

## フラン樹脂鑄型の焼着欠陥対策

赤田英里\*, 樋尾勝也\*, 伊藤恭祐\*, 近藤義大\*

### Countermeasures against Burn-on Defects in Furan Molds

Eri AKADA, Katsuya HIO, Kyousuke ITO and Yoshihiro KONDO

To reduce burn-on defects of cast iron, casting tests were performed on furan resin containing base molds (chromite, silica and artificial sand mainly consisted of  $Al_2O_3$ ) with or without coating agents. As a result, the chromite mold and the artificial sand mold were reduced effectively the burn-on defects. The silica mold reacted to melted iron and sulfur, combusted gas from curing agent for furan resin, was detected in this reaction phase. Application of a coating agents reduced burn-on defects, which would create a layer on the mold and prevent melted iron from contacting the sand. While the casting agent containing of iron oxide improved the resistance of the burn-on defects, the graphite-free layer were appeared. These findings would contribute not only to understand the mechanism of the burn-on defects attributed to chemical factors but also to achieve effective countermeasures for reduction of the defects.

Keywords: Burn-on Defects, Furan Molds, Sulfur gas, Artificial Sand, Coating Agent

#### 1. はじめに

焼着欠陥は鑄型表面の砂が鑄鉄に付着した表面欠陥の一つとして知られている。焼着欠陥の発生要因には化学的要因と物理的要因がある。化学的要因として、高温の溶湯と鑄型の反応により低融点物質を生成し溶湯と鑄型の濡れ性が変化すること<sup>1)</sup>、鑄型内の雰囲気ガスによる溶湯の接触角の変化<sup>2)</sup>などが挙げられる。一方で、物理的要因には、鑄物砂の粒度が粗くなることや、充填性が悪化することで鑄型間隙に溶湯が差し込むことが代表例<sup>3)</sup>として知られている。これらの焼着欠陥対策として、鑄型の表面にクロマイト鑄型砂を使用することが有効であると報告<sup>4)</sup>されている。クロマイト鑄型砂は耐火度が約 2273 K と高く、また 1273 K 以上で高い熱間強さを示し溶湯の鑄型間隙浸透に対する抵抗力を増す<sup>5)</sup>ため、焼着欠陥の発生が低減される。これらは主要な鉱物であるスピネルの特性に由来する。スピネルは化学成分が

$FeO \cdot Cr_2O_3$  と示されるように、約 50 mass% のクロム酸化物を含有する。

一方、クロム酸化物は  $CaO$  や  $Na_2O$ ,  $K_2O$  等のアルカリ酸化物と高温で反応すると六価クロム酸化物が生成するため<sup>6)</sup>、有害な廃棄物としての管理が必要となる。鑄型を由来とする廃棄物には、廃砂(微粉)や集塵ダスト等が挙げられるが、クロマイト鑄型砂を使用している場合には、廃棄物にクロム酸化物を含有することを既報で報告<sup>7)</sup>した。鑄造工程で発生する廃棄物の主なリサイクル用途のひとつにセメント原料が挙げられる<sup>7)</sup>。セメントの製造工程で廃棄物が加熱される事、鑄型砂や耐火材を由来とした廃棄物にはアルカリ酸化物を含むことから、六価クロム酸化物が生成する恐れがあるため、廃棄物にクロム酸化物は含有しないことが望ましい。そこで、鑄型由来の廃棄物についてリサイクルを促進するために、クロマイト鑄型砂と同等の耐焼着性能を有し、クロム酸化物をはじめとする環境負荷物質を含有しない鑄造資材を確認することを本研究の目的とした。本研

\* 金属研究室

究ではフラン樹脂を粘結材としたフラン自硬性鑄型（以下、フラン鑄型）を用いて耐焼着性能の比較を行った。フラン鑄型は砂の流動性が高く鑄型の生産性が高いなど多くの利点を持つため、鑄造企業で広く採用されている。一方、フラン鑄型は焼着欠陥が生じやすく、人工砂を用いた欠陥対策<sup>8,9)</sup>、高耐火度の耐火物粉末と溶媒で構成される塗型を用いた欠陥対策<sup>10)</sup>や、添加剤の使用による欠陥対策<sup>11)</sup>等が行われている。しかしながら、これらの欠陥対策が一元的に比較された先行事例や、焼着により生じたフラン鑄型との反応相を詳細に分析した事例は少ない。そこで本研究では、塗型や鑄物砂等に環境負荷物質を含まない鑄造資材を用いたフラン鑄型について耐焼着効果を評価するため、注湯により各種フラン鑄型に試験片を作製し、反応相の有無を確認するとともに、反応生成物を比較した。

## 2. 実験方法

### 2.1 各種鑄型の造型および鑄造実験

本研究では、化学組成が異なる供試砂を用いて図1に示す名工試型すくわれ試験片鑄型<sup>12)</sup>およびφ50×50mmの有機自硬性鑄型1号試験片を造型した。供試砂の化学成分を表1に示す。けい砂1、2および人工砂はAFS粒度指数40相当、クロマイト鑄物砂はAFS粒度指数60相当の粒度である。各供試砂に表2に示す量の樹脂および硬化剤を添加しフラン鑄型を造型した。本実験で使用したフラン樹脂の主成分はフルフリルアルコール(C<sub>5</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>)、硬化剤の主成分はアリアルスルホン酸(C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>SO<sub>3</sub>H)である。供試砂のうち、けい砂1にはAFS粒度指数80の球状酸化鉄を10mass%添加したフラン自硬性鑄型（以下、球状酸化鉄鑄型）も造型した。球状酸化鉄の組成を表3に示す。SiO<sub>2</sub>

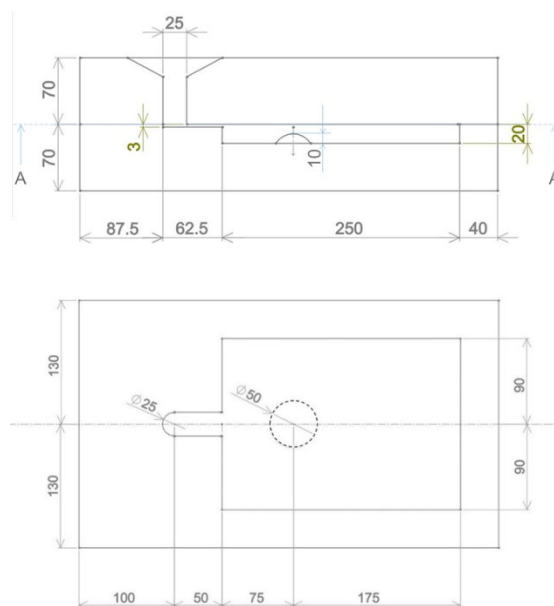


図1 名工試型すくわれ試験片鑄型（寸法：mm）

表2 樹脂および硬化剤の添加量

	成分	添加量
		(mass%/供試砂)
樹脂	フルフリル	1.5
	アルコール	
硬化剤	アリアル	0.6
	スルホン酸	

表3 球状酸化鉄の組成 (mass%)

化学成分	含有量
FeO および Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	98

表4 塗型剤の化学成分 (mass%)

	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Zr系塗型剤	80	10	2	-
酸化鉄系塗型剤	70	10	-	13

表1 供試砂の化学成分 (mass%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *
クロマイト鑄物砂	2	15	19	1	0	0	10	46
けい砂1	90	6	1	0	1	2	0	-
けい砂2	99	1	0	0	0	0	0	-
人工砂	20	73	3	3	0	0	0	-

※ファンダメンタルパラメータ法による定量

含有率の低いけい砂 1 を用いたフラン鑄型において、球状酸化鉄の添加により焼着欠陥低減効果が見られるかを確認するため、鑄造実験を行った。

また、造型後の鑄型表面に塗型剤を塗布し、塗型の有無による耐焼着特性も比較した。使用した塗型剤は水性塗型剤 (Zr 系塗型剤または酸化鉄系塗型剤) を 70 ボーメに調整したものであり、化学成分を表 4 に示す。造型後の鑄型表面に刷毛を用いて塗型剤を塗布し、自然乾燥した後に鑄造実験に供した。

鑄造実験は各供試砂を用いて造型した名工試型すくわれ試験片鑄型を用い、FC150 相当の溶湯をあらかじめ保温した杓に  $1823 \pm 50$  K で出湯し、注湯した。なお、予備実験として図 2 に示される各種の鑄型に対して  $1823$  K の鑄込実験を行ったところ、酸化鉄系資材の鑄型では激しい焼着欠陥が発生し、試験片間に差が見られなかった。酸化鉄系の資材について参考文献<sup>13,14)</sup>では、 $1623$  K 程度での実験が多く、加えて球状酸化鉄および酸化鉄系塗型剤は推奨使用温度域が  $1723$  K 以下であったため、 $1723 \pm 50$  K で出湯し、注湯した。本試験片は鑄込み時間が約 15 秒と極めて長いことから、堰直下の直径 50 mm、高さ 10 mm の凹部およびその周辺の鑄型の熱負荷が高くなる<sup>9)</sup>。そこで、各鑄型による試験片の凹部周辺について焼着欠陥発生の有無を観察した。

## 2.2 焼着状態の評価方法

鑄造実験により作製した名工試型すくわれ試験片に対してショットブラスト処理にて付着した供試砂を除去した後、凹部周辺を切断し、得られた試験片の断面を走査型電子顕微鏡 (以下、SEM) にて観察した。SEM 観察により供試砂等の付着が確認された焼着部について、SEM 付属の分析機器 (以下、SEM/EDX) を用いて成分分析を行った。

試料の調製方法は湿式切断機により小型試料を切り出し、二液硬化型樹脂に包埋し研磨した後、エタノールを用いた超音波洗浄を施した。試料は乾燥した後にカーボン蒸着を行い、SEM 観察および SEM/EDX 分析に供した。試験片の金属組織は、試験片の研磨後、3 % ナイタル液を用いて腐食させ、金属顕微鏡により観察した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 試験片の表面状態

鑄造実験後に型ばらしした状態の名工試型すくわれ試験片と、同試験片をショットブラスト処理した後の外観写真を図 2 に示す。図 2 (1) に示す型ばらし直後の試験片は供試砂が全面に付着した状態であることが確認された。粘土を粘結材とした鑄型である生型に発生する焼着欠陥は剥離しやすい焼着層を伴うことが報告<sup>11)</sup>されているが、フラン鑄型を用いた本実験では剥離する焼着層は確認されず、供試砂が付着した様子が確認された。本研究ではショットブラスト処理で除去されなかった供試砂の付着部を焼着欠陥とした。

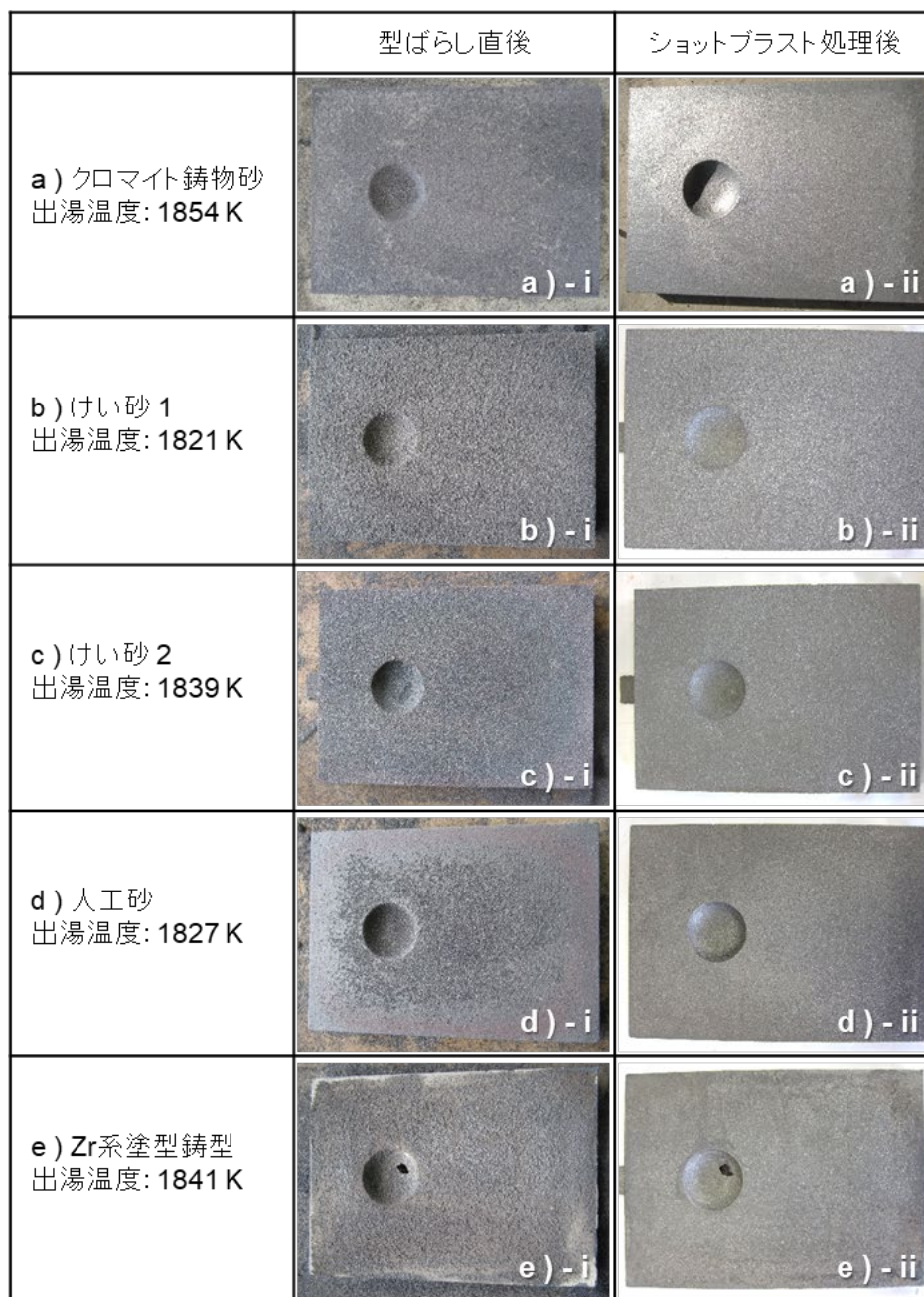
鑄造実験の際に  $1823$  K で出湯し、注湯した場合、クロマイト鑄型砂を用いた試験片 (図 2 (1) a) - ii)、人工砂を用いた試験片 (図 2 (1) d) - ii) および Zr 系塗型剤を用いた試験片 (図 2 (1) e) - ii) は、ショットブラスト処理により付着した供試砂が除去されたことが目視で確認された。ただし、Zr 系塗型剤を用いた試験片 (図 2 (1) e) - ii) では、ショットブラスト後の試験片表面に塗型剤を刷毛塗りした際の塗型膜の転写と、ガス欠陥の発生が確認された。水性の塗型剤を用いたため、一般的に行われる自然乾燥で水分が除去できると想定した。しかし、実際には、自然乾燥では水分が十分に除去されず、ガス欠陥が発生したと考えられる。その中で、けい砂を用いた試験片では、ショットブラスト処理後も供試砂が付着し、通常の鑄物に見られる金属光沢が見られないなど、多くの焼着欠陥が発生した。

その一方で、図 2 (2) f) - ii ~ h) - ii に示す  $1723$  K で出湯し注湯したけい砂 1 鑄型、球状酸化鉄鑄型および酸化鉄系塗型剤を塗布した鑄型を用いた試験片では、ショットブラスト処理後の供試砂の付着は目視では確認されなかった。

## 3.2 焼着欠陥の解析および考察

### 3.2.1 焼着欠陥の SEM 観察および SEM/EDX 分析

焼着欠陥部の SEM 像および SEM/EDX 分析によるマッピング像を図 3 に示す。けい砂を供試砂とした試験片では  $\text{SiO}_2$  含有量が 90 mass% (図 3 (1)) あるいは 99 mass% (図 3 (2)) であるかに関わらず、供試砂と鑄鉄が反応相を生じ、 $\text{FeO}$  を生成した。加えて、クロマイト鑄型砂を供試砂とした試験片でも、一部の供試砂と鑄鉄が反応相である  $\text{FeO}$  を生成していることが確認された (図 3 (3))。

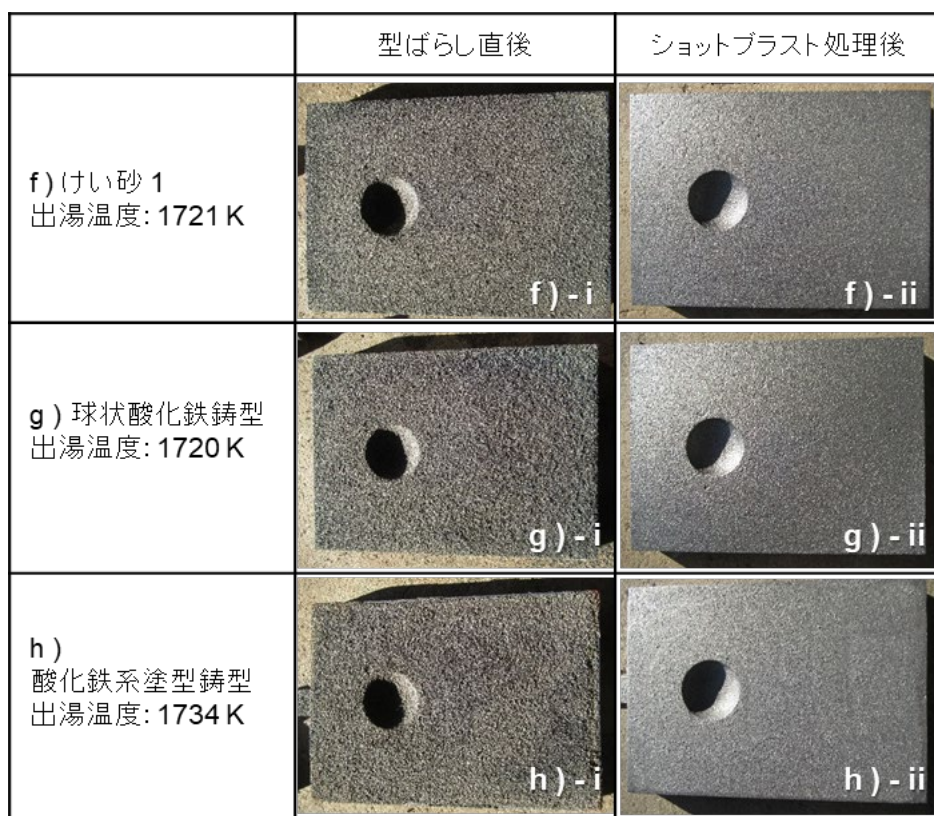


(1) 出湯温度 1823K  
図2 試験片外観写真

生成された反応相の化学成分を詳細に解析するため図4(1), (2), (3)に示した反応相をSEM/EDX分析(点分析)し、確認された代表的なスペクトルを右に示す。図4(1)に示すけい砂1を供試砂とした試験片の点分析のスペクトルからは、供試砂の化学成分であるSi, Al, Na, K, Caと鑄物の主成分であるFeのピークが検出された。その他に、Sのピークが検出された。また、図4(2)に示すけい砂2を供試砂とした試験片の点分析スペクトルには、供試砂の化学成分であるSi

と鑄物の主成分であるFeのピークが検出された。その他に、焼着欠陥に見られる低融点生成物<sup>3)</sup>であるMnOに由来するMnのピークと、Sのピークが検出された。

クロマイト鑄物砂を供試砂とした試験片は、目視では試験片への供試砂の付着がほとんど見られなかったが、SEM像では供試砂の付着が確認された(図4(3)参照)。この図4(3)に示すクロマイト鑄物砂を供試砂とした試験片の点分析のスペクトルからは、供試砂の化学成分のうちSiと鑄物



(2) 出湯温度 1723K

図 2 試験片外観写真

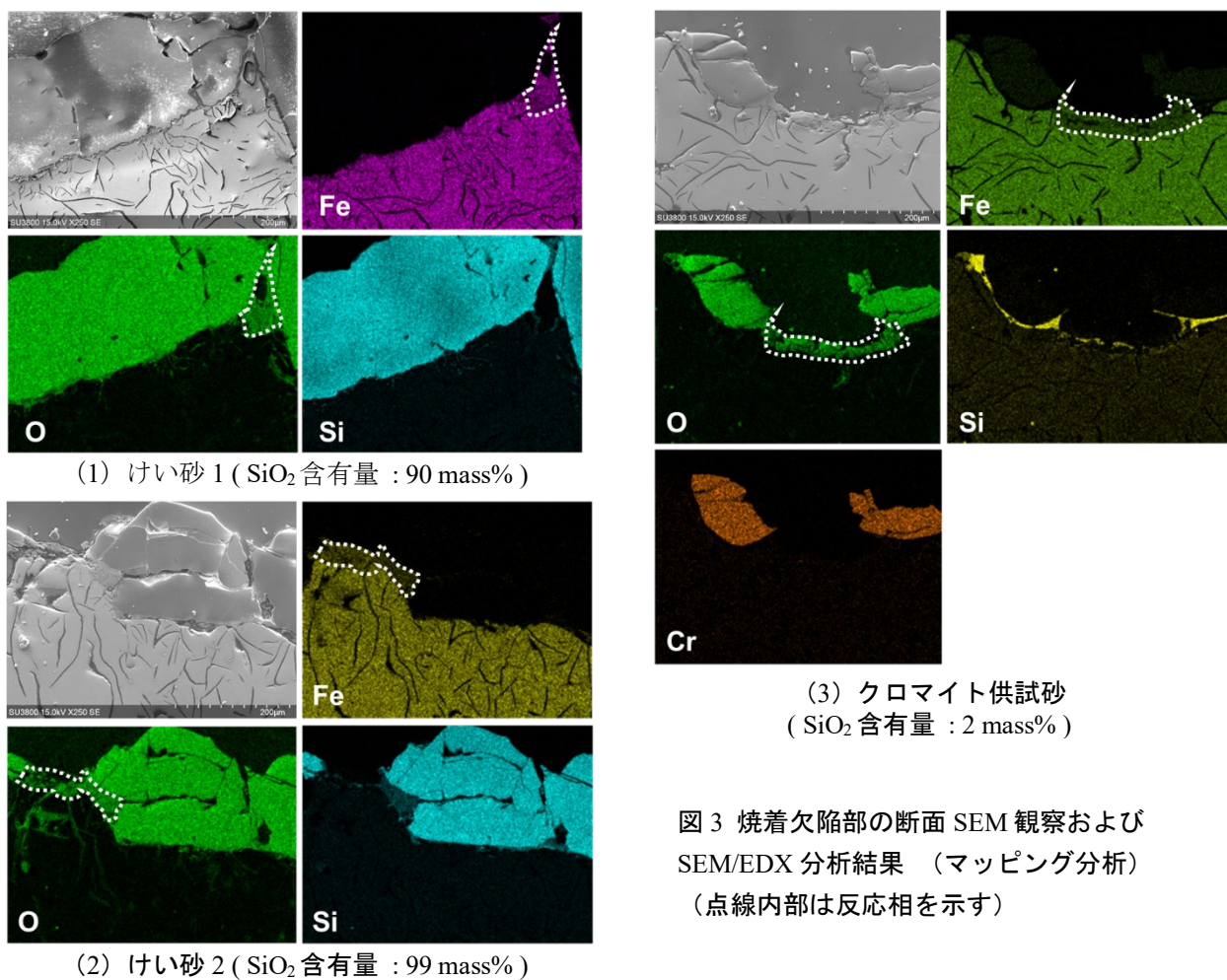
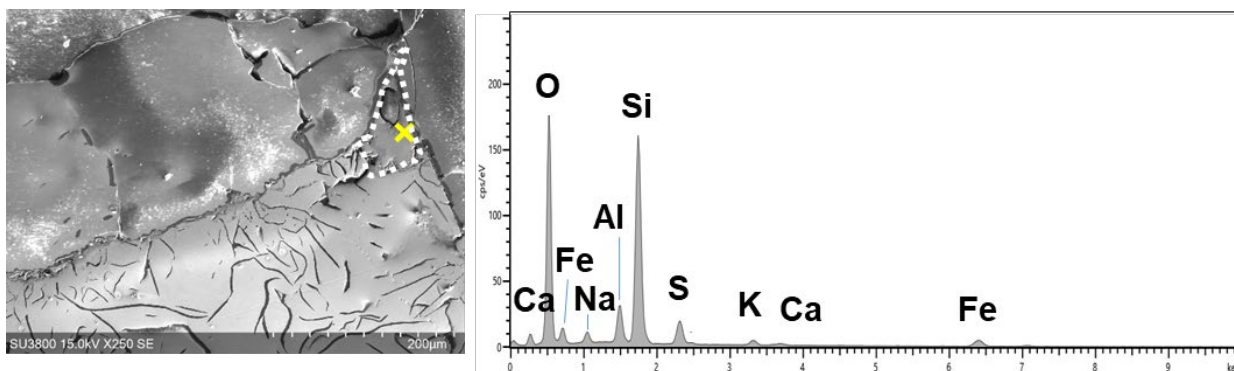
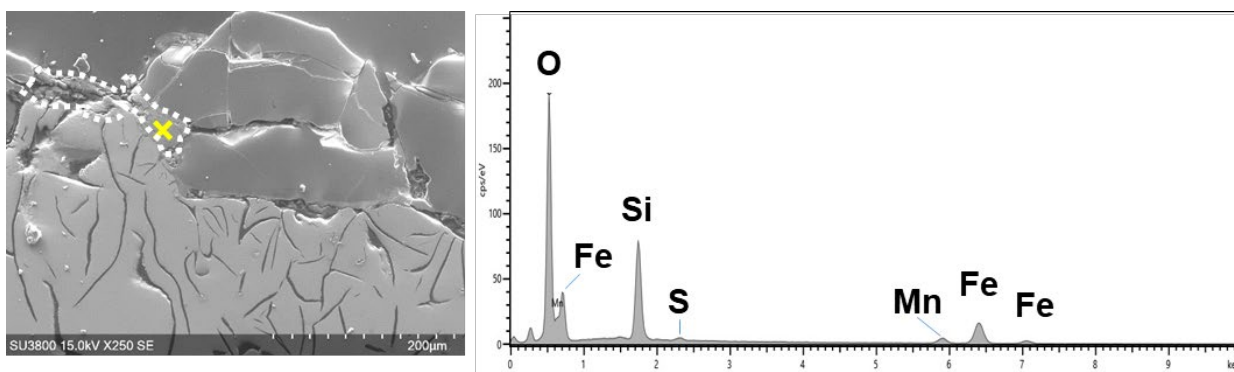


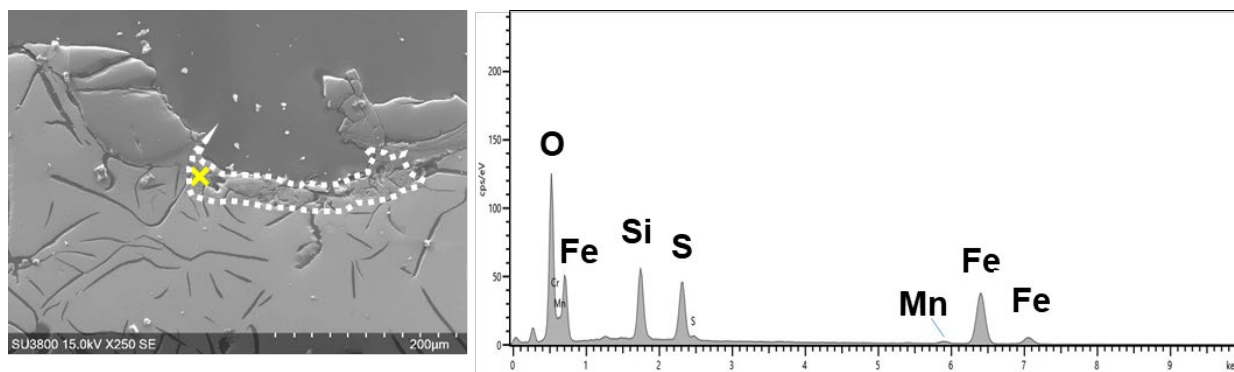
図 3 焼着欠陥部の断面 SEM 観察および SEM/EDX 分析結果 (マッピング分析)  
(点線内部は反応相を示す)



(1) けい砂 1 (SiO<sub>2</sub> 含有量 : 90 mass%)



(2) けい砂 2 (SiO<sub>2</sub> 含有量 : 99 mass%)



(3) クロマイト供試砂 (SiO<sub>2</sub> 含有量 : 2 mass%)

図 4 焼着欠陥部の断面 SEM 像および SEM/EDX 分析結果 (点分析) (点線内部は反応相を示す)

の主成分である Fe のピークが確認された. 表 5 にはクロマイト鑄型砂の中でも表 1 に示す平均的な成分値と異なる値を示す二つの砂粒子について, SEM/EDX 分析の結果を示す. クロマイト鑄型砂は主成分が Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> であるが, 天然鉱物であるため砂粒子毎に成分の含有率が異なり, SiO<sub>2</sub> の含有率が 50 mass%以上となる粒子も含まれることが分かった. クロマイト鑄物砂と溶湯との反応相では Si のピークも確認されることから, SiO<sub>2</sub> 含有率が高い砂粒子を多く含んだクロマイト鑄物砂の場合, これらの砂粒子を起点として焼着欠陥が生じることが示唆された.

### 3.2.2 フラン鑄型の熱分解ガス

SEM/EDX による点分析により各反応相からは供試砂および溶湯を由来とする元素に加えて, S が検出されることが分かった. 反応相にて検出された S は, 鑄型の粘結材に使用したフラン樹脂の硬化剤に含まれるアリールスルホン酸 (C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>SO<sub>3</sub>H) が注湯により熱分解した際に生成するガス<sup>14)</sup>に由来すると考えられる. アリールスルホン酸が熱分解した際に発生するガスは, 次式で示す通りである.

(完全燃焼の場合)

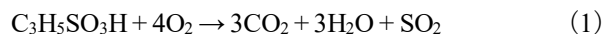
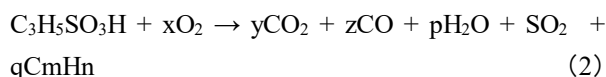


表 5 クロマイト 鑄物砂 各砂粒子の SEM/EDX 分析結果 (mass%)

	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO
砂粒子 1	3	53	31	2	10	1
砂粒子 2	3	52	16	2	5	21

(不完全燃焼の場合)



実際の鑄造時には(1), (2)式で示される反応式が同時に発生する複雑な環境であることが推察される. 鑄造時に発生したガスの分析結果によると, フラン樹脂の熱分解ガスには SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S など, S 系ガスが多く含まれることが報告<sup>15)</sup>され, これらはフラン鑄型の硬化剤に用いたアリースルホン酸の成分である S を由来とすることが推察される. 3.2.1 項の図 4 に示したように, けい砂と溶湯の反応相以外には S のピークを検出しないことを確認しており, S 系ガスはけい砂と溶湯の反応相に存在していることが分かった. S は表面活性元素であり, 溶鉄に添加されるとその表面張力を大きく低下することが報告<sup>16)</sup>されている. S が反応相に添加されることにより, 反応相の表面張力が低下し濡れ広がりをもたらし, 焼着欠陥を促進したことが推察される.

### 3.3 人工砂鑄型および塗型した鑄型による試験片の表面状態

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系人工砂を用いた鑄型による試験片の表面 SEM 像を図 5 に示す. 3.1 節で示した試験片の外観観察結果と同様に, 試験片表面への供試砂の付着は見られず, 図 5 に示すような凹形状が観察された. 図 6 に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系人工砂の断面 SEM 像を示す. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系人工砂は断面形状からほとんどの粒子が球状であることが分かり, 図 5 に見られた凹形状は, ショットブラスト処理により供試砂が脱落したため発生したことが推察される. このことから Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系人工砂を用いた鑄型は高温の溶湯との反応相を生成せず, ショットブラスト処理で除去されない焼着欠陥が発生し難いことが示唆された. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系人工砂をフラン鑄型に使用すると高い耐焼着性能を発現することが報告<sup>8)</sup>されており, 本研究でも同様の傾向が確認された.

けい砂鑄型に Zr 系塗型剤を塗布した鑄型による試験片の SEM 像および SEM/EDX 分析結果を

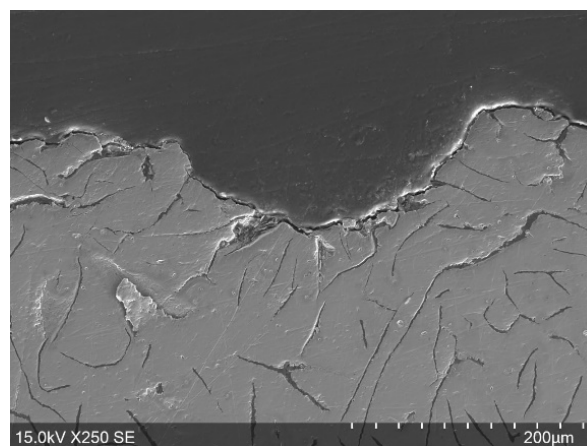


図 5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系人工砂鑄型による試験片表面の断面 SEM 像

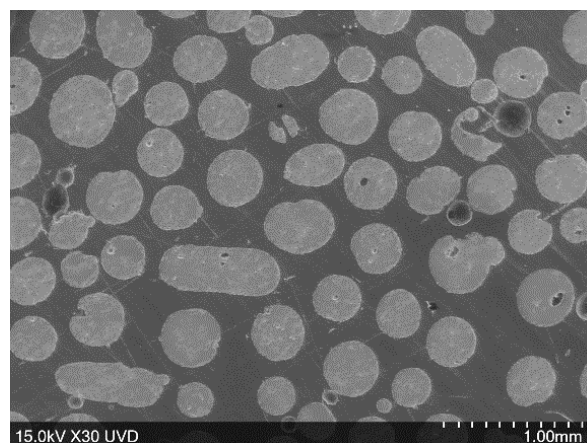


図 6 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系人工砂の断面 SEM 像

図 7 に示す. 試験片表面には片状の付着物が確認され, この付着物を SEM/EDX 分析により点分析すると, Zr と Si のピークが確認された. 使用した塗型剤の成分は ZrO<sub>2</sub> と SiO<sub>2</sub> を含み, 片状の付着物は残留した塗型剤であることが推察される. 一方で, 供試砂の付着は見られず, 塗型剤により生成された塗型膜が溶湯と供試砂の接触を妨げたため, 3.2.1 項で確認されたような反応相が生成せず, 焼着欠陥が発生しなかったと考えられる.

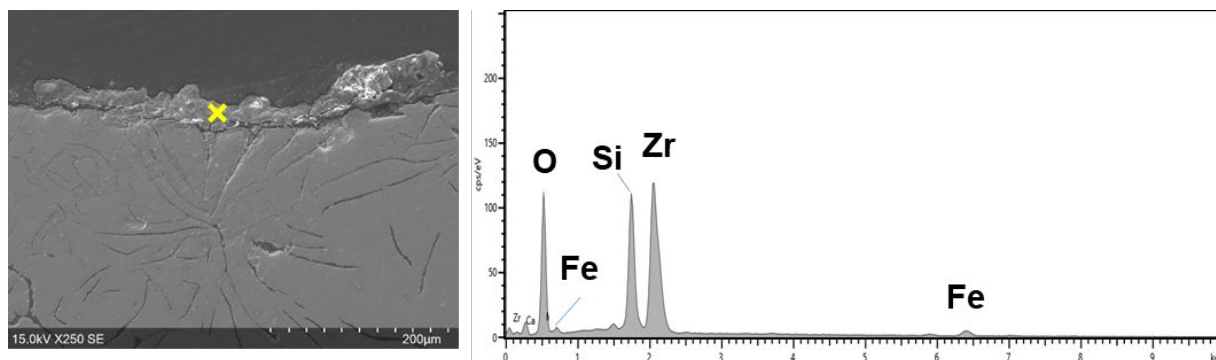


図7 Zr系塗型剤を用いた鋳型による試験片表層の断面SEM像およびSEM/EDX分析結果(点分析)

### 3.4 酸化鉄を含む資材の耐焼着効果

3.1節で述べた通り、1723 Kで出湯し注湯したけい砂1, 球状酸化鉄鋳型および酸化鉄系の塗型剤を塗布した鋳型による試験片の表面には供試砂の付着は目視では確認されなかった。これらの試験片の断面観察結果を図8に示す。図8(1)に示すSEM像によると、SiO<sub>2</sub>含有量の低いけい砂1鋳型では1723 Kでの注湯でも供試砂の付着が確認されたが、一方で、図8(2), (3)に示す球状酸化鉄鋳型と酸化鉄系塗型剤を用いた鋳型では供試砂の付着が確認されず、けい砂鋳型より耐焼着性能が増すことが分かった。球状酸化鉄の鋳型への添加は、チラー効果による凝固速度改善等、クロマイト鋳型砂と類似した作用により焼着欠陥を低減する効果があることが報告<sup>13,14,17)</sup>されている。本研究で造型した球状酸化鉄鋳型および酸化鉄系塗型剤の塗布した鋳型においても、同様の効果が

確認された。

球状酸化鉄鋳型と酸化鉄系塗型剤を用いた場合は、図8(2), (3)に示すSEM像により表層付近に厚さ50~100 μm程度の無黒鉛層が確認された。これらの金属組織を観察すると、無黒鉛層はパーライト組織となっていることが確認された。今回の検討に用いた酸化鉄は化学式で示すとFeOもしくはFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>であり、常温では安定しているが、溶湯熱による高温下ではFeへの還元が進む。この時、酸素が放出され、酸化性の強いO<sub>2</sub>ガスは鋳型内の有機物と反応してCOやCO<sub>2</sub>ガスが発生する。鋳鉄溶湯が凝固時にO<sub>2</sub>ガスやCOガス雰囲気曝されると、溶湯中の炭素が反応し脱炭する。これにより溶湯が凝固した際に無黒鉛層が発生することが報告<sup>18,19)</sup>されている。本研究で確認された無炭素層も、酸化鉄系資材の還元に伴い発生したガスによって生成したことが推察される。

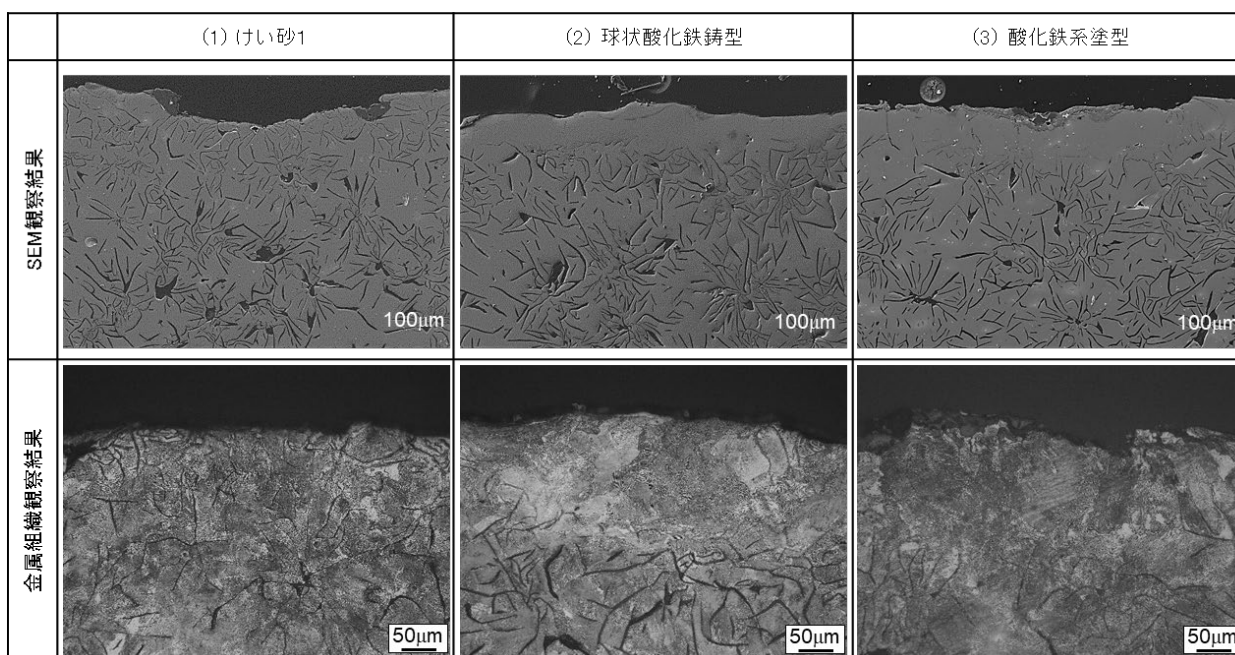


図8 酸化鉄系資材を用いた鋳型による試験片表層の断面観察像



#### 4. 結論

鋳鉄に発生する化学的要因である焼着欠陥に対して、各種鋳型を用いて対策を行った。使用した鋳型から排出される廃棄物の環境負荷低減のため、クロム酸化物を始めとした重金属を含まない資材を用いて鋳型を造型し検討したところ、次のことが明らかとなった。

- ・フラン鋳型の場合、 $Al_2O_3$ 系人工砂およびZr系塗型剤を用いた場合に耐焼着効果が高いことが分かった。 $Al_2O_3$ 系人工砂およびZr系塗型剤は環境負荷物質である重金属を含まないため、鋳型を由来とした廃棄物のリサイクルが可能となる。

- ・ $SiO_2$ を主成分とする鋳物砂は高温の溶湯との反応相を生成することが確認された。

- ・フラン樹脂の硬化剤が熱分解する際に生じるSを含むガスは、 $SiO_2$ を主成分とする鋳物砂と溶湯との反応相に存在することが分かった。

- ・鋳型への球状酸化鉄の添加および酸化鉄を含む塗型剤の塗布により耐焼着性能が向上することが分かった。一方で、鋳物表面には異常組織である無黒鉛層が生成することが確認された。無黒鉛層は酸化鉄が溶湯熱により還元する際に発生する $O_2$ ガスと溶湯の反応により生成する<sup>18, 19)</sup>。鋳型中の酸化鉄含有量により発生する $O_2$ ガス量も変化することが推測されるため、焼着対策として酸化鉄を使用する場合には、鋳型における酸化鉄の含有量と無黒鉛層の生成量との関係を確認する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 黒川豊ほか：“鉄鋳物に発生する焼付き欠陥の観察”。*鋳造工学*, Vol.74, No.5, p298 – 304, (2002)
- 2) 中江秀雄ほか：“鉄鋳物の鋳型の焼付きに対する雰囲気酸素の影響”。*鋳造工学*, Vol.71, No.1, p28 – 33, (1999)
- 3) 社団法人日本鋳造工学会：“鋳造欠陥とその対策”。(2009) p135 – 137.
- 4) 西野正ほか：“含アルカリ土複酸化物と酸化クロム(III)との反応”。*窯業協会誌*, Vol.85, No.10, p496 – 500, (1977)
- 5) 島田健三：“鋳造用クロマイトサンド”。*JACT NEWS*, p2640 – 2647, (1976)
- 6) 中嶋宏ほか：“クロマイト鋳型砂代替による鋳造工場の環境負荷低減”。*三菱重工技報*, Vol.42, No.4, p190 – 193, (2005)
- 7) 赤田英里ほか：“鋳物廃棄物の再資源化に関する調査研究”。*三重県工業研究所研究報告*, 44, p125 – 132 (2020)
- 8) 水木徹ほか：“アルミナ系人工砂の導入による鋳物製造技術の確立とクリーンファンドリーの実現”。*鋳造工学*, Vol.89, No.8, p487 – 492, (2017)
- 9) 土居康純ほか：“鋳鋼鋳物の焼着を防止する鋳型技術の開発”。*素形材*, Vol.51, No.12, p48 - 53 (2010)
- 10) 島田健三ほか：“フラン樹脂鋳型用水性塗型の研究”。*鋳物*, Vol.53, No.4, p176 – 180 (1980)
- 11) 財団法人素形材センター：“鋳造技術シリーズ 2 鋳型の生産技術”。(1995) p290 – 296.
- 12) 黒川豊ほか：“人工砂生型鋳鉄鋳物に発生した焼付き欠陥の鉱物成分”。*鋳造工学*, Vol.92, No.3, p131 – 137, (2020)
- 13) 黄子争ほか：“鉄系鋳物に対する鋳型に添加した酸化鉄( $FeO$ ,  $Fe_3O_4$ ,  $Fe_2O_3$ )の挙動”。*研報 122 特殊鋳型システムと環境適応化に関する研究*, 4-1, p40 – 45 (2018)
- 14) 亀田貴之：“球状酸化鉄を添加した球状人工砂の特性”。*研報 122 特殊鋳型システムと環境適応化に関する研究*, 4-1, p34 – 39 (2018)
- 15) 津田昌利ほか：“フラン樹脂鋳型の熱分解挙動に関する研究”。*鋳物*, Vol.51, No.4, p189 – 193, (1978)
- 16) 社団法人日本鉄鋼協会ほか：“鉄鋼物性値便覧 製鉄編”。(2006) p441 – 442.
- 17) 黒川豊ほか：“鉄鋳物に発生する焼付き欠陥の観察”。*鋳造工学*, Vol.74, No.5, p298 – 304, (2002)
- 18) 木村克彦：“ねずみ鋳鉄の表面に形成される無黒鉛層組織について”。*鋳物*, Vol.61, No.8, p563 – 569, (1989)
- 19) 木村克彦：“ねずみ鋳鉄の表面における無黒鉛層の生成過程について”。*鋳物*, Vol.62, No.11, 19) 木村克彦：“ねずみ鋳鉄の表面における無黒鉛層の生成過程について”。*鋳物*, Vol.62, No.11, p896 – 900, (1990)

(本研究は、産業廃棄物税を財源としています。)