

安全安心を実現する成形システムの高度化に関する研究開発

研究報告者 森 直樹

プロフィール



最終学歴 2014年3月
九州工業大学 大学院 情報工学系研究科
情報創成専攻 博士後期課程 修了
専門分野 生産工学、高分子成形加工
学 位 博士（情報工学）
所属団体 九州工業大学大学院 工学研究院
機械知能工学研究系
役 職 名 教授

今後の抱負

本研究では、継続的に取り組んでいる微細成形の高機能化のために、高精度な切削抵抗の前提となる加工工具の高信頼性化の検証と、成形品の高品位化を目指した。当初の想定よりも、一定の精度と強度が確保されていることが明らかになったが、従来想定していなかった工具の欠陥及び成形品の低強度化も明らかになった。また、加工精度の変動や成形品の強度低下要因に、原因が特定できない部分があることもわかった。今後はこれらの原因を追究するとともに、樹脂の流動制御法を応用した成形システムの構築に取り組んでいきたい。

1. はじめに

近年コロナ禍以降特に医療向けのプラスチック成形品には安全安心への要求度が高まっている。金型成形技術へのニーズは、医療用では人体に害の少ない難成形樹脂や、成形条件の確立が難しい半円球形状等が増えており在宅の検査治療を指向した光学部品への需要が増大している。



図1 医療向けプラスチック成形品

繊細な光路が要求される製品では、この微細な形状の誤差が画像に影響したと考えられ、この解決策としては、精密な真球面レンズ形状を持つカプセル内視鏡レンズ金型を研究開発することにより医療機関で受け入れられる映像を得る事例が有る。

一方、実測値の測定精度は未検証であることから、この偏差が発生する原因を明らかにするためには、切削抵抗と工具変位のより高精度な実測値が必要である。具体的には、図2に示すように、加工面を半球面形状とし、工具回転軸を平面の法線方向に対して一定角度傾斜した状態で、一定切込の経路を加工することを前提とする。

金型の球面加工の精度平滑性を上げたところ、画像に効果が表れた。またこの技術は、医療用のマイクロウェルプレートはじめ、医療用バイオ用の樹脂製品にも応用ができる。マイクロウェルプレートでは、 μm オーダーの微細な形状誤差が樹脂製品を通しての光学特性が観察や映像の品質に影響を及ぼすためであり、コロナ時代のワクチン開発予防治療に対応した今後需要の拡大する重要技術である。本課題解決により金型及び成形技術の向上を

図り、もって我が国工業技術社会及び産業経済の健全な発展に寄与することができる。

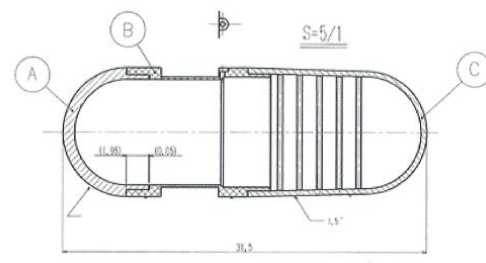


図2 半円球形状、微細成形品

2. 研究概要

2-1 微細成形品について

半円球形状の試作品を開発してきたが、医療機関から、電送画像が不鮮明で、現状品では医療現場で使用する事は難しいとの評価を受けた。

2-2 期待される研究・開発の成果

マイクロウェルプレートでは、 μm オーダーの微細な形状誤差が樹脂製品を通しての光学特性が観察や映像の品質に影響を及ぼすためであり、コロナ時代のワクチン開発予防治療に対応した今後需要の拡大する重要技術である。本課題解決により金型技術の向上を図り、もって我が国工業技術社会及び産業経済の健全な発展に寄与することができる。「細胞培養、単一細胞解析」を次のターゲットとして中期的なビジネス戦略に位置づけている企業あり。細胞培養、単一細胞解析は、iPS細胞・幹細胞による再生医療や新しい創薬スクリーニングなどの早期実現に必要不可欠である。その解析、培養装置や周辺の基礎研究、創薬・臨床実用化に関連する市場は今後益々大きく成長することが見込まれる。

2-3 研究・開発の実施計画

カプセルの球面レンズ形状に対して、切削加工
工具の先端Rの一点だけで加工する制御加工技
術と加工の「見える化」を開発する。(図4)

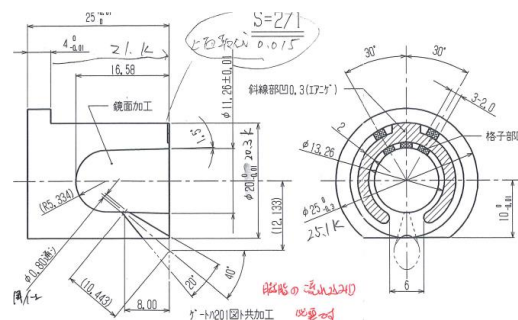


図3 本研究で想定する金型の概要

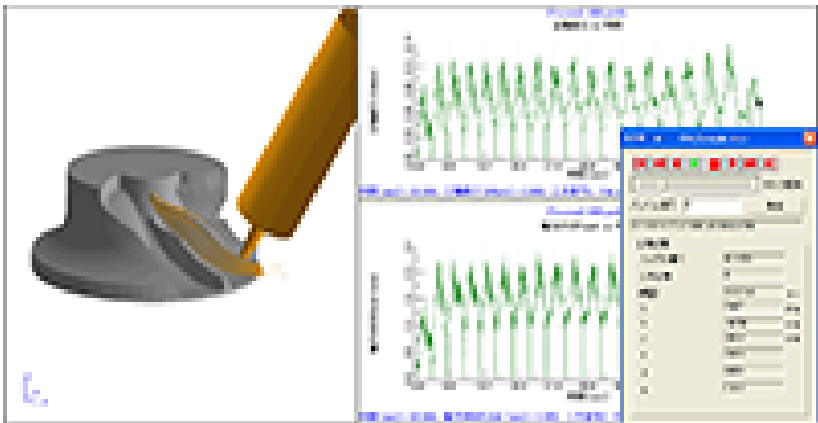


図4 CAEでの加工の「見える化」

医療機関が満足する高精細な画像が伝送可能な、金型加工技術と射出成形の技術開発を行う。

3. 切削加工に関する研究概要

3-1 金型加工技術

工具の先端R形状精度の影響を受けない加工技術を開発する必要がある。そこで、本提案では、カプセルの球面レンズ形状に対して、切削加工工具の先端Rの一点だけで加工する同時三軸制御加工技術と加工条件を開発する。(図5)

主な手段としては切削解析ツールを利用した加工技術の開発を行う。

金型加工技術には切削解析ツール「VERICUT Force」の活用および加工状態分析することで、工具が材料に接触したときに、加工経路上で切削ごとに何が起きているかをすばやく簡単に視覚化出来る。この胴体部分を切削(研削)する工程に着目した。その際に工具に課題が有ることが判明した。(図6)

3-2 解析ツールの活用

VERICUT Force を使用すると十分に活用されていない切削条件、過負荷、切削除去率、出力、トルク、工具のたわみを明確に見ることが可能となり、同時三軸制御加工技術と加工条件が開発の目途が立つ。

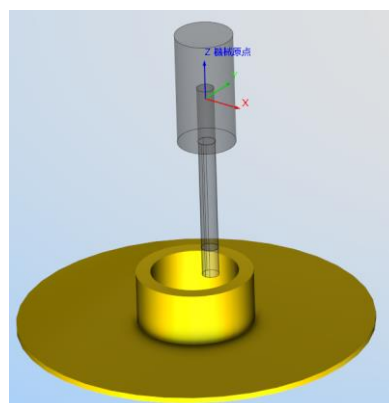
微細加工は、回転工具による断続切削であることから複雑に変動する切削抵抗を受け、切削過程における工具切れ刃位置は理想的な位置から変動する。切れ刃位置の変動は、直接予測値との偏差に影響することから、工具変位と回転角を高精度



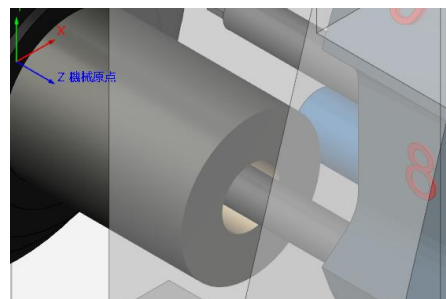
図5 切削技術の確認



(1) 内面研削加工



(2) 工具の接近方向



(3) 工具の挿入形態

図6 成形キャビティ加工概要

に測定する。加工対象を、あらためて解析シミュレーション活用の視点から「見える化」する。

3-3 解析システムの概要

具体的には、加工工具の種類や切削方法に基づいて、より安定した実測値が得られる高分解能な変位センサに置換して解析を進める。

工具解析については、回転角度の直接測定が困難なため、工具に力覚センサを取り付ける、

図7に工具解析システムの概念図を示す。工具の突き出し位置と変位挙動は、工具の種類を変更して解析する。



図7 工具解析システム概念図

3-4 解析の手順および評価

これまで実施していた加工を数値化し、どのような結果になるかを予想した。その結果工具に掛かる応力分布が明らかになった。(図8)

加工実験を実施し、多くの対象をシミュレーション試験することで加工実態が把握できることが判明した。(図9) 工具突出し長さを変え、変位を線形に拡大し検討する。

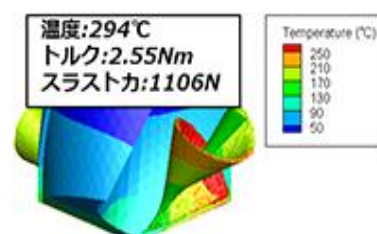


図8 加工の数値化

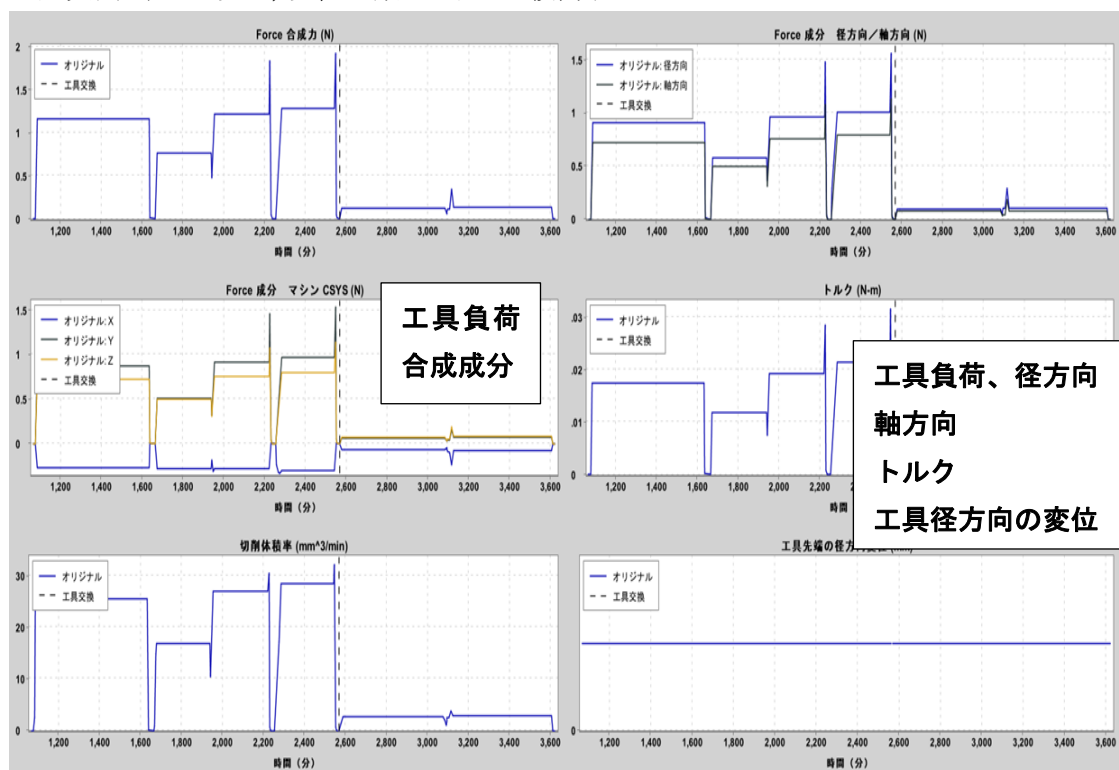


図9 加工実態の把握例

3-5 研究を進める際に判明した事（切削分野）

VERICUT Force の加工状態分析することで、工具が材料に接触したときに、加工経路上で切削ごとに何が起きているかをすばやく簡単に視覚化出来る。

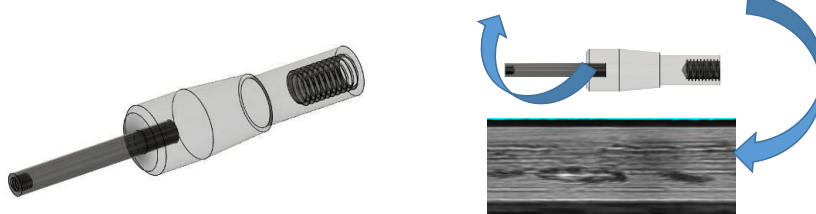
その際に内面切削(研削)する工具に以下の課題があることが判った。

- ・具体的にはクイル軸を製造時のボイドの影響がある。
- ・内面研削時のボイド有無を検証する。

研究内容を検討していくと以下の課題が有る。

- ・内面研削加工に用いる、クイル軸の高信頼性が重要である。
- ・スピンドルは10万回転以上高速で加工するが微細部品の高精度化に課題がある。

・現状-1；工具が高速（10万rpm）接続部のロウ付け部ボイド発生が課題



・現状-2；現状の工具を評価するシステムでは研削現象が不十分。 研削加工中のプロセスの「見える化」が不可欠である

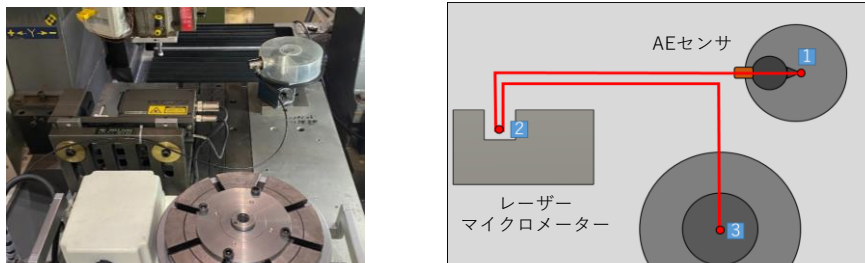


図 10 機上評価システムの概要

現状課題-1;工具が高速(10 万 rpm)接続部のロウ付け部ボイド発生し加工に影響する。

現状課題-2;現状の工具を評価するシステムでは研削現象の解明が不十分である。

3-6 実験装置の構築

機上測定装置の構築を行い、前述の課題解明を図る。その際に、研削加工中のプロセスの「見える化」を実現するためには以下の3つの工程を設けることとする。

最初に工具の研削状態を統一し、刃先の状況を精密計測し確認する。その後に実際の微細研削加工を行い、工具の最適化に関する状態を評価する。

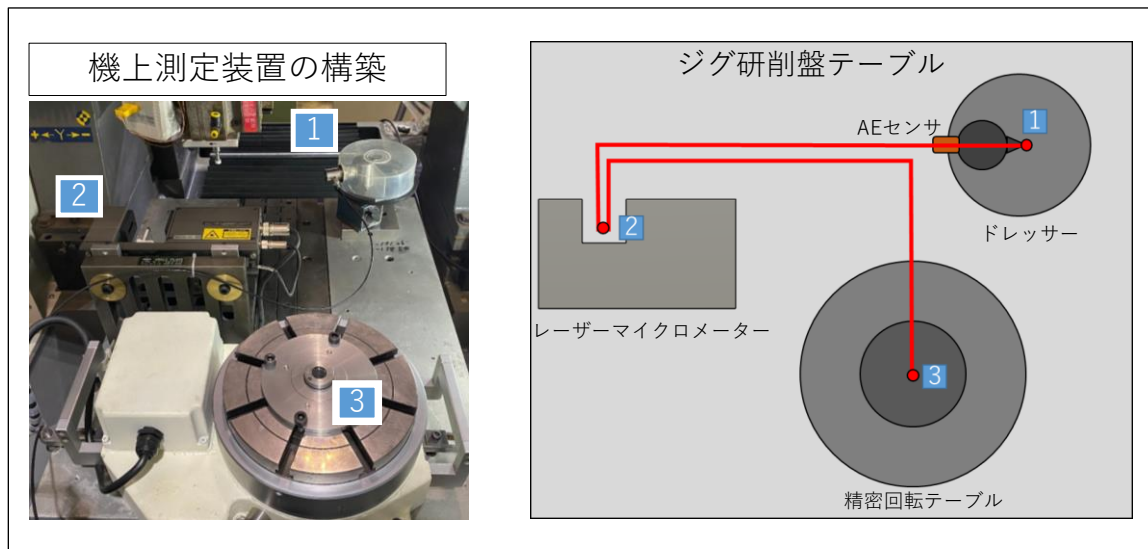


図 1 1 機上測定・評価システム

①工程（工具の研削状態を統一）

ドレッサーを用いてドレッシングを行う。

人工ダイヤ先端に触れているかを AE センサで確認

②工程（刃先の状況を精密計測し確認）

ドレッシング後の砥石の振れを測定。

測定時の回転数は 10,000[rpm]

③工程（実加工を行い、工具の評価を行う）

砥石の回転数：60,000[rpm]

切り込み量：0.001[mm]

実際の研削加工を行う。象限突起を考慮し回転テーブルを用いる。

上記①～③を行い、面粗さの測定（ミツトヨ社製面粗度計「SJ-500」使用）

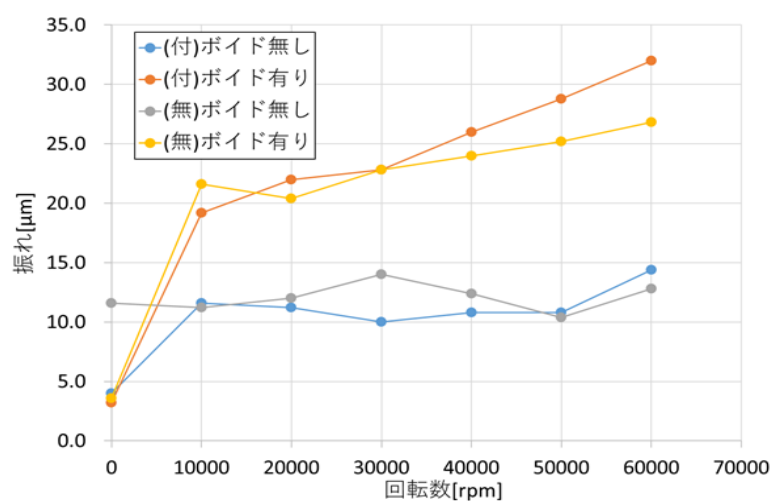


図 1 2 高速回転時のクイル軸振れ評価

ろう付け加工時に生じるボイドに関し特に軸先端の振れ精度に影響することが判明した。
 クイル軸、ろう付け部にボイド有り→ 砥石付きで更に振れ増加(19%)
 クイル軸、ろう付け部にボイド無し→ 砥石による振れの変化は顕著ではない
 ろう付け部に発生するボイド発生状態の詳細を図13に示す。

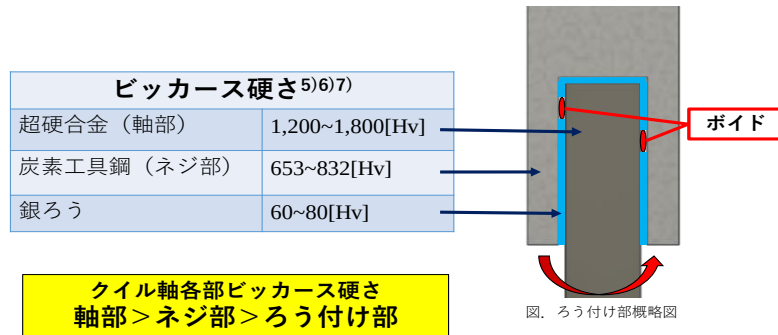


図13 接合部の詳細構造、硬度分布

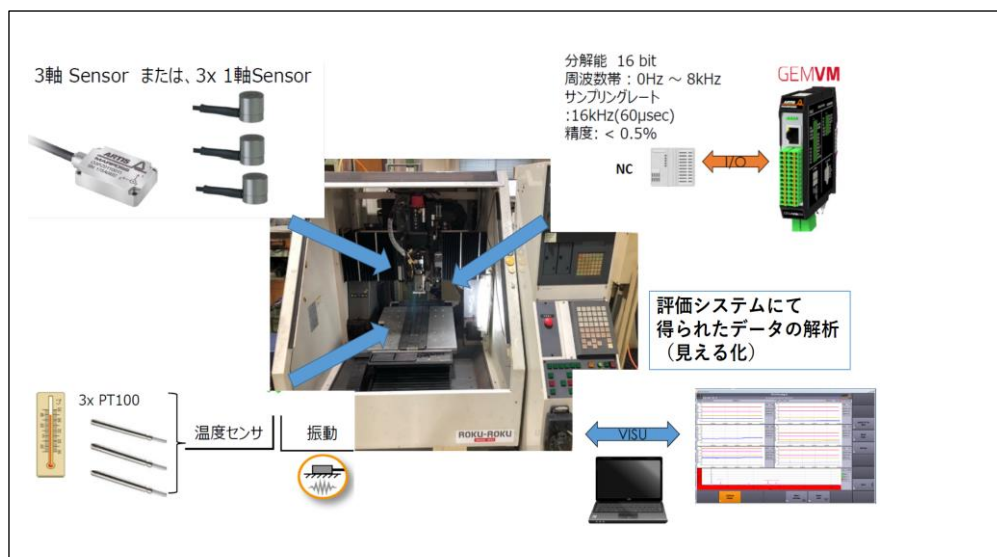


図14 実加工システムの概要

・高速回転時のクイル軸振れ評価を行うために実加工システムの構築を検討した。(図14)
 予備実験として加工を行う前にろう付け加工時に生じるボイド特にクイル軸先端の振れ精度を計測することとした。これが加工にいかに関与するか要因の有無を確認する。

4. 成形加工に関する研究概要

4-1 射出成形システムの技術開発

研究を進める際に判明した課題が成形関係に存在することが判った。まずはCAEにより成形状態を解析することで、成形欠陥が具体的に視覚化出来た。

COP成形では不活性ガスが必要であるが成形条件と成形品に課題がある。
 具体的には成形時のウェルドや形状精度低下によりの成形品の品質に悪影響が有る。
 そこで射出成形時の成形欠陥や精度低下の課題に対して対応する。

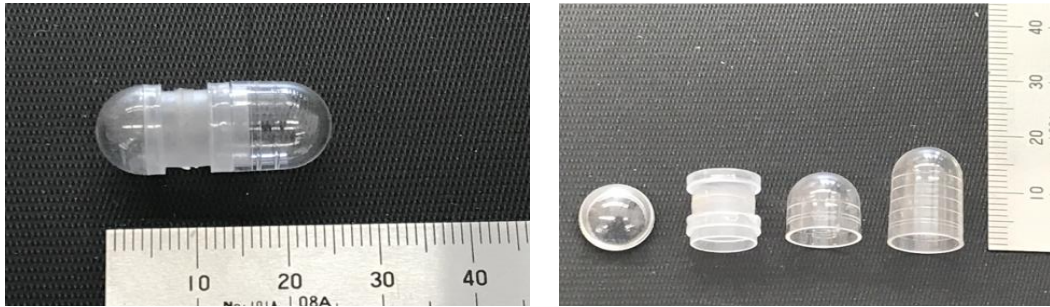


図 1 5 COP 成形品の例

シクロオレフィンポリマーの一つである COP(製品名:ZEONEX(R)、ZEONOR(R))は液晶テレビ・スマートフォン・医療容器などの主要用途で需要が拡大しており、今後さらなる需要増が見込まれる。

しかしながら成形中に「焼け」が発生するため不活性ガスを射出成形機に適応する必要がある。この不活性ガスの最適な使用方法には多くの課題があり技術開発を行うことが求められている。窒素シールは酸素が存在しない状態では 時間でも安定で製品中に炭化 ヤケ 変色などが 発生する事は無い。酸素が存在すると 場合によってはこのような不具合が発生する事が有る。

したがって このような不具合を極力嫌う製品の成形時には 酸素の混入を防止するための窒素シールが推奨される。そこで樹脂の流動解析を活用して設計通りに成形するための諸条件を求める。

成形条件、金型形状、部品形状を工夫して設計通りの形状に成形する条件を求める。

具体的には、射出成形流動解析ツール(Moldex3D)を用いて樹脂の挙動を可視化し、樹脂の「焼け」を回避する圧力、温度、金型形状を計算機上の試行錯誤と実機の検証により確立する

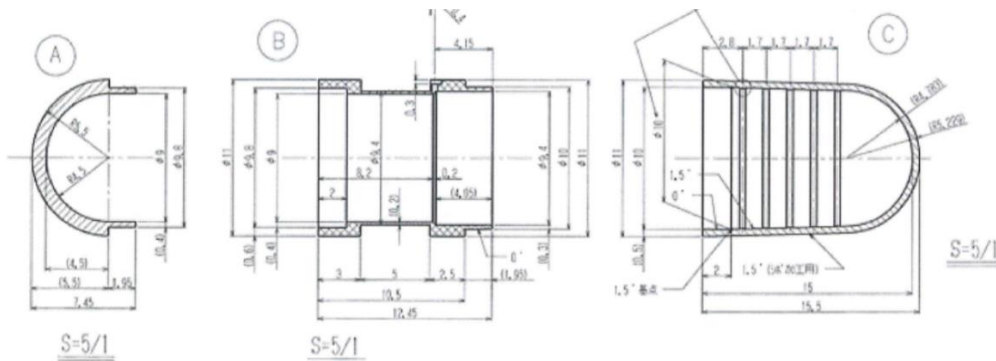


図 1 6 COP 成形品の仕様

今回の研究に際しては、COP成形品のなかでも特に胴体部分を成形する工程に着目した。
 その際にウェルド欠陥や精度確保に課題が有ることが判明した。成形解析CAEには境界要素法を用いた「Moldex3D」を活用した。(図17)

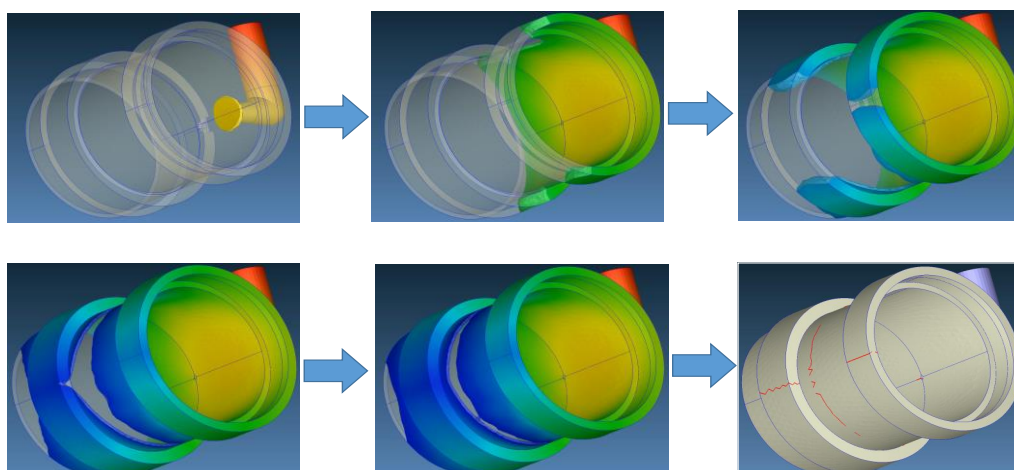


図 1 7 成形解析 C A E 「Moldex3D」での流動状況

4-2 成形解析ツール「Moldex3D」の活用

微細COPの成形に関して以下の課題が知られている.

COP成形に際してはオレフィン系の材料の中でも、取り扱いには以下の点で留意している.

- ・ガス焼けの発生;金型に注入される前にシリンダ中からのガス発生が顕著である.
- ・不活性ガスの添加;これを防止するためにホッパ内からガスを添加する.
- ・高コスト化;前述の対策のために高純度の不活性ガスや注入装置などの余分なコストを要す.

そこでガスの発生を抑制するために可塑化の際の樹脂温度を適正化することと成形性への影響を解析及び実験にて確認する必要がある.

一般的に樹脂温度を下げると物性と精度が低下する傾向がある. 微細なCOP成形の実現にはこれらの課題を解決する必要がある. 樹脂温度を下げると物性と精度が低下する傾向があり、同時に図18に示すようにゲートの反対側にウエルドラインが発生することが判明した.

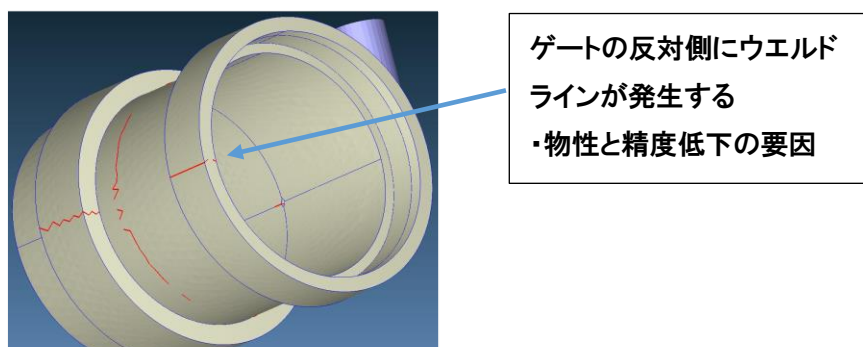


図 1 8 低温樹脂成形におけるパイプ形状の型内樹脂流動状態

4-3 樹脂流動制御成形

これまでの解析結果を纏める射出成形のプロセスにおいて、樹脂は金型内での流れに任せるままであると型内で成形中にウエルドラインなどの欠陥と精度低下が発生することが判っている. (図19)

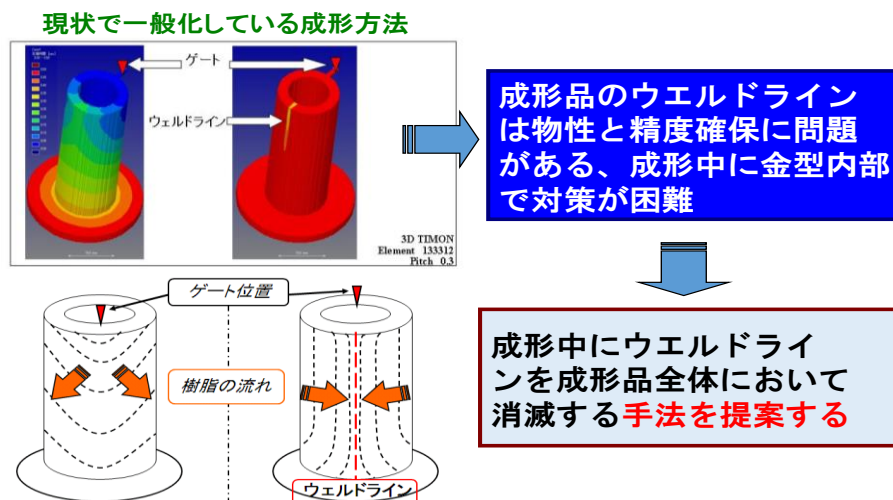


図 1 9 パイプ形状の成形加工での課題

4-4 樹脂流動制御（回転コアによる樹脂流動制御）

今回の研究開発には以下の手法を提案、適用した．金型内の回転コアによる金型内、樹脂流動制御する手法である．（図20） Rotating Core Mold 法(RCM法)

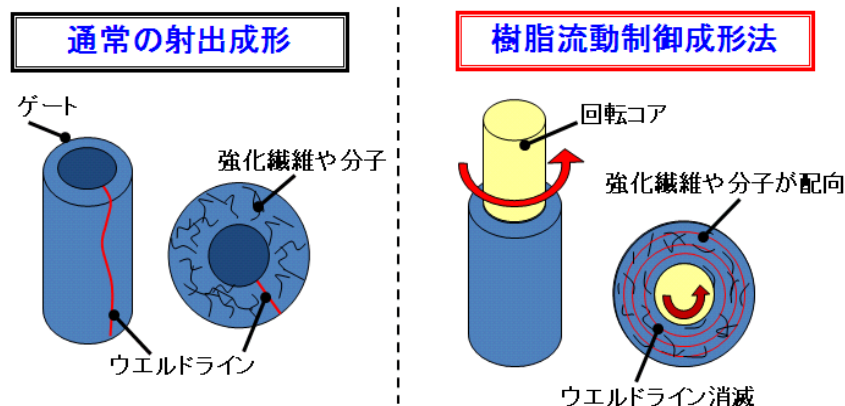


図 2 0 成形加工での課題解決手法

成形中、樹脂は金型内での流れに任せるまま型内で成形中に分子、繊維を成形品全域に配向制御手法を確立する．COP成形品のなかでも特に胴体部分を成形する工程に着目した．その際にウェルド欠陥や精度確保に課題が有ることが判明した．

解析結果を纏める射出成形のプロセスにおいて、樹脂は金型内での流れに任せるままだと型内で成形中にウェルドラインなどの強度起因の欠陥が出るが、この手法を活用してCOP成形品の強度と精度の向上を図る．

4-5 引張試験による評価

一定速度で試験片を引張り荷重及びひずみの変化を測定(図21, 表1)

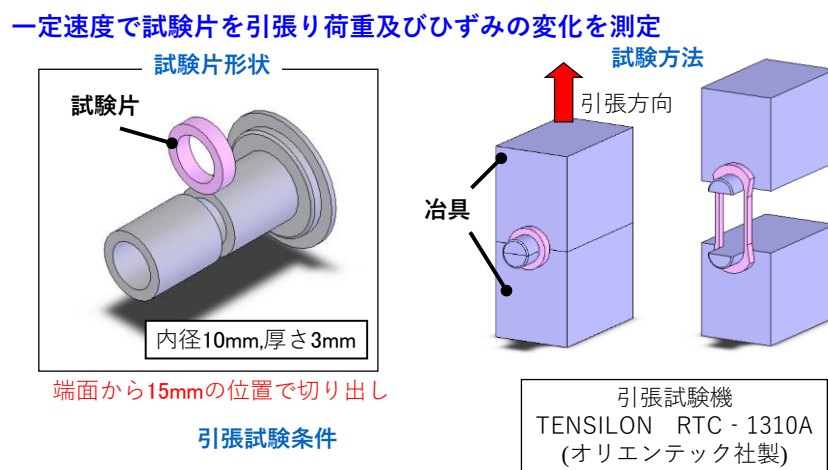


図 2 1 引張試験の概要

引張速度 [mm/min]	引張速度誤差 [%]	試験温度 [°C]
5	±0.2	20

表 1 引張試験条件

4-6 樹脂流動制御での効果

COPと同じオレフィン系材料であるポリプロピレン樹脂(PP)にて機械的強度の確認した(図22)



図 2 2 C O P 成形品の物性向上例 (B ~ E が樹脂流動制御)

4-7 パイプ形状の成形品での効果確認

オレフィン系材料のポリプロピレン樹脂（PP）にて精度向上効果を確認した（図 23、24）

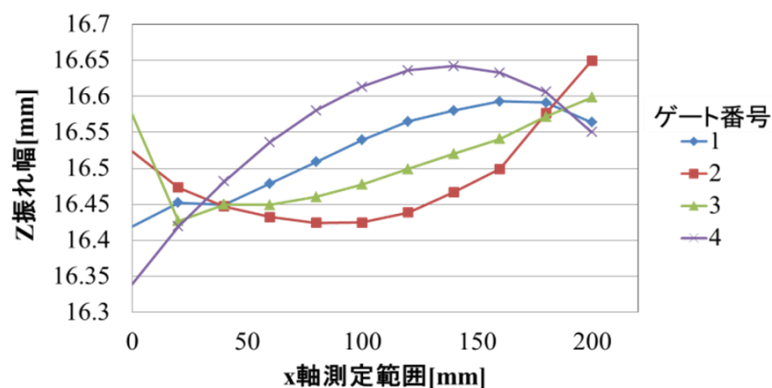


図 2 3 通常成形品

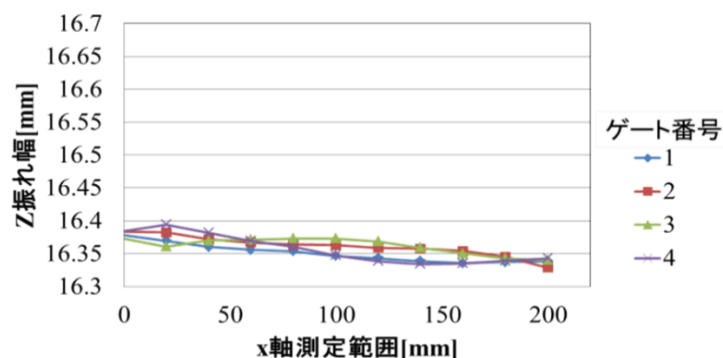


図 2 4 樹脂流動制御の成形品

今回の研究開発には以下の手法を提案、適用した。金型内の回転コアによる金型内、樹脂流動制御する手法である Rotating Core Mold 法 (RCM法) とした。

これまでの解析結果を纏める射出成形のプロセスにおいて、樹脂は金型内での流れに任せるままであると型内で成形中にウエルドラインなどの欠陥と精度低下を発生することが判っている。

スの発生を抑制するために可塑化する際の樹脂温度を適正化することと成形性への影響を解析及び実験にて確認する必要がある。

COP成形品のなかでも特に胴体部分を成形する工程に着目した。その際にウエルド欠陥や精度確保に課題が有ることが判明した。樹脂流動制御における制御軸の長さが成形品に及ぼす影響を検証するため引張試験と XRD による結晶化度の算出を行った。（詳細データは省く）

独自に開発した樹脂流動制御成形により形状精度が向上し、成形品の結晶化度も上がり更なる強度が上がる可能性を確認した。

5. まとめ

半円球形状の試作品を開発してきたが、医療機関から、電送画像が不鮮明で、現状品では医療現場で使用することは難しいとの評価を受け、微細切削(サブテーマ①)および成形加工に関する課題(サブテーマ②)を抽出して夫々取り組んできた。

サブテーマ①

・高速回転時のクイル軸振れ評価

加工を行う前にろう付け加工時に生じるボイド特にクイル軸先端の振れ精度を計測することとした。これを確認することで加工に影響の有無を確認した。

加工の重要部品である工具に関する課題に関して解決手法を確立した

内面高速加工に有効なクイル軸の開発に目途が付いた。

これらの成果により今後、電動化に伴う、高速アクチュエータへの応用が可能となる。

サブテーマ②

・COP樹脂の成形に伴う課題。

独自に開発した樹脂流動制御成形により形状精度が向上し、成形品の結晶化度も上がり更なる強度が上がる可能性を確認した。成形品の物性及び精度の向上に目途が付いたので医療機器、光学部品への応用拡大が期待できる。

研究開発を進行する上で周辺技術に課題があることが判った。今後の展開を図る上で以下のテーマが採択された。

①切削及び成形に関すること

ボイドの影響を継続して研究

⇒九州産業技術センターの研究課題に採択された

②樹脂流動制御に関する効果を継続して研究

⇒NEDOの研究課題に採択された

謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団研究助成の補助を受けて行ったものであり、特に工具変位や挙動評価に用いた解析システムは、本研究助成によって導入できたものである。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 神田真徳, 吉川浩一, 水垣善夫, 森直樹: 切削抵抗予測に基づく5軸制御ボールエンドミル加工用 CAM システムの開発ー第1報: 傾斜面加工結果に基づく工具姿勢制御の効果ー, 2017 年度精密工学会九州支部熊本地方講演会講演論文集, pp. 103-104 (2017).
- 2) 佐藤 惇: 樹脂流動制御を用いた円盤型射出成形品の中心軸拡張破壊試験による静的強度向上効果の評価 (2019)
- 3) 森直樹: 樹脂流動制御プロセスに基づく成形品の物性向上に関する研究(2014)
- 4) 村山正樹: 樹脂材料の結晶化度の評価に関する検討(2022)
- 5) 植村益次: NOLリング引張試験法の検討, 日本材料学会「材料」27 巻 301 号 p.1001-1007, (1978)
- 6) 森直樹, The Influence Capitalize of Properties Improvement for Reinforced Plastics by Resin Flow Control Molding Method International Journal of Automation Technology, Vol.6, No.4, pp. 522-528
- 7) 高アスペクト比成形品の精度向上に関する研究, 森直樹, 北村貴祐, 是澤宏之, 檜原弘之, 鈴木裕, 日本材料学会論文集, 63 巻 11 号, 757-762, (2014).
- 8) Verification and evaluation of automatically designed cooling channels for block-laminated molds”, Jianguo Liang, Hiroyuki Narahara, Hiroshi Koresawa and Hiroshi Suzuki, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-11, (2014)
- 9) Automatic Design of Cooling Channels for Block Laminated Molds: A Resolution Study, Jianguo Liang, Hiroyuki Narahara, Hiroshi Koresawa and Hiroshi Suzuki, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2-6, 52-60, (2013)
- 10) The Influence Capitalize of Properties Improvement for Reinforced Plastics by Resin Flow Control Molding Method, Naoki Mori International Journal of Automation Technology, Vol. 6, No.4, pp. 522-528. 6-pages, (2012).