

システム開発
16-F-13

ダイカスト湯流れ直接観察システムの 開発に関するフェージビリティスタディ 報告書

— 要 旨 —

平成17年3月

財団法人 機械システム振興協会
財団法人 素形材センター



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要です。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとにシステム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業等を実施しております。

このうち、システム技術開発調査研究事業およびシステム開発事業については、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長：放送大学副学長 中島 尚正氏）を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「ダイカスト湯流れ直接観察システムの開発に関するフィージビリティスタディ」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人素形材センターに委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成17年3月

財団法人 機械システム振興協会

はじめに

我が国製造業では、国際競争力が激化する中で、経済全体の生産性の低迷、厳しい雇用情勢、エネルギー・環境・リサイクル問題の重要性の増大等、その環境が厳しさを増す中、情報技術革新への対応、企業の事業再構築、グローバル化等々の動きが加速しており、経済構造改革の推進の重要性が高まっています。

このような中で、素形材産業は素材に形を与えて機械産業に供給するという、素材産業と機械産業を結びつける重要な役割を担っており、機械産業を中心とする我が国経済発展にとって、素形材産業が今日まで果たしてきた役割は極めて大きく、今後もその重要性に変わりはないでしょう。

技術革新が急速に進む機械産業界にあって、素形材産業は、求められるニーズに即応した機動的な生産体制を確立し、提案型企業への転換、高品質で安価な素形材製品を安定的に供給するため、素形材産業の技術基盤を強化する必要があります。

素形材産業では、CAD/CAM/CAEの進展、新材料の出現、新たなプロセスや型技術等の開発を受けて様々な技術革新が行われておりますが、ユーザニーズの多様化、生産性・歩留り向上、技術・技能の継承、リサイクル・省エネルギー等の諸課題にさらに積極的に対応し、素形材産業の活性化を図ることが強く望まれています。

このような観点に立って、本年度、財団法人素形材センターでは、財団法人機械システム振興協会から「ダイカスト湯流れ直接観察システムの開発に関するフェージビリティスタディ」について委託を受け、本テーマを推進するために当センター内に「ダイカスト可視化委員会(委員長 甲南大学経営学部教授 長坂悦敬 氏)」を設置し、事業を推進してきました。本報告書は、この開発成果をとりまとめたものです。

ここに、本報告書を作成するにあたり、ご指導・ご援助をいただいた経済産業省および財団法人機械システム振興協会に深く感謝の意を表すると共に、長坂委員長をはじめとする委員会委員、開発を実施したアイ・イー・ソリューション株式会社、並びに開発を支援した東洋機械金属株式会社および虹技株式会社に対し、厚く御礼申し上げます。

本書が関係各方面で十分に活用され、我が国素形材の発展に寄与することを願う次第であります。

平成17年3月

財団法人 素形材センター

目 次

序

はじめに

1 スタディの目的	1
2 スタディの実施体制	2
3 スタディの要約	5
3-1 可視化装置用小型ダイカストマシンの開発・製作	5
3-2 可視化用ダイカスト型モデルの開発・製作	10
3-3 湯流れ、ガス巻き込みの直接観察実験	14
3-4 数値シミュレーション結果との比較検討等	28
3-5 シミュレーションソフトの改訂、高精度化等	37
3-6 まとめ	51
4 スタディの今後の課題および展開	54

1 スタディの目的

日本の機械工業は、中国等アジア諸国の技術水準の向上により、かつての圧倒的地位から厳しい国際競争下にさらされるようになってきている。機械工業の基盤を支える高度な機械部品を安価に提供してきた我が国素形材産業は、さらに厳しい状況にあり、低価格品、汎用品を中心に中国等に対し競争力を失いつつあり、企業の存続面でも影響が出ている。

機械部品の量産方法の大きな柱の1つであるダイカストは、近年の自動車等の軽量化の動きの中で、アルミニウム、マグネシウムの製品製造法として地位を高めつつある。中でも高強度薄肉ダイカスト品は、製品の軽量化を通じた省エネ化および製品の高付加価値化の鍵を握っており、これを安価に製造する技術の開発は、我が国機械産業の競争力の維持向上を図るためには重要なものである。

ダイカスト装置内での湯流れ等の挙動を X 線透過装置により直接観察し、現象に関する知識を高めることにより、シミュレーション・ソフトの精度の向上と鑄造方案設計の高度化が可能となり、ダイカスト製品の精度向上と開発期間の短縮につながる。これにより、高度な機械部品の安価かつ短期間の開発、生産が可能になり、ひいては我が国機械産業の競争力の高度化に資することとなる。

本スタディは、ダイカスト製品の鑄造過程における鑄型中の湯流れ(アルミ金属の溶湯が金型内部に注湯されて行く際の流れ方)を X 線透視することにより、鑄型の外から鑄造過程を直接観察する X線透過法直接観察装置を開発し、この装置を活用することにより、湯流れ制御技術に関する基礎知識を充実させ、鑄造方案設計の高度化を図ることを目的とする。

さらに、この装置によって観察された実際の湯流れとシミュレーションソフトによって予測された湯流れとを比較・検討することにより、シミュレーションソフトの精度の向上を実現することも目的である。

これらの達成により、開発期間の短期化と、欠陥のない薄肉ダイカスト製品の安定的な生産を可能とするとともに、より高度な鑄造技術およびダイカストマシンの開発につながられる可能性がある。

現在、この分野については日本が比較的優位性を保っていることに鑑みると、本開発事業は、近年中国等のアジア諸国における素形材産業の競争力の向上に対応し、我が国素形材産業と機械産業の競争力を維持するための技術力格差の維持向上を図っていくことが極めて重要である。

注：用語の意味

X線透過法直接観察装置：X線管と高速度カメラの間に、溶解炉を持つダイカストマシンがあり、X線を照射して、鑄型等における溶湯の挙動を撮影する装置で、X線防護のため密閉構造となっている。

欠陥：鑄造欠陥の代表例としては、金型内の全部に溶湯が行きわたらない「湯回り不良」や、注湯の際に空気等を巻きこみ、凝固後も空隙が残る「ガス巻きこみ」等

がある。

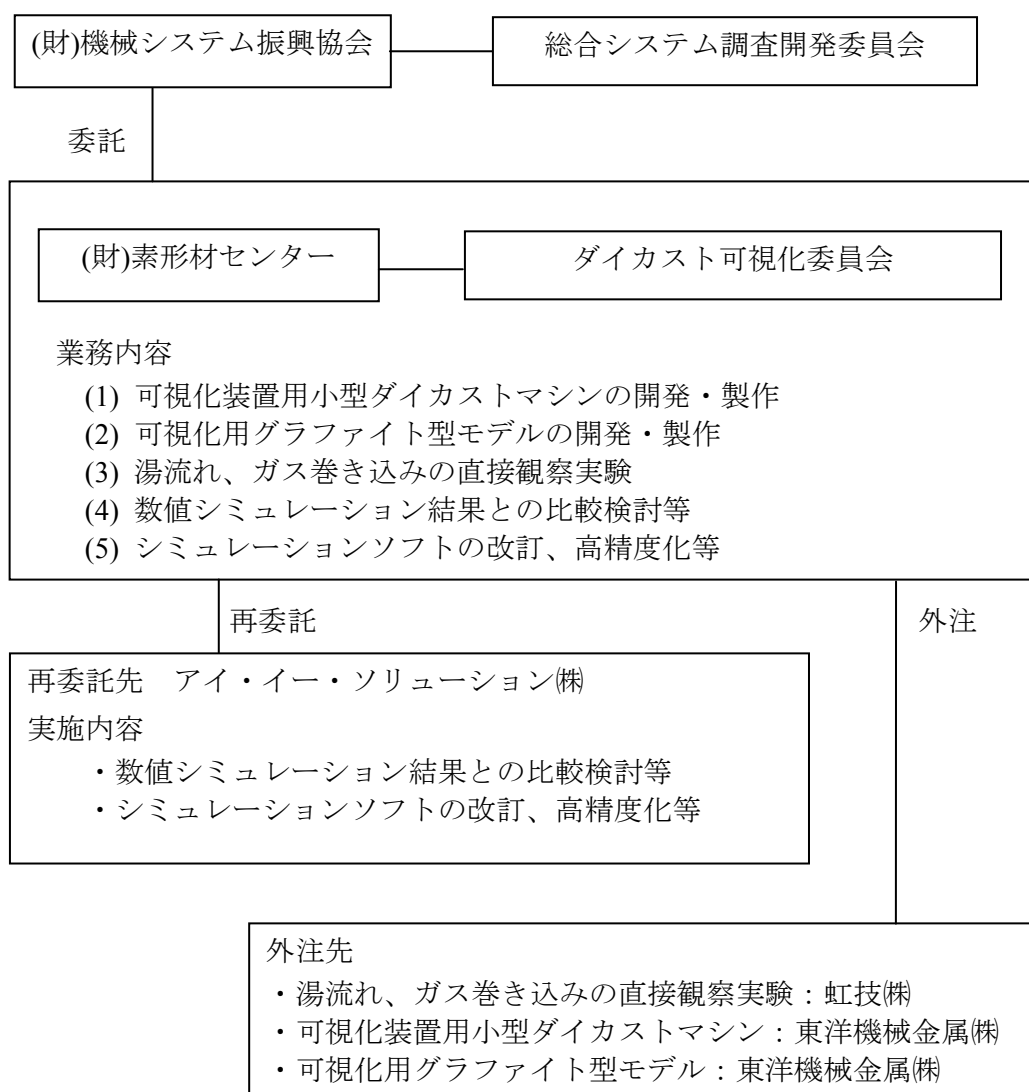
2 スタディの実施体制

(1) 実施体制

(財)機械システム振興協会より(財)素形材センターが委託を受け、本スタディを実施した。なお、(財)機械システム振興協会内に「総合システム調査開発委員会(詳細は「(3)委員会構成」のとおり)」を設置し、同委員会指導のもと、(財)素形材センターがスタディを推進した。

(財)素形材センター内に学識経験者、専門技術者(鋳造業界)からなる「ダイカスト可視化委員会(詳細は「(3)委員会構成」のとおり)」を設置し、計画の立案、検討審議および結果の評価等を行い、その決定に基づき事業を推進し、この活動から得られた成果を報告書にまとめた。

なお、具体的なスタディの遂行は、素形材センターおよび再委託先であるアイ・イー・ソリューション(株)がテーマを分担し実施した。



(2)委託先の業務分担

1) (財)素形材センター

分担内容：可視化装置用小型ダイカストマシンの開発、可視化用グラファイト型モデルの開発

2) アイ・イー・ソリューション(株)(大学発ベンチャー、代表 大中逸雄大阪大学名誉教授)

分担内容：数値シミュレーション結果との比較検討、シミュレーションソフトの改訂、高精度化

3) 外 注

①東洋機械金属(株)：可視化装置用小型ダイカストマシンの製作、組付け

②東洋機械金属(株)：可視化用グラファイト型モデルの製作

③虹技(株)：湯流れ、ガス巻き込みの直接観察実験

(3)委員会構成

「(1)実施体制」に示した、総合システム調査開発委員会およびダイカスト可視化委員会の委員構成は、以下のとおりである。

① 総合システム調査開発委員会 (順不同・敬称略)

委員長	中島 尚正	放送大学	副学長
委員	藤正 巖	政策研究大学院大学政策研究科	教授
〃	廣田 薫	東京工業大学大学院総合理工学研究科	知能システム科学専攻 教授
〃	藤岡 健彦	東京大学大学院工学系研究科	助教授
〃	太田 公廣	独立行政法人産業技術総合研究所	産学官連携部門 コーディネータ
〃	志村 洋文	独立行政法人産業技術総合研究所	産学官連携部門 シニアリサーチャ

② ダイカスト可視化委員会 (順不同・敬称略)

委員長	長坂 悦敬	甲南大学経営学部	教授
委員	大中 逸雄	大阪大学 名誉教授、大阪産業大学	客員教授 (アイ・イー・ソリューション(株) 代表取締役)
〃	杉山 明	大阪産業大学	客員教授 (アイ・イー・ソリューション(株) 取締役)
〃	笹井 直樹	(株)双立	取締役工場長
〃	三中西信治	(株)アーレスティ	技術部
〃	岩根 潤	虹技(株)開発部	研究開発グループ
〃	都築 尚彦	東洋機械金属(株)設計部	副部長
オブザーバ	稲邑 拓馬	経済産業省製造産業局素形材産業室	課長補佐
事務局	荻布真十郎	財団法人素形材センター	専務理事

- ” 笹谷 純子 財団法人素形材センター 技術部長
- ” 田邊 秀一 財団法人素形材センター 技術部 主任研究員

(4)実施日程

項目	16年				17年		
	9	10	11	12	1	2	3
(1)研究計画詳細の決定		→					
(2)可視化装置用小型ダイカストマシンの開発・製作				→	→	→	
(3)可視化用グラフィイト型モデルの開発・製作				→	→	→	
(4)湯流れ、ガス巻き込みの直接観察実験				→	→	→	
(5)数値シミュレーション結果との比較検討等				→	→	→	
(6)シミュレーションソフトの改訂、高精度化等					→	→	
(7)報告書の作成						→	→

3-1-5-2 吸引予備実験

大気圧のもとで、水を使用して FCS-RV による吸引の予備実験を実施した。図 1-3 に予備実験装置の構成を示す。また、図 1-4 に、大気圧ベースでの FCS-RV 吸引予備試験結果を示すが、良好な直線関係が得られている。

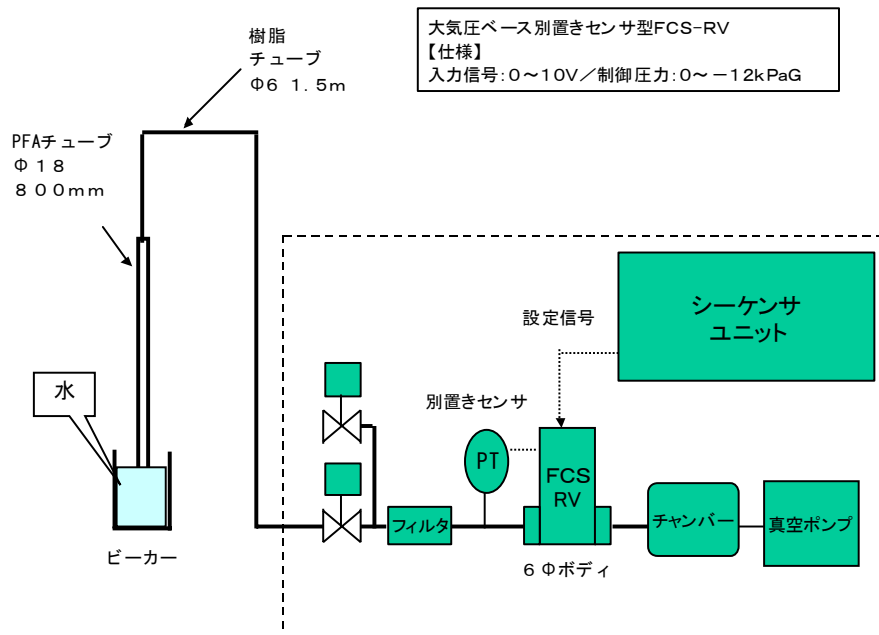


図 1-3 大気圧ベース FCS-RV 引上げ予備実験フロー

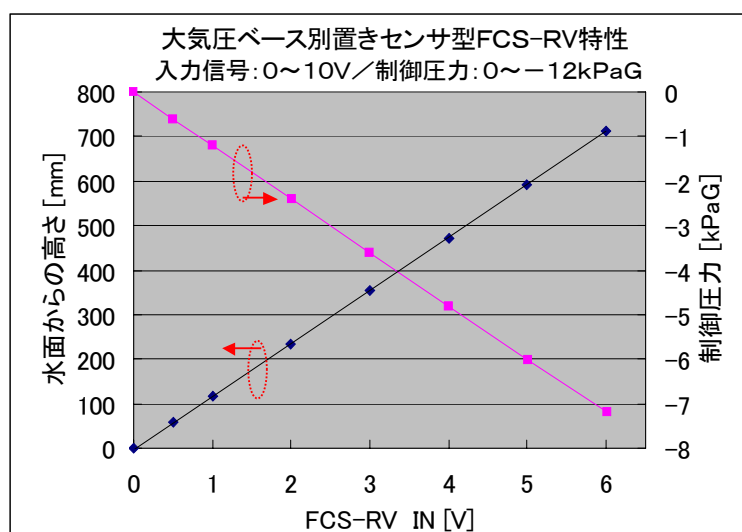


図 1-4 大気圧ベース FCS-RV 吸引予備試験結果

3-1-6 直動システム

使用した直動システムは、AC サーボモータ、サーボモータアンプ、コントローラ、直動ボールねじなどからなる。AC サーボモータは、出力 300W のものを用いた。直動ボールねじは、株式会社 THK 製の KR シリーズを使用した。これは 25mm のピッチを有し、1,000 回転で 1 ピッチ移動する仕様とした。従って、AC サーボモータに対し、毎秒 10,000 パルスの動作信号を送れば、1 秒間に 250mm の移動が可能となる。AC サーボモータの挙動はコントローラによって制御した。使用したコントローラには G 言語系のプログラムが内蔵されており、外部信号によってプログラムを起動することができる。そこで、真空系のシーケンサから所定の時間が経過後、規定の信号をコントローラに送信することとして、プランジャ移動のタイミングを自動化した。

3-1-7 全体システム

湯流れ直接観察用 X 線透過装置内でプランジャスリーブに溶湯を吸引し射出用のリニアサーボ装置にて鑄型に溶湯を射出するために装置制御装置も一体化した。写真 1-1 に湯流れ直接観察用 X 線透過装置ボックス前に設置した小型ダイカストマシンを示す。このダイカストマシンの一連の動作は、湯流れ直接観察用 X 線透過装置外に設置した操作ボックスの「スタート」押しボタンスイッチにて完了できる。写真 1-2 に小型ダイカストマシンの左面外観を示す。マシン内に真空系や直動システムのコントロール系がコンパクトにまとめられて設置されていることがわかる。

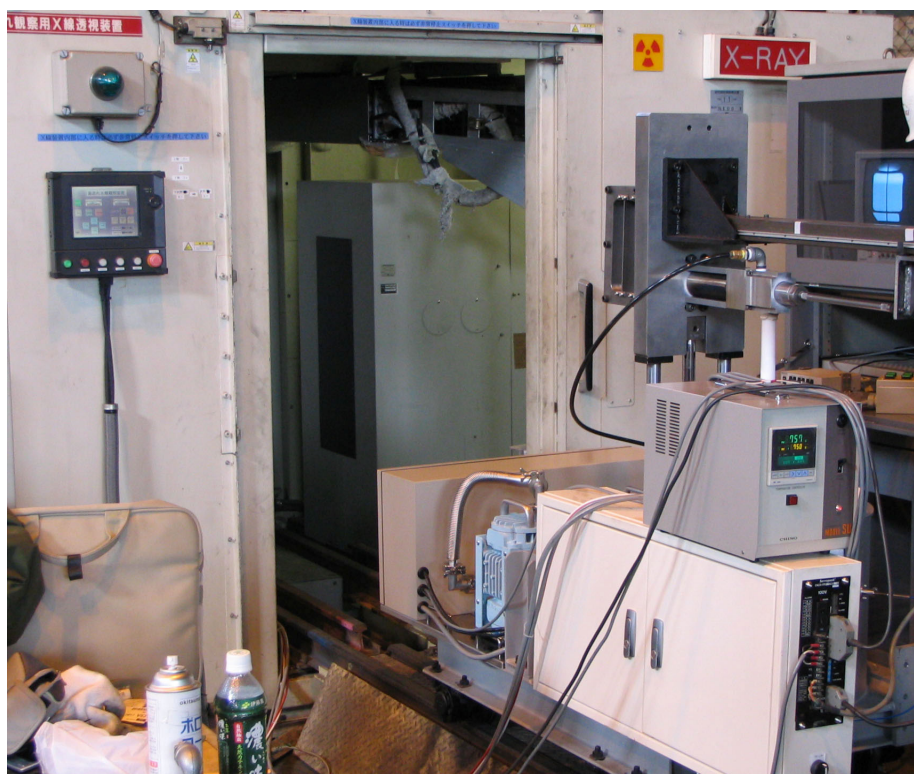


写真 1-1 湯流れ直接観察用 X 線透過装置

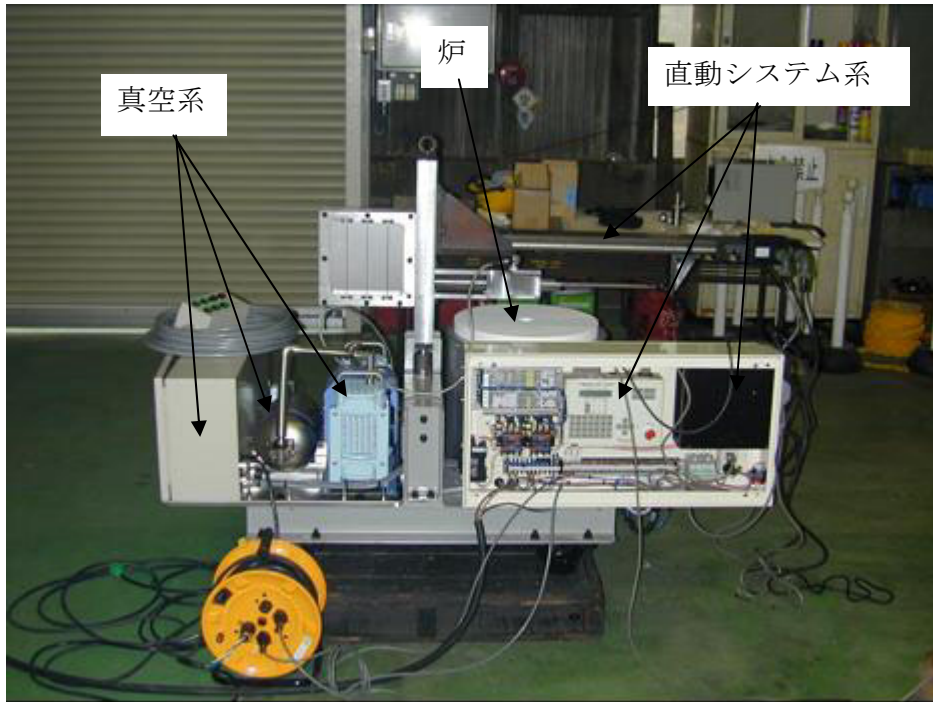


写真 1-2 小型ダイカストマシン

3-1-8 結言

開発した「可視化装置用小型ダイカストマシン」は直接観察用に特化した小型ダイカストマシンとして当初の目的を達成できた。また、プランジャスリーブに溶湯を供給する真空(減圧)吸引方式は実際のダイカストシステムにも採用できる技術であることがわかった。

3-2 可視化用ダイカスト型モデルの開発・製作

3-2-1 緒言

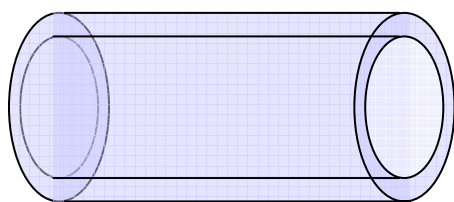
本スタディでは、ダイカスト法の基本的、且つ特徴的な湯流れ挙動を観察できる鑄型形状を優先的に取り上げることとした。

また鑄型材質としては、通常、ダイカストでは鋼製の金型が使用されるが、面密度が高いためX線を透過しにくく、湯流れ観察が困難であるため、今回は面密度が低く、耐火度の高いグラファイト材を供することとした。

3-2-2 要求仕様

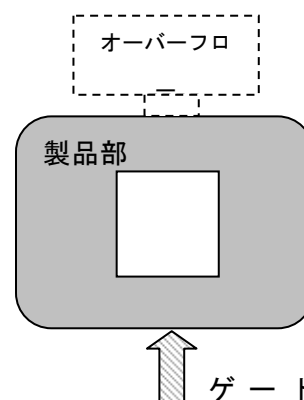
製作した型形状は、以下の4種類である。なおこれらの型は、3-1節で述べた「可視化装置用小型ダイカストマシン」に設置されるものである。

- ① プランジャ・スリーブ (図 2-2)
- ② 矩形鑄物 (図 2-3)
- ③ 円形鑄物+単ゲート (図 2-4)
- ④ 円形鑄物+複ゲート (図 2-5)



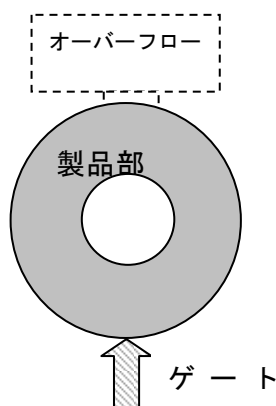
内径 $\phi 44\text{mm}$ × 外径 $\phi 50\text{mm}$ × 長さ 200mm

図 2-2 プランジャ・スリーブ



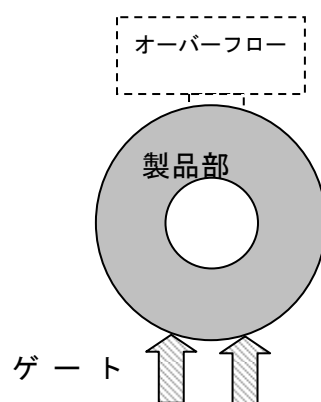
外形： $\square 80\text{mm}$ 程度、肉厚：5mm 程度
窓部： $\square 40\text{mm}$ 程度

図 2-3 矩形鑄物



外形： $\phi 100\text{mm}$ 程度、肉厚：5mm 程度
窓部： $\phi 50\text{mm}$

図 2-4 円形鑄物+単ゲート



外形： $\phi 100\text{mm}$ 程度、肉厚：5mm 程度
窓部： $\phi 50\text{mm}$

図 2-5 円形鑄物+複ゲート

3-2-4 可視化用ダイカスト型モデルの設計図面、写真

制作した型設計図の一部を図 2-6,2-7、写真 2-1～2-4 に示す。

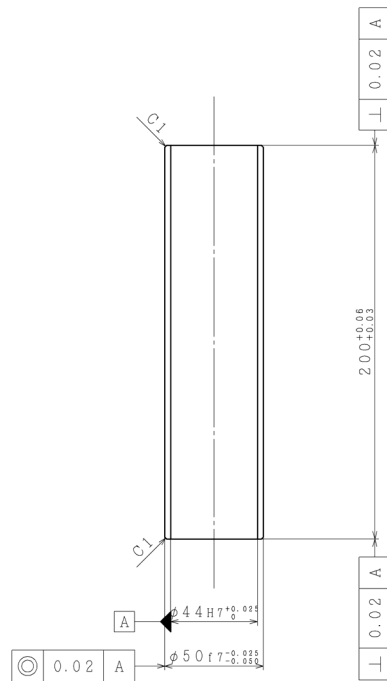


図 2-6 プランジャ・スリーブ図面

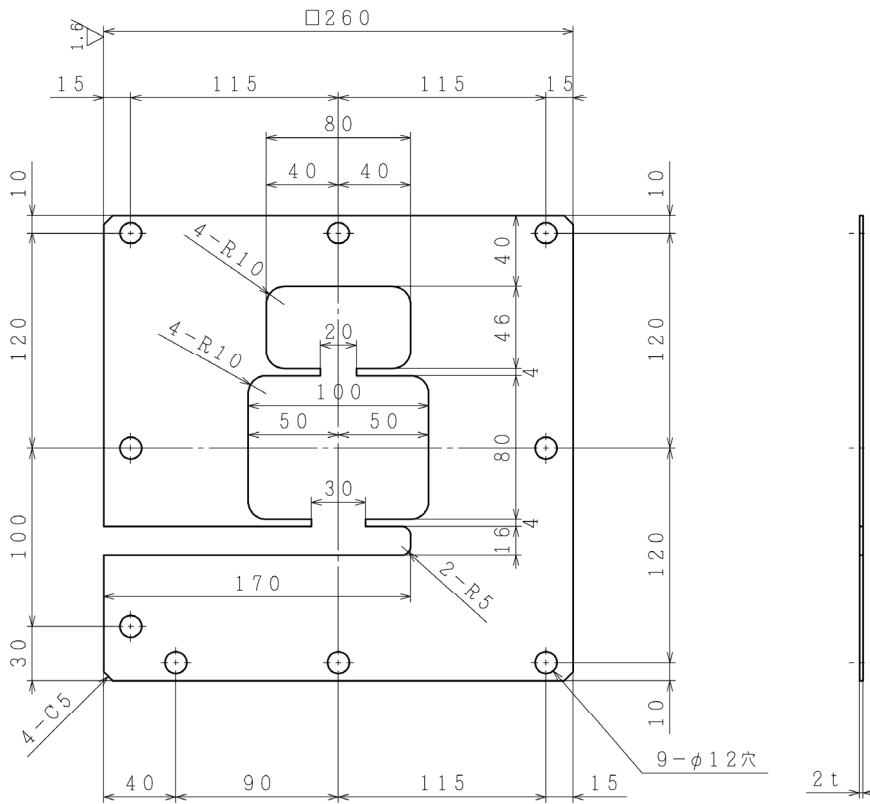


図 2-7 鋼板製矩形鋳型ゲート付図面

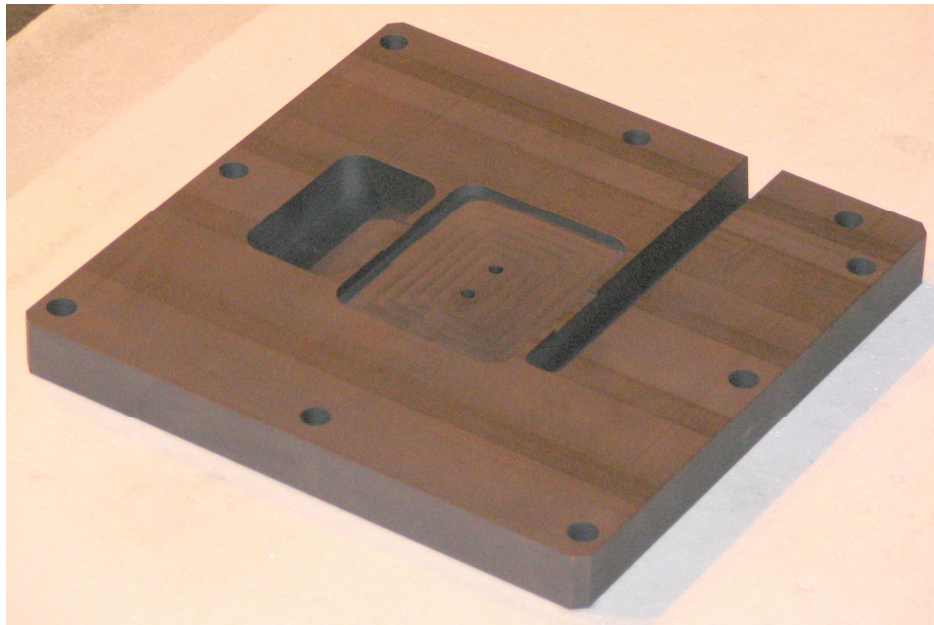


写真 2-1 矩形グラファイト鋳型

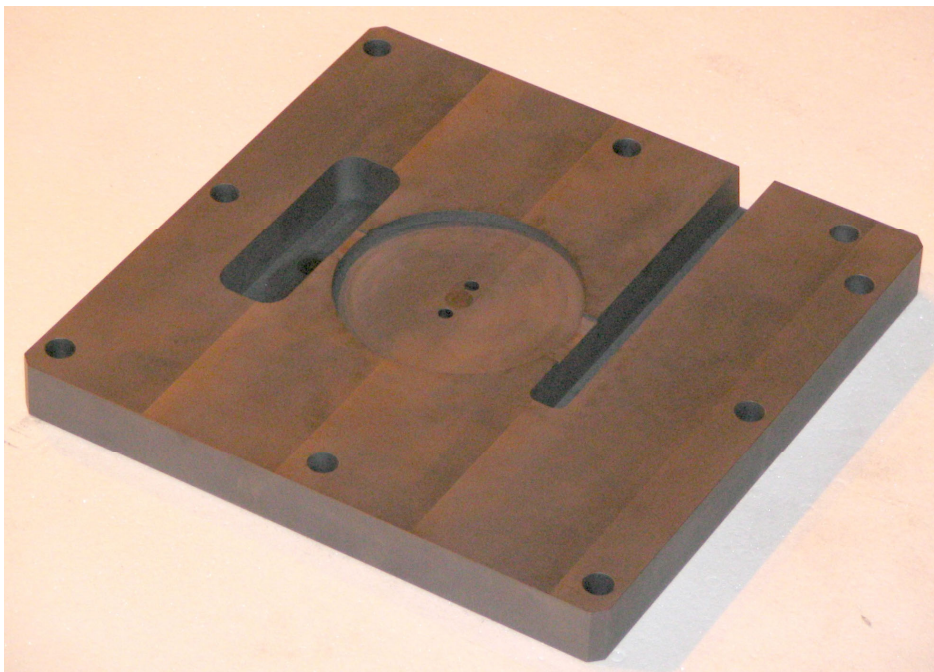


写真 2-2 円環状グラファイト鋳型+単ゲート

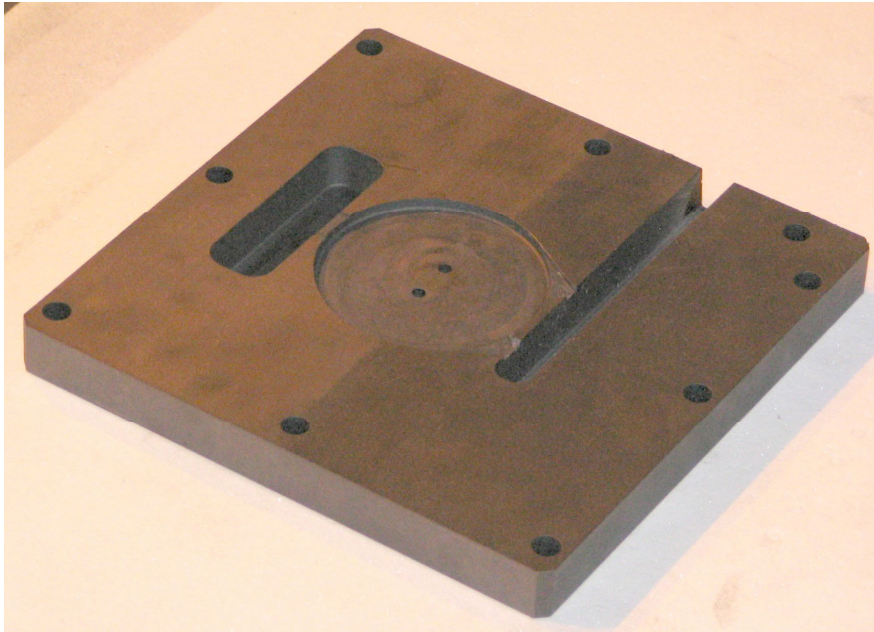


写真 2-3 円環状グラファイト鋳型+複ゲート

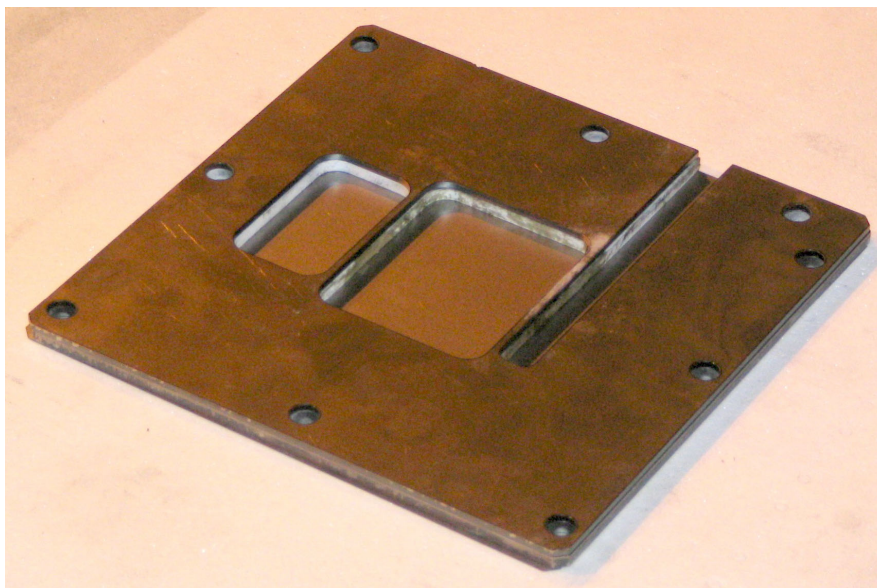


写真 2-4 矩形鋼板鋳型

3-2-5 結言

4 種類のグラファイト鋳型および鋼板製鋳型を作製した。製作したグラファイト鋳型の X 線透過部の厚みは 3mm としたが、3-3 節で述べるように 10mm でも可能なことがわかった。なお、鋼板製鋳型も使用可能なことがわかった。鋼板製鋳型の X 線透過部の厚みは当初 0.6mm としたが 1mm でも可能なことがわかった。鋼板製鋳型は形状に一部制約はあるが安価に製作できるため今後のテストに十分採用できる。ただし、0.6mm の場合、熱変形が大きい。また、1mm でもかなり変形するので繰り返し使用には問題がある。また、X 線透過後の鮮明さはグラファイト型の方が良い。

3-3 湯流れ、ガス巻き込みの直接観察実験

3-3-1 緒言

3-1,3-2 節で述べた、可視化装置用小型ダイカストマシンおよび型モデルを用いて、可視化実験を行った。

3-3-2 実験設備

直接観察実験は、虹技株式会社東工場(姫路市)に設置されている湯流れ直接観察装置に、3-1,3-2 節で述べた装置を設置して実施した。この湯流れ直接観察装置は、平成 11~14 年度の新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)プロジェクトである「革新的鑄造シミュレーション技術開発」(管理法人：財団法人素形材センター、プロジェクトリーダー：大阪大学大中逸雄名誉教授)の中で開発されたもので、主に鑄鉄の砂型鑄造の湯流れ直接観察を行い、その有効性が確認されている。本装置の規格は、以下のとおりである。

(1) X線源

- ・管電圧 : 0~225kV
- ・管電流 : 0~13mA
- ・最大出力 : 3kW

(2) イメージ・インテンシファイア

- ・入力面寸法 : ϕ 230mm

(3) 高速度ビデオカメラ

- ・最高撮影速度 1000 コマ/秒

ただし、1000 コマ/秒の場合、観察範囲が 1/4 と小さくなるため、鑄型空隙部の一部しか観察できない。

なお、実験に使用したダイカスト装置は、3-2 節に記述したとおりである。

3-3-3 使用合金

実験には ADC12 を使用した。本実験に供した合金組成は、以下のとおりである。

(単位 : %)

ADC12	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Sn	Al
供試材	2.27	11.28	0.24	0.62	0.66	0.20	0.05	0.02	残部
JIS 規格 (参考)	1.5-3.5	9.6-12.0	≤ 0.3	≤ 1.0	≤ 1.3	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.3	残部

3-3-4 実験条件の設定

本実験は、これまでに発表例のない初めての実験であるため、下記のような実験条件の検討が必要であった。

(1) 吸引注湯条件の設定

本実験では、減圧により遠隔操作でルツボ中のアルミニウム溶湯をプランジャスリーブに供給し、サーボモータでプランジャチップを駆動して溶湯を鋳型空隙部に射出する。このため、まず、適切な溶湯量をプランジャスリーブに供給する条件を求めた。

(2) プランジャチップ・スリーブ潤滑剤

プランジャチップとスリーブ間に潤滑剤が必要と考えられた。ここで要求される要件は、

- ・アルミニウム溶湯との反応がほとんどない
- ・ガス発生が少ない
- ・減圧を保持できる

などがあげられ、要求を満たす材料を選定した。

(3) 鋳型空隙部の気密性

鋳型空隙部の気密性は、鋳型とダイプレート間、鋳型を構成する部材の合わせ面の機密性(水平精度と凹凸)によって決まる。そこで、様々なシール材、シール方法について検討した。

(4) 最終的実験条件

以上のような検討および X 線源の強度、高速度ビデオカメラでの撮影条件等を検討した結果、以下の条件で実験することとした。

- ・溶湯溶解温度：780～800℃
- ・鋳型温度：室温(8～12℃)
- ・注湯のための吸引減圧(図 3-1 のとおり)

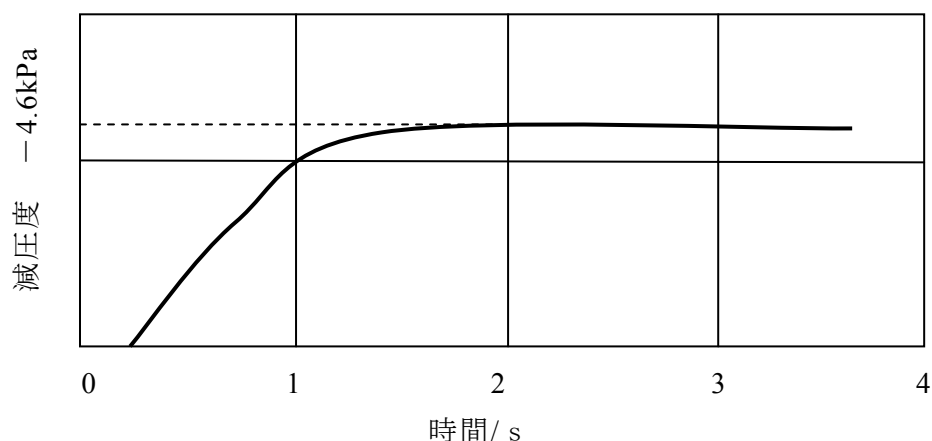


図 3-1 減圧度と時間の関係

- ・湯面からプランジャスリーブ内面までの距離：90～170 mm
- ・潤滑剤：油性黒鉛潤滑剤
- ・シール：図 3-2 に示すような、紙およびひも状密封材の組み合わせ

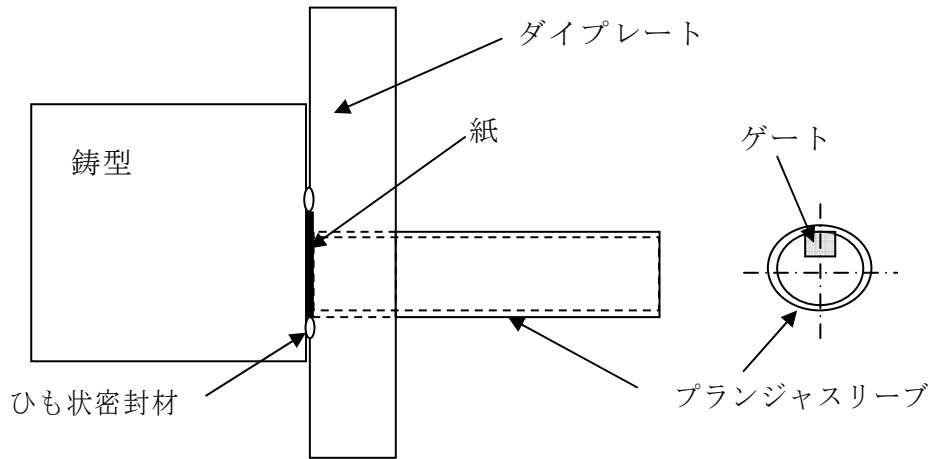


図 3-2 鑄型とプランジャスリーブ間のシール¹⁾

・プランジャチップ駆動速度：

0.3m/s 0.4m/s 0.6m/s

(ただし、0.4m/s、0.6m/s はかなりの回数試みたが、プランジャが途中で停止し射出できなかった。3-3-5-6 に詳述する。)

・高速度ビデオカメラ：250 フレーム/秒

・X線の強度：

金型	0.6m m 鋼板の場合	120 k V、電流	10m A
	1.0m m 鋼板の場合	150kV、	10mA
黒鉛		100kV	10mA

3-3-5 実験結果

3-3-5-1 鋼板製鑄型の場合

写真 3-1 に鋼板製鑄型の場合の直接観察結果を示す。また、写真 3-2 は凝固後の状況である。この場合、溶湯は鑄型を完全には充満していない。これはプランジャスリーブへの溶湯供給が少なかったためである。これらの実験結果から、以下のことがわかる。

- (1) 鋼板厚さ 1 mm でも、気泡の巻き込みを含めて湯流れが観察可能である。
- (2) 溶湯はかなり乱れて、堰から非対称的に空隙部に流入している。
- (3) ゲート厚さが 2mm でもゲートでの凝固はあまり問題にはならない可能性がある。
- (4) 射出・冷却後鋼板はかなり熱変形する。特に 0.6mm 厚さの場合、1 回で変形してしまい再使用が困難である。
- (5) 鋼板間の溶湯が差込み、分解困難になるので注意が必要である。

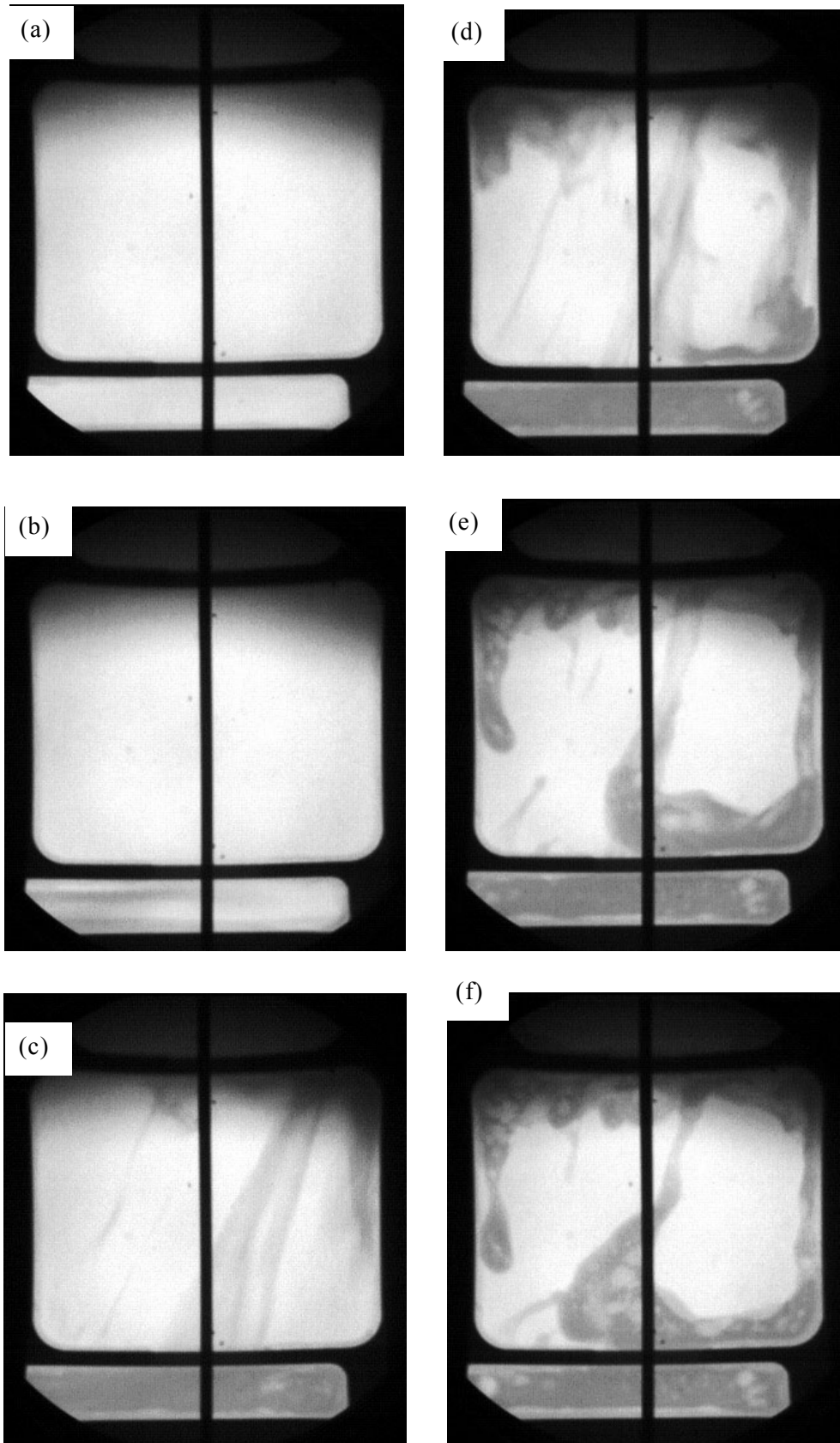


写真 3-1 鋼板製鑄型による湯流れの直接観察結果
 (a) を基準として 0.04 秒ごとの表示

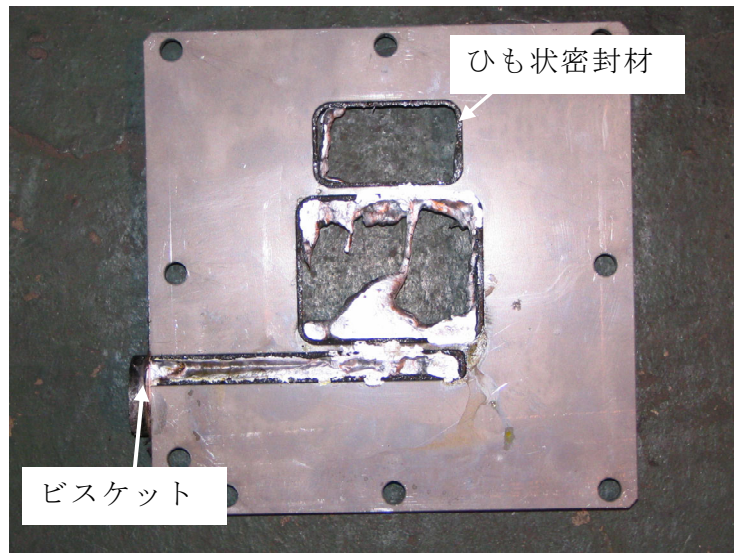


写真 3-2 鑄型充填状況(鋼板製鑄型、冷却後)

3-3-5-2 矩形グラファイト鑄型の場合

矩形状空隙のグラファイト鑄型による直接観察結果を写真 3-3 に、凝固後の様子を写真 3-4 に示す。

- (1) 写真 3-4 において(動画では流動現象が良くわかるが、静止写真ではわかりにくい)、すでに気泡を含んだ溶湯が左から右に流入し、湯道先端で衝突後堰からキャビティにほぼ対称的に流入している。
- (2) 続いて、中子下面に衝突し、グラファイト鑄型の内側面に衝突し、中子上面で合流し、中子側面近傍が最終充填位置となっている。
- (3) 中子下面より下の空隙部に流入した溶湯は、激しく渦を巻いている様子が観察できた。
- (4) また、途中でガスを巻き込み、鑄物中に捕捉されている。なお、中子の鑄物との境界が白っぽく見えているが、これは中子テーパおよび X 線が平行でない影響と思われる(未充填領域ではない)。なお、写真 3-3(a)の印刷写真では判別困難であるが、鑄型組み立て時に中子に亀裂が入っていることがわかった。
- (5) 写真 3-3(f)において、中子側面に生じた未充填領域に、局所的にさらに溶湯が充填されるという、ダイカストに特有とされている現象が初めて直接観察され確認された。この現象は、プランジャチップによる加圧により、固液共存域で凝固層の一部が変形あるいは破断して、溶湯がさらに押し込まれたためと推定される。
- (6) 充填後に製品内部に見られる斑点状の白い領域は、取り込まれたガスがそのまま凝固して生じたガス気泡欠陥だと思われる。写真 3-4 に示す鑄物外観からは気泡部分が判別できないことから、鑄物内部に生じていると考えられる。

写真 3-4 は、冷却後に鑄型の内部を撮影したもので、溶湯は製品空隙部を充填し、オーバーフロー部に一部流入していることがわかる。また、鑄肌は鑄型温度

が低い(10°C程度)であるため光沢は見られない。

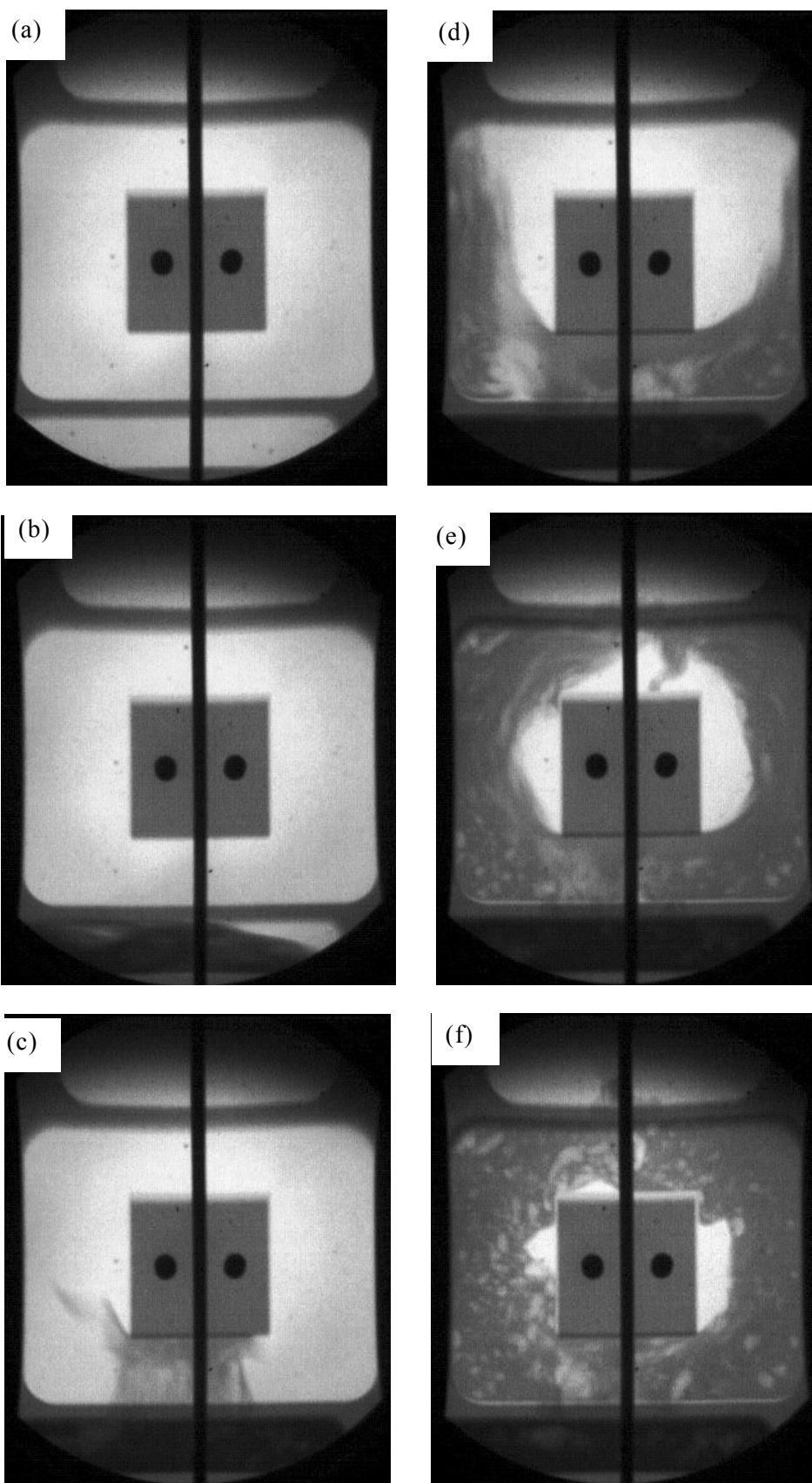


写真 3-3 矩形空隙部グラファイト鑄型による湯流れの直接観察結果
(a) を基準として 0.04 秒ごとの表示

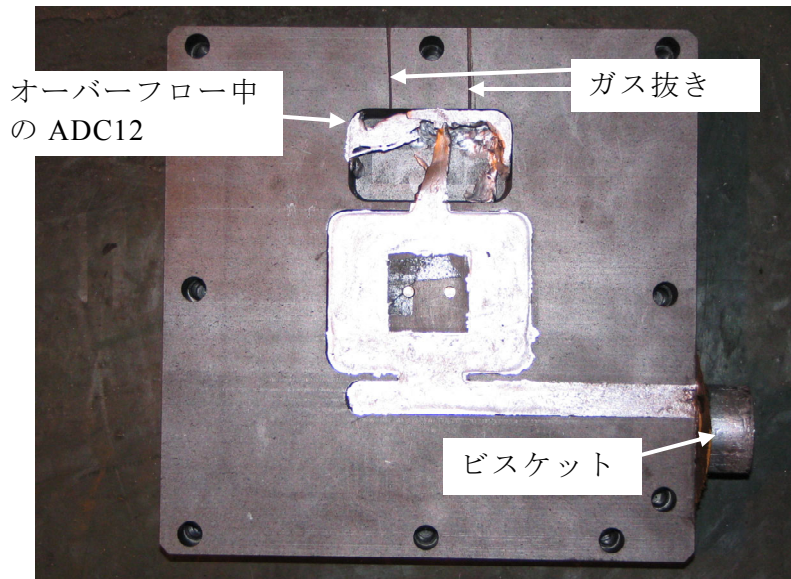


写真 3-4 鋳型充填状況
(矩形空隙部グラファイト鋳型、冷却後)

3-3-5-3 円環状グラファイト鋳型(単ゲート)の場合

写真 3-5 に、円環状グラファイト鋳型で単ゲート(堰)の場合の直接観察結果を示す。また、充填し冷却後の鋳型内の鋳物の様子を写真 3-6a に、鋳物の外観を写真 3-6b に示す。

- (1) 湯道内において、溶湯流動が激しく乱れている様子が確認できる。
- (2) ゲートから製品空隙部に流入する溶湯は多少絞られ気味で、その後右方向へ振れる。
- (3) ゲートから流入後、溶湯は中子に衝突し、左右に飛び跳ねている様子が観察できた。その後、グラファイト鋳型内側面に衝突し、側面にそって上方に流動した。
- (4) 矩形鋳型の場合と同様に中子側面部に未充填領域が発生し、充填が遅れている。
- (5) ゲートから流入する溶湯の色が薄いことは、肉厚方向には充填されていないことを示している。
- (6) 矩形形状鋳型と同様に、充填過程においてガスを巻き込む様子が観察された。
- (7) 充填後の写真(写真 3-5(f))に観られる斑点状の白い領域は、取り込まれたガスが存在する部分を示している。

また、写真 3-6a、写真 3-6b は冷却後の状況を示す。鋳肌はかなり悪い。やはり溶湯温度が低いことがわかる。ただし X 線で観られるほどの気泡欠陥は表面からはわからない。今後断面の組織を観れば、湯流れと欠陥の関係がわかるであろう。

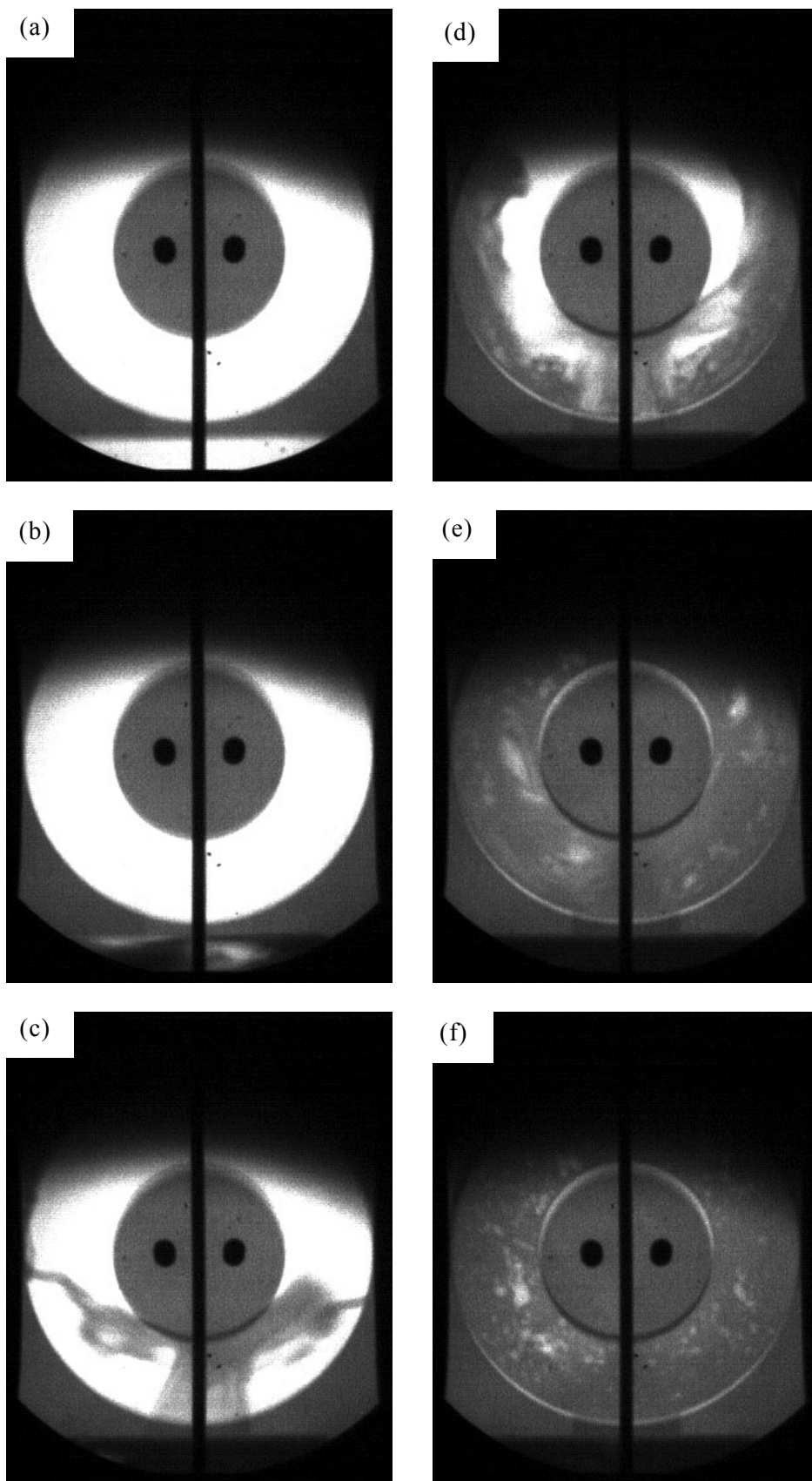


写真 3-5 円環状グラファイト型で単ゲートの場合の直接観察結果
 (a) を基準として 0.04 秒ごとの表示

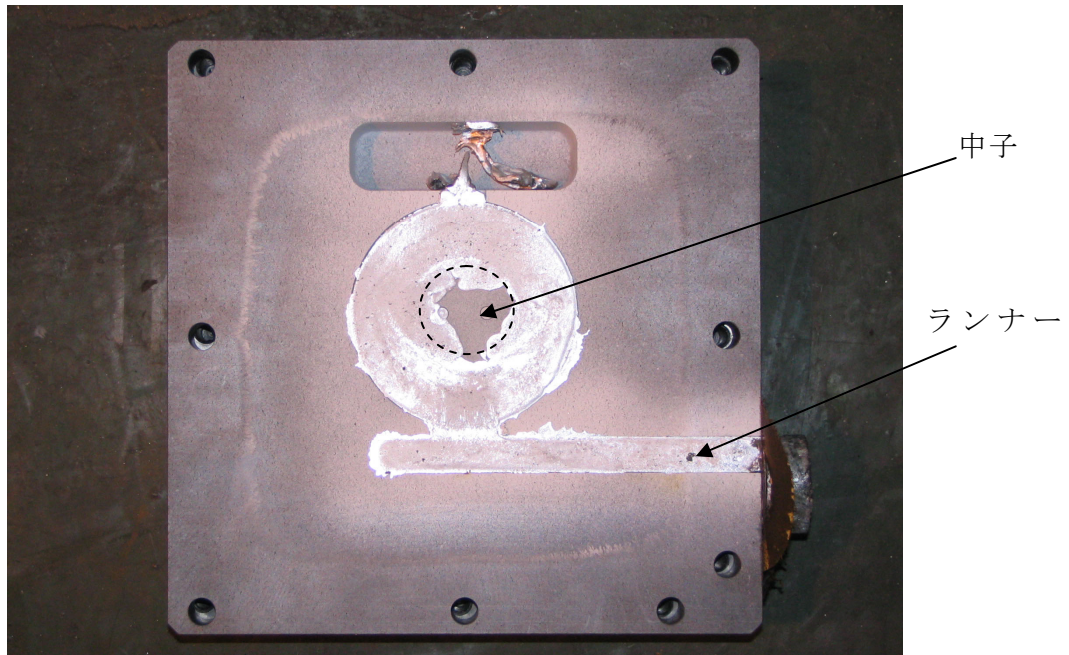


写真 3-6a 円環状鋳型(単ゲート)に充満したアルミニウム合金
(中子と鋳型の間隙に湯が差し込み、ばりを生じている)



写真 3-6b 円環状鋳型(単ゲート)に充満したアルミニウム合金

3-3-5-4 円環状グラファイト鑄型(複ゲート)の場合

写真 3-7 に円環状グラファイト鑄型で単ゲート(堰)の場合の直接観察結果を示す。また、充滿し冷却後の鑄型内の鑄物の様子を写真 3-8 に示す。

複ゲート鑄型の場合、何度か実験を繰り返したところキャビティ内に完全充滿に至ることはなく、ショートショットのような状態が続いた。そこで、この原因の一つと考えられるゲート部での急速な凝固を防ぐため炉の保持温度を少し高め(800℃)に設定した。その結果、途中で留まることなく、キャビティ内を完全充滿した観察結果が得られた。

- (1) ゲートから流入する溶融金属は、ゲートから遠方に向かって跳ね上がる場合もあれば、ゲート方向に向かって跳ね上がる場合もあり、ランナーでの流入状態によって一定しないことがわかった。写真では、ゲートから遠方に向かって流入する場合を示している(写真 3-7(c))。
- (2) その後、ゲートの上方へ直線的に勢いよく流入し、中子の側面で若干方向が変わっている様子が観察できた。
- (3) 中子位置は二つのゲートの中間部分に、対称になるように配置したはずであるが、写真に向かって中子左側と右側で溶湯の中子への衝突の度合いが異なっている。これは、ゲート(写真向かって左)から流入してくる溶湯によってわずかに流入方向が右(ゲートから遠方)に傾いているためである。
- (4) 入口から遠方のゲートから流入した溶湯は、中子をわずかにかすめてグラファイト鑄型内壁上方に衝突した。
- (5) 入口に近いゲートから流入した溶湯は、中子に衝突して流動方向を変えられ、中子下部、あるいは、鑄型左壁に向かって流動し、衝突した。
- (6) 左右ゲートからの流入が異なるため、キャビティ内の流動は複雑になった。
- (7) 矩形形状、および単ゲートの円環状形状に観られた、中子側面での充填遅れ部分は観察されなかった。

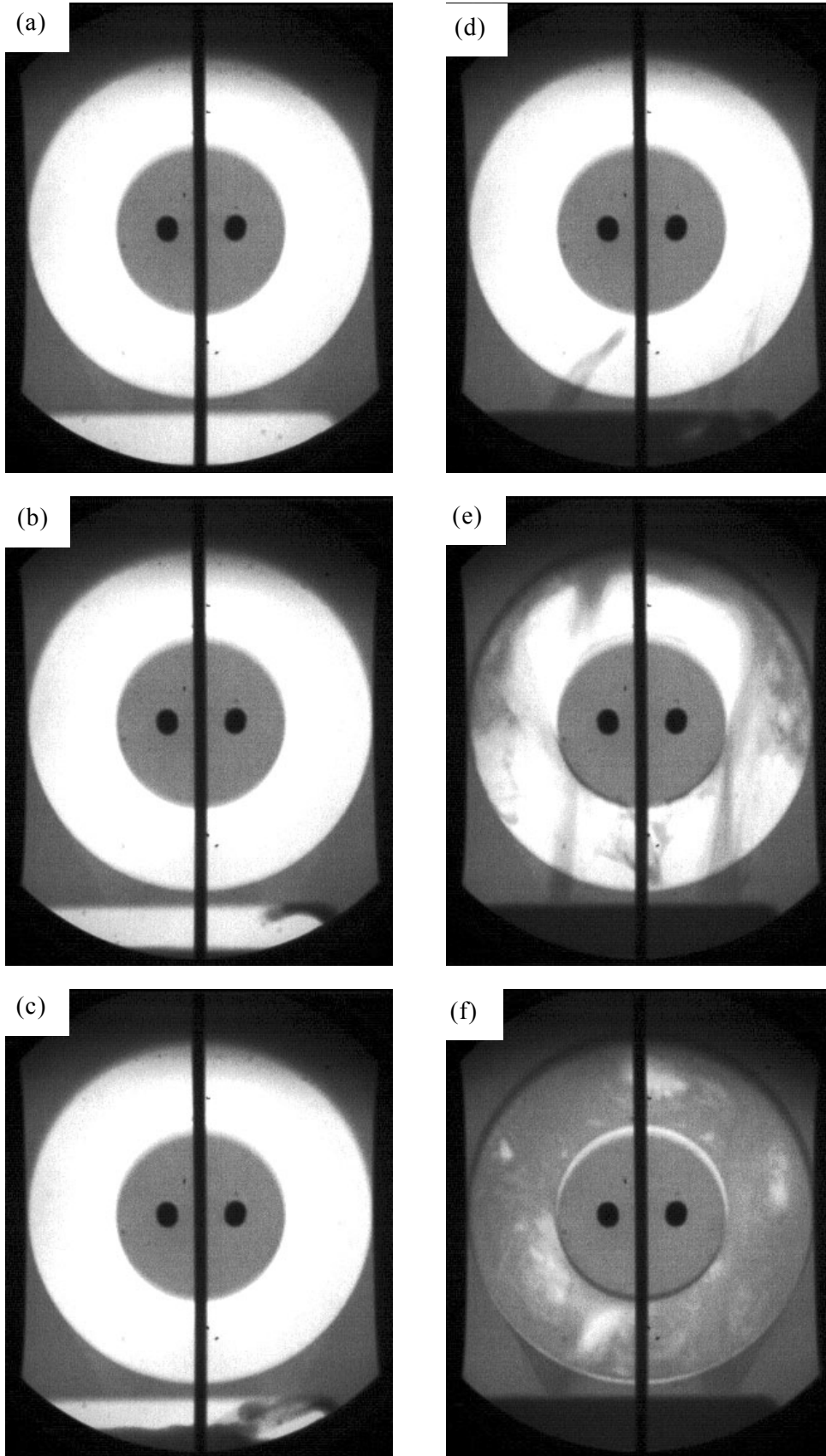


写真 3-7 円環状グラファイト型で複ゲートの場合の直接観察結果
(a) を基準として 0.056 秒ごとの表示

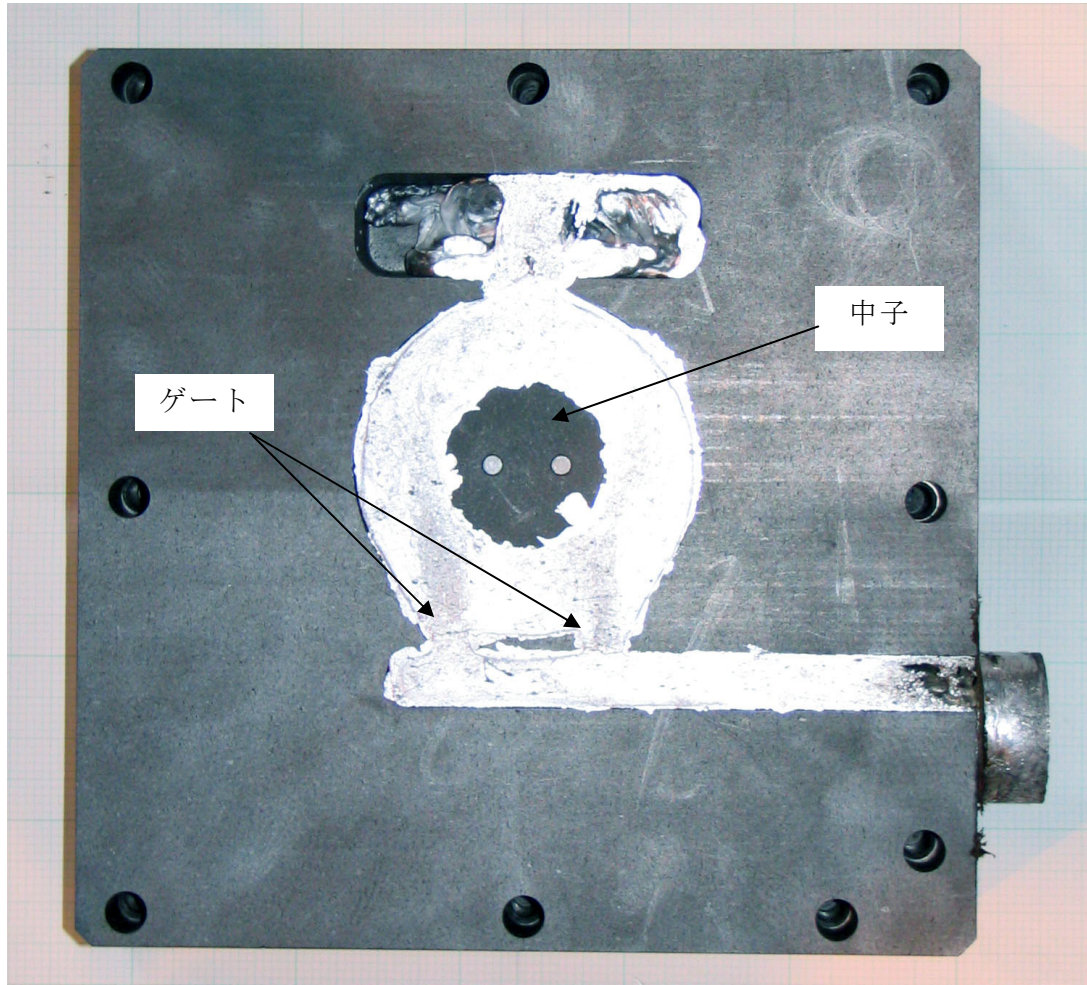


写真 3-8 円環状型(複ゲート)に充満したアルミニウム合金
(中子と鋳型の間隙に若干溶湯が差し込み、ばりを生じている)

3-3-5-5 黒鉛スリーブ内の流動

写真 3-9 に、黒鉛スリーブ内流動の直接観察結果を示す。

- (1) 吸引された溶湯は比較的スムーズにスリーブ内を流れて充満した。
- (2) スリーブの奥の壁に当たって反射する波も見られたが、表面が乱れるほど大きな波ではなかった。
- (3) プランジャの移動に伴って盛り上がりながら移動する溶湯の様子が観察された。
- (4) プランジャ速度が 0.3m/s と極めて低速のため、やはり溶湯挙動が大きく乱れることはなかった。

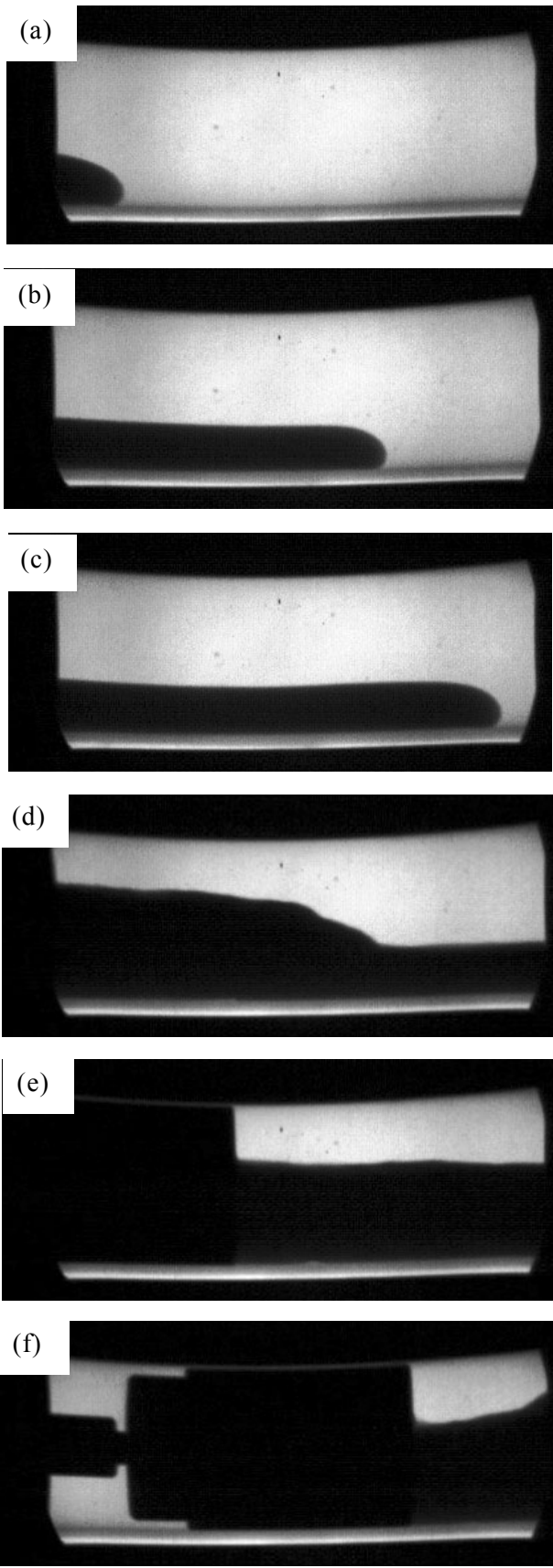


写真 3-9 黒鉛スリーブ内流動の直接観察結果
(a) を基準として 0.04 秒ごとの表示

3-3-5-6 プランジャ速度の影響

当初、プランジャの射出速度を変化させて溶湯挙動を観察することにより、射出速度が溶湯充満挙動に及ぼす影響を調査する予定であった。しかし、再三試みた結果、下記の理由により現時点では断念せざるを得ない状況となっている。

- (1) サーボモータの出力不足。現実験で使用しているサーボモータは出力 300W の規格のものであるが、高負荷(アルミニウム溶湯の存在とプランジャ-スリーブ間の摩擦抵抗：減圧を保つために必要不可欠)時の高速回転のためには力不足であり、0.3m/s が限界である可能性がある。また、この負荷にはプランジャスリーブとプランジャチップの芯合わせ不良も関係する。
- (2) サーボモータアンプの回路設計の問題。現有装置の回路設計アルゴリズムには、サーボモータに対し瞬間的な負荷の印可によって自動停止する制御が組み込まれており(モータ保護のため)、アルミニウム溶湯の不規則な流動や部分的な凝固による瞬間的な負荷増大によって射出動作の停止が頻発していた。

3-3-6 結言

以上の直接観察の結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 4 種類の鋳型(内 1 つはスリーブ)における流動現象の直接観察が可能で、貴重なデータが得られた。製品表面性状は良くない。これは射出時の温度低下(鋳型は常温)が原因であろう。
- (2) 単ゲートの場合、矩形状鋳型でも円環状鋳型でも、中子側方の充満が遅れる興味深い現象が観察された。
- (3) 未充満領域に溶湯が局所的に移動する、ダイカスト特有とされる現象が直接観察された。
- (4) ガスの巻き込みと溶湯との流動が鮮明に観察された。
- (5) これらの現象はある程度再現されるが、繰り返し鋳造で完全に同じ状態を再現できているとはいえない。
- (6) 鋼板製鋳型の場合
 - ・ 鋳型前後の鋼板は 1mm 以上にしても撮影可能であることがわかった。
 - ・ 積層金型では熱変形による隙間の発生を抑える工夫が必要である。
 - ・ 0.6mm 厚さ鋼板は熱変形のため繰り返し使用困難である。
- (7) グラファイト鋳型の場合
 - ・ 鋼板鋳型より鮮明な撮影が可能である。
 - ・ 堰などの細い部分が破損しやすく、その部分の繰り返し利用が困難である。
 - ・ 通気性の高いグラファイトの場合、気密性を高める工夫が必要である。
 - ・ 3mm 厚のグラファイト板は繰り返し利用が可能である。

文献

- 1) 大中逸雄、杉山明：特許出願 2004-317146(2004 年 9 月 30 日提出)

3-4 数値シミュレーション結果との比較検討

3-4-1 緒言

本節では、3-3 節で述べた湯流れの直接観察結果に対応する数値シミュレーションを従来コードで実施し、両者を比較検討して従来シミュレーション法の精度上の問題点を明らかにする。

実験との比較に使用したシミュレーションコードは、「革新的鋳造シミュレーション技術」プロジェクト¹⁾で開発し、市販しつつあるシミュレーションコード(JSCAST2004)である。なお、本コードはダイカスト専用ではないが、ゲート速度を与えることで、ダイカストの湯流れシミュレーションが可能である。

本コードは後述の物理的な基本式に基づくものであり、調整パラメータ等はない。シミュレーション結果に影響するのは、基礎式、要素分割と初期および境界条件と物性値である。

以後本コードを「従来コード」と呼ぶ。本コードを採用した理由は、他のコードではソースコードの入手ができずプログラム変更ができないことと、本コードであればその詳細がわかっており、問題点等が明確にできるからである。なお、他のシミュレーションコードでシミュレーションした場合にも同様にして各ソフト開発者が改善できるはずである。

3-4-2 数値シミュレーション方法

従来コードでは、下記の仮定に基づいてプログラムされている(この仮定は他のシミュレーションコードでも同じである)。

- (1) 流れは層流
- (2) 液相のみの単層流
- (3) 溶湯の表面張力および鋳型との濡れを無視可能
- (4) 気泡の浮力による移動は無視

このような仮定を置くと、湯流れ現象を支配する物理法則である運動量保存則、質量保存則、熱エネルギー保存則は比較的簡単になる。本コードは、これらの基本保存則を分割要素に適用して直接差分法²⁻⁶⁾に基づいて差分式を直接求めて使用している。なお、湯流れ中の温度変化もシミュレーション可能であるが今回は温度一定の場合についてシミュレートしているため、熱エネルギー保存則は記述していない。

3-4-3 数値シミュレーション条件

計算に供したモデル(要素分割図)は、後述の各シミュレーション結果に示す。ここでは共通に使用した条件を示す。

- (1) 初期条件：温度一定
- (2) 境界条件：

- ・ 鋳型と溶湯は非スリップ条件
- ・ 通常のダイカストでは図 4-1 に示すようにゲート部(B)でプランジャチップの速度から算出される溶湯速度を境界条件として与える。ただし、一部のソフトではプランジャスリーブ内の流動もシミュレーションできるようになっているが、通常のシミュレーションでは計算時間がかかるためあまり使用しない。本シミュレーションでは、図 4-2 のような構造であるため、境界条件としては、B1 あるいは B2 で与えた。

すなわち、B1 に設定した場合にはプランジャチップ速度 0.3m/s を与えた。B2 に設定した場合には、プランジャチップ速度にプランジャスリーブ内断面積と湯道断面積の比を乗じた値 1.42m/s を与えた(断面方向に一定速度)。

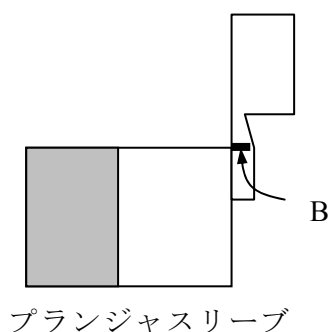


図 4-1 通常のダイカストにおける境界条件(B)

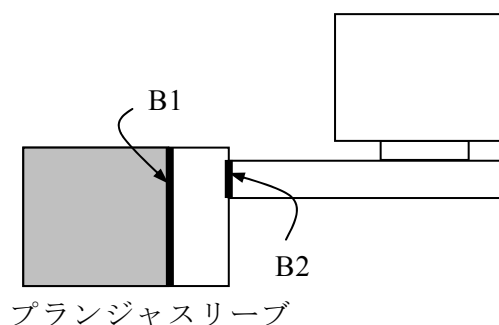


図 4-2 本シミュレーションにおける境界条件設定位置 (B1および B2)

(3) 物性値

物性値としては溶湯の物性値のみが関係する。以下の値を使用した。

- ・ 密度 : 2.76 g/cm³
- ・ 動粘性係数 : 0.01 cm²/s

3-4-4 数値シミュレーション結果および直接観察結果との比較

3-4-4-1 矩形状鋳物の場合

図 4-3 に要素分割モデルを示す。計算に用いた各種条件は、下記のとおりである。

総要素分割数 :	1,540,000
鋳物要素数 :	190,896
流入速度 :	0.3m/s
解析方法 :	等温湯流れ解析

実際の鑄型は抜き勾配や、角部における曲面加工などが存在するが、計算では直方体と近似した。

このモデルで前述の境界条件 B1 によりシミュレーションした結果を図 4-4 に示す。また、この図には 3-3 節で述べた直接観察結果の写真も示し比較している。シミュレーション結果はタイムステップ毎の全データを出力すると記憶容量が大きくなり計算機上に保存できなくなるため、一定の充填率(2 あるいは 5%)ごとに出力させた。そのため、観察時刻と一致させた比較が困難であった。

なお、経過時間は、直接観察において溶湯が画面上に現れた瞬間を基準(0 秒)とし、その時点からの相対的な時間で計測している。シミュレーション結果に示される色は、流体の流速を示し、赤に近づくほど流速が速く、青に近いほど遅い。

また、直接観察結果において完全充填後に見られる斑点状に白く透過した部分は巻き込まれたガスが存在する部分であると思われる。3-3 節で確認したように、これらのガス欠陥は表面上は観察できない。

次に、順を追って実際の充填過程と計算結果を比較する。

- (1) 直接観察によると、湯道の充填過程は実験毎に異なり、偶然性が強いことがわかった。シミュレーションでは同じ境界条件では必ず同じ結果になるため、現状の手法では偶然性のある現象は(出現確率を含めて)予測できない。
- (2) 直接観察によると、溶湯の流れは最初堰と平行の流れではなく、湯道先からプランジャスリーブの方向に多少斜め気味にキャビティに流入し、その後堰と平行に近い流れとなり、概略対称的に空隙部を充填した。この傾向はシミュレーションでも再現された。
- (3) 直接観察およびシミュレーション共に堰からの流れは中子に衝突するまで肉厚方向には鑄型を充填せずに流れた。ただし、その後は、実際の流れでは鑄型肉厚方向に充填しない傾向が見られたのに対し、計算では比較的早い段階で溶湯が空隙を充填して流れた。この要因として、シミュレーションではキャビティ部分を厚さ方向に 5 分割しており、一つの要素の大きさ(厚さ)が 1mm であるのに対し、実際の溶湯は厚さ 1mm 以下で流動していることが考えられる。シミュレーションでは、厚さ 1mm 以下の溶湯であっても条件が満たされればその要素を満たす溶湯として取り扱われるため、実際より充填が速くなる場合があると考えられる。
- (4) 結果の(b)と(b')において、中子下面に衝突した流れが左右に広がっているが、実際の流れがプランジャ側(写真向かって右側)の溶湯高さが高いのに対し、計算はほぼ対称な充填状態となっている。また、中子下部の充填状態も異なっていた。
- (5) 直接観察により、矩形中子の両側の充填が遅れることがわかった。従来コードでもこの傾向を再現できたが、完全な一致はできなかった。なお、シミュレーション結果は要素分割数でかなり変化し、肉厚方向に 3,4 分割では不十分で

あることがわかった。

(6) 多数の気泡の巻き込みが観察されたが、シミュレーションでの再現精度はあまり良くなかった。観察によると気泡の巻き込みは、製品空隙部のみならず、すでに湯道での巻き込みが生じていることがわかった。

(7) 空隙部をほぼ充満した後、局所的にさらに溶湯が充填されるというダイカスト鋳造に特有とされている現象が初めて直接観察され確認された。

この現象は、プランジャチップによる加圧により、固液共存域で凝固層の一部が変形あるいは破断して溶湯がさらに押し込まれたためと推定される。

この現象をシミュレートするには、固液共存層の変形問題を解く必要があり、従来シミュレーションでは予測できない。

(8) 充満時間については、20~30%程度の誤差でシミュレートできた。

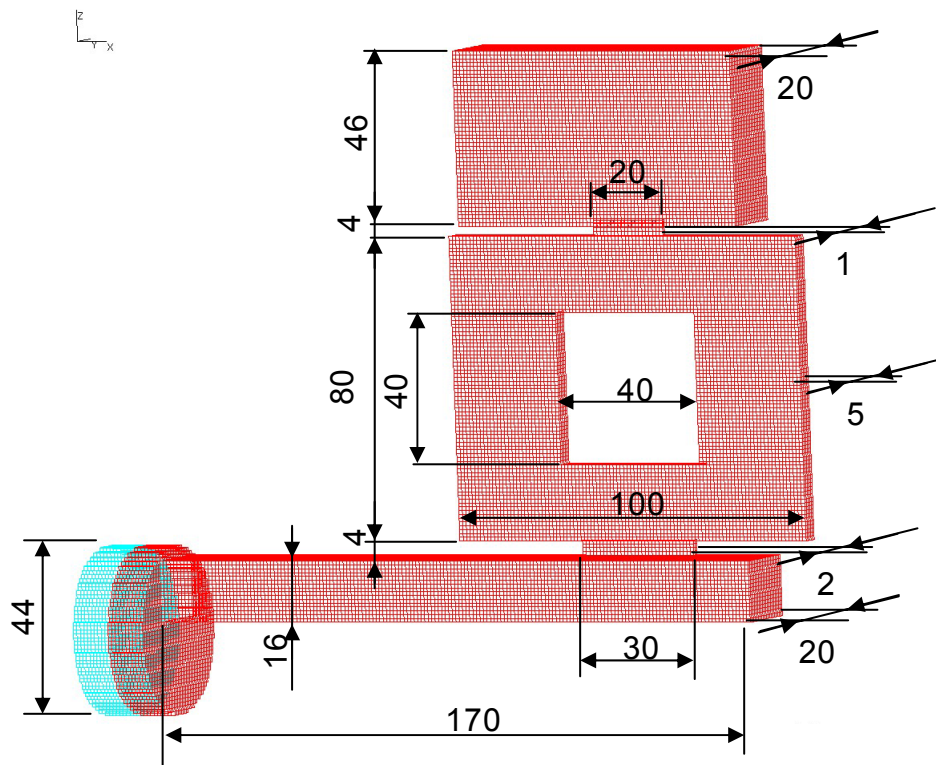


図 4-3 矩形状鋳物の場合の要素分割モデル

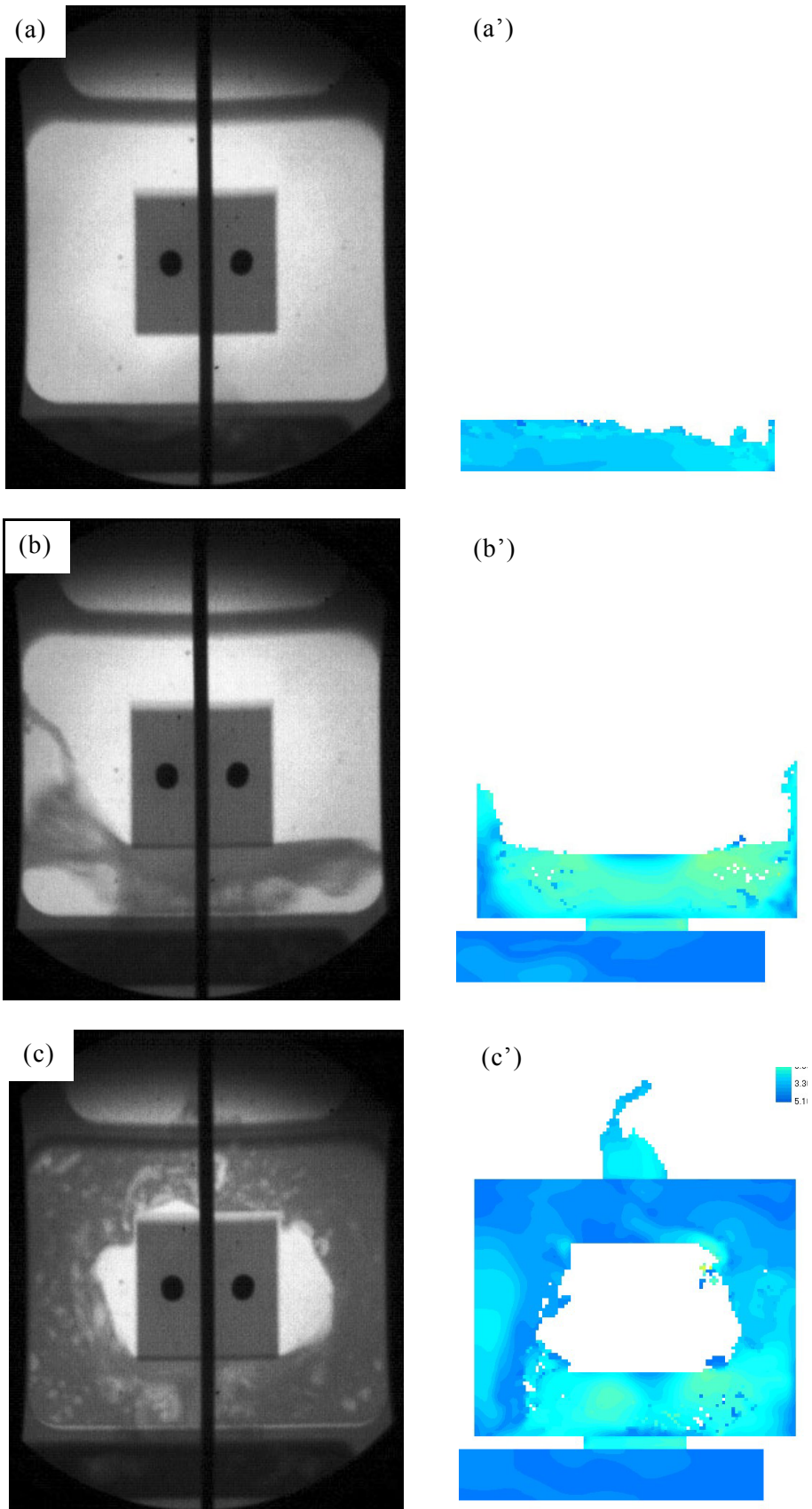


図 4-4 シミュレーション結果と観察結果の比較
 (境界条件 B1 : 図 4-2 参照)
 経過は約 0.04 秒ごとに表示

3-4-4-2 円環状鋳物の場合(複ゲート)

図 4-5 に要素分割モデルを示す。計算に用いた各種条件は、下記のとおりである。

総要素分割数：	1,575,200
鋳物要素数：	175,628
流入速度：	0.3m/s
解析方法：	等温湯流れ解析

実際の鋳型は抜き勾配や、角部における曲面加工などが存在するが、計算では直方体と近似した。

このモデルで前述の境界条件 B1 によりシミュレーションした結果を図 4-6 に示す。また、この図には 3-3 節で述べた直接観察結果の写真も示し比較している。

なお、経過時間は、直接観察において溶湯が画面上に現れた瞬間を基準(0 秒)とし、その時点からの相対的な時間で計測している。シミュレーション結果に示される色は、流体の流速を示し、赤に近づくほど流速が速く、青に近いほど遅い。

また、直接観察結果において完全充満後に見られる斑点状に白く透過した部分は巻き込まれたガスが存在する部分であると思われる。3-3 節で確認したように、これらのガス欠陥は表面上は観察できない。

次に、順を追って実際の充填過程と計算結果を比較する。

- (1) 直接観察から、湯道における実際の溶湯の流動が非常に複雑であることがわかった。シミュレーションでは、矩形形状、単ゲート円環状と同様に湯道底部から流入し、湯道先端で反射してぶつかる様子が計算できている。
- (2) 堰から流入した溶湯は、実験ではゲートから遠い方向(写真に向かって右)に進行したのに対し、シミュレーション結果ではゲートに近い方向(写真に向かって左)に進行した。これは、湯道先端で反射した溶湯と新たに進入してくる溶湯の衝突位置によって変化すると思われるが、実際の流入では偶然性が高く制御することは困難である。
- (3) 単ゲートの場合と異なり中子側面の充填遅れは観察、シミュレーション両者とも顕著ではなかった。中子側面では堰から流入する、速度の大きな流れがあり、堰の設けている壁面に沿って上昇している様子が計算でも再現できている。
- (4) 堰から流入後の流れは肉厚方向に充満せずかなりの距離流れることが観察されたが、シミュレーションでは比較的早く充満する傾向となった。これは単ゲート円環状鋳物の場合と同じである。
- (5) その他、気泡の巻き込み、充満後の局所的溶湯移動など上記の矩形および円環状鋳物の場合と同様の結果が得られた。

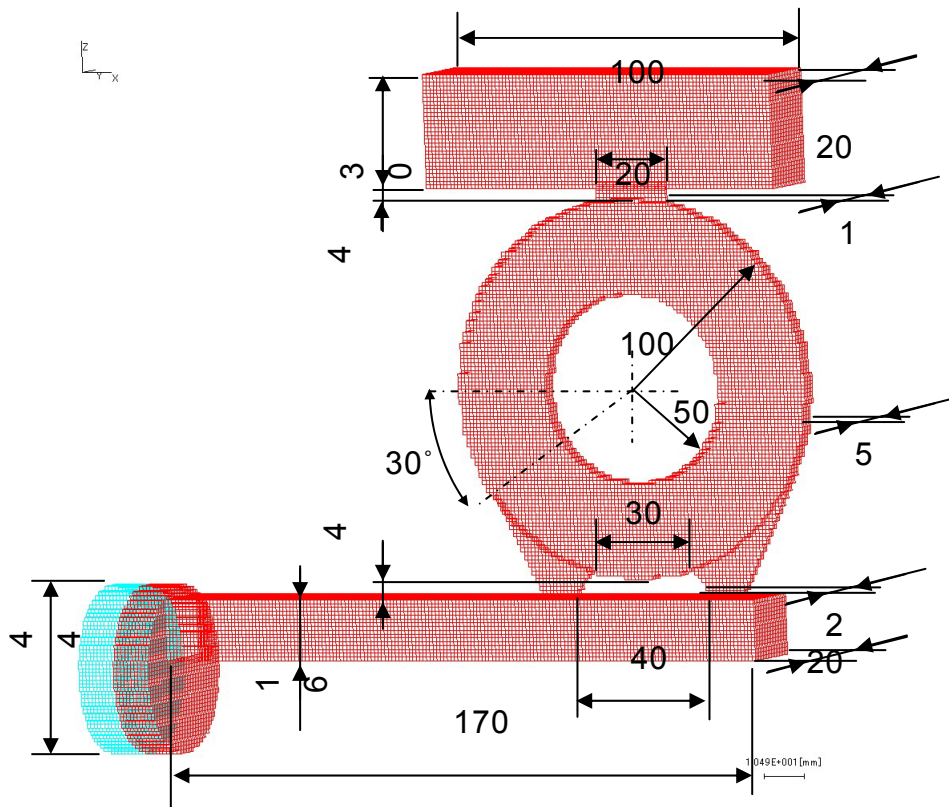
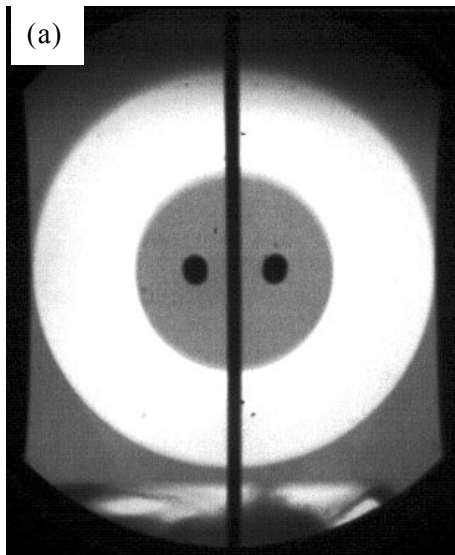
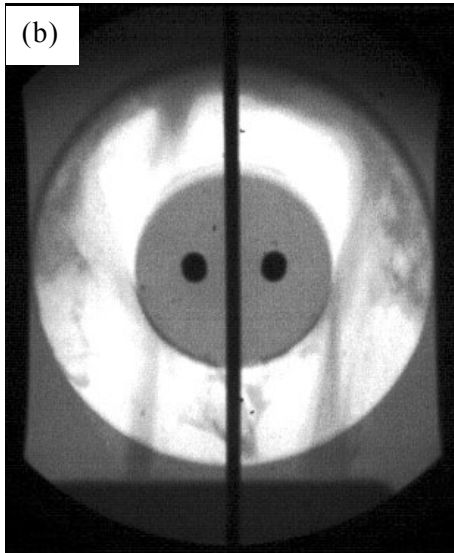


図 4-5 円環状鋳物(複ゲート)の場合の要素分割モデル



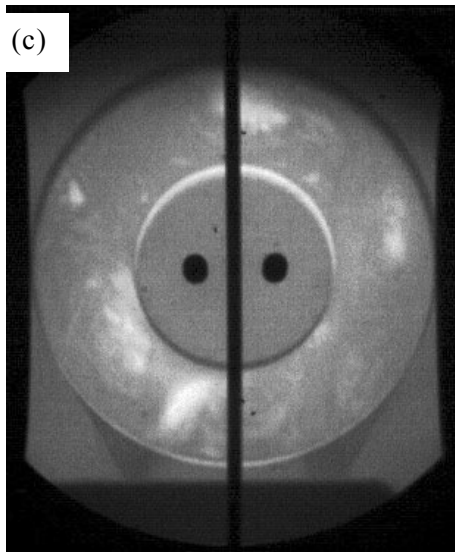
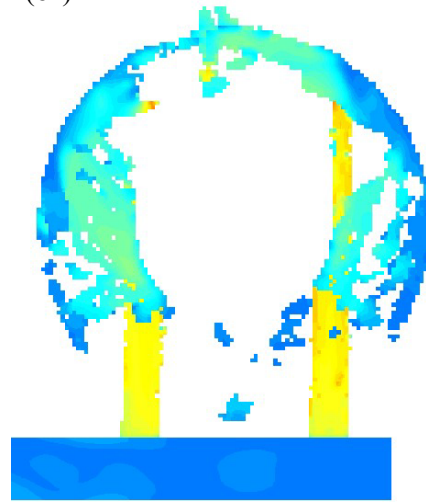
(a)

(a')



(b)

(b')



(c)

(c')

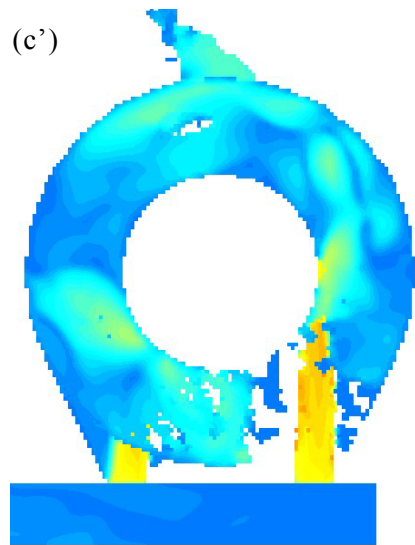


図 4-6 シミュレーション結果と観察結果の比較
(境界条件 B1 : 図 4-2 参照)
経過は約 0.06 秒ごとに表示

3-4-4-3 黒鉛スリーブ内の流動

スリーブを減圧して溶湯を吸引し、プランジャチップで溶湯を押し出すシミュレーションは、溶湯を吸引する部分、プランジャチップの移動による溶湯の押出し部分、押し出された溶湯がキャビティ内を充満する部分に分けて考えることができる。これらのうち、キャビティ内への充填以外は従来コードでは計算できない。そこで、新たにシミュレーションコードを開発し、シミュレートした。この結果については次の3-5節で述べる。なお、溶湯を従来法でスリーブに注湯し、スリーブ内の流動をシミュレートするソフトが市販されている。ただし、減圧吸引の機能はない。

3-4-5 結言

従来開発したシミュレーションコードを使用しても、ある程度キャビティ内の流動は計算できることがわかった。例えば、ゲートからの流入直後は空隙を完全に充満する流れではないこと、空隙内の流動がある程度対称的であること、充満時間が20～30%程度の誤差で予測できることなどである。

一方、矩形形状および円環状単ゲート型において見られる、中子側面での充填遅れや、中子側面におけるはく離現象は予測することができなかった。また、実際の注湯では多数のガスの巻き込みが観察されたが、これらの現象についても従来コードでは予測することができなかった。

文献

- 1) 大中逸雄：革新的鑄造シミュレーション技術の開発，素形材，45(2004)9,37
- 2) 大中逸雄：コンピュータによる伝熱・凝固解析入門，丸善，(1985)
- 3) I. Ohnaka: Solidification Analysis of Castings, in Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering, ed. K.C. Cheng and N. Seki, (Hemisphere Pub., 1991), Chapter 21.
- 4) 大中逸雄：鉄と鋼，65(1979), p.1737
- 5) I. Ohnaka and K. Kobayashi: Trans. Iron Steel Inst. Jpn. 26(1986), p.781
- 6) 朱金東，大中逸雄：鑄造工学，68(1996)，668

3-5 数値シミュレーションソフトの改訂・高精度化

3-5-1 緒言

3-4 節で述べたように、従来コードによりある程度観察結果を再現できるが、未充満領域の形状の再現性や気泡の巻込みの再現性が良くないことがわかった。このための改善および従来コードではシミュレーションできない点について検討した。また、今後の casting 方案設計の改善について述べる。

3-5-2 従来シミュレーションの問題点とその対応

3-4 節で述べたように従来シミュレーションの問題点として、

- (a) 中子側面での充填遅れと気泡の捕捉
- (b) 湯道部での気泡の捕捉
- (c) キャビティ内での気泡の捕捉

などが精度良く推定できないことがわかった。

これらに関連して、以下のようなことを検討する必要がある。

(1) シミュレーションの仮定との相違点

3-4-2 項で述べたように従来シミュレーションでは、流動は層流と仮定し、表面張力等は考慮していない。従って、下記の考慮が必要かも知れない。

- ・乱流現象
- ・溶湯の表面張力
- ・溶湯と鋳型との濡れ
- ・気泡の浮力による移動
- ・湯面における酸化皮膜の生成

これらのうち、乱流の影響は少なくとも自由表面に生じる細かい波等に影響するはずである。しかし、溶湯の表面張力が水などに比較して大きいため表面張力の影響の方が大きい可能性もある。また、湯流れのような自由表面流れでは乱流解析の効果は少ないという意見もある。少なくとも、表面張力を考慮せず単に乱流を考慮してもあまり効果はないと予想される。

従って、乱流を考慮する前に、まず表面張力の影響を調べる必要がある。特に鋳型近傍では、溶湯と鋳型の濡れにより(接触角が変化する)曲率が変わり、表面張力による力が変化することになる。実際には焼き付きを防ぐため、鋳型と溶湯はぬれないように塗型剤を塗布する。つまり濡れ難いはずであり、この影響は溶湯速度が遅いほど顕著になる¹⁾。しかし、一般にダイカストでは溶湯速度が速いので、その影響は大きくないとされている。一方、桜木²⁾は表面張力の影響を考慮するとガスの巻き込み位置の推定精度が上がることを報告している。従って、表面張力を考慮したシミュレーションも検討する必要がある。

酸化皮膜の生成は、見かけ上溶湯の表面張力を上げることで考慮できる可能性がある。しかし、酸化皮膜の生成は合金成分により異なるし、湯流れ中の短時間

での生成とその機械的性質についての知見はほとんどない。従って、この考慮は表面張力の考慮の後の将来課題として良いと考える。

気泡の浮力による移動は、直接観察では確認できず、気泡が液相と共に流動しているように観察された。ダイカストでは注湯流動速度が速く、また凝固速度が速いので比較的浮力の影響は小さいと推定されるが、肉厚が厚くなると問題になる可能性がある。

(2) 要素形状

流れには要素形状の影響が大きいことが知られている。3-4 節で比較した従来コードは直交 6 面要素であるため、特に円環状鋳物の場合の中子側面での充填遅れは、その影響が出た可能性がある。すなわち、階段上要素では流れが減速されるため、図 4-6 のような結果になったという解釈も可能である。

(3) 従来コードでシミュレーションできない現象

従来コードではプランジャスリーブ内の流動(減圧吸引の影響も発生する場合もあり得る)を考慮していない。また、ガス気泡の巻き込みとプランジャおよび湯道内、製品キャビティ内の流動の連成も行っていない。しかし、本直接観察からわかるように少なくとも湯道でのガス巻き込みが製品中のポロシティ欠陥に大きく影響している。実際のダイカストでは、本実験のような湯道は存在しないが、プランジャスリーブ内でのガス巻き込みが問題となることは従来の経験からわかっている。従って、プランジャスリーブ内の流動シミュレーションと製品キャビティ内の流動およびガス巻き込みを連成したシミュレーションは重要である。

(4) 自由表面の取り扱い

気泡の捕捉には、自由表面形状の影響が大きい。本スタディで使用した従来コードでは前述(3-4-2 項)のような方法で自由表面を推定している。他のベンダのシミュレーション・コードでいかなる取り扱いをしているかの詳細は不明である(発表されていない)。しかし、自由表面形状には前述のように表面張力も影響するし、表面張力には自由表面形状が影響する。従って、表面張力の影響が小さい流体での直接観察と比較して自由表面の取り扱いの妥当性を評価すべきである。この直接観察は比較的容易であり、ある程度本シミュレーションにおける取り扱いが妥当であることをすでに確かめている。従って、この検討は将来の課題としても良いであろう。

(5) その他

シミュレーションで要素数が大きくなるとタイムステップごとの結果の保存には非常に大きなメモリが必要になる。このため、ある時間間隔ごとにデータを保存する。この時間指定が適切に行うことが可能なプリ、ポストプロセッサでないと、肝心な部分での流動情報が取り出せない。この改良も今後必要である。

また、シミュレーションに使用しているパラメータとしては溶湯の粘性係数と密度、ガスベント等での通気抵抗がある。しかし、これらは物理的に決まるもので任意に与えるものではない。ただし、粘性係数は多少変化させても、万一流動挙動がより実際に近くなるのであれば変化させても良いであろう(要素寸法が十

分細かければ変化させるのはおかしいが、実際の計算では多くの場合、十分細かい要素は使用できないので、その誤差との関係で粘性係数を変化させることも許されると考える)。

3-5-2 溶湯粘性係数の影響

以上の考察から、まず実施が容易な溶湯の粘性係数の影響について検討した。

図 5-1 は、妥当と考えられる粘性係数の場合とそれを 10 倍した場合のシミュレーション結果を比較したものである。前述のプリ、ポストプロセッサの問題で、同一時間での比較ができなかったが、粘性係数を変化させても特に改善されるということはないようである。

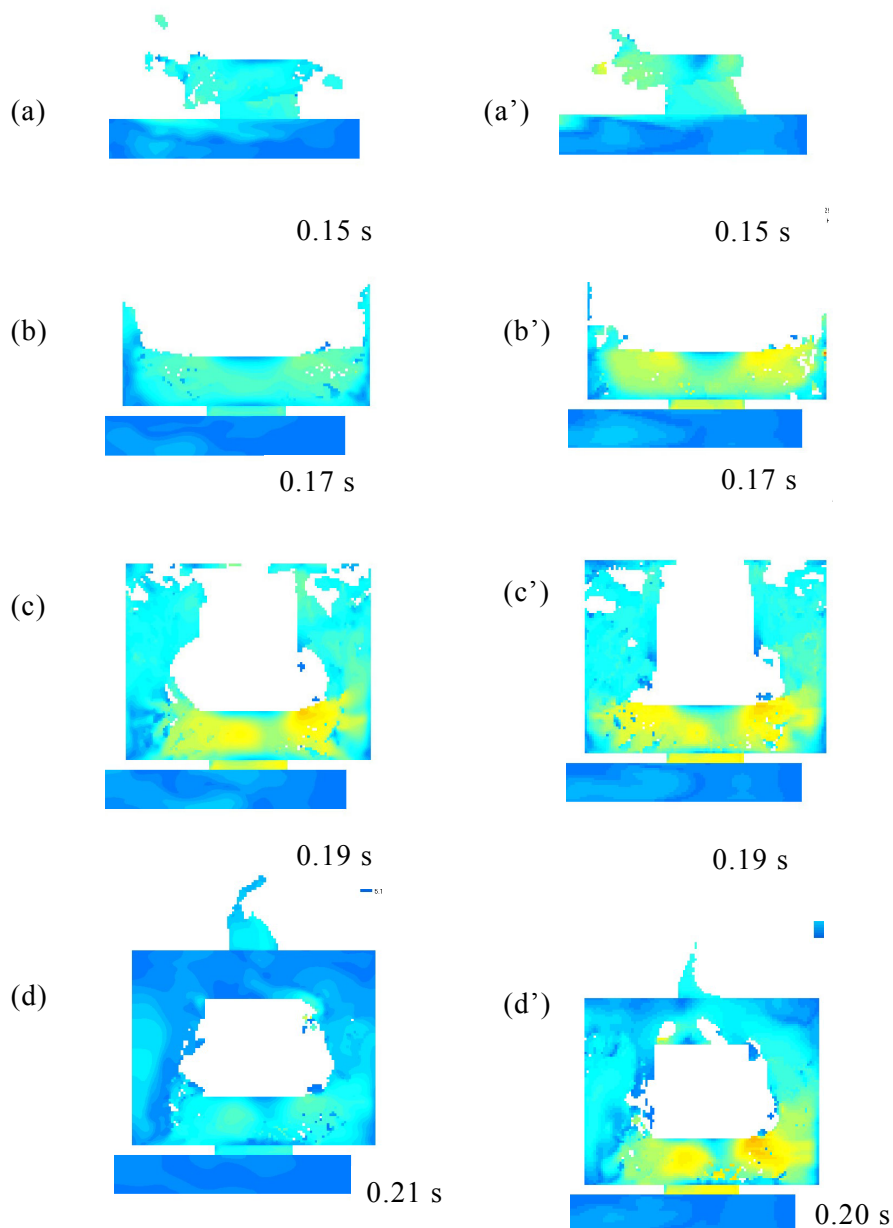


図 5-1 粘性係数の影響(色は流速の大小を示している)
 (a)～(d) : 動粘性係数 $0.01\text{cm}^2/\text{s}$, (a')～(d') : 動粘性係数 $0.1\text{cm}^2/\text{s}$

3-5-4 減圧吸引およびスリーブ内の流動シミュレーション

次に減圧吸引とスリーブ内の流動シミュレーションが可能なプログラムを開発した。従来コードにはスリーブ内の流動シミュレーションは含まれていないが、他社のシミュレーション・コードには可能なものもある。しかし、減圧吸引の機能はない。

3-5-4-1 モデルおよびアルゴリズム

図 5-2 は、本直接観察で使用した注湯系のモデル図である。実際には真空パイプをプランジャスリーブに接続してプランジャスリーブを減圧し、湯面に作用する大気圧との差圧で溶湯がスリーブ内に吸引される。しかし、ここでは真空パイプを無視して、スリーブ内の圧力は一定として、湯面位置に差圧分の外圧が作用するとした。また、この外圧は時間的に変化するものとした。

なお、注湯後、プランジャチップを移動させる段階では、注湯パイプはスリーブと見なすようにプログラムを変更した。

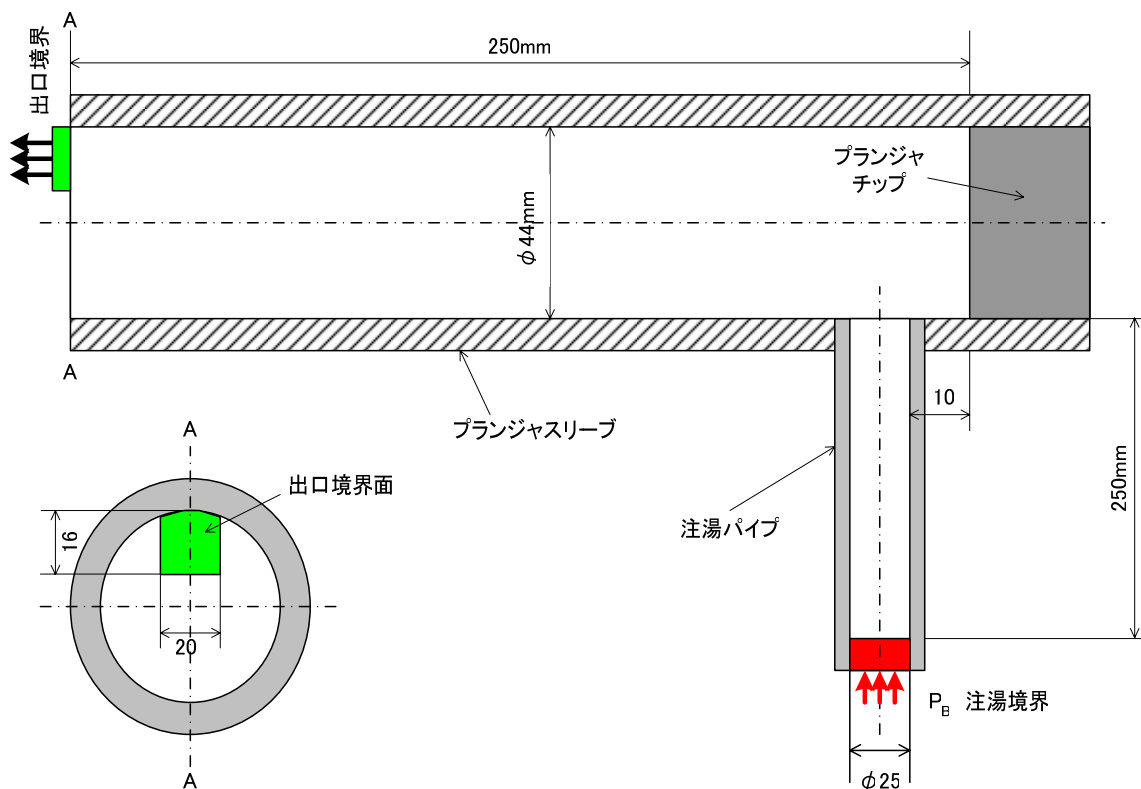


図 5-2 減圧吸引とプランジャスリーブのモデル

3-5-4-2 シミュレーション例および直接観察結果との比較

図 5-3 にシミュレーションしたモデルを示す。シミュレーション条件は以下のとおりである。

- ・総要素数： 2,914,692
- ・鋳物要素数： 360,998
- ・吸引のための差圧： 46,500 dyne/cm²
- ・溶湯吸引後の保持時間： 3.0 sec
- ・プランジャ速度： 0.3 m/s
- ・解析方法： 等温湯流れ解析

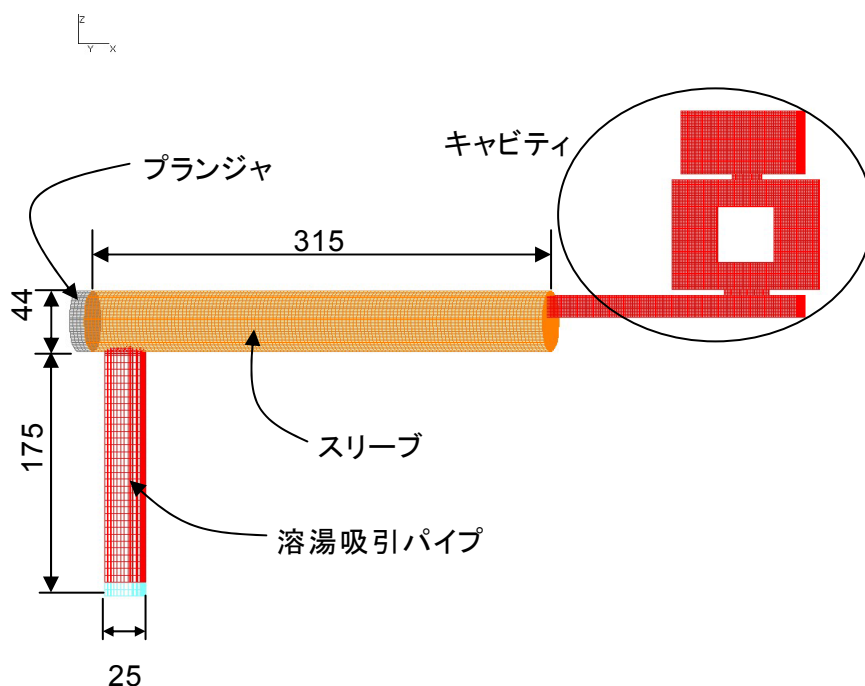


図 5-3 シミュレーションモデル

図 5-4 に溶湯がスリーブに吸引状態された後、スリーブ内に溜まっていく状況のシミュレーション結果を示す。減圧速度が高いとスリーブ中での乱れが大きくなる。また、2,3 秒で湯面がかなり沈静化することがわかる。このようなスリーブ内の流動の影響を考慮することで、より高精度なシミュレーションが可能になるであろう。

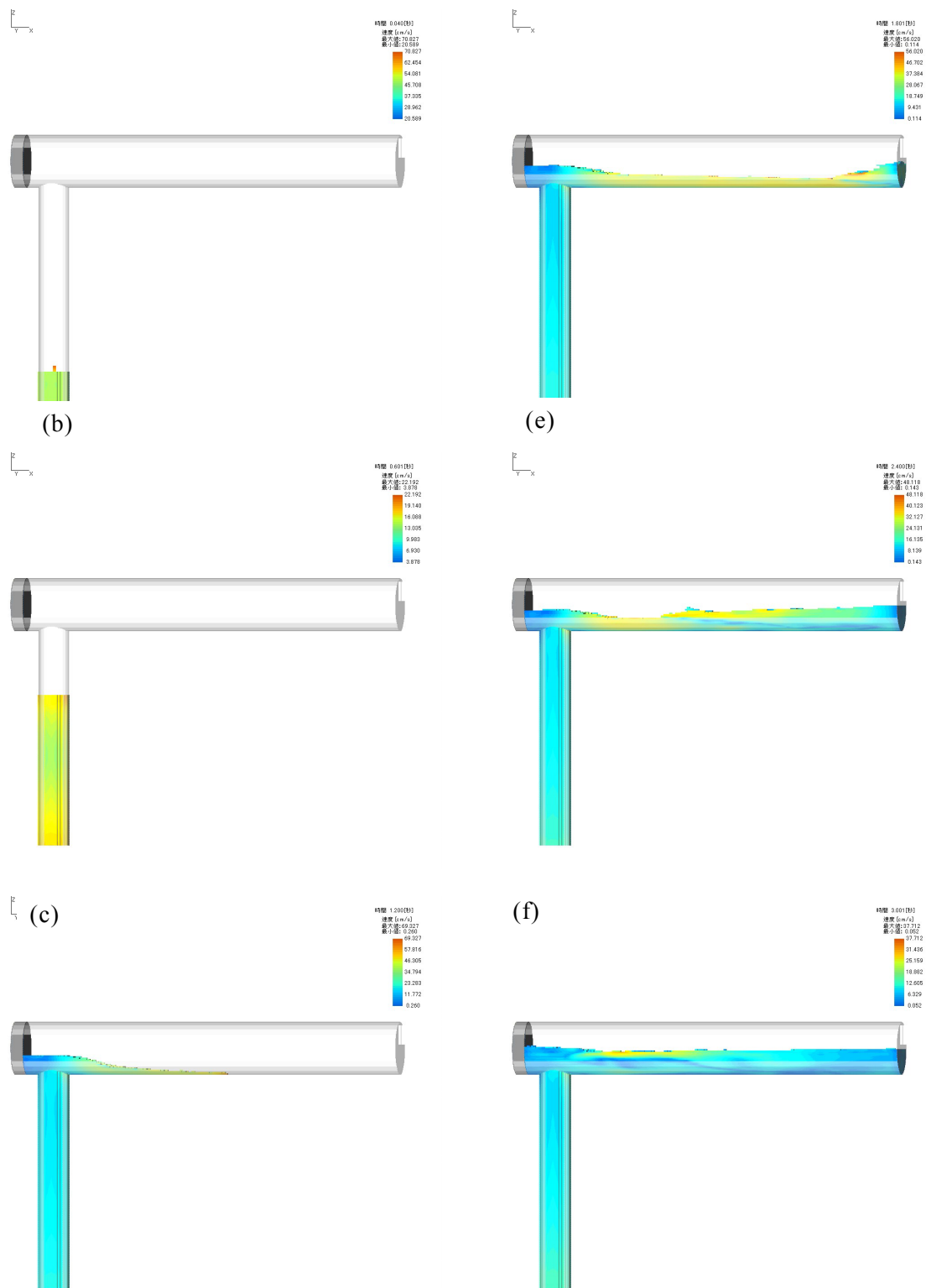


図 5-4 プランジャスリーブへの溶湯吸引充填シミュレーション結果例

(0.6 s 毎の表示)

図 5-5

に黒鉛スリーブ内の溶湯流動の直接観察結果とシミュレーション結果を比較した

。直接観察領域はスリーブのほぼ中心付近の幅 145mm の領域である。プランジャで溶湯が押し上げられ、他端から跳ね返ってきた波でプランジャチップ前方の湯面高さが上がっていることなど良くシミュレートできている。

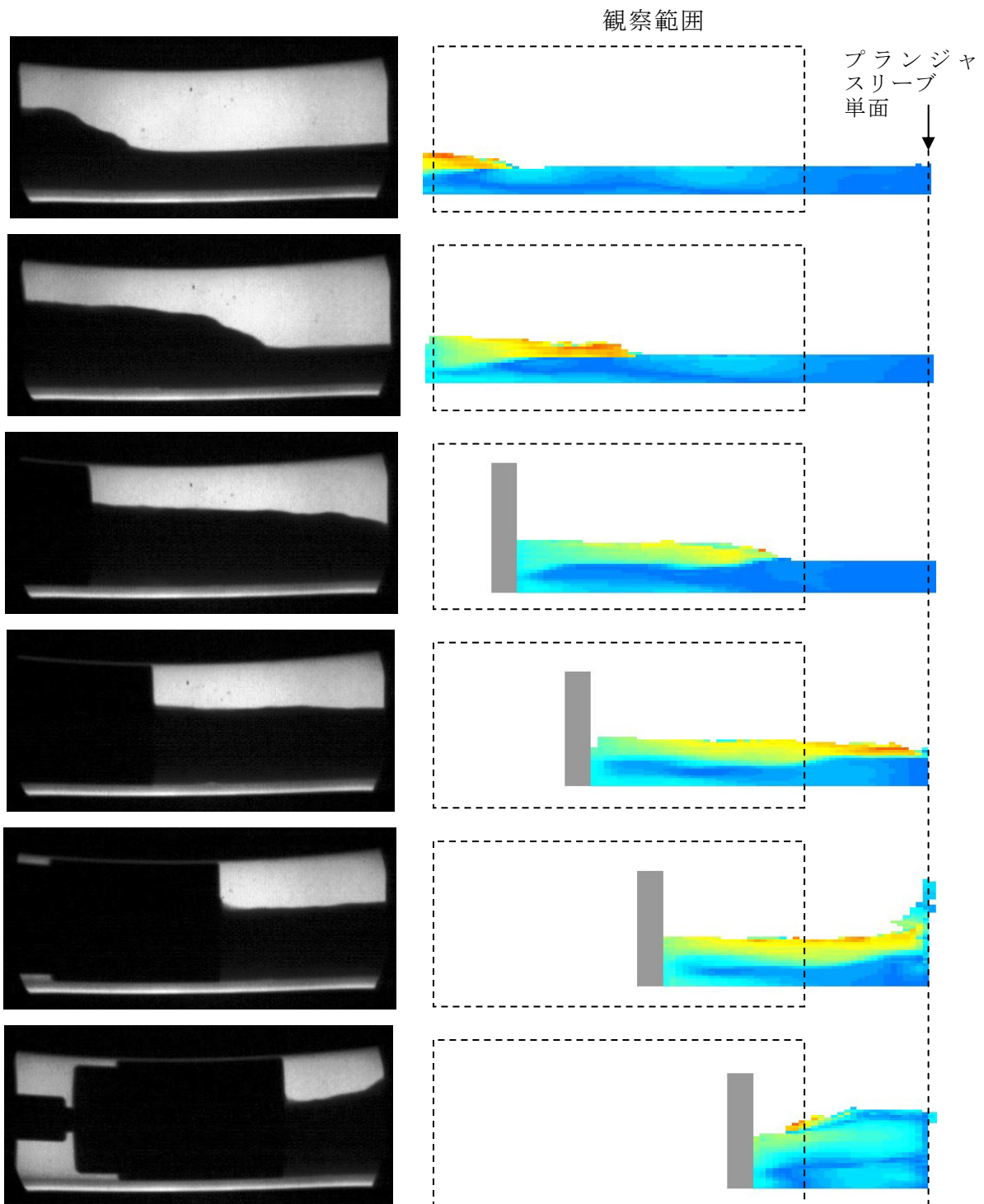


図 5-5 注湯後のプランジャスリーブ内の流動シミュレーション結果と直接観察結果の比較(約 0.1 s 間隔で表示している)

3-5-5 ガス巻き込みシミュレーションとの連成

上記のスリーブ内の流動と、キャビティ内への流動を連続的に計算することで、より現実的な計算結果が得られる可能性がある。特に、気泡の巻き込みを考慮した湯流れシミュレーションと連成させることで、より高精度なシミュレーションの可能性はある。

そこで上記のシミュレーション・コードと「革新的鋳造シミュレーション技術開発」で開発したガス巻き込みシミュレーション^{3,4)}と連成させたプログラムを新たに開発した。

3-5-5-1 アルゴリズム

連続している未充満要素は同一ガスグループとする。体積は理想気体として算出する。ガスグループのうち、ガスの逃げ道がないグループをガス欠陥要素と定義する(大きなガス巻き込み欠陥)。また、要素サイズ以下となったガスグループをマーカーに置き換えて追跡することにより微小なガス欠陥を予測する。すなわち、ガス欠陥予測手順は以下のとおりである。

- (1) 溶湯あるいはベント等ガスの逃げがない領域によって取り囲まれたガスグループをガス欠陥グループと定義する。
- (2) ガス欠陥グループのうち要素サイズ以下になった場合に要素中心にマーカーを一つ発生させる。
- (3) 巻き込まれた微小ガスは溶湯によって運ばれる。
- (4) マーカーがガスグループに再度含まれた場合はマーカーを消滅させる。

また、マーカー同士の衝突は無視し、壁面に接触した場合の吸着は考えない。マーカー追跡により従来不可能であった微小なガス巻き込み欠陥を予測することが可能である。

3-5-5-2 シミュレーション例

図 5-6 はプランジャスリーブ内の流動と製品空隙部への流入を連成させたシミュレーション例である。ただし、ここではガスの巻き込みを考慮していないので、プランジャスリーブ内の流動を考慮しない場合と目立った差は生じていない。

図 5-7 は、図 5-6 のようなシミュレーションにさらにガス巻き込みを考慮してシミュレートした例と直接観察結果を比較したものである。図からわかるように中子側面での充満遅れとその後の流動で消失し、欠陥が減少していることなどが一致している。特に、欠陥位置が誰にでも良くわかる点が優れている。従来法では、前述のように膨大な計算データを保存し、時々刻々流れを追わないとどこに欠陥が生じる可能性があるのかわからない。

ただし、欠陥位置は全てが一致している訳ではない。さらに推定精度を上げるには、使用要素形状や表面張力、気泡への浮力の影響などを今後検討する必要がある。

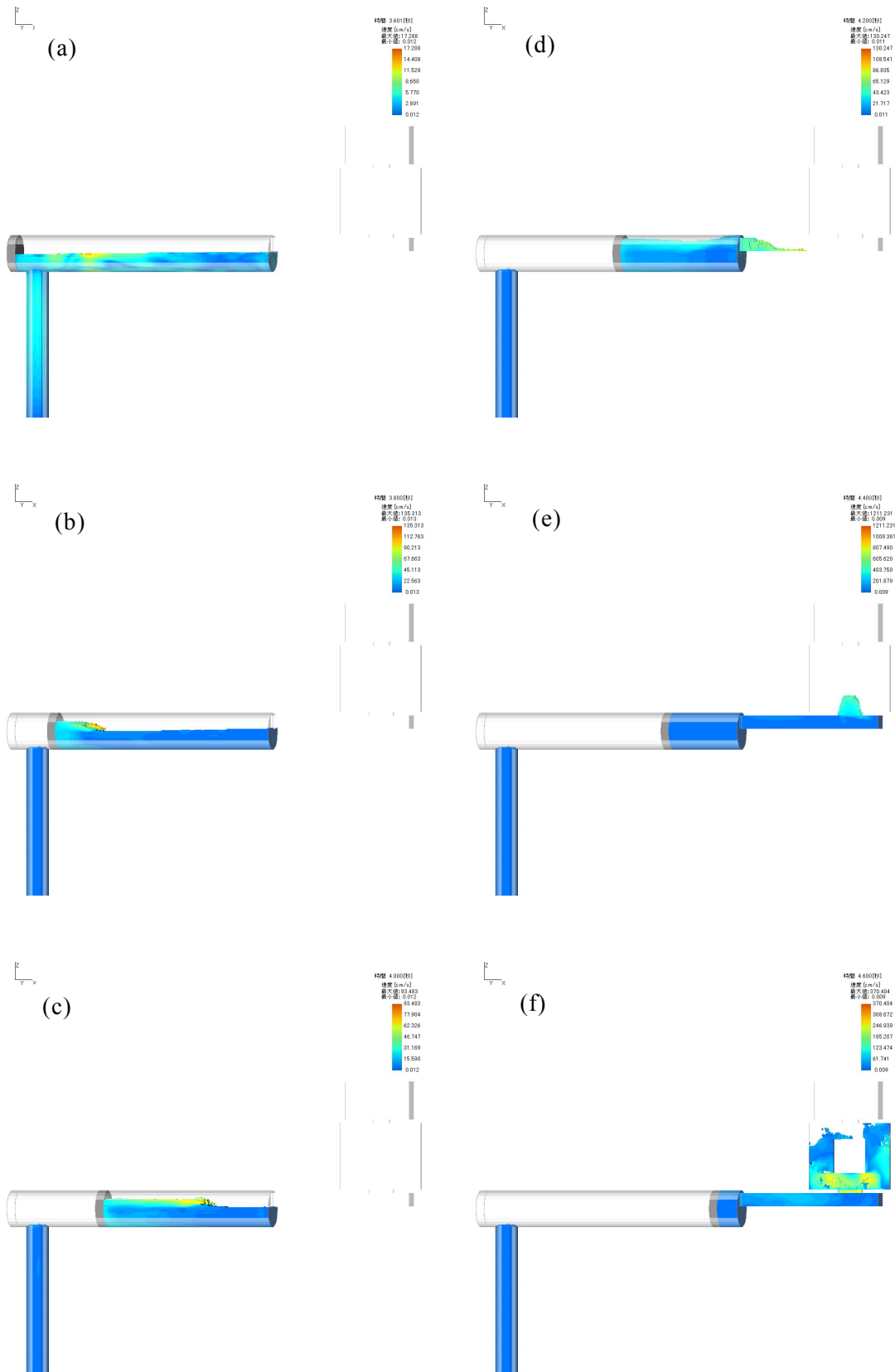
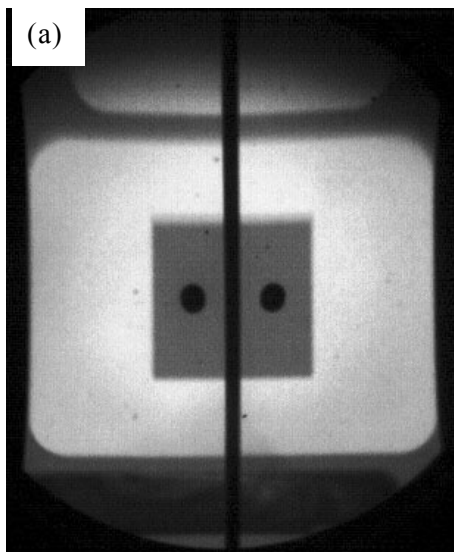
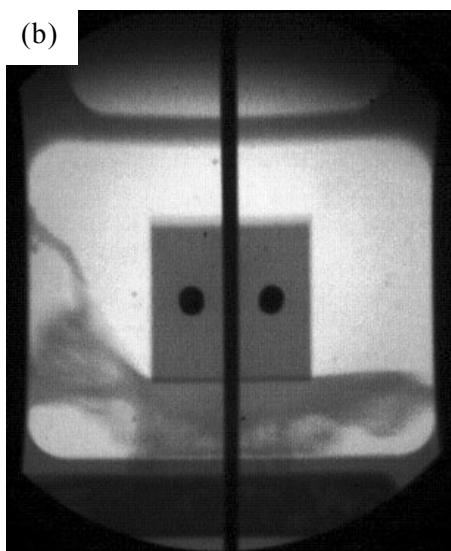


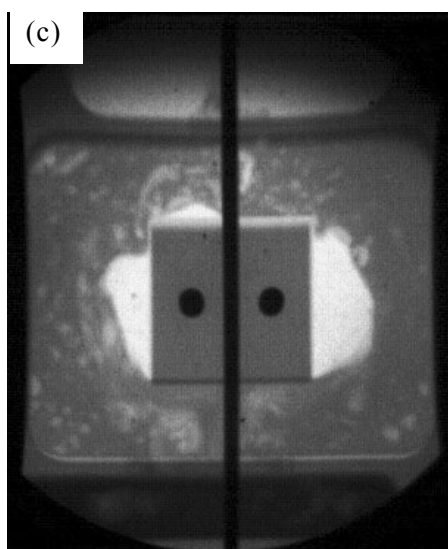
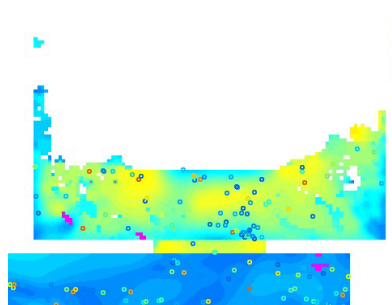
図 5-6 プランジャスリーブ内の流動と製品空隙部での流動を連成させた場合のシミュレーション例(ガス巻き込みは考慮していない)
(0.2 s ごとの表示)



(a')



(b')



(c')

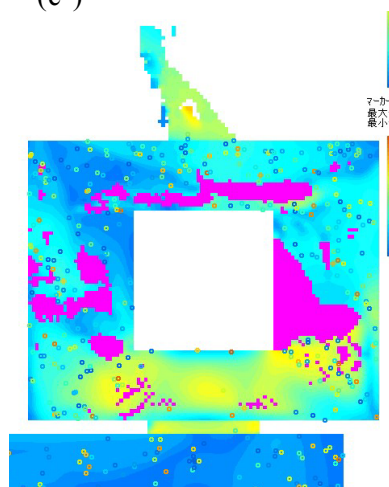


図 5-7 シミュレーション結果と観察結果の比較
(経過は約 0.04 秒ごとに表示)

3-5-6 その他の改善・高精度化

3-5-6-1 曲面への対応

直交ブロック要素ではなく多角形要素を鋳型近傍の要素に利用する曲面对応用規則・不規則要素の採用により、特に円環状鋳物の湯流れを改善できる可能性がある。これに関しては「革新的鋳造シミュレーション技術の研究開発」において既にソフトを開発しているため、ダイカスト用に変更するのは時間の問題である。

5.6.2 表面張力の考慮

表面張力を考慮するには、運動量保存則の式に以下の表面張力項を追加する。

$$\mathbf{F}_\sigma = -\sigma \cdot \kappa \cdot \mathbf{n}, \quad (5-1)$$

ここで、 κ, σ および $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ は湯面の曲率、表面張力、外向き法線ベクトルである。

実際の計算では、湯面の曲率および法線ベクトルの計算法が問題となり、様々な方法が考えられる^{2,5-8)}。

また、鋳型と溶湯との濡れについては、鋳型部分に仮想的液相率を与えることで考慮する。

図 5-8 に表面張力を考慮する場合のフローチャートを示す。

流動計算ルーチンにおける仮想流速計算ルーチンの外力項計算に表面張力項を追加

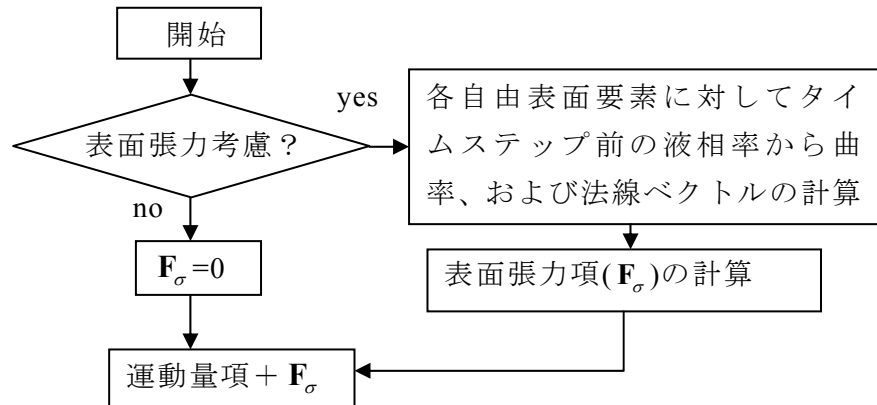


図 5-8 表面張力項を考慮する場合のフローチャート

3-5-6-3 気泡移動の考慮

気泡移動については従来法では液相と同一速度で移動するとしているが、流速が遅く、気泡寸法が大きくなると気泡に浮力を考慮した運動方程式を適用する必要がある。気泡間の干渉を考慮する場合にはさらにそれらを考慮した式が必要であるが⁹⁾、実用性を考慮して、寸法の大きい気泡数がある程度限定して対応する。しかし、鋳型近傍の気泡が多いので、そのための見かけの抵抗が増えることも考慮する必要がある。

3-5-7 今後の鋳造方案理論の改善

ダイカストの鋳造方案では、ゲート形状、寸法が最も重要である。この他、引け巣予測と対策としての局所加圧や焼付き、変形防止等がある。湯流れ現象は、これらの全てに関係している。すなわち、ガス巻き込みによるポロシティ欠陥は直接的で当然ながら、湯周り不良の発生にも関係しているし、湯流れにより鋳型の温度が局所的に変化するため凝固収縮位置や焼付き、変形にも影響する。

ただし、本直接観察が直接役立つのはポロシティ欠陥と湯周り不良に関連する方案である。特に、今回は温度変化情報がないため、気泡の巻き込みを防ぐゲート方案について考えてみる。

従来のゲート方案では、まず湯回り不良を防ぐため肉厚と寸法に応じてゲート速度を経験的に決定することが多い。ゲート速度が決まり、ゲートの分離し易さを考慮してゲート厚さを決めればゲートの幅が決定される。ゲートの位置や個数はガスの巻き込みを経験的に推定して決定する。この際、従来の同様の製品での経験が生かされる。そして最終的にはシミュレーションで、問題がないかどうかをチェックする。このシミュレーションにかける前の方案設計を初期設計と呼ぶことにする。

このような従来の方法では、シミュレーションで問題が発生するとわかってもその対策に場合によっては非常に時間がかかる。もし、初期設計が適切であれば一回のチェックですむ。また、最適設計も容易になる。従って、納期の短縮や高品質化には初期設計技術の向上が非常に重要である。

初期設計技術の向上の一つの方法は、ある種の標準化である。すなわち、ゲート形状をある程度大まかに分類すればそれほど多くはない。また、製品形状も Group Technology(GT)^{10,11)}的な手法である企業に限定すればある程度の基本形状に分類できるであろう。従って、信頼できるシミュレーションにより各分類ゲート形状、寸法、基本製品形状に対してその適切さを評価しておき、類似条件の場合に採用すれば従来法よりより適切な初期設計となるであろう。さらに、このような初期設計基本データに個々の方案実例も容易に利用できるデータベースを構築していけばより良いものになるであろう。また、これらの信頼できるデータを解析することで従来法より優れた初期設計経験式が導出できる可能性もある。

いづれにしても、シミュレーション精度の確認とより高精度で利用しやすいシ

ミュレーション・コードが基本になるし、そのためには本スタディのような直接観察が重要である。

3-5-8 結言

3-4 節の検討結果を踏まえて、シミュレーション・コードの改良、高精度化と今後の鑄造方案について検討した結果以下のような成果が得られた。

- (1) 中子側面での充填遅れのシミュレーション精度をあげるには、閉じ込められた気泡の圧力、溶湯の表面張力、鑄型との濡れの考慮の他、使用する要素形状にも注意する必要がある。
- (2) 従来コードでシミュレーションできない減圧による溶湯吸引—プランジャチップ駆動—射出がシミュレーション可能なコードを開発し、スリーブ内流動現象および湯道での気泡巻込みをシミュレートできることを確認した。
- (3) 上記のシミュレーション・コードと気泡の圧力や背圧を考慮したコードを連成させたコードを開発し、より高精度で欠陥位置がわかりやすいシミュレーションが可能であることがわかった。
- (4) 溶湯表面張力および溶湯と鑄型の濡れや気泡の浮力による上昇を考慮するアルゴリズム開発した。今後、これらを組み合わせることでより役に立つシミュレーション・コードが実現できるはずである。
- (5) シミュレーションを有効活用することで初期方案設計の新たな方法を提案した。

文献

- 1) 大政光史、大中逸雄：鑄物、64(1992)167
- 2) 桜木卓也、鑄造工学、76(2004),562-569
- 3) A.Kimatsuka, I. Ohnaka, J.D.Zhu, and T. Ohmichi: Int. J.Cast Metals Research, 15(2002),149
- 4) A.Kimatsuka, I.Ohnaka, J.D. Zhu, A.Sugiyama,T. Kamitsu : “Mold Filling Simulation of Die Casting for Predicting Gas Porosity”, Proc. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes-X,(ed.by D.Stefanescu et.al.) TMS, (2003.5) 335
- 5) Hideyuki Yasuda and Itsuo Ohnaka, Modeling of Faceted Growth for Microstructure Formation, *Proceeding of modeling of casting and solidification processes IV*, edited by C.P.Hong, J.K.Choi and D.H.Kim, (1999), 117-124
- 6) L.Nastac, A New Stochastic Approach for Simulation of Solidification Morphologies and Segregation Patterns in Cast Dendritic Alloys, in *Modeling of Casting and Solidification Processes 1999*, ed. by C.P.Hong, J.K.Choi and D.H.Kim,CAMP, Yonsei University, Korea,(1999),31-42
- 7) R.Sasikumar and R.Sreenivisan, Acta Metall., 42(1994),2381-2386
- 8) D.B.kothe, R.C.Mjolsness, and M.D.Torrey, RIPPLE:A Computer Program for

Incompressible Flows with Free Surface, Los Alamos National Lab., LA-10612-MS,
Los Alamos, NM(1991)

9) 本間仁、水理学、丸善、(1967),189 粒子群の速度低下

10) 日本鋳鋼会：鋳造品の方案図集、鋳造品分科会資料 2-8、(1968)

11)(財)素形材センター研究調査報告書 176,(1974), GTS4(堤信久)

3-6 まとめ

本スタディにより世界的にも貴重なダイカストにおける湯流れの直接観察が可能となりビデオ撮影ができた。また、数値シミュレーション結果と比較検討の結果、以下のことが明らかになった。今後、本観察結果および本装置を利用した種々の観察結果と種々のシミュレーションコードによるシミュレーション結果を比較することで、シミュレーションコードの評価および改良が可能になる。

本節では、本スタディで得られた主な成果をまとめる。なお、比較に使用したシミュレーションコードは平成 11～14 年度に実施した「革新的シミュレーション技術の研究開発」プロジェクトで開発したコードを使用した(これを以後「従来コード」と呼ぶ)。

3-6-1 直接観察結果とシミュレーション結果との比較検討

3-6-1-1 矩形状鋳物の場合

- (1) 直接観察により、矩形中子の両側の充填が遅れることがわかった。従来コードでもこの傾向を再現できたが、完全な一致はできなかった。なお、シミュレーション結果は要素分割数でかなり変化し、肉厚方向に 3,4 分割では不十分であることがわかった。
- (2) 多数の気泡の巻き込みが観察されたが、シミュレーションでの再現精度はあまり良くなかった。観察によると気泡の巻き込みは、製品空隙部のみならず、すでに湯道での巻き込みが生じていることがわかった。
- (3) 空隙部をほぼ充填した後、局所的にさらに溶湯が充填されるというダイカスト鋳造に特有とされている現象が初めて直接観察され確認された。
この現象は、プランジャチップによる加圧により、固液共存域で凝固層の一部が変形あるいは破断して溶湯がさらに押し込まれたためと推定される。
この現象をシミュレートするには、固液共存層の変形問題を解く必要があり、従来シミュレーションでは予測できない。
- (4) 充填時間については、20～30%程度の誤差でシミュレートできた。
- (5) 直接観察によると、溶湯の流れは最初堰と平行の流れではなく、湯道先からプランジャスリーブの方向に多少斜め気味にキャビティに流入し、その後堰と平行に近い流れとなり、概略対称的に空隙部を充填した。この傾向はシミュレーションでも再現された。
- (6) 直接観察およびシミュレーション共に堰からの流れは中子に衝突するまで肉厚方向には鋳型を充填せずに流れた。ただし、その後の流れでは、実際の方が鋳型肉厚方向に充填しない傾向が見られた。

3-6-1-2 円環状鋳物(単ゲート)の場合

- (1) 矩形状鋳物の場合と同様に、中子の両側の充填が遅れ、従来コードでも、この傾向を再現できた。
- (2) 気泡の巻き込み、充填後の局所的溶湯移動など上記の矩形鋳物の場合と同様

の結果が得られた。

- (3) 充満時間については、2, 30%程度の精度でシミュレートできた。
- (4) 直接観察によると、堰部での流れは最初多少絞られ気味で、その後概略対称的に空隙部を充満した。この傾向はシミュレーションでも再現できた。

3-6-1-3 円環状鋳物(複ゲート)の場合

- (1) 単ゲートの場合と異なり中子側面の充填遅れは観察、シミュレーション両者とも顕著ではなかった。
- (2) 二つの堰の内、湯先に近い堰から最初に空隙部に溶湯が流入し、その後ほぼ対称的に流入する様子が観察され、シミュレーションでも同様の結果となった。
- (3) 堰から流入後の流れは肉厚方向に充満せずかなりの距離流れることが観察されたが、シミュレーションでは比較的早く充満する傾向となった。これは単ゲート円環状鋳物の場合と同じである。
- (4) その他、気泡の巻き込み、充満後の局所的溶湯移動など上記の矩形および円環状鋳物の場合と同様の結果が得られた。

3-6-1-4 プランジャチップ・スリーブ中の流れ

- (1) 吸引されてスリーブに流入した溶湯はスリーブ先端に向かって流れ、(先端で跳ね返り)プランジャチップに向かい逆流する様子が観察された。ただし、跳ね返る様子はその部分が鋼鉄製であるため観察できなかった。今後装置を改良すれば先端での観察も可能である。
- (2) 約 2,3 秒で湯面変動が沈静化されることがわかった。
- (3) プランジャチップを駆動させるとプランジャチップで溶湯が押し上げられる様子やその後の湯面変化が観察された。
- (4) これらの挙動は従来コードではシミュレートできないため新たにコードを開発し、シミュレートできることを確かめた。

3-6-2 従来コードの改善

上記のように従来コードによりある程度観察結果を再現できるが、未充満領域の形状の再現性や気泡の巻き込みの再現性が良くないことがわかった。このための改善および従来コードではシミュレーションできない点について検討した。その結果は以下のとおりである。

- (1) 湯流れシミュレーションの最終目的は欠陥の推定にあり、湯流れ中の気泡巻き込みの再現精度を上げることが極めて重要である。この改善には、湯道(実際にはプランジャスリーブ内での巻き込みも発生する可能性がある)での気泡巻き込みをシミュレーションする必要がある。また、浮力による気泡の移動、溶湯の表面張力、鋳型との濡れの考慮、自由表面形状推定精度の向上が必要である。
- (2) そこで、まず従来コードでシミュレーションできない減圧による溶湯吸引—

プランジャチップ駆動一射出がシミュレーション可能なコードを開発した。そして、スリーブ内流動現象および湯道での気泡巻き込みをシミュレートできることがわかった。

- (3) さらに上記のプログラムにガス巻き込みを考慮したプログラムと連成させることを試み、未充填領域のシミュレーション精度が上げられることがわかった。
- (4) 気泡の浮力による上昇、溶湯表面張力および溶湯と鋳型の濡れを考慮するアルゴリズム開発した。今後、これらを組み合わせることでより役に立つシミュレーションコードが実現できるはずである。
- (5) 従来コードにおけるパラメータとしては、溶湯の粘性係数と密度があるが、変更可能なものは粘性係数であり、これを 10 倍程度変化させても結果への影響はあまり大きくなかった。

今後、これらの改善点を完成させることで大幅なシミュレーション精度の向上が期待される。

3-6-3 可視化用小型ダイカストマシンの開発

- (1) 可視化用の小型ダイカストマシンを設計・試作した。本マシンの特徴は、以下のとおりであり、普通のダイカストマシンの湯流れとは完全には同じではないが、類似の湯流れの直接観察が可能であることがわかった。

- ・電動駆動で射出する(ダイカストマシンではめずらしい)。
- ・プランジャスリーブのみを減圧して溶湯を吸引注湯する。
- ・小型軽量である。

特に、300W という低押し力で一応の射出が可能であったのは、今後の小型・省エネルギー用マシンの方向として興味深い。

- (2) 上記のマシンは、今後改良することで将来の多品種少量、変動生産に適した新しいダイカストマシンの開発に寄与できる可能性がある。改良点としては、以下がある。

- ・空隙部の高真空化(プランジャスリーブと分離されているので容易)
- ・金型の温度調節
- ・駆動力増大による高速射出
(これに対応してより高速度のビデオカメラも必要)

4 スタディの今後の課題および展開

ダイカスト専門メーカー、ダイカストを内製している産業機械メーカーや自動車メーカーにおけるダイカスト品の品質、コスト競争力を画期的に向上させることは、日本の"ものづくり"の基盤強化に直接結びつく。そのために、従来のように経験と勘に頼ってノウハウを積み重ねる方法ではなく、精緻な現象分析と理論に基づくコンピュータシミュレーションを融合した高度な生産技術の確立が不可欠である。本プロジェクトでは、ダイカストの直接観察技術の開発、公開し得る直接観察の結果、シミュレーション技術の向上という成果を得るとともに、今後の課題を抽出することができた。日本のダイカスト技術の発展のために、これらの成果が生かされ、更なる技術開発へつながることを期待したい。

なお、当面の課題としては以下のようなものがある。

4.1 直接観察

以下のような場合の直接観察が望まれる：

- ・種々のプランジャチップ速度における流動現象
- ・プランジャチップ速度を低速から高速に切り替えた場合など途中で変化させた場合
- ・ファンゲートなど種々のゲート形状、寸法の場合
- ・実際に欠陥が出やすい種々の製品形状の場合
- ・鋳型温度、溶湯温度や塗型剤を変化させた場合
- ・局所加圧鋳造の場合

4.2 製品欠陥の観察

湯流れシミュレーションの最終目的は製品に生じる欠陥の推定である。このためには、製品に生じた欠陥の観察結果と湯流れ挙動の観察結果、シミュレーション結果を比較検討して、欠陥の生成機構を明確にする必要がある。

4.3 シミュレーション

まず、本スタディではアルゴリズムの開発のみで完成できなかった表面張力および溶湯と鋳型の濡れを考慮したシミュレーション・コードの実用化が望まれる。また、ガス巻き込みを考慮して、直交6面体要素以外より局面の形状再現性の良い要素を使用したプログラムの開発も重要である。

さらに、上記の種々の直接観察結果とシミュレーション結果の比較によりシミュレーションの限界と問題点を、より明確にする必要がある。さらにその結果に基づいてシミュレーション・コードを必要に応じて改良・改善すべきである。特に欠陥生成の直接シミュレーション・コードの開発が望まれる。

4.4 その他

- ・上記の結果と湯流れ観察およびシミュレーション結果の比較
- ・高真空、高速マシンへの改良
- ・この改良マシンによる湯流れ、欠陥観察とシミュレーション
- ・ゲート方案の初期設計技術の開発

これらの課題、特に興味深い高品質・多品種・少量生産・省エネルギーマシンの開発につなげるため、高真空、高速、電動、小型軽量高真空を今後実施していくには、下記の改良が望まれる。

- ・射出力の増加
- ・空隙部の高真空化
- ・金型の温度調節
- ・デジタルビデオの更新(現有ビデオでは高速射出時の流れを撮影できない)

— 禁無断転載 —

システム開発 16-F-13

ダイカスト湯流れ直接観察システムの
開発に関するフェージビリティスタディ
報告書
(要 旨)

平成17年3月

作 成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
TEL 03-3454-1311

委託先 財団法人 素形材センター
東京都港区芝公園三丁目5番8号
TEL 03-3434-3907