

鑄造工場を対象とした生産シミュレータの開発*

菊池 貴**、長谷川 辰雄**、堀田 昌宏**

製造ラインの効率化を図るため、製造装置や搬送装置などの製造ラインにおける構成要素のモデル化と、それらを連結させたラインモデルを構築し生産シミュレータを開発した。これを鑄造工場に適用し、ボトルネックの調査を行い、その改善方法について検討した。その結果、搬送装置上に設置可能な砂型の個数不足と注湯時間の2つのボトルネックを特定し、これらを改善することにより、生産量を22.7%向上できることがシミュレーションにより明らかとなった。

キーワード：生産シミュレーション、待ち行列理論、鑄造工場、スマート工場

Development of production simulator for foundry

KIKUCHI Takashi, HASEGAWA Tatsuo, HOTTA Masahito

Key words : Production simulation, Queuing theory, Foundry, Smart Factory

1 緒言

製造業における人手不足が課題となっており、IoT (Internet of Things) を活用した生産性の高い工場の実現が期待されている。これまで当センターでは、製造ライン監視システムを開発し、鑄造工場や電子基板製造工場、ワイヤ製造工場の製造ラインに適用し、その有効性について確認している¹⁾。この製造ライン監視システムは、各製造装置にセンサを設置し各々の稼働状況を取得し可視化するものである。これにより、製造ラインにおける稼働率の低い製造装置を特定することが可能となった。しかし、製造ライン全体の効率化を考えた場合、各装置の稼働状況は前後の工程の進捗の影響を受けるため、個々の装置の稼働率だけに注目しても効率化の障壁となる要因(以下、「ボトルネック」という。)を特定することは困難であった。

製造ラインのボトルネック調査や最適化を行うためには、シミュレーションが用いられている^{2), 3)}。シミュレーションは、実機を動作させずに性能や挙動を評価し、改善策を検討することができる。しかし、シミュレーションを行う生産シミュレータは一般に高額であり、使いこなすことが難しく、利用場面もライン設計時などに限られる⁴⁾ことから、普及が進んでいない。

そこで本研究では、安価で簡易なシミュレーションを実現するためにオペレーションズ・リサーチにおける待ち行列理論を応用し、材料である鑄鉄の移動状態に注目したシミュレータを開発し、鑄造工場への適用を行った。本報告では、製造ラインのモデル化、シミュレータの開発、および株式会社シグマ製作所一関工場(以下、「シグマ製作所」という。)におけるボトルネックの分析と改善

策について述べる。

2 シミュレータの開発

待ち行列理論は、不特定多数の客が特定のサービス施設を利用する際に生じる交雑現象を分析するための数理モデルである⁵⁾。これを鑄造工場の製造ラインに応用する。対象とした鑄造工場における作業工程の流れを図1に示す。製造ラインでは材料である鑄鉄が製造装置による加工や搬送装置による搬送といった工程を経て製品となる。そのため、鑄鉄が加工および搬送されるために必要な条件と時間に注目し、製造工程を要素毎に分解する。次に各工程における開始条件、終了条件、搬送量、搬送時間、加工時間といったパラメータを抽出し、そのパラメータに沿って振る舞う要素モデルを構築した。構築した要素モデルの一覧を表1に示す。また、主要な要素モデルの例として砂型造型機および搬送装置の振る舞いを表すフローチャートをそれぞれ図2、3に示す。砂型造型機は砂型の材料となる砂は常に十分な量が供給されると仮定したため、自動的に造型を開始する。造型した砂型は後工程に空きがあれば送り出されるが、空きが無い場合は工程内に留まり造型機は停止する。搬送装置は砂型や製品の移動に加えて、一時置場(以下、「バッファ」という。)としての役割を持っている。搬送装置はバッファに空きがある場合は前工程から材料を受入、後工程に空きが有る場合に送り出す。それ以外では停止する。

次に、表1に示す複数の要素モデルから成るラインモデルを構築し、材料が製品となるまでの一連の移動をモデル化した。ラインモデルは要素モデルの連結状態を表現しており、順序を変更することでラインの変更にも容

* 令和2年度 技術シーズ創生研究事業 プロジェクトステージ

** 電子情報システム部

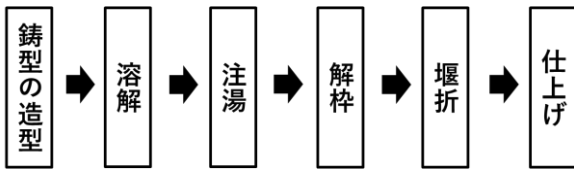


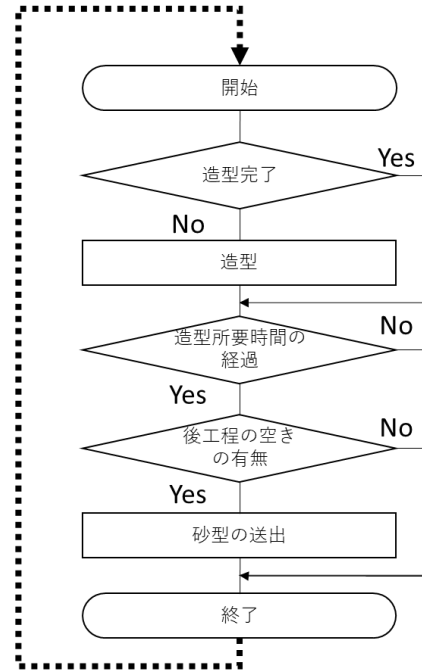
図1 製造工程の流れ

表1 要素モデル一覧

要素モデル	主なパラメータ	単位
砂型造型機	造型所要時間	分
	造型個数	個
電気炉	材料投入所要時間	分
	溶解量	Kg
	溶解時間	分
	出湯量	Kg
	出湯所要時間	分
搬送装置 A	1分当りの搬送個数	個
	バッファ量	個
搬送装置 B	1分当りの搬送個数	個
	バッファ量	個
	冷却所要時間	分
注湯作業	砂型への注湯量	Kg
	砂型への注湯所要時間	Kg
	注湯時の砂型の必要個数	個
堰折作業	1分当りの処理数	個
	バッファ量	個
製品置場	質量	kg
非製品置場	質量	Kg

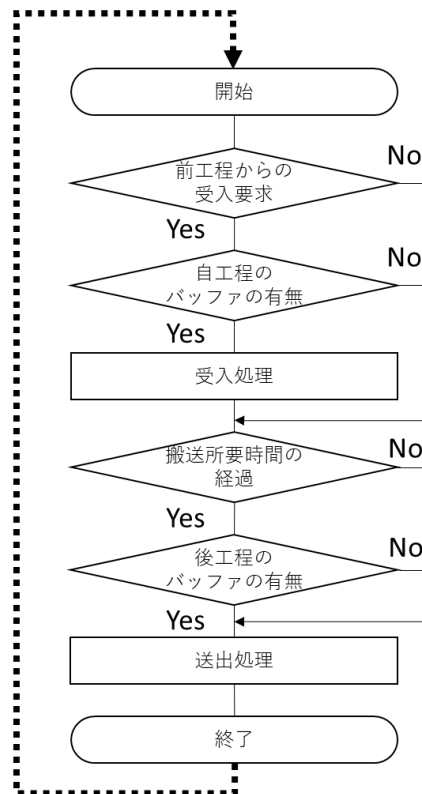
易に対応できる。図4にシグマ製作所を対象としたラインモデルを示す。3台の砂型造型機からそれぞれ砂型が送り出され、一定数貯まったら注湯が行われる。注湯後の砂型と製品は一定の冷却時間の後、解砕作業で砂型が除去され、次に堰折作業へ送られ、製品部分と湯道等の非製品部分に分離される。ここでの砂型造型機3台は各々異なる装置であり、造型できる砂型の種類や造形速度が異なる。しかし、注湯の際はこれら3種類の砂型に並行して注湯するため、効率良く注湯作業を行うためには3種類の砂型をバランスよく造型する必要がある。

シミュレーションでは時間を離散化し、各時刻における要素モデルの振る舞いを前後の工程の状態から決定する。そのため、砂型造型機や搬送装置は各時刻に1回、図2、図3に示すフローチャートに沿って振る舞いを決定し、材料である鑄鉄がラインモデル上のどの要素モデ



次の時刻に進んだら、再度開始から実行

図2 砂型造型機モデルのフローチャート



次の時刻に進んだら、再度開始から実行

図3 搬送装置モデルのフローチャート

ルにどれだけあるかを計算する。これを終了時刻まで繰り返し、生産量を計算する。

上述のモデルを基に実装したシミュレータの開発環境を表2に示す。有料のライブラリ等を用いていないため、生産シミュレータを安価に実現している。

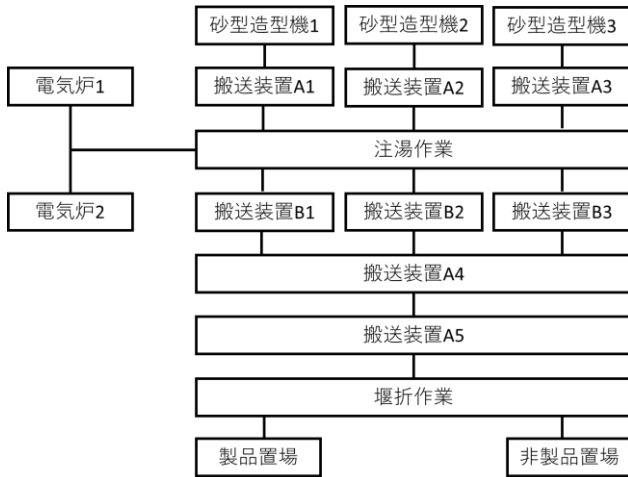


図4 鋳造工場のラインモデル

表2 開発環境

PC	Let`s Note CF-N10
OS	Windows 10
開発言語	C++
統合開発環境	Visual Studio 2012
描画用ライブラリ	OpenCV 2.4.5

3 シミュレーション

3-1 シミュレーション条件および手順

シミュレーションに先立ち、製造ラインにおけるパラメータについて、シグマ製作所において聞き取り調査と計測を行った。計測した項目を表3に示す。

表3の各項目について初期値として計測値をそのまま用い、繁忙期の操業時間である15時間分のシミュレーションを実施した結果、総溶解量は22,000kgであった。次に、表3に示した項目のうち、生産量への影響があるものとして、砂型造型機1~3の造型所要時間、砂型造型機1~3の造型個数、搬送装置A1~3のバッファ量、注湯時間、について値を変えながらシミュレーションを繰り返し、各項目の値が総溶解量に対してどの程度影響するかを調査し、本製造ラインにおけるボトルネックの特定を行った。

3-2 シミュレーション結果と考察

シミュレーションの結果、搬送装置A1のバッファ量と注湯時間の2つのボトルネックを特定した。1つ目のボトルネックである搬送装置A1について原因を考察した結果、砂型造型機1の造型速度は他の2台と同等であるが、砂型を一時的に置いておく搬送装置A1のバッファ量が少ないため、一定時間内に造形できる砂型の個数が他の造形機よりも少ないことを確認した。注湯作業では搬送装置A1、A2およびA3上にある3種類の砂型に同時並行で注湯するが、注湯終了後に搬送機A1上に残っている未注湯の砂型の数が他の2つよりも少なかった。その結果、次の注湯までに砂型造型機1が造型しなければならない砂型の数が砂型造型機2および3よりも多く

表3 シミュレーションのために計測した項目

項目	単位
砂型造型機1が扱う製品質量	kg
砂型造型機2が扱う製品質量	kg
砂型造型機3が扱う製品質量	kg
砂型造型機1が扱う非製品質量	kg
砂型造型機2が扱う非製品質量	kg
砂型造型機3が扱う非製品質量	kg
砂型造型機1の造型所要時間	分
砂型造型機2の造型所要時間	分
砂型造型機3の造型所要時間	分
砂型造型機1の造型個数	個
砂型造型機2の造型個数	個
砂型造型機3の造型個数	個
電気炉1の溶解量	kg
電気炉2の溶解量	kg
電気炉1の溶解時間	分
電気炉2の溶解時間	分
電気炉1の出湯量	kg
電気炉2の出湯量	kg
電気炉1の出湯所要時間	分
電気炉2の出湯所要時間	分
電気炉1の出湯待ち時間	分
電気炉2の出湯待ち時間	分
電気炉1の材料投入所要時間	分
電気炉2の材料投入所要時間	分
搬送装置A1のバッファ量	個
搬送装置A2のバッファ量	個
搬送装置A3のバッファ量	個
搬送装置A4のバッファ量	個
搬送装置A5のバッファ量	個
搬送装置B1のバッファ量	個
搬送装置B2のバッファ量	個
搬送装置B3のバッファ量	個
搬送装置A1の注湯開始条件	個
搬送装置A2の注湯開始条件	個
搬送装置A3の注湯開始条件	個
搬送装置A1の搬送速度	個/分
搬送装置A2の搬送速度	個/分
搬送装置A3の搬送速度	個/分
搬送装置A4の搬送速度	個/分
搬送装置A5の搬送速度	個/分
搬送装置B1の搬送速度	個/分
搬送装置B2の搬送速度	個/分
搬送装置B3の搬送速度	個/分
搬送装置A1の注湯量	kg
搬送装置A2の注湯量	kg
搬送装置A3の注湯量	kg
注湯時間	分
搬送装置B1上での冷却所要時間	分
搬送装置B2上での冷却所要時間	分
搬送装置B3上での冷却所要時間	分
1分当りの堰折処理量	個
堰折作業場のバッファ量	個

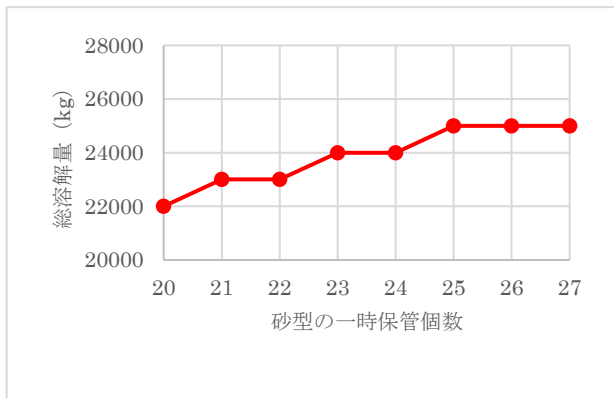


図5 搬送装置A1のバッファ量の増加による総溶解量の変化

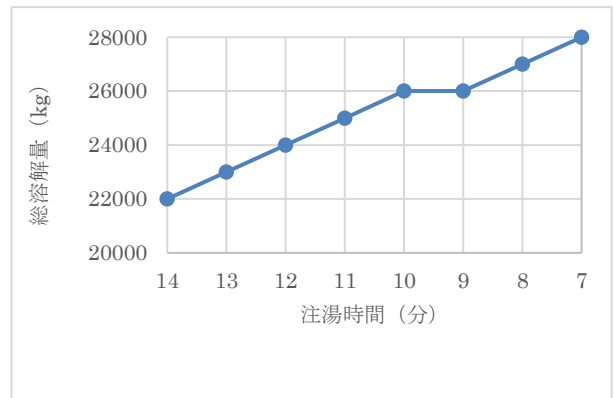


図6 溶解時間の短縮による総溶解量の変化

なるため、待ち時間が発生していた。そこで、搬送装置 A1 のバッファ量を増やした場合の総溶解量についてシミュレーションにより試算した。結果を図5に示す。バッファ量を従来の20個から25個に増やすと、総溶解量は22,000 kg から25,000 kg と13.6%の増加が見込まれる。これは、砂型造型機1の造型所要時間を半分短縮した場合と同等の効果であった。

次に2つ目のボトルネックである注湯時間の短縮について考察した。鋳造工場では電気炉の稼働状況が最も重視され、効率よく溶解と出湯を繰り返すことで生産量を最大化することを目指している。しかし、シグマ製作所では電気炉の容量に対して、溶湯を運ぶ取鍋の容量が小さいため注湯を2回に分割している。2回目の出湯が終われば即時に溶解作業に入れるが、1回目の注湯作業中は溶湯を保持していなければならない。この時、注湯時間を短縮できれば保持時間も削減できることから、注湯時間を短縮した場合の総溶解量について試算した結果を図6に示す。注湯時間を従来の14分から10分に短縮した場合、総溶解量は22,000 kg から26,000 kg と18.1%の増加が見込まれる。また、これら2つのボトルネックを同時に改善した場合の総溶解量について試算した結果を図7に示す。総溶解量は従来の22,000 kg から28,000 kg と22.7%の増加が見込まれる。

これらのシミュレーション結果を受け、シグマ製作所では、砂型造型機1と搬送装置 A1 の新機設備導入を予定している。注湯作業の短縮については工程変更の影響が大きい今後の課題とする。

4 結 言

本研究では、生産シミュレータを開発し、シグマ製作所の生産性向上におけるボトルネックの調査と対策について検討し、以下の成果を得た。

- (1) 材料である鋳鉄の移動に着目したモデルを構築し、鋳造工場における生産シミュレーションを実現した。
- (2) 生産シミュレーションに必要なパラメータ52項目について、製造現場での聞き取り調査と計測を行い

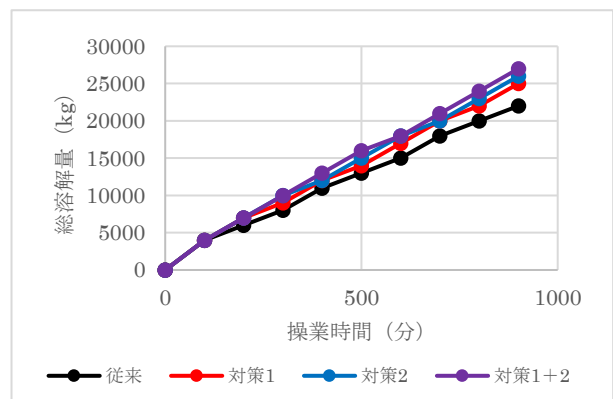


図7 搬送装置A1のバッファ量の増加および溶解時間の短縮による総溶解量の変化

取得した。

- (3) シミュレーションにより、搬送装置 A1 のバッファ量と注湯時間の2つのボトルネックを特定し、対策を行うことによって、総溶解量を最大で22.7%増加できることを試算した。

今後、シグマ製作所ではシミュレーション結果を受けて新規設備導入を予定しており、導入効果の測定についても本シミュレータを活用していく。また、実際の生産では、1日で数十種類の製品を製造しており、これをシミュレーションするためには膨大なパラメータを計測する必要がある。そのため、センサシステムや生産計画のデータとの連携が今後取り組むべき課題と考える。

文 献

- 1) 菊池貴、高川貫仁、大和田功、寒川陽美：IoTを活用した製造ライン監視システムの開発、岩手県工業技術センター研究報告 第22号 (2019)
- 2) Yifei Tan, Wenhe Yang, Kohtaroh Yoshida and Soemon Takakuwa : Application of IoT-Aided Simulation to Manufacturing System in Cyber-Physical System, Machines, 7(1), 2 (2019)
- 3) 貝原俊也：IoT時代におけるシミュレーション技術を活用した生産システムの最適計画・運用手法、シミュレ

ーション、vol. 35、No. 4、p37-42 (2016)

4) 貝原俊也：生産ラインのシミュレーション、シミュレーション、vol. 33、No. 3、p13-18 (2014)

5) 逆瀬川浩孝：待ち行列現象のシミュレーション分析、オペレーションズ・リサーチ：経営の科学、59(4)、p198-204 (2014)