

# 軟質工具を用いた高精細かつ大面積転写技術の開発

名城大学 理工学部 機械工学科  
准教授 吉川 泰晴  
(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019029-B3)

キーワード：凹凸転写，圧延，軟質工具

## 1. 研究の目的と背景

微細凹凸は撥水性や防汚性などの機能性表面の付与や、硬貨などの意匠製品などに適用されている。これらの微細凹凸はエッチングや放電加工、精密切削、コイニングなどにより製作されている。微細凹凸の大面積化は機能性表面を有する素材としての活用や、生産性の向上による低コスト化に対して有効である。しかしながら、エッチング、放電加工、精密切削は製造時間やコストの問題で大面積への凹凸成形は現実的ではない。一方、コイニングは塑性加工であり、大量生産に向いているものの、金型と被加工材の摩擦の影響を受けやすい。そのため、大面積のコイニングを行うと、加工時の荷重や圧力が極端に大きくなり、加工不可能である。

この問題に対し、コイニングではなく圧延加工を用いることで、容易に大面積へ凹凸転写が可能になる。圧延による凹凸転写法として、佐々木らはフォトリソグラフィ加工により圧延ロールの表面に凹凸を作製することを実現し、そのロールで圧延することで被加工材に凹凸を転写させる方法を提案している<sup>1)</sup>。Kurnia, 吉野らは微細加工により作られた平板状のマスターモールドにニッケルめっき後に分離して、凹凸が転写されたニッケル型を使用し、このニッケル型を純アルミニウム板材と重ね合わせて圧延する「ローラーインプリント」を提案している<sup>2)</sup>。

一方、我々の研究グループは凹凸パターンを印刷した軟質材料を工具に用いた転写技術を提案している<sup>3-5)</sup>。この技術では、紙や樹脂フィルムなどにレーザープリンターで転写模様を印刷したものを工具として、被加工材と重ねて圧縮することで凹凸を転写する。そのため、従来の凹凸成形技術より短時間かつ安価に工具を作製でき、模様の変更も容易である。この方法を圧延加工に適用すれば、ロールの周長によらず長い凹凸の転写も可能となる。

そこで、本研究ではこの軟質材料を用いた凹凸転写技術を圧延加工に適用し、大面積への凹凸転写を試みる。圧延加工ではロールのたわみによる板厚の分布や、材料の異方流動が発生することで転写の挙動が変化することが予想される。印刷工具を用いた場合の各種圧延条件が凹凸の転写精度や均一性に及ぼす影響について検討する。

## 2. 実験方法

### 2・1 実験装置

本実験で使用した圧延機を 図 1 に示す。本圧延機は独自に設計、製作したものである。最大圧延荷重は 80 kN、

最大ロール回転数は 11.1 rpm で、直径 40mm と 80mm のロールが取り付け可能である。ロールの幅は 120 mm である。ロールギャップは左右の压下量調節スクリューにより 0~40 mm の範囲で調節が可能である。ロールの下部には左右にロードセルが設置されており、左右のチョックを介して圧延荷重が測定できる。ロールの材質は焼入れ焼戻しを行った SKD11 で表面は鏡面仕上げとし、その算術平均粗さは  $Ra = 0.005 \mu\text{m}$  である。

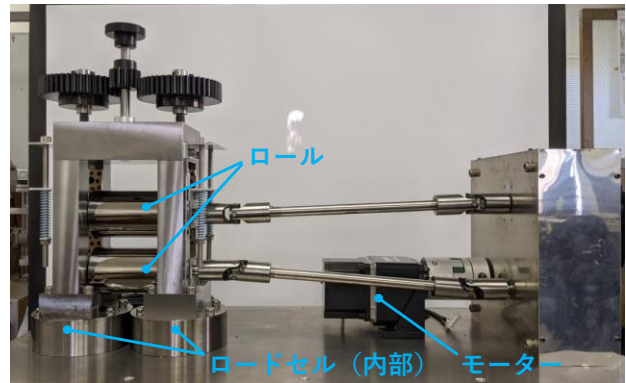


図 1 独自設計・製作の圧延機

### 2・2 試験片および印刷工具

試験片は幅 100 mm、長さ 50 mm、厚さ 0.965 mm の純アルミニウム A1050-O と幅 50 mm 長さ 50 mm、厚さ公称 1 mm の冷間圧延鋼板 SPCC を使用する。SPCC については、凹凸を転写する面は研磨により算術平均粗さ  $Sa = 0.1 \mu\text{m}$  程度、裏面は素材のまま  $Sa = 0.4 \mu\text{m}$  となっている。流動応力は A1050-O が  $\sigma = 165(0.0002 + \epsilon)^{0.30}$  SPCC が  $\sigma = 568(0.02 + \epsilon)^{0.22}$  である。降伏応力(耐力)は A1050-O が 24.6 MPa、SPCC が 218.2 MPa である。凹凸転写時の圧延方向は素材の圧延方向と同じ方向とする。アセトンによる脱脂洗浄を行い、実験に供する。

印刷工具の基材にはポリエチレンテレフタレート (PET) フィルム (厚さ 12, 25, 38, 75, 100  $\mu\text{m}$ )、アルミニウム箔 (厚さ 11, 25, 40, 60  $\mu\text{m}$ ) を用いた。薄いフィルムは単体で印刷するとプリンター内での詰まりを起こすため、普通紙に貼って印刷した。レーザープリンターで図 2 に示すような線幅 0.6 mm、ピッチ 2.6 mm の格子模様を印刷する。ロールギャップの影響を調べるときは全面に、ロール直径の影響を調べるときは中央部と端部に格

子模様を配置する。トナーの平均高さは PET フィルム表面と印刷部が含まれる断面曲線の高さに関するヒストグラムから求める。印刷部の高さはおよそ  $4\mu\text{m}$  である。トナーは表 1 に示す成分の黒い着色剤の粉末であり、印刷機によって PET フィルム上に焼き付けられる。

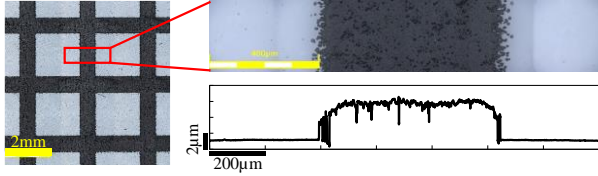


図 2 印刷部の顕微鏡写真と断面プロファイル

表 1 トナーの成分

成分	割合 (wt%)
スチレン・アクリル酸エステル共重合体	75-85
ワックス	5-10
カーボンブラック	5-10
非晶質シリカ	1-3

### 2・3 実験方法

本実験では、図 3 のように、試験片の両面で同じ摩擦状態とするために印刷工具と印刷していない PET フィルムで試験片を挟み、潤滑剤を使用しないドライ環境下で圧延する。直径 80mm のロールを用いて、圧延速度を 8.5 mm/s とし、上下ロールの隙間であるロールギャップを 1.150 mm $\sim$ 0.725 mm まで 0.025 mm ピッチで実験を行う。また、ロールギャップを 0.9 mm として、ロール直径の影響を調査する。

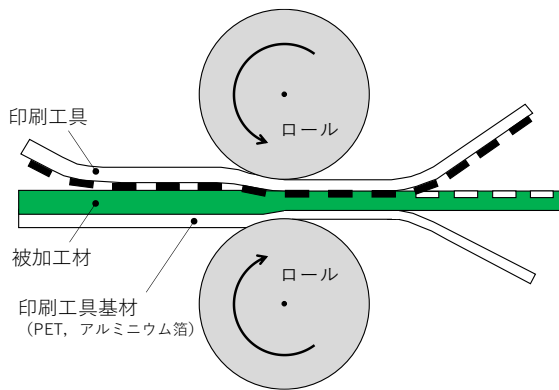


図 3 圧延式凹凸転写の概略図

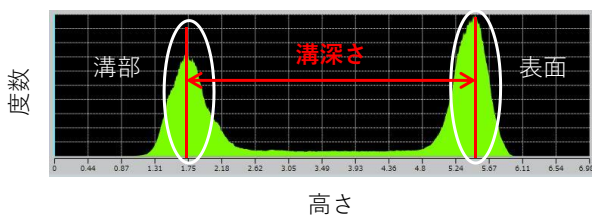


図 4 転写した凹凸の高さヒストグラム

凹凸転写を行った試験片は圧延方向(Rolling Direction : RD)と幅方向(Transversal Direction : TD)の断面曲線をレーザー顕微鏡により測定する。断面曲線から溝の幅を求め、また図 4 のようにヒストグラムから溝の深さを求める。板厚はポイントマイクロメーターを使用して測定する。

## 3. 実験結果

### 3・1 純アルミニウム A1050-0 への転写

直径 80 mm のロールを用いてロールギャップを変化させたときの、実験後の試験片の端部における板厚を測定し、圧下率を求めた。PET フィルムの厚さは 100 $\mu\text{m}$  である。ロールギャップと圧下率の関係を図 5 に示す。試験片と 2 枚の PET フィルムを合わせた厚さは 1.165 mm であり、ロールギャップが 1.125 mm から板厚が減少した。さらにロールギャップを小さくしていくことで、線形的に圧下率が上昇し、0.725 mm では圧下率が 15.08 %であった。

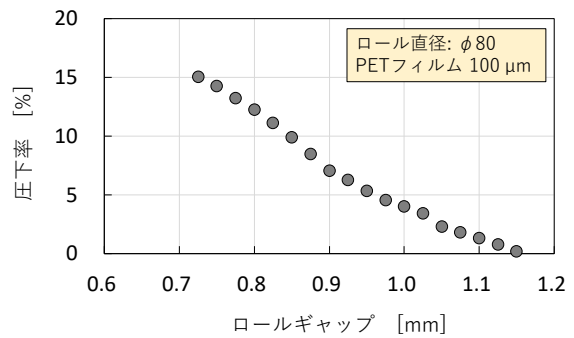


図 5 純アルミニウム板材に対するロールギャップと圧下率の関係

各ロールギャップで圧延した試験片の外観写真を図 6 に示す。ロールギャップが 1.150 mm の試験片では格子模様はほとんど見られないが、1.100 mm ではわずかに格子模様がみられる。さらにロールギャップが小さくなると格子模様が明瞭に転写されていくことがわかる。おおむねロールギャップが 0.950mm 程度であれば明瞭な格子模様が得られており、純アルミニウムに対して凹凸を明瞭に転写するためには、圧下率はおおよそ 5 %以上必要である。

圧下率と溝ピッチの伸びの関係は凹凸転写において重要である。いずれの圧下率においても、幅方向の伸びは 0 $\sim$ 1%程度であった。圧延方向には、圧下率 5.36%では 3%ほど溝ピッチが伸び、圧下率 14.27%では 10%程度に溝ピッチが伸びた。溝ピッチの伸びは圧下率が增大するに従い大きくなり、概ね線形的に増加した。なお、試験片の中央部と端部において溝ピッチの変化は同等であった。

圧下率が 14.27%の試験片の中央部と端部における圧延方向と横方向の表面のプロファイルを図 7 に示す。いずれのプロファイルからも溝が成形されていることが分かる。また、溝深さは概ね同程度であるが、中央部、端部ともに、圧延方向の溝幅が横方向の溝幅よりも長くなっているようである。

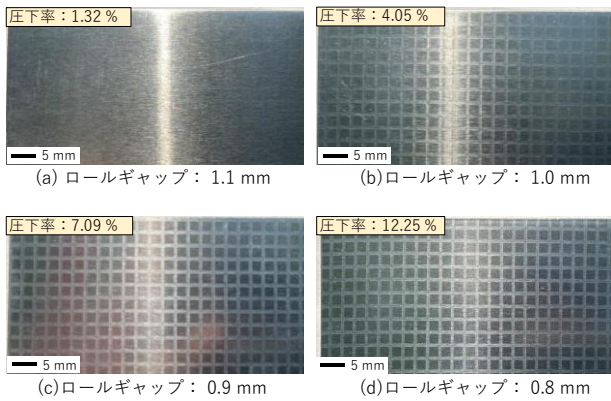


図6 各ロールギャップにおける試験片の外観写真

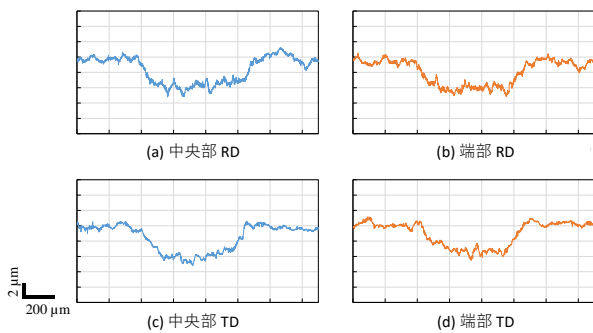


図7 中央部と端部における圧延方向と横方向のプロファイル

各圧下率における溝幅の転写率を図8に示す。幅方向、圧延方向どちらも圧下率によらず 100~115% の転写率となっている。また中央部と端部の差はなくほとんどなく、均一に転写されていることがわかる。

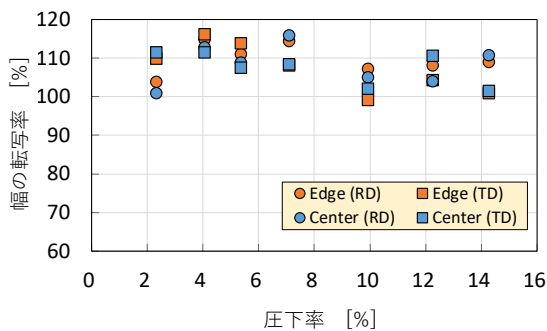


図8 各圧下率と溝幅の転写率

各圧下率における溝深さの転写率を図9に示す。圧下率 3%以下では転写率が低くなっている。圧下率が大きくなるにつれて溝深さの転写率も高くなるが、圧下率が 10%程度から 100%に満たない溝深さの転写率となった。以上の結果より、圧下率を 4~10%程度に設定することで、厚さ 1 mm の A1050-O 板材に転写率が 100%に近い凹凸転写を行うことができる。また、圧延方向の伸びを見越して、

転写する凹凸パターンは圧延方向に圧下率程度収縮させておくことが望ましい。

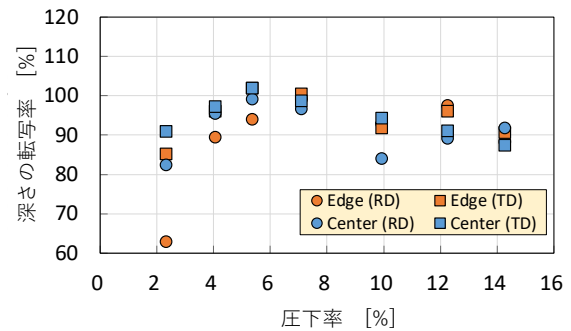


図9 各圧下率と溝深さの転写率

ロールギャップ 0.9 mm で、ロール直径を 40 mm と 80 mm としたときのそれぞれの転写時の圧延荷重を図 10 に示す。板の端部がロール間に入ってから数 mm 圧延した後に、定常状態となっていることが分かる。ロールと試験片の接触長さの違いから、φ40 ではおよそ 13 kN、φ80 ではおよそ 21 kN の圧延荷重となった。

それぞれのロール直径による転写後の試験片の幅方向の板厚分布を図 11 に示す。φ80 では板厚が一定であり平均板厚が 0.90 mm であった。一方、φ40 の板厚は端部では 0.895 mm であるが、中央部では 0.918 mm となり、中央部が厚くなる板クラウンが見られた。この原因は圧延時のロールのたわみによるものである。

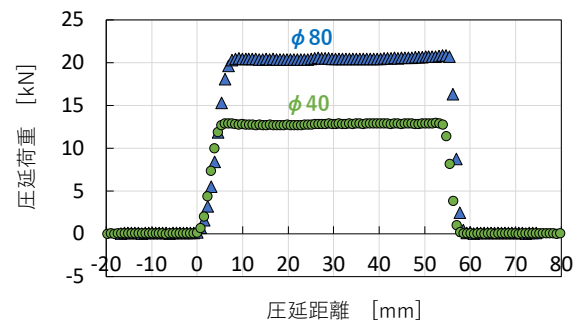


図10 ロール直径 40 mm と 80 mm での圧延荷重

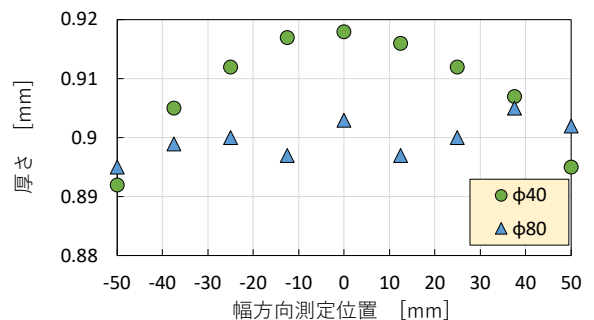


図11 ロール直径 40 mm と 80 mm で圧延した時の板厚分布

転写後の試験片の中央部と端部における圧延方向と幅方向の溝幅の転写率を図 1 2 に示す。幅方向の転写率はロール直径が  $\phi 40$ ,  $\phi 80$  ともに 100 % 近い転写率となった。一方、圧延方向ではどちらも 100 % を超えており溝幅の転写率は幅方向より圧延方向の方が大きい結果となった。

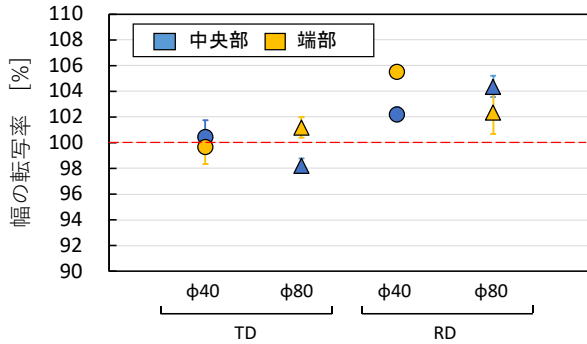


図 1 2 溝幅の転写率

転写後の試験片の中央部と端部における圧延方向と幅方向の溝深さの転写率を図 1 3 に示す。いずれのロール直径のときでも幅方向の溝深さの転写率は 100 % 程度となっている。ロール直径を  $\phi 40$  とした場合、圧延方向の溝深さの転写率は中央部と端部に大きな差があった。また、 $\phi 80$  においてもデータにばらつきが見られた。

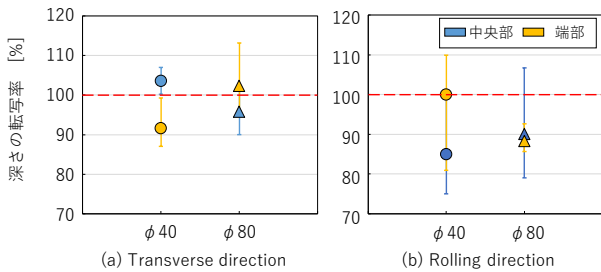


図 1 3 溝深さの転写率

大面積のパターンを転写する場合、ロール直径が  $\phi 40$  では板クラウンが発生するため、長尺になるほど PET フィルムのしわの発生につながるものが懸念される。したがって、小径ロールでの凹凸転写を行う場合はバックアップロールやロールベンディング法などで板クラウンの発生を抑制することが望ましい。

### 3・2 冷間圧延鋼板 SPCC への転写

各厚さの PET フィルムを用いて転写実験を行った SPCC 試験片の表面の光学顕微鏡写真を図 1 4 に示す。厚さ  $12 \mu\text{m}$  の PET フィルムを工具に用いた場合は転写された格子模様が明瞭に確認できる。厚さ  $25 \mu\text{m}$ ,  $38 \mu\text{m}$  でも同様に明瞭な模様を確認することができるが、厚さ  $75 \mu\text{m}$  では溝部と非溝部の境界が判別し難いほど不明瞭な転写結果となっている。

各厚さの PET フィルムを用いて転写実験を行った SPCC 試験片の溝部の断面プロファイルである。顕微鏡写真と同様に、薄い工具を用いたものほど印刷工具の印刷部形状と同様な角に丸みがあり、かつ溝底面が平坦な形になっている。しかしながら、厚さ  $75 \mu\text{m}$  の PET フィルムを用いた場合の断面プロファイルは溝の底面が平坦ではなく中央部が最も深い逆三角形のような形状となっており、溝は転写できているものの印刷部形状を正確に転写できてはいない。

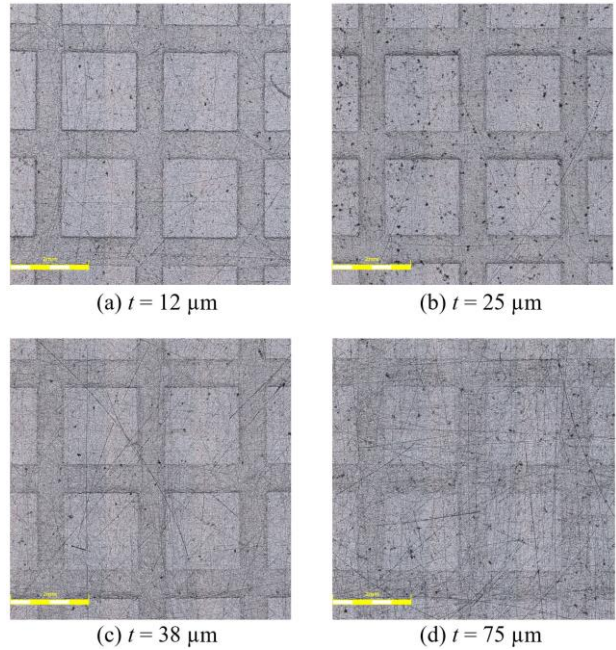


図 1 4 各厚さの PET フィルムで凹凸を転写した SPCC の外観

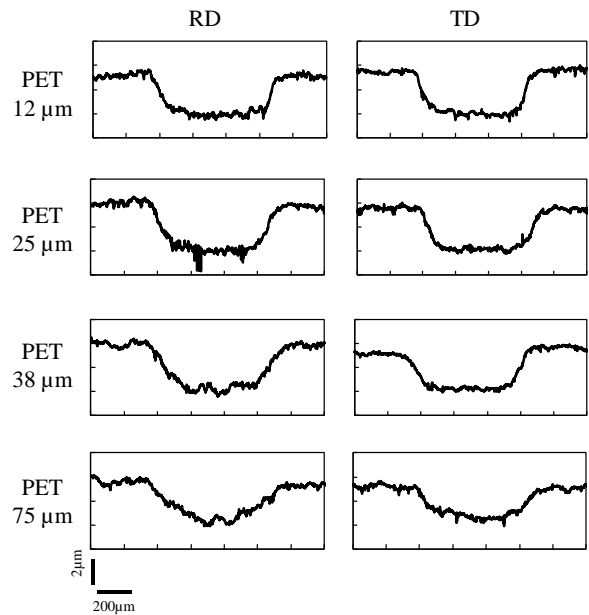


図 1 5 各厚さの PET フィルムで凹凸転写した SPCC の溝のプロファイル



各厚さの PET フィルムを用いて転写実験を行ったときの溝深さの転写率を図 1 6 に示す. RD, TD のいずれもフィルム厚さが薄くなるに従い, 転写率が高くなっていく傾向がみられ, 12  $\mu\text{m}$  の PET フィルムを使用した場合の転写率は RD で 106.9%, TD で 100.3% となった. RD では厚さが 12~38  $\mu\text{m}$  では転写率はほぼ 100% となっているが, 75  $\mu\text{m}$  の PET フィルムを使用した場合は RD の転写率 60.3% と低くなっている. TD ではフィルム厚さが厚くなるに従い, 転写率が低くなり, 100% 程度となるのは 12  $\mu\text{m}$  のみである.

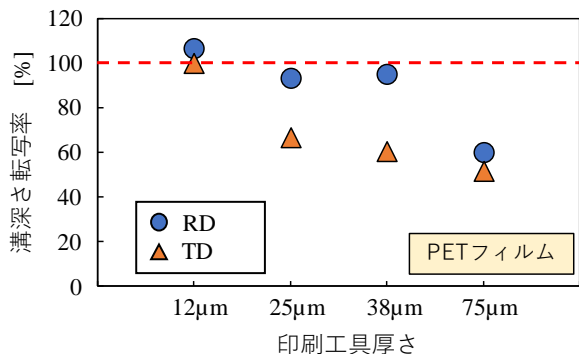


図 1 6 PET フィルムを使用した場合の溝深さ転写率

各厚さのアルミニウム箔を用いて転写実験を行った SPCC 試験片の表面の光学顕微鏡写真を図 1 7 に示す. 厚さ 11  $\mu\text{m}$  のアルミ箔を工具に用いた場合は転写された格子模様が明瞭に確認でき, 厚さ 25  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$  の工具を用いて転写した場合も同様に明瞭な模様を確認できるが, 60  $\mu\text{m}$  の工具を用いて転写した場合は溝部と非溝部の境界が不明瞭な転写結果となっており, PET フィルムを工具に用

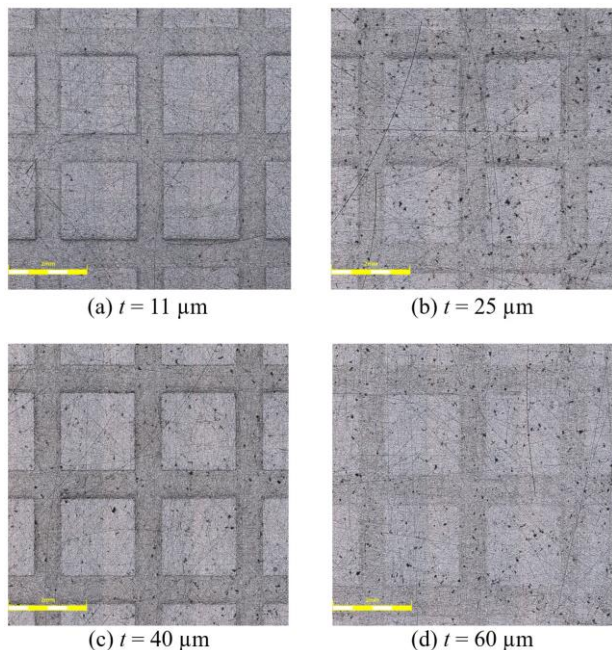


図 1 7 各厚さのアルミニウム箔で凹凸を転写した SPCC の外観

いた転写実験と同じ傾向を示している.

各厚さのアルミニウム箔を用いて転写実験を行った SPCC 試験片の断面プロファイルを図 1 8 に示す. 外観写真で明瞭な模様を確認できた 11, 25, 40  $\mu\text{m}$  のアルミニウム箔の印刷工具を使用した場合には, いずれの厚さにおいても凹凸が転写できていることが確認できる. しかし, 60  $\mu\text{m}$  の工具で転写した断面プロファイルからは, ならかな溝形状が転写されており, 溝部と非溝部の境界は断面形状においても不明瞭である. この傾向は PET フィルムを用いた場合と同様の傾向を示している.

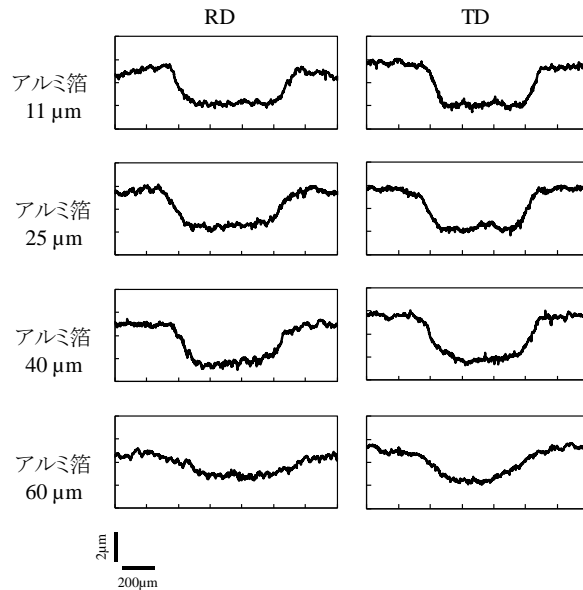


図 1 8 各厚さのアルミニウム箔で凹凸を転写した SPCC の溝のプロファイル

各厚さのアルミニウム箔を用いて転写実験を行ったときの溝深さの転写率を図 1 9 に示す. PET フィルムを使用した時と同様に, RD, TD のいずれもアルミニウム箔の厚さが薄くなるに従い転写率がたかくなった. 12, 25  $\mu\text{m}$  のアルミニウム箔を使用した場合の転写率は 100% 程度となり, 60  $\mu\text{m}$  のアルミ箔を使用した場合は RD の転写率 30.9%, TD の転写率 63.6% と低くなった. しかし RD の転写率と TD の転写率を比較すると, どの厚さの工具でも

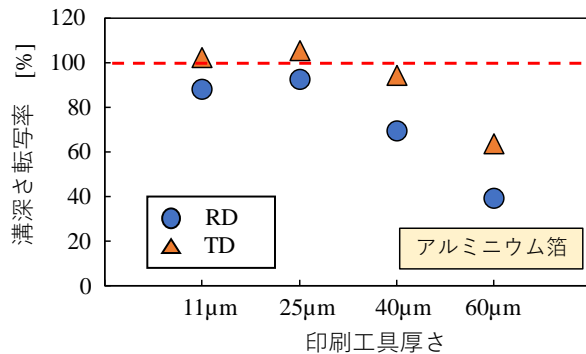


図 1 9 アルミニウム箔を使用した場合の溝深さ転写率 TD が RD より高い転写率となっている. これは PET フィ

ルムの工具と逆の傾向となった。

PET フィルム、アルミニウム箔ともに薄くなるに従い、転写率が高くなったが、さらに薄くした場合には平板金型に直接印刷したものと同等になると考えられる。この場合、トナーの変形挙動がフィルムが厚い場合と変わると予想しており、詳細な転写機構の解明を進めていく必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では大面積への凹凸転写が可能となる圧延加工において、印刷した工具を使用した凹凸転写法を適用し、その加工条件が及ぼす転写への影響を調べた。その結果を以下にまとめる。

- ・ 圧延加工において、印刷した PET フィルムおよびアルミニウム箔を工具として純アルミニウム A1050-O および冷間圧延鋼板 SPCC への凹凸の転写が可能であることを確認した。
- ・ 凹凸転写に対してロールギャップを小さくすることで明瞭な転写が可能となることがわかり、A1050-O に対してはおよそ 5%以上の圧下率とすれば深さの転写率が 100%近くなることがわかった。
- ・ ロール直径は大きい方がたわみは少なくなり、板厚と

転写率の均一性が高くなる傾向がみられた。

- ・ 印刷工具の基材として、その厚さは薄い方が転写率は高くなり、外観上も明瞭なパターンを得られることが明らかになった。

#### 謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成 (AF-2019029-B3) の助成を受けて行われました。ここに記し謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 佐々木実, 弓削英翔, 鈴木大瑛: 塑性と加工, Vol. 60 (2019), 195-202.
- 2) W. Kurnia and M. Yoshino: Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 19 (2009), 12502835.
- 3) Y. Yoshikawa, Y. Masegi: Forming the Future, (2021), 2211-2219.
- 4) 西山拓実, 吉川泰晴: 第 71 回塑性加工連合講演会 (2020), 31-32.
- 5) 柵木佑介, 吉川泰晴: 第 71 回塑性加工連合講演会 (2020), 33-34.