

# 半凝固ダクタイル鋳鉄成形法の開発

*Development of Semi-Solid Casting Process for Ductile Cast Iron*

板村 正行\* Masayuki ITAMURA  
糸藤 春喜\*\* Haruki ITOFUJI  
安 達 充\*\*\* Mitsuru ADACHI

ダクタイル鋳鉄の高品質・高生産性を図るため、砂型鋳造からダイカストへの取り組みがされてきたが、チル発生と金型寿命の問題で広く普及されるまでに至っていない。従来の鋳造技術では熱処理なしでは黒鉛化が不可能であった。今回、フリー窒素によるチル化抑制技術と半凝固鋳造技術を適用することで熱処理なしで黒鉛の微細化（黒鉛粒数の向上）を達成する成形法を開発したので報告する。

## 1. はじめに

ダクタイル鋳鉄は図1に示すようにFCや鋳鉄管や可鍛鋳鉄の生産量が減少する中で、FCDが直線的に増加している。近年、自動車用部品は、CO<sub>2</sub>排出量削減・低燃費化の観点から軽量で強靱なダクタイル鋳鉄の開発が進められている。さらに製造コスト削減という大きな課題があるため、ダクタイル鋳鉄を砂型鋳造から生産性の高いダイカストでおこなう取り組みがされてきたが、チル抑制と金型寿命の問題で広く普及されるまでに至っていない<sup>1)-9)</sup>。これまでにダクタイル鋳鉄の半凝固・半溶融の分野では微細化する鋳鋼以上の強度と伸びをもつ高強度部品の成型法の確立のため、1988年に「レオテック」が設立、虹枝が半溶融ダイカスト法、2011年クロダイト工業（中部サ

ポイン・戦略的基盤技術高度化支援事業）が半凝固鋳造法としての適用事例を報告し実用化に向けて進みつつあるものの、チルが生成の問題で、黒鉛化熱処理なしには使えてないのが現状である。一方アルミ合金の半凝固ダイカストの分野では既に量産されている<sup>10)-23)</sup>。

表1にその半溶融・半凝固成形技術の変遷とダクタイル鋳鉄の技術開発について示す。このような状況の中、半溶融・半凝固鋳造法は、収縮巣、偏析の発生が少ないこと、金属組織が細かいこと、酸化物の混入が少ないなどの優れた品質上の特徴を有すること、半凝固状態で成形することから高サイクルでの成形が可能であること、から低コストの成形法として期待できる成形法と考えられる。

著者の糸藤は、金型鋳造においてフリー窒素を制御すれば、チルが発生しないことを発見し、熱処理なし鋳放し材で黒鉛化の超微細化技術を開発した<sup>25)-32)</sup>。

本研究では、フリー窒素によるチル化制御技術

\* 東北大学工学研究科 准教授

\*\* 東北大学 ACS センター センター員

\*\*\* 東北大学 ACS センター センター員 客員教授

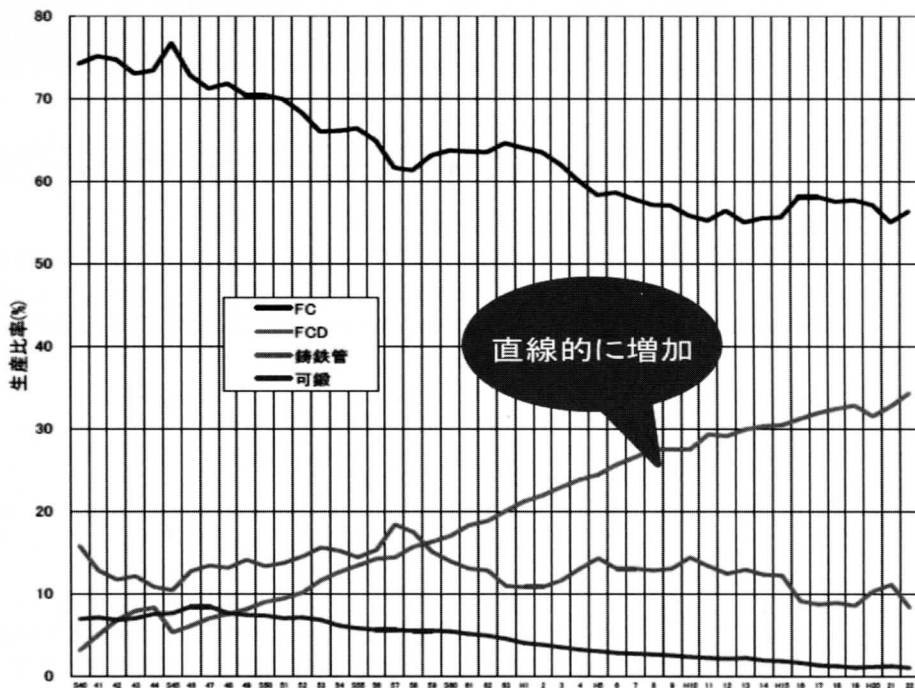


図1 ダクタイル鑄鉄 (FCD) と各種鑄鉄の生産量の比較 (1965~2010年)

表1 半溶融半凝固技術・ダクタイル鑄鉄成形技術の変遷

|      |                                 |                          |
|------|---------------------------------|--------------------------|
| 1953 | 田中ダイカスト                         | ペースト状ダイカスト               |
| 1972 | 東大生研・福岡                         | 半溶融金属の変形抵抗の測定            |
| 1972 | MIT・フレミング                       | レオキャストの研究                |
| 1988 | 塑性加工学会に半溶融・半凝固加工分科会発足           |                          |
| 1988 | レオテック設立 (1988~1994)             |                          |
| 1990 | 第1回半溶融・半凝固加工国際会議 (フランス)         |                          |
| 1992 | 日本製鋼所チクソモールディング成形機完成            |                          |
| 1993 | Buhler・SSM(Semi Solid Metal)開発  |                          |
| 1994 | 旭テック・ATF(Asahi Thixo Forming)開発 |                          |
| 1995 | 東京理化・ホンダエンジニアリング SSM 導入         |                          |
| 1996 | レオテック                           | 鑄鉄ダイカストの開発               |
| 1997 | 東大・木内・杉山                        | 片状黒鉛鑄鉄の開発                |
| 1997 | 日立金属                            | 半凝固ダイカスト法開発              |
| 1998 | 宇部興産                            | 安達ら・NRC(New Rheo Cast)開発 |
| 1999 | 名大・野村・滝田                        | ら片状黒鉛鑄鉄の開発               |
| 2002 | 本田技研・土屋                         | 鑄鉄ダイカスト試作                |
| 2003 | ホンダエンジニアリング                     | ・ASCTの開発                 |
| 2003 | 板村                              | らナノキャスト法の開発              |
| 2005 | 虹技                              | ・鑄鉄の半溶融ダイカストの開発 (熱処理)    |
| 2006 | 板村                              | らカップ法・半凝固ダイカスト法の開発       |
| 2000 | レオテック                           | 鑄鉄ダイカストの開発               |
| 2011 | 板村                              | らスリーブ法・半凝固ダイカスト法の開発      |
| 2011 | クロダイト工業                         | 真空+半凝固ダクタイル鑄鉄開発          |
| 2013 | 板村                              | らモールド法・半凝固ダイカスト法の開発      |
| 2013 | 糸藤                              | ・フリー室素によるチル制御技術の開発       |
| 2015 | 板村                              | ・糸藤・安達 半凝固ダイカスト法の開発      |

と半凝固鑄造技術を適用することで従来の半溶融・半凝固ダイカスト法では、熱処理なしで黒鉛化が不可能であった半凝固ダクタイル鑄鉄の微細化と黒鉛粒数の向上に向けて取り組んだ結果について報告する。

## 2. 東北復興とダクタイル鑄鉄ダイカストプロジェクト

東北大震災の発生を受け、軒並み工場は生産停止となった。東北復興にあたり、いままでの生産性のありかたを見直しが東北経済産業局の井元・三瓶らによって検討された。井元・三瓶らは、学術的に優れたものが今後の日本の生産技術として世界に勝てる高い技術力となり、「東北復興とものづくり技術の基盤の強化」「日本のものづくりを変える」ための転機となると考えていた。

その点からも長きにわたって直線的に増加しているダクタイル鑄鉄の生産性と品質とコストを各段と飛躍させることが、東北復興であり、これからの日本のものづくりを変える先駆けとなるので

はないかと思いで「東北復興とダクタイル鑄鉄ダイカストプロジェクト」が発足した。そのプロジェクトの概要を表2（東北経済産業局・井元作成）に示す

### 3. ダクタイル鑄鉄の微細化と金型鑄造の問題点

ダクタイル鑄鉄の高強度・高靱性化のため、砂型鑄造から金型鑄造による取り組みがおこなわれているが、実現できていないのが現状である。これは金型でダクタイル鑄鉄を生産すると溶湯が急冷され、白鉄化（チル化）組織となり靱性が低下する問題のためである。

表2 半凝固ダクタイル鑄鉄ダイカストプロジェクトの概要

自動車総重量の約10%は、鑄鉄部品で占められる。鑄鉄の総生産量の約50%は自動車部品で、その殆どが砂型鑄造である。生産性・コスト・環境・CO<sub>2</sub>の排出削減の観点から、鑄鉄部品のダイカスト化の取り組みがなされてきたが未だに実用化されていない。

本研究では、鑄鉄の中でも高強度なダクタイル鑄鉄（FCD）部品を半凝固ダイカスト法により製造する技術を開発する。固液共存温度領域まで大幅に溶湯温度を低下させた半凝固溶湯をダイカスト金型へ低温鑄造することで、チル化（脆性化）抑制と金型寿命の問題も克服できる。

本提案によるダクタイル鑄鉄（FCD）ダイカストの実用化により、溶解炉をキューボラから小型の誘導溶解炉に変更することが可能となり、CO<sub>2</sub>の排出量を年間39万トン（約40%）削減可能となる。さらに高温で粉塵が発生する作業環境を改善可能で、廃砂の発生が伴わないため産業廃棄物の大幅な削減が可能となり、地球と人の環境面で優れた産業転換が図れる。

砂型鑄造からダイカスト化による期待効果

- ①生産性・コスト・環境・CO<sub>2</sub>の排出削減を図る。
- ②高強度・高靱性による軽量化を図る。
- ③鑄造サイクルの大幅短縮を図る
- ④大幅なコストダウンを図る。
- ⑤環境問題の改善
  - (1)珪砂が不要 → 堆積・粉塵なし
    - 遊離珪砂発生なし
    - 法規制によるマスクの着用が不要となる
  - (2)鑄込み時のSO<sub>x</sub> NO<sub>x</sub>の発生なし
- ⑥産業廃棄物の改善 廃砂の発生なし

冷却速度とチルの関係は図2に示すように冷却速度を上げると黒鉛粒数が増加するが、チルが生成するので限界があった。堀江らは一定の冷却速度でチルが晶出しなくなる時の黒鉛粒数をチル臨界黒鉛粒数と定義し、チル臨界粒数（ $N$ ）と冷却速度（ $R$ ）から  $N = 0.58R^2 + 19.07R + 1.01$  であるとの回帰式を算出し、その臨界黒鉛粒数は960個/mm<sup>2</sup>であることを明らかにした<sup>24)</sup>。

糸藤らはフリー窒素を制御すれば、チルが発生しないことを見出し、黒鉛の超微細化技術を開発した。図3に従来のダクタイル鑄鉄、図4に超微細化したダクタイル鑄鉄の金属組織写真を示す。超微細化したダクタイル鑄鉄では従来のダクタイ

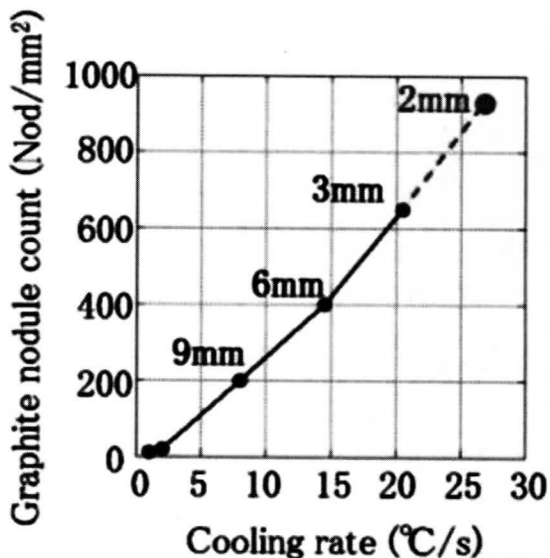


図2 冷却速度とチル臨界粒数との関係<sup>10)2</sup>

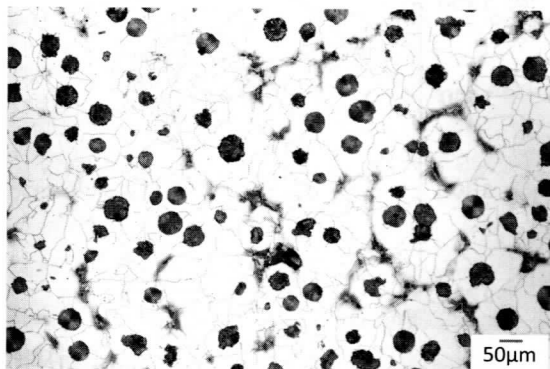


図3 従来のダクタイル鑄鉄の金属組織と黒鉛粒数

ル鋳鉄と比較して 20 倍以上の黒鉛粒数で 3222 個/mm<sup>2</sup>であった。

#### 4. ダクタイル鋳鉄の微細化と従来の半溶融・半凝固鋳造の問題点

半溶融・半凝固鋳造のダクタイル鋳鉄の微細化への取り組みは、1960 年から 1970 年代前半には東工大、三菱重工、東芝機械、宇部興産、日産自動車などで鉄系ダイカストの研究がおこなわれ、鋳鉄ダイカスト製の部品が試作されたが実用化ま

ではいかなかった。1988 年に新日鉄、日本鋼管、神戸製鋼など (18 社) で通産省が設立した基盤技術研究促進センターの出資を受けて研究開発株式会社の「レオテック」を設立し、鉄鋼およびその他の合金への適用について基礎研究が開始された。1996 年にはレオテックにて鉄系セメントダイカストの研究結果が数多く報告され、2004 年には虹枝がチクソキャスト法で農機具部

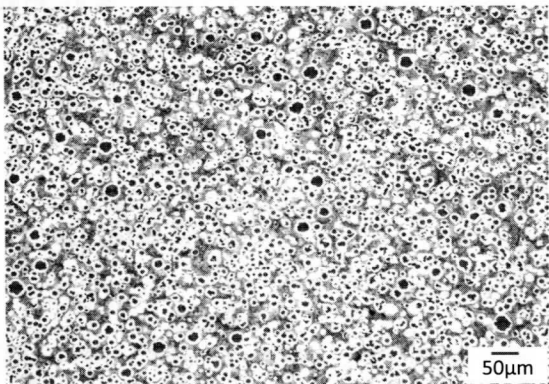
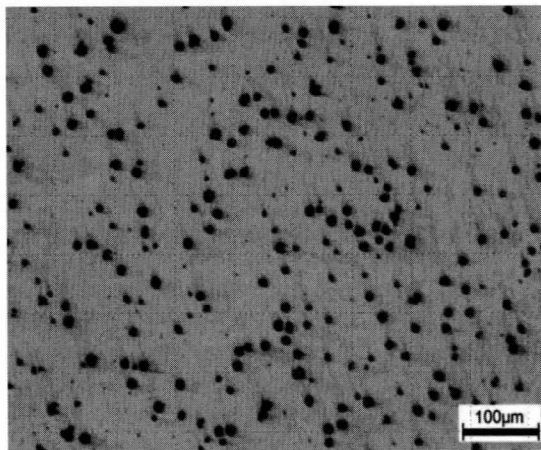


図 4 ダクタイル鋳鉄の金属組織と黒鉛粒数 (フリー窒素)



(黒鉛粒数 788 個/mm<sup>2</sup>)  
図 5 ダクタイルダイカスト微細化事例 (熱処理有)

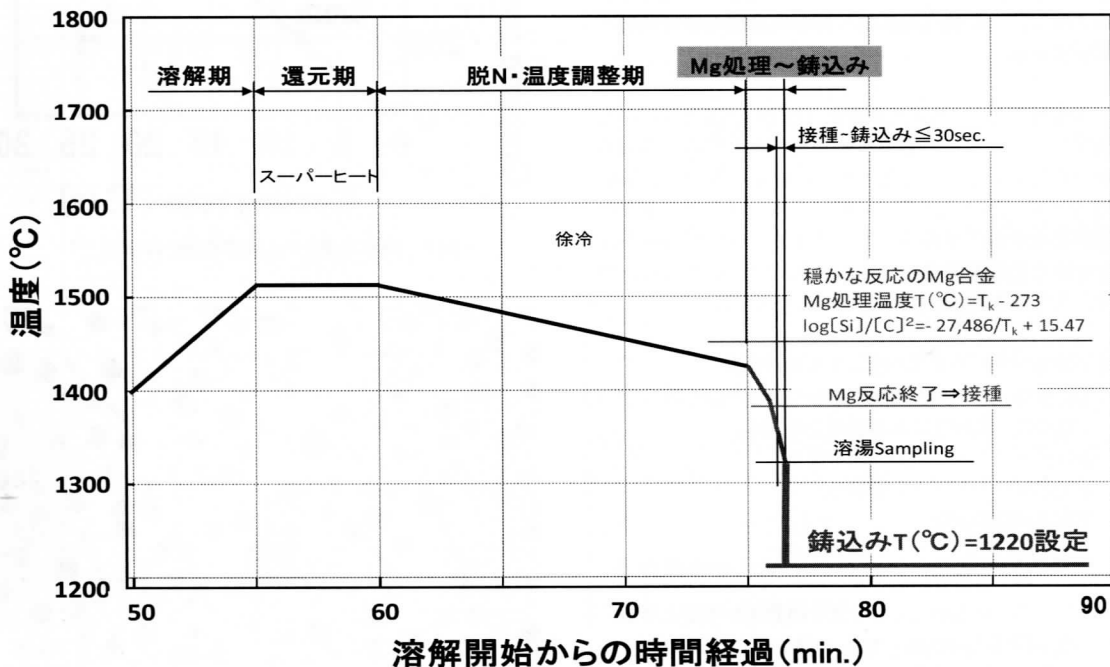


図 6 鑄放し無チル金型 FCD を得るための溶解～鑄込み工程

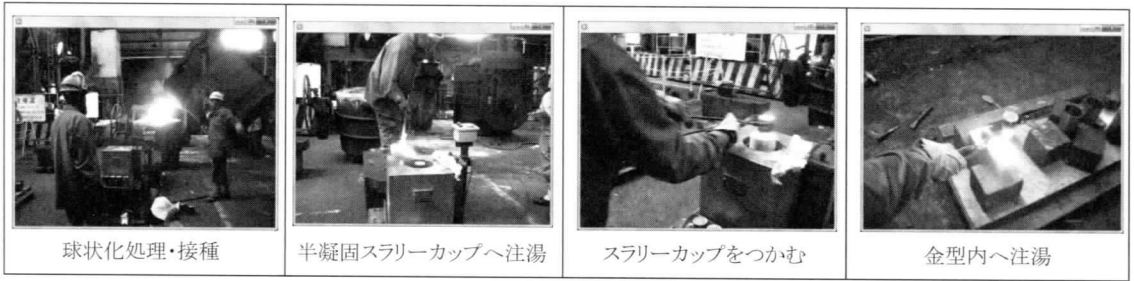


図7 フリー窒素・ナノキャスト法による半凝固铸造

品を鑄鉄ダイカストで実用化している。

しかしながら、半溶融ダイカストの虹枝および半凝固ダイカスト法のクロダイト工業もチル化のため黒鉛化熱処理なしには使えてないのが現状である。

図5に鑄造後、熱処理によりダクタイル鑄鉄を微細化した参考事例（特許掲載金属組織；スケールが $100\mu\text{m}$ ）を示す。その結果、黒鉛粒数が $788\text{個}/\text{mm}^2$ で、従来の制御技術の限界値である $960\text{個}/\text{mm}^2$ を超えていない。

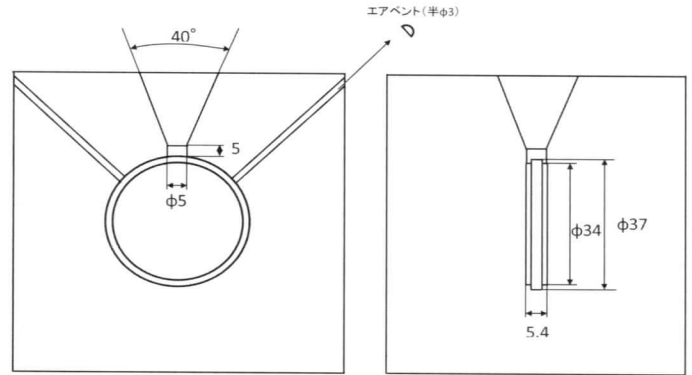


図8 コイン型の金型方案

## 5. フリー窒素・ナノキャスト法による半凝固铸造実験

図6に半凝固スラリー生成用のカップ仕様、図7に宇部スチールにておこなったFCD600半凝固铸造実験の実施状況を示す。20 ton 低周波炉に元湯を溶製し、球状化処理・接種後、半凝固スラリー生成カップに注湯し、電磁攪拌をおこなった。固相率制御のため図6による半凝固スラリー生成用カップを変えて、金型内へ鑄造した。この方法では、金型注湯時のカップ投入や半凝固生成条件に課題があり、一時中断した。

## 6. フリー窒素・スリーブ法による半凝固铸造実験

### 6.1 実験方法

まず、重力下で半凝固金型鑄造を試み、チルや引け巣生成の程度、鑄肌、寸法精度等の鑄造性を確認した。

表3 球状化処理及び接種後の目標化学成分 (mass%)

| C    | Si   | Mn    | P      | S     | F・Mg  | T・Mg  |
|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 3.50 | 3.30 | <0.10 | <0.020 | 0.010 | 0.015 | 0.025 |

25 kg 高周波誘導炉に元湯を溶製し、スーパーヒート後、 $\text{CO}/\text{SiO}_2$  臨界平衡温度以下 $-15^\circ\text{C}$ でプランジャーにて炉内球状化処理を実施した。球状化剤は、低N系Fe-Si-3Mgを用いた。その後、Ca系Fe-75Siにて出湯流接種を行った。鑄込み溶湯の目標化学成分を表3に示す。鑄込みは、接種後に、取鍋温度が $1220^\circ\text{C}$ を目標とした。工程は、フリー窒素制御を意識したものとした。

### 6.2 実験結果 (コイン型)

図8に、コイン型の金型方案、図9に25 mm 砂型Yブロック、図10に鑄造と比較して半凝固鑄造品の金属組織（黒鉛粒数）を示す。25mm砂型Yブロック（黒鉛粒数 $111\text{個}/\text{mm}^2$ ）に比較して半凝固鑄造の黒鉛粒数は $1640\text{個}/\text{mm}^2$ であった。

### 6.3 実験結果（ナックル型）

図 11 に、ナックル型の鑄造状況を示す。鑄込み重量は、約 5.3 kg である。金型は、S50C にて製作し、基礎塗型と作業塗型を塗布した。予熱は、金型に内蔵のヒータにて行い、温度を 350℃ に設定した。金型からの供試材の取出しは、500℃ 以下とした。

ナックルの鑄し外観を図 12 に示す。極一部に湯回り不良やドロスカミが見られたが、全体的には、良好な形状が得られた。厚肉部を切断した結果、引け巣は皆無であった（図 13）。

### 6.4 実験結果（金型内容湯温度と充填挙動）

図 14、図 15 に鑄込み中の金型内容湯温度計測

結果と充填挙動との関係とあわせて示す。金型内充填中の測温箇所の温度は、1160℃ のほぼ一定温度で充填していることがわかった。これは、注湯口から充填された 1224℃ の溶湯がランナー内（湯道内）で冷却され、ゲート近傍の測温箇所では固液共存温度領域の 1160℃ となって一定温度で充填されており、いままで著者らがアルミの半凝固ダイカストで行っているスリーブ法の流動挙動と同様であることを確認した。

各社砂型量産市販品ナックルと半凝固鑄造品ナックルの金属組織と黒鉛粒数の比較を図 16、図 17 に示す。その結果、砂型量産市販品ナックルの黒鉛粒数は、A 社 122 個/mm<sup>2</sup>、B 社 159 個/m

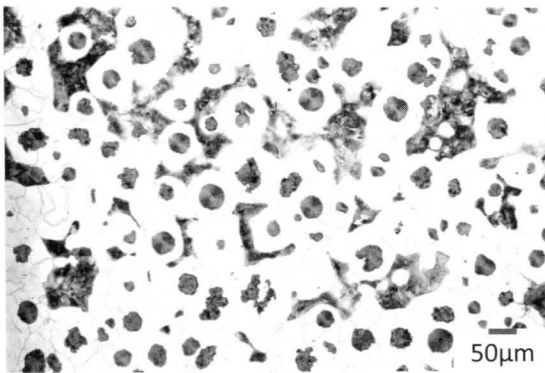


図 9 25mm 砂型 Y ブロック（黒鉛粒数 111 個/mm<sup>2</sup>）

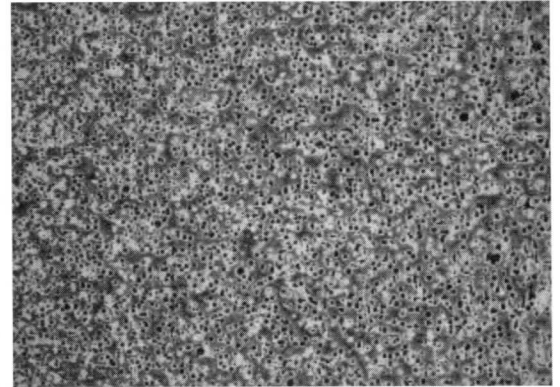


図 10 コイン型半凝固鑄造（黒鉛粒数 1640 個/mm<sup>2</sup>）



図 11 フリー窒素・スリーブ法による半凝固鑄造

m<sup>2</sup>, C社 171個/mm<sup>2</sup>に対して、金型・半凝固  
 鑄造品ナックルの黒鉛粒数は、加圧なしで1785  
 個/mm<sup>2</sup>, 加圧ありで2992個/mm<sup>2</sup>の結果となり、  
 砂型量産市販品と比較して一桁も多くなっ  
 ていることが確認された。

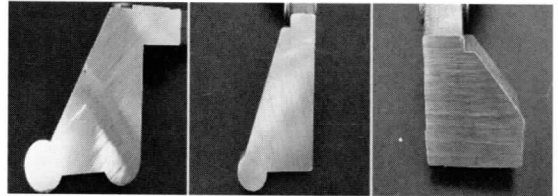
## 7. まとめ

フリー窒素制御した溶湯を金型内で半凝固成形  
 する技術の開発により、熱処理なしで、チルや引  
 け巣のないダクタイル鑄鉄製のナックルが得られ  
 た。

砂型市販品ナックルの黒鉛粒数が122~171個  
 /mm<sup>2</sup>であるのに対して、金型・半凝固鑄造品ナッ

クルは、加圧なしで1785個/mm<sup>2</sup>, 加圧ありで  
 2992個/mm<sup>2</sup>の結果が得られ半凝固成形の微細  
 化が確認された。

今後、コンパクトな装置によるダクタイル鑄鉄  
 鑄物の金型鑄造・成形技術の開発へと展開する予



(1) A部 (2) B部 (3) C部  
 図13 切断面の目視観察 (図12-A, B, C)

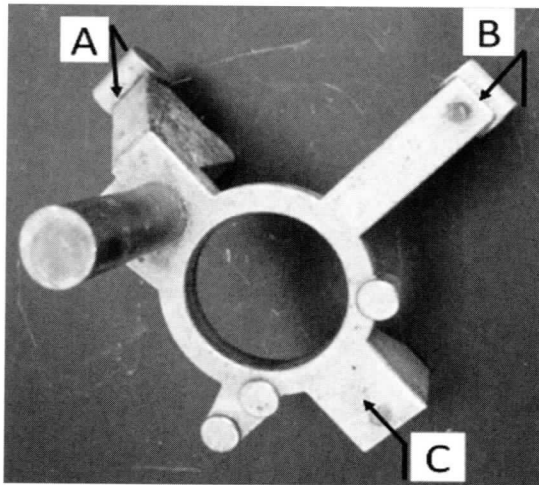


図12 ナックルの鑄放し外観

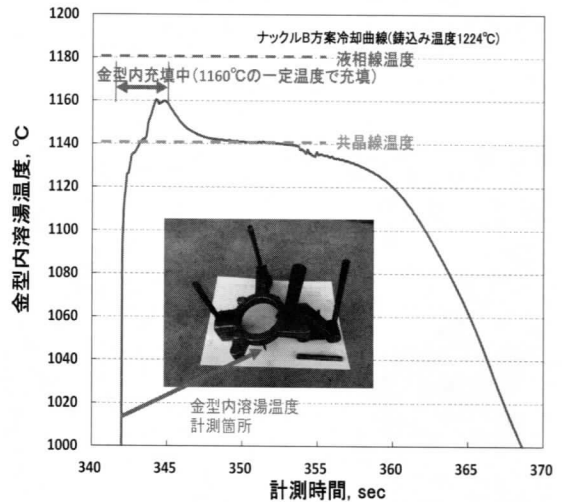


図14 金型内溶湯温度・計測結果

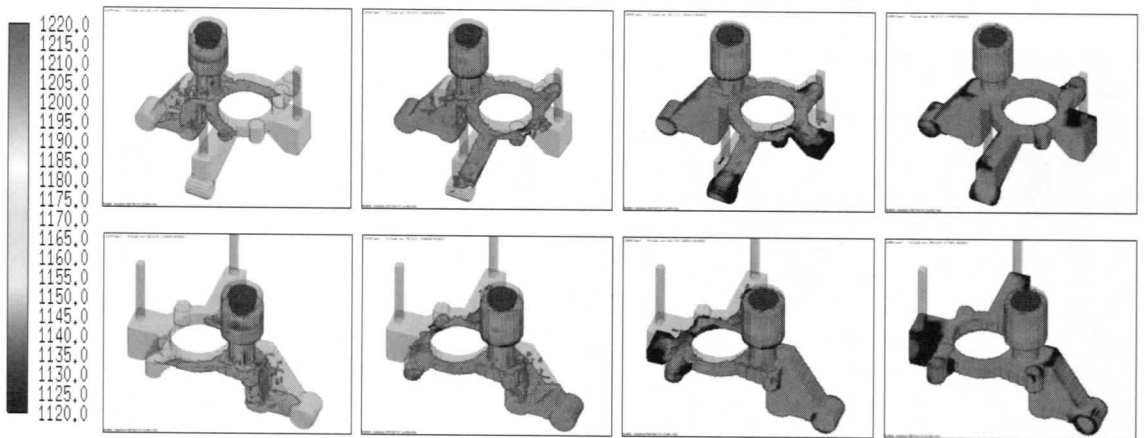


図15 金型内溶湯温度・解析結果 (温度コンタ図)

定である。

参考文献

- 1) 吉田, 北村, 安堂, 廣中; 鑄造工学 68(1966)141
- 2) 吉田; 塑性と加工 41 (2000)1215

- 3) 木内, 杉山; 鑄造工学 69(1997)438
- 4) 木内, 杉山; 塑性と加工 42(2001)173
- 5) 土屋, 上野, 高木; Honda R&D Technical

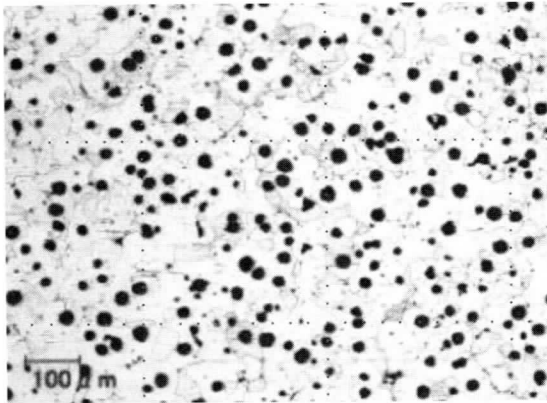


図 16-1 A社の金属組織 171個/mm<sup>2</sup>

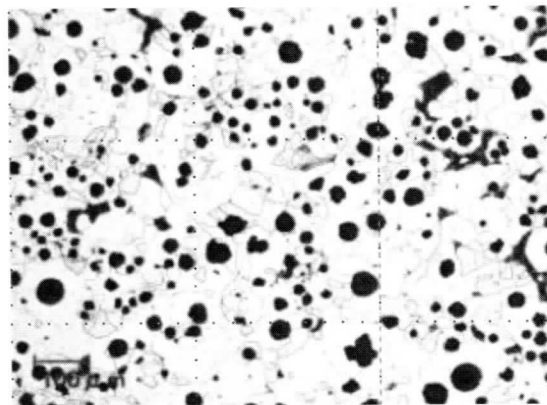


図 16-2 B社の金属組織 159個/mm<sup>2</sup>

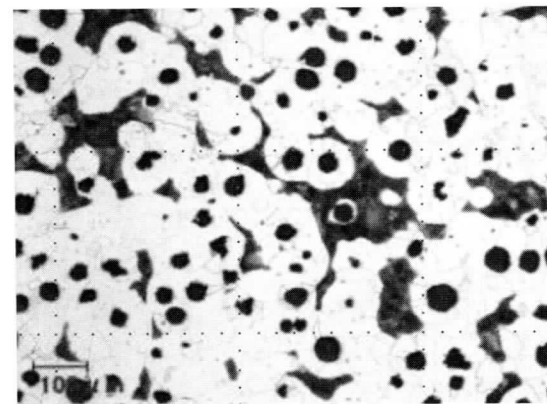


図 16-3 C社の金属組織と黒鉛粒数 122個/mm<sup>2</sup>

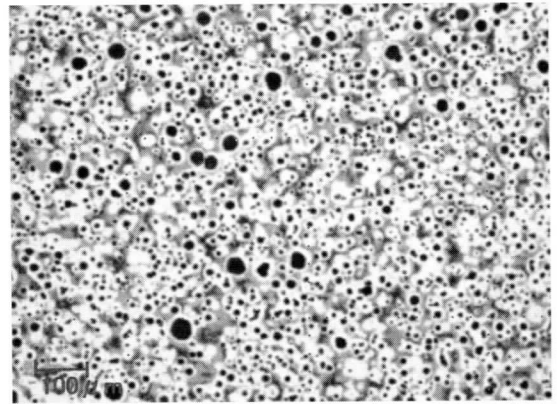


図 16-4 半凝固鑄造（加圧無）金属組織 1785個/mm<sup>2</sup>

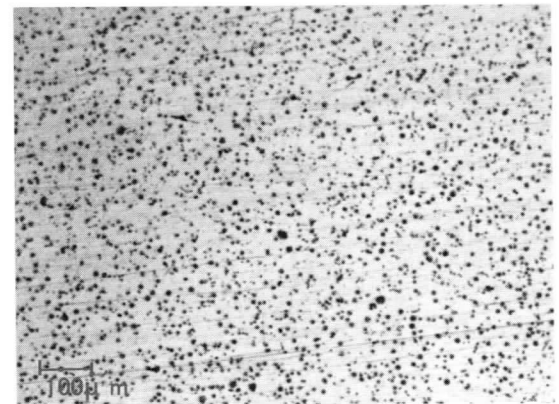


図 16-5 半凝固鑄造（加圧有）金属組織 2992個/mm<sup>2</sup>

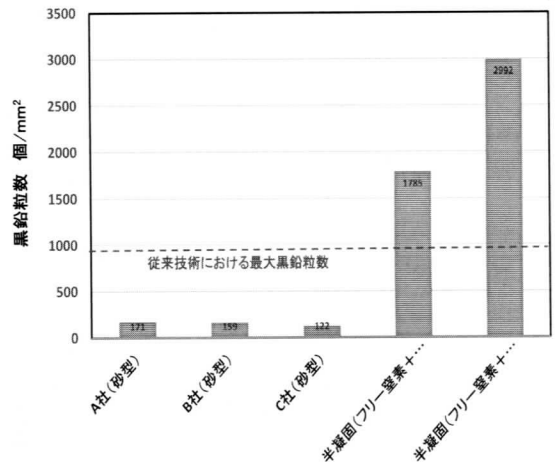


図 17 砂型市販品と半凝固鑄造品の黒鉛粒数の比較



Review;Vol14 No1(2002)247

- 6) 滝田, 今泉, 野村; 鑄造工学 73(2001)721
- 7) 大加戸, 黒田, 藤永, 四海, 牛込; 日本鑄造工学会概要集(2004)81
- 8) 高木, 黒田, 滝田, 他「半凝固鑄造」鑄造工学 159 大会(2011)153
- 9) B. Marineki; Modern Vasting 42, 6(1962) 99
- 10) 柴田, 山根, 早田, 金内: 鑄造工学, 69(1997), 885
- 11) 金内, 今村, 柴田: 塑性と加工, 41 (2000), 1197
- 12) 金内, 柴田, 今村: 鑄造工学, 74(2002)9, 595
- 13) 安達, 佐藤, 佐々木等: 1998 日本ダイカスト会議論文集(1998), 123
- 14) 安達, 佐藤: 塑性と加工, 41 (2000), 1191
- 15) 安達, 内田, 佐藤, 佐々木, 原田, 石橋: 軽金属, 51 (2001), 568
- 16) 佐々木, 原田, 河島, 上野, 黒瀬, 河田, 佐藤, 安達, 前田: 2002 日本ダイカスト会議論文集(JD-02), 181
- 17) 安達, 佐藤, 佐々木, 原田, 石橋, 川崎: 軽金属, 58 (2008), 421
- 18) 渡邊, 土屋, 小林, 花田, 板村, 金, 洪: 2004 日本ダイカスト会議論文集(JD-04), 229
- 19) 板村, 洪, 金: 鑄造工学, 77 (2005), 537
- 20) 安齋・板村・菊池・新山: 2006 日本ダイカスト会議論文集(JD06-38), 253
- 21) M. Itamura, M. Adachi, K. Murakami, M. Tanaka, S. Sato and T. Maeda “Flow analysis application to Rheo-casting” CAST METALS, 15 (2002),173-178
- 22) 嶋崎, 谷口, 上野, 安齋, 板村, 菊池, 前田, Perakit: 2008 日本ダイカスト会議論文集(JD08-31), 205
- 23) 板村, 菊池, 前田, 安齋, 嶋崎, 渡邊: 鑄造工学, 82 (2010)12, 812
- 24) 平成 20 年度戦略的基盤高度化支援事業「極薄肉鑄造技術の自動車用鑄物部品軽量化への応用開発」
- 25) 糸藤, 田村, 守武, 板村, 安齋: 鑄造工学講演概要集 163 (2013)99
- 26) 糸藤, 安齋, 板村, 枝根, 上林, 小谷: 鑄造工学講演概要集 166 (2015) 96
- 27) 糸藤, 安齋, 板村, 枝根, 上林, 小谷: 鑄造工学講演概要集 166 (2015) 96
- 28) 糸藤, 枝根, 黒川, 板村, 安齋: 鑄造工学講演概要集 168 (2016) 148
- 29) 枝根, 天久, 黒川, 糸藤, 板村, 安齋: 鑄造工学講演概要集 168 (2016)149
- 30) 枝根, 天久, 黒川, 糸藤, 板村, 安齋: 鑄造工学講演概要集 168 (2016) 150
- 31) 枝根, 天久, 黒川, 糸藤, 板村, 安齋: 鑄造工学講演概要集 168 (2016)151
- 32) 糸藤, 板村, 枝根, 黒川, 山口: 鑄造工学講演概要集 168 (2016)152

## 山縣 裕 著

コンピュータ・シミュレーションによる

# ダイカスト金型技術の可視化

B5 判、簡易製本、本文 13 級活字 2 段組み、80 ページ、  
4 色カラー、図表写真 220 点、定価本体 5,900 円 (+税)

ダイカスト技術を構成する 3 大要素は材料、ダイカストマシン、金型である。とりわけ金型は一見、鉄の塊のように見えるが、実は複雑・緻密な機能を持たされており、高温・高圧力の急激な変動のもとで使用され、その使用環境は極めて厳しい。

本書は、コンピュータ・シミュレーションによるダイカスト金型技術の可視化に挑んだものであり、この CAE 画像はダイカスト技術のかなり深い部分まで直視的に理解させ、品質管理と改善、生産性の向上に大いに役立つ。ベテラン現場技術者はもちろん、初学者にとって手許に置いておきたい 1 冊である。

●発行 カロス出版

〒104-0031 東京都中央区京橋 1-17-12  
TEL (03) 3562-5736 / FAX (03) 3561-7080