

東北復興とダクティルダイカストプロジェクト

Ductile Diecasting Project along with Tohoku Revitalization

板村 正行* Masayuki ITAMURA
糸藤 春喜* Haruki ITOFUJI
井元 尚充** Takamitsu IMOTO

東北大震災の翌月の2011年4月26日、東北復興とものづくり技術の基盤を強化することを目的としてダクティルダイカストプロジェクトがスタートした。ここでは、「東北復興とダクティルダイカストプロジェクト」と題してこれまで取り組んできた内容について紹介する。

(井元) 2011年(平成23年)3月11日午後2時46分に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波、およびその後の余震により引き起こされた大規模地震災害で死者、行方不明者は2016年(平成28年)3月10日現在で18,455名(死者15,894名、行方不明者2,561名)と報告されています。

その東北大震災発生翌月の2011年4月26日(火)東北大学ACSセンターの板村さんが当局に来訪されました。東北に元気を取り戻すビックリするようなプロジェクトの提案としてDDプロジェクト(ダクティルダイカストプロジェクト)を提案いただき、スタートすることができました。

(図1)

(板村) そのDDプロジェクトのスタートにあたり、東北大震災発生翌月の4月15日に安達さん前田さん糸藤さんと検討会をおこないました。

その後、4月15日から22日にかけて数社会社訪問をしてDDプロジェクトスタートの概要説明をおこないました。

(糸藤) DDプロジェクトは、この図(図2)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(ダクティル鋳鉄)が直線的に増加していることに着目し、従来の砂型鋳造からダクティルダイカストに変えようとしたことから始まりました。このDDプロジェクトは、まず私たちができる鋳造技術で東北復興とものづくり技術の基盤強化に貢献したいとの思いから、スタートしたものです。

(井元) 東北大震災の発生を受け、軒並み工場は生産停止となりました。当時はまず復旧ということでしたが、震災前を超える新しい取り組みによって、活力を生んでいくということも大切だと思いました。そのためには、やっぱり学術的に凄いもの、今までの常識を覆すものが必要だと思います。

* 東北大学工学研究科 ACS センター

** 東北経済産業局(現・花巻市)



図1 DDプロジェクトの発足 (2011年4月26日)

従来、何度も試行されてきたダクタイル鋳鉄の金型鋳造化について、半凝固により温度を下げ、微細化するというコンセプトを聞いたときはびっくりしました。更に、鋳造やダイカストのレジェンドが皆で手を組んで東北で立ち上げていこうというお話を聞いて、これは応援すべきものと思いました。

ダクタイルのダイカスト化は、単にマシンがあれば良いというだけでなく、設備オペレーション上も大変なノウハウの付帯を要求するもので、日本のものづくりに必要な取り組みではないかと思うのです。

(糸藤) ダクタイル鋳鉄の研究一筋に生きてきた

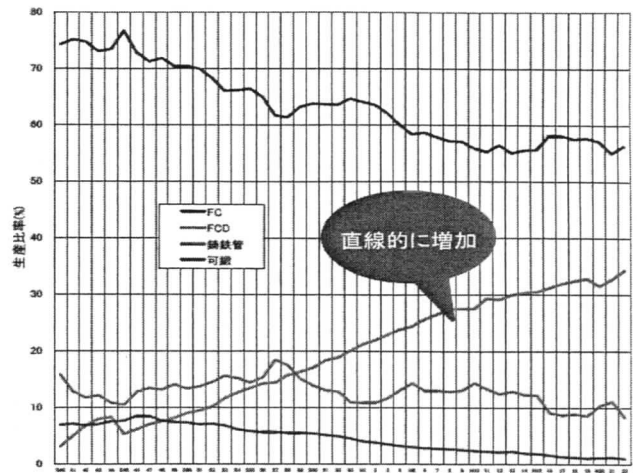


図2 各種鋳鉄の生産量の比較 (1965~2010年)

私にとって、井元さんのダクタイルダイカストで日本のものづくりは変わる！との思いを是非実現させたい。

ところで、生産性と品質とコストというだけでなく、ダクタイル鋳鉄の生産現場で研究してきた私の思いは、鋳造工場の環境改善も重要です。まずは、珪砂の問題です。珪砂が不要になれば、堆積・粉塵なしとなり、遊離珪酸の発生がなくなり、法規制によるマスクの着用が不要となります。次に鋳込み時のSO_x、NO_xの発生がなくなります。さらにクロマイトが不要となり、6価クロムの発生がなくなります。廃砂の発生がなくなることで産業廃棄物の改善となり、大きく鋳造現場の環境が改善されます。

(井元) 素晴らしいですね。ものづくりの生産性・品質・コストだけでなく、環境問題も大きく変えたいですね。

(板村) 生産性と品質とコストに取り組むことが、環境問題まで改善につながるものづくりを兼ね備えている。このDDプロジェクトは、素晴らしい活動が期待できる鋳造技術ですね。まず私たちがわくわくしてきますね。このような鋳造技術で日本列島を技術の宝石箱でいっぱいになりたいですね。

表1 DDプロジェクトの概要（井元作成（当時））

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・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FCD（球状黒鉛鑄鉄）部品を半凝固鑄造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、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・CO₂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_x NO_xの発生なし

⑥産業廃棄物の改善 廃砂の発生なし

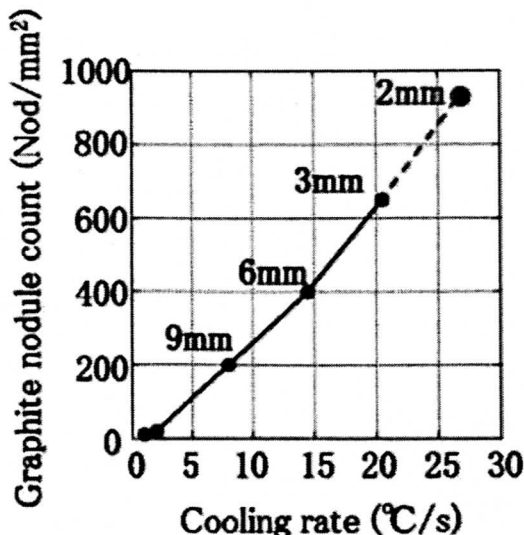


図3 冷却速度とチル臨界粒数との関係¹⁰⁾

（井元）ところで、ダクタイル鑄鉄は砂型で鑄造されています。金型寿命の問題とは別に金型にすることで、どのような機能向上が期待できると考えていますか？

（糸藤）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鑄鉄の開発を進めてきました。さらに製造コスト削減という大きな課題があるため、ダクタイル鑄鉄を砂型鑄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ましたが、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ません¹¹⁻⁹⁾。これまでにダクタイル鑄鉄の半凝固・半溶融の分野では微細化による鑄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）が半凝固鑄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はないでしょうか。一方、私のダクタイル鑄鉄の研究結果から、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、熱処理なし鑄放し材で黒鉛化の超微細化技術を開発しました¹¹⁾⁻¹⁸⁾。今回のDDプロジェクトでは、フリー窒素によるチル化制御技術を適用することで従来の熱処理なしでは黒鉛化が不可能であったダクタイル鑄鉄に対して、チルの発生がなく、微細化で黒鉛粒数の多い鑄造品が可能となります。

球状黒鉛鑄鉄の高強度・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ますが、実現できていないのが現状です。これは金型で球状黒鉛鑄鉄を鑄造すると溶湯が急冷され、白銹化（チル化）組織となり靱性が低下するからです。

冷却速度とチルの関係は図3に示すように冷却速度を上げると黒鉛粒数が増加しますが、チルが生成するので限界がありました。岩手大学の堀江

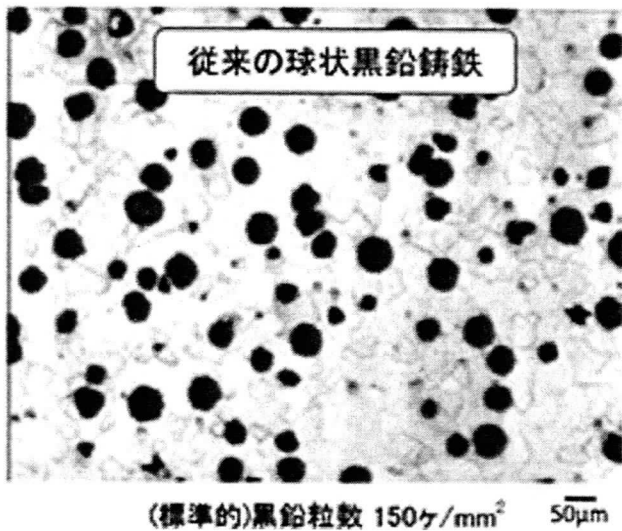


図4 従来の球状黒鉛鑄鉄の金属組織と黒鉛粒数

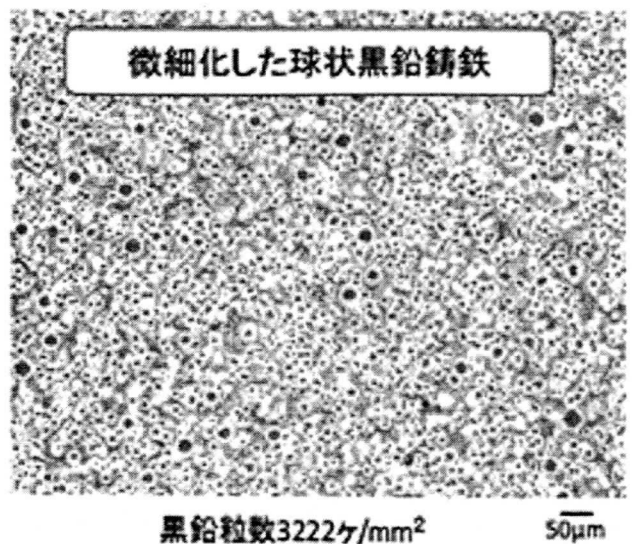


図5 フリー窒素制御した球状黒鉛鑄鉄の金属組織と黒鉛粒数

先生たちは、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/mm^2 であることを明らかにしています¹⁰⁾。

私の研究では、フリー窒素を制御すれば、チルの発生がなくなり、黒鉛が超微細になる鑄造技術を開発しました。図4に従来の球状黒鉛鑄鉄、図5にフリー窒素を制御した金型で超微細化した球状黒鉛鑄鉄の金属組織の写真を示します。超微細化した球状黒鉛鑄鉄では従来の球状黒鉛鑄鉄と比較して20倍以上の黒鉛粒数で 3222 個/mm^2 となっています。

(井元) フリー窒素によるチル制御技術がポイン

トということですよ。議論の余地はあるのですが、何故、フリー窒素にするとチルが出なくなると考えていますか？

(糸藤) 私は、京都大学での研究時代からいままでの研究結果からフリー窒素とチルに相関があることをあきらかにしました(図6)。それは、Fe-C系平衡状態図(図7)からも見て、 Fe_3C 、チルだからその中の結晶格子にはいるのは窒素しかない、Cにとってかわるのは窒素だけです。

そのフリー窒素という観点から今までの研究者を私なりに整理してみると表2のようなフリー窒素とチル化指標(金型鑄造)となります。文献に記載のないことは直接本人と会って私なりに整理しました。赤字が殆どないNo.1と赤字がまったくないNo.2は、無チルとなります。この指標

定義1: 全窒素 N_T = 酸可用性窒素 N_{Sol} + 酸不溶性窒素 N_{Insol}
 $= (\text{フリー窒素 } N_F + A\&N) + A\&N \text{ 以外の窒化物}$

1970年代~1986年: 京大Gr「 N_T とチルとの間に相関がある。」
 ①低 N_T ⇒少チル
 ②Arバブリング, Ca, Al前処理⇒脱 N_2 ⇒少チル, 黒鉛化促進
 ③真空溶解(脱ガス)⇒無チル

定義2: 全窒素 N_T = フリー窒素 N_F + 全窒化物 N_{Al}

1988年~: 糸藤の研究「 N_T とチルとの間に相関がある。」
 ① N_T がチル Fe_3C のCと一部置き換わり, チル化促進
 ②低 N_T ⇒少チル
 ③脱 N_2 ⇒金型でも無チル
 ④Arバブリング, 低O, N溶解, 低N合金処理, 緩冷却⇒無チル

図6 フリー窒素の定義

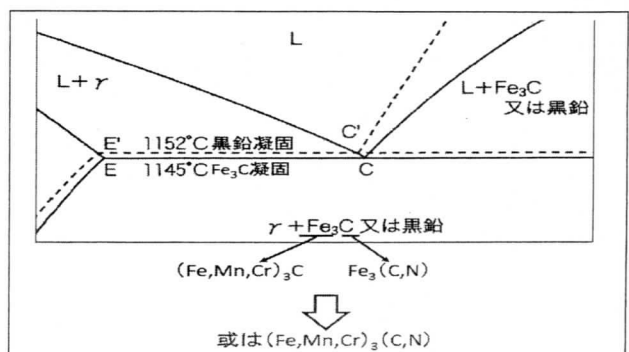


図7 Fe-C系平衡状態図

No.	研究者 西暦	溶解量 投入材	溶解炉	Super Heat (°C)	前処理	Mg処理	接種	鑄込み	化学成分 (mass%)	鑄放し組織
1	宇藤河 1980~1986	3kg ダクタイル 電解鉄 金属Si	Criptal Furnace	1450°C	湯面添加・攪拌 0.3wt% 純Al 0.5wt% 純Ca	湯漬添加 42Mg Coke 1470- 1480°C	湯面接種・攪拌 1.2wt% Fe-Si	金型=70°C 鑄型=C ₂ H ₄ スのみ 坩堝=米淵=1420°C SS φ10 FC φ30	C 3.39~3.77 Si 3.54~4.33 Mn 0.14~0.18 P — S 0.010~0.019 Mg 0.015~0.025	チル
		高純度	1300°Cよりチャージ、断気	断気、10分保持	Al,Ca添加後にFtMg準備、<2~3分		<30秒		高CE、中Mn、 高Mg、NEフリー	
2	橋本忠 1988~1993	3kg ダクタイル 電解鉄 金属Si	50kg高周波炉で母合金 ↓ 5kg高周波炉で3kg再溶解 坩堝増量 Ar:0.7ℓ/min	>1500 Ar:0.7ℓ/min 1400°C	>1500°C Ar:0.7ℓ/min 1400°C	湯漬添加 出湯=1400°C 取鍋→入炉予熱800°C 0.8wt%処理 Fe-45Si-3.1Mg-1.6RE-1.1Ca	湯面接種・攪拌 0.3wt% Fe-75Si-1.2Ca	金型=150°C 鑄型=基礎+C ₂ H ₄ ス 取鍋=1300°C(推定) φ20,25,30連鎖FC * 坩堝入り(リソ樹脂)	C 3.40~3.50 Si >2.60 Mn <0.009 P 0.010~0.020 S 0.010~0.020 Mg 0.013~0.019	チル
		高純度	Ar雰囲気	Ar雰囲気、Super Heat後、1400°Cまで炉冷	1400°CでMg処理、接種後、10秒以内に鑄込み				高CE、高Mn、高Mg	
3	HCNOA 1993~1995	3000kg 鉄鋼 リターン	3t HF溶解炉 加圧3C自動出湯炉 湯面接種 注湯装置	球化・接種剤、カバー材 高加熱容量炉	ブラスモック設置	1shot後、同時量注ぎ処理: 1.5wt% Fe-Si-3Mg 0.6~0.8wt% Fe-75Si 処理温度: 不明(取鍋から逆算>1500°C)	金型=初期130±30°C 鑄型中100~230°C 鑄型=基礎(独自開発) 取鍋=1380~1430°C	C 3.40~3.80 Si 2.80~3.40 Mn 0.15 P 0.029 S 0.011 Mg 0.022	全チル	
		やや高純度	—	—	* 推定: 保持が高温過ぎる	推定: Mg処理のFading考慮有り、30s以内に鑄込み			高CE、中Mn、高Mg	
4	アイシン 2006杉本氏	不明	?t高周波炉	* Mg処理温度からして、 結果として実証された 格好。	—	同時量注ぎ処理: ?wt% (Fe-Si-4Mg + Fe-30Si) ?wt% Fe-75Si 処理温度 : 1500±10°C	金型=630、200±10°C 鑄型=基礎(従来土スレ) 作業(C ₂ H ₄ ス) 取鍋=1400±10°C	C 3.65 Si *3.00 Mn 0.25 P 0.020 S 0.010 Mg *0.040	チル	
		やや高純度	—	通常冷却、但し、1400°C鑄込み後、保持→Mg処理・接種温度が低い。	—	—	断熱鑄型	高CE、高Mn、高Mg		
5	糸原 ヤンマ ツチヨシ 鳥根工技セ 2012~2013	3kg真空高周波炉	1500~1625°C 真空下で脱C過多	—	—	湯漬添加: 1.0wt% Fe-Si-3Mg-1.5RE-0.6Ca-1.95C 処理温度: 1420~1500 接種なし	金型=RT~100°C 鑄型=水性スレのみ 坩堝=測定出来ず	C 3.01 Si 2.53 Mn 0.07 P 0.030 S 0.003 Mg 0.008	モットル	
		やや高純度	≒0.1pa(10 ⁻² torr)	—	—	0.2~0.8pa(10 ⁻² ~10 ⁻¹ torr)	—	—	低過熱C・Si 低S・Mg	

表 2 フリー窒素制御とチル化指標 (金型鑄造)

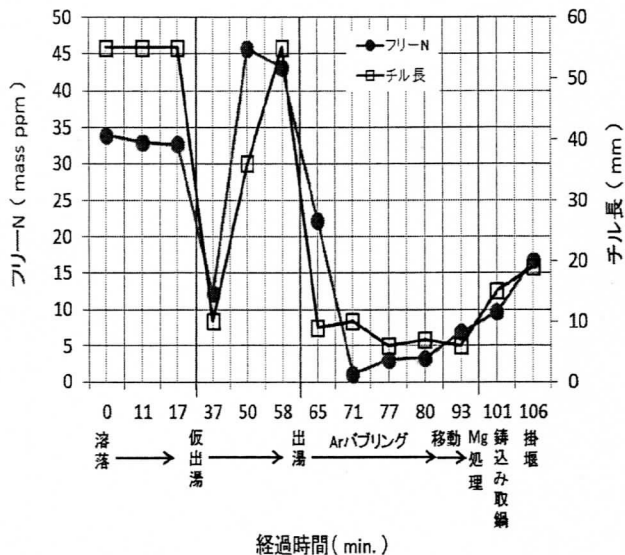


図 8 30 t アーク炉で溶製した FCD450 のフリー N とチル長との相関 (全チル 55mm) ¹¹⁾

作成に 30 年以上もかけた労作です。

アーク炉の湯は、チル化傾向が強く鑄物に不向きとされて来た。この悪評をフリー N 制御によ

り払拭、製品化を実現した (図 8)。1400°C での Mg 処理でチル化傾向が最少となる。これが CO/SiO₂ 臨界平衡温度に相当し、更に、酸素・窒素が最少となることを見出した (図 9) フリー N を制御しチル抑制を安定化した工程としたのが図 11 です。

(井元) フリー窒素とチルの関係は本当に深いですね。もっともっと解き明かしたいです。ところで、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について教えて下さい。

(板村) 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、日産自動車などで鉄系ダイカストの研究がおこなわれ、鑄鉄ダイカスト製の部品が試作されました

が実用化するまでにはいたっていません。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にて、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ました。1996年にはレオテックから鉄系セミノリッドダイカストの研究結果が数多く報告され、2004年にはチクソキャスト法で農機具部品を鋳鉄ダイカストで実用化しています。

しかしながら、半溶融ダイカストおよび半凝固ダイカスト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す。

図12に鋳造後、熱処理によりダクタイル鋳鉄を微細化した参考事例(特許掲載金属組織;スケールが $100\mu\text{m}$)を示しますが、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 $960\text{個}/\text{mm}^2$ を超えるまでにはなっていません。

(井元)フリー窒素によるチル化抑制技術をナノ

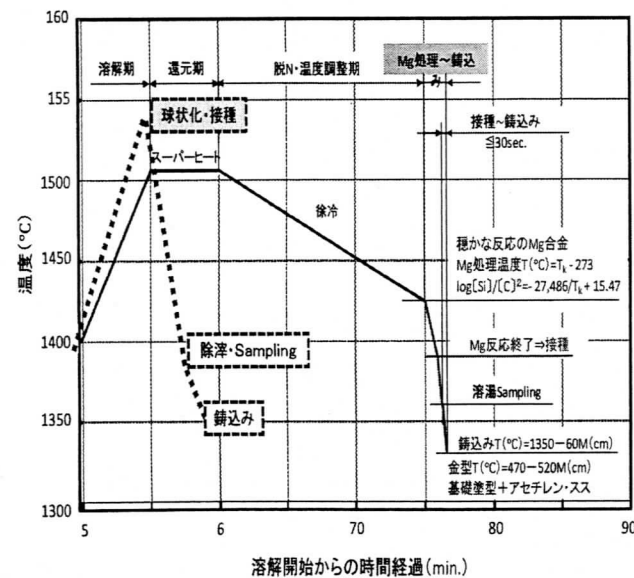


図11 無チル金型FCDを得るための溶解～鑄込み工程

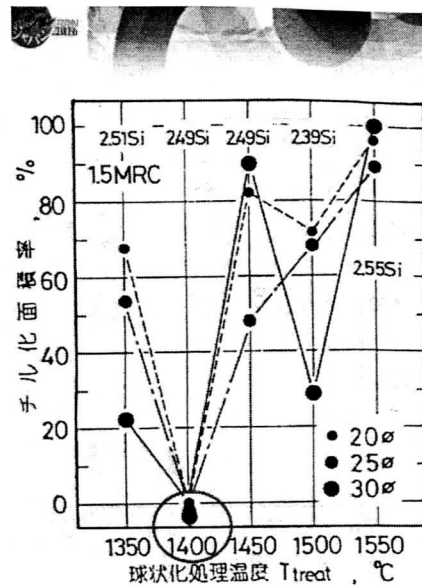


図9 チル化面積率に及ぼす球状化処理温度の影響³³⁾

最少チルに向けたベストの球状化処理:
元湯 $>1500^\circ\text{C}$ \Rightarrow 徐冷 \Rightarrow 処理 $=1400^\circ\text{C}$
 $0.013\sim 0.019\text{Mg}$
* COポイルで脱O, 再酸化させずに処理。
更に、徐冷で脱N.

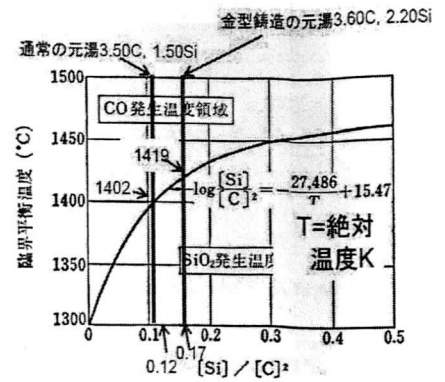
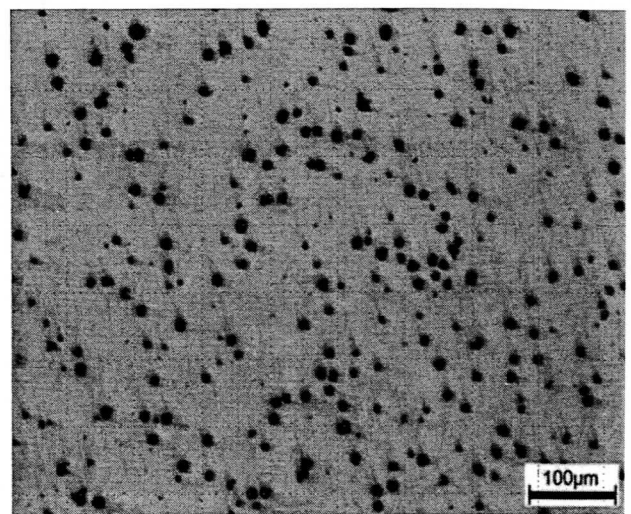


図10 CO/SiO₂反応の臨界平衡温度と成分の関係³⁴⁾

キャスト法による半凝固鋳造実験に適用したらどうなりましたか。

(板村) 図13に半凝固スラリー生成用のカップ仕様、図14に半凝固ダクタイルダイカストの概要、図15に宇部スチールにておこなったFCD600半凝固鋳造実験の実施状況を示します。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、電磁攪拌をおこないました。固相率制御のため図13による半凝固スラリー生成用カップを変えて、金型内へ鋳



(黒鉛粒数 $788\text{個}/\text{mm}^2$)
図12 ダクタイルダイカスト微細化事例(熱処理有)

造しました。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、その課題の対策をとるまで一時中断することにしました。

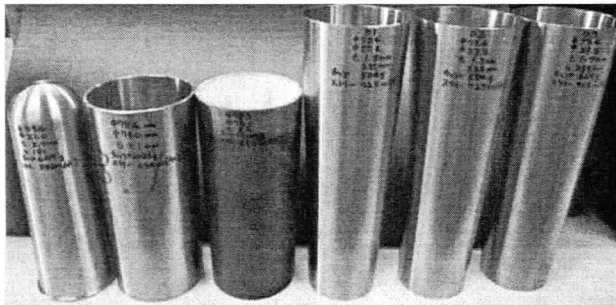
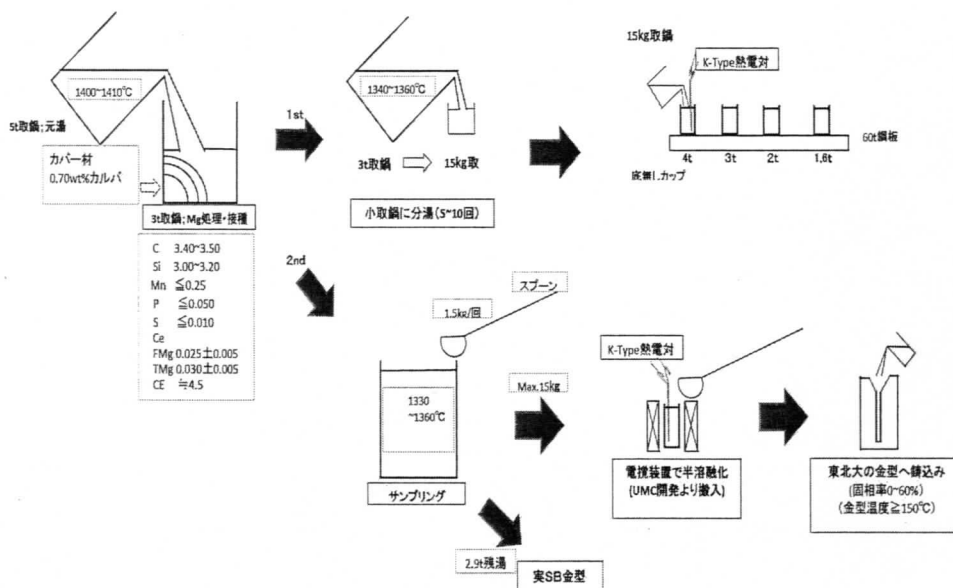


図 13 半凝固スラリー生成用カップ仕様

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



半凝固ダクタイルダイカスト用予備実験要領 2016年7月8日(金) (作成:東北大学ACSセンター糸藤春喜)

図 14 半凝固ダクタイルダイカストの概要

(井元) ここで、やっとスリーブ法やカップ法が出てきました。当方としては、これらの技術がまさに東北で震災前からずっと実用化開発をアルミやマグネでやってきたということで「東北」発の思いれが強い部分です。

フリー窒素によるチル化抑制技術のスリーブ法による半凝固鑄造実験に適用したらどうなりましたか^{11)~18)}。

(糸藤) 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ました。25 kg 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°Cでプランジャーにて炉内球状化処理を実施しました。球状化剤は、低N系 Fe-Si-3Mg を用いてその後、Ca系 Fe-75Si にて出湯流接種を行ないました。

鑄込み溶湯の目標化学成分を表 3 に示します。鑄込みは、接種から 2 分以内、取鍋温度が 1220°C を目標としました。工程は、フリー N 制御を意識したものとしました。

次に、実験結果です。ナックルの鑄放し外観を図 16 に示します。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

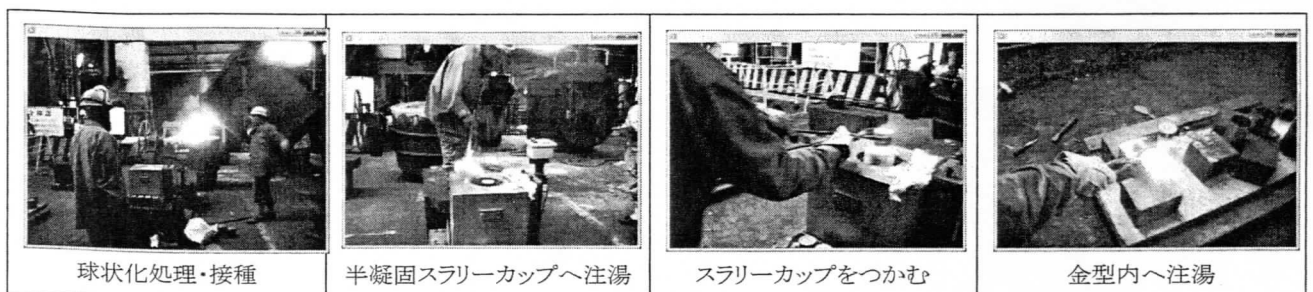


図 15 フリー窒素・ナノキャスト法による半凝固鑄造

な形状が得られました。厚肉部を切断した結果、引け巣は皆無でした（図 17）。図 18 に切断面 B のマイクロ組織を示しましたが、黒鉛粒数は、砂型量産品の 13 倍程度でした。チルの発生は、観察されませんでした。鑄込み中の温度計測により、

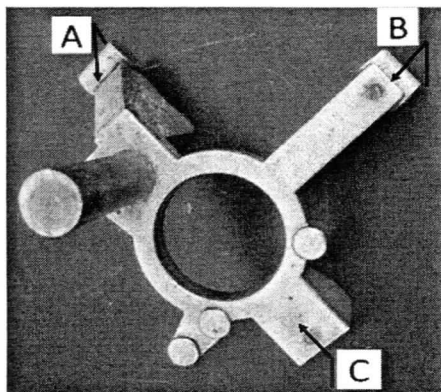


図 16 ナックルの鑄放し外観

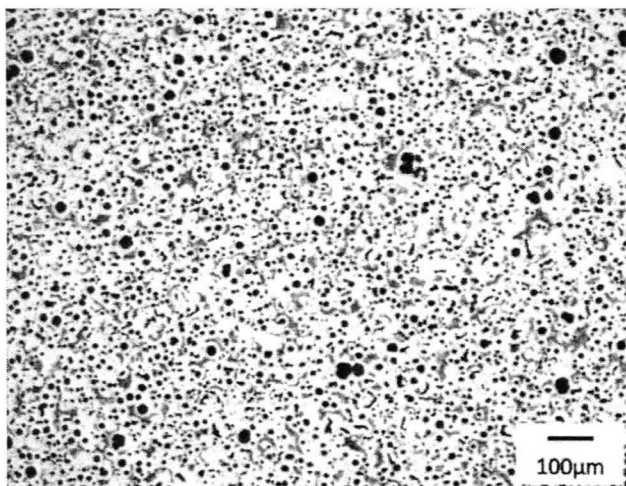
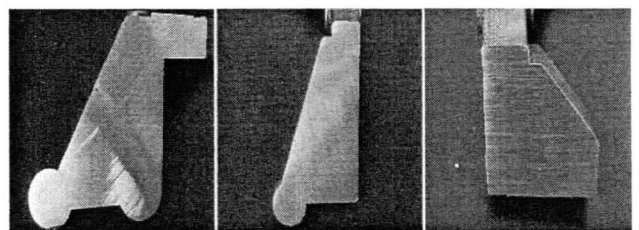


図 18 ナックルの金属組織・黒鉛粒数 1922 個/mm²

共晶温度直上で充填されたことを確認しています。

次に図 19, 図 20 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をあわせて示します。金型内充填中の測温箇所温度は、1160°C のほぼ一定温度で充填していることを確認しました。これは、注湯口から充填された 1224°C の溶湯がラ



(1) A 部 (2) B 部 (3) C 部

図 17 切断面の目視観察 (図 10-A, B, C)

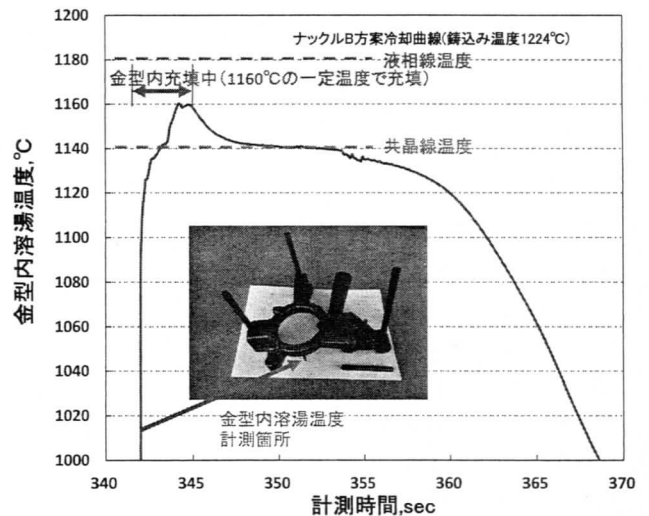


図 19 金型内容湯温度・計測結果

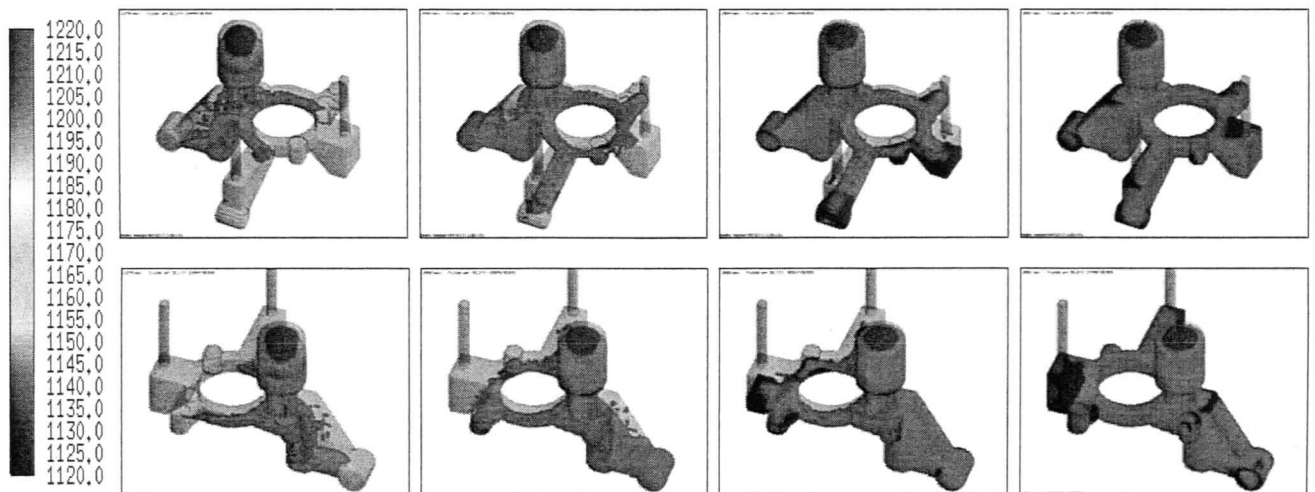


図 20 金型内容湯温度・解析結果

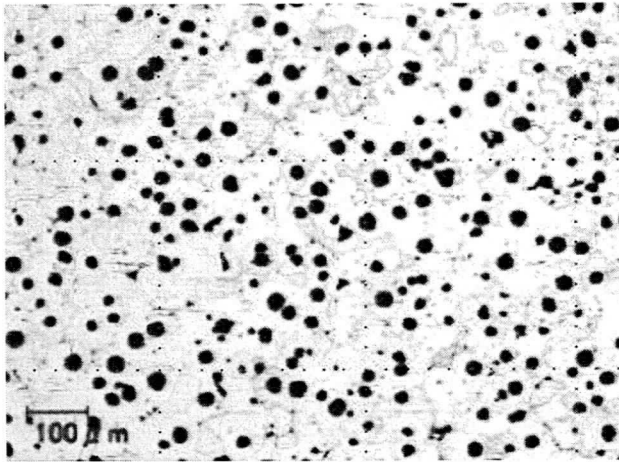


図 21-1 A社の金属組織と黒鉛粒数 171個/mm²

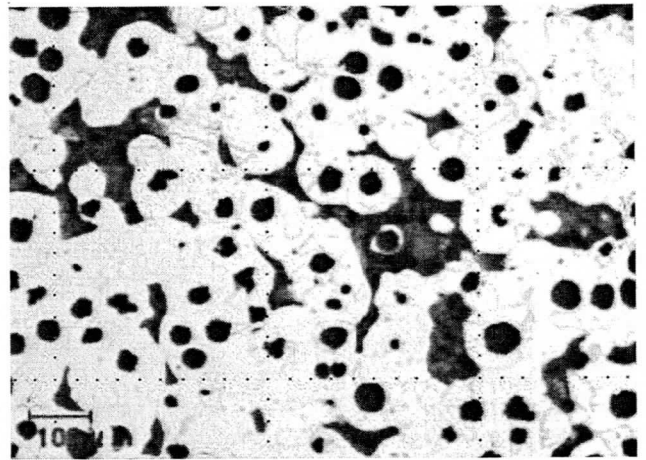


図 21-3 C社の金属組織と黒鉛粒数 122個/mm²

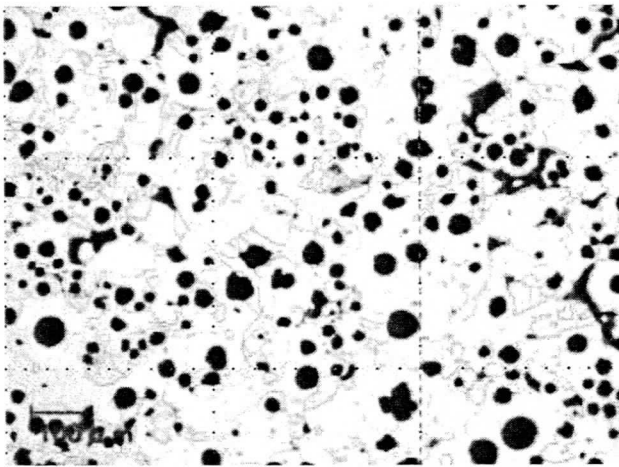


図 21-2 B社の金属組織と黒鉛粒数 159個/mm²

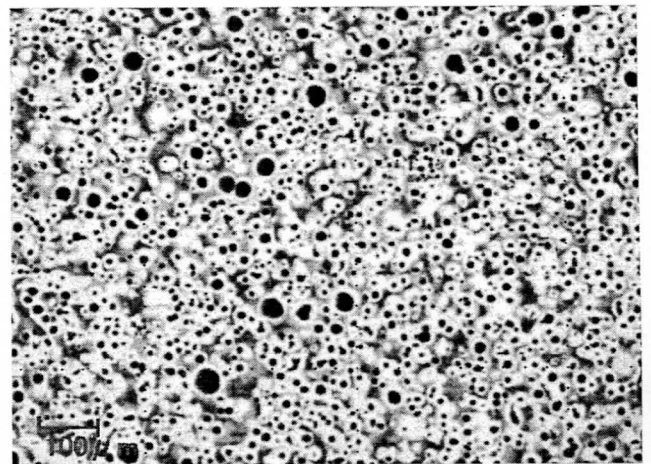


図 21-4 半凝固鑄造（加圧無）金属組織 1785個/mm²

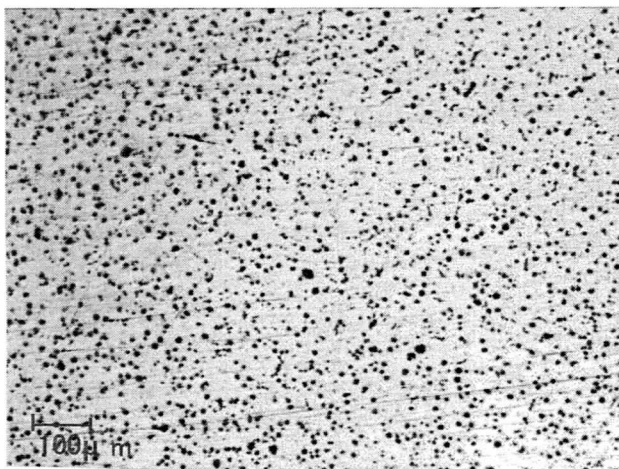


図 21-5 半凝固鑄造（加圧有）金属組織 2992個/mm²

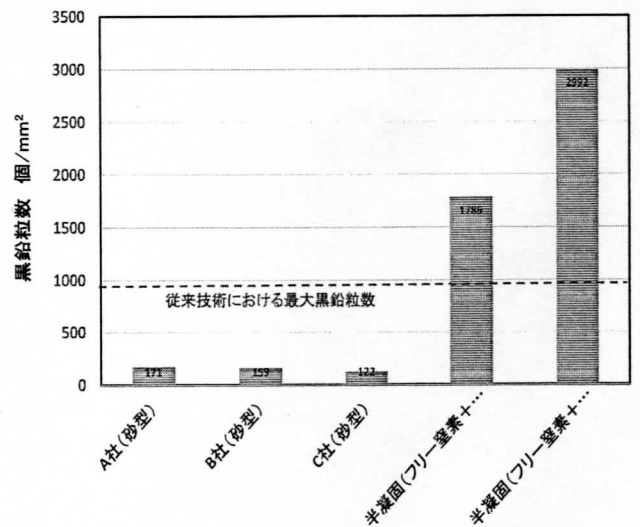


図 22 砂型市販品と半凝固鑄造品の黒鉛粒数の比較

ンナー内（湯道内）で冷却され、ゲート近傍の测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、いままで私たち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が確認できました。

（井元）黒鉛粒数はどうなりましたか。

(糸藤) 黒鉛粒数は各社砂型量産市販品のナックルを購入し比較をしました。その結果を図 21, 図 22 に示します。砂型量産市販品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 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/mm², 加圧ありで 2992 個/mm² の結果でした。砂型ナックルと比較して画期的な黒鉛粒数となりました。

(井元) この結果は, 凄いですね。びっくりしました。

(井元) DD プロジェクトの結果をまとめるとどうなりますか。

(板村) 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ました。

砂型市販品ナックルの黒鉛粒数が 122~171 個/mm² であるのに対して, 金型・半凝固鑄造品ナックルは 2992 個/mm² の結果が得られ半凝固成形の微細化が確認されました。

(井元) ダクタイル鑄鉄の研究一筋に生きてきた糸藤さんとダイカストの研究一筋に生きてきた板村さんの成果ですね。これからが楽しみです。今後, 生産性と品質とコストと鑄造工場の環境改善に向けての取り組みで, 私もこの DD プロジェクトに関わった人間としてまた, 東北経産局の一員として「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」をしっかりと応援していきたいと思っています。

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; 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) 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」
- 11) 糸藤, 田村, 守武, 板村, 安斎; 鑄造工学講演概要集 163 (2013) 99
- 12) 糸藤, 安斎, 板村, 枝根, 上林, 小谷; 鑄造工学講演概要集 166 (2015) 96
- 13) 糸藤, 安斎, 板村, 枝根, 上林, 小谷; 鑄造工学講演概要集 166 (2015) 96
- 14) 糸藤, 枝根, 黒川, 板村, 安斎; 鑄造工学講演概要集 168 (2016) 148
- 15) 枝根, 天久, 黒川, 糸藤, 板村, 安斎; 鑄造工学講演概要集 168 (2016) 149
- 16) 枝根, 天久, 黒川, 糸藤, 板村, 安斎; 鑄造工学講演概要集 168 (2016) 150
- 17) 枝根, 天久, 黒川, 糸藤, 板村, 安斎; 鑄造工学講演概要集 168 (2016) 151
- 18) 糸藤, 板村, 枝根, 黒川, 山口; 鑄造工学講演概要集 168 (2016) 152
- 19) 柴田, 山根, 早田, 金内; 鑄造工学, 69(1997),885
- 20) 金内, 今村, 柴田; 塑性と加工, 41 (2000),1197
- 21) 金内, 柴田, 今村; 鑄造工学, 74(2002)9,595
- 22) 安達, 佐藤, 佐々木等; 1998 日本ダイカスト会議論文集(1998),123
- 23) 安達, 佐藤; 塑性と加工, 41 (2000),1191
- 24) 安達, 内田, 佐藤, 佐々木, 原田, 石橋; 軽金属, 51 (2001),568
- 25) 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
- 26) 安達, 佐藤, 佐々木, 原田, 石橋, 川崎; 軽金属, 58(2008),421
- 27) 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
- 28) 板村, 洪, 金; 鑄造工学,77 (2005),537
- 29) 安斎・板村・菊池・新山: 2006 日本ダイカスト会議論文集(JD06-38), 253
- 30) 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
- 31) 嶋崎, 谷口, 上野, 安斎, 板村, 菊池, 前田, Perakit : 2008 日本ダイカスト会議論文集(JD08-31),205
- 32) 板村, 菊池, 前田, 安斎, 嶋崎, 渡邊; 鑄造工学, 82 (2010) 12,812
- 33) 橋堂忠; 鑄鍛造と熱処理(1993)4,5-15
- 34) 日本強靱鑄鉄協会編(1976)183