

熱間ブルドーザ自動運転

Automatic Operation of Heat-Resistant Dozer

1. はじめに

製鋼工程で副産物として発生する高温の溶融スラグは、工場搬出後に冷却して回収される。従来の車両や重機に人が搭乗する作業には、機体が冷却不足のスラグに接触する火災リスクがあり、作業員の安全確保、3K 対策、および人手不足解消などの課題があった。

JFE 物流は、JFE スチール西日本製鉄所（倉敷地区）構内で、ブルドーザにより製鋼スラグの処理を行っている。前記の課題を解消するため、ブルドーザの自動運転システムを開発した。自動運転プログラムの開発は、株式会社 DeepX と共同で実施した¹⁾。

2. ブルドーザ自動運転の概要

2.1 スラグ処理作業と自動化対象

溶融スラグはスラグ処理場に放流され、水冷・空冷される。上から見たスラグ処理場とブルドーザを写真 1 に、ブルドーザの外観を写真 2 に示す。ブルドーザが行う主な作業は以下のとおりである。

- 1) リッパースタック：ブレード（排土板）での集積を容易にするため、凝固したスラグ表面をブルドーザ後部のリッパースタック（爪状）で破碎する。機体と高温物との接触リスクがある。
- 2) 集積：凝固を終えたスラグをブルドーザ前部のブレードで集めながら押し上げ、スラグ処理場の端に山状に集積する。スラグ処理場の凹凸形状に合わせてブレードを上下する必要がある。
- 3) 整地：次のスラグ放流受入準備として、ブルドーザを後進させながらブレードを使ってスラグ処理場全体を平らにする。

安全および 3K 対策の観点から、前記 1) から 3) までの作業を自動化対象とした。

2.2 機器仕様

2.2.1 センサ類

表面状態や凹凸が時間とともに変化する不整地で自動運転するため、ブルドーザおよびアクチュエータ（リッパースタック、ブレード）の位置、姿勢、状態をリアルタイムに高精度で把握する必要がある。以下のセンサ群を設置し、アクチュエータの位置と姿勢を推定している。

- 1) GNSS（自己位置計測）受信機
- 2) IMU（方位・姿勢計測）
- 3) 傾斜計（アクチュエータ位置・姿勢計測）

2.2.2 その他

スラグ処理場の凹凸形状を高精度に把握するため、3D LiDAR を複数設置している。

ほかに、通信用の無線機器、安全対策としてカメラ、センサ類を設置している。

2.3 自動運転システム

2.3.1 電子制御

オペレータが初期条件を与えて作業指令を出すと、ブルドーザは自律的に自動運転を実施する。

重機の自動化は、運転操作の電子制御化が前提となる。対象の熱間ブルドーザは、目視距離での無線による遠隔操縦機能を備えており、すでに電子制御が可能であった。

遠隔操縦の指令回路中に自動制御指令を入力することで、ブルドーザを自律運転できるようにした。

2.3.2 開発の進め方

スラグ処理におけるブルドーザの運転にあたっては、作業



写真 1 スラグ処理場と熱間ブルドーザ
Photo 1 Slag yard and automated dozer

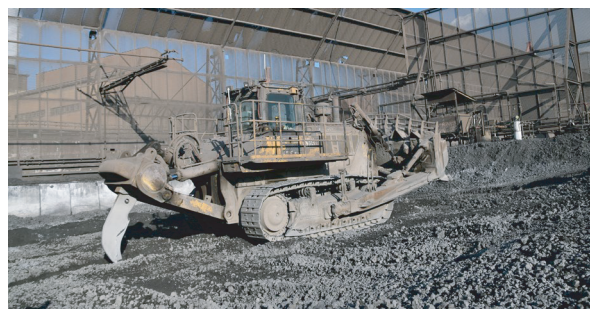


写真 2 熱間ブルドーザ
Photo 2 Automated dozer

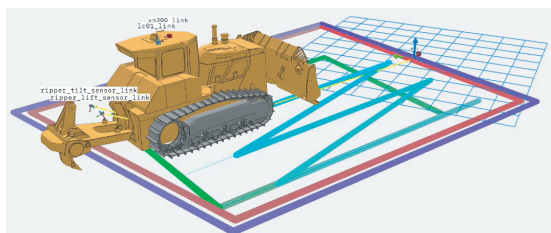


図1 デジタルツイン画面

Fig. 1 Digital twin window

マニュアルに沿った基本動作を行いながら、スラグの状態や機体の挙動をその場で判断して適切に対応する必要がある。

開発の初期段階で、オペレータ搭乗による各作業をセンサ類で記録して解析した。その結果を基本仕様として自動運転プログラムに実装した。

さらに開発にあたっては、デジタルツイン技術を最大限に活用した(図1)。製作したプログラムは、デジタル空間で動作を確認してから現場試験に持ち込むことで、開発効率を向上させた。

実機による現場試験は、実操業とは別の試験場や機体を用いるのが最も効率的である。しかしスラグが時間とともに凝固してゆく状況の再現は難しく、試験場の活用は基本動作の確認などに限定した。

2.3.3 自動運転プログラム：リッパー掛け

リッパー掛け作業(図2)は以下の手順で実施する。

スラグ処理場内の作業範囲に、ブルドーザの横幅の列をすき間なく並べるように、機体を走行させながら後部のリッパーを下げて凝固したスラグ表面を破碎してゆく。前進(リッパー下げ、破碎)、後進(リッパー上げ、次の列に移動)、を繰り返す。

オペレータが作業範囲の座標を指示すると、自動運転プログラムは、ブルドーザの走行経路およびリッパーの上下タイミングを自動で計算する。

現場試験では、不整地上を履帯で走行するブルドーザの走行不安定性のために、事前に設定した走行経路に沿って移動させる制御が、過剰な動きを引き起こす場合があることが分かった。走行指令を工夫し、安定した経路追従を実現した。

また、オペレータ搭乗作業の解析から、凝固スラグの負荷に応じたリッパーの昇降動作(反力が大きいとリッパー上げ、反力が小さいとリッパー下げ)を自動運転プログラムに反映し、現場試験で機能を確認した。

2.3.4 自動運転プログラム：集積

集積作業は以下の手順で実施する。

スラグ処理場内の凹凸形状を事前に把握する。スラグを押し上げる山の頂上を終着点として、ブルドーザの横幅の走行経路(曲がりあり)でスラグ処理場内を覆うように並べて、走行経路を自動計算する。前進(ブレード下げ)、後進

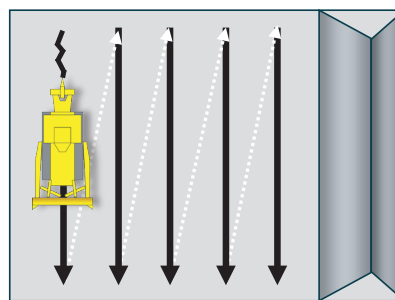


図2 リッパー掛け

Fig. 2 Ripping

(ブレード上げ)を繰り返す。ブレード高さは、押し上げたスラグの量と目的地の山の形状に基づいて上下させる。

現場試験では、スラグ処理場内の凹凸形状の把握に誤差がある場合に、押上の負荷に応じたブレードの昇降動作(リッパーと同じ原理)が、むしろ凹凸形状を増幅する場合があることが判明した。3D LiDAR 計測データとブルドーザ座標を同期させることで、ブレードによる適切な押上、集積を実現した。

2.3.5 今後の展開

スラグ処理は複数のスラグ処理場で時間をずらして順次行われる。現在、各スラグ処理場での自動運転を集中制御する以下の機能を持つシステムを構築し、運用する準備を進めている。

- ・スラグ処理場に無線ネットワークを設置し、自動運転指令や現在位置を伝送する。
- ・稼働状況やエラーを一覧できる管制画面を設置し、オペレータがスラグ処理場全体を管理・監視する。
- ・安全対策としてブルドーザの遠隔非常停止機能を備える。

3. おわりに

高温物との接触リスクがあるリッパー掛け作業を含む、製鋼スラグ処理を行うブルドーザの自動運転システムを開発した。

今後も、物流DXを駆使して、作業者の安全を確保するとともに、作業の自動化・省力化を推進する。

参考文献

- 1) JFE 物流ニュースリリース。倉敷地区構内におけるブルドーザーによるスラグ破碎作業の自動化の実証について。
<https://www.jfe-logistics.co.jp/cms/wp-content/uploads/2025/06/548fe29c472867c58f116fa9260bfad5a6e07201.pdf>

〈問い合わせ先〉

JFE 物流 スマート物流推進部

TEL: 03-6671-9870

ホームページ: <https://www.jfe-logistics.co.jp/>