



セル生産システムにおける人的要因を考慮した作業 者訓練に関する研究

原口, 春海

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2016-09-25

(Date of Publication)

2018-09-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6747号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006747>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

セル生産システムにおける人的要因を考慮した 作業者訓練に関する研究

2016 年 7 月

原口 春海

1. 緒論	1
1.1. 研究の背景	1
1.1.1. セル生産システムの現状	1
1.1.2. 先行研究	5
1.2. 研究の目的	9
1.2.1. 研究の目的	9
1.2.2. 対象システム	10
1.2.3. 研究の全体像	10
1.3. 本論文の構成	12
2. 人的要因を考慮した技能指標の提案	13
2.1. 緒言	13
2.1.1. 人的要因と生産性の関係	13
2.1.2. 現状の問題点	14
2.2. スキルインデックスの提案と人的要因を示す指標	15
2.2.1. スキルインデックスの提案	15
2.2.2. 習熟指数	17
2.2.3. 技能による作業者の分類	19
2.2.4. 現場の習熟率	20
2.2.5. その他の指標	20
2.3. 人的要因を考慮した作業者のセル配置及びタスク割当て問題	22
2.3.1. 目的関数	22
2.3.2. 作業台数決定方法	24
2.3.3. 求解手順	25
2.4. 計算機実験	28
2.5. 結言	36
3. 訓練計画時のセル配置とタスク割当て	37
3.1. 緒言	37
3.2. 訓練目的に応じた目的関数の設定	38
3.2.1. スキルインデックスの総和最小化	38
3.2.2. 訓練必要台数の総和最小化	38
3.2.3. 作業頻度指数の総和最小化	39
3.3. スケジューリング	40
3.4. 計算機実験	41
3.4.1. 熟練から新人への技能伝承を考慮した配置	41
3.4.2. 新製品の導入を考慮した配置	48
3.4.3. 作業頻度を考慮した配置	52

3.5. 結言	56
4. 日程計画時のセル配置・タスク割当てとスケジューリング	57
4.1. 緒言	57
4.2. 提案アルゴリズム	58
4.2.1. 求解アルゴリズム	58
4.2.2. セル配置とタスク割当て	58
4.2.3. スケジューリング	60
4.3. 計算機実験	61
4.3.1. 作業者数が変わる状況	61
4.3.2. オーダ内容が変更される状況	68
4.4. 結言	79
5. 運用時のセル再配置・タスク再割当てと再スケジューリング	80
5.1. 緒言	80
5.2. 提案アルゴリズム	80
5.2.1. 3種類の対応方法	80
5.2.2. 目的関数	81
5.3. 計算機実験	83
5.3.1. オーダキャンセル	84
5.3.2. オーダ追加	86
5.4. 結言	88
6. 結論と今後の展望	90
図表一覧	92
参考文献	95
本論文の構成	100
参考論文	102
謝辞	103

1. 緒論

1.1. 研究の背景

1.1.1. セル生産システムの現状

顧客ニーズの多様化，製品サイクルの短期化による製造業の多品種変量生産化に伴い，セル生産システムに注目が集まっている．セル生産システムは自律分散型の生産システムであり，組み立てラインの構成を複数のセルにすることによって，生産する製品の種類や数量をある程度自由にコントロールすることが可能であると言われている．セル生産システムを採用している現場においては，通常，組み立てだけではなく検品や梱包と言った関連工程もそれぞれ独立したセルとなっており，それぞれの工程が自己完結性を持つことになることによって，工程ごとの進捗状態や問題点を把握しやすいという利点がある[1]．

セル生産システムにおいても自動化・ロボット化の波が押し寄せてはいるが，依然として労働集約型のセル生産システムは製造業の重要な位置にある．そのため，高い自己完結性を保つために，ライン生産システムと比較して作業員一人当たりの担当範囲，責任範囲が広くなり，作業者の技能や裁量に依存した生産方式とも言え，作業者の効果的な技能教育が求められる．

セル生産システムは「1人ないし数人の作業者が1つの製品を作り上げる自己完結性の高い生産方式」と言い換えることもできる[2]．従来のコンベアラインを主体としたライン生産システムに比べて，一人の作業者の組み立て点数が増え，作業者に求める技能レベルは高くなるが，一方で変量生産の対応が容易で，仕掛り品が出ないなど，ライン生産システムが持つ特徴的な問題を解決しうる生産方式である．セル生産システムの特徴は以下のとおりである．

- ・ 少人数生産

セル生産システムの場合，1つのセルの中で作業する人員は1名または数人である．人数を絞る理由としては，以下の3点があげられる．

(1) 作業の編成効率を高める 1人作業は編成効率 100%となる．

(2) 人員が増えることによる，作業者の能力のばらつきを抑える．複数人での作業の場合，一番作業が遅い人に合わせることになり，コンベアラインを使用した生産方式と同じ弊害が出る．

(3) 責任の所在が明確になり，モチベーションを維持できる．

などがある。1つのセルに配置される人員は最大でも5～6人が限度と言われている。それ以上になると、セルが大型になり投資が嵩み、セルの本質である生産種類や生産量の変動に対する適応力が下がってしまう。組み立てに必要な部品点数が増え、どうしても設備、人員を増加しなければならない場合は、組み立てを幾つかのセルに分散させモジュール化をはかる。

- ・ 自己完結型

自己完結性の高さが、セル生産システムの最大の特徴と言える。ライン生産の場合、作業員1人当たりの受け持つ範囲は狭く製品全体のほんの一部となる。対してセル生産システムでは、相当数の部品を組み立てることになるので、「自分で作った製品」という意識を持ちやすい。その結果、組み立てる製品に対する、思い入れの差が不良品の低減や作業員のモチベーションの向上、創意工夫の実施などに結びついてくる。生産性の面でも、他の人に渡すという作業が無くなるので効率の向上が期待できる。よって停滞時間が極小化していくので、製造のリードタイム短縮や仕掛品の削減に大きな効果を発揮する。

- ・ 小ロット生産

製造単位を小さく出来るのは、従来のライン生産システムと比較して大きなメリットとなる。ライン生産システムの場合、ロット数が小さくなると頻繁に段取り替えが必要となり、実稼働時間の減少による生産性の低下が問題となる。セル生産システムの場合、比較的シンプルな設備が前提となっているため、段取り替え時間が短くて済み、稼働ロスがほとんど出ない。そのため、高い生産性を維持することが出来る。

セル生産システムは一般にライン生産システムとの対比で説明されることが多い。しかし一口に「セル生産システム」と言っても、セルの形状や作業方式によって様々な種類があり、単純に対称的な存在と語ることは出来ない。他の生産システムとの関係から見たセル生産システムの大まかな位置づけを考えると、セル生産システムは既存の様々な生産システムの特徴を含んでいると言える。一般に多品種・小ロット生産に対応した柔軟な生産システム全般を指す「フレキシブルマニュファクチャリングシステム(Flexible Manufacturing System, FMS)」や工具の移動量や速度をコンピュータに数値を設定することによってコントロールする「コンピュータ数値制御(Computer Numerical Control, CNC)」などは、その概念自体がセル生産システムに含まれると考えられている。また、生産する品種が少ない場合、段取り換えをしながら生産する方法はロット生産方式と被る部分があり、品種が多い場合は異なる工程を持つ製品を同じ機械で生産するジョブショップ生産方式の考え方に近い方法を取るようになる。このように、セル生産システムは生産する製品の種類や生産量によって、既存の様々な生産システムの

手法を採用し、単に独立した生産システムとは言えない側面がある[3]。セル生産システムは多くの既存生産システムの一部を内包することもあり、その発祥説はさまざまであるが、一般にはグループテクノロジー(Group Technology, GT)から派生したものである[4]。GTは多品種少量生産を効率的に行うための手法ならびに考え方であり、類似部品(例えば、形状が似たもの、寸法が似たもの、加工方法が似たもの)を集約してグループ化し、工程設計を合理化し、各グループに適切な機械と工具を割り当て、段取り時間や運搬、待ちの無駄を排除して生産性を向上しようとするものである。GTは多品種少量生産品をひとまとめにセル化するのではなく、適した単位でセル化することを示唆している。

セル生産システムの設備(セルの形状)の種類としては、直線型・二の字型・T字型・U字型の4種類ある[5]。各形状の主な特徴を以下に示す。

(1) 直線(ストレート)型

1人ライン、複数人数の分業ラインがある。生産量と工程の長さにより、作業者が担当する工程の分割を行い、分業することが出来る。長い設備工程を1人で担当することもあるが、これは歩行などの無駄が発生するという問題がある。

(2) 二の字(パラレル・デュアル)型

向かい合わせで製品を分けて生産したり、作業者の端数人工をあわせて無駄をなくす場合に使われる。長い直線型の場合もそうだが、製品の出口を一方方向にしたい場合にも有効である。

(3) T字型

直線型を組み合わせたものとも考えられる。1人の作業員あたりの作業エリアが増加するので、歩行や工具調達の無駄を最小限にすることが可能である。

(4) U字型

歩行距離の短縮や、部品と製品の出入り口方向を揃えるなどの目的で使われる。直線型が、設備工程の問題などで短縮が難しい場合は、U字型が有効である。1人生産のU字型セルを1人屋台生産方式と呼ぶこともある。

その他、上記4種類を連結して組み合わせたもの、工程の分岐や合流のあるセルが、作業内容によって作られる場合もある。

セル生産システムの作業形態には大きく以下の4種類がある[6]。

(1) 1人完結方式

1人の作業で全ての組み立てを完結する。1人で作業を行うので作業編成効率は常に100%である。半面、生産スピードは作業者自身のスキルに依存するため生産性を維持するための規制が必要となってくる。また、常に低位置で作業できるように、全て手の届く範囲に部品、治具、設備を配置するのが望ま

しい。この方式は、多能工の作業者として高い技能スキルが必要となり、作業者の習熟に時間が掛かる。また一般には少量品生産にふさわしい方式と言える。大量生産に対応するためには、設備投資、スペース、作業者の訓練が非効率になる。

(2) 工程分割方式

従来のライン生産システムをセル生産システムに転換する場合にもっともやり易い方式である。作業を数名で分担して製品を完成させる方式である。作業工程ごとに担当者を決め、自分の作業が終わったら次の作業者に渡す形になる。1人完結方式と比較すると、作業者1人1人の負担は小さいが、ライン生産システム同様、作業バランスロスによる遊休が発生する可能性があるため、作業者の技能に応じた工程割り当てが必要となる。作業者によって習熟の度合いが異なるので、運用開始とは別の遊休が発生する可能性があるため、運用中は、随時バランスチェックを行う必要がある。そのため、製品の投入順を工夫したり、各作業者間に分担のグレーゾーン(助け合いゾーン)を設置したりするなど、全体のロス時間を軽減する工夫が必要である。

(3) 複数巡回方式(ウサギ追い方式)

この方式はセルの形態自体は、工程分割方式と変わらないが、作業の割り当て方が異なる。複数巡回方式では、作業者がセル内を移動しながら作業する。工程ごとに置かれた部品や工具を順に使用してセル内を一巡するうちに作業が完成する。全ての工程を1人で行うのは1人完結方式と同じであるが、作業が増えるごとに設備が必要となる。1人完結方式と異なり、生産調整はセル内の人員数を変えることによって可能となるので、変量生産に向く生産方式である。ただし、1つのセル内の巡回人数を5~6人程度に抑えないと、作業のスピード差による遊休が発生し、生産性を低下させることになる。また、近接しての作業も発生するため、作業干渉が起こらないように注意する必要がある。そのため、巡回方式を採用した場合には、必ず追い抜き可能場所を作る必要がある。

(4) インラインセル方式

インラインセル方式には幾つかのパターンが存在する。まず、セルの搬出経路をラインと統合する方法がある。完成部品を流すラインの横にセルを配置する。別のパターンとしては、セルをモジュール化・ユニット化した場合に、それぞれのセルで作業したモジュールもしくはユニットをラインに流し、本組み立てセルに供給する方法である。

以上の他にも複数の作業形態があり、必要性、用途、作業環境に応じて適切な方法を選択することが重要である。また、セル生産システムの導入動機として多くのライン生産をセル生産システムに変更する際にはセル内を小さなライン生産

に見立てた工程分割型セル方式で多能工化を図り，1 人完結方式へと移行するのが一般的である．

現在確認しうる最初のセル生産システムの事例はオリエンタル・モーター社であるといわれている[7]．同社の生産する小型モーターは 1970 年代半ばに多品種化が急速に進み，生産品種数は 3000 点を超えるようになった．そのため，従来のコンベアラインでは切り替えに手間取り，切り替え段取りのコストを吸収するため大口ロットでの生産を行ったため，在庫水準が高まり，生産のリードタイムも長くなり，製品の供給バランスが崩れてしまった．この悪循環から抜け出すため 1978 年ごろから生産システムの改良に取り組み，1983 年に最終的にたどり着いたのが U 字の組み立て台に作業員 2 名というレイアウトを有するセル生産システムである．オリエンタル・モーター社の成功の後，セル生産システムは随所で採用されるようになったが，特に注目を集めるようになったのは 1990 年代以降である．市場需要の多様化や製品のライフサイクルの短縮により，小規模変量生産に対応する生産システムが求められるようになったからである．日本においては，この時期にキヤノンなどの精密機器メーカーやソニー，NEC など大手電機メーカーが大規模なセル生産システムを導入し，それが経済ジャーナリズムを通して広く紹介されたことも大きな要因と言える[8]．

その後，セル生産システムは様々な展開を見せている．セルの作業性質によって「加工セル」「組み立てセル」と言った細分化した呼び方をするケースもある[9]．また，ライン生産システムを全てセル生産システムに転換するのではなく，それぞれの特性を活かして，ライン生産システムとセル生産システムを組み合わせた作業形態を採用する現場も少なくない[10]．2000 年以降に，セル生産システムを採用した大手メーカーもあり[11]，今後も様々な可能性を含む生産システムと言える．

1.1.2. 先行研究

セル生産システムの主要な特徴は「自律分散型の生産システム」という点にあり，作業員への依存度が高い．そのため，セル生産システムの人的課題に関わる研究は数多く行われている．一言に「人的課題」と言っても，その研究の方向性は「人的要因の影響を軽減するための機械・システムに関する研究」と「人的要因と生産性の関係を明らかにして，人材を最大限に活用する研究」の 2 方向に大きく分かれている．

前者は主に，セル生産システムの設備や作業手順をよりシステム化，マニュアル化して行くことに主眼を置いている．作業員には高いスキルも複雑な訓練もなく，確立された手順に従えば問題なく作業が行える環境を提供するというものである．その典型的な事例としては，関[12]が紹介する「デジタル屋台」がある．

「デジタル屋台」は、作業者の記憶力、注意力、集中力に頼ることなく「完全一人一台生産」を実現するシステムである。全ての部品、工具、手順がシステム管理されており、作業者は目の前におかれたディスプレイの指示で作業を進める。作業者が間違った手順や部品で作業しようとする時、警告音と共にディスプレイに「そのドライバーは違います」といった注意を促すメッセージが表示され、作業者は正しい手順以外の操作は出来ないようになっている。

自動組み立て機械による生産システムと融合したセル生産システムである「Advanced Cell Production System」は Hata 他[13]が提案している。この研究ではライン生産システムを、セル生産システムとオートメーション生産システムに分解することから始まり、ある程度柔軟に調整可能な自動組み立て機械の横に複数作業員による U 字セルを配置し、自動組み立て機械が分担する作業と、作業員が担う作業を切り分けて、ヒューマンエラーを軽減できるとしている。

一方後者は、前者とは異なり作業員の技能や意識を向上させることによって生産性を上げる方策を探求している。しかし、その方向性としては数理モデルを使うなどある程度汎用的な手法を提案しているものと、アンケートやインタビューを使用した特定ケースにおける限定的なものに分かれる。また、対象期間も短期的なものや長期的視野に立ったものがある。そこで、人的要因を考慮したセル生産の先行研究を Figure 1.1 に示す。

Group A は人的要因を考慮したセル生産システムの作業計画やスケジューリングを一般的な数理モデル化しているものである。谷水[14]らは、作業者の技能向上と納期遅れ最小化の多目的問題を、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms:GA) を用いて求解した。大森[15]らは組合せオークションを用いた作業配置とスケジューリングの同時最適化問題を扱う際に、作業者の技能レベルを 2 種類に分けた。村瀬[16]らは作業者の『多能工率』を考慮したセル生産とライン生産の数理的解析による比較を行った。山田ら[17]は作業者の多能工化を「セル化係数」として需要変化を考慮した組立システムの提案をした。Viviana[18]は、ピニオンギア製造工場の例をとり、一連の作業工程のモジュール化と各モジュールへの人員配置プランを提案した。各モジュールのワークロードバランスを見ながら、一人の作業員が特定のセルを専任して受け持つ「占有」と、複数のオペレータがセルに存在する「共有」、「占有」と「共有」を組み合わせた「結合」の配置パターンを設定していた。中村ら[19]は類似作業がある場合、段取り時間が短縮するという前提を用いたセル構成の提案をおこなった。Richard[3]はセル設備の設計に作業者の動線を考慮した。Bhaskar ら[20]は作業者の持つ技能を考慮したセル設備への配置手法を提案した。

Group B はある程度の限定した対象に対してモデル化を行っているものである。谷水ら[21]は作業者の習熟に着目し、習熟を考慮した人材育成や作業配置のモ

デルを検討した後、初期段階の習熟の重要性を促進する作業支援システムの提案を行った。このシステムでは作業員同士のコミュニケーションや技能伝承に頼らず、確立された手順に従えば問題なく訓練が行われる。Banditら[22]は作業者の技能を考慮したセル生産システムの提案をしている。本研究では実際の作業現場を利用し、テレビ会議システムを利用したインターネット学習の方法を提案している。この方法では、1セル1作業者の特性を利用して、各作業者の訓練履歴を管理するほか、遠隔操作によって、訓練を受ける側はマンツーマンに感じる一方で、教育担当者は一度に複数人の訓練を施すことを可能にしている。安國[23]は作業者の無駄を省くセル生産システムの設計手法を提案している。技能ではなく、意欲を測る指標としては、Fitzpatrick[24]が提案する「コルベ・インデックス(Kolbe Index)」がある。これは、心理学で一般的に使われる性格の5因子モデル(情緒不安定性、外向性、知性、同調性、誠実性)[25]を応用した意欲指標である。コルベ・インデックスでは、作業における基本的な行動形態を4つの「モード」に、それぞれの行動形態に対する作業員の態度を3つの「ゾーン」のいずれかに当てはまるとし、各作業員の意識を4×3のマトリクスで表したものをを用いて生産性が高いグループと問題を抱えているグループの作業員ごとの意識構成の違いを比較した。Slomp[26]他は多能工化に必要なクロストレーニングを行う際の効果的な訓練の組合せ決定手法を紹介した。川上ら[27]はライン生産とセル生産の生産性を比較する際に、作業の分割数による主作業時間と段取りや移動に要する時間との関係について述べている。

Group Cはセル生産システムに関する事例研究や先行研究のサーベイで人的要因に触れているものである。平田[28]らは実現場における習熟過程の推移を調査した。Azadeh[29]はDEAを用いて作業者の能力を判定し、セル配置に対する提案を行った。信夫[30]は実現場へのインタビューによりセル生産システムの課題の中で人的要因の重要性を述べている。中村ら[31]はセル生産システムにおける作業員の技能向上の例としては、セル生産システムを導入によって劇的な生産性の向上を実現したキャノンの事例をまとめた。この事例では現場の女性従業員が中心となった自主的改善活動で作業員全員のスキルアップを計った。その他の実現場の事例として董[32]や水口[33]らの事例研究がある。これらの事例では誰がどの工程を担当できるかを独自のスキルマップ(スキル管理表)を作成する例がある。スキルマップは従業員が見える場所に掲示して作業員の職級の透明性を測るだけでなく、担当できる作業が増えるたびに随時スキルマップを更新することによって、作業員の達成感や向上心を鼓舞し、生産性につなげている。金[34]は、作業者の短所に目をつぶり長所を伸ばすのがセル生産システムにおける作業員教育のあり方であると解いたうえで、作業員たちの目標となるような「スタープレイヤー」を育てることが全体の多能工化の早道であると結論付けている。

橋爪[35]は，製造現場での生産管理で日常的に使われる「標準作業」，「標準時間」に着目して，ライン生産システムとセル生産システムの作業コントロール方法と従業員の統制メカニズムを比較した． Bopaya[36]らは，まず先行研究よりセル生産システムの成功に重大な影響を与える人的要因を 8 つの要因に分けた．続いて学者，企業管理者，現場従業員 40 人に対してアンケートを実施し，先に分けた 8 要因の重要性について順序付けを行い，作業者間のコミュニケーションが最も重要であると結論付けた． Olorunniwo[37]らは，セル生産システムにおける従業員教育のあり方として，セル生産システムの訓練の成果をあげるには判断力，経験，熟知に依存すると示した．

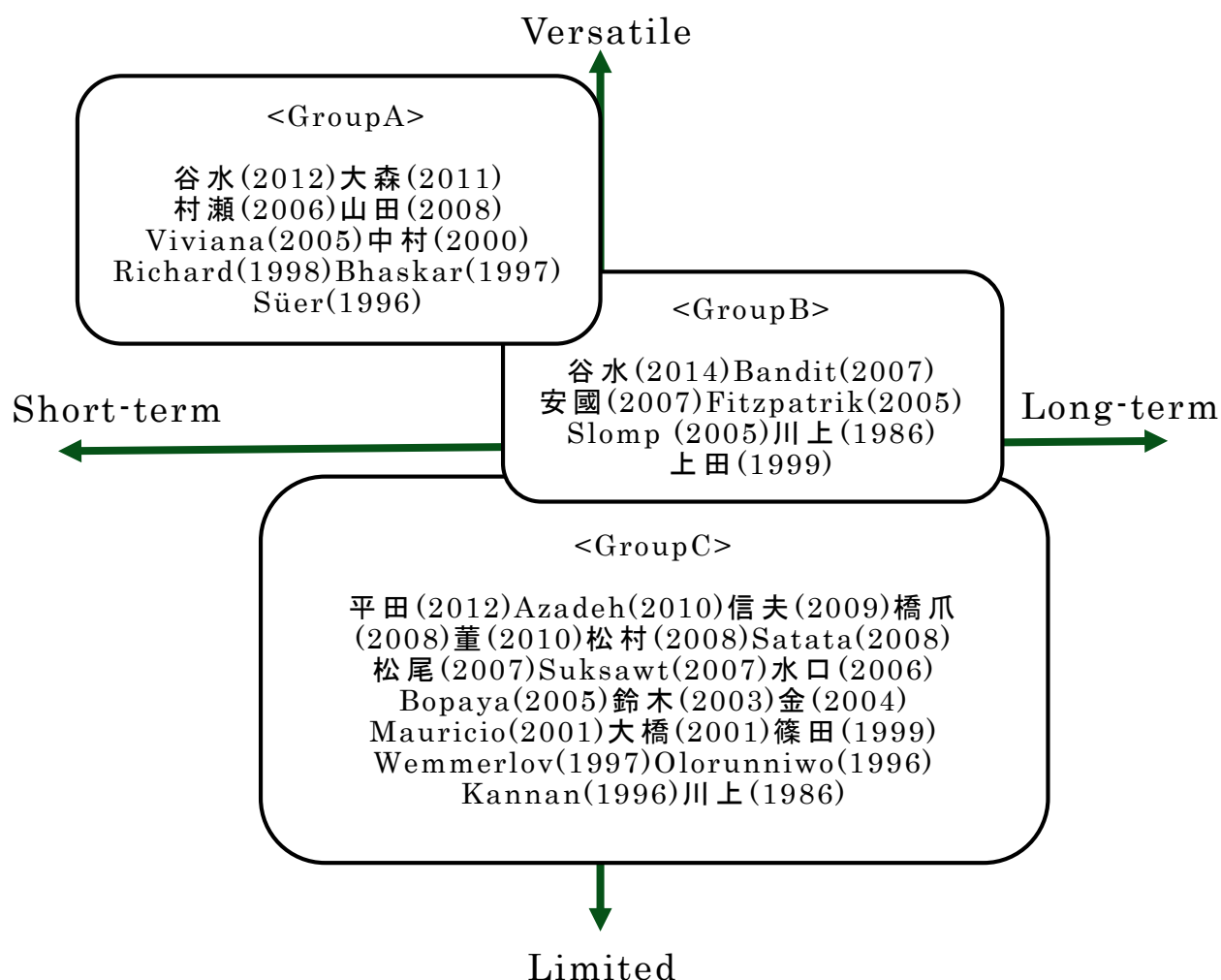


Figure 1.1 Map of Previous Study

作業者個人の技能だけではなく、セル生産システムとしての組織のあり方についての研究もある。Wemmerlov[38]らは、アメリカ国内の46工場の126個のセル生産システムを調査し、セル生産システムの導入と運営に影響を与える重大な要因を、「Cell design and operation(セルの設計と運用)」「Implementation factors(導入目的)」「Human Issues(人的要因)」の3つのカテゴリに分けて整理した。その中で、人的要因に関しては、12ものの工場が「Employee involvement(従業員の意欲)」が重要であると回答している。これは、全ての項目の中でも最も多い回答数であった。秋野[39]はセル生産システムにおける労働内容、労働編成をセル生産システムの人的要因のキーワードである「多能工」を用いて、複数の工程を習得する「ヨコの多能工」と、現場リーダーに複合的な管理能力が必要となってくる「タテの多能工」という職務充実を提案している。セル生産システムにおける技能評価や作業者訓練の計画は数多く行われている。これらは主に、実作業現場でアンケートや技能測定から得た人間工学的な知見である。

一方、また、セル生産システムに限らない製造現場でのOJT問題としては、岩村ら[40]や舘野ら[41]が、生産性と訓練を同時に達成する生産計画・スケジューリングの提案を行っている。岩村らは訓練対象を『現在の生産作業』ではなく『今後必要になる技能』と明確に切り分け、残業時間を考慮したうえで期間内の生産作業回数と訓練回数を決定している。舘野らはOJT頻度をパラメータとして調節することによって、OJTと生産性を同時に考慮するスケジューリングの提案を行っており、長期的な作業者教育をも視野に入れている。

このように、セル生産システムの製造現場における人的要因に関わる研究は、人間工学と数理モデルの2つの流れの中で発展してきた。そこで今後は双方で得られた知見を統合化した、より汎用的な研究が求められる。また、セル生産システムの現場の多くは中小規模で注文に応じた流動的な生産体制をとることが多い。同じ製品でも複数人体制で作業することもあれば、必要に応じて1人セルで作業をするケースも考えられる。出来るだけ多くの現場へ平易に応用できるOJTモデルを提案するには、より柔軟な作業者配置のモデルを考える必要がある。

1.2. 研究の目的

1.2.1. 研究の目的

本研究では、統合的・汎用的なセル生産システムにおける作業者訓練研究として多様な作業者配置を実現するタスク分割型の複数人セル生産システムを想定し、作業者の多能工化・熟練工化による「中長期的スパンでのコスト削減」を見据えた実務と訓練を兼ねる配置計画の提案とその有効性の検証をする。

具体的には、作業者の技能を作業要素(タスク)ごとに分類する指標『スキルイ

ンデックス』を提案する．そしてスキルインデックスを使用して作業者の技能を判定した後，OJTにおける作業者の『セル配置およびタスク割当て』手法を提案する．その際，従来からある「習熟」の考え方を採用し，一定作業終了後に習熟によって得られる技能向上を算出し，期待出来る技能の熟達並びに全体的な作業者集団の熟練化を目指す．さらに，作業時におけるメイクスパンを最小化する『スケジューリング』手法を提案する．

以上の通り本研究は，提案指標として『スキルインデックス』，提案手法として『セル配置およびタスク割当て』『スケジューリング』の3つの柱で進めていく．

1.2.2. 対象システム

以上を踏まえ，本研究の対象となるセル生産システムを以下の通り定義する．

- (1) 中小規模の作業現場である．
- (2) 1人にも複数人セルにも対応するセル設備がある．設備の形状は問わない．
- (3) 複数人セルの場合，タスク分割型の作業形態とする．
- (4) 決められた順番にタスクを処理するフローショップ型セルである．
- (5) 各製品はいずれも1つのセルで組立てが完成する．

また，作業者のセル配置やタスク割当ての基本ルールは以下の通りとなる．

- (6) 作業者は必ずいずれかのセルに配置される．
- (7) 作業者は必ず1つのセルに配置され，複数のセルにまたがって作業することはない．
- (8) 同一セル内で，1つのタスクに割当てられるのは1名のタスク専任制の作業とする．

1.2.3. 研究の全体像

本研究の全体像および本著における各章との対応は Figure 1.2 に示した通りである．まず，セル生産システムにおける統合的な作業計画を「A. 計画フェーズ」，「B. 運用フェーズ」および「C. 検証フェーズ」の3つのフェーズに分ける．

「A. 計画フェーズ」では中長期の作業計画を立案する．<計画>は年期ごと，半期ごとなどの長期的な人員計画や製品計画を指す．<作業者の技能を設定>では作業に影響する人的要因の指標を決定し，各作業者をその指標に基づいて判定する．これは四半期，月次などの中期的タイムスパンで行うことを想定している．ここで設定した作業者の技能に基づいて<月次計画時の配置／スケジューリング>において，訓練の目的に応じた作業者の配置とタスク割当て，スケジューリングを行う．訓練はOJTで行われることを想定しているため訓練用の作業を別に設けることはしない．本著では<作業者の技能を設定>が第2章，<月次計画時の配置

／スケジューリング>が第 3 章となる．

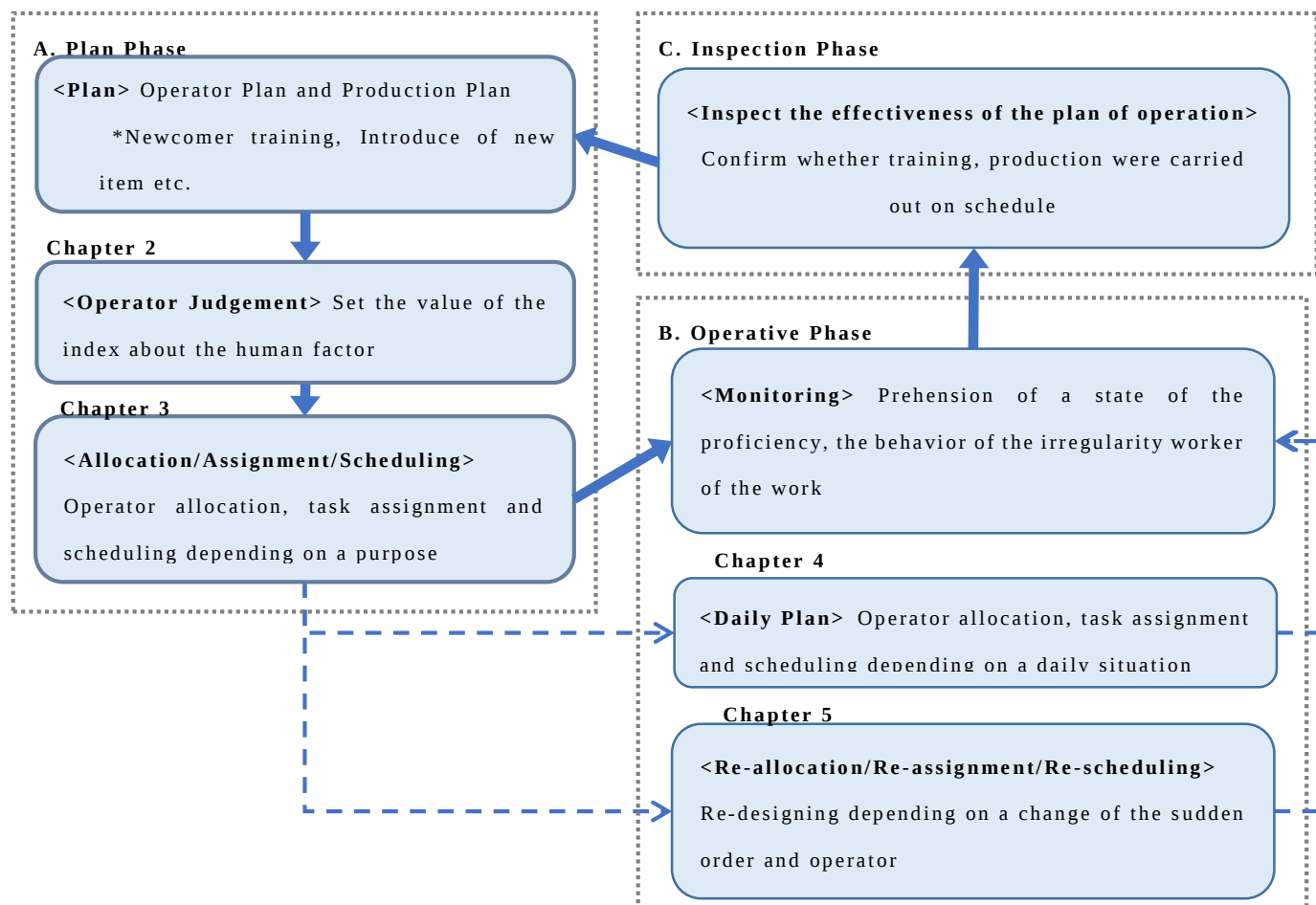


Figure 1.2 Perspective of the study

「B. 運用フェーズ」は日々の運用で行われる作業を指す．<監視>では作業が予定通り行われているかと同時に訓練の達成度を確認する．しかし，急なオーダー内容の変更や作業者の欠勤，ほか業務へのヘルプなど日々の作業は計画通りに進まない場合がある．そこで，このフェーズではこのような変動を「その日の作業開始前に分かっていたか」「作業の途中で発生したか」に分けて対応を行う．作業開始前にオーダー内容の変更や作業者の変更が分かっていた場合は，第 4 章となる<日次計画時の配置／スケジューリング>にて作業者のセル配置からやり直し，その日の作業そのものを見直すことによって変動による生産性の低下や訓練の不足を抑える．一方，作業開始後に発生した変更に対しては<運用時の再配置／再スケジューリング>で作業の見直し範囲を検討する．変更が発生したタイミングによって作業の進捗や作業者の訓練達成度は異なる．そこで，予定されていた作業や

訓練に対して最も影響度の低い変更方法を採用するための指針を提案する．本著では第 5 章となる．

最後に「C. 検証フェーズ」では、「B. 運用フェーズ」の<監視>で得られたデータを下に，計画通りに作業や訓練が行われているかを判定し「A. 計画フェーズ」で立てた作業計画および「B. 運用フェーズ」で行った計画変更の有効性を確認する．検証結果は「A. 計画フェーズ」にフィードバックされ，新しい作業計画や運用指針作成の基盤となる．

1.3. 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．

まず第 2 章で作業者の技能を作業要素(タスク)ごとに分類する指標「スキルインデックス」を提案する．そして，スキルインデックスを使用して作業者の苦しいタスクへ優先的に作業を割り当てることによって期待出来る技能の熟達，並びに全体的な作業者集団の熟練化を目指すモデルの提案をする．

第 3 章では，第 2 章で提案したスキルインデックスを計画時における作業者のセル配置およびスケジューリング問題に適用し，計画時に一定回数のオーダ内容が既知である場合を想定した計算機実験によりその有効性を検証する．その際，訓練目的に応じて目的変数を変更し，熟練化するまでの技能向上の様子を観察する．

第 4 章では，第 3 章で述べた作業者配置計画・スケジューリング手法を発展させ，日程計画時の作業者配置・スケジューリング手法の提案を行う．計算機実験では作業用件(作業者数，オーダ内容)が不安定な状況下において，作業開始前に変更が発生した場合を想定した条件に適用し，その有効性を確認する．

第 5 章では，運用中の作業者再配置・スケジューリング手順の検討を行う．計算機実験では計画期間中に急なオーダ変更が生じた場合を想定し，対応方法の違いによる作業者の習熟結果の違いについて確認する．最後に第 6 章で本研究の結論を述べる．

2. 人的要因を考慮した技能指標の提案

2.1. 緒言

本章では、セル生産システムにおける人的要因と生産性の関係と現状の問題点について触れた後、本研究で提案する新しい人的要因の指標であるスキルインデックスについて述べる。またスキルインデックスを使用した基本的な作業配置手法の提案を行う。

2.2 節では新しい人的要因の指標であるスキルインデックスの提案と従来から使用されている習熟率について紹介する。

2.3 節ではスキルインデックスを使用した作業配置手法のアルゴリズムと解法について述べる。

2.4 節では、中長期的視野に立った作業員訓練に対する提案手法の有効性について計算機実験により検証する。

最後に 2.5 節で本章をまとめる。

2.1.1. 人的要因と生産性の関係

労働集約型のセル生産システムにおいて、人的要因が生産性に大きく関わる事は知られている。具体的な人的要因としては、「作業員一人一人の技能」「繰り返しによる習熟」「作業に対する意識、モチベーション」などが挙げられる。董らはセル生産システムにおける技能、意識の両面と生産性の関係を、学生によるセル生産システムの組立実験の作業時間結果と意識アンケート結果で共分散構造分析を行った[42]。

その結果、セル生産システムの教育効果としては、作業員への教育を充実させることによって、作業時間および作業員同士の生産性のばらつきをある程度抑えることが可能であることを示した。特に、教育を充実させた場合と、そうでない場合の初回の作業時間及び標準偏差の違いは顕著である。その後の繰り返し作業による時間短縮率の平均は、教育の内容によらずほぼ同程度となる。これは、初回の時間差を維持したまま作業時間が低減するということになるので、教育の重要性は大きいと言える。その意味で、初回の作業時間を「作業員が元々持っている適性+教育効果」と見ることも出来る。一方で、教育の程度如何に関わらず初回から非常に高い生産性を示す作業員がいることも見逃せない。

また、セル生産システムにおける基本適性と習熟効果として、基本適性の高い作業員を割り当てることによって、高い生産性を得ることが出来る。また、繰り返し

返し作業による習熟でも生産性の向上をはかることが出来る．生産性向上の要因を，習熟と作業員個人の適性で見た場合，基本適性の影響の方が大きいと結果が得られた．習熟の影響は作業対象の難易度および繰り返し回数によって異なるが，本研究では繰り返し回数が増えることによって，習熟による影響の大きくなることが分かった．

セル生産システムにおける作業意欲と生産性の関係としては，組み立て作業に対する学生の印象が，授業の進め方や教師の態度による「授業構成」，授業の意義の理解度による「授業理解」，前向きな態度で実験に臨む「積極性」，組立作業が完了したときに得られる「達成感」の 4 つの因子で構成されることが分かった．なかでも「積極性」と「達成感」は，肯定的な印象を持つ学生たちの初回作業時間や，最終的な作業時間が，そうでない学生と比べて短いという結果となった．これは，作業員の意欲の種類によっては実際の作業時間に大きく影響することが分かり，従来のセル生産システムにおける作業員のモチベーションの重要性が数値的にも証明される結果となった．

最終的には，セル生産システムの生産性を決める人的要因として「基本的器用さによる適性」「創意工夫による習熟」「作業をやり遂げる達成感」の 3 要因が大きく影響することがわかった．3 要因の中で最も比重が大きいのは基本的器用さで，続いて創意工夫による習熟，達成感の順番になる．よって，セル生産システムには，基本的な器用さと同時に，作業内容を自分なりに咀嚼してどのようにやるのが効率的か工夫しながら作業できる作業者を見出す必要がある．そして，自分でやり遂げたという達成感が，次の作業への意欲にも繋がり，生産性向上の連鎖となっていくことが期待できる．

2.1.2. 現状の問題点

一方で，人的要因と生産性には以下のような問題点がある[2]．

(1) 作業員個人の技量の差が出る

作業員の熟練度，技能レベル，モチベーションによって作業速度や，生産性が異なる．作業速度については，ある程度セルに規制をかけて目標達成させる必要も出てくるが，この規制のかけ方と，作業員の自由度のバランスを取るのには容易でない．

(2) 過大な責任がストレスになる

セル生産システムでは，一人あたりの作業員が受け持つ範囲が広く，部品数や作業工程数も増えることによる責任も増大する．ある程度の責任増大は作業員のモチベーションを高めるが，その責任が過大になるとかえってストレスになり，不良品の増加をもたらすことになる．

(3) より多くの多能工が必要になる

セル生産システムは自己完結性の高い、自律分散型の生産システムである。このため、多くの作業者に多能工化を要求することになる。必然的に、作業習熟にかなりの時間を要することになり、そのための訓練や教育に掛かるコストも増大する。

(4) 高価な設備を設置しにくい

一般にセル生産システムでは、設備投資の軽減も目的の 1 つになるが、アウトプットごとに高価な検査設備などが必要な場合は、その設備自体の増設が困難になる。高価な多機能機器の傾向としては、ハード部分の品質よりもソフト的な機能を重視するので、最初から設備投資を前提にするのではなく、要求事項を絞った設備導入の検討が必要である。

本章では、上記(1)、(3)の問題点に着目し、作業員個人の技能の差を減らし、作業員の多能工化を目指すセルへの作業員配置とタスク割当てを実現するために、作業員の技能を判定する指標の提案を行う。

2.2. スキルインデックスの提案と人的要因を示す指標

2.2.1. スキルインデックスの提案

製造業の生産現場では、作業員に必要な技能を明確化し、現時点で保有している技能を確認・可視化するために、Table 2.1 のような「スキルマップ」と呼ばれる技能管理表を利用する。この例の場合は、タスクごとの達成率と達成率が 75% 以上のタスクの数が示されているほか、セル生産が出来る多能工の要件が全タスクの達成率が 75% 以上となっており、それを満たす人には◎印が付けられている。

Table 2.1 Example of skill map

Cell production worker	Operator	Acquisition rate every Task (%)						Number of Acquisition	
		I	II	III	IV	V	VI	Number	%
◎	A	75	75	100	100	75	75	6	83
◎	B	75	100	100	75	100	100	6	92
	C	75	25	100	100	100	100	5	83
	D	100	100	0	25	50	100	3	63
◎	E	75	75	75	75	75	75	6	75
Requirements of the cell production worker (Multi-skilled worker)									
Fill the number of the acquisition 6 and acquisition rate 75%									

このように、スキルマップの表記方法には達成度合いをパーセンテージや 5 段階評価で示したものなど様々な方法があるが、判定結果から具体的な作業時間の見積もりすることは困難である。そこで本研究では、セル生産システムの現場の作業能力とその作業時間の算出を容易にする人的要因の指標として、作業タスク別の「スキルインデックス」を提案する[43]。

例えば、ある製品が Task 1～Task 6 の 6 つの作業要素(タスク)で構成されており、各タスクの標準作業時間(Standard Time)と、それぞれの作業者(Operator 1～Operator 3)の実際の作業時間が Table 2.2 のとおりとする。

Table 2.2 Values of Execution time

	Task 1	Task 2	Task 3	Task 4	Task 5	Task 6
Standard Time	60.0	90.0	90.0	45.0	75.0	60.0
Operator 1	66.7	112.5	81.8	37.5	75.0	66.7
Operator 2	46.2	69.2	64.3	30.0	53.6	46.2
Operator 3	60.0	100.0	100.0	45.0	83.3	75.0

製品 j の作業要素(タスク) k ごとの標準作業時間を ST_{jk} 、作業者 i ごとの実作業時間を ET_{jki} としたとき、スキルインデックスの値 s_{jki} は式(1)で求められ、Table 2.2 の各作業者のスキルインデックスの値は Table 2.3 になる。

$$s_{jki} = \frac{ST_{jk}}{ET_{jki}} \quad (1)$$

上式より、作業者の実作業時間が標準作業時間と同じ場合はスキルインデックスの値が 1.0 となる。実作業時間が標準作業時間より短い場合は 1.0 以上の値となり、その値が標準作業時間の何倍速で作業できるかを示す。また、標準作業時間より長い場合はスキルインデックスの値が 1.0 以下となり、訓練が必要であるとみなす。

作業者の技能をスキルインデックスで表現するメリットとしては、容易にモデル化し定式化出来ることの他に

- (1) タスクごとの作業時間の影響を受けない。

(2) タスクごとの難易度の影響を受けない。

という 2 点を挙げることができる。

(1)については、様々な作業を扱うセル生産システムの現場ではタスクごとに標準作業時間が大きく異なる可能性がある。そのため、単純に作業時間で比較したのでは、標準作業時間に対してどの程度の達成度合いであるかを把握しにくい。一方、スキルインデックスの場合は達成度合いを、標準を 1.0 とした単純な数値で確認できるうえ、実作業時間を算出も容易である。

(2)についても、タスクごとの作業内容も多岐に渡るため、難易度も様々であるのに加えて作業者一人一人の得手不得手が関わる場合もある。スキルインデックスの値自体には難易度を示す要素は全くないが、後述する習熟率を適切に得ることによって一般的に難易度が高い作業、作業者によって難易度が変わる作業を表現することが可能になる。

Table 2.3 Values of Skill Index

	Task 1	Task 2	Task 3	Task 4	Task 5	Task 6
Operator 1	0.9	0.8	1.1	1.2	1.0	0.9
Operator 2	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3
Operator 3	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8

本研究では、スキルインデックスの値を使ってそれぞれの作業者にとって訓練が必要な作業をどれだけ割当てたかとセルごとの生産性を判定する。

2.2.2. 習熟指数

習熟とは、一般的に同一の作業を繰り返すことによって作業の所要時間が減少していく現象である[44]。通常、生産システムにおける習熟には、生産設備の改善、治工具の改善、設計の改良、作業者の熟練、良品質の工場、管理方式の改善などの要因が含まれるが、本研究では作業者の習熟に着目する。

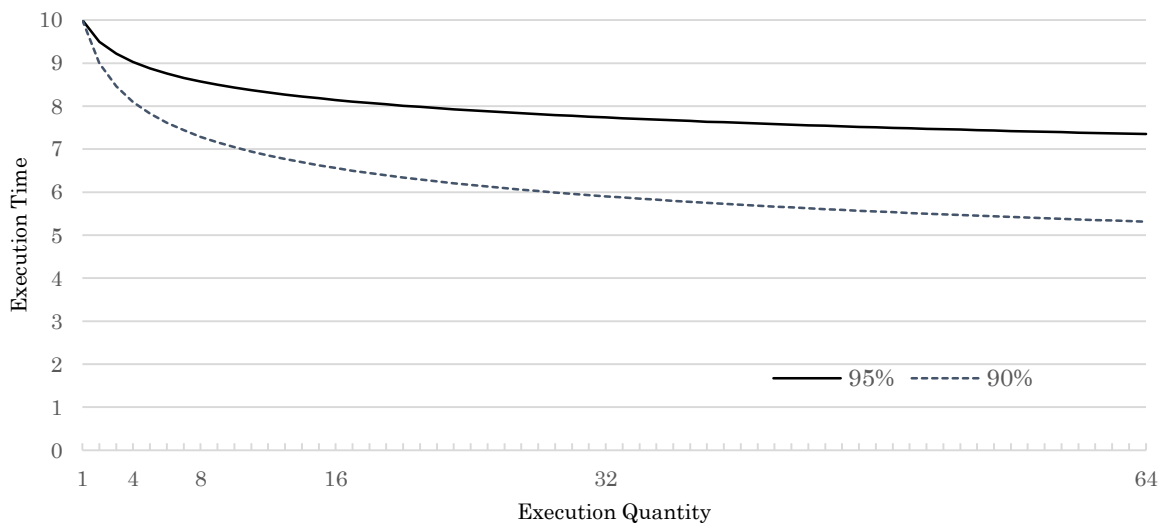


Figure 2.1 Learning Curve

習熟の様子は通常，Figure 2.1 のように横軸に生産量，縦軸に実績時間を用いて表現する[45]．習熟の状態を図として表現したものを習熟曲線と呼ぶ．習熟曲線のグラフは，一般には生産台数を横軸に取り，生産時間を縦軸に取って生産時間とその台数までの生産コストの平均(累計平均工数)で示す．この累計平均工数の曲線がほとんどの場合に双曲線になるため，習熟曲線が一般的に利用されるようになった．本研究では通常の習熟曲線における生産台数を組み立て回数(=組み立て台数)に，累計平均工数を累計平均作業時間に置き換えて使用する．

習熟の程度を表現するには，習熟指数 α を使用する表現と，習熟率 β を使用する表現があり，併用されている．いずれも累計平均作業時間が双曲線になることを仮定した表現である．

(1) 習熟率 β

習熟曲線を双曲線と仮定すると累計平均工数は生産台数が一定倍になるごとに同じ比率で減少する．そこで，生産台数が 2 倍になるごとの累計平均工数の低減率を習熟率と定義し，パーセントで表現する．このときの数値は『工数は何パーセント減ったか』ではなく『前工数の何パーセントになったか』で表現する．つまり，生産台数が倍になった後の平均工数が 10 から 9 に減った場合，10% 減少したので習熟率は 90% となる．

(2) 習熟指数 α

習熟指数 α は習熟率をもとに式(2)を用いて得る．

$$\alpha = -\frac{\log \beta}{\log 2} \quad (2)$$

初回の作業時間を t_1 , 作業台数を n としたとき, n 台までの累計平均作業時間 t_n は式(3)で得られる.

$$t_n = \frac{t_1}{n^\alpha} \quad (3)$$

作業時間を考える際, 習熟の度合いを表す α または β に着目することが多いが, 実際は, 習熟度合い同様, 作業者によって初度作業時間は異なり, セル生産システムにおいてそれは顕著である. また, 程度の違いこそあれ, 繰り返しの習熟によって作業時間が短縮することは分かっているため, この初回の作業時間を作業員が持ち合わせる適性とみなすことができる[46].

また Table 2.4 のとおり, 作業現場における機械作業と手作業の割合からおおよその習熟率を得ることが出来る[47]. 機械作業 100%のフルオートメーションの製造現場では, 全く習熟は行われなため, 習熟率は 100%となる. 労働集約的なセル生産システムの製造現場においても, 機械作業の比率は高いため習熟率は 85%~95%であると考えられる. 本研究では, 一般的な作業者の習熟率を 90%~95%とし, 習熟が早い場合の習熟率を 85%として計算機実験で使用する.

Table 2.4 Relationship between the handwork rate and the learning rate

Machine operation	Hand work	Learning rate	Operational style
100%	0%	100%	Full automation
75%	25%	90%	Labor-intensive
50%	50%	85%	
25%	75%	80%	Handcraft

2.2.3. 技能による作業者の分類

スキルインデックスを使用した作業者のタスクごとの技能は Table 2.5 の通り Level 1~Level 3 の 3 段階で示す. また作業者ごとの技能を 2 種類の方法で分類する.

1 つ目はスキルインデックスの平均値から作業者の技能レベルを分類する方法である. 新人(Newcomer)は, 文字通り新人作業者を示し, すべてのタスクに対す

るスキルインデックスの平均値が Level 1 の作業員である。標準(Standard)は Level 2 の値をとる作業員であり、作業現場の平均的な作業員層といえる。熟練(Expert)は Level 3 となる。習熟による作業時間の低減は理論上無限であるが、実際の人の技能には限界がある。そこで本研究では、スキルインデックスの上限を 1.5 と設定した。

2 つ目が熟練レベルに達している技能数に応じて多能工(Multi-Skilled)レベルを判定する方法である。本研究ではタスク全体の 2/3 以上が熟練レベルの作業員を多能工レベルが高い(High)、それ以外を多能工レベルが低い(Low)と分類する。このように 2 種類の分類を設ける理由は作業現場によって技能の構成が異なるためである。特に、ライン生産システムからセル生産システムへ移行した現場では、ある技能に特化して熟練である場合が多く、単純に新人／熟練という分け方をするのは困難である。

Table 2.5 Skill Classification

	Values of Skill Index
Level 3	$1.3 \leq S_{jki} \leq 1.5$
Level 2	$0.9 \leq S_{jki} < 1.3$
Level 1	$0.6 \leq S_{jki} < 0.9$

2.2.4. 現場の習熟率

スキルインデックスを用いて作業員の一人一人の技能を示す一方で、作業員の全体的な技能を作業員全員のスキルインデックスの平均値と標準偏差で確認する。スキルインデックスの平均値が高くかつ標準偏差が小さいほど、作業員ごとの技能のムラが少なく頑健性の高い作業員集団と見做すことができる。

2.2.5. その他の指標

その他の人的指標としては、作業員の作業時間のムラ、エラー率などが挙げられる。これらの指標は作業員の手先の器用さや知識に基づく技能だけではなく、集中力や意欲などの心理的な側面にも関わる(Table 2.6)。本研究では、作業時間と学習能力だけではなく、熟練者から新人への技能伝達にもスキルインデックスと習熟を使用する。

Table 2.6 Indexes of Human factor

	Human Factor	Index
Element about Execution time of quality	Skill Level	Skill map
	Execution time	Skill index
	Learning Capacity	Proficiency
	Unevenness of the execution time	Standard deviation
	Unevenness of the quality	Error rate
Element about operator cooperation	Sense of cooperation	Skill index / Proficiency
	Skills transfer	Skill index / Proficiency

2.3. 人的要因を考慮した作業者のセル配置及びタスク割当て問題

提案指標であるスキルインデックスを使用して作業者のセル配置およびタスク割当てを行う。本研究では、OJTにおける効率的な作業割当ての実現を目的とする。そのために、各作業者が苦手とする作業を優先的に割当て、技能の熟練化をはかる。そのためには、よりスキルインデックスの値が低い作業を割り当てればよい。具体的には、各作業者が割当てられたタスクのスキルインデックスの値を総和の最小化を目的とする。スキルインデックスの総和した値が小さければ小さいほど、苦手な作業を割当てられていることになり、より多くの訓練が行われると判断できる。一例として Table 2.1 の Task 1～Task 6 の作業を 1 つのセルで行うときの作業割当てを Task 1～Task 2 は Operator 2, Task 3～Task 4 は Operator 1, Task 5～Task 6 は Operator 3 とした場合、各作業者に割当てられた作業のスキルインデックスの値および作業時間は Table 2.7 のようになる。

また、全ての作業者の中でもっとも長い作業時間をそのセルのタクトタイムとし、セルごとの生産性の指標とする。Table 2.7 の例では、Operator 3 が行う Task 5 と Task 6 の作業時間を足し合わせた値が、他の作業者と比べて最も長いため、それをタクトタイムとする。

Table 2.7 Example of assignment

Task No	Task 1	Task 2	Task 3	Task 4	Task 5	Task 6	Sum of	Tact Time
Operator	Operator 2		Operator 1		Operator 3		Skill Index	per Unit
Skill Index	1.3	1.3	1.1	1.2	0.9	0.8	6.6	
Time[sec]	46.2	69.2	81.8	37.5	83.3	75.0		158.3

2.3.1. 目的関数

定式化する際に使用する記号は以下の通りである。

t : オーダ番号 $(1, 2, \dots, T)$

c : セル番号 $(1, 2, \dots, C)$

i : 作業者番号 $(1, 2, \dots, I)$

j : 製品番号 $(1, 2, \dots, J)$

k : タスク番号 $(1, 2, \dots, K)$

q : 作業台数番号 $(1, 2, \dots, Q)$

s_{jki} : 作業者 i の製品 j タスク番号 k のスキルインデックスの値

x_{tci} : 作業員 i がオーダー t においてセル c に配置される場合 1, それ以外 0 (決定変数 1)

y_{tjki} : 作業員 i が製品 j タスク k を担当する場合 1, それ以外 0 (決定変数 2)

z_{ei} : 作業員 i が作業 e を作業する場合 1, それ以外 0

C_{max} : 1 つのセルに配置できる作業員の最大数

K_{jmax} : 製品 j で 1 人の作業員が担当出来るタスクの最大数

F_{tjki} :

作業員 i がオーダー t の製品 j において複数タスクを担当する際の最初のタスク番号

E_{tjki} :

作業員 i がオーダー t の製品 j において複数タスクを担当する際の最後のタスク番号

$TotalQ_{tj}$: オーダー t の製品 j の数量

$SpecQ_{tcj}$: オーダー t の製品 j におけるセル c の生産数量

$TactTime_{tcj}$: オーダー t の製品 j におけるセル c のタクトタイム

$AvelIdx_{tcj}$: オーダー t の製品 j におけるセル c のスキルインデックス平均値

$TotalAvelIdx_t$: オーダー t における作業員全員のスキルインデックス平均値

各作業員が担当するタスクのスキルインデックスの総和を最小化するため、目的関数は式(4)となる。各作業員のスキルインデックスの値 s_{jki} は所与であり、決定変数は x_{tci} (誰をどのセルに配置するか)と y_{tjki} (誰がどのタスクを担当するか)である。

$$\min \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjki} \quad (\forall t) \quad (4)$$

制約条件は式(5)～式(10)で表現する。式(5)で全ての作業員がいずれかのセルに配置される。式(6)はセルへ配置できる作業員の最大数の制約である。式(7)はタスクの連続制約となり、複数タスクを担当する場合必ず連続したタスクとなる。これは本研究におけるセルの製造形態がタスク分割型でセル内フローショップのためである。

$$\sum_{c=1}^C x_{tci} = 1 \quad (\forall t, i) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{tci} \leq C_{max} \quad (\forall t, c) \quad (6)$$

$$\sum_{k=F_{tijk}}^{E_{tijk}} y_{tjki} = E_{tijk} - F_{tijk} + 1 \leq K_{jmax} \quad (\forall_{t,j,i}) \quad (7)$$

式(8)においてセル内で同一タスクを担当できる人数を 1 人とし, タスク専任制を実現する.

$$\sum_{i=1}^I x_{tci} y_{tjki} = 1 \quad (\forall_{t,c,j,k}) \quad (8)$$

また, 式(9)(10)でセルごとのスキルインデックスの平均値に制約を設けることによって, セルごとの技能レベルを調整できるようにする. 値は全体のレベルから相対的に指定できるよう, 全体のスキルインデックスの平均値に定数 AVE_{max} (最大値)と AVE_{min} (最小値)をかけて求める.

$$AveIdx_{tcj} \leq TotalAveIdx_t * AVE_{max} \quad (\forall_t) \quad (9)$$

$$AveIdx_{tcj} \geq TotalAveIdx_t * AVE_{min} \quad (\forall_t) \quad (10)$$

上記制約で使用する各セルのスキルインデックスの平均および, 全体のスキルインデックスの平均は式(11), 式(12)で求める.

$$AveIdx_{tcj} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjki}}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{tci} y_{tjki}} \quad (\forall_{t,c,j}) \quad (11)$$

$$TotalAveIdx_t = \frac{\sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjki}}{\sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{tci} y_{tjki}} \quad (\forall_t) \quad (12)$$

2.3.2. 作業台数決定方法

セルごとの作業台数の決定には, セルごとの作業台数を均等化する方法とセルごとの作業時間を均等化する方法の 2 つを検討する. 作業台数を均等化する場合, 式(13)に示したとおりオーダー数量をセル数で割って各セルの作業台数を求める. セル数で割った際に余りが出た場合は, セル番号の若い順に 1 台ずつ割当てて.

$$SpecQ_{tcj} = TotalQ_{tj} / C_{num} \quad (\forall_{t,c,j}) \quad (13)$$

作業時間を均等化する場合，式(14)で各セルの品種ごとに各作業者の担当タスクの作業1台当たりの所用時間の和を求め，その中で一番作業時間が大きいものをそのセルのタクトタイムとし，式(15)でオーダー数をタクトタイムの比率で分割する．

$$Tact_{tcj} = \max \left\{ \sum_{k=1}^K \frac{ST_{jk}}{s_{1jk}x_{c1}y_{jk1}}, \sum_{k=1}^K \frac{ST_{jk}}{s_{2jk}x_{c2}y_{jk2}}, \dots, \sum_{k=1}^K \frac{ST_{jk}}{s_{ljk}x_{cl}y_{jkl}} \right\} \quad (\forall_{t,c,j}) \quad (14)$$

$$SpecQ_{tcj} = TotalQ_{tj} / (Tact_{cj} \sum_{c=1}^C \frac{1}{Tact_{tcj}}) \quad (\forall_{t,j}) \quad (15)$$

セルごとの作業時間は式(16)のように作業台数とタクトタイムをかけて求める．

$$Work_{tcj} = \sum_{j=1}^J SpecQ_{tcj} * TactTime_{tcj} \quad (\forall_{t,c}) \quad (16)$$

2.3.3. 求解手順

オーダーごとの作業者のセル配置とタスク割当ておよび各セルの作業台数の求解は，オーダーが複数回($t=1, 2, \dots, T$)くると想定して求める．オーダーごとに担当した作業とその数量から，作業終了後に期待できる技能の向上を決定しスキルインデックスの値を更新する．次のオーダーの配置と作業数量は更新後のスキルインデックスを使用して決定する．オーダーごとの求解はSA(Simulated Annealing)を使用する．求解の流れを Figure 2.2 に示す．

開始後，まず<2>でスキルインデックスの値を設定して，<4>でオーダー回数 t の判定を行った後 SA のアルゴリズムに入る．<6>で温度 $Temp_r$ およびステップ数 r を初期化($r=1$)した後，<7>で作業者のセル配置およびタスクの割当てを行う．初期解はランダムで設定したのち，2回目以降は近傍を作成して解を探索する．近傍は，決定変数 x_{tci} の作業者のセル配置をランダムに交換する方法と，決定変数 y_{tjki} のタスク割当てにおいて，ランダムに選択した作業者の割当てタスクをタスクの連続制約を満たす範囲で1つ増やす方法の2種類を50%の割合で採用する．セル配置とタスク割当てが決定したらセルごとの作業台数を<8>で求め，<9>で受理判定を行う．受理判定の方法は現在の解を x ，次期解を x' ， Δx を $x-x'$ の値とした

とき，式(17)の条件で判定する．

$$(\text{accept } x) = \begin{cases} \Delta x < 0 : 1 \\ \text{otherwise: } \exp(-\Delta x / \text{Temp}_c) \end{cases} \quad (17)$$

$\Delta x < 0$ の場合は<10>で最良解かどうかの判定を行い，最良解ならば<11>で最良解の更新を行う．それ以外で受理された場合は最良解を更新せずに<12>の冷却判定に進む． Temp_r は r ステップ目の温度を示す．冷却(Reduce)は冷却率 μ で式(18)を用いて次の温度 Temp_{rnext} を設定する．通常 μ は 0.8 以上 1.0 未満の範囲で設定する．

$$\text{Temp}_{rnext} = \mu \text{Temp}_r \quad (0.8 \leq \mu < 1.0) \quad (18)$$

SA の終了条件はステップ数 r で判定する．終了条件に満たない場合は<7>のセル配置およびタスクの割当に戻る．一定ステップを終えて SA のアルゴリズムを出た後，最良解をオーダ t 回目の解として出力する．ここで担当したタスクとセル毎に割当てられた製品毎の作業台数 Q_{tcj} からスキルインデックスの値を更新する．式(3)の t_1 を各オーダの 1 台目の作業時間 $ST_{jk}/s_{jki}x_{tci}y_{tjki}$ に，作業台数 n を $\text{Spec}Q_{tcj}$ に置き換える事により，そのオーダの作業完了後の作業時間を式(19)で算出する．新しい作業時間と式(1)より作業者のスキルインデックスの値が更新され，次のオーダの配置を決定する．

$$ET_{jki} = \frac{ST_{jk}}{s_{jki}x_{tci}y_{tjki}} / \text{Spec}Q_{tcj}^\alpha \quad (\forall_{j,k,i}, x_{tci} = 1 \wedge y_{tjki} = 1) \quad (19)$$

これを，<4>でオーダ回数 t の値が終了条件を満たすまで繰り返す．

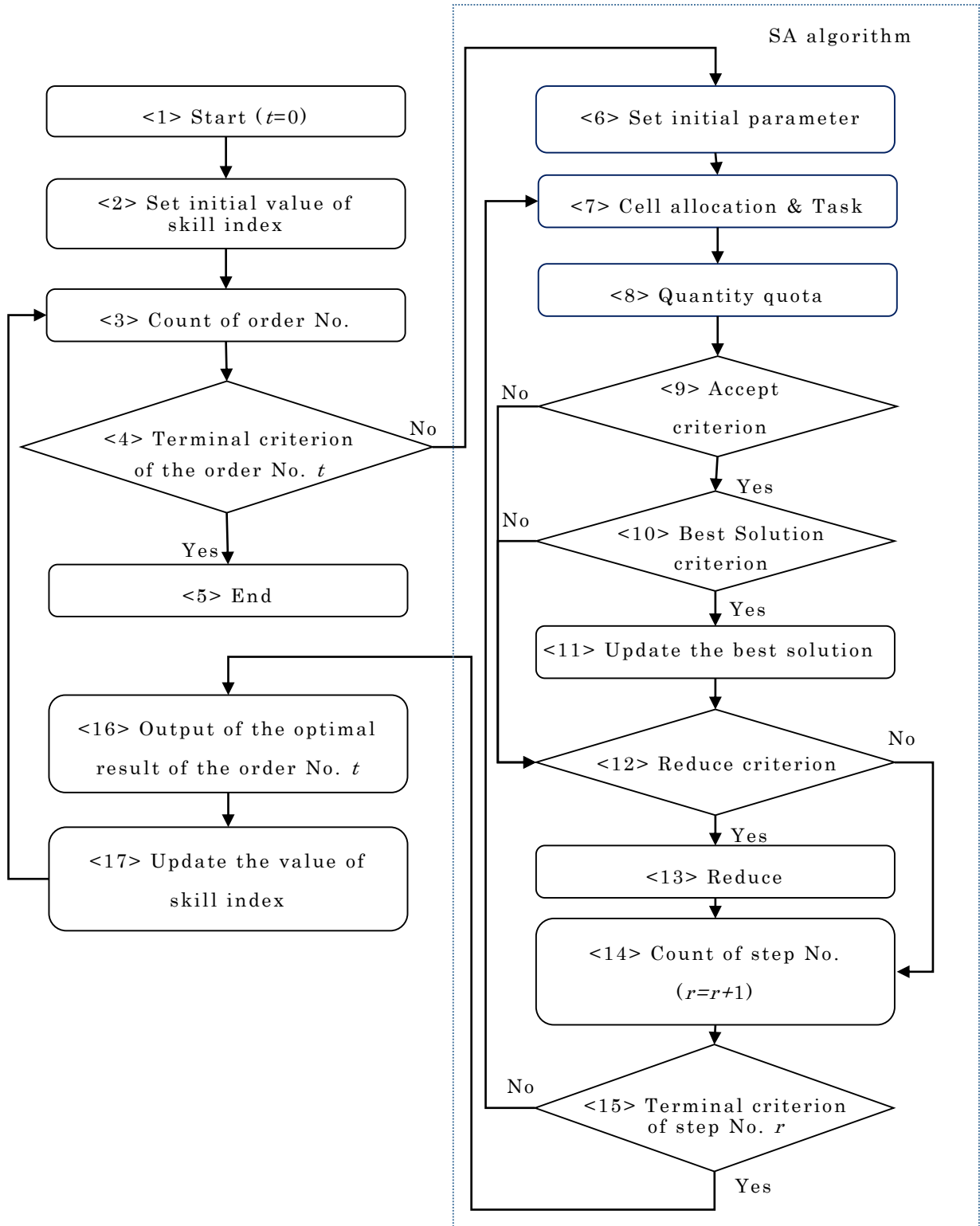


Figure 2.2 Flow Chart

2.4. 計算機実験

スキルインデックスを使用した作業者のセル配置およびタスク割当てを用いた際の作業者の習熟の過程およびその有効性を検証するために計算機実験を行う。対象となるセル構成およびオーダー内容を Table 2.8 に示す。

Table 2.8 Experimental Condition

Variable Identifier	Values
Number of Cells	3 (C1~C3)
Number of Operators	8 (O1~O8)
Max number of Operators in one Cell	4
Number of Production Items	3 (J1~J3)
Number of Tasks	4 (K1~K4) (in each Item)
Standard Time	45~90 (in each Task)
Order Quantity	30 (in each Item)
Number of Orders	5 (T1~T5)

3 台のセル(C1~C3)はすべて同等の設備を持ち、1 人セルも複数人セルでも対応可能とする。作業者数は 8(O1~O8)とし、1 つのセルに配置出来る作業者数は 1~4 名とした。オーダー内容は製品種別が 3(J1~J3)、タスク数は全製品種別ともに 4(K1~K4)、オーダー数量も各製品種別 30 台とした。また標準作業時間は 45~90 単位時間の範囲でランダムに設定した。

作業者の技能については、作業者集団として特徴的な 2 種類のパターンを用意した[47]。スキルインデックスの値の一例を Table 2.9, Table 2.10 に示す。Table 2.9 は作業者の技能が新人、標準、熟練に分けられるケースで、様々な技能レベルを持つ作業者が混在している一般的なセル生産システムの作業現場を想定している。これをケーススタディ 1「新人の熟練化(Newcomer Training)」とする。

一方 Table 2.10 のケースでは全ての製品に対して熟練の技能を持つ多能工作業者 O1 と O2 と、1 つの製品に対しては熟練レベルであるものの他の製品に対しては新人レベルの技能しか持たない単能工作業者がいる。このような作業現場は単能工の多いライン生産からセル生産システムへ以降過程にある作業現場を想定している。これをケーススタディ 2「単能工の多能工化(Cross Training)」とする。

Table 2.9 Values of Skill Level (Newcomer Training)

Operator No	Operator Level	J1				J2				J3			
		K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
O1	Expert	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.5	1.5	1.3	1.4	1.5	1.3	1.3
O2	Expert	1.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.3	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3	1.4
O3	Standard	0.9	1.2	1.0	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	1.1	1.2	1.0
O4	Standard	1.2	0.9	1.2	1.1	1.0	1.2	0.9	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1
O5	Standard	1.1	1.0	1.2	0.9	1.1	1.2	1.1	1.0	1.2	1.1	1.1	1.1
O6	Standard	1.1	1.2	0.9	1.1	1.1	0.9	1.2	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1
O7	Newcomer	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8
O8	Newcomer	0.7	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7

Table 2.10 Values of Skill Level (Cross Training)

Operator No	Multi-Skilled Level	J1				J2				J3			
		K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
O1	High	1.3	1.4	1.3	1.5	1.5	1.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.4	1.3
O2	High	1.4	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.3	1.5	1.3	1.4	1.4	1.4
O3	Low	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.3	1.3	1.4	1.3
O4	Low	0.6	0.7	0.7	0.8	0.6	0.6	0.8	0.8	1.3	1.3	1.5	1.5
O5	Low	0.6	0.7	0.8	0.7	1.3	1.5	1.4	1.3	0.7	0.6	0.8	0.6
O6	Low	0.8	0.7	0.6	0.7	1.4	1.5	1.5	1.4	0.7	0.8	0.7	0.6
O7	Low	1.5	1.4	1.3	1.3	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6
O8	Low	1.3	1.3	1.5	1.3	0.7	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8

データセットは各ケースともに 5 パターン用意した。それぞれのデータセットの基本統計量を Table 2.11 に示す。なお、作業者の習熟率は 90%～95% の範囲でタスクごとにランダムに設定した。

求解で使用する SA の条件は Table 2.12 のとおりである。初期値をランダムで決定した後、交換近傍で探索を進める。冷却は 100 ステップごとに行った。オーダ 1(T1)～5(T5)までを 1 回の実験とみなし、オーダが変わるごとにステップ数、

温度を初期化した．試行回数は 5 種類のデータセットで各 20 回ずつ，合計 100 回とした．

Table 2.12 Basic Statistics of 1st Skill Level

	Newcomer Training	Cross Training
Max	1.5	1.5
Min	0.6	0.6
Average	1.06	1.04
S.D.	0.28	0.36

Table 2.12 SA Condition

Item	Values
Initial Solution	Random
Neighborhood Creation	Exchange Neighborhood
Cooling Rate	0.95
Cooling Condition	Every 100 steps
Terminal Condition	10000 steps

全試行のオーダごとのスキルインデックス総和最良値の基本統計量を Table 2.13 に示す．スキルインデックスの値に関して複数のデータセットを用意したものの，作業者の技能内訳は統一したので試行ごとの結果には大きなばらつきはなかった．ケーススタディ 1 の新人の熟練化に比べ，ケーススタディ 2 の単能工の多能工化の方は多能工の割合が低い今回の実験では，両ケースともオーダ 4 回目ではほとんどの作業者が熟練となる結果となった．

Table 2.13 Basic Statistics of result

		T1	T2	T3	T4	T5
Newcomer Training (Case 1)	Min	32.0	35.2	42.2	50.7	54.0
	Max	35.0	38.5	46.2	54.0	54.0
	Average	33.6	36.9	44.3	52.9	54.0
	S.D.	0.93	1.02	1.22	1.15	0.00
Cross Training (Case 2)	Min	30.0	36.0	43.2	47.5	52.3
	Max	33.0	39.6	47.5	52.3	54.0
	Average	31.4	37.6	45.2	49.7	53.6
	S.D.	0.89	1.07	1.28	1.41	0.57

SA における探索の様子を確認するためケーススタディ 1 におけるオーダ 1 回目の最良解の推移を Figure 2.3 に示す．解の精度を確認するため，全探索で最適解(Opt)も求めた．これより，1000 ステップ前後である程度解が収束していることが分かる．また，最終的に得られた解についても大きな差はなく，最適値を得られた試行もあった．

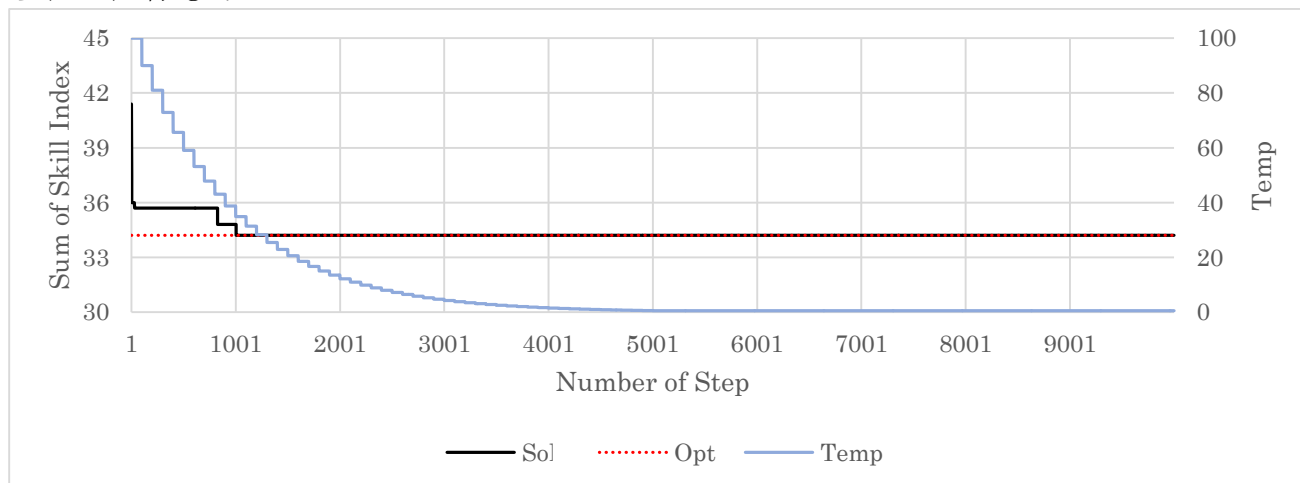


Figure 2.3 Solution Process

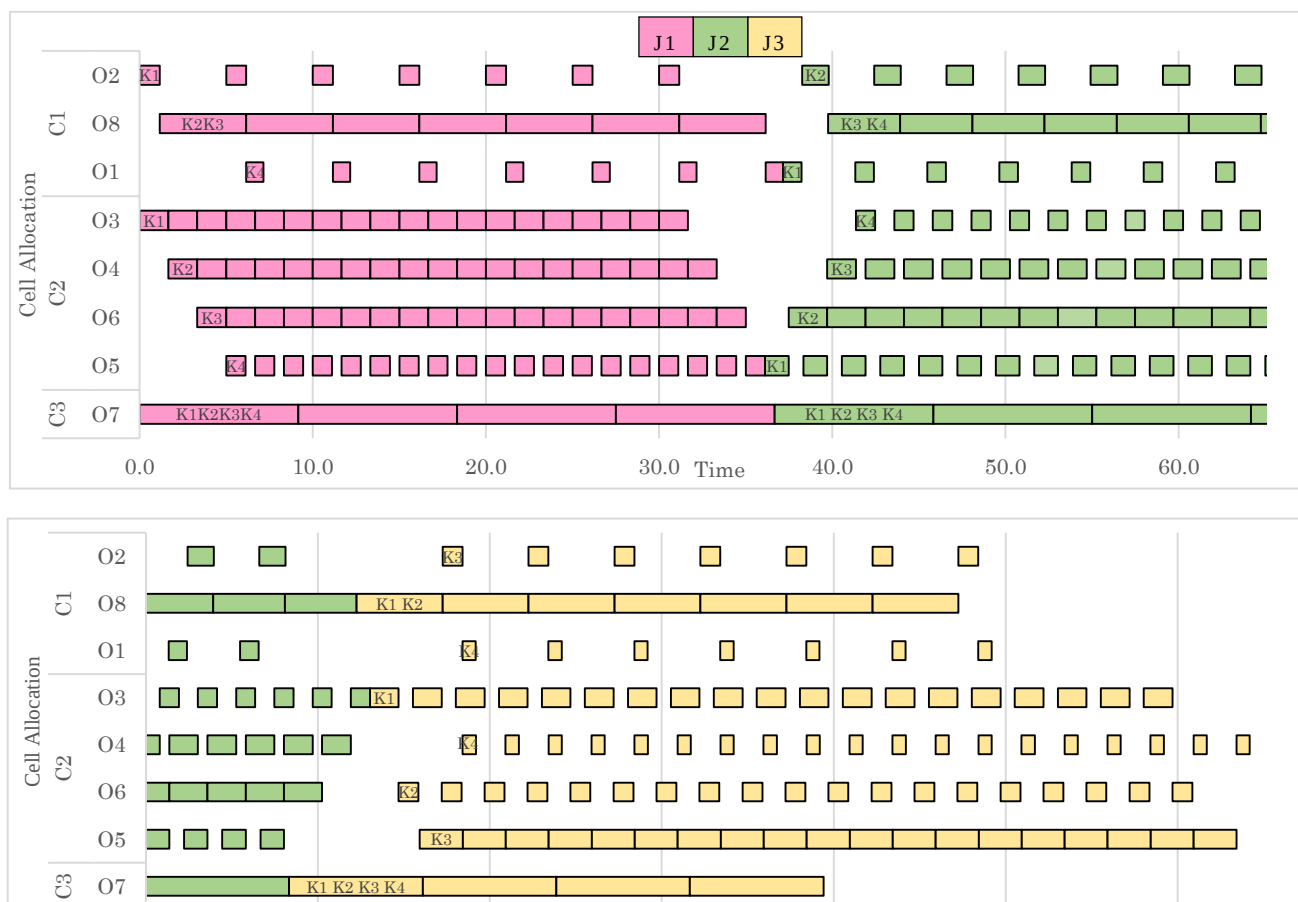


Figure 2.4 Gantt chart (Newcomer Training)

それぞれのケースにおける，典型的な配置結果と製品ごとのスキルインデックスの総和の一例を Table 2.14, Table 2.15 に，その際のガントチャートを Figure 2.4, Figure2.5 に示す．

ケーススタディ 1「新人の熟練化」においては，新人レベルである O7 または O8 のいずれかが 1 人セルになった．1 人セルは全ての作業を行うことになるため，この結果は多くの作業をまんべんなく訓練できると言える．

Table 2.14 Allocation Result (Case 1: Newcomer Training)

Cell	C1				C2				C3			
Item	I1											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O2	O8		O1	O3	O4	O6	O5	O7			
Skill Index	1.3	0.6	0.6	1.5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	0.6	0.6	0.6
Sum of Skill Index	4.0				3.6				2.4			
Exe. Time	1.2	2.5	2.5	0.7	1.7	1.7	1.7	1.1	2.5	2.5	2.5	1.7
Tact Time	5.00				1.67				9.17			
Quantity	7				19				4			
Item	I2											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O1	O2	O8		O5	O6	O4	O3	O7			
Skill Index	1.4	1.3	0.6	0.6	1.1	0.9	0.9	0.9	0.6	0.8	0.6	0.6
Sum of Skill Index	3.9				3.8				2.6			
Exe. Time	1.1	1.5	2.5	1.7	1.4	2.2	1.7	1.1	2.5	2.5	2.5	1.7
Tact Time	4.17				2.22				9.17			
Quantity	9				17				4			
Item	I3											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O8		O2	O1	O3	O6	O5	O4	O7			
Skill Index	0.6	0.6	1.3	1.3	0.9	1.0	1.1	1.1	0.6	0.7	0.8	0.8
Sum of Skill Index	3.8				4.1				2.9			
Exe. Time	2.1	2.5	2.5	0.8	1.2	1.2	2.1	1.7	1.2	2.5	2.5	1.7
Tact Time	5.00				1.67				7.77			
Quantity	7				19				4			

Table 2.15 Allocation Result (Case 2: Cross Training)

Cell	C1				C2				C3			
Item	I1											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O1	O8	O5		O6	O2	O3		O4			O7
Skill Index	1.3	1.3	0.8	0.7	0.8	1.3	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	1.3
Sum of Skill Index	4.1				3.3				3.3			
Exe. Time	1.2	1.2	1.9	1.4	1.9	1.2	2.5	1.7	2.5	2.1	2.1	0.8
Tact Time	3.30				4.17				6.79			
Quantity	13				10				7			
Item	I2											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O5	O8		O1	O3		O2	O6	O4			O7
Skill Index	1.3	0.6	0.6	1.4	0.6	0.7	1.3	1.4	0.6	0.6	0.8	0.6
Sum of Skill Index	3.9				4.0				2.6			
Exe. Time	1.2	3.3	2.5	0.7	2.5	2.9	1.2	0.7	2.5	3.3	1.9	1.7
Tact Time	5.83				5.36				7.71			
Quantity	11				11				8			
Item	I3											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O5		O8	O1	O2	O3	O6		O4	O7		
Skill Index	0.7	0.6	0.6	1.3	1.3	1.3	0.7	0.6	1.3	0.6	0.6	0.6
Sum of Skill Index	3.2				3.9				3.1			
Exe. Time	2.1	2.5	2.5	0.8	1.2	1.2	2.1	1.7	1.2	2.5	2.5	1.7
Tact Time	4.64				3.81				6.67			
Quantity	10				13				7			

一方、ケーススタディ 2「単能工の多能工化」では 1 人セルが発生する結果は得られなかった。すべてが複数人セルとなり、新人レベルの製品に対しては複数タスクを担当し、熟練レベルの製品に対しては 1 つのタスクを担当する結果が多かった。その場合、複数タスク担当時の連続制約が効くため担当するタスクは最初のタスクまたは最後のタスクになる。

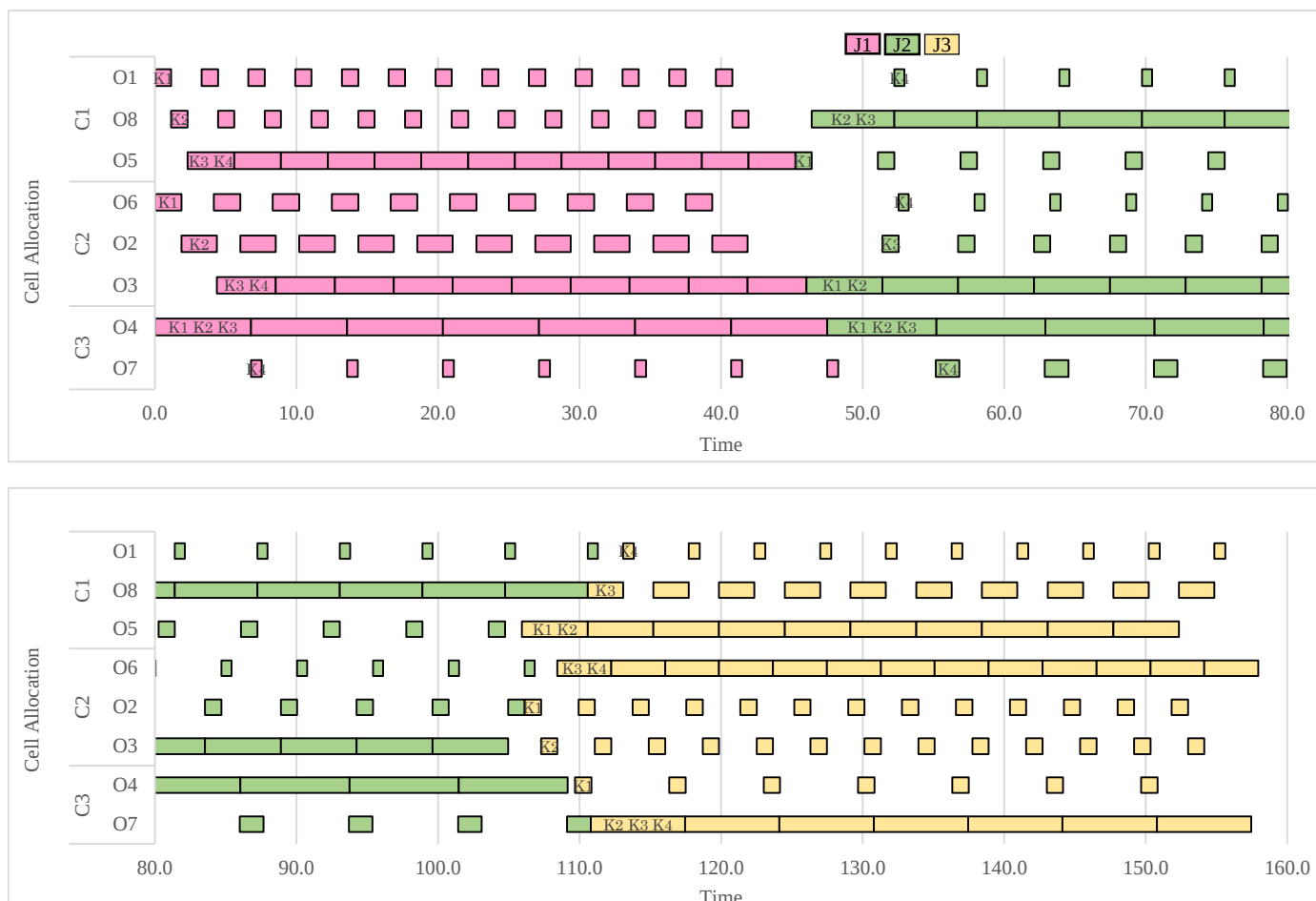


Figure 2.5 Gantt chart (Cross Training)

本研究の主眼はあくまで OJT 上での効率的な訓練計画にあるが、実際の作業現場では生産性の確保が求められる。そこで生産性の検証のために、同一条件下で作業時間最小化を目的関数とした場合の結果と比較した。

**Table 2.16 Average of Working time
(Newcomer Training)**

Order No.	Proposed	Compered
T1	102.4	72.5
T2	95.2	62.1
T3	69.7	61.0
T4	62.3	60.0
T5	60.0	60.0

それぞれのケースにおけるメイクスパンの平均値を Table 2.16, Table 2.17 に示す. いずれのケースでもオーダ 1 回目～4 回目までは比較手法(メイクスパン最小化)のメイクスパンが短く, 提案手法はオーダ 5 回目で比較手法に追いつく結果となった.

それぞれのケースについて各作業者の技能の変化例を Table 2.18 に, 最終的なスキルインデックスの値の基本統計量(全試行)を Table 2.19 に示す. いずれのケースにおいても提案手法の場合は 5 回の作業終了後に全ての作業者が熟練化, 高レベルの多能工化しており, 熟練率の高い, すなわち頑健性の高い作業者集団が構築されたと言える.

Table 2.17 Development of Skill Index

	Newcomer Training			Cross Training		
Operator No	Skill Index (Initial)	Skill Index (Final)		Skill Index (Initial)	Skill Index (Final)	
		Proposed	Compered		Proposed	Compered
O1	Expert	Expert	Expert	High	High	High
O2	Expert	Expert	Expert	High	High	High
O3	Standard	Expert	Standard	Low	High	Low
O4	Standard	Expert	Standard	Low	High	High
O5	Standard	Expert	Expert	Low	High	Low
O6	Standard	Expert	Standard	Low	High	Low
O7	Newcomer	Expert	Standard	Low	High	High
O8	Newcomer	Expert	Standard	Low	High	Low

一方, 比較手法では一部の作業者が熟練, 高レベルの多能工に達しなかった. これは, メイクスパンを最小化するために苦手な作業への割当てが後回しになってしまうためである. そのため, オーダを繰り返しても苦手な作業の訓練が十分に行われず, その結果, 作業者の技能のばらつきも残ってしまったと考えられる. このような作業者は得意な作業を担当する分には問題ないが, 急なオーダ変更や作業者の欠員によって不得手な作業を担当せざるを得なくなったとき, 作業効率の低下を引き起こす可能性がある.

Table 2.18 Basic Statistics of Final Skill Level

	Newcomer Training			Cross Training		
	1st	Final		1st	Final	
		Proposed	Compared		Proposed	Compared
Max	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Min	0.6	1.5	0.6	0.6	1.5	0.6
Average	1.06	1.5	1.21	1.04	1.5	1.16
S.D.	0.28	0.00	0.24	0.36	0.00	0.34

2.5. 結言

本章では，作業者の技能を示す新しい指標としてスキルインデックスの提案および作業者の訓練に主眼を置いた作業者のセル配置およびタスク割当て手法を提案した．

スキルインデックスは，タスクごとに設定されている標準作業時間を作業者ごとの実作業時間から算出するため，作業レベルを単純な指標として表現できるだけでなく作業者のセル配置およびタスク割当て手法の定式化に容易に組み込めるというメリットを持っている．

作業者のセル配置およびタスク割当て手法では作業現場における OJT を想定し，スキルインデックスの値を用いて苦手な作業を優先的に割当てることによって，各個人が効率的に訓練を行えるだけでなく，頑健性の高い作業者集団の構築を目指した．計算機実験においては，作業者の構成が異なる 2 つのケーススタディを用意し，配置結果の違いを検討した．その結果，新人教育の場合は 1 セルの活用が有効であり，単能工を多能工化していく場合には『苦手な作業が異なる作業者』が複数人セルに配置される傾向があることが分かった．

3. 訓練計画時のセル配置とタスク割当て

3.1. 緒言

本章では前章で提案したスキルインデックスを使用した作業者のセル配置，タスク割当て手法を月次などの既知の複数オーダに対する作業計画時に適用する手法を提案する．作業計画時には現場の状況や製品計画に応じた訓練目的がある．例えば，製造業における熟練者の高年齢化，継承者の人材不足は重要な問題となっており様々な議論がなされている[49]．技能伝承を効果的に実現する方策としては，従来からあるマニュアル作成手法の他，熟練者の動作を収録したマルチメディアコンテンツの作成[50]や，Web を使用した作業支援システムの開発[51]，新人による熟練者の模倣を効率的に行えるようなタスク支援システム[52]などがある．一方，鈴木[53]らは，技能伝承に必要なコストと現場の生産性へ影響をシミュレーションによって評価し，より適切な技能伝承の進め方を設計する手法を提案した．

しかし実際の作業現場では技能の伝達や生産性を高めるために，新人作業者に熟練作業者が付き添って訓練する状況が発生する．Nancy[54]らは，技能訓練の際には指導者(熟練者)が作業の説明をし，作業者(新人)の作業の様子を監視して，フィードバックをする手順を提示している．また大橋[55]は，高い技能を有する作業者(熟練者)と未熟練作業者(新人)の 2 人が組んで訓練することによって，1 人で訓練するときよりも短時間で目標となる技能に到達できることを示した．

一方で，熟練作業者から新人作業者への技能指導だけではスムーズな教育が実現できないケースもある．例えば，新技能を有するような製品を新しく導入する場合，新技術に対しては全ての作業者が新人作業者レベルとなる．このような場合は，技能伝承ではなく各自がいち早く技能を習得する必要がある．また，継続的にオーダが発生するとはいえその頻度が非常に低い技能がある場合，貴重な訓練機会を逃さないようにする必要がある．

そこで本章では，第 2 章で提案したスキルインデックスと作業者配置計画を，訓練目的に応じた作業者配置計画およびスケジューリング問題へと適用する方法について述べる．

3.2 節では訓練目的に応じた目的関数の使分けについて述べる．第 2 章で提案したスキルインデックスの総和最小化の目的関数以外に訓練必要台数の総和最小化と作業頻度指数の総和最小化の 2 種類の目的関数を提案し，それぞれのアルゴリズムを述べる．

3.3 節では，3.2 節で決定したセル配置とタスク割当を下に，セルごとのスケジューリング手法について述べる．

3.4 節では訓練目的が異なる作業配置問題に対して，それぞれの目的関数を適用した計算機実験を行い，特性の違いを比較する．

最後に 3.5 節で本章をまとめる．

3.2. 訓練目的に応じた目的関数の設定

3.2.1. スキルインデックスの総和最小化

第 2 章で述べた目的関数は，各作業者が苦手とする作業を優先的に割当て，技能の熟練化をはかるものであった．そこで，スキルインデックスの値が低い作業が割り当てられるよう，式(4)の目的関数で各作業者に割当てられたタスクのスキルインデックスの総和を最小化した．

また，タスクの割当てルールを制約条件として設定したが，全ての作業者が必ず何らかのタスクを担当することになっており，熟練作業者と新人作業者の技能伝達は想定されていなかった．そこで，タスク割当てに対する制約である式(9)を式(20)のように変更しどのタスクも担当しない作業者の存在を許す．これによって，セルに配置はされるが特定のタスクを担当しない作業者が発生しうる．このような配置のセルを『技能指導セル』と呼ぶ．技能指導セルで特定のタスクを割当てられていない作業者は，他の作業を指導，サポートする存在とみなす[56]．

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K y_{tjki} \geq 0 \quad (\forall_{t,i}) \quad (20)$$

3.2.2. 訓練必要台数の総和最小化

新製品を導入する際には同時に新しい技能の導入を伴うことがある．新技能に対しては，新人作業者は勿論，熟練作業者も技能が Level 1(スキルインデックスの値が 0.6~0.8)になることも考えられる．この場合，全体の熟練化よりも新技能をいち早く標準レベルまで引き上げる事が急務となる．

そこで，新技能を伴うような製品の導入の際には，あらかじめ作業者が標準レベルになるのに必要な作業台数を算出しておき，訓練が必要なタスクを訓練が必要な台数だけ優先的に作業することによって，作業者の技能向上を目指す配置を行う．さらに与えられたオーダを勤務時間内に作業完了するという制約を設けることで，訓練の目標設定を可能にし，計画的で効率のよい作業者の技能向上が期待できる[57][58]．

そこで、作業者のスキルインデックスの値から、訓練が必要なタスクとその台数の総和 $ReqQ_{jki}$ を算出し、それぞれ担当するタスクと作業台数の総和 $ExecQ_{jki}$ を求め、式(21)で得られる差 $DiffQ_{jki}$ の総和を最小化することを目的とする。決定変数をセル番号 c への作業者 i の配置 x_{tci} 、作業者の担当タスク y_{tjki} 、 t 回目のオーダーに対するセル番号 c への割当て数量 $AllocQ_{tcj}$ としたとき、目的関数は式(22)で示される。

$$DiffQ_{jki} = \max\{ReqQ_{jki} - ExecQ_{jki}, 0\} \quad (\forall_j, \forall_k, \forall_i) \quad (21)$$

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I DiffQ_{jki} \quad (22)$$

各作業者の訓練必要台数は、式(23)にて求める。 α_i は作業者ごとの習熟指数である。スキルインデックスの値が1以上の場合は、標準以上の技能レベルであるから必要台数は0となる。

$$ReqQ_{jki} = \begin{cases} 0 & \cdots \text{ if } s_{jki} \geq 1.0 \\ s_{jki}^{-\alpha_i} & \cdots \text{ else} \end{cases} \quad (\forall_{j,k,i}) \quad (23)$$

作業者ごとの担当数量の総和は、各オーダーにおいて各セルに割当てられた数量から得られる。

$$ExecQ_{jki} = \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{tci} y_{tjki} AllocQ_{tcj} \quad (\forall_{t,i}) \quad (24)$$

3.2.3. 作業頻度指数の総和最小化

セル生産システムの特徴の1つとして、変種変量生産への柔軟な対応がある。多品種を扱う場合、品種ごとのオーダー頻度が異なるケースがある。スキルインデックスは作業時間のみを扱う指標なので、作業頻度は考慮されない。作業頻度の低いタスクは、次に作業するまでの間が開くので出来るだけ優先的に訓練するのが望ましい一方、スキルインデックスは作業時間のみを扱う指標のため、前述の目的関数ではスキルインデックスの値が同じであれば、等価とみなされる。

そこでオーダー頻度に差がある現場を想定して、作業頻度を考慮した目的関数を設定する。具体的には各作業者が割当てられたタスクのスキルインデックスの総和を、実際に割当てられた作業の種類の総和で割った値を最小化することを目的

とする．異なる作業要素に対して，スキルインデックスの値が同じであれば，同じ作業要素を繰返しするのではなく異なる作業要素を優先的に割当てることによって，まんべんなく訓練することを目指す[59]．

作業要素を P_e とし，決定変数を t 回目のオーダーに対するセル番号 c への作業員 i の配置 x_{tci} ，作業員の担当タスク作業員の担当作業要素を z_{tei} としたとき，目的関数は式(25)で示される． z_{tei} の値は y_{tjki} から得られ， y_{tjki} に対応する作業要素 P_e を担当するとき 1 を取り，担当しない場合は 0 となる．同じ作業員が同じ作業要素を繰返し担当しても値が 1 以上になることはないので，各作業員が色々な種類の作業要素を担当すればするほど目的関数値が小さくなる．

$$\min \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjki} / \sum_{e=1}^E \sum_{i=1}^I p_e z_{tei} \quad (\forall_t) \quad (25)$$

3.3. スケジューリング

本研究では，作業員へのセル配置とタスク割当てを行う際にタクトタイムと作業数量で仮のメイクスパンを求めることによってある程度の生産性を見通すことは出来る．しかし，実際には，同一セル内に入っている作業員の技能の違いや製品切り替え時の担当作業の順番変化により遊休が発生する．そのため，得られた配置と担当タスクを基に実際の作業スケジュールを組むことが必要になる．作業スケジュールについては，式(26)のとおり，メイクスパン最小化を目的関数として以下の定式化でヒューリスティックに求める．また，製品の投入順は製品番号中とする．ここでのメイクスパンは，セルごとに一番最後のタスクの作業終了時刻から，一番最初のタスクの作業開始時刻の差とする．

$$\min F_{tmax} = \max\{BT_{tc1KQ} + ET_{tc1KQ}, BT_{tc2KQ} + ET_{tc2KQ}, \dots, BT_{tcJKQ} + ET_{tcJKQ}\} - \min\{BT_{tc111}, BT_{tc211}, \dots, BT_{tcJ11}\} \quad (\forall_{t,c}) \quad (26)$$

式(27)は作業台数の先行制約である．作業員は担当するタスクを作業台数順に作業を行い，前の作業が終わってから次作業を行う．

$$x_{tci} BT_{tcjkk+1} \geq x_{tci} (BT_{tcjkk} + ET_{tcjkk}) \quad (\forall_{t,c,i,j,k,q}) \quad (27)$$

式(28)はタスクの先行制約である．作業はタスク番号順に行われ，前のタスクの作業が終わってから次のタスクの作業を行う．

$$BT_{tcj(k+1)q} \geq BT_{tcjkq} + ET_{tcjkq} \quad (\forall_{t,c,j,k,q}) \quad (28)$$

式(29)は作業者の並行作業の制約である．作業者は一度に 1 つのタスクだけを行い，同時に複数のタスクを並行して作業することは出来ない．

$$x_{tci}(BT_{tcjkq} - BT_{tcj'k'q'}) \geq x_{tci}ET_{tcj'k'q'} \quad (\forall_{t,c,i}) \quad (j \neq j', k \neq k', q \neq q') \quad (29)$$

本研究では，前節で提案した作業者のセル配置およびタスク割当てのための目的関数(目的関数 1)と，作業スケジューリングのための目的関数(目的関数 2)の 2 つを使用して段階的に求解を行う．2 つの目的関数を 1 つにまとめて求解しないのは，研究の主目的があくまで OJT における効率的な作業割当ての実現であり，スケジューリングに関しては，得られた配置・割当て結果から最も生産性の高い作業順番を決定する，あくまで配置・割当てありきで検討するものだからである．

3.4. 計算機実験

上記で提案した 3 つの目的関数に対して計算機実験を行い，訓練目的に応じたそれぞれの目的関数の有効性を検証する．対象となるセルの構成および作業者のスキルインデックスの構成は，基本的に Table 2.8 と同じとするがオーダ数量は本実験では各品種とも 30 台とした．

3.4.1. 熟練から新人への技能伝承を考慮した配置

熟練から新人へ技能指導を実現するモデルの場合，前章で提案した作業者のセル配置，タスク割当て手法との違いは，品種ごとのタスクの担当制約のみである．そこで，本実験では従来手法と提案手法の比較を行う．また，セルごとの作業数量の決定はセルごとのタクトタイムの比率で台数を割振る作業時間均等化で行う．また，習熟指数の違いによる熟練過程を比較するため，習熟率の値を変えて比較を行った(Table 3.1)．

Table 3.1 Experimental Condition of learning rate

Method	Conventional	Proposed	
Cell Type	Un-collaborative	Collaborative	Un-collaborative
Case 1	0.95	0.95	0.95
Case 2	0.95	0.90	0.95

Case 1 は共同技術者の有無によらず習熟率は一定の場合であり本実験では 95%とした。この場合、技能指導セル(Collaborative)で作業した作業者と、そうでないセル(Un-collaborative)で作業した作業者には習熟の違いは無い。習熟率を上げれば熟達が早くなるのは確実であるから、提案手法と従来手法の手法そのものの違いを検証するために、同じ条件下である Case 1 を用意した。

Table 3.2 Allocation Result (1st order, Conventional)

Cell	C1				C2				C3			
Item	J1											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O1	O8			O2	O7			O3	O4	O6	O5
Skill Index	1.4	0.6	0.6	0.8	1.3	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9
Sum of Skill Index	3.4				3.1				3.6			
Exe. Time	1.1	2.5	2.5	1.3	1.2	2.5	2.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.1
Tact Time	6.25				6.67				1.67			
Quantity	5				5				20			
Item	J2											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O1	O8			O2	O7			O5	O6	O4	O3
Skill Index	1.4	0.8	0.6	0.6	1.5	0.8	0.6	0.6	1.1	0.9	0.9	0.9
Sum of Skill Index	3.4				3.5				3.8			
Exe. Time	1.1	2.5	2.5	1.7	1.0	2.5	2.5	1.7	1.4	2.2	1.7	1.1
Tact Time	6.67				6.67				2.22			
Quantity	6				6				18			
Item	J3											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O8			O1	O7			O2	O6	O5	O4	O3
Skill Index	0.6	0.6	0.7	1.3	0.6	0.7	0.8	1.4	0.9	1.1	1.1	1.0
Sum of Skill Index	3.2				3.5				4.1			
Exe. Time	2.5	2.5	2.1	0.8	2.5	2.1	1.9	0.7	1.7	1.4	1.4	1.0
Tact Time	7.14				6.52				1.67			
Quantity	5				5				20			

一方、Case 2 は技能指導セルの習熟率を 90%に、指導者がいないセルを 95%にした。これは、技能指導者の存在によって、指導される作業者がより短い時間

で習熟が上がることを期待しているためである．本手法では，技能指導者は特定のタスクを担当しないため単純に作業員数の減少によって生産性が低下する可能性がある．しかし，早い段階で習熟が進み，新人作業員が戦力となる標準作業員，熟練作業員へとスキルアップすれば，技能指導セルによる一時的な生産性の低下が補えると期待できる．

Table 3.3 Allocation Result (1st order, Proposed)

Cell	C1					C2					C3				
Item	J1														
Task	-	K1	K2	K3	K4	-	K1	K2	K3	K4	-	K1	K2	K3	K4
Operator	O1	O8				O2	O7					O3	O4	O6	O5
Skill Index		0.7	0.6	0.6	0.8		0.6	0.6	0.6	0.6		0.9	0.9	0.9	0.9
Sum of Skill Index	2.7					2.4					3.6				
Exe. Time		2.1	2.5	2.5	1.3		2.5	2.5	2.5	1.7		1.7	1.7	1.7	1.1
Tact Time	8.39					9.17					1.67				
Quantity	4					4					22				
Item	J2														
Task	-	K1	K2	K3	K4	-	K1	K2	K3	K4		K1	K2	K3	K4
Operator	O1	O8				O2	O7					O5	O6	O4	O3
Skill Index		0.8	0.8	0.6	0.6		0.6	0.8	0.6	0.6		1.1	0.9	0.9	0.9
Sum of Skill Index	2.8					2.6					3.8				
Exe. Time		1.9	2.5	2.5	1.7		2.5	2.5	2.5	1.7		1.4	2.2	1.7	1.1
Tact Time	8.54					9.17					2.22				
Quantity	5					5					20				
Item	J3														
Task	-	K1	K2	K3	K4	-	K1	K2	K3	K4	-	K1	K2	K3	K4
Operator	O1	O8				O2	O7				O4	O6		O5	O3
Skill Index		0.6	0.6	0.7	0.7		0.6	0.7	0.8	0.8		0.9	1.0	1.1	1.0
Sum of Skill Index	2.6					2.9					4.0				
Exe. Time		2.5	2.5	2.1	1.4		2.5	2.1	1.9	1.3		1.7	1.5	1.4	1.0
Tact Time	8.57					7.77					3.17				
Quantity	6					7					17				

オーダ 1 回目の配置の一例とセルごとの作業割当て数量およびメイクスパンの結果の一例を Table 3.2, Table 3.3 に示す．

今回の実験では、セルごとの生産性を均等にするために作業者のスキルインデックスの平均値の制約を設けなかった。それでも、苦手な作業をより多く割当てる配置を求めた結果、最初のオーダでは新人レベルの作業者と熟練レベルの作業者が同じセルに配置された。同時に、タスクを割当てる際にはスキルインデックスの値が小さいものが優先されるため、熟練作業者は専任作業がない状態となる。それが熟練者による新人への技能指導のモデルとなる。一方で、一部製品に対して同じセル内の他の作業者よりスキルインデックスが高い作業者がいる場合、熟練作業者でなくても作業の割当が行われないケースもある。その状況が Table 3.2 ではセル 3 (C3)の製品 3(J3), Table 3.3 ではセル 3 (C3)の製品 2(J2)と製品 3(J3)に発生している。このようなケースはいずれの試行でも発生した。

Table 3.4 Basic Statistics of result

		T1	T2	T3	T4	T5
Conventional	Min	32.6	32.2	35.2	37.7	40.5
	Max	33.4	33.1	35.9	38.5	40.9
	Average	32.9	32.6	35.4	38.1	40.7
	S.D.	0.33	0.37	0.29	0.33	0.16
Proposed (Case 1)	Min	27.0	32.4	37.6	42.7	46.3
	Max	27.7	33.1	38.2	43.5	47.3
	Average	27.2	32.9	37.9	43.0	46.7
	S.D.	0.29	0.29	0.24	0.33	0.41
Proposed (Case 2)	Min	27.0	32.9	40.0	47.3	52.2
	Max	27.7	33.5	41.0	48.1	53.1
	Average	27.2	33.1	40.4	47.8	52.7
	S.D.	0.29	0.25	0.41	0.33	0.37

全試行のオーダごとの目的関数値(スキルインデックス総和の最小値)の基本統計量を Table 3.4 に、目的関数値の平均の推移を Figure 3.1 に示す。これによりオーダ T1 の時は提案手法の目的関数値が小さいことから、より多くの苦手な作業が割当てられていることが分かる。しかし早い段階で新人の習熟が進むため、作業者のスキルインデックスの値が大きくなり T2 で目的関数値が逆転している。本研究の場合、作業を重ねて習熟が上がるごとにスキルインデックスの値は大きくなるためである。その後、オーダを重ねるごとに差が広がっていく。なおスキルインデックスの上限値(本論文では 1.5)を設定しているため、目的関数値は上限値×タスク総数の値以上になることはない。作業者ごとのスキルインデックスの値については、全体の平均値に大きな差は無いが、提案手法の方はいずれも T3 か

ら最小値が 1.0 を超えている．作業者ごとの技能の差も小さくなっている．

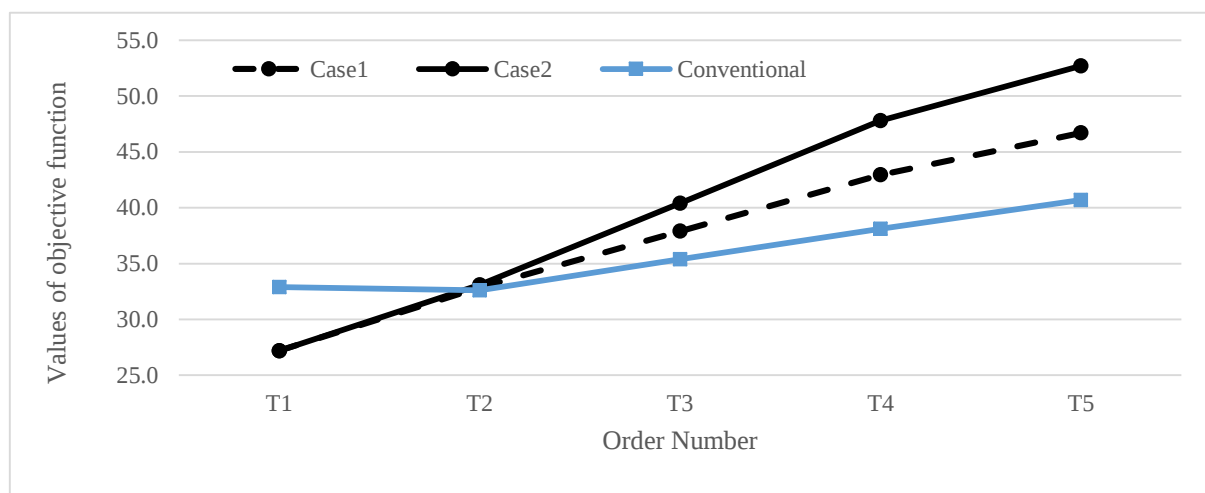


Figure 3.1 Average Values of objective function

全試行のオーダ終了後ごとの作業者全体のスキルインデックスの基本統計量を Table 3.5 に示す．

Table 3.5 Basic Statistics of Values of skill index

		T1	T2	T3	T4	T5
Conventional	Min	0.60	0.60	0.67	0.84	0.96
	Max	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
	Average	1.11	1.17	1.22	1.27	1.33
	S.D.	0.28	0.27	0.24	0.21	0.16
Proposed (Case 1)	Min	0.73	0.89	1.11	1.23	1.38
	Max	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
	Average	1.16	1.23	1.32	1.38	1.42
	S.D.	0.33	0.17	0.11	0.08	0.02
Proposed (Case 2)	Min	0.73	0.99	1.16	1.30	1.46
	Max	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
	Average	1.16	1.29	1.42	1.46	1.49
	S.D.	0.24	0.16	0.10	0.04	0.01

前述した通り，本論文ではスキルインデックスの上限を 1.5 としているため，どんなに習熟が進んでも最大値が変わることではない．一方でスキルインデックスが低い作業を担当して習熟を進めることによって最小値が上がっていき，最も苦

手な作業(スキルインデックス最小値)と得意な作業(スキルインデックス最大値)の差が小さくなる。従来手法の場合、タスク担当数の制約により、新人作業者がスキルインデックスの最低値である 0.6 の作業全てを担当するまでオーダ回数を重ねる必要がある。一方で提案手法の場合、新人と熟練者が同じセルになり、新人が全ての作業を担当して熟練は指導に徹することにより、早い段階で全ての作業を経験し習熟を進めている。そのため、提案手法はオーダを重ねるごとにスキルインデックスの平均値が上がっているだけでなく、標準偏差も小さくなっている。これは新人の熟練が進んだ結果、作業者ごとの技能の差が小さくなっているからである。

一方、メイクスパンについては、Case 1 の場合は T4 で、Case 2 の場合は T3 までは従来手法のほうが短い時間となっている(Table 3.6)。これは T1, T2 で新人作業者が多くの作業を担当したため一時的に生産性が下がったものの、早い段階で習熟が進んだため、それ以降は高い生産性を実現出来たことを示している。従来手法と提案手法のオーダ 1 回目のガントチャートを Figure 3.2, Figure 3.3 に示す。新人作業者に多くの作業を割当てている点では共通するが、タスク割当ての制約がある従来手法と比較して、提案手法では新人作業者により多くの作業が割当てられている。

作業を割当てられない作業者がいるということを、単純に『作業者が減る』と考えると、その分の労働力が下がるため生産性にとっては不利な要因となるが、それを承知の上で新人に作業を分担させることにより、早い段階で習熟が進み、単なる全員作業よりも生産性を上げることが可能となる。

Table 3.6 Example of makespan

Order No.	Conventional	Proposed	
		Case 1	Case 2
T1	113.8	142.3	142.3
T2	105.3	133.9	125.8
T3	93.9	123.8	91.2
T4	90.9	89.6	86.4
T5	84.8	83.2	81.6

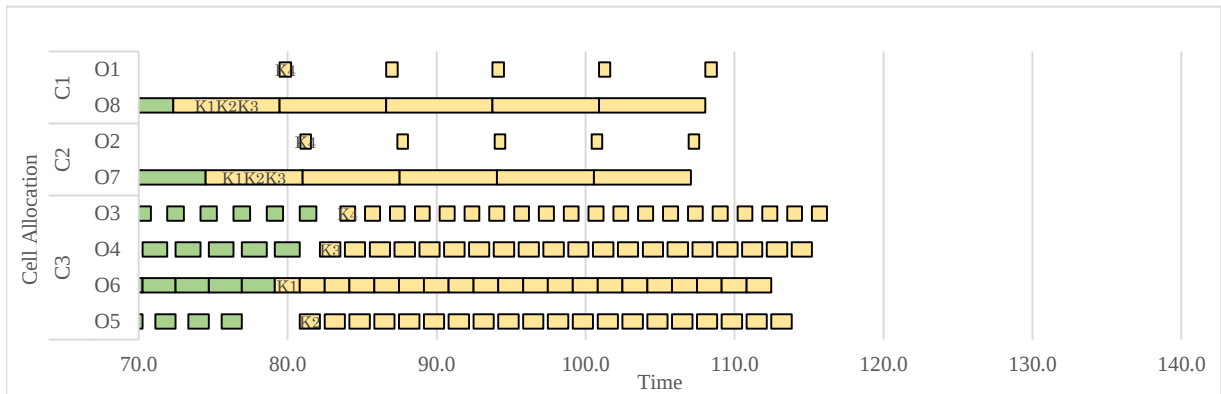
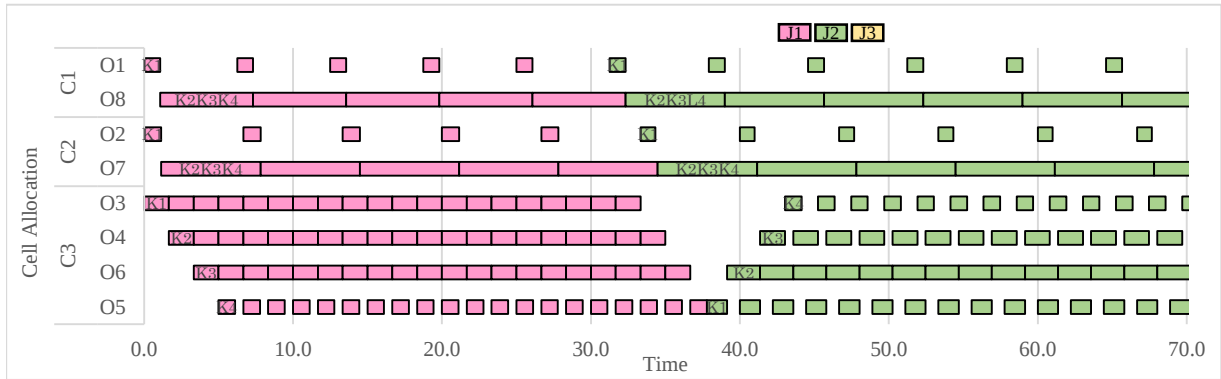


Figure 3.2 Gantt chart (Conventional)

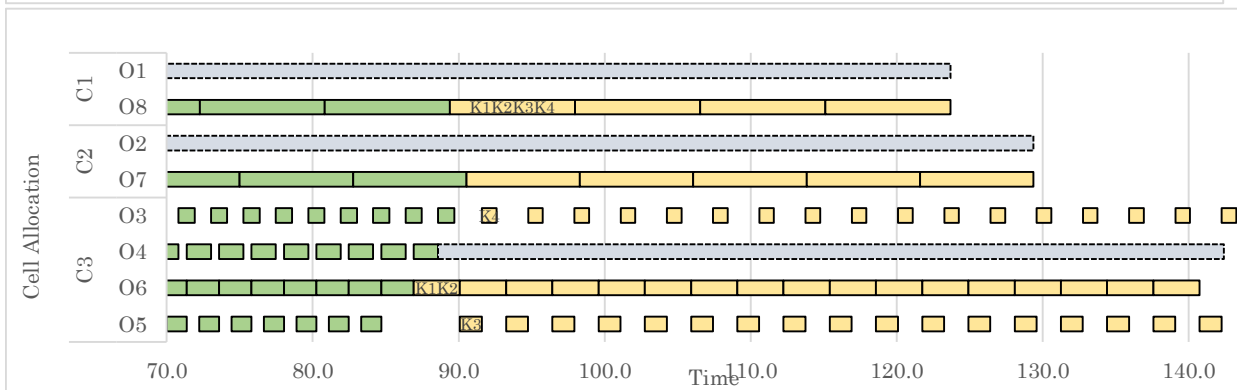
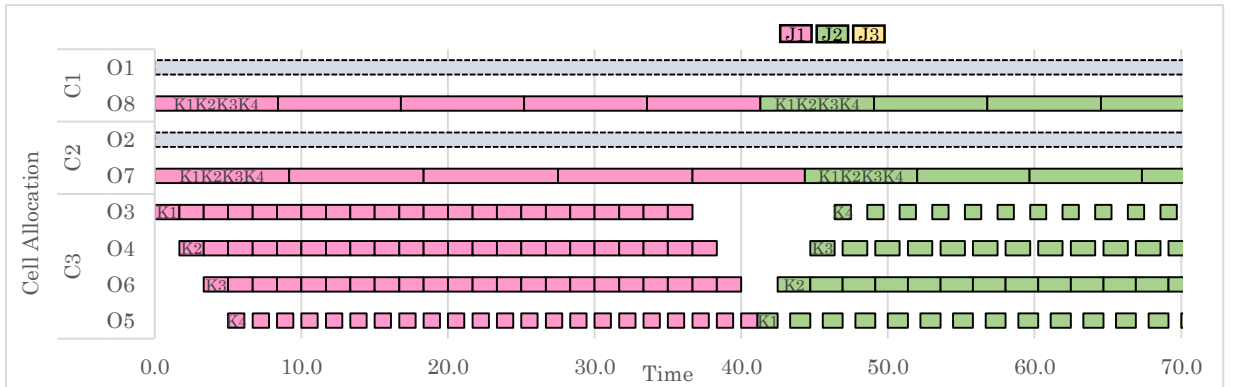


Figure 3.3 Gantt chart (Proposed)

本実験では、従来手法で提案したスキルインデックスを使用して、熟練が新人へ技能伝承をするモデルの検討を行った．具体的には従来手法で設定していた全ての作業員へのタスク割当義務の制約を無くすことによって、セルに配置されるもののタスクは割当てられない作業員の存在を許し、その作業員がセル内のほかの作業員をサポートする役割とみなした．『技能指導』というとは、1つのタスクを熟練者と新人が一緒に行うことをイメージする場合もあるが、ここで注目すべきはあくまで新人側の技能熟達であるから、技能指導をする側である熟練者のスキルインデックスの値を目的関数値の対象外とするためにこのようなモデルとなった．

その結果、訓練の初期段階では熟練者と新人が同じセルに配置されつつも、技能向上のために新人のみが作業を割当てられ、熟練者がそれをサポートするという状況が確認された．また、熟練者に限らず、セル内でどのタスクに対しても一番技能が高い作業員がいる場合、その作業員にもタスクは割当てられず指導側の立場となりえることがわかった．

担当作業のない作業員の存在は、生産性を下げる要因ではあるが、熟練者のサポートにより新人の習熟が早く進むため、早い段階で生産性を取り戻すことが可能である．

3.4.2. 新製品の導入を考慮した配置

新製品の導入時は、新技能に対して全ての作業員は新人作業員レベルとなる．そこで、新製品の導入時には出来るだけ早く一定技能に到達する必要がある．そこで、目的関数を式(22)の訓練必要台数最小化として実験を行う．また、生産対象となる製品品種を6種類としそのうち3品種を新製品とみなす．オーダー回数は10回とし、最初の5オーダーは既存製品の製造、後半の5オーダーは新製品の製造と考える．また、新製品導入時の新技能の割合を33%、50%に分けて比較を行う(Table 3.7)．

Table 3.7 Experimental Condition

Variable Identifier	Values
Production Item	6(include 3 new items)
% of new Task in new items	50% / 33%(about 1/3 of all Task s)

Table 3.8 Results of Remained training quantity (New Task 50%)

Training Quantity	Ave.	Max	Min	S.D.
Initial (Current 3 Items)	450.8	458	441	7.73
After 5 orders	78.8	83	71	5.02
Introduce New 3 Items (50%)	473.6	483	460	9.71
After 10 orders	92.6	105	81	11.10

新技能の導入率が 50% のときのメイクスパンの変化を Table 3.8 に、33% のときのメイクスパンの変化を Table 3.9 に示す．オーダー 1～5 は、同じオーダー内容なので同じ結果となっている．新技能が 50% の場合、オーダー 6 開始前の時点では訓練必要台数の残数がオーダー 1 回目よりも多くなっている．これは熟練技能者であっても半分のタスクの技能がレベル 1 になってしまうからである．

Table 3.9 Results of Remained training quantity (New Task 33%)

Training Quantity	Ave.	Max	Min	S.D.
Initial (Current 3 Items)	450.8	458	441	7.73
After 5 orders	78.8	83	71	5.02
Introduce New 3 Items (33%)	380.0	385	372	5.79
After 10 orders	53.6	63	43	7.33

オーダー 1～5 の訓練必要台数の総和の推移を Figure 3.4 に、新技能の導入率が 50% のオーダー 6～10 の訓練必要台数の総和の推移を Figure 3.5、33% のオーダー 6～10 の訓練必要台数の総和の推移を Figure 3.6 に示す．新技能の導入率がいずれの場合もオーダーの 1 回目から 5 回目は全て同じ結果になる．オーダーを重ねるうちに習熟によりメイクスパンは短縮するが、新製品導入時にメイクスパンが増加する．それは新技能の導入割合が高いほど大きくなる．

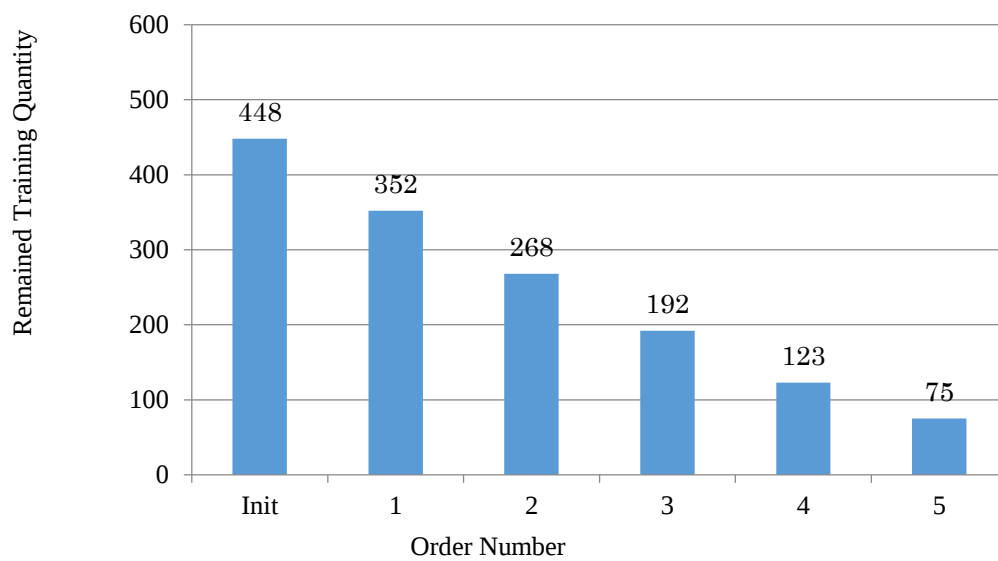


Figure 3.4 Remained training quantity (Order 1-5)

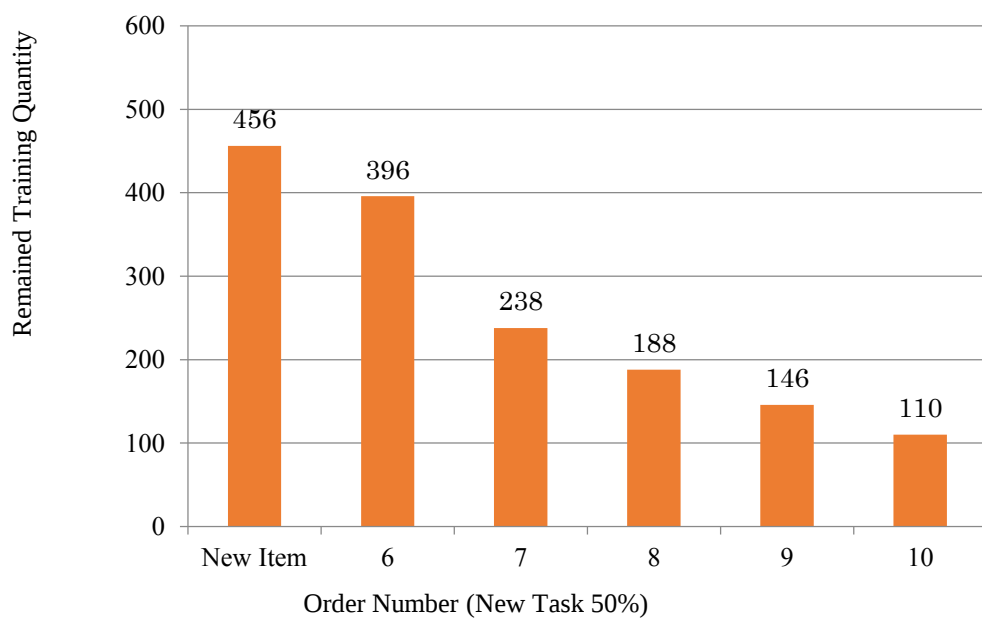


Figure 3.5 Remained training quantity (Order 6-10)
New Task 50%

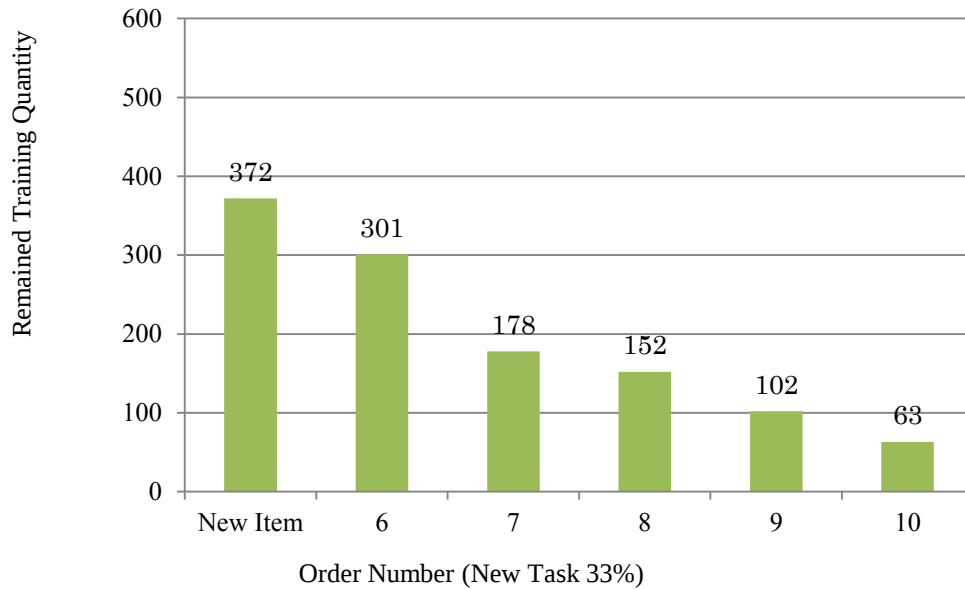


Figure 3.6 Remained training quantity (Order 6-10)

New Task 33%

また，同じ条件で目的関数を一般的な総作業時間最小化とした場合のメイクスパンの推移を Figure 3.7 および Figure 3.8 に示す．オーダの初期はメイクスパン最小化の方が高い生産性を示すが得意な作業を優先して行うために苦手な作業の訓練が行われなない．そのため，作業者ごとの技能にバラつきが生じる．製品が切り替わると新技能のタスクに関しては全ての作業者のスキルインデックスの値が小さくなるために技能のバラつきは顕著となり生産性がなかなか上がらない．その傾向は新技能の割合が高いほど顕著である．

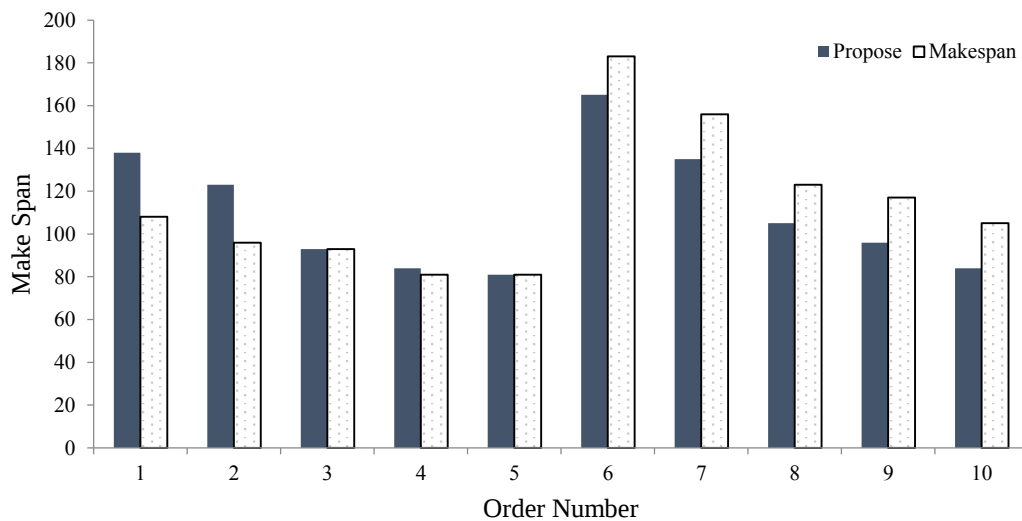


Figure 3.7 Average of Makespan (New Task 50%)

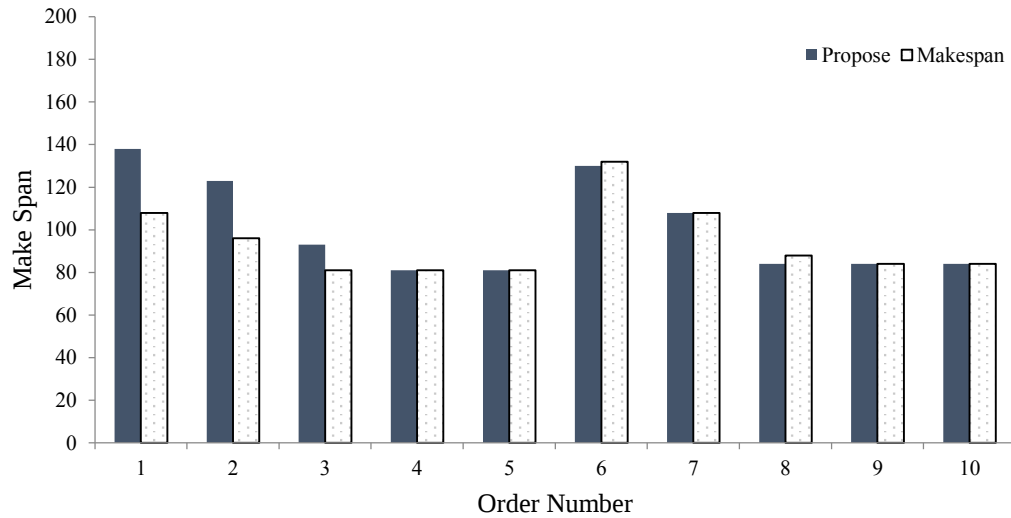


Figure 3.8 Average of Makespan (New Task 33%)

3.4.3. 作業頻度を考慮した配置

作業頻度を考慮する場合，単純にオーダ頻度が異なるケースと，品種の作業構成が異なるケースが考えられる．本研究では基本的に，全てのタスクが異なる作業内容を想定しているが，この場合は頻度を意識しなくてもオーダ発生のたびに，前述のいずれかの目的関数を使用したセル配置とタスク割当てで頻度違いに対応できる．

品種の作業構成が異なる場合，作業要素とタスク番号を切り分けて考える必要があり，式(24)の目的関数を使用する．本実験では，作業構成に差が無い場合(A)と差がある場合(B)を比較する．Table 3.10 の数字は，オーダの中での作業要素の割合である．A は P1～P4 の作業要素が全て 25%の割合で発生することを示す．一方 B の場合は作業要素 P1 と P2 は 33%に対して，P3 は 25%，P4 は 8%であ

Table 3.10 Task Rate

	P1	P2	P3	P4
A: Task no Frequency	0.25	0.25	0.25	0.25
B: Task Frequency	0.33	0.33	0.25	0.08

る．具体的なタスクごとの作業要素の構成を Table 3.11 に示す．

また，作業頻度を考慮した目的関数値の動きを確認するために，作業者構成は作業者の技能が全員 1.0 で差が無い場合と，Table 2.7 同様の構成(技能に差があ

る場合)で比較を行った。

オーダごとの目的関数の推移を作業者の技能に差が無い場合を Figure 3.7 に、差がある場合を Figure 3.8 に示す。技能に差が無く作業頻度にも差が無い場合、

Table 3.11 Example of Task Combination

	Item1				Item1				Item1			
Task No.	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
A: Task no Frequency	P1	P2	P3	P4	P2	P4	P3	P1	P3	P4	P2	P1
B: Task Frequency	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P4

全てのセル配置とタスク組合せパターンが同じ目的関数値を取るため、ランダムで最初に得られた組合せが採用される。また、セル配置とタスク割当の組み合わせは、作業者数 $8! \times$ セル配置パターン $12 \times$ セル数 $3 \times$ タスク組合せパターン $8 = 12,579,840$ 通りとなるため、最初のオーダ後にスキルインデックスの値が更新されたタスクを除いても同じ目的関数値をとる組合せの数は非常に多くなり、目的関数値はそれほど変わらない。習熟によってスキルインデックスの値が大きくなり、目的関数値も大きくなる傾向にはあるがオーダ 1 回目から 5 回目までの目的関数値の差は 0.30 である。一方で、作業頻度に差がある場合は、オーダを繰り返すごとに目的関数値は大きくなっており、オーダ 1 位回目から 5 回目までの差は 1.01 ほどある。これは、作業頻度が高い作業を繰り返し担当しても目的関数値が小さくならないためである。

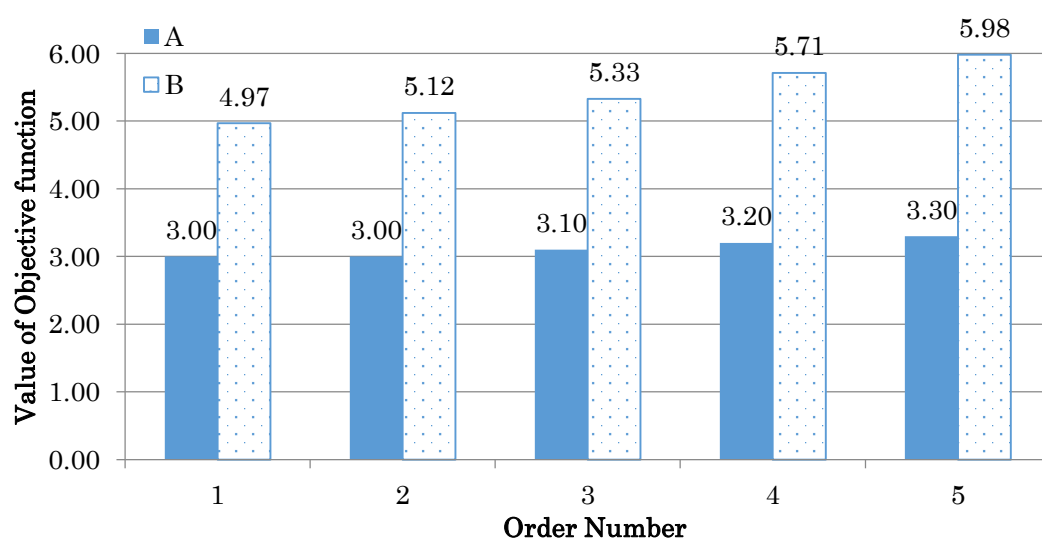


Figure 3.9 Values of Objective Function (No Skill Difference)

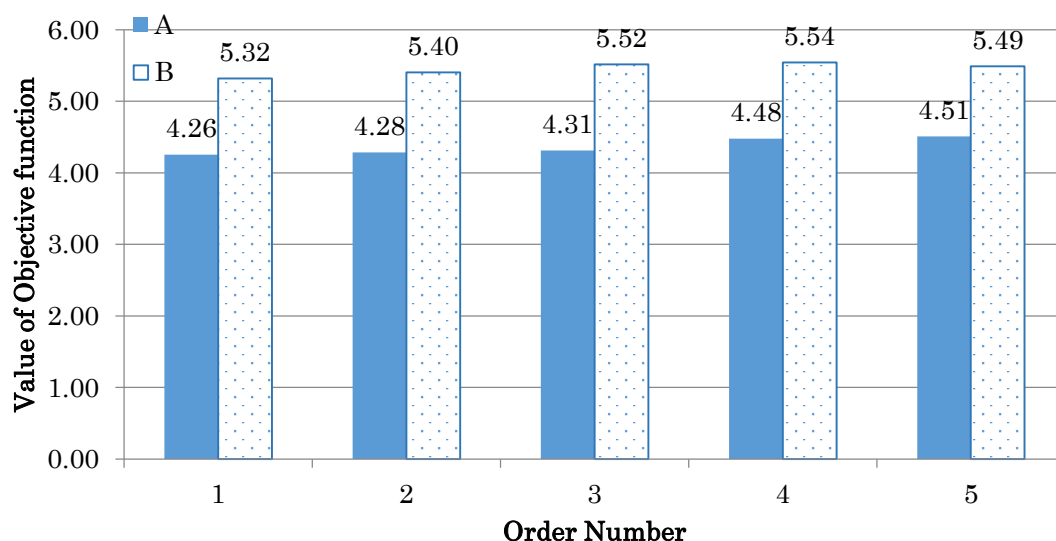


Figure 3.10 Values of Objective Function (Skill Difference)

一方で、作業者の技能に差がある場合、目的関数値はオーダの1回目から5回目までにそれほど差が無く、差作業頻度に差が無い場合で0.25、差が無い場合でも0.27となっている。目的関数値に影響するのは担当するタスクのスキルインデックスの値と、担当する作業要素の数であるが、技能に差がある場合はスキルインデックスの値が目的関数値に大きく影響していることが分かる。

続いてそれぞれの条件下での習熟の様子を確認する。各オーダ終了後のスキルインデックスの平均値について、作業者の技能に差が無い場合をTable 3.12に、作業者の技能に差がある場合をTable 3.13に示す。

オーダ5回目終了後の値で比較すると作業者の技能に差が無い場合が1.20、作業頻度に差が無い場合が1.23でわずかに高い値になった。標準偏差に関しては、全く差が無い初期段階は勿論、作業頻度に差が無い場合はオーダ1回目から5回目まで0.04～0.06、作業頻度に差がある場合でも0.9～1.0と大きな差は出なかった。

本条件では、オーダ開始前に全ての作業者の技能がレベル2である1.0であったため、作業頻度が低いタスクが平均値を大きく下げる要因とはなり得ず、作業頻度が高い作業に対して習熟が進むことによって全体の底上げがなされている。また、スキルインデックスの総和のみならず、作業頻度が指標に含まれているため、各作業者がより多くの種類の作業を担当するタスク割当がなされていると考えられる。

一方で作業者の技能に差がある場合、作業頻度と習熟の平均に大きな差は見られなかった。こちらも作業要素のばらつきよりも作業者のスキルインデックスの

値の差による習熟の影響が大きいことが分かった。

Table 3.12 Average of Skill Index (Without Skill Difference)

	Order number	Init	T1	T2	T3	T4	T5
A:Task no Frequency	Average	1.00	1.06	1.11	1.16	1.18	1.20
	S.D.	0.00	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04
B:Task Frequency	Average	1.00	1.08	1.12	1.17	1.21	1.23
	S.D.	0.00	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09

Table 3.13 Average of Skill Index (With Skill Difference)

	Order number	Init.	T1	T2	T3	T4	T5
A:Task no Frequency	Average	1.02	1.05	1.08	1.09	1.10	1.12
	S.D.	0.23	0.18	0.17	0.15	0.14	0.14
B:Task Frequency	Average	1.02	1.05	1.07	1.09	1.10	1.12
	S.D.	0.23	0.20	0.19	0.17	0.16	0.15

Table 3.14 Example of Cell Allocation & Task Assignment Result
(From Order 1 to 3 / No Skill Difference / Task Frequency / Item4)

		Cell1				Cell2				Cell3			
Task Contents		P3	P1	P2	P4	P3	P1	P2	P4	P3	P1	P2	P4
Frequency Rate		0.33	0.33	0.25	0.08	0.33	0.33	0.25	0.08	0.33	0.33	0.25	0.08
T1	Operator	O1	O1	O2	O2	O3	O3	O4	O5	O6	O6	O7	O8
	Skill Index	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
T2	Operator	O2	O2	O1	O1	O4	O5	O6	O6	O8	O7	O3	O3
	Skill Index	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0
T3	Operator	O5	O5	O5	O4	O6	O1	O3	O7	O2	O8	O8	O8
	Skill Index	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2	1.1	1.1	1.0	1.2	1.1	1.1	1.1

作業頻度を指標に含めた際の配置の動きを確認するため，同じ目的関数値を取る結果の組合せが多い作業者の技能に差が無い場合の作業者のセル配置およびタスク割当ての結果を Table 3.14 に示す．オーダ内容は作業頻度に差があるケースとし，作業頻度がもっとも低い P4 作業を持つ品種 4 のオーダ 1 回目から 3 回目までの結果である．これを見ると分かるように，オーダ 1 回目で P4 を担当した

作業者とオーダ 2 回目で P4 を担当した作業者は全く重複しない．これは，オーダ 1 回目で担当した作業者のスキルインデックスの値が上がるため割当て優先度が下がるためでもあるが，多くの作業者が P4 を担当することによって目的関数値が下がることも影響している．

3.5. 結言

本章では，作業者の訓練計画時における目的別のセル配置およびタスク割当て手法について検討した．熟練作業員から新人作業員への技能伝承を積極的に推進するには，第 2 章で提案したモデルから，全品種に対するタスク担当の制約を外すことによってタスクを割当てられない作業員の存在を許した．その結果，技能の高い熟練作業員にタスクを割当てられない結果が発生した．熟練作業員が作業を担当できないことは生産性への影響が懸念されるが，タスクを割当てられない作業員は周囲の作業員の指導する立場とみなし，同じセル内の作業員の習熟が早く進む場合は十分にその影響を補えることが確認できた．

新製品導入時など新技能が必要な場合は，新技能に対して全ての作業員の技能が一時的にレベル 1 になる．その際は全体の熟練化よりも，レベル 1 の技能をいち早くレベル 2 程度に引き上げる必要がある．そこで，スキルインデックスを上限まで引き上げるのではなく，スキルインデックスの値が 1.0 以下のタスクを減らすことを目的として訓練必要台数の残数最小化の目的関数でセル配置とタスク割当てを行う．この目的関数の場合，スキルインデックスの値が 1.0 以上のタスクに関しては等価とみなされるので，作業時間の制約を満たしながら訓練することが容易になる．

最後に作業頻度が異なるタスク構成の場合は，スキルインデックスを最小化するだけで無く，作業頻度の指標を追加して，積極的にできるだけ多くの種類の作業をするモデルを採用する．スキルインデックスは単純な指標で扱いが容易である分，単純な総和最小化では等価となる組合せが多くなる傾向にある．そこで，スキルインデックスだけでは判定できない作業頻度を組み入れることによって，作業頻度の差を考慮した作業員の訓練計画が実現できた．

4. 日程計画時のセル配置・タスク割当てとスケジューリング

4.1. 緒言

第 3 章で訓練計画時の作業者のセル配置およびタスク割当て手法について述べてきたが、実際に運用が始まると作業者の欠勤やオーダー内容の変更など計画とは異なる条件化で作業をするケースがある[60]。作業者数やオーダー内容の変更に対しては生産性の維持は勿論であるが、作業者訓練という側面からは十分な訓練の遂行も考慮に入れなくてはならない[61]。

前章までの提案手法に共通する前提として、オーダーごとにセル配置とタスク割当てを決定し、同一オーダー内では配置されるセルおよび担当タスクが変わらないという条件があった。セル配置や担当タスクを固定する方法は、セル内フローショップを実現する上でセル内の移動を最小限にし、作業スケジュールの決定を容易にする。しかし、実現場ではセル間を移動して作業をするケースは容易に想定できる。また、訓練に十分な作業量を終えているにも関わらず 1 つのオーダーが完了するまで同じタスクをやり続けなければならないという状況も十分に考えられる。これは効率的な技能向上を目指すうえで大きな制約となる。また、セル生産システムとは本来限られた大きさのセル機械内を自由に動き回って必要な作業を必要最小限の製造資源で実現するものである。

そこで本章では、第 2 章で提案したスキルインデックスと作業者配置計画を応用して、日程計画時の状況に応じた作業者配置計画およびスケジューリング問題へと適用する方法について述べる[62]。前提としては、作業者数やオーダー内容の変更が当日の作業前に分かっているとし、その日の日程計画を見直す状況を想定する。具体的には、作業者のセル移動を許す配置方法と、タスクの割当てを 1 台単位とし、同一オーダー内でも担当作業を柔軟に切替えることによって担当するタスクとその数量を決定する配置の提案をする。同時に、狭いセル内を複数の作業者が入替わりながら作業をする上で、遊休や無駄な移動・段取りを避ける作業スケジュールの提案を行い、計算機実験によってその有効性を検証する。

4.2 節では、より柔軟に作業者配置と作業スケジュールを決定するために、第 2 章の提案手法を一部変更した求解アルゴリズムと定式化について述べる。

4.3 節では訓練目的が異なる作業者配置問題に対して、それぞれの目的関数を適用した計算機実験を行い特性の違いを比較する。最後に 4.4 節で本章をまとめ

る.

4.2. 提案アルゴリズム

4.2.1. 求解アルゴリズム

作業者のセル移動を許す配置方法の場合，制約式(5)を式(30)に変更し，セルを移動できるとする.求解の流れは Figure 2.3 と同じである.

$$\sum_{c=1}^C x_{tci} \geq 1 \quad (\forall_{t,i}) \quad (30)$$

一方タスクの割当てを 1 台ごとに決定する場合の求解の流れを Figure 4.1 に示す. タスクの割当てを 1 台ずつすることになるため，最初にオーダごとの作業者のセル配置と 1 台ごとのタスク割当てを決定した後に， Simulated Annealing (SA)のアルゴリズムを使用してセルごとに作業スケジューリングを行う.

開始後，まず<2>でスキルインデックスの初期値を設定して，<3>で品種番号，台数番号を初期化する. <4>でセルの配置をした後，各品種の 1 台ごとの割当てを決定する. 1 台ごとにスキルインデックスの値を更新しながら割当てを進め，1 品種について全台数に対して割当てが修了したら<9>で台数番号を初期化し，次の品種に進む. 全品種終了後，<12>でセル配置とタスク割当ての結果を出力し，作業スケジューリングを行うため SA のアルゴリズムに入る. <13>でステップ数 n およびその時の温度 $Temp$ を初期化した後，<14>で First In First Out(FIFO)のルールを用いて初期解を得る. <15>で，ランダムに選択したタスクを交換する交換近傍を作成し，<16>で受容判定を行う. $\Delta x < 0$ の場合は<17>で最良解の更新を行う. それ以外で受理された場合は最良解を更新せずに<18>の冷却判定に進む. 終了条件はステップ数 n で判定する.

終了条件に満たない場合は<23>で受容されているか否かを確認し，受容されていれば<15>の近傍作成，棄却であれば<14>の初期解作成に戻る.

本研究では，作業者のセル配置およびタスク割当てとスケジューリングに別の目的関数を用意し，それぞれ目的関数 1(セル配置とタスク割当て)，目的関数 2(スケジューリング)と呼ぶ.

4.2.2. セル配置とタスク割当て

1 台毎にタスク割当てする場合の目的関数 1 は目的関数式(4)に作業台数を示す変数 $q(1, 2, 3, \dots, Q)$ を追加した目的関数式(31)とする. 各作業者のスキルインデックスの値 s_{jki} は所与であり，決定変数は x_{tci} と y_{tjkqi} である. 1 台毎に作業者のスキルインデックスの値が更新され，次の配置を決定する. これは，少しずつ

でも習熟が進んでいるのを表現すると同時に，オーダ開始段階にスキルインデックスの値が同じであった作業者との差別化をはかるためである．

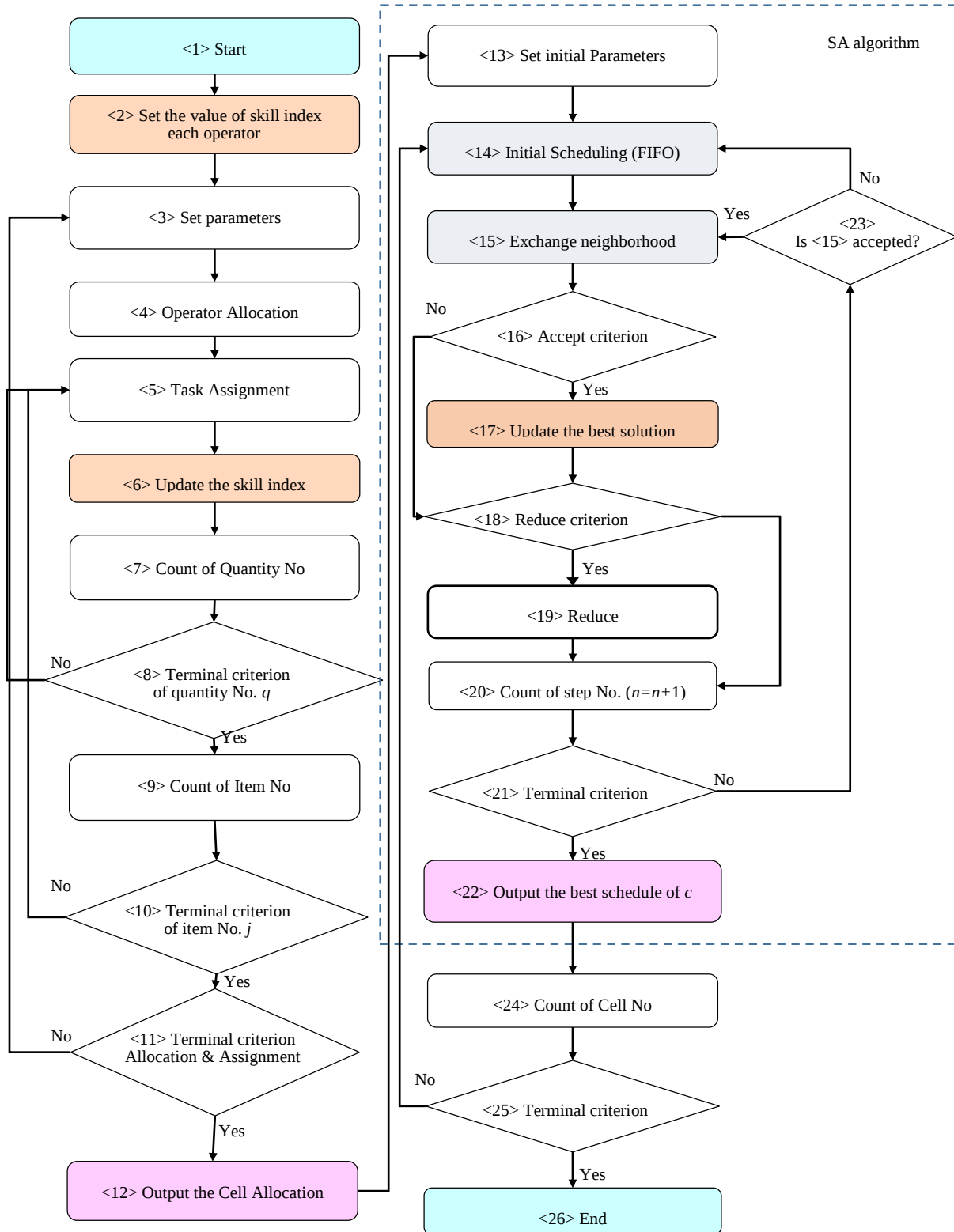


Figure 4.1 Flow Chart

$$\min \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjkqi} \quad (\forall_t) \quad (31)$$

1 台ごとのタスク割当てにより，制約条件は式(32)～式(34)のように変更される．

$$\sum_{i=1}^I x_{tci} y_{tjkqi} = 1 \quad (\forall_{t,c,j,k,q}) \quad (32)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{tjkqi} \geq 1 \quad (\forall_{t,j,q,i}) \quad (33)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{tjkqi} \leq K \max_j \quad (\forall_{t,j,q,i}) \quad (34)$$

セルへの配置はオーダごととし，品種を切替えるごとにセルを移動できるとした式(30)を式(5)に戻す．

$$\sum_{c=1}^C x_{tci} = 1 \quad (\forall_{t,i}) \quad (5)$$

各セルのスキルインデックスの平均および，全体のスキルインデックスの平均は各作業者の 1 台目($q=1$)の作業時間を使用して式(35)，式(36)で求める．

$$AveIdx_{tcj} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjk1i} / \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{tci} y_{tjk1i} \quad (\forall_{t,c,j}) \quad (35)$$

$$TotalAveIdx_t = \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjk1i} / \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{tci} y_{tjk1i} \quad (\forall_t) \quad (36)$$

4.2.3. スケジューリング

目的関数 2 のスケジューリングに関しては各セルのメイクスパン最小化の式(26)を目的関数とする．オーダ内容が変更する場合は，1 台ごとにタスクの割当

てが変わるため製品の投入順序は任意とする．作業時間 PT_{tcjkq} は式(2)の $t1$ を最初の作業時間 ST_{jk}/s_{jki} に，作業台数 n を割当てた時点で何台作業していたかに置き換える事により算出する(式(37)).

$$PT_{tcjkq} = x_{tci} y_{tjkqi} ET_{jki} = \frac{ST_{jk}}{s_{jki}} \left/ \left(\sum_{\forall q} y_{tjkqi} \right) \right.^\alpha \quad (x_{tci} = 1, y_{tjkqi} = 1) (\forall_{t,c,j,k,i}) \quad (37)$$

同一オーダ内で様々なタスクを担当することから，スケジューリングに関して式(38)の制約が追加され，同一セル内で複数の作業者が同じタスクを同時作業することは出来ない．

$$x_{tci} BT_{tcjkq} - x_{tci'} BT_{tcjkq'} \geq PT_{tcjkq} \quad (\forall_{t,c,j,k}) (i \neq i', q \neq q') \quad (38)$$

なお， BT_{tcjk} と $BT_{tcjk'}$ には式(39)の関係がある．

$$\begin{aligned} & (BT_{tcjkq} - BT_{tcjk'q''})(BT_{tcjk'q''} - BT_{tcjk'q'}) < 0 \\ & (\forall_{BT_{tcjkq}, BT_{tcjk'q'}, BT_{tcjk'q''}}) (BT_{tcjk'q''} \neq BT_{tcjkq}, BT_{tcjk'q'}) (BT_{tcjkq} > BT_{tcjk'q'}) \end{aligned} \quad (39)$$

4.3. 計算機実験

ここでは，急な欠勤または担当変更により作業人数が変わる状況をセルの移動を許す手法で，オーダ内容が不安定な状況を1台毎のタスク割当ての手法を用いて計算機実験を行う．

4.3.1. 作業人数が変わる状況

セル設備および作業者の設定条件は Table 2.8 と同等とする．作業数量はこの実験では50台とし，セルごとのタクトタイムをもとに全セルともほぼ同じメイクスパンになるよう割当て，スキルインデックスの平均値から求めた平均作業時間から総作業時間の制約を設けた．

また，提案手法の有効性を確認するためにセル配置，タスク割当ての条件は以下の3パターンを設定した．

Case 1：作業者が全員揃っているときの提案手法(制約式(30))

Case 2：Standard 作業者が1名抜けた場合の従来手法(制約式(5))

Case 3：Standard 作業者が1名抜けた場合の提案手法(制約式(30))

Case 1 で当初の作業人数でのセル配置とタスク割当てを得て，作業者が1名抜けた場合の結果を Case 3 と比較する．一方で，本来，訓練計画時のセル配置とタ

スク割当ては同一オーダ内でのセル配置は固定であるので、訓練計画の段階で人員が分かっているならば Case 2 の手法でセル配置とタスク割当てをしていたので、同じ条件での手法の違いを Case 3 と比較する。今回は、Case 2 と Case 3 において Standard レベルの作業員 O4 が抜けた場合を想定した。

Table 4.1 Results of Allocation & Assignment (Case 1)

Cell	C1				C2				C3			
Item	J1											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O6	O2	O7	O7	O3	O3	O5	O4	O8	O8	O8	O1
Skill Index	1.1	1.5	0.6	0.6	0.9	1.2	1.2	1.1	0.7	0.6	0.6	1.5
Sum of Skill Index	3.8				4.4				3.4			
Exe. Time	1.4	1.0	2.5	1.7	1.7	1.3	1.3	0.9	2.1	2.5	2.5	0.7
Tact Time	4.17				2.92				7.14			
Quantity	16				24				10			
Item	J2											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O7	O7	O2	O6	O5	O5	O3	O4	O1	O8	O8	O8
Skill Index	0.6	0.8	1.5	0.9	1.1	1.2	1.0	1.1	1.4	0.8	0.6	0.6
Sum of Skill Index	3.8				4.4				3.4			
Exe. Time	2.5	2.5	1.0	1.1	1.4	1.7	1.5	0.9	1.1	2.5	2.5	1.7
Tact Time	5.00				3.03				6.67			
Quantity	15				24				11			
Item	J3											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O6	O2	O7	O7	O4	O3	O3	O5	O8	O8	O8	O1
Skill Index	0.9	1.3	0.8	0.8	1.2	1.1	1.2	1.1	0.6	0.6	0.7	1.3
Sum of Skill Index	3.8				4.6				3.2			
Exe. Time	1.7	1.2	1.9	1.3	1.3	1.4	1.3	0.9	2.5	2.5	2.1	1.7
Tact Time	3.13				2.61				7.14			
Quantity	19				23				8			
Working Time	203.74				203.64				202.10			

それぞれのケースにおける配置結果の一例を Table 4.1～Table 4.3 に、ガントチャートを Figure 4.2～Figure 4.4 に示す。

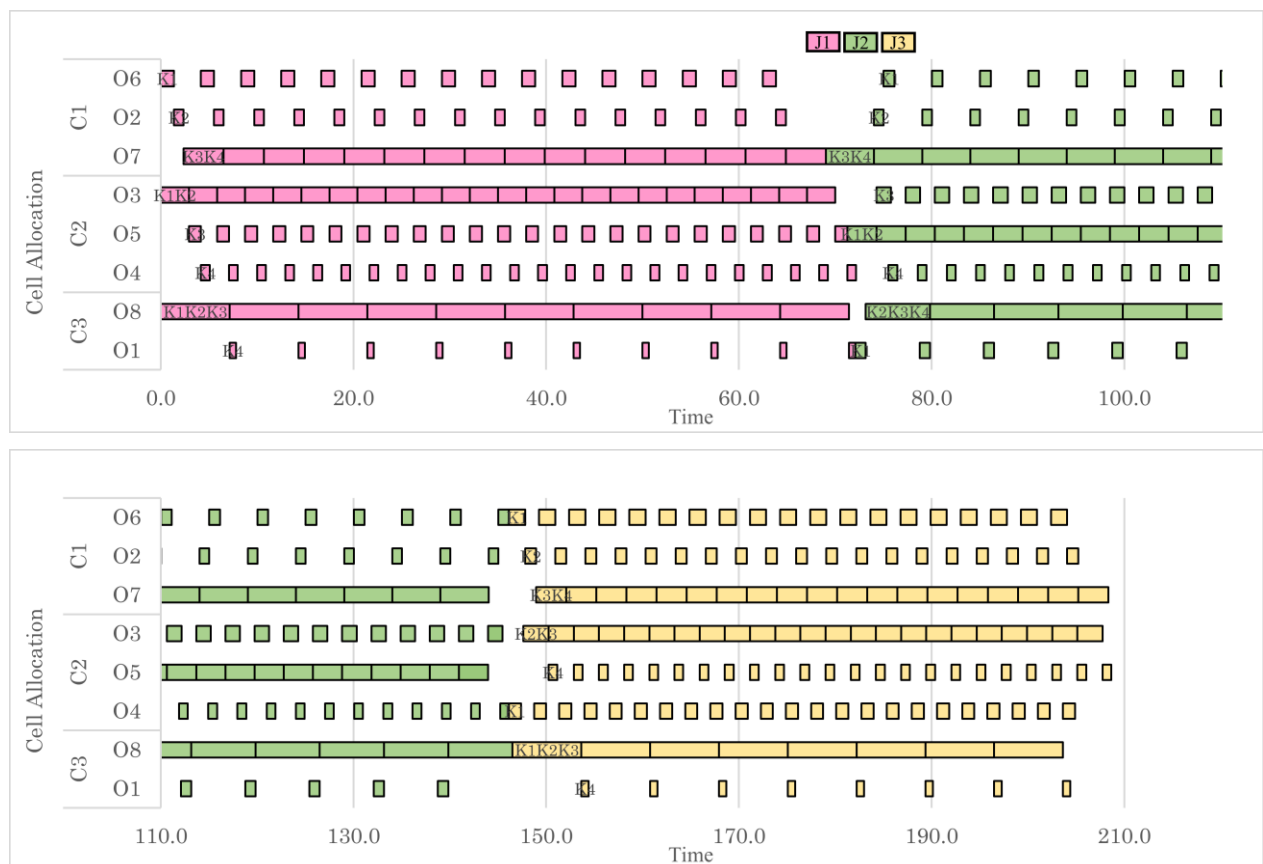


Figure 4.2 Gantt chart (Case1)

Table 4.1 は、作業計画時の作業員全員が揃っているときの提案手法の配置である。複数セルへの配置を許しているが結果的に移動は発生しなかった。これは作業員の移動によって作業時間を調整する必要が無かったことを示している。その理由として **Standard** 作業員(標準作業員)で構成される複数人セル(C2)が、総作業時間の制約を十分に満たす作業台数を割当てられており、**Newcomer** レベルの作業員(新人作業員)と **Expert** レベルの作業員(熟練作業員)を含む複数人セル(C1および C3)への割当て台数が少なく調整の必要が無かったことが挙げられる。また、新人作業員の作業台数としては Case 1 の時には O7 は 6 つのタスクを、O8 は 8 つと O8 が多く作業している印象があるが、それぞれの割当て台数をかけると O7 は 66 台、O8 は 62 台と総作業台数は O8 の方が少ない。これは、担当するタスクの数が多いと作業時間がかかってしまい割当て台数が少なくなるからである。Table 4.2 は作業員 O4 が抜けたときの、従来手法によるセル移動を許さない場合の配置結果である。メイクスパンの制約を設けているため、新人作業員が担当するタスク数が少ない。作業員が全員揃っている Case 1 の時には新人作業

者の O7 は 6 つのタスクを，O8 は 8 つのタスクを担当していたが，Case 2 では O7 が 3 つ，O8 が 5 つとそれぞれ担当タスクが 3 つずつ減っており，その分を Expert や Standard が受け持っている．その一方で，生産性が最も高くなる 4 人構成のセルがないため，セルごとのタクトタイムの差が小さくなり，セルごとの担当台数の差も小さくなった．

Table 4.2 Results of Allocation & Assignment (Case 2)

Cell	C1				C2				C3			
Item	J1											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O6	O5	O5	O5	O1	O1	O8	O8	O3	O3	O7	O2
Skill Index	1.1	1	1.2	0.9	1.4	1.5	0.6	0.8	0.9	1.2	0.6	1.5
Sum of Skill Index	4.2				4.3				4.2			
Exe. Time	1.4	1.5	1.3	1.1	1.1	1.0	2.5	1.3	1.7	1.3	2.5	0.7
Tact Time	3.86				3.75				2.92			
Quantity	15				15				20			
Item	J2											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O6	O6	O6	O5	O1	O1	O1	O8	O2	O7	O3	O3
Skill Index	1.1	0.9	1.2	1.0	1.4	1.5	1.5	0.6	1.5	0.8	1	0.9
Sum of Skill Index	4.2				5.0				4.2			
Exe. Time	1.4	2.2	1.3	1.0	1.1	1.3	1.0	1.7	1.0	2.5	1.5	1.1
Tact Time	4.84				3.40				2.61			
Quantity	12				17				21			
Item	J3											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O6	O6	O6	O5	O8	O8	O1	O1	O7	O3	O3	O2
Skill Index	0.9	1.0	1.0	1.1	0.6	0.6	1.3	1.3	0.6	1.1	1.2	1.4
Sum of Skill Index	4.0				3.8				4.3			
Exe. Time	1.7	1.5	1.5	0.9	2.5	2.5	1.2	0.8	2.5	1.4	1.3	0.7
Tact Time	4.67				5.00				2.61			
Quantity	13				13				24			
Working Time	175.18				177.84				183.49			

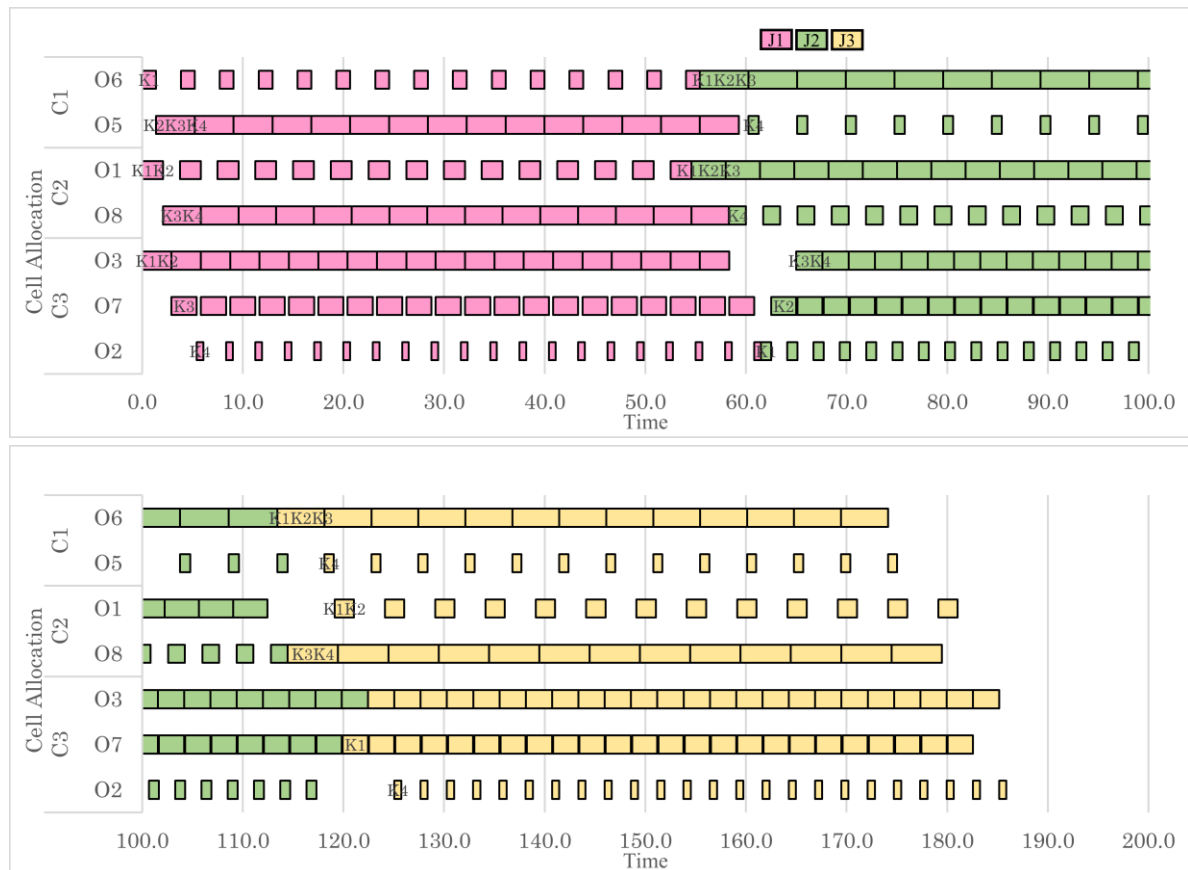


Figure 4.3 Gantt chart (Case 2)

Table 4.3 は Case 3 の作業員 O4 が抜けたときの、提案手法による作業員のセル移動を許す配置結果である．このケースでは熟練作業員によるセルの移動が見られた．熟練作業員の O1 は品種 1(J1)では新人作業員 O8 との 2 人セル(C2)、品種 2(J2)では新人作業員 O7 との 2 人セル(C3)となり、品種 3(J3)では標準作業員 3 人とともに 4 人セル(C1)に配置された．また熟練作業員の O2 は J1, J2 では 4 人セル(C1)に配置されているが、J3 で新人作業員 O7 との 2 人セル(C3)に配置されている．一方で、新人作業員の O7 が J1 で、新人作業員の O8 が品種 2(J2)と品種(J3)で 1 人セルに配置された．作業台数も 4 人セルの C1 は 29～32 台を割当てられているのに対して、2 人セルは 12 台～14 台、1 人セルは 6～8 台と大きく差がある．

作業終了後の Standard, Newcomer レベルの作業員のスキルインデックスの平均値を Table 4.4 に示す．ここで、Expert の結果を除いたのは、Expert は標準以上の技能を持っており、習熟の変化がほとんど無いためである．この表より Standard 作業員に関してはいずれのパターンでも同等の習熟を示しているが、Newcomer 作業員は提案手法の Case 3 がわずかに Case 1 を上回り、Case

1 と同等の習熟を実現している．これは，**Newcomer** 作業者が多くのタスクを担当できたため，全体の習熟が上がった結果と考えられる．

本実験では，複数セルへの配置を許すことによって作業人数の変化に対応しつつ，生産性を維持しながら作業員の訓練を優先的に行う配置とスケジューリングの検討をした．その結果，セル配置を固定した従来手法と比較して高い習熟が得られることが分かった．

Table 4.3 Results of Allocation & Assignment (Case 3)

Cell	C1				C2				C3			
Item	J1											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O3	O2	O6	O5	O1	O1	O8	O8	O7	O7	O7	O7
Skill Index	0.9	1.5	0.9	0.9	1.4	1.5	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6
Sum of Skill Index	4.2				4.3				2.4			
Exe. Time	1.7	1.0	1.7	1.1	1.1	1.0	2.5	1.3	2.5	2.5	2.5	1.7
Tact Time	1.67				3.75				9.17			
Quantity	30				14				6			
Item	J2											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O5	O6	O3	O2	O8	O8	O8	O8	O7	O7	O1	O1
Skill Index	1.1	0.9	1.0	1.5	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.8	1.5	1.3
Sum of Skill Index	4.5				2.8				4.2			
Exe. Time	1.4	2.2	1.5	0.7	1.9	2.5	2.5	1.7	2.5	2.5	1.0	0.8
Tact Time	2.22				8.54				5.00			
Quantity	29				8				13			
Item	J3											
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Operator	O3	O1	O5	O6	O8	O8	O8	O8	O7	O7	O2	O2
Skill Index	0.9	1.5	1.1	1.1	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	1.3	1.4
Sum of Skill Index	4.6				2.6				4.0			
Exe. Time	1.7	1.0	1.4	0.9	2.5	2.5	2.1	1.4	2.5	2.1	1.2	0.7
Tact Time	1.67				8.57				4.64			
Quantity	32				6				12			
Working Time	170.18				169.11				175.90			

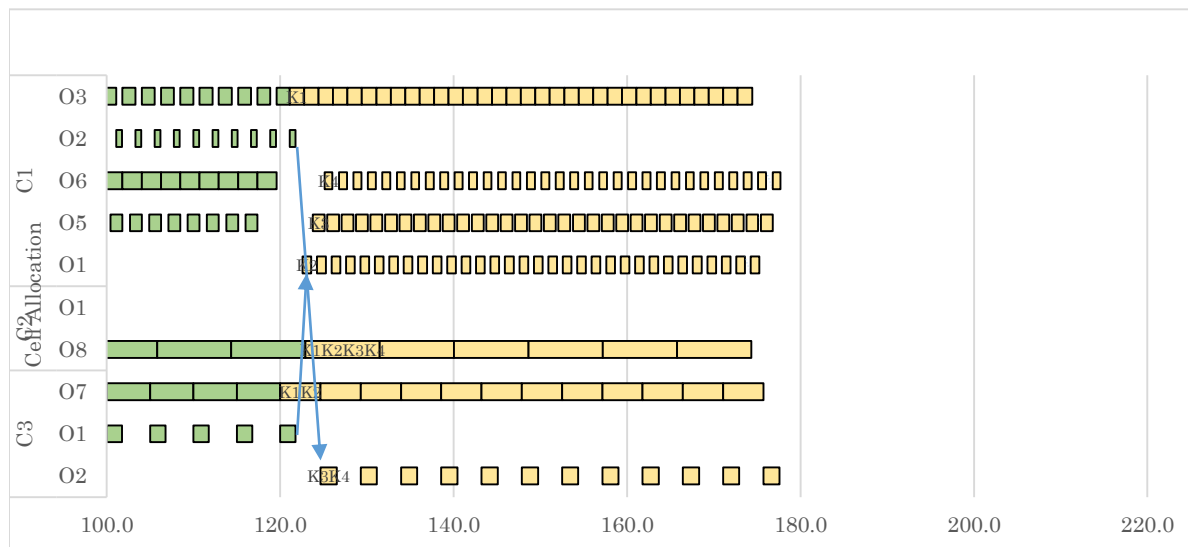
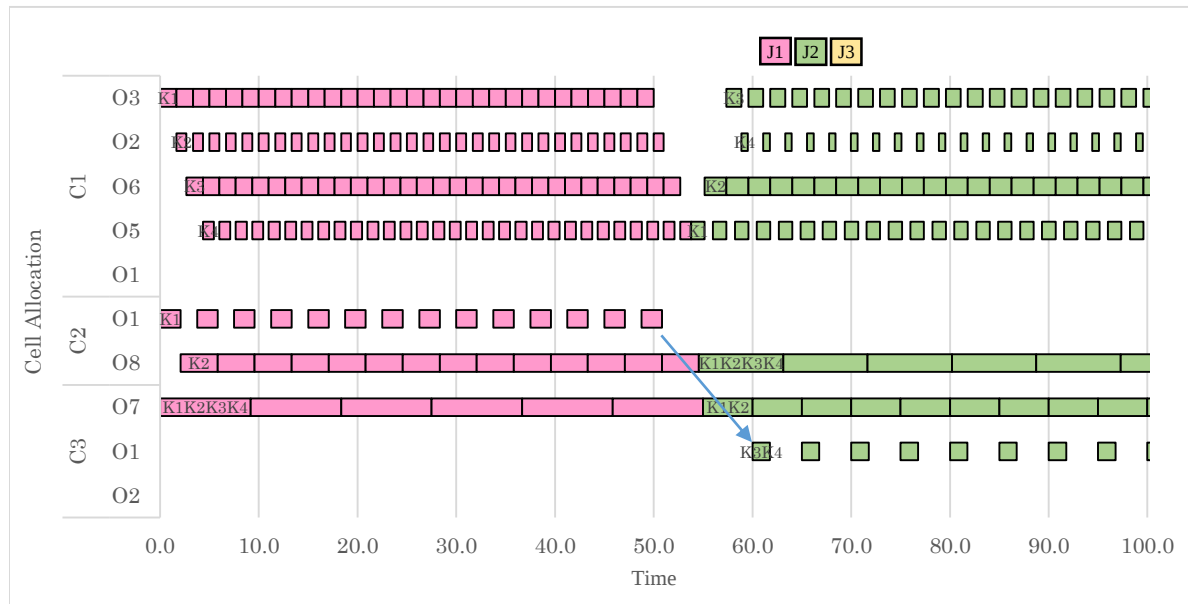


Figure 4.4 Gantt chart (Case 3)

Table 4.4 Basic statistic of Skill Index (Operator O3 - O8)

	Standard				Newcomer			
	Ave	Max	Min	S.D.	Ave	Max	Min	S.D.
Initial	1.0	1.1	0.9	0.08	0.7	0.8	0.6	0.08
Case 1	1.1	1.4	0.9	0.12	0.8	1.0	0.6	0.11
Case 2	1.1	1.4	0.9	0.13	0.7	1.0	0.6	0.12
Case 3	1.1	1.4	0.9	0.15	0.8	1.0	0.6	0.11

4.3.2. オーダ内容が変更される状況

対象となるセルの構成及び作業者の技能の設定は Table 2.8 と同等とする．オーダ状況については，計画段階では同じ内容のオーダが繰り返し発生する状況とし (Case 1:Planned)，日程計画時にオーダ内容が異なる状況 (Case 2 : Order Change)を用意した．計画段階のオーダ内容およびオーダ変更の一例を Table 4.5 に示す．オーダ内容の変更については試行ごとにオーダ内容を変更したが，T1～T5 までのオーダ数量の総和が計画段階と等しく，全品種 150 台ずつ合計 450 台となるように設定した．

本研究の有効性を検証するために，同一オーダ内ではタスク割当てを固定とした式(4)の訓練計画時における目的関数との比較を行う．訓練計画時の作業数量はセルごとのタクトタイムを求め，その比率で配分する．配置と割当ての目的関数は式(31)とする．各セルの作業台数についてはタクトタイムを式(14) のとおりセル内で一番が長い作業時間としてそれを基に式(15)で決定する．

Table 4.5 Order Condition

	Case 1:Planned					Case 2:Order Change				
	J1	J2	J3	Order Subtotal	Total	J1	J2	J3	Order Subtotal	Total
T1	30	30	30	90	90	10	10	30	50	50
T2	30	30	30	90	180	30	20	0	50	100
T3	30	30	30	90	270	50	40	40	130	230
T4	30	30	30	90	360	0	80	50	130	360
T5	30	30	30	90	450	60	0	30	90	450
Total	150	150	150	450		150	150	150	450	

Table 4.5 で示した条件下での計画段階における習熟の経過の一例としてスキルインデックス平均値と標準偏差の推移を Figure 4.5 に示す．

全ての品種が同数ずつ生産するオーダが繰り返される状況下で，タスク割当てを 1 台ずつ決定する提案アルゴリズムの有効性について従来手法および作業時間最小化を目的関数とした一般手法の結果と比較・検討する．Case 1 は全オーダとも全品種 30 台ずつのオーダ内容である．オーダ 1 回目(T1)完了後のスキルインデックスの平均値は提案手法(Proposed)が 1.33, 従来手法(Conventional)は 1.28, 作業時間最小化(Makespan)は 1.11 となっている．これは，従来手法がオーダの開始時点でのスキルインデックスの値だけを対象にタスク割当てをしているのに

対し，提案手法は 1 台ごとにスキルインデックスの値を更新して次のタスク割当てを決定するため，その時点でスキルインデックスの値が低い作業者が優先的に選択されることにより全体的により習熟が進み，スキルインデックスの値が大きくなったと考えられる．作業時間最小化の場合は，スキルインデックスの値が高い作業者が優先的に選ばれる傾向にあるため，スキルインデックスの値が低いままであったことから，作業者の底上げがなされなかったと考えられる．

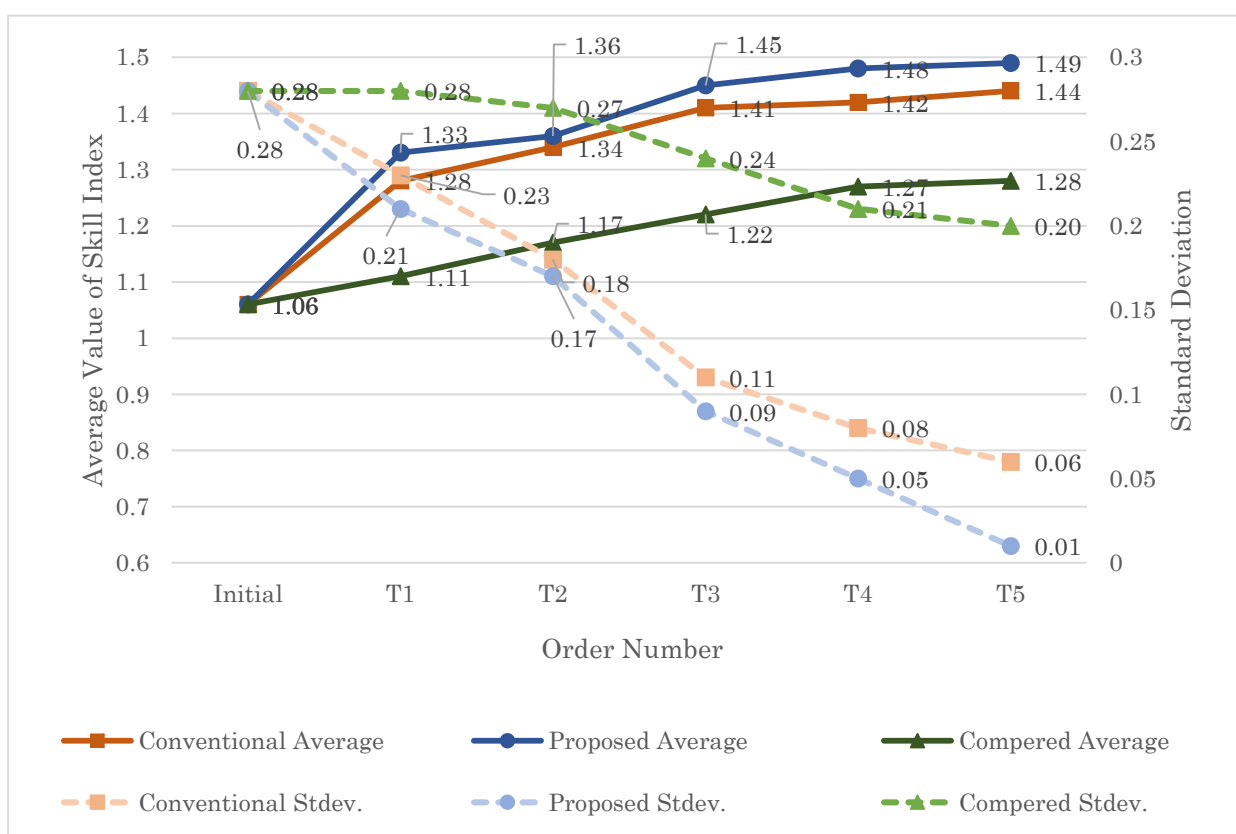


Figure 4.5 Average Values of Skill Index (Case 1: Planed)

また，提案手法ではスキルインデックスの平均値が上がるだけでなく，ばらつきも小さくなっていった．特に T4 完了後はスキルインデックスの平均が 1.48，標準偏差は 0.05 となり作業者全員が熟練作業者となった．この理由として 1 台ごとに作業者のタスク割当てを決める事によって，同じオーダ内でも様々なタスクを担当することが可能となり，よりまんべんなく熟練が進んでいると考えられる．最終的には T5 完了後のスキルインデックスの平均値は提案手法が 1.49，比較手法が 1.28 とよりも 0.21 低い結果となった．

**Table 4.6 Results of Cell Allocation & Task Assignment
(1st order Conventional)**

Cell No.		C1		C2				C3	
Operator		O2	O7	O3	O4	O5	O6	O1	O8
		Expert	Newcomer	Standard	Standard	Standard	Standard	Expert	Newcomer
J1	K1	-	10	10	-	-	-	-	10
	K2	-	10	-	10	-	-	-	10
	K3	-	10	-	-	-	10	-	10
	K4	-	10	-	-	10	-	-	10
J2	K1	-	10	-	-	10	-	-	10
	K2	-	10	-	-	-	10	-	10
	K3	-	10	-	10	-	-	-	10
	K4	-	10	10	-	-	-	-	10
J3	K1	-	10	-	-	-	10	-	10
	K2	-	10	-	10	-	-	-	10
	K3	-	10	-	-	10	-	-	10
	K4	-	10	10	-	-	-	-	10
Quantity		0	120	30	30	30	30	0	120

3つの手法の違いによる、作業者のセル配置とタスク割当ての違いを比較する為に、そこで Figure 4.2 の際のオーダ 1 回目のセル配置とタスク割当ての一例を従来手法での結果を Table 4.6 に、作業時間最小化での結果を Table 4.7 に、提案手法での結果を Table 4.8 に示す。表中の数字はそれぞれの作業者が担当するタスクの台数である。また一番下の **Quantity** は割当てられたタスクの総数を示す。

Table 4.6 を見て分かるとおり、熟練作業者の O1, O2 はそれぞれ新人作業者 O7, O8 と 2 人セルに配置され、タスク割当てされない技能指導セルとなっている。新人作業者は熟練作業者の指導のもとで 1 人セル同様に全てのタスクを担当する。技能指導セルは他のセルと違って習熟率を高く見なしているうえ、本実験では作業台数を等分しているため、新人作業者の担当タスク数の総数 120 ずつとなり、初期のスキルインデックスの値で作業台数を配分する従来手法よりも多くなるため習熟が早く進む。一方で、同じオーダ内では担当するタスクが変わらないので割当てられなかったタスクの習熟は全く進まない。標準作業者 O3~O6 は 4 人セルを構成し、一人 1 タスクずつ割当てられているので、作業数は 30 ずつとなっている。

Table 4.7 Results of Cell Allocation & Task Assignment
(1st order Minimized Execution Time)

Cell No.		C1			C2			C3	
Operator		O1 Expert	O4 Standard	O7 Newcomer	O2 Expert	O5 Standard	O8 Newcomer	O3 Standard	O6 Standard
J1	K1	-		10	-	10	-	10	-
	K2	-	10	-	-	-	10	10	-
	K3	10		-	10	-	-	-	10
	K4	10		-	10	-	-	-	10
J2	K1	10		-	-	-	10	-	10
	K2	-		10	10	-	-	10	-
	K3	-	10	-	-	10	-	10	-
	K4	10		-	-	10	-	-	10
J3	K1	10		-	-	10	-	10	-
	K2	-	10	-	10	-	-	10	-
	K3	10	-	-	10	-	-	-	10
	K4	-		10	-	-	10	-	10
Quantity		60	30	30	50	40	30	60	60

Table 4.7 の作業時間最小化の場合は、得意な作業を優先的に作業者に割当てるため、新人作業者に割当てられるタスクが少なくなる。この例では、新人作業者の O7 と O8 はそれぞれ 30 ずつしか担当しない。一方熟練作業者の O1 が 60 台、O2 が 50 台を担当して作業時間短縮に貢献している。作業時間最小化の場合、オーダ 1 回目(T1)で得られたタスク割当てがその後のオーダでも繰り返し割当てられる傾向にあった。これは習熟により作業時間が短縮するため、優先度がますますからである。そのため、オーダ 3 回目(T3)完了時点で得意な作業に特化した作業割当てのパターンがほぼ固定した。本実験ではスキルインデックスの値に上限を設定しているため、上限に達した作業を繰り返し割当てられることによって全体の習熟も進まない。

一方、Table 4.8 の提案手法の場合は必ずしも新人作業者と熟練作業者が同じセルに配置されるとは限らない。この例では新人作業者はいずれも 3 人セルに配置されているが、1 台ごとにタスクの割当てを変えているため全てのタスクをまんべんなく作業できている上、品種 1(J1)のように担当台数が従来手法より同等または多いものもある。新人作業者の習熟が進み、標準作業者と同程度になると配

置の優先度も同等になるため、標準作業者も多くのタスクを担当できるようになり同じくまんべんなく訓練できるため、技能の差が小さくなったと考えられる。

Table 4.8 Results of Cell Allocation & Task Assignment (1st order Proposed)

Cell No.		C1			C2			C3	
Operator		O2 Expert	O6 Standard	O7 Newcomer	O1 Expert	O3 Standard	O5 Standard	O4 Standard	O8 Newcomer
J1	K1	3	2	5	3	3	4	3	7
	K2	-	3	7	2	6	2	2	8
	K3	3	3	4	3	5	2	2	8
	K4	4	2	4	2	3	5	3	7
J2	K1	2	3	5	3	4	3	3	7
	K2	5	1	4	1	5	4	4	6
	K3	2	3	5	2	4	4	3	7
	K4	1	3	6	4	3	3	3	7
J3	K1	-	3	7	1	6	3	4	6
	K2	4	2	4	-	5	5	3	7
	K3	3	2	5	4	3	3	3	7
	K4	3	3	4	5	3	2	4	6
Quantity		30	30	60	30	50	40	37	83

1台ごとの作業者へのタスク割当てとそれに伴う習熟過程の一例として、Table 4.8のセル3(C3)の品種1(J1)に対する1台ごとの割当て結果をTable 4.9に示す。Assign列の1は作業が割当てられたことを、0は作業が割当てられなかったことを表している。1台目(Q1)は作業者O4がK4のみ、作業者O8がK1～K3を割当てられていることになる。Values of Skill Index列はInitial行の値がスキルインデックスの初期値であり、割当てられた作業終了後のスキルインデックスの値を示している。この結果では全台数ともO8が3つのタスクを割当てられ、O4は1つのタスクのみを担当する。

続いてCase 2の変動するオーダ状況下での有効性を従来手法と比較する。

Figure 4.6はスキルインデックスの平均値と標準偏差の推移の一例である。Case 2ではTable 4.5に示したようにオーダによっては全く作業の無い品種もあるため、オーダ発生時に苦手な作業を優先的に割当てることが重要になってくる。本実験では、計画時とオーダ変更時ともにT5完了後のオーダ総数は全品種150台ずつ合計450台と同数であるが、提案手法が最後のオーダ(T5)完了後のスキル

インデックスの平均値が訓練計画時，日程計画時ともに 1.49 にもかかわらず，従来手法では計画時が 1.44，オーダ変更時が 1.38 となっておりオーダ内容にバラつきがある日程計画時には効率良く訓練ができてない．

Table 4.9 Example of Task Assignment & Skill Index (Proposed)

	Assign								Values of Skill Index							
Operator	O4(Standard)				O8(Newcomer)				O4(Standard)				O8(Newcomer)			
Item	J1				J1				J1				J1			
Task	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
Initial	-	-	-	-	-	-	-	-	1.15	0.90	1.20	1.10	0.74	0.64	0.64	0.84
Q1	0	0	0	1	1	1	1	0				1.22	0.82	0.71	0.71	
Q2	0	0	0	1	1	1	1	0				1.30	0.87	0.76	0.76	
Q3	1	0	0	0	0	1	1	1	1.28					0.79	0.79	0.93
Q4	0	1	0	0	1	0	1	1		1.00			0.91		0.82	0.99
Q5	0	0	1	0	1	1	0	1			1.33		0.97	0.82		1.0
Q6	0	1	0	0	1	0	1	1		1.06			0.97		0.84	1.07
Q7	1	0	0	0	0	1	1	1	1.36					0.84	0.86	1.10
Q8	1	0	0	0	0	1	1	1	1.42					0.86	0.88	1.10
Q9	0	0	1	0	1	1	0	1			1.42		0.99	0.88		1.15
Q10	0	0	0	1	1	1	1	0				1.36	1.02	0.89	0.89	
Final	3	2	2	3	7	8	8	7	1.42	1.06	1.42	1.42	1.02	0.89	0.89	1.15

オーダが変動する状況でのセル配置およびタスク割当てを確認するために，Case 2 におけるオーダ 1 回目(T1)と 2 回目(T2)の結果の例を，従来手法は Table 4.10，作業時間最小化は Table 4.11，提案手法は Table 4.12 に示す．表中の数字はタスクごとに割当てられた台数を示し，Quantity は割当てられたタスクの総数である．オーダ 2 回目には品種 3(J3)のオーダ数量については，計画時は 30 であったが 0 に変更されたため，いずれの表にも数値は入らない．

オーダ変更時はオーダごとにオーダ品種と数量にバラつきがある状況を想定しており，計画時が T1，T2 とともにオーダ数量の総数が 90 台，タスクが全品種 4 タスクずつで 320 タスクなのに対し，日程計画時はオーダ数の変更により T1，T2 とともにオーダ数量の総数は全品種合わせて 50 台，総タスク数は 200 である．

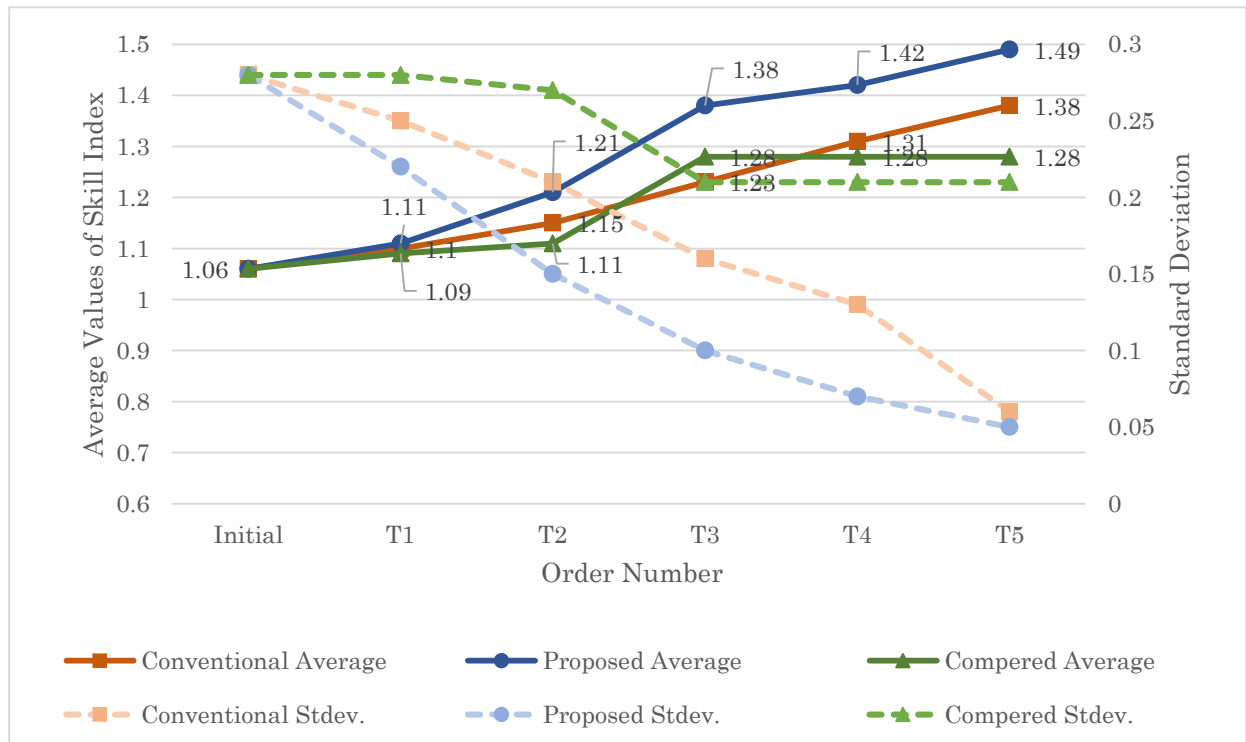


Figure 4.6 Average Values of Skill Index (Case 2)

**Table 4.10 Results of Cell Allocation & Task Assignment
(1st & 2nd order Conventional)**

Order No.		T1								T2							
Cell		C1		C2		C3				C1		C2				C3	
Operator		O1	O7	O2	O8	O3	O4	O5	O6	O1	O8	O3	O4	O5	O6	O2	O7
J1	K1	-	3	-	3	4	-	-	-	-	10	-	-	-	10	-	10
	K2	-	3	-	3	-	4	-	-	-	10	10	-	-	-	-	10
	K3	-	3	-	3	-	-	-	4	-	10	-	-	10	-	-	10
	K4	-	3	-	3	-	-	4	-	-	10	-	10	-	-	-	10
J2	K1	-	3	-	3	-	4	-	-	-	7	-	7	-	-	-	6
	K2	-	3	-	3	-	-	-	4	-	7	7	-	-	-	-	6
	K3	-	3	-	3	4	-	-	-	-	7	-	-	-	7	-	6
	K4	-	3	-	3	-	-	4	-	-	7	-	-	7	-	-	6
J3	K1	-	10	-	10	-	-	-	10								
	K2	-	10	-	10	-	10	-	-								
	K3	-	10	-	10	-	-	10	-								
	K4	-	10	-	10	10	-	-	-								
Quantity		0	64	0	64	18	18	18	18	0	68	17	17	17	17	0	64

従来手法である Table 4.10 では, オーダごとに担当タスクが変わらない. また, タスクを担当しない作業者を許しているので C1 と C2 は新人作業者と熟練作業者の 2 人セルとなり, 新人作業者である O7, O8 が全タスクを担当している. そのため, セルに対する割当て台数は少ないが総作業数はオーダ 1 回目(T1)でそれぞれ 64 となっており, 標準作業者の 3 倍の作業を担当していることがわかる. 新人作業者が熟練作業者のサポートを受けながら技能を向上させる, 訓練計画時の熟練から新人への技能伝承を考慮したセル配置とタスク割当ての結果が得られているといえる.

Table 4.11 Results of Cell Allocation & Task Assignment
(1st & 2nd order Minimized Execution Time)

Order No.		T1								T2							
Cell		C1		C2			C3			C1		C2			C3		
Operator		O3	O4	O2	O5	O8	O1	O6	O7	O4	O6	O1	O3	O8	O2	O5	O7
J1	K1	4	-	3	-	-	-	-	3	-	10	-	-	10	10	-	-
	K2	4	-	3	-	-	3	-	-	-	10	10	-	-	10	-	-
	K3	-	4	-	3	-	3	-	-	10	-	10	-	-	-	10	-
	K4	-	4	-	-	3	-	3	-	10	-	-	10	-	-	-	10
J2	K1	4	-	-	3	-	3	-	-	6	-	7	-	-	-	7	-
	K2	-	4	3	-	-	3	-	-	6	-	7	-	-	7	-	-
	K3	-	4	3	-	-	-	-	3	-	6	-	7	-	7	-	-
	K4	4	-	-	-	3	-	3	-	-	6	-	-	7	-	-	7
J3	K1	-	10	-	10	-	10	-	-								
	K2	10	-	-	-	10	10	-	-								
	K3	10	-	10	-	-	-	10	-								
	K4	-	10	10	-	-	-	-	10								
Quantity		36	36	32	16	16	32	16	16	32	32	34	17	17	34	17	17

一方で比較手法である Table 4.11 では総作業時間最小化を目的関数としているためセルごとのタクトタイムが短くなるタスク割当てとなっている. その結果, 熟練作業者の O1, O2 がそれぞれ 32 台, 2 人セルに配置された標準作業者の O3 と O4 が 36 台の作業を割当てられているのに対して新人作業者は 16 台ずつしか割当てられていない. T2 も T1 同様に標準作業者の 2 人セルと新人作業者, 標準作業者, 熟練作業者が 1 名ずつの 3 人セルの構成となっている. オーダが繰返さ

れるごとに前オーダの担当タスクと割当てられた数量から習熟によってスキルインデックスの値を更新するが、作業時間最小化の場合、得意な作業を優先的に割当ててゐる事になるため、技能の高い作業と低い作業の差が大きくなりここではじそれはオーダを繰り返すごとに顕著になる。

提案手法の Table 4.12 の場合、従来手法では T1 の場合、割当てられたタスクの総数は新人作業員 O7, O8 とともに 64 ずつになっているのに対し、提案手法では O7 は 54, O8 は 47 となっている。これは、割当てタスクの制約により従来手法ではタスクを割当てられなかった熟練作業員にもタスクが割当てられるケースがあり、新人作業員への割当て数が減ってしまったことが考えられる。

一方で、T1 の時点では標準作業員はもちろん熟練作業員でもスキルインデックスの上限に達していないタスクがある。また、1 台作業するごとにその時点でもっともスキルインデックスの値の低いタスクが優先的に割当てられるため、新人作業員のみならず標準作業員も割当て総数は減っても担当するタスクの種類は多くなり、スキルインデックスの平均自体は上がっていく。

**Table 4.12 Results of Cell Allocation & Task Assignment
(1st & 2nd order Proposed)**

Order No.		T1								T2							
Cell		C1		C2				C3		C1		C2				C3	
Operator		O1	O7	O3	O4	O5	O6	O2	O8	O2	O7	O3	O4	O5	O6	O1	O8
J1	K1	1	3	3	-	-	-	1	2	4	6	3	1	3	3	2	8
	K2	1	3	-	3	-	-	1	2	2	8	1	3	1	5	2	8
	K3	1	3	-	-	1	2	1	2	2	8	4	1	3	2	4	6
	K4	1	3	-	-	3		0	3	2	8	2	2	4	2	2	8
J2	K1	1	3	-	1	1	1	1	2	2	5	-	2	2	3	2	4
	K2	1	3	1	1	1		1	2	1	6	2	4	-	1	2	4
	K3	1	3	1	1	-	1	1	2	3	4	2	1	2	2	1	5
	K4	1	3	1	-	2		1	2	1	6	2	2	3	-	1	5
J3	K1	2	8	2	3	1	4	4	6								
	K2	3	7	2	2	3	3	2	8								
	K3	3	7	2	3	3	2	2	8								
	K4	2	8	4	2	3	1	2	8								
Quantity		18	54	16	16	18	14	17	47	17	51	16	16	18	18	16	48

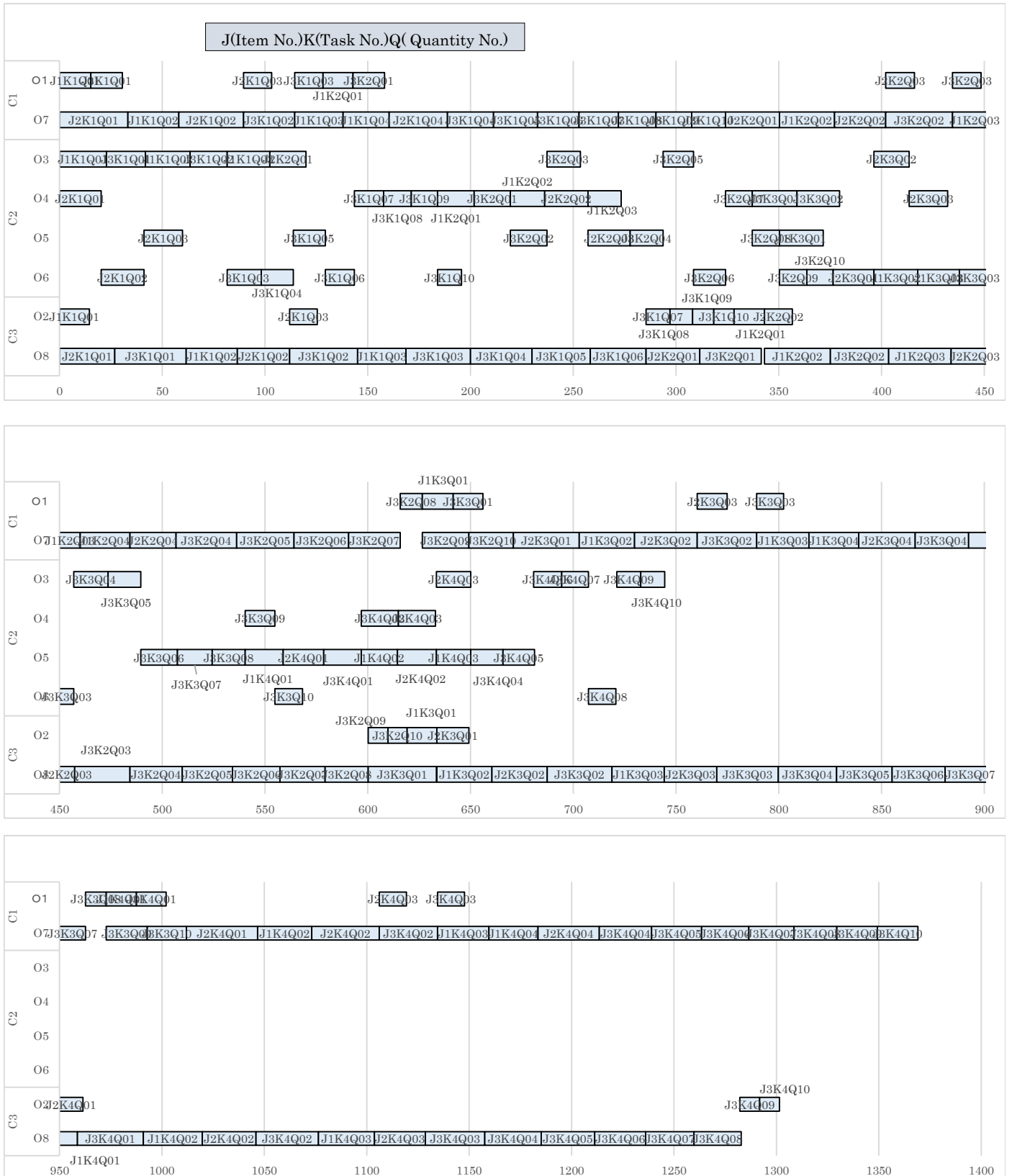


Figure 4.7 Gantt chart (Proposed)

最後に従来手法，作業時間最小化，提案手法それぞれのオーダーごとのメイクスパンの平均値および，従来手法と提案手法のメイクスパン比，作業時間最小化と提案手法のメイクスパン比を，計画時は Table 4.14，オーダー変更時は Table 4.15 に，オーダー変更時のガントチャートを Figure 4.8 に示す．第 3 章で示したスケジューリングの目的関数(式(26))のとおり，メイクスパンはセルごとに得られるが，その中で一番目的関数値が大きいものの平均を取っている．計画時は同じオーダー内容のため，前手法ともメイクスパンはオーダーを重ねるごとに短くなっていく．従来手法は新人作業者が一人で全工程を行うケースが多いため，メイクスパンが非常に長くなっている．そのため，提案手法は従来手法の約 64%のメイクスパンとなった．一方，作業時間最小化と比較すると，オーダー 1 回目(T1)の時は 121%で 1.2 倍の作業時間が掛かっているが，オーダーを重ねるごとにメイクスパンの差は小さくなりオーダー 5 回目(T5)では同等のメイクスパンが得られた．

オーダー変更時には，オーダーごとに数量が異なるため，前オーダーとのメイクスパンの差を単純に習熟の結果と見なす事はできないが，今回の例の場合，オーダー 1 回目(T1)，2 回目(T2)オーダー総数が 50 台，オーダー 3 回目(T3)，4 回目(T4)が 130 台，オーダー 5 回目(T5)が 90 とオーダーが進むにつれて作業数量が増える傾向がある中でメイクスパンが減少し続けているのは，早い段階で習熟が進んだ結果，同等の技能を持つオペレータが増えたため，作業時間そのものの短縮に加えてセットアップタイムや遊休の少ない連続作業が選ばれているからである．

Table 4.13 Example of makespan (Case 1: Planed)

Order No.	Conventional	Compered	Proposed	Proposed / Conventional	Proposed / Compered
T1	4458.42	2185.92	2654.82	60%	121%
T2	3775.98	1980.00	2352.00	62%	119%
T3	2647.98	1804.77	1914.92	72%	106%
T4	2563.38	1564.20	1634.64	64%	105%
T5	2237.67	1504.80	1509.75	67%	100%
Total	15683.43	9039.69	10066.13	64%	111%

Table 4.14 Example of makespan (Case 2: Order Change)

Order No.	Conventional	Compered	Proposed	Proposed / Conventional	Proposed / Compered
T1	2120.64	986.83	1395.52	66%	141%
T2	2076.93	1116.67	1300.46	63%	116%
T3	5215.59	2705.82	2819.46	54%	104%
T4	4001.58	2168.36	2212.84	55%	102%
T5	2392.77	1523.76	1621.90	68%	106%
Total	15807.51	8501.44	9350.18	59%	110%

4.4. 結言

本章では，第 2 章を発展させより効率に習熟度を上げる作業配置とスケジューリングの検討を行った．本論文での提案法においては，同一オーダー内ではセル配置と担当タスクが変わらないという第 3 章までのふたつの制約に対して，それぞれの制約を 1 つずつ外した手法の検討を行った．

同一オーダー内でもセルを移動できるモデルに対しては，作業数数の変更が生じる場合を考慮した計算機実験を行い，従来手法との習熟の比較を行った．その結果，熟練作業者がセルを移動することによって生産性を維持しながら新人作業者が十分に訓練を行う結果が得られた．

1 台ごとにタスクの割当てを行うモデルに対しては，オーダー内で少しずつ熟達する様子も考慮した．計算機実験では，従来手法で使用していた同じオーダーが繰り返し発生する実験条件に加えて，オーダー内容が毎回異なる条件での実験を行い，従来手法および作業時間最小化との比較を行った．その結果，従来手法がオーダー内容一定の状況とバラつきがある状況では習熟の進み具合に差が出てしまうのに対し，提案手法ではいずれのオーダー状況でも同等の習熟を得られることがわかった．また，作業内容の重複や先行関係を考慮したスケジューリングをすることによって，決まった作業配置とタスク割当ての中でもっともメイクスパンの少ない作業手順を得ることができた．苦手な作業を優先的に割当てるポリシーは一時的な生産性の低下をまぬがれないため，作業時間最小化を目的関数とした場合の比較では，メイクスパンが長くなってしまいが，オーダーを重ねるごとに作業全体が習熟し，同等のメイクスパンを得られることも確認できた．

5. 運用時のセル再配置・タスク再割当てと再スケジューリング

5.1. 緒言

前章では、セル生産システムの現場における日程計画時のセル配置およびタスク割当ての提案を行った。計画時にはオーダーごとに固定であったタスクの割当てを、1 台ごとのタスク割当てにし、訓練を維持しつつも作業員数やオーダー内容の変更への対応を可能にした。

一方で、実際の作業現場では作業開始後に急なオーダー変更により担当作業や作業スケジュールを変更せざるを得ない事態が発生する。その際、オーダー変更による作業時間やコストの増加を最小化するための研究はあるが[20]、作業員訓練に主眼を置いた場合、計画していた訓練の実現を目指す必要がある。オーダー変更の内容としては「オーダー追加」と「オーダーキャンセル」が考えられるが、それぞれのオーダー変更を本研究で提案している苦手な作業を優先的に割当てて作業員訓練を行う観点から見ると、以下の課題があると言える。

- ・ オーダー追加：生産性を保つために熟練作業員に作業が集中し、訓練が滞る。
- ・ オーダーキャンセル：訓練する予定であった作業を行えず、訓練が滞る。

そこで本章では、計画期間中にオーダー内容が変更する状況を想定し、動的な環境下においても効率的な作業員訓練を実現するための作業員再配置・再スケジュールリングの手順を提案する[63]。

5.2 節では、計画期間中にオーダー変更が発生に当たり、3 種類の対応手順を作業員のセル再配置、タスク再割当ておよび再スケジュールリングを行うにあたり、の手順を提案する。5.3 節で計算機実験により、オーダー変更のタイミングと対応方法の違いによる訓練度合いの違いを確認し、5.4 節で本章をまとめる。

5.2. 提案アルゴリズム

5.2.1. 3 種類の対応方法

本研究では、求解ステップを作業員のセル配置とタスク割当てを決定する目的関数 1(目的関数式(31))と各タスクの開始時刻を決定変数として作業のスケジュールリングを行う目的関数 2(目的関数式(26))の 2 段階で行ってきた。また、目的関

数 1 では作業者のセル配置とタスク割当てをそれぞれ独立した決定変数として扱ってきたので、実際にはセル配置→タスク割当て→スケジューリングの 3 ステップの求解をしていることになり、求解の順序を逆転したりいずれかのステップを省略したりすることは出来ない。

そこで新たに提案するオーダ変更による再配置および再スケジューリングの流れを Figure 5.1 に示す。まず、計画段階で作業者のセル配置、タスク割り当ておよびスケジューリングを行って作業を開始する。作業開始後に、オーダの変更が発生した際には 3 つの対応方法(Procedure 1~Procedure 3)のいずれかの対応が考えられる。Procedure 1 は従来手法の配置、スケジューリングを全て再決定する方法である。この方法の場合、作業途中であっても別のセルに移動して新しいタスク割当てで作業しなおすことになる。Procedure 2 は作業者のセル配置は変更せずタスク割当てとスケジューリングを再決定する方法である。作業者は同じセルに留まるが、担当するタスクが変わることになる。Procedure 3 はスケジューリングのみを再決定する方法である。この場合、セル配置もタスク割当ても変わらないが、作業の手順が変わることになる。

Procedure 1 の場合、その時点でもっとも適した作業者のセル配置とタスク割当ての実現が期待できるが、別セルへの移動など作業者の手間が増えることになる。一方 Procedure 2 はセル間の移動は無いが担当タスクが変わることによってセル内での移動が発生する可能性がある。Procedure 3 は作業スケジュールだけを変更するので作業者にとって負担は一番小さいと思われるが、多量のオーダキャンセルや一部の作業者の担当作業に偏ってキャンセルがあった場合は期待通りの訓練が実施できない可能性もある。また、オーダ追加の場合は担当タスクの割当てを行う必要があるのでこの方法は採用できない。前述のとおり求解のステップは逆転したり飛ばしたりすることは出来ないので、セル配置とスケジューリングのみ、セル配置またはタスク割当てのみの対応は不可能である。よって、オーダ追加の場合は Procedure 1 または Procedure 2、オーダキャンセルの場合は Procedure 1~3 のいずれかの対応方法をとる必要がある。

5.2.2. 目的関数

本研究では、配置およびタスク割当てのための目的関数と、作業スケジューリングのための目的関数の 2 つを使用して段階的に求解を行っている。ここで、オーダ発生が変更した時点での作業タスクを k^* 、作業台数を q^* 、新しい創作業台数を Q_{new} としたとき、作業は k^*+1 から再開することになる。そのため、Procedure 1 のセル配置、タスク割当ての目的関数は式(40)になる。

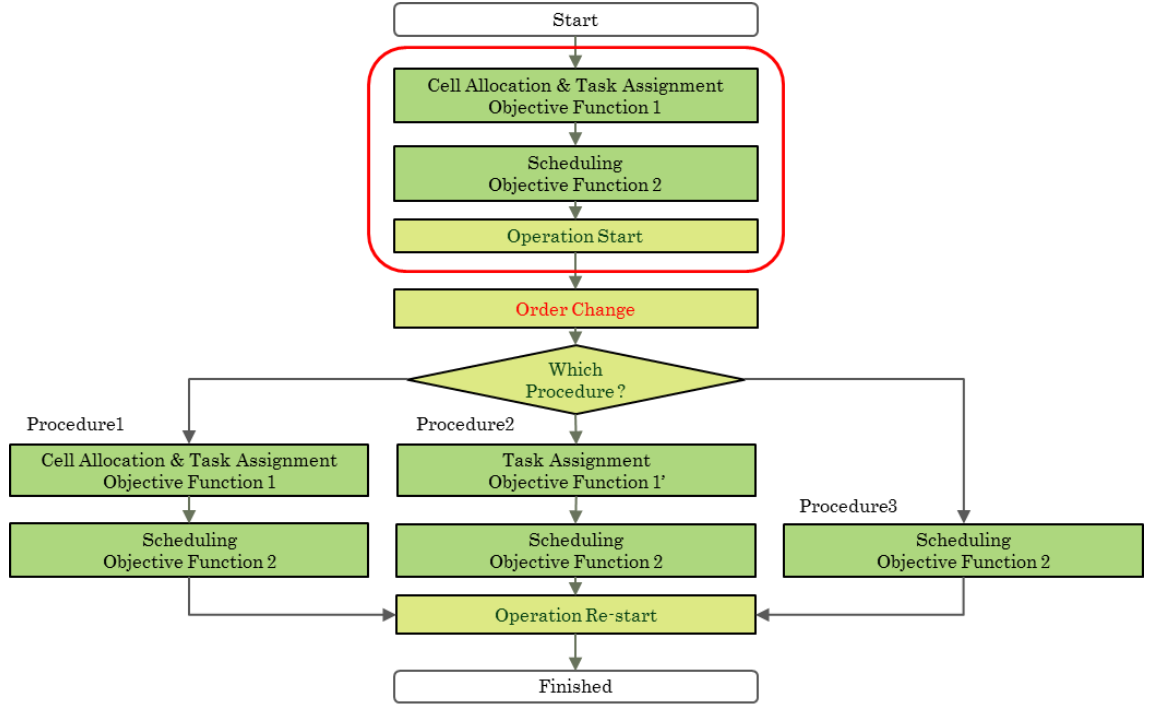


Figure 5.1 Flow Chart

$$\min \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^J \sum_{k=k^*+1}^K \sum_{q=q^*}^{Q_{new}} \sum_{i=1}^I s_{jki} x_{tci} y_{tjkqi} \quad (\forall_t) \quad (40)$$

Procedure 2 の場合，セルの配置は変更しないので決定変数 x_{tci} は省かれ，式 (41) のようにタスク割当てのみを決定することになる．

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{k=k^*+1}^K \sum_{q=q^*}^{Q_{new}} \sum_{i=1}^I s_{jki} y_{tjkqi} \quad (\forall_t) \quad (41)$$

Procedure 1～3 で使用するスケジューリングの目的関数は式 (42) になる．

$$\begin{aligned} \min \quad MS_{max} = & \max \{ BT_{c1KQ_{new}} + ET_{c1KQ_{new}}, BT_{c2KQ_{new}} + ET_{c2KQ_{new}}, \dots, BT_{cJKQ_{new}} + ET_{cJKQ_{new}} \} \\ & - \min \{ BT_{c1(k^*+1)q^*}, BT_{c2(k^*+1)q^*}, \dots, BT_{cJ(k^*+1)q^*} \} \quad (\forall_c) \end{aligned} \quad (42)$$

但し $k^* = K$ のとき，最後のタスクを作業していることになるので，再割当ておよび際スケジューリングは次の台数番号 ($q = q^* + 1$) の最初のタスク ($k = 1$) から行うことになる．

5.3. 計算機実験

計画期間中のオーダ変更について，変更の発生タイミングおよび変更内容と対応方法の関係を確認するために計算機実験を行う．オーダ変更のタイミングと対応手順による結果の違いを比較するため，作業計画の時点でのセル配置とタスク割当て，作業スケジュールを決定した後，計画期間を3期に分け，期が切替わるタイミングでオーダの変更を1回発生させる．オーダ変更のタイミングは，Figure 5.2 に示すように計画期間の第1期終了後と第2期終了後の2種類とし，それぞれのタイミングでのオーダ追加とオーダキャンセルに分けて計算機実験を行う (Table 5.1, Table 5.2)．なお，オーダ追加の場合，追加オーダを誰が担当するかを決める必要があり，Procedure 3 は採用できないので Procedure 1 と Procedure 2 のみを行う．

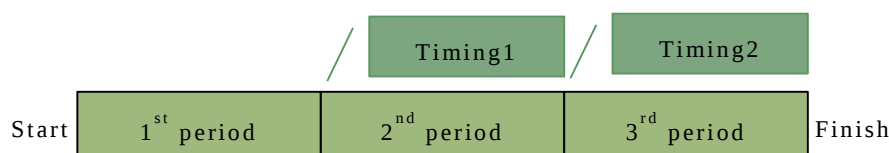


Figure 5.2 Timing of Order Change

Table 5.1 Experiment Condition (Order Cancellation)

Case	Timing	Order	Procedure
1	After 1 st period	Cancellation 1 item 15 qty.	Procedure 1
2	After 1 st period	Cancellation 1 item 15 qty.	Procedure 2
3	After 1 st period	Cancellation 1 item 15 qty.	Procedure 3
4	After 2 nd period	Cancellation 1 item 15 qty.	Procedure 1
5	After 2 nd period	Cancellation 1 item 15 qty.	Procedure 2
6	After 2 nd period	Cancellation 1 item 15 qty.	Procedure 3

Table 5.2 Experiment Condition (Order Addition)

Case	Timing	Order	Procedure
1	After 1 st period	Addition 1 item 30 qty.	Procedure 1
2	After 1 st period	Addition 1 item 30 qty.	Procedure 2
3	After 2 nd period	Addition 1 item 30 qty.	Procedure 1
4	After 2 nd period	Addition 1 item 30 qty.	Procedure 2

作業計画の時点のオーダー内容およびスキルインデックスの構成は Table 2.8 と同等とする．オーダー変更の内容については，オーダーキャンセルの場合は，作業台数が 20 台以上残っている品種の中からランダムで 1 品種を選択して 15 台のキャンセルを行う．オーダー追加の場合はランダムで 1 品種を選択して 30 台の追加オーダーとする．また，本実験では Procedure 1 または Procedure 2 の対応をする場合にはタスク割当ての際に作業時間の制約を設ける．オーダーキャンセルの場合は，作業計画時に得られた初期作業時間を制約とし，オーダー追加の場合は初期作業時間にオーダー追加の割合をかける．Procedure 3 については各作業者が担当するタスクの作業時間をコントロールできる要素がないため作業時間の制約は設けない．

5.3.1. オーダーキャンセル

オーダーキャンセルは，作業台数が 20 台以上残っているランダムな 1 品種に対して 15 台のキャンセルが発生するとした．初期計画でのオーダー数量は 3 品種×各 30 台=90 台なので，15 台キャンセルすることにより合計 75 台，割合としては 83.3%の減産となる．作業時間の制約は初期スケジュールで得られたメイクスパンと同じとした．キャンセルするタスクは，残っている台数の中で，台数番号の大きい順から 15 台とした．作業台数番号の 16 台目～30 台目としなかったのは，スケジューリングの制約条件として同じ台数番号でのタスクの先行制約さえ満たせば，台数番号が前後することを許しているからである．

オーダー変更発生タイミングごとのそれぞれの対応方法におけるスキルインデックスの変化を Table 5.3 に示す．表右端の Ratio は初期計画時のスキルインデックスの平均値を 100%としたとき，各ケースでの作業後に得られたスキルインデックスの平均値が何パーセントであるかを示す．この場合，初期計画作業後に見込まれたスキルインデックスの平均が 1.24 で，Case 1 の対応をしたときに見込まれる作業後のスキルインデックスの平均が 1.21 であるから 98%となる．

1st period 終了後にキャンセルが発生した場合，83.3%の減産にもかかわらず，セル配置から見直す Procedure 1 の場合は初期計画の 98%，タスクの割当てから行う Procedure 2 は初期計画の 96%の習熟度合いを達成した．これは，担当タスクの再割当てをすることによって，キャンセルで新人作業者のタスクが一度は失われたとしても，熟練作業者や標準作業者に割当てられていたタスクが分配されたためである．一方で Procedure 3 の場合は 90%の習熟と全ケースを通して最も習熟が低い結果となった．これは，計画の初期段階でキャンセルが発生したとき，担当タスクの割当てを見直さないと十分に訓練が行われないことを示す．

2nd period 終了後の場合は Procedure 1～Procedure 3 とともに大きな差は出なかった．これは 1st period 終了後とは反対に，既にある程度必要な習熟は進んでいるためキャンセルの影響が小さく済んだと考えられる．

Table 5.3 Result of Skill Proficiency (Order Cancel)

			Values of Skill index				
			Ave	Max	Min	S.D.	Ratio
Initial			1.00	1.50	0.60	0.23	
Planned			1.24	1.50	0.71	0.21	
Case 1	1st period	Cell, Task, Scheduling	1.21	1.50	0.71	0.20	98%
Case 2	1st period	Task, Scheduling	1.19	1.50	0.71	0.18	96%
Case 3	1st period	Scheduling	1.12	1.50	0.71	0.16	90%
Case 4	2nd period	Cell, Task, Scheduling	1.19	1.50	0.68	0.18	96%
Case 5	2nd period	Task, Scheduling	1.18	1.50	0.68	0.17	95%
Case 6	2nd period	Scheduling	1.18	1.50	0.67	0.17	95%

続いて各ケースにおけるメイクスパンの結果を Table 5.4 に示す．Table 5.4 の右端にある Ratio は計画段階でのメイクスパンの平均を 100%としたときの，各ケースで得られたメイクスパンの割合である．オーダキャンセルの場合，作業が減るためメイクスパンは当然短くなると予想されるが作業時間の制約は初期計画の値とした．

Table 5.4 Result of Makespan (Order Cancel)

			Makespan				
			Ave	Max	Min	S.D.	Ratio
Initial			-	-	-	-	-
Planned			127.3	132.0	123.2	2.6	-
Case 1	1st period	Cell, Task, Scheduling	96.72	100.3	93.6	3.4	76%
Case 2	1st period	Task, Scheduling	99.26	103.0	97.3	2.9	78%
Case 3	1st period	Scheduling	109.5	113.5	105.9	3.8	86%
Case 4	2nd period	Cell, Task, Scheduling	101.8	105.6	92.4	6.8	80%
Case 5	2nd period	Task, Scheduling	104.4	108.2	102.2	3.0	82%
Case 6	2nd period	Scheduling	105.6	109.6	99.8	4.9	83%

1st period 終了後の場合、Procedure 1 および Procedure 2 の対応後のメイクスパンは 83.3%の減産に対して 76%、78%と減産分よりも短くなっている。これは、少ないタスクが新人作業者に集中的に割当てられたために遊休時間が小さくなってスケジュールが詰まった為である。

2nd period 終了後の場合はスキルインデックスの平均と同様に大きな差は無かった。今回の実験条件の場合、計画期間の 2/3 を過ぎると、このオーダで見込まれている習熟がある程度達成されているためだと考えられる。

5.3.2. オーダ追加

オーダ追加の場合、Procedure 3 は対応できないので Procedure 1 と Procedure 2 のいずれかで対応することになる。それぞれのタイミングで、ランダムな 1 品種に対して 30 台の追加オーダが発生するとした。初期計画でのオーダ数量は 3 品種×各 30 台=90 台なので、30 台追加することにより合計 120 台、割合としては 133%の増産となる。初期計画の作業者のセル配置およびタスク割当てで得られた作業時間×1.33 を作業時間の制約とした。

オーダ変更発生タイミングごとそれぞれの対応方法におけるスキルインデックスの変化を Table 5.5 に示す。オーダ追加の場合でも、計画期間の前半である 1nd period 終了後の Case 1、Case 2 のスキルインデックスの平均値が 1.33、1.31 と 2nd period 終了後の Case 3、Case 4 のスキルインデックスの平均値である 1.27、1.27 よりも大きな値となり習熟が進んでいることが分かる。また、1st period 終了後にセルの再配置から行う Case 1 の方のスキルインデックスの最小値は 0.81 と計画段階の最小値である 0.71 よりも 0.1 良い結果となっており、作業時間の制約を満たしつつも新人作業者の技能の底上げがなされていることが分かる。この理由を確認するために、最初の配置例を Table 5.6 に、Case 1 と Case 3 の再配置の例をそれぞれ Table 5.7、Table 5.8 に示す。

Table 5.6 の計画段階での配置では、新人作業者の一人セルと新人作業者と熟練作業者が同じセルに入る複数人セルという、本研究における典型的な訓練目的の作業配置となっていた。これが Case 1 での再配置結果である Table 5.7 では新人作業者が同じセルに配置されて少ない台数ながらも複数タスクを担当しまんべんなく訓練を進める一方で、標準作業者と熟練作業者が複数人セルで生産性を維持していることが分かった。

一方で Case 3 では新人作業者と熟練作業者が同じ複数人セルに入って作業を進めていた。この場合、作業増加分を見越した作業時間の制約とはなっているものの、計画期間の後半のため生産性を上げるには熟練作業者が多くのタスクを担当し新人作業者の割当てが減ったと考えられる。

Table 5.5 Result of Skill Proficiency (Order Addition)

			Values of Skill index				
			Ave	Max	Min	S.D.	Ratio
Initial			1.00	1.50	0.60	0.23	-
Planned			1.24	1.50	0.71	0.21	-
Case 1	1 st period	Cell, Task, Scheduling	1.33	1.50	0.81	0.16	107%
Case 2	1 st period	Task, Scheduling	1.31	1.50	0.78	0.19	106%
Case 3	2 nd period	Cell, Task, Scheduling	1.27	1.50	0.72	0.21	102%
Case 4	2 nd period	Task, Scheduling	1.27	1.50	0.71	0.21	102%

Table 5.6 Result of Allocation (Initial)

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
C1	○					○	○	
C2		○	○	○	○			
C3								○

Table 5.7 Result of Allocation (Case 1)

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
C1		○			○	○		
C2	○		○	○				
C3							○	○

Table 5.8 Result of Allocation (Case 2)

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
C1		○						○
C2				○	○	○		
C3	○		○				○	

最後に、オーダ変更発生タイミングごとのそれぞれの対応方法におけるメイクスパンの平均値を Table 5.9 に示す．

Table 5.9 Result of Makespan (Order Addition)

			Makespan				
			Ave	Max	Min	S.D.	Ratio
Initial			-	-	-	-	-
Planed			127.26	132.0	123.2	2.6	-
Case 1	1 st period	Cell, Task, Scheduling	139.55	153.0	150.0	12.4	110%
Case 2	1 st period	Task, Scheduling	144.84	164.9	159.3	17.7	114%
Case 3	2 nd period	Cell, Task, Scheduling	168.58	182.9	168.4	7.1	132%
Case 4	2 nd period	Task, Scheduling	168.78	182.0	168.4	7.3	133%

ここでも、作業量が 133% の増産となったにも関わらず 1st period 終了後のメイクスパンは Case 1 が初期計画の 110%，Case 2 が 114% と増産分よりも低いメイクスパンを実現している．これは，Table 5.7 で見た通り新人作業者が 2 人セルに入り同じような作業時間でタスクを分け合うため遊休が短くなるのと，標準作業者と熟練作業者の複数人セルが生産性を上げているためである．また同じ作業を担当した場合，習熟によって式(43)で示す通り 1 台ごとに作業時間が短くなっているのもメイクスパンが短くなった要因と考えられる．

$$PT_{tcjkq} - PT_{tcjkq+1} = \frac{ST_{jk}}{S_{jki}} \left\{ \frac{1}{\left(\sum_{\forall q} y_{tjkqi} \right)^{\alpha}} - \frac{1}{\left(\sum_{\forall (q+1)} y_{tjk(q+1)i} \right)^{\alpha}} \right\} \quad (\forall_{t,c,j,k,i,q}) \quad (43)$$

2nd period 終了後の場合も，習熟によって作業時間は短くなっているが熟練作業員などはスキルインデックスの上限に達しているタスクも多く，大きな作業時間の短縮にはつながらなかったと思われる．

5.4. 結言

本章では，計画期間中のオーダ変更に対する対応策として，作業員のセルへの再配置およびタスク再割当て，再スケジューリングの手法について検討してきた．

運用中の変更に対しては、生産性を維持するためにも変更直前の作業から変更後の作業へ出来るだけスムーズに移行させたい一方で、作業者訓練への影響を抑える必要がある。そこで、オーダー変更が発生したタイミングと対応方法による訓練成果の違いを確認するため、2種類の変更タイミングを設定して計算機実験を行った。その結果、オーダー追加の場合でもオーダーキャンセルの場合でも計画段階の初期で変更が発生した際は、タスクの再割当てから実施するのが生産性を維持するためにも訓練への影響を抑えるにも有効であることが分かった。特に、セルの再配置から行うことによって訓練を維持しながらより短いメイクスパンも得られることが分かった。これは計画の初期段階であればまだ未着手のタスクも多く、訓練を十分に実施できる計画を組みなおすことが可能であることを示す。一方で、単なる再スケジューリングは訓練に必要な作業を十分に実施できないだけでなく、生産性への貢献も少ないことが分かった。

一方で計画期間の後半である 2nd period 終了後に変更が発生した場合はどの手順でも大きな差は無かった。これは、オーダー変更が発生した時点で、その計画期間で見込まれる訓練がある程度達成されていることと、作業時間の制約により生産性を維持するためにあまり大きな変更を受け入れる余地がないためと考えられる。

6. 結論と今後の展望

本論文では、労働集約的なセル生産システムの現場において、訓練に主眼を置いた作業者のセル配置、タスク割当ておよびスケジューリングの手法を提案した。作業者の作業計画と日々の運用、作業遂行の監視とその結果のフィードバックという一連の流れを、計画フェーズと運用フェーズの 2 つに分けて議論を進めた。

第 2 章では計画フェーズによる作業者の技能判定のために新しい人的要因であるスキルインデックスの提案を行った。

第 3 章ではスキルインデックスを使用した複数オーダーにまたがる一定期間の作業計画手法の提案を行った。その際に、3 種類の目的関数値を設け、作業の目的に応じて目標関数を使い分けられるようにした。その結果、スキルインデックスの総和最小化を目的関数とした場合は新人が複数タスクを担当してまんべんなく熟練するモデルの他に、熟練作業者が新人作業者をサポートするモデルを確認することができた。また、訓練必要台数の残数最小化を目的関数とした場合は、あらかじめ標準レベルになるのに必要な訓練台数を見積もっておき、その台数を作業したらそれ以上の技能レベルは等価とすることによって、訓練の目的がまんべんなく熟練化するのではなく、標準以下のタスクをいち早く標準レベルに引き上げることとなり、多くの作業者が標準レベル以下となる新技能導入時に有効であることが分かった。そして、作業頻度の最小化を目的関数とした場合は、スキルインデックスの値が同じであっても発生頻度の低いタスクの優先度が上がり、出来るだけ多くの作業者が発生頻度の低いタスクを分け合って訓練するモデルを実現した。

第 4 章では運用フェーズでの毎日の日程計画における作業者のセル配置とタスク割当て手法を提案した。具体的にはタスク割当ての決定変数に、作業台数の変数を追加してオーダーごとに固定であったタスクの割当てを、1 台ごとに変更可能とし、計画時には網羅できなかった作業者数の変更やオーダー内容の変更に対応できる作業者のセル配置とタスク割当てスケジューリングの手法を提案し計画の見直しを行えるようにした。

第 5 章では計画期間中でオーダー内容が発生した場合の対応手順について検討した。本研究の作業者のセル配置、タスク割当て、スケジューリングの 3 ステップの求解を一連の流れとして計画段階に対し、計画期間中のオーダー変更に対してどのステップから再計画しなおすのが生産性の維持及び訓練の実現に寄与するかを比較した。その結果、計画期間の早い段階であればタスクの再割当てから行うことが有効であり、特にオーダー追加時にはセル再配置から行うことによって訓練の実現と同時に短いメイクスパンを得られることが分かった。一方で計画期間

の後半の場合は対応方法による差は無いことが分かった。

今後の研究の展望としては、実際のセル生産現場に近い条件での提案手法の検証が挙げられる。本研究ではセル機械に関しては配置できる人数の制約しか与えてなかった。しかし実際には作業者の動線やより綿密な段取り換え考慮が必要である。また、エラー率や忘却率、作業者同士の相性などの人的要因の検討も課題である。

一方でスキルインデックスのセル生産システム以外の生産現場への適用も期待できる。人的要因の考慮はセル生産システムに限らず労働集約的な作業現場共通の課題である。労働集約的な作業現場とはセル生産以外の製造業はもちろん、サービス業、運輸業など多岐に渡る。本研究で提案したスキルインデックスは標準時間を基準とした作業者ごとの生産効率であり、単純ではあるが扱い方によって習熟度合いや難易度など様々な側面を表現することができる。そこでセル生産以外の労働集約的な作業現場を対象に、考慮すべき人的要因を整理し、新しい指標の提案を行い、その指標を基に現場の特性に応じた作業計画・カスタマイズ手法の提案が可能であると考ええる。

図表一覽

Table 2.1 Example of skill map	15
Table 2.2 Values of Execution time.....	16
Table 2.3 Values of Skill Index.....	17
Table 2.4 Relationship between the handwork rate and the learning rate	19
Table 2.5 Skill Classification	20
Table 2.6 Indexes of Human factor	21
Table 2.7 Example of assignment	22
Table 2.8 Experimental Condition	28
Table 2.9 Values of Skill Level (Newcomer Training)	29
Table 2.10 Values of Skill Level (Cross Training)	29
Table 2.12 Basic Statistics of 1 st Skill Level	30
Table 2.12 SA Condition.....	30
Table 2.13 Basic Statistics of result.....	30
Table 2.14 Allocation Result (Case 1: Newcomer Training)	32
Table 2.15 Allocation Result (Case 2: Cross Training)	33
Table 2.16 Average of Working time (Newcomer Training)	34
Table 2.17 Development of Skill Index	35
Table 2.18 Basic Statistics of Final Skill Level	36
Table 3.1 Experimental Condition of learning rate	41
Table 3.2 Allocation Result (1st order, Conventional)	42
Table 3.3 Allocation Result (1st order, Proposed)	43
Table 3.4 Basic Statistics of result.....	44
Table 3.5 Basic Statistics of Values of skill index.....	45
Table 3.6 Example of makespan	46
Table 3.7 Experimental Condition	48
Table 3.8 Results of Remained training quantity (New Task 50%)	49
Table 3.9 Results of Remained training quantity (New Task 33%)	49
Table 3.10 Task Rate.....	52
Table 3.11 Example of Task Combination	53
Table 3.12 Average of Skill Index (Without Skill Difference)	55
Table 3.13 Average of Skill Index (With Skill Difference)	55
Table 3.14 Example of Cell Allocation & Task Assignment Result (From	

Order 1 to 3 / No Skill Difference / Task Frequency / Item4)	55
Table 4.1 Results of Allocation & Assignment (Case 1)	62
Table 4.2 Results of Allocation & Assignment (Case 2)	64
Table 4.3 Results of Allocation & Assignment (Case 3)	66
Table 4.4 Basic statistic of Skill Index (Operator O3 - O8)	67
Table 4.5 Order Condition	68
Table 4.6 Results of Cell Allocation & Task Assignment (1st order Conventional)	70
Table 4.7 Results of Cell Allocation & Task Assignment (1st order Minimized Execution Time)	71
Table 4.8 Results of Cell Allocation & Task Assignment (1st order Proposed)	72
Table 4.9 Example of Task Assignment & Skill Index (Proposed)	73
Table 4.10 Results of Cell Allocation & Task Assignment (1st & 2nd order Conventional)	74
Table 4.11 Results of Cell Allocation & Task Assignment (1st & 2nd order Minimized Execution Time)	75
Table 4.12 Results of Cell Allocation & Task Assignment (1st & 2nd order Proposed)	76
Table 4.13 Example of makespan (Case 1: Planed)	78
Table 4.14 Example of makespan (Case 2: Order Change)	79
Table 5.1 Experiment Condition (Order Cancellation)	83
Table 5.2 Experiment Condition (Order Addition)	83
Table 5.3 Result of Skill Proficiency (Order Cancel)	85
Table 5.4 Result of Makespan (Order Cancel)	85
Table 5.5 Result of Skill Proficiency (Order Addition)	87
Table 5.6 Result of Allocation (Initial)	87
Table 5.7 Result of Allocation (Case 1)	87
Table 5.8 Result of Allocation (Case 2)	87
Table 5.9 Result of Makespan (Order Addition)	88
Figure 1.1 Map of Previous Study	8
Figure 1.2 Perspective of the study	11
Figure 2.1 Learning Curve	18
Figure 2.2 Flow Chart	27
Figure 3.1 Average Values of objective function	45

Figure 3.2 Gantt chart (Conventional)	47
Figure 3.3 Gantt chart (Proposed).....	47
Figure 3.4 Remained training quantity (Order 1-5)	50
Figure 3.5 Remained training quantity (Order 6-10)	50
Figure 3.6 Remained training quantity (Order 6-10)	51
Figure 3.7 Average of Makespan (New Task 50%)	51
Figure 3.8 Average of Makespan (New Task 33%)	52
Figure 3.9 Values of Objective Function (No Skill Difference)	53
Figure 3.10 Values of Objective Function (Skill Difference)	54
Figure 4.1 Flow Chart.....	59
Figure 4.2 Gantt chart (Case1)	63
Figure 4.3 Gantt chart (Case 2)	65
Figure 4.4 Gantt chart (Case 3)	67
Figure 4.5 Average Values of Skill Index (Case 1: Planed)	69
Figure 4.6 Average Values of Skill Index (Case 2).....	74
Figure 4.7 Gantt chart (Proposed).....	77
Figure 5.1 Flow Chart.....	82
Figure 5.2 Timing of Order Change	83

参考文献

- [1] 松尾 知也, セル生産の運営上の課題 : 外部社員の活用と作業習熟を中心に, 九州産業大学 商経論叢, Vol. 38, No.2, pp.67-83, 2007
- [2] 岩室 宏, セル生産方式, 日刊工業新聞社, 2002
- [3] Richard E. Billo, A design methodology for configuration of manufacturing cells, Computers and Engineering, Vol.34, No.1, pp.64, 1998
- [4] 柳生 俊二, 1 から始める同期セル生産方式, 日刊工業新聞社, 2003
- [5] 篠田 心治, セル生産方式の課題と展望, 日本インダストリアル・エンジニアリング協会 IE レビュー, Vol.40, No.4, pp.6-8, 1999
- [6] 竹内 登, 図解でわかる生産の実務 セル生産, 日本能率協会マネジメントセンター, 2006
- [7] 鈴木 良始, セル生産方式の普及と市場条件, 同志社商学, Vol.54, No.4, p52-72, 2003
- [8] 小嶋 建史, 超リーン革命, 日本経済新聞社, 1994
- [9] 安國 廣祐, 組み立て情報を考慮したセル生産システム設計の一方法, 日本経営工学会秋季研究大会予稿集, pp.20-21, 2007
- [10] 小暮 敏春, セル生産方式を実現するためのシステムとラインの改善, 日本インダストリアル・エンジニアリング協会 IE レビュー, Vol.44, No.2, pp.25-30, 2003
- [11] 小菅 正伸, 日本企業におけるビジネス・プロセス・マネジメント, 関西学院大学商学研究会 商学論究, Vol.57, No.3, pp.27-55, 2009
- [12] 関 伸一, 「デジタル屋台」による一人一台生産—組み立て現場における 3D-CAD データの活用—, 日本機械学会誌, Vol.106, No.1013, pp.254-258, 2003
- [13] Seiji HATA and Takashi ANEZAKI, Human Friendly Production System, International Conference on Mechatronics and Automation, pp.3196-3122, 2007
- [14] 谷水義隆 他, 習熟過程の分析に基づくセル生産のための作業支援システムの開発, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814, 2012
- [15] 大森達 他, セル生産システムにおける組合せオークションを用いた作業配置とスケジューリングの同時最適化手法に関する研究, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp.553-551, 2011
- [16] 村瀬康比古 他, セル生産とコンベアー組立ラインの数理的解析, 日本経営工学会誌, Vol.57, No.4, 2006

- [17] 山田哲男 他, 需要変化のもとでの効率的組み立てシステムの比較研究, 日本経営工学会論文誌, Vol.59, No.1, pp.1-10, 2008
- [18] Viviana I. Cesani and Harold J. Steudel, A study of labor assignment flexibility in cellular manufacturing systems, Computer & Industrial Engineering, Vol.48, pp.571-591, 2005
- [19] 中村将輝 他, 段取り時間の短縮を考慮に入れたセル構成, 日本経営工学会論文誌, Vol.51, No.3, pp.254-262, 2000
- [20] K. Bhaskar & G. Srinivasan , Static and dynamic operator allocation problems in cellular manufacturing systems, International Journal of Production Research, Volume 35, Issue 12, 1997
- [21] 谷水 義隆, 石井 知, 横谷 隆志, 岩村 幸治, 杉村 延広", 習熟過程の分析に基づくセル生産のための作業支援システムの開発, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814, 2014
- [22] Bandit Suksawat, et. al., A Model of Communications for Anthropocentric Cell Manufacturing System, International Conference on Control Automation and System, Seoul, Korea, p.1514-1517, 2007.10
- [23] 安國 廣祐, “組み立て情報を考慮したセル生産システム設計の一方法”, 日本経営工学会秋季研究大会予稿集, p.20-21, 2007
- [24] Erin L. Fitzpatrick and Ronald G. Askin, Forming effective worker teams with multi-functional skill requirements and operation: a review and survey, Computer & Industrial Engineering, Vol.48, pp.593-608, 2005
- [25] 柏木 繁男, 性格の評価と表現, 有斐閣, 1997
- [26] Jannes Slomp et. al., Cross-training in a cellular manufacturing environment, Computer & Industrial Engineering, Vol.48, pp.609-624, 2005
- [27] 川上満幸 他, 作業分割数から見た二つの異なる作業方式の比較・検討, 日本経営工学会誌, Vol.37, No.5, 1986
- [28] 平田将太 他, 連続的なセル生産作業の習熟評価に関する研究, 人間工学 = The Japanese journal of ergonomics 48(2), 55-61, 2012
- [29] A. Azadeh, An integrated fuzzy DEA-fuzzy C-means-simulation for optimization of operator allocation in cellular manufacturing systems, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.46, 2010 木 良始, “セル生産方式の普及と市場条件”, 同志社商学, Vol.54, No.4, p52-72, 2003

- [30] 信夫千佳子,セル生産システムの課題,桃山学院大学経済経営論集,Vol.50,No.4,2009
- [31] 中村 久人, 日本発 MOT 改新としての「セル生産方式」の創生に関する一考察, 経営力創生研究, Vol.2, No.1, pp.187-199, 2006
- [32] 董 彦文, 融合から生まれた高品質と競争力, 日本インダストリアル・エンジニアリング協会 IE レビュー, Vol.51, No.4, pp.63-68, 2010
- [33] 水口 博, セル生産導入によるリードタイムの短縮, 日本インダストリアル・エンジニアリング協会 IE レビュー, Vol.47, No.5, p.47-52, 2006
- [34] 金 辰吉, 経営効果に結びつけるセル生産実践の鉄則, 日刊工業新聞社 工場管理, Vol.50, No.10, pp12-21, 2004
- [35] 橋爪 裕, セル生産方式における作業者の統制メカニズム, 日本経営学会誌, Vol.22, pp.91-104, 2008
- [36] Bopaya Bidanda et. al., Human related issues in manufacturing cell design, Implementation Computers & Industrial Engineering, Vol.48, No.3, pp.507-523, 2005
- [37] Olorunniwo F.O. and Udo G.J., Cell design practices in US manufacturing firms, Production and Inventory Management Journal, Vol.37, No.3, pp.27-33, 1996
- [38] Wemmerlov U and Johnson D.J., Cellular manufacturing at 46 user plants: implementation experiences and performance improvements, International Journal of Production Research, Vol.35, No.1, pp.29-49, 1997
- [39] 秋野 晶二, セル生産方式における労働の変容--現代日本の職場労働--超過密労働の実態と仕組み, 新日本出版, pp.54-73, 2000
- [40] 岩村 幸治, 西濱 大佑, 田中 健太郎, 谷水 義隆, 杉村 延広", 生産計画を考慮した作業者の教育計画の作成手法に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814, 2014
- [41] 舘野 寿丈, 清水慶子", 作業者の技能レベルと教育を考慮した作業スケジュールリング支援, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.734, pp.216-224, 2007
- [42] Yanwen DONG, Harumi HARAGUCHI and Xiying HAO", Structural Equation Modelling of Human Factors and Their Impact On Productivity of Cellular Manufacturing, Innovation and Supply Chain Managemnet, Vol.8, No.1, pp.1-7, 2014

- [43] 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠", セル生産における技能向上 を目的とした作業者の配置に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.825, 2015
- [44] 師岡 孝次, 習熟性工学, 日本機械学会誌, Vol.71, No.596, pp.83-88, 1968
- [45] 千住 鎮雄 他, 作業研究, 日本規格協会, pp.191-194, 1980
- [46] Xiying HAO, Harumi HARAGUCHI and Yanwen DONG", An Experimental Study of Human Factors' Impact in Cellular Manufacturing and Production Line System, International Information Institute, Vol.16, No.7, 2013
- [47] Hirschmann W. B., Profit from the learning curve, Harvard Business Review, Vol.42, pp.125-139, 1964
- [48] 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠", セル生産システムにおける訓練の目的別による作業者の配置に関する研究, 日本経営工学会 2013 年春季大会, pp.104-105, 2013
- [49] 松永桂子, 中小企業の技能継承問題と基盤技術振興に関する政策, 島根県立大学 総合政策論叢, Vol.11, pp.143-161, 2006
- [50] 長島 孝, 横山 淳, 松田 信一, 中平 勝子, 福村 好美", 高度技能伝承のためのマルチメディアコンテンツ開発, 情報処理学会 コンピュータと教育研究会報, Vol.15, pp.81-87, 2005
- [51] 渋谷 正弘, 三上 行生, 飯田 憲一, 畑沢 賢一, "高齢化対応型職場づくりのための "Web による職場改善支援システム" の活用事例, 日本生産管理学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.83-89, 2005
- [52] 上田 芳弘, 加藤 直孝, 木村 春彦, 熟練技能者の模倣情報伝達による試行錯誤型タスク支援, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J82-A, No.5, pp.726-735, 1999
- [53] 鈴木 陽一郎, 小山 秀夫, 金 雁, 適切な技能伝承の進め方を定量的に選択する手法に関する研究(技能伝承過程における生産プロセスのシミュレーションによる再設計), 日本機械学会論文集, Vol.80, No.812, 2014
- [54] Nancy H. and Urban W., Reorganizing the Factory -Competing through cellular manufacturing-, Productivity Press, pp.424-429., 2002
- [55] 大橋 和正, 生産教育における技能訓練の効率化, 日本情報経営学会 オフィス・オートメーション, Vol.22, No.2, pp.44-49, 2001
- [56] 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, 國領 大介, セル生産における技能向上 を目的とした作業者の配置に関する研究(第 2 報, 熟練者による新人指導を考慮したモデル), 日本機械学会論文集, Vol.92, No.835, 2016

- [57] 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, 野中 朋美, 生産性と技能向上を目指したセル生産システムの効率的運用に関する研究, 精密工学会 2013 年度秋季大会, 2013
- [58] Harumi HARAGUCHI, Toshiya KAIHARA, Nobutada FUJII, Tomomi NONAKA", A Study on Operator Allocation Considering Skill Education in Cell Manufacturing Systems, ISFA(International Symposium on Flexible Automation) 2014, 2014
- [59] 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, セル生産システムにおける作業の発生頻度を考慮した訓練計画に関する研究, 精密工学会 2014 年度秋季大会, 2014
- [60] 坂爪 裕, セル生産方式の編成原理, 慶応義塾大学出版会, 2012
- [61] 独立行政法人 高齢・障害・求職者雇用支援機構, 作業集約化方式に関する調査, pp.112-170, 2001
- [62] 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, 國領 大介, セル生産における技能向上 を目的とした作業者の配置に関する研究(第 3 報, オーダ内容に変動を伴う場合の検討), 日本機械学会論文集, 採択決定
- [63] 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, 國領 大介, セル生産における技能向上 を目的とした作業者の配置に関する研究(第 4 報, 運用中の再配置・再スケジューリング), 日本機械学会論文集, 投稿中

本論文の構成

本論文の第 2 章は以下の論文からなる

- ・ 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠", セル生産における技能向上を目的とした作業者の配置に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.825, 2015
- ・ Harumi HARAGUCHI, Toshiya KAIHARA and Nobutada FUJII, A study on flexible operator allocation method for operator's training in cellular manufacturing systems, SICE(The Society of Instrument and Control Engineers) 2013 Annual Conference, Nagoya, Japan, 2013/9/13

第 3 章は以下の論文からなる

- ・ 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, 國領 大介, セル生産における技能向上を目的とした作業者の配置に関する研究(第 2 報, 熟練者による新人指導を考慮したモデル), 日本機械学会論文集, Vol.92, No.835, 2016
- ・ Harumi HARAGUCHI, Toshiya KAIHARA, Nobutada FUJII and Tomomi NONAKA, A Study on Operator Allocation Method Considering the Process of Skill Proficiency in Cell Manufacturing Systems, SICE(The Society of Instrument and Control Engineers) 2014 Annual Conference, Sapporo, Japan, 2014/9/12
- ・ Harumi HARAGUCHI, Toshiya KAIHARA, Nobutada FUJII, Tomomi NONAKA, A Study on Operator Allocation Considering Skill Education in Cell Manufacturing Systems, ISFA(International Symposium on Flexible Automation) 2014, Hyogo, Japan, 2014/7/14

第 4 章は以下の論文からなる

- ・ 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, 國領 大介, セル生産における技能向上を目的とした作業者の配置に関する研究(第 3 報, オーダ内容に変動を伴う場合の検討), 日本機械学会論文集, 採択決定
- ・ Harumi HARAGUCHI, Toshiya KAIHARA, Nobutada FUJII and Daisuke KOKURYO, A study on operator allocation and scheduling method considering demand fluctuations in cell manufacturing systems, SICE(The Society of Instrument and Control Engineers) 2015 Annual Conference, Hangzhou, China, 2015/7/28

第 5 章は以下の論文からなる

- ・ 原口 春海, 貝原 俊也, 藤井 信忠, 國領 大介, セル生産における技能向上を目的とした作業者の配置に関する研究(第 4 報, 運用中の再配置・再スケジュールリング), 日本機械学会論文集, 投稿中
- ・ Harumi HARAGUCHI, Toshiya KAIHARA, Nobutada FUJII and Daisuke KOKURYO, A study of designing for the operator training under an order change in cell manufacturing system, SICE(The Society of Instrument and Control Engineers) 2016 Annual Conference, Tsukuba, Japan, 2016/9/20-23(Scheduled)

参考論文

本論文以外の業績

- Yanwen DONG, Harumi HARAGUCHI and Xiyang HAO, Structural Equation Modelling of Human Factors and Their Impact On Productivity of Cellular Manufacturing, Innovation and Supply Chain Managemnet, Vol.8, No.1, pp.1-7, 2014
- Xiyang HAO, Harumi HARAGUCHI and Yanwen DONG, An Experimental Study of Human Factors' Impact in Cellular Manufacturing and Production Line System, Information, International Information Institute, Vol.16, No.7, 2013
- Harumi Haraguchi and Yanwen Dong: "An Experimental Study of Human Factors' Impact in Cellular Manufacturing and Production Line System", Proceedings of 2011 Asian Conference of Management Science & Applications (ACMSA2011), pp.381-389, December 21-23, 2011, Sanya, Hainan, China

謝辞

本研究を遂行するにあたり、本当に丁寧で思いやり深い御指導御鞭撻を賜わりました神戸大学 大学院システム情報学研究科 貝原俊也教授, 藤井信忠准教授, 國領大介特命助教に心から厚く御礼を申し上げます。また, お忙しい中, 本論文の副査をお受け頂き, 有意義なご助言を賜わりました大川剛直教授, 多田幸生教授に厚く深甚なる謝意を表します。

数々の貴重なご意見を賜りました青山学院大学 理工学部 野中朋美助教, 株式会社神戸製鋼所 梅田豊裕氏, 同 井筒理人氏に深く感謝申し上げます。

また, 遠くからエールを送り続けてくださった福島大学 共生理工学類 董彦文教授, 同 経済経営学類 井上健教授に深く感謝申し上げます。常に的確で前向きな御助言を頂きました学習院女子大学 国際文化交流学部 平野次郎前特別専任教授に深く感謝申し上げます。

研究室に配属されてから約 5 年間, 非常に多くの方々から暖かいご支援を賜わりました。本研究室の卒業生, 在学生の皆様は心から御礼申し上げます。皆様のおかげにより, 大変充実した研究生活を送ることができました。皆様のこれからのご活躍を期待しております。

最後になりましたが, 私の選択を常に応援してくれた両親, 様々な面で理解と協力をしてくれた夫と娘の玲貴子に心から感謝いたします。

2016 年 7 月 原口春海

神戸大学博士論文「セル生産システムにおける人的要因を考慮した作業者訓練に関する研究」全 103 頁

提 出 日 2016 年 7 月 4 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 原口春海

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。