

(技術資料)

耐火物容器の管理計測技術

Method of Measuring Brick Thickness



大竹 了*¹
Ryo OTAKE



小里俊哉*²
Toshiya OZATO

It is difficult to estimate the thickness of brick visually due to the complicated shape of the torpedo ladle shell. Kobe Steel has developed a method of measuring torpedo ladle brick thickness at room temperature using a commercial 3D laser scanner, which can accurately evaluate a damaged position in a short time and visualize the damaged area. This method has actually produces highly accurate data for the torpedo ladle brick thickness. Thanks to this method, the life of the torpedo ladle refractory has been prolonged by appropriate repair and the usage of the torpedo ladle refractory has been reduced.

ま え が き = 耐火物は、製鉄・製鋼工程において高温の溶銑や溶鋼を保持、あるいは運搬する容器の内部に施工されている。耐火物の厚さが薄くなると、高温溶融物である溶銑や溶鋼を容器の外部に流出させる漏銑、漏鋼という大きな事故につながる。そのため、耐火物の厚さを計測し、管理する技術が重要である。

混銑車は、高炉にて溶銑を受銑して転炉まで運搬する耐火物容器である。一般的に混銑車は、溶銑の保熱のために開口部が小さく、外部から耐火物を観察することが困難である。

そこで本稿では、汎用の三次元レーザ距離計を用いて実測した鉄皮の外面形状を厚さの基準とすることにより、混銑車の耐火物厚さを短時間で簡易に精度良く定量化する管理計測技術¹⁾について紹介する。

1. 混銑車における耐火物管理の概要

混銑車はトピードカーとも呼ばれ、魚雷型をした耐火物容器である。一般的な混銑車の耐火物構造を図1に示す。混銑車の鉄皮内側に施工される耐火物は、鉄皮側から順に永久張りれんが、内張りれんがと呼ばれている。内張りれんがは、溶銑による摩耗やスラグによる溶損、熱衝撃などにより損耗していき、薄くなると交換あるいは補修を行う。そのため、内張りれんがの厚さを測定し管理している。通常は、定期修理のときに耐火物を室温に冷やし、熟練作業者が炉内に入って内張りれんがの薄い場所を目視によって判断し、図2に示すボーリング作業で取り出した内張りれんが厚さを測定している。しかし、この方法では以下の問題点がある。

- ・ボーリング箇所以外のれんがの厚さはわからない。
- ・混銑車はその複雑な鉄皮形状から、れんがが薄くなっている箇所を目視で精度良く判断することが難しい。

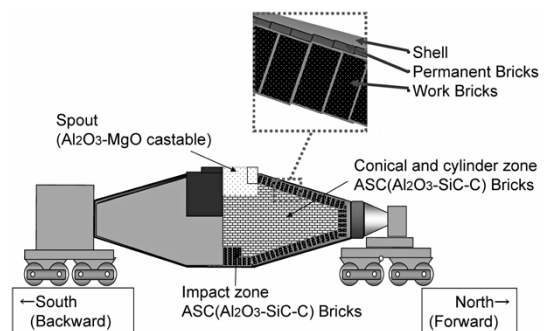


図1 混銑車の耐火物構造
Fig. 1 Refractory lining of torpedo ladle

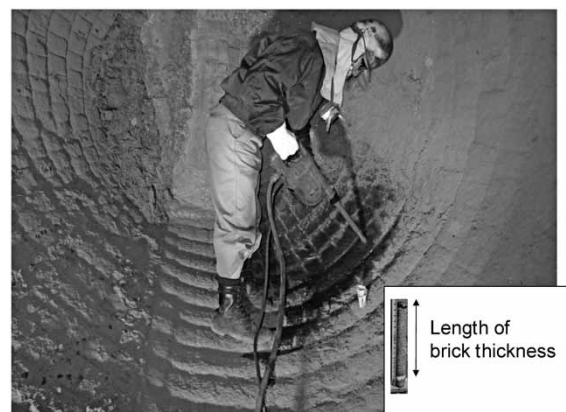


図2 耐火物のボーリング作業
Fig. 2 Appearance of boring

い。
・ボーリングするために1箇所あたり20分程度の時間がかかる。このため、修理工程の都合上、数多くの箇所を測定することもできない。
そのため混銑車は、耐火物の厚さを精度良く管理計測することが困難な耐火物容器である。

*¹ 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 製鋼部 *² 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 制御部

2. 耐火物厚さ測定技術の概要と特徴

耐火物の厚さ測定技術としては三次元レーザ距離計を用いた方法が一般的であり、転炉や取鍋において広く適用されている²⁾。三次元レーザ距離計の原理を図3に示す。三次元レーザ距離計は、対象物に対して連続してレーザを照射し、対象物から反射波が戻ってくるまでの時間を計測することにより、その時間と光の速度から対象物までの距離を計算して形状として測定することができる。

$$l = c \Delta t / 2$$

ここで、 l は対象物とレーザ距離計との距離、 Δt はレーザを照射して反射波が対象物から戻ってくるまでの時間、 c は光の速度である。レーザ距離計は光の速度で距離を計算することから、短時間で測定することができるという特長を有している。

三次元レーザ距離計を用いて耐火物厚さを測定するには、図4に示すつぎの三つの手順が必要である。まず、測定対象とする耐火物容器とレーザ距離計を所定の位置に設置し、互いの距離や向きなどの位置関係を定める。つぎに、レーザ距離計で損耗後の耐火物表面形状を測定する。そして、損耗後の耐火物表面形状と、厚さを求める上で基準となる形状を比較して耐火物の残存厚さを計算する。レーザ距離計で耐火物厚さを精度良く測定する

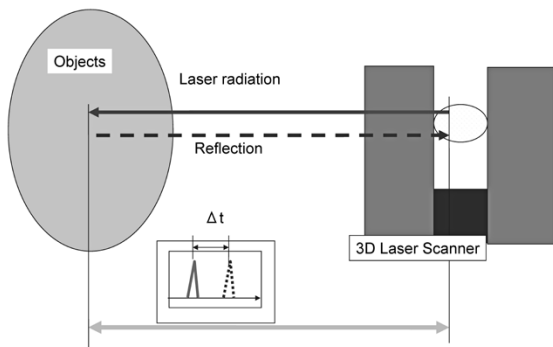


図3 レーザ距離計の原理

Fig. 3 Basis of laser scanner (time of flight method)

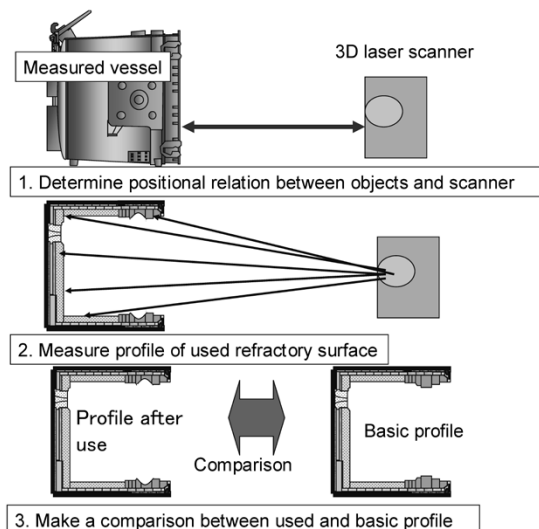


図4 レーザ距離計を用いた耐火物の厚さ測定手順

Fig. 4 Procedures to measure the brick thickness using laser scanner

ためには、耐火物容器とレーザ距離計の位置関係を精度良く決めること、および耐火物厚さの基準となる形状を適切に決めることが重要である。

3. 混鉄車とレーザ距離計の位置関係の決定方法

転炉や取鍋は混鉄車と比較して開口部の面積が広く、レーザ距離計を炉の外部に設置しても炉内の測定が可能である。そのため転炉や取鍋では、レーザ距離計の測定位置（炉外）において基準を固定物にとることができ、位置関係を定めることが容易であった。これに対して混鉄車の炉内を測定するためには、レーザ距離計を炉内に入れる必要があるが、炉内からの測定のみでは位置関係を定めることが困難である³⁾。

そこで、混鉄車においてレーザ距離計と混鉄車の位置関係を定めるために、一つのレーザ距離計を用いて炉内外で測定を2回実施する以下の方法を採用ことにした。まず、炉内から測定可能な位置（炉外）に、移動可能な基準を3箇所以上設置し、その基準と耐火物表面形状の位置関係を測定する。つぎに、耐火物容器に固定した3箇所以上の基準と移動可能な基準を炉外から測定する。このときの測定方法を図5に示す。1回目の測定により、耐火物表面とレーザ距離計の位置関係、および移動可能な基準の位置の関係を定めることができる。2回目の測定により、耐火物容器に固定した基準と移動可能な基準の位置関係を定めることができる。移動可能な基準に三角測量の原理を適用することで1回目と2回目の測定の位置関係を定めることができ、これらによりレーザ距離計と混鉄車の位置関係を定めることができるようになる。

4. 内張りレンガ厚さ基準形状の選択

内張りレンガ厚さの基準形状としては一般的に、つぎの三つのなかから選択される。

- 1) 耐火物を全て新しく施工したときの形状
- 2) 鉄皮や永久張りレンガの内面形状
- 3) 鉄皮図面形状や耐火物施工図面形状

1) においては、新しく施工した内張りレンガの形状から損耗した量を引くことによって内張りレンガ厚さが

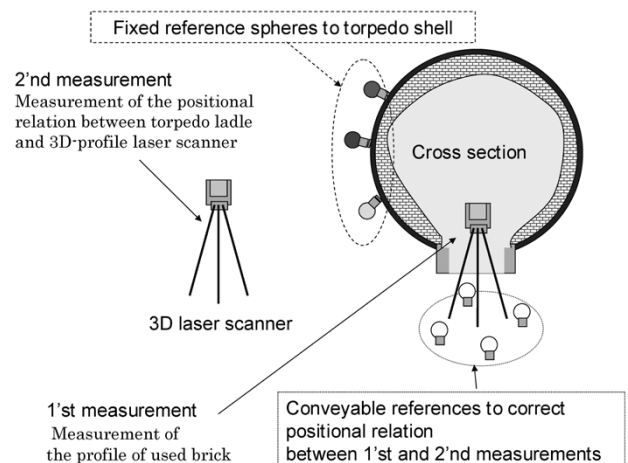


図5 使用后耐火物表面形状の測定方法

Fig. 5 Schematics of measuring profile after use

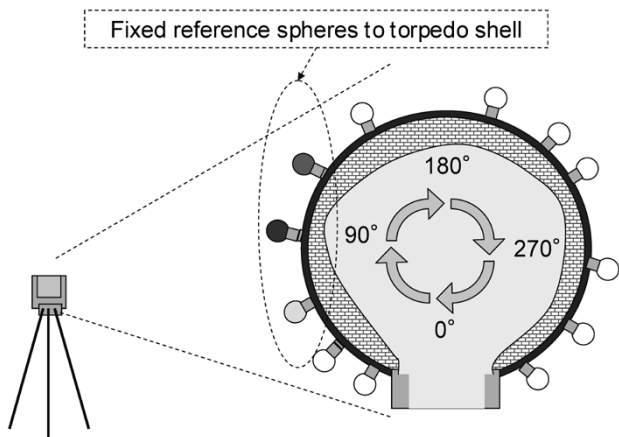


図6 混鉄車鉄皮外面形状の測定方法
Fig. 6 Schematics of measuring outer TPC shell

計算できる。しかし混鉄車においては、耐火物を全て新しく施工する時間間隔が長く、基準形状の適用に長期間かかる。2)においては、基準形状と耐火物表面形状の表面間の距離から残存している内張りレンガの厚さを直接計算することができる。しかし、鉄皮内面形状を測定するためには内張りレンガを全て解体せねばならず、内張りレンガを全て新しく交換する間隔が長い混鉄車では容易に適用できるものではない。3)においては、実際の混鉄車鉄皮が長期間の使用により変形しているため、測定誤差が大きくなって精度の良い評価ができない。

そこで、短期間で精度の良い測定を実現するために、鉄皮の実際の外面形状を基準形状とする方法を発案した。鉄皮の外面形状はいつでも測定が可能であり、鉄皮の変形の影響も考慮することができる。ただし、レンガ厚さの全体の分布を測定するためには鉄皮外面形状全体を測定することが必要であり、1回の測定では鉄皮の一部しか測定することができない。

そのため、鉄皮の外面全周を覆うように適切な位置に基準を設置し、レーザー距離計を1箇所固定したままの状態ですべてを90°ずつ回転させて鉄皮外面全体を測定した。測定の模式図を図6に示す。適切な位置に設置した基準に対して三角測量の原理を適用することで、おのこの角度から測定した鉄皮外面形状をつなぎ合わせて

混鉄車鉄皮の全体形状とした。

5. 測定結果

図7に示すように、前述の位置関係の決定方法と基準形状の選択を適用して混鉄車の内張りレンガの厚さを測定した。なお、測定に用いた機器の仕様は表1のとおりであり、汎用の三次元レーザー距離計を用いた。

混鉄車の内張りレンガを全て新しく施工する大修理から263kt受鉄し、中間修理にて停止したときに内張りレンガの残厚を測定した結果を図8に示す。測定結果の出力は、炉内全体のレンガ残存状況が一つの図から読み取りが可能となるように三次元の厚さ分布を展開図に変換した。また、炉内を適切な区域に分け、各区域内の最小れ

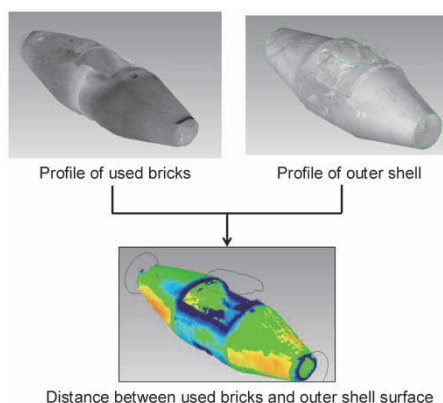


図7 混鉄車レンガ厚さの測定方法と結果
Fig. 7 Measuring method and results of brick thickness of torpedo ladle

表1 測定に使用したレーザー距離計の仕様
Table 1 Specifications of 3D profile laser scanner

Specifications of 3D laser scanner	Laser power	20 (mW)
	Beam size	3 (mm circle)
	Speed	976000 (point/sec.)
	Accuracy	2 (mm/second)
	Wavelength	905 (nm) infrared light
	Vertical field of view	300 (°)
Setup for measurement	Horizontal field of view	360 (°)
	Measurement time	2 (min.) 17 (sec.)
	Measurement point	10 ⁷ (point)

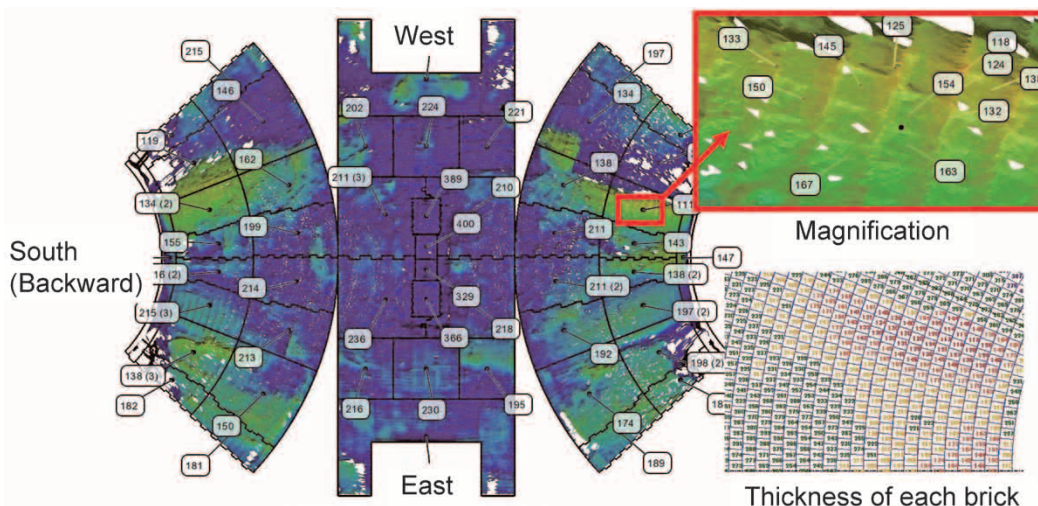


図8 測定結果の展開図
Fig. 8 Developed figure of measurement results

んが厚さを出力するようにしている。さらに、れんがの最小管理単位はれんが1枚であるため、れんが1枚ごとの最小厚さの出力も可能としている。

測定に用いた汎用三次元レーザー距離計の分解能は炉内で約3~5mmであり、図8に示すようにれんが間の目地まで判別可能な測定結果を得ることができる。繰り返し精度を評価するために、同一の混鉄車に対してレーザー距離計の設置位置を変更して2回測定を行った結果を図9に示す。得られた繰り返し精度は平均誤差-0.1mm、標準偏差1.9mmとなり、レーザー距離計と混鉄車の位置関係は移動可能な基準と固定位置に設置した基準により適切に決められていることが確認できた。

実際に残存している内張りれんがの厚さとレーザー距離計による測定から得られる結果を合わせるために、れんが1枚1枚に対して鉄皮厚さと永久張りれんがの厚さを設定できるようにして、図10に示すように鉄皮外面と耐火物稼動面の距離から設定した鉄皮と永久張りの厚さの差分を計算した。レーザー距離計による測定結果とボーリングによる厚さ測定の比較を図11に示す。図11より同一部位の測定結果はボーリングによる実測値に対して+20~-10mmの範囲内に収まり、レーザー距離計から得られた結果が平均的に11mm厚く測定されたことがわかる。ボーリングと比較して厚く出力される原因は、れんがのごく表層の脆化部分がボーリング測定時に剥離することがあること、れんがの変質層部分の厚さをれんがではないとして測定時に除いていること、および施工時の

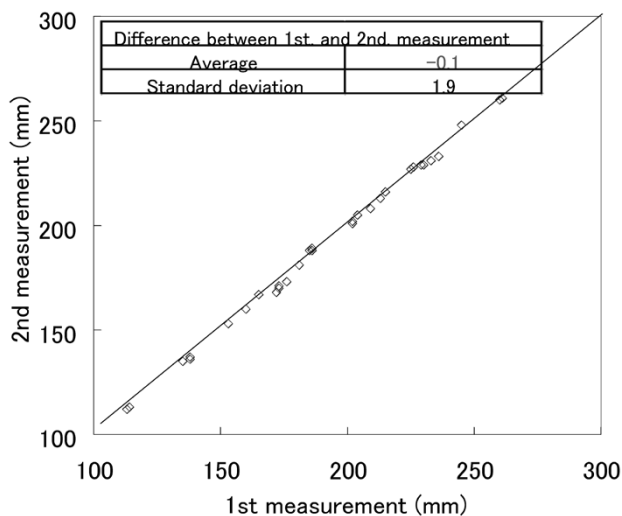


図9 繰り返し精度
Fig. 9 Repeated accuracy

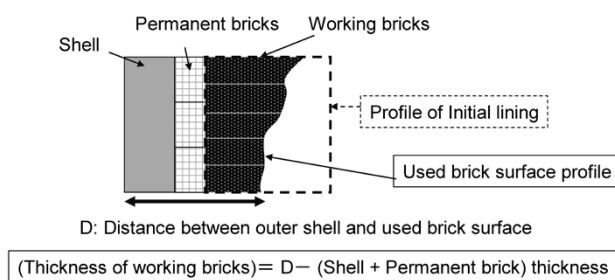


図10 内張りれんがの厚さ計算方法
Fig.10 Calculation of work brick thickness

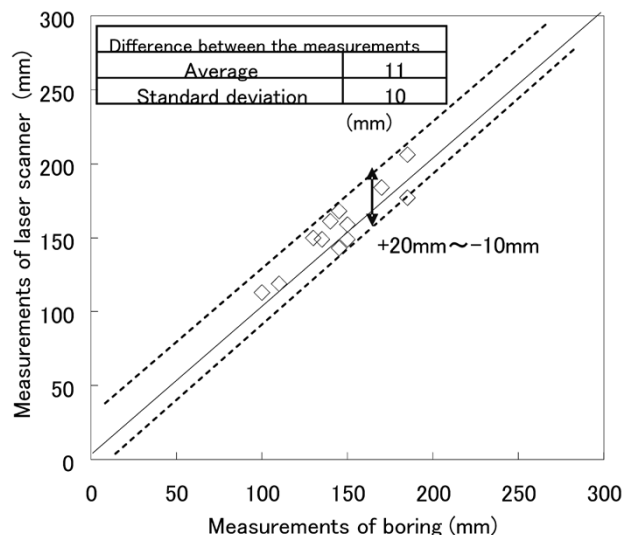


図11 測定精度
Fig.11 Measurement accuracy

表2 従来技術と開発したレーザー距離計による測定結果のまとめ
Table 2 Comparison between conventional method and developed method

	Boring (conventional method)	3D laser method (developed method)
Measurement point	1・3 point/time	10 ⁷ point/time
Accuracy	± 10 mm	repeated accuracy ±2 mm degree of accuracy +20・-10mm
Measurement time	20 min/point	1 h

モルタル厚さの誤差に起因すると考える。これらの影響を考慮すると、レーザー距離計により正確に測定できていると考えられる。

従来はボーリング箇所を目視で決めていたため、最も薄いれんがの位置がわからなかった。しかし、このレーザー距離計を用いた内張りれんがの厚さ測定方法により、炉内全体において最も薄いれんがを確実に判別できるようになり、補修が必要な範囲を明確に把握することができるようになった。また、測定時間も解析時間を含めて1時間であり、修理工程に支障をきたすことなくれんがが残存状況の測定が可能となった。従来の測定方法であるボーリングと開発した技術の差異を表2にまとめて示す。

6. 混鉄車れんが残厚測定技術の活用

レーザー距離計による耐火物厚さ測定方法の導入前後における混鉄車耐火物の各種指標を図12に示す。従来の目視とボーリングによる残厚測定では正確なれんがが残存状況がわからないため、炉内を吹き付け補修するにあたって、本来必要な位置を限定することができず、炉内全体を一定量補修せざるを得なかった。

れんが残厚測定技術の活用により耐火物損傷状況が明確になり、れんが残厚の薄い部分を限定して補修することができるようになった。具体的には、管理区域内のれんが残厚が初期施工時の半分以下まで薄くなった場合、その区域内を吹き付け補修することで補修量を削減した。この結果、吹き付け補修量を60%低減できた。

また、炉内全体のれんが残存状況が定量的に把握できるようになった。従来は、過去の大修理において解体したときのれんがの残存状況から大修理寿命を経験的に決

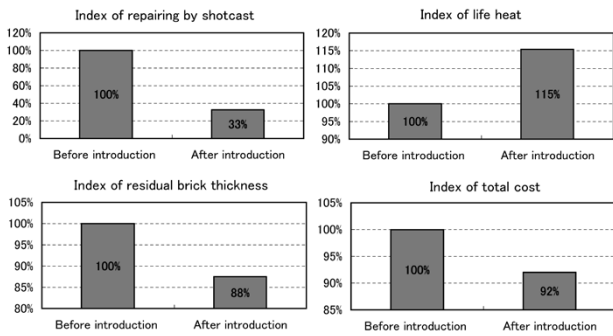


図12 測定技術導入前後の各指標の変化

Fig.12 Index of torpedo ladle refractory before and after introduction of laser scanner

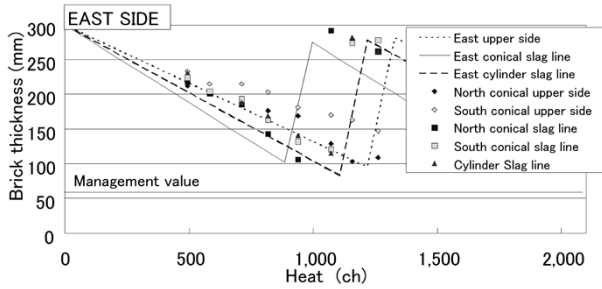


図13 れんが厚さの管理

Fig.13 Management of brick thickness

定していた。このため、漏銑防止のために大修理寿命を延ばすことができていなかった。れんが残厚測定技術の活用により、混銑車ごとのれんが残存状況が正確に良く把握することが可能となった。これにより、薄い部分を補修して漏銑を確実に防止しながら大修理寿命の延長を図ることができるようになった。

その結果、大修理寿命を8%延長することができ、大修理解体時の内張りれんが残存厚みを平均12%削減できた。これらの取り組みの結果として、混銑車耐火物のコストは汎用三次元レーザ距離計によるれんが厚さ測定技術導入前後で9%削減することができた。さらに、図13に示すように、各損耗部位に対する損耗状況の傾向管理が可能となり、漏銑を防止するための技術としても活用できている。

むすび = 汎用の三次元レーザ距離計を用いた混銑車の内張りれんが厚さ測定技術を開発し、混銑車耐火物厚さの管理、耐火物使用量の削減に取り組みについて紹介した。今後、さらなる耐火物コスト削減技術の開発につなげていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 大竹 了ほか. CAMP-ISIJ. 2013, Vol.26, p.734.
- 2) 鈴木義之. 耐火物. 2008, 第60巻, 第9号, p.483-487.
- 3) 柳本隆之ほか. 耐火物. 1989, 第41巻, 第4号, p.197-202.