

環境負荷低減を目指した鋳造プロセスに関する研究

目 次

第1章 序論	1
1-1 鑄造の歴史	1
1-2 背景	1
1-3 研究概要	2
1-3-1 消失模型鑄造法による環境負荷低減型プロセスの研究	2
1-3-2 鑄造廃棄物の省エネ型溶融によるリサイクルシステム の実用化研究	4
1-3-3 木質資源を用いた鑄物用加炭材の研究開発	5
第2章 消失模型鑄造法による環境負荷低減型プロセスの研究	6
2-1 模型熱分解生成物の発生挙動およびその性状	7
(1) 緒言	7
(2) 共重合模型について	7
(3) 実験方法	8
(4) 実験結果および考察	11
(5) 結言	18
2-2 模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響	18
2-2-1 垂直面円運動振動を適用した消失模型鑄造法の試作	18
(1) 緒言	18
(2) 垂直面円運動振動テーブルの概要	18
(3) モデル形状による検討	20
(4) 実製品への適用	22
(5) 結言	27
2-2-2 パイプ形状模型を用いた消失模型鑄造における造型と 鑄造特性	27
(1) 緒言	27
(2) 実験方法	28
(3) 実験結果および考察	33
(4) 結言	39
2-2-3 消失模型鑄造法におけるフラン樹脂再生砂使用の影響	40
(1) 緒言	40
(2) 実験方法	40
(3) 実験結果および考察	45
(4) 結言	50

2-3	環境負荷低減プロセスの改善	5 1
	「消失模型鑄造用塗型膜の熱間通気度」	
(1)	緒言	5 1
(2)	実験方法	5 2
(3)	実験結果および考察	5 7
(4)	結言	6 4
第3章	鑄造廃棄物の省エネ型溶融によるリサイクルシステム	
	の実用化研究	6 7
3-1	緒言	6 7
3-2	実験方法	6 8
3-2-1	電気炉による塩基度調整効果	6 8
3-2-2	小型溶解炉による溶融還元処理	6 9
3-2-3	実用溶解炉による溶融還元処理	7 1
3-3	実験結果	7 5
3-3-1	電気炉による塩基度調整効果	7 5
3-3-2	小型溶解炉による溶融還元処理	7 8
3-3-3	実用溶解炉による溶融還元処理	8 2
3-4	考察	8 5
3-4-1	電気炉による塩基度調整効果	8 5
3-4-2	小型溶解炉による溶融還元処理	8 5
3-4-3	実用溶解炉による溶融還元処理	8 5
3-5	結言	8 6
第4章	木質資源を用いた鑄物用加炭材の研究開発	8 7
4-1	鑄鋼用加炭材への木炭の利用	8 7
(1)	緒言	8 7
(2)	実験方法	8 7
(3)	実験結果および考察	9 2
(4)	結言	9 4
4-2	アーク式溶解炉での木質系加炭材の利用	9 5
(1)	緒言	9 5
(2)	実験方法	9 5
(3)	実験結果	9 9
(4)	結言	1 0 1

第5章 結論	103
5-1 消失模型鑄造法による環境負荷低減型プロセスの研究	103
5-1-1 模型熱分解生成物の発生挙動およびその性状	103
5-1-2 模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響	103
5-1-3 環境負荷低減プロセスの改善	106
5-2 鑄造廃棄物の省エネ型溶融によるリサイクルシステム の実用化研究	107
5-3 木質資源を用いた鑄物用加炭材の研究開発	108
5-3-1 鑄鋼用加炭材への木炭の利用	108
5-3-2 アーク式溶解炉での木質系加炭材の利用	108
5-4 結語	109

第1章 序論

1-1 鑄造の歴史

金属材料に適当な物性や機能を付与して所定形状の品物を造るのに最も簡単で古くから使われている方法は、金属を融点以上に加熱溶解した後、これを適当な鑄型を用いて凝固させる流動と成形のプロセス、すなわち鑄造である。

鑄造は、紀元前 5500 年頃、ヨーロッパとアジアの狭間にあつて、北に豊かな鉱石産地をもつメソポタミア地方、チグリス川とユーフラテス川に挟まれた肥沃な三日月地帯を中心に、銅の精錬より始まったとされている。当初は、比較的低温で還元する炭酸銅が原料として用いられ、As、Sb、Ag 等の不純物が多く含まれるため、機械的性質が悪く、装飾品としてしか使用されなかった。その後、精錬技術の進歩と共に、紀元前 3600 年頃には、シュメール人により、鑄造性が良く、機械的性質に優れた青銅が発見され、さらに、紀元前 1700～1100 年にかけて発展したヒッタイト王国が鉄の精錬加工をおこない、世界中で発展していくことになる。

日本の鑄物の始まりは、弥生時代前期末頃（紀元前 200～100 年）に中国大陸より伝わったとされている。日本での鑄物造りは、当初削りやすい砂岩などを鑄型として用いた石型であったことが知られており、やがて希望する形状をより自由に造り出すために、粘土等を用いた鑄型に発展していったと伝えられている。当初は、大陸で製造された銅器の模倣から始まり、銅鐸や腕輪など日本独特の形状、用途のものに移り、西暦 300～600 年頃には鉄器の鑄造も始まったとされている¹⁾。

近代の鑄造は、18 世紀のイギリスで端を発した産業革命以降、科学的解析が加えられ、機械化、量産化が飛躍的に発展し、現在、世界中で約 5000 万トン、日本で約 700 万トンの鑄物が生産されている。

1-2 背景

長い歴史を持つ鑄造の中で砂型を使用した空洞鑄型鑄造法（空洞型）は、紀元前 3500 年頃から使用されてきた代表的な鑄造法である。しかしながら、空洞型は、型を合わせた場所に鑄バリが発生するとともに、砂型から木型を抜き取る必要があるため抜き勾配が必要となる。また鑄物に余肉が着くなど、本来必要とする形状と若干異なり、勾配などでは再現しにくいなどの不便さが伴う。このため作業者の熟練度により品質が左右される。また一方では使用した型砂は一部の鑄造法ではリサイクルにより再使用がおこなわれているが、すべてにリサイクルは実現できておらず、最終的には砂の廃棄が必要となる。

この熟練作業者の不足と砂の廃棄による公害問題は現在の鑄造業界において大きな問題となっている。また鑄物工場の廃棄物処理は、地域における環境問題とその処理費用の高騰が、工場自体の存続を危ぶませている。鑄造工場から排出される廃棄物は、埋め立て処分する場合、廃掃法においてすべて「鉍さい」として管理型処分地への処理を義務づけられている²⁾。近年これらの処分地の不足、環境に対する意識の高まりなどから処理費用は高くなる一方で、鑄造業界にとって、諸外国との価格競争で経営を圧迫する重大な問題となっている。

また、埋め立て処分以外にも、排出される廃棄物の種類によっては、セメント工場への受け入れや、路盤材、土木、建築資材への再利用などもおこなわれているが^{3)~5)}、これらによって再利用可能な廃棄物は、成分などの問題からごく一部であり根本的な解決策とはなっていない。

一方、鑄鉄は、その特質を決定づける最重要な添加元素として炭素を添加する。そのため溶銑中に加炭材を入れる。加炭材は現在、主に石炭から造られるコークスが使われている。

石炭は、化石資源であり、CO₂の発生源でもある。また、中国等の製鉄業の興隆で石炭価格はここ10年で約50%も上昇している(2000年で\$80/トンが2010年は\$130/トン)⁶⁾。このため石炭を原料とするコークス価格も上昇の一途をたどっており、鑄物業界など中小の企業では加炭材に使うコークスの価格上昇を何かで補う必要に迫られている。

このような観点から、現状の鑄造業界の問題点は、「環境(破壊)」、「資源(枯渇)」、「人材(不足)」の3つに大きく集約される。このため、まず始めに環境と人材の問題に対応するために、「消失模型鑄造法」に取り組み、次に環境と資源の課題解決のために、それぞれ違ったアプローチではあるが、「鑄造廃棄物のリサイクル」および「木質資源を用いた鑄物用加炭材」の研究をおこなった。

1-3 研究概要

1-3-1 消失模型鑄造法による環境負荷低減型プロセスの研究

鑄造プロセスを取り巻く環境問題に対処するために、まず最初にその砂型造型法の改善に取り組んだ。その手法として選んだ消失模型鑄造法(消失型)は、1958年にアメリカのH.F. Shroyerが発明した。この鑄造法は、鑄物と同形状の発泡ポリスチレン製の模型を砂型中に埋設し、模型を抜き取ることなく金属溶湯を注ぎ、溶湯熱で発泡模型を分解し、置換することにより鑄造品を得る砂型鑄造法の一つである。減圧消失模型鑄造法の手順を図1-1に示す。

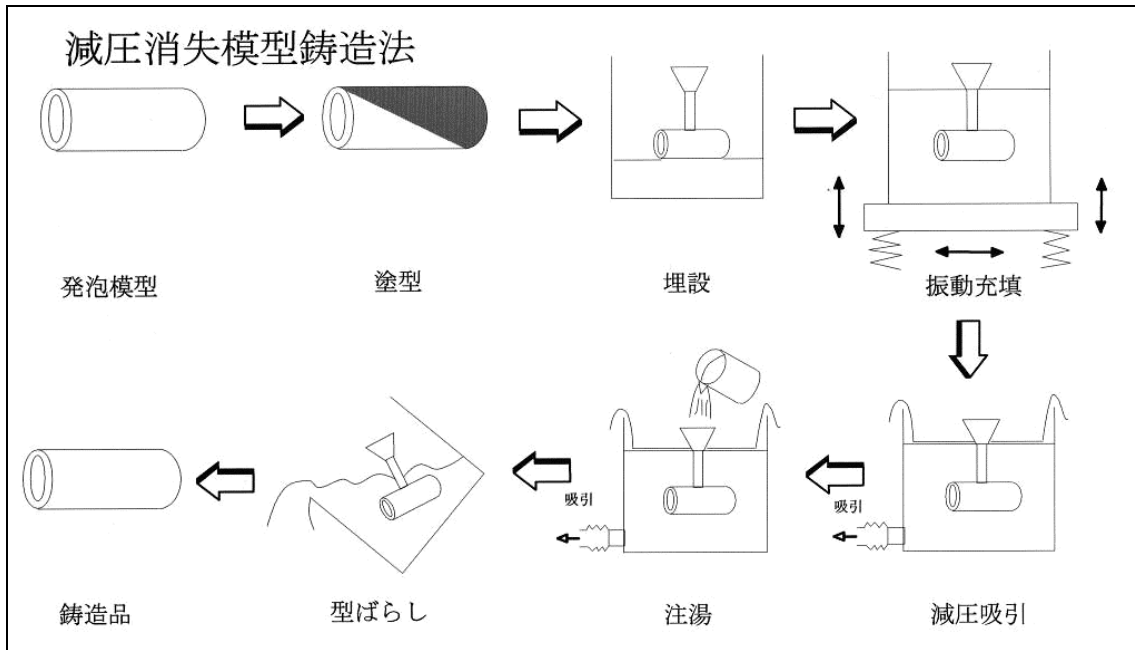


図 1-1 減圧消失模型鑄造の手順

従来の砂型鑄造法との最も大きな相違点は造型後に型抜きが必要ないことである。そのため、複雑形状の一体鑄造やニアネットシェープの鑄物が製造出来るなどのメリットがある。また、減圧下での注湯をおこなうため、消失模型から発生する熱分解生成物の一括処理が可能で、鑄物砂の廃棄が不要で、熟練作業員以外でも生産が可能であるなどの特長を有している。

日本における消失模型鑄造法による鑄物の年間総生産量^{8)、9)}は1995年度約3万6千トン程度で、アメリカの約11万トンの約1/4である。アメリカでは1960年代からアルミニウム鑄物を中心に展開されてきた。日本では基本特許¹⁰⁾が切れたのが契機となり1980年代から、主として鑄鉄鑄物を中心に展開した違いがある。

消失模型鑄造は、これらの種々の特徴を有する反面、従来法では発生しなかった模型の熱分解ガスの鑄造品や鑄造設備への影響、またそのガス処理や工場内における作業環境などの公害および環境問題に対しては、従来鑄造法に比べて、当初より悪影響が少ないためか見過ごされてきた部分が多い。しかし、昨今の環境問題への世界的な流れから見た場合、これらの問題への取り組みは、無視出来ない状態となっている。

そこで本研究では、これらの課題を解決するために、次の3項目に着目して研究をおこなった。

- ・ 模型熱分解生成物の発生挙動およびその性状
- ・ 模型熱分解生成物が鋳造品に与える影響
- ・ 環境負荷低減プロセスの改善

本研究により、消失模型鋳造法における環境負荷低減型プロセスを提案することで、技術の空洞化が進む中、鋳造業界で問題になる公害および熟練作業者不足に対して有効な本鋳造法が、今後更なる発展が期待されるものであることを示すことができる。

1-3-2 鋳造廃棄物の省エネ型溶融によるリサイクルシステムの実用化研究

次に、鋳造工場を取り巻く環境問題の中で、最も重要で、不可避な課題である鋳造廃棄物の処理問題について取り組んだ。

その方法として共同研究者らと共に見出した、廃棄物中の有用金属を従来よりも遥かに低い温度で溶融抽出できるなどの技術シーズ¹¹⁾を使って、鋳物工場の廃棄物完全クローズドシステムの開発をおこなった。

研究の基礎となっている廃棄物の溶融処理については、従来から減量化や有害重金属類の除去などを目的として廃棄物のみによる溶融についての実験、研究はおこなわれてきたが¹²⁾、高温での溶融が必要なことから処理コストの面で実用化に至るような開発はおこなわれていなかった。

著者らは、鋳造工場から排出される金属分を含む無機系廃棄物を、アーク式（抵抗加熱式も含む）溶融炉内での比較的低温で溶融することにより、無機物分と金属分に分離し、鋳造原料として再利用可能な金属分の抽出をおこなうと共に、残存スラグ成分についても鋳型砂などへの再生をおこなうクローズドシステムの開発を目指した。

具体的には、溶融促進用ガラス層を形成させ、塩基度調整した廃砂を投入することで、従来よりも約 200℃低い温度でクロム成分を溶融抽出できることを見出した。この成分は再び鋳物用成分として利用できる。また、スラグ層は、そのままセメント原料としての利用も可能であるが、将来的には、人工砂化して鋳型砂として再利用し完全な循環サイクルを構築することも開発の視野に入れて研究をおこなった。

この研究の技術シーズとなっている溶融促進スラグ層の形成による還元反応の効率化技術、還元剤の投入による還元力の改善技術および塩基度調整による溶融温度の低下処理技術を使えば、省エネルギーでの溶融処理が可能となる。それにより溶融効率の改善と高品質の再利用資源の抽出により大幅なコスト削減が図れ、処理コスト問題を解決できると考えた。

1-3-3 木質資源を用いた鋳物用加炭材の研究開発

古来より鉄に炭素を添加して鋳鋼、鋳鉄といった鋳物を製造してきた鋳造業界では、化石資源である石炭を乾留して製造されるコークスを主原料とする加炭材や石油残さから造られる加炭材を使用してきた。

加炭材は、鉄にとって最重要元素である炭素を添加するために鉄鋳物製造時には欠かせない副資材で、この炭素の添加により、鋳造品の特性は大きく左右される。

しかし、近年、この加炭材の主原料となる石炭、石油を始めとする化石資源の価格高騰、資源の減少、CO₂の増加による地球温暖化問題等により、化石資源の使用低減、代替品の探求が急務となっている。現在、この問題が、鋳造業界にも影を落とし始めている。そこで、この問題の一端となっている鋳造業界での化石燃料加炭材の使用削減についての取り組みもおこなった。

具体的には、共同研究者らが開発した、木質系資源から大量にかつ安価に木炭を製造する方法¹³⁾¹⁴⁾および木炭の気孔を制御することで、各種の性状の木炭を造ることができる技術¹⁵⁾¹⁶⁾を利用した。この技術により高知県の未利用木質資源から造られる木炭を、コークスを主原料とする加炭材の代替にする研究をおこなった。

参考文献

- 1) 石野亨：鋳物 5 千年の足跡、日本鋳物工業新聞 (1994) 3
- 2) 廃棄物の処理および清掃に関する法律：(1970) 法律第 137 号
- 3) (財)素形材センター：研究調査報告 No. 474 (1994) 4
- 4) (財)素形材センター：研究調査報告 No. 538 (1998) 14
- 5) (財)素形材センター：研究調査報告 No. 548 (2000) 71
- 6) JCOAL：World Coal Report (2009) 2.1
- 7) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 (2010) 99
- 8) 鶴池実：鋳鍛造と熱処理 6 (1996) 3
- 9) Precision E. P. C. Tech. Final Research Report Oct. 1. 1990～Jan. 31. 1993
Cast Expo. (1996)
- 10) H. F. Shroyer：U. S. Patent No. 2830343
- 11) 河野敏夫、関田寿一、藤原正道、西岡克展：高知県工業技術センター研究報告 No. 25 (1994) 1
- 12) 柴田悦郎、江川真、中村崇：ISIJ International Vol. 42 No. 6 (2002) 609
- 13) 坂輪光弘、橋爪利夫：特願 2005-343071
- 14) 坂輪光弘：化学工業 39 (2005) 42-56
- 15) 坂輪光弘、山崎新平：炭素 No. 211 (2004) 4
- 16) 坂輪光弘：日本エネルギー学会 総説 86 (2007) 736

第2章 消失模型鑄造法による環境負荷低減型プロセスの研究

消失模型鑄造法の特徴としては、①粘結剤を用いない砂型を使用するため鑄物砂の繰り返し使用が簡単、②木型を取り出すことがなく、型の分割が無用なので型合わせや中子の必要がない、③バリの発生や押し湯の必要がないため鑄造歩留りが良い、④鑄仕上げ工程が簡単、⑤高度の機械化が可能なので熟練技術者が不要、⑥軽量の発泡模型を用いるため重い木型を取り扱う必要がなく労働力の確保が容易、⑦工場環境整備が容易、などの点が挙げられる。

ただ、これらの特徴を有する反面、従来法では発生しなかった模型の熱分解ガスの鑄物や鑄造設備への影響、またそのガス処理や工場内における作業環境などの公害および環境問題に対しては見過ごされてきた部分が多い。

そこで本研究では、これらの課題を解決するために、次の3項目に着目して研究をおこなった。

・ 模型熱分解生成物の発生挙動およびその性状

消失模型鑄造法では、注湯された溶湯が模型を燃焼・気化させることで、模型の熱分解により発生したガスは塗型層を通して型砂部に排出しながら、順次充填する特異な流動形態¹⁾²⁾をとるといわれている。その際、塗型層を通して型砂部に排出した模型の熱分解ガスはその後、大気中に放出される。このように従来から、特に排気ガス処理対策はおこなわれていないのが現状である。

本項目では、高温曝熱下でのこれらの模型の気化に伴う熱分解ガスの排気ガス処理対策の必要性について検討した。

・ 模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響

模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響を正確に検証するためには、その前提となる造型での欠陥要因を排除する必要がある。消失模型鑄造法にとって、従来の上下動もしくは、3次元振動のみの充填に比べ、鑄型砂の充填率が良いといわれている垂直面円運動振動³⁾を適用した場合の試作と量産の可能性を検討し、鑄型砂の充填不足による鑄造欠陥の要因排除を試みた。

また同様に、長尺のパイプ形状の鑄物を消失模型鑄造法で鑄造した場合、パイプ内部の型崩れが起りやすいという事実がある。このことにより、長尺のパイプ形状の鑄物は、パイプ内部に模型熱分解生成物の影響を受けやすいと予測される。その検証のため、振動鑄枠内に設置した

アクリル製のパイプ模型内部へ流入した砂の充填性を確認した後、消失模型鑄造法でパイプ鑄物を鑄造し、その影響について検討をおこなった。また同時にパイプ内部の型崩れ対策についても検討した。

さらに、消失模型鑄造法で鑄物を製造している事業所の中には、設備のスペースの問題や生産量との兼ね合いからフラン樹脂鑄型の砂処理設備を併用している場合が多く見られる。この場合、フラン樹脂鑄型の再生砂を再利用するため、再生砂に付着している残留樹脂成分や再生砂中に含まれる硬化剤などの影響を受けると考えられる。本項目では、消失模型鑄造法に造型砂として再生砂を用いて鑄物を製造した場合のこれら残留樹脂および模型熱分解生成物が鑄造設備に与える影響を検討した。

・環境負荷低減プロセスの改善

消失模型鑄造法は一般の鑄造法とは異なる溶湯の充満挙動を示すため、この充満挙動を示す主因となる“溶湯により消失模型が分解して生成される熱分解生成物^{4~7)}が塗型膜を介して鑄型砂中に排出される機構”について、鑄造時に高温の熱分解生成物と溶湯にさらされる塗型膜の複雑に変化する熱間通気度を精度よく、リアルタイムに測定する方法を提案し、市販塗型剤を用いて評価した。また、これら塗型膜の熱間通気度と溶湯充満挙動の関係について検討を加えた。

2-1 模型熱分解生成物の発生挙動およびその性状

(1) 緒言

消失模型鑄造法は、基本的には造型の際、鑄物と同形の発泡ポリスチレン (PS) で作った模型を鑄物砂の中に埋めたまま抜き取ることなく注湯して鑄物を製造する方法⁸⁾である。注湯された溶湯は模型を気化させながら、順次充満する特異な流動形態^{1) 9)}をとるといわれている。その際、模型の熱分解ガスは、従来から特に排気ガス処理対策はおこなわれず、大気中へ放出されている。昨今の地球的規模での環境悪化が指摘されている中では、今後の問題として放置することは許されないかも知れない。本研究では、鑄造時のこれらの模型の気化に伴う熱分解ガスの排気ガス対策の必要性とその処理の可能性について検討した。

(2) 共重合模型について

最近の鑄造欠陥対策の一つとして、共重合 (Copolymerization) 模型^{1) 10)}の需要が急速に進んでいる。PS とポリメチルメタアクリレート (PMMA) との共重合体構造のモデルを図 2-1-1 に示す。しかし、その詳細な構造および熱分解時

に発生するガス組成などは不明である。共重合模型とは、構造内にベンゼン環を有する PS と酸素原子を有する PMMA とを適当な割合¹¹⁾で重合させたものである。したがって、模型の構造に含まれる酸素が熱分解過程で炭素の酸化を助けるので、炭素によるすす欠陥を少なくする²⁾と考えられている。すなわち、低炭素溶鋼の表面への炭素のピックアップ現象は、密度 0.022~0.029g/cm³ の PMMA 模型では 0.05%C より少ない¹²⁾といわれている。

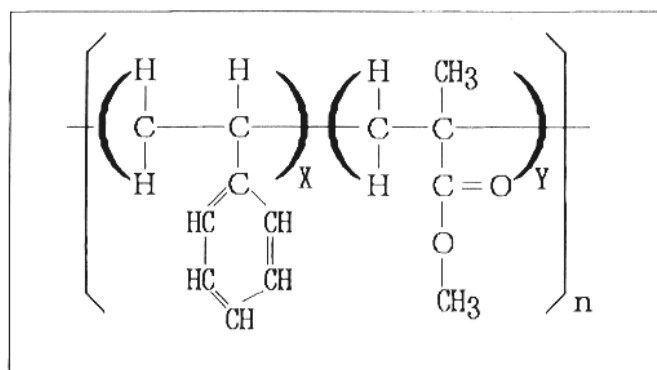


図 2-1-1 共重合体構造 (PS/PMMA)

一般には、PS/PMMA 共重合ビーズは PS と PMMA の原料に α -メチルスチレンを含有させた単量体混合物に、発泡剤(ペンタンなど)を配合し懸濁重合させて製造される。得られた共重合ビーズはスチームで予備発泡、熟成後、金型内に充填し、さらに加熱発泡して成形(模型)される。しかし、急激な共重合反応による生成重合体の塊状化、発泡剤の含浸性ならびに成形性などの改善に対して最適重合緩和剤が添加される。例えば、ジフェニルメチルペンテン、プチルメルカブタンさらにはアクリロニトリルなどである。したがって、これら添加剤の種類と量の違いが模型気化時にさらに複雑なガスを生成する可能性がある。

(3) 実験方法

(a) 熱分解ガスの組成分析

模型の気化により生成する熱分解ガス測定法のフローチャートを図 2-1-2 に示す。すなわち、PS/PMMA 共重合模型 (100/0、50/50 および 5/95) をそれぞれ磁性ボートに約 0.2g 精粹した。あらかじめ 600°C、1000°C および 1300°C に加熱保持した電気炉(窒素雰囲気下)内にすばやく挿入してばく熱気化させた。約 1L の窒素ガスを 6 分間通気して生成した熱分解ガスを追い出した。三方コックによりテトラパックに補集後、水素、メタン、一酸化炭素、二酸化炭素、エチレン、エタン、プロパン、プロピレンおよび酸素などの無機ガス系をガスクロマトグラフィにて分析した。さらにテトラパックに付着した液体残さおよび

固体残さをアセトンにて溶出分別測定した。

同様に気化させたガスをドライアイスとエチルアルコールとの混合液で冷却したアセトンに吸収後、ベンゼン、トルエン、エチルベンゼンおよびスチレンなどの芳香族炭化水素系のガスをガスクロマトグラフィにより分析した。なお、このような方法で測定できない残りのガス組成を総称して不明成分として表示した。

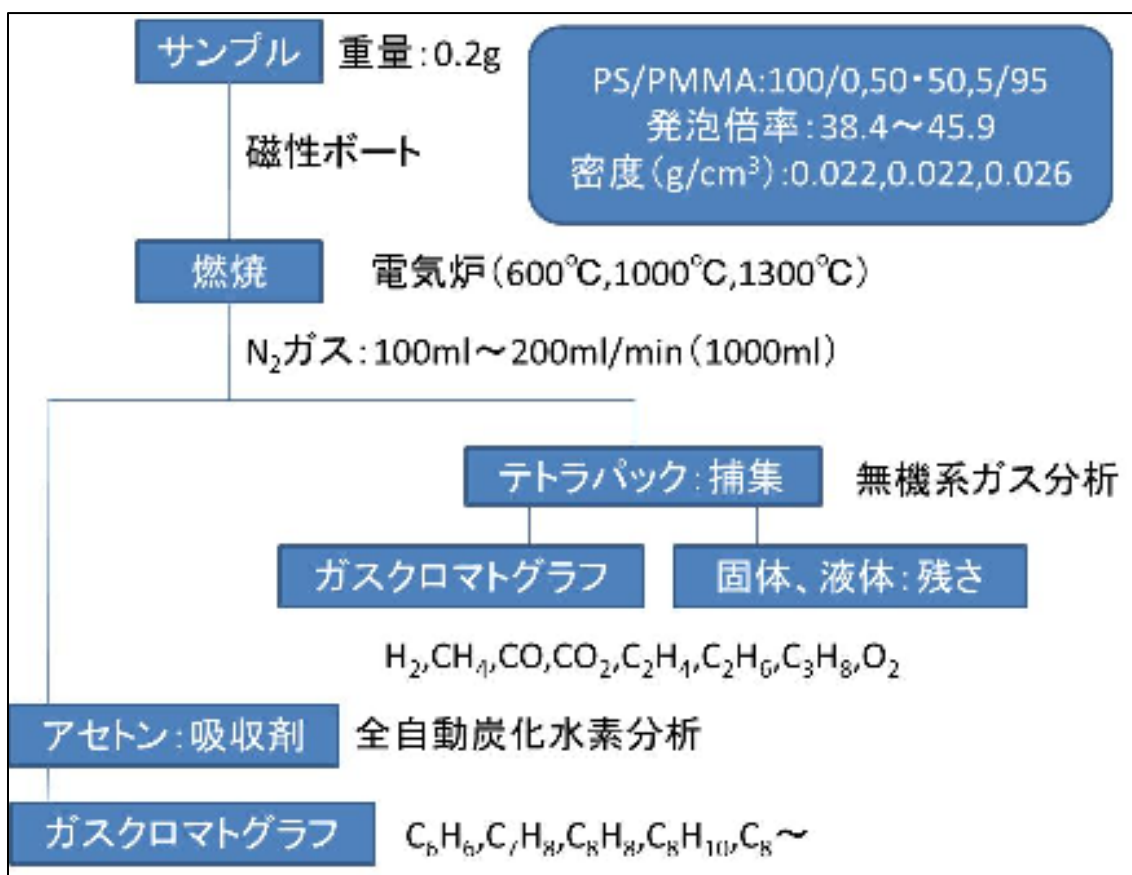


図 2-1-2 熱分解ガス測定フローチャート

(b) 熱分解ガスの吸着処理

吸着剤処理ガス分析装置の概略図を図 2-1-3 に示す。ガス吸着剤として麦飯石および比較剤として市販の活性炭を用いた。装置の発生ガス導入ラインの吸収容器に、あらかじめ約 50°C で真空乾燥した吸着剤 (約 10g) を充填した。前述した熱分解ガス測定法に準じて、電気炉内で発生させたガスを吸着剤で充填した吸収容器中を通過させ、吸着剤処理前後の分析値から吸着除去率を求めた。

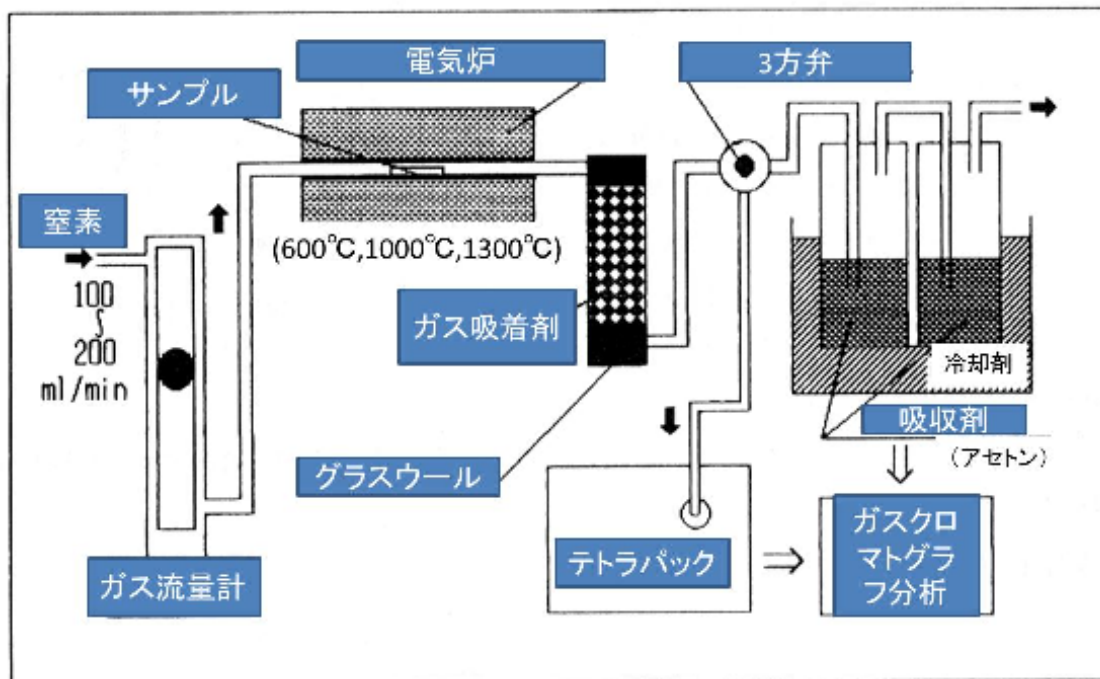


図 2-1-3 吸着剤処理ガス分析装置の概略図

麦飯石とは、地下に生ずる溶融した造岩物質で、岩しょうともいうマグマが凝固・結晶(分化作用)により、化学組成が変化した一種の火成岩である。本実験では、中国内蒙古自治区奈鼻旗平頂山で産出する麦飯石¹³⁾を用いた。日本では岐阜県と三重県で産出したが、既に採掘し尽くされたといわれている。その主要な酸化物および含有微量元素量の一覧表を表 2-1-1 に示す。臭気を吸収する作用もあることから、活性炭に代わる吸着剤としての応用が期待される。そのメカニズムは明らかでないが、アルミナけい酸塩鉱物としてけい酸四面体構造分子を形成する遊離イオンの存在が考えられる。すなわち($-SiO^-$)に吸着されることにより脱臭されると推察される。また、比較吸着剤として水蒸気賦括法で作られた、やし殻活性炭を用いた。

表 2-1-1 麦飯石の組成

酸化物	mass%	微量元素	ppm
SiO ₂	50.0～66.0	Sr	300～600
Al ₂ O ₃	17.0～18.5	Zn	70～140
CaO	2.7～4.0	V	25～55
MgO	1.0～2.0	Cu	4～20
K ₂ O	2.5～3.5	Ni	2～15
Na ₂ O	3.6～5.1	F	300～800
Fe ₂ O ₃	1.5～3.3	Co	5～15
FeO	2.0～4.0	Se	0.1～1
TiO ₂	0.6～0.9	Mo	0.5～3
P ₂ O ₅	0.19～0.35	Sn	0.5～5
MnO	0.06～0.10		

(4) 実験結果および考察

(a) 熱分解ガス組成分析

ばく熱下で得られた共重合模型の熱分解ガスの組成一覧表を表 2-1-2 に示す。図 2-1-4 に発生ガス、固体残さ、液体残さ、無機ガス系、芳香族炭化水素系、さらに不明成分とにわけて生成量との関係をまとめて示す。固体残さはテトラパックおよびガラス器具をアセトンにて洗浄し、ろ過分別して、ろさいの重量からすべて炭素(カーボン)として求めた。液体残さは実験前後の器具の重量変化の合計から固体残さを差し引いた値である。発生ガス量(Nml/g)は標準状態におけるガス量 $[N\ 1 = (\text{発生ガス量}(1) \times 273 / 273 + \text{ガス補集温度})]$ に換算した。

表 2-1-2 ばく熱下での共重合模型熱分解ガス組成一覧

共重合比	100/0			50/50			5/95		
	600	1000	1300	600	1000	1300	600	1000	1300
熱分解温度:°C	600	1000	1300	600	1000	1300	600	1000	1300
水素 H ₂	0.08	4.24	8.07	0.03	2.76	8.00	0.04	2.55	7.28
メタン CH ₄	0.00	6.90	3.50	0.28	11.68	4.10	0.43	17.16	6.55
一酸化炭素 CO	0.75	2.57	4.52	2.23	20.87	27.90	2.28	33.74	40.97
2酸化炭素 CO ₂	0.27	0.66	0.43	2.09	8.28	2.97	4.01	15.38	7.59
エチレン C ₂ H ₄	0.14	0.86	1.37	0.44	3.30	2.11	0.54	6.10	3.38
エタン C ₂ H ₆	0.00	0.10	0.07	0.12	0.20	0.11	0.12	0.23	0.04
プロパン C ₃ H ₆	0.00	0.00	0.00	0.56	0.00	0.15	0.90	0.06	0.00
プロピレン C ₃ H ₆	0.04	0.00	0.00	1.31	0.00	0.17	2.69	0.14	0.00
酸素 O ₂	2.60	0.76	1.06	0.96	0.66	0.88	0.76	0.64	0.83
小計 :mass%	3.88	16.09	19.02	8.02	47.75	46.39	11.77	76.00	66.64
固体残さ:mass%	0.00	10.09	10.03	0.00	8.23	10.86	0.00	3.73	8.11
液体残さ:mass%	32.74	13.44	8.82	19.93	10.63	15.65	22.88	0.00	0.76
小計 :mass%	32.74	23.54	18.85	19.93	18.86	26.51	22.88	3.73	8.87
ベンゼン C ₆ H ₆	0.43	11.60	1.16	0.76	8.48	0.81	0.15	9.47	1.39
トルエン C ₇ H ₈	2.02	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00
エチルベンゼン C ₈ H ₈	0.66	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
スチレン C ₈ H ₁₀	29.58	0.00	0.00	19.02	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00
C ₈ ~	5.54	2.54	0.00	2.26	2.79	0.00	0.56	2.38	3.51
小計 :mass%	38.45	14.14	1.16	23.19	11.27	0.81	0.71	12.84	4.90
検出成分合計:mass%	75.07	53.76	39.05	51.13	77.88	73.69	35.36	92.59	80.42
不明成分合計:mass%	24.93	46.24	60.97	48.87	22.12	26.31	64.64	7.41	19.58
発生ガス:Nml/g	186	570	984	255	823	1026	399	970	1230

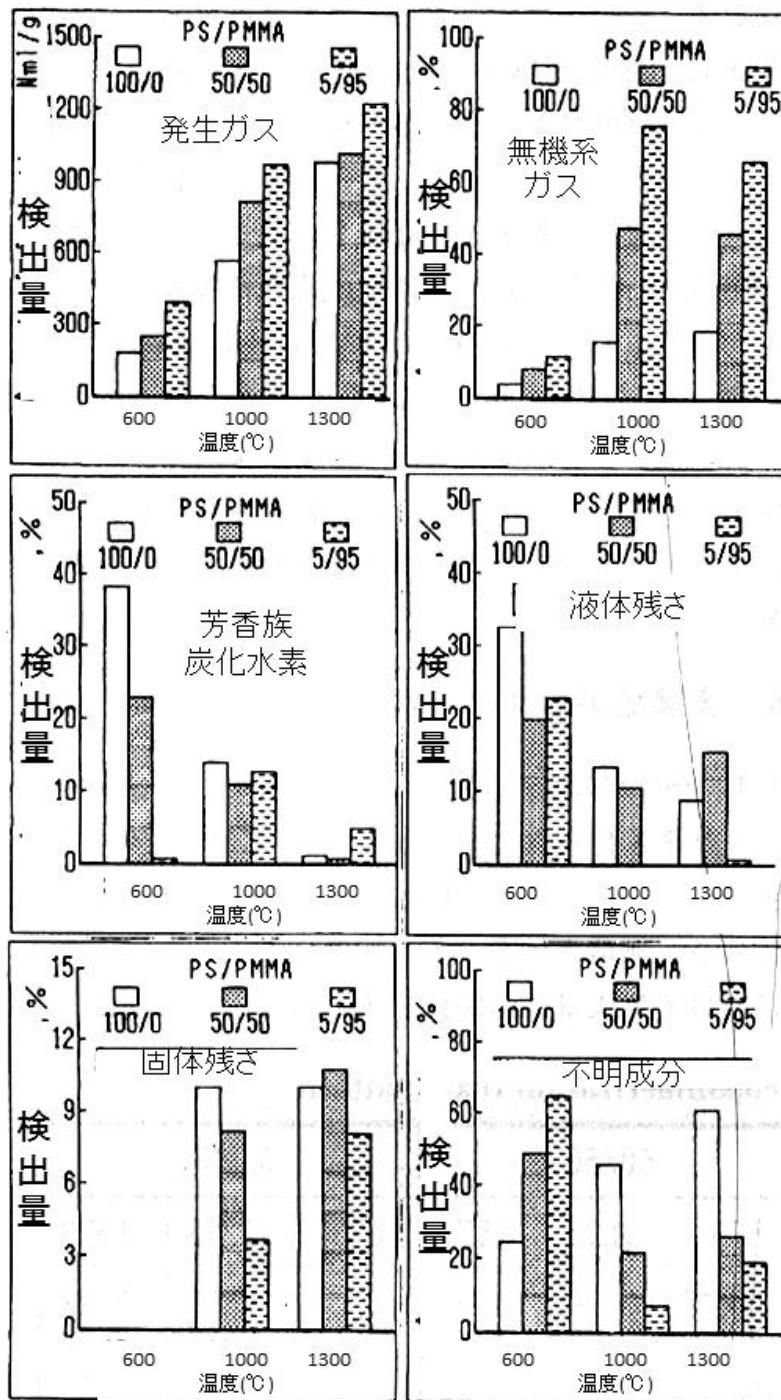


図 2-1-4 ばく熱下での共重合模型熱分解ガス発生各成分と生成量の関係

発生ガスおよび無機ガス系ともに、PMMA の共重合比率が多くなるほど、また熱分解温度が高くなるほど生成量は多くなる傾向にある。これに対して、液体残さおよび芳香族炭化水素系は PMMA の比率が多くなるほど、また熱分解温度が高くなるほど少なくなる傾向(なお、液体残さの場合は PS/PMMA=5/95 の

1000℃では検出されない)にある。固体残さのカーボンは熱分解温度の低い600℃ではいずれの共重合比率の模型とも検出されず、そのほとんどがスチレン系のガスと思われる。熱分解温度が高くなるとカーボンは多くなる。しかし、PMMAの比率が大きくなるほどむしろ少なくなる。これはPMMA構造中の酸素原子の存在が熱分解時に生成される炭素と結合してCOガスになることに起因するものである。このことはPMMAの比率が大きくなるほど「すす欠陥」および「炭素のピックアップ現象」に対して有効^{2) 11)}になることとよく対応している。一方、不明成分の量は熱分解温度および共重合比率によって一定の関係が見られない。低い温度でもPMMAの比率が大きい模型で大きくなる値を示している。このことは、前述したように、重合緩和剤の種類と量の違いが、模型気化時の複雑なガス形成に深く関係していると考えられる。

(b) 排気ガス対策の必要性

一般的な生砂型などによる鋳造業では、以下に示すような環境悪化の可能性が考えられる。「砂や有機系の樹脂、でん粉および石炭粉などの使用による粉じん発生」、「溶解・注湯時のガスやヒュームによる気中有害物(臭気)の発生」さらには「造型時や型ばらし時の悪臭発生」などである。これらに対して日本産業衛生学会、ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienist)による許容濃度の勧告、さらには悪臭防止法ならびに大気汚染防止法などによる規制がおこなわれている。そのほか、騒音、振動、熱、照明および重量物運搬に関しても環境基本法などで規制の対象になっている。これに対して消失模型鋳造法では、ダウケミカル社が提出したMSDS、すなわち材料安全データシート¹⁴⁾の写しの一部に、鋳造上の注意を示している。すなわち、「消失模型鋳造法で発生するこれらのガスは恐らく刺激的で有害であると思われる。」さらに「使用している砂についても有害物質や可燃性物質に汚染されている可能性がある。」と指摘している。

日本鋳造工学会関西支部の消失模型鋳造法研究委員会でおこなった、消失模型鋳造法に関する環境へのアンケート調査¹⁵⁾によると、公害環境問題に対して約70%の企業が有効であると答えている。さらに、いかなる公害対策になるかに対しては、大気および騒音においてそれぞれ約35%が有効であると答えている。このように消失模型鋳造法を適用した場合そのほとんどが工場の環境衛生の改善に効果が期待されると理解している。しかし一方では、この鋳造法独特の微粉樹脂による粉じん発生や模型の気化に伴う悪臭(気中有害物ガス)の発生などの可能性があり排気ガス処理対策の必要性を指摘している。しかし、実際の対策となると具体的にはとっておらず、将来の方向性を打ち出す程度で、ほとんどが大気中に放出されている。

さらに、今回の模型の熱分解ガスの分析により検出された項目の中には、大気にかかわる有害物質および粉じん排出基準の対象¹⁶⁾となるものがある。工場敷地境界基準での排出濃度は別にして、一酸化炭素、スチレン、ベンゼン、タール状物質、ホルムアルデヒド、メルカプタンおよび一般粉じんなどである。その他不明成分を考慮した場合、多かれ少なかれ今後の規制対象が厳しくなる可能性がある。そのため、何らかの対策が必要になることを示唆している。

(c) 麦飯石による排気ガス処理

PS/PMMA 共重合模型(100/0~5/95)を、600°C~1300°Cの範囲で気化後、吸着剤処理した場合の熱分解ガスの除去率を表 2-1-3 にまとめて示す。参考までに、PS 模型(100%)を 600°Cで活性炭吸着処理した場合のデータを示した。麦飯石による吸着処理では、液体残さ、芳香族炭化水素系および発生ガスについては約 50%以上の除去率が期待され、その他の項目についても低い数値ではあるが吸着効果が期待できる。これらの除去率は従来から報告されている活性炭処理と比較した場合、いずれの場合も活性炭のほうが良好な除去率を示している。特に不明成分の除去率は、活性炭で約 96%とほぼ完全に除去できる。しかし、項目によっては麦飯石の場合の方が高い値を示している。例えば、液体残さでは活性炭より高い除去率であり、吸着効果が期待できると考えられる。図 2-1-5 に麦飯石および活性炭それぞれの表面層付近の走査型電子顕微鏡写真(SEM 像)を示す。通常、鋳物砂用けい砂の表面は光を照射するとピンク色の滑らかな肌を呈し微細な穴などは認められない。これに対して活性炭には微細な穴および導入孔としての殻組織状の導管すなわち吸着穴が多数存在¹⁷⁾しているのが観察される。麦飯石には活性炭のような導入孔はないものの、分化作用によって形成された孔が多数一面に認められる。

表 2-1-3 麦飯石と活性炭による模型熱分解ガスの除去結果

	麦飯石	活性炭
PS/PMMA：倍率	100/0～5/95	100/0
発泡模型熱分解温度(°C)	600～1300	600
無機ガス：%	0.5～25.8	73.7
固体残さ：%	100	100
液体残さ：%	35～72.9	38.4
芳香族炭化水素：%	12.1～82.9	100
不明成分：%	3.4～12.2	95.9
発生ガス：Nm ³ /g	24.2	65.1
吸着率：%	13.7～57.2	75.9

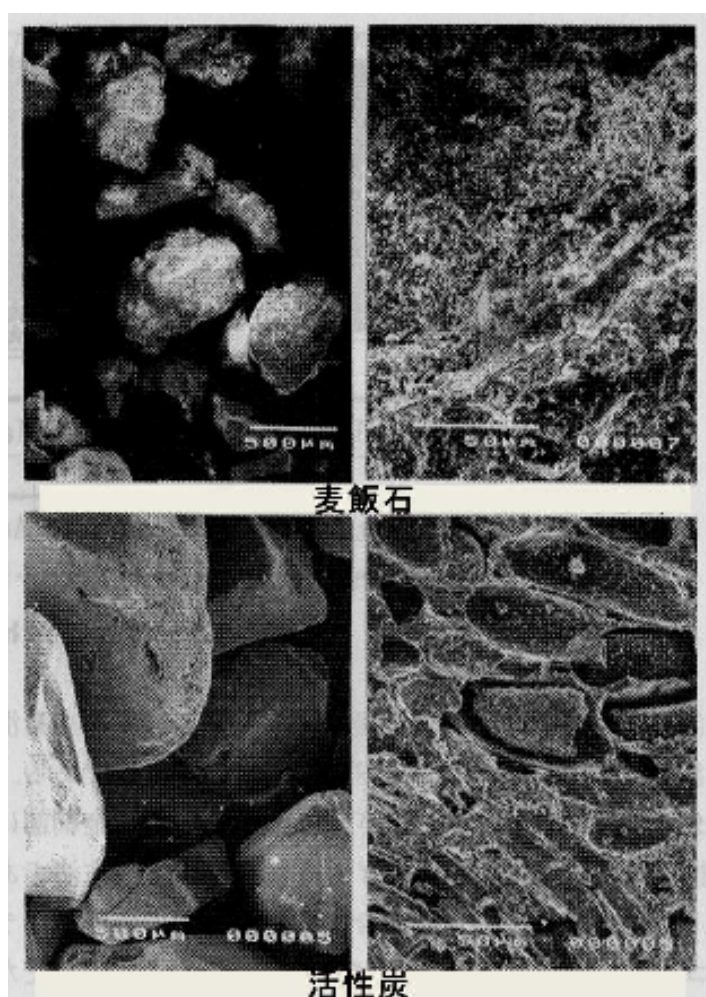


図 2-1-5 麦飯石と活性炭の SEM 像

図 2-1-6 に活性炭の吸着作用の細孔構造モデル¹⁷⁾を示す。このように活性炭は導入孔を介して微細な吸着孔が存在するために、吸着作用に優れていると説明される。したがって、麦飯石の場合も活性炭ほどではないが、微細な表面孔が多数存在することから、吸着効果があると考えられる。

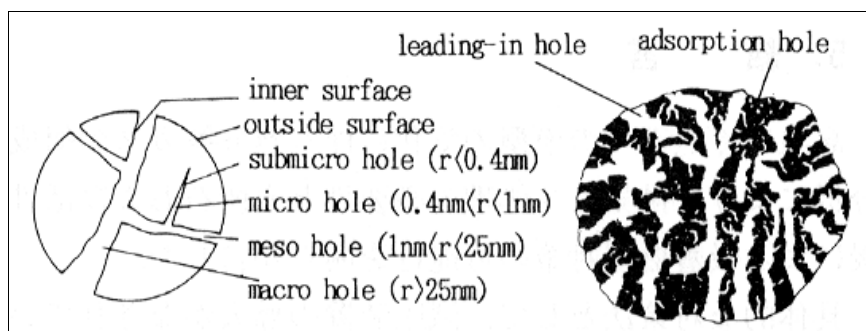


図 2-1-6 活性炭の吸着作用の細孔構造モデル¹⁷⁾

以上のことから、麦飯石および活性炭それぞれの利用方法によっては吸着効果がさらに期待できると思われる。図 2-1-7 に排気ガス処理対策のモデルを示す。このモデルは、いずれも減圧下であることが基本であり、減圧消失模型鑄造法への適用は、より簡単に対策できることにある。すなわち、A タイプのモデルの場合は本法で使用されているけい砂に活性炭および麦飯石を適量混合させたものをバックサンドとして用いる方法である。B タイプの場合はフラスコ下部の減圧吸引用の金網部に活性炭あるいは麦飯石をフィルタ状に埋没する方法である。さらに、C タイプの場合はフィルタ状の装置をフラスコ系外に設置して取替えが簡単にできるように考えた方法である。今後、その効果については実操作下でのデータ解析が待たれる。

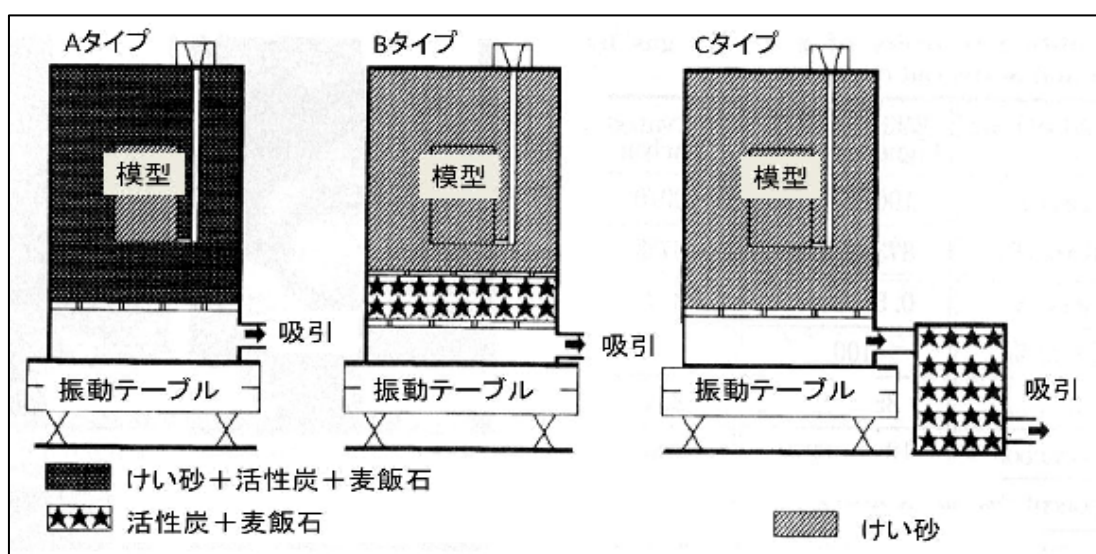


図 2-1-7 排気ガス処理対策のモデル

(5) 結言

高温ばく熱下での模型の気化に伴う熱分解ガスの組成分析により、排気ガス処理の必要性を明らかにした。

また、これらのデータは実験室的なものであるが、実操業下での塗型および砂中を通過する際の熱分解生成物の基礎を示したものとする。

2-2 模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響

消失模型鑄造法特有の鑄造時に発生する模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響について、次の3つの課題に取り組んだ。

「垂直面円運動振動を適用した消失模型鑄造法の試作」

「パイプ形状模型を用いた消失模型鑄造における造型と鑄造特性」

「消失模型鑄造法におけるフラン樹脂再生砂使用の影響」

2-2-1 垂直面円運動振動を適用した消失模型鑄造法の試作

(1) 緒言

現在、消失模型鑄造法に使用されている砂充填用の装置(以後、振動テーブルと記す)は、模型寸法や方案の大きさならびにフラスコ寸法に見合った加振力のものが市販されている。これらの種類分けは、消失模型鑄造法にとって“模型への砂充填”特性が極めて重要と認識されることから存在している。それは、砂が振動により流動化して模型を完全に埋没するとともに、見かけ密度を高くすることにより鑄型強度を確保するためである。したがって、この砂の流動性および充填性は振動テーブルの加振条件(振動方向、加振力、振幅および加振時間など)によって異なることは容易に予想される。

本実験では、模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響を正確に検証するために、その前提となる造型での欠陥要因を排除するため、消失模型鑄造法にとって有用な砂の流動形態をとるといわれている垂直面円運動振動³⁾を適用した場合の試作をおこなった。それにより、従来の水平軸および垂直軸振動では不十分な砂充填により生産が困難であった深い横穴やアンダカット部などを有する現用の製品模型の鑄造について検討した。

(2) 垂直面円運動振動テーブルの概要

現在、広く用いられている造型用振動テーブルには、その加振方向によって、一軸加振機(垂直面上下直線運動)、二軸加振機(垂直面上下直線運動および水平面前後もしくは左右直線運動)および三軸加振機(垂直面上下直線運動と水平

面前後ならびに左右直線運動)がある。各一組のアンバランスモーターを対向して回転させ直線方向の加振力を得る方法である。それぞれ加振条件に合わせて垂直面(Z軸)および水平面(X軸あるいはY軸)の方向に振動させる方式である。本来、模型がなければいずれの加振機とも砂の充填はかなり容易で、最終的には最も低い振動エネルギーに落ち着くと考えられる。しかし、これらの振動テーブルでは加振条件によっては過剰の振動エネルギーが供給される結果、模型の変形や接着部の破損を生じる。その結果、塗型膜の割れやはく離により焼着や型崩れおよび溶湯への砂の巻込みを引き起こすことになる。ことに、深い横穴やアンダカット部などを有する模型では、不十分な砂充填により鋳物の安定生産が困難となる。これに対して、垂直面円運動振動³⁾¹⁸⁾は、模型の有孔部への良好な砂の流入性を有するため、今後期待される振動テーブルの一つである。

本実験で用いた垂直面円運動振動テーブルを含む装置の概略図を図 2-2-1-1 に示す。振動板(寸法:縦 500×横 500×高さ 480mm)の側面両側に設置した一組のアンバランスモーターの不釣り合いおもりを同方向に回転させて、垂直面(Z軸)に円運動を与える加振方式である。モーターの回転方向は正転および逆転に、さらに回転数を変化させることが可能である。ここで、正転とはモーターの回転方向が時計回りで、見かけの砂の移送方向は手前から奥へ(図 2-2-1-1 の右から左へ)砂が移送される。これに対して、逆転とはモーターの回転方向を反時計方向に回転させ逆向き(図 2-2-1-1 の左から右へ)に砂を移送することである。なお砂投入後のフラスコをクランプした本装置の振動加速度はモーターの回転数が 1780s^{-1} の時、垂直成分: 8.9m/s^2 および水平成分: 2.7m/s^2 の一定である。振動形態としては、垂直 Z 軸を長軸とする楕円の運動軌跡を有する振動(以後、円運動と記す)が得られている。

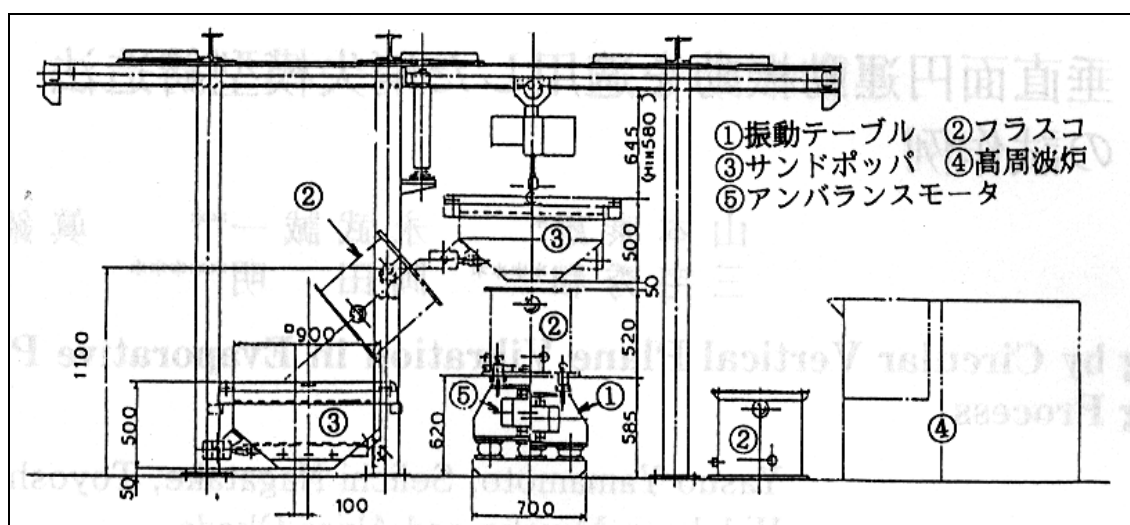


図 2-2-1-1 実験装置

(3) モデル形状による検討

一般に深い横穴やアンダカット部などを有する模型に対しては、加振しながら砂の投入をおこなったり、砂の投入と加振を交互に繰り返す方法や、横穴部などにあらかじめ自硬性砂を埋め込むことで対策をおこなっている。しかし、一方では模型の破損を招いたり、取扱いに注意を必要とすることがある。またそれらの対策を講じると、解枠時に自硬性砂の除去を必要とし、工程数を増加させることになる。これらのことは、消失模型鑄造法の自然解枠（砂処理を必要としない）という利点を失くしてしまうので現状では十分な対策にはなりえていない。

池永³⁾らは T 字を 90 度反転させた片側にのみ水平孔を有するアクリル製のパイプ模型に対する砂充填性への円運動の影響を検討し、円運動は非常に優れた振動形態を有していると報告している。本実験ではさらに砂充填が困難になると思われる大小 2 種類の水平横穴を両側に設けたモデル形状模型における砂充填性を、試作した鑄物の断面観察から評価した。

(a) 模型方案

モデル形状の模型方案を図 2-2-1-2 に示す。模型の材質はいずれもポリスチレン (PS) とポリメタメチルクリレート (PMMA) との共重合品 (共重合比率: PMMA/PS = 85/15、発泡倍率: 40 倍) である。あらかじめ金型成形した 100×100×10mm の大きさのブロック形状模型両側に長さ 70mm に切断した内径 φ20mm および φ30mm のパイプ状模型 (肉厚 5mm) をホットメルトで接着した。さらに、シリカ系の水溶性塗型剤 [通気度: 1.5 (85 ボーメ、20°C、標準法)¹⁹⁾] を厚さ約 1mm になるように塗布し、50°C で強制乾燥した。

(b) 造型法

フラスコ (図 2-2-1-1 参照) 内に乾燥砂 (JIS5 号けい砂) を流入させ、12.7m/s² の上下振動で加振しながらベッドサンドの高さを 160mm に調整した。その上にモデル形状の模型をパイプの軸方向と砂の加振方向が平行となるよう設置した。さらにフラスコ上部まで砂をシャワリング方式で充填させた後、砂充填性の良否を評価するために次の二通りの方法で造型をおこなった。造型法①は垂直面円運動振動を正転 60 秒間のみの加振で造型をおこない、造型法②は垂直面円運動振動を正転 30 秒間、次いで逆転 30 秒間による加振で造型をおこなった。

それぞれの造型終了後、フラスコ上面をビニールシートでシールし、33.3kPa の減圧下で、FC200 相当の溶湯を鑄込温度 1450°C で注湯した。なお、参考までに従来の一軸加振機 (垂直面上下直線運動) による造型についても併せて検討した。

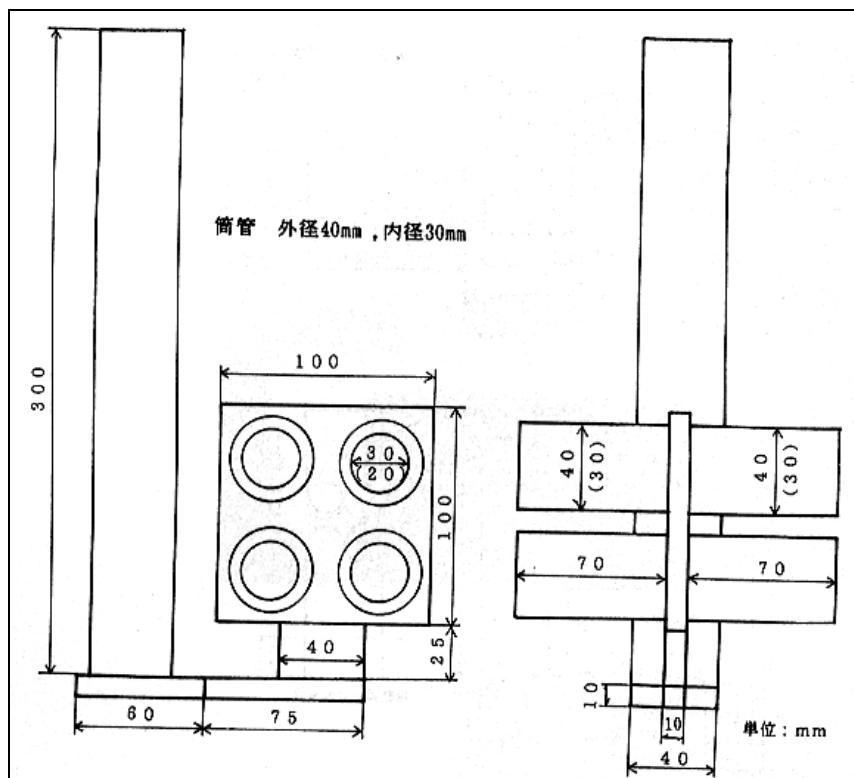


図 2-2-1-2 方案

(c) 試作結果

図 2-2-1-3 に従来の一軸加振方式による造型で鑄造した鑄物切断部を示す。内径 $\phi 30\text{mm}$ の太いパイプ形状の場合でもパイプ内側(中子部)の接着部(深部)に型崩れが見られる。この欠陥は砂充填が完全におこなわれていないことによる溶湯の差し込みに起因するもので、この造型法では生産が困難であることを示している。

図 2-2-1-4 に造型法②を適用した後、鑄造した鑄物の切断部を示す。いずれのパイプ形状とも模型の寸法どおりの鑄物が得られている。これに対して、写真には示していないが造型法①のみでは、パイプ模型の穴の開口部に対して砂の流入性が反対となる接着部(深部)に型崩れが認められた。この傾向はパイプの直径が $\phi 20\text{mm}$ となっても同様であった。このことはパイプの軸方向と砂の加振方向が平行であるため、パイプ模型の穴の開口向きが反対となる場合は穴径とその深さに依存して中子部への砂充填は困難になる³⁾¹⁸⁾ことを示唆している。

以上のことから、正転および逆転の垂直面円運動振動を併用した場合、砂圧効果による押し込み作用³⁾により両サイドの横穴パイプ内部(内径 $\phi 20\text{mm}$ および 30mm の穴深さ 70mm)への砂充填は可能であることがわかった。

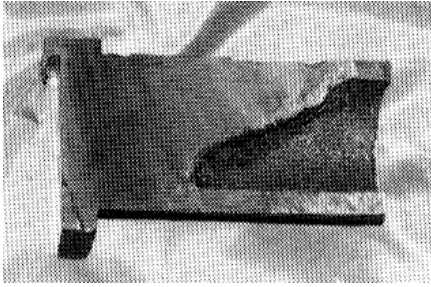


図 2-2-1-3 上下直線運動振動による内径 30mm パイプ部切断面

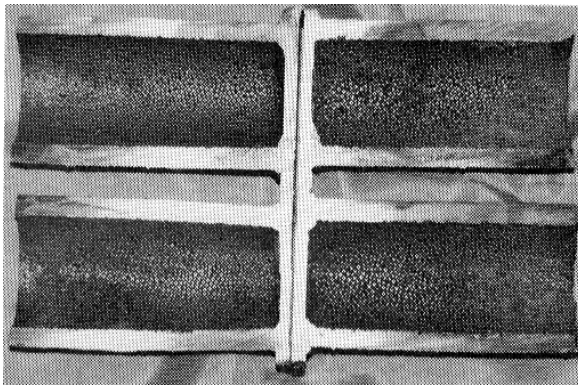


図 2-2-1-4 垂直面円運動による内径 30mm パイプ部切断面

(4) 実製品への適用

製品はブロック形状の冷凍機用コンプレッサシリンダ部品(単量：約 6.4kg)で、外観は単純な箱型に 4 本の脚がついた形状である。しかし、製品前後の同一軸線上に未貫通の深さや形状の異なる横穴が左右対称に設けられている。しかも内部形状は軽量化のため複雑な中空構造で設計されている。

現状では、主型および中子を 6 面給組みのシェル型鑄造で生産されている。このため鑄バリのはつきり、押湯部の切断や中子部の砂落とし作業を必要とする。また従来法では、非常に複雑な型構成となることから、最近の熟練労働者不足と技能者の高齢化などに対して、消失模型鑄造法での対応が期待される製品である。

(a) 造型法

本製品の模型はいかに鑄造方を考慮しても、いずれかでアンダカットとなる。そのため、従来の直線運動による加振方式での造型では砂充填が不十分で、型崩れや、溶湯の差し込み欠陥が発生し、量産が困難であった。

そこで、本実験ではモデル形状模型の試作で確立した正転 30 秒間および逆転 30 秒間の垂直面円運動振動による造型法を本製品模型に適用した。円運動振動

下での砂流入性が模型に対して平行あるいは垂直となるような方向で設計した種々の铸造方案例を図 2-2-1-5 に示す。方案 C の堰は図示していないが方案 D と同じ堰を各脚の底に接着している。表 2-2-1-1 に実験条件を示す。基本的な造型条件は前述のモデル形状模型の試作実験と同じである。湯口棒はアルミナ製の筒管(外径： $\phi 40\text{mm}$ 、内径： $\phi 30\text{mm}$ 、長さ 300mm)、湯道糸は前述の共重合模型のブロックを加工して用いた。

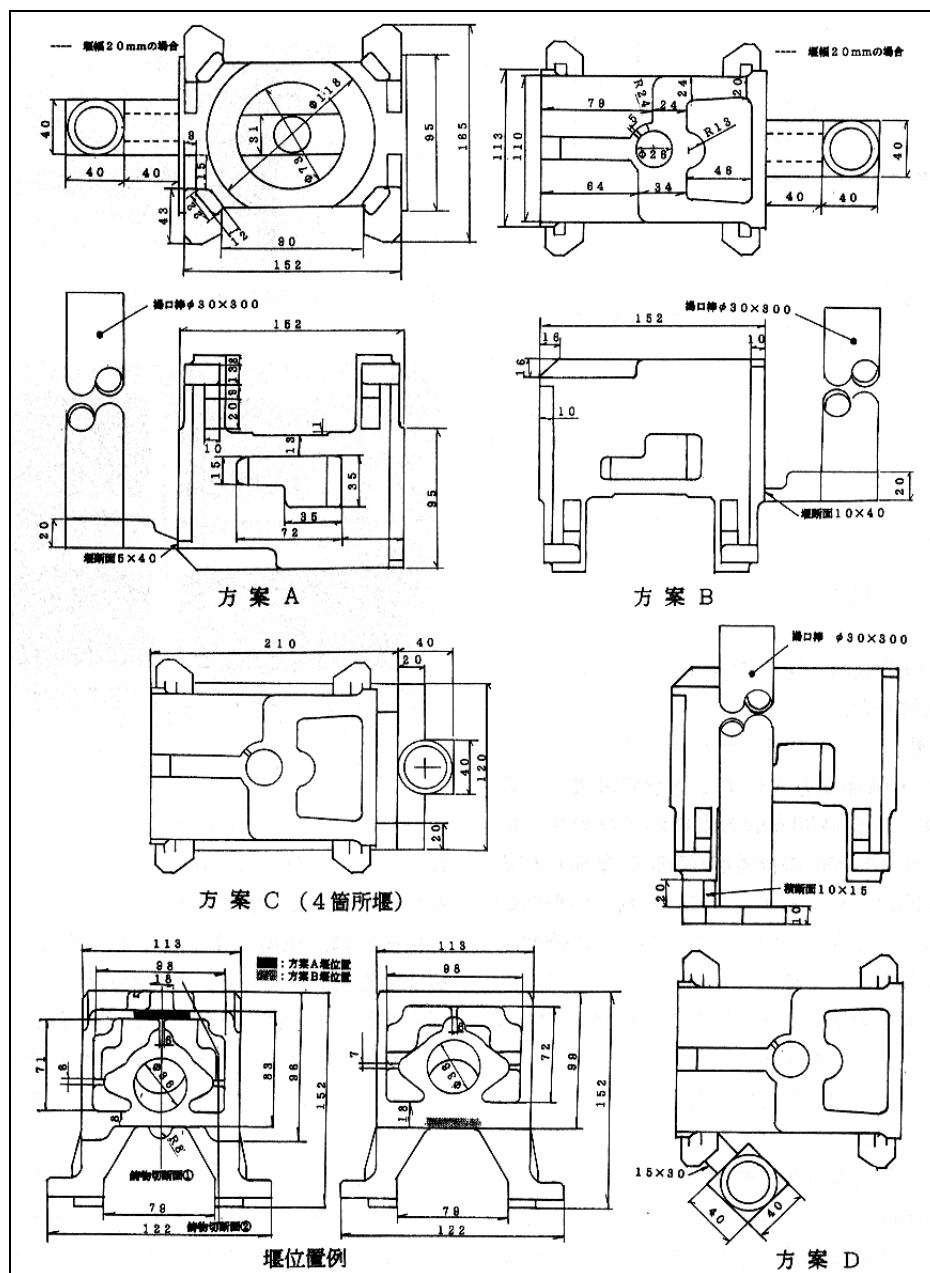


図 2-2-1-5 方案例

表 2-2-1-1 試作実験条件

模型	共重合比率	85%PMMA:15%PS
	発泡倍率	40 倍
塗型剤	種類	シリカ骨材水性塗型剤
	使用濃度	85 ボーメ
	塗型方法	ドブ漬
	乾燥	50℃強制乾燥
	通気度	1.5 (85Be, 293K, 標準法)
造型	砂	5 号けい砂
	加振条件	垂直面円振動：正転 30 秒、逆転 30 秒 上下振動：60 秒
	減圧度	33.3KPa
溶湯	材質	FC200
	鑄込温度	1400℃ (1 個込め方案) 1500℃ (4 個込め方案)

(b) 試作結果

図 2-2-1-6 に鑄物切断面を示す。方案 C および方案 D (図 2-2-1-5 参照) の脚底部に堰を切った押上方案のみ、型崩れや差し込みなどの欠陥が認められずに良好な製品が得られた。他の方案ではいずれも砂充填が十分であると思われるのに、いずれも横穴部やアンダカット部周辺で型崩れが認められた。例えば、深い穴は十分鑄抜きができていのに小穴部に型崩れが認められる。また、塗型が破れて飛ばされた破片や、反対側の穴部に溶湯が差し込んだ状況などが観察される。

このような個所では、型崩れした後の塗型膜の状態から、空洞部に充満した溶湯が製品側に流入したものと考えられる。したがって、適正な方案でない場合は模型内での溶湯の充満状況の差異に起因するガス滞留による型崩れや溶湯の差し込みが生じると考えられる。

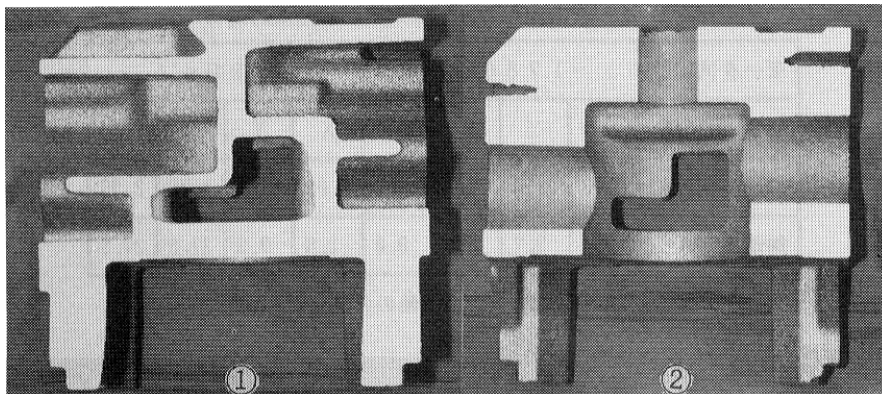


図 2-2-1-6 垂直円運動振動による鋳物切断面

(c) 多数込め方案の検討

図 2-2-1-7 に方案 D (図 2-2-1-5 参照) を基にして設計した 4 個込め押上げ鋳造方案を示す。また、多数込め方案を採用したことによる砂の流入性を評価するために造型時の振動挙動を追跡した。

測定には、図 2-2-1-8 に示す位置でセンサーを模型表面に接着し、ハンディタイプの振動計(ハンディバイブロメータ AVT-3000DZ)を用いた。アンバランスモーターの回転数(s^{-1})を変化させた場合の模型の水平面(X 軸)および Y 軸さらに垂直面(Z 軸)での振幅および加振加速度の関係をまとめて表 2-2-1-2 に示す。

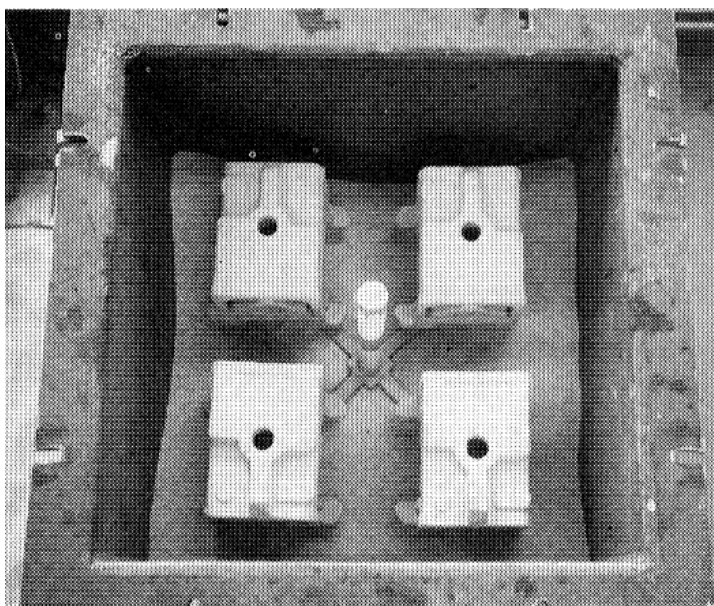


図 2-2-1-7 4 個込め方案

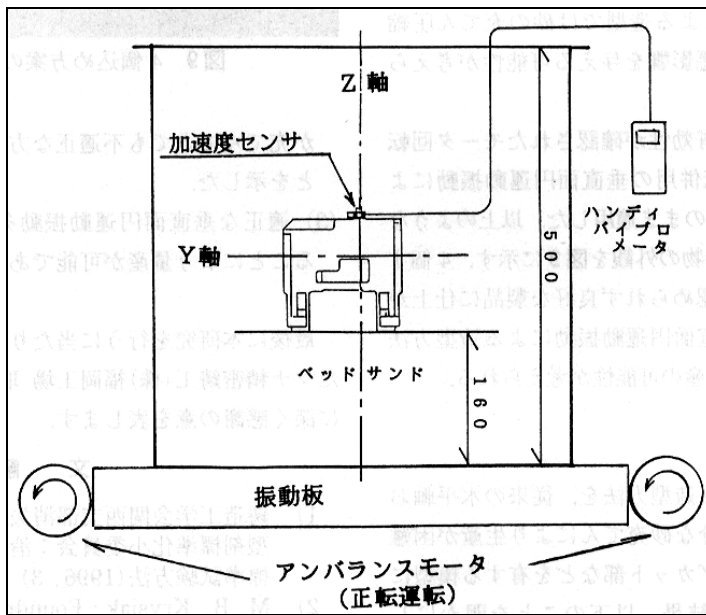


図 2-2-1-8 加速度センサー設定位置

表 2-2-1-2 モーターの回転数と振幅および加速度の関係

モーター回転数	1780 s^{-1}				2590 s^{-1}			
	X	Y	Z	3D	X	Y	Z	3D
振幅 mmp-p	0.03	0.16	0.55	0.91	0.03	0.17	0.79	2.76
加速度 m/s^2	0.6	2.7	8.9	9.0	1.8	7.3	27.8	27.8

注) 3D: X軸、Y軸およびZ軸の各測定値の合成値

模型の長手水平方向に対するY軸およびZ軸の加振加速度は、いずれもモーターの回転数の増加にともなってそれぞれ大きくなるが、X軸の振動はほとんど無い。このことから、 1780 s^{-1} の回転数の造型では砂粒体層に有用な振動流動状態（円運動振動）が得られていることを示唆している。これに対して、 2590 s^{-1} の回転数の場合はZ軸の加振加速度が 27.0 m/s^2 と異常に大きくなり、振幅合成値も 2.76 mm と大きな値を示した。そこで 2590 s^{-1} の回転数による造型では砂の充填圧縮性や模型の変形に対して悪影響を与える可能性が考えられた³⁾。

したがって、ここでは有効性が確認されたモーター回転数 1780 s^{-1} での正・逆転併用の垂直面円運動振動による造型条件(表 2-2-1-1 参照)をそのまま適用した。以上のような条件で造型して鋳造した鋳物の外観を図 2-2-1-9 に示す。

4個すべての鋳物には型崩れは認められず良好な製品に仕上がっている。このことは垂直面円運動振動による造型方法の有効性を示すと同時に量産の実現を示唆している。



図 2-2-1-9 4個込め方案の型ばらし状況

(5) 結言

垂直面円運動振動による造型方法を、従来の水平軸および垂直軸振動では十分な砂充填がおこなえず、生産が困難であった深い横穴やアンダカット部などを有する模型に適用して試作した。その結果、以下のことを明かにした。

- ①垂直面円運動振動による造型は横穴への砂充填に対して有効であることを明かにした。
- ②垂直面円運動振動による造型で横穴部に十分に砂が充填できても、不適正な方案では型崩れを生じることを示した。
- ③適正な垂直面円運動振動条件および方案を選定することにより、従来は不可能であった横穴を有する鋳物形状でも、量産が可能であることを示した。

2-2-2 パイプ形状模型を用いた消失模型鑄造法における造型と鑄造特性

(1) 緒言

従来の消失模型鑄造用振動テーブルは直線往復運動が主流であった。しかしこのタイプの振動テーブルでは方案や振動条件を変化させて造型しても、製品横穴部の砂充填不良による型崩れを防止することができなかった。近年、垂直面円運動による振動テーブルが開発され^{3) 20)}、振動鑄枠内での砂圧特性²¹⁾および砂の圧縮性や水平孔への砂の充填特性^{22~24)}に関する研究報告も比較的数量多い。

この垂直面円運動振動テーブルを、これらの鋳造品の造型に適用することで、型崩れの無い鋳物の鋳造が可能になることが報告²³⁾されている。しかし長尺の穴形状の鋳物製品などでは、十分に砂充填されているにも関わらず偏肉や型崩れを生じ鋳造不良となる場合がある。さらには縦置きのパイプ形状の鋳物では、パイプ内の砂の自重による圧力は期待されるものの模型の分解ガスが滞留しやすいため鋳物の中央部では減圧による形状の維持が期待できないなどの問題がある。特に、砂の自重による圧縮力、砂粒と壁面との摩擦力および減圧による大気圧の载荷効果²¹⁾による圧力などが複雑に影響することで、新たな欠陥が発生している。しかしながら、これらの現象を視野に入れた系統的な研究は見当たらない。

砂充填が十分でも模型の熱分解ガスが一時的にでも滞留した場合、砂の自重による圧縮力が期待できず、形状保持するだけの強度を維持できないので、型崩れや中子部の浮力による偏肉が生じると考えられる。

そこで本研究では、まず、パイプ形状の亚克力模型を用いて、内部への振動充填特性を測定し、次に偏肉や型崩れを生じやすい形状で、しかも中子部が片持ちとなる底付きの長尺パイプ形状の模型を用いて鋳造した鋳物の外観や断面観察から型崩れや偏肉の状況を評価し、振動充填特性や減圧度、塗型の通気度との関連性について考察した。

(2) 実験方法

(a) 実験装置

垂直面円運動振動テーブルの振動周波数は、上下振動および円振動とも 30～45 Hz の範囲で、また円振動の場合はモーターの回転方向（正転、逆転）が可変できる。なお、正転とはアンバランスモーターをウエート側から見て右回転させ、逆転とは左回転させた場合である。鋳枠（以後、フラスコと称する）は 500W×500L×480H(mm) の大きさである。振動加速度計にはハンディタイプのバイプロメーター（AVT-3000DZ）を用いた。水平方向における振動加速度測定用のセンサーは垂直面円振動の運動形態が評価できるようにパイプ軸を円運動の垂直面と平行になる Y 軸に合わせて設置した。なお、X 軸は横穴軸に直角な方向を、Y 軸は平行な方向を、Z 軸は垂直方向を示している。

一般にアンバランスモーターを用いた振動テーブルでは剛性に問題がない場合、アンバランス度と载荷重量が一定であれば、振動数に関わりなく振幅は一定となり、任意の振動方向の振動加速度 G と振動数の関係は、

$$G = r \omega^2 / g = 0.56 N^2 A \times 10^{-6}$$

(r ; 振幅、 ω ; 振動角速度 rad/s、 g ; 重力の加速度 9.8 m/s^2 、 N ; 振動数 rpm、 A ; 両振幅 mm_{p-p})

によって示される²⁶⁾。本実験に使用した垂直面円振動テーブル装置の振動特性においても、上下振動および円振動の場合ともに上式を満たすものであった(図 2-2-2-1)。

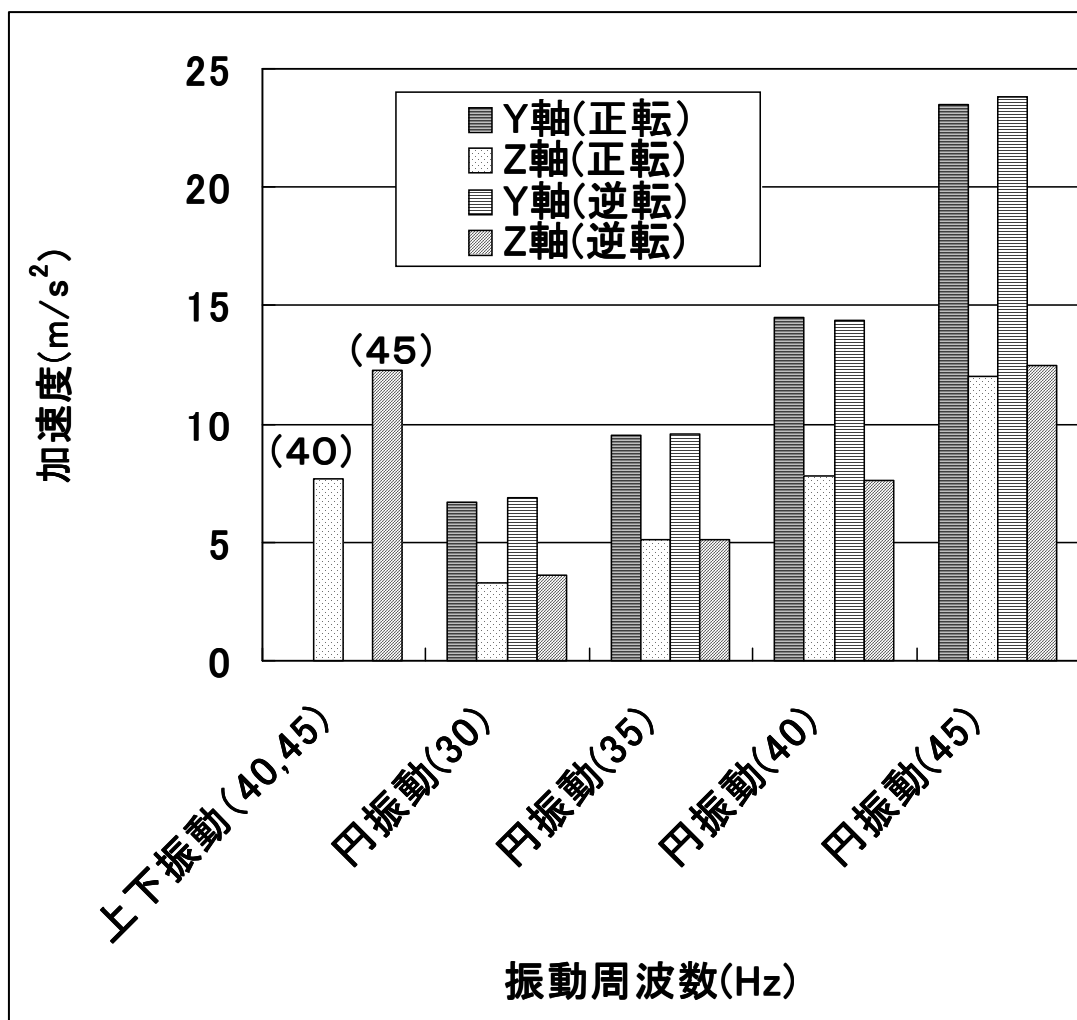


図 2-2-2-1 振動モーター振動周波数と加速度の関係

なお垂直面円振動では、正転と逆転の差はほとんど見られないが、Y軸方向の振動加速度はZ軸方向のものに比べると常に大きく、また加速度と比例関係にある振幅についてもZ軸方向よりもY軸方向が大きくなった。そこで、本垂直面円振動テーブルの運動軌跡は、真円ではなく、Z軸を短径(約0.25 mm前後)、Y軸を長径(約0.45 mm前後)とする楕円であると言えるが、横孔の砂詰めに対しては、優れた砂充填特性を示すことで知られている真円運動軌跡を有する円振動テーブル³⁾²⁰⁾²⁴⁾²⁶⁾と同様に上下振動よりも良好だと考えられる。

(b) 砂充填実験

・アクリル樹脂模型

中子部への砂充填を確認するために、市販のパイプ形状のアクリル樹脂製の模型(以後、アクリル模型と称す)を用いた。アクリル模型の形状は、鑄造評価用の発泡模型に砂が十分に充填されていることを確認することを目的に肉厚 5 mm で、内径 30 mm を用いた。

・実験条件

模型方案：パイプ形状模型の横置き方案を図 2-2-2-2 に示す。アクリル模型をそれぞれ 100 mm、150 mm および 200 mm 長さに切断し、同じくアクリル模型で作製した湯道および堰部ともそれぞれ、市販の二塩化メチレン系接着剤を用いて接続した。湯口にはアルミナ製の陶管(内径 30 mm×高さ 300 mm)を用いた。

砂 充 填：充填砂には JIS 5 号けい砂を用いた。まずフラスコ内に床砂を底部から高さ 180 mm になるよう Rain Fill 法²⁷⁾により投入し、振動加速度 14.7 m/s^2 の上下振動により充填した。この後アクリル模型を設置し、フラスコ上面まで砂を Rain fill 法により、投入し所定の振動条件で中子部に砂を充填した。

かさ密度：それぞれのアクリル模型に充填された砂の重量から体積当りのかさ密度 (g/cm^3) を求めた。すなわち、砂充填後、注意しながらアクリル模型上端まで砂を取り除き、砂が漏れないように開口部を板で塞いで各中子部に充填された砂の重量を求めた。

なお、底つきの中空アクリル模型(内径 30 mm×高さ 200 mm)の開口部を上向きにして縦置き設置し、つき固めにより、その中子部に充填された砂(JIS5 号ケイ砂)を最も堅く充填したときの最終かさ密度は 1.77 g/cm^3 である。

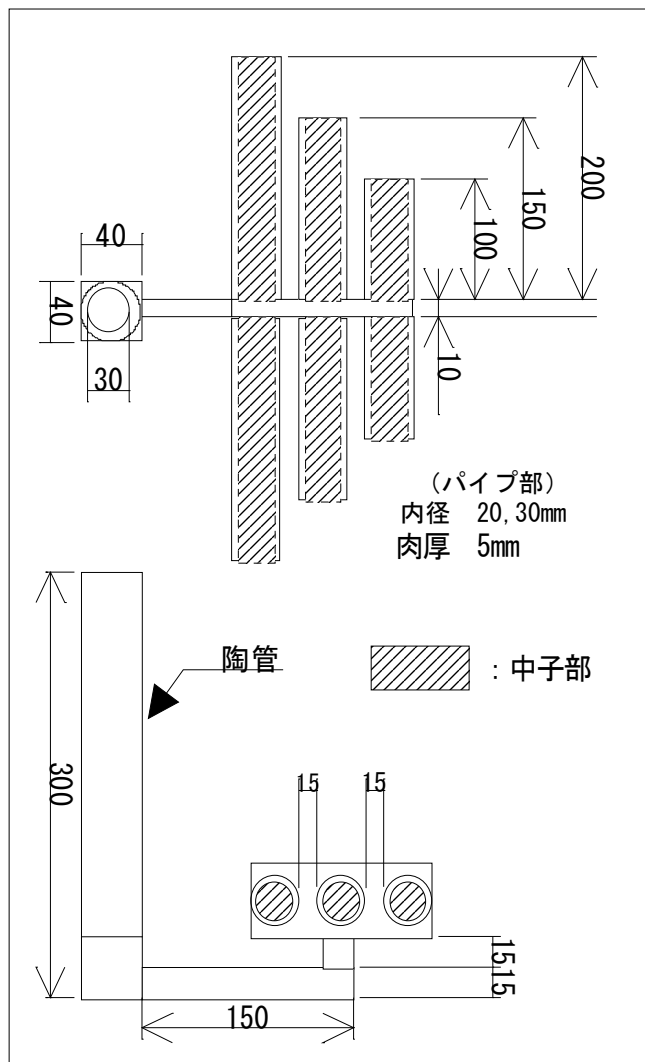


図 2-2-2-2 パイプ形状模型の横置き方案

(c) 鑄造実験

- ・消失模型：砂充填に用いたアクリル模型と同じ形状の消失模型を用いた。すなわち、鑄鉄鑄物の製造に広く使用されているポリメタメチルアクリレート (PMMA) 75 % とポリスチレン (PS) 25 % を共重合したビーズを発泡倍率 40 倍で金型成型した内径 30 mm、長さ 300 mm のパイプ状模型および板を用いた。これらを所定の寸法に切り出し、酢酸ビニール系接着剤で組み立てた。使用した塗型剤はシリカ骨材の水溶性塗型剤であり、これを 85 ボーメに調整した。模型への塗布は浸せき法でおこない、さらに、50°C で強制乾燥させた。

- ・実験条件： 鋳造条件を表 2-2-2-1 に示す。パイプ模型を最適の振動条件で砂充填し、フラスコ上面に減圧時のシール用ビニールシートを被せ、湯口棒先端に合わせて湯鉢を置いて造型した。フラスコ内を大気圧から 33.3 kPa の圧力差で減圧した条件下で FC200 相当のねずみ鋳鉄溶湯を 1450℃で注湯した。得られた鋳物の外観ならびに断面観察から型崩れや偏肉の状況を評価した。また、注湯時に長さ 200 mm のパイプ模型のうち的一本に、底部から 50 mm の位置の中子側と外周側および開口部から 50 mm の位置の中子側の計 3 カ所に内径 2 mm のステンレスパイプを設置し、ガス圧測定装置 (DA-2000) を用いてガス圧測定をおこなった。

表 2-2-2-1 鋳造条件

模型	共重合比率	75%PMMA:25%PS
	発泡倍率	40 倍
塗型	種類	シリカ骨材水性塗型剤
	使用濃度	85 ボーメ
	塗型方法	ドブ漬
	乾燥	50℃強制乾燥
	通気度	1.5 (85Be, 293K, 標準法)
造型	砂	5 号けい砂
	加振条件	垂直面円振動 正転 30 秒、逆転 30 秒 振動周波数：40Hz
	減圧度	33.3KPa
溶湯	材質	FC200 相当
	鋳込温度	1450℃

(3) 実験結果および考察

(a) 砂充填特性

上下振動の振動周波数 45 Hz で 2 分間加振をおこない、円振動の振動周波数を 30~45 Hz の範囲で、それぞれ正転で 1 分間加振した後、さらに逆転で 1 分間加振をおこなった時のかさ密度の変化を図 2-2-2-3 に示す。ただし、パイプ模型は垂直振動面に対して左右 2 本ずつあり、それぞれの開口部（砂流入口）は反対方向を向いている。左右のパイプのかさ密度測定結果に大きな差異が認められなかったことから、ここでの充填かさ密度は、左右のパイプにおける平均値で示した。

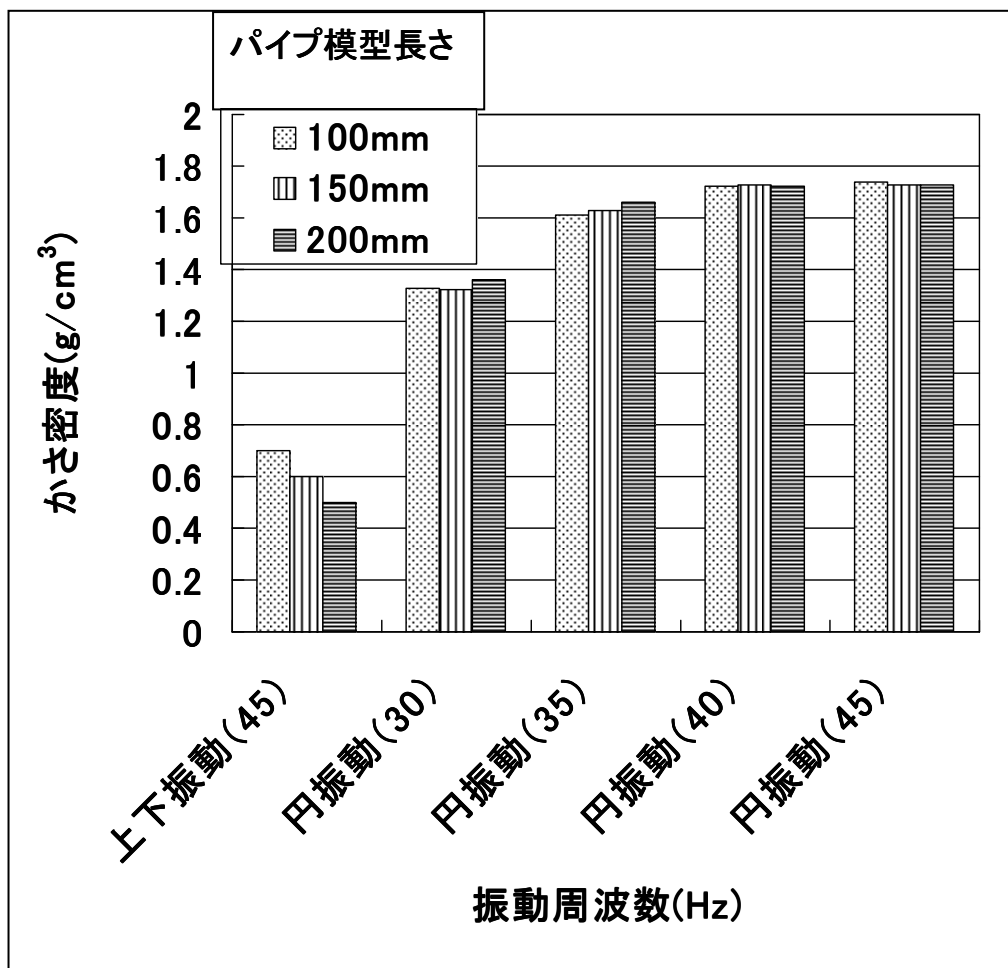


図 2-2-2-3 振動モーター振動周波数とかさ密度の関係

円振動の振動周波数の増加に伴っていずれのパイプ模型ともかさ密度が高くなり、40 Hz 以上（垂直成分：7.84 m/s²、水平成分：14.7 m/s² 以上の振動加

速度) で一定値を示している。同じ振動周波数に対して、パイプ模型長さによるかさ密度の違いはほとんどない。また、円振動では実験をおこなった範囲内で最も悪条件となる 30 Hz でも上下振動の 45 Hz の場合よりもかさ密度が高い。このことは、円振動の Y 軸方向への振動加速度の効果が大きく、砂の充填性に関する優位性を示していると考えられる。

次に、円振動モーターの振動周波数を 40 Hz 一定にして、加振時間を 60 秒まで変化させた時のかさ密度の変化を図 2-2-2-4 に示す。こちらも同じ振動周波数に対して、パイプ模型長さによるかさ密度の違いはほとんどない。0 秒は砂に埋設し加振する前の状態で、加振時間 30 秒以上で各パイプ模型ともかさ密度がほとんど一定となり、この時のかさ密度は先に調べた最終かさ密度と同じ 1.77 g/cm^3 になっていることから横穴に対して十分に砂が充填されていることが確認された。なお、パイプ模型に塗型した場合についても同様に検討したが砂充填性に違いは認められなかった。

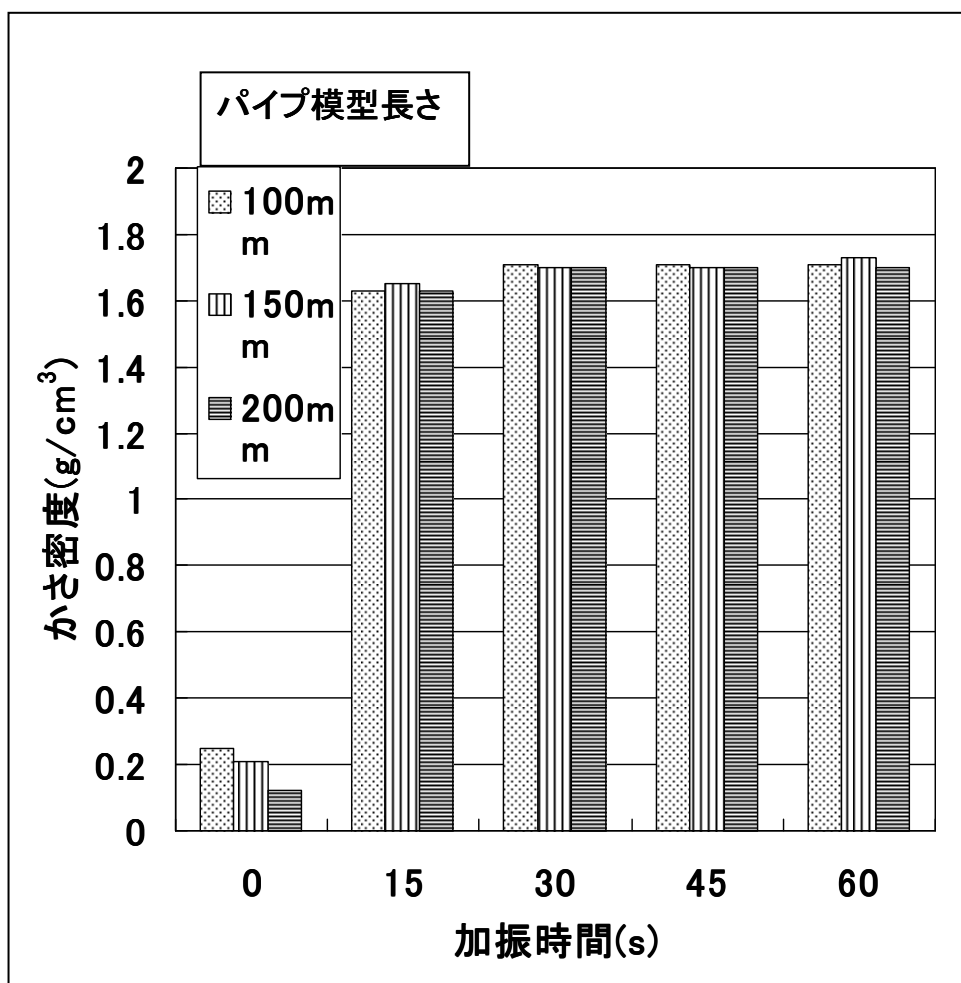


図 2-2-2-4 加振時間とかさ密度の関係

以上のことから、本実験装置の場合、円振動の振動周波数 40 Hz 以上で 30 秒ずつ正転、逆転の加振をおこなえば最大のかさ密度が得られることが明らかとなった。

(b) 鑄造特性

得られた鑄物の外観を図 2-2-2-5 に示す。いずれも模型と同じ形状の鑄物が得られたが、一部模型接続部に浮かされによると思われる数 mm 程度の貫通孔が認められる。鑄物の断面を図 2-2-2-6 に示す。先に示したアクリル模型の中子部の砂充填は十分であったが、長さ 100 mm のパイプ鑄物を除いて全て中子部の浮かされによる貫通孔や型崩れが認められる。パイプ先端部は模型どおりの肉厚 5 mm であるが、薄いところで肉厚 0~1 mm、厚いところで 11~12 mm の範囲で偏肉を生じており、パイプ部の長さが長くなるほどその程度は著しくなっている。



図 2-2-2-5 横置き鑄物外観



図 2-2-2-6 横置き鋳物切断面

ガス圧測定の結果、注湯後に到達する最高ガス圧は、大気圧から 33.3 kPa の圧力差で減圧した条件下を原点とした場合、パイプ模型の底部から 50 mm 位置の中子部が 36.8 kPa、外周側が 2.0 kPa、開口部から 50 mm の中子部が 22.0 kPa となった。

なお、参考までに縦置き方案での注湯実験をおこなった。消失模型を用いた縦置き方案を図 2-2-2-7 に示す。砂充填は、上下振動のみで振動周波数 45.9 Hz で 2 分間加振をおこなった。得られた鋳物の断面を図 2-2-2-8 に示す。縦置き方案では、砂の自重による模型パイプ内への高い充填効果により砂のかさ密度が 1.75 g/cm^3 と最終かさ密度に近い値が得られたが、中子部底部では型崩れが認められた。

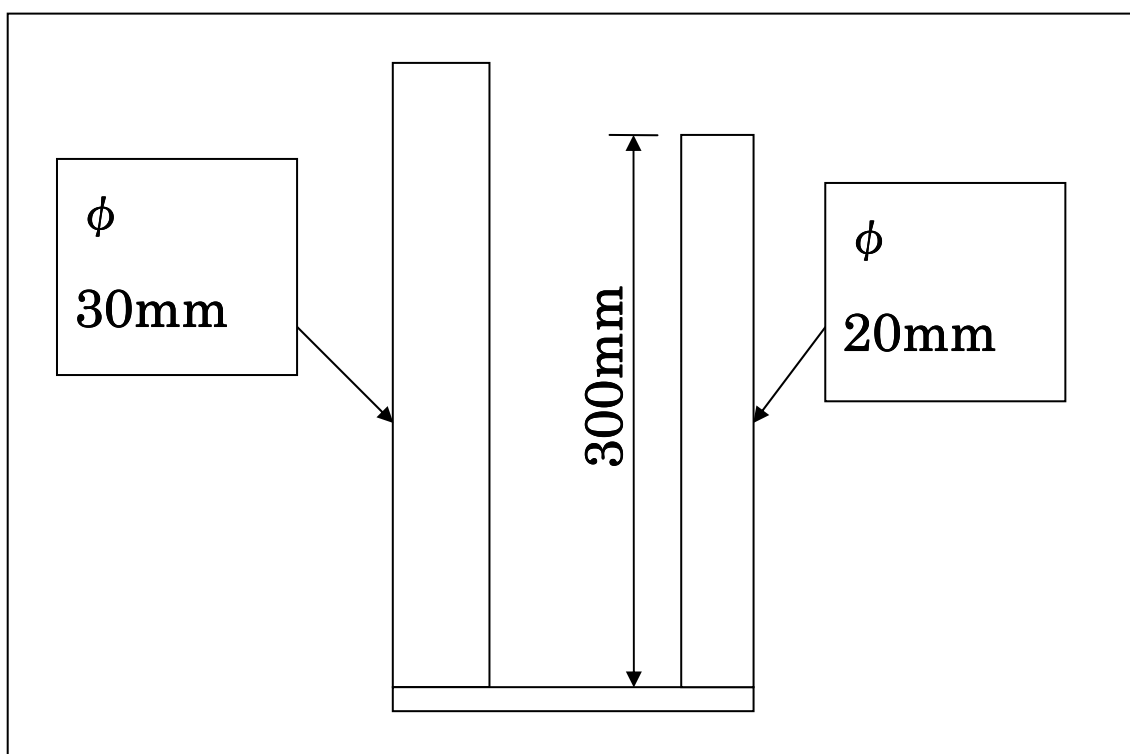


図 2-2-2-7 縦置き方案



図 2-2-2-8 縦置き鋳物切断面

以上のことから、一端を塞いだパイプ形状の模型を横置きおよび縦置き方案で造型し注湯をおこなうと、いずれの場合も、中子部に十分に砂充填されているにも関わらず偏肉および型崩れなどの欠陥が発生した。このことは注湯時に必要な中子部分の型強度は砂の自重による圧力や砂粒と壁面との摩擦力だけでは不足していることを示唆しており、ガス圧測定の結果からも伺える。よって注湯時に中子部の形状を保持するためには、砂の自重による圧力や砂粒と壁面との摩擦力に加えて、減圧による鋳型保持力が影響していると考えられる。すなわち、減圧状態の崩壊が型崩れにつながり、さらには、それによる鋳型保持力の低下により、溶湯充満後に中子部の浮かされによる偏肉が発生すると考えられる。その発生機構を図 2-2-2-9 に模式図で示す。上図に示すように、模型から中子部へ排出される熱分解ガスが滞留することにより、減圧度の低下により鋳型保持力が低下し、型崩れが発生する。また、下図に示すように、中子部の浮かされについては、溶湯が充満した状態で中子部の幅木が片持ち状態であ

ることから、鑄型保持力が低下し、溶湯圧および中子部の浮力に負けたことが原因と考えられる。

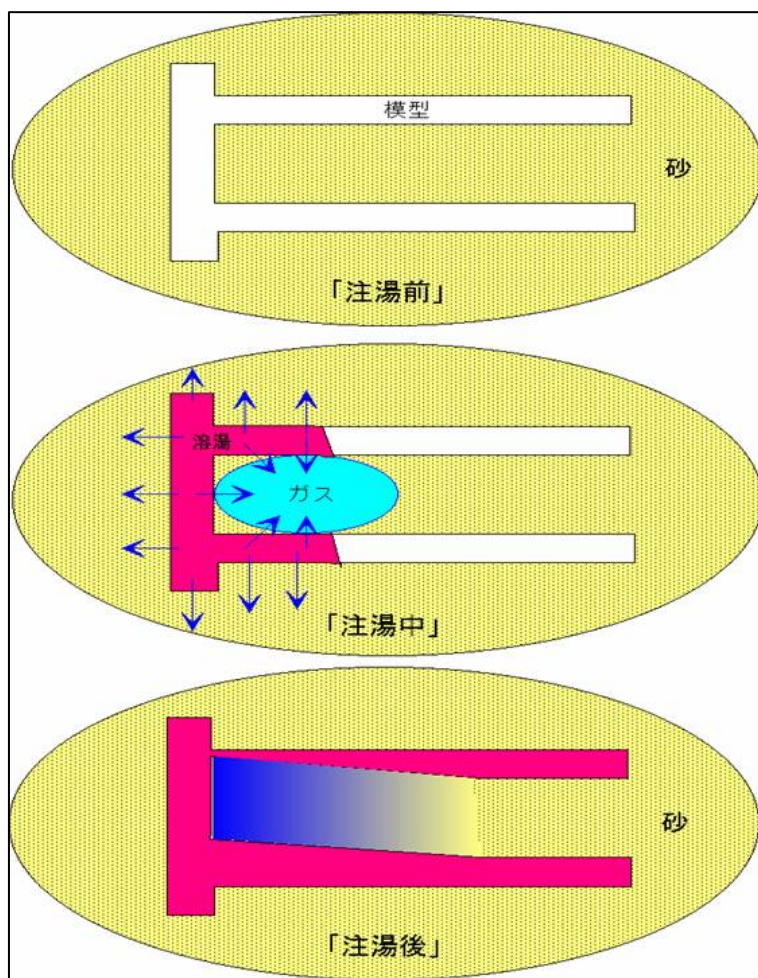


図 2-2-2-9 鑄造欠陥発生原因 模式図

これらの欠陥対策として、熱分解ガス自体の中子部への流出を抑制するために、中子部への低通気度塗型を塗布して検討した。すなわち、消失模型全体に塗型（通気度：1.5）を塗布乾燥した後、再度、中子部のみ通気度の低い塗型剤（通気度：0.4）を重ね塗りし、前回と同じ条件で鑄造をおこなった。横置きおよび縦置き方案で得られた鑄物の断面を図 2-2-2-10 および図 2-2-2-11 にそれぞれ示す。いずれの場合も型崩れは防止できたが、偏肉の発生を抑えることはできなかった。また、同時におこなったガス圧測定の結果、注湯後に到達する最高ガス圧は、大気圧から 33.3 kPa の圧力差で減圧した条件下を原点とした場合、パイプ模型の底部から 50 mm 位置の中子部が 30.0 kPa、開口部から 50 mm の中子部が 15.2 kPa となり、中子部での発生ガス圧の減少を確認することができた。

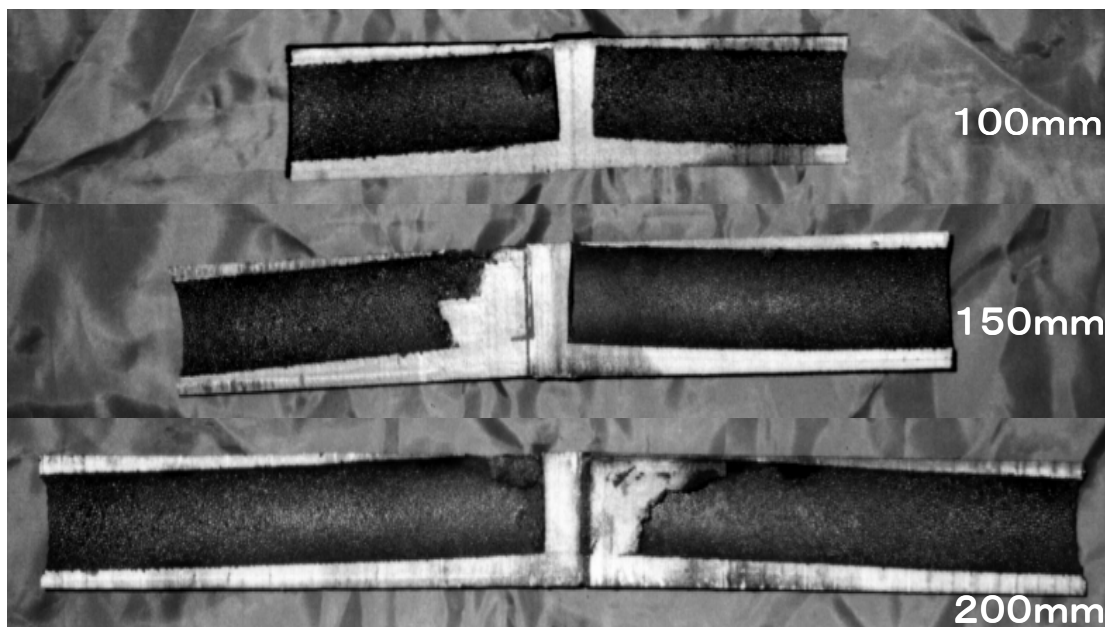


図 2-2-2-10 横置き方案 低通気度塗型塗布铸造例



図 2-2-2-11 縦置き方案 低通気度塗型塗布铸造例

なお、本実験では検討していないが偏肉の発生を抑えるためには、減圧度を強くする方法や模型より長めの中空パイプを中子部へ埋めこむ方法などが示唆される。さらにはフラスコ底面からの吸引減圧を利用し、開口部を下にして造型する方法などが考えられる。しかしいずれの場合も、塗型の通気度選定や砂充填の工夫が必要となる。

(4) 結言

本研究では内径 30 mm で長さを変化させたパイプ形状模型への砂充填性を評価し、得られた造型条件に基づき試作をおこなって铸造特性を検討した。その結果、本実験条件下で以下の内容が明らかになった。

- ① 振動周波数 40 Hz の円運動振動で、正転、逆転をそれぞれ 30 秒おこなえば、パイプ内のかさ密度は十分に高くなる。
- ② パイプ形状模型を鑄造した時に発生する中子部の偏肉および型崩れは、砂の充填が十分であっても減圧による型強度の維持が困難である場合に発生する。
- ③ 型崩れ対策として、中子部に低通気度塗型剤を重ね塗りすることで防止効果が見られる。

2-2-3 消失模型鑄造法におけるフラン樹脂再生砂使用の影響

(1) 緒言

消失模型鑄造法を採用した工場では、設備のスペースの問題や生産量との兼ね合から、専用ラインを設置しないで、他の鑄造法の砂処理設備を兼用して再生砂を再利用している場合がある。特に製品の種類や形状およびサイズから、フラン樹脂鑄型からの再生砂（以下再生砂と記す）を用いた場合、再生砂に付着している残留樹脂やその中に含まれる硬化剤などの影響が生じると予想される²⁸⁾。本研究では、消失模型鑄造法に再生砂を使用した場合の鑄造品および設備への影響について検討をおこなった。特に再生砂中に残留するフラン樹脂および有機スルホン酸系硬化剤による鑄鋼への加炭現象および球状黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化阻害現象を研究の対象とした。また、実際に再生砂による消失模型鑄造法での生産をおこなっている工場の消失模型鑄造用設備への影響を調査した。

(2) 実験方法

実験で使用した再生砂の性状を表 2-2-3-1 に示す。この砂は、フラン樹脂鑄型砂を用いて鑄鉄鑄物を 80 トン/月生産している工場で再利用されている。この工場の再生砂総使用量は約 20 トンで、毎月約 1 トンの新砂が補給されている。

この工場の砂再生装置は衝撃式粘結剤剥離方式²⁹⁾を採用している。この装置の処理能力は、1.5~5 トン/hr（有機系）であり、装置はセル数：2 組、ブロー風量：26m²/min、ブロー風圧 1200mmAq、で構成されている。

フラン樹脂鑄型砂の再生方式は、日本ではロータリークレーマーによる機械再生が主体である³⁰⁾。その砂の再生（研磨）は、粘結剤のフラン樹脂を残すように再生される。近年では、鑄肌をよくするためのガス欠陥対策の一環として、フラン樹脂は、出来るだけ取り除く方向にある³¹⁾。

なお、一般的な消失模型鑄造用の設備の概略図を図 2-2-3-1 に示す。装置は、振動テーブル、バキューム装置、フラスコおよびサンドホッパーで構成されている。

表 2-2-3-1 試験に用いたフラン樹脂再生砂

元砂	J I S 5 号ケイ砂
粘結剤	高品位フラン樹脂
硬化剤	有機スルホン酸系
砂再生処理	高速気流によるスクラッピング行程により再生

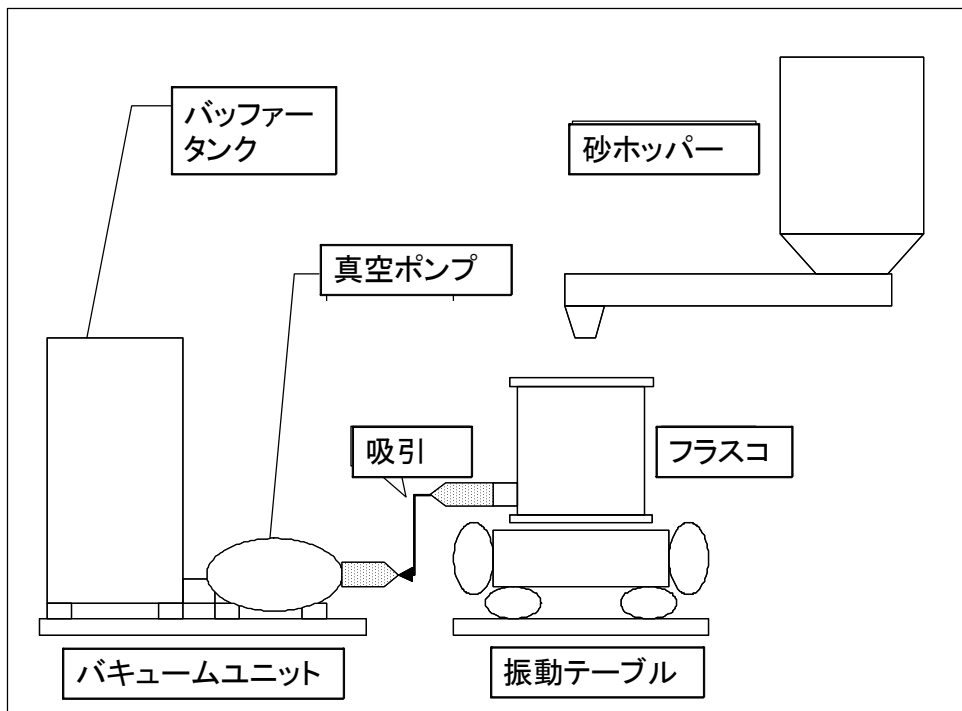


図 2-2-3-1 消失模型鑄造用設備の概要

(a) 砂の分析

再生砂の特性を把握するために、鑄造工場内の再生砂ホッパーから砂再生処理後の砂を採取した。新砂（フリーマントル5号）およびフラン樹脂を用いて硬化処理した砂を比較のため用いた。砂中の硫黄分析は、「原油および石油製品の硫黄分析」（JIS K2541）に準じた。測定方法は燃焼管式空気法である。あらかじめ 1273K に加熱した石英製燃焼管中に試料を挿入し、空気を導入して砂表面の付着物を燃焼させる。この時、生成した硫黄酸化物を過酸化水素水に吸収させ、得られる硫酸を水酸化ナトリウム標準液で中和滴定して硫黄分を求めた。

砂の表面状態は、走査型電子顕微鏡 (JSM-5800LV 型) を用いて SEM 観察した。帯電防止のため、再生砂の表面に厚さ 10nm の金を蒸着した。また、同時に砂表面をエネルギー分散型 X 線分析装置 (JED-2120 型) を用いて EDS 分析した。

砂全体の性状を把握するために、「粒度分布試験」(JIS Z2602) に準じて砂の粒度指数を求めた。砂はあらかじめ鋳物砂試験用 (ロータップ型) ふるい機で 15min 間ふるい分けし、それぞれのふるい目で測定した重量より算出した。

また、「通気度試験」(JIS-Z2603) に準じて、砂の通気度を求めた。それぞれの砂に 6%の水ガラスを添加し混練後、鋼製の試験筒内でき固めて試験片を作製した。

(b) 鋳造品への影響

再生砂を用いた場合の鋳造品に及ぼす影響を検討した。鋳造条件を表 2-2-3-2 に示す。肉厚による影響を検討するために用いた階段状試験片の概略図を図 2-2-3-2 に示す。肉厚は、最小 5mm から最大 30mm まで変化させた。最大肉厚側に堰を設置して、押し上げ方で注湯した。この階段状試験片の消失模型は、発泡倍率 40 倍のポリメタメチルクリレート (以下 PMMA と記す) のブロックから、マシニングセンターを用いて所定の寸法に切削加工した。模型は、シリカ骨材の水溶性塗型剤を 85Be' で塗型後、約 50°C で強制乾燥した。塗型した模型は、湯口系とともに減圧可能な鋳枠 (以下フラスコと記す) 内に、再生砂を用いて加速度 12.7m/s^2 の上下振動で充填した。フラスコの上面をビニールシートでシールした後、所定の条件で減圧した。FCD450 溶湯 (C : 3.7%、Si : 2.3%、Mn : 0.3%、P : 0.03%、S : 0.01%) の場合は、33.3kPa に減圧し、1450°C の温度で鋳造した。また SC450 溶湯 (C : 0.3%、Si : 0.3%、Mn : 0.7%、P : 0.02%、S : 0.02%) の場合は、46.6kPa に減圧し、1600°C の温度で鋳造した。

図 2-2-3-2 に示す階段状試験片の各肉厚で金属顕微鏡組織 (倍率 100 倍) および SEM 像 (倍率 300 倍) を観察した。

表 2-2-3-2 鑄造条件

模型	材質	PMMA	
	発泡倍率	40倍	
塗型剤	種類	シリカ骨材水性塗型剤	
	ボーメ度	85Be	
	塗型方法	ドブ漬け	
	乾燥	323K強制乾燥	
	通気度	1.5(85Be,20°C,標準法)	
造型	砂	フラン樹脂再生砂 (5号ケイ砂)	
	振動方向	上下振動	
	振動時間	1min	
	加速度	1.3G	
溶湯	材質	FCD450	SC450
	鑄込温度	1480°C	1610°C
	減圧度	33.3kPa	46.6kPa

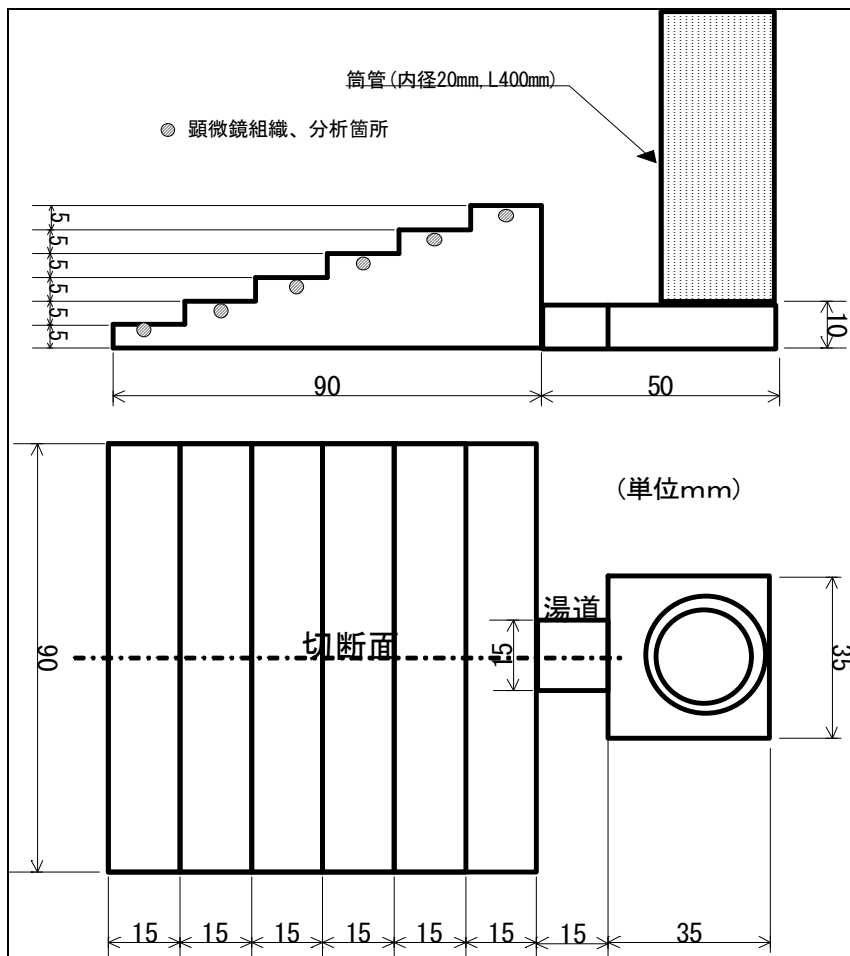


図 2-2-3-2 消失模型用の階段状試験片概略図および模型方案

(c) 設備への影響

造型砂として再生砂を使用している工場の消失模型鑄造用の設備への影響を検討した。この設備の概略図を図 2-2-3-3 に示す。フラスコの大きさは、幅：1000mm×1000mm、高さ：1400mm（継ぎ枠の高さ：400mm を含む）である。図 2-2-3-3 中の拡大図に示すように、フラスコ内部は、底部にパンチングメタルと金網で区切られた高さ 200mm の減圧室を持つ 2 重底の構造である。

また、この工場では、再生砂を利用し、消失模型鑄造法によって 20 トン／月の鑄物を生産し、約 5 年間使用されている。

高さ 200mm の深さを持つフラスコ底部に設けられた減圧室の金網に発生した赤色および黒色の堆積物の外観を図 2-2-3-4 に示す。これらの堆積物について SEM 観察（倍率 300 倍）および蛍光 X 線分析（Rigaku-3270E 型）と EDS 分析した。

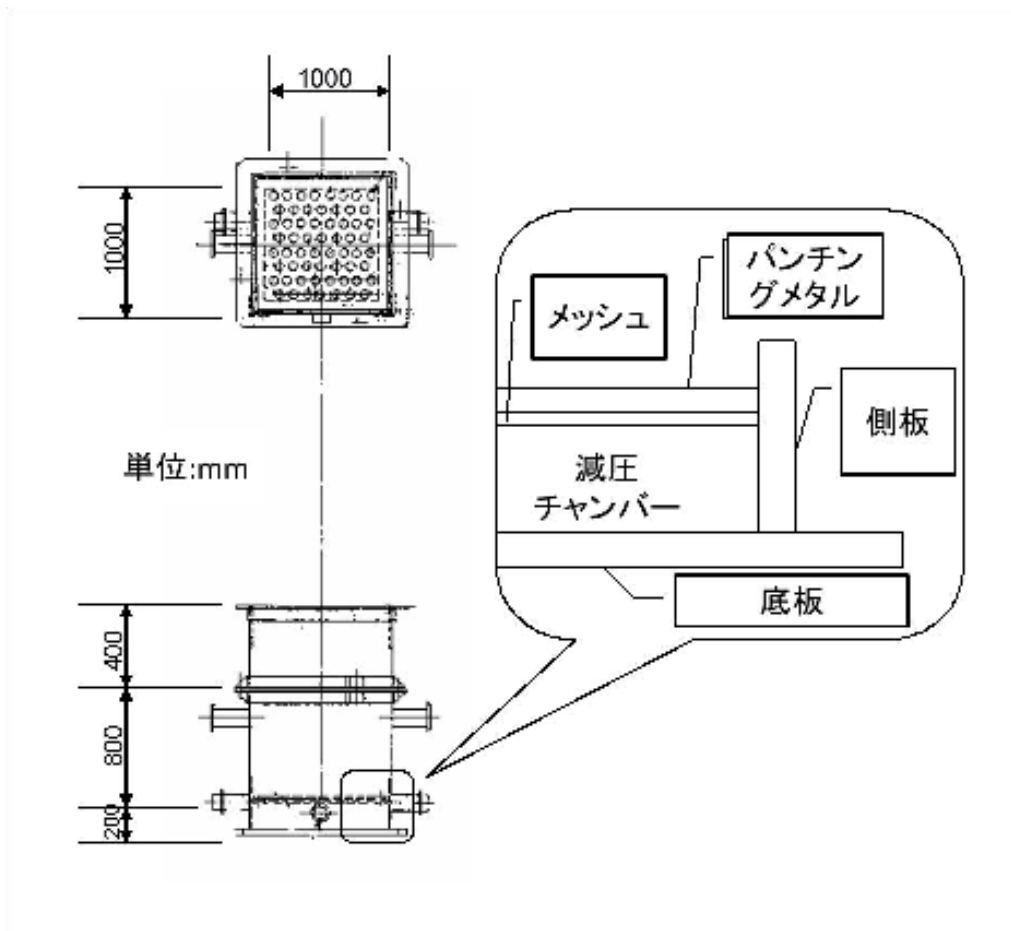


図 2-2-3-3 消失模型鑄造法用フラスコの概略図



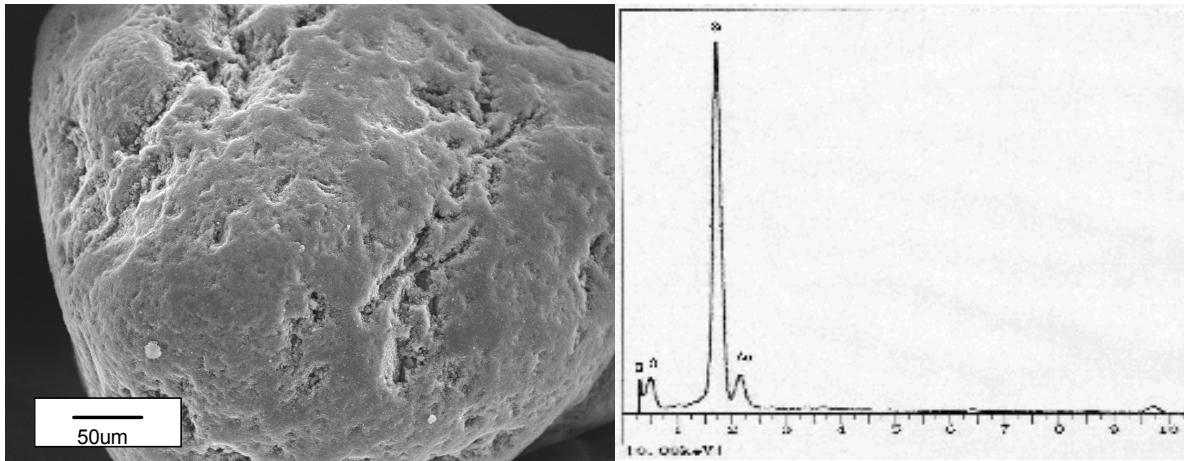
図 2-2-3-4 フラスコ減圧室内の金網に生じた堆積物の外観

(3) 実験結果および考察

(a) 砂の残留物分析

再生砂、新砂およびフラン樹脂硬化処理砂の硫黄分はそれぞれ 0.014%、0.005% および 0.097% である。フラン樹脂硬化処理砂 (0.097% S) を再生することで硫黄分はかなり削減 (0.014% S まで) されるが、新砂に比して再生砂の硫黄分が若干多い。

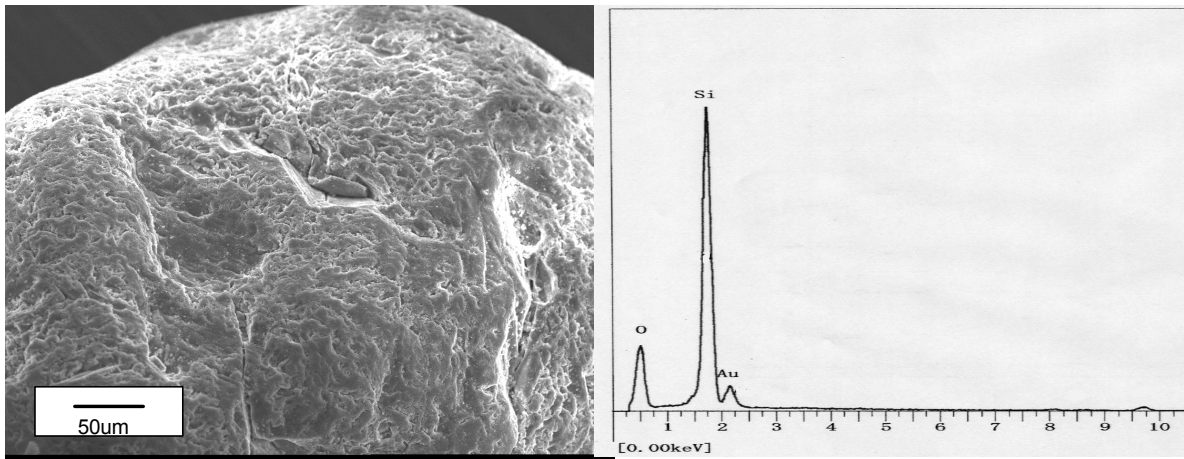
これらの砂表面の SEM 像および EDS 分析結果を図 2-2-3-5、図 2-2-3-6 および図 2-2-3-7 にそれぞれ示す。EDS 分析ではすべての試料で検出濃度に達していないため硫黄に相当するピークは検出されない。しかし、再生砂では炭素に相当するピークが検出される。これは、フラン樹脂が溶湯熱により炭化し砂の表面に付着したと考えられる。一方 SEM 像の観察では、再生処理による研磨のため新砂に比べ再生砂表面の凹凸が少ない。



(a) SEM Image

(b) EDS chart

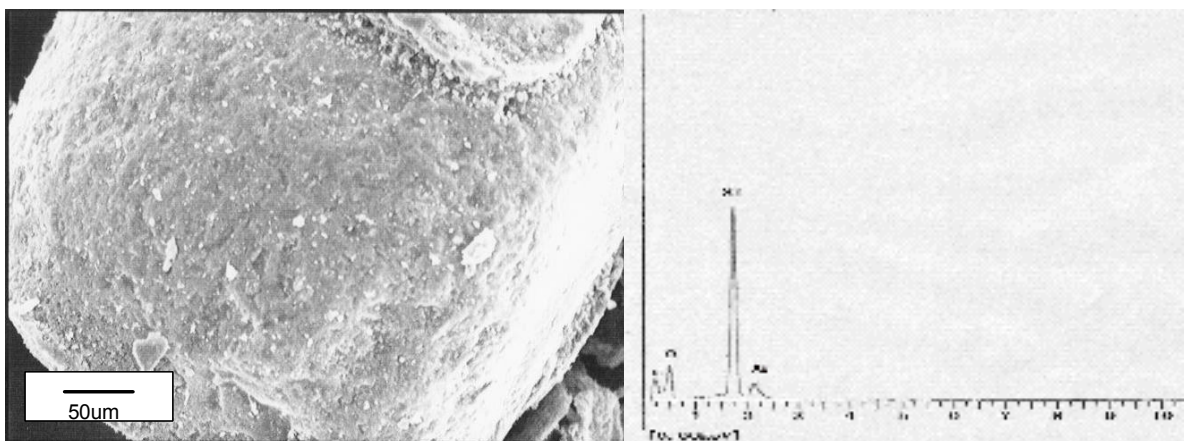
図 2-2-3-5 フラン樹脂再生砂の SEM 像および EDS 分析結果



(a) SEM Image

(b) EDS chart

図 2-2-3-6 新砂の SEM 像および EDS 分析結果



(a) SEM Image

(b) EDS chart

図 2-2-3-7 フラン樹脂硬化処理砂の SEM 像および EDS 分析結果

粒度分布試験および通気度試験結果を表 2-2-3-3 に示す。再生砂の粒度指数は 52.1、新砂のそれは 49.7 である。再生砂の方が若干細かいが大差は見られない。再生砂の通気度は 394、新砂のそれは 748 である。再生砂は新砂の半分程度の通気度である。この原因は、再生処理により再生砂表面の凹凸が少なくなり、充填密度が上昇するからであると考えられる。

表 2-2-3-3 JIS 粒度分布および通気度試験結果

粒度分布	フラン樹脂	
	再生砂 (%)	新砂 (%)
Mesh		
20	1.0	1.0
28	12.9	19.7
35	49.7	44.7
48	28.1	30.1
65	7.5	4.4
100	0.7	0.1
150	0.1	0.0
粒度指数	52.1	49.7
通気度	394	748

(b) 鑄造品の分析

空洞鑄型鑄造法とは異なり、消失模型鑄造法では注湯された溶湯は模型を熱分解させながら放射状に充満するといわれている³²⁾。したがって階段状試験片模型を充満する溶湯の湯先は肉厚 5mm の部分で、模型の熱分解ガスならびに造型砂の再生砂の影響を大きく受けると考えられる。本研究では図 2-2-3-2 に示した FCD450 および SC450 試験片の肉厚 5mm 部分の顕微鏡組織写真 (3%ナイトル腐食) をそれぞれ図 2-2-3-8 および図 2-2-3-9 に示す。FCD450 試験片の場合、パーライト基地中に微細球状黒鉛 (ブルズアイ) が認められる。試験片の最表面で浸硫現象すなわち、再生砂に付着する硫黄分による組織の異常は認められない。また、SC450 試験片の場合、初析セメンタイトとパーライト組織が認められる。試験片の最表面で模型の熱分解ガスによる加炭現象³³⁾は認められない。このように FCD450 および SC450 製品とも、鑄造品の表面近傍に組織の異常や浸硫および浸炭現象が認められない。これは消失模型鑄造法では、模型の分解ガスは塗型を介して造型砂へ向かって排出されること。しかも再生砂に残留する硫黄分や炭素分の濃度に関わらず、塗型膜が存在するため溶湯は再生砂と直接

接触しないこと。さらには、本実験では消失模型に PMMA を用いたことなどから、
鑄造品への影響はないと考えられる。

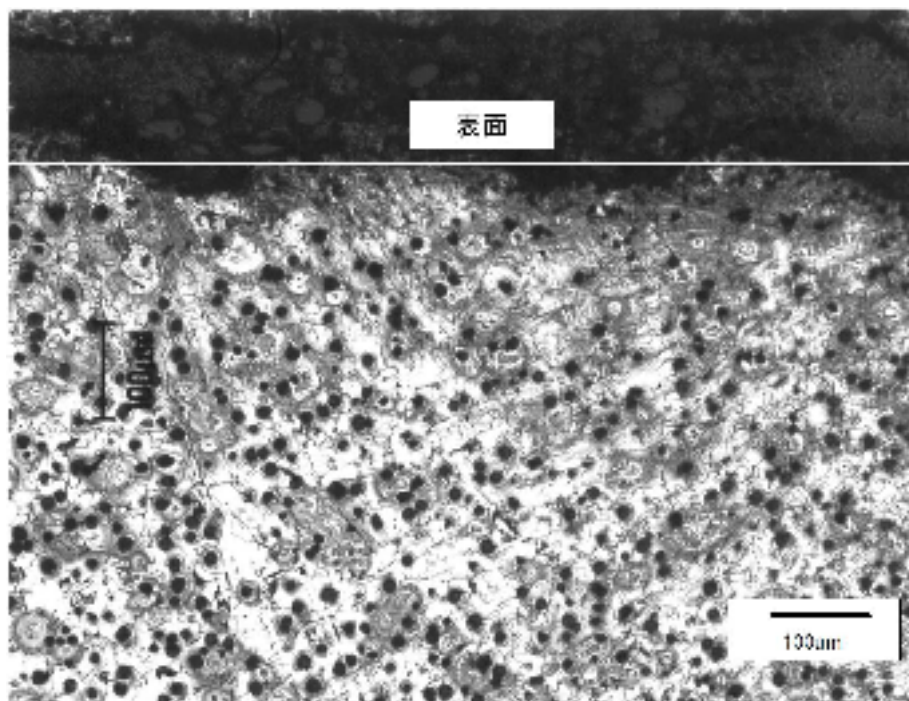


図 2-2-3-8 FCD450 試験の肉厚 5mm 部の組織写真

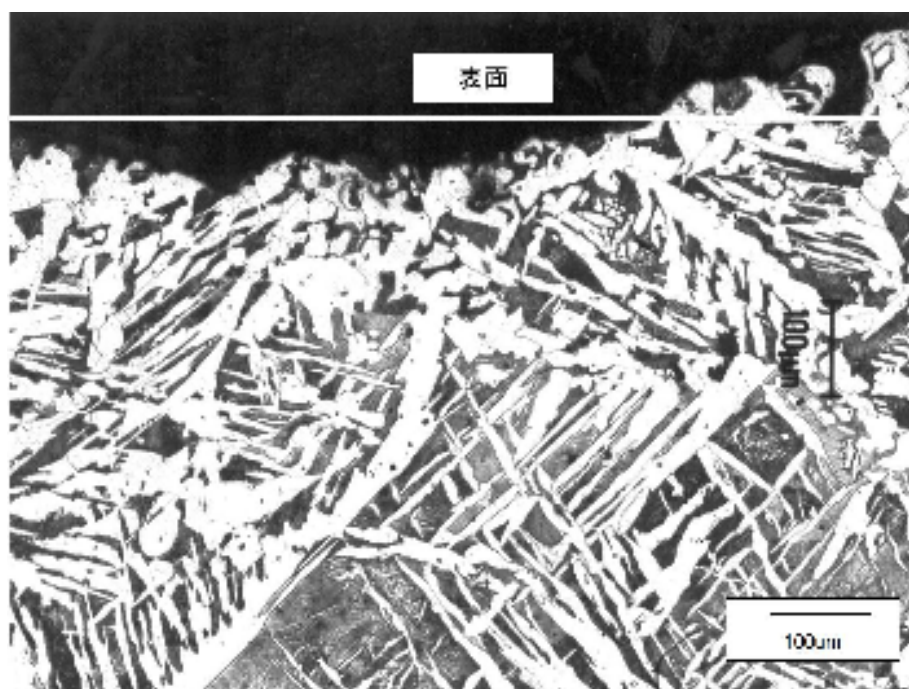
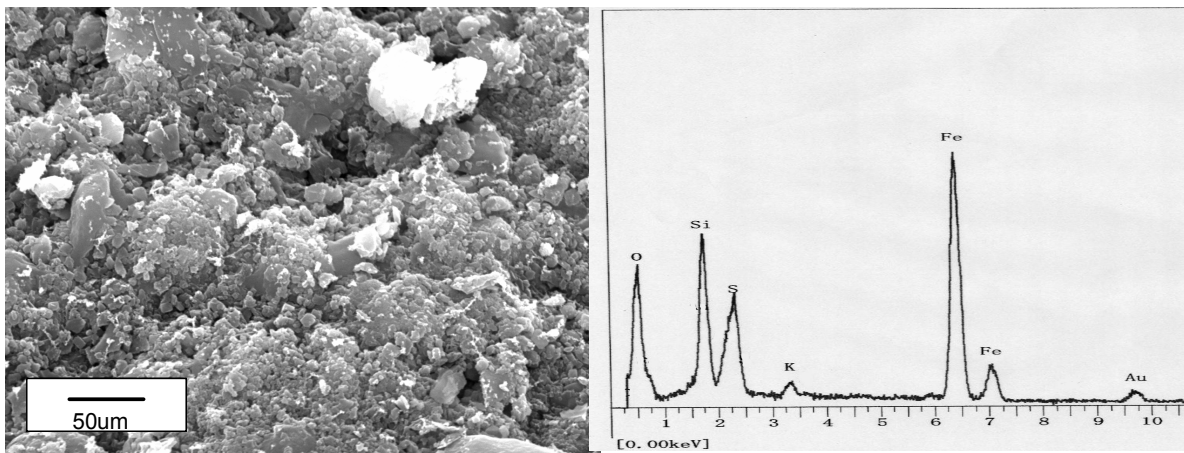


図 2-2-3-9 SC450 試験の肉厚 5mm 部の組織写真

(c)設備の分析

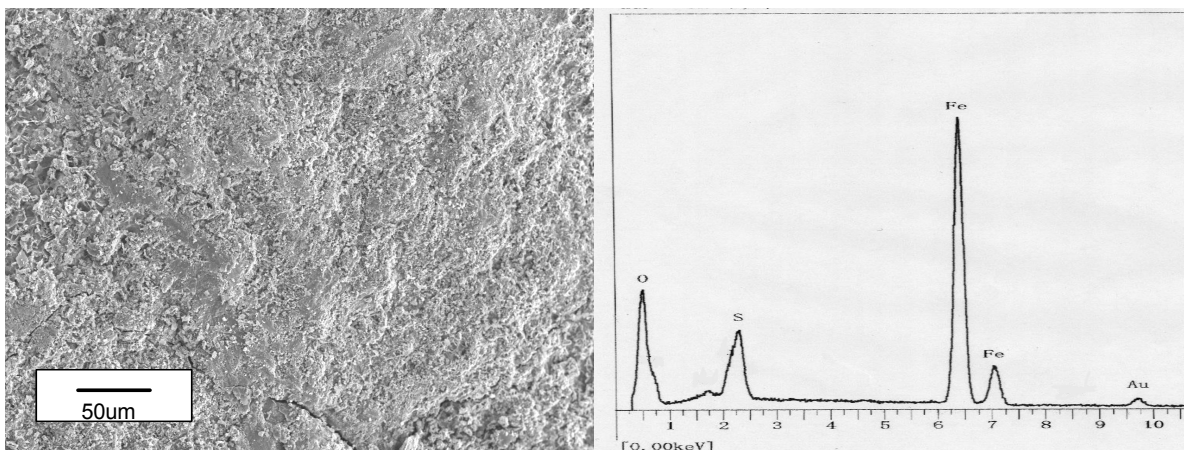
図 2-2-3-4 に示した金網上の堆積物は、いずれも積層状になっている。これらは鋳物砂や塗型骨材 (SiO_2) の微粉が付着堆積した部分 (以下、砂付着部と記す) とフラスコの内壁および減圧室内の金網が消失模型の熱分解ガスと鉄部との反応によって生成した腐食生成物が堆積した部分 (以下、錆付着部と記す) に大別される。砂付着部と錆付着部の SEM 像を図 2-2-3-10 および図 2-2-3-11 に示す。砂付着部の SEM 像には、かなり凹凸の激しい付着物が堆積している。一方、錆付着部の SEM 像には、後述するように比較的滑らかな表面状態の鉄の酸化物が堆積している。EDS 分析ではけい砂および鉄酸化物に起因する Fe、Si、O および S がそれぞれ検出された。



(a)SEM Image

(b)EDS chart

図 2-2-3-10 砂付着部の SEM 像および EDS 分析結果



(a)SEM Image

(b)EDS chart

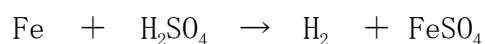
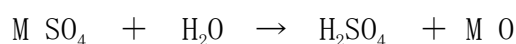
図 2-2-3-11 錆付着部の SEM 像および EDS 分析結果

砂付着部と鑄付着部の蛍光 X 線分析結果を表 2-2-3-4 に示す。これらの分析値は、検出元素 (Fe、Si および S) の相対 X 線強度を 100% に換算して簡略化した。なお、僅かに検出される K および C 等は無視した。砂付着部および鑄付着部ではいずれも約 4% の硫黄が検出された。当然ことながら、砂付着ではけい砂および塗型に起因する Si が多量に検出される。なおこれら堆積物は、鑄造を繰り返すことによって増加し、フラスコ減圧室内に張られた金網のメッシュの目詰まりや減圧ポンプおよび吸引ホースを詰まらせる可能性がある。その結果、鑄造不良の原因になると考えられる。

表 2-2-3-4 砂付着部および鑄付着部の蛍光 X 線分析結果

砂部		鑄部	
検出元素	分析値 (%)	検出元素	分析値 (%)
Fe	80.0	Fe	94.0
Si	14.0	Si	0.6
S	3.8	S	4.3

フラスコ減圧室内の金網上に堆積した鑄付着部の発生原因は以下のように説明出来る。すなわち下記に示す反応式で表されるよう消失模型の熱分解ガス (液化樹脂を含む)³⁴⁾ の結露と再生砂に残留する硫黄成分などの反応により生成される硫酸が鉄の腐食を進行させると考えられる。



(ここで M は鉄などの金属や硬化反応後のフラン樹脂などの有機化合物を示す。)

以上のことから、フラン樹脂鑄型再生砂を消失模型鑄造法で再利用を続けると、造型砂の通気度の低下および設備の腐食などが生じることが明らかになった。その対策として、粘結剤 (添加剤) を含まない乾燥けい砂を造型砂として使用することが望まれる。しかし、設備のスペースなどからフラン樹脂再生砂を再利用する場合は、塗装などの防錆対策が不可欠である。また、砂の目詰まりは、定期的な清掃をおこなうことで対策できる。

(4) 結言

本研究では、消失模型鑄造法に設備のスペースの問題や生産量との兼ね合から、専用ラインを設置しないで再生砂を使用した場合の鑄造品および設備への影響について検討をおこない次の知見を得た。

- ①有機スルホン酸を主成分とする硬化剤で処理したフラン樹脂鑄型砂の再生砂には、硫黄および炭素等の残留が認められる。
- ②再生砂の繰り返し再利用は、砂粒度の微細化により造型砂としての通気度を低下させる。その結果として鑄造不良を引き起こすと考えられる。
- ③再生砂の利用による鑄造品への影響は、PMMA 模型を用いる場合は、基本的には認められない。しかし、再生砂に残留する硫黄分に起因して消失模型鑄造用設備の内部が腐食する影響が認められる。
- ④フラン樹脂再生砂を再利用する場合は、塗装などの防錆対策が不可欠である。

2-3 環境負荷低減プロセスの改善 「消失模型鑄造用塗型膜の熱間通気度」

(1) 緒言

次に、従来法に比べ環境負荷の低減に効果のある消失模型鑄造法のプロセス改善、特に鑄造品の精度や品質に多大な影響を与える「塗型」について、「消失模型鑄造用塗型膜の熱間通気度」に関する研究に取り組んだ。

消失模型鑄造法は発泡ポリスチレン(以後、EPS と記す)などの消失模型に塗型剤を塗付し、減圧可能な鑄枠(以後、フラスコと記す)に非粘結材の乾燥けい砂で充填造型し、模型を抜き取ることなく直接溶湯を注湯する。そのため一般の鑄造法とは異なる溶湯の充満挙動を示す。この充満挙動の違いは、溶湯により消失模型が分解して生成されるガス、液化樹脂および固体カーボン(すす)などの熱分解生成物⁴⁾⁶⁾³⁵⁾³⁶⁾が塗型膜を介して乾燥砂中に排出される機構に起因している。

したがって消失模型鑄造法に用いられる塗型剤は、一般の鑄型に使用されている塗型剤とは異なる性能が要求される。特に、造型時の模型にかかる応力を防止^{23)37~41)}するとともに模型表面を保護するに十分な機械的強度と熱分解生成物を停滞させることなく、速やかに排出できる通気性を兼ね備える必要がある。ここでの通気性とは気体の流れやすさの程度で、熱分解生成物を型砂中に排出する能力(以後、通気度と記す)を示すものである。

消失模型鑄造法用塗型膜の通気度測定方法は、日本鑄造工学会・関西支部の「消失模型鑄造法研究委員会」で標準化⁴²⁾され、室温での通気度測定法が提案されている。しかし、鑄造時に塗型膜は高温の熱分解生成物と溶湯にさらされるため、その通気度は複雑に変化すると考えられる。したがって、塗型膜の熱間における通気度(以後、熱間通気度と記す)の変化が評価できれば、欠陥対策などに有効であると考えられる。しかし、鑄造時における塗型膜の熱間通気

度変化に関する報告は見当たらない。そこで本研究では、熱間通気度を精度よく、リアルタイムに測定する方法を提案し、市販塗型剤を用いて評価した。また、これら塗型膜の熱間通気度と溶湯充滿挙動の関係について検討を加えた。

(2) 実験方法

(a) 消失模型鑄造用塗型の特性

消失模型鑄造用塗型の具備すべき条件として、下記のことが挙げられる。①消失模型への塗付性が良好で、たれ落ちがないこと、②乾燥割れがないこと、③造型時に損傷しないこと、④耐熱衝撃性や耐圧性に優れていること、⑤焼着が発生しないこと、⑥造型時の模型変形を防止または緩和する強度、および⑦EPS 模型の熱分解生成物(ガス、液化樹脂、すす)が速やかに排出できる通気度が挙げられる。特に⑥および⑦が最も重要になる。

実験に用いた市販塗型剤について測定した特性を表 2-3-1 に示す。通気度および三点曲げ抗折強度は「消失模型鑄造法研究委員会」の試験方法⁴²⁾に準拠して測定した。また、通気度は通気度試験器を使用して塗型膜単体で測定する方法である。したがって室温測定値である。熱伝導率は簡易式の熱伝導測定機を使用して測定した。固形分は希釈した塗型剤を 50℃で乾燥し、その重量変化から算出した。強熱減量は塗型膜を 1000℃で 1 分間加熱し、重量変化から算出した。現在市販されている塗型剤のほとんどは水溶性である。これは、有機系溶剤の使用では模型が溶解または収縮する可能性があるためである。塗型剤 A は鑄鉄専用、塗型剤 B および塗型剤 D は鑄鉄とアルミニウム合金兼用、塗型剤 C はアルミニウム合金専用の塗型剤として市販されている。塗型剤 A、B および D の主骨材はシリカサンド、塗型剤 C は雲母である。本実験では、それぞれ塗型剤メーカーが使用に適したボーメ度として推奨している値の A : 75 ° Bé、B : 85 ° Bé、C : 60 ° Bé および D : 85 ° Bé に希釈して使用した。なお、ユーザでは製品形状、寸法および設備能力を考慮し鑄造欠陥が発生しないように塗型剤を選定しているのが現状である。

表 2-3-1 実験に用いた市販塗型剤の特性

塗型剤	A	B	C	D
使用用途	鋳鉄、 アルミ鋳物	鋳鉄	アルミ鋳物	鋳鉄、 アルミ鋳物
骨材	シリカ	シリカ	マイカ	シリカ
ボーメ度 (be)	75	85	60	85
通気度	0.4	0.4	0.2	1.2
曲げ強度 (MPa)	2.80	2.40	5.10	2.75
熱伝導率 (w・mK)	0.58 (at309K)	0.54 (at309K)	0.27 (at319K)	0.73 (at309K)
固形分(%)	64	68	45	66
強熱減量(%)	4.1	4.2	1.4	4.3

(b) 消失模型鋳造用塗型膜の室温における通気度

消失模型鋳造用塗型膜の通気度は消失模型鋳造法が導入された当初から、その評価法の確立が望まれてきた。例えば、塗型試験片としては、自硬性の砂型や金網に塗布する方法や専用のホルダによる塗型膜単体の方法が提案された³⁷⁾⁴³⁾⁴⁴⁾。一方、測定装置としては、一定圧力(元圧)で空気を塗型膜に通過させて自然排気させる方法³⁷⁾とコンプレッサによる圧縮空気を塗型膜に強制送風して排気させる方法⁴⁵⁾などが提案された。

これらの経緯を踏まえて平成8年に標準化された通気度測定法⁴²⁾に関する「静水圧空気通気方式」の測定装置概略図を図 2-3-1 に示す。基本的には JIS 規格の「鋳型通気度測定法」に準じており、Darcy の実験式に基づいて塗型の通気度 (P1) は(1)式で与えられる。

$$P1 = (V \times h) / (a \times p \times t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

V: 通過空気量 (ml) h: 塗型膜厚さ (cm)

a: 塗型膜断面積 (cm²)

p: 通気抵抗 (cm) (1000 ml の空気が排出された時の大気圧と元圧の圧力差)

t: 排気時間 (min) (2000 ml の空気が排出されるのに要する時間)

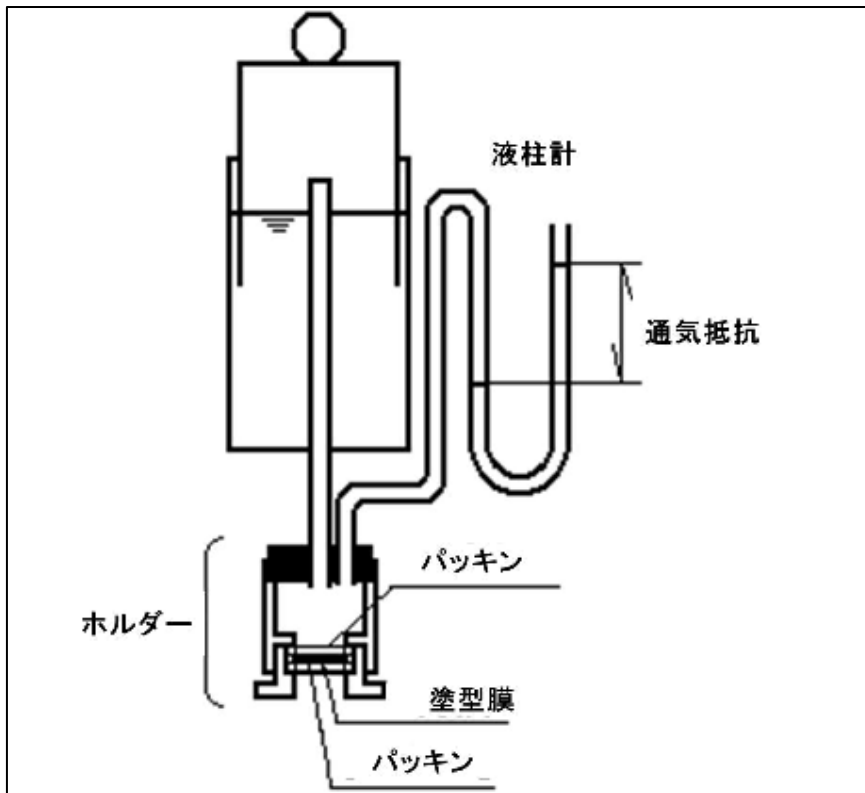


図 2-3-1 通気度測定装置の概略図

(c) 消失模型鑄造用塗型膜の熱間通気度

塗型膜の熱間通気度は鑄造時に次の影響を受けると考えられる。塗型膜に対する溶湯の放射熱。模型の熱分解生成物である高温高压のガスおよび塗型膜を目詰まりさせる液化樹脂およびすす。しかし、これらの影響は鑄造条件により大きく異なる。そこで熱間通気度を知ることは通気度に対する熱分解生成物の影響を推測するためにも重要である。

したがって、本実験では熱分解生成物が塗型膜に捕捉されることは別として、鑄型へ排気される流体として、これに見合う気体が塗型膜を通して吸引するシステムを提案した。

・測定装置

当初コンプレッサによる圧縮空気を送風する方式を検討した。しかし、送風圧の調整および塗型膜の加熱などに問題が生じたため、吸引式の通気度試験器を考案した。

吸引式の熱間通気度測定器の概略図を図 2-3-2 に示す。本試験器は石英製通気度測定用ホルダ、横型管状シリコニット電気炉、サイリスタ式の温度調整器、バッファタンク、吸引ポンプ(規格：60 LPM・93.31 kPa)、デジタル式マノメー

タ(規格:10~2000 Pa/アナログ出力 4~20mA)、ホイール式気体用流量計(規格:0.2~1 ml/min・アナログ出力 DC:0~5V)およびコンピュータで構成されている。

石英製通気度測定用ホルダの概略図を図 2-3-3 に示す。まず 直径 26mm のステンレス製金網(400 メッシュ)を肉厚 2 mm、内径 24 mm の長さ 10 mm と 800 mm の石英管で挟み込んだ。次にこの部分の外側に肉厚 2 mm、内径 27 mm の長さ 20 mm の石英管をセットし、その隙間に耐熱性のアルミナ接着剤を充填した。自然乾燥後、1000℃で焼結した。

通気度測定用の塗型試験片は、測定用ホルダを垂直に保持して金網部に市販塗型剤(A~D)を塗付し、そのままの姿勢を保持して室温で24時間自然乾燥した。次いで横型管状炉を用いて50℃の温度で2時間強制乾燥をさせて作製(図 2-3-2 参照)した。以後、塗型剤 A の塗型膜を塗型膜 A と記し、塗型剤 B~D についても同様に記す。

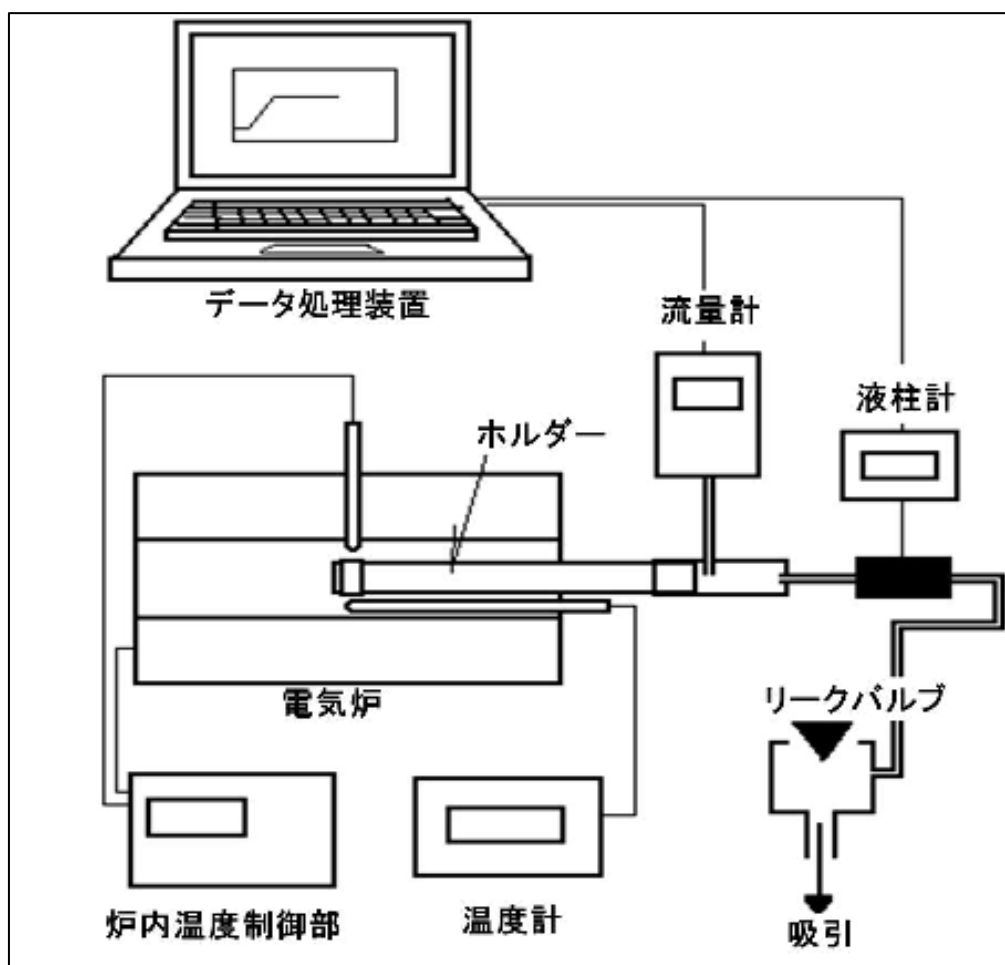


図 2-3-2 吸引式熱間通気度測定器の概略図

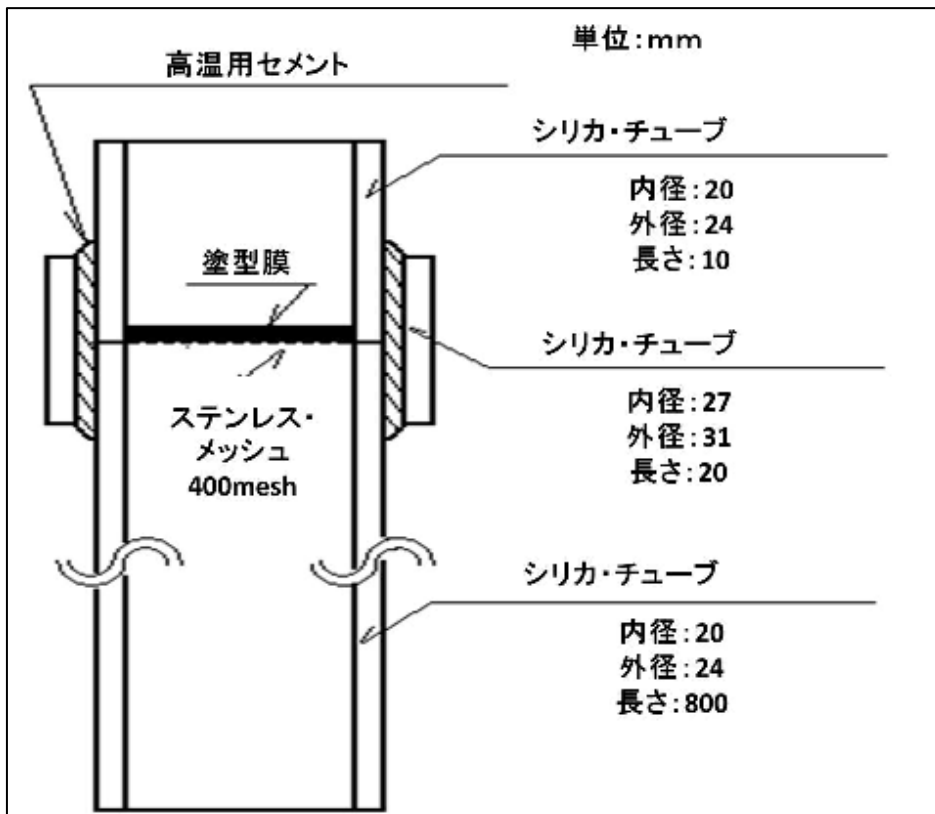


図 2-3-3 石英製通気度測定用ホルダの概略図

・測定法

塗型試験片付きの石英製通気度測定用ホルダをスライド式のレールに設置し、ホルダのもう一方の端部に吸引式測定器を接続した。表 2-3-1 の室温通気度と比較するため同じ元圧である、0.98 kPa(水柱圧：10cmH₂O)で吸引しながら室温での通気度を測定した。次に、1000℃に加熱保持した電気炉内に塗型試験片付きの石英製通気度測定用ホルダを素早く挿入し、リアルタイムに強熱中の熱間通気度の変化をそれぞれの塗型膜 (A~D) について測定した。

本実験で作製した吸引式測定器の通気度 (P2) は(2)式で与えられる。実際には測定中の通気抵抗などを電気信号としてリアルタイムにパソコンへ取り込むことで熱間通気度が得られる。

$$P2 = (L \times h) / (a \times p) \quad \dots \dots \dots (2)$$

L: 流量 (ml/min) h: 塗型膜厚さ (cm) a: 塗型膜断面積 (cm²) p: 通気抵抗 (Pa) (大気圧と元圧の差圧)

なお、式(2)は同一条件における流体の流れやすさの程度を示すものである。したがって、吸引圧力が変化すると通気抵抗が異なるため、相対値として取り扱う必要がある。

(3) 実験結果および考察

(a) 消失模型鋳造用塗型の熱間通気度

塗型膜 A~D の熱間通気度曲線を図 2-3-4 に示す。また参考として別の実験として 1273K の雰囲気中で強熱した時の塗型膜温度と時間の関係を図 2-3-5 に示す。塗型膜温度はあらかじめ石英製ホルダの塗型試験片中に熱電対の温接点を埋設して測定した。いずれの塗型膜とも 20 秒後には急激に昇温し 450℃に、その後緩やかに昇温し約 60 秒後に 800℃、さらに 120 秒後には 1000℃の温度に到達した。

1000℃での熱間通気度（以後、 $P2_{1273}$ と記す）は強熱開始後の時間経過につれて、その変化傾向は三つのタイプに区別される。すなわち、室温通気度よりも熱間通気度が高くなる場合（塗型膜 A および D）、低くなる場合（塗型膜 B）、および変わらない場合（塗型膜 C）である。なお、得られた室温通気度（以後、 $P2_R$ と記す）は、JIS 鋳物砂通気度試験器による測定値と一致した。このことより通気度試験器としての精度は JIS 規格の「鋳型通気度測定法」と同じ精度と判断できる。また、各塗型膜について 5 回通気度試験をおこなったが、いずれの測定値も JIS の鋳物砂通気度試験の規定による平均値の偏差±5%以内を満足した。塗型膜 A の場合：約 90 秒後まで徐々に熱間通気度が上昇するが、その後 120 秒経過しても変わらない。 $P2_R=0.4$ に対して $P2_{1273}=0.6$ まで高くなる傾向にある。

塗型膜 B の場合：約 30 秒後まで熱間通気度が急激に低下し、 $P2_R=0.4$ に対して $P2_{1273}=0.1$ まで低くなる傾向にある。

塗型膜 C の場合：約 120 秒経過しても熱間通気度は変わらずに、 $P2_R=P2_{1273}=0.2$ である。

塗型膜 D の場合：約 20 秒後から急激に熱間通気度が上昇し、その後 110 秒まで上昇して一定となっている。 $P2_{1273}=1.2$ に対して $P2_{1273}=2.7$ まで高くなる傾向にある。

以上のように、室温通気度（ $P2_R=0.4$ ）が全く同じである塗型膜 A および B において、熱間通気度が $P2_T=0.6$ まで高くなる場合と $P2_{1273}=0.1$ まで低くなる場合の逆の傾向を示すことが明らかになった。また、塗型膜 D では熱間通気度が大幅に高く（ $P2_{1273}=2.7$ ）なる傾向が明らかになった。

一方、通気度が強熱直後から変化する場合（塗型膜 A および B）や一定時間経過後に変化する場合（塗型膜 D）および変化しない場合（塗型膜 C）がある。さらには熱間通気度の変化が終了するまでの経過時間（塗型膜 A：約 90 秒、塗型膜 B：約 30 秒および塗型膜 D：約 110 秒）に差が生じている。

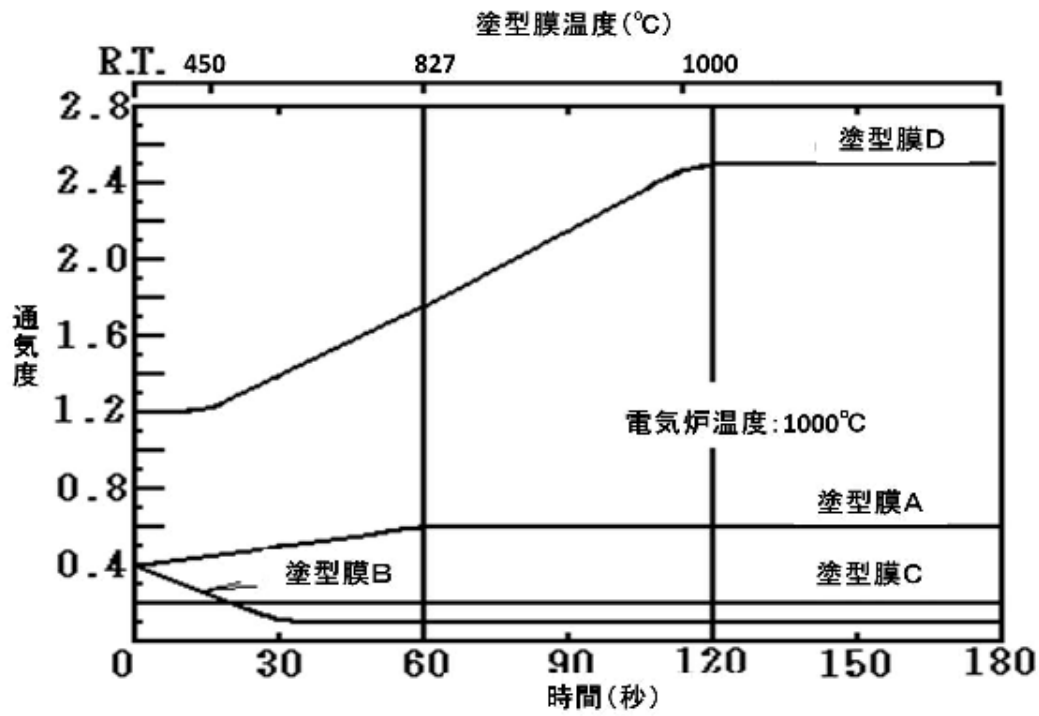


図 2-3-4 塗型膜 A~D の熱間通気度曲線

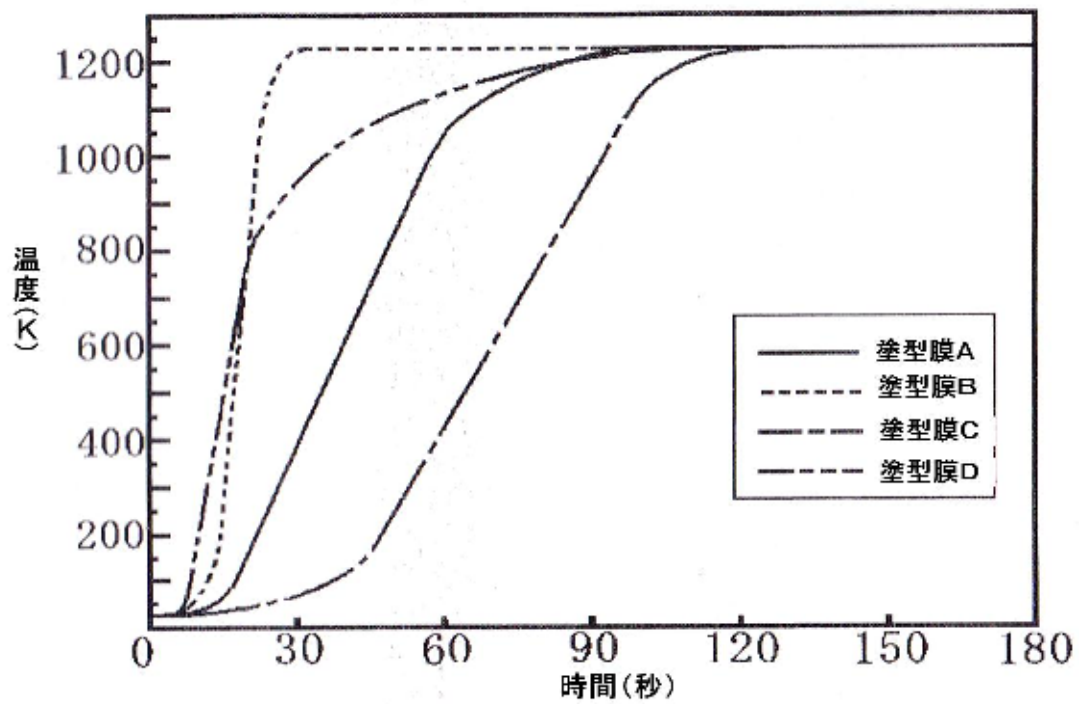


図 2-3-5 1273K で強熱した塗型膜温度と時間の関係

(b) 熱間通気度の鋳造性に対する影響

室温通気度 ($P_{2R}=0.4$) が全く同じであるが、熱間通気度が逆の傾向を示した塗型剤 A ($P_{21273}=0.6$) および塗型剤 B ($P_{21273}=0.1$) を、同一方案の消失模型にそれぞれ塗付して鋳造した場合の鋳込速度と充満速度の影響を検討した。なお、減圧下で注湯をおこなう場合はフラスコ上面をプラスチックフィルムでシールした。

①鋳込み時間の影響：鋳鉄製ライナの模型方案を図 2-3-6 に示す。外径 140 mm × 長さ 340 mm × 肉厚 230 mm の EPS 模型(発泡倍率 45 倍)に、熱間通気度が逆の傾向を示した塗型剤 (A および B) を塗付した。鋳造条件を表 2-3-2 に示す。フラスコに乾燥けい砂を用いて造型した後、26.66 kPa の減圧下で FC250 相当の溶湯(約 120kg)を 1400℃で注湯した。その時の鋳込み時間をストップウォッチで測定した。

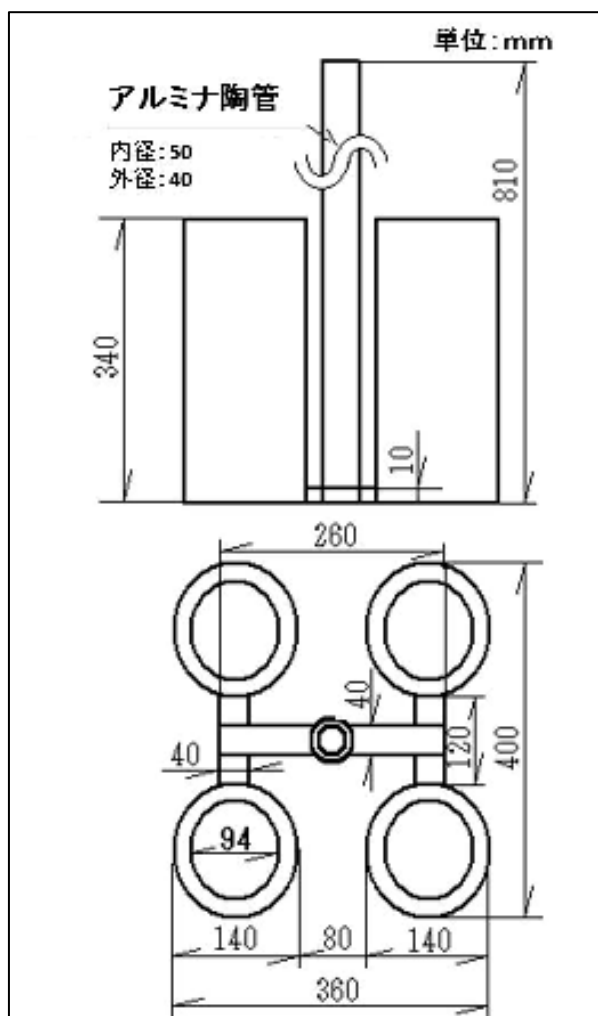


図 2-3-6 鋳鉄製ライナの模型方案

表 2-3-2 鋳鉄製ライナの鋳造条件

模型	材質	EPS
	発泡倍率	45 倍
塗型	塗型剤	塗型 A、塗型 B
	ボーメ度	塗型 A:75Be 塗型 B:85Be
	塗型方法	ドブ漬け
	乾燥温度	50°C
	通気度	塗型 A P2R : 0.4 → P2T : 0.6 塗型 B P2R : 0.4 → P2T : 0.1
鋳型	フラスコ	W1000 × L1000 × H1000mm
	鋳型砂	JIS 5 号けい砂
	振動条件	上下振動(1.5G、60Hz)
	減圧度	26.66KPa
溶湯	材質	FC250
	鋳込温度	1400°C
	鋳込重量	120Kg

その結果、熱間通気度が上昇する塗型膜 A では、注湯開始から終了までほぼ一定の速さのスムーズな鋳込みであり、鋳込み時間は 18 秒である。鋳造品の外観には鋳造欠陥は観察されなかった。これに対して、熱間通気度が低下する塗型膜 B では、注湯開始 5 秒後から鋳込みは流入と停止を繰り返す断続的な注湯現象(湯がおどる)が生じ、鋳込時間は 24 秒を要した。また製品上部には残さ欠陥や湯じわが認められた。このように、塗型膜の熱間通気度の違いは鋳込み時間ならびに製品の外観に影響を与えることが明らかである。特に、湯がおどりながら注湯されるのは、溶湯熱により塗型膜が加熱され通気度が低下するため模型分解ガスの排気が阻害され、一時的に溶湯の流入が停止する。しかし溶湯の放射熱により模型の分解が進み新たな塗型膜が露出するため模型分解ガスの排気が再開される。このようにして、溶湯の流入と停止の過程が繰り返されるためと考えられる。なお模型分解ガスの排気は塗型膜の熱間通気度の大小に影響される。

② 充満速度の影響：丸棒試験片の模型方案を図 2-3-7 に示す。直径 40 mm × 長さ 200 mm の EPS 模型(発泡倍率 45 倍)に、熱間通気度が逆の傾向を示した塗型剤(A および B) を塗付した。鋳造条件を表 2-3-3 に示す。溶湯の充満速度を測定するために、EPS 模型の底部から 25 mm 毎にタッチセンサを設置した。フラスコに

乾燥けい砂を用いて造型後、無減圧ならびに 13.33kPa の減圧下で、約 1kg のアルミニウム合金 (AC4C) 溶湯を 850°C で注湯した。また、模型先端に熱電対を設置 (図 2-3-7 参照) して到達した溶湯の温度を測定した。

試験片底部からの溶湯充滿距離と時間の関係を図 2-3-8 に示す。室温通気度が同じでも熱間通気度の異なる塗型膜 A と B では溶湯の充滿速度が明らかに異なっている。無減圧での注湯では、熱間通気度が高くなる塗型膜 A が約 40 mm/s の平均速度で充滿しているのに対して、熱間通気度が低下する塗型膜 B は 16.7 mm/s と 2 倍以上の違いがある。減圧下での注湯では、無減圧に比していずれの塗型膜も充滿速度は速くなり、塗型膜 A で 66.7 mm/s、塗型膜 B で 22.2 mm/s と約 3 倍の差となった。また、減圧下での注湯を例にすると、試験片先端に到達した溶湯の最高温度は塗型膜 B で 630°C であり、塗型膜 A の 654°C よりも 24°C 低い。このことは充滿速度が遅くなることにより鑄型内での溶湯温度低下が溶湯の流動性や模型の熱分速度を低下させる可能性を示唆している。

以上のように、塗型膜における熱間通気度の違いは溶湯充滿時間すなわち充滿速度に影響を与えることが明らかである。

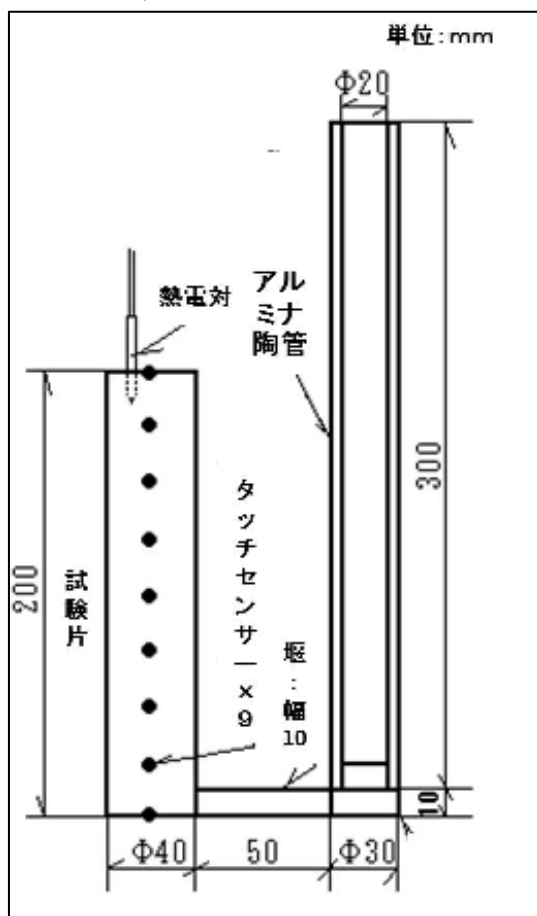


図 2-3-7 丸棒試験片の模型方案

表 2-3-3 丸棒試験片の鑄造条件

模型	材質	EPS
	発泡倍率	45 倍
塗型	塗型剤	塗型 A、塗型 B
	ボーメ度	塗型 A:75Be 塗型 B:85Be
	塗型方法	ドブ漬け
	乾燥温度	50℃
	通気度	塗型 A P2R : 0.4→P2T : 0.6 塗型 B P2R : 0.4→P2T : 0.1
鑄型	フラスコ	W400×L400×H500mm
	鑄型砂	JIS 5号けい砂
	振動条件	上下振動(1.2G、60Hz)
	減圧度	13.33KPa
溶湯	材質	JIS AC4C
	鑄込温度	850℃
	鑄込重量	1Kg

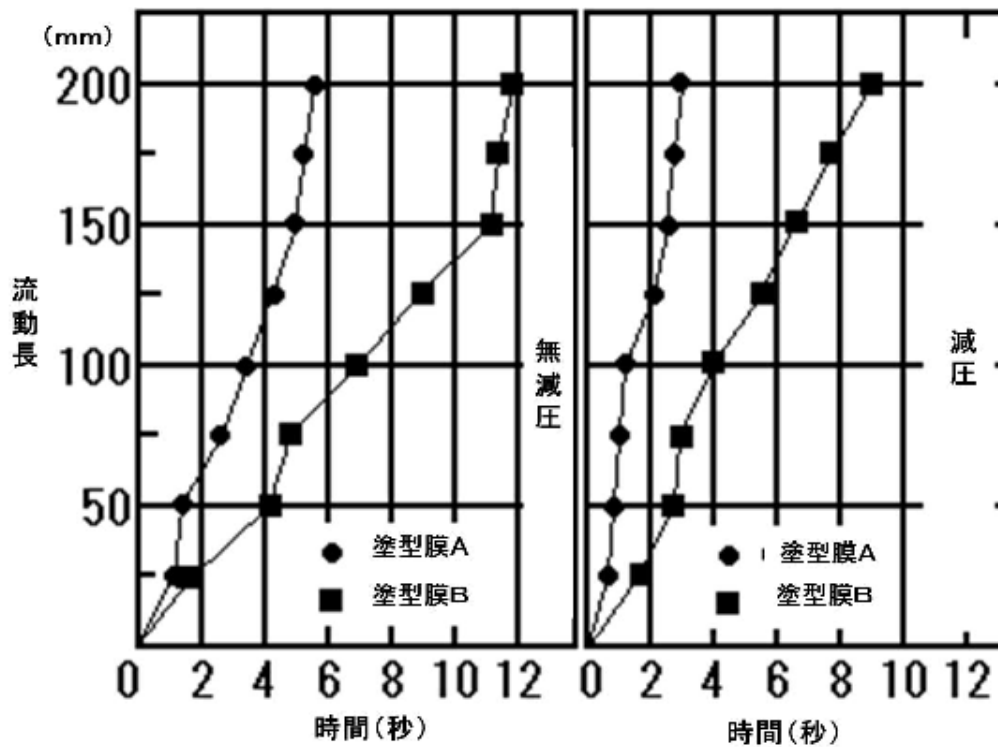


図 2-3-8 溶湯充満距離と時間の関係

(c) 消失模型鑄造用塗型剤の考察

鑄造実験により同じ室温通気度でも塗型膜の熱間通気度が異なる場合は、これに応じて鑄込み時間や充満速度も変化する可能性を明らかにした。

このような現象が生じるのは、塗型剤の製造方法およびその組成などに起因していると考えられる。しかし、塗型剤の組成や骨材の大きさなどはメーカ各社のノウハウであるため公表されていない。またカタログ上でも主に室温通気度と強度の特性しか表示されていないため詳細は不明である。

一般的に、消失模型鑄造法用塗型剤は骨材の耐火物や鉱物粘土などの固体成分と水、活性剤、分散剤、着色剤および粘結剤などの液体成分に大別⁴⁶⁾される。なおメーカによっては着色剤として水に不溶の固体であるベンガラ(酸化鉄)などの粉末が使用されることもある。塗型膜の室温通気度調整は固体成分の粒度を変えることでおこなわれており、通気度が高い塗型剤では粗い骨材を使用している。他方、熱間通気度の変化傾向が異なる原因を検証するために塗型膜を1273Kで強熱し、その時の状況観察とガス発生量測定をおこなった。その結果、塗型剤により発生時期は異なるがガスやすすが生じ、メーカにより傾向が異なることを認めた。特に塗型膜から発生するすすは直接塗型膜を目詰まりさせるため熱間における通気度に大きく影響を与えていると考えられる。塗型剤の塗布性や作業性および乾燥後の強度などは液体成分に添加される有機系化合物の活性剤、分散剤および粘結剤などの添加量や種類を調整することでおこなわれている。粘結剤は有機系以外にも無機系の水ガラスなどが混合使用される。またいずれの添加剤も液体、固体に関わらず水に溶解するものが選定される。

塗型膜 A および B は、固形分(64~68%)、熱伝導率(0.58~0.54W/(m·K))および強熱減量(4.1~4.2%)ともほぼ同じである。したがって、室温通気度(0.4)が同じであることから、同じ程度の粒度の骨材を配合していると思われる。しかし、その後の熱間通気度の違いは、液体成分に添加されている有機系添加剤の種類と総添加量および固体成分などが異なることに起因していると考えられる。塗型剤 A は有機系添加剤の燃焼による空隙の生成や骨材の熱膨張の差で発生した塗型膜の割れなどにより、熱間通気度が大幅に上昇するものと予想される。一方、塗型剤 B は使用されている有機系添加剤が塗型剤 A と異なるため、燃焼、分解時に発生するすすが塗型膜に滞留し熱間通気度を低下させるものと考えられる。

塗型剤 C は骨材に雲母を使用しているため熱伝導率が低く、三点曲げ抗折強度(5.1MPa)は他の塗型に比して2倍前後の高い値である。これは、主骨材は細かく粉砕された板状の雲母を使用しているため、模型に塗付され塗型膜を形成した時に骨材が積層状に堆積し骨材の間隙が少なくなり室温通気度も低くなると考えられる。また、有機系添加剤の量が少ないので過熱、燃焼しても空隙が

生じないため板状の骨材が積層した状態が保持され、熱間通気度も変化せず加えて強熱減量も低いと考えられる。

塗型剤 D の固形分は A および B と同じであるが、熱伝導率 ($0.73 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) が他の塗型に比して最も高い。このことは、粗い骨材を配合しているため、室温および熱間通気度とも高くなると考えられる。なお、熱間通気度変化が加熱開始から一定になるまでの時間が長いのは、他の塗型に比して添加剤の配合率が異なることによるものと推察される。

以上のことから、今回の実験で塗型剤の通気度評価は室温通気度のみではなく、熱間通気度も併せて評価することの重要性を明らかにした。しかし、実際の鑄造において塗型膜は瞬時に高温にさらされるとともに模型の熱分解生成物による通気度への影響を受けると考えられる。したがって、さらに精度良い鑄造状況の推測や鑄造欠陥対策をおこなうためにはこれらの影響を考慮した塗型膜の熱間通気度のデータ解析が望まれる。

(4) 結言

本研究では熱間通気度を精度よく、しかもリアルタイムに測定する方法を提案し、市販塗型剤による塗型膜の通気度特性を解析した。また、これら塗型膜の熱間通気度と溶湯充満挙動の関係について検討を加えた結果、以下のことが明らかになった。

- ①市販塗型剤による塗型膜には室温と熱間で通気度が異なる場合があり、室温通気度に対して熱間通気度が上昇するタイプ、変化しないタイプおよび低下するタイプの三つに大別されることを明らかにした。
- ②熱間通気度が上昇する塗型膜は、残さ欠陥や湯回り不良の防止対策に有効である。
- ③熱間通気度が低下する塗型膜の使用は、残さ欠陥や湯回り不良などが発生しやすいと考えられる。
- ④方案や鑄造条件が同じでも塗型剤の熱間通気度により鑄造時間や鑄造欠陥の発生状況が異なる。このことから、方案設計や不良対策に対して使用する塗型剤の通気度は室温および熱間の両方を把握することが重要である。

参考文献

- 1) 飴谷章裕、山本康雄、中村猛、三宅秀和、岡田明：日本鑄物協会 全国講演大会概要集 123(1993) 9
- 2) 山本康雄、三宅秀和、岡田明：日本鑄物協会 全国講演大会概要集 126(1995) 41

- 3) 池永明、川本信、後藤佳行：鑄物 67(1995) 184
- 4) 小林武、粕谷俊郎：鑄物 64(1992) 192
- 5) 三宅秀和、山本康雄、眞鍋豊士、片岡洋一、岡田明：鑄物 69(1997) 841
- 6) 阪口康司、山田豊章：鑄造工学 75(2003) 355
- 7) 眞鍋豊士、竹内宏太郎、山本康雄、三宅秀和、岡田明：日本鑄造工学会 全国講演大会概要集 140(2002) 134
- 8) H. F. Shroyer : U. S. Patent No. 2830343
- 9) 三宅秀和、岡田明、山本康雄、飴谷章裕：鑄物関西支部「消失模型鑄造法研究委員会」資料 No. 5-31-7 (1993-12)
- 10) 鶴池実：鑄鍛造と熱処理 6(1996) 3
- 11) 日本特許：例えば特開平 2-269746
- 12) N. Moll and D. Jolmson : Modern Casting 77(1987) 37
- 13) 中華麦飯石：中国内蒙古自治区標準計量局批准 実施 蒙 DB523-89 (1989-04)
- 14) DOW CHEMICAL CANADA INC. MSDS : 003445 (1990-8)
- 15) 消失模型鑄造法の現状について「アンケート調査結果」
鑄物関西支部消失模型鑄造法研究委員会 4(1994) 26
- 16) 参考資料：大気にかかわる有害物質および粉じん排出基準一覧表
(大阪府公害対策室)
- 17) H. Juntgen : Carbon 15(1977) 274
- 18) 山本康雄、永武誠一、眞鍋豊士、三宅秀和、岡田明：日本鑄造工学会 全国講演大会概要集 128(1998) 30
- 19) 日本鑄造工学会 関西支部 消失模型鑄造法研究委員会 塗型剤標準化小委員会：消失模型鑄造法用塗型剤の標準試験方法(1996-3)
- 20) 池永明、川本信、河本光弘：AFS Trans. 125(1998) 1
- 21) 池永明、川本信、田村啓治：鑄物 60(1988) 524
- 22) 池永明、川本信、南英孝：鑄物 60(1992) 699
- 23) 頃安貞利、松田政夫、小池勝美：鑄造工学 74(2002) 23
- 24) 池永明、川本信、後藤佳行：鑄造工学 68(1996) 760
- 25) 山本康雄、永武誠一、眞鍋豊士、三宅秀和、岡田明：鑄造工学 69(1997) 589
- 26) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧 丸善 (2002) 114
- 27) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧 丸善 (2002) 112
- 28) 西尾憲行、河合真、水谷稔、森啓、高橋和久：鑄物 58(1986) 460
- 29) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧 丸善 (2002) 192
- 30) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧 丸善 (2002) 191
- 31) 日本鑄物協会：鑄物便覧 改訂 4 版 丸善(1993) 412
- 32) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧 丸善 (2002) 111

- 33) 阪口康司：鑄物 64(1992) 38
- 34) 三宅秀和、山本康雄、眞鍋豊士、岡田明：AFS Trans. 105(2001) 1417
- 35) 三宅秀和、山本康雄、眞鍋豊士、片岡洋一、岡田明：鑄造工学 69(1997) 841
- 36) 眞鍋豊士、竹内宏太郎、山本康雄、三宅秀和、岡田明：日本鑄造工学会 全国講演大会概要集 140(2002) 134
- 37) 山本康雄、滝本哲、三宅秀和、岡田明：鑄物 59(1987) 729
- 38) 山本康雄、三宅秀和、岡田明：鑄物 63(1991) 965
- 39) 池永明、川本信、南英孝：鑄物 64(1992) 699
- 40) 眞鍋豊士、本川高男、南典明、山本康雄：高知県工業技術センター研究報告 No.26(1995) 131
- 41) 勝木惇正：日本鑄造工学会 全国講演大会概要集 132(1998) 23
- 42) 日本鑄造工学会平成8年度関西支部例会
「消失模型用塗型剤の特性と標準化」(1996) 18
- 43) 日本鑄造技術普及協会研究報告書
「消失模型鑄造用塗型剤塗付装置の開発研究」(1992) 22
- 44) 山本康雄：日本鑄造協会関西支部消失模型鑄造法研究会塗型剤標準化小委員会「各社における塗型試験方法概要」(1993-10) 資料No.3-4
- 45) 高田雅直：日本鑄造協会 最近の自硬性鑄型の特性と評価に関する研究部会 (1991-1) 資料No.3-8-40
- 46) 日本鑄造工学会：鑄造工学便覧 丸善(2002) 110

第3章 鑄造廃棄物の省エネ型溶融によるリサイクルシステムの

実用化研究

3-1 緒言

鑄造工場から排出される廃棄物は、埋め立て処分する場合、廃掃法¹⁾においてすべて「鉱さい」として管理型処分地への処理を義務づけられている。近年これらの処分地の不足、環境に対する意識の高まりなどから処理費用は高騰しており、鑄造業界にとって、諸外国との価格競争などと併せて経営を圧迫する重大な問題となっている。

また、埋め立て処分以外にも、排出される廃棄物の種類によっては、セメント工場への受け入れや、路盤材、土木、建築資材への再利用などもおこなわれているが^{2) 3) 4)}、これらによる再利用可能な廃棄物は、成分などの問題からごく一部であり根本的な解決策とはなっていない。

今回の研究の基礎となっている鑄鋼工場から排出される集塵ダストの溶融処理については、従来から減量化や有害重金属類の除去などを目的として廃棄物のみによる溶融についての実験、研究⁵⁾はおこなわれてきたが、高温での溶融が必要なことから処理コストの面で実用化に至るような開発はおこなわれていない。

そこで我々は、鑄鋼工場から排出されるクロム酸化物を含有する集塵ダストを、アーク式溶解炉内で、比較的低温で溶融することで、無機物分と金属分に分離し、鑄造原料として再利用可能な金属分の抽出をおこなうと共に、将来的には残存スラグ成分についても鑄型砂などへの再生をおこなうクロードシステムへ発展させるための研究開発をおこなった。

具体的には、実生産に用いられている鑄鋼生産用アーク式溶解炉を用いて溶融処理をおこない、集塵ダスト中の残留クロムの濃度を1%以下に低減し、実用化の可能性について検討をおこなった(図3-1)。

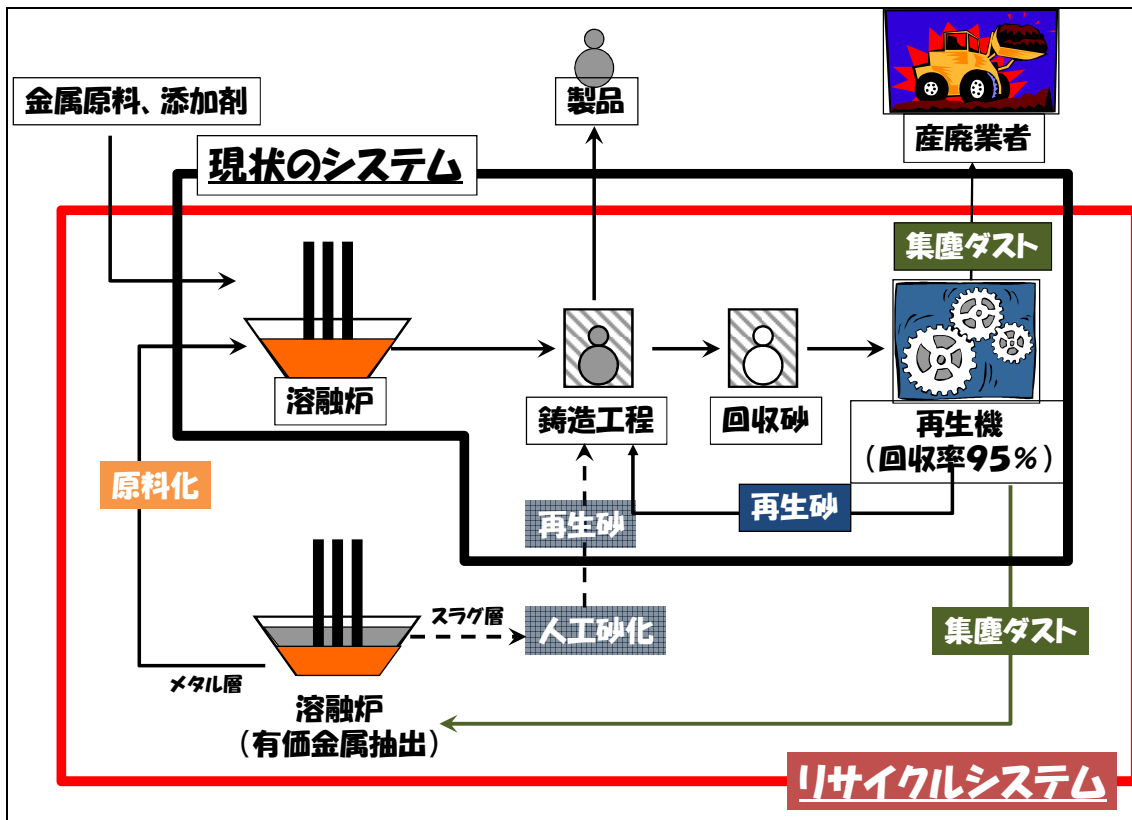


図 3-1 リサイクルシステムのご概念図

3-2 実験方法

3-2-1 電気炉による塩基度調整効果

まず、溶融状態にある集塵ダストの塩基度 (CaO/SiO_2 重量比) が、金属クロムの抽出率および溶融塩の状態に与える影響について、小型炭素製坩堝および昇降式電気炉を用い、実験室スケールでの解明をおこなった。

(1) 原料調整

塩基度の調整方法はまず、原料 (集塵ダスト) 中の SiO_2 含有量を蛍光 X 線装置を用いて定量した。次に原料中の SiO_2 濃度に応じて、炭酸カルシウム (CaCO_3) を添加し、遊星型ボールミルを用いて、回転速度 $150\text{rpm} \times 10$ 分間 \times (正転・逆転) $\times 2$ 回の条件で混合・攪拌し、均一化をおこなった。塩基度は重量比で 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.5、2.0 とした。

(2) 溶融試験および評価試験

上記の方法で塩基度調整した試料を 30 g 測りとり、カーボン製坩堝に入れ昇

降式電気炉内にて昇温した。昇温速度 20°C/min において各目標温度 1200、1300、1400、1500、1550、1600°C まで昇温し、各目標温度に達した後、即座に昇温を停止して、炉内において放冷した。

放冷後、デジタルカメラを用いて内容物の状態を撮影し、撮影後ダイヤモンドカッターによって坩堝を垂直方向に切断して、再度内容物の状態を撮影した。溶融状態の評価はこれら撮影した画像をもとに任意の条件を設定し、目視において評価をおこなった。

また、内容物を坩堝から取り出し、スラグ層を粉砕し、硼酸リチウムを融剤としてビードを作成し、蛍光 X 線装置によって定量をおこない、クロムの抽出効率についての評価もおこなった。

3-2-2 小型溶解炉による溶融還元処理

次に、対象となる鑄造廃棄物の中でも主たる対象物となる集塵ダストについて分析、評価をおこなって、集塵ダストの特性を明らかにすること、ついで小型直流アーク式電気炉を用いて、実際に集塵ダストの溶融実験をおこない、集塵ダストからの金属クロムの抽出率を指標として、塩基度（溶融したスラグ中の CaO/SiO_2 の重量比）および還元剤（アルミニウム）の効果等の最適な条件を設定するための試験をおこなった。

(1) 集塵ダストの化学組成分析

研究協力工場で発生している集塵ダストをサンプリングして、含有されている化学成分（Ig-loss、CaO、MgO、 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 、 ZrO_2 ）について湿式方法による定量をおこなった。

湿式分析方法は、JIS M 8852（セラミックス用高シリカ質原料の化学分析方法）、8853（セラミックス用アルミノけい酸塩質原料の化学分析方法）、8856（セラミックス用高アルミナ質原料の化学分析方法）を参考に、105°C の乾燥機において一昼夜試料を乾燥し、1000°C、一時間による質量減から Ig-loss を求めた。次に冷却後、この試料から一定量秤量して、炭酸カリウムナトリウムを融剤としてアルカリ溶融をおこない、残る成分の分析をおこなった。

(2) その他添加剤の化学組成分析

溶融試験の際用いる生石灰、ガラスビーズについて蛍光 X 線装置による化学組成分析をおこなった。

(3) 小型アーク式電気炉による溶融試験

実験に使用した小型アーク式電気炉は、株式会社石川島岩国製作所製 IS-DC0001 型で、直流方式（アーク、抵抗加熱併用型）を採用しており、出力：70KVA、電極：φ50mm、炉容量：10kg/ch（溶融物比重 2.6～2.8）という性能を有している。実験のフローを図 3-2 に示す。

フロー中の諸条件において、ガラス層形成剤および塩基度調整用として用いた生石灰ならびにガラスビーズ量、還元剤として用いたアルミニウムの量を変化させて溶融試験をおこなった（表 3-1）。最終的な調整となる還元促進剤を投入した後、スラグ層は一定時間毎にサンプリングし、メタル層は最終的に一括でサンプリングをおこなった。試験の結果、得られたスラグ層およびメタル層の分析をおこなうことによって、最適な溶融条件の検討をおこなった。

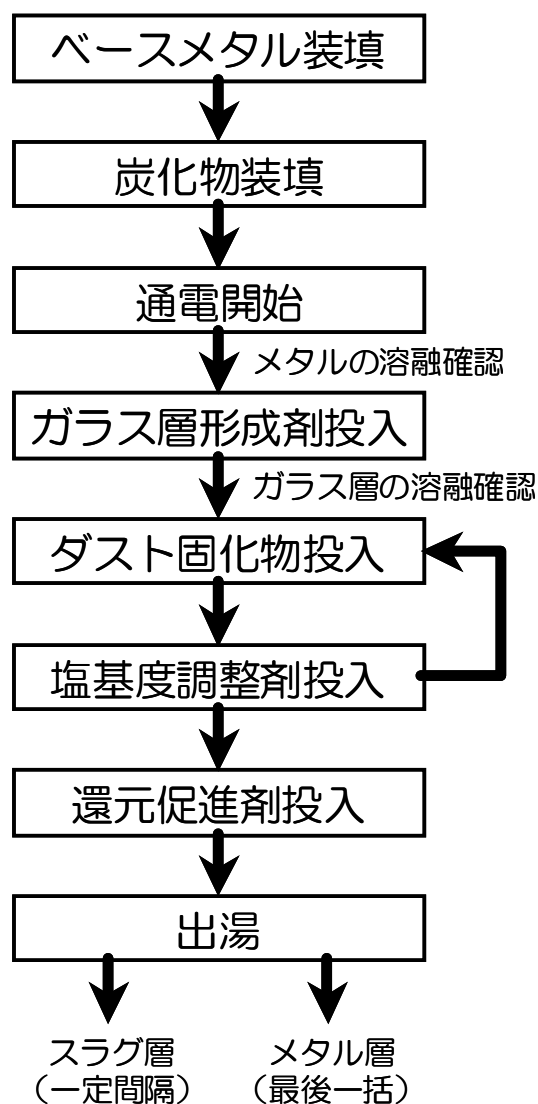


図 3-2 小型アーク式電気炉による溶融試験フロー

表 3-1 小型アーク式電気炉による溶融試験条件

テストNO.	ベースメタル	集塵ダスト	生石灰投入量	ガラスビーズ投入量	アルミニウム投入量
①	1,000	1,800	600	800	0
②	1,000	1,800	400	400	100
③	1,000	1,800	600	800	100
④	1,000	1,800	600	800	200
⑤	1,000	1,800	600	800	300

単位(g)

3-2-3 実用溶解炉による溶融還元処理

鑄鋼工場から排出される金属分を含む集塵ダストを、アーク式溶解炉内で溶融することで、無機物分と金属分に分離し、鑄造原料として再利用可能な有用金属であるクロムの抽出をおこなう。

アーク式電気炉を使用して溶解をおこなう場合、炉内はある程度密閉された環境である上に、溶解物や電極などによる酸化物反応により還元雰囲気となっている。この還元性を利用して集塵ダストを溶融する。

小型アーク式電気炉による実験で、クロムの抽出を良くするには集塵ダストを投入後、還元保持時間を長くとれば良いことがわかった。しかしそれでは溶解時間が長くなり、電気代が多く必要となるので、実用化に向けて問題が残る。そこで効率の良い溶解方法や還元剤についての検討をおこなった。

(1) 実験方法

実験は小型アーク式電気炉での実験結果を元に、研究協力工場の所有する3トンエルー式電気炉を用い、同工場より排出される表 3-2 の成分のクロマイト (Cr_2O_3) を含有するダストを溶融し、その結果について蛍光 X 線装置を用い定量分析をおこなった。

表 3-2 集塵ダストの成分

	含有率 (mass%)
含水率	1.1
Ig-loss	9.8
CaO	0.3
SiO ₂	21.4
Na ₂ O	1.0
K ₂ O	0.2
MgO	1.5
Fe ₂ O ₃	36.6
Al ₂ O ₃	3.0
Cr ₂ O ₃	20.5
ZrO ₂	4.0
合計	99.4

本実験において対象としている鑄造廃棄物は、主に鑄型砂の再生時に発生する集塵ダストを中心としたもので、平均粒径が 50 μm 以下と非常に細かいため、通常集塵機を備えた溶解炉への原料直接投入は、原料投入時の飛散等を考えると、ほとんど不可能である。そのため、集塵ダストにバインダーとしてデンプンと水を添加して、ブリケット状（約 36.6×34.7×20mm）に固形化し使用した。

また、溶解手順としては、図 3-3 のフロー図のとおりにおこなった。

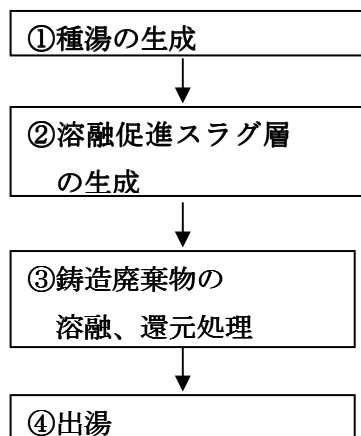


図 3-3 実用溶解炉による溶解試験フロー

①種湯の生成

鑄造廃棄物は、 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Cr_2O_3 、などの酸化物を主成分とするため、電気を通さない。このため電気式溶解炉で溶解する場合、あらかじめ電気を通す金属分などを溶かした“種湯”を作っておく必要がある。種湯の代表的な成分を表 3-3 に示す。固体状態では電気を通さない鑄造廃棄物も、種湯の温度により溶解され液体になれば電気を通すようになり、電気炉による溶解が可能になる。

表 3-3 代表的な種湯の成分値 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S
種湯	0.14	0.23	0.52	0.016	0.009

②溶融促進スラグ層の生成

鑄造廃棄物は電気を通さないだけでなく、耐火物などに使用される素材も含まれているため溶融温度も高く溶融が困難な物質である。この廃棄物を溶解させるために、鉄などの金属で出来た種湯の上に石灰石等を添加し、酸化物でありながら反応性が良いスラグを生成し、廃棄物を容易に溶かして溶融を助けるための層を作った。

③鑄造廃棄物の溶融、還元処理

鑄造廃棄物の SiO_2 の量に対し、生石灰 CaO 分を投入することにより塩基度 (CaO/SiO_2) を 1 に近づけるよう調整をおこないながらダストを投入する。通常高炉スラグは塩基度 1.2~1.25、焼結鉱の塩基度は 1.6~1.7 程度で操業されている。アーク式電気炉を使用して溶解をおこなう場合、炉内はある程度密閉された環境である上に、溶融物や電極などによる酸化物反応により還元雰囲気となっている。この還元性を利用して廃棄物を溶融し、さらに Al を還元剤として投入することで、廃棄物中に含まれる有用金属酸化物の還元を助けることにより有用金属を取り出す。

④出湯

炉内で比重差により分離した有用金属を分離して排出する。

(2) 溶融方法の検討

効率の良い溶融方法を探るため、集塵ダストやメタル原料等の投入手順について、図 3-4 に図示する以下の 3 つの方式で検討をおこなった。

①かけ湯方式 (Shower method)

集塵ダスト、石灰石等の溶解原料を先に投入しておき、その上から先

に溶解した金属“溶湯”を流し込む方法

②同時溶解方式 (Package method)

集塵ダスト、石灰石等の溶解原料と種湯となるスクラップ等の金属原料を一緒に投入して、同時に溶解する方法

③追加投入方式 (Addition method)

種湯となる金属溶湯へ、集塵ダスト、石灰石などの溶解原料を順次投入していく方法

これらの評価には溶解時間を用いた。溶解時間は、実用溶解炉の電源を投入した時を開始時間とし、固形物が炉内を攪拌棒で攪拌しても見当たらなくなる時点を終了時間とした。炉の電源投入の時期はそれぞれ、①かけ湯方式は、金属溶湯を注ぎ終わった時点、②同時溶解方式は、炉内にすべての原料を投入し終わった時点、③追加投入方式は、炉内に種湯を用意し、集塵ダスト、石灰石等を投入し始めた時点とした。

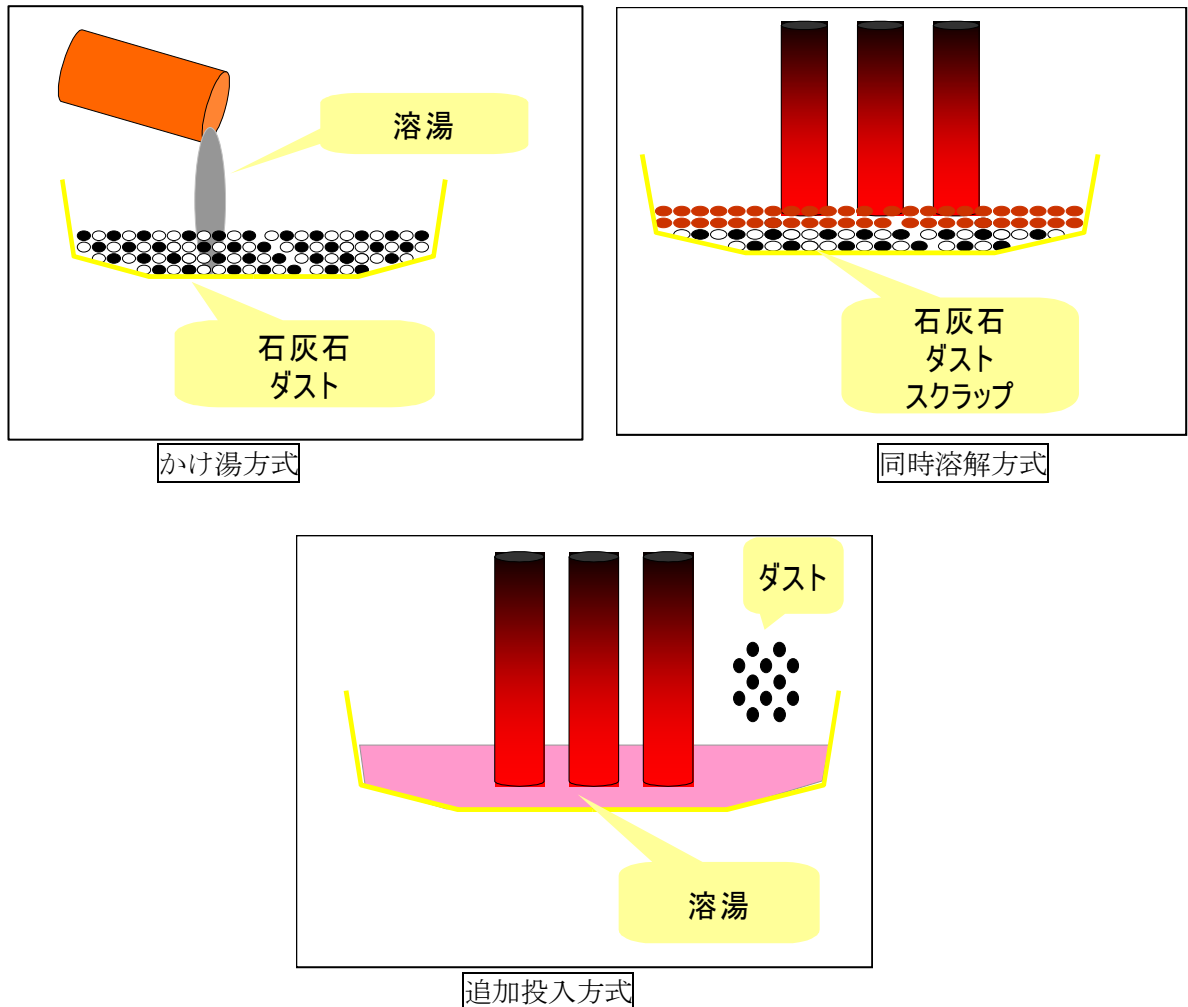


図 3-4 溶融方法

(3) 還元剤 (A1) の検討

クロムの抽出効率を改善するため、還元剤 (A1) の投入効果および投入後の保持による還元率の変化についての検討をおこなった。

3-3 実験結果

3-3-1 電気炉による塩基度調整効果

(1) 塩基度調製による溶融性について

目視によって、溶融状態を評価するに当たって、あらかじめ溶融に対する条件を以下のとおり定めた (図 3-5 参照)。

- ・未焼結状態 (図 3-5-a)

試料が粒子状に分散しており、熱処理前と同様の形状をしている。

- ・焼結状態 (図 3-5-b)

試料の表面、断面上に融解前の状態に由来する粒子が確認できるが、ある程度 (持ち上げても破損しない) の強度を持っている。

- ・溶融状態 (図 3-5-c)

ガラス状であり、試料の表面、断面上に融解前の状態に由来する粒子が確認できない。

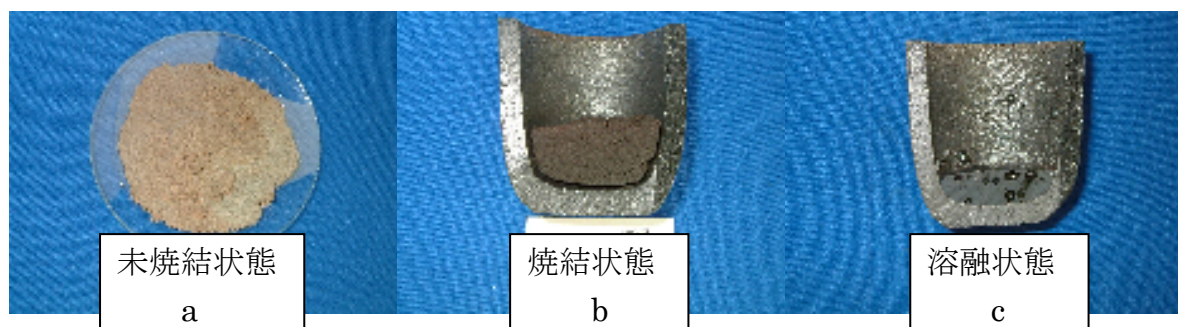


図 3-5 溶融状態の条件

図 3-6 に溶融試験の結果に関する塩基度と溶融温度の関係を示す。図中赤線で囲まれた部分が目視によって溶融状態と判定された部分である。塩基度を 0.2 ~0.6 の間に調整することで最も低温である 1300°C における溶融が確認された。塩基度を 2.0 に調整したものは 1600°C でも溶融せず、カルシウムの過剰添加は溶融性に悪影響を及ぼすことか示唆される。

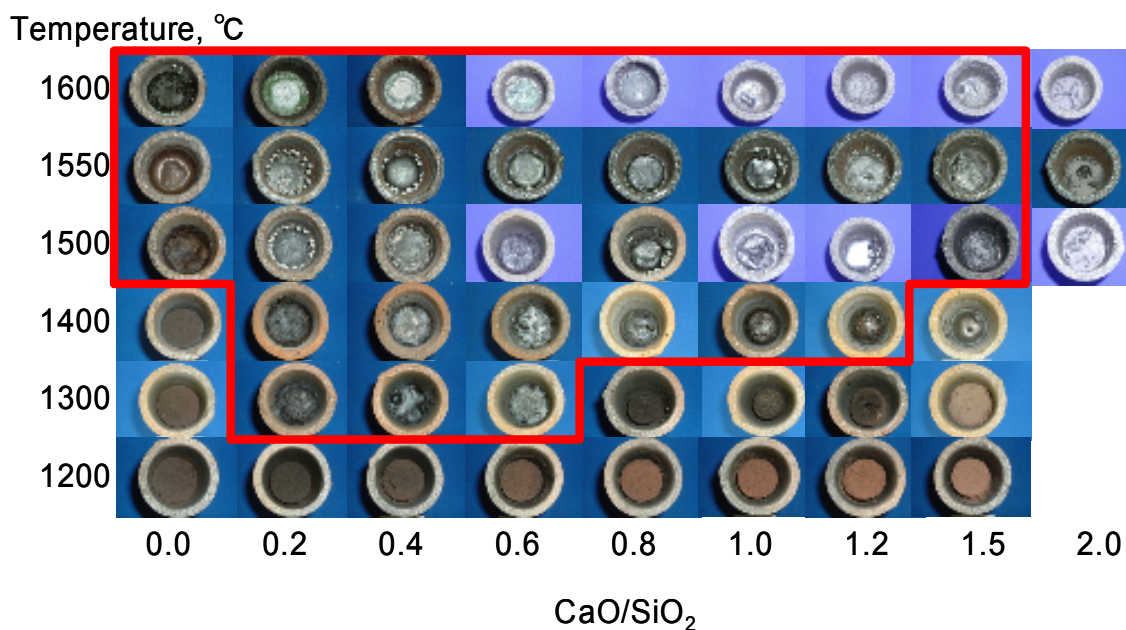


図 3-6 溶融試験結果

(2) 塩基度調製による還元性について

溶融による酸化クロムから金属クロムへの還元反応は、未焼結・焼結状態では進行せず、溶融状態において進行すると考えられることから、図 3-6 において溶融が確認された試料について、スラグ部分を分取して蛍光 X 線装置によって定量をおこなった酸化クロムの結果を図 3-7 に、酸化鉄の結果を図 3-8 に示す。

図 3-7 から、塩基度調製によるクロムの還元性と塩基度の相関は見られず、初期値に沿った形で一律にスラグ中の酸化クロムの含有量に減少が見られる。1600°Cで溶融をおこなった試料は、塩基度の低い領域で初期値に対する還元性が高い傾向が見られた。

図 3-8 から、酸化鉄についても図 3-7 同様、塩基度調製効果が低く、1600°Cにおいて塩基度の低い領域で高い還元性が見られた。

以上の結果より、クロム、鉄の還元性に塩基度調製の効果は低いと考えられる。

溶融処理過程においてクロムおよび鉄の還元反応は内部で均一に進行すると考えられるが、比重差によるスラグ層、メタル層の分離のためには、溶融状態における粘性が大きく関与する。また、文献⁶⁾によると、クロム、鉄の還元反応を律する化学反応速度及び液体拡散も融液の粘度係数に反比例することも示されており、最も実験温度が高く、融液の粘度係数の低くなる 1600°Cの還元性が高くなる要因と考えられる。

このことから、鉄の融点は1535℃、クロムの融点は1907℃と高温であるため、流動性を還元効率向上の一つの要因として考えると、より高い温度が効果的と言える。

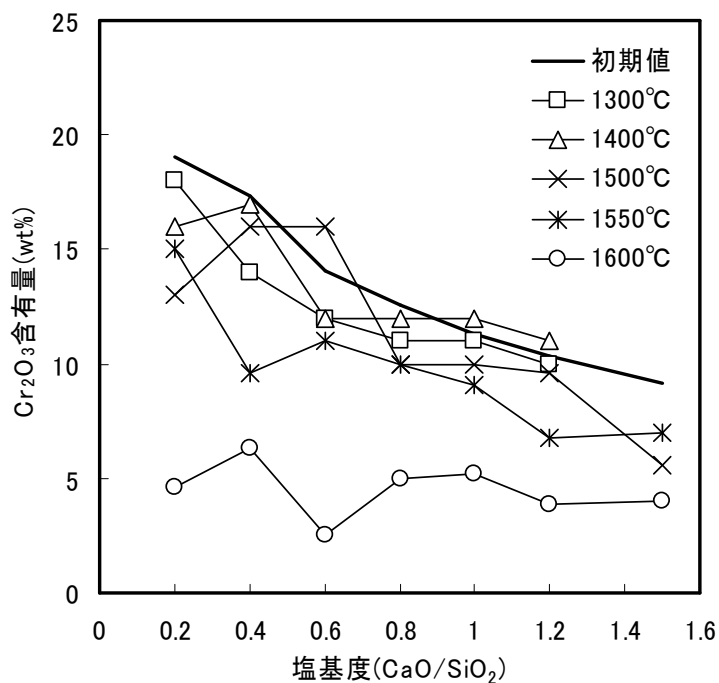


図 3-7 塩基度と酸化クロム含有量の関係

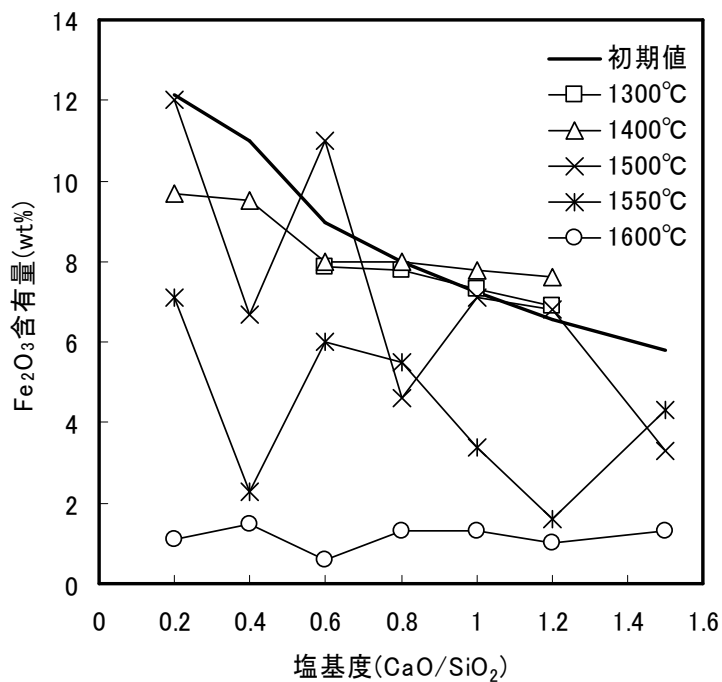


図 3-8 塩基度と酸化鉄含有量の関係

3-3-2 小型溶解炉による溶融還元処理

(1) 集塵ダスト、ガラスビーズの化学組成について

集塵ダストおよびガラスビーズの分析結果を表3-4に示す。生石灰はCaO:100%とした。

表 3-4 集塵ダストおよびガラスビーズの成分

	Ig-loss	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂	Total, wt%
集塵ダスト	5.66	0.49	0.20	0.61	2.92	7.74	14.15	11.32	53.77	0.90	97.76
ガラスビーズ		9.2	1.5	19	3.3			0.5	65		98.5

(2) 塩基度調整がクロムの抽出に与える影響について

生石灰およびガラスビーズの量を変えて塩基度を変化させておこなった溶融試験について、スラグ層の成分の時間に対する挙動を図 3-9、10 に、溶融試験終了後のメタル層の分析結果を表 3-5 に示す。

図 3-9、10 を比較して、塩基度の差によるスラグ中の酸化クロムおよび酸化鉄の含有量に大きな差は見受けられない。また、90 分間保持することによって、スラグ中の酸化クロムの含有量は 1wt%を切っていることがわかる。

表 3-5 から、塩基度調製によるメタル層中のクロムの含有量に大きな差は見られなかった。

したがって、塩基度調製がクロムの抽出効率に与える影響は少ないものと示唆される。

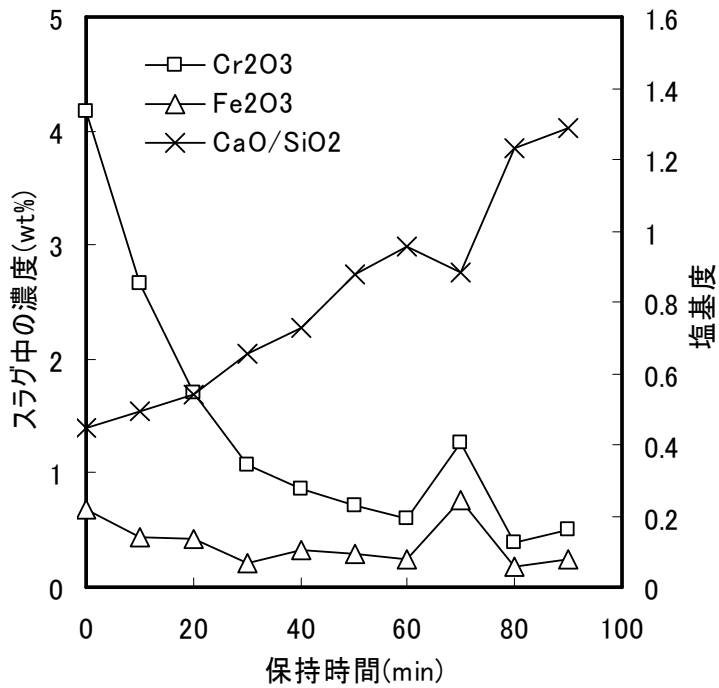


図 3-9 テスト No. 2 スラグ層成分の時間に対する変化

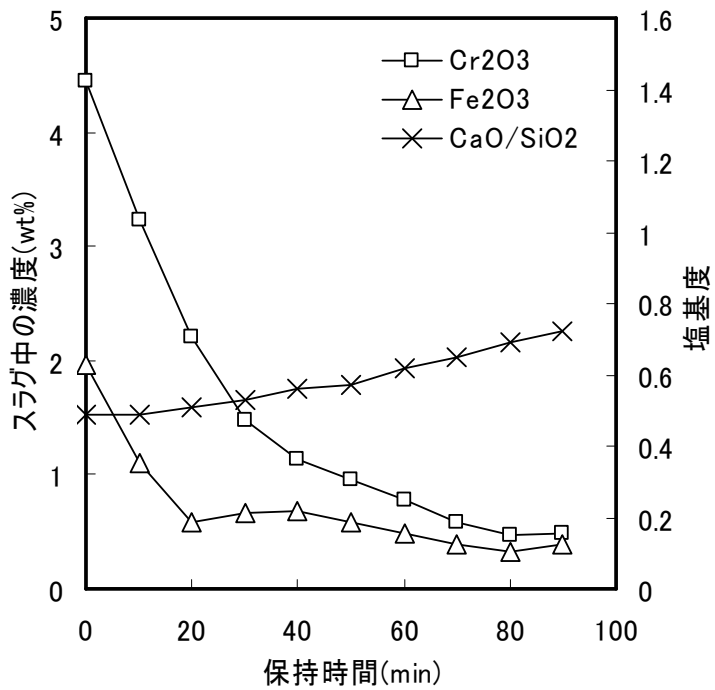


図 3-10 テスト No. 3 スラグ層成分の時間に対する変化

表 3-5 塩基度を変化させたメタル層の分析結果

	Al	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	C
②	0.38	15	0.03	12	0.47	72	-	0.09	0.10	2.07
③	0.06	14	0.03	12	0.57	73	0.11	0.10	0.04	1.84

wt%

(3)還元剤がクロムの抽出に与える影響について

図 3-11~13 にアルミニウムの投入量を変えておこなった熔融試験の結果を示す。

図 3-10 および図 3-11~13 より、アルミニウムの添加量が増加するにしたがって、スラグ中の酸化クロムの含有量は減る傾向を示し、特に、アルミニウムを投入してから早い時間で含有量が減ることが明らかである。

しかしながら、表 3-6 から熔融処理後のメタル層中のクロムの濃度は、アルミニウムを投入することによる効果が見られない。これはメタル層側の試料の分取による差と考えられ、クロムは効果的に還元抽出されていると思われる。

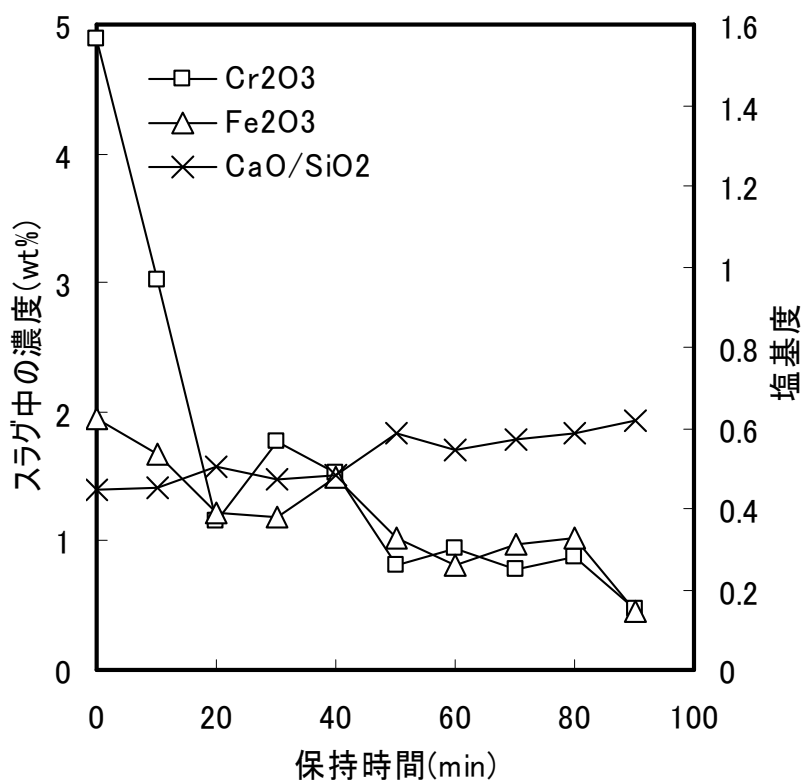


図 3-11 テスト No.1 スラグ層成分の時間に対する変化

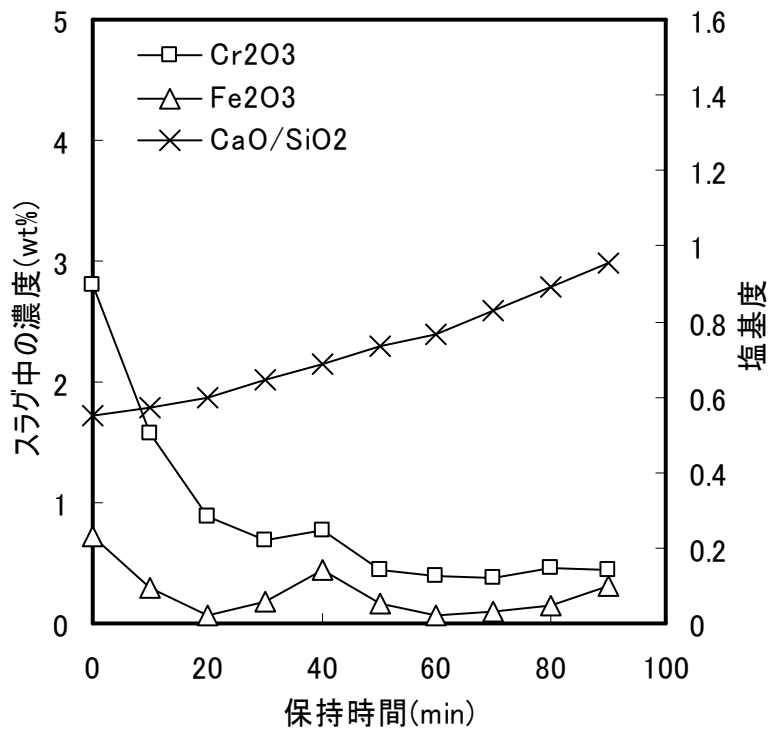


図 3-12 テスト No. 4 スラグ層成分の時間に対する変化

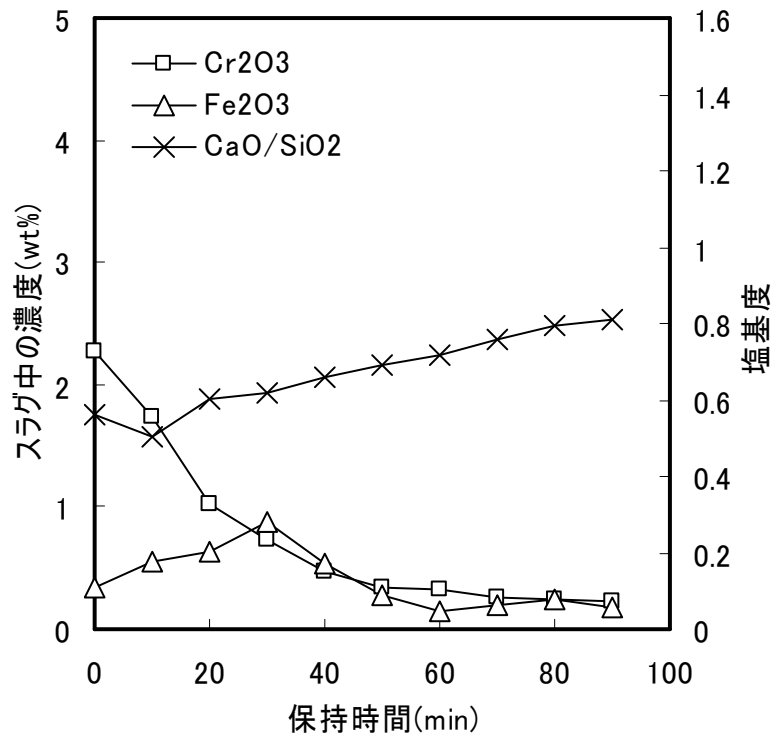


図 3-13 テスト No. 5 スラグ層成分の時間に対する変化

表 3-6 還元剤の量を変化させたメタル層の分析結果

	Al	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zr	C
①	0.87	15	0.03	14	0.45	69	0.13		0.02	4.13
③	0.06	14	0.03	12	0.57	73	0.11	0.10	0.04	1.84
④	0.13	16	0.03	12	0.52	71			0.11	
⑤	0.33	20	0.02	13	0.45	66	0.11	0.10	0.04	

wt%

3-3-3 実用溶解炉による熔融還元処理

(1) 集塵ダストの固形化

図 3-14 に集塵ダストの外観および固形化後の外観を示す。集塵ダストはデンブンをバインダーとして用いることによって、乾燥後は高さ 1m からの落下試験においても、破壊することなく固形化することができた。

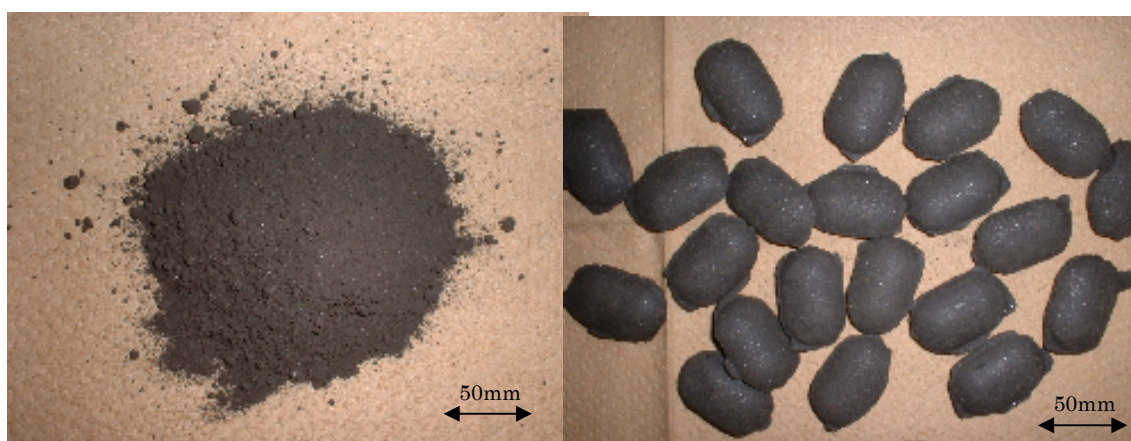


図 3-14 集塵ダストと固形化サンプルの外観

(2) 熔融方法の検討

熔融方法の検討結果を表 3-7 に示す。追加投入方式がその他の 2 方式に比べ、ダスト投入量が最も多いにもかかわらず溶解時間が短い。このことから最も効率が良いと考えられる。

表 3-7 溶解方法ごとの溶解条件と溶解時間

	同時溶解方式	かけ湯方式	追加投入方式
溶解時間(分)	137	109	105
ダスト量(kg)	500	500	940
石灰石量(kg)	482	508	557
下湯量(kg)	0	890	2200
スクラップ(kg)	2000	680	0
塩基度	1	1.06	0.59

(3)還元剤(AI)の効果

還元剤(AI)投入によるスラグ層、メタル層中のCr分の変化を図3-15、16に示す。AI投入直後に明らかなスラグ中の Cr_2O_3 の減少と有用金属中のCrの増加が見られる。

また、AI投入後保持した場合のCrおよびAIの成分値変化を図3-17に示す。AI投入直後に著しい還元効果が現れ、その後は保持時間と共に徐々に還元効果が高まっていく。溶解コストを考慮した場合、AI投入直後に処理を終了した方が、保持時間を延長するよりも望ましい。

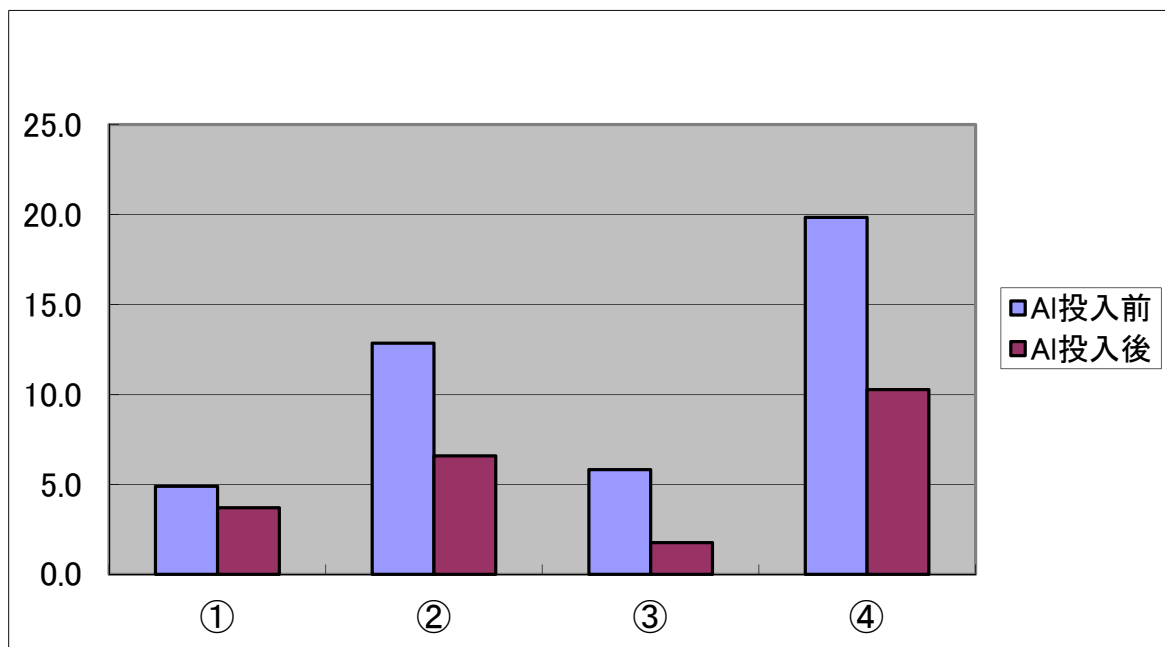


図 3-15 スラグ中の Cr_2O_3 (mass%)

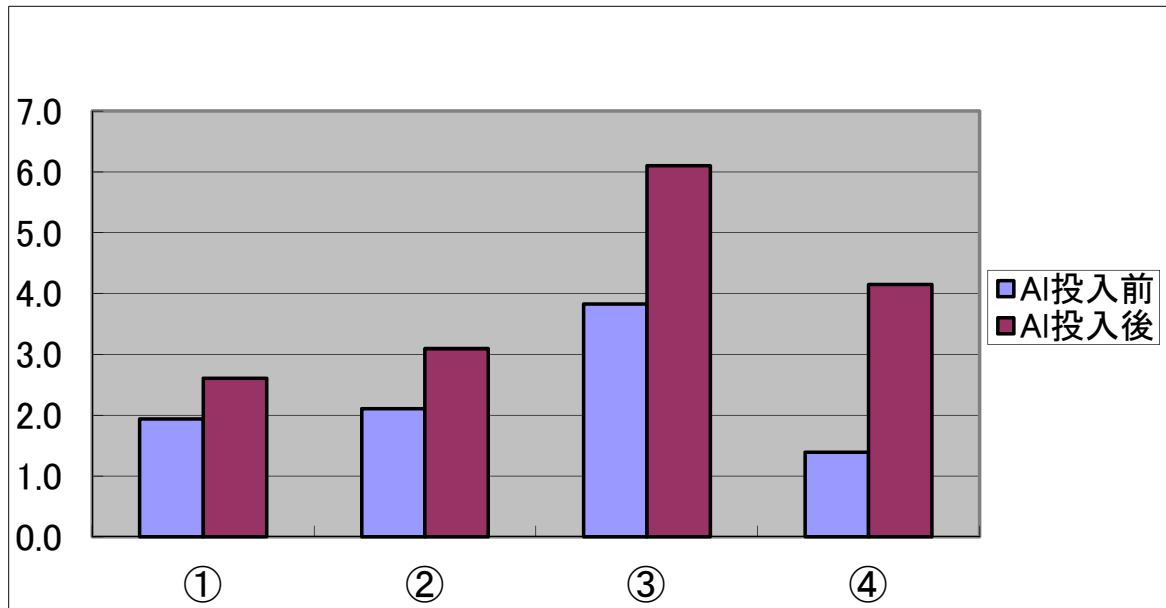


図 3-16 メタル層中の Cr (mass%)

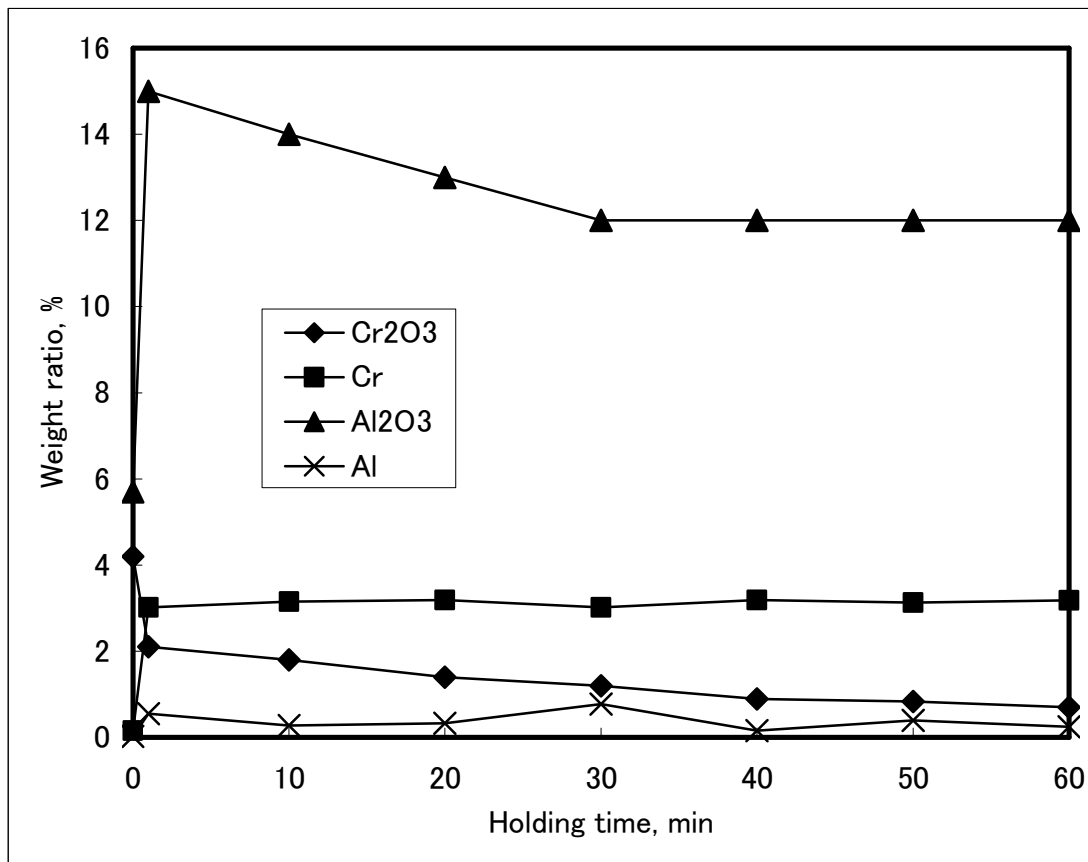


図 3-17 Al 投入後の保持時間と成分値の関係

3-4 考察

3-4-1 電気炉による塩基度調整効果

塩基度を0.2~0.6の間に調整することで最も低温である1300℃における溶融が確認された。塩基度を2.0に調整したものは1600℃でも溶融せず、カルシウムの過剰添加は溶融性に悪影響を及ぼすことか示唆される。

実験の結果、クロム、鉄の還元性への塩基度調製の効果は低いと考えられる。

3-4-2 小型溶解炉による溶融還元処理

塩基度調製自体が直接クロムの抽出効率に与える影響は少ないものと考えられるが、塩基度調製によって融液の粘性が低下し、スラグ層、メタル層の比重分離が生じやすくなると示唆される。

アルミニウムの添加によって、スラグ層からのクロム抽出速度が速くなり、効率的に処理をおこなうことが可能となる。

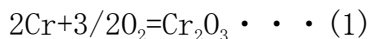
3-4-3 実用溶解炉による溶融還元処理

集塵ダストの成分変動については、有用金属元素である、Fe、Crとも数%程度の変動が見られた。ただ、実際の廃棄物処理では、溶解中に成分チェックをおこないながら溶解をおこなうので、この程度の変動であれば大きな問題にはならないと考えられる。

溶解方式については、溶解時間や必要電力量から考えて、追加投入方式がもっとも効率が良いと考えられる。

還元剤としてのAlの効果はすばらしいものがある。特に添加直後の還元効果が著しい。

還元剤としてのAlの添加効果は、以下に示す化学平衡式からも明らかである。クロム酸化物の生成反応式は、



で、(1)式の標準生成自由エネルギーは、以下の式に示される。

$$\Delta G_{\text{Cr}} [\text{J}] = -1136747 + 259.03T \quad ^{\text{7)}$$

また同様にAlの生成反応式は、

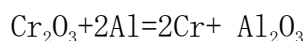


で、(2)式の標準生成自由エネルギーは、

$$\Delta G_{\text{Al}} [\text{J}] = -1685637 + 326.11T \quad ^{\text{7)}$$

となる。

実際の Al 添加による溶湯中でのクロム酸化物の還元反応は、(1)、(2)式より



となり、2つの反応式における標準生成自由エネルギーの差は、

$$\Delta G_{\text{T}} = \Delta G_{\text{Al}} - \Delta G_{\text{Cr}} = -548890 + 67.08T \quad \cdot \cdot \quad (3)$$

で、クロム酸化物の還元を進行させる方向に反応が進むこと示している。

これらのことから、電気代、メタル中のクロム量等を考えると Al 投入後、長時間保持せずに、投入した Al が溶融した時点での出湯することが望ましいと考えられる。

3-5 結言

本研究により、次のような成果を得ることができた。

- ・ 鑄造廃棄物中の塩基度 (CaO/SiO₂ 比) を調製することによって、低温での溶融が可能となる。
- ・ 鑄造廃棄物からの金属クロムの抽出率向上のために、還元剤を添加することを試みた結果、融液中にアルミニウムを添加投入することによって、還元速度が飛躍的に向上した。
- ・ 実験室スケールにおいて得られた成果をもとに、実用溶解炉を用いた実機試験をおこなった結果、金属クロムの還元抽出に成功した。

参考文献

- 1) 廃棄物の処理および清掃に関する法律：(1970) 法律第 137 号
- 2) (財)素形材センター：研究調査報告 No. 474 (1994) 4
- 3) (財)素形材センター：研究調査報告 No. 538 (1998) 14
- 4) (財)素形材センター：研究調査報告 No. 548 (2000) 71
- 5) 木口昭二、田代雅也、炭本治喜：鑄造工学 74(2002) 571
- 6) 日本鉄鋼協会編：第 2 版 鉄鋼便覧 丸善(1967) 10
- 7) 日本鉄鋼協会編：第 3 版 鉄鋼便覧 I 基礎 丸善(1981) 3

第4章 木質資源を用いた鋳物用加炭材の研究開発

今回加炭材の原料として利用した木質系資源は、再生可能な資源であるため、化石資源に変わる新たなエネルギー源として期待されている。

高知県は森林面積 84%を有する全国有数の森林県である。しかし発生した間伐材の多くが山林に放置されており、豊かな資源を有効に利用できていない¹⁾。それらの資源を効率良く利用することで地域産業が発展し、そして、間伐材を利用する方法が確立されれば更なる地域産業の発展に繋がるという大きな可能性がある。また、木質系資源は、成長過程で光合成により大気中の CO₂ を吸収する。そのため燃焼時に発生する CO₂ は本来大気中に存在した CO₂ であり、大気中の CO₂ 総量に影響は与えないので（カーボンニュートラル）、地球温暖化への影響が化石燃料より少ないことも利点として挙げられる^{2) 3)}。

これらの、化石資源の代替や森林資源の有効利用の観点から、本研究では、鋳物用加炭材として木炭を使用することを目的とし、木炭とコークスの物性評価、小型実験炉での小規模試験、大型実機炉での実用化試験の 3 つの過程を踏まえ研究をおこない、木炭を加炭材として実用化することを目指した。

4-1 鋳鋼用加炭材への木炭の利用

(1) 緒言

木質資源の有効利用は、二酸化炭素、化石資源利用削減の観点からも研究されてきている。著者の共同研究者らは、炭素化過程での発生ガス中に水素やメタン、一酸化炭素などの可燃ガスが含まれていることから、これらのガスを熱源とする炭素化炉を開発した^{4) 5)}。この炭素化炉を用いることで、安価な炭の製造が可能になった。

今回は木炭を鋳物用に使われる加炭材としての利用を考え、中でも研究協力企業が製造する鋳鋼への適用を図った。鋳鋼を製造するには、鋳鋼の用途に合った炭素を含有させることが必要である。このため鋳鋼の熔融中に加炭材を添加する。現在、加炭材としては石炭から造ったコークスが主に利用されている。化石資源の低減、CO₂削減からもコークスの代替品としての木炭の使用を検討した。

(2) 実験方法

(a) 使用した加炭材

使用した加炭材は、実機で使用しているコークス、筆者らが開発した炭化炉

で製造した木屑から造った高密度木炭、間伐材などから造った廃棄木材炭の 3 種類を用いた。

性状を表 4-1-1 に示す。

表 4-1-1 加炭材の物性

加炭材	嵩密度 (g/cm ³)	比表面積 (m ² /g)	灰分 (%)	発火温度(°C)	硫黄分 (%)
コークス	1.65	3.62	18.8	467	0.12
高密度木炭	1.13	12.86	0.8	368	0.04
廃棄木材炭	0.45	16.21	1.11	342	0.03

コークス加炭材は、かさ密度が高く比表面積が小さい。また灰分量が 18.8%と多く、鑄鋼の品質を劣化させる恐れのある硫黄が 0.12%含まれていた。

それに対し、木質系の加炭材では、高密度木炭の密度はコークスに準じる 1.13g/cm³であったが、廃棄木材炭では、0.45g/cm³と小さな値であった。

これに対し比表面積については、木炭系加炭材はコークスの 4 倍程度であった。木炭の灰分や硫黄分はコークスと比較して非常に小さいものであった。

加炭材として供する際、炉内温度によって燃焼する問題があり、これに関係する発火温度については、コークスが 467°Cであったのに対し、木炭系は約 100°C 低い温度であった。

X線回折法での結晶構造を調べたところ、コークスは Cu K α 2 θ 26 度付近にピークを持つ黒鉛構造を示していた。木炭系加炭材は何れも非晶質構造であった。

表面観察を電子顕微鏡でおこなった。結果を図 4-1-1~4-1-3 に示す。

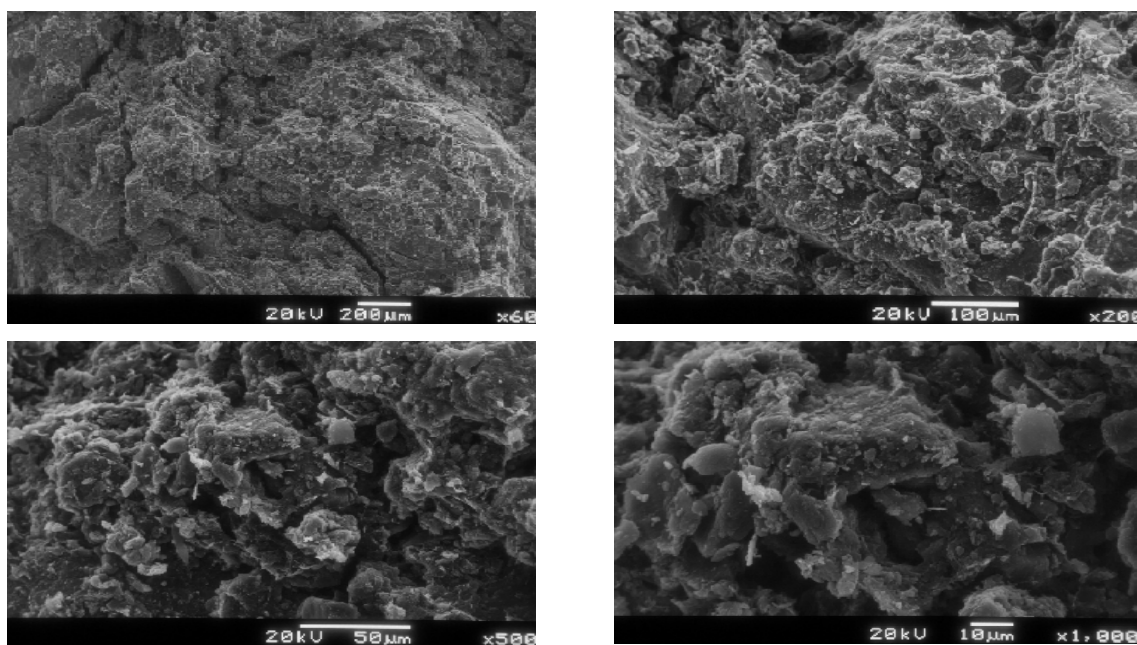


図 4-1-1 電子顕微鏡によるコークス加炭材の表面写真

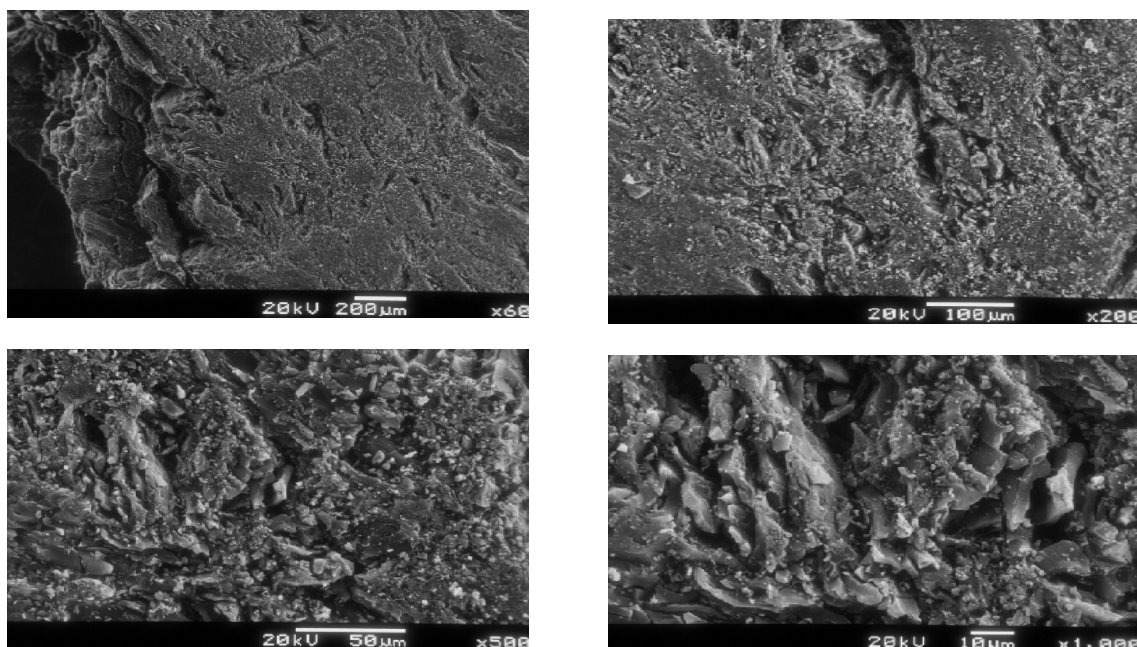


図 4-1-2 電子顕微鏡による高密度木炭の表面写真

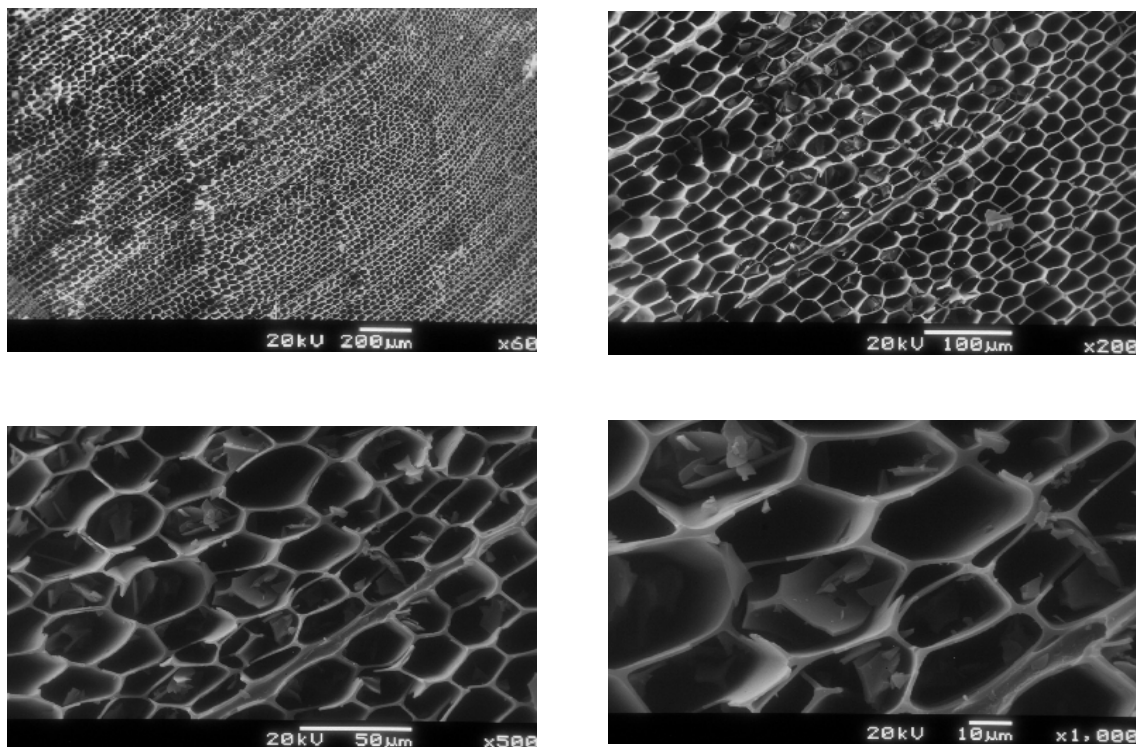


図 4-1-3 電子顕微鏡による廃棄木材炭の表面写真

表面観察では、コークスの表面は非常に凹凸が多く、粒の集まりが観察された。これは、コークス製造の際、石炭を高温で蒸し焼きした時に石炭粒子が溶融したためだと考えられる。

廃棄木材炭は、植物の特性である細胞壁が顕著に現れていた。なお、高密度木炭も木質系材料であるが、原料が木炭と異なり、おがくずを加熱圧縮成型したものであるため、細胞壁や維管束など植物の構造的特徴は観察されなかった。

(b) 高周波誘導炉による加炭試験

実験装置は、高周波誘導炉を使用した。装置の概要を図 4-1-4 に示す。内容積は約 5000cm^3 である。



図 4-1-4 実験に用いた高周波誘導炉

実験操作は、以下のようにおこなった。
炉底に加炭材 100g、その上から生石灰 50g、鉄板 10kg を充填した (図 4-1-5)。

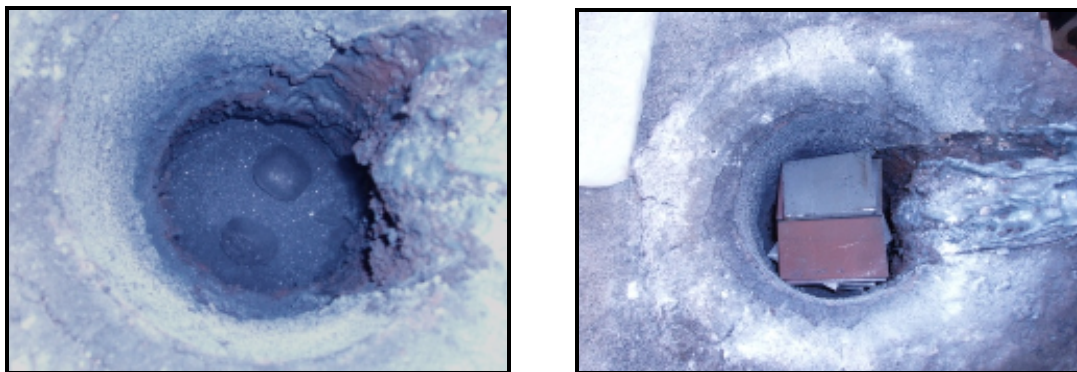


図 4-1-5 高周波誘導炉への試料充填の様子

加炭材、鉄板、生石灰の充填後、高周波誘導炉により溶解をおこなった。溶解炉起動時点から時間を計り、60 分で溶解が終わるように出力を調整した。溶解温度は 1600℃とし、温度の測定は、R 型消耗熱電対によりおこなった。

出湯前に、CaSi 50g、Al 50g をそれぞれ投入し脱酸処理をおこない、再度 1600℃へ昇温した後出鋼した。

また、炭素が鉄に加炭していく反応をより明確にするために、加炭材を 500g にしての試験もおこなった。この試験では、溶解、昇温後、1600℃の温度を保持したまま、脱酸剤添加時を 0 分とし、2、5、9 分後にサンプル採取し、炭素含有率の測定をおこなった。

(c) 加炭反応

溶湯と加炭材の加炭反応を調べるために、コークス、木炭系加炭材を 1.14～4mm の粒状にし、原料に鉄板、生石灰のみを用いて、脱酸処理した 1600℃の鑄鋼溶湯との接触時間ごとの炭素含有量を調査した。接触時間は、加炭材投入時を 0 秒とし、その後、20 秒おきに 120 秒後までサンプルを採取した。

(3) 実験結果および考察

(a) 高周波誘導炉による加炭試験

高周波誘導炉での鑄鋼への加炭結果を以下に示す (表 4-1-2)。

表 4-1-2 加炭試験後の鑄造品成分分析結果

	成分 (%)					
	C	Si	Mn	P	S	Al
使用鉄板	0.14	0.23	1.08	0.016	0.004	0.01
コークス	0.53	0.30	0.59	0.018	0.006	0.39
高密度木炭	0.67	0.27	0.64	0.016	0.004	0.27
廃棄木材炭	0.65	0.26	0.67	0.015	0.004	0.20

コークス、高密度木炭および廃棄木材炭を加炭材として用いた結果、製造された鑄物中の炭素量は、それぞれ 0.53%、0.67%、0.65%となった。木炭による加炭はコークスと同等または上回る結果となった。また、木炭系の加炭材同士の差はほとんどなかった。

硫黄の量については、原料鉄板中の硫黄量が 0.004%であったものが、コークスを加炭材として使用すると 0.006%に上昇した。一方、木炭では加炭後も 0.004%と全く増加していなかった。木炭中には、ほとんど硫黄分が含まれてないことから、本試験によって加炭材として用いた際にも硫黄の含有量に増加がないことが示された。

次に、加炭材を 500g に増量し、脱酸剤添加後の時間ごとに採取したサンプル中の炭素含有率を測定した結果を図 4-1-6 に示す。

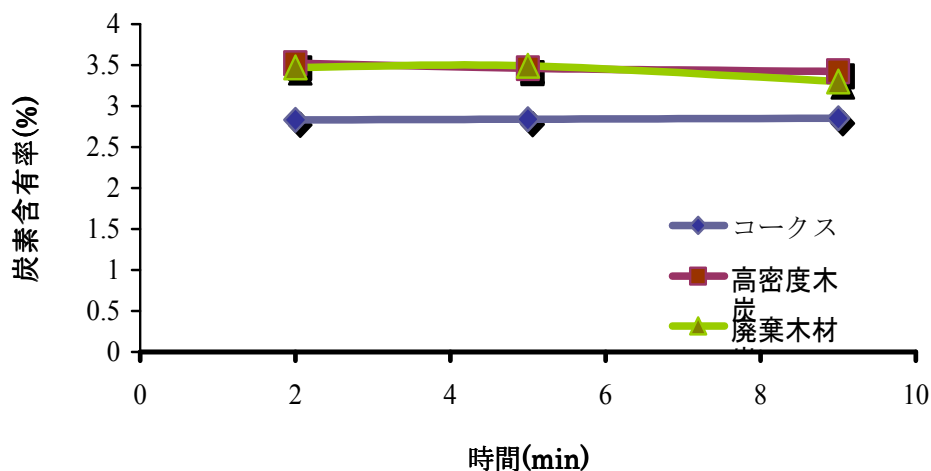


図 4-1-6 加炭試験における脱酸処理後の経過時間と炭素含有量

コークスを加炭材とした場合は、炭素含有率は脱酸処理後 2 分で既に約 2.7% に達していたが、木炭系の加炭材ではいずれも約 3.5%であった。その後 9 分まで 1600℃を保持したが、炭素含有率に変化は見られなかった。加炭については、2 分より以前に起こっている可能性があることが示された。また、この実験では、木炭系の加炭材はコークスよりも炭素の加炭効果が高いことがわかった。

(b) 加炭反応

用意した 1600℃の鋳鋼溶湯に加炭材を添加した時の、120 秒以内の加炭の様子を図 4-1-7 に示した。コークスを加炭材に用いた場合は緩やかに加炭し、120 秒で炭素含有率 0.4%となった。これに対し木炭系加炭材は、40 秒までに炭素含有率 0.8%に達した。40 秒以降、高密度木炭では 60 秒で約 1%、廃棄木材炭では 60 秒で 0.8%となり、それ以降 120 秒後まではほぼ同じ値を示した。

木炭系加炭材は加炭反応が速やかに起こり、約 60 秒で完了することが確認された。

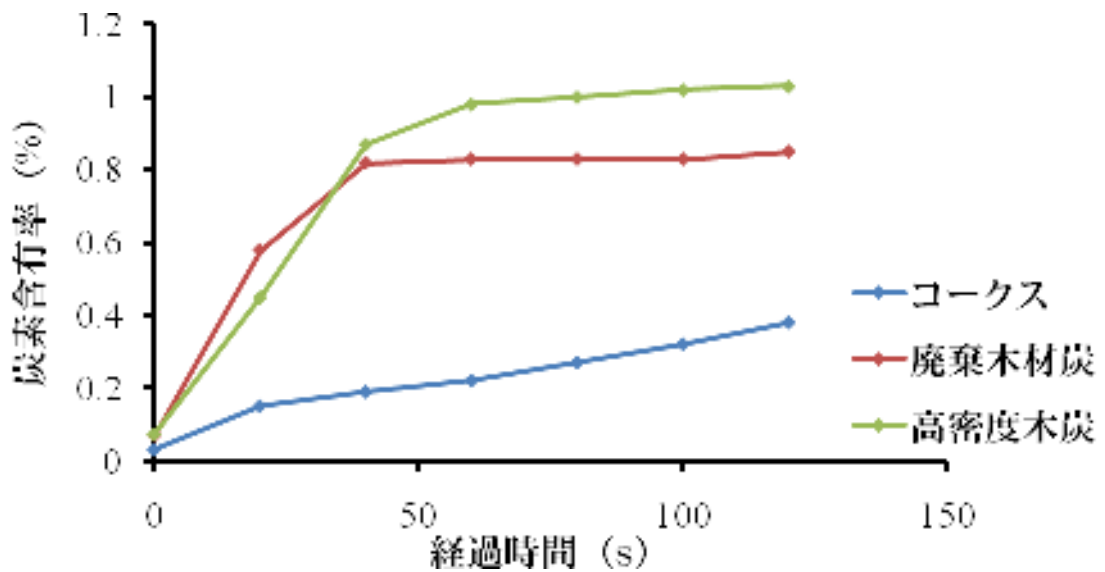


図 4-1-7 鑄鋼への加炭材添加後の経過時間と炭素含有量

(4) 結言

試験結果により、加炭材を木炭とした場合、この試験のような条件であれば、コークスと木炭では、物性に大きな違いはあるものの、同等またそれ以上の加炭効果が得られることがわかった。また、高密度木炭、廃棄木材炭では両者に加炭効果に大きな違いはなかった。

さらに、木炭には硫黄分がほとんど含まれていないことから、加炭材として使用した場合、コークス加炭材と比べ、鑄鋼にとって有害な硫黄分の増加を防ぐ効果があると考えられる。

また、木炭はコークスに比べ加炭反応が速いことも確認できた。

4-2 アーク式溶解炉での木質系加炭材の利用

(1) 緒言

著者の共同研究者らは、木質資源の炭素化過程での発生ガス中に可燃ガスが含まれていることから、これらのガスを熱源とする炭素化炉を開発した⁴⁾⁵⁾。この炭素化炉を用いることで、安価な炭の製造が可能になった^{3)~5)}。この安価な木炭を鋳物用に使われる加炭材としての利用を考え、中でも共同研究企業が製造する鋳鋼への適用を図った。

前項の実験により、小型の高周波炉での実験では、十分に加炭することが判明した。そこで共同研究企業が所有するアーク式溶解炉で実証実験をおこなった。

(2) 実験方法

(a) 実験装置および実験材料

実験装置には、(株)特殊製鋼所が所有しているアーク式溶解炉（鋳鋼3トン溶解用）を使用した。本炉は、傾動機構を持つ3相交流アーク炉である。外観写真を図4-2-1に示す。



図 4-2-1 実験に用いたアーク式溶解炉

実験材料には以下のものを用いた。

- ・ コークス加炭材

コークスを原料とする加炭材を使用した。(炭素含有量：80%)

- ・ 木質系加炭材

ここでは廃棄木材炭を使用し実験をおこなった。廃棄木材炭というのは、著者らが開発した炭化炉で製造した間伐材から造った木炭である。(炭素含有量：98%)

それぞれの実験において使用量が異なるが、約 20～40kg を目安に設定した。

(溶落時の溶湯中の目標炭素含有量：0.4～0.5%)

- ・ スクラップ (鉄板)

肉厚 5～20mm 程度のプレス屑を主とする鉄スクラップを使用した。(炭素含有率：0.15%)

- ・ カバー材

木炭と空気の接触を可能な限り抑え、加炭材の燃焼が起こることを防ぐために、約 10cm～15cm 程度の長さに切りそろえられた農業用機械部品製造時の端材をカバー材とし使用した。この端材は、炭素含有量の多いばね鋼素材である。(炭素含有率：0.48%)

- ・ 戻り材

通常の製造時に生じる普通鋳鋼の戻り材を使用した。(炭素含有率：0.25%)

(b) 実験手順

実験手順を以下に示す。

- ① 試料充填・・・まず炉底に木質系加炭材を敷き詰める。その上に、カバー材、戻り材、スクラップの順に充填していく。
- ② 試料充填後、アーク式溶解炉の電源を投入し、溶解作業をおこなう。
- ③ 加炭効果を確認するための溶銑中の炭素含有量測定は、固体発光分光分析装置を用い、炉内の原料が完全に溶け落ちた直後に採取したサンプルによりおこなった。



① 炉底に加炭材投入



②次にカバー材を投入



③さらに戻り材を投入



④最後にスクラップを投入

図 4-2-2 アーク式溶解炉への試料充填の手順

(c) 実験条件

①溶解炉が室温の場合

まず、炉が完全に室温になっている状態での実験をおこなった。木質系加炭材を投入しても燃焼してしまう心配がない。投入実験材は以下の通りである。

表 4-2-1 室温での供試原料

使用加炭材	スクラップ (kg)	カバー材 (kg)	戻り材 (kg)	加炭材 (Kg)	全体湯量 (kg)	総炭素量 (%)
コークス	3330	1040	2120	40	6530	0.72
コークス	4070	370	2570	40	7050	0.66
廃棄木材炭	1320	680	2740	20	4760	0.67
廃棄木材炭	3320	1040	2120	50	6530	0.98

② 溶解炉が温まっている場合

次に、前日に溶解をおこなった場合など、炉内がまだ温かい状態（加炭材充填時約 300℃）での実験をおこなった。

本実験での課題として、加炭材充填時の溶解炉内温度が挙げられる。今回の実験炉では、深夜電力を使用し溶解をおこなっている。通常は一晩に 3 回の溶解をおこなうため、最後の出鋼が午前 7 時前後となる。そのため、昼間に試料を充填する際、加炭材の発火が起こってしまうのではないかと考えた。そこで本実験では、溶解炉内部の時間毎の温度変化についても調査をおこなった。温度測定方法は以下のとおりである。

温度測定は、放射温度計（IR-304（株）カスタム）を使用し、測定時間は、9:00、11:00、12:00、13:00、14:00、15:00 とした。以下に炉内の温度測定箇所（5カ所）を示す。



図 4-2-3 温度測定箇所

本実験の投入実験材は以下の通りであった。

表 4-2-2 溶解炉が温まっている場合の供試原料

使用加炭材	スクラップ (kg)	カバー材 (kg)	戻り材 (kg)	加炭材 (kg)	全体湯量 (kg)	総炭素量 (%)
コークス	2700	0	1500	40	4240	0.94
コークス	3130	740	2550	40	6460	0.72
廃棄木材炭	2100	880	800	27	3807	0.94
廃棄木材炭	2620	730	1270	35	4655	0.96

③ 連続操業実験

一回目の出鋼終了後すぐに試料を充填する連続操業での実験もおこなった。連続操業実験では、試料充填時における溶解炉内の温度は 1000℃以上ある。それぞれ 1 回目の溶解は①、連続溶解 2 回目は②として表記した。

表 4-2-3 連続操業実験における供試原料

使用加炭材	スクラップ (kg)	カバー材 (kg)	戻り材 (kg)	加炭材 (Kg)	全体湯量 (kg)	総炭素量 (%)
コークス①	4000	980	1520	40	6540	0.71
コークス②	2640	800	900	40	4380	0.96
廃棄木材炭 1-①	2370	800	1100	50	4320	1.37
廃棄木材炭 1-②	2690	800	1280	30	4800	0.84
廃棄木材炭 2-①	2730	1160	840	30	4760	0.87
廃棄木材炭 2-②	2900	1100	1000	33	5033	0.88

(3) 実験結果

①溶解炉が室温の場合

溶落時に採取したサンプルより測定した炭素含有量および添加原料の総炭素量から算出した歩留りについて以下に結果を示す。また、カバー材の効果を確認するために、カバー材と加炭材の重量比についても記載した。

表 4-2-4 溶解炉が室温の場合の実験結果

使用加炭材	添加原料中の総炭素量 (%)	溶落時の炭素含有量 (%)	歩留り (%)	カバー材/加炭材
コークス	0.72	0.57	79.2	26
コークス	0.66	0.29	43.9	9
廃棄木材炭	0.67	0.28	41.8	34
廃棄木材炭	0.98	0.57	58.2	21

この結果から、ばらつきは大きいものの、木質系加炭材がコークス加炭材と同様に実機溶解炉でも実用範囲内で使用できることがわかった。

②溶解炉が温っている場合

まず、炉内の温度測定の結果を示す。

表 4-2-5 溶解炉内温度測定結果

(°C)

測定位置	時刻					
	9:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
1	500	360	318	300	270	243
2	447	300	250	242	240	222
3	409	305	267	241	230	213
4	451	270	263	230	219	209
5	419	325	296	268	246	228

温度測定の結果、12:00 の時点では最も温度が高い箇所で 318°Cであることがわかった。

そのため、廃棄木材炭の発火温度である 342°Cを下回る 12:00 以降の試料充填であれば発火が起こらないことがわかった。

①と同様に実験結果を以下に示す。

表 4-2-6 溶解炉が温まっている場合の実験結果

使用加炭材	添加原料中の 総炭素量(%)	溶落時の炭素 含有量(%)	歩留り(%)	カバー材/加 炭材
コークス	0.94	0.54	0.57	0
コークス	0.72	0.40	0.56	19
廃棄木材炭	0.94	0.51	0.54	33
廃棄木材炭	0.96	0.50	0.52	21

表 4-2-6 より、溶解炉が温まっている状態でも木質系加炭材が使用可能であることがわかった。但し、木質系加炭材にとって、カバー材の充填による空気との遮断は必須であると考えられる。

③連続操業実験

表 4-2-7 は連続操業実験の結果である。

表 4-2-7 連続操業実験結果

使用加炭材	添加原料中の総炭素量 (%)	溶落時の炭素含有量 (%)	歩留り (%)	カバー材/加炭材
コークス①	0.71	0.42	0.59	25
コークス②	0.96	0.45	0.47	20
廃棄木材炭 1-①	1.37	1.19	0.87	16
廃棄木材炭 1-②	0.84	0.67	0.80	27
廃棄木材炭 2-①	0.87	0.61	0.70	39
廃棄木材炭 2-②	0.88	0.47	0.53	33

表 4-2-7 より、連続操業により、1 回目の溶解時より 2 回目の溶解時の方が、歩留りが悪化しているのが確認できる。但し、この歩留り低下は、従来のコークス加炭材でも同様に発生しており、木質系加炭材を使用する場合に不利な条件になるとは考え難い。

(4) 結言

以上の結果より、実機大型溶解炉においても、小型実験炉と同様に木質系加炭材をコークスの代替品で使用できることが確認できた。

また、木質系加炭材は、炭素含有率が高く、溶解条件によっては、従来のコークス加炭材よりも歩留りが良い場合もあるため、使用量を低減できる可能性がある。

但し、木質系加炭材の低い燃焼温度に起因する溶解炉の残留熱による燃焼損失を防ぐためには、カバー材の充填による空気との遮断が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 高知県森林局：高知県木質バイオマス活用プラン(2006) 5
- 2) 環境省、経済産業省：温室効果ガス算定報告マニュアル Ver. 3.1(2010) II-1
- 3) 木下徳彦、平野春好、井上紀夫、佐々木利博、村田博敏：J. JFS
Vol. 80, No. 6(2008) 337

- 4) 坂輪光弘、橋爪利夫：特願 2005-343071
- 5) 坂輪光弘：化学工業 39(2005) 42-56
- 6) 坂輪光弘、山崎新平：炭素 No. 211(2004) 4
- 7) 坂輪光弘：日本エネルギー学会 総説 86(2007) 736
- 8) 坂輪光弘：炭素材料の新展開 日本学術振興会 第 117 委員会編 (2007) 290

第5章 結論

金属材料に適当な物性や機能を付与して所定形状の品物を造るのに最も簡単で古くから使われている金属の成形プロセスである鋳造は、これまで世界中の工業の根幹を支えてきたが、同時に昨今盛んに取り沙汰されている環境負荷の大きさでも常に話題にされている。鋳造プロセスの環境負荷低減に関しては、世界中の企業、研究機関等が、近年様々なアプローチを試みているが、ほとんどの分野で根本的な解決には至っていない。

そこで、本研究では、{1} 鋳造プロセスそのものの改良による環境負荷低減（消失模型鋳造法による低環境負荷鋳造プロセスの開発）、{2} 鋳造プロセスから排出される環境負荷の循環リサイクル（鋳造廃棄物の省エネ型溶融によるリサイクルシステムの開発）、{3} 鋳造プロセスに使用される材料の代替による環境負荷の低減（木質資源を用いた鋳物用加炭材の開発）、の3つの観点から技術開発をおこない、一定の成果を得ることが出来たのでその結果について報告する。

5-1 消失模型鋳造法による環境負荷低減型プロセスの研究

5-1-1 模型熱分解生成物の発生挙動およびその性状

消失模型鋳造法は、基本的には造型の際、鋳物と同形の発泡ポリスチレン(PS)で作った模型を鋳物砂の中に埋めたまま抜き取ることなく注湯して鋳物を製造する方法である。注湯された溶湯は模型を気化させながら、順次充填する特異な流動形態をとるといわれている。その際、塗型層を通して型砂部に排出した模型の熱分解ガスはその後、大気中へ放出される。このように従来から、特に排気ガス処理対策はおこなわれていないのが現状である。本研究では、高温ばく熱下でのこれらの模型の気化に伴う熱分解ガスの排気ガス対策の必要性とその処理の可能性について検討し、次の結果を得た。

- ①高温ばく熱下での模型の気化に伴う熱分解ガスの組成分析により、排気ガス処理の必要性を明らかにした。

5-1-2 模型熱分解生成物が鋳造品に与える影響

「垂直面円運動振動を適用した消失模型鋳造法の試作例」

現在、消失模型鋳造法に使用されている砂充填用の振動テーブルは、模型寸法や方案の大きさならびにプラスチック寸法に見合った加振力のものが市販されている。これらの目的とするところは、消失模型鋳造法にとって“模型への砂充填”特性が極めて重要と認識されることによる。すなわち、砂が振動により流

動化(流動性)して模型を完全にバックアップ(埋没)するとともに見かけ密度を高く(充填性)することにより鑄型強度が確保される。したがって、この砂の流動性および充填性は振動テーブルの加振条件(振動方向、加振力、振幅および加振時間など)によって異なることは容易に予想される。

本研究では、模型熱分解生成物が鑄造品に与える影響を正確に検証するために、その前提となる造型での欠陥要因を排除するため、消失模型鑄造法にとって有用な砂の流動形態をとるといわれている垂直面円運動振動を適用した場合の試作と量産の可能性を調べた。すなわち、従来の水平軸および垂直軸振動では不十分な砂充填により生産が困難であった深い横穴やアンダカット部などを有する現用の製品模型について検討し、次の結果を得た。

垂直面円運動振動による造型方法を、従来の水平軸および垂直軸振動では不十分な砂充填により生産が困難であった深い横穴やアンダカット部などを有する模型に適用して試作し、以下のことを明かにした。

- ①垂直面円運動振動による造型は横穴への砂充填に対して有効であることを明らかにした。
- ②垂直面円運動振動による造型で横穴部に十分に砂が充填できても不適正な方案では型崩れを生じることを示した。
- ③適正な垂直面円運動振動条件および方案を選定することにより量産が可能であることを示した。

「パイプ形状模型を用いた消失模型鑄造法における造型と鑄造特性」

従来の消失模型鑄造用振動テーブルは直線往復運動が主流であった。しかしこのタイプの振動テーブルでは方案や振動条件を変化させて造型しても、製品横穴部の砂充填不良による型崩れを防止することができなかった。近年、垂直面円運動による振動テーブルが開発され、この垂直面円運動振動テーブルを、これらの鑄造品の造型に適用することで、型崩れの無い鑄物の鑄造が可能になることが報告されている。しかし長尺の穴形状の鑄物製品などでは、十分に砂充填されているにも関わらず偏肉や型崩れを生じ鑄造不良となる場合がある。さらには縦置きのパイプ形状の鑄物では、パイプ内の砂の自重による圧力は期待されるものの模型の分解ガスが滞留しやすいため鑄物の中央部では減圧による形状の維持が期待できないなどの問題がある。特に、砂の自重による圧縮力、砂粒と壁面との摩擦力および減圧による大気圧の載荷効果による圧力などが複雑に影響することで、新たな欠陥が発生している。しかしながら、これらの現象を視野に入れた系統的な研究は見当たらない。

砂充填が十分でも模型の熱分解ガスが一時的にでも滞留した場合、砂の自重による圧縮力が期待できず、形状保持するだけの強度を維持できないので、型

崩れや中子部の浮力による偏肉が生じると考えられる。

そこで本研究では、まず、パイプ形状の亚克力模型を用いて、内部への振動充填特性を測定し、次に偏肉や型崩れを生じやすい形状で、しかも中子部が片持ちとなる底付きの長尺パイプ形状の模型を用いて鋳造した鋳物の外観や断面観察から型崩れや偏肉の状況を評価し、振動充填特性や減圧度、塗型の通気度との関連性について考察した。

本研究では内径 30 mm で長さを変化させたパイプ形状模型への砂充填性を評価し、得られた造型条件に基づき試作をおこなって鋳造特性を検討し、次の結果を得た。

- ①振動周波数 40 Hz の円運動振動で、正転、逆転をそれぞれ 30 秒おこなえば、パイプ内のかさ密度は十分に高くなる。
- ②パイプ形状模型を鋳造した時に発生する中子部の偏肉および型崩れは、砂の充填が十分であっても減圧による型強度の維持が困難である場合に発生する。
- ③型崩れ対策として、中子部に低通気度塗型剤を重ね塗りすることで防止効果が見られる。

「フラン樹脂再生砂使用の影響」

消失模型鋳造法を採用した工場では、設備のスペースの問題や生産量との兼ね合から、専用ラインを設置しないで、他の鋳造法の砂処理設備を兼用して再生砂を再利用している場合がある。特に製品の種類や形状およびサイズから、フラン樹脂鋳型からの再生砂を用いた場合、再生砂に付着している残留樹脂やその中に含まれる硬化剤などの影響が生じると予想される。本研究では、消失模型鋳造法に再生砂を使用した場合の鋳造品および設備への影響について検討をおこなった。特に再生砂中に残留するフラン樹脂および有機スルホン酸系硬化剤による鋳鋼への加炭現象および球状黒鉛鋳鉄の黒鉛球状化阻害現象を研究の対象とした。また、実際に再生砂による消失模型鋳造法での生産をおこなっている工場の消失模型鋳造用設備への影響を調査し、次の結果を得た。

- ①有機スルホン酸を主成分とする硬化剤で処理したフラン樹脂鋳型砂の再生砂には、硫黄および炭素等の残留が認められる。
- ②再生砂の繰り返し再利用は、砂粒度の微細化により造型砂としての通気度を低下させる。その結果として鋳造不良を引き起こすと考えられる。
- ③再生砂の利用による鋳造品への影響は、PMMA 模型を用いる場合は、基本的には認められない。しかし、再生砂に残留する硫黄分に起因して消失模型鋳造用設備の内部が腐食する影響が認められる。
- ④フラン樹脂再生砂を再利用する場合は、塗装などの防錆対策が不可欠である。

5-1-3 環境負荷低減プロセスの改善

「消失模型鑄造用塗型膜の熱間通気度」

消失模型鑄造法は発泡ポリスチレンなどの消失模型に塗型剤を塗付し、減圧可能な鑄枠に非粘結材の乾燥けい砂で充填造型し、模型を抜き取ることなく直接溶湯を注湯する。そのため一般の鑄造法とは異なる溶湯の充満挙動を示す。この充満挙動の違いは、溶湯により消失模型が分解して生成されるガス、液化樹脂および固体カーボン(すす)などの熱分解生成物が塗型膜を介して乾燥砂中に排出される機構に起因している。

したがって消失模型鑄造法に用いられる塗型剤は、一般の鑄型に使用されている塗型剤とは異なる性能が要求される。特に、造型時の模型にかかる応力を防止するとともに模型表面を保護するに十分な機械的強度と熱分解生成物を停滞させることなく、速やかに排出できる通気性を兼ね備える必要がある。ここでの通気性とは流体の流れやすさの程度で、熱分解生成物を型砂中に排出する能力を示すものである。

消失模型鑄造法用塗型膜の通気度測定方法は、日本鑄造工学会・関西支部の「消失模型鑄造法研究委員会」で標準化され、室温での通気度測定法が提案されている。しかし、鑄造時に塗型膜は高温の熱分解生成物と溶湯にさらされるため、その通気度は複雑に変化すると考えられる。したがって塗型膜の熱間における通気度の変化が評価できれば、欠陥対策などに有効であると考えられる。しかし、鑄造時における塗型膜の熱間通気度変化に関する報告は見当たらない。そこで本研究では、熱間通気度を精度よく、リアルタイムに測定する方法を提案し、市販塗型剤を用いて評価した。また、これら塗型膜の熱間通気度と溶湯充満挙動の関係について検討し、次の結果を得た。

- ①市販塗型剤による塗型膜には室温と熱間で通気度が異なる場合があり、室温通気度に対して熱間通気度が上昇するタイプ、変化しないタイプおよび低下するタイプの三つに大別されることを明らかにした。
- ②熱間通気度が上昇する塗型膜は、残さ欠陥や湯回り不良の防止対策に有効である。
- ③熱間通気度が低下する塗型膜の使用は、残さ欠陥や湯回り不良などが発生しやすいと考えられる。
- ④方案や鑄造条件が同じでも塗型剤の熱間通気度により鑄造時間や鑄造欠陥の発生状況が異なる。このことから、方案設計や不良対策に対して使用する塗型剤の通気度は室温および熱間の両方を把握することが重要である。

5-2 鑄造廃棄物の省エネ型溶融によるリサイクルシステムの実用化研究

鑄造工場から排出される廃棄物は、埋め立て処分する場合、廃掃法においてすべて「鉍さい」として管理型処分地への処理を義務づけられている。近年これらの処分地の不足、環境に対する意識の高まりなどから処理費用は高騰しており、鑄造業界にとって、諸外国との価格競争などと併せて経営を圧迫する重大な問題となっている。

また、埋め立て処分以外にも、排出される廃棄物の種類によっては、セメント工場への受け入れや、路盤材、土木、建築資材への再利用などもおこなわれているが、これらによって再利用可能な廃棄物は、成分などの問題からごく一部であり根本的な解決策とはなっていない。

今回の研究の基礎となっている鑄鋼工場から排出される集塵ダストの溶融処理については、従来から減量化や有害重金属類の除去などを目的として廃棄物のみによる溶融についての実験、研究はおこなわれてきたが、高温での溶融が必要なことから処理コストの面で実用化に至るような開発はおこなわれていない。

そこで著者らは、鑄鋼工場から排出されるクロム酸化物を含有する集塵ダストを、アーク式溶解炉内で、比較的低温で溶融することで、無機物分と金属分に分離し、鑄造原料として再利用可能な金属分の抽出をおこなうと共に、将来的には残存スラグ成分についても鑄型砂などへの再生をおこなうクローズドシステムへ発展させるための研究開発をおこなった。

具体的には、実生産に用いられている鑄鋼生産用アーク式溶解炉を用いて溶融処理をおこない、集塵ダスト中の残留クロムの濃度を1%以下に低減し、実用化の可能性について、次の結果を得た。

- ①鑄造廃棄物中の塩基度（CaO/SiO₂比）を調製することによって、低温での溶融が可能となる。
- ②鑄造廃棄物からの金属クロムの抽出率向上のために、還元剤を添加することを試みた結果、融液中にアルミニウムを添加投入することによって、還元速度が飛躍的に向上した。
- ③実験室スケールにおいて得られた成果をもとに、実用溶解炉を用いた実機試験をおこなった結果、金属クロムの還元抽出に成功した。

5-3 木質資源を用いた鋳物用加炭材の研究開発

5-3-1 鋳鋼用加炭材への木炭の利用

木質資源の有効利用は、二酸化炭素、化石資源利用削減の観点からも研究されてきている。著者らは、木質資源を炭にすることで有効活用できないかの検討をおこなってきた。木質資源を炭にすることで、重量として約2割に減少できるが、炭素化には、炭素化炉が必要になる。この工程でのエネルギーや操業コストが必要になる。このため、付加価値のある炭を製造する必要がある。著者らは、炭素化過程での発生ガス中に水素やメタン、一酸化炭素などの可燃ガスが含まれていることから、これらのガスを熱源とする炭素化炉を開発した。この炭素化炉を用いることで、安価な炭の製造が可能になった。

今回は炭を鋳物用に使われる加炭材としての利用を考え、中でも研究協力企業が製造する鋳鋼への適用を図った。現在、加炭材としては石炭から造ったコークスが主に利用されている。鋳鋼を製造するには、鋳鋼の用途に合った炭素を含有させることが必要である。このため鋳鋼の熔融中に加炭材を添加する。化石資源の低減、CO₂削減からもコークスの代替品を探索した。

通常の鋳鋼は、鉄スクラップを電気炉などで溶解する。この過程でコークスである加炭材を添加するが、1600℃程度の高温化で処理されるので、加炭する前に木炭では燃焼するのではないかと考えられたが、小型の高周波炉での実験により、次の結果を得た。

- ①加炭材を木炭とした場合、この試験のような条件であれば、コークスと木炭では、物性に大きな違いはあるものの、同等またそれ以上の加炭効果が得られることがわかった。
- ②高密度木炭、廃棄木材炭では両者に加炭効果に大きな違いはなかった。
- ③木炭には硫黄分がほとんど含まれていないことから、加炭材として使用した場合、コークス加炭材と比べ、鋳鋼にとって有害な硫黄分の増加を防ぐ効果があることがわかった。
- ④木炭はコークスに比べ加炭反応が速いことも確認できた。

5-3-2 アーク式溶解炉での木質系加炭材の利用

鋳鋼製造時、溶銑中に炭素添加用に加炭材を入れる。加炭材は現在石炭から造られるコークスが使われている。

石炭は、化石資源であり、CO₂の発生源でもある。また、中国等の製鉄業の興隆で石炭価格はここ10年で急激に上昇している。このため石炭を原料とするコークス価格も上昇の一途をたどっている。このため、鋳造業界など中小の企業では加炭材に使うコークスの価格上昇を何かで補う必要に迫られている。

著者らは、木質資源の炭素化過程での発生ガス中に可燃ガスが含まれていることから、これらのガスを熱源とする炭素化炉を開発した。この炭素化炉を用いることで、安価な炭の製造が可能になった。この安価な木炭を鋳物用に使われる加炭材としての利用を考え、中でも共同研究企業が製造する鋳鋼への適用を図った。

前項の実験により、小型の高周波炉での試験では、十分に加炭することが判明した。そこで共同研究企業が所有するアーク式溶解炉で実機試験をおこない、次の結果を得た。

- ①実機大型溶解炉においても、小型実験炉と同様に木質系加炭材をコークスの代替品で使用できることが確認できた。
- ②木質系加炭材は、炭素含有率が高く、溶解条件によっては、従来のコークス加炭材よりも歩留りが良い場合もあるため、使用量を低減できる可能性がある。
- ③木質系加炭材の低い燃焼温度に起因する溶解炉の残留熱による燃焼損失を防ぐためには、カバー材の充填による空気との遮断が必要になると考えられる。

5-4 結語

工業生産の根幹を成す鋳造プロセスを取り巻く環境問題を 3 つの異なる視点から捉え、実験室的なデータとりよりも現場技術に直接結びつく課題を優先的に検討し、実践に役立つ成果を得ることを目標に研究開発をおこなってきた。得られた成果のすべてではないが、実際の製造現場で使われるようになった技術や実用化目前まで迫っている技術もあり、大変有難いことである。本研究開発により、鋳造プロセスの環境問題が根本的に解決された訳ではないが、いくつかの分野の課題解決の一助にはなったのではないかと考えている。今後も、鋳造プロセスの環境負荷低減に関する取り組みは続けていく必要があり、それを達成するための研究開発は続けていく所存である。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、指導教官として終始ご指導戴いた、高知工科大学 総合研究所教授 坂輪光弘先生に深謝の意を表す。

高知工科大学 環境理工学群教授 谷脇雅文先生、前田敏彦先生、同名誉教授 門馬義雄先生、同システム工学群教授 大塚幸男先生ならびに新日鐵化学株式会社 原口博 博士には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導戴いた。ここに深謝の意を表す。

消失模型鑄造法の研究においては、関西大学 工学部教授 三宅秀和先生、山本康雄先生に助言を戴くとともに、実験等についてご指導戴いた。ここに深謝の意を表す。

鑄造廃棄物のリサイクルシステムの開発および木質資源を用いた鑄物用加炭材の開発において、資料を提供して戴くとともに実験に多大なご協力を戴いた株式会社特殊製鋼所 常務取締役 土居康純氏、井戸啓彰氏に対して感謝の意を表す。

有限会社 稲田建設の稲田将人氏には、木質資源を用いた鑄物用加炭材の開発において、実験遂行に多大な協力を戴いた。ここに感謝の意を表す。

鑄造廃棄物のリサイクルシステムの開発において、ご助言を戴くとともに細部にわたりご協力戴いた、高知県工業技術センター 主任研究員 河野敏夫氏に感謝の意を表す。

坂輪研究室に在籍し、本研究遂行に多くの協力を戴いた眞邊照展氏、山崎新平氏、篠田雄一氏、長谷川耕平氏、嶋瀬康宏氏に謝意を表す。