

技術資料



Technical Data

チタン合金の減圧吸引鑄造におけるブローホールの生成におよぼす減圧速度の影響

堀亜由美^{*1}, 松木隆紀^{*1}, 鷺見芳紀^{*1}, 田邊 顕^{*2}, 澤田康弘^{*2}

Influence of Decompression Speed on Blowholes in Countergravity Investment Casting of Titanium Alloys

Ayumi HORI, Takanori MATSUKI, Yoshinori SUMI, Ken TANABE and Yasuhiro SAWADA

Synopsis

Titanium precision casting parts are manufactured by countergravity investment casting. Improper casting conditions may cause casting defects such as blowholes, so casting must be performed under appropriate conditions. Casting CAE is a powerful method to predict filling behavior. However, it is important to calibrate the calculation and actual phenomena. So, it is necessary to elucidate the blowhole formation mechanism and investigate the influences of each manufacturing parameter.

In this study, the filling behavior of molten titanium alloys at a reduced pressure rate was observed by an experimental casting device and a high-speed camera.

As a result, it was confirmed that the decompression rate plays an important role in blowhole formation, and that the presented method can be used for accurate prediction of mold filling of titanium alloys.

1. 緒言

2016年に発効されたパリ協定以降、温室効果ガスの排出削減に向けた取り組みが各国で行われており、自動車業界でも電動化が加速しつつある。一方で、航続距離や充電インフラの課題に対し、ハイブリッド車や発電用エンジン装置の用途として、内燃機関の高効率化に寄与できるターボチャージャの需要も高まっている。

ターボチャージャの重要構成部品であるタービンホイールは、高温の排ガスに曝されつつ高速で回転するた

め、高温強度が必要である。また、回転効率を向上させるため、軽量化も必要となる。そのため、比強度や耐熱性に優れたチタン合金製のタービンホイールのニーズが高まっている^{1), 2)}。

チタン合金製のタービンホイールは、精密鑄造法の一つである減圧吸引鑄造法にて製造される。減圧吸引鑄造法は、他の鑄造方案に比べて、薄肉で複雑形状の製品にも対応でき、他の金属加工（粉末造型や切削加工）よりも大量生産が可能であるなど、利点が多い^{3), 4)}。

しかし、減圧吸引鑄造法にてチタン合金製のタービン

2022年5月9日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 (株)大同キャストイングス (Daido Castings Co., Ltd.)

ホイールを製造する上で、ブローホールと呼ばれる铸造欠陥がしばしば問題となる。

ブローホールの生成要因は大きく分けて2つある。一つは、熔融チタン合金を鑄型に充填する過程で生じる気体の巻き込みにより発生する気泡である。タービンホイール形状は複雑なため、気体の巻き込みが生じやすい。

もう一つは、耐火物（るつぼや鑄型）とチタン合金の反応により発生する反応ガスである。チタン合金は、ニッケル基超合金などの他の耐熱材料と比べて、耐火物と反応しやすい。

大同特殊鋼(株)では、反応ガスの抑制として、浮遊溶解が可能なコールドクルーシブル炉による汚染の低減⁴⁾や鑄型の最適化を実施してきた。

一方で、気体の巻き込みにより発生した気泡の抑制を行うには、熔融チタン合金の充填挙動や気体の巻き込みにおよぼす鑄造条件の影響を把握することが重要である。

そこで、温度センサや数値シミュレーションによる熔融チタン合金の充填挙動の可視化を試みてきたが⁵⁾、チタン合金は高融点であり、直接観察が難しいため、気体の巻き込み挙動の実験的な検証はまだ十分ではない。

本研究では、ブローホールの生成におよぼす減圧速度の影響を把握するため、熔融チタン合金の充填挙動を直接観察できる装置を開発し、気体の巻き込み挙動をその場観察した。

また、鑄造後の試料におけるブローホールの位置や量をX線CT(Computed Tomography)の画像解析により確認した。さらに、水モデル試験にて気体の巻き込みによって生じた気泡の浮上挙動を調査した。得られた実験結果と比較することで、鑄造シミュレーションの妥当性を検証した。

2. 鑄造可視化試験

2.1 鑄造可視化試験方法

鑄造可視化装置の構成をFig. 1, 2に示す。本装置は、減圧吸引鑄造法と同様に溶解室および鑄造室で構成され、装置の一部に覗き窓を設けることで鑄造室内部を観察することができる構造となっている。

鑄型は、タービンホイールを模した厚み25 mm十字形状である。鑄型の一面を厚み5 mmの石英ガラスに変更し、鑄型内部を観察するための観察面とした。

可視化試験は減圧吸引鑄造と同様の工程から成る。まず、溶解室の誘導加熱炉にて、チタン合金(DAT-TA2; Ti-31.5Al-7.5Nb-1Cr mass%)を $\phi 85 \times 230$ mmのカルシ

アるつぼ内で溶解する。

次に、溶解室と鑄造室を繋ぐスノートと予熱した鑄型を鑄造室にセットし、鑄造室を下降させることにより、スノート先端をるつぼ内の熔融チタンに浸漬させる。

最後に、吸引ポンプを用いて鑄造室を減圧することにより、通気性を有した鑄型内部は減圧され、熔融チタンが鑄型内部に充填される。

鑄造室内の減圧速度を10 kPa/s, 20 kPa/s, 50 kPa/sとなるように、吸引ポンプのバルブ開度を調整した。その圧力変化をFig. 3に示す。再現性を確認するため、それぞれの水準で3回実施し、平均値で評価した。

鑄型内における熔融チタン合金の充填挙動を撮影速度3000 fpsの高速度カメラで撮影した。熔融チタン合金が鑄型内に流入した時間と充填が完了した時間の差を充填時間と定義した。

減圧速度の違いによる冷却速度への影響を把握するため、鑄造後試料(鑄物)の縦断面をフッ硝酸水溶液で腐食し、マクロ組織観察により結晶粒サイズを確認した。

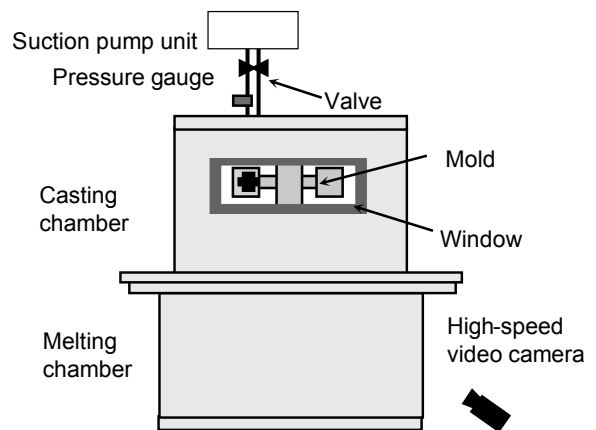


Fig. 1. Schematics of visualizing apparatus.

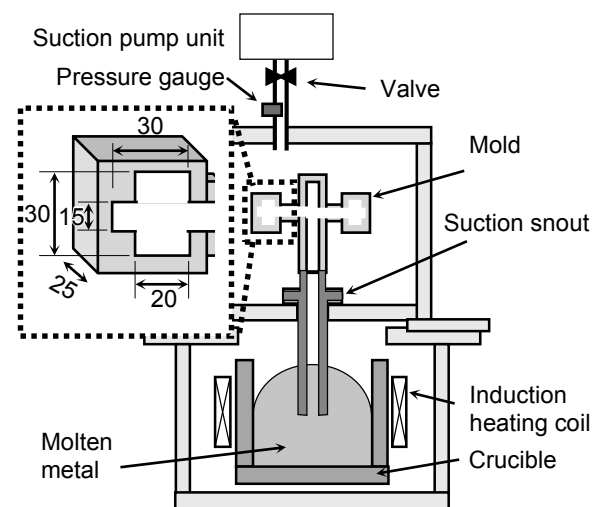


Fig. 2. Internal structure of visualizing apparatus.

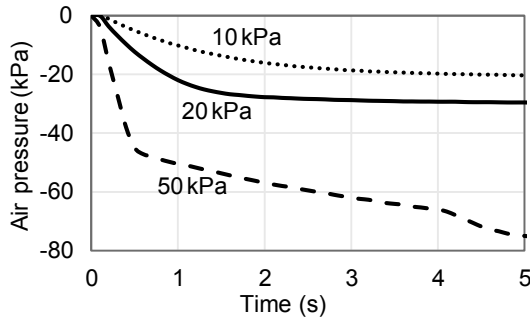
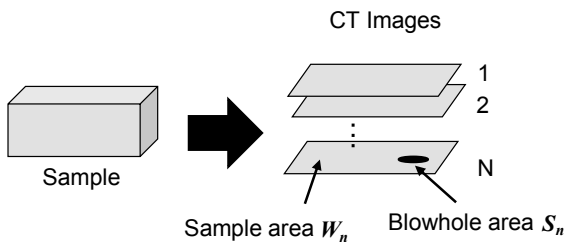


Fig. 3. Pressure changes in casting chamber.

さらに、最終的なブローホールの位置や量を確認するため、X線CTの画像解析を実施した。画像解析によるブローホール面積率の算出方法を Fig. 4 に示す。X線CT画像を元にX線の吸収の少ない黒色部をブローホールとした。この時、CT画像の形状から、ひげ巣などの他の鑄巣欠陥と識別し、除外した。全断層に渡って解析し、ブローホール総面積を鑄物の総面積で除した値をブローホール面積率と定義した。



The gross area of blowhole $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$
 The gross area of sample $W = W_1 + W_2 + \dots + W_n$
 The area ratio of blowhole $B = S / W \times 100 (\%)$

Fig. 4. Method for calculating area ratio of the blowhole.

2. 2 熔融チタン合金の充填挙動観察結果

熔融チタン合金の鑄型内充填挙動を Fig. 5 に示す。減圧速度が低速 (10 kPa/s) の場合、熔融チタンが鑄型の下面に向かって流入した。その後、鑄型の上面に向かって静かに充填した。充填過程の観察面において、気体の巻き込みは見られなかった。

一方、減圧速度が高速 (50 kPa/s) の場合、熔融チタン合金が鑄型下面に接触することなく水平方向に流入し、鑄型側面で跳ね返った。その後、鑄型の上下面で気体の巻き込みを確認した。

2. 3 ブローホールの発生位置・量の結果

CT画像とマクロ組織の観察結果を Fig. 6 に示す。CT画像において、減圧速度が低速 (10 kPa/s) では、ブローホールは確認できなかった。一方、中速 (20 kPa/s) 以上では、ブローホールを鑄物上端で確認した。また、

中速 (20 kPa/s) では、微細なブローホールが点在し、高速 (50 kPa/s) では、粗大なブローホールが生成された。

マクロ組織において、減圧速度の違いによる結晶粒サイズの変化が見られなかったため、減圧速度の違いによる冷却速度への影響は小さいと推定される。

また、鑄物上端のブローホールが表層の凝固シェルの下でトラップされていることを確認した。

これらの結果より、充填時に生じた気泡が浮上し、凝固シェルにトラップされることが、ブローホールの生成要因であると推定される。

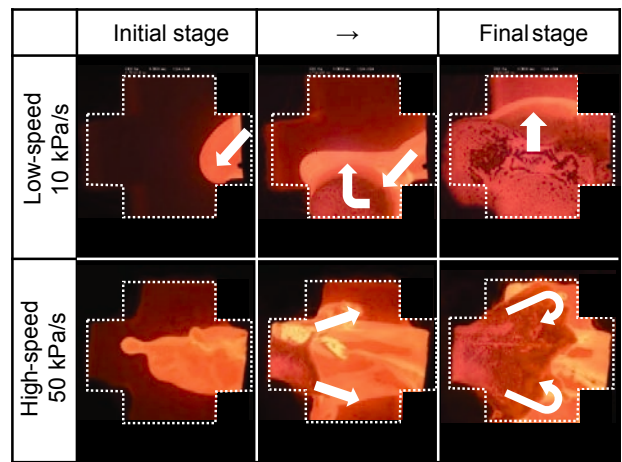


Fig. 5. Behavior of the filling into a mold.

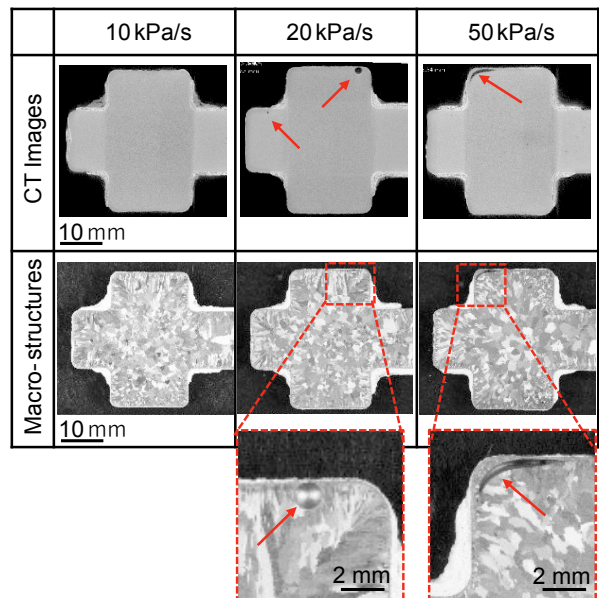


Fig. 6. CT Images and macro-structures.

減圧速度がブローホール面積率および充填時間におよぼす影響を Fig. 7 に示す。鑄型内の減圧速度が速いほど、ブローホール面積率は増加するのに対し、鑄型内の充填時間は短くなった。これは、減圧速度が速いほど、気体の巻き込みが発生し、粗大なブローホールが生成されるため、ブローホール面積率が増加したと推定される。

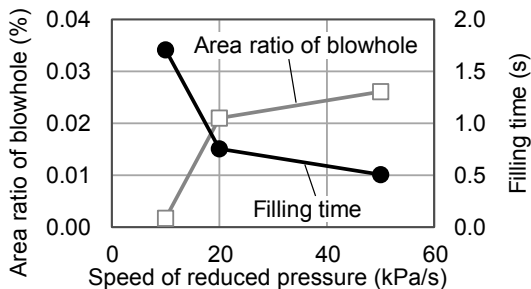


Fig. 7. Effect of speed of reduced pressure on area ratio of blowhole and filling time.

3. 水モデル試験

3. 1 水モデル試験方法

鑄造可視化装置の観察面からは確認できない鑄型内部で発生した気泡の浮上挙動を把握するため、鑄造可視化装置を用いた水モデル試験を実施した。

鑄造可視化試験時のカルシアるつぼと同じ体積の水槽 (φ85 × 230 mm) を用いた。水槽下端から 220 mm まで精製水を充填し、鑄造可視化試験時の溶融チタン合金と同じ体積、水面高さにした。また、溶融チタン合金の充填速度を再現するため、鑄造可視化試験時の減圧速度 10 kPa/s、50 kPa/s における溶融チタン合金の充填速度と水の充填速度をフルード数 ($Fr = v^2/gl$ ここで、 v : 流れの代表速度、 l : 代表長さ、 g : 重力加速度) が一致するようにバルブ開度を調整した。再現性を確認するため、同一条件で 3 回実施し、平均値で評価した。鑄型内で発生した気泡の挙動を撮影速度 3000 fps の高速度カメラで観察した。

3. 2 気泡の浮上挙動観察結果

水モデル試験における鑄型内の気泡の浮上挙動を Fig. 8 に示す。青線が水面、赤丸が気泡を示す。

減圧速度が低速 (10 kPa/s) の場合、微細な気泡が発生するものの、気泡は水面近傍まで浮上し、水面が鑄型上面に到達する直前に鑄型内へ除去された。

一方、高速 (50 kPa/s) の場合、粗大な気泡が発生し、鑄型上端まで浮上するが、鑄型内壁と接したまましばらくの間鑄型内に除去されず、水面下に留まった。また、

低速と高速では、気泡の浮上速度はほとんど変化しなかった。

よって、ブローホールが鑄物上端の凝固シェル直下に残存する理由は、以下のように推定される。気泡が鑄型上端に到達後、粗大な気泡は、気泡の曲率が大きいため、膜切れ (気泡崩壊) が起こりにくく、気泡が液面から排出されず液面に長時間留まる。この間に、凝固シェルが形成され、気泡は凝固シェル直下に残存した。

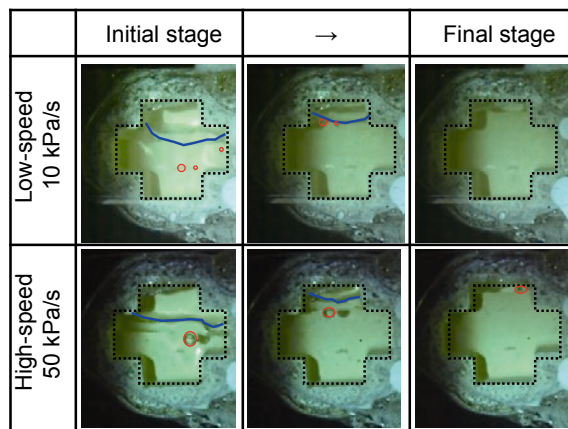


Fig. 8. Result of water model.

4. 鑄造シミュレーションの検証

4. 1 シミュレーション条件

鑄造シミュレーションのモデル形状を Fig. 9 に示す。解析には有限体積法に基づいたソルバーである Siemens 社の STAR-CCM+ を用いた。溶融チタン合金と気体の流れは乱流を加味した $k-\epsilon$ モデルを用いており、溶融チタン合金の流れと気体の流れを連成した 2 相流解析を実施した。自由表面の計算には、VOF (Volume Of Fluid) 法を用いた。

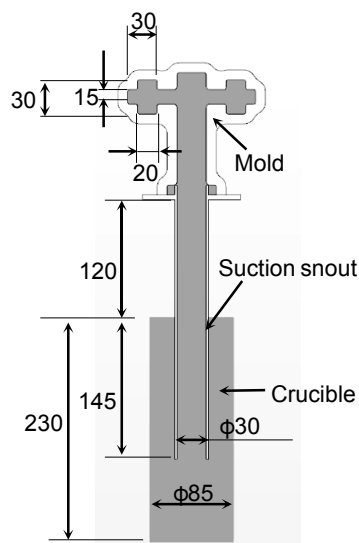


Fig. 9. Simulation model.

鑄型内の背圧を加味した気体の流れを計算するためには、鑄型室と鑄型内の圧力変化を実測し、鑄型透過率 K を算出する必要がある。そこで、鑄型透過率 K を求めるため、鑄型の通気度試験を行った。

試験方法を Fig. 10 に示す。湯口を密閉にした空鑄型を鑄造室に設置し、鑄造可視化試験時の減圧速度と同じ減圧速度で鑄造室を減圧する。その時の鑄造室（圧力計 A）と鑄型内（圧力計 B）の圧力変化を測定し、その圧力変化と一致する鑄型透過率 K をシミュレーションで求めた。

溶融チタン合金の流動停止条件は、伝熱解析により溶融チタン合金の冷却速度を算出し、チタン合金 (DAT-TA2) の状態図計算で求めた固相率 0.9 以上の温度まで冷却された時とした。

鑄造可視化試験時の減圧速度が低速 (10 kPa/s)、高速 (50 kPa/s) の場合を模したシミュレーションを実施した。

鑄造可視化試験における溶融チタン合金の充填挙動や水モデル試験における気泡の浮上挙動と比較し、鑄造シミュレーションの妥当性を検証した。

4. 2 数値解析結果

シミュレーションによる充填挙動と可視化試験の結果を Fig. 11 に示す。シミュレーションは溶融チタン合金の体積率を示している。

シミュレーションによる溶融チタン合金の充填挙動は、可視化試験と同様に、減圧速度が低速 (10 kPa/s) の場合は、下から静かに充填し、気体の巻き込みが生じ

ない。一方で、高速 (50 kPa/s) の場合は、溶融チタン合金の跳ね返りが生じ、気体の巻き込みも発生した。このことから、シミュレーションでの溶融チタン合金の充填挙動は妥当であると思われる。

シミュレーションによる充填完了時と凝固完了時の気泡の浮上挙動を Fig. 12 に示す。青色の部分がガス (気泡) である。

低速 (10 kPa/s) の場合、気体の巻き込みにより生成されたガス (気泡) は凝固完了までに鑄型内へ除去される。一方、高速 (50 kPa/s) の場合、鑄型上部で発生した気体の巻き込みによるガス (気泡) は鑄型内に除去されるが、鑄型下部で発生した気体の巻き込みガス (気泡) は、鑄型上端まで浮上するものの、気泡崩壊の前に凝固シェルが発達し、鑄型内に除去されず、そのまま巨大なブローホールとして残存した。

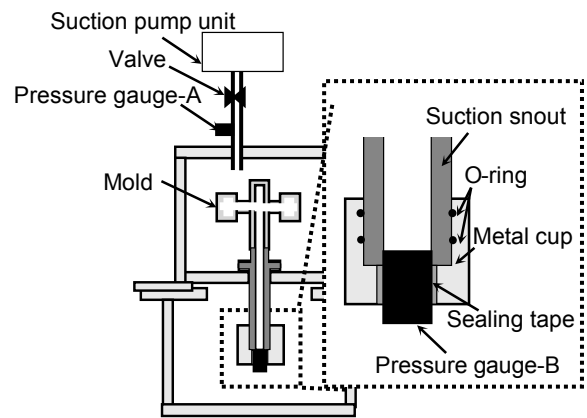


Fig. 10. Air flow test of mold.

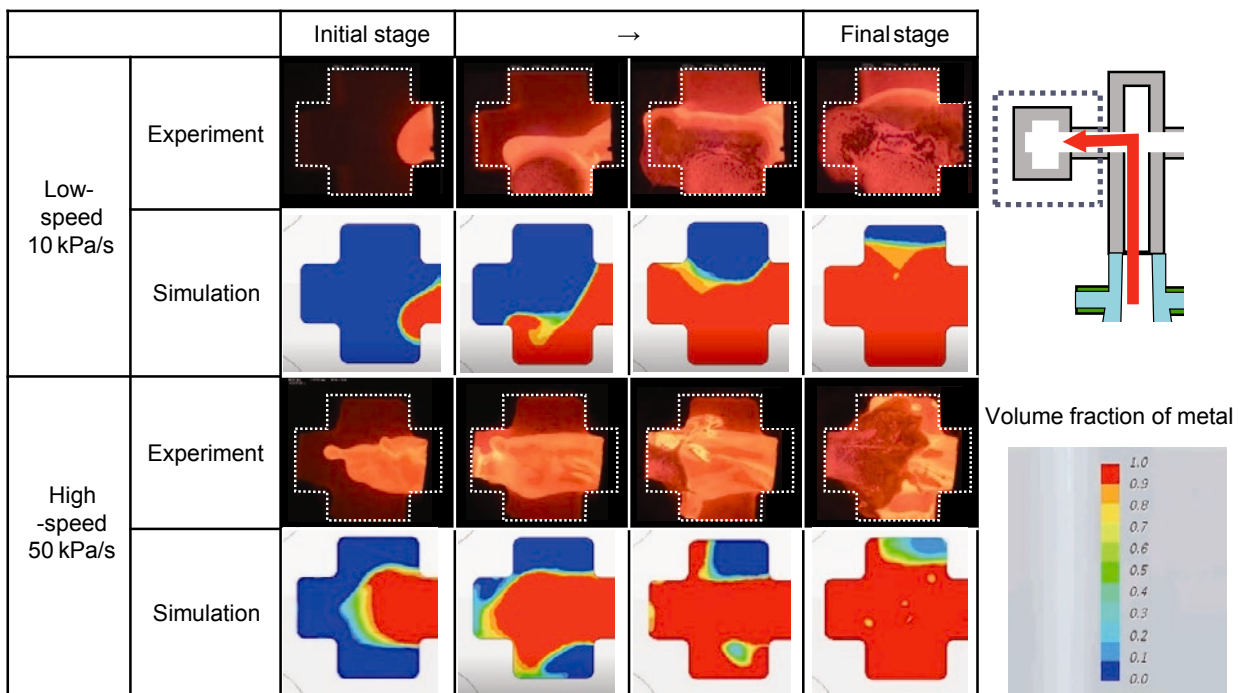


Fig. 11. Filling behavior of experiments and simulations.

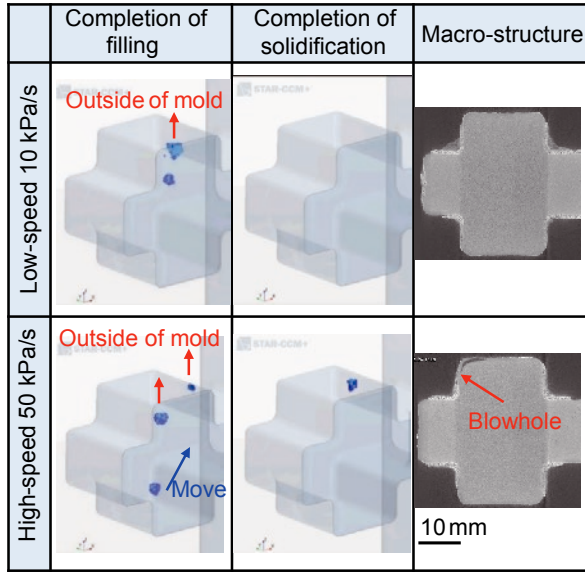


Fig. 12. Behavior of air bubbles by simulation.

これは、水モデルにおける気泡の浮上挙動や鑄造可視化試験におけるブローホールの発生位置・サイズと類似している。このことからシミュレーションによるブローホールの予測が妥当であるといえる。

5. 結 言

鑄型内充填挙動を観察できる鑄造可視化装置を構築し、溶融チタン合金の鑄造可視化試験と水モデル試験により、ブローホールの生成におよぼす減圧速度の影響を把握し、以下の知見を得た。

- 1) 減圧速度が速くなる程、ブローホールが増加する。
- 2) これは、減圧速度が速い程、湯の鑄型内充填時間が短く、溶融チタンの跳ね返りや気体の巻き込みにより粗大な気泡が生成されるためである。
- 3) ブローホールは鑄物上面表層付近で発生する。これは、充填過程で生成された気泡が鑄型上端まで移動し、表層の凝固シェルでトラップされるためである。

また、得られた実験結果との比較から、鑄造シミュレーションを用いた精度の高いブローホールの予測が可能であることを確認した。

(文 献)

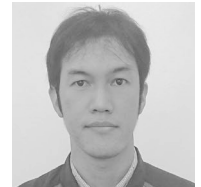
- 1) 京谷美智男: 電気製鋼, 70(1999), 223.
- 2) 高橋恭, 丸井勇治: 鑄造工学, 73(2001), 814.
- 3) 鈴木信雄: 電気製鋼, 60(1989), 53.
- 4) 佐藤敬: 鑄造工学, 73(2001), 791.
- 5) 山本和巳, 鈴木寿穂: 電気製鋼, 80(2009), 157.



堀 亜由美



松木隆紀



鷺見芳紀



田 邊 顕



澤田康弘