

作業時間から工程・時限・反復効果を分離する  
統計モデルの研究  
－製造ラインの改善に向けて－

博士学位論文

2014 年 3 月

総合研究大学院大学  
複合科学研究科 統計科学専攻  
博士後期課程

泉 陽介



## 目次

1	はじめに.....	5
1.1	工場の製造現場について.....	7
1.1.1	製造と生産.....	7
1.1.2	作業と動作.....	7
1.1.3	流し作業の製造.....	8
1.1.4	製造ラインの流し作業.....	8
1.1.5	製造における時間.....	9
1.1.6	正味の作業時間.....	10
1.2	分析データ事例.....	10
1.2.1	データの種類.....	10
1.2.2	データから得られる情報.....	10
1.2.3	様々な設計.....	12
1.3	インダストリアル・エンジニアリング.....	13
1.3.1	インダストリアル・エンジニアリングの目的と歴史.....	13
1.3.2	時間研究（Time Study）.....	13
1.3.3	動作研究（Motion Study）.....	14
1.3.4	稼働研究（Operation Study）.....	15
2	問題提起.....	17
2.1	時間研究の問題点.....	17
2.1.1	工程に関する先行研究.....	17
2.1.2	疲労に関する先行研究.....	17
2.1.3	習熟に関する先行研究.....	18
2.2	先行研究のまとめ.....	19
2.2.1	時間研究に関する先行研究の問題点のまとめ.....	19
2.2.2	動作研究に関する先行研究の問題点のまとめ.....	19
2.3	本研究の目的.....	20
2.3.1	本研究のための指針.....	20
2.3.2	本研究の目的.....	21
3	識別問題への対応と作業時間モデル.....	22
3.1	識別問題とは.....	22
3.2	正味作業時間を用いた分析が少ない理由.....	23
3.3	識別問題に対応できると何が分かるか.....	23
3.4	一日作業時間モデル.....	24
3.4.1	一日作業時間の変動.....	24
3.4.2	一日作業時間モデル.....	25
3.4.3	一日作業時間モデルの尤度関数.....	26
3.4.4	識別問題の源泉.....	27

3.4.5	一次階差の 2 乗和の条件式 .....	29
3.4.6	一日のベイズ型作業時間モデル .....	30
4	一日作業時間の計測と分析 .....	32
4.1	3 社の一日作業時間モデルの分析 .....	32
4.1.1	3 社の一日作業時間の計測 .....	32
4.1.2	3 社の一日作業時間の分析と結果考察 .....	37
4.2	組立メーカー D の一日作業時間の分析 .....	44
4.2.1	組立メーカー D の一日作業時間の計測 .....	44
4.2.2	組立メーカー D の一日作業時間の分析と結果考察 .....	48
5	一日作業時間モデルの分析方法の評価 .....	58
5.1	先行研究の分析方法との比較による評価 .....	58
5.2	シミュレーションによる最適モデルの評価 .....	61
5.2.1	地域工芸メーカー A のシミュレーション .....	62
5.2.2	精密機器メーカー B のシミュレーション .....	65
5.2.3	自動車関連メーカー C のシミュレーション .....	68
5.2.4	組立メーカー D の改善策実行前のシミュレーション .....	71
5.2.5	組立メーカー D の改善策実行直後のシミュレーション .....	74
5.2.6	組立メーカー D の改善策実行 2 週間後のシミュレーション .....	77
6	2 時点作業時間の作業時間モデルと分析結果 .....	80
6.1	2 時点の作業時間モデル .....	80
6.1.1	低減効果を含んだ 2 時点の作業時間モデル .....	80
6.1.2	2 時点のベイズ型作業時間モデル .....	83
6.2	2 時点作業時間の分析と考察 .....	84
6.2.1	改善策実行前後の分析と結果考察 .....	84
6.2.2	改善策実行直後と 2 週間後の分析と結果考察 .....	90
6.3	本章の注 .....	96
7	おわりに .....	97
7.1	本研究の目的 .....	97
7.2	本研究の成果 .....	98
7.2.1	一日の作業時間の分析方法の開発と分析 .....	98
7.2.2	先行研究の分析方法との比較と最適モデルの評価 .....	99
7.2.3	改善策実施前後の分析方法の開発と分析 .....	100
7.3	実際の改善活動で行う分析方法 .....	101
7.3.1	本分析を含めた改善活動 .....	101
7.3.2	計測・分析過多にならない改善活動 .....	101
7.4	今後の研究 .....	102
7.5	参考文献 .....	103
7.5.1	1 章の参考文献 .....	103
7.5.2	2 章の参考文献 .....	103

	7.5.3	3, 4 章の参考文献 .....	105
8		付録 .....	106
	8.1	製造工程について .....	106
	8.2	イノベーション .....	107
	8.2.1	ラディカル・イノベーションについて .....	107
	8.2.2	インクリメンタル・イノベーションについて .....	107
	8.3	動作研究と稼働研究 .....	107
	8.3.1	動作研究について .....	107
	8.3.2	稼働研究について .....	111
	8.3.3	作業改善の方法について .....	113
	8.4	先行研究の調査 .....	116
	8.4.1	時間研究 .....	116
	8.4.2	動作研究 .....	122
9		謝辞 .....	124



# 1 はじめに

工場現場では、データを系統的・継続的に収集し、収集したデータを分析して、その結果を踏まえて製造事業の維持継続を目的とした様々な改善の意思決定が行われている。意思決定の目的には、製造能力向上、プロセス管理技術の開発、技能継承、作業技術者安全、環境法令の遵守などが挙げられる。用いられるデータの種類は、正味作業時間、材料ロス率（歩留まり率）、作業ミスの回数、部品の紛失数、製造ライン全体の製造機械稼働時間、部品/成果物の在庫量、使用電気量などがあり、工場では改善の意思決定を行うために、これらのデータを日常的に工程×時限形式で得ている。

工程×時限形式のデータには工程・時限そして反復効果が混在すると考えられるが、識別問題が存在し、これらの効果を分離することが難しい。もし工程・時限・反復効果を分離することができれば、各効果の変動する様子を捉えられ、不均衡なラインバランス、作業継続による疲労、作業の繰り返しによる習熟など、3効果の挙動を引き起こす問題要因を見つけ出す助けになる。すなわち工程・時限・反復効果の様子を捉えることで、改善のための重要な情報を得ることが出来る。さらに改善策を実行した後においては、改善策を実行する前の工程・時限・反復効果の変動と比較して改善の成果を捉えることが出来る。

一方で作業中の問題を探す方法として、動作観察もある。動作観察は細かな手や足の動作、歩き方などを観察し要素動作の問題の要因を直接見つけ出す方法である。実際に製造ラインで動作観察をすると、観測者の目視により様々な問題個所を見つけ出すことができる反面、動作観察を一日続けることは観察者の作業量やコスト面から現実的でない。現実には、製造ラインに携わる作業技術者は一日作業をしており、作業を継続することでポカミスなど作業上の問題が発生することも少なくない。このようなことから、実際の改善活動で要求される分析方法は動作研究の分析方法と乖離があり、経営者や工場管理者は改善策を立案するための分析方法について問題を抱えている。

製造工場での作業改善は、費用対成果、製造作業への負荷など、コストや時間、計測中の製造作業への影響を考慮しながら改善計画を行い、改善の成果を出さなければならない。もし日常的に収集しているデータを短時間で分析し結果を得る分析方法があれば、工場現場でその方法を日常的に使用でき、作業改善の手助けになるであろう。ただし識別問題を克服した方法でなければ、3効果の挙動を引き起こす問題要因を見つけることが難しい。

以上から本研究では、日常的に収集する工程×時限形式のデータから識別問題に対応しかつ恣意性の無い分析結果を導く分析手法を開発すること、さらに工場で計測した実際の正味作業時間を開発した分析方法を適用し有効性を確認することを目的とした。具体的には、識別問題に対応するベイズ型作業時間モデルを形成し、工程×時限形式のデータから工程・時限・反復効果を分離して各効果の変動する様子を捉える方法を開発し、実際の正味作業時間を分析して各効果の変動する様子から製造ラインの問題点を明らかにすることを行った。

1 章では導入として、工場の製造現場・製造ライン・流し工程、およびそこで得られているデータの種類・形式などについて説明をしている。

2 章では、先行研究の問題提起を行い、本論文の研究目的を述べている。

3 章では、工程×時限形式のデータが年齢×調査時点形式のデータと同様の構造をもつことを指摘、そこに潜む識別問題について解説し、Age-Period-Cohort モデルを援用した「1 日（1 時点）の作業時間モデル（Manufacturing Process Period Repetition、MPR モデル）」について説明をしている。

4 章では、地域工芸メーカ A、精密機器メーカ B、自動車関連メーカ C、組立メーカ D で実際に計測した正味作業時間を MPR モデルで分析した結果を示し、工程・時限・反復効果からそれぞれに対する手待ち・疲労・習熟の様子を表している。さらに、分析結果に基づく改善策の提案を行っている。

5 章では、先行研究との分析方法の比較を行い、作業を継続することで段々と作業の捗り具合が悪くなっていく様子（時限効果）や作業を繰り返すことで段々と作業の捗り具合が良くなっていく様子（反復効果）など、本研究方法の特長を挙げている。さらに乱数シミュレーションを行って、選択された最適モデルの各効果の変動する幅や様子が再現されているか確かめている。

6 章では、MPR モデルを拡張し、低減（After Improvement）効果も付加した「改善策実行前後の作業時間モデル（MPR-AM'P'R' モデル）」の説明をしている。次に、内一社の改善実行前・直後／改善策実行直後・改善 2 週間後のデータをそれぞれ 2 時点の MPR-AM'P'R' モデルで分析した結果を与え、改善の効果として疲労の進行の抑制を検証している。

7 章は、まとめである。

8 章は、付録である。製造工程の設計方針・改善のための研究方法等、先行研究のレビューについて整理している。



## 1.1 工場の製造現場について

### 1.1.1 製造と生産

製造とは、製品の設計図や製造仕様書に従い、市場/顧客へ販売する製品を実際に製作する過程や行為をいう。

生産とは、市場調査、商品企画、R&D、製品設計、製造プロセス設計、コスト調達、製造、流通、販売、ユーザーからの意見収集など、川上から川下までのモノ、金・情報などの営業活動の流れをいい、狭義の意味では製造のみを表してはいない。

### 1.1.2 作業と動作

作業と動作[1]は、大きく最小単位が異なる。以下の図 1 で説明する。

図より作業および動作は単位・要素に分かれており、要素動作を組み合わせる単位動作をつくり、単位動作を組み合わせる要素作業をつくる。さらに要素作業を組み合わせる単位作業をつくる。これらの順で作業の設計を行うことが多い。

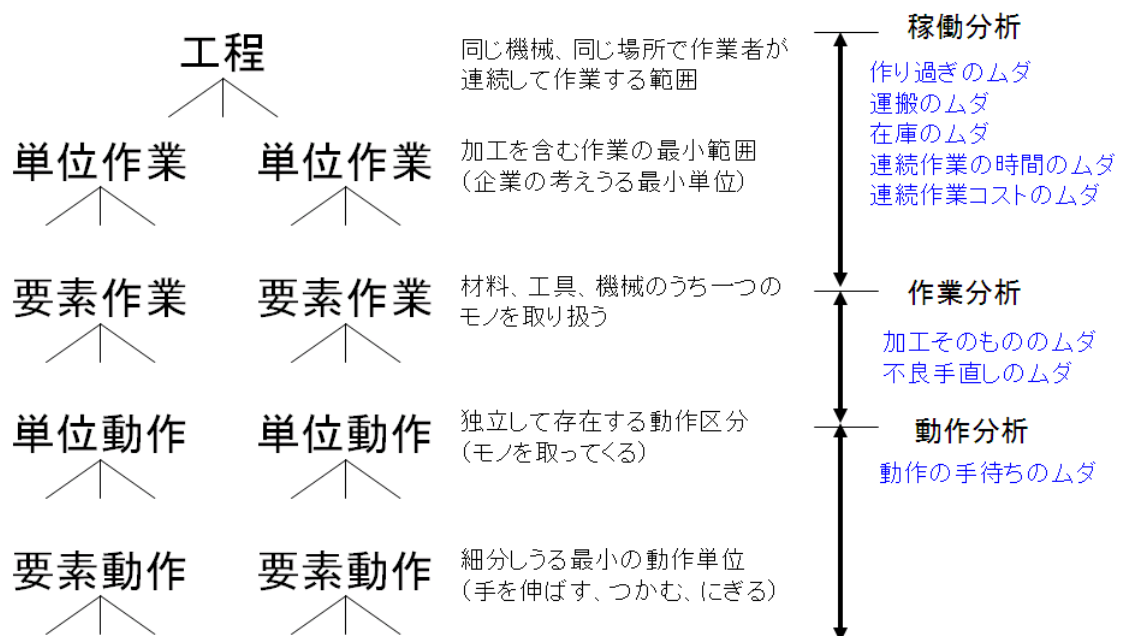


図 1 作業と動作

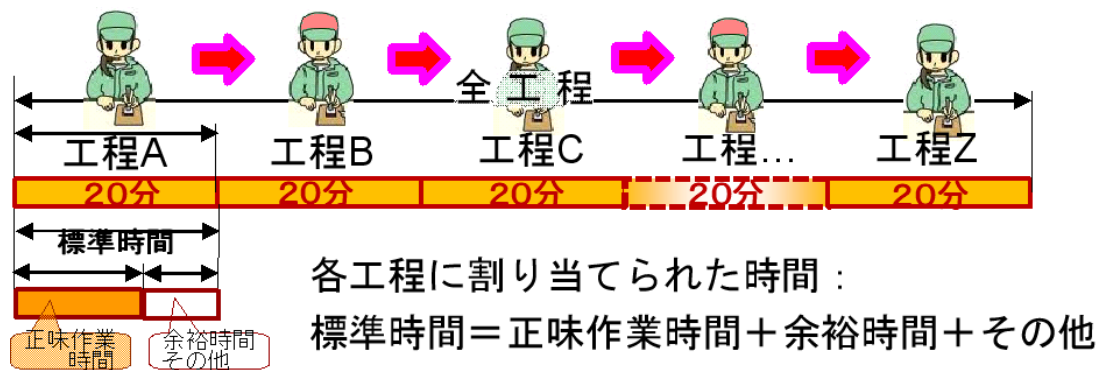


図 2 標準時間と正味作業時間

### 1.1.3 流し作業の製造

物理的なパーテーションに分かれたいくつかの工程の間を、前工程から来る成果物を受け取り決められた時間内に加工し、加工した成果物を次の工程に引き渡す様子を一般的に流し作業（いわゆるコンベヤ式）の製造という。流す成果物の単位は、一個から複数個を単位としたロット単位のものがある。流し作業のイメージ図を、図 2 に示す。

### 1.1.4 製造ラインの流し作業

#### (a) 一個流し

一個流しは、部品の製造から組立に至るまで、お客様が必要とする単位である「一個ずつ」流す製造方法である([2], pp.119-131)。一個流しとロット製造方法と比較し、一個流しの特長を挙げる。

一つ目は、リードタイムが短いことである。ロット製造の場合は、1つの工程が終わるまで、次の工程は待たなければならない「工程待ち」が発生する。また運搬でも、ロットの最初の製品は、ロットがすべてを完了するまで、ロット待ちをしなければいけない。一個流しの場合是一个ずつ順番に製造するため、このような工程待ち、運搬待ちが発生しない。

二つ目は、不良が見つかった時点からさかのぼり不良の発生品を見つけやすく、ロット全体を再検査する時間やコストを必要としない。また不良ロットの成果物を全て捨てる必要が無いなど、一個流しは様々なロスを低減できる。また、突発的な故障が発生して製造が停滞すればその後の製造がすぐにできなくなるので、否応無しに即刻対応しなければならず、さらに製造ラインをいち早く再稼働した後に再発防止策を打たなければならない。予防技術や即対応技術が備わりやすくなる。

主に、競合他社が多く迅速に販売供給を行わなければならない製品、人命事故や火災等の販売リスクが高い製品の製造は、一個流しのコンベヤ式製造を採用することが多い。例えば、一度に同型の製品を多数製造する場合、また自動車や家電品など大型機器を製造する場合に一個流しが採用され易い。

次に、一個流しの製造ラインが成立するための条件を挙げる。

- 欠品がないことが確認済みであるとき
- 不良、手直し、手戻りがないことが確認済みであるとき
- 段取り替えが素早いことが確認済みであるとき
- 設備故障、いわゆるチョコ停（少しだけ製造を停止する事象が発生すること）が無いことが確認済みであるとき
- 作業時間の配分が良いことが確認済みであるとき
- 多工程持ちが出来るとき

これらが確認済みでないと、一個流しを採用しても手待ちが発生し、製造ラインの流れが止まるだけでなく、各工程間で成果物のダブツキが生じて、製造再開への管理が難しい状況に陥る可能性がある。

## (b) ロット流し

ロット流し([2], pp.31-32) はロット製造やダンゴ製造ともいわれ、各工程で数十個や数百個などの単位で成果物を製造し、次工程へ数個から数百個の成果物を引き渡して加工する製造方法である。一個流しと比較し、ロット流しの特長を挙げる。

ロット毎に工程の切り離しや足し合わせを行いやすい。また、中量多品種製造にも対応しやすい。主に、薬品、ネジなどの部品、携帯電話など機種が多いアセンブラ品、マスターバッチやコンパウンド品等素材の製造に向いている。一個に切り離せない製品や一個に切り離して製造をすることでコスト面や作業が煩雑になる場合は、ムリに一個流しをせずにロット製造を行う。

次に、ロット流し製造ラインが成立するための条件を挙げる。

- 段取り替えに時間が掛かる際にまとめ製造し、段替え回数を減らしたいとき
- 作業効率化とコスト削減のため、まとめて次工程へ成果物を運搬するとき
- 各要素作業が難しく、また細かな作業がたくさんあり、たくさんの作業技術者が各工程で製造しなければならないとき
- 品質検査を頻繁に行わなければならないとき

これらが確認済みでないと、ロット流しを採用しても各作業が煩雑になり、かえって非効率になる可能性がある。

## 1.1.5 製造における時間

製造において時間とは単に時の経過を示すものではなく、モノづくりの良し悪しを判断する重要なものさし([3], pp.17-25) である。時間を計測する理由を示す。

- 作業の改善を行い、作業を標準化する場合
- 新製品の量産能力評価を終え、商業製造に入る前に標準化の再設定を行う場合
- 作業の方法など設計・製造条件、標準時間を定期的・不定期で見直す場合
- 実際の作業と標準作業に大きな違いがある場合
- 新規設備導入により作業を再設定する場合
- 設定している標準時間に不都合な面があり、再設定する場合

### 1.1.6 正味の作業時間

複数工程のコンベヤ式製造ラインは、1単位あたりの標準時間が予め設定されている。標準時間は、コンベヤ式に進められる作業の最大作業時間である。正味の作業時間は、実際に作業に費やした作業時間である。余裕時間は、正味の作業時間の変動を吸収する役目を担う調整可能な時間であるが、定められた上限時間を持つ。その他の時間は、作業の準備等に用いられる時間である。標準時間は、正味の作業時間と余裕時間、その他の時間に分けられる。また、余裕時間と準備時間は予め設定されていることがほとんどであり、コスト対生産効率の面から製造メーカー各社はいかに正味作業時間を削減するべきか、日々改善活動行っている。

正味作業時間の変動が小さくなれば、正味の作業時間の変動を吸収する役目である余裕時間も小さくでき、ひいては標準時間も小さくできる。

## 1.2 分析データ事例

### 1.2.1 データの種類

工場で収集するデータは、正味の作業時間のみならず様々な種類がある。例えば作業ミスの回数、材料ロス（歩留まり）、機器の故障頻度、作業未達率、品質データ、成果物の不良率など工程×時限形式で得られるデータも多い。工場では、業種業態を問わず日常的にこれらのデータを収集している。

### 1.2.2 データから得られる情報

工場現場において日常的に収集するデータの中で、特に工場の改善に役立つデータを示す。

- 作業技術者の能力が未熟な場合、熟練者と比べると作業ミスの回数、材料ロス、正味作業時間などが嵩む。各人のデータを比較することで、相対的に能力のバラツキを観察している。
- 各工程の作業量がアンバランスな場合、ラインバランスが整っている場合と比べると作業未達率、正味作業時間などが嵩む。ラインバランス設計の達成状況を定期的に確認している。
- 各工程のメイン機械の状態が悪い場合、良い場合と比べると作業未達率、正味作業時間などが嵩む。作業が慣熟している同一作業者の作業状況を日にちで比較し、機械故障の予兆を察知している。
- 作業技術者の基礎体力が低いまた体調などが万全ではない場合、健康な作業技術者と比べると作業ミスの回数、材料ロス、正味作業時間などが嵩む。作業が慣熟している同一作業者の作業状況を日にちで比較し、病気や疲労過多の予兆を察知している。
- 作業技術者の視力や聴力が弱いまた補完機具が合わない場合、作業時に合う眼鏡や補聴器を備えた時と比べると作業ミスの回数、材料ロス、正味作業時間などが嵩む。特に精密機器の手作業工程では補完機具のミスマッチが品質に影響するので、定期的にデータを見て補完機具やその他作業環境に問題がないかチ

チェックをしている。

- 作業技術者が作業する環境が整っていない場合、健康な作業技術者と比べると作業ミスの回数、材料ロス、正味作業時間などが嵩む。特に細かな手作業工程では作業環境の悪さが品質に影響するので、定期的にデータを見て作業環境に問題がないかチェックをしている。
- 作業技術者が作業する場所や能力の不足にとまどいや不安を感じる場合、作業技術者が後々に場所や作業に慣れた場合と比べると作業ミスの回数、材料ロス、正味作業時間などが嵩む。特に作業に不慣れな技術者や若手技術者については、同一作業者の作業状況を日にちで比較し、習熟状況を相対的に確認している。

通常工場では、機械故障、停電など突然のアクシデントが無く安全に製造ラインを稼働できる状態においては、工程間のバラツキ、時間帯のバラツキ、ロット間のバラツキ、日にち間のバラツキに着目して、各工程の平均、各時限の平均、各ロットの平均、日にちの平均の変動を観察していることが多い。ただし工場現場で収集する工程×時限形式のデータには分析を困難にする識別問題があるので、労働管理の参考程度に計測している企業が多い。メーカ各社が主に収集しているデータの種類と活用目的を表 1 にまとめた。

表 1 計測データの活用先の表

データ種	活用目的
正味の製造数量	在庫管理
材料のロス率/量	材料コスト削減
作業技術者のミス回数	製造管理
正味の作業時間	製造管理
道具の紛失数	安全管理、品質管理
部品の紛失数	安全管理、品質管理
製造機械稼働時間	製造管理
粉塵量	作業技術者安全管理、公害対策
在庫量	在庫管理
使用電気量	製造管理

### 1.2.3 様々な設計

製造ライン機器の配置、作業順序、工場周辺への環境維持など、工場の設計は多くの種類がある。設計の目的は、出来るだけ材料/作業時間のロスを削減し潤滑に作業を進めるため、業務全体をパーテーション化して業務を分配したり、作業や材料を標準化とする等、また製造作業以外の設計([4], pp.91-110) もある。

#### (a) 作業設計

##### 1) 工程設計：

工程設計は、コンベヤ式の複数工程の場合は各工程への作業量の平等分配になるように設計する。大まかに作業量を各工程に分配した後、なるだけ作業量が均一に分配されるように前後の工程の作業量を見ながら微調整する。

##### 2) 時限設計：

時限設計は作業効率維持を目的とし、どの時間帯でどれくらいの休憩を挟むと作業効率を維持できるのか作業と休憩時間のバランスを設計する。しかし実際の製造現場では、休憩時間は労働基準法および習慣的に 10 時頃に 10 分程度、昼食時に 1 時間程度、15 時頃に 10 分程度の休憩を取っていることがほとんどである。

##### 3) 反復設計：

反復設計は、作業を経験することで失敗する回数が減少するなど作業時間の短縮化を目的とし、要素作業の順序などを設計することである。短期で完熟するよう製造の効率化を図りたいが、作業時間の短縮率は作業技術者各人の技能や体調等に依存しやすい。現実的には各人の能力を測り、その上で作業の順序を設計することは難しい。

##### 4) 動作設計：

動作設計は、加工物を掴む、運ぶ、置くなど動作の効率化を目的とし、効率的な動作の順序を設計することである。現在稼働している製造ラインを動作観察し、問題の原因を特定する研究事例は数多くある。観測時にはたくさんの観測者が長時間観察することが望ましいのであるが、現実的にはコストの面から観察時間を数分から数時間程度にとどめるなど、観察から問題の原因を特定することが難しいことが多い。また、動作の順序は人の嗜好や体力などに依存するので観察費用対効果が得られにくく、経営の判断としては観察費用を支払わないつまり動作観察を行う決断がなされないことが多い。従って一度動作設計を行った後は、工場現場では各人が自己裁量で度々動作再設計を行い動作の順序を改善していることがほとんどである。

#### (b) 他の設計：

他にも材料設計、環境設計、製品ラベルや製品袋など様々な設計対象がある。

## 1.3 インダストリアル・エンジニアリング

### 1.3.1 インダストリアル・エンジニアリングの目的と歴史

#### (a) インダストリアル・エンジニアリングの目的

経営工学の目的は、1 つは加工技術の向上、もう 1 つは管理技術の向上を図ることに大きく分けられる[1]-[4]。特に、管理の技術は体系化されてインダストリアル・エンジニアリング（以下；IE）と呼ばれるようになった。

経営工学の目的は以下 3 点である。

- (1) 良い製品〔品質管理の視点〕
- (2) 安いコスト〔原価管理の視点〕
- (3) 短い納期〔製造管理、作業管理の視点〕

である。

#### (b) IE の歴史

19 世紀末から 20 世紀初頭の米国は、急速な経済成長を続け、工業は西欧の水準に近づき、機械化による製造能力の向上が図られるようになった。しかし、作業技術者の作業効率化や作業の簡素化・標準化についてはその手法が明確にはなく、実際に作業を行う労働者各人が自己裁量で自身の作業を改善設計する程度の状態にあった。

作業の効率化や簡素化さらには標準化についての研究が 2 種類ある。ひとつはフレデリック・テラーの「時間研究 (Time Study)」であり、他方はギルブレスの「動作研究 (Motion Study)」である。これらは、19 世紀末から 20 世紀初頭の米国製造業の発展に貢献してきた。テラーの時間研究の技法は後に「作業計測の技法 (Work Measurement)」、ギルブレスの動作研究は動作改善の技法が後に「方法改善の技法 (Method Engineering)」と発展し、「作業計測の技法」と「方法改善の技法」は、現在の IE の基礎的な位置づけになっている。

### 1.3.2 時間研究 (Time Study)

時間研究とは、各工程の稼働時間や工程を細分化された動作の作業時間について効率性を観察して効率の悪いポイントを探し出す仕事やその仕事の成果のことを言う。

米国のミッドベール製鋼会社の現場職長であったフレデリック・テラーは、作業を作業技術者任せにしていた効率化・標準化の方法を改めて研究にまとめた。この研究は、1911 年に「科学的管理法」として発表された。科学的管理法の 4 原則として挙げられている項目は、次のとおりである。

- 作業の各要素について科学を導入し、従来のあて推量のやり方をやめる
- 科学的に作業技術者を選び、これを訓練し、教育し、かつ発展せしめる
- 科学の原理に合わせて、すべての仕事をやらせるように管理者は作業技術者と心から協力する
- 管理者と作業技術者の間に、仕事と責任が分担される

以上の 4 原則は、IE の進歩によって今日では必ずしも適切ではない。しかし当時の熟練者依存、慢性的な怠業、非科学的な経営の考え方に課題提起した研究成果であった。後続する研究者達がこの 4 原則を展開して時間研究や動作研究の手法を構築し、出来高払いの改善、スタッフ組織や原価計算制度を確立し、設備・工具、材料などの標準化を推進した。

### 1.3.3 動作研究（Motion Study）

動作研究とは、製造活動におけるすべての動作について、観察・分析を行い、そこから不必要な動作を取り除いたり、小さく楽にしてより効率的な作業方法に改善するための仕事やその成果のことを言う。

建築工事の職人であったギルブレスは、レンガ積みという一見単純に見える作業でも、職人によって作業の手順や動作に関して様々な方法があることに気付いた。職人による出来高の相違は、その人の作業のやり方、特に動作のムダに起因していることを発見し、独自の分野で動作研究を確立し、サーブリック（therblig：作業動作を 18 の最小単位にまとめたもの）分析やフィルム分析など改善技法を考案し、今日の動作標準法の基礎となっている。



### 1.3.4 稼働研究 (Operation Study)

日本において従来の IE を実践している代表例が自動車メーカーであるが、景気等で会社の経営環境がさらに厳しくなり、自動車メーカーに限らず素形材産業や他のセットメーカーも従来の IE を導入し、より複雑で多くのニーズに合わせるために多品種中量製造に対応しようとしている。しかし、「Q (Quality)」「C (Cost)」「D (Delivery)」「M (Motivation)」いわゆる QDCM、また製造の 4 要素 (4 M) である人 (Man)、設備 (Machine)、材料 (Material)、手法 (Method) いわゆる 4 M の改善だけでは多品種中量の製造対応が十分ではない。

近年では IT を駆使し、経営判断の迅速化、製造プロセスの開発から商業製造までの迅速化、全社的なコストダウン、サプライチェーン全体を見て歪箇所を探す、上長への報告作業の簡略化など製造工場も IT 化を進め、会社全体として生産活動全体の最適化に取り組むことができるようになってきた。

#### (a) 稼働研究の概要

時間研究や動作研究は、要素動作や単位動作を中心とした作業研究である。これに対し稼働研究は、稼働時間全体における作業技術者の稼働の様子を観察するための研究で、いわば製造ライン全体の改善といえる。

本研究は作業時間を分析するので時間の研究であるが、製造ライン全体の一日の作業時間を分析し工程・時限・反復効果の変動する様子を表すので、図 3 においては稼働研究に分類される。製造ライン全体を対象として、工程・時限・反復回数別に作業時間が変動する様子を明らかにする。

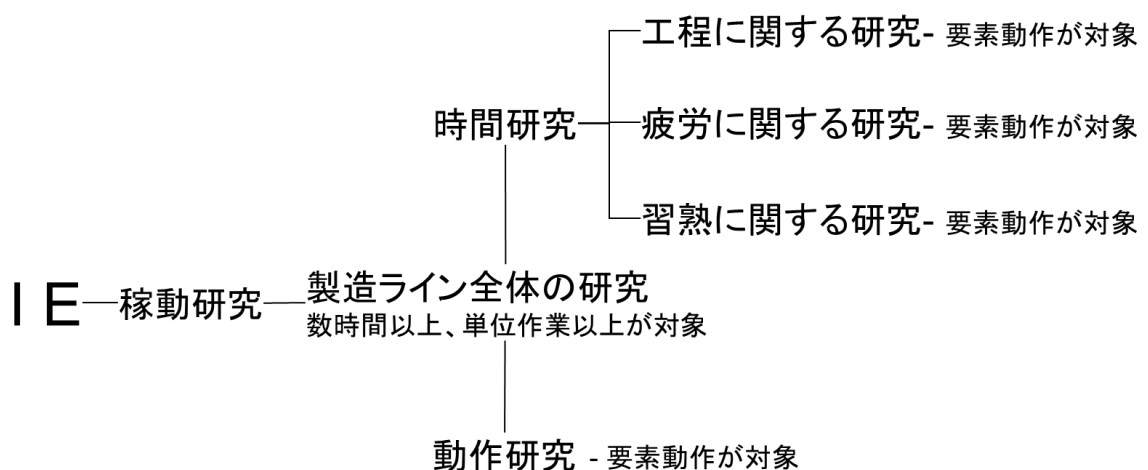


図 3 IE と本研究のポジション

## (b) 一日の稼働研究

作業内容や作業時間の標準化の見直しがされていない雑然とした複数工程の製造ラインに対してある一日の作業時間を計測・分析を行い、一日の作業時間が変動する様子を捉え作業改善を行う。一日の作業時間が変動する様子から、ラインバランスの不均衡、作業継続による疲労、反復作業による習熟について問題や課題を探して改善し、再度標準化を図る。

一日の稼働研究を行う主な目的は、製造ライン全体の製造コストの削減である。最初に、稼働研究で作業時間の短縮と安定化を図り、作業内容を見直す。次に、作業時間が安定したら余裕時間を短縮でき、続いて標準時間を短縮できる。最後に、作業内容や作業時間の再標準化を図り、製造ライン全体の工数の再見積りを行って製造コストの削減を行う。

## (c) 2 時点の稼働研究

改善策実行前の一日と改善策を実行直後の日について 2 時点の稼働研究を行う主な目的は、製造ライン全体の製造コストのさらなる削減である。

最初に、一日の稼働研究で作業内容や作業時間の再標準化を図り、製造ライン全体の工数の再見積りを行って製造コストの削減を行う。次に、改善策を実行する前後の 2 時点の稼働研究を行い、改善策を実行した成果を推定し、改善策を通常業務に取り入れるべきか、また改善策を改善するべきか、もしくは改善策を止めるべきか経営上の判断を行う。最後に、作業内容や作業時間の標準化を図り、製造ライン全体の工数の再見積りを行って製造コストのさらなる削減を行う。

改善活動は、2 時点の稼働研究を定期的に繰り返し行い、製造ライン全体の製造コスト削減をもたらす経営の安定化を図る活動である。さらにラインバランスの不均衡、作業継続による疲労、反復作業による習熟について問題や課題を取り除いて作業技術者が作業し易い環境にするため、定期的に行う改善活動でもある。

## 2 問題提起

本章は、先行研究[5]-[25]で用いられている計測方法や分析方法からその問題・課題を挙げ、問題・課題に対応する分析方法について検討する。

### 2.1 時間研究の問題点

#### 2.1.1 工程に関する先行研究

以下では、先行研究[5]-[11]の特徴や問題・課題を挙げる。

- 作業素人の学生のみを集めて、同じ技能レベルの作業者（学生）のみが作業を行う実験をしている。
- 単一工程・単純単調作業に限定した作業実験を行っており、短時間で慣熟できる作業を選んで行っている。
- 一つのモデルを取り上げるのみであり、複数のモデルを比較することがなされていない。
- モデルは効果の数が多く、実用的ではない。
- 収集すべきデータの種類が多い。
- 実際のデータを分析していない。
- 疲労に対する効果が無いモデルを設定している研究が多い。疲労に対する効果がある例は、恣意的に効果パラメタを設定するモデルである。どのように疲労に対する効果パラメタ値を決定し、分析しているのかわからない。
- 習熟に対する効果が無いモデルを設定している研究が多い。習熟に対する効果がある例は、恣意的に効果パラメタを設定するモデルである。どのように習熟に対する効果パラメタ値を決定し、分析しているのかわからない。

#### 2.1.2 疲労に関する先行研究

以下では、先行研究[12]-[18]の特徴や問題・課題を挙げる。

- 疲労は医学・生理学的に扱われている。
- 収集するデータは、フリッカー値（光のちらつきの臨界融合頻度）、作業時間に加えて心拍数、体温、眼球運動（瞬き）などであり、工場現場で作業技術者や製造管理者が簡単に収集できるデータではないものが多い。
- VDT など単一工程・単純単調作業に限定した作業実験を行っている。
- 作業素人の学生のみを集めて、同じ技能レベルの作業者（学生）のみが作業を行う実験をしている。
- 単一工程・単純単調作業に限定した作業実験を行っており、短時間で慣熟できる作業を選んで行っている。
- 主に精神的疲労の各要因を分離する分析をしているが、疲労は肉体的疲労と精神的疲労は混交した状態でデータとして表れるので、肉体的疲労を考慮されていない研究も多い。
- 習熟に対応する効果が無いモデルが多く、習熟に対応する効果がある先行研究は恣意的に効果パラメタを設定するモデルである。どのように習熟に対する効

果パラメタ値を決定し、分析しているのかわからない。

- 要素動作や単位動作ばかりを対象としておらず、正味作業時間を計測している研究もある。

### 2.1.3 習熟に関する先行研究

以下では、先行研究[19]-[25]の特徴や問題・課題を挙げる。

- 未熟者と熟練者の比較研究も多いが、各人は得意作業と不得意作業があるので工程作業の内容にも寄る。
- 作業素人の学生のみを集めて、同じ技能レベルの作業（学生）のみが作業を行う実験をしている。
- 単一工程・単純単調作業に限定した作業実験を行っており、短時間で慣熟できる作業を選んで行っている。
- 一つのモデルを取り上げるのみであり、複数のモデルを比較することがなされていない。
- モデルはパラメタが多く、実用的ではない。
- 疲労に対する効果が無いモデルがほとんどである。
- 習熟と疲労の関係を分析した研究がいくつかあるが、様々なデータを取得し比較している。ただし、分析結果から習熟と疲労の関係は明確に説明しておらず考察が無い。
- 作業を繰り返す中で、作業技術者が自ら要素作業の改善を図りながら進めている実験もある。
- モデルのシミュレーション研究が多い。
- モデルに必要とされるデータの中には専門的知識を有していないと取得できないデータが含まれており、実用的ではない。
- 恣意的に効果パラメタ値を設定しなければならないモデルを扱う研究がある。

以上、工程・時限・反復効果を中心に先行研究の特徴を挙げたが、次にこれらをまとめる。

## 2.2 先行研究のまとめ

### 2.2.1 時間研究に関する先行研究の問題点のまとめ

- 工程効果を推定したい場合、時限効果や反復効果を考慮していないモデルを扱っており、識別問題を認識しないまま分析している。他の効果を推定したい場合も同様である。
- 工程効果を推定したい場合、時限効果や習熟効果を考慮して、意図的に他の効果を抑制した実験を計画し、理想的なデータを収集する先行研究が多い。他の効果を推定したい場合も同様である。すなわち抑制したデータを収集し、識別問題の回避をしている。実際の製造ラインでは技能や年齢、体力や知力がバラバラの技能者が一緒に作業することがほとんどである。
- データを収集するコスト面や作業・通常業務への負荷を考えず、日常的に収集できないデータを扱う先行研究がある。
- モデルが複雑で、中には恣意的にパラメタ値を設定するモデルもあり、シミュレーション研究のためたくさんの効果を有するモデルを立てている先行研究もある。

従って、識別問題に取り組んだ先行研究はこれまでのところ無い。また、制約したデータを取得するなどデータの収集方法を工夫し、識別問題を回避する先行研究も散見される。

1970 年から 90 年代には学会投稿数も多かった時間研究が、近年はほとんど無い。その理由について、実際の製造現場で収集したデータを分析しても識別問題のために工程・時限・反復効果を分離できず、メーカーからの改善手法に関する期待と関心が薄れてしまっており、メーカーの分析ニーズに時間研究が応じられていないことが、最近の先行研究の減少要因の一つであると思われる。

### 2.2.2 動作研究に関する先行研究の問題点のまとめ

以下で、先行研究[26]-[32]の問題・課題をまとめる。

主にサーブリックの 18 動作を基準に観察しているが、特に繰り返し作業などは 18 動作の一部の動作のみ利用しているものが多い。直接観察は、10 分程度から長時間の観察でも 2 時間程度のみであり、継続作業の疲労や習熟の様子は観察からでは得られにくい。間接観察はビデオ撮影による観察であるが数時間程度の撮影であり、また局所的な作業の観察でもあり、録画からでは得られない情報については憶測で考察する論文が散見される。

特に動作研究は製造ラインの中の局所的な要素作業や単位動作の観察であるため、予め問題箇所を特定しておかないと製造ライン全体をたくさんの観察者が観察することになり、観察コストや通常業務負荷がかかる。

## 2.3 本研究の目的

### 2.3.1 本研究のための指針

これまでの時間研究や動作研究は、主に局所的な要素動作と単位動作を対象とし、複数工程から成る製造ライン全体を分析の対象としてこなかった。その理由は、問題の原因は要素動作や単位動作にあることが多いと考えられているようであるが、例えば設計上の仕事配分の違いが引き起こす製造ラインのアンバランスは要素動作や単位動作を改善したところで良いラインバランスになるわけではない。また、若手技能者の作業能力も作業を通じて徐々に上達していく。さらに、瞬時には問題として注目されない小さな事柄が作業を繰り返す中で蓄積する疲労の原因になることも考えられる。

実際の製造ラインは、携わる作業技術者の能力や作業環境、設計状況などによって、作業時間が日々刻々と動的に変化している。

- 問題を俯瞰的に探った上で必要に応じて、問題ポイントを絞って局所的な問題の原因を見出さなければ、コストと時間が掛かり過ぎる。
- 作業継続による効果もあるので、一日以上作業の観察を継続しなければ、見出せない原因もある。
- 分析するデータについて、コスト面や収集作業面から日常的に収集しているもしくは収集しやすいものでなければ、日常的な改善活動ができない。
- 特に若手技能者の作業能力は、作業を通じて徐々に上達していく。
- 各工程に携わる作業技術者のメンバー構成も、製造ライン全体の流れ方に効果をもたらす。例えば、熟練工だけで組んだメンバー構成が効率的な作業であるとは限らない。人と人の近しさなども少なからず効果に出る可能性が考えられる。

時間研究、動作研究、稼働研究の特長をうまく組み合わせることで、工場現場における改善活動の更なる活性化に繋がると考えられる。製造ライン全体について俯瞰的な視点で問題を探り改善策を立案・実行し、さらに必要に応じて詳細な問題情報を得て局所的な改善策を立案・実行する。

### 2.3.2 本研究の目的

複数工程のコンベヤ式製造ラインの正味作業時間には、様々な要因の影響でバラツキが生じる。正味作業時間が変動する主な要因としては、工程設計に問題があること、年齢や保有技能の異なる作業技術者数名が携わること、疲れが溜まりやすい作業であることなどが考えられる。

正味作業時間の変動に関する先行研究としては例えば、工程間の変動から手待ちを把握し改善を試みるラインバランシング研究[5]-[11]、時限間の主な変動から継続作業による疲労の様子を捉える研究[12]-[18]、作業反復から習熟過程を捉える研究[19]-[25]などがある。

これらの先行研究では求めたい要因の効果のみを得ようとし、同技能レベルの作業技術者数名が同一単純作業を継続的に繰り返すなど推定したい効果のみを取り上げるため、他の効果が混交しないように制約した作業実験に基づくデータを取得している。すなわち、推定したい効果のみで構成する分析モデルで分析している。先行研究の方法では、実際の製造ラインで計測した正味作業時間表データを分析できない。

その理由として、実際の製造ラインで計測した正味作業時間表データは工程・時限・反復効果の混交と観測誤差が含まれており、工程別・時限別・反復回数別に図示する等では十分ではなく、統計モデルの力を借りる必要がある。さらには工程・時限・反復要因の配置に起因して効果が数学的に何らかの制約条件がないと一義的に決定できないという識別問題があり、通常の回帰分析等の方法では各効果を推定できないことが挙げられる。

しかし多くの工場では先行研究の作業実験とは異なり、労働者管理を目的とした何らかの制約の無い正味作業時間を継続的に計測されている。このような日常的に計測して得られる正味作業時間データから、工程・時限・反復効果が分離できれば、制約された作業実験に基づかなくともそれぞれの効果に対応する手待ち・疲労・習熟の様子がわかり、実際の製造ラインおよび労働環境に直接結びつく改善のための糸口が得られる。

本研究では、実際の製造ラインで簡便に計測して得られる工程×時限形式の正味作業時間データから、識別問題に対応して工程・時限・反復効果を分離し、それぞれに対する手待ち・疲労・習熟の様子を明らかにすることができる統計的分析方法を開発した。

一番目に、一日の作業時間の分析モデルを組み立てて、地域工芸メーカー A、精密機器メーカー B、自動車関連メーカー C、組立メーカー D の工場で実際に計測した各一日の作業時間を分析し有効性を確認した。

二番目に、改善策実行前後日の作業時間の変化を比較する 2 時点の分析モデルを組み立てて、組立メーカー D の工場で実際に計測した作業時間を分析し有効性を確認した。

### 3 識別問題への対応と作業時間モデル

工程×時限形式の作業時間データにおける工程・時限・反復要因の配置と同じ構造を、人間社会における年齢区分×調査時点形式の調査データにおける年齢・時代・世代（コウホート）要因の配置に見ることができる。従って作業時間データを分析する際には、人間社会の調査データのコウホート分析に存在する識別問題と同じ問題を考慮する必要がある。

#### 3.1 識別問題とは

識別問題について、正味作業時間表で説明する。

製造ラインにて、正味作業に費やした時間を $r_{ij}$ とする。 $i$ は工程、 $j$ は時限を示す。例示用に $r_{ij}$ をまとめた作業時間表を表 2 に示す。ここでは、一工程が標準時間 60 分で流れるコンベヤ式の製造ラインを想定している。この標準時間 60 分の中には、正味作業時間 $r_{ij}$ の他に余裕時間や準備時間を含む。

表は、全工程数 $I$ は 5 工程、一日の時限数 $J$ は 4 時限としている。作業のおおよその反復回数はロット番号で分かる。一日に扱うロット数 $K$ は $I+J-1$ となり、表では $K=8$ ロットである。 $k$ ロット目（すなわち反復回数 $k$ ）と、 $i$ 工程目、 $j$ 時限目の関係は $k=j-i+I$ である。

$i$ 工程目、 $j$ 時限目が定まれば、自動的に $k$ が定まる。この関係が引き起こす問題を識別問題という。すなわち、工程・時限・反復の 3 効果の各要因の添字間にある「反復＝時限－工程」すなわち $k=j-i+I$ という関係に起因してデザイン行列の各要因の配置が独立しておらず、何らかの制約条件がなければ 3 効果を一意に推定できない問題が識別問題である。

表 2 工程×時限の正味作業時間表の例

	1時限目 9時～10時	2時限目 10時～11時	3時限目 11時～12時	4時限目 12時～13時	
工程 1	48分	49分	50分	52分	
工程 2	52分	51分	55分	54分	ロット 8
工程 3	47分	48分	51分	51分	ロット 7
工程 4	53分	56分	55分	53分	ロット 6
工程 5	51分	50分	52分	55分	ロット 5
		ロット 1	ロット 2	ロット 3	ロット 4



## 3.2 正味作業時間を用いた分析が少ない理由

正味作業時間表データには工程・時限・反復要因の影響の混交と観測誤差が含まれるために、工程・時限・反復効果の分離は、正味作業時間表データを工程別・時限別・反復回数別に図示する等では十分ではなく、統計モデルの力を借りる必要がある。これは工程・時限・反復要因の配置に起因して効果が数学的に何らかの制約条件がないと一義的に決定できないという識別問題があり、通常の回帰分析の方法では各効果を推定できない。この識別問題が作業時間表データの分析を困難にしている。

工程・時限・反復要因の配置とまったく同じ構造を、年齢区分×調査時点形式の調査データにおける年齢・時代・世代（コウホート）要因の配置として見ることができ、同様な識別問題の克服を必要としている[33][34]。年齢区分×調査時点形式の調査データについて識別問題を克服した分析事例としては[35][36]などがある。

## 3.3 識別問題に対応できると何が分かるか

識別問題に対応したモデルにより工程・時限・ロットに関する3効果の分離が可能となれば、製造ラインを俯瞰して見るできるようになり、工程・時限・ロットの効果から手待ちの様子・疲労の様子・習熟の様子が分かる。これらの様子が分かることで、ラインバランシングの問題、作業疲労の問題、習熟過程の問題点を一度の分析で得て、工場現場にあるそれぞれの問題について改善策を立案し、改善策を実行して改善成果の可視化も行うことができる。このようなプロセスは工場経営管理上、必要なPDCA<sup>(注1)</sup>のC機能となりうる。現在までは工程・時限・ロットの効果を分離できなかったため、工程間・時限間で平均化した値を図示してもそれぞれの効果が相殺して問題が見えにくい状況であった。

識別問題に対応できると製造コスト、在庫量、成果物の品質維持、技能維持、技能向上などに資することができる。

## 3.4 一日作業時間モデル

### 3.4.1 一日作業時間の変動

#### (a) 工程による正味作業時間の変動を捉える工程効果

工程効果は、各工程への作業配分や担当作業技術者の能力の不均衡による工程間での正味作業時間の変動を捉えるものである。もし工程効果があるとすれば作業時間表では、横方向にとった平均作業時間の変動となって顕れる。担当作業が早く終わり、他の工程作業技術者の作業が終わるのを何の作業もせずに待つ時間は、手待ちの時間である。手待ちの時間は、生産性につながらないムダな時間であると判断できる。

工程効果の動きをみることにより、手待ちの意味でのムダを見つけることができる。

#### (b) 時限による正味作業時間の変動を捉える時限効果

時限効果は、製造ラインに携わる作業技術者の継続作業による疲労蓄積により時限間での正味作業時間の変動を捉えるものである。もし時限効果があるとすれば作業時間表では、縦方向にとった平均作業時間の変動となって顕れる。作業を進めると疲れが溜まり段々と正味作業時間が長くなり、一方休憩を挟めばその直後の正味作業時間は短くなることが考えられる。作業進捗の悪い時限は、ムリが重なった時限と判断できる。

時限効果の動きをみることにより、このようなムリを捉えることができる。

#### (c) 反復による正味作業時間の変動を捉える反復効果

反復効果は、製造ラインに携わる作業技術者の反復作業による習熟により作業の反復回数間での正味作業時間の変動を捉えるものである。もし反復効果があるとすれば作業時間表では、斜め右下方方向にとった平均作業時間の変動となって顕れる。作業技術者が作業をある程度反復することで、段々とかかる正味作業時間が短くなることが考えられる。さらには、変動はやがてある一定時間に収束することも想定できる。それは習熟から慣熟に達したことを示している。製造コストや品質維持のため、習熟で正味作業時間をなるべく短くすること、さらに早く慣熟に達することが望まれる。

反復効果の動きをみることにより、作業の習熟を判断することができる。

### 3.4.2 一日作業時間モデル

計測した正味作業時間  $r_{ij}$ （以下、作業時間と記す）の期待値を  $\mu_{ij} \equiv E(r_{ij})$  とし、これを総平均効果  $\beta^G$ 、第  $i$  工程の工程(Manufacturing process)効果  $\beta_j^M$ 、第  $j$  時限(Period)効果  $\beta_i^P$ 、第  $k$  反復 (Repetition) 効果  $\beta_k^R$  で説明する作業時間モデルを考える。

例えば、工程・時限・反復の 3 効果があるモデルを MPR model と呼ぶことにすると

$$(1) \quad \mu_{ij} = \beta^G + \beta_i^M + \beta_j^P + \beta_k^R, \\ i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J; \quad k (= j - i + I) = 1, \dots, K,$$

と書ける。

効果パラメタは次のようなゼロ和制約を満たすよう基準化する。すなわち、

$$(2) \quad \sum_{i=1}^I \beta_i^M = \sum_{j=1}^J \beta_j^P = \sum_{k=1}^K \beta_k^R = 0$$

である。(2)より各効果の最終要素は、

$$\beta_I^M = -(\beta_1^M + \beta_2^M + \dots + \beta_{I-1}^M), \\ \beta_J^P = -(\beta_1^P + \beta_2^P + \dots + \beta_{J-1}^P), \\ \beta_K^R = -(\beta_1^R + \beta_2^R + \dots + \beta_{K-1}^R),$$

と表すことができる。

(1)の 3 効果の有無を考慮すると、比較すべき 8 モデルが考えられる。それらを表 3 に列挙する。

表 3 作業時間全モデル

モデル名称	モデル式
G model	$\mu_{ij} = \beta^G$
M model	$\mu_{ij} = \beta^G + \beta_i^M$
P model	$\mu_{ij} = \beta^G + \beta_j^P$
R model	$\mu_{ij} = \beta^G + \beta_k^R$
MP model	$\mu_{ij} = \beta^G + \beta_i^M + \beta_j^P$
MR model	$\mu_{ij} = \beta^G + \beta_i^M + \beta_k^R$
PR model	$\mu_{ij} = \beta^G + \beta_j^P + \beta_k^R$
MPR model	$\mu_{ij} = \beta^G + \beta_i^M + \beta_j^P + \beta_k^R$

### 3.4.3 一日作業時間モデルの尤度関数

作業時間 $r_{ij}$ をまとめたベクトルを $\mathbf{r}=(r_{11}, r_{21}, \dots, r_{IJ})'$  (以下、転置は $'$ で表す)、 $\mathbf{1}$ をすべての要素が1のベクトル、 $\mathbf{X}_*$ を比較すべき8つの個別のモデルに対応するゼロ和制約を考慮した適当なデザイン行列として $\mathbf{X}=(\mathbf{1} \ \mathbf{X}_*)$ とする。工程・時限・反復効果のあるモデルのデザイン行列を図4に示す。

$$\mathbf{X}_* = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

図4 3効果モデルのデザイン行列（工程数 $I=5$ 、時限数 $J=4$ の場合）

作業時間ベクトル  $\mathbf{r}$  について、平均  $\boldsymbol{\mu} = (\mu_{11}, \mu_{21}, \dots, \mu_{IJ})' = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$ 、分散  $\sigma^2 \mathbf{W}$  の正規分布に従うと仮定する。ただし  $\mathbf{W}$  は分散の相対的な大きさを与える対角行列で既知とし、 $|\mathbf{W}|=1$  と基準化するが、本分析では単位行列  $\mathbf{I}$  を用いて  $\mathbf{W} = \mathbf{I}$  とした。以上の下で尤度関数は次のようになる。

$$(3) \quad f(\mathbf{r} | \boldsymbol{\beta}, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{H}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(\mathbf{r} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})' \mathbf{W}^{-1}(\mathbf{r} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})\right\}$$

ここでのたとえばゼロ和制約を考慮した MPR model の効果パラメタを

$$\boldsymbol{\beta}_* = (\boldsymbol{\beta}_1^M, \dots, \boldsymbol{\beta}_{I-1}^M, \boldsymbol{\beta}_1^P, \dots, \boldsymbol{\beta}_{J-1}^P, \boldsymbol{\beta}_1^R, \dots, \boldsymbol{\beta}_{K-1}^R)'$$

とすると、 $\boldsymbol{\beta} = (\boldsymbol{\beta}^G, \boldsymbol{\beta}_*)'$  である。

同程度の説明力を持つモデルが複数ある場合には、より簡単な記述のモデルが良い。そのような節約原理を実現する制約条件を次に考える。

### 3.4.4 識別問題の源泉

以下では、 $k = j - i + I$  という工程・時限・反復の 3 効果の関係が引き起こす識別問題について、MPR model に基づいて説明する。

作業時間表のセルに入っている計測値をベクトルでまとめると  $\mathbf{r} = (r_{11}, r_{21}, \dots, r_{IJ})'$  であった。

3 効果のパラメタと作業時間表のセルを結びつけるゼロ和制約を考慮しないときのデザイン行列を  $\tilde{\mathbf{X}}$  とおき、列ベクトルを用いて、

$$(4) \quad \tilde{\mathbf{X}} = (\mathbf{e}_1^M, \dots, \mathbf{e}_I^M, \mathbf{e}_1^P, \dots, \mathbf{e}_J^P, \mathbf{e}_1^R, \dots, \mathbf{e}_K^R)$$

と表すと、作業時間表データの場合、

$$(5) \quad \sum_{i=1}^I \mathbf{e}_i^M = \sum_{j=1}^J \mathbf{e}_j^P = \sum_{k=1}^K \mathbf{e}_k^R = \mathbf{1}$$

であり、 $K = I + J - 1$  とあわせて

$$(6) \quad -\sum_{i=1}^I i \mathbf{e}_i^M + \sum_{j=1}^J j \mathbf{e}_j^P - \sum_{k=1}^K k \mathbf{e}_k^R = -I \mathbf{1}$$

のような関係にあることが容易に確かめられる。

これらにより  $\tilde{\mathbf{X}}$  のランクは高々  $I + J + K - 3$  になっている。(5)式については、ゼロ和制約によって対処することができる。

先のゼロ和制約を考慮したデザイン行列を

$$\mathbf{X}_* = (\mathbf{x}_1^M, \dots, \mathbf{x}_{I-1}^M, \mathbf{x}_1^P, \dots, \mathbf{x}_{J-1}^P, \mathbf{x}_1^R, \dots, \mathbf{x}_{K-1}^R)$$

と表すと、ゼロ和制約を考慮しないデザイン行列(4)の  $\tilde{\mathbf{X}}$  との間には

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i^M &= \mathbf{e}_i^M - \mathbf{e}_I^M, \quad i = 1, \dots, I-1; \\ \mathbf{x}_j^P &= \mathbf{e}_j^P - \mathbf{e}_J^P, \quad j = 1, \dots, J-1; \\ \mathbf{x}_k^R &= \mathbf{e}_k^R - \mathbf{e}_K^R, \quad k = 1, \dots, K-1; \end{aligned}$$

という関係がある。従って、

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^I i \mathbf{e}_i^M &= \sum_{i=1}^{I-1} i(\mathbf{e}_i^M - \mathbf{e}_I^M) + \sum_{i=1}^{I-1} i \mathbf{e}_I^M + I \mathbf{e}_I^M \\
&= \sum_{i=1}^{I-1} i \mathbf{x}_i^M + \left\{ \frac{I(I-1)}{2} + I \right\} \mathbf{e}_I^M = \sum_{i=1}^{I-1} \left( i - \frac{I+1}{2} \right) \mathbf{x}_i^M + \sum_{i=1}^{I-1} \left( \frac{I+1}{2} \right) \mathbf{x}_i^M + \frac{I(I+1)}{2} \mathbf{e}_I^M \\
&= \sum_{i=1}^{I-1} \left( i - \frac{I+1}{2} \right) \mathbf{x}_i^M + \frac{I+1}{2} \sum_{i=1}^{I-1} (\mathbf{e}_i^M - \mathbf{e}_I^M) + \frac{I(I+1)}{2} \mathbf{e}_I^M \\
&= \sum_{i=1}^{I-1} \left( i - \frac{I+1}{2} \right) \mathbf{x}_i^M + \frac{I+1}{2} \sum_{i=1}^{I-1} \mathbf{e}_i^M - \frac{(I+1)(I-1)}{2} \mathbf{e}_I^M + \frac{I(I+1)}{2} \mathbf{e}_I^M \\
&= \sum_{i=1}^{I-1} \left( i - \frac{I+1}{2} \right) \mathbf{x}_i^M + \frac{I+1}{2} (\mathbf{1} - \mathbf{e}_I^M) + \frac{I+1}{2} \mathbf{e}_I^M \\
&= \sum_{i=1}^{I-1} \left( i - \frac{I+1}{2} \right) \mathbf{x}_i^M + \frac{I+1}{2} \mathbf{1}
\end{aligned}$$

であり、また同様にして、

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^J j \mathbf{e}_j^P &= \sum_{j=1}^{J-1} \left( j - \frac{J+1}{2} \right) \mathbf{x}_j^P + \frac{J+1}{2} \mathbf{1}, \\
\sum_{k=1}^K k \mathbf{e}_k^R &= \sum_{k=1}^{K-1} \left( k - \frac{K+1}{2} \right) \mathbf{x}_k^R + \frac{K+1}{2} \mathbf{1},
\end{aligned}$$

であるから、

$$-\frac{I+1}{2} + \frac{J+1}{2} - \frac{K+1}{2} = \frac{-I-1+J+1-(I+J-1)-1}{2} = -I$$

であることに注意すると、(6)より、

$$-\sum_{i=1}^{I-1} \left( i - \frac{I+1}{2} \right) \mathbf{x}_i^M + \sum_{j=1}^{J-1} \left( j - \frac{J+1}{2} \right) \mathbf{x}_j^P - \sum_{k=1}^{K-1} \left( k - \frac{K+1}{2} \right) \mathbf{x}_k^R = \mathbf{0}$$

もしくは

$$\boldsymbol{\theta}_* = (\dots, -(i - \frac{I+1}{2}), \dots, (j - \frac{J+1}{2}), \dots, -(k - \frac{K+1}{2}), \dots)'$$

とおくと、

$$\mathbf{X}_* \boldsymbol{\theta}_* = \mathbf{0}$$

という関係が存在することがわかる。これが識別問題の源泉である。  
ここで、変動の大きさの小さい節約的な解があるとしてそれを

$$\boldsymbol{\beta}_0 = (\boldsymbol{\beta}^G, \boldsymbol{\beta}'_{*0})'$$

また

$$\boldsymbol{\theta} = (0, \boldsymbol{\theta}'_*)'$$

と置くと、任意の実数  $\alpha$  に対して

$$\begin{aligned}\mu &= X\beta_0 = \beta^G \mathbf{1} + X_*\beta_{*0} + \alpha \cdot 0 = \beta^G \mathbf{1} + X_*\beta_{*0} + \alpha X_*\theta_* = \beta^G \mathbf{1} + X_*(\beta_{*0} + \alpha\theta_*) \\ &= X(\beta_0 + \alpha\theta)\end{aligned}$$

となり、 $\beta_{\dagger} = \beta_0 + \alpha\theta$  も同じ  $\mu$  を与えるので解が不定となる。  
改めて要素で示せば、

$$\begin{aligned}\beta_{\dagger i}^M &= \beta_{0i}^M - (i - \frac{I+1}{2})\alpha, \quad i = 1, \dots, I-1; \\ \beta_{\dagger j}^P &= \beta_{0j}^P - (j - \frac{J+1}{2})\alpha, \quad j = 1, \dots, J-1; \\ \beta_{\dagger k}^R &= \beta_{0k}^R - (k - \frac{K+1}{2})\alpha, \quad k = 1, \dots, K-1;\end{aligned}$$

である。

さて、効果パラメタの一次階差は、例えば工程効果については

$$\beta_{\dagger, i+1}^M - \beta_{\dagger i}^M = \beta_{0, i+1}^M - \beta_{0i}^M + \alpha$$

であるからこの 2 乗和は、

$$\sum_{i=1}^{I-1} (\beta_{\dagger, i+1}^M - \beta_{\dagger i}^M)^2 = \sum_{i=1}^{I-1} (\beta_{0, i+1}^M - \beta_{0i}^M + \alpha)^2 = \sum_{i=1}^{I-1} (\beta_{0, i+1}^M - \beta_{0i}^M)^2 - 2\alpha(\beta_{01}^M - \beta_{0I}^M) + (I-1)\alpha^2$$

となる。効果パラメタの一次階差の 2 乗和を小さくすることにより、 $\alpha$  の制御で節約的な解  $\beta_0$  に近い  $\beta_{\dagger}$  が得られると期待できる。

### 3.4.5 一次階差の 2 乗和の条件式

識別問題に対処するため、先行研究として各効果パラメタに制約条件を付与して効果パラメタを一義的に推定できるようにした中村のコウホート分析の方法[33][34]を本分析方法に採用する。

付与する制約条件は、工程・時限・反復効果それぞれの隣り合う効果パラメタの 1 次階差の重みつき 2 乗和を小さく抑える以下の式である。

$$(7) \quad \frac{1}{\sigma_M^2} \sum_{i=1}^{I-1} (\beta_i^M - \beta_{i+1}^M)^2 + \frac{1}{\sigma_P^2} \sum_{j=1}^{J-1} (\beta_j^P - \beta_{j+1}^P)^2 + \frac{1}{\sigma_R^2} \sum_{k=1}^{K-1} (\beta_k^R - \beta_{k+1}^R)^2 \rightarrow \min$$

ここで、 $\sigma_M^2, \sigma_P^2, \sigma_R^2$  は上記条件式を正規分布の密度関数で表現したときの事前分布の分散（超パラメタ）である。

(7) 式を正規分布の密度関数で表現すると

$$(8) \quad \pi(\beta_* | \sigma_M^2, \sigma_P^2, \sigma_R^2, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{L}{2}} |D'\Sigma^{-1}D|^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \beta_*' D' \Sigma^{-1} D \beta_*\right) \rightarrow \max$$

となる。 $\sigma^2$  は、超パラメタの基準値としても用いている。 $L = I + J + K - 3$  は効果パラメタ数からゼロ和制約による分を引いたもの、 $D$  は一次階差を表現するデザイン行列、 $D'$  はその転置行列、 $\Sigma$  は超パラメタの対角行列、 $\Sigma^{-1}$  はその逆行列である。工程・時限・反復効果のあるモデルの階差デザイン行列を図 5 に示す。

$$D = \begin{pmatrix} \begin{matrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{matrix} & \begin{matrix} \mathbf{0} & & \mathbf{0} \\ & \begin{matrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 2 \end{matrix} & \mathbf{0} \\ & & \begin{matrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 \end{matrix} \end{matrix} \end{pmatrix}$$

図 5 3 効果モデルの階差デザイン行列（工程数  $I=5$ 、時限数  $J=4$  の場合）

### 3.4.6 一日のベイズ型作業時間モデル

#### (a) 効果パラメタの一次階差 2 乗和の条件

制約条件(7)を密度関数で表した(8)を事前密度とするベイズ型作業時間モデルを構築する。

事後密度は、規格化定数を除いて、

$$(9) \quad f(\mathbf{r} | \boldsymbol{\beta}, \sigma^2) \pi(\boldsymbol{\beta}_* | \sigma_M^2, \sigma_P^2, \sigma_R^2, \sigma^2)$$

と与えられる。もし超パラメタ  $\sigma_M^2, \sigma_P^2, \sigma_R^2$  が与えられれば(9)に比例する事後密度が決まり、効果パラメタ  $\boldsymbol{\beta}$  を事後密度のモード（最大化）によって推定する（MAP 推定量）が一つの方法である。これは

$$(10) \quad \hat{\boldsymbol{\beta}} = \arg \max_{\boldsymbol{\beta}} f(\mathbf{r} | \boldsymbol{\beta}, \sigma^2) \pi(\boldsymbol{\beta}_* | \sigma_M^2, \sigma_P^2, \sigma_R^2, \sigma^2)$$

と表される。ただし(10)は、超パラメタの値によって  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  の結果が左右される。そこで、以下の赤池ベイズ型情報量規準(ABIC)最小化法[37]により、超パラメタを決定する。



$$\begin{aligned}\text{ABIC} &= -2\log(\text{周辺尤度}) + 2h \\ &= -2\log \int f(\mathbf{r} | \boldsymbol{\beta}, \sigma^2) \pi(\boldsymbol{\beta}_* | \sigma_M^2, \sigma_P^2, \sigma_R^2, \sigma^2) d\boldsymbol{\beta}_* + 2h \rightarrow \min\end{aligned}$$

ABIC はベイズ型モデルの赤池情報量規準 AIC であり、ABIC (AIC) 最小化法によってデータに基づいて複数のモデルを恣意性なく比較できる。推定するパラメタ数  $h$  は、超パラメタの数に  $\beta^G$  と  $\sigma^2$  の分の 2 を足したものとなる。 $\beta^G$  と  $\sigma^2$  も、ABIC が最小になるように決めれば以下のようなになる。

$$\begin{aligned}\hat{\beta}^G &= (\mathbf{1}'\mathbf{W}\mathbf{1})^{-1}\mathbf{1}'\mathbf{W}^{-1}(\mathbf{r} - \mathbf{X}_*\hat{\beta}_*), \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{1}{IJ} \left\{ (\mathbf{r} - \mathbf{X}\hat{\beta})\mathbf{W}^{-1}(\mathbf{r} - \mathbf{X}\hat{\beta}) + \hat{\beta}_*'\mathbf{D}'\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\mathbf{D}\hat{\beta}_* \right\}.\end{aligned}$$

ここで、

$$\mathbf{D}_W = \mathbf{X}_* - (\mathbf{1}'\mathbf{W}^{-1}\mathbf{1})^{-1}\mathbf{1}'\mathbf{W}^{-1}\mathbf{X}_*$$

とすると、ABIC は

$$\begin{aligned}\text{ABIC} &= \text{ABIC}(\boldsymbol{\sigma}) \\ &= (IJ)\log \hat{\sigma}^2 - \log |\mathbf{D}'\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\mathbf{D}| + \log |\mathbf{D}_W\mathbf{W}^{-1}\mathbf{D}_W + \mathbf{D}'\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\mathbf{D}| + 2h + \text{Const}\end{aligned}$$

となる。ただし ABIC で大小を比較する際は、定数項は無視する。上式は、超パラメタベクトル  $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_M^2, \sigma_P^2, \sigma_R^2)'$  の関数となっていることに注意する。

ベイズ型モデルや ABIC に関する解説は例えば[38]や([39], pp.160-161) にある。

## (b) 計算の手順

本分析の手順を以下に示す。

- 比較すべき各モデルについて、ABIC を最小にする超パラメタ・ベクトル  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$  を求める。本論文では数値的最適化法である準ニュートン法により、ABIC 値が最小となる超パラメタ  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$  を求めた。
- 算出した 8 モデルの ABIC を比較し、ABIC 最小モデルを選ぶ。
- ABIC 最小モデルから  $\hat{\boldsymbol{\mu}}$  を計算し、説明力の 1 つの指標として決定係数を算出する。

## 4 一日作業時間の計測と分析

### 4.1 3 社の一日作業時間モデルの分析

#### 4.1.1 3 社の一日作業時間の計測

ここでは地域工芸メーカー、精密機器メーカー、自動車関連メーカー 3 社の計測結果を示す。地域工芸メーカーの製造工程は 1 個/1 ロット単位いわゆる一個流しの製造で、工程 3 のいくつかの要素作業は軒下にて行われた。精密機器メーカーの製造工程は数個/1 ロット単位の製造で、すべての作業は室温、湿度、照明は一定に保たれた工業用クリーンルーム内で行われた。自動車関連メーカーの製造工程は数十個/1 ロット単位の製造で、雨風に影響しない工場内作業で行われた。異なる作業環境にある 3 社製造ラインの作業時間を計測したことになる。

各社ともに、作業時間を計測する計測日の前日を計測準備日とした。

計測準備日の午後、稼働中の製造ラインのある一ロットに対し、計測日に担当する作業メンバーが作業中の作業メンバーに代わり工程進捗に沿って順次製造ラインに加わった。この作業メンバー交代の方法は各工程担当作業技術者とロット番号を一致させて、ロット番号で品質管理する方法に則したものである。1 工程目の担当作業技術者が製造ラインに参加し終えた後に、製造ライン全体で慣らし製造作業を 2 回行って作業時間の計測を練習した。

##### 1) 地域工芸メーカー A の計測

メーカー A は部材取付けおよび組立を行う製造プロセス開発のために、作業時間の計測を行った。その結果を表 4 に示す。

コンベヤ式に余裕時間を含む一工程 35 分で流れる製造ラインを対象としている。計測当日に各工程を担当する人員は若手作業技術者を中心にメンバー構成され、各人は一日同作業を繰り返した。この製造ラインの各工程の作業時間を各工程に割り当てられた計測者が、ストップウォッチを用いて計測した。予め各時限の作業開始時間は決められている。

##### 2) 精密機器メーカー B の計測

メーカー B は本稼働している精密機器の製造ラインを改善するために、作業時間の計測を行った。その結果を表 5 に示す。コンベヤ式に余裕時間や部品準備等の時間を含む一工程 30 分で流れる製造ラインを対象としている。計測当日に各工程を担当する人員は男性若手作業技術者を中心にメンバー構成され、各人は一日同じ作業を繰り返した。

この製造ラインの各工程の作業時間を各工程に割り当てられた計測者が、ストップウォッチを用いて計測した。予め各時限の作業開始時間は決められている。

##### 3) 自動車関連メーカー C の計測

メーカー C は本稼働している自動車に関連する製造ラインを改善するために、作業時間の計測を行った。その結果を表 6 に示す。コンベヤ式に余裕時間を含む一工程 20

分で流れる製造ラインを対象としている。計測当日に各工程を担当する人員は中堅作業技術者を中心にメンバー構成され、各人は一日同作業を繰り返した。

この製造ラインの各工程の作業時間を、赤外レーザ計測器を用いて計測した。予め各時限の作業開始時間は決められており、各工程の作業技術者が計測台の上に各々の成果物を置き赤外レーザが成果物を感知すると、計測器が作業終了時間として記録される。予め各時限の作業開始時間は決められている。

表 4 地域工芸メーカー A の作業時間表  
(単位：秒、工程数  $I=7$ 、時限数  $J=12$ 、反復回数  $K=18$ )

時限	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ロット 番号
開始時間	8:30	9:05	9:40	10:30	11:05	12:35	13:10	13:45	14:20	15:15	15:50	16:25	
工程1	1984.13	1980.84	1991.18	1994.75	2003.30	1980.18	1993.90	2002.94	2011.42	2004.90	2009.35	2021.51	
工程2	2001.29	1980.86	1995.48	2004.03	2023.25	1988.85	2006.06	2014.83	2014.64	2017.56	2025.90	2031.56	18
工程3	1972.25	1956.92	1973.95	1982.14	1992.28	1962.22	1968.24	1990.23	1996.03	1979.14	2003.88	2005.85	17
工程4	1966.71	1962.70	1963.95	1984.74	1994.53	1962.60	1965.99	1982.18	1990.65	1988.53	2002.52	1999.00	16
工程5	2011.26	1994.40	2000.87	2020.18	2027.06	2004.79	2008.44	2022.19	2019.52	2020.50	2033.10	2038.32	15
工程6	1971.00	1955.99	1975.89	1981.45	1999.56	1959.53	1970.56	1985.99	1991.22	1999.22	2004.35	2012.39	14
工程7	1981.83	1957.29	1967.12	1984.02	2004.70	1971.93	1976.29	1986.80	1998.10	1983.99	2001.07	2016.92	13
ロット番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

実際の分析については、分析の便宜上、表の数値を 100 で割ったデータで行った。

表 5 精密機器メーカー B の作業時間表  
(単位：秒、工程数  $I = 6$ 、時限数  $J = 12$ 、反復回数  $K = 17$ )

時限	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ロット 番号
開始時間	9:15	9:45	10:15	10:55	11:25	11:55	13:20	13:50	14:20	15:05	15:35	16:05	
工程1	1251.42	1249.13	1253.31	1256.49	1248.63	1248.61	1239.85	1258.04	1259.27	1254.52	1254.61	1261.39	
工程2	1252.65	1253.19	1252.40	1263.48	1253.39	1249.19	1239.88	1258.18	1260.40	1260.52	1251.40	1262.34	
工程3	1259.15	1255.02	1253.38	1260.14	1253.12	1251.77	1238.81	1255.16	1262.66	1261.85	1249.26	1265.56	
工程4	1260.03	1252.67	1255.19	1263.25	1259.56	1256.52	1248.00	1261.85	1262.55	1260.24	1258.78	1264.66	
工程5	1267.61	1262.70	1263.37	1262.85	1255.80	1257.66	1247.05	1265.00	1264.64	1258.12	1253.05	1261.80	
工程6	1268.61	1267.16	1270.28	1266.17	1251.81	1258.14	1247.45	1266.21	1266.08	1261.31	1256.08	1269.25	
ロット番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

実際の分析については、分析の便宜上、表の数値を 100 で割ったデータで行った。

表 6 自動車関連メーカー C の作業時間表  
 (単位：秒、工程数  $I = 5$ 、時限数  $J = 18$ 、反復回数  $K = 22$ )

時限	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	ロット 番号
開始時間	9:30	9:50	10:10	10:45	11:05	11:25	11:45	13:05	13:25	13:45	14:05	14:25	14:45	15:05	15:45	16:05	16:25	16:45	
工程1	910.06	927.65	945.22	950.68	955.47	954.48	958.48	960.10	947.65	949.12	948.61	961.90	981.96	998.76	987.13	1017.59	1030.79	1018.77	
工程2	905.31	923.18	939.63	947.70	952.24	954.79	952.72	955.05	943.15	946.08	947.16	960.69	978.35	996.61	983.33	1014.29	1025.67	1015.34	
工程3	903.50	919.34	934.71	945.72	949.14	949.68	950.72	952.86	939.95	942.50	943.29	955.36	976.02	991.52	980.20	1010.84	1023.38	1011.21	
工程4	913.72	927.65	945.01	953.53	958.33	958.31	958.90	960.93	948.27	948.84	950.34	963.76	983.38	1001.87	985.72	1020.24	1032.54	1020.71	
工程5	901.55	918.38	934.48	943.87	949.23	947.59	950.08	951.94	936.35	939.84	941.30	955.74	974.35	992.77	978.77	1009.37	1023.55	1011.30	19
ロット番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	22

実際の分析については、分析の便宜上、表の数値を 100 で割ったデータで行った。

#### 4.1.2 3社の一日作業時間の分析と結果考察

業種の異なる3社の計測データについて、8つのモデル間でのモデル選択表を表7に示す。ABICの値の小さいモデルがよいモデルなので、各メーカーの分析結果について、表では最小のABICに\*をつけた。

選択されたモデルについて、効果が有りがちその効果の変動が大きい場合は、対応する要因に何かしらの問題や課題が隠されていることを示している。一方、効果が含まれない場合は、その効果は統計的には検出されなかったということであり、対応する要因について問題や課題を懸念する必要が少ないことを示している。

工程効果が大きな変動をしている場合、手待ち工程がありラインバランスに改善の余地がある。時限効果が大きな変動をしている場合、疲労の時間帯があり休憩の取り方や作業環境、作業順序や作業内容などに改善の余地がある。反復効果が大きな変動をしている場合、作業を通じて如何に作業時間を縮められたか、また如何に速く慣熟できたか習熟過程の様子が分かる。さらには成果物の品質や材料ロス、作業ミスなど製造管理の面で作業に課題を含んでいるロットであることもわかる。

表 7 モデル選択表 (ABIC 値)

モデル名称	$h$	地域工芸メーカー A のデータ	精密機器メーカー B のデータ	自動車関連メーカー C のデータ
G model	2	506.73	282.55	626.14
M model	3	506.99	273.98	628.65
P model	3	495.69	255.87	330.58
R model	3	486.78	281.11	494.89
MP model	4	338.66*	280.05	147.28*
MR model	4	438.39	272.06	597.38
PR model	4	478.68	202.05*	331.14
MPR model	5	340.73	203.47	149.26

### (a) 地域工芸メーカ A の分析結果と考察

表 4 のデータを分析すると ABIC 最小モデルとして、反復効果は統計的にはないとする MP model が選ばれた。総平均効果  $\hat{\beta}^G = 1993.65$  (秒) である。このモデルの決定係数 (寄与率) は 0.95 であった。以下では、MP model に含まれている工程・時限効果について示す。

#### 1) 工程効果

図 6 に工程効果を示す。下に伸びるほど作業が捗っており手待ち時間が長いことを、また上に伸びるほど作業が捗っておらず作業時間が長いことを示している。

工程 3 と工程 4、工程 6 と工程 7 が並んで手待ちしている工程である。また工程 2 や工程 5 の作業時間が長い。軒下作業である工程 3 については、作業時間が大きくなっていなかった。特に手待ち工程である工程 4,6 に挟まれた工程 5 の作業時間が一番長いことが分かる。一番手待ちをしている工程 4 と一番作業時間が長い工程 5 の効果の差が約 35 秒あり、大きな差である。従ってラインバランスに問題があると考えられる。

#### 2) 時限効果

図 7 に時限効果を示す。縦帯は左から小休憩、昼休憩、小休憩を表す。下であるほど作業が捗っており、上であるほど作業が捗っていないことを示している。

午前の作業時間をみると 9:05 開始の 2 時限目は 1 時限目よりもほぼ 12 秒捗り、9:40 開始の 3 時限目の作業から 1 つの時限あたりほぼ 10 秒ずつ作業が捗らなくなっている。午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて 13 秒程度捗らなくなっており、午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて 4 秒程度のみ捗っている。また昼休みを挟むと 30 秒程度捗り具合が良くなっている。このことから、短時間の休憩では疲労回復の可能性は低く、一方で長時間の休憩では疲労回復する可能性が高いことが分かる。

#### 3) 地域工芸メーカ A の改善策案

分析結果の工程効果から手待ち工程が見つかった。改善策案として工程 5 の頭の単位作業や要素作業のいくつかを工程 4 の最後に移し、また工程 5 の最後の単位作業のいくつかを工程 6 の頭に移すと、工程 4 の手待ち時間と工程 5 の作業時間が短くでき、ムダが小さくなる可能性がある。

時限効果から小休憩の時間が短く疲労回復していないため、改善策案の一つは午前中の小休憩の時間を増やすことが考えられる。また夕方の作業進捗が下がっているので、一日作業の疲れが夕方に出てきていると推察でき、例えば夕方は少しゆっくりと製造ラインを流し進めると夕方の作業時間は延びるが、ムリの少ない作業に改善できる可能性がある。

製造管理の面では、分析結果から休憩の取り方で疲れ方が変わることがわかった。特に休憩をとる直前の作業については、材料ロス量に注目し通常よりも注意深く成果物の品質チェックを行うと良い。



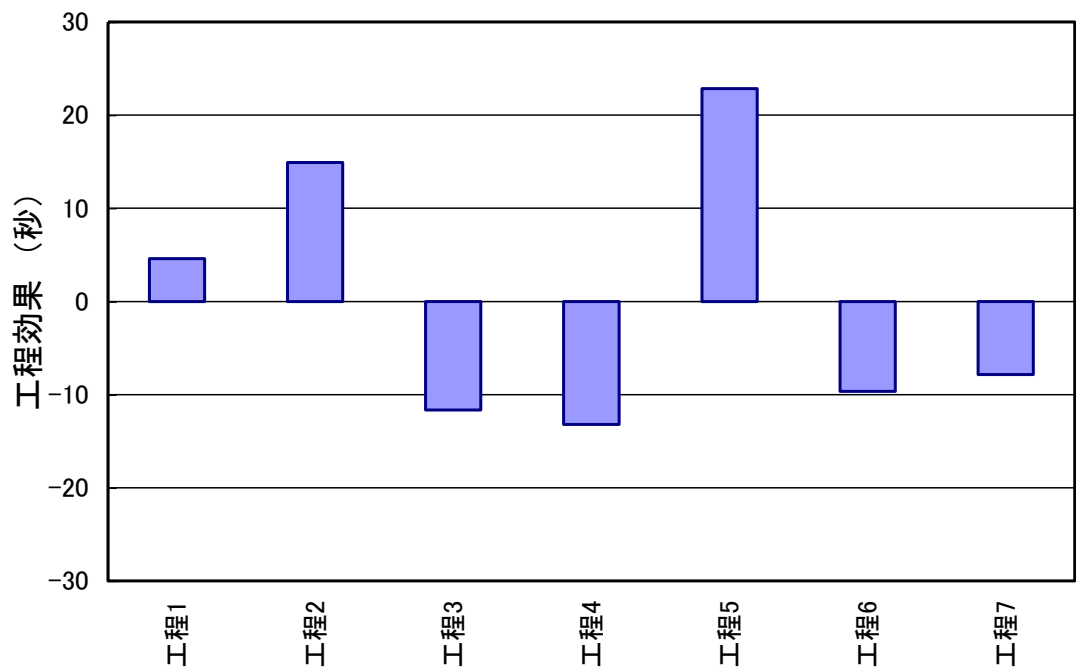


図 6 地域工芸メーカー A の工程効果  $\hat{\beta}^M$

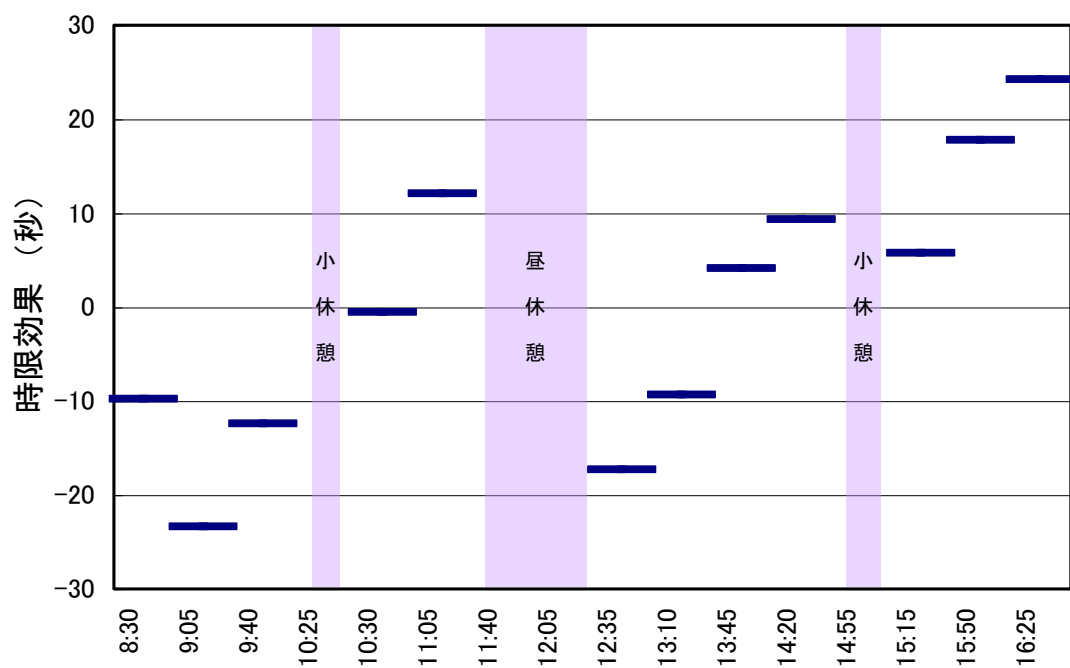


図 7 地域工芸メーカー A の時限効果  $\hat{\beta}^P$

## (b) 精密機器メーカー B の分析結果と考察

表 5 のデータを分析すると、ABIC 最小モデルとして工程効果は統計的にはないとする PR model が選ばれた。総平均効果  $\hat{\beta}^G = 1258.39$  (秒) である。またこのモデルの決定係数 (寄与率) は 0.91 であった。

以下では、PR model に含まれる時限・反復効果について示す。

### 1) 時限効果

図 8 に時限効果を示す。縦帯は左から小休憩、昼休憩、小休憩を表す。

午前の作業と比べて、昼休憩直後の作業を除き、午後の作業が捗らなくなっている。一番捗っている昼休憩直後の作業と一番捗らなくなっている 16:15 開始の作業の効果の差が約 26 秒あり、変動は小さくはない。午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて 6 秒程度捗らなくなっており、午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて 2 秒程度しか捗っていない。

また昼休憩直後は休憩前より 8 秒程度捗るが、それ以降の作業は午前中の作業と比べて捗っていない。従って休憩による疲労の改善は期待できない。

### 2) 反復効果

図 9 に反復効果を示す。反復回数 (ロット番号) が累積するにつれて、習熟から慣熟へと推移し作業が捗っていく様子が分かる。注目すべきは、初期習熟期 (rapid early improvement stage) <sup>(注2)</sup> のロット番号 1~2 は習熟の加速が少ないが、ロット番号 3 から習熟が加速している。初期習熟期に習熟の加速が小さいので、作業内容を理解把握しやすい単純な作業ではないと考えられる。またロット番号 5~7 は習熟が一旦鈍化し、ロット番号 8 から再び加速した。ロット番号 5~7 を learning plateau stage または高原現象 <sup>(注3)</sup> などと呼ばれることもあるが、当期は習熟が加速するロット番号 3, 9 に挟まれているので単なる中弛みの時間とは考えにくく、作業理解と反省等の時間である可能性がある。またロット番号 11 以降は習熟の加速が緩やかで、慣熟に近づいた。

本製造ラインにおいて反復効果は習熟が加速、減速、さらに加速しており、いわゆる単純な習熟曲線ではない軌跡を確認できる。

### 3) 精密機器メーカー B の改善策案

時限効果について、分析結果から休憩を挟んでも疲労の回復は期待できないので、作業環境の改善策の実行を優先的に行うことが考えられる。改善策案として、作業台付近の電灯や冷暖房の調節、作業台の高さや大きさ、機具、製造条件の見直しなど疲労や負担を感じる部分について、作業技術者各人へヒヤリングし作業技術者とともに改善策を立案し実行すると、改善する可能性がある。

反復効果について、分析結果から一日をかけて習熟から慣熟へと推移しており、3,4 ロット程度の作業反復では作業の習得が難しい可能性がある。例えば難しい要素作業については、熟工技能者による技術講習会を定期的に開催し技術移転を行うなど、作業支援体制を見直すのも改善策案の一つである。

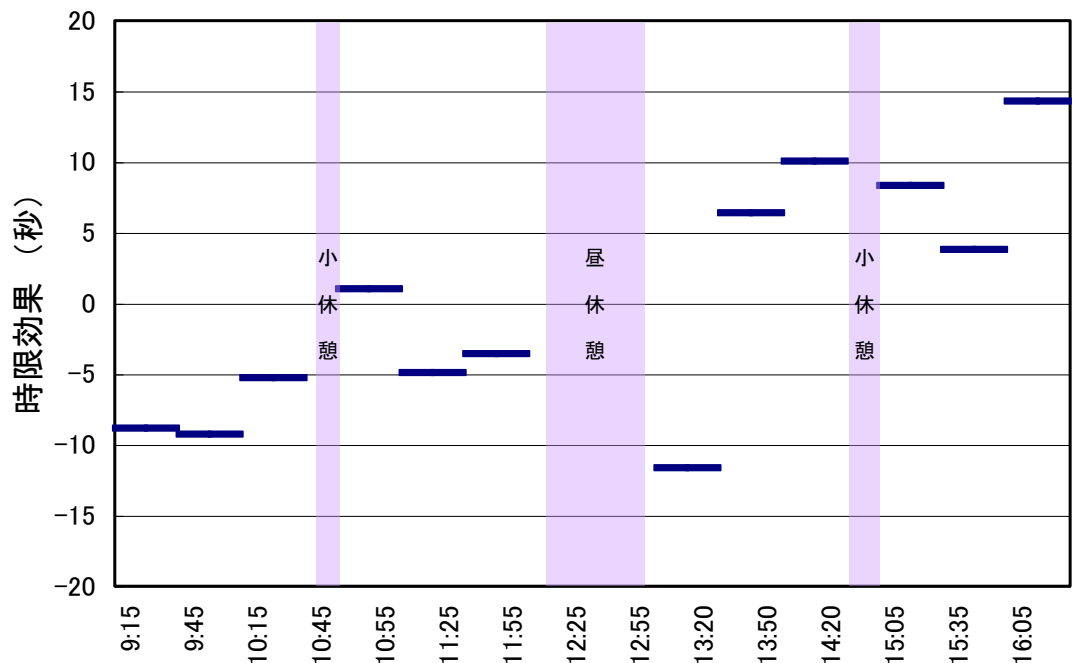


図 8 精密機器メーカー B の時限効果  $\hat{\beta}^p$

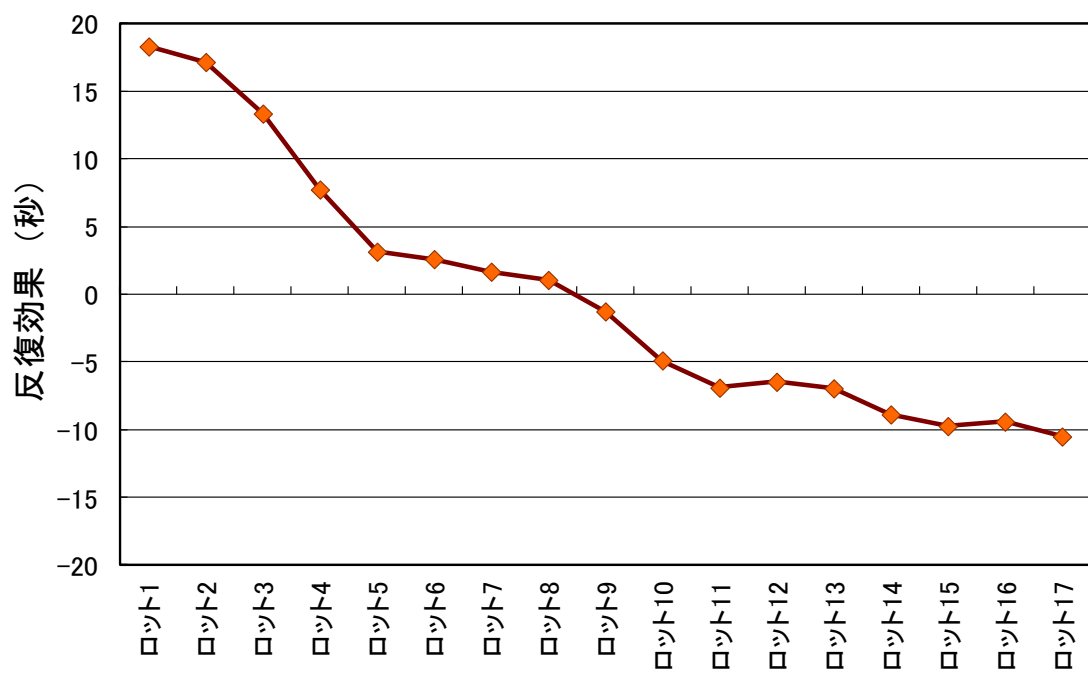


図 9 精密機器メーカー B の反復効果  $\hat{\beta}^R$

製造管理の面では、ロット 1 から 11 までの作業時間の低下が大きく、工程・ロット毎の作業ミスの回数に注目し、ロット 11 までは通常よりも注意深く成果物の品質チェックを行う必要がある。

### (c) 自動車関連メーカー C の分析結果と考察

表 6 のデータを分析すると、ABIC 最小モデルとして、MP model が選ばれた。総平均効果  $\hat{\beta}^G = 963.53$  (秒) である。またこのモデルの決定係数 (寄与率) は 0.94 であった。以下では、MP model に含まれる工程・時限効果について示す。

#### 1) 工程効果

図 10 は工程効果を示す。工程効果は表れたが一番手待ちしている工程 4 は 3 秒程度であり、工程 4 と一番作業時間が掛かっている工程 5 の効果の差が約 5 秒である。工程効果は小さな変動であり、ラインバランスはとれていると考えられる。

#### 2) 時限効果

図 11 に時限効果を示す。縦帯は左から小休憩、昼休憩、小休憩を表す。午前中は正午に近づくにつれて、段々と作業の捗らなくなっている。

午後の作業は次の時限へ進むとおおよそ 16 秒ずつ捗らなくなっている。午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて一時的に 15 秒程度捗っているが、その後は作業進捗が悪い。また昼休憩後の作業進捗は休憩前に比べて差が無い。従って休憩による疲労回復は期待できない。

作業が一番捗っている 9:30 開始の作業と作業が捗っていない 16:30 の作業を比べると効果の差が約 120 秒あり、とても大きな変動である。早急に対応すべき問題であると考えられる。

#### 3) 自動車関連メーカー C の改善策案

工程効果について、分析結果から時限効果よりも優先的に改善する必要にはないと考えられる。

時限効果について、分析結果から大きな変動であることがわかり、また休憩後に疲労が回復できていないことが確認できた。そこで午前と午後で作業人員を交代して、特に夕方の作業効率を落とさない改善策案が考えられる。また疲労の原因の一つとして、設備などの作業環境に難点がある可能性も考えられる。例えば動作研究を行うなど要素動作から疲労の原因を見つけ出して動作および作業の再設計を行う改善策案、作業技術者各人から設備に対する要望をヒヤリングし設備投資を行う改善策案も考えられる。

製造管理の面では、特に時限効果の変動が大きいので、早急な改善策を実行するとともに改善策の成果をチェックする必要がある。例えば定期的・継続的に本分析を行い、工程・時限・反復効果から問題点を読み取って改善策を立案実行し、実行した改善策の見直しを行う PDCA<sup>(注 1)</sup>を繰り返すと良い。また各工程・各時限・各ロットの材料ロス量や作業ミスの回数に注目し、常に注意深く成果物の品質チェックを行う必要がある。

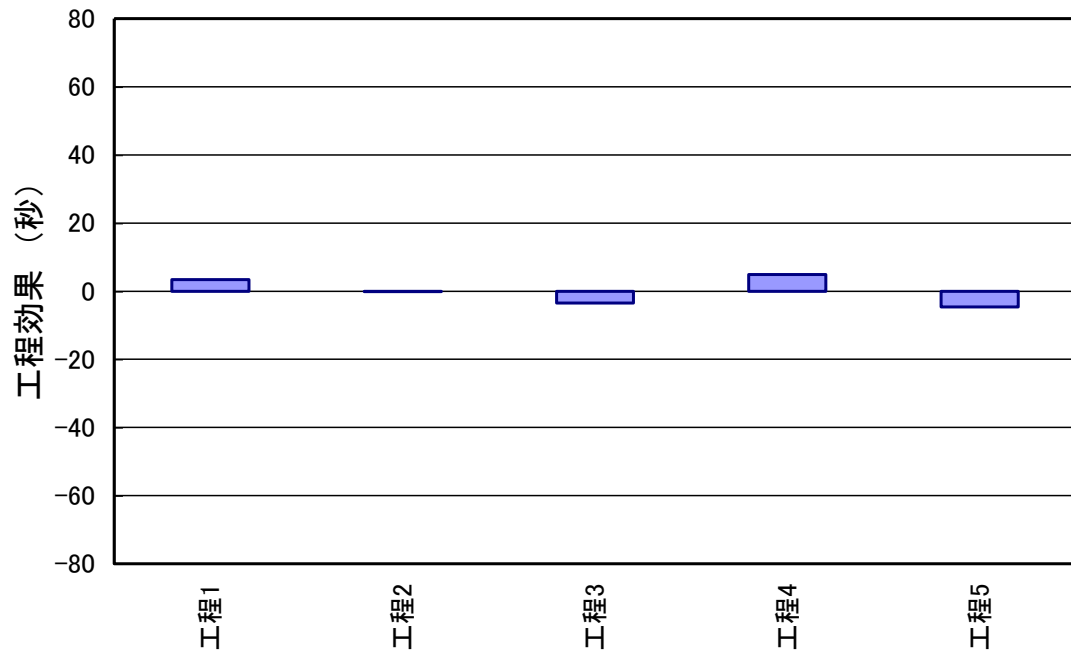


図 10 自動車関連メーカー C の工程効果  $\hat{\beta}^M$



図 11 自動車メーカー C の時限効果  $\hat{\beta}^P$

## 4.2 組立メーカー D の一日作業時間の分析

組立メーカー D は、改善策を実行する前、実行した直後、実行 2 週間後の各一日の作業時間を計測した。本章では、各一日の作業時間を分析する。

組立メーカー D は競合他社が無く、事業業界では特別な事業者であり、業種を記述することで企業名が特定されるため、本論文では企業名のみならず業種名や作業内容が記述できない。

### 4.2.1 組立メーカー D の一日作業時間の計測

#### (a) 組立メーカー D の計測日程

組立メーカー D では、部材取付けおよび組立を行う製造ラインの改善の為に、実作業時間の計測を行った。計測の日程について、計測準備日 2010/6/30、改善実行前 2010/7/1、改善策実行の翌営業日 2010/7/8、改善策実行後 2 週間経過時点 2010/7/29 で、それぞれ表 8, 表 9, 表 10 に示す。また改善策実行日は 2010/7/5 である。

#### (b) 組立メーカー D の計測準備

作業時間を計測する D 社では、最初の計測日の前日を計測準備日とした。

準備日の午後、稼働中の製造ラインのある一ロットに対し、計測日に担当する作業メンバーが、作業中の作業メンバーに代わり工程進捗に沿って順次製造ラインに加わった。この作業メンバー交代の方法は、各工程担当作業技術者とロット番号を一致させて、ロット番号で品質管理する方法に則したものである。

1 工程目の担当作業技術者が製造ラインに参加し終えた後に、製造ライン全体で慣らし製造作業を 2 回行って作業時間の計測を練習した。

#### (c) 組立メーカー D の計測

コンベヤ式に標準時間 20 分で流れる製造ラインを対象としている。計測当日に各工程を担当する人員は 4 年目～6 年目の工程主任クラスの作業技術者を中心にメンバー構成され、各人は一日同作業を繰り返した。

この製造ラインの各工程の実作業時間を、各工程に割り当てられた計測者が、ストップウォッチを用いて計測した。予め各時限の作業開始時間は決められている。

表 8 組立メーカ D の改善策実行前の作業時間表  
 (単位：秒、工程数  $I = 6$ 、時限数  $J = 18$ 、反復回数  $K = 23$ )

実際の分析については、分析の便宜上、表の数値を 100 で割ったデータで行った。

時限	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	ロット 番号
開始時間	9:30	9:50	10:15	10:35	11:00	11:20	11:45	12:05	13:20	13:40	14:05	14:25	14:50	15:10	15:35	15:55	16:20	16:40	
工程1	926.67	943.49	957.62	977.20	977.15	976.66	980.37	957.41	966.92	966.77	966.98	981.55	1000.61	1018.41	1009.95	1034.72	1051.56	1040.08	23
工程2	912.50	936.81	953.44	963.02	965.47	969.98	973.69	948.23	950.24	955.09	950.30	972.37	981.43	999.23	988.27	1023.04	1032.39	1025.90	22
工程3	908.90	930.71	947.34	959.42	964.37	966.38	965.09	949.63	946.64	951.49	959.20	976.27	990.33	998.13	989.67	1014.44	1033.79	1022.30	21
工程4	931.23	948.05	962.17	971.76	981.70	988.71	984.93	959.46	963.98	966.32	974.03	983.61	1000.16	1017.96	1004.51	1031.77	1046.12	1047.14	20
工程5	910.77	930.08	946.71	961.29	963.74	970.75	969.47	944.00	953.51	950.86	958.57	970.65	989.70	997.50	989.04	1018.81	1040.66	1029.17	19
工程6	921.92	938.73	957.86	969.94	979.89	981.90	978.11	955.15	967.16	964.51	969.72	979.29	1000.85	1008.65	1010.19	1034.96	1041.81	1042.82	
ロット番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	

表 9 組立メーカー D の改善策実行直後の作業時間表  
 (単位：秒、工程数  $I = 6$ 、時限数  $J = 18$ 、反復回数  $K = 23$ )

時限	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	ロット番号
開始時間	9:30	9:50	10:15	10:35	11:00	11:20	11:45	12:05	13:20	13:40	14:05	14:25	14:50	15:10	15:35	15:55	16:20	16:40	
工程1	908.50	902.42	922.24	919.53	915.60	929.68	924.15	917.36	925.04	920.05	915.33	922.07	930.61	932.75	938.13	944.73	940.97	942.58	
工程2	882.28	890.05	896.39	903.89	913.33	902.22	911.49	897.28	907.98	896.80	911.96	904.99	918.01	929.05	925.49	935.06	928.30	926.90	23
工程3	894.84	890.41	901.60	909.13	907.77	914.54	916.61	900.71	902.49	898.82	895.79	917.69	908.01	925.03	921.37	923.50	925.70	928.80	22
工程4	900.38	915.40	921.89	917.77	931.44	931.90	932.36	915.25	927.34	923.76	928.24	922.95	940.64	943.96	941.78	942.31	955.07	949.13	21
工程5	891.00	903.15	899.09	914.27	904.29	906.28	918.43	898.21	906.10	905.32	911.38	906.11	917.61	915.30	918.92	922.43	929.09	935.22	20
工程6	903.23	908.37	919.45	925.57	924.39	923.74	926.91	921.39	909.66	922.68	910.55	923.36	922.88	927.88	933.37	938.17	950.81	937.34	19
ロット番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	

実際の分析については、分析の便宜上、表の数値を 100 で割ったデータで行った。



表 10 組立メーカ D の改善策実行 2 週間後の作業時間表  
 (単位：秒、工程数  $I = 6$ 、時限数  $J = 18$ 、反復回数  $K = 23$ )

実際の分析については、分析の便宜上、表の数値を 100 で割ったデータで行った。

時限	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	ロット 番号
開始時間	9:30	9:50	10:15	10:35	11:00	11:20	11:45	12:05	13:20	13:40	14:05	14:25	14:50	15:10	15:35	15:55	16:20	16:40	
工程1	900.37	907.64	909.43	919.57	916.74	924.87	923.71	916.69	913.50	914.25	916.25	924.65	921.99	926.39	934.20	940.33	935.09	939.25	23
工程2	891.10	893.88	897.16	908.81	911.97	908.10	909.95	907.43	907.23	901.99	900.98	909.38	917.22	923.13	924.93	920.56	922.83	926.99	
工程3	887.22	897.49	900.78	903.42	902.08	902.71	906.06	902.04	897.34	902.60	904.60	907.00	910.34	916.24	915.05	928.67	929.44	927.60	22
工程4	908.87	910.14	916.43	922.07	920.73	922.86	923.21	922.19	920.49	921.25	915.74	918.15	928.99	936.39	938.19	938.32	939.09	935.75	21
工程5	891.99	893.27	907.05	903.70	908.36	907.49	912.34	900.82	903.62	907.38	909.37	910.27	912.11	919.52	918.32	921.45	926.72	924.88	20
工程6	899.45	908.22	917.51	914.15	914.32	914.95	924.29	917.27	914.08	911.83	921.33	922.23	924.07	928.48	934.78	940.91	934.17	936.83	19
ロット番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18

#### 4.2.2 組立メーカ D の一日作業時間の分析と結果考察

前節の方法に沿いまずは改善実行前のデータ、改善直後のデータ、改善策実行 2 週間後のデータそれぞれ一日について作業時間を分析する。比較すべき 8 つのモデルについて、分析結果をモデル選択表で示す。ABIC の値の小さいモデルがよいモデルとされる。モデル選択表を表 11 に記す。

##### (a) 組立メーカ D の改善策実行前の一日作業時間の分析結果と考察

改善策実行前データである表 8 のデータを分析すると ABIC 最小モデルとして、反復効果は統計的にはないとする MP model が選ばれた。総平均効果  $\hat{\beta}^G = 978.43$  (秒) である。また、このモデルの決定係数（寄与率）は 0.99 であった。

##### 1) 工程効果

図 12 に工程効果を示す。下に伸びるほど作業が捗っており手待ち時間が長いことを、また上に伸びるほど作業が捗っておらず作業時間が長いことを示している。

工程 3 と工程 5 は手待ちしている工程であることが分かる。また工程 4 の作業時間が長い。一番手待ちをしている工程 3 と一番作業時間が長い工程 4 の効果の差が約 15 秒であり、大きな差ではない。従ってラインバランスに大きな問題はないと考えられる。

工程効果から分かる問題点について、比較的作業時間が長い工程 4 は日常的に作業に負荷が掛かっている可能性がある。例えば、まず各工程への要素作業の配分が不均衡であることが考えられる。また工程 4 にのみ手暗がりになっているなど、他の工程とは異なる作業環境が原因で作業時間が長くなっている可能性がある。工程 4 で扱う道具の不具合が原因で、作業時間が長くなっている可能性も考えられる。

表 11 モデル選択表（ABIC 値）

改善策実行前の 一日作業時間			改善策実行直後の 一日作業時間			改善策実行後 2 週間目の 一日作業時間		
モデル名称	$h$	ABIC 値	モデル名称	$h$	ABIC 値	モデル名称	$h$	ABIC 値
MP	4	-627.97	MPR	5	-580.08	MP	4	-678.86
MPR	5	-625.73	MP	4	-578.16	MPR	5	-676.54
P	3	-490.94	MR	4	-534.61	MR	4	-604.91
PR	4	-488.05	P	3	-476.51	P	3	-534.20
MR	4	-357.54	PR	4	-474.50	PR	4	-531.28
R	3	-294.62	M	3	-428.33	R	3	-484.51
G	2	-237.36	G	2	-410.00	M	3	-466.38
M	3	-234.82	R	3	-408.76	G	2	-449.97

製品/品質管理について、ラインバランス上は大きな問題はないと考えられるが、もし各工程に対して通常よりも製品/品質の管理に注力するならば、例えば比較的作業時間が長い工程 4 について、定期的に材料ロス、道具の不揃いや不具合があるかどうか、また道具の置き場で問題がないかどうかチェックする。もし問題があると判断した場合、道具の扱い方や片付け方について改善策を練る。改善策を実施することで、効果の変動の幅が小さくなってラインバランスが良くなる可能性がある。

## 2) 時限効果

図 13 に時限効果を示す。縦帯は左から小休憩、昼休憩、小休憩を表す。下であるほど作業が捗っており、上であるほど作業が捗っていないことを示している。

午前の作業時間をみると 9:50 開始の 2 時限目は 1 時限目よりもほぼ 20 秒捗り、10:15 開始の 3 時限目の作業から 1 つの時限あたり 5-10 秒ずつ作業が捗らなくなっている。午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて 10 秒程度捗らなくなっており、午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて 8 秒程度のみ捗っている。また昼休みを挟むと 7 秒程度捗り具合が良くなっている。さらに昼休憩直前の 12:05 開始の時限目は、11:45 開始の時限目よりも 10 秒程度捗っている。このことから休憩を取っても疲労回復の可能性は低いことが分かる。

時限効果から分かる問題は、効果の変動の幅が大きいこと、また特に夕方の作業は疲労が蓄積していて作業進捗が悪いことが挙げられる。直ぐに改善策を立案し、実行してなるべく変動の幅を小さくして、作業技術者の作業の疲労軽減を行うと良い。

製造/品質の管理について、時限効果が変動する幅は大きく継続作業による疲労があるので、時限毎のミス回数、材料ロス、不良率などに注目しなければならない。また工場内の電灯、作業位置の高さ、室温、歩数、工場の清潔さ、道具の片付け方など、継続作業で負荷が掛かる要因について作業技術者へヒヤリングし、時限効果に対する問題点を確認することが考えられる。

## 3) 組立メーカ D の実行した改善策

本分析の結果を作業技術者へ見せて工程・時限効果の特徴を説明した上で、工程・時限効果の問題についてヒヤリングを行った。

作業技術者へのヒヤリングの結果、多くの作業技術者から各人の作業台の高さが各人の腰の高さと合わないという意見が出た。腰を曲げながら緻密な作業を繰り返すことで疲労が蓄積していると考えられる。

そこで、すべての作業台を固定式の作業台から高さが可変式の作業台に変更する作業台への変更の意思決定を行った。可変式の作業台導入後は作業技術者各人の体格に合わせて、各人が自分自身で高さを調節することができるようになった。

この可変式の作業台は、従来使用している固定式の作業台の面よりも 500cm<sup>2</sup>程度広くなり、作業中の道具の置き場が以前よりも確保され作業がしやすくなっている。この投資総額は 400 万円程度であった。

作業改善策導入日について、改善策実行開始日は 2010/7/5 の朝から改善策を製造プロセスに導入し、改善策実行の翌営業日に改善策実行直後日 2010/7/8 の作業時間を計測した。

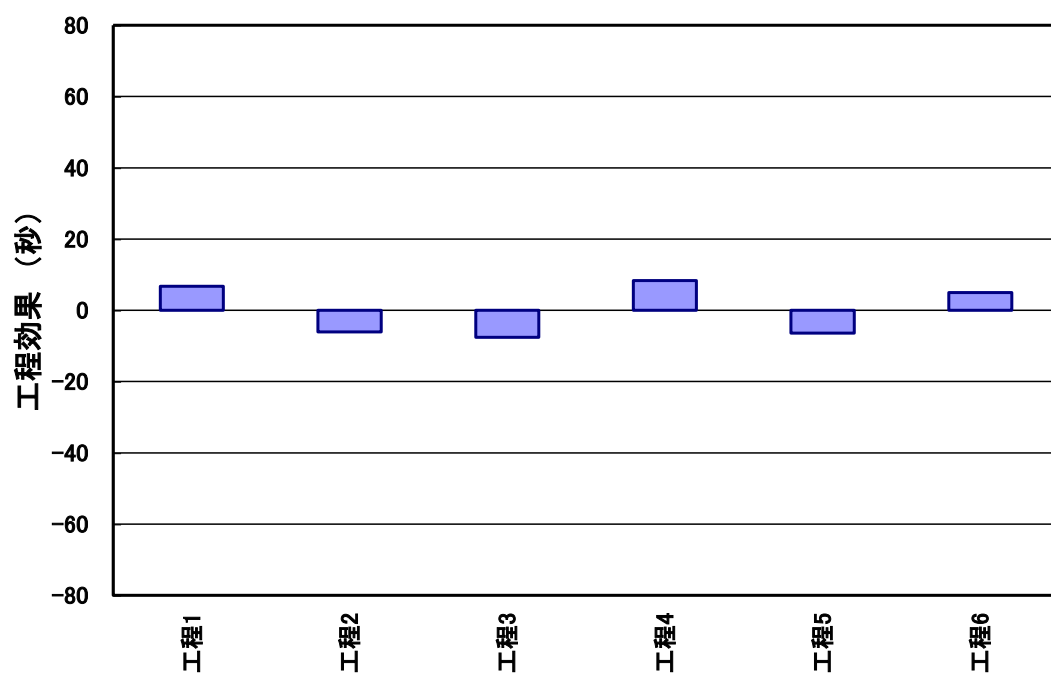


図 12 改善策実行前の工程効果  $\hat{\beta}^M$

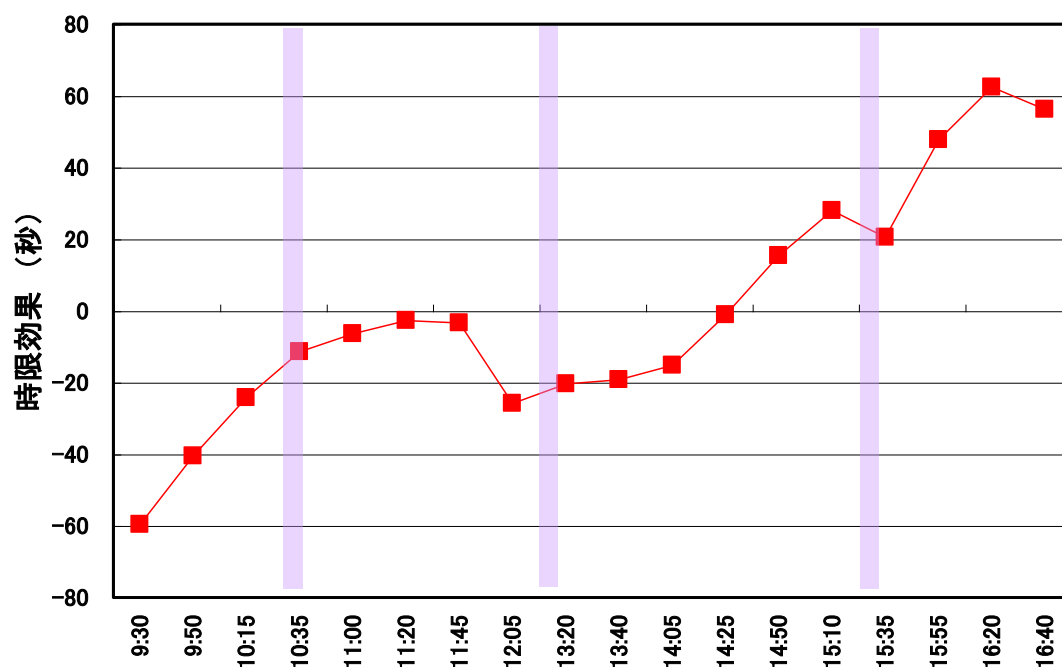


図 13 改善策実行前の時限効果  $\hat{\beta}^P$

## (b) 改善策実行直後の一日作業時間の分析結果と考察

表 9 のデータを分析すると ABIC 最小モデルとして、MPR model が選ばれた。総平均効果  $\hat{\beta}^G = 918.47$  (秒) である。また、このモデルの決定係数 (寄与率) は 0.93 であった。

### 1) 工程効果

図 14 に工程効果を示す。工程 3 と工程 5 は手待ちしている工程であることが分かる。また工程 4 の作業時間が長い。一番手待ちをしている工程 3 と一番作業時間が長い工程 4 の効果の差が約 15 秒であり、大きな差ではない。従ってラインバランスに大きな問題はないと考えられる。

工程効果から分かる問題点について、比較的作業時間が長い工程 4 は日常的に作業に負荷が掛かっている可能性がある。例えば、まず各工程への要素作業の配分が不均衡であることが考えられる。また工程 4 にのみ手暗がりになっているなど、他の工程とは異なる作業環境が原因で作業時間が長くなっている可能性がある。工程 4 で扱う道具の不具合が原因で、作業時間が長くなっている可能性も考えられる。

製品/品質管理について、ラインバランス上は大きな問題はないと考えられるが、もし各工程に対して通常よりも製品/品質の管理に注力するならば、例えば比較的作業時間が長い工程 4 について、定期的に材料ロス、道具の不揃いや不具合があるかどうか、また道具の置き場で問題がないかどうかチェックする。もし問題があると判断した場合、道具の扱い方や片付け方について改善策を練る。改善策を実施することで、効果の変動の幅が小さくなってラインバランスが良くなる可能性がある。

### 2) 時限効果

図 15 に時限効果を示す。一番作業の進捗が良いのは 9:30 開始の 1 時限目であり、また一番作業の進捗が悪いのは 16:20 開始の時限目である。変動の幅は 40 秒程度である。

午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて 6 秒程度捗らなくなっており、また午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて 2 秒程度捗らなくなっている。昼休みを挟むと 3 秒程度捗り具合が悪くなっている。このことから休憩を取っても疲労回復の可能性は低いことが分かる。

また昼休憩直前の 12:05 開始の時限目は、11:45 開始の時限目よりも 8 秒程度捗っている。

時限効果から分かる問題点について、変動の幅が依然として小さくはなく、また午後の中で一番作業が捗っている 13:20 開始の作業と一番作業が捗っていない 16:40 開始の作業を比較すると 30 秒程度の変動幅がある。従って、特に夕方の作業時間は疲労蓄積している様子であり、改善策の成果は確認できるが、改善策の対象とする問題のみならず他の問題も混在していることも考えられ、さらなる改善の余地がある可能性を持つ。

製造/品質の管理について、特に時限効果の変動する幅は依然として小さくないので、次に改善策を実行するのであれば、時限効果に対して改善策を実行するとともに改善策の成果をチェックすると良い。例えば定期的・継続的に本分析を行い、工程・時限・反復効果から問題点を読み取って改善策を立案実行し、実行した改善策の見直

しを行う PDCA を繰り返すと良い。また、時限毎の材料ロス、不良率などに注目し、常に注意深く成果物の品質チェックを行う良い。さらに工場内の電灯、作業位置の高さ、室温、歩数、工場の清潔さ、道具の片付け方など、継続作業で負荷が掛かる要因についてヒヤリングし、作業技術者に作業上の問題点を確認する方法もある。

### 3) 反復効果

図 16 に反復効果を示す。反復回数（ロット番号）が累積するにつれて、習熟から慣熟へと推移し作業が捗っていく様子が分かる。

統計的には反復効果があるモデルが選択されたが、効果の変動する幅は小さく、また ABIC 値からもこの効果は  $r$  の説明に大きく影響していないことが分かる。

反復効果から分かる問題点について、統計的には反復効果があるとされているので製造ラインは全体的に不慣れな作業を行っている期間であることが分かり、少し日を置いて次の改善策を実行すると良い。

製造/品質管理について、初期のロット作業時間がわずかであるが変動しているので、反復回数毎の作業ミス回数に注目し、通常よりも注意をはらって製造上の確認を行うと良い。

### 4) 組立メーカ D の改善策実行直後の改善案

統計的には反復効果があり、わずかではあるが反復効果の変動が確認できるので改善策の変更は行わずにそのまま改善策の実行を継続し、しばらく様子を見ることにした。また、引き続き定期的に作業時間を計測して分析を行い、工程・時限・反復効果から分かる問題点を読み取っておく。

時限効果について、11:45 開始の時限目はその次の 12:05 開始の時限目よりも作業進捗は 10 秒程度低い。この理由は、昼休憩前の気持ちの引き締まり、もしくは昼休憩前の作業の粗さのどちらかの可能性があり、作業技術者へヒヤリングを行いまた作業観察を行い、原因を確認することになった。

製造/品質の管理について、もし昼休憩前の作業が粗いと判断した場合は、昼休憩前の作業に掛かるすべてのロットの不良率を注意深くチェックし、全体的な品質低下になっていないか確認をすることになった。

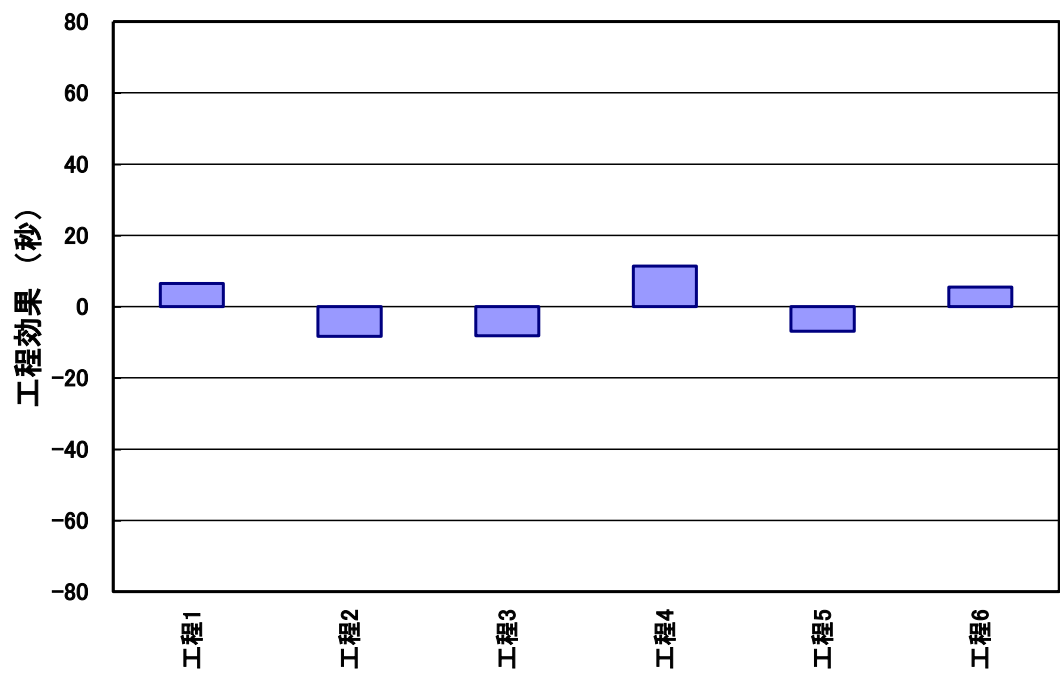


図 14 改善策実行直後の工程効果  $\hat{\beta}^M$

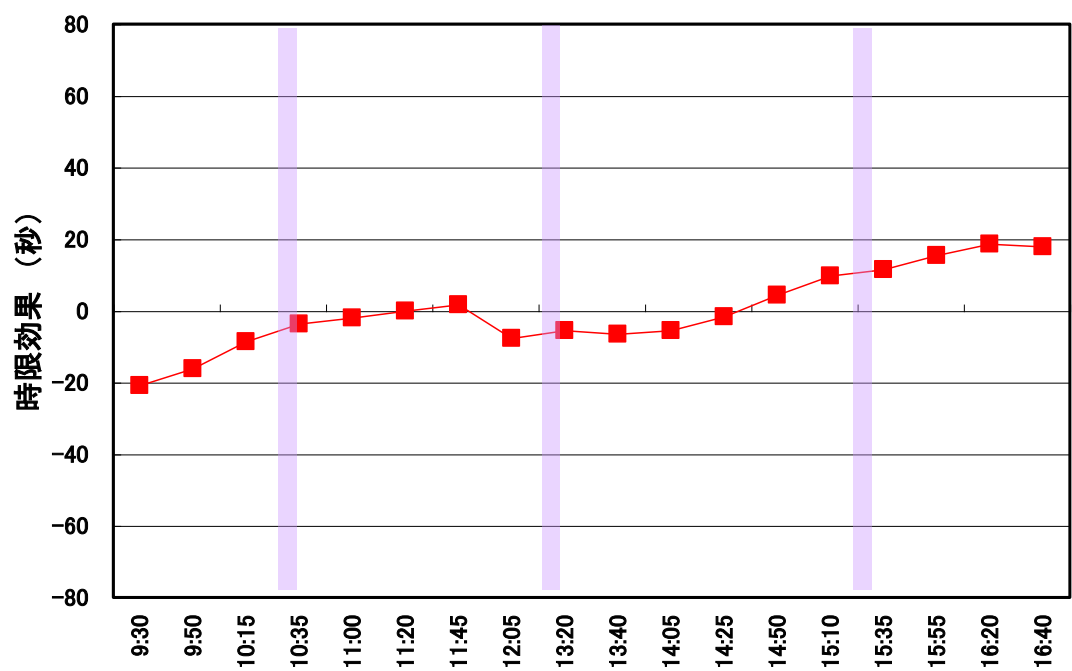


図 15 改善策実行直後の時限効果  $\hat{\beta}^P$

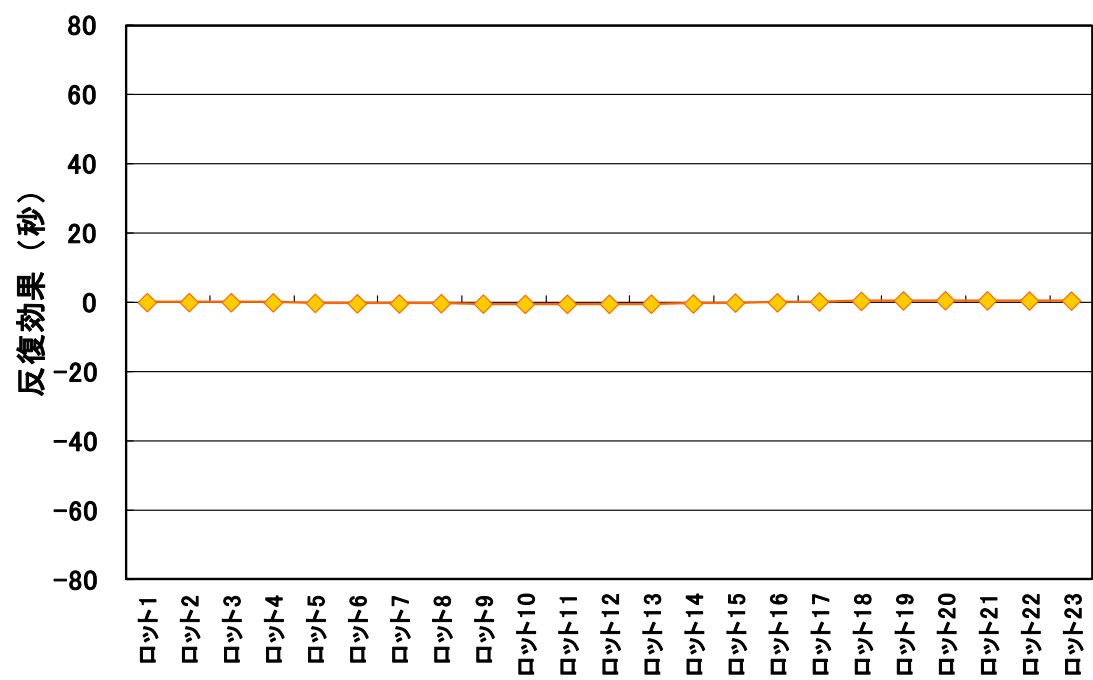


図 16 改善策実行直後の反復効果  $\hat{\beta}^R$



### (c) 組立メーカ D の改善策実行 2 週間後の一日作業時間の分析結果と考察

表 10 のデータを分析すると ABIC 最小モデルとして、反復効果は統計的にはないとする MP model が選ばれた。総平均効果  $\hat{\beta}^G = 915.78$  (秒) である。また、このモデルの決定係数 (寄与率) は 0.95 であった。

#### 1) 工程効果

図 17 に工程効果を示す。工程 3 と工程 5 は手待ちしている工程であることが分かる。また工程 4 の作業時間が長い。一番手待ちをしている工程 3 と一番作業時間が長い工程 4 の効果の差が約 15 秒であり、大きな差ではない。従ってラインバランスに大きな問題はないと考えられる。

工程効果から分かる問題点について、比較的作業時間が長い工程 4 は日常的に作業に負荷が掛かっている可能性がある。例えば、まず各工程への要素作業の配分が不均衡であることが考えられる。また工程 4 にのみ手暗がりになっているなど、他の工程とは異なる作業環境が原因で作業時間が長くなっている可能性がある。工程 4 で扱う道具の不具合が原因で、作業時間が長くなっている可能性も考えられる。

製品/品質管理について、ラインバランス上は大きな問題はないと考えられるが、もし通常よりも製品/品質の管理に注力するならば、例えば比較的作業時間が長い工程 4 について、定期的に材料ロス、道具の不揃いや不具合があるかどうか、また道具の置き場で問題がないかどうかチェックする。もし問題があると判断した場合、道具の扱い方や片付け方について改善策を練る。改善策を実施することで、効果の変動の幅が小さくなってラインバランスが良くなる可能性がある。

#### 2) 時限効果

図 18 に時限効果を示す。午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて 6 秒程度捗らなくなっており、また午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて 2 秒程度捗らなくなっている。昼休みを挟むと 3 秒程度捗り具合が悪くなっている。このことから休憩を取っても疲労回復の可能性は低いことが分かる。

また昼休憩直前の 12:05 開始の時限目は、11:45 開始の時限目よりも 8 秒程度捗っている。

時限効果から分かる問題点について、変動の幅が依然として小さくはなく、また午後の中で一番作業が捗っている 13:20 開始の作業と一番作業が捗っていない 16:40 開始の作業を比較すると 35 秒程度の変動幅がある。従って、特に夕方の作業時間は疲労蓄積している様子であり、改善策の成果は確認できるが改善策の対象とする問題のみならず、他の問題も混在していることも考えられ、さらなる改善の余地がある可能性を持つ。

製造/品質の管理について、特に時限効果の変動する幅は依然として小さくないので、次に改善策を実行するのであれば、時限効果に対して改善策を実行するとともに改善策の成果をチェックすると良い。例えば定期的・継続的に本分析を行い、工程・時限・反復効果から問題点を読み取って改善策を立案実行し、実行した改善策の見直しを行う PDCA を繰り返すと良い。また、時限毎の材料ロス、不良率などに注目し、常に注意深く成果物の品質チェックを行う良い。さらに工場内の電灯、作業位置の高さ、室温、歩数、工場の清潔さ、道具の片付け方など、継続作業で負荷が掛かる要因

についてヒヤリングし、作業技術者に作業上の問題点を確認する方法もある。

### 3) 組立メーカ D の改善策実行 2 週間後の改善案

実行した改善策について、特に時限効果に変動する幅が 120 秒程度であったが、改善策を実行したことで 40 秒程度まで低減でき、改善策の成果は確認できる。従ってこの改善策に対する改善の必要はないと判断した。

一方で、時限効果に変動の幅は 40 秒程度と依然として小さくはなく、また午後の中で一番作業が捗っている 13:20 開始の作業と一番作業が捗っていない 16:40 開始の作業を比較すると 30 秒程度の変動幅がある。従って、特に夕方は疲労蓄積している様子であり、他の問題もあると考えられる。そこで工場内の電灯、室温、歩数、工場の清潔さ、道具の片付け方などの継続作業で負荷が掛かる要因について、作業技術者へヒヤリングを行い作業上の問題点を確認することになった。

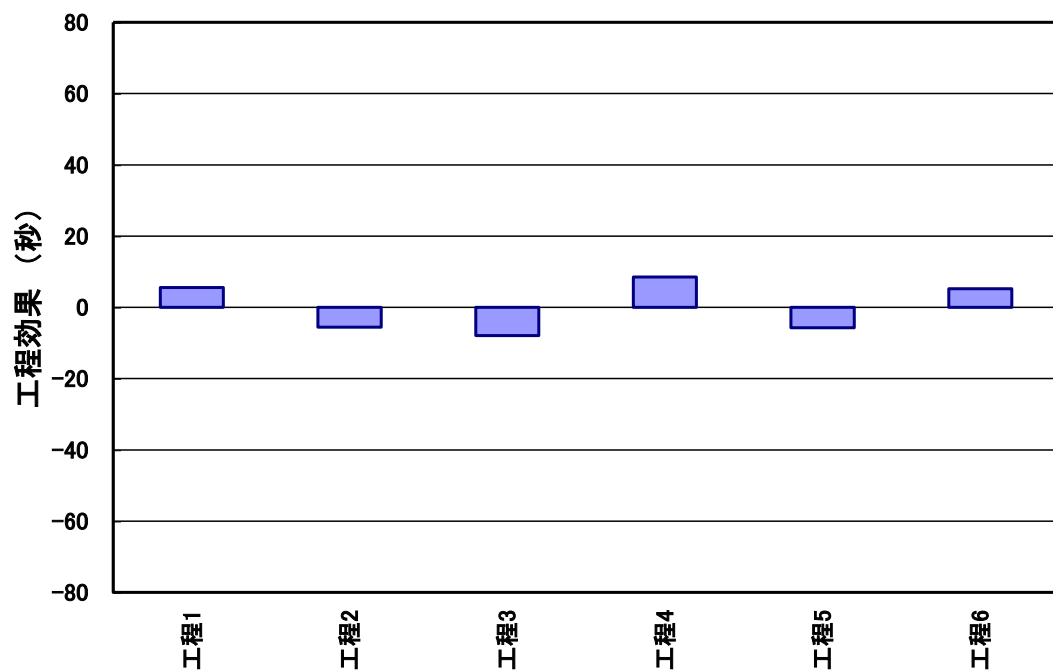


図 17 改善策実行 2 週間後の工程効果  $\hat{\beta}^M$

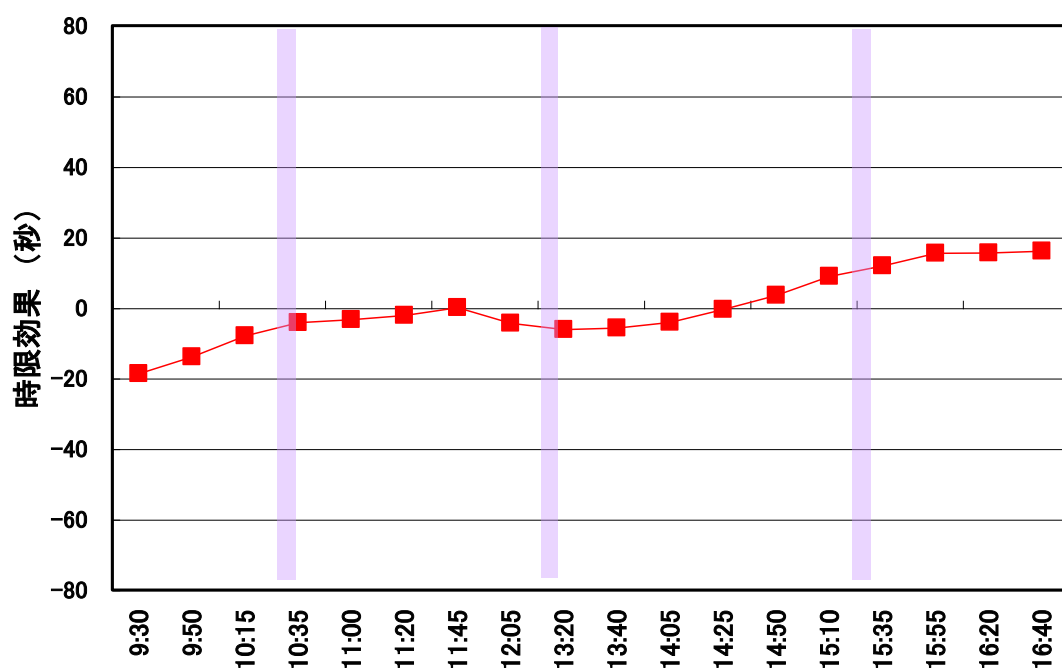


図 18 改善策実行 2 週間後の時限効果  $\hat{\beta}^P$

## 5 一日作業時間モデルの分析方法の評価

### 5.1 先行研究の分析方法との比較による評価

ここでは先行研究等の用いられている分析方法と本分析方法を比較し、本研究方法の長所を示す。

#### (a) 計測と分析の作業に多くの工数を要しない

先行研究[5]-[25]は、制約した条件の下（同レベルの技能を保有する作業技術者を選定して単一工程で単純作業を行う）で、作業時間やフリッカー値、心拍数などを計測している。また習熟の様子を捉えるために作業時間を分析し、一方で疲労の様子を捉えるためにフリッカー値や心拍数を分析するなど、識別問題を回避するために複数の計測・分析を行って考察をしている。

しかし実際の工場では、技能や経験が異なる作業技術者が集まって各人が各工程に分かれて複雑な作業をしており、またフリッカー値や心拍数は普段計測していない。

本分析方法は識別問題に対応しているので、実際の工場で計測した1日の作業時間のみを分析対象データとし、一度の分析で工程・時限・反復効果のあり方が分かる。

##### 1) 実際の作業時間のみを分析データとする

製造ラインの作業改善に結びつける際に、安価でかつ作業技術者各人に余計な作業負担を強わず、さらに大規模な計測装置を使わずに情報を得るのが望ましい。本分析方法では、実際の製造ラインにてストップウォッチや赤外レーザ等を用いて簡単に計測できる作業時間のみを分析対象データとしている。

##### 2) 一度の計測・分析で3効果の様子が分かる

作業技術者が習熟過程にある中で作業改善を行うと、現場の作業技術者が混乱するため、慣熟した後に作業を改善するのが良いと考えられる。本分析方法は習熟の様子を確認しながら同時に疲労具合や手待ちの様子を把握できるので、作業改善に着手すべきか否かならびに改善する個所が何処であるか一度のデータ収集と分析により判断することができる。

#### (b) バラツキの原因がより明確に分かる

基準化した作業時間の変動を表示しても各効果の混交により挙動が分かりにくい様子を本分析方法による結果と比較して示す。

##### 1) 時限基準化作業時間と時限効果の比較

図19は、表5の精密機器メーカーBの計測データを一時限内の平均作業時間と作業時間表全体平均の差（以下、時限基準化作業時間とする）、ならびに本分析方法で推定し図8にて示した時限効果とグラフで比較したものである。

本分析方法による時限効果と比べると時限基準化作業時間は全体的に縮まり、午前の早い時間帯と午後の遅い時間帯の特徴が抑えられてしまっている。これは図から分かるように反復に関する効果と一部相殺されてしまっているためである。直感的には時限基準化作業時間の変動は、正午を挟んだ午前と午後の挙動が同じ水準にあり、

段々と作業の捗り具合が悪くなっていく様子をうまく表せていない。一方で時限効果は段々と作業の捗り具合が悪くなっていく様子を表せている。

従って時限基準化作業時間を見るだけでは改善したい問題点を認識することが難しく、改善策案が大雑把になり改善成果を得られにくい可能性がある。

## 2) 反復基準化作業時間と反復効果の比較

図 20 は、表 5 の精密機器メーカー B の計測データを、一ロット内の平均作業時間と作業時間表全体平均の差（以下、反復基準化作業時間とする）、ならびに本分析方法で推定し図 9 に示した反復効果とグラフで比較したものである。

本分析方法による反復効果と比べると反復基準化作業時間は全体的に縮まり、時限効果も含むことから習熟から慣熟への過程の様子を認識することが難しい。これは図から分かるように時限に関する効果（時限基準化作業時間）と一部相殺されてしまっているためである。直感的には反復基準化作業時間の変動は全体の変動が同じ水準にあり、段々と作業の捗り具合が良くなっていく様子をうまく表せていない。一方で反復効果は作業の捗り具合が良くなっていく様子を表せている。

従って、反復基準化作業時間をみるだけでは改善策を実行して良いか否かの判断が難しい。

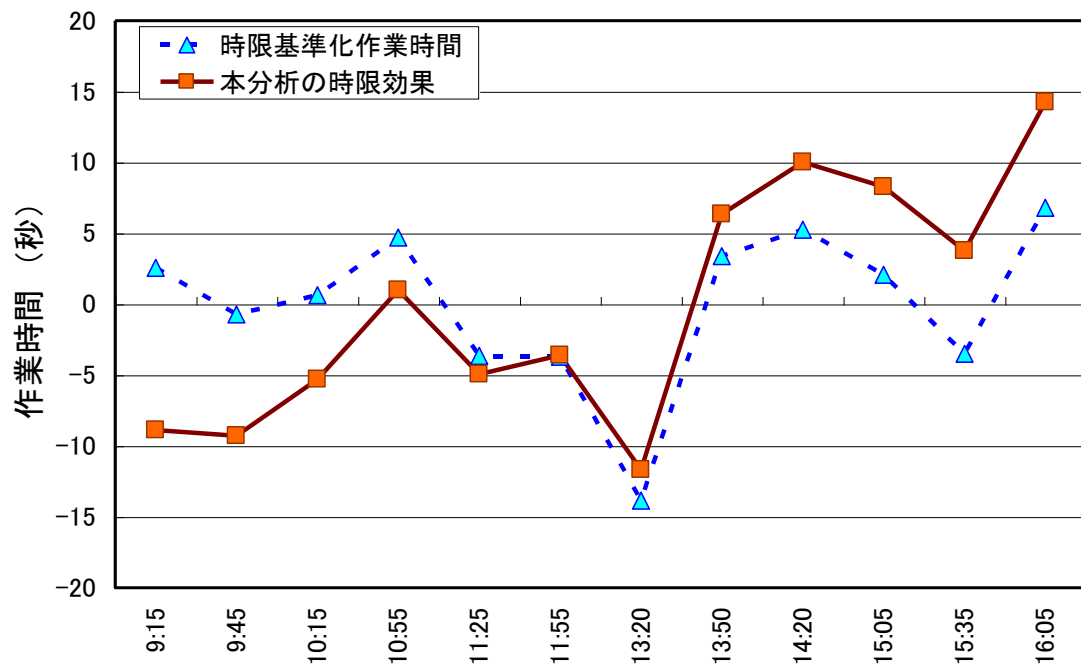


図 19 時限効果と時限基準化作業時間の比較

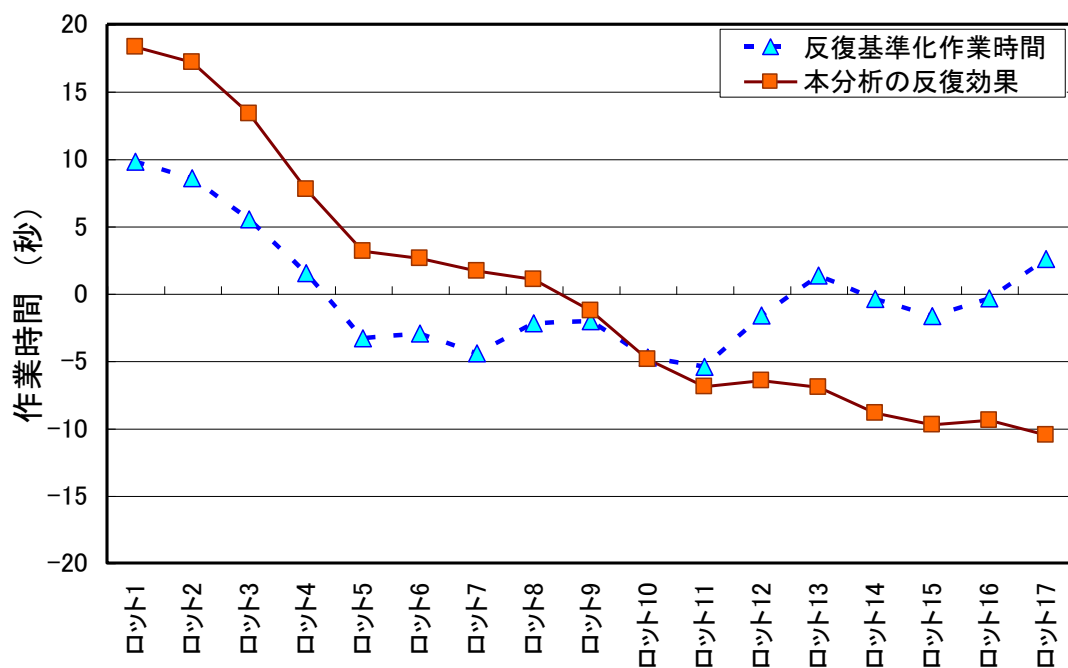


図 20 反復効果と反復基準化作業時間の比較

## 5.2 シミュレーションによる最適モデルの評価

作業時間モデルには識別問題が存在しており、何らかの制約を加えなければ工程・時限・反復効果は分離できなかった。本分析方法が取り入れた制約(7)が働いているかを、シミュレーション実験で確認する。

手順は以下のとおりである。

最適モデルで得られた  $\hat{\beta}$  を真として、データ  $r^*$  を生成する。すなわち、最適モデルで推定された誤差分散  $\sigma^2$  を用いて、正規乱数  $\varepsilon \sim N(0, \hat{\sigma}^2 \mathbf{I})$  を生成し、

$$r^* = X\hat{\beta} + \varepsilon$$

のように得る。こうして得られたデータをあらためて MPR 分析する。 $r^*$  の生成と分析を 200 回繰り返し、主に最適 (ABIC 最小) として選択されたモデルの頻度を観察する。

例えば精密機器メーカー B の分析結果 (表 7) では、最適モデルとして選択された PR model と 2 番目に ABIC が小さい次善の MPR model は、ABIC が近い値を示していた (PR model の ABIC=202.05、MPR model の ABIC=203.47 で、差が 1.42)。ABIC の差が小さい場合に、最適モデルが入れ替わることもあり得る。

本節では、4 節で分析した四社の結果に基づき、シミュレーション実験を行い、以下のことを確かめる。

- a) 選択された最適モデルが、シミュレーションでどの程度再選択されるのか。
- b) 選択された最適モデルと ABIC 値が近接する次善モデルやそれ以降のモデルについて、シミュレーションで選択回数が多いモデルの各効果の効果パラメータを比較し、各効果の傾向がどの程度再現されるのかを確かめる。

### 5.2.1 地域工芸メーカ A のシミュレーション

#### (a) シミュレーションによる最適モデルの選択頻度の比較

シミュレーションの結果である各モデルの選択回数を表 12 に示し、分析結果の ABIC 値の小さいモデルの順位と比較する。

シミュレーションの各モデル選択回数は、MP model が一番、MPR model は二番目に多く、MP model と MPR model で 91.5%を占めている。ただし、8.5%は他のモデルが選択されている。表 7 の分析結果も同様に、ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model、次善は MPR model であった。

また分析結果は、ABIC 値は 2 番目に小さな MPR model と 3 番目に小さなモデルの ABIC 値の差は大きく開いている。またシミュレーションの結果も同様に、選択回数が 2 番目の MPR model と 3 番目のモデルの差は大きい。

#### (b) シミュレーションによる工程・時限・反復効果の比較

分析結果の各モデルの効果パラメタとシミュレーション結果の各モデルの工程・時限・反復効果のパラメタ値を平均化したもの（以下：シミュレーション平均と記す）を比較する。比較したグラフを図 21, 図 22, 図 23 に示す。

グラフの凡例は、ABIC の小さなモデルを上から順に記述している。

以下、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model とシミュレーション結果における各モデルの効果が変動する様子を比較する。

##### 1) MP model

図 21 より、分析結果（工程効果）が変動する幅は 35 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（工程効果）も変動する幅は 35 秒程度であった。工程効果が変動する様子も近いことがわかる。

図 22 より、分析結果（時限効果）が変動する幅は 50 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（時限効果）も変動する幅は 50 秒程度であった。時限効果が変動する様子も近いことがわかる。

表 12 シミュレーション結果の選択頻度表

	数	%
MP model	137	68.5
MPR model	48	24.0
R model	10	5.0
MR model	4	2.0
P model	1	0.5
PR model	0	0.0
M model	0	0.0
G model	0	0.0



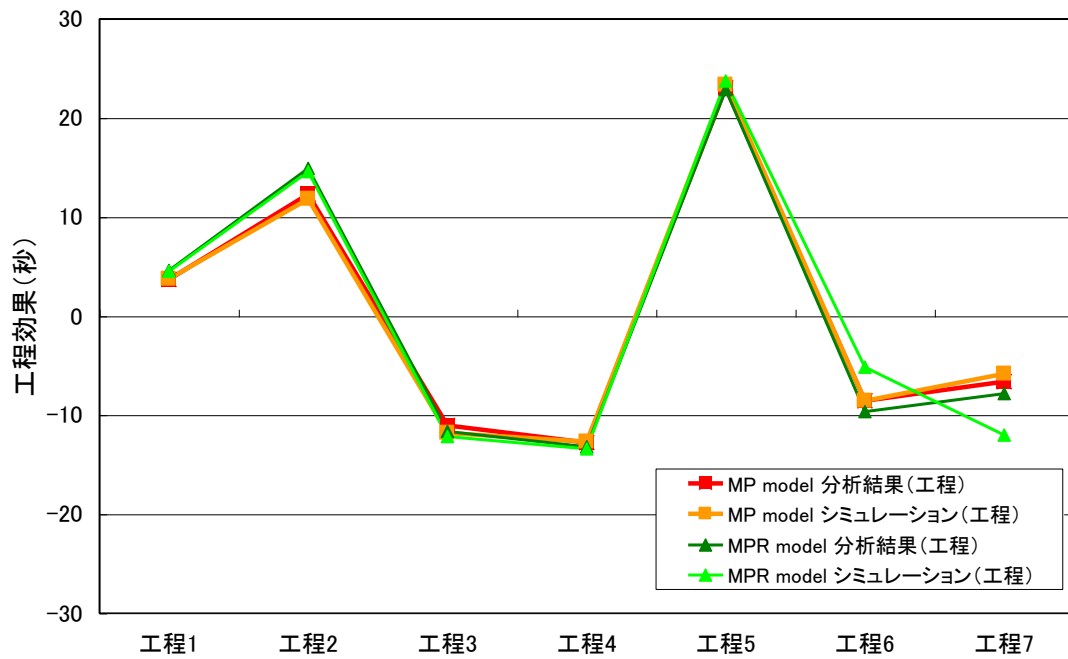


図 21 地域工芸メーカ A の工程効果のシミュレーション比較

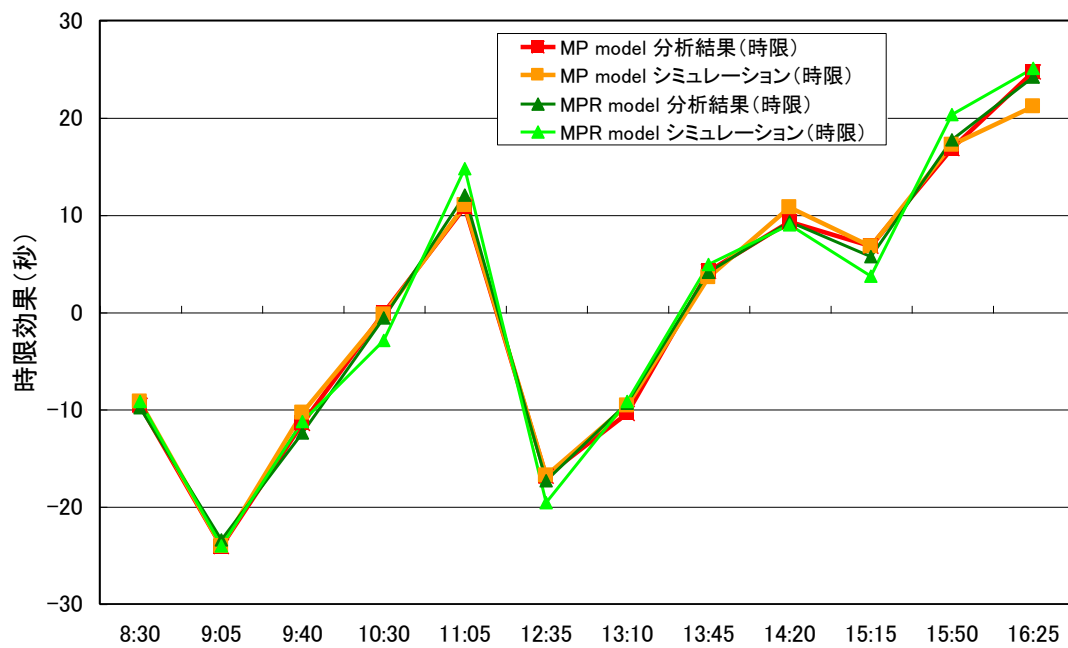


図 22 地域工芸メーカ A の時限効果のシミュレーション比較

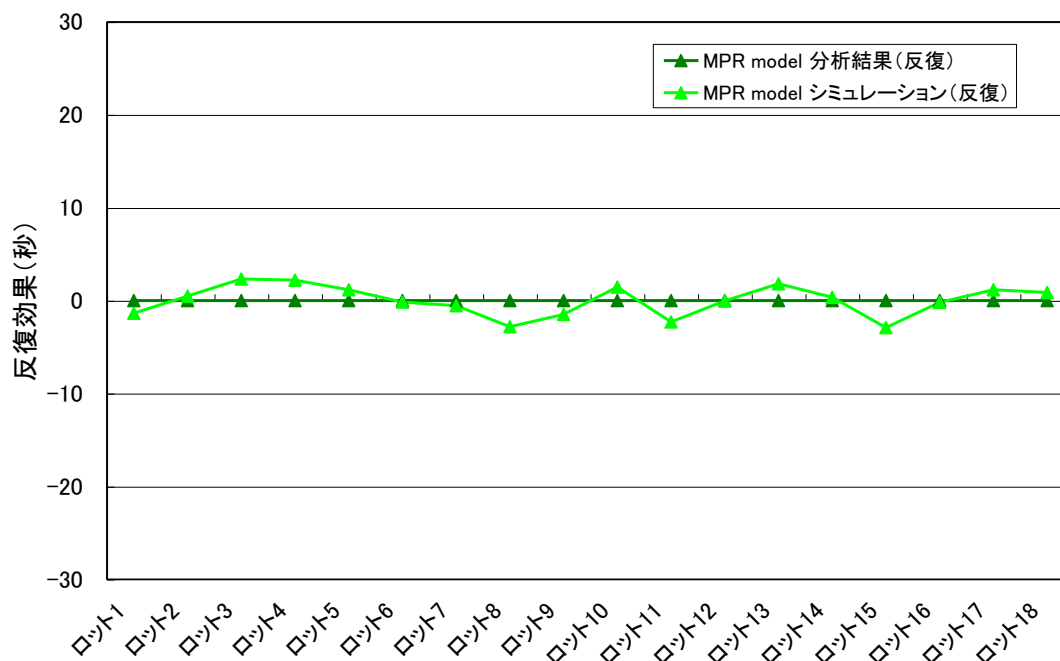


図 23 地域工芸メーカ A の時限効果のシミュレーション比較

## 2) MPR model

図 21 より、分析結果（工程効果）が変動する幅や変動する様子は、MP model の分析結果（工程効果）やシミュレーション平均（工程効果）と近い。

図 22 より、分析結果（時限効果）が変動する幅や変動する様子は、MP model の分析結果（時限効果）やシミュレーション平均（時限効果）と近い。

図 23 より、分析結果（反復効果）が変動する幅や変動する様子の特徴は、シミュレーション平均（反復効果）と同じく微動である。

以上より直感的には、推定した効果パラメタとシミュレーション平均はほぼ重なっており、大きな差は見られない。従って、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model と 2 番目に小さな次善モデルの MPR model の各効果は、シミュレーションの結果においても再現できている可能性は高いと考えられる。

## 5.2.2 精密機器メーカー B のシミュレーション

### (a) シミュレーションによる最適モデルの選択頻度の比較

シミュレーションの結果である各モデルの選択回数を表 13 に示し、分析結果の ABIC 値の小さいモデルの順位と比較する。

シミュレーションの各モデル選択回数は、PR model が一番、MPR model は二番目に多く、MP model と MPR model で 78%を占めている。ただし、22%は他のモデルが選択されている。表 7 の分析結果も同様に、ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model、次善は MPR model であった。

また分析結果は、ABIC 値は 2 番目に小さな MPR model と 3 番目に小さなモデルの ABIC 値の差は大きく開いている。またシミュレーションの結果も同様に、選択回数が 2 番目の MPR model と 3 番目のモデルの差は大きい。

### (b) シミュレーションによる工程・時限・反復効果の比較

分析結果の各モデルの効果パラメタとシミュレーション平均を比較したグラフを図 24、図 25、図 26 に示す。

グラフの凡例は、ABIC の小さなモデルを上から順に記述している。

以下、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの PR model とシミュレーション結果における各モデルの効果が変動する様子を比較する。

#### 1) MPR model

図 24 より、分析結果（工程効果）が変動する幅や変動する様子は、PR model の分析結果（工程効果）やシミュレーション平均（工程効果）と近い。

図 25 より、分析結果（時限効果）が変動する幅や変動する様子は、PR model の分析結果（時限効果）やシミュレーション平均（時限効果）と近い。

図 26 より、分析結果（反復効果）が変動する幅は、PR model の分析結果（反復効果）よりもやや幅が小さくなっているが変動する特徴は近い。また、シミュレーション平均（反復効果）と近い。

表 13 シミュレーション結果の選択頻度表

	数	%
PR model	112	56.0
MPR model	44	22.0
MP model	19	9.5
P model	15	7.5
G model	5	2.5
M model	2	1.0
R model	2	1.0
MR model	1	0.5

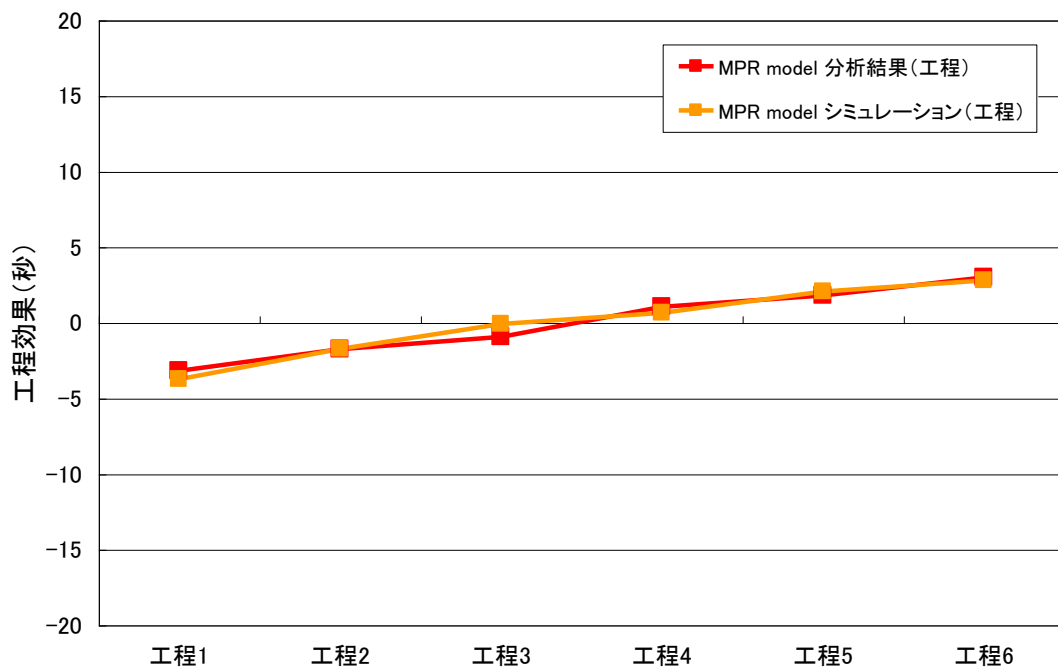


図 24 精密機器メーカー B の工程効果のシミュレーション比較

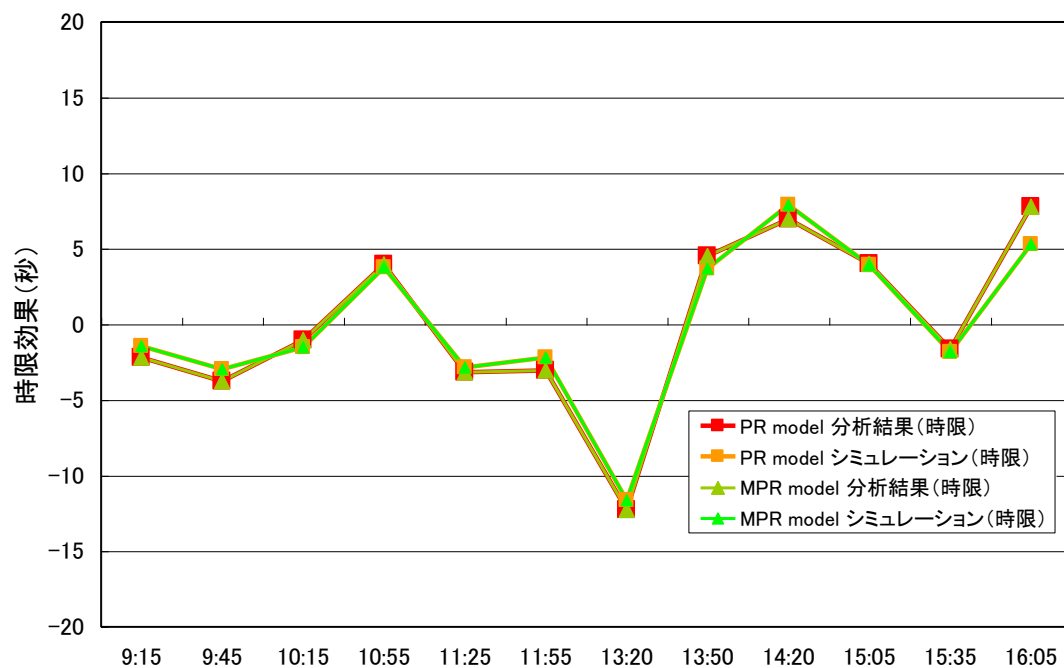


図 25 精密機器メーカー B の時限効果のシミュレーション比較

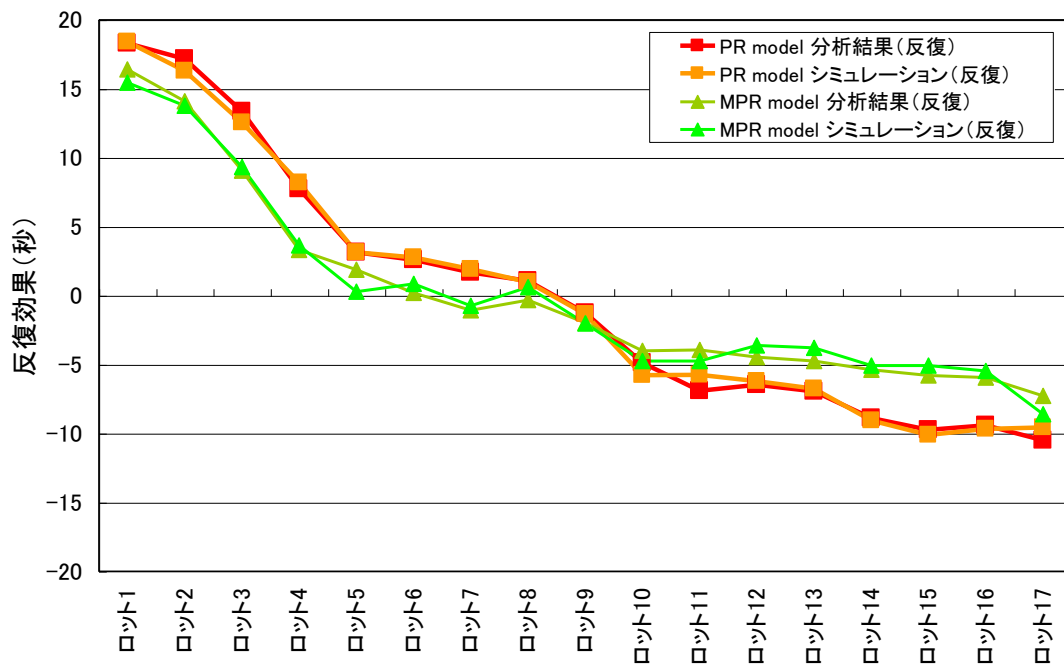


図 26 精密機器メーカー B の反復効果のシミュレーション比較

## 2) PR model

図 25 より、分析結果（時限効果）が変動する幅は 26 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（時限効果）も変動する幅は 26 秒程度であった。時限効果変動する様子も近いことがわかる。

図 26 より、分析結果（反復効果）が変動する幅は 28 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（反復効果）も変動する幅は 28 秒程度であった。反復効果変動する様子も近いことがわかる。

以上より直感的には、推定した効果パラメタとシミュレーション平均はほぼ重なっており、大きな差は見られない。従って、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの PR model と 2 番目に小さな次善モデルの MPR model の各効果は、シミュレーションの結果においても再現できている可能性は高いと考えられる。

### 5.2.3 自動車関連メーカー C のシミュレーション

#### (a) シミュレーションによる最適モデルの選択頻度の比較

シミュレーションの結果である各モデルの選択回数を表 14 に示し、分析結果の ABIC 値の小さいモデルの順位と比較する。

シミュレーションの各モデル選択回数は、MP model が一番、MPR model は二番目に多く、MP model と MPR model で 80.5%を占めている。ただし、19.5%は他のモデルが選択されている。表 7 の分析結果も同様に、ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model、次善は MPR model であった。

また分析結果は、ABIC 値は 2 番目に小さな MPR model と 3 番目に小さなモデルの ABIC 値の差は大きく開いている。またシミュレーションの結果も同様に、選択回数が 2 番目の MPR model と 3 番目のモデルの差は大きい。

#### (b) シミュレーションによる工程・時限・反復効果の比較

分析結果の各モデルの効果パラメタとシミュレーション平均を比較したグラフを図 27, 図 28, 図 29 に示す。

グラフの凡例は、ABIC の小さなモデルを上から順に記述している。

以下、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model とシミュレーション結果における各モデルの効果が変動する様子を比較する。

##### 1) MP model

図 27 より、分析結果（工程効果）が変動する幅と変動する様子は微動である。一方で、シミュレーション平均（工程効果）も変動する幅と変動する様子は微動である。

図 28 より、分析結果（時限効果）が変動する幅は 120 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（時限効果）も変動する幅は 120 秒程度であった。時限効果が変動する様子も近いことがわかる。

表 14 シミュレーション結果の選択頻度表

	数	%
MP model	98	49.0
MPR model	63	31.5
P model	39	19.5
M model	0	0.0
R model	0	0.0
MR model	0	0.0
PR model	0	0.0
G model	0	0.0

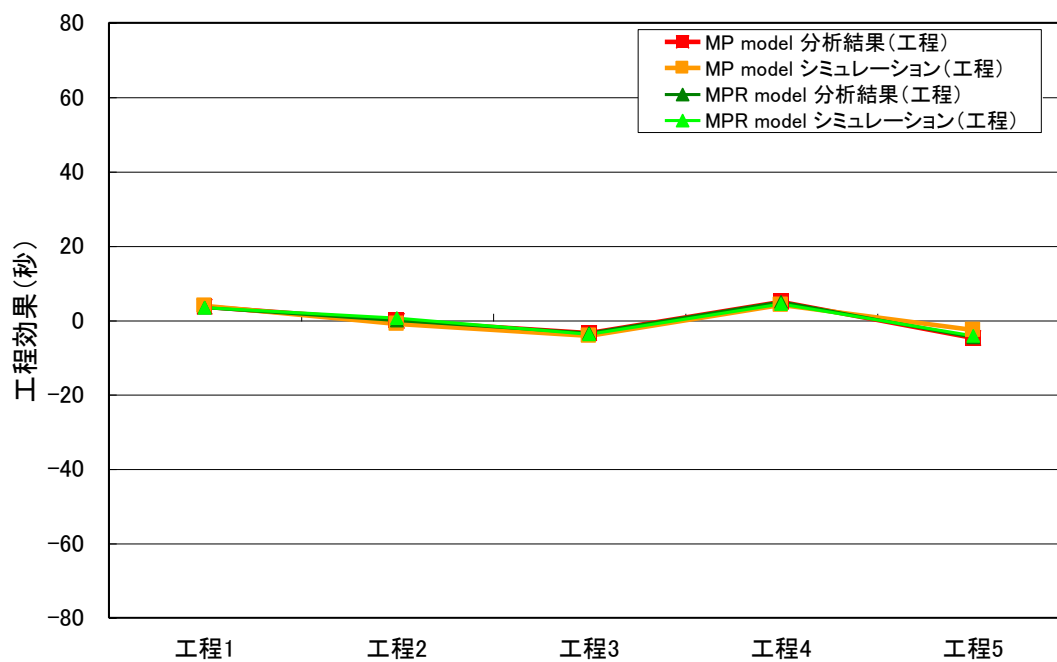


図 27 自動車関連メーカー C の工程効果のシミュレーション比較

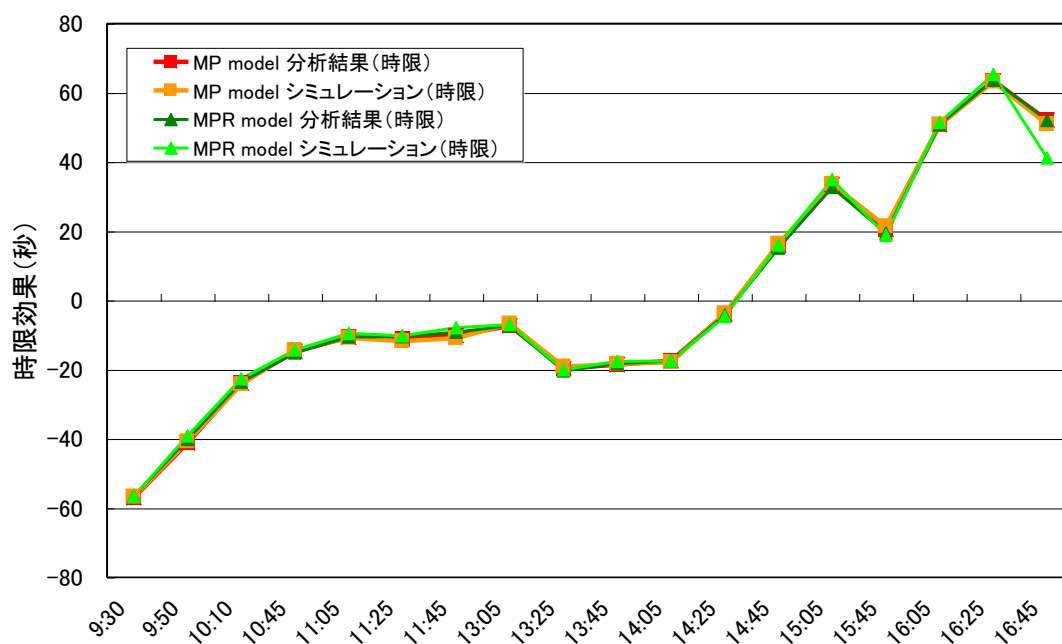


図 28 自動車関連メーカー C の時限効果のシミュレーション比較

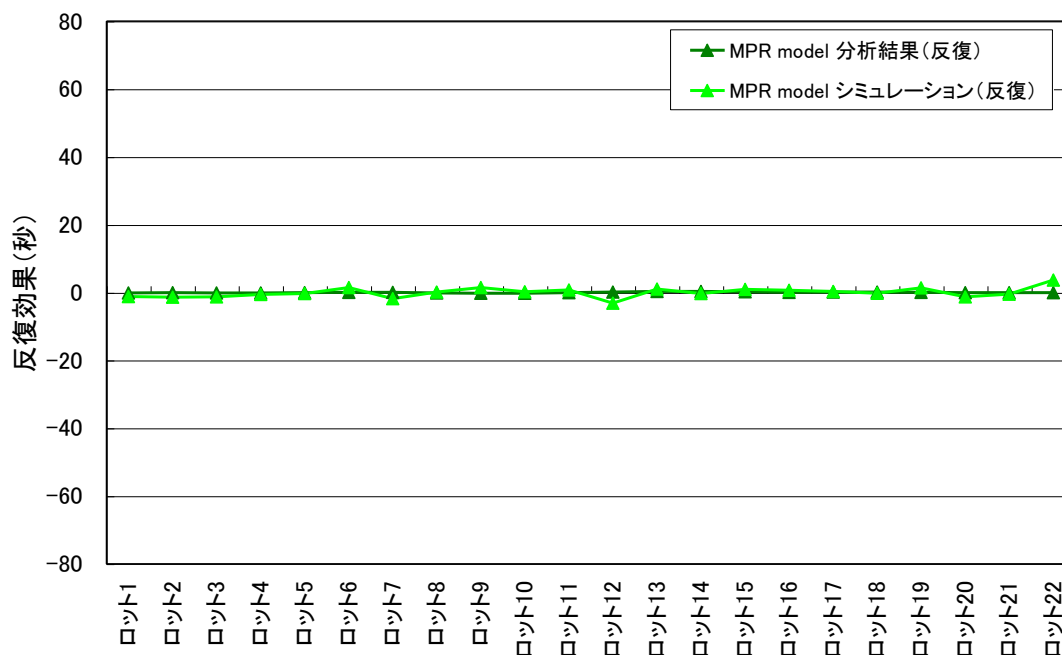


図 29 自動車関連メーカー C の反復効果のシミュレーション比較

## 2) MPR model

図 27 より、分析結果（工程効果）が変動する幅や変動する様子の特徴は、シミュレーション平均（工程効果）と同じく微動である。

図 28 より、分析結果（時限効果）が変動する幅や変動する様子は、MP model の分析結果（時限効果）やシミュレーション平均（時限効果）と近い。

図 29 より、分析結果（反復効果）が変動する幅や変動する様子の特徴は、シミュレーション平均（反復効果）と同じく微動である。

以上より直感的には、推定した効果パラメタとシミュレーション平均はほぼ重なっており、大きな差は見られない。従って、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model と 2 番目に小さな次善モデルの MPR model の各効果は、シミュレーションの結果においても再現できている可能性は高いと考えられる。



## 5.2.4 組立メーカ D の改善策実行前のシミュレーション

### (a) シミュレーションによる最適モデルの選択頻度の比較

シミュレーションの結果である各モデルの選択回数を表 15 に示し、分析結果の ABIC 値の小さいモデルの順位と比較する。

シミュレーションの各モデル選択回数は、MP model が一番、MPR model は二番目に多く、MP model と MPR model で 93.5%を占めている。ただし、6.5%は他のモデルが選択されている。表 11 の分析結果も同様に、ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model、次善は MPR model であった。

また分析結果は、ABIC 値は 2 番目に小さな MPR model と 3 番目に小さなモデルの ABIC 値の差は大きく開いている。またシミュレーションの結果も同様に、選択回数が 2 番目の MPR model と 3 番目のモデルの差は大きい。

### (b) シミュレーションによる工程・時限・反復効果の比較

分析結果の各モデルの効果パラメタとシミュレーション平均を比較したグラフを図 30、図 31、図 32 に示す。

グラフの凡例は、ABIC の小さなモデルを上から順に記述している。

以下、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model とシミュレーション結果における各モデルの効果が変動する様子を比較する。

#### 1) MP model

図 30 より、分析結果（工程効果）が変動する幅は 15 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（工程効果）も変動する幅は 15 秒程度であった。工程効果が変わる様子も近いことがわかる。

図 31 より、分析結果（時限効果）が変動する幅は 120 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（時限効果）も変動する幅は 120 秒程度であった。時限効果が変わる様子も近いことがわかる。

表 15 シミュレーション結果の選択頻度表

	数	%
MP model	166	83.0
MPR model	21	10.5
P model	9	4.5
PR model	4	2.0
M model	0	0.0
R model	0	0.0
MR model	0	0.0
G model	0	0.0

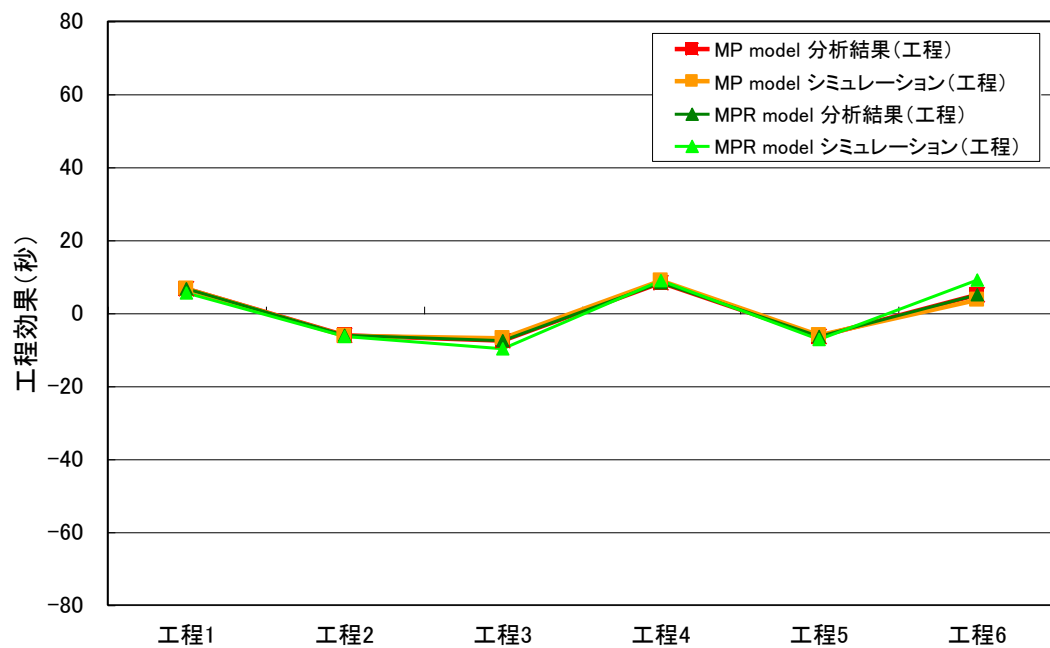


図 30 改善策実行前の工程効果のシミュレーション比較

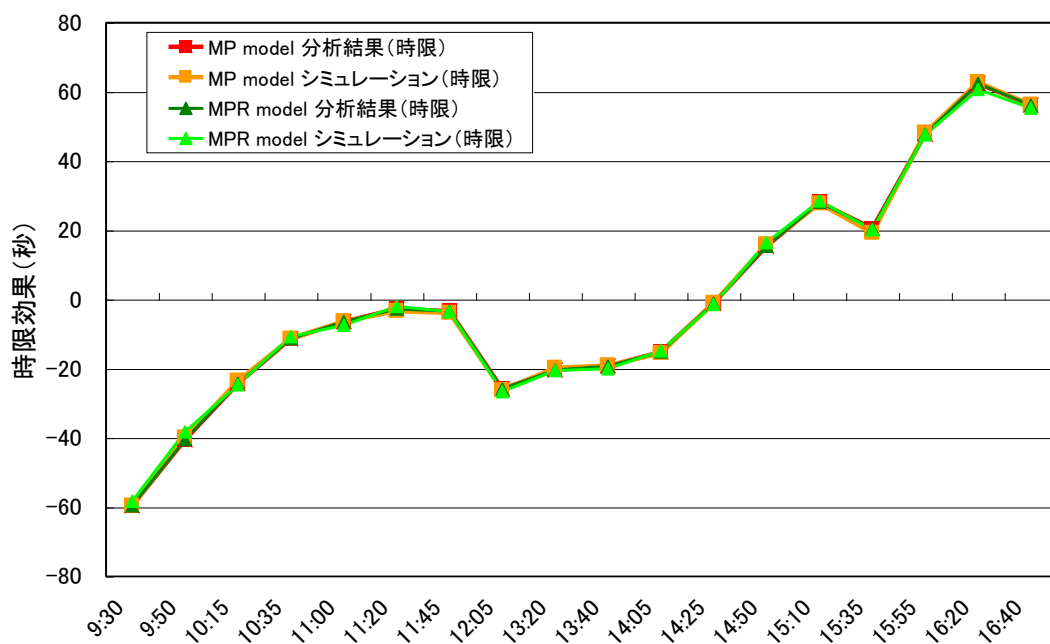


図 31 改善策実行前の時限効果のシミュレーション比較

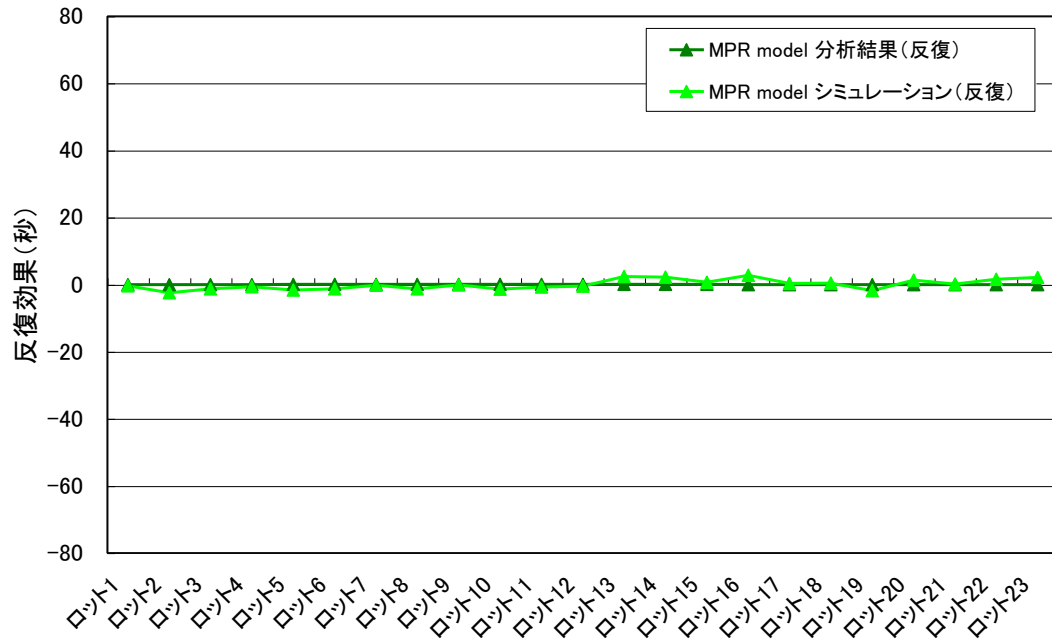


図 32 改善策実行前の反復効果のシミュレーション比較

## 2) MPR model

図 30 より、分析結果（工程効果）が変動する幅や変動する様子は、MP model の分析結果（工程効果）やシミュレーション平均（工程効果）と近い。

図 31 より、分析結果（時限効果）が変動する幅や変動する様子は、MP model の分析結果（時限効果）やシミュレーション平均（時限効果）と近い。

図 32 より、分析結果（反復効果）が変動する幅や変動する様子の特徴は、シミュレーション平均（反復効果）と同じく微動である。

以上より直感的には、推定した効果パラメタとシミュレーション平均はほぼ重なっており、大きな差は見られない。従って、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model と 2 番目に小さな次善モデルの MPR model の各効果は、シミュレーションの結果においても再現できている可能性は高いと考えられる。

### 5.2.5 組立メーカ D の改善策実行直後のシミュレーション

#### (a) シミュレーションによる最適モデルの選択頻度の比較

シミュレーションの結果である各モデルの選択回数を表 16 に示し、分析結果の ABIC 値の小さいモデルの順位と比較する。

シミュレーションの各モデル選択回数は、MPR model が一番、MP model は二番目に多く、MPR model と MP model で 77.5%を占めている。ただし、22.5%は他のモデルが選択されている。表 11 の分析結果も同様に、ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model、次善は MPR model であった。

また分析結果は、ABIC 値は 2 番目に小さな MP model と 3 番目に小さなモデルの ABIC 値の差は大きく開いている。またシミュレーションの結果も同様に、選択回数が 2 番目の MP model と 3 番目のモデルの差は大きい。

#### (b) シミュレーションによる工程・時限・反復効果の比較

分析結果の各モデルの効果パラメタとシミュレーション平均を比較したグラフを図 33, 図 34, 図 35 に示す。

グラフの凡例は、ABIC の小さなモデルを上から順に記述している。

以下、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MPR model とシミュレーション結果における各モデルの効果が変動する様子を比較する。

##### 1) MPR model

図 33 より、分析結果（工程効果）が変動する幅は 15 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（工程効果）も変動する幅は 15 秒程度であった。工程効果が変動する様子も近いことがわかる。

表 16 シミュレーション結果の選択頻度表

	数	%
MPR model	99	49.5
MP model	56	28.0
MR model	16	8.0
P model	13	6.5
PR model	9	4.5
M model	6	3.0
R model	1	0.5
G model	0	0.0

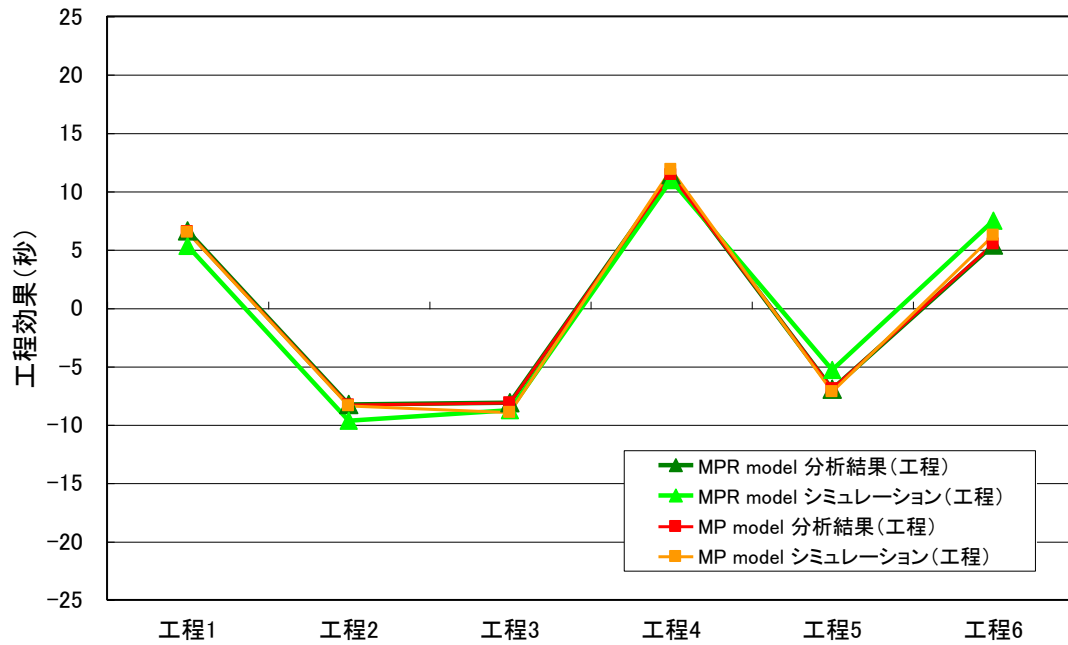


図 33 改善策実行直後の工程効果のシミュレーション比較

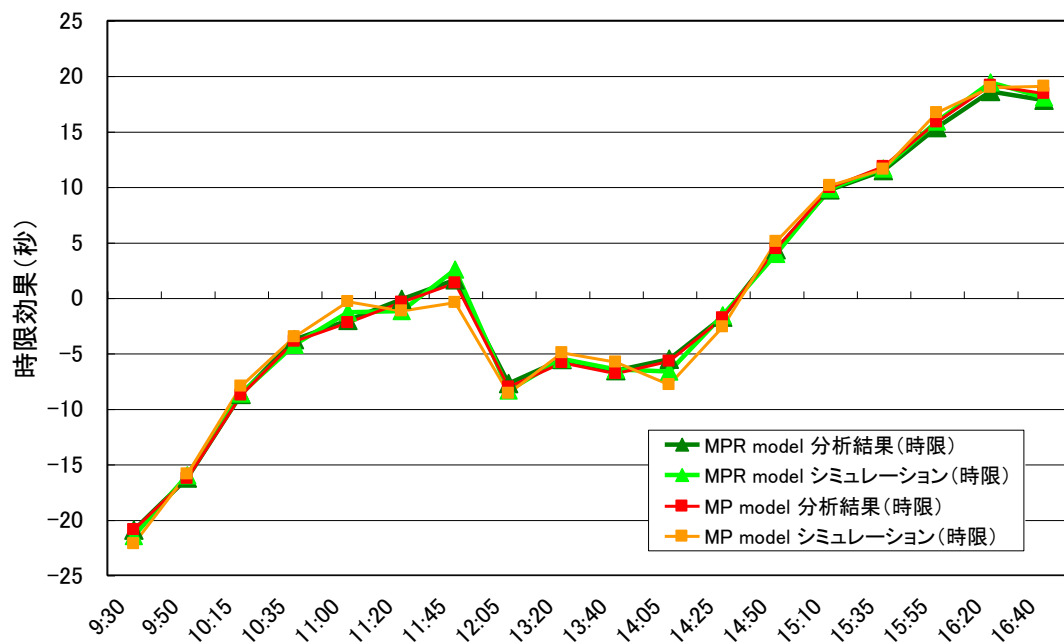


図 34 改善策実行直後の時限効果のシミュレーション比較

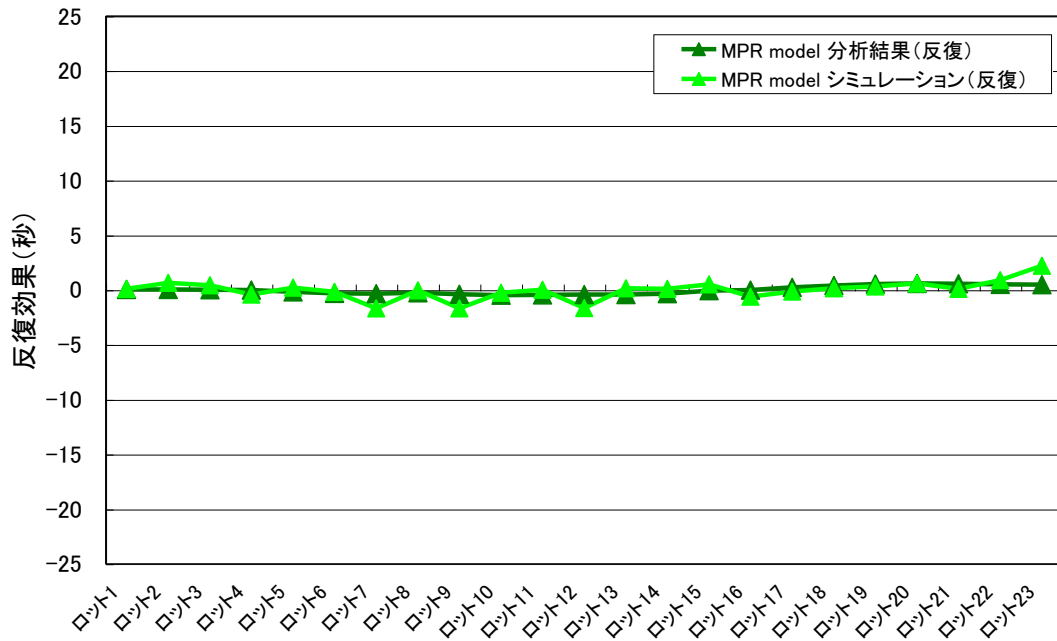


図 35 改善策実行直後の反復効果のシミュレーション比較

図 34 より、分析結果（時限効果）が変動する幅は 40 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（時限効果）も変動する幅は 40 秒程度であった。時限効果変動する様子も近いことがわかる。

図 35 より、分析結果（反復効果）が変動する幅や変動する様子の特徴は、シミュレーション平均（反復効果）と同じく微動である。

## 2) MP model

図 33 より、分析結果（工程効果）が変動する幅や変動する様子は、MPR model の分析結果（工程効果）やシミュレーション平均（工程効果）と近い。

図 34 より、分析結果（時限効果）が変動する幅や変動する様子は、MPR model の分析結果（時限効果）やシミュレーション平均（時限効果）と近い。

以上より直感的には、推定した効果パラメタとシミュレーション平均はほぼ重なっており、大きな差は見られない。従って、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MPR model と 2 番目に小さな次善モデルの P model の各効果は、シミュレーションの結果においても再現できている可能性は高いと考えられる。

## 5.2.6 組立メーカ D の改善策実行 2 週間後のシミュレーション

### (a) シミュレーションによる最適モデルの選択頻度の比較

シミュレーションの結果である各モデルの選択回数を表 17 に示し、分析結果の ABIC 値の小さいモデルの順位と比較する。

シミュレーションの各モデル選択回数は、MP model が一番、MPR model は二番目に多く、MP model と MPR model で 93.5%を占めている。ただし、22.5%は他のモデルが選択されている。表 11 の分析結果も同様に、ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model、次善は MPR model であった。

また分析結果は、ABIC 値は 2 番目に小さな MPR model と 3 番目に小さなモデルの ABIC 値の差は大きく開いている。またシミュレーションの結果も同様に、選択回数が 2 番目の MPR model と 3 番目のモデルの差は大きい。

### (b) シミュレーションによる工程・時限・反復効果の比較

分析結果の各モデルの効果パラメタとシミュレーション平均を比較したグラフを図 36, 図 37, 図 38 に示す。

グラフの凡例は、ABIC の小さなモデルを上から順に記述している。

以下、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MP model とシミュレーション結果における各モデルの効果が変動する様子を比較する。

#### 1) MP model

図 36 より、分析結果（工程効果）が変動する幅は 15 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（工程効果）も変動する幅は 15 秒程度であった。工程効果が変わる様子も近いことがわかる。

図 37 より、分析結果（時限効果）が変動する幅は 35 秒程度であった。一方で、シミュレーション平均（時限効果）も変動する幅は 35 秒程度であった。時限効果が変動する様子も近いことがわかる。

表 17 シミュレーション結果の選択頻度表

	数	%
MP model	145	72.5
MPR model	42	21.0
P model	7	3.5
PR model	6	3.0
M model	0	0.0
R model	0	0.0
MR model	0	0.0
G model	0	0.0

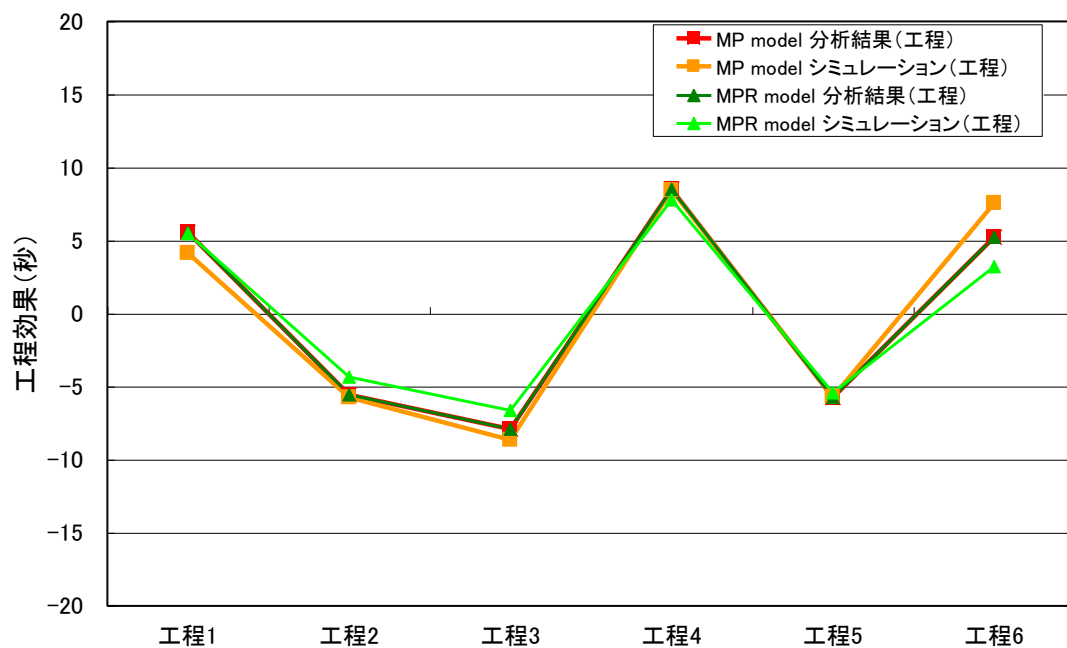


図 36 改善策実行 2 週間後の工程効果のシミュレーション比較

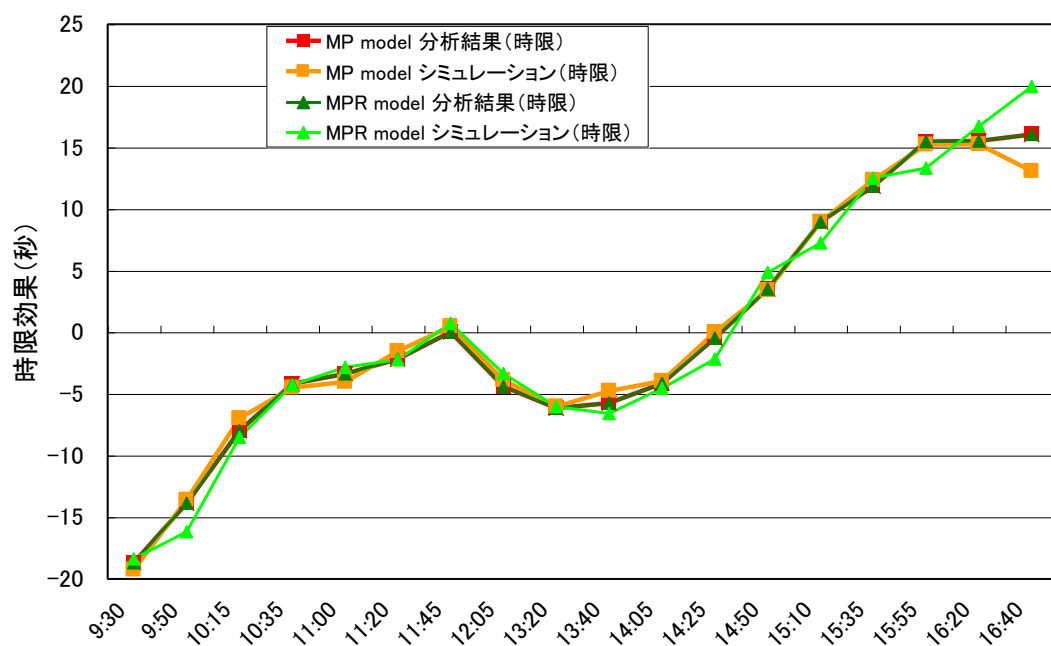


図 37 改善策実行 2 週間後の時限効果のシミュレーション比較



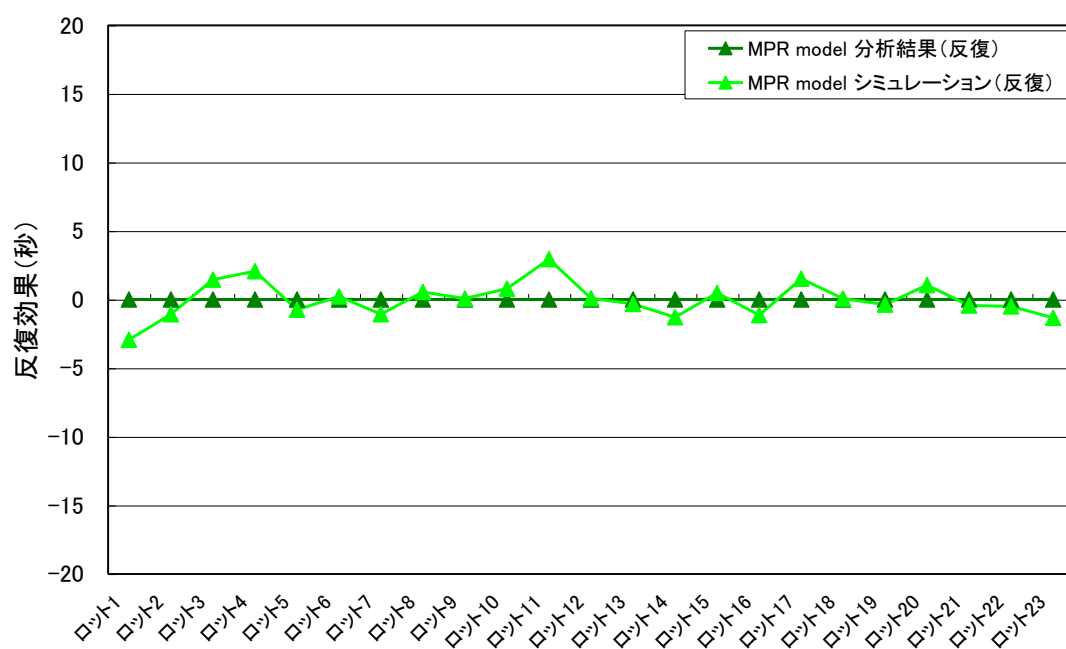


図 38 改善策実行 2 週間後の反復効果のシミュレーション比較

## 2) MPR model

図 36 より、分析結果（工程効果）が変動する幅や変動する様子は、MP model の分析結果（工程効果）やシミュレーション平均（工程効果）と近い。

図 37 より、分析結果（時限効果）が変動する幅や変動する様子は、MP model の分析結果（時限効果）やシミュレーション平均（時限効果）と近い。

図 38 より、分析結果（反復効果）が変動する幅や変動する様子の特徴は、シミュレーション平均（反復効果）と同じく微動である。

以上より直感的には、推定した効果パラメタとシミュレーション平均はほぼ重なっており、大きな差は見られない。従って、分析結果で ABIC 値が一番小さな最適モデルの MR model と 2 番目に小さな次善モデルの MPR model の各効果は、シミュレーションの結果においても再現できている可能性は高いと考えられる。

## 6 2 時点作業時間の作業時間モデルと分析結果

### 6.1 2 時点の作業時間モデル

一日の作業時間のベイズ型作業時間モデルについては、3 章で示した。

次に、改善策を実施する前後日を比較するベイズ型改善策実行前後作業時間モデルを導出する。

立案した改善策を工場現場で実行し改善した成果は、各効果のバラツキが減少した事もしくは無くなった事、作業時間が全体的に減った事から分かる。改善成果は、インクリメンタル・イノベーション<sup>(注4)</sup> そのものである。

#### 6.1.1 低減効果を含んだ 2 時点の作業時間モデル

##### (a) 2 時点の作業時間モデル

2 時点  $t=1,2$  で計測した実作業時間  $r_{ijt}$  の期待値を  $\mu_{ijt} = E(r_{ijt})$  とし、 $r_{ijt}$  が平均  $\mu_{ijt}$ 、分散  $\sigma^2 w_{ijt}$  の正規分布に従うと仮定する。ここで、 $t$  時点の低減 (After improvement) 効果  $\beta_t^A$ 、第  $i$  工程の工程 (Manufacturing process) 効果  $\beta_{it}^M$ 、第  $j$  時限の時限 (Period) 効果  $\beta_{jt}^P$ 、第  $k$  反復 (Repetition) 効果  $\beta_{kt}^R$  で説明する作業時間モデルを考える。すなわち、たとえばすべての効果で構成されているモデルは

$$\text{MPR-AM'P'R' model: } \mu_{ijt} = \beta^G + \sum_{t'=1}^2 (\beta_t^A + \beta_{it}^M + \beta_{jt}^P + \beta_{kt}^R) \delta(t, t'), \quad t=1,2;$$

$$i=1,\dots,I; \quad j=1,\dots,J; \quad k(=j-i+I)=1,\dots,K; \quad \delta(t, t') = \begin{cases} 1, & t=t'; \\ 0, & t \neq t', \end{cases}$$

であり、 $\beta^G$  は総平均効果、 $\beta_t^A$  は低減効果であるが  $\beta_1^A = 0$  として  $t=1$  を基準とし、改善策実行後に低減した時間を  $\beta^A (= \beta_2^A)$  で表すことにする。

また工程・時限・反復効果パラメタは、これまでと同様に次のようなゼロ和制約を満たすとする。

$$\sum_{i=1}^I \beta_{it}^M = \sum_{j=1}^J \beta_{jt}^P = \sum_{k=1}^K \beta_{kt}^R = 0, \quad t=1,2.$$

##### (b) 作業時間モデルのネーミング

比較する 2 時点の工程・時限・反復効果から成るモデルは、一日の 3 効果ともう一日の 3 効果の間にハイフンをつけて各時点に分ける。

例えば改善策実行前後日を比較する場合は、改善策を実行する前の日は先に記述し、その後にハイフン、次に改善策実行後した後の日を記述する。各効果の記述について、改善策実行前後でともに効果は存在し、改善策実行後の効果が有意に異なる場合は右肩に「'」を着け、一方で同等とみなせる場合は右肩には着けない。また、低減効果  $\beta_2^A$  は比較する後日のみ出現するので、右肩に「'」は着けない。

例えば、改善策実行後に低減効果が有意に無い場合と同等とみなせる場合について、

$$\text{MPR-M'R model: } \mu_{ijt} = \beta^G + (\beta_{it}^M + \beta_{jt}^P + \beta_k^R)\delta(t,1) + (\beta_{it}^M + \beta_k^R)\delta(t,2), \quad t=1,2;$$

となる。ここで、 $\beta_k^R = \beta_{k1}^R = \beta_{k2}^R$  である。このモデルは、

- 改善策実行前後でともに工程（M）効果が存在し、その動態が異なる
- 改善策実行前後で反復（R）効果の動態は同じである
- 時限（P）効果は改善策実行後には動態が無くなった

という特徴を表している。

また、例えば改善策実行後に低減効果が有意にある場合は、

$$\text{MPR-AM'R model: } \mu_{ijt} = \beta^G + (\beta_{it}^M + \beta_{jt}^P + \beta_k^R)\delta(t,1) + (\beta_t^A + \beta_{it}^M + \beta_k^R)\delta(t,2), \quad t=1,2;$$

となる。このモデルは、

- 改善策実行前後で工程（M）効果の動態が異なる
- 改善策実行前後で反復（R）効果の動態は同じである
- 時限（P）効果は改善策実行後には動態が無くなった
- 低減効果（A）がある

という特徴を表している。

### (c) 2 時点のモデルの比較すべき効果パラメタ

実作業時間  $r_{ijt}$  をまとめたベクトルを  $\mathbf{r} = (r_{111}, \dots, r_{IJ1}, r_{112}, \dots, r_{IJ2})'$  とする。 $\mathbf{r}$  を平均  $\boldsymbol{\mu} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$ 、分散  $\sigma^2\mathbf{W}$  の正規分布に従うと仮定する。ただし、 $\mathbf{W}$  は分散の相対的な大きさを与える対角行列で既知とし、 $|\mathbf{W}|=1$  と基準化する。

ここで、 $\mathbf{X}_* = (\mathbf{X}_M \mathbf{X}_P \mathbf{X}_R)$  を 2 時点の実作業時間表に対応する効果モデルのデザイン行列、 $\mathbf{x}_A = (0, \dots, 0, 1, \dots, 1)'$  は低減効果  $\beta_2^A$  に対応するベクトル、 $\mathbf{1}$  はすべての要素が 1 のベクトルとして、選択するモデルに合わせてデザイン行列を作成する。例えば、全ての効果を持つモデルについて、デザイン行列は  $\mathbf{X} = (\mathbf{1} \mathbf{x}_A \mathbf{X}_*)$  となる。

効果ベクトルは  $\boldsymbol{\beta} = (\beta^G, \beta_2^A, \boldsymbol{\beta}_*^M)'$ 、 $\boldsymbol{\beta}_* = ((\boldsymbol{\beta}_*^M)', (\boldsymbol{\beta}_*^P)', (\boldsymbol{\beta}_*^R)')'$  であり、例えば  $\boldsymbol{\beta}_*^M = (\boldsymbol{\beta}_{*1}^M, \boldsymbol{\beta}_{*2}^M)'$ 、 $\boldsymbol{\beta}_{*t}^M = (\beta_{1t}^M, \dots, \beta_{I-1,t}^M)'$  である。

比較すべきモデルは全部で 250 通りが考えられる。なぜならば、 $\boldsymbol{\beta}_*^M$ 、 $\boldsymbol{\beta}_*^P$ 、 $\boldsymbol{\beta}_*^R$  の 3 効果のそれぞれについて、前後での有無と相違で 5 通りあり、また  $\beta^A$  の有無を考慮すると  $5 \times 5 \times 5 \times 2$  通りとなるからである。

より具体的に、例えば  $\boldsymbol{\beta}_*^M$  について示すと、以下のようになる。

$\boldsymbol{\beta}_{*1}^M$ のみ表れた時	$\boldsymbol{\beta}_*^M = \boldsymbol{\beta}_{*1}^M, \boldsymbol{\beta}_{*2}^M = \mathbf{0}$
$\boldsymbol{\beta}_{*2}^M$ のみ表れた時	$\boldsymbol{\beta}_*^M = \boldsymbol{\beta}_{*2}^M, \boldsymbol{\beta}_{*1}^M = \mathbf{0}$
異なる効果が表れた時	$\boldsymbol{\beta}_*^M = ((\boldsymbol{\beta}_{*1}^M)', (\boldsymbol{\beta}_{*2}^M)')'$
同じ効果が表れた時	$\boldsymbol{\beta}_*^M = \boldsymbol{\beta}_{*1}^M = \boldsymbol{\beta}_{*2}^M$
$\boldsymbol{\beta}_{*1}^M$ 、 $\boldsymbol{\beta}_{*2}^M$ 効果が共に無い時	$\boldsymbol{\beta}_*^M$ : 空ベクトル

対応するデザイン行列は、例えば  $\mathbf{X}_M$  について示すと、1 時点のときのデザイン行列を  $\check{\mathbf{X}}_M$  として以下ようになる。

$\boldsymbol{\beta}_{*1}^M$ のみ表れた時	$\mathbf{X}_M = \begin{pmatrix} \check{\mathbf{X}}_M \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$
$\boldsymbol{\beta}_{*2}^M$ のみ表れた時	$\mathbf{X}_M = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \check{\mathbf{X}}_M \end{pmatrix}$
異なる効果が表れた時	$\mathbf{X}_M = \begin{pmatrix} \check{\mathbf{X}}_M & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \check{\mathbf{X}}_M \end{pmatrix}$
同じ効果が表れた時	$\mathbf{X}_M = \begin{pmatrix} \check{\mathbf{X}}_M \\ \check{\mathbf{X}}_M \end{pmatrix}$
$\boldsymbol{\beta}_{*1}^M, \boldsymbol{\beta}_{*2}^M$ 効果が共に無い時	$\mathbf{X}_M$ : 空行列

#### (d) 2 時点の作業時間モデルの尤度関数

低減効果を含んだ 2 時点の作業時間モデルの尤度関数は形式的には(3)と同じであり、ここに再掲しておく。

$$f(\mathbf{r} | \boldsymbol{\beta}, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{H}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(\mathbf{r} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})'\mathbf{W}^{-1}(\mathbf{r} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})\right\}$$

### 6.1.2 2 時点のベイズ型作業時間モデル

#### (a) 2 時点の作業時間モデルに対する一次階差 2 乗和の条件式

識別問題に対処するために付与する制約条件は、工程・時限・反復効果それぞれの隣り合う効果パラメタの 1 次階差の重みつき 2 乗和を小さく抑える以下の式である。

$$(11) \quad \sum_{t=1}^2 \left\{ \frac{1}{\sigma_{M,t}^2} \sum_{i=1}^{I-1} (\beta_{it}^M - \beta_{i+1,t}^M)^2 + \frac{1}{\sigma_{P,t}^2} \sum_{j=1}^{J-1} (\beta_{jt}^P - \beta_{j+1,t}^P)^2 + \frac{1}{\sigma_{R,t}^2} \sum_{k=1}^{K-1} (\beta_{kt}^R - \beta_{k+1,t}^R)^2 \right\} \rightarrow \min$$

ここで、 $\sigma_{M,t}^2, \sigma_{P,t}^2, \sigma_{R,t}^2$  ( $t=1,2$ ) は、条件(11)を正規分布の密度関数で表現したときの事前分布の分散（超パラメタ）である。

事前密度は、形式的には(8)と同じであるが、選択するモデルに応じて超パラメタを導入するので、超パラメタ・ベクトル  $\sigma$  とまとめて以下に再掲しておく。

$$\pi(\beta_* | \sigma, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-\frac{L}{2}} |D'\Sigma^{-1}D|^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \beta_*' D' \Sigma^{-1} D \beta_*\right) \rightarrow \max$$

#### (b) 計算の手順

計算の手順は、比較するモデルが 8 から 250 に増えるだけで、3.4.6 節 b) と同じである。

## 6.2 2 時点作業時間の分析と考察

改善策実行前のデータ（表 8）、改善策実行直後のデータ（表 9）、改善策実行 2 週間後のデータ（表 10）の各時点の作業時間データについて、比較したい 2 時点のデータを取り上げて 2 時点の作業時間モデルで分析する。その結果を表 18 に記す。ただし、最小の ABIC から順に比較すべき 250 モデルの上位 8 番目まで記した。

### 6.2.1 改善策実行前後の分析と結果考察

表 8 のデータを  $t=1$  のものとし、表 9 のデータを  $t=2$  のものとして作業時間データを同時に分析すると、ABIC 最小モデルとして MP-AMP'R' model が選ばれた。総平均効果  $\beta^G = 978.42$ （秒）、低減効果  $\beta^A = -61.07$ （秒）である。また、このモデルの決定係数（寄与率）は 0.986 であった。

低減効果について、改善策を実行する前と比較して改善策を実行したことで全体的に約 61 秒作業時間が短縮され、改善策を実行したことによる直接的な成果が分かる。また、各効果の変動する幅はどの程度小さくなったのか、2 時点の同じ効果のグラフを比較することで改善策の成果が分かる。

表 18 モデル選択表（最小 ABIC 値 上位 8 モデル）

モデル名称	$h$	改善策実行前から 改善直後	モデル名称	$h$	改善策実行直後から 改善策実行後 2 週間目
MP-AMP'R'	7	-1208.76	MPR-AMP'	7	-1279.90
MP-AMP'	6	-1206.45	MP-AMP	5	-1259.16
MPR-AMP'	7	-1205.75	MP-AM'P	6	-1253.60
MPR-AMP'R'	8	-1203.42	MP-AP'R'	7	-1252.13
MP-AM'P'	7	-1189.34	MPR-AMP'R'	8	-1250.33
MPR-AM'P'	8	-1186.38	MP-MP	4	-1245.85
MPR-AM'P'R'	9	-1184.84	MPR-MP	5	-1242.59
MP-AM'R'	7	-1117.20	MPR-AM'P'	8	-1236.77

### 1) 改善策実行前後の工程効果

改善策実行前と改善策実行直後の工程効果を図 39 に示す。

統計的には改善策実行前と改善策実行直後の工程効果の変動の変化は無いとされた。改善策がラインバランスに対する改善策ではないため改善策実行後の工程効果は変動に変化が無く、改善策が工程効果へ影響していないことが分かる。

工程 3 と工程 5 は手待ちしている工程であることが分かる。また工程 4 の作業時間が長い。一番手待ちをしている工程 3 と一番作業時間が長い工程 4 の効果の差が約 15 秒であり、大きな差ではない。従ってラインバランスに大きな問題はないと考えられる。

工程効果から分かる問題について、比較的作業時間が長い工程 4 は日常的に作業に負荷が掛かっている可能性がある。例えば、まず各工程への要素作業の配分が不均衡であることが考えられる。また工程 4 にのみ手暗がりになっているなど、他の工程とは異なる作業環境が原因で作業時間が長くなっている可能性がある。工程 4 で扱う道具の不具合が原因で、作業時間が長くなっている可能性も考えられる。

製品/品質管理について、ラインバランス上は大きな問題はないと考えられるが、もし各工程に対して通常よりも製品/品質の管理に注力するならば、例えば比較的作業時間が長い工程 4 について、他の工程と作業環境が異なっていないか、材料ロスや道具の不揃いや不具合があるかどうか、また道具の置き場で問題がないかどうか確認する。もし問題があると判断した場合、問題に対する改善策を練る。改善策を実行することで、効果の変動の幅が小さくなってラインバランスが良くなる可能性がある。

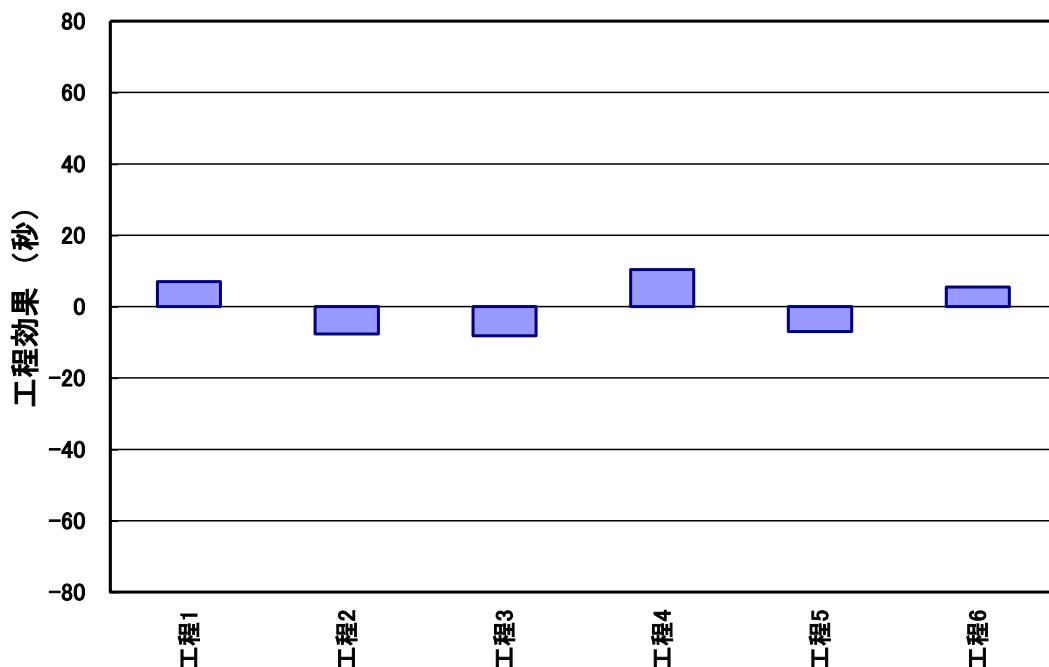


図 39 改善策実行前および改善策実行直後の工程効果  $\hat{\beta}_1^M = \hat{\beta}_2^M$

## 2) 改善策実行前後の時限効果

図 40 と図 41 に時限効果を示す。縦帯は左から小休憩、昼休憩、小休憩を表す。下であるほど作業が捗っており、上であるほど作業が捗っていないことを示している。

改善策実行前と改善策実行直後では、時限効果が異なる結果となった。

これらの効果の変動を比較すると、改善策実行直後は時限効果の変動の幅が小さくなっており、改善策の成果があることが分かる。また、夕方の変動の幅も 120 秒程度から 40 秒程度へ小さくなっており、継続作業による疲労が軽減されていることが分かる。改善策を実行した成果として、工程効果の変動に変化が無いということから、低減効果のほとんどが、時限効果が変動する幅の収縮によりできたものと考えられる。

休憩前後の時限目については、改善策実行前後の効果の変動を比較しても変化に差が無い様子であり、休憩による疲労回復はあまり期待できないと考えられる。

改善策の実行前は、午前の作業時間をみると 9:30 開始の 2 時限目は 1 時限目よりもほぼ 20 秒捗り、10:15 開始の 3 時限目の作業から 1 つの時限あたり 5-10 秒ずつ作業が捗らなくなっている。午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて 10 秒程度捗らなくなっており、午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて 8 秒程度のみ捗っている。また昼休みを挟むと 7 秒程捗り具合が良くなっている。さらに昼休憩直前の 12:05 開始の時限目は、11:45 開始の時限目よりも 10 秒程度捗っている。

一方で改善策の実行直後は、午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて 6 秒程度捗らなくなっており、また午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて 2 秒程度捗らなくなっている。昼休みを挟むと 3 秒程捗り具合が悪くなっている。このことから改善策の実行前と同様に、休憩を取っても疲労回復の可能性は低いことが分かる。また昼休憩直前の 12:05 開始の時限目は、11:45 開始の時限目よりも 8 秒程度捗っている。

製造/品質管理について、分析結果から休憩を挟んでも疲労の回復は期待できないので、作業環境の改善策の実行を優先的に行うことが考えられる。改善策案として、作業台付近の電灯や冷暖房の調節、機具、製造条件の見直しなど疲労や負担を感じる部分について、作業技術者各人へヒヤリングし作業技術者とともに改善策を立案し実行すると、改善する可能性がある。



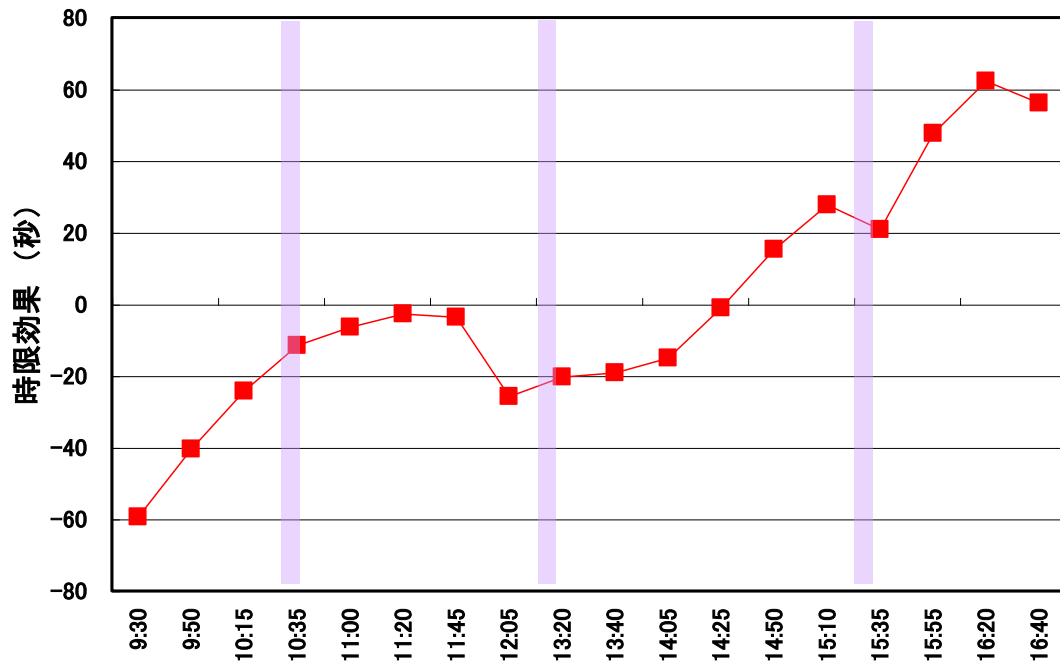


図 40 改善策実行前の時限効果  $\hat{\beta}_1^p$

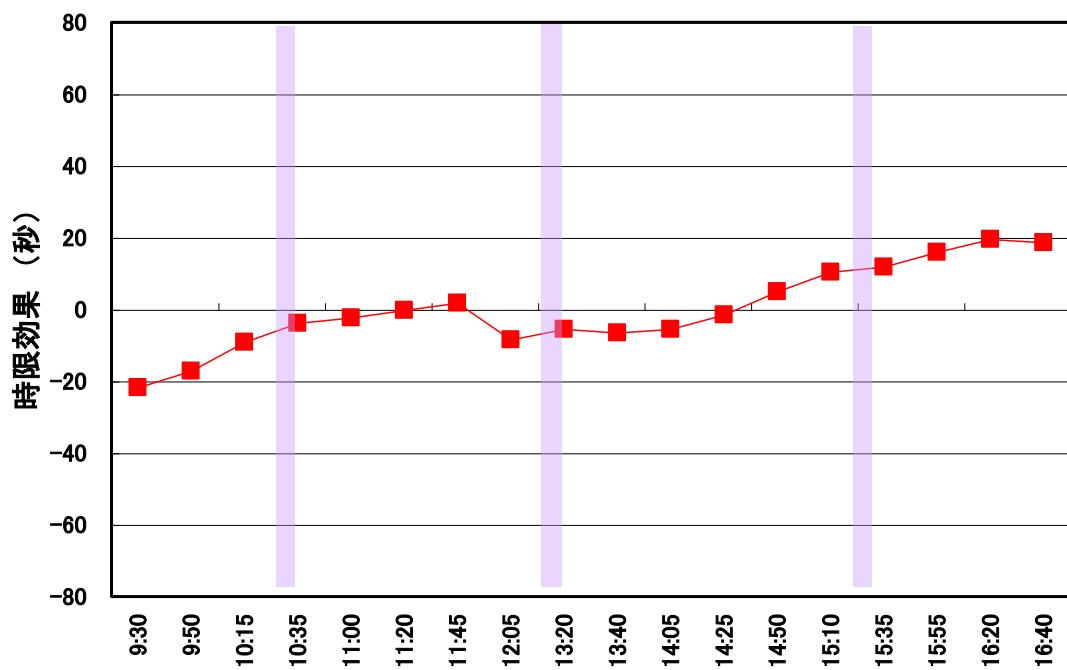


図 41 改善策実行直後の時限効果  $\hat{\beta}_2^p$

### 3) 改善策実行前後の反復効果

図 42 に反復効果を示す。反復回数（ロット番号）が累積するにつれて、習熟から慣熟へと推移し作業が捗っていく様子が分かる。

統計的には改善策実行直後は反復効果があるモデルが選択されたが、効果変動する幅は 6 秒程度と小さく、また ABIC 値からもこの効果は  $r$  の説明に大きく影響していないことが分かる。従って、改善策を実行したことによる製造ラインへの影響は小さいものと考えられる。

反復効果から分かる課題について、統計的には反復効果があるとされているので、製造ラインは全体的に不慣れな作業を行っている期間であることが分かり、少し日を置いて次の改善策を実行すると良い。

製造/品質管理について、初期のロットの作業時間がわずかであるが変動しているので、工程・ロット毎の作業ミスの回数に注目し、通常よりも注意をはらって成果物の品質チェックを行うと良い。

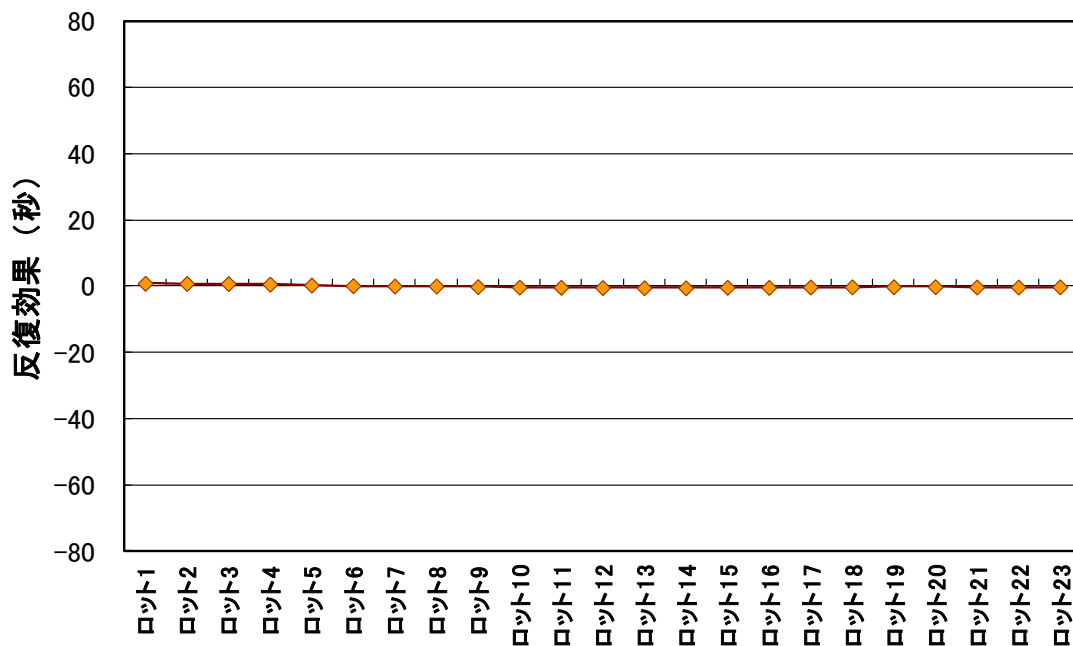


図 42 改善策実行直後の反復効果  $\hat{\beta}_2^R$

#### 4) 改善策実行直後のさらなる改善策の一案

改善策実行後は、 $\beta_2^A$  から製造ライン全体で 60 秒ほど作業時間が低減されたことがわかる。 $\beta^P$  の変動が低減されたことが確認できる。また  $\beta^R$  が表れたので、製造ラインは少しではあるが不慣れな状態であることがわかり、慣れるまでの時間を設けるため、次の改善策の立案は行わず、現行の改善策を続けながら製造ラインを稼働し、しばらく様子を見る判断をした。

時限効果から分かる問題点について、11:45 開始の時限目はその次の 12:05 開始の時限目よりも作業進捗は 10 秒程度低い。この理由は、昼休憩前の気持ちの引き締まり、もしくは昼休憩前の作業の粗さのどちらかの可能性があり、作業技術者へヒヤリングや作業観察を行い、原因を確認することになった。

製造/品質の管理について、もし昼休憩前の作業が粗いと判断した場合は、昼休憩前の作業に掛かるすべてのロットの不良率を注意深くチェックし、全体的な品質低下になっていないか確認をすることになった。

### 6.2.2 改善策実行直後と 2 週間後の分析と結果考察

表 9 のデータを  $t=1$  のものとし、表 10 のデータを  $t=2$  のものとしてデータを同時に分析すると、ABIC 最小モデルとして MPR-AMP' model が選ばれた。総平均効果  $\beta^G = 918.42$  (秒)、低減効果  $\beta^A = -2.71$  (秒) である。またこのモデルの決定係数 (寄与率) は 0.896 であった。

#### 1) 改善策実行直後と 2 週間後の工程効果

改善策実行直後と改善策実行 2 週間後の工程効果を図 43 に示す。

改善策実行前と改善策実行直後の工程効果と同様に、統計的には改善策実行直後と改善策実行 2 週間後の工程効果の変動の変化は無いとされた。

改善策がラインバランスに対する改善策ではないため改善策実行 2 週間後の工程効果は変動に変化が無く、改善策が工程効果へ影響していないことが分かる。

工程 3 と工程 5 は手待ちしている工程であることが分かる。また工程 4 の作業時間が長い。一番手待ちをしている工程 3 と一番作業時間が長い工程 4 の効果の差が約 15 秒であり、大きな差ではない。従ってラインバランスに大きな問題はないと考えられる。

工程効果から分かる問題点について、比較的作業時間が長い工程 4 は日常的に作業に負荷が掛かっている可能性がある。例えば、まず各工程への要素作業の配分が不均衡であることが考えられる。また工程 4 にのみ手暗がりになっているなど、他の工程とは異なる作業環境が原因で作業時間が長くなっている可能性がある。工程 4 で扱う道具の不具合が原因で、作業時間が長くなっている可能性も考えられる。

製品/品質管理について、ラインバランス上は大きな問題はないと考えられるが、もし各工程に対して通常よりも製品/品質の管理に注力するならば、例えば比較的作業時間が長い工程 4 について、定期的に材料ロス、道具の不揃いや不具合があるかどうか、また道具の置き場で問題がないかどうかチェックする。もし問題があると判断した場合、道具の扱い方や片付け方について改善策を練る。改善策を実施することで、効果の変動の幅が小さくなってラインバランスが良くなる可能性がある。

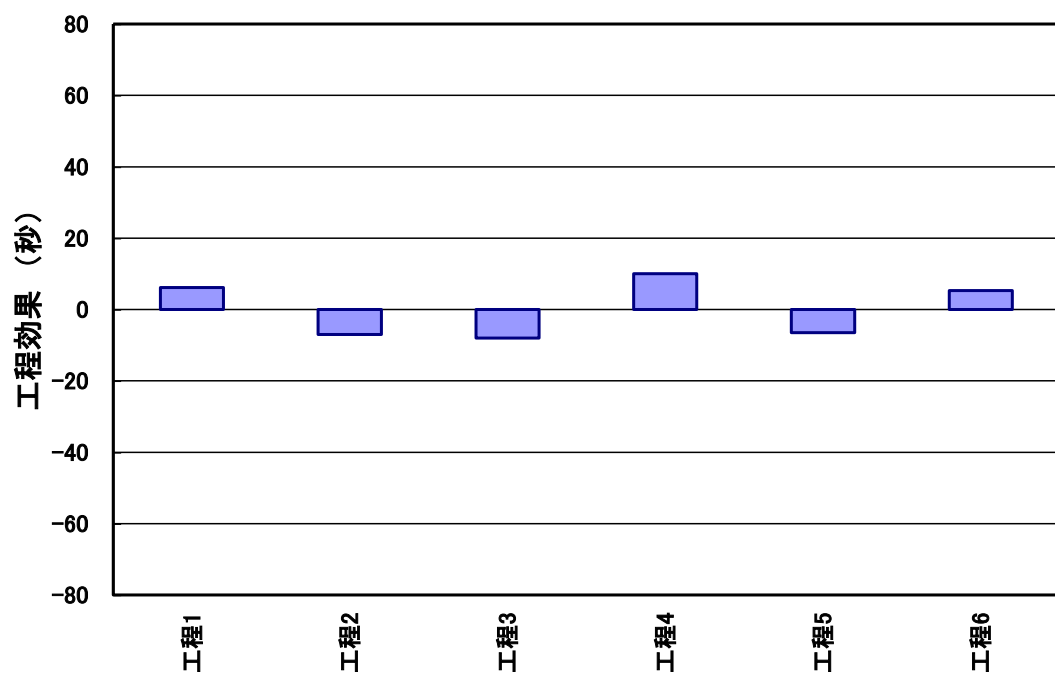


図 43 改善実行直後および改善策実行 2 週間後の工程効果  $\hat{\beta}_1^M = \hat{\beta}_2^M$

## 2) 改善策実行直後と2週間後の時限効果

図 44 と図 45 に時限効果を示す。縦帯は左から小休憩、昼休憩、小休憩を表す。下であるほど作業が捗っており、上であるほど作業が捗っていないことを示している。

改善策実行直後と改善策実行2週間後では、時限効果が異なる結果となった。

改善策実行直後と改善策実行2週間後の時限効果の変動を比較すると、改善策実行直後の時限効果の変動はやや凸凹しているが、一方で改善策実行直後の時限効果の変動はムラが少なく推移している様子が確認できる。この改善策が、製造ラインの携わる作業技術者の一日の作業ペースに馴染んできた可能性があると考えられる。改善策実行直後と改善策実行2週間後の時限効果の変動に大きな変化は無いと考えられる。

また休憩前後の時限目については、改善策実行前後の効果の変動と同様であり、休憩による疲労回復はあまり期待できないと考えられる。改善策の実行直後および実行2週間後は、午前の小休憩後の作業は小休憩直前の作業に比べて6秒程度捗らなくなっており、また午後の小休憩後の作業は小休憩前の作業に比べて2秒程度捗らなくなっている。昼休みを挟むと3秒程度捗り具合が悪くなっている。このことから休憩を取っても疲労回復の可能性は低いことが分かる。また昼休憩直前の12:05開始の時限目は、11:45開始の時限目よりも8秒程度捗っている。

時限効果から分かる問題について、変動の幅が依然として小さくはなく、また午後の中で一番作業が捗っている13:20開始の作業と一番作業が捗っていない16:40開始の作業を比較すると35秒程度の変動幅がある。従って、特に夕方は疲労が蓄積している様子であり、改善策の成果は確認できるが、改善策の対象とする問題のみならず他の問題も混在していることも考えられ、さらなる改善の余地がある可能性を持つ。

製造/品質の管理について、特に時限効果の変動する幅は依然として大きいので、次に改善策を実行するのであれば、時限効果に対して改善策を実行するとともに改善策の成果をチェックすると良い。例えば定期的に本分析を行い、工程・時限・反復効果から問題点を読み取って改善策を立案実行し、実行した改善策の見直しを行うPDCAを繰り返すと良い。また、時限毎の材料ロス、不良率などに注目し、常に注意深く成果物の品質チェックを行う良い。さらに工場内の電灯、作業位置の高さ、室温、歩数、工場の清潔さ、道具の片付け方など、継続作業で負荷が掛かる要因についてヒヤリングし、作業技術者に作業上の問題点を確認する方法もある。

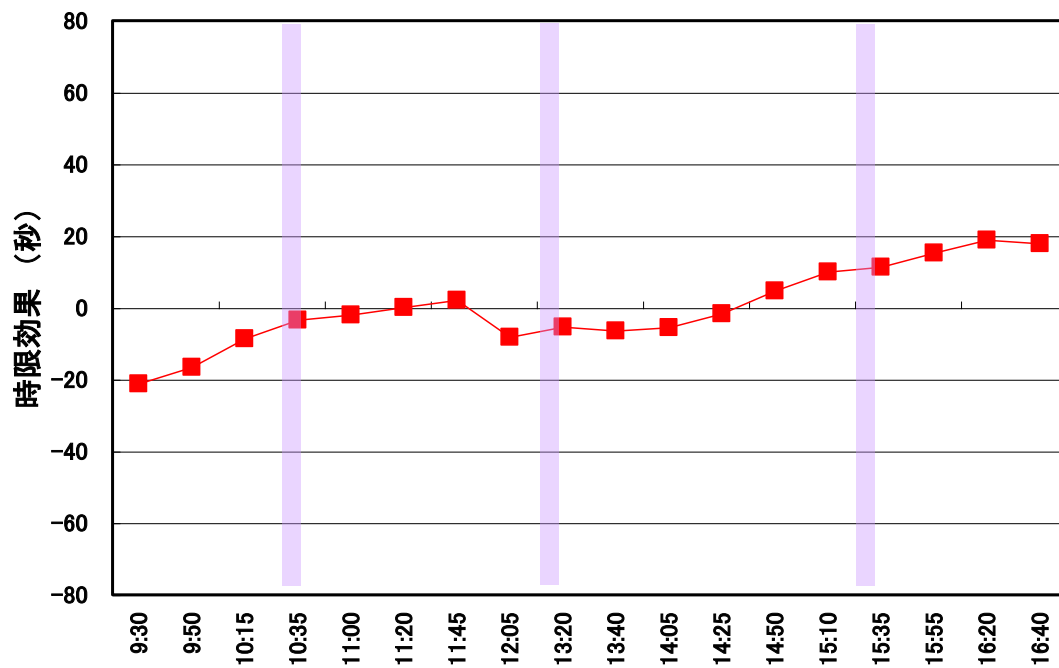


図 44 改善策実行直後の時限効果  $\hat{\beta}_1^p$

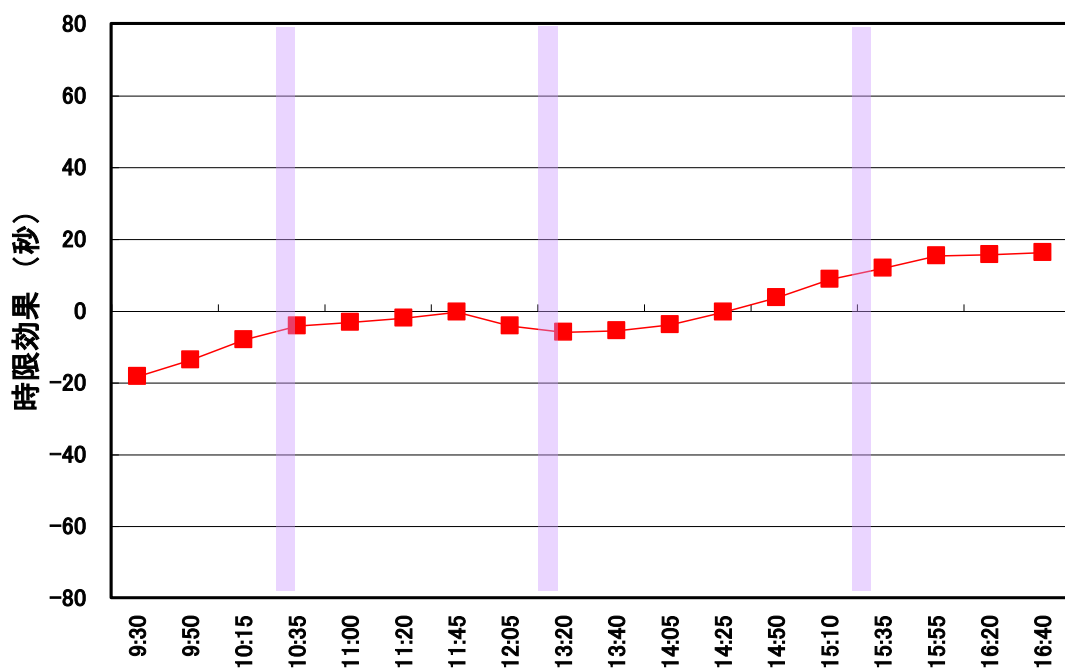


図 45 改善策実行 2 週間後の時限効果  $\hat{\beta}_2^p$

### 3) 改善策実行直後と 2 週間後の反復効果

図 46 に反復効果を示す。反復回数（ロット番号）が累積するにつれて、習熟から慣熟へと推移し作業が捗っていく様子が分かる。

統計的には改善策実行直後は反復効果があるモデルが選択されたが、効果の変動の幅は 6 秒程度で小さく、また ABIC 値からもこの効果は  $r$  の説明に大きく影響していないことが分かる。

反復効果から分かる課題について、改善策 2 週間後は反復効果が無いモデルが選択されたので、その時点では作業が慣熟していると考えられ、課題は無くなった。この点からも改善策が製造ラインに馴染んでおり、通常業務として取り入れて良いと考えられる。

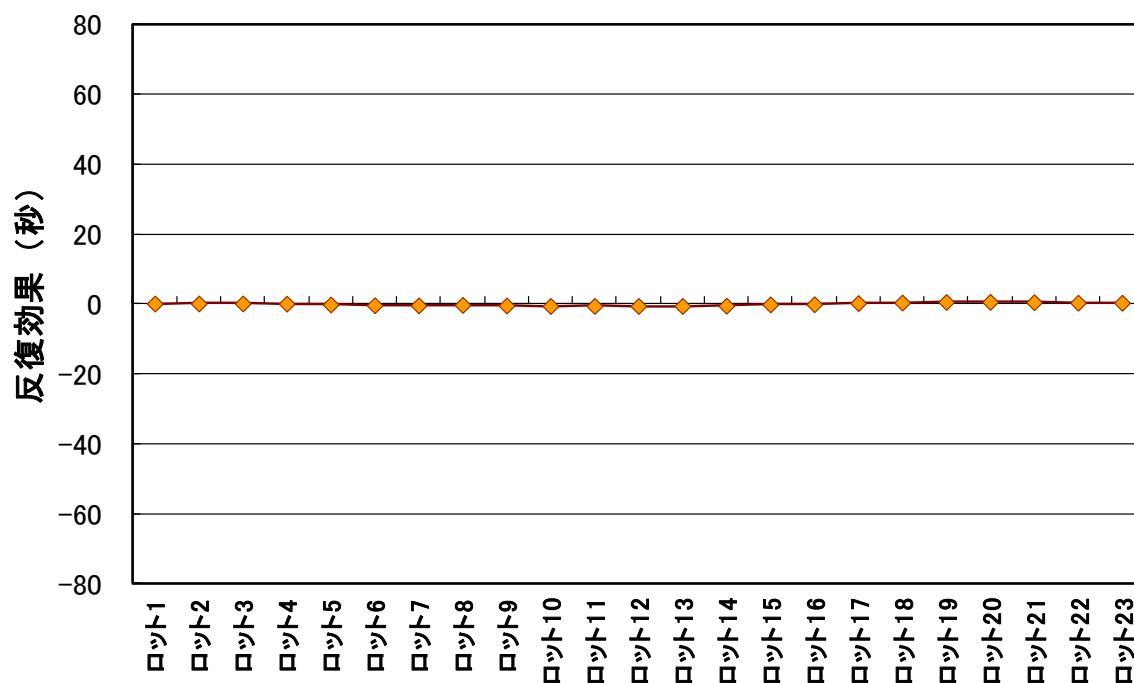


図 46 改善策実行直後の反復効果  $\hat{\beta}_2^R$



#### 4) 改善策実行 2 週間後のさらなる改善策の一案

改善策実行 2 週間後の時点で、工程効果は 15 秒程度の変動幅であり、また時限効果は 40 秒程度の変動があるので、ごく小さなマイナーチェンジを目的とした改善策案が考えられる。これを今後の改善活動の課題とする。

改善策案の一つとして、分析結果から工程 3 が手待ち工程であることが、一方で工程 4 が手待たせ工程であることが分かったので、改善策案として工程 4 の頭の単位作業や要素作業のいくつかを工程 3 の最後に移し、また工程 4 の最後の単位作業のいくつかを工程 5 の頭に移すと、工程 3,5 の手待ち時間と工程 4 の作業時間が短くでき、ムダが小さくなる可能性がある。

別の改善策案として、作業台付近の電灯や冷暖房の調節、機具、製造条件の見直しなど疲労や負担を感じる部分について作業技術者各人へ製造ラインの問題点についてヒヤリングし、作業技術者とともに改善策を立案し実行すると更に改善する可能性がある。

#### 5) 改善策実行 2 週間後の経営者の意思決定

改善策実行直後から改善策実行 2 週間後までの低減効果 $\hat{\mu}$ が 3 秒程度あり、次に標準時間を短くするか否かの判断を行った。その結果、今回は更なる改善策の立案および実行は行わないという判断をした。

一日の作業を 1 時限増やして一日当たりの製造数量を増やす判断を行った。その理由は、製造している製品は量産普及品ではなく、市場占有率の高いニッチな製品であり、一日に扱うロット数を 1 つ増やし、製造量の強化を図ることが求められているためである。また新規作業台の投資額は総額 400 万円程度であったので、その回収を早期に行うためでもある。

そこで一日当たりの製造数量を増やすため、現在の一日 18 時限よりさらに 1 時限増やす具体的な標準時間の再設計を行った。改善策の実行前の製造ラインは、標準時間 (20 分)、作業時間 (総平均: 約 16 分 30 秒、工程効果の変動幅: 約 15 秒、時限効果の変動幅: 約 120 秒) であった。改善策実行 2 週間後の製造ラインの状態は、標準時間 (20 分)、作業時間 (総平均: 約 15 分 30 秒、工程効果の変動幅: 約 15 秒、時限効果の変動幅: 約 35 秒) である。

改善策の成果より、標準時間は 20 分から 17 分へと短縮できる。すなわち標準時間を 3 分短縮すると、 $3 \text{ 分} \times 18 \text{ 時限} = \text{約 } 54 \text{ 分}$ /1 日の作業時間削減に繋がる。

一方の工場管理者は、一日 19 時限の作業を行うと特に夕方の疲労が重なることがこれまでの分析結果から容易に予想できるので、引き続き本分析を C とした PDCA で製造ラインの様子を把握し、次の改善策を立案し実行する準備を行った。

## 6.3 本章の注

- (注1) PDCA： PDCA は、事業活動における生産管理や品質管理などの管理業務を円滑に進める手法の一つである。Plan（計画）→ Do（実行）→ Check（評価）→ Act（改善）の 4 段階を繰り返すことによって、業務を継続的に改善する。Act は改善策を実行した成果を見て、その改善策で良いかもしくは改善策を改善すべきか判断するフェーズでもある。Plan は、改善策を通常業務・通常管理業務の中に含めるプランニングのフェーズでもある。
- (注2) 初期習熟期： 作業を始めた直後は作業が不慣れであり、作業を繰り返しながら徐々に作業の内容を覚え費やす作業時間が段階的に削減されていく。初期習熟期は作業を繰り返す度に大幅に作業効率が良くなることがある。
- (注3) Learning plateau stage： 不慣れであった作業が段々と慣れていくと、あるところで作業効率が一旦一定となる。またしばらく経つとまた作業効率が少しずつ良くなる。作業技術者が慣れを感じて作業に対する気持ちに緩みが生じ、作業効率が一旦一定になる現象を Learning plateau stage または高原現象と呼ばれる。しかし Learning plateau stage は、作業理解と反省等の時間である可能性も考えられる。
- (注4) インクリメンタル・イノベーション： 既存製品や製造方法の部分的な改善（いわゆるマイナーチェンジ）を言う。イノベーションの中では、程度の小さい改善を指す。製造工場ではインクリメンタル・イノベーションのため定期的に改善作業を行っている。改善活動の目的は、品質向上、製造コスト削減、製造能力向上、安全管理などである。改善する様子を捉えるには、なるべく普段から収集しているデータを短時間で分析し、分析結果から問題点や課題点を短時間で見出せること、改善成果すなわちインクリメンタル・イノベーションを可視化できることが工場の管理者等から望まれている。

## 7 おわりに

### 7.1 本研究の目的

先行研究では、求めたい要因の効果のみを得るために同技能レベルの作業技術者数名が同一単純作業を継続的に繰り返すなど、推定したい効果のみ取り上げて他の効果が混交しないように制約した作業実験に基づくデータを取得している。そのデータについて、推定したい効果のみで構成する分析モデルで分析している。左記より先行研究で開発された分析手法は、実際の製造ラインで計測した作業時間表データに十分に対応できていない。

その理由として、実際の製造ラインで計測した作業時間表データは工程・時限・反復効果の混交と観測誤差が含まれており、工程別・時限別・反復回数別に図示する等では十分ではなく、統計モデルの力を借りる必要がある。さらには工程・時限・反復要因の配置に起因して効果が数学的に何らかの制約条件がないと一義的に決定できないという識別問題があり、通常の間帰分析等の方法では各効果を推定できないことが挙げられる。

多くの工場では先行研究の作業実験とは異なり、労働者管理を目的とした何らかの制約の無い作業時間を定期的に計測されている。このような日常的に計測して得られる作業時間データから、工程・時限・反復効果が分離できれば、制約された作業実験に基づかなくともそれぞれの効果に対応する手待ち・疲労・習熟の様子がわかり、実際の製造ラインおよび労働環境に直接結びつく改善のための糸口が得られる。

本研究では、実際の製造ラインで簡便に計測して得られる工程×時限形式の作業時間データから、識別問題に対応して工程・時限・反復効果を分離し、それぞれに対する手待ち・疲労・習熟の様子を明らかにすることができる統計的分析手法を開発した。次に、MPR model を拡張し、低減 (After Improvement) 効果も付加した 2 時点の作業時間モデル (MPR-AM'P'R' model) を開発した。検証として、業種の異なる 4 社で計測した作業時間に本分析方法を適用し、有効性を確認した。

## 7.2 本研究の成果

### 7.2.1 一日の作業時間の分析方法の開発と分析

作業時間が変動する要因である手待ち・疲労・習熟の様子を明らかにする1日の作業時間モデルで作業時間を分析する方法を開発した。

1章では、複数工程のコンベヤ式の製造ライン、その製造ラインで計測する工程×時限形式の作業時間、および作業時間の変動の要因の効果について説明した。2章では、先行研究の問題点を示した。3章では、識別問題、工程・時限・反復効果から成る作業時間モデル(MPR model)とその尤度関数、識別問題に対応するための一次階差2乗和の条件式、識別問題に対応する条件式を取り入れたベイズ型作業時間モデル(1日の作業時間モデル)について示した。

#### (a) 分析方法で得られる情報のまとめ

##### 1) 工程効果から手待ちの様子が分かる

工程効果は、作業配分や作業者各人の能力の不均衡による工程間での作業時間の変動を捉えるものである。担当作業が早く終わり、他の工程作業者の作業が終わるのを何の作業もせずに待つ時間は手待ちの時間であり、生産性につながらないムダな時間である。本分析方法で作業時間を分析し、工程効果の動きをみることにより手待ちの意味でのムダを見つけることができた。

##### 2) 時限効果から疲労の様子が分かる

時限効果は、製造ラインに携わる作業者の継続作業による疲労蓄積により時限間での作業時間の変動を捉えるものである。作業を進めると疲れが溜まり段々と作業時間が長くなり、一方休憩を挟めばその直後の作業時間は短くなり作業進捗の悪い時限はムリが重なった時限である。本分析方法で作業時間を分析し、時限効果の動きをみることによりこのようなムリを捉えることができた。

##### 3) 反復効果から習熟の様子が分かる

反復効果は、製造ラインに携わる作業技術者が作業反復により習熟し、作業の反復回数間での作業時間の変動を捉えるものである。作業者が作業をある程度反復することで、段々とかかる作業時間が短くなることが考えられ、さらには変動はやがてある一定時間に収束し習熟から慣熟に達したことが分かる。製造コストや品質維持のため、習熟で作業時間になるべく短くすること、さらに早く慣熟に達することが望まれる。本分析方法で作業時間を分析し、反復効果の動きをみることにより作業の習熟具合を判断することができた。

#### (b) 4業種の一日の作業時間分析

一般的な複数工程のコンベヤ式製造ラインで計測した実際の作業時間データに本分析方法を適用し、4章にてその有効性を示した。

具体的には、4 業種の工場現場にて計測した工程×時限形式の作業時間に本分析方法を適用し、工程・時限・反復効果を分離しそれぞれに対する手待ち・疲労・習熟の様子を明らかにした。地域工芸メーカ A を分析し MP model が、精密機器メーカ B を分析し PR model が、自動車関連メーカ C を分析し MP model が、組立メーカ D の改善策実行前の作業時間を分析し MP model がそれぞれ選ばれ、各モデルの効果から手待ち・疲労・習熟の様子が分かり、改善策の一案を立案し示した。また、製造管理上の注意すべき問題点や課題点などを示した。

ただし、4 業種の製造ラインの作業内容は全く異なり、各業種の製造作業の難しさや簡単さについては科学的に比較できるものではない。従って、本研究は業種間の比較については言及しなかった。

## 7.2.2 先行研究の分析方法との比較と最適モデルの評価

### (a) 先行研究の分析方法との比較による評価

本分析方法の評価を行うため、5.1 にて先行研究の分析方法で分析した結果と比較した。具体的には、精密機器メーカ B の作業時間を本分析方法で分析した結果である PR model を例に、時限基準化作業時間と本分析方法で推定した時限効果、また反復基準化作業時間と本分析方法で推定した反復効果から疲労・習熟の様子を比較した。

時限基準化作業時間は、正午を挟んだ午前と午後の挙動が同じ水準にあって午前の早い時間帯と午後の遅い時間帯の特徴が抑えられてしまっていることが確認できた。一方本分析方法で推定した時限効果は、段々と作業の捗り具合が悪くなっていく様子を表せていることを示した。

また反復基準化作業時間については、全体の変動が同じ水準にあり段々と作業の捗り具合が良くなっていく様子いわゆる習熟から慣熟への習熟過程をうまく表せていないことが確認できた。一方本研究方法で推定した反復効果は、作業の捗り具合が良くなっていく様子を表せていることを示した。

時限基準化作業時間は反復基準化作業時間の特徴と一部相殺されてしまっており、一方で反復基準化作業時間も時限基準化作業時間の特徴と一部相殺されてしまっているために、作業の反復による捗り具合の向上と継続作業による捗り具合の低下がうまく表せられていなかった。これらから作業時間には工程・時限・反復効果が混交しており、工程別・時限別・反復回数別に図示する等では十分ではないことが分かった。一方で本分析方法は、作業の反復による捗り具合の向上と継続作業による捗り具合の低下が顕れることを示した。

### (b) シミュレーションによる最適モデルの評価

作業時間モデルには識別問題が存在しており、何らかの制約を加えなければ工程・時限・反復効果は分離できなかった。5.2 では、本分析方法が取り入れた制約が働いているかを、シミュレーションで確認した。

### 7.2.3 改善策実施前後の分析方法の開発と分析

MPR model を拡張し、2 時点の工程・時限・反復効果と改善策実行後の低減（After Improvement）効果も付加した「改善策実行前後のベイズ型作業時間モデル：2 時点の作業時間モデル（MPR-AM'P'R' model）」を開発し、6.1 にてその説明を行った。作業時間が変動する主な要因である手待ち・疲労・習熟の様子、および低減効果を明らかにする 2 時点の作業時間モデルで分析する方法を説明した。

#### (a) 分析方法で得られる情報のまとめ

##### 1) 2 時点の比較で低減効果が分かる

2 時点の作業時間モデルは、2 時点の工程・時限・反復効果および低減効果で構成されている。低減効果は、比較する一日の作業時間がどの程度低減（増大）したのか全体的な変化の様子を示すものであり、インクリメンタル・イノベーションの指標の一つとして活用できる可能性がある。

##### 2) 2 時点の比較で各効果の変化の様子が分かる

2 時点の作業時間モデルには、統計的に各効果が変化したのかしなかったのか、もしくは存在していた効果が無くなったのか無くならなかったのか、時点間の工程・時限・反復効果の変動する様子の変化が分かる。各効果が変動する様子の変化から、ラインバランスの均衡さ、疲労の軽減、習熟など改善活動の進捗状況が分かる。

#### (b) 組立メーカ D の 2 時点の作業時間分析

組立メーカ D について、工場現場にて計測した工程×時限形式の 2 時点の作業時間に本分析方法を適用し、改善策実行前後の工程・時限・反復効果を分離しそれぞれに対する手待ち・疲労・習熟の様子、および低減効果を、6.2 にて明らかにした。

具体的には、改善策実行前と改善策実行直後の 2 時点の作業時間分析の結果を示した。この分析では MP-AMP'R' model が選ばれた。改善策実行前と改善策実行直後の各効果が変化する様子を比較すると、工程効果の変動は変化せず、改善策実行直後の時限効果の変動幅は 40 秒程度まで抑えられ、一方で改善策実行直後には微動ながら反復効果が表れた。また、1 分程度の低減効果があったことを示した。

また、改善策実行直後と改善策実行 2 週間後の 2 時点の作業時間分析結果を示した。この分析では MPR-AMP' model が選ばれた。改善策実行 2 週間後と改善策実行直後の各効果が変化する様子を比較すると、工程効果の変動は変化せず、改善策実行 2 週間後の時限効果の変動幅は 3 秒程度抑えられ、改善策実行 2 週間後は反復効果が無くなった。また、3 秒程度の低減効果があったことを示した。

6.2 の分析結果より、工程・時限・反復効果に対する手待ち・疲労・習熟の様子から改善策の成果や製造ラインの問題点・課題点が分かり、改善策の一案を立案し示した。また、製造管理上の注意すべき問題点や課題点なども示した。

## 7.3 実際の改善活動で行う分析方法

### 7.3.1 本分析を含めた改善活動

本分析方法を PDCA<sup>(注1)</sup> の Check（評価）に適用した改善活動の流れについて、以下に記す。

最初に、1日の作業時間を分析し、分析結果から各効果の変動する要因となる問題点を読み取り、それら問題点に対する改善策を立案する。

2番目に、改善策実行直後に作業時間を計測し、2時点の作業時間モデルで分析して、改善策を実行した成果である低減効果、改善策実行前後の工程・時限・反復効果の変動の様子をみる。改善策の実行前後で各効果が変動する様子と比較して、改善の成果が芳しくないと判断した場合は必要に応じて実行した改善策も改善する。

3番目に、改善策を実行してから暫くした時の作業時間を計測し、改善策を実行した直後と暫くした時の2時点の作業時間について、2時点の作業時間モデルで分析する。ここで改善策に対する効果の変動幅の減少と反復効果の有無を分析から得て、実行した改善策を改善するか、もしくは改善策を含めた通常業務を再設計するか、一方で改善の成果が改悪と成っている場合は実行した改善策を止めるか、経営者は意思決定を行う。

4番目に、通常業務の再設計後にさらに作業時間を計測し、改善策を含んだ通常業務が順調に進められているか本研究の分析で評価を行う。ただし本研究は、分析方法の開発と開発した分析方法を適用し有効性を確認することが目的であるので、通常業務を再設計した後の製造ラインの追跡評価は行わなかった。

### 7.3.2 計測・分析過多にならない改善活動

工場現場では、コスト面や労働面からムダな作業は行わない。従って、目的が無いもしくは費用対効果の低いデータの計測や分析は行わない。

例えば、改善策実行前と改善策実行2週間後の2時点の分析は可能であるが、製造管理作業としてこの分析は行われない。

なぜならば製造管理作業の流れは、先ず現状の製造ラインの問題点・課題点を知るために一日（1時点）の作業時間モデルで分析を行い、改善策を立てて実行する。次に、改善策実行後に改善成果を知るため、2時点の作業時間モデルで分析を行い、改善策を実施し、通常の製造業務に改善策を反映させる。以上の理由から、改善策実行前と改善策実行2週間後の2時点の分析は、必要無いと考えられる。他方で改善活動に対する予算配分額の意思決定の動機として、改善策実行前と直近の作業時間の2時点进行分析し改善成果を可視化するよう経営者は工場管理者に要請するかもしれないが、この分析は製造管理作業の範疇ではない。また、改善策実行前・改善策実行直後・改善策実行2週間後の3時点の分析モデルを立てることは可能であるが、上記と同じ理由で実際の改善活動では3時点の分析モデルの必要は当面無いと考えられる。

必要に応じた分析を行うことで、計測と分析に協力する作業技術者に余計な作業負担を掛けず、コスト削減や迅速な改善活動が可能となる。

## 7.4 今後の研究

本研究内容を踏まえ、今後取り組みたい研究について下記する。

### (a) 異なる業種の製造ラインへの適用

本研究では異なる 4 業種の製造ラインで計測した作業時間データを分析し、その有効性を示した。しかし他の業種については、未だ分析できていない。本研究で示した統計モデルでは不十分である可能性も考えられる。今後は様々な業種の製造ラインで計測した作業時間を分析し、その有効性を確かめたい。

### (b) 新たな作業時間モデル

工場現場で定期的に取り得している工程×時限形式のデータは、作業時間データだけではない。工程×時限形式のデータは、他にも製造プロセスデータや品質データがあり、それらのデータも本分析方法と同様の分析が可能であると考えられる。また、作業時間とそれらデータを合わせた新たな分析モデルを開発できたら、品質維持のみならず品質管理作業の簡素化や品質向上に対する施策立案の一助となりうる。



## 7.5 参考文献

### 7.5.1 1章の参考文献

- [1] 工藤達男, 出見世信之, 佐久間信夫: 「現代経営における企業理論—現代社会の担い手」, 学文社. (1997)
- [2] 富士明良: 「生産管理工学—理論と実際」, 東京電機大学出版局. (2009)
- [3] 平野裕之: 「新作業研究—現代モノづくりの基本技術」, 日刊工業新聞社. (2001)
- [4] 東京大学ものづくり経営研究センター: 「170の keyword による ものづくり経営講義」, 日経 BP 社. (2005)

### 7.5.2 2章の参考文献

#### (a) ラインバランシングに関する先行研究

- [5] 赤木文男, 大崎紘一, 菊地進他: マイクロコンピュータを利用した IE 方法の有機的活用法—各工程の作業遂行度を考慮したラインバランシング方法—, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.52, No.473, pp.182-190. (1986)
- [6] 長沢啓行, 西山徳幸: 作業時間分布を考慮した組立生産システムの設計に関する研究 第3報, 作業域の長さが通過率と手待ち率に与える影響, 日本機械学会論文集, C 編, 46(408), pp.1000-1007. (1980)
- [7] 村瀬康比古, 郭偉宏, 殷勇: セル生産とコンベヤ組立ラインの数理的解析 生産方式選択基準の構築へむけて, 日本経営工学会論文誌, 57(4), pp.314-322. (2006)
- [8] 吉村康史, 羽鳥文雄, 横井裕司, 長谷川茂, 四方信夫, 大里有生: プラント建設における配管据付作業の基準作業時間推定法の研究, 日本経営工学会論文誌, 53(4), pp.261-272. (2002)
- [9] 上野俊夫: 作業時間のバラツキによる干渉時間の排除法 多種少量型生産の流れ作業化に関する問題点の解明, 日本経営工学会誌, 25(2), pp.115-120. (1974)
- [10] 竹田仁: 流れ作業における最適工程数決定の研究, 日本機械学会論文集, C 編, 52(476), pp.1170-1176. (1986)
- [11] 武田健二: “コンピュータによる組立工程設計”, 日本経営工学会誌 25(3), pp.233-238 (1974)

#### (b) 疲労に関する先行研究

- [12] 野津哲子, 岸本朗: 縫製作業における疲労の研究(第2報), 島根女子短期大学紀要, 21, pp.75-79. (1983)
- [13] 山口晴久, 山口有美, 笠井俊信: VDT 文書入力作業の作業時間による心理負担計測のための評価尺度の開発, 日本教育工学会論文誌, 28(4), pp.295-302. (2004)
- [14] 堀江良典: VDT 作業の休憩時間の過ごし方に関する一考察, 日本経営工学会誌, 46(3), pp.225-231. (1995)
- [15] 角谷学, 泉博之, 窪田誠, 山下剛司, 神代雅晴: 作業中の休憩時間の設定による身体的作業負荷パターンの違いが心拍数の回復に及ぼす影響について, 産業衛生学雑誌, 52(1), pp.12-20. (2010)

- [16] 澤貢, 宇賀神博, 大久保堯夫, 芳賀繁: 作業負担に及ぼす作業時間効果の計測のための実用的調査指標の開発, 日本経営工学会論文誌, 52(4), pp.202-210. (2001)
- [17] 岡村法宜: 長時間の計算作業による精神疲労が事象関連電位 P300 に及ぼす影響, 産業衛生学雑誌, 49(5), pp.203-208. (2007)
- [18] 大西徳明: 労働形態の変化にみる労働負担と健康, 東京農業大学農学集報, 51(4), pp.155-166. (2007)

#### (c) 習熟に関する先行研究

- [19] 芳賀繁, 福田康明, 原盛将他: 作業習熟と作業時間が作業負担に及ぼす影響, 日本経営工学会論文誌, 49(6), pp.357-364. (1999)
- [20] 福田康明, 坂井龍二: 生産性傾向式による作業評価法, 日本経営工学会誌, 32(3), pp.188-194. (1981)
- [21] 児玉ひろみ: 学内給食管理実習における作業時間の検討, 淑徳短期大学研究紀要, 44, pp.137-145. (2005)
- [22] 三林洋介, 上野俊夫, 大久保堯夫, 川上満幸: 人間作業におけるとまどい現象と最適作業分割量に関する研究, 日本経営工学会論文誌, 47(3), 150-156. (1996)
- [23] 師岡孝次, 山本照雄: 大量生産における習熟の研究, 日本経営工学会論文誌, 25(2). (1974)
- [24] 大矢雅之, 福田康明, 山田裕昭: セル生産における作業技術者の習熟特性に関する研究, 人間工学, 45(5), pp.278-285. (2009)
- [25] 西岡基夫, 岡田明, 宮野道夫: 繰り返し作業における操作方略の変化と動作特性に関する基礎的研究, 生活科学研究誌, 7, pp.45-55. (2008)

#### (d) 動作研究に関する先行研究

- [26] 金沢孝: 単純作業において作業条件が作業能率に及ぼす影響の研究, 日本経営工学会誌, 33(4), 287-294. (1982)
- [27] 山内須美子: 調理作業における動作研究, 中村学園研究紀要, 26, pp.157-161. (1994)
- [28] 小柳礼之助, 乾安行, 石原定男, 深津久治, 永井勝美: X線透視台の人間工学的動作研究, 日本機械学会誌, 69(572), pp.1212-1217. (1966)
- [29] 松山敬左, 荻原洋太郎: プログラミング作業における動作研究, オフィス・オートメーション, 4(3), pp.41-46. (1983)
- [30] 杉本吉恵, 塩川満久, 網島ひづる, 青井聡美, 森木ゆう子, 高辻功一: 熟練看護師の車椅子移乗介助動作の分析, 広島県立保健福祉大学誌人間と科学, 5(1), pp.41-51. (2005)
- [31] 荒川雅裕, 田伏顕也, 冬木正彦: 多工程組み立て作業に対する作業分析の研究 — 第1報: 実績収集機能を含む On-Job デジタルマニュアル表示システムと作業時間予測法 —, 日本経営工学会論文誌, 58(2), pp.136-146. (2007)
- [32] 竹中弘行: 生活の中における動作分析とアプローチ, 理学療法学, 32(4), pp.288-293. (2005)

### 7.5.3 3, 4 章の参考文献

- [33] 中村隆：ベイズ型コウホート・モデル—標準コウホート表への適用—, 統計数理研究所彙報, Vol.29, No.2, pp.77-97. (1982)
- [34] 中村隆：コウホート分析における交互作用効果モデル再考, 統計数理, Vol.53, No.1, pp.103-132. (2005)
- [35] 坂元慶行：日本人の国民性 50 年の軌跡—日本人の国民性調査から—, 統計数理, Vol.53, No.1, pp.3-33. (2005)
- [36] Ito, Y., Ioka, A., Nakayama, T., Tsukuma, H. and Nakamura, T.: Comparison of trends in cancer incidence and mortality in Osaka, Japan, using an age-period-cohort model, *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 12, pp. 879-888. (2011)
- [37] Akaike, H.: Likelihood and the Bayes Procedure, *Bayesian Statistics* (eds. Bernardo, J.M., De Groot, M.H., Lindley, D.V. and Smith, A.F.M.), University Press, Valencia, Spain, pp.143-166. (1980)
- [38] 石黒真木夫：事前情報を利用した複雑な系の解析, (甘利俊一・竹内啓・竹村彰通・伊庭幸人 編), 「階層ベイズモデルとその周辺」, 岩波書店, pp.1-88. (2004)
- [39] 小西貞則, 北川源四郎：「情報量規準」, 朝倉書店. (2004)
- [40] 児玉文雄：「ハイテク技術のパラダイム—マクロ技術学の体系」, 中央公論社. (1991)

## 8 付録

### 8.1 製造工程について

#### (a) 製品設計：

製品の設計は仕様設計と価値設計があり、顧客の要望等の意見収集や需要表現をして仕様設計と価値設計を行き来させながら製品とサービスを設計する。

##### 1) 仕様設計：

意見収集して製品の仕様を決定し、その仕様に合った製品を設計する。特に受注製造、顔料やプラスチックなどの素材、マシニングセンター（複合加工工作機械）や ERP (Enterprise Resource Planning) などシステムの設計は、顧客からの要求仕様に沿った設計を行わなければならない。

##### 2) 付加価値設計：

デザイン、風合、各部の色など外見、および機能の配置やボタンの配置など使いやすさの設計を行う。また、分かりやすく簡素でかつ保管しやすい取扱説明書の設計も行う。さらに、供給方法や供給タイミングなども考慮し、副資材（例えば、製品箱/袋や付属品など）の設計も行う。

#### (b) 安全設計：

##### 1) 製造プロセスの安全設計：

製品を購入/使用する顧客への品質保証を設計する。例えば、静電気火災防止器具の設置や定期的な取替え、異物混入防止の掃除作業、ラインのフィルタの設置や定期的な取替えなどがある。

##### 2) 作業技術者の安全設計：

毎日作業する労働者心身の健康面に対する取組みである。特に有機物質を使用する際は暴露防止の為、定期的な気中濃度計測、直接（口元）計測、循環水の水質計測などがなされている。例えば、工程別の作業着/マスクなどのスペック、安全限界時間（有機化学物質の暴露量/時間）など、物理的な健康被害に対しては化学的安全項目などで広く知られている。

#### (c) 環境設計：

周辺環境の安全設計について、工場の周辺地域への汚染などにより、周辺住民生活への悪影響を排除するための設計およびその取り組みである。例えば、工場排水の定期チェック、排気の定期チェック、騒音の定期チェックおよび自治体への報告、自治体の定期立ち入り調査などがある。

\* これらは ISO14000 の上でも守るべき項目であり、各社のステークホルダーや自治体からも厳しく管理介入されている。

#### (d) ビジネス上の設計：

受注製造や素形材品の製造は、顧客が指定した仕様で製造することが多く、品質維持の面から供給ラインのみならず供給方法に至るまで仕様に含まれることがある。例えば、輸送時に破けない・水滴が内部に浸透しない製品袋の設計、輸送経路の設計などが挙げられる。

## 8.2 イノベーション

### 8.2.1 ラディカル・イノベーションについて

ラディカル・イノベーションとは、製品に用いる機能技術・製造方法・サービスに対して従来とは全く異なる価値基準をもたらす革新を指す。イノベーションの中では、最も程度の大きい革新を言う。

### 8.2.2 インクリメンタル・イノベーションについて

インクリメンタル・イノベーション<sup>(注4)</sup>とは、既存製品や製造方法の部分的な改善（いわゆるマイナーチェンジ）である。イノベーションの中では、程度の小さいものを指す。製造工場では技能者個人・作業チーム・部門等が、インクリメンタル・イノベーションを定期的に行っている。その目的は、品質向上、製造コスト削減、製造能力向上、安全管理などである。



















改善する様子を捉えるには、なるべく簡素な分析方法を開発し、普段から収集している情報で分析できること、分析結果から問題点や課題点を簡単に見出せること、また改善業務では改善成果すなわちインクリメンタル・イノベーションを可視化できることが工場現場の管理者等から望まれている。

## 8.3 動作研究と稼働研究

### 8.3.1 動作研究について

動作研究は、主に工場現場へ行き、観察を行い現状作業の負荷点を導き出す。まずは、観察時に用いるサーブリック記号を表 19 に記す。

表 19 サブブリック記号

サブブリック記号					① 仕事を進めるための動作要素				
					② 仕事を進めるのを遅くする動作要素				
					③ 仕事が進まない動作要素				
No.	名 称	記号	説 明	分類	No.	名 称	記号	説 明	分類
1	探す		目で物を探す形	②	10	分解する		組み合わせから1本離れた形	①
2	見出す		目で物を探しあてた形	②	11	調べる		レンズの形	②
3	選ぶ		選んだ物を指示した形	②	12	用意する		ボーリングの棒を立てた形	②
4	から手		からの皿の形	①	13	手放す		皿を逆さにした形	①
5	つかむ		物をつかむ手の形	①	14	保持する		磁石に物がついている形	③
6	運ぶ		皿に物を載せた形	①	15	休む		人がイスに腰かけた形	③
7	位置を正す		物が手の先にある形	②	16	避けられない遅れ		人がつまずいて倒れた形	③
8	組み合わせる		組み合わせた形	①	17	避けられる遅れ		人が寝ている形	③
9	使う		コップを上向きにした形	①	18	考える		頭に手をあてて考える形	②

出典： [3], p.68.

### (a) 現在の動作研究 (Motion Study)

動作研究 ([3], pp.65-87) とは、製造活動におけるすべての作業動作について観測・分析し、そこから不要な動作を取り除いたり、小さくラクにしてより効率的な作業方法に改善するための基礎的な分析手法である。

動作研究の方法は、目視による動作分析とビデオ撮影による動作分析の2つに大分される。

#### 1) 目視動作分析

観察者が作業技術者の動作を直接目視して分析する方法である。その場で分析して、すぐに悪いところを改善できる長所がある。また、その場での改善ができることで、組み立て作業に目視による動作分析を応用したヨーイドン方式などがある。

しかし、目視分析では複雑な動作の観察が難しく、微細な動作分析には向いていない面もある。

#### 2) ビデオ (VTR) 動作分析

ビデオ (VTR) 技術の進歩と機材コストの安さから、近年ではビデオによる動作分析が主流になっている。ビデオによる分析は、時間の計測と作業単位、動作単位が繰り返し何回でも観察でき、さらに必要に応じてスロー再生で微細な観察も可能である。こうした特長を生かし、多品種混流製造での助け合いゾーンの設定や段取り作業

の観察には、用いられやすい。

目視による動作分析、ビデオによる動作分析いずれも分析の単位は、分解最小動作・サブリックに分ける方法と、それより少し大きな動作・要素作業に分ける方法がある。従って分析手法の特性上、それ以上の大きな要素作業、作業自体についての観察に、コストや観察時間の面から時間動作研究の手法を適応することが難しい。

## (b) 動作研究の手順

製造現場に行われている作業について、実際に動作研究を実施しようとする、次の手段になる。

### 1) 手順1：観察と記録

まず、観察する作業場に立ち、作業技術者の手足それに目の動きなどを観察し、これらの動作を分解して、観察記録に記録する。

### 2) 手順2：作業のムダ取り

観察用紙に記録した動作内容をもとに、ムダな動作を取り除き、かつ遅い動作を速い動作に改善する。

### 3) 手順3：原則適用のムダ取り

動作改善についての各種原則を当てはめて、再度ムダを取り、動作を小さくし、作業全体の効率化を図る。

### 4) 手順4：新作業の設定

これまでの動作手順にこだわることなく、必要動作とその手順を見直し、さらにラクで効率的な作業方法へと改善する。

## (c) サブリックの分析内容；

### 1) 探す・見出す・選ぶ

目的物の所在を確かめるために、目もしくは指先を使って「探す」動作をする。目的物が自分の探していた物と合致した時、「見出す」になる。「選ぶ」は集合物の中から1つの物を選び出す動作である。

### 2) から手・つかむ・運ぶ

「から手」は、何も持っていない手や指の動作を表す。「つかむ」は物を手や指先でつかむ、つまむ動作をいう。「運ぶ」は手や指で物を移動して位置を変えることをいう。

### 3) 位置を正す・組み合わせる・使う

「位置を正す」は、物の位置や向きを作業のやりやすいように変える動作を指す。「組み合わせる」は、物と物を合体させて1つの目的物にする動作で、「使う」は目的の作業を行うために、なんらかの道具を用いることを表す。

### 4) 分解する・調べる・用意する

「分解する」は組み合わせることの逆で、一体の物をその構成要素に戻すことをいう。「調べる」は基準となる数字、物などと比較する動作である。また「用意する」は、目的の作業をする前にやりやすさを考慮して準備する動作を指す。

#### 5) 手放す・保持する・休む

「手放す」はつかむことの反対の動作で、「保持する」はつかんだままの動作状態をいう。「休む」はほかの動作と関係なく、ただ単に疲れを取るために中断した状態を指す。

#### 6) 避けられない遅れ・避けられる遅れ・考える

「避けられない遅れ」は、動作しようとする作業技術者の意思に反して、手や指が待ち状態になる動作をいう。「避けられる遅れ」は、作業技術者の意思で避けられるはずの待ち状態をいう。また、考えることは多くの場合、なんらかの動作をしながら行われる。このため、「考える」を単独で用いる時は、他の動作を中断して行う状態をいう。

### (d) IE の動作分類

動作研究は、作業動作の中から単にムダを取り除くだけでなく、使用部材、使用治工具、機械、作業環境など、製造作業全体を見直し、効率的にすることである。特に動作は、機械の操作位置、部材、治工具やゴミ箱の置き場など3定（定位、定品、定量）の影として存在している。この影を効率的にするには、すべての3定の見直しが基本となる。3定の見直す上で、ギルブレスは、建設業のレンガ積み作業の動作研究などを通じて18の基本要素（サーブリック記号）を定めた。現在では、その動作を更に3つに分類している。

ここで、作業の単位およびサーブリックの概要を説明する。

#### 1) 第1類；主として上肢で行い作業に必要な8動作

- 延ばす
- つかむ
- 運ぶ
- 放す
- 位置を決める
- 使用する
- 組立てる
- 分解する

#### 2) 第2類；主として感覚器官、頭脳で行い作業を遅らせる5動作

- 探す
- 選ぶ
- 調べる
- 考える
- 用意する



### 3) 第3類；作業に不必要な5動作

- 見出す
- つかみ続ける
- 避け得ぬ遅れ
- 避け得る遅れ
- 休む

### 8.3.2 稼働研究について

従来のIEすなわち動作研究や時間研究に対し、現在のIEは稼働研究の稼働率に対する考え方が含まれる。従来のIEでの稼働率は、数分もしくは1時間程度の稼働時間の中でムダな動作を省き、1個でも製造量を多くすることが目的である。無論、現在のIEでもムダな動作を省くことはその目的に違いはない。しかし現在のIEは、製造量を増やすことのみが目的ではない。

なぜならば、製造量は本来、企業や工場が勝手に決めるものではなく、顧客の要求量や市場のニーズ数量によって決まるものである。従って、ムダを省いて製造量を増やすということは、顧客や市場の要求量以上の製品を作ることにもなり得てしまい、それは製品在庫量が増えることに波及し、工場の稼働率がかえって下がってしまう結果となる。これは見かけの製造量や稼働率を向上させただけで、結局作り過ぎのムダを招いているのである。こうした考えをプロダクトアウトという。

稼働研究の計測は、1日、2日、一週間などの長い時間の時間研究や連続観察法、瞬間観察法（ワークサンプリング法）の2つに大分される。

#### 1) 連続観察の方法

観察内容は、作業技術者、作業内容、作業場所、開始時間、使用器具、歩行距離などである。また観察の特徴として、次のことが挙げられる。

- 1日の作業全体を観察する
- 観察で捉える作業内容が大きいので、複数の対象者を同時に観察できる
- 観察単位が大きいので、比較的誰でも観察できる

動作分類は、主に要素作業別に単位動作について観察し、ノートに記述する。ここであまり細かく要素動作まで分析すると、観察時に疲れてしまって観察作業が持続できないので、製造ラインの単位動作を予習するなどしておく。

観察のまとめと改善案立案について、例えば作業能率の向上をめざするのであれば、作業経過表で表し、要素作業別に時間を集計し、グラフで示しながら周囲と問題箇所を議論する。問題箇所すなわち改善箇所を絞ったら、さらにその部分の時間研究や動作研究をするなど詳しく分析すると、問題の原因が分かることもある。

## 2) 瞬間観察の方法

瞬間観察法とは時計を用いずに観察する方法で、ある一定時刻に発生している工場現場の動きを瞬間的に捉えて記録していく。すべての観察の目が作業現場の動きに集中する反面、時計が無いので細かな研究ができない。

- 1人の観察者が、同時に複数の対象者を観察できる
- 対象職場の概略を知っていれば、誰でも容易に観察できる
- 作業技術者各人の稼働状況や余裕状況をつかむことができる
- 観察は大きく断片的である
- 対象者の行動が職場内外をまたいだ作業である場合、観察者は追跡できないのでその行動はつかむことが出来ない。

観察の対象について、様々な分類が可能である。

- 直間分類；直接工と間接工に分ける
- 職能分類；プレス工と旋盤工など職能別に分ける
- 経歴分類；ベテラン工と新人工など経歴別に分ける
- 製品分類；ライン化された工場では製品別に分ける
- 職場分類；観察対象が機械の場合、ライン毎に分ける
- 機種分類；観察対象が機械の場合、機械の種類別に分ける
- 能力分類；観察対象が機械の場合、機種別・能力別に分ける
- 動力分類；観察対象が機械の場合、自動・手動別に分ける

これらは、“何か”とまた“誰かと”比較しながら観察する動作分析の手法であり、観察/分析コスト、データ収集、観察時間、および作業負荷について、なんら分析手法が改善されたものではない。

### 8.3.3 作業改善の方法について

改善計画の基本である 5W1H、何（誰）に対し、いつ、どのように、誰が、どんな手法で改善すべきか改善計画を立案し改善策を実行して、その改善成果を見てさらに改善策自体も改善しながら、よりよく改善成果を出し続ける。

1990 年代の製造効率の向上活動における製造現場の役割、すなわち 1990 年代の IE は、「Q（Quality）」「C（Cost）」「D（Delivery）」「M（motivation）」の総合的な向上で、納期厳守と品質厳守を実現してきた。また、優れた QCDM を生み出すために、製造の 4 要素（4 M）である人（Man）、設備（Machine）、材料（Material）、手法（Method）の総合的な向上を図り、ムリ・ムダ・ムラの改善を続けてきた。改善のポイントを図 47 にまとめた。

日本の製造業は 1990 年代に、従来の IE とりわけ QDCM や 4 M などの製造管理手法を取り入れるようになり、Japan as No.1 と呼ばれるようになった。

一般に製造効率の尺度として時間の単位がよく使われるので、この観点から製造の過程を考えてみる必要がある。作業技術者が 1 つの作業をしたり、または一定量の製品を製造するために費やす時間が作業時間である。

製造効率を高めるためには、図 48 の A、B、C、D の改善をしなければならない。図で示すようにムダや無効時間を削減していくのが現在の IE 活動である。表 20 は、製造効率の阻害時間である A、B、C、D に対する IE の解決方法をまとめたものである。

製造効率の向上の 1 つの見方・考え方の例として、時間の側面に着目したが、製造現場の製造効率の向上はその要件も含めてもう少し広くとらえて考え、取り組まなければならない。

たとえば、原価（材料調達コスト）の低減がすべて収益（利益向上）につながると考えてしまいやすいが、収益は原価だけで決まるものではない。企業にとっては「継続的な収益」が必要である。当然のことだが、品質が悪ければ商品価値が下がるだけでなく、売上高の減少につながっていく。また納期が守られなければ、顧客からの信用もなくなり、売上高の減少に繋がる。

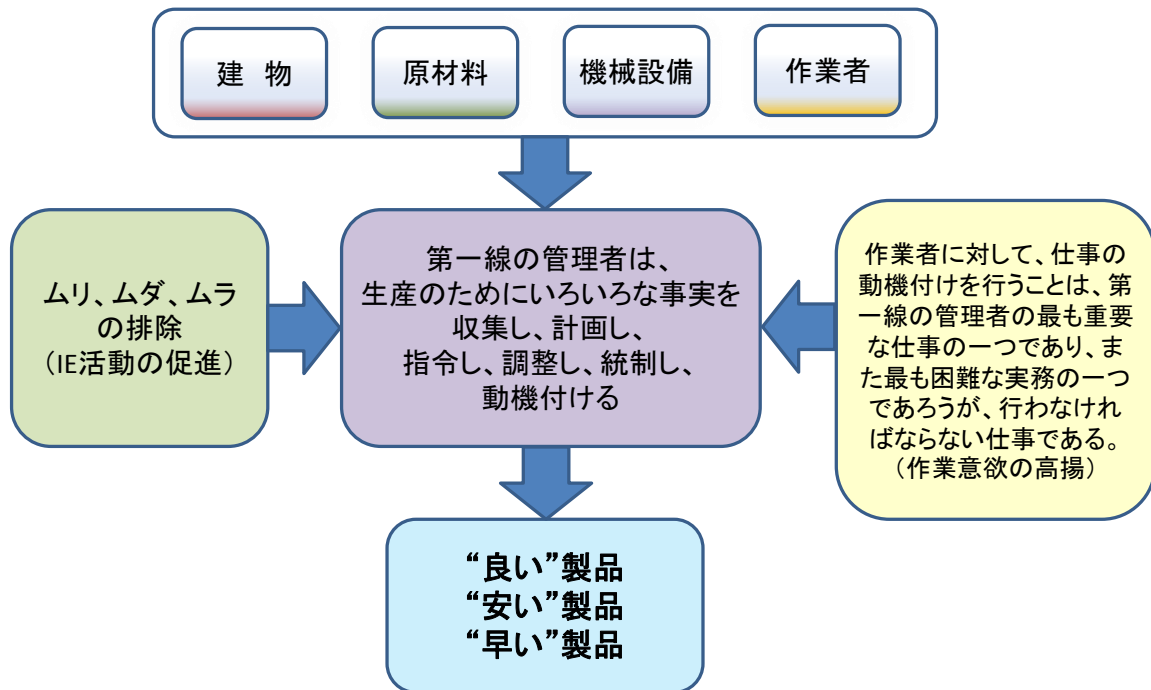


図 47 現場の管理者の役割

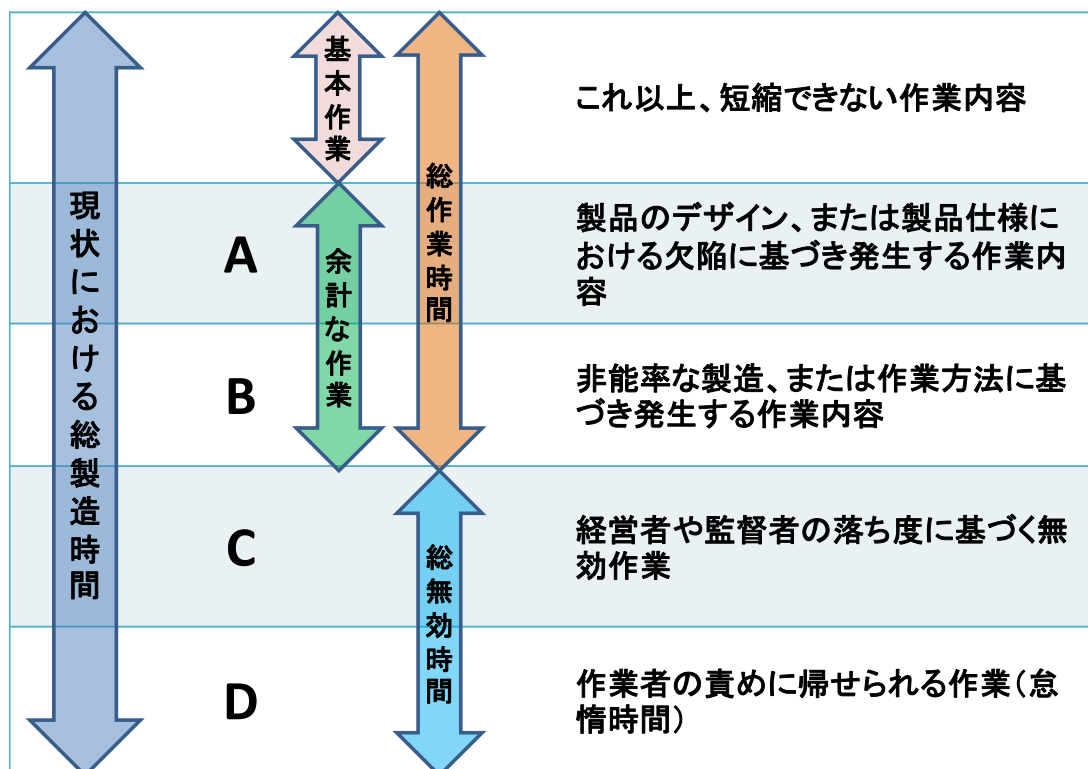


図 48 実働時間の実態

表 20 製造効率の阻害時間と IE による解決方法

	分類	IEの解決手法
A:	製品に原因のあるムダな作業内	専門化と標準化 市場、顧客、製品などの調査分析
B:	工程や方法に原因のあるムダな作業内容・工程	工程研究 方法研究 作業技術者の訓練
C:	経営者側に原因のある無効時間・資材管理	業務の専門化（単能工） マーケティング 間違った標準化の設定、改善しない標準化 製品分析 保全（PM） 作業計測に基づく製造統制 安全措置 作業環境の改善
D:	作業技術者が制御し得る無効時間・人事方針	労務管理 刺激給制度 安全訓練 作業技術者の訓練

## 8.4 先行研究の調査

### 8.4.1 時間研究

実際の工場の製造ラインで計測される工程×時限形式の作業時間について、工程・時限・ロット（作業の反復回数）の効果が変動する要因は、ラインバランスの不均衡・作業疲労・作業習熟があると考え、それらに関する先行研究の概要および問題や課題を挙げる。

#### (a) ラインバランシングに関する先行研究の概要

##### [5] 赤木文男(1986) “マイクロコンピュータを利用した IE 方法の有機的活用法”

この研究は、マイコンで作業時間を観測・計算・記録を動的に計測して、単位作業の作業配分を動的に割り振る作業遂行度を考慮した管理システムを提案している。管理システムをシミュレーションし、作業余裕率、作業ピッチタイム（標準時間）と習熟度合いを推定・予測してライン速度（ピッチタイム）を可変している。

ただし、作業継続による疲労はないものとする前提で管理するシステムである。

##### [6] 長沢啓行(1980) “作業時間分布を考慮した組立生産システムの設計に関する研究”

この研究は、実際のコンベヤ式組立作業にて、成果物を置く作業完了位置の違いについて確率分布を求めている。次に、その分布からサイクルタイムと作業域の長さが、作業ができなかった通過率や手待ち発生率/手待ち時間に与える影響をシミュレーション解析で検討している。

ただし、作業継続による疲労、作業反復による習熟についてはないものとされており、理想的なデータを想定しシミュレーション解析を行っている。

##### [7] 村瀬康比古(2006) “セル生産とコンベヤ組立ラインの数理的解析”

この研究は、セル生産方式のコンベヤ式組み立てラインを対象に、多数の制御要因を統合的に数理モデルで構成し、習熟効果もあるモデルを立て、シミュレーションを行っている。具体的には、セル生産方式における負荷作業、多能工化率、プロセス難易度、各作業技術者を受け持っている作業数の増加に対する困難率、それを補う作業支援システムの整備度を制御要因としたモデルを提案している。

ただし、作業継続による疲労はないものとされており、理想的なデータを想定しシミュレーション解析を行っている。解析方法は、各工程、各時限の平均作業時間を算出し、その変動する様子について考察している。

##### [8] 吉村康史(2002) “プラント建設における配管据付作業の基準作業時間推定法の研究”

この研究は、作業内容が均一ではないプラント建設で、配管の据付作業の性

質が作業時間に与える影響を PTS 法（既定時間標準法）にて表し、各動作の標準的な作業時間を推定する方法の開発が目的である。3 箇所の火力発電プラントの配管据付作業を動作研究し、プラント建設配管据付作業の主な単位動作を計測して、平均作業時間を算出している。

ただし、時限・反復の効果は考えられていない。

[9] 上野俊夫(1974) “作業時間のバラツキによる干渉時間の排除法”

この研究は、成果物を組み合わせる流れ作業において、各製品の作業時間にはバラツキにより発生する干渉時間の理論的求め方、干渉時間の排除方法を検討している。適当に置いたデータで計算を行い、干渉時間の推定を行っている。

ただし、時限・反復の効果は考えられていない。

[10] 竹田仁(1986) “流れ作業における最適工程数決定の研究”

この研究は、各要素作業の作業時間が確率的に変動し、かつ習熟という動的要因を考慮したモデルで最適工数を決定する理論法を示している。モデルは、習熟を考慮したモデルと考慮しないモデルの 2 通り提示している。

ただし、作業継続による疲労はないものとし、また理論式を展開しているだけでデータ分析は無い。

[11] 武田健二(1974) “コンピュータによる組立工程設計”

この研究は、組立の工程設計は組立作業の作業順序、作業時間、使用工具、設備、製造速度など制約条件下で、可能な限り余白時間を削減し標準時間を決定する従来の CADAP 方法に対して、作業技術者数、作業技術者能力も条件に加えた新たな CADAP 方法を提案している。家電の組立作業について CADAP 方法で各工程の要素作業数量（作業順序と作業量）を求め、ラインバランシングを行い、作業時間実測値よりバランス崩れが 6・10%減少したことを確認している。

ただし、このモデルは作業継続による疲労、作業反復による習熟に関する効果が出ないように慣熟した熟練技能者が作業する作業実験を行っており、抑制したデータを計測している。

(b) 疲労に関する先行研究の概要

[12] 野津哲子(1983) “縫製作業における疲労の研究(第 2 報)”

この研究は、どんな作業時間形態がより疲労を少なくし作業能率に向上をもたらすか、作業経過時間と疲労との関係を観察検討している。縫製作業を例に継続作業時間に休憩時間を挟む 4 パターンに分けて、予め作業台に道具を据え置き、室温・湿度は一定に保ち、縫製作業に慣れている学生 40 名が繰り返し同じ作業を行って、継続作業時間別のフリッカー値（光りのちらつきの臨界融合頻度）、自覚症状アンケートを得て作業経過時間と疲労との関係を示している。

ただし、単一作業であり複数工程ではなく、また作業に慣れている学生のみが選ばれて作業実験に参加しており、工程間のバラツキに関する効果や工程作業反復による習熟に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。また医学データの計測を行っており、定期的に得られるデータではない。

[13] 山口晴久(2004) “VDT 文書入力作業の作業時間による心理負担計測のための評価尺度の開発”

この研究は、2つの目的を持つ。1つめは、先行する疲労研究では心拍数・フリッカー値・眼球運動など生理評価指標は多くの機器を必要とするので、簡素なデータから得られる VDT 心理負担評価尺度の開発を目的としている。2つ目は、継続作業時間が心理負担と感ずる関係を表している。実験は3パターン別の継続作業時間での VDT 作業を行い、誤入力回数、課題ごとの平均作業時間、自覚症状アンケートから「誘眠・疲労、労務遂行努力、倦怠感（飽き）・集中力減退」の3因子を得て、生理指標（心拍数・フリッカー値・誤入力数）との比較から評価尺度の妥当性を検討した。

ただし、VDT という単純作業を行っていて複数工程の製造ラインではなく、また作業反復による習熟は無いことが前提となっており、工程間のデータのバラツキに関する効果や作業反復による習熟に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。また医学データの計測を行っており、定期的に得られるデータではない。

[14] 堀江良典(1995) “VDT 作業の休憩時間の過ごし方に関する一考察”

この研究は、VDT 作業の休憩時間の過ごし方で作業疲労がどのように変化するか調べている。実験は、大学生8名が一位数の検索・加算作業を60分を行い、15分の休憩を取っている。休憩時間は、2通りの方法を採用している。1つめは15分閉目安静、2つめは5分の肉体労働+10分の精神作業（図形分割）を行い、作業技術者各人は休憩時間を過している。また心拍数、CFF 値、作業量、聴覚信号弁別、自覚症状アンケート、物理的環境情報を得て、作業疲労の変化の様子を表している。

ただし、VDT という単純作業を行っていて複数工程の製造ラインではなく、また作業反復による習熟は無いことが前提となっており、工程間のデータのバラツキに関する効果や作業反復による習熟に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。また医学データの計測を行っており、定期的に得られるデータではない。

[15] 角谷学(2010) “作業中の休憩時間の設定による身体的作業負荷パターンの違いが心拍数の回復に及ぼす影響について”

この研究は、作業中の休憩配分による生体負担回復効果について、作業の身体活動負荷強度と作業技術者能力の個人差の影響を併せた検討をしている。実験は、自転車エルゴメーターで50Wと100Wの2段階の身体活動強度を設定し、10名の22.0±1.7歳男性が運動し、運動後の心拍数の回復に及ぼす活動強度および作業負荷パターンの影響を考察している。



ただし、自転車を漕ぐという単純作業を行っていて複数工程の製造ラインではなく、また作業反復による習熟は無いことが前提となっており、工程間のデータのバラツキに関する効果や作業反復による習熟に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。また医学データの計測を行っており、定期的に得られるデータではない。

[16] 澤貢(2001) “作業負担に及ぼす作業時間効果の計測のための実用的調査指標の開発”

この研究は、運転時間の長さが運転士に及ぼす影響について、妥当さと簡便さを併せもつ質問票を開発目的としている。実験は、20-24 歳の学生 19 名が継続時間(100 分, 200 分, 400 分)のシュミレータによる運転作業を行う。運転時刻表にあわせて 1 区間 23 分の周回路線を 5 周・9 周・17 周し、100 分・200 分・400 分となるよう設定し、自覚感(眠気・疲労、負担に抗する努力、飽き・集中困難)の 3 因子について質問して、作業継続に伴う蓄積された負担および負担に抗する努力(注意や心的エネルギー)について因子分析している。

ただし、複数工程の製造ラインではなく、運転に知識がある学生のみが集まって作業を行い作業反復による習熟は無いことが前提となっており、工程間のデータのバラツキに関する効果や作業反復による習熟に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。

[17] 岡村法宜(2007) “長時間の計算作業による精神疲労が事象関連電位 P300 に及ぼす影響”

この研究は、事象関連電位 P300 の計測が精神的疲労の評価に有効かどうかを検討している。実験は、12 名学生(男性 8 名、女性 4 名; 19.5±0.5 歳)が精神作業(2 時間の連続加算作業=内田クレペリン試験紙を使用して実験する)を行い、作業前と作業後に Fz, Cz, Pz より導出した聴覚事象電位、疲労を反映するとされる血中乳酸値やコルチゾール値、オドゾール課題の反応時間を計測している。

ただし、計算作業という単純作業で複数工程の製造ラインではなく、計算能力が同じレベルの学生のみが集まって作業を行い作業反復による習熟は無いことが前提となっており、工程間のデータのバラツキに関する効果や作業反復による習熟に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。また医学データの計測を行っており、定期的に得られるデータではない。

[18] 大西徳明(2007) “労働形態の変化にみる労働負担と健康”

同姿勢を保ちながら長時間作業をすることで、疲労の一つである静的筋収縮が起こる。この研究は、静的筋収縮が動的筋収縮とは異なる負荷過多要因があること、また作業反復は急激な筋疲労を生起させる主因であることを示している。実際のカボチャの軸きり作業(前屈みの状態を続けながら仕事をしている)を繰り返し、10 個のカボチャの軸切りの作業時間、筋電図電位、エネルギー代謝率(RMR)を計測している。

ただし、カボチャの軸きり作業という単純作業で複数工程の製造ラインでは

なく、事前知識を有しない同じレベルの作業者が集まって作業を行い作業反復による習熟が無いことが前提となっており、工程間のデータのバラツキに関する効果や作業反復による習熟に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。また医学データの計測を行っており、定期的に得られるデータではない。

### (c) 習熟に関する先行研究の概要

#### [19] 芳賀繁(1999) “作業習熟と作業時間が作業負担に及ぼす影響”

この研究は、聴覚探査課題を与えて、達成度手法を用いて探査作業の時間の変化から習熟過程を分析し、習熟の進み方および作業習熟と作業時間および作業負担（疲労）の関係を調べている。実験は、20-24歳の学生11名が聴覚探査課題を行い、探査数字提示からキー入力までの反応時間つまり単位作業当たりの作業時間を計測している。習熟は、作業時間、フリッカー値（CFF）、自覚症状（自覚症状しらべ）アンケート記入、休憩時に簡易精神疲労尺度（心拍数変動指標）、1セッションあたりの作業量（検索回答回数）とエラー数を計測し、達成度手法で達成度評価量の式から達成度評価量を出している。

ただし、キー入力作業という単純作業で複数工程の製造ラインではなく、事前知識を有しない同じレベルの作業者が集まって作業を行っている。工程間のデータのバラツキに関する効果が無いように抑制したデータを計測している。また医学データの計測を行っており、定期的に得られるデータではない。

#### [20] 福田康明(1981) “生産性傾向式による作業評価法”

この研究は、作業の繰り返し回数と作業時間の関係を動的に表示できる生産性傾向式 RS 法の開発が目的である。実験は、7名の学生が旋盤作業をモデル化した S 字周回作業（盤上に表示された S 字を固定した指針でとり、往復周回させる単純作業）を行い、作業時間を計測している。作業時間を分析し、作業状態の評価を達成度 Q で表している。

ただし、単一作業で複数工程の製造ラインではなく、技術能力が同じレベルの学生のみが集まって作業を行っている。作業継続による疲労は無いことが前提となっており、工程間のデータのバラツキに関する効果や作業継続による疲労に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。

#### [21] 児玉ひろみ(2005) “学内給食管理実習における作業時間の検討”

この研究は、給食調理作業の作業計画を立てるため調理開始から配膳までの各作業について作業時間を計測し、熟練者と未熟者の作業時間の差を分析している。実験は、作業知識別学生3クラス（1年生クラス、2年生クラス）が献立別（4つ）に10食当たり作業時間/60分当たりの食数を調理する時間を計測し、労働生産性を算出している。

ただし、技術能力が同じレベルの学生のみが集まって作業を行っている。作業継続による疲労は無いことが前提となっており、作業継続による疲労に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。

[22] 三林洋介(1996) “人間作業におけるとまどい現象と最適作業分割量に関する研究”

この研究は、製造ラインの複雑化による動作時間と動作距離の関係、および作業習熟ととまどいとの関係を検討している。実験は、男子学生 4 名が 1 サイクル 7 要素動作の小物組み立て（座位作業）を行い、動作別（視覚探索、置き、組み付け）作業時間、置き動作距離と移動時間、習熟後の作業一部変更によるとまどいの時間を計測している。

ただし、技術能力が同じレベルの学生のみが集まって作業を行っている。作業継続による疲労は無いことが前提となっており、作業継続による疲労に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。

[23] 師岡孝次(1974) “大量生産における習熟の研究”

この研究は、実務的処理の便や近似の度合いを考慮した習熟モデルの開発を目的としている。シミュレーションを行い、累積製造数、期間平均工数、経過時間を計測している。

ただし、習熟曲線を加工した習熟モデルの開発であり、作業継続による疲労は考えられていない。

[24] 大矢雅之(2009) “セル生産における作業技術者の習熟特性に関する研究”

この研究は、6 つの単一作業とそれらをセル生産した場合の習熟過程の違いについて、達成度手法により習熟状態を評価する指標の開発を目的としている。実験は、6 工程からなる事務機器組立作業（座位作業、21-24 歳男性学生、室温湿度照度は一定）について、6 工程の単一ライン作業（3 つの組み合わせを作る）と異なる 3 種のセル生産の組み合わせ、計 6 つの作業の習熟特性を 20 回繰り返し、セル生産の達成度  $Q$  を比較している。

ただし、技術能力が同じレベルの学生のみが集まって作業を行っている。作業継続による疲労は無いことが前提となっており、作業継続による疲労に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。

[25] 西岡基夫(2008) “繰り返し作業における操作方略の変化と動作特性に関する基礎的研究”

この研究は、モノの動き（操作時間や速度）一人の動き（筋電図など）を用いて、習熟との関連性を検討している。実験は、作業未経験の 18-20 歳までの男子学生 5 名が作業を行い、10 回ごとの作業成功率、超過距離、筋電図、エラー率と作業時間を計測し、作業時間と習熟との関連性を調べている。

ただし、単一作業で複数工程の製造ラインではなく、技術能力が同じレベルの学生のみが集まって作業を行っている。作業継続による疲労は無いことが前提となっており、作業継続による疲労に関する効果が無いように抑制したデータを計測している。

## 8.4.2 動作研究

次に改善活動でしばしば適用されている動作研究の先行研究に関して、それらの概要および問題や課題を挙げる。

### (d) 動作研究に関する先行研究の概要

#### [26] 金沢孝(1982) “単純作業において作業条件が作業能率に及ぼす影響の研究”

この研究は、繰り返し作業を対象とした動作研究用の実験装置の開発を目的としている。実験は、鋼球をつかむ・運ぶ・孔に挿入する繰り返し作業を行い、作業面の高さと RP 位置を可変させながら開発した実験装置が精度よく観察できているか検討をしている。実験から、肘の高さや最適値を捉え、もっとも作業能率の良い作業条件を示している。

#### [27] 山内須美子(1994) “調理作業における動作研究”

この研究は、大量調理を行う給食調理作業は、調理担当者の作業負荷が腰痛などの身体への影響をがあるので、動作研究を通じて各動作の問題点と改善策案を示している。実験は、19名の学生が調理作業を担当し、1名の作業技術者に対して2名の観察者を配置し、小型ビデオカメラを設定しさらに観察者がカメラで撮影するなど、間接観察を行っている。要素動作の負荷箇所を挙げるだけでなく、要素動作の作業時間を測り、各動作に掛かる時間についても検討している。

#### [28] 小柳礼之助(1966) “X線透視台の人間工学的動作研究”

暗闇で行うレントゲン技師の各動作について、作業時の位置、姿勢、生理的能力に関する情報が乏しく、X線透視台の設計開発が進まない。そこで、レントゲン技師の実作業を動作研究し、各動作の特徴や問題点を洗い出す。レントゲン技師の左手の指に豆電球をつけて、この軌跡を 16mm メモーションカメラで撮影記録する。また作業を録音し、音と画像から時間的推移を観察し、動作の特徴や問題点、各動作の作業時間について検討している。

#### [29] 松赤本文男(1983) “プログラミング作業における動作研究”

この研究は、精神疲労が多いと推察されるオフィス作業とくに静的姿勢を継続するプログラミング作業について、各動作の問題点を把握するため動作研究である。実験は、成績の同レベルの学生 6 名が数理的知識を必要としない COBOL 言語をプログラミングし、要素動作や各動作時間を直接観察している。

#### [30] 杉本吉恵(2005) “熟練看護師の車椅子移乗介助動作の分析”

この研究は、指導がしにくい立位が困難な患者への車椅子移乗介助方法について、看護経験の豊富な熟練看護師の動作研究を通じて、その方法を検討している。熟練看護師の車椅子移乗介助動作をビデオに撮り、腰痛予防や患者の自然な動きに沿った立ち上がり介助、立位での方向転換の介助、立位から座位へ

の介助方法を標準化している。

[31] 荒川雅裕(2007) “多工程組み立て作業に対する作業分析の研究”

この研究は、多工程連続作業について、作業実績およびその動作研究をするデジタルマニュアル表示システムの開発を目的としている。具体的には、工程毎に収集される正味作業時間と動作研究結果と関連付けて、類似商品の製造プロセス設計の算出方法を示している。また動作研究から、作業技術者間の動作の違いと製品構造、作業技術者の姿勢の違いと作業位置の違いを考慮し、ニューラルネットワークにて作業時間の補正をする方法も示している。実験は、4名の学生が三角プレートの取り付け作業をして、その様子を直接観察し、また作業時間を計測し、提案手法に沿って算出している。

[32] 竹中弘行(2005) “生活の中における動作分析とアプローチ”

この研究は、理学療法士による繰り返し作業、また介助される患者の介助時の無自覚な行動を動作研究し、介助する側とされる側の双方の動作の特徴や問題点を示している。主に介助を必要とする患者の動作を直接観察し、運動学的なパターンや姿勢を示し、患者と情報を共有化することで患者の介助時の動作改善を行っている。

## 9 謝辞

本研究実行にあたって、主任指導教員として懇切丁寧な御指導ならびに御助言を頂きました総合研究大学院大学 複合科学研究科 統計科学専攻の中村隆教授に深く感謝致します。並びに同大学院で研究開始から一貫して研究の御指導を仰ぎました副指導教員の椿広計教授、川崎能典准教授に感謝の意を表します。さらに、副指導教員として御指導頂きました故藤田利治教授には御存命中に拙論を取りまとめること叶わず心残りではありますが、感謝の意を捧げたいと思います。

博士論文審査委員会で主査を引き受けて下さいました川崎能典准教授、委員として厳しくも懇親丁寧に論文審査頂きました中村隆教授、椿広計教授、河村敏彦助教、外部審査委員として懇親丁寧に御指摘と御指導を下さいました小平和一朗氏、本審査に携わって下さいましたすべての教員の皆様に感謝致します。

本研究は、株式会社東大総研において、著者が工場現場の製造管理作業・作業員製造作業に関する改善業務の担当となったことから始まったものであり、5年にわたり同一業務を行いその中で研究に従事できたことは、上長の御理解と御助言の賜物であります。この間、業務実施における御指導を頂きました上長である柚原義久氏、藍澤進一氏に感謝致します。

さらに工場でのデータ収集では、地域工芸メーカ A、精密機器メーカ B、自動車関連メーカ C、組立メーカ D の工場長と御担当各氏に御協力を賜りました。ここに、関係各位に心から感謝の意を表します。

最後に夫であり父であることに限りのない責任と喜びを常に筆者に思い起こさせてくれた、妻 江美子、長男 昂苺が本研究を成し遂げる原動力になったことを記します。