

鑄造現場の安全性向上に向けた遠隔操作ノロ取りロボットの開発 Improving Foundry Safety through Remote-Controlled Slag Removal Robotics

阪野 樹央^{*1} 垣見 勇介^{*1} 松澤 知行^{*1} 安達 直功^{*1} 松井 俊幸^{*1}
Shigeo Banno Yusuke Kakimi Tomoyuki Matsuzawa Naokatsu Adachi Toshiyuki Matsui

*1 エンジン事業部鑄造部

要旨

鑄造現場の安全性向上を目的に、遠隔操作ノロ取りロボットを開発。背景には高熱物接近作業の危険性と熟練者依存があり、操作性と力覚フィードバックを評価。専用コントローラとフィードバックの織込みにより熟練作業の再現性を実現。結果として安全性と作業標準化に貢献できる目途付け完了。今後は設備完成度を高め、類似工程への横展を目指す。

キーワード：鑄造、遠隔操作、高熱物、熟練作業、安全性向上、作業標準化

Abstract

To improve safety in casting operations, a remotely operated slag removal robot was developed. The system addresses risks from working near high-temperature materials and dependence on skilled labor. Operability and haptic feedback were evaluated, confirming that expert-level performance can be reproduced using a dedicated controller. The results indicate potential contributions to safety and operational standardization. Future work will focus on refining the system and applying it to similar processes.

Keywords: Casting, Remote Operation, High-Temperature Materials, Skilled Worker, Safety Improvement, Work Standardization

1 はじめに

当社および豊田工業(昆山)有限公司(TIK)で生産される鑄鉄部品は、エンジン用のシリンダブロック、シリンダヘッド、カムシャフト、繊維機械のフレーム、産業車両の油圧バルブなど、幅広い分野で活用されている(図1)。エンジン事業部方針には「鑄鉄事業の継続」が掲げられており、東知多工場とTIKには、期待と責任が寄せられている。

エンジン事業部鑄造部では、東知多701, 702工場が鑄造業界をリードするという気持ちで、鑄造現場の安全・品質・生産性向上に向けた技術開発や現場活動を進め、鑄造業界を「この工場で働きたい」と思える製造業に変化させる取組みを行っている。

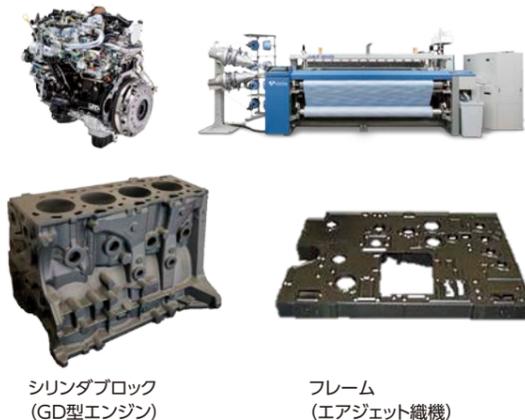


図1 製品紹介
Fig.1 Product Introduction

2 背景

鑄造とは、金属を溶かして型に流し込み、目的の形状に成形する加工方法である。鑄鉄はそのなかでも鉄を主成分とする鑄造品を示している。東知多工場では、鉄源としてプレス端材(長草工場から支給)、Si(シリコン)合金、黒鉛、銅線屑(刈谷工場から支給)などを原料として使用している。これらの材料を高周波誘導炉(以降 溶解炉)で約1500℃まで加熱・溶解し、成分調整を行う工程が「溶解工程」である。

溶解工程では、溶湯を確認しながら作業を行う必要がある。とくに「ノロ取り」と呼ばれる、溶湯表面に浮かぶ不純物を除去する作業では、約1500℃の溶湯に接近する時間が長く、高温の重量物をハンドリングする高リスク作業となる。そのため、ノロ取り作業(図2)において「作業者と危険源を隔離」する技術開発に着手した。



図2 ノロ取り作業
Fig.2 Slag removal work

東知多工場の高周波誘導炉
6 トン炉2基
3.5トン炉1基
2 トン炉2基

3 ノロ取り作業の課題

1) 鑄鉄に発生するノロについて

ノロ(写真1)は材料に付着した汚れや、砂、鑄鉄の主成分であるSi(シリコン)の酸化物、材料である黒鉛の溶け残りなどが混在した不純物で、材料溶解時や、溶湯を保持しているときに発生する。

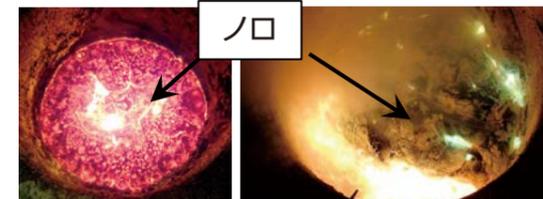


写真1 溶解炉内のノロ
Photo1 Slag

2) ノロの影響

ノロは溶解炉から溶湯を移し替える作業で溶湯の流れを乱し、火災や災害の原因となる可能性がある。ノロが製品に入ると粗材不良を引き起こす可能性がある。安全性と品質の両面から、ノロの確実な除去が不可欠となっている。

3) ノロ取り作業

ノロ取り作業(図3)は、溶湯表面に浮かぶ軟化したノロや、塊状のノロを溶解炉外へ排出する作業である。「溶湯に接近できない」、「溶湯品質に影響しない」、「安価」などの理由で、棒状のノロ取りツール(図4)を使用して実施する。ノロ取り作業には、熟練者の経験と勘に頼る部分が多く残存している。

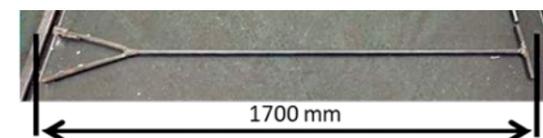


図4 ノロ取りツール
Fig.4 Slag removal tools

4 目指す姿 熟練作業と同等

他社でも産業用ロボット(写真2)を使用したノロ取り作業の事例はある。しかし、他社のロボットを使用したノロ取りでは、溶解炉開口面積の20%程度のノロが取り残されていた。そのため、作業者が炉に接近してノロ取り作業を完了する必要があった。※トヨタ自動車(株)はツール形状の工夫により、ノロ取りの完成度を高めた。

私たちの目指す姿は、熟練作業者と同等のノロ取り作業をロボットにより実現して、作業者と高熱物を隔離することとした。そこで、遠隔からノロ取り作業を完了する方法を検討した。



写真2 トヨタ自動車(株)のノロ取りロボット
Photo2 Slag Removal Robot (TMC)

5 技術的課題とアプローチ

ロボットによるノロの取り残しは、溶解炉の炉壁周辺に発生する(図5)。これは、溶湯の対流によってノロが炉壁に集まり、冷えて固着するためである。固着したノロを剥がすには、炉壁とノロの間にノロ取りツールを差し込む縁切り作業が必要となる。しかし、ロボットの自動プログラムでは炉壁ギリギリまで接近できず、縁切り作業が困難であった。

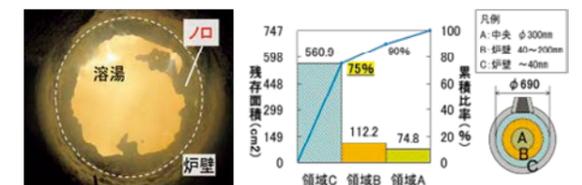


図5 ノロ残存部位
Fig.5 Slag Residual Areas

ロボットが炉壁に接近できない要因解析を行った。ノロ取りツールの溶損や炉壁の変形、損耗による、「ロボットと炉壁の位置関係の変化に対して修正ができない」。ロボットと炉壁を守るための「接触を認知・調整ができない」という2つの真因が洗い出された(図6)。



図6 要因解析
Fig.6 Cause Analysis

6 解決策

2つの真因に対応するために、ロボットを自在に遠隔操作可能で、手元に反力を伝え認知を補う機能を持つ遠隔操作システムを使用し、熟練作業者が遠隔から炉壁のノロを除去することを目指した。

そこで、川崎重工業(株)の遠隔操作システムに着目し、東知多工場での鑄鉄ノロ取りに適用するために共同で追加開発を実施した。

遠隔操作システム「Successor Plesio」は、以下の構成で成り立っている(図7)(写真3)。

- ・スレーブロボット(産業用ロボット)
- ・コミュニケーター(遠隔操作を行う装置)
- ・制御PC(動作演算・指令)

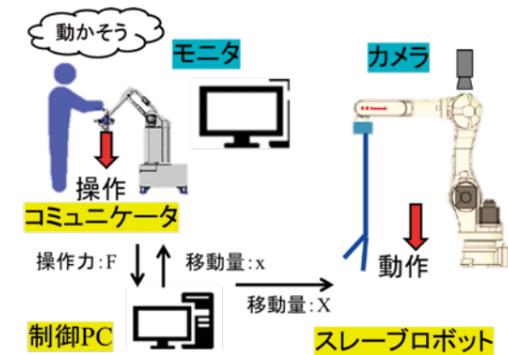


図7 遠隔操作システムの構成⁽¹⁾
Fig.7 Configuration of Remote Control System

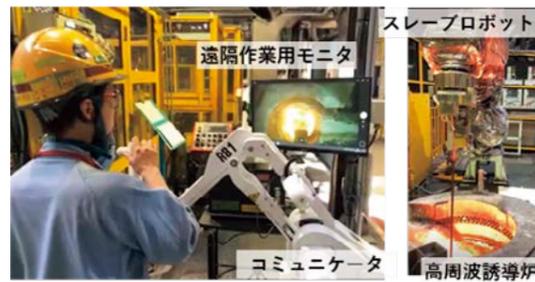


写真3 遠隔操作システム
Photo3 Remote Control System

作業者は溶解炉のなかを映すカメラ映像を、モニタにより確認しながらロボットを遠隔操作して、遠隔からのノロ取り作業を実現する。

ロボットを遠隔操作する作業者が、ノロ取りツールを炉壁まで違和感なく操作するための視界の確保を実施した。

炉壁のノロに対する縁切り作業では、作業の反力を6軸フランジ面に搭載する力覚センサにより検知し、コミュニケーターの動作として作業者に認知させるシステムとした。作業に必要な接触感覚を伝えるための評価を実施した。

7 評価結果

オフラインの事前評価では、遠隔操作システムを東知多工場の環境下で機能を発揮するための適用開発を実施した。インライン(溶湯を使用した)評価では、溶解工程という特殊環境への対応と、遠隔操作により熟練作業者同等のノロ取り結果を得るための評価を実施した。評価内容は下記表(表1)のとおりである。

表1 ノロ取りロボット評価項目
Table.1 Evaluation Items of Slag Removal Robot

区分	評価項目	内容・目的
オフライン	操作性	ノロ取りツールの動き、角度調整、操作時の重さを確認
	手感覚のフィードバック	力覚センサを使用した接触感覚をチューニング
オンライン	視覚	炉内状況の把握と、操作性を満足するカメラ設定
	ロボットへの熱影響	高温環境下でのロボット使用可否判断
	ノロ取り残し量	ノロ除去の能力確認 安全・品質を満足する熟練作業者と同等を目指す

1) オフライン評価

試験場に東知多工場のレイアウトを再現して模擬溶解炉とロボットを設置して、遠隔操作の事前

評価を実施した。

(1) 操作性

実作業に近い操作感を遠隔操作で再現できることを目指した。

ロボットの操作感に関しては、コミュニケーターを操作しながら手元にあるミニチュア炉に対してノロ取り作業を実施すると、スレーブロボットが溶解炉のノロ取り作業を実施しているような状態を目標とした。コミュニケーターとスレーブロボットの動作比率を調整して、敢えて小さい操作で大きく動作する設定とすることにより、操作感を向上させた(図8)。

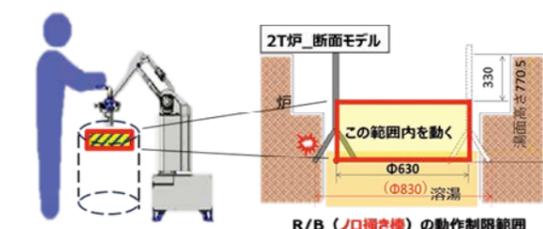


図8 コミュニケーターとロボットの動作範囲
Fig.8 Work Area

ノロ取りツールの操作感は、コミュニケーターに取り付けするグリップ部分を「両手」で操作するノロ取りツールの持ち手を模した形状とすることで、ノロを取るための3つの動作(図9)が、実作業に近い感覚で操作できるようになった。



図9 両手操作によるコントロール性の向上
Fig.9 Improved Control by Two-Hand Operation

(2) 手感覚フィードバック

ノロ取り3動作(掬う、突く、巻き取る)の反力(図10)を再現して、必要な感覚がコミュニケーターにフィードバックされるための調査・設定を実施。

曲げ方向の反力は長尺のノロ取りツールが変形するため感覚が悪い。また、振動(しなり)により操作性を悪化させたため、フィードバックを無効とした。

圧縮方向の反力は想定通りにフィードバックされ、炉壁とノロの縁切り作業に必要な力を認知することを可能とした(図11)。

動作	力	結果	コメント
掬う(曲げ)	曲げ	△ →○	過敏に設定すると曲げ振動で、円滑な操作を阻害
突く	圧縮	○	縁切りに必要なフィードバックを得た
巻き取る	振れ	△	突き、曲げと比較してフィードバックを感じにくい

図10 手感覚フィードバック調査
Fig.10 Tactile Feedback Investigation

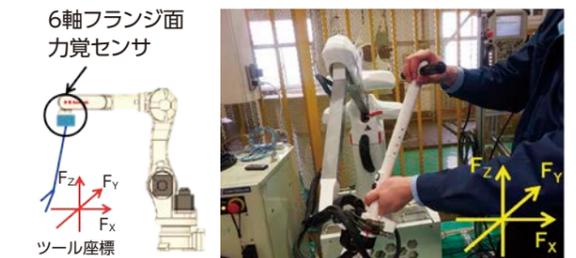


図11 フィードバック座標系
Fig.11 Feedback coordinate system

2) インライン(溶湯使用)評価

東知多工場の溶解炉にロボットを設置。溶湯を使用して、明るさ・輻射熱への対応と、事前評価した遠隔操作機能が、ノロ取り作業に使用できるか目途付けを実施した(表2)。

表2 インライン(溶湯使用)評価
Table.2 Inline (Molten Metal Usage) Evaluation

項目	観点	内容	結果	コメント
SQE	視覚	溶湯に残るノロを確認	× ↓ ○	遮光ガラス使用し白飛びが減少
S	耐熱性(熱影響)	ロボットのエンコーダ温度の変化	○	耐熱ジャケット着用。上限95℃に対して、0.2℃/minの温度上昇
SQ	品質	ノロの取り残しゼロ	△ ↓ ○	ツール形状を変更

(1) 視覚

炉壁やノロと溶湯の明暗差が大きく、溶湯が白飛びする課題があった。遮光ガラスを使用し、短波長光をカットすることで対策を実施した。飛散する溶湯や、赤外線からカメラを保護する効果も期待できる。

溶湯から煙が多く発生するときに、乱反射により作業性が損なわれるため、引き続き改善が必要。

(2) ロボットの耐熱性

溶湯の輻射熱に対して、ロボット、ケーブル、付帯機器が対応可能か確認を実施した。輻射熱に対しては、遮熱板により影を作れば十分対応可能であることを確認したが、飛散する溶湯への対応としてロボットジャケットを採用した。

ジャケット着用状態で、溶湯に約1000mmまで接近させた状態(写真4)で25分保持しロボットエンコーダ温度の変化を確認した。上限温度95℃に対して、温度上昇は0.2℃/minで問題ないことを確認できた。



写真4 ノロ取りロボットの輻射熱対策
Photo4 Heat Protection for Slag Removal Robot

(3) ノロの取り残しゼロ

遠隔操作によるノロ取りツールの操作は、熟練作業者のようにクイックなノロの排出動作が実施できない課題が浮き彫りになった。

そこで、ノロ取りツール(表3)をロボット用に形状変更してノロを掬う能力を強化することで、ノロを安定して排出することに成功した。この形状は溶損しても能力が維持できること、ノロ排出後にノロ取りツールとノロを分離する作業性の悪化がないことを確認した。

表3 ノロ取りツールの評価結果
Table.3 Evaluation Results of Slag Scraping Tool

ノロ取りツール	先端形状	結果	コメント
三角 (手作業)		×	先端が溶損にともない作業性が悪化
四角 (ロボット)		○	溶損してもノロをのせる面積を維持重量増加するが、ロボットなら対応可能

8 今後の展望

実証機による味見評価を経て、号口炉にロボットと付帯設備を設置し評価のN増しを実施している。ロボットの周囲には、ノロ取り作業以外の溶湯接近作業用のツールも配置した。結果として溶解炉2個分のスペース(図12)を使用しているため、横展を目指すには省スペース化や、作業区域の見直しが必要となる。

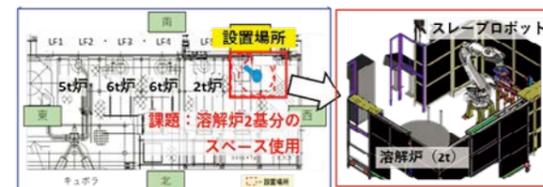


図12 ロボットレイアウト(現在の姿)
Fig.12 Current Demonstration Furnace Layout

ロボットを使用してノロ取り以外の溶解作業の自動化(図13)を評価するため、溶湯量の変化に追従する機能と、自動ツールチェンジが可能なハンドを別途評価し織込みした。

今後は、溶解中の溶湯攪拌作業を自動化して、作業者が溶湯を確認する時間の短縮と、発生するノロの性状安定化を目指す。

No.	溶解工程フロー	進捗	No.	ノロ取り工程	進捗
1	材料計量・投入	-	2-1	ノロ掻き棒装着	完了
1.5	溶解中の溶湯攪拌	新課題	2-2	湯面高さ測定	完了
2	遠隔操作ノロ取り	完了	2-3	スラグキャッチ投入	完了
3	自動ノロ取り	完了	2-4	(遠隔)ノロ取り	完了
3	温度測定	完了	2-5	ノロ搬送	-
4	分析試料採取	評価中	2-6	ノロ掻き棒取り外し	完了
5	材料計量・投入(調整用)	-	2-7	湯面残存ノロ確認	完了
6	出湯	-	2-8	ノロ分離	完了

図13 ロボット化完了目途有り工程
Fig.13 Schedule for Completion of Robotization

1) 溶湯高さ追従機能がもたらすメリット

自動プログラムで溶湯に触れることが可能となった。これにより遠隔操作開始位置が、当初の炉外定位置に対して、溶湯と一定距離の位置に変更することができる。溶湯量が増加した際も、同じ遠隔操作の動きによる作業が可能となった。

2) ハンドとツール

溶解工程では、熱や荷重によりツールの変形が起きる。ロボットハンド(写真5)には変形による位置ずれを許容することをコンセプトに掲げてノロ取りロボットの設計を実施した。具体的には、ツール把持部の形状を統一し、置き台とハンドそれぞれV字形状として、ノロ取りツールが重力とクランプ力により同一位置に修正される設計とした。

クランプにはトグルクランプを採用した。小型シリンダで大きなクランプ力を発生するためハンドの小型化に寄与している。

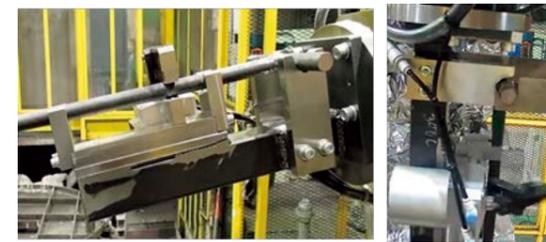


写真5 ロボットハンド
Photo5 End Effector

9 まとめ

鑄造現場の安全性向上に向けて、遠隔操作ノロ取りロボットの開発を行った。ノロ取り作業の動きを分解・分析し、遠隔操作を介してロボットに必要な動作を選定することで、熟練作業といわれるノロ取り作業の設備化を実現した。ロボットを介するノロ取り作業は、作業者の体格差に左右されず、標準化された作業が可能となり、習熟の効率化にもつながると考えている。

将来は東知多工場すべてのノロ取り作業場所へ横展し、「作業者と高熱物の隔離」を進めていきたい。そのため、残存する接近作業の遠隔化、設備故障時の保全作業などの課題解決を進めていく。

引き続き現場の知恵と技術を融合し、より安全で持続可能な鑄造ラインの構築を目指す。

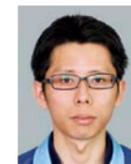
参考文献

[1] Successor コミュニケーター Plesio Kawasaki Robot
トラブルシューティング要領書

著者紹介



阪野 樹央 垣見 勇介 松澤 知行 安達 直功



松井 俊幸

開発の経緯と開発者の思い

鑄造現場の安全性向上を目的に、遠隔操作によるノロ取りロボットの開発を進めた。熟練作業を理解するために自らノロ取り作業を体験し、現場作業者との対話を通じて得た知見を設備に反映した。

試験評価は操作性など官能評価が中心で、ログ活用や感覚の数値化ができなかった点が反省として残る。今後は、カメラ映像・ロボット動作・ノロ取り結果を紐づけたAI解析による自動化に挑戦したいと考えている。鑄造には多くの熟練作業が残されており、AIなど活用して暗黙知を紐解き、自動化により安全で魅力ある鑄造工場を目指して引き続き取り組む。