新することで最適解へと収束させる。このように物理とサイバーの間で双方向かつ密接な連携を確立することにより、高度な自律的最適化が実現される。

さらに、SCPSの目的は単なる実験ベースの最適化にとどまらない。反復的な最適化過程で得られた入力（加工条件）と出力（品質）の関係を「経験」として明示的に可視化し、デジタルナレッジアーカイブ(Digital kNowledge Archive, DnA)として自動生成する点にも特徴がある。これは、熟練技術者の暗黙知に依存してきた技術伝承を自動化・体系化する試みであり、SCPSが担う重要な使命の一つである。

本研究では、せん断加工を対象として、設計変数にパンチ-ダイス間クリアランス C および加工速度 v を設定した。SCPSの最適化目標は、せん断加工部に形成されるだれ高さを最小化することである。図2にせん断加工SCPSのワークフローを示す。まず、最適化アルゴリズムが候補となる加工条件を提案する。続いて、提案条件に基づき、金型およびプレス機が自動的に加工設定を行い、設定完了後にプレス機が自律的に加工を開始する。加工の様子は高速度カメラにより記録され、得られた映像を画像解析することでだれ高さを定量的に計測する。測定結果は最適化アルゴリズムへフィードバックされ、次の加工条件の提案に反映される。このサイクルを、アルゴリズムに設定された終了条件を満たすまで繰り返すことで、せん断加工における加工条件の最適化を実現する。

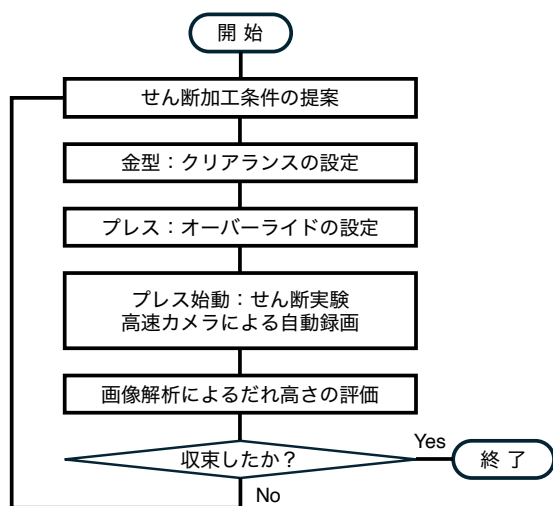


図2 せん断加工 SCPS のワークフロー

2.2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms, GA)は、Hollandによって提唱された、生物の進化原理に着想を得た探索型最適化手法である⁹⁾。GAは、設計変数を符号化して遺伝子とみなし、これを持つ個体群に対して選択・交叉・突然

変異といった遺伝的操作を繰り返し適用することで、広範な解空間の探索を行い、最適解を導出する。この性質により、GAは非線形性や多峰性を有する複雑な問題にも適用可能であり、工学的設計問題や制御系最適化など多岐にわたる領域で汎用的に利用されていることが特徴である。

GAの基本的なワークフローを図3に示す。まず、「初期化(Initialization)」において、ランダムに生成された遺伝子を持つ個体で構成される初期個体群を作成する。次に、「選択(Selection)」により、次世代を形成するための親個体を確率的に選出する。本研究では、個体群からランダムに2個体を抽出し、そのうち適応度が高い方を選ぶバイナリトーナメント選択を採用した。選択された親個体はランダムにペアを組み、「交叉(Crossover)」により互いの遺伝子情報を組み換えて、次世代の同数の子個体を生成する。本研究では、交叉手法として Simulated Binary Crossover(SBX)¹⁰⁾を用いた。

このように、GAは複雑な設計空間を効率的に探索可能であり、特定の初期条件や局所解に依存せずに最適解に近づく性質を有することから、本研究におけるSCPSにおいて、せん断加工条件の自律的最適化に適した手法である。

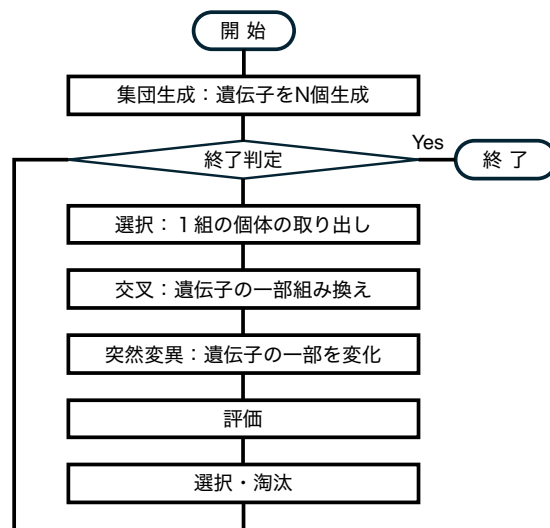


図3 遺伝的アルゴリズムのワークフロー

2.3 滑降シンプレックス法

滑降シンプレックス法¹¹⁾は、 N 個の設計変数に対して $N+1$ 個の頂点からなる非退化シンプレックスを構築し、各頂点における目的関数値に基づき、反射(reflection)、拡大(expansion)、収縮(contraction)、縮小(shrink)といった操作を反復的に適用することで最適解を探索する逐次探索型の手法である。勾配情報を必要とせず、非線形性や多峰性を有する設計空間に対して汎用的に適用可能であることが特徴であり、複雑な加工条件最適化問題においても有効である。

本研究では、設計変数が2つの場合を例として、目的関数の最小化手順を設定した。設計変数が2つの場合、シンプレックスは3頂点からなる三角形となる。初期シンプレ

ックスは、設計空間内で一边の長さ 0.45 の正三角形を形成し、その重心 (0.5, 0.5) を中心に空間範囲内でランダムに移動させることで生成した。

生成されたシンプレックスに対しては、以下の操作を順次適用することで最適解を探索する。

- 1) 頂点の整列：各頂点の目的関数値を評価し、最良点から最悪点まで整列する。
- 2) 反射：最悪点を他の頂点に対して反射させ、新たな探索点を生成することで、改善方向への探索を行う。
- 3) 拡大：反射点が最良点より優れている場合、さらにその方向に探索範囲を広げ、改善の可能性を追求する。
- 4) 収縮：反射点が中程度の改善しか示さない場合や悪化した場合、シンプレックスの中心方向に向かって縮め、新たな探索点を生成する。
- 5) 縮小：シンプレックス全体を局所的に縮小することで探索空間を絞り込み、収束精度を向上させる。

SCPS において滑降シンプレックス法を実装する意義は、これらの操作が自律的に物理空間の実加工結果に基づく評価（だれ高さ）とサイバー空間の目的関数更新とを密接に連携させることにある。勾配情報を必要としないため、高速かつ非線形なせん断加工条件の最適化に対しても適用可能であり、局所的な実験データに基づき探索方向を柔軟に更新できる点が SCPS との親和性を高めている。さらに、反復的な探索過程で得られる入力（加工条件）と出力（品質）の関係は、自動的に記録され、デジタルナレッジアーカイブ(DnA)として蓄積されるため、技術伝承の自動化や次世代への知見継承にも貢献する。

このように、滑降シンプレックス法は、SCPS における自律的最適化プロセスの核として、非線形な加工条件空間に対して効率的かつ信頼性の高い探索手段を提供し、実データに基づく知識の蓄積と活用を両立させる役割を果たす。

3. 実験方法

3・1 セン断実験条件

せん断実験の概略を図 4 に示す。実験には板幅 50 mm, 板厚 1.0 mm のステンレス鋼 SUS430 を用い、平面ひずみせん断挙動の解析を目的とした。設計変数としてパンチ・ダイ間クリアランス C [% t] およびせん断速度（パンチ速度） V [mm/s] を設定し、せん断加工後のだれ高さを最小化する最適な組み合わせを自律的に導出することを目標とした。実験条件の詳細を表 1 に示す。クリアランス C の探索範囲は板厚の 12~20 % t とし、1 % t 刻みで探索した。加工速度 V の探索範囲は 10~100 mm/s とし、1 mm/s 刻みで最適解を探索した。

3・2 セン断加工その場観察システム

クリアランス制御型せん断加工その場観察金型を図 5 に示す。加工中の挙動は、高速度カメラを用いて自動撮影

した（図 5(a)）。撮影のトリガ信号はプレススライドの定位置でプレス本体から発信される。

本金型は、サーボモータによるパンチの水平移動およびエアクランプによる材料固定が可能であり、移動距離をレーザー変位計で計測することでクリアランス C の NC 制御を実現した（図 5(b)）。さらに、プレスには 300 tonf 電動サーボプレスを使用し、スライド速度 V を外部信号で変化させることで、自動加工を実行した。

最適化アルゴリズムとして、前節で述べた GA および滑降シンプレックス法を採用した。加工中に自動計測されただれ高さ l_{sd} を目的関数とし、これを最小化するために設計変数 V および C を探索した。各探索ステップで得られた条件に基づき NC 制御を行い、実験と計測を自律的に繰り返すサイクルを構築した。

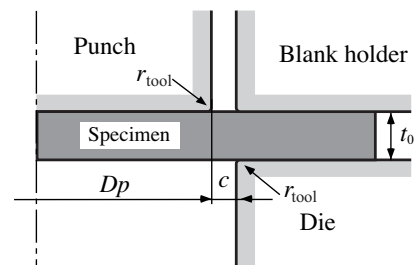


図 4 セン断加工実験概要

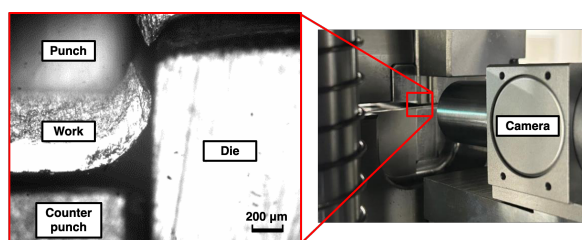
表 1 セン断加工条件

パラメータ	値
被加工材	SUS430
被加工材板厚 t_0 [mm]	0.5
パンチ刃先半径 r_p [mm]	0.1
ダイ刃先半径 r_d [mm]	0.1
板抑え力 [tonf]	0.35
クリアランス探索範囲 C [% t]	12~20
パンチ速度探索範囲 V [mm/s]	10~100

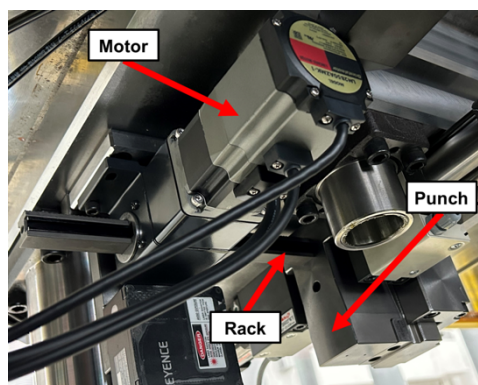
3・3 画像解析を用いただれ高さの評価

高速度カメラで撮影した画像を用い、パンチ、ダイおよびカウンターパンチの位置関係をパターンマッチングにより座標として特定した。評価対象外の領域をマスキングして材料表面を抽出した後、エッジ検出により材料の下面、だれ表面、および側面上の画素群を取得した（図 6）。

抽出された 3 領域の境界を特定するため、まず 2 点を抽出し、左側を P_1 、右側を P_2 とした。次に、 P_1 より左側の点群および P_2 より右側の点群を用いて直線近似を行い、 P_1 - P_2 間の点群は累乗関数で近似した（図 7）。各近似関数について平均二乗誤差(MSE)を算出し、MSE の和が最小となる P_1 と P_2 の組み合わせを決定した。最終的に、 P_1 と P_2 の y 座標の差 $y_2 - y_1$ をだれ高さ l_{sd} として評価した。



(a) 高速度カメラを用いたその場観察機構



(b) サーボモータ駆動クリアランス制御機構

図5 クリアランス制御せん断加工その場観察金型

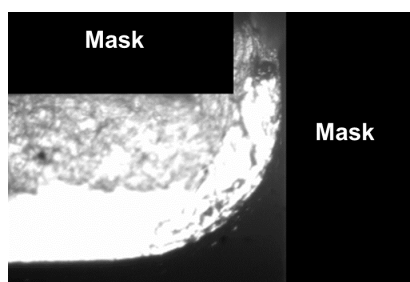


図6 被加工材表面認識およびマスキングの例

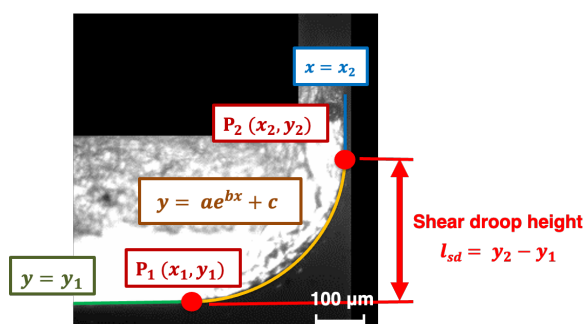


図7 被加工材表面形状の関数近似

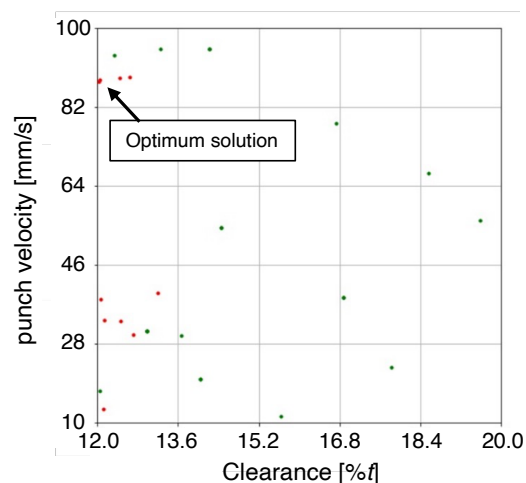
4. 結果と考察

4・1 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化結果

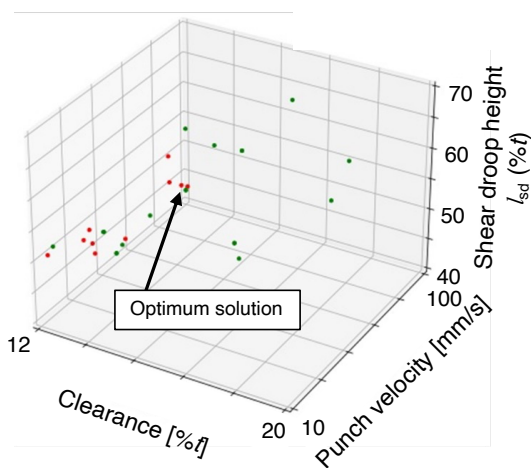
遺伝的アルゴリズム(GA)による最適化では、各サイクルで生成された個体を図8(a)に、評価回数と目的関数値の関係を図8(b)に示す。また、最適化結果を表2に示す。GAの特徴として、広範囲の解空間を並列的に探索できる点が

挙げられる。本実験では、初期に生成された個体群の中に最良解に近い個体が含まれていたため、評価回数と目的関数値の変化はほとんど見られず、最小限の評価回数で探索が終了した。

遺伝的アルゴリズムに基づく最適化結果を表2に示す。評価回数は40回であったのに対し、実験回数は33回であった。最良解として得られた加工条件は、クリアランス C が探索範囲の最小値である $12\%t$ 、加工速度 V が 89 mm/s であり、この条件におけるだれ高さは $45.89\%t$ であった。



(a) 設計空間



(b) 応答空間

図8 GAを用いたSCPSにおける試行過程

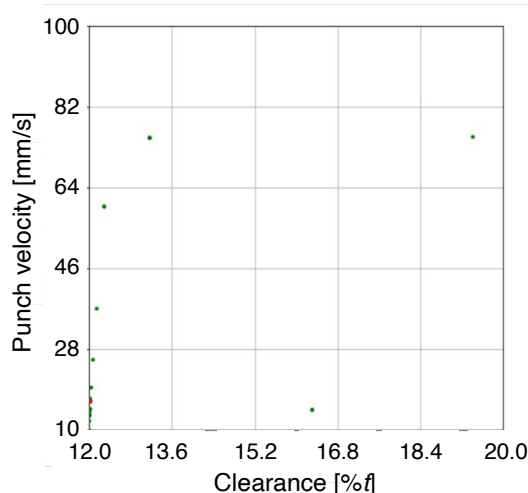
表2 GAを用いた最適化結果

パラメータ		値
評価回数		40
実験回数		33
最小だれ高さ [%t]		45.89
最適解	クリアランス C [%t]	12
	パンチ速度 V [mm/s]	89

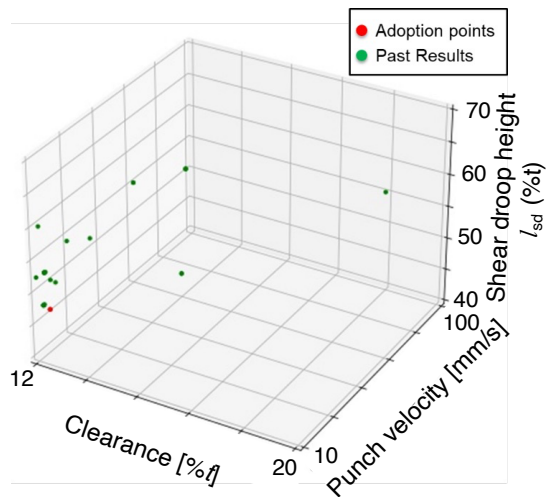
GA の特徴である多点並列探索は、広い設計空間において局所解に陥るリスクを低減し、初期個体に最適解が含まれていれば高速に収束することを示している。今回の結果は、GA が離散的かつ非線形なせん断加工条件探索において有効であることを裏付けている。

4・2 滑降シンプレックス法を用いた最適化結果

各サイクルにおいて生成されたシンプレックスを図 9(a)に、評価回数と目的関数値との関係を図 9(b)に示す。また、最適化結果を表 3 に示す。



(a) 設計空間



(b) 応答空間

図 9 滑降シンプレックス法を用いた SCPS における試行過程

表 3 滑降シンプレックス法を用いた最適化結果

パラメータ		値
評価回数		40
実験回数		33
最小だれ高さ [%t]		45.89
最適解	クリアランス C [%t]	12
	パンチ速度 V [mm/s]	89

評価回数が進むにつれてシンプレックスが段階的に縮小し、目的関数値が収束に向かう様子が明確に確認された。特に 12 サイクル以降では、1 サイクルに要する評価回数が 4 回に固定され、シンプレックスが収縮操作を繰り返していることが示される。

さらに、最終的にはすべての頂点が同一の加工条件を示し、離散的な探索空間上で同一点に収束したことから、完全収束が達成されたと判断できる。この過程は、滑降シンプレックス法が持つ逐次的な局所探索と収縮による安定的な収束特性を反映している。また、探索の過程でクリアランスや加工速度が同一となる加工条件が繰り返し提案される場合があったが、本実験ではその際に過去の計測結果を利用することで、重複した実験を回避している。その結果、評価回数が 57 回であったのに対し、実際の実験回数は 18 回に抑制された。

最終的に、滑降シンプレックス法によって得られた最良解は、クリアランスが探索範囲における最小値である 12 %t、加工速度が 16 mm/s の条件であり、そのときのだれ高さは 46.12 %t であった。これは、滑降シンプレックス法がランダム探索を行わず、局所的にシンプレックスを変形させながら効率的に探索を進める手法であることを踏まえれば、探索範囲内で確実に最小解へ収束するという本手法の特性をよく表している。

4・3 滑降シンプレックス法と遺伝的アルゴリズムとの最適化結果の比較

評価回数に関しては、GA が SCPS より 17 回少なかった一方で、実際の実験回数は GA が 15 回多い結果となった。この差異は、GA では初期に生成された個体群の中に偶然最良解が含まれていたため、最小の評価回数で探索が終了したことに起因している。しかし、初期個体の生成過程に依存する GA の性質を考慮すると、乱数種の設定を変えることで探索過程が大きく変動し、必ずしも評価回数の優位性が維持されるとは限らない。したがって、初期条件を複数回変更して比較検討することが不可欠である。

一方、滑降シンプレックス法は、反射・拡大・収縮・縮小の手続きを通じて連続的に収束を進めるアルゴリズムであり、探索の安定性が高く、評価回数と実験回数の乖離が比較的小さいという特徴を示した。本研究においては、SCPS により得られただれ高さの最良値は 46.12 %t であり、GA による 45.89 %t との差はわずか 0.23 %t と極めて近い値となった。また、クリアランスの最適解はいずれのアルゴリズムにおいても 12 %t で一致したが、加工速度については SCPS で 16 mm/s、GA で 89 mm/s と差が見られた。

この違いをさらに検討するため、両手法により得られた全実験データを基に平行座標線図 (図 10) および縮退感度分析表 (図 11) を示す。その結果、だれ高さが小さい上位 4 条件では、いずれもクリアランスが 12 %t であった一方、加工速度は 13~89 mm/s と広範囲に分布していた。また、クリアランスとだれ高さとの相関係数は 0.69 と強い正の相関を示したのに対して、加工速度とだれ高さとの相

関係数は0.19と低く、強い依存関係は認められなかった。

以上より、本研究の探索範囲においては、クリアランスを小さく設定することがだれ高さの低減に決定的に寄与する一方、加工速度の影響は相対的に小さいことが明らかとなった。この点からも、局所的に収束挙動を明示的に捉えられるSCPSの特徴は、設計変数間の影響度を解析的に検討する上で有用であるといえる。一方でGAは、広域的な探索によって多様な候補解を得られる可能性を有するものの、初期個体に強く依存するため、再現性の観点からは複数回の試行が不可欠である。したがって、両手法は互いに補完的な役割を担い得ることが示唆される。

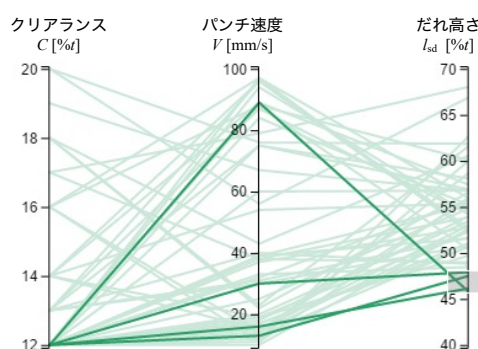


図 10 平行座標線図

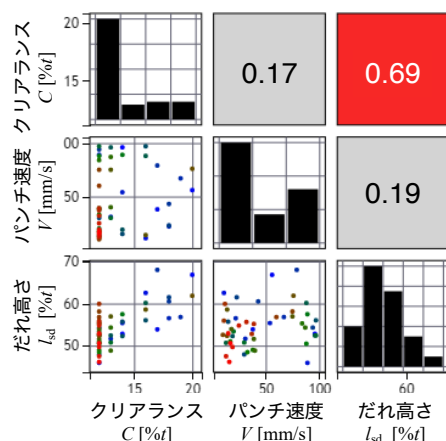


図 11 縮退感度分析表

5. 結言

本研究では、SUS430のせん断加工において、だれ高さを最小化するクリアランスおよび加工速度を探索するため、最適化アルゴリズムを適用し、自動化システムを構築した。本システムは材料のフィードおよびクリアランス調整を除き、最適化に関わる一連の操作を自動で実行できることを確認した。さらに、滑降シンプレックス法と遺伝的アルゴリズムを用いた最適化を比較し、両手法で得られた全実験データを基に因子の影響を評価した。得られた知見を以下に要約する。

1) 材料フィードおよびクリアランス調整以外の工程を自動化することで、完全自動の最適化が可能であることを実証した。

- 2) 遺伝的アルゴリズム(GA)は滑降シンプレックス法に比べ、評価回数が17回少なく収束した。ただし、これは初期集団に最良解が含まれていたことに起因しており、乱数種を変更した複数試行による統計的検証が必要である。
- 3) 滑降シンプレックス法は、GAより実験回数が15回少ない18回で収束した。これは評価回数と実験回数の乖離が大きいGAに比べ、実機実験を伴う最適化において効率的であることを示す。
- 4) 両アルゴリズムにおけるクリアランスの最良解は探索範囲の下限である12%となった。さらに、クリアランスとだれ高さの間には明確な正の相関が認められ、既往の知見と一致した。
- 5) 加工速度の最良解は滑降シンプレックス法で16 mm/s、GAで89 mm/sと差異が見られたが、両者ともに加工速度とだれ高さの間には有意な相関は確認されず、クリアランスに比べ影響は小さいと結論づけられた。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団 2021 年度重点研究開発助成課題研究(AF-2021001-A2)により実施した。同財団および関係各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：せん断加工—プレスせん断加工の基礎と活用技術—，コロナ社，(2016)，6-7.
- 2) 笹田昌弘：せん断加工，塑性と加工，**47**-547(2006)，724-726.
- 3) 日本塑性加工学会編：せん断加工，コロナ社，(1992)，8-39.
- 4) 安富隆，西村隆一，米村繁，中田匡浩，吉田亨，水村正昭：高強度鋼板のせん断加工技術，日本製鉄技報，**412** (2019)，28-34
- 5) 路大涛，村田眞，久保木考，金英俊：工具を水平方向に移動させる新しいせん断加工と従来のせん断加工との加工力および切口面の比較，**61**-3，(2011)，100-106.
- 6) 型技術協会：型技術便覧，日刊工業新聞社，(1989)，335.
- 7) Maiti S.K., Ambekar A.A., Singh U.P., Date P.P., Narasimhan K. : Assessment of influence of some process parameters on sheet metal blanking, Journal of Materials Processing Technology, **102**-1 (2000), 249-256.
- 8) 増田雪也，山岸光：プレス打抜き加工における加工条件の最適化，品質工学，**12**-1 (2004)，97-104.
- 9) J.H. Holland : Adaption in Natural and Artificial Systems, The Univ. Michigan Press (1975).
- 10) K. Deb, R.B. Agrawal: Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space, Complex Systems, **9** (1995), 115-148.
- 11) J.A. Nelder, R. Mead : A simplex method for function minimization, The Computer Journal, **7**-4, (1965), 308-313.