

回帰分析による樹脂保持器の寸法予測技術開発

Development of Dimensional Prediction Technology for Plastic Retainers Using Regression Analysis

大石将揮 M. OISHI 溝口翔太 S. MIZOGUCHI 岡崎那耶 T. OKAZAKI
足立智也 T. ADACHI 宮村和宏 K. MIYAMURA 山本 進 S. YAMAMOTO
古藤直成 N. KOTO 國井勇希 Y. KUNII 真田みゆき M. SANADA

Development of prototype molds for plastic retainers often suffers from repeated modifications due to dimensional inaccuracies, resulting in long lead times. Conventional molding relies on empirical shrinkage compensation, which does not adequately account for the anisotropic and multi-factorial shrinkage behavior of glass fiber-reinforced resins, resulting in a low first-pass acceptance rate of about 36%. This study proposes molding design based on regression analysis using past prototype data. Regression models were constructed for each critical dimension and the maximum prediction error was constrained within half of the specified dimensional tolerance. The proposed method was applied to eight new prototype molds, all of which achieved first-pass acceptance without further modification. As a result, prototype lead time was reduced by up to two weeks. These results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: regression analysis, plastic retainer, injection molding, mold design

1. はじめに

近年、製品の開発高速化および多品種化に伴い、試作開発の重要性は一層高まっている。特に電動化の進展によってeAxle向け軸受の需要が拡大しており、開発リードタイムの短縮が顧客から強く要求されている。

樹脂保持器のような部品は製品寸法に高い精度が要求され、試作段階における金型設計工程および製作後の金型精度が開発リードタイムや開発コストに大きな影響を及ぼす。なかでも樹脂保持器の試作金型製作は、開発全体の制約要件となりやすい。これは、成形品の寸法評価で不適合となった場合には、金型の再設計・再製作のプロセスを繰り返すことになるためである。

一般に樹脂成形品は成形時に収縮する。特にガラスファイバー（GF）を含有する樹脂では、繊維配向の影響により収縮挙動が異方的となるため、寸法ごとの収縮を高精度に予測することは困難である。現状では、金型設計における樹脂収縮量の設定は設計者の経験に依存しており、試作金型が一度で寸法精度を満たす「一発合格」の割合は低い。その結果、顧客から要求された開発期間に対応できず、受注機会の損失につながっている。

そこで本報では、現状の試作金型開発プロセスにおける課題を整理し、過去試作データを活用した回帰モデルの構築について紹介する。さらに、回帰分析に基づく金型設計手法の提案およびモデル精度の検証結果を示すとともに、実機検証によるリードタイム短縮の効果を述べる。

2. 現状の整理と課題抽出

2.1 試作金型開発の現行プロセス

樹脂保持器の試作開発における現行プロセスは、金型の設計・製作、当該金型を用いた成形、成形品寸法の測定・評価という一連の工程から構成される（図1）。案件ごとに製品形状が異なるため、初回で成形品の寸法精度基準を満たすことは困難である。測定・評価の結果、寸法が図面要求を満たさない場合には、成形品の寸法誤差に基づいて金型を再設計し、改めて金型を製作する必要がある。金型修正および再製作が複数回にわたると試作開発全体のリードタイムが増加する。



図1 試作金型開発の現行プロセス
Current prototype mold development flow

2.2 一発合格率の実態とリードタイムへの影響

過去の試作実績について、金型修正回数の内訳を調査した結果を図2に示す。初回の金型から製作された成形品のうち、図面で指定された許容寸法範囲（公差）内をすべて満たす（一発合格）割合は36%であった。残り64%の案件は金型修正が必要であり、1回の金型修正で合格した案件は36%、2回の修正を要した案件は12%、特別採用（寸法が図面公差を満たさないものの、試作評価上は許容された案件）は16%であった。1回の金型修正につき数週間のリードタイム増加が発生する。このような修正を要する案件の累積により、開発工数およびコストが増加する。

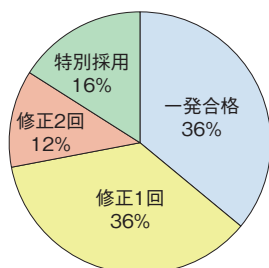


図2 金型修正回数の内訳
Number of mold modifications

2.3 金型設計における問題点の分析

一発合格率が低い要因を明らかにするため、金型設計の内容およびプロセスを分析した。樹脂成形品の寸法は、各部位の金型寸法と成形後の収縮量によって決まり、現状では、過去の類似事例や設計者の経験則に基づいて収縮量が予測されている。しかし、過去の試作データは体系的に整理・活用されておらず、各公差寸法の収縮挙動が十分に把握されていないため、対象公差寸法に影響を及ぼす複数の形状要素や関連寸法が現在の金型設計には十分考慮されていない。

2.4 課題の整理

分析結果から、以下の課題が明らかとなった。

- (1) 試作金型の一発合格率は約36%と低く、再製作が頻発している
- (2) 樹脂収縮量は過去試作データや設計者の経験則に基づき設定されているが、収縮量の設定値が定量的に整理・数値化されておらず、複数の形状要素を考慮した金型設計手法が確立されていない

以上の分析結果より、試作金型の一発合格率が低い主要因は、金型設計時における樹脂成形後の収縮量の設定方法にあると考えられる。現状では収縮量の設定が設計者の経験や過去事例に依存しており、複数の形状要素を考慮した定量的な設計手法が確立されていない。これらの課題解決には、経験依存型の設計から脱却し、過去試作データに基づくデータ駆動型の金型設計手法が必要である。

3. 回帰分析を用いた金型設計手法

3.1 対象データ

本開発では、回帰分析に用いるデータとして、過去に実施された樹脂保持器の試作金型に関するデータを整理した。本開発における試作金型の設計、製作、成形および成形品の寸法測定は、実際の製造を担う福井精機工業株式会社と協業して実施した。同社より金型寸法および成形後の寸法データの提供を受け、データ整理および回帰分析を実施した。対象データには、金型設計時に設定された各金型寸法と、試作成形後に測定された成形品寸法が含まれる。なお、本開発で対象とした樹脂材料は、ガラスファイバーで強化されたポリアミド系樹脂である。

3.2 回帰モデルの概要

本手法では、過去試作データを統計的に整理・分析し、金型設計に適用可能な回帰モデルを構築する。具体的には、過去試作データに含まれる金型寸法および成形品寸法から成形後の収縮量を算出し、製品形状を表す金型寸法を説明変数（特徴量）、算出した収縮量を目的変数として設定した。

本開発では、抽出した特徴量を用いて、各公差寸法について回帰分析を実施した。まず、単一の金型寸法と公

差寸法との関係性を評価する単回帰分析を行った。くわえて、複数の金型寸法を説明変数として重回帰分析を適用した。これにより、製品形状に起因する複合的な影響をモデルに反映させた。

樹脂保持器は部位および形状によって収縮挙動が異なる。そのため、すべての公差寸法に対して同一の金型寸法を特徴量として用いるのではなく、各公差寸法との関連性が高い金型寸法を個別に選定した。特徴量の選定にあたっては、各公差寸法に対する収縮量を算出し、収縮量と各金型寸法との関係を散布図および相関係数により確認した。また、収縮量のばらつきが大きいデータについては、肉厚や周辺形状、金型構造との関係を確認し、収縮量に影響すると思われる形状要素を抽出した。特徴量の選定および組み合わせは、これらの傾向分析に加え、金型構造および公差寸法に対応する福井精機工業株式会社の設計・製造知見を反映して検討した。

3.3 回帰モデルの評価方法

試作金型の設計では、多くの寸法を高精度に予測できたとしても一部の寸法が図面公差を外れると金型修正が必要となる。そのため、回帰モデルの評価には平均的な予測精度ではなく最大誤差を用い、各公差寸法について最大誤差が図面公差幅の2分の1以下となることを目標とした。

回帰モデルの予測値と実測値の関係、および最大誤差と図面公差幅の2分の1との関係を概念的に図3に示す。各プロットは、過去試作データにおける実測値と回帰モデルによる予測値の組を表す。予測値と実測値が一致する場合、プロットは「予測値=実測値」を示す基準線上に位置する。本研究では、各プロットにおける予測値と実測値との差の絶対値を予測誤差とし、その最大値を最大誤差と定義した。

なお、本開発で回帰モデルの構築に用いた過去試作データには、金型加工誤差や成形条件に起因するばらつきが含まれている。したがって、当該データに基づいて構築した回帰モデルの最大誤差が本条件を満たす場合、実際の製造においても成形品寸法が図面公差内に適合すると判断できる。

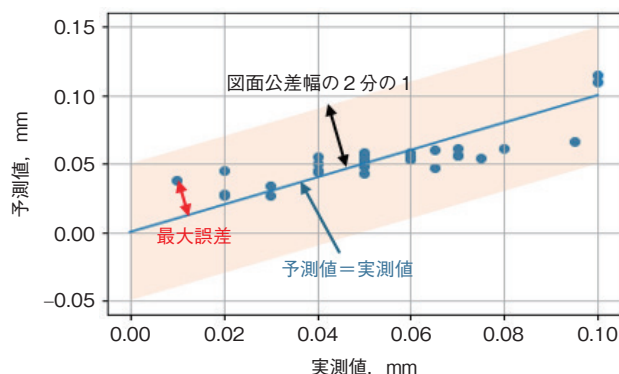


図3 回帰モデルを用いた最大誤差の評価
Evaluation of maximum error using a regression model

3.4 回帰モデルの構築プロセス

図4に本手法による回帰モデル構築および金型設計への適用手順を示す。まず、過去試作データから金型寸法および成形品寸法を整理し、各公差寸法に対応する収縮量を算出した。つぎに、各公差寸法に対して、選定した金型寸法を説明変数とする回帰モデルを構築した。

構築した回帰モデルについて、予測値と実測値との差を算出し、その最大値が図面公差幅の2分の1以下であるかを評価した。最大誤差が目標基準を満たさない場合には、以下の手順により回帰モデルを改善した。

- (1) 最大誤差が発生した過去試作データの傾向分析
- (2) 収縮量変動要因のさらなる検討
- (3) 特徴量の追加または削減によるモデルの再検討

以上の手順を反復的に実施することにより、回帰モデルの精度向上を図った。確定した回帰モデルを金型設計に適用することで従来の経験則に基づく収縮量設定に代えて、収縮挙動を定量的に考慮した金型設計が可能となる。また、最大誤差が図面公差幅の2分の1以下となる回帰モデルを構築することで理論上は初回の金型製作で一発合格が可能となる。

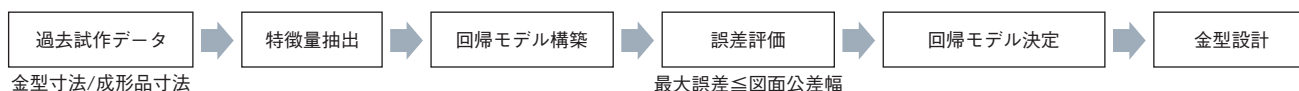


図4 提案手法の概要
Overview of proposed mold design method

4. 回帰モデルの評価

4.1 回帰モデルの予測精度

各公差寸法に対する回帰モデルの最大誤差および評価結果を表1に示す。すべての公差寸法において、最大誤差は当該公差寸法の図面公差幅の2分の1以下であった。この結果より、構築した回帰モデルは、樹脂保持器の試作金型設計において十分な精度を有することが確認された。

表1 回帰モデルの予測精度の評価結果
Accuracy results of regression models

寸法名	公差	最大誤差	評価
A	± 0.1	0.097	○
B	± 0.05	0.046	○
C	± 0.1	0.087	○
D	± 0.125	0.107	○
E	± 0.125	0.049	○
F	± 0.125	0.111	○
G	± 0.125	0.117	○
H	± 0.05	0.030	○

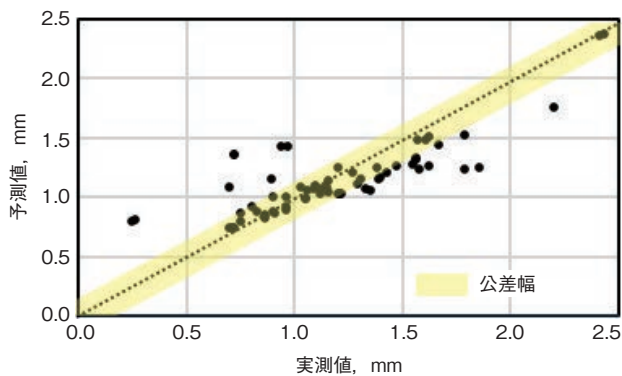
4.2 寸法別モデル特性の考察

構築した回帰モデルを公差寸法ごとに比較した結果、影響度の高い特徴量の組合せは公差寸法によって異なった。これは、各成形品寸法の収縮挙動が単一の要因ではなく、製品形状に起因する複数の要因によって決定されることを示している。

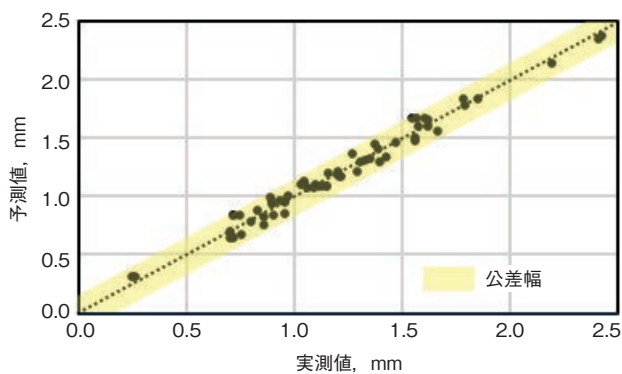
従来の金型設計手法では、各公差寸法に個別の収縮量を設定していた。そのため、対象公差寸法以外の形状的特徴が寸法変動に影響する場合でも、それが十分に反映されずに金型寸法が決定されていた。本開発では、公差寸法ごとに回帰モデルを構築し、予測誤差を評価しながら特徴量を選定した結果、各公差寸法に影響する要因を体系的に整理できた。

収縮量の予測精度について、従来手法と提案手法を比較した結果を図5に示す。従来手法では一部のデータが図面公差幅の2分の1を超過しているのに対し、提案手法ではすべてのデータが公差内であることが確認された。

以上より、本開発で構築した公差寸法別の回帰モデルは、製品形状に起因する複合的な影響を反映できており、樹脂保持器成形品の寸法精度を向上させるのに有効であ



(a) 従来手法



(b) 提案手法

図5 収縮量予測精度の比較

Comparison of accuracy for predicting shrinkage

ることが示された。

5. 実機検証

本回帰モデルの実用性を検証するため、樹脂保持器の新規試作案件に本手法を適用し、金型製作および成形品寸法検証を実施した。

福井精機工業株式会社にて本手法により、算出した金型寸法に基づいて金型を設計、製作し、成形品の寸法を測定した。得られた測定結果について、設計値との差および図面公差幅に対する適合可否を評価し、本手法の有効性を検証した。

新規製作案件8件について検証した結果、すべての案件において初回の金型製作で成形品寸法が図面公差内となり、一発合格を達成した。従来の試作実績における一発合格率の約36%と比較すると大幅な改善である。また、従来は寸法不適合時に金型修正を要していたが、本手法の適用により金型修正工程を削減できたため、試作金型1件あたり最大で約2週間のリードタイム短縮を確認した。以上より、回帰モデルを用いた金型設計手法は、新規試作案件に対して有効であることが実証された。

6. おわりに

本報では、樹脂保持器の試作金型開発における一発合格率が低い（約 36%）という課題に対し、過去試作データを活用した回帰分析に基づく金型設計手法を提案した。具体的には、各公差寸法に対応する収縮量を目的変数、製品形状を表す複数の金型寸法を説明変数として回帰モデルを構築した。その結果、全公差寸法で最大誤差が図面公差幅の 2 分の 1 以下という目標基準を満たす回帰モデルを構築できた。さらに、本回帰モデルを新規試作案件 8 件に適用した結果、すべての案件において初回の金型で成形した成形品寸法が図面公差を満たし、一発合格を達成した。これにより、試作金型 1 件あたり最大で約 2 週間のリードタイムの短縮を実現した。また、従来は設計者の経験則や試行錯誤に依存していた金型設計をデータに基づく定量的判断へ移行することが可能となった。これにより、設計業務の標準化や属人性の低減も期待できる。

本手法は、経験依存型であった試作金型設計をデータ駆動型設計へ転換する有効な手段であり、試作開発の効率向上に寄与する。一方で、本検証は新規試作案件 8 件を対象としたものであり、対象形状および樹脂材料は限定されている。今後は試作データをさらに蓄積し、回帰モデルの精度および汎用性の向上を図るとともに、他形状および他樹脂材料への適用を検討する。

筆者



大石将揮*
M. OISHI



溝口翔太**
S. MIZOGUCHI



岡崎那耶**
T. OKAZAKI



足立智也***
T. ADACHI



宮村和宏****
K. MIYAMURA



山本 進*****
S. YAMAMOTO



古藤直成*****
N. KOTO



國井勇希*****
Y. KUNII



真田みゆき*****
M. SANADA

- * 生産技術本部 素形材革新部
- ** イノベーション本部 データアナリティクス研究部
- *** イノベーション本部 材料研究部
- **** 産機・軸受事業本部 試作部
- ***** 福井精機工業株式会社 生産技術部