

生産工程のボトルネック把握に向けた 作業時間集計の実用化研究

木村 眞実*
宮地 英生**

Abstract

This paper examines a method of aggregating work time. We developed a work extraction program based on “OpenPose,” a machine learning (human) posture estimation program. Then, the waveforms showing the features of the tasks were imported into the software for coding the video.

As a result, although the accuracy varied depending on the task, the waveforms indicating the feature values of the task could be imported into ELAN, enabling the accurate tabulation of the work time in a short time.

Keywords : work time, ELAN, OpenPose, site improvement, recycling industry

1. はじめに

生産工程のボトルネックを把握して工程改善を行うために、本稿では作業時間の集計方法を検討する。検討対象は使用済み品を再資源化する静脈産業、いわゆる一般に言うリサイクル業における解体・分別作業である。

* 長崎大学 経済学部

** 東京都市大学 メディア情報学部

本稿で検討する「作業時間」について先行研究では次のように指摘する。製造現場での時間概念には2つの側面があり、1つは作業者のフローからみた直接工の作業時間、もう1つはモノのフローからみたモノの時間（リードタイム）である（柘・上總2017）。従来の原価計算では直接工の作業時間に焦点が当てられてきたが、工程の改善効果を網羅的に把握するためにはリードタイム内での加工時間についても原価計算の対象とすべきである（柘・上總2016・2017）。

たとえば、マテリアルフローコスト会計（MFCAという）の発展的研究では時間概念がMFCAの限界を補完する。MFCAとは、工程内を物量情報と金額情報で見える化する原価計算の一手法であり、工程の改善箇所の特定に役立つデータを提供する。しかし、MFCAで計算されるシステムコスト、つまり加工費については、材料の重量比によって、製品（正の製品）と廃棄物（負の製品）に配賦するため、システムコストのデータ自体には意味はない。つまり、MFCAで計算される加工費については、労働生産性や設備生産性に関するムダの顕在化を企図していないといえる（飛田ら2013）。そこで、先行研究では、MFCAにTOC（制約理論）を連携させて、作業時間当たりの工程完了品数が少ない作業をボトルネックとして抽出する。TOCにおける時間概念がMFCAを補完し、MFCAでは投入材料の物量削減を、TOCでは作業時間の短縮化を行うことで、コスト削減効果を導き出す（飛田ら2013,70）。

従来、会計学では、産業のうち、原材料から製品を製造する「製造業」を対象としてきた。しかし、使用済み品が資源として循環すると仮定した場合、産業は、原材料から製品を製造する製造業（動脈産業）と、使用済み品を再資源化する製造業（静脈産業）からなる（木村2015）。本稿では後者の静脈産業を対象とする。

動脈産業と静脈産業とでは、工程に投入される「物質形状」と「生産の視点」が異なる。動脈産業では一般に原料を組み立てて製品を製造するが、静

脈産業では製品を解体・分別して製品を製造する。投入される物質形状と生産の視点が異なるという違いは、上述の「製造現場での時間概念」(柘・上総2017)の違いを生むと考えられる。

これまで、静脈産業のうち使用済み品から中古部品や鉄・非鉄等の資源を回収・分別する「解体業」では、使用済み品を再資源化する工程(生産工程という)について実証試験が行われてきた。たとえば、従来は廃棄処分されてきた自動車のガラスをリサイクルする新たな生産工程の構築(マテック2015)や、短時間での回収方法の検討(三菱UFJリサーチ&コンサルティング2016)である。しかし、工程改善に向けた作業時間の把握・分析、および解体業者・静脈産業の製造現場での「作業時間」の概念の検討は、筆者の知る限りでは行われていない。

本稿では、静脈産業のうち解体業を対象として、作業時間の集計方法を検討する。なお、本稿の考察を、さらなる時間集計の実用化研究と静脈産業における作業時間の概念の研究につなげたい。

2. 工程改善の先行研究

図1はMFCAの計算構造を示す。原材料原費1,000円、加工費700円、廃棄物処理費30円と仮定し、アウトプットされた製品と廃棄物に配賦する。原材料費1,000円は、製品と廃棄物の重量比(製品90kg, 廃棄物10kg)で製品900円、廃棄物100円と配賦される。また、加工費700円についても、製品と廃棄物の重量比(製品90kg, 廃棄物10kg)で製品630円、廃棄物70円と配賦される。集計すると、製品(90kg)の金額は1,530円、廃棄物(10kg)の金額は廃棄物処理費30円を加

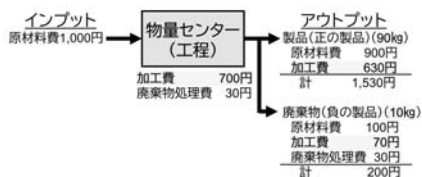


図1 MFCAの計算構造

出所: 木村(2015)より作成。

算した200円である。

つまり、MFCAでは加工費は、単に、製品と廃棄物の重量比（製品90kg、廃棄物10kg）で製品630円、廃棄物70円と配賦したのみである。したがって、MFCAでは、加工費に関してはボトルネックの見える化と課題解決にはつながらない。そこで、MFCA&TOC（Theory of Constraints：制約理論）によって、加工費のムダを意味する時間的なボトルネックを見える化し、そのボトルネックを解決することが考えられる（飛田ら2013）。

MFCAで課題となる点は、上述に加えて、「機会損失額が集計できない」という点がある。たとえば、作業にかかる工程改善が進めば、変動費の低減として現れる。工程改善によって、直接作業時間が減少することは、加工費（直接労務費）の減少につながり、その結果、原価低減額として示すことが出来る。しかし、多くの日本企業の場合には正規従業員の賃金は固定費であるため、改善効果を原価低減額として測定できない。そこで、現場改善会計では、原価低減額として測定できない改善効果相当分を「機会損失額」として認識する（柘・上總2016）。

現場改善会計における機会損失額の集計は、MFCAが抱える経営者の意思決定に関しての課題への解決策となる。たとえば、投入コストを下げるための行動と、収益を上げるための行動を比較すると、経営者は、後者の、将来の成長を優先して収益向上のための手段を採用する傾向が強い（國部2007, 54）。つまり、MFCAでは将来の収益機会を逸するコスト（機会損失額）を集計できないため、収益機会の提案と比べて、MFCAから提案された改善策を選択する意思決定は行われ難い。そこで、「機会損失額の集計」を行うことによって、MFCAが抱える経営意思決定に関しての課題が解決できる。

上述のように、MFCAは、物量情報と金額情報を示すことで工程の改善に資する情報を提供するが、加工費のボトルネックの把握を企図していない。また、工程改善に向けた経営意思決定に役立つ情報（機会損失額）を提

供できない。そこで、作業時間の集計を行い加工費のボトルネックを明示することが求められる。その結果、MFCAを補完する現場改善情報が経営意思決定情報として提供される。では、どのように作業時間を集計するのか、できるのか、である。

3. 作業集計

3.1 作業集計方法の検討

解体業を対象としたMFCAを用いた工程改善の研究では、物量センター（工程内でデータを収集する作業をいう）で物量情報と時間情報を集計し、工程の改善個所を特定してきた（木村2015）。集計する情報のうち、作業時間については動画を撮影し、動画の観察者が作業時間を集計していた。

図2は2019年12月に作業動画を観察した際の資料である。個々の作業について、作業者の移動と破碎を、観察者が手作業でカウントし、カウントした作業時間を元動画に表示させている。



図2 動画観察による時間集計

出所：長崎大学_原価計算・管理会計システム研究室（木村研究室）

従来の「動画観察による時間集計方法」では、作業時間の集計に多くの時間を要する、また、観察者が複数人の場合には作業定義と共通認識のための教育時間が必要となる。

そこで、本研究では、動画に作業のアノテーション（注釈という）を付けることができるEUDICO Linguistic Annotator (ELAN)を使用して作業分析を行う。本ソフトウェアは無料で公開されており、誰でも利用することができる。

アノテーションでは、一つ一つの出来事へあらかじめ定義しておいた分類

に従って簡単な記号を付けていくことを「コーディング」と言う(細馬・菊池2019)。コーディングの前に、観察者(作業をコーディングする者をいう)が、作業名、作業の内容を定義し、コード付けをしておく。そして、観察者は作業動画を見て、当該作業がどのコードなのかをコーディングしていく。

コーディング終了後には、コード別での時間集計結果をデータでアウトプットできる。

図3は、実際のELANの分析画面である。左上に分析する動画が読み込まれており、その下側に「作業内容」や「使用工具」等の層を作成し、動画に注釈をつけている。



図3 コーディングによる時間集計

出所：長崎大学_原価計算・管理会計システム研究室(木村研究室)

「コーディングによる時間集計」では、比較的、機械的に作業のコード付けが出来る。また、コード別での時間集計結果が容易にでき、観察者によるコード付け箇所が適切であるかどうかの再検証が可能である。

しかし、やはり、動画を見て行う作業であり、前述した従来からの「動画観察による時間集計」と同様の作業負荷と、作業の見落としが生じてしまう。

そこで、本研究では、「OpenPose」を利用して作業内容の推定を行い、ELANにOpenPoseで作成したデータを取り込むことで作業分析の効率化を試みる。

3.2 OpenPoseの活用

本研究で対象とする動画は、使用済み品のエアコンの室外機からフロンガスを抜く作業である。この一連の作業を大まかに分けると、「チェーンホストを使用して室外機置き場から作業台に移動させる」→「プラスチックのカバーを外す」→「フロン回収バルブにフロンホースを繋ぐ」→「ソケット



写真1 対象作業

出所：長崎大学_原価計算・管理会計システム研究室（木村研究室）

注：左）チェーンホイストを用いた移動作業，

中）ソケットを用いたバルブ開栓作業，

右）移動作業．

レンチを使用してバルブを開ける」→「室外機を移動させる」である。写真1は分析対象の作業を示す。

この作業のうち、一連の作業の始めに行われるチェーンホイストを使用した室外機の移動（写真1-左）と、一連の作業の最後に行われる室外機の移動（写真1-右）を検知することができれば、一連の作業が何サイクル繰り返されているのかを把握することができ、分析作業の効率化になるのではないかと考える。

そこで、これらの作業抽出プログラムを開発（Miyokawa et al.2022）し、プログラムによる作業の探知について評価を行う。本研究では、世界的に学習が蓄積されている「機械学習による（人の）姿勢推定プログラム」を用いる。これにより動画から首、肩、肘、鼻、手首など、人間の25か所のキーポイントの画像中の座標（X、Y）を推定する。本研究では姿勢推定プログラムの「Open Pose」を利用した。

筆者らは、まず、異常な腕の長さをチェックする機能を開発した。図4は、Open Poseで推定したキーポイントをラインで結んだ



図4 スケルトンデータ

出所：東京都市大学_宮地研究室

図を画像に重ね合わせて表示した例である。また、図5-左は、解体工程を対象として、キーポイント（図5-右）をラインで結んだ図を、画像に合わせたものである。きれいに関節が取得できているように見える。しかし、図5-左のスケルトンをじっくり見ると、しばしば腕の関節を取り違えることがある。そこで、プログラムへ異常な長さの腕などをチェックする機能を追加した。



図5 スケルトン化のトライ

出所：東京都市大学_宮地研究室

次に、特徴量に時間要素を加えて、作業内容を推定するプログラムを開発した。例えば、フロン回収バルブにフロンホースを繋ぐ作業では、他の作業と比較すると長い時間、フロン回収装置の方向（右側）を作業者が向いた状態が続く、さらに、ホース接続のために右手を上げ下げする状態がある。そこで、一瞬右手を上げたときと、ホース接続作業のために右手を上げた場合を区別するために、右手を上下させる検定時間を経験的に決定した。



図6 人物特定プログラムの開発

出所：東京都市大学_宮地研究室

さらに、同一人物判定機能を開発した。Open Pose自体には、同一人物か判断する機能はついていない。図6-左に示すように、Open Poseで検出した作業者は3人であるが、Open Poseでは、動画を画像に分割し、その画像ごとに人を検出するため、次の画像（図6-右）では同一人物かどうかの判断ができない。そこで、作業抽出プログラムでは、一定時間の中で同一人物かどうかを判定する

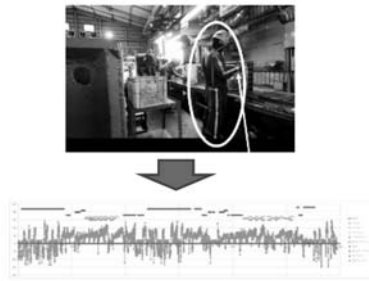


図7 特徴的な波形の検討

出所：東京都市大学_宮地研究室

機能を実装した。これにより、特定の作業者の動きを検出することが可能となった。

また、特徴的な波形を抽出するプログラムを開発した。まず、着目する人（メイン作業員）の部位を決定する。たとえば、腕、腰がある。着目した部位（座標）の動きを時系列にグラフに表示すると波形データになる。図7に示すように、作業員の特定の動き（例：作業員の右手に着目）に着目して、動画と波形データを見比べて、作業と特徴的な波形を見つける。そして、作業員の特定の動きが波形として補足できる条件（例：作業員の右手に着目すると一定の波がみられる）から、特定の作業を検出するプログラムを開発した。

さらに、図8に示すように、検出した作業の時間を矩形波として出力し、音声波形にするプログラムを開発した。これより、コーディングソフト（ELAN）へ波形を取り込めることが可能となった。

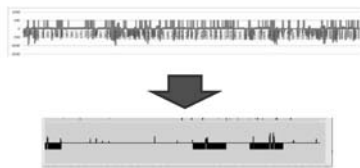


図8 波形から矩形波への変換

出所：東京都市大学_宮地研究室

3.3 ELANによる作業時間集計

作業抽出プログラムから作成した波形をELANへ取り込み、作業のコーディングを試行した。図9は「ホイス作業」の波形で、図10は「移動作業」の波形である。枠の箇所が当該作業の特徴量を示す。

そして、図11は、一連の作業の波形と、ホイス作業の波形をELANへ統合した画面の一部である。

ELANにおいて、一連の作業の始

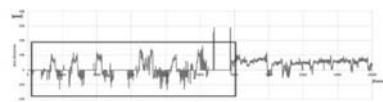


図9 ホイス作業の波形

出所：東京都市大学_宮地研究室

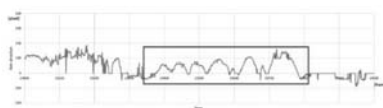


図10 移動作業の波形

出所：東京都市大学_宮地研究室

めである「ホイスト作業」と終わりである「移動作業」が波形で把握可能となることで、一連の作業が何サイクル繰り返されているのか、短時間かつ正確に補足することが可能となる。

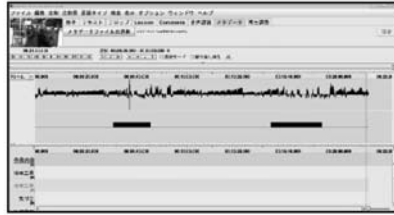


図11 ELANでの波形表示

出所：長崎大学_原価計算・管理会計システム研究室（木村研究室）

3.4 作業抽出プログラムの精度

作業抽出プログラムの精度評価、つまり波形が作業の特徴量を示しているのかを、一連の作業の開始である「ホイスト作業」、作業中盤の「ソケット作業」、および最終作業である「移動作業」について行った。

評価対象とした動画は5本である。以下の表1、表2、表3では、動画A, B, C, D, Eとしている。なお、5本の動画は、それぞれ長さが異なる。また、評価対象の3つの作業のうち、一部の作業のみの動画もある。

表1、表2の「動画番号：区分」の欄のうち、「評価」とは、波形が示した当該作業の時間と、動画に映る当該作業の時間とを比較した、作業抽出プログラムの精度の評価結果である。また、「波形」とは作業抽出プログラムによる波形が示した当該作業の時間である。そして、「実際」とは精度評価者が確認した動画に映る当該作業の時間を示す。

また、表1、表2の「動画番号：区分」の欄に示した評価は、「○:正解」、「×:不正解」、「△:部分的に正解」とした。「○:正解」では、作業抽出プログラムが示す作業時間が、実際の作業時間を包含、または作業抽出プログラムが判断した作業時間が実際の作業時間と少しでも重なっている。「×:不正解」では、作業抽出プログラムが作業を見逃し、または作業抽出プログラムが作業時間と判断したが実際の作業時間ではない。そして、「△:部分的に正解」では、実際は一連の作業であるが、作業抽出プログラムが2回の作業であると判断している等、正解とも不正解との判断が難しい。

表3の移動作業については、特徴量だけの抽出が難しい。そのため作業抽出プログラムでは、ELANでのコーディング作業で見逃しを探す二度手間を避けるため、移動作業を見逃さないパラメータ設定とした。評価は他の作業と異なり「正解」「不正解」で判定した。

まず、ホイスト作業についてである。全体で正解は6，不正解は4，部分

表1 ホイスト作業

動画番号： 区分	作業1回目	作業2回目	作業3回目	作業4回目	作業5回目
A：評価	○	—	—	—	—
A：波形	1分39秒976- 3分13秒605	—	—	—	—
A：実際	0分45秒499- 2分13秒833	—	—	—	—
B：評価	△	△	—	—	—
B：波形	1分39秒967- 4分1秒301	4分5秒595- 4分27秒169	—	—	—
B：実際	2分57秒5- 4分24秒000	—	—	—	—
C：評価	×（見逃し）	×	○	○	○
C：波形	—	2分46秒400- 4分5秒800	9分51秒000- 11分39秒600	9分51秒000- 11分39秒600	20分56秒800- 22分13秒200
C：実際	0分17秒- 1分50秒800	2分13秒800- 2分45秒800	8分18秒625- 10分39秒125	11分10秒500- 11分18秒000	20分14秒500- 21分40秒500
D：評価	×（見逃し）	○	×（見逃し）	○	—
D：波形	—	5分09秒165- 7分35秒499	—	15分33秒665- 18分53秒456	—
D：実際	0分05秒166- 0分15秒499	6分10秒000- 8分04秒000	8分31秒665- 8分52秒999	16分51秒750- 19分38秒500	—

出所：Yamane et al.(2022) を一部修正・加筆。

表2 ソケット作業

動画番号： 区分	作業1回目	作業2回目	作業3回目
A：評価	○	—	—
A：波形	2分29秒5- 8分3秒05	—	—
A：実際	4分10秒5- 5分45秒5	—	—
B：評価	○	—	—
B：波形	4分30秒094- 8分02秒461	—	—
B：実際	5分44秒833- 6分44秒666	—	—
C：評価	○	△	△
C：波形	4分12秒800- 6分11秒800	14分19秒000- 15分45秒800	16分06秒200- 17分06秒200
C：実際	4分25秒250- 6分11秒000	14分22秒750- 16分59秒500	—
D：評価	○	○	—
D：波形	2分33秒400- 4分34秒200	11分20秒600- 13分45秒800	—
D：実際	2分48秒500- 4分31秒000	11分29秒200- 13分41秒200	—
E：評価	○	—	—
E：波形	0分10秒954- 2分35秒847	—	—
E：実際	0分26秒499- 2分32秒022	—	—

出所：Yamane et al.(2022) を一部修正・加筆。

的に正解は2である。不正解の箇所であっても、作業抽出プログラムが、もう少しが長い作業時間を指定していれば正解という箇所もあり、正答率が高いと言える。

ソケット作業についてである。全体で正解は6，不正解は無く，部分的に

表3 移動作業

動画番号	正解の数	不正解の数
A	1	26
B	4	26
C	4	67
D	5	89
E	1	20

出所：Yamane et al.(2022) を一部修正・加筆。

正解は2であり、波形データで示されたほとんどが正解であり正答率は非常に高い。

そして、移動作業については、正解は15、不正解は228であり、他と比べて正答率は低いという結果である。上述したように作業抽出プログラムでは見逃しを少なくするためのパラメータ設定としたことが影響している。

4. おわりに

生産工程のボトルネックを把握して工程改善を行うために、本稿では作業時間の集計方法を検討した。従来、作業時間の集計に際しては、動画観察による時間集計を行っていた。しかし、分析に時間がかかる点、集計者による人為的な集計ミスが課題であった。

そこで、機械学習による（人の）姿勢推定プログラムの「OpenPose」をベースに作業抽出プログラムを開発して作業内容の推定を行い、作業の特徴量を示す波形を、動画をコーディングするソフトウェアへ取り込めるようにした。その結果、作業によっては精度のバラツキがあるものの、ELANに作業の特徴量を示す波形を取り込むことで、作業時間集計を短時間で正確に行えるようになった。

次の研究課題は、対象製品を他の使用済み品とすること、対象人数を複数

人とする事、対象作業を重機作業とすることがある。また、理論の構築に向けて、実用化研究での知見から「静脈産業」における作業時間の概念を検討したい。

謝辞：本研究課題はJST（課題番号JPMJTM20DC）を受けている。

参考文献

- 木村真実（2015）『静脈産業とマテリアルフローコスト会計』白桃書房。
- 國部克彦（2007）「マテリアルフローコスト会計の継続的導入に向けての課題と対応」『国民経済雑誌』第196巻第5号，pp. 47-61.
- 飛田甲次郎，中嶋道靖，木村麻子（2013）「全体最適化に資するMFCAの拡張－MFCAとTOCの相互補完性－」『原価計算研究』第37巻第1号，pp. 64-75.
- 柗紫乃・上總康行（2016）「生産現場の改善と原価計算－改善効果の見える化－」『原価計算研究』第40巻第2号，pp. 72-86.
- 柗紫乃・上總康行（2017）「製造現場における改善効果測定と2種類の時間概念」『原価計算研究』第41巻第1号，pp. 76-88.
- 細馬宏道・菊池浩平編（2019）『ELAN入門－言語学・行動学からメディア研究まで』ひつじ書房。
- 株式会社マテック（2015）『低炭素型3R技術・システム実証事業（自動車のガラスリサイクルの推進事業）報告書』。
- 三菱UFJリサーチ&コンサルティング（2016）『平成27年度低炭素型3R技術・システム実証事業（自動車リサイクルの全体最適化を念頭においた解体プロセスの高度化実証事業）報告書』。
- Takumi Yamane, Mami Kimura, Minagi Miyokawa, Koshiro Murakami, Hideo Miyachi（2022）Process Visualization and Verification of Improvement Methods and Effects, Proceedings of 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics AROB 27th 2022（2022年1月）。
- Minagi Miyokawa, Mami Kimura, Takumi Yamane, Koshiro Murakami, Hideo Miyachi（2022）A Study on Motion Analysis of Disassembly Work of Home Appliances Using Arm Posture Information Obtained by Openpose, Proceedings of 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics AROB 27th 2022（2022年1月）。