

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04742

研究課題名（和文）消失模型鋳造における発泡模型の熱酸化分解の解明と湯流れの直接観察による検証

研究課題名（英文）Elucidation of thermal oxidative decomposition of foamed pattern in evaporative pattern casting and verification by in-situ observation of molten metal flow

研究代表者

丸山 徹（Maruyama, Toru）

関西大学・化学生命工学部・教授

研究者番号：80330174

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：消失模型鋳造の「残渣欠陥」と「湯回り不良・溶湯の吹き返し」の発生に及ぼす発泡模型の燃焼・爆発の影響を明らかにすることを目的として、発泡模型内のガスを不活性ガスで置換実験およびその模型を用いた鋳造実験を行った。発泡模型を減圧雰囲気で一定時間保持した後に不活性ガス雰囲気中で一定時間保持することで模型内のガスを効果的に置換できることが明らかになった。不活性ガスで置換した模型を用いて鋳鉄溶湯を注湯すると、模型分解速度は置換なしと比べて速くなり、湯流れ速度は遅くなる傾向を示すが、湯流れ長は大きくなることが明らかとなり、発泡模型内を不活性ガスで置換することで湯回り不良の抑制に効果があることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発泡模型内のガスを不活性ガスで置換することにより、発泡模型の熱分解速度が増加したことから、学術的な意義として、発泡模型の分解において熱酸化分解の影響が明確になった点が挙げられる。不活性ガスで置換した模型を用いると湯回り不良を抑制できることが明らかとなったことから、社会的な意義として、消失模型鋳造法の普及率向上に寄与すると考えられる。本鋳造法の普及率が向上することによって、鋳物砂の廃棄量低減やそれに伴うCO2排出削減が期待される。さらに、鋳物の軽量化が期待され、それによって製造の省資源・省エネルギーにも寄与することが考えられる。

研究成果の概要（英文）：To clarify the influence of combustion and explosion of foamed patterns on the occurrence of "residual defects" and "misrun and molten metal spouting" in evaporative pattern casting, experiments to replace the gas inside the foamed pattern with an inert gas and to measure mold filling rate of molten cast iron using the pattern.

By holding the foamed pattern in an inert gas atmosphere for a certain period of time after holding the foamed pattern in a reduced pressure atmosphere for a certain period of time was efficient to replace the gas inside the foamed pattern. Using the foamed pattern with the gas replaced with inert gas, the pattern decomposition rate was faster than without replacement, and the molten metal flow rate tended to be slower. The molten metal flow length was longer even slower flow rate, making it clear that replacing the inside of the foamed pattern with an inert gas is effective in suppressing misrun.

研究分野：金属生産工学

キーワード：消失模型鋳造 鋳鉄 スチレン 熱分解 湯流れ

1. 研究開始当初の背景

(1) 消失模型鑄造法は、「高い生産性」、「鑄物の軽量化」や「環境負荷低減」など多くの利点を有する鑄造法である。例えば鑄物の国内生産量約 500 万 t の全てを本法で製造すると、発生する約 30 万 t の廃棄鑄物砂（リサイクルできずに廃棄する量）とその輸送による約 5 万 t の CO₂ 排出のほとんどを削減できる。しかし、しばしば「残渣欠陥の発生」、「湯回り不良・溶湯の吹き返し」による鑄造欠陥発生が技術的課題であり、本鑄造法の導入を検討する企業は多いが実際に採用されるケースは少なく、本法による鑄物生産量は約 3 万 t と国内生産の 1% に満たないのが現状である。一方で、欧米や中国では本法の導入が進んでいるが、その鑄造歩留まりは日本と比べて高くなく、本法のメリットを十分に活かしているとは言えない状況である。また、鑄物品質は日本製の方が評価されているが、生産性は欧米・中国の方が優れているのが現状である。

(2) 上述の鑄造欠陥発生の要因は、発泡模型の熱分解ガスによる「鑄型内の圧力上昇」と溶湯が分解物を巻き込むことによる「タール状の残渣生成」と考えられている。しかし、熱分解ガス圧の実測値は溶湯背圧よりも小さいという矛盾が報告されている。また、残渣生成の要因は、密度の小さい模型分解物が密度の高い溶湯内に取り込まれ、浮上せずに鑄物内部に残るという説が報告されているのみであり論理的に矛盾がある。これらの矛盾は、消失模型鑄造法における発泡模型の分解機構が学術的に解明されていないことを意味する。ポリマの分解は、熱分解（酸素のない状態の反応）と熱酸化分解（酸素のある状態での反応）に大別され、前者は熱による解重合などが考えられ、後者には燃焼が考えられる。しかし、国内外の研究では模型の熱分解においてポリマの解重合のみが考慮され、燃焼は考慮されておらず、発泡模型の分解が熱分解か熱酸化分解の何れかについて不明である。

2. 研究の目的

(1) 消失模型鑄造の「残渣欠陥」と「湯回り不良・溶湯の吹き返し」の発生に及ぼす発泡模型の燃焼・爆発の影響を明らかにすることを目的として、発泡セル中の空気を不活性ガスに置換する手法とその効果的な条件を明らかにする。

(2) 発泡模型内を不活性ガスで置換した模型を用いて鑄鉄の鑄造実験を行い、発泡模型の分解速度と湯流れ速度に及ぼす模型内ガス置換の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 発泡模型内のガスを不活性ガスで置換するために、発泡模型を密閉容器に入れ容器内の雰囲気圧を減圧にして模型内の空気を排出させた後に容器内をアルゴンあるいは窒素の雰囲気として模型内の空洞に不活性ガスを導入する。この手法で模型内ガス置換が可能であることは研究者の先行研究で把握済みであるが、これに加えて効果的に模型内のガスが置換される条件を調査した。

(2) 溶湯タッチセンサ、熱電対、ガス圧センサを模型内に挿入し、鑄造中の「湯流れ速度」、「模型分解速度」及び「熱分解ガス層内のガス圧」を測定した。このとき模型内のガス置換条件を変化させて鑄造実験を行った。得られた結果から、湯流れ速度が変化する模型内ガス置換条件を検討した。また、溶湯の湯流れ長を測定し湯回りに及ぼす影響を調査した。

4. 研究成果

(1) 発泡ポリスチレン模型内の空気をアルゴンあるいは窒素でガス置換を行う過程を模型重量変化の測定から調べたところ、アルゴンよりも窒素の方がガス置換率が大きいことが示唆された。図 1 に発泡模型内ガス置換過程における模型重量変化を示す。時間 0 付近の重量増加は減圧雰囲気にした際の浮力減少に伴う重量増加を示す。その後の重量減少は模型内空気が排気を意味する。1500min 近傍の重量減少は不活性ガス雰囲気としたことにより、模型に浮力がかかり重量が減少したことによる。その後の重量増加は不活性ガスが模型内に導入されたことを意味する。ガス置換開始前後の重量差は模型内ガスの質量と雰囲気による浮力による。このときの模型体積は $3 \times 10^{-4} \text{m}^3$ のため、模型内ガスが全てアルゴンガスに

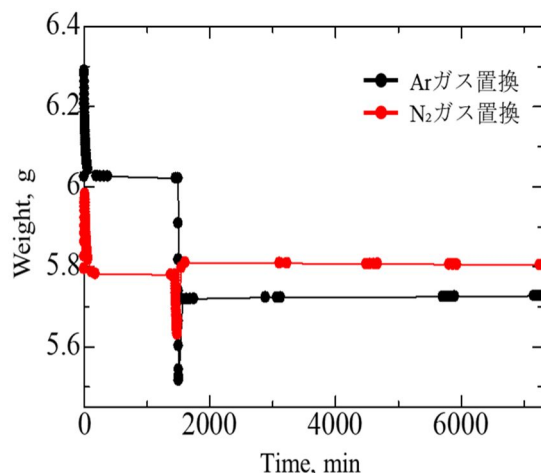


図 1 発泡模型内ガス置換過程における模型重量変化

置換された場合、約 0.15g の重量減少と見積もられるが、図 1 の結果より、重量減少量は約 0.25g であり、模型内のガスは半分程度しかアルゴンに置換されていないことが推定された。一方で窒素で置換した場合の重量変化は約 0.02g の増加であり、全て窒素ガスで置換された場合の重量変化とほとんど同じと見積もられた。このことから、アルゴンよりも窒素の方が模型内に導入されやすいことが知られた。模型内にガスが置換されるためには発泡セル膜を通じたガス透過現象と考えられる。ポリスチレン膜に対するガス透過係数はアルゴンで $152 \times 10^{15} \text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^2\text{Pas}$ に対して窒素では $45.6 \times 10^{15} \text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^2\text{Pas}$ であり、アルゴンの方がガス透過係数が大きい図 1 に示すとおりアルゴンの方がガス置換率が低いことが考えられた。このことからガス置換は、単なるポリスチレン膜に対するガス透過現象では説明できないことが明らかになった。

(2) アルゴンあるいは窒素ガスで模型内ガス置換を行った模型を用いて鑄鉄溶湯による鑄造実験を行った結果、模型分解速度はガス置換なしと比べて速くなった。一方で湯流れ速度は必ずしも速くならず、むしろ遅くなる傾向を示した。湯流れ速度が遅くなると、時間経過による溶湯温度の低下により湯回り不良が懸念されるが、不活性ガス置換を行った模型では湯回り不良は発生しなかった。これに対してガス置換を行わなかった模型を用いた場合は湯回り不良が生じた。

(3) ガス置換率の大きい窒素を用いて発泡ポリスチレン模型内のガス置換を行い、鑄鉄溶湯による鑄造実験を行った。図 2 に模型分解時間に及ぼす模型内ガス置換時の減圧時間の影響を示す。減圧雰囲気保持時間が大きくなると模型分解時間は小さくなった。このことから減圧雰囲気保持時間が大きいほど模型内の空気が排気され、窒素に置換される割合が大きくなることが知られた。図 3 に模型分解時間に及ぼす模型内ガス置換時の窒素ガス雰囲気保持時間の影響を示す。窒素ガス雰囲気保持時間が大きくなると模型分解時間は小さくなったことから、この保持時間が大きくなると模型内に窒素が導入される量が大きくなることが示唆された。同図中の矢印で示した 2 条件では、減圧雰囲気保持時間が長い条件で行ったものであり、そのことから直線近似からの差が大きくなったと考えられる。

(4) 図 2、3 より、窒素ガス置換を行った模型を用いると模型分解速度が速くなることが明らかとなったが、上述の通り湯流れ速度は必ずしも速くならなかった。このことは塗型層からの模型分解ガス排出量の影響が考えられたため、湯流れ中の模型と溶湯の間に生じるガス層の厚さについて調査した。図 4 に湯流れ中のガス層厚さに及ぼす模型内ガス置換時の減圧時間の影響を示す。減圧雰囲気保持時間が大きくなるとガス層厚さが大きくなった。このことは模型内の窒素置換割合が大きくなるとガス層厚さが大きくなることを意味している。すなわち、模型内の酸素量が小さくなるほどガス層が厚くなっている。ガス層が大きくなる要因としては、模型から発生する単位時間当たりのガス量が大きい場合が考えられ

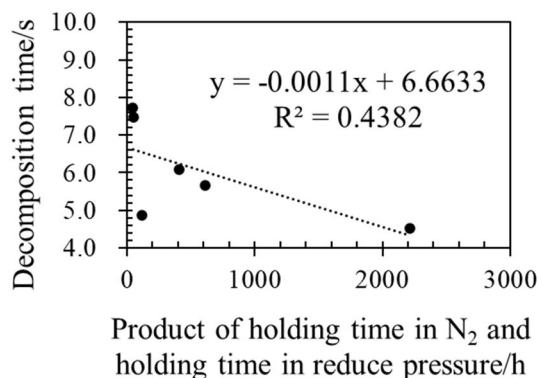


図 2 模型分解時間に及ぼす模型内ガス置換時の減圧時間の影響

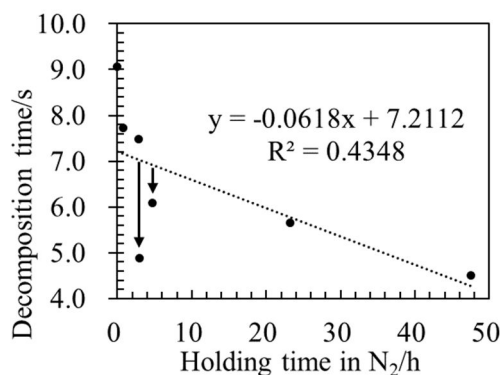


図 3 模型分解時間に及ぼす模型内ガス置換時の窒素ガス雰囲気保持時間の影響

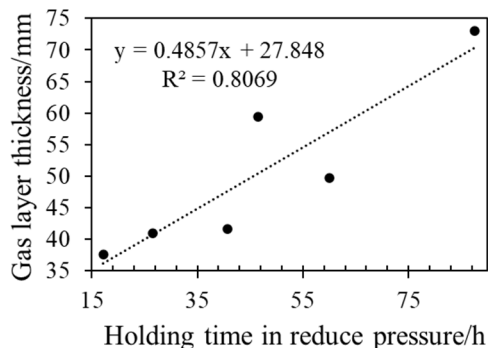


図 4 湯流れ中のガス層厚さに及ぼす模型内ガス置換時の減圧時間の影響

る。塗型から系外へのガス排出速度が小さい場合にもガス層が大きくなる要因となる。そこで、湯流れ中のガス層厚さに及ぼす塗型層厚さの影響を調べた。その結果を図5に示す。同図より、塗型層の厚さが大きくなるほど分解ガス層厚さは小さくなることが知られた。塗型層厚さが大きくなると単位時間あたりのガス排出量は小さくなることからガス層厚さを決める要因として塗型からのガスの系外への排出は小さいと考えられた。窒素ガスで置換した模型の分解では、模型内酸素が少ないため、熱酸化分解よりも熱分解が優勢であると考えられる。熱分解で生成する分解物はスチレンモノマが多いことが知られており、スチレンモノマの液化物が多く生じたとすると、その液化物が塗型層に浸透し系外に排出されることで分解ガス層が小さくなるものと推察された。

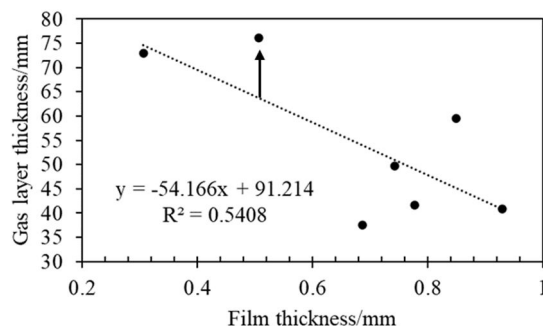


図5 湯流れ中のガス層厚さに及ぼす塗型層厚さの影響

(5) (1)～(4)の研究成果より、不活性ガスで置換した発泡模型を用いると鑄造時の模型分解反応が熱酸化分解が抑制され熱分解が主な分解反応となり、その分解生成物はモノマのような液化物が増加することが示唆された。そして模型分解速度は速くなるが、液化物の生成量は増加することで塗型層に液化物が浸透しガス通気性の低下につながることで湯流れ速度は小さくなることが推察された。これらのことから不活性ガスで置換した模型を用いると鑄造中における燃焼・爆発の現象は抑制され湯回り不良の抑制に寄与したものの考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 丸山 徹	4. 巻 94
2. 論文標題 鋳鉄鋳物の消失模型鋳造法における模型分解及び湯流れ速度に及ぼす模型内ガス置換の影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鋳造工学	6. 最初と最後の頁 748-754
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11279/jfes.94.748	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 丸山 徹
2. 発表標題 消失模型鋳造用EPS模型内の不活性ガスによる置換と湯流れ挙動
3. 学会等名 日本鋳造工学会第181回全国講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 丸山 徹、西 豊祐
2. 発表標題 鋳鉄の消失模型鋳造における湯流れ速度に及ぼす模型内のアルゴンガス置換の影響
3. 学会等名 日本鋳造工学会第177回全国講演大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------