

# Study of the flow in a dual cavity slot die

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-06-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00062716">https://doi.org/10.24517/00062716</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



## Study of the Flow in a Dual Cavity Slot Die

Takeaki TSUDA<sup>\*1</sup>, Tomiichi HASEGAWA<sup>\*2</sup>, and Takatune NARUMI<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>Graduate School of Science and Technology, Niigata University

<sup>\*2</sup>Faculty of Engineering, Niigata University  
2-8050 Ikarashi, Niigata 950-2181, Japan

One-dimensional flow model for non-Newtonian fluids in a dual cavity slot die is presented. The viscosity of non-Newtonian fluids is treated as the Ellis model. The conservation equations of mass and momentum in a dual-cavity slot die are one-dimensionally simplified by assuming an appropriate mean flow over the cross section of the flow. The flow field in the slot is assumed to be fully developed. The equations of flow for the cavity and the slot are derived separately and then coupled. We use a finite difference method to solve these governing equations. Using this model, we find that the location and the cross-section area of a secondary cavity have large effects on the distribution of outlet flow. It is concluded that the dual cavity die can effectively reduce the flow non-uniformity.

**Key Words:** Dual cavity/ Non-Newtonian fluid/ Numerical analysis/ Finite difference method/ Pipe flow/ Slot die

## 2 段分配室付押し出し金型内の流れに関する研究

津田 武明<sup>\*1</sup>, 長谷川 富市<sup>\*2</sup>, 鳴海 敬倫<sup>\*2</sup>

(原稿受理: 2002年3月4日)

### 1. 緒 論

押し出し金型は、フィルム・ガラス等へ精密に塗液をコーティングする手段として、近年幅広く使用される傾向にある。押し出し金型の内部流路の構成としては、一般に金型内部へ注入された塗液を長手方向(幅方向)に広げる分配室と、塗液を薄膜に成膜するためのスロット状の間隙より成り立っている。このような金型へ塗液を注入した場合、分配室流動壁より受ける流動抵抗並びに、塗液の非ニュートン流動特性の影響により、スロット出口における流量は幅方向において、偏差を生じることが知られている。<sup>1)</sup>

このような金型内部の流動状態を評価する手法として、従来は設計・評価に多大な時間を要する、可視化実験並びに3次元数値解析が使用されてきたため、流量偏差の少ない最適な内部形状を短時間で見出すことは困難であった。<sup>2)</sup>

筆者はこの様な問題点の改善のために、べき乗則流体、Ellis流体の系において、スロットより吐出する流量分配を簡便に解析可能な1次元流れモデルを提案すると共に、効率的に数値解析を行う手法を提示した。<sup>3)4)</sup> また、べき乗則流体については、解析結果と実験値の比較を行い、数値解析による流量分配予測は実用上有効であることを確認した。<sup>3)</sup>

一方、これらの検討により得た内部流動特性をもとに、押し出し金型の内部形状を変更し、均一な流量分配特性を得る手

法がある。<sup>1)</sup> この手法の代表例としては、金型内部の塗液流入口付近のスリット長を長くすることで、分配室内の圧力を均一化させる、コートハンガー方式が広く知られている。<sup>5)</sup>

しかし、内部流動結果により流路を変更し、流量分配特性を補正するこれらの方法は、設計条件下においての流量分配精度は良好であるが、流量、粘度、非ニュートン性等のプロセス条件の変動に対する頑健性に乏しいため、近年これらの変動を抑制する目的で、2段分配室を付けた押し出し金型が使用されている。<sup>6)</sup>

この分野の研究として、Leonardはべき乗則流体を用いて、分配室とスリットの連成計算を行わない単純な系において、第2分配室による流量分配精度向上が可能であることを指摘した。<sup>6)</sup> また、LeeとLiu<sup>7)</sup> およびYuan<sup>8)</sup> はべき乗則流体を用いて連成計算を行い、慣性力を考慮した条件において検討し、慣性力並びに粘性圧力降下による流量分配精度低下に対して、第2分配室追加が有効であることを示した。

以上、2段分配室付押し出し金型の有用性は確認されているが、筆者が前報<sup>9)</sup> に提示した様な、実際の塗液に対応する流動モデルで且つ、計算時間が短く、精度の良い数値計算を可能とする様な実用性を考慮した研究は行われていない。また、第2分配室の内部形状と流量分配特性の関係および、従来方式に対する優位性などの検討はなされていない。

そこで、本報においては前報にて提示した、Ellisモデルによる1次元流れ解析モデルを用い、2段分配室付押し出し金型の内部流動に対する数値計算方法と効率的に実行可能な計算手法を提示する。また、第2分配室の設置位置、形状等の諸

\*1 新潟大学大学院自然科学研究科  
〒950-0861 新潟市五十嵐2の町 8050  
\*2 新潟大学工学部機械システム工学科  
〒950-0861 新潟市五十嵐2の町 8050

条件における流量分配特性の解析並びに、コートハンガー方式等従来方式とプロセス条件の変動に対する頑健性の比較を行い、2段分配室付押し出し金型の有効性を検討する。

## 2. 主な記号

- $A_k$  : 分配室断面積
- $k$  : 分配室・スリット位置区別記号  
(No.1 : =1, No.2 : =2)
- $L_k$  : スリット長さ
- $n$  : Ellis流体の指数
- $p_k$  : 圧力
- $R_k$  : 分配室断面半径
- $Q_k$  : 分配室任意断面流量
- $q_k$  : スリット内単位幅流量
- $S_k$  : 分配室断面濡縁長さ= $2\pi R_k$
- $t_k$  : スリット間隙
- $u, v, w$  :  $x, y, z$ 方向の流速成分
- $u_{mk}$  : 分配室平均流速
- $W$  : 分配室奥行き長さ
- $\alpha_{1k}, \alpha_{2k}$  : 積分方程式修正係数
- $\beta_k$  : 運動量修正係数
- $\mu$  : 粘性係数
- $\mu_0$  : Ellis流体のゼロせん断粘度
- $\rho$  : 塗液密度
- $\tau_{ij}$  : せん断応力 ( $ij$ は座標の方向を示す)
- $\tau_{wk}$  : 管壁せん断応力
- $\tau_{12}$  : Ellis流体の定数

## 3. 1次元流れモデル・解析

### 3.1 押し出し金型内流れのモデル

Fig.1に2段分配室付押し出し金型のモデルを示す。本研究に使用する押し出し金型のモデルは、第1分配室内へ側面より流入するものであり、それぞれの分配室の断面は円形で、その面積は一定とするものである。第1分配室へ流入した液は幅方向に均一に設けられている第1スリットより全量吐出され、第2分配室へ流入し更に幅方向に広げられ、第2スリットより全量排出される。

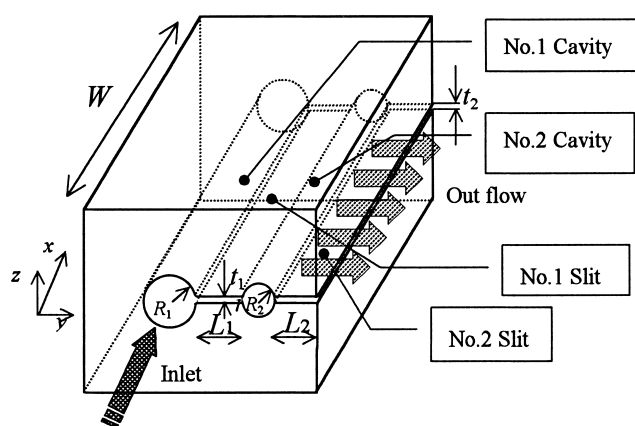


Fig.1 Geometry of dual cavity die.

### 3.2 各分配室内流れの1次元化

前報<sup>4)</sup>に記した手順と同様に、各分配室内の1次元運動方程式を導出する。最初に非圧縮性流体における、 $x$ 方向の流れの定常運動方程式並びに、連続式を以下に示す。なお、体積力は無視できるものと仮定する。

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

(2)式を(1)式と組み合わせれば、以下の様に整理される。

$$\rho \left( \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) + \frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (3)$$

次に分配室 $x$ 方向の流れの1次元化のために、任意断面( $y-z$ )における運動の平均化を行う。つまり、式(3)の両辺を $x$ 軸に垂直な面 $A$ により面積分を行い、分配室内の流れを定常層流流れと近似し、ガウスの発散定理を適用すれば、各対流項、圧力項、粘性項は以下の式(4)~(6)の様に変形される。<sup>4)</sup>

$$\int \rho \left( \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) dA_k \quad (4)$$

$$= \frac{d}{dx} \left( \rho \beta_k \frac{Q_k^2}{A_k} \right)$$

$$\int \frac{dp}{dx} dA_k = A_k \frac{dp_k}{dx} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ = 2\mu_{mk} \alpha_{1k} \frac{d^2 Q_k}{dx^2} + 2\alpha_{2k} \frac{d\mu_{mk}}{dx} \frac{dQ_k}{dx} - \tau_{wk} \cdot S_k \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\mu_{mk}$ は分配室内の任意断面における平均粘度を示し、式(7)の $\tau$ へ、 $\tau_{wk}/2$ を代入したものである。

(Ellisモデルの粘度)

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \left( \frac{\tau}{\tau_{12}} \right)^{n-1}} \quad (7)$$

なお、 $\tau_{wk}$ はCauchyの運動方程式とEllis流体の構成方程式を連立した非線形方程式を数値的に解くことにより得る。また、式(6)の修正係数 $\alpha_{1k}$ 、 $\alpha_{2k}$ は次の様に定義される<sup>4)</sup>。

$$\alpha_{1k} = \int \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dA_k / \mu_{mk} \int \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dA_k \quad (8)$$

$$\alpha_{2k} = \int \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} dA_k / \frac{\partial \mu_{mk}}{\partial x} \int \frac{\partial u}{\partial x} dA_k \quad (9)$$

以上の結果より，式(3)は次式のように1次元化される。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left( \rho \beta_k \frac{Q_k^2}{A_k} \right) + A_k \frac{dp_k}{dx} \\ = 2\mu_{mk} \alpha_{1k} \frac{d^2 Q_k}{dx^2} + 2\alpha_{2k} \frac{d\mu_{mk}}{dx} \frac{dQ_k}{dx} - \tau_{wk} \cdot S_k \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.3 スリット流れの1次元化

非圧縮性流体における，y方向の流れの定常2次元運動方程式並びに，連続の式を以下に示す．なお，体積力は無視できるものとする．

$$\frac{dp}{dy} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

以上の系は平行平板間流れであり，Ellis 流体がスリットより吐出される流量 $q_k$ は，運動方程式を解き次式のように簡略化される．

$$q_k(x) = \left( \frac{t_k^3 p_k(x)}{12\mu_0 L_k} \right) \left\{ 1 + \frac{3}{(n+2)} \left( \frac{t_k p_k(x)}{2L_k \tau_{12}} \right)^{n-1} \right\} \quad (14)$$

### 3.4 離散化モデル

Fig.2に，第2分配室付押し出し金型の離散モデルを示す．

図のように1次元運動方程式の差分格子には，分配室は分割数が等間隔なスタガード格子，スリット部は1次元平行平板流れを示す格子を用いた．またこの1次元差分格子の物質収支は $Q_1^{h+1} = Q_1^h - q_1^h$ ， $Q_2^{h+1} = Q_2^h + q_1^h - q_2^h$ の関係のもと計算した．なお，格子点番号hはx方向に昇順とした．

Fig.3に4.1節にて使用する標準条件で，第2分配室位置 $L_1/(L_1 + L_2) = 0.2$ のもとに計算した，差分格子分割数と第2スリット吐出分布偏差の計算値との関係を示し，必要格子分割数を検討する．ここで，縦軸の吐出分布偏差は幅方向における第2スリット吐出量値の(最大値 - 最小値) / 平均値 × 100%で表した．

図より分かるように格子分割数の増加につれて計算値は収束し，分割数1000の条件にて一定値に漸近していることが分かる．この結果より，分割数は1000で十分であると考え，決定することとした．

また本手法は，x方向以外の流速成分は解析的に演算しているため，通常の3次元数値差分法に比べ，少ない格子分割

数においても，著しい計算誤差を生じない利点を持つことがこの図より分かる．

### 3.5 数値計算手法・アルゴリズム

前報<sup>9)</sup>と同様，Ellis 流体の内部流れにおける速度分布形状は流量により変化するため，各分配室断面毎の流速分布を計算し，その結果を用いて各種係数を算出した．また，空間の離散化は，前進差分を用いた．以上の手法による2段分配室付押し出し金型の内部流動計算のアルゴリズム概略を示す．

(step1)

押し出し金型への流入量を $Q_1^1$ と定義すると共に，格子点番号 $h = 1$ におけるスリット吐出流量 $q_1^1$ へ平均吐出流量 $q_m$ ( $= Q_1^1/W$ )の値を仮の値として代入し，この値を用い(14)式を解くことで圧力 $p_1^1$ を計算する．

(step2)

物質収支式 $Q_1^2 = Q_1^1 - q_1^1$ により各流量関係を計算すると共に，各変数( $\tau_{w1}$ ， $\alpha_{11}$ ， $\alpha_{21}$ ， $\beta_1$ ， $\mu_{m1}$ )を数値的に計算し決定したものを，(10)式を差分方程式にしたものへ代入し，格子点番号 $h = 2$ における圧力 $p_1^2$ を計算する．またこの値を用いてスリット流量 $q_1^2$ を計算する．

(step3)

物質収支式により $h = 3$ の各流量関係を計算し，続く同様の操作で圧力を計算する．この操作をx方向に端部まで次々と繰返し行い， $Q_1^1$ と $\Sigma q_1^h$ の収支を計算する．この値の無次元値が最終的に $10^{-8}$ に収束するまで，繰返し $q_1^1$ をニュートン・ラプソン法により変化させる．

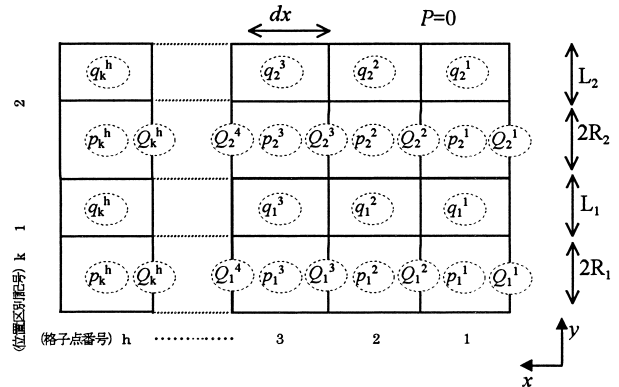


Fig.2 Geometry of dual cavity slot die.

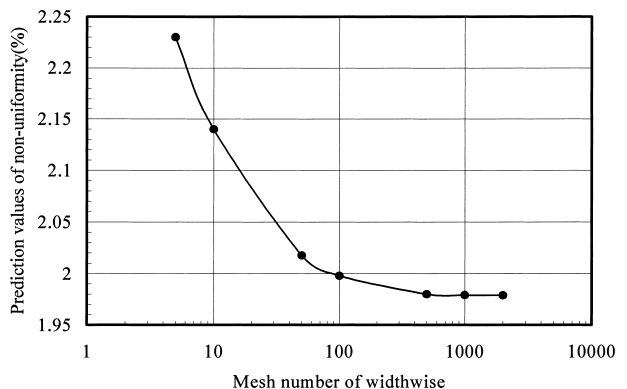


Fig.3 Mesh number vs predictions of non-uniformity.

(step4)

第2分配室・スリットに関して、step1～step3と同様の操作を行い、圧力、スリット吐出流量を計算する。(但し、物質収支式は $Q_2^{h+1} = Q_2^h + q_1^h - q_2^h$ を用いる。)

以上の計算ループを最低2巡させ、圧力 $p_1^i$ と $p_2^i$ の各ループ毎の無次元変化量を計算し、両者の二乗平均が $10^{-7}$ 以下に収束するまで繰返し計算することで、解とした。収束演算にはニュートン・ラプソン法を使用した。この様に前報の手法を用いたとしても、本来2次元空間である2段分配室付押し出し型を、前述のアルゴリズムにより、1次元モデルとして扱える様にし、安定かつスムーズに計算を行えるようにした。なお、計算時間は前報<sup>9)</sup>の解析に比べ5～20倍の時間(約15～60sec)を要した。

4. 解析結果および考察

4.1 各内部形状における吐出量偏差の変化

第2分配室の設置位置並びに、断面積を変化させた場合の幅方向の吐出量偏差補正効果を確認する。最初に設置位置の変化に関して検討を行う。解析に使用した金型の寸法は $W = 50\text{cm}$ ,  $R_1 = 0.5\text{cm}$ ,  $R_2 = 0.25\text{cm}$ ,  $t_1 = t_2 = 0.05\text{cm}$ 各スリット長さはスリット部のトータル長さが一定との金型設計上の拘束条件を持たせるため、 $L_1 + L_2 + 2R_2 = 5\text{cm}$ とし、スリット長さ比 $\gamma = (L_1 / (L_1 + L_2)) = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ の条件に関して解析した。なお、液物性に関しては、設置位置による影響を見るために、 $n = 1.0$ のニュートン流体の条件で、 $\mu = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $Q_1(0) = 25\text{cc}/\text{sec}$ の値を標準条件として使用した。吐出プロファイルの代表例として、スリット長さ比0.2の条件の第1, 第2スリットの吐出量偏差をFig.4に示す。ここで、縦軸は幅方向における吐出量の値を平均値にて除することで無次元化し吐出偏差として示したものであり、横軸は、最大幅を1としたx方向の無次元位置である。

Fig.4より、第1スリットより流出する幅方向に流量偏差を持った流れは、第2分配室へ流入し再度幅方向に分配される効果により、流量偏差が減少していることが分かる。この条件下において計算した、第1, 第2スリットの幅方向の吐出量分布を示す関数の比 $q_2(x)/q_1(x)$ を、第2分配室における流量分布特性の伝達関数と定義し、これをFig.5に示す。

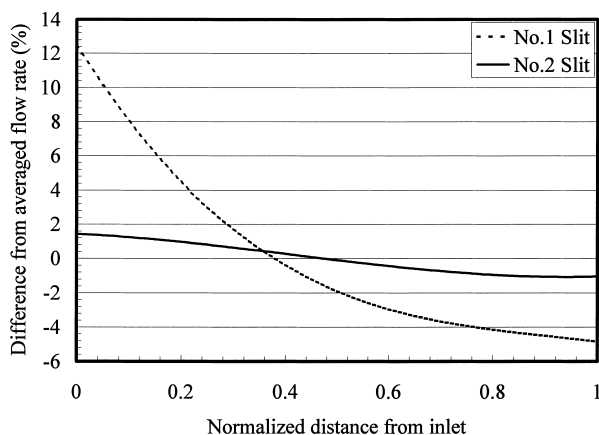


Fig.4 Distribution of flow rate at No.1, No.2 slit. (Slit length ratio  $\gamma = 0.2$ ).

Fig.5は第1スリットの幅方向の吐出分布特性が、第2分配室において補正された割合を示しているが、図より流入口付近(横軸0.4付近まで)の流量は減少させられる傾向を示しており、最大10%程度変化していることが分かる。逆に、流路後半の領域は流量を徐々に増加させている。この現象は、第1スリットから流入する流れのトータルヘッドの落差が関係していると考えられる。つまり、Fig.4に示す第1スリットの吐出プロファイルを見ても分かる様に、ヘッドが大きい(流入流量が多い)場所からヘッドが小さい(流入流量が少ない)場所へ第2分配室流路を伝って塗液が移動した結果、第2スリットの吐出量偏差を減少させる効果が発現したものである。

次に、スリット長さ比 $\gamma$ を0～1に変化させたときの第2スリット吐出分布偏差をFig.6, 流量分布特性の伝達関数をFig.7に示す。

ここで、Fig.6の吐出分布偏差は幅方向における第2スリット吐出量値の(最大値 - 最小値)/平均値 $\times 100\%$ の値を示す。

Fig.6より、第2分配室の位置には、スリット方向において、最適設置位置が存在し、スリット長さ比で0.5つまり、第1スリット入口と第2スリット出口の中央が最も良好な性能を発揮する条件であることが分かる。一方、Fig.7より、第2分配室による第1スリット吐出量分布の補正量はスリット長さ比 $\gamma$ の増加に伴い、徐々に減少しており、必ずしも前述の最適位置において補正量が最大になっているのでは無いことが分かる。

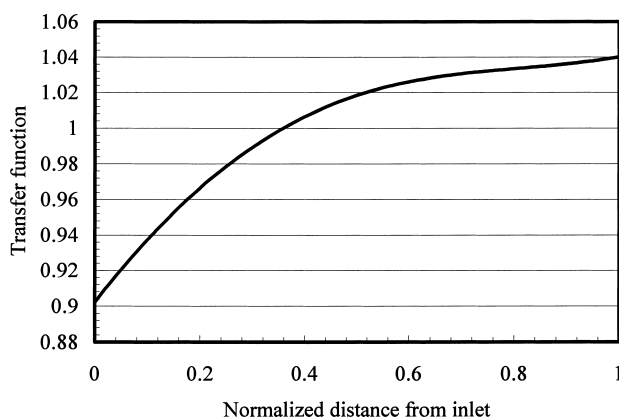


Fig.5 Transfer function of flow rate profiles at No.2 cavity.

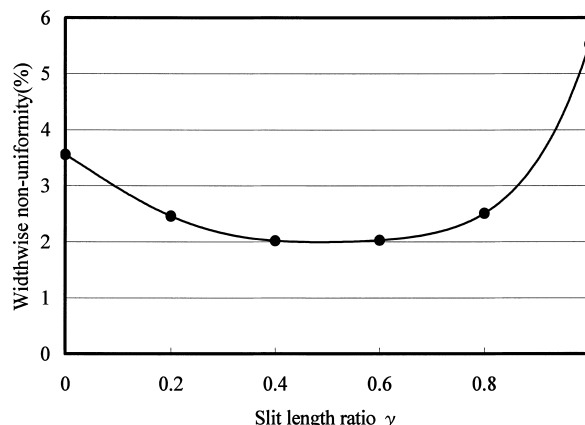


Fig.6 Widthwise non-uniformity ( $\gamma = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ ).

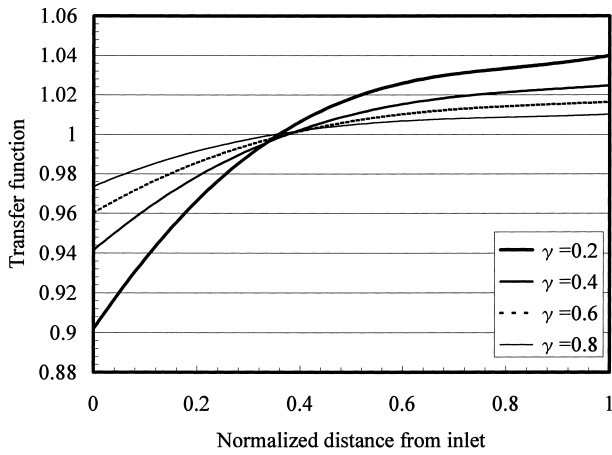


Fig.7 Transfer function of flow rate profiles ( $\gamma=0.2,0.4,0.6,0.8$ ).

最適第2分配室位置が存在する理由としては、スリット長さ比 $\gamma$ が小さい場合は、各分配室が一体となった状態のため、スリット長さ比 $\gamma$ が大きい場合は元々幅方向の吐出量偏差が少ない状態のため、第2分配室のスミージング効果が十分発揮されなかったためと思われる。また、スリット長さ比 $\gamma$ の増加に伴い、吐出量分布の補正量が減少している理由としては、第2スリットの長さが短くなることで、第2分配室内の静圧が小さくなり、第2分配室幅方向に塗液をスミージングさせるためのエネルギーが減少するためと考えられる。

では次に第2分配室の断面積を変化させた場合の吐出量補正効果を確認する。解析に使用した金型の寸法は $W=50\text{cm}$ 、 $R_1=0.5\text{cm}$ 、スリット長さ比 $\gamma$ の条件は前記の条件で最適であった $L_1=L_2$ の条件を使用する。各スリット長さはスリット部のトータル長さが一定との金型設計上の拘束条件を持たせるため前回と同様に、 $L_1+L_2+2R_2=5\text{cm}$ とし、分配室断面積比 $\delta(A_2/A_1)=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ の条件に関して解析した。また、スリット隙間 $t_k$ に関しては、断面積増加のみの効果を見るために、第1分配室の静圧を各条件において等しくする様 $t_1=t_2$ のもとに値を変化させた。これらの値をTable.Iに示す。なお、液物性に関しては、設置位置による影響を見るために、 $n=1.0$ のニュートン流体の条件で、 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $Q_1(0)=25\text{cc}/\text{sec}$ の値を標準条件として使用した。分配室断面積比 $\delta$ を0~1に変化させたときの第2スリット吐出量偏差をFig.8、流量分布特性の伝達関数をFig.9に示す。

Fig.9より、分配室断面積比 $\delta$ が増加するにつれて、伝達関数は一定の曲線に漸近していくことが分かる。また、Fig.8より吐出量偏差も分配室断面積比 $\delta$ の増加につれて減少するが、 $\delta=0.5$ 付近より減少量が鈍化した後、偏差ゼロに漸近してい

Table.I Measure of cavity and slit.

Ratio of cavity cross area $\delta$	Slit length (cm)	Slit gap (cm)
0.0	2.5	0.05
0.2	2.276	0.0485
0.4	2.184	0.0478
0.6	2.113	0.0473
0.8	2.053	0.0468
1.0	2.0	0.0464

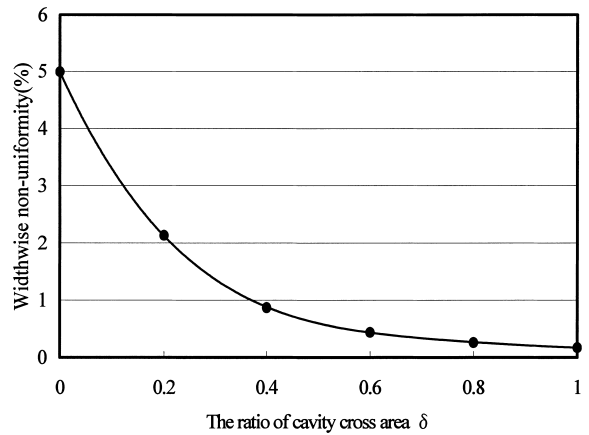


Fig.8 Widthwise non-uniformity ( $\delta=0.0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0$ ).

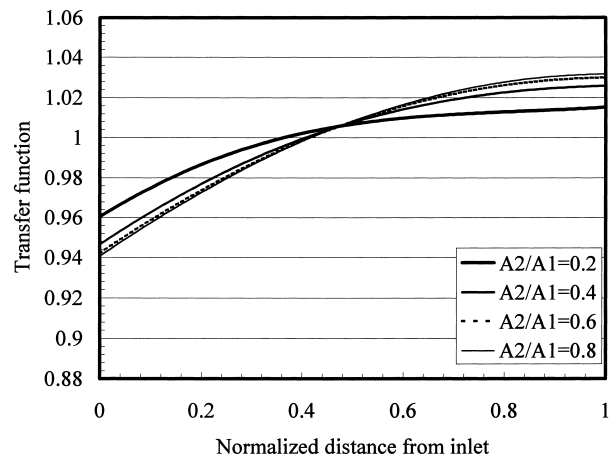


Fig.9 Transfer function of flow rate profiles ( $\delta=0.2,0.4,0.6,0.8$ ).

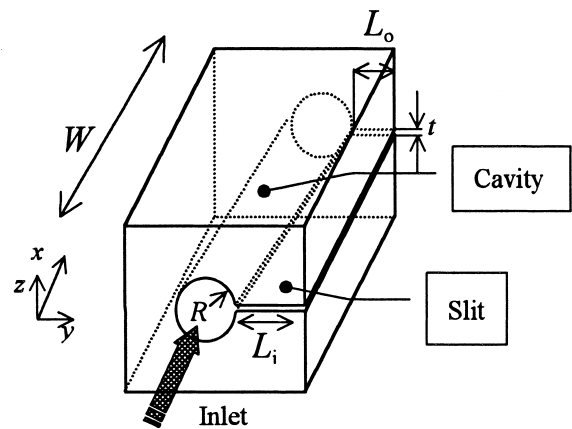


Fig.10 Geometry of coat hanger die.

ることが分かる。これらの結果より、第2分配室の断面積増加は、吐出量偏差低減に有効であるが、分配室断面積比 $\delta$ を0.5より大きくしたとしても、いたずらに液溜りを増やすだけであり、補正量は大差が無いことが分かった。

よって、以後の検討より第2分配室の設置位置・断面積はスリット長さ比 $\gamma=0.5$ 、分配室断面積比 $\delta=0.5$ 付近の値を採用することとする。

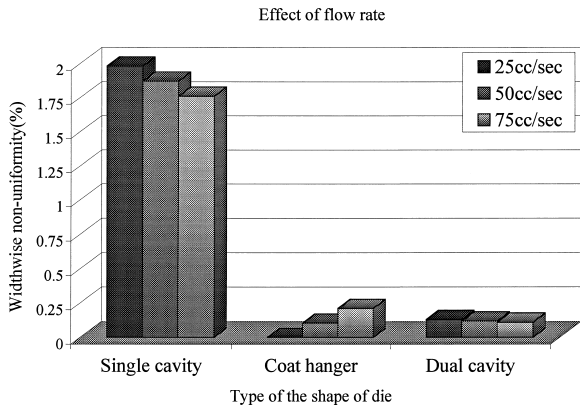


Fig.11 Effect of flow rate on non-uniformity.

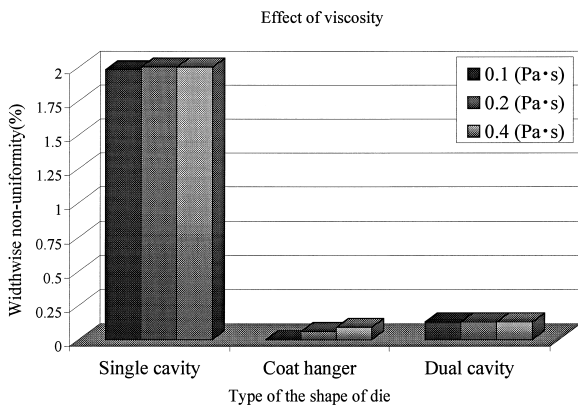


Fig.12 Effect of viscosity on non-uniformity.

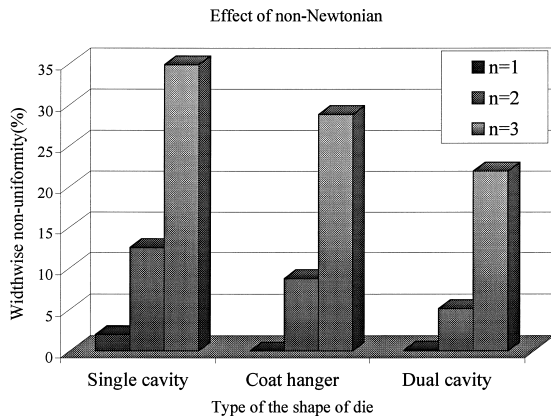


Fig.13 Effect of non-Newtonian viscosity on non-uniformity.

4.2 従来方式との吐出量変動頑健性比較

本方式と従来方式のコートハンガー，単一分配室方式との各パラメータ変動に対する，幅方向の吐出均一性の変化を次に検討する．コートハンガーの内部形状をFig.10に示す

解析に使用した本方式の金型寸法は  $W = 50\text{cm}$  ,  $R_1 = 0.75\text{cm}$  ,  $R_2 = 0.5\text{cm}$  ,  $t_1 = t_2 = 0.05\text{cm}$  各スリット長さ  $L_1 = L_2 = 2.5\text{cm}$  である．コートハンガー方式の図中に示す寸法は，  $W = 50\text{cm}$  ,  $R = 0.75\text{cm}$  ,  $t = 0.05\text{cm}$  ,  $L_1 = 5.0\text{cm}$  ,  $L_1 - L_0 = 0.1\text{cm}$  である．この

内部形状はニュートン流体を使用した際に，幅方向の吐出量偏差がゼロになる様に設計している値である．単一分配室方式は，コートハンガー方式の形状において  $L_1 = L_0 = 5.0\text{cm}$  とした寸法である．

なお，液物性に関しては， $n = 1.0$  のニュートン流体の条件で，  $\mu = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$  ,  $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$  ,  $Q_1(0) = 25\text{cc}/\text{sec}$  の値を標準条件として，粘度を  $0.1, 0.2, 0.4\text{Pa}\cdot\text{s}$  と変化させたものと，流量を  $25, 50, 75\text{cc}/\text{sec}$  と変化させた条件を使用した．また，非ニュートン性を変化させる条件においては，流量・密度に関しては標準条件を使用し，  $\mu_0 = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$  ,  $\tau_{12} = 2.5\text{Pa}\cdot\text{s}$  の条件で，  $n = 1, 2, 3$  と指数を変化させた．

各流量，粘度，非ニュートン性を変更させた時の幅方向の吐出不均一性の変化をFig.11, Fig.12, Fig.13に示す．

Fig.11より，従来方式である単一分配室方式は，どの流量においても幅方向の吐出不均一性は他方式に比べ大きい傾向を示していることが分かる．また，流量の増加につれて内部流動において慣性力の効果が増加するために，吐出不均一性を減少させる傾向を示している．また，従来方式のコートハンガー方式は設計値である  $25\text{cc}/\text{sec}$  の流量においては吐出不均一性がゼロであるが，流量の増加につれて内部流動における慣性力の影響でバランスを乱されるため，徐々に不均一性が大きくなっていく傾向に有る．本方式の2段分配室方式は吐出不均一性はゼロではないものの，吐出量の変化に対してその値は殆ど変動していないことが分かる．つまり，第2分配室は流量変化により生じる，慣性力起因の幅方向の流量偏差を吸収する効果を持っていることが分かる．

Fig.12は塗液の粘度を変更した場合の，幅方向吐出量の不均一性の変化である．流量変化の時と同様に，従来方式の単一分配室方式は各条件において吐出不均一性は最も大きく且つ，粘度の上昇により粘性圧力降下の作用が強くなるために吐出量偏差が増加していることが分かる．また，コートハンガー方式に関しても流量変化の時と同様に，設計時の粘度  $0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$  の時は均一であるが，粘度の増加につれて，不均一性は増加する傾向に有る．また，本方式の2段分配室方式も同様に吐出不均一性はゼロではないものの，粘度の変化に対して殆ど変動しておらず，粘性力起因の幅方向の流量偏差を吸収する効果も持ち合わせていることが分かる．

Fig.13は非ニュートン性を変化させた時の各方式の幅方向の吐出不均一性の変化であるが，各方式を比較すると非ニュートン性の変化による吐出不均一性の変動量，各条件における幅方向の吐出偏差量共2段分配室方式が最も優れていることが分かる．つまり，本方式は，塗液のレオロジー物性の変動により生じる，幅方向の流量偏差を吸収する効果に関しても，優れた特性を持っていることが分かる．

以上の様に，2段分配室方式は幅方向の吐出偏差量を低減させる効果のみならず，種々の操作条件の変化に対しても，安定した幅方向の吐出プロファイルを維持できる特性も持つ，非常に有効な方式であることが分かった．

5. 結 論

本報では，2段分配室付押し出し金型内における塗液の流動について，Ellis流体について，スリットより吐出する流量分配を簡便に解析することが可能な1次元流れモデルを用い，効率的に数値解析を行う手法を提示した．また，第2分配室

の形状，設置位置による幅方向の吐出偏差補正特性を明らかにすると共に，各操作パラメータの変化による吐出プロファイルの変化を解析すると共に，従来方式との比較を行い，本方式の有用性を確認し，次の結論を得た．

- (1) 2段分配室付押し出し金型内流動をEllis流体を用いた1次元流動モデルを用いて定式化し，第1，第2分配室・スリット部のそれぞれの流動方程式を独立に計算後，連成させることで簡便に計算することが可能である．
- (2) 第2分配室の形状，設置位置を変更し，幅方向の吐出偏差をニュートン流体の条件にて計算した結果，スリット長さ比 $\gamma = 0.5$ ，分配室断面積比 $\delta = 0.5$ 付近の条件が，実用上最も吐出偏差を低減させる条件であることが分かった．
- (3) 各操作条件の変化に対する，従来方式と本方式の吐出プロファイルの安定性を計算した結果，本方式が最も有効な方式であることが分かった．
- (4) 以上の結果より，2段分配室方式は幅方向の吐出偏差量を低減させる効果のみならず，種々の操作条件の変化に対しても，安定した幅方向の吐出プロファイルを維持

できる特性も持つ，非常に有効な方式であることが分かった．

#### 参考文献

- 1) 気賀沢忠広，能條和彦，“コーティングのすべて”，(1999)，157-166，加工技術研究会．
- 2) 飯田陽弘，“コーティング技術”，(1999)，37-44，技術情報協会．
- 3) 津田武明，長谷川富市，鳴海敬倫，日本機械学会論文集B編 67-661, 2174 (2001)．
- 4) 津田武明，長谷川富市，鳴海敬倫，日本レオロジー学会誌，**30**，133 (2002)．
- 5) Byron B, Robert CA and Ole H, “*Dynamics of polymeric liquids, Volume I*”, John Willey and Sons, (1987), 245-246.
- 6) Leonard WK, *ANTEC*, (1985), 144-148.
- 7) Lee KY and Liu TJ, *Polym Eng Sci*, **29**, 1066 (1989).
- 8) Yuan SL, *Polym Eng Sci*, **35**, 577 (1995).