

# ごみ溶融処理施設／酸素洗浄装置の高度化

## ～リアルハプティクス(力触覚)技術の適用と 今後の自動制御に向けた展望～

Waste Melting Plant / Advanced Oxygen Washer  
～Application of the Real-Haptics sensing technology for the oxygen  
washing, and its future automatic control prospects～

古賀 隆二 Ryuji KOGA

北九州技術センター 制御システム技術部  
技術企画室 シニアマネジャー

川口 秀喜 Hideki KAWAGUCHI

NS プラント設計(株)  
制御システムエンジニアリング部  
電気チーム チーフ

陳 立 Ri CHIN

技術本部 技術開発研究所  
データサイエンス室

川田 一輝 Kazuteru KAWATA

環境ソリューション事業部 技術部  
プラント技術室 室長

田中 規博 Norihiro TANAKA

北九州技術センター 制御システム技術部  
環境・エネルギー制御システム室 マネジャー

小池 純 Jun KOIKE

環境ソリューション事業部 技術部  
プラント技術室 マネジャー

小宮 史朗 Shiroh KOMIYA

NS プラント設計(株)  
環境・エネルギープラントエンジニアリング部  
環境プラントグループ 溶融炉チーム  
チーム長

津田 貢 Mitsugu TSUDA

NS プラント設計(株)  
環境・エネルギープラントエンジニアリング部  
環境プラントグループ 溶融炉チーム

### 抄 録

都市ごみのガス化溶融技術の一つであるシャフト炉式直接溶融炉プロセスにおいて、炉底部の溶融を促進させるために酸素洗浄作業が行われることがある。酸素洗浄作業は酸素洗浄装置を遠隔操作して行われるが、外部から炉内の状況を把握できなかったため、これまではオペレータの経験と勘に頼ってきた。この課題に対して、当社は、リアルハプティクス<sup>\*)</sup>(力触覚)技術を酸素洗浄装置に適用した。その結果、オペレータが酸素洗浄装置を通して炉内の状態を力触覚として把握できるようになり、酸素洗浄の作業性が向上した。本稿ではリアルハプティクス技術を適用した酸素洗浄装置についての当社の取組みと今後の自動制御への展開について述べる。

### Abstract

The oxygen washing is occasionally done for improving the activation of the melting reaction in the furnace bottom of the shaft-furnace type direct melting system which is one of the gasification and melting technologies for municipal solid waste treatment. The oxygen washing is performed in remote control operation by the oxygen washer. However, in the past the operators couldn't grasp the condition in the furnace for this operation, and the operation of the oxygen washer depend on operator's experience and sense.

We applied Real-Haptics technology to the oxygen washer to this problem. Real-Haptics, is the technology transmitting the sense of touch to a remote place. The operators have been able to sense touchably the conditions in the furnace through the oxygen washer, and the operability for the oxygen washer has been increased.

<sup>\*)</sup>「リアルハプティクス」は、モーションリブ(株)の登録商標です。

## 1 緒言

当社が独自開発した従来型シャフト炉式ガス化溶融炉は、廃棄物を熱分解・ガス化させた後高温燃焼させ、廃棄物中の灰分を溶融・再資源化するものであり、図1に示す様なガス化-溶融一体型のシンプルな構造となっている。

溶融炉に入ったごみは、上部の予熱・乾燥帯で乾燥され、下部の熱分解ガス化帯で可燃分が熱分解・ガス化され、さらに下部の燃焼帯において熱分解されずに残った可燃残渣を燃焼したあと、残った無機分が炉底部の溶融帯で1700℃から1800℃の高温で溶融されて溶融スラグとして出湯口から出湯される。

当社では、出湯作業の負荷軽減や効率向上のために、機械化や自動化に積極的に取り組んできた。その取り組みの一つとして、出湯における酸素洗浄作業に対して、力触覚センシング技術であるリアルハプティクス技術を適用することで、オペレータが炉内の状況を力触覚情報として把握できるシステムを実現し、酸素洗浄作業の効率を向上させると共に、2年間の稼働実績を積み重ねてきた。

本稿では、このリアルハプティクス技術を適用した酸素洗浄装置についての当社の取り組みと今後の自動制御への展開について述べる。

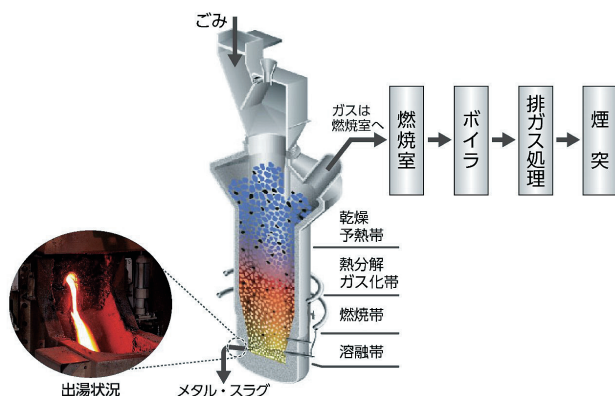


図1 シャフト炉式ガス化溶融炉  
Fig. 1 Overview of Shaft-furnace type gasification and melting furnace

## 2 酸素洗浄作業の現状と課題

間欠出湯方式の溶融炉においては、炉底部の溶融帯に溶融物を一時的に貯めておき、1時間に1回程度の出湯を行っている。本方式の場合、溶融物を炉

外へ排出する出湯作業は出湯口開閉機を用いて、①マッドで閉塞している出湯口の開孔、②溶融物の排出、③閉塞機を用いたマッドでの閉塞の順で行われる。この出湯作業中に、炉底部の比較的低温の部分の温度を上げて無機分の溶融を促進させる酸素洗浄作業が行われることがある。

この酸素洗浄作業は、出湯口から酸素供給パイプを挿入して炉底部内のコークスに酸素を供給するもので、主に酸素洗浄装置による遠隔手動にて操作を行っている。しかしながら、高温の炉底部内では酸素供給パイプは先端部側から徐々に消耗してゆくため酸素供給パイプの先端位置の把握が難しく、コークスへの酸素供給が効率よく行われているかについてはオペレータの経験と勘に頼ってきた。そのため、これまでは、酸素洗浄作業の自動化への足掛りを得ることができなかった。

## 3 酸素洗浄作業へのリアルハプティクス技術の適用

当社は、上記酸素洗浄作業の課題に対して、オペレータが操作状況を定量的に把握するための手段として、慶応義塾大学の西大教授が開発した、機械が触った物体の感覚を人間に伝える『リアルハプティクス』技術に着目した。

ハプティクスとは、利用者に力、振動、動きなどを与えることで皮膚感覚フィードバックを得る技術で、一般に仮想モデルによって仮想的な力覚を実現する技術とされているが、慶應義塾大学が開発したリアルハプティクス技術は、力触覚を装置に実装することにより現実(リアル)の物体や周辺環境との接触情報の長距離伝達を実現するもので、介護、医療といった分野の他に、一般の産業分野での実用化も期待されている全く新しい技術である。

機械の遠隔操作の代表例として、操作器(マスタ)の操作に応じて遠隔地に配置された作業装置(スレーブ)を作動させるようにしたマスタ・スレーブ制御があるが、リアルハプティクスを実現するためには、マスタ側とスレーブ側双方向に力触覚を伝達させる必要がある。これを可能にする制御技術が、マスタ・スレーブ制御の一つであるバイラテラル制御である。バイラテラル制御では、マスタからス

スレーブにその動作指令を伝えると同時に、スレーブが作業対象物や障害物等から受けた作業反力をマスタにフィードバックすることで、マスタとスレーブ双方を同時に制御している(図2)。こうすることにより、遠隔地における力触覚を、物理的に離れた操作者側で受け取ることが可能となる。図中において、 $f_s$ はスレーブが障害物から受ける反力、 $f_m$ はスレーブからマスタに伝達される反力、 $x_m$ 、 $x_s$ は各々マスタ、スレーブの位置情報を表す。

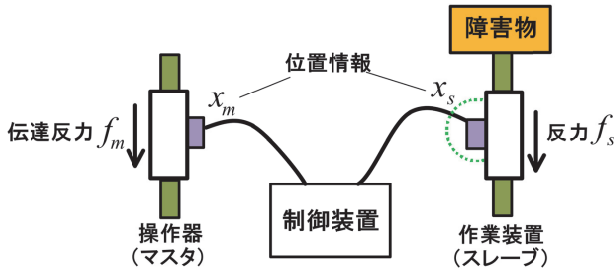


図2 バイラテラル制御の概念図  
Fig. 2 Conceptual diagram of bilateral control system

このバイラテラル制御でリアルな力触覚を実現するためには、マスタとスレーブの位置制御と力制御を同時に実現することが必要不可欠であるが、位置制御では位置決めを緻密に行う硬い動作が、力制御では力を適切に調整する柔らかい動作が要求される。これら相反する要求を同時に満たす手法として、慶応義塾大学の太西教授が開発したものが、加速度基準バイラテラル制御方式(Acceleration-based Bilateral Control, ABC方式)である。この制御方式では、図3のように、マスタシステムとスレーブシステム内のエンコーダから出力される位置情報 $x_m$ 、 $x_s$ を二階微分して加速度 $x''_m$ 、 $x''_s$ を算出

し、それらの加速度の差がゼロになるように制御することで位置制御を、加速度の和がゼロになるように制御することで力制御を行う。こうすることにより、位置制御と力制御が互いに干渉するといった問題が生じることなく、リアルな力触覚を再現させることが可能となる。

当社ではこの加速度基準バイラテラル制御方式によるリアルハプティクス技術を酸素洗浄装置に適用して、炉内の状況を触感としてオペレータにフィードバックするシステムを実用化した。

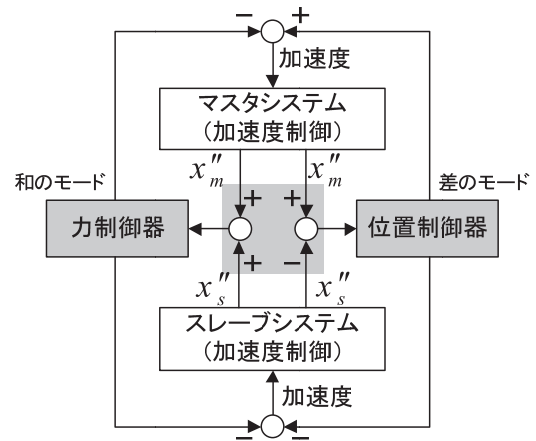


図3 加速度基準バイラテラル制御方式のブロック図  
Fig. 3 Block diagram of Acceleration-based Bilateral Control

## 4 リアルハプティクス技術を適用した酸素洗浄装置

### 4.1 酸素洗浄装置の構成

リアルハプティクス技術を適用した酸素洗浄装置の構成を図4に示す。酸素洗浄装置は、オペレータ

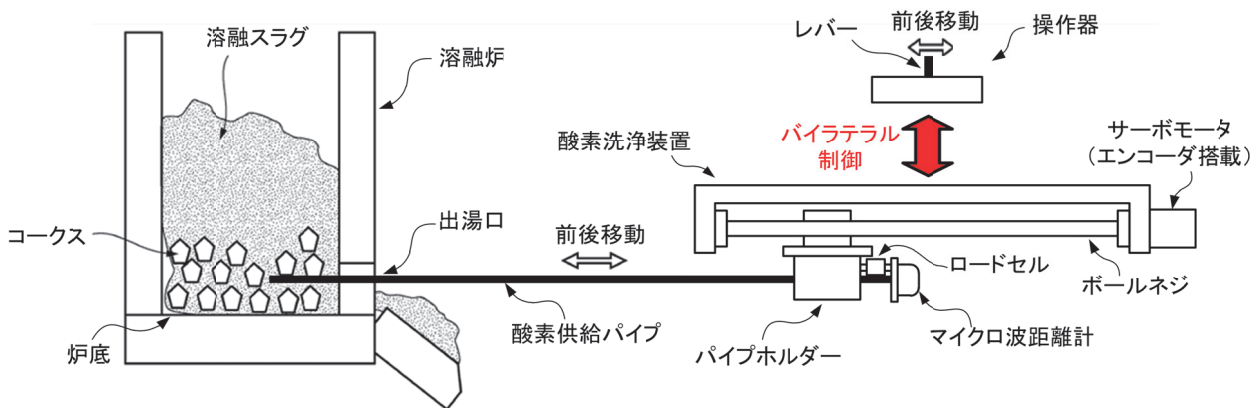


図4 酸素洗浄装置の構成  
Fig. 4 Diagram of oxygen washer of melting furnace



が操作器のレバーを前後に移動させることで、酸素供給パイプを固定しているパイプホルダーがレバーの動きと同期して前後に移動するもので、操作器のレバー操作によりサーボモータを駆動させ、ボールネジを用いてパイプホルダーが前後する。このパイプホルダーには、パイプの長さをリアルタイムで測定するためのマイクロ波距離計と、酸素供給パイプの反力を補正するためのロードセルが設置され、パイプホルダーの位置情報はサーボモータに搭載されたエンコーダにてリアルタイムに収集される。

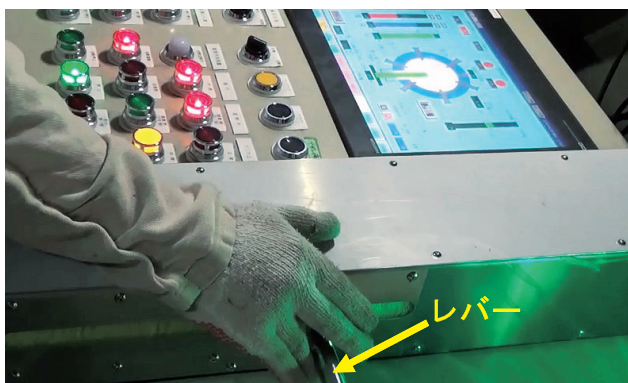
## 4.2 操作状況

図5に酸素洗浄装置の操作状況を示す。オペレータは(a)に示す操作器のレバーを移動させて、(b)に示す酸素洗浄装置を遠隔操作して炉内の洗浄を行なう。酸素洗浄装置の酸素供給パイプが挿入される炉底部内は、溶融スラグ、コークスが混在した状態であり、酸素供給パイプが炉内を移動した際に受ける反力は炉内の混在状態によって変化する。その反力の変化は、操作器に力触覚データとして伝達さ

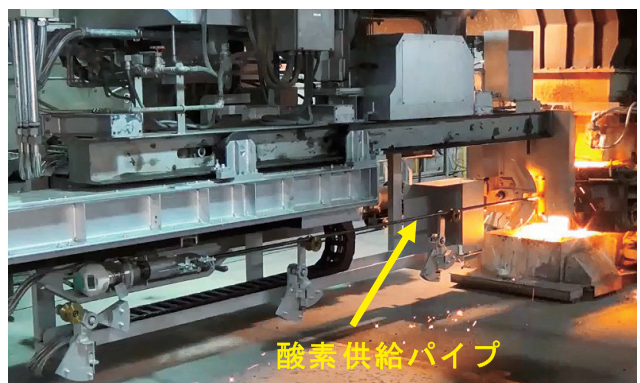
れ、操作器のレバーに反力として再現されるとともに、モニターに数値として表示される。オペレータは酸素供給パイプが受ける反力を、「硬い」、「柔らかい」、「重い」、「軽い」といった感覚とともに、定量的なデータとして視覚で確認することで炉内の状態を把握でき、酸素洗浄装置の操作に反映させることが可能となる。更に、パイプホルダーの位置情報とマイクロ波距離計で測定した酸素供給パイプの長さからパイプの先端位置を求め、それをモニター上に表示させることで、オペレータは視覚的にも酸素供給パイプの位置を把握することもできる。

## 4.3 バイラテラル制御の改善

バイラテラル制御では、リアルな力触覚が伝わる一方、制御外乱による影響も大きい。今回適用した酸素洗浄装置などの比較的大型の機械では、ボールねじの機械的な弛みや、ギヤのバックラッシュ・摩擦などが制御外乱となり、酸素供給パイプの先端が障害物と接触した瞬間の反力が操作器にリアルに伝わらない問題が発生した(図6)。そのため、力セン



(a) 操作器(マスタ)  
(a) Operating device (Master)



(b) 酸素洗浄装置(スレーブ)  
(b) Oxygen washer (Slave)

図5 酸素洗浄装置の操作状況(写真)  
Fig. 5 Operation scene of oxygen washer (Photo)

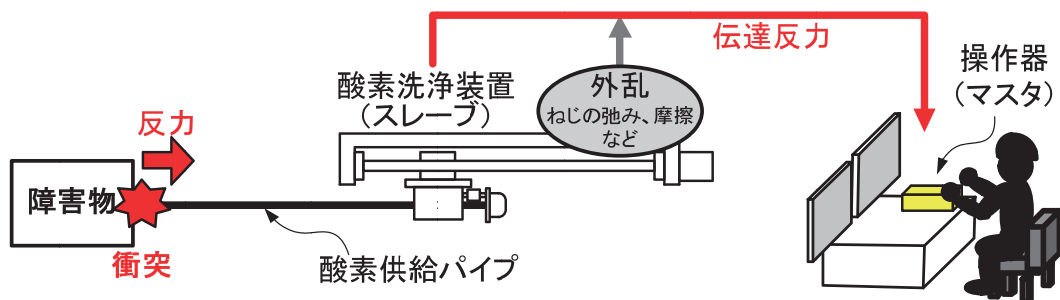


図6 操作器(マスタ)への反力の伝達  
Fig. 6 Transmission of reaction force to operating device (Master)

サの一種であるロードセルを増設し、エンコーダから求められる反力にロードセル信号の変化量を加える補正を行うことで衝突の瞬間の反力の再現を試みた。酸素供給パイプが障害物と衝突した時の伝達反力について、ロードセルによる補正がない場合と補正がある場合の例を図7に示す。図中において、横軸は時間、左側の縦軸はロードセル測定値と操作器(マスタ)への伝達反力、右側の縦軸はスレーブ位置、赤の矢印は障害物との衝突のタイミングを示す。ロードセルによる補正がない場合は、(a)に示すように衝突時の反力は緩やかに変化するため、操作器における反力変化は不明瞭となり、衝突を認識することが困難であった。一方、ロードセルによる補正を行なった場合は、(b)に示すように衝突時の反力は急激に変化し、操作器における反力変化が明瞭となり、衝突を認識することが容易となった。こ

のように、酸素洗浄装置などの比較的大型の機械では、ロードセルによる補正を行う改善により、制御外乱の影響を低減させ、よりリアルな力触覚伝達が実現できることを確認した。

#### 4.4 操作性の評価

本酸素洗浄装置の操作性を評価するために、2年間実際に操作に従事したオペレータ8名に対して、操作感(力触覚)に関する以下のアンケートを行った。

(a) 炉内のコークスに当たった感覚はわかりますか？

(b) 溶融スラグの粘り具合はわかりますか？

その結果、全員が炉内の状況を把握できると回答しており、オペレータの実感として、リアルハプティクス技術の実用性を確認することができた。

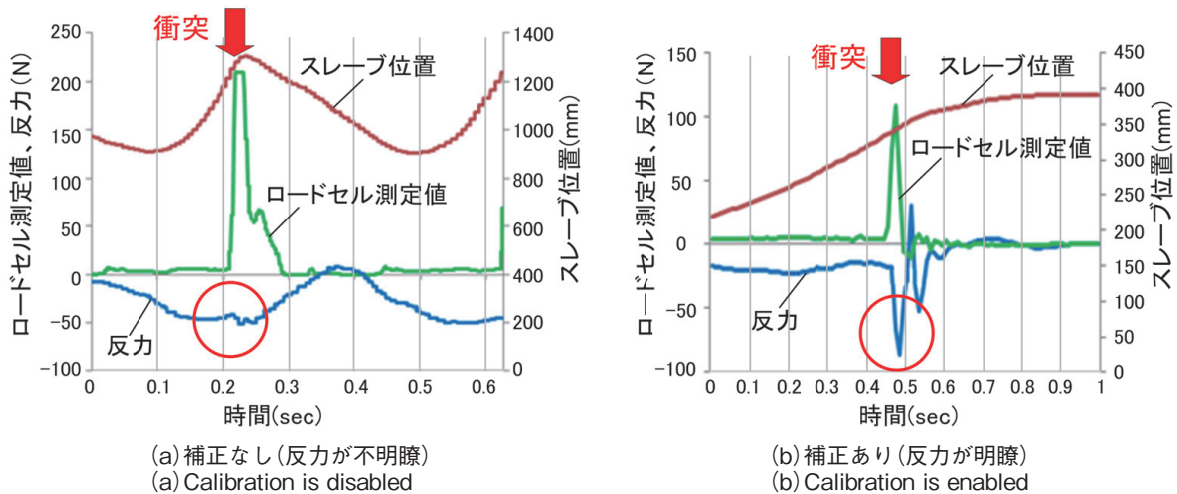


図7 ロードセル補正の効果  
Fig. 7 Effect of calibration method by load cell

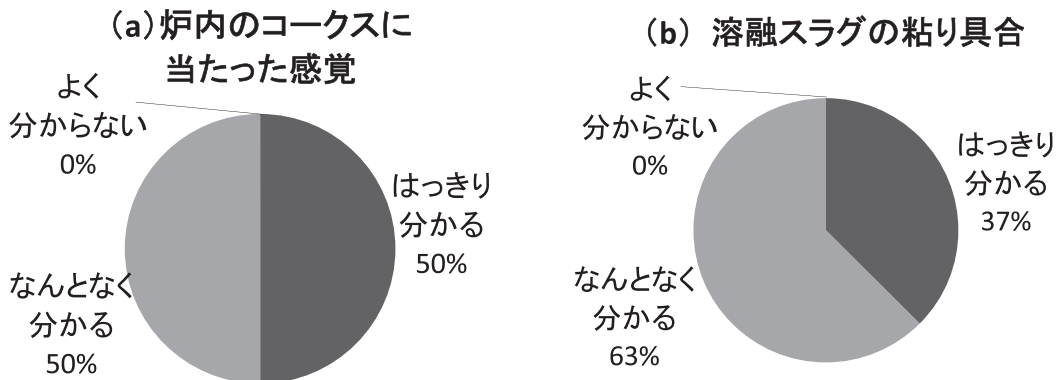


図8 操作感に関するアンケート結果  
Fig. 8 Questionnaire results of operation feeling

## 5 今後の展開

酸素洗浄装置にリアルハプティクスのセンシング技術を適用したことにより、オペレータによる位置と力からなる操作データを定量的に収集することが可能となった。このことにより、オペレータの動きやノウハウなどの暗黙知を定量的なデータとして「見える化」して形式知とすることが可能となり、経験の浅いオペレータがこのデータを手本にして操作を行うことで技術の伝承にも繋げられる。

更には、オペレータの操作データを解析し、得られた操作パターンをロジック化することで、酸素洗浄装置の自動化の可能性も見えてきた。現在当社では、次のステップとなる酸素洗浄装置の全自動化の実現に取り組んでいる。

今後は、リアルハプティクス技術の適用により操作データを定量的に収集できるようになることから、酸素洗浄装置に限らず、様々な装置の遠隔操作や自動化への適用拡大が期待できる。

## 6 結言

本論文では、当社のシャフト炉式ガス化溶融炉における酸素洗浄装置へリアルハプティクス技術を適用し、2年間の操業を行った実用実績と、その有効性について述べた。

これまでの様々な機械の自動化の歴史では、「力触覚」は実装されずに放置されてきたが、革新的理論と高速 ICT によって鮮明な力触覚通信を実現できるリアルハプティクス技術の適用により、機械に人間の優れた判断力と柔軟さを持たせることを可能とした。今後、人の判断や感性によって操作している部分の遠隔化や自動化へのアプリケーション適用の拡大だけでなく、人の優れた能力と機械の力強さ・確実さが協調する最強システムの実現を目指した取り組みを進めてゆく。

## 謝辞

本システムの開発と実機化にあたり、慶應義塾大学 大西公平教授を始め、大西研究室、ハプティクス研究センターならびにモーシオンリブ(株)の皆様

には、多くのアドバイスと御協力を賜り、深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 長田守弘ほか：シャフト炉式ガス化溶融炉の改善の経緯と今後の展望, 新日鉄エンジニアリング技報, Vol. 1, p 15-22, (2010)
- 2) W. Iida and K. Ohnishi: Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation, Proc. Of the 8<sup>th</sup> IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, AMC' 04-KAWASAKI, pp. 217-222, (2004)
- 3) 大西公平：「リアル」を掴む！力を感じ、感触を伝えるハプティクスが人を幸せにする, 東京電機大学出版局, (2017)