

現場監督者の業務自動化を図る生産管理システムの検討

～プレキャストコンクリート製造工程における IoT プロトタイプ製作～

A Study of Product Management System to Automate the Work of On-Site Supervisors

～IoT Prototyping in Precast Concrete Manufacturing Process～

川越 敏昌

Toshiaki Kawagoshi

法政大学経営大学院 イノベーション・マネジメント研究科

Hosei Business School of Innovation Management

要旨: 生産現場における監督業務は現場での情報収集やコミュニケーションを優先し、省力化が後回しとなっている。今は、IoT や画像処理技術など新しいデジタル技術の適用により、現場に取り付けられたカメラやセンサーなどの情報活用が容易となってきた。これらの情報を使えば、現場監督者の代替えとして自動化につながられる。ところが、現場監督業務の省力化の事例はまだ少ない。要因の一つとして、事例が不足していることが挙げられる。今回、プレキャストコンクリート製造工程の訪問調査に基づき、現場監督者の省力化に向けたプロトタイプ開発と実証試験を行いその有効性を示した。

キーワード: コンクリート製品、プレキャストコンクリート、IoT、業務自動化、生産管理システム

Abstract: on-site supervising

On-site supervision work prioritizes on-site information gathering and communication, and labor saving is untouched. Nowadays, the application of new digital technologies such as IoT and image processing technology makes it easier to utilize information such as cameras and sensors installed in the field. This information can be used as an alternative to field supervisors for automation. However, there are still few cases of labor saving in on-site supervision work. One of the factors is the lack of examples. This time, based on a visit survey of the precast concrete manufacturing process, we conducted prototype development and verification tests for labor saving of the site supervisor and demonstrated its effectiveness.

Keywords: Concrete Products, Precast Concrete, IoT, Business Process Automation

1. 序論

1.1. 背景

DX への関心がますます高まるなか、世界中でデジタル化による生産性向上の取組みが進められている。我が国においても、生産年齢人口の減少に対応するため、生産性改善が喫緊の課題であるが、その解決策として DX 化が推進されている。また、ポスト・コロナに向けてその流れは加速している。生産性向上に向けた方策として、人手業務の自動化による代替が挙げられるが、我が国は自動化により代替されうる業務の割合が他の先進

国と比べ高いことが堀井、櫻井(2020)により指摘されている。すなわち、改善の余地がまだまだ大きい状況にある。

従来、製造業の生産現場では、ロボットや搬送設備の導入により自動化・省力化が進められている。これは主に作業者の人手作業を機械に代替することで、生産性向上を目指すものである。一方、現場監督者の業務に視点を向けると、現場でのコミュニケーションを優先し、自動化・省力化対象ととらえていない現場もまだまだ多い。

本来、現場監督者は顧客満足度向上のため、QCD（品質 (Quality)、コスト (Cost)、納期 (Delivery)）の改善活動をリードし、成果を生み出さなければならない。また、需要変化に合わせた在庫調整や生産計画の変更、不良の多い作業者に対するケア、設計変更や製品トラブルの対応など、突発的な事象に対応しなければならない。デジタルへ活用により業務の代替えを行い、本来業務の時間を増やしていく必要がある。

今は、IoT や画像処理などの新しいデジタル技術の適用事例が増え、標準化・汎用化・低価格化が進んでいる。現場に設置されたセンサー情報やカメラ映像は現場監督者の目や手足の代替えなりうる。工夫次第で、自動化の仕掛けを手にすることができる環境となっている。

1.2. 先行研究

生産現場の現場作業者の自動化・省力化の実例は多くあるが、現場監督者の業務の自動化に着目した研究はまだ少ない。ここでは、2つの先行研究に着目した。小湊、藤川 (2016)は、模擬的な生産ラインにおいて、映像処理技術を用いて生産現場のカメラ映像を分析し、得られた情報を元に生産意思決定を行うシステムを構築し、現場監督者の業務の自動化が可能であることを示した。また、斎藤、舘野(2018)は、建設工事の工事管理業務について、作業実績の記録とワークフロー分析を通し、工事現場監督者の標準業務の中の現場確認業務の効率化にIoTの適用が効果的であると述べている。いずれも、現場監督者の自動化・省力化につながる研究結果であるが、実際の生産ラインへの適用による効果実証までは至っていない。

1.3. 研究目的

IoT や画像処理技術などのデジタル技術を活用し、実際の生産ラインで現場監督者の業務の自動化につながる基本システムを構築する。そして、実証試験によりその有効性を示す。デジタル技術活用による業務自動化が遅れている要因の一つとして、実践者や実例が不足していると考えており、研究成果がデジタル技術の活用による生産プロセスの改善促進や現場監督者の業務省力化と生産性向上の取組み促進につながることを期待している。

1.4. 研究方法

今回、プレキャストコンクリート(略称 PCa)製造工場の訪問調査により、生産効率向上や現場監督者の省力化に向けた課題の抽出を行う。そして、デジタル技術を手段とした、課題解決方法を考案し、基本システ

ムのプロトタイプの実証試験により効果検証まで行う。

2. コンクリート製品工場(実証先)

2.1. 工場と製品の概要

実証試験はプレキャストコンクリート製品の製造・販売を行う會澤高圧コンクリート株式会社 岩瀬工場にて行った。実証先の概要を表1に示す。

表 1 実証先の概要

所在地	茨城県桜川市岩瀬
主な製品	1. 住宅用 H 型 PC パイル 単一品種、定尺サイズ品 2. 土木向け PCa ユニット品 多品種少量生産品
年間生産量	約 32,000 トン (住宅用 27,000 トン、土木向け 5,000 トン)

製品の外観を図1に示す。(a)は断面がH型の形状をした住宅用のコンクリートパイル(杭)である。PCはプレストレストコンクリートの略称で、コンクリートの引張強度を増すため、コンクリートの型枠内に張力をかけたワイヤーを仕込み、ワイヤーごとコンクリートを硬化させたものである。脱型後、張力をかけたワイヤーを切断すると、ワイヤーに圧縮力が働くため、コンクリート杭の引張強度が増す。本製品は定尺の標準品である。製造ラインには全長 130m 型枠が設置されている。標準長さにあわせて仕切り板を配置し、複数本まとめて製造している。(b)は法面工事や排水工事など土木向けに製作される PCa ユニット品である。PCaはプレキャストコンクリートの略称で、工場で行うコンクリート製品の総称である。金属製の箱型の型枠内に鉄筋を配置し、コンクリートを打設して製作する。製品一つに対し、一つの型を使用して製作する。1ロットあたり1~3個の数量を製作する。1日あたり複数品種を数ロットずつ生産する多品種少量の生産形態である。



(a) H 型 PC パイル

(b) PCa ユニット品

図 1 製品の概観 (中間品)

2.2. 工場レイアウト

図2に工場レイアウトを示す。本工場には幅 21m、長さ 130m の2つのヤードがある。住宅用 H 型 PC パイルは1つのヤード全体を使って製造してい

る。土木向けPCaユニット品は、もう一つのヤードの一部、幅12m、長さ48mのエリアで製造している。図中に、それぞれのエリア内のコンクリート型の配置を示している。

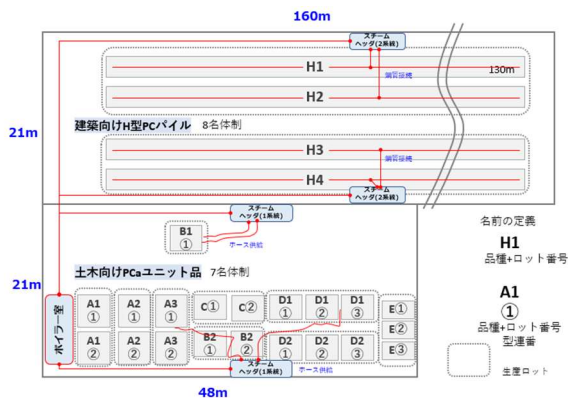


図2 ラインレイアウト

住宅用生産ラインには、130m長さの型H1~4が配置されている。また、土木向け生産ラインには、A~Eの5種類の型が配置されている。土木向け製品は、1~3つの型を1ロットとして製造している。アルファベットの後の数字はロット番号をあらわしている。A1①とA1②は2つを型を1ロットとして製造していることをあらわしている。土木製品向けの型のレイアウトは生産計画にあわせてフレキシブルに変更される。また、コンクリートの硬化促進には、蒸気を使用するため、ボイラーで加熱した蒸気を供給する配管とホースが設置されている。

2.3. 生産プロセス

図3に生産プロセスを示す。PC及びPCa製品はいずれも、段取、打設、促進養生、脱型の4つの工程で製造される。



図3 生産プロセス

それぞれの工程の概略を以下説明する。

(1) 段取工程

型の清掃から、離型剤の塗布、型クローズ、そしてPC製品の場合はワイヤーのセットを行い、鉄

筋と仕切り板のセット、製品の場合はワイヤーのセットが無く、鉄筋をセットして完了する。

(2) 打設工程

次は型にコンクリートを流しこむ、打設工程となる。打設工程では、コンクリートを型に流し込んだあと、表面をならし、養生シートで製品を覆って完了する。

(3) 促進養生工程

コンクリートの硬化促進を行う工程である。いくつか方法があるが、本工場では常圧蒸気養生を行っている。養生シートの中をあらかじめ定められた温度条件にしたがって、スチームで加熱する。本工場では、およそ3時間半の加熱を行っている。

(4) 脱型工程

硬化されたコンクリートを型から取り外す工程である。型を解放し、製品は天井クレーンで吊り上げられて、取り出される。

製品取り出し後、再び段取工程へ戻る。また、取り出された製品は外面の清掃や補修を行った後、ストックヤードへ移送され出荷まで保管される。

図4に作業現場で撮影した動画解析により作成した作業実績のガントチャートを示す。促進養生がもっとも処理時間の長いボトルネック工程である。

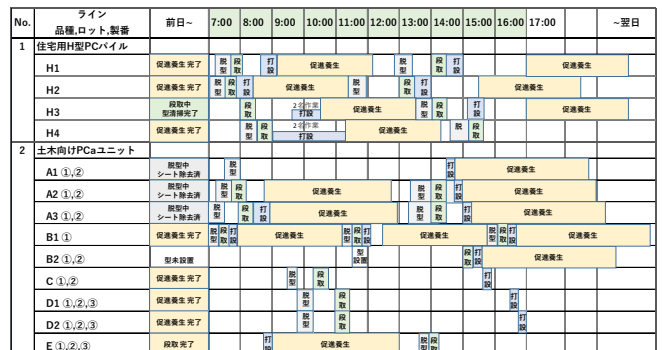


図4 作業実績のガントチャート

2.4. 生産プロセスの解析

生産プロセスの解析結果を整理すると、次の通りである。

(1) 住宅用PC製品も土木向けPCa製品も同じ工程である。

(2) 工程内訳は次の通りである。

段取(30分)⇒打設(30分)

⇒促進養生(3~4時間)⇒脱型(30分)

(ボトルネック工程が促進養生工程となる)

(3) 作業者の関与は、LT(リードタイム)約5時間のうち、2時間程度である。空いている3時間で別のラインの作業が可能(図5)となる。すなわち、工程の組み方で作業稼働率が向上する。

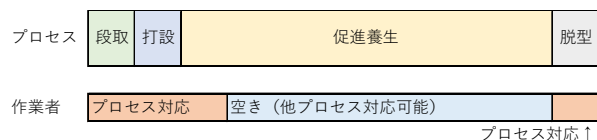


図 5 プロセスと作業者の対応

- (4) 促進養生工程の作業者が関与していない時間帯も監督者が温度などをチェックしている。そのため、①作業基準が明文化されていない（感覚的な判断）ので標準時間が定まっていない。②この管理作業は機械化・自動化できるので監督者の負荷が下がる。
- 以上より、現場の課題は①作業標準の確立、②監視プロセスの自動化(IoT化)、③作業者のスケジュールリング、④作業者の入れ換え指示による稼働率向上とLT短縮であると考えられる。

2.5. 促進養生プロセス

監視が必要な促進養生プロセスを図6に示す。促進養生では経過時間に対する温度管理を行っている。温度管理は品質確保の上でも重要となることから、監督者が温度監視をしながら、蒸気を供給するバルブの調整も行っている。IoTによるセンサーデータ(温度、湿度)の取り込みにより自動化へつなげることができる。

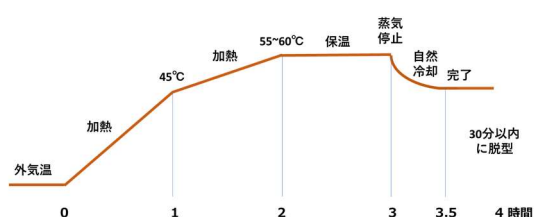


図 6 促進養生プロセス

3. 提案手法

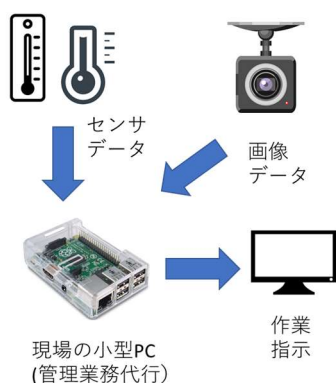


図 7 提案システムのイメージ

図7に提案システムのイメージを示す。コンクリート型に設置した温度・湿度センサーのデータをIoTで小型PCに取り込むことにより、目標値に対する、実際の温度の監視を行う。目標値との差異が発生した場合には、監督者又は作業者に対するバルブの調整指示

や自動弁に対して制御信号を出せるような基本システムを構築する。

また、映像データの活用により、隣接する生産ライン間で作業者の移動指示を出すための基本機能を実現する。現場にモニターカメラを設置して映像データの取得を行い、取得した映像データに画像認識技術を適用し、各ラインの作業者の数をカウントする。観測される作業者の数よりラインの負荷状況把握し、生産意思決定につなげる。以上の機能実現により、コンクリート製品の生産プロセスの改善と監督者の役割の代替えによる業務省力化の可能性を示す。

4. プロトタイプ

4.1. IoT プロトタイプ

今回製作を行ったIoTプロトタイプの構成を図8に示す。これらを製造現場に設置する。コンクリートの型はスチーム環境下にさらされるため、センサー本体のみを取り付け、データを送信するIoTマイコンはスチームにさらされない数m離れた場所に設置することとした。センサーとマイコンはケーブルで接続している。センサー本体及びケーブル接続部は水分の付着を防止するため、樹脂でモールドした。

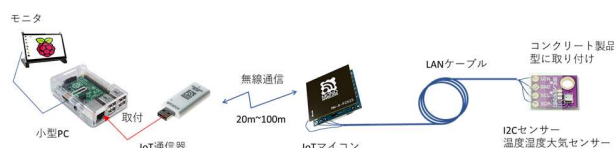


図 8 システム構成

構成品の型式及び仕様を表2に示す。製作の容易性を確保するため、市中で入手可能な汎用品を選定した。

表 2 構成品の型式と仕様

番号	項目	型式等	仕様
1	小型PC	Raspberry Pi3 Model B+	CPU:Broadcom BCM2837 1.2GHz 64-bit quad-core ARMv8 Cortex-A53 Memory: 1GB I/F: USB2.0 standard Aコネク4、HDMIx1、(出力)、RJ-45 x1 電源: DC5V, 外形寸法: 約86(W) x 57(D)x17(H)mm 重量: 45g
2	モニター	タッチモニター7インチ IPSパネル (ノーブランド)	画面サイズ7インチ 解像度SVGA Wide インターフェースHDMI
3	IoT無線機 (受信機)	モノワイヤレス USBスティック MONOSTICK-B	通信方式: 2.4GHz z IEEE 802.15.4 準拠 通信速度: 250kbps 送信出力: 1mW級
4	IoTマイコン (送信機)	モノワイヤレス TWELITE 2525A	加速度センサー付き無線タグ (I2Cセンサー接続可) 通信方式: 2.4GHz z IEEE 802.15.4 準拠 通信速度: 250kbps サイズ: 25 mm x 25 mm x 10 mm 重量: 6.5g (電池CR2032含む)
5	センサー	BOSH社製BME280 温度湿度大気 センサーモジュール (ノーブランド)	温度測定範囲: 0℃~65℃(誤差±0.5℃、分解能0.1℃) 湿度測定範囲: 0%~100% 気圧測定範囲: 300から1000hPa
6	ケーブル	LANケーブル	規格: CAT5e, サイズ-極数: 0.5sq-4極

4.2. 画像処理プロトタイプ

現場にカメラを設置して映像取得を行い、取得映像の動画解析により、人数カウント機能の実証を行う。

図9に取得した動画画面とエリア定義を示す。住宅用ラインと土木向けのラインのそれぞれの全体が映る位置に1台ずつのカメラを設置した。

写真内の長方形で囲われたエリア内で認識される人物の人数のカウントを行う。例えば、図9(a)では、H1, H2の長方形の中でカウントされる人数をH1, H2ラインの作業人数として取り扱う。本機能により各ラインの負荷状況の確認を行う。



(a)住宅用PCライン (b)土木向けPCaライン

図9 取得動画とエリア

表3 オープンソースによるWindows PC 開発環境

番号	項目	仕様・バージョン等
1	使用言語	Python 3.7.9
2	ディストリビューション	Anaconda
3	ライブラリ	ニューラルネットワーク: Keras(2.2.4) 機械学習: Tensorflow(1.9.0) 画像処理: Pillow(8.0.1), OpenCV(3.4.2) グラフ描画: matplotlib(3.3.2)
4	画像認識プログラム	アルゴリズム: YoloV3 プログラム: Keras実装版 YoloV3 学習モデル: オリジナルで公開の学習済みモデルをKeras用に変換

開発環境を表3に示す。Windows PCによるプログラム開発環境を用い、映像内に写る人物の人数カウントを行うプログラムの製作を行った。今回、画像処理、物体認識、機械学習などのプログラミングには、表中のオープンソースを利用した。取得した映像より、60秒ごとに静止画を切り出し、エリア内の人数カウントを行うプログラムとした。静止画内の人物の推論にはYoloV3の学習済みモデルを利用した。公開されているYoloV3の学習済みモデルは、人、自転車、車の他、動物など80カテゴリの推論に対応しているが、人を識別した場合のみ、画面表示と人数のカウントを行う。

5. プロトタイプ検証

5.1. IoT プロトタイプ検証

図10にコンクリート型へのIoTセンサーの取り付け状況を示す。型の側面にセンサーを磁石で固定し

た。作業者の作業経路を避けたルートに配線を地面上に這わせ、IoTマイコンと接続している。IoTマイコンは、温度、湿度、気圧のセンサーデータを10秒に1回発信する設定とした。



図10 IoTセンサー取り付け状況

養生促進工程の温度・湿度データ測定結果を図11に示す。温度目標値と温度実測値、湿度実測値をプロットしている。目標値が折れ線状であるのに対し、実際の温度変化はコンクリートへの蓄熱特性により、飽和曲線となる。また、バルブ操作の結果は、不規則な温度変化となってあらわれるため、不規則な温度変化があらわれた部分を現場監督者（リーダー）のバルブ操作と判断し、グラフ下部に追記している。促進養生プロセスの開始後、1時間以内のところで、頻繁にバルブ操作を行っていることが測定結果から読み取れる。

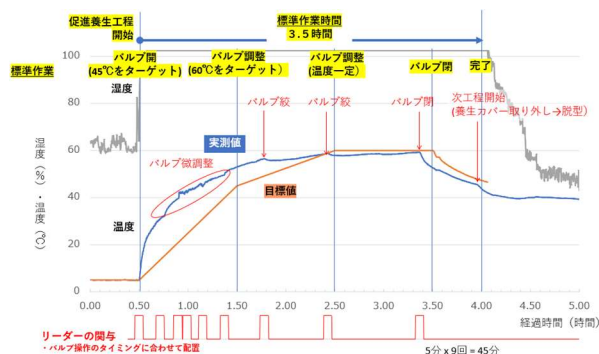
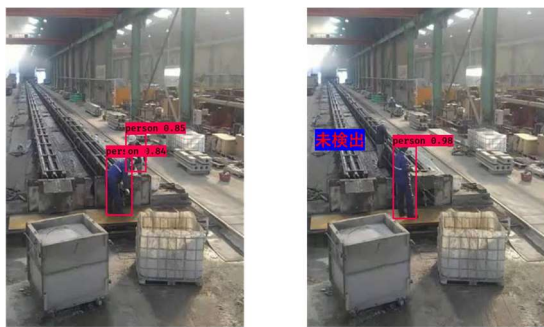


図11 養生促進工程の温度・湿度データ測定結果

5.2. 画像認識プロトタイプ検証

図12に人物検出を行った結果の一例を示す。住宅用H3,H4ラインの映像から静止画を切り出して画像認識を行った。左の図では画像内の人物が漏れなく認識できている。右の図では一部検出漏れがある。概ね作業者を認識するものの、人の動きや向きによっては背景色と同化するなどして人物として認識されないことがあるが、負荷状況のトレンド把握には使えることが分かった。カメラ設置位置や画像認識のアルゴリズムなど、認識率を向上させる調整の余地もある。



(a)検出漏れなし (b)検出あり

図 12 人物検出例 (H3,H4 ライン)

図 13 は動画解析により作成した作業実績のガントチャートに、作業人数のカウント結果を追記したものである。カウント人数を棒グラフで表示している。一部の画像で、人物の検出漏れはあったものの、棒グラフの山の高さと密集具合により、作業の負荷状況の可視化が行えている。

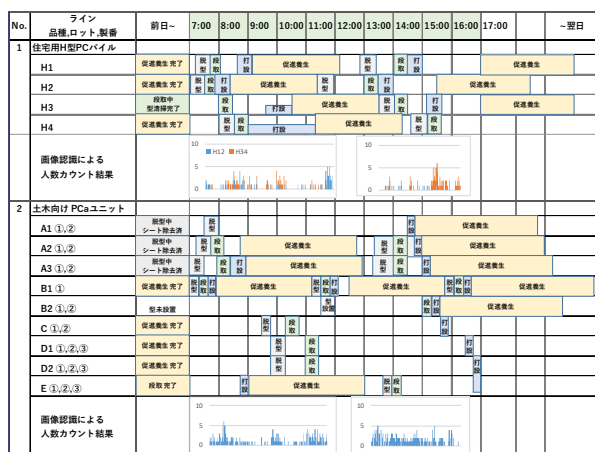


図 13 作業実績ガントチャートと人数カウント結果

5.3. 検証結果まとめ

IoT プロトタイプにより、促進養生工程の温度・湿度データの観測を行い、目標値との差異の可視化ができることを示した。温度データの可視化により、作業標準の確立を行うとともに、監視プロセスの自動化により、品質向上と監督者の省力化につなげることができる。

また画像認識プロトタイプにより、作業現場の負荷状況の可視化ができることを示した。負荷状況の把握により、作業平準化を図るための作業スケジューリング検討や作業者の入れ換え指示による稼働率向上とLT短縮につなげることができる。

6. 考察と今後の課題

6.1. 温度管理ロジック

IoT プロトタイプにより目標値との差異の可視化を行ったが、次に、差異が発生したときのアラーム機能について具体的なロジックの考察を行った。

- 促進養生プロセスか否かは、湿度上昇と温度上昇により判断する。その後の促進養生開始後の温度管理ロジックを図 14 に示す。目標となる温度条件は、
- A. 外気温から 45℃までの昇温 (1 時間)
- B. 45℃から 60℃までの昇温 (1 時間)
- C. 60℃のキープ(1 時間)
- D. 自然冷却 (バルブ閉)
- E. 30 分経過後完了

である。温度変化、温度トレンド(上昇・下降・横ばい)、温度閾値、経過時間の閾値設定により実現が可能である。

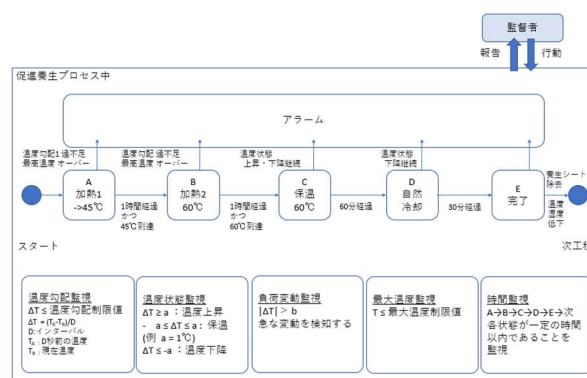


図 14 温度管理ロジック

6.2. 自動制御の効果

促進養生工程における製品の温度上昇特性を制御工学における一次遅れ系として、モデル化を行った。温度変化の実測データより、時定数 0.3 と定めた。図 15 に、実測値とモデルの比較結果を示す。

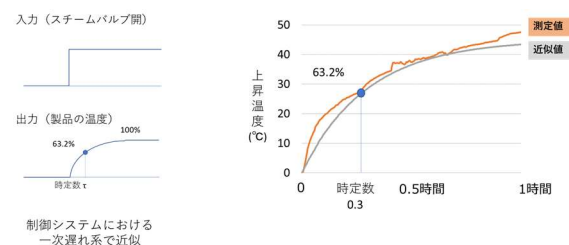


図 15 一次遅れ系での近似

次に得られたモデルを使い、MATLAB/SIMLINK を用いて、温度上昇のシミュレーションを行った。図 16 に結果を示す。最初の 1 時間で 40℃まで昇温、次の 1 時間で 55℃まで昇温、最後の 1 時間は 55℃で保温する条件を目標値とした。比較条件を 3 つ設定し

た。まずは、既存の方法に相当するものとして、開始時と1時間後の2回のバルブ操作を行った場合。次に従来の改善案として、バルブの操作頻度を増やし、30分に1回バルブ操作を行う場合、そして最後に自動制御(FB制御)を行う場合の3つのケースを目標値と比較を行った。②、③、④の順で目標値①への追従性が高くなっている。

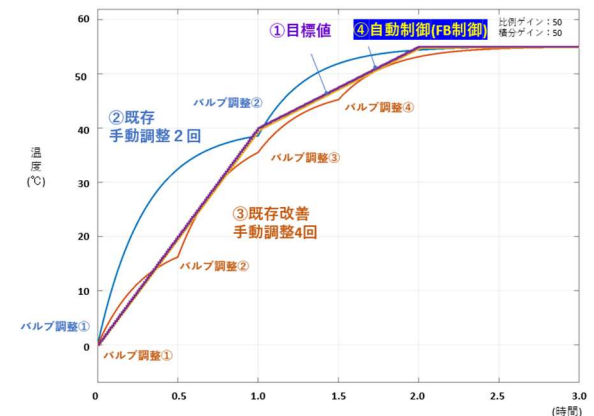


図 16 温度シミュレーション結果

表4に結果の比較を示す。監督者の拘束時間、スチーム使用量、リードタイム、コスト効果の4点の比較を行った。監督者の拘束時間は、現状、約45分掛かっている。バルブ操作を増やすと監督者の関与が増え、少なくとも50分程度には増加する。一方、自動制御の場合は不要(0分)となる。

スチーム使用量(目標値通りの場合を100で指数化)については、現状が109に対し、バルブ操作4回で-11ポイント、自動制御で-10ポイントとなる。リードタイムは現状4時間(プロセス3.5時間+次工程待ち時間0.5時間)かかっているのに対し、改善、自動化では待ち時間が減り、それぞれ213分、212分となる。その結果、改善額は、改善案で約27千円、自動化で約33千円コスト低減効果となる。(監督費100円/分、スチーム50円/分、生産単価1,000円/分と仮定)これは1ロット生産時の低減効果であり、生産ロットの分だけの低減効果が得られるものと推定される。

(およそ1日10ロット生産)

表 4 結果比較

比較項目	目標値	現状	改善	自動化
監督者時間	—	45分	50分	0分
スチーム使用(指数)	100	109	98	99
リードタイム	240分	240分	213分	212分
改善額(1商品/円)	—	—	27,050	33,000

コスト改善額 = 監督時間変化 × 監督者単価 + スチーム使用変化 × 単価 × リードタイム変化 × 生産単価
 改善1 / 現状 = $5 \times 100 - 11 \times 50 - 27 \times 1000 = -27,050$
 自動化 / 現状 = $-45 \times 100 - 10 \times 50 - 28 \times 1000 = -33,000$

6.3. 今後の課題

プロトタイプとして作成した基本システムを適用することで、生産プロセスや作業負担の見える化が可能となる。そして、組織や業務の改善、最適生産プロセスの検討など現場力の向上と併せて、制御システムの開発・導入により、監督業務の代替えや生産効率化を実現していくことができる。

また、IoTと画像認識を組合せたシステムへ改良するとともに、工場内Wifiネットワークを構築し、複数のカメラ・センサー・表示端末を接続することで、工場の広範囲に渡って省力化と生産効率化へつなげることができる。

今後の課題としては、システムの適用範囲拡大や、認識精度向上、センサー・マイコン類の信頼性・安定性・耐環境性の確保などが挙げられる。

謝 辞

実証試験の機会と場を提供頂いた會澤高圧コンクリート株式会社様に感謝申し上げます。また、実証試験先の紹介並びに実証試験に協力頂いた株式会社未来樹脂様に感謝申し上げます。

文 献

堀井 摩耶, 櫻井 康彰, The future of work in Japan
 ポスト・コロナにおける「New Normal」の加速とその意味合い, McKinsey & Company Insights, 2020年5月

小湊 昂平, 藤川 裕晃, 映像認識を用いた生産管理システム ~ 生産現場でのIoT導入、平成28年度日本経営工学会春季大会予稿集、2016年5月、P.154~155
 斎藤 寛彰, 館野 孝信, 建築工事における管理業務の負荷に関する調査研究、日本建築学会技術報告集 24(56)、2018年2月、P.391~395

Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi, You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, arXiv preprint arXiv:1612.08242, 2016

Joseph Redmon and Ali Farhadi, YOLOv3: An incremental improvement, arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.