

スパイラルコア用リボンケーブルの ダイリップ形状推定方法開発

シセ-キ 小林

2025/08/29

第 1 章 概要

スパイラルコア用リボン押出を対象として異形樹脂押出工程における CAE¹⁾手法を検討した。

実製造工程と製品形状を数値化し、物理モデルと数値モデルで記述する方法を考案し、モデルの逆解析による製造工程最適化方法を検討中である。

それらについて説明する。

1) Computer Aided Engineering

第2章 背景

スパイラルコア (以下 ”SC” と略) は、電力ケーブル接続部の絶縁処理部材 RBJ¹⁾ の装着時に使用される円筒状の部材である。この SC は SC 用リボンをらせん (スパイラル) 状に嵌合させ形成されており、嵌合時の強度と安定性を確保するために適切な断面形状が指定されている²⁾ (図 2.1a , 2.1b 参照)³⁾。

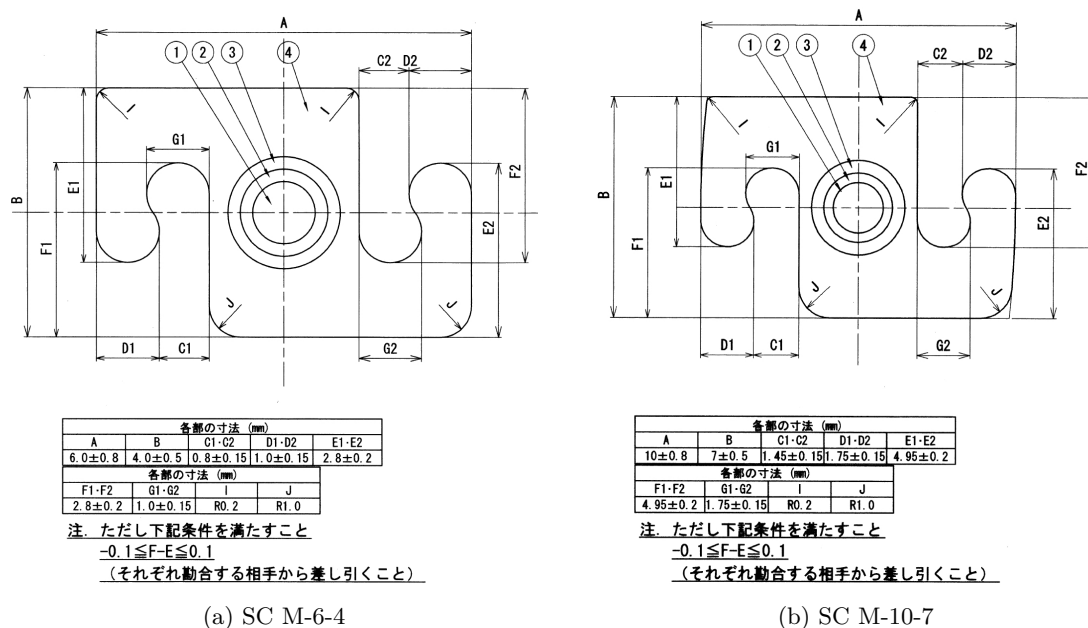


図 2.1: SC 図面例

この SC 用リボンケーブルはこれまで UEXC⁴⁾ 社に外注していたが、2025 年 3 月をもって製造から撤退することとなったため、2026 年 10 月までに SWCC 社の内製化に移行することとなった。

- 1) Rubber Block Joint - 電力用ケーブル (主に CV ケーブル) を接続する際に使われる、ゴムブロック絶縁型のジョイント (中間接続部材)
- 2) 参考: 特開 2006-289791
- 3) ”スパイラルコア用リボン購入仕様書”, ATS-SS-060697H 号 より抜粋
- 4) 宇部エクシモ株式会社 <https://www.ube-exsymo.co.jp/>

第3章 目的

内製化移行において難易度が高い課題の一つにダイス設計がある。

樹脂押出工程において、ダイス出口から吐出する溶融樹脂は流体であるため、冷却により硬化するまでに様々な外的要因 (例えば吐出口の流速分布や重力の影響など) により変形する。

すなわちダイス設計はその「押出過程における樹脂変形挙動」を考慮して製品設計からダイス形状を推定する**逆解析問題**といえる。

従来この問題解決は、“複数のダイス形状”と“それを用いた押出製品の形状”の観察画像を比較し、ダイス形状変化に対する製品形状変化から傾向を読み取ることで行われていた。しかし、多分に解析者の主観や経験に基づく手法であり効率が良いと言えなかった。

本検討の第一の目的は、この“人力に基づく逆解析”をシミュレーションやインフォマティクスといった数値解析・情報工学を駆使することで**データ駆動型逆解析**とする要素技術確立およびその要素技術の組合せによるソリューション開発を行うことである。

そして最終的な目的は、そのソリューションを用いることで本内製化プロジェクトのスケジュールを遅延なく進めることである。

第 4 章 実験方法/解析方法

4.1 本検討の全体像

本検討ではソリューション (逆解析) 本体を物理モデルと数値モデルの組合せで実現する。

そして、このソリューションの妥当性確認は試作データとの比較により行う。

以下に、物理モデル - 数値モデル - 実測 (値) の連携方法について示す。

4.2 形状表現

物理モデル - 数値モデル - 実測 (値) のそれぞれを連携させるためには、製品とダイリップの輪郭形状を比較する何らかの数学的表現を定義する必要がある。

今回は輪郭の多角形表現を用いた。(図 4.1)

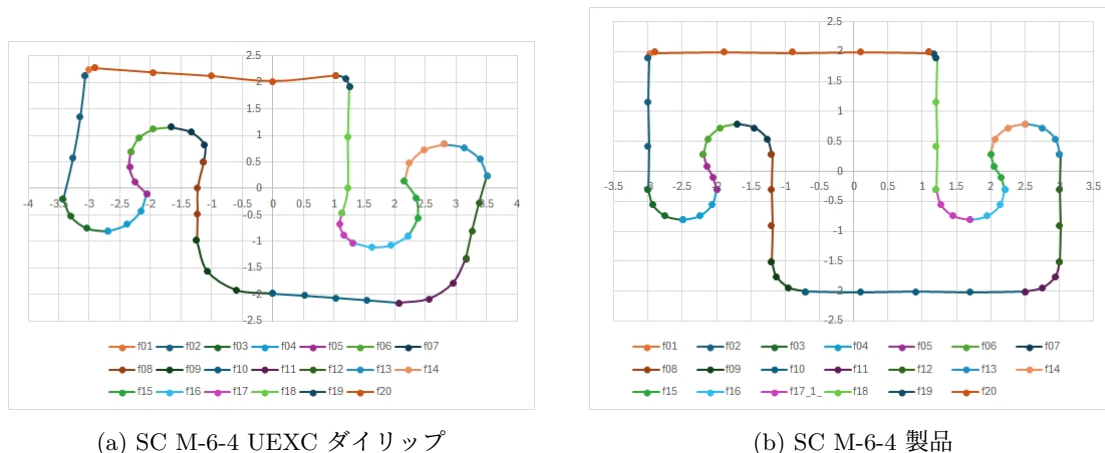


図 4.1: 多角形表現

ダイリップ、製品の両輪郭形状は特徴的な 20 辺に分割し、それぞれの辺を 2~4 分割することで 60 角形としている。

4.3 シミュレーション

本報では物理現象に基づく数値解析 (物理モデル) をシミュレーションと呼ぶ。
想定している物理現象を以下に示す。

1. ダイス内流路
 - (a) 伝熱解析 (壁面や線材との間の伝熱)
 - (b) 流体解析 (固定壁面で定義された流路内流れ)
2. 押出機外流路
 - (a) 流体解析 1 (出口における速度分布に基づく断面内流れ)
 - (b) 流体解析 2 (重力影響による流れ)
 - (c) 流体解析 3 (上記 1, 2 の影響による自由表面の変形)
 - (d) 伝熱解析 (空冷や水冷による断面内温度分布)
 - (e) 構造解析 (温度と線膨張係数から求めた体積変化)
 - (f) 流体解析 4 (体積変化の影響による自由表面の変形)

4.3.1 物理モデル

前述の想定している物理現象は、「自由表面の変形を考慮した流体」というモデルで取り扱う。

ただし、空冷や水冷による冷却 (物理現象 2(d)) を解析するための表面熱伝達率設定は別途熱流体解析を行った。(頁の関係で本報では説明を省略する)

4.3.2 流路形状

流路形状はダイリップ形状を引き延ばした多角柱状とした。また、流路中心には線材径に相当する円筒状領域が設けてある。](図 4.2)

ダイス内流路長さは 40[mm](図 4.2(a) の濃い緑色の領域)、ダイス外流路長さは 50[mm](標準的な変形解析用)、150[mm](長時間で生じる変形解析用) とした (図 4.2(a) の薄い水色の領域)。

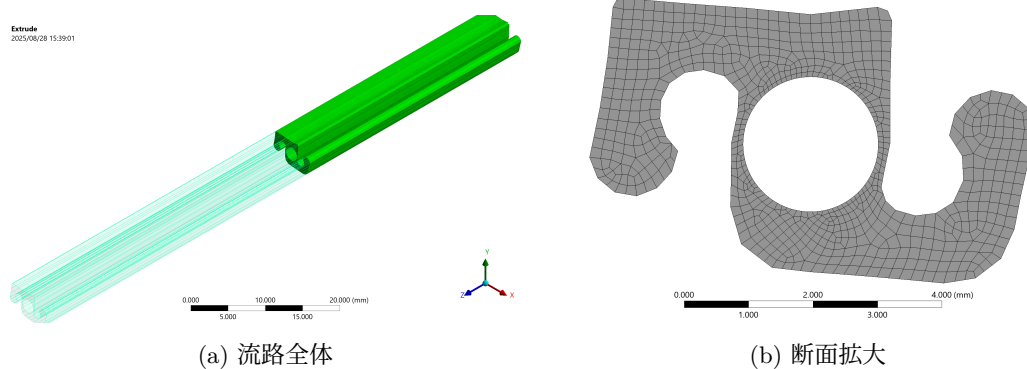


図 4.2: 流路形状およびメッシュ (SC M-6-4)

4.3.3 境界条件

- 樹脂入口：図 4.2(a) の Z 軸マイナス側に設定。基本的に線速に基づく速度境界としている。
- 芯線表面：速度境界。滑り無し。線速を $z+$ ベクトルとして設定。
- ダイス内流路表面：固定境界。滑り無し。現時点では断熱境界として取り扱っている。
- ダイス外流路表面：自由表面。図 4.1 に基づいて面 (辺) 毎に境界温度と熱伝達率を定義。

4.3.4 材料物性

使用材料：Hizex6300M

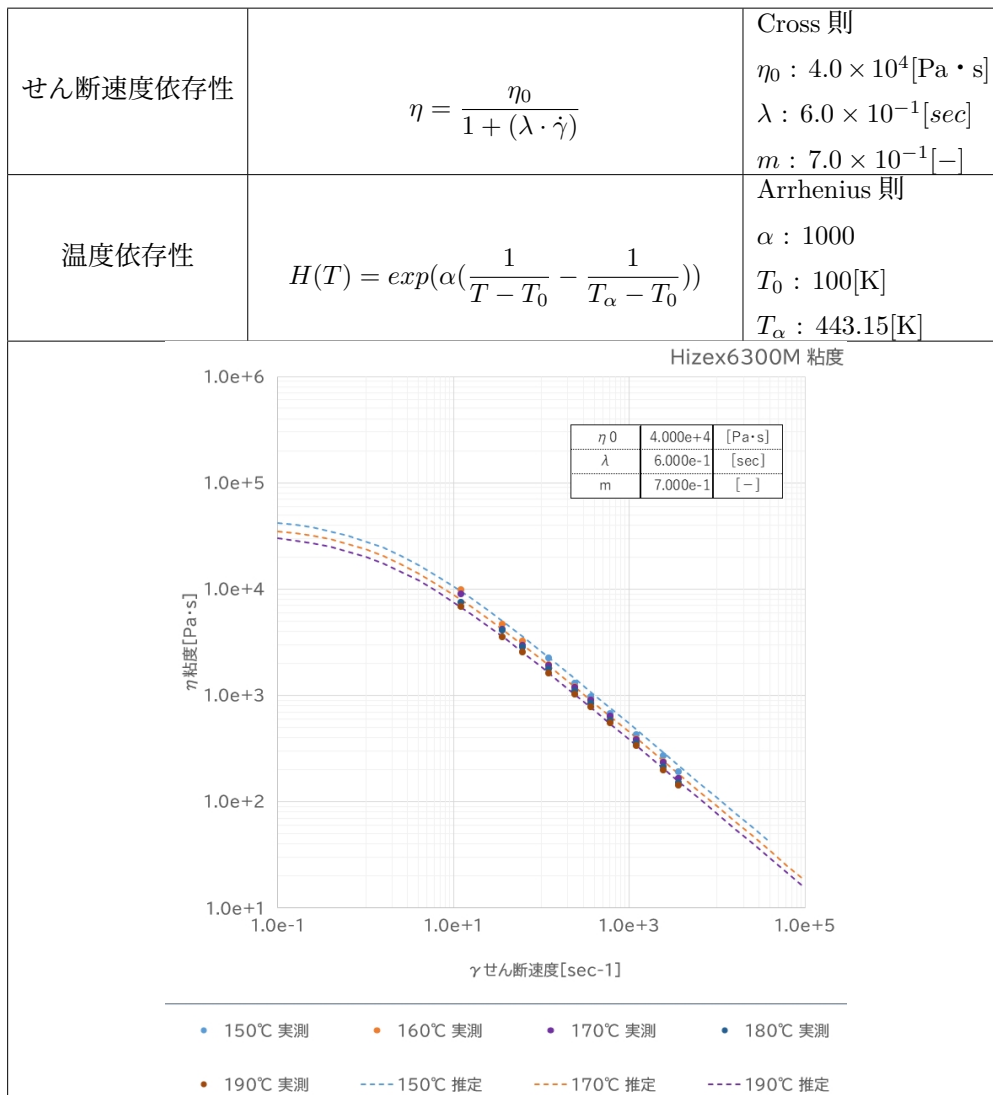
物性値を以下に示す。

表 4.1: Hizex6300M 物性値

物性値	数値	備考
密度 [kg/m^3]	951	融点以下での値
熱伝導率 [$W/m \cdot K$]	0.48	融点以下での値
比熱容量 [$J/kg \cdot K$]	2300	融点以下での値
線膨張係数 [$1/K$]	1.2×10^{-4}	融点以下での値

粘度は擬塑性流体として取り扱っており、せん断速度依存性は Cross 則、温度依存性は Arrhenius 則で表現している。

表 4.2: Hizex6300M 粘度



4.3.5 解析用ソフトウェア

ANSYS ソフトウェアスイートを用いている。バージョンは 2025 R1。

- 熱流体解析ソルバー 1 : ANSYS Polyflow - 自由表面変形を考慮した流体解析
- 熱流体解析ソルバー 2 : ANSYS Fluent - 表面の熱伝達率計算用
- モデラー : ANSYS DesignModeler
- メッシャー : ANSYS Meshing

4.3.6 解析用ハードウェア

ハードウェアの基本仕様を以下に示す。

- プロセッサ Intel(R) Core(TM) Ultra 9 285K 3.70 GHz
- 実装 RAM 192 GB
- Windows 11 Pro Version 23H5

4.4 インフォマティックス

「インフォマティックス」という用語は文脈によりいろいろな意味で用いられている。

本報ではシミュレーション (物理モデル表現) 以外の数理モデル表現をすべてインフォマティックスに含まれるものとして取り扱うことにする。

具体的には説明変数、目的変数の因果関係を把握すること (データ空間内の分布傾向を把握すること)、それに基づく逆解析による推定を行うこと、試作結果に基づく実測値と推定値とのずれに基づく補正を行うこと、またシミュレーションを含めすべての連携を効率良く行うための各種ツール作成、などをインフォマティックスとして取り扱う。

ここでは「シミュレーションと試作のデータ傾向の確認」「逆解析」および「形状最適化」について説明する。

4.4.1 データ傾向の確認

押出工程でダイス出口から吐出した樹脂の変形挙動は、ダイス出口断面における樹脂領域の任意の点の座標 p_{die} が、製品断面における樹脂領域内の位置 p' に移動した関係で示すこととする。

$$p' = f(p)$$

押出口から出た樹脂の現実の変形挙動は直線移動ではないため実際には履歴を考慮する必要があるが、ここでは単純化するため初期位置 p_{die} と最終位置 p' だけに限定して考えることにする。

線形問題とすると、変形挙動は $\overrightarrow{p_{die}p'}$ というベクトルで表現できる。これをダイス出口形状、押出樹脂形状の両輪郭の多角形の各頂点に対して扱ったものが、変形挙動を示すデータセットである。

シミュレーションが FEM¹⁾ を用いていれば、各頂点はメッシュ節点として明確に定義出来るため $\overrightarrow{p_{die}p'}$ を求めることは非常に容易である。

想定している物理現象により $\overrightarrow{p_{die}p'}$ がどう変化するか、を評価することで、データ傾向を確認することができる。

ただし、試作品の評価においては試作品輪郭の特定の位置がダイス出口のどの位置に対応するか求められないためこの手法は使用できない。

1) Finite Element Method : 有限要素法

そのため、試作品の評価に対しては

- 製品輪郭形状をトレースする
- 事前に行っているシミュレーションと対比させることで、試作品の輪郭の $\overrightarrow{p_{die}p}$ 関係を推定する

という (間接的な) 手法を取ることにする。

4.4.2 逆解析

逆解析は輪郭上のすべての点 p' が、製品図面で定義される輪郭上の点 p_{ref} に一致するよう $p_{ref} = p' = f(p_{die})$ の逆関数 $p_{die} = f^{-1}(p_{ref})$ を求める事である。

前述のように、現在は輪郭を多角形とみなし、変形を直線移動とみなした線形問題として解いている。

もしこの考え方で上手く表現できない場合にはスプライン関数²⁾を検討する。

4.4.3 形状最適化

これは試作もしくはシミュレーションのフィードバックで実装する。

シミュレーションで行ったフィードバック検討の手順を以下に示す。

- 初期ダイス形状の任意の多角形頂点を p_{die_0} とする
- 初期ダイス形状で押し出された樹脂形状の対応する多角形頂点を p'_0 とする
- 製品図面上で対応する多角形頂点を p_{ref} とする。
- 押出樹脂形状と製品図面のずれ $\overrightarrow{p_{ref}p'_0}$ を求める
- 初期ダイス形状の各頂点を、このずれ量に基づいて逆方向に移動させる $p_{die_1} = p_{die_0} - a \times \overrightarrow{p_{ref}p'_0}$ を求める (a は再帰計算時に振動を防ぐための緩和係数 ($0.1 \leq a \leq 0.9$ 程度))
- 補正ダイス形状の任意の多角形頂点を p_{die_1} として同様に解析
- 押出樹脂形状と製品図面のずれ $\overrightarrow{p_{ref}p'_n}$ が許容量以下になれば解析終了

2) 3次スプライン (頂点フィット型) 等

4.5 試作

「試作条件と試作品形状の関係は、実製造でも再現可能である」という前提に基づく場合（「試作結果を量産と同等とみなせる」と言える場合）、シミュレーションは試作結果を再現できるように調整する必要がある。

しかしシミュレーションは対象のすべての物理現象を網羅することは不可能であるため、試作結果に対する妥当性確認を行った場合ずれが生じてしまう可能性が高い。

このずれは何らかの数理モデルで表現することとし、試作のモデル化は「物理モデル+数理モデル」で表現する。

現在は数理モデル化の部分が不十分であり、検討中である。

第5章 結果

ツケ4月試作内容をシミュレーションで再現した。(8月スタッフ会議報告内容)

第 6 章 考察

第 7 章 結論

第 8 章 今後の進め方

9 月 4 日に次回ツケ試作が行われ、ダイリップ形状の異なる試作結果を入手できる。
その結果を踏まえてダイリップ形状と押出形状の関係をモデル化する。

第 9 章 参考報告書・文献