

論文の内容の要旨

氏名：水谷 篤

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：自動車用プラスチック部品の射出成形における表面品質に関する研究

近年、地球温暖化への取り組みが急務になっており、自動車の電動化が大きな課題となっている。電動化においては、モーターやバッテリーの搭載により、車両重量が増加するために軽量化が重要となる。自動車の軽量化においては、スチールの高張力化やアルミ以外に比重の小さいプラスチックの適用拡大が期待されている。現在、自動車におけるプラスチック部品の適用比率は、車両重量の約 10%~15%であり、今後もプラスチック材料の性能向上とともに適用比率が増加すると予測されている。自動車プラスチック部品の主な工法は射出成形が約 9 割で、材料はポリプロピレン（以下 PP）が約 4 割である。バンパーなどの外装部品やインストルメントパネルなどの内装部品は、PP 材料を用いた生産性の高い射出成形により生産されている。射出成形におけるプラスチック部品の表面品質については、樹脂合流部で発生するウェルドラインの線状の傷や厚肉部でのヒケや製品端部の材料ショートなどが問題となる。中でも、バンパーは大型化しており、樹脂を製品に注入するゲート点数が増え、合流部も増加するため、合流部における外観品質が課題となる。これまで、熔融樹脂が合流する際に生じるウェルドラインについて、強度や表面形状への影響などの研究が行われてきた。しかし、自動車の PP 材料において、バンパーなどの外装部品では、高い剛性や衝撃性を確保するために、フィラーであるゴムとタルクを含有しており、PP 複合材と呼ばれる。このゴムとタルクが含有することで表面に数ミクロンの隆起が発生し、傷に見える連続的な隆起が塗装後も残る外観不具合が問題となっており、発生メカニズムの解明と抑制方法を必要としている。隆起は異なる合流部付近の表層において、2 つの隆起が発生しており、1 つ目はウェルドライン直下に沿って発生し、2 つ目はウェルドラインから数mm離れた部位に発生している。

そこで、本件研究では、射出成形を用いた自動車プラスチックの外装部品の外観品質について、ゴムとタルクを含有する PP 複合材における樹脂合流部で発生する隆起の発生メカニズムと抑制方法を研究した。

はじめに、1 つ目のウェルドラインに沿って発生する隆起の発生メカニズムと抑制方法を研究した。金型内の樹脂の材料流動挙動におけるゴム伸張と配向に着目し、樹脂が通過し部位（以下、一般部）、流動先端部（以下、フローフロント部）、また、樹脂の合流後（以下、合流部）の各部位の金型表層付近と板厚中心部について、SEM 観察と SEM の写真から 2 値化し、ゴムの伸張と配向を定量的に評価した。この結果、樹脂の金型内の流動挙動において、噴水のように樹脂が流動するファンウンテンフローに沿って、板厚中心部からゴム粒子が噴き出し、金型壁面近傍に移動して、金型に接触すると直ちに冷却固化されるスキン層と樹脂の流動層の間で生じるせん断力により、樹脂が通過した部位の壁面近傍では流動方向にゴムが伸張することがわかった。一方、樹脂の合流部では、樹脂の流速が低下し、ゴムは伸張しながら板厚方向に伸張し、金型冷却により板厚方向に配向して冷却固化する。これにより、ゴムが流動方向に配向した一般部のほうが、板厚方向に配向した合流部よりも板厚方向の収縮率が大きくなり隆起が相対的に発生することが明らかになった。次に、金型近傍のスキン層の厚みと隆起の関係を調査した結果、スキン層の厚みが大きいと隆起も大きくなることがわかった。そして、金型温度を変化させた場合のゴムの伸張度の変化と隆起の関係を調査し、金型温度が PP の熔融温度以下、かつ、ゴムの熔融温度以上の状態で PP に分散されたゴムの伸張が小さく楕円の状態、PP が冷却固化するとゴムは楕円形状を保って凍結されるため、隆起が小さくなることがわかった。また、金型温度が高いことと金型壁面付近のスキン層と流動層の間に応じるせん断応力が小さくなり、一般部のゴムの伸張は小さくなる。次に、塗装前と塗装後の合流部の表層の形状をレーザー顕微鏡で観察した結果、塗装前から隆起が発生していることを確認した。また、材料の影響を評価するために、ゴムとタルクの影響度を確認し、PP 材料のみ、ゴムだけを含有し材料、タルクだけを含有した材料、そして、ゴムとタルクの両方が含有した材料を用いて、成形実験を行い、材料の影響を評価し、ゴムとタルクが含有することで隆起が発生することを確認でき、また、ゴムの影響が大きいことがわかった。以上のメカニズム解明より、ゴムの伸張と配向が隆起に影響することから、ゴムの伸張を抑える方策について、材料と成形条件の 2 つの面から抑制方法を考案し検証した。1 つ目の抑制方法の検証では、ゴムの物性に着目し、熔融せん断粘度の異なる 2 つのゴムを用いて、合流部におけるゴムの伸長及び配向を SEM

及び 2 値化により定量評価した結果、合流部では流速が遅くなり、せん断速度が低下することから、熔融せん粘度の高いゴムにより隆起の低減効果を確認できた。2 つ目の抑制方法では、金型表面に断熱コーティングすることで、金型壁面近傍の樹脂の冷却硬化の速度を緩和することでゴムの伸張と板厚方向への配向を変化させることで、隆起高さを低減できることを確認できた。

次に、2 つ目はウェルドラインから数mm離れた部位に発生する隆起についての発生メカニズムと抑制方法を研究した。隆起部の断面観察より、樹脂合流の先端部分の表層で隆起が発生しており、前述の金型内の流動挙動の観察から板厚中心部ではゴムの伸張が少ないことから、タルクの配向が影響していると考え、流動過程におけるタルクの配向挙動に着目した研究を実施した。はじめに、隆起を引き起こす因子を定量的に評価するために、品質工学を用いて隆起高さに関する因子を評価し、板厚が隆起高さに及ぼす影響が最も高かった。また、2 つのゲートから樹脂の注入タイミングを変化させて、片側の樹脂を反対側の樹脂に潜り込んだ状態に成形し、樹脂の潜り込み長さと同合流部の形状が隆起高さに及ぼす影響を評価することで、潜り込みの先端部の R 形状が小さいとタルクの板厚方向への配向が少なり、隆起高さが低くなることを確認できた。また、成形品の板厚と同合流部の形状と隆起高さとの関係を断面の SEM 観察より隆起高さの関係を評価した。その結果、合流部において樹脂の流入量が多き側の樹脂が反対側の樹脂に潜り込み、潜り込み長さを樹脂の注入タイミングや板厚を変化することを確認し、潜り込み長さが大きいほど板厚中心部のタルクの板厚方向への配向が小さくなるので、隆起も小さくなることがわかった。次に、樹脂流動シミュレーションを用いて、潜り込み長さより隆起高さの予測評価について、異なる合流形状における実験とシミュレーションの差異を評価し、一方向への潜り込みであれば高い予測精度であること確認できた。以上より、合流部における板厚中心のタルクの配向が、板厚方向に配向することで、流動方向に配向している一般部と冷却の収縮差が生じるため、隆起が発生することが明らかとなった。そこで、隆起を引き起こすタルクの板厚方向への配向に着目し、隆起の低減方策を検討した。板厚中心部のタルクの板厚方向への配向が要因であることから、金型温度による抑制方法は難しいため、樹脂の合流部形状に着目して、隆起を抑制する方法を考案し、合流部付近の板厚を徐変させることで、合流界面の形状を変化させて、隆起高さの影響を評価した。実際の部品形状で起こる樹脂の流動について、樹脂が対向して合流する場合と平行に流動しながら合流するとの 2 つの合流モードを対向流動領域と平行流動領域として、隆起への影響を検証した。以上の結果、合流部を徐変することで、隆起を低減できることを確認し、徐変形状を定量評価することでできた。また、徐変による隆起の低減方法について、特許を出願した。

以上、本研究の結果より、射出成形におけるゴムやタルクを含有する PP 複合材を用いたプラスチック部品の表面品質課題である塗装後の隆起について、発生メカニズムと抑制方策を立案することができた。今後展望として、カーボンニュートラルより、材料に NCF (ナノセルロースナノファイバー) など天然素材を用いたフィラーの適用も考えられ、今回の研究より、ナノサイズの粒子が影響する表面品質の改質にも本研究の知見を活用できると考えられる。今後の研究課題として、部品設計の段階から合流部付近の隆起を予測できれば、効率的な製品設計が可能となる。そこで、樹脂流動シミュレーションを用いて、隆起を予測できることが望まれるが、大物プラスチック部品での 3D によるソリッドのシミュレーションは膨大な計算時間を要するため、現在の 2D であるシェルメッシュを用いて、流速や温度分布との境界条件から、部分的に 3D により算出できれば、実際の製品開発において、有益であり、継続検討していきたい。