製造現場におけるIoT/DXを考慮した生産システムの開発

荒川　雅裕

現在では製造現場へのIoTの導入は当然のこととされており，多くの工場ではIoTの導入により作業の効率化から生産性向上，人員削減などの効果が広く得られている．また，最近では自社開発したIoTシステムの市販化が進められており，その導入も広まっている．一方で，多品種少量生産が進み，個別受注に近くなるとともに製品のライフサイクルが短くなるため，効果的なIoTシステムの開発を生産システムの運用と合わせて短期間で考える必要がある．本稿では，製造現場へのIoTシステムの導入とシステム運用の考え方を説明し，その後，著者により開発を進めている画像処理を利用する工程分析と改良機能を考慮したシステム開発の事例を紹介する．

キーワード：IoTシステム，見える化，工程分析，画像処理，改善案導出

1. はじめに

現在の国内製造業では，少子高齢化や製造現場の作業者の減少により，省人化を含めた作業の効率化が早急に対応しなくてはならない問題となっている．ドイツ発のIndustry 4.0が発表されて以降，国内においても作業現場へIoTシステムや自動化システムの導入が進み，省人化や生産性向上のための取り組みが活発になっている [1].

国内に限らず，現在の製造業ではネットワークやICTシステムの発展を背景に，顧客要求の多様化が促進され，これにより，製品のライフサイクルも短くなっているため，多品種少量生産の開発と運用が製造現場だけではなく，製品企画・設計にも要求されている．製造現場に限れば，IoTシステムの導入により，利益の向上に貢献する生産性向上を目的とした生産工程を構築し，その工程の下で安定した稼働を評価しながら，運用，監視に利用する工場が多い．また，顧客ニーズの多様化による，需要の変動や短サイクルでの新製品の導入などに対応するため，生産工程は継続的に改良，改善を加えていくことも必要となる．このように，工場内を対象としても，工場全体の視点で継続的な運用を考慮した対策が必要となるが，実空間ではそれらの運用を管理するのは容易ではない．

本稿では，多工程持ち作業の工程管理に着目して，IoTシステムの開発と運用事例を示す．ここでは，既存工程の作業分析や工程分析から，問題点の抽出とともに原因の推定，作業と工程の再設計を行う方法を提案し，それを実現するためのIoTシステムの開発と適用例を示す．

あらかわ　まさひろ
名古屋工業大学大学院
〒466–8555 名古屋市昭和区御器所町

2. 製造現場でのIoT化の特徴

これまでの製造現場におけるIoTシステムの導入実績はおおよそ以下に分類される [1].

(1) 業務の見える化（工程の分析と問題の発見）
(2) 作業者の作業支援
　(2-1) 作業者の負荷削減
　(2-2) 作業ミス削減（認識ミス，迷いの削減）
　(2-3) 品質管理（品質検査，工程検査）
(3) 設備の予防予知
(4) 作業の安全性

この中で，(1)，(2)，(4) は工場内のIoT化に相当し，生産技術の技術者が担当している場合が多く，IoTシステムの開発や導入は生産工程の改善活動との関連が高い．一方，(3) は設備の故障に対する分析システムであり，機械の故障を避けるための設備管理のしくみを構築することが必要となる．企業では，この問題の業務は設備の担当技術者が行っている場合が多い．Industry 4.0やIoTが広まってからは，センサーとネットワークを組み合わせた測定装置が普及し，測定が簡便になり，多くの企業で分析に取り組んでいる．多様な測定データを用いて設備の状態を管理する方法は過去から研究されているが，設備の“個性”や，トラブルの発生回数の少なさ，トラブル発生時の急激な変化などから，測定データの取得や分析が困難なため，IoT装置や分析法が発展した現在においても解決が困難な問題とされている．

IoTシステムの導入では目的や工程の特徴から適切な測定装置や方法の選定が必要となる．本稿では，継

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

続的な生産工程の評価と再設計を対象として，(1)，(2) を目的とする生産工程の作業特性の測定と分析，問題抽出，原因推定から，解決案策定のプロセスを含めた IoT システムの開発例を示す．

3. 生産工程の分析・設計法

3.1 生産工程の分析・設計法の特徴

開発対象の IoT システムでは，生産工程の作業の測定結果から，問題抽出，原因推定，解決案策定を行うため，工程で生じる問題の特性や原因を想定した処理のプロセスを構築する．図 1 は開発したシステム内における生産工程の分析・設計のプロセスを示す．生産工程や作業の分析では，生産性の評価を行うため“時間”に着目し，“時間”に関する評価値を調べる．生産工程の分析から改良案設計のプロセスは以下の手順により行う．

（手順 1）標準作業の分析（事前の作業分析）

MTM (Method-Time-Measurement) 法を利用して作業をモデル化し，標準作業時間を見積もる．また，作業特徴を抽出し，開発した情報システムを利用して効率的に作業分析を行う．

（手順 2）作業工程の情報収集

本システムでは，工程全体を測定するため，全方位カメラと画像処理により作業場全体の実作業情報を収集する．具体的には，各作業者の作業時間の計測や作業者の移動の追跡を行う．

（手順 3）評価値による作業の分析

事前に設定した複数の評価指標について，測定した評価値から各工程の作業を評価する．手順 2 で収集した実作業の状態を表すデータから評価値を計算することにより，現状の工程の問題を抽出する．

（手順 4）問題のある工程と問題の原因の検出

事前に各評価指標の値が悪い場合に考えられる問題の原因や特徴を関連付けた情報を用意する．そして，各評価値において，工程に問題があるかどうかを判断する基準を設定する．

（手順 5）工程に対する改善案の提案

各工程で問題とされる評価値から，改善案の候補を抽出する．手順 4 で示す，事前に評価値から想定される評価値を悪くする原因を関連付けたデータ構造と，原因に対して解決する方法（改善案）を関連付けたデータ構造を用意する．手順 4 で抽出された各工程において，想定される問題に対する改善案の候補を提示する．

（手順 6）改善案による工程・レイアウトの設計

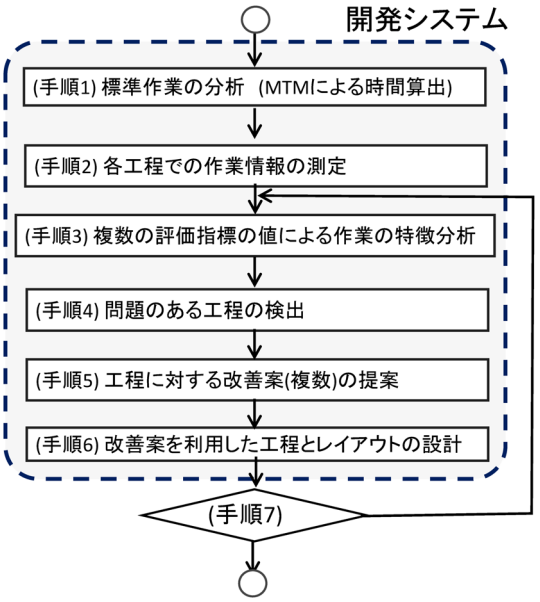


図 1 生産工程の分析・設計のプロセスの概要図

手順 5 で提示された改善案を利用して，生産工程やそのレイアウトの改善と再設計を行う．

（手順 7）改善効果の検証

MTM 分析システムにより作業時間を算出し，改善の効果を評価する．必要であれば再度，手順 3 に戻り，同様の手順に従って生産工程の分析・再設計を実行する．

上記の手順のうち，手順 1 から手順 5 までは IoT システムで実行される．手順 6 と 7 では，システムから提示された対策案に対して，設計者が工程を変更し，MTM 分析によって作業時間を見積もり，評価する．この手続きより，測定値によるデータ収集から作業や工程の分析，改善案の導出を行うことで，生産工程の問題解決のための判断と問題解決の対策を支援するしくみを構築する．

3.2 作業・工程分析からの改善案の導出方法

工程の作業分析から問題を抽出し，さらに改善案を導出するために各情報の関係を格納することで，測定結果から改善案を自動的に導出するしくみを構築する．情報の関連付けは複数の二次元表を利用し，改善案を導出するためにこれらの表を組み合わせた演算を行う．

情報システムでは工程ごとに測定値から算出される評価値を格納する．そして，評価値から想定される問題の特徴や原因を抽出する．抽出した問題の特徴や原因から効果的な改善案を導出する．図 2 は測定値から改善案を導出するしくみの概要図を示す．三つの二次元表 W，X，Y を用意し，式 (1) によって行列の積を

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

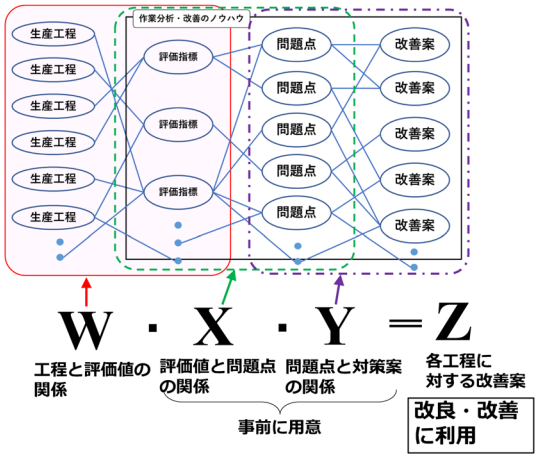


図 2　処理プロセスの概要図

計算する．

$$Z = W \cdot X \cdot Y \tag{1}$$

W は工程と評価値の計算結果の関連を示した二次元表である．X は評価項目に対して，その評価値が悪い場合に考えられる問題と特徴や原因の関連を格納した表である．Y は問題と原因に対して，効果的な改善案を関連付けた二次元表である．このとき，改善案は過去に生じた問題に対して行った改善案や過去の事例に基づく改善例などを利用する．これらの二次元表では，行と列に異なる情報を関連付けて，工程と評価指標，評価指標と問題点，そして，問題点と改善案の表を作成し，多対多の関係性を表現する．

これらの行列の中で X，Y は事前に用意する．W の要素の値は測定データが閾値を超えるかどうかを判断し，決定される．これにより，式 (1) によって算出される行列 Z は問題とされる工程に対して有効な改善案を示す．

4.　開発した IoT システムの特徴

4.1　MTM 分析サブシステムの特徴

図 3 は開発したシステムの構造を示す．本システムは MTM 分析サブシステムと動作分析・改善案導出サブシステムから構成される．

動作分析・改善案導出サブシステムは作業時間を計測し，評価値から問題を抽出，改善案を導出するシステムである．MTM 分析サブシステムは，作業情報を入力として，MTM 法によって作業時間を自動算出する機能を有する．計算した作業時間や各工程の作業情報は動作分析・改善案導出サブシステムに転送し，動作分析に利用する．

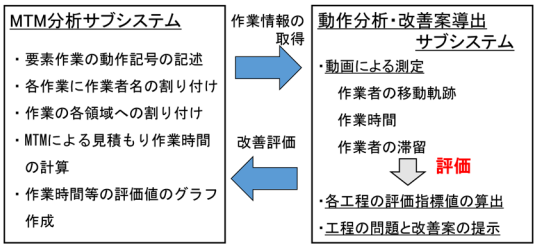


図 3　開発した IoT システムの構造

なお，動作分析・改善案導出サブシステムで導出された改善案を利用して工程改善を行った後，改善した工程の評価を行うため，改善案に関する作業情報を MTM 分析サブシステムに入力し，作業時間の見積もりを行うことで，改善案の効果を調べる．

本事例では，セル生産工程での部品組み立て作業を取り上げる．MTM 法による部品組み立て作業の動作分析として，“手を伸ばす (R)”，“つかむ (G)”，“運ぶ (M)”，“放す (RL)”，“定置する (P)”，“引き離す (D)” の動作に分類する．ここで，アルファベットは MTM 法による動作の記号を指す．分析では動作の記号のほか，距離，目的，取り付ける物体の条件（重量，難易度）を利用して記述する．MTM 分析サブシステムは以下の機能を有する．

(1)　MTM 基本要素時間データの読み込み
(2)　GUI 画面で作業モデルの作成
(3)　作業時間の算出
(4)　作業者・工程の設定
(5)　作業情報の変更・出力
(6)　各工程における作業時間のグラフ表示

4.2　動作分析・改善案導出サブシステム

図 4 に動作分析・改善案導出サブシステムを含む IOT システムの概要図を示す．このサブシステムは (1) 作業者の位置情報の検出機能，(2) 評価用作業関連情報の格納機能，(3) 作業の評価・改善案の導出機能，を有するサブシステムより構成される．以下に各機能の特徴を示す．

(1) 作業者の位置情報を検出する機能

作業者の作業動作から各工程の作業時間を計測するため，画像処理を利用した作業者の位置検出システムを開発した．本システムでは，天井カメラに取り付けた全方位カメラで作業場全体を撮影し，作業者が身に付けた色を認識することで複数の作業者の位置情報（画面上の 2 次元座標）を取得する．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

色認識処理ではまず，認識する作業者の帽子の色のRGB 値と RGB の許容誤差の値を設定する．それらの値に対し，画像の左上から 1 ピクセルごとに色を判定し，判定結果に応じて二値化した画像を作成する．そして，二値化画像に対してラベリング処理をして，白色の面積が最も大きい領域の重心の座標を作業者の位置情報とする．

(2)　評価用作業関連情報の格納

各工程での作業時間に関する評価値の計算のための基準となる作業時間などの作業の関連情報を格納する．具体的には，①作業領域，②作業者，③作業時間，④作業内容のデータなどを保存する．これらのデータは，作業のマスタデータとして，測定データと関連付けられ，MTM 分析サブシステムにより利用する．

(3)　作業の評価・改善案導出機能

本システムでは，作業者の位置情報と作業の領域情報をもとに各作業者の作業時間，移動の軌跡などを測定し，下記の四つの評価値を調べる．

（評価値 I ）：作業時間の標準偏差
（評価値 II）：MTM による作業時間に対する平均作業時間の比
（評価値 III）：作業者の場所に関する滞留時間
（評価値 IV）：作業者の移動量と移動経路

評価値 I は作業時間のバラツキを表す．評価値 I が大きい場合では，同一作業でも容易に行える場合と行えない場合が混在する現象が考えられる．値が大きくなる原因として，部品の取り付け作業が習熟度に関連し，“コツ”や“勘”に関するスキルが必要な作業であることが考えられる．

評価値 II は基準となる作業時間に対する実作業時間の大きさを表す．評価値 II が大きい場合では，該当する作業が基準の作業に比べて，ムダな動作を含むことが考えられる．具体的には，動作による移動距離が長いことや，部品取り付けが困難な動作を含むことなどが考えられ，部品の配置や製品の構造に依存する．評価値 I と II が大きい作業については，作業者に高いスキルを必要としない作業への改良の必要性が考えられる．

評価値 III は滞留時間の大きさと位置の評価値である．大きな滞留時間が作業場に位置するならば，その位置での動作の確認と改良の必要性が考えられる．滞留時間は作業時間に依存するため，評価値 II の結果を参照し，作業の改善を検討する．

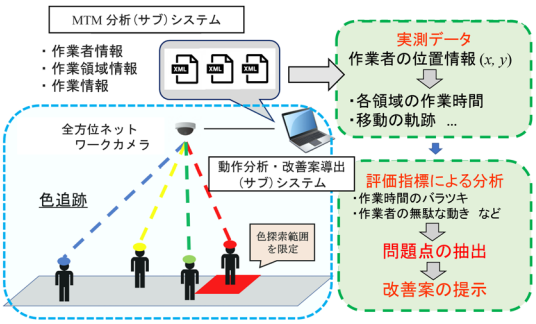


図 4　IoT システムの概要

評価値 IV は作業者がムダな移動を行っていないかを判断する評価値である．この値が大きく，作業場とは異なる場所での移動経路が存在すれば，ムダな移動動作を示している．この結果から，レイアウトの変更を含めて，ムダな移動経路の削減を要する．

上記の各評価値を算出し，閾値を超えているかを判断し，3.2 節の行列 W の要素が決定する．その後，行列の計算を行うことで，問題と考えられる工程について，問題の原因と改善案を自動的に導出する．

5.　IoT システムの評価

5.1　模擬生産ラインを利用した評価

開発した IoT システムを検証するため，模擬生産ラインによる実験を行った．模擬生産ラインは，実際の作業を模擬した実機による作業から構成される工程より形作られる．

図 5 には初期の生産ラインにおける作業者の配置と作業工程，および製品の流れを示す．作業者は 4 名であり，計 21 の作業を繰り返し行う．作業対象はレゴ・ブロックから作成される製品である．工程数は A〜K の 11 工程であり，作業者 1 が工程 A と B を，作業者 2 が工程 C，D，E を，作業者 3 が工程 F，G，H を，作業者 4 が工程 I，J，K を担当する．

作業は部品組付けの作業であるが，工程内には模擬装置による圧延工程，自動締め付け工程，自動検査工程が存在する．これらの装置では，タイマーが設定されており，設定された時間内では作業ができないように設定することで自動装置での作業を模擬する．

IoT システムを利用して，既存の生産工程における各工程での作業時間の分析を行う．表 1 に工程の MTM 分析の結果を示す．この表の記号は図 5 の記号に一致しており，工程のアルファベットは各工程での作業領域に該当する．MTM 分析では MTM の記号による作業の動作を表記している．ここで，主作業と付帯作業

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

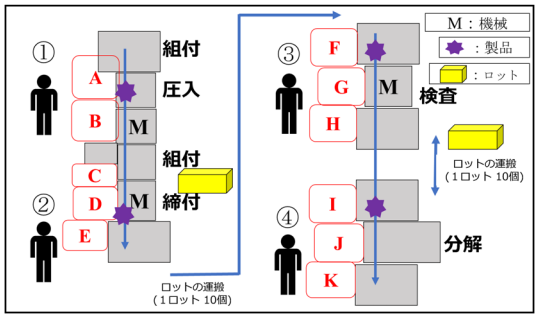


図 5　模擬生産ラインの初期工程レイアウト

表 1　作業工程における MTM 分析の結果

順序	工程	MTM 分析（主作業／付帯作業）	見積もり作業時間(秒)	
1	A	RGM RGMAP RGMAP RGMAP RGMAP W2P / GMP	6.9 / 1.1	Walk W5P 2.7s
2	B	T RGMAP T	1.9	
3	B	MP	1.3	
4	B	RAP	3.5	
5	B	W1P RGMP	2.2	
6	C	RGM W2P	1.8	Walk W5P 2.7s
7	D	RGM RGMP RGMAP MP	4.4	
8	D	RAP	3.5	
9	D	RGM	0.7	
10	E	W2P MP / W1P GMBPA	2.3 / 2.8	
11	運搬	RG W15PM BPA W15PM	19.5	
12	F	RGM W2P / W1P BGAMP	1.8 / 2.8	Walk W5P 2.7s
13	G	MP	1.3	
14	G	RAP	3.5	
15	G	RGM	0.5	
16	G	RGM RGM AP MP	1.6	
17	H	W2P MP / W1P GMBPA	2.3 / 2.8	
18	運搬	RG W3PM BPA W3PM	6.5	
19	I	RGM W2P / W1P BGAMP	1.8 / 2.8	Walk W5P 2.7s
20	J	GDMPL AGMPL AGDGDMPL AGDMPL ATGDMPL	3.9	
21	K	W2P TMP / GMP	2.5 / 1.1	

の動作を記述している．この動作の記号列は事前に設定し，作業の特徴から数値を当てはめて決定した．これらの作業の動作記号から，作業時間を算出した．

図 6 はシステム内に表示される，天井カメラによる作業者の作業状況の表示例を示す．この画像において，表示されているグリッドによって作業領域が区分されている．グリッド上に表示されているアルファベットは作業領域を示している．作業時間の計測では，作業者が各作業領域に侵入した時刻を作業開始時刻，退去した時刻を作業終了時刻とし，各工程での作業時間を計測する．図 7 はシステムの表示例であり，左側が作業者の作業の状態，右側が各工程での作業のリストを指す．

5.2　作業工程の分析

システムから得られた結果を各評価値から考察する．

（評価値 I）作業時間の標準偏差

図 8 は各工程における評価値 I（ここでは，平均作業時間に対する作業時間の標準偏差の比を利用する）のグラフを示す．各工程の評価値 I は次式により算出

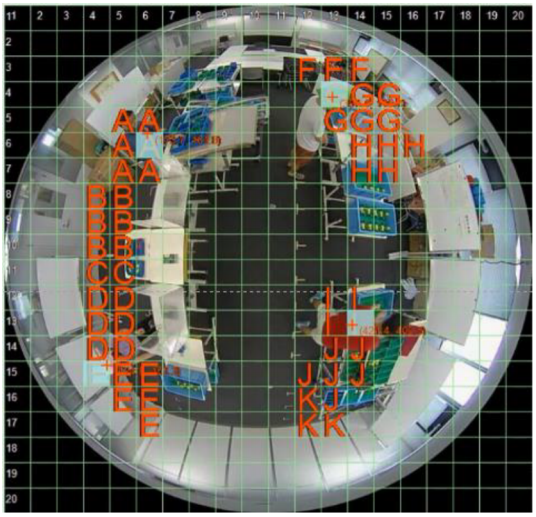


図 6　全方位カメラによる作業者の作業状況の表示例

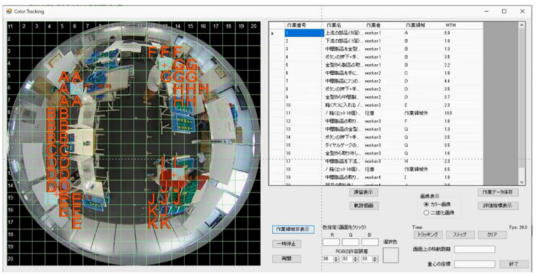


図 7　システム上での動画の分析画面例
（左：全方位カメラの画面，右：作業情報のリスト）

した．

$$V_{I,s} = \sigma_s / \overline{t_s} \tag{1}$$

ここで，$V_{I,s}$ は工程 s の評価値 I の値，σ_s は工程 s の測定した作業時間の標準偏差，$\overline{t_s}$ は工程 s の測定した作業時間の平均値を示す．

実験では評価値 I の閾値は 0.5 に設定した．図 8 から工程 F，H，I が閾値を越えており，これらの工程では付帯作業が存在し，工程 F，I では部品の持ち直しによる作業時間のバラつきが生じていた．

（評価値 II）MTM による作業時間に対する平均作業時間の比

図 9 は各工程における評価値 II のグラフを示す．各工程の評価値 II は次式により算出した．

$$V_{II,s} = \overline{t_s} / \widehat{t_s} \tag{2}$$

ここで，$V_{II,s}$ は工程 s の評価値 II の値，$\overline{t_s}$ は工程 s の測定した作業時間の平均値，$\widehat{t_s}$ は工程 s の MTM による作業時間を示す．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

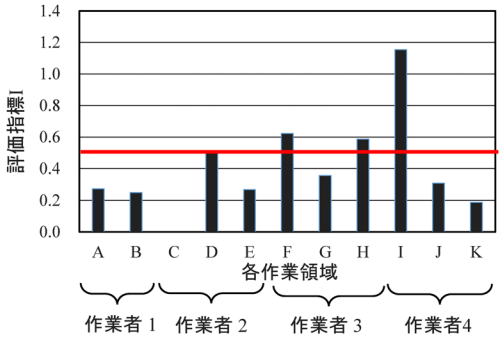


図 8　各工程における評価指標 I に関するグラフ

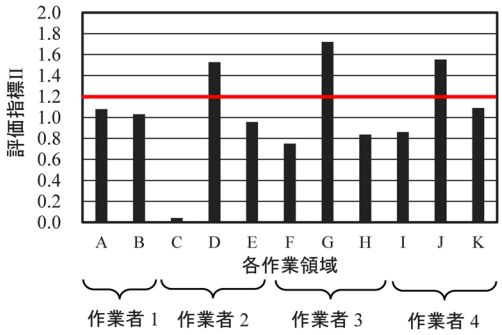
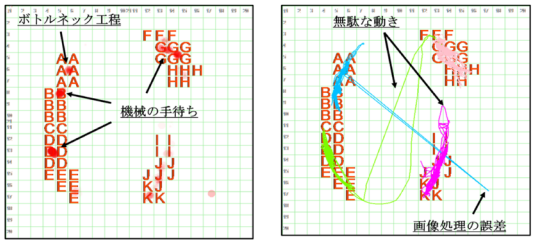


図 9　各工程における評価値 II に関するグラフ



(a)**作業者の滞留**　　(b)**作業者の移動の軌跡**

図 10　作業者の移動に関する結果

評価値の閾値を 1.2 に設定し，評価値 II>1.2 の工程を抽出する．図 9 から工程 D，G，J が抽出される．MTM による動作分析の表記から，工程 D，G は小さい部品を利用する作業を含んでおり，工程 J は動作数の多い工程である．これらの作業は改善の対象とする．

(評価値 III) 作業者の場所に関する滞留時間

図 10(a) は作業者の滞留を示す図である．作業者の単位時間の移動が少ない場所に赤い円を描画し，作業者の滞留場所を評価する．図より工程 A，B，D，G では作業者の滞留が存在する．MTM による作業時間の見積もり値と図 9 から，工程 B，D，G では機械加工の手待ちのムダが考えられ，これらは改善対象となる．

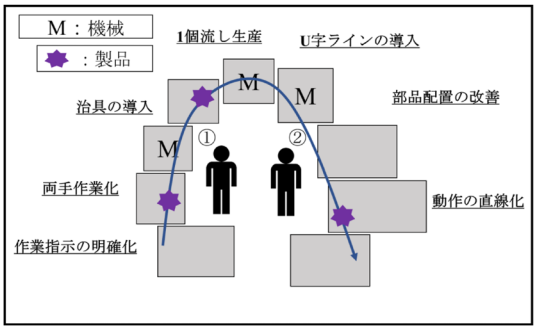


図 11　改善後の作業レイアウト

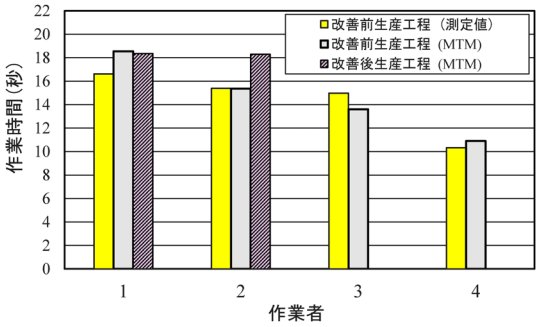


図 12　改善前後の各作業者の作業時間
（改善前の工程の作業者が 4 名，改善後の工程の作業者は 2 名）

(評価値 IV) 作業者の移動量と移動経路

図 10(b) は各作業者の移動の軌跡を示す．工程 E から工程 F への軌跡から，作業者 2 が複数の中間製品を箱に入れて移動する，付加価値のない移動動作が生じている．また，工程 H と工程 I の間の軌跡からムダと考えられる移動が見られる．ビデオの分析から，これはロットの交換作業で生じる動きであった．前者では，工程 E と工程 F の移動距離が小さくなるようにレイアウトの変更する．後者は，ムダな移動が生じないように変更する．

5.3　作業・工程の改善案の策定

5.2 節の分析結果を利用して，作業・工程の改善および再設計を行った．3.2 節に示した行列計算から得られた結果を利用し，下記の改善を検討した．

- 工程 E から工程 F の移動の削減，
- 工程 H，I で 1 個流しへ変更，
- 指標値 I の大きい工程で，治具などの導入による作業の簡略化，
- 指標値 II の大きい工程でのムダ作業の削減，
- 作業者間の作業時間のバランシング．

これらの処理を含めて，下記の特徴の作業・工程の再設計を行った．

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

・工程 E と F の接続による，U 字ラインの構築，
・作業者数を 4 名から 2 名への削減，
・工程 E と F，工程 H と I の間での 1 個流しへの変更．

図 11 は改善後の生産工程のレイアウトの概要図を示す．図 12 は改善前後の各作業者の作業時間の分布を示す．改善後の生産工程では作業者が 2 名に削減後のサイクルタイムが 16.5 秒から 18.4 秒に上昇したが，2 名の削減により，リードタイムは 36.8 秒となった．これより，改善前である 4 名の場合のリードタイムは 66 秒であることから，改善案により 44%の削減を得た．

6. 製造現場における IoT 化の限界と DX への展開に関する検討

製造現場の日常の主な業務は計画から指示された製造指示によって行われるため，製造指示された業務を効率的かつ効果的に行うことが問題となる．このため，製造工場の分析や管理を対象とする IoT システムだけでは企業の利益を効果的に考えられる方法が得られない．近年，製造現場での DX (Digital Transformation) として取り組みが着目されている [2] が，従来の IoT が DX として扱われる場合が多く，DX を IoT システムやプログラムを指している場合が多い．また，DX はイノベーションに関連づけられて議論される場合が多い．

文献 [3] によれば，DX の目的は，企業が外部エコシステム（ここでは，顧客や市場を指す）の変化に対応し，内部エコシステム（ここでは，企業内の組織，文化，従業員を指す）の変革を牽引しながら現在の先端の IT プラットフォームであるクラウド・ビッグデータ/アナリシス，ソーシャル技術，モビリティの技術を利用することで，新しい製品やサービス，新しいビジネスモデルを通して企業の優位性を確立することが述べられている．文献が公開された 2018 年では，企業は DX の必要性を認識し，DX 関連の部門の設置や投資を行っているが，ビジネス変革に繋がっているといえない状況が記述されている．ビジネス変革やビジネスモデルの構築は主に B2C の間の業務内容の評価から検討されるが，製造現場の業務は通常，B2C での検討事項が所与の条件として渡された B2B の業務として実施される．このため，製造現場のみを対象として，先端の IT プラットフォームの技術を使っても改革が行えるビジネスモデルの構築は困難である．

このことから，製造業において企業の利益を高めるビジネスモデルを考えるには，製造現場だけでなく，エンジニアリングチェーン上の製品設計や製造準備の情報やマーケティング情報と連携させることで製造に関する情報を拡張し，意思決定の対象を広げることで戦略的な対策を継続的に検討することが必要と考えられる．

7. おわりに

本稿では生産ラインの作業工程の分析から作業・工程の再設計案を抽出するための ICT・IoT システムを開発した．そして，模擬ラインを利用してシステムの適用事例を示した．

今後，製造情報を製品設計やマーケティングなどの情報と組み合わせ，多様な意思決定の仕組みを入れて，高速で処理することで競争力を高める方法を検討する．

なお，本システムの開発では元大学院生の鈴木渉氏（現，日本 IBM(株)）の協力を得た．

参考文献

[1] 荒川雅裕，“中小規模企業における工場の ICT・IoT 化の課題と対策，”IE レビュー，**59**(1), pp. 8–16, 2018.
[2] 荒川雅裕，朴英元，阿部武志，田崎一広，“「未来戦略デザイン・システムクリエーター」の育成に対する問題解決型 IoT/DX システムの開発プログラムと実習による実証，”経営システム，**32**, pp. 8–14, 2022.
[3] デジタルトランスフォーメーションに向けた研究会，“DX レポート　～IT システム「2025 年の崖」の克服と DX の本格的な展開～，”経済産業省, 2018.

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.