

博士論文

見込生産環境下の生産座席システムにおける  
座席枠設定方法に関する研究

東京都立大学

大学院 システムデザイン研究科

経営システムデザイン学域

林 千宏

# 目 次

|   |           |
|---|-----------|
| <b>第1章 緒論</b> .....                       | <b>1</b>  |
| 1.1 研究背景.....                             | 1         |
| 1.2 管理技術の歴史的経緯.....                       | 2         |
| 1.2.1 生産システムの歴史的経緯.....                   | 2         |
| 1.2.2 生産システムに関する先行研究.....                 | 3         |
| 1.2.3 従来の生産スケジューリング方法の分類.....             | 7         |
| 1.2.4 生販統合型生産システムの重要性.....                | 8         |
| 1.3 生産座席システム.....                         | 9         |
| 1.3.1 生産座席システムの開発背景.....                  | 9         |
| 1.3.2 生産座席システムの概要および特徴.....               | 10        |
| 1.3.3 生産座席システムに関する先行研究.....               | 12        |
| 1.3.4 見込生産環境への生産座席システムの適用.....            | 14        |
| 1.3.5 見込生産環境下の生産座席システムに関する研究課題.....       | 15        |
| 1.4 本研究の目的.....                           | 16        |
| 1.5 本論文の構成.....                           | 17        |
| <br>                                      |           |
| <b>第2章 生産座席システムの定量的評価および座席枠設定方法</b> ..... | <b>19</b> |
| 2.1 本章の目的.....                            | 19        |
| 2.2 生産モデルの定式化.....                        | 19        |
| 2.2.1 生産モデルの仮定.....                       | 19        |
| 2.2.2 生産計画.....                           | 20        |
| 2.2.3 評価指標.....                           | 23        |
| 2.3 シミュレーション実験.....                       | 24        |
| 2.3.1 シミュレーションの設定条件.....                  | 24        |
| 2.3.2 シミュレーション実験結果.....                   | 26        |
| 2.3.3 実験結果の要約.....                        | 30        |
| 2.4 重回帰分析を用いた管理パラメータの推定.....              | 31        |
| 2.4.1 分析方法および分析結果.....                    | 31        |
| 2.4.2 管理パラメータ推定方法の提案.....                 | 33        |
| 2.5 本章のまとめ.....                           | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>第3章 固定ロットサイズ生産および補充生産方式への拡張モデル .....</b> | <b>35</b> |
| 3.1 本章の目的.....                              | 35        |
| 3.2 拡張モデルの定式化.....                          | 36        |
| 3.2.1 生産モデルの仮定 .....                        | 36        |
| 3.2.2 生産計画.....                             | 37        |
| 3.2.3 評価指標.....                             | 42        |
| 3.3 シミュレーション実験.....                         | 45        |
| 3.3.1 シミュレーションの設定条件.....                    | 45        |
| 3.3.2 予備実験.....                             | 47        |
| 3.3.3 シミュレーション実験結果.....                     | 48        |
| 3.3.4 実験結果の要約.....                          | 54        |
| 3.4 過不足のない管理パラメータ値の探索.....                  | 55        |
| 3.4.1 管理費用による総合評価 .....                     | 55        |
| 3.4.2 管理費用を低く抑える管理パラメータの探索 .....            | 58        |
| 3.4.3 管理パラメータの探索方法提案.....                   | 60        |
| 3.5 本章のまとめ .....                            | 61        |
| <br>  |           |
| <b>第4章 階層分析法(AHP)を用いた座席枠設定 .....</b>        | <b>62</b> |
| 4.1 本章の目的.....                              | 62        |
| 4.2 階層分析法(AHP)の適用 .....                     | 62        |
| 4.2.1 階層化.....                              | 63        |
| 4.2.2 評価指標の対比較.....                         | 63        |
| 4.2.3 管理パラメータ重要度および総合化.....                 | 66        |
| 4.2.4 整合性の確認.....                           | 68        |
| 4.2.5 階層分析法(AHP)適用結果の考察.....                | 71        |
| 4.3 AHP 重要度を用いた過不足のない管理パラメータ探索方法.....       | 72        |
| 4.3.1 評価指標重要度を用いた総合評価指標.....                | 72        |
| 4.3.2 過不足のない管理パラメータ値の探索.....                | 73        |
| 4.4 本章のまとめ .....                            | 76        |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>第5章 座席枠設定方法の提案</b> .....           | <b>77</b> |
| 5.1 本章の目的 .....                       | 77        |
| 5.2 実工程への適用事例 .....                   | 77        |
| 5.2.1 適用工程の概要 .....                   | 78        |
| 5.2.2 第3章の生産モデルとの関係 .....             | 78        |
| 5.2.3 適用工程における従来の管理パラメータ値 .....       | 86        |
| 5.2.4 適用工程における過不足のない管理パラメータ値の探索 ..... | 87        |
| 5.2.5 実工程への適用結果比較 .....               | 89        |
| 5.3 一般環境への座席枠設定方法の提案 .....            | 90        |
| 5.3.1 生産モデルの定式化における注意事項 .....         | 91        |
| 5.3.2 評価指標の一対比較における注意事項 .....         | 91        |
| 5.3.3 座席枠設定方法の提案 .....                | 92        |
| 5.4 本章のまとめ .....                      | 94        |
| <br>                                  |           |
| <b>第6章 結 論</b> .....                  | <b>95</b> |
| <br>                                  |           |
| 参考文献 .....                            | 97        |
| <br>                                  |           |
| 付録 .....                              | 107       |
| 付録1 記号一覧 .....                        | 107       |
| 付録2 生産モデルの比較 .....                    | 109       |
| <br>                                  |           |
| 研究業績 .....                            | 110       |
| <br>                                  |           |
| 謝辞 .....                              | 112       |

## 第1章 緒論

本論文では、見込生産環境において、生産座席システムをどの様に実工程へ適用させるかについて、シミュレーション実験、重回帰分析や応答曲面法による近似、階層分析法(AHP)などの様々な方法を多面的に考察したうえで適用方法を提案している。

生産座席システムとは、予め生産能力を計画的に用意し、新幹線の座席指定(空席予約)の様にスケジューリングを行い、生産部門と販売部門の間で生産情報(混雑状況など)を共有するシステムである。本システムは、ジョブ割当と同時に生販間の需給調整が行える利点と、専用ソフトを用いることなく導入できる容易性から多くの中小企業で採用されている。本システムの特徴として、生産計画の可視化、納期の確約性、在庫の仮想化が挙げられ、納期の確約性が高い生産計画を後工程や納入先へ提示すること(生産計画の可視化)で、透明性の高いシステム構築が可能となる。ここで、在庫の仮想化とは、納期の確約性から座席にジョブを割り当てた時点でそれらが将来の在庫(仮想在庫)とみなせることを指す。実在庫に需要を割り当てる方式に加え、仮想在庫にも需要を割り当てることができるため、実在庫の削減や突発的変更への対応力向上に寄与するものである。

本システムに関する研究は 1990 年代から行われているが、それらは注文生産や見込・注文複合生産を対象としており、見込生産を対象とする研究は多くない。また、生産座席システムにおいて、予め用意する生産能力をどの程度設けるかという座席枠設定が最も重要である。過少の座席枠は品切れを、過剰の座席枠は設備などの遊休(空席)を招くため、計画立案者には過不足のない座席枠設定が求められる。座席枠は、能力余力や基準在庫などを決定する管理パラメータによって設定されるため、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータ値の探索(推定)が求められるが、先行研究は適切な管理パラメータの存在範囲提示に留まっており、具体的な管理パラメータ値の探索方法まで言及していない。

以上より本論文は、見込生産環境下の生産座席システムを対象に、一般の製造工程に対して汎用的に適用できる、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータ値の探索方法を提案することで、計画立案者の意思決定支援を狙う。

### 1.1 研究背景

日本経済を牽引してきた製造業は、特に 1950 年代から 1970 年代までの高度経済成長期を支えてきたが、日本立地の工場は年々数を減らし、家電業界の凋落など日本のものづくりの危機が叫ばれている[1]。一方、自動車のトヨタ社やアパレルのユニクロ社などは現在でも世界に存在感を示しており、また、日本の名目 GDP に占める産業別割合(2019 年)においても製造業は 20.4%と大きな比重を占めていることから、製造業は現在もなお最重要産業のひとつに位置付けられている[2]。第二次世界大戦後の枠組みが 1980 年代後半から劇的に転換し、中国などの東アジア地域に直接投資を展開するなど、日本の製造業大手は国内完結型の生産分業体制から海外製造拠点の活用に移ったため、中小企業は更なる苦境に立たされた。この頃から産業の空洞化が叫ばれ始め、1991 年のバブル崩壊を機に 2000 年代までのいわゆる失われた 20 年と言われる不況に

突入した。その間、中小企業の多くは資金繰りにあえぐ事態となり、2008年のリーマンショックや2011年の東日本大震災が追い打ちをかけ、現在に至ってもなお厳しい経営環境に苛まれている。

日本の製造業における企業数は2016年時点で382,478社、内99.5%に当たる380,517社が中小企業として位置づけられ[3]、製造品出荷額を見ても中小製造業がその内の47.7%、付加価値額についても53.6%を占めている[4]。先の大震災を機に、特に自動車産業や電子機器製造業においてサプライチェーンの重要性が注目され、日本経済の更なる経済成長や構造改革の好機とみなす動きも活発となった。2012年に制定・施行された中小企業経営力強化支援法に基づく経営革新等支援機関の設置による、中小企業診断士などの専門家が中小企業の多様化・複雑化する経営課題に対してきめ細かい支援を行う活動や、2014年に設置されたよろず支援拠点による国・自治体の支援策活用を促す活動などが挙げられる[5]。この様に苦境に立たされ続けている中小企業ではあるが、この国の製造業を支える存在であることは現在でも変わらず、各中小企業は現場改善や業務プロセスの効率化など、生産性向上に向けて様々な策を講じ続けている。

2000年代に入り、IoT(Internet of Things)やAI(Artificial Intelligence)を活用したFA(Factory Automation)であるスマート工場が着目され始め、近年はRPA(Robotic Process Automation)活用の事務効率化やDX(Digital Transformation)などが生産性向上策として注目される。しかし、多くの中小企業は資金面や労働力が十分でないことから、これらの大掛かりな革新は容易でないため、各企業は作業工程の3M(ムダ・ムラ・ムリ)削減や5S(整理・整頓・清掃・清潔・躰)活動、QC(Quality Control)サークル活動など、比較的着手に容易な活動を中心に継続的に取り組んでいる。さらに、作業改善活動だけでなく生産計画立案の効率化についても取り組む必要があり、今もなおJIT(Just In Time)やMRP(Material Requirements Planning)など、様々な生産システム導入にSE(System Engineer)や企業コンサルタントの力を借りて取り組んでいる[6]。

この様な背景より、特に中小企業においては生産性向上の支援策として、その効果だけでなく導入のしやすさもまた重要と言える。本論文では生産計画立案の効率化について述べるが、特にその導入のしやすさについて有益である生産座席システムを取り上げ、様々な中小企業で導入されている本システムを効果的に活用するための設計方法について論じる。

## 1.2 管理技術の歴史的経緯

本節では、生産座席システムが着目される理由について、生産計画立案の効率化に関する管理技術の歴史的経緯から説明する。まず1.2.1項で生産システムの歴史的経緯を述べ、1.2.2項で生産システムに関する先行研究を説明する。ここで、先行研究の分類基準となる生産スケジューリングの種類について述べ、1.2.3項で従来の生産スケジューリングの方法を解説する。最後に、1.2.4項で生産座席システムを研究対象とした経緯について説明する。

### 1.2.1 生産システムの歴史的経緯

1940年代、米国自動車メーカーのGeneral Motors社が自動的に部品を供給するシステムとしてオートメーション生産を立ち上げた。1950年代には、工具の自動装着と加工を自動的に行う

NC(Numerically Controlled)工作機械が MIT(Massachusetts Institute of Technology)によって開発され、後の CAM(Computer Aided Manufacturing)に発展する。1960 年代、設計情報を CG(Computer Graphics)技術で支援し、データを電子媒体に保管する CAD(Computer-Aided Design)が開発され、その後 CAD/CAM システムとして一体化される。1970 年代では、生産数量をタイムバケットごとに示した基準生産日程と、所要材料を示した部品表、材料や仕掛品在庫を示した在庫表を用いて生産スケジュールや材料発注を行う MRP が誕生した[7]。なお、この MRP は工程能力を加味した MRPIIや流通分野の DRP(Distribution Requirement Planning)へ発展し、さらに会計分野を取り込んだ ERP(Enterprise Resources Planning)へと発展していく[1]。

製造業は市場要求が多様化するにつれ、他社製品と比較してより高い付加価値の競争が求められてきた。付加価値には、単に機能面や使いやすさだけでなく、タイミングよく製品を供給するという納期についても関心が高い。特に製造リードタイムを短縮したり、顧客の希望納期に対して先行や遅延なく納品したり、といった納期対応の向上に際しては、受注管理や生産計画、進捗管理などの生産情報を多く処理する必要がある。前述のシステム開発では生産の自動化が進められてきたが、それぞれのシステム間では生産情報に関する互換性が無いため、システムごとに同類の情報を保有し、更新していかなければならないという無駄が生じていた。

この問題を解決すべく、1980 年代に製造業における研究・開発、生産、販売という3つの業務を情報システムによって統合し、これをひとつの経営戦略の下で動かしていくシステムとして CIM(Computer Integrated Manufacturing)が普及する[8]。総合生産情報システムと位置付けられる CIM は、現在の CAD/CAM/CAE(Computer Aided Engineering)や生産技術、生産管理を総合データベースとして、コンピュータネットワークにより総合化を図るコンセプトを持つが、生産工程における加工・移動・組立・検査などの設備の自動化や生産工程の管理に加え、設計・販売・財務情報までを包括するシステムである。日本においては、1980 年代からのメカトロニクスの発展をベースに工場内の FA が進展することで日本的 CIM を形成した。この日本的 CIM はとりわけ生産・販売の統合に高い関心が寄せられ、顧客ニーズに素早く対応するための生販統合システムに繋がる[1]。

### 1.2.2 生産システムに関する先行研究

この様な背景から1990年代以降、様々な生産システムに関する研究が行われており、その概要を表 1-1 に示す。先行研究を大別すると、まず、縦軸は生産形態を表し、単一機械・並列機械・フローショップ・ジョブショップ・ハイブリッドフローショップと分類することができる。他方、対象とする生産環境として注文生産・見込生産・それら複合生産に区分でき、その区分を表の横軸で示す。また、表中の太字は生産座席システムに関する研究を表す。先行研究の内容については後述する。

まず、縦軸の生産形態は生産設備数や工程数、ジョブの流れ方によって分類され、その代表的な生産スケジューリングの種類として次の5種類がある。

#### (1) 単一機械スケジューリング:

1 台の機械を対象にスケジュールを作成する問題であり、ジョブの順番や生産数量の大きさの決定が主な意思決定になる。

表 1-1 生産システムの先行研究(概要)

|          |                   | 生産環境  |   |   |
|----------|-------------------|---|---|---|
|          |                   | 注文生産  | 見込・注文複合生産   | 見込生産  |
| 生産<br>形態 | 単一機械              | 田村ら(1994)[14], 大橋(2002)[11], 杉川ら(2008)[9], 翁ら(2018)[15]   |   | Agnes et al.(1997)[12], 李ら(2000)[13], Veatch et al.(2003)[10]   |
|          | 並列機械              | 孫ら(2001)[17], 森川ら(2001)[18], 渡辺ら(2007)[19]  | Tamura et al.(1997)[21]   | 市村ら(2001)[16], 新井ら(2004)[20]  |
|          | フローショップ           | 的場ら(1994)[39], Kher et al.(2000)[22], 堀川ら(2002)[26], 児玉ら(2008)[40], 和田ら(2016)[27], 中邨ら(2018)[41], 熊谷ら(2018)[28], 大宮(2020)[42]   | 松浦(1992)[43], 阿久澤(1993)[44], 高島(1993)[45], 阿久澤(1994)[46], Sennott et al.(2006)[23], 石垣ら(2008)[29]   | 坪根ら(1991)[30], 坪根ら(1992)[36], 坪根ら(1992)[31], Tsubone et al.(1994)[34], Tsubone et al.(1995)[32], 古田ら(1996)[33], 坪根ら(2004)[35], 佐藤ら(2005)[37], 大場ら(2014)[47], Song et al.(2015)[24], 富山ら(2020)[38], 趙ら(2020)[25] |
|          | ジョブショップ           | 岡庭(1993)[65], 久我(1994)[66], 冬木ら(1995)[52], 片岡ら(1996)[53], Tsubone et al.(1999)[54], 堀川ら(1999)[55], 黒屋ら(2000)[48], Suwa et al.(2007)[50], Hozak et al.(2010)[49], 伊呂原ら(2012)[57] | 長森ら(1997)[58], 長森ら(1999)[59], 石川ら(2000)[60], Wu et al.(2008)[61], Zhang et al.(2013)[51], 佐藤ら(2004)[56]   | 野中ら(2008)[63]   |
|          | ハイブリッド<br>フローショップ | 石淵ら(1998)[75], 今泉ら(1999)[76], 今泉ら(2001)[77], Arima et al.(2001)[78], Urbani et al.(2006)[79], 原嶋ら(2010)[80], 市来嵩ら(2017)[81], 藺ら(2021)[74]                                       | Uetake et al.(1995)[72], 大場ら(1996)[87], 大場ら(2000)[88], 小林ら(2001)[89], Tsubone et al.(2002)[90], 小林ら(2002)[91], 大場(2003)[92], 大場ら(2003)[93], Uetake et al.(2004)[94] | 佐藤ら(1994)[82], 大場ら(1995)[71], 植竹ら(1995)[83], 鈴木ら(1997)[84], 鈴木ら(1999)[85], 大森ら(2000)[86], 松本ら(2021)[73]   |

(※ 出版年順に記載, 太字は生産座席システムに関する研究を表す)

単一機械スケジューリング問題に関する先行研究はその構造上, 注文生産環境または見込生産環境に大別され, 杉川ら[9]は注文生産におけるスケジュール頻度を抑制する方法の提案について, Veatch et al.[10]は見込生産における在庫保管費用とバックオーダーコストの最小化について論じており, 両論文はいずれも単一機械の動的スケジューリング問題を対象としている。

単一機械スケジューリングの関連研究として, ジョブの滞留時間や納期遅れなどに着目した研究が多く見受けられ, 大橋[11]による注文生産環境の単一機械であるマシニングセンタに対する動的な工程計画法についての数学モデル構築および製造リードタイム短縮方法の提案などがある。一方, 見込生産環境を対象とした研究としては, Agnes et al.[12]による生産能力が限定された単一機械における在庫システムをヒューリスティックアプローチによって改善する方法や, 李ら[13]による品切れをバックオーダー化した発注点モデルの提案などがある。また, 単一機械の生産座席システムに関する研究(田村ら[14], 翁ら[15])もあるが, これらの詳細については 1.3 節で説明する。

(2) 並列機械スケジューリング:

同種の機械が複数ある場合のスケジューリング問題であり, 主に機械間の負荷バランス平準化や代替性(工程の共通化)の決定が取り扱われる。

並列機械スケジューリング問題に関する先行研究には, 市村ら[16]の見込生産環境におけるプラスチック製品の製造工程を対象とした複数の柔軟性(Machine flexibility, Routing flexibility, Process flexibility)評価に関する研究や, 孫ら[17]の注文生産環境におけるマシニングセンタを対象とした動的スケジューリング問題の近似解法提案などがある。他にも, 注文生産環境を対象とした研究では, 森川ら[18]による総滞留時間(メイクスパン)に着目したスケジューリング法の提案や, 渡辺ら[19]による納期ずれ(納期



遅れ)を最小化するスケジューリング方法の提案などがあり、見込生産では新井ら[20]がスケジューリング問題に対して列成形法を適用する方法を研究している。さらに Tamura et al.[21]は、見込・注文複合生産環境を対象とした生産座席システムのコンセプトについて述べている。

(3) フローショップスケジューリング:

1 製品を生産するために複数機械を通るスケジューリング問題で、主にジョブの投入順序の意思決定が取り扱われる。また、加工順序に従う生産設備の配列を決定する物流システムの構成に関する問題も存在する。

フローショップは実際の製造工程でも多く用いられている生産形態であり、全ての生産環境(注文生産・見込生産・見込注文複合生産)のそれぞれにおいて研究されている。一例を挙げると、Kher et al.[22]は注文生産環境下のロット生産工程を対象に、伝統的な PUSH 型のロット割当から PULL 型割当に切り替えることで、次工程への搬送頻度が減りマテリアルハンドリング性が向上することを明らかにしており、Sennott et al.[23]は見込・注文複合生産環境のフローショップにおいて、在庫保管費用と段取替え作業時間・コストに関する最適化問題について言及している。また Song et al.[24]や趙ら[25]は、見込生産環境下のフローショップにおけるリセット多期間制約サイクルモデルに関する最適配置法則について論じている。

他にも、注文生産環境では、堀川ら[26]が精密機器組立作業の多能工化に関する柔軟性について、和田ら[27]が生産の平準化と仕掛り量最小化のための混流生産ラインにおける生産の平準化と仕掛在庫量の最小化について、熊谷ら[28]が実企業を対象とした収益性に関する在庫価値評価モデルについて議論しており、石垣ら[29]は多段階生産ラインに応援作業者を編成することで仕掛在庫量を低減する見込・注文複合生産システムの設計方法を提案している。また、見込生産環境については、多段階生産計画における再計画法に関する研究(坪根ら[30], 坪根ら[31], Tsubone et al.[32], 古田ら[33])や柔軟性に関する研究(Tsubone et al.[34], 坪根ら[35]), 部品の共通化に関する研究(坪根ら[36], 佐藤ら[37])などがあり、鉄鋼プロセスへの動的ロットサイズスケジューリング適用について述べた富山ら[38]も見込生産を対象としている。

これら以外にもフローショップ対象の先行研究として多くの生産座席システムに関する研究(的場[39], 児玉ら[40], 中邨ら[41], 大宮[42], 松浦[43], 阿久澤[44], 高島[45], 阿久澤[46], 大場ら[47])があるが、それらについては 1.3 節で説明する。

(4) ジョブショップスケジューリング:

製品により加工順序が異なるスケジューリング問題で、前述のフローショップと異なり各機械でのジョブの作業順序が主な意思決定問題となる。

ジョブショップスケジューリングについては、製品ごとに異なる加工経路を滞留なくスムーズに流す方法について議論される研究が多く見受けられる。黒屋ら[48]は注文生産環境下のジョブショップスケジューリング問題に対し、特に飛び込みオーダーがある場

合に工程内滞留が生じないためのシステム設計方法を提案しており, Hozak et al.[49]も注文生産のジョブショップを対象として, RFID(Radio Frequency Identifier)をロット分割に活用することでマテリアルハンドリング性が向上することを明らかにしている。

ジョブショップに関する研究は注文生産環境や見込・注文複合生産環境を対象とする研究にも集中している。Suwa et al.[50]は, 注文生産環境を対象とした機械故障を伴う場合の動的スケジューリング問題に対して, 累積遅延指標を最小化する製作を提案しており, Zhang et al.[51]は, 見込・注文複合生産環境ジョブショップの動的スケジューリング問題を対象として, マルチサーバ待ち行列モデルなる方法を開発し, そのモデルによって見込品の在庫と注文品の滞留時間を最小化できると論じている。

他にも, 注文生産環境においては, オーダリリース方式の違いが評価指標に与える影響に関する研究(冬木ら[52], 片岡ら[53], Tsubone et al.[54])や, 生産システムの柔軟性に関する研究(堀川ら[55], 佐藤ら[56]), 伊呂原ら[57]によるマテリアルハンドリングルールに関する研究などがあり, 見込・注文複合生産についても, 評価指標を低く抑えるための生産システム設計に関する研究(長森ら[58], 長森ら[59], 石川ら[60])や, Wu et al.[61]による半導体製造工程に対するスケジューリング問題を対象とする研究, 神田ら[62]の動的在庫管理に関する研究などがある。

野中ら[63]は, Wu et al.[61]と同じ半導体製造工程ながらも所属工場を見込生産と位置付け, VCVA(Visualized Coefficient of Variation Analysis: 生産変動可視化技術)法を適用した生産性向上について述べている。見込生産はフローショップをとるのが一般的である[64]ことから, ジョブショップの見込生産を対象としたこの研究は珍しい。

岡庭[65]および久我[66]は注文生産環境における生産座席システムを対象とした研究となるが, これらの詳細については1.3節で説明する。

#### (5) ハイブリッドフローショップスケジューリング:

前述(3)のフローショップの派生問題として, ジョブにより一部の工程を飛び越すフローショップや, 一部工程に機械が並列される編成のフローショップ, また, 2段階のフローショップ工程において前工程がバッチ生産, 後工程が連続生産といった生産設備が異なるフローショップなどがあり, これらをハイブリッドフローショップと呼ぶ。

Narashimhan et al.[67]は, ガラス産業や鉄鋼産業, 製紙産業など多くの一般産業でハイブリッドフローショップが存在することを解説し, Guinet et al.[68]は, ハイブリッドフローショップにおける各ジョブ完了時間の最適化問題に近似解法アプローチが適すると述べている。また, Tsubone et al.[69]は総作業時間(メイクスパン)と仕掛在庫量に対するロットサイズと投入順序の関係を, Tsubone et al.[70]はスケジューリングと後工程の段取替え作業の関係を, それぞれハイブリッドフローショップを対象として評価している。

ハイブリッドフローショップは, 単純なフローショップと同様に見込生産や注文生産など様々な生産環境で用いられるため, 先行研究が対象とする生産環境も多岐に亘る。例えば, 大場ら[71]は2段階のフィルム製造ハイブリッドフローショップ工程を対象に,

ロットサイズが仕掛在庫量などに与える影響を明らかにしており、Uetake et al.[72]は、SPT(Shortest Processing Time)やLPT(Longest Processing Time)といった投入順序規則がメイクスパンに及ぼす影響について評価している。また、松本ら[73]は3工程(粉碎・乳化・充填)から成るプロセスチーズ製造ラインの見込生産ハイブリッドフローショップを対象として、需要と生産能力などの制約条件から成る設備投資に関する最適化問題を明らかにしている。他にも、藺ら[74]による、自動車部品の注文生産ハイブリッドフローショップを対象に納期遵守率や機械稼働率および段取替え作業を最適化するための、半導体組立工程で実用化されている分散協調スケジューリング P3D(Pseudo Periodical Priority Dispatching)法を応用したアルゴリズムの提案がある。

注文生産を対象とした研究として、スケジューリング問題を遺伝的アルゴリズムや分枝限定法などで最適解を探索する研究(石渕ら[75], 今泉ら[76], 今泉ら[77])や、Arima et al.[78]による組立工場での作業員配置問題、生産システムの再形態変化可能性に関する研究(Urbani[79], 原嶋ら[80])や、市来寄ら[81]の流動数分析の応用などがあり、見込生産に対する研究としては、佐藤ら[82]の部品と工程の共通化が評価指標に与える影響の評価や、大場ら[71]の派生である日程計画に関する研究(植竹ら[83], 鈴木ら[84], 鈴木ら[85], 大森ら[86])なども見受けられる。

見込・注文複合生産環境を対象とする研究に、大場ら[87]の生産能力と計画達成率との関係に着目した研究があるが、この派生として生産座席システムに関する研究(大場ら[88], 小林ら[89], Tsubone et al.[90], 小林ら[91], 大場[92], 大場ら[93], Uetake et al.[94])が多く取り組まれており、それらの詳細については1.3節で述べる。

以上から、表 1-1 の太字で示される生産座席システムに関する先行研究は、上記分類の様々なところで見受けられることが判る。これは生産座席システムの効果のひとつである生産部門と販売部門での情報共有化、つまり生販統合化が様々な環境で求められ、注文生産や見込生産およびそれら複合生産環境のいずれにおいても、生産座席システムがその生販統合に対して有益であると考えられていることを示している。生販統合の重要性については1.2.4項で述べるが、先んじて従来の生産スケジューリング方法の分類について述べる。

### 1.2.3 従来の生産スケジューリング方法の分類

生産スケジューリングには納期見積と生産資源の予約、作業の具体的実行計画の作成や、作業実施に関する決定と物的システムの予期しない変化に応じた計画の修正という目的がある。これら目的を満足するため、3M(Man・Machine・Material)などの保有資源を有効活用しつつ、顧客満足を如何に高めるかが生産システムに求められており、その評価項目は次の4つに分類される[7]。

- |                  |                           |
|------------------|---------------------------|
| (1) 生産量の最大化:     | 生産量, スループット, 工程間の負荷平準化度など |
| (2) 仕掛量の低減:      | 仕掛在庫, 在庫スペース, 在庫維持費用など    |
| (3) 生産リードタイムの短縮: | 生産リードタイム, 滞留時間など          |
| (4) 納期遵守:        | 要望納期充足率, 回答納期達成率[95]など    |

生産スケジューリング方法は、評価目的(生産量の最大化や仕掛量の低減など)や、工程の制約条件に依存する前項のスケジューリング分類(フローショップやジョブショップなど)の違いにより、体系的な整理が困難である。また、複数の生産スケジューリング方法を組合せて構築する場合もあるため、3M の有効活用を実現するためのスケジューリング問題はさらに複雑となる。そこで黒田[96]は、生産スケジューリングの方法を問題解決の特徴から次の3つの方法に分類している。

(1) OR(Operation Research)的アプローチ:

OR 的アプローチとは、スケジューリング問題を目的関数と説明変数および制約式を用いて表し、目的関数を最適化する方式である。その問題解決の代表例としてジョンソンのアルゴリズムがあるが、このアルゴリズムは $n$ ジョブ 2 工程フローショップのスケジューリング問題を対象としている。しかしながら、3 工程以上の問題は計算時間が指数的に増加してしまい、効率的なアルゴリズムが存在しないため、ラインバランシングやフローショップスケジューリング問題などの静的問題の解法とする発見的方法や、ジョブショップスケジューリングにおける投入順序の様な動的問題の解法としてシミュレーションが利用され、いずれも準最適解を求める方法として使用されている。

(2) AI 的アプローチ:

AI 的アプローチとは、人間が持つ知識をシステムに与え、生産スケジュールを自動的(もしくは半自動的)に求める方法であり、制約誘導理論やルールベースシステム、事例ベース推論などがある。

(3) Man-Machine system アプローチ:

前述の 2 アプローチがスケジューリングに関する情報を全てシステムに組み込むのに対し、この Man-Machine system アプローチは人間とシステムの親和性や人間が判断する合理性を重視する方法である。例えば、Man-Machine system のひとつである階層型アプローチでは、生産現場からの作業進捗情報を参照しながら、作業者が自己判断で次の作業の指示を出し、同時に納期や生産工程の負荷状況を確認できる環境となっている。作業者の経験則に依存する性質は否めないが、ノウハウをできる限り定量的に継承するためのアプローチとして活用される。

以上が従来の生産スケジューリング方法となるが、これらの方法はいずれも顧客からの引き合いや注文を受けてからの工程負荷状況に対応した基準リードタイムに基づく納期回答[54]や、全ての注文を確定してからスケジューラにより納期を確定する方法[97]である。しかしながら、これらの方法では納期回答などに、工程負荷状況の把握や全注文が確定するまでなどの時間を要してしまうため、その短縮を図る生販統合型の生産システムが望まれることとなった。

#### 1.2.4 生販統合型生産システムの重要性

前項で述べた従来の生産スケジューリング方法では、一旦プールされた受注情報を FCFS(First Come First Served)や EDD(Earliest Due Date), SPT などのディスパッチングルールに従ってスケジューリングする。ただし、これらの方法では、多様化や短納期化、正確かつ迅速な納期回答が望ま

れる顧客(市場)要求に対して応えることができない。製造業は、より市場ニーズを反映した製品開発から製品供給までのリードタイム短縮が求められており、そのためには生産現場と市場ニーズを把握しやすい販売部門が、直接に需給調整を行う必要がある[8]。

短納期化と同時に顧客への納期提示を如何に正確に行うかも問題であり、特に顧客が自社製品を使って生産する場合、顧客側の生産計画を乱さぬ様に納期を遵守することが必須となる。また、特に低成長が常態化していた1990年代において、ビジネス環境の構造が顧客要求の多様化による多品種少量化に変化してきた[6]。この対応が経営の重要課題となったことで、小ロット化などの生産システムの柔軟性を向上しながら、在庫圧縮と納期短縮を同時に行う営業力の向上が必要となり、生販間の需給調整を簡略化する新しいスケジューリング方法が論じられる様になった。

この様な背景より、正確かつ迅速な納期回答ができるシステムが求められ、そのために生販統合のシステムが求められてきた。生産座席システムは予め生産能力を計画的に用意したうえで、新幹線の座席指定(空席予約)の様にスケジューリングを行い、生販間で生産情報(混雑状況など)を共有することで、生産と販売の需給調整を簡略化することができる。前述の課題に対して、正確かつ迅速な納期回答が可能な生販統合型のスケジューリングシステムとして生産座席システムは着目され、現在様々な研究が進められている。なお、生産座席システムを適用した実際の製造工程では、システム適用工程のスケジュールを後工程が把握できることで生産部門内の3M(ムダ・ムラ・ムリ)削減に繋がったり、資材部門が所要資材をより正確に把握することができるために資材在庫低減に繋がったりなど、生販統合以外の付随効果も多く見受けられている。

### 1.3 生産座席システム

前節では、管理技術の歴史的経緯から生産座席システムがどのような経緯で着目されてきたかについて述べたが、本節では、その生産座席システムについての詳細を説明する。1.3.1項でその開発背景、1.3.2項で概要と特徴を解説する。1.3.3項で生産座席システムに関する先行研究を述べ、1.3.4項において見込生産環境へ適用する理由を、1.3.5項でその適用に関する研究課題を説明する。

#### 1.3.1 生産座席システムの開発背景

CIMが発展する中で、顧客志向を求めながらの従来規模の生産設備の組合せは日本的生産システムと呼ばれており[7]、この注文生産と多品種少量生産に対応した生産管理システムとして生産座席システムがある。

生産リードタイムが長い製品などでは、原材料や部品に至るまでを受注情報に紐づかせるのではなく、ある工程までは見込生産によって仕掛在庫を設け、受注後に仕掛品から最終製品までを生産する、という方法を用いる場合がある。この接点に当たる工程はボトルネック工程と位置付けられ、生産座席システムが適用される場合が多い。次工程以降はボトルネック工程よりも生産能力を有しているため、ボトルネック工程の生産割当に対して、後工程の標準製造リードタイムを加えることで顧客への納期が確定できる。この様に、生産座席システムは、ボトルネック工程の生産能力を

示す座席枠を販売部門に提示することで、顧客との引き合い時や受注時に明確な納期を顧客へ提示できるシステムである。さらに、生産割当後の座席枠は次工程にとって前工程の加工完了予定になるため、段取替え作業や資材調達などの準備ができ、工程内納期としても活用される。

大場ら[88]は本システムの一例として、カラーフィルム製造工場において元巻と呼ばれる約 2m×2,000m のロール状フィルムを原材料とし、顧客注文サイズへの切断工程の生産能力を座席枠とした。この中で、生産座席枠は包装工程内のボトルネックとなる裁断機に設定し、生産座席システムを導入することで顧客に対して納期回答を迅速かつ正確に行うことを明らかにしている。この様に生産座席システムとは、注文生産において予め生販間で合意した生産計画に確定注文を割り当てることで、納期即答できるスケジューリングシステムであり、田村ら[14]は生産座席システムにおける生産計画立案とスケジューリングの手続きを紹介し、数値実験を交えて MRP と比較している。

従来の生産管理システムでは、一旦顧客からの注文を受けた後に注文情報を一旦プールして資材所要量の計算を経て生産計画を作成するシステムとなっていたが、生産座席システムでは最初に月次などの総量生産計画で座席枠を作成し、それが生産能力に見合うか否かをチェックした後、販売部門が顧客からのオーダーを座席枠に随時予約していく。このため、スケジュールが示す最遅着手の前日までに 1 日分ずつ受注を割り当てられれば、標準製造リードタイムで納入できることになる(生産座席システムは主にボトルネック工程に適用され、非ボトルネック工程は十分な生産能力を有することから、ボトルネック工程の加工完了後、一定期間後に出荷可能とみなせる)。生産部門は、製造着手を可能な限り遅らせて確定受注だけを生産することができるので、JIT に基づく生産が可能となり、調達部門はその生産計画を共有しながら所要資材を準備することができる。

生産座席システムでは、生産・販売・在庫における受注と発注の仕組みを見直す管理システムの改革と、計画リードタイムや製造リードタイムの短縮を同時に行い、生販部門で連携した協調計画を実施することで物流情報の高度利用化を図っている。特に、生産座席システムの導入は、事前に生販で受注計画を考慮した生産能力を計画的に用意したうえで、新幹線の座席指定の様に空席を予約する感覚でスケジューリングを行うため、生販間での生産情報共有と同時に、生産と販売の需給調整を行える利点がある。この様な背景から生産座席システムは開発され、今もなお発展を繰り返しているシステムである。

### 1.3.2 生産座席システムの概要および特徴

受注時に製造設備の使用日程などにオーダーを割付け、顧客が要求する納期通りに生産するという生産座席予約方式[98]を用いた生産座席システムは、生産計画立案(生産能力の設定およびスケジューリング)から製作指示までを行うシステムであり、生産予定を新幹線の座席表の様に作成し、その空席を順次予約する様に生産予定を割り当てるなど、専用のパッケージングソフトなどを用いることなく比較的容易に導入できるスケジューリングシステムである。その一例を図 1-1 に示すが、縦軸が生産設備(例:1 m/c, 1 号機など)、横軸が生産日程、その中で区切られた升目が生産座席を表し、同日内の 1 列が当日の生産能力を示す座席枠となる。なお、図中の升目は割り当てられた製品種類ごとに濃淡差をつけて表している。

|          | 6/1  | 6/2  | 6/3      | 6/4  | 6/5  | 6/8  | 6/9  | 6/10 | ... |
|----------|------|------|----------|------|------|------|------|------|-----|
| 1<br>m/c | 製品Aa | Ab   | Cb       | Ca   | (空席) | Aa   | Ba   | Bb   | ... |
|          | Aa   | Ab   | 製品Ca     | Ca   | (空席) | Aa   | Ba   | Bb   | ... |
|          | 製品Ab | 製品Cb | Ca       | (空席) | (空席) | Aa   | Bb   | Aa   | ... |
|          | Ab   | Cb   | Ca       | (空席) | Aa   | 製品Ba | Bb   | Aa   | ... |
| 2<br>m/c | 製品Bb | Ba   |          |      | Cb   | Cb   | Ab   | (空席) | ... |
|          | Bb   | Ba   | (メンテナンス) |      | Cb   | Ab   | (空席) | Ca   | ... |
|          | Bb   | (空席) |          |      | Cb   | Ab   | (空席) | Ca   | ... |
|          | 製品Ba | (空席) |          |      | Cb   | Ab   | (空席) | Ca   | ... |

図 1-1 生産座席システムの一例

計画立案者はジョブ(生産ロット)を空席に割り当ててスケジュールリングするが、その前段階として需要と在庫などを考慮し予め座席数を増減させる。この増減が生産能力を決定する座席枠設定であり、この設定が品切れや過剰在庫などを防ぐ重要な意思決定となる。生産座席システムでは、予め設けた座席枠に生産ロットを如何に効率良く割り当てるかが計画立案者の重要な意思決定となるが、その前段階として生産座席数をどの程度設けるかという生産能力を決定するための座席枠設定もまた重要であり、その増減をコントロールする能力余力や基準在庫などをどの程度設けるかを決定するパラメータ(管理パラメータ)を適切に設定しなければならない。

生産座席システムの特徴には次の3点が挙げられる。

(1) 生販統合ツールとしての「生産計画の可視化」

新幹線の座席予約の様に生産工程に空きが有るか否かを視覚的に捉えることができ、受注後のスケジュールリングではなく事前に用意した生産座席に随時ジョブ(生産ロット)を割り当てる方式のため、顧客への納期回答が迅速に行える。さらに、急な飛込注文でも余力の有無をすぐに把握でき、ジョブを割り当てることが可能となる。また、その座席を埋めることが販売目標に置き換えられ、さらに調達部門も座席表を確認することで必要な資材をその生産予定までに調達するといった情報の共有化が図れる。

例えば図 1-1 の 1 m/c において、6/4~6/5 の空席を埋める様に販売活動を行ったり、6/5~6/8 の製品 Aa を製造するための資材を前日までに調達したりするなどである。加えて、設備補修(メンテナンス)予定なども明示できるため、様々な部門が一元的に予定を把握することが可能となる。

(2) 「納期の確約性」

厳密に言えば座席ごとの生産時間や座席前後の段取替え作業負荷などは各々異なるが、特に中小規模の工場ではそれらのコントロールが困難な場合も多く、各日の生産予定(座席数)の完遂を納期目標に置換する機会が多い。つまり、本システムはある程度の余裕を持たせた計画になってしまうが、反対に、その計画の実効性は高く、納期が確約できるシステムとして多くの中小企業で利用されている。

納期とは顧客への納品期日だけでなく、工程ごとの加工完了予定の意味合いも含み、生産座席システムによる納期の確約性は、顧客への納期対応のみならず、次工程の生産準備や資材調達などに対しても有益である。

(3) 「在庫の仮想化」

「納期の確約性」から、座席にジョブ(生産ロット)を割り当てた時点で、それらが将来の在庫(仮想在庫)とみなせることを指す。従来の実在庫に需要を割り当てる方式に加えて、仮想在庫(生産計画)にも需要を割り当てることが可能となるため、実在庫の削減に寄与する[47]。また、仮想在庫は実在庫と異なり現物管理ではないため、突発的な変更に対する柔軟性も高く、注文取消に対しても最小限の損害で対応することが可能となる。

1.3.3 生産座席システムに関する先行研究

以上より生産座席システムが着目され研究が進められてきたが、表 1-1 から生産座席システムに関する先行研究についてのみを抜粋し、図 1-2 にまとめる。横軸が注文生産環境か見込生産環境かを示し、その中間が見込・注文複合生産環境を表す。縦軸はフローショップを対象とするかジョブショップを対象とするかを示す座標であり、中間は単一機械またはハイブリッドフローショップを意味する。なお詳細は後述するが、図中右上部の点線枠は本論文の研究対象範囲を示している。

従来の生産座席システムの研究として、田村ら[14]が生産座席システムの概要や特徴を述べ、単一工程における従来システムのMRPと比較しており、受注してから生産計画を作成するMRPと比べて、予め設定されたスケジュールにオーダを割り当てる生産座席システムは、納期や生産能力を考慮した実行可能なスケジュールを作りやすいなどの利点を明らかにしている。一方、生産座席システム適用事例も多く、阿久澤[46]は(株)東芝青梅工場、久我[66]は豊田工機(株)、的場ら[39]は(株)日立製作所の事例を紹介しており、大場ら[88]はカラーフィルム生産の実工程に生産座席シ

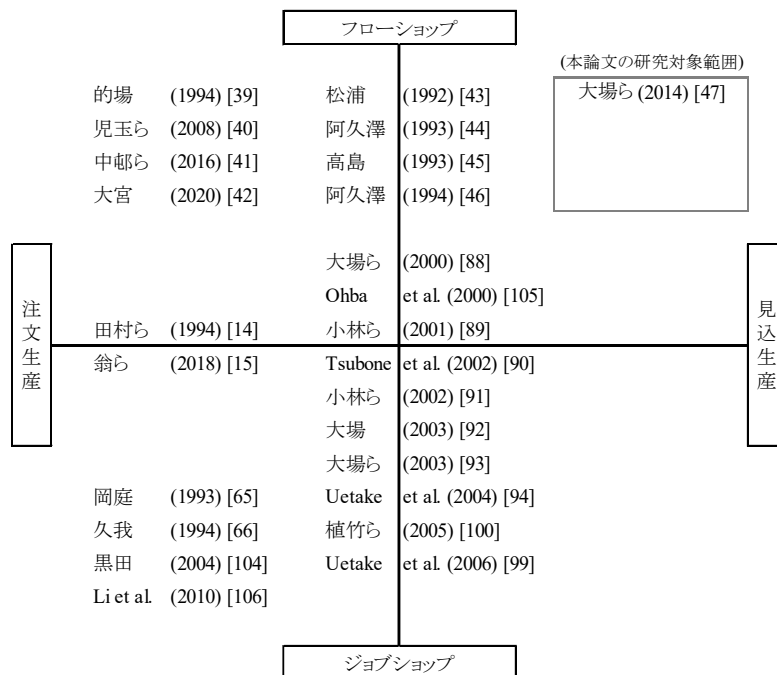


図 1-2 生産座席システムの先行研究



システムを適用することで計画リードタイムの大幅な短縮につながり、納期短縮に加えて在庫削減まで実現することが可能となったことを示している。しかしながら、いずれの先行研究も各筆者が所属する工場を対象としており、生産モデルが限定的であるため、汎用的な生産座席システムの適用方法については言及していない。なお、田村ら[14]と久我[66]は注文生産環境を対象としているため図 1-2 の左部に属しており、阿久沢[46]は見込・注文複合生産環境のフローショップが対象のため中央上部、的場ら[39]は注文生産フローショップ対象により左上部、大場ら[88]は見込・注文複合生産かつハイブリッドフローショップを対象とするため中央部に示している。

そこで小林ら[89], Tsubone et al.[90], 小林ら[91]は、単一工程やハイブリッドフローショップの多段階工程において、生産座席の大きさを決めるパラメータや見込品の座席枠にも注成品の座席枠を割り当てられる自由座席枠を設定するパラメータ(管理パラメータ)が、要望納期充足率や見込品の品切れ率に与える影響を明らかにし、効果的な生産座席システムの設計指針を示した。さらに大場ら[93]は、カラーフィルム製造工程を対象として、生産座席システムが持つ特性について、ルーティングフレキシビリティや自由座席枠および生産座席枠の構成についての 3 つの柔軟性調整が、評価指標である要望納期充足率や見込品の品切れ率に与える影響を明らかにしている。

しかしながら、久我[66]や大場ら[93]が課題として挙げた、機械故障などの内乱やオーダー変更などの外乱に対して、生産座席システムはどの様に対応すればよいかについては言及していないため、Uetake et al.[94]が柔軟性を組み込んだ生産座席システムの分析について、Uetake et al.[99]がフローショップ工程における生産座席システムの再生産計画法、植竹ら[100]がハイブリッドフローショップ工程における生産座席システムの再生産計画法について論じ、様々な柔軟性が評価指標に対する影響を調査するためのモデルを構築している。

この様に、生産座席システムに関しては事例研究([14], [46], [66], [39], [88]etc.)から理論研究([89]~[91], [93], [94], [99], [100]etc.)まで取り組まれているが、大半が注文生産や見込・注文複合生産環境を対象としているため、図 1-2 の右側部が示す通り、見込生産環境への適用に関する研究は極めて少ない(図 1-2 右下部は見込生産環境のジョブショップと位置付けられるが、見込生産は製品種類が限定的で製品ごとの加工手順や加工時間が同一なことからフローショップが採用されるのが一般的であり[64]、ジョブショップで見込生産を行う環境は稀であるため研究対象には含めていない)。さらに、見込生産環境に限らず、先行研究が効果的な生産座席システム設計について指針を示しておりながらも、具体的な設計方法(特に管理パラメータ値の設定方法)には言及していないため、実際の計画立案者に対する意思決定支援としては十分でないのが現状である。

近年では、中邨ら[41]による生産座席枠システムを 3D プリンター生産へ適用した場合の課題や可能性に関する議論や、翁ら[15]による ETO(Engineer To Order)生産に生産座席を拡張した受注座席を用いた受注仕様・納期見積の営業支援システム開発、大宮[42]の従来理論研究([89]~[91] etc.)における需要シミュレーションを実企業データから構成されるモデルに拡張したシミュレーションモデルの構築など、様々な環境への生産座席システム適用研究が行われている。これらはいずれも、生産座席システムが従来方式に代わる、より効果的なシステムであることを提言しており、生産座席システムが長年に亘って有用なアプローチのひとつとして用いられていることを意味する。

1.3.4 見込生産環境への生産座席システムの適用

この様に生産座席システムに関する研究は様々な環境を対象にして進められてきたが、前に述べた生産座席システムの特徴から、大場ら[47]は第三の特徴である「在庫の仮想化」に着目し、見込生産環境への生産座席システムの適用を考察した。注文生産における生産座席システムは、予め生販間で合意した生産スケジュールに確定注文を割り当てることで納期を即答できるスケジューリングシステムであるが、これを見込生産環境に適用させることで仮想在庫(生産計画)に需要を割り当てる事が可能となり、即時需要対応できるスケジューリングシステムとなることに加え、倉庫在庫と生産能力のバランスまでを組み込むことができるという考えである。

ここで、従来の伝統的な見込生産システムと生産座席システムの比較を表 1-2 に示す。従来システムでは、見込品の生産計画を生産者が生産能力をベースに作成し、製品在庫を貯め、その在庫に販売量を引き当てて需要に対処する。一方、見込生産の生産座席システムでは、生産計画を予め生販間で合意した生産座席として提示し、実需要を計画製品在庫に割り当て、出荷日程を即時に提示できるシステムとなる。生産座席システムが生販間で開示されることにより、時間単位の需要と連動したリアルタイム需給運用管理も可能になると考えられており、包装資材やプラスチックワイヤなどの見込生産工程で生産座席システムが用いられている。

見込生産環境では、生産設備の稼働時間を長くしたり、アイドル時間を短くしたりすることを目的としたスケジューリング問題が多くあるため、生産部門と営業部門の両方が頻繁に生産スケジュールを共有しなければならず、生産座席システムが持つ生販統合化の特徴がこれらの問題解決に対して非常に有効である。しかしながら、見込生産は製品在庫を需要予測に従って生産し、在庫から需要に対応する方式が大半であるため、製品ごとに異なる需要量や到着間隔に対して品切れや過剰在庫が問題となる[1]。

見込生産を対象とした先行研究は、先述の通り、在庫管理に着目した研究[10]や需要予測を主とした研究[101]が大半である。一般的な見込生産はフローショップ生産形態をとるため、そのスケジューリング問題は主にジョブの投入順序の意思決定問題となることから、より複雑なジョブショップなどの研究に注目が集まったことも致し方ないと考えられるが、近年では、工程一つひとつの作業遅れに着目した自己バランスラインに関する研究[102]や、一工程の遅れをペナルティ費用に置

表 1-2 従来の見込生産システムと生産座席システム

| 名称                                   | 定義[7]  | スケジューリング   | 需要引当   |
|--------------------------------------|--|--|--|
| 従来システム                               | FCFS<br>(First Come First Served)                    | ジョブ情報を一旦プールし、任意のタイミングで左記ルールに従って生産割当を行う(一定のプール期間を要する) | 製品在庫を倉庫に貯めて需要分を倉庫から出荷する(余りは需要のバラつきに対処する分として残す)生産が完了した製品を新たな在庫として追加保管する |
|                                      | EDD<br>(Earliest Due Date)                           |  |  |
|                                      | SPT<br>(Shortest Processing Time)                    |  |  |
|                                      | LPT<br>(Longest Processing Time)                     |  |  |
|                                      | SLACK<br>(Minimum Slack First)                       |  |  |
| 生産座席システム<br>(Production Seat System) | 受注時に、製造設備の使用日程・資材の使用予定などにオーダを割り付け、顧客が要求する納期通りに生産する方式 | ジョブが到着した時点で空席を探し、即時予約する                              | 在庫から引き当てる以外に、割当済座席を「仮想在庫」として引き当てることも可能                                 |

き換えて作業速度の異なる作業者を最適に配置するリセット多期間制約サイクル問題に関する研究(Song et al.[24], 趙ら[25])など, 単純なフローショップを対象としながらも, そのライン構成の最適化を図る研究は進められており, 今なお日本の製造業に対して存在感を示す見込生産環境は, 研究対象の重要な一つとして取り扱われなければならない。

大場ら[47]は, 見込生産が抱える品切れや過剰在庫の問題に対して, 能力余力や基準在庫の設定に関する管理パラメータが評価指標に及ぼす影響を定量的に評価することで, 生産座席システムの適用が品切れや過剰在庫のリスクに対応でき, 画一的な在庫引当管理に代わることを示した。さらに, 生産座席システムは在庫だけでなく座席にも需要を割り当てることができるため, 在庫が現物数量のみで管理されるシステムと異なり, 生産スケジュールに割り当てられた座席は時間と数量から成る予定として管理されることから, 突発的な変更などに対して容易に変更することが可能であるとしている。これは, 割当済座席が確度の高い納期を示すために将来の在庫(仮想在庫)と考えることができ, その仮想在庫に需要を割り当てられる点と, 仮に変更があった場合もあくまで仮想であることから容易に変更できる点が従来の見込生産システムより優れていることを意味する。そのため, 生産座席システムは需要変動に対する柔軟性も高く, 見込生産環境の有効な制御方法であると考えられ, 仮想在庫が実在庫を極小化することも明らかにすることで, 前述の過不足リスクに対応できることを示した。

近年の見込生産環境は, 従来と比べて多品種少量化されつつ, 在庫低減も求められ, 市場要求や需要変動に対する柔軟性の向上が課題とされている。見込生産といえども, 生産品種の切替えや突発需要に対する頻繁なスケジュール変更を要する 경우가多くあり, さらに, 一工程のスケジュール変更はその工程だけで完結せず, 後工程や協力会社, 顧客などの生産計画にも影響するため, 計画立案者には迅速かつ適切なスケジューリングが求められる。この頻繁なスケジュール変更に対して, 生産座席システムの「生産計画の可視化」という特徴が計画立案者だけでなく所要資材を調達する部門にとっても有益となり, 加えて, 「納期の確約性」という特徴が後工程などの生産計画に対しても効果的と考えられている。さらに, より厳しく削減が求められる在庫に対しても, 本システムの「在庫の仮想化」という特徴が安全在庫の圧縮などに効果的と考えられることから, 従来の管理方式に代わるシステムとして, 生産座席システムが多くの見込生産環境で適用されている。

### 1.3.5 見込生産環境下の生産座席システムに関する研究課題

生産座席システムは事前に生販で受注計画を考慮した生産能力を計画的に用意したうえで, 新幹線の座席指定(空席予約)の様にスケジューリングを行うため, 生販間での生産情報共有と同時に, 生産と販売の需給調整を行えるシステムであるが, 需要と在庫などを考慮して生産能力を決定する座席枠設定が計画立案者にとって重要な意思決定となる。

生産座席システムの見込生産環境への適用に関する研究は, 2014 年の大場ら[47]による提案が初めてであり, 「在庫の仮想化」という特徴から品切れや過剰在庫のリスクに対応できる有益なシステムであることが示されているが, 先行研究は図 1-2 の右上部の通り他に見受けられないため, 更なる議論が必要とされる研究対象範囲である。

大場ら[47]は能力余力と基準在庫の管理パラメータ設定が品切れと在庫に及ぼす影響を評価しているが、例えば品切れと在庫を共に最小化する様な設定方法までは言及しておらず、実際の計画立案者に対する意思決定を支援するためには、より詳細な根拠の提示が必要となる。小林ら[91]は、見込・注文複合生産環境を対象とした研究ではあるが、より具体的な座席枠設定方法を提案しており、見込生産環境下においても同様の提案を行うことが課題として挙げられる(小林ら[91]の提案については第2章で説明する)。

見込生産環境下の生産座席システム特有の評価指標として、段取替え作業および空席についても評価する必要があり、ロットサイズといった管理パラメータも追加する必要がある。詳細は第3章で説明するが、適切な座席枠設定を行うために、複数の管理パラメータと評価指標の関係を考察する必要があり、多目的・多変数の複雑なスケジューリング問題となるため、階層分析法(AHP:複雑なマルチ基準決定状況で意思決定を助ける体系化された方法論[103])などの手法を用いて、より重要とされる管理パラメータや評価指標を絞り込むことも有効と考える。

以上を踏まえ、見込生産環境下で生産座席システムを適用している実際の製造工程に対して、品切れや在庫といった評価指標を低く抑える効果的な座席枠設定方法を提示することが研究課題として挙げられる。

#### 1.4 本論文の目的

前節で述べた課題を解決するために、本論文では、次節に示す構成に従って生産座席システムの利点を明らかにし、見込生産環境下での生産座席システムにおいて、一般の製造工程に対して汎用的に適用できる、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータ値の探索方法を提案することを目的とする。ここで過不足のない座席枠設定とは、例えば望小評価指標を最小化する管理パラメータの設定を意味する。そのために、大場ら[47]の生産モデルを、実在の工場を想定した補充点生産方式の固定ロットサイズ見込生産まで拡張する。さらに、能力余力や基準在庫などをどの程度設けるかについて決定するパラメータ(管理パラメータ)が、品切れや在庫などの評価指標に及ぼす影響を定量的に評価する。なお、これら複数の評価指標を同時に最適化することは困難なため、各評価指標を総合的に評価する指標を用いることで、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータ値の探索方法を提案する。

生産座席システムにおける座席枠設定方法については管理パラメータの設定が重要となるが、管理パラメータを変化させることで評価指標に対してどのような影響が及ぼされるかを定量的に評価し、その結果を用いて重回帰分析や応答曲面法による近似を行うことで、品切れや在庫といった望小評価指標を低く抑える管理パラメータ値を探索することが可能になる。また、実際の計画立案者の定性的な感覚を数値化できる階層分析法(AHP)を実工程の座席枠設定に活用することで、複数の管理パラメータや評価指標の中から、より重要度の高い項目を絞り込むことができる。

生産座席システムは、専用のパッケージングソフトなどを用いることなく導入できるシステムであるため、その導入のしやすさから多くの中小企業で採用されている。前述の様なプロセスを示し、座席枠設定方法を提案することで、計画立案者の意思決定に対する一助を得ることができ、日本の

製造業を支える中小企業の生産性向上支援に寄与するものとする。また、実際の製造工程に近い生産モデルを提示することで見込生産特有の評価方法を示すことができるため、今なお多くの企業が抱える見込生産環境に関する問題に対して、より詳細な検討を行うことが可能となる。

1.5 本論文の構成

本論文の構成について図 1-3 に示す。

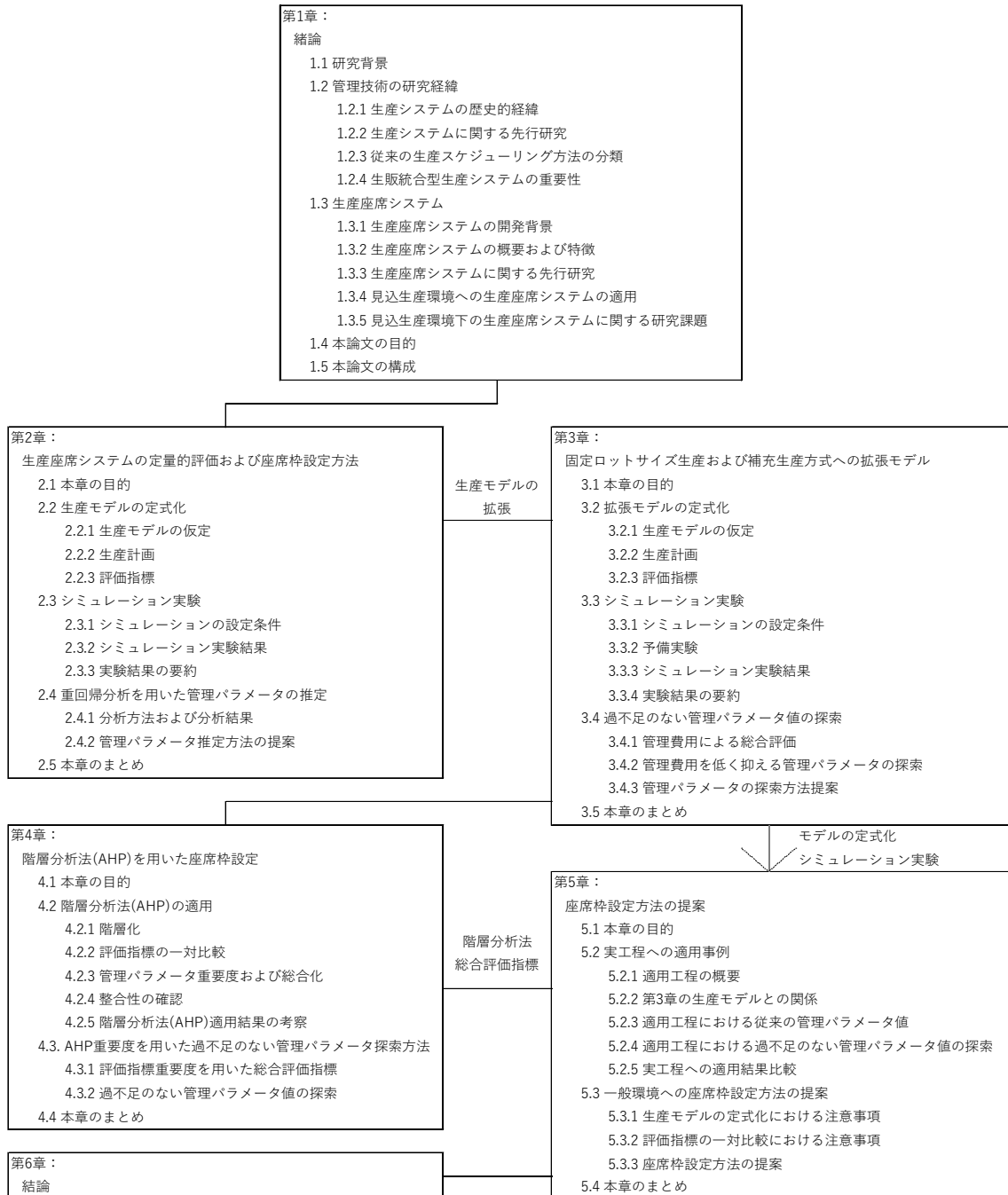


図 1-3 本論文の構成

第1章「緒論」では、生産システム関連の研究経緯や既存の研究をまとめ、生産座席システムを研究対象とする理由について述べている。また、生産座席システムの特徴や、見込生産環境へ適用する理由などを述べ、その課題や研究目的、意義についてまとめている。

第2章「生産座席システムの定量的評価および座席枠設定方法」では、大場ら[47]のモデルを基に、需要量や在庫量算出などの詳細な定式化を行い、評価指標(品切れ、在庫)に対して定量的な評価を行う。さらに、重回帰分析による近似を用い、各評価指標を総合的に低く抑える能力余力と基準在庫の管理パラメータ推定方法を提案する。先行研究の多くが適切と考えられる管理パラメータの存在範囲提示に留まるのに対し、より具体的な管理パラメータ値の推定方法を示す。

第3章「固定ロットサイズ生産および補充生産方式への拡張モデル」では、まず、第2章の生産モデルを補充点生産方式の固定ロットサイズ見込生産モデルに拡張し定式化する。管理パラメータに固定ロットサイズ生産特有のロットサイズを決定するパラメータを追加し、評価指標にも段取替え作業負荷や生産座席システム特有の空席(一般的には設備などの遊休に該当する指標)を加えることで、実際の製造工程に近い見込生産環境下の生産座席システムを再現することができ、より詳細な考察を行うことが可能となる。さらに、このモデルを基にシミュレーション実験による定量的評価を行い、実験結果から各評価指標を低く抑えられている管理パラメータのデータを抽出し、複数の管理パラメータを座標とする空間内で曲面に近似することで、定量的かつ視覚的に各評価指標を総合的に低く抑える管理パラメータ値が探索できることを示す。

第4章「階層分析法(AHP)を用いた座席枠設定」では、第3章の提案方法をより定量的に改善するため、意思決定における恣意性(曖昧さ)を排除できる階層分析法(AHP)を適用させた座席枠設定方法を示す。実工程における管理パラメータや評価指標の重要度は製造・営業・生産管理などの部門(立場)ごとに異なるため、対象工程の各部門責任者による評価指標の一对比較や、第3章で得られた実験結果を用いた管理パラメータの一对比較を行い、AHPを用いることで定量的に重要度が算出できることを示す。また、AHPによって、元々の3種の管理パラメータ(説明変数)と4つの評価指標(目的関数)から成る複雑な最適化問題が、2説明変数・2目的関数の問題に近似できることも示す。さらに、AHPによる評価指標重要度を用いた効果的な管理パラメータ値の探索方法についても明らかにする。

第5章「座席枠設定方法の提案」では、第4章で提示した座席枠設定方法を実工程に適用した実例および適用効果を示し、その方法の実効性について明らかにする。そのうえで、一般の見込生産環境にも汎用的に適用できる座席枠の設定方法を提案する。

第2章から第5章までで用いる各種記号の説明を巻末の付録1に纏めており、適宜参照されたい。その中で、アクセント符号を付与した記号をいくつか用いているが、 $\bar{\phantom{x}}$ は平均値(例:平均需要量 $\bar{d}_h$ )、 $\hat{\phantom{x}}$ は推定値(例:需要予測量 $\hat{d}_{h,t}$ )、アクセント無しは実際の値(例:実需要量 $d_{h,t}$ )、をそれぞれ意味している。

第6章「結論」では、本論文における結論と今後の課題を示し、本論文を総括する。

以上より、実際の製造工程を意識した見込生産環境下での生産座席システムにおける、より効果的な座席枠設定方法の提案を行う。

## 第2章 生産座席システムの定量的評価および座席枠設定方法

### 2.1 本章の目的

生産座席システムに関する先行研究として、小林ら[91]は見込・注文複合生産を対象に、まず市場環境や製造環境を定式化し、どの程度の能力余力や基準在庫を設けるかについて決定するパラメータ(管理パラメータ)が評価指標に対して及ぼす影響を分析しており、そのうえで経営方針としての任意基準を満たす管理パラメータ範囲を算出する、という設計方法を提案している。しかしながら、実際の製造工程では具体的に管理パラメータをどの値に設定すればいいかという意味決定が求められており、管理パラメータの範囲提示のみではその設定が困難な場合が多く、より具体的な管理パラメータ値の提案が求められる。

本章では、見込生産環境における生産座席システムを対象とし、過不足のない座席枠設定のための具体的な管理パラメータ値を推定する方法を提案する[107]。見込生産フローショップへの生産座席システムを対象とし、大場ら[47]が検討した生産モデルを基に、需要量や在庫量などの算出に関する詳細な定式化を行う。次に、能力余力と基準在庫を決定する2種類の管理パラメータを変化させ、品切れや在庫といった評価指標に対してどの様な影響を及ぼすかをシミュレーション実験によって明らかにする。さらに、その結果を用いた重回帰分析による近似を適用することによって、品切れや在庫を低く抑える管理パラメータ値を推定することが可能となることを示す。これら一連の手順を具体的な管理パラメータ値の推定方法として提案し、実際の製造工程における意思決定を支援することを本章の目的とする。

### 2.2 生産モデルの定式化

本節では、大場ら[47]の生産モデルを基に、次節のシミュレーション実験のための生産モデルを定式化する。加えて、品切れと在庫を同時評価する新たな評価指標として在庫コストを導入する。2.2.1項では生産モデルの仮定を、2.2.2項では生産計画を、そして2.2.3項では評価指標について各々説明する。なお、ここで用いる記号説明を巻末の付録1に纏めるので、適宜参照されたい。

#### 2.2.1 生産モデルの仮定

本章を通じて以下を仮定する。

- (ア) 対象とする製造工程は見込生産環境とし、製品種類は $H$ 種類とする。
- (イ) 製造工程は $M$ 段階の多段階フローショップとし、ボトルネック工程が存在する。
- (ウ) ボトルネック工程は別工程へ移動しないものとし、他工程は十分な生産能力を有する。
- (エ) ボトルネック工程の生産計画に生産座席システムを適用する。

特に(イ)(ウ)は、 $M$ 個の工程を持つ製造工場において、工程全体の生産能力はボトルネック工程の生産能力に依存するという考えに基づき、ボトルネック工程の生産計画に他の工程の生産計画を合わせる(同期させること)を意味している。

次に、生産計画の対象期間やリードタイムおよび在庫保管場所に関する仮定を以下に規定する。

(オ) 生産計画は1週間(L日間)単位で立案するものとする。

(カ) 生産リードタイムはボトルネック工程での加工完了後から後工程の標準製造リードタイム分(一定期間)とする。

(キ) 保管場所には十分なスペースがあるものとするが、在庫量に比例した保管料を要する。一般的に在庫保管場所に悩まされる場合は多いが、外部倉庫などを活用するなどに対応可能として在庫量に比例する保管料を設けている。

### 2.2.2 生産計画

生産計画には、以下3段階で構成される階層型生産計画を適用する。(1)の基準在庫設定が上位計画、(2)の座席枠設定(負荷計画)が中位計画にあたり、(3)の座席割当および生産指示が下位計画に該当する。

基準在庫設定は適宜変更されるものだが、中長期間の在庫(過不足)状況を鑑みて設定するため、頻繁に変更されるものではない。また、座席枠設定(負荷計画)は各週末に翌々週分を立案し、座席割当および生産指示は各日末に翌日分を確定するものと仮定する。

#### (1) 上位計画:基準在庫設定

まず初めに、 $h = 1, 2, \dots, H$ に対して、式(2.1)で示す製品種類ごとの基準在庫量 $SI_h$ を設定する。

$$SI_h = \bar{d}_h \times \varphi \quad (2.1)$$

ここで、 $h$ は製品種類を表す記号であり、 $\bar{d}_h$ は週あたりの製品 $h$ の平均需要量を示す。また、 $\varphi$  ( $\varphi > 0$ )は、それぞれの製品において品切れを予防するため、需要予測量の定数倍を基準在庫量として設定するパラメータ(管理パラメータ)であり、基準在庫パラメータと呼ぶ。基準在庫パラメータ $\varphi$ は、需要変動を吸収するために予めどの程度の在庫を設けるかを決定するものであり、過小であれば品切れを招き、過大であれば過剰在庫を生じさせてしまうパラメータである。

#### (2) 中位計画:座席枠設定(負荷計画)

次に、負荷計画としての座席枠設定の概要を図2-1に示す。図の上段部は計画対象週の生産能力設定に該当し、需要予測量と基準在庫量の合計から推定在庫量を減じて生産能力を設定する。当該週の生産能力を図下段部の様に期間内の日数で均等分配して各日の生産座席数を決定する。

まず、 $h = 1, 2, \dots, H$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(2.2)で示す $t$ 週のボトルネック工程の稼働可能時間 $MS_t$ を、当該週の前々週末に決定する(図2-1上段部)。なお、 $t = 0$ に対して $MS_0 \equiv 0$ であり、初週および第2週の $MS_t$ については、シミュレーション開始時に設定している。また、 $t$ は週を表す変数、 $T$ はシミュレーション期間(週数)である。

$$MS_t = \bar{m}_b \times \sum_{h=1}^H \{(1 + \varepsilon) \hat{d}_{h,t} + SI_h - \hat{I}_{h,t-1}\} \quad (2.2)$$

ここで、 $\bar{m}_b$ はシミュレーション時に与えるボトルネック工程の平均加工時間である。次に、



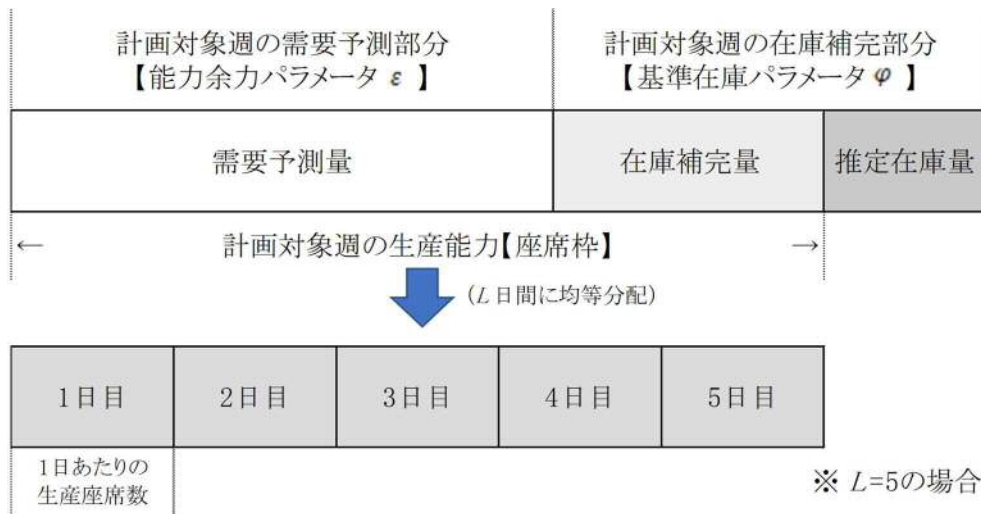


図 2-1 座席枠設定(負荷計画)の概要

$\varepsilon$  ( $\varepsilon \geq 0$ )は、需要予測に対する実需要のバラつきを吸収する目的で設定するパラメータであり、能力余力パラメータと呼ぶ。このパラメータを適切に設定することで需要予測に対する実需要のバラつきを吸収することができるが、過大設定の場合、実需要量が需要予測量よりも下振れした際に過剰な生産能力となってしまふ。 $\hat{d}_{h,t}$ は $t$ 週の製品 $h$ の需要予測量を表し、実環境では需要実績や前々週末時点での販売予測などから計画立案者が任意に推定するものであるが、シミュレーション上では平均 $\bar{d}_h$ 、変動係数 $CV$ の正規分布に従う乱数として設定することとしている。さらに、 $SI_h$ は式(2.1)で算出した製品 $h$ の基準在庫量である。 $SI_h$ 内には基準在庫パラメータ $\varphi$ が含まれるため、 $t$ 週のボトルネック工程の稼働可能時間 $MS_t$ の算出においても基準在庫パラメータ $\varphi$ の設定が関係することとなる。また、 $\hat{I}_{h,t}$ は $t$ 週末の製品 $h$ の推定在庫量を表しており、 $h = 1, 2, \dots, H$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(2.3)で与えられる。なお、 $t = 0$ に対して $\hat{I}_{h,0} \equiv 0$ とする。

$$\hat{I}_{h,t} = \begin{cases} I_{h,t-1} + \hat{p}_{h,t} - \hat{d}_{h,t} & (I_{h,t-1} + \hat{p}_{h,t} - \hat{d}_{h,t} \geq 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.3)$$

$I_{h,t}$ は $t$ 週末の製品 $h$ の实在在庫量、 $\hat{p}_{h,t}$ は $t$ 週の製品 $h$ の推定生産量を表し、これらは $h = 1, 2, \dots, H$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、シミュレーション内で式(2.4)および式(2.5)で与えられる。なお、 $t = 0$ に対して $I_{h,0} \equiv 0$ および $\hat{p}_{h,0} \equiv 0$ とする。

$$I_{h,t} = \begin{cases} I_{h,t-1} + p_{h,t} - d_{h,t} & (I_{h,t-1} + p_{h,t} - d_{h,t} \geq 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\hat{p}_{h,t} = (1 + \varepsilon)\hat{d}_{h,t} + SI_h - I_{h,t-1} \quad (2.5)$$

ここで、 $p_{h,t}$ は $h = 1, 2, \dots, H$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(2.6)で示される $t$ 週の製品 $h$ の実生産量であり、 $t = 0$ に対して $p_{h,0} \equiv 0$ とする。

$$p_{h,t} = \hat{d}_{h,t} + SI_h - I_{h,t-1} \quad (2.6)$$

ここで式(2.3)に関し、多くの先行研究では在庫がマイナス値をとらない制約条件を設けたり[38]、マイナス値が発生したとしてもその分をバックオーダー(積み残し)として翌期の需要量に追加したり[13]することで、問題を線形化する研究が多く見受けられるが、実際の製造工程ではそのマイナス値を品切れとして失注する場合も多くあるため、実状に近づけることを意図して本論文においては式中の分岐条件を設ける。また、 $d_{h,t}$ は $h = 1, 2, \dots, H$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(2.7)で与えられる $t$ 週の製品 $h$ の実需要量である。

$$d_{h,t} = \sum_{j=\{t-1\}L+1}^{t \cdot L} d_{h,j} \quad (j = \{t-1\}L+1, \{t-1\}L+2, \dots, t \cdot L) \quad (2.7)$$

ここで、 $j$ は日を表す変数であり、 $d_{h,j}$ は平均( $\bar{d}_h/L$ )、変動係数 $CV$ の正規分布によってシミュレーション内で与えられる $j$ 日の製品 $h$ の実需要量である。上記の推定生産量と実生産量および実需要量について、大場ら[47]ではこれらの算出方法を言及していないが、本論文では式(2.4)~(2.7)で定式化している。

$MS_t$ は、図 2-1 上段部の通り需要予測部分と在庫補完部分から成り、需要予測への対応として能力余力パラメータ $\varepsilon$ を、在庫補完への対応として基準在庫パラメータ $\varphi$ を用いて、全体の生産能力となる座席枠を設定している。需要予測量や在庫状況を鑑みて、週ごとに生産能力を変動させる計画となる。

式(2.2)で設定した生産能力( $t$ 週の稼働可能時間 $MS_t$ )を当該週内の各日( $L$ 日間)に均等分配する(図 2-1 下段部)が、これは $t = 1, 2, \dots, T$ に対して式(2.8)で与えられる。

$$SS_j = [MS_t/L] \quad (j = \{t-1\}L+1, \{t-1\}L+2, \dots, t \cdot L) \quad (2.8)$$

ここで、 $SS_j$ は $j$ 日の生産座席枠数である。同一週内における各日(例: $t$ 週における $j = \{t-1\}L+1, \{t-1\}L+2, \dots, t \cdot L$ )の $SS_j$ は一定となるが、 $MS_t$ は週ごとに異なるため、翌週内における各日(例: $(t+1)$ 週における $j = t \cdot L+1, t \cdot L+2, \dots, \{t+1\} \cdot L$ )の $SS_j$ とは異なる。つまり、各日の $SS_j$ は週ごとに異なることを式(2.8)で表している。

### (3) 下位計画:座席割当および生産指示

座席割当は、大場ら[47]が検討したモデルと同様に、前項で設定した各日の生産座席枠に対し、フォアワード方式[52]に従って座席割当を行う。その例を図 2-2 に示す。なお、下記説明に併記する丸数字は、図 2-2 の中で当該説明に該当する生産座席の箇所を表すため、それぞれ説明と図を照合されたい。

まず、 $(j-2)$ 日に到着した需要量を在庫から出荷し、残在庫量と基準在庫量の差をFCFS(First Come First Served)ルールに従い翌日の空席に割り当て(①②③)、在庫が常に基準在庫量を維持する様に生産する。次に、 $(j-1)$ 日未到着の需要も同様に割り当てる(④)が、 $j$ 日の空席が需要量より少ない場合は、 $(j+1)$ 日に繰り延べて割当を行う(⑤)。 $j$ 日の空席に対しては、 $(j-1)$ 日末の实在在庫量と基準在庫量の差を製品ごとに算出し、その差の比率に従って各製品を配分し割り当て(⑥)、空席が生じない様に座席を埋める。(①~⑤は製品種類ごとの割当だが⑥のみ複数種類を合算したものの割当である)

最後に、各日末に翌日分の割当を確定させて、生産指示を行う。

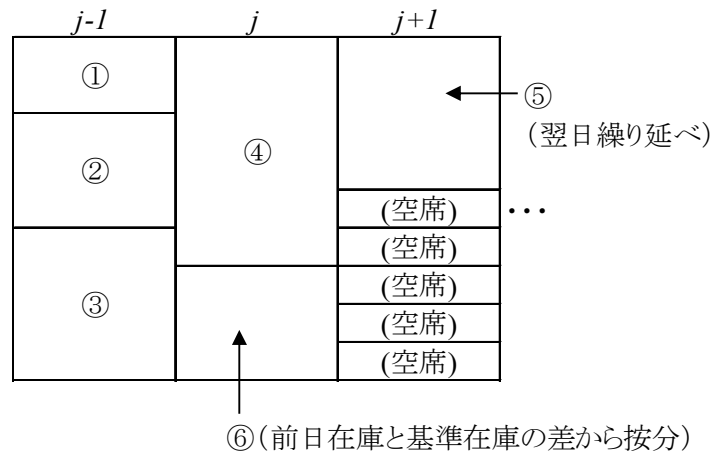


図 2-2 座席割当の例

### 2.2.3 評価指標

見込生産は製品在庫を需要予測に従って生産し、在庫から需要に対応する方式であるため、製品ごとに異なる需要量や到着間隔に対して品切れや過剰在庫が問題となる[64]。そこで本章では、次の 3 つの評価指標を取り扱う。次節のシミュレーション実験で得られる結果として品切れ率 $\alpha$ と平均在庫率 $\beta$ を用い、さらにそれらを総合的に評価するために在庫費用 $IC$ を定義する。

#### (1) 品切れ率 $\alpha$

品切れ率 $\alpha$ は、実需要量に対する品切れ量の割合として、式(2.9)で与えられる。

$$\alpha = \frac{\sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T U_{h,t}}{\sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T d_{h,t}} \quad (2.9)$$

$$U_{h,t} = \begin{cases} 0 & (p_{h,t} - d_{h,t} + I_{h,t-1} \geq 0) \\ |p_{h,t} - d_{h,t} + I_{h,t-1}| & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.10)$$

ここで $U_{h,t}$ は、 $h = 1, 2, \dots, H$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、 $t$ 週における製品 $h$ の品切れ量であり、式(2.10)で与えられる。なお、 $t = 0$ に対して $U_{h,0} \equiv 0$ とする。 $p_{h,t}$ は $t$ 週における製品 $h$ の実生産量であり、 $d_{h,t}$ は平均 $\bar{d}_h$ 、変動係数 $CV$ の正規分布によってシミュレーション内で与えられる $t$ 週における製品 $h$ の実需要量、 $I_{h,t}$ は $t$ 週末の製品 $h$ の实在在庫量を示している。

品切れは生産量と在庫量の合計が需要量より多い場合には発生しないが、反対に需要量の方が多い場合にその差分が品切れとなる。

#### (2) 平均在庫率 $\beta$

平均在庫率 $\beta$ は、実需要量に対する实在在庫量の割合として、式(2.11)で与えられる。

$$\beta = \frac{\sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T I_{h,t}}{\sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T d_{h,t}} \quad (2.11)$$

ここで $I_{h,t}$ は、 $h = 1, 2, \dots, H$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、 $t$ 週末の製品 $h$ の实在在庫量であり、式(2.5)で与えられる。生産量と在庫量の合計が需要量より多い場合にその差分が在庫となり、反対の場合は品切れが発生するために在庫量を 0 にリセットしている。

(3) 在庫費用  $IC$

品切れは売上損失のみならず顧客からの信頼損失などというペナルティが伴うものであり、在庫についても保管料や運搬工数などのコストが掛かるものである。これらの損失を鑑み、品切れ率  $\alpha$  と平均在庫率  $\beta$  の評価指標を総合的に評価するため、式(2.12)で示される在庫費用  $IC$  を定義する。

$$IC = \omega \cdot \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T U_{h,t} + \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T I_{h,t} \quad (2.12)$$

$$\omega = C_\alpha / C_\beta \quad (2.13)$$

ここで、 $U_{h,t}$  はシミュレーションによって出力される  $t$  週における製品  $h$  の品切れ量であり、 $I_{h,t}$  も同じくシミュレーションによって出力される  $t$  週における製品  $h$  の実在庫量である。また、 $\omega$  は在庫保管料に対する品切れのペナルティ費用の重みであり、計画立案者によって任意に与えられる品切れペナルティコスト係数  $C_\alpha$  と在庫保管コスト係数  $C_\beta$  を用いて、式(2.13)で与える。

2.3 シミュレーション実験

本節では、前節の生産モデルに基づくシミュレーション実験を行い、生産能力を決定する座席枠設定の管理パラメータ ( $\varepsilon, \varphi$ ) が評価指標 ( $\alpha, \beta$ ) に与える影響と、各製造環境において在庫コストを最小化するための管理パラメータの推定方法を示す。

シミュレーションの流れを図 2-3 に示す。シミュレーションは、太線で囲まれた基準在庫設定、座席枠設定、座席割当および生産指示の順で行われ、生産結果として各日の品切れ量や在庫量が得られる。また、図右下部の分岐条件に従ってシミュレーションを繰り返している。

2.3.1 項ではシミュレーションの設定条件を、2.3.2 項ではシミュレーション実験結果を述べ、2.3.3 項で実験結果を要約する。

2.3.1 シミュレーションの設定条件

シミュレーションの設定条件は、大場ら[47]の検討を踏襲し、以下の通り設定する。

- (ア) 週あたりの操業日数は 5 日間 ( $L = 5$ ) とする。
- (イ) 品種は 3 種類 ( $I = 3$ ) とする。
- (ウ) 製造工程数は 3 工程 ( $M = 3$ ) とする。
- (エ) 製品需要予測量  $\hat{d}_{h,t}$  および実需要量  $d_{h,j}$  は各週および各日の終業時に入力され、他の日に依存せず独立に決定されるものとし、各製品の週あたりの平均需要量は 5,000 個 ( $\bar{d}_h = 5,000$ ) とする。
- (オ) ボトルネック工程の加工時間  $m_b$  は、平均  $\bar{m}_b$ 、フェイズ  $K$  のアーラン分布に従うものとし、ボトルネック工程の平均加工時間は  $\bar{m}_b = 1.0$  とする。
- (カ) シミュレーション期間は 600 日間 ( $T \times L = 600$ ) とし、初動影響を除去するために初期 100 日間のデータを除いた 500 日間の結果を用いる。

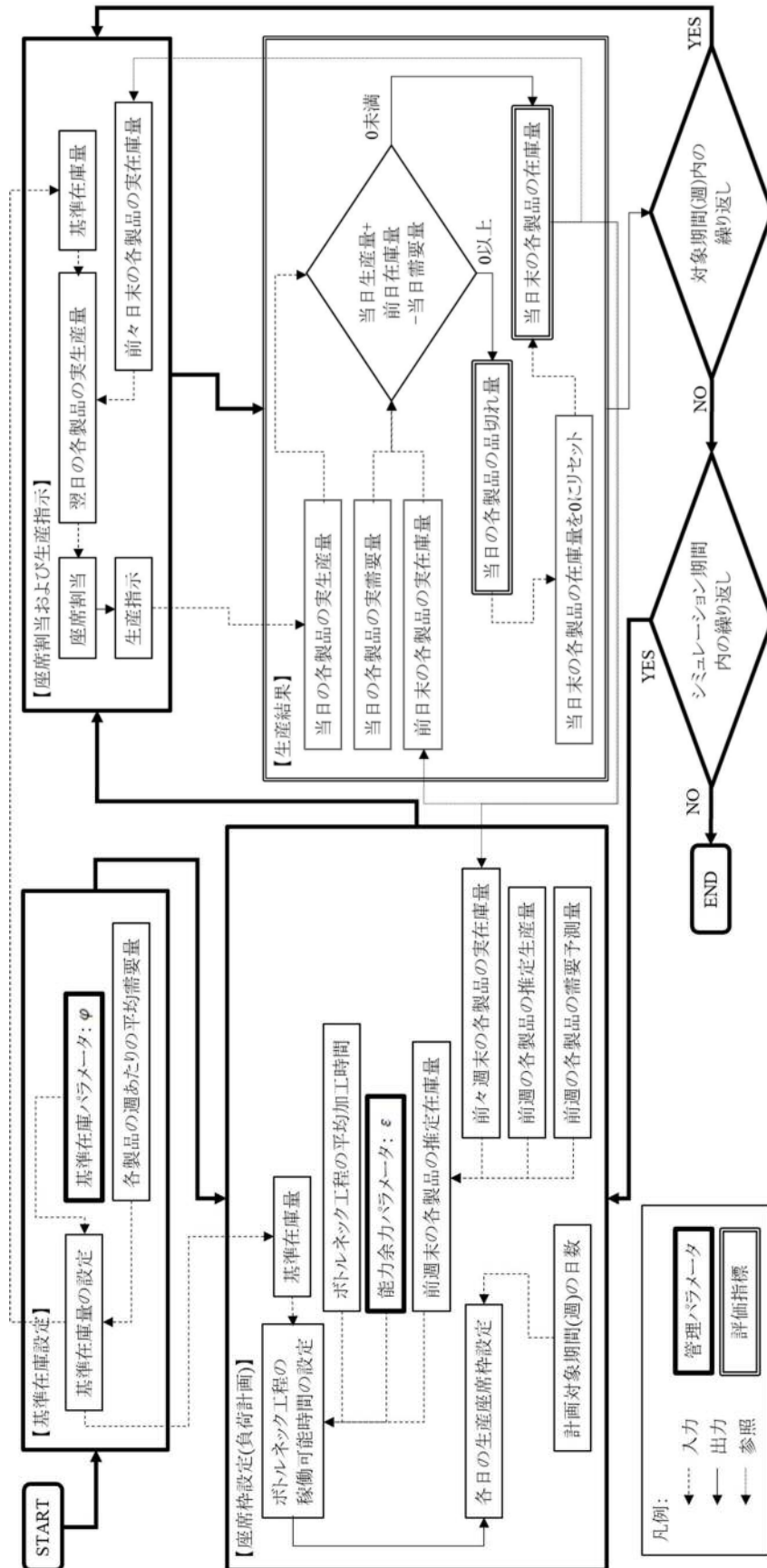


図 2-3 シミュレーションの流れ

2.3.2 シミュレーション実験結果

能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ の値を入力としてシミュレーション実験を行い、出力として各日の製品ごとの実生産量や品切れ量および実在庫量が得られる。需要量については確率分布に従ってランダムに与えられるものとしているが、設定した入力値 $(\varepsilon, \varphi)$ ごとに品切れ率 $\alpha$ や平均在庫率 $\beta$ を評価指標として算出している。なお、以下では離散のシミュレーション結果を連続的に図示しているが、入力値 $(\varepsilon, \varphi)$ は 0.001 間隔と細かく設定しているため、管理パラメータによる影響を近似的に表す意味では差し支えないものと判断されたい。

能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ の管理パラメータが品切れ率 $\alpha$ に与える影響を図 2-4 に示す。縦軸が品切れ率 $\alpha$ を示し、残りの 2 軸が管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ を示している。この図より、能力余力を大きくすることで品切れを減少させることができ、基準在庫を大きくすることでまた品切れを減少することができることが判る。例えば、 $\varphi = 0.00$ 付近では能力余力パラメータ $\varepsilon$ が 0.00 から 0.10 に移動するにつれて品切れ率 $\alpha$ が減少しており、 $\varepsilon = 0.00$ 付近でも基準在庫パラメータ $\varphi$ を 0.00 から 0.10 と大きくすることによって品切れ率 $\alpha$ が減少している。一方、それぞれの減少の傾き具合を見ると、基準在庫を大きくするよりも能力余力を大きくした方が、品切れ率をより減少させられている。大場ら[47]でも同様の評価は行っているが、能力余力と基準在庫の影響度比較までは示していないため、図 2-4 によって定量的な比較評価を示すことができた。

図 2-5 は、品切れ率 $\alpha$ を 3.0%以下に抑える( $\alpha \leq 3.0\%$ )ために必要な管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ の範囲を示しており、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ の値を図の黒塗り部内に収まる様にそれぞれ選択すれば、品切れ率を 3.0%以下に抑えることができる、ということを意味する。例えば、 $(\varepsilon, \varphi) = (0.04, 0.02)$ の場合はその座標が対象範囲(黒塗り部)内に収まるため品切れ率 $\alpha$ を 3.0%以下に抑えられることになり、 $(\varepsilon, \varphi) = (0.01, 0.03)$ の場合はその範囲外となってしまうため $\alpha > 3.0\%$ になるということである。

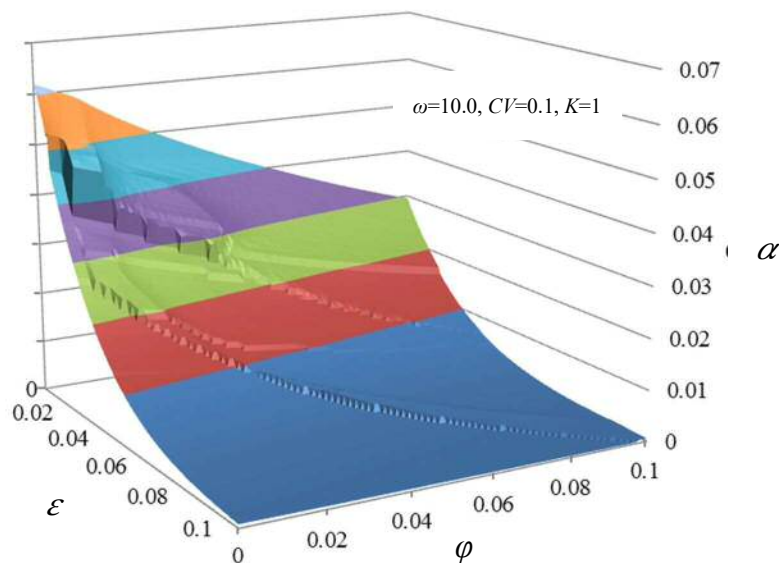


図 2-4 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と品切れ率 $\alpha$ の関係

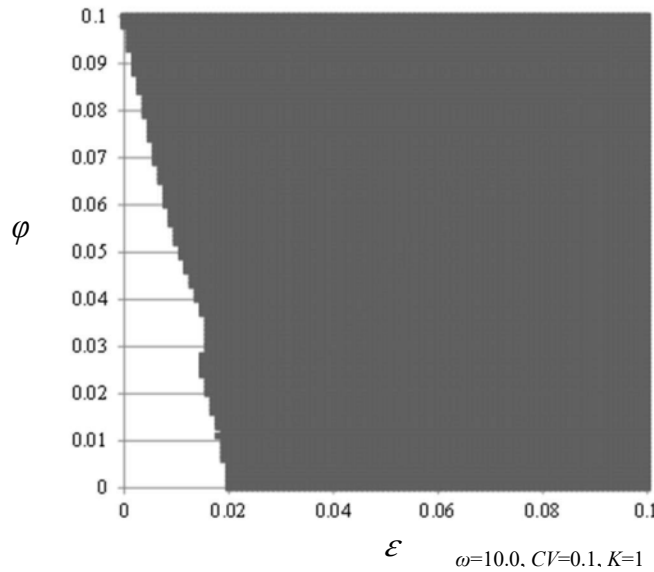


図 2-5 品切れ率 $\alpha$ を 3.0%以下に抑えるための管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )の関係

なお、この条件 $\alpha \leq 3.0\%$ は計画立案者が任意で設定する目標値であり、小林ら[91]が示した経営方針としての任意基準に該当する。小林ら[91]はこの様な目標値を任意設定した後に、図 2-5 が示す様な管理パラメータの範囲内を明らかにし、その中から状況に応じて管理パラメータを選択することを提案している。しかしながら、実際の製造工程においては、この図が示す管理パラメータの範囲の中からどの値を選択すべきかが難しい問題であるため、次節でその対策について述べる。

図 2-6 は、品切れ率 $\alpha$ を 3.0%以下に抑えるという条件下における、能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と平均在庫率 $\beta$ を 3 軸とするグラフである。縦軸は平均在庫率 $\beta$ を示し、他 2 軸が管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )のそれぞれを表している。能力余力と基準在庫は共に平均在庫の増大を招くが、図の傾きから基準在庫パラメータ $\varphi$ の方がその影響が大きいことが判る。例えば、 $\varepsilon = 0.10$ 付近において、基準在庫パラメータ $\varphi$ を 0.00 から 0.10 に大きくすることで平均在庫率 $\beta$ が約 0.15 から 0.60 程度まで上昇しているが、 $\varphi = 0.10$ 付近では、能力余力パラメータ $\varepsilon$ を大きくしても平均在庫率 $\beta$ は 0.10 程度しか増加していないため、平均在庫に関しては基準在庫の方が能力余力よりも影響が大きいと言える。

図 2-4 と図 2-6 を合わせて考察すると、品切れと平均在庫にはトレードオフ関係が存在することが判る。例えば、能力余力パラメータ $\varepsilon$ を 0 から 0.1 に大きくした場合、図 2-4 では品切れ率 $\alpha$ が減少しているのに対して、図 2-6 では平均在庫率 $\beta$ が増加しており、傾きの程度は違うが基準在庫パラメータ $\varphi$ に関しても同様である。このトレードオフ関係については自明ではあるが、本実験によってそれを定量的に評価したと理解されたい。さらに、能力余力パラメータ $\varepsilon$ の方が基準在庫パラメータ $\varphi$ より品切れ率 $\alpha$ に対する影響が大きいことが判る。例えば図 2-4 において、 $\varphi = 0.00$ のときに $\varepsilon$ を 0.00 から 0.10 に大きくした場合の品切れ率 $\alpha$ の減少具合と、 $\varepsilon = 0.00$ のときに $\varphi$ を 0.00 から 0.10 に大きくした場合の品切れ率 $\alpha$ の減少具合を比較すると、前者の方が明らかに大きく減少しており、この傾向は平均在庫率 $\beta$ における関係と反対である。つまり、能力余力パラメータ $\varepsilon$ は品切れを減



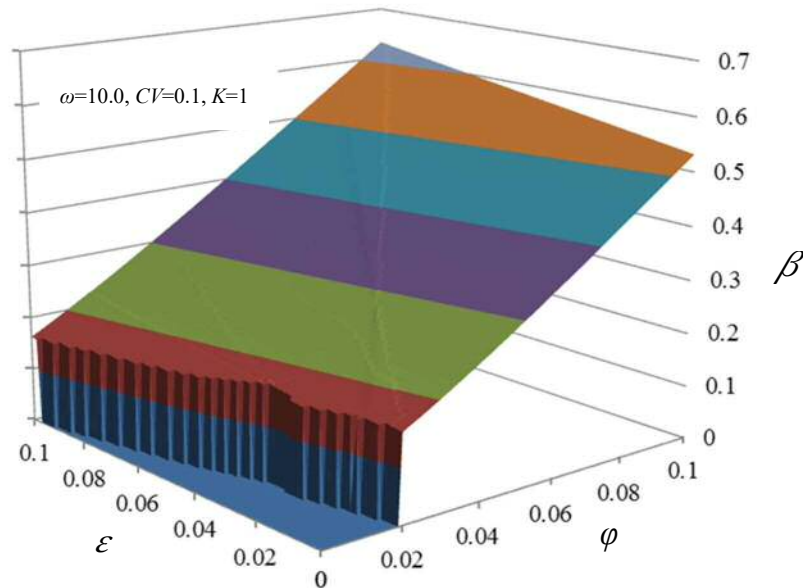


図 2-6 能力余力パラメータ $\epsilon$ および基準在庫パラメータ $\phi$ と平均在庫率 $\beta$ の関係( $\alpha \leq 3.0\%$ )

小さくする効果が大きく、在庫はそれほど増大しないということを意味しており、より効果的な管理パラメータと言える。ただし、基準在庫パラメータ $\phi$ の設定もまた各評価指標に対して影響を及ぼしているため、いずれの管理パラメータも適切に設定しなければならないということが定量的に示された。

以上より、評価指標( $\alpha, \beta$ )を総合的に評価するため、在庫費用 $IC$ を導入した評価を行う。在庫費用 $IC$ は、前述式(2.12)の通り、在庫保管料に対する品切れペナルティコストの重み $\omega$ を用いて品切れと在庫を同時評価する指標であり、今回は筆者所属工場内の製造・営業・生産管理部門の各責任者による協議から暫定的に $\omega = 10.0$ と設定した。

図 2-7 に管理パラメータ( $\epsilon, \phi$ )と在庫費用 $IC$ を軸とするグラフを示す。縦軸が在庫費用 $IC$ を示し、他の軸が管理パラメータ( $\epsilon, \phi$ )のそれぞれを示す。この図から、基準在庫パラメータ $\phi$ が 0.0 に近いときに在庫費用 $IC$ が高く、 $\phi$ を大きくするに従って $IC$ は減少するが、ある点を超えると再び $IC$ が増大するという、凹型の二次曲線のような傾向が見て取れる。例えば、図中の最も手前部である $\epsilon = 0$ のとき、 $\phi$ が 0.0 に近いときは品切れが増大するためペナルティ費用が高くなり、 $\phi$ が 0.05 付近で $IC$ は最も底面に近づき、以降 $\phi$ が 0.10 に近づくとつれ在庫保管料が高くなるために $IC$ が再び増加している。この様に、管理費用 $IC$ という評価指標を用いることで、品切れと在庫のトレードオフ関係を同時評価することができ、また、 $IC$ は小さければ小さいほど良いとされる指標であるため、この図において $IC$ が底面に近いときの管理パラメータ( $\epsilon, \phi$ )の値が適切な座席枠設定のための具体的な値と位置付けられる。小林ら[91]で曖昧だった管理パラメータの設定基準をより具体的に提示できることとなり、これは実際の製造工程に対して意思決定を支援するための一助となる。

さらに、図 2-8 および図 2-9 に管理パラメータ( $\epsilon, \phi$ )と在庫費用 $IC$ の関係を示す。これらは図 2-7 と同様のグラフとなるが、製造環境を表す変数( $\omega, CV, K$ )の値がそれぞれ異なる。 $\omega$ は在庫保管料



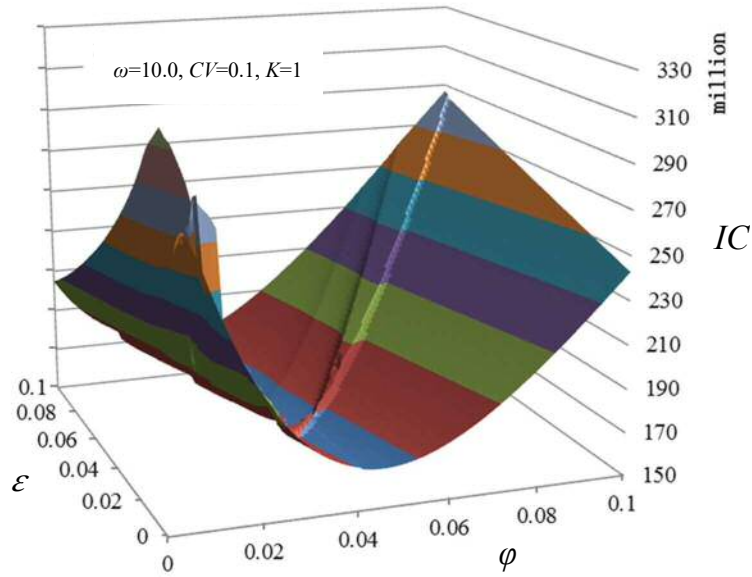


図 2-7 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と在庫費用 $IC$ の関係  
 ( $\omega = 10.0, CV = 0.1, K = 1$ )

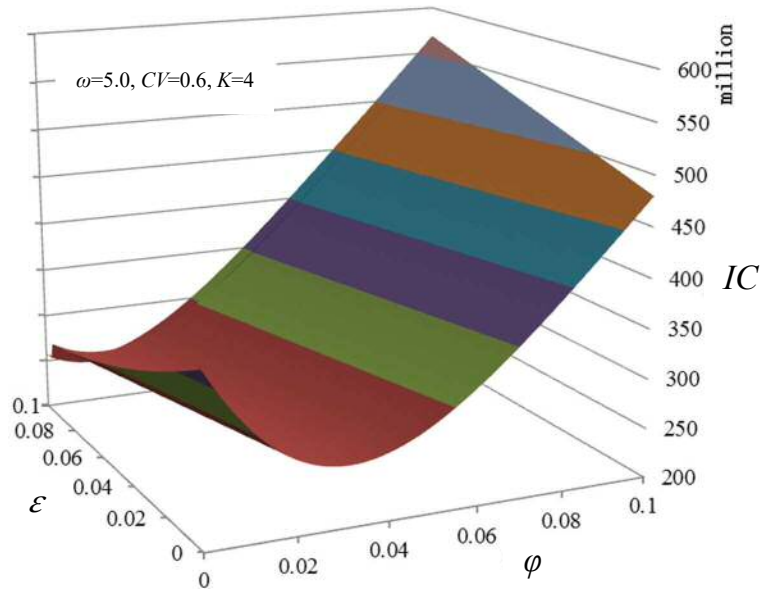


図 2-8 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と在庫費用 $IC$ の関係  
 ( $\omega = 5.0, CV = 0.6, K = 4$ )

に対する品切れペナルティコストの重みであり、 $CV$ は需要のバラつきを表す正規分布の変動係数、 $K$ はアーラン分布に従うボトルネック工程の加工時間のバラつきを設定するフェイズである。

図 2-7 においては $(\omega, CV, K) = (10.0, 0.1, 1)$ であったが、図 2-8 では $(\omega, CV, K) = (5.0, 0.6, 4)$ 、図 2-9 は $(\omega, CV, K) = (11.0, 0.2, 8)$ である。これら 3 つの図より、製造環境変数 $(\omega, CV, K)$ が異なる場合、在庫費用 $IC$ が底面に近づく管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ の値もまた異なることが判る。例えば、図 2-

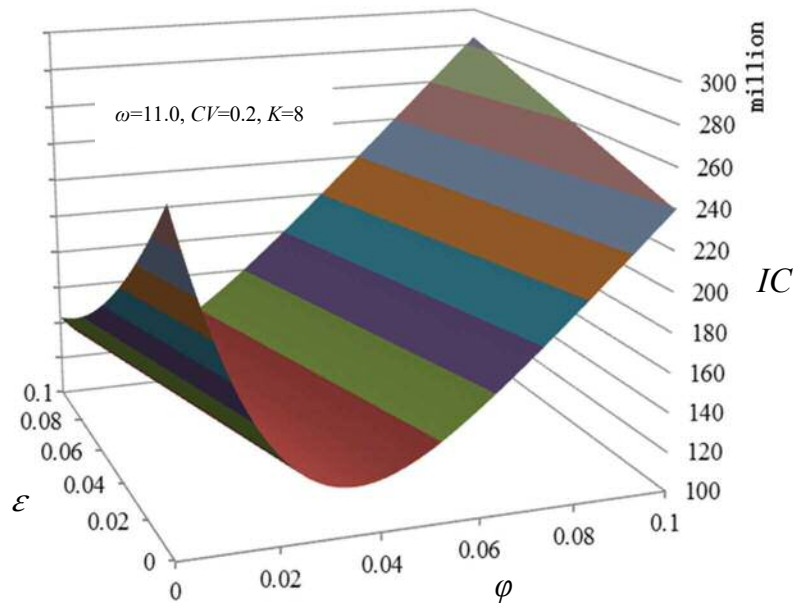


図 2-9 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と在庫費用 $IC$ の関係  
( $\omega = 11.0, CV = 0.2, K = 8$ )

7 において $IC$ が $(\varepsilon, \varphi) = (0.05, 0.03)$ 付近で底面に近かったのに対し, 図 2-8 では $(\varepsilon, \varphi) = (0.02, 0.04)$ 付近, 図 2-9 では $(\varepsilon, \varphi) = (0.08, 0.02)$ 付近で底面に近い結果が得られた.

在庫保管料に対する品切れペナルティコストの重み $\omega$ については品切れに対してどの程度の損失影響があるかによって異なり, 需要のバラつきを表す正規分布の変動係数 $CV$ は市場環境によって左右されるもの, ボトルネック工程の加工時間バラつきに関するフェイズ $K$ は製造工程に依存するものであるため, これらは時々刻々と変化する変数であると言える. そのため, 在庫費用 $IC$ を最小化する管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ の存在が明らかになったといえども, 製造環境変数 $(\omega, CV, K)$ が変動する実際の製造工程においては一概に最適な管理パラメータ値を断定することは困難であり, 製造環境変数の違いによってそれらの値が異なることを考慮しなければならない. そこで, 2.4 節において重回帰分析による近似を用いた適切な管理パラメータの推定方法を説明する.

### 2.3.3 実験結果の要約

次節の管理パラメータ推定へ移る前に, 前項の実験結果の要約を以下に述べる.

- (1) 能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ の管理パラメータが, 品切れ率 $\alpha$ と平均在庫率 $\beta$ の評価指標に対して, 各々どのような影響を及ぼすかを明らかにした. また本モデルにおいては, 能力余力の方が基準在庫よりも品切れ低減に寄与し, 在庫の増大程度も低いことから, 能力余力を如何に適切に設定するかが重要であることを定量的に示した.
- (2) 在庫費用 $IC$ という評価指標を用いることで, 品切れと在庫のトレードオフ関係を同時に評価できることを示した. また, その結果をグラフにより可視化することで, 在庫費用 $IC$ を最

小化する管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )が存在することを明らかにし、そのときの管理パラメータの値が適切な座席枠設定のための具体的な値となることを示した。

- (3) 製造環境変数( $\omega, CV, K$ )が異なる場合の管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )と在庫費用 $IC$ の関係を複数示すことで、ペナルティ費用の重みや需要のバラつきなどの製造環境条件によって、在庫費用 $IC$ を最小化する管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )の値が異なることを明らかにした。

以上より、適切な座席枠設定を行うためには管理パラメータをどの様に設定するかが重要であり、製造環境ごとにそれらの値が異なることが判った。次節では、製造環境条件の違いを考慮しつつ、品切れや在庫を低く抑える管理パラメータ値の推定方法について考察する。

#### 2.4 重回帰分析を用いた管理パラメータの推定

2.3 節では、それぞれの製造環境条件において在庫費用 $IC$ を最小化する管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )を考慮する必要性を述べた。しかしながら、時々刻々と変化する製造環境の全ての条件でシミュレーション実験を行うのは困難である。そこで本節では、重回帰分析による近似を適用して品切れや在庫を低く抑える管理パラメータを推定する方法を提案する。

2.4.1 項で分析方法と分析結果について述べ、2.4.2 項で管理パラメータの推定方法を提案する。

##### 2.4.1 分析方法および分析結果

本項では、前節で得られた実験結果を用いて、製造環境ごとに変わる過不足のない管理パラメータ値を推定するために重回帰分析を行う。このときの目的変数を、在庫費用 $IC$ を最小化する能力余力パラメータ $\hat{\varepsilon}$ と基準在庫パラメータ $\hat{\varphi}$ と定義する。それぞれは、前節のシミュレーション実験結果を用いて近似するものとするが、二変数を同時に近似できないため( $\hat{\varepsilon}, \hat{\varphi}$ )を各々近似していく。また、説明変数は製造環境を表す変数( $\omega, CV, K$ )とし、これら説明変数は、管理パラメータと在庫費用に密接な関係を持つことが前節の実験結果より明らかとなっている。 $\omega$ は在庫保管料に対する在庫切れペナルティコストの重みであり、 $CV$ は需要量のバラつきを示す正規分布の変動係数、 $K$ は生産ロットサイズあたりの加工時間のバラつきを表すアーラン分布におけるフェイズである。

分析に用いるデータは、前節におけるシミュレーションの実験結果から、在庫費用 $IC$ を最小にする管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )の値を製造環境ごとに抽出したものを示す。表 2-1 にそのデータ範囲を示し、表 2-2 にその実験結果データの一部を示す。例えば表 2-2 の最上段は、( $\omega, CV, K$ ) = (2.0, 0.6, 6) の条件でシミュレーションした結果、在庫費用の最小値が $IC = 358,041,325$ であり、そのときの管理パラメータ値が( $\varepsilon, \varphi$ ) = (0.003, 0.017)であったことを意味する。これらより、在庫費用 $IC$ を最小

表 2-1 データ値の範囲

| 説明変数     | 値の範囲       | 値の間隔 |
|----------|------------|------|
| $\omega$ | 2.0 ~ 11.0 | 1.0  |
| $CV$     | 0.1 ~ 1.0  | 0.1  |
| $k$      | 1.0 ~ 10.0 | 1.0  |

表 2-2 実験結果から抽出したデータの一部

| $\omega$ | $CV$ | $k$ | $\varepsilon$ | $\varphi$ | $IC$        |
|----------|------|-----|---------------|-----------|-------------|
| 2.0      | 0.6  | 6   | 0.003         | 0.017     | 358,041,325 |
| 2.0      | 0.7  | 3   | 0.004         | 0.018     | 386,675,070 |
| 3.0      | 0.9  | 7   | 0.010         | 0.002     | 237,997,620 |
| 3.0      | 0.1  | 6   | 0.011         | 0.002     | 245,515,833 |
| 3.0      | 0.2  | 6   | 0.019         | 0.002     | 255,617,604 |
| 3.0      | 0.9  | 9   | 0.010         | 0.003     | 237,975,864 |
| 3.0      | 0.5  | 9   | 0.010         | 0.006     | 249,490,944 |
| 5.0      | 0.9  | 4   | 0.019         | 0.005     | 200,460,434 |
| 5.0      | 0.9  | 6   | 0.018         | 0.008     | 195,533,282 |
| 9.0      | 0.9  | 1   | 0.049         | 0.016     | 186,364,389 |
| 9.0      | 0.2  | 9   | 0.026         | 0.020     | 118,914,644 |
| 9.0      | 1.0  | 10  | 0.023         | 0.027     | 114,276,629 |
| 9.0      | 0.7  | 2   | 0.030         | 0.029     | 139,323,878 |
| 10.0     | 0.2  | 9   | 0.031         | 0.001     | 118,935,693 |
| 10.0     | 0.7  | 3   | 0.034         | 0.001     | 129,682,136 |
| .        | .    | .   | .             | .         | .           |
| 10.0     | 0.1  | 8   | 0.300         | 0.004     | 117,917,658 |
| 10.0     | 1.0  | 8   | 0.290         | 0.005     | 116,936,050 |

化するための管理パラメータ( $\varepsilon, \hat{\varphi}$ )を、それぞれ重回帰分析によって近似し推定する。なお、得られた近似式は、式(2.14)に示す寄与率 $R^2$ によって評価する。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{z=1}^n (y_z - \hat{y}_z)^2}{\sum_{z=1}^n (y_z - \bar{y})^2} \quad (y = \varepsilon, \varphi) \quad (2.14)$$

ここで、 $z$ は近似に用いたデータを表す記号、 $n$ はそのデータ数であり、 $y_z$  ( $y = \varepsilon, \varphi$ )は実験結果から抽出した実データ(表2-2)、 $\hat{y}_z$  ( $y = \varepsilon, \varphi$ )は近似式により得られる推定値、 $\bar{y}$  ( $y = \varepsilon, \varphi$ )は実データの平均値である。式(2.14)の右辺第2項の分母は近似に用いたデータの総平方和、同分子は推定値の残差平方和である。

分析の結果、次式(2.15)および式(2.16)の近似式が得られ、これら近似式に対する寄与率 $R^2$ は、式(2.15)では $R^2 = 0.789$ 、式(2.16)では $R^2 = 0.704$ であった。これら寄与率 $R^2$ はいずれも、重回帰分析において整合性が高いことを意味しており、特に能力余力パラメータ $\varepsilon$ の推定は当てはまりの良い近似式であると言える。

$$\hat{\varepsilon} = (2.136 + 2.257\omega - 7.878CV + 2.081K) \cdot 10^{-3} \quad (2.15)$$

$$\hat{\varphi} = (6.327 + 3.423\omega + 39.087CV - 2.474K) \cdot 10^{-3} \quad (2.16)$$

例えば、製造環境変数が $(\omega, CV, K) = (5.0, 0.6, 4)$ で表される場合、近似式から $(\hat{\varepsilon}, \hat{\varphi}) = (0.017, 0.037)$ が過不足のない管理パラメータ値と算出される。同じ製造環境条件である図 2-8 を見ても、 $(\varepsilon, \varphi) = (0.02, 0.04)$ 付近において在庫費用 $IC$ が底面に近い値をとっているため、これら近似式の当てはまり具合が良いと考えられる。なお、今回得られた $(\hat{\varepsilon}, \hat{\varphi})$ は単位が極めて細かな値となるが、実際には製造工程の都合を鑑みたくうえで $(\varepsilon, \varphi) = (0.02, 0.04)$ などの現実的な値を選択すればよい。

前節の実験結果から、能力余力パラメータ $\varepsilon$ は基準在庫パラメータ $\varphi$ よりも品切れ率減少と在庫抑制に寄与する管理パラメータであることが判っているため、 $\varepsilon$ の推定は重要な管理ポイントのひとつと考えることができ、その近似式を比較的高い整合性で推定できることは、過不足のない座席枠設定のために役立つ結果であると言える。

#### 2.4.2 管理パラメータ推定方法の提案

前項では、在庫保管料に対する品切れペナルティの重み $\omega$ と、需要量のばらつきを示す変動係数 $CV$ 、生産ロットあたりの加工時間のバラつきを示すフェイズ $K$ を説明変数に置くことで、在庫費用 $IC$ を最小化するための管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ が高い寄与率 $R^2$ で近似できることを示した。本項では、その方法を用いた管理パラメータ推定方法として、表 2-3 の座席枠設定方法を提案する。

第1ステップのモデル定式化は本章 2.2 節、第2ステップのシミュレーション実験および総合的評価指標の定量的評価は 2.3 節に該当する。第3ステップのデータサンプリングおよび第4ステップの重回帰分析による近似が 2.4.1 項となり、第5ステップの管理パラメータ設定のみが計画立案者の意思決定となる。

先行研究との比較のために小林ら[91]における同様の提案方法を表 2-4 に示す。これは、評価指標を一定水準以上に保つことができる生産座席枠設定方法として提案されており、第1および第2ステップは本節の提案方法と同様であるが、第3ステップで目標とする評価指標の基準値(目

表 2-3 本論文における座席枠設定方法の提案

| STEP | 内容  |
|------|---|
| 1    | 市場環境や製造環境、複数指標を総合的に評価できる指標を定式化する<br>(生産計画モデルや管理パラメータ、製造環境を表す変数などの設定)      |
| 2    | シミュレーション実験により、管理パラメータが各評価指標や総合的評価指標に与える影響を定量的に明らかにする                      |
| 3    | シミュレーション実験結果から、総合評価指標を最小化する<br>管理パラメータ値を製造環境ごとにサンプリングしてデータ化する             |
| 4    | 得られたデータを使用して重回帰分析を行い、<br>総合評価指標を最小化する管理パラメータを推定する近似式を得る                   |
| 5    | 得られた近似式の寄与率からその妥当性を検討し、管理パラメータを設定する<br>(寄与率が不満足の場合は追加実験によりサンプリングデータ数を増やす) |

表 2-4 小林ら[91]における座席枠設定方法の提案

| STEP | 内容  |
|------|---|
| 1    | 市場環境や製造環境を定式化する<br>(見込・注文の製品比率、加工工程のフロー化率などの設定)             |
| 2    | シミュレーション実験により、市場環境や製造環境ごとに<br>管理パラメータや割当ルールが評価指標に与える影響を分析する |
| 3    | 経営方針に従った評価指標の基準値を決定する<br>(目標とする納期達成率や納期遅れ率、平均納期遅れ日数など)      |
| 4    | その基準値を満たすための管理パラメータの範囲を算出する<br>(座席設定パラメータや座席変更パラメータなど)      |
| 5    | 算出された管理パラメータの範囲内から、技術的・経済的可能性を考慮して、<br>管理パラメータや割当ルールを決定する   |

標納期達成率や目標納期遅れ率、目標平均納期遅れ日数などを意思決定している。次いで、第4ステップでそれを満足させる管理パラメータの範囲を提示し、第5ステップでその範囲から技術的・経済的な条件を鑑みて管理パラメータを設定するという意思決定になる。この提案方法に対して、実際の製造工程における計画立案者にヒアリングしたところ、まず、第3ステップでの評価指標基準値の意思決定で、どの程度の値を製造工程が満足するレベルとするのかが悩ましく感じられ、第5ステップでの「技術的・経済的可能性を考慮して」という箇所についても計画立案者を悩ませる要因となるとの感想が得られている。

表2-4の提案方法に対し、本節の提案方法(表2-3)では、あくまで寄与率を基準に妥当か否かを意思決定するため、定量的かつ合理的な提案が可能となるだけでなく、それを上申する相手側にも納得感が得られやすい説明を行うことができる、との感想が得られた。定性的な評価のため導入事例比較などが今後の課題となるが、現実的にはやってみなければ判らないという問題が実際の製造工程には多く存在しており、このような意思決定の定量的支援は担当者が承認者を説得するうえで非常に有益な手助けになり得るため、本節の提案する手法は計画立案者の意思決定に対して一助になるものと考えられる。

### 2.5 本章のまとめ

本章の目的は、生産座席システムにおいて全体の生産能力を決定する座席枠設定のために、品切れや在庫を低く抑える具体的な管理パラメータ値を推定する方法を提案することで、実際の製造工程における意思決定を支援することである。

2.3節の実験では、能力余力と基準在庫を設定する管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )が、品切れと在庫の評価指標( $\alpha, \beta$ )に与える影響を示し、さらにその2つのトレードオフ関係を総合的に評価することができる在庫費用 $IC$ という指標を用いることで、それに及ぼす影響についても定量的に評価した。2.4.1項では、製造環境を表す変数( $\omega, CV, K$ )を説明変数とし、在庫費用 $IC$ を最小化するための管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )を目的変数として、重回帰分析による近似を用いることによって品切れや在庫を低く抑える管理パラメータ値が推定可能であることを明らかにした。生産モデルの定式化、シミュレーション実験および管理パラメータ推定を順に行う方法を、過不足のない管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi$ )の推定方法として2.4.2項で提案することにより、従来研究の提案方法に代わって、計画立案者の意思決定をより具体的に支援することが可能となることを明らかにした。

しかしながら、大場ら[47]を踏襲した本章のモデルは、実需要量に合わせて生産ロットサイズを変動させていたり、生産ロット間で発生する段取替え作業や設定した座席が空席のまま消化された場合の損失などについては言及されていなかったりなど、一般的な見込生産環境が抱える問題に対してさらに考察を深める必要がある。そこで次章において、一般的な見込生産環境を再現するモデルへの拡張を行い、考察を深めていく。



## 第3章 固定ロットサイズ生産および補充点生産方式への拡張モデル

### 3.1 本章の目的

前章では、大場ら[47]の生産モデルを基に、需要量や在庫量などの算出に関する詳細な定式化を行い、シミュレーション実験により品切れと在庫およびそれらの総合的指標の評価を行ったうえで、重回帰分析を用いてその総合評価指標を最小化するための能力余力と基準在庫を決定するパラメータ(管理パラメータ)の推定方法を提案した。過不足のない座席枠設定のための具体的な管理パラメータ値を推定するこの提案方法は、小林ら[91]が提案する方法と比べて、より具体的に計画立案者の意思決定を支援することができる。しかしながら、一般的な見込生産環境では経済的発注量の様に生産ロットサイズを決定する[64]のに対し、前章のモデルは非ロットサイズ生産だったり、品種切り替え時に発生する段取替え作業に言及していなかったりと、一般的な見込生産環境が抱える問題に対してさらに考察を深める必要があるとの課題が残った[107]。

そこで本章では、一般的な見込生産環境に対して過不足のない座席枠設定を提案するために、まず、前章のモデルを固定ロットサイズ生産と補充点生産方式を取り入れた生産モデルに拡張する[108]。固定ロットサイズ生産は一般的な見込生産環境で多く用いられている生産形態、補充点生産方式も定期生産方式や定量生産方式と並んで一般的に採用される生産方式であり、これらは実在の工場でも用いられているものとなるため、本論文の生産モデルに取り入れた。この拡張に伴い、前章の能力余力と基準在庫の管理パラメータに加えて、本章ではロットサイズを決定するパラメータを設定する。生産計画には上位計画に「基準在庫設定」、中位計画として負荷計画となる「座席枠設定」、下位計画としての「生産ロット割当および生産指示」の3段階で構成される階層型生産計画を前章と同様に適用するが、新たに固定ロットサイズ生産を上位計画に組み込み、補充点生産方式を下位計画に導入する。評価指標についても前章の品切れと平均在庫だけでなく、ロットサイズ生産の特徴である段取替え作業負荷と、一般的には遊休と同意になる生産座席システムにおける空席の指標を追加する。なお、対象工場では顧客の生産設備に取り付けるコンベアベルトの様な消耗品を生産しているが、B2B(Business-to-Business)製品に限らず食料品や日用品などのB2C(Business-to-Consumer)製品でも固定ロットサイズ見込生産を適用している場合が多いため、いずれの生産環境にも適用可能な生産モデルの定式化を行う。

次に、その生産モデルを基にシミュレーション実験を行い、3つの管理パラメータ(能力余力、基準在庫、ロットサイズ)が4つの評価指標(品切れ、平均在庫、段取替え作業負荷、空席)に対してどのような影響を及ぼすかを定量的に評価する。また、4つの評価指標を総合的に評価する指標として管理費用を定義し、その管理費用と3種の管理パラメータとの関係についても定量的評価を行う。さらに、実験結果の中から管理費用が目標値以下となるデータを抽出し、解析アプリケーションのひとつの機能である「応答曲面法(RSM) 1 特性の最適化(JUSE-StatWorks®/V5)」を用いて管理パラメータの関係の近似式および等高線図(3つのパラメータの関係を三次元的に表した図)を得ることで、評価指標に対して過不足のない管理パラメータの探索が定量的かつ視覚的に行えることを示す[108]。最後に、これら一連の方法を過不足のない座席枠設定方法として提案する。

以上から、実際の見込生産環境下における生産座席システムをより詳細に再現するモデルを得て、管理パラメータと評価指標の定量的評価から過不足のない管理パラメータの探索方法までを提案することで、固定ロットサイズ見込生産環境の生産座席システムにおける座席枠設定の一助を得ることを本章の目的とする。

### 3.2 拡張モデルの定式化

本節では、前章のモデルを一般的な見込生産環境で多く用いられている固定ロットサイズ生産と補充点生産方式を取り入れた生産モデルに拡張する。3.2.1 項で生産モデルの仮定、3.2.2 項で生産計画について述べ、3.2.3 項では評価指標について説明する。なお、第2章同様、本節以降で用いる記号説明についても巻末の付録1に纏めている。

#### 3.2.1 生産モデルの仮定

本項では、生産モデルの仮定について述べる。まず、前章との共通項目について述べ、次に前章から拡張した固定ロットサイズ生産に関する項目を説明する。

##### (1) 第2章との共通仮定

以下の項目は、前章に引き続きモデルの仮定として適用する。

- (ア) 製造工程は $M$ 段階の多段階フローショップとし、ボトルネック工程が存在する。
- (イ) ボトルネック工程は別工程へ移動しないものとし、他工程は十分な生産能力を有する。
- (ウ) ボトルネック工程の生産計画に生産座席システムを適用する。

特に(イ)(ウ)は、 $M$ 個の工程を持つ製造工場において、工程全体の生産能力はボトルネック工程の生産能力に依存するという考えに基づき、ボトルネック工程の生産計画に他の工程の生産計画を合わせる(同期させること)を意味している。

次の項目についても前章モデルと同様に適用する。

- (エ) 生産リードタイムはボトルネック工程での加工完了後から後工程の標準製造リードタイム(一定期間)とする。
- (オ) 保管場所には十分なスペースがあるものとするが、在庫量に比例した保管料を要する。

一般的に在庫保管場所に悩まされる場合は多いが、外部倉庫などを活用するなどに対応可能として在庫量に比例する保管料を設けている。

##### (2) 固定ロットサイズ生産モデルの仮定

(1)では前章モデルとの共通項目を説明したが、本項では本章で新たに設ける仮定を述べる。

ロット生産方式は日本の製造業の80%で採用されている生産方式[109]であり、ロットごとで加工を纏めることにより効率的な生産を図る方式であるが、そのロット間つまり加工の切替え時に段取替え作業が発生する。段取替え作業においては、大掛かりな清掃や



治具の付け替えなどを要する段取替えや、原材料を取り換えるだけの段取替えなど、その作業負荷が個々の事情に即して異なる。本章ではその違いを再現するため、次の仮定を設ける。

- (カ) 製品種類は、 $F$ 種の製品群(Family, 例:A, B, C)と、 $I$ 種の品種(Item, 例:a, b)から構成される( $F \times I$ )種類(例:Aa, Ab, Ba, Bb, Ca, Cb)とし、その識別のため製品( $f, i$ )と表す(例:Aa=製品(1, 1), Ab=製品(1, 2), Ba=製品(2, 1),...).
- (キ) 生産ロット間では必ず段取替え作業が発生するものとし、製品群が切り替わる場合(例:Aa→Ba など)には大規模な段取替えが発生、同一郡内で品種が切り替わる場合(例:Aa→Ab など)には中規模の段取替え、同一製品内で品種が切り替わる場合(例:Aa→Aa など)にも小規模の段取替えと、3種類の段取替え作業が発生するものとする。

なお、(カ)では各製品群における品種数を同一のものと仮定しているが、実際の製造工程では当然同一とは限らない。存在しない製品種類に対しては、シミュレーション時に当該製品の平均需要量を0値に設定することで除外することができる。

この段取替え作業間で加工する製品の数量がロットサイズであり、このロットサイズを一定として生産を繰り返すのが固定ロットサイズ生産である。一般には可変ロットサイズ生産も存在するが、ロットサイズの大小によって加工時間も異なるため、例えば複数設備の加工で段取替え作業を分散させるなどの目的で固定ロットサイズ生産を用いる場合が多く、見込生産環境においてその採用はより顕著に表れている[64]。本章では次項でロットサイズを決定するが、ロットサイズと加工時間に関する仮定を次の通り設ける。

- (ク) ロットサイズは製品種類に関わらず一定とする。
- (ケ) ボトルネック工程における加工時間はロットサイズに比例するが、ロットサイズが同じ大きさであれば製品種類に依存せず加工時間も同一とする。

最後に計画対象期間について、前章では週単位での座席枠設定をモデル化していたが、本章では座席枠設定を月単位で行うものと仮定する。実際の製造工程において生産能力を柔軟に変化させる場合、作業人員の確保(派遣社員や他部署からの応援)や勤務予定(日勤・夜勤・残業対応など)の変更を要する場合もあり、雇用契約や労使協定などの手続きが必要である。短期間での柔軟な生産能力変更が理想ではあるが、1ヶ月単位の調整が現実的であると考へ、次の仮定を設ける。

- (コ) 生産計画は1ヶ月( $L$ 日間)単位で立案するものとする。

以上を本章のモデルの仮定として適用する。

### 3.2.2 生産計画

生産計画には、以下3段階で構成される階層型生産計画を適用する。(1)のロットサイズおよび基準在庫設定が上位計画、(2)の座席枠設定(負荷計画)が中位計画にあたり、(3)の生産ロット割当および生産指示が下位計画に該当する。

ロットサイズおよび基準在庫設定は適宜変更されるが、中長期間の在庫(過不足)状況を鑑みて設定するため頻繁に変更されるものではない。特にロットサイズは、その変更には治具や台車などの改造を要する場合も多く、慎重な判断が求められる。また、座席枠設定(負荷計画)は各月末に翌々月分を立案し、座席割当および生産指示は各日末に翌日分を確定するものである。この構成は前章と同様であるが、(1)で固定ロットサイズを決定すること、(3)で基準在庫量を下回った場合に補充生産を行うことと、段取替え作業を出来るだけ省力化するディスパッチングルールを適用することを新たに設けたことが、前章から拡張した点である。これにより、前章の品切れと平均在庫に加えて、段取替え作業と空席の損失も評価できる生産モデルとなる。

(1) 上位計画:ロットサイズおよび基準在庫設定

まず初めに、 $f = 1, 2, \dots, F$ および $i = 1, 2, \dots, I$ に対して、式(3.1)で示されるロットサイズ $LS$ と式(3.2)で示される基準在庫量 $SI_{f,i}$ の設定を行う。

$$LS = \lceil \lambda \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \bar{D}_{f,i} / (L \cdot F \cdot I) \rceil \quad (3.1)$$

$$SI_{f,i} = \lceil \varphi \cdot \bar{D}_{f,i} / L \rceil \quad (3.2)$$

ここで、 $f$ は製品群(Family)を表す記号、 $i$ は品種(Item)を表す記号であり、製品種類を $(f, i)$ と表す。 $\bar{D}_{f,i}$ は1ヶ月あたりの製品 $(f, i)$ の平均需要量を示し、 $L$ は1ヶ月間の操業日数、 $F$ は製品群数、 $I$ は品種数である。

固定ロットサイズ生産は、製造設備上の治具や使用材料のセッティング量などの都合により、製品種類に関わらずロットサイズを一定に設定する生産形態であるが、 $\lambda$  ( $0 < \lambda \leq 1$ )はそのロットサイズを決定するパラメータ(管理パラメータ)であり、ロットサイズパラメータと呼ぶ。ロットサイズパラメータ $\lambda$ は本章から導入したパラメータであり、1ヶ月あたりの全製品の平均需要量を操業日数と製品群数および品種数で除したもの(1製品1日あたりの平均需要量)に $\lambda$ を乗じることでロットサイズを決定している。段取替え作業を少なく抑えたい場合にはロットサイズを大きくする、つまり $\lambda$ を1に近づけることが有効であるが、過大なロットサイズは過剰在庫や品種切替の柔軟性低下を招き、一方 $\lambda$ を0に近づけ過ぎる、つまりロットサイズを過小に設定しまうと需要変動への対応は向上するものの段取替え作業が増えてしまう。この様な理由から、過不足のないロットサイズのために、このロットサイズパラメータ $\lambda$ の設定が固定ロットサイズ生産においては重要となる。

次に、 $\varphi$  ( $\varphi > 0$ )は、それぞれの製品において品切れを予防するための基準在庫量を、どの程度設けておくかについて決定するパラメータであり、基準在庫パラメータと呼ぶ。基準在庫量は、全製品の1日あたりの平均需要量合計に対して、基準在庫パラメータ $\varphi$ によって定数倍することで与えるものであり、基準在庫パラメータ $\varphi$ が需要変動を吸収する役割を果たすことになるため、過小であれば品切れを招き、過大であれば過剰在庫を生じさせてしまうパラメータである。また、詳細は後述するが、本章から導入する補充点生産方式においては、基準在庫量が補充点に相当するため、ロットサイズパラメータ $\lambda$ に続いて、基準在庫パラメータ $\varphi$ もまた重要なパラメータとして位置づけられる。

## (2) 中位計画:座席枠設定(負荷計画)

次に、負荷計画に該当する座席枠設定について説明する。ここでは、各月末に翌々月分の生産能力を決定し、それを操業日数とロットサイズとで均等分配して座席枠を立案する。

まず、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(3.3)で示される $t$ 月の稼働可能時間 $MS_t$ を、当該月の前々月末に設定する。なお、 $t = 0$ に対して $MS_0 \equiv 0$ であり、初月および第2月についてはシミュレーション開始時に設定している。また、 $t$ は月を表す変数、 $T$ はシミュレーション期間(月数)である。

$$MS_t = (1 + \varepsilon) \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \hat{D}_{f,i,t} + \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I SI_{f,i} - \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \hat{I}_{f,i,t-1} \quad (3.3)$$

ここで、 $\varepsilon$  ( $\varepsilon \geq 0$ )は、需要予測に対する実需要のバラつきを吸収する目的で設定するパラメータであり、能力余力パラメータと呼ぶ。能力余力パラメータ $\varepsilon$ を適切に設定することができれば需要予測に対する実需要のバラつきを吸収することができるが、 $\varepsilon$ が小さ過ぎれば需要変動の上振れに対して対応する柔軟性が乏しくなり、一方で大き過ぎると需要が少ないときに空席が目立つ結果を招いてしまう。また、 $\hat{D}_{f,i,t}$ は $t$ 月の製品( $f, i$ )の需要予測量を表し、実需要に対して正規分布に従う誤差を有するものとしている。 $SI_{f,i}$ は上位計画で設定した製品( $f, i$ )の基準在庫量、 $\hat{I}_{f,i,t-1}$ は $(t-1)$ 月末における製品( $f, i$ )の推定在庫量を示す。

$\hat{I}_{f,i,t}$ は、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 及び $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、 $(t-1)$ 月末における製品( $f, i$ )の实在在庫量 $I_{f,i,t-1}$ と $t$ 月の推定生産量 $\hat{P}_{f,i,t}$ および $t$ 月の需要予測量 $\hat{D}_{f,i,t}$ を用いた式(3.4)で与えられ、計算値が0を下回る場合は在庫が0となる分岐条件を有している。なお、 $t = 0$ に対して $\hat{I}_{f,i,0} \equiv 0$ とする。

$$\hat{I}_{f,i,t} = \begin{cases} I_{f,i,t-1} + \hat{P}_{f,i,t} - \hat{D}_{f,i,t} & (I_{f,i,t-1} + \hat{P}_{f,i,t} - \hat{D}_{f,i,t} \geq 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで、 $I_{f,i,t}$ は $t$ 月末の製品( $f, i$ )の实在在庫量、 $\hat{P}_{f,i,t}$ は $t$ 月の製品( $f, i$ )の推定生産量を表し、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 及び $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、シミュレーション内で式(3.5)および式(3.6)から与えられる。なお、 $t = 0$ に対して $I_{f,i,0} \equiv 0$ および $\hat{P}_{f,i,0} \equiv 0$ とする。

$$I_{f,i,t} = \begin{cases} I_{f,i,t-1} + P_{f,i,t} - D_{f,i,t} & (I_{f,i,t-1} + P_{f,i,t} - D_{f,i,t} \geq 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\hat{P}_{f,i,t} = (1 + \varepsilon) \hat{D}_{f,i,t} + SI_{f,i} - I_{f,i,t-1} \quad (3.6)$$

ここで、 $P_{f,i,t}$ は $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(3.7)で示される $t$ 月の製品( $f, i$ )の実生産量であり、 $j$ は日を表す変数である。

$$P_{f,i,t} = LS \cdot \sum_{j=\{t-1\}L+1}^{t \cdot L} PL_{f,i,j} \quad (j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L) \quad (3.7)$$

ここで、 $PL_{f,i,j}$ はj日の製品( $f, i$ )の生産ロット数を示し、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L$ に対して、式(3.8)で与えられる。なお、 $j = 0$ に対して $PL_{f,i,0} \equiv 0$ とする。

$$PL_{f,i,j} = \begin{cases} [(SI_{f,i} - I_{f,i,j-1})/LS] & (SI_{f,i} - I_{f,i,j-1} > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.8)$$

ここで、 $I_{f,i,j}$ は製品( $f, i$ )のj日末の实在庫量を示し、製品( $f, i$ )のj日の実需要量 $D_{f,i,j}$ と実生産量 $P_{f,i,j}$ を用いて、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L$ に対して、式(3.9)で与えられる。なお、製品( $f, i$ )のj日末の在庫量 $I_{f,i,j}$ が負の値になるときは、品切れが発生していると判断され0に置換される。なお、 $j = 0$ に対して $I_{f,i,0} \equiv 0$ とする。

$$I_{f,i,j} = \begin{cases} I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j} & (I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j} \geq 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.9)$$

また、 $D_{f,i,t}$ は $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(3.10)で示されるt月の製品( $f, i$ )の実需要量である。

$$D_{f,i,t} = \sum_{j=\{t-1\}L+1}^{t \cdot L} D_{f,i,j} \quad (j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L) \quad (3.10)$$

ここで、 $D_{f,i,j}$ は、平均( $\bar{D}_{f,i}/L$ )、フェイズkのアーラン分布によってシミュレーション内で与えられるj日の製品( $f, i$ )の実需要量であり、式(3.10)で示される $D_{f,i,t}$ は、当該月内の $D_{f,i,j}$ の合計である。

需要量について、前章では実需要量と需要予測量をそれぞれ正規分布に従うものとして独立に発生させるモデルだったが、本章では実需要量をアーラン分布に従うものとし、そのフェイズを変更することで様々な市場環境を再現することとした。これは、実需要の到着が、前日の需要に関係しない完全なランダムではなく、前の到着に多少なりとも影響を受けるものと考えためである。需要予測量については実需要量に対して誤差が避けられないものと考え、そのバラつきが正規分布に従うものと仮定している。また、式(3.3)の通り、稼働可能時間 $MS_t$ は需要予測部分と在庫補充部分とで構成されるが、能力余力パラメータ $\varepsilon$ を用いることで、生産能力としての座席枠数をコントロールしている。

次に、各日の生産能力設定として、 $t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L$ に対して、式(3.11)で示されるj日の生産座席枠数 $SS_j$ を設定する。

$$SS_j = [MS_t / (L \cdot LS)] \quad (3.11)$$

ここでは、式(3.3)で設定した稼働可能時間 $MS_t$ を1ヶ月間の操業日数 $L$ に均等分配し、さらにロットサイズ $LS$ で除している。式(3.11)は、同一月内における各日(例: t月における $j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L$ )の $SS_j$ は一定となるが、 $MS_t$ は月ごとに異なるため、

翌月内における各日(例: $(t+1)$ 月における $j = t \cdot L + 1, t \cdot L + 2, \dots, \{t+1\} \cdot L$ )の $SS_j$ とは異なることを意味しており、各日の $SS_j$ は月単位で変更されるとの意である。

ロットサイズおよび基準在庫設定からここまでの流れを図 3-1 に示す。横軸方向が日を、縦軸方向が各日の座席数を表す。まず上位計画で設定したロットサイズ(\*1)と基準在庫量(\*2)について、ロットサイズパラメータ $\lambda$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ を用い決定する。次に、前期末の在庫量(\*3)と当期の需要予測量(\*4)を基に1ヶ月間の生産能力を設定する。図の升目の大枠(二重線)がその1ヶ月間の生産能力に該当し、1期間(1ヶ月)の稼働可能時間 $MS_t$ として設定する。このとき、能力余力パラメータ $\varepsilon$ を用いて需要予測量に対する能力余力(\*5)を持たせている。次に、1ヶ月間の生産能力を日数で横軸方向に分割し、同時にロットサイズでも縦軸方向に分割して升目を作る。この升目一つひとつが生産座席に当たり、1列の座席数が各日の生産座席枠数(生産能力) $SS_j$ となる。

(3) 下位計画:座席(生産ロット)割当および生産指示

座席(生産ロット)割当前に、各日末の在庫量を基に、 $f = 1, 2, \dots, F, i = 1, 2, \dots, I, t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L$ に対して、式(3.8)で示される翌日の生産ロット数 $PL_{f,i,j}$ を決定する。大場ら[47]の生産モデルに従う前章では、前日の実需要に対して出荷した量を生産量としていたが、本章では出荷後の在庫量と基準在庫量を比較して生産量を決定する。

式(3.8)は、出荷後の製品( $f, i$ )の前日末の実在庫量が基準在庫量を下回った場合に、その不足分を補充するために必要なロット数を生産ロット数 $PL_{f,i,j}$ として生産を行う補充点生産方式を表している。補充点生産方式は、在庫量が減少したときにその減少分を補充して一定の在庫量を保とうとする在庫管理方式に従って生産を行う方式[98]であり、本章で新たに設定したモデルのひとつとなる。他方、出荷後の在庫量が基準在庫量以上であれば補充生産は不要と判断している。なお、典型的な補充点生産(発注)方式は、補

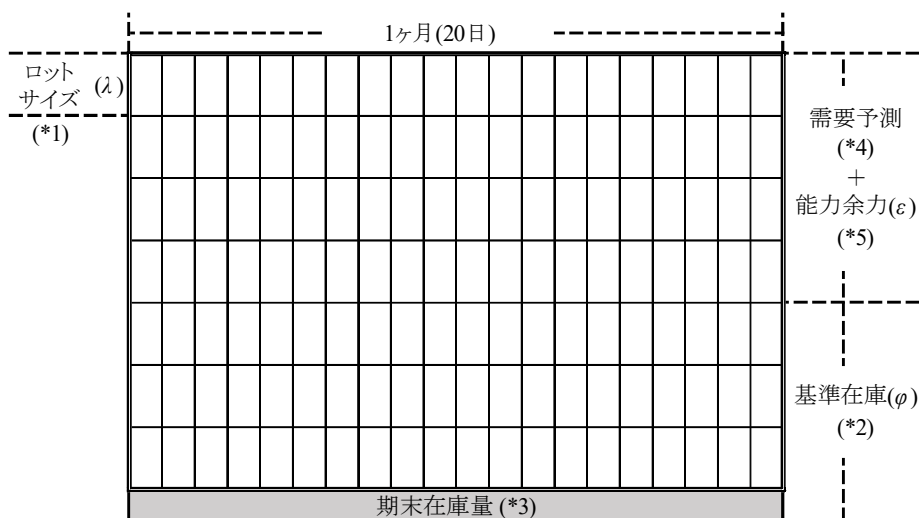


図 3-1 座席枠設定の概要

充点を下回った場合に、変動的な数量でその点(基準在庫量)までを補充するものであるが、生産(または発注)ロットサイズに制約がある場合、厳密に補充点を満たすのではなく、その補充点を多少上回る程度に補充するという運用も一般的に多く存在する(例えば、補充点が500個、ロットサイズが50個の場合、在庫が495個であれば補充後の在庫は545個になるなど)。従って、ロットサイズを過剰に設定してしまうと在庫が増大するため、ロットサイズパラメータ $\lambda$ の適切な設定が求められる。

また、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L$ に対する式(3.9)は、品切れ有無によって場合分けされており、品切れ発生時には在庫をマイナス値ではなく0値にリセットすることを示している。品切れをバックオーダーとして次期に繰り越す訳でなく純粋なペナルティとして処理することになり、これも実工程ではよく見受けられる問題のひとつである。バックオーダーとした方が線形問題化でき[13]、最適化するには難易度を抑えられるのだが、バックオーダーとして都合よく納期に余裕を貰える場合は限られるため、特に見込生産環境においてはこの品切れを適切に評価しなければならない。

ここで決定した生産ロットを、フォアワード方式[52]に従って座席に割り当てるが、不要な段取替えを回避するため、図3-2のディスパッチングルールを適用して投入順序の並び替えを行う。前節で述べた通り、製品( $f, i$ )は製品群(Family)と品種(Item)から成る製品種類で区別され、生産ロット間で製品群が切り替わる場合は大規模、同一製品群内で品種のみが切り替わる場合は中規模の段取替え作業が発生する。また、製品種類が同じ製品を続けて生産する場合でも、簡易清掃や伝票差し替えなどの小規模の段取替え作業が発生する。直前に割り当てられた生産ロットと未割当の生産ロットで製品種類を比較して、同じ製品種類の生産ロットがあればそれを優先して割り当て、無ければ同じ製品群の生産ロットを、同じ製品群の生産ロットも無ければ全く異なる製品種類の生産ロットをランダムに割り当てるというルールである。

最後に、図3-3の様に生産ロット割当を確定させて、生産指示を行う。なお、図の縦軸は生産設備、横軸は生産日程、その中で区切られた升目が生産座席を表し、同日内の1列が当日の生産能力を示す座席枠である。作業者は、ディスパッチングルールによって割り当てられた製品種類の順番に従って生産を行う。ただし、当日分の生産が完了した後に次の製品を生産する余裕が仮にあったとしても、翌日分のスケジュールを予測するなどして前倒し生産を行うことは禁じている。

### 3.2.3 評価指標

見込生産環境においては、品切れを起こさないと同時に在庫量を低く抑えること、さらに製品の切替えに必要な段取替え作業についても考慮する必要がある。また、座席枠が空席のまま消化された場合の損失も少なく抑えなければならない。そこで本章では、前章の評価指標の品切れ率 $\alpha$ と平均在庫率 $\beta$ に、段取替え作業負荷率 $\gamma$ と空席率 $\delta$ を加えた計4種の評価指標を設ける。

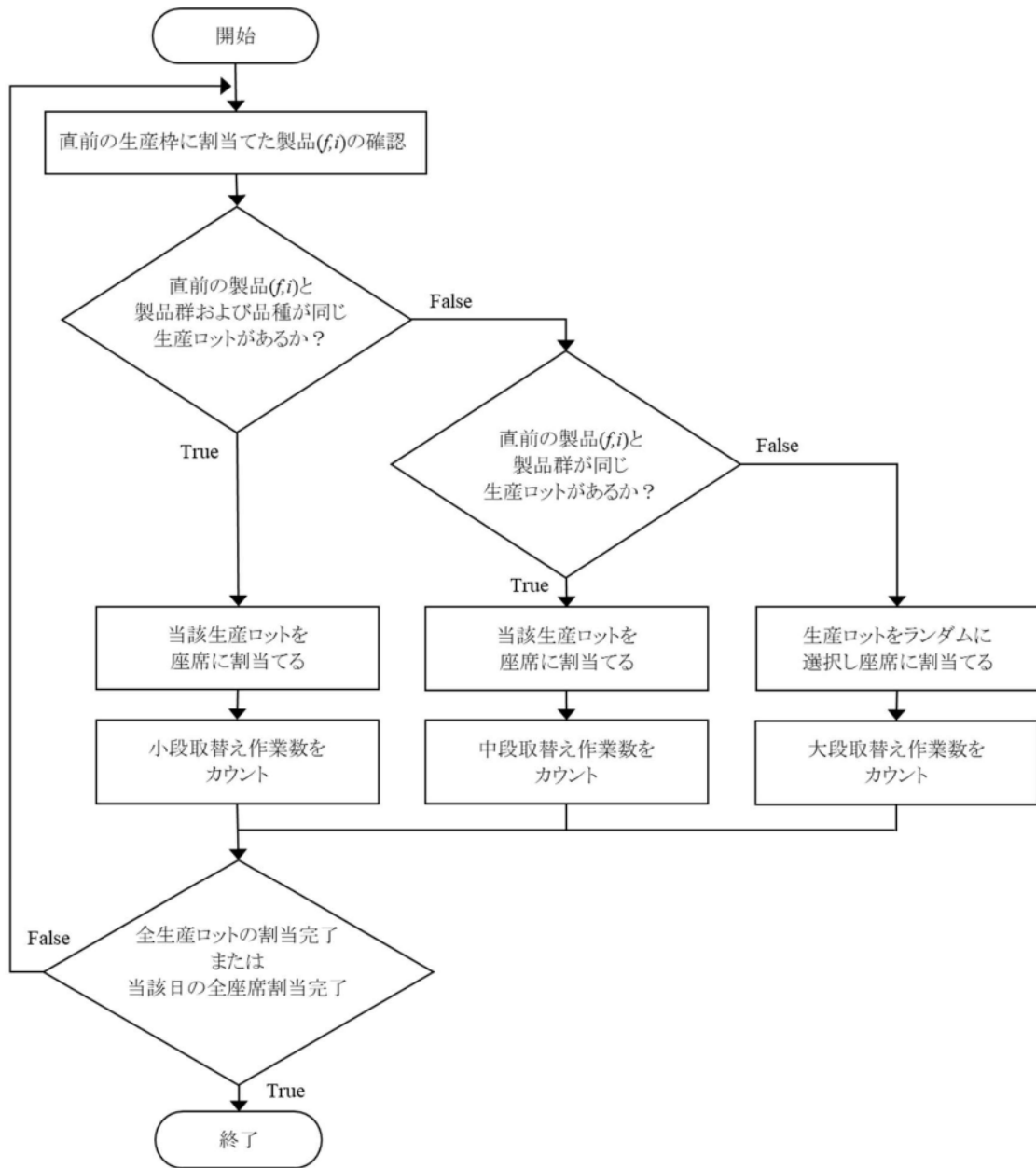


図 3-2 本モデルにおけるディスパッチングルール

|          | 6/1  | 6/2  | 6/3      | 6/4  | 6/5  | 6/8  | 6/9  | 6/10 | ... |
|----------|------|------|----------|------|------|------|------|------|-----|
| 1<br>m/c | 製品Aa | Ab   | Cb       | Ca   | (空席) | Aa   | Ba   | Bb   | ... |
|          | Aa   | Ab   | 製品Ca     | Ca   | (空席) | Aa   | Ba   | Bb   | ... |
|          | 製品Ab | 製品Cb | Ca       | (空席) | (空席) | Aa   | Bb   | Aa   | ... |
|          | Ab   | Cb   | Ca       | (空席) | Aa   | 製品Ba | Bb   | Aa   | ... |
| 2<br>m/c | 製品Bb | Ba   | ⊗        | ⊗    | Cb   | Cb   | Ab   | (空席) | ... |
|          | Bb   | Ba   | (メンテナンス) |      | Cb   | Ab   | (空席) | Ca   | ... |
|          | Bb   | (空席) | (メンテナンス) |      | Cb   | Ab   | (空席) | Ca   | ... |
|          | 製品Ba | (空席) | ⊗        | ⊗    | Cb   | Ab   | (空席) | Ca   | ... |

図 3-3 生産ロットの割当例

(1) 品切れ率 $\alpha$

品切れは見込生産環境下での重要な評価指標のひとつであり、その尺度として実需要量に対する品切れ量の割合となる品切れ率 $\alpha$ を式(3.12)で定義する。

$$\alpha = \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{f,i,j} / \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{f,i,j} \quad (3.12)$$

ここで、 $U_{f,i,j}$ はj日における製品( $f, i$ )の品切れ量 $U_{f,i,j}$ を示し、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $j = 1, 2, \dots, T \cdot L$ に対して、式(3.13)で与えられる。なお、 $j = 0$ に対して $U_{f,i,j} \equiv 0$ である。また、 $D_{f,i,j}$ は平均( $\bar{D}_{f,i}/L$ )、フェイズ $k$ のアーラン分布によってシミュレーション内で与えられるj日の製品( $f, i$ )の実需要量である。

$$U_{f,i,j} = \begin{cases} |I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j}| \\ (I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j} < 0) \\ 0 \quad (otherwise) \end{cases} \quad (3.13)$$

品切れは生産量と在庫量の合計が需要量より多い場合には発生しないが、反対に需要量の方が多い場合にはその差分が品切れとなる。

(2) 平均在庫率 $\beta$

在庫には需要変動を吸収するという重要な機能を有しているが、過剰在庫は保管スペースの圧迫やキャンセル時の損害リスク、キャッシュフローの悪化などを招く要素もあるため、その評価指標として実需要量に対する実在庫量の割合となる平均在庫率 $\beta$ を式(3.14)によって定義する。

$$\beta = \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J I_{f,i,j} / \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{f,i,j} \quad (3.14)$$

ここで $I_{f,i,j}$ は、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $j = 1, 2, \dots, T \cdot L$ に対して、式(3.9)で示されるj日末における製品( $f, i$ )の実在庫量である。

生産量と在庫量の合計が需要量より多い場合にその差分が在庫となり、反対の場合は品切れが発生するため在庫量を0にリセットすることになるため、本問題は非線形問題となる。品切れ発生時の在庫マイナス分をバックオーダーとして線形問題化する李ら[13]のアプローチと異なり、より実状に合わせた生産モデルとなっているが、最適化を図る場合には難易度がその分高くなってしまう。

(3) 段取替え作業負荷率 $\gamma$

ロット生産形態の製造工程では段取替え作業が重要であり、その尺度として実需要量に対する段取替え作業負荷の割合となる段取替え作業負荷率 $\gamma$ を式(3.15)にて定義する。

$$\gamma = SU / \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{f,i,j} \quad (3.15)$$

ここで、 $SU$ は段取替え作業負荷を表し、シミュレーションから与えられる規模ごと(大・中・小)の段取替え作業数( $SU_L, SU_M, SU_S$ )と、小規模段取替え作業に対する大規模および中規模段取り作業負荷の重み( $\omega_L, \omega_M$ )を用いた式(3.16)で定義される。

$$SU = \omega_L \cdot SU_L + \omega_M \cdot SU_M + SU_S \quad (3.16)$$



なお、この段取替え作業負荷率 $\gamma$ は先行研究では見受けられない指標である。また、段取替え作業負荷の程度は製造環境によって異なるため、 $\omega_L$ および $\omega_M$ を変更することでその違いを副次的に評価することが可能となる。

(4) 空席率 $\delta$

生産座席システムでの空席はいわゆる遊休に該当する。ここでは遊休率という尺度の代わりに、座席総数に対する空席総数の割合として、式(3.17)で示される空席率 $\delta$ を定義し評価する。

$$\delta = \sum_{j=1}^J VS_j / \sum_{j=1}^J SS_j \quad (3.17)$$

ここで、 $VS_j$ はシミュレーションから与えられる $j$ 日の空席数、 $SS_j$ は $j$ 日の生産座席数である。以上4種の評価尺度を用いて、管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )が及ぼす影響について明らかにする。

### 3.3 シミュレーション実験

前節では、一般的な見込生産環境で多く用いられる固定ロットサイズ生産と補充点生産方式を取り入れた生産モデルを定式化した。これにより実際の見込生産環境をより詳細に再現することができ、評価指標(品切れ、平均在庫、段取替え作業負荷、空席)に対する管理パラメータ(能力余力、基準在庫、ロットサイズ)の定量的評価や適切な座席枠設定方法を考察することが可能となる。なお巻末付録2に、大場ら[47]と第2章および本章の生産モデル比較表を示しており、それぞれの変更点を太字標記しているため適宜参照されたい。

本節では前節の生産モデルを基にシミュレーション実験を行い、3つの管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )が4つの評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )に対してどのような影響を及ぼすかについて述べる。なお、シミュレーションの流れを図3-4に示す。シミュレーションは、太枠で囲まれたロットサイズおよび基準在庫設定、座席枠設定、生産ロット割当および生産指示の順で行われ、シミュレーションの結果として各日の品切れ量や在庫量といった生産結果が得られる。また、図右下部の分岐条件に従ってシミュレーションを繰り返している。

3.3.1項でシミュレーションの設定条件について説明し、3.3.2項で予備実験について触れ、3.3.3項では実験結果を、3.3.4項ではそれら実験結果の要約について説明する。

#### 3.3.1 シミュレーションの設定条件

本節で行うシミュレーションの設定条件は以下の通りである。

次の条件設定に対する基本的な考え方は第2章の実験条件と概ね相違ないが、例えば1期間を1週間とするか1ヶ月とするか、製品種類を段取替えが評価できる様に製品群と品種から構成させるか、などの生産モデルの違いにより各値は若干異なる箇所がある。

(ア) 1ヶ月あたりの操業日数は20日間( $L = 20$ )とする。

(イ) 製品種類( $F \times I$ )は、製造群 $F$ が3種類( $F = 3$ )、品種 $I$ は2種類( $I = 3$ )から成る6種類( $F \times I = 6$ )とする。

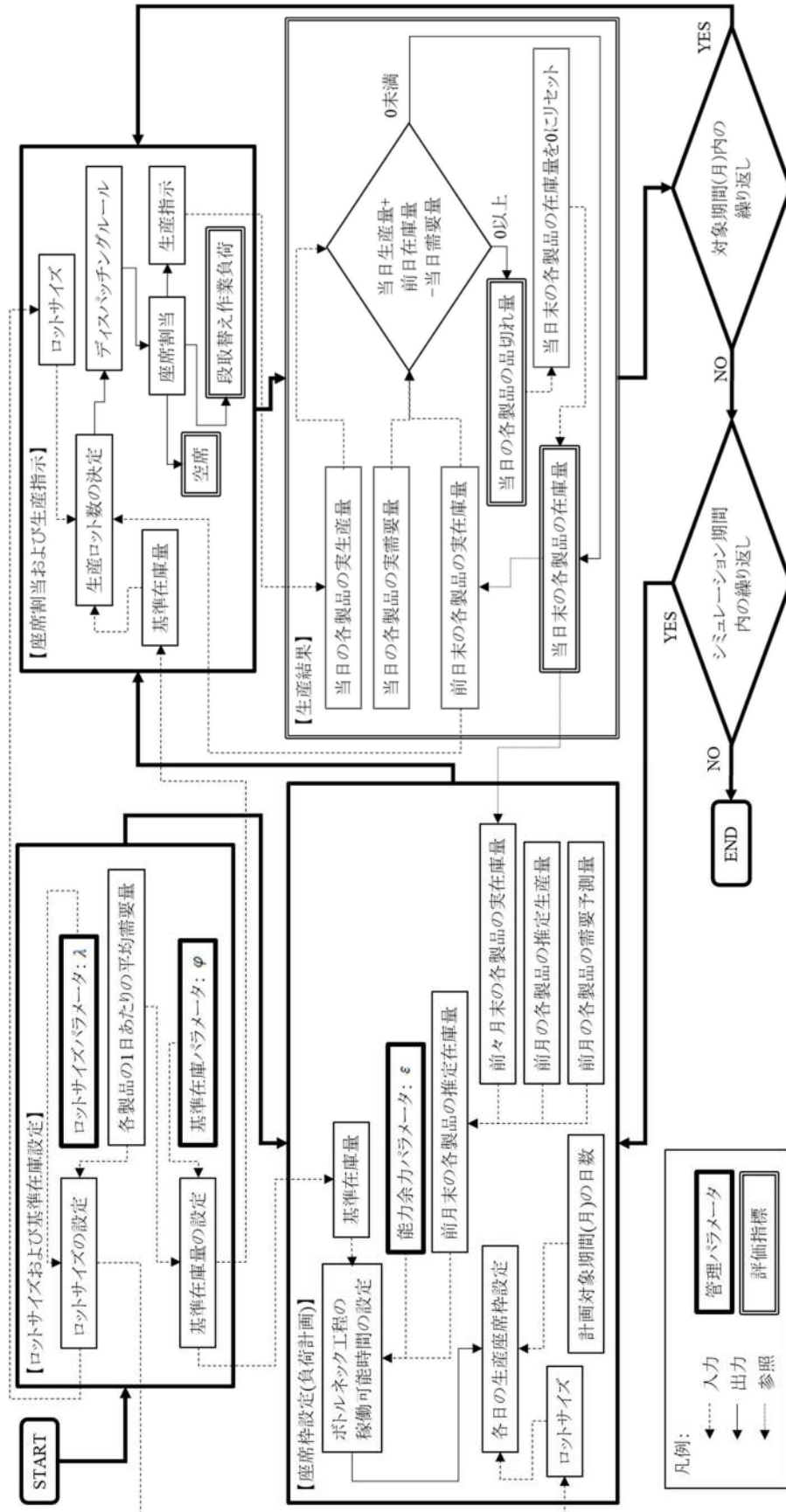


図 3-4 シミュレーションの流れ

- (ウ) 製造工程数は3工程( $M = 3$ )とする。
- (エ) 1ヶ月あたりの製品( $f, i$ )の平均需要量 $\bar{D}_{f,i}$ は20,000個( $\bar{D}_{f,i} = 20,000$ )とする。
- (オ) シミュレーション期間は、繰返しによる初期影響を低減させるために150ヵ月(3,000日)とし、初期100日を除いた2,900日間のデータを用いる。

次の条件は第2章と大きく異なる。

- (カ) 小規模段取替え作業に対する大規模段取替え作業負荷の重み $\omega_L$ および中規模段取替え作業負荷の重み $\omega_M$ は、 $\omega_L = 10$ および $\omega_M = 5$ と設定する。
- (キ) 各日( $j$ 日)の製品( $f, i$ )の実需要量 $D_{f,i,j}$ は、平均( $\bar{D}_{f,i}/L$ )、フェイズ $k$ のアーラン分布に従う乱数として与えられ、各日および製品種類によって独立とし、 $k = 30$ と設定する。
- (ク) 各日( $j$ 日)の製品( $f, i$ )の需要予測量 $\hat{D}_{f,i,j}$ は、各日( $j$ 日)の製品( $f, i$ )の実需要量 $D_{f,i,j}$ に対する変動係数 $cv$ の正規分布によって与えられるものとし、 $cv = 0.03$ と設定する。

(カ)の段取替え作業負荷の重みは、第2章では触れられていない段取替え作業に関する条件であり、固定ロットサイズや可変ロットサイズに関わらず、ロット生産環境を評価するうえでは重要な項目である。今回は、対象工場を参考に( $\omega_L, \omega_M$ ) = (10, 5)と暫定的に設定したが、この値を変えることで様々な環境を再現することが可能となる。また、(キ)(ク)の実需要および需要予測に関する条件について、第2章では共に正規分布に従うものと仮定していたが、実際の製造工程への適用を鑑みて、実需要の到着は完全にランダムではなく前の到着に影響を受けるものと考えためアーラン分布に、需要予測については実需要に対してどの程度の誤差があるかで設定すべきものと考え上記条件での正規分布に従うものとしている。

### 3.3.2 予備実験

管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )は、前節モデルの各所で入力情報たる変数として扱われている。上位計画において式(3.1)でロットサイズ $LS$ を、式(3.2)で製品( $f, i$ )の基準在庫量 $SI_{f,i}$ をシミュレーション開始前に決定しているが、ロットサイズパラメータ $\lambda$ はロットサイズ $LS$ の決定に、基準在庫パラメータ $\varphi$ は基準在庫量 $SI_{f,i}$ の決定に使用される。一方、式(3.3)にて $t$ 月の稼働可能時間 $MS_t$ を算出しているが、ここで能力余力パラメータ $\varepsilon$ が使われている。また、式(3.8)では $j$ 日の製品( $f, i$ )の生産ロット数 $PL_{f,i,j}$ を各日末に計算しているが、ここで式(3.1)のロットサイズ $LS$ と式(3.2)の製品( $f, i$ )の基準在庫量 $SI_{f,i}$ が関係してくるため、ロットサイズパラメータ $\lambda$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ が間接的に関わることになる。式(3.3)および式(3.8)は繰り返し計算されるものであるため、管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )のそれぞれがシミュレーション内の繰り返し計算に関係している。

これら管理パラメータは、規定内( $\varepsilon \geq 0, \varphi > 0, 0 < \lambda \leq 1$ )の値をとっていたとしても、実験環境によっては非現実的な結果を導出する場合がある。例えば、過大な能力余力パラメータ $\varepsilon$ が膨大な空席を招いたり、過小な基準在庫パラメータ $\varphi$ が品切ればかりを生じさせたり、ロットサイズが大きすぎて需要変動に全く対応できずに品切れが膨大になったりなどである。そこで本項では、この様な解析的に意味をなさない結果を予め省略するために、前項の実験環境に従って、管理パラメータを規定条件内( $\varepsilon \geq 0, \varphi > 0, 0 < \lambda \leq 1$ )かつ大きめの間隔で予めシミュレーションし、管理パラメー

タが及ぼす影響についての簡易的な傾向把握を行う。

一例として能力余力パラメータ $\varepsilon$ と品切れ率 $\alpha$ の関係を図 3-5 に示す。横軸が能力余力パラメータ $\varepsilon$ 、縦軸が品切れ率 $\alpha$ を表し、他の管理パラメータ( $\varphi, \lambda$ )は一定としている。一般的な見込生産環境において、品切れ率が定常的に 10%を超える様な状況は、事業として成立しておらず現実的ではない。この様な観点から妥当と思われる範囲を検討して、他の管理パラメータ( $\varphi, \lambda$ )や他評価指標( $\beta, \gamma, \delta$ )に関しても予備実験を行い、現実的と判断される範囲を策定する。

予備実験から、能力余力パラメータ $\varepsilon$ としては  $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75$ 、基準在庫パラメータ $\varphi$ で  $1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ 、ロットサイズパラメータ $\lambda$ では  $0.10 \leq \lambda \leq 0.50$  が現実的な管理パラメータ値の範囲と判断されたため、この範囲を対象とした実験について後述していく。

なお、この予備実験結果と生産実績を比較することで、品切れ率や平均在庫率などが概ね相違ないことを定性的ではあるが確認している。需要実績やメンテナンス停止による影響などの細かい違いにより、シミュレーション精度の定量評価までは至らず、今後の課題とすることを理解されたい。

### 3.3.3 シミュレーション実験結果

本項では、能力余力と基準在庫およびロットサイズの管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の値を入力としてシミュレーション実験を行う。出力として各日の製品ごとの実生産量や品切れ量、平均在庫量や段取替え作業負荷および空席数が得られる。なお、需要量については確率分布に従って与えられるものとしており、設定した入力値( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )ごとに各評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )を算出している。

#### (1) 品切れと平均在庫

まず管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )が品切れ率 $\alpha$ と平均在庫率 $\beta$ に与える影響について述べる。

図 3-6 と図 3-7 は管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )が品切れ率 $\alpha$ に与える影響を示す。両図とも縦軸は品切れ率 $\alpha$ を表しており、他 2 軸は図 3-6 で能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ

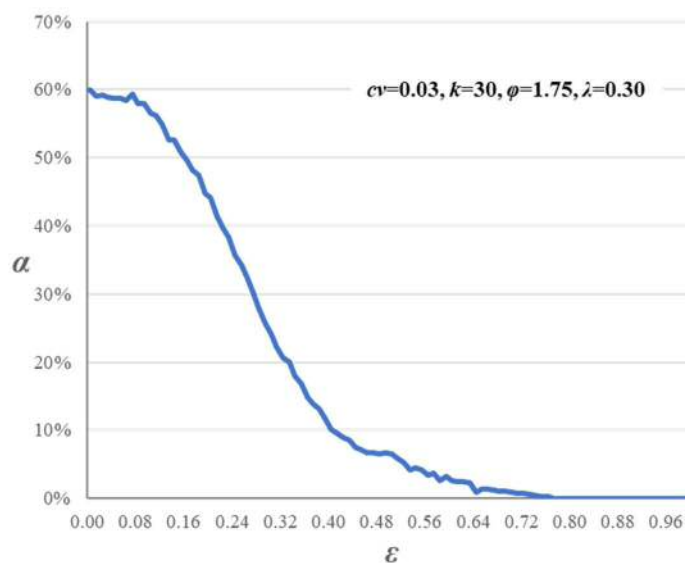


図 3-5 予備実験の一例(能力余力パラメータ $\varepsilon$ と品切れ率 $\alpha$ の関係)

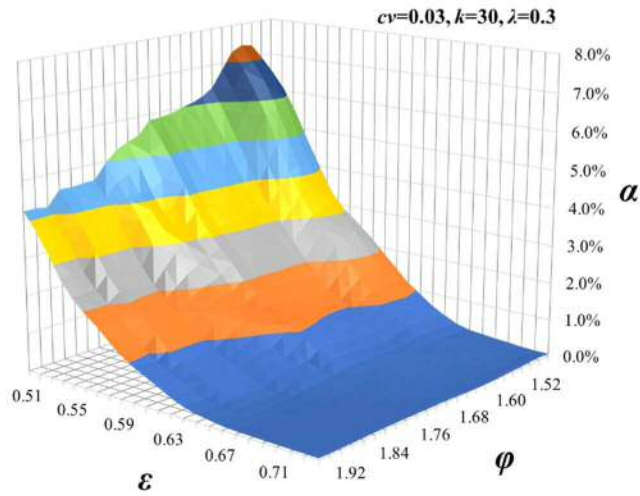


図 3-6 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と品切れ率 $\alpha$ の関係

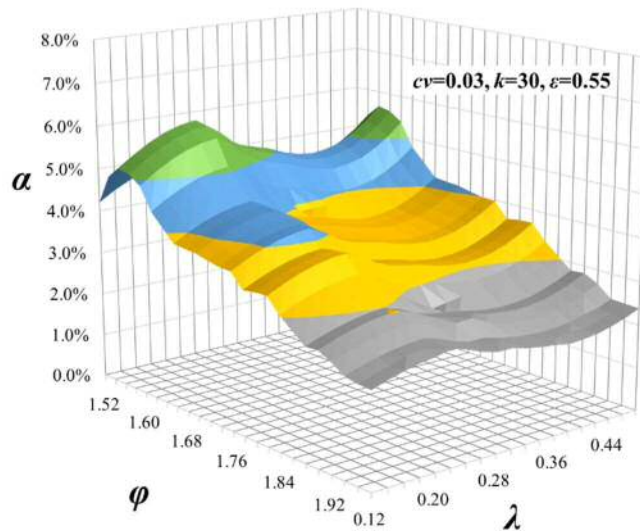


図 3-7 基準在庫パラメータ $\varphi$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と品切れ率 $\alpha$ の関係

タ $\varphi$ を, 図 3-7 で基準在庫パラメータ $\varphi$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ を示している.

図 3-6 から, 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ は, 共にその値を大きくすることで品切れ率 $\alpha$ の低減に寄与することが判るが, それぞれの傾きに注目すると, 能力余力パラメータ $\varepsilon$ の傾きの方が基準在庫パラメータ $\varphi$ の傾きより大きい. 例えば,  $\varphi = 1.50$ に着目すると $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75$ の間で品切れ率 $\alpha$ は約 7.0%から 0.0%まで減少しており,  $\varepsilon = 0.50$ 付近に着目すると $1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ で品切れ率 $\alpha$ は約 7.0%から約 4.0%まで減少している. ( $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75, 1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ )が予備実験から得られた現実的な管理パラメータの範囲であるため, 基準在庫パラメータ $\varphi$ の減少度合より能力余力パラメータ $\varepsilon$ の方が, より大きな減少に寄与するということである.

図 3-7 では品切れ率 $\alpha$ を極小化するロットサイズパラメータ $\lambda$ が存在しており, ロットサイ

ズもまた品切れに影響を与えていることが明らかとなる。ロットサイズパラメータ $\lambda$ の影響については、図 3-7 の $\varphi = 1.52$ 付近に着目すると $\lambda \cong 0.26$ で品切れ率 $\alpha$ が約 6.0%の極大値をとっており、 $\lambda = 0.40$ 付近で品切れ率 $\alpha \cong 4.5\%$ の極小値をとっている。このロットサイズが与える影響の評価が可能となったことは第 2 章と異なる新たな点であるが、ロットサイズパラメータ $\lambda$ による品切れの影響は単調的な増加や減少ではないため、品切れ率 $\alpha$ が極小となるためのロットサイズパラメータ $\lambda$ の値を探索する必要がある。また、基準在庫パラメータ $\varphi$ については、 $\lambda = 0.50$ 付近の $1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ の範囲で $\alpha \cong 5.5\%$ から $\alpha \cong 2.2\%$ の減少傾向が示されており、図 3-6 と同様の傾向を示している。

次に、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が平均在庫率 $\beta$ に及ぼす影響を図 3-8 と図 3-9 に示す。

図 3-8 は能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ が平均在庫率 $\beta$ に与える影響を示す。能力余力と基準在庫が各々大きくなるにつれ在庫が増大しており、これは先述の品切れ率 $\alpha$ に対してのトレードオフ関係を表す。例えば、 $\varphi = 1.52$ 付近に着目すると $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75$ の間で平均在庫率 $\beta$ が約 140%から 170%程度まで増加、 $\varepsilon = 0.44$ 付近でも $1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ の間で同様の増加が見受けられている点である。ただし、能力余力と基準在庫による平均在庫率への影響(増加)度合には大きな差が見受けられないが、図 3-6 から基準在庫より能力余力の方が品切れへの減少影響が大きかったため、トレードオフ関係であってもその影響度は能力余力の方が大きいとすることができる。

図 3-9 は管理パラメータ $(\varphi, \lambda)$ と平均在庫率 $\beta$ の関係を示す。ロットサイズパラメータ $\lambda$ を大きくすることで、平均在庫率 $\beta$ が一旦極小を経てから単調的に増加している。例えば、 $\varphi = 1.92$ 付近での $0.10 \leq \lambda \leq 0.50$ における平均在庫率 $\beta$ について、約 185%から一旦 180%程度に減少し、その後 205%程度まで上昇している。平均在庫率 $\beta$ の増加の程度(傾き)は、およそ 170%から 205%程度まで増加する基準在庫 $\varphi$ ほどではないが、ロットサイズパラメータ $\lambda$ を大きくすることによって同じ製品を一度に多く生産することになるため、在庫

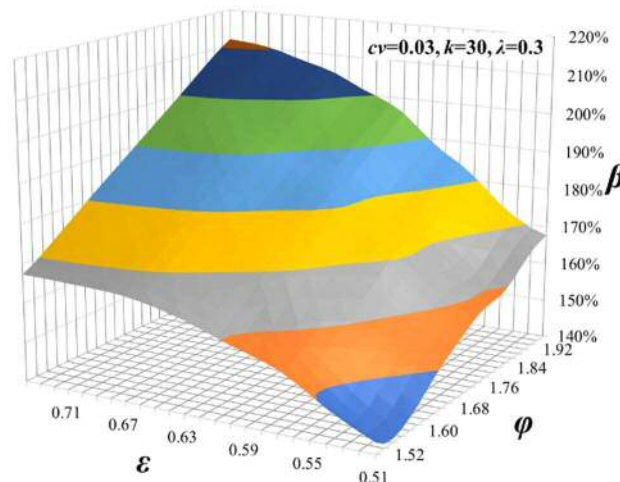


図 3-8 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と平均在庫率 $\beta$ の関係



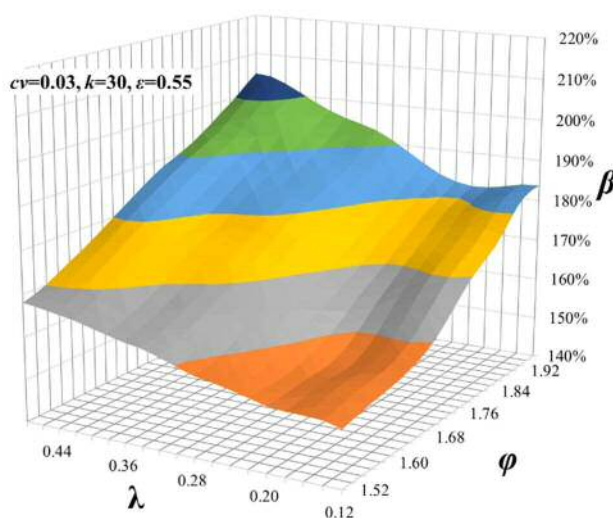


図 3-9 基準在庫パラメータ $\varphi$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と平均在庫率 $\beta$ の関係

が増加するものと考えられる。また、図 3-7 の品切れに対する影響と同様に極小値を持っていることから、適切なロットサイズを設定しなければならないこともまた、留意点として挙げられる。

(2) 段取替え作業負荷と空席

ここでは、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が段取替え作業負荷率 $\gamma$ と空席率 $\delta$ に与える影響について述べる。段取替え作業は固定ロットサイズ生産において重要な管理指標であり、直接的に生産機会の損失につながる空席もまた、生産座席システムにおいて重要な管理指標である。前述の通りこれらの評価指標は本研究から用いた新しい指標であり、特に $\gamma$ は、前節モデルで定義した製品群(Family)と品種(Item)の違いによって、大・中・小と規模が異なる段取替え作業を発生させるため、より詳細な評価が可能になった指標である。

図 3-10 と図 3-11 は管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が段取替え作業負荷率 $\gamma$ に与える影響を表し、両図とも縦軸は段取替え作業負荷率 $\gamma$ である。他 2 軸は、図 3-10 で能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ を、図 3-11 で基準在庫パラメータ $\varphi$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ を示している。

図 3-10 より、ロットサイズを大きくすることで段取替え作業を軽減できるのは自明だが、一方の能力余力 $\varepsilon$ を大きくすることで段取替え作業が若干増加することが明らかとなった。例えば、 $\lambda = 0.12$ 付近で段取替え作業負荷率 $\gamma$ が 1.1%強から約 1.4%まで増加している点である。これは、能力余力を大きくすることで生産座席枠も大きくなり、品切れ防止のため需要変動に対して柔軟に生産ロットを割り当てることが可能となることで、(それ程多い訳ではないが)こまめに品種の切替えを行うためと考えられる。

能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と段取替え作業負荷率 $\gamma$ の関係を示す図 3-11 より、例えば $\varepsilon = 0.51$ 付近で段取替え作業負荷率 $\gamma$ が 0.7%弱から 0.5%強まで減少している様に、基準在庫を大きくすることで微量ながらも段取替え作業が減少してい

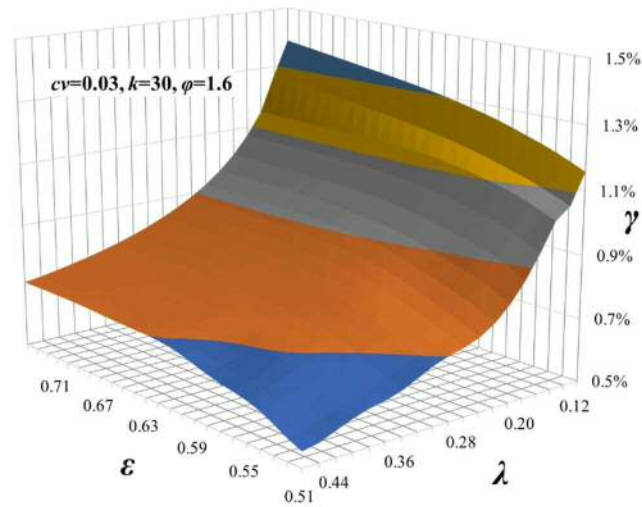


図 3-10 能力余力パラメータ $\varepsilon$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と段取替え作業負荷率 $\gamma$ の関係

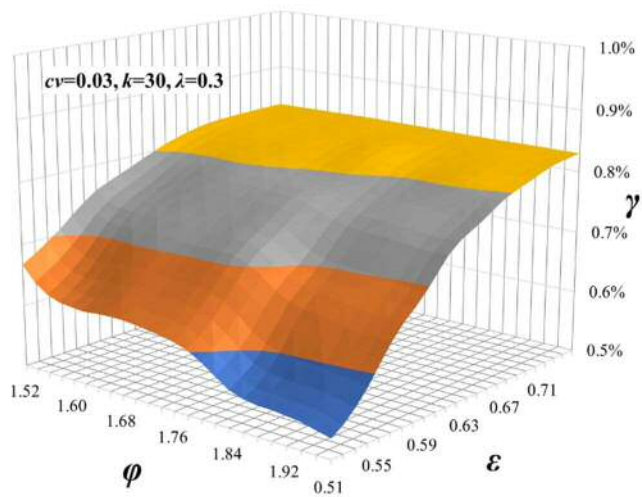


図 3-11 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と段取替え作業負荷率 $\gamma$ の関係

る。つまりロットサイズパラメータ $\lambda$ ほどではないが、能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ による段取替え作業への影響も若干ながら存在することが明らかとなった。

図 3-12 および図 3-13 は、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が空席率 $\delta$ に与える影響を示す。両図とも縦軸が空席率 $\delta$ であり、他 2 軸は図 3-12 で能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ を、図 3-13 で能力余力パラメータ $\varepsilon$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ を示している。

図 3-12 から、能力余力を大きくすることで空席が増えるリスクは自明であるが、反対に基準在庫を大きくすることで若干ながらも空席を減少できることが判る。前者の自明な関係に関しては、図 3-6 で能力余力パラメータ $\varepsilon$ が品切れ率 $\alpha$ を減少させるのに効果的であることを示したが、図 3-12 では、例えば $\varphi = 1.52$ 付近の $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75$ の間で $30\% < \delta < 40\%$ といった様に、明らかに空席率 $\delta$ の増加を招いているため、能力余力に関しては品



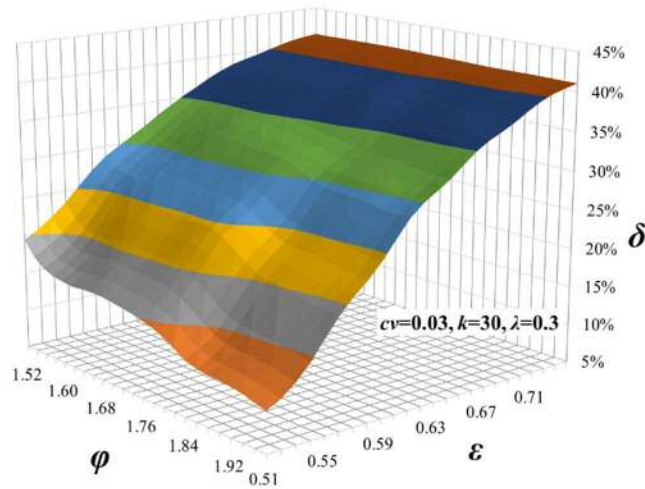


図 3-12 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と空席率 $\delta$ の関係

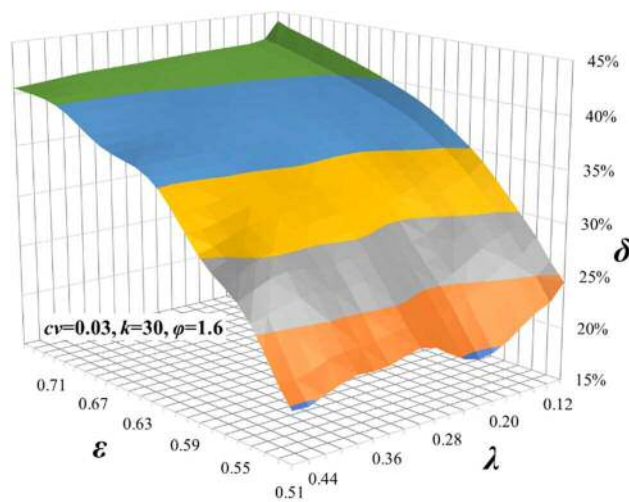


図 3-13 能力余力パラメータ $\varepsilon$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と空席率 $\delta$ の関係

切れと空席にトレードオフ関係が存在するとも言える。一方後者の基準在庫が若干ながらも空席を減少できる点については、 $\varepsilon = 0.52$ 付近の $1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ の間で20%から15%程度の空席率 $\delta$ 減少が見受けられることより、基準在庫を増やすことで、それを補充する生産座席数が増えるために空席が減少するものと考えられる。

図 3-13 では、能力余力については前述(図 3-12)の通りだが、ロットサイズについては若干ではありながらも空席を減少する結果が得られている。例えば、 $\varepsilon = 0.51$ の $0.10 \leq \lambda \leq 0.50$ で空席率 $\delta$ の5%程度の減少が見受けられる。能力余力パラメータ $\varepsilon$ が高く設定されている場合はそれほど減少しないが、能力余力が少ない場合の変動は大きい。図 3-7と比較すると、ロットサイズパラメータ $\lambda$ が品切れに与える影響と反する傾きが見受けられるため、ロットサイズに関しても品切れと空席にトレードオフ関係が存在していることが判る。

以上より、3つの管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )それぞれは、大なり小なり段取替え作業負荷率 $\gamma$ と空席率 $\delta$ に影響を与えていることが判った。これらは従来の研究では触れられたことがない新たな評価指標であり、これを定量的に評価できたことは意義のあることと考える。また、これら評価指標に対しても、適切な管理パラメータの設定が必要と言える。

### 3.3.4 実験結果の要約

以上の結果を表3-1にまとめる。縦軸は管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )を、横軸は評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )を示しており、例えば能力余力パラメータ $\varepsilon$ に関して、品切れ率 $\alpha$ に対しては単調減少の関係があり、平均在庫率 $\beta$ については単調増加関係であるということを矢印で表している。前項では評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )ごとに結果を述べたが、本項では管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )別に以下要約する。













まず能力余力パラメータ $\varepsilon$ について、能力余力を多く持つことで品切れ率 $\alpha$ を大きく減少させることができるが、反対に平均在庫率 $\beta$ の増加を招くトレードオフの関係が存在する。さらに、空席率 $\delta$ も増大するという品切れと空席のトレードオフ関係も示されている。段取替え作業負荷率 $\gamma$ についてはその微増を招くことが明らかとなったが、これは能力余力を大きくとることで座席枠も大きくなり、品切れ防止のため需要変動に対して柔軟に生産ロットを割り当てるのが可能となることで、(それ程多い訳ではないが)こまめに品種の切替えを行うためと考えられる。

基準在庫パラメータ $\varphi$ は、品切れ率 $\alpha$ 、段取替え作業負荷率 $\gamma$ および空席率 $\delta$ の減少に寄与するパラメータである。一方で平均在庫率 $\beta$ を大きく増加させてしまうことは自明であるが、在庫を大きく持つことで品切れが減少するだけでなく、それを作ろうとするために多くの生産が行われ、空席が減少するものと考えられる。段取替え作業負荷については、各品種で多くの在庫を有することになるために、需要変動以上の段取替え作業が減少しているものと考えられる。

ロットサイズパラメータ $\lambda$ が段取替え作業負荷率 $\gamma$ を大きく減少させることは自明だが、その他の指標(品切れ率 $\alpha$ 、平均在庫率 $\beta$ 、空席率 $\delta$ )においては極値が存在する影響を与えている。それらの極小値がロットサイズパラメータ $\lambda$ の同一値のときに発生すれば最良であるが、前項図の通りそれぞれで当然異なるため、適切な値の選択が求められるパラメータということが明らかとなった。

以上より、管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )が評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )のそれぞれに及ぼす影響について明らかにすることができた。一部自明の結果もあるが、これらを定量的に評価したことに意義があり、こ

表 3-1 実験結果の要約

|             |               | 品切れ率  | 平均在庫率   | 段取替え作業負荷率   | 空席率   |
|-------------|---------------|---|---|---|---|
|             |               | $\alpha$  | $\beta$   | $\gamma$  | $\delta$  |
| 能力余力パラメータ   | $\varepsilon$ |  |  |  |  |
| 基準在庫パラメータ   | $\varphi$     |  |  |  |  |
| ロットサイズパラメータ | $\lambda$     |  |  |  |  |

での結果を用いて次節で過不足のない管理パラメータの探索を行う。なお、次章の考察にも本節結果を用いている。

### 3.4 過不足のない管理パラメータ値の探索

前節では、実験結果を示すことで3つの管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が4つの評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ へ与える影響を定量的に評価した。生産座席システムにおいては過不足のない座席枠設定が重要であり、そのためには各望小評価指標をできる限り低く抑える管理パラメータの設定が課題である。得られた実験結果から、各評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ を最小化する管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が探索できれば最良ではあるが、例えば品切れを最小化する $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ と段取替え作業を最小化する $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が同値になることは稀であり、まして本章の様に評価指標が4つともなれば、各指標を最小化する管理パラメータが同値に一致する可能性は極めて低い。

そこで本節では、4つの評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ を総合的に評価する管理費用 $CC$ という指標を定義し、その定量的評価を行う。さらに、得られた結果から管理費用 $CC$ を低く抑える管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の関係を近似し、得られた近似式と管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の関係を表す等高線図(3つの管理パラメータのうち1つの値が等しいときの線図)から定量的かつ視覚的にその管理パラメータを探索する方法を提案する。

#### 3.4.1 管理費用による総合評価

前節の実験結果を踏まえ、本項では4つの評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ を総合的に同時評価するための指標として、管理費用 $CC$ を式(3.18)より算出する。

$$CC = C_{\alpha} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{f,i,j} + C_{\beta} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J I_{f,i,j} + C_{\gamma} \cdot SU + C_{\delta} \cdot \sum_{j=1}^J VS_j \quad (3.18)$$

ここで、 $(C_{\alpha}, C_{\beta}, C_{\gamma}, C_{\delta})$ はそれぞれ品切れ、在庫保管、段取替え作業負荷および空席に対するペナルティの重み付けを行うコスト係数を示している。前述の品切れ数 $U_{f,i,j}$ 、実在庫量 $I_{f,i,j}$ 、段取替え作業負荷 $SU$ および空席 $VS_j$ の各累計に対して、それぞれコスト係数を乗じて合計したものを管理費用 $CC$ として算出する。

各コスト係数 $(C_{\alpha}, C_{\beta}, C_{\gamma}, C_{\delta})$ は製造環境によって異なるため、対象とする製造工程側でそれぞれ検討し設定される任意の値となる。今回は対象工場の製造・販売・生産管理の各責任者との協議を経て、式(3.19)の通り設定する。

$$(C_{\alpha}, C_{\beta}, C_{\gamma}, C_{\delta}) = (50, 1, 10, 5000\lambda) \quad (3.19)$$

具体的数値は社外秘情報を含むため開示できないが、売上(利益)減少額や在庫保管費用、段取替え作業工数に対する原価計算値などの定量的に評価できる指標に加え、品切れに伴う顧客との信頼損失や空席による遊休損失などの定量化が困難な指標について、それらの損失影響を試算し、前述の協議によって設定している。

以上を基に、コスト係数が式(3.19)で与えられるときの管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ と管理費用 $CC$ の関

係について評価を行う。

まず、図 3-14 に能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と管理費用 $CC$ の関係を示す。縦軸が管理費用 $CC$ であり、他 2 軸が能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ である。この図では、例えば、 $\varphi = 1.50$ 付近の $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75$ 間では $CC$ が約 135million(以下、million は表記省略する)から 105 まで変動しており、その中の $\varepsilon = 0.67$ 付近で約 95 の極小値をとっていることから、 $\varepsilon$ に関しては $CC$ に極小が存在することが判る。また、 $\varphi$ に関しては、例えば、 $\varepsilon = 0.51$ 付近の $1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ 間で $CC$ が 130 から一旦 120 程度まで減少し、その後 135 程度の極大値をとって約 130 まで減少していることから、 $CC$ に極小と極大が存在することが判る。この様に管理費用 $CC$ が複雑な変動を示すのは、管理費用 $CC$ が能力余力における品切れと空席のトレードオフ関係や、基準在庫における品切れと在庫のトレードオフ関係などの様々な関係を、式(3.19)のコスト係数を介して総合的に評価する指標であるためであり、前節で示した様に各管理パラメータの変化によって評価指標それぞれが様々に変化するためと考えられる。なお、管理費用 $CC$ には特に単位(円や USD など)は設けておらず、増減を測るためだけの指標と理解されたい。

この図において、 $\varphi = 1.50$ における $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75$ では $CC$ が約 135 の最大値から極小 95 程度まで変動しているのに対し、 $\varepsilon = 0.51$ 付近における $\varphi$ では同じく 135 程度の最大値から約 120 の極小値までの変動に留まっている。つまり、基準在庫パラメータ $\varphi$ よりも能力余力パラメータ $\varepsilon$ の方が管理費用 $CC$ に対して大きく影響を及ぼしていることが判る。さらに、 $0.63 \leq \varepsilon \leq 0.67$ および $1.52 \leq \varphi \leq 1.68$ 付近で示される、グラフ底面に近いエリアについても着目されたい。管理費用 $CC$ は望小評価指標であるため、グラフ底面に近いほど望ましいこととなるが、逆説的に述べると管理費用 $CC$

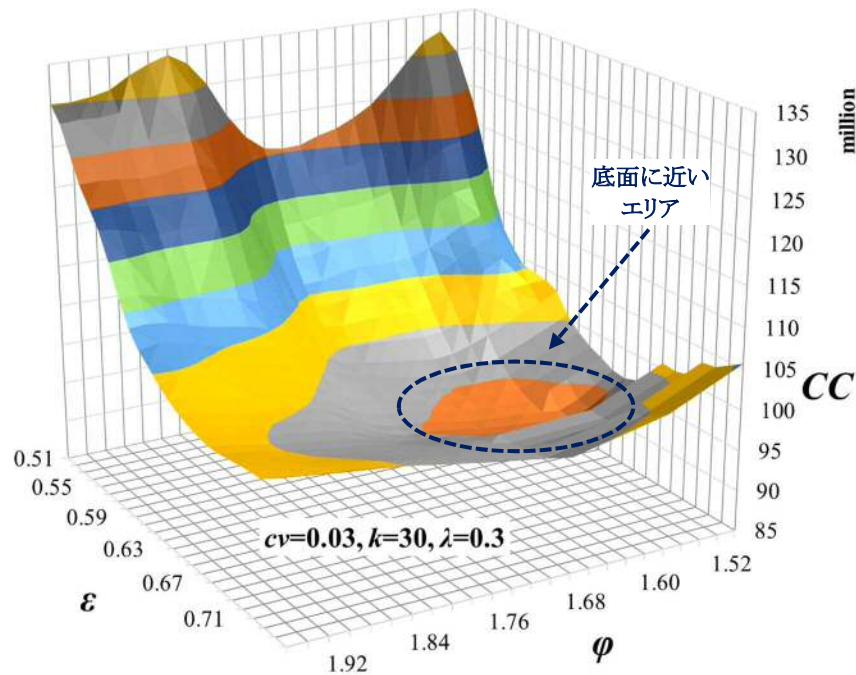


図 3-14 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と管理費用 $CC$ の関係

を最小化する管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ が存在すると言える。図 3-14 が $\lambda = 0.30$ という条件のグラフであり、フであり、この条件下においては $\varepsilon = 0.64$ かつ $\varphi = 1.54$ で管理費用 $CC$ が最小値であったため、この条件に関しては $(\varepsilon, \varphi) = (0.64, 1.54)$ が最も過不足のない管理パラメータ値とすることができる。

次に、基準在庫パラメータ $\varphi$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と管理費用 $CC$ の関係を、図 3-15 に示す。縦軸は管理費用 $CC$ を示し、他の 2 軸が基準在庫パラメータ $\varphi$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ である。能力余力パラメータ $\varepsilon$ が管理費用 $CC$ に与える影響については図 3-14 で述べた通りであるため割愛するが、ロットサイズパラメータ $\lambda$ が与える影響としては、図 3-14 の基準在庫パラメータ $\varphi$ と同様に、 $CC$ に極大と極小をもつ関係であることが判る。例えば、 $\varepsilon = 0.51$ 付近において $0.10 \leq \lambda \leq 0.50$ の範囲で $CC$ は 200 弱から 205 程度まで増加し、その後 175 程度まで減少して微増している。また、能力余力パラメータ $\varepsilon$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ の影響について、 $\lambda = 0.12$ 付近で $\varepsilon$ は $CC$ の最大 200 弱から最小 170 弱まで影響を及ぼしているのに対し、 $\varepsilon = 0.51$ 付近の $\lambda$ は 205 から 175 程度の範囲で $CC$ に影響していることから、概ね同程度の影響と考えることができる。さらに、図 3-14 と同様に、 $0.55 \leq \varepsilon \leq 0.59$ および $0.28 \leq \lambda \leq 0.36$ 付近でグラフ底面に近いエリアが存在しており、この図は $\varphi = 1.60$ という条件であるため、この条件下においては管理費用 $CC$ を最小化する管理パラメータが $(\varepsilon, \lambda) = (0.58, 0.29)$ であった。

以上から、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ が管理費用 $CC$ に与える影響を定量的に評価したことに加え、管理費用 $CC$ を最小化する管理パラメータ値が存在することを明らかにした。ここでは、1 つの管理パラメータ値を一定としたうえで、管理費用 $CC$ が最小となる残りの管理パラメータ値を示したが、3 つの管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の組合せをうまく設定することができれば、各評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ を総合的に評価する管理費用 $CC$ を最小化できることになる。

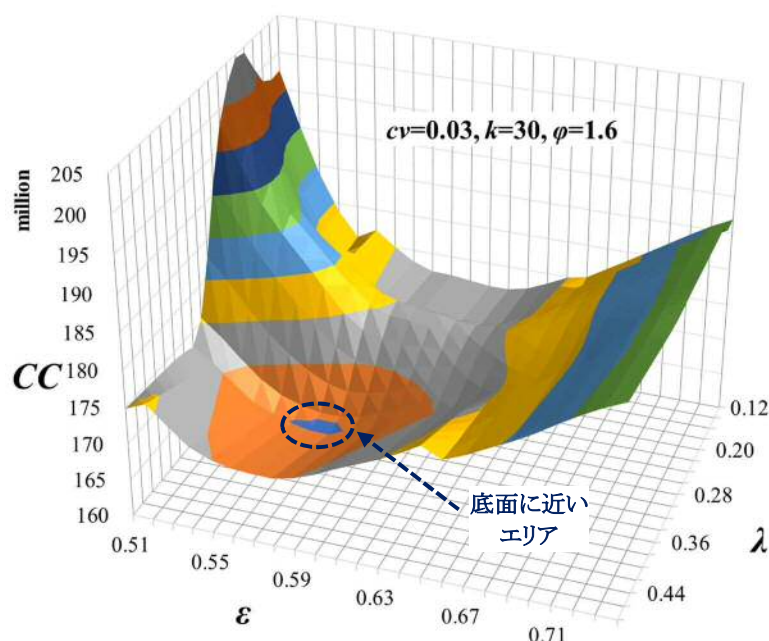


図 3-15 能力余力パラメータ $\varepsilon$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と管理費用 $CC$ の関係

3.4.2 管理費用を低く抑える管理パラメータの探索

前項では、管理費用 $CC$ という総合的評価指標を用いた定量的評価を行い、それを最小化する管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の存在を明らかにした。本項では、前項で得られた結果を用いて管理費用 $CC$ を低く抑える管理パラメータ値の探索方法を説明する。

まず、シミュレーション実験で得られたデータの中から管理費用 $CC$ が目標値以下となるデータを抽出し、解析アプリケーションを用いて管理パラメータの関係の近似式および等高線図(3つのパラメータの関係を三次元的に表した図)を得る。これにより、管理費用 $CC$ に対して過不足のない管理パラメータ値の探索が定量的かつ視覚的に行えることを示す。

(1) 近似方法

まず目標コストレベルを設定する。予め管理費用 $CC$ が目標値以下となるデータを全ての実験データの中から抽出し、その抽出データを用いて管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の関係を近似する。本章ではその目標値を 65 million と設定し、そのデータ例を表 3-2 に示す。例えば表 3-2 の最上段は、管理費用 $CC$ が 45.9million と目標値を下回っており、このときのシミュレーション条件が $(k, CV) = (30, 0.03)$ 、そして $CC = 45,953,112$ が得られたときの管理パラメータ値が $(\varepsilon, \varphi, \lambda) = (0.54, 1.50, 0.50)$ であったことを意味している。

次に、目的関数をロットサイズパラメータ $\lambda$ 、説明変数を能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ として、それらの関係を近似する。解析には「JUSE-StatWorks®/V5」を用い、前述のデータを適用して「応答曲面法の 1 特性の最適化[110]」という機能を用い近似を行う。この機能は、実験データを 2 次モデルに当てはめ、寄与率などにより当てはまり具合を評価し、そのモデルに基づいて最適条件を探索する機能であるが、本章では近似式と等高線図を得るところまで行う。これは、実工程にはモデル化困難な他の制約条件が存在し、最終的にはそれらを踏まえて担当者がパラメータを協議・決定する場合が多く、その検討材料として近似式と等高線図を用いるためである。

表 3-2 適用データの一例

| $k$ | $CV$ | $\varepsilon$ | $\varphi$ | $\lambda$ | $CC$       |
|-----|------|---------------|-----------|-----------|------------|
| 30  | 0.03 | 0.54          | 1.50      | 0.50      | 45,953,112 |
| 30  | 0.03 | 0.55          | 1.50      | 0.50      | 49,305,939 |
| 30  | 0.03 | 0.52          | 1.50      | 0.50      | 49,573,997 |
| 30  | 0.03 | 0.56          | 1.50      | 0.50      | 49,883,252 |
| 30  | 0.03 | 0.51          | 1.60      | 0.46      | 51,577,189 |
| 30  | 0.03 | 0.50          | 1.60      | 0.46      | 54,522,345 |
| 30  | 0.03 | 0.58          | 1.60      | 0.48      | 56,466,280 |
| 30  | 0.03 | 0.55          | 1.50      | 0.50      | 59,864,540 |
| 30  | 0.03 | 0.57          | 1.60      | 0.48      | 59,888,306 |
| 30  | 0.03 | 0.64          | 1.60      | 0.42      | 61,141,840 |
| 30  | 0.03 | 0.55          | 1.58      | 0.46      | 63,540,057 |
| 30  | 0.03 | 0.53          | 1.60      | 0.44      | 63,679,344 |
| ⋮   | ⋮    | ⋮             | ⋮         | ⋮         | ⋮          |



能力余力を変動させる場合は人員など、基準在庫を変更させるには保管スペースなどで対応可能となるが、ロットサイズは一度決めると治具や台車などの改造が発生する場合が多い。そのため、実際の製造工程においては3つの管理パラメータのうちでロットサイズがより慎重に扱われるパラメータとなり得るため、本章ではロットサイズパラメータ $\lambda$ を目的関数に置くこととする。当然ながら、目標とするコストレベルやどのパラメータを目的関数に置くかについては実際の製造工程側で選択可能である。

(2) 適用結果

前述の方法による近似結果として式(3.20)の近似式を得た。

$$\hat{\lambda} = 0.655 - 0.008\varepsilon - 0.125\varphi + 2.679\{(\varepsilon - 0.550) \times (\varphi - 1.557)\} - 7.208(\varepsilon - 0.550)^2 + 11.491(\varphi - 1.557)^2 \quad (3.20)$$

ここで、 $\hat{\lambda}$ は近似式(3.20)に従って算出されるロットサイズパラメータの推定値である。

この近似式の当てはまり具合を判断するため、式(3.21)で表される寄与率 $R^2$ を用いる。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{z=1}^n (\lambda_z - \hat{\lambda}_z)^2}{\sum_{z=1}^n (\lambda_z - \bar{\lambda})^2} \quad (3.21)$$

ここで、 $z$ は近似に用いたデータを表す記号、 $n$ はそのデータ数であり、 $\lambda_z$ は実験結果から抽出した実データ(表 3-2)、 $\hat{\lambda}_z$ は近似式(3.20)から得られる管理費用 $CC$ を最小化するロットサイズパラメータの推定値、 $\bar{\lambda}$ は実データの平均値である。式(3.21)の右辺第2項の分母は近似に用いたデータの総平方和、同分子は推定値の残差平方和である。

近似式(3.20)の寄与率を式(3.21)に従って算出すると $R^2 = 0.866$ であった。この値は応答曲面法において整合性が高いことを意味しており、得られた近似式は良く当てはまっていると判断できる。また、3つのパラメータの関係を三次元的に表した等高線図として図 3-16を得た。この図は管理費用 $CC$ を目標コストレベル(今回は 65million)以下に抑制するという条件下での管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の関係を表している。横軸が能力余力パラメータ $\varepsilon$ を、縦軸が基準在庫パラメータ $\varphi$ 、等高線がその条件を満たすロットサイズパラメータ $\lambda$ を示す。一例を述べると、例えばロットサイズパラメータ $\lambda$ の値を $\lambda = 0.460$ と選択した場合、図中の“(4) $\lambda = 0.460$ ”を示す等高線上の任意の点から各軸に下した垂線の交点が示す $(\varepsilon, \varphi)$ の値が導け、それらの値と $\lambda = 0.460$ の組合せをとれば目標コストレベルを満たすことが可能という意味になる。例えば、 $\varphi = 1.540$ と指定した場合、“(4) $\lambda = 0.460$ ”を示す等高線と交わる $\varepsilon$ の座標は $\varepsilon = 0.526$ または $\varepsilon = 0.558$ と導けるため、 $(\varepsilon, \varphi, \lambda) = (0.526, 1.540, 0.460)$ または $(\varepsilon, \varphi, \lambda) = (0.558, 1.540, 0.460)$ が過不足のない管理パラメータ値と提案できる。

この等高線図を用いることにより、近似式(3.20)の様な複雑な計算を行わず、過不足のない管理パラメータ値の探索を視覚的に行うことができる。これは計画立案者の意思決定を支援するだけでなく、その根拠を周囲や上位者へ説明する際にも役立つものである。

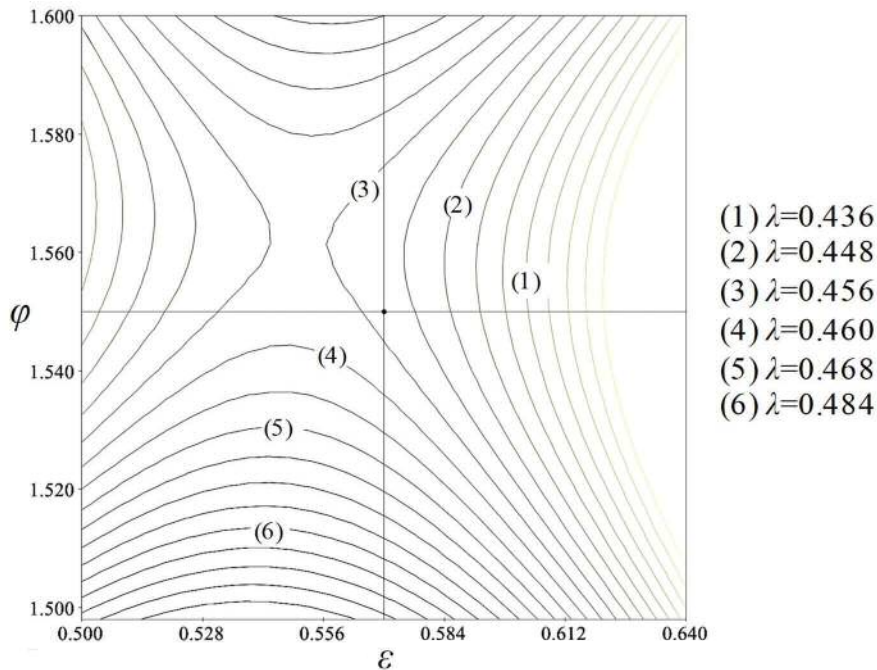


図 3-16 管理費用 $CC$ を目標以下に抑える管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の関係

### 3.4.3 管理パラメータの探索方法提案

前項の結果より、管理費用 $CC$ を目標値以下に抑えるための管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の関係を表す近似式を導出することができた。特に、今回得られた近似式は高い寄与率 $R^2 = 0.866$ を有しており、当てはまり具合が良い傾向であることを示している。さらに、得られた等高線図から目標コストレベルを満たす管理パラメータ値を容易に導出できることも示した。

以上より本項では、目標コストレベルを満たす管理パラメータの探索方法を次の通り提案する。

(1) 生産モデルの定式化

需要変動や製造条件など、シミュレーション実験を行うための環境を定式化する。特に、管理パラメータや評価指標は適用環境に合わせて設定する(例:3.2 節)。

(2) シミュレーション実験

管理パラメータが各評価指標に与える影響を定量的に評価する(例:3.3 節)。また、各評価指標を総合的に評価する指標を設け、その影響についても評価する(例:3.4.1 項)。

(3) 過不足のない管理パラメータの探索

実験結果の中から総合的な評価指標を目標値以下に抑えられた結果を抽出し、解析アプリケーションの機能を用いて管理パラメータの関係を近似する。得られた近似式の寄与率から当てはまり具合を評価する(例:3.4.2 項)。なお、寄与率が低い場合は手順(1)を見直し再考する。

(4) 実環境に合わせた管理パラメータの選択

(3)で得られた等高線図(例:図 3-16)などから、実環境に合わせた管理パラメータの組合せを検討し選択する。



この手順に従い管理パラメータ値を選択すれば、適切な座席枠設定を定量的かつ視覚的に行うことが可能となり、実際の製造工程における意思決定の一助になると考える。また、等高線図の様な視覚的根拠は、周囲や上位者へ説明するときにも効果的に使用できるため、実際の製造工程において、この提案方法は高い納得感が得られやすいものである。特に、座席枠設定が複数の管理パラメータに従い、それらが影響を及ぼす評価指標も複数という複合的な検討が求められる場合において、今回の提案は効果的な方法になり得るものとする。

#### 3.5 本章のまとめ

本章では、補充点生産方式を採用した固定ロットサイズ見込生産環境における生産座席システムを対象に、解析アプリケーションの機能を用いた管理パラメータの探索方法を提案することで、生産座席システムで重要な座席枠設定の一助を得ることを目的とした。

3.2 項で定式化した生産モデルを基に、3.3 項で3つの管理パラメータ(能力余力, 基準在庫, ロットサイズ)が4つの評価指標(品切れ, 平均在庫, 段取替え作業負荷, 空席)に対してどのような影響を及ぼすかを定量的に評価し、3.4.1 項の様に4つの評価指標を総合的に評価する指標として管理費用を定義したうえで、これに対しても定量的評価を行った。さらに3.4.2 項で、その管理費用を最小化する管理パラメータ値が存在することを明らかにした。加えて、これらシミュレーション実験で得られたデータから管理費用が目標値以下となるデータを抽出し、管理パラメータの関係を近似式および等高線図で定量的かつ視覚的に示した。最後に、これら一連を過不足のない座席枠設定のための管理パラメータの探索方法として、3.4.3 項の通り提案した。

以上より、実際の製造工程における計画立案者にとって、適切な座席枠設定を定量的かつ視覚的に行うことが可能となる。実需要に関するアーラン分布のフェイズや需要分布自体を変更した場合の検証は今後の課題として残るが、本章によって固定ロットサイズ見込生産環境の生産座席システムにおける座席枠設定の一助を得ることができたものとする。

しかしながら一方で、本章で提案した方法は4つの評価指標に対する各コスト係数の設定次第で結果が大きく変わる可能性もあり、また、その設定が計画立案者の経験則に従うものである。このため、多くの管理パラメータや評価指標による複雑な多目的・多変数の問題に対して、恣意性を排除したより定量的な科学的アプローチを行う必要がある[108]。この課題については次章で議論する。

## 第4章 階層分析法(AHP)を用いた座席枠設定

### 4.1 本章の目的

前章では、第2章の生産モデルを拡張した補充点生産方式適用の固定ロットサイズ見込生産環境における生産座席システムを対象に、解析アプリケーションの機能を用いた管理パラメータの探索方法を提案した。座席枠設定では管理パラメータの設定が重要となるが、管理パラメータを能力余力と基準在庫およびロットサイズを決定するパラメータの3種類とし、品切れ、平均在庫、段取替え作業負荷および空席の4種を評価指標に設定した。まず、それら管理パラメータが各評価指標に対してどのような影響を及ぼすかを定量的に示し、次に4つの評価指標に各々ペナルティとなるコスト係数を設定して、その総和を管理費用とする総合的評価を行ったうえで、管理費用を目標レベル以下に抑える管理パラメータを探索するという方法である。

しかしながらこの方法は、4種の評価指標に対する各コスト係数の設定次第で結果が大きく変わる可能性もあり、また、その設定が計画立案者の経験則に従うものであったため、恣意性を排除したより定量的な科学的アプローチを行う必要があるということを課題に残している[108]。本論文においては、見込生産環境を対象とした生産座席システムにおいて、4種の望小評価指標をそれぞれ低く抑えるための3つの管理パラメータ値を、適切に設定することが意思決定問題となるが、実際の製造工程においては、管理パラメータや評価指標の基準が工程の事情により異なるため、さらに複雑(マルチ)な基準を考慮した意思決定問題になる。

そこで本章では、マルチ基準決定状況において意思決定を助ける体系化された方法論である階層分析法(以下、AHP(Analytic Hierarchy Process)と略す)[103]という曖昧さを排除できる科学的アプローチを用いることで、計画立案者の意思決定をより定量的に支援することを目的とする。まず、一対比較によって4種の評価指標の重み付けを行い、各評価指標における3つの管理パラメータの重要度を算出する。それら重要度の総合化を行って整合性を確認することで、経験則に代わるより定量的な重み付けが図れることを示す。次に、この重み付けに対応した評価指標の総合評価方法を説明し、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータを探索する方法を示す。これらを示すことで、科学的なOR(Operation Research)手法であるAHPを適用した座席枠設計方法の提案のための基礎となる考え方を明らかにする[111]。

### 4.2 階層分析法(AHP)の適用

本節では、前章で残された課題である複数の評価指標に対する重み付けの曖昧さに関して、AHPを用いることでより定量的な評価指標の重み付けを行う。

AHPは曖昧な状況下での意思決定に際して、計量化の難しい勘や直観、フィーリングによる部分が多いことを認識した上で、それでも最大公約数的な判断をその中から見出す手法[112]であり、決定を行う個人やグループメンバー個々の感覚的判断をも取り込んだ、より納得の得やすい手法[113]として広く注目されている。また、AHPは意思決定における問題の分析において、人間の主観的判断とシステムアプローチの両面からこれを決定する問題解決型の意思決定手法とされ、マ

ルチ基準決定状況で意思決定を助ける体系化された方法論である[103]。前章のペナルティコスト係数を用いた総合的評価手法に代わり、AHPを用いたOR的アプローチ[114]によって曖昧さを排除した定量的評価が可能となり、重み付けの裏付けが強くなるものとする。定量的評価基準と定性的評価基準を同時に扱うことができるエバミックス法や、代替案の一対比較を優位性と劣位性の両面から検証するコンコーダンス分析など、AHP以外でも代替案ごとに評価することで意思決定を定量的に支援する手法はある[115]が、AHPでは、代替案の一対比較において、比較に用いるデータが意思決定者の補助情報としてあればよいという点が他の手法と異なる[116]ため、今回はAHPを採用する。

AHPにはT. L. Saaty[103]の提案による普遍的視点による従来型と呼ばれるAHPや、木下ら[113]が提案する支配的視点による支配型AHPなどの幾つかの手法がある。例えば後者は、代替案(本論文における評価指標)において、特定の代替案がこの程度の重みを持つべきという支配力を持つ支配代替案と、そうではない服従代替案に分けられる場合に用いられる手法である。何らかの恣意性が存在する場合に有効な手法であるが、本章における評価基準の重みは、優先度を予見することなく生販公平に検討することを前提とした、AHPからトップダウン的に一意に決定できるものと考え、前者の従来型AHPを適用することとする。

4.2.1項でAHPの階層化を行い、4.2.2項で各評価指標に対する重み付けとして評価指標重要度を決定する。4.2.3項では各評価指標における管理パラメータ重要度を算出し総合化する。4.2.4項で整合性を確認することで、経験則に代わるより定量的な重み付けと問題の簡略化が図れることを示す。なお、以下で用いる各種記号については、前章同様に巻末の付録1を参照されたい。

#### 4.2.1 階層化

一般に、意思決定にはまず問題が存在し、その選択対象となるいくつかの代替案がある。それら代替案の中からどれを選択するかを判断するために幾つかの評価基準があり、ある評価基準の下ではある代替案が良く、別の評価基準下では別の代替案が良いといった意思決定の問題が起こる。AHPを用いて問題解決を図る場合、まず問題の要素を「最終目標」、「評価基準」、「代替案」の関係に整理して階層構造を作り上げる。次に最終目標から見た評価基準の重要度を求め、各評価基準から見た代替案の重要度を評価し、最後に最終目標から見た代替案評価に換算する[114]。

本項では、このAHPにおける最終目標を「管理パラメータの選択」として、代替案を能力余力パラメータ $\varepsilon$  ( $\varepsilon \geq 0$ )、基準在庫パラメータ $\varphi$  ( $\varphi > 0$ )、ロットサイズパラメータ $\lambda$  ( $0 < \lambda \leq 1$ )の3項目、評価基準に品切れ率 $\alpha$ 、平均在庫率 $\beta$ 、段取替え作業負荷率 $\gamma$ 、空席率 $\delta$ の4項目を設定する。AHPの第一段階としてこの階層構造を階層図(図4-1)に示し、問題要素を整理する。

#### 4.2.2 評価指標の一対比較

本項では、表4-1の一対比較値を用いて評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ の一対比較を行う。一対比較は定量的指標を基に行われることが望ましいが、例えば品切れと平均在庫を比較する場合、品切れによる損害は費用損失だけでなく信用問題にも直結し得るため、在庫保管費との単純比較が難しい。

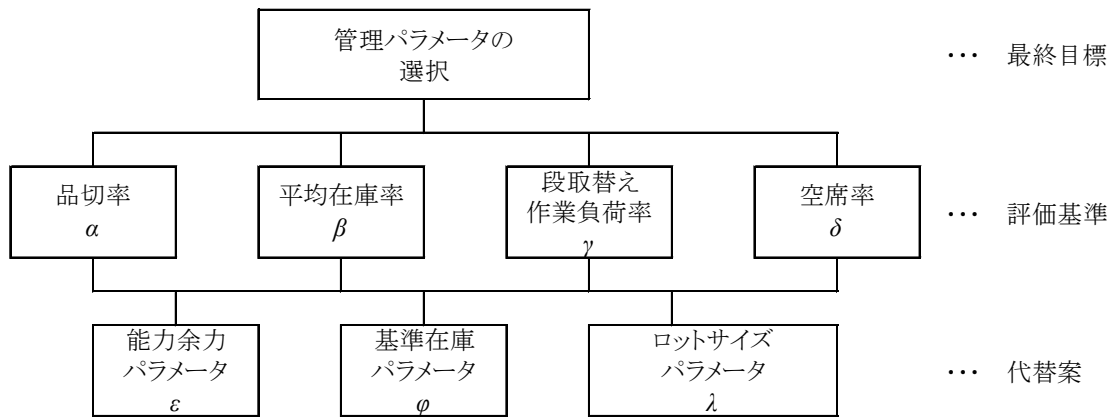


図 4-1 本研究における階層図

表 4-1 一対比較値

| 一対比較値      | 意味                      |
|------------|-------------------------|
| 1          | 両方の項目が同じくらい重要           |
| 3          | 前(左)の項目が後(上)の項目より若干重要   |
| 5          | 前(左)の項目が後(上)の項目より重要     |
| 7          | 前(左)の項目が後(上)の項目よりかなり重要  |
| 9          | 前(左)の項目が後(上)の項目より絶対的に重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 上記に対して補間的に用いる           |
| 上記数値の逆数    | 後項目から前項目を見た場合に用いる       |

本章では、表 4-1 を用いて実工場の製造・営業・生産管理部門各責任者と協議し、評価指標の一対比較行列を表 4-2 の通り設定した。具体的には、まず総当たりで表 4-1 の一対比較を行い、得られた一対比較行列を部署内に展開、三者にて妥当と判断されるまでブラッシュアップを繰り返して設定した。これにより、AHP の特徴である意思決定を行うグループメンバー個々の感覚的判断の取り込みが実現できる[114]。なお、表 4-2 における重要度は、簡易的な調和平均方式ではなく幾何平均方式[117]により算出する。調和平均は、項目数を各要素の逆数の和で除するという関数電卓不要の計算方法であるが、調和平均の和が理論的には項目数と合致するのに対して、実際にはずれてしまうことがあるものとされる。一方、幾何平均法ではそのずれが極めて小さく計算できるため、本論文では幾何平均方式を用いることとし、その方法を以下に示す。

表 4-2 評価指標の一対比較行列および重要度

|      | 品切れ | 平均在庫 | 段取替え | 空席 | 重要度   |
|------|-----|------|------|----|-------|
| 品切れ  | 1   | 5    | 3    | 5  | 0.540 |
| 平均在庫 | 1/5 | 1    | 1/3  | 3  | 0.122 |
| 段取替え | 1/3 | 3    | 1    | 5  | 0.274 |
| 空席   | 1/5 | 1/3  | 1/5  | 1  | 0.062 |

まず、品切れ、平均在庫、段取替え作業負荷、空席の重要度をそれぞれ $(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma, \omega_\delta)$ として、表 4-2 で示した一対比較行列 $A$ を式(4.1)で表す。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 5 \\ \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & 3 \\ \frac{1}{3} & 3 & 1 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_\alpha}{\omega_\alpha} & \frac{\omega_\alpha}{\omega_\beta} & \frac{\omega_\alpha}{\omega_\gamma} & \frac{\omega_\alpha}{\omega_\delta} \\ \frac{\omega_\beta}{\omega_\alpha} & \frac{\omega_\beta}{\omega_\beta} & \frac{\omega_\beta}{\omega_\gamma} & \frac{\omega_\beta}{\omega_\delta} \\ \frac{\omega_\gamma}{\omega_\alpha} & \frac{\omega_\gamma}{\omega_\beta} & \frac{\omega_\gamma}{\omega_\gamma} & \frac{\omega_\gamma}{\omega_\delta} \\ \frac{\omega_\delta}{\omega_\alpha} & \frac{\omega_\delta}{\omega_\beta} & \frac{\omega_\delta}{\omega_\gamma} & \frac{\omega_\delta}{\omega_\delta} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

各評価指標に対する幾何平均 $\frac{\omega_l}{B}$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )は、各行の要素(今回は 4 つ)の積を計算し、その項目数の乗根(今回は 4 乗根)と定義され、式(4.2)で与えられる。

$$\frac{\omega_l}{B} = \sqrt[4]{\frac{\omega_l^4}{\omega_\alpha \omega_\beta \omega_\gamma \omega_\delta}} \quad (l = \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (4.2)$$

ここで、幾何平均の母数 $B$ は式(4.3)で示される関係が成り立つことと定義し、これを用いて式(4.4)により幾何平均を各々算出する。

$$B = \sqrt[4]{\omega_\alpha \omega_\beta \omega_\gamma \omega_\delta} \quad (\omega_\alpha + \omega_\beta + \omega_\gamma + \omega_\delta = 1) \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \frac{\omega_\alpha}{B} = \sqrt[4]{1 \times 5 \times 3 \times 5} = 2.943 \\ \frac{\omega_\beta}{B} = \sqrt[4]{\frac{1}{5} \times 1 \times \frac{1}{3} \times 3} = 0.669 \\ \frac{\omega_\gamma}{B} = \sqrt[4]{\frac{1}{3} \times 3 \times 1 \times 5} = 1.495 \\ \frac{\omega_\delta}{B} = \sqrt[4]{\frac{1}{5} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5} \times 1} = 0.340 \end{cases} \quad (4.4)$$

これより、得られた幾何平均の和が式(4.5)で与えられる。

$$\frac{1}{B} = \frac{\omega_\alpha}{B} + \frac{\omega_\beta}{B} + \frac{\omega_\gamma}{B} + \frac{\omega_\delta}{B} = 5.447 \quad (4.5)$$

これを用いて、式(4.6)の通り各重要度を算出する。

$$\begin{cases} \omega_\alpha = \frac{\omega_\alpha}{B} \times \frac{1}{5.447} = \frac{2.942}{5.447} = 0.540 \\ \omega_\beta = \frac{\omega_\beta}{B} \times \frac{1}{5.447} = \frac{0.669}{5.447} = 0.122 \\ \omega_\gamma = \frac{\omega_\gamma}{B} \times \frac{1}{5.447} = \frac{1.495}{5.447} = 0.274 \\ \omega_\delta = \frac{\omega_\delta}{B} \times \frac{1}{5.447} = \frac{0.340}{5.447} = 0.062 \end{cases} \quad (4.6)$$

なお、本方法の数学的理論として、式(4.6)が示す重要度は式(4.1)で示される一対比較行列 $A$ の固有ベクトルである。 $N = 4$ が固有値となるため、上記はこの固有ベクトルと固有値の関係から計算されている[112]。

式(4.6)の計算結果から、品切れが最も重要視される評価指標であり、次に段取替え作業負荷、平均在庫、空席という優先順になることが判る。更に、 $\omega_\gamma$ が3割弱の重要度であることから、必ずしも品切れのみを重視している訳ではなく、段取替え作業負荷も低く抑えたいという意図が読み取れる。ここで得られた結果が各評価指標の重要度 $\omega_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )と定義され、それぞれ

$(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma, \omega_\delta) = (0.540, 0.122, 0.274, 0.062)$ となる。

ここで示された重要度が、前章の計画立案者の経験則に従う重み付けに代わる、曖昧さを排除した科学的アプローチによる定量的指標となり、より裏付けの強い重み付けと位置付けられる。

#### 4.2.3 管理パラメータ重要度および総合化

本項では、品切れ率 $\alpha$ 、平均在庫率 $\beta$ 、段取替え作業負荷率 $\gamma$ 、空席率 $\delta$ の4つの評価指標それぞれにおいて、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の一対比較を行い、管理パラメータの重要度を算出する。各評価指標における管理パラメータの一対比較は、前章の実験結果である各管理パラメータとそれぞれの評価指標の関係を参照しながら、表 4-1 の一対比較表を基に比較する。

まず、品切れ率 $\alpha$ に関する前章の結果を図 4-2 と図 4-3 に示す。

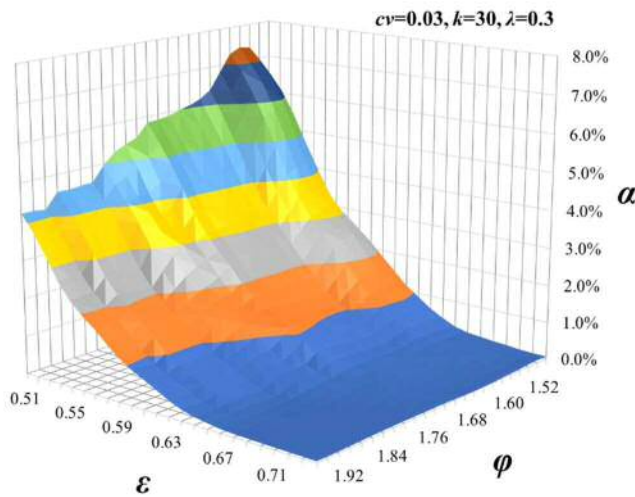


図 4-2 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と品切れ率 $\alpha$ の関係

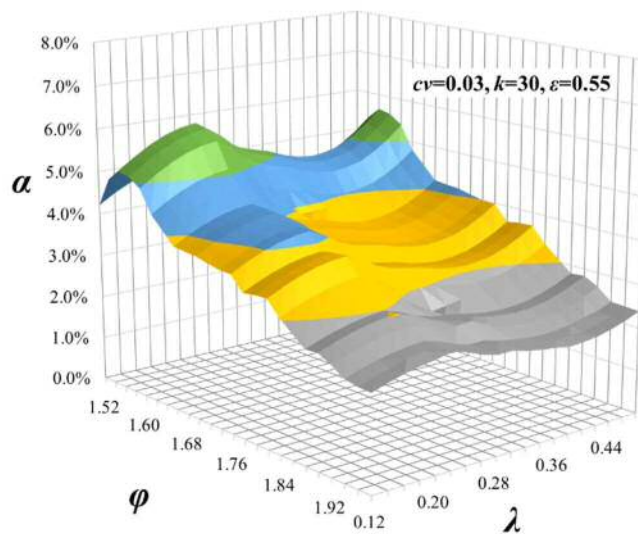


図 4-3 基準在庫パラメータ $\varphi$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と品切れ率 $\alpha$ の関係

図 4-2 から、基準在庫パラメータ $\varphi$ よりも能力余力パラメータ $\varepsilon$ の方が品切れ率 $\alpha$ 減少の傾きが大きいことが判る。例えば、最も顕著な例として、 $\varphi = 1.50$ と $\varepsilon = 0.50$ 付近に着目する。 $\varphi = 1.50$ 付近の $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.75$ の間では品切れ率 $\alpha$ が約 7.0%から 0.0%まで減少しているのに対し、 $\varepsilon = 0.50$ 付近の $1.50 \leq \varphi \leq 2.00$ では品切れ率 $\alpha$ の減少は約 7.0%から 4.0%程度までである。このような関係性から能力余力が基準在庫より重要であると判断して、表 4-1 に従って今回は一対比較値を「5」と設定する。

次に基準在庫とロットサイズについて、図 4-3 より、例えば $\varphi = 1.52$ 付近に着目すると、 $\lambda \cong 0.26$ で品切れ率 $\alpha$ が約 6.0%の極大値をとり、 $\lambda = 0.40$ 付近で品切れ率 $\alpha \cong 4.5\%$ の極小値をとっている。つまり、ロットサイズパラメータ $\lambda$ は品切れ率 $\alpha$ に対して極値を持つ関係であることが判り、ロットサイズの設定にはその傾向を注意する必要がある。一方、ロットサイズパラメータ $\lambda$ の極値の差が約 2%弱であるのに対し、基準在庫パラメータ $\varphi$ による減少は $\lambda = 0.40$ 付近を見ると 3%程度である。品切れ率 $\alpha$ の変動差のみに着目すれば基準在庫の方が影響度は若干高いと考えられるがその差は 1%程度、一方で、ロットサイズパラメータ $\lambda$ には極値を持つという注視すべき傾向がある。以上から、今回はロットサイズが基準在庫より若干重要と判断し、一対比較値を「3」と設定する。

これら一対比較の結果と幾何平均法による重要度算出結果を表 4-3 に示す。同表の最右列から、能力余力とロットサイズは品切れ率 $\alpha$ に大きな影響を及ぼしており、この 2 つが基準在庫よりも注意深い制御が必要であることが示された。

加えて、平均在庫率 $\beta$ 、段取替え作業負荷率 $\gamma$ 、空席率 $\delta$ についても前章の実験結果を参照して同様の一対評価を行い、それら結果を表 4-4 から表 4-6 に示す。平均在庫率 $\beta$ についてはロットサイズパラメータ $\lambda$ 、基準在庫パラメータ $\varphi$ 、能力余力パラメータ $\varepsilon$ の順で重要度が高く、段取替え作業負荷率 $\gamma$ においてはロットサイズパラメータ $\lambda$ が 6 割以上を占め、基準在庫パラメータ $\varphi$ の重要度は極めて低いことが判る。空席率 $\delta$ については能力余力パラメータ $\varepsilon$ が明らかに高い重要度となっており、ロットサイズパラメータ $\lambda$ の重要度は極めて低いことが判る。

表 4-3 品切れ率 $\alpha$ における管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の一対比較表

| 品切れ率<br>$\alpha$    | 能力余力 | 基準在庫 | ロットサイズ <sup>*</sup> | 重要度   |
|---------------------|------|------|---------------------|-------|
| 能力余力                | 1    | 5    | 1                   | 0.481 |
| 基準在庫                | 1/5  | 1    | 1/3                 | 0.114 |
| ロットサイズ <sup>*</sup> | 1    | 3    | 1                   | 0.405 |

表 4-4 平均在庫率 $\beta$ における管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の一対比較表

| 平均在庫率<br>$\beta$    | 能力余力 | 基準在庫 | ロットサイズ <sup>*</sup> | 重要度   |
|---------------------|------|------|---------------------|-------|
| 能力余力                | 1    | 1    | 1/3                 | 0.221 |
| 基準在庫                | 1    | 1    | 1                   | 0.319 |
| ロットサイズ <sup>*</sup> | 3    | 1    | 1                   | 0.460 |

表 4-5 段取替え作業負荷率 $\gamma$ における管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の一対比較表

| 段取替え作業<br>負荷率 $\gamma$ | 能力余力 | 基準在庫 | ロットサイズ <sup>*</sup> | 重要度   |
|------------------------|------|------|---------------------|-------|
| 能力余力                   | 1    | 5    | 1/3                 | 0.297 |
| 基準在庫                   | 1/5  | 1    | 1/5                 | 0.086 |
| ロットサイズ <sup>*</sup>    | 3    | 5    | 1                   | 0.618 |

表 4-6 空席率 $\delta$ における管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の一対比較表

| 空席率<br>$\delta$     | 能力余力 | 基準在庫 | ロットサイズ <sup>*</sup> | 重要度   |
|---------------------|------|------|---------------------|-------|
| 能力余力                | 1    | 5    | 5                   | 0.701 |
| 基準在庫                | 1/5  | 1    | 3                   | 0.202 |
| ロットサイズ <sup>*</sup> | 1/5  | 1/3  | 1                   | 0.097 |

これらに前節で得られた表 4-2 の評価指標重要度( $\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma, \omega_\delta$ ) = (0.540, 0.122, 0.274, 0.062)を各評価指標での管理パラメータ重要度に掛け合わせ、管理パラメータごとの合計値が総合得点となる。この総合得点一覧を表 4-7 に示す。その結果、ロットサイズパラメータ $\lambda$ 、能力余力パラメータ $\varepsilon$ 、基準在庫パラメータ $\varphi$ の順に重要度が高く、ロットサイズパラメータ $\lambda$ と能力余力パラメータ $\varepsilon$ の2つで86%以上の重要度を占めることも明らかになった。

前項では、品切れ、段取替え作業負荷、平均在庫、空席の順に重要度が高いことを示したが、本項では各評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )における管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の重要度を示し、表 4-2 の各評価指標の重要度を乗じることで管理パラメータ重要度を総合的に評価した。

#### 4.2.4 整合性の確認

これまでは評価指標や管理パラメータそれぞれに対して、一対比較の重ね合わせから総合得点までを判断してきたが、例えば、品切れと平均在庫の比較では品切れを重要とし、平均在庫と段取替え作業負荷の比較では平均在庫を重要としていながらも、品切れと段取替え作業負荷の比較では段取替え作業負荷が重要という矛盾した結果になっていないか、との整合性のずれが懸念され

表 4-7 総合得点表

|                     | 品切れ   | 平均<br>在庫 | 段取<br>替え | 空席    | 評価指標重要度の掛け合わせ  |                |                |                | 総合<br>得点 |
|---------------------|-------|----------|----------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|
|                     |       |          |          |       | $\times 0.540$ | $\times 0.122$ | $\times 0.274$ | $\times 0.062$ |          |
| 重要度                 | 0.540 | 0.122    | 0.274    | 0.062 | $\times 0.540$ | $\times 0.122$ | $\times 0.274$ | $\times 0.062$ |          |
| 能力余力                | 0.481 | 0.221    | 0.297    | 0.701 | 0.260          | 0.027          | 0.081          | 0.043          | 0.411    |
| 基準在庫                | 0.114 | 0.319    | 0.086    | 0.202 | 0.062          | 0.039          | 0.024          | 0.013          | 0.138    |
| ロットサイズ <sup>*</sup> | 0.405 | 0.460    | 0.618    | 0.097 | 0.219          | 0.056          | 0.169          | 0.006          | 0.450    |



る。また、矛盾まではないとしても、比較値の与え方に著しい偏りがあった場合も、得られた判断に整合性が欠けていることとなる。そこで本項では、前項で得られた総合得点が適切か否かを判断するために、整合性の確認を以下の流れで行う。

まず、表 4-8 に従って評価指標重要度( $\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma, \omega_\delta$ )の整合性を評価する。表 4-2 の一対比較値それぞれに評価指標ごとの重要度を乗じて Step 1 を算出する(表 4-8 の品切れ行における左から 6~9 列部に該当)。

$$\begin{aligned} \text{Step 1 : (品切れ対品切れの一対評価値)} \times (\text{品切れ重要度}) &= 1 \times 0.540 = 0.540 \\ (\text{品切れ対平均在庫の一対評価値}) \times (\text{平均在庫重要度}) &= 5 \times 0.122 = 0.610 \\ (\text{品切れ対段取替えの一対評価値}) \times (\text{段取替え重要度}) &= 3 \times 0.274 = 0.822 \\ (\text{品切れ対空席の一対評価値}) \times (\text{空席重要度}) &= 5 \times 0.062 = 0.310 \end{aligned}$$

Step 1 の小計を Step 2 とし、それを当該評価指標重要度で除して Step 3 とする(表 4-8 の品切れ行における右から 1~2 列部に該当)。

$$\begin{aligned} \text{Step 2 : (品切れ Step 1 の小計)} &= 0.540 + 0.610 + 0.822 + 0.310 = 2.282 \\ \text{Step 3 : (品切れ Step 2) / (品切れ重要度)} &= 2.282 / 0.540 = 4.225 \end{aligned}$$

上記では品切れに対する Step 1 から Step 3 までの手順を示したが、残る評価指標についても同様に計算を行い、各評価指標における Step 3 の値を算出すると、表 4-8 の通り、平均在庫では 4.155、段取替え作業負荷では 4.124、空席では 4.258 が得られる。そこで Step 4 として、評価指標ごとの Step 3(表 4-8 の最右列)の平均値(相加平均)が次の通り算出される。

$$\text{Step 4 : (相加平均)} = (4.225 + 4.155 + 4.124 + 4.258) / 4 = 4.1905$$

ここで、整合性の尺度となる整合度 CI(Consistency Index)が、一般に式(4.7)で定義されている[112]。

$$CI = \frac{(\text{相加平均} - \text{評価項目数})}{(\text{評価項目数} - 1)} \quad (4.7)$$

表 4-8 評価指標重要度の整合性確認

|      | 品切れ | 平均<br>在庫 | 段取<br>替え | 空席 | Step 1<br>(重要度×一対比較値) |       |       |       | Step 2 | Step 3 |
|------|-----|----------|----------|----|-----------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
|      |     |          |          |    | 重要度                   | 0.540 | 0.122 | 0.274 |        |        |
| 品切れ  | 1   | 5        | 3        | 5  | 0.540                 | 0.610 | 0.822 | 0.310 | 2.282  | 4.225  |
| 平均在庫 | 1/5 | 1        | 1/3      | 3  | 0.108                 | 0.122 | 0.091 | 0.186 | 0.507  | 4.155  |
| 段取替え | 1/3 | 3        | 1        | 5  | 0.180                 | 0.366 | 0.274 | 0.310 | 1.130  | 4.124  |
| 空席   | 1/5 | 1/3      | 1/5      | 1  | 0.108                 | 0.040 | 0.054 | 0.062 | 0.264  | 4.258  |

この整合度CI算出を Step 5 とし、今回は評価項目数が 4 であるため、CIは以下の通り算出される。

$$\text{Step 5 : } CI = (4.1905 - 4) / (4-1) = 0.1905 / 3 = 0.0635$$

これら整合度の評価方法に関して、式(4.1)の評価指標における一対比較行列AにはN = 4個の固有値があり、その和がNになることが既知であるため、式(4.7)の右辺分子は相加平均以外の固有値の大きさを示す指標と見ることができる。この指標は(N - 1)個の固有値から成るため、1 個当たりの平均を求めることから、式(4.7)の右辺分母は(N - 1)となる。行列A が完全な整合性を持つ場合はCI = 0となり、CIが大きくなるほど不整合性が高いと見なされる[117]。

一般的に、整合度CIが 0.100 より小さい場合は「許容できる整合性のずれ」と認識される[112]ため、ここで得られた整合度CI = 0.0635はその範囲内であり、表 4-2 の評価指標の重要度  $(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma, \omega_\delta) = (0.540, 0.122, 0.274, 0.062)$ は整合性のとれたものであると判断できる。この整合度CIは、対象工場の各部門責任者の協議による評価指標の一対比較が妥当であったことを説得する根拠になる。

次に、表 4-9 に基づいて品切れ率αの重要度の整合性を確認する。表 4-3 の一対比較値それぞれに、Step 1 として品切れ率αにおける管理パラメータの重要度を各々乗じる。Step 2 から Step 4 の相加平均算出までは前記と同様であり、ここで得られた相加平均値は 3.0287 である。今回の品切れ率α重要度においては評価項目数が管理パラメータ数の 3 であることから、Step 5 の整合度CIを式(4.7)に従って計算すると

$$\text{Step 5 : } CI = (3.0287 - 3) / (3-1) = 0.0287 / 2 = 0.0144$$

という値が得られ、これもまた「許容範囲できる整合性のずれ」であるとの判断に至る結果である。

平均在庫率β、段取替え作業負荷率γ、空席率δの重要度それぞれに対しても整合性の確認を行う。表 4-10 から表 4-12 に基づいて品切れ率α重要度に対する整合性の確認と同様に Step 1 から Step 4 の相加平均算出まで計算すると、それぞれ 3.1343, 3.1313, 3.1330 という相加平均値が得られ、また、0.0672, 0.0657, 0.0665 という整合度CIを得ることができた。これらの値は、いずれの場合も整合性が許容範囲内であることを示している。

表 4-9 品切れ率αにおける管理パラメータ重要度の整合性確認

| 品切れ率<br>α<br>重要度 | 能力<br>余力 | 基準<br>在庫 | ロット<br>サイズ | Step 1<br>(重要度×一対比較値) |       |       | Step 2 | Step 3 |
|------------------|----------|----------|------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|
|                  | 0.480    | 0.114    | 0.405      |                       |       |       |        |        |
| 能力余力             | 1        | 5        | 1          | 0.480                 | 0.570 | 0.405 | 1.455  | 3.031  |
| 基準在庫             | 1/5      | 1        | 1/3        | 0.096                 | 0.114 | 0.135 | 0.345  | 3.026  |
| ロットサイズ           | 1        | 3        | 1          | 0.480                 | 0.342 | 0.405 | 1.227  | 3.029  |

表 4-10 平均在庫率 $\beta$ における管理パラメータ重要度の整合性確認

| 平均在庫率<br>$\beta$    | 能力<br>余力 | 基準<br>在庫 | ロット<br>サイズ <sup>a</sup> | Step 1<br>(重要度×一対比較値) |       |       | Step 2 | Step 3 |
|---------------------|----------|----------|-------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|
| 重要度                 | 0.221    | 0.319    | 0.460                   |                       |       |       |        |        |
| 能力余力                | 1        | 1        | 1/3                     | 0.221                 | 0.319 | 0.153 | 0.693  | 3.135  |
| 基準在庫                | 1        | 1        | 1                       | 0.221                 | 0.319 | 0.460 | 1.000  | 3.134  |
| ロットサイズ <sup>a</sup> | 3        | 1        | 1                       | 0.663                 | 0.319 | 0.460 | 1.442  | 3.134  |

表 4-11 段取替え作業負荷率 $\gamma$ における管理パラメータ重要度の整合性確認

| 段取替え作業<br>負荷率 $\gamma$ | 能力<br>余力 | 基準<br>在庫 | ロット<br>サイズ <sup>a</sup> | Step 1<br>(重要度×一対比較値) |       |       | Step 2 | Step 3 |
|------------------------|----------|----------|-------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|
| 重要度                    | 0.297    | 0.086    | 0.618                   |                       |       |       |        |        |
| 能力余力                   | 1        | 5        | 1/3                     | 0.297                 | 0.430 | 0.206 | 0.933  | 3.141  |
| 基準在庫                   | 1/5      | 1        | 1/5                     | 0.059                 | 0.086 | 0.123 | 0.268  | 3.116  |
| ロットサイズ <sup>a</sup>    | 3        | 5        | 1                       | 0.891                 | 0.430 | 0.618 | 1.939  | 3.137  |

表 4-12 空席率 $\delta$ における管理パラメータ重要度の整合性確認

| 空席率<br>$\delta$     | 能力<br>余力 | 基準<br>在庫 | ロット<br>サイズ <sup>a</sup> | Step 1<br>(重要度×一対比較値) |       |       | Step 2 | Step 3 |
|---------------------|----------|----------|-------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|
| 重要度                 | 0.701    | 0.202    | 0.097                   |                       |       |       |        |        |
| 能力余力                | 1        | 5        | 5                       | 0.701                 | 1.010 | 0.485 | 2.196  | 3.132  |
| 基準在庫                | 1/5      | 1        | 3                       | 0.140                 | 0.202 | 0.291 | 0.633  | 3.133  |
| ロットサイズ <sup>a</sup> | 1/5      | 1/3      | 1                       | 0.140                 | 0.067 | 0.097 | 0.304  | 3.134  |

以上のことから、前項で得られた表 4-7 の総合得点は妥当であると言える。従って、この生産モデルにおいては、3 つの管理パラメータの中でロットサイズパラメータ $\lambda$ と能力余力パラメータ $\varepsilon$ の 2 つが重要な管理パラメータである、という前項の結果の裏付けが明らかとなった。

#### 4.2.5 階層分析法(AHP)適用結果の考察

前項の整合性確認により、対象工場の各部門責任者の協議による評価指標の一対比較(表 4-2)と総合得点(表 4-7)について妥当性が明らかとなった。これにより、第 3 章の生産モデルにおいては、品切れ率 $\alpha$ と段取替え作業負荷率 $\gamma$ が重要な評価指標であることが判り、さらに、能力余力パラメータ $\varepsilon$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ が重要な管理パラメータと示された。なお、第 2 章のモデルは管理パラメータと評価指標が少ないため、AHP の適用外としている。

第3章モデルを総合的に最適化する管理パラメータの探索は、3説明変数(管理パラメータ)による4つの目的関数(評価指標)の組合せ最適化問題となる。それは明らかに難易度が高いため、前章では複数の評価指標に重み付けを行った総合評価指標を用い、その指標を最小化する管理パラメータの探索方法を示した。それでも最適解の探索までには至らず、応答曲面法を用いた近似によって管理パラメータ探索を行い、最終的には計画立案者にその選択を委ねるものであった。

本節で述べた AHP の適用により、評価指標の定量的な重み付けと重要な管理パラメータの絞り込みを行うことができた。この結果は、次節で説明する過不足のない管理パラメータ値の探索に関して一助となる。さらに、各評価指標に対する管理パラメータの一対比較が行えれば良いため、前章の様に膨大な数の実験結果を用意する必要が無い点も本方法の利点として挙げられる。

#### 4.3 AHP 重要度を用いた過不足のない管理パラメータ探索方法

前節では AHP を適用することによって、経験則に代わるより定量的な評価指標の重み付けと、重要な管理パラメータおよび評価指標の絞り込みが図れることを示したが、本節では AHP 重要度を用いることで過不足のない管理パラメータ値が探索できることを説明する。

前章の総合評価方法では各評価指標を計画立案者の経験則に従った係数によってコスト換算する指標を用いたが、そのコスト係数の代わりに前節の AHP による評価指標重要度を用いようとしても、評価指標の基準が異なるため単純に代替することができない。例えば、品切れ量 $U_{f,i,j}$ は個数で評価されるが空席数 $VS_j$ は席数で評価されたり、品切れ率 $\alpha$ や平均在庫率 $\beta$ においてもその発生範囲が $0\% < \alpha < 10\%$ や $100\% \leq \beta$ と異なっていたり、などである。

従って、4.3.1 項において、AHP の評価指標重要度を活用することで、基準が異なる評価指標を総合的に評価できる指標について説明し、4.3.2 項でその評価指標を用いた過不足のない管理パラメータ値の探索方法について述べる。

##### 4.3.1 評価指標重要度を用いた総合評価指標

前章では、式(4.8)によって重み付けを行い、式(4.9)に基づく管理費用 $CC$ を用いて4つの評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ を総合的に評価した。

$$(C_\alpha, C_\beta, C_\gamma, C_\delta) = (50, 1, 10, 5000\lambda) \quad (4.8)$$

$$CC = C_\alpha \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{f,i,j} + C_\beta \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J I_{f,i,j} + C_\gamma \cdot SU + C_\delta \cdot \sum_{j=1}^J VS_j \quad (4.9)$$

ここで、 $C_\alpha$ は品切れに対するペナルティコスト係数、 $C_\beta$ は在庫に対するコスト係数、 $C_\gamma$ および $C_\delta$ は段取替え作業負荷および空席に対する係数である。空席に対するコスト係数に限っては、ロットサイズの大きさによって空席1つあたりの損失規模が異なるため、ロットサイズを決定する管理パラメータ $\lambda$  ( $0 < \lambda \leq 1$ )を乗じてその差を考慮している。一方、 $(U_{f,i,j}, I_{f,i,j}, SU, VS_j)$ はそれぞれ $j$ 日の製品 $(f, i)$ の品切れ量および実在庫量、段取替え作業負荷および $j$ 日の空席数を表している変数である。式(4.9)の計算における $(U_{f,i,j}, I_{f,i,j}, SU, VS_j)$ にはシミュレーション実験で得られた結果を代入

しているが、式(4.8)の $(C_\alpha, C_\beta, C_\gamma, C_\delta)$ は対象工場の生販部門による協議で設定されている係数のため、計画立案者の経験則に基づく手法であった。

そこで本章では、式(4.8)および式(4.9)による管理費用 $CC$ に代わり、式(4.10)の管理費用指数 $ID_{CC}$ を用いて評価する。

$$ID_{CC} = \omega_\alpha \cdot OF_\alpha + \omega_\beta \cdot OF_\beta + \omega_\gamma \cdot OF_\gamma + \omega_\delta \cdot OF_\delta \quad (4.10)$$

ここでは、式(4.11)で示される各評価指標における発生度合を表す評価指数 $OF_l$  ( $0 < OF_l \leq 1, l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )を定義し、前節で得られた各評価指標に対する重要度 $\omega_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )のそれぞれに、各 $OF_l$ を乗じて $ID_{CC}$ を算出する。

$$OF_l = (l - l_{MIN}) / (l_{MAX} - l_{MIN}) \quad (l = \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (4.11)$$

ここで、 $l_{MAX}$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )および $l_{MIN}$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )は前章のシミュレーション実験から得られた各評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ の最大値および最小値を示す。例えば品切れにおいて、実験結果における品切れ率 $\alpha$ の最大値が $\alpha_{MAX}$ 、最小値が $\alpha_{MIN}$ となり、仮に $OF_\alpha = 0.5$ の場合、そのときの品切れ率 $\alpha$ は $\alpha_{MAX}$ と $\alpha_{MIN}$ のちょうど中間に位置することを意味する。なお、式(4.11)の算出方法については、次項で具体的数値を用いた実例により詳細を説明する。

前章で用いた式(4.9)では、品切れ量 $U_{f,i,j}$ や空席数 $VS_j$ といった単位の異なる各指標に対し、式(4.8)で設定したコスト係数 $(C_\alpha, C_\beta, C_\gamma, C_\delta)$ を用いることで総合評価指標を算出しているが、AHPによる重要度 $\omega_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )を用いる場合、該当する重要度 $\omega_l$ を品切れ量 $U_{f,i,j}$ や空席数 $VS_j$ などにそのまま乗じても単位が異なる(例： $U_{f,i,j}$ は個数、 $VS_j$ は席数など)ため一元的には評価できず、品切れ率 $\alpha$ や平均在庫率 $\beta$ に乘じようとしても各々の発生範囲が異なる(例： $\alpha$ は0~10%程度、 $\beta$ は100%以上など)ため一元評価できない。そこで本章では、各評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ の最大値 $l_{MAX}$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )と最小値 $l_{MIN}$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )を調べ、得られた当該率の値がその発生範囲内のどこに位置するかを数値化するために $OF_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )を定義し、それを用いた式(4.9)の管理費用指数 $ID_{CC}$ を評価の対象としている。これにより、計画立案者の経験則に基づく評価指標から、より定量的な指標での評価に発展することができる。なお、空席に関して、前章はロットサイズの大きさによる損失規模の差を考慮し、ロットサイズパラメータ $\lambda$ を設定値に乘じることで空席ペナルティコスト係数 $C_\delta$ を設定しているが、ロットサイズパラメータ $\lambda$ を大きくすることで空席が減るという実験結果が得られていることから、損害規模の差と空席発生頻度の減少とでその影響が相殺されるため、本評価方法ではその差を無視することができ、式(4.10)の最終項を単純に $\omega_\delta \cdot OF_\delta$ としている。

#### 4.3.2 過不足のない管理パラメータ値の探索

本項では、前項の式(4.10)で定義した管理費用指数 $ID_{CC}$ を用いて、過不足のない管理パラメータ値の探索を行う。 $ID_{CC}$ は、前節で得られた各評価指標の重要度 $\omega_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )と、前項で定義した発生度合指数 $OF_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )によって算出されるものであり、 $OF_l$ は前章でのシミュレーション結果から導かれるものである。つまり、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の値を任意設定したときに、シミュレーションによって各評価指標 $(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ が得られ、ある程度のデータ数が得られた後、

$(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ の値ごとに $OF_l$ と $ID_{CC}$ が計算されることになる。

ここで、ロットサイズパラメータを $\lambda = 0.30$ と固定し、残る管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ を変化させたシミュレーション結果から得られた管理費用指数 $ID_{CC}$ をプロットした三次元図を図4-4に示す。この図は、ロットサイズパラメータが $\lambda = 0.30$ という条件下において、能力余力と基準在庫のパラメータ $(\varepsilon, \varphi)$ が管理費用指数 $ID_{CC}$ に及ぼす影響を示している。縦軸が管理費用指数 $ID_{CC}$ であり、他2軸が能力余力パラメータ $\varepsilon$ と基準在庫パラメータ $\varphi$ を表す。この図より、能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と管理費用指数 $ID_{CC}$ の関係が単調なものではなく最大値および最小値を持つ関係であることが判る。例えば、 $0.50 \leq \varepsilon \leq 0.53$ および $1.52 \leq \varphi \leq 1.56$ 付近で $ID_{CC}$ は最大値をとっており、 $0.53 \leq \varepsilon \leq 0.59$ および $1.88 \leq \varphi \leq 1.96$ 付近でグラフ底面に近い最小値をとっている。この図は最も底面に近いときの $(\varepsilon, \varphi)$ が管理費用指数 $ID_{CC}$ を最小化する効果的な条件であることを意味するため、 $\lambda = 0.30$ の場合では $(\varepsilon, \varphi) = (0.55, 1.88)$ のときに最小値 $ID_{CC} = 0.3404$ をとっていたことから、この条件下においては $(\hat{\varepsilon}, \hat{\varphi}) = (0.55, 1.88)$ が管理費用指数 $ID_{CC}$ を最小化するパラメータ値と言え、この値を用いることが過不足のない座席枠設定となる。なお、 $\hat{y}$  ( $y = \varepsilon, \varphi, \lambda$ )は管理費用指数 $ID_{CC}$ を最小化する管理パラメータの推定(探索)値である。

なお、図4-4の一例において前項の式(4.11)の発生度合指数 $OF_l$  ( $l = \alpha, \delta$ )の算出例を説明する。この図の基となる実験結果においては、品切れ率 $\alpha$ および空席率 $\delta$ の最小値と最大値が $\alpha_{MIN} = 0.01\%$ 、 $\alpha_{MAX} = 7.58\%$ および $\delta_{MIN} = 9.44\%$ 、 $\delta_{MAX} = 32.09\%$ であった。 $(\varepsilon, \varphi) = (0.55, 1.88)$ のときの品切れ率と空席率は $\alpha = 2.54\%$ および $\delta = 18.14\%$ であったため、管理費用指数 $ID_{CC}$ を構成する品切れおよび空席に関する発生度合指数( $OF_\alpha, OF_\delta$ )は、次の式(4.12)および式(4.13)から算出される。

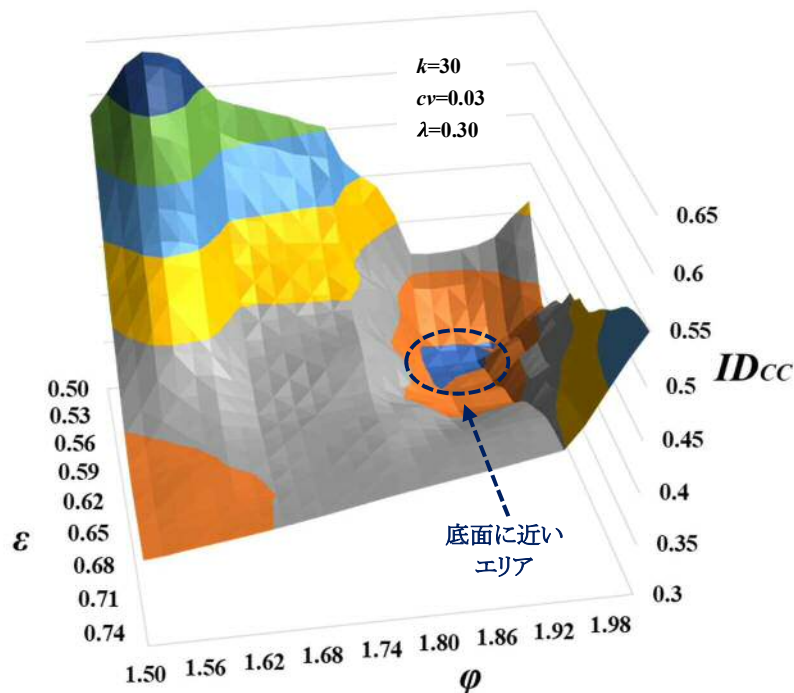


図4-4 能力余力パラメータ $\varepsilon$ および基準在庫パラメータ $\varphi$ と管理費用指数 $ID_{CC}$ の関係

$$OF_{\alpha=2.54} = \frac{(\alpha - \alpha_{MIN})}{(\alpha_{MAX} - \alpha_{MIN})} = \frac{(2.54 - 0.01)}{(7.58 - 0.01)} = 0.3337 \quad (4.12)$$

$$OF_{\delta=18.14} = \frac{(\delta - \delta_{MIN})}{(\delta_{MAX} - \delta_{MIN})} = \frac{(18.14 - 9.44)}{(32.09 - 9.44)} = 0.3841 \quad (4.13)$$

ここで、式(4.12)の $OF_{\alpha=2.54} = 0.3337$ とは、 $\alpha_{MIN}$ を0、 $\alpha_{MAX}$ を1とする数直線を引いたとき、 $\alpha = 2.54\%$ がその数直線上で0.3337に位置することを意味する。中央より0に近い位置であることから、 $(\varepsilon, \varphi) = (0.55, 1.88)$ のときの品切れ率 $\alpha = 2.54\%$ は、品切れの発生度合としては低めの結果であることを示している。一方、式(4.13)の $OF_{\delta=18.14} = 0.3841$ もまた0に近い値であり、空席の発生度合としても低い程度であることを示している。この様に求めた各評価指標における発生度合指数の $OF_{\alpha}$ や $OF_{\delta}$ などを、式(4.10)に代入して管理費用指数 $ID_{CC}$ を算出している。

基準在庫パラメータが $\varphi = 1.60$ という条件下での、能力余力とロットサイズのパラメータ $(\varepsilon, \lambda)$ が管理費用指数 $ID_{CC}$ に及ぼす影響を図4-5に表す。縦軸は図4-4と同じ管理費用指数 $ID_{CC}$ を表すが、他2軸が能力余力パラメータ $\varepsilon$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ を表している。この場合における管理費用指数の最小値は $(\varepsilon, \lambda) = (0.58, 0.32)$ のときに $ID_{CC} = 0.2543$ という結果が得られている。

$ID_{CC}$ の最小値は、図4-4の $\lambda = 0.30$ では $(\varepsilon, \varphi) = (0.55, 1.88)$ のときに、図4-5の $\varphi = 1.60$ では $(\varepsilon, \lambda) = (0.58, 0.32)$ のときにそれぞれ得られていることから、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ のいずれを固定値とするかで、過不足のない他のパラメータ値が異なることが判る。実際の製造工程においては、能力余力パラメータ $\varepsilon$ は作業人員や稼働時間の延長などにより比較的調整しやすいが、基準在庫パラメータ $\varphi$ やロットサイズパラメータ $\lambda$ は保管スペースや加工治具・台車などの物理的制約により容易に変更することが難しい場合もある。本項の図からは $(\varepsilon, \varphi, \lambda) = (0.55, 1.88, 0.30)$ 、または

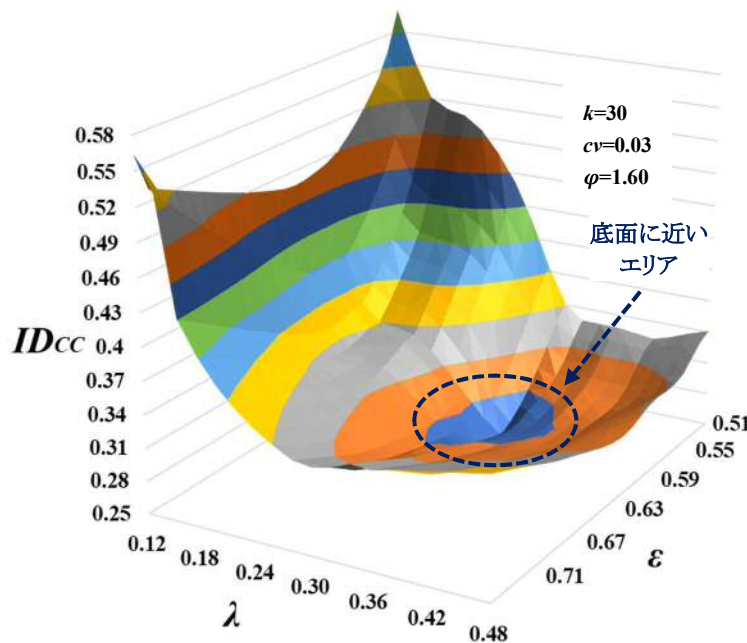


図4-5 能力余力パラメータ $\varepsilon$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ と管理費用指数 $ID_{CC}$ の関係

$(\hat{\varepsilon}, \hat{\varphi}, \hat{\lambda}) = (0.58, 1.60, 0.32)$ が過不足のない管理パラメータ値と提案したが、それぞれの製造環境における制約を考慮した上で、どの管理パラメータを固定するか判断すればよい。

以上より、管理パラメータ $(\varepsilon, \varphi, \lambda)$ のうち1つを一定とする制約は生じながらも、管理費用指数 $ID_{CC}$ を最小化する残り2つの管理パラメータ値の探索が可能となる方法を示すことができた。また、これら一連のプロセスを製造・営業・生産管理部門の各責任者のみならず、現場のリーダーらへの説明も行ったところ、特に評価指標に対する重み付けに関して、前章における重み付けよりも従業員の直観に合致する、重み付けの裏付けが論理的で腑に落ちるといった納得感が得られた。これについては定性的評価となってしまうが、実際の作業環境、特に中小企業に対して科学的アプローチを適用しようとする際には、従業員側の納得感が一つの重要な要因となることを改めて強調させて頂きたい。従って、本章で示した方法は限られた条件下ではあるが、座席枠設定に関する管理パラメータ設定において、計画立案者の意思決定に対して一助になるものとする。

#### 4.4 本章のまとめ

本章では、意思決定における曖昧さを排除できる科学的なOR手法であるAHPを用いることで、計画立案者の意思決定をより定量的に支援することを目的とし、一対比較による評価指標の重み付けと、各評価指標における管理パラメータ重要度の算出および総合化を行い、それらの整合性を確認することで経験則に代わる、より定量的な重み付けと重要な管理パラメータと評価指標の絞り込みが可能となることを示した。また、AHPによる評価指標の重み付けに対応する総合評価方法についても明らかにしている。

以上より、重要な評価指標を4つから2つに、重要な管理パラメータも3つから2つに絞ることができ、さらにAHPを適用した場合の総合評価指標によって、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータ値を探索できることを示した。本章では、評価指標に関して品切れ率 $\alpha$ と段取替え作業負荷率 $\gamma$ が、管理パラメータに関しては能力余力パラメータ $\varepsilon$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ が重要と位置付けられ、それぞれ合わせた重要度は80%以上になる。残る評価指標(平均在庫率 $\beta$ および空席率 $\delta$ )や管理パラメータ(基準在庫パラメータ $\varphi$ )を含めての最適解が求められれば最良ではあるが、重要度を鑑みるとそれら項目を省略した問題と置き換えても差し支えない程度と判断できる。その中で1つの管理パラメータを一定とすれば、総合評価指標である管理費用指数 $ID_{CC}$ を最小化する残り2つの管理パラメータ値が探索できることは、限られた条件下ではあるが、座席枠設定に関する管理パラメータ設定において、計画立案者の意思決定に対して一助になるものとする。

次章では、本章で示したAHPによる座席枠設定方法について、対象工場での適用事例を報告する。まず、第3章で示した生産モデルの各項目と実際の製造環境との関係について述べ、従来(適用前)の管理パラメータがどのように設定されていたのかについて説明する。次に、本章で示した座席枠設定方法による過不足のない管理パラメータ値の探索について述べ、その値を適用した結果について解説する。この事例報告によって、本章が示した総合評価指標を最小化する管理パラメータの探索方法、つまり過不足のない座席枠設定方法の実効性を明らかにする。さらに、その適用結果を踏まえて、一般の見込生産環境にも汎用的に適用できる座席枠設定方法を提案する。



## 第 5 章 座席枠設定方法の提案

### 5.1 本章の目的

前章では、意思決定における曖昧さを排除できる階層分析法(以下、AHP と略す)を用いることで、裏付けの強い定量的な評価指標の重み付けを示した。また、第 3 章の実験結果を用いて各評価指標における管理パラメータの重要度を算出し、それらを掛け合わせることで総合化を行ったうえで、各重要度に関する一対比較の整合性を確認した。以上より、複数の管理パラメータと評価指標の中から、より重要度の高い項目を抽出することができることを定量的に示した。具体的には、前章の AHP によると、本論文の生産モデルにおいては平均在庫率 $\beta$ や空席率 $\delta$ と比べて品切れ率 $\alpha$ と段取替え作業負荷率 $\gamma$ が重要な評価指標であり、ロットサイズパラメータ $\lambda$  ( $0 < \lambda \leq 1$ )と能力余力パラメータ $\varepsilon$  ( $\varepsilon \geq 0$ )が基準在庫パラメータ $\varphi$  ( $\varphi > 0$ )よりも重要な管理パラメータに位置付けられることが明らかとなった。これに対する裏付けが第 3 章の実験結果からも得られていることから、元々の 3 説明変数(管理パラメータ)と 4 目的関数(評価指標)を組合せる複雑な最適化問題に対して、2 説明変数・2 目的関数の問題に近似できることを示した。

前章では、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータ値の探索として、AHP による評価指標の重み付けに対応させた総合評価方法を用いる方法についても明らかにした。具体的には、能力余力パラメータ $\varepsilon$ とロットサイズパラメータ $\lambda$ の重要度(総合得点)が合わせて 80%以上を占めていることを活用し、基準在庫パラメータ $\varphi$ を任意の一定値としたうえで総合評価指標(関連費用指数  $ID_{CC}$ )を最小化する $\varepsilon$ と $\lambda$ の値を探索する方法である。限られた条件下ではあるが、座席枠設定に関する計画立案者の意思決定に対して一助となる方法である。

そこで本章では、前章で示した AHP の適用による座席枠設定方法を、実在の工場に適用した事例を報告し、その実効性を明らかにする[118]。まず、対象工程の概要について説明し、第 3 章で示した生産モデルの各項目と実工程の製造環境との関係について述べ、従来(適用前)の管理パラメータがどのように設定されていたのかについて説明する。次に、前章で示した座席枠設定方法による過不足のない管理パラメータ値の探索について述べ、その値を適用した結果について解説する。さらに、その適用結果を踏まえて、一般の見込生産環境にも汎用的に適用できる座席枠設定方法を提案する。対象とする市場環境と生産環境に対して、第 3 章で示した様なモデルを定式化する際の注意点・着眼点について説明し、評価指標の重み付けを AHP の一対比較に基づいて行う際に考慮すべき事項についての解説を経て、シミュレーション実験から AHP の整合性確認までのプロセスを含めた座席枠設定方法を提案する。以上から、補充点生産方式を適用した固定ロットサイズ見込生産環境における座席枠設定の意思決定を支援することを目的とする。

### 5.2 実工程への適用事例

本節では、前章で示した AHP の適用による座席枠設定方法を実在の工場に適用した事例を報告する。まず、5.2.1 項で対象工程の概要を説明し、5.2.2 項では第 3 章で定式化した生産モデルとの関係について述べ、5.2.3 項で従来(適用前)の管理パラメータ設定について解説する。さらに、

5.2.4 項では前章で示した座席枠設定方法に基づく管理パラメータ値の探索について述べ、5.2.5 項でその管理パラメータ値を対象工場に適用した結果と適用前の評価指標値との比較について述べる。

### 5.2.1 適用工程の概要

適用工程は、プラスチック糸を織り合わせたコンベヤ製品(B2B 製品)の生産工程である。大別すると、元網製造、エンドレス加工、樹脂部品溶着、最終仕上工程の4段階から成り、いずれも異なる製造設備で加工している。生産座席システムはボトルネック工程である元網製造工程に採用されている。元網製造工程は、まず固定ロットサイズで製織し、張力と熱を掛けて物性(伸びや剛性など)を規定値内に収めた後、ロットごとに決められた長さに切断する工程である。

特に、製織部では製造途中で設備を停止してしまうと製品に段差不具合などが生じるために停止不可とされており、そのため長期休業を除けば週5日24時間で操業している。工程内には十数台の生産設備を保有しているが、常に全ての設備を稼働させている訳ではなく、生産計画量に合わせて稼働台数を変更させており、基準となる稼働台数に追加して稼働台数を増やすことで能力余力を調整している。また、次工程以降は生産設備よりも作業員の数や能力に依存する工程であるため、残業や休日出勤などで需要変動に対応することが可能な生産能力に対する柔軟性が高い工程である。そのため、元網製造工程は次工程(エンドレス加工工程)前にある仕掛在庫量が一定量を下回った場合に、その不足分を補充するための生産を行う補充点生産方式を採っている。

最終製品は顧客側で消耗品として定期的に交換されるものだが、使用状況によって急遽破損したり、顧客側製品の品質不具合で交換されたりする場合がある。顧客側では、当該製品が不足するとライン全体が停止しかねず、その際の損害は莫大になることもあるため、必要に応じて遅滞なく納品することが求められ、同業他社も存在するため迅速に納品できる体制を維持しなければならない。製品仕様は、顧客ごとに若干異なる点(端部補強や梱包方法など)があるため厳密に言えばテーラメイドではあるが、その素材となる元網は規格化されており、顧客の使用状況などを営業員が確認しながら常に補充ができる様に完成品を全国の倉庫に保管しておくといったビジネスモデルであるため、当該環境は見込生産であるものと認識している。

以上より、適用工程は補充点生産方式を用いた固定ロットサイズ見込生産環境と位置付けられ、第3章で定式化した生産モデルの原型に当たる。

### 5.2.2 第3章の生産モデルとの関係

本項では、第3章で定式化した生産モデルと実工程との関係について述べる。

#### (1) モデルの仮定

第3章では、まず対象製造ラインの概要について、以下の通り仮定している。

(ア) 製造工程は $M$ 段階の多段階フローショップとし、ボトルネック工程が存在する。

(イ) ボトルネック工程は別工程へ移動しないものとし、他工程は十分な生産能力を有する。

(ウ) ボトルネック工程の生産計画に生産座席システムを適用する。

前項記述の通り、対象製造ラインは元網製造、エンドレス加工、樹脂部品溶着工程、最終仕上工程の4段階から成り、ボトルネック工程である元網製造工程以外は残業や休日出勤などで需要変動に対応可能なため、ボトルネックが他工程に移動することはないと言える。また、生産座席システムが元網製造工程に適用している点も(ウ)の通りである。

次に、生産リードタイムと在庫保管場所については以下の通り仮定している。

(エ) 生産リードタイムはボトルネック工程での加工完了後から後工程の標準製造リードタイム(一定期間)とする。

(オ) 保管場所には十分なスペースがあるものとするが、在庫量に比例した保管料を要する。

厳密に言えば、後加工の生産リードタイムは製品によって当然異なるため、残業や休日出勤による対応が可能といえども、それらの製造費増加は存在する。しかしながら、本論文は製造ライン全体ではなく生産座席システムを適用する工程についての考察が中心となるため、(エ)の通り一定期間と仮定し、元網製造工程における遅延がそのまま品切れに直結するものとしている。なお、各工程の標準製造リードタイムは開示できないが、3工程合わせて概ね1ヶ月程度と認識されたい。一方、保管場所について、対象工程では仕掛在庫が対象となり工場内スペースでの保管となるため、直接的な保管料の支払は発生しないが、工場内運搬や毎月末の棚卸作業などの工数を要するため、在庫量に比例した保管料が掛かるものと仮定している。

製品種類と段取替え作業については以下の通り仮定している。

(カ) 製品種類は、 $F$ 種の製品群(Family, 例:A, B, C)と、 $I$ 種(Item, 例:a, b)の品種から構成される( $F \times I$ )種類(例:Aa, Ab, Ba, Bb, Ca, Cb)とし、その識別のため製品( $f, i$ )と表す(例:Aa=製品(1, 1), Ab=製品(1, 2), Ba=製品(2, 1), …)。

(キ) 生産ロット間で段取替え作業が発生するものとし、製品群が切り替わる場合(例:Aa→Ba など)には大規模な段取替え、同一群内で品種が切り替わる場合(例:Aa→Ab など)には中規模、同一製品内で品種が切り替わる場合(例:Aa→Aa など)には小規模と、3種類の段取替え作業が発生するものとする。

対象とする製品は、幅寸法・使用縦糸ごとの製品群分けと、使用する横糸や織り方による品種分けで構成されており、製品群が4種類、品種が群ごとに3~5種類であり、製品種類は16種類となる。新規製品や極めて少量の製品まで含めれば、実際の製品種類は無数に存在することになるが、いわゆるレギュラーな製品種類として概ね16種類である。また、段取替え作業については仮定の通り3種類であるが、同規模内の作業について、例えばAa→BaとBa→Caなど製造群の違いまでを比較すると、現実では多少の工数差は存在する。ただし、時間差というよりも投入人員数の違いが主となるため、厳密に言えば人件費が加味されるべきとも言えるが、大局的に見るとその影響は軽微と考えることができ、当該モデルの定式化上では省略している。

ロットサイズの関連事項として以下を仮定している。

(ク) ロットサイズは製品種類に関わらず一定とする。

(ケ) ボトルネック工程における加工時間はロットサイズに比例するが、ロットサイズが同じ大きさであれば製品種類に依存せず加工時間も同一とする。

対象工程のロットサイズは(ク)の通り、製品種類に関わらず一定である。対象製品はプラスチックワイヤであるが、仕掛在庫の形状としてはトイレトペーパーや新聞紙の原紙の様な一定長の巻物をイメージされたい。巻取部の設定を変更することでロットサイズを変更することも可能であるが、製造設備(特に巻取部)や治具・台車の都合上、頻繁に変更することが難しいため、一定長として設定している。また、(ケ)の加工時間について、厳密には製品種類によって多少の差があるものの、概ね 5~10 分程度の差となるため同一と仮定しても差し支えない。加えて、当該工程は細かな作業単位や分単位での時間管理はしておらず、1日あたり何ロットを生産したかといった出来高管理であることもその要因となる。

最後に、計画対象期間を以下の通り仮定しているが、これは対象工程でも同一である。

(コ) 生産計画は1ヶ月(L日間)単位で立案するものとする。

例えば、この生産計画期間を1週間単位などの詳細な計画にすることも可能ではあるが、旧来の慣習を変えるには相当の期間(主に説得のための期間)を要するため、別儀の問題と認識されたい。

## (2) 生産計画

第3章では、上位計画としてロットサイズおよび基準在庫の設定を、中位計画として座席枠設定(負荷計画)、下位計画に座席割当および生産指示を行う階層型生産計画を適用しているが、これは対象工程の生産計画も同様である。上位計画のロットサイズ設定は、製造設備の初期稼働時からロットサイズを変更していないため厳密に言えば行っていないことになるが、基準在庫の設定は半年から1年間の在庫状況を見ながら適宜変更している。一方、中位計画は第3章説明の通り月単位で行っており、下位計画についても同様で日次での設定を行っている。以下に、第3章の定式化に順じて、実工程における生産計画との関係を説明する。

まず初めに上位計画として、 $f = 1, 2, \dots, F$ および $i = 1, 2, \dots, I$ に対して、式(5.1)で示されるロットサイズ $LS$ と式(5.2)で示される基準在庫量 $SI_{f,i}$ を設定している。

$$LS = \left[ \lambda \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \bar{D}_{f,i} / (L \cdot F \cdot I) \right] \quad (5.1)$$

$$SI_{f,i} = \left[ \varphi \cdot \bar{D}_{f,i} / L \right] \quad (5.2)$$

ここで、 $f$ は製品群(Family)を表す記号、 $i$ は品種(Item)を表す記号であり、製品種類を $(f, i)$ と表す。 $\bar{D}_{f,i}$ は1ヶ月あたりの製品 $(f, i)$ の平均需要量を示し、 $L$ は1ヶ月間の操業日数、 $F$ は製品群数、 $I$ は品種数である。また、 $\lambda$ はロットサイズを決定する管理パラメータ(ロットサイズパラメータ)であるが、ロットサイズは製造設備の初期稼働時から不変であった

ため、 $\lambda$ もまた同一であった。 $\varphi$ は基準在庫を設定する管理パラメータ(基準在庫パラメータ)であり、従来は計画立案者の経験則によって設定されていた。これらの具体的な値については次項(5.2.3 項)で述べる。

この上位計画に関して、前述の通りロットサイズは製造設備稼働初期から不変であるが、これはロットサイズ変更に対して設備設定を変更したり、治具や台車を改造したりする必要があるためである。一方、基準在庫量については、ある程度容易に変更することが可能であるため、中長期的な在庫(過不足)状況を見ながら、計画立案者が半年～1 年間の中で販売予算などを鑑みて変更しているのが実状である。

次に、中位計画に当たる座席枠設定(負荷計画)として、第 3 章では、各月末に翌々月分の生産能力を決定し、それを操業日数とロットサイズとで均等分配することで座席枠を設定している。

まず、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $t = 1, 2, \dots, T$ に対して、式(5.3)で示される $t$ 月の稼働可能時間 $MS_t$ を、当該月の前々月末に設定するものとしている。なお、 $t = 0$ に対して $MS_0 \equiv 0$ であり、初月および第 2 月についてはシミュレーション開始時に設定している。また、 $t$ は月を表す記号、 $T$ はシミュレーション期間(月数)である。

$$MS_t = (1 + \varepsilon) \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \widehat{D}_{f,i,t} + \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I SI_{f,i} - \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \widehat{I}_{f,i,t-1} \quad (5.3)$$

ここで、 $\varepsilon$ は能力余力を設定する管理パラメータ(能力余力パラメータ)であり、計画立案者の経験則による設定であった。 $\widehat{D}_{f,i,t}$ は $t$ 月の製品( $f, i$ )の需要予測量を表し、実需要に対して正規分布に従う誤差を有するものとしているが、これはシミュレーション都合による設定である(詳細は後述する)。なお、 $\widehat{I}_{f,i,t-1}$ は $(t-1)$ 月末における製品( $f, i$ )の推定在庫量であり、以下式で与えられるものとしている。

$$\widehat{I}_{f,i,t} = \begin{cases} I_{f,i,t-1} + \widehat{P}_{f,i,t} - \widehat{D}_{f,i,t} & (I_{f,i,t-1} + \widehat{P}_{f,i,t} - \widehat{D}_{f,i,t} \geq 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.4)$$

$$I_{f,i,t} = \begin{cases} I_{f,i,t-1} + P_{f,i,t} - D_{f,i,t} & (I_{f,i,t-1} + P_{f,i,t} - D_{f,i,t} \geq 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\widehat{P}_{f,i,t} = (1 + \varepsilon) \widehat{D}_{f,i,t} + SI_{f,i} - I_{f,i,t-1} \quad (5.6)$$

$$P_{f,i,t} = LS \cdot \sum_{j=\{t-1\}L+1}^{t \cdot L} PL_{f,i,j} \quad (j = \{t-1\}L + 1, \{t-1\}L + 2, \dots, t \cdot L) \quad (5.7)$$

$$PL_{f,i,j} = \begin{cases} [(SI_{f,i} - I_{f,i,j-1})/LS] & (SI_{f,i} - I_{f,i,j-1} > 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.8)$$

$$I_{f,i,j} = \begin{cases} I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j} & (I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j} \geq 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (5.9)$$

$$D_{f,i,t} = \sum_{j=\{t-1\}L+1}^{t \cdot L} D_{f,i,j} \quad (j = \{t-1\}L+1, \{t-1\}L+2, \dots, t \cdot L) \quad (5.10)$$

ここで、式(5.4)～(5.10)は $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L+1, \{t-1\}L+2, \dots, t \cdot L$ に対して、それぞれ与えられるものとしている。

まず $\hat{I}_{f,i,t-1}$ は、 $(t-1)$ 月末における製品 $(f, i)$ の实在庫量 $I_{f,i,t-1}$ と $t$ 月の推定生産量 $\hat{P}_{f,i,t}$ および $t$ 月の需要予測量 $\hat{D}_{f,i,t}$ を用いた式(5.4)で与えられるものとしている( $t=0$ に対して $\hat{I}_{f,i,0} \equiv 0$ )。次に、式(5.4)における $I_{f,i,t}$ は $t$ 月末の製品 $(f, i)$ の实在庫量、 $\hat{P}_{f,i,t}$ は $t$ 月の製品 $(f, i)$ の推定生産量を表し、これらはシミュレーション内で式(5.5)および式(5.6)から与えられるものとしている( $t=0$ に対して $I_{f,i,0} \equiv 0$ および $\hat{P}_{f,i,0} \equiv 0$ )。ここで、式(5.5)における $P_{f,i,t}$ は、式(5.7)で示される $t$ 月の製品 $(f, i)$ の実生産量としており、 $j$ は日を表す変数である。さらに、式(5.7)における $PL_{f,i,j}$ は $j$ 日の製品 $(f, i)$ の生産ロット数を示し、式(5.8)で与えられるものとしている( $j=0$ に対して $PL_{f,i,0} \equiv 0$ )。ここで、式(5.8)における $I_{f,i,j}$ は製品 $(f, i)$ の $j$ 日末の实在庫量を示し、製品 $(f, i)$ の $j$ 日の実需要量 $D_{f,i,j}$ と実生産量 $P_{f,i,j}$ を用いて、式(5.9)で与えられるものとしている( $j=0$ に対して $I_{f,i,0} \equiv 0$ )。最後に、式(5.5)における $D_{f,i,t}$ は式(3.10)で示される $t$ 月の製品 $(f, i)$ の実需要量である。ここで、式(5.10)における $D_{f,i,j}$ は、平均 $(\bar{D}_{f,i}/L)$ 、フェイズ $k$ のアーラン分布によってシミュレーション内で与えられる $j$ 日の製品 $(f, i)$ の実需要量としている。この $D_{f,i,j}$ もまた、 $t$ 月の製品 $(f, i)$ の需要予測量 $\hat{D}_{f,i,t}$ と同じくシミュレーション都合による設定であり、実環境との関係については後述する。

さらに、これら各月末における翌々月分の生産能力決定を経て、各日の生産能力設定を行っている。式(5.3)で設定した稼働可能時間 $MS_t$ を基に、 $t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L+1, \{t-1\}L+2, \dots, t \cdot L$ に対して、式(5.11)で示される $j$ 日の生産座席枠数 $SS_j$ の設定がその各日の生産能力設定に当たる。

$$SS_j = [MS_t / (L \cdot LS)] \quad (5.11)$$

$MS_t$ を1ヶ月間の操業日数 $L$ に均等分配し、さらにロットサイズ $LS$ で除して $SS_j$ を設定するが、これは実工程でも同様である。

以上の中位計画を経て、階層型生産計画の下位計画として、第3章では生産ロット割当および生産指示を行っている。生産ロット割当前に、各日末の实在庫量を基に、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ および $j = \{t-1\}L+1, \{t-1\}L+2, \dots, t \cdot L$ に対して、式(5.8)で示される翌日の生産ロット数 $PL_{f,i,j}$ を決定しているが、これは実工程を反映させたものであり、同様に毎日実施している。対象とする各日末の在庫量が次工程(エンドレス加工工程)前の仕掛在庫量となるが、式(5.8)は基準在庫量との差分を生産して補充する補充点生産方式に当たる。また第3章では、次いで図5-1のディスパッチングルールを適用して納入順序の並び替えを行っているが、これについても実工程と同じである。直前に割り当てられた生産ロットを基準に、未割当の生産ロットの中から出来るだけ段取

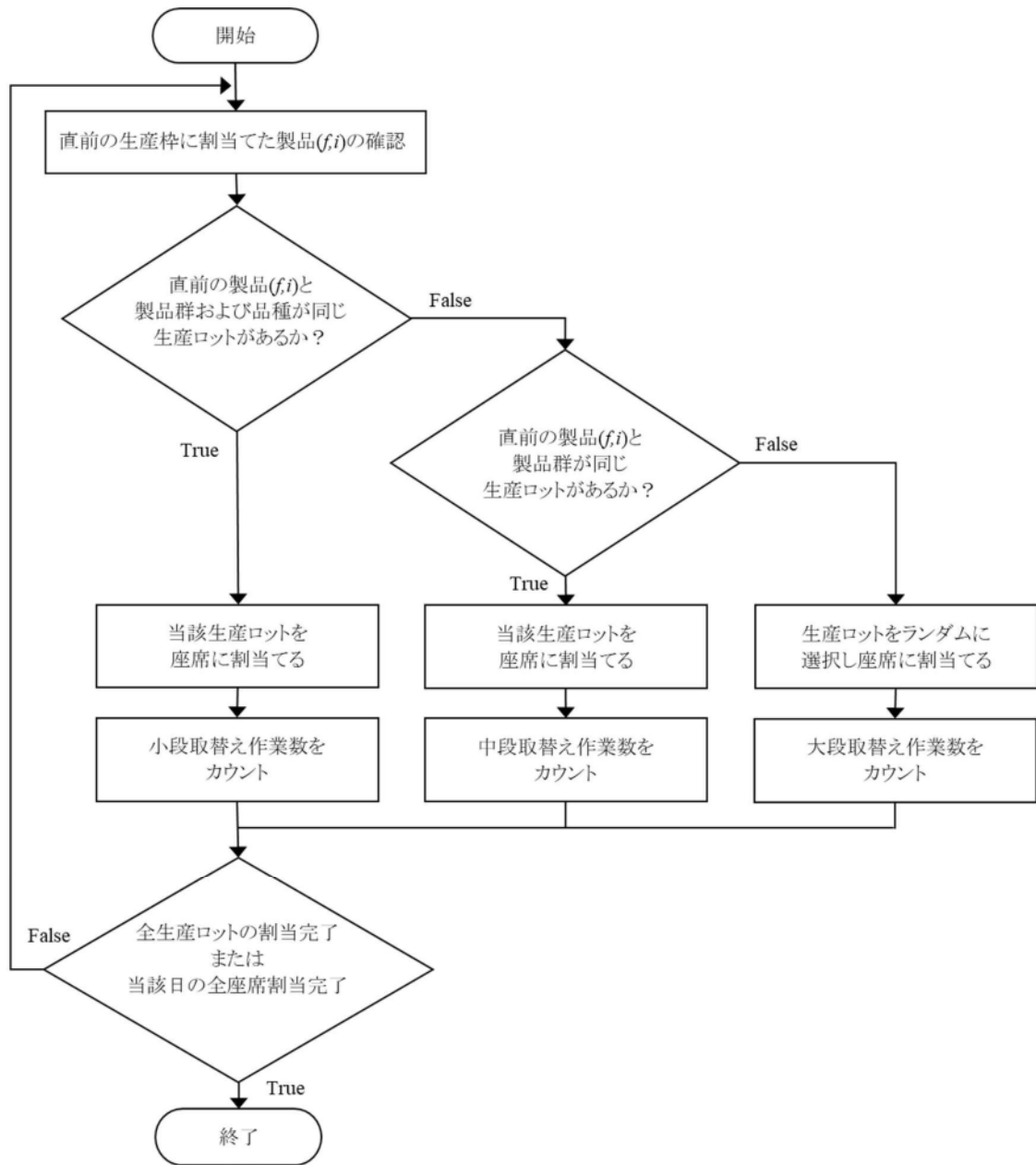


図 5-1 ディスパッチングルール

替え作業負荷が小さくなる様に製品種類を選んで割り当てるルールである。最後に割当ロットを確定して生産指示を行う点も、実工程と同じ流れである。

以上の生産計画に対して、特に第 3 章のシミュレーション稼働初期においては、シミュレーションによる稼働可能時間  $MS_t$  などの計算と実際の状況とでは差異が当然ある。しかしながら、実際の流れは記載の通りであるため、シミュレーション安定後の座席枠設定は実工程における実状と相違ないものと考えて差し支えない。

## (3) 評価指標

第3章では以下4種類の評価指標を定式化しているが、これらはいずれも実工程における年次評価指標である。

 (ア) 品切れ率 $\alpha$ 

第3章では、見込生産環境下での重要な評価指標のひとつとして、実需要量に対する品切れ量の割合となる品切れ率 $\alpha$ を式(5.12)で定義している。

$$\alpha = \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{f,i,j}}{\sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{f,i,j}} \quad (5.12)$$

ここで $U_{f,i,j}$ はj日における製品( $f, i$ )の品切れ量 $U_{f,i,j}$ を示し、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $j = 1, 2, \dots, T \cdot L$ に対して、式(5.13)で与えられるものとしている。なお、 $j = 0$ に対して $U_{f,i,j} \equiv 0$ としている。

$$U_{f,i,j} = \begin{cases} |I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j}| \\ (I_{f,i,j-1} + LS \cdot PL_{f,i,j} - D_{f,i,j} < 0) \\ 0 \quad (otherwise) \end{cases} \quad (5.13)$$

 (イ) 平均在庫率 $\beta$ 

同じく第3章では、需要変動を吸収するという重要な機能として、実需要量に対する実在庫量の割合となる平均在庫率 $\beta$ を式(5.14)によって定義している。

$$\beta = \frac{\sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J I_{f,i,j}}{\sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{f,i,j}} \quad (5.14)$$

ここで、 $I_{f,i,j}$ はj日末における製品( $f, i$ )の実在庫量であり、 $f = 1, 2, \dots, F$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ および $j = 1, 2, \dots, T \cdot L$ に対し、前述式(5.9)で与えられるものとしている。

 (ウ) 段取替え作業負荷率 $\gamma$ 

ロット生産形態の製造工程では段取替え作業が重要となるため、その尺度として実需要量に対する段取替え作業負荷の割合となる段取替え作業負荷率 $\gamma$ を式(5.15)で定義している。

$$\gamma = \frac{SU}{\sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{f,i,j}} \quad (5.15)$$

ここで、 $SU$ は段取替え作業負荷を表し、規模ごと(大・中・小)の段取替え作業数( $SU_L, SU_M, SU_S$ )と小規模段取替え作業に対する大規模および中規模段取り作業負荷の重み( $\omega_L, \omega_M$ )を用いた式(5.16)で定義されるものとしている。

$$SU = \omega_L \cdot SU_L + \omega_M \cdot SU_M + SU_S \quad (5.16)$$

なお、段取替え作業負荷の程度を表す( $\omega_L, \omega_M$ )の設定については、後述のシミュレーション設定条件において述べる。

 (エ) 空席率 $\delta$ 

生産座席システムでの空席はいわゆる遊休に該当するため、座席総数に対する空席総数の割合として、式(5.17)で示される空席率 $\delta$ を定義している。



$$\delta = \sum_{j=1}^J VS_j / \sum_{j=1}^J SS_j \quad (5.17)$$

ここで、 $VS_j$ はj日の空席数、 $SS_j$ はj日の生産座席数である。

以上評価指標の基となる値(例:実需要量や実品切れ量など)について、第3章ではシミュレーションによる実験結果を用いていたが、本事例においては実工程における基幹システム記録の実績値を用いている。ただし、詳細は当然開示できないため、結果としての各種割合(率)についてのみの記述となることを理解されたい。

実工程ではこれら以外にも評価指標が当然多数あるが、本論文で議論する補充点生産方式を用いた固定ロットサイズ見込生産環境下の生産座席システムにおいては、上記4種類を対象とすることで十分評価可能と考える。

#### (4) シミュレーションの設定条件

第3章で実施したシミュレーション実験の設定条件は以下の通りである。

- (ア) 1ヶ月あたりの操業日数は20日間( $L = 20$ )とする。
- (イ) 製品種類( $F \times I$ )は、製造群 $F$ が3種類( $F = 3$ )、品種 $I$ は2種類( $I = 3$ )から成る6種類( $F \times I = 6$ )とする。
- (ウ) 製造工程数は3工程( $M = 3$ )とする。
- (エ) 1ヶ月あたりの製品( $f, i$ )の平均需要量 $\bar{D}_{f,i}$ は20,000個( $\bar{D}_{f,i} = 20,000$ )とする。
- (オ) シミュレーション期間は、繰返しによる初期影響を低減させるために150ヵ月(3,000日)とし、初期100日を除いた2,900日間のデータを用いる。
- (カ) 小規模段取替え作業に対する大規模段取替え作業負荷の重み $\omega_L$ および中規模段取替え作業負荷の重み $\omega_M$ は、 $\omega_L = 10$ および $\omega_M = 5$ と設定する。
- (キ) 各日(j日)の製品( $f, i$ )の実需要量 $D_{f,i,j}$ は、平均( $\bar{D}_{f,i}/L$ )、フェイズ $k$ のアーラン分布に従う乱数として与えられ、各日および製品種類によって独立とし、 $k = 30$ と設定する。
- (ク) 各日(j日)の製品( $f, i$ )の需要予測量 $\hat{D}_{f,i,j}$ は、各日(j日)の製品( $f, i$ )の実需要量 $D_{f,i,j}$ に対する変動係数 $cv$ の正規分布によって与えられるものとし、 $cv = 0.03$ と設定する。

まず(ア)の操業日数について、実工程では祝日や長期休業などがあるため全く同じとは言えない条件であるが、実験目的である管理パラメータと評価指標の関係を評価するうえでは支障ないものとする。

次に(イ)の製品種類について、実工程では前述の通り製品群が4種類、品種が群ごとに3~5種類からなる計16種類であるため、同じ条件とは言えない。しかしながら、第4章のAHPで行った段取替え作業負荷率 $\gamma$ における管理パラメータ( $\varepsilon, \varphi, \lambda$ )の対比較などの様に、同一基準において管理パラメータ別での影響を比較することが目的となるため、厳密に再現できなくとも差し支えない程度であると考えられる。(ウ)(エ)についても実工程と同じ条件であるとは言えないが、同様に差し支えないものと判断している(特に(エ)については開示不可であることを理解されたい)。

(オ)は実際の日数(8 年以上)を再現する目的ではなく、シミュレーション精度を上げることを意図して設定した日数である。短期間のシミュレーションを繰り返す方法もあるが、その方法だとシミュレーションが安定するまでの初期期間を取り除く作業が増えてしまうと考えて、3,000 日という期間に設定している。

(カ)の段取替え作業負荷については、小規模段取替え作業(伝票差替えや簡易的な初動確認など)の工数を基準として、大および中規模の段取替え作業がその何倍程度に当たるかによって設定した値である。大規模の場合は縦糸と横糸の交換が必要となり、中規模であっても横糸交換が必要となるため、それらの工数はそれぞれ 10 倍および 5 倍程度と設定している。

最後に(キ)(ク)の需要量についてだが、実工程の実需要量を確率分布で表すことは正直困難であり、需要予測誤差についても同様である。しかしながら、アーラン分布を用いることで様々な需要変動を表すことが可能と考え、需要予測はどの程度の誤差があるかを想定して正規分布に従うものとしている。需要予測の精度については別儀の大きな問題となるため、本論文では上記の様に設定していることを理解されたい。

### 5.2.3 適用工程における従来の管理パラメータ値

本項では、前項で説明した生産モデルにおける能力余力パラメータ $\varepsilon$ 、基準在庫パラメータ $\varphi$ およびロットサイズパラメータ $\lambda$ について、従来の実工程ではどのような設定になっているのかについて説明する。前述の通り、ロットサイズについては設備導入初期から変更されておらず、能力余力と基準在庫は計画立案者の経験則に基づく設定であった。

まず、式(5.1)で示されるロットサイズ $LS$ は、全製品種類の 1 日あたりの需要予測量の合計に対してロットサイズパラメータ $\lambda$ を乗じることで求められるが、従来の $LS$ が既知であるため、直近 1 年間の需要実績から導く 1 日あたりの需要量を需要予測量に置換することで、ロットサイズパラメータ $\lambda$ が算出できる。社外秘情報となるため具体的数値は開示できないが、計算の結果、 $\lambda = 0.32$ が得られた。

次に、式(5.2)で示される製品ごとの基準在庫量 $SI_{f,i}$ であるが、これも 1 日あたりの需要予測量に対して基準在庫パラメータ $\varphi$ を乗じて求めるものであるため、基準在庫パラメータ $\varphi$ についても同様の逆算が可能、 $\varphi = 1.72$ であることが判った。当初から一定のロットサイズとは異なり、基準在庫量は半年から 1 年程度の間隔で変更されるものであるが、その間隔は不定期かつ大幅な変更がほとんど無い(計画立案者の経験則による若干の変更である)ことから、直近 1 年間の需要実績を基に計算しても差し支えないものと考えらる。

最後に能力余力について、翌々月の総稼働可能時間 $MS_t$ が毎月末に式(5.3)を用いて求められているが、その内部にある能力余力パラメータ $\varepsilon$ は、3 ヶ月から半年程度の間隔かつ不定期に、計画立案者の経験則によって変更されている。能力余力パラメータ $\varepsilon$ は設備設定や治具などの改造や在庫保管場所などといった物理的制約を全く受けないパラメータであるため、計画立案者は毎月末の在庫状況と販売側からの需要予測情報を鑑みて調整を掛けている。このような背景から、従

来の能力余力パラメータ $\varepsilon$ 値については、直近3ヵ月間の需要実績を基に逆算することとし、その結果、 $\varepsilon = 0.58$ という値が得られた。具体的には、3ヵ月分の既知 $MS_t$ を基準として、各月の需要実績および在庫実績から各月における $\varepsilon$ を算出し、その平均値から求めている。

以上より、従来の管理パラメータ値は $(\varepsilon, \varphi, \lambda) = (0.58, 1.72, 0.32)$ であったと導くことができた。これらの値と、 $\varepsilon$ の算出と同期間の直近3ヵ月間における各評価指標値を基準に、前章提示方法による過不足のない管理パラメータ値による効果を比較するが、その前に次項にて過不足のない管理パラメータ値の探索について解説する。

#### 5.2.4 適用工程における過不足のない管理パラメータ値の探索

前項では、実工程の需要実績や在庫実績から $(\varepsilon, \varphi, \lambda) = (0.58, 1.72, 0.32)$ であったと導いたが、本項では、第4章で示した方法を用いた過不足のない管理パラメータ値の探索について説明する。

##### (1) AHPによる評価指標および管理パラメータの重要度

第4章では、第3章の生産モデルおよび実験結果を基としたAHPによって、表5-1の総合得点表が得られている。第3章のモデルは5.2.2項で説明した通り、本章が対象とする実工程の生産モデルを基に定式化されたものであるため、表5-1は対象工程におけるAHPの結果と位置付けることができ、これを基に実工程における評価指標と管理パラメータの重要度について述べる。

表5-1の左上部では、品切れ、平均在庫、段取替え作業負荷、空席という4つの評価指標について、各々の評価指標の重要度が $(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma, \omega_\delta) = (0.540, 0.122, 0.274, 0.062)$ と示されている。これは対象工場における製造・営業・生産管理部門の各責任者で協議した結果であり、その整合性は前章で確認済であるため、対象工程においては品切れが最も重要な評価指標であり、次いで段取替え作業負荷も低く抑えたい評価指標であることが定量的に示されている。また、表5-1の最右列では、能力余力と基準在庫およびロットサイズの3種の管理パラメータについて、それぞれが工程全体に及ぼす影響の度合を定量的に示している。能力余力とロットサイズの重要度が各々4割以上を占めることから、特にこの2つの管理パラメータは注意深く設定しなければならないことが明らかとなった。

表 5-1 総合得点表

|        | 品切れ   | 平均在庫  | 段取替え  | 空席    | $\times 0.540$ | $\times 0.122$ | $\times 0.274$ | $\times 0.062$ | 総合得点  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| 重要度    | 0.540 | 0.122 | 0.274 | 0.062 |                |                |                |                |       |
| 能力余力   | 0.481 | 0.221 | 0.297 | 0.701 | 0.260          | 0.027          | 0.081          | 0.043          | 0.411 |
| 基準在庫   | 0.114 | 0.319 | 0.086 | 0.202 | 0.062          | 0.039          | 0.024          | 0.013          | 0.138 |
| ロットサイズ | 0.405 | 0.460 | 0.618 | 0.097 | 0.219          | 0.056          | 0.169          | 0.006          | 0.450 |

(2) 過不足のない管理パラメータ値の探索

第 4 章では、前述の各評価指標重要度 $\omega_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )を用いた式(5.18)で示される管理費用指数 $ID_{CC}$ を総合評価指標として、この $ID_{CC}$ を最小化する管理パラメータの値が過不足のない管理パラメータ値であると提案している。

$$ID_{CC} = \omega_{\alpha} \cdot OF_{\alpha} + \omega_{\beta} \cdot OF_{\beta} + \omega_{\gamma} \cdot OF_{\gamma} + \omega_{\delta} \cdot OF_{\delta} \quad (5.18)$$

$$OF_l = (l - l_{MIN}) / (l_{MAX} - l_{MIN}) \quad (l = \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (5.19)$$

ここで、 $OF_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )は各評価指標における発生度合を表す評価指数であり、式(5.19)で与えられるものとしている。また、 $l_{MAX}$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )および $l_{MIN}$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )は、第 3 章の実験結果から得られた各評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )の最大値および最小値を示す。

この管理費用指数 $ID_{CC}$ を用いることで、品切れ数や空席数などの単位や数値規模が異なる評価指標を一元化することができ、3 種の管理パラメータの内の 1 つ(任意)を一定としたうえで残り 2 つの管理パラメータ値を変化させ、 $ID_{CC}$ が最小となる(グラフでは底面に最も近い)ときの管理パラメータ値を過不足のない管理パラメータ値とする方法である。

対象工程では、前述の通り能力余力とロットサイズの重要度が合わせて 8 割以上を占めている。そこで、一定にする管理パラメータを基準在庫として $\varphi = 1.72$ に固定し、第 4 章で示した管理費用指数 $ID_{CC}$ を求めた。なお、この $\varphi = 1.72$ は前項で求めた従来の基準在庫パラメータ値であり、残る管理パラメータ( $\varepsilon, \lambda$ )を変化させたシミュレーションを行って、その結果から式(5.18)および式(5.19)を用いて管理費用指数 $ID_{CC}$ を算出している。

シミュレーション結果と管理費用指数 $ID_{CC}$ の一例を表 5-2 に、管理パラメータ( $\varepsilon, \lambda$ )と管理費用指数 $ID_{CC}$ の関係を図 5-2 に示す。

まず表 5-2 について、左側 3 列はシミュレーションのインプットとなる管理パラメータの値を示し、 $\varphi = 1.72$ は一定のまま( $\varepsilon, \lambda$ )の値を変えてシミュレーションを行っている。その右側 4 列がシミュレーションによって得られた各評価指標( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )の値であり、さらに右側

表 5-2 シミュレーション結果と管理費用指数の一例

| $\varepsilon$ | $\varphi$ | $\lambda$ | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\omega_{\alpha}$ | $\omega_{\beta}$ | $\omega_{\gamma}$ | $\omega_{\delta}$ | $OF_{\alpha}$ | $OF_{\beta}$ | $OF_{\gamma}$ | $OF_{\delta}$ | $ID_{CC}$ |
|---------------|-----------|-----------|----------|---------|----------|----------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------|
| 0.51          | 1.72      | 0.12      | 7.77%    | 141.57% | 1.16%    | 24.45%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.540         | 0.024        | 0.214         | 0.023         | 0.801     |
| 0.52          | 1.72      | 0.12      | 6.81%    | 144.90% | 1.18%    | 26.09%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.486         | 0.032        | 0.220         | 0.026         | 0.764     |
| 0.53          | 1.72      | 0.12      | 6.13%    | 147.63% | 1.20%    | 28.02%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.449         | 0.038        | 0.225         | 0.030         | 0.742     |
| 0.54          | 1.72      | 0.12      | 5.63%    | 149.68% | 1.21%    | 29.57%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.421         | 0.043        | 0.229         | 0.033         | 0.726     |
| 0.55          | 1.72      | 0.12      | 5.17%    | 151.64% | 1.23%    | 31.10%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.395         | 0.048        | 0.233         | 0.036         | 0.712     |
| 0.56          | 1.72      | 0.12      | 4.75%    | 153.54% | 1.24%    | 32.60%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.372         | 0.052        | 0.237         | 0.039         | 0.700     |
| 0.57          | 1.72      | 0.12      | 4.38%    | 155.22% | 1.26%    | 33.98%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.352         | 0.056        | 0.241         | 0.042         | 0.690     |
| ⋮             | ⋮         | ⋮         | ⋮        | ⋮       | ⋮        | ⋮        | ⋮                 | ⋮                | ⋮                 | ⋮                 | ⋮             | ⋮            | ⋮             | ⋮             | ⋮         |
| 0.59          | 1.72      | 0.14      | 1.16%    | 163.35% | 1.18%    | 35.10%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.326         | 0.061        | 0.247         | 0.046         | 0.680     |
| 0.60          | 1.72      | 0.14      | 0.96%    | 164.21% | 1.18%    | 35.99%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.316         | 0.064        | 0.249         | 0.048         | 0.677     |
| 0.61          | 1.72      | 0.14      | 0.80%    | 164.94% | 1.19%    | 36.82%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.309         | 0.066        | 0.252         | 0.050         | 0.676     |
| 0.62          | 1.72      | 0.14      | 0.69%    | 165.43% | 1.20%    | 37.49%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.306         | 0.067        | 0.254         | 0.051         | 0.677     |
| 0.63          | 1.72      | 0.14      | 0.63%    | 165.73% | 1.21%    | 38.05%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.305         | 0.067        | 0.256         | 0.052         | 0.681     |
| 0.64          | 1.72      | 0.14      | 0.60%    | 165.92% | 1.21%    | 38.53%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.306         | 0.068        | 0.258         | 0.053         | 0.685     |
| 0.65          | 1.72      | 0.14      | 0.57%    | 166.07% | 1.22%    | 39.00%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.307         | 0.068        | 0.259         | 0.054         | 0.689     |
| 0.66          | 1.72      | 0.14      | 0.56%    | 166.16% | 1.23%    | 39.42%   | 0.540             | 0.122            | 0.274             | 0.062             | 0.308         | 0.069        | 0.261         | 0.055         | 0.693     |
| ⋮             | ⋮         | ⋮         | ⋮        | ⋮       | ⋮        | ⋮        | ⋮                 | ⋮                | ⋮                 | ⋮                 | ⋮             | ⋮            | ⋮             | ⋮             | ⋮         |

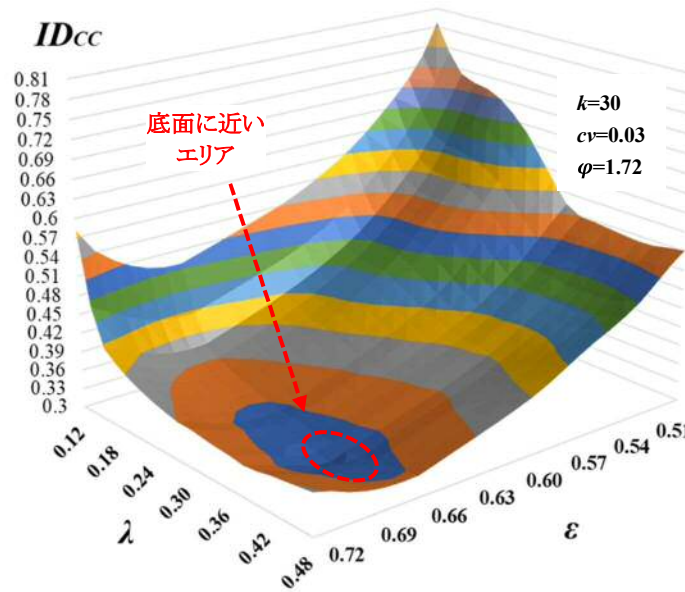


図 5-2 能力余力およびロットサイズと管理費用指数の関係

の4列は評価指標重要度 $(\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma, \omega_\delta) = (0.540, 0.122, 0.274, 0.062)$ である。残る5列は各評価指標における発生度合指数 $OF_l$  ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )と管理費用指数 $ID_{CC}$ であり、これらは式(5.18)と式(5.19)から算出され、この $ID_{CC}$ と $(\varepsilon, \lambda)$ 値の三次元図が図 5-2 である。

図 5-2 より、例えば $\lambda = 0.12$ 付近を見ると、 $\varepsilon$ が大きくなるにつれて $ID_{CC}$ は減少しており、 $\varepsilon = 0.66$ 付近で極小をとり、その後増加している。これは能力余力を大きくとることによって品切れが減少するため $ID_{CC}$ を減少させているが、ある一定値より大きくしてしまうと空席が多く生じるために $ID_{CC}$ の増加に繋がっているものと考えられる。一方、 $\varepsilon = 0.51$ 付近では、 $\lambda$ が大きくなるにつれて $ID_{CC}$ が減少する傾向を示しており、ロットサイズを大きくすることで段取替え作業負荷が低減されるためと考えられ、 $(\varepsilon, \lambda)$ が $ID_{CC}$ に対して複合的な影響を及ぼしていることが判る。また、同図中の点線で囲った箇所はグラフの底面に近いエリアであり、 $ID_{CC}$ が他に比べて小さい範囲を示している。詳細値を確認すると $(\varepsilon, \lambda) = (0.69, 0.37)$ で管理費用指数 $ID_{CC}$ の最小値をとっていたため、一定にした $\varphi = 1.72$ を踏まえると、対象工程においては $(\hat{\varepsilon}, \varphi, \hat{\lambda}) = (0.69, 1.72, 0.37)$ が過不足のない管理パラメータ値と探索された。なお、 $\hat{\varepsilon}$ および $\hat{\lambda}$ は管理費用指数 $ID_{CC}$ を最小化する能力余力パラメータおよびロットサイズパラメータの推定値である。

### 5.2.5 実工程への適用結果比較

本項では、前項で探索した過不足のない管理パラメータ値 $(\hat{\varepsilon}, \varphi, \hat{\lambda}) = (0.69, 1.72, 0.37)$ を、実工程に適用した事例を報告する。

適用結果比較を表 5-3 に示す。5.2.3 項で示した通り、適用前の管理パラメータ値は $(\varepsilon, \varphi, \lambda) = (0.58, 1.72, 0.32)$ であった。結果比較については、適用時点より3ヶ月前の実績を適用後3ヶ月の

表 5-3 提案方法の適用結果と従来方法の実績との比較

| 項目          | 記号            | 適用前     | 適用後     | 増減率    |
|-------------|---------------|---------|---------|--------|
| 能力余力パラメータ   | $\varepsilon$ | 0.58    | 0.69    | 19.0%  |
| 基準在庫パラメータ   | $\varphi$     | 1.72    | 1.72    | 0.0%   |
| ロットサイズパラメータ | $\lambda$     | 0.32    | 0.37    | 15.6%  |
| 品切れ率        | $\alpha$      | 5.09%   | 3.96%   | ▲22.2% |
| 平均在庫率       | $\beta$       | 171.86% | 185.13% | +7.7%  |
| 段取替え作業負荷率   | $\gamma$      | 0.79%   | 0.66%   | ▲16.5% |
| 空席率         | $\delta$      | 10.19%  | 12.19%  | +19.6% |
| 管理費用指数      | $ID_{CC}$     | 0.6048  | 0.3785  | ▲37.4% |

実績を用いている。品切れ数などの具体的数値は開示できないため、各3ヶ月間の実績から算出する率単位での比較となることを理解されたい。

表5-3より、提案方法による管理パラメータの設定 $(\hat{\varepsilon}, \hat{\varphi}, \hat{\lambda}) = (0.69, 1.72, 0.37)$ によって、能力余力パラメータ $\varepsilon$ については能力余力を19.0%増やし、ロットサイズパラメータ $\lambda$ についてロットサイズを15.6%大きくしたことが判る。その結果、品切れ率 $\alpha$ については22.2%の改善が見られ、段取替え作業負荷率 $\gamma$ についても16.5%を削減することができている。一方、平均在庫率 $\beta$ は7.7%の増加、空席率 $\delta$ も19.6%増加という結果になっているが、各評価指標の重要度が $(\omega_{\alpha}, \omega_{\beta}, \omega_{\gamma}, \omega_{\delta}) = (0.540, 0.122, 0.274, 0.062)$ であることより、増加した平均在庫率 $\beta$ や空席 $\delta$ よりも削減できた品切れ率 $\alpha$ と段取替え作業負荷率 $\gamma$ の方が全体への効果が大きく、総合評価指標である管理費用指数 $ID_{CC}$ の37.4%削減という結果に表れている。

この比較結果から、従来は能力余力とロットサイズが小さめな設定であったことが判る。能力余力が計画立案者の経験則に基づく設定であったため、裏付けのある定量的思考から改善が得られたことは非常に有意義と考える。一方、ロットサイズ変更は治具・台車などの改造を要する場合もあり、容易な変更が難しいパラメータである。本事例も例外ではなく、実際の導入には代車改造などの準備を要したため、ロットサイズが設備稼働時から不変であったのは致し方ないと思う。

以上より、第4章で示した座席枠設定方法(過不足のない管理パラメータの探索方法)が、実工程においても有効であることを明らかにした。

### 5.3 一般環境への座席枠設定方法の提案

前節では、第4章で示した座席枠設定方法を実工程へ適用した事例を報告し、総合評価指標である管理費用指数 $ID_{CC}$ を大幅に削減できたという結果が示された。しかしながら、この適用結果は限られた条件下での一例であるため、本節では一般の見込生産環境にも汎用的に適用できる座席枠設定方法を提案する。まず、5.3.1項と5.3.2項にて生産モデル定式化および評価指標重要度に関する注意事項を述べ、5.3.3項で提案方法について述べる。

### 5.3.1 生産モデルの定式化における注意事項

市場環境のモデル化については需要の到着をどの様に設定するかが重要となり、本論文では実需要量がアーラン分布に従うものとすることを推奨する。これは、実需要の到着が前日の需要に関係しない完全なランダムではなく、前の到着に多少なりとも影響を受けるものと考えためであり、フェイズを変更することで様々な市場環境を再現することが可能となるためである。シミュレーション実験を行う前に予備実験として需要の到着傾向を実データと比較しておけば、その再現性をより高めることができる。また需要予測については、実需要との誤差を正規分布に従うものと仮定し、実データからそのバラつき程度(変動係数)を設定すれば良い。実際の製造工程においては営業の需要予測に基づいて生産能力を予め検討する場合が大半であるため、予実差からある程度の傾向は把握できるものとする。

次に製造環境について、見込生産環境といえども多くの製品は加工速度の異なる複数工程を経て生産される場合が多い。例えば前節の対象工場の場合、コンベヤ製品の元となる網(元網)の製造、元網切断後のエンドレス加工工程、樹脂部品などの溶着工程、最終仕上工程の4工程が存在するが、これらはいずれも異なる製造設備で加工している。多くの場合、工程全体の生産能力はボトルネック工程の生産能力に依存するという考えが成り立つため、ボトルネック工程の生産計画に他の工程の生産計画を合わせることで生産計画の同期化となる。即ち、ボトルネック工程に着目した生産モデルの定式化を行うことが重要となる。

管理パラメータや評価指標の設定について、実際の製造工程では第3章の生産モデルの様な3つの管理パラメータや4つの評価指標に収まるものではなく、その他にも多くのパラメータや指標が存在することが自明であるが、あまり複雑に生産モデルを組立ててしまうと、最終的に目的とする最適化問題の難易度が格段に上がってしまうため、それぞれ3~4個程度に絞ることを推奨する。後述の評価指標重要度については製造や生産管理だけでなく営業も含めた生販部門による協議を提案するが、この管理パラメータおよび評価指標の設定については製造環境の再現が主となるため、生産部門中心に協議・検討すればよい。

これらは特別な注意事項ではないが、実際の製造工程、特に中小企業においては検討時点での考えが散乱してしまう場合が多く見受けられるため、予め整理することを意図して述べておく。

### 5.3.2 評価指標の一对比較における注意事項

AHPにおいて、主たる過程は階層化、評価基準重要度の設定、各評価基準における代替案重要度の設定、総合化、整合性の確認となる[117]が、評価基準重要度の設定と各評価基準における代替案重要度の設定で行う一对比較が重要である。これらはいずれも定量的指標による比較が望ましいが、特に前者は前章記載の通り、品切れによる営業損害が費用損失だけでなく信用問題にも直結したり、在庫保管と段取替え作業負荷の損失具合を単純に比較することが困難だったり定性的側面も持ち合わせるため、その設定には十分な検討を要する。

本論文では、対象工場の営業・製造・生産管理部門の各責任者と協議し、評価指標の一对比較を総当たりで行い、得られた一对比較行列を部署内に展開、三者にて妥当と判断されるまで



ブラッシュアップを繰り返して設定したが、複数人それぞれの対比較結果を幾何平均によって要素値を得る手法も存在する[113]。この対比較における幾何平均法は検討者が十数名程度までであれば有効とされているが、検討者が4~5名程度であれば個の考えによる平均値の偏りが懸念されるため、本論文の様にブラッシュアップしていく方法を推奨する。特に中小企業においては、このような案件を検討する人員はそれほど多くない場合が想定されるため、少数による検討結果を部署内に展開してブラッシュアップしていく方が短時間で策定しやすいものとする。

いずれにせよ、定性的側面も持ち合わせる評価指標の対比較は従業員間に十分な納得感が得られる様に配慮すべきであり、この設定が最終結果に大きく影響しかねないため、十分な検討を要する項目であることを強調しておく。

### 5.3.3 座席枠設定方法の提案

以上の注意点を踏まえ、見込生産環境下での生産座席システムにおける、実際の製造工程に対して適用可能かつ過不足のない座席枠設定方法として、以下方法を提案する。

- (1) 市場環境と生産環境の定式化を行い、AHPの問題を「管理パラメータの選択」として階層化する。

AHPでは管理パラメータや評価指標の数を重要と位置付けられるものに絞り込むことができるが、次項で述べるシミュレーション実験の複雑さを考慮すると管理パラメータは3~4個程度に絞ることが望ましい。また、この時点では生産部門を中心としてモデル化すれば良い。

評価指標の選定については、生販部門どちらか一方の検討のみだと偏りが生じ得るため、両者協議のうえで決定すべきである(双方の見解を整理することが可能な生産管理部門が参画すると尚良い)。多くの場合は複数の指標が選定されることになると考えられるが、これも多過ぎると問題が複雑となるため、管理パラメータと同様に3~4個程度に絞ることが望ましく、さらに、後の総合評価のため望小もしくは望大のどちらかに統一することを推奨する。

- (2) 評価指標の重要度を対比較表(表5-4)に基づいて比較し、定量化する。

恣意性を排除するためには複数名で協議することが望ましいが、人数が多すぎると合意形成が難しくなるため、主要部門の責任者数名(多くても十数名)と協議することを推奨する。検討者が少数であればその結果の部署内展開による検討案のブラッシュアップを行うべきであり、十数名程度であれば幾何平均法[113]を用いることも有効である。

- (3) シミュレーション実験により、管理パラメータが評価指標へ及ぼす影響や、同一評価指標における管理パラメータの影響度合の比較などを行う。

(1)で行った市場環境と生産環境の定式化からシミュレーション実験を行うが、AHPを適用することによって、第2章や第3章で行った様な各管理パラメータと評価指標それぞれとの関係を数多く評価する必要はなく、各評価指標に対する各管理パラメータの重要度を対比較するために十分なデータがあればよい。



実需要のバラつきや需要予測の誤差、管理パラメータの現実的な範囲などを確認するための予備実験を事前に行うことによって、実験回数を出来るだけ少なく抑えることが期待できる。

- (4) (3)の結果を用いて管理パラメータの重要度を定量化し、総得点を評価する。

表 5-4 の一対比較の値に従って、(3)で行ったシミュレーション実験結果(前章で開設した図 5-3 の様なグラフの傾きなど)に注目して、表 5-1 の様な AHP の総合得点表を作成する。

- (5) 各一対比較の整合性を確認し、より重要な評価指標と管理パラメータを特定する。

式(5.20)で示される整合度CIを求め、 $CI < 0.100$ の場合は「許容できる整合性のずれ」と判断して次の段階に進み、そうでなければ各一対比較を見直す必要がある。

$$CI = \frac{(\text{相加平均} - \text{評価項目数})}{(\text{評価項目数} - 1)} \quad (5.20)$$

- (6) 特定された評価指標を最適化する管理パラメータを探索する。

優先すべき評価指標が複数ある場合、それらを一元的に評価する指標を設定し、それを最適化する管理パラメータを探索する。なお、AHP アプローチにはいくつかの種類があ

表 5-4 一対比較値

| 一対比較値      | 意味                      |
|------------|-------------------------|
| 1          | 両方の項目が同じくらい重要           |
| 3          | 前(左)の項目が後(上)の項目より若干重要   |
| 5          | 前(左)の項目が後(上)の項目より重要     |
| 7          | 前(左)の項目が後(上)の項目よりかなり重要  |
| 9          | 前(左)の項目が後(上)の項目より絶対的に重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 上記に対して補間的に用いる           |
| 上記数値の逆数    | 後項目から前項目を見た場合に用いる       |

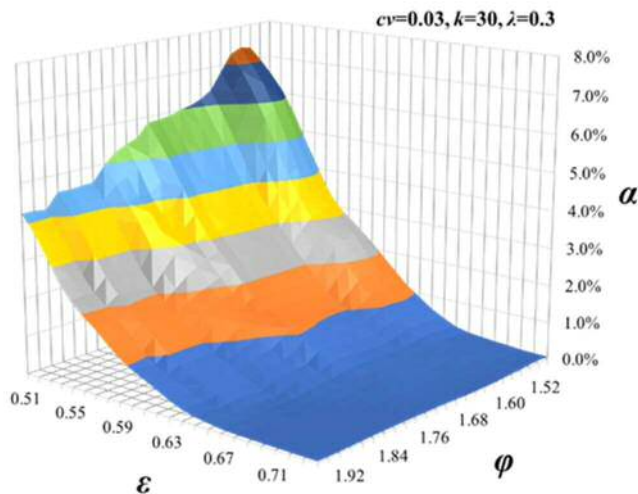


図 5-3 実験結果の一例

り、一度実施して完了するものではなく継続的にブラッシュアップしていくことが AHP の原則となる[117]ため、どのアプローチが最適かは実工程の状況に応じて選択する必要がある。また、管理パラメータ探索値を実装した後も、引き続き本提案方法を繰り返すことで精度向上を図ることが求められる。

#### 5.4 本章のまとめ

本章では、第 4 章で示した過不足のない管理パラメータ値の探索方法を実工程へ適用した事例を報告し、総合評価指標の改善効果が示されたことで、本論文が提唱する座席枠設定方法の実効性を明らかにした。また、一般の見込生産環境にも汎用的に適用できる座席枠設定方法を提案した。これらは計画立案者の経験則に代わる過不足のない座席枠設定として提案することができ、実際の製造工程における意思決定の一助になるものとする。

## 第6章 結論

本論文は、見込生産環境下の生産座席システムを対象に、一般の製造工程に対して汎用的に適用できる、過不足のない座席枠設定のための管理パラメータ値の探索方法を提案することを目的としており、計画立案者の意思決定となる能力余力やロットサイズなど生産能力を決定する管理パラメータをどの様に設定すべきかについて論じた。まず、品切れなどの評価指標に対して、各管理パラメータが及ぼす影響について明らかにし、総合評価指標(品切れや在庫など複数の評価指標を総合的に評価する指標)を最小化する管理パラメータ値の探索方法を過不足のない座席枠設定として明らかにした。さらに、階層分析法(以下、AHP と略す)を用いることで重要な管理パラメータと評価指標を絞り込み、そこで得られた重要度から総合評価指標を最小化する管理パラメータの探索方法についても提案した。以上より、本論文から得られた主な知見を以下に述べる。

第2章では、能力余力と基準在庫の管理パラメータが品切れと在庫の評価指標に与える影響を評価し、能力余力が在庫増大を抑制しつつ品切れ低減に寄与することを明らかにしたうえで、基準在庫による単純な在庫増や品切れ減の効果よりも有益であることを示した。また、品切れと在庫のトレードオフ関係を総合的に評価する方法を示し、その総合評価指標を最小化する管理パラメータの存在も明らかにした。さらに、重回帰分析による総合評価指標を最小化する管理パラメータの推定方法も示し、先行研究の多くが適切と考えられる管理パラメータの存在範囲提示に留まるのに対し、より具体的な管理パラメータの推定値が得られることを示した。以上から従来方法に代わる過不足のない座席枠設定を提案し、計画立案者の意思決定に対する一助を示すことができた。

第3章では、第2章の生産モデルを、固定ロットサイズ生産と補充生産方式を適用した、より実工程の製造環境に近いモデルに拡張した。具体的には、ロットサイズを決定する管理パラメータと、段取替え作業負荷および空席に関する評価指標を追加して、実在工場のモデルに近づけている。特に段取替え作業に関して、製品群と品種の組合せから規模の異なる段取替えが生じることを定式化し、出来る限り大規模な段取替えが生じないディスパッチングルールも設けた。さらに、そのモデルを基にシミュレーション実験を行い、能力余力と基準在庫およびロットサイズの管理パラメータが、品切れと在庫、段取替え作業負荷および空席の4種の評価指標に及ぼす影響を明らかにした。特にロットサイズについては、段取替え作業負荷を低減するだけでなく、他の評価指標(品切れ、在庫、空席)に関して極値を持つ関係であることが明らかとなり、適切なロットサイズの設定が重要となることを示した。また、能力余力が空席を増加させてしまうだけでなく、段取替え作業負荷の増加を招いたり、基準在庫に段取替え作業負荷や空席を減少させる効果があったりといった評価についても明らかにすることができた。しかしながら、この生産モデル拡張によって管理パラメータと評価指標が増え、第2章で行った総合評価指標を最小化する管理パラメータの最適化問題はより複雑となった。その対応として、得られた実験結果から各評価指標を低く抑えられている管理パラメータのデータを抽出し、応答曲面法によって曲面に近似することで、関連費用(各評価指標から成るペナルティ費用の合計)を目標値以下に抑えるための管理パラメータ値が、定量的かつ視覚的に探索できることを示した。

第4章では、第3章で示した提案方法において課題とされた、総合評価指標の設定が計画立案者の経験則に基づくものであるという恣意性(曖昧さ)をより定量的なものに改善するため、AHPを適用した座席枠設定について提案した。実工程における管理パラメータや評価指標の重要度は製造・営業・生産管理などの部門(立場)ごとに異なるため、AHPを用いることで意思決定における曖昧さを排除した評価指標の重み付けが定量的に行えることを示した。さらに、その重み付けに対応した総合評価指標となる関連費用指数(品切れ数や段取替え作業負荷といった単位や発生頻度の異なる指標を一元的に評価できる指数)を用いることで、その総合評価指標を最小化する管理パラメータ値が探索できることも示した。なお、AHPの適用によって、元々の4評価指標(目的関数)と3管理パラメータ(説明変数)から成る組合せ最適化問題から、各々2種類の目的関数と説明変数の問題に近似できることも明らかにしている。AHPを用いることで管理パラメータや評価指標の重要度が算出でき、重要な項目を定量的に絞り込むことが可能であることを示した点は、実工程における計画立案者の意思決定に対して一助になるものと考えられる。

第5章では、第4章で示した管理パラメータ値の探索方法を実工程へ適用した事例を報告し、総合評価指標の改善効果が示されたことで、本論文が示すシミュレーションデータを用いた、AHPの適用による座席枠設定方法の実効性を明らかにした。適用結果として、在庫と遊休(空席)は増加したが、AHPで重要度が高いとされた品切れと段取替え作業を低減できたという改善効果が得られている。さらに、生産モデル定式化と評価指標の重要度に関する注意事項を述べたうえで、一般の見込生産環境にも汎用的に適用できる座席枠設定方法を提案した。

以上から、見込生産環境下の生産座席システムにおける過不足のない座席枠設定方法を、実際の一般的な製造工程に対して汎用的に適用できる方法として提案することができた。これは、計画立案者が抱える意思決定問題を支援するための重要な一助になるものと考えられる。

今後の課題として、本論文では普遍的視点による従来型のAHPを適用した座席枠設定について述べたが、AHPには他にも幾つかの手法(例:支配型AHPなど)が存在する。AHPアプローチは一度実施して完了するものではなく、様々な種類を継続的にブラッシュアップしていくことが必要であるため、他の手法による重要度の算出方法についても引き続き検討しなければならない。さらに、多段階製造工程間の生産座席システム連動についても今後の課題である。本論文では多段階製造工程内のボトルネック工程に適用される生産座席システムのみを対象とし、それ以外の工程は十分な能力を有することから対象外としていたが、生産座席システムの第一の特徴は「生産計画の可視化」である。この特徴を活用することで、生産座席システムは同一工場内の他工程だけでなく、前後工程に当たる協力会社なども生産計画を共有することが期待できる。複数の生産座席システムを連動させることが叶えば、サプライチェーンマネジメントに対しても有効であると考えられる。また、本論文はシミュレーションに基づく考察が中心であったため、これを数学的に最適化するアプローチにも取り組みたい。見込生産環境に限らず、注文生産や見込・注文複合生産を対象とした様々な先行研究でも、シミュレーションを中心に議論している研究が多いため、数学的アプローチによる最適化が叶えば、これまでの研究に対して更なる一助を示すことができるものと考えられるため、これらを今後の課題と提議し、本論文を結ぶ。

## 参考文献

- [1] 公益社団法人日本経営工学会:「ものづくりに役立つ経営工学の辞典」, 朝倉書店 (2014) (ISBN 9784254270228)
- [2] 内閣府:“2019 年度国民経済計算” (2020),  
[https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/\\_list/kakuhou/files/2019/2019\\_kaku\\_top.html](https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/_list/kakuhou/files/2019/2019_kaku_top.html)  
(参照 2021-07-16)
- [3] 中小企業庁:“2021 年度版中小企業白書-産業別規模別企業数-” (2021),  
<https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/2021/chusho/f1.html> (参照 2021-07-16)
- [4] 経済産業省大臣官房調査統計グループ:“平成 30 年工業統計速報” (2019),  
<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyou/result-2/h30/sokuho/pdf/h30s-hb.pdf>  
(参照 2021-07-16)
- [5] 関 智宏:「よくわかる中小企業」, ミネルヴァ書房, pp. 112-117 (2020)  
(ISBN 9784623088225)
- [6] 赤松建治, 筒井 徹, 藤野洋, 江口政宏:「いま中小企業ができる生産性向上:連携組織・IT・シェアリングエコノミーの活用」, 商工総合研究所, pp. 123-126 (2019)  
(ISBN 9784901731300)
- [7] 園川隆夫, 黒田 充, 福田好朗:「生産管理の辞典」, 朝倉書店 (1999)  
(ISBN 9784254270013)
- [8] 松島克守:「CIM 製造業の情報戦略」, 工業調査会 (1987) (ISBN 9784769350231)
- [9] 杉川 智, 諏訪晴彦:“動的スケジューリングに対するハイブリッド・タイミング方策(単一機械モデルへの適用):単一機械モデルへの適用”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 740, pp. 1026-1033 (2008), <https://doi.org/10.1299/kikaic.74.1026>
- [10] Veatch M. H. and Vericourt F. D.:“Zero-inventory Conditions for a Two-part-type Make-to-stock Production System”, *Queueing Systems*, Vol. 43, No. 3, pp. 251-266 (2003),  
<https://doi.org/10.1023/A:1022846711722>
- [11] 大橋和正:“単一多能生産システムにおける動的工程計画法”,  
日本経営工学会論文誌, Vol. 53, No. 5, pp. 378-384 (2002),  
<https://doi.org/10.11221/jima.53.378>
- [12] Agnes P. P. and Paul Z.:“Dynamic Scheduling Rules for a Multiproduct Make-to-Stock Queue”, *Operation Research*, Vol. 45, No. 6, pp. 919-930 (1997),  
<https://doi.org/10.1287/opre.45.6.919>
- [13] 李 康雨, 金 正子:“調達期間中の需要が不確実な状況下での線形バックオーダー比率をもつ発注点モデル”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 51, No. 1, pp. 35-42 (2000),  
<https://doi.org/10.11221/jima.51.35>

- [14] 田村隆善, 藤田精一:“生産座席システムについての一考察”, *経営システム*, Vol. 4, No. 1, pp. 5-13 (1994)
- [15] 翁 嘉華, 赤坂信悟, 大成 尚:“ETO 生産における営業支援システムの開発”, *経営システム*, Vol. 28, No. 1, pp. 17-23 (2018)
- [16] 市村智孝, 坪根 斉:“階層構造を持つ製造の柔軟性の評価に関する研究”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 52, No. 4, pp. 221-230 (2001),  
<https://doi.org/10.11221/jima.52.221>
- [17] 孫 曦, 森澤和子, 長沢啓行:“機械指定型問題に対する近似解法の機械非指定型問題への拡張 : 加工-組立フローショップ・スケジューリング(第2報)”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 52, No. 3, pp. 154-162 (2001),  
<https://doi.org/10.11221/jima.52.154>
- [18] 森川謙志, 森澤和子, 長沢啓行:“総滞留時間の期待値:分散最小化の効率的な近似並列機械スケジューリング法”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 51, No. 6, pp. 566-573 (2001), <https://doi.org/10.11221/jima.51.566>
- [19] 渡辺浩司, 戸泉和也, 伊呂原隆:“非一様型並列機械において納期ずれ最小化を行うスケジューリング方法の提案”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 58, No. 5, pp. 333-341 (2007), <https://doi.org/10.11221/jima.58.333>
- [20] 新井裕明, 森戸 晋, 今泉 淳:“同一並列機械ロットスケジューリング問題への列成形法の適用”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 55, No. 2, pp. 69-76 (2004),  
<https://doi.org/10.11221/jima.55.69>
- [21] Tamura T., Fujita S. and Kuga T.:“The Concept and Practice of the Production Seat System”, *Managerial and Decision Economics*, Vol. 18, pp. 101-112 (1997),  
<https://www.jstor.org/stable/3108279> (参照 2021-07-26)
- [22] Kher H. V., Malhotra M. K. and Steele D. C.:“The Effect of Push and Pull Lot Splitting Approaches on Lot Traceability and Material Handling Costs in Stochastic Flow Shop Environment”, *International Journal of Production Research*, Vol 38, No. 1, pp. 141-160 (2000), <https://doi.org/10.1080/002075400189626>
- [23] Sennott L. I., Oyen M. P. V. and Iravani S. M. R.:“Optimal Dynamic Assignment of a Flexible Worker on an Open Production Line with Specialists”, *European Journal Operation Research*, Vol. 170, No. 2, pp. 541-566 (2006),  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.030>
- [24] Song P., Kong X. Yamamoto H., Sun J. and Matsui M.:“A Study on Three Rookie Workers' Assignment Optimization under the Limited-Cycled Model with Multiple Periods -Law of Rookie First-”, *Innovation and Supply Chain Management*, Vol. 9, No. 2, pp. 51-59 (2015),  
<https://doi.org/10.14327/iscm.9.51>

- [25] 趙 曉雯, 山本久志, 孫 晶, 大岡龍佑: “3 グループが存在するリセット多期間制約サイクルモデルにおける最適配置法則に関する研究 -2 グループの人数が少ない場合-”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 71, No. 3, pp. 111-122 (2020), <https://doi.org/10.11221/jima.71.111>
- [26] 堀川三好, 坪根 斉: “精密機器組立作業の多能工化のための Decision Support Systems の研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 53, No. 4, pp. 329-338 (2002), <https://doi.org/10.11221/jima.53.329>
- [27] 和田拓己, 荒川雅裕: “生産の平準化と仕掛り量最小化のための混流生産ラインの設計と評価”, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 835, pp. 1-13 (2016), <https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00492>
- [28] 熊谷 敏, 神谷喜穂, 大場允晶: “収益性を考慮した在庫価値評価モデル”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 68, No. 4, pp. 221-231 (2018), <https://doi.org/10.11221/jima.68.221>
- [29] 石垣 綾, 稲田周平, 平川保博: “応援作業者を活用した多段階生産ラインの設計”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 59, No. 5, pp. 376-382 (2008), <https://doi.org/10.11221/jima.59.376>
- [30] 坪根 斉, 筒 孝夫, 吉田知和: “固定計画法と再計画法の比較: 階層型生産計画システムに関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 42, No. 3, pp. 159-167 (1991), [https://doi.org/10.11221/jimapre.42.3\\_159](https://doi.org/10.11221/jimapre.42.3_159)
- [31] 坪根 斉, 木村経子: “生産計画の DSS コンセプトとプロトタイプ”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 43, No. 3, pp. 200-207 (1992), [https://doi.org/10.11221/jimapre.43.3\\_200](https://doi.org/10.11221/jimapre.43.3_200)
- [32] Tsubone H.: “Decision Support System for Production Planning -Concept and Prototype-”, *International Journal of Decision Support System*, Vol. 13, No. 2, pp. 207-216 (1995) [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(93\)E0037-E](https://doi.org/10.1016/0167-9236(93)E0037-E)
- [33] 古田博久, 長森康英, 坪根 斉, 松浦春樹: “再計画法のタイミングに関する研究: 階層型生産計画システムに関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 47, No. 1, pp. 1-8 (1996), [https://doi.org/10.11221/jimapre.47.1\\_1](https://doi.org/10.11221/jimapre.47.1_1)
- [34] Tsubone H., Matsuura H. and Sato S.: “Component Commonality and Process Flexibility Affects on Manufacturing Performance”, *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 10, pp. 2479-2493 (1994), <https://doi.org/10.1080/00207549408957079>
- [35] 坪根 斉, 堀川三好, 田坂友幸: “共通化の階層的評価に関する研究-生産システムの柔軟性に関する研究-”, 日本ロジスティクス・システム学会誌, Vol. 44, No. 2, pp. 21-30 (2004), <https://doi.org/10.11221/jima.50.121>

- [36] 坪根 斉, 松浦春樹, 佐藤正一:“部品の共通化が製造のパフォーマンスに与える効果:階層型生産計画システムに関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 43, No. 2, pp. 117-123 (1992), [https://doi.org/10.11221/jimapre.43.2\\_117](https://doi.org/10.11221/jimapre.43.2_117)
- [37] 佐藤正一, 堀川三好, 金沢 孝, 菅原光政:“需要に季節変動がある場合の生産システムに関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 56, No. 2, pp. 65-73 (2005), <https://doi.org/10.11221/jima.56.65>
- [38] 富山伸司, 北條成人, 山口収, 村松健児:“動的ロットサイズスケジューリング手法の鉄鋼プロセスへの応用”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 70, No. 4, pp. 185-196 (2020), <https://doi.org/10.11221/jima.70.185>
- [39] 的場秀彰, 大成 尚, 榎本充博:“生産座席決定のための生産計画システム”, 経営システム, Vol. 4, No. 1, pp. 25-30 (1994)
- [40] 児玉公信, 水野忠則:“少量多品種型生産管理システム一般モデル CHARM の提案”, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 2, pp. 902-909 (2008)  
<http://id.nii.ac.jp/1001/00009674/> (参照 2021-08-02)
- [41] 中邨良樹, 大場允晶:“PW 企業の 3D プリンター生産に伴う生産座席システムの適用と考察”, 横幹(横断型基幹科学技術研究団体連合会誌), Vol. 10, No. 2, pp. 100-106 (2016), [https://doi.org/10.11487/trafst.10.2\\_100](https://doi.org/10.11487/trafst.10.2_100)
- [42] 大宮 望:“プラスチックワイヤー企業のデータを用いた拡張型生産座席システムシミュレーションモデルの構築”, 日本工業大学研究報告, Vol. 49, No. 4, pp. 88-89 (2020)
- [43] 松浦純一:“生・販・技統合型 CIM—東芝・青梅工場における構築事例—”, オートメーション, Vol. 37, No. 8, pp. 29-43 (1992)
- [44] 阿久澤正:“生産座席による生販統合型 CIM”, ファクトリ・オートメーション, Vol. 11, No. 1, pp. 41-44 (1993)
- [45] 高島芳樹:“生産・販売の統合による経営効率の向上—東芝・青梅工場の CIM—”, オペレーションズ・リサーチ経営の科学, Vol. 38, No. 6, pp. 279-285 (1993)
- [46] 阿久澤正:“電算機生産における生産座席予約システム”, 経営システム, Vol. 4, No. 1, pp. 14-19 (1994)
- [47] 大場允晶, 李 慧子, 堀川三好, 中邨良樹:“見込生産環境における生産座席システムの研究”, 日本設備管理学会誌, Vol. 26, No. 2, pp. 49-55 (2014), <https://doi.org/10.11221/jima.52.53>
- [48] 黒屋珠緒, 坪根 斉, 堀川三好, 松浦春樹:“飛び込みオーダーがある場合のオーダーリリース方式の選択に関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 51, No. 1, pp. 42-52 (2000), <https://doi.org/10.11221/jima.51.43>
- [49] Hozak K. and Hill J. A.:“The Material Handling Trade-off when Lot Splitting with RFID in a Jobshop”, *International Journal of Production Research*, Vol. 48, No. 9, pp. 2723-2743 (2010), <https://doi.org/10.1080/00207540903527386>



- [50] Suwa H. and Sandoh H.: “Capability of Cumulative Delay Based Reactive Scheduling for Job Shops with Machine Breakdowns”, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 53, No. 1, pp. 63-78 (2007), <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.04.002>
- [51] Zhang Z. G., Kim I., Springer M., Cai G. and Yu Y.: “Dynamic Pooling of Make-to-stock and Make-to-order Operations”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 144, No. 1, pp. 44-56 (2013), <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.01.012>
- [52] 冬木正彦, 井上一郎: “バックワード/フォワード・ハイブリッドシミュレーション法に基づく個別受注生産における納期重視型生産スケジューリング”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 46, No. 2, pp. 144-151 (1995), [https://doi.org/10.11221/jimapre.46.2\\_144](https://doi.org/10.11221/jimapre.46.2_144)
- [53] 片岡 清, 黒屋珠緒, 坪根 斉, 松浦春樹: “リリース方式の違いがリードタイムおよび納期遅れ率に与える影響: ショップフロア・コントロールに関する研究”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 47, No. 1, pp. 17-25 (1996), [https://doi.org/10.11221/jimapre.47.1\\_17](https://doi.org/10.11221/jimapre.47.1_17)
- [54] Tsubone H.: “The Impact of Order Release Strategies on the Manufacturing Performance for Shop Floor Control”, *Production Planning & Control*, Vol. 10, No. 1, pp. 58-66 (1999), <https://doi.org/10.1080/095372899233433>
- [55] 堀川三好, 坪根 斉: “マシーン・フレキシビリティ, ルーティング・フレキシビリティおよびボリューム・フレキシビリティが製造のパフォーマンスに与える影響について”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 50, No. 2, pp. 88-96 (1999), <https://doi.org/10.11221/jima.50.88>
- [56] 佐藤正一, 堀川三好, 福田修一: “金属加工工程におけるオペレーショナル・フレキシビリティの研究”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 54, No. 6, pp. 357-364 (2004), <https://doi.org/10.11221/jima.54.357>
- [57] 伊呂原隆, 菱倉将史, 山下英明: “ロット分割における材料移動とリードタイムのトレードオフを考慮したマテリアルハンドリングルール(理論・技術)”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 62, No. 6, pp. 256-266 (2012), <https://doi.org/10.11221/jima.62.256>
- [58] 長森康英, 坪根 斉: “見込・注文複合生産計画システムに関する研究: 階層型生産計画システムに関する研究”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 48, No. 2, pp. 133-139 (1997), <https://doi.org/10.11221/jima.48.133>
- [59] 長森康英, 坪根 斉: “注成品に飛び込みがある場合の見込・注文複合生産システムの設計に関する研究”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 50, No. 4, pp. 235-242 (1999), <https://doi.org/10.11221/jima.50.235>
- [60] 石川 裕, 坪根 斉: “製品設計の違いが製造のパフォーマンスに与える影響-見込・注文複合生産システムの設計に関する研究-”, *日本経営工学会論文誌*, Vol. 52, No. 3, pp. 54-59 (2000), <https://doi.org/10.11221/jima.52.180>

- [61] Wu M. C., Jiang J. H. and Chang W. J.: "Scheduling a Hybrid MTO/MTS Semiconductor Fab with Machine-dedication Features", *International Journal of Production Economics*, Vol. 112, No. 1, pp. 416-426 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.04.008>
- [62] 神田翔平, 高橋勝彦, 森川克己: "動的 MTS/MTO ハイブリッドシステムに対する在庫管理方針", 日本経営工学会論文誌, Vol. 67, No. 1, pp. 20-28 (2016), <https://doi.org/10.11221/jima.67.20>
- [63] 野中洋一, Lengyel A., 杉本浩: "生産変動可視化技術を用いた津波現象の特定", 日本経営工学会論文誌, Vol. 59, No. 5, pp. 383-390 (2008), <https://doi.org/10.11221/jima.59.383>
- [64] 坪根 斉: 「生産管理システム入門」, 工学図書 (2000) (ISBN 9784769204091)
- [65] 岡庭正臣: "CIM による部門間の連携と分散システム", オートメーション, Vol. 38, No. 4, pp. 10-14 (1993)
- [66] 久我健夫: "個別受注生産に於ける生産管理システム-豊田工機座席指定システムによる負荷の平準化-", 経営システム, Vol. 4, No. 1, pp. 20-24 (1994)
- [67] Narashimhan S. L. and Mangiameli P. M.: "A Comparison of Sequencing Rules for a Two-stage Hybrid Flow Shop", *Decision Sciences*, Vol. 18, No. 2, pp. 250-265 (1987), <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1987.tb01520.x>
- [68] Guinet A. G. P. and Solomon M. M.: "Scheduling Hybrid Flow Shops to Minimize Maximum Tardiness or Maximum Completion Time", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 1643-1654 (1996), <https://doi.org/10.1080/00207549608904988>
- [69] Tsubone H., Ohba M., Takamuki H. and Miyake Y.: "Production Scheduling System in the Hybrid Flow Shop –A Case Study", *Omega*, Vol. 21, No. 2, pp. 205-214 (1993), [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(93\)90053-N](https://doi.org/10.1016/0305-0483(93)90053-N)
- [70] Tsubone H., Suzuki M., Ohba M. and Uetake T.: "A Comparison between Basic Cyclic Scheduling and Variable Cyclic Scheduling in a Two-stage Hybrid Flow Shop", *Decision Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 197-222 (2000), <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2000.tb00930.x>
- [71] 大場正明, 植竹俊文, 坪根 斉: "製造連と投入順序付けが製造のパフォーマンスに与える影響", 日本経営工学会論文誌, Vol. 46, No. 3, pp. 175-181 (1995), [https://doi.org/10.11221/jimapre.46.3\\_175](https://doi.org/10.11221/jimapre.46.3_175)
- [72] Uetake T., Tsubone H. and Ohba M.: "A Production Scheduling System in a Hybrid Flow Shop", *International Journal of Production Economics*, Vol. 41, pp. 395-398 (1995), [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(94\)00081-6](https://doi.org/10.1016/0925-5273(94)00081-6)

- [73] 松本卓夫, 久保寺静, 志田敬介, 松川弘明: “プロセスチーズ工場における 2 工程ライン設計問題に関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 72, No. 1, pp. 65-74 (2021), <https://doi.org/10.11221/jima.72.65>
- [74] 藺 嘉, 田中瑛理, 佐々木優, 森江 翔, 有馬澄佳: “複数種のリソースを共有する多品種生産システムの分散協調スケジューリングー自動車部品あと補充生産への適用ー”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 72, No. 1, pp. 75-87 (2021), <https://doi.org/10.11221/jima.72.75>
- [75] 石渕久生, 村田忠彦: “多目的フローショップ・スケジューリング問題のための遺伝的局所探索法”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 48, No. 6, pp. 301-313 (1998), <https://doi.org/10.11221/jima.48.301>
- [76] 今泉 淳, 森戸 晋: “ジョブの分岐と重複生産を許す 2 工程並列機械フローショップスケジューリング問題: 分枝限定法によるアプローチ”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 50, No. 5, pp. 308-315 (1999), <https://doi.org/10.11221/jima.50.308>
- [77] 今泉 淳, 森戸 晋: “ジョブの分岐と時間重複生産を許す 2 工程並列機械フローショップスケジューリング問題: 納期遅れ最小化に対するラグランジュ緩和に基づくヒューリスティックアプローチ”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 52, No. 5, pp. 263-272 (2001), <https://doi.org/10.11221/jima.52.263>
- [78] Arima S. and Saito K.: “Operator Allocation Planning for a Product-Mix VLSI Assembly Facility”, *IEICE Transactions o Electronics*, Vol. E84-C, No. 6, pp. 832-840 (2001) [https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e84-c\\_6\\_832](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e84-c_6_832) (参照 2021-08-14)
- [79] Urbani A. : “Life Cycle Cost Calculation for Manufacturing Systems by Means of Reconfigurability Analysis”, *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, Springer Verlag Berlin / Heidelberg, pp. 643–658 (2006) (ISBN 978-3-540-29397-2 )
- [80] 原嶋 茂, 大野勝久: “デンソーで開発・実用化された柔軟な生産システムの再形態変化可能性”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 60, No. 6, pp. 306-317 (2010), <https://doi.org/10.11221/jima.60.306>
- [81] 市来寄治, 片桐健悟, 稲田周平, 河野宏和: “滞留量に着目した並列型フローシステムへの流動数分析の応用方法”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 68, No. 3, pp. 191-200 (2017), <https://doi.org/10.11221/jima.68.191>
- [82] 佐藤正一, 坪根 斉, 松浦春樹: “部品の共通化と工程の共通化が製造のパフォーマンスに与える効果: 階層型生産計画システムに関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 45, No. 1, pp. 549-550 (1994), [https://doi.org/10.11221/jimapre.45.1\\_41](https://doi.org/10.11221/jimapre.45.1_41)

- [83] 植竹俊文, 坪根 斉, 大場正明:“基本サイクリック・スケジューリング方式と変則サイクリック・スケジューリング方式との比較:ハイブリッド・フローショップの生産日程計画システムの研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 46, No. 4, pp. 276-283 (1995)  
[https://doi.org/10.11221/jimapre.46.4\\_276](https://doi.org/10.11221/jimapre.46.4_276)
- [84] 鈴木正彦, 坪根 斉, 大場正明, 植竹俊文:“製品在庫量と中間在庫量の関係:ハイブリッド・フローショップの生産日程システムの研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 47, No. 6, pp. 359-366 (1997), <https://doi.org/10.11221/jima.47.359>
- [85] 鈴木正彦, 坪根 斉:“計画変更と安全在庫量との関係:ハイブリッド・フローショップの生産日程システムの研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 11-19 (1999),  
<https://doi.org/10.11221/jima.50.11>
- [86] 大森弘之, 坪根 斉:“負荷量のアンバランスを考慮に入れたロットスケジューリング方式”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 51, No. 4, pp. 356-364 (2000),  
<https://doi.org/10.11221/jima.51.356>
- [87] 大場正明, 植竹俊文, 坪根 斉:“生産能力と計画達成率との関係:ハイブリッド・フローショップの生産日程計画システムの研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 46, No. 4, pp. 557-564 (1996), [https://doi.org/10.11221/jimapre.46.6\\_557](https://doi.org/10.11221/jimapre.46.6_557)
- [88] 大場正明, 坪根 斉, 植竹俊文:“カラーフィルム生産における生産座席システムの利用”, 日本ロジスティクスシステム学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 25-30 (2000)
- [89] 小林義和, 坪根 斉:“見込・注文複合生産システムにおける生産座席システムに関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 52, No. 1, pp. 53-59 (2001),  
<https://doi.org/10.11221/jima.52.53>
- [90] Tsubone H. and Kobayashi Y.:“Production Seat Booking System for the Combination of Make-To-Order and Make-To-Stock Products”, *Production Planning & Control*, Vol. 13, No. 4, pp. 394-400 (2002), <https://doi.org/10.1080/09537280210130487>
- [91] 小林義和, 坪根 斉:“多段階製造工程における生産座席システム設計に関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 53, No. 4, pp. 273-281 (2002),  
<https://doi.org/10.11221/jima.53.273>
- [92] 大場允晶:“生産座席システムにおける内乱下での再調整法の設計に関する研究”, 日本大学経済学部経済集志, Vol. 72, No. 4, pp. 93-102 (2003)
- [93] 大場允晶, 新井一貴, 坪根 斉:“柔軟性を組み込んだ生産座席システムに関する研究:写真用カラーフィルム製造を事例にして”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 54, No. 3, pp. 176-183 (2003), <https://doi.org/10.11221/jima.54.176>
- [94] Uetake T., Ohba M., Yamamoto H., Sugawara H. and Kawakami M.:“A New Approach for Production Control with Production Booking Seat System”, *International Congress on Logistics and SCM System* (2004)

- [95] 大場正明, 植竹俊文, 坪根 斉: “生産計画と計画達成率との関係”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 46, No. 6, pp. 557-564 (1996), [https://doi.org/10.11221/jimapre.46.6\\_557](https://doi.org/10.11221/jimapre.46.6_557)
- [96] 黒田 充: “生産スケジュールリングの方法”, 経営システム, Vol. 5, No. 1, pp. 5-14 (1995)
- [97] Tsubone H., Matsuura H. and Kanda M.: “Interactive Due Date Management System”, *Omega*, Vol. 20, No. 1, pp. 89-98 (1992), [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(92\)90058-F](https://doi.org/10.1016/0305-0483(92)90058-F)
- [98] 社団法人日本経営工学会: 「生産管理用語辞典」, 日本規格協会 (2002) (ISBN 978-4-5422-0154-5)
- [99] Uetake T., Ohba M. and Yamamoto H.: “A Study on the Design of Readjusting Method in the Production Seat System”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol. 56, No. 6, pp. 421-428 (2006), <https://doi.org/10.11221/jima.56.421>
- [100] 植竹俊文, 伊藤大輔, 大場允晶, 山本久志, 川上満幸: “製造工程に変動要因が発生する場合の生産座席システムの設計に関する研究”, 日本ロジスティクスシステム学会誌, Vol. 5, No. 2, pp. 29-36 (2005)
- [101] 大倉弘樹, “専門家の勘を利用したアパレル製品の最適見込生産量”, 日本生産管理学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 9-14 (2001),
- [102] 広谷 大助, 森川 克己, 高橋 勝彦: “ボトルネック区間が存在する自己バランスラインの解析”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 61, No. 1, pp. 1-10 (2005), <https://doi.org/10.11221/jima.61.1>
- [103] Saaty T. L.: “How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process”, *Inform Journal on Applied Analytics*, Vol. 24, No. 6, pp. 19-43 (1994), <https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19>
- [104] 黒田 充: “APS の論理構造－MRP からの離脱－”, オペレーションズ・リサーチ経営の科学, Vol. 49, No. 9, pp. 563-568 (2004)
- [105] Ohba M., Uetake T. and Tsubone H.: “Logistics Innovation the Film Manufacturing Industry”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 11, No. 2 (2000), <https://doi.org/10.1108/09576060010314099>
- [106] Li L. and Chen Z.: “Lead-time, Capacity and Pricing Decisions for the Production Seat Booking System”, *17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (2010)
- [107] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M. and Horikawa M.: “A Study on the Seat Setting of the Production Seat Booking System”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol. 68, No. 2E, pp. 139-148 (2017), <https://doi.org/10.1080/09537280210130487>
- [108] 林 千宏, 山本久志, 大場允晶, 丸山友希夫, 中邨良樹: “固定ロットサイズ見込生産環境における生産座席システム設計方法の提案”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 72, No. 2, pp. 110-122 (2021), <https://doi.org/10.11221/jima.72.110>

- 
- [109] 大場允晶, 藤川裕晃:「生産マネジメント概論－技術編－」, 文眞堂ブックス, pp. 225-226 (2009) (ISBN 9784830946585)
- [110] 山田 秀, 立林和夫, 吉野睦:“パラメータ設計・応答曲面法・ロバスト最適化入門”, 日科技連, pp. 107-114 (2011) (ISBN 9784817194053)
- [111] 林 千宏, 山本久志, 大場允晶, 佐藤正一:“生産座席システムにおける階層分析法を用いた座席枠設定”, 日本経営工学会 2021 年秋季大会(オンライン), pp. 174-175 (2021)
- [112] 刀根 薫:「ゲーム感覚意思決定法-AHP 入門」, 日科技連(1986) (ISBN 9784817122145)
- [113] 木下栄蔵:「AHP の理論と実際」, 日科技連(2000) (ISBN 9784817150301)
- [114] 加藤 豊, 小沢正典:「OR の基礎 AHP から最適化まで」, 実教出版(1998) (ISBN 9784407023855)
- [115] 木下栄蔵:「マネジメントサイエンス入門-経営・政策科学の戦略モデル」, 近代科学社 (1996) (ISBN 9784764910393)
- [116] 木下栄蔵:「わかりやすい数学モデルによる多変量解析入門-第 2 版」, 近代科学社 (2009) (ISBN 9784764910379)
- [117] 木下栄蔵:「入門 AHP –決断と合成形成のテクニック-」, 日科技連 (2000) (ISBN 9784817150319)
- [118] 林 千宏, 山本久志, 大場允晶, 佐藤正一:“生産座席システムにおける階層分析法を用いた座席枠設定方法の提案および適用事例”, 日本設備管理学会 2021 年秋季研究発表大会 (オンライン), pp. 79-82 (2021)

## 付録1 記号一覧

| 記号                  | 名称   | 記号                | 名称                            |
|---------------------|--|-------------------|-------------------------------|
| $\alpha$            | 品切れ率   | $CI$              | 整合度                           |
| $\beta$             | 平均在庫率  | $cv$              | 需要予測のバラつき<br>(正規分布変動係数)       |
| $\gamma$            | 段取替え作業負荷率  | $CV$              | 実需要および需要予測のバラつき<br>(正規分布変動係数) |
| $\delta$            | 空席率  | $d_{h,j}$         | $j$ 日の製品 $h$ の実需要量            |
| $\varepsilon$       | 能力余力パラメータ ( $\varepsilon \geq 0$ )                         | $d_{h,t}$         | $t$ 週の製品 $h$ の実需要量            |
| $\hat{\varepsilon}$ | 総合評価指標を最小化する<br>能力余力パラメータ ( $\hat{\varepsilon} \geq 0$ )   | $\bar{d}_h$       | 週あたりの製品 $h$ の平均需要量            |
| $\varphi$           | 基準在庫パラメータ ( $\varphi > 0$ )                                | $\hat{d}_{h,t}$   | $t$ 週の製品 $h$ の需要予測量           |
| $\hat{\varphi}$     | 総合評価指標を最小化する<br>基準在庫パラメータ ( $\hat{\varphi} > 0$ )          | $D_{f,i,j}$       | $j$ 日の製品( $f, i$ )の実需要量       |
| $\lambda$           | ロットサイズパラメータ ( $0 < \lambda \leq 1$ )                       | $D_{f,i,t}$       | $t$ 月の製品( $f, i$ )の実需要量       |
| $\hat{\lambda}$     | 総合評価指標を最小化する<br>ロットサイズパラメータ ( $0 < \hat{\lambda} \leq 1$ ) | $\bar{D}_{f,i}$   | 1ヶ月あたりの製品( $f, i$ )の<br>平均需要量 |
| $\omega$            | 在庫保管料に対する<br>品切れのペナルティ費用の重み                                | $\hat{D}_{f,i,t}$ | $t$ 月の製品( $f, i$ )の需要予測量      |
| $\omega_\alpha$     | 品切れ重要度   | $f$               | 製品群を表す記号                      |
| $\omega_\beta$      | 平均在庫重要度  | $F$               | 製品群の数                         |
| $\omega_\gamma$     | 段取替え作業負荷重要度  | $f, i$            | 製品種類を表す記号                     |
| $\omega_\delta$     | 空席重要度  | $F \times I$      | 製品種類の数                        |
| $\omega_L$          | 小規模段取替え作業に対する<br>大規模段取替え作業負荷の重み                            | $h$               | 製品種類を表す記号                     |
| $\omega_M$          | 小規模段取替え作業に対する<br>中規模段取替え作業負荷の重み                            | $H$               | 製品種類の数                        |
| $A$                 | 一対比較行列   | $i$               | 品種を表す記号                       |
| $B$                 | 幾何平均母数   | $I$               | 品種の数                          |
| $C_\alpha$          | 品切れペナルティコスト係数  | $I_{f,i,j}$       | $j$ 日末の製品( $f, i$ )の実在庫量      |
| $C_\beta$           | 在庫保管コスト係数  | $I_{f,i,t}$       | $t$ 月末の製品( $f, i$ )の実在庫量      |
| $C_\gamma$          | 段取替え作業コスト係数  | $I_{h,t}$         | $t$ 週末の製品 $h$ の実在庫量           |
| $C_\delta$          | 空席ペナルティコスト係数   | $\hat{I}_{f,i,t}$ | $t$ 月末の製品( $f, i$ )の推定在庫量     |
| $CC$                | 管理費用   | $\hat{I}_{h,t}$   | $t$ 週末の製品 $h$ の推定在庫量          |

| 記号              | 名称   | 記号                | 名称  |
|-----------------|--|-------------------|---|
| $IC$            | 在庫費用   | $\hat{P}_{f,i,t}$ | $t$ 月の製品( $f, i$ )の推定生産量                                  |
| $ID_{CC}$       | 管理費用指数   | $PL_{f,i,j}$      | $j$ 日の製品( $f, i$ )の生産ロット数                                 |
| $j$             | 日を表す変数   | $R^2$             | 近似式の寄与率   |
| $k$             | 実需要のバラつき<br>(アーラン分布フェイズ)   | $SI_{f,i}$        | 製品( $f, i$ )の基準在庫量  |
| $K$             | ボトルネック工程加工時間のバラつき<br>(アーラン分布フェイズ)                                      | $SI_h$            | 製品 $h$ の基準在庫量   |
| $l$             | 評価指標を表す記号 ( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )                      | $SS_j$            | $j$ 日の生産座席枠数  |
| $l_{MAX}$       | 各評価指標データの最大値<br>( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )                | $SU$              | 段取替え作業負荷  |
| $l_{MIN}$       | 各評価指標データの最小値<br>( $l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ )                | $SU_L$            | 大規模段取替え作業数  |
| $L$             | 1 期間(週または月)の操業日数   | $SU_M$            | 中規模段取替え作業数  |
| $LS$            | ロットサイズ   | $SU_S$            | 小規模段取替え作業数  |
| $m_b$           | ボトルネック工程の加工時間  | $t$               | 期間(週または月)を表す変数  |
| $\bar{m}_b$     | ボトルネック工程の平均加工時間  | $T$               | シミュレーション期間<br>(週数または月数)                                   |
| $M$             | 製造工程数  | $U_{f,i,j}$       | $j$ 日の製品( $f, i$ )の品切れ量                                   |
| $MS_t$          | 期間 $t$ (週または月)の<br>ボトルネック工程の稼働可能時間                                     | $U_{h,t}$         | $t$ 週の製品 $h$ の品切れ量  |
| $n$             | 近似に用いるデータ数   | $VS_j$            | $j$ 日の空席数   |
| $N$             | 一般比較行列 $A$ の固有値数   | $\bar{y}$         | 近似に用いたデータの平均値<br>( $y = \varepsilon, \varphi, \lambda$ )  |
| $OF_l$          | 評価指標発生度合指数<br>( $0 < OF_l \leq 1, l = \alpha, \beta, \gamma, \delta$ ) | $y_z$             | 実験結果から抽出した実データ<br>( $y = \varepsilon, \varphi, \lambda$ ) |
| $p_{h,t}$       | $t$ 週の製品 $h$ の実生産量   | $\hat{y}_z$       | 近似式により得られた推定値<br>( $y = \varepsilon, \varphi, \lambda$ )  |
| $\hat{p}_{h,t}$ | $t$ 週の製品 $h$ の推定生産量  | $z$               | 近似に用いたデータを表す記号  |
| $P_{f,i,t}$     | $t$ 月の製品( $f, i$ )の実生産量  |                   |   |



付録2 生産モデルの比較

|                      | 先行研究_大場ら[37]  | 第2章   | 第3章   |
|----------------------|---|---|---|
| 対象                   | 見込生産環境  | 見込生産環境  | 見込生産環境  |
| 工程                   | M段階から成る多段階フローショップ工程   | M段階から成る多段階フローショップ工程   | M段階から成る多段階フローショップ工程   |
| システム適用               | ボトルネック工程に生産座席予約システムを適用  | ボトルネック工程に生産座席予約システムを適用  | ボトルネック工程に生産座席予約システムを適用  |
| リードタイム               | 1期間(L日)   | 1期間(L日)   | 加工完了後から一定期間   |
| 保管倉庫                 | 十分なスペースを有する   | <b>在庫量による保管料が発生するが十分なスペースを有する</b>   | 在庫量による保管料が発生するが十分なスペースを有する  |
| 稼働日数                 | 1期間は1週間と想定し、その間の稼働日数L=5日とする   | 1期間は1週間と想定し、その間の稼働日数L=5日とする   | <b>1ヶ月あたりの稼働日数Lを20日とする。(L=20)</b>   |
| 製品種類                 | I種類とし、I=3とする  | I種類とし、I=3とする  | <b>製品種類は、製造群は3種類(例:A/B/C),<br/>品種は2種類(例:a/b)から成る6種類(例:Aa/Ab/Ba/Bb/Ca/Cb)とする。<br/>(F=3,I=2,F×I=6)</b>  |
| 製造工程                 | 製造工程Mは3段階とする。(M=3)  | 製造工程Mは3段階とする。(M=3)  | 製造工程Mは3段階とする。(M=3)  |
| 平均需要量                | 1期間あたりの製品iの平均需要量は1,000個とする。   | 1期間あたりの製品iの平均需要量は1,000個とする。   | <b>1ヶ月あたりの製品(f,i)の平均需要量は20,000個とする。</b>   |
| 実需要量                 | (平均需要量に対する)正規分布   | (平均需要量に対する)正規分布   | (平均需要量に対する)アーラン分布   |
| 需要予測量                |   | <b>(平均需要量に対する)正規分布</b>  | <b>(実需要量に対する)正規分布</b>   |
| 加工時間                 | アーラン分布  | アーラン分布  | 一定  |
| シミュレーション期間           | 600日(初期100日間を除いた500日間のデータを使用)   | 600日(初期100日間を除いた500日間のデータを使用)   | <b>3,000日(初期100日間を除いた2,900日間のデータを使用)</b>  |
| 管理パラメータ<br>(政策変数)    | $\epsilon$ :能力余力パラメータ   | $\epsilon$ :能力余力パラメータ   | $\epsilon$ :能力余力パラメータ   |
|                      | $\phi$ :基準在庫パラメータ   | $\phi$ :基準在庫パラメータ   | $\phi$ :基準在庫パラメータ   |
|                      |   |   | $\lambda$ :ロットサイズパラメータ  |
| 生産計画                 | 基準在庫設定<br>基準生産計画<br>生産座席枠の設定<br>仮オーダーの割当<br>生産指示  | 基準在庫設定<br>基準生産計画(負荷計画)<br>生産座席枠の設定(各日の生産能力設定)<br><b>オーダー割当およびオーダーリリース</b>   | <b>ロットサイズ設定および</b> 基準在庫設定<br>座席枠設定(負荷計画)および各日の生産能力設定<br>オーダー割当およびオーダーリリース   |
| 基準生産計画<br>(負荷計画)     | t週の稼働可能時間設定   | t週の稼働可能時間設定   | t月の稼働可能時間設定   |
| 各日の<br>生産能力設定        | t週の稼働可能時間を期間日数で均等分配   | t週の稼働可能時間を期間日数で均等分配   | t月の稼働可能時間を期間日数およびロットサイズで均等分配  |
| オーダー割当及び<br>オーダーリリース | 各期に到着したオーダーは、<br>次期の生産座席枠で未割当の座席から優先して<br>FCFSルールによって割り当て、<br>その期の座席枠に入りきれなかった分は、<br>次期以降の未割当の座席に同様のルールで順次割当てる。<br>また、当該期に未割当の生産座席枠がある場合には、<br>前期の実在庫量と基準在庫量から求める所要量から算出される<br>稼働時間により、各製品を比率分配して割当てる。<br>最後に翌日のオーダー割当を各日末に確定しオーダーリリースする。 | 各期に到着したオーダーは、<br>次期の生産座席枠で未割当の座席から優先して<br>FCFSルールによって割り当て、<br>その期の座席枠に入りきれなかった分は、<br>次期以降の未割当の座席に同様のルールで順次割当てる。<br>また、当該期に未割当の生産座席枠がある場合には、<br>前期の実在庫量と基準在庫量から求める所要量から算出される<br>稼働時間により、各製品を比率分配して割当てる。<br>最後に翌日のオーダー割当を各日末に確定しオーダーリリースする。 | <b>出荷後の在庫量が基準在庫量を下回った場合、<br/>その不足分を補充するために必要なロット数を生産ロット数とする。<br/>他方、出荷後の在庫量が基準在庫量以上であれば<br/>補充生産は不要と判断する。</b><br>ここで決定した生産ロットをフォワード方式に従って<br>座席に割当てるが、 <b>不要な段取替えを回避するため、<br/>できる限り大きな段取替え作業を実施しない様に<br/>投入順序の並び替えを行う。</b><br>最後に翌日のオーダー割当を各日末に確定しオーダーリリースする。 |
| 評価指標                 | $\alpha$ :品切れ率  | $\alpha$ :品切れ率  | $\alpha$ :品切れ率  |
|                      | $\beta$ :平均在庫率  | $\beta$ :平均在庫率  | $\beta$ :平均在庫率  |
|                      |   |   | $\gamma$ :段取替え作業負荷率   |
|                      | ※太字は前研究(左隣)との違いを明示している。   |   | $\delta$ :空席率   |

## 研究業績

## 【1.研究論文】

- [1-1] 林千宏, 山本久志, 大場允晶, 丸山友希夫, 中邨良樹:“固定ロットサイズ見込生産環境における生産座席システム設計方法の提案”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 72, No. 2, pp. 110-122 (2021) <https://doi.org/10.11221/jima.72.110>
- [1-2] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M. and Horikawa M.:“A Study on the Seat Setting of the Production Seat Booking System”, *Journal of Japan Industrial Management Association*, Vol. 68, No. 2E, pp. 139-148 (2017) <https://doi.org/10.11221/jima.68.139>

## 【2.国際会議発表】

- [2-1] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M., Maruyama Y. and Nakamura Y.:“The effective seat setting of the production seat booking system for the make-to-stock manufacturing process with the fixed lot-size production”, *The 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (APIEMS2019 Kanazawa)*, pp. 543-548 (2019)
- [2-2] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M., Maruyama Y. and Nakamura Y.:“A Study on the Seat Setting of the Production Seat Booking System for Make-To-Stock Manufacturing Process -In case of the Fixed Lot Size Production-”, *The 18th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (APIEMS2017 Yogyakarta)*, pp. 7-12 (2017)
- [2-3] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M. and Horikawa M.:“A Study on the Seat Setting of the Production Seat Booking System for Make-To-Stock Manufacturing Process”, *The 16th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (APIEMS2015 Ho Chi Minh)*, pp. 899-906 (2015)
- [2-4] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M. and Horikawa M.:“A Study on the Optimization of Seat Setting in the Production Seat Booking System”, *23rd International Conference for Production Research (ICPR23 Manila)*, CD-ROM (2015)
- [2-5] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M. and Horikawa M.:“A Study on Seat Setting in the Production Seat Booking System -The Effective Seat Setting for Make-To-Stock Manufacturing Process -”, *International Symposium on Scheduling 2015 (ISS2015 Kobe)*, pp. 275-279 (2015)

## 【3.国内学会発表】

- [3-1] 林千宏, 山本久志, 大場允晶, 佐藤正一:“生産座席システムにおける階層分析法を用いた座席枠設定方法の提案および適用事例”, 日本設備管理学会 2021 年秋季研究発表大会 (オンライン), pp. 79-82 (2021)

- [3-2] 林千宏, 山本久志, 大場允晶, 佐藤正一:“生産座席システムにおける階層分析法を用いた座席枠設定”, 日本経営工学会 2021 年秋季大会(オンライン), pp. 174-175 (2021)
- [3-3] 林千宏, 山本久志, 大場允晶, 堀川三好:“見込生産環境下における生産座席予約システムに関する研究”, 第 6 回横幹連合コンファレンス(名古屋工業大学), pp. 323-324 (2015)
- [3-4] Hayashi C., Yamamoto H., Ohba M. and Horikawa M.:“A study on the seat setting of the production seat booking system for make-to-stock manufacturing process”, 日本経営工学会 2015 年秋季大会(金沢工業大学), pp. 92-93 (2015)
- [3-5] 林千宏, 山本久志, 大場允晶, 堀川三好:“生産座席枠システムにおける座席枠設定の最適化に関する研究-見込生産環境下での最適な座席枠設定-”, 日本経営工学会 2015 年春季大会(首都大学東京), pp. 108-109 (2015)
- [3-6] 林千宏, 山本久志, 大場允晶, 堀川三好:“生産座席枠システムにおける座席枠設定の最適化に関する研究-見込生産環境下での生産座席枠システム-”, 日本経営工学会 2014 年秋季大会(広島大学), pp. 74-75 (2014)
- [3-7] 林千宏, 山本久志, 大場允晶:“フロー化率の高いジョブショップラインへの生産座席枠システムの導入”, 日本経営工学会 2014 年春季大会(東京理科大学), pp. 154-155 (2014)
- [3-8] 林千宏:“銅箔+PET 複合フィルムを原材料とするエッチング加工を対象とした MFCA 導入事例”, 日本経営工学会平成 23 年度秋季大会(岩手県立大学), pp. 284-285 (2011)
- [3-9] 林千宏, 堀川三好, 大場允晶, 菅原光政:“見込・注文複合生産システムにおける納期パフォーマンスに関する研究”, 日本ロジスティクスシステム学会第 7 回全国大会(早稲田大学), pp. 106-109 (2004)

#### 【4.その他著書】

- [4-1] 林千宏:“プラスチックワイヤー企業を対象とした見込環境下での生産座席システムの基礎研究”, 日本大学産業経営プロジェクト報告書産学連携研究, Vol. 41, No. 1, pp. 7-14 (2018)
- [4-2] 林千宏:“一企業人から見た日本経営工学会”, 日本経営工学会経営システム誌, Vol. 20, No. 6, pp. 301-303 (2011)

#### 【5.賞罰】

- [5-1] 日本経営工学会特別賞(経営工学実践賞)受賞, 平成 23 年度:“銅箔+PET 複合フィルムを原材料とするエッチング加工を対象とした MFCA 導入事例”(2011)

---

## 謝 辞

本論文は、筆者が日本ファイルコン株式会社に在職中に東京都立大学大学院に在学し、山本久志先生(東京都立大学・教授)ご指導の下に纏めたものとなります。研究に従事してから19年、諸先生方や諸先輩方より賜った多大なるご高配について、深く感謝申し上げます。

梶原康博先生(東京都立大学・教授)、開沼泰隆先生(東京都立大学・教授)、竹野健夫先生(岩手県立大学・教授)には、学位(博士)論文審査会を通じて、本論文を纏めるにあたり温かく的確なご助言を頂戴致しました。

坪根斉先生(元東京都立科学技術大学・教授、故人)には、筆者を生産管理専攻の道に導いて頂き、川上満幸先生(元首都大学東京・教授)には、修士課程において研究の基礎をお教え頂きました。

山本久志先生、大場允晶先生(日本大学・教授)、堀川三好先生(岩手県立大学・教授)には、博士課程へ進む動機を与えて頂いたのみならず、進学後も終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻と適切なご助言を頂き、これまでの険しい道のりを支え続けて下さいました。

丸山友希夫先生(千葉工業大学・教授)、中邨良樹先生(青山学院大学・教授)、大宮望先生(日本工業大学・教授)には、定期開催の研究会において幅広い様々な視点からたくさんの示唆を与えて頂きました。

古川孔基氏(株式会社マースエンジニアリング)には、本研究の基礎となるシミュレーション作成について専門的知見を多分に賜り、佐藤正一先輩(東洋エンジニアリング株式会社)には、本論文を最終的にまとめる段階で有益なご指摘・ご助言ならびに激励を賜りました。

また、社会人学生として本論文に取り組むことができたのは、勤務先である日本ファイルコン株式会社の協力に負うところが大きいと考えます。同社には自由闊達な気風や自己啓発制度がありますが、直接的には上司や同僚、職場全体の理解が得られなければ成し得ることができなかったものと考えます。博士課程への進学を決心した際に背中を押して頂いた外池敏夫監査役(当時、所属部長)には特に深謝致します。

皆様から賜りました種々のご支援に対し、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

末筆となりますが、私自身の身勝手な目標のために淋しい思いを強いてしまった、長女凜音と次女乃音に心より謝意を表し、本論文を捧げます。

以上、ありがとうございました