

# 鋳鉄の引け性評価研究

近藤義大\*, 藤川貴朗\*

## Evaluation on Shrinkage Characteristics of Cast Iron

Yoshihiro KONDO and Takao FUJIKAWA

Key words: Spheroidal Graphite Cast Iron, Shrinkage Defect, Different Thicknesses Test Piece, Casting Simulation, X-ray Transmission

### 1. はじめに

球状黒鉛鋳鉄は、複雑な形状の製品を作製できるうえに、高い強度を併せ持つことから、機械の構造用部品として欠かすことのできない素材である。この球状黒鉛鋳鉄製造において、引け巣（鋳鉄溶湯の凝固収縮に伴い発生する空隙欠陥）は主要な欠陥の一つである<sup>1)</sup>。引け巣は鋳物製品の形状や肉厚によって、引けの形態や大きさが変化するため、引け巣対策は製品ごとにケースバイケースである。しかし、これらのノウハウは一般には公開されず、そのうえ形状等の条件が変わった場合に引け巣の発生傾向も大きく変わるため、普遍的な引け性（引け巣の発生しやすさ）のデータを収集しにくいのが現実である。また、当研究室がこれまで保有していた円柱状引け試験片（上底  $\phi 50$  mm、下底  $\phi 60$  mm、高さ 60 mm、堰肉厚 3 mm、幅 40 mm）は、引け巣発生位置が実験ごとにばらつきやすく、わずかな引け性の違いが測定しにくいことが課題となっていた。

本研究では、球状黒鉛鋳鉄溶湯の引け性を正確に測定するノウハウを獲得することを目的として、引け試験片鋳型を作製した。これは吉田、鈴木らの引け試験片<sup>2,3)</sup>を参考にした。これにより、球状黒鉛鋳鉄溶湯の引け性を測定する試験法を検討した。

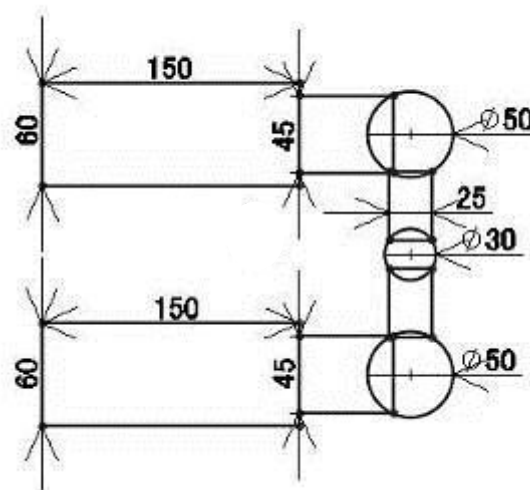
### 2. 実験方法

#### 2. 1 引け試験片の形状・方案

引け巣は様々な種類で発生することが知られて

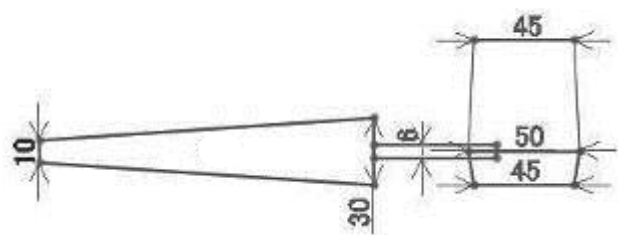
いるが、大まかには鋳物表面にへこみ等が発生する外引けと、鋳物内部に空隙が発生する内引けの二通りに分類され、そのいずれも欠陥として扱われる。

本研究では、一つの方案で厚肉試験片と薄肉試験片を作製することで、同じ溶湯で異なる種類の引けの発生傾向を測定することを目的とした。引け試験片は吉田、鈴木らの引け試験片の形状を参考にした。寸法は図 1 a)-c)のとおりである。押し湯効果をなくし強制的に引け巣を発生させるために、堰の厚みは 6 mm に設定した。人の手で造型・型の移動等を行うことを前提としたため、試験片方案の体積は約 630 cm<sup>3</sup>、鋳型重量は上型下型ともに 14 kg となるように設計した。

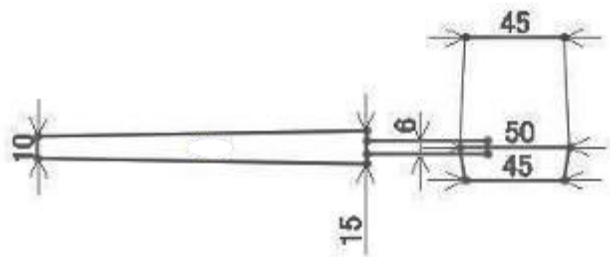


a) 試験片図面（上から）

\* 金属研究室



b) 厚肉試験片図面 (横から)



c) 薄肉試験片図面 (横から)

図 1 引け試験片図面 (単位はすべて mm)

## 2. 2 溶解実験

作製した引け試験片の有効性を判断するため、溶解実験を行った。球状黒鉛鑄鉄の製造は通常 CE 値 (炭素当量) 4.4~4.5 の共晶~過共晶の範囲で行われており、亜共晶~共晶点付近である CE 値 4.1~4.3 で製造すると引け欠陥が発生しやすくなることが知られている<sup>4)</sup>。今回の溶解実験は、作製した引け試験片により球状黒鉛鑄鉄溶湯の引け性の違いを測定することが目的のため、実験条件は CE 値 4.1, 4.3, 4.5 をねらい値とした。CE 値 =  $C_{mass\%} + 1/3 Si_{mass\%}$  とした。

実験に用いる鑄鉄の溶湯は、銑鉄、鋼板を原料に用いて、50 kg 高周波誘導炉にて基地組織をフェライトとする組成で溶製した。溶湯は約 1530°C まで昇温した後、表 1 に示す化学成分の球状化剤を用いて置き注ぎ法により接種・球状化処理した。接種剤には Ca, Ba 系のものを使用し、接種剤、球状化剤はそれぞれ溶湯重量比で 0.40%, 1.36% 用いた。球状化処理した溶湯は、ただちに引け試験片鑄型 (フェノールウレタン鑄型), JIS G 5502 B 号 Y ブロック鑄型 (シェルモールド鑄型) に鑄込み、60 分後に型ばらしを行った。この際の鑄込み温度はいずれも約 1400°C だった。Y ブロック下部から金属組織観察用試料を切り出し、組織観察により球状化率、黒鉛粒数、黒鉛粒径、黒鉛面積率を計測し

た。引け試験片は厚肉試験片、薄肉試験片別々に検査した。厚肉試験片は外観をデジタルカメラで撮影することで外引けの様子を観察したのち、外引けのくぼみに鑄物砂を満たし、砂の重さを測定することで外引けの体積を定量的に測定した。この方法は水木らの手法<sup>5)</sup>を参考にした。薄肉試験片は X 線透過装置により非破壊で内部欠陥を測定したのち、湿式精密切断機にて切断、内部欠陥をデジタルカメラで撮影することで内引けの様子を観察した。

表 1 球状化剤の成分 (mass%)

| Si | Mg  | Ca  | RE  | Al  | Fe |
|----|-----|-----|-----|-----|----|
| 46 | 4.7 | 2.3 | 2.0 | 0.6 | 残部 |

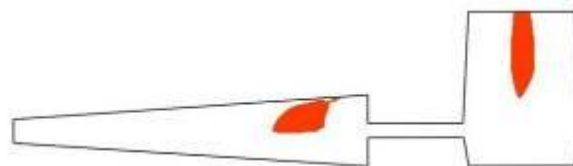
## 3 結果と考察

### 3. 1 凝固シミュレーションによる引け巣発生予測

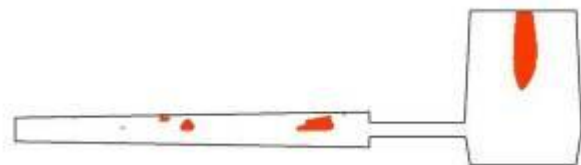
厚肉試験片、薄肉試験片について、鑄造シミュレーションソフト ADSTEFAN を用いて引け巣の形状予測を行った。溶湯の組成は FCD450 相当として、表 2 の物性値設定にてシミュレーションを行った。健全度 (.svfs3d) 測定を用いて解析を行った結果を図 2a),b) に示す。図の引け巣発生予測領域は健全度 0~20% までの範囲をクリッピング表示させたものである。

表 2 湯流れ凝固解析物性値設定

|                             | 1. dummy | 2. mold  | 3. casting |
|-----------------------------|----------|----------|------------|
| 材料名称                        | Iso-Air  | CO2_Mold | FCD450     |
| 壁面抵抗                        | 0        | 1        | -          |
| 面積 (g/cm <sup>3</sup> )     | 1E+10    | 1.5      | 7          |
| 熱伝導率 (cal/cm s deg)         | 0.0001   | 0.0025   | 0.05       |
| 比熱 (cal/g deg)              | 1E+10    | 0.25     | 0.25       |
| 初期温度 (deg C)                | 20       | 20       | 1280       |
| 液相線温度 (deg C)               | -        | -        | 1180       |
| 固相線温度 (deg C)               | -        | -        | 1140       |
| 潜熱 (cal/g)                  | -        | -        | 50         |
| 表面張力 (dyn/cm)               | -        | -        | 1800       |
| 動粘性係数 (cm <sup>2</sup> /s)  | -        | -        | 0.0078     |
| 体積収縮率 (%)                   | -        | -        | 3          |
| 流動限界固相率 (湯流れ)               | -        | -        | 0.3        |
| 流動限界固相率 (凝固)                | -        | -        | 0.8        |
| 線膨張係数 (1/deg C)             | -        | 0        | 0          |
| ヤング率 (kgf/mm <sup>2</sup> ) | -        | 0        | 0          |
| ポアソン比 (-)                   | -        | 0        | 0          |



a) 厚肉試験片



b) 薄肉試験片

図 2 引け巣発生予測

健全度測定の結果、厚肉試験片、薄肉試験片ともに鑄込み上面の、堰から 20 mm 程度試験片先端に向かった所から引け巣が発生する可能性があることが示された。堰周辺は最終凝固部になることが予想されるため、このような結果になったと考えられる。

また、吉田らによると鑄物中心部の凝固開始から表面の凝固終了までの時間 ( $S$ ) と、中心部の凝固に要する時間 ( $I$ ) との比 ( $SI$ ) が 0.6~0.7 程度以下であれば、押湯からの給湯がない場合でも引け巣のない鑄物を作ることができるとしている<sup>6)</sup>。ここでいう中心部を最終凝固部、表面を中心部直下の鑄物表面から 3.0mm 内部に入った点とし、本研究にて作製したそれぞれの肉厚の引け試験片の  $SI$  を、凝固開始時間 (.ssolst3d) および凝固終了時間 (.ssolend3d) のシミュレーションによって求めたところ、厚肉試験片は 0.45、薄肉試験片は 0.63 となった。なお凝固開始時間は測定点が液相線温度 (1180℃とした) に達する時間、凝固終了時間は固相線温度 (1140℃とした) に達する時間とした。この考え方によると、両肉厚の試験片ともに引け巣のない健全な鑄物を作製できることが考えられる。ただし、これはあくまで凝固シミュレーション解析の結果であり、実測値によるさらなる検討が必要である。

### 3. 2 成分分析

鑄造した試験片の化学成分を表 3 に示す。CE 値は高い順に 4.48、4.36、4.20 となり、4.48 は実用的な過共晶の範囲<sup>4)</sup>、4.36 は共晶点付近の過共晶範囲、4.20 は共晶点付近の亜共晶範囲とみなすことができる。これにより、おおむねねらい値通りの化学成分で溶解できたといえる。

表 3 試験片成分分析 (mass%)

| CE値  | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Mg    |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 4.48 | 3.62 | 2.58 | 0.26 | 0.014 | 0.009 | 0.033 |
| 4.36 | 3.54 | 2.47 | 0.27 | 0.014 | 0.008 | 0.033 |
| 4.20 | 3.42 | 2.33 | 0.26 | 0.014 | 0.008 | 0.027 |

### 3. 3 金属組織観察

それぞれの溶湯で鑄造した Y ブロック下部から切り出した試料の金属組織観察結果を表 4 に示す。CE 値の違いによる球状化率、黒鉛粒径の違いはなかった。しかし、黒鉛粒数は CE 値が低くなるほど少なくなり、それに伴い黒鉛面積率も減少した。このことから、CE 値が低くなることで晶出黒鉛粒数が減り、凝固に伴う体積減少を補いにくくなり、引け性は引けやすい順に 4.20、4.36、4.48 となったことが考えられる。

表 4 金属組織観察







| CE値  | 球状化率 | 黒鉛粒数              | 黒鉛粒径 | 黒鉛面積率 |
|------|------|-------------------|------|-------|
|      | %    | 個/mm <sup>2</sup> | μm   | %     |
| 4.48 | 87   | 153               | 26.0 | 8.0   |
| 4.36 | 86   | 133               | 25.9 | 7.0   |
| 4.20 | 87   | 127               | 26.4 | 6.9   |

### 3. 4 外引け測定

各試験片の外観写真を表 5 に示す。すべて鑄込み上面を上にして設置、撮影した。外引けは CE 値 4.20、4.36 の厚肉試験片の 2 つのみに確認された。いずれも鑄込み上面、堰から 20 mm 程度試験片先端へ進んだ所から発生しており、これは 3. 1 の凝固シミュレーションの予測とおおむね一致した。各厚肉試験片について鑄物砂を用いて外引けの体積を測定した結果を図 3 に示す。CE 値 4.48 の試料は外引けが測定されなかったのに対し、4.36、4.20 の試料はそれぞれ 2.3 cm<sup>3</sup>、4.0 cm<sup>3</sup> の外引けが測定された。これは 3. 3 で示した通り、CE 値が低くなることで晶出黒鉛が減り、これにより凝固に伴う体積減少が補えず、外引けが発生したと考えられる。

薄肉試験片はすべて外引けがなかったため、外観観察による引け性の違いを確認することができなかった。

表 5 引け試験片外観

|       | CE値   |  |   |
|-------|---|--|---|
|       | 4.20  | 4.36   | 4.48  |
| 薄肉試験片 |  |  |  |
| 厚肉試験片 |  |  |  |

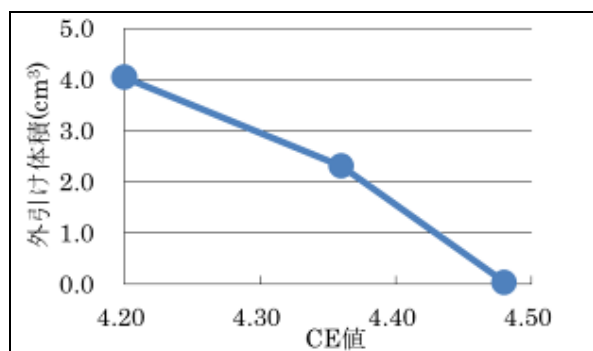


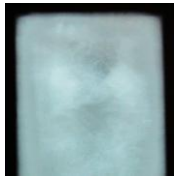
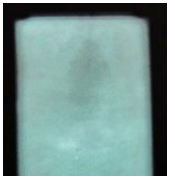

図 3 外引け体積測定

### 3. 5 X線透過測定

薄肉試験片について非破壊で内引けを観測することを目的として、X線透過測定を行った。測定条件は電圧 150 kV、電流 5 mA、測定時間 60 秒間として実験した。堰が写真上向きになるように設置して撮影した。この手法では X 線が透過しなかった部分は白く、透過した部分は感光し黒い像として現像される。

測定の結果を表 6 に示す。CE 値 4.48 の試験片は全体が白く現像され、黒い像は見られなかったが、4.36、4.20 では堰から 20 mm 程度先端方向へ進んだ所からやや黒ずんだ部分が確認された。このことから、CE 値 4.36、4.20 の試験片にはこの部分の内部に空洞欠陥（内引け巣）があることが確認された。この結果は、3. 1 の凝固シミュレーションで予測した結果と一致した。

表 6 X線透過測定写真

| CE値  | 4.20  | 4.36   | 4.48   |
|------|---|--|--|
| 現像写真 |  |  |  |

20 mm

### 3. 6 切断検査

薄肉試験片について、実際に内引け巣があるかを確認するために、試験片堰側半分を見切り面に沿って切断し、上型部を#1000 まで研磨したのち、内引け巣の様子をスキャナにて撮影した。撮影した断面写真を表 7 に示す。




| CE値  | 4.20   | 4.36  | 4.48  |
|------|--|---|---|
| 断面写真 |  |  |  |

表 7 内引け試験片断面

20 mm

CE 値 4.48 の試験片について、堰付近から先端に向かって約 25 mm にわたって直径 1 mm 程度の引け巣が点々と確認された。CE 値 4.36 の試験片は堰付近に 5 mm×3 mm 程度の引け巣が確認され、その他にも直径 1 mm 程度の引け巣が堰付近

から約 25 mm にわたって断続的に確認された。CE 値 4.20 の試験片は堰付近に 10 mm×5 mm 程度の引け巣が確認され、堰付近から約 25 mm にわたって直径 2~3 mm 程度の小さな引け巣がつながって存在しているのが確認された。

CE 値が低いほど引け巣が多く発生した理由として、3. 3 にて示した通りのことが考えられる。3. 5 の X 線透過測定では CE 値 4.48 の試験片は引け巣が確認されなかったが、実際に切断検査をすると直径 1 mm 程度の微細な引け巣が確認された。このことから、今回の X 線透過試験ではこれほど小さな引け巣は検出できないことが分かった。また、CE 値 4.36, 4.20 の試料について、X 線透過試験では堰から 20 mm 程度先端方向に進んだ所から引け巣が確認されたのに対し、切断検査では堰ごく近傍から引け巣が確認された。この原因として、切断面の観察では切断したある面の引け巣の有無しか判断できないことに加え、本試験片は堰部から先端にかけてゆるやかなテーパをつけており、堰から 20 mm 部では堰部より 0.67 mm 厚みが薄くなっているため、その分 X 線が透過しやすく、相対的に引け巣を感度よく検出できたことが考えられる。

#### 4. 結論

球状黒鉛鑄鉄の引け性を測定することを目的として、凝固シミュレーションを活用しつつ引け試験片を作製し、引け性の異なる溶湯を用いて引け性を測定した結果、以下の性能を確認した。

・凝固シミュレーションの引け巣発生予測（健全度）を利用することで、発生する引け巣の位置をほぼ正確に予測することができる。しかし、CE 値の適切な溶湯を鑄込んだ場合に発生した引け巣の量は、予測したほど多くなく、シミュレーションと現実との合わせこみには、凝固シミュレシ

ョンの物性値に溶湯の引け性の違いを反映させる等のさらなる検討が必要である。

・厚肉試験片は外観にて外引けの傾向を把握でき、鑄物砂を用いることで簡易かつ定量的に外引けの体積を測定できる。

・薄肉試験片は X 線透過試験を行うことにより非破壊で内引けの傾向を把握することができる。また、実際に試験片を切断し、切断面を観察することで、さらに精度よく内引けの様子を観察できる。

・今回作製した引け試験片は、外引け・内引けの発生具合の測定をすることで、溶湯の引け性を評価することが可能である。

#### 参考文献

- 1) 橋本邦弘：“鑄造欠陥とその対策”. 鑄造工学会 東海支部「鑄鉄の中級講座」別冊配布資料,p31-65 (2014)
- 2) 吉田敏樹ほか：“球状黒鉛鑄鉄の表面と内部の凝固時間比による溶湯ひけ傾向評価”. 鑄造工学,71,p104-110 (1999)
- 3) 鈴木克美：“ダクタイル鑄鉄の引け巣に関する各社諸条件での評価”. 鑄造工学会第 162 回全国講演大会講演概要集,p49 (2013)
- 4) 菅野利猛：“鑄鉄溶解管理技術と鑄物の不良について”. 鑄造工学会東海支部「鑄鉄の中級講座」配布資料,p24-33 (2014)
- 5) 水木徹ほか：“大物球状黒鉛鑄鉄鑄物へのレアース低減球状化剤の適用”. 鑄造工学,84,p720-724 (2012)
- 6) 吉田敏樹ほか：“球状黒鉛鑄鉄のひけに及ぼす鑄物表面と内部の凝固時間比の影響”. 鑄造工学,70,p709-715 (1998)