コンピュータシミュレーションによる
平板状 ADC12 ダイカスト製品のそり変形予測山縣 裕^{*1}, 黒川 公恭^{*2}, 谷川 昌司^{*3}, 新川 真人^{*4}

Computer simulation for prediction of thermal distortion of JIS ADC12 flat-shape die-casting

Hiroshi YAMAGATA^{*1}, Kimiyasu KUROKAWA^{*2}, Shoji TANIKAWA^{*3} and Makoto NIKAWA^{*4}^{*1, *4} Faculty of Engineering, Gifu University

1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193, Japan

^{*2} Graduate School of Engineering, Gifu University

1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193, Japan

^{*3} KOTOBUKI KINZOKU KOGYO Co., Ltd.

1 Kitayama, Houkouji-cho, Nishio-shi, Aichi 445-0892, Japan

Received 20 November 2013

Abstract

A computer simulation method to predict the thermal distortion value of a high-pressure die cast part was investigated. The evaluated product was a flat-shape JIS ADC12 part. The actual distortion value of the part was measured by an optical 3D digitizer and it was compared with the predicted distortion value. In this method, the initial temperature distribution of the part was determined by casting simulation. The thermal distortion value during cooling was calculated by FEM analysis. The stress-strain relation was approximated by the elastic-perfectly plastic material model including the temperature dependence of the yield strength. It was found that the heat-transfer coefficient between the die and the injected molten metal is a critical factor to implement an accurate FEM simulation in the casting simulation. The heat-transfer coefficient value was accessed and confirmed using the temperature distribution measured by a thermo camera. The distortion values of the actual part optically measured as a function of the curing time well coincided with the simulated value. It was concluded that the method can predict the distortion within a practically accepted preciseness.

Key words : Casting, High-pressure die casting (HPDC), Thermal distortion, Finite difference method, Finite element method, ADC12, Shape measurement

1. 緒 言

製品のニアネットシェイプ化を推進することは、工業上重要な課題である。鑄造においては、離型後の冷却過程において製品にそりが発生し、所望とする形状、寸法精度から逸脱する。ここで、変形量とその位置を事前に予測し、型設計段階にその情報を活用することができれば、製品のニアネットシェイプ化に極めて有益である。

鑄物には、湯回り不良やひけ巣欠陥防止の観点から出来るだけ均一な肉厚となる製品設計が望ましい。しかし、要求される機能上、肉厚が完全に均一であることは少ない。そのため、充填完了後の凝固および冷却過程においては鑄物内に熱的勾配が存在することになる。さらに、金型内では凝固収縮の結果として鑄物に応力が発生する。この応力は、離型後に鑄物に対する拘束が外れると製品を変形させ、また残留応力となる。さらに残留応力は、のちに解放されると応力状態のバランスを保つようにしてさらなる変形が発生する。

鑄造工程において、①金型内で進展する凝固・冷却過程、②離型後の冷却過程において応力が発生すると考えられる。このうち①では、凝固の進展とともに材料は液相、固液共存、固相状態となる。このとき、材料は金型内で拘束される状態であるために収縮に伴う応力が発生する。また、鑄造時の材料への圧力による応力の発生も考えられる。これら応力をコンピュータシミュレーションにより評価するためには、高温域における粘弾塑性モデル式が必要である。この点については、材料試験により応力とひずみ、ひずみ速度および温度との関係を調査

No. 13-00825 [DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0133]

^{*1} 岐阜大学工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)^{*2} 岐阜大学大学院工学研究科^{*3} 寿金属工業(株) (〒445-0892 愛知県西尾市法光寺町北山 1)^{*4} 正員, 岐阜大学

E-mail of corresponding author: mnikawa@gifu-u.ac.jp

[DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0133]

© 2014 The Japan Society of Mechanical Engineers

することが重要である。そのため、半凝固・半熔融状態における流動抵抗、変形抵抗の測定結果、適用可能なモデル式および材料試験方法に関して報告(Koric and Thomas, 2008), (Kang and Bae, 2008), (木内, 2000), (座間他, 2011), (李他, 1989), (Motoyama, et al., 2012) がなされている。

一方、②では、材料に発生する応力としては温度変化による熱応力が主要因であると考えられる。材料の状態としては、ほぼ完全な固相状態である。この段階での応力は一般に用いられている弾塑性モデルにより評価が可能である。この数式モデルに必要な変形抵抗については、各種材料試験や FEM 解析を組み合わせることにより多くの報告(本村他, 1976), (加田他, 1998)がされている。

鑄造後の製品の変形を予測するためには、溶湯の充填完了後から凝固完了に至るまでの温度変化を詳細に把握し、その情報をもとにして応力を評価することが重要である。しかし、これらの過程について、金型内で起きる挙動を実測することは困難である。そこで、製品全体の温度変化および応力を定量的に評価できるコンピュータシミュレーション(Guo, et al., 2009), (XU, et al., 2008), (金他, 1991), (萩野他, 2002)は極めて有力である。

シミュレーションにより諸特性を評価するうえで留意すべきことは、設定する境界条件を精度よく推定することである。そのためには、各種測定器具により温度や形状変化等の現象を数値化することが不可欠となる。例えば、温度変化を測定する場合には、温度測定対象に測定器具を直接接触させて測定する方法と接触させない方法に大別される。前者の接触測定方法に用いられる測定器具としては熱電対がある。温度測定方法としては、熱電対を金型表面から金型厚み方向へ複数設置し、金型表面からの距離と温度差から熱流束を算出し、伝熱理論をもとにして金型表面の温度を推定(植木他, 2010)するものである。また、溶湯内に直接熱電対を設置することも報告(Pedersen and Tiedje, 2008)されている。熱電対による測定の利点としては、温度の非定常変化挙動を把握できることである。しかしながら、設置した位置のみでの温度変化を測定することになる。さらに、熱電対はその仕様により測定値に若干の差が生じる(Long, et al., 2011)。これは、接触測定方法の本質的な問題である。

一方、測定対象物から放出される温度エネルギーを検出することにより温度を算出する非接触温度測定方法としては、例えば赤外線を検出する赤外線サーモグラフィ等がある。検出される赤外線に対して適切な補正を行うことによって高い精度で温度を評価することは可能である。さらに、型開き時の金型正面からサーモグラフィにより測定することによって、シミュレーションを行う上で実効性の高いデータの取得が可能となる(谷川他, 2012a)。このように、非接触方式による高精度測定を行うことができれば、評価したい領域の全体の挙動を把握することが可能となる。全体の挙動を詳細に把握することは、より正確にコンピュータシミュレーションの各種境界条件を推定することができ、シミュレーションの精度の向上が期待できる。

本研究は、高精度非接触測定をもとにしたコンピュータシミュレーションにより、肉厚の異なる平板状ダイカスト製品に発生するそり変形を精度よく予測することを目的とする。本研究において、そり変形は離型後の冷却工程における熱応力に起因するものだけを検討対象とし、そりは熱応力の開放により発生するものとした。鑄造シミュレーションにより離型時の製品表面温度を算出し、その情報をもとにして熱変形シミュレーションによりそり変形を算出した。本研究のように鑄造シミュレーションと熱変形シミュレーションを活用し、製品に発生する変形を検討したものとして、例えば材料物性値の温度依存性を考慮したプロセスシミュレーション(Guo, et al., 2009)や湯流れ・凝固解析を利用した変形解析(萩野他, 2002)等が報告されている。しかしながら、本研究のように解析対象全体の挙動を詳細に調査し、その結果から境界条件を推定した報告は少ない。

鑄造シミュレーションによる計算結果の妥当性は、非接触金型表面温度測定と比較することにより検証した。また熱変形シミュレーションによる計算結果の妥当性は、ダイカスト鑄造後に室温まで冷却された製品の非接触3次元形状測定と比較することにより検証した。

さらに、離型後に発生するそり量の大きさは、型内でのキュアリングタイムの長さにも影響を受ける(養田他, 1979)。そり変形量に対するキュアリングタイムの影響をシミュレーションにより最適化できれば、生産活動において有益となる。そこで、キュアリングタイムの違いによるそり変形量についても検討した。

2. 実験方法

実験では、製品に実際に発生するそり量を測定した。また、金型温度測定を実施し、コンピュータシミュレーションにおける熱伝達係数の決定に使った。

2・1 鑄造実験

鑄造実験は、型締め力 2450kN のダイカストマシンにより行った。鑄造条件としては、低速射出速度 0.3m/s、高速射出速度 1.7m/s とし、キュアリングタイムを 4.0, 5.5, 7.0s とした。20 回連続して鑄造を行い、そのうち安定したと思われる後半 10 回分を評価対象製品とした。図 1 に JIS-ADC12 製ダイカスト製品のビスケットおよびゲート、ランナのついた CAD モデルを示す。製品全体重量は、約 0.91kg であり、そのうち製品部は 0.42kg である。製品部の肉厚は、最小で 4mm、最大で 15mm となっている。また、表 1 に使用した材料組成の代表値を示す。

2・2 金型温度測定実験

金型温度測定実験は、製品取出しロボットアームに赤外線サーモグラフィを取り付けた。次に鑄造後に鑄物を取り出した直後の固定側、可動側金型を正面から撮影することによって金型表面温度分布を測定(谷川他, 2012a)した。

2・3 製品の 3 次元形状測定実験とそり量計測

3 次元形状の測定には、3 次元デジタイザ (ATOSIII, 参照点位置合わせ精度 12 μ m) を用いた。型から取出し、室温下で十分冷却された測定対象物を撮影し、ポリゴンモデルを作成することによって製品の 3 次元形状とした。なお、撮影した製品形状は、製品部にランナ部が付いた状態とランナ部をせき折りして製品部のみとした状態の 2 種類とした。このとき、せき折りにより製品部に対して塑性変形は加わらない。

そり量は、作成されたポリゴンモデルと製品 CAD モデルで対応する基準位置において、専用ソフトウェア上で X, Y, Z 方向に対して重ね合わせることによって計測した。図 2 にそり量測定時の基準位置とそり量測定ポイントを示す。測定点は、基準点 (図中の Reference) に対して製品の変形状態が把握できるように設定した。

Fig. 1 3D-CAD model

Fig. 2 Positions for the distortion measurement. The seven marks (open circles) express positions of distortion measurement.

Table 1 Chemical compositions of ADC12 (mass%)

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Sn	Al
1.79	10.82	0.16	0.76	0.74	0.24	0.07	0.02	(bal.)

3. シミュレーション方法

鋳造工程における金型温度および型取出し後の熱応力を解析した。このとき、シミュレーションに用いる各種物性値には温度依存性を考慮した。材料物性値計算ソフトウェア (JMatPro) を用いて、材料組成 (表 1) からこの物性値を算出した。

3・1 鋳造シミュレーションによる金型温度解析

金型温度解析は、鋳造シミュレーションソフト (ADSTEFAN Ver. 2011) により解析を行った。シミュレーションにより型開き時の金型温度を算出し、その値が金型温度測定実験の結果と一致するように熱伝達係数を調整した。本来、熱伝達に影響する凝固収縮により生じるエアギャップは型内で均等ではないことが予想される。しかし、この値を均一な値として扱うことは工業的に極めて有益である。そこで、本研究においては鋳物-金型間の熱伝達係数は一定値とした。実際のダイカスト鋳造時では、溶湯の射出からキュアリング、型開き、鋳物取出し、スプレー・エアブローおよび型閉めを経て次の鋳造が開始する。さらに、製造初期では、捨て打ちと呼ばれる慣らし工程がある。シミュレーションにより精度よく金型表面温度を算出するためには、これら 1 サイクル中の鋳物と型の接触・非接触状態を再現すると共に、熱伝達係数を適切に設定する必要がある。さらに、捨て打ち工程を考慮し、複数サイクル後の金型表面温度を算出する必要がある。

そこで鋳造シミュレーションでは、この溶湯射出から型閉めまでを 1 サイクルとして、20 サイクルの湯流れ・凝固冷却解析を行うことによって実際の鋳造の状態を再現した。このときに用いた鋳物-金型間の熱伝達係数は、シミュレーションによる計算結果と高精度金型温度測定実験の結果を比較した結果、 $8.4\text{ kW}/(\text{m}^2\text{K})$ であった(谷川他, 2012b)。図 3 に鋳造シミュレーションに用いた金型モデルを示す。金型材質は、SKD61 とした。可動側および固定側入子は実際の形状と対応させてモデルを作成している。また、冷却管についても実際の状況を再現している。

Fig. 3 The die insert models for casting simulation created by 3D digitizer.

3・2 金型温度解析結果の FEM へのマッピング

FEM による高精度な解析を行うためには、鋳造シミュレーションによる金型温度解析結果を FEM 解析の初期金型温度情報に組み込むことが必要である。今回用いる鋳造シミュレーションの解析方式は直交差分法 (FDM) である。そのため、FDM による結果を直接 FEM メッシュに組み込めない。FEM メッシュに FDM メッシュの情

報を組み込むためには、取得したいメッシュ接点の情報をその周辺の接点情報をもとにして算出することが必要となる。マッピングツール (ADSTEFAN T-MAP) を用いて FDM による金型温度解析結果を FEM メッシュ情報に統合し、必要な初期金型温度を設定した。

3・3 熱変形シミュレーションによるそり変形解析

汎用 FEM ソフト (ANSYS Workbench Ver.14.0) により弾塑性熱応力解析を行った。図 4 に解析に用いた ADC12 の物性値を示す。変形解析に用いた形状モデルには、製品最終形状の CAD データを用いた。シミュレーションを行うためには、解析開始時の正確な形状は離型直後の形状である必要がある。しかしながら、 casting 中の金型キャビティ形状の変化を正確に評価することは困難であるとともに、離型直前までの凝固収縮進展過程を織り込むには不明な点もある。また、そり変形量は製品の品質上重要な肉厚方向 (図 2, 紙面垂直方向) に対し評価している。評価箇所における製品肉厚は、4-12mm である。離型時の温度を 300℃ として室温まで冷却されたときの肉厚方向の熱収縮量は、最大で約 0.07mm となる。シミュレーションにより計算されるそり量は、熱応力による変形量と熱収縮量とが重畳されることになるが、熱収縮量を考慮すると 10⁻¹mm オーダーまでは信頼できると考えられる。上記理由から、変形解析のための初期形状モデルとしては、実製品形状寸法の保証がある製品最終形状モデルを用いた。

変形解析における材料は、弾完全塑性体と仮定し、温度変化による 0.2% 耐力の値 (軽金属協会, 1991) を用いて定義した。仮定した材料モデルの妥当性としては次のように考える。本研究において製品に発生するそりは、型取出し後の熱応力により発生するものとする。離型直後の製品温度を凝固点直下の 580℃ とし、室温まで冷却されたときの収縮による熱ひずみを線膨張係数から計算すると、約 0.028 となる。このことは、検討対象としている領域におけるひずみが小さいことを示唆している。また、今回用いた ADC12 は 360℃ から 540℃ の間で加工硬化現象はほとんどない (李他, 1989)。これらの理由により、加工硬化型モデルではなく完全塑性型モデルと定義した。またひずみ速度による変形抵抗への影響については、製品全体を室温下で冷却しているため急激なひずみ速度の変化はないと考え、ひずみ速度依存性については考慮していない。

そり量は、製品の型取出し後から室温下で製品が冷却されるとき熱応力を解析し、その結果から算出した。そり量を前述したように製品部にランナ部が付いた状態とせき折りして製品部のみとした状態の 2 種類について考えた。製品部のみのそり量を算出する場合にはランナから切り離した状態での解析が必要になる。しかしながら、熱応力解析の初期段階から製品部のみを解析対象とすることは不適當である。製品部とランナ部の全体構造に起因する応力状態をシミュレーションできなくなるためである。そこで、まず製品にランナが付いている状態で熱応力を解析した。その後、ランナ部による製品部変形に対する拘束を極めて小さくすることによって擬似的にランナ切断後の状態を再現し、応力の開放に伴う変形解析を行うことによってそり量を算出した。表 2 に解析に用いた各種熱伝達係数を示す。なお本解析においては、さらに以下の 2 つを仮定した。

- ① 製品の金型への抱きつき等、製品離型時に起こる変形はない
- ② キュアリング中は、製品は型に拘束されて変形しない

4. 実験結果

4・1 製品そり変形の 3 次元測定結果

図 5 にキュアリングタイム 5.5s におけるゲートせき折り前後のそり量を 3 次元測定した結果を示す。図中、そり量が正の値の場合は、変形方向が図 2 中の紙面手前方向であること示し、負の値の場合には、紙面奥方向であることを示している。ゲートの有無でそり量に違いがみられ、せき折り後の製品のほうが高い値を示した。

4・2 シミュレーションによるそり変形量の計算結果と実測結果との比較

図 6 にゲートせき折り前後におけるそり量の測定結果とコンピュータシミュレーションによる計算結果の比較を示す。図中の測定点は、図 5 と対応している。図より、シミュレーションによる計算結果は、ゲートせき折り前後でそり量に違いがみられる。また、せき折り後の製品のほうが全ての測定点で変形量がやや大きくなった。

これらの結果は、製品の実測結果と同じ傾向である。計算結果は測定結果に対して最大で約 0.1mm のずれが生じたが、変形の方法や製品部全体の変形挙動については、測定結果をよく表現している。

Fig. 4 Temperature dependence of the physical properties of ADC12. These properties were calculated by JMatPro.

Table 2 Heat transfer coefficients

	Heat transfer coefficient (kW/m²K)
Between die and molten metal	8.4
Between die and coolant	4.2
Between product and air	0.04

Fig. 5 Distortion after casting at a curing time of 5.5s. The gray bar expresses the distortion values before cutting the gate. The black bar expresses the distortion values after cutting the gate.

Fig. 6 Comparison of the distortion value. The gray bars express experimental values. The black bars express calculated values.

4・3 キュアリングタイムによるそり量の測定結果と計算結果の比較

図7にキュアリングタイムを変化させたときのゲートせき折り後の製品そり量の測定結果と計算結果の比較を示す。12点の測定点から算出した金型表面平均温度は、191.6℃（キュアリングタイム：4.0s）、182.8℃（5.5s）、175.1℃（7.0s）であった。測定結果から、キュアリングタイムの増加に伴って測定点1-6のそり量は小さくなり、測定点7のそり量はそれほど大きな変化は見られない。一方、計算結果においても同様の結果を示している。このことは、シミュレーションはキュアリングタイムによるそり量への影響をよく再現しているといえる。

5. 考 察

ゲートせき切り前後で製品のそり量が変化した（図5）。これは、ランナが付いた状態での残留応力が解放された結果である。このことは、コンピュータシミュレーションにより製品のそり変形量を予測するためには、ゲートせき切り前の状態からシミュレーションを行い、その後にシミュレーション上でゲートせき切り後の状態を再現する必要があることを示唆している。本研究においては、ランナ部の剛性を小さくすることによって、シミュレーション上でランナ除去状態を擬似的に表現した。この方法により実際のゲートせき切り前後のそり変形挙動をシミュレーションによってよく再現できたと考えられる（図6）。

そり変形予測は、製品を型から取り出したのちの温度変化により発生する熱ひずみをもとに算出している。熱ひずみは、以下の式のように与えられる。

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

式(1)中, ε_{th} は熱ひずみ, α は線膨張係数, T は高温側温度(型から取り出したのちの製品温度), T_0 は低温側温度(室温)を表す. シミュレーションにより熱応力に伴うそり量を精度よく予測するには, 型から取り出したのちの初期の製品温度を実際の製品温度とよく合うように計算する必要があることを示唆している. そのためには, 境界条件を精度よく推定し, 鋳造シミュレーションにより製品温度を算出する必要がある. 著者らの一部が報告した結果において, 鋳造シミュレーションにより, 金型表面温度を精度よく計算できた(谷川他, 2012b). これは, 金型全体の温度を精度良く測定することによって熱伝達係数を推定することが実現できたためである.

そり変形は, 実用的に十分な精度であった(図6, 図7). アルミニウム合金のダイカストのように熔融状態から凝固点近傍まで金型内で拘束される場合には高温のため拡散が十分に起き, 凝固の進展に伴う残留応力は緩和され無視できると予想される. そのため, 離型後の熱収縮のみを弾完全塑性モデルで評価することで, 製品に発生するそり量を実用レベルで十分に予測できる. しかしながら, 測定値との間にはまだ最大で0.1mm程度の差が生じた所もある. 原因としては, 金型内で型ばらし前に発生している変形および離型作業時の変形を無視していることも考えられる. また, 金型内においては, 熔融状態から半凝固・半熔融状態を経て凝固状態となる. この半凝固・半熔融状態においても製品は収縮していると考えられる. この収縮に伴う製品形状の変化を正確に評価することは, 製品に発生するそり量をさらに精度良く予測するためには不可欠であるとも考えられる. 半凝固・半熔融状態における応力状態を評価するためには, この領域における変形特性のメカニズムを明らかにする必要があるが, シミュレーションは大規模, 複雑になる. さらなる進展は経済効果とのトレードオフで決まるといえるが, ここで仮定したような前提条件が成立する場合には, 十分な精度で現時点でも予測は可能である.

Fig. 7 Effect of curing time on the distortion. The circle marks express experimental values. The triangle marks express calculated values.

6. 結 言

平板状ダイカスト製品のそり変形量を、鋳造シミュレーションと熱変形シミュレーションを組み合わせ予測した。その中で、製品のゲートせき折り後に発生するそり変形量およびキュアリングタイムが製品そり変形に及ぼす影響について主に検討した。得られた結果は以下になる。

- 1) 非接触3次元形状測定の結果、せき折り前後で製品の変形量に違いが発生し、せき折り後で変形量が大きくなった。
- 2) シミュレーションによりせき折りによる変形の増加を再現できた。その精度は、実測値に対して最大で0.1mmであった。
- 3) 非接触3次元形状測定の結果、キュアリングタイムの増加にともない、製品のそり量は減少した。
- 4) シミュレーションによりキュアリングタイムとそり変形量の関係を再現できた。その精度は、実測値に対して最大で0.1mmであった。

謝 辞

本研究は、平成 22-24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業（課題名：鋳放し高精度を有するアルミニウム合金ダイカスト鋳造品の生産技術の開発・確立）により行われた。関係各位に謝意を表します。

鋳造シミュレーションについてご協力いただいた茨城日立情報サービス(株)殿、物性値の計算についてご協力いただいた(株)ユーイーエス・ソフトウェア・アジア、木島秀弥様に感謝いたします。

文 献

- Guo, Z., Saunders, N., Schille, J. P. and Miodownik, A. P., Material properties for process simulation, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 499, No. 1-2 (2009), pp. 7-13.
- 軽金属協会編, アルミニウム鋳鍛造技術便覧 (1991), p.490, 492, カロス出版(株).
- 加田修, 三木武司, 戸田正弘, 小坂田宏造, 有限要素法と単純圧縮実験を組み合わせた等温変形抵抗の算出, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 64, No. 628 (1998), pp.4914-4919.
- Kang, C. G. and Bae, J. W., Numerical simulation of mold filling and deformation behavior in rheology forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 5 (2008), pp.944-955.
- 金基永, 佐久田博司, 鈴木俊夫, 梅田高照, 汎用有限要素解析コードによる金型鋳物の変形予測, *鋳物*, Vol. 63, No. 3 (1991), pp. 233-238.
- 木内学, 半溶融/半凝固金属の変形特性, *生産研究*, Vol. 52, No. 9(2000), pp. 367-375.
- Koric, S. and Thomas, B., G., Thermo-mechanical models of steel solidification based on two elastic visco-plastic constitutive laws, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, No. 1-3 (2008), pp.408-418.
- Long, A., Thomhill, D., Armstrong, C. and Watson, D., Determination of the heat transfer coefficient at the metal-die interface for high pressure die cast AlSi9Cu3Fe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 17-18 (2011), pp.3996-4006.
- 李遠才, 大平貴規, 梅田高照, 鋳造用アルミニウム合金 AC4C および ADC12 合金の高温変形挙動, *鋳物*, Vol. 61, No. 4 (1989), pp. 258-262.
- 本村貢, 島村三郎, 西村孝, 純アルミニウムおよびアルミニウム合金の変形抵抗の数式モデル, *軽金属*, Vol. 26, No. 9 (1976), pp. 432-440.
- Motoyama, Y., Takahashi, H., Inoue, Y., Shinji K. and Yoshida, M. Development of a device for dynamical measurement of the load on casting and the contraction of the casting in a sand mold during cooling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 6 (2012), pp.1399-1405.
- 荻野雄一郎, 小宅勝, 平方篤, 日下田雅男, 田村允, 湯流れ・凝固解析技術を利用したダイカスト品の変形量評価 (第 1 報), *群馬県工業試験場研究報告* (2002), pp.24-29.

- Pedersen, K. M. and Tiedje, N., Temperature measurement during solidification of thin wall ductile cast iron Part 1: Theory and experiment, *Measurement*, Vol. 41, No.5 (2008), pp.551-560.
- 谷川昌司, 原田雅行, 山縣裕, 新川真人, 山岡充昌, 眞鍋孝顕, 3次元デジタイザによるダイカスト品の寸法測定とシミュレーションによる変形予測, *日本ダイカスト会議論文集* (2012a), pp. 99-104.
- 谷川昌司, 山縣裕, 久保英二, 青山浩喜, 正面から撮影した熱画像によるダイカスト金型の温度測定, *アルトピア*, Vol. 42, No. 11 (2012b), pp.15-17.
- 植木徹, 田代政己, 田島淳郎, 加藤栄光, 八下田健次, 神戸洋史, ダイカスト型内の casting 挙動計測, *日本ダイカスト会議論文集* (2010), pp.157-162.
- Xu, Y., Kang, J., Huang, T. and Hu, Y., Thermal stresses in a cylinder block casting due to coupled thermal and mechanical effects, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 13, No. 2 (2008), pp.132-136.
- 養田実, 阿手雅博, 中川勇, 型ばらし時間の casting 応力に及ぼす影響, *富山大学工学部紀要*, Vol. 30(1979), pp. 16-20.
- 座間淳志, 利光万弘, 渡部智也, 千葉浩行, 鳥山隆成, 吉田誠, 半溶融および半凝固状態の Al-Mg 系合金の力学特性の比較, *軽金属*, Vol. 61, No. 9 (2011), pp. 446-451.

References

- Guo, Z., Saunders, N., Schille, J. P. and Miodownik, A. P., Material properties for process simulation, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 499, No. 1-2 (2009), pp. 7-13.
- Japan Light Metal Association ed., *Handbook of Aluminum Casting & Forging Technology* (1991), p.490, 492, Kallos Publishing Co., Ltd. (in Japanese).
- Kada, O., Miki, T., Toda, M. and Osakada, K., Calculation of isothermal flow stress by the combination of FEM and a simple compression test, *Transactions of the JSME, Series C*, Vol. 64, No. 628 (1998), pp.4914-4919 (in Japanese).
- Kang, C. G. and Bae, J. W., Numerical simulation of mold filling and deformation behavior in rheology forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, No. 5 (2008), pp.944-955.
- Kim K., Y., Sakuta, H., Suzuki, T. and Umeda, T., Prediction on casting deformation using an FEM code, *IMONO*, Vol. 63, No. 3 (1991), pp. 233-238 (in Japanese).
- Kiuchi, M., Deformation characteristics of mushy/semi-solid metals, *SEISAN-KENKYU*, Vol. 52, No. 9 (2000), pp. 367-375 (in Japanese).
- Koric, S. and Thomas, B., G., Thermo-mechanical models of steel solidification based on two elastic visco-plastic constitutive laws, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, No. 1-3 (2008), pp.408-418.
- Long, A., Thomhill, D., Armstrong, C. and Watson, D., Determination of the heat transfer coefficient at the metal-die interface for high pressure die cast AlSi9Cu3Fe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 17-18 (2011), pp.3996-4006.
- Li, Y., C., Ohira, T. and Umeda, T., Deformation behavior of cast aluminum AC4C and ADC12 alloys at high temperature, *IMONO*, Vol. 61, No. 4 (1989), pp. 258-262 (in Japanese).
- Motomura, M., Shimamura, S. and Nishimura T., On relationg the resistance to deformation of commercial pure aluminum and aluminum alloy to strain, strain rate and temperature, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 26, No. 9 (1976), pp. 432-440 (in Japanese).
- Motoyama, Y., Takahashi, H., Inoue, Y., Shinji K. and Yoshida, M. Development of a device for dynamical measurement of the load on casting and the contraction of the casting in a sand mold during cooling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 6 (2012), pp.1399-1405 (in Japanese).
- Ogino, Y., Oyake, M., Hirakata, A., Higeta, M. and Tamura, M., Deformation evaluations of die-cast products using metal flow and solidification simulation techniques (1st report), *Reports of Gunma Prefectural Industrial Technology Research Laboratory* (2002), pp. 24-29 (in Japanese).

- Pedersen, K. M. and Tiedje, N., Temperature measurement during solidification of thin wall ductile cast iron Part 1: Theory and experiment, *Measurement*, Vol. 41, No.5 (2008), pp.551-560.
- Tanikawa, S., Harada, M., Yamagata H., Nikawa, M., Yamaoka M. and Manabe, T., Measurement of die castings by 3Ddigitizer and calculation of distortion by computer simulation, 2012 Japan Die Casting Congress Transactions (2012a), pp. 99-104 (in Japanese).
- Tanikawa, S., Yamagata, H., Kubo, E. and Aoyama, H., Accurate measurement of temperature distortion of a die-casting die using a direct frontal loaded thermo-camera, *ALTOPIA*, Vol. 42, No. 11 (2012b), pp.15-17 (in Japanese).
- Ueki, T., Tashiro, M., Tajima, A., Kato, H., Yageta, K. and Kambe, H., Measurement of melt and die behavior in die-casting process, 2010 Japan Die Casting Congress Transactions (2010), pp.157-162 (in Japanese).
- Xu, Y., Kang, J., Huang, T. and Hu, Y., Thermal stresses in a cylinder block casting due to coupled thermal and mechanical effects, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 13, No. 2 (2008), pp.132-136.
- Yohda, M., Ate, M. and Nakagawa, I., Effect of shake-out time on the casting stress, *Bulletin of Faculty of Engineering, Toyama University*, Vol. 30 (1979), pp. 16-20 (in Japanese).
- Zama, A., Toshimitsu, K., Watanabe, T., Chiba, H., Toriyama, T. and Yoshida, M., Comparison of mechanical characteristics between semi-liquid state and semi-solid state in Al-Mg alloys, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 61, No. 9 (2011), pp. 446-451 (in Japanese).