

第38号

平成29年10月1日

博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(平成29年度 前学期授与分)

金沢工業大学

目 次

◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)
博甲 第 112 号	博士(工学)	杉田 寿夫	LCP 長尺射出成形品の熱間処理予測に関する研究・・・・・・・・・・1

は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏名	すぎた としお 杉田 寿夫				
学位の種類	博士（工学）				
学位記番号	博甲 第112号				
学位授与の日付	平成29年9月8日				
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当				
学位論文の題目	LCP 長尺射出成形品の熱間反り予測に関する研究				
論文審査委員	(主査) 教授	山部 昌	教授	廣瀬 康夫	
		教授	高野 則之	教授	中田 政之
		金沢大学			
		教授	米山 猛		

論文内容の要旨

近年、スマートフォンやタブレットといった携帯通信端末が急速に進んでいる。これらの端末は薄型化・多機能化が進んでおり、筐体の中に様々な機能を持つ部品を集積させる必要があるため、各部品の小型化・薄型化が求められている。一方、基板への部品の自動実装のため、基板の表面にはんだと部品をセットした後、全体をはんだの融点以上に加熱するリフロー実装が普及している。さらに、欧州連合（EU）による RoHS 指令をはじめとした環境対応のため、従来の鉛を含むはんだが使用できない。そのため、融点の高い鉛フリーはんだが用いられている。このように、携帯通信端末に使用される部品は小型・薄肉といった省スペースだけでなく、実装に耐えうる耐熱性が求められる。そこで、液晶ポリマー（以下、LCP）が広く用いられている。

LCP は高流動・高弾性率・低線膨張係数といった優れた特性から、小型・薄肉・微細形状の射出成形品に広く用いられている。しかし、特有の線膨張係数の強い異方性により、射出成形品に線膨張係数の分布が現れ、熱膨張のアンバランスによる高温環境下における熱間反りが発生する。熱間反りを低減するためには、線膨張係数の異方性分布のバランスが必要となる。ところが、LCP は成形時のせん断ひずみにより異方性を発現するため、金型内での流動・固化プロセス履歴により成形品内に異方性分布（配向、強度）が発生する。そのため、LCP 射出成形品の熱間反りを CAE により予測するためには、金型内の流動・固化シミュレーションが正確に行われることと、そこから得られるせん断ひずみと LCP の異方性の定量的関連付けが必要となり、困難であった。成形条件や成形品形状変更などのト

ライ&エラーによる修正となり、射出成形品開発リードタイムの増大につながっている。

そこで、LCP 射出成形品の熱間反りを予測するため、(1) 金型内の流動・固化の正確な把握、(2) せん断流動場における線膨張係数異方性発現の定量化 を行い、熱間反り予測の精度向上のための要因を定量化する。そして、実際の熱間反り変化がシミュレーションにより再現するか解析精度を確認し、実用できる LCP の熱間反り予測手法を確立することが本研究の目的である。

まず、LCP の流動固化プロセスの実験解析を行った。従来の高速度カメラを用いた PIV のような流速計測手法は熔融状態でも不透明なため適用困難であり、また、薄肉かつ高速な成形現象であるため、熱電対アレイなどの温度計測手法も応答面、空間分解能の面から困難である。そこで、電極間の不導体の静電容量計測結果を数学的に再構成し、内部の比誘電率分布を求める誘電率トモグラフィを応用した温度計測手段を開発した。LCP は比誘電率の温度依存性が確認されたが、誘電率トモグラフィの適用には電極切り替えの時間的制約と薄肉による形状的制約があった。そこで、静電容量の計測は 1 対の対向電極による高速計測とし、内部の比誘電率分布は流動解析と電界解析の連成により静電容量を解析し実測と比較する。流動解析の熱伝達率をパラメータとして高温樹脂到達から冷却が飽和するまでの時間が解析と実測で等しくなる熱伝達率を求め、流動固化の予測精度について考察した。

次に、小型薄肉成形品の線膨張係数異方性分布の実測について、小スポットの X 線回折による分子配向度計測と平板成形品の線膨張係数異方性の関連から調べた。そして実測された異方性分布を与えた構造解析により熱間反りを解析した。熱間反りの方向は実測と解析で一致したものの、薄肉角部を曲がる流れによりマトリクスである LCP とファイラーであるガラス繊維の配向差が影響していると予測できた。

そこで、ガラス繊維配向の分布を定量化するため、従来の細線化等の画像処理では困難であった、鮮明でない X 線の CT 画像から 1 本 1 本のガラス繊維を 3 次元で抽出するアルゴリズムを開発した。この結果から均質化手法を用いたコンパウンドの線膨張係数異方性の補正を行ったところ、熱間反りの解析精度が向上した。

最後に、流動固化の実験解析から求めた LCP のせん断流動場における熱伝達率を設定した流動解析を行い、得られたせん断ひずみエネルギーと線膨張係数異方性を当てはめた熱間反り解析を行った。実際の形状変更にもなう熱間反り変化を再現することができた。

一連の研究を通じて、当初の目的であった、熱間反り予測の精度向上のための要因を定量化し、実用できる LCP の熱間反り予測手法を確立することができた。

本研究の今後の展開として、線膨張係数異方性のみでは説明ができない、アニールによるひずみ緩和を含めた熱間反りを工程全体で予測に適用範囲を拡大すること、金型内の伝熱現象のより深い解明に繋げる有用な知見を与えること、LCP 以外の熱間反り予測に適用範囲を拡大すること、を期待する。

論文審査の結果の要旨

近年、スマートフォンやタブレットといった携帯通信端末の普及が進んできている。これらの端末には薄肉化・多機能化が求められており、筐体の中に様々な機能を持つ部品を集積させる必要があるため、各部品の小型化・薄肉化が求められている。この実現には樹脂材料を成形材料とした精密射出成形技術の向上が不可欠である。一方、基板への部品の自動実装では、基板の表面にはんだと部品をセットした後、全体をはんだの融点以上に加熱して接合を行う、「リフロー実装」という技術が普及している。その中で、欧州連合 (EU) による環境対応のため、従来の鉛を含むはんだが使用できず、融点の高い鉛フリーはんだが用いられている。このような背景のもと、携帯通信端末に使用される樹脂部品は小型・薄肉といった省スペースだけでなく、実装に耐えうる耐熱性も求められる。樹脂材料に耐熱性が不足すると「リフロー実装」の過程で、部品が変形を起し、はんだ接合による不具合の発生が予測される。このことが申請者杉田氏の本研究への取り組みの原点である。上述のようなプロセスを可能にする樹脂材料として液晶ポリマー（以下 LCP と略す）の応用が一般的となった。LCP は高流動・高弾性率・低線膨張係数といった優れた特性から、小型・薄肉・微細形状の射出成形品に広く用いられている。しかし、この材料は線膨張係数に強い異方性が生じるために、射出成形品に広く用いられている。しかし、この材料は線膨張係数に強い異方性が生じるために、射出成形品に線膨張係数の分布が現れ、熱膨張・収縮のアンバランスによる高温環境下において熱間反りが発生する。熱間反りを提言するためには、線膨張係数の異方性分布のバランスが必要となる。この異方性分布は、LCP による射出成形過程の樹脂材料のせん断ひずみにより発現するため、LCP 射出成形品の熱間反りを事前に正確に予測するためには、金型内の流動・固化現象を物理的にシミュレートされること、そこから得られるせん断ひずみと LCP の異方性の定量的関連付けが必要であり、従来までは理論的には困難であった。このために成形条件や成形品形状変更などのトライ&エラーによる修正とならざるを得ず、射出成形品開発リードタイムの増大につながっていた。これを解決すべく杉田氏は LCP 射出成形品の熱間反りを予測するため、(1) 金型内の流動・固化の正確な把握、(2) せん断流動場における線膨張係数異方性発現の定量化を行い、熱間反り予測の精度向上のための要因を定量化した。そして、実際の熱間反り変化がシミュレーションにより再現するか解析精度を確認し、実用できる LCP の熱間反り予測手法の確立に取り組んだ。まず杉田氏は、LCP の流動固化プロセスの実験解析を行った。従来の高速度カメラを用いた PIV のような流速計測手法は熔融状態でも不透明なため適用困難であり、また、薄肉かつ高速な成形現象であるため、熱電対アレイなどの温

度計測手法も応答面、空間分解能の面から困難であった。そこで、独自に電極間の不導体の静電容量計測結果を数学的に再構成し、内部の比誘電率分布を求める誘電率トモグラフィを応用した温度計測手法を開発した。LCP は比誘電率の温度依存性が確認されたが、誘電率トモグラフィの適用には電極切り替えの時間的制約と薄肉による形状的制約があった。そこで、静電容量の計測は 1 対の対向電極による高速計測とし、内部の比誘電率分布は流動解析と電界解析の連成により静電容量を解析し実測と比較した。流動解析の熱伝達率をパラメータとして高温樹脂到達から冷却が飽和するまでの時間が解析と実測で等しくなる熱伝達率を求め、流動固化の予測精度について考察した（この研究内容で論文投稿済）。次に、小型薄肉成形品の線膨張係数異方性分布の実測について、小スポットの X 線回折による分子配向度計測と平板成形品の線膨張係数異方性の関連から調べた。そして実測された異方性分布を与えた構造解析により熱間反りを解析した。熱間反りの方向は実測と解析で一致したものの、薄肉角部を曲がる流れによりマトリクスである LCP とフィラーであるガラス繊維の配向差が影響していると予想できた。そこで、ガラス繊維配向の分布を定量化するため、従来の細線化等の画像処理では困難であった、X 線 CT 像から 1 本 1 本のガラス繊維を 3 次元で抽出するアルゴリズムを開発した。この結果から均質化手法を用いたコンパウンドの線膨張係数異方性の補正を行ったところ、熱間反りの解析精度が向上した（この研究内容で論文投稿済）。前述の結果をもとに、流動固化の実験解析から求めた LCP のせん断流動場における熱伝達率を設定した流動解析を行い、得られたせん断ひずみエネルギーと線膨張係数異方性を当てはめた熱間反り解析を行った。その結果実際の形状変更にもなう熱間反り変化を再現することができた。これら一連の研究を総合して、当初の目的であった、熱間反り予測の精度向上のための要因を定量化し、実用できる LCP の熱間反り手法を確立することができた（この研究内容で論文投稿済）。

本論文は 6 章で構成されている。第 1 章では、本研究の背景、ならびに本研究が解決すべき課題とアプローチ方法など、本論文の目的と意義を明確にしている。第 2 章では LCP 射出成形過程の金型内流動・固化挙動を独自で開発した実験ならびに数値解析手法により金型と樹脂製品間の熱伝達挙動を明らかにしている。第 3 章では、LCP の分子配向度と線膨張係数の関連性を種々の方法により計測し、その差異を論ずるとともに、実験による配向度と線膨張率の異方性に関する検証も行っている。第 4 章では、LCP に補強材として配合されているガラス繊維の配向度計測を様々な方法で取り組み、最終的には X 線 CT 測定と独自の繊維抽出方法により、従来にはない新しい繊維配向予測手法を構築した。第 5 章は本研究の背景である、「リフロー」工程における熱間反り現象予測に関して、第 2 章から

第 4 章までの研究成果を、現在杉田氏の社内で生産されている長尺小型コネクタ成形品に適用し、この技術の有用性について事例を交えて論じている。また工学的な理論構築が具体的にどれほど工業的に有益であるかを自社の例を示して述べている。第 6 章ではこれまでの LCP 射出成形品の機械的特性と本技術の適用範囲、さらには今後の課題を明確に述べている。これらの研究成果は本学大学院博士後期課程在学中において、有審査論文 3 編（掲載予定 2 件含む）、海外口頭発表 1 件、国内発表 6 件が示すように、学協会でも高く評価されている。よって本論文は博士（工学）の学位に十分値すると判断する。