

技術論文

Technical Paper

減圧吸引鑄造における2相流解析技術の開発

山本和巳*, 鈴木寿穂*

Two-Phase Flow Simulation of Low Pressure Casting

Kazumi Yamamoto and Toshio Suzuki

Synopsis

A two-phase simulation method of gas and metal flow for counter gravity investment casting has been carried out to investigate the mold filling process. The method is capable of calculating back pressure inside the mold cavity and air entrapment during mold filling because the removal of the air from the shell mold is solved using CFD (Computer Fluid Dynamics) model. The calculation results of mold filling patterns have been compared with the experimental results and show good agreement. On the other hand, there is a substantial difference from experiment data in the result of conventional simulation by using only metal flow dynamics. It is due to underestimation of back pressure. It is proved that the presented method can be used effectively for accurate prediction of the metal flow patterns during mold filling.

1. 緒言

精密鑄造プロセスは、ニアネットシェイプで複雑形状部品を製造する手法として広く普及しており、他の成形手法（粉末冶金、切削加工）と比べても利点が多く¹⁾、さまざまな分野の製品が製造されている。たとえばディーゼルのNO_x対策として車載が進んでいるターボチャージャーの部品、なかでもタービンインペラはその薄肉複雑形状から精密鑄造プロセスで製造されることが多い。それ以外にも、ノズルベーンやロッカーアームなどの自動車部品を始め、二輪車用排気部品、発電機用燃焼部品、さらにはゴルフクラブやジェットスキー部品のレジャー分野など、その適用は幅広い。

精密鑄造プロセスのなかでも、1 mm以下の薄肉品の湯回りを確保するためには、減圧吸引鑄造法を用いた精密鑄造法が有効²⁾であり、減圧条件を含む鑄造条件や鑄造方を適宜設定することで、肉厚0.1 mmという極薄鑄物の鑄造も可能である。

近年、鑄型方案および鑄造条件の設定にCAE (Computer Aided Engineering) が積極的に取り入れられており、各種鑄造不良の削減を目的に、さまざまな数値

予測手法の開発が行われている³⁾。減圧吸引鑄造法においても、真空ダイカストを中心に湯流れの数値予測手法の開発が行われており^{4),5)}、鑄型内の湯流れを直接観察した結果を活用した予測手法開発の取り組みも行われている^{6),7)}。しかしながら、鑄型全体が通気度を有している精密鑄造における減圧吸引鑄造法に関しては、鑄型を通過する空気挙動が大きく影響すると考えられているが、数値予測の適用例はあまり報告されていない。

そこで、本研究では減圧吸引鑄造法を用いた精密鑄造プロセスにおいて、空気流および溶湯流を連成させながら計算する2相流解析を用いた湯流れ予測手法を開発し、実験データとの比較検証を行った。

2. 実験方法

2.1 鑄造方法および鑄造方案

本実験で用いた鑄造炉をFig.1に示す。本実験では、減圧吸引鑄造法のひとつであるレビキャスト法を用いた。レビキャスト法は、活性・高融点金属に適応するため、浮揚溶解 (LEVitation) が可能なコールドクルーシブル炉⁸⁾と減圧吸引鑄造法⁹⁾ (CASTing) とを組み合

せた当社独自の鑄造方法で、現在 TiAl タービンインペラの量産などに用いられている。減圧吸引鑄造法とは、チャンバー内に鑄型をセットし、溶湯中に吸引スノートを押し入れした後、チャンバー内を減圧することで、大気圧の溶湯がスノートを通じて鑄型内に吸引され、鑄型キャビティを充填する鑄造法である。このときの圧力変化の模式図を Fig.2 に示す。大気圧とチャンバー内の圧力の差を減圧度といい、この減圧度の設定が湯流れに大きく影響する。

鑄造方案および溶湯流動測定方法を Fig.3 に示す。鑄造方案には、るつぼから溶湯を吸い上げる吸引スノート、チャンバー内にてそれに接続されるセンタースプ

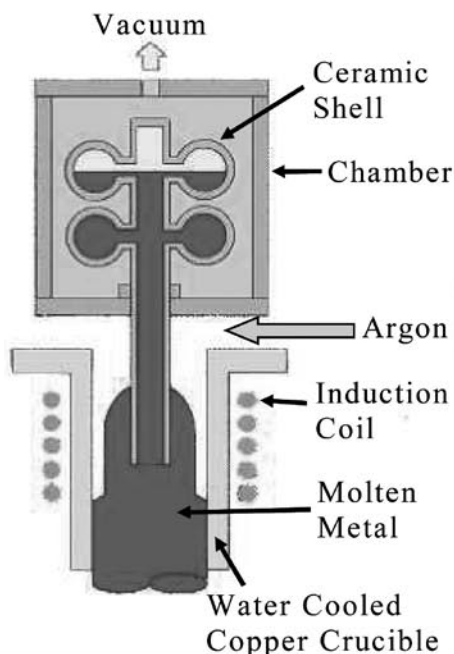


Fig.1. Schematic diagram of LEVICAST process.

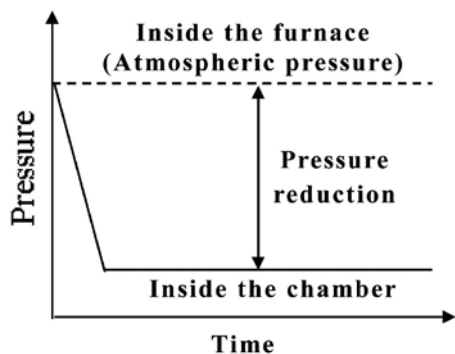


Fig.2. Schematic view of reduced pressure curve.

ルー、および製品から構成されるセンタースプルー方式を用いた。スプルーには円筒形状の模擬製品を上・下段各2個、計4個取り付けけた。

2. 2 鑄型内溶湯流動測定方法

測定は、鑄型各部にセンサーを埋め込み、溶湯到達時の導電により判定を行う、いわゆる電気探針法にて行った。センタースプルー、模擬製品の寸法、およびセンサー埋め込み位置を Fig.4 に示す。センサーは鑄型壁面から内部に5 mm 露出するように取り付けけた。信号はデータロガーにて、サンプリング間隔 0.001 s で取り込んだ。

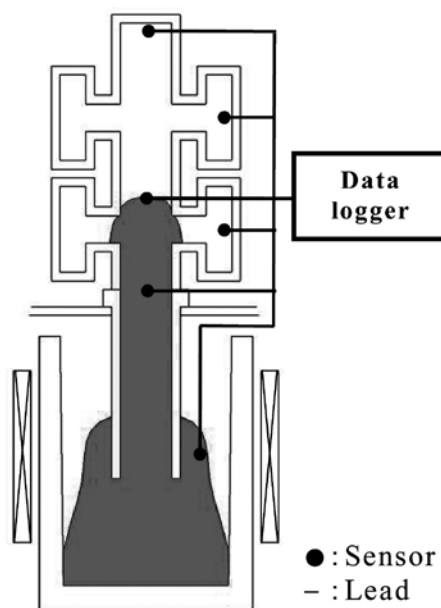


Fig.3. Schematic of casting plan and conductive probe method.

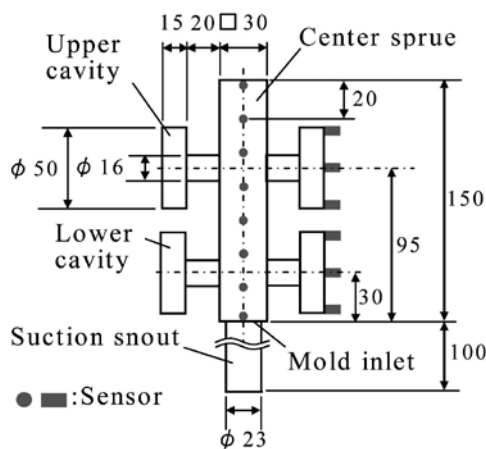


Fig.4. Mold geometry and sensor positions.

鑄型キャビティへの溶湯流入時間は、センタースプルーの一番下のセンサーに溶湯が到達した時間を 0 s とした。製品への溶湯到着時間は、製品部のいずれかのセンサーに溶湯が到達した時間とし、溶湯充填時間は、全てのセンサーに溶湯が到達した時間とした。

2. 3 実験条件

Fig.5 に真空排気装置の模式図を示す。チャンバーの容積は $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、減圧空気のリザーブタンク容量は $4.6 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 、真空ポンプの排気能力は $3.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ である。鑄型温度は室温とし、鑄造材料には、レビキャスト法での実用を踏まえて、TiAl 金属間化合物（融点約 1773 K）を用いた。

減圧度は 10.7, 13.3, 16.0 kPa の 3 水準とし、リザーブタンク内の圧力を真空調整弁により制御することで設定した。

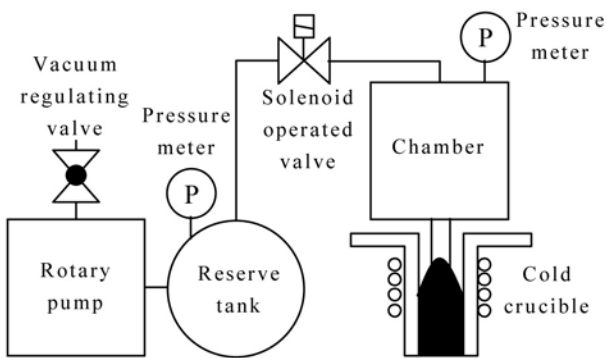


Fig.5. Schematic diagram of vacuum system.

3. 計算方法

3. 1 計算モデル

溶湯流および空気流の 2 相流解析には、SOLA-VOF 法^{8),9)}を採用している市販 CFD ソフトである FLOW-3D[®]を用いた。流れは全て層流として取り扱い、鑄型中の空気の流れはダルシー流れ¹⁰⁾とした。また、比較検証のため、従来法である溶湯流のみ計算する 1 相流解析も行った。なお、本研究では伝熱計算は考慮していない。

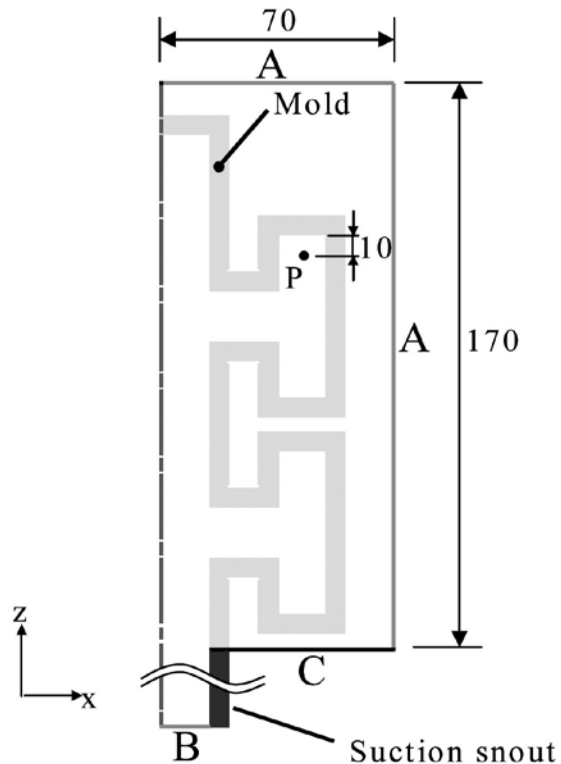
3. 2 鑄型透過率

鑄型中の空気流れの計算に用いる鑄型透過率 K は、実験データへの合せ込みにより求めた。実験データは、鑄型のスノートに繋がる鑄型口を密閉してチャンバーに

セットし、その状態でチャンバーを実際に鑄造するときと同様に大気圧から所定の減圧度まで変化させたときのチャンバーおよび鑄型キャビティの圧力変化を測定することで求めた。このチャンバー圧力の実測値を入力データとし、鑄型の透過率を変えて空気の流れを計算したときの鑄型キャビティの圧力値が実測値と一致するときの透過率を湯流れ計算に用いることとした。

3. 3 湯流れ計算

Fig.6 に 2 相流解析における計算モデルを、Table 1 に計算に用いた物性値を示す。計算負荷軽減のため、計算領域は鑄型から 30 mm 離れたところまでのチャンバー内空間とし、z 軸方向の 1/4 対称モデルとした。初期条件は、計算領域が大気圧の空気満たされているとした。境界条件は、図中境界 A の空気圧が大気圧から設定減圧度まで変化する圧力境界とし、境界 B は大気圧一定の溶湯が存在する圧力境界とした。よって、計算内容は、計算開始と同時に境界 A の空気圧が大気圧よ



Boundary conditions

- A: Pressure, Outlet of air
- B: Pressure, Inlet of molten metal
- C: Wall

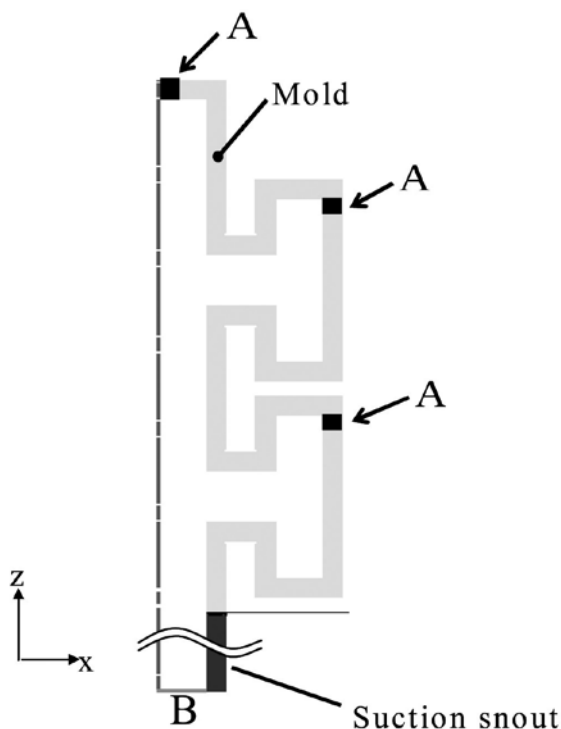
Fig.6. Simulation model of two-phase flow simulation.

り下がることで、チャンバー内空間の空気が境界 A より排出される。それに伴って鑄型内の空気も通気性を有する鑄型を通じて排出され、鑄型内の圧力が下がる。その結果、大気圧の溶湯がスノートを通じて鑄型キャビティに吸引される。

2相流解析との比較のため、溶湯流のみ計算する1相流解析も実施した。Fig.7に計算モデルを示す。1相流解析では、空気に関する連続の式（質量保存則）および運動方程式を計算しないため、鑄型を通じた空気の排出による鑄型キャビティの減圧を計算できない。そこで、鑄型キャビティの圧力を操作することで減圧を模擬する

Table 1. Physical properties used in simulation .

TiAl	Density	kg/m ³	3420
	viscosity	mPa-s	3.6
Air	Density	kg/m ³	1.29
	viscosity	μ Pa-s	1.9
Mold	porosity	—	0.47
	permeability	10 ⁻¹⁴ m ²	3.7, 5.6, 9.2



Boundary conditions

- A: Pressure
- B: Pressure, Inlet of molten metal

Fig.7. Simulation model of one-phase flow simulation.

こととした。鑄型は通気度を有しない壁として定義し、初期条件として鑄型キャビティの圧力を大気圧とした。境界条件は、Fig.7の図中Aで示す位置に圧力境界を設定し、その圧力値として3.2項で述べた鑄型キャビティ減圧時の実測値を入力した。そして、この圧力境界と連通している鑄型キャビティの圧力は境界と一致するとした。この方法により、鑄型キャビティが大気圧から減圧され、スノートを通じて吸引される湯流れを計算した。なお、湯流れ計算中に溶湯と鑄型、もしくは溶湯のみに囲まれることで圧力境界と連通しなくなった鑄型キャビティ（空気）は、それぞれをグループとして取り扱うこととした。グループの圧力は、連通しなくなった時点の体積 V と圧力 P を基準に PV=一定により計算し、その圧力を溶湯計算に用いた。

鑄型キャビティへの溶湯流入時間は、センタースプルーの下端に溶湯が到達した時間を 0 s とした。製品部への溶湯到着時間は、製品の外側（ゲートから離れた面）に溶湯が到達した時間とし、製品部への溶湯充填時間は、製品部キャビティが溶湯で満たされた時間とした。

3. 4 背圧計算

鑄造において、鑄型キャビティに溶湯が流入する際、鑄型キャビティに背圧が発生し、それが湯流れに大きく影響すると報告されている⁷⁾。鑄型を通じて常に鑄型キャビティの空気を鑄型外に吸引している減圧吸引鑄造時においても、溶湯の慣性力により背圧が発生し、それが湯流れに影響していることが考えられる。そこで、Fig.6中の点Pにおいて、湯流れ計算中の鑄型キャビティの圧力を計算し、2相流および1相流解析における背圧およびその湯流れへの影響について評価した。

4. 結果と考察

4. 1 鑄型透過率

Fig.8に減圧度 13.3 kPa でのチャンバーの圧力実測値と鑄型キャビティの圧力実測値と計算値を示す。実測値において、チャンバーは約 0.1 s で大気圧より 13.3 kPa 減圧されているのに対し、鑄型キャビティは鑄型での通気抵抗により遅れて減圧されているのが確認された。また、計算値においては、鑄型透過率が大きいほど鑄型内が速く減圧されており、その中で透過率が 5.6×10^{-14} m² の計算値が実測値とほぼ一致した。よって、以降の2相流計算においてはこの透過率を使うこととした。

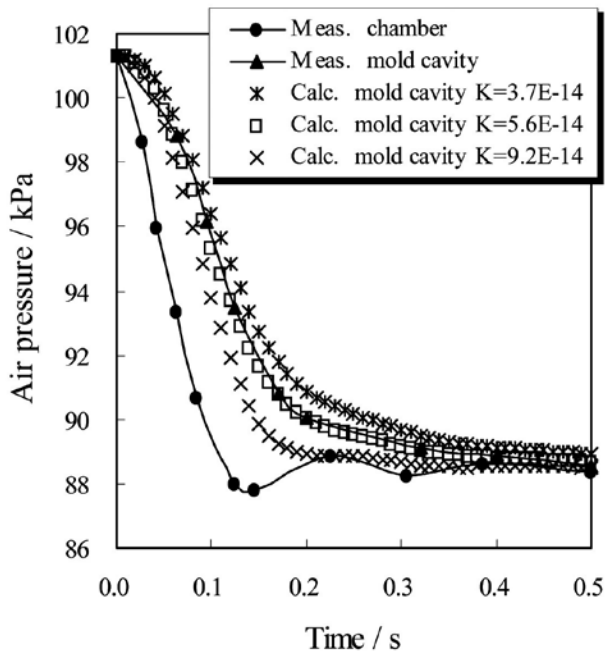


Fig.8. Pressure changes in mold cavity.

4. 2 鑄型内湯流れ状況

Fig.9 に 2 相流および 1 相流解析の鑄型内湯流れ解析結果を示す。赤色が溶湯、青色が空気を表しており、中間色は溶湯と空気の混在領域を表している。2 相流、1 相流とも、溶湯がセンタースプルーを上昇し、製品部へ溶湯が流入している様子が計算されていることが分かる。ただし、2 相流の方が流入が遅く、0.2 s において 2 相流では上製品に溶湯が到達しているのに対し、1 相流では溶湯が 7 割充填している。また、2 相流では鑄型キャビティが完全に充填するのに 1.6 s を要しているのに対し、1 相流では 0.37 s で充填完了している。

センタースプルーにおける溶湯到達高さを Fig.10 に示す。到達高さは、センタースプルーの下端を 0 mm とした。2 相流解析結果は、実測値より溶湯上昇が約 10 % 速い傾向にあるが、おおむね良い一致を示している。それに対し、1 相流解析結果は溶湯上昇が非常に速く、その誤差は約 40 % と非常に大きい。

Fig.11 および Fig.12 に、上製品と下製品の溶湯の到達時間と充填時間を示す。2 相流解析結果では、上製品の充填時間を除き、実測値より速い傾向にあるが、誤差は 10 % 程度でおおむね良い一致を示している。一方、1 相流解析結果では到達、充填ともに非常に速く、特に充填時間は実測値対比で下製品が 1/3、上製品が 1/5 と大きな差がある。

以上より、鑄型内湯流れ状況において、2 相流解析結果は、実測値より湯流れが速い傾向にあったが、おおむね良い一致を示した。一方で、1 相流解析結果は実測値に比べ湯流れが非常に速く、実測値と大きく異なる結果となった。

4. 3 背圧の湯流れへの影響

Fig.13 に 2 相流解析と 1 相流解析における 0.15 s での上製品の湯流れ状況を、Fig.14 に Fig.6 中の点 P における背圧計算結果を示す。2 相流解析では、Fig.13 から 0.15 s に上製品に繋がるゲートに溶湯が流入し始めている。その 0.15 s 過ぎから背圧が発生し、下がり続けていた圧力が上昇し始めるのが Fig.14 から分かる。その後、0.42 s に 98.4 kPa まで背圧により鑄型キャビティ圧力が上昇した後、0.6 s に 94 kPa まで再度減圧され、以降は 94 ~ 95 kPa を維持しつつ、1.4 s に溶湯が到達する。一方、1 相流解析では、溶湯が既に上製品に流入している 0.15 s からわずかに背圧が発生するが、0.24 s には溶湯が到達する。このことから、2 相流解析が 1 相流解析より湯流れが遅く、実測値に近い理由は、この背圧によるものと考えられる。

背圧の違いは 3.3 項で述べた解析方法の違いに起因する。2 相流解析では計算領域全ての空気流を計算しているため、鑄型キャビティで発生する全ての背圧を計算することができる。一方、1 相流解析では、圧力境界に連通した鑄型キャビティは、あらかじめ境界値として入力した圧力値になるため、背圧は計算されない。Fig.14 で見られる 1 相流解析の背圧は、鑄型キャビティが圧力境界と連通しなくなった後、 $PV = \text{一定}$ の法則によりキャビティ体積が減少した分、圧力が上昇した結果である。この部分的な背圧計算のため、1 相流解析で発生する背圧は 2 相流解析より非常に小さい。

また、Fig.15 に下製品の湯流れ充填過程を示す。図中の円印は溶湯および鑄型に囲まれた鑄型キャビティ（空気）を表している。2 相流解析ではキャビティ（空気）は直ぐに消滅せず溶湯中に残留しているのに対し、1 相流解析では同程度の体積を示すキャビティが 0.015 s という非常に短時間で消滅している。この理由は、1 相流解析では発生する背圧が小さいことが考えられる。さらに、1 相流解析では、湯流れ計算とキャビティ圧力計算を連立させておらず、湯流れ計算の結果からキャビティの圧力を計算するため、湯流れの変化が激しいところでは、キャビティ圧力を正確に計算できない可能性がある。この点もガス巻き込みがすぐに消滅した理由とし

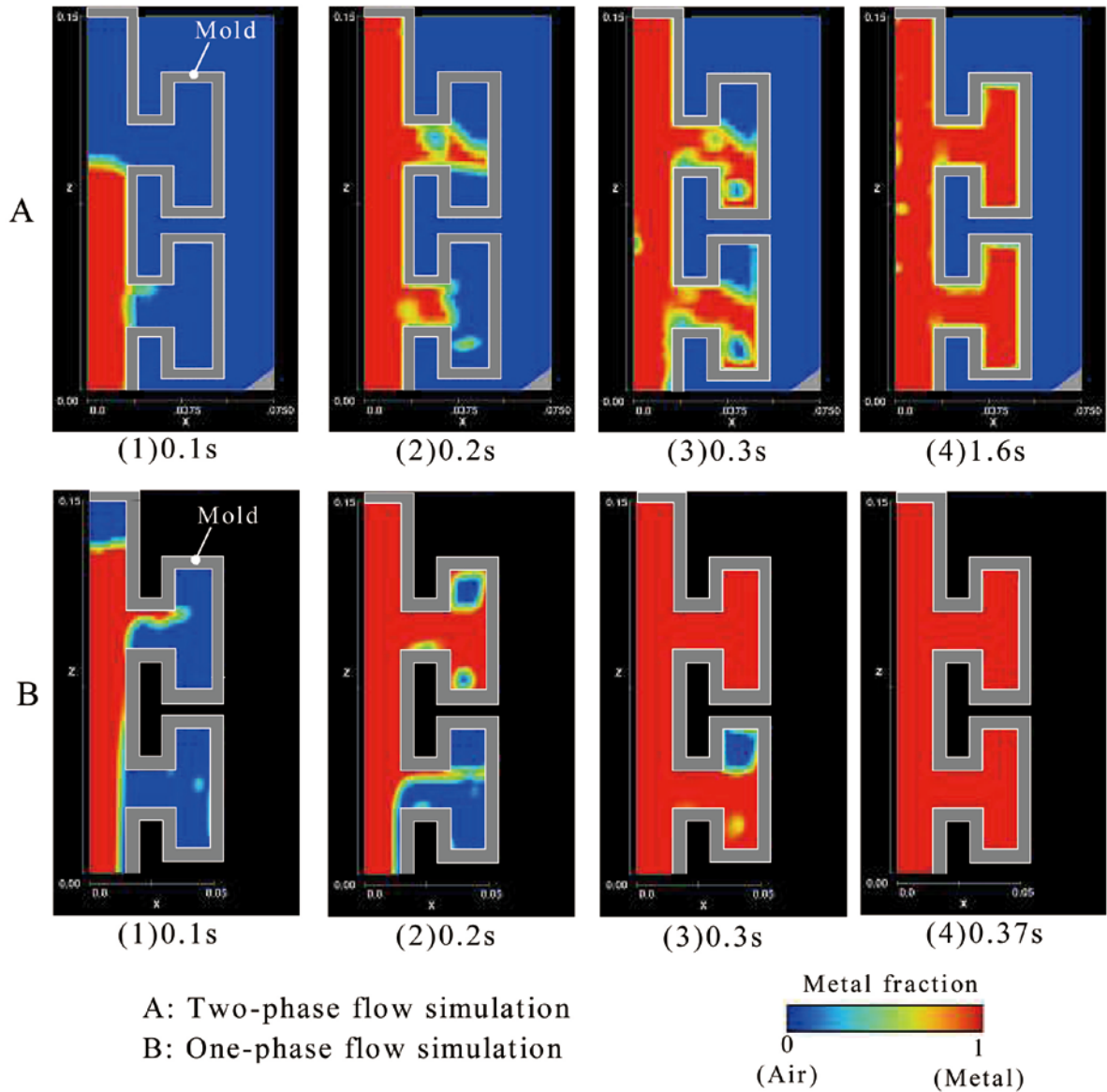


Fig.9. Mold filling images of two-phase and one-phase simulations.

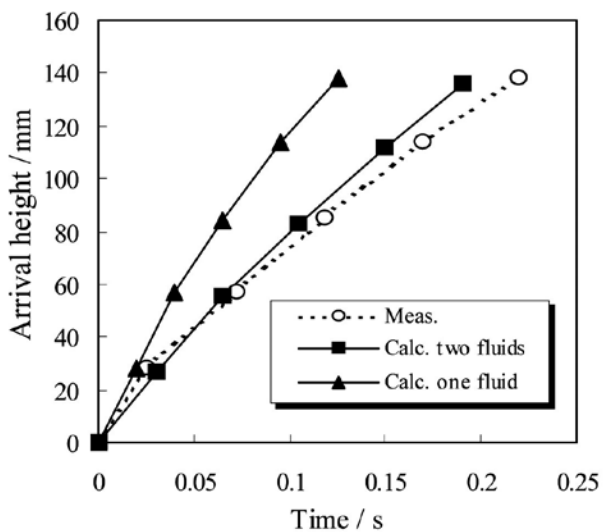


Fig.10. Arrival height of molten metal in center sprue.

て考えられる。よって、2相流解析では、溶湯に巻き込まれるガスの挙動を計算できるが、1相流解析では難しい可能性がある。

仮に、1相流解析において、圧力境界や鑄型キャビティに背圧発生を含む圧力を入力できれば、その湯流れへの影響を加味できるが、そのためには鑄型キャビティ圧力の実測が必要であるため、実用上困難である。

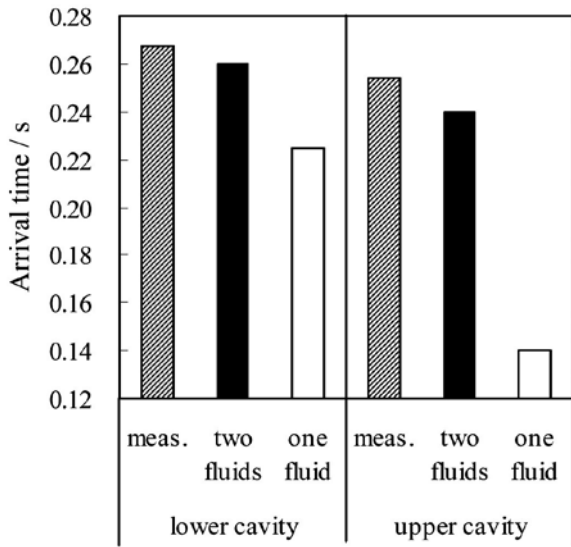


Fig.11. Arrival time of molten metal at upper and lower cavities.

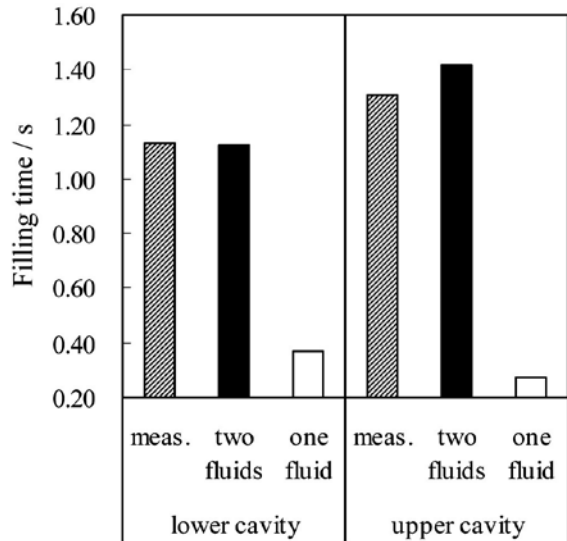


Fig.12. Filling time of molten metal at upper and lower cavities.

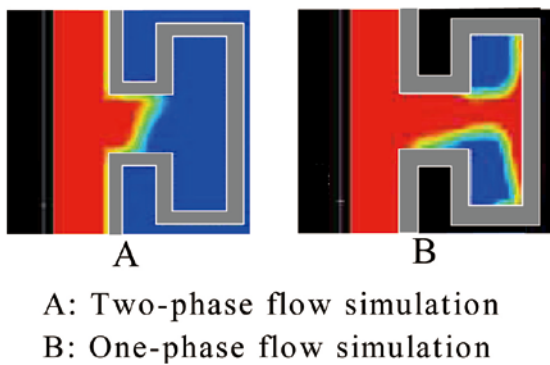


Fig.13. Mold filling images of molten metal in upper cavity at 0.15 s.

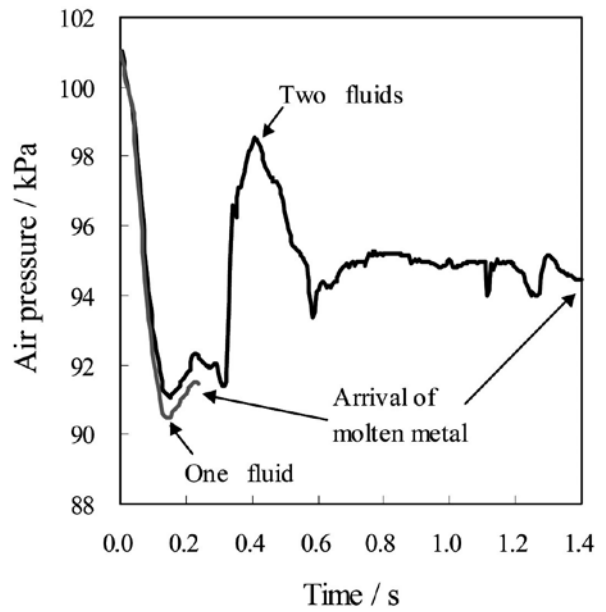


Fig.14. Back pressure during mold filling of molten metal in upper cavity.

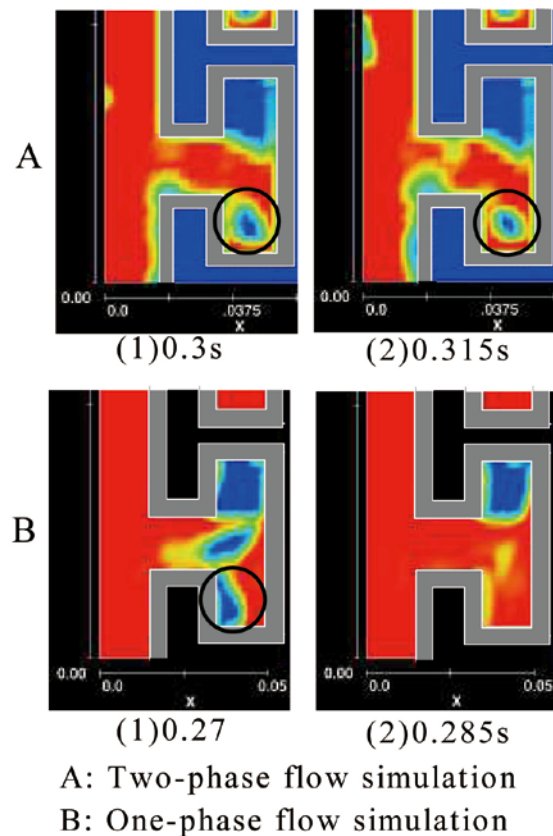


Fig.15. Mold filling images of molten metal in lower cavity.

5. 結 論

減圧吸引鑄造法において、空気流および溶湯流を連成させながら計算する2相流解析、および溶湯流のみを計算する1相流解析を用いた湯流れ計算結果を、実測値と比較検証した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 鑄型中をダルシー流れとして鑄型外を減圧した時の空気流を計算した結果、鑄型キャビティ圧力は実測値と一致しており、この計算手法の妥当性が確認された。
- 2) 鑄造時の鑄型キャビティに発生する背圧を計算できる2相流解析は、湯流れ計算結果がおおむね実測値と一致しており、減圧吸引鑄造法の湯流れ予測が可能であることが確認された。
- 3) 一方、背圧を部分的にしか考慮できない1相流解析では、実測値に比べて湯流れが非常に速く、湯流れを精度良く計算することは困難であることが確認された。

(文 献)

- 1) 鈴木信雄：電気製鋼，60（1989），53.
- 2) 宮野光憲：金属，（1982），2月臨時増刊，57.
- 3) 大塚幸男：鑄造工学，78（2006），609.
- 4) 例えば，コンピュータシミュレーション事例集，（社）日本鑄物協会，1990.
- 5) KUO J-H, HSU F-L and HWANG W-S：Sci. Technol. Adv. Mater., 2（2001），1, 131.
- 6) 田中孝一，寺嶋一彦，野村宏之：鑄物，65（1993），277.
- 7) 柏井茂雄，大中逸雄，木間塚明彦：鑄造工学，76（2004），30.
- 8) B. D. Nichols, C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss：Los Alamos Scientific Lab., Report LA-8355（1980）.
- 9) H. J. Lin and W. S. Hwang：AFS Trans., 144（1988），447.
- 10) 大中逸雄：コンピュータ伝熱・凝固解析入門，丸善株式会社，1985，139.