

(論文)

## 消失模型鑄造法における鑄物形状予測

### Predicting Shapes of Castings Manufactured by Evaporative-pattern Casting Process



堤 一之\*<sup>1</sup>  
Kazuyuki TSUTSUMI



黒澤瑛介\*<sup>1</sup> (博士(工学))  
Dr. Eisuke KUROSAWA



高川優作\*<sup>1</sup>  
Yusaku TAKAGAWA



小西 毅\*<sup>2</sup>  
Tsuyoshi KONISHI

In order to obtain a near net shaped product by evaporative pattern casting, the deformation of the foaming resin pattern during molding or solidification and the heat shrinkage of the casting should be taken into account in designing the initial pattern shape. In this study, the strain on the pattern during molding was measured with sufficient accuracy so as to understand the influence of vibration and evacuation on pattern deformation. Moreover, the geometries of the initial pattern and the casting product were compared, and the influence of casting conditions was also examined. As a result, the deformation of pattern during molding was relatively small, and the size of the casting product was larger than the initial pattern in some cases, despite the shrinkage due to solidification. Therefore, it became clear that the pressure of molten metal or decomposition gas of forming resin may have an effect on the final geometry of the casting product.

まえがき = 圧縮機械本体のケーシングやロータなど、機械部品の多くに鑄物が使われており、加工コスト低減や設計自由度を向上させるためにも、その形状制御が重要である。

一般的な鑄造法であるキャピティ鑄造法では、求める形状を模した木型または金型を用いて砂型内に空洞を作り、そこに溶けた金属を流し込んで品物を得る。一方、消失模型鑄造法では、求める形状を模した発泡樹脂の型をそのまま砂内に埋め込み、溶けた金属と置換させることで品物を得る。後者の場合、上型と下型を組み合わせる必要がなく、合わせ面の“ばり”を手入れする必要がない。また、砂型から木型を抜く時の摩擦抵抗を減じるために設けられる“抜け勾配”が必要なく、よりニアネットに品物を鑄造することができる。

消失模型鑄造法には、自硬性砂を用いるFMC (Full Mold Casting) と、樹脂添加されていない砂を用いるEPC (Evaporative Pattern Casting) がある。EPCの概要を図1に示す。いずれの方法も、変形しやすい発泡樹脂模型の表面に“塗型剤”と呼ばれる耐火性のコーティング剤を塗布・乾燥させて、模型の表面強度を上げてから枠(以下、フラスコという)内に設置した後、砂を充填する。FMCの場合、砂に樹脂が混練されており、その樹脂の脱水縮合反応を利用して砂の強度を得る。一方、EPCの場合は、フラスコ内の砂に振動を付与した後に減圧することで充填密度を上げ、くさび効果で砂型の形状を保持させる。このように、FMCよりEPCのほうが砂型の強度が低く、砂型内の発泡樹脂模型が変形しやすいプロセスになっているため、砂の重量や溶湯からの浮力の大きい数百kg以上の大型製品はFMC、数十kg以

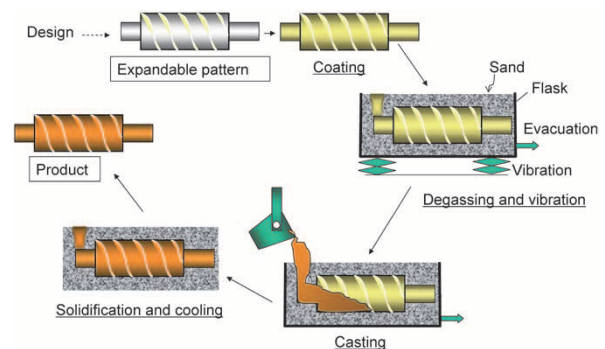


図1 EPC工程の概念図  
Fig. 1 Evaporative-pattern casting process

下の中小型製品はEPCで作られることが多い。

消失模型鑄造法では、造型中に受ける外力で発泡樹脂模型が変形するため、鑄物をニアネットシェイプ化するためにはこの変形も考慮して模型形状を設計する必要がある。しかし、通常は溶湯が製品になる際の熱収縮しか考慮せず、模型が一定の収縮率(8/1,000~10/1,000)で製品になると仮定して模型形状を設計し、複数回の試作を通じて形状の修正を行う。したがって、試作回数の少ない効率的な模型設計を行うためには、模型形状から得られる鑄物の最終形状を事前に予測することが必要である。模型の形状と鑄物の最終形状が異なる理由として、先に述べた冷却による熱収縮のほか、造型中の模型の変形、模型が溶湯と置換する際の静圧や燃焼ガス圧による変形などが考えられ、それらの影響を定量的に把握しなければならない。

本稿では、中小型製品のニアネットシェイプ化を目的とし、EPC造型中の発泡樹脂模型の変形挙動を調査し

\*<sup>1</sup> 技術開発本部 機械研究所 \*<sup>2</sup> 神鋼造機(株) 製造部

た。これまで、EPCにおける振動、脱気中のフラスコ内の砂圧分布<sup>1)</sup>や、その結果生じる発泡樹脂模型のひずみ<sup>2), 3)</sup>について報告されている。しかし、造型中の模型のひずみを精度良く測定し、その変形挙動について定量的に考察した例は少ない。従来は、柔らかい発泡樹脂模型表面のひずみをひずみゲージで測定する実験が行われていた。しかしながら、このような実験から求めた模型の表面ひずみでは、ゲージ自身の変形抵抗（剛性）の影響が無視できず、模型の正確な変形挙動の把握が困難であった。そこで当社は、発泡樹脂または塗型を施した発泡樹脂表面のひずみをひずみゲージで測定する時に、ひずみゲージ自身の変形抵抗を考慮することによって、模型に作用する真のひずみの値を算出する校正式を提案した<sup>4), 5)</sup>。本稿では、提案した校正方法を述べるとともに、この方法を用いて模型に発生するひずみ量を測定し、EPC造型中に砂から受ける力によって生じる模型の変形量から、造型時の模型変形が最終鑄造形状に与える影響を明らかにした。また、模型と鑄物の形状を比較することで、最終形状に大きな影響を与える鑄造条件について考察した。

## 1. ひずみの校正方法

### 1.1 主な計算条件

市販されているはく状のひずみゲージは、ひずみを受感する金属はくを埋め込んだラミネートフィルムを樹脂系の接着剤で被測定物に貼付して用いられる（図2）。一方、フィルムや硬化した接着剤はそれぞれ、ヤング率2～3 GPa程度の剛性を有しているため、被測定物のヤング率が数GPa以下になると、ひずみの測定感度が低下して補正する必要が生じることが知られている。本稿で用いる発泡樹脂は、ポリメチルメタクリレート75%、ポリスチレン25%の共重合体ビーズ「クリアポール<sup>注)</sup>」を約40倍に発泡して作られるもので、図3に示す応力-ひずみ関係を持つ。図で明らかのように、ヤング率換算で数MPaの剛性しか持たないため、真のひずみを得るための補正が必要である。また、EPCでは模型表面に塗型剤を塗布、乾燥させて強化するが、乾燥後の塗型剤の層（以下、塗型という）も、図4に示すようにヤング率約

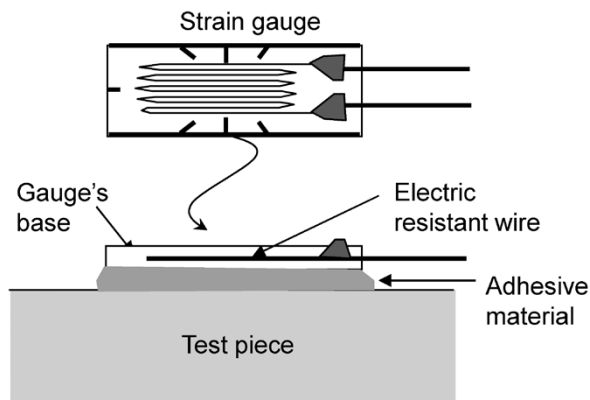


図2 ひずみゲージの貼付状況  
Fig. 2 Schematic view of strain gauge on test piece

200MPaの剛性しか有しておらず、塗型した模型であっても補正が必要となる。

そこで、発泡樹脂体と塗型の2層構造を持つ被測定物の表面ひずみをひずみゲージで求めるため、数値解析を用いて補正方法を検討した。塗型後の発泡樹脂体のブロックにゲージを貼付した1/4計算モデル（図5）に対して、汎用有限要素法解析ソフト「Abaqus ver.6.4」（ダッソー・システムズ株）を用いてひずみ分布を求めた。

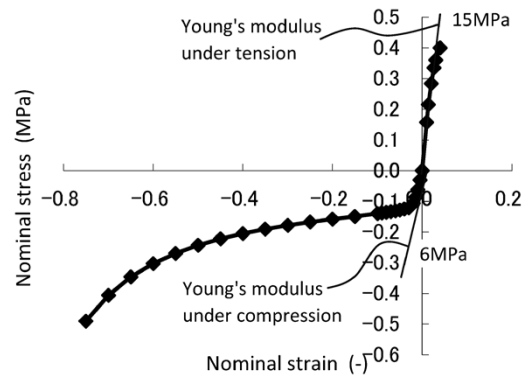


図3 発泡樹脂の応力-ひずみ線図  
Fig. 3 Stress-strain diagram of foaming resin

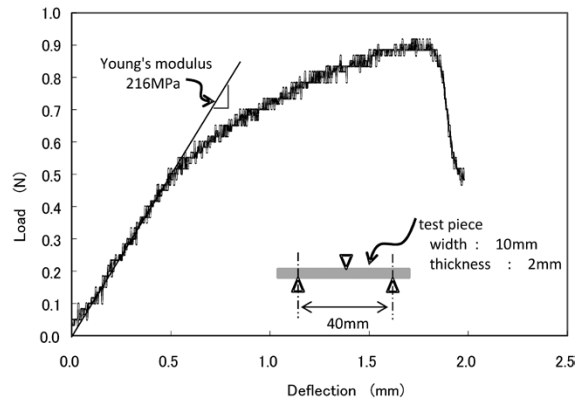


図4 塗型Aの荷重-たわみ線図  
Fig. 4 Load-deflection diagram of coating "A"

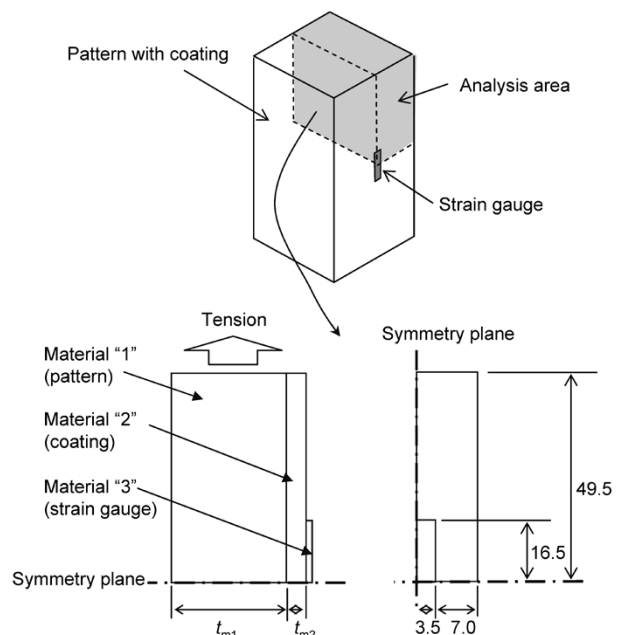


図5 計算モデル  
Fig. 5 Computational model

脚注) クリアポールは(株)ジェイエスピーの登録商標である。

表1 計算に用いたデータ  
Table 1 Numerical analysis data

Young's modulus of material "2" $E_{m2}$ (MPa)	Thickness of material "1" $t_{m1}$ (mm)	Thickness of material "2" $t_{m2}$ (mm)
200,300	5.0~50	0.5~2.0

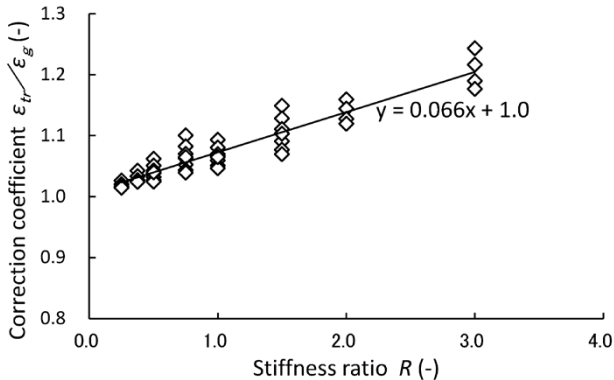


図6 剛性比と補正係数の関係

Fig. 6 Relationship between stiffness ratio and correction coefficient

表1に示す異なる厚さの発泡樹脂体，塗型について計算することで，汎用性の高い補正式を得ることを目的とした。

## 1.2 計算結果

引張変位が0.5mmの時点における模型表面のひずみ（真のひずみ  $\varepsilon_{tr}$ ）とゲージのひずみ（ゲージ出力値  $\varepsilon_g$ ）の比を求め，2層体の剛性比  $R$  との関係を図6に示す。このとき，剛性比  $R$  は式（1）で定義した。

$$R = (E_g \times t_g) / (E_{m2} \times t_{m2}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで， $E_g$ ， $t_g$  は，それぞれひずみゲージと接着剤を一体とみなした場合のヤング率，厚さであり， $E_{m2}$ ， $t_{m2}$  は塗型のヤング率と厚さである。

図6に示すように，真のひずみ  $\varepsilon_{tr}$  とひずみゲージの測定値  $\varepsilon_g$  の比，つまり補正係数は，塗型とひずみゲージ（および接着剤）の剛性比  $R$  に応じて線形に変化している。すなわち，発泡樹脂の厚さによらず，塗型厚さとその縦弾性係数を把握して  $R$  が求められれば，ひずみゲージで測定した値を式（2）に代入することで，真のひずみが得られることがわかった。

$$\varepsilon_{tr} = (0.066R + 1.0) \varepsilon_g \dots\dots\dots (2)$$

## 2. 実験方法

ねずみ鋳鉄（JIS\_FC250）製の100×100×200mmの直方体鋳物を対象に，EPCにおける造型中の発泡樹脂模型の変形と鋳物の最終形状の関係を調べた。鋳造に供した発泡樹脂模型は前章で検討した材料と同じである。この模型に，表2に示す異なる塗型剤2種を塗布した。所定の濃度（表2のボーメ値）の塗型剤の入った槽に模型を浸してから40℃で乾燥させた後，再度塗布と乾燥を行い，「2度塗り」した模型を作製した。なお，塗型前後の模型形状を3次元デジタイザ「SpinArm-Apex247S」（株ミットヨ）で測定し，両者を比較して求めた塗型の平均厚さを表2に示す。

塗型，乾燥後の模型の代表位置に低弾性材料用のひずみゲージ「KFML-5-350-C1」（株共和電業）をエポキシ系接着剤「EC-30」（同社）を用いて貼付し，ひずみを測定した。また，別の試験体には，模型表面に土圧計「KDE-200kPa」（株東京測器研究所）を両面テープで貼付し，造型中の圧力を測定した。なお，この土圧計で得られる負圧の精度は低く，参考値として用いた。本実験では，とくに模型側面の変形に着目し，模型の底面から高さ100mm（側面中央）の位置で，鉛直方向のひずみと圧力を測定した（図7）。

鋳造には，図8に示す内部形状が縦830×横660×高さ650mmのフラスコを用い，図9に示すように模型を縦方向に配置するパターン，横方向に配置するパターン，それぞれ4個同時に鋳造した。前述したひずみと圧力の

表2 実験に使用した塗型剤と塗型厚さ  
Table 2 Characteristics and thickness of coating materials

Coating	Baumé degree (° Be)	Deflection strength*1 (MPa)	Average thickness after twice dipping (mm)
A	80	>1.5	1.5
B	100	>4.4	0.9

\*1 catalog data

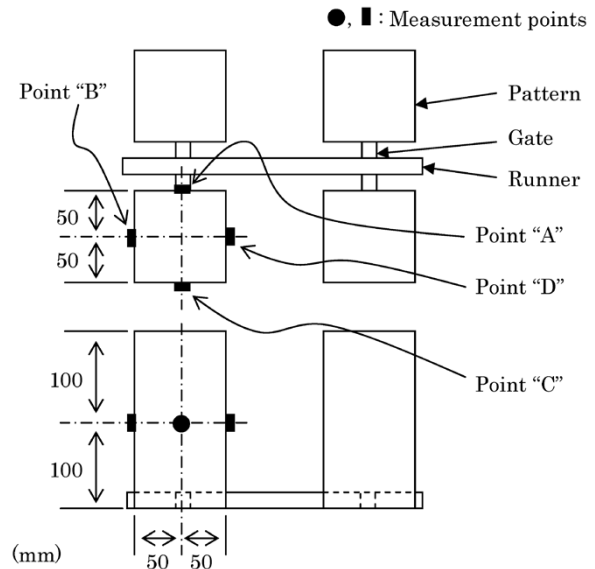


図7 ひずみ，圧力の測定位置

Fig. 7 Measurement points of strain and pressure

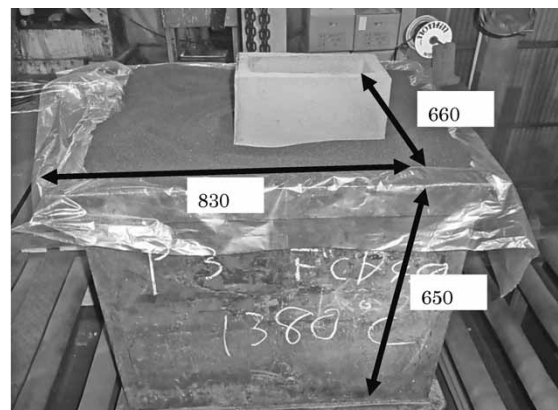
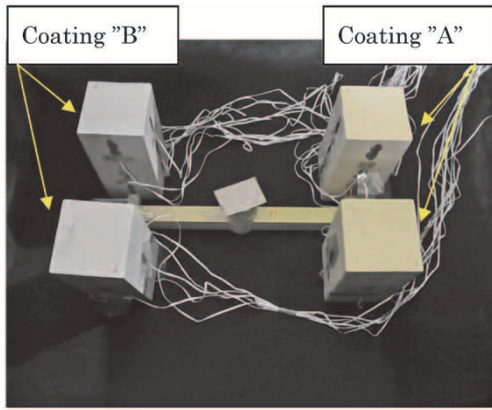
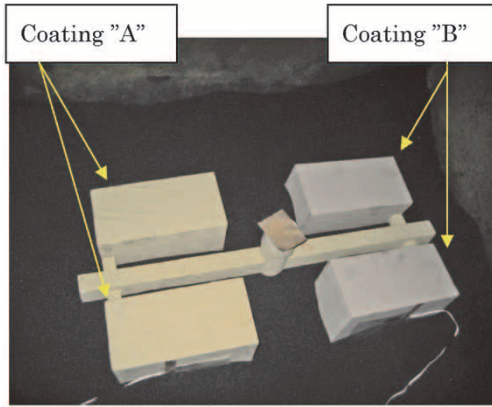


図8 フラスコの外観

Fig. 8 Appearance of flask



(a) Normal configuration



(b) Horizontal configuration

図9 フラスコ内の模型の配置

Fig. 9 Configurations of patterns in flask

測定は縦方向の配置時に行った。

造型では、はじめにフラスコの内底面から高さ120mmまでけい砂 (JIS\_5号) を敷き、その上に模型、湯道などを配置した。ひずみゲージを結線して測定開始後、模型が埋まる高さ (内底面から320mm) まで砂を投入して1G (約40Hz) の上下振動を30秒加えた。その後、フラスコ上面まで砂を投入して同じ条件で振動を加えた。加振終了後にフラスコ上面にビニールシートを被せ、フラスコ下部から内部の空気を抜いて0.038MPa減圧した。減圧開始から約3分後、1,380℃の溶湯を12秒間で注ぎ込んだ。なお、減圧は注湯15分後まで続いた。

注湯の約16時間後にフラスコ内から鋳物を取り出し、ショットブラスト、不要部の切除を行った後に3次元デジタイザにて形状を測定した。

### 3. 実験結果と考察

図10に造型中の圧力の変化を示す。2度の砂投入、加振によって砂圧は上昇し、振動停止後に安定した。フラスコ底面からの高さが同じでも砂圧には分布があり、最大となるA点 (堰 (せき) 側) では5 kPaとなる。

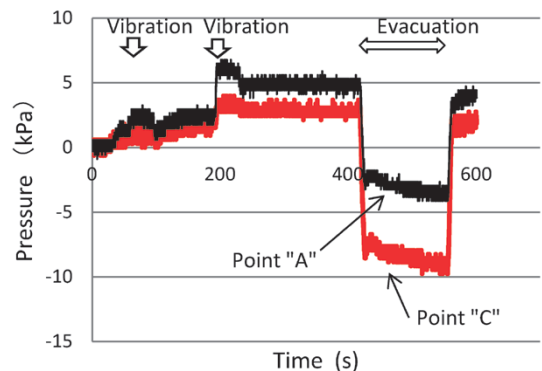
振動停止後に減圧すると、模型側面の圧力は急激に減少して負圧 (模型側面を外側に引っ張る力) となった。減圧すると砂層の上表面が一様に下がることから、砂の充填密度は上がっているが、模型の側面を砂が押し付ける力は減じたといえる。

以上から、模型が砂から受ける圧力は、振動充填時に

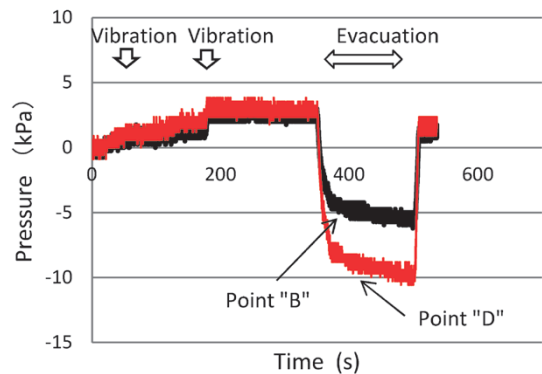
正圧、脱気時に負圧となること、模型の向き (配置) によって絶対量が変わることがわかった。

図11に造型中の模型側面の鉛直方向ひずみの変化を示す。なお、このひずみは、式 (1) で求めた $R=1.05$ を式 (2) に代入して求めた値である。砂の投入、振動に伴って鉛直方向のひずみは圧縮となり、その絶対量は増加した。さらに減圧すると、前述したように模型側面は負圧に転じるが、鉛直方向の圧縮ひずみは増加した。これは、試験体全体が鉛直方向に圧縮される効果のほうが、側面を負圧で引っ張る (塗型が曲げ変形して表面に引張ひずみが生じる) 効果より支配的なためと考えられる。

模型の初期形状と鋳物の最終形状を比較した。測定の様子、およびデータ処理例として鋳物の形状 (分布は模



(a) Pressure at point "A" and "C"



(b) Pressure at point "B" and "D"

図10 造型中の圧力の変化

Fig.10 Change of pressure during molding

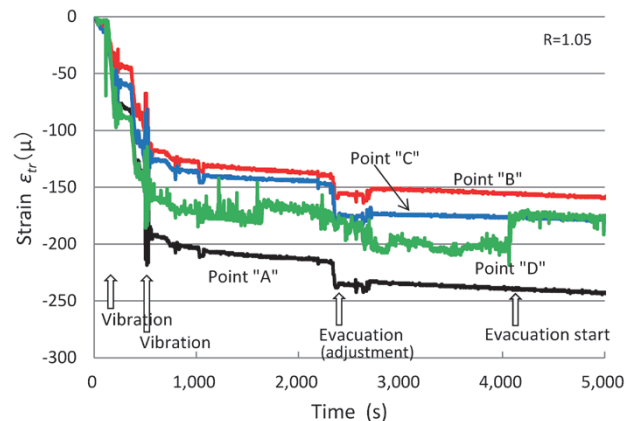


図11 造型中の模型表面のひずみ変化

Fig.11 Change of strain at pattern surface during molding (Coating "A")

型との寸法差)を図12に示す。図中の代表点(①~⑦)における模型と鋳物の厚みの差を求め、①の値を高さ方向の収縮量、②から⑦の平均値を横方向の収縮量として整理した。その結果を図13に示す。

塗型Aを用いた場合、縦配置の時は、模型より鋳物のほうがやや大きくなり、横配置の時は、鋳物のほうが小さくなる。一方、Aより強度の高い塗型Bを用いた場合、模型と鋳物の形状差は小さくなる(収縮率±0.8%以下)が、同じ条件でも模型より鋳物が膨張する場合と収縮する場合があります、傾向が一致していない。このことから、塗型あるいは鋳込み姿勢によって、鋳物の最終形状は元の模型より膨張する場合と収縮する場合がありますことがわかった。

本実験に用いた材料JIS\_FC250は、凝固温度から常温までに約1%熱収縮することから、熱収縮だけを考えると、鋳物は造型終了時の模型形状より約1%収縮するはずである。図11に示したひずみの測定結果から、造型時の模型変形は数十μmオーダーであり、それを考慮しても、鋳物の最終形状は模型の初期形状(造型前)より小さくなるはずである。つまり、模型より大きい鋳物ができる場合、造型終了から凝固完了までの間に、何らかの理由で模型、もしくは模型と置換した溶湯の領域が拡大したと考えられる。

EPCの場合、溶湯による圧力(湯の流れによる動圧、ヘッド差に伴う静圧)、または発泡樹脂の燃焼で生じるガスの圧力<sup>6)</sup>によって、模型と置換した溶湯の領域、つまり外表面の塗型(以下塗型殻)を広げようとする内

圧が生じる。それに対し、前述したように周囲の砂は塗型殻の変形を抑制しているが、砂充填が不十分で砂と塗型殻表面に微小な隙間ができたり、砂の形状保持力(くさび効果)が弱い場合、塗型殻は広がることできる。このことから、鋳込み姿勢(縦置きか横置きか)による変形量の違いは、溶湯による圧力(流体力)の変化、塗型ごとの変形量の違いは、内圧に対する変形抵抗、すなわち塗型殻の剛性の違いの影響という仮説が成り立つ。

例えば、塗型殻(塗型“A”)に相当する、ヤング率200MPa、厚さ1.5mm、100×200mmの面が、静圧に相当する0.04MPaの圧力を受けた時の最大たわみを求めると、4辺固定板の問題<sup>7)</sup>と仮定しても約170mmである。このことから、溶湯による圧力または発泡樹脂の燃焼ガス圧による塗型殻の変形を周囲の砂が支えていることがわかる。

これまで述べてきたように、鋳物の最終形状を予測する上では、造型中の振動や減圧といった条件に加え、注湯以降の溶湯による圧力や燃焼ガス圧、それに対する変形抵抗力(塗型の強度や、砂による形状保持力)の影響を把握する必要のあることがわかった。また、燃焼ガス圧の影響を減じるためには塗型の通気度も問題になる。従来は、残渣(さ)欠陥や湯回り不良対策として通気度が研究されてきた<sup>8)</sup>が、鋳物形状予測の観点でも今後の検討が必要と考えられる。

むすび=EPC造型中の試験体表面の圧力とひずみを測定するとともに、発泡樹脂模型の形状と鋳物の最終形状を比較することで、以下の結論を得た。

- 1) 造型中の振動、減圧によって、模型表面の圧縮ひずみは増加する。
- 2) この圧縮変形に凝固・冷却時の収縮変形が加わるにも関わらず、元の模型より鋳物が大きくなることもある。
- 3) 以上より、鋳造中の溶湯による圧力や発泡樹脂の燃焼で生じるガスの圧力が、鋳物の最終形状に大きな影響を与えていることが示唆された。

今後は、溶湯の動圧を含めた流体力や、燃焼ガス圧が鋳物形状に与える影響を調査する。

最後に、発泡樹脂およびその圧縮強度データを提供していただいた(株)ジェイエスピーに感謝の意を表します。

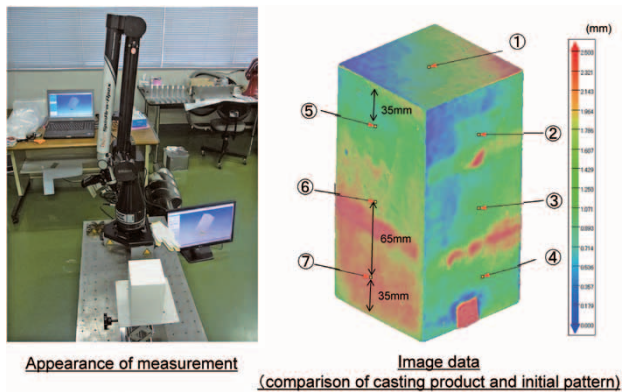


図12 3次元形状測定機による測定

Fig.12 Measurement by coordinate measuring machine

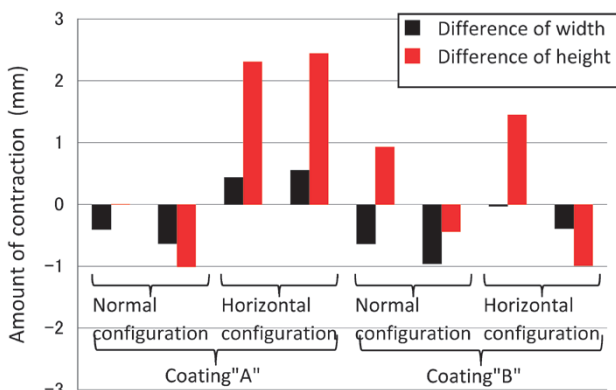


図13 製品形状に与える鋳造条件の影響

Fig.13 Effects of casting conditions on product shape

#### 参考文献

- 1) 池永 明ほか. 鋳物. 1992, Vol.60, No.8, p.524-528.
- 2) 山本康雄ほか. 鋳物. 1991, Vol.63, No.12, p.965-970.
- 3) 眞鍋豊士ほか. 高知県工業技術センター研究報告. 1995, No.26, p.131-137.
- 4) 堤 一之ほか. 日本鋳造工学会第161回全国講演大会講演概要集. 2012, p.149.
- 5) 堤 一之ほか. 日本鋳造工学会第162回全国講演大会講演概要集. 2013, p.81.
- 6) 丸山 徹ほか. 鋳造工学. 2006, Vol.78, No.2, p.53-58.
- 7) 土木学会. 構造力学公式集. 第2版. p.341.
- 8) 眞鍋豊士ほか. 鋳造工学. 2004, Vol.76, No.10, p.844-849.