

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

水谷 篤

第1章	序論	- 1 -
1.1	研究の背景	- 1 -
1.1.1	自動車を取り巻く環境	- 1 -
1.1.2	自動車の軽量化とプラスチック部品	- 6 -
1.2	自動車プラスチック部品の成形法と材料	- 9 -
1.2.1	自動車プラスチック部品の成形法	- 9 -
1.2.2	自動車プラスチック部品の材料	- 12 -
1.3	自動車プラスチックにおける品質課題	- 15 -
1.3.1	射出成形プラスチック部品の外観品質の課題と先行研究事例	- 15 -
1.3.2	ウェルドラインと先行研究事例	- 19 -
1.3.3	PP複合材フィラーが及ぼす外観品質課題	- 23 -
1.4	本研究目的と本論文の構成	- 25 -
1.5	参考文献	- 31 -
第2章	ウェルドライン直下に発生する表面隆起	- 38 -
2.1	緒言	- 38 -
2.2	実験条件	- 41 -
2.2.1	使用材料	- 41 -
2.2.2	成形品形状	- 42 -
2.2.3	成形及び塗装条件	- 43 -
2.2.4	樹脂流動面の金型表面処理	- 45 -
2.2.5	表面形状の計測と断面観察	- 47 -
2.2.6	ゴム伸長度の計測	- 48 -
2.2.7	溶融粘度測定	- 49 -

2.3	実験結果及び考察	- 50 -
2.3.1	金型内流動におけるゴムの伸長度と配向	- 50 -
2.3.2	スキン層の厚さが隆起に及ぼす影響	- 56 -
2.3.3	樹脂の合流部におけるゴムの伸長およびタルクの配向	- 58 -
2.3.4	タルクとゴムの隆起への影響	- 62 -
2.3.5	隆起の発生メカニズム	- 65 -
2.3.6	金型温度が隆起に及ぼす影響	- 66 -
2.3.7	ゴムの熔融せん断粘度が隆起に及ぼす影響	- 68 -
2.3.8	金型コーティングと隆起への影響	- 71 -
2.4	結果と考察	- 78 -
2.5	結論	- 79 -
2.6	参考文献	- 80 -
第3章	合流界面の先端部で発生する表面隆起	- 82 -
3.1	緒言	- 82 -
3.2	実験条件	- 84 -
3.2.1	使用材料	- 84 -
3.2.2	成形品形状	- 84 -
3.2.3	射出成形機及び成形条件	- 87 -
3.2.4	表面形状の計測と断面観察	- 88 -
3.3	実験結果及び考察	- 88 -
3.3.1	実験計画法による隆起に影響する因子の検討	- 88 -
3.3.2	成形品板厚における樹脂の潜り込み長さとの隆起への影響	- 89 -
3.3.3	樹脂の潜り込み長さとの先端形状の関係	- 92 -

3.3.4	樹脂潜り込み界面のタルクの配向観察	- 93 -
3.3.5	樹脂潜り込み界面のタルクの配向角度評価	- 98 -
3.3.6	シミュレーションによる潜り込み長さの予測.....	- 101 -
3.3.7	対向流動領域における合流部の形状と隆起への影響.....	- 106 -
3.3.8	平行流動領域における合流形状と隆起への影響.....	- 108 -
3.4	結果と考察	- 110 -
3.5	結論.....	- 112 -
参考文献.....		- 113 -
第4章	結言と今後の展望.....	- 114 -
4.1	本研究による成果と総括.....	- 114 -
4.2	今後の展望	- 117 -
謝辞		

Study on surface quality of automotive plastic parts in injection molding

Atsushi Mizutani

Surface quality is an important issue for plastic automotive parts. Weld lines are one of several types of surface defects, but it is known that weld lines can be improved by controlling the confluence angles of the flow of resin in the die. Additionally, surface grooves that occur at confluence points during molding become smoother after the application of primer in the painting process. However, even after the painting process, there are quality defects that appear in the vicinity of weld lines that look like scratches, and urgent efforts are being made to find the causes of occurrence, and technologies to control them. In order to improve the visual surface quality of bumpers and other external components, when light hits the raised resin confluence areas after the painting process, shadowing causes them to look like defective scratches. In this paper, in order to improve the visual quality of parts after painting, we investigated the surface profile using automotive composite PP material. The ridges which affects the appearance quality are generated in two places, right under the weld line of the confluence part of the resin and in the position separated from the weld line. As a result of our investigations we found the first ridges under weld line that are classified as ridges look like slight, connected scratches, and that the elongation and orientation of rubber and talc contained in the composite material affects the raised areas and their size. Moreover, it was found that the connected bumps seen after painting were related to the elongation of the rubber. We then found that increasing the die temperature suppressed rubber elongation and thus prevented the occurrence of ridges. In addition, we also considered practical, material-based control methods that can be implemented instead of increasing die temperature, and were able to confirm that the ridges can be controlled by changing from a polypropylene-based rubber to an ethylene-based rubber. In addition, we found the second ridges in the position separated from the weld line is related to the length of subduction and was affected by the orientation of talc at the tip of the subduction, and the ridges could be suppressed by changing the confluence gradually.

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 自動車を取り巻く環境

2021年に入り,ますます地球温暖化への取り組みが急務となっている. Fig. 1-1に1960年から2100年までの世界平均気温の予測推移を示す¹⁾. 2020年までに気温は1°C上昇し, 2040年頃には, 更に, 気温が1.5°C上昇するとIPCC(気候変動に関する政府間パネル)は予測している. そのため, 2050年に向けたカーボンニュートラル削減の取り組みが世界中で加速している. アメリカ, EC, 中国などもカーボンニュートラルを宣言し, 既に約120カ国が宣言をしている. 日本も2050年に温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする目標を定めた²⁾.

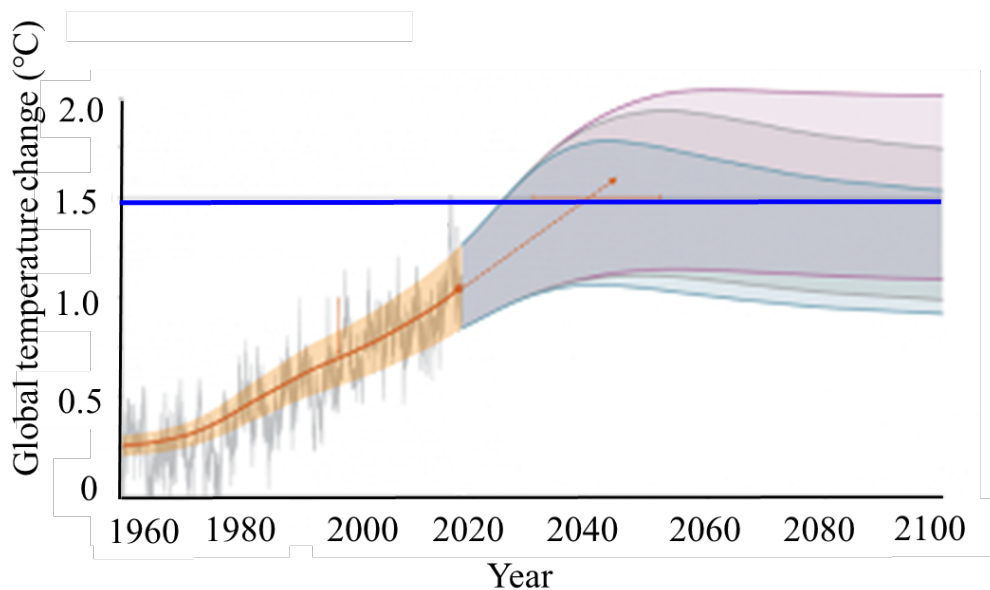


Fig. 1-1 Forecast of global temperature change due to CO₂ emissions ¹⁾

Fig. 1-2に日本の産業全体における温室効果ガスの産業別発生比率を示す。自動車の温室効果ガスの発生比率は約18%を占めており、自動車におけるカーボンニュートラルへの取り組みは重要となっている³⁾。

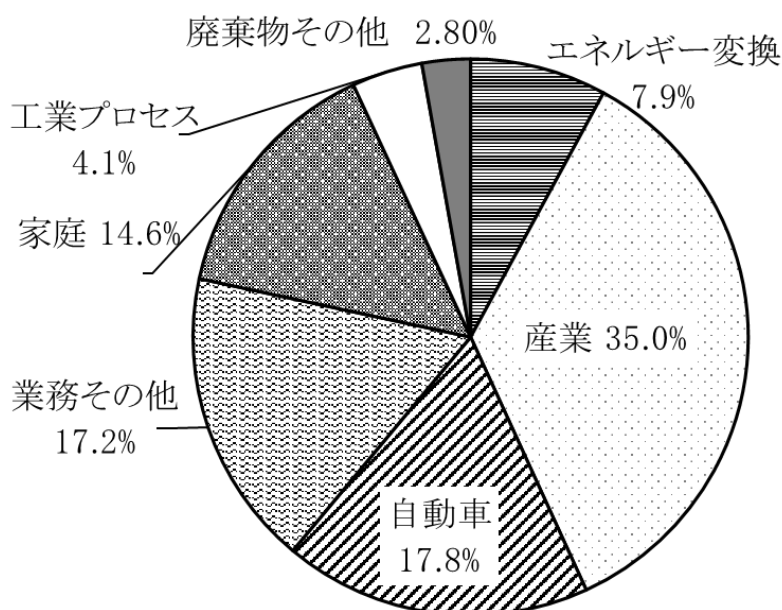


Fig. 1-2 CO₂ emissions by sector in Japan³⁾

自動車の環境問題への対応は1990年代頃から急速に高まり、ガソリンエンジンを中心に排出ガス規制や燃費規制への対応が必要となった。排出ガス規制においては、低排出ガス車やゼロエミッション車の導入が進んだ。燃費規制においては、安全対策強化を進めながら、エンジンの改善、および、摩擦の低減に伴う走行抵抗の低減の技術開発が進んだ。また、循環型社会構築のために自動車の製造から廃棄までの自動車リサイクルの取り組みやLCA(ライフサイクルアセスメント)と呼ばれる環境負荷の評価手法も取り入れられるようになった⁴⁾。

Fig. 1-3にガソリン車と電気自動車のCO₂のLCA評価を示す⁵⁾。同じクラスのガソリン車と電気自動車のLCAの比較であり、自動車工場への物流を含む素材や部品調達から自動車の生産、自動車の使用およびメンテナンスそして廃車までを考慮している。ガソリン車のCO₂総発生量を100%とすると、電気自動車は約65%となり、約35%のCO₂を削減が可能となる。特に、使用時のCO₂はゼロになっている。一方、素材、部品、車両製造、物流は増加しており、CO₂を低減できる素材選定や車両製造が今後の課題である。

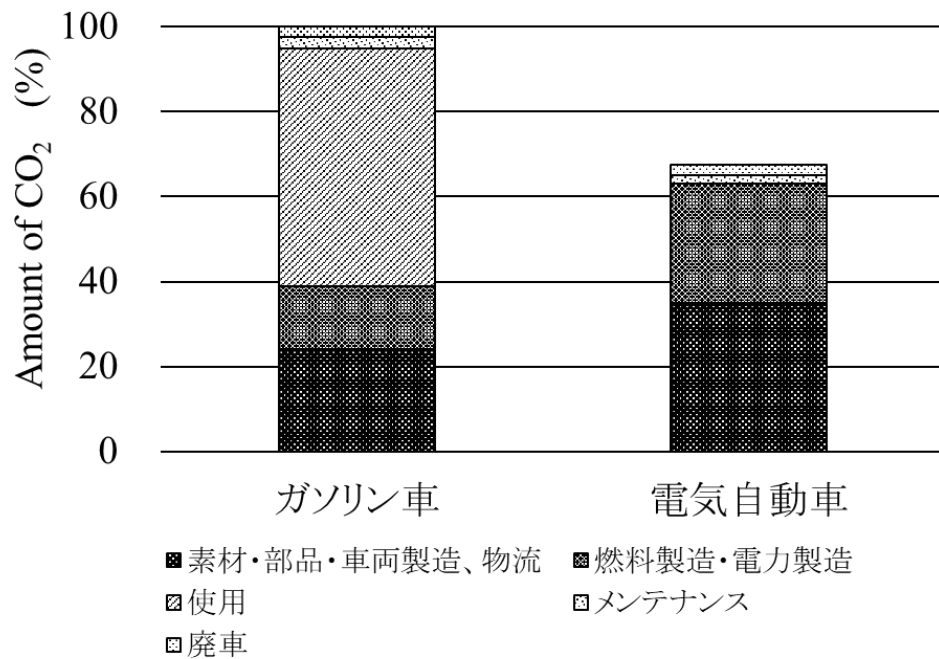


Fig. 1-3 LCA comparison of ICE and EV on CO₂⁵⁾

電気自動車の歴史は、ボルタが電池を発明し、ロバート・アンダーソンがモーターを発明したことで、1839年に初めて電気自動車を作られた。しかし、走行距離が短くエンジン車に比べて走行性能が劣ることから2000年頃まで普及はしなかった⁶⁾。しかし、環境問題を背景に、電池やモーターの性能が向上し、2010年頃から電気自動車の量産が本格的に始まった。そして、現在では、各自動車メーカーは電気自動車の販売を拡大すべく、性能向上のための開発に注力している。

Fig. 1-4に電気自動車のグローバル販売状況を示す。2019年では、中国の販売が最も多く、2018年から2019年にかけて、欧州での販売も大きく増加しており、世界的に電動化が拡大している⁷⁾。

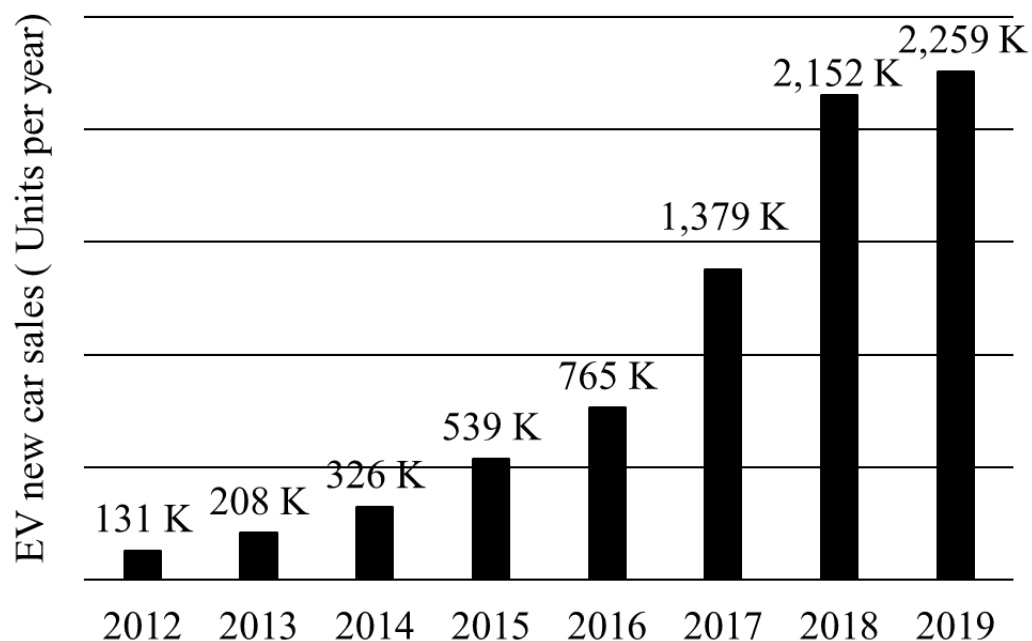


Fig. 1-4 Global sales of electric vehicles⁷⁾

電気自動車の普及のためには、モーターやバッテリーの性能向上以外に、車両重量の低減が重要である。これは、エンジンの代わりにバッテリーやモーターが搭載され、車両のサイズにもよるが車両重量は約200kg から400kg以上と大幅に増加し、走行距離や電池の性能に大きく影響するためである。

Fig. 1-5に電気自動車の車両重量と電力消費量の関係を示す。車両重量が1,800kg 以上になると、電力消費率がほぼ線形に低下している。電力消費量は空気抵抗、転がり抵抗などの走行抵抗に加えて、車両重量にも影響する⁸⁾。

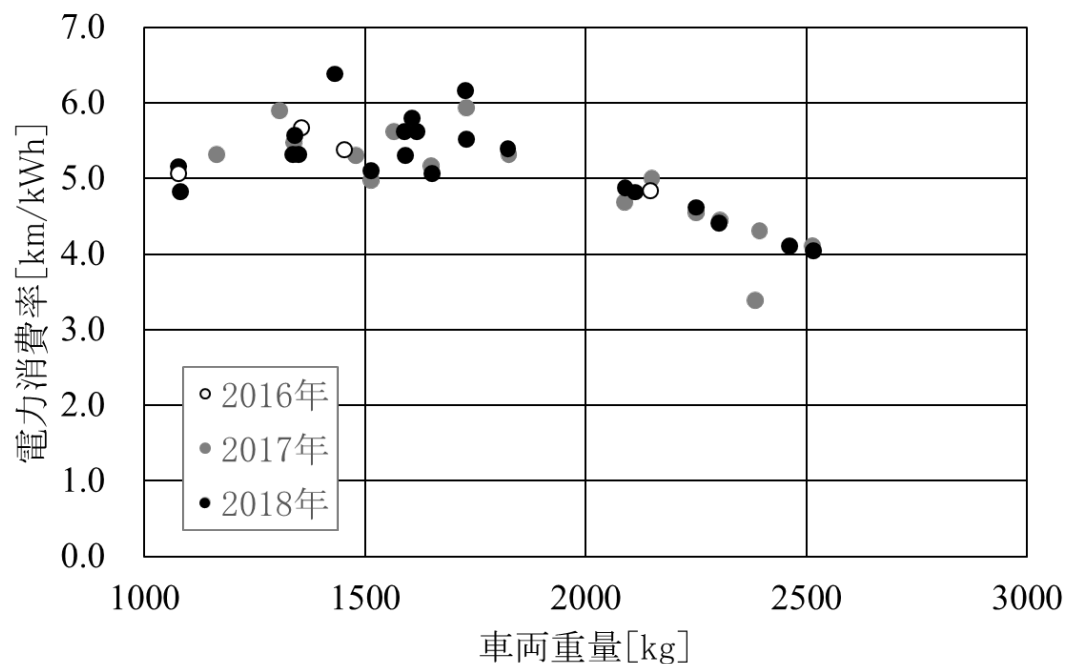


Fig. 1-5 Vehicle weight and fuel efficiency⁸⁾

以上のことから、自動車を取り巻く環境は、2050年に向けたカーボンニュートラル実現のために、電動化の普及のためのバッテリーやモーターの技術開発と同時に自動車の軽量化の技術開発が重要な課題である。

1.1.2 自動車の軽量化とプラスチック部品

自動車プラスチック部品の使用量は2000年頃は重量比で約8%⁹⁾であったが、その後も増加し、車両によっては、2009年約15%まで増加している¹⁰⁾。また、Fig. 1-6の全世界で自動車に使用されるプラスチックの重量の変化に示すように、今後も使用量は増加し、10年後の2030年に約30%増加すると予測されている¹¹⁾。

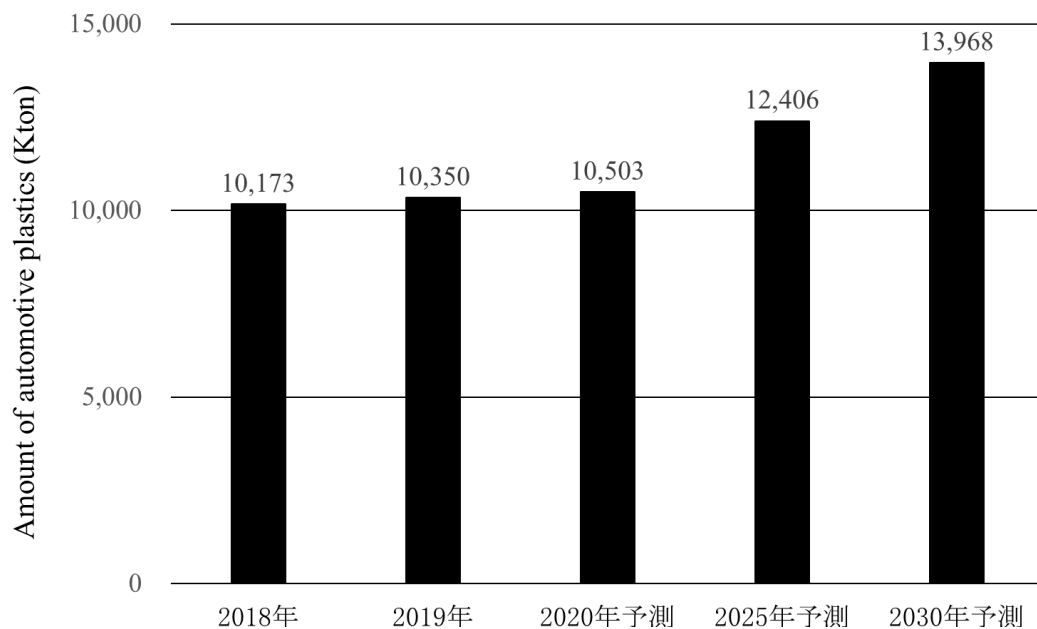


Fig. 1-6 Global market for automotive plastics¹¹⁾

プラスチックを自動車に適用する主なメリットを以下に述べる。

- 1) 比重が小さいので軽量化が可能になる。従来の鉄鋼に比べて、超ハイテンは35%～45%、アルミは30-40%、複合材料を含むプラスチックは35%の軽量化が可能であることが示されている¹²⁾。
- 2) 複雑な形状を一体で成形できるのでデザインの自由度が高く、部品を組み立てる工程数を削減できる。

- 3) 防音性, 遮音性や耐熱性などの性能から意匠性まで部品に求められるニーズにあった多種多様な材料選択が可能である.
- 4) 錆びないので金属と異なり防錆処理が不要である.

Fig.1-7に自動車における主なプラスチック部品を示す. バンパーなどの外装部品やインストメントパネルやドアトリムなどの内装部品, 更に, シートからカーペットにいたる様々な部位に使用されている¹³⁾.



Fig. 1-7 Plastic parts in automotive¹³⁾

自動車のプラスチック部品は, バンパーから始まりインストルパネル等の内装部品へと広がった. 1990年には外装部品に鋼板と同じ温度で塗装できる高耐熱性を有するシートモールドコンパウンド(以下 SMC)やPPE/PA系の適用例も報告されているが, 材料コストの課題から適用は限定的である¹⁴⁾. Fig. 1-8に2000年以降の主なプラスチック外装部品を示す. 近年は, 鋼板からプラスチック製に材料変更されたバックドアも実現しており, 軽量化だけでなく, デザイン性や部品点数の削減にも貢献している¹⁵⁾.

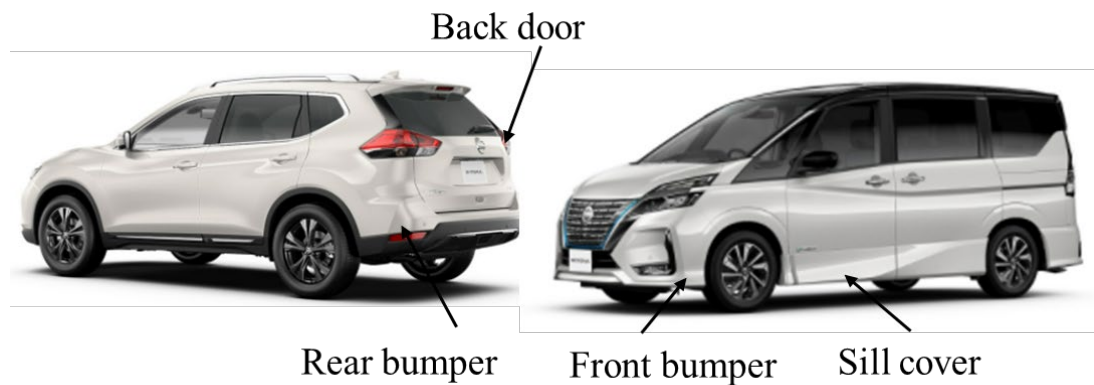


Fig. 1-8 Automotive plastic parts ¹⁶⁻¹⁷⁾

また、プラスチック材料の性能が向上し、エンジン部品であるインテークマニホールドなどのエンジン関連の部品のプラスチック化が進んだ¹⁸⁾。

更に、近年では軽量化のために、鋼板に対して比強度や比剛性に優れる炭素繊維強化プラスチック(以下CFRP)の車体構造や外装部品への適用事例があるが、適用拡大には材料コストや生産性向上が課題となっている¹⁹⁻²¹⁾。以上のように、自動車の軽量化を背景に、今後も自動車へのプラスチックの使用量は増えていくと予測され、自動車のプラスチック部品の生産性や品質向上の研究は重要である。

1.2 自動車プラスチック部品の成形法と材料

1.2.1 自動車プラスチック部品の成形法

自動車におけるプラスチック部品の成形法は、材料や部品形状によって、多様な工法が存在する。主な工法は射出成形、ブロー成形、圧縮成形と押出成形の4つに分類される。Fig. 1-9に自動車プラスチック部品の成形法別の比率を示す。約9割が射出成形法によって生産されている²²⁾。

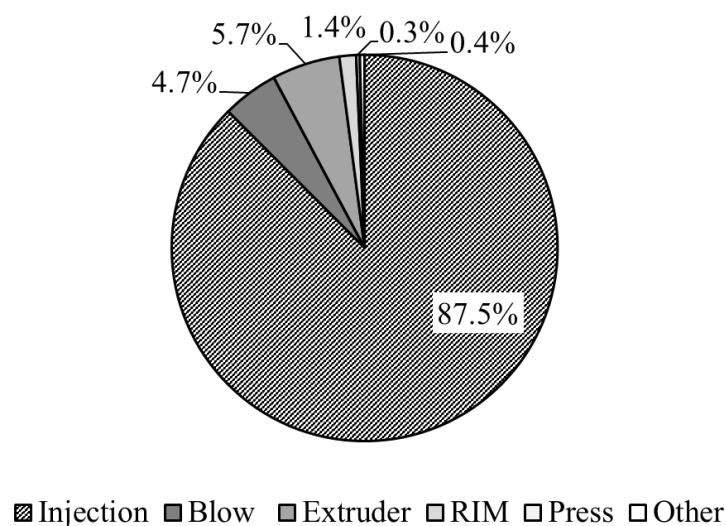


Fig. 1-9 Ratio by molding method in automotive plastics parts ²⁰⁾

射出成形はペレットと呼ばれる米粒状のプラスチック材料を約200℃に加熱して溶融し、高圧で金型内に溶融した樹脂を流しこむ工法であり、プラスチック部品の成形法のなかでは、最も生産性が高い。1930年頃にヨーロッパで始まり、日本には1940年頃に輸入されている。初期の射出成形機は、プラスチックを可塑化するスクリーと射

出するシリンダーが独立していたが、現在はインライン方式とよばれる可塑化と射出を一本のスクリーで行うタイプが主流となっている²³⁾。

Fig. 1-10に射出成形機の基本構造を示す。プラスチック材料は射出ユニットに投入され、加熱溶融されてスクリー先端部に溶融樹脂が蓄えられ、その後、高圧で金型に樹脂が流れていく。バンパーやインストルメントパネルの大物プラスチック部品生産では、型締め能力で2000~3000 tonの大型射出成形機が標準的である。

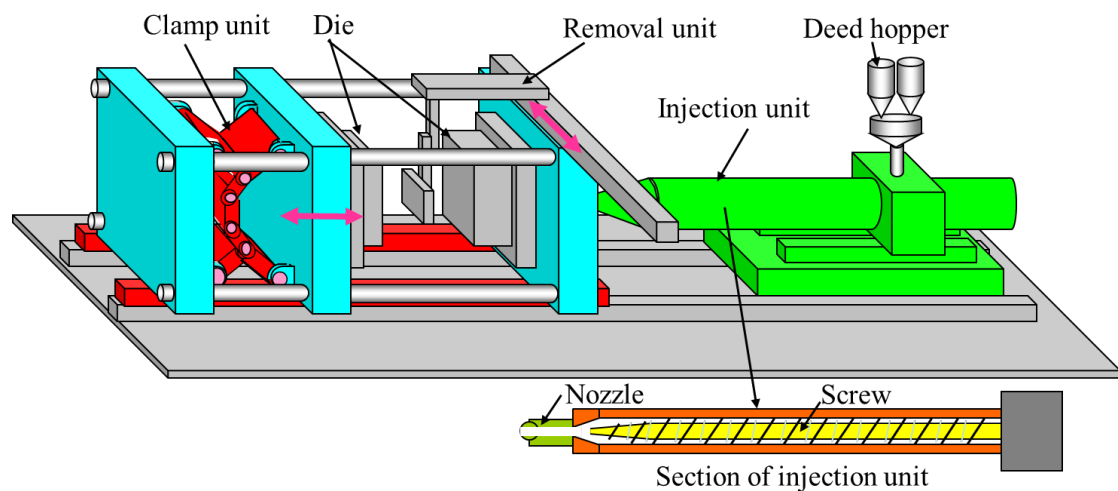


Fig. 1-10 Injection molding machine

Fig. 1-11に射出成形における設備動作と材料挙動を説明する。射出ユニットから高圧で押し出された溶融樹脂は金型内にあるホットランナーと呼ばれる成形品へ溶融樹脂を流すための流路を通り、各ゲートに分配され、ゲートから金型の製品形状内に流れる。一般的に、金型温度は約30°Cに設定されており、約200°Cの溶融樹脂は金型内で急速に冷却され、樹脂材料は収縮しながら固化し、冷却が終了した後、金型から取り出される。

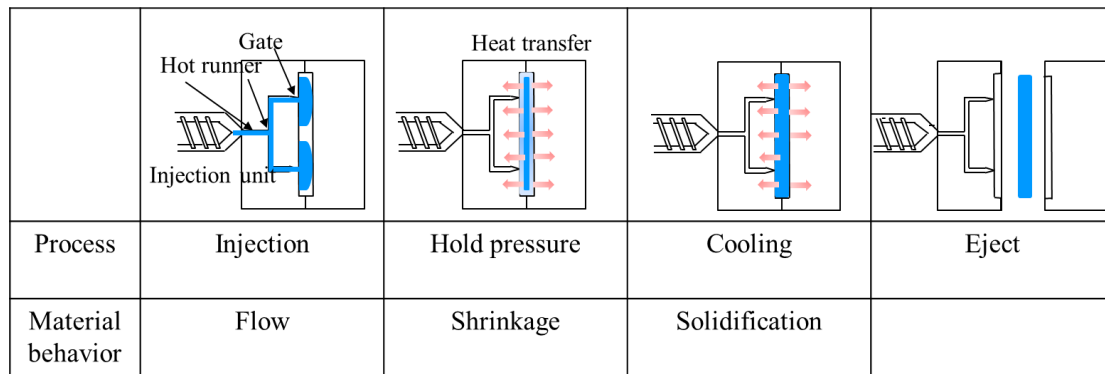


Fig. 1-11 Process and material behavior of injection molding

また、最新の射出成形の技術動向は、型締め装置の小型化のための金型内圧力の低減、金属などのインサート成形や軽量化のため発泡成形などの開発事例もある²⁴⁾。射出成形の次に多いのがブロー成形である。主な部品は燃料タンクやウォッシャータンクなどの容器類やエアードクトなどである。パリソンと呼ばれる円筒形状の溶融体を金型内で挟み圧縮空気で膨らませることで成形する²⁵⁾⁻²⁶⁾。

更に、前項1.1.2で述べたCFRPのような複合材料では予め強化繊維を金型にチャージ(腑形)し、型締め後に樹脂を注入硬化させるレジントランスファーモールドディング(以下RTM)等の成形法がある²⁷⁾。

1.2.2 自動車プラスチック部品の材料

自動車に使用されているプラスチック材料としては、ポリプロピレン (PP), ポリエチレン (PE) ポリ塩化ビニル (PVC), ポリウレタン (PUR), ABS樹脂, フェノール樹脂 (PF) 等があげられる. Fig. 1-12に自動車用プラスチック部品の材料分類の比率を示す. 自動車用プラスチック部品材料において, PPが約4割を占める²⁸⁾.

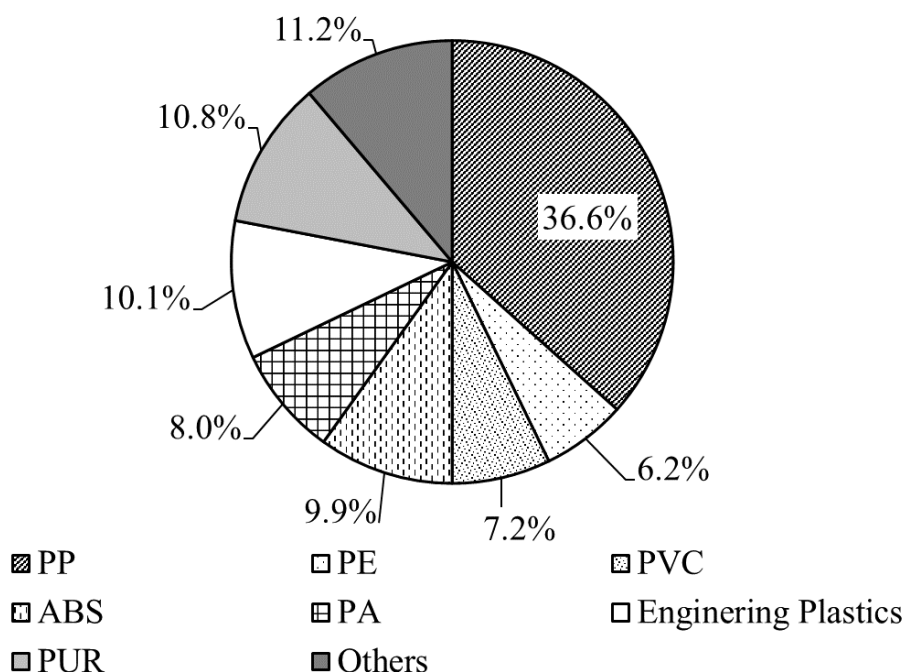


Fig. 1-12 Material classification of automobile plastic parts ²⁸⁾

特に, 大物プラスチック部品であるバンパーやインストルパネルなどのプラスチック部品はPP材料を使用している. 自動車でPP材料を用いる代表的な自動車プラスチック部品であるバンパーは, 1925年頃から, 自動車車体を衝突から保護する部品として広がり, 1972年のFMVSS 215規制 (米国) への対応をきっかけにバンパーのPP化が進んだ. しかし, 当初はマイナス10°Cの低温で割れてしまう問題があったが, エチレン・ポリプロピレン (EP) という弾性力のあるゴム成分を混ぜることにより改質された²⁹⁻³¹⁾.

更に、バンパーが大型となり、高い曲げ剛性が求められるようになり、PP材料に無機材料であるタルクも混ぜることで低温衝撃性と高い曲げ剛性を有する材料となった。

Fig. 1-13にバンパーの材料組成を示す。PPが約60wt%、エラストマーであるゴムが約20wt%と無機フィラーとしてタルクが約20wt%配合されている。その他、耐候性などの添加材が数%wt混入している³²⁾。ベース材料となるPPの高性能化は重合触媒や重合プロセスの改良によって進化してきた。また、材料の複合化に関しては、ゴムの分散技術や無機フィラーの分散制御や界面制御等に関する技術開発が進められてきた。

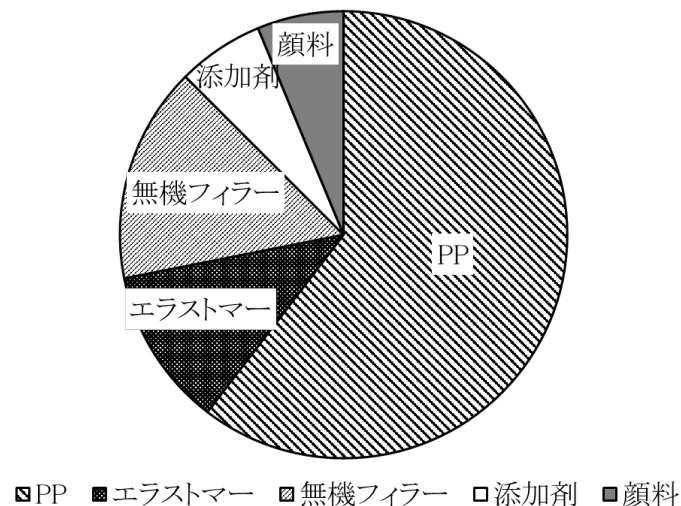


Fig. 1-13 Composition of PP materials for automobiles ³⁰⁾

現在、ゴムやタルクを含有するPP複合材料が自動車プラスチックの外装及び内装の標準的な材料となっている。Fig. 1-14に部品別に衝撃に対する靱性を評価するのアイゾット衝撃強度と曲げ弾性率の関係を示す³²⁾。バンパーでは、衝撃性が求められるのでアイゾット衝撃強度は高い、一方、エンジンルーム内やヒーターケース類の部品では、耐熱性が求められるので、曲げ弾性率が高い。このようにゴムやタルクの配合を変えることで、部品の性能要求に適した様々なPP複合材料を得ることができる。

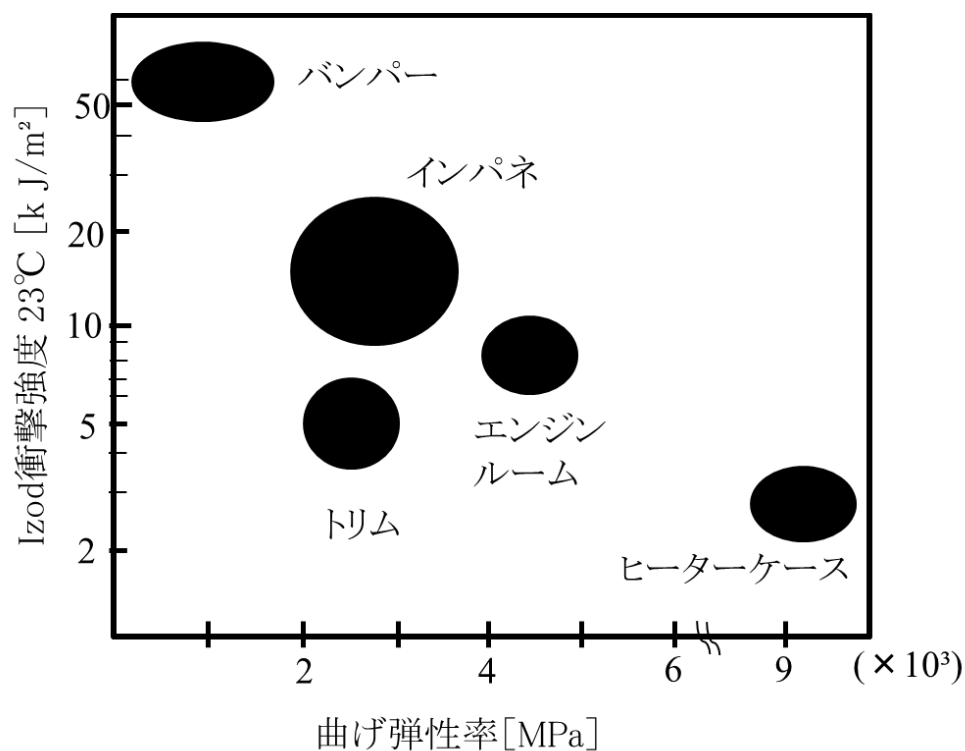


Fig. 1-14 Relationship between Izod impact strength and flexural modulus ³²⁾

今後のプラスチック材料は、リサイクルとカーボンニュートラルが重要な課題である。リサイクルはマテリアルリサイクルの更なる促進、また、カーボンニュートラルのために、ケナフなどの天然繊維³¹⁾やバイオプラスチック³⁴⁾の適用が広がると考えられる。

1.3 自動車プラスチックにおける品質課題

1.3.1 射出成形プラスチック部品の外観品質の課題と先行研究事例

射出成形を用いて生産されるバンパーやインストルメントパネルなどのプラスチック部品の外観品質の欠陥をFig. 1-15に示す.

上段の(a)~(c)は, 金型内における熔融樹脂の流動に関わる品質欠陥である. (a)のショートは, 熔融樹脂が流動先端部に到達する以前に冷却固化することと流動過程でエアトラップと呼ばれる. 空気溜まりが樹脂の流れを妨げることによる2つの要因がある. ショート防止のためには射出圧力や保圧, 金型温度や樹脂温度などを適切に設定する必要がある. そして, 複数のプロセスパラメータを最適化し, 熔融樹脂の体積収縮率を考慮することで, ショートを防ぎながら型締力を最小化ができることが明らかになっている^{35)~37)}.

(b)のウェルドラインは熔融樹脂が合流することで発生する線状の品質欠陥で, 過去にも多くの研究がされており, 本研究に大きく関わり重要であるので, 1.3.2で詳細を説明する.

(c)のフローマークは線状の縞模様であり, 自動車バンパーでは経時劣化により顕著に表れる³⁸⁾. フローマークの発生メカニズムは, 熔融樹脂の流動中の冷却に起因し, 流動先端部の金型壁面近傍の樹脂が金型壁面に達する前に固化することが要因である³⁹⁾. 更に, 自動車用バンパー材に含有しているフィラー(ゴムやタルク)の影響の研究では, フローフロントの非対称な流れの解明⁴⁰⁻⁴³⁾が報告されている. フローフロント部の流動速度からシミュレーションを用いて発生を予測することが可能となった⁴⁴⁾.

(d), (e), (f)は, 材料に含まれる水分や空気が起因する品質課題である. (d)のボイドは成形品の内部に空気の泡が存在する品質欠陥であり, バンパーでは塗装時の熱に

より膨れや破れの原因になる。これは、熔融樹脂に混ざった空気が抜けないことや周りの樹脂が早く固化することに起因する。横井は金型内の可視化実験により空気がフロートフロントから抜けていく過程を観察可能としている⁴⁵⁾。また、樹脂流動シミュレーションの進歩により空気が残留する場所を予測することでき⁴⁶⁻⁵⁷⁾、製品形状やゲート配置の変更により対策が可能である。また、積極的に金型外に空気を逃がすためのエアイベントも有効であることがわかっている⁴⁸⁾。

(e)のシルバーは成形品表面に現れる銀色の筋である。主に材料に含まれる水分やガスが原因である。過去の研究では、可視化実験により気泡が破裂し、シルバーが発生する過程を解明している⁴⁹⁾。また、抑制技術として、PP材料のガラス転移温度(T_g)以上にすることで、シルバーを抑制できることから、誘導加熱や赤外線加熱により金型温度を約90℃にした状態で樹脂を流すことで抑制できることを示した研究例がある⁵⁰⁻⁵¹⁾。

(f)のガス焼けは、PPの熱分解温度約350℃以上にならないと焼けとなる熱分解には達しない⁵²⁾。しかし、樹脂が熔融される際に添加剤などの低分子のものが揮発し、射出成形時にガスとして樹脂よりも先に流れる。このガスがリブ部などの閉塞された末端部に逃げ場のなくなった空気が圧縮されて自己発熱し燃焼に至る。圧縮によりガスの濃度が高くなりより着火しやすくなることが実験でわかっている⁵³⁻⁵⁴⁾。また、ガス残渣が金型に堆積し、製品の外観不良となるため、金型にダイヤモンドライクカーボン(DLC)またはフッ素コーティングすることで改善できる報告がある⁵⁵⁾。また、発生するガスを金型内に侵入する前に、ゲートの前の流路にガス排出構造を有した金型により、ガスを減らすことでガス焼けを防止できる報告がある⁵⁶⁾。

Fig.1-15の下段は、射出成形時の不均一性が起因となる品質課題である。(g)のヒケは成形品表面が凹になる品質課題である。ヒケの発生量に対する成形圧力やリブ形

状やリブ部への樹脂の流入速度との関係が報告されている⁵⁷⁻⁵⁸⁾。また、材料の圧力・体積・温度データから樹脂充填・保圧・冷却までを算出し、ヒケを予測するシミュレーションも完成しており⁵⁹⁾⁻⁶⁰⁾、これにより、ヒケが発生しない製品形状に見直すことができる⁶¹⁾。更に、有限要素法による解析における形状データーの要素毎の収縮率の予測から収縮量の可視化⁶²⁾や発泡によりリブ部の内部圧力を制御することでヒケの抑制の報告がある⁶³⁾⁻⁶⁴⁾。

(h)の艶ムラは成形品表面の光沢にムラが生じて、不均一に見えることである。特に、自動車内装部品には意匠性のためにシボ加工⁶⁵⁾が施されており、シボの深さや傾斜が艶ムラに影響することがわかっている⁶⁶⁾。主に着色剤を用いたシボ付き内装部品に多く発生し、同じ部品でも部位によってグロス値が異なる。これは、金型内で熔融樹脂が冷却されながら流動していくため、内部の樹脂圧力がゲートから近い部位は高いが、遠い部位は低くなることで転写に差が生じる。そこで、金型温度と型内樹脂圧力の関係が報告されている⁶⁷⁾。また、断熱性のある金型を用いて、金型内の圧力を均一し艶ムラを改善する手法も報告されている⁶⁸⁾⁻⁶⁹⁾。

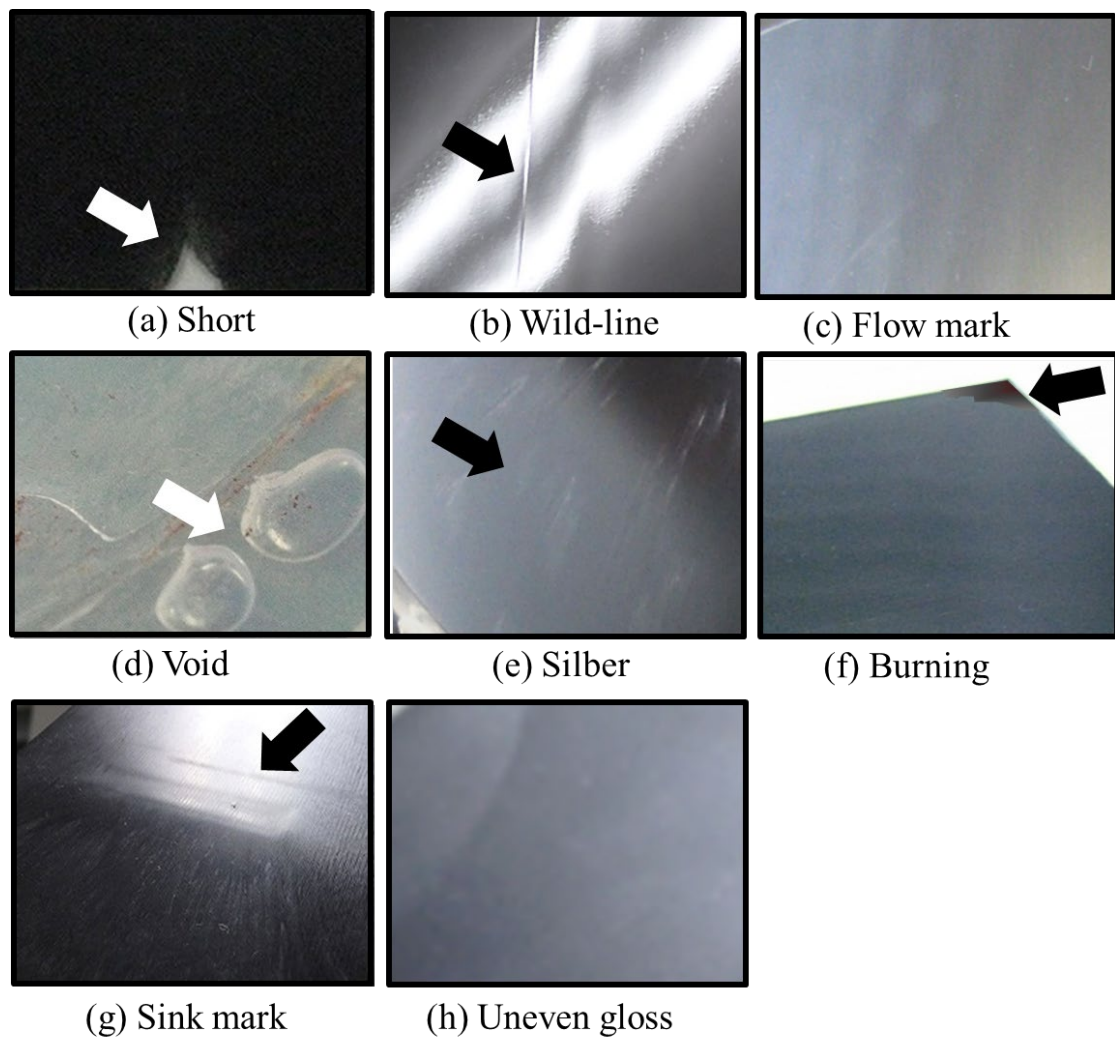


Fig. 1-15 Quality defect of automotive plastic parts

1.3.2 ウェルドラインと先行研究事例

前項の1.3.1で、自動車プラスチック部品の主要な品質課題と先行研究事例を説明した。本項では、特に実際の生産現場で問題となるウェルドラインの品質欠陥と先行研究事例を説明する。ウェルドラインとは金型内を熔融樹脂が流れて合流したときにできる線の総称である。

Fig. 1-16, Fig. 1-17に一般的なウェルドライン発生メカニズムを示す。熔融樹脂は金型に接触した部分は即座に固化され、スキン層部と呼ばれる膜を形成し、徐々に中心部の熔融樹脂も冷却され固化していく。そして、熔融樹脂がぶつかり合流すると、板厚中心から上下に向けて接触し、合流面が板厚方向に進むが、材料の粘性が高くと、最後に三角形の部分が残る、これがウェルドラインのV溝と呼ばれ、⁷⁰⁾外観不具合や強度低下につながる。

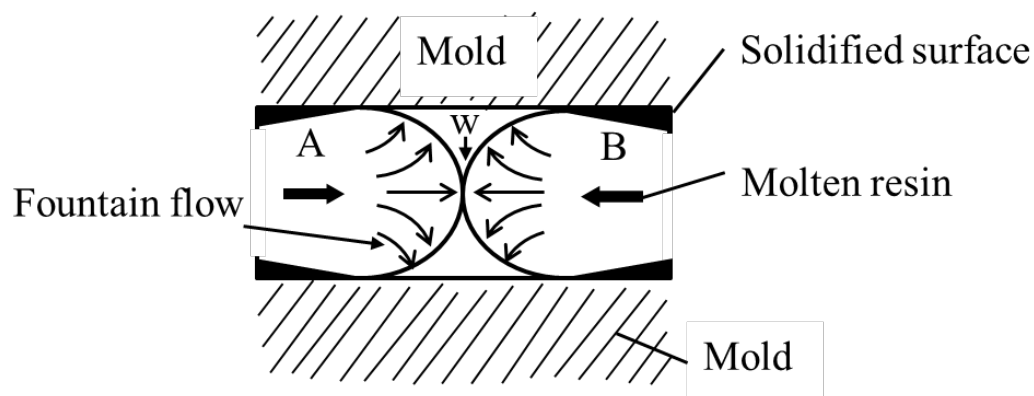


Fig. 1-16 Weld line generation mechanism⁷⁰⁾

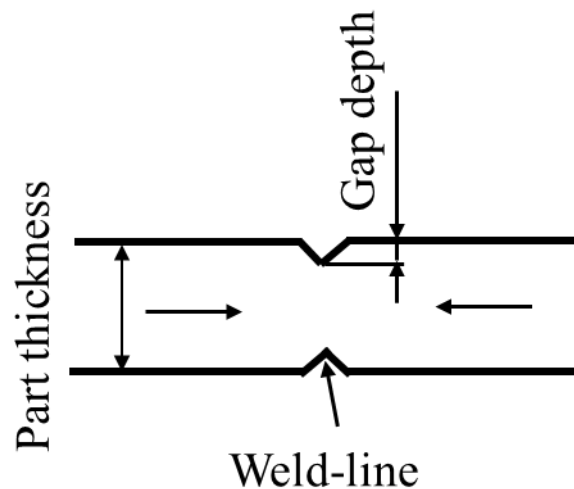


Fig. 1-17 V- Notch due to weld-line⁷⁶⁾

ウェルドラインに起因する品質欠陥は、主に強度や外観品質の低下が多く、メカニズム解明や抑制方策が多く研究されてきた。以下に、過去の研究事例を記す。

ウェルドラインが成形品の強度におよぼす影響に関しては、数多くの報告がなされている。泊はポリスチレン (PS)とポリカーボネート(PC)を用いてウェルドラインのV溝深さとじん性破壊の関係や分子配向を調査した⁷¹⁾。また、短繊維強化プラスチックについてのウェルドラインの強度影響の報告もある⁷²⁻⁷³⁾。更に、金型を少し開いた状態で射出し充填後に圧縮する射出プレス工法⁷⁴⁾や溶融樹脂が完全に固化する前に強制的に板厚中心部の流動を起こさせるコアピン駆動法によるウェルドラインの強度向上の研究報告がある⁷⁵⁻⁷⁶⁾。

材料に注目したアプローチとしては、PC/ABSポリマーブレンドに添加剤を混入しウェルドライン界面のモロフォロジーと機械特性の改善⁷⁷⁾や分子配向構造を赤外分光法 (FTIR)により測定し、ウェルドラインの強度の調査が報告されている⁷⁸⁾。また、ABS材を用いて樹脂温度、金型内圧および樹脂溶融粘度とウェルドラインの深さの関係が報告されている⁷⁹⁾。開口部やピンの周りで発生するウェルドラインについて、樹脂流動に着

目し合流角度との関係を求め⁸⁰⁾, また, ピン後方で合流してから平行流になる際のウェルドラインの深さとの関係や合流時の樹脂温度の影響が報告されている⁸¹⁾⁻⁸²⁾. 更に, 高速射出成形によるウェルドラインの低減⁸³⁾やガラスインサート金型によるウェルドライン消失の解明⁸⁴⁻⁸⁵⁾や熔融樹脂のフローフロント形状が与えるウェルドラインへの影響の可視化⁸⁶⁻⁸⁸⁾の研究報告が行われてきた.

ウェルドラインの発生場所の予測については, シミュレーションする研究が活発に行われている⁸⁹⁾. Fig. 1-18に示すようにTham氏はこの三角形が樹脂が充填していく過程をシミュレーションで導いている⁹⁰⁾. また, Azieatul氏は, Fig. 1-19に示すような開合角と熔融粘度の関係を定式化した⁹¹⁾.

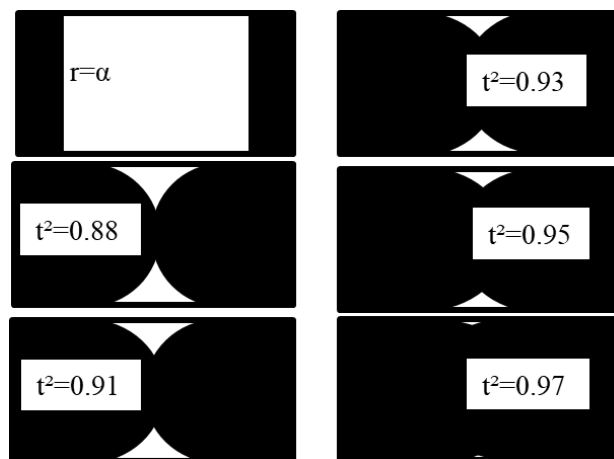


Fig.1-18 Development of the flow fronts ⁹⁰⁾

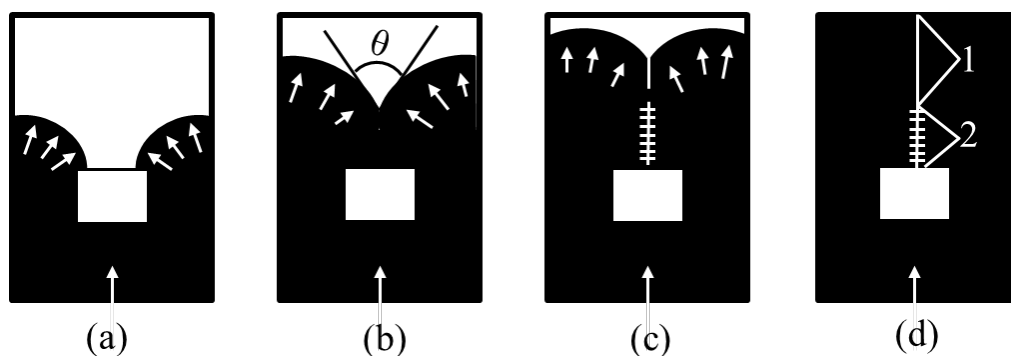


Fig. 1-19 Formation of weld line and meeting angle ⁹¹⁾

これらを踏まえ、実際の生産現場でも、ウェルドラインを目立たないようにするために、シミュレーションでウェルドラインの発生場所を予測し、ウェルドラインを目立たない場所に移動させるためにゲートの位置を変更したり、また、ウェルドラインの合流角度を大きくするなど製品形状の変更を行っている。

1.3.3 PP複合材フィラーが及ぼす外観品質課題

これまでも多くのウェルドラインに関する研究がされてきたが、これまでの研究は、PCやABSなどの単一材料におけるウェルドラインの研究が中心である。

PP複合材料は、PPにタルクやゴムなどのフィラーを配合した材料である。材料の複合化技術とも呼ばれ、力学特性の改良、機能性の付与、成形性、寸法精度、2次加工性などの材料性能の向上に寄与してきた。その優れた力学特性から、自動車や家電で広く用いられている。

しかし、前項1.2.2で述べたように、バンパーやインストメントパネル等の自動車向けのプラスチック材料にはタルクやゴムが含有することで流動挙動が複雑となり、それが要因となる外観不良に対する対策が課題となっている。

これまでのゴムやタルクを含有するPP複合材料の研究においては、強度に及ぼす影響の報告例がある^{92)・93)}。その他に、寸法精度に関して、製品コーナー部におけるゴムやタルクの配向による倒れこみ現象やソリ変形の影響が報告されている⁹⁴⁻⁹⁶⁾。シボ付きプラスチック部品について、ゴムやタルクが転写性に与える影響を研究した報告もある⁹⁷⁻⁹⁹⁾。

自動車外板の代表的な部品であるバンパーについて、Fig. 1-20に90年代と現在のバンパーの大きさを比較した。現在のバンパーの特徴は、グリルまで覆うデザインとなり、更に、SUV車が増加し、バンパーのサイズは大型化している。高さ方向では、90年代と比較すると2倍近くになっている。

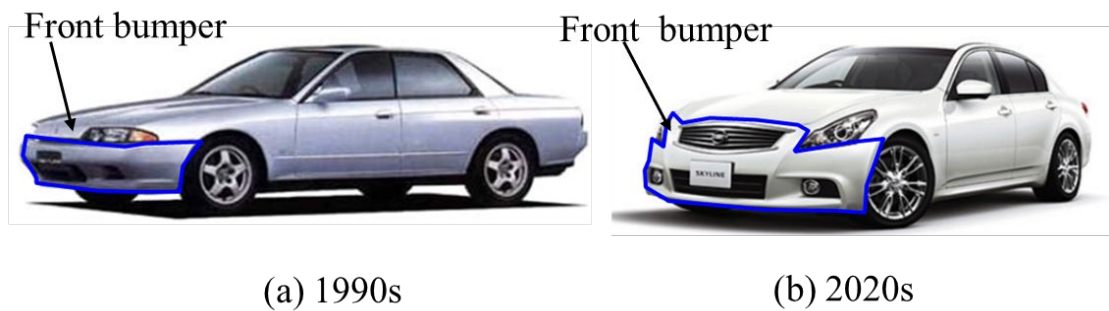


Fig. 1-20 Comparison of bumper size

Fig. 1-21のように、ゲートの設定位置と製品形状の関係から、樹脂が合流する場所にウェルドラインが発生する。バンパーなど、今後のプラスチック部品は大型化により、ゲート点数も増加することから、樹脂が合流する部位も増加し、合流部付近で起こる外観品質の改善が重要な課題となる。

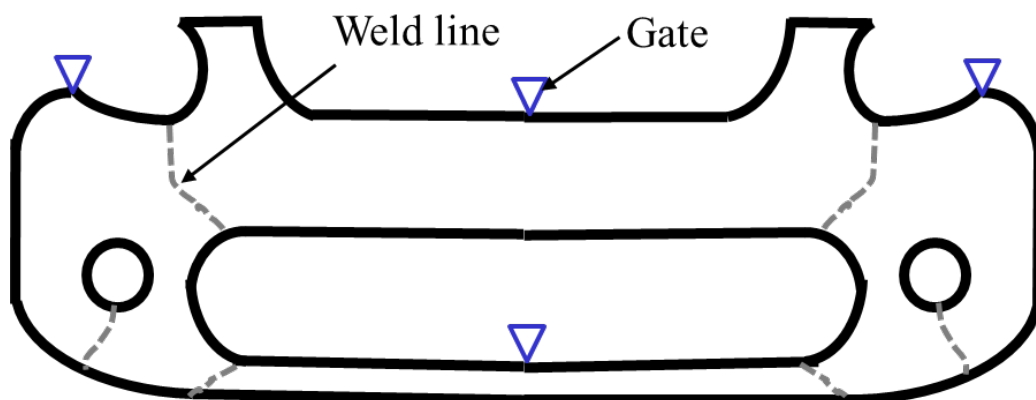


Fig. 1-21 Relation of gate and weld line position

1.4 本研究目的と本論文の構成

以上より、本研究では、プラスチック部品の樹脂合流付近における外観品質について、材料に含有するフィラー(ゴムやタルク)への影響の研究例が少ないことから、樹脂流動挙動におけるフィラーの伸張や配向に着目し、品質課題となっている表面の隆起の現象および発生メカニズム、また、抑制方法について研究を実施した。本論文の構成を以下に示す。

第1章「序論」では、本研究の背景を整理した。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搭載により、車両重量が増加するため軽量化が重要となる。自動車の軽量化において、鋼板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。自動車用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凹、厚肉部でのヒケや製品端部の材料のショートなどが課題である。中でも、バンパーは大型化しており、樹脂を注入する注入口の点数が増え、合流部も増加するため、樹脂の合流部における外観品質が課題となる。これまでも各注口から流れる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という外観不具合が問題となっており、発生のメカニズム解明と抑制方法を必要としている。隆起は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。

第2章「ゴムの配向がウェルドライン直下に発生する表面隆起への影響」では、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の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）の各部位の金型に接したスキン層部と板厚中心部について、SEM観察とSEMの写真を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、樹脂の金型内流動挙動において、噴水のように噴き出す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、スキン層部に移動し、冷却固化が進むスキン層と流動層の間に生じるせん断力により、樹脂が通過した部位のスキン層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、合流することで樹脂の流速が低下し、ゴムが伸張しながら板厚方向に伸張し、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発生することが明らかになった。次に、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は、PPに分散されたゴムの伸張は小さく楕円の状態でPPが冷却固化し、ゴムは楕円に凍結されるため、一般部と合流部の板厚方向の収縮率の差が小さくなり、隆起も小さくなることがわかった。また、金型温度が高いこと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、一般部のゴムの流動方向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でき、材料の影響を評価するために、PP材のみ、ゴムだけを含有した材料、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4つの材料を用いて、評価した結果、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、更に、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観察及びSEM写真の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固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。

第3章「タルクが合流界面の先端部で発生する表面隆起への影響」では、第2章でスキン層部のゴムの伸張と配向が樹脂合流部のウェルドライン直下で発生する隆起を研究したが、本章で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影響する因子を評価し、板厚が隆起高さに及ぼす影響が最も高かった。また、2つのゲートからの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で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が小さいとタルクの板厚方向への配向が少なくなり、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い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、潜り込み長さから隆起の高さを予測する評価について、異なる合流形状における実際の成形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が確認できた。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の冷却後の収縮差が生じるために、隆起が発生することがわかった。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、合流部の潜り込みの長さや形状に着目して、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、合流部の形状を変化させて、隆起高さの影響を評価した。評価は、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場合と実際の生産で起

この樹脂の流動について、対向流動領域と平行流動領域とし、隆起への影響を検証した。その結果、隆起を低減できる徐変の長さや厚さを定量評価することができた。

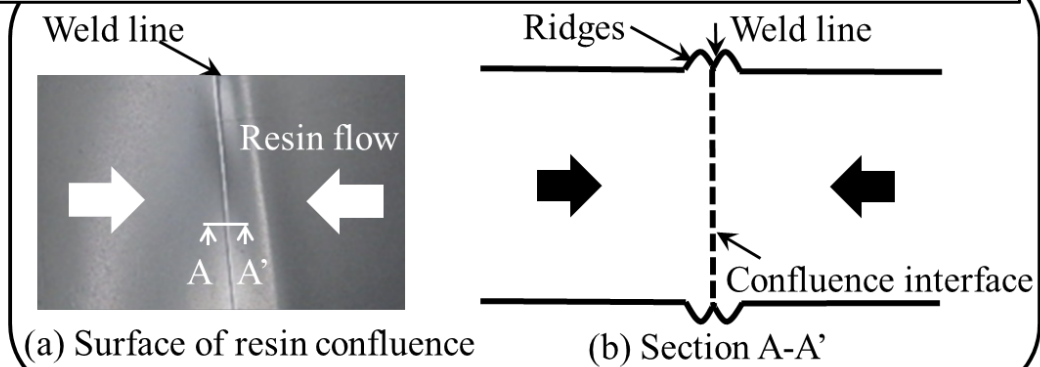
第4章「結言と今後の展望」では、第2章と第3章から得られた知見を総括し、射出成形におけるゴムやタルクを含有するPP複合材料を用いたプラスチック部品の表面品質課題である塗装後の隆起についての発生メカニズムと抑制方策を立案することができた。一方、部品設計の段階から合流部付近の隆起について、樹脂流動シミュレーションを用いて予測できることが望まれるが、大物プラスチック部品での3Dのソリッド要素を使用したシミュレーションは膨大な計算時間を要するため、現在の2Dであるシェル要素を用いて流速や温度分布との相関から予測できれば、計算時間を短縮でき、実用性を得られるので、継続検討していきたい。また、今後展望として、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が考えられ、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件研究は貢献できると考えられる。

Fig. 1-22に本論の全体構成をまとめた。

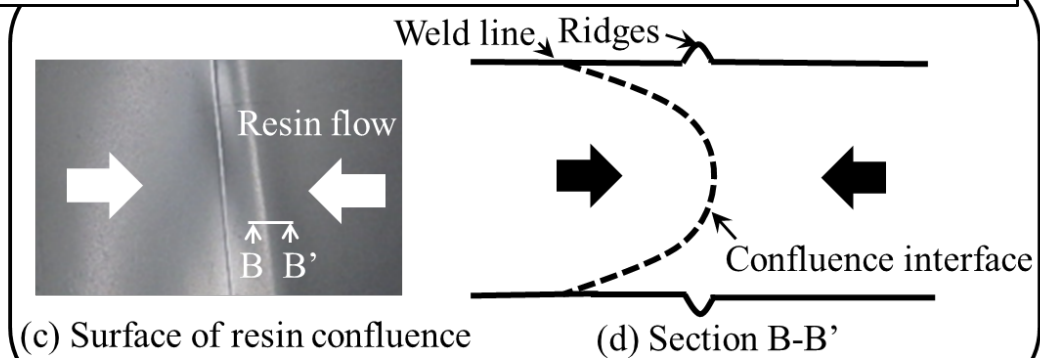
第1章 序論

- 研究の背景
- 自動車プラスチック部品の成形法と材料
- 自動車プラスチック部品の品質課題
- 本研究目的

第2章 ウェルドライン直下に発生する表面隆起



第3章 合流界面の先端部で発生する表面隆起



第4章 結言と今後の展望

- 本研究による成果と総括
- 今後の展望

Fig. 1-22 Outline of this thesis

1.5 参考文献

1. Summary for Policymakers, Special report of Global Warming of 1.5°C, IPCC, <<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>>, 2022年02月04日最終アクセス
2. 森本英香, 2050年CN(カーボンニュートラル)に向けた成長戦略, 月刊資本市場, 4, 4-15(2021)
3. 日本の自動車工業2020 P30, 運輸部門の地球温暖化対策への取り組み, 日本自動車工業会, <https://www.jama.or.jp/industry/ebook/2020/book_j/book.pdf>, 2022年02月04日最終アクセス
4. 鈴木一義, 自動車を取り巻く環境問題, JSME, 99, 768-771(1996)
5. 環境課題を踏まえた事業基盤の強化, 新型「日産リフ」におけるLCA比較, 日産自動車株式会社, <<https://www.nissan-global.com/JP/SUSTAINABILITY/REPORT/ENVIRONMENTAL/FOUNDATION/>>, 2022年02月04日最終アクセス
6. 佐藤員暢, 電気自動車の動向, 農業機械学会誌, 73(1), 4-7(2011)
7. Electric vehicle sales—a global snapshot in uncertain times, Automotive World, <<https://www.automotiveworld.com/articles/electric-vehicle-sales-a-global-snapshot-in-uncertain-times/>>, 2022年02月04日最終アクセス
8. 茂木春樹, 佐藤貴文, 吉田 郁哉, 次世代・革新型蓄電池技術の現状と課題, みずほリサーチ&テクノロジーズ, <https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2019/mhir18_battery_02.html>, 2022年02月04日最終アクセス
9. 自動車を構成する3大材料とボディ, 自動車工業会, <<https://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/201303/01.html>>, 2022年02月04日最終アクセス
10. Min-Young Lyu¹, Tae Gyun Choi, Research Trends in Polymer Materials for Use in Lightweight Vehicles, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, 16(1), 213-220(2015)
11. 自動車用樹脂世界市場に関する調査, 矢野経済研究所, <https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2293>, 2022年02月04日最終アクセス
12. Chengzhi Han, Research on the Development and Application of Lightweight, Journal of Physics(2020)
13. 水谷篤, 自動車リサイクルと材料リサイクル技術, 同志社大学材料研究センター-第3回講演会(2008)

14. 大庭敏之, 自動車に用いられる樹脂材料の現状と将来, 精密工学学会誌, 56(4), 13-16(1990)
15. 岩野昌夫, 自動車用構造部品に対する要求特性と樹脂化, 成形加工, 20(6), 324-330(2008)
16. X-Trail Webカタログ, 日産自動車, <<https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/x-trail/exterior.html>>, 2022年02月04日最終アクセス
17. セレナ Webカタログ, 日産自動車, <<https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/serena/exterior.html>>, 2022年02月04日最終アクセス
18. 石野光洋, エンジニアリングプラスチック繊維, 繊維と工業, 64(10), 336-341(2008)
19. 石川隆司, 自動車構造部品への炭素繊維強化プラスチックの応用と展望, 精密工学, 81(6), 489-493(2015)
20. 影山裕史, 自動車CFRP技術の最新動向, Material Japan, 53(12), 612-615(2014)
21. 影山裕史, 自動車分野におけるCFRP技術の現状と展望, 成形加工, 28(12), 480-483(2016)
22. 水谷篤, 自動車におけるプラスチック・複合材料の開発技術動向, 第43回CSセミナー(2018年4月19日)
23. 日本一古い射出成形機, 成形加工, 20(1), 3(2008)
24. 加藤和典, 最新の射出成形技術と基礎研究の動向, 精密工学会, 66(10), 1493-1499(2000)
25. 葛良忠彦, ブロ-成形技術の最新動向, 日本塑性加工, 57(661), 124-128(2016)
26. 今泉洋行, 自動車用樹脂材料における成形加工の技術動向, 成形加工, 15(18), 654-659(2003)
27. 山崎真明, 関戸俊英, 山口晃司, ハイサイクルRTM成形方法の開発, 成形加工, 19(10), 645-648(2007)
28. 自動車プラチック市場・技術・採用動向, CMCリサ-チ, <<https://cmcre.com/archives/17849/>>, 2022年02月04日最終アクセス
29. 梶岡孝宏, 自動車産業におけるプラスチック成形加工の現状と展望, Seikei-Kakou, 20(8), 589-594(2015)
30. 井出正, 自動車用プラスチック成形材料と加工の進歩, 高分子, 27(11), 804-807(1978)
31. 小林豊, プラスチックでできた自動車材PPバンパ-を巡って, 公益社団法人日本化学会, 54, (11), 31-68(2015)

32. 矢田健一郎, 森富悟: Seikei-Kakou, 27(11), 457-461(2015)
33. 宮本康史, 自動車における樹脂材料, 高分子, 54(10), 746-749(2005)
34. 吉田邦彦, 松田祐之, 栃岡孝宏, 宮本康史, 自動車部品用バイオプラスチックの開発, マツダ技術報, 25, 157-160(2007)
35. 夏目慎二, 北山哲士, ショットショットを考慮した射出成形プロセスパラメータの多目的最適設計, 日本機械学会, 第24回設計工学・システム部門講演会(2014)
36. 夏目慎二, 北山哲士, プラスチック射出成形における体積収縮率と型締力の低減, 日本機械学会, 第11回最適化シンポジウム(2014)
37. 横井秀俊, 林高樹, 平岡弘之, 射出成形における型内樹脂挙動の直接観察, 生産研究, 39(7), 306-309(1987)
38. 平野幸喜, 田村聡, 小幡寛, 金井俊孝, ポリプロピレン系自動車のストライプ状劣化, 成形加工シンポジウム予稿集, 306-309(2007)
39. 吉井正樹, 蔵本浩樹, プラスチック射出成形におけるマイクロフロ-マ-クの発生に及ぼす成形条件の影響, 高分子論文集, 49(3), 241-248(1992)
40. 大和田茂, 横井秀俊, 横井秀俊, 射出成形におけるウェルド部後方のフロ-マ-ク生成現象の解析, 成形加工, 30(2), 87(2018)
41. 大和田茂, 横井秀俊, 横井秀俊, 射出成形におけるタイガ-ストライプ・フロ-マ-クの生成メカニズム, 生産研究, 69(6), 387-396(2017)
42. 前田修一, 福永謙二, 亀井衛位置, ポリプロピレン/ラバ-/タルク系ブレンド射出成形のフロ-マ-ク, 日本レオロジ-学会, 35(5), 239-299(2007)
43. 前田充勲, 金藤芳典, 横井秀俊, 光輝材フレ-ク射出成形品におけるフロ-マ-ク生成現象の解析, 2014年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 963-964(2014)
44. 田中宣隆・藤岡良和, 谷本治生, 射出成形バンパ-のフロ-マ-ク現象と対策, Seikei-Kakou, 13(8), 549-553(2001)
45. 横井秀俊, ファウンテンフロ-現象の可視化と射出成形品外観不良, 成形加工, 29(6), 176-182(2017)
46. 井上良徳, 松岡孝明, 射出成形樹脂流れの3次元シミュレーション, 日本レオロジ-学会誌, 21, 175-180(1993)
47. 山部昌, 吉川秀雄, 梶原稔尚, 樹脂部品成形のための CAE 技術の変遷と今後への期待, 成形加工, 20(8), 517-522(2008)
48. 武田亘, 国枝正典, 山崎拓哉, 積層金型ベント穴付き射出成形型への応用, 電気加工, 44(107)110-117(2010)

49. 吉村洋平, 横井秀俊, 高速解像度ビデオカメラによるシルバ-ストリ-ク生成過程の可視化解析, 2008年精密工学会春季大会講演論文集, 495-496(2008)
50. 村田泰彦, 西島一徳, 南彰浩, 誘導加熱・冷却金型を用いた射出成形品の外観向上, 2008年精密工学会春季大会講演論文集, 859-860(2008)
51. 村田泰彦, 河口大介, 竹内琢馬, 石田和也, 加藤嗣未, 遠赤外線ヒ-タを用いたプラスチック加熱・冷却射出成形金型の開発, 2015年精密工学会春季大会講演論文集, 859-860(2015)
52. 村田勝英, 牧野忠彦, ポリプロピレンの熱分解, 日本化学会誌, 1, 192-200(1975)
53. 恩田紘樹, 鈴木崇, 黒岩広樹, 福島祥夫, 小松秀和, ポリブチレンテレフタレート射出成形時のガス焼け防止及びアウトガス量低減の試み, 群馬県立産業技術センター研究報告(2012)
54. 恩田紘樹, 小松秀和, 鈴木崇, 黒岩広樹, 福島祥夫, ガスセンサ-を用いたポリブチレンテレフタレート成形時のガス焼け発生予測に関する研究, 群馬県立産業技術センター研究報告(2013)
55. 寺澤章裕, 山田博之, 阿部治, 西村通喜, プラスチック射出成形におけるガス成分付着による外観不良対策の研究(第1報), 山梨県富士工業技術センター-研究報告, 47-52(2011)
56. 胡子大樹, 是澤宏之, 檜原弘之, 射出成形金型の成形中のガス排出に関する研究, 2018年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 241-242(2018)
57. 一柳高時, 中裕之, 剣持加津衛, 樹脂射出成形の研究(第1報 リブにおける熱的局部過収縮現象の実験的研究, 日本機械学会論文集, 53(485), 148 -152(1987)
58. 佐藤和人, 和田卓也, 山部昌, 複雑形状射出成形品に生じるそり発生メカニズムに関する研究, 成形加工, 18(8), 593-599(2006)
59. 松岡孝明, 高畠淳, 井上良徳, 高橋秀郎, 射出成形充填・保圧・冷却過程における樹脂流動挙動のシミュレ-ション, 高分子論文集, 48(3), 137 -144 (1991)
60. 中野亮, 坂場克哉, 澤田聡, 結城高志, 須賀康雄, 3次元射出成形CAE システムの開発, 成形加工, 15(8), 550-555(2003)
61. 長尾毅, 水谷篤, 石井郁, 徳毛一晃, 寿原雅也, 小船義人, 射出成形による超薄肉インストルメントパネル表皮の開発, 成形加工, 26(11), 525-527(2014)

62. 大西駿介, 乾正知, 梅津信幸, プラスチック成型品のヒケ形状の可視化, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 629-630
63. 秋元英郎, 微細射出発泡成形の技術動向, 成形加工, 25(9), 406-410(2013)
64. 遊佐敦, 山本智史, 後藤英人, 高圧装置を用いない発泡射出成形技術の開発, 30(6), 234-238(2018)
65. 須田高史, 無塗装プラスチックにおける質感向上に関する基礎的研究, 千葉大学審査学位論文(2015)
66. 米原牧子, 樹野淳也, 中村一美, 竹原伸, 自動車内装部品におけるシボ加工面の表面性状が光沢度と色に及ぼす影響, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, 3, 73-77(2012)
67. 石見浩之, Yew Wei Leong, 濱田泰以, 低圧射出成形品における表面品質へのキャビティ/コア型温度差, 成形加工, 22(7), 385-389(2010)
68. 川村誠, 加藤龍彦, 太田久司, 市川二郎, 通気性金型材ポ-セラックスIIの特性とその応用例, 電気製鋼, 64(3), 210-218(1993)
69. 加藤龍彦, 西川和之, 通気性金属型材「ポ-セラックスII」の射出成形への適用, 成形加工, 5(3), 177-182(1993)
70. 黒田英夫, 下平勝義, 射出成形ウェルドラインの定量化と成形要因の定量評価, 成形加工, 2(2), 159-165(1990)
71. 泊 清隆:九州大学博士論文(19915)
72. 濱田泰以, 前川善一郎, 堀野恒雄, 泊清隆, 四辻晃, 伊丹正郎, 李貴, 短繊維強化熱可塑性樹脂の射出成形品の強度に及ぼすウェルドラインの影響, 高分子論文集, 44(9), 649- 656 (1987)
73. 泊清隆, 原田敏彦, 濱田泰以, 前川善一郎, 李美恵, 繊維強化ポリプロピレン射出成形平板のウェルドライン特性, 材料, 41(465), 808-814 (1992)
74. 納土賢悟, リオンユ-ウェイ, 山田和志, 濱田泰以, 射出プレス成形における成形品ウェルドラインの評価, 材料, 23(1), 56-62(2011)
75. 福島祥夫, 須田高史, 茂木淳志, 菱田智大, 村田泰彦, 射出成形型内のコアピン駆動によるウェルド部強度改善に関する研究, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 861-862(2015)
76. 福島祥夫, 須田高史, 茂木淳志, 菱田智大, 村田泰彦, 射出成形型内のコアピン駆動による円筒部品ウェルド部強度改善に関する研究, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 363-364(2015)

77. 梅村俊和, Leong Yew Wei, 須田高史, 濱田泰以, ポリカ-ボネ-ト/ABSブレンド射出成形品のウェルドラインの性質に及ぼすポリカ-ボネ-トオリゴマ-の影響, 成形加工, 20(6), 362-367(2008)
78. 泊清隆, 原田敏彦, 前川善一郎, 濱田泰以, FTIRによる熱可塑性樹脂射出成形品のウェルドライン分子配向構造の解析, 高分子論文集, 49(7), 591-600(1992)
79. 大岡進, 高田公太郎, 城所勝己, 土佐隆廣, 小宮山真司, 浅沼正実, ウェルドライン形状の決定因子検討, 高分子論文集, 53(15), 339-344(1996)
80. 山田浩二, 泊清隆, 原田敏彦, 濱田泰, 並走流ウェルドラインの表面V溝形状に関する形態学的研究, 成形加工, 14(2), 742-748(2002)
81. 米山猛, 阿部論, 宮丸充, 金属光造形金型によるウェルド低減と熱風予熱効果, 精密工学会誌, 77(10), 955-959(2011)
82. 山田浩二, 村田泰彦, ウェルドライン生成現象と抑止技術, 成形加工, 20(10), 715-719(2008)
83. 大和田 茂, 横井 秀俊, 射出成形におけるウェルド部後方のフロ-マ-ク生成現象の解析, 成形加工, 30(2), 87(2015)
84. 斉藤卓志, 佐藤勲, 上杉憲治, 半田浩一, 射出成形品の邪魔ピンまわりに生じるウェルドの発現機構に関する研究, 成形加工, 12 (15), 325-331 (2000)
85. 横井秀俊, 超高速射出成形現象の可視化・計測技術, 生産研究, 59(6), 483-491(2007)
86. 村田泰彦, 宮地智章, 横井秀俊, 超高速射出成形におけるウェルドライン生成および消失過程の可視化解析, 成形加工, 19(1), 41-47(2007)
87. 横井秀俊, 村田泰彦, 岡克典, 渡辺広三, ガラスインサ-ト金型によるウェルドライン生成および消失過程の解析成形加工, 9(4), 290-298(1991)
88. 瀬戸雅宏, 田中宏明, 山部昌, 射出成形品のウェルドライン形状に与える射出成形中のフロ-フロント形状の影響, 成形加工, 27(15), 481-488(2015)
89. 東川芳晃, 特集 長持ち研究会, CAEを用いた樹脂射出成品の品質向上-ウェルドライン生成現象の予測と対策, マテリアルライフ学会誌, 27(1), 2-12 (2015)
90. Tham Nguyen-Chung, Flow analysis of the weld line formation during injection on mold filling of thermoplastics, Rheol Acta , 43: 240-245(2004)
91. Azieatul Azrin Dzulkipia, M. Azuddina, Study of the Effects of Injection Molding Parameter on Weld Line, FormationProcedia Enginnering, 184, 663-672 (2017)

92. 野村孝夫, 西尾武純, 佐藤寛樹, 佐野博成, ポリプロピレン/エチレンプロピレンゴム系ポリマ-ブレンドの力学的特性とモルフォロジ-の関係, 高分子論文集, 50(1), 19-25(1993)
93. 永田員也, 日笠茂樹, 西勝志, 岩路仁, EPDMブレンドポリプロピレン/タルク複合材料の耐衝撃性に及ぼすポリエチレン-ポリアクリレートブロックコポリマ-の添加効果, 日本ゴム協会, 79(5), 267-270(2006)
94. 高原忠良, 古橋洋, 前田秀典, 井ノ山達也, 小山清人, タルク・ゴムを含有するポリプロピレン射出成形品における成形変形の検討-成形条件がコ-ナ倒れに及ぼす影響-, 成形加工, 20(3), 193-200(2008)
95. 高原忠良, 小山清人, タルク・ゴムを含有するポリプロピレン射出成形品におけるゴム含有量の角部閉じ変形への影響反り変形現象と抑止技術, 成形加工, 21(5), 280-286(2009)
96. 高原忠良, 古橋洋, 荒井毅, 石畝学, 反り変形現象と抑止技術, 成形加工, 20(10), 724-732(2008)
97. Journal of Polymer Engineering Shinichi Kuroda , Atsushi Mizutani and Hiroshi Ito, Influence of Talc and Rubber Contents on Surface Replication of Polypropylene Injection Molding Application to Automotive Plastics, 39(3), 300-308 (2018)
98. Polymer Engineering & Science Shinichi Kuroda , Atsushi Mizutani and Hiroshi Ito, Effect of Talc Size on Surface Roughness and Glossiness of Polypropylene Injection Molding Application to Automotive Plastics, 60(1), 132-139 (2020)
99. 黒田真一, 自動車用ポリプロピレンの射出成形における表面微細転写性に関する基礎研究, 山形大学学位論文(2018)

第2章 ウェルドライン直下に発生する表面隆起

2.1 緒言

本研究の第2章では、まず、射出成形におけるPP複合材料に含有するフィラーが影響する外観品質について調査した。Fig. 2-1のウェルドライン部におけるフィラーの配向と収縮に示すように、樹脂合流部において、ゴムとタルクが板厚方向に配向するため、一般部と比べて線膨張係数が小さくなり、冷却固化後の寸法変化が小さく、隆起となることがわかっている¹⁾。

自動車のバンパー等の外装部品は、成形後に塗装されるので、樹脂の合流部付近において、ウェルドラインのV字溝には塗料が入り込むため平滑になるはずが、塗装後も線傷に見える外観不具合は発生しており解決されていない。過去の研究でも、隆起と塗装後の外観品質課題の関係性や金型内の樹脂流動挙動におけるゴムやタルクが流動過程や外観への影響の研究事例は無い。

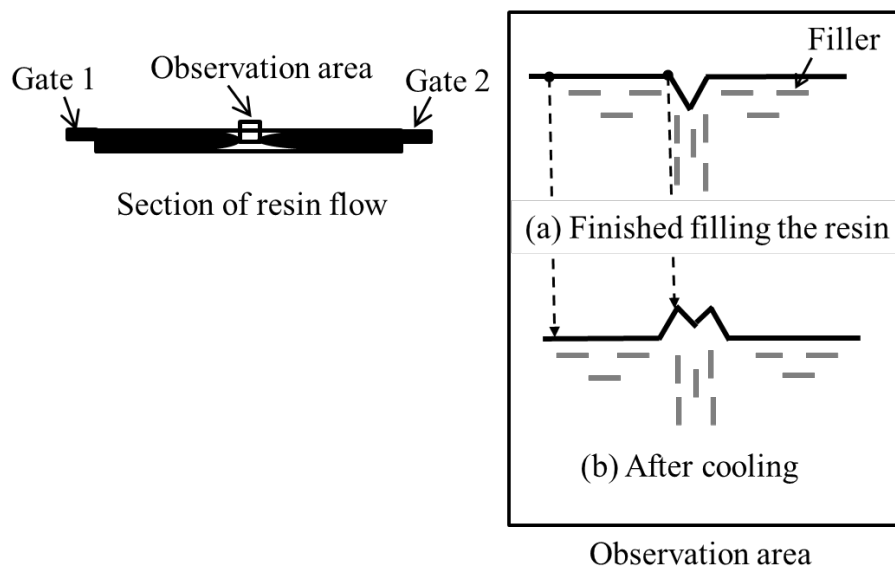


Fig. 2-1 Effect of filler orientation and shrinkage at weld line ¹⁾

はじめに、溶融した樹脂が金型に流動する際にゴム粒子が変形して、材料の線膨張が変化²⁾することから、樹脂の金型内流動におけるゴムの伸長と配向を評価し、流動過程において、スキン層部と板厚中心部のSEM画像を2値化してゴム粒子のアスペクト比(ゴム粒子の長軸と短軸の比)の定量測定³⁾を行った。樹脂合流部の外観品質について、線キズを検出するために表面に照明の鏡像を映し⁴⁾、成形後と塗装後の外観品質を比較した。更に、隆起の差異を明確化するために、レーザー顕微鏡を用いて、塗装前と塗装後の表面形状を計測した。次に、金型温度がゴムの伸長と配向に与える影響を評価した。また、ABS樹脂を射出成形するとせん断力流動によりゴムが変形し、配向した状態で冷却固化される⁵⁾。また、強度などに異方性が生じることが報告されており、強度からゴムの配向予測が報告されている⁶⁻⁷⁾。射出成形において、金型から受ける熱影響がスキン層とコア層で異なる⁸⁾ことから、金型壁面で早く固化し流動が停止するスキン層と板厚中心部では流動が続くコア層があり⁹⁾、スキン層の厚さは射出速度により変化すると報告されている¹⁰⁾。金型温度が高いと転写性が向上し表面が良好になる¹¹⁾ことやABS中のゴムでも160℃ではゴムの伸長が緩和して球形に近い状態になる観察報告¹²⁾があり、金型温度は隆起に大きく影響するものと考えられる。材料であるゴムの物性に着目すると、自動車バンパー材料に含有しているゴムはエチレン系であり、PPに海島構造的にゴムが分散し、一部はPP非晶部が溶解して一体となっている。ゴムの粘度の違いによりゴムの変形や分散が異なること¹³⁾も報告されている。

外観品質には、金型温度が大きく影響するが、金型内で樹脂を冷却してから、取り出さないとヒケやソリが問題¹⁶⁾となり、寸法精度も外気温度の影響を受け安定しない。急速加熱・冷却工法¹⁷⁾⁻¹⁹⁾が研究報告されているが、部品サイズが大きく複雑な金型構造であるバンパーやインストメントパネルの金型には適用が困難である。そこで、金

型にコーティングすることでスキン層部の冷却を遅延させることで、スキン層部の流動状態が変化し、ゴムの伸長と配向に影響すると考え評価した。金型へのコーティングに関しては、被膜の最初の検証は1970年代にフィルムを貼って行った研究²⁰⁾が最初である。その後、岩見らは、電解ニッケル(Ni)や二酸化ケイ素(SiO₂)などを金型に被覆し、転写性が向上したことを報告している²¹⁾。また、ブロー成形機において断熱金型被覆を用いて板厚均一化の改善が報告されている²²⁾。このように、断熱効果により金型表層付近を流動する樹脂の固化を遅らせる方法が提案²³⁾⁻²⁶⁾されているが、ウェルドラインのV字溝の改善や転写性への効果検証の報告が多く、ゴムやタルクの配向が引き起こす隆起へのメカニズム解明と抑制方策の検討が必要である。

2.2 実験条件

2.2.1 使用材料

自動車のバンパー等に一般的に使用されているPPにゴムとタルクを配合した材料を使用した。PPはNBX03HRS(日本ポリプロ社製), ゴムは強度が異なる2種類とし, ゴムAはENGAGE8200(ダウ・ケミカル社製), ゴムBはVERSIFY3300(ダウ・ケミカル社製), タルクはMAT-725TP(白石カルシウム社製)を用いた。Table 2-1にゴムの物性を示し, Table 2-2にPP, ゴムとタルクのそれぞれの配合比率を示す。

Table 2-1 Physical characteristics of rubber

Rubber	Rubber A	Rubber B
Tensile strength (MPa)	5.7	19.6
Tension elongation (%)	1100	750
Durometer hardness		
Shore A	66	85
Shore D	17	31

Table 2-2 Mixing ratio of PP, rubber and talc

No.	PP (wt %)	Rubber (wt %)	Talc (wt %)
1	100	-	-
2	80	20	-
3	80	-	20
4	60	20	20

2.2.2 成形品形状

実際の金型内の樹脂の合流状態を考慮し、樹脂が対向に合流する場合と平行に合流する場合を再現するために、2つの成形品形状を用いて実験を行った。Fig. 2-2では、300x80mmの平板形状で、厚みは2.5mmとし、対向した2ヶ所にバルブゲートを配置した。また、Fig. 2-3に示すように、1000x500mmの平板形状で、厚さを2.5mmとし、3ヶ所のバルブゲートを等間隔に配置し、任意のタイミングで樹脂を金型内に注入できるようにした。

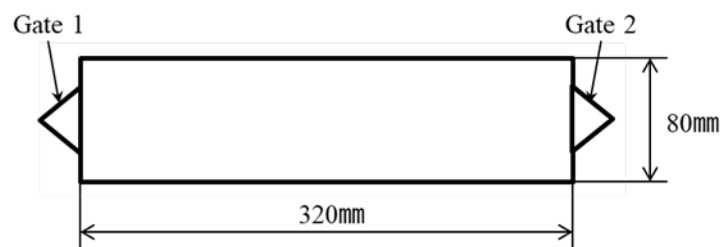


Fig. 2-2 Shape of test piece with 2 gates in the opposite direction

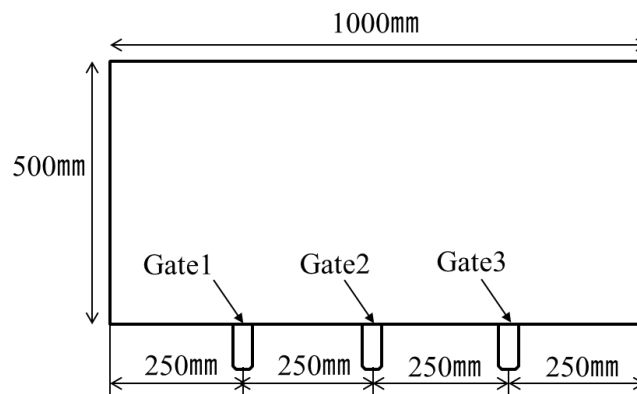


Fig. 2-3 Shape of large test piece with 3 gates

2.2.3 成形及び塗装条件

成形及び塗装条件をTable 2-3に示す. Fig.2-2の大物部品を想定した成形品形状にはFig. 2-4(a)に示した大型射出成形機3000ton(芝浦機械株式会社製 型式ED3000W-325AL)を使用し, 3ヶ所のゲートからの任意のタイミングで樹脂の注入を可能としており, 条件1は全てのゲートを同時に開放し, 条件2はGate 2の開放タイミングを条件1よりも0.1s遅く, 条件3はGate 2の開放タイミングを条件1よりも0.2s遅くした.

また, Fig. 2-4(b)の小型の成形品形状には小型射出成形機110ton(日精樹脂株式会社製 型式FN-2000)を用いて, Gate 1とGate 2の開放タイミングは同時とした. その他の成形条件および塗装条件をTable 2-3に示す. 金型温度は30°Cから120°Cまで変化させて実験を行い, 樹脂温度は210°Cとした.

Table 2-3 Conditions of injection molding and painting

Process	Conditions		
Injection molding	Resin temperature (°C)		210
	Die temperature (°C)		30, 80, 100, 120
Painting	Thickness(μm)	Primer	5
		Base	15
		Clear	30
	Baking	Temperature (°C)	80
		Time (min)	20



(a) Large injection molding machine ²⁷⁾ (b) Small injection molding machine ²⁸⁾

Fig. 2-4 Injection machines

2.2.4 樹脂流動面の金型表面処理

Fig. 2-3の小型の成形品形状を用いて, Fig. 2-5に示した金型構造で, コア側を入れ子構造とし, Table 2-4に示した3種類のコーティングを施工した. Fig. 2-6にコーティングした入れ子金型を示す. Table 2-4の条件②と条件③は, 直径20 μm 程度の微細な粒状のセラミックスを金型の表面に吹き付けて焼成して金型表面に固定する棚澤八光社製のコーティング材料を用いて, 2つコーティング厚み(300 μm , 700 μm)を用意した. また, 条件④は大森クローム工業社製のクロムメッキを施工した.

Table 2-4 Conditions of coating

Coating condition number	①	②	③	④
With or without coating	Without	With		
Coating material	—	Ceramic	Ceramic	Chromium
Coating thickness (μm)	—	300	700	2
Process	—	Spraying baking	Spraying baking	Plating

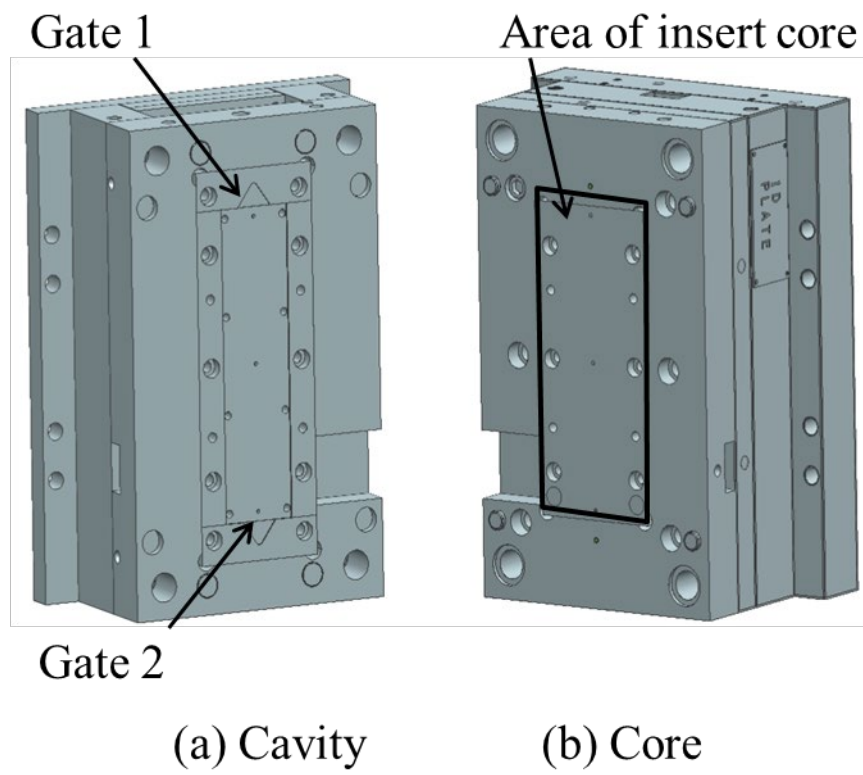


Fig. 2-5 Experimental die

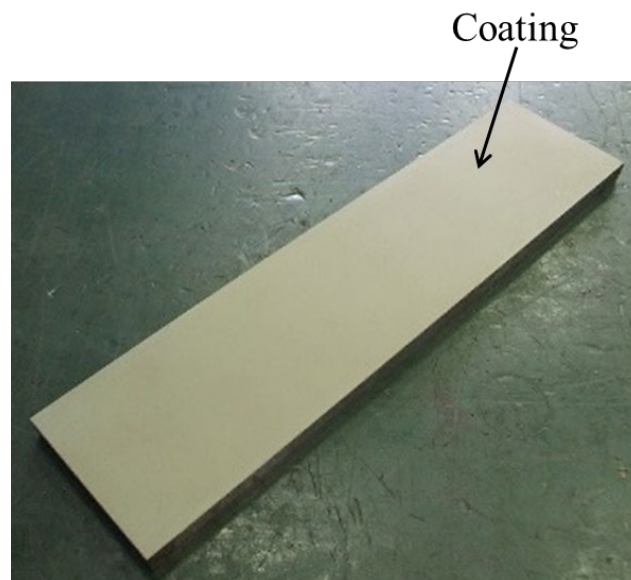


Fig. 2-6 Insert core with coating

2.2.5 表面形状の計測と断面観察

成形品のウェルドライン近傍の隆起形状は、Fig. 2-7に示した走査型レーザー顕微鏡(オリンパス株式会社製 OLS4100)を用いて計測した。また、隆起部の断面観察は、ウルトラミクロノーム(LEICA社製 EM UC7)で凍結切削した後に、イオンエッチングによる金属オスミウム(Os)極薄膜コーティングによる導電処理を実施し、走査型電子顕微鏡SEM(日本電子株式会社製 JSM-6340F)で観察した。

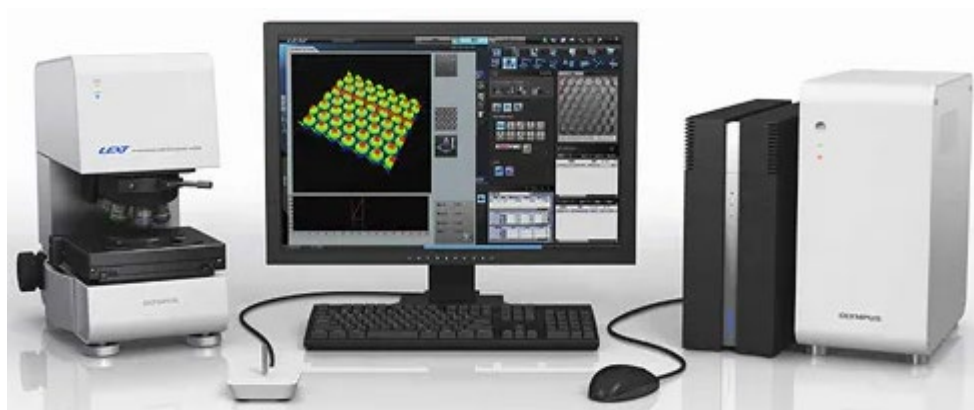


Fig. 2-7 Scanning laser scanning microscope

2.2.6 ゴム伸長度の計測

Fig. 2-8(a)に示すSEMによる断面画像を、画像処理装置(三谷商事株式会社 WinROOF2018)により2値化処理した後, Fig.2-8(b)で示すゴムの長さLと幅Wの比率を求め, ゴムの伸長度を計測した. W/Lが1.0に近いと円形, W/Lが0に近いとゴムが細長く伸びた状態を示す.

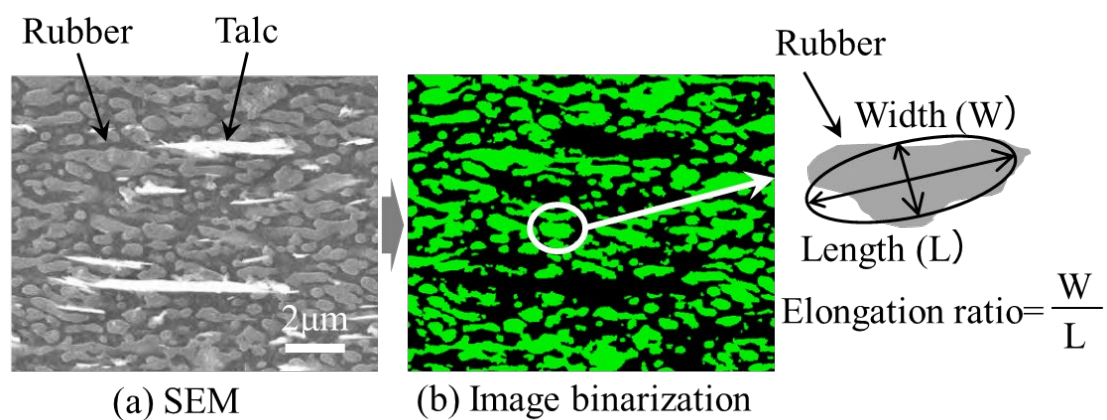
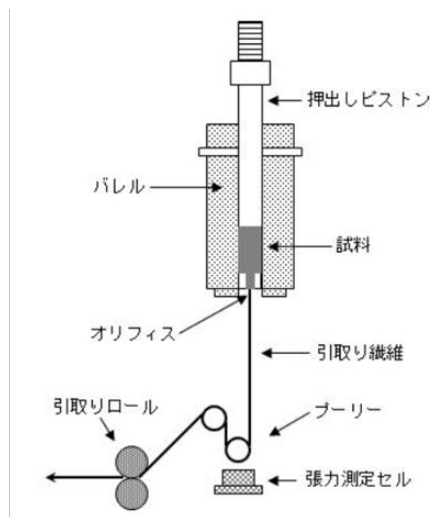


Fig. 2-8 Image binarization of rubber orientation

2.2.7 溶融粘度測定

Fig. 2-9に示すように、キャピラリーレオメーターによるベース材料(PP・ゴム・タルク)とゴムの溶融せん断粘度を計測した。材料を90℃, 1時間以上予備乾燥し, キャピラリーレオメーター(東洋精機製作所製 キャピログラフ1D)を用いて計測した。キャピラリーの条件は, 長さ $L=40\text{mm}$, 直径 $D=1.0\text{mm}$, 流入角 $=180^\circ$ で, 測定温度は 210℃とした。溶融粘度測定は, せん断速度($\dot{\gamma}_a$)に依存したせん断粘度(η_a)とせん断応力(τ_a)を計測した²⁹⁾。



(a) Equipment appearance (b) Measurement method

Fig. 2-9 Capillary rheometer ²⁹⁾

2.3 実験結果及び考察

2.3.1 金型内流動におけるゴムの伸長度と配向

Fig. 2-2に示す成形品のショートショット成形を行い、フローフロントと合流後の断面におけるゴムとタルクの配向について検討した。タルクとゴムAを含有した材料を用い、配合比率はTable 2-2のNo.4とした。成形条件は、3ヶ所同時にゲートを開放する条件1とし、金型温度は30℃である。Fig. 2-10に成形途中および成形完了後の成形品におけるSEM観察部位を示す。部位①と部位②はフローフロントが通過後の金型壁面近傍と板厚中心、部位③と部位④はフローフロントの表層付近と中心部である。部位⑤と部位⑥は金型内の樹脂が合流した後の金型壁面近傍と板厚中心である。

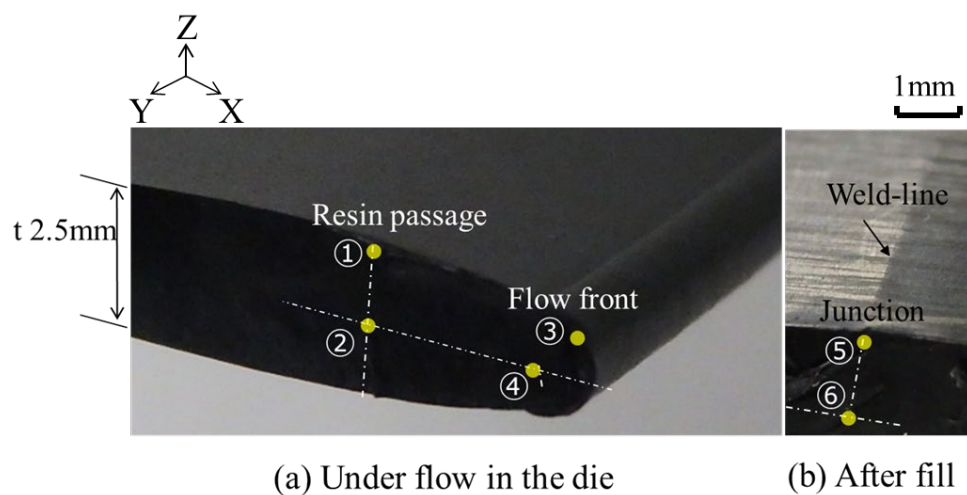


Fig. 2-10 Locations of observation by SEM

Fig. 2-11にフローフロントが通過した部位①と部位②の伸長度の分布を示す．部位①の伸長度は0.1付近に多く発生し、ゴムは細長くX方向に配向している．部位②のゴムは、部位①よりも伸長しておらずSEM観察からも変形が少ないことがわかる．

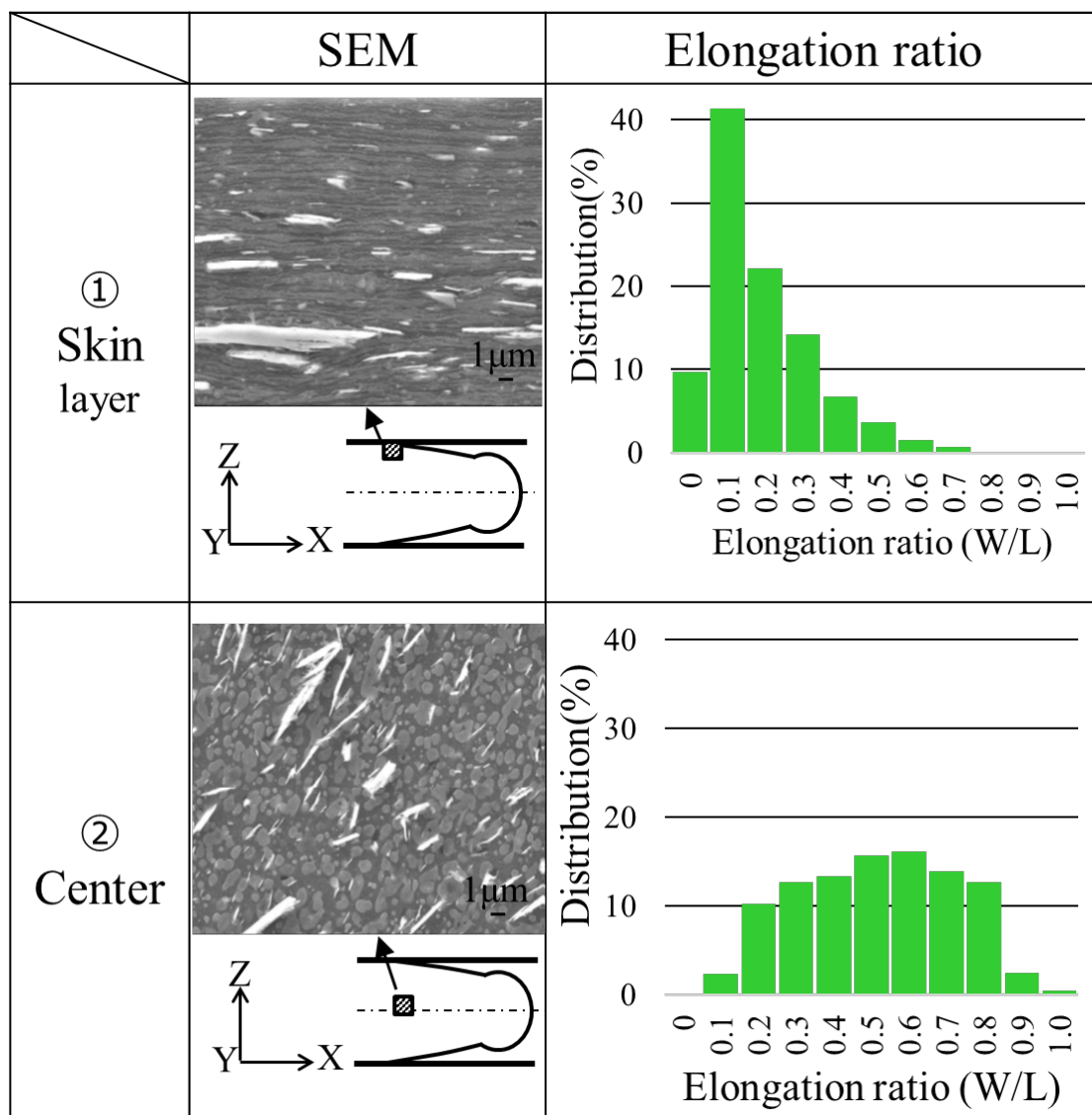


Fig. 2-11 Cross section and elongation ratio of rubber at ① and ②

フローフロントの流れに沿った部位③と部位④の計測結果をFig. 2-12に示す．部位③と部位④のSEM観察では，フローフロントでの樹脂の流れに沿って断面観察した．部位③のゴムの伸長は部位④と比較して，やや大きいが，部位④のゴムの伸長は部位②と同様に小さい．

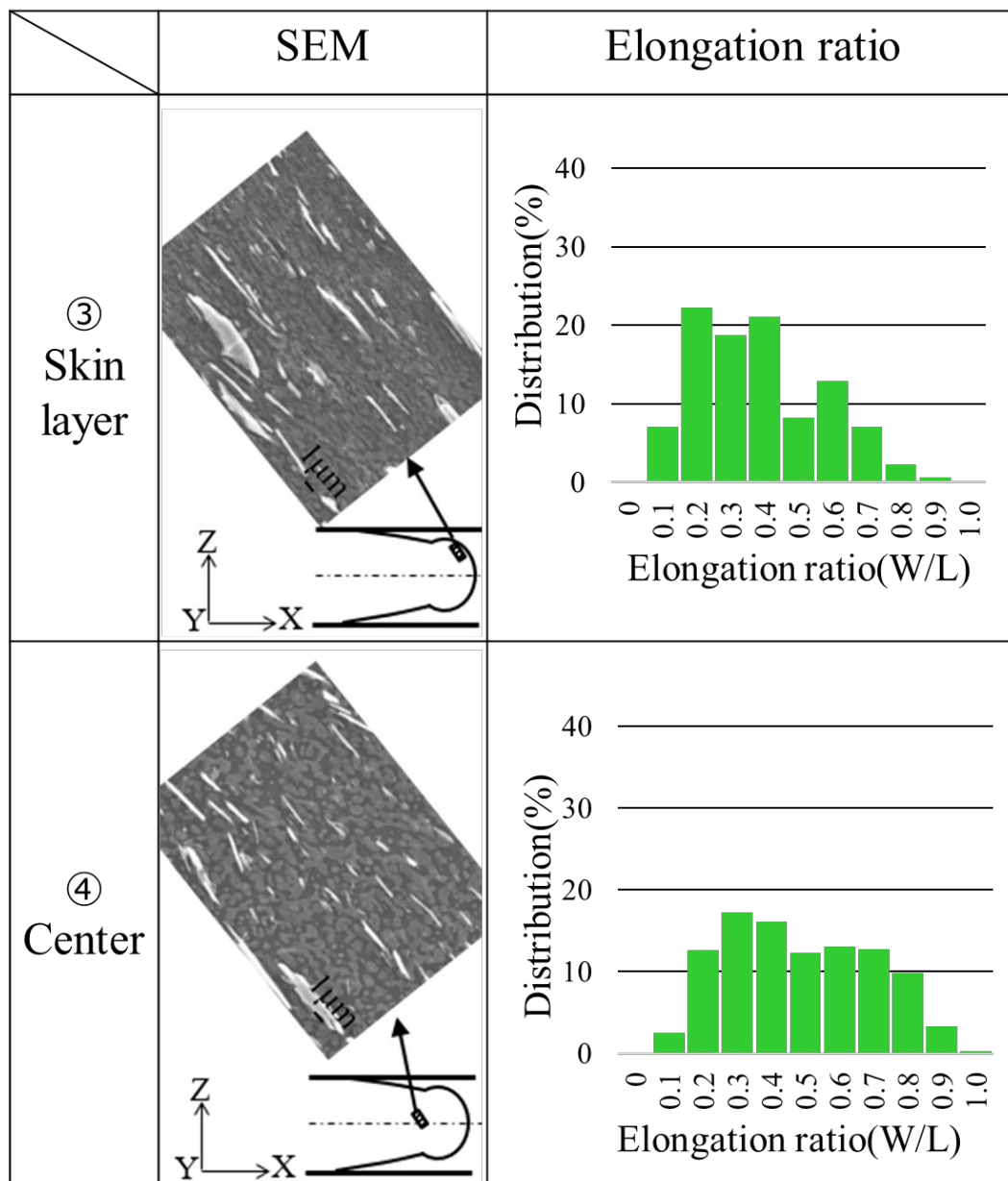


Fig. 2-12 Cross section and elongation ratio of rubber at ③ and ④

樹脂の合流後における部位⑤と部位⑥の計測結果をFig. 2-13に示す．部位⑤では、ゴムの伸長度は0.1付近に多く分布し、ゴムは細長くZ方向に配向している．しかし、部位⑥では、タルクはほぼZ方向に配向しているが、ゴムのZ方向への配向は弱く、ゴムの伸長度は同じ板厚中心である部位②と部位④に近い．

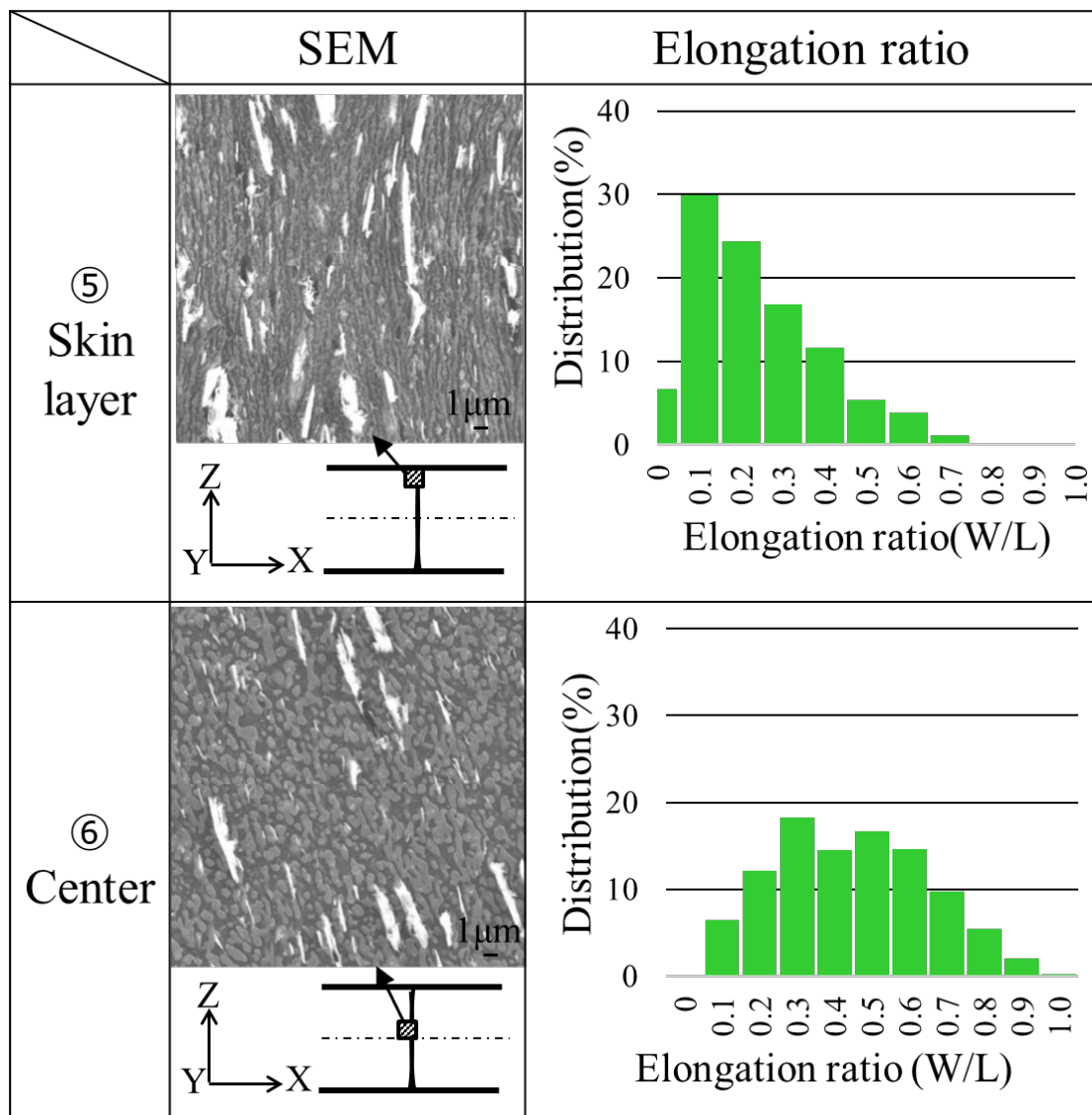


Fig. 2-13 Cross section and elongation ratio of rubber at ⑤ and ⑥

以上の結果より、板厚中心部では、ゴムの配向は弱く合流後も大きな伸長はしていない。一方、金型壁面近傍では、ファウンテンフローに沿って流動したゴムはフローフロント部で徐々に伸長を開始し、金型壁面付近に達したところにスキン層と流動層間で発生するせん断応力によりゴムが伸長し、そのままX方向に配向して固化する。一方、合流部ではフローフロント同士が合流することで伸長したゴムはX方向からZ方向に配向が変化し固化する。

合流部のZ方向にスキン層から中心部までの4ヶ所のゴムの伸長度をFig. 2-14に示す。表層の部位Aと表層から0.25mmの部位Bのゴムの伸長度は大きいですが、中心部に近い表層から0.75mmの部位Cと中心部Dの伸長度は小さかった。このことから、スキン層部でのゴムのZ方向への配向及び伸長が隆起に影響すると考えられる。

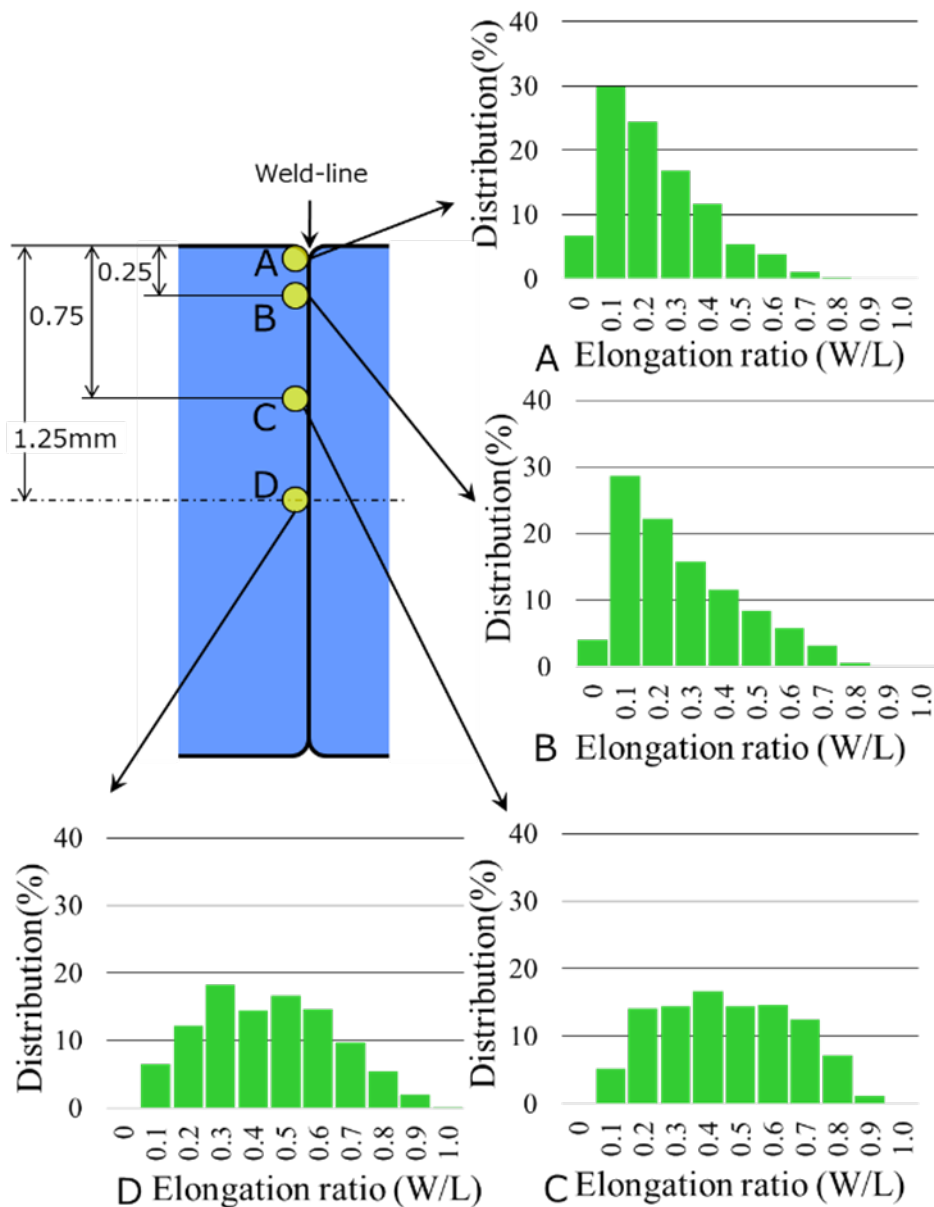


Fig. 2-14 Elongation ration of rubber at confluence

2.3.2 スキン層の厚さが隆起に及ぼす影響

スキン層の厚さと隆起の関係を以下に述べる．タルクとゴムAの含有材を使用し，配合比率はTable 2-2のNo.4とした．金型温度は30℃とした．スキン層の厚さを変化させるためにゲートの開放タイミングを条件1から条件3まで変化させて成形した．Fig. 2-15に合流部のSEM観察を示す．X方向にGate 1とGate 3から流動し，合流付近で，Y方向の紙面手前から奥にGate 2から流入した樹脂が流動する．条件1では合流部のスキン層はほぼ無く，条件2では40 μm ，条件3では65 μm となった．Fig. 2-16に金型表層からゴムの配向が板厚から流動方向に変化するスキン層の厚さと隆起の関係を示す．スキン層と隆起の高さは比例関係であることがわかった．

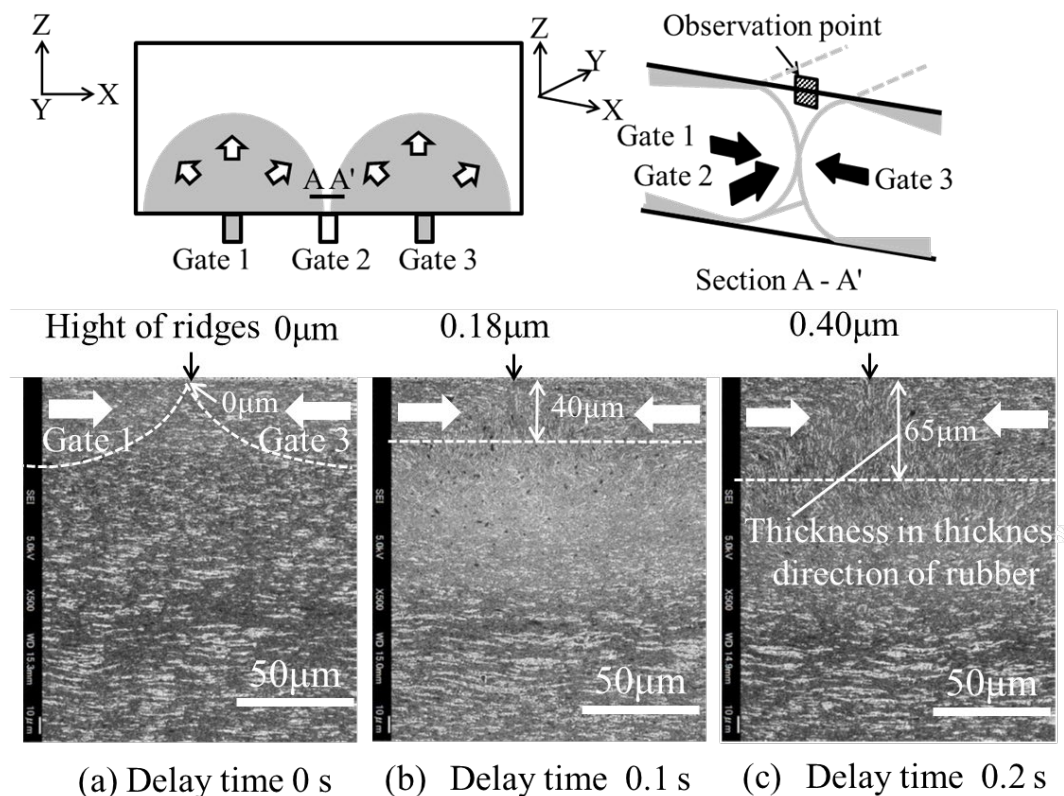


Fig. 2-15 Cross-sectional observation of the skin layer at the confluence

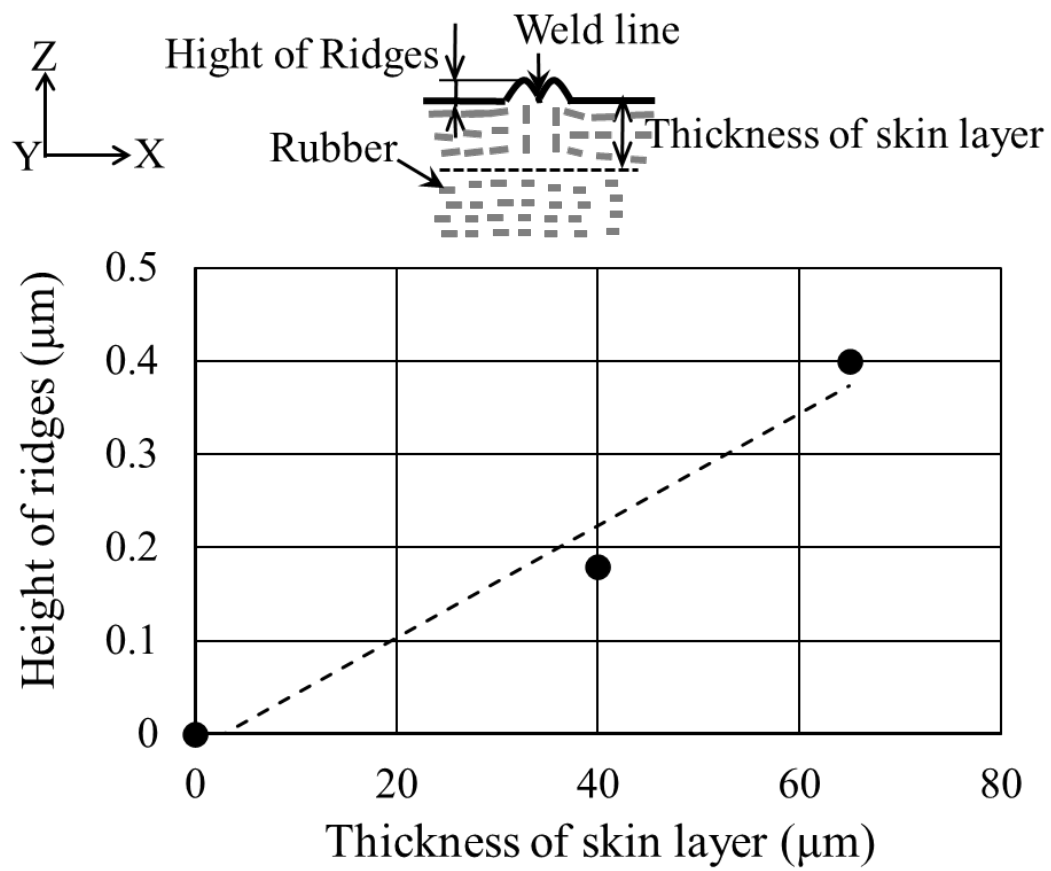


Fig. 2-16 Relationship between skin layer thickness and height of ridges

2.3.3 樹脂の合流部におけるゴムの伸長およびタルクの配向

Fig. 2-1の成形品形状で, PP, タルクとゴムAをTable 2-2のNo.4の比率で混合した材料を用い, 全バルブを同時に開放し, 金型温度は30°Cで成形した. Fig. 2-17に隆起の有無の部位と表面形状を示す. ゲートから樹脂の流入を開始してから最初に合流する部位(a)を対向流動領域とし, 合流後にY方向に樹脂が流動しながら合流する部位(b)を平行流動領域とした. レーザー顕微鏡を用いて, 部位(a)と部位(b)の隆起を計測した結果, 対向流動領域の部位(a)は約0.7 μ mで, 目視で線状の隆起が確認できるが, 平行流動域の部位(b)は0.15 μ mと小さく, 隆起は認識できなかった.

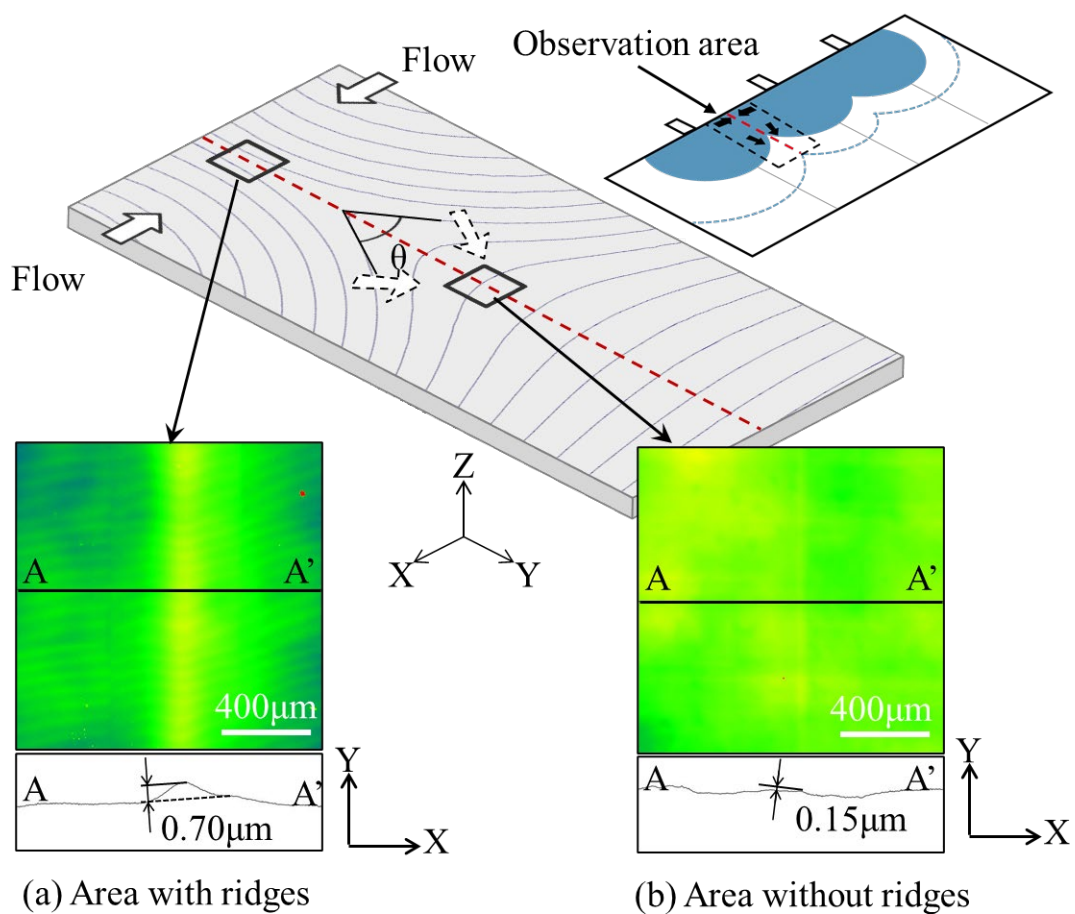


Fig. 2-17 Observation area with and without ridges

次に、部位(a)と部位(b)における、XZ平面とYZ平面の断面のSEM写真をFig. 2-18に示す。対向流動域の部位(a)のXZ平面において、X方向に樹脂が流動し合流する。合流部から離れた場所では、ゴムとタルクはX方向に配向しているが、合流部でZ方向にゴムが伸長し、タルクは配向している。YZ平面でも同様にゴムとタルクはZ方向に配向している。平行流動領域の部位(b)では、Y方向に樹脂が流動しながら合流していく。XZ平面の合流部から離れた部位では、ゴムとタルクは部位(a)と同様にX方向に配向しており、合流部ではタルクはZ方向に配向しているがゴムのZ方向への伸長は弱く、部位(a)と異なる。YZ平面でも、タルクはZ方向に配向しているが、ゴムはY方向に伸長し、部位(a)と部位(b)のYZ平面では明らかにゴムの伸長の大きさに差があることが確認できる。

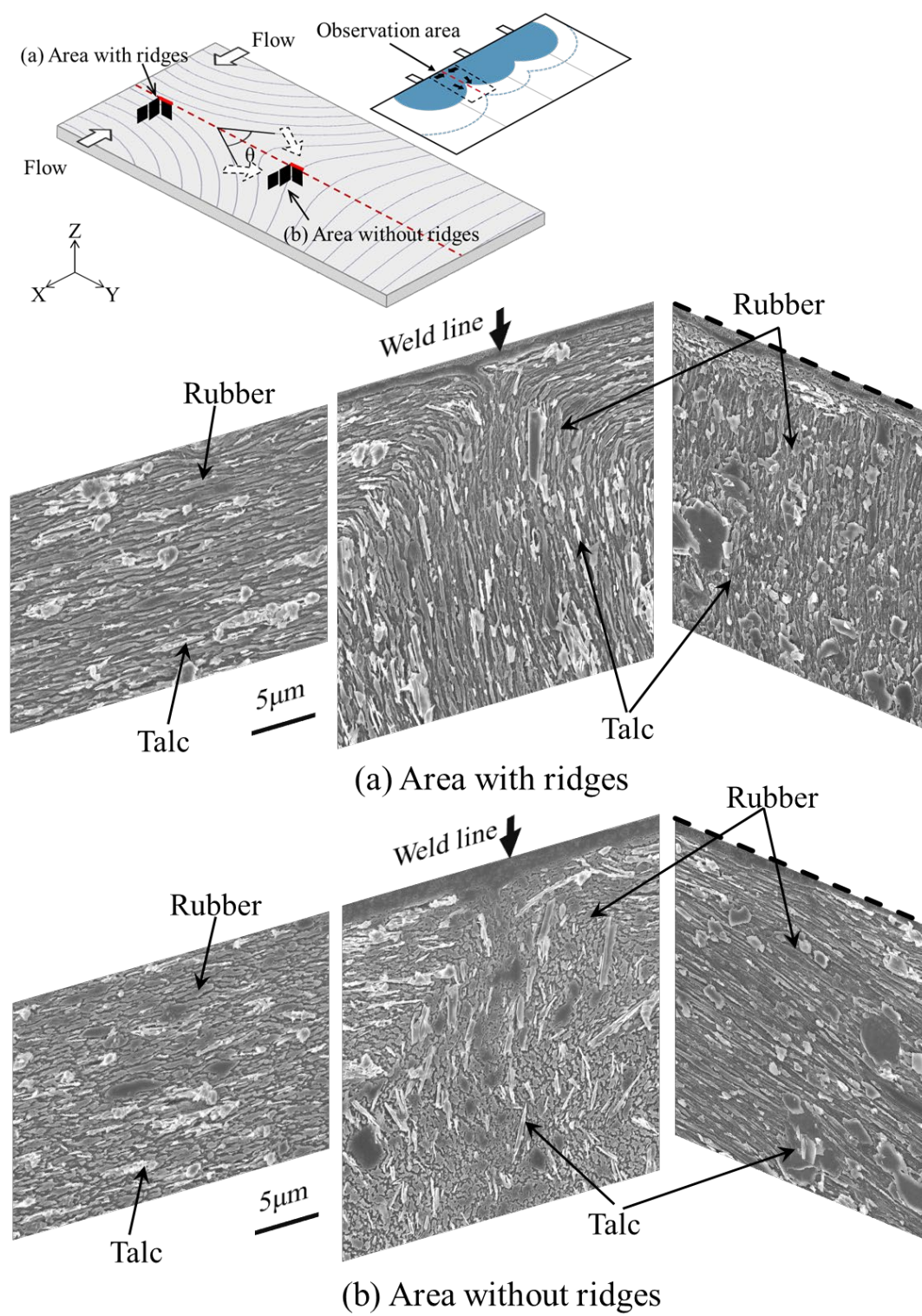


Fig. 2-18 Cross section observation at the areas with and without ridges

樹脂の金型内での流動状態とゴムの伸長方向およびタルクの配向の模式図をFig. 2-19に示す. 対向流動領域の部位(a)では, 板形状のタルクは, それ自体が変形すること無く, 流動に伴ってX方向に配向し, 合流部ではZ方向に配向する. 一方, ゴムは流れにそって伸長しながら流動し, 対向する樹脂のフローフロントの合流部ではタルクと同様にZ方向に伸長する. そして, 平行流動領域の部位(b)では, 部位(a)で合流した後, 流動方向はY方向に変化し, 合流面が増加しつつY方向に流動する. タルクはZ方向に配向したまま合流するが, ゴムは流動方向に伸長することから, 部位(a)では流動方向がX方向であったが, 部位(b)ではY方向になり, Y方向に伸長しながら流動する. このため, 部位(b)の合流部の断面模式図が示すように, Y方向から見るとゴムの形状は合流部付近では円になっており, Z方向への伸長はないと考えられる.

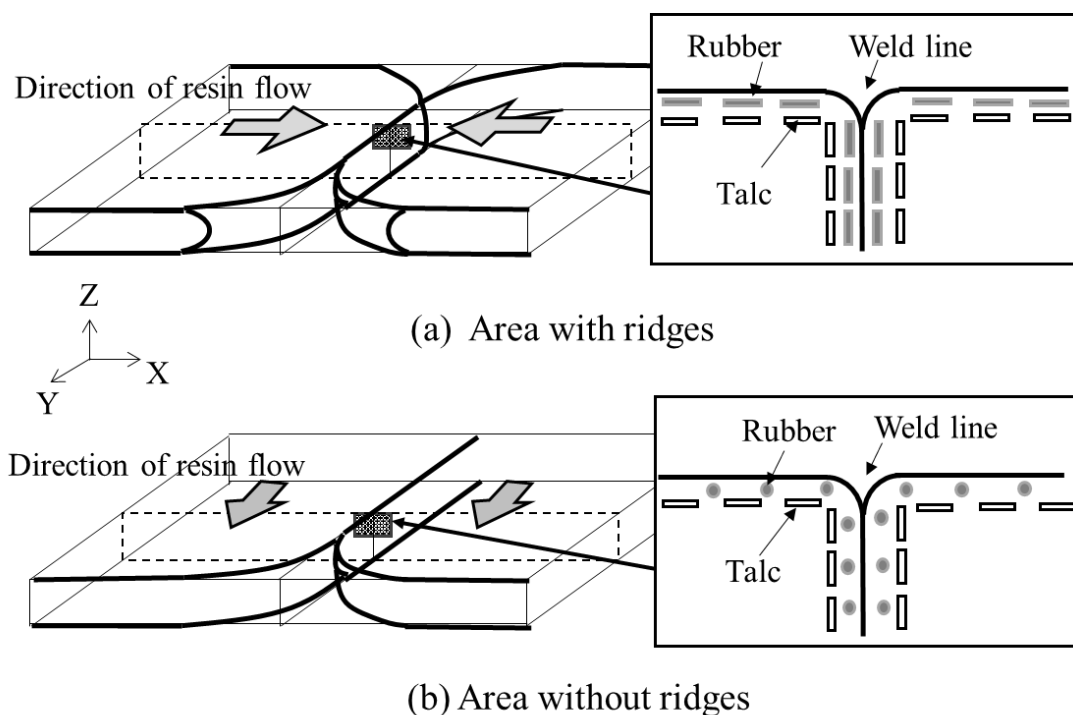


Fig. 2-19 Diagram of rubber and talc orientation at the areas with and without ridges

2.3.4 タルクとゴムの隆起への影響

材料はPP, タルクとゴムAを用い, Table 2-2のNo.4の配合比率とした. 射出成形におけるゲートの開放タイミングは同時の条件1とし, 金型温度は30℃とした. Fig. 2-20に成形品と塗装品の合流部付近の表面状態の写真を示す. 塗装表面に映り込んだ直線の光源を横断する線状の濃淡が確認できる.

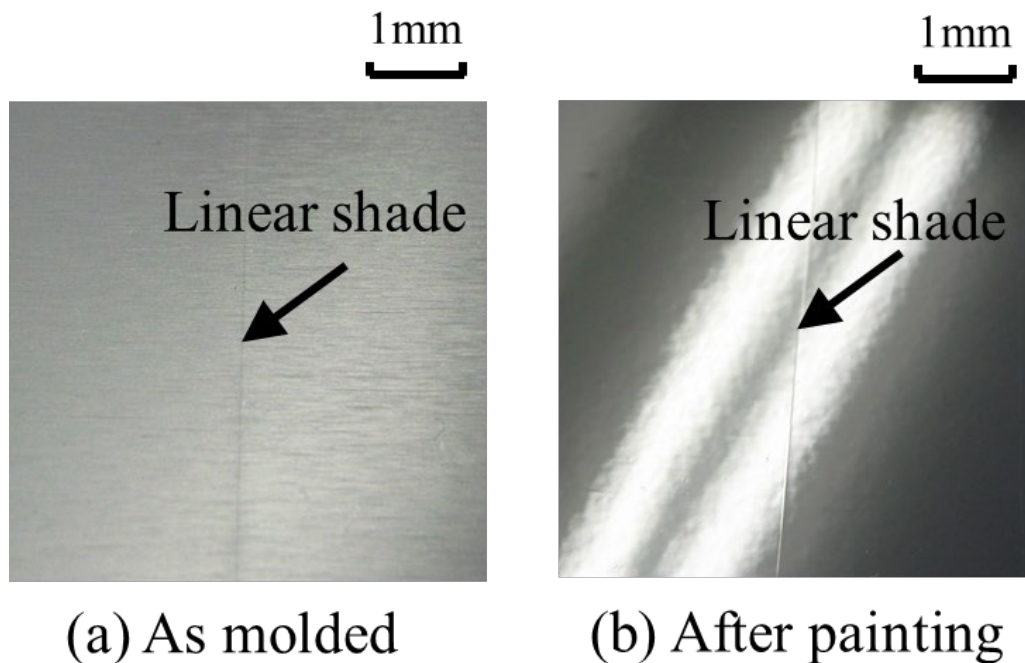


Fig. 2-20 Surface appearance of as molded and after painting specimen

線状の濃淡部位の形状を, Fig. 2-21に示すように成形品表面を走査レーザー顕微鏡により3次元計測した. 線状の濃淡付近では, 隆起が確認でき, 当該部分では光の反射角度が部分的に異なるために濃淡が発生していることがわかる.

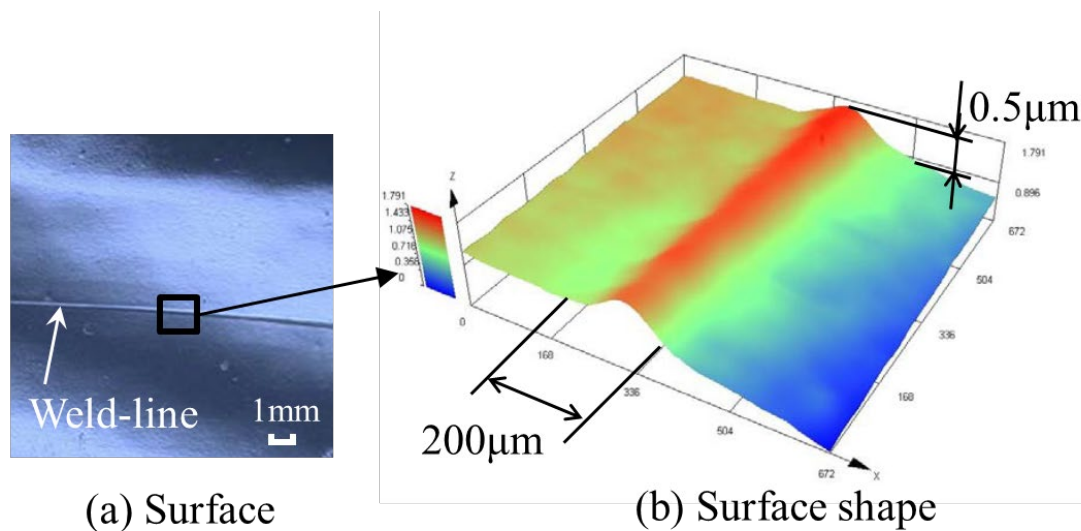


Fig. 2-21 Dimensions of ridges after painting

そこで、隆起が材料に含有するフィラー（ゴムとタルク）に起因して発生していると考え、Table 2-2に示した4つの配合比率の材料を用い、ゴムはゴムAを用いた。Fig. 2-22に合流部の成形後と塗装後の表面形状を示す。上段に成形後、下段に上段の観察範囲（写真の破線部）より広げた塗装後の表面形状を示す。成形後の表面形状には、全ての材料で深さ約 $1\mu\text{m}$ のV溝が確認できるが、塗装後はV溝に塗料が入りこみV溝は消失している。観察範囲を広げた塗装品の隆起の高さについて、タルクを含有する材料は $0.76\mu\text{m}$ 、ゴムを含有する材料は $0.93\mu\text{m}$ 、ゴムとタルクの両方を含有する材料は $1.14\mu\text{m}$ となった。一方、PPのみの材料は隆起を確認できなかった。以上から、タルクとゴムが隆起に影響し、ゴムを含有する材料のほうがタルクを含有する材料よりも隆起の高さが大きいことを確認できた。

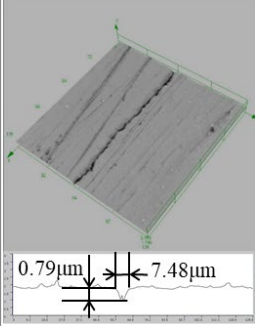
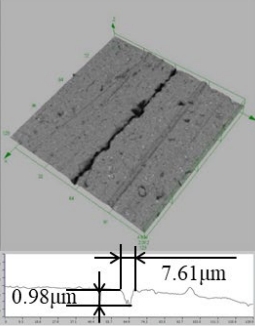
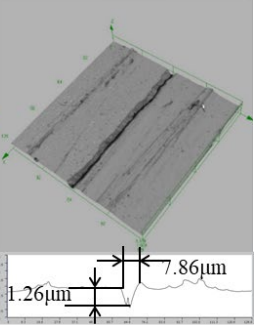
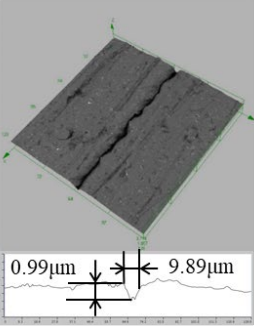
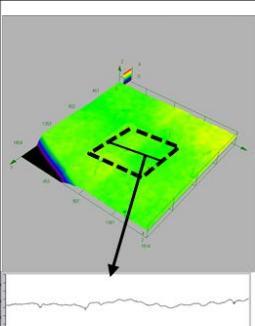
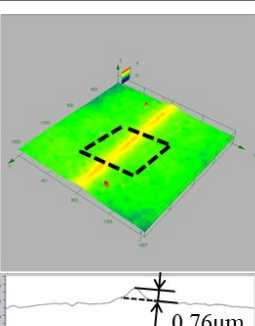
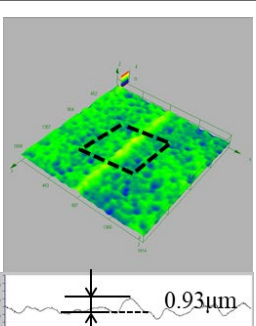
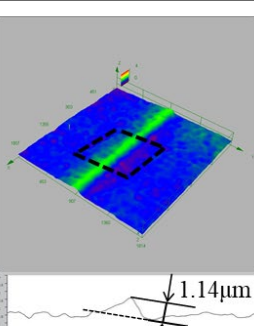
No	1	2	3	4
Material	PP	PP / Talc	PP/ Rubber	PP/ Rubber/ Talc
As molded				
After painting				

Fig. 2-22 Comparison of ridges on materials difference

2.3.5 隆起の発生メカニズム

ウェルドラインに沿った表面の隆起の発生メカニズムについて、Fig. 2-23の模式図を示す。金型内の樹脂の合流前のFig. 2-23(a)が示すように、ファウンテンフローから流出したゴムがフローフロントで伸長を開始しながら金型壁面付近のスキン層と流動層の間に発生するせん断力によりX方向のゴムの伸長が増大する。次にFig. 2-23(b)に示すように、合流直後に合流面に沿ってゴムがZ方向に配向する。そしてFig. 2-23(c)に示すように、樹脂内の圧力P1とP2が同じ場合、スキン層からコア層までゴムがZ方向に伸長し、隙間を埋めながら最終充填される。合流部から離れた部位ではゴムがX方向に配向し、合流部はゴムがZ方向に伸長し固化するため、一般部と合流部でZ方向の収縮率に差が生じ隆起となる。また、Fig. 2-23(d)は実際の成形の合流部で起こり得る圧力P1と圧力P2に差がある場合である。合流直後、高い圧力P1側のコア層は圧力P2側に潜り込む。このため、合流部のコア層のゴムはZ方向に伸長はしないが、スキン層ではFig. 2-23(c)と同様にZ方向へ伸長し固化する。従って、均一な圧力で合流した場合より隆起は小さいが、スキン層のゴムのZ方向の伸長は生じるため隆起は発生する。以上のことから、隆起を抑制するためには、スキン層のゴムの伸長を小さくすることが重要だと考えられる。

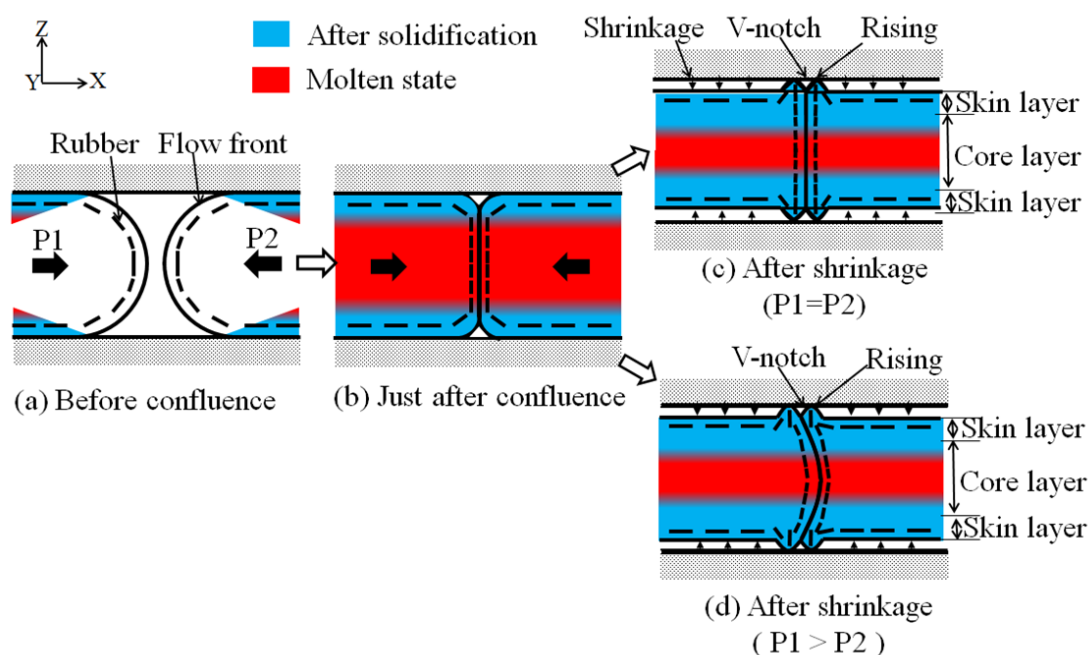


Fig. 2-23 Mechanism of the ridges

2.3.6 金型温度が隆起に及ぼす影響

タルクとゴムAを用いて、配合比率はTable 2-2のNo.4とした。ゲートの開放タイミングは3カ所の同時開放の条件1とした。金型温度は30, 80, 100, 120°Cと変化させた。金型温度と隆起高さ、および各金型温度におけるスキン層の断面状態の関係をFig. 2-24に示す。隆起高さは、通常成形における金型温度30°Cの時に、最も大きく、温度の上昇に伴って減少し、100および120°Cでは隆起がほぼなかった。各温度におけるスキン層のゴムの伸長を観察すると30°Cでは細長く伸長しているが、100°C, 120°Cでは、円に近い形状となっている。金型温度が高いと樹脂温度が上昇し、スキン層とコア層のせん断力が緩和され、ゴムの伸長が小さくなったと考えられる。

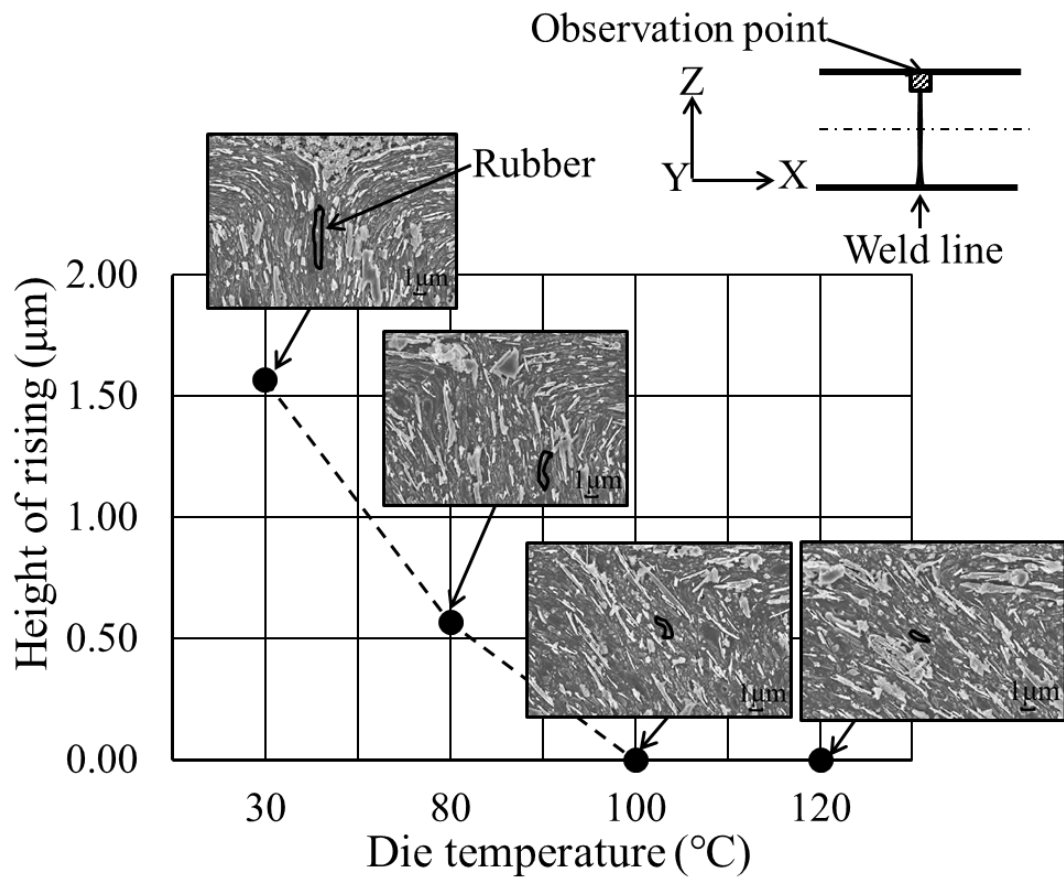


Fig. 2-24 Relationship between ridges height and die temperature with cross section observation

2.3.7 ゴムの熔融せん断粘度が隆起に及ぼす影響

熔融せん断粘度が異なるゴムA、ゴムB及びタルクを含有する材料を使用し、金型のバルブゲートは同時に開放する条件1とし、金型温度は30°Cで成形した。成形品の樹脂の合流部のゴムの伸長度及びスキン層における断面のSEM写真をFig. 2-25に示す。ゴムAはZ方向に、高い伸長度を示しており、隆起高さは0.58 μm であった。一方、ゴムBは、楕円に近い形状で分散し、伸長度はゴムAと比較して小さく、隆起高さは0.19 μm と小さい。

次に、PPとゴムの粘度差が小さいことによってゴムの伸長性が異なる¹⁴⁻¹⁵⁾ことから、せん断速度と熔融せん断粘度およびせん断応力の関係を調査した。Fig. 2-26にせん断速度とせん断粘度の関係、また、Fig. 2-27にせん断速度とせん断応力の関係を示す。各特性の計測には、キャピロレオメーター(東洋精機製作所製、キャピログラフ1D)を用いた。キャピラリーの条件は、長さを40mm、直径を1mm、および、流入角=180°とした。樹脂温度は、Table 3に示した射出成形時の温度(210°C)とした。

Fig. 2-26より、せん断速度が小さいと、ゴムAよりもゴムBの方が粘度は高いが、せん断速度が大きくなると逆転し、ゴムBの粘度はゴムAよりも小なる。また、Fig. 2-27より、せん断速度が小さいとゴムAよりもゴムBのせん断応力は大きく、せん断速度が増加するとゴムAの方が大きくなる。このことから、せん断速度が小さい領域では、ゴムBは粘度が高く、変形のためにゴムAよりも大きなせん断力が必要であることがわかる。

以上から、射出成形中の金型内の樹脂は、合流するまでは、せん断速度は大きいですが、合流後は小さくなる。このため、合流後のせん断速度が小さい領域で、ゴムBは、ゴムAよりも熔融せん断粘度およびせん断応力が高いので、ゴムBはゴムAよりも伸長せず、隆起高さが小さくなったと考えられる。

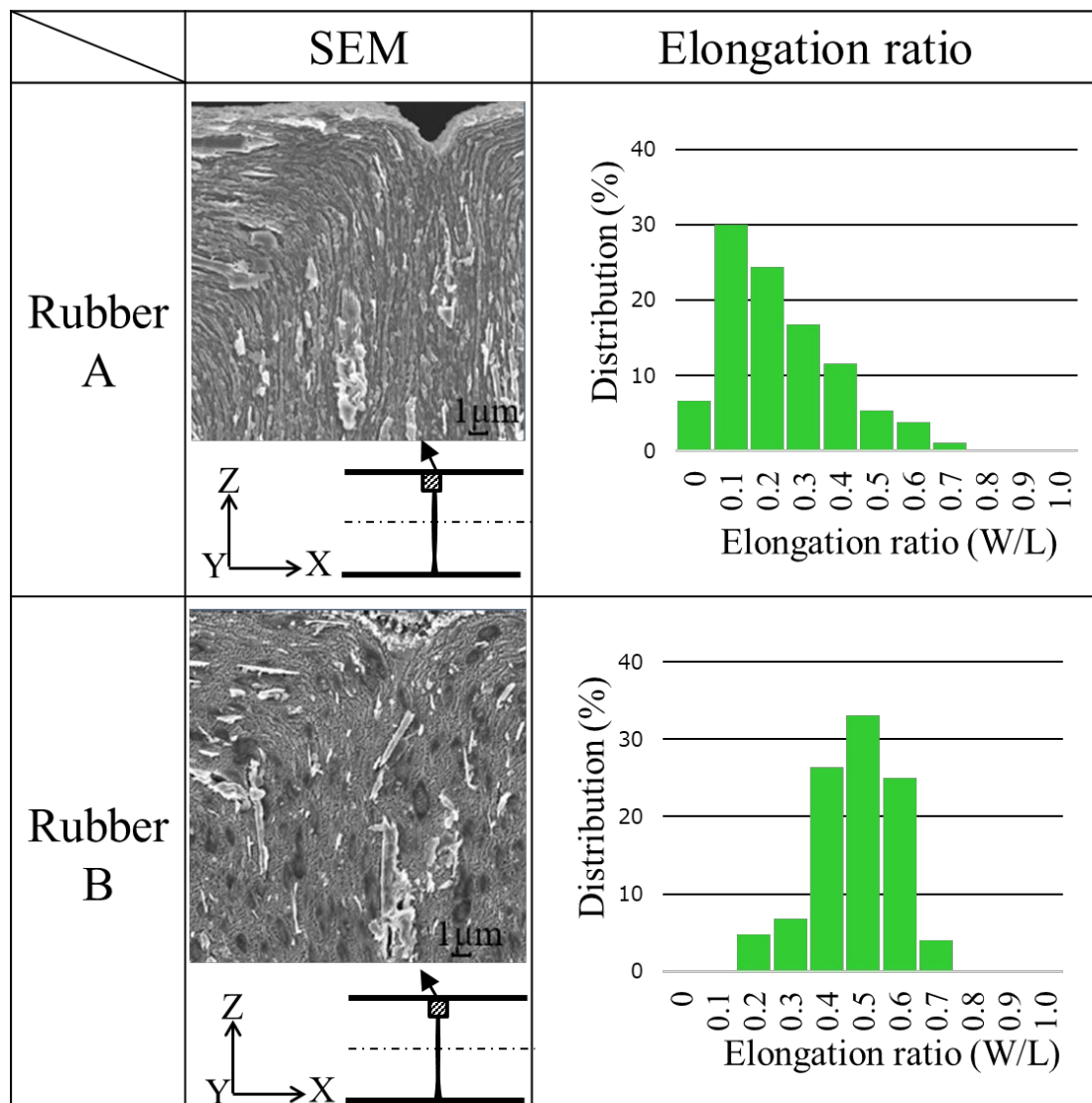


Fig. 2-25 Cross section and elongation ratio of different rubber

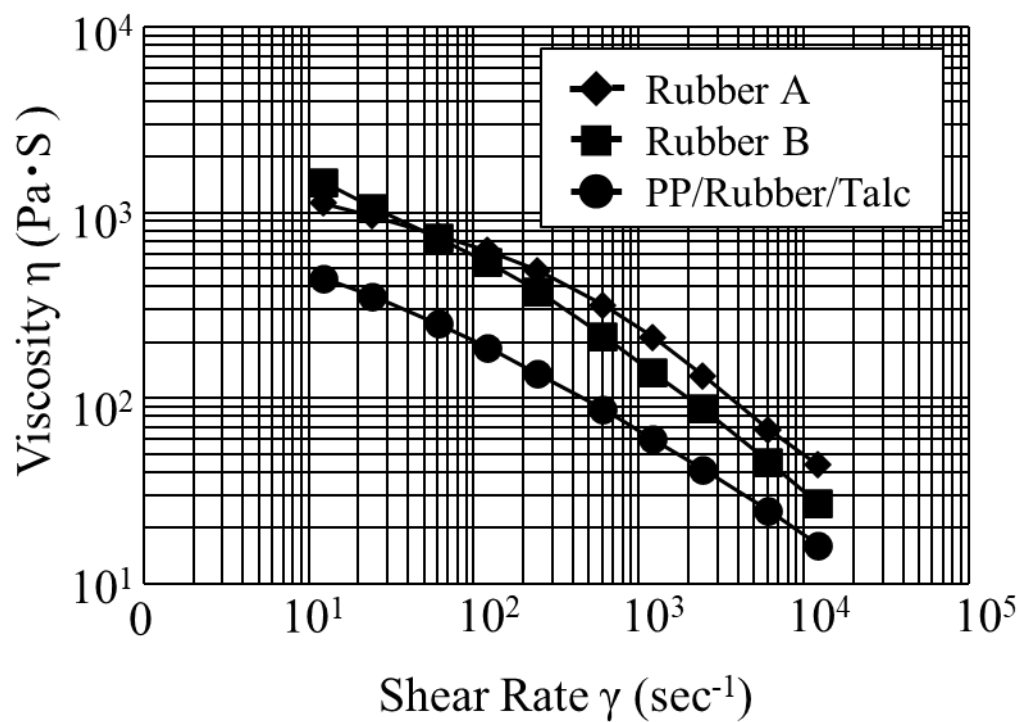


Fig. 2-26 Measurement of viscosity and share rate at 210°C

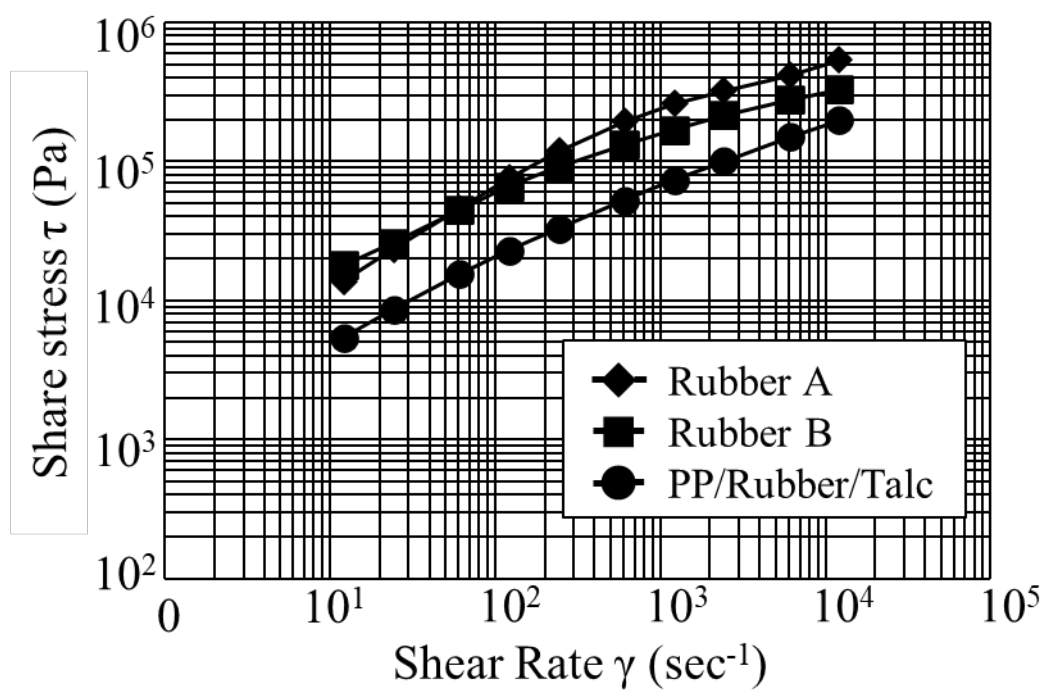


Fig. 2-27 Measurement of shear stress and shear rate at 210°C

2.3.8 金型コーティングと隆起への影響

熔融樹脂が流動する際に接する金型表面の状態によって、樹脂の流動が変化することでゴムの伸長と配向にも影響すると考え、金型コーティングによる隆起への影響を調査した。Table 2-4に示したコーティングを施工し、合流部を中心に100mmの範囲をカメラで撮影した結果をFig. 2-28に示す。目視では条件①から条件④の差がわかりにくい、ウェルドラインの合流部に発生する線傷が目立つ順番に順位をつけると、条件④クロムメッキ、条件①コーティング無し、条件②セラミック300 μ m、条件③セラミック700 μ mの順位となった。

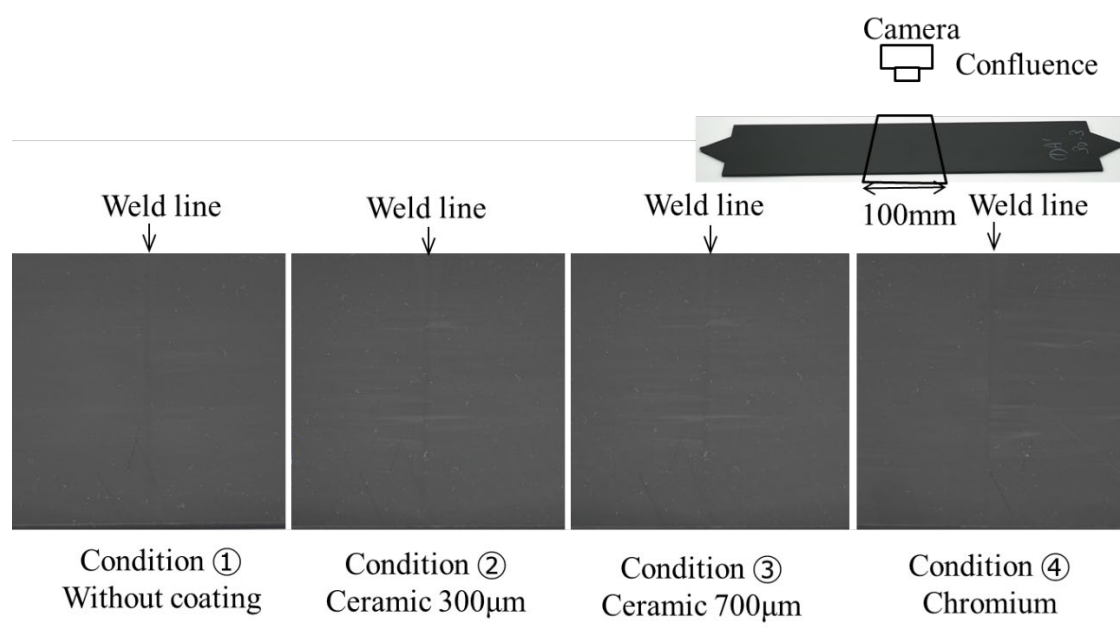


Fig. 2-28 Comparison of surface quality depending on coating condition

次に、詳細の外観品質について、レーザー顕微鏡を用いて観察を行った結果をFig. 2-29に示す。条件①と条件④は中央に赤い縦の線が確認できる。色の濃い部分は凹になっていることを示し、条件④メッキの腑尾が、条件①コーティング無よりも凹は小さい。条件②セラミック300 μm と条件③セラミック700 μm では、中央の縦の線は確認できない。しかし、条件②と条件③は横方向に筋があり、セラミックをコーティングし焼結した後に、表面をサンディングで磨いており、磨きにより筋状の凹になっていることがわかった。

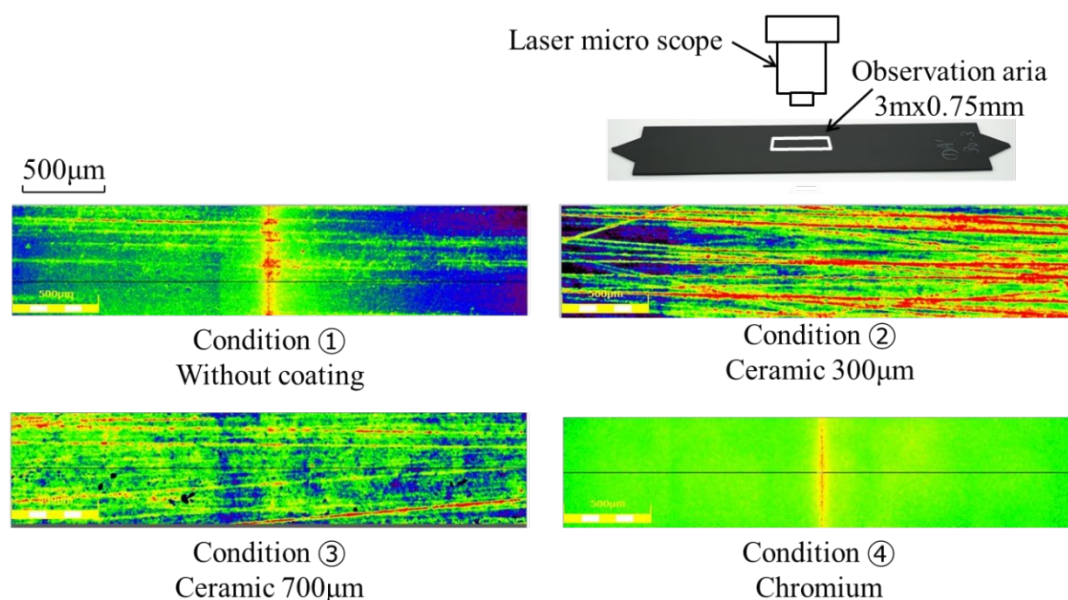


Fig. 2-29 Observation of surface by laser micro scope

更に、レーザー顕微鏡による断面プロファイルの結果をFig. 2-30に示す。断面測定部位は合流部を中心に約3mmの範囲を観察した。条件①と条件④は、計測部位の中央付近に約1~2 μm の隆起の波形を明確に確認できたが、条件②と条件③のセラコーティングの波形は全体が凹凸となっていた。Fig. 2-29とFig.2-30より、合流部の隆起の高さは、条件①コーティング無しと条件④メッキは、隆起が明確に確認できるが、条件②のセラミックのコーティング300 μm と条件③セラミックのコーティング700 μm は、成形品の表面が粗いために、樹脂合流部部で隆起の波形は確認できなかった。

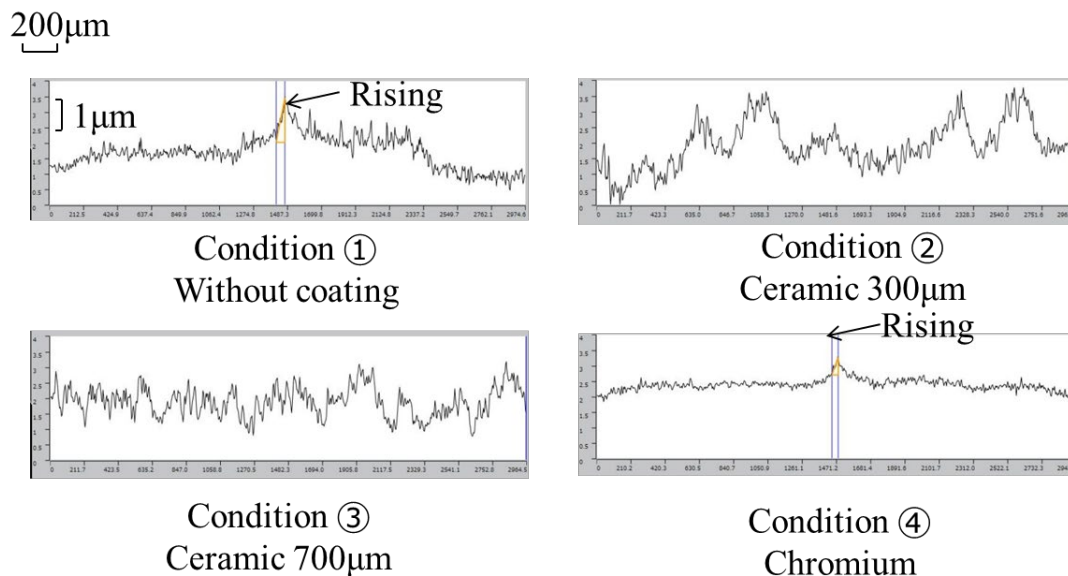


Fig. 2-30 Measurement of surface by laser micro scope

そこで、コーティングの表面粗さを計測した結果をFig. 2-31に示す。条件④メッキのは0.034 μm とほぼ平坦であり、条件①コーティング無しは0.225 μm 、条件②コーティング30 μm は、0.393 μm 、条件③コーティング700 μm は0.615 μm と粗く、そのため成形品の表面は粗く転写されたことがわかった。

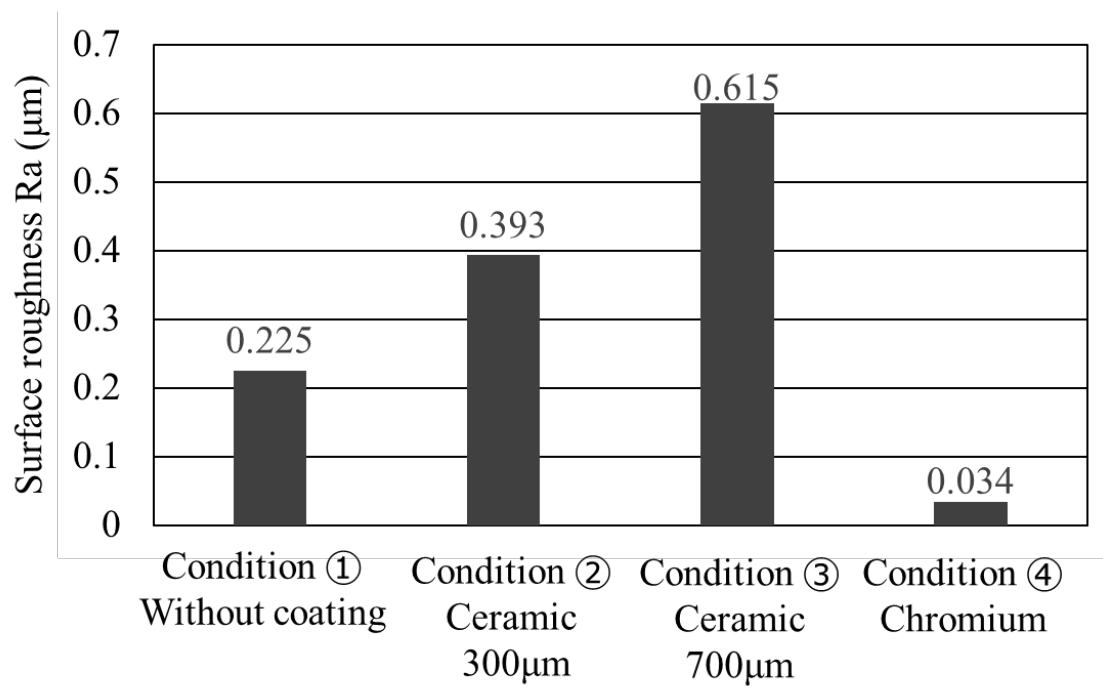


Fig. 2-31 Roughness of the coating surface

次に、金型コーティングが樹脂の冷却に影響すると考え、Fig. 2-32に示すように、金型と同じ材質で5mmの円柱にコーティングを行い、熱電導率を計測した。

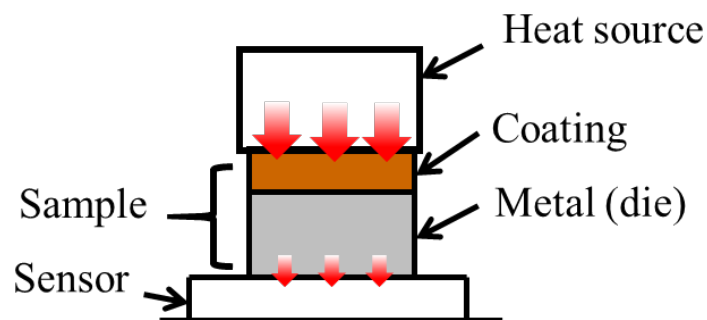


Fig. 2-32 Calculation heat transfer coefficient

Fig. 2-33に各条件の熱電導率の測定した結果を示す。条件①コーティング無しと条件④メッキに対して、条件③と条件④のセラミックコーティングは熱伝導率が低かった。

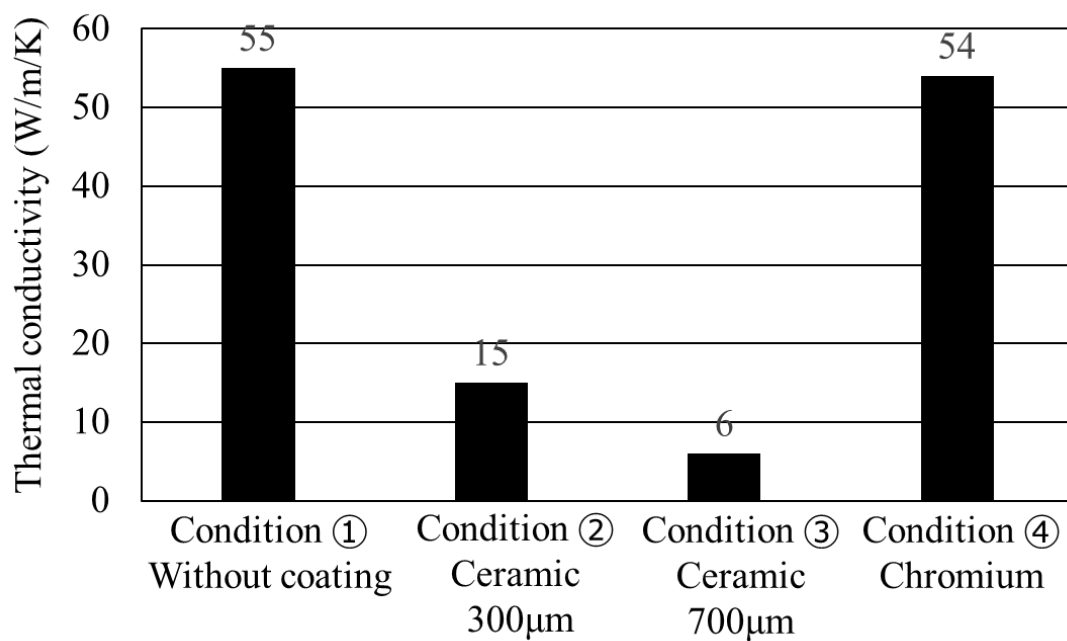
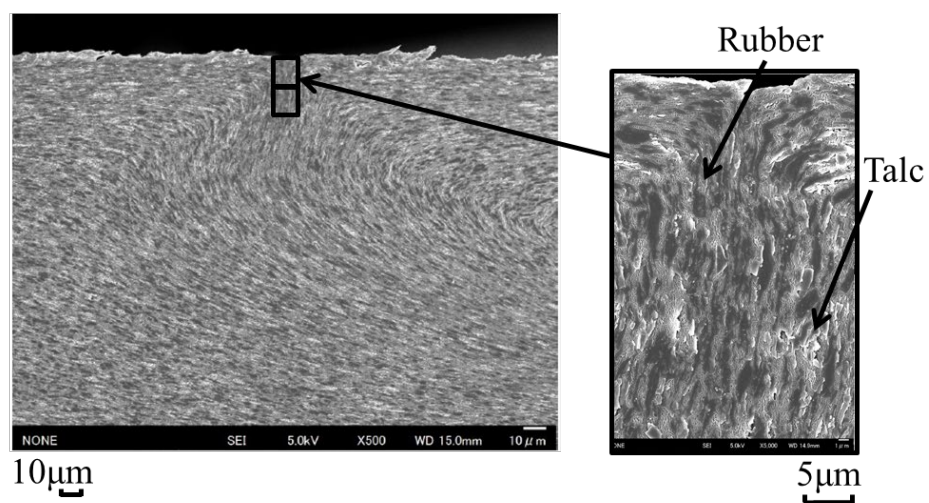
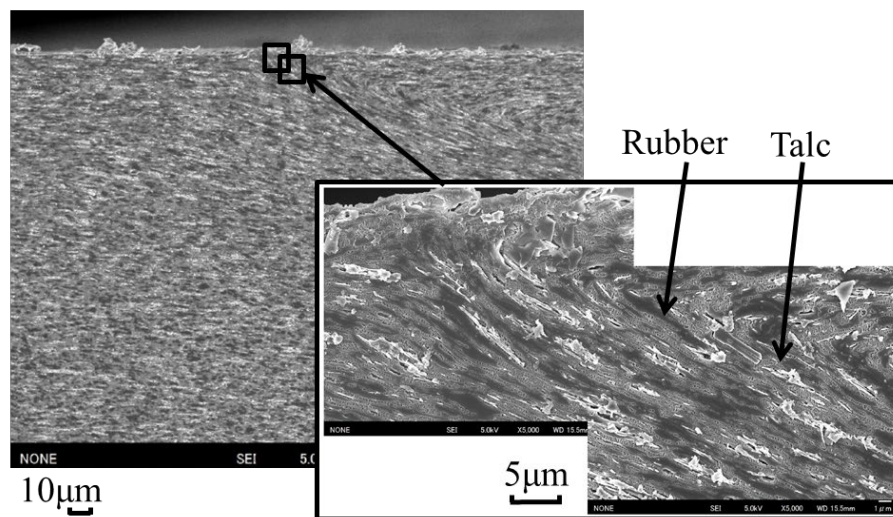


Fig. 2-33 Thermal conductivity by coating

条件①コーティング無しと条件③のコーティング700 μm についての合流部のスキン層部の断面のSEM写真をFig. 2-34に示す. 条件①は板厚方向にゴムもタルクも配向しているが, 条件②では斜め方向に配向している. この結果より, セラミックコーティングにおいては, 熱伝導率が低いことから樹脂が金型に流れた際に表層の冷却が遅くなり流動しやすくなったと考えられる. ただし, 今回の実験では, セラミックのコーティング表面が粗かったため, 表面の粗さに影響する可能性もあり, セラミックコーティングの表層をコーティング無しと同じ粗さにして, 隆起の評価が必要だと考えられる.



Condition ①
Without coating



Condition ③
Ceramic 700μm

Fig. 2-34 Obsevation of filler orientation at skin layer by SEM

2.4 結果と考察

本報告では、ウェルドラインに沿った表面の隆起に対する外観品質について、自動車複合PP材料に含まれるタルクやゴムの影響を検討し、下記の結果が得られた。

- 1) 金型流動中の樹脂内のゴムは板厚中心部では、伸長と配向は小さいが、金型壁面部では、ゴムの伸長は大きく流動方向に、合流部では板厚方向に伸長する。
- 2) スキン層の厚さが大きくなると隆起の高さも大きくなり比例関係にある。
- 3) 成形中の樹脂の金型内における対向流動領域と並行流動領域の隆起について、対向流動領域の合流部で板厚方向にタルクは配向しゴムは伸長するが、平行流動領域では、タルクは板厚方向に配向、ゴムは樹脂の流動方向へ伸長しながら配向するため、平行流動領域より対向流動領域のほうが大きな隆起となる。
- 4) 塗装後に線傷と認識される外観品質欠陥はウェルドラインによるV字溝ではなく、ウェルドラインに沿って発生する隆起が原因である。
- 5) ウェルドラインに沿った隆起の発生メカニズムは、樹脂のスキン層と流動層の間のせん断応力をゴム粒子が受けて樹脂の流動方向に伸長し、合流時にスキン層付近のゴムが板厚方向に伸長しながら配向し固化する。これにより、一般部は合流部よりも収縮率が大きくなり、隆起が発生する。
- 6) 金型温度を高くすることで金型壁面付近の樹脂温度も上昇し、スキン層と流動層の間のゴムに作用するせん断力が小さくなりゴムの伸長は抑制される。
- 7) 樹脂が合流する直前では、せん断速度が低下するため、熔融せん断粘度の高いゴムを用いることにより、ゴムの伸長が小さくなり、合流部での隆起は減少する。
- 8) 金型コーティングにより隆起の高さは変化することが確認できたが、コーティングによる断熱効果が表面の粗さの影響は明確にできていないため検討を継続する。

2.5 結論

第2章の目的である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について、金型内の樹脂の材料流動挙動におけるゴムの伸張と配向に着目し、ゴムは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、冷却固化されるスキン層と樹脂の流動層の間に生じるせん断力により、流動方向にゴムが伸張する。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発生することが明らかになった。また、ゴムの伸張を抑える方法について、熔融せん断粘度が高いゴムを用いると伸張が小さくなり隆起も低減することがわかった。更に、金型表面に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配向が変化することを確認できた。ゴムの物性に着目した隆起の抑制方法は今後の材料設計に、また、金型コーティングは、大型の金型への実用的な適用が期待できると考えられる。

2.6 参考文献

1. 森富悟, 渡辺毅, 神崎進, 自動車用ポリプロピレン複合材料, 住友化学技報, 2010-I, 4-17(2010)
2. 小泉順二, 奥本忠興, 水谷治靖, 七田裕章, ポリプロピレン/エチレンプロピレンゴム混合系の線膨張とモルフォロジ-の関係, 成形加工, 6(19), 697-702
3. Fritch, L., *Plastics Eng.*, 35(5), 68(1979).
4. 脇迫仁, 森勇貴, 光沢のあるプラスチック部品の外観検査, 産業応用工学会論文誌, 1(2), 45-49 (2016).
5. Kato, K., *Polymer*, 9, 225(1968)
6. 横田肇, 浅野秀樹, ABS樹脂成形品の強度と異方性(ゴム粒子の配向状態と異方性の相関), 日本機械学会論文集, 57(543), 168-173(1991)
7. 高亀寿, 浅野秀樹, 宮野靖, ゴム補強系樹脂の強度異方性に及ぼすゴム粒子の配向の影響, 材料, 41(461), 219-224, (1992)
8. 平井恒夫, 片山傳生, 平井三友, 経澤昌, 射出成形におけるスキン層の生成とその影響, 材料, 38(472), 334-340(1992)
9. 藤山光美, ポリプロピレン射出成形物のスキン層の構造, 高分子論文集, 32(7), 411-417(1975)
10. 藤山光美, 木村修吉, ポリプロピレン射出成形物の諸物性に及ぼすスキン層の影響, 高分子論文集, 32(10), 581-590(1975)
11. 村田泰彦, 解説:「射出成形における成形不良現象の解明と対策」特集ウェルドライン生成現象と抑止技術【対策編】, 成形加工, 20(10)720-723(2008)
12. 斎藤鷹逸郎, ABSの伸長特性III.ABSの回復可能なひずみとゴム粒子の変形, 日本レオロジ-学会誌, 10, 135-139(1982)
13. 野村孝夫, 西尾武純, 佐藤寛樹, 佐野博成, ポリプロピレン/エチレンプロピレンゴム系ポリマ-ブレンドの力学的特性とモルフォロジ-の関係, 高分子論文集, 50(1), 19-25(1993)
14. 石川優, 杉本昌隆, 畑田浩一, エチレン-プロピレンゴムをブレンドしたポリプロピレンの組成がタフネスに及ぼす効果, 高分子論文集, 53(1), 8-14(1996)
15. 佐野博成, 松田雅敏, 佐藤寛樹, 野村孝夫, ポリプロピレン/エチレン- α -オレフィン共重合ゴムブレンドにおける高せん断場での相溶解挙動とスピノダル分解による相構造形成過程の観察, 高分子論文集, 56(10), 693-701(1999)

16. 村田泰彦, 阿部友康, 菅野裕樹, 水澤隆行, 鈴木一洋, 石川和彦, 丸山剛史, 射出成形品におけるそり変形と金型温度分布との相関関係検討, 成形加工, 20(10), 769-775(2008)
17. 吉井正樹, 青木正義, 佐藤秀巳, 金田愛三, プラスチック射出成形品の寸法バラツキの要因解析, 高分子論文集, 39(5), 351-358(1982)
18. 村田泰彦, 河口大介, 浅野智, 石田和也, 加藤嗣未, 竹内琢馬, 遠赤外線ヒータを用いた加熱・冷却射出成形金型による箱状プラスチック成形品外観の改善, 精密工学会誌, 83(10), 962-966(2017)
19. 村田泰彦, 河口大介, 竹内琢馬, 石田和也, 加藤嗣未, 遠赤外線ヒータを用いたプラスチック加熱・冷却射出成形金型の開発, 2015年精密工学会春季大会講演論文集, 859-860(2015)
20. Dr. -Ing. G. Menges, Plastverarbeiter, 25.279(1974)
21. 石見浩之, 福岡正義, 斉藤卓志, 濱田泰, 射出成形における“表面転写／裏面ヒケ”現象のメカニズム解明と実用可能性の探求, 成形加工, 23(11), 667-674(2011)
22. 片岡 紘, 梅井勇雄, 加藤巖生, 断熱層被覆金型を用いた合成樹脂の射出成形型表面転写性に与える断熱層の影響-, 成形加工, 9(11), 889-896(1997)
23. 安田和浩: 成形加工, 12(9), 543(2000)
24. 宮下貴之, 廣田晋一, 成形加工, 11, 107(2011)
25. 田原久志, 兼石彰雅, 成形加工, 99.321(1999)
26. 渡邊豊彦, 解説 成形用金型へのシボ加工技術について, 23(1), 654-658(2011)
27. 超大型電動式射出成形機ED3000Wおよび大型全電動式射出成形機EC650NIIを開発(省エネ・省スペース・ハイサイクルを実現), 芝浦東芝, <https://www.shibaura-machine.co.jp/jp/NEWS/product/20061129_02.html>, 2022年02月04日最終アクセス
28. 製品情報NEX-III, 日精樹脂工業, <https://www.nisseijushi.co.jp/products/pr_nex3.php?id=1>, 2022年02月04日最終アクセス
29. 熔融張力, ロンビック, <<https://www.rhombic.co.jp/technicaldata/%E6%B8%A%B%E8%9E%8D%E5%BC%B5%E5%8A%9B>>, 2022年02月04日最終アクセス

第3章 合流界面の先端部で発生する表面隆起

3.1 緒言

第2章では、金型壁面と接する熔融樹脂のフィラーの配向に着目し、流動過程において、ゴム粒子が伸長し、スキン層部のゴムが板厚方向に配向することで、ウェルドラインに沿った隆起が発生することを解明した。しかし、ウェルドラインから数mm離れた場所にも隆起が発生し、同様に線傷に見える品質欠陥がある。Fig. 3-1に示すように、左右から流れる熔融樹脂の会合後の圧力差により、一方の熔融樹脂が反対側の熔融樹脂に潜り込むことで起こる板厚中心の合流先端部の表面が隆起することが知られている¹⁾。生産現場では、この表面の隆起による外観不具合を2次ウェルドラインと呼んでいる。第2章の研究結果より、板厚中心部であるコア層のゴムの伸張と配向が小さいため、板厚中心部のタルクの配向が隆起に大きく影響すると考えた。

これまで、2次ウェルドラインの発生場所と隆起の高さをシミュレーションを用いて、予測する技術が研究されている。片側の樹脂が反対側の樹脂に潜り込んだ先端部までの長さを潜り込み長さとして、その長さから隆起の高さを予測するものである。例えば、樹脂の充填が完了するまでの時間の積より潜り込み移動量を算出²⁾する方法や樹脂の充填後の繊維配向と収縮率の関係より隆起量を予測³⁾するなどがある。また、潜り込んだ樹脂の先端形状の曲率と潜り込み長さの関連性⁴⁾から予測するなど、2次ウェルドラインの発生場所と隆起量の予測に関する特許がある。また、タルクの配向については、粒子分散状況を粒子シミュレーションを用いて予測する研究⁵⁾⁶⁾やタルク粒子のスリット流路内の配向⁷⁾の研究事例がある。しかし、タルクの充填量とスキン層厚みおよび物性への影響⁸⁾やタルクの配向がコーナー部の収縮に及ぼす影響⁹⁾の研究事

例があるが、合流部における樹脂の潜り込みとタルクの配向状態や隆起の関係の詳細な研究は行われていない。

そこで、本章では合流部の板厚中心部のタルクの配向によって生じる隆起のメカニズム解明と抑制方法を検証した。

はじめに、品質工学を用いて、隆起に関わる影響因子を検討し、影響の大きい要因についての定量評価を実施した。次に、合流部におけるタルクの配向をSEMにより観察し、合流部に付近のタルクの配向を詳細に定量評価した。また、隆起の高さに関係のある樹脂の潜り込み長さについて、樹脂流動シミュレーションを用いて、実際の流動とシミュレーションの結果を比較した。そして、隆起のメカニズム解明より、合流部の形状を変化させることで隆起高さを低減する方策を検討し、実生産で起こる対向流動領域と平行流動領域における効果を検証した。

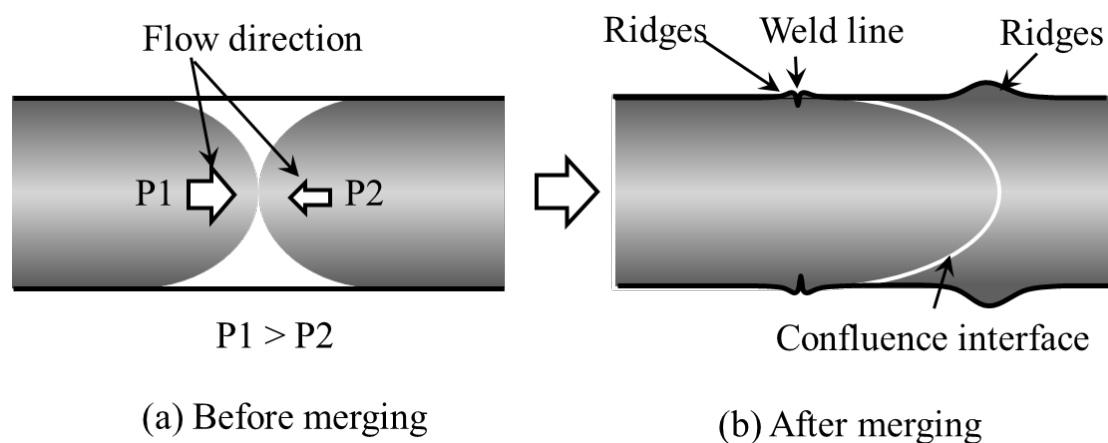


Fig. 3-1 Confluence due to pressure difference

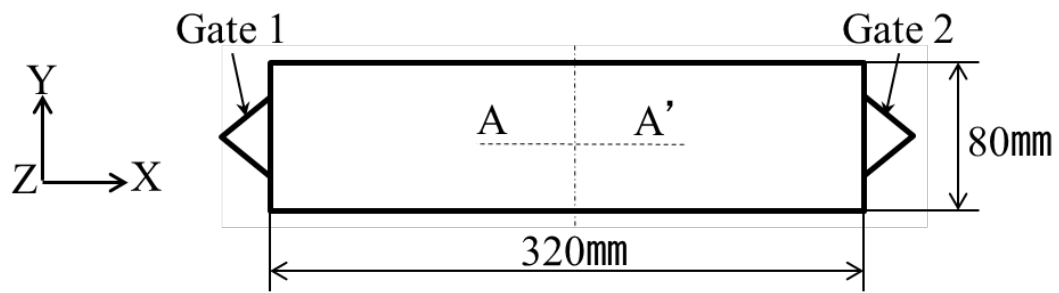
3.2 実験条件

3.2.1 使用材料

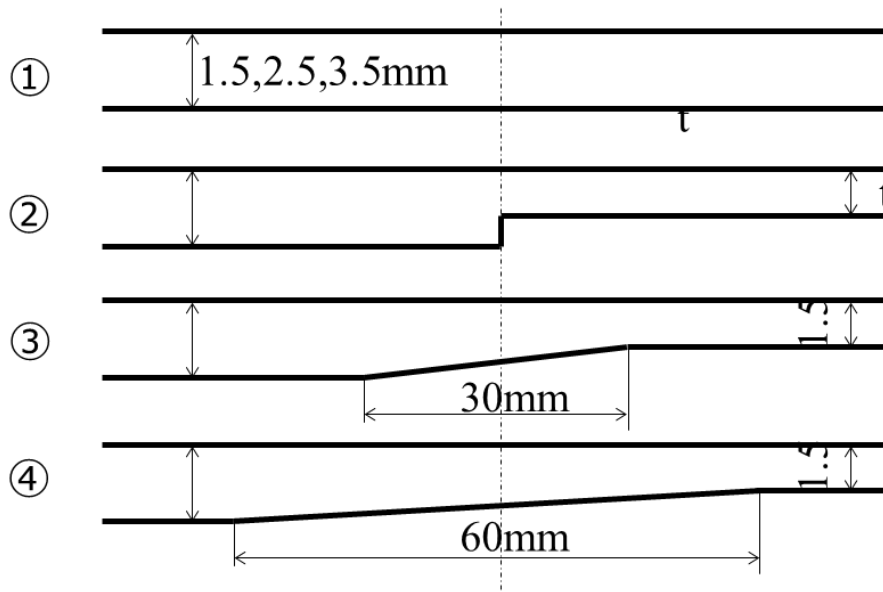
2.2.1項で示したPP, タルクとゴムAを用いて, Table 2-2, No.4の配合率で混合した材料を使用した.

3.2.2 成形品形状

Fig. 3-2に示すように, 対向流動領域の評価のために2つの対向するゲートを持つ成形品形状を用い, 樹脂が合流する中央部の板厚の形状を変化させた. Fig.3-2 (a)の成形品形状は, Fig. 2-3で示した形状と同一である. 条件①はFig. 2-2と同等の形状で2.5mmと一定の板厚である. 条件②は中央部に1mmの段差を設けた. 条件③は板厚を1.5mmから2.5mmと30mmの範囲で徐変した形状とした. 条件④は条件③と同様に板厚を1.5mmから2.5mmと60mmの範囲で徐変した形状とした. 樹脂は, 任意のタイミングで注入できるようにした. 次に樹脂が平行に合流する平行流動領域を評価するために, Fig. 3-3に示した成形品形状を用いた. Gate1から樹脂が2つに分かれて成形品内に同一方向に樹脂が流れる. Fig. 3-3(b)は一定板厚で, Fig. 3-3(c)は徐変した形状であり, 板厚 t は, 2.5mm, 2.9mm, 3.1mm, 3.3mm, 3.5mmまで変更できるようにした.

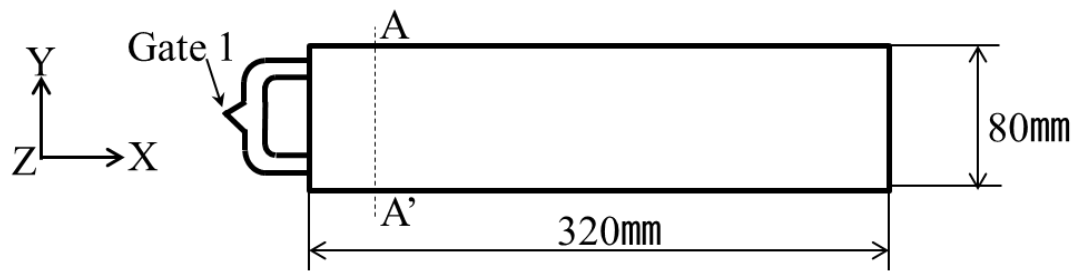


(a) Plan view of test pieces

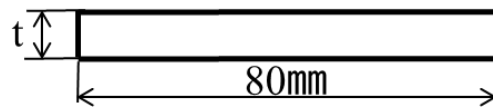


(b) Shape of cross section at A-A' indicated in (a)

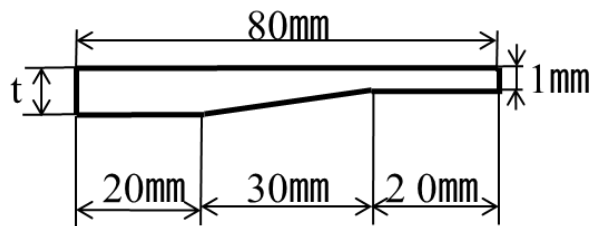
Fig. 3-2 Shape of test pieces on counter flow



(a) Plan view of test pieces



(b) Shape of cross section at A-A' indicated in (a)



(c) Shape of cross section at A-A' indicated in (a)

Fig. 3-3 Shape of test pieces on parallel flow

3.2.3 射出成形機及び成形条件

射出成形機は, FN-2000 (日精樹脂社製110t)を用いた. Table 3-1に成形条件を示す. 樹脂温度210°C, 金型温度30°Cとし, Fig.3-4に示すように樹脂の潜り込み長さはゲート2に対するゲート1の開放タイミングを遅らせて変化させた.

Table 3-1 Conditions of injection molding

Process	Conditions	
Injection molding	Resin temperature (°C)	210
	Die temperature (°C)	30
	Gate1 open timing to Gate2 (s)	0, 0.5

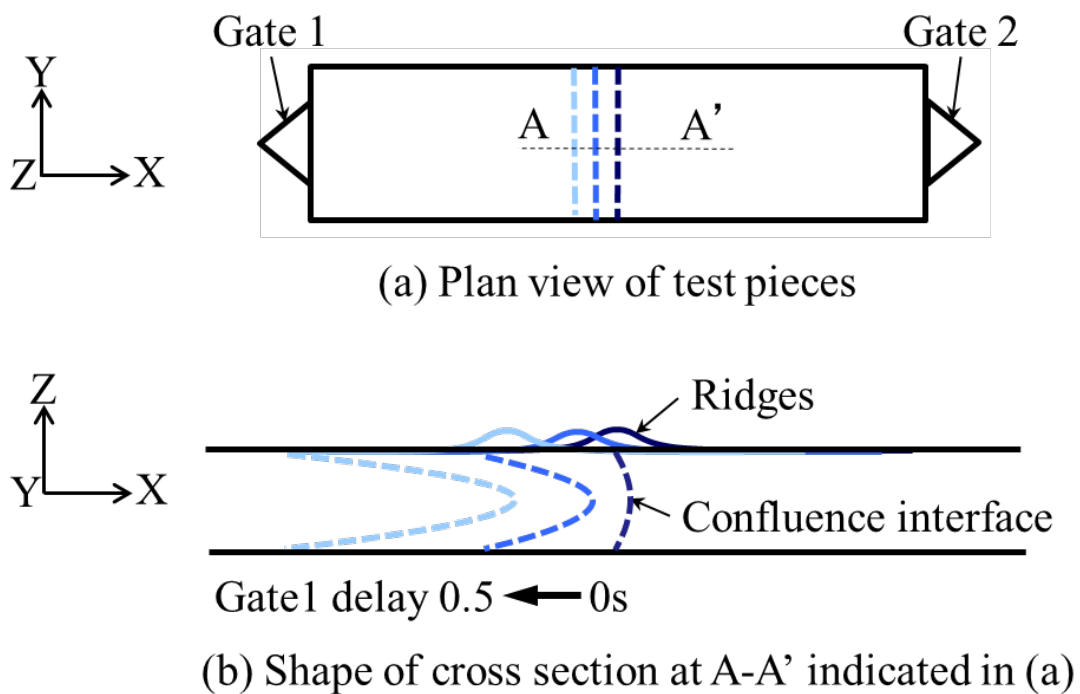


Fig. 3-4 Relation of ridges position and Gate 1 opening timing

3.2.4 表面形状の計測と断面観察

隆起形状は、Fig. 2-5に示した走査型レーザー顕微鏡(オリンパス株式会社製 型式OLS4100)を用い、隆起部の断面観察は、ウルトラマイクロノーム(LEICA社製 EM UC7)で凍結切削した後に、イオンエッチングによる導電処理(Osプラズマコート)を行い、走査型電子顕微鏡SEM(日本電子株式会社製 JSM-6340F)を用いて観察した。

3.3 実験結果及び考察

3.3.1 実験計画法による隆起に影響する因子の検討

隆起の高さに影響する因子を絞り込むために、実験計画法(L18)を用いて実験を行った実験条件の直行表への割付けをTable 3-2に示す。成形品形状はFig.3-2に示した2.5mmの均一の板厚である条件①を用いた。成形におけるバルブゲートは同時に開放した。選定した因子は、金型温度、樹脂温度、板厚、射出時間、保圧圧力と保圧時間とした。

Table 3-2 Allocation table of design of experiments

	Control factor	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
A	Die temperature	°C	30	60	-
B	Resin temperature	°C	190	210	230
C	Thickness	mm	1.5	2.5	3.5
D	Injection time	s	0.55	1.10	1.65
E	Holding pressure	%	12	15	18
F	Holding time	s	5	10	15

Fig. 3-5に各要因のS/N比を示す。隆起が少ないとSN比は高い。この結果、板厚の影響が大きく、板厚が薄いほど隆起が小さくなることがわかった。その他の第2章のスキン層の隆起に影響した金型温度は、他の因子と同等で隆起に影響していないことがわかった。

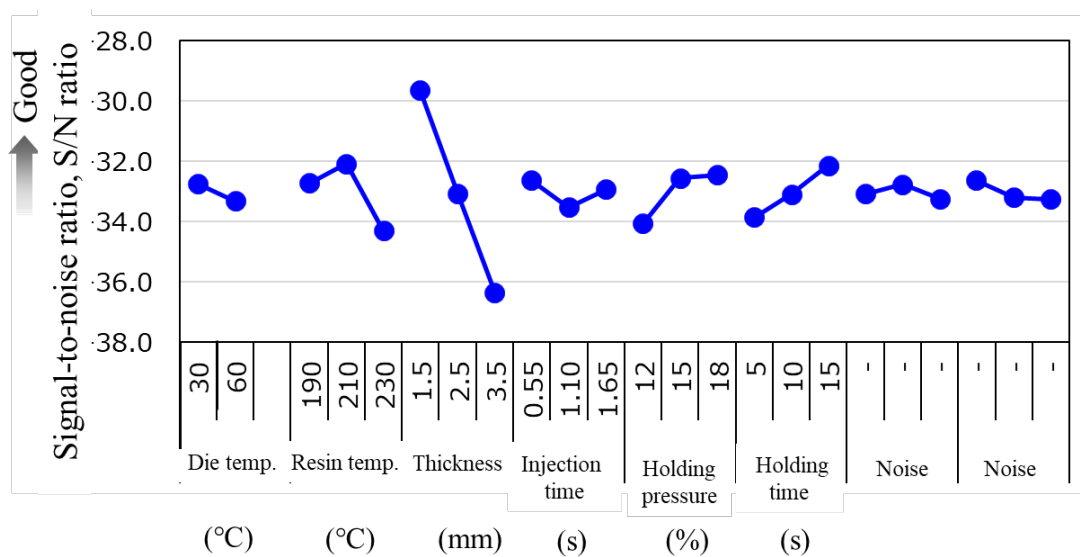


Fig. 3-5 Result of signal-to-noise (SN) ratio

3.3.2 成形品板厚における樹脂の潜り込み長さとの隆起への影響

品質工学の結果より、板厚が隆起に最も影響することがわかり、板厚が変化することで潜り込み長さがどのように変化し、隆起に影響するか実験した。

Fig. 3-2 ①の成形品形状を用いて、板厚1.5, 2.5, 3.5mmと変化させ、ゲート1のゲート2に対する開放タイミングを0から0.5sの間で変化させ、潜り込み長さとの隆起量の関係を計測した結果をFig. 3-6に示す。板厚3.5mmにおいては、潜り込み長さとの隆起高さは反比例しており、潜り込み長さが小さく4mmでは隆起高さが約58～66μmに対して、

潜り込み長さ17mmでは隆起高さは3mmと小さくなっていることが明らかとなった。板厚2.5mmと板厚1.5mmと同様に潜り込み長さが大きくなるに伴い、隆起高さが小さくなっている。板厚の違いでは、同じ潜り込み長さである5mmの場合では、隆起高さは板厚3.5mmの時は42 μ m、板厚2.5mmの時は20 μ m、板厚1.5mmの時は4 μ mと板厚が小さくなると隆起高さも小さくなるが、板厚2.5mmと板厚3.5mmでは、潜り込み長さと同様に潜り込み長さが反比例しているが、板厚1mmでは、板厚2.5mm、板厚3.5mmに対して、タルクの板厚方向への配向量が小さいため、潜り込み長さが大きくなっても隆起高さにあまり変化がなかったと考えられる。また、Fig. 3-7に板厚に対する隆起の高さの比率を用いて正規化した結果を示す。板厚に対する隆起の高さの比率は、潜り込み長さに比例していることが確認できた。

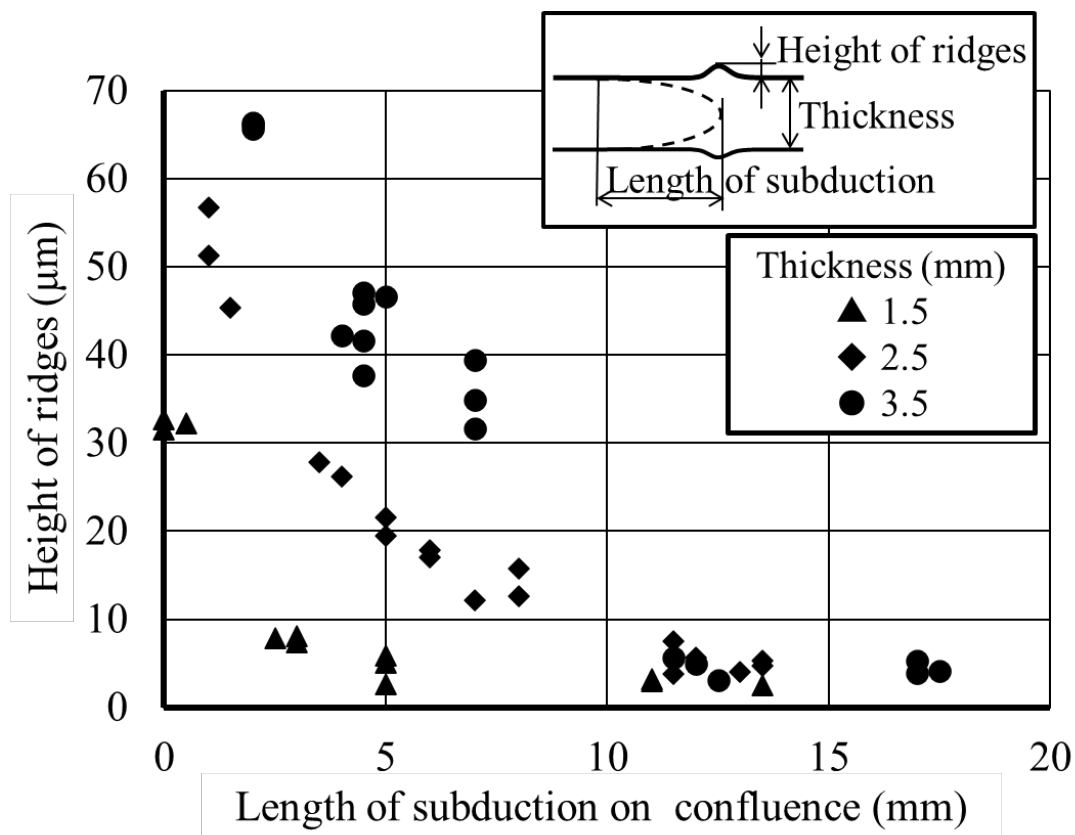


Fig. 3-6 Relation between length of subduction and height of ridges

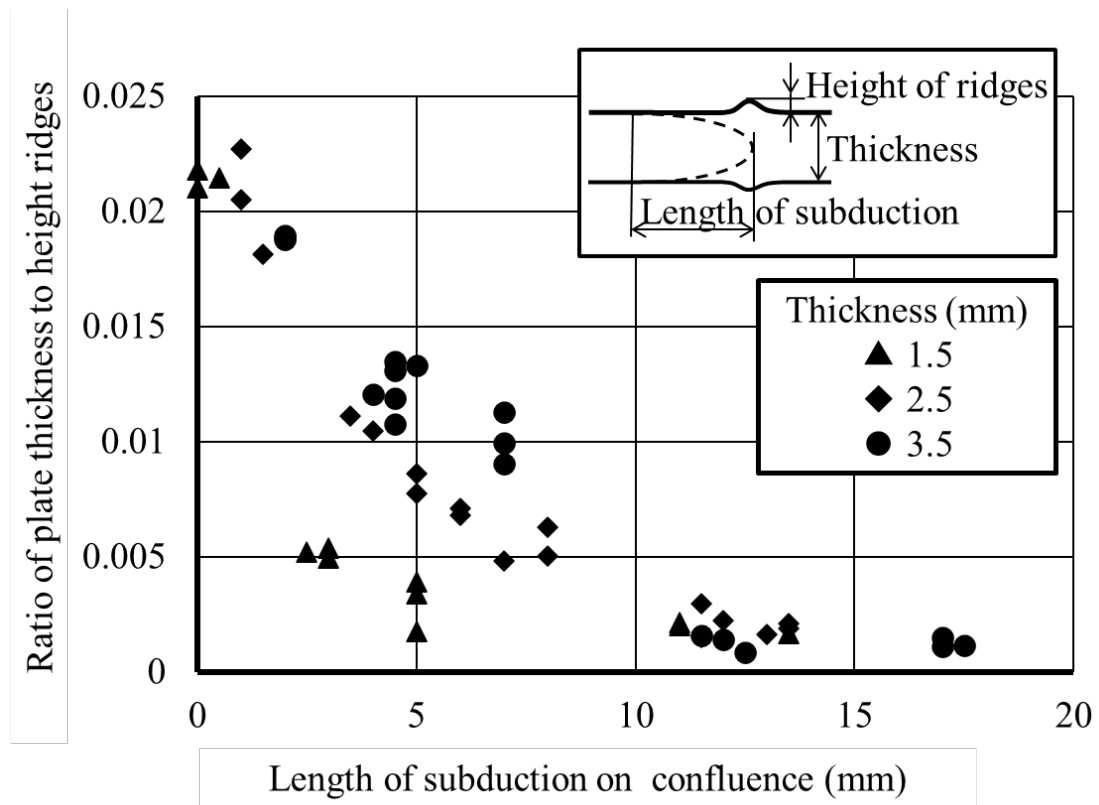


Fig. 3-7 Ratio of height of ridges to the plate thickness height of ridges

3.3.3 樹脂の潜り込み長さと先端形状の関係

Fig.3-2 条件①の成形品形状を用いて、ゲート1の開放タイミングをゲート2に対して、0s(同時開放)と0.5s遅延させた条件により、樹脂の潜り込みの長さと隆起高さを計測した。Fig.3-8に合流部の断面観察を示す。(a)はゲート1の開放タイミングを同時に開放した条件で、潜り込み長さが4mmで、表層の隆起は20 μ m, (b)はゲートを0.5秒遅延させた条件で、潜り込み長さが13.5mm, 隆起は2 μ mと約1/10となっていることがわかった。同じ板厚で樹脂のゲートからの注入タイミングによって、潜り込み長さが変わり、隆起も変化することがわかった。これは、潜り込み先端部のR形状が潜り込み長さ4mmではR0.4mmに対して、潜り込み長さが13.5mmではR0.1mmと小さくなり、板厚方向へのタルクの配向量が小さくなり、成形後の収縮時の一般部と合流先端部のタルクの配向差が小さくなり隆起が小さくなったと考えられる。

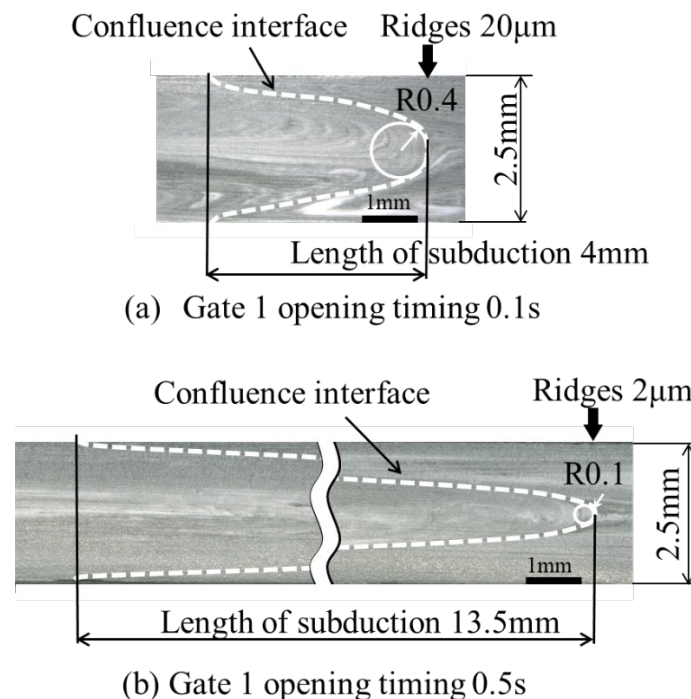


Fig. 3-8 Cross-sectional observation of the confluence

3.3.4 樹脂潜り込み界面のタルクの配向観察

2.3.4項で示したように、板厚中心部のコア層においては、ゴムの配向や伸長や配向は小さいことから、コア層にある潜り込みの先端部による表層の隆起は、コア層のタルクの配向に影響を受けると考えた。そこで、タルクの配向について、SEMを用いて詳細に観察した。Fig. 3-9に観察部位を示す。潜り込み長さを基準に樹脂の流動方向に、潜り込みが始まるラインをAラインとし、潜り込みが終わるラインをBラインとし、それぞれ、表層(A1, B1)、表層と板厚中心の中央(A2, B2)、そして、板厚中心(A3, B3)を測定した。試験片は、板厚2.5mmで、潜り込み長さが0.5, 4, 13.7mmの3種類を観察した。

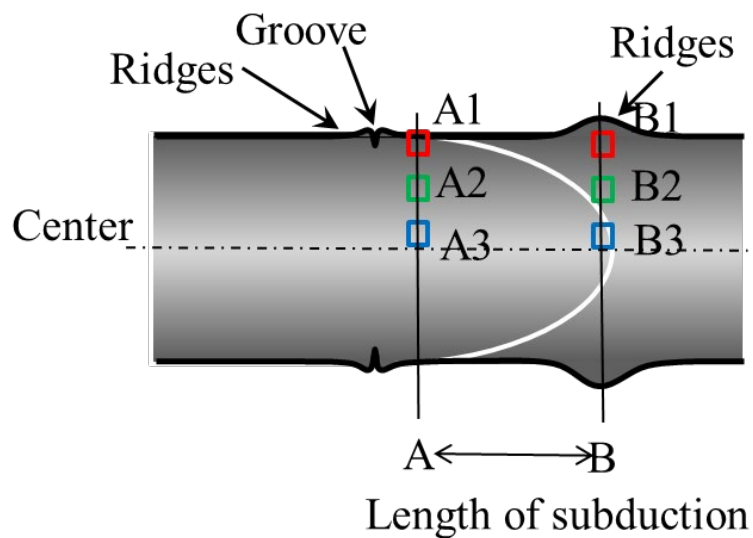


Fig. 3-9 Observation point by SEM

Fig. 3-10に潜り込み長さ0.5mmのタルクの配向観察を示す．潜り込みが始まるAラインの表層にあるA1ではウェルドラインも確認でき板厚方向に配向，A2では流動方向方向に対して約45度に斜めに配向し，A3では板厚方向に配向している．潜り込みが終わるBラインでは，表層のB1ではタルクは流動方向に配向しているが，B2とB3では板厚方向に配向している．

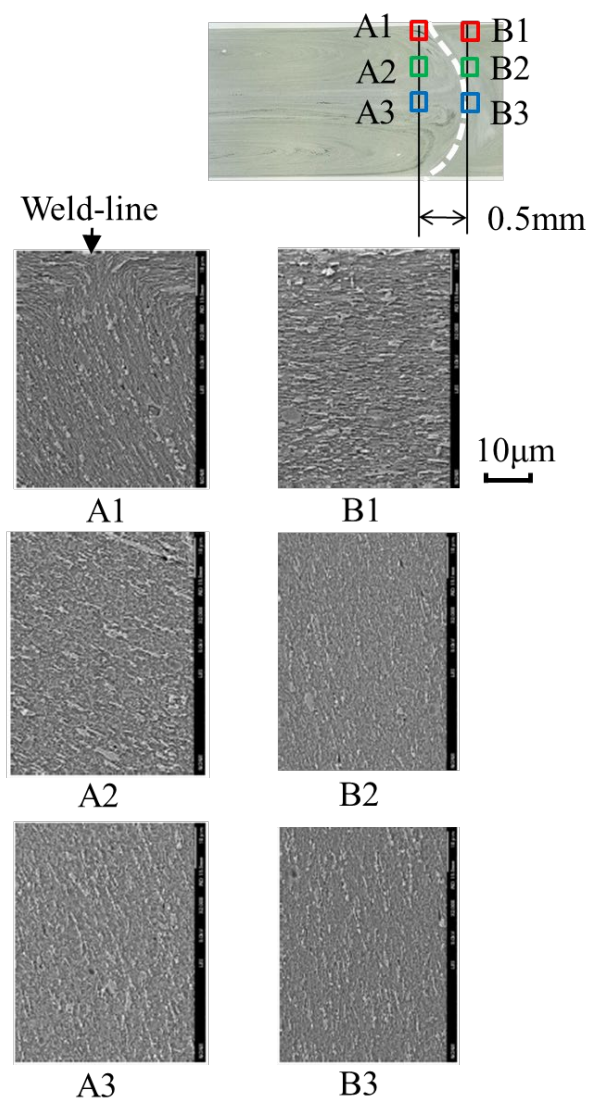


Fig. 3-10 Observation of talc orientaion on length of subduction 0.5mm

次に, Fig. 3-11に潜り込み長さ4mmの配向観察を示す. 潜り込みが始まるAラインの表層にあるA1では同様にウェルドラインを確認できるが, A2はやや水平方向, A3はランダムに配向している. 潜り込みが終わるBラインでは, B1, B2はタルクは水平方向に配向しているが, B3は板厚方向に配向している,

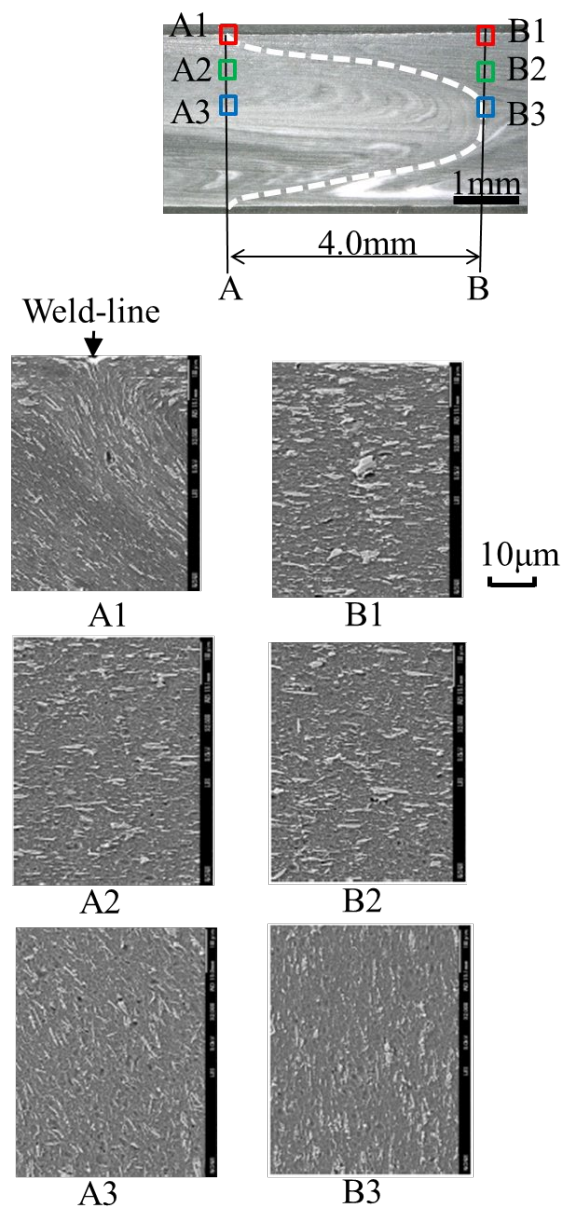


Fig. 3-11 Observation of talc orientation on length of subduction 4mm

最後に, Fig. 3-12に最も長い潜り込み長さ13.5mmの配向観察を示す. 潜り込みが始まるAラインの表層A1ではウェルドラインは確認できない. A2はやや水平方向, A3は板厚方向に配向している. 潜り込みが終わるBラインでは, 潜り込み長さ4mmと同様に, B1, B2は水平方向に配向しているが, B3は板厚方向に配向している,

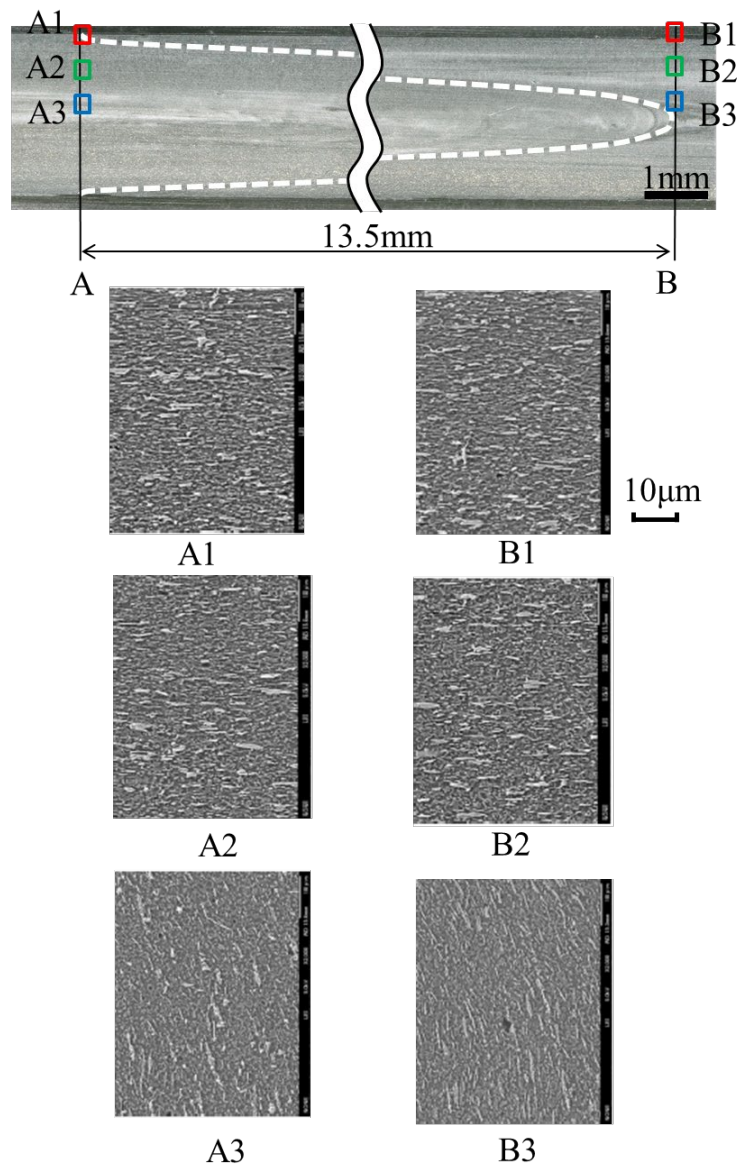


Fig. 3-12 Observation of talc orientaion on length of subduction 13.7mm

以上の観察結果をFig. 3-13にまとめた。潜り込み長さが大きくなると先端部のタルクはB3の板厚の中心付近のみ板厚方向の配向となる。今回の成形品の板厚が2.5mmでは、板厚中心から上下板厚方向に約0.6mmの範囲にあるタルクの配向が隆起に影響すると考えられる。

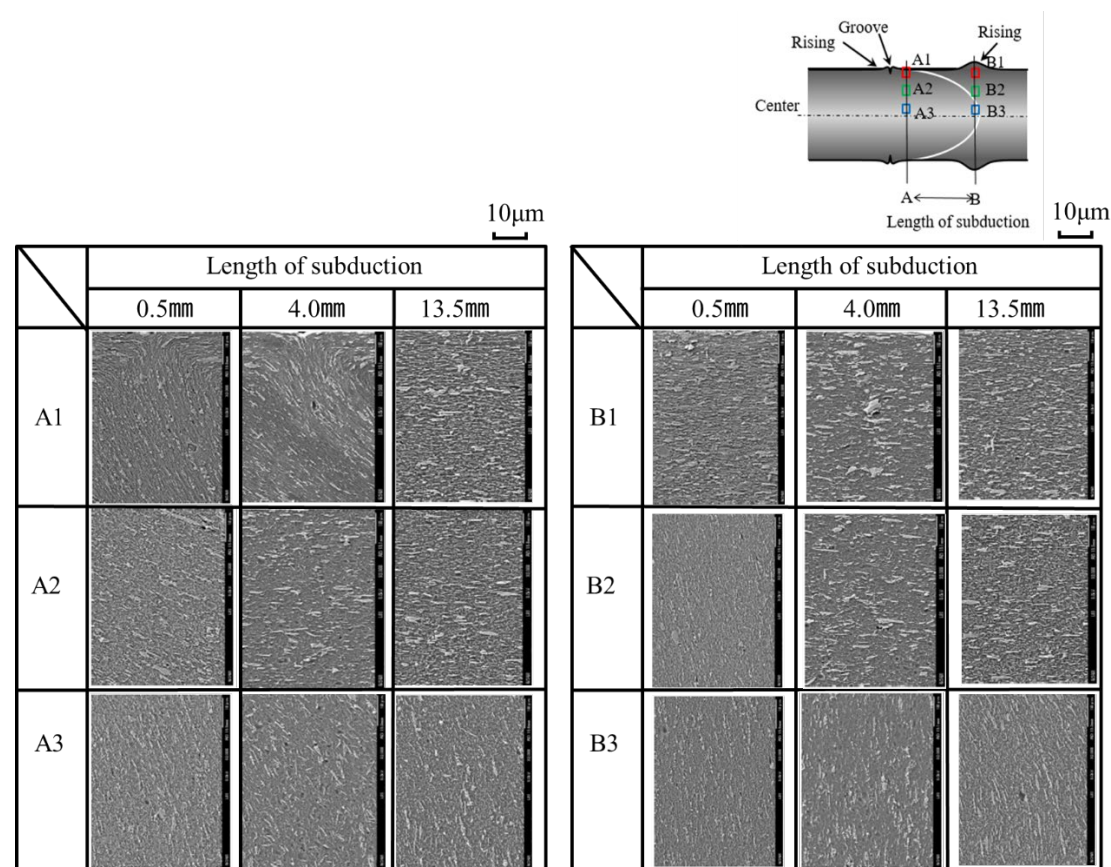


Fig. 3-13 Comparison of talc orientation on each length of subduction

3.3.5 樹脂潜り込み界面のタルクの配向角度評価

Fig. 3-14(a)のSEM観察より, (b)に示すように2.2.6項で用いた2値化によりタルクのみを抽出し, タルクの配向角度を調査した. Fig.3-14(c)に配向基準を示した. 配向は流れに沿った水平方向を 0° , $0\sim10^\circ$, $10\sim20^\circ$ と 10° 毎に度数分布を用いて配向の状態を定量化した

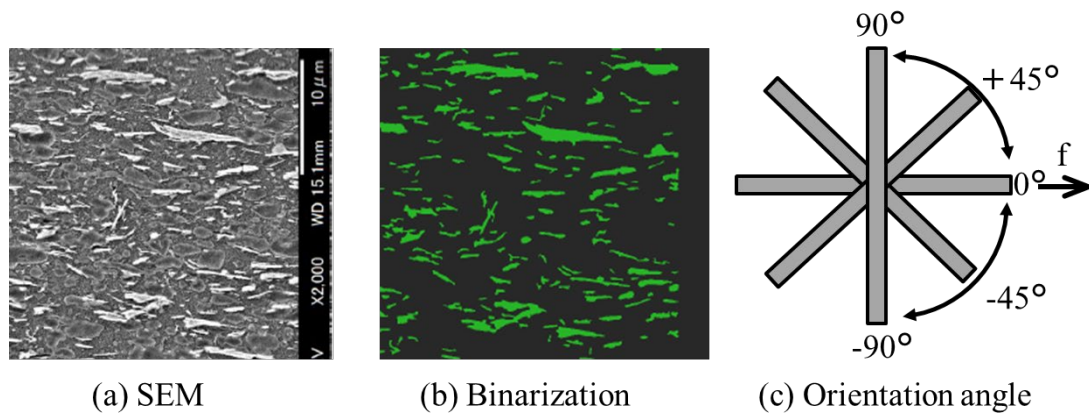


Fig. 3-14 Orientation angle of talc after binarization

Fig. 3-15に潜り込み長さで部位別に、タルクの分布状態を示す。潜り込みが始まるAラインにおいて、表層A1に着目すると、潜り込み長さが大きくなるにしたがって、水平方向に配向しており、Fig. 3-11のA1でウェルドラインのV溝が観察されなかった要因と考えられる。一方、潜り込みの終わりとなるラインBでは、(a)潜り込み長さが0.5mmに対して、(b)の潜り込む長さ4mmを比較すると、表層と板厚中心の中間の部位で、配向に大きく変化があり、潜り込み長さが長くなることで $60^{\circ} - 90^{\circ}$ 、 $-90^{\circ} - 60^{\circ}$ の板厚方向の配向が減少していることがわかる。また、潜り込み長さの最も大きい13.5mmでは、潜り込み始めのラインAと潜り込みの終わりのラインBにおいて、表層、板厚中心、表層と板厚中心の間の部位では、ほぼ同じタルクの配向状態になっていることがわかった。以上のことから、潜り込み長さが大きいと潜り込みの先端部のタルクのは流動方向に配向し、板厚方向への配向が少なくなるため、一般部のタルクの配向と近くなるため、冷却時の板厚方向の収縮率に差が少なくなり、隆起も減少すると考えられる。

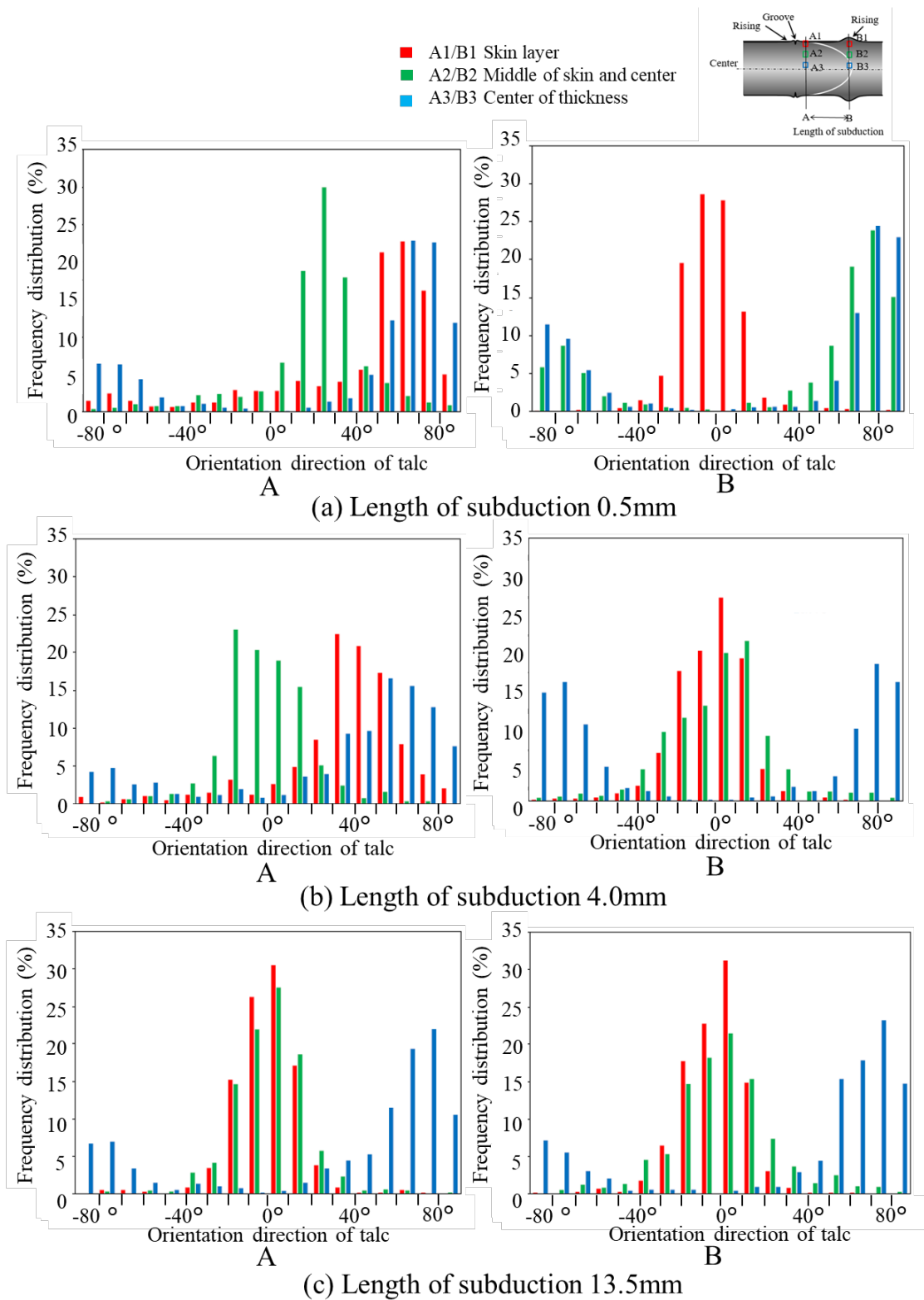


Fig. 3-15 Orientation of talc depending on deferent length of subduction

3.3.6 シミュレーションによる潜り込み長さの予測

3.3.2項のFig. 3-7で示したように潜り込み長さと隆起には相関があることが確認できた。そこで、樹脂流動シミュレーションを用いて、潜り込み長さの予測検証を行った。

Fig. 3-2 ①で示した板厚2.5mmの成形品形状を用いた。合流部の詳細を解析するためにFig. 3-16に示すように板厚方向を16層分割したメッシュモデルとした。

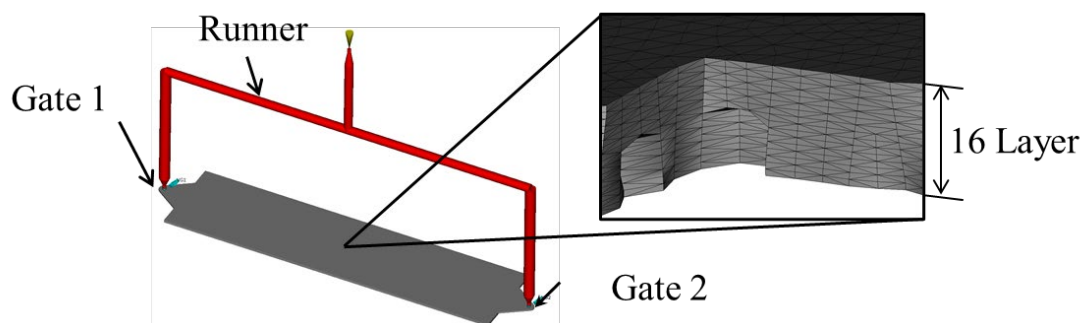


Fig.3-16 Shape of simulation model

シミュレーションはAutodesk Moldflow Insight 2018 (MoldFlow社製)を用いた。粘度式については、低せん断部のニュートン領域と高せん断部の非ニュートン性領域を算出する式を用い、温度と圧力の関数としての材料の密度を決定するため下記の(1)式に示した2-domain Tait pvT モデルを使用した¹⁰⁾。

$$v(T, p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_t(T, p) \quad \cdots \cdots (1)$$

- $v(T, p)$: 所定の温度および圧力における比容積
- v_0 : ゲージ圧力がゼロの場合の比容積
- T : 温度(K)
- p : 圧力(Pa)
- C : 定数(0.0894)

・B : 材料の圧力感度を考慮するための係数

樹脂の温度，せん断速度，および粘度の圧力依存性は，下記の(2)式であるCross - WLF 粘度モデルを使用した¹¹⁾。

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad \dots\dots(2)$$

・ η : 樹脂粘度(Pa s)

・ η_0 : ゼロせん断粘度(Pa s)

・ $\dot{\gamma}$: せん断速度(1/s)

・ τ^* : せん断による低粘度化への転移点での臨界応力レベル(N/mm²)

・ n : 曲線フィッティングで決定する，高せん断速度におけるべき乗則指数

そして，結晶性樹脂および非晶性樹脂の熔融状態と固化状態の体積変化の挙動の関係は，2.2.1項で説明したPP，タルクとゴムAを用いて，Table 2-2 No.4の配合率で混合した材料のPVT(圧力・体積・温度)曲線をFig.3-17を用いた。

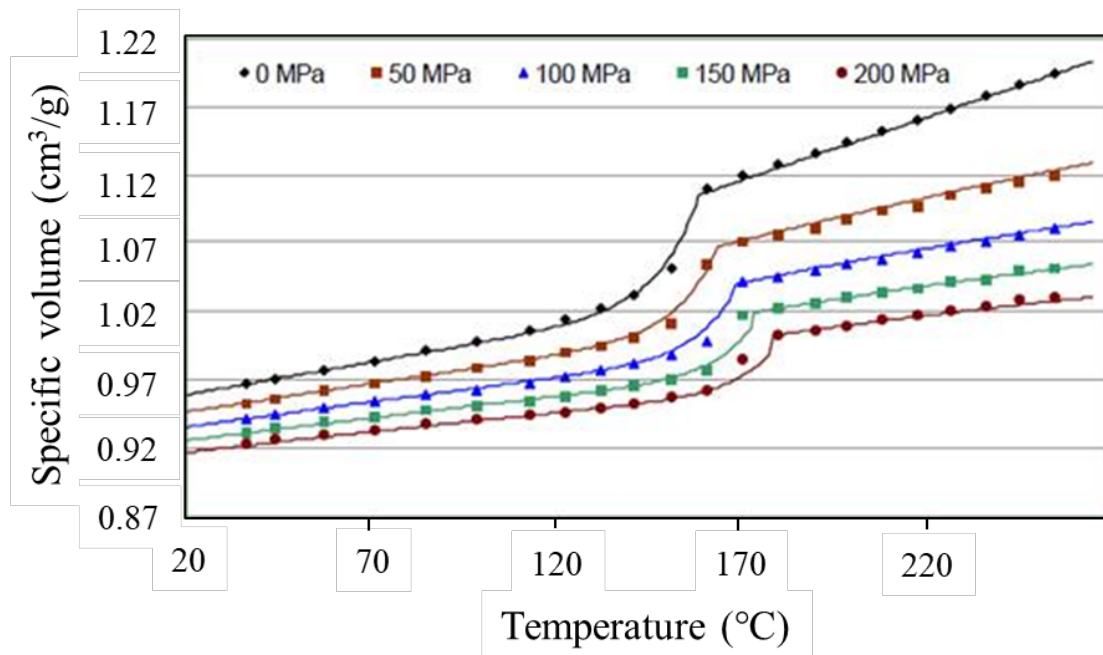
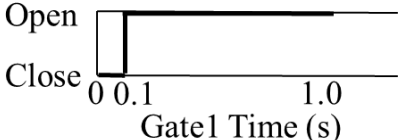
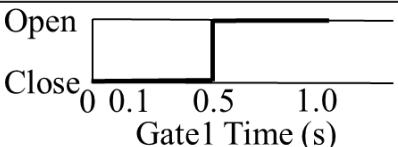
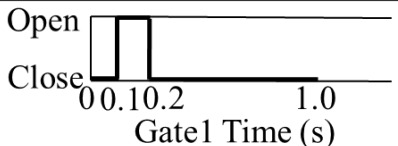
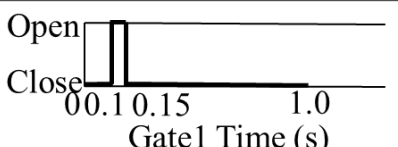


Fig. 3-17 Curves of PVT on mixed material of PP, rubber and talc

シミュレーションと実成形との比較で用いた成形条件は、Table 3-1と同じ条件で、樹脂温度210℃、金型温度30℃、ゲート1の開放タイミングはTable 3-3に示す条件で行った。条件①と条件②は、ゲート1の開放タイミングをゲート2に対して、0.1sと0.5sとし、片側のみに樹脂が潜り込んだ合流になるU字の潜り込み形状になるように設定した。また、条件③と条件④は、ゲート1の開放タイミングをゲート2に対して0.1s遅くし後、条件③は0.2s後にゲート1を閉じた条件で、条件④は0.15s後にゲート1を閉じた条件とした。これにより、合流部で樹脂の潜り込みが折り返す条件とし、潜り込み形状をW字になるように設定した。以上のように、樹脂合流部の潜り込み形状が、条件①と条件②はU字形状、条件③と条件④はW字形状となるように設定した。

Table 3-3 Condition of the open timing of Gate 1 to Gate 2

No	Timing of opening and closing of Gate1
①	
②	
③	
④	

※0 time is the open timing of Gate2

Fig. 3-18に実験結果とシミュレーションの結果の比較を示す. (a)の実験結果は合流部の断面を写真撮影し, (b)のシミュレーションの結果は, フロワーフロントが合流後, 樹脂の流動が停止した合流界面である. 片側に潜り込んだU字である条件①と条件②の潜り込み長さは, 実験結果とシミュレーション結果はほぼ同じであることが確認できた. しかし, 折り返した潜り込みのW字である条件③と条件④は, 実験結果に対して, シミュレーションの潜り込み長さに差が生じている.

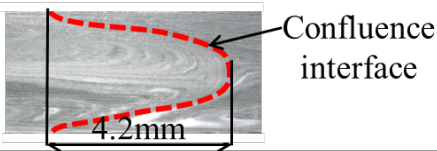
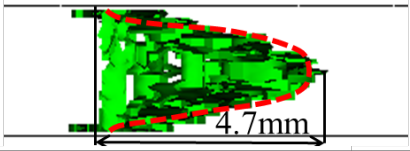
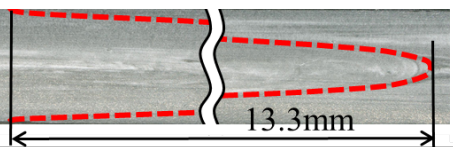
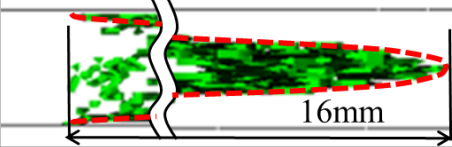
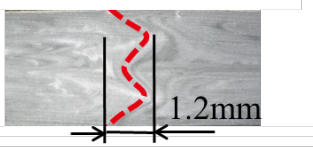
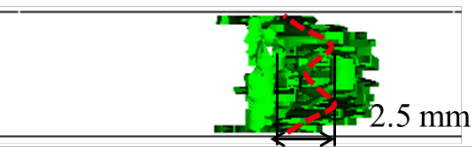
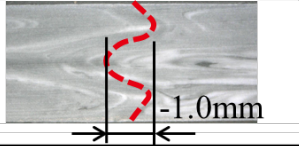
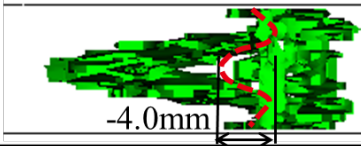
No	Experiment result	Simulation result
①		
②		
③		
④		

Fig. 3-18 Comparison of simulation and experiment on length of subduction

更に、ゲート1の開放タイミングを変えて、潜り込み長さ（U字・W字）について、実験数を増やし、シミュレーションと比較した結果をFig. 3-19に示す。潜り込み長さについて、横軸に実験値、縦軸にシミュレーションの結果をプロットした。また、合流部の形状U字とW字も比較できるようにプロットした。その結果、全体の相関係数は約80%と潜り込み長さはほぼ一致しており、潜り込み長さをシミュレーションで予測できる。しかし、合流形状であるU字とW字では精度に差があり、それぞれの相関係数は、U字が約85%、W字は約70%であり、W字の精度は低い。これは、フローフロントが合流してから樹脂の流動が停止するまでの時間が長いと金型内を流れるホットランナー部やゲート部の圧力が損失の影響を、実際の成形では流動が小さくなるためだと考えられる。

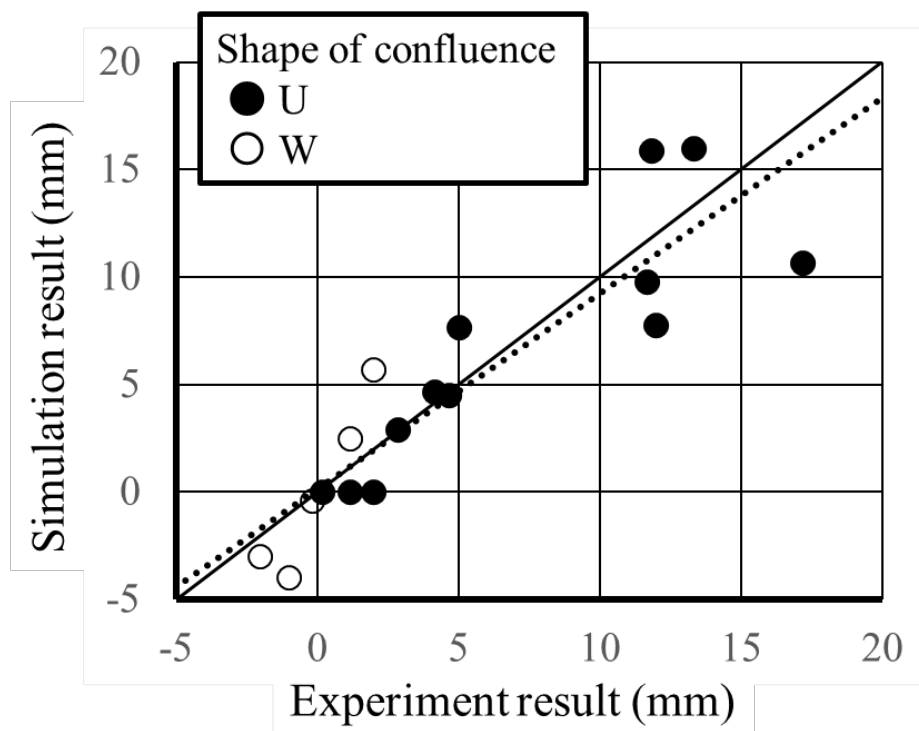


Fig. 3-19 Accuracy of experiments and analyses on the length of subduction

3.3.7 対向流動領域における合流部の形状と隆起への影響

3.3.2項での検証結果より、バルブゲートの開放タイミングを変えることで潜り込みを制御をすることがわかった。しかし、Fig. 3-20に示すように、自動車向けの大物樹脂部品のゲート間ピッチは広く、対向するゲートの配置も少ないため、実部品でのゲートの開放タイミングで潜り込み長さを制御し、2次ウェルドで発生する隆起を低減させることは難しい。ゲートの開放タイミング以外に潜り込みを発生させる方法を検討した。

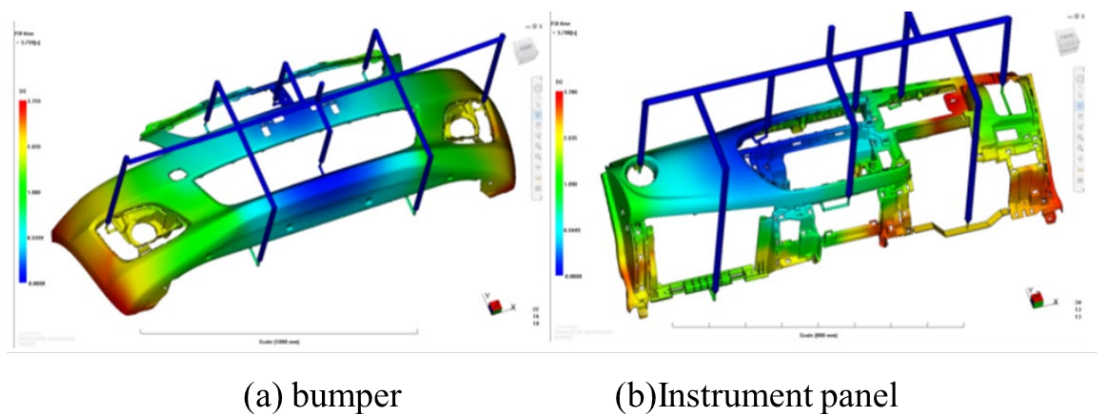


Fig. 3-20 Gate position of bumper and instrument panel¹²⁾

Fig. 3-2 の①～④に示すように、合流部の形状が変化できる成形品形状を用いて、潜り込み長さ及び隆起について評価した。成形条件は、Table 3-1と同等し、ゲート1とゲート2の開放タイミングは同じとした。Fig. 3-21に実験結果を示す。樹脂合流部の潜り込み長さは、長い順に条件④は3.8mm、条件③は2.1mm、条件②は1.5 mm、条件①は0.7 mmとなった。2次ウェルドによる合流部先端の表層の隆起量は、条件①が53 μ m、条件②が43 μ m、条件③は8 μ m、条件④は2 μ mと最も小さくなり、条件①の53 μ mに対して、条件③徐変30mmと条件④徐変60mmでは隆起を約1/6と大きく低減できた。しかし、

条件②段差は徐変と比較して、潜り込み長さは小さく、更に、段差部の急な板厚が変化することで熱収縮の歪により隆起が発生したと考えられる。

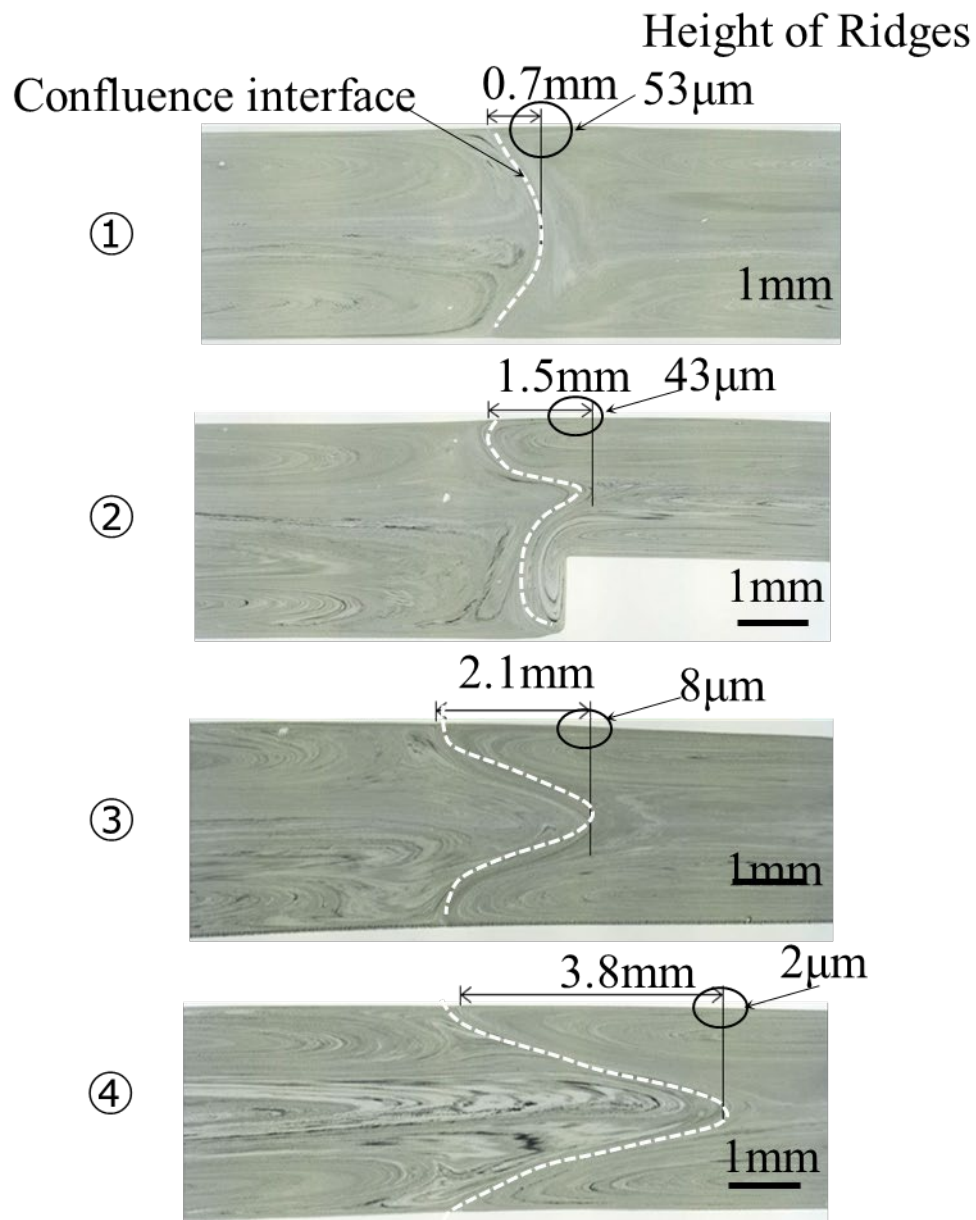


Fig. 3-21 Result of experiment for the effect of shape of slop at confluence

3.3.8 平行流動領域における合流形状と隆起への影響

実際の生産ではゲートが平行に配置されて、平行に樹脂が合流するケースも多いので、平行流における合流部の形状の違いが潜り込みに与える影響も評価した。Fig. 3-3の成形品形状を用い、板厚2.7mm, 3.1mm, 3.5mmについて、一定板厚と徐変有り形状について、ゲート1側の製品端末から5mmで断面をSEMを用いて観察した結果をFig. 3-22示す。一定板厚の2.5mm, 3.1mm, 3.5mmに差は無いが、徐変のある形状は、合流部の潜り込み形状がW字になっており、合流した後、薄肉側の樹脂は早く流れ固化を始めるが、厚肉側の中心部の樹脂は熔融状態であり、薄肉側に潜り込みW形状になったと考えられる。

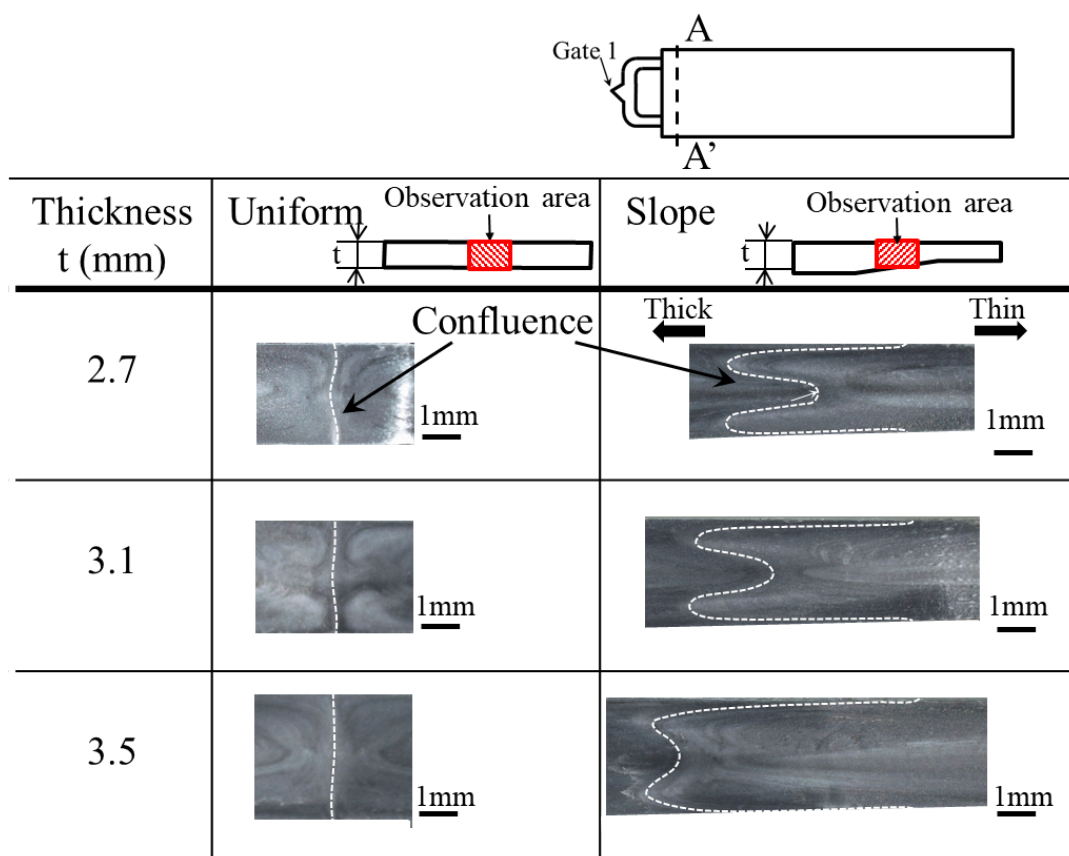


Fig. 3-22 Comparison of observation on at confluence section

次に、板厚を2.5mmから3.5mmまで0.2mm刻みで板厚を変化させて成形した板厚と隆起の高さの関係をFig. 3-23に示す。一定板厚では厚くなるにつれて、隆起高さも大きくなっている。一方、徐変形状では、隆起が小さくなっている。平行に樹脂が合流しながら徐変部で合流することで板厚が薄い側は早く固化するが厚肉側の板厚中心部の樹脂は流動しようとし板厚の薄い側に潜り込むため、潜り込みの先端部形状が尖った形状となり、タルクの板厚方向への配向が少なくなると考えられる。

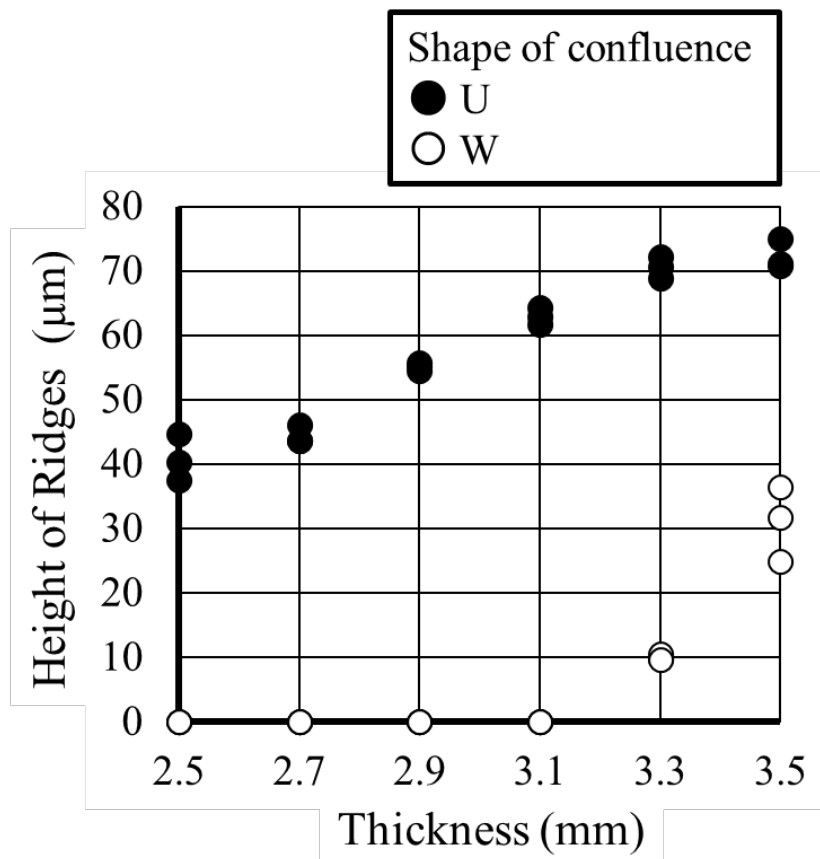


Fig. 3-23 Relation of thickness and height of ridges

3.4 結果と考察

ウェルドラインから離れた樹脂の潜り込みの先端部の表層が隆起する現象について、成形条件や板厚の変化による隆起への影響、潜りこみ界面のタルクの配向観察、シミュレーションによる潜り込み長さの予測と隆起の関係、及び、隆起を低減する合流部形状の検証を行った結果より、以下の結果が得られた。

- 1) 品質工学により成形条件及び成形品板厚の影響因子を調査した結果、板厚の影響が大きく、板厚が薄いほど隆起は小さくなることがわかった。
- 2) 合流部の樹脂の潜り込みが長いと板厚中心部の潜り込みの先端形状のR半径が小さくなり、これにより、板厚方向へのタルクの配向が小さくなる。また、一般部のタルクの配向は樹脂の流動方向に配向するが、合流部先端のタルクは板厚方向に配向するため、一般部と合流部中心のタルクの配向に差が生じ、成形後の板厚方向への収縮率に差が生じ、隆起が発生すると考えられる。
- 3) 潜り込み長さが長いと隆起は減少し、特に、成形品板厚が2.5mm, 3mmにおいては、潜り込み長さを小さくすることによる隆起低減の効果が大きいことがわかった。
- 4) 合流部の界面において部位別にタルクの配向をSEM観察した結果、潜り込みが長いほど金壁面近傍の表層部ではタルクは流動方向に配向しており、タルクは板形状であり流動方向に沿って配向し冷却固化する。一方、板厚中心部では冷却固化が遅く、表層が固化しても合流界面は沿って、流動は進行しタルクの配向が形成され则认为られる。
- 5) 隆起は潜り込み長さに関係があり、シミュレーションにより予測した潜り込み長さより隆起の高さの予測が可能であるがわかった。また、一方向に潜り込んだU字形状で

はシミュレーションと高い相関があつたが、折り返すW形状では実験とシミュレーションに差があり、ホットランナーやゲート等の圧力損失を考慮する必要がある。

- 6) 合流形状を徐変することで、板厚の厚い側の樹脂から板厚の薄い側に潜り込み、その合流部先端のR形状を小さくでき、タルクの板厚方向の配向が減少させ、隆起を低減できることがわかった。

3.5 結論

樹脂の合流部であるウェルドライン部から数mm離れた隆起の発生メカニズムについて、樹脂が合流した後、板厚中心部のタルクの板厚方向の配向が隆起を引き起こすことがわかった。そこで、合流部を徐変させることで板厚の薄い側を早く冷却固化させて、板厚の厚い側の板厚中心部の樹脂を板厚の薄い側の中心部に突き刺さるように合流させることで、合流先端部は尖った形状になり、板厚方向へのタルクがほぼなくなる。このため、一般部と合流先端部のタルクの配向に差がなくなり、収縮時の隆起も低減できることがわかった。これにより、ゲートから遠い部位や対向するゲート配置ができない部品形状において、合流部を徐変形状にすることで隆起の高さを低減できる実用的な隆起の抑制方策を見出すことができた。

参考文献

1. 東川芳晃, CAEを用いた樹脂射出成品の品質向上-ウェルドライン生成現象の予測と対策, マテリアルライフ学会誌, 27(1), 2-12(2015)
2. 東レエンジニアリング株式会社, 2次ウェルドライン予測方法及び装置, そのプログラム, 記憶媒体およびそれ等を用いた成形品の製造方法, 特開2008-1088, 2008-1-10
3. マツダ株式会社, 樹脂成形品の流動解析方法 流動解析装置及び流動解析プログラム, 特許5573276, 2014-7-11
4. トヨタ自動車株式会社, 射出成形品の品質予測装置, 方法及びプログラム, 特許4807280, 2011-8-26
5. 山本智, 井上良徳, 東智美, 松岡孝明, 粒子シミュレーション法による粒子分散樹脂射出成形品のマイクロ構造予測, 日本機械学会論文集, 65(631), 506-513(1993)
6. 山本智, 繊維および板状粒子分散系の粒子シミュレーション法の開発と応用, 日本レオロジー学会誌, 29(4), 185-190(2001)
7. 藤山光美, 河崎洋徳, 脇野哲夫, 微粉末粒子充填ポリプロピレン射出成形物の分子鎖配向 I 構造と物性, 日本レオロジー学会誌, 15, 191-202(1987)
8. 古橋洋, 青木健朗, 岡部沙也佳, 荒井毅, 瀬戸雅宏, 山部昌, L字形状射出成形品のコナ-内反りメカニズム-内反り発現に与える添加材料および成形収縮の影響-, 成形加工, 22(4), 206-212(2010)
9. 保田和則, 小原教弘, 森教安, 千葉訓司, マイクロコンポジットの成形中におけるディスク状粒子の配向, 日本繊維機械学会誌, 58(3), 29-36(2005)
10. 2-domain Tait pvT モデル, Autodesk, <<https://help.autodesk.com/view/MFIA/2018/JPN/?guid=GUID-E21B0B8A-EAC4-4905-ABDA-8EB1A924F43A>>, 2022年02月04日最終アクセス
11. Cross - WLF 粘度モデル, Autodesk, <<https://help.autodesk.com/view/MFIA/2018/JPN/?guid=GUID-7BC3A8F0-8B41-4FCB-BDF1-F1159E4DD175>>, 2022年02月04日最終アクセス
12. CAE for Injection, ASIS, <<http://www.asis.co.kr/technology01.htm>>, 2022年02月04日最終アクセス

第4章 結言と今後の展望

4.1 本研究による成果と総括

本研究では、自動車プラスチック部品の射出成形における表面品質の向上を目的に、樹脂合流部における外観品質への材料に含有するフィラー（ゴムやタルク）への影響の研究を実施し、ウェルドライン直下に起こる隆起では、樹脂流動挙動におけるゴムの伸張や配向に着目し、また、ウェルドラインから離れた表層に発生する隆起については、合流部の板厚中心部における樹脂の潜り込み長さ及び合流部のタルクの配向に着目し、各々の現象観察よりメカニズム解明を行い、抑制方法を提案できた。

第1章の序論では、研究の背景や自動車プラスチックの材料や工法の現状から大物プラスチック部品の外観品質の状況を説明し、材料に含まれるゴムやタルクの流動が引き起こす外観品質の課題である隆起のメカニズム解明と抑制方策の必要性を述べた。

第2章では、ウェルドライン直下に隆起する品質問題に対して、樹脂の流動挙動の過程におけるゴムの伸張や配向について、SEM観察と2値化による定量化により、評価を行い、ファウンテンフローから噴き出すゴム粒子が流れにそって伸張をはじめ、金型壁面付近のスキン層と流動層の間に生じるせん断力によりゴム粒子が流動方向に伸張し固化する。一方、合流部では、樹脂がぶつかることでゴム粒子が板厚方向に伸張しながら配向するため、一般部と合流部ではゴムの伸張と配向に差が生じ、収縮率が異なり、ゴムが板厚方向に配向した合流部よりも流動方向に配向した一般部では収縮率が大きくなり、合流部での隆起が形成させることがわかった。また、金型温度を変化させた実験により、ゴム粒子の伸張を小さくすることでウェルドライン直下の隆起を小さくできること確認できた。

第3章では、ウェルドラインから離れた部位に発生する隆起について、板厚中心部のコア層の合流状態とタルクの配向について、合流部の断面観察と合流部のシミュレーションと隆起の関係を調査し、隆起のメカニズムを検証した。これにより、合流部の板厚中心部の合流状態により、タルクの配向が変化し、隆起に影響することを明らかにし、合流部の形状を徐変にすることで、隆起を低減できる技術方策の検証もできた。

総括

以上の結果より、本研究によって、自動車プラスチック部品における材料に含有するゴムやタルクの流動が及ぼす外観品質の課題である隆起への影響を明らかにし、外観を向上する技術方策を提示することができた。

以下に、そのメカニズムと外観品質に影響する隆起を低減する方法を示す。

- ウェルドライン直下の発生する隆起は、一般部と合流部のゴムの伸張と配向に大きく影響し、一般部ではゴムは金型近傍のスキン層と流動層の間に生じるせん断応力により流動方向に伸張しながら配向する。一方、合流部では樹脂が充填するに伴い、せん断速度が小さくなり、樹脂が合流することでゴムが板厚方向に伸張しながら配向する。このため、一般部ではゴムが流動方向に、合流部ではゴムが板厚方向に配向し、板厚方向への収縮に差が生じて、相対的な隆起が発生することがわかった。以上から、ゴムの伸張を抑えるために熔融せん断粘度の高いゴムを用いることや樹脂の冷却を緩和させることで一般部と合流部のゴムの伸張差を抑える金型コーティングが有効であることがわかった。
- ウェルドラインから数mm離れた隆起については、板厚中心部において樹脂が合流した際に片側に樹脂が潜り込み先端部のタルクの配向が隆起に影響することがわかった。また、潜り込み長さと同隆起高さには関係があり、シミュレーションよ

り潜り込み長さを算出することで潜り込み高さを予測できることを確認できた。また、バルブゲートの流量制御により、潜り込み長さを制御することで隆起を低減する方法やゲートから遠い部位に発生する隆起については、合流部の板厚を徐変にすることで、隆起を低減できる方法を提示できた。

4.2 今後の展望

プラスチック材料に含有するゴムやタルクの伸張および配向が外観品質に影響するメカニズムが明らかになったことで、実際の製品形状における外観品質の予測が期待される。設計段階で外観品質を定量的に評価できれば、製品設計、金型製作から品質確保までの試作期間が短縮できる。しかし、大物プラスチック部品のシミュレーションにおいては、開発期間も重要であり、3次元のソリッドモデルでは膨大な時間を要する。そこで、現在のシェルモデルを活用して、樹脂の合流位置、流速ベクトル、圧力、温度等の結果を境界条件として、部分的なソリッドモデルを用いたゴムやタルクの伸張および配向より表面形状を予測する解析手法を継続検討していきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始変わらぬご指導を頂きました日本大学生産工学部・高橋進教授に厚く御礼申し上げます。

論文の作成にあたりご多忙の中ご指導いただきました日本大学生産工学部・平山紀夫教授、並びに安藤努教授に深く感謝申し上げます。

試料の分析にご協力頂きました株式会社ロンビック様と株式会社日産アーク様、また、金型コーティングにご協力頂きました株式会社棚澤八光社様と大森クロム工業株式会社様に深く感謝いたします。

最後に、本研究へのご理解とご協力や励ましを頂きました日産自動車株式会社の皆様に心より感謝申し上げます。