射出成形品の表面性状に関する研究 第1報

—多数個取り金型内の樹脂流動の影響—

児玉 勝 洋^{*1}・藤原 健 輔^{*1}・丹下 章 男^{*1}・
山下 勝 久^{*2}・野々村 千里^{*1}・横山 敦 士^{*3}

The Study of Surface Properties in Injection Moldings(Part-1) —Effect of Molten Polymer Flow in an Injection Molding Die with Multi-cavities—

Kodama, Katsuhiro^{*1}/Fujiwara, Kensuke^{*1}/Tange, Akio^{*1}/
Yamashita, Katsuhisa^{*2}/Nonomura, Chisato^{*1}/Yokoyama, Atsushi^{*3}

Injection molding is used in various fields. Surface properties are an important subject and there are many reports on them. From the viewpoints of cost and productivity, the injection molding of multi-cavity injection die is used widely. However, there is no report on the research of surface properties in these injection moldings.

In this study, we observed surface state and measured surface roughness for the injection molding with emboss form on the surface and compared with surface state about molding conditions. Moreover, we carried out the optimization of runner design in consideration of simultaneous filling using injection molding flow analysis and considered the influence of runner balance on the surface state. High mold temperature improves surface properties for the whole injection molding. Short filling time improves surface properties for the portions do not require much packing pressure. The optimized runner balance can realize uniform surface properties in multi cavity injection die.

Key words : Multi cavity injection die/Injection molding/Surface properties/Optimization/
Runner balance

1. 緒 言

近年、自動車、家電製品および電子機器など様々な分野にプラスチック成形品が使用されており、その多くは射出成形により生産されている。プラスチック成形品には用途に応じて、耐熱性、剛性および衝撃性などの様々な要求品質がある。成形品表面の微細な凹凸形状に対する樹脂の転写状態も、重要な要求品質の一つであり、CD、DVDの光

ディスク基板としての実用的な要求や自動車・家電製品の外観に高級感などを与える感覚的な要求がある。それに対して、これまで表面性状に関して様々な研究がなされており、例えば、単一のV字溝の成形品における充填時間や金型温度などの成形条件および材料、溝方向の違いによる微細形状の転写機構に関する研究^{1),2)}や、転写性を向上させる方法として、二酸化炭素注入や超高压射出成形などによる研究^{3),4)}、金型表面の急冷・急加熱による成形サイクル短縮の研究⁵⁾が報告されている。一方、自動車・家電製品には、耐熱性や剛性などの要求性能を満足させるために、ガラス繊維（以下GFと略す）を含んだGF強化樹脂が多く使われている。GF強化樹脂の場合、射出成形時のGFの流動状態が成形品の表面状態やソリなどに影響を与えるため、非強化樹脂とは異なる挙動を示し、それらの要求品質を満足させる金型設計が課題となっている。また、コスト削減や生産性の向上などの観点から、複数のキャビティを設けた多数個取り金型による成形が広く行われている。多数個取りの場合、ランナーの配置やランナー径などのラ

^{*1} 東洋紡績(株) 総合研究所
大津市堅田 2-1-1 (〒520-0292)
TOYOBO Co., Ltd. Research Center
1-1, Katata 2-Chome, Otsu, 520-0292, Japan
^{*2} 東洋紡績(株) エンプラ事業部
TOYOBO Co., Ltd. Engineering Plastics Department
17-9, Nihonbashi, Koami-cho, Chuo-ku, Tokyo, 182-0024, Japan
^{*3} 京都工芸繊維大学大学院先端ファイブ科学専攻
Kyoto Institute of Technology Division of Advanced Fibro-Science
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585, Japan
2007.5.24 受理

Fig.1 Cavity and runner shape

ランナーバランスの違いにより、キャビティ間の樹脂流動状態が異なるため、均一な品質を有する製品を生産するための金型設計が課題となっている。

このように、射出成形によるGF強化樹脂や多数個取り金型を用いた成形品は広く使われており、これらの成形品に対する問題を解決することは重要なことである。それに対して、これまで著者らは、射出成形によるガラス繊維の配向状態がソリ変形に及ぼす影響に関する研究⁶⁾や、数値解析に最適化手法を組み合わせたランナー設計の研究を行い^{7)~9)}、GF強化樹脂や多数個取り金型が成形品に及ぼす影響に対する知見を得てきた。そこで、著者らはGF強化樹脂を用いた多数個取り成形品を対象に、成形品の表面品質について検討し、最適化手法を用いることにより、ランナー径を最適化した場合にキャビティ間の樹脂流動状態が、成形品の表面状態に与える影響についての研究を試みた。

本報では、キャビティ表面にシボ形状を有した多数個取り金型について、表面観察および表面粗さ計による計測を行い、充填時間、金型温度およびキャビティ間の違いによるシボ表面状態を比較した結果、同時充填を考慮して最適化手法を用いたランナー径の設計を行ったモデルを対象に、成形実験と有限要素法 (Finite element method: 以下 FEM と略す) による数値解析の結果について比較を行い、樹脂流動状態がシボ表面状態に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 試験片

本研究に使用した材料は、ポリエチレンテレフタレートとポリブチレンテレフタレート樹脂にガラス繊維 40 wt% を複合させた材料 (EMC-445: 東洋紡績製) であり、この材料に対して射出成形機 (東芝機械製: IS-80) を用いて、試験片を作製した。本研究では多数個取り成形品の表面状態を検討する上で、図 1 に示す 5 個取り金型を使用した。Cavity-1~5 の大きさは 60×10 mm、厚さ 2.0 mm、ゲート径は 3.0×3.0 mm、厚さ 2.0 mm とすべて同じ大きさとし、メインランナー径は ϕ 4.0 mm、サブランナー径 (ds_1 , ds_2 , ds_3 , ds_4 , ds_5) は、すべて ϕ 3.0 mm とした。また、キャビティ表面の金型固定側の面には、表面状態を評価するために、微細な凹凸形状を有するシボ加工を施し

Table 1 Molding conditions

Filling time (sec)	1.0, 3.0
Resin temperature (°C)	270
Mold temperature (°C)	50, 70, 90

Fig.2 Measurement part of surface state

た。このような金型に対して、表 1 に示すように、充填時間および金型温度を変えた成形条件にて射出成形を行い、試験片を作製した。

2.2 表面観察方法

成形品の表面観察は、デジタルマイクロスコープ (HI-ROX 製: KH-7700) を用いて、試験片のシボ表面を観察した。測定箇所は、図 2 に示すように試験片のゲートからの距離が 10 mm (Point-A)、40 mm (Point-B) の二箇所について観察を行った。

2.3 表面粗さ計による測定方法

成形品の表面状態は、表面粗さ測定機 (ミットヨ製: SURFTEST SV-600) を用いて、各試験片のシボ表面の表面粗さを測定した。測定箇所は、前述と同じ Point-A, B の二箇所をそれぞれ起点として、樹脂流動方向に 5 mm の部分について測定を行った。

3. 実験結果

3.1 シボ表面の観察結果

充填時間 1.0, 3.0 sec の場合の、金型温度 50°C, Cavity-3 における Point-A, B のシボ表面写真を図 3 に示す。充填時間 1.0 sec の場合には、Point-A, B とともに、シボ表面にガラス繊維は観察されず、シボ表面の外観は良好であることが確認された。充填時間 3.0 sec の場合には、ゲート近傍の Point-A では、ガラス繊維は観察されなかったが、成形品末端の Point-B では、シボ表面にガラス繊維が多数観察され、シボ表面の外観が悪いことが確認された。また、充填時間 1.0, 3.0 sec の場合の、金型温度 90°C, Cavity-3 におけるシボ表面写真を図 4 に示す。充填時間 1.0 sec の場合には、Point-A, B とともに、シボ表面にガラス繊維は観察されず金型温度 50°C と同様な傾向にあることが確認された。充填時間が 3.0 sec の場合には、金型温度 50°C に比べてシボ表面のガラス繊維の数は少なく、金型温度を高くしたことにより、シボ表面の外観が良くなっていることが確認された。

Fig. 3 Photographs in surface of molding at each point (Mold temperature = 50°C)

Fig. 4 Photographs in surface of molding at each point (Mold temperature = 90°C)

3.2 表面粗さ計による計測結果

結果の一例として、充填時間 1.0, 3.0 sec の場合の、金型温度 50°C, Cavity-3 における Point-A, B のシボ表面の凹凸状態を計測した結果を図 5, 6 に示す。縦軸は成形品表面の凹凸状態、横軸は測定位置を表している。充填時間 1.0 sec の場合には、Point-A, B とともに表面の凹凸はピッチが短いことが確認された。充填時間 3.0 sec の場合には、Point-A では表面の凹凸のピッチが短い、Point-B では表面の凹凸のピッチが長くなだらかな状態になることが確認された。

以上のように、金型温度 50°C における表面観察と表面粗さ測定から求めた凹凸のピッチを比較すると、充填時間 1.0 sec の Point-A, B および充填時間 3.0 sec の Point-A の場合は、表面観察において成形品表面にガラス繊維が観察されず、シボ表面の外観が良い場合には、表面粗さ測定において凹凸のピッチが短く、充填時間 3.0 sec の Point-B の場合は、表面観察において成形品表面にガラス繊維が観察され、シボ表面の外観が悪い場合には、表面粗さ測定において凹凸のピッチが長くなることが確認された。このように、表面観察から得られたシボ表面状態と表面粗さ計から求められる凹凸のピッチに相関があることが確認された。そこで、成形条件や多数個取りの形状がシボ表面の外観に与える影響を定量的に求めるため、各条件において、

Fig. 5 Results of surface roughness (Filling time = 1.0 sec)

Fig. 6 Results of surface roughness (Filling time = 3.0 sec)

表面粗さ測定結果から凹凸の個数を算出し、成形品のシボ表面状態について検討した。

結果の一例として、充填時間 1.0, 3.0 sec, 金型温度 50, 70, 90°C について計測した結果を図 7, 8, 9 に示す。ここで、計測した凹凸の個数を凹凸度数と定義した。充填時間、金型温度およびキャビティ間における、凹凸度数の傾向について以下に示す。

充填時間および金型温度のすべての条件について、ほとんどのキャビティで Point-A の凹凸度数が Point-B の凹凸度数に比べて大きくなることが確認された。

金型温度の比較においては、充填時間が 1.0, 3.0 sec のいずれの場合にも、金型温度が高くなると Point-A, B とともに凹凸度数が多くなる。特に、充填時間が 3.0 sec の場合に金型温度が高くなると凹凸度数の増加の程度が大きくなることが確認された。充填時間の比較においては、充填時間が短い場合については、Point-A, B の凹凸度数にほとんど差が見られない、Point-B は、充填時間が短くなることにより、凹凸度数が多くなることが確認された。キャビティ間の比較においては、Point-A はいずれのキャビティにも、凹凸度数に差が見られないが、Point-B はスプルから遠いキャビティに比べて、スプルに近いキャビティでの凹凸度数が少なくなる傾向が見られ、特に、充填時間 3.0 sec の場合にその傾向が顕著であることが確認された。

Fig.7 Relationship between uneven frequency and cavity number (Mold temperature = 50°C)

Fig.8 Relationship between uneven frequency and cavity number (Mold temperature = 70°C)

Fig.9 Relationship between uneven frequency and cavity number (Mold temperature = 90°C)

4. 流動解析を用いた流動状態がシボ表面に及ぼす影響

多数個取り射出成形品において、成形条件によりキャビティ間でシボ表面の外観が異なる。そこで、流動解析を実施し、樹脂の流動状態がシボ表面の外観に及ぼす影響について検討する。

4.1 数値解析方法

数値解析に用いた形状モデルは、図1に示す実験を行った形状と同じとし、成形条件は、充填時間 1.0, 3.0 sec, 樹脂温度 270°C, 金型温度 90°C とした。また、金型内の充填時の経時的な変化を推定するための樹脂流動解析ソフトウェアは、CIMP-PACK 3 DM (Cornell Injection Molding Program) を使用した。

4.2 数値解析結果によるシボ表面に対する推察

充填時間 1.0, 3.0 sec について、充填完了時の樹脂温度分布の解析結果を図10に示す。充填時間 1.0 sec の場合、キャビティ間において、樹脂温度の差がほとんどないことが確認された。しかしながら、充填時間 3.0 sec の場合、キャビティ間において、充填完了時間の短い Cavity-3 の樹脂温度が最も低く、充填完了時間の遅い Cavity-1, 5

Fig.10 FEM results of temperature distribution at the time of filling end

Fig.11 Experimental and FEM results of filling pattern at various filling rate. (Filling time = 3.0 sec)

の樹脂温度が最も高くなることが確認された。

数値解析結果と実験結果を比較すると、充填時間 1.0 sec の場合、すべてのキャビティで樹脂温度が高く、凹凸度数も多いことがわかる。充填時間 3.0 sec の場合、樹脂温度が高い Cavity-1, 5 は成形品末端の凹凸度数が多いが、樹脂温度の低い Cavity-3 は、成形品末端の凹凸度数が少ない。このようにキャビティ間で凹凸度数が異なるのは、キャビティ内での成形品の樹脂温度が異なるためであり、樹脂温度が成形品のシボ表面に影響のあることが推察される。そこで、キャビティ間で樹脂温度が異なる影響を検討するために、樹脂の充填過程での流動状態の評価を行った。

結果の一例として、充填時間 3.0 sec, 金型温度 90°C において、充填率 30, 80% 時の、実際に射出成形を行ったときの成形品のショートショットの写真および流動解析結果の充填パターンを図11に示す。ここで、充填率はすべてのキャビティの末端部まで充填されるのに必要な樹脂量と実際に充填された樹脂量との比と定義した。実験結果と数値解析結果は、各充填率における各キャビティに充填されている樹脂の量が、すべてのキャビティでほぼ一致していることが確認された。実験結果および数値解析結果からスプルに最も近い Cavity-3 の充填が最も速く、スプルから最も遠い Cavity-5 の充填が最も遅く、各キャビティでの充填完了時間を比較した場合、充填完了時間が最も速い Cavity-3 と充填完了時間が最も遅い Cavity-5 の充填完了

時間には、0.7 sec の違いがあることが確認された。このように、キャビティ間での充填完了時間の差が大きいため、すべてのキャビティの充填が完了したときに、先に充填が完了したキャビティの樹脂温度が大きく低下する。そのために、Cavity-3 の成形品末端部分のシボ表面の外観が悪くなると推察される。

以上のことから、充填完了時の樹脂温度が高い場合に、シボ表面の外観が良くなることが推察され、成形品のシボ表面状態を向上させるには、キャビティ内の樹脂温度をできるだけ高くした状態で充填を完了させる必要がある。その方法としては、金型温度を高くする、または、充填時間を短くすることが効果的であるが、前者は成形サイクルが長くなり、後者はせん断発熱により樹脂が劣化する可能性がある。その場合、キャビティ間で樹脂温度に差が生じない方策として、キャビティ間の充填完了時間の差をできるだけ小さくすることが効果的であり、そのためには樹脂の充填バランスを均一にすることが有効であると推察される。

5. シボ表面状態均一化のためのランナー設計

実験結果と数値解析結果から、成形品の樹脂温度分布とシボ表面の外観に相関が見られ、キャビティ間の温度分布をできるだけ小さくする要因の一つとして、キャビティ間のランナーバランスの均一化があげられる。そこで、キャビティ間の充填バランスを均一にするために、最適化手法を用いた流動解析により、ランナー径の最適化の検討を行った。

5.1 解析条件

数値解析に用いた金型モデルのキャビティ、ゲート形状およびメインランナー径は、図 1 に示す実験および数値解析を行った形状と同じとし、サブランナー径を設計変数として、各キャビティへの同時充填、すなわち、各キャビティの末端部に熔融樹脂が到達する時間の差がゼロとなる条件を目的として、最適化手法と流動解析を組み合わせたランナー径の最適化を行った。最適化手法は、最急降下法による方法を用いた。

ここで、最適化に用いた設計パラメータを表 2 に示す。スプルに最も近いサブランナー (ds_3) のみ ϕ 2.6 mm と一定にし、その他のサブランナー径 (ds_1 , ds_2 , ds_4 , ds_5) を設計変数とした。成形条件は、充填時間 3.0 sec, 樹脂温度 270℃, 金型温度 90℃ として数値解析を行った。

5.2 最適化による樹脂流動状態への影響

多数個取り成形品の各キャビティへの同時充填を目的として、最適化手法を用いた樹脂流動解析により、サブランナー径の最適化を行った。その結果、設計変数とした各サブランナー径の値は以下に示すとおりに算出された。 $ds_1 = \phi$ 3.2 mm, $ds_2 = \phi$ 2.8 mm, $ds_4 = \phi$ 3.1 mm, $ds_5 = \phi$ 3.6 mm となり、スプルに近いほど径が小さい結果になること

Table 2 Design parameters

Main runner (mm)	ϕ 4.0
Sub runner (mm)	
ds_3	ϕ 2.6
ds_1, ds_2, ds_4, ds_5	ϕ 2.0~4.0
Sprue (mm)	ϕ 4.0

が確認された。各キャビティ間での充填完了時間を比較した場合、キャビティ間の充填完了時間の違いが、最適化前のすべてのサブランナーが同じ形状（以下 Case-1 とする）は、0.7 sec あったものが、最適化した形状（以下 Case-2 とする）では 0.05 sec 以下になることが確認された。

ここで、Case-2 の金型を作製し、射出成形実験により Case-1 と同様の条件にて試験片を作製し、流動解析結果との比較を行った。充填時間 3.0 sec, 金型温度 90℃ において、充填率 30, 80% 時の実際に射出成形を行ったときの成形品のショートショットの写真および流動解析結果の充填パターンを図 12 に示す。実験結果から、Case-2 の場合、すべてのキャビティに充填されている樹脂量がほぼ等しく、同時充填されていることが確認された。また、流動解析結果は、実験結果とほぼ一致していることが確認された。Case-1, Case-2 における充填率と流動長の関係について実験結果と流動解析結果を比較したものを図 13, 14 に示す。Case-1 の場合、Cavity-3 の充填が最も速く、順に Cavity-2, 4, 1, 5 の順になるが、Case-2 の場合、すべてのキャビティに充填されている樹脂の量がほぼ等しく、同時充填されていることが確認された。ここで、Case-2 の充填時間 1.0, 3.0 sec, 金型温度 90℃ における充填完了時での、樹脂温度分布の流動解析結果を図 15 に示す。充填時間 1.0 sec の場合、キャビティ間において、樹脂温

Fig. 12 Experimental and FEM results of filling pattern at various filling rate. (Filling time = 3.0 sec)

Fig. 13 Relationship between filling length and filling rate (Sub-runner : Case-1)

Fig. 14 Relationship between filling length and filling rate (Sub-runner : Case-2)

Fig. 15 FEM results of temperature distribution at the time of filling end

Fig. 16 Relationship between uneven frequency and cavity number (Mold temperature = 50°C)

度の差がほとんどなく、Case-1 と同様な傾向が見られた。一方、充填時間 3.0 sec の場合、Case-1 と異なり、キャビティ間において、樹脂温度がほぼ同じ傾向になることが確認された。

5.3 最適化による表面状態への影響

結果の一例として、充填時間 1.0, 3.0 sec, 金型温度 50, 70, 90°C について計測した結果を図 16, 17, 18 に示す。金型温度が高くなる、または充填時間を短くすると凹凸度数が大きくなり、Case-1 と同様な傾向が見られた。

しかし、Case-2 の場合においては、Case-1 のように、スプルから遠いキャビティに比べてスプルに近いキャビティの凹凸度数が小さい傾向が見られないことが確認された。そこで、Point-A, B の差のキャビティ間でのバラツキについて標準偏差を求めた。充填時間 1.0, 3.0 sec において、Case-1, 2 の場合における標準偏差と金型温度の

Fig. 17 Relationship between uneven frequency and cavity number (Mold temperature = 70°C)

Fig. 18 Relationship between uneven frequency and cavity number (Mold temperature = 90°C)

Fig. 19 Relationship between standard deviation and mold temperature

関係を図 19 に示す。充填時間 1.0 sec の場合、金型温度が高くなると、標準偏差は小さくなる傾向が確認された。充填時間 3.0 sec の場合も同様に、金型温度を高くすると標準偏差は小さくなる傾向にあり、金型温度による標準偏差の違いが充填時間 1.0 sec に比べて大きいことが確認された。また、充填時間 1.0 sec の場合、Case-1 と Case-2 の標準偏差の違いはほとんど見られないが、充填時間 3.0 sec の場合、Case-1 に比べて Case-2 の標準偏差は小さくなり、成形品の表面状態のバラツキが小さくなることが確認され、ランナー径を最適化したことにより、シボ表面の外観が良くなることが確認された。

6. 考 察

多数個取り成形品に関して、成形条件およびランナーバランスがシボ表面状態に及ぼす影響について得られた知見を以下に考察する。

6.1 成形条件がシボ表面に及ぼす影響

表面観察と表面粗さ測定結果から、充填時間および金型温度が多数個取りの金型に及ぼす影響について考察した。一個取りの金型における成形品のシボ表面の転写状態につ

いて、射出速度による影響も若干あるが、金型温度の影響が顕著なことが以前から報告されている⁴⁾。今回行った多数個取り金型のシボ表面状態の結果についても、金型温度を高くするとゲート近傍から成形品の末端部まで全体的にシボ表面の凹凸が多くなり、シボ表面の外観が良くなる結果が得られた。しかし、充填時間に関しては、射出速度を上げて充填時間を短くした場合に、シボ表面の外観は、ゲート近傍については、若干良くなる程度で過去の事例と同様な傾向であったが、成形品末端部については、金型温度による効果と同じ程度にシボ表面状態が向上することが明らかとなった。これは、ゲート近傍は樹脂の充填が速く、保圧もかかりやすいために充填時間の影響をあまり受けないが、成形品末端部は充填時間が長くなると、樹脂の温度低下による固化により、保圧が作用しにくくなるため、シボ表面に樹脂が転写されず、シボ表面の外観が悪くなったと考えられる。特に、スプルに近いキャビティの成形品末端において、充填時間が異なる場合のシボ表面状態の違いが大きい。これは、スプルに近いキャビティは充填時間の早い段階において樹脂の充填が完了するので、スプルから遠いキャビティよりも、樹脂の温度低下による固化が進展するためと考えられる。

6.2 ランナーバランスがシボ表面に及ぼす影響

最適化手法により同時充填を考慮したランナー径でのシボ表面について考察した。本報の結果からランナー径の最適化は、充填時間の長い場合にシボ表面状態のバラツキを抑制する効果のあることが確認された。これは、上述したようにランナー径が均一の場合、キャビティ間で充填完了時間が異なるため、図11の解析結果で示したように樹脂温度分布に違いが生じる。そのために、シボ表面の樹脂の固化状態や保圧のかかり方がキャビティ間で異なり、成形品のシボ表面状態にキャビティ間でのバラツキが起きたものと考えられる。したがって、同時充填を考慮した最適化手法によりランナー径を最適化することによって、キャビティ間の充填完了時間がほぼ等しくなったため、図15の解析結果に示すように、充填完了時におけるキャビティ間での樹脂温度分布が均一になり、シボ表面状態のバラツキが抑えられたものと考えられる。

以上のことから、実際の多数個取り成形品の製品設計においてシボ表面状態を考慮する場合、一般的には樹脂温度を高い状態にするには、金型温度を高くするまたは充填時間を早くする方法が用いられるが、それぞれ成形に問題が生じる場合がある。したがって、金型温度を低く抑えながら、キャビティ間でのシボ表面状態のバラツキを小さくするためには、キャビティ間の樹脂流動状態を等しくすることが重要であると考えられ、その一つの方法として、ラン

ナー径を最適化することは、非常に効果的であると考えられる。

7. 結 言

多数個取り金型による成形品のシボ表面の表面観察と表面粗さを測定し、最適化手法を用いて同時充填を考慮したランナー設計を行った結果、樹脂流動状態および成形条件が、多数個取り金型の成形品の表面性状に及ぼす影響について、以下の結論を得た。

- (1) 金型温度を高くすることは、成形品のゲート近傍から末端部まで、成形品全体に対してシボ表面の外観を向上させる効果がある。
- (2) 充填時間を短くすることは、成形品末端部分に対してシボ表面の外観を向上させる効果がある。
- (3) ランナーバランスを最適化することは、樹脂流動状態を均一にし、金型温度を低く抑えながら、キャビティ間でのシボ表面状態のバラツキを小さくする方法として効果がある。

本報では、充填完了時の樹脂温度に着目し、成形品の表面状態との相関性を確認したが、キャビティ内での樹脂流動およびガラス繊維が表面状態に影響を与える要因についてさらに詳細な検討を行い、それらを考慮した数値解析による最適化手法からランナー設計を行うシステムを構築していくこと、さらには表面性状以外の性能についても検討していくことが、今後の研究課題として残る。

参 考 文 献

- 1) 安原鋭幸, 加藤和典, 今村博史, 大竹尚登: 塑性と加工, **43**(1), 45(2002)
- 2) 村上治, 濱田泰以: 成形加工 '05, 85(2005)
- 3) 海野雄士, 館山弘文, 加藤毅: 成形加工シンポジア '05, 251(2005)
- 4) 高橋辰夫, 金佑圭, 瀬川憲, 横井秀俊: 成形加工シンポジア '02, 59(2002)
- 5) 安原鋭幸, 加藤和典, 藤澤直樹, 大竹尚登: 日本機械学会論文集, C-67(5), 422(2001)
- 6) 山下勝久, 野々村千里, 山田敏郎: 成形加工, **13**(6), 400(2001)
- 7) 安武健司, 横山敦士, 濱田泰以: 成形加工, **10**(7), 548(1998)
- 8) 高藤昭夫, 久保貴裕, 横山敦士, 濱田泰以: 成形加工, **14**(7), 456(2002)
- 9) 高藤昭夫, 田村圭, 横山敦士: 成形加工, **15**(5), 357(2003)