

# 特集 | ダイカスト湯流れの可視化検証による解析精度向上\*

## More Accurate Diecasting Fluid Flow Simulation by Direct Observation of Cavity Filling

飯見秀紀 亀山吉朗 鈴木芳雄 長縄由紀子 加藤鋭次 野村宏之  
 Hidenori IIMI Yoshiro KAMEYAMA Yoshio SUZUKI Yukiko NAGANAWA Eiji KATO Hiroyuki NOMURA

Diecasting is an important process for manufacturing high volume and low cost automotive components, such as alternator housings, diesel pump housings, etc. In this process, liquid metal is injected at high speed and under high pressure into the complex shaped die. It is crucial to form homogeneous cast components with minimal entrapped voids. This is determined by the design of the gating system and the geometry of the die. So, it is very important to understand the mechanical and thermal phenomena in order to obtain high quality castings.

We predict metal flow patterns using Diecasting CAE (Computer Aided Engineering), trying to make use of them in order to design better dies. But as present accuracy of simulation is low, many simulation results are very different from real products.

In this case, we inspect the accuracy of simulation by direct observation of cavity filling, and then improve the simulation method. As a result, we achieve a highly-accurate metal flow simulation.

**Key words :** Diecasting, Fluid flow simulation, Direct observation

### 1. はじめに

現状、ダイカスト部品の生産準備は製品設計 - 金型設計 - 金型製作 - 試作鋳造 - 量産と進められている。その中で、設計時の製造性検討が不足しているため、金型製作後、経験と勘による型修正・試作を繰り返さなくては製品の品質確保が困難である。これによる、生産準備期間の増加・コストアップが大きな問題となっている。(耐圧気密部品の場合 8 ヶ月程度)

そこで、製品設計段階、および型設計段階において CAE による仮想試作を行うことによって、ダイカスト形状・冷却・ランナー・ゲート方法を事前に適正化しておけば、生産準備期間を短縮・コストダウンできるだけでなく品質確保も図れると考え、ダイカスト CAE 技術開発を進めている。(Fig.1)

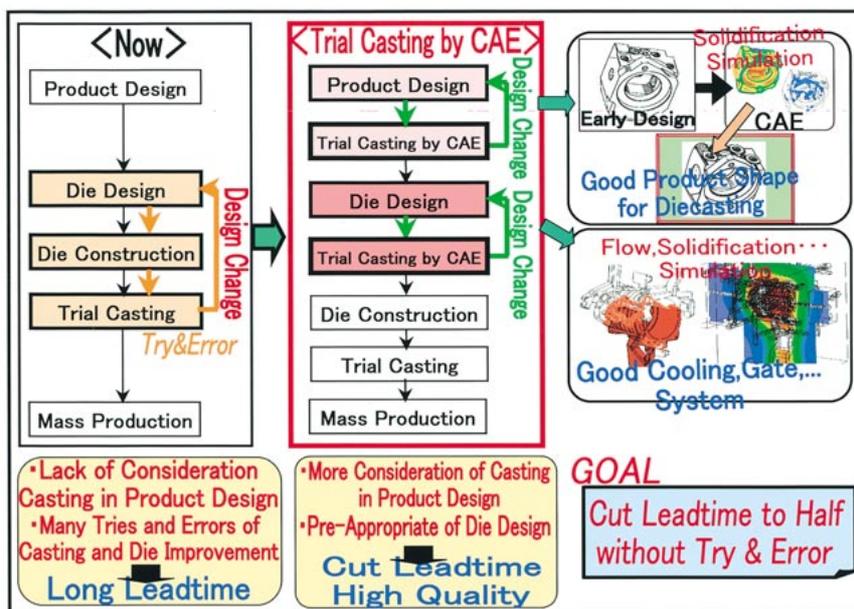


Fig.1 Aim of diecasting CAE

\* 2001年 8月22日 原稿受理

## 2. ダイカスト加工の課題

Fig.2にダイカストの主な不良の模式図を示す。ダイカスト品における主な不良内容は、厚肉部に発生する引け巣、最終充填部に発生する巻込み巣・湯じわ・湯境、充填遅れ部に発生する引け巣・湯じわ・湯境があげられる。

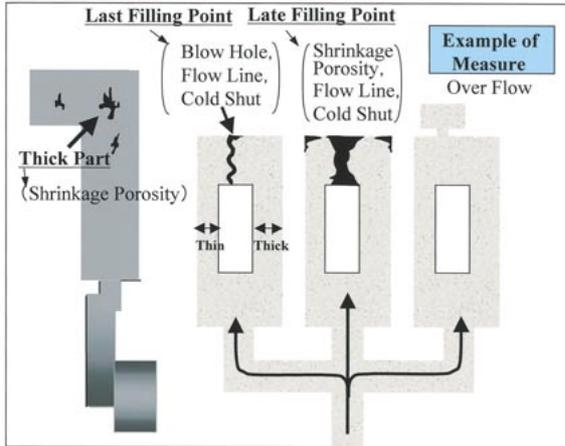


Fig.2 Diecasting defect

このうち厚肉部に発生する引け巣は、市販の鋳造シミュレーションソフトを用いて最終凝固部を評価することによって予測が可能である。

最終充填部・充填遅れ部に発生する欠陥は型へのアルミ溶湯の流れパターンが予測できれば型方案修正による対策が効率よく実施できるが、市販の鋳造シミュレーションソフトでは精度の信頼性が不明確なため、実用的ではない。

湯流れ予測精度向上の取組みとしては、実機鋳造現象の可視化結果とシミュレーションによる予測結果を比較検証し、精度の低い部分の現象を考察し、シミュレーション上の問題点を把握・改良していくという考え方で進めた。

このうち、実機鋳造現象の可視化について考えてみる。ダイカストの特徴は高速・高温の慣性支配の流れである。したがって型内の湯流れの把握は困難であり、従来は最終的結果（製品品質）のみでシミュレーションの結果を検証していた。しかし、このような結果系からだけの検証では、型内の溶湯挙動を把握するのに限界がある<sup>1)</sup>

そこで今回、型内への充填プロセスである流れ現象そのものを直接可視化することによってシミュレーションの結果を検証しレベル向上を図った。なおダイカスト流れの直接的可視化実験は名古屋大学大学院野村研究室と共同で実施した。

## 3. 実験方法

### 3.1 実験装置

ダイカスト湯流れの可視化には、野村研究室で実験用に製作したマシン<sup>2)3)4)5)</sup>を用いた。概略図をFig.3に示す。このマシンの特徴は、ガラス窓を通して型内の流れが直接観察可能なことである。また、金型変更により様々な流れパターンを容易に作る事ができる。ただし射出機構に電気サーボ式プランジャを用いているため、射出速度は最大で0.3m/sであり、これは実生産設備の射出速度1.5～2.0m/sに対して低い。しかし、断面積の設定によって、慣性流れ、乱流、凝固を伴う流れを検証するために十分な流速を得ることが可能である。従ってこのマシンを用いることは妥当であると考え研究を進めた。

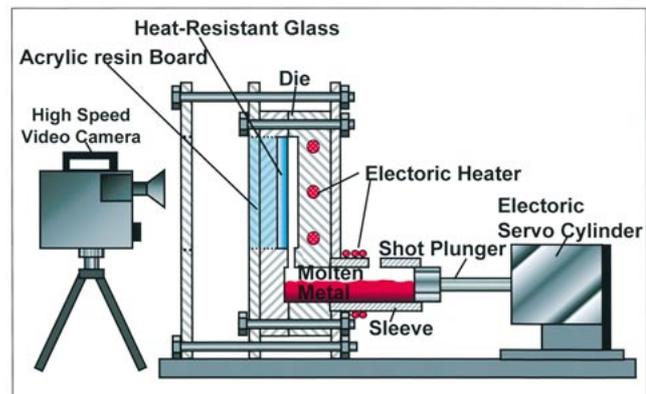


Fig.3 Diecasting machine for direct observation

### 3.2 可視化・検証の進め方

多数個取り複雑形状で、より実機に近い流れパターンの可視化（流れのバランス、抵抗部での拳動、分流・合流）を行う。これによって凝固率の取り扱い（特に流れへの影響）、流れ構成式の検証を行う。

次に今回実施した実験方法を説明する。Fig.4に実験鋳造方案の概略を示す。

実験に用いた方法案は板状の製品部を並列に配置し

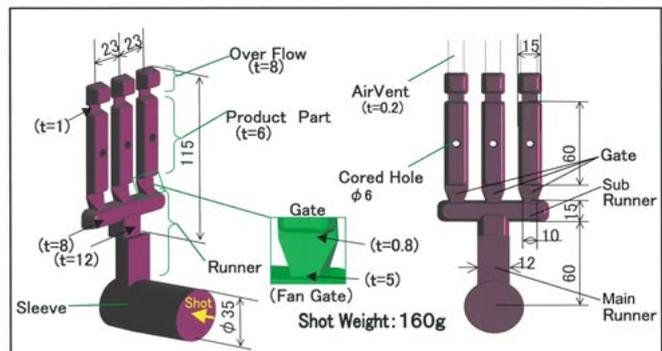


Fig.4 Diecasting machine for direct observation

た3個取りで、製品部には鑄めきピンを設けた。またゲートはダイカストの一般的な形状であるファンゲート形状を採用した。鑄造条件は、炉内保持温度670(注湯直後スリーブ内での平均湯温約600)、初期金型温度190、射出速度0.1m/s、0.2m/s、0.3m/sとした。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 可視化実験結果

実験結果を説明する。Fig.5に射出速度0.1m/sにおける実験結果の写真を示す。

この場合、溶湯がメインランナー(Main Runner)( $t = 12$ )からサブランナー(Sub Runner)( $t = 8$ )に流入し中央湯口(Gate)( $t = 5 \sim 0.8$ )に達すると中央製品部(Product Part)への流れは停止し、サブランナー左右への流れのみが進行する。その後、溶湯は左右両

側の湯口( $t = 5 \sim 0.8$ )から製品部に流入していく。しかし、中央湯口は停止したままで中央製品部には最後まで溶湯は流入しない。左右の湯口から流入した溶湯は、鑄めきピンに衝突した後、それぞれ二つの流れに分流しそのまま直進する(慣性流れ)。そして奥の壁面に衝突すると二つの流れは合流し空気を巻き込む。

射出速度0.2m/s、0.3m/sでは(Fig.6.1, Fig.6.2), 0.1m/sと同様に中央湯口で流動停止した後、左右の湯口に溶湯が達すると、左右・中央の三つの湯口から同時にそれぞれの製品部に充填していく。その際、中央の充填は左右にくらべ遅れて進行する。また、その遅れは0.2m/sのほうが0.3m/sより大きい。鑄抜きピンへの衝突後は0.1m/sと同様な挙動を示す。

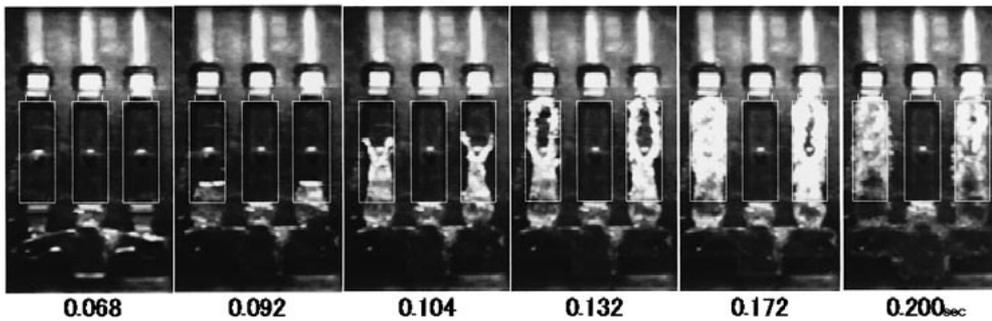


Fig.5 Filling pattern experiment (Shot speed 0.1m/s)

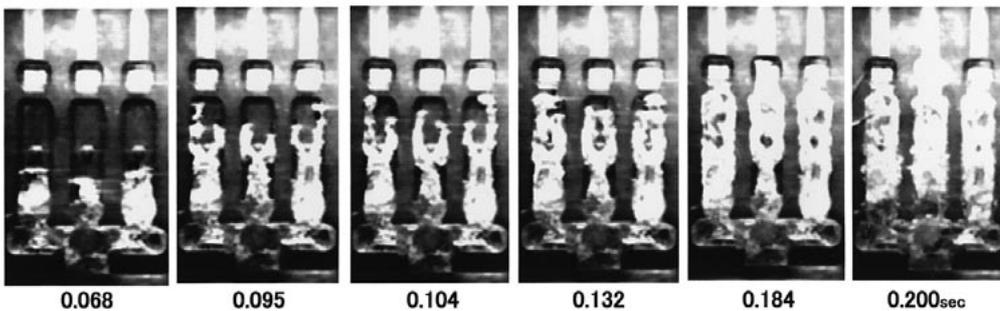


Fig.6.1 Filling pattern experiment (Shot speed 0.2m/s)

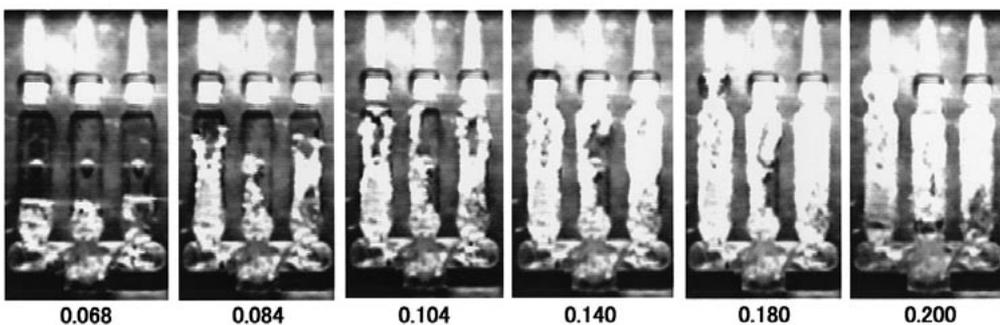


Fig.6.2 Filling pattern experiment (Shot speed 0.3m/s)

#### 4.2 シミュレーション結果検証

次に実験と同様な形状・条件でシミュレーションを行なった。Fig.7に射出速度0.1m/sにおける湯流れ解析結果を示す。射出速度0.1m/sでの解析結果では、溶湯が中央湯口に達したときの中央製品部への流動が停止した。したがって、充填開始から0.10s以前の中央湯口部においては実験を再現している。

しかし、左右の湯口に溶湯が達すると、左右・中央

の三つの湯口から同時にそれぞれの製品部に充填していった。実験では中央部の湯は最後まで製品部に流動しなかったため、充填開始から0.10s以降の中央湯口部では実験を再現できていない。鑄抜きピン衝突後の慣性流れパターン、及び空気の巻き込みパターンはFig.5とFig.7を比較すると分るように正確に再現されている。

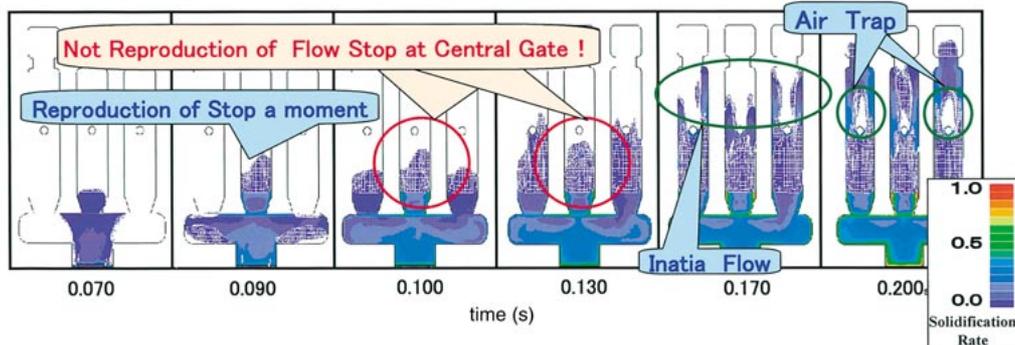


Fig.7 Filling pattern simulation (Shot speed 0.1m/s)

#### 4.3 実験・シミュレーションの不一致原因の考察

シミュレーションで再現できなかった射出速度0.1m/sにおける中央ゲートでの流動停止現象について考察してみる。

Fig.8に射出速度3条件それぞれの可視化実験結果

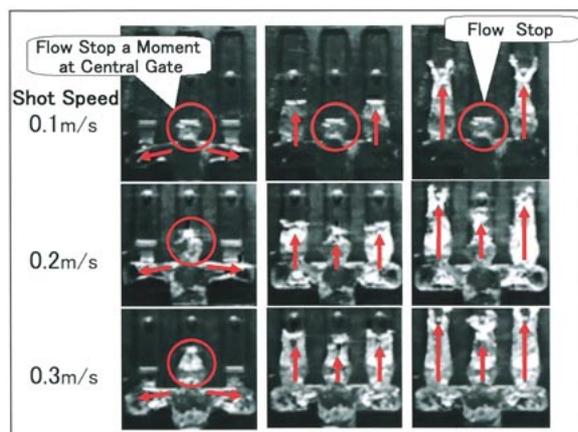


Fig.8 Comparison 3 patterns in gate filling

の写真(ゲート流入前後)を示す。

射出速度0.1m/s, 0.2m/s, 0.3m/sのすべての条件において、溶湯がメインランナーからサブランナーに流入し中央湯口に達すると中央製品部への流れは一旦停止している。これはゲート部の厚さが0.8mmと薄いので流動抵抗が大きくなり、より抵抗が小さいサブランナー(肉厚8mm)の左右に流れていったものと考えられる。そして、溶湯が左右の湯口に達すると、射出速度0.2m/s, 0.3m/sの条件では、左右の圧力抵抗

と中央部の圧力抵抗がそろうため、三つの湯口から同時に製品部への流入が開始されると考えられる。

ただし、射出速度0.1m/sでは中央湯口で流動停止している。これについては、0.2m/s, 0.3m/sでの左右に対する中央部の流動遅れが0.3m/sより0.2m/sの方が大きいことに注目すると、中央湯口で一旦流動が停止してから再流動するまでのタイムラグが大きい程、(すなわち、射出速度が小さいほど)中央部の充填が遅くなることが分る。結局、このタイムラグの間に中央湯口での凝固が進行すると、流動に対する粘性抵抗が大きくなり、その結果、充填の遅れが生じると考えられ、凝固の進行が大きい場合には粘性抵抗が大きくなり、射出速度0.1m/sのように流動停止すると考える。

このように、凝固が湯流れ挙動に大きく影響していると考えられ、従って、シミュレーションが実験結果と異なるのは、解析モデルにおいて凝固の影響を正確に再現できていないと考えられる。そこで次に、凝固に影響する因子をどのように改良すれば良いかについて検討する。

解析モデル上で凝固に影響する因子としては、流れ・凝固の関係式、温度の予測精度、Alダイカスト合金の温度-凝固率データの三つが考えられる。

まず流れ・凝固の関係式について検討する。解析上用いられている関係式はNavie-Stokesの式(流れの式)にCozeny-Carmenの式(凝固率と流れの透過率

の関係式)を組み込んだ式 (Fig.9.1) )<sup>9)</sup>である。

凝固率増大に伴う流動抵抗増大の模式図をFig.9.2に示す。

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \delta_{ij} (\mu + \mu_T) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = \rho g_i - \frac{\mu}{K} u_i$$

Flow Permeability —  $K = \frac{(1 - f_s)^3}{5 M_s^2 f_s^2}$  — Solidification Rate

- $u_{i,j}$  : velocity
- $t$  : time
- $\delta_{ij}$  : kronecker delta
- $\mu$  : viscosity
- $\mu_T$  : eddy viscosity
- $\rho$  : density
- $p$  : pressure
- $g_i$  : gravitational acceleration
- $K$  : flow permeability
- $f_s$  : solidification rate
- $M_s$  : surface to volume ratio at solid structure

Fig.9.1 Navie-Stokes Eq. + Cozeny - Carmen Eq.

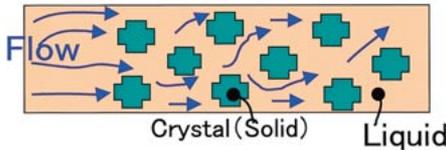


Fig.9.2 Solidification rate grow up Flow resistance grow up

この式は凝固率が增大すると粘性による流動抵抗が大きくなることを表しており、鑄造関係では広く一般に用いられている。

次に 温度の予測精度について検討する。温度の解析精度に直接影響する因子は、鑄物型の熱伝達係数、および、鑄物・型それぞれの熱伝導率・比熱の三つである。これらの値は他社のデータ・文献が豊富(リョービ・アーレスティ等)であり、しかもデータの値はほとんど同じである。

次に Alダイカスト合金の温度vs凝固率データについて検討する。鑄造に用いている合金はJIS - ADC12 (Al-11% Si-2.6% Cu-0.6% Fe-0.01% Mg,Zn,Ni)である。この合金は液相線580, 固相線515で、液相線と固相線の間では固液共存状態であるため、凝固率によって粘性が大きく変化する。

しかし、ADC12の温度vs凝固率のデータは計測が困難なため存在しない。このため、従来液相線580で凝固率0, 固相線515で凝固率1とし、固相線と液相線の間を直線で近似したデータを用いることが一般的に行われていた。Fig.10に従来の温度 - 凝固率曲線データを示す。

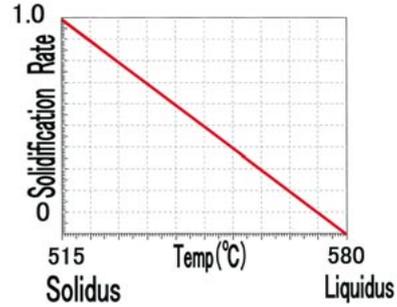


Fig.10 Former data of Temp-Solidification rate (ADC12)

上記の温度 - 凝固率のデータの精度を検討してみる。例えばAl - Si共晶組成合金 (Al-12% Si)の凝固を考える。Al - Si共晶組成合金 (Al-12% Si)は共晶線(577)になると凝固が開始され、577の状態最後まで凝固が完了する。ダイカスト合金ADC12はSi11%と、共晶組成に非常に近いため、共晶線での凝固進行が非常に大きいと考えられる。したがって温度 - 凝固率のデータは577で大きく立ち上がった曲線になると予想される、しかしSi以外の成分がどの程度影響するか不明であり、正確にデータを設定することはできない。(Fig.11)

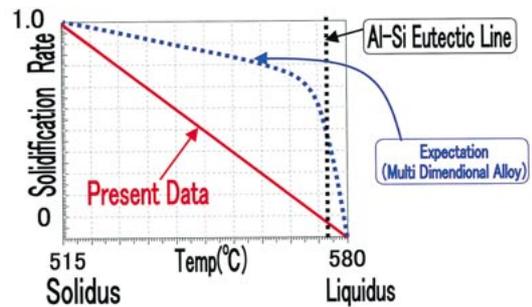


Fig.11 Expectation date of Temp-Solidification rate (ADC12)

このように ~ を比較すると, については十分に研究されているのに対して, については研究不十分であり、検討の余地があると考えられる。そこで、温度vs凝固率のデータを知る方法について詳細な検討を実施した。

#### 4.4 鑄造材料の温度-凝固率データの改良検討

多元合金の温度 - 凝固率の関係式 (Fig.12)はShielら (1942)<sup>8)9)10)</sup>により提唱されており広く知られている。

$$T = T_f - \sum a_i C_{0i} (1 - f_s)^{k_i - 1}$$

$T$ : Temp.,  $f_s$ : Solidification Rate,  $T_f$ : Melting Point (Solvent: Pure Aluminium 660°C)  
 $C_0$ : Initial Diffusion in the Liquid,  $a_i$ : Liquidus Diminution Coefficient,  $i$ : Each Solute  
 $k_i$ : Equilibrium Distribution Coefficient =  $(C_s/C_L) < 1$  [Al Alloy]  
 $C_L$ : Limited Diffusion in the Liquid,  $C_S$ : Limited Diffusion in the Solid

Fig.12 Sheil's equation

この式は、純金属に対して、不純物を入れると液相線がどれだけ低下するかを表した関係式で、凝固率について解くことによって、凝固率に対する温度を計算可能である。

ただし、実際に計算するには、各不純物成分の分配係数  $k$  と液相線温度低下係数  $a$  が必要となる。そこで今回、上式に近年の Backerud の実験によるデータベース<sup>9)</sup>を取り入れ、Shiel の式に基づく計算ソフト<sup>11)</sup>を用いることによって、ダイカスト合金 ADC12 の温度-凝固率データの計算を実施した。

ダイカスト合金 ADC12 の温度 vs 凝固率のデータ計算結果を Fig.13 に示す。

従来の直線近似のデータに対して共晶線付近の勾配が大きくなっていることから、温度低下が、流動に対する粘性抵抗に、より強く効いてくることが分る。

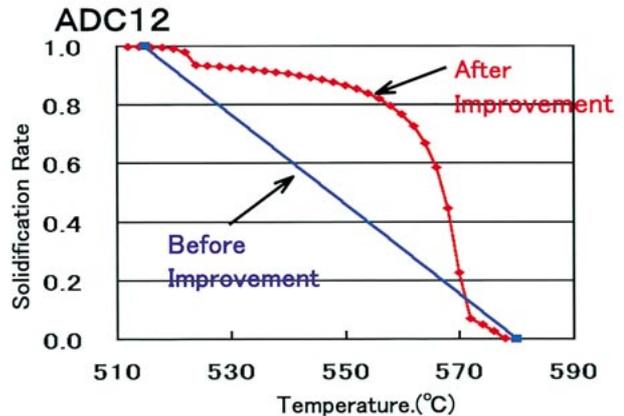


Fig.13 Improved data of Temp-Solidification rate (ADC12)

#### 4.5 シミュレーション改良結果

上述で算出したダイカスト合金 ADC12 の温度 - 凝固率のデータを用いて、再度湯流れ解析を行なった。その結果、射出速度 0.1m/s における中央湯口部の流動停止を再現できるようになった。

このようにして、溶湯の充填パターンを正確に再現することが可能となった。改良データによる湯流れ解析結果を Fig.14 に示す。

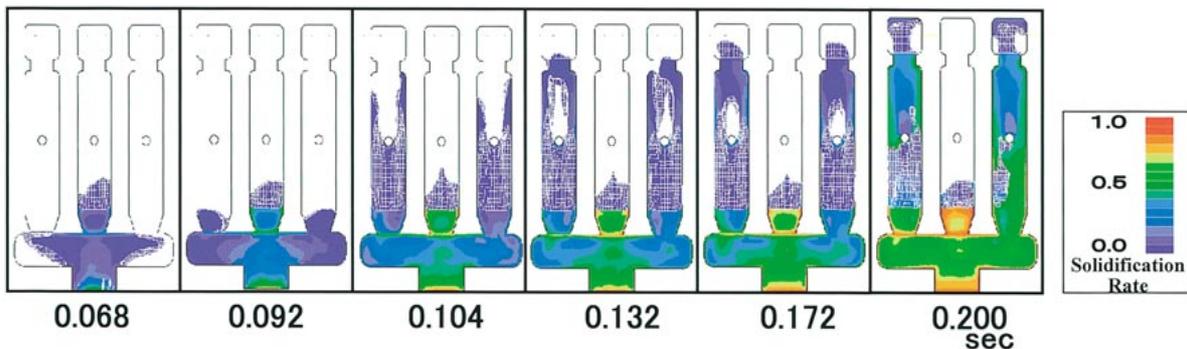


Fig.14 Improved filling pattern simulation (Shot speed 0.1m/s)

### 5. おわりに

- (1) 実機の湯流れの可視化結果とシミュレーション結果の比較検証によって、従来の解析方法では、相変化（凝固）を伴う流れパターンの予測に問題があることを確認した。
- (2) ダイカスト合金材料物性値（温度 - 凝固率）を Sheil の式に基づく計算によって改良した。
- (3) (2) の改良によって、実機の湯流れパターンをシ

ミュレーションで正確に再現可能とした。これにより 鑄造方案設計への活用による生産準備期間の短縮・製品品質向上が期待できる。

今後の進め方としては、

- (1) 簡易形状での可視化とあわせ、実機生産型の可視化を実現し、更なる精度向上を進める。
- (2) 設計者に広く展開するため、シミュレーションソフトの使いやすさについても改善を図る。

<参考文献>

- 1) 神戸 洋史：日本ダイカスト会議論文集（1998）pp.215 ~ 220 .
- 2) 加藤 鋭二，綾瀬 明三：鑄造工学 第70巻（1998）pp.103 ~ 108 .
- 3) 加藤 鋭二，前田 安郭：鑄造工学 第71巻（1999）pp.34 ~ 39 .
- 4) 加藤 鋭二：日本ダイカスト会議論文集（1998）pp.209 ~ 213 .
- 5) 可視化情報学会：（1996）朝倉書店“可視化情報ライブラリー1 流れの可視化入門”
- 6) 大中 逸雄：（1985）丸善“コンピュータ伝熱・凝固解析入門”
- 7) UES software, Inc : (1999) ProCAST User's Manual & Technical Reference
- 8) Nigel Saunders : (1997) Symp.Cast Shop Technology, Orlando, USA pp.49 ~ 56 .
- 9) 新山 英輔：（1998）丸善“金属の凝固を知る”
- 10) Kurz Fisher : (1998) Trans Tech Publications 『FUNDAMENTALS OF SOLIDIFICATION』
- 11) Thermo Tech : (1999) Thermo Tech Databases Manual

<著者>



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の開発・適用化に従事



亀山 吉朗  
(かめやま よしろう)

デンソーテクノ（株）  
流体・成形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



鈴木 芳雄  
(すずき よしお)

情報企画部  
シミュレーション技術の開発・適用化に従事



長縄 由紀子  
(ながなわ ゆきこ)

生産技術開発部  
加工データベースおよび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の開発・適用に従事



加藤 鋭次  
(かとう えいじ)

名古屋大学大学院工学研究科  
材料プロセス工学専攻助手  
工学博士  
凝固過程を伴うプロセスの解明に関する研究．特にダイカスト加工プロセスの研究に従事



野村 宏之  
(のむら ひろゆき)

名古屋大学大学院工学研究科  
材料プロセス工学専攻教授  
工学博士  
凝固過程を伴うプロセスの解明に関する研究．特に，ダイカスト加工，鑄造様砂型造型，金属粉末射出成形の研究に従事