

研究論文

凝固中の体積変化を考慮したCAEによる厚肉球状黒鉛鑄鉄のひけ巣予測

宮本 諭卓* 糸藤 春喜**

Research Article

J. JFS, Vol. 90, No. 4 (2018) pp. 175 ~ 181

Prediction of Shrinkage Cavity in Heavy-Section Ductile Cast Iron Using CAE Considering Volume Change During Solidification

Yutaka Miyamoto* and Haruki Itofuji**

A new analysis parameter, which is the volume balance during solidification in heavy section ductile cast irons, was adopted to predict shrinkage cavities by computer simulation. To realize higher precision and quantify the behavior of expansion / contraction during solidification, the temperature and solidification ratio of each reaction stage from the start to completion of solidification were determined by the tangent line method. The expansion / contraction amounts of each reaction were calculated from chemical compositions of carbon and silicon and the initial temperature of the test material. Finally, the expansion / contraction degree was calculated by dividing the amounts of the expansion / contraction at each reaction by the solidification ratio. The quantified value was input into the casting simulation software as the expansion / contraction amounts. The result showed better matching compared to the actual shrinkage phenomenon.

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

1. 緒 言

厚肉の球状黒鉛鑄鉄鑄物（以下、大型FCD）は共晶黒鉛膨張圧力及び体積を最大限に利用すると、無押湯にてひけ巣のない健全な鑄物の製造が可能とされている^{1~4)}。しかし、板状鑄物の場合、無押湯条件によるとひけ巣が発生することがあり、全ての形状に無押湯方案が適用できるわけではない。このため実際には、鑄物モジュラス（以下、Mc）や形状係数から無押湯安全指数を求め、無押湯方案の適用可否を判定する方法が取られている^{5~7)}。押湯が必要と判定された場合、鑄鋼と同様な方法で設計される。また、設置する押湯を最小限に抑えるための方案として、自らもひけない熱バランサー方案も報告されている^{8,9)}。しかし、厚肉FCDでは鑄物形状が複雑になるほど、ひけ巣発生部位の事前予測が困難になり、品質仕様において溶接補修が不可の場合には数十ton鑄物であっても再度製造することが余儀なくされ、大きな損失を招くことも少なくはない。この様なリスクを回避するため過剰な押湯を付加し

た方案となり、作業効率や製品歩留りを低下させている場合もある。その要因の一つとして、CAE解析によるFCDの事前ひけ巣予測が困難なことがあげられる。代表的な予測法には、修正温度勾配法、温度勾配法、閉ループ法等があり、材質や製造方法により適当な予測法の選択が可能となっている¹⁰⁾。しかし、これらの解析精度は、表皮形成型凝固で収縮一途の凝固形態を取る鑄鋼鑄物、アルミニウム合金鑄物等に対して確立されている一方で、かゆ状凝固で黒鉛膨張を伴うFCD鑄物に対しては、種々の解析ソフトは開発されているものの^{11~15)}、予測精度が得られていないのが現状であり¹⁶⁾、予測精度を得るためにはFCD特有の凝固形態や体積変化を考慮した解析ソフトウェアが必要と考えられる。

凝固時の体積変化については、測定用の鑄型を用いて鑄物としての膨張収縮を測定した研究や、化学組成などから材料としての膨張収縮を算出する方法などがあるが、理論的に体積収支がプラスになる化学組成であっても実際にはひけ巣が発生するため、あくまで参考指標として鑄造後

受付日：平成29年11月15日，受理日：平成30年1月12日（Received on November 15, 2017; Accepted on January 12, 2018）

* (株)宇部スチール Ube Steel Co., Ltd.

** 東北大学ACSセンター Adstefan Casting Solution Center, Tohoku University

のひけ巣発生傾向評価に用いられている¹⁷⁻²⁰⁾。これは冒頭に述べたような、ひけ巣発生傾向が鑄物の大きさにより異なるという要因が考慮されていないために起こると考えられる。ひけ巣発生傾向が異なるということは、凝固中の膨張収縮のタイミング、割合、量が異なるとも考えられるが、凝固シミュレーションにおいてこれらを定量的に算出し検討している例は少ない。

そこで本研究では、凝固に伴う理論的な収縮及び膨張体積量を求め、それを凝固冷却カーブの変曲点で区切って当てはめたゾーンに数値代入して計算するひけ巣予測法を検討した。

2. 実験方法

2.1 ひけ巣解析

凝固過程に発生する膨張・収縮の挙動を凝固解析にて再現しひけ巣を予測するために、入力値として扱う体積変化の定量化を行った。まず Fig. 1 に示す実測の凝固冷却曲線から接線法にて変曲点を求め、その点の温度及び固相率を求めた。固相率の開始は鑄込み完了時とし、各反応は順番に、①液体収縮→①液体収縮 + ②初晶反応→①液体収縮→③共晶反応→④凝固末期における共晶セル間のオーステナイト収縮が発生することとした。次に C, Si 含有量及び鑄込み完了温度を (1) 式に代入し、理論的な体積変化量を求めた⁵⁾。

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

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%)

Spγ = 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%)

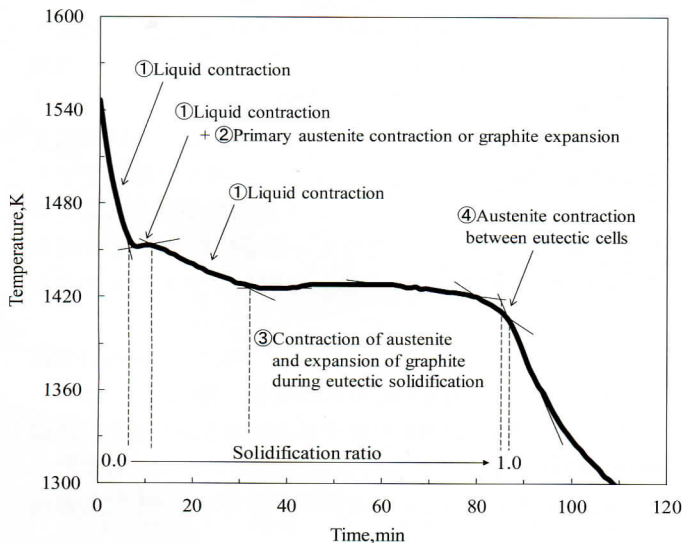


Fig. 1 Critical points of volumetric change in solidification curve of 300×300×150mm sample casting, for example.
凝固曲線における各反応点の例。

ここで、化学組成が過共晶組成の場合は Epg を、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%)

Cγ = オーステナイトの炭素固溶量 (mass%)

ここでの液体収縮量は 100K につき 1.5vol% とした^{1, 5, 21, 22)}。さらに、Ce 及び Cγ 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%)

求めた各反応時の膨張・収縮量をそれぞれの固相率で割ることにより、膨張収縮度を算出した。実際の計算結果は 3 項で示すこととする。

凝固解析には日立産業制御ソリューションズ製 ADSTEFAN Ver.2016 を用いた。凝固解析前に湯流れ解析は行わず、鑄型内の各部における溶湯は一定の温度として解析を行った。

算出した膨張・収縮挙動は、ソフトウェア内の凝固収縮率の項目に数値として入力した。凝固収縮率は通常、溶湯流動を考慮した凝固収縮量¹⁵⁾を求めるために用いられており、凝固収縮量は固相率増加分に凝固収縮率を掛け合わせて求められる。解析上での溶湯流動は、限界固相率よりも大きい固相率が部分流動可能領域とされ、近接する要素からのみ補給が行われる。限界固相率よりも小さい固相率では自由流動領域とされ、同じ自由流動領域の要素から補給が行われる様に区分けされる。また、凝固収縮量の解析結果は Filled ratio という指標で表示される。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。

Table 1 Physical properties and heat transfer parameters for plate test blocks.

供試材用の物性値及び境界条件。

	Casting	Mold	Chill	Sleeve
Density (kg/m ³)	7000	1550	7850	650
Specific heat (kJ/(kg·K))	1.047	1.047	0.670	0.921
Thermal conductivity (W/(m·K))	20.93	1.05	33.49	0.46
Latent heat (kJ/kg)	209	-	-	-
Heat transfer coefficient (W/(m ² ·K))	Casting/Mold:4186.2 Casting/Chiller:1395.4 Casting/Sleeve:837.2 Mold/Chiller:8372.4 Mold/Sleeve:837.2			

また、膨張・収縮挙動を再現させるために限界固相率は1.0とした、3次元モデルにおける分割メッシュサイズは一律5mmとした。

2.2 ひけ巣確認及び温度測定用供試材の作製

ひけ巣の発生には凝固特性以外にも様々な要因が絡むことが知られている。本研究ではそのような外乱を排除し、厚肉FCDの製造条件下にてひけ巣発生傾向を確認するため、4種類の板状供試材を実際に鋳造した。供試材の形状及び鋳造方をFig. 2に示す。供試材は、伸び尺8/1000、幅220×奥行300×厚み70(mm)のFig. 2(a)無押湯方を基本とし、Fig. 2(b)余肉方案は幅220×奥行70×厚み70(mm)の余肉を上型の長手方向中心に設置、Fig. 2(c)冷金方案は幅50×奥行100×厚み50(mm)の冷金を上型及び下型に各2個ずつ設置、Fig. 2(d)押湯方案は直径240×高さ240(mm)のネックダウン押湯を設置した。揚がりはφ30(mm)とし各供試材上型面中央部に一箇所設置した。また、化学組成及び鋳込み温度等の鋳造条件の差を最小にするため、鋳型は、4種類の供試材を一つの鋳枠の中で湯道に繋ぎ作製した。鋳型は珪砂にフラン樹脂0.8mass%、硬化剤を40mass%(対樹脂)の割合で混練し、鋳型壁の移動が無いよう鋳型強度は4.5MPa以上にな

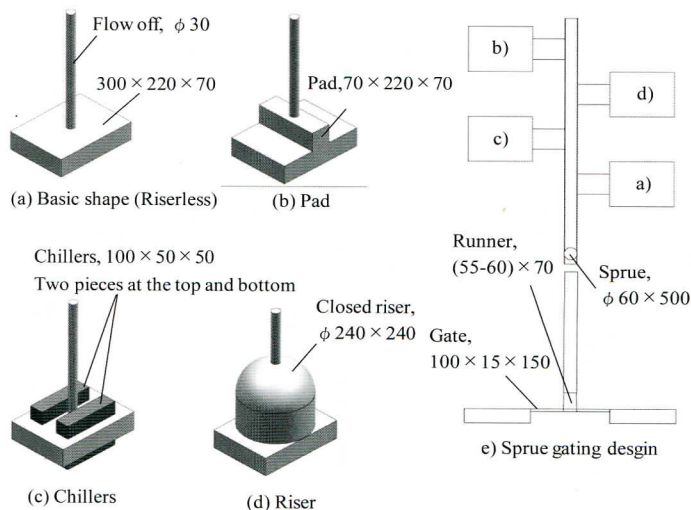


Fig. 2 Casting design for plate test blocks. (Unit; mm) 供試材の鋳造方案.

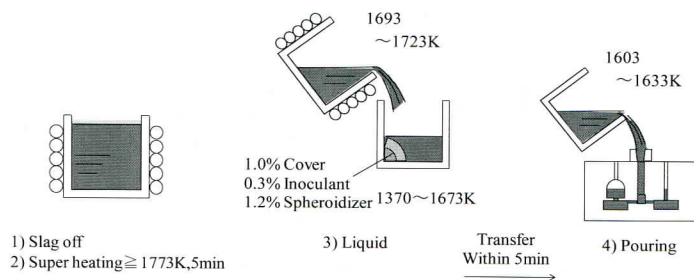


Fig. 3 Temperature and time schedule for melting, liquid treatment and pouring.

溶解、溶湯処理及び鋳込み時の温度と時間条件.

るようにした。塗型は、アルコール性のMgO系を使用し、着火乾燥後は鋳型強度が十分復元するよう、24時間以上の自然乾燥を行った。溶解及び鋳込み方法をFig. 3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、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。球状化処理及び接種は、Fe-45mass%Si-5.8mass%Mg合金を1.2mass%、Fe-50%Si合金を0.3mass%、カバー材を1.0mass%の順で取鍋内に置き、サンドイッチ法にて行った。鋳込みは、反応終了後から鋳込み完了までを5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。化学組成目標は亜共晶成分とし、凝固冷却曲線測定用に各供試材の板部厚み中央にK熱電対を設置した同一の鋳型をもう一つ製作し、続けて鋳込みを行った。

3. 実験結果

3.1 厚み70mm 供試材の鋳造結果

(1) 鋳込み結果

Table 2に化学組成を示す。表より、FCD450相当の組成で鋳込みが出来ており、Mgの歩留まりも良いことがわかる。

Fig. 4に各鋳造方案での凝固冷却曲線を示す。冷金方案、無押湯方案、余肉方案、押湯方案の順に共晶温度は高くな

Table 2 Chemical composition of plate test blocks. (mass %) 供試材の化学組成. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ce	Mg	CE
3.31	2.38	0.30	0.06	0.011	Trace	0.059	4.10

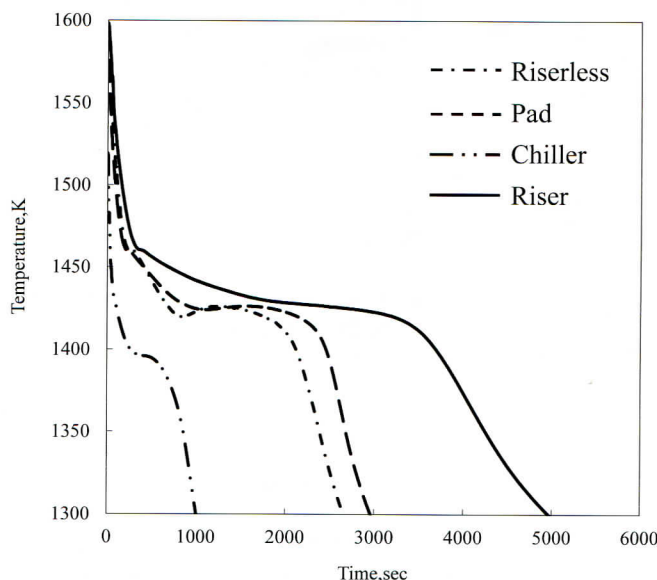


Fig. 4 Cooling curves during the solidification of plate test blocks.

供試材の凝固中における冷却曲線.

り、凝固完了時間は長くなった。また温度測定は問題なく行えていることがわかる。

(2) 膨張・収縮挙動の算出

実測した凝固冷却曲線より求めた凝固完了までの各反応時の温度と固相率の関係を Fig. 5 に示す。各供試材の凝固完了時間の長さと同反応の固相率割合において、相関性が確認できるのは共晶反応区間と、凝固末期に発生するセル間オーステナイト収縮区間であり、凝固完了時間が長くなると、共晶反応区間は大きくなり、セル間オーステナ

イト収縮区間は小さくなる傾向がある。次に理論体積変化量を Table 3 に示す。鑄込み完了時の鑄型内溶湯初期温度は異なるため、測定した凝固冷却曲線より読み取り、それぞれを計算した。表より、いずれの供試材でも、体積収支は凝固完了までに合計で正になっており、理論上では無押湯方案でもひけ巣が発生しない化学組成であることがわかる。本来ならば、ひけ巣発生量が最低になる共晶組成を採用すべきであるが、しばしば問題となるチャンキー黒鉛の発生を抑制するための対策として、厚肉 FCD において

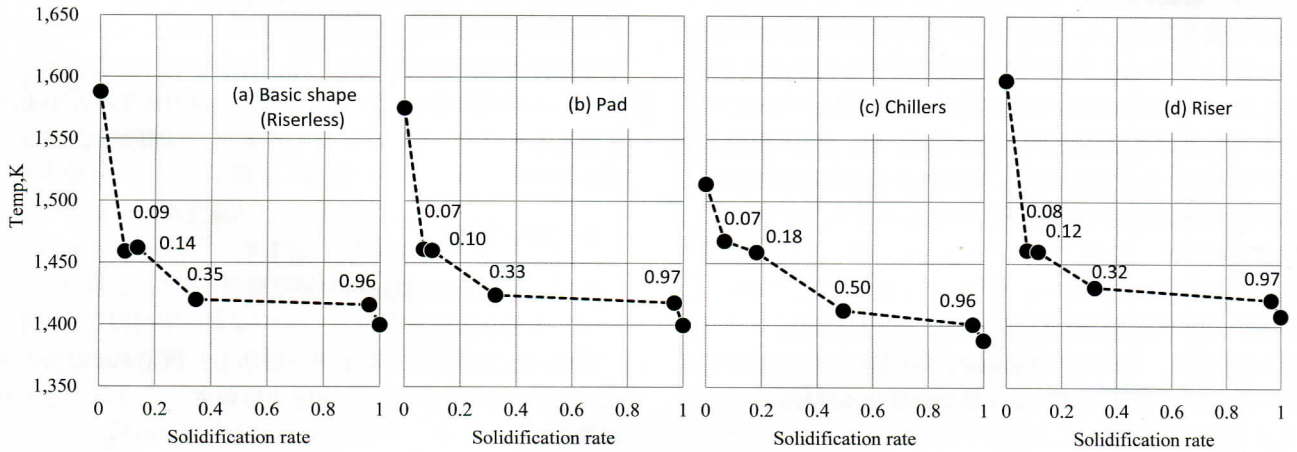


Fig. 5 Relationship between temperature and solidification ratio at each reaction of plate test blocks. 供試材の各反応時における温度と固相率の関係。

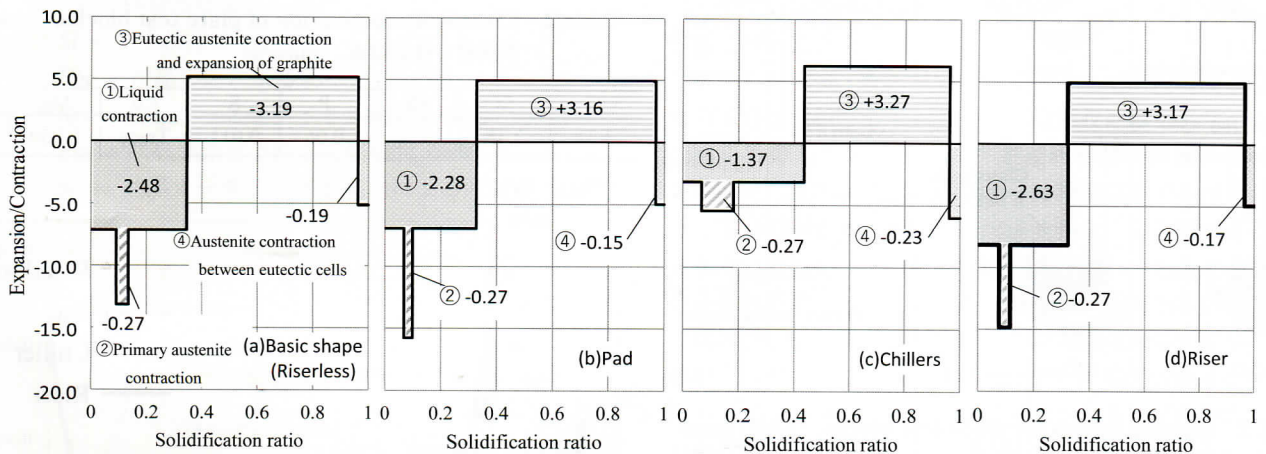


Fig. 6 Relationship between expansion and contraction at each reaction of plate test blocks. 供試材の各反応時における膨張と収縮の関係。

Table 3 Theoretical volumetric change of plate test blocks. 供試材の理論体積変化量, (vol%)

Casting design	① Liquid contraction	② Primary austenite contraction or graphite expansion	③ Contraction of austenite and expansion of graphite during eutectic solidification		④ Austenite contraction between eutectic cells	Volume change from pouring to completion of solidification
			Contraction	Expansion		
(a) Riserless	-2.48	-0.27	-3.16	6.35	-0.19	0.25
(b) Pad	-2.28	-0.27	-3.21	6.37	-0.15	0.46
(c) Chillers	-1.37	-0.27	-3.16	6.43	-0.23	1.40
(d) Riser	-2.63	-0.27	-3.17	6.34	-0.17	0.10

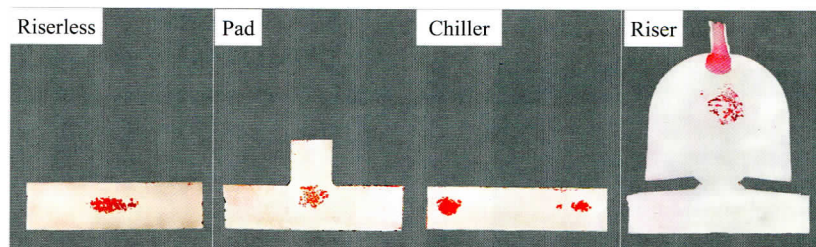
は、亜共晶組成が採用される場合がある^{23~25}。Fig. 6に凝固完了までの膨張・収縮挙動を示す。算出した各反応時の理論体積変化量を固相率割合で割ることにより、膨張収縮度を計算した。凝固完了時間が異なる供試材の各反応時の膨張・収縮度を確認すると、凝固完了時間が長い供試材ほど、凝固末期に発生するセル間オーステナイトの収縮度が小さくなる傾向がある。

(3) ひけ巣解析結果

Fig. 7(a)に各铸造方案で作製した供試材中心断面の浸透探傷試験結果を示す。無押湯方案では肉厚中央付近に指示模様があり、ひけ巣が発生している。余肉方案でも肉厚中央付近に指示模様があり、ひけ巣が発生している。冷金方案では、両端の肉厚中央付近に指示模様があり、ひけ巣

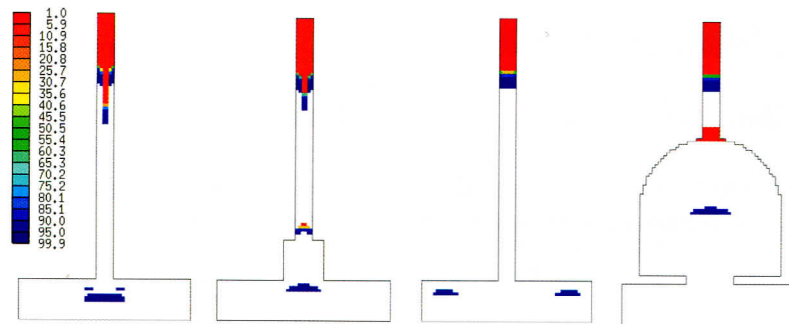
が発生している。またひけ巣面積は堰側が大きい。押湯方案では、平板部に指示模様は無いが、押湯内部に指示模様が確認でき、ひけ巣が発生している。Fig. 7(b)に膨張・収縮挙動をソフトウェア内の凝固収縮率の項目に入力し、凝固収縮量を求めた本研究の解析結果(Filled ratio)をFig. 7(c)に、 G/\sqrt{R} 法による結果を示す。観察箇所は、実際のひけ巣確認断面と同位置である。Filled ratioは凝固収縮量の指標として割合で表され、ひけ巣のしきい値は100%が中実とした場合、それより小さいとひけ巣が発生しているとして、99.9%以下を設定した。

実際のひけ巣発生位置と Filled ratio の結果による発生位置は良く一致しており、 G/\sqrt{R} 法での予測よりもやや上に発生していることがわかる。また、この結果から実際の鋳

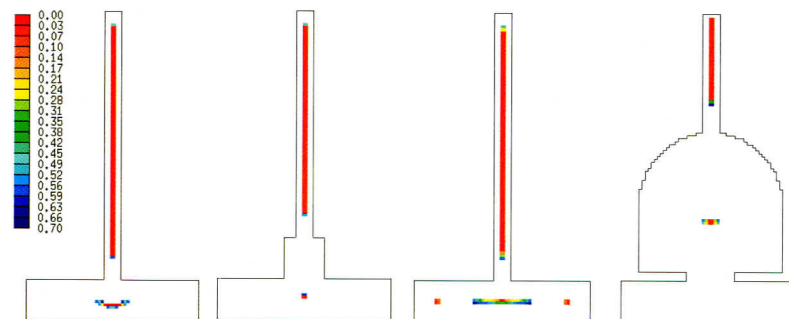


a) Shrinkage distribution at cross section of test blocks.

(The right side of the photo is the gate)



b) Filled ratio 99.9~0.0%



c) G/\sqrt{R} 0.7~0.0

Fig. 7 Result of CAE analysis for plate test blocks.

a) Shrinkage distribution at cross section of test blocks. (The right side of the photos is the gate)

b) Filled ratio 99.9 ~ 0.0%

c) G/\sqrt{R} 0.7 ~ 0.0

供試材の解析結果。

a) 中心断面のひけ巣位置, b) Filled ratio 99.9 ~ 0.0%, c) G/\sqrt{R}

物では最終凝固位置が肉厚中心よりも上の方向にずれることがわかる。

3.2 大型厚肉供試材の予測及び実績

FCDは、鑄物モジュラスが十分に大きく、かつ形状が立方体に近いとひけ巣が発生しないことが知られている。Fig. 8(a)に亜共晶組成で鑄造した、600mm立方体(以下、Mc=10cm)供試材の中心を切断し、断面を浸透探傷試験した結果を示す。板状供試材と同様の亜共晶組成であるにもかかわらず、中心部に指示模様は確認出来ない。G/√R法ではひけ巣の発生を予測すると、立方体中心位置の最終凝固部が必ず危険区域として表示され、無押湯方案ではひけ巣のない鑄物は製造できないと判断されるが、実際には無押湯方案でも実際にひけ巣がない鑄物が製造できている。ひけ巣が発生しないのは凝固時間が長くなると、黒鉛と

オーステナイトの共晶セルが成長し凝固末期の収縮分を補うためと考えられる。このように厚肉FCDのひけ巣予測を行うには、ひけ巣発生位置の再現の他に、ひけ巣が発生しないことの再現も必要であることがわかる。本研究の方法にてMc=10cm供試材の凝固解析を行うとFig. 8(b)に示すように最終凝固位置にひけ巣が発生しない。Fig. 9に板状供試材とMc=10cm供試材の凝固冷却曲線を示す。Mc=10cm供試材の凝固時間は十分長く、9時間以上である。Fig. 10にMc=10cmの固相率と膨張収縮量を示す。共晶セル間オーステナイトの凝固収縮区間は板状供試材よりも小さく、収縮量も少なくなっている。ひけ巣発生機構の一部に凝固時の共晶セルの成長が関係しているとした場合、本研究の方法ではそれが再現されているため、解析結果でもひけ巣発生傾向が小さくなったと考えられる。

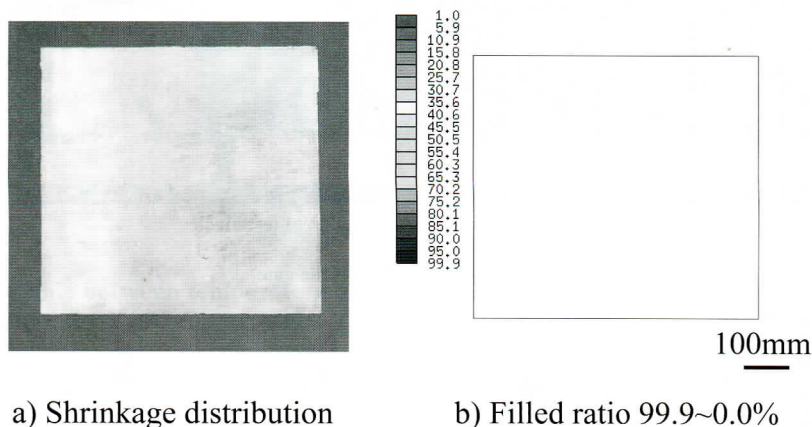


Fig. 8 Cross section of Mc=10cm block and analysis result.

a) Shrinkage distribution b) Filled ratio 99.9 ~ 0.0%.

Mc=10cmブロックの断面と解析結果.

a) ひけ巣発生位置 b) Filled ratio 99.9 ~ 0.0%.

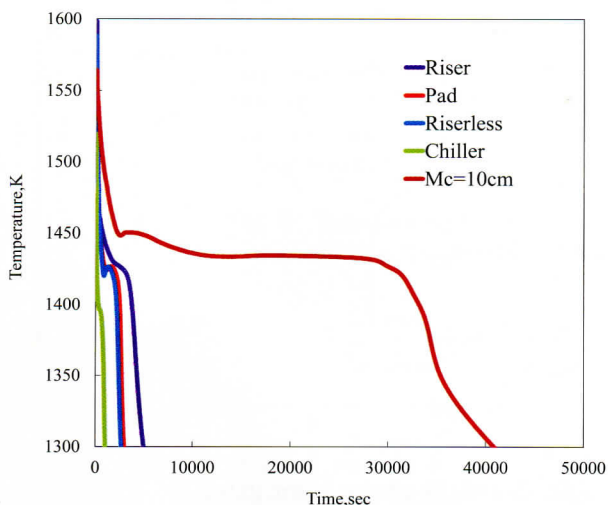


Fig. 9 Cooling curves during solidification of plate test blocks.

供試材の凝固中における冷却曲線.

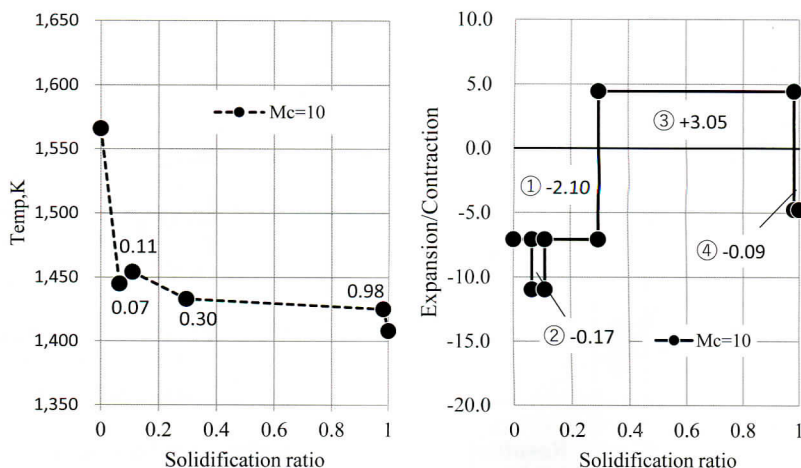


Fig. 10 Relationship between "temperature and solidification ratio" and "expansion and shrinkage" in each reaction of Mc=10cm block.

Mc=10cmブロックの各反応時における温度と固相率及び膨張と収縮の関係.

4. 考 察

本研究で行った解析は、凝固時の膨張・収縮を考慮している。供試材作製に際しては、ガス発生や鋳型壁の移動等の凝固以外でのひけ巣起因を排除しており、供試材及び解析結果共にひけ巣発生要因が凝固によるものを示したと考えることができる。厚み70mm供試材のひけ巣確認結果では、化学組成的に理論体積収支がプラスであるにもかかわらず、最終凝固位置にひけ巣が発生した。解析結果でもひけ巣発生位置は同位置を示し、Filled ratio 99.9%以下がひけ巣発生領域という直感的に理解しやすく無理のないしきい値が設定できている。ひけ巣発生領域については、供試材のひけ巣面積が、冷金方案にて左右で等しくない。これは堰の影響を受けている可能性がある。しかし、発生傾向は概ね一致しており、ひけ巣を推定するにあたっては問題のないものとする。膨張収縮を定量的に算出し、凝固シミュレーションに組み込んだことで、ひけ巣発生位置は理論的体積収支や G/\sqrt{R} 法での予測よりも精度が向上したと言える。

5. 結 言

凝固時に発生する膨張及び収縮を計算し、その値を用いて行うひけ巣予測と鋳込み試験結果と比較した結果次の結論を得た。

- (1) 凝固冷却曲線と理論体積収支から算出した、膨張・収縮の挙動を基にひけ巣を評価する手法を開発した。
- (2) 膨張・収縮の挙動を適用することで、ひけ巣位置精度が従来の手法よりも向上した。
- (3) 共晶セル間オーステナイト収縮量を考慮することで、ひけ巣発生の有無も良く一致した。
- (4) フラン自硬性鋳型にて製造する厚肉大型FCDの実用的なひけ巣予測として有用であることが確認できた。

参考文献

- 1) S. I. Karsay: Ductile Iron I-Production, Quebec Iron and Titanium (1992) 158-161
- 2) 張博：鋳物 **55** (1983) 113
- 3) M. Taffazzoli, V. Kondic: Foundry Management and Technology **104** (1976) 86
- 4) H. Itofuji, K. Kawamura, N. Hashimoto and H. Yamada: AFS Trans. **98** (1990) 585-595
- 5) 張博, 明智清明, 塙健三：球状黒鉛鋳鉄—基礎・理論・応用 (アグネ) (1983)
- 6) 吉田敏樹, 矢野健太郎, 川畑將秀：鋳造工学 **71** (1999) 104
- 7) T. Kotani, K. Edane, K. Iwakado, and H. Itofuji: Castech (2016)
- 8) H. Itofuji, M. Tamura, H. Ito, T. Nishimura, and Y. Esashika: Mater. Trans. **51** (2010) 103
- 9) K. Ishikawa, T. Kotani, T. Ogino, and H. Itofuji: The 12 AFC (2013) 46
- 10) E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa and S. Saito: AFS International Cast Metals Journal **7** (1982) 52
- 11) 出来尚隆：鋳造工学 **86** (2014) 914
- 12) 田代貴之：鋳造工学 **86** (2014) 922
- 13) 村上敦, 瀧下雅彦：鋳造工学 **86** (2014) 931
- 14) 米澤剛：鋳造工学 **86** (2014) 940
- 15) 高橋勇, 内田敏夫, 安斎浩一：鋳造工学 **78** (2006) 661
- 16) 新山英輔, 安斎浩一：鋳物 **67** (1995) 30
- 17) C. E. Bates: AFS Trans. **85** (1979) 289
- 18) S. I. Karsay: Ductile Iron - The State of the Art (1980) 26
- 19) 井川克也：鋳物 **41** (1969) 714
- 20) 宮本剛汎, 成田英記, 工藤博昭：鋳造工学 **68** (1996) 843
- 21) 蘇國璋, 大中逸雄, 山内勇, 福迫達一：鋳物 **58** (1986) 702
- 22) 吉田敏樹, 川畑將秀：鋳造工学 **70** (1998) 336
- 23) S. I. Karsay: AFS Trans. **78** (1970) 85
- 24) 豊島繁：鋳物 **67** (1995) 133
- 25) H. W. Hoover: AFS Trans. **94** (1986) 601