

## 1. はじめに

近年、製品形状の複雑化と薄肉化などを背景として、ダイカスト金型内部の冷却水路の複雑化と冷却管の細径化が進んでいる。これに伴い伝熱面積の不足や流速の低下による金型冷却能力の低下が懸念されている。また同じく細径化した冷却管路では、カルキ成分や錆なども堆積しやすくなり、これも通水の阻害による冷却能力の低下を引き起こしている。冷却能力の低下は金型と接触する溶湯の効率的な凝固の妨げとなり、様々な casting 不良を発生させる要因となっている。

そこで本研究ではウルトラファインバブル（以下 UFB）と呼ばれる、直径が  $1\ \mu\text{m}$  未満の気泡を含有させることによる水の性質変化に着目した。UFB を含有した水（以下 UFB 水）では、洗浄効果が向上する、金属の腐食防止効果があるなどの特徴がある<sup>1),2)</sup>。これに加えて、通常の水に比べて蒸発速度の向上、すなわち潜熱の吸収量が増加したという報告もある<sup>3),4)</sup>。従ってダイカスト金型の冷却に UFB 含有水を用いることで一般的な工業用水よりも高い冷却性能を得られるのではないかと考えた。

## 2. 目 的

以上のような背景から、本研究では UFB 含有水の冷却能力を調査するために、ダイカスト生産工程を模擬した加熱・冷却サイクル試験を実施し、以下の項目を明らかにすることを目的としている。

- ① 水の種類による冷却性能への影響に対する UFB 水の優位性の証明
- ② ①における UFB 水の気泡特性および水質変化の調査
- ③ 金型への熱疲労やヒートチェックの発生への影響

まず①においては、ダイカスト金型を模した金属を加熱し、その中に UFB を含む水と含まな

い水を流すことでそれらの冷却性能を比較する。高温状態から一定時間通水することで低下した金型温度と、熱吸収後の水温を測定することで UFB 水の冷却能力を定量化する。なおこれらの実験では UFB 水と通常の水の混合比を変えることで水に含まれる UFB の濃度を変量し、これが冷却性能に及ぼす影響も合わせて調査する。続いて②では、①で行う加熱冷却試験の前後において、種々の水の状態、特に UFB の気泡径分布を測定することで、金型冷却時の熱吸収が UFB の気泡径分布をどのように変化させるかを検証する。③は UFB 水を実用する上での懸念点となる過剰な冷却による金型寿命の低下に関しての検証を行うものである。以上を通じて、UFB が熱の吸収や錆の発生に及ぼす化学的・物理的な要因を明らかにし、ダイカストの生産品質の向上に寄与することが最終的な目標である。

## 3. 実用的な価値、実用化の見込など

ダイカストは、小型で複雑な形状の部品を大量生産する手法として、自動車部品を中心に幅広い分野で活用されている。先述の通り、近年では一つの部品に要求される機能や耐久性の水準が向上した結果、部品形状は複雑化の一途を辿っている。こうした状況においても生産効率の向上や不良率低減によるコスト削減の取り組みは様々行われているが、これらは往々にして金型にセンサーを追加したり、複雑なデータ取りを必要とするなど、導入自体にコストを要するものである。これに対し、本研究で着目している UFB 水への置き換えに関しては、従来から使用している冷却システムを流用することを前提としたものである。このため、導入コストは水の費用程度であり、実用化は比較的容易であると想定している。一方で本手法によって冷却能力の向上が図れれば、ダイカスト不良の多くを引き起こす要因と言われる金型の温度制御に寄与できるため、実用的な価値は大きいと期待している。

#### 4. 研究内容の詳細

##### 4. 1. 加熱・冷却サイクル試験

##### 4. 1. 2. 実験方法

本研究では先述の目的を達成するために、実際のダイカスト工程で使用されている市販の中子ピンを用いた通水試験を実施した。中子ピンは図 1(a)に示すように、ダイカスト金型に挿入して溶湯と接触させ、製品にボルトの下穴のなどを開けるためのいわゆる鋳抜きをする部品である。中子ピン内部には二重通水管を用いて冷却水を循環させ、溶湯と接触するピンの温度制御を行っている。本研究ではこうしたダイカストの生産工程を模擬して、溶湯との接触の代わりに管状炉で加熱した中子ピンに水を流す実験を行うこととした（図 1(b)）。

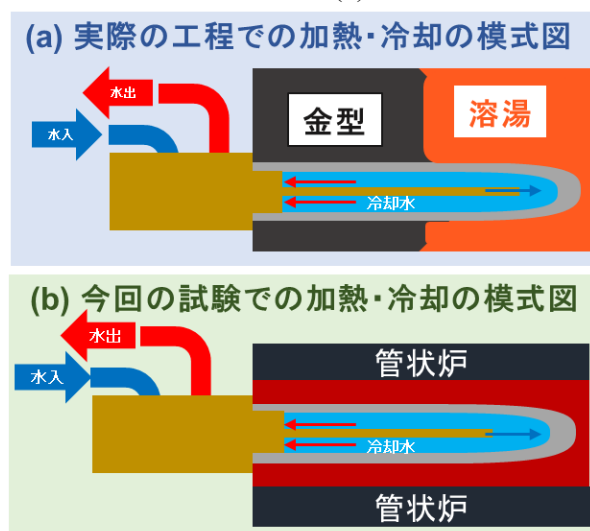


図 1 中子ピンおよび冷却概要

UFB 含有水の冷却能力を比較するために、① 群馬高専の水道から採取した水道水、② 水道水に軟水化処理を施した KN1、③ KN1 に UFB を含有させた KN3 (100 %KN3)、④ KN1 に KN3 を 10 %加えた 10 %KN3 の 4 種類の水を使用した。これらを冷却水として用い、ダイカスト生産工程を模擬した中子ピンの加熱・冷却サイクル試験を行った。サイクル試験の模式図を図 2 に示す。まず温度を 900 °C に設定した管状炉に二重通水管を取り付けた中子ピンを挿入し保持する。その後、ピン先端に取り付けた熱電対の計測値が 500 °C になったところで通水ポンプを作動させ、10 秒間の冷却を行う。10 秒経過後にバルブを切り替え、コンプレッサーの圧縮空気によって 10 秒間のエアパージを行い装置内に残った

水を除去した。以上の工程を 1 サイクルとし、これを 50 サイクル行った。なお初期タンク水温および室温は 20 °C、通水ポンプ圧力は 3 MPa であり、中子ピンを冷却した水はタンクに戻り、これを循環させて使用した。試験中には中子ピンの先端の温度、出口側水温、タンク水温をデータロガーで連続的に測定した。

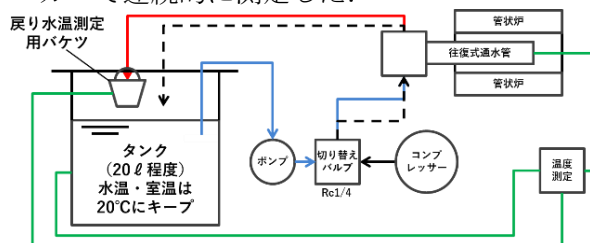


図 2 加熱・冷却サイクル試験の模式図

##### 4. 1. 3. サイクル試験の測定結果

加熱・冷却サイクル試験を行うことで得られた中子ピン先端の温度測定結果の一例を図 3 に示す。急激な温度低下は通水によるものである。最初の数サイクルはいずれの水を使用した場合でも、図 3 のような様な加熱・冷却サイクルとならなかったため、以降の結果はいずれも 11 から 40 サイクルで得られた実験結果を示す。

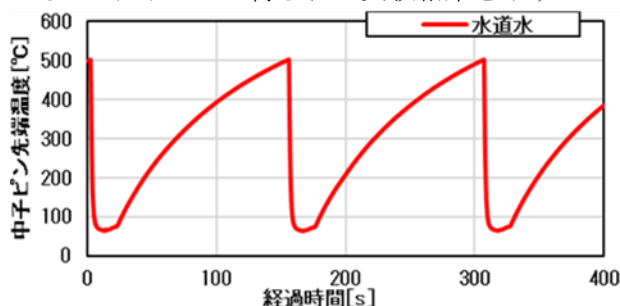


図 3 中子ピン先端温度の測定例

各サイクルの通水開始時点のピン先端温度を基準として、10 秒間冷却した後の低下温度を水の種類ごとにまとめた結果を図 4 に示す。温度低下量は全てのサイクルにおいて水道水が最も小さく、KN1、KN3、10 %KN3 の順に大きくなっていった。すなわち軟水化処理および UFB の含有は冷却能力の向上に効果があることが分かった。一方でいずれの水においてもサイクルが進むほど温度低下量は右肩下がりとなり、冷却能力は悪化する傾向になっていた。これは実験開始から終了までの間に、いずれの水においてもタンク水温が上昇したことに起因すると考えられる。ただし試験前後のタンク水温は、水道水が

約 2℃上昇であったのに対して、他 3 種類は約 3℃上昇であり、この結果からも水道水に対して他の水の冷却能力が向上していることが伺える結果となっていた。

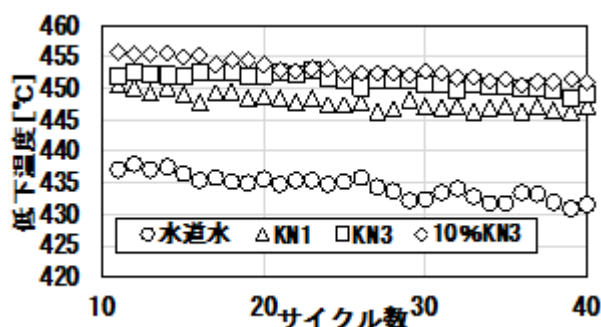


図 4 サイクルごとの 10 秒冷却後の低下温度

一方で温度低下量が大きくなると、急激な温度変化による熱衝撃が金型寿命へ及ぼす影響が懸念される。ピン温度が 500℃の時点から通水を開始した際には、おおむね 2 秒間で 100℃ほどまで急激に温度が下がり、その後はゆるやかに低下していた。このため通水開始から 2 秒間の温度低下の傾き、すなわち冷却速度を求め、これを熱衝撃の指標として水の種類ごとに比較したグラフを図 3 に示す。冷却速度は 10%KN3 が最も小さい、すなわち冷却は最も緩やかだが、10 秒間の抜熱量は最も大きいという結果になった。以下、水道水と KN3 がほぼ同等で、KN1 が最も熱衝撃が大きくなっていた。以上の結果より、10%KN3 は急激な温度変化はおさえつつも、高い冷却能力を有する結果となり、ダイカスト金型の冷却水として有効であることがわかった。ただしこうした変化が起こる理由や、UFB の含有量が少ない 10%KN3 の方が、含有量の多い KN3 (100%KN3) よりも冷却能力が高くなっていった化学的な理由などは、現時点では明らかとなっておらず今後の課題である。

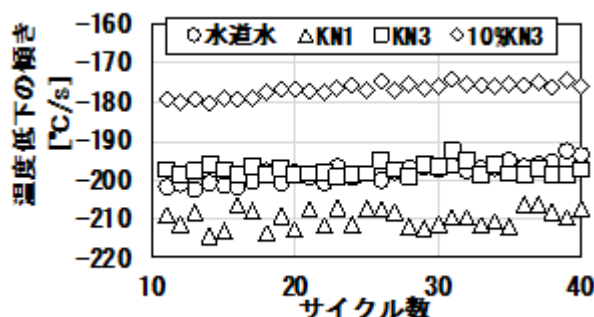


図 5 通水開始から 2 秒間の温度低下の傾き

#### 4. 1. 4. サイクル試験後の中子ピン内径観察

UFB の含有による中子ピン内部における錆などの堆積に及ぼす影響を比較するために、サイクル試験終了後の中子ピンの内径観察を行った。サイクル試験終了後、7 日間放置した中子ピン内部をファイバースコープで撮影した代表例として、水道水と 10%KN3 の結果を図 6 に示す。定量的な評価は行っていないものの、内部の様子は水ごとに大きな変化はなく、おおむね一様に錆が付着していた。

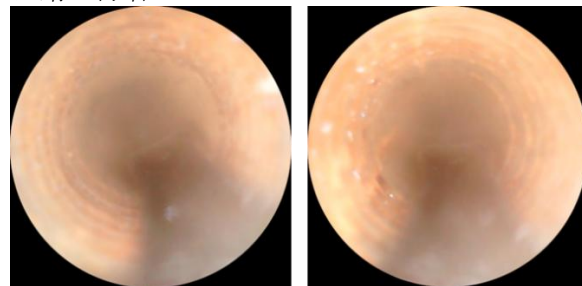


図 6 サイクル試験後の中子ピン内径観察  
(左) : 水道水, (右) 10 %KN3

#### 4. 2. ピンの残留応力測定

##### 4. 2. 1. 実験方法

4. 1. において 10 %KN3 の冷却能力が最も高く熱衝撃の影響も抑えられる可能性がある事がわかった。そこで加熱・冷却サイクル試験を行った中子ピン表面の残留応力を測定して、水の種類が熱疲労などの金型寿命に及ぼす影響を比較することとした。一般的にダイカスト金型は、作業時の溶湯との接触による急加熱と冷却を繰り返し受けることにより生じる熱疲労によって、金型表面に亀裂を生じ寿命に至る事が多い。このため使用開始時点を圧縮残留応力状態にしたり、表面に窒化処理を施すなどの対策が講じられる。こうした金型寿命に及ぼす冷却水の影響を定量評価するために  $\cos \alpha$  法<sup>5)</sup>による X 線残留応力測定 (パルステック工業製,  $\mu$ -X360s) を行った。加熱・冷却サイクル試験実施前後の中子ピンに対して、ピン先端の平行部の開始点を原点として長手方向に 1 mm 間隔で 40 mm まで測定を行った。

##### 4. 2. 2. 残留応力の測定結果

図 7 に残留応力, 図 8 に半価幅の測定結果を示す。まま材は根本側でやや値が大きい, おおむね一様に高い圧縮残留応力状態であった。そ

して加熱・冷却サイクルを経たことで水の種類によらず、全体的に引張応力側にシフトした（圧縮残留応力の絶対値が小さくなった）ことがわかる。また、水道水と比べ他の3種類は先端側で引張側への変化が大きく、根本側では小さかった。今回の結果からは水の種類により、冷却能が大きくなったことで、熱疲労の影響が大きくなることが懸念される。ただし、図8の半価幅の結果を見ると、先端側ほど値が小さく、根本側はまま材との変化があまりみられず、水ごとの差異もあまり確認されなかった。半価幅が低下する要因の一つとして、転位密度の低下が挙げられる。今回の実験において、ピンは管状炉に挿入する形で加熱しているため、先端ほど優先的に加熱されやすい。このため半価幅の低下は焼なましによる影響の可能性も考えられ、残留応力の変化もこうした焼なましの影響によるものかさらに検討する必要がある。以上の結果より、実際のダイカスト生産現場においてUFB含有水を導入する場合には、冷却効果の過剰化による金型不良の発生を防止するため、条件の最適化などを検討する必要があると考えられる。

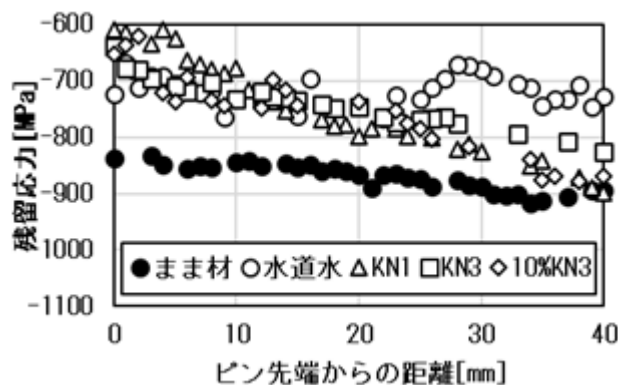


図7 ピン先端からの残留応力測定結果

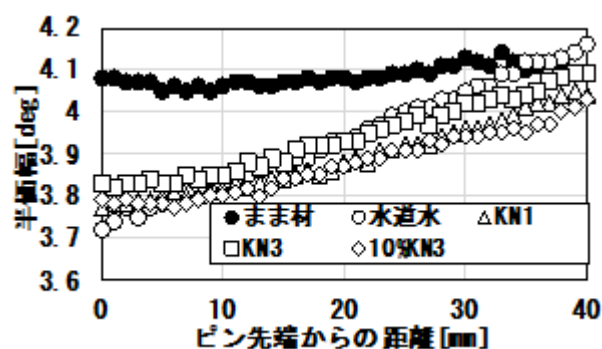


図8 ピン先端からの半価幅測定結果

## 5. まとめ(結言)

- 1) 軟水化処理水・UFB含有水の導入により、ダイカスト金型における冷却能力の向上がみられ、冷却能力が大きい順に10%KN3, KN3, KN1, 水道水となった。
- 2) 加熱・冷却サイクルによって全体的に残留応力は引張側にシフトし、軟水化処理水・UFB含有水によりピン先端側で引張側の変化が大きくなった。
- 3) 今後は実際のダイカスト工程において今回検証した水を導入し、本実験よりも大きな抜熱量を要する環境においても同様の効果を得られるか検証し、本手法の実用化に向けた知見を積み重ねていく予定である。

## 6. 参考文献等

- 1) 安井久一：日本音響学会誌，73 (2017)，pp.424-431.
- 2) 寺坂宏一，田中俊也：混相流，36 (2022)，pp.4-11.
- 3) 黒瀬雅詞，丸茂洋一，奈良力男：型技術，35 (2020)，pp.034-035.
- 4) 黒瀬雅詞：化学工業，72 (2021)，pp.187-193.
- 5) 丸山洋一，宮崎利行，佐々木敏彦：材料，64 (2015)，pp.560-566.

## 【補足事項】

1. 本助成金による研究成果の印刷物。例えば発表論文(発表予定を含む)、特許、実用新案等の印刷物があればその実物、或は、コピーを1部添付してください。

投稿論文の掲載はありませんが、以下の学会にて本助成金にもとづく口頭発表を指導学生が行い、発表賞を受賞致しました。

- ・ 小此木悠希, 高山雄介, 黒瀬雅詞, 日本機械学会関東支部第31期総会・講演会, 埼玉大学, 2025年3月3日  
⇒日本機械学会関東支部第31期講演会, 若手優秀講演賞
- ・ 小此木悠希, 黒瀬雅詞, 高山雄介, 日本機械学会 関東支部群馬ブロック研究・技術交流会2024, オンライン, 2024年12月25日  
⇒日本機械学会 関東支部群馬ブロック研究・技術交流会2024, 優秀講演賞