

樹脂被覆鋼板への表面エンボス賦形に関する理論解析

中島利幸*・逸見勇介*²

Theoretical Analysis of Embossing Process on a Film Coated Steel Sheet

Toshiyuki NAKASHIMA, Yusuke HENMI

Synopsis : A crystalline polybutylene terephthalate (PBT) film coated steel sheet has been used as an interior building material. The PBT film coated surface on the steel sheet is usually given a design property by embossing at high-speed continuous manufacturing line. Therefore, it is very difficult to estimate the suitable emboss condition. Especially, in terms of determining the minimum film thickness required for embossing process on the PBT film surface, we have needed considerable experiments. In an effort to reduce cost and time, theoretical estimation of the minimum film thickness is significant. Thus, the viscoelastic behavior of PBT polymer during the embossing process has been investigated by a numerical simulation in order to optimize the film thickness for stamp geometries. As a filling process of the PBT polymer into the pattern, the embossing process can be described by viscoelastic deformation based on generalized Maxwell model. For a sand pattern, filling ratio dependencies on a roll transit time, a nip pressure and an initial film thickness were evaluated by both experiments and simulations and they agreed with each other quantitatively. The dependence on the initial film thickness was attributed to adhesion of the polymer at the stamp and substrate surfaces. The requisite minimum film thickness for a sand pattern under an actual condition was estimated and the value corresponded to the film thickness enough to avoid any emboss form defects. To estimate the rectangular pattern suitable for thin film, parameters of the stamp and the polymer were expressed as dimensionless parameters. As a result, we created the contour plot of filling time as a function of dimensionless convex width and dimensionless concave width at a dimensionless initial film thickness. A decrease of filling time at dimensionless convex width 0.5~1.0 and dimensionless concave width 2.0~3.0 suggests that the region corresponds to the rectangular pattern suitable for thin film. In addition to it, as a guideline of estimating the requisite minimum film thickness for a rectangular pattern, the contour plots of limit time and dimensionless limit film thickness were also created.

Keywords : embossing process; PBT film coated steel sheet; viscoelastic deformation; numerical simulation; requisite minimum film thickness

1. 緒言

内装建材用として、結晶性ポリエステル樹脂のポリブチレンテレフタレート (PBT) を鋼板に被覆した、PBT樹脂被覆鋼板が用いられている^{1,2)}。このPBT樹脂被覆鋼板に意匠性を賦与するため、鋼板上でPBT樹脂を融点以上の230~240°Cまで加熱して完全に溶融させ、エンボスロールで加圧することにより、高速かつ連続的にエンボス賦形を

行っている。

Fig. 1に示すように、これまでのエンボスは塩ビ鋼板に用いられてきた砂目 (Fig. 1 (a)) 等の比較的製造しやすいパターンが多かったが、近年では矩形 (Fig. 1 (b)) 等のより精度の要求されるパターンが増加してきている。これは、PBT樹脂のエンボス賦形性が高いことによる¹⁾。直近では、凹凸感をコンセプトとするエンボス深さ120 μ mの意匠が求められているが、コストや不燃認定等により、膜厚は最大200 μ m程度に制限されている。また、一般的

* 技術研究所 薄板材料グループ チームリーダー

*² 製膜部 製膜技術グループ 主事

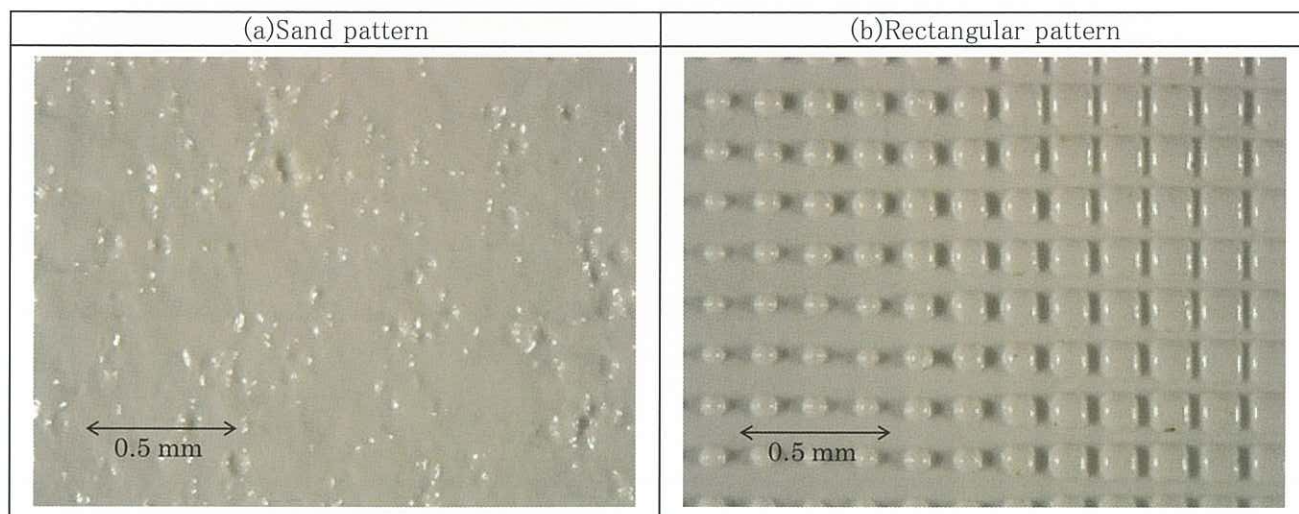


Fig.1 Sand and rectangular patterns transferred into PBT film coated steel sheets

に膜厚はエンボス深さに対して2~3倍必要という経験則が知られているが³⁾、5倍以上必要となる場合もあり、エンボス賦形に最低限必要となる膜厚は個々のエンボスパターン毎に実験により見出すしかない状況にある。そこで、客先の要求するエンボスパターンの必要最小膜厚や、薄膜化に適したエンボスパターンを推定するための手法を開発し、客先への新柄提案を円滑に行い、エンボスロール作製、実験等に要するコストや時間を削減することが望まれる。これらの課題を解決する手段として、数値解析を利用した新柄設計プロセスの構築が考えられる。

本報では、PBT樹脂被覆鋼板へのエンボス賦形を、エンボスパターンへの樹脂の充填過程と捉え、その充填過程に対して粘弾性体変形解析^{3,6)}を行った。砂目パターンについて解析結果と実験結果とを比較するとともに、製品製造条件における必要最小膜厚を推定し、本手法の妥当性を検証した。また、矩形パターンの必要最小膜厚や薄膜化に適した矩形パターンを推定するための手法を提案した。

2. 実験

2.1 供試材

エンボス賦形試験や粘弾性測定用フィルムとしては、ポリブチレンテレフタレート (PBT) フィルムを用いた。PBT樹脂 (ポリプラスチック製ジュラネックス700FP) を、Tダイを設置した二軸押出機に投入し、キャスト法により、膜厚35, 60, 85, 320 μ mに製膜した。いずれのフィルムも酸化チタン系白色顔料を混練して着色しており、顔料濃度は18wt%とした (膜厚35 μ mのみ20wt%)。エンボス賦形試験用には膜厚35~85 μ mのフィルムを、粘弾性測定用としては、膜厚320 μ mのフィルムを用いた。

エンボス賦形試験用の原板としては、板厚0.40mmの電気亜鉛めっき鋼板 (めっき量20g/m²) を用いた。

フィルムを原板にラミネートする際の接着剤としては、

ポリウレタン系接着剤 (東洋インキ製造製オリバインGXA) を用いた。

2.2 エンボス賦形試験

接着剤を塗布した原板を240 $^{\circ}$ Cに加熱し、ラミネート試験機にてフィルムをラミネートした。このラミネート鋼板を再度240 $^{\circ}$ Cに加熱し、Fig.2に示すエンボス賦形試験機にて砂目パターンが彫刻されたエンボスロールを用いて、エンボスロール温度 $15\pm 5^{\circ}$ C、ニップ圧力0.49~0.85 MPa、ロール通過時間0.028~0.12s (ロール通過速度1.3~5.4m/min) の条件でエンボス賦形を行った。その際、エンボス直前の裏面温度を、レコーダーに接続した放射温度計により連続的に取得し、ラミネート鋼板中央部の裏面温度を計測した。いずれの条件でも、エンボス直前における裏面温度は210 $^{\circ}$ Cであることを確認した。なお、主な品種の製品製造条件は、エンボス直前における裏面温度235~240 $^{\circ}$ C、ニップ圧力2.0~2.5MPa、ロール通過時間0.06

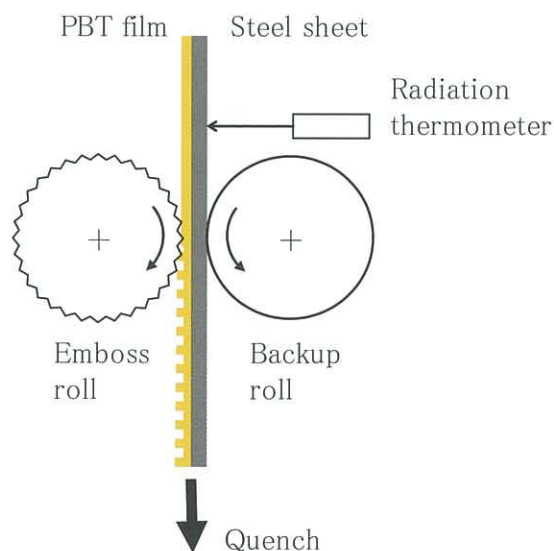


Fig.2 Schematic diagram of embossing process

～0.12sである。砂目パターンに関しては、エンボス直前における裏面温度235°C、ニップ圧力2.0MPa、ロール通過時間0.06sとなる。

表面粗度計（東京精密製SURFCOM 1400D-3DF）を用いて、エンボス賦形後の樹脂被覆鋼板表面とエンボスロール表面について、表面粗さの最大高さRmaxを測定した。充填率は、エンボス賦形後の樹脂被覆鋼板表面のRmaxをエンボスロール表面のRmaxで除すことにより算出した。砂目パターンのエンボスロール表面は、Rmax = 21 μmであった。また、砂目パターンの解析モデルを作成するため、エンボスロール表面について、粗さ曲線要素の平均長さRSmを測定し、RSm = 120 μmを得た。

2.3 粘弾性測定

粘弾性測定装置（アントンパール製Physica MCR 301）にて、PBT樹脂の粘弾性測定を行った。ここで、測定治具には直径8mmの平行プレートを用い、振り角0.005%として、温度60～250°C、周波数1～100Hzの範囲で掃引した。得られた粘弾性データよりマスターカーブを作成し、WLF則パラメータとして、参照温度 $T_{ref} = 200^\circ\text{C}$ 、第一定数 $C_1 = 3$ 、第二定数 $C_2 = 800^\circ\text{C}$ を得た。さらに、粘弾性材料カーブフィットプログラム（メカニカルデザイン製）を用いて、式(1)、(2)で表されるProny級数^{6,7)}の緩和時間 τ_i と無次元横弾性率 g_i を算出した。

$$G'(\omega) = G_\infty + G_0 \sum_{i=1}^n g_i \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (1)$$

$$G''(\omega) = G_0 \sum_{i=1}^n g_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (2)$$

ここで、 ω は角周波数、 $G'(\omega)$ は貯蔵弾性率、 $G''(\omega)$ は損失弾性率、 G_∞ は長期横弾性率、 G_0 は即時横弾性率をそれぞれ示す。次式(3)、(4)に粘弾性体変形解析の入力に用いる長期ヤング率 E_∞ と長期ポアソン比 ν_∞ を代入することにより、式(1)、(2)に含まれる G_∞ と G_0 を求めた^{6,7)}。

$$G_\infty = \frac{E_\infty}{2(1 + \nu_\infty)} \quad (3)$$

$$G_0 = \frac{G_\infty}{\left(1 - \sum_{i=1}^n g_i\right)} \quad (4)$$

Table 1にPBT樹脂のProny級数パラメータを示す。

3. 解析

3.1 解析方法

エンボス充填過程の粘弾性体変形解析には、熱ナノインプリント解析シミュレータ（みずほ情報総研製MemsONE）を用いた³⁻⁶⁾。スタンプを剛体、樹脂を一般化マックスウェルモデルで記述した粘弾性体とし、有限要素法を用いて解析を行った。本シミュレータでは、樹脂の

Table 1 Parameters of Prony series for PBT polymer

i	$\tau_i(\text{s})$	g_i
1	6.84932×10^{-8}	6.37431×10^{-2}
2	1.82001×10^{-7}	2.26296×10^{-1}
3	4.83615×10^{-7}	4.10693×10^{-3}
4	1.28507×10^{-6}	2.72113×10^{-3}
5	3.41470×10^{-6}	4.75098×10^{-4}
6	9.07357×10^{-6}	6.50893×10^{-1}
7	2.41104×10^{-5}	4.28048×10^{-2}
8	6.40664×10^{-5}	2.19794×10^{-4}
9	1.70238×10^{-4}	1.33242×10^{-7}
10	4.52359×10^{-4}	6.90172×10^{-8}
11	1.20201×10^{-3}	2.26092×10^{-3}
12	3.19400×10^{-3}	6.36414×10^{-3}
13	8.48715×10^{-3}	1.99740×10^{-6}
14	2.25521×10^{-2}	1.06533×10^{-4}
15	5.99258×10^{-2}	6.77991×10^{-13}

τ_i : relaxation time of i th Prony element,

g_i : dimensionless shear modulus of i th Prony element

粘弾性挙動を記述する構成方程式として、以下の式(5)を採用している⁶⁾。

$$\mathbf{T} = KE_{vol} \mathbf{I} + 2G_0 \left(\mathbf{E}' - \sum_{i=1}^n g_i \mathbf{E}'_{v,i} \right) \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{T} は応力テンソル、 K は体積弾性率、 E_{vol} は体積ひずみ、 \mathbf{I} は単位テンソル、 \mathbf{E}' は偏差ひずみテンソル、 $\mathbf{E}'_{v,i}$ は偏差粘性ひずみテンソルをそれぞれ示す。応力テンソルの第一項（圧力項）は線形弾性モデルを、第二項（粘性項）は一般化マックスウェルモデルとWLF則に基づく線形粘弾性モデルを適用している。解析に必要なパラメータは、文献値⁸⁾より、長期ヤング率 $E_\infty = 0.03\text{MPa}$ 、長期ポアソン比 $\nu_\infty = 0.4999$ とした。また、メーカーカタログ値より、熱膨張率 $\alpha = 0.0001\text{K}^{-1}$ とした。

解析モデルを表現するパラメータとしては、スタンプの凸部幅 S 、凹部幅 W 、凹部深さ D_0 、樹脂の初期膜厚 h_0 、充填長 D 、系の温度 T 、ニップ圧力 p 、ロール通過時間 t を用いた。また、スタンプや樹脂の各パラメータを凹部深さで除すことにより、無次元凸部幅 S/D_0 、無次元凹部幅 W/D_0 、無次元初期膜厚 h_0/D_0 、充填率 D/D_0 を求め、これらの無次元パラメータに基づき考察を行った。

エンボスパターンとしては、砂目パターンと矩形パターンの2種類について解析を行った。砂目パターンについて、ロール通過時間、ニップ圧力、初期膜厚が変化したときの充填率の変化を評価し、実験結果と比較することにより、粘弾性体変形解析の妥当性を検証した。また、砂目パターンにて妥当性が確認できた解析手法を用いて矩形パターンについても解析を行い、必要最小膜厚や薄膜化に適したエンボスパターンを推定するための手法を提案した。

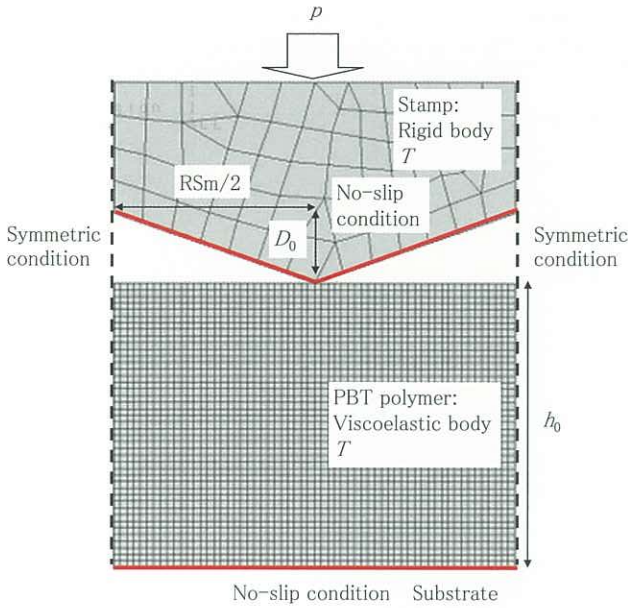


Fig.3 Analytical model of filling process for a sand pattern

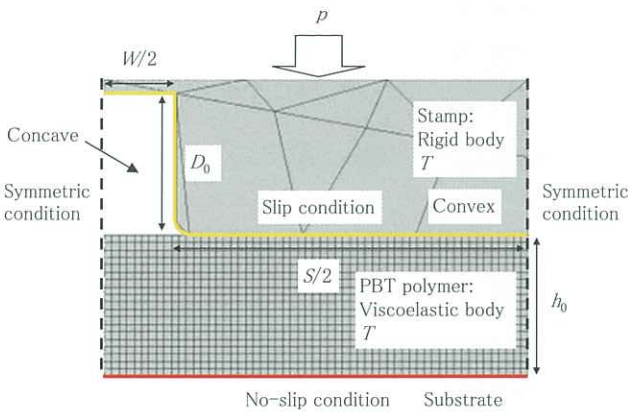


Fig.4 Analytical model of filling process for a rectangular pattern

3.2 砂目パターンにおける解析

Fig.3に砂目パターンの解析モデルを示す。実験結果との比較や製品製造条件での解析においては、樹脂-スタンプと樹脂-基材界面を滑りなし境界、左右両端を対称境界とした。また、膜厚依存性の原因推定においては、樹脂-スタンプと樹脂-基材界面を、滑りなし境界と自由滑り境界の各種組合せとして計算を行った。実験結果との比較においては、スタンプと樹脂は温度210°Cの等温系とし、エンボスロール上面にニップ圧力0.75MPaを印加したときの樹脂変形の時間変化を解析した。また、製品製造条件での解析においては、スタンプと樹脂の温度235°C、ニップ圧力2.0MPaとした。充填率は、凹部中央におけるスタンプ表面と樹脂表面との間隔から充填長を求め、これを凹部深さ21μmで除すことにより算出した。充填時間は、充填率0.97に到達した時間とした。

3.3 矩形パターンにおける解析

Fig.4に矩形パターンの解析モデルを示す。樹脂-スタンプ

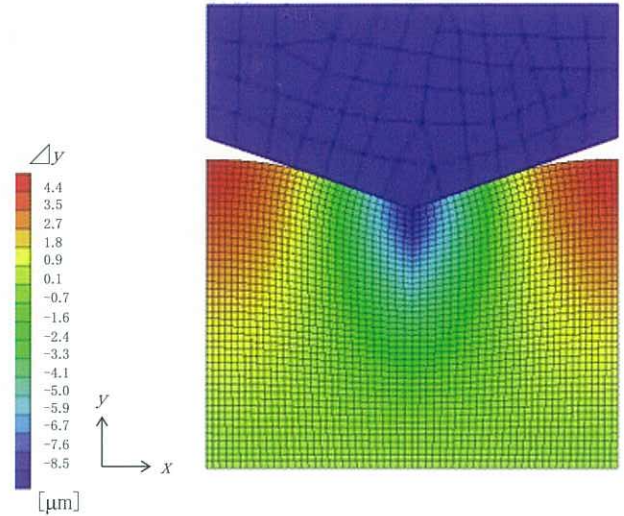


Fig.5 Analytical result of filling process for a sand pattern with $R_{Sm} = 120 \mu\text{m}$, $D_0 = 21 \mu\text{m}$ at $h_0 = 85 \mu\text{m}$, $T = 210^\circ\text{C}$, $p = 0.75\text{MPa}$, $t = 0.028\text{s}$

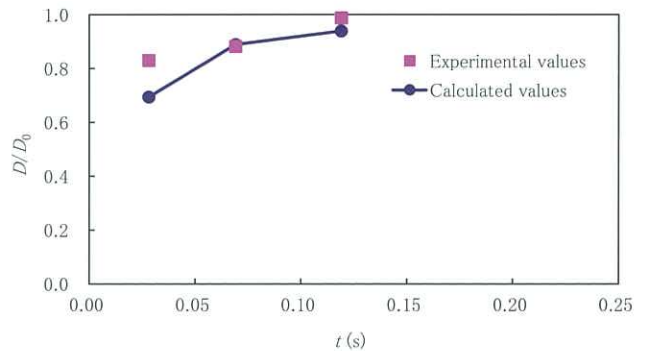


Fig.6 Relation between filling ratio D/D_0 and roll transit time t for a sand pattern at $h_0 = 85 \mu\text{m}$, $T = 210^\circ\text{C}$, $p = 0.75\text{MPa}$

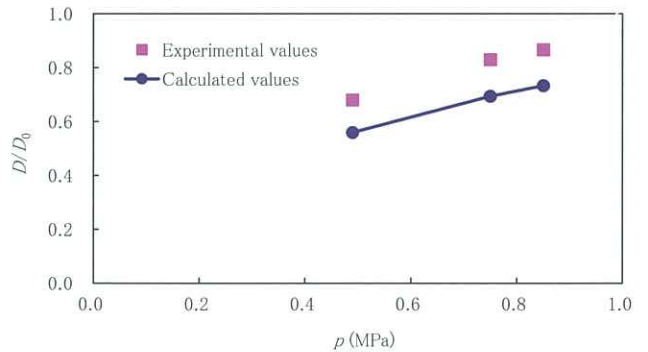


Fig.7 Relation between filling ratio D/D_0 and nip pressure p for a sand pattern at $h_0 = 85 \mu\text{m}$, $T = 210^\circ\text{C}$, $t = 0.028\text{s}$

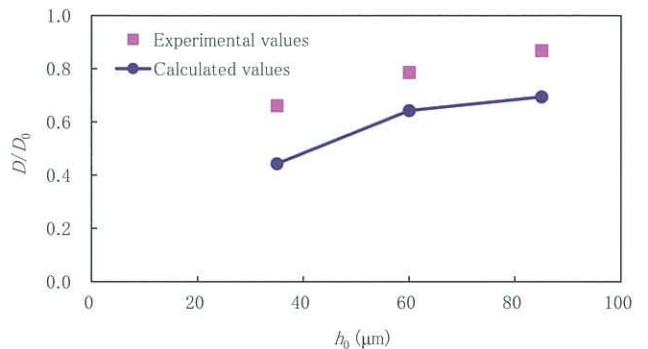


Fig.8 Relation between filling ratio D/D_0 and initial film thickness h_0 for a sand pattern at $T = 210^\circ\text{C}$, $p = 0.75\text{MPa}$, $t = 0.028\text{s}$

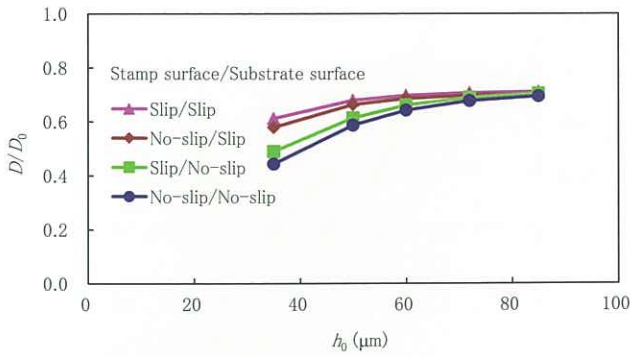


Fig.9 Relation between filling ratio D/D_0 and initial film thickness h_0 for a sand pattern with various boundary conditions of stamp and substrate surfaces at $T = 210^\circ\text{C}$, $p = 0.75\text{MPa}$, $t = 0.028\text{s}$

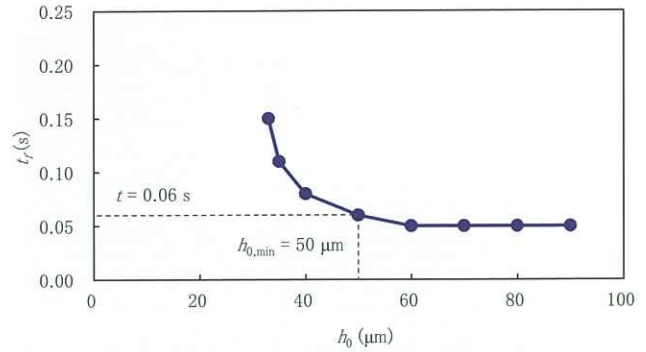


Fig.11 Relation between filling time t_f and initial film thickness h_0 for a sand pattern at $T = 235^\circ\text{C}$, $p = 2.0\text{MPa}$

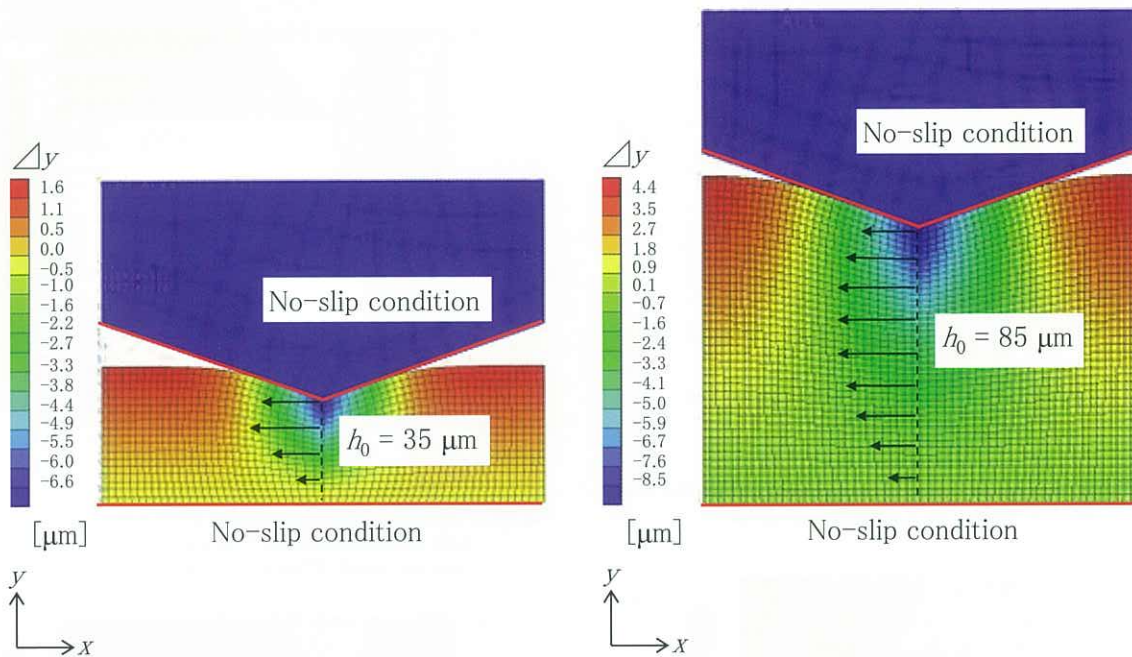


Fig.10 Effect of initial film thickness on filling process for a sand pattern at $T = 210^\circ\text{C}$, $p = 0.75\text{MPa}$, $t = 0.028\text{s}$

ブ界面は樹脂の変形を妨げないように自由滑り境界とし、樹脂-基材界面は滑りなし境界、左右両端は対称境界とした。スタンプと樹脂は温度 240°C で一定とした。充填時間と無次元凹部幅との比較においては、ニップ圧力 3.5MPa にて解析を行った。また、充填時間と初期膜厚との比較においては、ニップ圧力 2.0MPa とした。充填時間は、凹部中央に樹脂が接触した時間とした。

4. 結果および考察

4.1 砂目パターン

Fig.5に砂目パターンのエンボス充填過程について粘弾性体変形解析を行った結果を示す。等高線レベルは、スタンプや樹脂の初期位置を基準としたときの y 方向変位 Δy を表している。Fig.6に示すように、ロール通過時間が長くなると充填率が増加する傾向が見られ、解析結果は実験結果と定量的に概ね一致した。また、Fig.7に示すように、ニップ圧力が高くなると充填率が増加する傾向が見られ、

解析結果は実験結果と概ね一致した変化傾向が確認できた。Fig.8に示すように、初期膜厚が厚くなると充填率が増加し、解析結果は実験結果と概ね同様の傾向が見られた。Fig.6~8より、長時間領域では解析結果は実験結果と妥当な一致が見られるが、短時間領域では解析結果が低くなることがわかった。この理由としては、適用したマクスウェルモデルが短時間領域で実際の現象を十分に表現できなくなっている可能性が考えられる。また、等温系解析であることの影響等も考えられる。

Fig.9に充填率と初期膜厚との関係において、樹脂-スタンプと樹脂-基材界面の境界条件を変化させたときの解析結果を示す。この結果より、薄膜化による充填率の低下は、樹脂-スタンプ界面を滑りなし境界とした場合に比べ、樹脂-基材界面を滑りなし境界とした場合の方がより顕著だが、両者とも影響が現れることがわかった。このことから、膜厚依存性の原因は、樹脂-スタンプと樹脂-基材界面の付着による樹脂変形の抑制と推測された。Fig.10に示すように、膜厚が厚くなると両界面の付着による影響が無視でき

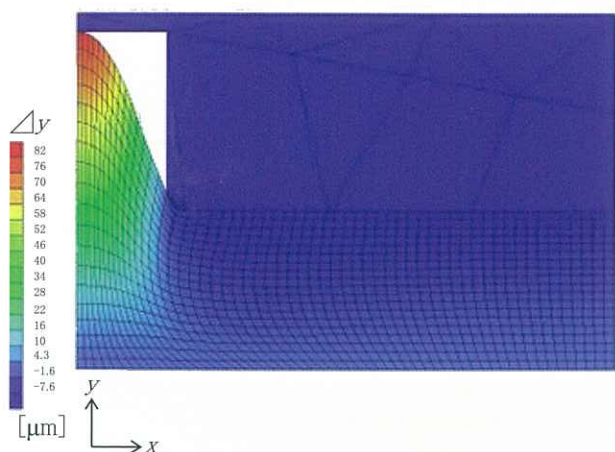


Fig.12 Analytical result of filling process for a rectangular pattern with $S = 500 \mu\text{m}$, $W = 100 \mu\text{m}$, $D_0 = 100 \mu\text{m}$ at $h_0 = 100 \mu\text{m}$, $T = 240^\circ\text{C}$, $p = 3.5\text{MPa}$, $t = 0.10\text{s}$

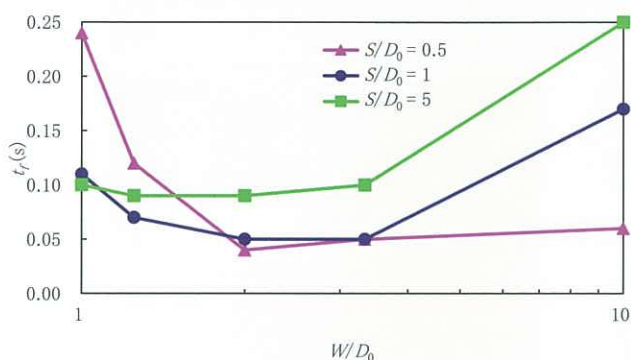


Fig.13 Relation between filling time t_f and dimensionless concave width W/D_0 at $h_0/D_0 = 1$, $T = 240^\circ\text{C}$, $p = 3.5\text{MPa}$

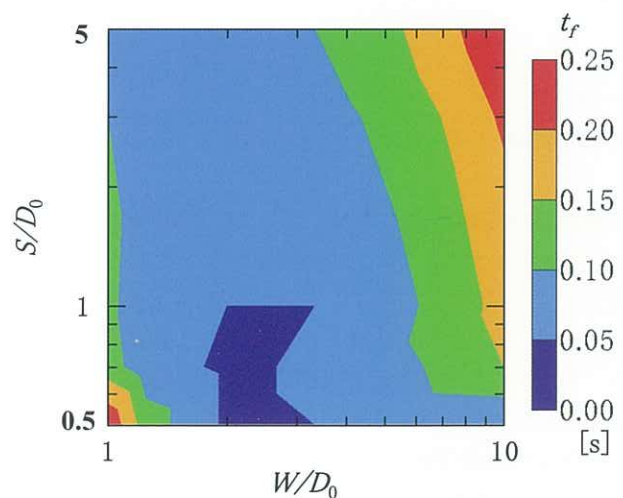


Fig.14 Variation of filling time t_f with dimensionless convex width S/D_0 and dimensionless concave width W/D_0 at $h_0/D_0 = 1$, $T = 240^\circ\text{C}$, $p = 3.5\text{MPa}$

ることから充填率が増加し、ある一定以上の膜厚になると充填率が変化しなくなると推測される。同様の膜厚依存性はこれまでも確認されている^{3,4)}。

砂目パターンについて、製品製造条件における充填時間と初期膜厚との関係をFig.11に示す。ロール通過時間 t において完全充填されるために必要な最小膜厚を必要最小膜

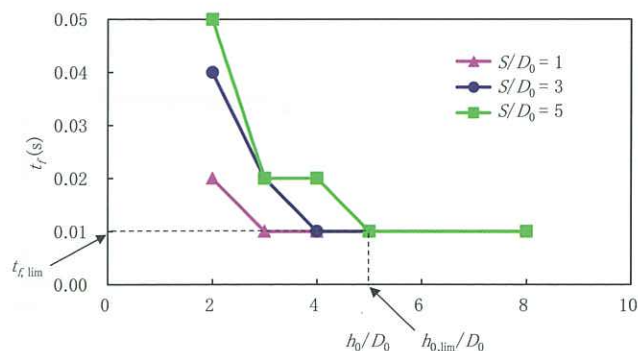


Fig.15 Relation between filling time t_f and dimensionless initial film thickness h_0/D_0 at $W/D_0 = 10$, $T = 240^\circ\text{C}$, $p = 2.0\text{MPa}$

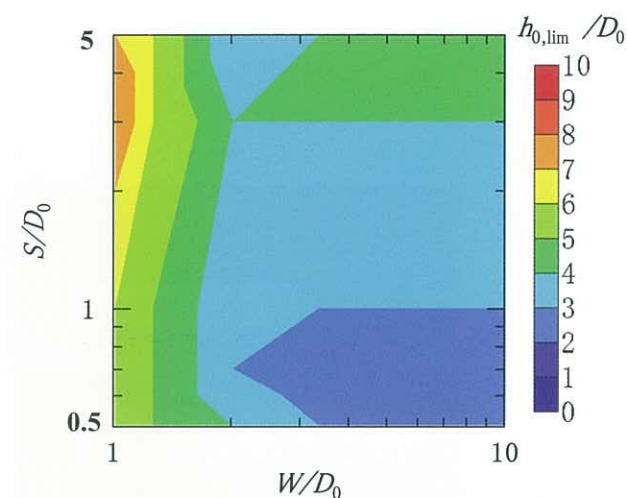


Fig.16 Variation of dimensionless limit film thickness $h_{0,\text{lim}}/D_0$ with dimensionless convex width S/D_0 and dimensionless concave width W/D_0 at $T = 240^\circ\text{C}$, $p = 2.0\text{MPa}$

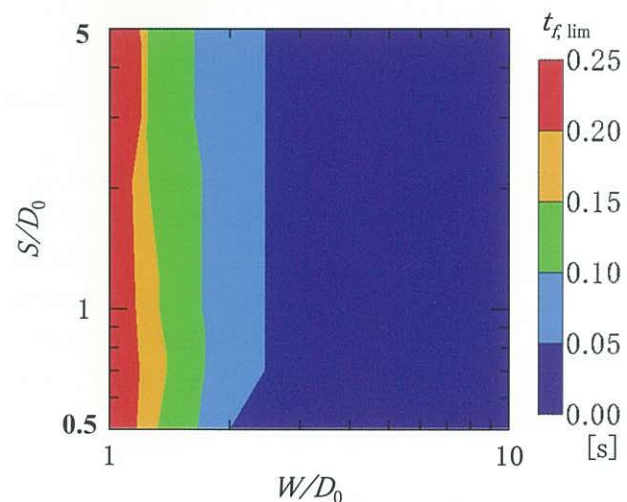


Fig.17 Variation of limit time $t_{f,\text{lim}}$ with dimensionless convex width S/D_0 and dimensionless concave width W/D_0 at $T = 240^\circ\text{C}$, $p = 2.0\text{MPa}$

厚 $h_{0,\text{min}}$ とおくと、 $t = 0.06\text{s}$ と充填時間との交点において $h_{0,\text{min}} = 50 \mu\text{m}$ が得られた。接着剤なし低粗度原板ベースの砂目パターンは膜厚 $35 \mu\text{m}$ でもエンボス賦形不良を生じないが、ラミネート時にシワが入りやすいことから現行膜厚は $40 \mu\text{m}$ に設定されている。一方、接着剤付き高粗度原板ベースの砂目パターンは膜厚 $35 \mu\text{m}$ にてエンボス賦形不

良を生じる。これは、接着剤や高粗度原板の使用で樹脂-基材界面の付着が増加し、横方向の変形が抑制されたためと推測される。樹脂-スタンプと樹脂-基材界面に滑りなし境界を仮定したときの必要最小膜厚は $50\mu\text{m}$ と見積られたが、これは接着剤付き高粗度原板ベースの砂目パターンにおいて妥当な値ではないかと考えられる。今後、エンボス充填過程を最適化する上で、樹脂下層や接着剤、原板表面の設計が重要となると考えられる。また、樹脂表層やエンボスロール表面についても考慮する必要があると言える。

4.2 矩形パターン

Fig.12に矩形パターンのエンボス充填過程について粘弾性体変形解析を行った結果を示す。等高線レベルは、砂目パターンと同様に y 方向変位を表している。Fig.13に各種エンボスパターンにおける充填時間と無次元凹部幅との関係を示す。充填時間が最小となる無次元凹部幅の存在が確認され、この値以上では横方向の変形を生じにくく、この値以下では縦方向の変形を生じにくくなることが推測される。このような無次元凹部幅依存性は、これまでにも、広い無次元凹部幅の場合は凹部側壁に近い部分のみが盛り上がり凹部の中央部分まで充填されにくくなり、狭い無次元凹部幅の場合には樹脂が凹部の奥まで入り込みにくくなるということが示されている^{3,8-10)}。今回の粘弾性体変形解析においても同様の現象が観測された。

充填時間とエンボスパターンとの関係を明確にするため、Fig.14に示すような等高線図を作成した。無次元凸部幅 $0.5\sim 1.0$ 、無次元凹部幅 $2.0\sim 3.0$ 付近の領域にて充填時間が短くなることから、この領域が薄膜化に適したエンボスパターンを表すと考えられる。無次元凸部幅と無次元凹部幅が広い領域にて充填時間が長くなっているが、この領域は横方向の変形が樹脂-基材界面の付着により抑制されるものと推測される。また、無次元凸部幅と無次元凹部幅が狭い領域でも充填時間が長くなっているが、この領域は縦方向の変形が樹脂-基材界面の拘束により抑制されるものと推測される。

Fig.15に各種エンボスパターンにおける充填時間と無次元初期膜厚との関係を示す。無次元初期膜厚を増加させると充填時間が減少し、特定の無次元初期膜厚に到達すると充填時間が一定となった。充填時間が一定となるために必要な最小膜厚を限界膜厚 $h_{0,\text{lim}}$ 、このときの時間を限界時間 $t_{f,\text{lim}}$ とする。これらの値は、最小膜厚に関する評価基準値となる。Fig.16に無次元限界膜厚 $h_{0,\text{lim}}/D_0$ とエンボスパターンに関する等高線図、Fig.17に $t_{f,\text{lim}}$ とエンボスパターンに関する等高線図をそれぞれ示す。

Fig.16の等高線図より、無次元凸部幅と無次元凹部幅が広いエンボスパターンでは、無次元限界膜厚が比較的厚くなる傾向が見られた。また、Fig.17の等高線図より、この領域の限界時間は短く抑えられることがわかった。このこ

とから、このようなエンボスパターンの場合、充填時間の減少や充填率の増加を図る上で薄膜化が有効な手段であることが確かめられた。また、Fig.16において、無次元凹部幅が狭いエンボスパターンで無次元限界膜厚がかなり厚くなる領域が確認できた。これは、前述のように縦方向の変形が樹脂-基材界面の拘束により抑制されるためと考えられる。製品製造時のロール通過時間は 0.1s 前後であるので、Fig.17の無次元凹部幅が広い領域においては必要最小膜厚が得られると考えられる。無次元凹部幅が狭い領域については、必要最小膜厚は得られないが、無次元限界膜厚までは充填率が増加すると考えられる。

5. 結言

エンボスを賦形したPBT樹脂被覆鋼板の開発コストを削減するため、粘弾性体変形解析によりエンボス賦形性及び膜厚の影響等について考察した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 粘弾性体変形解析を行い、砂目パターンについてロール通過時間、ニップ圧力、初期膜厚が変化したときの充填率の変化を評価したところ、いずれも解析結果は実験結果と定量的に概ね一致することがわかった。また、膜厚依存性の原因として、樹脂-スタンプと樹脂-基材界面の付着による樹脂変形の抑制が示唆された。製品製造条件における必要最小膜厚を推定したところ、製品製造時のエンボス賦形不良を抑制できる膜厚に概ね相当すると考えられた。
- (2) 粘弾性体変形解析により、薄膜化に適した矩形パターンを推定するための充填時間に関する等高線図を作成した。無次元凸部幅 $0.5\sim 1.0$ 、無次元凹部幅 $2.0\sim 3.0$ 付近の領域にて充填時間が短くなることから、この領域が薄膜化に適した矩形パターンを表すと推測された。また、矩形パターンの必要最小膜厚を推定するための指針として、限界時間に関する等高線図および限界膜厚に関する等高線図を作成した。

以上のように、エンボスを賦形したPBT樹脂被覆鋼板の膜厚に関わる製品設計において、粘弾性体変形解析による検討が有用であることが明らかとなった。

なお、本報では表面張力、温度分布、離型過程、ロールエンボスの取り扱いについては考慮しておらず、より複雑な系においては改善の余地があると考えられる。今後、これらの因子を含んだ解析を行い、実環境により近い解析モデルの構築を図る。また、単一樹脂についての解析のみで、樹脂の粘弾性効果については言及できなかったことから、粘弾性特性が異なる樹脂での比較検討を行い、エンボス賦形における粘弾性体変形解析の適用性を確認する。

PBT樹脂の粘弾性測定, 粘弾性データ解析につきまして
は, 大阪府立大学の平井義彦教授のご尽力を賜りました。
ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 加隈徳昭, 友森基裕, 田熊幸治, 谷上雅則, 武居芳樹:
東洋鋼鋳, **33** (2002), 45.
- 2) 逸見勇介, 岩下寛之, 武居芳樹, 毎田知正: 東洋鋼鋳,
34 (2004), 23.
- 3) 平井義彦編: ナノインプリントの最新技術と装置・材料・
応用 - ナノインプリント技術の最先端と広がる用途
-, フロンティア出版, 東京, (2008).
- 4) Y. Hirai, Y. Onishi, T. Tanabe, M. Shibata, T.
Iwasaki and Y. Iriye: Microelect. Eng., **85** (2008),
842.
- 5) H. Takagi, M. Takahashi, R. Maeda, Y. Onishi, Y.
Iriye, T. Iwasaki and Y. Hirai: Microelect. Eng., **85**
(2008), 902.
- 6) Y. Onishi, Y. Hirai, H. Takagi, M. Takahashi, T.
Tanabe, R. Maeda and Y. Iriye: Jpn. J. Appl.
Phys., **47** (2008), 5145.
- 7) T. A. Osswald and G. Menges: Materials Science
of Polymers for Engineers, 2nd Ed., Hanser
Publishers, Munich, (2003).
- 8) Y. Hirai, Y. Onishi, T. Tanabe, M. Nishihata, T.
Iwasaki, H. Kawata and Y. Iriye: J. Vac. Sci.
Technol. B, **25** (2007), 2341.
- 9) T. Tanabe, M. Nishihata, H. Kawata and Y. Hirai: J.
Photopolym. Sci. Technol., **20** (2007), 573.
- 10) 平井義彦: 表面技術, **59** (2008), 642.

記号

C_1	: WLF則の第一定数 (-)
C_2	: WLF則の第二定数 (°C)
D	: 充填長 (μm)
D_0	: 凹部深さ (μm)
D/D_0	: 充填率 (-)

E_{vol}	: 体積ひずみ (-)
E_∞	: 長期ヤング率 (MPa)
E'	: 偏差ひずみテンソル (-)
E'_{vi}	: i 番目のマックスウェル要素の偏差粘 性ひずみテンソル (-)
g_i	: i 番目のProny要素の無次元横弾性率 (-)
G_0	: 即時横弾性率 (MPa)
G_∞	: 長期横弾性率 (MPa)
$G'(\omega)$: 貯蔵弾性率 (MPa)
$G''(\omega)$: 損失弾性率 (MPa)
h_0	: 初期膜厚 (μm)
h_0/D_0	: 無次元初期膜厚 (-)
$h_{0,lim}$: 限界膜厚 (μm)
$h_{0,lim}/D_0$: 無次元限界膜厚 (-)
$h_{0,min}$: 必要最小膜厚 (μm)
I	: 単位テンソル (-)
K	: 体積弾性率 (MPa)
p	: ニップ圧力 (MPa)
R_{max}	: 表面粗さの最大高さ (μm)
RS_m	: 粗さ曲線要素の平均長さ (μm)
S	: 凸部幅 (μm)
S/D_0	: 無次元凸部幅 (-)
t	: ロール通過時間 (s)
t_f	: 充填時間 (s)
$t_{f,lim}$: 限界時間 (s)
T	: 温度 (°C)
T_{ref}	: WLF則の参照温度 (°C)
T	: 応力テンソル (MPa)
W	: 凹部幅 (μm)
W/D_0	: 無次元凹部幅 (-)
α	: 熱膨張率 (K^{-1})
Δy	: y 方向変位 (μm)
ν_∞	: 長期ポアソン比 (-)
τ_i	: i 番目のProny要素の緩和時間 (s)
ω	: 角周波数 (rad/s)