

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03435

研究課題名(和文)鉄鋼関連材料の新しい迅速分析法の確立

研究課題名(英文)Establishment of novel analytical method for steel related materials

研究代表者

今宿 晋 (Imashuku, Susumu)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：40606620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、カソードルミネッセンス(CL)法を用いて、鉄鋼中の非金属介在物を迅速に識別する手法および耐熱鋼の酸化スケールの同定、形状観察、膜厚測定を非破壊で測定する手法の確立を目指した。走査型電子顕微鏡を用いて、測定試料からの発光を分光器(CLスペクトル)およびデジタルカメラ(CL像)によって測定した。Alキルド鋼中のAl₂O₃-CaO介在物、希土類金属(La, Ce, Nd)を脱酸・脱硫剤に用いた鋼中の介在物、窒化物介在物(BN, AlN)をCL像の発光色から識別することができた。Al₂O₃およびSiO₂スケールの同定と形状観察をCL像から、膜厚測定をCLスペクトルから行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、カソードルミネッセンス法という分析手法を用いて、鉄鋼の特性や生産性を低下させる原因となる介在物を迅速に識別する手法や耐熱鋼の性能評価に重要な表面の酸化被膜の同定、形状および膜厚を非破壊で評価する手法を確立した。これらの手法は、従来の評価法と異なり、非破壊で短時間で評価できるため、鉄鋼生産の向上や鉄鋼製品の品質向上につながる分析手法となる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we established methods to rapidly identify non-metallic inclusions in steels and to non-destructively identify, observe the surface morphology, and measure the thickness of oxide scales on heat-resistant steels using cathodoluminescence (CL). CL spectra and images of samples were acquired using scanning electron microscopy equipped with a spectrometer and digital camera. Non-metallic inclusions in calcium-treated aluminum-killed steels, steels deoxidized and desulfurized by La, Ce, and Nd, and nitride inclusions of BN and AlN were distinguishable from luminescent colors in their CL images. CL images allowed us to distinguish Al₂O₃ and SiO₂ scale from other scales from their luminescent colors, and to observe the surface morphology of the scale. The CL intensity of peaks related to Al₂O₃ and SiO₂ could be used to determine the scale thickness.

研究分野：材料分析化学

キーワード：カソードルミネッセンス 介在物 製鋼スラグ 遊離CaO 遊離MgO 耐熱鋼 スケール

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄鋼材料中の非金属介在物は連続鋳造におけるノズル閉塞や伸線・撚線工程での破断の原因になるなど生産工程に問題を引き起こすだけでなく、疲労破壊、水素誘起割れ、耐食性の低下、低温脆性、表面の疵など製品に問題を引き起こす可能性がある[1]。介在物が引き起こすこれらの問題は介在物の種類、大きさ、形状に依存する[2]ため、介在物の種類・形態・量を調べることは品質管理や品質向上のために重要である。さらに、生産効率を高めるために、介在物を迅速に現場で分析する(オンライン・オンサイト分析)需要も高まっている。従来、介在物分析に用いられているスパーク放電発光分光法や電子線マイクロアナライザー(EPMA)などの分析法は、介在物の種類・形態・量の3つの性質を迅速に分析できる方法とは言えない。そのため、迅速に介在物を分析する手法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、カソードルミネッセンス(Cathodoluminescence: CL)法を用いて、迅速に介在物を分析する方法の確立を目指した。CL法とは、電子線を試料に照射することで、発生する光を測定する分析法であり、発光には不純物準位や欠陥準位が関わっており、バンドギャップを有する半導体や絶縁体が発光する。したがって、鉄鋼材料では母材は発光せず、介在物(絶縁体)だけが発光するので、発光色から介在物の種類・形態・量を測定できる可能性がある。また、鉄鋼材料中の介在物の分析以外にも、CL法を用いた耐熱鋼の酸化被膜の評価法も確立する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

CL測定は、図1に示す装置を用いた。走査型電子顕微鏡(SEM)(Mighty-8DXL, テクネクス工房)の電子銃を電子線源に用いた(SEM-CL法)。CL像を撮影する際は、試料台を60°傾け、試料室に石英製のビューポートを取り付け、ズームレンズ(LZM-06075A, 精密ウェーブ株式会社)を取り付けたデジタルミラーレスカメラ(a7RII, ソニー株式会社)を用いた(図1(a))。CLスペクトルを取得する際は、試料室に直径5mmの穴を開けた放物面ミラーを導入し、試料からの発光を集光した。集光した光は、先端に平凸レンズを取り付けた光ファイバーを通して、小型分光器(QE65Pro, Ocean Optics)に導入して、発光スペクトルを取得した(図1(b))。CL像およびCLスペクトルを取得する際、電子銃のフィラメントによる光がカメラあるいは分光器に検出されないように、対物絞りの中心が電子線の中心軸からずれるようにした。また、エネルギー分散型X線検出器(EDX)(Quantax70, Bruker製)付属のSEM(TM3030 Plus, 株式会社日立ハイテクノロジーズ)あるいは波長分散型X線検出器(WDX)付属のSEM(JXA-8530F, 日本電子株式会社)を用いた介在物の元素分析も行った。

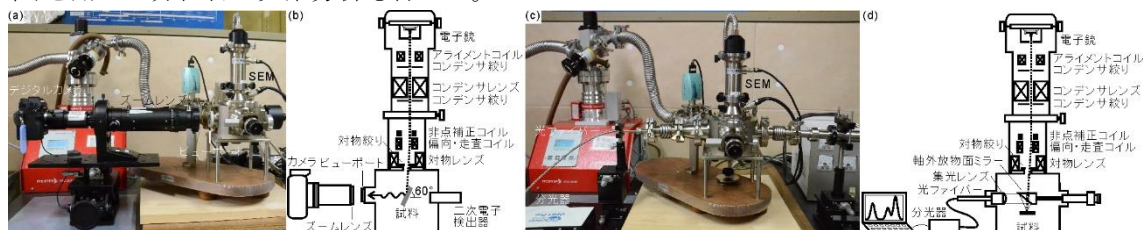


図1 SEM-CL装置の写真および模式図((a), (b): CL像撮影用、(c),(d): CLスペクトル測定用)

(2) 試料作製

介在物を含む測定試料は、電解鉄粉(純度99.9%)に、粒状ランタン(純度99.9%)、粒状セリウム(純度99.9%)、粒状ネオジウム(純度99.9%)あるいは硫黄粉末(純度98%)を表1に示す割合で混合し、アルミナ坩堝に入れ、アルゴン雰囲気中で1550°C、30分間保持して作製した。熱処理後、試料表面をSiC耐水研磨紙(#600, #1200, #2400)にて研磨後、1μmのダイヤモンドスラリーにて鏡面に仕上げた。

表1 本研究で用いた介在物測定用試料の組成 (mass%)

試料	Fe	Al	Ca	B	La	Ce	Nd	S
A	97.45	-	-	-	2.5	-	-	0.05
B	97.45	-	-	-	-	2.5	-	0.05
C	97.5	-	-	-	-	-	2.5	-
D	97.45	-	-	-	-	-	2.5	0.05

耐熱鋼の酸化スケールの評価では、Fe-25%AlおよびFe-15%Al-10%Cr (mass%)合金を測定試料とした。電解鉄粉(純度99.9%)にアルミニウム粉末(純度99.9%)あるいはクロム粉末(純度99.99%)を所定量の混合し、アルミナ坩堝に入れ、4%水素とアルゴンの混合ガス雰囲気中で1560°C、30分間保持して、試料を作製した。その後、得られた合金を0.1Paの真空中で1100°C、12時間保持した。試料表面をSiC耐水研磨紙(#600, #1200, #2400)にて研磨後、1μmのダイヤモンドスラリーにて鏡面に仕上げ、大気中1000°Cで熱処理をすることで合金表面に酸化スケールを作製した。断面SEM観察で酸化スケールの厚さ測定するために、熱処理後の試料の側面

を熱処理前と同様に研磨して、鏡面に仕上げた。

4. 研究成果

(1) CL 法による介在物測定法の確立[3]

本研究では、様々な製鋼過程で生成する介在物を CL 像の発光色から迅速に識別する方法について検討した。ここでは、希土類を含む介在物の測定を行った。ミッシュメタル(La, Ce, Nd)が主要な構成金属を溶鋼に導入することによって、介在物のサイズの減少、MnS などの有害な介在物の生成の抑制、鋼中の酸素および硫黄濃度の減少につながる。そのため、ミッシュメタルは有望な脱酸・脱硫剤として期待されている。ミッシュメタルを脱酸・脱硫剤として用いた場合、酸化物およびオキシ硫化物が介在物として生成されることが報告されており[4,5]、CL 測定

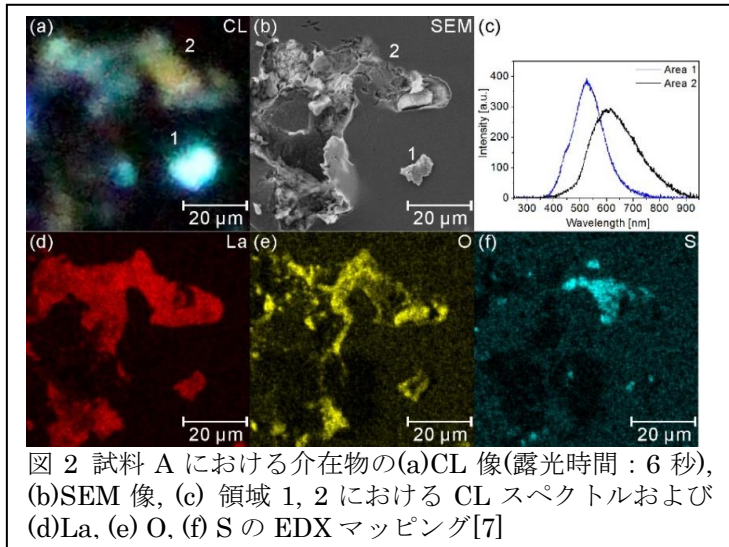


図 2 試料 A における介在物の(a)CL 像(露光時間：6 秒)、(b)SEM 像、(c) 領域 1, 2 における CL スペクトルおよび (d)La、(e) O、(f) S の EDX マッピング[7]

でこれらの介在物を検出し、それぞれを識別することができるかを調査した。

La を脱酸・脱硫剤に用いた試料 D の CL 像、SEM 像、CL スペクトルおよび EDX マッピング(La, O, S)を図 2 に示す。介在物の大部分は La と O だけを含んでいたため、 La_2O_3 であり、青緑色の発光が検出された。一方、La と O に加えて S も検出された部分(図 2(a)の領域 2)も存在し、黄色の発光を示した。EDX 分析によって領域 2 は $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ (La: 69 at.%, S: 31 at.%)であることがわかった。CL スペクトルを測定したところ、 La_2O_3 は 525 nm 付近にピークが検出され、このピークによって青緑色に発光したと考えられる。また、 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ は 600 nm 付近にピークが検出され、このピークによって黄色に発光したと考えられる。図 2(a)から、La を脱酸・脱硫剤として用いた鋼中の La_2O_3 と $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ の介在物は発光色から識別できることがわかる。

Ce を脱酸・脱硫剤に用いた試料 B の CL 像、SEM 像、CL スペクトルおよび EDX マッピング(Ce, O, S)を図 3 に示す。黄色に発光する介在物が検出され、これらの介在物はすべて、Ce と O だけを含んでいたためセリウム酸化物と考えられる。セリウム酸化物は CeO と Ce_2O_3 が存在する。黄色に発光した介在物の CL スペクトルを取得したところ、図 3(h)に示すように 600 nm と 900 nm 付近にピークが検出された。600 nm のピークは過去に報告されている CeO_2 のピーク[6]と一致していたので、今回検出された黄色に発光するセリウム酸化物は CeO_2 であることがわかった。 CeO_2 と $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ は似たような黄色の発光を示しており、この 2 つの介在物が同時に存在すると識別が難しいことが予想される。しかし、 CeO_2 と $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ の CL スペクトルを比較すると、 CeO_2 には 900 nm 付近にピークが存在しているのに対して、 $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ にはこの波長領域にピークは存在しない。そこで、測定に用いたカメラに内蔵されているフィルターを除去して CL 像の撮影を行った。内蔵フィルターは赤外光および紫外光をカットするもので、このフィルターを除去することで、350~1000 nm の波長範囲の光を検出できるようになる。この 350~1000 nm の波長範囲の光を検出できるカメラを用いて、 CeO_2 の CL 像を撮影したところ、図 3(c)のように赤色の発光を検出した。したがって、内蔵フィルターを除去して 350~1000 nm の波長範囲の光を検出できるカメラと内蔵フィルターを除去していないカメラの CL 像から CeO_2 と $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ を識別することは可能である。図 3(b)に示す領域 4 に電子線を集光して、露光時間を

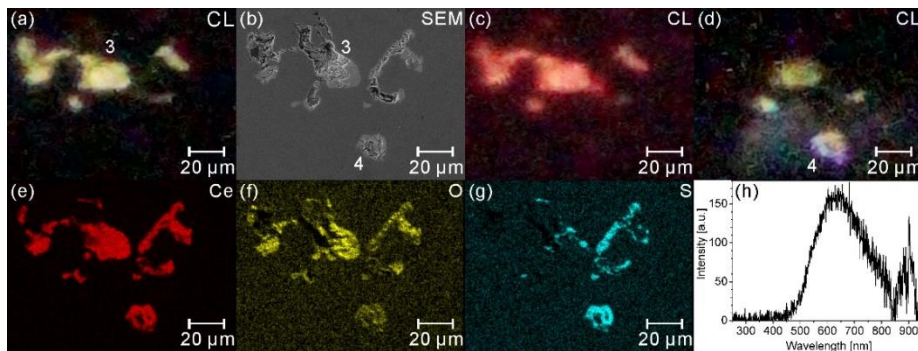


図 3 試料 B における介在物の(a)CL 像(露光時間：6 秒)、(b)SEM 像、(c) 内蔵フィルターを除去したカメラを用いて撮影した CL 像(露光時間：2 秒)、(d) 領域 4 に電子線を集光して撮影した CL 像(露光時間：30 秒) および(e)Ce、(f) O、(g) S の EDX マッピング(h) 領域 3 における CL スペクトル[3]

30 秒にして CL 像を撮影したところ、紫色の発光が検出された(図 3(d))。EDX 分析の結果、紫色に発光した介在物は $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ (Ce: 68 at.%, S: 32 at.%)であることがわかった。

Nd を脱酸剤に用いた試料 C の SEM 像、CL 像および CL スペクトルを図 4 に示す。弱い青紫色の発光が検出され(図 4(b))、EDX 分析の結果、 Nd_2O_3 であることを確認した。CL スペクトルを取得したところ(図 4(c))、420 nm 付近にピークが存在し、このピークによって Nd_2O_3 が青紫色に発光したと考えられる。 Nd_2O_3 と $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ は似たような紫色の発光を示したが、 Nd_2O_3 は赤外領域に強いピーク(870, 885, 900, 915 nm)が存在する(図 4(c))。350~1000 nm の波長範囲の光を検出できるカメラを用いて、 Nd_2O_3 の CL 像を撮影したところ、図 4(d)のように赤紫色の発光を検出したが、 $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ は発光を検出することができなかった(図 8(c))。したがって、内蔵フィルターを除去して 350~1000 nm の波長範囲の光を検出できるカメラと内蔵フィルターを除去していないカメラの CL 像から Nd_2O_3 と $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ を識別できる。Nd を脱酸・脱硫剤に用いた試料 D には、図 5(a)に示すような赤色の発光が検出され、この介在物は Nd, O および S を含んでいた。EDX 分析によってこの介在物は $\text{Nd}_2\text{O}_2\text{S}$ (Nd: 67 at.%, S: 33 at.%)であることがわかった。CL スペクトルを測定したところ、 $\text{Nd}_2\text{O}_2\text{S}$ は 600 nm 付近にピークが検出され、このピークによって青紫色に発光したと考えられる。

以上の結果、ミッシュメタルを脱酸・脱硫剤として用いた場合、 La_2O_3 , $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$, CeO_2 , $\text{Nd}_2\text{O}_2\text{S}$ は市販されているカメラ(検出波長:420~680 nm)の CL 像から識別できる。その後、同じカメラを用いて、露光時間を延ばして撮影することで、 $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$, Nd_2O_3 を検出することができる。さらに、検出波長が 350~1000 nm のカメラを用いれば、 CeO_2 と $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$ の識別と Nd_2O_3 と $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ の識別が可能となり、今回検出された介在物すべてを発光色から識別できる。また、本手法を用いて、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系介在物($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, CaAl_2O_4 , $\text{Ca}_3\text{Al}_{10}\text{O}_{18}$, CaAl_4O_7 , $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$, Al_2O_3)[7]および窒化物介在物(BN, AlN)[8]の識別も可能であった。

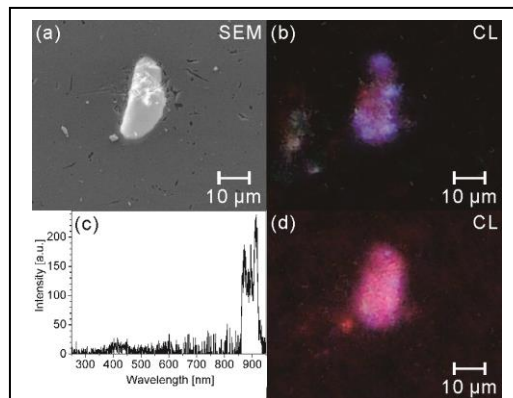


図 4 試料 C における介在物の(a)SEM 像, (b)CL 像(露光時間: 20 秒), (c)CL スペクトルおよび(d)内蔵フィルターを除去したカメラを用いて撮影した CL 像(露光時間: 3.2 秒)[7]

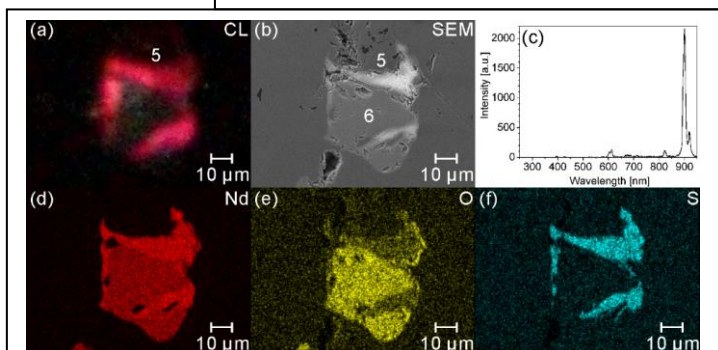


図 5 試料 D における介在物の(a)CL 像(露光時間: 5 秒), (b)SEM 像, (c)領域 5 における CL スペクトルおよび (d)Nd, (e)O, (f)S の EDX マッピング[7]

(2) CL 法による耐熱鋼上の酸化スケールの評価法の確立[9]

耐熱鋼表面における不均一な酸化スケールが形成は腐食の原因となるため、表面の酸化スケールの評価は重要である。特に、形成される酸化スケールの同定、形状観察および厚さの評価が耐熱鋼の性能を制御する上で重要である。一般的には、SEM-EDX による表面と断面の分析によってこれらの性質の評価が行われている。この分析法は、断面観察を必要とするため、破壊分析となってしまう。本研究では、CL 法を用いて非破壊で表面酸化スケールを評価する方法の確立を目指した。測定対象には、 Al_2O_3 を選択した。 Al_2O_3 は高温で均一で密着性が高いスケールを形成し、成長速度が遅いため、下地の金属の保護スケールとして実用上非常に重要な酸化物である。

Fe-25%Al を 1000 °C, 25 時間大気中で熱処理を行った表面の SEM 像、CL 像および CL スペクトルを図 6 に示す。ほとんどの部分が赤色に発光しており、CL スペクトルを測定すると 700 nm 付近にピークが検出され、このピークは過去の報告されている Al_2O_3 にピーク[10]と一致することから、表面に Al_2O_3 スケールが形成されたことがわかる。また、このピークによって、赤

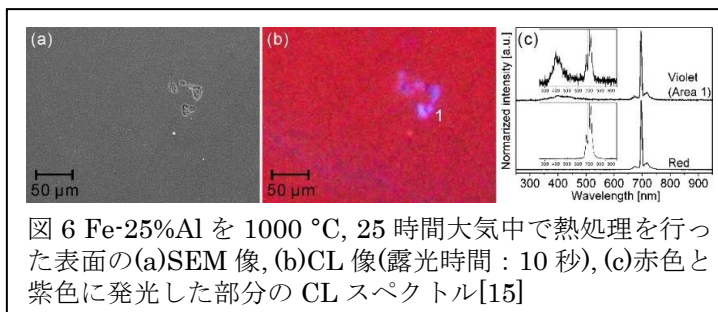


図 6 Fe-25%Al を 1000 °C, 25 時間大気中で熱処理を行った表面の(a)SEM 像, (b)CL 像(露光時間: 10 秒), (c)赤色と紫色に発光した部分の CL スペクトル[15]

く発光したと考えられる。また、一部では紫色に発光している部分が見られた(図 6(b)の領域 1)。この部分の CL スペクトルを取得すると、700 nm のピークに加え、400 nm 付近にもピークが検出された。このピークは、 Al_2O_3 中の酸素空孔に起因しており[10]、図 6(a)の SEM 像から紫色に発光した部分は Al_2O_3 スケールが一部剥がれていることがわかる。したがって、この部分は元々表面から遠いので、 Al_2O_3 スケールの一部が剥がれる直前まで酸素ポテンシャル低いことが推測される。そのため、紫色に発光した部分は、酸素空孔濃度が他の場所より高く、酸素空孔由来の 400 nm のピークが強かったと考えられる。Fe-25%Al 上に形成される酸化スケールとしては、 Al_2O_3 以外に FeO 、 Fe_2O_3 、

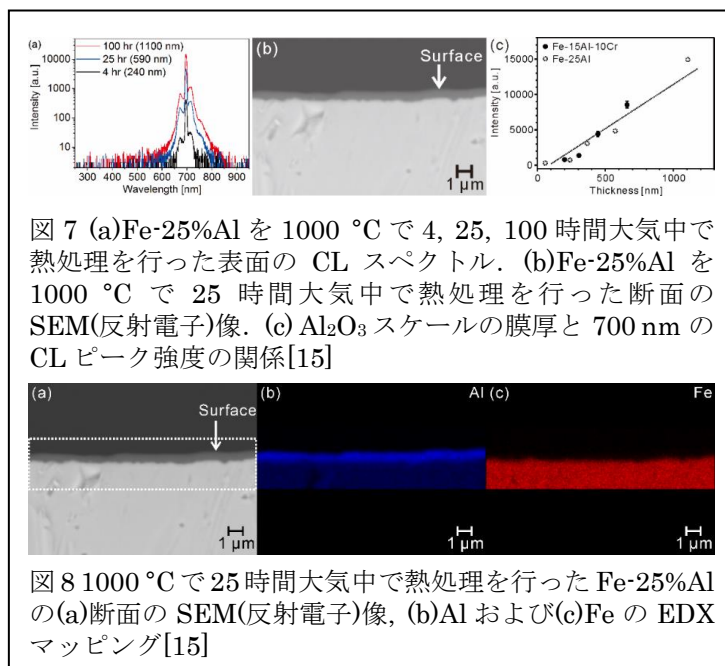


図 7 (a)Fe-25%Al を 1000 °C で 4, 25, 100 時間大気中で熱処理を行った表面の CL スペクトル. (b)Fe-25%Al を 1000 °C で 25 時間大気中で熱処理を行った断面の SEM(反射電子)像. (c) Al_2O_3 スケールの膜厚と 700 nm の CL ピーク強度の関係[15]

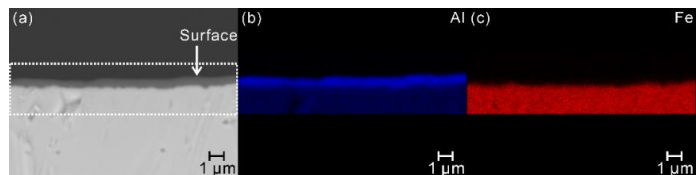


図 8 1000 °C で 25 時間大気中で熱処理を行った Fe-25%Al の(a)断面の SEM(反射電子)像, (b)Al および(c)Fe の EDX マッピング[15]

FeAlO_4 があるが、これらの酸化物の粉末の CL 像を撮影したところ、発光は検出されなかった。したがって、酸素空孔の濃度に関係なく、CL 像の撮影によって、 Al_2O_3 スケールの同定と形状観察を行うことができることがわかった。また、紫色に発光した部分において、400 nm のピークが 700 nm のピークより低いにもかかわらず、紫色に発光したのは、撮影に用いたカメラの検出波長が 420~680 nm であり、この波長範囲では、400 nm のピークの面積強度が 700 nm よりも大きいためである。

次に、1000 °C、大気中での保持時間を変化させて、厚さが異なる Al_2O_3 スケールを作製し、それぞれの CL スペクトルを測定した。得られた CL スペクトルを図 7(a)に示す。膜厚の測定は図 7(b)に示すような断面 SEM 観察によって測定した。濃い灰色の部分が Al_2O_3 スケールであり、このことは図 8 に示すような断面の EDX マッピングによって、濃い灰色の部分が Al だけが検出されていることからわかる。図 7(a)より、 Al_2O_3 スケールの膜厚の増加によって 700 nm 付近のピーク強度が大きくなっているのがわかる。膜厚に対して 700 nm 付近のピーク強度をプロットすると図 7(c)のように線形的に変化した。また、Fe-15%Al-10%Cr についても、同様に膜厚と 700 nm 付近のピーク強度をプロットすると、Fe-25%Al と同じ直線に乗ることが分かった(図 7(c))。したがって、下地の金属によらず、700 nm 付近のピーク強度から Al_2O_3 スケールの厚さを推定できる。

以上の結果、耐熱鋼表面の CL 像および CL 像を取得することで、表面に形成された Al_2O_3 スケールの同定、形状観察および膜厚測定が可能であることがわかった。この測定は、非破壊で測定ができるため、従来の SEM-EDX による測定よりも迅速な測定法であると言える。また、この手法を用いて、CL 像の撮影によって、 SiO_2 スケールの同定と形状観察を行うこともわかった[11]。

<引用文献>

- [1] H. Suito and R. Inoue, *ISIJ Int.*, **36**, 528 (1996).
- [2] P. Rocabois, J. N. Pontoire, J. Lehmann and H. Gaye, *J. Non-Cryst. Solids*, **282**, 98 (2001).
- [3] S. Imashuku and K. Wagatsuma, *Metall. Mater. Trans. B*, **51B**, 79 (2020).
- [4] H. Ha, C. Park, H. Kwon, *Scripta Mater.*, **55**, 991 (2006).
- [5] Q. Ma, C. Wu, G. Cheng, F. Li, *Mater. Today Proc.*, **2S**, S300 (2015).
- [6] S. Mochizuki and F. Fujishiro, *Phys. Status Solidi B*, **246**, 2320 (2009).
- [7] S. Imashuku and K. Wagatsuma, *Metall. Mater. Trans. B*, **49B**, 2868 (2018).
- [8] S. Imashuku and K. Wagatsuma, *Surf. Interface Anal.*, **51**, 31 (2019).
- [9] S. Imashuku and K. Wagatsuma, *Corros. Sci.*, **154**, 226 (2019).
- [10] P.D. Townsend and A.P. Rowlands: *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer, Berlin, p. 41, (2000).
- [11] S. Imashuku and K. Wagatsuma, *Oxid. Met.*, **93**, 175 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Imashuku Susumu, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 154
2. 論文標題 Non-destructive evaluation of alumina scale on heat-resistant steels using cathodoluminescence and X-ray-excited optical luminescence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Corrosion Science	6. 最初と最後の頁 226 ~ 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.corsci.2019.04.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Imashuku Susumu, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 48
2. 論文標題 Simple identification of Al ₂ O ₃ and MgO · Al ₂ O ₃ spinel inclusions in steel using X-ray-excited optical luminescence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 X-Ray Spectrometry	6. 最初と最後の頁 522 ~ 526
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/xrs.2995	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tsuneda Hiroki, Imashuku Susumu, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 105
2. 論文標題 Detection of Free-lime in Steelmaking Slag by Cathodoluminescence Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 522 ~ 529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2018-131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Imashuku Susumu, Tsuneda Hiroki, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 51B
2. 論文標題 Rapid and Simple Identification of Free Magnesia in Steelmaking Slag Used for Road Construction Using Cathodoluminescence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science	6. 最初と最後の頁 27-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11663-019-01724-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imashuku Susumu, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 51B
2. 論文標題 Cathodoluminescence Analysis of Nonmetallic Inclusions in Steel Deoxidized and Desulfurized by Rare-Earth Metals (La, Ce, Nd)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science	6. 最初と最後の頁 79-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11663-019-01732-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imashuku Susumu, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 49
2. 論文標題 Rapid Identification of Calcium Aluminate Inclusions in Steels Using Cathodoluminescence Analysis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Metallurgical and Materials Transactions B	6. 最初と最後の頁 2868 ~ 2874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11663-018-1362-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imashuku Susumu, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 51
2. 論文標題 Cathodoluminescence analysis of nonmetallic inclusions of nitrides in steel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Surface and Interface Analysis	6. 最初と最後の頁 31 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sia.6539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuneda Hiroki, Imashuku Susumu, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 38
2. 論文標題 Mapping of free-lime particles in steelmaking slag utilizing cathodoluminescence method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Metallurgical Analysis	6. 最初と最後の頁 31 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imashuku Susumu, Ono Koichiro, Shishido Rie, Suzuki Shigeru, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 131
2. 論文標題 Cathodoluminescence analysis for rapid identification of alumina and MgAl ₂ O ₄ spinel inclusions in steels	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Characterization	6. 最初と最後の頁 210 ~ 216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2017.07.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imashuku Susumu, Ono Koichiro, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 23
2. 論文標題 X-Ray Excited Optical Luminescence and Portable Electron Probe Microanalyzer-Cathodoluminescence (EPMA-CL) Analyzers for On-Line and On-Site Analysis of Nonmetallic Inclusions in Steel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 1143 ~ 1149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1431927617012685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imashuku Susumu, Ono Koichiro, Wagatsuma Kazuaki	4. 巻 49
2. 論文標題 Cathodoluminescence imaging for detecting non-metallic inclusions in steel	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ALC'17 Proceedings	6. 最初と最後の頁 2868 ~ 2874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 今宿 晋
2. 発表標題 カソードルミネッセンス法による窒化物およびCaO-Al ₂ O ₃ 系介在物の分析
3. 学会等名 製鋼第19委員会製鋼計測化学研究会第73回会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田大喜, 今宿晋, 我妻和明
2. 発表標題 カソードルミネッセンス法を用いた製鋼スラグ中のフリーライムの簡便な分析
3. 学会等名 第135回金属材料研究所講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Susumu Imashuku, Hiroki Tsuneda, Kazuaki Wagatsuma
2. 発表標題 dentification of free lime in slag using scanning electron microscope-cathodoluminescence analysis
3. 学会等名 European Conference on X-Ray Spectrometry (EXRS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今宿 晋
2. 発表標題 製鋼スラグ中のフリーイム迅速分析
3. 学会等名 第3回精錬関係討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Susumu Imashuku
2. 発表標題 Elemental analysis using pyroelectric electron beam
3. 学会等名 The 5th International Conference on X-ray Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Tsuneda, Susumu Imashuku, Kazuaki Wagatsuma
2. 発表標題 Mapping of free-lime particles in steelmaking slag utilizing cathodoluminescence method
3. 学会等名 International Committee of Analysis for Steel & Iron Industry (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田大喜, 今宿晋, 我妻和明
2. 発表標題 カソードルミネセンス法による製鋼スラグ中の遊離MgOの分析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今宿 晋, 我妻 和明
2. 発表標題 非金属介在物分析のオンライン・オンサイト化のための装置開発
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田大喜, 今宿晋, 我妻和明
2. 発表標題 製鋼スラグ中の遊離CaOの二次元マッピング
3. 学会等名 第54回X線分析討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今宿 晋, 我妻 和明
2. 発表標題 カソードルミネッセンス法によるアルミナスケールの評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今宿 晋
2. 発表標題 ルミネッセンス現象を利用した鋼中の非金属介在物の評価法
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 学術部会 3フォーラム合同講演会 「複雑な挙動を示す物質の特性や構造」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今宿 晋
2. 発表標題 カソードルミネッセンス法による鉄鋼中の介在物の迅速な分析方法の確立
3. 学会等名 日本学術振興会製鋼第19委員会製鋼計測化学研究会第69回会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今宿 晋
2. 発表標題 鉄鋼材料の迅速分析法の確立
3. 学会等名 第134回東北大学金属材料研究所講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 常田 大喜, 今宿 晋, 我妻 和明
2. 発表標題 転炉スラグ中に含まれるライム相のカソードルミネッセンス法を用いた分析
3. 学会等名 第134回東北大学金属材料研究所講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 常田 大喜, 今宿 晋, 我妻 和明
2. 発表標題 転炉スラグ中に含まれるライム相のカソードルミネッセンス法を用いた分析
3. 学会等名 第16回日本金属学会東北支部研究発表大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Susumu Imashuku, Koichiro Ono, Kazuaki Wagatsuma
2. 発表標題 Cathodoluminescence imaging for detecting non-metallic inclusions in steel
3. 学会等名 11 th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials ' 17 (ALC'17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今宿 晋
2. 発表標題 カソードルミネッセンス法を用いた鋼中の窒化物の分析
3. 学会等名 マイクロビームアナリシス第141委員会 第171回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田 大喜, 今宿 晋, 我妻 和明
2. 発表標題 製鋼スラグ中の遊離CaO相の新規分析手法の検討
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 学術部会 3フォーラム合同シンポジウム「最先端解析技術を用いた金属材料の特性解析と制御」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今宿 晋, 我妻 和明
2. 発表標題 カソードルミネッセンス法を用いた鋼中の窒化物の分析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第175回春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 常田 大喜, 今宿 晋, 我妻 和明
2. 発表標題 カソードルミネッセンス法による転炉スラグ中に含まれる遊離石灰の簡便な分析法の開発
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第175回春季講演大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	常田 大喜 (Tsuneda Hiroki)	東北大学・金属材料研究所・大学院生 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	我妻 和明 (Wagatsuma Kazuaki) (30158597)	東北大学・金属材料研究所・教授 (11301)	
研究協力者	鈴木 茂 (Shigeru Suzuki) (40143028)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	