

半凝固ダクタイル鋳鉄成形法の開発

板村正行 糸藤春喜 安達充

東北大学

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。従来のダイカスト技術は、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、CO₂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^{1)~9)}。これまでにダクタイル鋳鉄の半凝固・半溶融の分野では、微細化による鋳鋼以上の強度と伸びをもつ高強度

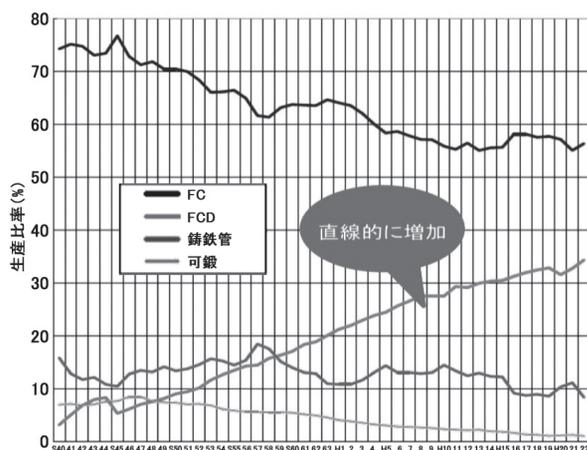


図1 デクタイル鋳鉄 (FCD) と各種鋳鉄の生産量の比較 (1965 ~ 2010年)

表1 半溶融半凝固技術・ダクタイル鋳鉄成形技術の変遷

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 鋳鉄ダイカストの開発
1997	東大・木内・杉山 片状黒鉛鋳鉄の開発
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・滝田ら片状黒鉛鋳鉄の開発
2002	本田技研・土屋ら 鋳鉄ダイカスト試作
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・鋳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 鋳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+半凝固ダクタイル鋳鉄開発
2013	板村らモールド法・半凝固ダイカスト法の開発
2013	糸藤・フリー窒素によるチル化制御技術の開発
2015	板村・糸藤・安達 半凝固ダイカスト法の開発

部品の成型法の確立のため、1988年にレオテックが設立され、2005年に虹枝が半熔融ダイカスト法、2011年にクロダイト工業（中部サポイン・戦略的基盤技術高度化支援事業）が半凝固鑄造法としての適用事例を報告している。しかし、実用化が進むものの、チル生成の問題で黒鉛化熱処理なしには使え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^{10)~23)}。

表1に半熔融・半凝固成形技術の変遷とダクタイル鑄鉄の技術開発について示す。半熔融・半凝固鑄造法は、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く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ため高サイクルでの成形が可能であることなどから、低コストの成型法として期待できる成型法と考えられる。

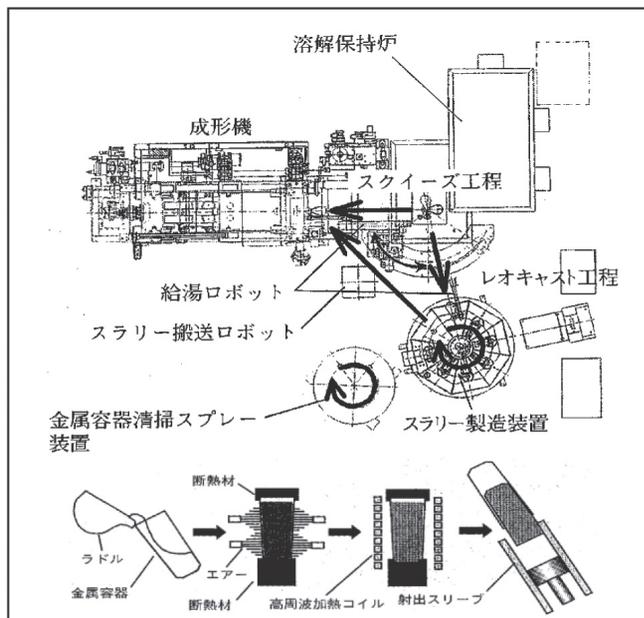


図2 NRC法の概要

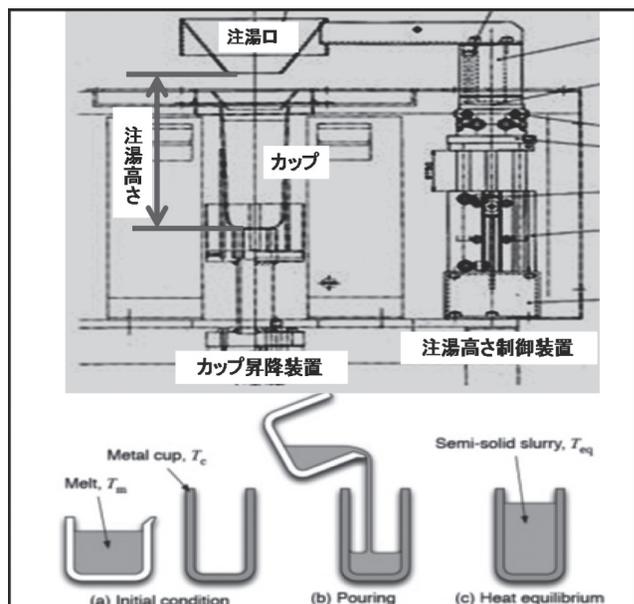


図3 カップ法の概要

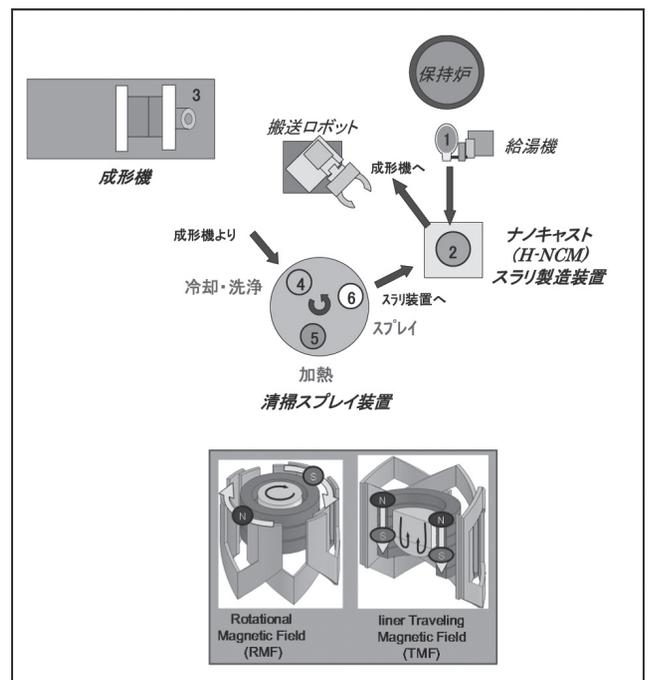


図4 NanoCast法の概要

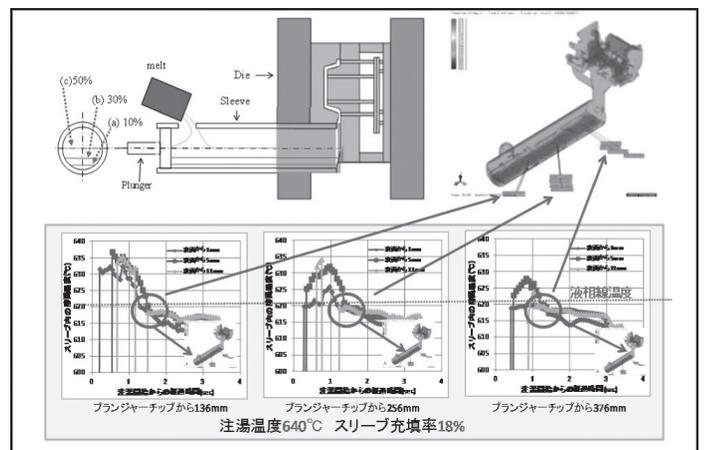


図5 スリーブ法の概要

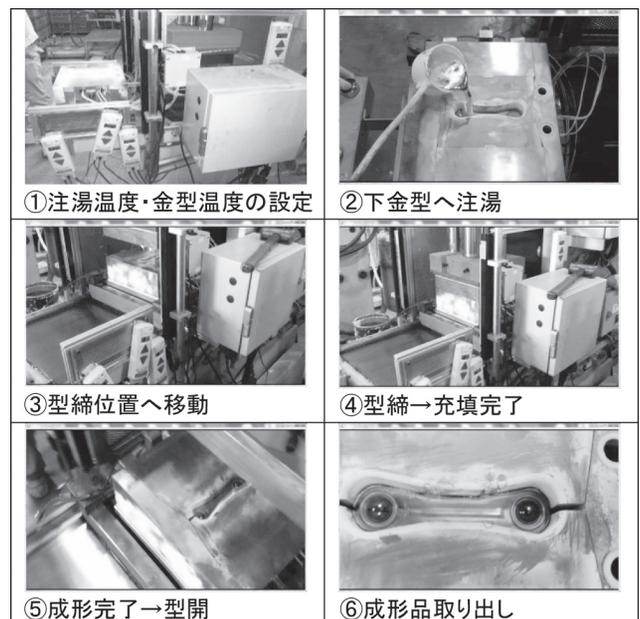


図6 モールド法の概要

著者らは、これまでに半凝固鑄造技術として①NRC法、②NRF法、③ナノキャスト法、④カップ法、⑤スリーブ法、⑥モールド法を開発した(図2～図6、表2)。さらに、ダクタイル鑄鉄の金型鑄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、熱処理なしの鑄放し材で黒鉛化の超微細化技術を開発した^{25)～32)}。

本研究では、フリー窒素によるチル化制御技術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不可能であった鑄放しでの

ダクタイル鑄鉄の黒鉛化、微細化および黒鉛粒数の向上に向けて取り組んだ。

表2 モールド法と他の半凝固プロセスとの比較

	電磁攪拌	カップ	スリーブ
NRC法	なし○	あり●	あり●
NRF法	なし○	あり●	なし○
ナノキャスト法	あり●	あり●	あり●
カップ法	なし○	あり●	あり●
スリーブ法	なし○	なし○	あり●
モールド法	なし○	なし○	なし○

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、工場は、軒並み生産停止となった。東北復興にあたり、従来の生産性のありかたの見直しが、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強化となる」「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。

これらの点からも、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3(東北経済産業局・井元作成)に示す。



図7 DDプロジェクトの発足(2011年4月26日)

表3 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。さらに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・CO₂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、CO₂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の改善が可能で、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・CO₂の排出削減が図れる。
- ②高強度・高靱性による軽量化が図れる。
- ③鑄造サイクルの大幅短縮が図れる。
- ④大幅なコストダウンが図れる。
- 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 → 法規制のマスク着用が不要
 - (2)鑄込み時のSO_x NO_xの発生なし
- ⑥産業廃棄物の改善 廃砂の発生なし
- ⑦鑄造工場のコンパクト化が図れる。

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ため

ある。

冷却速度を上げると黒鉛粒数が増加するが、それには限界があり、チルが生成するようになる(図8)。堀江らは、一定の冷却速度でチルが晶出しなくなるとき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/mm² であることを明らかにした²⁴⁾。

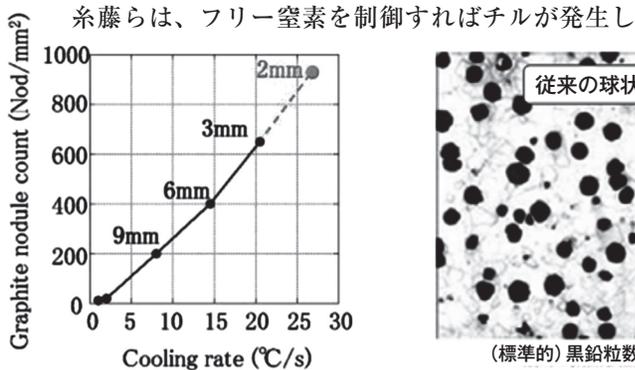


図8 冷却速度とチル臨界粒数との関係¹⁰⁾

ないことを見出し、黒鉛の超微細化技術を開発した。図9に従来のダクタイル鑄鉄、図10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、従来のダクタイル鑄鉄と比較して20倍以上の黒鉛粒数となっている。

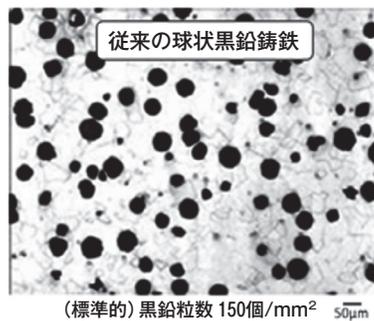


図9 従来のダクタイル鑄鉄の金属組織と黒鉛粒数

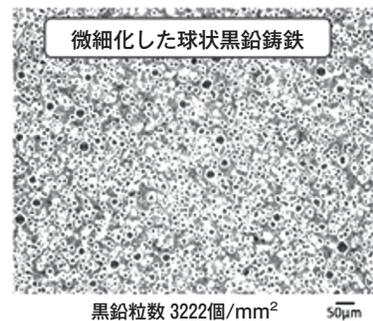


図10 開発したダクタイル鑄鉄の金属組織と黒鉛粒数

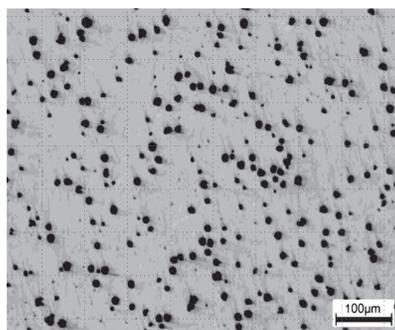
4. ダクタイル鑄鉄の微細化と従来の半溶融・半凝固鑄造の問題点

半溶融・半凝固鑄造のダクタイル鑄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、日産自動車などでおこなわれ、鑄鉄ダイカスト製の部品が試作されたが実用化までにはいたらなかった。1988年に新日鉄、日本鋼管、神戸製鋼など(18社)で通産省の出資を受けて研究開発株式会社「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ミソリッド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11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100µm)を示す。その結果、黒鉛粒数が 788 個/mm² で、従来の制御技術の限界値である 960 個/mm² を超えていない。



(黒鉛粒数 788 個/mm²)

図11 ダクタイルダイカスト微細化事例(熱処理有)

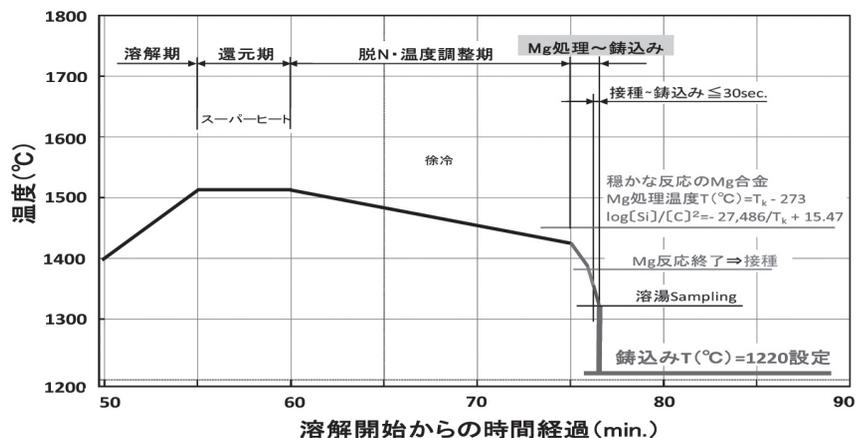


図12 鑄放し無チル金型FCDを得るための溶解〜鑄込み工程

5. フリー窒素・ナノキャスト法による半凝固鑄造実験

図6に鑄放し無チル金型FCDを得るための溶解〜鑄込み工程、図13に宇部スチールにておこなったFCD600半凝固鑄造実験の実施状況を示す。20ton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。



図13 フリー窒素・ナノキャスト法による半凝固鑄造

6. フリー窒素・スリーブ法による半凝固鑄造実験

6.1 実験方法

先ず、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。

25kg 高周波誘導炉に元湯を溶製し、スーパーヒート後、CO/SiO₂ 臨界平衡温度以下 -15℃でプランジャーにて炉内球状化处理を実施した。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4示す。鑄込みは、接種後に、取鍋温度が1220℃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。

表4 球状化处理およ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

6.2 実験結果 (コイン型)

図14にコイン型の金型方案を示す。図15に25mm砂型Yブロック、図16に半凝固鑄造品の金属組織を

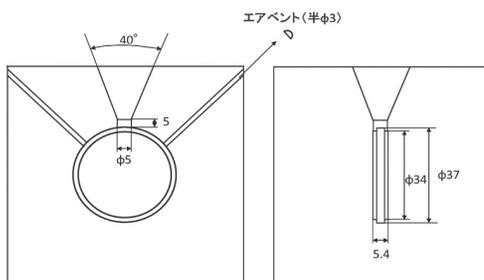


図14 コイン型の金型方案

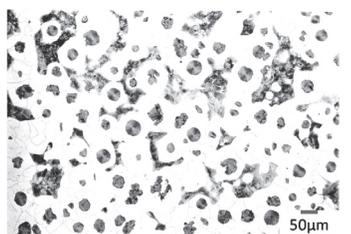


図15 25mm 砂型Yブロック (黒鉛粒数 111 個/mm²)

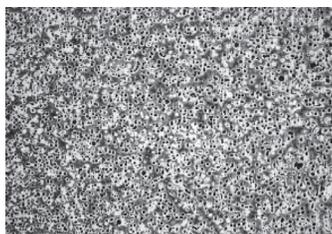


図16 コイン型半凝固鑄造 (黒鉛粒数 1640 個/mm²)

示す。25mm 砂型 Yブロックが黒鉛粒数 111 個/mm² に対して、半凝固鑄造の黒鉛粒数は 1640 個/mm² であった。

6.3 実験結果(ナックル型)

図17にナックル型の鑄造状況を示す。鑄込み重量は、約5.3kg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。

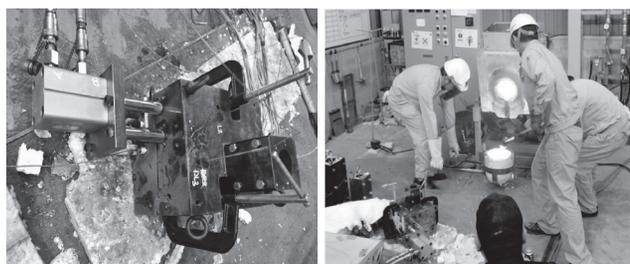


図17 フリー窒素・スリーブ法による半凝固鑄造

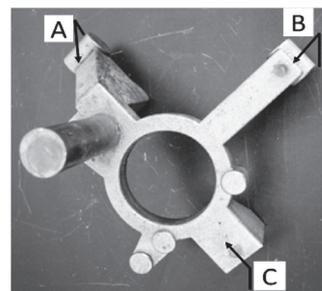
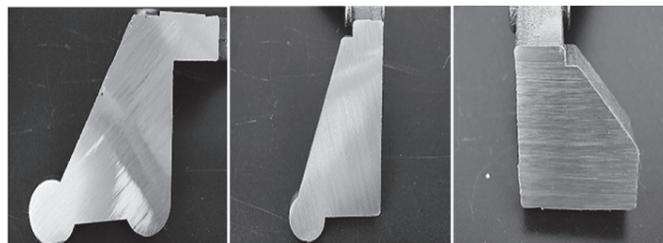


図18 ナックルの鑄放し外観



(1) A部 (2) B部 (3) C部

図19 切断面の目視観察 (図12-A、B、C)

ナックルの casting 外観を図18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19)。

6. 4 実験結果(金型内溶湯温度と充填挙動)

図20に casting 中の金型内溶湯温度計測結果を示す。金型内充填中の測温箇所温度は、注湯口から充填された1224℃の溶湯がランナー内(湯道内)で冷却されて固液共存温度領域となり、1160℃のほぼ一定温度で充填していることがわかった。この半凝固充填は、事前 CAE 解析の予測とほぼ一致した(図21)。この流動挙動は、著者らがアルミの半凝固ダイカストで行ったスリーブ法のそれと同様であることを確認した。

市販の砂型量産ナックルと半凝固 casting ナックルの金属組織と黒鉛粒数の比較を図22、図23に示す。その結果、市販の砂型量産ナックルの黒鉛粒数は、A社 122個/mm²、B社 159個/mm²、C社 171個/mm²

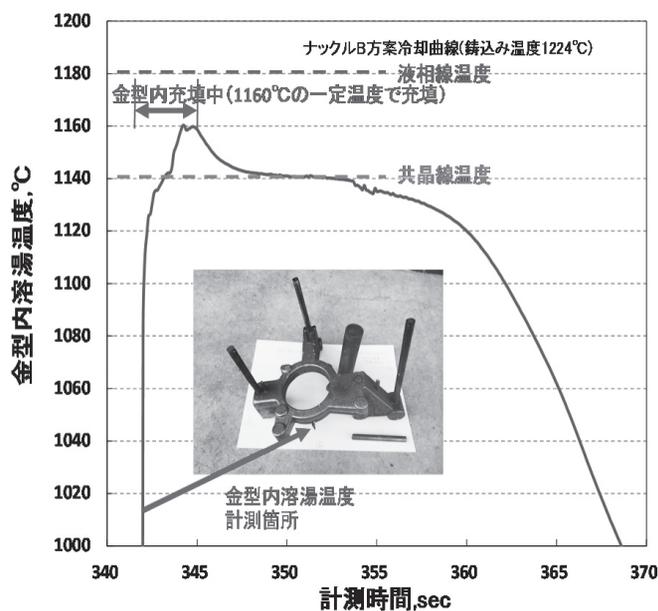


図20 金型内溶湯温度・計測結果

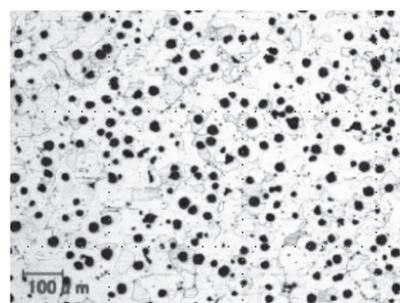


図22-1 A社の金属組織 171個/mm²

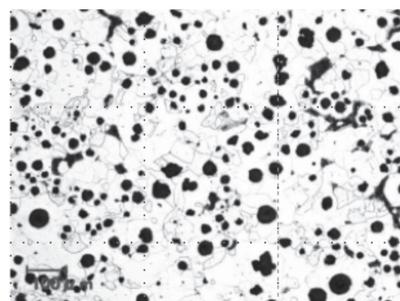


図22-2 B社の金属組織 159個/mm²

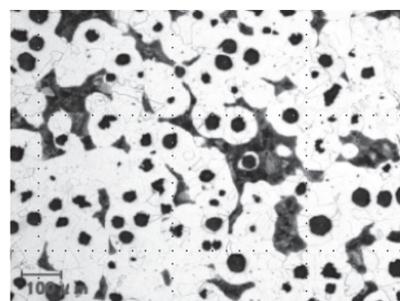


図22-3 C社の金属組織と黒鉛粒数 122個/mm²

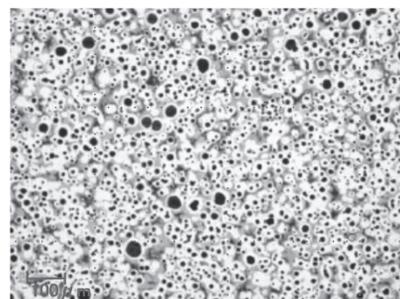


図22-4 半凝固 casting (加圧無) 金属組織 1785個/mm²

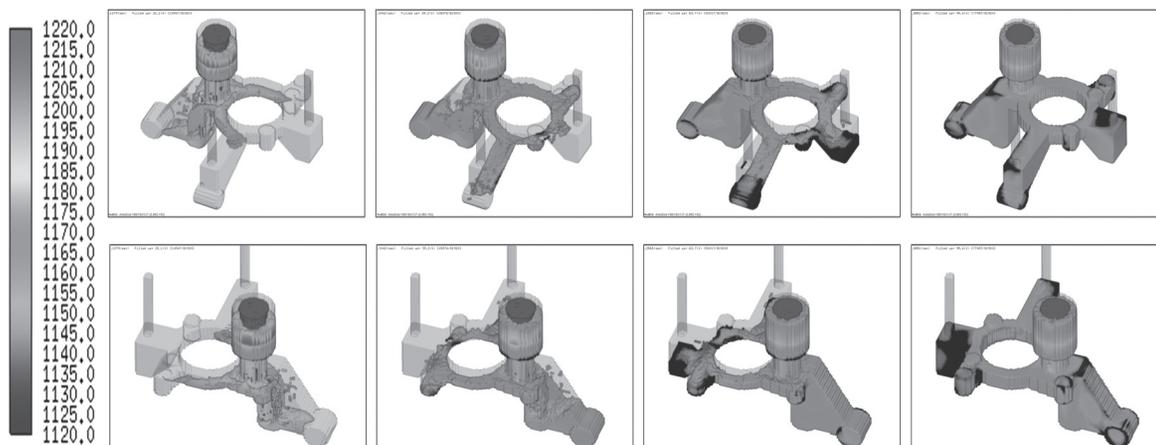


図21 金型内溶湯温度・解析結果(温度コンタ図)

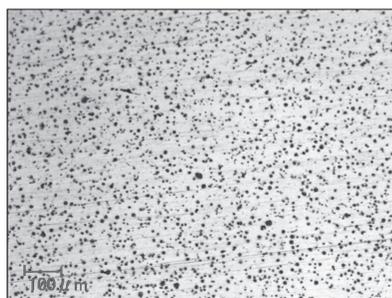


図22-5 半凝固鑄造(加圧有)金属組織 2992個/mm²

に対して、金型・半凝固鑄造ナックルの黒鉛粒数は、加圧なしで1785個/mm²、加圧ありで2992個/mm²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。

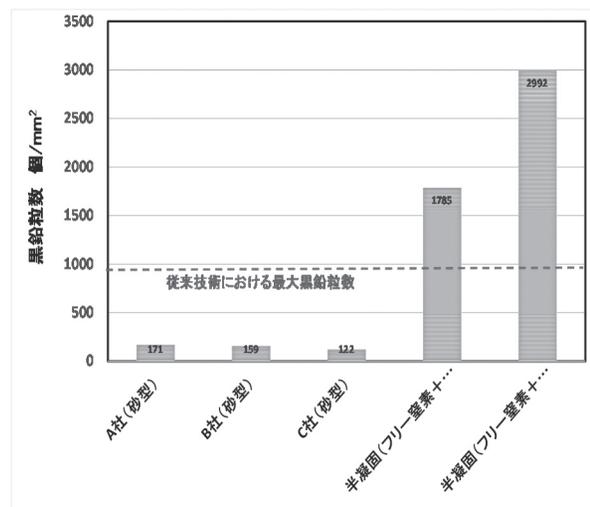


図23 砂型市販品と半凝固鑄造品の黒鉛粒数の比較

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、チルやひけ巢のないダクタイル鑄鉄製ナックルが得られた。

市販の砂型量産ナックルの黒鉛粒数が122~171個/mm²であるのに対して、金型・半凝固鑄造ナックルは、加圧なしで1785個/mm²、加圧ありで2992個/mm²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物の金型鑄造・成形技術の開発へと展開する予定である。

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 Review; Vol.14, No.1 (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