

研究論文

溶湯浸漬した鑄物砂の表面分析による
鑄鉄砂かみ欠陥の同定

黒川 豊* 上林仁司* 水田豊昭*
太田英明** 三宅秀和***

Identification of Cast Iron Sand Inclusion Defect by Surface Analysis of Foundry Sand Dipped in Molten Metal

Yutaka Kurokawa*, Hitoshi Kambayashi*, Toyoaki Mizuta*,
Hideaki Ota** and Hidekazu Miyake***

The purpose of this research was to analyze sand inclusion defects using SEM/EDS. For this, foundry sand was dipped in molten metal and SEM/EDS data was used for comparison. In the green sand of SEM/EDS data for comparison, the surface was porous. Sand particles also showed the tendency to melt easily. The core sand showed the tendency for smooth surface did not melt easily compared with green sand. Data of new sand, reclaimed sand, refractory sand, and ladle slag, etc. was gathered as SEM/EDS data for comparison. Sand inclusion defects which at casting factories were analyzed using the SEM/EDS data for comparison. The results confirmed that the causes can be determined.

Keywords : casting defect, cast iron, inclusion, green sand, SEM/EDS, molten metal

1. 緒言

砂かみ欠陥は生型鑄物に最も多く発生する鑄造欠陥¹⁻³⁾のひとつで、その防止技術は鑄造製品の歩留りや信頼性の向上のために重要な課題とされ、本誌の現場改善事例例え⁴⁻⁷⁾で多く検討されている。砂かみ欠陥の発生源は生型砂や中子砂の溶融の有無に起因すると考えられる。しかし、欠陥を肉眼で観察した場合、生型砂か中子砂による欠陥発生なのか、他の介在物によるのかの区別が難しい。介在物とは鑄型の外から混入する取鍋スラグ、スラグ取り材、接種剤残渣スラグ及び各種溶解材料や耐火材等であり、鑄型の内部で凝固時に生成するスラグや酸化物である。更に、溶融した鑄物砂からガスが発生した場合のガス欠陥とも区別し難い。

そこで、本研究では高温の鑄鉄溶湯表面に鑄物砂を浸漬した時の状態をSEM・EDSにより表面分析しデータ化した。これらデータを基に鑄造工場で発生した介在物欠陥の発生源を特定する方法の可能性を検討した。

2. 実験方法

鑄物砂の溶湯への浸漬は、実験用高周波炉を用いて溶解したFC 250相当の溶湯(25 kg)を1673 Kの温度に保

持した湯面に約5 gの鑄物砂を投入し、5~30秒保持することにより行った。保持時間は生型鑄物では小物鑄物の生産が多く鑄込み時間が5~20秒と短いこと、砂かみ欠陥が発生する部位は凝固の速い黒皮面が多いことを考慮して決めた。Fig. 1に鑄物砂の溶湯浸漬実験の模式図を示す。鑄物砂浸漬時には高周波溶解炉の出力を抑え、鑄物砂を溶湯に浮遊させた。時間毎に浮遊している鑄物砂をステンレス製のさじを用いてすくい上げ、ステンレス製の容器(直径50 mm, 高さ50 mm)に注入した。この時、わずかな溶湯が混入するが、湯玉となって鑄物砂と分離する。

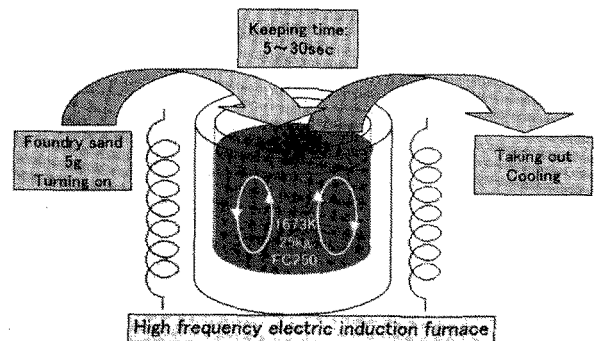


Fig. 1 Method of dipping in molten metal of foundry sand

平成14年1月9日 原稿受理

* (株) ツチヨシ産業 Tsuchiyoshi Industry Co., Ltd.

** 中部科学技術センター Chubu Science Technology Center

*** 関西大学工学部 Kansai University, Faculty of Engineering

Table 1 Properties of foundry sand (green sand)

	Low refractoriness materials mass%	Silica content mass%	Grain distribution JIS FN	Refractoriness	
				SK	temp. K
Green sand(No.1)	7.7	80.5	98.0	SK-34(-)	2013
Green sand(No.2)	14.0	73.0	92.1	SK-33(-)	1993
Green sand(No.3)	16.5	73.4	112.6	SK-29(+)	1933
Green sand(No.4)	19.2	66.3	120.7	SK-20	1803

Table 2 Properties of foundry sand (new sand, reclaimed sand, core sand)

	SiO ₂ mass%	Grain distribution JIS FN	Refractoriness	
			SK	temp. K
New sand(No.1)	99.7	113.4	SK-35	2043
New sand(No.2)	94.6	114.2	SK-35	2043
New sand(No.3)	92.8	107.9	SK-30(-)	1933
Reclaimed sand(No.1)	92.0	100.6	SK-33(+)	2013
Reclaimed sand(No.2)	93.2	112.0	SK-34(+)	2033
Core sand	91.8	107.9	SK-30(-)	1933

Table 3 Properties of foundry sand (refractory sand)

	Grain distribution JIS FN	Refractoriness	
		SK	temp. K
Mullite sand	137.3	SK-37(+)	2098<
Zircon sand	204.8	SK-37(+)	2098<
Cromite sand	138.3	SK-37(+)	2098<
Olivin sand	185.1	SK18~27	1828
Slag sand	126.7	SK6a	1488

冷却した鋳物砂を用いて SEM・EDS 分析を行った。なお、鋳物砂の SEM 観察時は白金蒸着した。

Table 1 ~ Table 3 に溶湯浸漬に用いた各種鋳物砂の特性をそれぞれ示す。生型砂として 4 種類、新砂 3 種類、再生砂 2 種類及、中子砂、特殊砂 4 種類とスラグ砂の 15 種類を用いた。それぞれの鋳物砂のゼーゲルコーンによる耐火度 (SK 番号)⁸⁾ と概略の耐火温度を合わせて示す。生型砂は低耐火度物質⁹⁾ の異なるものを選んだ。新砂及び再生砂は SiO₂ 量の異なるものを選んだ。中子砂は実際に鋳造工場で使用されているコールドボックス中子 (生型砂 No. 3 を使用する鋳造工場) から採取した。特殊砂は一般的に使用されるものから選んだ。

3. 鋳物砂の溶湯浸漬実験結果と考察

3.1 溶湯浸漬鋳物砂の SEM・EDS 分析

溶湯に浸漬させた鋳物砂が外観や浮遊状態において変化のない場合 (新砂 No. 1, ムライト砂, オリビン砂, ジルコン砂及びクロマイト砂) と徐々に砂粒同士が凝集する場合 (他の 10 種類の鋳物砂) に分かれる。また、凝集する鋳物砂の中で生型砂 No. 3, 生型砂 No. 4 及びスラグ砂は 30 秒後には試料が塊状のスラグとなる。

溶湯浸漬によってスラグ化した生型砂 No. 3 と No. 4 の

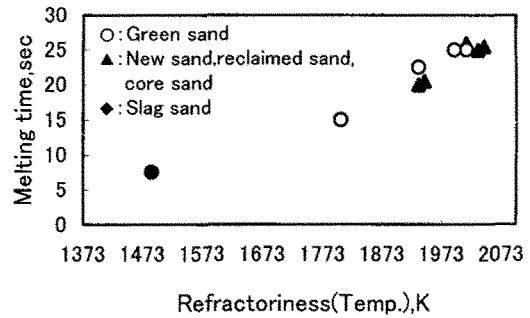


Fig. 2 Relation between refractoriness and melting time at 1673K

耐火度は本実験で設定した鋳鉄の溶解温度よりも高い。しかも、特殊砂と新砂-1 を除いた鋳物砂の全てが溶湯浸漬によって凝集する傾向が肉眼観察によって認められた。このように溶湯の溶解温度よりも耐火度の高い鋳物砂が溶解するのは、構成材料に低耐火度物質が含まれる度合いに依存すると考えられる。そこで、15 種類の鋳物砂について、凝集開始時間を溶融開始時間として耐火度との関係を Fig. 2 に示す。特殊砂と新砂-1 を除き、いずれも耐火度は高いにかかわらず耐火度の低いものほど溶融開始時間が短くなることが明らかである。すなわち、生型砂に含まれる粘土鉱物 (モンモリロナイト) の耐火度は約 1200 K ~ 1500 K (米国産ベントナイト測定例) と溶解温度より低いこと、また、溶融開始した新砂、再生砂及び中子砂の SiO₂ が低く、含まれる長石の耐火度が約 1500 K ~ 1600 K (島根産長石測定例) で同様に低いことが主原因である。したがって、これらの耐火度が低い粘土鉱物や長石が含まれる度合いにより、溶湯の溶解温度で鋳物砂が溶融を開始したものと考えられる。

Fig. 3 に溶湯浸漬後鋳物砂の SEM 像を示す。生型砂は溶湯浸漬前では全粘土分が砂粒の周りに付着しているためにその表面はポーラスであり、浸漬後は全粘土分がオーリチック化することで同様にポーラスとなる。生型砂 No. 1 と No. 2 の砂粒は溶湯浸漬により溶融していないが、生型砂 No. 3 と No. 4 では砂粒の原形が崩れて溶融した状態になる。新砂及び再生砂ではいずれも全般的に滑らかである。中子砂は当初は滑らかであり、溶湯浸漬 20 秒以降で若干ポーラスとなる。特殊砂のムライト砂は球状で、その表面は生型砂とよく似ている。ジルコン砂とクロマイト砂はその表面が滑らかである。オリビン砂は粒形がやや鋭角的な形状であり、その表面には若干の付着物が認められる。スラグ砂では浸漬前は生型砂と似ているが、浸漬 10 秒以降に溶融しスラグ状となる。したがって、各鋳物砂の溶湯浸漬前後の SEM 観察から各鋳物砂の区別が可能であると考えられる。すなわち、砂かみ欠陥の SEM 像では生型砂の表面はポーラスであり、中子砂は滑らかであると評価できる。

Fig. 4 に溶湯浸漬前と浸漬 30 秒後の鋳物砂の EDS 分析結果を抜粋して示す。浸漬後は鋳物砂成分の Si, Al, O

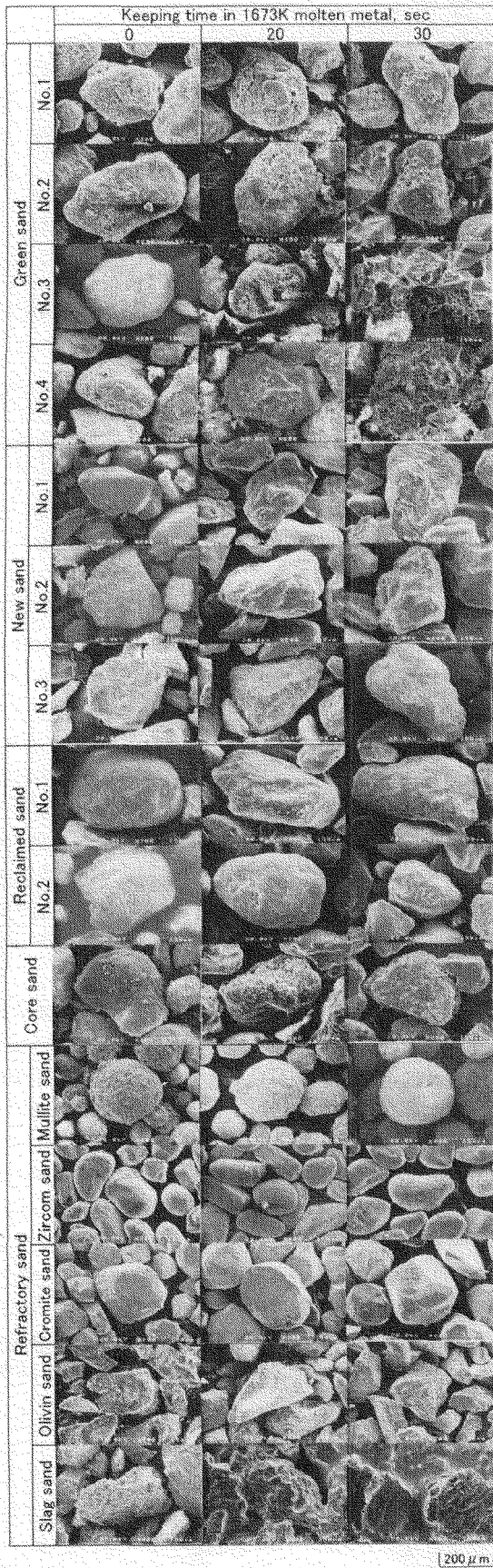


Fig. 3 SEM image of foundry sand dipped to molten metal (1673K, FC250).

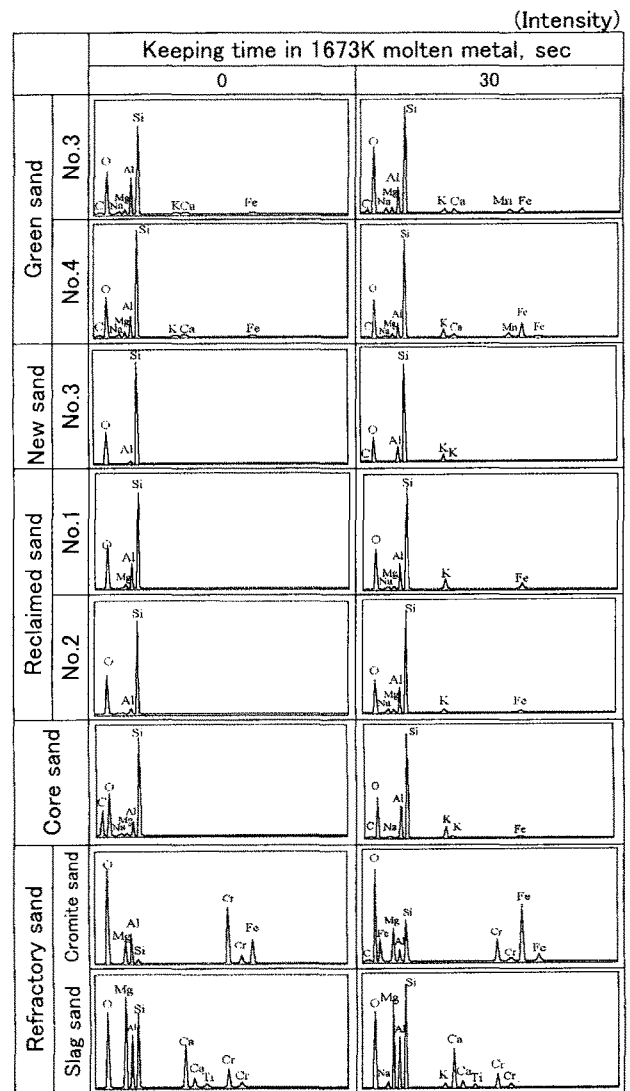


Fig. 4 EDS analysis of foundry sand dipped to molten metal (1673K, FC250). The foundry sand which changes the analysis data before and after dipping are shown.

及びK等に加えて、生型砂No.3と生型砂No.4では溶湯成分のMnが検出されており、FeとKが増加している。新砂No.3ではKが、再生砂及び中子砂ではKとFeが、クロマイト砂ではFeの増加が、スラグ砂ではMnの増加が認められる。このことから、鑄物砂中のSi、Al、O及びK等が溶湯中のFe及びMnと反応してFe-Mn-Si-Al-K-O系のスラグを生成するものと考えられる。すなわち、砂かみ欠陥のEDS分析では生型砂ではMnが検出され、中子砂では浸漬30秒では検出されないと評価される。

3.2 実操業下での判定用データ

個々の鑄物工場毎に砂かみ欠陥が発生した鑄物砂を用いて溶湯浸漬した時のデータを収集した。

Fig. 5に鑄造工場で使用している生型砂(Tabl 1の生型砂No.2)並びに鑄型中子砂をそれぞれ採取して溶湯浸漬した。また、取鍋スラグの混入を仮定して同様に溶湯浸

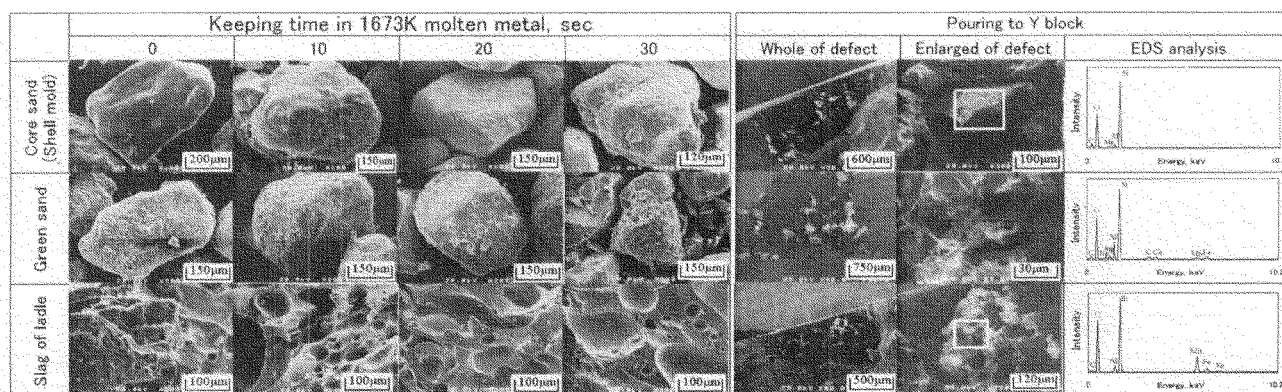


Fig. 5 SEM・EDS analysis of foundry sand which are dipped in 1673K molten metal and are poured in Y block.

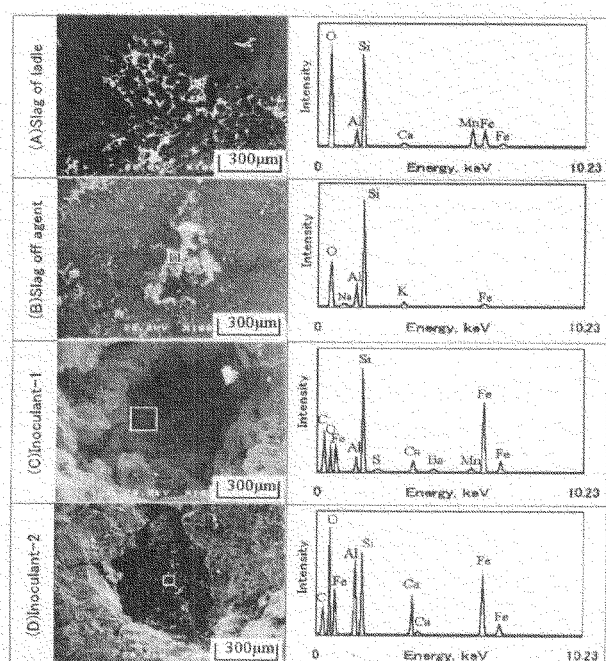


Fig. 6 SEM・EDS analysis of inclusion by pouring experiment.

漬して判定用データとした。更に、Y型供試材C型¹⁰⁾鋳型の底部にこれらの鋳物砂を置き鋳込みで発生させた欠陥のEDS分析を行った。シェル中子砂は生型ラインの余剰砂のばい焼再生(生型)砂で、わずかにオーリチックが付着している。このために、溶湯浸漬時のSEM像はその表面がわずかにポラスであるが全体的には滑らかである。Y型供試材には砂粒が欠陥内部に認められ、砂粒拡大像では滑らかな砂粒として観察される。生型砂の溶湯浸漬では生型表面はポラスであり砂粒は溶融していない。Y型供試材への鋳込みでは欠陥全体像では砂粒が欠陥内部に認められ、砂粒拡大像ではFig. 3の生型砂No.3とNo.4と同様に溶融して観察される。取鍋スラグは溶湯浸漬時、ポラスで粗大である。Y型供試材への鋳込みでは欠陥全体像ではスラグが分散して欠陥内部に付着しており拡大像では溶融して観察される。EDS分析では全ての場合ともにSiが検出され、生型砂はAlが、取鍋スラグでMnが

それぞれ多量に検出されている。

Fig. 6にTabl 1のNo.4の生型砂を使用している鋳造工場で鋳造製品を生産する際に、鋳型キャビティ内部に取鍋スラグ、スラグ取り材及び2種類の接種剤を置き、鋳込みを行って判定用データ^{11, 12)}を収集した。SEM像では、取鍋スラグとスラグ取り材とも欠陥内部に白色の付着物として、接種剤2種では導電性によりほとんどチャージアップせずに介在物として観察される。EDS分析では全てSiのピークが高くOが検出される。取鍋スラグはMnが検出されること、スラグ取り材では鉍物系元素のNa, Kが検出されること、接種剤ではいずれもCaが多いこと、接種剤-1ではBaが検出されている。以上のことから実操業下での欠陥評価にSEM像での外観とEDS分析から各々を区別できることがあきらかである。

4. 鋳造工場で発生した砂かみ欠陥の判定

以上の溶湯浸漬実験による判定用データ及び個々の鋳造工場用の判定用データを参照して、鋳造製品に発生した砂かみ欠陥のSEM・EDS分析を行い判定した。

4.1 砂かみ欠陥(生型砂)の分析事例-1

Fig. 7に材質FCH-1C、主型は生型、中子はコールドボックス鋳型とシェル鋳型に発生した砂かみ欠陥を示す。欠陥の発生位置は堰付近で下型面の黒皮直下である。本事例では、湯道系は生型とコールドボックス中子で構成されていることから、生型砂とコールドボックス砂の両方が砂かみ欠陥の原因となる可能性がある。欠陥全体のSEM像では欠陥内部には砂粒が凝集して介在している。砂粒の拡大SEM像では粘土分が溶融したオーリチックが付着している。EDS分析では粘土系元素と溶湯成分のMnが検出される。したがって、本事例では生型砂が介在していると判断した。

4.2 砂かみ欠陥(生型砂)の分析事例-2

Fig. 8に材質FC 250、主型は生型、中子はシェル鋳型に発生した砂かみ欠陥を示す。欠陥の発生位置は上型の黒皮面であり堰の反対側である。欠陥全体のSEM像では欠陥内部には砂粒が凝集して介在している。砂粒の拡大

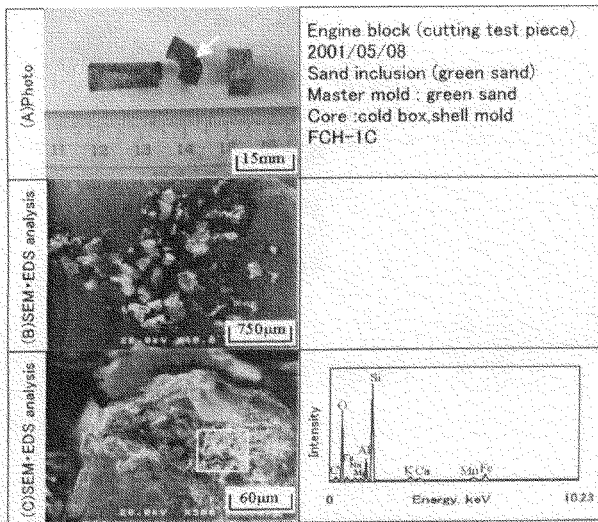


Fig. 7 Defect of sand inclusion-1 by green sand.

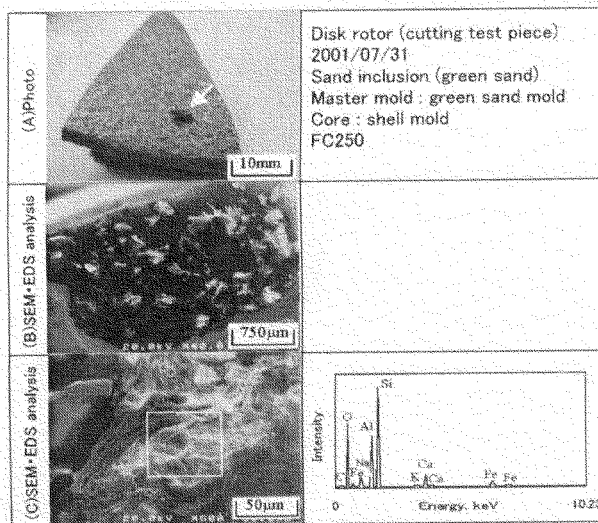


Fig. 8 Defect of sand inclusion-2 by green sand.

SEM像では粘土分が溶融したオーリチックが付着している。これのEDS分析では粘土系元素であるSi, Al, Na, K, Ca, Oが検出され、生型砂が介在していると判断した。この事例では肉眼観察では欠陥部が球状であり、黒皮面のピンホール欠陥やスラグによる介在物欠陥などと区別し難い。生型砂が凝集している砂かみ欠陥では、生型砂がスラグ化し溶湯中のCと反応してCOガスが発生するために球状の凹みとなる。スラグ化した生型砂は比重が低下し、ガスが発生することも相まって欠陥発生位置が鑄込み姿勢の上方向となりやすい。

4.3 砂かみ欠陥(生型砂)の分析事例-3

Fig. 9に材質FC 250, 主型は生型, 中子はシェル鑄型に発生した砂かみ欠陥を示す。欠陥の発生位置は製品のほぼ中央の内部であり, シェル鑄型と接している。また, 砂かみと同時に微細なピンホールが認められる。砂かみ欠陥のSEM像では欠陥内部に砂粒が認められ, 砂粒表面は溶

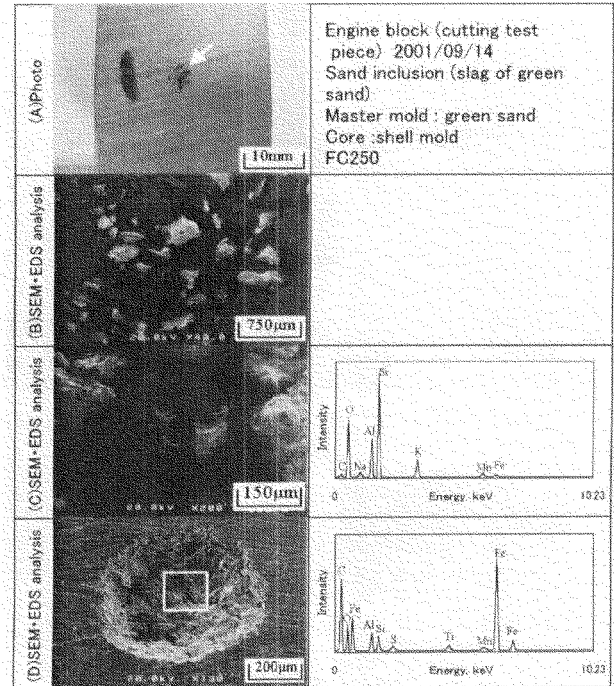


Fig. 9 Defect of sand inclusion-3 by green sand.

融し, やや大きなポーラス状である。EDS分析でAlが多いことと併せて, 生型砂が介在していると判断した。ピンホール欠陥は溶融した生型砂から発生したCOガスの影響で生成したと考えた。

4.4 砂かみ欠陥(中子砂)の分析事例

Fig. 10に材質FCH-1, 主型は生型, 中子はコールドボックス鑄型とシェル鑄型に発生した砂かみ欠陥を示す。Fig. 7と同一の鑄造品で欠陥発生位置も同一の堰近傍の下型の黒皮面である。欠陥全体のSEM像では砂粒が認められる。砂粒は凝集していない。砂粒の拡大SEM像では表面は滑らかである。拡大像以外の砂粒も同様であることから本事例では中子砂が介在していると判断した。

4.5 砂かみ欠陥(生型砂とスラグ)の分析事例

Fig. 11に材質FCD 450, 主型は生型, 中子は未使用における砂かみ欠陥を示す。欠陥発生位置は堰付近の下型の黒皮面である。欠陥全体のSEM像では凝集し溶融している砂粒と単独の砂粒が認められる。溶融している砂粒のEDS分析ではSi, Al, Mn, Oの溶融けい砂成分以外にMgとCeが検出される。砂粒単独の箇所はけい砂成分のみの検出である。生型砂がはく離して砂かみとなり, 溶湯中の酸化物の標準生成エネルギーが低いMg及びCeと反応して溶融してスラグ化していると考えた。

4.6 砂かみ欠陥と近似した介在物欠陥(スラグ)の分析事例

Fig. 12に材質FCH-1, 主型は生型, 中子はコールドボックス鑄型とシェル鑄型に発生したスラグかみ欠陥を示す。Fig. 7及びFig. 10と同一の鑄造品で, 欠陥発生位置は堰付近であるが, 砂かみ欠陥の発生箇所よりも上方向の黒皮面である。本事例は砂かみ欠陥の近似例として示す。

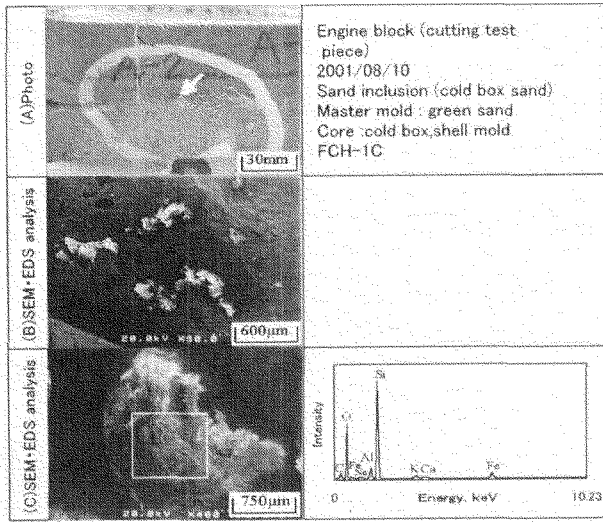


Fig. 10 Defect of sand inclusion by cold box sand.

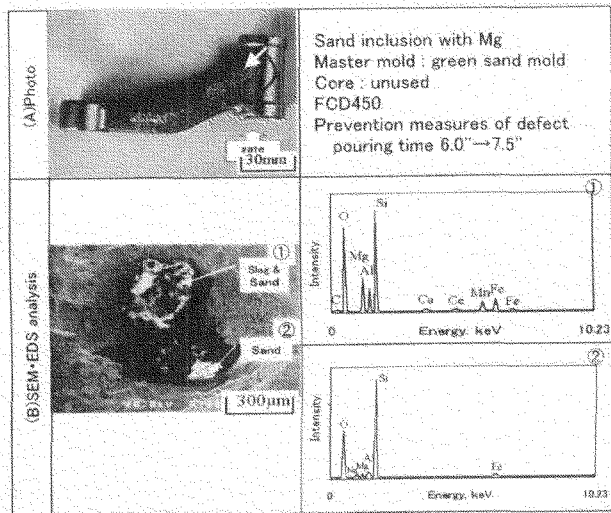


Fig. 11 Defect of sand inclusion with Mg dross.

光学写真ではあばた状の凹みがあり、Fig. 8、Fig. 10 及び Fig. 11 とよく似た外観である。SEM 像では鑄物砂とは明らかに異なり、スラグ状の物質が欠陥内部に付着している。EDS 分析では Ca が多く、接種剤に含まれる Ba が検出されることが特徴的である。接種剤残渣成分がスラグ化したものと考えた。

4.7 砂かみ欠陥と近似した黒皮面のピンホール欠陥の分析事例

Fig. 13 に材質 FC 250、主型は生型、中子は未使用に発生したピンホール欠陥を示す。欠陥の発生位置は黒皮面であり堰の反対側である。本事例は砂かみ欠陥の近似例として示す。光学写真では黒皮面に凹みがあり、Fig. 8 及び Fig. 10~12 とよく似た外観である。欠陥内部及び鑄造製品には介在物は無く、欠陥内部の EDS 分析では O のピークが高く酸化している。したがって、黒皮部の O 濃度が増加し、溶湯中の C と反応した黒皮部における酸化反応

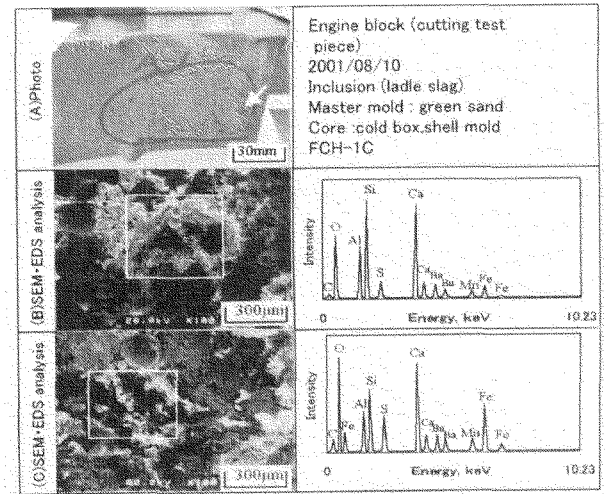


Fig. 12 Defect of slag inclusion by inoculant.

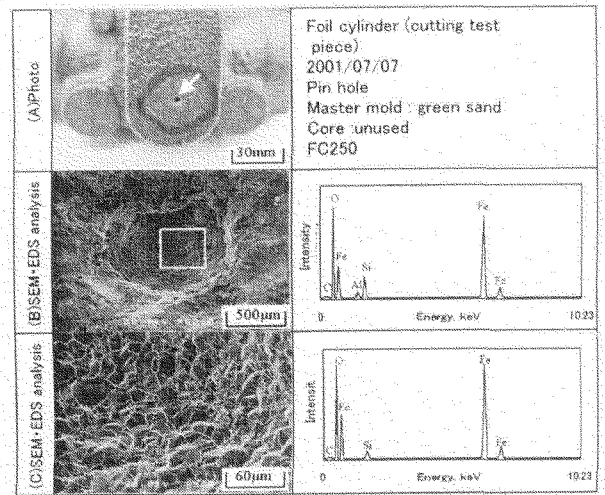


Fig. 13 Defect of pinhole by oxidation.

型のピンホール欠陥であると判断した。

5. 結 言

- (1) 溶湯浸漬実験によって得た鑄物砂及び個々の鑄造工場毎の鑄物砂等を用いて得た欠陥を SEM・EDS 分析することで砂かみ欠陥の判定用標準データが得られることを明らかにした。
- (2) 判定用標準データを基に、鑄造工場で発生した砂かみ欠陥の発生源となる鑄物砂の判定が可能となる。

文 献

- 1) 生型砂の管理の現状：日本鑄物協会・東海支部・無機砂型研究部会報告書 I (1981) 21
- 2) 生型砂の管理の現状 (II)：日本鑄造工学会・東海支部・砂型研究部会報告書 (1998) 35
- 3) 竹本義明：鑄物 53 (1981) 425
- 4) 下見貞治, 奥川健二, 林松男, 山根信之, 佐木紀夫；

- 鑄物 **63** (1991) 55
- 5) 田村恭一, 宮本宗武, 曾我今朝信, 木下祐二: 鑄物 **66** (1994) 462
- 6) 森田富士郎, 金沢英雄, 大塚博之: 鑄物 **66** (1994) 700
- 7) 伊藤忠明, 杉中隆司, 田中裕一, 齊藤已由: 鑄造工学 **69** (1997) 69
- 8) JIS R 2204 「耐火物及び耐火物原料の耐火度試験方法」
- 9) 黒川豊, 矢尾井潤, 太田英明, 三宅秀和: 鑄造工学 **71** (1999) 177
- 10) JIS G 5502 「球状黒鉛鑄鉄品」
- 11) 黒川豊, 尾添伸明, 江草好市, 太田英明: 鑄造工学 **71** (1999) 115
- 12) 黒川豊, 尾添伸明, 太田英明: 鑄造工学 **73** (2001) 258