樹脂成形環境における汚染粒子挙動に関する研究

西 村 哲 郎*

A Study on Contamination Particle Behavior in Polymer Processing Environments

Nishimura, Tetsuro

A high level cleanliness is required in polymer processing environments in order to obtain reliability in advanced applications for plastic components such as packages of electronic devices and optical elements. It is important to know contamination particle behavior during injection molding machine operations. From the view point of practical research, the actual movements of articles originating in the sliding elements of the machine were measured in the processing environment. Particle movements were theoretically analyzed using aerodynamics and numerical analysis methods of air turbulent flows and particle concentrations. Comparing these calculated results for particle concentration with those from particle number measurements, the proposed numerical analyses were confirmed to be effective for use in contamination control during polymer processing environments. Furthermore, it was suggested theoretically that heat convection around heated molds was closely related to movements of small sized particles, and was one of the important factors for realization of cleanliness in polymer processing environments.

Key words : Polymer processing/Contamination/Environment

1. 緒 言

樹脂成形は、数多くの高付加価値部品の製造に適用されている。しかし、薄形化、微細化している電子デバイス用パッケージの成形工程において、成形環境に浮遊する粒子が樹脂内部に混入すると、デバイスとしての信頼性を損なう場合がある。また、薄形化、小型化している情報機器には微細な樹脂光学部品が用いられるが、成形品に粒子が付着すると光学特性を損なう要因となる。このように、部品の高付加価値化、高機能化にともない、樹脂成形の環境を清浄化することが、ますます重要な課題となっている。

通常、成形環境を清浄化する方法として、成形領域に清浄なエアを供給し、粒子をエアにより領域外に輸送する方法が用いられる。しかし、粒子の物質には、成形機の摺動部から生じるオイルミスト、外部から持ち込まれる埃、作業員から生じる分泌物など、物理化学的性質の異なる数多くの種類が考えられる。また同じ物質であっても、粒子の大きさは一定ではないために、性状の特定が難しい。しかも粒子は、エアの供給条件、成形機の種類、成形条件、装置のレイアウトなどの影響をうけて複雑に挙動する。以上

のような理由により、樹脂成形環境を対象とした粒子挙動の解析は困難であると考えられ、研究もほとんど公表されていない。

一方、樹脂成形以外の分野では、半導体の成膜工程を対象とした研究が報告されている¹⁾。しかし半導体製造では、クリーンルームは厳密に清浄度の管理がなされており、必然的に検討対象とすべき粒子の種類、大きさも限られる。したがって、この分野で得られた研究の結果を樹脂成形に適用することは、ほとんど困難であると考えられる。

そこで筆者は、樹脂の成形環境を対象とし、浮遊する粒子の挙動を解析する方法を検討することとした。研究成果の実用性という観点から成形現場をモチーフとし、成形機摺動部から発生する粒子に着目して、浮遊粒子数の位置による分布を実験により評価した。一方、エアの流れと粒子の濃度分布を数値解析し、実験結果を数値解析に基づいて説明することを試みた。

ここでは、実験および数値解析を併用して明らかにした粒子の力学的性質、粒子挙動の究明に対する数値解析の有用性について報告する。

2. 解析対象

解析の対象とした系を図1に示す。すなわち、

- (1) 一般室に、油圧式の横型射出成形機が設置されている。
- (2) 成形機に取り付けた金型は、クリーンブースで囲まれている。

* (株)東芝 生産技術センター 部品技術研究センター
横浜市磯子区新磯子町 33 (〒257-0017)
Toshiba Corporation
33, Sin-Isogochō, Isogo-ku, Yokohama 257-0017, Japan
1999. 11. 5 受理

Fig. 1 Object of research on contaminating particle behaviors in polymer processing

- (3) この金型は 373 K に加熱され、金型の周辺には熱対流が発生している。
- (4) 一般室のエアに含まれる粒子は、フィルター (Pleated air filter) によって捕集される。ブースの天井には、同じフィルターが 2 個とりつけられている。それぞれのフィルターからは、粒子が除かれた 293 K のエアが均一に、0.3 m/s の流速でブース内に供給される。ここで、フィルター 1 個当りのエアの流量は $5.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ である。供給されたエアはブース内を通り、ブース下部の排出口から一般室に排出される。
- (5) 成形機型締めユニットの摺動部には、グリースが塗布してある。成形機を稼動し、加熱された金型を定期的に開閉すると、摺動部から粒子が発生する。
- (6) 摺動部から発生した粒子は、エアの流れによってエア排出口に向かって輸送される。

3. 解析方法

3.1 実験

一般室からの粒子の進入を、クリーンブースにより完全に抑止することは困難である。また、ブース内にいる実験者からも粒子は発生する。すなわち、成形機を停止している時であっても、ブース内には粒子が存在していると考えられる。そこで、次のように実験を進めた。

- (1) 成形機停止時および成形機稼動時における粒子数を計測し、成形機停止時に対して稼動時に増加する粒子数を評価した。

- (2) ブース内にいる実験者は防塵服を着用した。

3.1.1 計測位置

計測位置は一般室で 1 ヶ所、ブース内で 4 ヶ所の計 5 ヶ所とした。すなわち、図 1 に示すように、ポイント I ~ ポイント V の計測位置を設けた。

- (1) 一般室 (ブース外) : ポイント I
- (2) フィルター近傍 (ブース内) : ポイント II
- (3) 上部摺動部近傍 (ブース内) : ポイント III
- (4) 下部摺動部近傍 (ブース内) : ポイント IV
- (5) 作業領域 (ブース内) : ポイント V

3.1.2 計測方法

粒子数の計測にはパーティクルカウンターを使用した。

Fig. 2 Timing of Particle Measurement

用いたカウンターでは、粒子を含んだエアを 60 s 間に 1 立方フィート吸引する。そして、レーザー光を照射して、散乱光を検知し、粒子数を直径と関連づけて算出する。検出可能な粒子直径 d は、 $3.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$ である。

3.1.3 金型動作および温度に関する条件

(a) 成形機停止時

金型および射出ユニットの温度を 293 K とした。また、射出ノズルを金型から十分に離し、金型は開いた。この時、固定側金型と移動側金型のパーティング面の距離は $350 \times 10^{-3} \text{ m}$ である。

(b) 成形機稼動時

射出ノズルを金型に接触させ、金型の温度を 373 K に、成形機の射出ユニットを 473 K に設定した。

金型動作のタイミングを図 2 に示す。金型を閉じる時に要する時間を 5 s、型締め状態にある時間を 20 s、型開きに要する時間を 5 s、アイドルタイムを 10 s とし、サイクルタイム 40 s の樹脂成形を想定している。また、パーティクルカウンターによる粒子数計測の時間は 60 s である。金型を開閉する時、型締めユニットの移動ストローク (摺動する距離) は $350 \times 10^{-3} \text{ m}$ である。また、成形機を稼動している時であっても、樹脂は射出しなかった。

3.2 数値解析

エア流れと、粒子の濃度分布を 2 次元解析することとした。

3.2.1 エアの流れ

ブース内のエアの流れは、フィルターから供給されるエ

ア流れと、加熱された金型により発生する自然対流によって定まるとした。そして、連続の式、運動量保存則の式、エネルギー保存則の式を Boussinesq 近似により連成して解析した。また、解析には乱流モデルを使用した。

3.2.1.1 基礎方程式

2次元の基礎方程式を示す。テンソル量の添字には1あるいは2が代入されるが、ここで1は水平方向、2は重力方向を示す。

(1) 連続の式

エアを非圧縮性流体と仮定した。すなわち、

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

ここで、 x_i ：座標、 u_i ：エア流速の*i*方向成分である。

(2) 運動量保存則の式

加熱された金型により発生する熱対流を表現するために、エアの体積膨張による浮力を外力とした運動量保存則を(2)式により与えた。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right) + \delta_{i2} g (1 - \beta(T - T_0)) \quad (2)$$

ここで、 t ：時刻、 p ：圧力、 T ：エアの温度、 T_0 ：基準とする温度（常温）、 ρ_g ：エアの密度、 ν ：動粘性係数、 β ：体積膨張率、 g ：重力加速度、 δ_{ij} ：クロネッカーの δ である。

(3) エネルギー保存則

エアの粘性散逸率は無視できるほど小さいので0とした。この時、エネルギー保存則は(3)式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(a \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{q_s}{\rho_s C_p} \quad (3)$$

ここで、 q_s ：単位熱源、 C_p ：定圧比熱、 a ：熱拡散率である。

3.2.1.2 乱流モデル

エアに発生する乱流の解析では、時間平均モデルの一つである k - ϵ モデルを用いた。

すなわち、乱流状態にあるエアの流速 u 、圧力 p 、温度 T はそれぞれの平均値 $\bar{u}$ 、 $\bar{p}$ 、 $\bar{T}$ と、ゆらぎの成分 u' 、 p' 、 T' を用いて(4)式～(6)式のように表現できる。

$$u = \bar{u} + u' \quad (4)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (5)$$

$$T = \bar{T} + T' \quad (6)$$

(4)式～(6)式を(1)式～(3)式に代入し、代入した3つの式をさらに時間平均すると、 $\bar{u}$ 、 $\bar{p}$ 、 $\bar{T}$ 、すなわちゆらぎの平均値が0となり、(7)式～(9)式がえられる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) \right) + \delta_{i2} g (1 - \beta(\bar{T} - T_0)) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((a + a_t) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) + \frac{q_s}{\rho_s C_p} \quad (9)$$

ここで、 ν_t ：渦動粘性係数、 a_t ：渦熱拡散率である。

(7)式～(9)式の連立方程式において、(8)式と(9)式には、位置に依存する ν_t 、 a_t が含まれている。ここで、 ν_t 、 a_t は(10)式～(13)式²⁾を連立することにより求めた。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - c_2 \frac{k \epsilon}{\nu_t} \quad (11)$$

$$\nu_t = c_3 \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

$$a_t = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (13)$$

ここで、 k ：乱流エネルギー、 ϵ ：乱流エネルギーの散逸率、 Pr_t ：乱流プラントル数、 c_1 、 c_2 、 c_3 、 σ_1 、 σ_2 ：定数である。

3.2.1.3 解 析

金型については、温度を境界条件として与えることとし、ここでは熱源は考慮せず、(14)式を与えた。

$$q_s = 0 \quad (14)$$

また、金型は周期的に開閉動作をしているが、ここでは定常解析を行うこととし、時間微分の項を0とした。

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

3.2.2 粒子の個数濃度

粒子の個数濃度は、粒子の拡散、体積力およびエアの流れに支配されるとした¹⁾。

3.2.2.1 基礎方程式

(1) 粒子の拡散の要因

1個の粒子に働く抗力 F_D は、(16)式により表現される³⁾。

$$F_D = 3\pi\rho_p\nu u_r d \quad (16)$$

ここで、 F_D ：粒子に働く抗力、 u_r ：粒子とエアの相対速度、 d ：粒子の動力学的直径、 ρ_p ：粒子の密度である。

粒子の大きさが十分に小さい場合には、粒子がエアの分子間をスリッパし、落下速度が増す。そこで、抗力を補正する方法として、粒子の直径、エアの動粘性係数と関係づけた Cunningham の補正係数を用いて、(17)式、(18)式のように補正した³⁾。

$$F_D = \frac{3\pi\rho_p\nu u_r d}{C_c} \quad (17)$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d} \left(c_4 + c_5 \exp \left(\frac{c_6 d}{\lambda} \right) \right) \quad (18)$$

ここで、 C_c ：Cunningham の補正係数、 c_4 、 c_5 、 c_6 ：定数である。

一方、微小距離 dx 間の拡散力は、各点での抗力差に等しいとする Van't Hoff の法則に従えば、2点間のフラックスは(19)式により記述される。すなわち、

$$J = -\frac{\kappa TC_c}{\pi \rho_g \nu d} \frac{dn}{dx} \equiv -D \frac{dn}{dx} \quad (19)$$

ここで、 J ：フラックス、 κ ：Boltzmann 定数、 n ：個数濃度、 D ：拡散係数である。

ここに、2 点間の拡散係数が求まる。

(2) 体積力の要因

一般に物体が静止したエアのなかに置かれると、等加速度で落下する。しかし、静止したエアに置かれた十分に小さい粒子は、加わる重力とエアによる抗力が釣り合い、ある時刻になると等速度運動する。最終的に等速度運動に達した時の終末沈降速度は、粒子の密度および直径の関数として(20-1)式または(20-2)式により与えられる³⁾。

すなわち、粒子の速度が十分に小さく、粒子の周囲のエアがストークス領域にある場合には、抗力が重力と等しいとして、終末沈降速度は式(20-1)で表される。

$$v_t = \frac{(\rho_p - \rho_g) d^2 g}{18 \rho_g \nu} \quad (20-1)$$

粒子の周囲のエアがニュートン領域にある場合には、(20-2)式によって与えられる。

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_g) dg}{3 C_D \rho_g}} \quad (20-2)$$

ここで、 v_t ：終末沈降速度、 C_D ：抵抗係数である。

C_D は、粒子まわりのエアの Reynolds 数 Re を用いて、(21)式で表現することとした³⁾。

すなわち、 $3 < Re < 1000$ に対して、

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{2/3}}{6} \right) \quad (21)$$

(3) エアの流れの要因

フィックの第 2 法則は(22)式で表される。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x_i^2} \quad (22)$$

この式に、移流の項と重力沈降速度に関する項を加え、2 次元で表現すると、(23)式がえられる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -u_i \frac{\partial n}{\partial x_i} - v_t(t) \frac{\partial n}{\partial x_i} \delta_{i2} + D \frac{\partial^2 n}{\partial x_i^2} \quad (23)$$

表 1 は、Hinds が求めた粒子直径と終末沈降速度に達する時間との関係³⁾を示している。本研究であつかう直径 $1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ の大きな粒子であっても、 $9.4 \times 10^{-4} \text{s}$ という十分に短い時間で一定の終末沈降速度に達することが報告されている。そこで、 $v_t(t)$ は一定値と仮定した(24)式を与えることとした。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -u_i \frac{\partial n}{\partial x_i} - v_t \frac{\partial n}{\partial x_i} \delta_{i2} + D \frac{\partial^2 n}{\partial x_i^2} \quad (24)$$

Table 1 Time for terminal settling velocity³⁾

Particle size (m)	Settling time (s)
1.0×10^{-8}	2.0×10^{-8}
1.0×10^{-7}	2.6×10^{-6}
1.0×10^{-6}	1.1×10^{-5}
1.0×10^{-5}	9.4×10^{-4}
1.0×10^{-4}	9.2×10^{-2}

3.2.2.2 解析方法

粒子の濃度 n を(24)式を用いて解析することとした。ここで終末沈降速度 v_t 、拡散係数 D および流速 u_i を知る必要がある。

v_t は、(20)式を用いて算出するが、ストークス領域とニュートン領域の遷移領域における沈降速度は、(20)式、(21)式を繰り返して計算することにより求めた。

D は(19)式により求めた。さらに u_i は(1)式～(3)式を連立してえられた乱流の定常解を与えることとした。

また、濃度分布も定常解を求めることとし、(24)式の時間微分の項を 0 とした。

4. 結果と考察

4.1 成形環境における粒子単体の挙動

4.1.1 重力の影響

粒子の基本的性質を知るために、静止したエアに置かれた粒子 1 個の重力による沈降について解析した。図 3 は、粒子直径と終末沈降速度との関係を、密度の異なる各物質に対して示している。物質の種類は、成形環境に存在するオイル、樹脂 (PPS)、アルミニウムおよび鉄とした。

終末沈降速度は、粒子周囲のエアの性状により、(20-1)式または(20-2)式により記述される。一方図 3 は、直径 $1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ 以下の 4 種類の粒子がいずれもストークス領域の式(20-1)にしたがうことを示している。すなわち、ここで対象とする粒子は、密度よりも直径に支配されて沈降することがわかる。

4.1.2 エア流れの影響

エア流れと粒子 1 個の挙動との関係を知るために、単位密度粒子を対象とした 1 次元解析を行った。

図 4(a)に解析モデルを示す。すなわち、

- (1) 上部から強制的にエアが供給されている。このエアの温度は 293 K であり、流速は 0.3 m/s である。
- (2) プレートを加熱することにより、熱対流に起因する上昇流を発生させる。プレートの温度は 373 K、473 K、573 K、673 K の 4 種類である。
- (3) 以上の場に、直径が $3.0 \times 10^{-7} \text{m}$ 以上の粒子 1 個が置かれている。粒子には、プレート温度を変化させることにより異なった上昇流を与える。

図 4(b)は粒子直径と沈降速度の関係を示している。す

Fig. 3 Relation between terminal settling velocity and particle diameter for each substance

Fig. 4 Relation between particle settling velocity and particle diameter for air flow due to heat convection and air supply

Table 2 Definition of nominal diameter dn for actual diameter d of detected particle

Actual diameter d of detected particle	defined nominal diameter dn
$3.0 \times 10^{-7} \text{m} \leq d < 5.0 \times 10^{-7} \text{m}$	$4.0 \times 10^{-7} \text{m}$
$5.0 \times 10^{-7} \text{m} \leq d < 7.0 \times 10^{-7} \text{m}$	$6.0 \times 10^{-7} \text{m}$
$7.0 \times 10^{-7} \text{m} \leq d < 1.0 \times 10^{-6} \text{m}$	$8.5 \times 10^{-7} \text{m}$
$1.0 \times 10^{-6} \text{m} \leq d < 5.0 \times 10^{-6} \text{m}$	$3.0 \times 10^{-6} \text{m}$
$5.0 \times 10^{-6} \text{m} \leq d < 1.0 \times 10^{-5} \text{m}$	$7.5 \times 10^{-6} \text{m}$

なわち、次の4点が考察できる。

- (1) 直径が $2.0 \times 10^{-6} \text{m}$ 以上の粒子では、プレートの加熱温度にかかわらず、沈降速度はほとんど変化しない。すなわち、直径 $2.0 \times 10^{-6} \text{m}$ 以上の単位密度の粒子は、対象としている場のエア流れの影響をほとんどうけず、重力により沈降する。
- (2) プレートの温度が 373K である場合には、直径が $3.0 \times 10^{-7} \text{m}$ に近づくにともない、上昇流の影響が大きくなり、粒子の沈降速度は小さくなる。
- (3) プレートの温度が 473K レベル以上では、上方からのエアの供給よりも上昇流の影響がさらに大きくなる。そして、直径 $3.0 \times 10^{-7} \text{m}$ のような十分に小さい粒子は浮き上がる。
- (4) プレートを金型に置き換えて考えると、ホットランナーを用いる時のように金型を高温にする場合、十分に小さな粒子の挙動を検討するためには、熱対流の性状を十分に把握することが重要である。

4.1.3 粒子の評価パラメータの設定

粒子の直径は、その挙動と密接に関連する。そこで、表2に示す公称直径 dn を粒子の評価パラメータとした。

4.2 フィルターの粒子捕集に関する性能

4.2.1 一般室のエアに含まれる粒子

クリーンブースから十分に離れたポイントIにおいて、

一般室のエアに含まれる粒子の数を計測した。その結果、図5(a)に示すように、パーティクルカウンターの検出範囲全域に相当する直径 $3.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ の粒子がみとめられた。ここで、公称直径 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子数は約 64000 個/ft^3 であった。また $dn = 4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の小さな粒子は約 800000 個/ft^3 、 $dn = 3.0 \times 10^{-6} \text{m}$ の大きな粒子は極めて少なく約 80 個/ft^3 であった。

4.2.2 フィルターによる粒子の捕集

成形機を停止した状態で、フィルターからブース内に供給されたエアに含まれる粒子数を、ポイントIIにおいて計測した。その結果、図5(b)に示すように、 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ よりも大きな粒子はみとめられず、 $dn = 4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子のみが 9 個/ft^3 検出された。図5(a)と比較することにより、使用したフィルターは、一般室の粒子をほとんど完全に捕集し、清浄なエアをブース内に供給していることがわかる。

4.3 ブース内における粒子の挙動

成形機を停止し、金型を加熱せずにブース内に一般室のエアを満たし、フィルターから清浄なエアを供給した。そして、ブース内における粒子数の変化を評価した。評価した位置は、上部摺動部近傍（ポイントIII）である。

図6に示す結果より、次の2点がわかる。

- (1) フィルターからエアを供給する時刻を 0 s とすると、 0 s から 240 s までに粒子の数は著しく減少した。
しかし、 240 s から 720 s までは、粒子数は各直径ともにほとんど変化しなくなった。すなわち、エア供給開始から 240 s で粒子数はほぼ定常状態になった。
- (2) 定常状態において、 $dn = 4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ 、 $6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ 、 $3.0 \times 10^{-6} \text{m}$ の粒子数はそれぞれ 3000 個/ft^3 、 300 個/ft^3 、 20 個/ft^3 程度であり、 $dn = 7.5 \times 10^{-6} \text{m}$ の大きな粒子は検出されなかった。

ポイントIIIにおける粒子数減少を定量的に表現するために、粒子数の減少のしやすさを表わす R を(25)式により定義した。

Fig. 5 Particle collection by pleated air filter

Fig. 6 Particle decrease patterns in clean booth for each diameter

$$\Delta n = n_0 - n_{720} \quad (25-1)$$

$$R = \frac{\Delta n}{n_0} \quad (25-2)$$

ここで n_0 : 時刻 0 s における粒子数, n_{720} : 時刻 720 s における粒子数である。

図 7 は、公称直径 d_n と粒子数減少の割合 R との関係を示している。この結果より、次の 3 点がわかる。

- (1) R が最も小さく、ポイントⅢから粒子が除去されにくいと考えられる粒子の直径は、 $d_n = 6.0 \times 10^{-7}\text{m}$ であった。
- (2) 直径がより大きい粒子では、 R の値は大きな値となった。これは、十分に大きな粒子では、エアの流れよりも重力沈降に支配されて挙動するためであると考えられる。
- (3) 直径が十分に小さい $d_n = 4.0 \times 10^{-7}\text{m}$ の粒子でも、 R の値は大きな値となった。これは、十分に小さな粒子の挙動は、重力沈降よりもエア流れに支配され、エア流れに輸送されてポイントⅢから除去されやすいため

Fig. 7 Characterization of particle decrease by particle decrease rate R

あると考えられる。

4.4 成形機摺動部から発生した粒子挙動の評価

4.4.1 実験による評価

フィルターからエアを供給しながら、加熱した金型を開閉させた。予備実験として、パーティクルカウンターを上下の摺動部に可能な限り近づけて粒子を検知し、上下の摺動部から粒子が発生することを確認した。

次に、ポイントⅡ～ポイントⅤにおいて、 $d_n = 6.0 \times 10^{-7}\text{m}$ の粒子に着目して粒子数を計測した。計測した時刻は、成形機を稼動してから約 1200 s 後であり、金型の動作に対する計測のタイミングは図 2 に示した通りである。また、参考のために $4.0 \times 10^{-7}\text{m}$, $3.0 \times 10^{-6}\text{m}$ に関する計測結果も示す。

4.4.1.1 摺動部近傍

(1) 上部摺動部近傍 (ポイントⅢ)

図6によれば、成形機停止時における定常状態における粒子数は、 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ で約 300 個/ ft^3 であった。また、 $dn = 4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子は約 3000 個/ ft^3 、 $dn = 3.0 \times 10^{-6} \text{m}$ の粒子は 20 個/ ft^3 程度みとめられている。

成形機を稼動させた時の計測結果を図8に示す。 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子が 2100 個/ ft^3 程度みとめられた。また、 $dn = 4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子は約 20000 個/ ft^3 、 $dn = 3.0 \times 10^{-6} \text{m}$ の粒子は 70 個/ ft^3 程度みとめられた。すなわち、摺動部から粒子が発生することにより、 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子の数は約 1800 個/ ft^3 増加していることがわかる。同様に $dn = 4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ 、 $dn = 3.0 \times 10^{-6} \text{m}$ 、粒子の増加数はそれぞれ 17000 個/ ft^3 、50 個/ ft^3 程度であった。

(2) 下部摺動部近傍 (ポイントⅣ)

成形機停止時において、粒子は図9(a)に示すように、ほとんどみとめられなかった。これは、ポイントⅣがフィ

ルターの鉛直線上に位置していること、成形機を停止した時には金型を開いた状態にしてあること、この二つの要因により、フィルターから供給される清浄なエアがこの領域に直接的に到達することによっていると考えられる。

一方、成形機を稼動させた時の結果を図9(b)に示す。 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子は約 2600 個/ ft^3 増加している。一方 $dn = 4.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子は約 35000 個/ ft^3 、 $dn = 3.0 \times 10^{-6} \text{m}$ の粒子は 80 個/ ft^3 増加した。

4.4.1.2 フィルター近傍 (ポイントⅡ)

図5(b)に示すように、成形機停止時に、 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子はみとめられなかった。

一方、成形機を稼動させて、金型を開閉しても粒子は検出されなかった。これは、摺動部から発生した粒子がこの領域に進入しようとしても、フィルターから供給される清浄なエアにより、速やかに除去されるためであると考えられる。

4.4.1.3 作業領域 (ポイントⅤ)

成形機停止時、 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子は、定常状態において 1200 個/ ft^3 程度であった。成形機停止の状態でも粒子が比較的多いのは、エア排出口より一般室の粒子が進入してくるためであると考えられる。

一方、成形機を稼動させると、 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ は約 2000 個/ ft^3 みとめられ、増加数は約 800 個/ ft^3 と比較적の少なかった。これはポイントⅤが、粒子の発生源である摺動部から比較的遠いためであると考えられる。

4.4.1.4 まとめ

加熱した金型を開閉した時、摺動部から生じる粒子の数は位置に大きく依存した。例えば $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子は、表3に示すように下部摺動部において著しく増加した。

また $dn = 1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ の浮遊粒子の数は少なかった。この要因の一つとして、重力により速やかに沈降することがあげられる。また本研究では解析の対象とはしていない $dn = 1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ 以上の粒子では、粒子挙動は重力沈降にさらに支配され、浮遊粒子数はより減少するものと考えられる。

Fig. 8 Relation between particle diameter and particle number during operation of injection machine at pointⅢ (near upper slide ways)

(a) Before operation of injection machine

(b) During operation of injection machine

Fig. 9 Particle increase by the operation of the injection machine at pointⅣ (near lower slide ways)

Table 3 Increases of particle number for diameter of $6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ at four measurement points

	Particle number : N 1	Particle number : N 2	Increase of particle number $\Delta N = N1 - N2$
	before operation of injection machine	during operation of injection machine	
Diameter	Near pleated air filter at point II		
$6.0 \times 10^{-7} \text{m}$	0/ft ³	0/ft ³	0/ft ³
Diameter	Near upper slide way at point III		
$6.0 \times 10^{-7} \text{m}$	300/ft ³	2100/ft ³	1800/ft ³
Diameter	Near lower slide way at point IV		
$6.0 \times 10^{-7} \text{m}$	0/ft ³	2600/ft ³	2600/ft ³
Diameter	Operator area at point V		
$6.0 \times 10^{-7} \text{m}$	1200/ft ³	2000/ft ³	800/ft ³

Table 4 Comparison of analyzed particle concentrations with measured particle numbers for diameter of $6.0 \times 10^{-7} \text{m}$

Position of estimation	Increases of measured number of particle	Analyzed concentration	Reference data
			Estimated number of particle
Slide ways	—	100%	5000/ft ³
Near air filter (Point II)	0/ft ³	0 %	0/ft ³
Near upper slide ways (Point III)	1800/ft ³	35%	1750/ft ³
Near lower slide ways (Point IV)	2600/ft ³	72%	3600/ft ³
Operator area (Point V)	800/ft ³	8 %	400/ft ³

Fig.10 Creation of two dimensional analysis model

4.4.2 数値解析による評価

エアの流れと、 $dn = 6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子を対象とした濃度分布解析を行った。

4.4.2.1 エアの流れ

ブース内におけるエア流れの無次元数を推定した。まず、フィルターにおけるエア供給口から流れ出るエアのレイノルズ数 Re は、代表寸法が $6.8 \times 10^{-1} \text{m}$ であり、約 1.1×10^4 と算出された。また、加熱された金型表面におけるエアのグラスホフ数 Gr は、代表寸法が $4.0 \times 10^{-1} \text{m}$ であるところから、約 3.8×10^8 と算出された。すなわち、フィルターから供給されるエア、加熱された金型により発生する熱対流ともに乱流が発生しており、ブース内のエア流れを乱流としてあつかうことは妥当であると考えられる。

次に、図 1(a) に示す A-A 断面形状から、図 10 に示すように 2 次元解析モデルを作成し、金型表面には 373 K を与え、フィルターにおいて供給されるエアの流量は $5.5 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{s}$ とした。

図 11 はエアの流れのパターンを示している。この図より次の 2 点がわかる。すなわち、

- (1) 図 11(c) に示した等温度曲線のパターンにより、金型周辺におけるエアは、フィルターから供給されたエアの流れと、加熱された金型により発生した熱対流とが密接に係わりあって流れている。

- (2) 図 11(a) (b) より、下部摺動部近傍に澱みがみとめられる。

4.4.2.2 粒子の濃度分布

ブース内粒子の個数濃度拡散を定常解析した。仮定は次の 3 点である。すなわち、

- (1) ブース内全体の初期濃度は 0 % である。
(2) フィルター位置の濃度は常に 0 % である。
(3) 上部摺動部の中心位置には、直径 $6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子が濃度 100% で存在する。

さらに、上部摺動部の摺動面積 (2 次元解析であるので摺動部輪郭円の周の長さ) を US 、図 10 に示す下部摺動部 (1) の摺動面積を $LS1$ 、下部摺動部 (2) の摺動面積を $LS2$ とすると、本モデルにおいて US は $LS1$ と $LS2$ の和にほとんど等しい。そこで、2 組の下部摺動部においては、下部摺動部 (1) にのみ直径 $6.0 \times 10^{-7} \text{m}$ の粒子が濃度 100% で存在するとした。

図 12 に濃度分布を解析した結果を等濃度曲線として示す。すなわち、保護扉の内側の金型周辺では、粒子の濃度が高い。これは、保護扉は作業領域へ粒子が移動することを防止してはいるが、粒子を金型周辺に分布させる要因になっていることを示唆している。また、摺動部から発生する粒子が金型表面に分布する傾向がみとめられる。すなわち、汎用の横型成形機を用いる場合、摺動部から発生する

Fig. 11 Air flow analyses in clean booth

Fig. 12 Concentration of particle originated at four slide ways of injection machine

粒子は成形品を汚染する要因となりうると考えられる。

粒子の各位置における濃度について検討した。まず下部摺動部近傍（ポイントⅣ）においては、摺動部に発生した粒子数の約 72% に相当する数が存在すると算出された。同様に上部摺動部近傍（ポイントⅢ）では 35%，フィルター近傍（ポイントⅡ）では 0%，作業領域（ポイントⅤ）では 8% と計算された。図 13 は、各ポイントにおける濃度の解析結果を計測した粒子数と比較した結果である。縦軸のフルスケールは、粒子数 5000 個/ft³、濃度 100% とした。各ポイントにおける濃度の差異と、計測した粒子数の相違は定性的に相関関係がみとめられる。特に、下部摺動部近傍において粒子数の増加が最も多く計測されているが、解析においても高い濃度が算出された。図 11～図 13 により次の 2 点を考察することができる。

- (1) 図 11(c) に示す等温度曲線と、図 12 に示した等濃度曲線とを比較した場合、特に下部摺動部近傍から排出口への曲線パターンに関して相関がみとめられる。これは、直径 6.0×10^{-7} m の粒子が、373 K の金型による熱対流が加わったエア流れと密接に関係して挙動するためである。
- (2) 下部摺動部近傍における流れの滞りが、この位置に

Fig. 13 Comparison of particle number increase with analyzed concentration

において濃度が高くなる要因となっている。すなわち、成形環境が局部的に粒子により汚染される要因として、流れの滞りが挙げられることが解析的にわかる。

4.5 ま と め

解析的に把握した粒子挙動に関する知見を示す。

- (1) 金型が常温の時、直径の十分に大きな粒子は、重力により沈降し、直径が十分に小さな粒子は、フィルターから供給されるエアの流れによって挙動する。
- (2) 金型温度が高くなると、より小さな粒子の挙動は、フィルターから供給されるエアの流れだけでなく、金型による熱対流にも影響をうける。そして金型温度が十分に高くなると、小さな粒子の挙動は熱対流に著しく支配される。一方で、十分に大きな粒子は、金型温度が高くなっても、エア流れよりも重力に大きく支配される。

成形環境を清浄化する場合、各直径の粒子挙動に与える熱対流の影響を把握することが肝要である。

- (3) 粒子の直径や発生量分布は、成形機の種類に代表される系と密接に関係する。しかし、粒子数計測と数値解析とを併用すれば、異なった系に対しても粒子挙動を追求することが可能であると考えられる。

5. おわりに

射出成形機の摺動部から発生する直径 $3.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{m}$ の粒子を対象とし、粒子挙動を解析する方法を示し、その工業的有用性と粒子の力学的性質を明らかにした。

成形環境の清浄化を促進するためには、さらに小さな粒子の挙動を究明する必要がある。粒子とエアの分子との衝突をあつかう分子運動論を加味した解析法の確立と、成形環境への適用が今後の課題であると考えられる。

参考文献

- 1) Suwa, Y., Yanagisawa, H., Nishimura, T., Fujii, S., and Yuasa, K. : *ICCCS the 11 th Int. Symp. Proc.*, 279 (1992)
- 2) Launder, C. W., and Spalding, D. B. : *Lecture in Mathematical Model of Turbulence*, Academic Press (1972)
- 3) Hinds, W. C. : *Aerosol Technology* (1982), John Wiley & Sons