

## CAEを利用した鋳造品の高品質化技術の開発

永井寛\* 永瀬重一\*\* 大浦賢一\*\*\*

### Development of Technology for Improving Quality of Castings using CAE

NAGAI Yutaka\*, NAGASE Juuichi\*\*, OHURA Kenichi\*\*\*

#### 抄録

本研究では、CAEを利用した高品質な鋳物づくりについて単純形状の球状黒鉛鋳鉄（FCD）鋳造品を例に引け巢の評価を対象として検討した。引け巢評価には円板状モデルを用い、このモデルに対して三種の異なる鋳造方案を適用したFCD鋳造試料の内部欠陥（引け巢と表面近傍の欠陥）と湯流れ凝固解析結果とを比較した。解析による引け巢判断基準<sup>1)</sup>の①最終凝固位置、②等凝固時間曲線の閉ループ、③温度勾配（閾値：1.0°C/cm以下の領域）、④G/√Rの値（閾値：0.5以下の領域）と実際の引け巢位置が比較的よい一致を示し、FCD鋳造品に対する鋳造CAEの適用が有効な手法であることが確認できた。

キーワード：鋳鉄，鋳造方案，CAE，湯流れ，凝固，変形

## 1 はじめに

鋳造技術は溶融金属（溶湯）を鋳型内に流し込み、凝固させることにより、構造部材等の複雑な三次元形状を比較的容易に成形できることから産業を支える基盤の技術として重要な役割を果たしている。

金属材料は液体から固体へと状態変化すると液体収縮や凝固収縮が生じ、さらに熱収支による変形が生ずることもあるため、鋳造による目的形状の成形には、これらを補うための種々の工夫が必要になる。この工夫が鋳造方案であり、適切な鋳造方案設計は健全な鋳造品製造のための核心技術となっている。

県内には多品種少量生産の機械鋳物の鋳造工場が多いが、求められる技術的課題は、付加価値の高い鋳物を高品質に、しかも迅速に製造するための技術

の確立である。このためには「勘と経験」を中心とした従来の鋳造方案設計手法から、湯流れ・凝固解析や変形解析等の鋳造CAEを用いた、自社の鋳造方案を「データベース」として利用できる環境への転換を進める必要がある<sup>2)</sup>。

本研究では、CAEを利用した高品質な鋳物づくりのための鋳造方案設計についてL字形板状のFCD鋳造品を対象としたそり変形に関する検討<sup>3)</sup>と円板状のFCD鋳造品を対象とした引け巢に関する検討を行った。ここでは円板状のFCD鋳造品に異なる鋳造方案を適用した場合の引け巢の発生状況について検討した結果を報告する。

## 2 実験方法

### 2.1 引け巢の評価

引け巢評価のためのモデルの寸法と形状を図1に示す。この形状は平成20年度の埼玉県鋳造技術コンクールの課題として用いたもので、中心部に貫通穴を有し、その周囲には4個の平底穴を有

\* 材料技術部

\*\* 株式会社永瀬留十郎工場

\*\*\* 独立行政法人理化学研究所

する円板状を呈している。このモデル形状をアルミニウム合金材の機械加工により作製し、铸造用模型として用いた。本研究で解析した铸造試料は、この模型（図1の右側に示した円板状模型）をマスターに三種類の異なる铸造方案を付加して铸型を作製し、表1に示した铸造条件によりFCD450相当の溶湯を注湯したものである。これらの引け巣評価試料の作製に用いた溶湯の化学組成と機械的性質をそれぞれ、表2、表3に示す。

ここでは、解析した三種の铸造試料をA方案铸造試料、B方案铸造試料、C方案铸造試料といい、

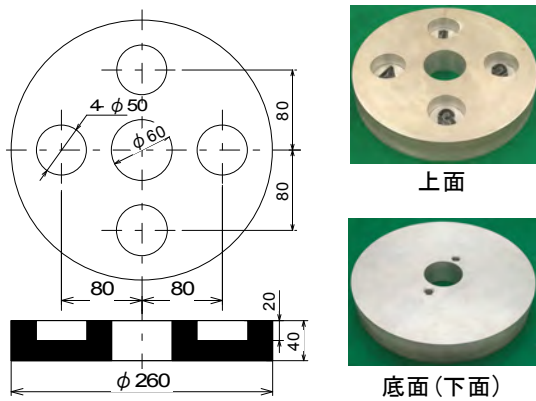


図1 引け巣評価モデルの形状と铸造用模型

表1 铸造試料の铸造条件

方案	注湯温度(°C)	注湯時間(秒)
A	1,380	12.0
B	1,400	9.0
C	1,350	10.0

表2 試料の化学成分

方案	化学成分 (mass%)					
	T. C	Si	Mn	P	S	Mg
A	3.73	2.38	0.28	0.037	0.010	0.029
B	3.45	2.66	0.21	0.029	0.009	0.070
C	3.73	2.79	0.25	0.063	0.014	0.067

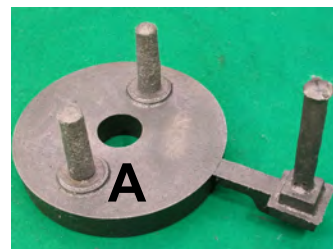
表3 試料の機械的性質

方案	引張試験			硬さ試験
	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	耐力 N/mm <sup>2</sup>	伸び %	ブリネル硬さ HB
A	482	318	21	167
B	474	334	20	170
C	454	328	23	156

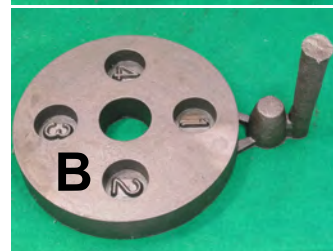
それぞれ、図2に示す。A方案では、セキ前の湯口下部にフィルターが配置され、長いセキを通過した溶湯が製品内部に流入する。底面側に冷やし金を、製品上部には2個の発熱押湯を設けたことが特徴である。B方案では、製品部の天地をA方案とは逆に配置して凹みのある面を上型とし、湯口先に小さな湯だまり状の押湯を設けている。そこから二本のセキを分岐させて製品内に溶湯が流入する。C方案は、A、B方案とは異なり、縦铸込みである。製品頂部に押湯が設置され、製品部横の縦方向に湯口を配置し、製品真横の高い位置に設けたセキから製品内部に直接溶湯が流入する。

これら方案の異なる引け巣評価モデルの铸造試料は、上下面をそれぞれ2mm旋削加工して铸肌の凹凸を除いた後に、厚さ40mmの厚肉部及び厚さ20mmの薄肉部を対象としたX線透過試験を行い、撮影後のX線フィルム画像の黒化度の差異から引け巣の有無を推定して評価した。続いて有限差分法を用いたCAE解析ソフト（JSCAST：(株)クオリカ製）を用いて湯流れ凝固解析を行

A方案



B方案



C方案

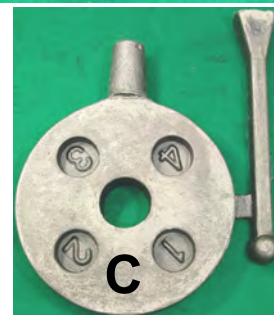


図2 同一製品モデルに対する三種の異なる铸造方案

い、鑄造試料のX線透過試験結果から示される引け巣と湯流れ凝固解析から推定される引け巣の位置及び形状を比較した。このことから、湯流れ凝固解析における引け巣の判断基準である最終凝固位置、等凝固時間曲線の閉ループの有無、温度勾配の値、G/Rの値を検討した。

表4 撮影・現像条件

対象部位	厚肉部	薄肉部
試料厚さ	40mm	20mm
使用管電圧	250kV	215kV
使用管電流	5mA	5mA
露出時間	1.5min	0.5min
フィルム	フジIX100	フジIX100
増感紙	Pb:0.03mm	Pb:0.03mm
線源-フィルム間距離	60cm	60cm
現像液	レンドール	レンドール
現像温度	20℃	20℃
現像時間	5.0min	5.0min

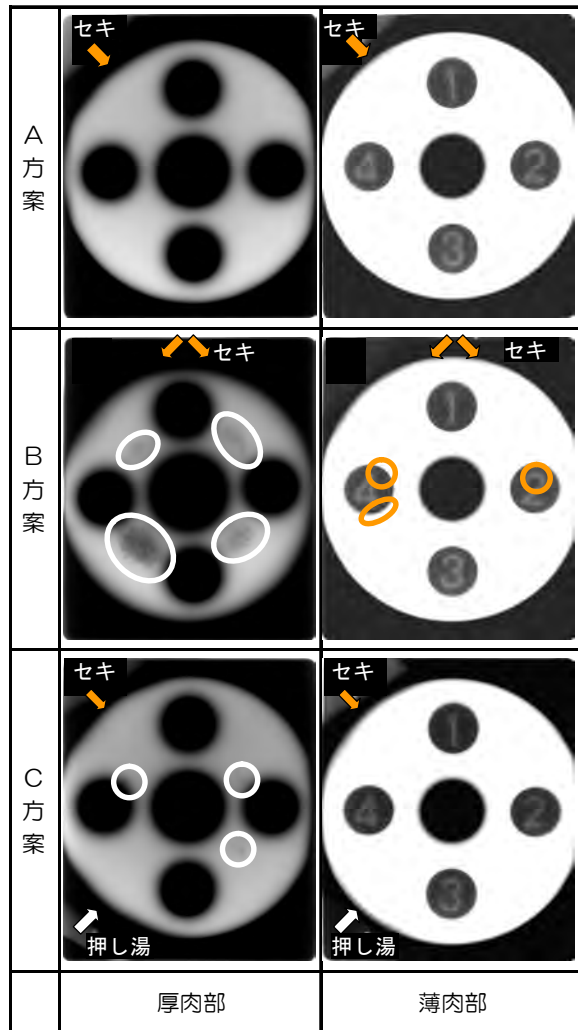


図3 三種の鑄造方案のX線透過試験画像 (丸印内には、引け巣の存在が推定される。)

### 3 結果及び考察

#### 3.1 引け巣の評価

引け巣評価モデルの X 線透過撮影条件を表4に示し、A方案、B方案、C方案の X 線透過試験画像を図3に示した。X線透過撮影では、X線の透過線量によりフィルム黒化度が異なり、同一厚さ部位では、同一の黒化度になる。引け巣があると周辺部よりも黒化度が大きくなるため、同一厚さ部位で黒化度の大きい領域には引け巣が存在すると推定し、これらの領域の黒化面積とその個数から表5により点数化した。

図3のA方案の場合、同一厚さ部位には黒化度の差異は認められず、0点と評価した。図3のB方案の場合、厚さ40mmの厚肉部の均一黒化度領域内に4箇所黒化度のより大きい灰黒色を呈する部位の存在が認められ、また、厚さ20mmの薄肉部の数字記号2の上部及び数字記号4の右上と右下には、周囲よりも黒化度の大きい灰黒色を呈する領域の存在が認められた。厚肉部の丸印で囲んだ部位のそれぞれを4点、2点、2点、1点、薄肉部の3箇所を各1点、合計12点の引け巣と評価した。また、図3のC方案では、厚さ40mmの厚肉部に、範囲は非常に狭いが、周辺部よりも黒化度の大きい灰黒色を呈した3箇所の領域の存在が認められ、丸印で囲まれた3箇所を各1点、合計3点の引け巣と評価した。これら三種の鑄造方案の引け巣の評価結果を表6に示す。

表5 引け巣の面積による点数化

面積 (cm <sup>2</sup> )	点
0=X	0
0<X<2	1
2≤X<3	2
3≤X<4	3
4≤X<5	4
5≤X	5

表6 三種の鑄造方案の引け巣評価

方案	厚肉部	薄肉部	合計点
A	0	0	0
B	9	3	12
C	3	0	3

### 3.2 湯流れ・凝固解析による評価

引け巣評価モデルの材質をFCD450とした場合の凝固解析により求めた凝固の進行過程を図4に示す。モデル外形はワイヤーフレームで表され、色別レンジバーで凝固時間を、その凝固時間における未凝固領域を色塗りで表している。色塗り領域は凝固の進行とともに小さくなり、最後は消失する。モデル形状の解析から、製品部の場合、最終凝固部は数字記号のある円筒状凹部の隣り合う中間部に位置することが分かった。

#### 3.2.1 A 方案の場合

A 方案の溶湯の充填状態を図5に示す。色別表示は温度を示す。この方案では、フィルターの効果もありスムーズな湯流れを示す。湯先の激しい衝突は見られず、溶湯充填は安定して進行する。また、充填終了時点で液相線温度以下に低下する部位は存在しない。凝固の進行過程を図6に示す。色塗りで示す領域は未凝固部位であり、押湯下部の凝固は遅れるが、発熱押湯と冷やし金の効果により、最終凝固部位は製品内部から押湯ネック部に移行する。この場合、最終凝固位置は等凝固時間曲線の閉ループと重なるが、押湯からの溶湯補給が期待できるため、製品部に引け巣は発生しないと考えられる。この解析結果は、図3に示したX線透過試験の結果とよい一致を示している。

#### 3.2.2 B 方案の場合

B 方案における溶湯の充填はスムーズであり、湯先が激しく衝突する領域もなく、比較的安定して進行する。B 方案の凝固過程を図7に示す。凝固は、図4に示した製品部分のみの凝固とほぼ同一形態で進行し、円筒状凹部の隣り合う中間部4箇所が最終凝固位置となることが分かる。この部位は、周囲に押湯や未凝固領域が存在しないため、溶湯補給が困難であり、引け巣となる可能性が高い。図3のB 方案のX線透過試験結果からも、これらの部位に引け巣が生じていることが確認できる。また、解析要素が凝固温度に到達した際の隣接要素との温度勾配が1.0以下の領域及び $G/\sqrt{R}$ の値が0.5以下の領域を図8に示す。これらの領域

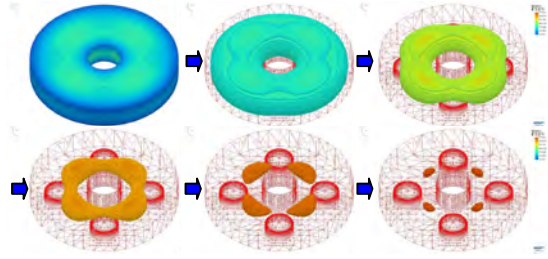


図4 引け巣評価モデルの凝固進行過程

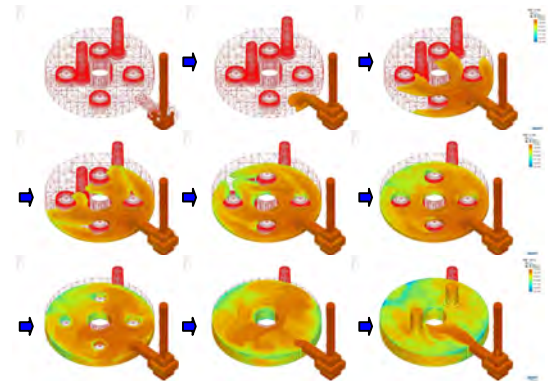


図5 A 方案における溶湯の充填過程

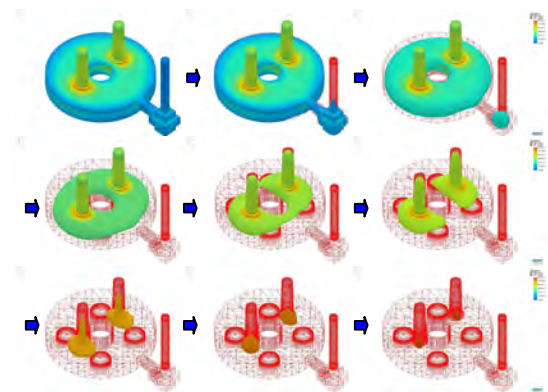


図6 A 方案における凝固過程

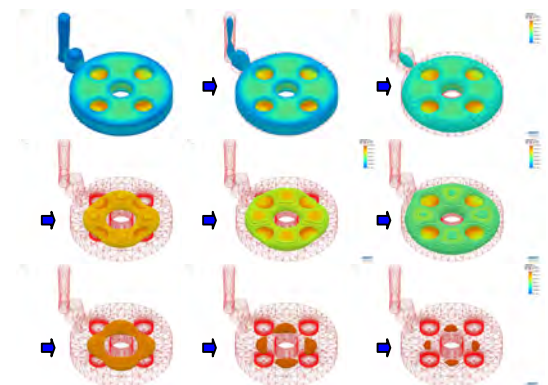


図7 B 方案における凝固過程

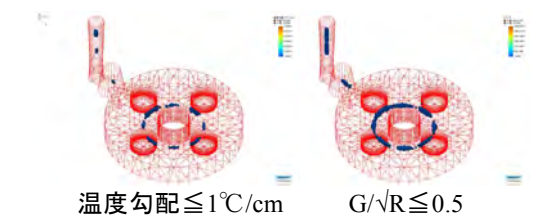


図8 隣接要素との温度勾配の低い領域

は、凝固時に隣接要素との温度差が小さく、溶湯補給が困難と考えられ、微小引け巣を生じやすいと推定できる。この閾値の場合、円筒状凹部底面の貫通穴寄り端部に同心円状の微小引け巣発生を予測しており、やや過剰な推定結果となった。

### 3.2.3 C 方案の場合

C 方案の湯流れ解析結果を図9に示す。本方案は溶湯が製品部へ流入するセキ位置が、製品の中心部高さにあり、セキ流入点下部の流れに大きな乱れの発生が推定される。解析結果からも溶湯がセキ上部に到達すると流れは安定状態を示すが、充填初期から50%充填を超えるあたりまでは他の方案と比較して溶湯の乱れが大きいことが確認できる。この方案の最終凝固位置と等凝固時間曲線を図10に示す。等凝固時間曲線の閉ループは、円筒状凹部の中間部の4箇所が存在したが、最終凝固位置はセキ寄りの中間部となり、他の3箇所

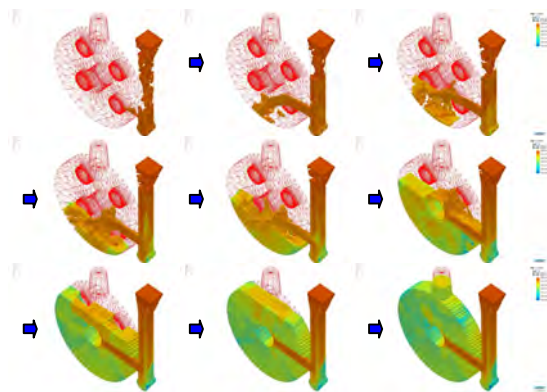


図9 C 方案における溶湯の充填過程

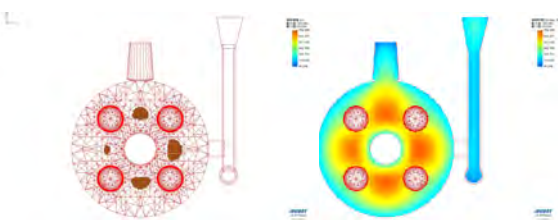


図10 最終凝固位置と等凝固時間曲線

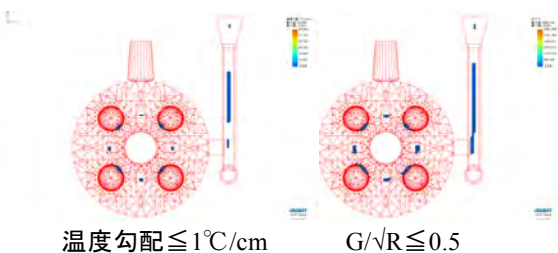


図11 隣接要素との温度勾配の低い領域

の中間部は先に凝固が完了した。これは、セキ先周辺が流入する高温溶湯に接する時間が長いと考えられる。また、図11に示した温度勾配と  $G/\sqrt{R}$  の解析結果は、微小引け巣が同心円状に分散して分布することを示唆している。これに対し、図3のC 方案のX線透過試験の結果は、円筒状凹部の中間部3箇所微小引け巣の存在を示した。押し湯下の中間部に引け巣が発生しなかったのは、押し湯からの溶湯補給が有効に作用した結果と考えられる。C 方案の場合をまとめると、解析による予測は、やや過剰なものであったが、実際の引け巣も極めて微小であり、必要条件の予測値としては過小ではなく、適切と考えられる。

## 4 まとめ

以上のことから、本研究における FCD450 鋳造品の CAE による引け巣発生予測は、

- ①最終凝固位置
- ②等凝固時間曲線の閉ループ位置
- ③温度勾配の閾値：1.0°C/cm 以下の領域
- ④ $G/\sqrt{R}$  の閾値：0.5以下の領域

を総合して評価することにより、実際の引け巣発生域とほぼ一致し、引け巣を過小に予測することなく、適切に行うことができることが分かった。

## 謝辞

本研究を進めるに当たり、客員研究員として御指導いただいた(有)張技術事務所 代表取締役 張博 様に感謝の意を表します。

## 文献

- 1) 大中逸雄：コンピュータ伝熱・凝固解析入門－鋳造プロセスへの応用－，丸善，(1985)，212
- 2) Shannon Wetzel：Simulation: Not Just for the Big Guys, Modern Casting, 9(2008), 35
- 3) 大浦賢一，Cristian Teodosiu，牧野内昭武，永井寛，永瀬重一：FEM凝固熱収縮連成シミュレーションを用いた砂型鋳物のそり解析，第154回鋳造工学会全国講演大会講演概要集，5(2009)，(印刷中)