

## 原著論文

## 常時混流方式と品種別段取時間を考慮したラインセル転換モデル Line-Cell Conversion Model Considering Continuous Mixed Flow System and Set-up Time in Each Product

片岡隆之\*  
Takayuki Kataoka\*  
\*近畿大学  
\*Kindai University

\*Email: kataoka@hiro.kindai.ac.jp

森川克己\*\*, 高橋勝彦\*\*  
Katsumi Morikawa\*\*, Katsuhiko Takahashi\*\*  
広島大学  
\*\*Hiroshima University

\*\*Email: {mkatsumi, takahasi}@hiroshima-u.ac.jp

**Key words:** Line-Cell Conversion, Continuous Mixed Flow System, Set-up Time

**要旨:** 現在, 我が国の製造業は, その生産機能の多くを新興国にシフトしており, 新設の製造現場ではより強靱かつ競争力を持った生産システムが構築されている. 特に海外進出企業の多くは, 従来のコンベア組立ラインの機能を維持しながら, 柔軟性の高い生産システムも組み込み始めている. 例えば, いくつかの先進的な日本企業は, 従来のコンベア組立ラインを順次変換してセル生産方式を導入することで大きな成功を収めている. しかしながら, ラインセル転換についての実践論文は数多く存在するものの, 理論研究は散見される程度であり, それらの理論モデルは, 時間帯混流方式 (1 バッチの処理量が大きく製品タイプ変化のあまりない投入方式) によるバッチ投入を用いているほか, タイプ間のセットアップタイムの違いを十分に考慮していないなどの問題点があり, 実際の工場に導入することが難しい. そこで本研究では, 現在の細分化された生産計画に対応可能な常時混流方式 (1 バッチの処理量が小さく製品タイプ変化の激しい多タイプの投入方式) に加え, タイプ間のセットアップタイムの違いも考慮可能なラインセル転換モデルを提案するとともに, 企業でのヒアリング結果に基づく数値実験により, 提案モデルの有効性について検討する.

**Abstract:** Given the fierce competition, almost every manufacturer has been improving its productivity in changeable customer demand. Mixed assembly line model, in which various products are produced in the same line, has shown its validity in such an uncertain demand. A number of papers have also made the academic efforts in each field. On the other hand, a reconfigurable production line that allows the modification of the system configuration, such as facility layout, workers' assignment and machine function, is also identified as an inevitable element for realizing next generation manufacturing. Recent researches show that Line-Cell Conversion (LCC) problem would provide more effective and adaptive solution for future production. However, focused on the automotive supply industry, almost every SME's supplier has a traditional conveyor assembly line and/or a cell system, in which one or multiple worker carries out all of the operations of a job in a cell. They have been improving its productivity in changeable demand. In fact, it might be more efficient to overcome in designing and implementing such a complex system. This research aims to analyze the impacts of a new proposed model under JIT supply by proposing metaheuristics or optimization models to design multiple production lines with both line production and/or cell manufacturing in automotive suppliers.

### 1. はじめに

現在, 我が国の製造業は, その生産機能の多くを新興国にシフトしており, 新設の製造現場ではより強靱かつ競争力を持った生産システムが構築されている. 一方, 既存の製造現場に目を向けると, 大量生産技術の先駆けであるライン生産方式が古くから使われてきたと同時に, 学術面でも長年広く応用研究がなされてきた. 例えば, 下社ら [1] は, 従来の単一作業周期を前提としたラインバ

ランス問題にマルチタクトを導入することで, より一般化した場合に拡張し, 作業稼働率を高めるアルゴリズムについて提案し, 投入時間間隔, 要素作業の先行関係ならびに分離関係が与えられた場合のマルチタクトによるラインバランス問題のモデル化と, これに分岐限定法を用いて解くアルゴリズムについて報告している. さらに徐 [2] は, 自己完結ラインとして, 車の機能別にいくつかの短いラインに分割し, 複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式を提案している. 組み付け作業は各作業ラインの自主的な運営に任せられ作業の意

原稿受付 平成 28 年 11 月 27 日  
審査終了 平成 29 年 2 月 16 日

義や目的を与え従業員満足の向上を図っている。他にも、井田ら[3]は、製造ラインのライフサイクル全体における品質と生産性のバランスを総合的に同時評価する評価法、千野[4]は、作業者の疲れを考慮したサイクルタイムの設定を提案している。さらに、山崎ら[5]は、高品質、低リードタイム、少在庫、高生産性の特徴を持ったトランスファラインを用いた、生産量、品種の変動に追従可能な自動化組み立てラインの設計、柳ら[6]は、生産変動に対する柔軟性を高めるために、工程差分の作業を専門的に行う補助作業者を導入した製品投入順序付け方法をそれぞれ提案している。

このように、様々な応用研究が提案されているが、その中でも、大量生産機能を維持しながら顧客ニーズに合わせた製品も生産可能なマスカスタマイゼーションが求められており、海外進出企業の多くは、従来のコンベア組立ラインの機能を維持しながら、柔軟性の高い生産システムも組み込み始めている。

例えば、いくつかの日本企業は、従来のコンベア組立ラインを変換してセル生産方式を導入している。実際 Canon においては[7]、従来のコンベア組立ラインをセル生産システムへ変換し成功を収めている。1995年から20,000メートル以上のコンベアベルトを撤退させ、720,000平方メートルのワークスペースを54の関連工場に作り8年間でトータルコストは62%から50%に減少させた。このような、従来のコンベア組立ラインをセル生産システムへ順次変換していくプロセスを Line-Cell Conversion (以下、LCC と呼ぶ) と呼んでいる。LCC についての実践論文はかなり多く存在するが、理論研究は散見される程度[8]であり、多くの論文がパフォーマンス向上について不透明な推論をしているにすぎない。

しかしながら、近年の理論研究として、Kaku ら[9]が作業者の能力要素を組み込んだ LCC モデルを提案している。当該論文では、セルで行うタスクは過去の生産計画において組立ライン上で割り当てられた作業に依存しているという点に着目し、ワーカーのクロストレーニングがセルへの転換における重要な指標となっている。そこでさらに彼らは、ワーカーのクロストレーニング量を分析し、人間の記憶能力とクロストレーニングの影響を考慮した理論モデルを提案した。同じく Kaku ら[10]は、混流生産、需要変動や製品によって変化するワーカー能力のような複雑な生産環境を扱う LCC モデルを提案した。しかしながら、これらの理論モデルは、時間帯混流方式(1バッチの処理量が大きく製品タイプ変化のあまりない投入方式)によ

るバッチ投入を用いているほか、タイプ間のセットアップタイムの違いを考慮していないなどの問題点があり、実際の工場に導入することが難しい。

そこで本研究では、現在の細分化された生産計画に対応可能な新しい LCC モデルを提案する。具体的には、常時混流(1バッチの処理量が小さく製品タイプ変化の激しい多タイプの投入方式)に加え、タイプ間のセットアップタイムの違いを考慮でき、LCC モデルの以下の知見を得ることができる。

- (1) どれだけの量のセルを編成すべきか。
- (2) どの作業者がセルに割り当てられるべきか。
- (3) どの作業者が縮小したコンベアラインに割り当てられるべきか。

さらに、定義されている総フロータイムを目的関数として用いることにより、生産システムの変更を望んでいる企業や、コンベアラインからセルシステムへ転換後のパフォーマンスを評価したい会社の査定ツールとして使うことが期待される。

## 2. 従来法とモデル

従来法では、ライン生産方式とセル生産方式の二つを直列的に結合させた新たな生産モデルを提案している。各生産方式とモデルの特徴について以下に示す。

### 2.1 ライン生産方式

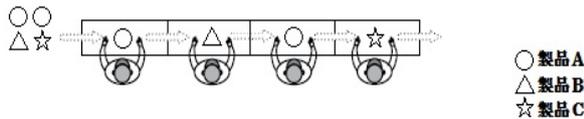
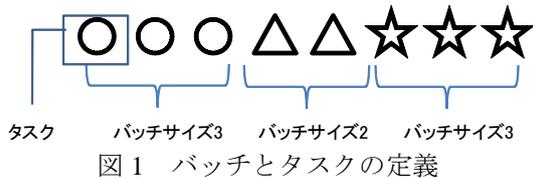
ライン生産方式は「特定の品種の生産のために専用のラインを設置し、特定の品種を連続的に繰り返し生産する方式」と一般的に定義されている。上記の定義において、ラインとは、製品が完成するまでに必要な一連の作業をいくつかの要素作業に分け、作業の手順に従って工程を配置した方式をいう。ライン生産方式は、連続生産形態における典型的な生産方式である[11][12]。本研究では、多品種製品ライン生産方式をとり、固定サイクル投入、静止作業のルールに基づくライン生産モデルを構築している。なお、ライン上の作業員間における仕掛品は考慮しない。

### 2.2 セル生産方式

セル生産方式は「1人ないし数人の作業員が一つの製品を作り上げる自己完結性の高い生産方式」と一般的に定義されている。従来のコンベアを主体とした生産方式に比べて、1人の作業員の組立点数が増え、求める技能レベルは高くなるが、反面、生産量の変動や仕掛量の削減、作業員モラルの向上など、現代の製造業者が抱える多くの問題に解決の糸口を示してくれる生産方式である[13][14]。

2.3 モデル用語

本モデルで使用する関連用語を以下に示す。



(1) バッチ

バッチとは処理する製品の一固まりをいう。図1の場合、製品“○”は、3つを1バッチとしており、バッチサイズ3と表現される。

(2) タスク

タスクとは1つの製品を組み立てることであり、タスクタイムはバッチの中の1つの製品を処理する時間である。図1の場合、製品“○”や“△”または“☆”1つを処理する時間がタスクタイムである。

(3) 製品タイプ (品種)

段取時間の発生の有無により製品タイプを定義する。図2の場合、A、B、Cの3つの異なるタイプの製品を作業するたびに、段取時間が発生することになる。

(4) 混流生産

混流生産とは、異なったタイプの製品を1つの組立ラインで流す生産方法である。図2の場合、A、B、Cの3つの異なるタイプの製品を1つの組立ラインで流している。

2.4 従来モデル

従来モデルは、高い技術力を持ったワーカーのために組立ラインの一部をセルに組み替え、低い技術力を持つワーカーのために組立ラインの一部を残すことを目的としている。具体的には、自動車業界や電機業界をはじめとする大量生産向け組立ライン全般を研究対象としている。従来法では、セルのみ、組立ラインのみ、セルと組立ラインの融合したシステムの3タイプの組立システムを考えている。セルと組立ラインの融合システムでは、セルが組立ラインの前工程でも後工程でも、システムのパフォーマンスに影響を与えないため[15]、一般性を失うことなく簡略化する目的で、組立ラインをセルの後工程に配置している(図3)。

まず、セル編成については、セルのみの場合、製品や工程によって変化するワーカーの技術力を考慮し割り当てを行い、融合システムの場合、高い技術力を持ったワーカーをセルに割り当て、低い技術力を持つワーカーは組立ラインに割り当てるように編成する。

次に、生産計画については、組立ラインに対し、先着順サービス(FCFS)ルールに基づき、バッチが割り当てられる。セルのみでは、先着順だけでなくワーカーの作業スキルレベルにも考慮しバッチが割り当てられる。これは対応する製品について、高いスキルレベルを持つワーカーが優先して割り当てられるべきであることを意味する。また融合システムにおいては、最初に割り当てられるセルに先着順サービス(FCFS)ルールが適用され、後工程の組立ラインに割り当てられるバッチは、セルから一番早く出たものが割り当てられるよう計算される。これはセル・ライン間に、セルでの作業が完了し、ラインでの作業を待つバッチが仕掛品として存在する可能性があることも意味する。

図3及び4は、ラインとセルの融合システムにおける要員配置計画とスケジューリングのフローを示している。また、図4の長方形の長さは製品バッチの組立時間を示している。システムパフォーマンスの評価尺度としては、生産力を示す総フロータイムを定義する。総フロータイムは、全てのバッチが完了したときに算出される。総フロータイムを最小にすることを目的として、セル数とセルに割り当てるワーカーの最適解を導き出すことができる。

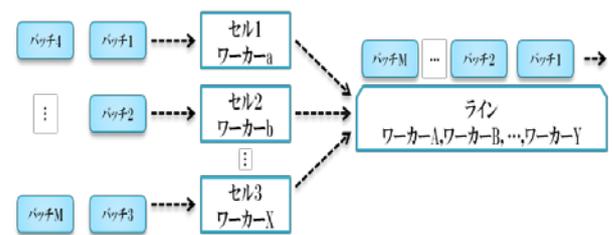


図3 従来法の要員配置計画

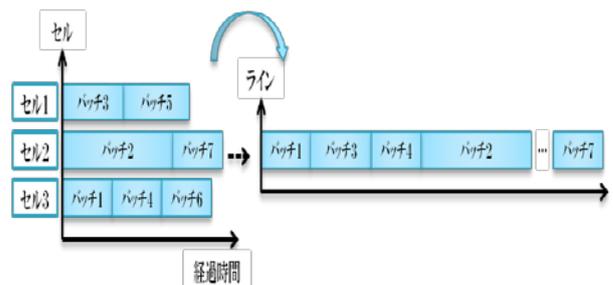


図4 従来法のスケジューリング

### 3. 提案法とモデル

近年の生産計画は、需要変動や在庫問題に対応するため、トヨタのジャストインタイム、マツダの計画順序生産などに見られるように、2時間おきに納入するなど、非常に短いサイクルの常時混流を用いた生産計画が主流である。一方、従来モデルでは、1バッチの処理が大きい時間帯混流を用いたバッチ投入、タイプ間のセットアップタイムの違いを考慮しないなどの問題点があった。本研究では、多品種生産を扱い需要変動の激しい自動車メーカーのサプライヤーに対するヒアリング結果をモデルとし、細分化された生産計画に対応することの出来る新しいモデルを提案する。

#### 3.1 品種別段取時間

従来モデルでは、製品バッチ  $m$  におけるセットアップタイムは、セルに与えられたバッチが同じ製品タイプの場合はゼロ、そうでなければ定数となる。しかしながら実際の現場では、直前に作業したタイプと異なったタイプの製品がセルに割り当てられた場合、セットアップタイムは製品タイプの違いが大きいほど多くかかり、小さいほどセットアップタイムは少ない。本研究では、前提条件として、タイプ番号が近いほど似た製品タイプ、タイプ番号が遠いほどよりタイプの違う製品とする。具体的には製品タイプの数を  $N$  個とした場合、製品タイプ  $n$  のセットアップタイムは、直前に作業した製品タイプ  $n'$  との絶対値  $|n - n'|$  を使って表現される。つまり製品タイプ番号が離れていくほどセットアップタイムは長くなる。

#### 3.2 常時混流方式

従来モデルでは、組立ラインの製品バッチ  $m$  の投入時刻は、製品バッチ  $m-1$  が組立ラインをすべて流れ終わってからである。つまり、組立ラインの製品バッチ  $m$  の投入時刻は、製品バッチ  $m-1$  の終了時刻またはセルの製品バッチ  $m$  の終了時刻のどちらかで計算される。しかしながら実際の現場では、常時混流が主流であることから、製品バッチ  $m-1$  がラインを流れきる前、すなわち次のワーカーに製品バッチ  $m-1$  が渡った時点かセルの製品バッチ  $m$  の終了時刻のどちらかで組立ラインの製品バッチ  $m$  の投入時刻が計算される。また、従来モデルには要素作業の概念がないことから、前提条件として、組立ラインにおいて、製品バッチ  $m-1$  のバッチサイズ/組立ラインの人数、が処理された時点で次の製品バッチが投入されることとする。

#### 3.3 セルと組立ラインのサイクルタイム

従来モデルでは、組立ラインで行っていた作業をセル化する場合、サイクルタイムを大きくしている。しかしながら実際の現場では、セル生産は作業員間の製品受渡作業がないため、時間ロスがなく、また個人の作業速度が向上するため、セル生産のサイクルタイムは、一般的に組立ラインより短く定義する。

#### 3.4 生産方式別段取時間

従来モデルでは、生産方式の相違はセットアップタイムに影響を与えなかった。しかしながら実際の現場では、組立ラインに流せる製品タイプという前提条件が存在する範囲においてセットアップタイムはほぼ存在しない。そこで本研究では、セル生産に比べて組立ラインのセットアップタイムは小さく定義する。

#### 3.5 バッチサイズの決定

従来モデルでは、バッチサイズは変動している。しかしながら実際の現場では、ハンガーやラックなどの設備制約により、どの製品も生産する最小バッチ量は等しいため、本研究では、バッチサイズを少量で固定する。具体的には、製品ごとの生産量には変動があるため、製品ごとに設定された各生産量を、それらの最大公約数で割った数をバッチ数として流すことにより、より現場の状況に近い方式とする。

#### 3.6 組立ラインへの検査工程の導入

従来モデルでは考慮されていないが、実際の現場では、1人で作業を行うセル生産には検査工程がなく、複数人で作業を行う組立ラインにおいては1人1人の作業員が1製品に責任を持たないため、工程の最後に検査工程が導入されている。ヒアリングの結果、その検査工程は組立ラインの1割ほどであるため、本研究では組立ラインのフロータイムを1.1倍するものと定義する。

### 4. 提案モデル

従来モデルと同様、複数の製品バッチと複数の製品タイプを持つ混流生産組立ライン問題を考える。複数のワーカーがセルとラインに割り当てられ、ワーカーの割り付けと投入順序を変動させ、目的関数として総フロータイムを算出する。

**指数**

- $i$  ワーカーの番号( $i=1, 2, \dots, W$ )
- $j$  セル数( $j=1, 2, \dots, J$ )
- $n$  製品タイプの数( $n=1, 2, \dots, N$ )
- $m$  バッチ数( $m=1, 2, \dots, M$ )
- $k$  セルにバッチが割り当てられているか判別する指数( $k=1, 2, \dots, M$ )
- $r$  組立ラインにバッチが割り当てられているか判別する指数( $r=1, 2, \dots, M$ )

**定数**

- $V_{mn}$  バイナリ定数. 前後のタイプが一致したとき 1, それ以外は 0
- $B_m$  バッチサイズ
- $T_n$  製品タイプ  $n$  のサイクルタイム
- $SL_n$  製品タイプ  $n$  の組立ラインにおけるセットアップタイム
- $SC_n$  製品タイプ  $n$  のセルにおけるセットアップタイム
- $\varepsilon_i$  ワーカー  $i$  の多様な工程におけるスキルレベル
- $\eta_i$  ワーカー  $i$  がセルでできるタスクの上限値
- $\beta_{ni}$  ワーカー  $i$  のタイプ  $n$  のスキルレベル

**決定変数**

- $X_{ij}$  ワーカー  $i$  がセル  $j$  に割り当てられている場合 1, それ以外は 0
- $Y_i$  ワーカー  $i$  が組立ラインに割り当てられている場合 1, それ以外は 0
- $Z_{mjk}$  製品バッチ  $m$  が順序  $k$  でセル  $j$  に割り当てられている場合 1, それ以外は 0
- $O_{mr}$  製品バッチ  $m$  が順序  $r$  で組立ラインを流れている場合 1, それ以外は 0

**変数**

- $C_i$  セルにおけるワーカー  $i$  のタスクタイム(1バッチの組立時間)の変動係数
- $SC_m$  セルのバッチ  $m$  におけるセットアップタイム
- $TC_m$  セルのバッチ  $m$  におけるタスクタイム
- $FC_m$  セルのバッチ  $m$  におけるフロータイム
- $FCB_m$  セルにおけるバッチ  $m$  の投入時刻
- $SL_m$  組立ラインのバッチ  $m$  におけるセットアップタイム
- $TL_m$  組立ラインのバッチ  $m$  におけるタスクタイム
- $FL_m$  組立ラインのバッチ  $m$  におけるフロータイム
- $FLB_m$  組立ラインのバッチ  $m$  における投入時刻

**セル公式**

セルの総フロータイムを定義するため, 以下のスケジューリングルールに従ってワーカーをセルに割り当てる.

最初に, ワーカーのスキルレベルはタスク数に従って変動する. もしワーカー  $i$  の最大タスク数  $\eta_i$  を, セルに割り当てられる人数が上回った場合, タスクタイムが長くなる. 以下に式を表す.

$$C_i = 1 + \varepsilon_i \max \left( \left( W - \sum_{i'=1}^W Y_{i'} - \eta_i \right), 0 \right) \quad (1)$$

次に, 製品のタスクタイムはワーカーによって変動する. 製品バッチ  $m$  のセルにおける工程のタスクタイムは以下のように表す.

$$TC_m = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M V_{mn} T_n \beta_{ni} C_i X_{ij} Z_{mjk}}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{ij} Z_{mjk}} \quad (2)$$

その次に, FCFS ルールを用い, 製品バッチ  $m$  におけるセットアップタイム  $SC_m$ , フロータイム  $FC_m$  と投入時刻  $FCB_m$  を以下のように表す.

$$SC_m = \sum_{n=1}^N (SC_n V_{mn} \left( 1 - \sum_{m'=1}^M \sum_{k=1}^M V_{m'n} Z_{m'j(k-1)} \right) + SC_n V_{mn} (0.01 * |n - n'|)) \quad (3)$$

$$FC_m = \frac{B_m TC_m (W - \sum_{i=1}^W Y_i)}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{ij} Z_{mjk}} \quad (4)$$

$$FCB_m = \sum_{s=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M \sum_{k'=1}^{k-1} (FC_s + SC_s) Z_{mjk} Z_{sjk'} \quad (5)$$

式(3)は製品バッチ  $m$  におけるセットアップタイムを表しており, 品種別段取時間を採用しているため, タイプ番号が離れていくほどセットアップタイムは長くなる. 具体的には, 製品タイプ  $n$  のセットアップタイムは, 直前に作業した製品タイプ  $n'$  との絶対値  $|n - n'|$  を使って表現される.

式(4)は製品バッチ  $m$  におけるフロータイムを表している.

式(5)は各々のバッチにおける投入時刻を表しており, セルなので待ち時間は存在せず, 同セルにおける以前のセットアップタイムとフロータイムから計算される.

**組立ライン公式**

組立ラインの組立バッチの割り当ての総フロータイムを定義するため, 以下のスケジューリングルールに従ってワーカーをラインに割り当てる. それゆえにワーカーを全て組立ラインに割り当てた場合, 従来の組立ラインと同様となる. それ以外の場合ハイブリッド組立システムとなり, ワーカーの中で 1 番組立時間の長いワーカーの組立時間がタスクタイムとなる. 製品バッチ  $m$  のタスクタイムは以下の式を通して計算される.

$$TL_m = \sum_{n=1}^N \max(V_{mn} T_n \beta_{ni} Y_i) \quad (6)$$

その次に、FCFS ルールを用い、セットアップタイム  $SL_m$ 、フロータイム  $FL_m$  と投入時刻  $FLB_m$  は以下のように表す。

$$SL_m = \sum_{n=1}^N (SL_n V_{mn} \left(1 - \sum_{m'=1}^M \sum_{r=1}^M V_{m'n} O_{m'(r-1)}\right) + SL_n V_{mn} (0.01 * |n - n'|)) \quad (7)$$

$$FL_m = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W V_{mn} T_n \beta_{ni} Y_i + TL_m (B_m - 1) \quad (8)$$

$$FLB_m = \max\left(FCB_m + FC_m + SC_m, \frac{FLB_{m'}}{\sum_{i=1}^W Y_i} + FL_{m'} + SL_{m'}\right) \quad (9)$$

式(7)は製品バッチ  $m$  のセットアップタイムを表しており、品種別段取時間を採用しているため、タイプ番号が離れていくほどセットアップタイムは長くなる。具体的には、製品タイプ  $n$  のセットアップタイムは、直前に作業した製品タイプ  $n'$  との絶対値  $|n - n'|$  を使って表現される。式(8)は製品バッチのフロータイムを表している。式(9)はバッチの投入時刻を表しており、従来モデルでは、組立ラインの製品バッチ  $m$  の投入時刻は、製品バッチ  $m-1$  が組立ラインをすべて流れ終わってからである。つまり、組立ラインの製品バッチ  $m$  の投入時刻は、製品バッチ  $m-1$  の終了時刻またはセルの製品バッチ  $m$  の終了時刻のどちらかで計算される。しかしながら実際の現場では、常時混流が主流であることから、製品バッチ  $m-1$  がラインを流れきる前、すなわち次のワーカーに製品バッチ  $m-1$  が渡った時点かセルの製品バッチ  $m$  の終了時刻のどちらかで組立ラインの製品バッチ  $m$  の投入時刻が計算される。さらに、本モデルには要素の概念がないため、組立ラインにおいて  $\frac{\text{製品バッチ}m-1\text{のバッチサイズ}}{\text{組立ラインの人数}}$  が処理された時点で次のバッチが投入されることとする。

### 制約条件

制約条件の数学的モデルを式(10)-(19)に示す。

$$Z = \text{Min}\{\text{Max}[(P - 1)(FCB_m + FC_m + SC_m) + P(FLB_{m'} + FL_{m'} + SL_{m'})]\} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^W X_{ij} \leq \sum_{i=1}^W X_{ij'}, \quad \forall j > j' \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} + Y_i \leq 1, \quad \forall i \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 1, \quad \forall m \quad (13)$$

$$Z_{mjk} \leq Z_{m'j(k-1)} \quad \forall m, m' = 1, 2, \dots, M, m' \neq m, k = 2, 3, \dots, M \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 0 \quad \{j | \sum_{i=1}^W X_{ij} = 0, \forall j\} \quad (15)$$

$$FCB_m \leq FCB_{m+1} \quad \forall m \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^M O_{mr} = 1 \quad \forall r \quad (17)$$

$$\sum_{r=1}^M O_{mr} = 1 \quad \forall m \quad (18)$$

$$O_{mr} FLB_m \geq O_{m'(r-1)} (FLB_{m'} + FL_{m'} + SL_{m'}) \quad \forall m, m' = 1, 2, \dots, M \quad (19)$$

$$P = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^W Y_i \geq 1 \\ 0, & \sum_{i=1}^W Y_i = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式(10)は、全ての製品バッチの割り当てから、総フロータイムの最適化を図るという意味で最小にすることを目的にした関数である。総フロータイムは最後に終わった製品バッチの時刻により計算される。前半のスループットタイムはセルのものであり、後半は組立ラインのスループットタイムを表している。式(11)はセルの制約式。セルに割り当ててよい人数は前のセルより小さくなくてはならない。式(12)はワーカーの割り当てについてのルールで、少なくとも組立ラインかセルに1人は配置することを保証した制約式である。不等式はワーカーが最低限のスキルレベルを持っていることを意味する。式(13)は各々の製品バッチは一つのセルにしか割り当てられないことを意味する制約式である。式(14)は割り当ての制約式を表しており、セルにおいて製品バッチは連続で割り当てられなければならないことを示す。式(15)は割り当ての制限を表した式で、製品が割り当てられているセルにおいて、少なくとも1人のワーカーを割り当てなければならないことを示す。式(16)はFCFSルールを表しており、セルにおいて前の製品バッチが始まる前に次の製品バッチを割り当てられないことを示す。式(17)は、製品バッチの割り当ては決まった順番で流されることを保証した制約式である。式(18)は製品の割り当ての順序は変わらないことを保証した制約式である。式(19)は製品バッチの投入時刻は前のバッチの終了時刻より早くなることが無いことを保証した制約式である。式(20)は組立ラインが存在するかどうかを意味する。

5. 数値実験

数値実験の前に自動車メーカーのサプライヤーにヒアリングを行い、実験に用いる数値の基準値を表1のように設定した。さらに、従来の実験モデルでは、表1の従来モデルに示すように、1つの正規分布に従ってワーカーのスキルレベル ( $\epsilon_i$ ) を変動させているが、本実験では、表1の提案モデルに示すように、正規分布を低スキル分布(非正規雇用者の分布)、中スキル分布(中堅社員の分布)、高スキル分布(熟練者の分布)の3つの正規分布に分類し、現実の工場に出来るだけ近づけた実験モデルを用いる。

実験では、ワーカーのスキルレベル、セル数、タイプ数、生産量を変動させてモデルの挙動を調べる。

・ワーカーのスキルレベル

高(熟練作業員)、中(一般作業員)、低(非正規雇用者)で変動させている。実験では(高, 中, 低)の各分布人数を(1, 11, 1), (2, 9, 2), (3, 7, 3), (4, 5, 4), (5, 3, 5), (6, 1, 6)と変動させてシミュレーションする。なお、基準値は(1, 11, 1)とする。

・セル数

1から6の間で変動させる。基準値は5セルとする。

・製品タイプ数

1から10の間で変動させる。なお、基準値は5タイプとする。

・生産量

6種類の変動を与える。生産量の合計を1500で固定し、最大公約数は全て50になるように設定している。なお、基準値は(250, 300, 300, 300, 350)とする。

表1 従来モデルと提案モデルのパラメータ比較

	従来モデル	提案モデル
$TnL$	1.8	2.45
$TnC$	1.8	2.2
$SLn$	2.2	0.5
$SCn$	1	4
$\epsilon_i$	$N(0.2, 0.05)$	$N(0.1, 0.05), N(0.2, 0.05), N(0.3, 0.05)$
$\eta_i$	10	1,13
$\beta_{ni}$	$N(1.0, 1), N(1.0, 1.5), N(1.0, 2), N(1.0, 2.5), N(1.0, 3)$	$N(0.6, 0.05), N(0.8, 0.05), N(1.2, 0.05)$
$Bm$	50, $N(50, 5), (10, 20, 30, 40, 50, 100, 200)$	5
$J$	1-10	1-6
$M$	1-5, 1-6, (1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 1-7)	1-15, 1-30
生産量	-	(250, 300, 300, 300, 350), (200, 250, 300, 350, 400), (100, 100, 350, 400, 550), (50, 100, 350, 450, 700), (50, 50, 100, 300, 1000), (50, 50, 50, 50, 1300)

表2 実験計画表

実験	変更要素	人(高,中,低)	セル数	タイプ数	生産量
①	人(高,中,低)	(1,11,1), (2,9,2), (3,7,3), (4,5,4), (5,3,5), (6,1,6)	5	5	250,300,300,300,350
②	セル数	(1,11,1), (2,9,2), (3,7,3), (4,5,4), (5,3,5), (6,1,6)	1-6	5	250,300,300,300,350
③	タイプ数	(1,11,1)	5	1-10	250,300,300,300,350
④	生産量	(1,11,1)	5	5	(250,300,300,300,350), (200,250,300,350,400), (100,100,350,400,550), (50,100,350,450,700), (50,50,100,300,1000), (50,50,50,50,1300)

5.1 ワーカーのスキルレベル変動 (①)

まず、提案モデル(常時混流)の信頼性を確認するため、表2の①に示すように、セル数5の条件でワーカーのスキルレベルを変動させた。その結果、図5に示すように、高いスキルレベルのワーカー数とセル数が同数になるまで総フロータイムが減少し、それを超えると同時に増加に転じた。これは提案モデル(常時混流)が従来モデル(時間帯混流)と同様に、高いスキルレベルのワーカーがセルに割り当てられることにより、ライン全体のパフォーマンスが向上する機能を有していることを示している。一方で、セル数を超えた場合における低いスキルレベルのワーカー増は、ライン全体のパフォーマンスを下げる可能性を示している。

5.2 セル数の変動 (②)

次に、表2の②に示すように、全ワーカーのスキルレベルパターンに対して、セル数を変動させることにより、5.1の疑問に対する解決を試みる。

各パターンの実験結果(図6)から、高いスキルレベルのワーカー数が一定値を超えると、セル数を増加させても変化が見られないケースが散見された。具体的には、高いスキルレベルのワーカー数が3を超えるとセル数2~4の範囲内で、ライン全体が安定した高いパフォーマンスを上げることが出来ている。

このようなワーカーのスキルレベルの分布状態を考慮したシミュレーションは、時間帯混流方式に基づく従来モデルにおいて十分な検討が出来ておらず、常時混流方式に基づく提案モデルの有効性を示す新たな指標といえる。

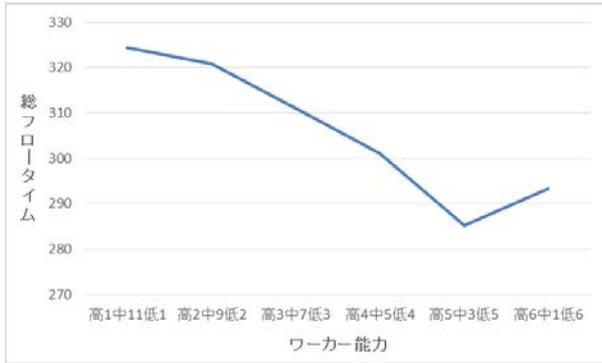


図5 ワーカー能力の変動

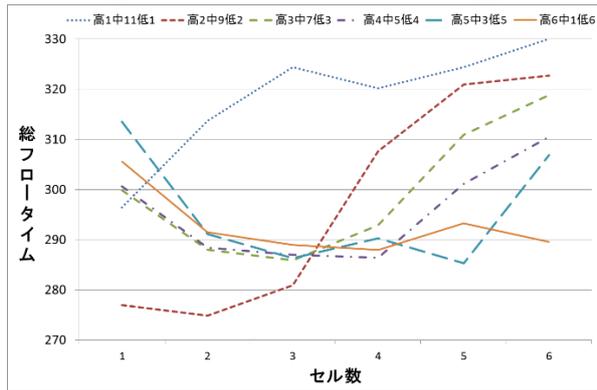


図6 セル数の変動

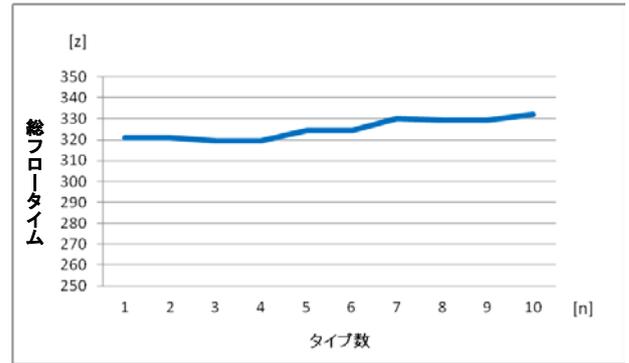


図7 製品タイプ数の変動

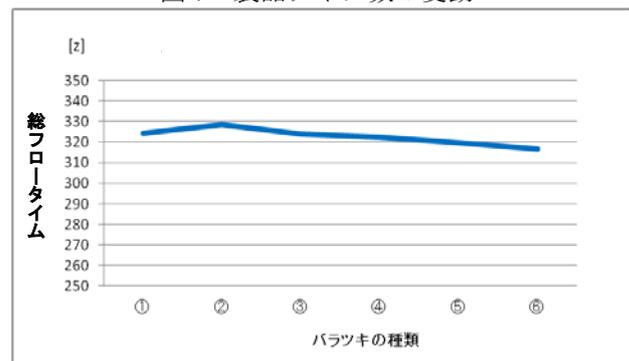


図8 生産量の変動

※①(250, 300, 300, 300, 350), ②(200, 250, 300, 350, 400),  
 ③(100, 100, 350, 400, 550), ④(50, 100, 350, 450, 700),  
 ⑤(50, 50, 100, 300, 1000), ⑥(50, 50, 50, 50, 1300)

### 5.3 タイプ数の変動 (③)

次に、表2の③に示すように、製品タイプ数を変動させた。その結果、図7に示すように、タイプ数が増加するほど、総フロータイムの増加が見られたが、タイプ数の変動による影響は小さく、セル生産システムを用いることが多品種生産ラインに有効であることが想定できる。

本結果は、段取時間をバイナリ表現、すなわち、同じ品種かそうでないかだけで付加していた従来モデルと比較し、タイプごとに品種の相関性に基づく品種別段取時間を考慮している点から、提案モデルが、従来モデルよりもさらに精度の高いシミュレーション結果を得ていると推測される。

### 5.4 生産量の変動 (④)

最後に、表2の④に示すように、製品タイプ数5の条件で、各生産量にバラツキを持たせた。その結果、図8に示すように、生産量に偏りが多くなると、総フロータイムが短くなることが判明した。この結果から、同タイプの生産量が多いほど、バッチ処理が速くなることが推測される。

本結果は、従来モデルの時間帯混流方式と比較し、提案モデルが常時混流方式を適用していることから、段取替え回数が増加していることに伴い、各製品タイプの生産量がライン全体のパフォーマンスに大きな影響を与えているものと思われる。

## 6. おわりに

本研究では、ライン生産からセル生産への順次変更を行う上で、ワーカーのスキルレベルを考慮しつつ人員配置と製品バッチの投入順を最適化していくモデルにおいて、常時混流方式や品種別段取時間などの細分化された生産計画にも対応可能な新たなモデルを提案し、ワーカーの作業スキルレベル差、セル数、製品タイプ数、タイプごとの生産量の各パラメータを変動させて実験を行った。その結果、セル生産方式の有効性ととも、ワーカーのスキルレベルとセル数の密接な関係性を見出すことが出来た。本結果は、現実の工場でライン生産方式からセル生産方式へ転換する際に必要なセル配置数の目安を示す事が出来るはずである。

しかしながら、本研究で用いた数理モデルは、ライン生産方式で重要な「要素作業(1つ1つの作業、動作)」について考慮出来ておらず、組立ラインの配置も考慮した最適解導出まで至っていない。今後、ライン生産方式の要素作業も考慮した新たなラインセル転換問題の数理モデルを提案したい。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 26350442 の助成を受けたものである。またデータ解析作業をしてくれた庄司秀典君と須方聡治朗君に感謝する。

## 参考文献

- [1] 下社貞夫, 磯田賢一, 栗根洋: 「分岐限定法によるマルチタクトのラインバランシング」, 日本経営工学会誌, Vol.32, No.3, pp.182-187, (1981)
- [2] 徐祝洪: 「自己完結型混合ラインの設計に関する研究」, 広島大学経済論集, Vol.27, No.2, pp.47-57, (2003)
- [3] 井田吉人, 中田行俊, 高橋克典: 「オンライン・オフライン QE 融合による製造ライン構想設計技術の開発」, 品質工学研究発表大会論文集, Vol.18, pp.18-21, (2010)
- [4] 千野宗博: 「作業者の疲れを考慮したラインバランシング」, 法政大学卒業論文概要集, (2012)
- [5] 山崎康彦: 「需要の変機種変量に対応した生産システムの設計」, デンソーテクニカルレビュー, Vol.9, No.1, pp.26-35, (2004)
- [6] 柳在圭, 許斐和彦, 樋野励, 清水良明: 「補助人員を考慮した混合品種組立ラインの製品投入順序付け」, 日本機械学会生産システム部門講演会講演論文集, pp.27-28, (2004)
- [7] 高橋志津子, 田宮寛之, 田北浩章: 「驚異のキャノン生産方式」, 週刊東洋経済, Vol.5866, pp.122-128, (2003)
- [8] 坂爪裕: 「セル生産方式と分業の新展開」, 日本経営学会誌, Vol.16, pp.95-110, (2006)
- [9] Kaku.I., Murase.Y., and Yin.Y., “A study on human tasks related performances of converting conveyor assembly line to cellular manufacturing”, *European Journal of Industrial Engineering*, Vol.2, No.1, pp.17-34, (2008)
- [10] Kaku.I., Gong.J., Tang.J., and Yin.Y., “Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems”, *International Journal of Production Research*, Vol.47, No.8, pp.2055-2078, (2009)
- [11] 村松林太郎: 「新版 生産管理の基礎」, 国元書房, (1979)
- [12] Becker.C. and Scholl.A., “A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing”, *European Journal of Operational Research*, Vol.168, No.3, pp.694-715, (2006)
- [13] 岩室宏: 「セル生産システム」, 日刊工業新聞社, (2002)
- [14] 佐藤昌次郎: 「変化に迅速に対応できる生産体制-セル生産方式の効用-」, 日本機械学会関西支部交流会資料, (2008)
- [15] Van der Zee.D.J and Gaalman.G.J.C., “Routing flexibility by sequencing flexibility exploiting product structure for flexible process plans”, *Proceedings of the third international conference on group technology/cellular manufacturing*, pp.195-202, (2006)

