

特集 粉体離型剤付着予測技術開発と適用*

Prediction of Powder Lubricant Adhesion to Die Casting Die Cavities and Application to Die Design

亀山 吉朗

Yoshiro KAMEYAMA

飯見 秀紀

Hidenori IIMI

濱田 俊彦

Toshihiko HAMADA

土居 正勝

Masakatsu DOI

Water-soluble lubricant made from oil etc. is generally used for die casting. Although the water-soluble lubricant method is easily applied by spraying, it has several disadvantages, such as the requirement for waste water treatment, pollution of the factory environment (because it is applied using an open die) and the occurrence of porosity due to thermal decomposition. In order to provide a solution for these problems we have developed a means of using a “powder lubricant” for die casting. So far, this powder lubricant has been used to produce pump housings, etc.¹⁾

The adhesion of powder lubricant is performed in the closed space of a closed die. Therefore, the control of a balanced supply of powder lubricant to the cavity surface has been a difficult problem, and a lot of time has been spent on the optimization of die design.

In order to first optimize die design, we have developed a prediction technique of the adhesion distribution of powder lubricant using CFD.

Key words : Die casting, Powder lubricant adhesion, Fluid flow simulation

1. 緒言

1.1 はじめに

ダイカスト加工は溶融したアルミを型に圧入して製品を成型する成型手法である。その工程はアルミ溶湯の充填、冷却、製品の取り出しがあるが、通常アルミ溶湯を充填させる前に金型表面に離型剤を塗布する。離型剤を塗布する主な目的は二つあげられる。

一つ目は凝固収縮による離型時の摩擦力低減である。金型と製品が入り組んだ部位ではアルミが凝固収縮により金型に抱き付き、アルミと金型の界面で摩擦力が発生する。この摩擦力が大きくなると製品が金型にかじりついてしまい離型できなくなるため、摩擦力を低減する目的で離型剤を塗布する。

二つ目は焼き付きによる製品と型の損傷防止であ

る。アルミ溶湯と金型は非常に反応しやすいため、アルミ溶湯が金型に接触すると金型に浸透し癒着する。この結果、焼き付きが発生し製品の外觀不良、型の損傷を引き起こす。離型剤は溶湯と金型が直接接触するのを防ぎ、焼き付きを防止する働きをする (Figs. 1-2)。

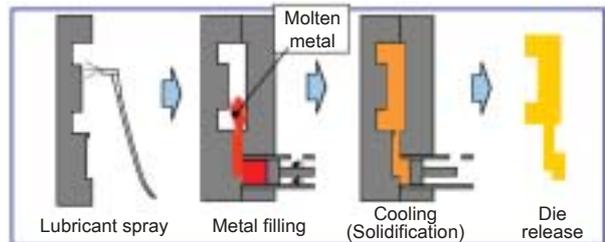


Fig. 1 Die casting process

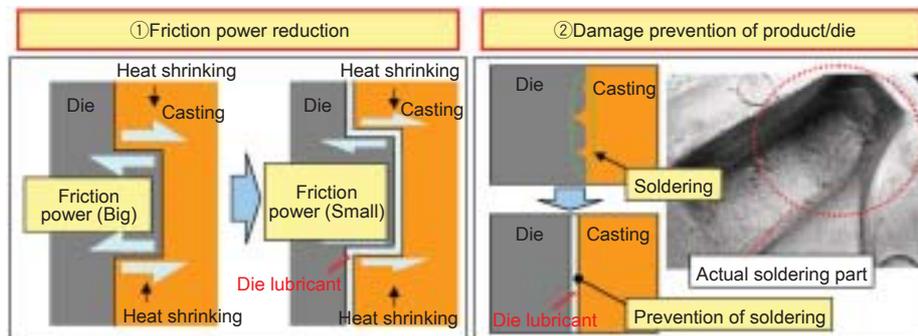


Fig. 2 Function of die lubricant

*2006年8月24日 原稿受理

これまで粉体離型剤を塗布する方法として水溶性離型剤を金型に直接スプレーする方法がとられていたが、

- (1) ゼロエミッション活動等での環境対応：排水処理，工場内オイルミスト低減
- (2) 高品質化への対応：巻きこみガスによる不良低減，金型への熱負荷低減
- (3) 高生産性への対応：サイクルタイム低減

の観点から粉体離型剤を型閉め潤滑法により塗布する方法に変わってきている。Table 1にハウジング部品に水溶性離型剤と粉体離型剤を適用し不良対策及び生産効率向上の効果を比較した結果を示す。粉体離型剤を用いることで従来水溶性離型剤の蒸発に伴う巣不良が1/8に、漏れ不良が1/3に低減できている。また評価段階ではあるが型寿命が40倍に改善されている。

1.2 粉体離型剤塗布の課題

現在，粉体離型剤は型閉め潤滑法¹⁾により塗布されている。Fig. 3に粉体離型剤供給装置の概略を示す。真空ポンプでキャピティ内の空気を引き、生じた圧力差を利用して粉体離型剤を吐出，塗布する。型を閉めたまま離型剤を塗布できるため大気中に離型剤が放出

Table 1 Comparison between water-soluble lubricant and powder lubricant

	Water-soluble lubricant	Powder lubricant
Porosity defect ratio	1	0.13 - 0.08
Leakage defect ratio	1	0.3
Die life ratio (Hair crack occur)	1	40
Cycle time ratio	1	1.1

されず作業環境をクリーンに保つことができる。しかし、型閉め潤滑法は離型剤の付着が型内部の空気の流れに依存するため手吹きに比べ離型剤の付着むらが発生しやすい。この結果、粉体が十分に付着しない箇所では焼き付きが発生しやすくなる。

現状では粉体離型剤の付着不足による焼き付きを解消するため、Fig. 4に示す試行ループを回し条件出しを行っている。先ハウジング部品の場合、この条件出しに約10ヶ月要した。またできあがった条件はその製品にしか適用できないため、製品ごとに多くの時間をかけて条件出しを行わねばならない。

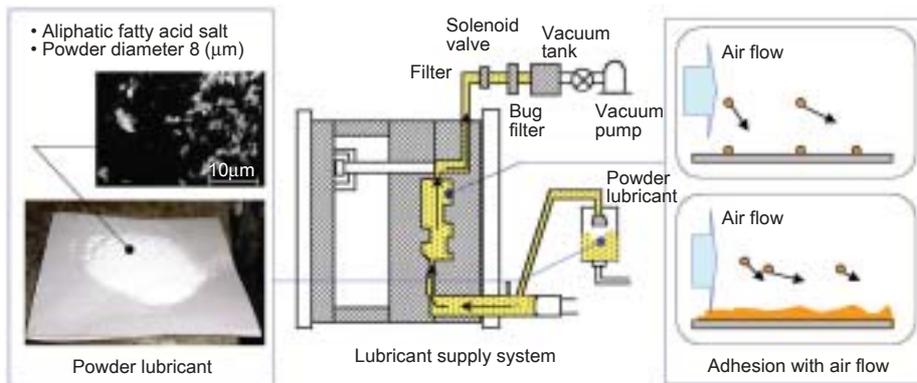


Fig. 3 Outline of powder die lubricant supply system

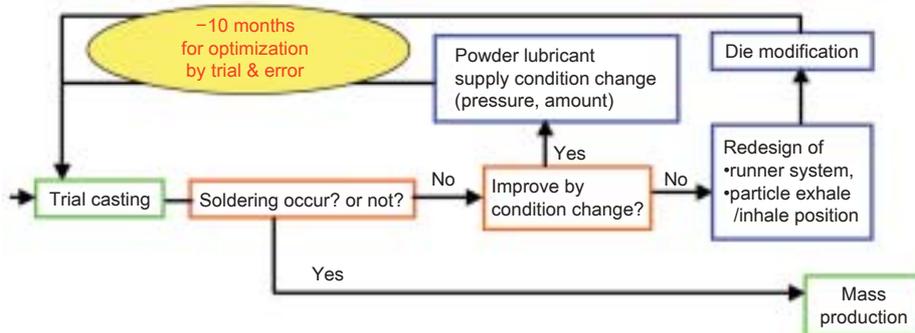


Fig. 4 Trial loop for powder die lubricant uniformity adhesion

鑄造方案検討段階で粉体の付着性が検討できれば、型製作後の試行サイクルが削減できる。また均一に付着されない原因を類別し、その原因に即した対処方法を施すことができれば効率的に粉体の不均一付着の改善を進めることができる。本研究の狙いはダイカスト粉体離型剤付着プロセスにおいて、型内部の流動解析を行い鑄造方案検討段階で粉体付着性が判断できる評価手法を開発し、均一な粉体付着を妨げる要因を特定の上、方案改良指針を示して、付着制御技術開発に生かすことにある。これにより従来、型製作後に行っていた粉体を均一に付着させるための試行を型製作前に行い、型修正に伴う費用削減と期間短縮が可能になる。従来～10ヶ月ほどかかっていた金型の適正化を1/10の期間に短縮することを目標とする (Fig. 5)。

2. 粉体離型剤付着予測の考え方

2.1 粉体離型剤付着に用いる式

粉体離型剤付着で生じる現象は主に四つに分けて考

えられる。その概要をTable 2に示す¹⁾

今回、付着過程で最も支配的な輸送と付着を予測できる評価手法を開発した。実機では金型温度が100～300 (°C) と高温であるため粉体粒子の溶融による影響や空気の対流による影響を加味する必要があるが、粉体が供給されない場所は粉体が付着しにくいという原則から流れ場を解くだけでも粉体付着に関する十分な情報が得られると考えられる。

粉体粒子が十分小さく、空気中に存在する粉体の量が微小 (粉体の体積分率が 10^{-3} 以下²⁾)、更に粉体粒子が高速に移動する (流れの変化に対する粉体の応答性が良いこと) とき、粉体粒子同士の衝突による影響、重力による影響を無視することができる。この結果、粉体輸送を式(1)に示す濃度の移流拡散方程式で表すことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((D + D_i) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

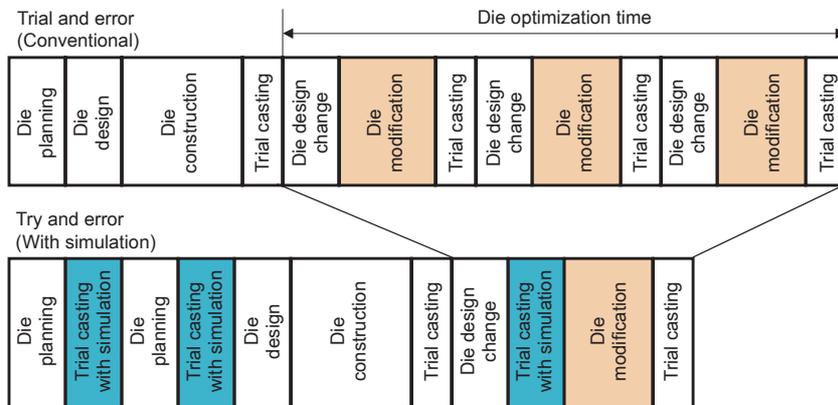


Fig. 5 Shortening of die optimization time

Table 2 Phenomena caused by powder die lubricant adhesion

Classification of phenomenon	Transportation	Adhesion	Formation of accumulative layer	Flaking off
Items that should be considered	<ul style="list-style-type: none"> • Advection • Particle diffusion • Turbulent diffusion • Collision of particle • Momentum exchange with flowfield • Influence of gravity 	<ul style="list-style-type: none"> • Density of powder in the vicinity of wall • Amount of particle passes • Inertia force of particle • Collision angle of particle to wall 	<ul style="list-style-type: none"> • Adhesion power of particle and wall • Condensation power of particle • Melt of particle by high temperature of die • Evaporation of particle by high temperature of die • Power to pull and to peel off particle (shearing power on wall) 	

ここで C は粉体の濃度、 D は粒子拡散係数、 D_i は粒子乱流拡散係数を示す。一方、壁面への粉体付着は粉体の雰囲気濃度と粉体粒子の壁面への移動しやすさに依存する。粉体粒子の壁面への移動しやすさは、粉体の濃度勾配と粉体粒子自身のもつ慣性力に依存する。壁面への粉体の移動しやすさを示すパラメータ k （粉体移動係数）を導入し壁面での粉体付着を式(2)で表現する³⁾。

$$F_{wall} = kC_{\infty} \quad (2)$$

C_{∞} は粉体の雰囲気濃度、 F_{wall} は単位時間、単位面積に付着する粉体量を示す。粉体移動係数はMcCoyらの論文⁴⁾に掲載された過去の粉体付着実験より得られた無次元粉体移動係数 k^+ と無次元緩和時間 τ^+ の関係（Fig. 6）を利用する。無次元緩和時間とは粉体粒子の持つ慣性力と粉体粒子の受ける空気抵抗の比を示したもので、この値が大きいほど粉体粒子の持つ慣性力が大きいことを示す。

McCoyらの論文⁴⁾では、粉体移動係数は無次元緩和時間によって三つの領域に分類されている。無次元緩和時間が非常に小さい領域では粉体粒子の慣性力はほとんどないため壁面への粉体移動は主に粉体粒子の濃度勾配によりなされる。緩和時間が大きい領域では粉体粒子の持つ慣性力が大きくなるため、壁面への粉体移動は主に粉体粒子の慣性によりなされる。またこれらの領域の間では拡散移動と慣性移動が共存するため粉体移動係数は粒子の慣性力の増大に伴い増大する。

各領域での粉体移動係数は式(3)により示される。

$$k^+ \equiv k/u_{\tau} \begin{cases} k^+ = 0.086Sc^{-0.7} & \tau^+ \leq 0.2 \\ k^+ = 3.25 \times 10^{-4} \tau^{+2} & 0.2 \leq \tau^+ \leq 22.9 \\ k^+ = 0.17 & 22.9 \leq \tau^+ \end{cases} \quad (3)$$

ここで Sc はシュミット数、 k^+ は無次元粉体移動係数、 τ^+ は無次元緩和時間を示す。

最終的な粉体付着は式(4)のようになる。

$$F_{wall} = k^+ u_{\tau} C_{\infty} \quad (4)$$

式中の雰囲気濃度 C_{∞} は粉体輸送解析より算出された値を利用する。またせん断速度 u_{τ} は流動解析より得られる速度分布より算出する。

この式から以下の2点が言える。

- ・ 雰囲気濃度が低いと付着量が低下する傾向にある
- ・ 壁面せん断速度が小さいと付着量が低下する傾向にある

3. 計算及び検証結果と考察

3.1 計算方法（計算モデル/条件）

次に、先に導出した粉体付着評価式を実機に適用した結果を報告する。Fig. 7に検証に用いたモデル概略を示す。製品は2個取りハウジング部品方案である。今回は2個取りモデルの片方のキャビティを取り出し計算を行った。実機では吐出圧力を時間的に変化させているが、解析では流入速度は一定とした。

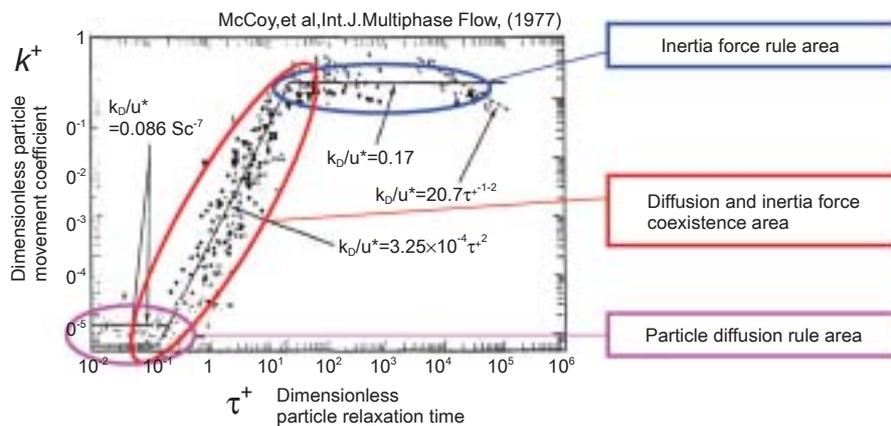


Fig. 6 Relation of dimensionless particle movement coefficient and dimensionless particle relaxation time

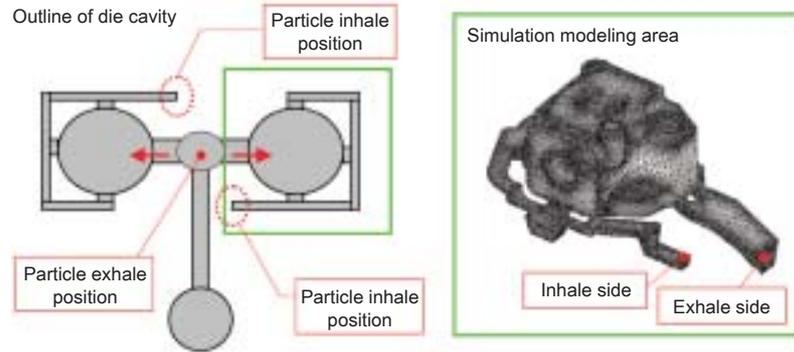


Fig. 7 Outline of die casting model for verification

3.2 計算結果検証と考察

Fig. 8に実機と評価結果を比較した図を示す。上段が可動型、下段が固定型である。左側は実機付着状況を示し、黒い部分は粉体付着が少ないことを示す。右側は解析付着評価結果を示し、青色の部分は付着が少ないことを示す。丸で囲まれた部分においては解析結果でも実機と同様な粉体付着量低下が見られ実機で付着が少ない部分が概ね予測できていることが分かる。ゲート直下では実機と解析の結果が一致していないが、これはこの部分では気体の流速が速く、気流により粉体が剥離したためと考えられる。

粉体の付着が低下する原因を層別するため、Fig. 9に壁面近傍粉体濃度と壁面せん断速度の分布を比較した図を示す。

中入れ子外側上端や入子ピン根元では粉体濃度がほ

かに比べ低いことが分かる。これらの部位では空気の流れが遅く粉体が供給されにくい部位となるため粉体の付着量が低下している。その他の部位ではせん断速度が低下するため付着量が低下している。気流の剥離が生じる部位や流れが遅くなる部位でせん断速度の低下が見られるため、流速や流入方向を変化させることで低せん断速度領域が一か所に集中しないようにする必要がある。均一な付着を実現するための改良指針として次のことが考えられる。

- ・粉体供給バランスがよいランナー、オーバーフローの設計
- ・粉体が回り込みにくい部位ができない吐出位置、吸引位置の設定
- ・低せん断速度部位が集中しない供給速度供給方向の設定

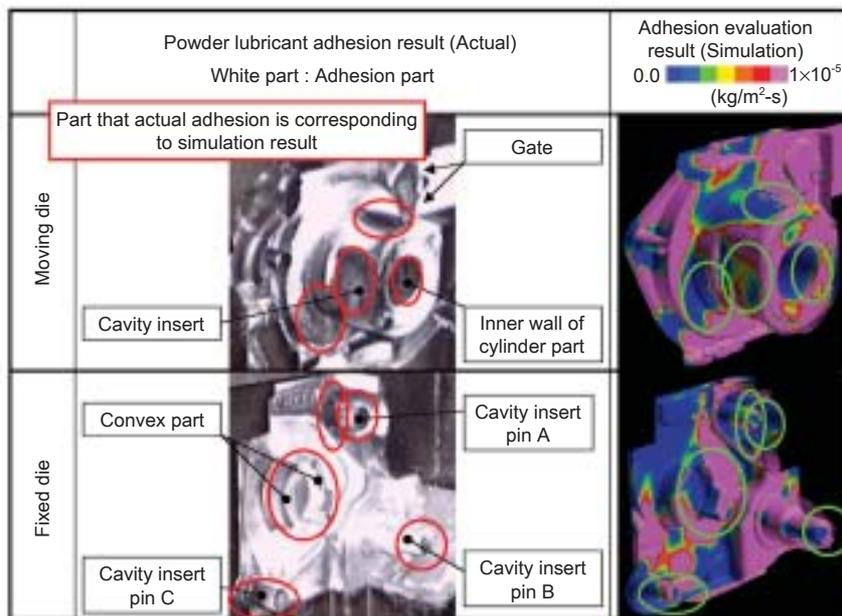


Fig. 8 Powder lubricant adhesion comparison verification between real machine and simulation

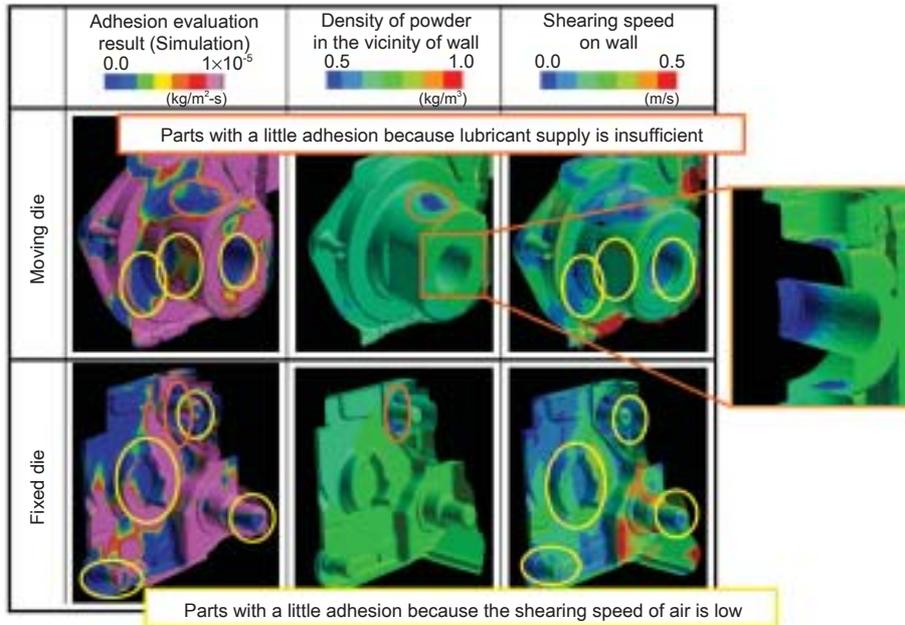


Fig. 9 Comparison between density of particle close-by wall and wall shearing speed

4. 結言

- (1) 粉体の輸送と付着に着目した付着量評価手法を開発した。
- (2) 本開発手法による付着分布予測結果と、実機付着分布との比較評価では特徴的な粉体付着量低下が定量的に確認できることが分かった。
- (3) 現在本手法を開発部品のランナーゲート方案でのキャビティへの粉体供給バランス把握、及び方案の事前適正化に常時活用中である。これにより生産準備期間の短縮・品質安定化に貢献している。

今後の進め方としては、

- (1) ダイカスト金型設計の事前適正化において活用を進めていく。(現在すべての新規金型に活用中)
- (2) 粉体付着量の定量的測定技術と合わせて本評価手法の定量的精度検証、及び定量的予測の検討を進めていく。

<参考文献>

- 1) Hiroshi Ohmi, Mitsuyoshi Yokoi, et al, 'Optimization of Die Casting Process with Powder Lubricant', CIATF Technical Forum-GIFA 99 (1999)
- 2) Friedlander, S. K. and Johnstone, H. F., Deposition of Suspended Particles from Turbulent GasStreams, Int. Eng. Chem., 49 (1957), pp.1151-1156.

- 3) Benjamin Y. H. Liu and Jugal K. Agarwal, Experimental Observation of Aerosol Deposition in Turbulent Flow, J. Aerosol Science, 5 (1974), pp.145-155.
- 4) McCoy, D. D. and Hanratty, T. J., Rate of Deposition of Droplets in Annular Two-phase Flow, Int. J. Multiphase Flow, 3 (1977), pp.319-331.
- 5) 鈴木朗ら, 数値計算によるダクト内固気二相流における微粒子の壁面付着挙動の解明, 日本機械学会論文集 (B編), 67 (2001), pp.2985-2992.
- 6) 雷康斌ら, ダイナミックSGSモデルによる固気混相乱流のFULL WAY COUPLING LES の構築, 日本機械学会論文集 (B編), 68 (2002), pp.352-359.
- 7) 松坂修二, 増田弘昭, 粒子沈着・再飛散同時現象 (管内固気二相流における粒子層の形成), 粉体工学会誌, 38 (2001), pp.866-875.
- 8) 狩野武著, 粉体粒子の挙動, 産業技術センター
- 9) 佐藤弘三著, 塗膜の付着, 理工出版社



<著 者>



亀山 吉朗
(かめやま よしろう)
デンソーテクノ (株)
加工分野のコンピュータシミュレーション手法の開発に従事



飯見 秀紀
(いみ ひでのり)
生産技術開発部
ダイカスト加工分野におけるコンピュータシミュレーション技術開発/シミュレーション技術活用方法の開発に従事



濱田 俊彦
(はまだ としひこ)
部品エンジニアリング部
ダイカスト加工工程の生産技術に従事



土居 正勝
(どい まさかつ)
デンソーテクノ (株)
ダイカスト加工分野におけるコンピュータシミュレーション技術開発に従事