

## 押出し金型における粒子濃度分布の数値予測

### The Prediction of Particle Concentration Distribution from a Slot Die

中野 公一<sup>a\*</sup>, 山本 和秀<sup>a</sup>, 津田 武明<sup>b</sup>, 京藤 敏達<sup>a</sup>

Koichi Nakano, Kazuhide Yamamoto, Takeaki Tsuda, Harumichi Kyotoh

Received 9 August 2012; Accepted 9 October 2012

Prediction of particle concentration distribution from a slot die is presented. The uniformity of particle concentration distribution is predicted by the particle trajectory in a slot die. In order to depict the movement of particles in the slot die, we coupled the one-dimensional flow equations in a slot die and Stokesian sedimentation equation. It is concluded that Reynolds number and particle diameters affect the uniformity of the particle concentration from the slit, and the predictions using the presented model agree with the experimental results.

**Keywords:** Numerical analysis, Particle concentration, Particle trajectory, Pipe flow, Finite difference method

#### 1. 緒 論

液晶テレビや LED 照明に用いられる拡散フィルムなどの精密薄膜塗布製品は、製品の品質や性能を得るため、塗液の均一化および精密な薄膜塗布が重要である。一般的な光学フィルムとしては、屈折率操作や光散乱現象を利用した拡散フィルムなどがあり、その光学性能を得るために、塗液では微粒子（10~30 μm 程度）と樹脂とを溶剤に低固形分（10 vol% 以下）で混合し、その塗液を薄膜に塗布（湿潤膜厚 20 μm 以下）する<sup>1)</sup>。

製造工程における塗工工程では、精密な薄膜が得られる押出し金型を使用する傾向<sup>2)</sup>がある。しかし、粒子径が 10~30 μm の微粒子では、安定な分散が難しく<sup>3)</sup>、微粒子を含む塗液にて押出し金型を用いた長時

間の生産を行う場合、金型内部で微粒子の沈降が生じ、清掃作業による機械停止、塗工欠陥の発生による品質低下や良品歩留りの低下などの生産時の問題が生じる<sup>4, 5)</sup>。

一般的な押出し金型は、塗液の流入口から金型端部へ塗液を分配する分配室と塗液を成膜するためのスリットの 2 つの構成要素から成る。金型全幅にわたり均一な薄膜を得るためには、金型内部の分配室およびスリットの形状を適切に設計することが重要である<sup>6, 7)</sup>。これまでの研究では、押出し金型における分配室およびスリットの流れを 1 次元方程式に簡略化し、短時間で最適形状を計算する研究などが行われており<sup>8, 9)</sup>、津田ら<sup>9)</sup>のモデルによる解析結果は実験値と比較され、両者の良好な一致が確認されている。しかしながら、微粒子を含む希薄な塗液を用いた場合、薄膜で厚みが均一な塗膜を得ながらも、金型内部での微粒子の沈降が発生するために、粒子の濃度が不均一となりやすい。そのため、金型の流路設計では、微粒子の沈降を防ぎつつも粒子濃度を均一に保つことが必要と考えられるが、これまでスリットを有する円管内部における粒子濃度に関する研究では十分な検討がなされていなかった。

筆者らはこの様な問題を改善するために、分配室内

a 筑波大学大学院 システム情報工学研究科  
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)  
Graduate School of Systems and Information Engineering,  
University of Tsukuba  
(1-chome 1-1, Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan)

b 大日本印刷株式会社  
(〒300-2646 茨城県つくば市緑ヶ原1-1-3)  
Dai Nippon Printing Co., Ltd.  
(1-chome 1-3, Midorigahara, Tsukuba, Ibaraki 300-2646,  
Japan)

\* 責任著者連絡先 s1030230@u.tsukuba.ac.jp

での1次元流動モデル<sup>9)</sup>とストークスの粒子沈降モデルとを連成計算することで、金型全幅にわたる分配室内での粒子濃度分布を数値的に予測する手法を提案し、実用上問題となる分配室内の粒子濃度分布について、非ニュートン性との関係、粒子径との関係について考察した<sup>10)</sup>。しかしながら、粒子濃度分布の解析モデルに関する検討を主に行い、解析と実験結果を含めた検討を実施していない。

そこで、本研究においては、スリットを有する金型内部の塗液流動において、塗液流入口からスリットへ流入する塗液の粒子濃度モデルを提示するとともに、せん断粘度が一定（ニュートン流体）の微粒子含有の水溶液において、スリットが下向きの場合に流出する粒子濃度を実験的に定量化し、粒子濃度モデルの解析結果と比較、粒子濃度と分配室内の粒子軌跡との関係を考察する。

## 2. 分配室内の粒子軌跡モデルおよび解析

### 2.1 解析モデル

本研究の金型モデルをFig. 1に示す。流路のうち分配室は円管状であり、 $x$ 方向にその断面形状および断面積は一定である。スリットは平行平板状であり、塗液は分配室に直接流入し、その全てがスリットより流出する。 $x$ 軸はFig. 1に示すように円管状の分配室の中心軸と並行にスリットと対向位置の壁面にとり、 $y$ 軸は分配室内部の断面方向、 $z$ 軸は分配室内部の鉛直方向である。各軸の原点位置は、塗液流入口断面のFig. 1のように与える。

### 2.2 分配室内の粒子軌跡モデル

金型内部の流路設計では、流れは層流と仮定する<sup>11)</sup>。また、塗液流量の保存則については、Fig. 2のような検査体積をとる。

円管内における塗液の流速は、放物型の流速分布であると仮定すると、 $x$ 方向の流速  $u$  は、

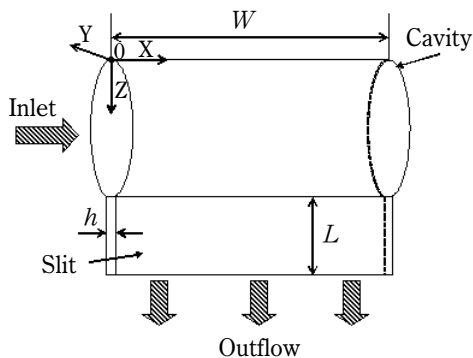


Fig. 1 Geometry of die

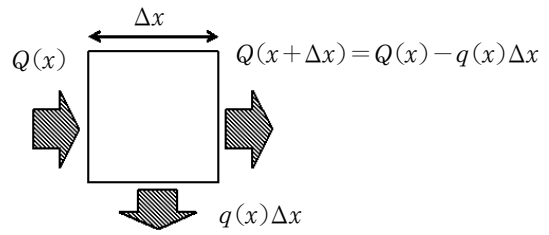


Fig. 2 Schematic model of conservation of volume

$$u = \alpha(x)(R^2 - r^2) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $R$ は円管断面半径、 $r$ は円管中心からの距離である。Eq. (1)を分配室の円管断面全体にわたって積分し、円管内位置  $x$  の円管断面流量  $Q(x)$  を求める。

$$Q(x) = \int_0^R u \cdot 2\pi r dr \quad (2)$$

Eq. (2)より  $\alpha(x)$  を求めると、流速分布を流量を用いて次式のように表される。

$$u = \frac{2(-r^2 + R^2)Q(x)}{\pi R^4} \quad (3)$$

さらに、非圧性流体の連続の式から、 $z$ 方向の流速  $w$  は、

$$\frac{\partial}{\partial x} u + \frac{\partial}{\partial y} v + \frac{\partial}{\partial z} w = 0 \quad (4)$$

を満たす。ただし、 $z$ 軸は円管頂部を原点に鉛直下方を正にとる。これを円管断面の位置  $z$  における範囲  $-b < y < b$ ,  $b = \sqrt{R^2 - (R-z)^2}$  で積分すると、

$$\begin{aligned} & \int_{-b}^b \left( \frac{\partial}{\partial x} u + \frac{\partial}{\partial y} v + \frac{\partial}{\partial z} w \right) dy \\ &= \left[ v \right]_{y=-b}^{y=b} + \frac{\partial}{\partial z} \int_{-b}^b w dy - \frac{db}{dz} (w|_{y=b} + w|_{y=-b}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \int_{-b}^b u dy - \frac{db}{dx} (u|_{y=b} + u|_{y=-b}) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。円管内の壁面では  $u = v = w = 0$  であるから、Eq. (5)は、

$$\frac{\partial}{\partial z} \int_{-b}^b w dy + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-b}^b u dy = 0 \quad (6)$$

となる。ただし、 $b$ は  $x$ によらないとした。本研究では、円管内の位置  $z$  における  $y$ 方向の平均流速、

$$\bar{u} \equiv \frac{1}{2b} \int_{-b}^b u dy, \quad \bar{w} \equiv \frac{1}{2b} \int_{-b}^b w dy \quad (7)$$

を使って、分配室内の粒子挙動を予測する。まず、 $\bar{u}$  は Eq. (3) から、

$$\bar{u} = \frac{4z(2R-z)}{3\pi R^4} Q(x) \quad (8)$$

と表すことができ、また、 $\bar{w}$  は Eqs. (6), (7) から、

$$\bar{w} = -\frac{1}{2b} \int_0^z \left( \frac{\partial}{\partial x} \int_{-b}^b u dy \right) dz \quad (9)$$

となる。ここで、 $z=0, w=0$  を用いた。Eq. (9) の積分を具体的に計算すると、

$$\begin{aligned} \bar{w} &= \frac{1}{2b} \int_0^z \frac{8\{(2R-z)z\}^{\frac{2}{3}} q(x)}{3\pi R^4} dz \\ &= \frac{1}{2b} \int_0^\theta R \sin \theta \frac{8(R \sin \theta)^3 q(x)}{3\pi R^4} d\theta \\ &= \frac{(12\theta - 8 \sin 2\theta + \sin 4\theta) q(x)}{24\pi R \sin \theta} \end{aligned} \quad (10)$$

が得られる。ここで、変数変換

$$z = R(1 - \cos \theta) \quad (11)$$

を用いた。また、 $q(x)\Delta x$  (ただし、 $q(x) = -dQ/dx$ ) は、Fig. 2 に示す微小区間  $\Delta x$  の検査体積における塗液流出流量である。単位区間当たりのスリットからの流出流量  $q(x)$  の算出は、次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$q(x) = \left( \frac{p(x)}{W} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{2n}{(2n+1)k^{1/n}} \left( \frac{h}{2} \right)^{\frac{2n+1}{n}} \quad (12)$$

ただし、 $p(x)$  は分配室内の圧力、 $W$  は分配室の長さ、 $n$  は非ニュートン性を表す指数で  $n=1$  はニュートン流体となる。また、 $k$  は粘度定数、 $h$  はスリット幅である。詳しくは、津田らの論文<sup>9)</sup> を参照されたい。

次に、流速場が Eqs. (8), (10) で与えられるときの粒子の軌跡を求める。本研究における対象とする粒子径は  $10 \sim 30 \mu\text{m}$  であり、同範囲におけるシュミット数は  $1.1 \times 10^6 \sim 3.5 \times 10^6$  と、ブラウン運動による拡散の影響は小さいと仮定する。また、粒子レイノルズ数が非常に小さい場合を対象とし、分配室内の粒子の速度を、流速場と微粒子の沈降速度のベクトル和で与える。微粒子の  $z$  方向への沈降速度は、終末沈降速度  $v_t$  とする。ここで  $X$  は粒子径、 $g$  は重力加速度、 $\rho_p$  および  $\rho_f$  は微粒子と液の密度であり、 $\mu$  は津田ら<sup>9)</sup>

の平均粘度係数である。

$$v_t = \frac{(\rho_p - \rho_f) X^2 g}{18\mu} \quad (Re < 6) \quad (13)$$

以上より、微粒子の速度 ( $u_p, w_p$ ) は、以下 Eqs. (14), (15) で与えられる。

$$u_p(x, z) = \frac{4z(2R-z)}{3\pi R^4} Q(x) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} w_p(x, z) &= \frac{(12\theta - 8 \sin 2\theta + \sin 4\theta) q(x)}{24\pi R \sin \theta} \\ &\quad + \frac{(\rho_p - \rho_f) X^2 g}{18\mu} \end{aligned} \quad (15)$$

微粒子の  $x$ - $z$  座標における位置 ( $x_p, z_p$ ) は ( $\Delta x_p, \Delta z_p$ ) = ( $u_p(x_p, z_p), w_p(x_p, z_p)$ ) より、 $\theta$  を媒介変数として次式にて与えられる。

$$\frac{dx_p}{d\theta} = \frac{u_p(x_p, z_p)}{w_p(x_p, z_p)} R \sin \theta \quad (16)$$

$$\frac{dz_p}{d\theta} = R \sin \theta \quad (17)$$

## 2. 3 解析および離散化

本研究における金型内部の円管内およびスリット内流れの1次元化、解析における離散化のモデル化は、津田らの研究に従う<sup>9)</sup>。1次元運動方程式の差分格子はスタガード格子、スリット部は1次元平行平板流れを示す格子を使用し、空間の離散化は1次精度の前進差分を用いる。収束演算にはニュートン法を用い、塗液流入口から  $x$  方向の金型全幅の長さ  $W$  に対し、格子分割数は等間隔で1000分割した。

## 2. 4 解析結果と考察

本研究では、緒論にて述べたような製品を対象とし、パラメータとして、粒子径を  $X = 10 \sim 30 \mu\text{m}$ 、インキの流量を塗液流入口のレイノルズ数が  $Re_0 = 25 \sim 100$  となる条件として数値解析を実施した。レイノルズ数は、 $Re_x = \rho [Q(x)/(2\pi R^2)]^{2-n} 2R^n / k$  にて定義し<sup>9)</sup>、塗液流入口のレイノルズ数を  $Re_0$ 、円管内  $x$  位置の局所レイノルズ数を  $Re_x$  とする。

本研究では、スリットからの塗液の吐出流量  $q$  が  $x$  によらずほぼ一定となるように  $R, W, h, L$  が与えられている場合について議論する。このとき、円管内の流れは塗液流入口のレイノルズ数  $Re_0$  によらず Fig. 3 のような流線となる。ここで Fig. 3 の縦軸は、円管直径  $2R$  で無次元化した  $z$  方向の位置、横軸は金型全幅  $W$  で無次元化した  $x$  方向の位置である。したがって、

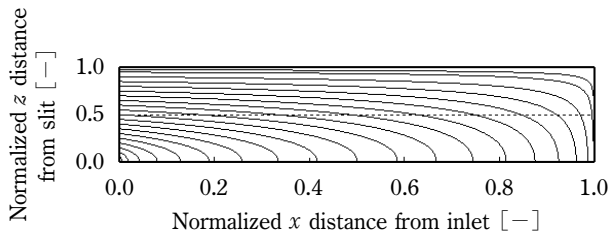


Fig. 3 Flow line in a slot die

微粒子の運動は Eq. (15) のみで議論することができる。

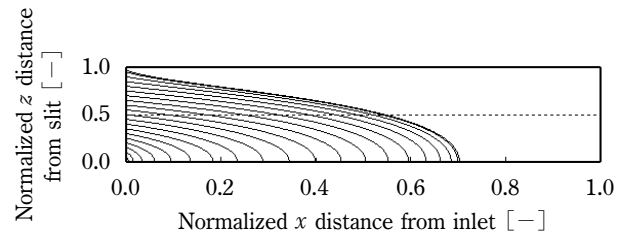
Eq. (15) の第 1 項はスリット方向の流速を表しており、その代表値は  $q/R$ 、第 2 項は粒子の沈降速度により支配される。そこで、Eq. (15) におけるこれら 2 項の大きさの比の代表値を以下の無次元量  $\xi$  (無次元沈降速度) で与える。

$$\begin{aligned} \xi &= \left\{ \frac{(\rho_p - \rho_f) X^2 g}{\mu} \right\} / \left( \frac{q}{R} \right) \\ &= \frac{(\rho_p - \rho_f) X^2 g}{\mu} \cdot \frac{W \cdot 2\rho}{\pi \mu R e_0} \\ &= \frac{2\rho(\rho_p - \rho_f) g W}{\pi \mu^2} \cdot \frac{X^2}{R e_0} \end{aligned} \quad (18)$$

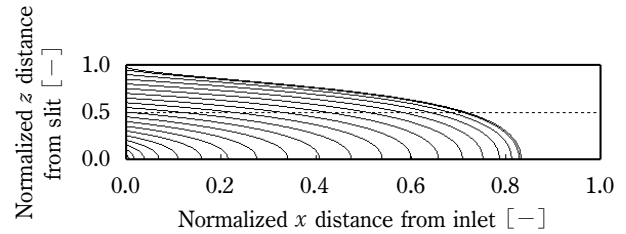
ただし、スリットからの吐出量  $q$  を  $Q_0/W$  とした。粒子軌跡は  $\xi$  が一定のとき変化しないため、例えば粒子径  $X$  を 2 倍としたときレイノルズ数  $Re_0$  を 4 倍とすることでスリットからの塗液の濃度の一様性を保つことが可能となる。以下、Eq. (18) の  $\xi$  を用いて分配室内の濃度分布について議論する。

解析に使用する金型形状は、金型全幅の長さ  $W=0.3\text{m}$ 、流出方向のスリット長さ  $L=0.02\text{m}$ 、スリットの間隔  $h=708\text{ }\mu\text{m}$ 、円管の断面半径  $R=9.0\text{mm}$  とし、塗液物性では液密度  $\rho_f=1000\text{ kg/m}^3$ 、粒子密度  $\rho_p=2200\text{ kg/m}^3$ 、流体粘度  $\mu=0.003\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、粒子径  $X=20\text{ }\mu\text{m}$  とし、これらを標準条件とする。 $\xi=4.00\sim 15.00$  条件における塗液流入口から  $x$  方向へ向かう粒子軌跡を Fig. 4 に示す。

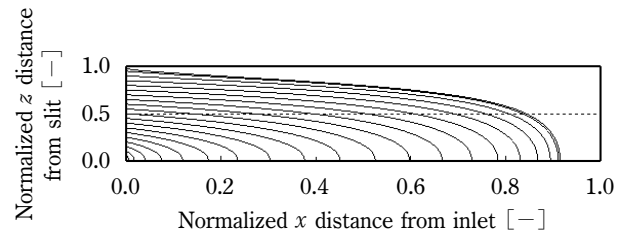
Fig. 4 (a) の粒子軌跡は、 $z$  方向の無次元沈降速度  $\xi$  が大きい場合を示しており、塗液流入口から  $x$  方向の流量が少ない場合もしくは粒子径が大きい場合を示している。流量が少ない場合は、金型内部での微粒子の滞留時間の増加により、微粒子が端部まで輸送されずに沈降する。また、粒子径が大きい場合は、微粒子の沈降の影響から、端部へ微粒子が輸送されにくくなることを示している。一方、Fig. 4 (c) に示す  $\xi$  が小さい場合は、塗液流入口から  $x$  方向へ向かう流量



(a) Particle trajectories ( $\xi=15.00$ )



(b) Particle trajectories ( $\xi=8.00$ )



(c) Particle trajectories ( $\xi=4.00$ )

Fig. 4 Particle trajectories for different values of  $\xi$ , (a) 15.0, (b) 8.0 and (c) 4.0

が多い場合もしくは粒子径が小さい場合であり、円管端部へ向かって微粒子が速く輸送され、また粒子径が小さく沈降の影響が小さいことから、微粒子が沈降せずに端部まで輸送される傾向となることがわかる。このように、円管内の粒子軌跡は、流動と粒子沈降の影響に依存していることがわかる。

### 3. 粒子濃度モデルおよび解析

樹脂、微粒子、溶剤から構成される塗液は、製品の品質を得るために、調合段階から各分量が決まっている。しかしながら、押出し金型を用いた製造では、塗布条件（膜厚、塗布速度等）により生じる金型内部の粒子沈降が起因する塗工欠陥や塗布膜厚ムラや品質不良などにより生じる基材端部付近の除去<sup>12)</sup>など、生産時対応が必要となっている。このような問題を事前に回避するために、金型内部の粒子沈降モデルを用い、スリットから流出する粒子濃度を予測する。

#### 3.1 スリットから流出する粒子濃度のモデル化

円管内からスリットへ流入する粒子濃度を解析にて求める。Fig. 5 は、分配室内の粒子運動に関するモデ

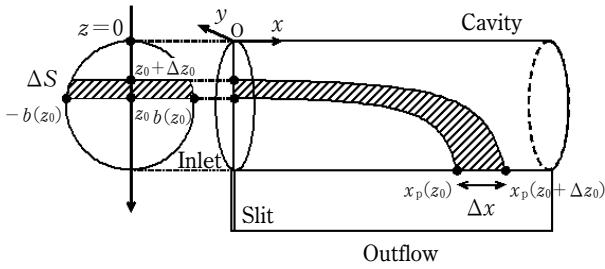


Fig. 5 Schematic model of particle concentration distribution

ル図である。

塗液流入口から流入した塗液流中の微粒子は、粒子軌跡の曲線間を流動してスリットへ流入する。スリットへ流入する粒子濃度を計算するために、粒子軌跡の始点位置を流入位置にて2点与え、それを $z=z_0$ ,  $z=z_0+\Delta z_0$ とする。さらに、粒子軌跡とスリット $z=2R$ との交点となる2点の座標間距離を $|\Delta x_p|$ ,  $\Delta x_p = x_p(z_0+\Delta z_0) - x_p(z_0)$ とすると、スリットへ流入する粒子濃度は、円管内に流入する粒子数と流出する塗液流量から求められる。

円管断面位置 $z=z_0$ ,  $z=z_0+\Delta z_0$ について、単位時間当りに通過する粒子数は、面積 $\Delta S=2b(z_0)\Delta z_0$ と塗液の粒子濃度 $C_0$ より、次式で与えられる。

$$\dot{N}=2b(z_0)\bar{u}(0, z_0)\Delta z_0 C_0 \quad (19)$$

ここで、 $\Delta z_0=\dot{N}/(2b\bar{u}C_0)$ は一定である。一方、スリットから単位時間当りに流出する粒子数は、

$$\dot{N}=q(x_p)|\Delta x_p|C(x_p) \quad (20)$$

ここで、 $C(x_p)$ はスリットの位置 $x=x_p$ における粒子濃度である。最終的に、粒子濃度は粒子数の保存則より、

$$\begin{aligned} C(x_p) &= \frac{2b(z_0)\bar{u}(0, z_0)\Delta z_0 C_0}{q(x_p)|\Delta x_p|} \\ &= \frac{8\{z_0(2R-z_0)\}^{3/2}}{3\pi R^4} \frac{Q_0}{q(x_p)} \frac{\Delta z_0}{|\Delta x_p|} C_0 \quad (21) \end{aligned}$$

が得られる。粒子沈降が無視できる場合には微粒子と流体粒子の軌跡は一致し、流入流量 $2b(z_0)\bar{u}(0, z_0)\Delta z_0$ と流出流量 $\dot{N}=q(x_p)|\Delta x_p|$ は等しいため、粒子濃度は $C(x_p)=C_0$ となる。

### 3.2 解析結果と考察

解析に使用した金型条件、液物性は、2.4節と同様である。Fig. 6に解析結果を示す。縦軸は初期濃度 $C_0$ と区間濃度 $C(x)$ の比 $C(x)/C_0$ 、横軸は金型全幅 $W$

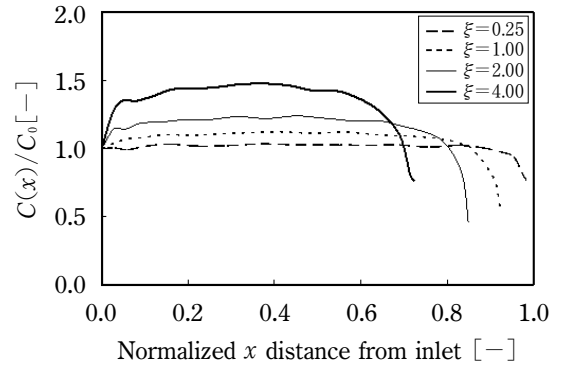


Fig. 6 Analytical results of particle concentration distribution for several values of  $\xi$

で無次元化した $x$ 方向の位置である。

Fig. 6の解析結果から、無次元沈降速度 $\xi$ が小さくなるにつれて、 $x$ 方向の位置におけるスリットへ流入する粒子濃度は、塗液流入口の初期粒子濃度 $C_0$ との差が小さく、円管端部付近まで初期粒子濃度が得られる傾向となる。これは、円管内部の粒子軌跡と同様に円管内の流速が増加し、金型内部における微粒子の滞留時間が減少することとともに、粒子径が小さく沈降の影響が小さい場合であり、円管端部へ向かって微粒子が沈降せずに輸送されるためと考えられる。

一方、 $\xi$ が大きい場合のスリットへ流入する粒子濃度は、初期濃度と区間濃度との比が大きくなる領域と希薄となる領域が顕著に発生することがわかる。これは、円管内部の流速の減少により、微粒子の滞留時間が長くなることから、粒子沈降の影響により、塗液の流入口から $x$ 方向へ、粒子濃度はいったん増加するが、円管端部へ向かうにつれて、塗液中の粒子濃度が希薄となるためである。

押し出し金型を用いた製造では、良品品質を得るために基材端部付近を除去する<sup>12)</sup>。前報<sup>10)</sup>と同様に、塗工幅に対して5%の位置(無次元位置0.95)まで、良好品質である下限値粒子濃度を $C(x)>0.9$ としたい場合には、 $\xi$ は0.38以下とするように金型形状、流量条件、液物性を決定することで得られる。

このように、スリットへ流入する塗液の粒子濃度をより金型全幅で均一化したい場合は、 $\xi$ を極めて小さくすることが重要であり、その指標を提案することに成功した。

### 3.3 実験および考察

実験装置に使用した金型寸法は、2.4節と同様である。実験に用いる塗液は、精製水、グリセリン(和光純薬工業株式会社)から成る水溶液にシリカ粒子(HS202, マイクロン社, 中位径 $15\mu\text{m}$ )をグリセリ

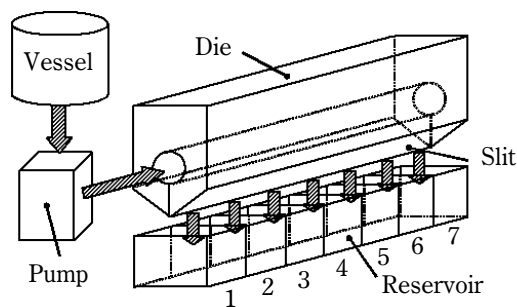


Fig. 7 Schematic of the experiment

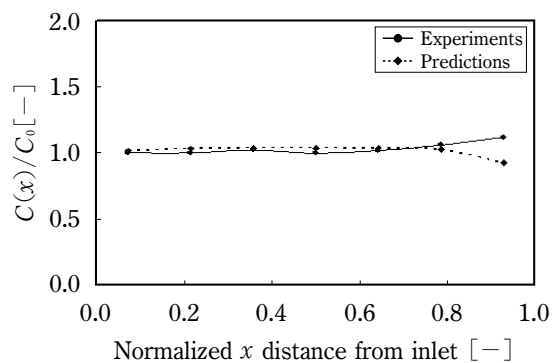
ン：精製水：微粒子の質量比で59.95：39.95：0.10となるように調整した混合液を十分に分散させたものを用いた。この時の微粒子の体積分率は、中位径で0.44 vol%，塗液の粘度は、レオメータ（MCR-301，アントンパールジャパン）の測定値から粘度  $\mu = 0.003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  であった。スリットから流出する塗液の粒子濃度分布の測定方法は、Fig. 7のように金型全幅に対し、等間隔で7分割した液回収器を用いて、回収した塗液を測定する。回収した塗液の粒子径と粒子数を光学微粒子測定器（LiQuilaz E-20）にて測定し、各回収器内の粒子数を測定した。流量については、容器内の塗液体積と時間から単位流量を算出した。

レイノルズ数  $Re_0 = 80$ ，粒子径  $X = 10 \mu\text{m}$ ， $30 \mu\text{m}$  の実験値と実験条件における無次元沈降速度  $\xi$  ( $\xi = 0.27, 2.49$ ) の解析値を比較した結果を Fig. 8 に示す。ここで、図中の理論値は実験における試料採取箱区間の平均値である。Fig. 8 に示すように、本解析値と実験値は、おおむね一致していることがわかる。Fig. 8 (a), (b) とともに、横軸0.8-1.0の円管端部付近の値がずれている。これは、円管内に沈降した微粒子の端部への移動や測定時の表面張力の影響による回収位置のばらつきが影響していると考えられる。

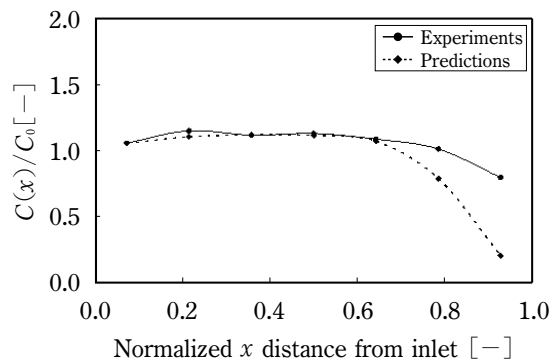
以上の結果から、塗液の円管内の流動と粒子沈降に依存して形成するスリットからの流出液中の粒子濃度分布を予測することに成功した。

#### 4. 結 論

本研究では、スリットを有する金型内部の塗液流動において、塗液流入口からスリットへ流入する塗液の粒子濃度モデルを提示するとともに、せん断粘度が一



(a) Concentration of particle ( $\xi = 0.27$ )



(b) Concentration of particle ( $\xi = 2.49$ )

Fig. 8 Comparison of particle concentration distribution between experiment and prediction

定（ニュートン流体）の微粒子含有の水溶液において、スリットが下向きの場合に流出する粒子濃度を実験的に定量化し、粒子流動モデルの解析結果と比較をおこなった。それらの結果、以下の結論を得た。

- 1) 押し出し金型内部の流れを考慮したストークスの粒子沈降モデルを用いて粒子軌跡を導いた。
- 2) 円管内部の粒子軌跡を用いて、塗液流入口からスリットへ流入する粒子の流れをモデル化し、スリットから流出する粒子濃度を計算した結果、 $z$  方向の無次元沈降速度  $\xi$  の値が0.38以下と小さい条件にて、スリットへ流入する  $x$  方向の粒子濃度は、初期濃度と比べて、差が小さく、円管端部付近まで微粒子が輸送されることがわかった。
- 3) レイノルズ数  $Re_0 = 80$ ，粒子径  $X = 10 \mu\text{m}$ ， $30 \mu\text{m}$  の条件におけるニュートン流体を用いた実験において、解析結果と実験値はおおむね一致した。

#### Nomenclature

$b$ : width of cavity at $z$	[m]	$C_0$ : concentration of particle at inlet	[mg/m <sup>3</sup> ]
$C$ : concentration of particles	[mg/m <sup>3</sup> ]	$g$ : gravitational acceleration	[m/s <sup>2</sup> ]

$h$	: slit clearance	[m]	$u_p$	: particle velocity of $x$ direction	[m/s]
$k$	: non-Newtonian viscosity at reference shear rate	[Pa·s]	$v$	: fluid velocity of $y$ direction	[m/s]
$L$	: slit gap length	[m]	$v_t$	: terminal settling velocity	[m/s]
$N$	: number of particles	[—]	$W$	: width of die	[m]
$\dot{N}$	: number of particles in unit time	[1/s]	$w$	: fluid velocity of $z$ direction	[m/s]
$n$	: power-law index	[—]	$w_p$	: particle velocity of $z$ direction	[m]
$p$	: pressure	[Pa]	$\bar{w}$	: average fluid velocity of $z$ direction	[m/s]
$Q$	: flow rate in cavity	[m <sup>3</sup> /s]	$X$	: particle diameter	[m]
$Q_0$	: flow rate in cavity at inlet	[m <sup>3</sup> /s]	$x$	: $x$ -coordinate in a cavity	[m]
$q$	: outflow rate to slit	[m <sup>3</sup> /s]	$x_p$	: $x$ -coordinate of particle	[m]
$R$	: radius of cavity	[m]	$y$	: $y$ -coordinate in a cavity	[m]
$Re$	: Reynolds number	[—]	$z$	: $z$ -coordinate in a cavity	[m]
$Re_0$	: Reynolds number at inlet	[—]	$z_p$	: $z$ -coordinate of particle	[m]
$Re_x$	: Reynolds number at $x$ -coordinate	[—]	$\mu$	: average of viscosity	[Pa·s]
$r$	: distance from the center of cavity	[m]	$\rho$	: density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$S$	: area of cavity	[m <sup>2</sup> ]	$\rho_p$	: particle density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$t$	: time	[s]	$\rho_l$	: liquid density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$u$	: fluid velocity of $x$ direction	[m/s]	$\theta$	: central angle	[deg]
$\bar{u}$	: average fluid velocity of $x$ direction	[m/s]	$\xi$	: dimensionless particle settling velocity	[—]

## References

- Tomizawa, N., M. Shimizu, Y. Noritake, T. Sakamoto and N. Nakamura: "Bougensei Film", Japanese Patent No. 4134159 (2008)
- Schweizer, P. M. and S. F. Kistler: "Liquid Film Coating", pp. 369-426, CHAPMAN & HALL (1997)
- Yanagida, H.: "Biryushi Kougaku Daikei, Dai Ikkan Kihongijyutu", pp. 765-801, Fuji Techno System (2003)
- Araki, M.: "Shin Coating no Subete", pp. 45-51, Converting Technical Institute (2009)
- Hasegawa, Y., T. Ogawa and K. Nojyou: "Tofuhouhou oyobi Bougensei Film no Seizouhouhou", Japanese Patent No. 4505810 (2010)
- Sartor, L.: "Slot coating: Fluid mechanics and die design", PhD Thesis University of Minnesota, Published by University Microfilms International, Ann Arbor, MI. (1990)
- Weinstein, S. J. and K. J. Ruschak: "One-dimensional equations governing single-cavity die design", *AIChE J.*, **42**(9), 2401-2414 (1996)
- Leonard, W. K.: "Inertia and gravitational effects in extrusion dies for non-Newtonian fluids", *Polym. Eng. Sci.*, **25**(9), 570-576 (1985)
- Tsuda, T., T. Hasegawa and T. Narumi: "Study of the Flow of Non-Newtonian Fluids in a Single Cavity Die", *Trans. Japan. Soc. Mech. Eng.*, B, **67**(661), 2174-2179 (2001)
- Nakano, K., T. Tsuda and H. Kyotoh: "Numerical Prediction of the Particle Concentration Distribution in a Slot Die", *J. Soc. Powder Technol. Japan*, **48**, 534-541 (2011)
- Tsuda, T.: "Kisokouza Coating to Suuchikaiseki Sono4 Ryuutairikigaku no Ouyou Chishiki (1)", *Converttech*, **38**(3), 28-33 (2010)
- Iwase, E., Y. Hasegawa and Y. Mizukai: "Extrusion Tofusouchi", Japanese Unexamined Patent Application Publication No. 2009-220025 (2009)