

論文・解説

30

## プレス金型加工時間予測手法の開発

### Development of a Method for Predicting Press Die Machining Time

上村 健祐<sup>\*1</sup> 川口 元志<sup>\*2</sup> 白川 真也<sup>\*3</sup>  
Kensuke Uemura Motoshi Kawaguchi Shinya Shirakawa  
秋月 匠<sup>\*4</sup> 上村 勝利<sup>\*5</sup> 江草 秀幸<sup>\*6</sup>  
Takumi Akizuki Katsutoshi Uemura Hideyuki Egusa

#### 要約

マツダは、プレス金型製作領域において量産準備段階でのムダを排除した高効率な製作プロセス確立を目指している。この目標を達成するためには、金型製作の各工程に要する時間を正確に見積もり、それに基づいた信頼性の高い製作計画を策定、実行していくことが求められる。しかし、実態は策定した計画からの逸脱が頻発し、製作効率の低下を招いていた。この要因として、従来の計画策定プロセスが人の勘・コツに基づいており、担当者の熟練度に依存しやすいことが挙げられる。特に、金型の機械加工は製作の上流工程かつ製作時間の大部分を占めており、金型製作全体に与える影響が大きいため、計画精度の向上が喫緊の課題である。本稿では、多変量回帰分析の一種である両側T法を用いて、金型機械加工時間を人的リソースに依存せず高精度に予測する手法を開発した事例を紹介する。

#### Abstract

Mazda aims to establish a highly efficient production process in the area of press die manufacturing by eliminating waste during the mass production preparation stage. To achieve this goal, it is necessary to accurately estimate the time required for each process of die manufacturing and to formulate and execute a highly reliable production plan based on that. However, in reality, frequent deviations from the formulated plan have led to a decline in production efficiency. One of the factors is that the conventional planning process is based on human intuition and skills, making it prone to dependence on the proficiency of the person in charge. Particularly, since the machining of dies is an upstream process and occupies a large portion of the production time, it has a significant impact on the overall die manufacturing, making the improvement of planning accuracy an urgent issue. This paper introduces a case where a method was developed to predict die machining time with high accuracy without relying on human resources, using the two-sided T method, a type of multivariate regression analysis.

**Key words** : Production • manufacture, Production plan/manufacturing plan/production management/  
manufacturing control, Die/mold

#### 1. はじめに

マツダは、クルマを通じてお客様へ人生の輝きを提供するため、造形の細部までこだわり、見る人の心を揺さぶる魂動デザインの深化 (Fig. 1) を始めとした商品価値向上を進めている。プレス金型製作領域においては、高品位な商品をベストプライス・ベストタイミングでお客様にお届けするため、量産準備段階でのムダを排除した

高効率な製作プロセス確立を目指している。金型を効率的に製作するためには、金型製作の各工程に要する時間を正確に見積もり、それに基づいた信頼性の高い製作計画を策定、実行していくことが求められる。

\*1~6 ツーリング製作部  
Tool & Die Production Dept.



Fig. 1 KODO Design

Fig. 2 にマツダのプレス金型製作フローを示す。①金型設計と並行して製作計画を策定し、②製作工程設計、NC データ（工作機械の動作制御命令）作成、素材・部品調達等の製作準備を経て、③工作機械を用いて素材を設計形状に機械加工する。その後、④手仕上げと部品組付けにより金型を完成させ、最後に⑤プレス機によるパネル成形トライアルを通して調整を行い、量産ラインに引き渡す。

この中で、特に③機械加工は金型製作の上流工程かつ製作全体工数の大部分を占めるため、計画と実績の乖離が発生した場合、金型製作全体へ与える影響が大きい。また、個々の能力が異なる工作機械を駆使して複数の金型を同時並行で加工するため、1つの金型で計画との乖離が生じると、効率的な工作機械の使い切りができなくなり、全金型を通しての大幅な製作タイムロスにつながってしまう。

更に、製作準備に万全を期すためには、可能な限り早期段階で各金型の工作機械割り付けや機械占有時間を検討し、製作負荷の見通しを立てることが重要である。そのため、理想的には、金型設計初期段階で高精度に機械加工時間を見積もり、計画を策定できる状態が望ましい。本稿では、この理想状態の実現に向けた取り組み事例について紹介する。

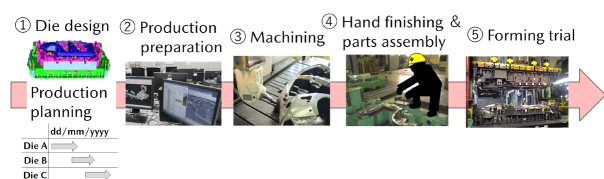


Fig. 2 Mazda's Die Production Flow

## 2. 従来の金型機械加工時間見積もりと課題

従来、新規製作する金型の機械加工時間は、過去に製作した類似金型の実績を基に、構造差等の影響を人が勘案して大まかに見積もっている。しかし、この方式は金型製作の複雑かつ暗黙的な知見を要することから、以下2点の問題を抱えている。

1) 見積もりの難易度や担当者の熟練度に依存して、最大で約60%にも達する見積もり誤差や見積もり所要時間の増大が生じる。特に、金型設計初期段階では、

金型構造の詳細が未確定であり、得られる情報が限られるため、熟練者であっても高精度な見積もりを安定して行うことは難しい。その結果、金型製作進行中に計画の練り直しが頻発し、全体の製作効率に悪影響を及ぼす。

2) 業務が属人化しており、ノウハウの伝達が難しい。担当者の転属等によるノウハウの消失や後継者の育成が難航する懸念がある。また、将来的な労働人口の減少に伴い、業務の属人化は業務停滞のリスクを高めている。これはマツダのみならず、金型業界全体にわたって存在する差し迫った問題である。

これらの問題により、信頼性の高い機械加工計画策定プロセスが確立できず、金型製作効率の低下を招いている。

計画策定の属人化を解消する事例として、機械学習等を用いて金型加工時間を機械的に予測する技術は存在するが、既存のものは金型構造詳細情報の利用を前提とする場合や、予測精度を十分に高めるために多量の学習データが必要となる場合等、さまざまな障壁が存在するため適用できていなかった。

以上のことから、適用性の高い手段を用いて、金型設計初期段階で人的リソースに依存せず機械加工時間を迅速かつ高精度に予測することが課題となる。

## 3. 新規金型機械加工時間予測手法開発

### 3.1 目的と方法

本取り組みでは、2章で述べた課題を達成し、従来の計画プロセスを理想状態に変革することを目的とした。なお、目標とする予測精度は、実務適用性を考慮して、計画策定時にあらかじめ用意しておくバッファ以内で乖離のリカバリーが可能となる平均絶対誤差率 (MAPE) 20%以内とした。

プレス金型製作は、量産の成形工程順序に従い、製品デザイン形状の成形を担う「ドロー型」、不要部の切断を担う「トリム型」、折り曲げ部の加工を担う「バンド型」の順に進行する。本稿では、このうち最も内製率が高く、かつ最初に製作する（優先順位が高い）ため計画策定上特に重要性の高い「ドロー型」を対象とした事例を紹介する。

製作する金型の構造体は主に、プレス機上面に設置される「上型」、プレス機下面に設置される「下型」に分かれて構成されている (Fig. 3)。これらは、求められる機能の違いから、基本構造が異なっており、それぞれの機械加工は独立して実施するため、両者を切り分けて検討を行った。

機械加工時間予測の手段として、以下2点の理由から多変量回帰分析手法の一種である両側T法<sup>(1)</sup>を採用した。

1) 金型は一品一様の製品であり、期間あたりの製作数が少ないため蓄積できるデータ数が限られている。そ

のため、少量データかつ説明変数の数 > データ数の場合も解析可能な両側 T 法が適する。

2) 加工時間の予測では、実際の加工時間との乖離の絶対値だけでなく乖離の正負も重要になる。そのため、正負の方向判定が可能な両側 T 法が適する。

両側 T 法では、複数の説明変数から 1 つの目的変数を専用の総合推定式を用いて回帰的に予測できる\*。目的変数を金型機械加工時間として、金型設計初期段階で入手可能な情報から適切な説明変数を選定することで、高精度な予測をねらう。そして、得られた予測値を計画に織り込むことで計画プロセスの変革を達成する。

\* 両側 T 法の成り立ちや総合推定計算ロジックの詳細については、参考文献 (1) を参照のこと。なお、以降は両側 T 法の慣例に倣い、「説明変数」を「特徴項目」、「学習データ (教師データ)」を「信号データ」と表記する。

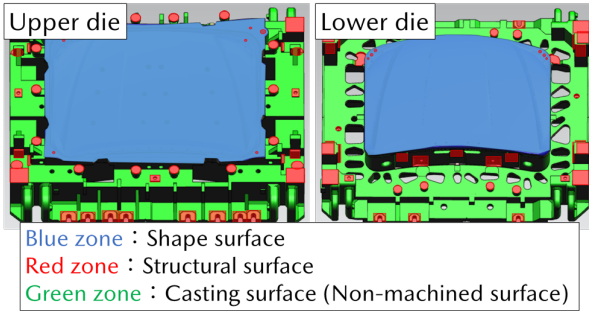


Fig. 3 Image of Upper and Lower Dies

3.2 特徴項目の選定

Fig. 4 に機械加工時間に影響を及ぼす因子と各因子情報を取得可能なタイミングの関係を示す。一般的に、加工時間は加工工具が通る経路長さや移動する速度 (送り速度) により決定する。これらは設計した加工面の性質 (形状, 位置, 面積, 面粗度) に基づいて作成する NC データにより決定する。そして、これら加工面の性質は、その加工面に付与される機能に基づいて決定される。加工面の機能は、金型設計初期段階で検討する項目のため、同段階で取得可能な情報である。したがって、加工面の機能から得られる情報を基にして、特徴項目を検討した。

プレス金型の機械加工面は、金属パネルを直接成形する機能を担う「形状部」と、それ以外の機能を担う「構造部」に分けられる (Fig. 3)。両者は加工面の性質や加工に使用する工具, NC データ作成の考え方が異なるため、特徴項目の検討を切り分けた。

「形状部」の機能は、パネルの成形 (すなわち金型形状の転写) である。その性質から、製品パネルと金型の「形状部」は形状相関性が高い。また、機械加工時間はその形状に相関すると考え、金型設計初期段階で容易に取得可能である製品パネル形状情報 (周長, 稜線長, 表面積) を項目として選定した。

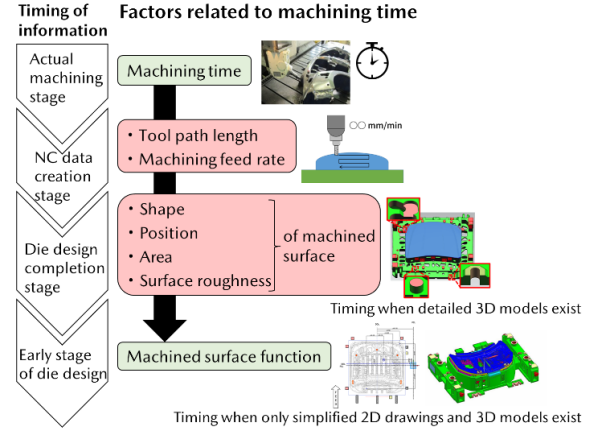


Fig. 4 Factors Related to Machining Time

「構造部」の機能は、部品保持, 金型動作補助, 加工基準, 部品干渉の回避など部位によって異なる。同一の機能をもつ構造面は、基本的に類似した面形状・加工法となり加工時間も相関すると考えた。したがって、各機能をもつ構造面ごとに項目を分割し、それぞれ設計された面の数をカウントするものとして項目を設定した。以上より、「上型」27 項目、「下型」28 項目を特徴項目として選定し、Table 1 にまとめた。

Table 1 Selection Item List

Category	Unit	Item list		
		No.	Upper die	Lower die
Shape	Length	1	Perimeter of panel	Perimeter of panel
		2	Ridgeline length of panel	Ridgeline length of panel
	Area	3	Surface area of panel	Surface area of panel
Structure	Quantity	4	Heel guide wear plates	Heel guide wear plates
		5	Sliding surfaces of heel guide wear plates	Sliding surfaces of heel guide wear plates
		6	U-slot covers	U-slot covers
		7	Side plates	Side plates
		8	Marking punches	Marking punches
		9	Air bleeding holes	Air bleeding holes
		10	Die straps	Die straps
		11	Height and balancer block seating surfaces	Height and balancer block mounting surfaces
		12	Gas spring receiving surfaces at 4 corners	Gas spring mounting surfaces at 4 corners
		13	Sliding surfaces of wear plates inside door	Gas spring mounting surfaces excluding 4 corners
		14	Thrust face wear plates	Wear plates inside door
		15	DCH punches	Sliding surfaces of thrust face wear plates
		16	Hanging bolts	DCH dices
		17	Lifter plates	Cushion bolts
		18	Location pins	Air cylinders
		19	Relief faces of gauge	Digital indicators
		20	Tool hooks	NC crane hangers
		21	Crossbar baseplate relief surfaces	Crossbar storage Assy
		22	Half-moon bushes	Half-moon punches
		23	Half-moon clamps	Punch bottom surface area
		24	Plungers	M surfaces
		25	Backup blocks	Die insert blocks
		26	Stress inhibition plates	Guide pins
		27	Push pins	Holder plates
		28	—	Counters

両側 T 法の総合推定に利用する金型データは、過去 5 年間に製作した「上型」29 型、「下型」27 型 (対象金型: サイドフレームアウター, フロントフェンダー, ボンネット, ドア) を採用した。目的変数である機械加工

時間には、工作機械の稼働計から得られる実加工時間を採用した（ただし、加工前の段取りや、加工後の切粉清掃作業等の実際の機械加工以外の時間は除外した）。

データの基準化に必要な単位空間については、両側T法の拡張手法であるTa法<sup>(1)</sup>の考え方を採用し、全データの平均値とした。この理由としては、重要項目診断精度向上の他、開発する機械加工時間予測手法の実務適用を見据えた際に、単位空間選定の恣意性の排除や管理の簡便性が求められることが挙げられる。

3.3 信号データによる総合推定

各金型データを信号データとして、総合推定式から予測加工時間を算出した。実加工時間と予測加工時間の関係を Fig. 5 に示す。上下型それぞれ信号データの決定係数R<sup>2</sup>が0.93, 0.89, 平均絶対誤差率 (MAPE) が9.0%, 16.1%であり、目標精度 (20%) 以内の予測ができています。また、全データのうち、85%以上が誤差率20%以内に収まっており、広範な種類の金型における機械加工時間予測に適用可能であることが期待される。

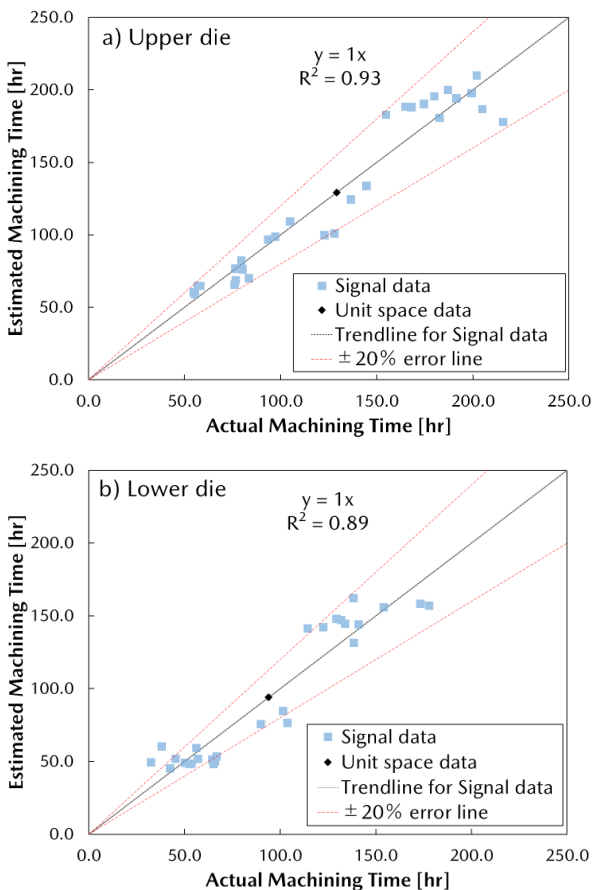


Fig. 5 Estimation of Signal Data

3.4 特徴項目の評価と絞り込み

続いて、選定した各特徴項目の重要性評価と絞り込みを実施した。項目の評価・絞り込みが必要な理由は以下の3点にある。

- 1) 予測に必要な項目数が多いと、それだけ必要情報の準備に工数を要する。定常的な業務プロセスに織り込む際は、項目数を最小限に抑えて可能な限り簡便かつ迅速に計画を策定できる必要がある。
- 2) 選定した項目の中には、予測の精度を下げる影響を与えるものや、予測に影響を与えないものが含まれる可能性があり、有意な予測手法開発のためにこれらを除外する必要がある。
- 3) 従来、人が暗黙知としてもっていた、または潜在的に見落としていた重要項目を可視化・定量化できる。項目の評価は既報<sup>(2)</sup>を参考に、Paleyの直交表を利用した項目使用の利得SN比で定義される「貢献度」と、総合推定式の各項目の係数を抽出し、標準偏差により基準化した「影響度」の2種の指標を利用して実施した。上下型それぞれについて、特徴項目ごとに「貢献度」、「影響度」を評価した結果を Fig. 6 に示す。

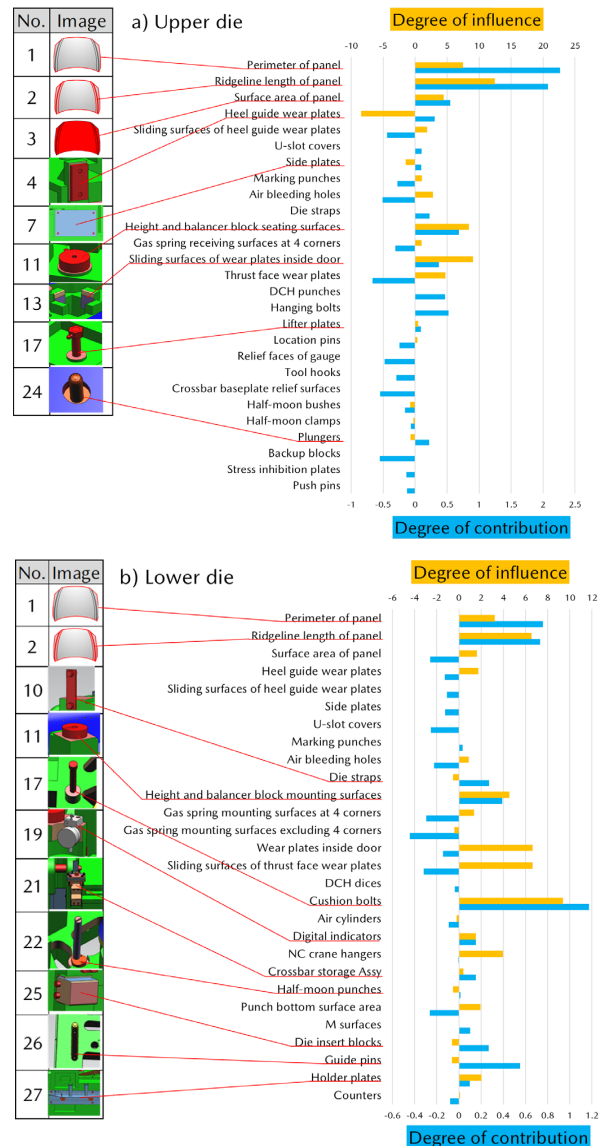


Fig. 6 Evaluation Results of Degree of Contribution and Influence for Each Item

一般的に、項目の「貢献度」が正に大きいほどその項目は予測精度を上げる方向に働き、「影響度」の絶対値が大きいほどその項目は予測値への寄与が大きいと解釈できる。本取り組みでは予測精度を最大化することを重視し、貢献度が正かつ、影響度が0でないものを重要項目として抽出した（該当項目を Fig. 6 図中に赤下線でマークした）。重要項目以外を除外すると、「上型」の項目数が27から9、「下型」の項目数が28から11に絞り込まれる。

絞り込んだ項目のみを用いて総合推定式による予測を行った結果を Fig. 7 に示す。項目の絞り込み前と比較し、上下型それぞれの相関係数  $R^2$  が0.93から0.94、0.89から0.93に改善し、平均絶対誤差率 (MAPE) が9.0%から7.3%、16.1%から12.8%に改善した。また、誤差率20%以内に収まっているデータの割合も85%から93%に増加した。

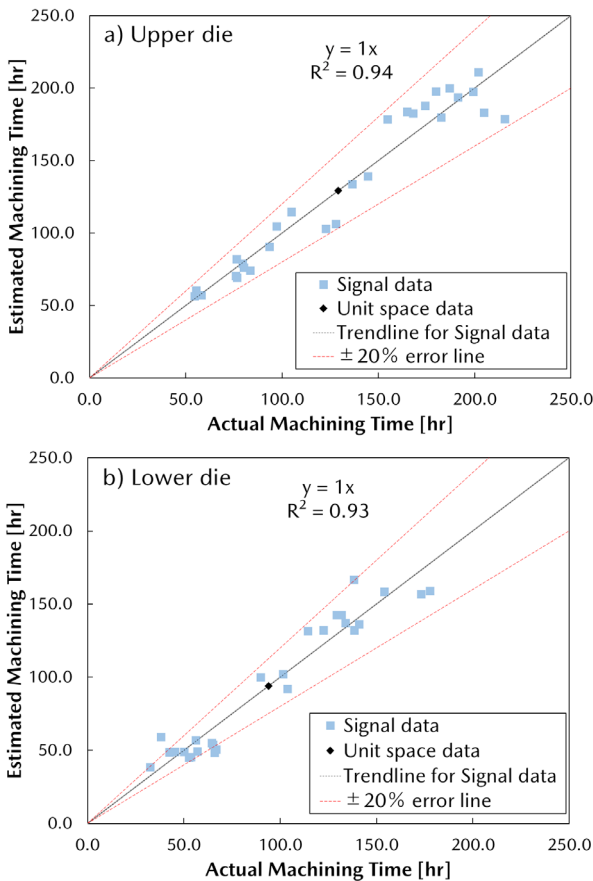


Fig. 7 Estimation of Signal Data after Refinement

3.5 汎化性能評価

続いて、各金型データを未知データとして取り扱うことで、機械加工時間予測の汎化性能を評価した。データを最大限活用して汎化性能を評価するため、評価方法は一つ抜き交差検証 (LOOCV)<sup>(3)</sup> を採用した。

評価結果を Fig. 8 に示す。横軸は未知データとした各金型のデータ番号、縦軸は機械加工時間を示している。

比較対象として、実加工時間及び項目絞り込み前後の信号データのみを用いた総合推定式による予測結果も同図にプロットした。未知データの予測結果は、おおむね項目絞り込み後の信号データのみを用いた予測結果に沿った傾向を示し、上下型それぞれの決定係数  $R^2$  は0.94から0.93、0.93から0.89に変化し、平均絶対誤差率 (MAPE) は7.3%から8.1%、12.8%から15.3%に変化した。比較対象間に大幅な乖離は認められず、過学習の傾向は確認されなかった。

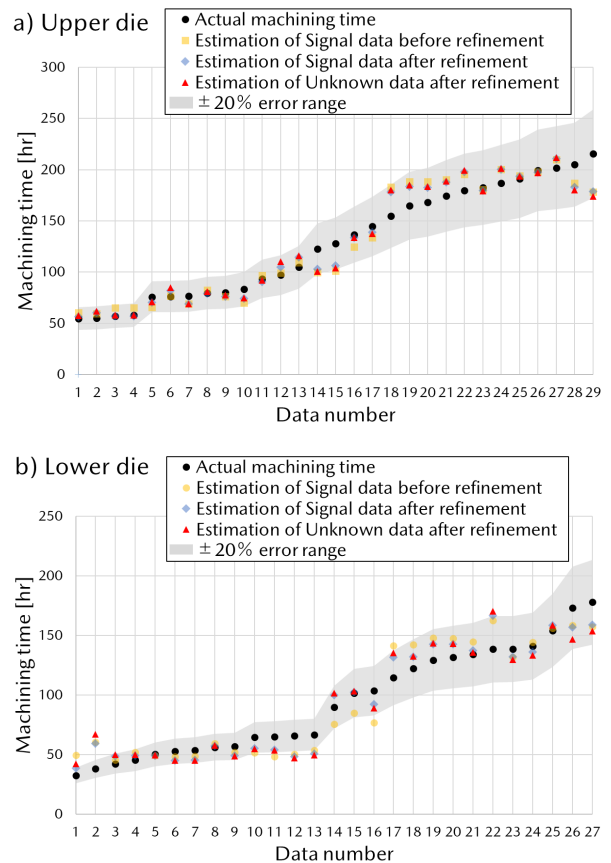


Fig. 8 Estimation of Unknown Data by Leave-One-Out Cross-Validation

更に、これまで使用したデータに含まれない新型車のプレス金型において、新手法を用いた機械加工時間予測トライアルを実施した。金型設計初期段階、金型設計完了段階それぞれの時点で得られる情報を用いて総合推定式による予測を実施した結果を Fig. 9 に示す。金型設計初期段階から完了段階までの構造変更範囲内で予測結果に差は発生するものの、いずれの段階でも目標精度 (20%) 以内で機械加工時間を予測できている。

以上の結果から、未知データに対しても一貫して高い予測精度を維持できることが確認された。

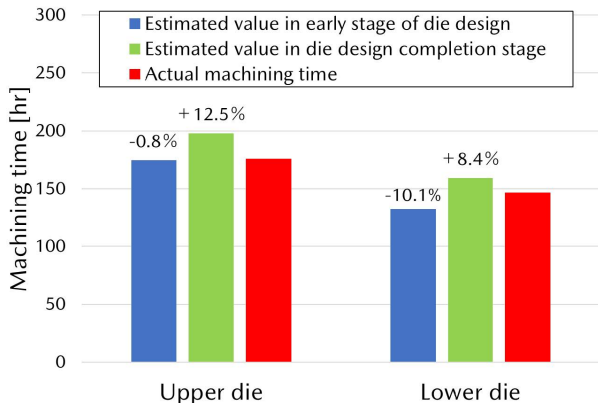


Fig. 9 Estimation of Unknown Data at Each Stage

#### 4. 改善の効果

Table 2 に新手法と従来手法の比較表を示す。新手法の予測精度 (MAPE) は 11.6% となり、熟練者、初心者実施の従来手法と比較してそれぞれ約 11%, 54% の改善となった (新手法の予測精度は、一つ抜き交差検証の上下型全体の平均値で算出)。また、目標精度である 20% を 8.3% 過達しているため、計画策定時に用意しておくバッファを縮小することにより、金型製作効率の向上が期待される。新手法の適用により、金型設計初期段階で信頼性の高い計画策定が可能となり、人材や設備といったリソースを従来よりも効率的に配分することができる。また、計画と実績の乖離に起因する軌道修正の必要性が低減され、具体的には突発的な計画の練り直しや製作の緊急外注対応といった非効率なプロセスを抑制する効果が期待される。これらの効果をコストインパクトに換算すると、1 車種あたりの金型製作で従来比約 12% の改善効果が見込まれる。なお、新手法の見積もり作業時間は現時点で従来手法 (熟練者実施の場合) と同等程度であるが、人的リソースにほとんど依存しない点で優位性がある。また、今後特徴項目の情報取得や総合推定計算を自動化することにより、数分程度まで作業時間の短縮を見込んでいる。

Table 2 Evaluation of Each Method

No.	Evaluation items	New method	Conventional method
1	Estimate accuracy (MAPE)	11.6%	Expert: 22.6% Novice: 65.5%
2	Estimated timing	Early stage of die design	Early stage of die design (With frequent plan revisions)
3	Working hours/die	0.5hr	Expert: 0.5hr Novice: 2.0hr
4	Personalization	No	Yes

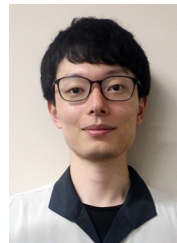
#### 5. まとめ

本稿では、金型機械加工時間と加工面の機能の相関に着目した両側 T 法による予測モデルの構築を通じて、金型設計初期段階における高精度な機械加工時間予測手法の開発事例を紹介した。本手法により、従来の属人的なプロセスを排除し、信頼性の高い計画プロセスへの変革が可能となった。本取り組みの成果は、金型製作の効率化に寄与するものであり、今後は本手法の更なる改良及び適用領域の拡大を通じて、金型製作効率の最大化を追求していく。

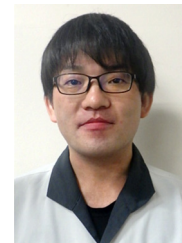
#### 参考文献

- (1) 永田 靖：MT システムの諸性質と改良手法，応用統計学，Vol42，No.3，pp.93-119 (2013)
- (2) 小松和正ほか：甲州種ワインの高品質化に向けた栽培・醸造技術に関する研究 (第 3 報)，山梨県工業技術センター研究報告，No.25，pp.25-40 (2011)
- (3) 津田悠人ほか：ガウス過程回帰を用いた基盤面の空間分布推定における地表面標高の考慮手法の比較，AI・データサイエンス論文集，4 巻，3 号，pp.254-264 (2023)

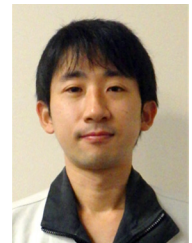
#### ■ 著 者 ■



上村 健祐



川口 元志



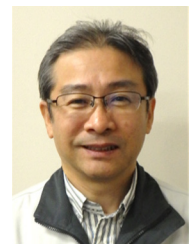
白川 真也



秋月 匠



上村 勝利



江草 秀幸