

## 研究論文

## 凝固時の体積変化を考慮した厚肉球状黒鉛鑄鉄実体モデルのひけ巣発生位置予測

宮本 諭卓\* 糸藤 春喜\*<sup>2</sup>

## Research Article

J. JFS, Vol. 90, No. 8 (2018) pp. 450 ~ 456

## Prediction of Shrinkage Cavity Occurring Position with Consideration of Volumetric Change during Solidification of Heavy Section Ductile Cast Iron

Yutaka Miyamoto\* and Haruki Itofuji\*<sup>2</sup>

The purpose of this research is to study the prediction method of shrinkages occurring in sample ductile cast iron castings. Sample castings had dimensions of 1000 × 1000 × 750 mm and wall thickness 75 mm, and convexities of different heights at each side wall. In order to investigate expansion / contraction behavior during solidification, the critical reaction point of solidification curves was obtained by the tangent line method, and the expansion / contraction amount of change points at the time of solidification was calculated from chemical composition and initial temperature. The expansion / contraction degree was calculated by dividing the amount of expansion / contraction at each reaction stage by the solidification ratio. As described above, it is possible to quantify the behavior of expansion / contraction occurring during solidification. The quantified value was input into simulation software as expansion / contraction amount. In this study, the solidification curves of three different test blocks pre-measured to have a modulus of 2 cm, 4 cm, and 10 cm were compared. In actual castings, shrinkage was not observed in the cross-section of the convex portion of 250 mm. On the other hand, shrinkage cavities were observed in other convex parts. The shrinkage occurred above the final coagulation position. Moreover, shrinkage amount decreased as the height of the convex portion increased. The analysis results showed that the method used in this study well suits the actual shrinkage tendency. On the other hand, the conventional prediction method adopted in this study was not suitable. As a result, by applying the expansion / contraction behavior to the contraction prediction, the shrinkage cavity exhibits the same tendency as the actual contraction and the contraction distribution area decreases as the convexity increases. Moreover, the shrinkage occurs at the same position as the actual casting.

**Keywords** : ductile cast iron, heavy-section, CAE, simulation, shrinkage

## 1. 緒 言

厚肉鑄鉄鑄物への設計要求は年々厳しくなり、過酷な使用条件へも積極的に適用できるよう対処し、製造されている。

それに伴い、検査項目は増加して、ひけ巣などの鑄造欠陥の全面検査や、鑄物内部でも JIS 規格を満足することが要求され、ひけ巣の発生が無いこと、実体強度の保障を要求されることが少なくないようである。

このような状況において、凝固解析を始めとする各種鑄造シミュレーションを鑄造品の製造プロセスへ活用することは必要不可欠となっており、鑄造方案を検討する事前の解析はもちろんのこと、鑄造欠陥の発生を究明する事後解析にも利用されている。

球状黒鉛鑄鉄鑄物のひけ巣の発生を予測する場合には、一般に各ソフトウェアで用意された、ガス発生、弾塑性応力、材料物性などを考慮し、解析精度の向上を図った独自の予測法<sup>1~3)</sup>を用いる。これら複数の予測法が開発されているのは、裏を返すとどのケースにでも対応できる画一的な予測法が存在していないためであるとも考えられる。

球状黒鉛鑄鉄と他の材質の凝固時における大きな違いは、黒鉛晶出による体積膨張を有しつつ、かゆ状凝固する点であり、この特有の凝固形態が影響し、鑄物内外部にひけ巣を発生させたり、させなかったりするものと考えられる。

実際に、球状黒鉛鑄鉄のひけ巣発生状況は化学組成が同じであっても、鑄物形状が平板状と塊状の場合では大きく異なってくるということが知られており、形状係数と鑄物モジュ

受付日：平成30年1月12日，受理日：平成30年5月11日 (Received on January 12, 2018; Accepted on May 11, 2018)

\* (株)宇部スチール Ube Steel Co., Ltd.

\*<sup>2</sup> 東北大学 ACS センター Adstefan Casting Solution Center, Tohoku University

ラスから、無押湯安全指数を算出し、無押湯方案でひけ巣が発生しない鋳物が製造可能であるかを手計算で求める方法が利用されている<sup>4)</sup>。

また、予測精度を向上させるにはひけ巣発生位置精度も検討すべき項目であると考え、これは前報にて、体積変化を考慮したひけ巣予測手法を検討した際に、供試材に確認されたひけ巣発生位置が凝固解析上での最終凝固位置よりもやや上に発生する傾向にあったためである<sup>5)</sup>。

これまでひけ巣発生位置の予測には、重力方向の追加や溶鋼流動などが検討されており、実際に鋼鋳物などに適用されているが<sup>6,7)</sup>、発生位置と同時に鋳鉄の冶金学的特徴である膨張・収縮を織り交ぜ検討した例は少ない。

そこで、本研究では厚肉球状黒鉛鋳鉄の実体モデルを鋳造し、それに対してひけ巣発生状況とひけ巣発生位置の両方を考慮した解析を実施し、ひけ巣観察結果及び一般的な解析法と比較することで、本予測法の精度について検討を行う。

## 2. 実験方法

### 2.1 ひけ巣確認用実体モデルの作製

本研究では、ひけ巣が凝固解析上の最終凝固部よりも上

方に発生する現象を確認しやすくするため、平板を縦にした形状を基本とし、ひけ巣発生傾向を比較するため、側面に厚みの異なる4つの凸形状を付けることとした。また、凝固特性以外の要因のバラつきを抑えるため、それらを一体にして鋳造した。実体モデルの形状及び鋳造方案を Fig. 1 に示す。実体モデルは、伸び尺 8/1000、1000 角 × 高さ 650 × 厚み 75 (mm) の中空四角柱の各側面に、250 角 ×

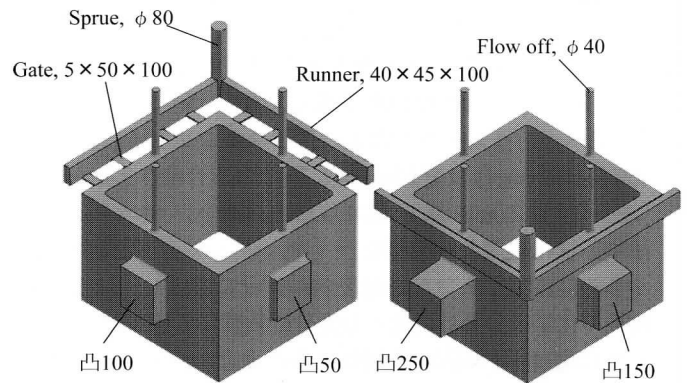


Fig. 1 Casting design for test block. (Unit ; mm)  
実体モデルの鋳造方案。

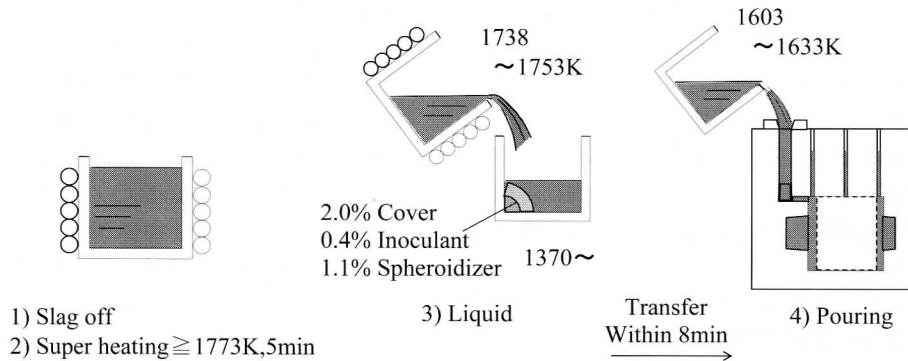


Fig. 2 Temperature and time schedule for melting, liquid treatment and pouring.  
溶解、溶湯処理及び鋳込み時の温度と時間条件。

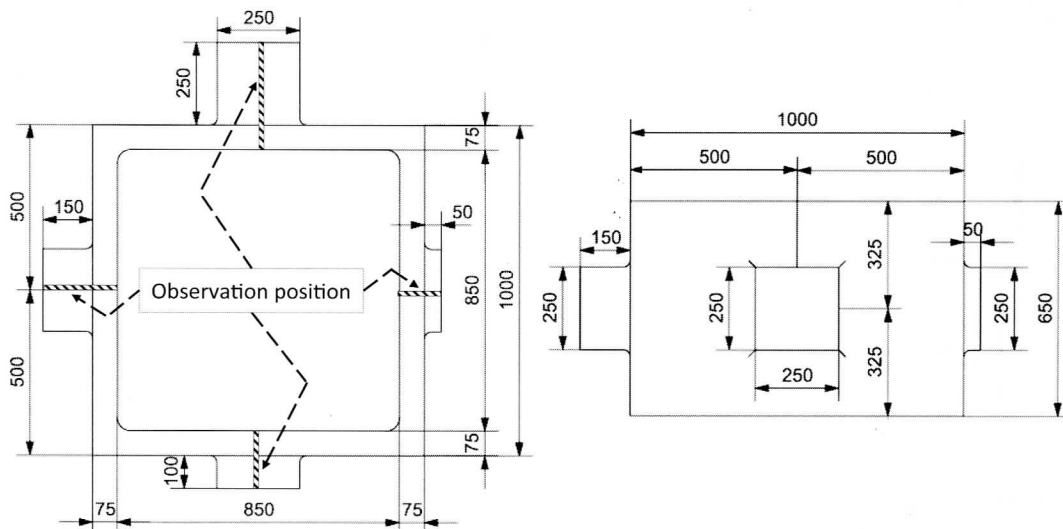


Fig. 3 Center section observation position of convex part.  
実体モデルのひけ巣確認位置。

厚み 50, 100, 150, 250 (mm) の凸形状を付けた形状である。揚がりは  $\phi 30$  (mm) とし、4 か所に設置した。鑄物の重量は 1,525kg である。鑄型は珪砂にフラン樹脂 0.8mass% (対砂)、硬化剤を 40mass% (対樹脂) の割合で混練したものを使用し、鑄型壁の移動が無いよう鑄型強度は 4.5MPa 以上になるようにした。塗型は水性の黒鉛系を使用し、8 時間以上の自然乾燥を行った後、180°C の熱風で 24 時間以上の強制乾燥を行った。

溶解及び鑄込み方法を Fig. 2 に示す。溶解は、低周波誘導炉を用い、製品戻り材を溶解材料とした。溶け落ち後、1723K に到達した時点で成分調整を行い 1770K 以上で 5 分間スーパーヒートした後、自然降温させ出湯した。Fe-45%Si-5.5%Mg 合金を 1.1mass%、Fe-75%Si 合金を 0.4mass%、カバー材を 2.0mass% の順で取鍋内に置き、サンドイッチ法で球状化処理及び接種を行った。鑄込みは、反応終了後から鑄込み完了までは 8 分以内に行うこととし、球状化処理後の化学成分分析は発光分光分析装置にて行った。

ひけ巣は、4 か所の凸部の中心を垂直にバンドソーで切断し表面を研磨した後、その面に紙を当て、擦り取ることで形状を転写し確認を行った。確認位置を Fig. 3 に示す。

## 2.2 ひけ巣解析

本研究では前報<sup>5)</sup>と同様に、凝固中の膨張収縮挙動を定量的に算出し鑄造シミュレーションに適用することで、ひけ巣発生の予測を行う。まず、凝固中の反応がどの温度及びタイミングで発生しているかを決定するために、実測凝固曲線から変曲点を読み取り、それらを各反応の開始と終了とした。反応は鑄込み完了時点から順に、液体収縮、初晶反応及び液体収縮、液体収縮、共晶反応、共晶セル間オーステナイトの収縮に発生することとした。

今回は事前に測温した Fig. 4 に示す鑄物モジュラス 2cm, 4cm, 10cm の 3 つの異なる供試材の実測凝固曲線からそれぞれ各反応の温度と固相率の関係を求めた。鑄物モジュラス 2cm 及び 10cm は前報<sup>5)</sup>の Fig. 2(a) Basic shape 及び Fig. 8 の Mc=10cm ブロックに相当し、鑄物モジュラス 4cm は本研究で新たに追加したものである。また、実

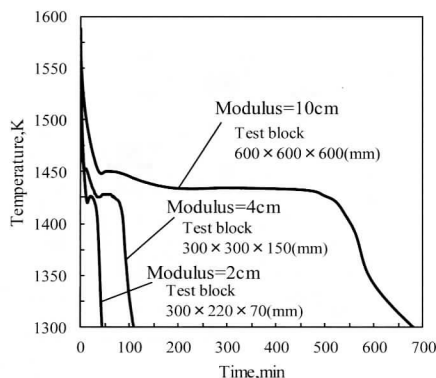


Fig. 4 Solidification curves of blocks with modulus 2, 4, 10cm.

鑄物モジュラス 2, 4, 10cm 供試材の凝固曲線。

測凝固曲線の変曲点の決定には接線法を使用し、固相率 0.0% を鑄込み完了時点とした。

次に、凝固完了までに発生する体積収支を算出するために、実体モデルの化学組成と溶湯の鑄型内初期温度から理論的体積変化量を求めた。理論的体積変化量は、化学組成の C, Si 量及び鑄込み完了後の鑄型内初期温度を (1) 式に代入し求めた<sup>8)</sup>。

$$TV = Sl + Epg \text{ (or } Sp\gamma) + Eeg + Sey \quad \dots (1)$$

TV = 体積変化量

Sl = 液体収縮量 (vol%)

Epg = 初晶黒鉛による膨張量 (vol%)

Sp $\gamma$  = 初晶オーステナイトによる収縮量 (vol%)

Eeg = 共晶黒鉛晶出による膨張量 (vol%)

Sey = 共晶オーステナイト晶出による収縮量 (vol%)

化学組成が過共晶組成の場合は Epg, 亜共晶組成の場合は Sp $\gamma$  を用いる。

また、各項目は以下の (2), (3), (4), (5), (6) 式で求められる。

$$Sl = [(Ti - 1423) / 100] \times 1.5 \quad \dots (2)$$

$$Epg = (Cx - Ce) / (100 - Ce) \times 3.4 \times 100 \quad \dots (3)$$

$$Sp\gamma = (Ce - Cx) / (Ce - C\gamma) \times -3.5 \quad \dots (4)$$

$$Eeg = [(1 - Sl) / 100] \times [(100 - Cx) / (100 - Ce)] \times [(Ce - C\gamma) / (100 - C\gamma)] \times 3.4 \times 100 \quad \dots (5)$$

$$Sey = [(1 - Sl) / 100] \times [(100 - Cx) / (100 - Ce)] \times [(100 - Ce) / (100 - C\gamma)] \times -3.5 \quad \dots (6)$$

Ti = 鑄型内初期温度 (K)

Ce = 共晶点の炭素量 (mass%)

Cx = 溶湯の炭素量 (mass%)

C $\gamma$  = オーステナイトの炭素固溶量 (mass%)

液体収縮量は 1.5vol%/100K とした<sup>8,9)</sup>。さらに、Ce 及び C $\gamma$  については以下の (7), (8) 式で求められる。

$$Ce = 4.27 + Si / 3 \quad \dots (7)$$

$$C\gamma = 2.045 - 0.178 \times Si \quad \dots (8)$$

Si = 溶湯の珪素量 (mass%)

実体モデルの理論的体積変化量を算出後、鑄物モジュラス 2cm, 4cm, 10cm の各反応の温度と固相率の関係より、反応時の膨張収縮量の割り振りを行った。液体収縮量は初晶反応と同時に発生する区間とその前後に 3 分割しそれぞれの収縮度を算出した。共晶オーステナイト収縮量も同様に、共晶収縮区間とセル間オーステナイト収縮区間の 2 つに分配されることとし、それぞれの収縮度を算出した。

以下に、液体収縮と共晶オーステナイト収縮の分配式を示す。

$$Sl1 = Srl2 / SrE, \quad Sl2 = (Srl3 - Srl2) / SrE, \\ Sl3 = (SrE - Srl3) / SrE$$

Sl1 = 鋳込み完了から初晶反応までの液体収縮量分配率

Sl2 = 初晶反応中の液体収縮量分配率

Sl3 = 初晶反応終了から共晶反応までの液体収縮量分配率

Srl2 = 初晶反応開始時の固相率

Srl3 = 初晶反応終了時の固相率

SrE = 共晶開始時の固相率

$$Sey = (Srbc - SrE) / (1 - SrE)$$

$$Sbcy = (1 - Srbc) / (1 - SrE)$$

Sey = 共晶反応時のオーステナイト収縮分配率

Sbcy = セル間オーステナイト収縮分配率

SrE = 共晶開始時の固相率

Srbc = セル間オーステナイト収縮開始時の固相率

**Table 1 Physical properties and heat transfer parameters for test block.**

物性値及び境界条件.

	Casting	Mold
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7000	1550
Specific heat (kJ/(kg·K))	1.047	1.047
Thermal conductivity (W/(m·K))	20.93	1.05
Latent heat (kJ/kg)	209	-
Heat transfer coefficient (W/(m <sup>2</sup> ·K))	Casting/Mold:4186.2	

凝固解析に使用する物性値と境界条件を **Table 1** に示す。これらは、解析ソフト初期値及び一般的な値を選択した。また、3次元モデルのメッシュサイズは5mmとした。また、解析結果比較のために修正温度勾配法 (Niyama criterion) と、使用するソフトウェアで一般的に使用される方法で凝固収縮量の解析を2条件行った。凝固収縮率を区間一定の3.0%とし、流動限界固相率を0.80 (表皮形成型凝固想定) と0.15 (かゆ状凝固想定) に設定した。

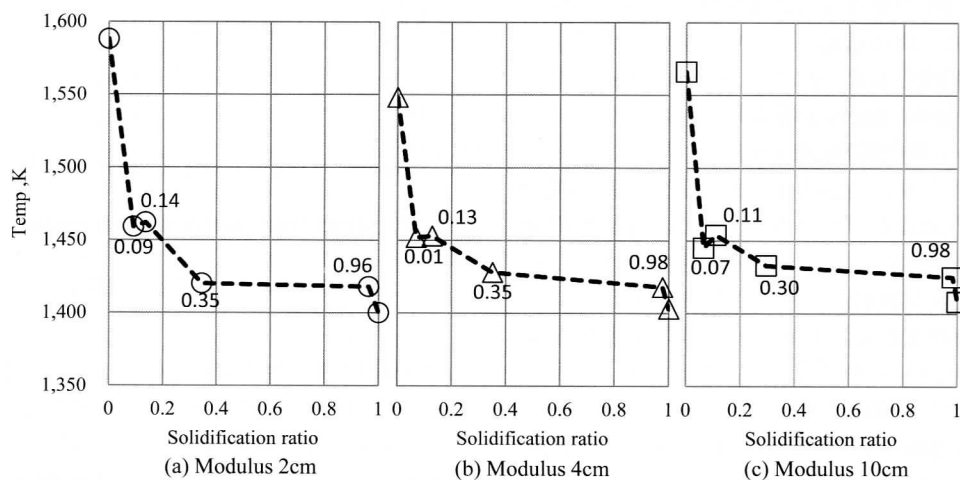
解析結果については、凝固収縮量と本研究の結果を区別するため、本研究の解析結果指標を修正凝固収縮量 (I & M's criterion) として3項に示すこととする。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 膨張収縮挙動の算出

鋳物モジュラス2, 4, 10cmの凝固中における各反応時の温度と固相率の関係を **Fig. 5** に示す。鋳物モジュラスが大きくなり凝固完了時間が長くなると共晶温度が上昇していることがわかる。また、凝固時間の異なる冷却曲線を固相率で整理することで、凝固中の各反応区間の割合が同一の指標で確認できるようになった。

次に各鋳物モジュラスの理論体積変化量を **Table 2** に示す。いずれも凝固完了までの体積収支は合計で正であり、理論上では押湯が無くともひげ巣が発生しない化学組成であることが確認できた。

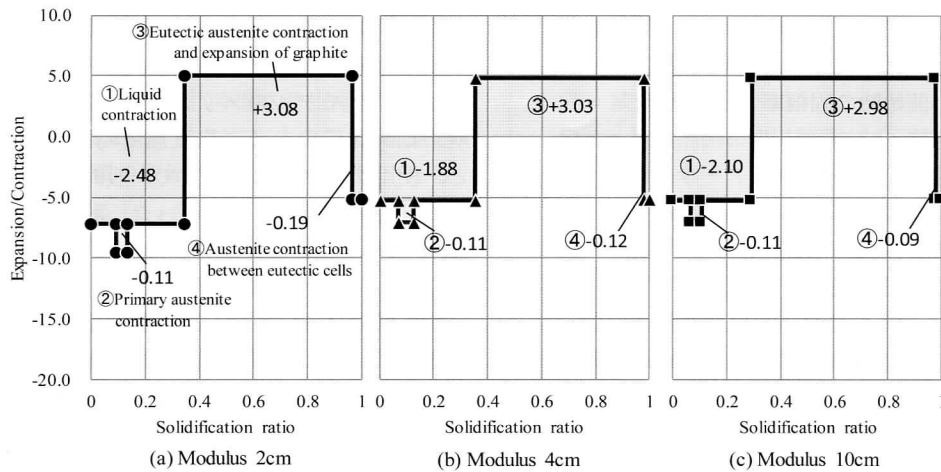


**Fig. 5 Relationship between temperature and solidification ratio at each reaction of blocks with modulus 2, 4, 10cm.**

鋳物モジュラス2, 4, 10cm 供試材の各反応における温度と固相率の関係。

**Table 2 Theoretical volumetric change in blocks with modulus 2, 4, 10cm. (vol%)**  
 鑄物モジュラス 2, 4, 10cm 供試材の理論体積変化量. (vol%)

Modulus	①Liquid contraction	②Primary austenite contraction or graphite expansion	③Contraction of austenite and expansion of graphite		④Austenite contraction between eutectic cells	Volume change from pouring to completion of solidification
			Contraction	Expansion		
2cm	-2.48	-0.11	-3.16	6.24	-0.19	0.30
5cm	-1.88	-0.11	-3.25	6.28	-0.12	0.92
10cm	-2.10	-0.11	-3.28	6.26	-0.09	0.68



**Fig. 6 Relationship between expansion and contraction at each reaction of blocks with modulus 2, 4, 10cm.**  
 鑄物モジュラス 2, 4, 10cm 供試材の各反応における膨張収縮の関係.

Fig. 6 に凝固完了までの膨張収縮挙動を示す。横軸の固相率に対し、縦軸は膨張収縮度を示している。膨張収縮度は、理論体積変化量を各反応時の固相率で割ることにより算出している。各鑄物モジュラス間で相関性が確認出来るのは、凝固末期に発生する共晶セル間オーステナイトの収縮区間であり、鑄物モジュラス 2cm よりも 4cm, 10cm の方が収縮は小さくなる傾向が確認できる。実体モデルのひけ巣確認結果では凸が大きくなるとひけ巣が減少しており、今回の研究では実際の現象と算出した膨張収縮挙動の相関性は一致するが、今後さらに詳細な検討が必要である。

3.2 実体モデルの鑄造結果

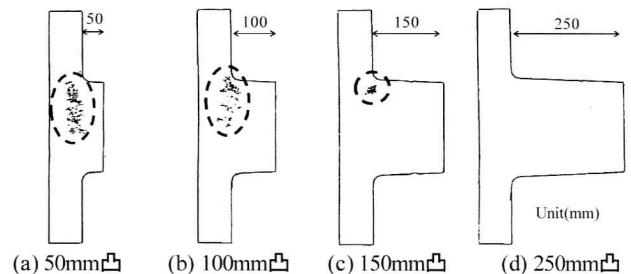
Table 3 に化学組成を示す。表より、FCD450 相当の組成で鑄込みが出来ており、Mg の歩留りも良いことがわかる。

Fig. 7 に実体モデル凸部中心断面のひけ巣発生状況を示す。ひけ巣の発生面積は凸が大きくなると減少する傾向にあり、250mm 凸ではひけ巣は発生していない。ひけ巣発生位置は高さ方向中心よりも上方に発生しており、凸が大きくなると発生位置は凸から遠ざかる結果となった。また、各凸部の鑄物モジュラスは、凝固時間 = 係数 × 鑄物モジュラス二乗の相関関係より算出した場合、凝固時間を凝固解析結果から適用し、係数を 5.15<sup>11)</sup> とすると、50mm 凸が 4.6cm, 100mm 凸が 4.9cm, 150mm 凸が 5.2cm, 250mm 凸が 5.6cm である。

実体モデルは、実際の厚肉球状黒鉛鑄鉄鑄物を想定した鑄造型プロセスにおいて、ひけ巣発生要因となり得る

**Table 3 Chemical composition of test block. (mass%)**  
 実体モデルの化学組成. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ce	Mg	CE
3.41	2.41	0.28	0.038	0.012	Trace	0.047	4.21



**Fig. 7 Shrinkage distribution in convex section of test block.**

実体モデル凸部のひけ巣発生位置.

ガスや鑄型壁の移動などを極力排除して作製しているため、凸部中心断面のひけ巣を凝固特性によるものと考えた場合、無押湯安全指数の報告にもあるように実際の鑄物においては、モジュラスが大きく、鑄物形状が塊状になるほどひけ巣の発生が抑制されることが本研究でも確認できたことになる。

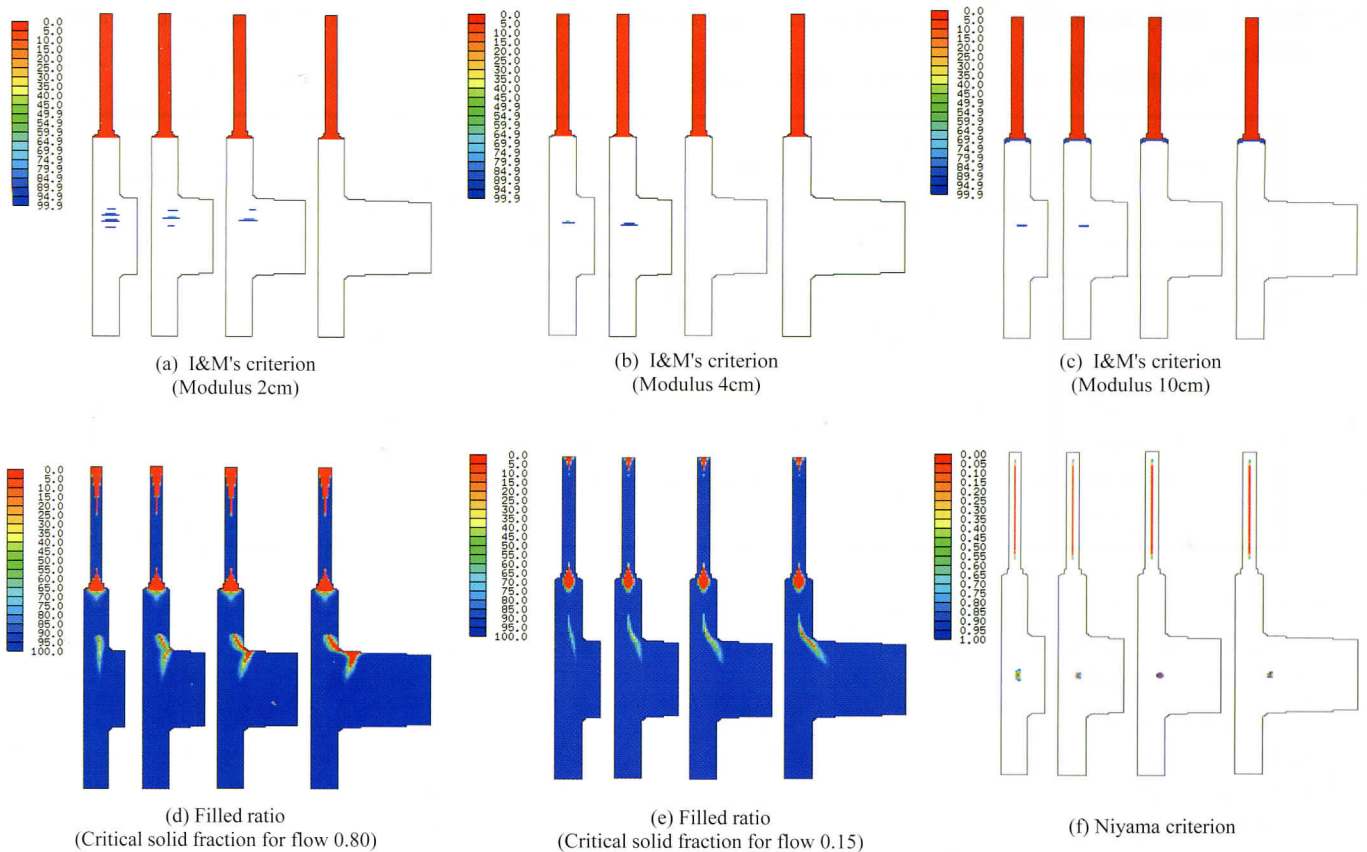


Fig. 8 CAE analysis results of test block.  
実体モデルのひげ巣解析結果.

### 3.3 ひげ巣解析結果

Fig. 8(a), (b), (c) に修正凝固収縮量の解析結果を示す。なお、ひげ巣発生確認位置は実体モデルと同断面であり、ひげ巣は、解析結果の数値において0.0～99.9%の部位に相当することとした。Fig. 8(a), (b), (c) を比較すると、ひげ巣発生予測状況は、適用した鑄物モジュラスに関係なく、実体モデルと同様に凸が大きくなるほどひげ巣発生予測量が減少する傾向にある。また、Fig. 8(a), (b), (c) の順に、適用した鑄物モジュラスが大きくなるほど、全体のひげ巣発生予測量は減少することがわかる。つまり、この結果から、適用する鑄物モジュラスの大小では、各凸部のひげ巣発生予測傾向は変化せず、ひげ巣発生予測量のみ増減することがわかった。また今回、実体モデルのひげ巣確認結果に最も近い結果となったのは鑄物モジュラス2cmの場合であった。3.2項で述べたように、凝固解析での凝固終了時間から求めた実体モデル各凸部の鑄物モジュラスは、5cm前後としており、ひげ巣予測解析においては、想定よりも小さな鑄物モジュラスの膨張収縮挙動を適用していることになるが、本研究では、実体モデルの凝固時に測温を行っておらず、実際の膨張収縮挙動を算出していないので、適用した挙動が実際とは異なると結論付けることは出来ない。現段階で鑄物モジュラス2cmが最も近い結果になった理由について考察すると、実体モデルの

凝固は各凸部に向かい進行し、それぞれが独立して凝固するが、その際の膨張収縮挙動が、供試材から算出した鑄物モジュラス2cmの膨張収縮挙動に近いのではないかと考えることができる。膨張収縮挙動は固相率割合で示すため、無次元化されており、凝固完了時間が異なる場合でも類似した挙動が算出される可能性はあり得るためであるが、今後さらに詳細な検討が必要である。

Fig. 8(d), (e), (f) に2種類の凝固収縮量の解析結果及び修正温度勾配法の解析結果を示す。表皮形成型凝固を想定したFig. 8(d)は、凝固解析上での最終凝固部よりも上方にひげ巣の発生予測位置を示しているものの、鑄物の凸部上部に外びげが発生予測されており、凸が大きくなるほど外びげ予測量が増加している。

かゆ状凝固を想定したFig. 8(e)は、鑄物内部にひげ巣発生予測を示しているが、発生予測位置は実体モデルのひげ巣発生位置よりも更に上方であり、Fig. 8(d)と同様に凸が大きくなるとひげ巣発生予測量が増加する結果となった。

凝固収縮量解析では、凝固収縮率と流動限界固相率を制御することで、凝固特性と流動現象をモデル化し、計算を行っている。今回、ひげ巣発生予測傾向が実体モデルの結果と逆の傾向を示したのは、凝固収縮率を一律に設定したことにより、凝固部の体積が大きくなるに従い収縮量が増

**Table 4 Analysis condition of prediction methods and characteristics of shrinkage cavity in actual castings and analysis.**

各予測法の設定及び実際と解析のひけ巣発生の特徴.

Item name	Analysis condition			Shrinkage cavity		
	Critical solid fraction for flow	Contraction ratio (%)	Direction of gravity	Occurrence tendency (Modulus :Small → Large)	Form	Occurrence position
Actual test block	-			Large → Small	Internal micro shrinkage	Above the final solidification position
I&M's Criterion	1.00	Expansion / contraction behavior calculation	Applied	Large → Small	Internal micro shrinkage (Qualitative)	Above the final solidification position
Niyama criterion	-	-	-	Large = Small	(Qualitative)	Final solidification position
Mushy	0.15	3	Applied	Small → Large	Internal micro shrinkage (Quantitative)	Above the final solidification position
Skin formation	0.80	3	Applied	Small → Large	External shrinkage (Quantitative)	Above the final solidification position

加したためと考えられる。

ひけ巣発生予測位置は、表皮形成型凝固・かゆ状凝固のいずれも実体モデルの結果よりも更に上方になっている。これは、流動限界固相率を制御して凝固特性を変えたとしても球状黒鉛鑄鉄のひけ巣位置を予測することは困難であることを示している。

Fig. 8(f) の修正温度勾配法では凸の大きさに関係なく全ての凝固解析上での最終凝固部に指標が表示されており、実体モデルのひけ巣発生傾向とは異なる。修正温度勾配法は、温度勾配による溶湯補給程度を評価する指標であり、ひけ巣発生予測を直接判断できないことが実体モデルのひけ巣発生傾向と一致しない要因と考えられる。

各予測法の解析設定条件及び実体モデルと各予測法のひけ巣発生傾向を **Table 4** に示す。本研究のひけ巣発生予測は凝固収縮量、流動限界固相率、重力方向を考慮したこれまでの予測法よりも、実体モデルのひけ巣発生傾向に近いものになった。また本研究では、ひけ巣発生位置が異なる要因と考えられる、鑄型とのエアギャップ・鑄込み後の温度分布・溶鋼の対流等は考慮していないため、これらとの組み合わせについてや、ひけ巣発生予測の定量的評価、適正な膨張収縮挙動の選定について今後の検討が必要である。

#### 4. 結 言

厚肉球状黒鉛鑄鉄鑄物のひけ巣発生位置を予測するために、実体モデルを作製し、実際のひけ巣発生傾向を確認した後、凝固・収縮挙動を算出し、鑄造シミュレーションソフトを用いて解析し、得られた結果について検討を行った。また、同一モデルにおいての他解析を比較した結果、次の結論を得た。

(1) 膨張収縮挙動を凝固解析に適用することで、ひけ巣発生状況は実体モデルと同様に、凸部が大きくなるとひけ巣発生予測量が減少する傾向を示す。

(2) 鑄物モジュラスが 2, 4, 10cm の膨張収縮挙動を適用し比較した場合、凸部のひけ巣発生予測傾向は変化せず、ひけ巣発生予測量は鑄物モジュラスが大きくなると減少する。また、実際のひけ巣発生に最も近い結果は鑄物モジュラス 2cm を適用した場合であった。

(3) 膨張収縮挙動を凝固解析に適用することで、ひけ巣は解析上での最終凝固部よりも上方で、実体モデルと同様の位置に発生する。

#### 参考文献

- 1) Sung-Bin Kim, Eung-Soo Kwon, Dong-Hoon Roh and Young-HoonYim: The 14th AFC (2017)
- 2) 佐藤暁拓, 岩根潤, 野本祐春, 大中逸雄: 鑄造工学 **76** (2004) 359
- 3) J. Hajkowski, P. Roquet, M. Khamashta, E. Codina, Z. Ignaszak: ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING **17** (2017) 57 Issue1
- 4) 張博: 素形材 **53** (2012) 21
- 5) 宮本諭卓, 糸藤春喜: 鑄造工学 **90** (2018) 175
- 6) M. Perzyk, A. Kochański, P. Mazurek, K. Karczewski: ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING **14** (2014) 77 Issue4
- 7) A. Gwiżdż, S. Pysz, P. Dworak: ARCHIVES of FOUNDRY ENGINEERING **10** (2010) 67 Issue3
- 8) 張博, 明智清明, 塙健三: 球状黒鉛鑄鉄—基礎・理論・応用 (アグネ) (1983) 203
- 9) S. I. Karsay: Ductile Iron I-Production, Quebec Iron and Titanium (1992) 158-161
- 10) 高橋勇, 内田敏夫, 安斎浩一: 鑄造工学 **78** (2006) 661
- 11) 糸藤春喜: 大物鑄物の方案設計の考え方と実例, 日本強靱鑄鉄協会平成 8 年度技術講習会 (1997)