

①

博士論文

自己完結型混合ラインのバッファの 設計に関する研究

1997年3月

広島大学大学院 社会科学部
経済学専攻 企業経営研究

徐 祝 淇

序

本論文は、筆者が広島大学大学院社会科学部経済学専攻に在学中、広島大学経済学部平木秀作教授の御指導のもとに進めた研究を中心に、自己完結型混合ラインのバッファの設計について1つの観点からまとめたものである。

経済環境の変化に対応するためには、生産システムの柔軟性を高める必要がある。自己完結型混合ライン生産方式は、製品の機能別に分けたいくつかの自己完結した混合ラインを用いて、複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式であり、混合ラインシステムの柔軟性を高めるために、1990年代初頭から、自動車の最終組立工場において積極的に導入されつつある。

混合ラインの柔軟性を高めるためには、機械設備の汎用化や自動化などの固有技術のみではなく、混合ラインの設計などの管理技術の開発・改良も必要である。

本論文のねらいは、混合ラインの柔軟性と生産の平準化という自己完結型混合ラインの2つの管理目標を達成するために、自己完結型混合ラインのバッファの設計方法と各製品の投入順序決定方法を提案することにある。

自己完結型混合ラインのバッファの設計にあたっては、混合ラインの経済性を論じることも重要であるが、本論文では、混合ラインの柔軟性に焦点を当てている。

本論文はつぎの6章から構成される。

- 第1章 自己完結型混合ラインの特徴と管理目標
- 第2章 混合ラインの柔軟性と生産の平準化
- 第3章 自己完結ライン間のバッファの設計
- 第4章 自己完結ライン内のバッファの設計
- 第5章 自己完結型混合ラインへの各製品の投入順序の決定
- 第6章 結び

第1章では、自動車の最終組立ラインを取り巻く経済環境の変化を概説し、自己完結型混合ラインの特徴と管理目標を明確にする。

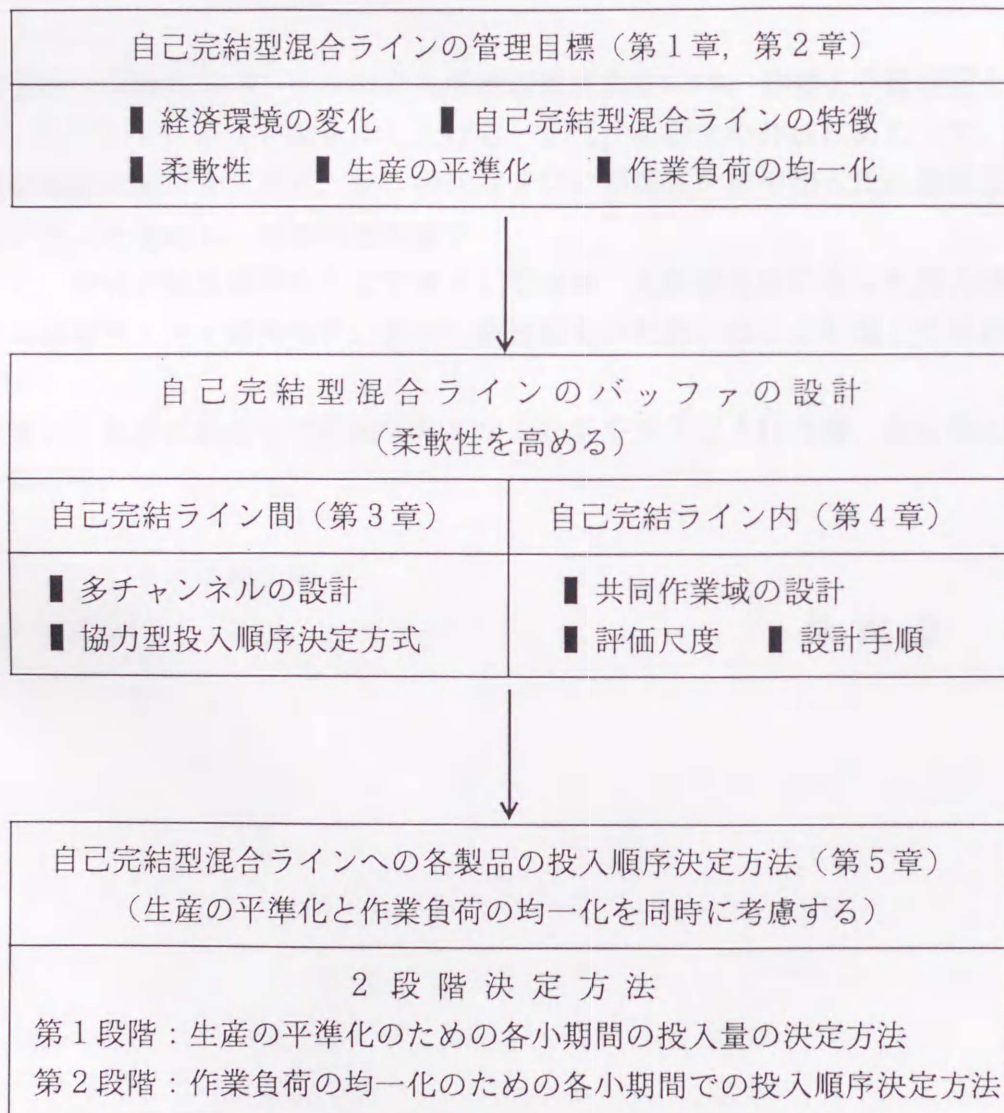
第2章では、自己完結型混合ラインの2つの管理目標、すなわち混合ラインの柔軟性と生産の平準化について論じている。

自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるためには、各作業工程での作業負荷をなるべく均一化しなければならない。第3章では、作業負荷を均一化するための、自己完結ライン間のバッファの設計について考察している。

第4章では、自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるための、自己完結ライン内のバッファの設計方法を提案している。

設計された自己完結型混合ラインを効率的に運用するためには、自己完結型混合ラインへの各製品の適切な投入順序を決定する必要がある。第5章では、生産の平準化と作業負荷の均一化を同時に考慮した投入順序決定方法を提案している。第6章で本論文全体を要約し、あわせて今後の研究課題を述べる。

本論文の研究の流れをつぎの図に示す。



本論文では、注記番号を章ごとに「*」で記し、各ページの下段に示している。また、参考文献を「[*]」で記し、章単位でまとめ全文の最後に示している。

筆者が指導教官の平木秀作先生にこの研究に導いていただいて以来、学問から人生観にわたり、終始懇切丁寧な御指導、御鞭撻と適切なる御助言をいただいたことを記し、深甚の謝意を表し厚く御礼申し上げます。

本論文を最終的にまとめる段階で、広島大学経済学部長前川功一教授、同学部坂口要教授には、御多忙のなか熱心に査読いただき、数々の有益な御指導ならびに御助言をいただいた。また、日本大学商学部市村隆哉教授には、御多忙のなか広島までお越しいただき、査読していただくとともに、多くの有益な御指導、御鞭撻と御助言をいただいた。ここに記して、深く感謝するとともに、心より御礼申し上げます。

筆者が大学院在学中、広島県立大学渡辺展男先生には、日頃より御助言と御鞭撻をいただいた。心より御礼申し上げます。また、本論文の作成にあたって、同経営情報論研究室の安范俊氏、宿元明氏ならびに同専攻の田中聖人氏に御助言をいただいたことを記し、感謝の意を表す。

また、筆者が私費留学生として来日して以来、大変御世話になった岡山県井原市の北條靖男・英子御夫妻に、温かい御激励をいただいたことを記して感謝の意を表す。

最後に、私事にわたって恐縮であるが、心身を支えてくれた妻、金正美に本論文を捧げる。

1997年3月

徐 祝 淇

目 次

序

第1章 自己完結型混合ラインの特徴と管理目標	1
1.1 自動車産業を取り巻く経済環境の変化	1
1.2 自己完結型混合ラインの特徴	2
1.3 自己完結型混合ラインの管理目標	7
1.3.1 混合ラインシステムの仕組み	7
1.3.2 自己完結型混合ラインの管理目標	9
第2章 混合ラインの柔軟性と生産の平準化	11
2.1 混合ラインの柔軟性	11
2.1.1 混合ラインの柔軟性の分類	11
2.1.2 品種構成の柔軟性と作業工程の柔軟性	13
2.1.3 混合ラインの柔軟性の評価尺度	15
2.2 生産の平準化	16
2.2.1 JIT生産方式	16
2.2.2 引っ張り型生産指示方式	17
2.2.3 混合ラインでの生産の平準化	19
第3章 自己完結ライン間のバッファの設計	21
3.1 多チャンネル型バッファの設計	21
3.2 作業負荷を均一化する投入順序の決定	23
3.2.1 作業負荷の均一化	23
3.2.2 投入順序の決定	25
3.3 多チャンネル型バッファが作業負荷の均一化に及ぼす影響	28
第4章 自己完結ライン内のバッファの設計	36
4.1 バッファ域の設計	36
4.1.1 作業工程の分類	36

4.1.2	安定した生産	39
4.2	共同作業域の概念	41
4.3	混合ラインの利用効率	43
4.3.1	混合ラインの編成効率	43
4.3.2	混合ラインの利用効率	45
4.4	共同作業域の設計のための数式モデルの定式化	49
4.4.1	数式モデルの前提条件	50
4.4.2	数式モデルの定式化	51
4.5	数式モデルの計算手順	53
4.6	数値例による数式モデルの解析	57
4.6.1	数値例 1	57
4.6.2	数値例 2	62
第 5 章 自己完結型混合ラインへの各製品の投入順序の決定		68
5.1	投入順序決定の 2 つの目標	68
5.1.1	投入順序決定の 2 つの目標	68
5.1.2	目標 1 を考慮した投入順序決定方法	70
5.1.3	目標 2 を考慮した投入順序決定方法	71
5.2	2 つの目標を同時に考慮した投入順序決定方法	76
5.2.1	部品の引き取り方式	76
5.2.2	投入順序決定の 2 段階決定方法	77
5.2.3	生産の平準化のための数式モデル	79
5.2.4	最大作業遅れを最小化するための数式モデル	80
5.2.5	数式モデルの計算手順	82
5.3	数値例による投入順序決定方法の解析	84
第 6 章 結 び		94
参考文献		96

第1章 自己完結型混合ラインの特徴と管理目標

1.1 自動車産業を取り巻く経済環境の変化

日本のように経済発展がすでに低成長期に入った先進工業国においては、情報・通信産業などの一部の成長業種は別として、成熟業種に属する多くの企業では、高度成長時代におけるような量的拡大に伴う売上の増大を期待することはなかなか困難になってきている。

このような時代の変化に伴い、自動車産業を取り巻く経済環境には大きな変化が見られる。その特徴としてつぎのいくつかの点を挙げる¹⁾。

- (1) 買手市場の傾向が強まるとともに、売手である各企業間の競争もますます激しくなっている。企業は激しい競争のもとで、発展もしくは生き残るために、高品質の製品を低価格で迅速に市場へ提供しなければならない。
- (2) 製品のライフサイクルが短縮化され、製品がますます多仕様化・多品種化されている。
- (3) 生産における無駄な要素を極力排除して、コストを低減し生産性を向上することが求められている。
- (4) 消費者が注文した製品の納期短縮を求める傾向が強まっている。また、市場ニーズにあった多品種の製品を迅速に提供するためにも、生産システムの柔軟性が求められている。
- (5) いわゆる3K（きつい、汚い、危険）職場を嫌う若者の製造業離れ、若年男子労働力の減少による人手不足、労働時間の短縮、仕事へのやりがい・達成感の重視、女性の職場進出と高齢化などへの対策が一層深刻な問題となり、

1) 五十嵐[1], 「工場管理」編集部[6], 小嶋[7], 坪根・松浦[9], 門田[13].

作業者にとって作業しやすい作業環境づくりが不可欠となっている。

- (6) コンピュータ技術と通信技術の飛躍的な発展と進歩に伴い、情報通信と情報処理を含む情報システムが企業の基盤技術となっているため、そういう状況に対応した高度情報化企業が求められている。

低成長期の今日において、上述のような経済環境の変化は、自動車産業に以前にも増して大きな影響を与えている。低コストで高品質と高収益を確保し、企業の競争力を高めるためには、ひたすら生産能力の増大、生産の効率化などを中心としてきた従来の生産システムを、経済環境の変化に適応するものに変えなければならない。そのために、特に市場ニーズに迅速に対応できる柔軟な混合ラインシステムの構築が要求されている²⁾。

柔軟な混合ラインシステムを構築するために、各企業はさまざまな生産管理方式を試みており、新しい管理技術の開発が重要な課題となっている。

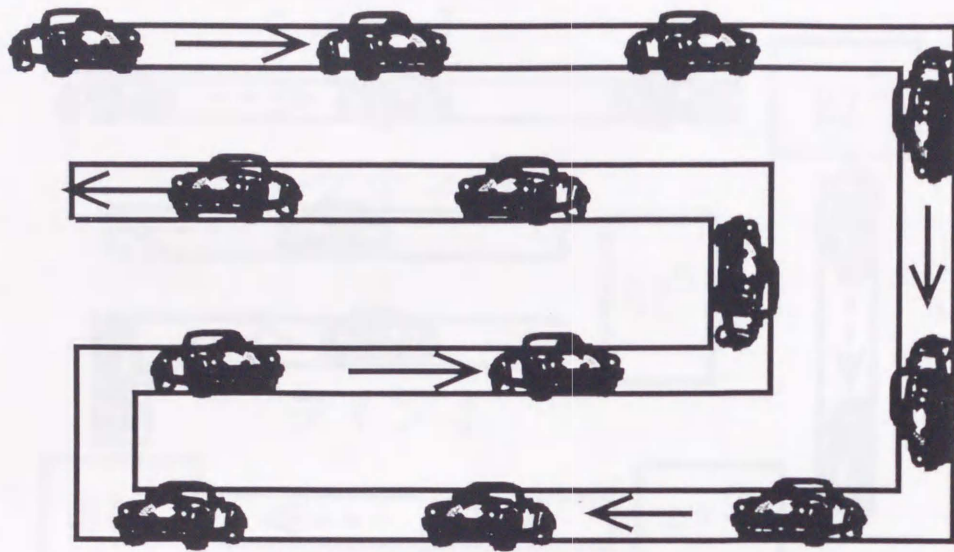
1.2 自己完結型混合ラインの特徴

1.1 で述べた経済環境の変化に適応し混合ラインの柔軟性を高めるために、1990年代の初頭から、自動車の最終組立工場において、従来の混合ライン生産方式の改良と拡張である自己完結型混合品種組立ライン（以下自己完結型混合ラインと略する）生産方式が積極的に導入されつつある³⁾。

自己完結型混合ライン生産方式は、すべての作業工程が1つのコンベアラインでつながる従来の混合ライン（図1-1に示す）を、車の機能別に電子電機関係ライン、駆動関係ライン、外装ライン、内装ラインなどのいくつかの自己完結した混合ライン（以下自己完結ラインと略する）に分割し、複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式である。各自己完結ラインの作業チームは所定の作業をまとめ、自らのラインを自己完結的に管理する。自己完結ライン間にはバッファゾーンが新たに設定される。

2) 加藤[4], 坪根・松浦[9].

3) 「工場管理」編集部[6], 小嶋[7].



—————→ : 混合ラインのコンベア移動方向

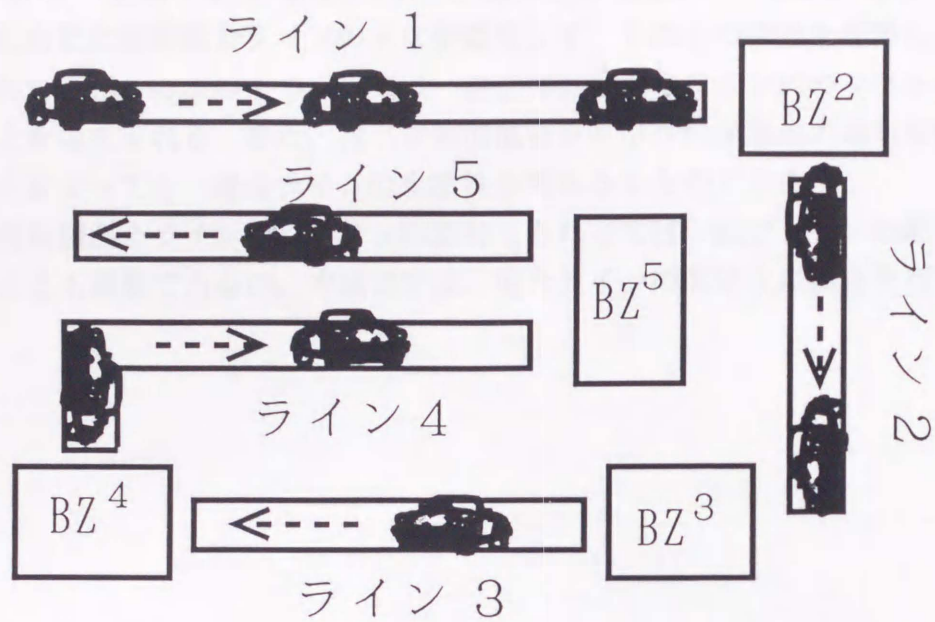
図1-1 従来の混合ラインのイメージ図⁴⁾

図1-2 に5つの自己完結ラインで構成された自己完結型混合ラインを示す。本論文では自己完結ライン $(z-1)$ と自己完結ライン z との間のバッファゾーンを自己完結ライン z のバッファゾーンとみなし、 BZ^z ($z=2, 3, \dots, Z$)と記す。

自己完結ライン $(z-1)$ の作業チームが、コンベアで流れてくる製品に対して、所定の作業を行い検査を行ったうえで、 BZ^z に1つずつ送り込む。自己完結ライン z の作業チームは BZ^z に入った製品をサイクルタイムの間隔で1つずつ引き取り、ラインへ投入し所定の作業を行う。

自己完結型混合ラインは、柔軟性を高めることを目的として、従来の1つの混合ラインを製品の機能別に複数の自己完結ラインに分割したもので、混合ラインの一種として導入されており、従来の混合ラインシステムにおける効率的な設計

4)出所：「工場管理」編集部[6].



---> : 自己完結ラインのコンベア移動方向
 BZ^z : 自己完結ラインz のバッファゾーン

図1-2 自己完結型混合ラインのイメージ図⁵⁾

5) 出所: 「工場管理」編集部[6]. 文献[6]によると, トヨタ自動車の元町工場では, 従来の1つの混合ラインをトリムライン(ラジエーター組み付け, ドア外し, インパネ組み付け), シャシーNo.1ライン(足まわり, フューエルタンク組み付け), シャシーNo.2ライン(タイヤ組み付け, エンジン組み付け), No.1ファイナルライン(ヘッドランプ, ウィンド接合, 天井), No.2ファイナルライン(バッテリー内蔵, シート組み付け, ドア組み付け)という5つの自己完結ラインに分割している.

トヨタ自動車の宮田工場(九州)の場合は, 従来の1つの混合ラインを以下の11の自己完結ラインに分割している.

T1ライン: 配線

T2ライン: 配管

T3ライン: インパネ組み付け

C1ライン: 足まわり組み付け

C2ライン: エンジン組み付け

A1ライン: ウィンド接合

A2ライン: 内装

A3ライン: 外装

A4ライン: タイヤ組み付け

Fライン: ドア組み付け

AIライン: 液体注入, 最終検査

方法や物流・生産・在庫管理方式のほとんどが継続的に利用されている⁶⁾。表1-1 に自己完結型混合ラインの主な特徴を示す。それらの特徴を考慮しラインの柔軟性を高める方法の1つとしては、自己完結型混合ラインにバッファを設計することが考えられる。また、自己完結型混合ラインへの各製品の適切な投入順序の決定によっても、混合ラインの柔軟性を高めることができる。

自己完結型混合ラインのバッファの設計にあたっては、混合ラインの経済性を論じることも重要であるが、本論文では、混合ラインの柔軟性に焦点を当てている。

項目	自己完結型混合ラインの特徴	柔軟性を高める方法
生産設備	専用設備	汎用設備
ライン構成	固定	可変
ライン内のバッファ	なし	設計可能
ライン間のバッファ	なし	設計可能
ライン間のバッファ	なし	設計可能
投入順序の決定	全ラインにわたる投入順序の決定が必要	ライン間のバッファを有効にすれば、各ラインへの投入順序の一部を決定することができる
作業員	多人数	作業員が少なくなる
設備投資	高	ラインごとの設備投資
柔軟性	低	高

6) 「工場管理」編集部[6], 小嶋[7].

表1-1 自己完結型混合ラインの特徴

項 目	従来の混合ライン	自己完結型混合ライン
生産方式	作業方法や内容がほぼ等しい複数品種の製品を生産するために、あらかじめ準備された1つの組立ラインでその複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式	製品の機能別に分けたいくつかの自己完結した混合ラインを用いて、複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式
主な管理目標	生産の平準化 作業負荷の均一化	柔軟性 生産の平準化
ライン間のバッファ	設計対象にならない	設計可能
ライン内のバッファ	設計可能	設計可能
バッファ設計のねらい	信頼性と経済性を前提に効率を高める	信頼性と経済性を前提に柔軟性を高める
投入順序の変更	全ラインにわたる投入順序の変更はできない	ライン間のバッファを利用すれば、各ラインへの投入順序の一部を変更することができる
作業環境	普通	作業しやすくなる
品質管理	ライン最後部で集中管理	ラインごとに分散管理
干渉 (ラインストップ、 不良品発生など)	トラブルの発生が全ラインに影響を及ぼす	トラブルの発生が他のラインに影響を及ぼさない

1.3 自己完結型混合ラインの管理目標

自己完結型混合ラインの管理目標は混合ラインシステムの仕組みによって定まる。本節では、本論文が考慮する混合ラインシステムの仕組みを明確にしたうえで、自己完結型混合ラインの管理目標を論じる。

1.3.1 混合ラインシステムの仕組み

混合ラインシステムは、所定の期間内に所定の数量と目標品質の製品を経済的に生産することを目的として、混合ラインの各生産要素を効率的に運用し生産活動を管理するシステムである。業種などによって、混合ラインシステムの構成や特徴には異なるところがある。本論文では、自動車産業における混合ラインシステムを想定する。図1-3 にその混合ラインシステムの仕組みを示す。

混合ラインシステムはつぎのような特徴または機能をもつ必要がある。

- (1) 販売部門は消費者から多品種の製品の注文を受け、納期内に納品しなければならない。製品の競争力を高めるためには、納期をなるべく短くしなければならない。
- (2) 注文後の一定期間内には、消費者からの品種の変更・取り消しが認められる。
- (3) 中日程生産計画（たとえば、月次生産計画）が需要予測などに基づいて立てられ、混合ラインが設計される。
- (4) 需要変動に伴い小日程生産計画（たとえば、日次生産計画）期間の各製品の生産量が変動する。各製品の生産量の変動に対応し、安定した生産を保つためには、混合ラインの柔軟性が求められる。
- (5) 混合ラインシステムは、混合ライン、前生産工程、前々生産工程など多段階生産工程から構成される。混合ラインと前生産工程との部品の引き取りは、ジャストインタイム生産方式のもとで、多回搬入で行われる。ここでは、各部品の引き取り量の平準化が求められる。
- (6) 小日程生産計画段階で、生産の平準化と作業負荷の均一化を考慮し、混合ラインへの各製品の適切な投入順序を決定する。
- (7) 混合ラインの各作業チームは、組立生産の過程や進度、改善点などを生産計画・管理部門に報告する。

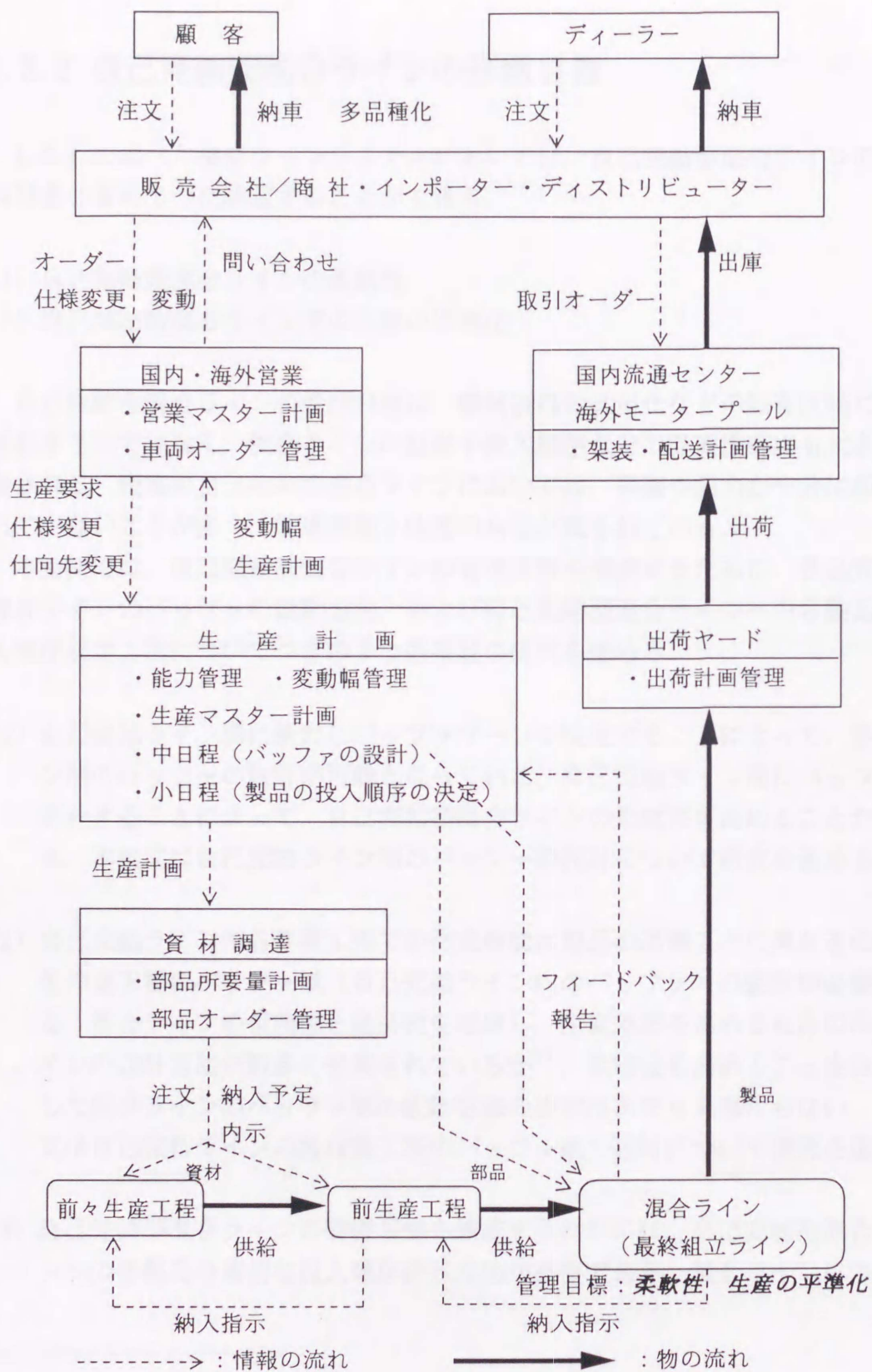


図1-3 混合ラインシステムの仕組み（出所：マツダ社内資料）

1.3.2 自己完結型混合ラインの管理目標

1.3.1 で述べた混合ラインシステムにおいては、自己完結型混合ラインの管理目標をつぎの2つに設定することができる。

- (1) 自己完結型混合ラインの柔軟性
- (2) 自己完結型混合ラインでの生産の平準化

自己完結型混合ラインの管理目標は、機械設備の汎用化などの固有技術だけに依存するのではなく、混合ラインの設計や投入順序などの管理技術にも大きく影響される。現実の自己完結型混合ラインにおいては、資源や能力が十分に活用されていないことが多く、管理技術上改善の余地が残されている。

本論文では、自己完結型混合ラインの管理目標を達成するために、自己完結型混合ラインのバッファの設計方法、および自己完結型混合ラインへの各製品の投入順序決定方法についてつぎの3つの項目の研究を進める。

- (1) 自己完結ライン間に新たにバッファゾーンを設定することによって、各ライン間のバッファの設計が可能となっている。自己完結ライン間にバッファを設計することによって、自己完結型混合ラインの柔軟性を高めることができる。本論文は自己完結ライン間のバッファの設計について研究を進める。
- (2) 自己完結ラインの各作業工程での作業時間は製品の品種ごとに異なるので、各作業工程のバッファ域（自己完結ライン内のバッファ）の設計が必要である。混合ラインの信頼性と経済性を考慮し、生産効率を高めるための混合ラインの設計方法が数多く提案されているが⁷⁾、柔軟性を高めることを目標とした混合ラインのバッファ域の設計方法の提案はあまり見当たらない。本論文は自己完結ラインの各作業工程のバッファ域の設計について研究を進める。
- (3) 自己完結型混合ラインの管理目標を達成するためには、自己完結型混合ラインへの各製品の適切な投入順序決定方法が必要である。混合ラインについて

7) たとえば、大崎ら[2]、黒田[5]、天田[10]、平木[12]、Thomopoulos[19]。

数多くの投入順序決定方法が提案されているが⁸⁾、それらは、投入順序の評価基準として、生産の平準化または作業負荷の均一化のいずれか一方だけを考慮したものである。本論文は生産の平準化と作業負荷の均一化を同時に考慮した投入順序決定方法について研究を進める。

本論文は、上述の3つの項目に対して、つぎの管理技術を開発しようとするものである。

- (1) 多チャンネルという概念を明確にし、多チャンネル型バッファの設定が作業負荷の均一化に与える影響を明らかにする。
- (2) 共同作業域という概念を提案し、それを考慮した自己完結ライン内の各作業工程のバッファ域の設計方法を与え、その性質を明らかにする。
- (3) 混合ラインへの各製品の投入順序を決定するにあたって、生産の平準化と作業負荷の均一化を同時に考慮した2段階決定方法を提案し、その性質を明らかにする。

上述の本論文の主要な目的と特徴をまとめ、表1-2に示す。

表1-2 本論文の主要な目的と特徴

研究の対象		従来の研究	本研究の目的	特徴
バッファ の設計	ライン間	設計対象にならない	柔軟性を高める	多チャンネル型 バッファの設計
	ライン内	効率を高める		共同作業域の設 計
投入順序決定		生産の平準化または 作業負荷の均一化	左記の2つの目 標を同時に考慮	2段階決定方法 の提案

8) たとえば、大野ら[3]、小谷[8]、徳安・黒田[11]、門田[13]、Cakir & Inman[14]、Miltenburg[15]、Miltenburg & Sinnamon[16]、Mitsumori[17]、Steiner & Yeomans[18].

第2章 混合ラインの柔軟性と生産の平準化

第1章で論じた自己完結型混合ラインの柔軟性と生産の平準化という2つの管理目標を達成するために、本論文では、自己完結型混合ラインのバッファの設計方法および各製品の投入順序決定方法という2つの面からアプローチする。

本章では、混合ラインの柔軟性と生産の平準化を論じ、自己完結型混合ラインのバッファの設計の目的と各製品の投入順序の決定の目的を明確にする。

2.1 混合ラインの柔軟性

2.1.1 混合ラインの柔軟性の分類

1.1 で述べた厳しい経済環境のもとで、自動車産業では、さまざまな観点から混合ラインの柔軟性を高めようとしている。

山田[13],[14] は市場ニーズに対する応答時間、質の変化、総量の変化の観点から柔軟性を論じている。中山[9] は生産計画の観点から柔軟性を論じている。坪根・松浦[8] は生産システムの柔軟性の概念を調査し、柔軟性のタイプを分類している。本論文では、坪根・松浦[8] に基づいて混合ラインの柔軟性を主につきの7つのタイプに分類する。

(1) 機械設備(Machine)の柔軟性

柔軟な混合ラインを設計するために、まず固有技術の面では混合ラインでの機械設備の柔軟性が不可欠である。混合ラインの機械設備の柔軟性を高めるためには、汎用性の高い機械設備の開発・導入や自動化の推進などが必要である。

(2) 加工手順(Routing)の柔軟性

混合ラインで生産される製品は複数の構成品・部品から構成され、各製品はそれぞれの加工手順を必要とする。加工手順の柔軟性とは、生産過程における予期できない事態に対処するための代替工程や多能工を利用して加工することができる性質である。混合ラインの加工手順の柔軟性を高めるためには、混合ラインのバイパスライン・バッファラインの設置や多能工の養成などが必要である。

(3) 作業(Operation)の柔軟性

混合ラインで生産される各製品の作業は複数の要素作業から構成される。要素作業間には先行関係があり、作業順序が定められている。作業の柔軟性とは、生産過程における作業順序を変更することができる性質である。混合ラインの作業の柔軟性を高めるためには、製品・部品の設計と作業工程、機械設備のレイアウトを考慮する必要がある。

(4) 製品(Product)の柔軟性

市場ニーズに応じて製品の改良や新製品の開発をするとともに、新製品の生産にあわせて生産工程などを迅速に変更しなければならない。製品の柔軟性とは、製品の設計の変更から実際の生産に迅速に移ることができる性質である。製品の柔軟性を高めるためには、部品の共通化などが必要である。

(5) 作業工程(Work Station)の柔軟性

各作業工程においては、混合ラインで流れてくる製品に対する作業時間はその製品の品種ごとに異なるので、作業負荷（本論文では作業負荷＝（作業時間の累積／加工した製品の数）と約束する）のアンバランスが生じ、作業遅れが生じることがある。作業工程の柔軟性とは、各製品の異なる作業時間に対応することができる性質である。混合ラインの作業工程の柔軟性を高めるためには、作業遅れがなるべく生じないように、作業負荷をなるべく均一化することと生じた作業遅れを吸収するためのバッファ域の設計が必要である。

(6) 生産量(Volume)の柔軟性

需要変動にしたがい、小日程生産計画期間の総生産量が異なる。生産量の柔軟性とは、総生産量の変動にしたがって、異なる生産量で混合ラインを経済的に運用できる性質である。

(7) 品種構成(Product Mix)の柔軟性

小日程生産計画期間の各製品の生産量の変動にしたがい、各製品間の混合比が異なる。混合ラインの品種構成の柔軟性とは、混合ラインで生産される製品間の混合比の変動に円滑に対応することができる性質である。品種構成の柔軟性を高めるためには、作業工程の柔軟性を高める必要がある。

おのおののタイプの柔軟性は独立したものでなく関連をもっている。あるタイプの柔軟性は他のタイプの柔軟性の基盤となることがあり、大きく影響を及ぼす。また、上述の柔軟性は、ハード・ソフトの観点から、生産基盤レベルのタイプ、

製品設計レベルのタイプおよび運用システムレベルのタイプに分類できる。生産基盤レベルの柔軟性は、生産基盤としての固有技術能力であり、製造資源における固有の柔軟性である。(1),(2)はそれに属する。製品設計レベルの柔軟性は、新製品を設計・企画するとき、既存の構成品・部品の仕様、作業方法などを十分に活用し将来製品の改良、設計変更を行うことの容易さである。(3),(4)はそれに属する。運用システムレベルの柔軟性は、所与の生産基盤レベルのもとで目標を達成するために、既存の資源や能力を十分に利用・発揮できるように、資源や能力を配分・管理する性質のものである。(5),(6),(7)はそれに属する。

表2-1 に混合ラインの柔軟性の分類を示す。

表2-1 混合ラインの柔軟性

機械設備の柔軟性 加工手順の柔軟性	生産基盤の柔軟性 (固有技術)	混合ライン の柔軟性
作業の柔軟性 製品の柔軟性	製品設計の柔軟性 (設計技術)	
作業工程の柔軟性 生産量の柔軟性 品種構成の柔軟性	運用システムの柔軟性 (管理技術)	

2.1.2 品種構成の柔軟性と作業工程の柔軟性

今日においては、自動車の市場ニーズの多品種化の傾向が一層強まり、自動車の生産量の推移に比べ、その車種数や類別が大幅に増加し、1品種あたりの生産台数は年々減少する傾向にある。

混合ラインでは、作業方法や内容がほぼ等しい多品種の製品がコンベア上に一定の間隔で乗せられ、コンベアごとに一定の速度で移動し、コンベア沿いの各作業工程で構成品・部品の組み付け作業が行われる。作業工程での作業は、一部の品種間の共通作業を除き、製品の品種ごとに作業時間が異なる。

各作業工程に課せられる作業負荷は品種ごとに異なるため、作業時間の大きい品種が連続して投入されると、作業負荷が一時的に大きくなり、作業遅れが生じ、

安定した生産ができなくなるおそれが生じる。逆に作業時間の小さい品種が連続して投入されると、作業負荷が一時的に小さくなり、作業者に遊休が生じる。

多品種化が進むにつれ、各作業工程での品種ごとの作業時間のばらつきは一層大きくなっている。

各製品の生産量の変動にしたいが、各製品の混合比が異なるので、各作業工程での作業負荷も異なる。したがって、各製品の混合比の変動に対応し混合ラインの品種構成の柔軟性を高めるためには、作業工程の柔軟性を高めなければならない。

作業工程の柔軟性を高めるためには、固有技術と生産管理技術の両面で作業工程の柔軟性をはかる必要がある。

自動車の組立作業は、コンベア上の製品に対して、多くの作業者がラインに沿って部品を取り付ける方式が基本となっている。混合ラインは自動車の多段階生産工程のなかで、最も複雑で労働集約的な工程であり、重筋作業の排除と悪い作業姿勢や作業環境の改善および品質の確保を目的に、自動化の推進および汎用性の高い機械設備の導入などが積極的に行われてきた。

ところが、作業工程の柔軟性を自動化などの機械設備の面だけに頼ると、モデルチェンジによる機械設備の頻繁な更新や高価な機械設備の導入などにつながり、新製品を生産するためには新工場や新しい機械設備など巨大な投資が必要となり、固有技術的リスクを負うことになる。実際、自動車の混合ラインにおける自動化は、現状の車両構造や技術力などの固有技術および経済性を考慮すると、いまのところ、全体の30%程度が上限であるという指摘もある¹⁾。

したがって、作業工程の柔軟性を高めるためには、固有技術の面だけではなく、管理技術の面での柔軟性も考慮しなければならない。むしろ、既存の生産基盤のもとで、混合ラインの柔軟性や効率などを最大限に追求することが生産管理における重要な課題となっている²⁾。

本論文では、品種構成の柔軟性と作業工程の柔軟性に的を絞って混合ラインの柔軟性を論じる。混合ラインの品種構成の柔軟性を高めるためには、作業遅れがなるべく生じないように、作業負荷を均一化するとともに、生じた作業遅れを吸収する機能が必要である。

1) 加藤[3].

2) 関根ら[6], 宋・崔[7].

したがって、混合ラインの柔軟性を高めるために、本論文では各作業工程での作業負荷の均一化を考慮する。作業負荷をなるべく均一化することは、混合ラインへの各製品の投入順序から影響を受ける。適切な投入順序を決定するにあたっては、自己完結ライン間の適切なバッファを設計すること（第3章で論じる）と自己完結型混合ラインへの各製品の適切な投入順序決定方法（第5章で論じる）について検討する必要がある。

また、生じた作業遅れを吸収するためには、各作業工程に適切なバッファ域が必要となる（第4章で論じる）。

2.1.3 混合ラインの柔軟性の評価尺度

2.1.1 で論じたように、多くの観点から柔軟性をはかることができる。そのため、混合ラインの柔軟性の評価尺度もさまざまである。Osullivan[15]が主張するように、すべての評価尺度を包含した唯一の評価基準は存在しない。

坪根・松浦[8], Slack[16]は柔軟性の評価に「範囲」と「応答」の2つの次元がある、と指摘している。「範囲」の柔軟性は生産システムまたは資源が達成できる能力（時間、利用率、稼働率など）または適応できる状態の範囲である。

「応答」の柔軟性は能力の範囲内で変更できる（コストや時間に関する）容易さのことである。

本論文では、「範囲」の面で自己完結型混合ラインの作業工程の柔軟性と品種構成の柔軟性をはかるために、表2-2に示す評価尺度を用いる。

表2-2 混合ラインの柔軟性の評価尺度

柔軟性のタイプ	「範囲」	「応答」
作業工程の柔軟性	混合ラインの利用効率	—
品種構成の柔軟性	各製品の生産量の変動の許容範囲	—

—：本論文では考慮しないことを示す

作業工程の柔軟性は品種構成の柔軟性の基盤となっており、各製品の生産量の変動の許容範囲を拡大するためには、混合ラインの利用効率を高める必要がある。混合ラインの利用効率と各製品の生産量の変動の許容範囲については第4章で論じる。

2.2 生産の平準化

2.2.1 JIT 生産方式

自動車産業においては、企業間の激しい競争下で一定の市場シェアを確保し、企業として生き残るために、消費者に多品種の製品を安く迅速に供給しなければならない。

そのためには、生産における無駄な要素を徹底的に排除して、コストを低減し生産性を向上する生産方式が求められている。

このような状況のもとで、トヨタ自動車により開発されたジャストインタイム（Just-In-Time、以下JITと略する）生産方式が、多くの企業で積極的に取り入れられている³⁾。自己完結型混合ラインにおいても、JIT 生産方式が引き続き利用されている。現在は、コンピュータ技術と通信技術の進歩に伴って、コンピュータ統合生産システム（Computer Integrated Manufacturing：CIM）の構築や試行が進む傾向が見られる⁴⁾。

JIT 生産方式とは、必要なものを必要なときに必要な量だけ作る（または搬入する）という生産方式である。JIT 生産方式はコストを低減し生産性を向上することを基本的な目標としている。その基本目標を達成するためには、生産における無駄な要素（余分な在庫、作業人員など）を徹底的に排除する必要がある。

混合ラインで多品種の製品を生産するためには、数多くの構成品・部品が必要となっている。これらの構成品・部品の使用、在庫を効率的に管理するために、JIT 生産方式が1つの有効な手段として利用されている。

3) 秋庭ら[1]，大野・門田[2]，黒田ら[4]，門田[12]。

4) CIM研究グループ[5]，門田[10]。

JIT 生産方式を実現するためには多くの生産管理技術が必要である。門田[12]は (1)JIT 生産方式を維持するためのかんばん方式, (2)無駄な要素を排除するための生産の平準化, (3)生産リードタイムを短縮するための段取り替え時間の短縮, (4)ラインの同期化を達成するための作業の標準化, (5)作業人員を弾力的に増減するための機械レイアウトと多能工などを挙げている。

2.2.2 引っ張り型生産指示方式

自動車産業においては、図2-1 に示すように、混合ラインで車を組み立てるために、エンジン、シート、トランスミッションなどの複数品種の構成部品が使われる。また、構成部品を作るためには、部品が必要である（エンジンという構成部品をつくるためには、シリンダ、ピストンなどの部品が必要である）。さらに、部品を作るためには、必要な資材を購入・調達しなければならない。

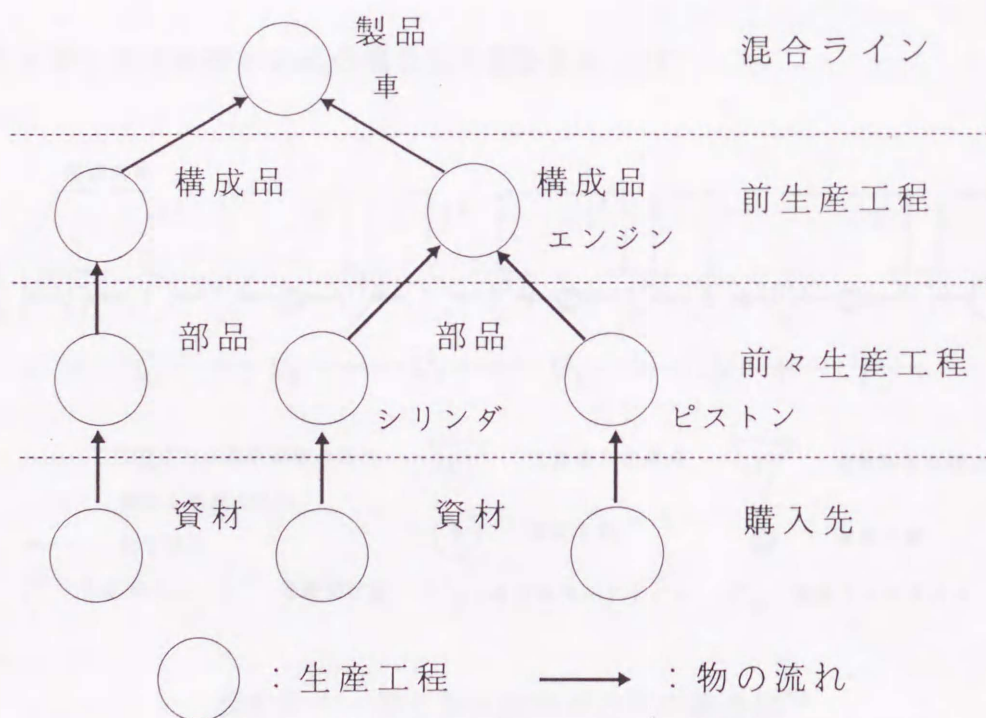


図2-1 多段階生産システムにおける製品の構成

本論文では、構成部品と部品をまとめて部品とよび、その生産の平準化をはかる。図2-1 に示すように、自動車の生産工程は、混合ライン、前生産工程および前

々生産工程など複数の生産工程からなる多段階生産システムである。

JIT 生産方式のもとで、混合ラインでは、必要とされる部品が必要なときに必要な量だけ前生産工程から調達され、その部品の組み付けが行われる作業工程のラインサイドに搬入されるようになっている。

混合ラインにおいてJIT 生産方式を実現するためには、混合ラインから前生産工程への部品の適切な生産指示方式が必要であり、多くの自動車メーカーでは、引っ張り型生産指示方式を用いている。

引っ張り型生産指示方式では、前生産工程での生産・輸送リードタイムを考慮してあらかじめ混合ラインと前生産工程との間に仕掛在庫（基準在庫）を設ける。混合ラインは生産待ち在庫（組み付け待ち在庫）の部品を使用して製品を生産する。その生産に使用される部品の数量相当分は前生産工程の部品の運搬待ち在庫（加工済み在庫）から引き取られる。前生産工程では、引き取られた数量分の部品を生産する。このように、引き取りの連鎖によって生産の情報を前生産工程に伝達する。

引っ張り型生産指示方式の概念図を図2-2 に示す。

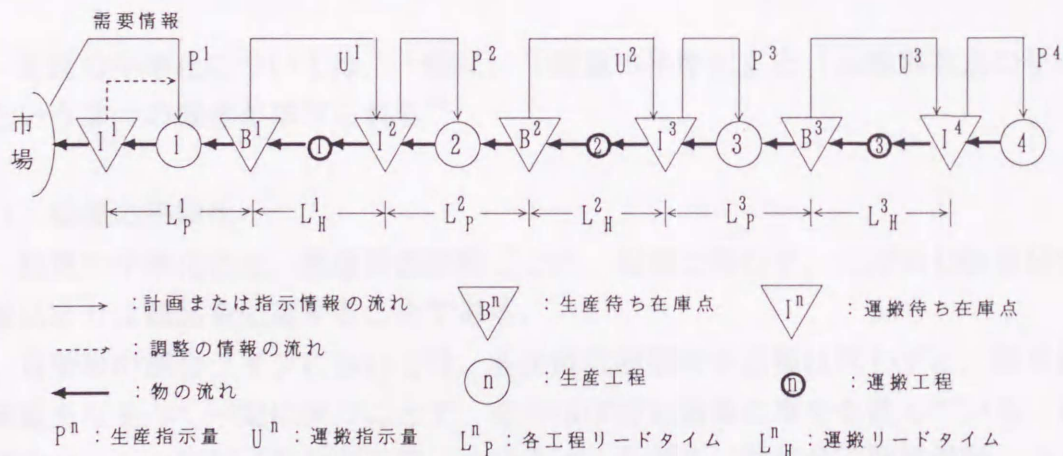


図2-2 引っ張り型生産指示方式の概念図⁵⁾

5) 黒田ら[4].

2.2.3 混合ラインでの生産の平準化

JIT 生産方式の基本的な目標の1つはコストを低減することにある。そのためには、混合ラインと前生産工程での余分な在庫や作業人員などを削減しなければならない。

図2-2 に示しているように、混合ラインは前生産工程から必要な部品を必要な量だけ引き取る。もし、混合ラインが部品をばらついた数量で引き取るとき、前生産工程の運搬待ち在庫に引き取り量のピークに対応できるだけの部品の在庫がないと、品切れが発生するおそれがある。また前生産工程では、その部品の必要数量のピークに対応するために、余分な作業人員や機械設備などを用意しておくなければならない。

さらに、部品のばらついた数量での引き取りは前々生産工程に遡って余分な在庫や作業人員を生じさせる。

生産の平準化は、JIT 生産方式を用いた混合ラインシステムにとっては、余分な在庫や作業人員などを削減するための最も重要な前提条件になるものである。自動車の多段階生産工程での生産の平準化を実現するためには、部品の引き取り量のばらつきを極力小さくしなければならない。

生産の平準化については、一般に、「総量の平準化」と「品種別数量の平準化」という2つの概念が挙げられる⁶⁾。

(1) 総量の平準化

総量の平準化とは、生産計画期間ごとに、品種は問わず、ほぼ同じ数量分だけ製品または部品を生産することである。

自動車の混合ラインにおいては、各生産計画期間中品種は問わずに、車の総生産量をなるべく一定に保つことで、毎日ほぼ同じ数量の車を生産している。自動車のエンジン工場（前生産工程）の場合は、各部品（排気量、使用燃料、タイプなどの組合せで、数十種類に分類されている）の種類を問わずに各生産計画期間にほぼ同じ数量のエンジンを生産している。

6) 門田[12]pp. 137-155.

自動車の需要は季節的変動が大きいので、月ごとの生産量のばらつきが生じざるを得ない。しかし、おのこの月において、日ごとの生産量のばらつきを小さくすることは、生産計画によって実現することができる。

(2) 品種別数量の平準化

製品の多品種化にしたがい、部品の種類も非常に多くなっている。そのため、総量の平準化だけでは、前生産工程における生産の平準化を実現することは難しい。それゆえ、品種別数量の平準化も考慮しなければならない。

たとえば、エンジンを生産する前生産工程にとっては、各生産計画期間ごとの各種のエンジンをなるべく同じ数量で生産することが望ましい。引っ張り型生産指示方式のもとでは、混合ラインで各製品の生産に使用されるエンジンの数量のばらつきをなるべく小さくすることによって、前生産工程で生産する各種のエンジンの数量の平準化がはかられる。

また、混合ラインでの時間あたりの各部品の使用量をなるべく一定にすることが部品の生産の平準化を実現する有効な方法の1つとして知られている⁷⁾。各部品の使用速度をなるべく一定にすることによって、部品の引き取り数量のばらつきが避けられる。

生産の平準化を実現するためには、混合ラインへの適切な投入順序決定方法が必要であり、これについては第5章で論じる。

7) 大野・門田[2]pp. 93-109.

第3章 自己完結ライン間のバッファの設計

第2章で論じたように、自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるためには、作業工程での作業負荷の均一化をはからなければならない。作業負荷をなるべく均一化するためには、各自己完結ラインに対する適切な投入順序が必要である。

自己完結型混合ラインは、従来の1つの混合ラインを製品の機能別にいくつかの自己完結ラインに分割したもので、自己完結ライン間にはバッファゾーンが設定されている。

適切な投入順序を決定するにあたっては、適切な投入順序決定方法が必要であると同時に、自己完結ライン間のバッファの設計も必要である。

本章では、自己完結型混合ラインの各作業工程での作業負荷をなるべく均一化するために、自己完結ライン間のバッファの設計方法の1つとして、多チャンネル型バッファの設計について考察する。また、数値実験により、多チャンネル型バッファが作業負荷の均一化に及ぼす影響を明らかにする。

3.1 多チャンネル型バッファの設計

自己完結型混合ラインは、混合ラインの柔軟性を高めるために、従来の1つの混合ラインをいくつかの自己完結ラインに分割したものである。ある自己完結ラインでラインストップが生じても、ほかの自己完結ラインに影響を与えないように、自己完結ライン間にはバッファゾーン（図3-1に示す）が設定されており、バッファゾーンには少量の製品（上流のラインにとっては組み付け済み製品、下流のラインにとっては組み付け待ち製品）がバッファとして貯められている。

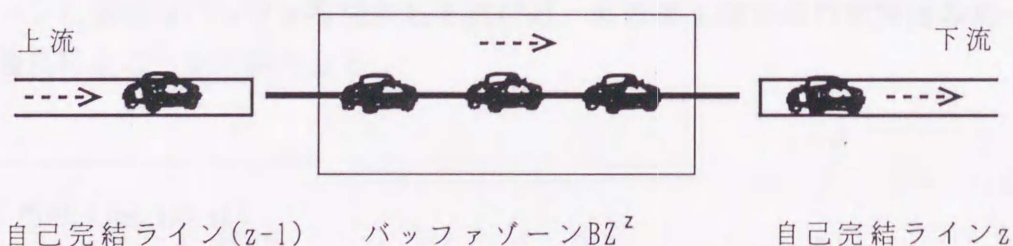


図3-1 従来の単チャンネル型バッファ

自己完結ライン($z-1$)の作業チームは、コンベア上の製品に、各作業工程で所定の組み付け作業を終了し、検査などを行ったうえで、組み付け済み製品を順番に BZ^z に送り込む。自己完結ライン z の作業チームは、 BZ^z のなかに入った製品をサイクルタイムの間隔で1つずつ引き取り、組み付け作業を行う。

図3-1のような単チャンネル型の場合は、 BZ^z にレーンが1本しか設定されていないので、製品(車)の重量や体積などの理由で、 BZ^z のなかで各製品の順番を入れ替えることが不可能である。それゆえ、各製品は、自己完結ライン($z-1$)からの投入順序のまま、ライン z に投入される。

すでに第2章で論じたように、混合ラインの柔軟性を高めるためには、各作業工程での作業負荷(各作業工程での部品の組み付けなどの所要時間)をなるべく均一化する必要がある。それを実現するために、混合ラインへの各製品の投入順序の決定が工夫されてきた。しかし、JIT生産方式のもとで混合ラインへの各製品の投入順序を決定するにあたっては、混合ラインでの生産の平準化を考慮することが最も重要となっているため¹⁾、近年の投入順序決定法のほとんどが混合ラインでの部品の使用速度をなるべく一定にすることを中心に提案されている²⁾。

しかし、混合ラインの柔軟性を高めるためには、生産の平準化に加え、作業負荷の均一化も考慮しなければならない。

トヨタ自動車は生産の平準化を実現するために、目標追跡法を開発している。さらに、作業遅れが生じないように、作業時間の大きい製品に対して投入制御を行い、目標追跡法で決定された投入順序を調整する目標調整法も開発している³⁾。徐・平木[3]は部品の引き取り形態を考慮し、生産の平準化と作業遅れの最小化を同時に実現するために、投入順序の2段階決定方法を提案している。

しかし、混合ラインの各作業工程での作業負荷は品種ごとに異なるので、投入順序決定方法に頼るだけでは、すべての作業工程において作業負荷を均一化することは難しい。自己完結型混合ラインにおいては、自己完結ライン間のバッファゾーンに適切なバッファを設計しておけば、各作業工程での作業負荷の均一化を一層高めることが可能となる。

1) 門田[4]pp. 419-422.

2) たとえば、小谷[2], Cakir & Inman[5], Miltenburg[6], Ng & Mak[7], Steiner & Yeomans[8].

3) 門田[4]pp. 435-468.

本論文では、自己完結ライン間のバッファゾーンに、1本のレーンのバッファ（単チャンネル型バッファ）のかわりに、図3-2に示すように、複数のレーンのバッファ（以下、多チャンネル型バッファとよぶ）を設計することを提案する。

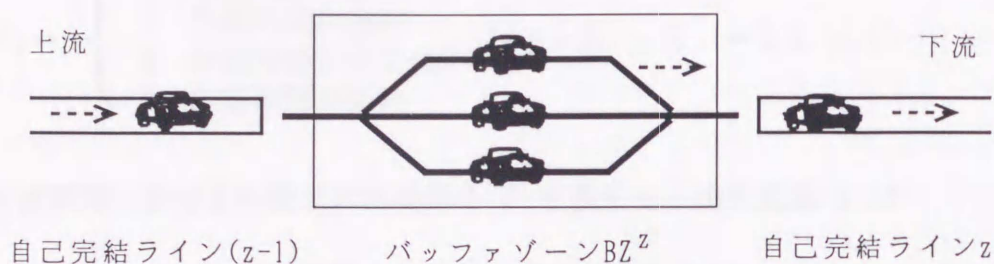


図3-2 多チャンネル型バッファ（チャンネル数=3の場合）

図3-2の場合、 BZ^z に3チャンネルが設定されている。自己完結ライン(z-1)の組み付け済み製品が BZ^z のチャンネルに送り込まれる。自己完結ラインzでは、各チャンネルに入った製品のなかから、作業負荷をなるべく均一化することが可能な製品を選択しラインへ投入する。 BZ^z で製品の進出順番を入れ替えられるので、自己完結ラインzへの投入順序は自己完結ライン(z-1)での投入順序と部分的に異なる。

したがって、各自己完結ラインは、多チャンネル型バッファを設定しておくことで、自らのラインへの投入順序を立て直す（調整する）ことができ、作業負荷が一層均一化される。

3.2 作業負荷を均一化する投入順序の決定

3.2.1 作業負荷の均一化

各作業工程での作業時間は品種ごとに異なるので、各作業工程での作業負荷をなるべく均一化する必要がある。作業時間（たとえば、秒単位）で表した作業負荷の均一化には複雑な計算が必要となるので、トヨタ自動車は、計算を単純化するために、各品種の製品の作業時間をいくつかのクラス（たとえば、大、中、小

など)に分類し、クラスで表した作業負荷の均一化をはかっている⁴⁾。

生産計画期間中製品の品種数を $I(i=1, 2, \dots, I)$ 、作業工程数を $S(s=1, 2, \dots, S)$ とする。本論文では品種 i の製品(以下製品 i とよぶ)の作業工程 s での作業負荷 e^s_i を4つのクラス $\{0, 1, 2, 3\}$ に分類し、できるだけその均一化をはかる。

$$e^s_i = \begin{cases} 0 & \text{作業時間が短い} \\ 1 & \text{作業時間が普通} \\ 2 & \text{作業時間がやや長い} \\ 3 & \text{作業時間が長い} \end{cases} \quad (s=1, 2, \dots, S; i=1, 2, \dots, I)$$

計画期間における各製品の生産量を d_i で表すと、総生産量 K は

$$K = \sum_{i=1}^I d_i \text{ となり, 作業工程 } s \text{ での総作業負荷 } E^s \text{ は } E^s = \sum_{i=1}^I e^s_i d_i \text{ となる.}$$

作業工程 s での製品1つあたりの平均作業負荷を r^s で表すと $r^s = E^s / K$ である。作業工程 s での k 番目の投入までの作業負荷の累積の実際値を X^s_k とし、目標値と実際値をつぎの表に示す。

投入順番	1	2	……	k-1	k	k+1	……	K
目標値	r^s	$2r^s$	……	$(k-1)r^s$	kr^s	$(k+1)r^s$	……	Kr^s
実際値	X^s_1	X^s_2	……	X^s_{k-1}	X^s_k	X^s_{k+1}	……	X^s_K

作業工程での作業負荷の均一化を実現するために、本章ではトヨタ自動車により開発された目標追跡法という数値計算法を用いる。目標追跡法は実際値を目標値になるべく近づけるように、最初から最後まで1つずつ投入する製品を決定していく発見的な方法で、 k 番目の投入品種を決定するとき、1番目から $(k-1)$ 番目までの投入順序は決定したものとし、単に k 番目の目標値と実際値との乖離を最小にする品種を k 番目の投入とするという数値計算法で、計算量が少なく、近似率が比較的に高いという特徴がある⁵⁾。

4) 門田[4]pp. 430-434.

5) 目標追跡法については、小谷[2]を参照。また、原文では、目標値と実際値との差の平方の和を「距離」(数値計算上の距離)と表現しているが、本論文では、長さの距離と区別するために、「距離」のかわりに「乖離」と表現している。

3.2.2 投入順序の決定

従来の混合ラインでは、一度各製品の投入順序が決定されたら、最初の作業工程から最後の作業工程までその順序で組み付け作業が行われる。自己完結型混合ラインの場合、各自己完結ラインは多チャンネル型バッファを利用し、投入順序を立て直してから各製品を自らのラインへ投入することができる。各自己完結ラインが作業負荷の均一化を考慮し投入順序を立て直すとき、考慮の対象となる作業工程の範囲の観点から、本論文では投入順序を協力型と非協力型に分類する。

協力型：当該自己完結ライン以後のすべてのラインの作業工程を考慮の対象とする。

非協力型：当該自己完結ラインの作業工程だけを考慮の対象とする。

自己完結ライン z の作業工程の集合を H^z 、自己完結ライン z 以後のすべての作業工程の集合を G^z とすると、投入順序の目的関数はつぎのとおりである。

$$\text{協力型： } \text{Min. } \sum_{s \in G^z} (kr^s - X^s_k)^2 \quad (3-1)$$

$$\text{非協力型： } \text{Min. } \sum_{s \in H^z} (kr^s - X^s_k)^2 \quad (3-2)$$

本論文は協力型投入順序を考慮し式(3-1)を目標追跡法の目的関数とする協力型目標追跡法を用いる。

本論文では以下の前提条件のもとで研究を進める。

- (1) 自己完結型混合ラインのサイクルタイムは一定である。
- (2) 各自己完結ラインのバッファゾーンに多チャンネル型バッファが設定されており、チャンネルごとに製品1つだけが入る。
- (3) ラインストップなどが下流のラインでの投入製品の選択に差し障ることはない。
- (4) 各生産計画期間の製品の生産は期間内で完了しなければならないものとする。

図3-3 に計画期間の製品の投入を例示する。

自己完結ライン(z-1)に製品がサイクルタイム c の間隔で投入される。投入されてからつぎの自己完結ラインのバッファゾーン BZ^z に到着するまでの所要時間を p^{z-1} (秒)とすると、当期の最初($k=1$)に投入された製品は p^{z-1} (秒)後 BZ^z に到着する。そのとき、自己完結ライン z では、前の計画期間(前期)の製品の生産がまだ終了していないし、 BZ^z にもまだ前期の製品が残っている。前期の製品の生産が終了するまでは、到着した当期の製品を選択しライン z へ投入することができないので、 BZ^z のなかにある前期の製品のなかから適切な製品を選択しラインへ投入する。さらに c (秒)後2番目の製品($k=2$)が BZ^z に到着する。 BZ^z のチャンネル数を w^z とすると、当期の製品がライン(z-1)に最初に投入されてから $p^{z-1}+c(w^z-1)$ (秒)後、 BZ^z のなかの製品はすべて当期の製品となり、そのなかから最初の製品($k=1$)を選択してライン z へ投入する。すなわち、ライン z ではライン(z-1)より $p^{z-1}+c(w^z-1)$ (秒)遅れて前期の製品の生産を終了し、当期の製品の生産を始める。

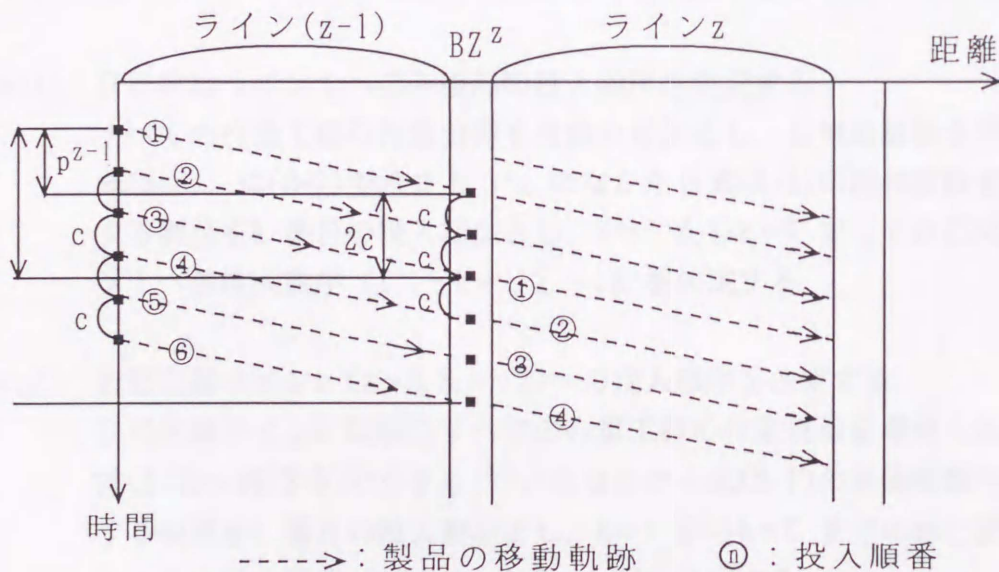


図3-3 計画期間の製品の投入 ($w^z=3$ の場合)

自己完結ライン z が k 番目の投入製品を選択するとき、バッファゾーン BZ^z で選択の対象となる製品の集合(同じ品種の製品も異なる元とみなす)を V^z_k 、投入する製品を i^z_k で表すと、つぎの式で V^z_k が求まる。

$$V^z_1 = \{i^{z-1}_1, i^{z-1}_2, \dots, i^{z-1}_{wz}\} \quad (z=2, 3, \dots, Z) \quad (3-3)$$

$$V^z_k = V^z_{k-1} - \{i^z_{k-1}\} + \{i^{z-1}_{k-1+wz}\} \quad (3-4)$$

(z=2, 3, \dots, Z; k=2, 3, \dots, (K-w^z))

$$V^z_k = V^z_{k-1} - \{i^z_{k-1}\} \quad (z=2, 3, \dots, Z; k=(K-w^z+1), \dots, K) \quad (3-5)$$

ただし、 BZ^1 は実在しないので、架空の V^1_k の算出式をつぎのように約束する。

$$V^1_1 = \{\text{計画期間中の全製品}\} \quad (3-6)$$

$$V^1_k = V^1_{k-1} - \{i^1_{k-1}\} \quad (k=2, 3, \dots, K) \quad (3-7)$$

自己完結ラインへの各製品の投入順序決定の手順はつぎのとおりである。

step1) : 自己完結ライン1への各製品の投入順序を決定する。

すべての作業工程の作業負荷を考慮の対象とし、目標追跡法を用いて、式(3-6)、式(3-7)で求まる V^1_k のなかから式(3-1)の評価関数を最小にする製品をk番目の投入製品とし、k=1からk=Kまでの自己完結ライン1への投入順序($i^1_k : k=1, 2, \dots, K$)を決定する。

step2) : 自己完結ラインz (z=2, 3, \dots, Z)への投入順序を決定する。

自己完結ラインz以後のすべての作業工程の作業負荷を考慮の対象とし、式(3-3)~式(3-5)で求まる V^z_k のなかから式(3-1)の評価関数を最小にする製品をk番目の投入製品とし、k=1からk=Kまでの自己完結ラインzへの投入順序($i^z_k : k=1, 2, \dots, K$)を決定する。

3.3 多チャンネル型バッファが作業負荷の均一化に及ぼす影響

多チャンネル型バッファが作業負荷の均一化に及ぼす影響を明らかにするために、本論文では、つぎのような自己完結型混合ラインを考慮する。

◆入力データ：

自己完結型混合ラインは2つの自己完結ラインから構成される。自己完結ライン1には作業工程1，作業工程2，作業工程3があり，自己完結ライン2には作業工程4，作業工程5，作業工程6がある。自己完結ライン間には多チャンネル型バッファを設定することができる。自動車の組立工場の管理理念やスペース制約などの理由で，バッファゾーンに3つ以下の製品を設定することが多いので⁶⁾，本論文ではチャンネル数のパラメータとして，1,2,3 の3つのケースを考慮する。また，最多で6種類の製品が生産され，作業工程での品種ごとの作業時間（クラス）が表3-1 で与えられるものとする。

表3-1 各作業工程での品種ごとの作業時間

e^s_i	自己完結ライン1			自己完結ライン2		
	s=1	s=2	s=3	s=4	s=5	s=6
i=1	3	1	2	0	2	1
i=2	3	2	1	1	1	0
i=3	1	3	2	2	2	2
i=4	2	1	1	0	3	1
i=5	3	2	2	1	1	2
i=6	2	1	2	2	3	1

◆数値例：

生産計画期間中25台の製品が生産される。各製品の生産量を $d_1=6$, $d_2=7$, $d_3=3$, $d_4=6$, $d_5=3$, $d_6=0$ とする。目標追跡法を用いて作業工程での作業負荷をなるべく均一化する投入順序を決定する。

6) 「工場管理」編集部[1].

自己完結ライン1は協力型目標追跡法を用いて、作業工程1～作業工程6での作業負荷をなるべく均一化するように各製品の投入順序を決定する。投入順序の決定過程を表3-2に示す。チャンネル数 $w^2 = 1$ の場合は、自己完結ライン1からの投入順序のまま、自己完結ライン2へ投入される。

チャンネル数 $w^2 = 2$ の場合は、自己完結ライン2は作業工程4～作業工程6での作業負荷を一層均一化するために、 BZ^2 の2つのチャンネルから適切な製品を選択し投入順序を立て直す。自己完結ライン2への投入順序の決定過程を表3-3に示す。

チャンネル数 $w^2 = 3$ の場合は、自己完結ライン2は BZ^2 の3つのチャンネルから適切な製品を選択し投入順序を立て直す。自己完結ライン2への投入順序の決定過程を表3-4に示す。

以上の各投入順序を表3-5にまとめて示す。

表3-5に示すように、上述の数値例の場合は、自己完結ライン2は多チャンネル型バッファを利用し一部の投入順序を立て直して、作業負荷の実際値と目標値との総乖離を小さくすることができ、また、チャンネル数を増やせば、作業負荷がより均一化できることが明らかになった。

表3-2 自己完結ライン1への投入順序の決定過程

順番 k	各製品が投入されるとき乖離					投入 順序 i^1_k	総乖離	各製品の投入量				
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5			i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
1	<u>1.35</u>	2.35	7.39	2.67	2.55	1	1.35	0	0	0	0	
2	5.39	<u>2.39</u>	4.47	5.03	3.79	2	3.73	1	0	0	0	
3	5.12	8.12	3.24	<u>3.08</u>	4.72	4	6.82	1	1	0	0	
4	6.84	5.84	2.00	9.12	<u>1.64</u>	5	8.46	1	1	1	1	
5	5.28	4.28	<u>3.48</u>	3.88	5.28	3	11.94	1	1	1	1	
6	<u>2.86</u>	3.86	20.10	3.78	10.06	1	14.80	2	1	1	1	
7	4.93	<u>1.93</u>	15.21	4.17	9.33	2	16.73	2	2	1	1	
8	2.70	5.70	12.02	<u>0.26</u>	8.30	4	16.99	2	2	2	1	
9	2.04	<u>1.04</u>	8.40	3.92	2.84	2	18.03	2	3	1	1	
10	<u>1.52</u>	6.52	6.92	1.72	3.52	1	19.55	3	3	2	1	
11	4.69	5.69	<u>3.13</u>	3.21	3.89	3	22.68	3	3	2	1	
12	<u>2.04</u>	5.04	19.52	2.88	8.44	1	24.72	4	3	2	1	
13	3.64	<u>2.64</u>	14.16	2.80	7.24	2	27.36	4	4	2	1	
14	2.93	7.93	12.49	<u>0.41</u>	7.73	4	27.77	4	4	2	1	
15	<u>1.72</u>	2.72	8.32	3.52	1.72	1	29.49	5	4	2	1	
16	5.72	<u>2.73</u>	5.36	5.84	2.92	2	32.21	5	5	2	1	
17	5.42	8.42	4.10	3.86	<u>3.82</u>	5	36.03	5	5	2	2	
18	6.41	9.42	8.13	<u>1.17</u>	10.01	4	37.20	5	5	2	2	
19	4.78	3.78	<u>3.54</u>	3.86	3.58	3	40.74	5	5	3	2	
20	<u>2.88</u>	3.88	-	4.28	8.88	1	43.62	6	5	3	2	
21	-	<u>1.91</u>	-	4.64	8.12	2	45.54	6	6	4	2	
22	-	5.64	-	<u>0.68</u>	7.04	4	46.22	6	6	3	2	
23	-	<u>1.42</u>	-	4.79	2.02	2	47.65	6	7	3	2	
24	-	-	-	<u>2.55</u>	2.67	4	50.20	6	7	3	2	
25	-	-	-	-	<u>0.0</u>	5	50.20	6	7	3	3	

表3-3 自己完結ライン2への投入順序の決定過程（チャンネル数 = 2の場合）

順番 k	BZ ² に 到着 i	BZ ² の製 品の集合 V ² _k	各製品が投入されるとき の乖離					投入 順序 i ² _k	総乖離
			i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5		
1		1, 2	<u>0.44</u>	1.76	-	-	-	1	0.44
2	4	4, 2	-	<u>1.39</u>	-	3.39	-	2	1.82
3	5	4, 5	-	-	-	<u>1.85</u>	-	4	3.68
4	3	3, 5	-	-	0.63	-	2.33	5	4.14
5	1	3, 1	<u>1.52</u>	-	2.12	-	<u>0.47</u>	1	5.66
6	2	3, 2	-	2.36	<u>1.56</u>	-	-	3	7.23
7	4	4, 2	-	<u>1.12</u>	-	3.12	-	2	8.35
8	2	4, 2	-	<u>4.20</u>	-	<u>0.20</u>	-	4	8.55
9	1	1, 2	0.90	<u>0.78</u>	-	-	-	2	9.33
10	3	1, 3	<u>0.68</u>	-	2.88	-	-	1	10.01
11	1	1, 3	1.45	-	<u>1.17</u>	-	-	3	11.18
12	2	1, 2	<u>0.34</u>	3.18	-	-	-	1	11.52
13	4	4, 2	-	1.54	-	<u>1.54</u>	-	4	13.06
14	1	1, 2	2.77	<u>0.25</u>	-	-	-	2	13.31
15	2	1, 2	<u>0.67</u>	2.48	-	-	-	1	13.99
16	5	5, 2	-	2.10	-	-	-	5	14.65
17	4	4, 2	-	1.76	-	<u>1.76</u>	0.66	4	16.41
18	3	3, 2	-	<u>0.36</u>	3.96	-	-	2	16.77
19	1	3, 1	1.40	-	<u>1.28</u>	-	-	3	18.06
20	2	2, 1	<u>0.72</u>	2.12	-	-	-	1	18.78
21	4	2, 4	-	<u>0.75</u>	-	2.75	-	2	19.52
22	2	2, 4	-	4.29	-	<u>0.29</u>	-	4	19.82
23	4	2, 4	-	<u>1.34</u>	-	3.34	-	2	21.16
24	5	5, 4	-	-	-	1.91	<u>1.75</u>	5	22.92
25		4	-	-	-	<u>0.0</u>	-	4	22.92

表3-4 自己完結ライン2への投入順序の決定過程（チャンネル数 = 3 の場合）

順序 k	BZ ² に 到着 i	BZ ² の製 品の集合 V ² _k	各製品が投入されるとき の乖離					投入 順序 i ² _k	総乖離
			i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	i = 5		
1		1, 2, 4	<u>0.44</u>	1.76	-	1.76	-	0.44	
2	5	5, 2, 4	-	<u>1.39</u>	-	3.39	1.71	1.82	
3	3	5, 3, 4	-	-	<u>1.45</u>	1.85	2.33	3.28	
4	1	5, 1, 4	<u>0.35</u>	-	-	0.63	5.27	3.62	
5	2	5, 2, 4	-	2.71	-	<u>0.72</u>	3.52	4.34	
6	4	5, 2, 4	-	<u>0.60</u>	-	4.60	1.56	4.95	
7	2	5, 2, 4	-	4.00	-	2.00	<u>1.12</u>	6.07	
8	1	1, 2, 4	0.64	4.20	-	<u>0.20</u>	-	6.27	
9	3	1, 2, 3	<u>0.90</u>	<u>0.78</u>	3.58	-	-	7.05	
10	1	1, 1, 3	<u>0.68</u>	-	2.88	-	-	7.73	
11	2	2, 1, 3	1.45	3.97	<u>1.17</u>	-	-	8.90	
12	4	2, 1, 4	<u>0.34</u>	3.18	-	1.18	-	9.24	
13	1	2, 1, 4	<u>0.38</u>	1.54	-	1.54	-	9.62	
14	2	2, 2, 4	-	<u>0.77</u>	-	2.77	-	10.39	
15	5	5, 2, 4	-	4.68	-	<u>0.68</u>	3.08	11.07	
16	4	5, 2, 4	-	2.10	-	4.10	<u>0.66</u>	11.73	
17	3	3, 2, 4	-	1.76	4.16	<u>1.76</u>	-	13.49	
18	1	3, 2, 1	3.60	<u>0.36</u>	3.96	-	-	13.85	
19	2	3, 2, 1	1.40	2.48	<u>1.28</u>	-	-	15.14	
20	4	4, 2, 1	<u>0.72</u>	2.12	-	2.12	-	15.86	
21	2	4, 2, 2	-	<u>0.75</u>	-	2.75	-	16.60	
22	4	4, 4, 2	-	4.29	-	<u>0.29</u>	-	16.90	
23	5	5, 4, 2	-	1.34	-	3.34	<u>1.02</u>	17.92	
24		4, 2	-	<u>1.32</u>	-	1.75	-	19.68	
25		4	-	-	-	<u>0.0</u>	-	19.68	

表3-5 自己完結ラインへの各製品の投入順序

BZ ²	ライン	投入順序	乖離	総乖離
w ² =1	ライン1:	1 2 4 5 3 1 2 4 2 1 3 1 2 4 1 2 5 4 3 1 2 4 2 4 5	25.08	50.20
	ライン2:		25.12	
w ² =2	ライン1:	1 2 4 5 3 1 2 4 2 1 3 1 2 4 1 2 5 4 3 1 2 4 2 4 5	25.08	48.00
	ライン2:	1 2 4 5 1 3 2 4 2 1 3 1 4 2 1 5 4 2 3 1 2 4 2 5 4	22.92	
w ² =3	ライン1:	1 2 4 5 3 1 2 4 2 1 3 1 2 4 1 2 4 1 2 5 4 3 1 2 4 2 4 5	25.08	44.76
	ライン2:	1 2 3 1 4 2 5 4 2 1 3 1 1 2 4 5 4 2 3 1 2 4 5 2 4	19.68	

(d₁=6, d₂=7, d₃=3, d₄=6, d₅=3, d₆=0 の場合)

◆数値実験

チャンネル数をパラメータとして1, 2, 3 と変動させると同時に、生産計画期間に生産される製品の品種数もパラメータとして4, 5, 6 と変動させる。各製品の生産量は表3-6 に示す範囲内で変動するものとする。数値実験は総生産量を25とし、各製品の生産量を変動範囲内で一様乱数で10,000回発生させ、示した投入順序決定の手順で、それぞれの投入順序を決定し作業負荷の変動を求め、総乖離を算出する。その総乖離の平均と分散を表3-7 の上段に示す。各値がそれぞれ $w^2 = 1$ のときの値に占める割合を収束率とよび、つぎの式(3-8) で定義し、表3-7 の下段に示す。

$$\text{収束率} = \frac{\text{多チャンネル型バッファを用いたときの総乖離}}{\text{単チャンネル型バッファを用いたときの総乖離}} \quad (3-8)$$

収束率は多チャンネル型バッファの設計により、従来の単チャンネルバッファと比べ総乖離がどのように変化するかを示すものである。収束率が0に近いほど多チャンネル型バッファの設計が有効であることを意味している。図3-4 に総乖離の収束率の変化を示す。

上述の数値実験をまとめ、

- (1)チャンネル数を増やせば、平均は緩やかに収束すると同時に分散は大幅に収束する、
- (2)品種数が多いほど総乖離の平均ならび分散の収束幅が大きくなるので、品種数が多いほど多チャンネル型バッファの設定が有効であることが明らかになった。

表3-6 各製品の生産量の変動範囲

d_i	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
$I=4$	5~11	4~9	3~8	1~12	0~0	0~0
$I=5$	6~10	5~9	3~7	2~6	2~6	0~0
$I=6$	7~9	6~8	5~7	2~4	2~4	1~3

表3-7 総乖離の平均と分散（収束率）

	I=4		I=5		I=6	
	平均	分散	平均	分散	平均	分散
$w^2=1$	42.20 1.0	74.76 1.0	46.22 1.0	31.79 1.0	203.99 1.0	33374.00 1.0
$w^2=2$	41.74 0.989	62.74 0.839	44.38 0.960	23.30 0.733	170.57 0.836	23287.00 0.698
$w^2=3$	42.04 0.996	59.35 0.794	44.00 0.952	20.44 0.638	159.75 0.783	19815.00 0.594

下段は収束率

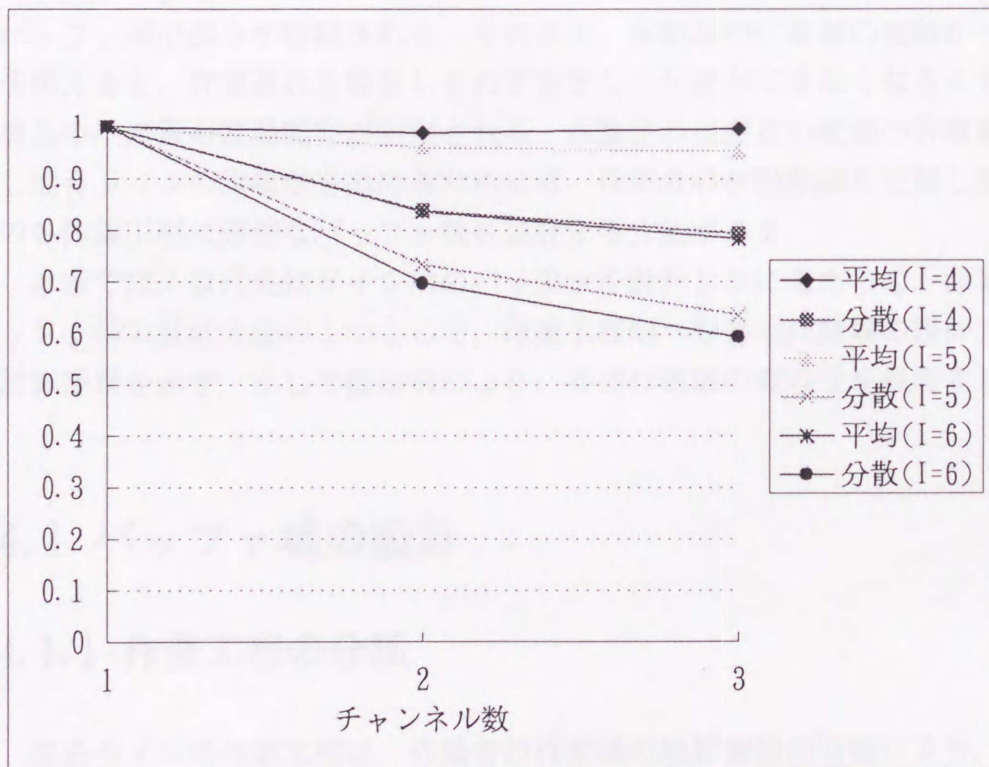


図3-4 総乖離の平均と分散の収束率

第4章 自己完結ライン内のバッファの設計

自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるためには、まず各作業工程での作業負荷をなるべく均一化する必要がある。第3章において、自己完結ライン間の多チャンネル型バッファの設計方法を考察したうえで、多チャンネル型バッファが作業負荷の均一化に及ぼす影響を明らかにするために、数値実験を行った。数値実験の結果が示したように、多チャンネル型バッファは作業負荷をなるべく均一化することには有効であるが、作業負荷を完全に均一化することはできないということがわかった。

自己完結ラインの各作業工程での品種ごとの作業時間が異なるにもかかわらず、製品は一定の間隔で投入されるので、作業時間の長い製品の生産量が増えると、作業遅れが生じやすくなる。場合によっては、作業遅れを吸収しきれず、安定した生産ができなくなる。したがって、各製品の生産量の変動に対応するためには、中日程生産計画段階であらかじめ各作業工程にバッファ域を与えなければならない。しかし、作業工程へのバッファ域の設計には、物理的な制約などが存在し、バッファ域の長さが制限される。それゆえ、各製品の生産量の変動が一定の範囲を超えると、作業遅れを吸収しきれず安定した生産ができなくなるので、通常各製品の生産量の変動範囲が制限される。各製品の生産量の変動の許容範囲を拡大し混合ラインの柔軟性を高めるためには、作業者の移動軌跡を把握し混合ラインの各作業工程に適切なバッファ域を設計する方法がある。

本章では、自己完結ライン内のバッファを設計するにあたって、作業工程のバッファ域の設計方法の1つとして、作業工程間への共同作業域の設計方法を与え、計算手順を示す。そして数値例により、共同作業域の有効性を検証する。

4.1 バッファ域の設計

4.1.1 作業工程の分類

混合ラインの作業工程は、作業者の作業域の境界制約の有無により、つぎの2種類に分類される¹⁾。

1) 平木[5], [6].

(1) タイプ1：境界制約のある作業工程（図4-1 に示す）

作業工程の作業者に作業域の境界制約があり，作業者が定められた作業域内で作業を行い，隣接する作業工程に入って作業することはできない。

(2) タイプ2：境界制約のない作業工程（図4-2 に示す）

作業工程の作業者に作業域の境界制約がなく，作業者が隣接する作業工程に入って作業することができる。

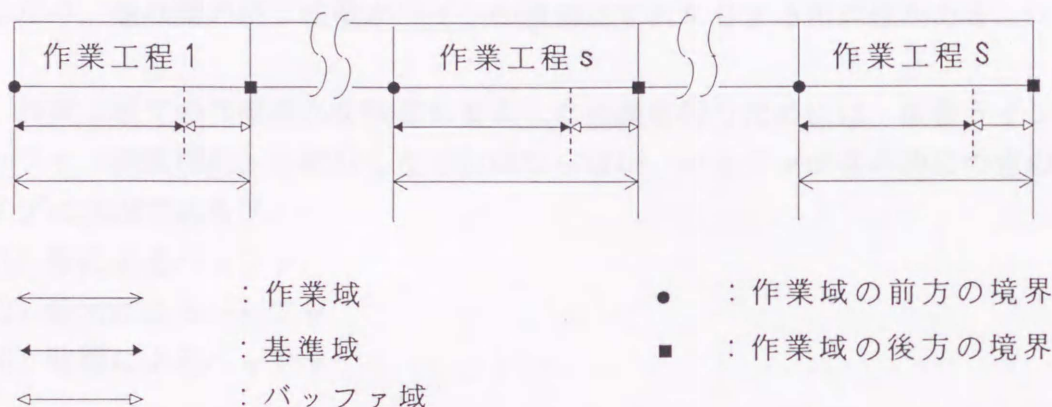


図4-1 タイプ1の作業工程²⁾

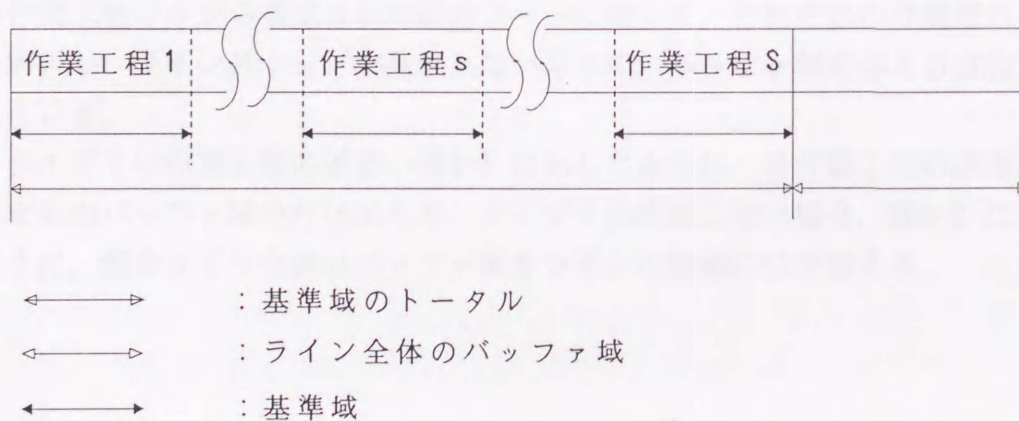


図4-2 タイプ2の作業工程²⁾

2) 平木[5].

混合ラインの稼働時，作業時間の長い製品が連続して流れてくると，作業者の作業終了位置が作業域の後方へずれてゆき，作業遅れが生じる。

作業遅れは，指定された基準域内で作業が終了できない状態であり，混合ラインのバランス，作業域，サイクルタイム，各製品の生産量および投入順序により影響される³⁾。上述のタイプ1の作業工程の場合は，作業域の後方の境界までに作業が終了できなければ，混合ラインのラインストップを引き起こす。タイプ2の作業工程に作業遅れが生じる場合は，つぎの作業工程の作業者に遊休が生じたり，全作業の終了位置がラインの後部にずれたりする可能性がある。

作業工程での作業遅れを吸収し安定した生産を行うためには，混合ラインにバッファ（緩衝機能）を設計しなければならない。バッファは基本的につぎの3タイプに大別できる⁴⁾。

- (1) 物によるバッファ
- (2) 能力によるバッファ
- (3) 時間によるバッファ

本論文では，物によるバッファの設計を考慮する。第3章で論じた自己完結ライン間の多チャンネル型バッファと，本章で論じる自己完結ライン内の各作業工程のバッファ域（作業域の余裕）とともに物によるバッファである。

平木[5], [6] はタイプ1の作業工程のみから構成された混合ラインとタイプ2の作業工程のみから構成された混合ラインに対して，それぞれの作業遅れの挙動を解析し，ラインストップが発生しないように，バッファ域を与える方法を提案している。

タイプ1の作業工程の場合，図4-1に示したように，各作業工程の基準域にそれぞれのバッファ域を付け加える。タイプ2の作業工程の場合，図4-2に示したように，混合ライン全体のバッファ域をラインの後部に付け加える。

3) 黒田[2].

4) 村松[7]pp. 64-65.

4.1.2 安定した生産

本論文では、作業域に前方の境界と後方の境界のある作業工程を考慮する。作業者が後方の境界までに作業を終えることができない場合、ラインストップが生じ、作業者の作業は不安定な状態となる。

安定した生産に要求される条件は、業種や管理方針によって異なるところがある。たとえば、大野ら[1]は混合ラインのラインストップ時間と作業者の遊休時間にそれぞれの損失係数を導入し、総損失を最小にするかぎり、ラインストップもやむを得ないこととして計画段階で認めている。

しかし、自動車の最終組立ラインのような混合ラインの場合には、ラインストップが生じると、ほかの作業工程の作業者に作業進行の影響を与えるだけでなく、作業意欲など精神的な面でも大きな影響を及ぼすので、計画段階でラインストップが生じないようにバッファ域の設計方法や各製品の投入順序の決定方法が提案されてきた⁵⁾。

本論文では、計画段階でラインストップは認められないものと考え、ラインストップが生じないことを「安定した生産」と約束する。

安定した生産を保つためには、作業遅れを吸収する適切なバッファ域を設計しなければならない。バッファ域を設計するにあたっては、既存のライン編成に対して、作業工程のタイプ、各製品の生産量の変動、投入順序の決定方法および作業工程の物理的な制限（たとえば、ラインの長さ、機械設備、部品の置場など）を考慮する必要がある。

作業遅れは、基準域内で作業が終了できない状態であり、混合ラインの非能率的な状態を表す。混合ラインの作業工程へのバッファ域の設計や各製品の投入順序の決定は作業遅れに影響を与える。作業遅れの算出方法もラインの特性によって異なる。

たとえば、ユニット住宅生産ラインのような大型製品の生産ラインの場合は、大型機械設備が必要であり、固有技術上の理由で作業域をいくつかの区域に分け、それぞれの区域に費用係数を与え、各区域での作業のコストを考慮する⁶⁾。

5) たとえば、徳安・黒田[4]，平木[5]，村松[7]，Mitsumori[9]。

6) 徳安・黒田[4]。

Thomopoulos[10]は作業工程を一般化し，作業域を3つの区域（すなわち，前方のバッファ域，基準域，後方のバッファ域）に分けている．基準域内での作業を損失のない0として，つぎの4種の損失を定義し，それぞれの損失係数を与える．各種の損失においての経過時間に損失係数を乗じ，総損失の概念を導入している．それらを図4-3に示す．

- (a) 作業者が前方の境界で品物の到着を待つ時間（idleness）
- (b) 作業者の前方のバッファ域内での作業時間（work deficiency）
- (c) 作業者の後方のバッファ域内での作業時間（work congestion）
- (d) 作業者が後方の境界内で作業を終えることができない場合の作業終了までの所要時間（utility work）

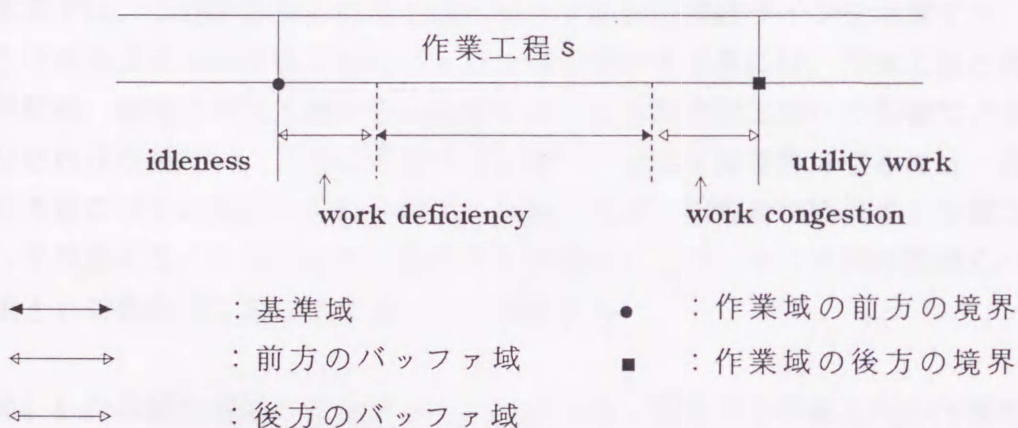


図4-3 作業域の3つの区域と4種の損失係数⁷⁾

本論文では，作業遅れについてつぎのように約束する．

- (1) 各製品の生産量の変動および投入順序による作業遅れを考慮する．
- (2) 作業工程の作業域は基準域とバッファ域から構成される．
- (3) 作業者の作業が基準域を超えた場合を作業遅れの発生とみなす．
- (4) バッファ域に侵入した距離を作業遅れの大きさとみなす．
- (5) 基準域は所与とする．

7) Thomopoulos[10].

4.2 共同作業域の概念

自動車の最終組立ラインのような混合ラインの各作業工程においては、機械設備や部品の置場などの物理的な制約がある。4.1 で述べたように、作業域の境界制約の有無により、作業工程はタイプ1とタイプ2に分類される。平木[5],[6]はそれぞれの作業工程から構成される混合ラインに対して、需要変動などの結果により生じた作業遅れを吸収するためのバッファ域の設計方法を提案している。

タイプ1の作業工程は、作業域の前方、後方ともに制約があるのに対して、タイプ2の作業工程は作業域の前方、後方ともに制約がない。また、作業域の片側にのみ制約があり、もう一方には制約のない作業工程も存在する⁸⁾。

本章では、上述の各種の作業工程が混在する自己完結ラインを考慮する。このような混合ラインの作業工程にバッファ域を設計する際には、作業工程の両側の境界制約、前方の作業工程からの影響および後方の作業工程への影響などを考慮しなければならない。このような作業工程にバッファ域を設計するには、従来の設計方法だけでは対応しがたいので、本論文では、作業者が隣接する作業工程に入って作業することのできる区域を共同作業域とよび、その共同作業域をバッファ域として各作業工程に与えることを提案する。

図4-4 に共同作業域のある混合ラインを示す。隣接する作業工程の作業域が重なる部分が共同作業域である。作業工程の作業域は前方の作業工程との共同作業域、基準域および後方の作業工程との共同作業域によって決められる。作業者は前方または後方の共同作業域に入って作業することで（本論文では隣接する作業工程の作業者の共同作業域での同時作業を考慮しない）、作業遅れを吸収することができる。

共同作業域は各種の作業工程を一般化したものであり、表4-1 は各種の作業工程に対応する共同作業域の設計を示すものである。

表4-1 に使用する記号の定義はつぎのとおりである。

j^{s-1} : 作業工程(s-1)に設定された共同作業域（長さ）。作業工程s からみて前方の共同作業域

8) 黒田[2]pp. 128-129.

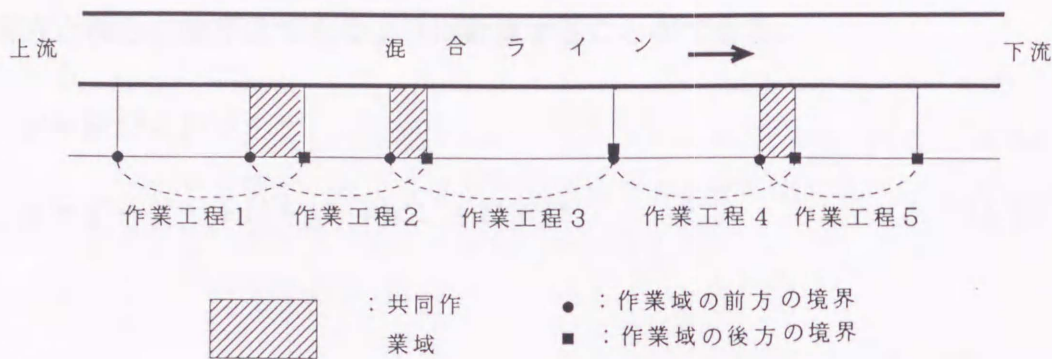


図4-4 共同作業域のある混合ラインの概念図

j^s : 作業工程 s に設定された共同作業域. 作業工程 $(s+1)$ からみて前方の共同作業域

図4-4 の場合, 作業工程 1 と 4 が (○, ×) 型のもの, 作業工程 2 が (×, ×) 型のもの, 作業工程 3 と 5 が (×, ○) 型のものである.

表4-1 共同作業域による対応

境界の制約		共同作業域による対応
あり	(○, ○)	$j^{s-1} = 0, j^s = 0$
	(○, ×)	$j^{s-1} = 0, j^s \geq 0$
	(×, ○)	$j^{s-1} \geq 0, j^s = 0$
なし	(×, ×)	$j^{s-1} \geq 0, j^s \geq 0$

(a, b) : a:作業域の前方 ○:境界制約あり
 b:作業域の後方 ×:境界制約なし

図4-5 に前方, 後方とも共同作業域が与えられた作業域の構成を示す. 使用する記号の定義はつぎのとおりである.

- ~
 l^s : 作業工程 s の基準域 (長さ)
 g^s : 作業工程 s の前方の境界. 作業工程 s の前方の共同作業域の始点
 h^{s-1} : 作業工程 $(s-1)$ の後方の境界. 作業工程 s の前方の共同作業域の終点
 g^{s+1} : 作業工程 $(s+1)$ の前方の境界. 作業工程 s の共同作業域の始点
 h^s : 作業工程 s の後方の境界. 作業工程 s の共同作業域の終点

作業工程(s-1)の後方の境界がすでに求められたものとする、作業工程sの前方と後方の境界はつぎのように計算することができる。

$$g^s = h^{s-1} - j^{s-1} \quad (4-1)$$

$$h^s = g^s + j^{s-1} + \tilde{l}^s + j^s = h^{s-1} + \tilde{l}^s + j^s \quad (4-2)$$

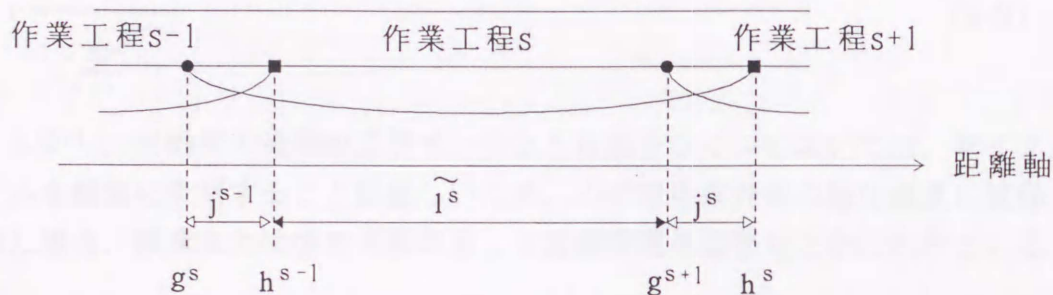


図4-5 作業域の構成

表4-1 に示したように、共同作業域の設定ができない場合には、その共同作業域の長さを0とみなせば、式(4-1)、式(4-2)が成り立つ。

4.3 混合ラインの利用効率

中日程生産計画段階で作業工程にバッファ域を設計する前の段階において、まず混合ラインのバランスングを行わなければならない。本節では、混合ラインのバランスングの評価尺度である編成効率と柔軟性の評価尺度である利用効率を論じる。

4.3.1 混合ラインの編成効率

混合ライン生産方式とは、作業内容と方法がほぼ等しい特定の複数品種の製品を混合して連続生産する方式である。切替ラインのように品種ごとに段取り替えをする必要はないが、その反面、混合ラインのバランスングを行う必要がある。

混合ラインのバランスングはつぎの手順にしたがって行われる⁹⁾。

(1) サイクルタイムの決定

サイクルタイム c は、製品がラインへ投入される時間間隔である。混合ラインでのサイクルタイムは、同一ラインで生産される各製品の生産予定量 \bar{d}_i が計画期間の稼働予定時間 A 内に完了できるように決定される。したがって、混合ラインのサイクルタイムは式(4-3)で与えられる。

$$c = \frac{A}{\sum_{i=1}^I \bar{d}_i} \quad (4-3)$$

しかし、自動車の最終組立ラインのような混合ラインにおいては、サイクルタイムを頻繁に変更することは難しいため、小日程生産計画の総生産量に変動が生じた場合、残業または休日出勤によって稼働時間の調整などが行われている。

(2) 要素作業の統合先行順位図の作成

混合ラインで生産される各製品には、それぞれ所定の作業が必要となるが、その作業は通常多くの基礎的な作業の要素から構成される。その分割可能かつ合理的な程度に分割された最小の作業単位を要素作業といい、その要素作業を行う標準的な所要時間を要素作業時間という。

要素作業は、品種間に共通のものもあるが、異なるものもある。各要素作業間には、作業実施順序に課せられた固有技術による制約がある。すなわち、要素作業間には先行関係がある。したがって、全品種の要素作業間の先行関係を示す先行順位図を作成する必要がある。

(3) 混合ラインのバランスング

各作業工程に要素作業が配分され、各作業工程での品種ごとの作業時間（要素作業時間の和）が異なる。各製品の生産予定量で加重平均した作業時間がサイクルタイムを超えることは認められない。サイクルタイムから作業時間の加重平均を差し引いた値を、その作業工程の遊休時間とよぶ。

9) 黒田[2], 村松[7], 門田[8].

安定した生産を保つためには、遊休時間の発生が不可避であるが、各作業工程の遊休時間および全ラインの総遊休時間を最小化する必要がある。

混合ラインのバランスングとは、混合ラインの作業工程の総遊休時間が最小になるように、サイクルタイムの制約、要素作業間の先行関係、その他の付加的な制約を満たしながら、すべての要素作業を作業工程に配分することである。

混合ラインのバランスングを行う際に、つぎのような問題が取り上げられる¹⁰⁾。

- ① 所定のサイクルタイムに対して、必要な作業工程数の最適（最小）値を決定する。
- ② 所定の作業工程数に対して、サイクルタイムを最小にする。
- ③ サイクルタイムと作業工程数に関する所与の範囲のもとで、適切なサイクルタイムと作業工程数を同時に調整する。

混合ラインのバランスングを評価するために、通常式(4-4)に示す編成効率 η が用いられる¹¹⁾。各作業工程の作業時間の加重平均はサイクルタイム以下であるので、 $0 \leq \eta \leq 1$ であり、 η が大きいほどラインのバランスがとれていることを意味する。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^I (d_i T_i)}{Sc \sum_{i=1}^I d_i} \quad (4-4)$$

本論文では、作業者の品種ごとの作業時間は確率変動のないものと仮定する。

4.3.2 混合ラインの利用効率

自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるためには、各作業工程の作業域が効率的に利用されるように、バッファ域を設計しなければならない。

式(4-4)に示したように、混合ラインの編成効率は各製品の生産予定量で加重

10) 黒田[2]pp. 36.

11) 村松[7]pp. 187.

平均した総作業時間がサイクルタイムと作業工程数との積に占める割合である。

混合ラインのライン速度 v （パラメータ）を用いて、ライン上の 製品の間隔の長さ（投入間隔）を W 、品種 i の総作業距離を L_i とすると、従来時間で表したものが距離（長さ）で表したものに換えられる。

製品の投入時間間隔 c → 製品の投入距離間隔 W

品種 i の作業工程 s での作業時間 t^s_i → 品種 i の作業工程 s での作業距離 l^s_i

品種 i の全作業工程の総作業時間 T_i → 品種 i の全作業工程の総作業距離 L_i

$$W = vc \quad (4-5)$$

$$l^s_i = vt^s_i \quad (4-6)$$

$$L_i = vT_i \quad (4-7)$$

本論文では、自動車の最終組立ラインのような移動作業方式の混合ラインを考慮している。ここでの作業距離 l^s_i は、作業工程 s の作業者がライン速度 v で流れてくる品種 i の製品に対して作業し始めてから終了するまでの製品の移動距離を表す。

よって、式(4-4) は式(4-8) に変形される。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^I (d_i L_i)}{SW \sum_{i=1}^I d_i} \quad (4-8)$$

式(4-8) では、距離（長さ）をもとに混合ラインの編成効率を測定している。

混合ラインの作業工程での作業者にはそれぞれの作業域という作業範囲が与えられている。式(4-4) もしくは式(4-8) はもっとも一般的に混合ラインのバランス率を表す指標である。しかし、編成効率は混合ラインの各作業工程での作業時間のバランスングを目標としているが、バッファ域を含めた作業工程の作業域がどの程度利用されるかという問題は考慮していない。式(4-8) から明らかのように、編成効率には各作業工程の作業域の長さまたはラインの全長が反映されていない。

計画期間の各製品の実際の生産量 \widetilde{d}_i は生産予定量 \overline{d}_i と変動量 Δd_i の和からなる.

$$\widetilde{d}_i = \overline{d}_i + \Delta d_i \quad (4-9)$$

4.3.1 で論じたように、自己完結ラインのサイクルタイム c はラインの編成段階で決められ、日々に変更することが困難である。計画期間ごとの総生産量が増え、通常サイクルタイムを変更せず、残業などによってラインの稼働時間を延長して対応することが多い。そのため、以下では、小日程生産計画期間の総生産量を一定として、各製品の生産量の変動を考慮する。したがって、つぎの式(4-10)が成り立つものとする。

$$\sum_{i=1}^I \Delta d_i = 0 \quad (4-10)$$

製品が全長 B の混合ラインの最初の作業工程から最後の作業工程まで流れていくとする。各作業工程において、作業者の製品に対する作業時間にはその品種の作業距離の長さだけの作業域が必要であるので、作業の終わった製品はつぎの作業工程での作業が始まるまで、混合ライン上を流れて行くだけで、作業域は利用されていない。すなわち、各作業工程の作業域には、利用される部分と利用されない部分があり、しかも品種ごとに異なる。

各作業工程の作業域が利用されない部分が長くなり無駄が生じたり、逆に必要である部分が短くなり安定した生産ができなかったりすることを防ぐための1つの方法として、本論文では、各作業工程間に共同作業域を与えることを提案する。

一方、混合ラインで生産される製品は品種ごとに作業工程での作業時間が異なり、総作業時間も異なる。作業時間の相対的に長い製品の生産量が増えると、混合ラインの能率は上がるが、作業遅れが生じ、安定した生産ができなくなるおそれが強まる。それゆえ、中日程生産計画段階で各製品の混合比の変動を考慮し、物理的な制約のもとで各作業工程にバッファ域を与えることによって、ある程度までは各製品の生産量の変動に対応できる。すなわち作業工程の観点から、その生産量の変動の許容範囲を示し、混合ラインの柔軟性を評価する評価尺度の導入が必要となる。

本論文では、計画期間中の各製品の生産量 d_i で加重平均した総作業距離がライ

ンの全長B に占める割合をラインの利用効率 γ と定義し、式(4-11)に示す。

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^I (d_i L_i)}{B \sum_{i=1}^I d_i} \quad (4-11)$$

混合ラインの利用効率は、編成された混合ラインにおいて、実際の生産量が d_i の場合、混合ライン全体がどの程度利用されているかを示す指標である。 γ が大きいほどラインが有効に利用されていることを示す。

式(4-11)を用いて、式(4-8)と式(4-9)から混合ラインの利用効率と編成効率の関係を求めると、つぎの式(4-12)が得られる。

$$\gamma = \frac{SW}{B} \eta + \frac{\sum_{i=1}^I \Delta d_i L_i}{B \sum_{i=1}^I d_i} \quad (4-12)$$

式(4-12)が示すように、混合ラインの利用効率は編成効率の1次関数で与えられ、編成効率が大きいと利用効率も大きくなる。

混合ラインの利用効率はある生産計画期間ごとの各製品の品種ごとの生産量に関わっているので、小日程生産計画期間ごとに各製品の生産量が異なり、その利用効率も異なる。各製品の生産量の変動が許容範囲を超えると、安定した生産ができなくなり、混合ラインが非能率的な状態となる。したがって、本論文で言及した利用効率は安定した生産という前提条件のもとでの指標を意味している。

中日程生産計画段階で自己完結ライン内のバッファを設計するにあたっては、各製品の生産量の変動に備えて、あらかじめ各作業工程にバッファ域を設計し、作業工程の柔軟性を高めなければならない。利用効率を高める方法の1つとして、混合ラインの作業工程に共同作業域を設計することが挙げられる。

式(4-13)に各製品の生産量で加重平均した総作業距離 θ を示す。式(4-13)を式(4-11)に代入すると、式(4-11)が式(4-11')に変形される。

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^I (d_i L_i)}{\sum_{i=1}^I d_i} \quad (4-13)$$

$$\gamma = \frac{\theta}{B} \quad (4-11')$$

一定の θ に対して、各作業工程での遊休距離を短くし、混合ラインの全長 B を短縮すれば混合ラインの利用効率が高くなる。しかし、現実のラインではその全長がいったん定められたら、小日程生産計画段階でその長さを変えることは困難である。以下では、混合ラインの全長 B は一定である、と約束する。そのときには、混合ラインの利用効率のかわりに、各製品の生産量で加重平均した総作業距離 θ をなるべく高めるように、共同作業域を設計しておけばよい。

4.4 共同作業域の設計のための数式モデルの定式化

式(4-11')に示したように、各製品の生産量で加重平均した総作業距離 θ が大きくなると、混合ラインの利用効率 γ が大きくなるとともに、作業遅れも生じやすくなる。安定した生産を保つためには、各 θ にそれぞれ必要最小限の共同作業域が必要となる。しかし、与えられるべき共同作業域がその長さの制約を満たす場合と、満たさない場合がある。満たす場合は、安定した生産ができるが、満たさない場合は、必要な共同作業域を与えることができず、安定した生産ができなくなる。

安定した生産ができる場合にも、それぞれの γ に対して、それぞれの共同作業域が必要であるが、値の小さい γ にあわせて混合ラインを設計すると、値の大きい γ の場合に不都合なことが生じる。したがって、安定した生産のもとで、値が最大となる γ を探索し、その場合の作業工程への共同作業域を全生産計画期間の共同作業域とすれば、各製品の生産量の変動の許容範囲が最大となり、混合ラインの柔軟性を高めることにつながる。

4.4.1 数式モデルの前提条件

つぎの前提条件のもとに数式モデルを構築する。

- (1) 移動作業方式を用いる。
- (2) 作業者の移動時間は作業時間と比べて十分小さい。
- (3) 品種ごとの各作業工程での作業時間の確率変動はない。
- (4) 各作業工程の作業域は前方と後方の境界により制約される。
- (5) 隣接する作業工程の作業者は1つの製品に対して同時に作業することができない。
- (6) 各作業工程に共同作業域が存在する。
- (7) 各作業工程の共同作業域に長さの制約がある。
- (8) 各作業工程の作業域は基準域と共同作業域からなり、基準域は所与とする。
- (9) 混合ラインの全長は計画期間中一定である。
- (10) 最後の作業工程に共同作業域の設計が可能である。

ライン生産方式は、加工時における作業者の移動状況から、静止作業方式と移動作業方式に分けることができる¹²⁾。静止作業方式は、ライン上を製品が連続的に流れ、作業者は定位置で所定の作業を行う方式である。この方式は一部の家電製品や電機部品のような重量や体積の小さい製品の組立に利用されている。それに対して、移動作業方式は、ライン上を製品が連続的に流れるとともに、作業者はマンコンベアなどに立ったまま移動しまたは製品に沿って歩きながら所定の作業域内で所定の作業を行う方式であり、自動車の最終組立ラインなどで利用されている。(1)に示したように、本章では、移動作業方式を考慮する。

混合ライン上を製品が間隔 W で流れる。作業者が手元の製品の作業を終えてからつぎの製品の作業に着手するまでには、ラインの上流方向へ W の距離を移動しなければならない。作業時間が通常50~180秒を要するのに対して、所要の移動時間は $(=W/(V+\text{作業者の歩く速度}))$ 通常数秒しかかからないので、本論文では(2)のように作業者の移動時間は考慮しない。

(3)は作業時間の確率変動を考慮しないことを意味し、標準作業時間内に作業が終了できるものとする。

(6)は各作業工程への共同作業域の設計が可能であることを意味する。物理的な制約があり、共同作業域を設計することができない場合は、本数式モデルでは、計算上その共同作業域の長さを0とする。

12) 村松[7]pp. 171-172.

4.4.2 数式モデルの定式化

需要変動にしたがい小日程生産計画期間の各製品の生産量が変動する。小日程生産計画期間中要求される各製品の生産量のパターンを想定することができる。たとえば、生産計画期間中3種類の製品の総生産量を6とする場合、各製品の生産量の変動パターンは最大つぎの28とおり要求されるかもしれない、ということが考えられる。

パターン1 : (2, 2, 2)	パターン2 : (2, 3, 1)	パターン3 : (2, 1, 3)
パターン4 : (3, 1, 2)	パターン5 : (3, 2, 1)	パターン6 : (1, 2, 3)
パターン7 : (1, 3, 2)	パターン8 : (2, 4, 0)	パターン9 : (2, 0, 4)
パターン10 : (0, 2, 4)	パターン11 : (0, 4, 2)	パターン12 : (3, 3, 0)
パターン13 : (3, 0, 3)	パターン14 : (0, 3, 3)	パターン15 : (1, 1, 4)
パターン16 : (1, 4, 1)	パターン17 : (4, 2, 0)	パターン18 : (4, 0, 2)
パターン19 : (5, 0, 1)	パターン20 : (5, 1, 0)	パターン21 : (4, 1, 1)
パターン22 : (1, 5, 0)	パターン23 : (1, 0, 5)	パターン24 : (0, 1, 5)
パターン25 : (0, 5, 1)	パターン26 : (6, 0, 0)	パターン27 : (0, 6, 0)
パターン28 : (0, 0, 6)		

各パターンにおいて共同作業域を設計する数式モデルはつぎのとおりである。各制約式をすべて満たす場合は、必要な共同作業域の設定が可能であることを示し、そのパターンに実行可能解が存在する。

T' をパターンの集合、 τ をパターンと記すと、各 τ にそれぞれ必要最小限の共同作業域が求められる。必要最小限の共同作業域が各制約条件を満たす τ には、実行可能解が存在する。必要最小限の共同作業域が各制約条件を満たさない τ には実行可能解が存在しない。中日程生産計画段階での作業工程への共同作業域の設計問題は、実行可能解の存在する τ のなかで、利用効率の最大になるものを探索し、その τ で設計された共同作業域を全生産計画期間の共同作業域とすればよい。

(1) 混合ラインの全長の制約

全作業工程の基準域 \tilde{l}^s と共同作業域 j^s との和がラインの全長 B (所与の一定値) と一致しなければならない。

$$\sum_{s=1}^S \tilde{l}^s + \sum_{s=1}^S j^s = B \quad (4-14)$$

(2) 作業工程の前方の境界の算出

作業工程 s の前方の境界は、作業工程 $(s-1)$ の後方の境界から作業工程 $(s-1)$ の共同作業域の長さを差し引いたものとして計算する。

$$g^s = h^{s-1} - j^{s-1} \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (4-15)$$

ただし、ダミー変数 $h^0=0, j^0=0$ とする。

(3) 作業工程の後方の境界の算出

作業工程 s の後方の境界は、作業工程 s の前方の境界に作業工程 $(s-1)$ の共同作業域、作業工程 s の基準域および共同作業域の和を加えたものとして計算する。

$$h^s = g^s + j^{s-1} + \tilde{l}^s + j^s \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (4-16)$$

(4) 共同作業域の長さの制約

作業工程 s の共同作業域の長さには制約があり、その設定可能な長さを超えてはならない。

$$j^s \leq \tilde{j}^s \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (4-17)$$

(5) 作業開始位置の算出

作業工程 s で最初 ($k=1$) に投入される製品の作業開始位置は作業工程 $(s-1)$ でのその製品の作業終了位置と作業工程 s の前方の境界のなかから最大値をとるものとして計算する。

n 番目のパターンで k ($k \geq 2$)番目に投入される製品の作業工程 s での作業開始位置は、①作業工程 $(s-1)$ での k 番目の製品の作業終了位置、②作業工程 s の前方の境界、③ $(k-1)$ 番目の作業終了時点での k 番目の位置という3つのなかから最大値をとるものとして計算する。

$$b_i^s = \max \{f_i^{s-1}, g^s\} \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (4-18a)$$

$$b_{k(n)}^s = \max \{f_{k(n)}^{s-1}, g^s, (f_{(k-1)(n)}^s - W)\} \\ (k(n)=2, 3, \dots, K; s=1, 2, \dots, S) \quad (4-18b)$$

ただし、 $f_{k(n)}^0 = 0$ ($n=1, 2, \dots, N; k(n)=1, 2, \dots, K$)とする。

(6) 作業終了位置の算出

n 番目のパターンで k 番目に投入される製品の作業工程 s での作業終了位置は、作業開始位置にその品種の作業距離を加えたものとして計算する。

$$f_{k(n)}^s = b_{k(n)}^s + l_{k(n)}^s \quad (4-19)$$

$$(n=1, 2, \dots, N; k(n)=1, 2, \dots, K; s=1, 2, \dots, S)$$

(7) 安定した生産を保つための制約

ラインストップを生じさせないために、最大作業終了位置は後方の境界を超えてはならない。

$$h^s \geq \max_{\substack{k(n)=1, K \\ n=1, N}} \{f_{k(n)}^s\} \quad (s=1, 2, \dots, S) \quad (4-20)$$

ここで、 $k(n)$ は n 番目のパターンで k 番目に投入される製品の品種を表す。作業開始と終了位置を算出するためには、各パターンの投入順序 ($1(n) \sim K^n(n)$ ($n=1, 2, \dots, N$)) が必要である。本章で論じる投入順序は、混合ラインを設計するための投入順序であり、第5章で論じる小日程生産計画段階でのラインの実際の各製品の組み立て順序と区別するために、以下 $k(n)$ を暫定の投入順序とよぶ。

自己完結ラインの柔軟性を高めるためには、作業遅れを吸収し作業を安定させることが必要である。そのため、各作業工程での作業負荷をなるべく均一化する投入順序が望ましい。本章では、第3章で論じた方法（多チャンネル型バッファを用いた作業負荷を均一化する目標追跡法）を利用し、暫定の投入順序はすでに決定されたものとする。

4.5 数式モデルの計算手順

集合 T' の順序集合を T と記す。順序集合 T の要素 τ^n は、加重平均した作業距離 θ (式(4-13)) が小→大の順に並べられているので、制約条件の式(4-14)～(4-20)のもとで、 n が大きいほど θ が大きくなり、ラインの利用効率 γ も単調に大きくなる。それゆえ、制約条件の式(4-14)～(4-20)のもとで、ラインの利用効率を最大にする τ^n を探索する問題は、制約条件の式(4-14)～(4-20)を満たす τ^n のなかで番号 n が最大であるものを探索することと同値となる。この性質を利用して、まず2分探索法により中点の τ が求まる。そして、中点の τ につ

いては、最初の作業工程から必要最小限の共同作業域を与え、その実行可能解が存在するかどうかを確認したうえで、つぎの midpoint を求め、最大の θ が求まるまで計算を繰り返す。

数式モデルの計算手順はつぎのとおりである。

計算手順：

step1 : m_1 と m_2 は 2 分探索法の左右端点、 m^* は midpoint とする。予想される各製品の生産量のパターンが 2 つ以下の場合の処理

$N=1$ ならば、 $m_1 \leftarrow 1$, $m_2 \leftarrow 1$, $m^* \leftarrow 1$, step5 へ

$N=2$ ならば、 $m_1 \leftarrow 1$, $m_2 \leftarrow 2$, $m^* \leftarrow 1$, step5 へ

$N \geq 3$ ならば、step2 へ

step2 : 予想される各製品の生産量のパターンが 3 つ以上の場合の端点の初期値の設定

$m_1 \leftarrow 1$, $m_2 \leftarrow N$, step4 へ

step3 : つぎの探索を行うための端点 m_1 または m_2 の再設定

τ^{m^*} に実行可能解が存在するならば、 $m_1 \leftarrow m^*$, step4 へ

実行可能解が存在しなければ、 $m_2 \leftarrow m^*$, step4 へ

step4 : つぎの探索対象のパターン τ^{m^*} の設定、および探索終了の判別

$m^* \leftarrow \lceil (m_1 + m_2) / 2 \rceil$ とし、

$m^* = m_2$ ならば、step6 へ

$m^* \neq m_2$ ならば、 $s^* = 1$ として、step5 へ

ただし、 $\lceil x \rceil$ は x 以上の最小の整数を表す

step5 : τ^{m^*} に実行可能解が存在するかどうかの判別

step5-1 : 1) 式(4-15) により g^{s^*} を求める

2) $k(n) = 1, 2, \dots, K$ に対して、式(4-18), (4-19)により $b_{k(n)}^{s^*}$, $f_{k(n)}^{s^*}$ を求める

3) $h^{s^*} = \max_{k(n)=1, K} \{f_{k(n)}^{s^*}\}$ とする

$$4) \tilde{j}^{s*} = \max\{0, (h^{s*} - j^{s*-1} - l^{s*})\} \text{ とする}$$

step5-2: step5-1 で求めた j^{s*} に対して, 式(4-17) が成り立つかを調べる

- 1) 式(4-18)が成り立つ場合, step5-3 へ
- 2) 式(4-18)が成り立たない場合, 前作業工程との共同作業域 j^{s*-1} に追加設置する余地があるかどうかを確認する. あるならば, 追加設置を行う

$$a) j^{s*} - \tilde{j}^{s*} \leq \widetilde{j^{s*-1}} - j^{s*-1} \text{ のとき,}$$

$$j^{s*-1} \leftarrow j^{s*-1} + j^{s*} - \tilde{j}^{s*},$$

$$j^{s*} \leftarrow \tilde{j}^{s*},$$

式(4-16)により, 新たな h^{s*} を算出, step5-3 へ

$$b) j^{s*} - \tilde{j}^{s*} > \widetilde{j^{s*-1}} - j^{s*-1} \text{ のとき,}$$

τ^{m*} に実行可能解が存在しないと判定, step3 へ

step5-3: 1) $\sum_{s=1}^{s*} j^s > A - \sum_{s=1}^S \widetilde{l^s}$ のとき, τ^{m*} に実行可能解が存在しないと判定, step3 へ

2) $\sum_{s=1}^{s*} j^s \leq A - \sum_{s=1}^S \widetilde{l^s}$ のとき, step5-4 へ

step5-4: $s^* = S$ ならば, τ^{m*} に実行可能解が存在すると判定,

$$j^{s*} = u - \sum_{s=1}^{s-1} j^s, \text{ step3 へ}$$

$s^* \neq S$ ならば, $s^* = s^* + 1$, step5-1 へ

step6: 手順終了

m1 番目のパターンの各製品の生産量の変動は許容範囲の上限であり, 各製品の生産量の変動の許容範囲は $[1, 2, \dots, m1]$ となる. m1 番目のパターンの各製品の生産量に基づいて決定された共同作業域を全生産計画期間の共同作業域とする

step2~step4はTのなかから制約条件式を満たす最大のnを探索する計算手順である. step5(step5-1~step5-4)は対象となるパターンに対して, 作業工程1から1つずつ共同作業域を与えて, 実行可能解が存在するかどうかを判別する計算手順である.

図4-6に計算手順のフローチャートを示す.

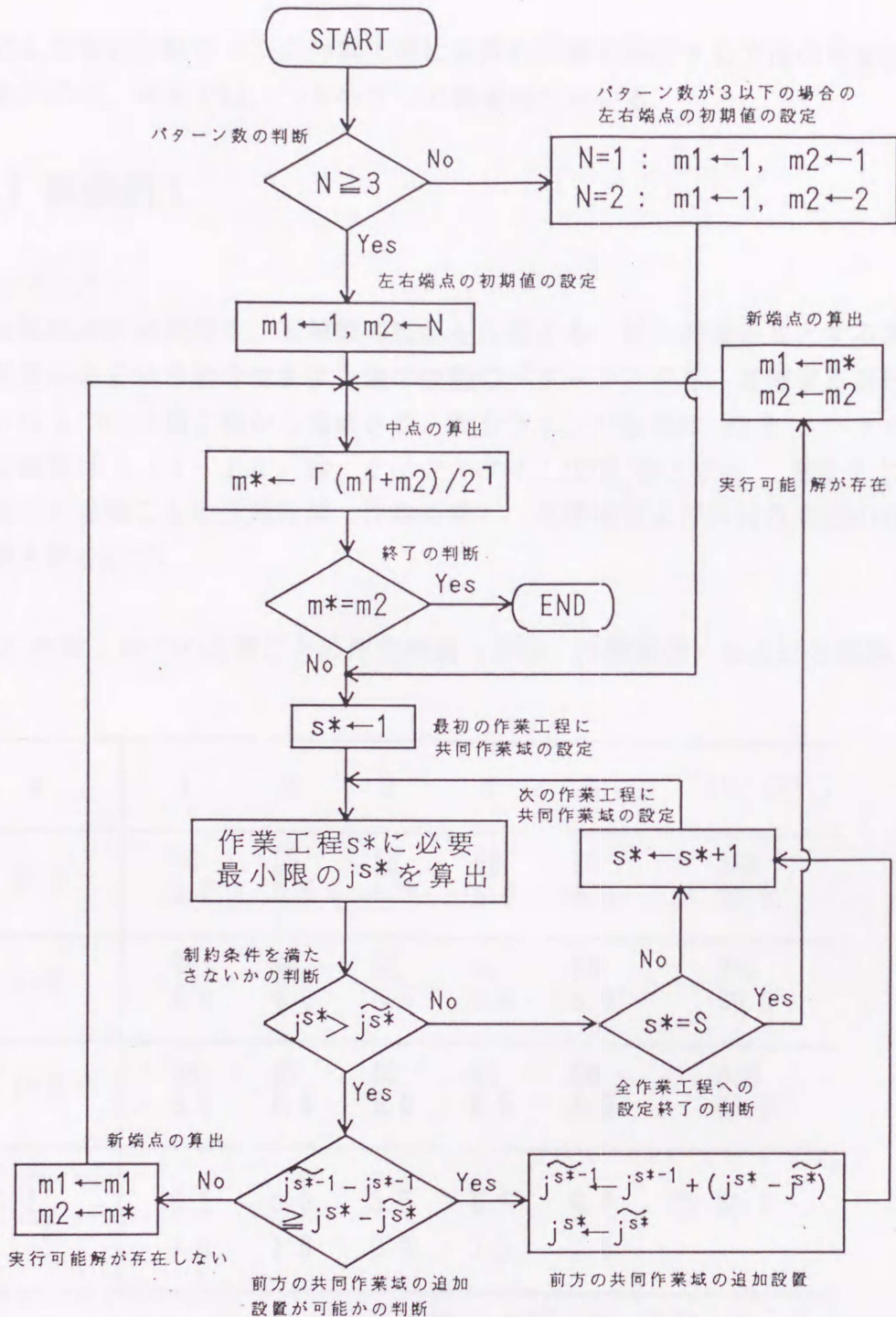


図4-6 共同作業域の設計の計算手順のフローチャート

4.6 数値例による数式モデルの解析

上述した自己完結ラインの作業工程に共同作業域を設計する方法の有効性を検証するために、本章では、つぎの2つの数値例を用いる。

4.6.1 数値例 1

◆入力データ：

小日程生産計画期間中、3種類の製品を生産する。総生産量を6とする各製品の生産量のあらゆる組合せを生産量の変動のパターンとする。考慮する自己完結ラインは5つの作業工程から構成され、混合ラインの全長は33.5メートル、ラインの速度は0.1メートル/秒、サイクルタイムは60秒とする。表4-2に各作業工程での品種ごとの作業時間（作業距離）、基準域および共同作業域の設定可能な最大値を示す。

表4-2 作業工程での品種ごとの作業時間（下段：作業距離）および各制約

s	1	2	3	4	5	$t^s_i (l^s_i)$
i=1	55 5.5	55 5.5	55 5.5	60 6.0	60 6.0	285 28.5
i=2	60 6.0	60 6.0	55 5.5	60 6.0	60 6.0	295 29.5
i=3	65 6.5	60 6.0	60 6.0	65 6.5	60 6.0	310 31.0
\tilde{l}^s	6.5	5.5	5.5	6.5	6.0	計 30.0
\tilde{j}^s	1.5	1.0	0.0	1.5	2.0	

単位：上段：秒，下段：メートル

◆共同作業域の設計過程：

(1) 所与の情報を整理する.

ライン速度 $v=0.1$ メートル/秒を用いて、時間ではかるものを距離ではかるものに変える.

ライン上の製品の間隔 $W=vc=0.1 \times 60=6$ メートルである.

各作業工程での作業距離 l^s_i ($l^s_i=vt^s_i$) を表4-2 の下段に示す.

各製品の生産量の変動のパターンには28 ($N=28$) とおりがあり、その集合 T' の各要素 (τ) に対して式(4-13) を用いて θ を求める. θ の小→大の順で T' の順序集合 T を求める. それらの結果を表4-3 の第1~3欄に示す.

(2) 1回目の探索を行う.

N は3以上であるので、左端点 m_1 に1, 右端点 m_2 に28の初期値を与える. 中点 m^* は15となる. 15番目のパターン (τ^{15}) の各製品の生産量は表4-3 で示しているように、(2, 2, 2)である. ラインへの各製品の暫定の投入順序は 品種2 → 品種2 → 品種3 → 品種1 → 品種3 → 品種1 のように決められたとする. 数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{15} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=0.0, j^2=1.0, j^3=0.0, j^4=0.5, j^5=2.0$ に決められる.

(3) 2回目の探索を行う.

1回目の探索の結果、15番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 m_1 に15を与え、右端点 m_2 は28のまま、2回目の中点 m^* は22となる. 22番目のパターン (τ^{22}) の各製品の生産量は(2, 0, 4)であり、暫定の投入順序は品種3 → 品種1 → 品種3 → 品種3 → 品種1 → 品種3 に決められたとする. 数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{22} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=0.5, j^2=1.0, j^3=0.0, j^4=1.5, j^5=0.5$ に決められる.

(4) 3回目の探索を行う.

2回目の探索の結果、22番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 m_1 に22を与え、右端点 m_2 は28のまま、3回目の中点 m^* は25となる. 25番目のパターン (τ^{25}) の各製品の生産量は(0, 2, 4)であり、暫定の投入順序は品種3 → 品種2 → 品種3 → 品種3 → 品種2 → 品種3 に決められたとする. 数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{25} に実行可能解が存在しないことが判明する.

(5) 4回目の探索を行う。

3回目の探索の結果、25番目のパターンに実行可能解が存在しないため、左端点 m_1 は22のままで、右端点 m_2 に25を与える。4回目の中点 m^* は24となる。24番目のパターン(τ^{24})の各製品の生産量は(1, 1, 4)であり、暫定の投入順序は品種3 → 品種1 → 品種3 → 品種2 → 品種3 → 品種3に決められたとする。

表4-3 各パターンの作業距離の加重平均と利用効率

順 番 n	パターン τ	作業距離の加重 平均(メートル) θ	利用効率 γ
1	(6, 0, 0)	28.50	85.07%
2	(5, 1, 0)	28.67	85.57%
3	(4, 2, 0)	28.83	86.07%
4	(5, 0, 1)	28.92	86.32%
5	(3, 3, 0)	29.00	86.57%
6	(4, 1, 1)	29.08	86.82%
7	(2, 4, 0)	29.17	87.06%
8	(3, 2, 1)	29.25	87.31%
9	(1, 5, 0)	29.33	87.56%
10	(4, 0, 2)	29.33	87.56%
11	(2, 3, 1)	29.42	87.81%
12	(0, 6, 0)	29.50	88.06%
13	(3, 1, 2)	29.50	88.06%
14	(1, 4, 1)	29.58	88.31%
15	(2, 2, 2)	29.67	88.56%
16	(0, 5, 1)	29.75	88.81%
17	(3, 0, 3)	29.45	88.81%
18	(1, 3, 2)	29.83	89.05%
19	(2, 1, 3)	29.92	89.30%
20	(0, 4, 2)	30.00	89.55%
21	(1, 2, 3)	30.08	89.80%
22	(2, 0, 4)	30.17	90.05%
23	(0, 3, 3)	30.25	90.30%
24	(1, 1, 4)	30.33	90.55%
25	(0, 2, 4)	30.50	—
26	(1, 0, 5)	30.58	—
27	(0, 1, 5)	30.75	—
28	(0, 0, 6)	31.00	—

—はその τ に実行可能解が存在しないことを示す

数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{24} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=1.0$, $j^2=1.0$, $j^3=0.0$, $j^4=1.5$, $j^5=0.0$ に決められる。

(6) 探索終了

4回目の探索の結果、24番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 $m1$ に24を与え、右端点 $m2$ は25のままで、5回目の中点 m^* は25となる。 $m^*=m2$ であるので探索を終了する。

2分探索の過程を表4-4に示す。

以上の内容をまとめると、各製品の生産量の変動の28パターンに対して、計4回の探索を行い、利用効率が最大になるパターンは τ^{24} であることがわかった。そのとき、各作業工程間に $j^1=1.0$, $j^2=1.0$, $j^3=0.0$, $j^4=1.5$, $j^5=0.0$ (メートル) の共同作業域を設計すれば、混合ラインの利用効率は 90.55% に達する。

中日程生産計画期間中、上述の混合ラインを設計するにあたり、 τ^{24} にあわせて各作業工程に共同作業域 $j^1=1.0$, $j^2=1.0$, $j^3=0.0$, $j^4=1.5$, $j^5=0.0$ (メートル) を設計しておけば、パターン1からパターン24までは安定した生産ができるので、各製品の生産量の変動の許容範囲は $\tau^1 \sim \tau^{24}$ となる。 $\tau^{25} \sim \tau^{28}$ の4つのパターンを除き、広範囲の需要変動に対応できる柔軟な混合ラインを設計することができる。

$\tau^1 \sim \tau^{24}$ までの混合ラインの利用効率 γ は 85.07%~90.55% まで変動する。各パターンの利用効率を表4-3の第4欄に示す。

図4-7に τ^{24} (各製品の生産量は(1,1,4)) の場合の共同作業域の設計と作業者の移動軌跡を示す。

表4-4 2分探索の過程

n	m1	m2	m*	投入順序 (品種の番号)	j^1	j^2	j^3	j^4	j^5
1回目	1	28	15	2→2→3→1→3→1	0.0	1.0	0.0	0.5	2.0
2回目	15	28	22	3→1→3→3→1→3	0.5	1.0	0.0	1.5	0.5
3回目	22	28	25	3→2→3→3→2→3	実行可能解が存在しない				
4回目	22	25	24	3→1→3→2→3→3	1.0	1.0	0.0	1.5	0.0
5回目	24	25	25	終了					

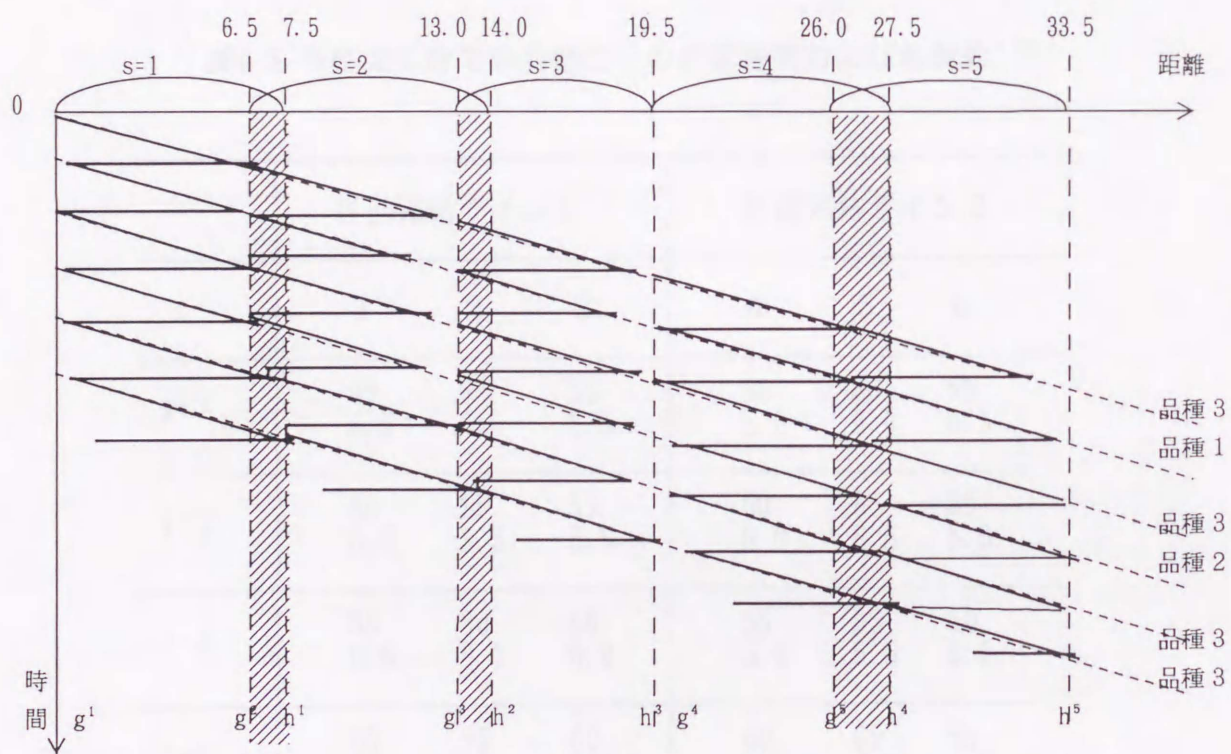


図4-7 共同作業域の設定と作業者の移動軌跡 (τ^{24} の場合)

4.6.2 数値例 2

数値例 2 では、3.3 で示した自己完結ラインの共同作業域の設計を考慮する。

◆入力データ：

小日程生産計画期間中、4種類の製品を生産する。自己完結ライン1には作業工程1～作業工程3があり、自己完結ライン2には作業工程4～作業工程6がある。ライン間の多チャンネル型バッファのチャンネル数は3とする。総生産量を8とする各製品の生産量のあらゆる組合せを生産量の変動のパターンとする。ライン速度は0.1メートル/秒、サイクルタイムは60秒とする。自己完結ライン1の全長は20.0メートル、自己完結ライン2の全長は19.5メートルとする。

表4-5に各作業工程での品種ごとの作業時間（作業距離）、基準域および共同作業域の設定可能な最大値を示す。

表4-5 各作業工程での品種ごとの作業時間および各制約¹³⁾

s	自己完結ライン1			自己完結ライン2		
	1	2	3	4	5	6
i=1	65 6.5	55 5.5	55 5.5	50 5.0	60 6.0	55 5.5
i=2	60 6.0	55 5.5	55 5.5	50 5.0	65 6.5	55 5.5
i=3	65 6.5	60 6.0	60 6.0	55 5.5	55 5.5	60 6.0
i=4	60 6.0	55 5.5	60 6.0	60 6.0	65 6.5	55 5.5
\tilde{l}^s	6.5	5.5	6.0	5.5	6.0	5.5
\tilde{j}^s	1.5	1.0	0.0	1.5	2.0	0.0

単位：上段：秒，下段：メートル

◆ 所与の情報を整理する：

ライン速度 $v=0.1$ メートル/秒を用いて、時間ではかるものを距離ではかるものに変える。

ライン上の製品の間隔 $W=vc=0.1 \times 60=6$ メートルである。

各作業工程での作業距離 $l^s_i=vt^s_i$ を表4-4 の下段に示す。

◆ 自己完結ライン1の共同作業域の設計：

各製品の生産量の変動のパターンには 35 ($N=35$) とおりがあり、その集合 T' の各要素 (τ) に対して式(4-13)を用いて θ を求める。 θ の小→大の順で T' の順序集合 T を求める。その結果を表4-6 の第1～3欄 (左の3つの欄) に示す。

(1) 1回目の探索を行う。

N は3以上であるので、左端点 $m1$ に1, 右端点 $m2$ に35の初期値を与える。中点 m^* は18となる。18番目のパターン (τ^{18}) の各製品の生産量は表4-5で示しているように、(1, 1, 1, 1)である。ラインへの各製品の暫定の投入順序は3.2.2で示した計算手順により、品種1→品種4→品種3→品種2のように決定される。数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{18} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=1.0, j^2=1.0, j^3=0.0$ に決められる。

(2) 2回目の探索を行う。

1回目の探索の結果、18番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 $m1$ に18を与え、右端点 $m2$ は35のまま、2回目の中点 m^* は27となる。27番目のパターン (τ^{27}) の各製品の生産量は(1, 1, 2, 0)であり、暫定の投入順序は品種1→品種3→品種2→品種3に決められる。数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{27} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=1.5, j^2=0.5, j^3=0.0$ に決められる。

13) 表4-4に示した各作業工程での作業時間は表3-1より、つぎの基準に基づいて換算したものである。表4-4の製品1, 2, 3, 4は表3-1の製品1, 4, 5, 6に相当する。

e^s_i	0	1	2	3
t^s_i	50	55	60	65

(3) 3回目の探索を行う。

2回目の探索の結果、27番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 m_1 に27を与え、右端点 m_2 は35のまま、3回目の中点 m^* は31となる。31番目のパターン (τ^{31}) の各製品の生産量は(0, 1, 3, 0)であり、暫定の投入順序は品種3 → 品種2 → 品種3 → 品種3に決められる。数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{31} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=1.5$, $j^2=0.5$, $j^3=0.0$ に決められる。

(4) 4回目の探索を行う。

3回目の探索の結果、31番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 m_1 には31を与え、右端点 m_2 は35のまま、4回目の中点 m^* は33となる。33番目のパターン (τ^{33}) の各製品の生産量は(0, 0, 3, 1)であり、暫定の投入順序は品種3 → 品種3 → 品種4 → 品種3に決められる。数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{33} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=1.5$, $j^2=0.5$, $j^3=0.0$ に決められる。

(5) 5回目の探索を行う。

4回目の探索の結果、33番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 m_1 には33を与え、右端点 m_2 は35のまま、5回目の中点 m^* は34となる。34番目のパターン (τ^{34}) の各製品の生産量は(1, 0, 3, 0)であり、暫定の投入順序は品種3 → 品種1 → 品種3 → 品種3に決められる。数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{34} に実行可能解が存在するので、各作業工程の共同作業域は $j^1=1.5$, $j^2=0.5$, $j^3=0.0$ に決められる。

(6) 探索終了

5回目の探索の結果、34番目のパターンに実行可能解が存在したため、左端点 m_1 に34を与え、右端点 m_2 は35のまま、6回目の中点 m^* は35となる。35番目のパターン (τ^{35}) の各製品の生産量は(0, 0, 4, 0)であり、暫定の投入順序は品種3 → 品種3 → 品種3 → 品種3に決められる。数式モデルの計算手順にしたがえば、 τ^{34} に実行可能解が存在しないので、探索が終了する。

結論：自己完結ライン1の各作業工程にそれぞれ1.5メートル、0.5メートル、0.0メートルの共同作業域を設計しておけば、作業距離の加重平均が18.375メートルのパターンまで安定した生産ができる。利用効率は最大91.88%に達する(表4-6の第4欄に示す)。

◆ 自己完結ライン2の共同作業域の設計結果：

上述した計算手順にしたがい、自己完結ライン2の共同作業域はつぎのように設計される。

自己完結ライン2の各作業工程にそれぞれ1.0, 1.5メートル, 0.0メートルの共同作業域を設計しておけば、作業距離の加重平均が17.50メートルのパターンまで安定した生産ができる。利用効率は最大89.74%に達する（表4-7に示す）。

表4-6 自己完結ライン1の各パターンの作業距離の加重平均と利用効率

順 番	パターン	作業距離の加重 平均(メートル)	利用効率
n	τ	θ	γ
1	(0, 4, 0, 0)	17.000	85.00%
2	(0, 3, 0, 1)	17.125	85.56%
3	(1, 3, 0, 0)	17.250	86.25%
4	(0, 2, 0, 2)	17.250	86.25%
5	(1, 2, 0, 1)	17.375	86.88%
6	(0, 3, 1, 0)	17.375	86.88%
7	(0, 1, 0, 3)	17.375	86.88%
8	(2, 2, 0, 0)	17.500	87.50%
9	(1, 1, 0, 2)	17.500	87.50%
10	(0, 0, 0, 4)	17.500	87.50%
11	(0, 2, 1, 1)	17.500	87.50%
12	(2, 1, 0, 1)	17.625	88.13%
13	(1, 0, 0, 3)	17.625	88.13%
14	(1, 2, 1, 0)	17.625	88.13%
15	(0, 1, 1, 2)	17.625	88.13%
16	(3, 1, 0, 0)	17.750	88.75%
17	(2, 0, 0, 2)	17.750	88.75%
18	(1, 1, 1, 1)	17.750	88.75%
19	(0, 0, 1, 3)	17.750	88.75%
20	(0, 2, 2, 0)	17.750	88.75%
21	(3, 0, 0, 1)	17.875	89.38%
22	(2, 1, 1, 0)	17.875	89.38%
23	(1, 0, 1, 2)	17.875	89.38%
24	(0, 1, 2, 1)	17.875	89.38%
25	(4, 0, 0, 0)	18.000	90.00%
26	(2, 0, 1, 1)	18.000	90.00%
27	(1, 1, 2, 0)	18.000	90.00%
28	(0, 0, 2, 2)	18.000	90.00%
29	(3, 0, 1, 0)	18.125	90.63%
30	(1, 0, 2, 1)	18.125	90.63%
31	(0, 1, 3, 0)	18.125	90.63%
32	(2, 0, 2, 0)	18.250	91.25%
33	(0, 0, 3, 1)	18.250	91.25%
34	(1, 0, 3, 0)	18.375	91.88%
35	(0, 0, 4, 0)	18.500	—

—はその τ に実行可能解が存在しないことを示す

表4-7 自己完結ライン2の各パターンの作業距離の加重平均と利用効率

順 番 n	パターン τ	作業距離の加重 平均(メートル) θ	利用効率 γ
1	(4, 0, 0, 0)	16.500	84.62%
2	(3, 1, 0, 0)	16.625	85.26%
3	(3, 0, 1, 0)	16.625	85.26%
4	(2, 2, 0, 0)	16.750	85.90%
5	(2, 0, 2, 0)	16.750	85.90%
6	(2, 1, 1, 0)	16.750	85.90%
7	(3, 0, 0, 1)	16.875	86.54%
8	(1, 3, 0, 0)	16.875	86.54%
9	(1, 0, 3, 0)	18.875	86.54%
10	(1, 2, 1, 0)	16.875	86.54%
11	(1, 1, 2, 0)	16.875	86.54%
12	(2, 1, 0, 1)	17.000	87.18%
13	(2, 0, 1, 1)	17.000	87.18%
14	(0, 4, 0, 0)	17.000	87.18%
15	(0, 0, 4, 0)	17.000	87.18%
16	(0, 3, 1, 0)	17.000	87.18%
17	(0, 1, 3, 0)	17.000	87.18%
18	(0, 2, 2, 0)	17.000	87.18%
19	(1, 2, 0, 1)	17.125	87.82%
20	(1, 0, 2, 1)	17.125	87.82%
21	(1, 1, 1, 1)	17.125	87.82%
22	(2, 0, 0, 2)	17.250	88.46%
23	(0, 3, 0, 1)	17.250	88.46%
24	(0, 0, 3, 1)	17.250	88.46%
25	(0, 2, 1, 1)	17.250	88.46%
26	(0, 1, 2, 1)	17.250	88.46%
27	(1, 1, 0, 2)	17.375	89.10%
28	(1, 0, 1, 2)	17.375	89.10%
29	(0, 2, 0, 2)	17.500	89.74%
30	(0, 0, 2, 2)	17.500	89.74%
31	(0, 1, 1, 2)	17.500	89.74%
32	(1, 0, 0, 3)	17.625	—
33	(0, 1, 0, 3)	17.750	—
34	(0, 0, 1, 3)	17.750	—
35	(0, 0, 0, 4)	18.000	—

—はその τ に実行可能解が存在しないことを示す

第5章 自己完結型混合ラインへの各製品の投入順序の決定

自己完結型混合ラインを効率的に運用するためには、自己完結型混合ラインへの適切な各製品の投入順序を決定する必要がある。本章では、混合ラインへの各製品の投入順序決定方法を論じる。

5.1 投入順序決定の2つの目標

5.1.1 投入順序決定の2つの目標

混合ライン生産方式は、作業方法がほぼ等しい複数品種の製品を生産するために、あらかじめ準備された混合ラインで、その複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式である。混合ラインを用いる場合、混合ラインへの各製品の投入順序を決定する問題が重要となる。

混合ラインへの各製品の投入順序の決定問題は、所与の生産計画と作業編成に対して、何らかの評価関数を最適化する、またはそれに準ずる各製品の投入順序を求める問題である¹⁾。

混合ラインへの各製品の投入順序の決定は、混合ラインの管理目標によって異なる。大野・門田[2]は自動車の最終組立ラインのような混合ラインにおいては、つぎの2つの目標があると指摘している。

目標1：安定した生産ができるように、混合ラインの各作業工程での作業遅れの発生をなるべく小さくすること

目標2：前生産工程への部品ごとの要求量を平準化するために、混合ラインでの部品の使用速度をなるべく一定にすること

中日程生産計画段階で、混合ラインの編成効率を高めるために、各作業工程において、各製品の生産予定量で加重平均した作業時間がサイクルタイム c を超えないようにラインが編成される。したがって、ある作業工程において、その作業時間がサイクルタイム c を超えない製品と超える製品が両方とも存在する。すで

1)黒田[3]pp.130.

に第4章で論じたように、作業工程間に共同作業域を設計することによって、作業時間（作業距離）の相対的に長い品種の生産量が増えることにより生じる作業遅れをある程度吸収することができるが、ラインに物理的な制約があるので、共同作業域だけに頼ると、作業遅れを吸収しきれない場合が生じる。

ある作業工程において相対的に長い作業時間を要する品種が連続して投入されると、作業者の作業終了位置が作業終了ごとに作業域の後方へずれ、その結果、作業工程内で作業が終了できなくなるという状態（ラインストップ）が生じる。そのため、最大作業遅れを最小化する投入順序が必要である。

一方、製品の多仕様化・多品種化という市場ニーズに対応するために、製造業には一層魅力のある製品を安くタイムリーに提供することが求められている。その結果、1970年代から1980年代にかけて、自動車産業をはじめ多くの製造業がJIT生産方式を取り入れることになった。

すでに2.2で論じたように、JIT生産方式は、引っ張り型生産指示方式を用いて、必要なものを必要なときに必要な量だけ作るという生産方式である。JIT生産方式は製造コストを低減し、生産性を向上することを基本的な目標としている。その基本目標を達成するためには、生産における過剰な在庫、労働力、機械設備、長すぎるリードタイムなどの無駄を極力排除する必要がある。

多くの自動車工場では、混合ラインにおいて必要とされる部品が必要なときに必要な数量だけ前生産工程から調達され、その部品の組み付けが行われる作業工程のラインサイドに搬入されるようになっている。

部品の需要の変動が激しいときには、引っ張り型生産指示方式を採用してもコストを低減することが難しくなる。なぜならば、混合ラインが前生産工程から部品をばらついた数量で引き取ると、前生産工程では、需要変動のピークに対応できる在庫や機械設備や労働力を用意しなければならないからである。極端な場合は、JIT生産方式を実現することができなくなるおそれもある。

したがって、前生産工程への部品ごとの要求量を平準化するために、混合ラインでの部品の使用速度をなるべく一定にすること、すなわち、目標2が混合ラインへの各製品の投入順序の決定において最も重要である²⁾。

2)門田[9].

5.1.2 目標1を考慮した投入順序決定方法

安定した生産ができるように、混合ラインの各作業工程での作業遅れの発生をなるべく小さくする投入順序が求められている（目標1）。この問題を解決するために、多くの研究がなされてきた。本節では、そのなかからいくつかの代表的な方法を概説する。

(1) 各品種の製品をできるだけ混合する方法

各作業工程での品種ごとの作業時間や作業者の移動軌跡の分析などを行わず、単に各製品の生産量もしくは混合比を考慮し、各製品をなるべく混合して投入することによって、作業時間の長い品種が連続して投入されることが避けられ、作業遅れを小さくすることにつながる。

各製品をなるべく混合して投入する方法として、村松[8]は生産比(混合比)逆数方式を提案している。生産比逆数方式は生産量 d_i のみに基づいて、最初から1つずつ投入する品種を決定していく。品種を決定するためのルールは、 k 番目の投入での各品種の生産比（生産すべき量の比率）の逆数から、最小値をもつ品種を k 番目の投入品種と決定し、そしてその品種の生産量を1を減らして新たに生産比の逆数を計算し、つぎに $(k+1)$ 番目に投入する品種を決定する。生産比逆数方式とは、このようなルールを繰り返しながら投入する品種を決定する方式である。

(2) 各作業工程での作業遅れを最小化する方法

生産比逆数方式は複雑な計算を避け、間接的に作業遅れの発生をある程度小さくする効果があるが、作業者の作業状況は把握していない。これに対して、平木・青木[7], Mitsumori[16]は各作業工程での品種ごとの作業時間、作業域を考慮し、作業者の移動軌跡と投入順序との関係を解析したうえで、作業移動状態を数式モデルに定式化しているので、直接に作業遅れの発生状況を把握することができる。

作業遅れの発生は作業が非能率的な状態であることを示し、作業遅れが大きくなると、混合ラインにラインストップが生じるおそれがある。それゆえ、作業遅れの総和を最小化することが重要であるが、平木・青木[7], Mitsumori[16]はラインストップを避けるために、各作業工程での最大作業遅れを最小化することを

投入順序の評価関数とし、数理計画法を用いて最適な投入順序を決定する方法を提案している。

また、Okamura & Yamashina[18]はラインストップの観点から、最大作業遅れを最小化することではなく、作業域でのゆとりを最大化しラインストップリスクを最小化するように、混合ラインへの各製品の適切な投入順序を決定する方法を提案している。

(3) 総作業費用を最小化する方法

機械設備の制約や作業遅れ、作業進みによる損失などを考慮し、作業工程の作業域をいくつかの区域に分ける。各区域での作業時間（作業距離）にそれぞれの費用係数（単位時間または単位距離あたりの費用）を乗じて、その総作業費用を最小化することを考える方法がある。

大野ら[1], 徳安・黒田[6], Thomopoulos[21]は総作業費用を最小化することを評価関数とし、混合ラインへの各製品の適切な投入順序を決定する方法を提案している。

5.1.3 目標2を考慮した投入順序決定方法

JIT生産方式が導入されている混合ラインシステムでは、生産の平準化が求められる。したがって、前生産工程への部品ごとの要求量（引き取り量）を平準化するために、混合ラインでの部品の使用速度をなるべく一定にすることが求められている（目標2）。

自動車の生産に使用される部品などの点数は2万点にも達し、各部品の重量、サイズ、作業工数などもさまざまである。現実には、混合ラインですべての部品に対して同一に生産平準化をはかる必要はなく、主にボディタイプ、エンジン、トランスミッションなど20項目程度の部品（下組み付け品の数）を考慮すればよい³⁾。

自動車の最終組立ラインへの各製品の投入順序は、上述の各項目の各部品（たとえば、エンジン項目には、排気量だけみても1300cc, 1500cc, 1800cc, 2000cc

3)門田[9].

などの複数品種の部品がある)の使用速度をなるべく一定にする投入順序であることが望ましい。

混合ラインへの各製品の投入順序決定問題の記述：

小日程生産計画期間中品種 i の製品の生産量(実際生産量)を d_i ($i=1, 2, \dots, I$)とする。各製品の合計の総生産量 K は、 $K = \sum_{i=1}^I d_i$ である。品種 i の製品を1つ生産するために使用される部品 j の必要量(個数)を a_{ij} ($i=1, 2, \dots, I; j=1, 2, \dots, J$)で表す(部品表)と、生産計画期間中部品 j の総使用量 n_j は、 $n_j = \sum_{i=1}^I a_{ij} d_i$ ($j=1, 2, \dots, J$)となる。製品1つあたりの部品 j の平均使用量 r_j は、 $r_j = n_j / K$ ($j=1, 2, \dots, J$)である。 k 個の製品を生産するための部品 j の平均必要量は kr_j である。この平均必要量を部品使用の目標値とよぶ。

同様に、1回の投入あたりの製品の平均投入量 R_i は $R_i = d_i / K$ ($i=1, 2, \dots, I$)である。 k 個の製品を投入するときの品種 i の平均投入量は kR_i である。この平均投入量を製品投入の目標値とよぶ。

1番目から k 番目までに投入される品種 i の量 E_{ik} ($i=1, 2, \dots, I; k=1, 2, \dots, K$)を製品投入の実績値とよぶ。

1番目から k 番目までに使用される部品の量

$$X_{jk} = \sum_{i=1}^I E_{ik} a_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, J; k=1, 2, \dots, K) \quad \text{を部品使用の実績値とよぶ。}$$

目標2を考慮した各製品の投入順序決定問題は、以上の生産計画に対して、部品使用の実績値の単位時間あたりの変動をなるべく一定にする各製品の投入順序を決定する問題となり、この問題を解決するために、多くの研究が行われてきた。本節ではそのなかからいくつかの代表的な方法について論じる。

(1) 目標追跡法とその関連法

目標2を達成するために、目標追跡法(Goal Chasing Method)がトヨタ自動車により提案されている。目標追跡法では、1番目の投入から K 番目の投入までの部品使用の目標値(点)と実績値(点)との乖離の和を最小化する(式(5-1))投入順序を最適解と定義している⁴⁾。

4)小谷[4].

$$\text{Min. } \sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J (kr_j - X_{jk})^2 \right)^{1/2} \quad (5-1)$$

しかし、相当な計算手数を要する最適な投入順序を求めることに代えて、近似解法である目標追跡法が提案されている。

目標追跡法は最初から最後まで1つずつ投入する品種を決定していく発見的な方法で、k番目の投入品種を決定するとき、1番目から(k-1)番目までの投入順序は決定したものとし、単にk番目の部品使用の目標値と実績値との乖離を最小化する(式(5-2))品種をk番目の投入品種とする。これを繰り返して1番目からK番目までの各製品の投入順序を決定する。

$$\text{Min. } \left(\sum_{j=1}^J (kr_j - X_{jk-1} - a_{ij})^2 \right)^{1/2} \quad (5-2)$$

小谷[4]は目標追跡法の近似程度を調べるために、シミュレーションで数値実験を行っている。部品の種類数を増加させ、かつ製品の品種数を増加させると、この両者の複合するどのケースについても、各部品の目標値と実績値との差の絶対値の平均と標準偏差がいずれも小さいことから、目標追跡法の近似程度はかなり良好であることがわかる。

また、計画期間中各品種とも構成する部品数(構成する部品の点数)が同一で、かつ構成数がすべて同一であるという条件を満たす部品表のもとでは、式(5-2)が式(5-3)と同値であることが証明されるので、式(5-2)の代わりに、より単純化された式(5-3)でk番目の投入品種を決定すればよい。

$$\text{Max. } \sum_{j \in A(i)} (kr_j - X_{jk-1}) \quad (5-3)$$

A(i)は品種iを構成する部品の集合である。

さらに、各品種間に共通に使用されている部品がないという条件を満たす部品表のもとで、式(5-3)が式(5-4)と同値であることが証明されるので、式(5-3)の代わりに、より単純化された式(5-4)でk番目の投入品種を決定することができる。

$$\text{Max. } (kR_i - E_{ik-1}) \quad (5-4)$$

式(5-4)は各製品の生産量のみに基づく投入順序決定方法である。

Cakir & Inman[10]は目標追跡法の改良法をつぎのように提案している。

まず y_{ijk} を1番目からk番目までの品種iの製品を生産するための部品jの使用量とすると、つぎの式が成り立つ。

$$X_{jk} = \sum_{i=1}^I y_{ijk} \quad (5-5)$$

式(5-3)の代わりに、評価関数をつぎの式(5-6)のように定義する。

$$\text{Max. } \sum_{j \in A(i)} (d_i a_{ijk} / K - y_{ijk-1}) \quad (5-6)$$

投入順序決定問題の記述部分で論じたように、

$$n_j = \sum_{i=1}^I a_{ij} d_i$$

$$X_{jk-1} = \sum_{i=1}^I a_{ij} E_{ik-1}$$

以上の2式が成り立つので、式(5-6)は式(5-7)に変形することができる。

$$\text{Max. } (kR_i - E_{ik-1}) \sum_{j \in A(i)} a_{ij} \quad (5-7)$$

各製品の構成数 w_i を品種iの重み(重要度係数)とすると、 $w_i = \sum_{j \in A(i)} a_{ij}$ に

なり、式(5-7)が式(5-7')に変形される。

$$\text{Max. } w_i (kR_i - E_{ik-1}) \quad (5-7')$$

Cakir & Inman[10]は式(5-7')で最初から最後まで1つずつ投入する品種を決定していく方法を提案している。シミュレーションで数値実験を行うと、目標追跡法に比べ、近似率はやや低下したが、計算量は1/20まで減少したことがわかる。

(2) Miltenburgの方法

混合ラインでの部品の使用速度をなるべく一定にするために、部品の使用の実際値と目標値との乖離をなるべく小さくする目標追跡法とその改良法に対して、Miltenburg[14]は製品の投入の平準化によって部品の使用速度の平準化を達成す

る方法を提案している。

Miltenburg 法は自動車の混合ラインで使用されるエンジンのような部品の使用の平準化を考慮する。通常車 1 台に各種類のエンジンのなかから 1 つだけが組み付けられる。すなわち、各製品の構成部品点数が同一で、かつ構成数も同一であるという部品表の特性を考慮すると、各製品の投入速度を一定にすることで、各部品の使用速度も一定になる。したがって、部品の使用速度を一定にするためには、製品の投入速度のみを考慮すればよい。

Miltenburg 法は製品の投入速度をなるべく一定にするために、つぎの 4 つの評価関数のうちいずれか 1 つを考慮すればよいことを指摘する。

$$\text{Min. } \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (E_{ik}/K - R_i)^2 \quad (5-8)$$

$$\text{Min. } \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (E_{ik} - kR_i)^2 \quad (5-9)$$

$$\text{Min. } \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I |E_{ik}/K - R_i| \quad (5-10)$$

$$\text{Min. } \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I |E_{ik} - kR_i| \quad (5-11)$$

Miltenburg 法は、式(5-9)のもとでその近似解法であるアルゴリズムを開発し、最初から最後まで 1 つずつ投入する品種を決定していく方法である。決定された投入順序に対して、不都合な投入が生じた部分を再スケジューリングする方法も提案している。

Inman & Bulfin[11]は Miltenburg 法の改良方法を提案している。Kubool & Sethi[12],[13]は式(5-9)のもとで最適な投入順序を決定する数式モデルを構築している。

(3) 部品および資材の平準化を同時に考慮した投入順序決定方法

図2-2 に示したように、混合ラインで使用される部品を生産するためには、前々生産工程で生産される資材などが必要となる。このように、多段階生産システムにおいては、生産の平準化は前生産工程だけでなく、前々生産工程でも行われる必要がある。Miltenburg & Sinnamon[15]は 4 つの生産工程から構成される多段

階生産システムに対して、各生産工程での平準化に重要度係数を導入し、各生産工程での平準化の損失（乖離の値に重要度係数を乗じたもの）の総和を最小化することを評価関数として、Miltenburg法に基づいた近似解法を提案している。

(4) 最適な投入順序決定方法

Sumichrast & Russell[20]は目標追跡法とMiltenburg法を対象に、総生産量、品種数、部品の構成をパラメータとして数値実験を行い、各投入順序決定方法の特徴、近似率を明確にしたうえで、コンピュータ技術と計算技術の許すかぎり、最適な投入順序を決定する必要がある、と指摘している。

Ng & Mak[17]は式(5-9)を評価関数とし、分枝限定法を用いてその最適な投入順序を決定する方法を提案している。Steiner & Yeomans[19]は図論法(Graph-Theoretic Approach)を用いて、式(5-11)の評価関数のもとで、最適な投入順序を決定する方法を提案している。

5.2 2つの目標を同時に考慮した投入順序決定方法

自己完結型混合ラインの2つの管理目標、すなわち混合ラインの柔軟性と生産の平準化を実現するためには、上述の混合ラインへの各製品の投入順序の決定の2つの目標を同時に考慮する必要がある、2つの目標を同時に考慮した投入順序決定方法の開発が必要である。

5.2.1 部品の引き取り方式

混合ラインシステムは、1本の混合ラインで複数品種の製品を混合して生産するシステムである。各製品に必要とされる部品には共通部品と品種ごとに異なる部品がある。各部品はそれぞれの生産工程（前生産工程）から混合ラインに引き取られる。

混合ラインシステムのような多段階生産システムにおいては、生産水準の安定化、仕掛在庫の削減、生産および運搬のリードタイムの短縮が求められ、JIT生産方式が実施されていることが多い。

第2章ですでに論じたように、混合ラインにおいては必要とされる部品が引張り型生産指示方式のもとで、必要なときに必要な量だけ前生産工程から調達さ

れ、その部品の組み付けが行われる作業工程のラインサイドに搬入される。在庫コストを削減するためには、仕掛在庫をなるべく小さくすることが理想的である。しかし、各部品の引き取りを小数量で、頻繁に行うと、部品の搬入（輸送）コストが高くなり、生産システムにおける全体のコストの低減の実現が難しくなる。

それゆえ、JIT 生産方式における混合ラインへの部品の引き取りは多回搬入方式で行われることが普通である。実務における前生産工程と混合ラインとの部品の引き取りは、ほとんどの場合数時間ごとに行われ、また、運搬はコンテナ（またはパレット）単位で行われる。

自動車の最終組立ラインにおいて、小日程生産計画（日次生産計画）期間は1シフトまたは2シフト（2交替）である。1シフトの場合は、AM8:00～PM4:00の8時間（480分、休憩時間などを除く）の計画期間中、タイヤのような部品は2時間間隔で、シートのような部品は1時間間隔で、前生産工程から混合ラインに搬入される。

5.2.2 投入順序決定の2段階決定方法

上述したように、混合ラインへの各製品の投入順序を決定するにあたっては、混合ラインの各作業工程での作業遅れをなるべく小さくすること（目標1）と、前生産工程への部品ごとの要求量を平準化するために、各作業工程での部品の使用速度をなるべく一定にすること（目標2）を考慮しなければならない。混合ラインへの各製品の投入順序決定方法に関する研究は多く行われている（5.1を参照）。しかし、それらの研究は前述の2つの目標のうちいずれか一方のみを目標としている。2つの目標を同時に考慮した数理的な解析に関する研究はあまり見当たらない。

混合ラインにおいては、各作業工程での作業時間が品種ごとに異なるので、作業時間の相対的に長い製品が連続して投入されると、作業遅れの発生によりラインストップを引き起こすおそれがある。目標1だけを混合ラインの管理目標として、できるだけ作業遅れが発生しないように投入順序を決定することは、歴史的にはJIT 生産方式が出現する以前から、混合ラインの管理上の重要な問題の1つとして取りあげられてきた。

1970年代から始まったJIT 生産方式のもとで、生産の平準化が求められることになった。混合ラインへ部品を供給する前生産工程における部品の生産の平準化のために、混合ラインでの部品の使用速度をなるべく一定にすることが最も重要

となり、投入順序の決定も目標2を中心として考察されることになった。

しかしながら、自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるためには、需要変動に迅速かつ幅広く対応しなければならない。また生産の平準化も保たなければならない。投入順序の決定にあたって、単に目標1もしくは目標2だけを考慮しては、需要変動に対応しきれないことがあり得る。したがって、目標1と目標2を同時に考慮する投入順序の決定方法が必要となる。

目標1と目標2を同時に考慮するために、生産の平準化度と作業遅れにそれぞれの損失係数を乗じたものの和を評価関数とし、その評価関数を最小化する投入順序決定方法が考えられる。しかし、実務上、生産の平準化度と作業遅れに適切な損失係数を与えることは極めて困難である。

門田[9]は目標調整法を紹介している。目標調整法は目標追跡法で決定した投入順序に対して、「連続・間隔制御」や「ウェイト（重み）制御」で、総作業時間の長い品種の連続的な投入を避けるように、部分順序を調整する方法である。結果的には各作業工程の負荷の平準化に役立つが、その理論的根拠は示されていない。

本論文では、投入順序決定の2つの目標を2段階に分けて考慮する投入順序決定方法を提案する。

混合ラインへの前生産工程からの部品の引き取りが定期的に、ある程度まとまった量で行われていることを考慮すると、前生産工程での部品の生産の平準化のために、混合ラインでの部品の使用速度をなるべく一定に保つことは必ずしも必要ではない。各部品の引き取り時点での引き取り量をその時点での目標値に近づければ、事実上前生産工程での部品の生産速度や運搬量の変動を小さくすることができる。したがって、引き取り時点での引き取り量を平準化すれば、混合ラインでの部品の使用速度に若干の変動があっても、前生産工程には影響を与えないということになる。それゆえ、混合ラインでの各部品の使用速度に若干の変動を許容する代わりに、混合ラインの作業工程での作業遅れの短縮をはかることができる。

本章では、つぎの前提条件が必要である。

- (1) 各作業工程の作業域（共同作業域）はすでに第4章で示した方法で決定されている。
- (2) 部品の引き取りは多回搬入による定期引き取り方式で行われる。

5.2.3 生産の平準化のための数式モデル

投入順序決定の第1段階では、目標2を達成するために、部品の引き取り間隔を考慮して生産計画期間をいくつかの小期間に分割し、小期間ごとの部品の使用量の平準化をはかる。

本数式モデルは、各引き取り時点での各部品の引き取り量とその時点での理想値との差の絶対値の和を最小化するように、各製品の各引き取り時点までの投入量を決定する。これは、式(5-13)～式(5-17)の制約のもとに式(5-12)を最小化する問題として定式化される。

評価関数(1)：引き取り時点での引き取り量の平準化

$$f_{11} = \sum_{k \in Q} \sum_{j \in M_k} |kr_j - X_{jk}| \rightarrow \text{Min.} \quad (5-12)$$

制約式：

$$E_{ik} \leq E_{ik'} \quad (i=1, 2, \dots, I; k, k' \in Q', k \neq k') \quad (5-13)$$

ただし、 k' は順序集合 Q' のうち、 k のつぎの元である。

$$E_{ik} = d_i \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (5-14)$$

$$\sum_{i=1}^I E_{ik} = k \quad (k \in Q) \quad (5-15)$$

$$X_{jk} = \sum_{i=1}^I a_{ij} E_{ik} \quad (j \in M_k; k \in Q) \quad (5-16)$$

$$E_{ik}, X_{jk} : \text{非負整数} \quad (5-17)$$

上述の数式モデルは評価関数が非線形型混合整数計画問題であるが、つぎの2つの変数 b_{jk}^+ と b_{jk}^- を導入して式(5-18)の制約条件を追加すると、式(5-13)～式(5-18)の制約のもとに新しい評価関数、式(5-19)を最小化する線形型混合整数計画問題に変形することができる⁵⁾。

5)坂和[5].

$$b_{jk}^+ = \frac{1}{2} \{ |kr_j - X_{jk}| + (kr_j - X_{jk}) \}$$

$$b_{jk}^- = \frac{1}{2} \{ |kr_j - X_{jk}| - (kr_j - X_{jk}) \}$$

$$X_{jk} + b_{jk}^+ - b_{jk}^- = kr_j \quad (j \in M_k; k \in Q) \quad (5-18)$$

評価関数(1)' :

$$f_{11}' = \sum_{k \in Q} \sum_{j \in M_k} (b_{jk}^+ + b_{jk}^-) \rightarrow \text{Min.} \quad (5-19)$$

本数式モデルでは複数の最適解が得られる可能性がある。その場合、得られる複数の最適解のなかから、各製品の生産量を平準化するように、式(5-20)を最小化するものを選べばよい。

評価関数(2) : 小期間ごとの生産量の平準化

$$f_{12} = \sum_{k \in Q} \sum_{i=1}^I \left| \frac{kd_i}{K} - E_{ik} \right| \rightarrow \text{Min.} \quad (5-20)$$

計算手順は、まず混合整数計画法を用いて式(5-13) ~ 式(5-18)の制約のもとに式(5-19)を最小化する最適解を求める。複数の最適解が得られる場合、おのこの解に対して式(5-20)を計算して得られる結果のなかから、最小の値をもつ最適解を選択する。

5.2.4 最大作業遅れを最小化するための数式モデル

混合ラインへ投入される各製品の総組立時間は品種ごとに異なり、各作業工程での作業時間も異なる。ある作業工程で作業時間が相対的に長い製品が連続して投入されると、その作業工程で作業遅れが生じ、場合によってはラインストップが発生するおそれもある。それゆえ、各作業工程での作業者の位置を把握しながら、最大作業遅れを最小化する投入順序を決定する必要がある。

投入順序決定の第2段階では、目標1を達成するために、第1段階で求められた小期間ごとの各製品の投入量のもとで、各作業工程での作業者の移動軌跡を定式化し、各小期間を対象に最大作業遅れを最小化する投入順序を決定する。

本数式モデルでは、各小期間に対して最大作業遅れを最小化する投入順序を求める。これは式(5-22) ~ 式(5-31) の制約のもとに式(5-21) を最小化する問題として定式化される。

評価関数(3) : 最大作業遅れの最小化

$$f_{21} = \max_k \sigma_k \rightarrow \text{Min.} \quad (5-21)$$

制約式 :

$$\sum_{i=1}^I P_{ik} = 1 \quad (k=1, 2, \dots, \widehat{K}) \quad (5-22)$$

$$\sum_{k=1}^{\widehat{K}} P_{ik} = \widehat{d}_i \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (5-23)$$

$$u^s_k = \sum_{i=1}^I (t^s_{ik} P_{ik}) \quad (s=1, 2, \dots, S; k=1, 2, \dots, \widehat{K}) \quad (5-24)$$

$$f^s_k = b^s_k + v u^s_k \quad (s=1, 2, \dots, S; k=1, 2, \dots, \widehat{K}; b^s_1 : \text{初期値}) \quad (5-25)$$

$$f^s_k \leq h^s \quad (s=1, 2, \dots, S; k=1, 2, \dots, \widehat{K}) \quad (5-26)$$

$$b^s_k = \max(f^{s-1}_k, g^s, (f^{s-1}_{k-1} - W)) \quad (5-27)$$

(s=1, 2, \dots, S; k=2, 3, \dots, \widehat{K}; f^0_k (k=1, 2, \dots, \widehat{K}) : 初期値)

$$\xi^s_k = \begin{cases} \max(0, (f^s_k - b^s)) & s \in S1 \\ \max(0, (f^s_k - m^s)) & s \in S2 \end{cases} \quad (5-28)$$

(k=1, 2, \dots, \widehat{K})

$$\delta_k = \sum_{s=1}^S \xi^s_k \quad (k=1, 2, \dots, \widehat{K}) \quad (5-29)$$

$$\sigma_k = \max \xi^s_k \quad (k=1, 2, \dots, \widehat{K}) \quad (5-30)$$

$$P_{ik} = 0 \text{ or } 1 \quad (i=1, 2, \dots, I; k=1, 2, \dots, \widehat{K}) \quad (5-31)$$

本数式モデルでも複数の最適解が得られる可能性がある。その場合、得られる複数の最適解のなかから式(5-32)で計算される作業遅れの和を最小化するものを選択する。

評価関数(4)：作業遅れの和の最小化

$$f_{2.2} = \sum_{k=1}^K \delta_k \rightarrow \text{Min.} \quad (5-32)$$

5.2.5 数式モデルの計算手順

生産の平準化のための数式モデルを解くために、本章では、混合整数計画法を用いて数式モデルの最適解を求める。

最大作業遅れを最小化するための数式モデルを解くために、本論文では、分枝限定法を用いて数式モデルの最適解を求める。計算上使用する記号をつぎのように定義する。

m：節点の番号

F：分枝可能な節点の集合

DK_m：節点mの深さ

FA_m：節点mの親節点

TP_{m i}：節点mまでの品種iの投入量

LL_m：節点mまでに決定済みの部分投入順序

LB1_m：節点mの第1下界値（最大作業遅れの下界）

LB2_m：節点mの第2下界値（作業遅れの和の下界）

a_m：つぎの分枝対象に選ばれる節点

s_m：生成する節点の番号

節点m（深さDK_m）の部分投入順序をLL_m=[l₁, l₂, ..., l_{DK}]とする。1番目からDK_m番目までの投入順序 LL_m に対して

$$\max_{k=1, \dots, DK} (\sigma_k) \leq \max \left[\max_{k=1, \dots, DK} (\sigma_k), \max_{k=DK+1, \dots, K} (\sigma_k) \right] \quad (5-33)$$

であるので、

$$\max_{k=1, \dots, DK_m} (\sigma_k) \leq \max_{k=1, \dots, K} (\sigma_k) \quad (5-34)$$

が成り立つ。したがって、節点 m の第1下界値はつぎの式で与えられる。

$$LB1_m = \left(\max_{k=1, \dots, DK_m} \sigma_k \right) = \max \left(\max_{k=1, \dots, DK_m-1} (\sigma_k), \sigma_{DK_m} \right) \quad (5-35)$$

同様に、第2下界値はつぎの式で与えられる。

$$LB2_m = LB2_{FA_m} + \delta_{DK_m} \quad (5-36)$$

以上より、つぎの4つのstepの計算手順で投入順序を決定する。

計算手順：

step1：初期値の設定

$$F = \{0\}, \quad a_m = 0, \quad s_m = 0, \quad LB1_o = 0, \quad LB2_o = 0, \quad DK_o = 0, \quad TP_{o_i} = 0$$

step2：分枝と下界の計算

$F = F - \{a_m\}$, $i = 1, 2, \dots, I$ に対してつぎの操作を繰り返す。

IF $TP_{mi} = K$

THEN 新しい節点を生成しない, $i = i + 1$

ELSE $s_m = s_m + 1$, $FA_{s_m} = a_m$

$$DK_{s_m} = DK_{a_m} + 1,$$

式(6-35), 式(6-36)を用いて下界 $LB1_{s_m}$, $LB2_{s_m}$ を計算する。

step3：分枝節点の選択

$\exists m \in F$ に対して $LB1_m \rightarrow \text{Min.}$ になる a_m を求める。ただし、複数の最適解が存在するときは、つぎの順に選ぶ。

① $LB2_m$ が最小のもの

② DK_m が最大のもの

③ m が最大のもの

step4：終了の判定

IF $DK_{a_m} = K$

THEN 投入順序を書き出し, 手順終了

ELSE step2 へ戻る

5.3 数値例による投入順序決定方法の解析

提案した投入順序決定の2段階方式の有効性を検証するために、つぎの数値例を用いる。

入力情報はつぎのとおりである。

計画期間中に4種類の製品を生産し、それらの製品には6種類の部品が使用されるものとする。表5-1に各製品の生産量を示す。表5-2に部品表及び各部品の引き取り時点を示す。

表5-1 各製品の生産量

i	1	2	3	4	K
d_i	30	40	30	20	120

表5-2 部品表及び各部品の引き取り時点

i \ j	1	2	3	4	n_j	引き取り時点
1	1	0	1	3	120	40, 80, 120
2	0	1	1	1	90	40, 80, 120
3	1	2	1	0	140	60, 120
4	1	3	2	1	230	60, 120
5	2	1	0	1	120	60, 120
6	2	1	1	3	190	120

投入順序の決定過程はつぎのとおりである。

(1) 所与の情報を整理する。

小日程生産計画期間中の引き取り時点の集合には、40番目の投入時点、60番目の投入時点、80番目の投入時点、120番目の投入時点が含まれるので、

$Q = \{40, 60, 80, 120\}$ になる。40番目、80番目の投入時点で部品1 と部品2 , 60番目の投入時点で部品3, 部品4, 部品5 の引き取りが行われ、そして120番目の投入時点では、すべての部品の引き取りが行われるので、

$M_{40} = \{1, 2\}$, $M_{60} = \{3, 4, 5\}$, $M_{80} = \{1, 2\}$, $M_{120} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ となる。

(2) 第1段階：各小期間の各製品の投入量の決定

図5-1 に示すように、2段階に分けて投入順序を決定する。計画期間中、4回の部品の引き取りが行われるので4つの小期間に分割される。各引き取り時点での引き取り量をなるべくその時点での理想値に近づけるために、5.3.3 で論じた数式モデルのもとに各小期間ごとの各製品の投入量を決定する。各小期間の各製品の投入量および累積投入量の計算結果は表5-3 に示すとおりである（計算は広島大学総合情報センターの HITAC M680/180E により、混合整数計画プログラム (MIP) を用いて行った）。

各引き取り時点での引き取り量とその時点での理想値との関係を図5-2 に示す。

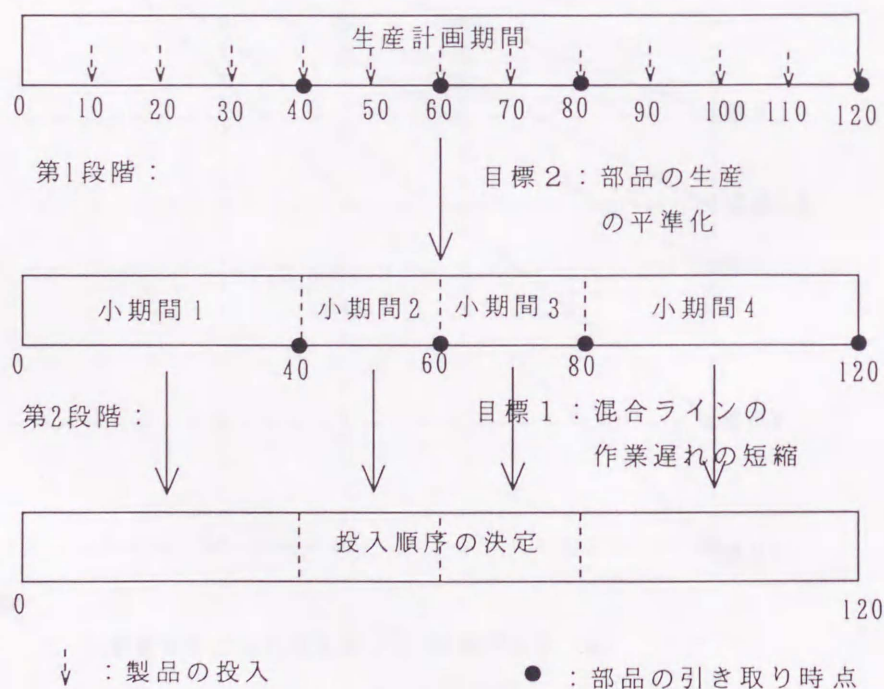


図5-1 投入順序決定の2つの段階

表5-3 小期間ごとの各製品の投入量および累積投入量

小期間	投入順番	投入量 / 累積投入量			
		i=1	i=2	i=3	i=4
1	1, ..., 40	10/10	10/10	15/15	5/5
2	41, ..., 60	5/15	10/20	0/15	5/10
3	61, ..., 80	5/20	0/20	15/30	0/10
4	81, ..., 120	10/30	20/40	0/30	10/20

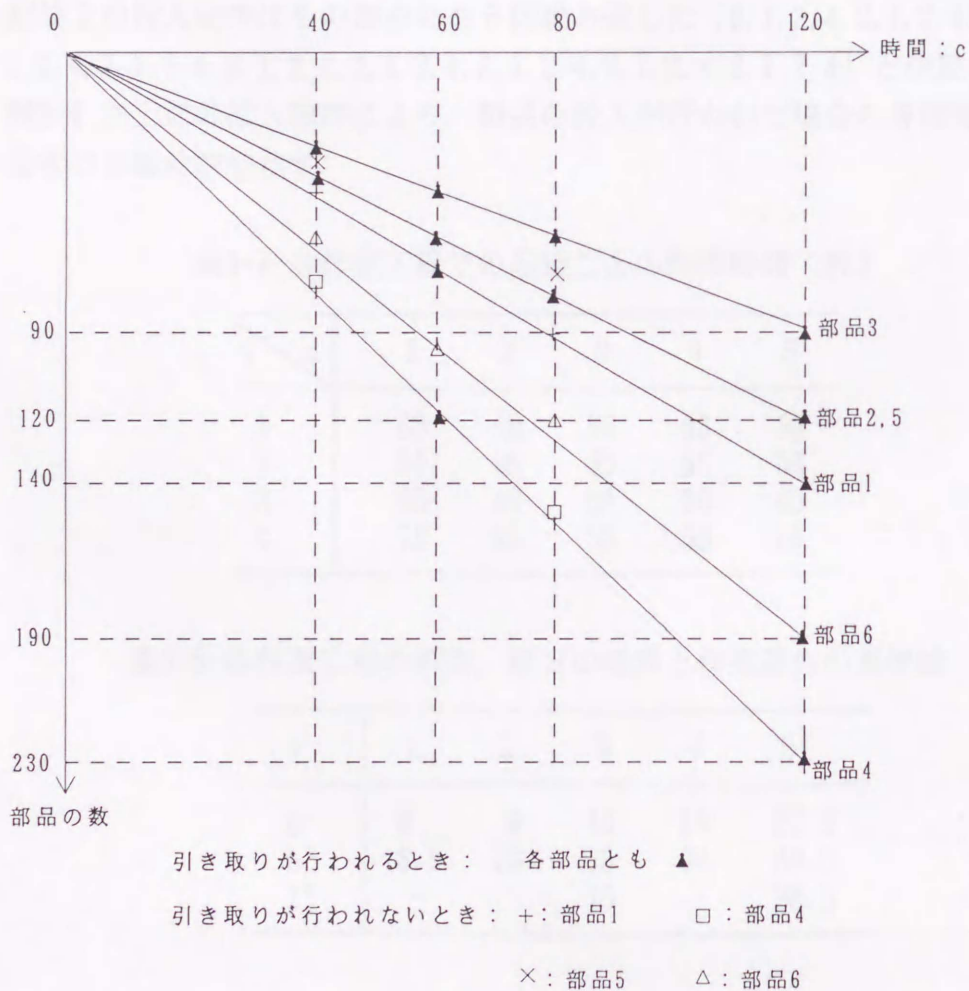


図5-2 引き取り時点での各部品の使用量

(3) 第2段階：投入順序の決定

ここでは、小期間2を例として、その投入順序を決定する。表5-3に示したように、小期間2の製品1, 2, 4の生産量はそれぞれ5, 10, 5で、その混合比は1:2:1となる。まずその混合比の投入順序を決め、それを5回繰り返したものを小期間2での全体の投入順序とする。

混合ラインには5つの作業工程があり、各作業工程での品種ごとの作業時間を表5-4に、各作業工程の作業域の前方と後方の境界を表5-5に示すものと仮定する。作業開始位置 g^s はそれぞれ1.5, 6.5, 10.0, 17.0, 23.0(単位:メートル)とし、 $c=60$ 秒, $v=0.1$ メートル/秒とする。したがって、 $w=6$ メートルとなる。

図5-3に分枝限定法を用いた混合比の投入順序 [2, 1, 2, 4]の決定経過を示す。小期間2の投入順序はその混合比を5回繰り返した [2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 1, 2, 4]と決定される。

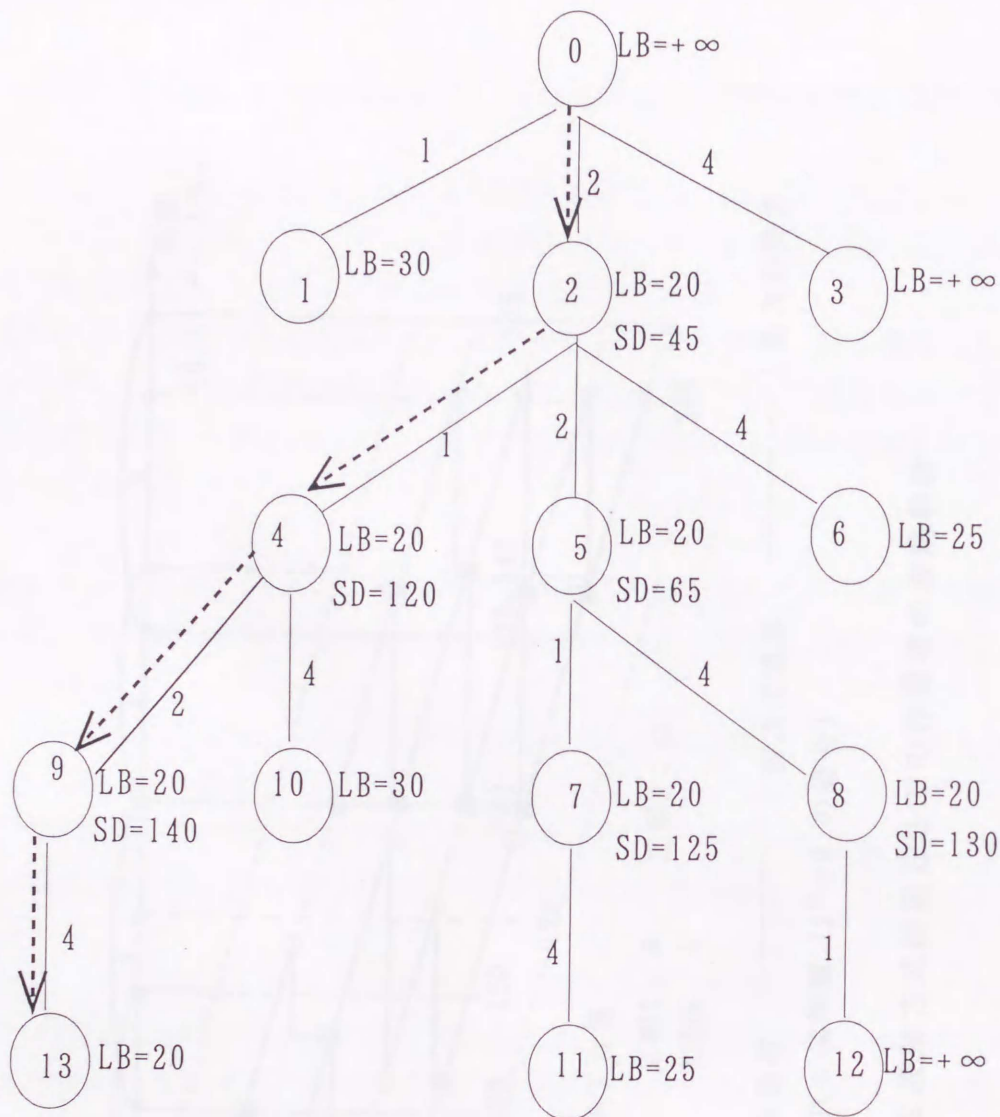
図5-4に上述の投入順序により、製品の投入が行われた場合の各作業工程での作業者の移動軌跡を示す。

表5-4 各作業工程での品種ごとの作業時間(秒)

i \ s	1	2	3	4	5
1	65	50	50	60	55
2	50	35	45	55	60
3	65	40	50	50	65
4	70	45	55	55	60

表5-5 各作業工程の前方, 後方の境界と作業遅れの基準線

s	1	2	3	4	5
g^s	0	6	10	18	22.5
h^s	8.5	13	18	24	30.5
l^s	-	-	15	-	28.5



凡例：

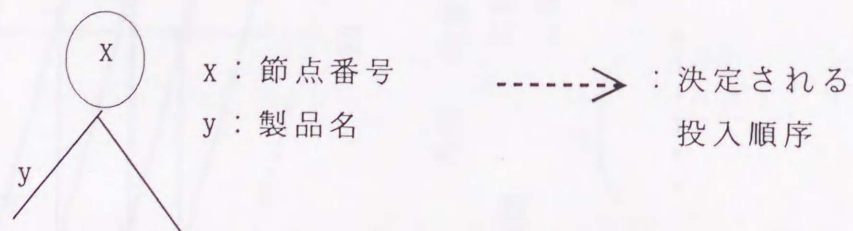


図5-3 分枝限定法を用いた投入順序の決定経過

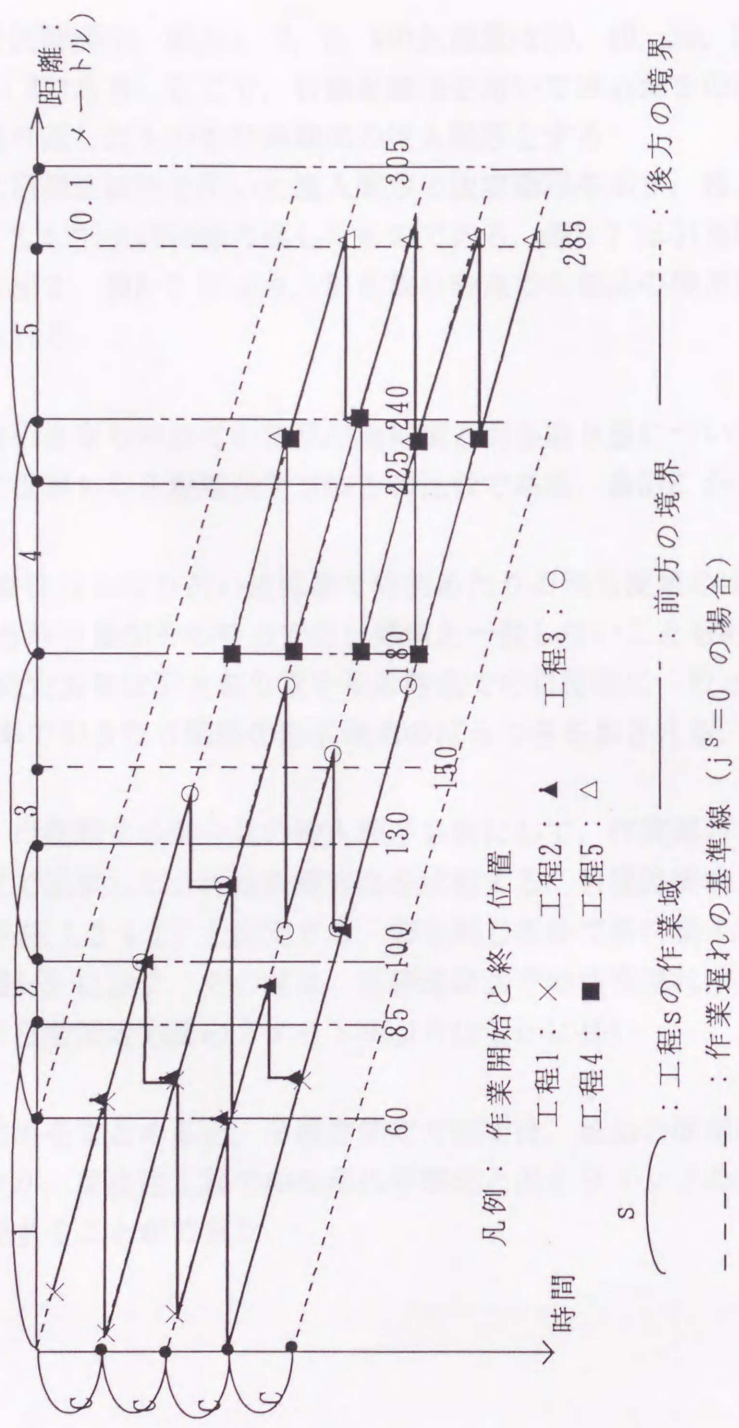


図5-4 2段階方式決定方法での作業者の移動軌跡

(4) 目標追跡法との比較

2段階決定方法との比較のために、目標追跡法[4]を用いた場合の投入順序を考える。

本生産計画期間中、製品1, 2, 3, 4の生産量は30, 40, 30, 20で、その混合比は3:4:3:2である。ここで、目標追跡法を用いて求めたその混合比での投入順序を10回繰り返したものを計画期間の投入順序とする。

表5-6 に目標追跡法を用いた投入順序の決定過程を示す。投入順序 [3, 1, 2, 4, 2, 1, 3, 3, 1, 2, 4, 2]を10回繰り返したものである。表5-7 は引き取り時点での製品の投入量を示す。表5-7 により、引き取り時点での部品の使用量および引き取り量が求められる。

表5-8 は引き取り時点での部品の使用量と引き取り量についての、目標追跡法と本論文で提案した2段階決定方法との比較である。表5-8 からつぎのことが明らかになる。

- ① 目標追跡法はかなり高い近似率で時間あたりの部品使用のばらつきをおさえるが、引き取り量はその時点での目標値と一致しないこともある。
- ② 2段階決定方法は引き取り量をその時点での目標値に一致させるとともに、高い近似率で引き取り間隔の部品使用のばらつきをおさえる。

つぎに、小期間2の混合比の投入順序を例にして、作業遅れについて目標追跡法と本論文で提案した2段階決定方法を比較する。目標追跡法では、その混合比の投入順序を[1, 2, 4, 2]と決定する。前と同じ条件で各作業工程での作業者の移動軌跡を図5-5に示す。その結果、目標追跡法での作業遅れは3メートルとなり、提案した2段階決定方法の2メートルよりはるかに長い。

上述の結果をまとめると、2段階決定方法では、部品の使用速度のばらつきが若干生じたが、前生産工程での生産の平準化と混合ラインでの作業遅れの短縮を同時に実現することができた。

表5-6 目標追跡法を用いた投入順序の決定経過

k	D_{k1}	D_{k2}	D_{k3}	D_{k4}	順序	X_{1k}	X_{2k}	X_{3k}	X_{4k}	X_{5k}	X_{6k}
1	2.60	3.27	1.44	>4	3	1	1	1	2	0	1
2	1.08	>2	>4	>3	1	2	2	1	3	2	3
3	>4	1.94	2.43	>4	2	4	2	2	6	3	4
4	>3	>4	4.0	2.33	4	4	5	3	7	4	7
5	>2	0.27	>2	>2	2	6	5	4	10	5	8
6	1.75	>2	1.75	>4	1	7	6	4	11	7	10
7	>4	>2	0.27	>5	3	8	7	5	13	7	11
8	>2	2.33	1.67	>4	3	9	8	6	15	7	12
9	2.44	4.44	-	>6	1	10	9	6	16	9	14
10	-	2.08	-	>4	2	12	9	7	19	10	15
11	-	>4	-	3.27	4	12	12	8	20	11	18
12	-	0.0	-	-	2	14	12	9	23	12	19

表5-7 目標追跡法による各引き取り時点までの各製品の累積投入量

k \ i	1	2	3	4
40	10	13	10	7
60	15	20	15	10
80	20	26	21	13
120	30	40	30	20

表5-8 引き取り時点での各部品の使用量と引き取り量

部品	k=40	k=60	k=80
1	<u>41(97.5)</u>	60(100)	<u>80(100)</u>
	<u>40(100)</u>	60(100)	<u>80(100)</u>
	<u>40</u>	60	<u>80</u>
2	<u>30(100)</u>	45(100)	<u>60(100)</u>
	<u>30(100)</u>	45(100)	<u>60(100)</u>
	<u>30</u>	45	<u>60</u>
3	46(98.6)	<u>70(100)</u>	93(99.6)
	45(96.4)	<u>70(100)</u>	90(96.4)
	46.67	<u>70</u>	93.33
4	76(99.1)	<u>115(100)</u>	174(86.5)
	75(97.8)	<u>115(100)</u>	150(97.8)
	76.67	<u>115</u>	153.33
5	40(100)	<u>60(100)</u>	79(98.8)
	35(87.5)	<u>60(100)</u>	70(87.5)
	40	<u>60</u>	80
6	64(99.0)	95(100)	126(99.5)
	60(94.7)	95(100)	120(94.7)
	63.33	95	126.67

ただし、この表では、上段は目標追跡法での数値、中段は本論文の2段階法での数値、下段は目標値を表す。()内の値は目標値を基準にした近似率(%)、下線は引き取り量を表す。

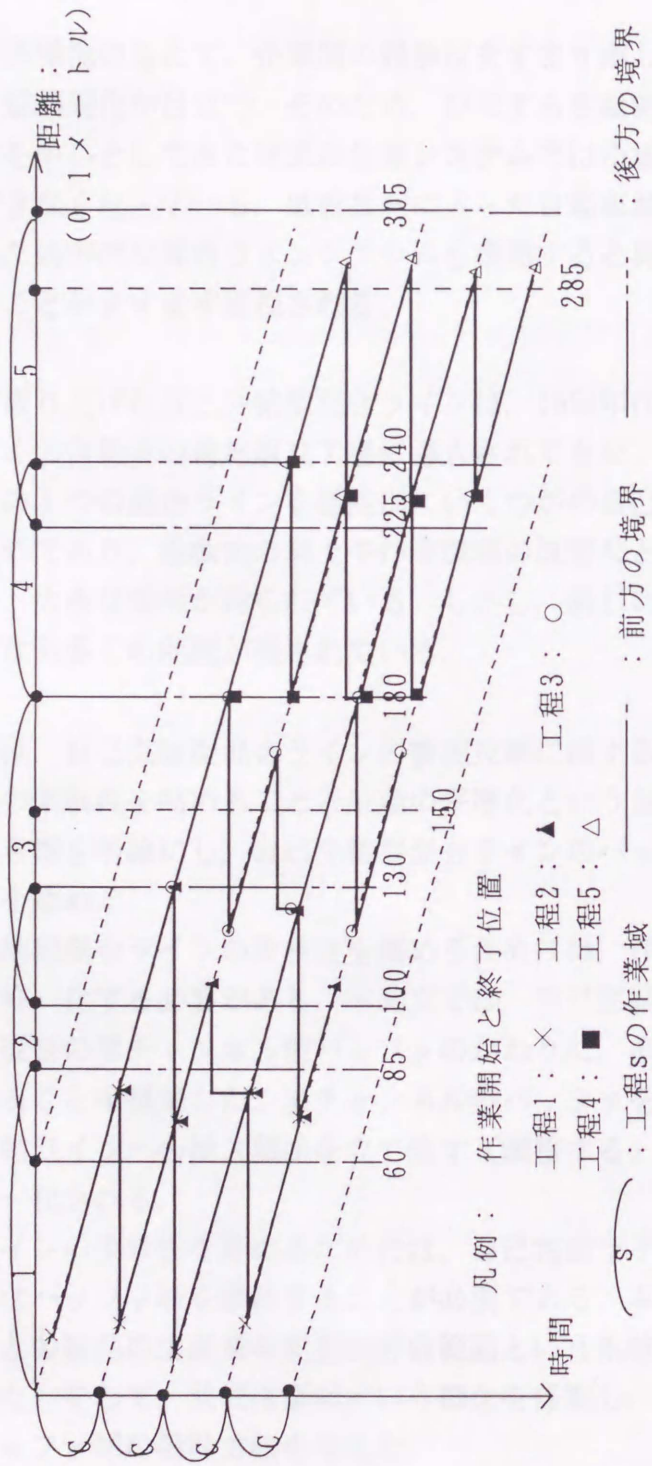


図5-5 目標追跡法での作業者の移動軌跡

第6章 結 び

厳しい経済環境のもとで、企業間の競争はますます激しくなっており、製品の多品種化、短納期化が目立つ。そのため、ひたすら生産能力を増大させ、生産の効率化などを中心としてきた従来の生産システムでは市場ニーズに迅速に対応することができなくなっている。低成長期に入った自動車産業においては、極力無駄を排除した効率的な混合ラインシステムを構築すると同時に混合ラインの柔軟性を高めることがますます重視される。

本論文で取り上げた自己完結型混合ラインは、1990年代の初頭からわずか数年の間に、多くの自動車の最終組立工場に導入されてきた。自己完結型混合ラインとは、従来の1つの混合ラインを機能別にいくつかの自己完結した混合ラインに分割したものであり、柔軟性の向上や作業環境の改善などの面で管理技術が試みられており、大きな効果が得られている。しかし、新しい管理技術の開発・改良についてはなお多くの問題が残されている。

本論文では、自己完結型混合ラインの管理技術に関する基礎研究の一環として、混合ラインの柔軟性を高めることと生産の平準化という自己完結型混合ラインの2つの管理目標を明確にし、自己完結型混合ラインのバッファの設計の観点からアプローチを進めた。

- (1) 自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるためには、作業工程での作業負荷をなるべく均一化する必要がある。本論文では、自己完結ライン間のバッファゾーンに、従来の単チャンネル型バッファのかわりに、多チャンネル型バッファを設定することを提案した。多チャンネル型バッファを設計することによって、各自己完結ラインへの投入順序を立て直す（調整する）ことができ、作業負荷が一層均一化される。
- (2) 混合ラインの柔軟性を高めるためには、自己完結ライン内に作業遅れを吸収する適切なバッファ域を設計することが必要である。本論文では混合ラインの利用効率と各製品の生産量の変動の許容範囲という柔軟性の2つの評価尺度を明確にした。そして、共同作業域という概念を提案し、それを考慮した作業工程へのバッファ域の設計方法を与えた。

(3) 自己完結型混合ラインの2つの管理目標を実現するためには、自己完結型混合ラインへの各製品の適切な投入順序決定方法が必要である。本論文では、生産の平準化と作業遅れの最小化を同時に考慮するために、2段階に分けた投入順序を決定する方法を提案し、その数式モデルを構築した。第1段階では、生産計画期間をいくつかの小期間に分割し、生産の平準化を保つために小期間ごとに各製品の投入量を決定する。第2段階では、最大作業遅れを最小化するように、各小期間の投入順序を決定する。

また、本論文では、上述の提案方法の有効性を検証するために、数値実験や数値例での解析を行い、いくつかの結論を導いた。

- (1) 数値実験を行い、多チャンネル型バッファの設定により、各作業工程での作業負荷の均一化の程度を表す平均と分散の変化の数値関係を明らかにした。チャンネル数を増やせば、平均は緩やかに収束すると同時に分散が大きく収束することと、製品の品種数が多いほど多チャンネル型バッファの設定が必要であることがわかった。
- (2) 自己完結ライン内の共同作業域を設計することにより、各製品の混合比の変動の許容範囲を拡大し、混合ラインの柔軟性を高めたことを、数値例で確認した。
- (3) 混合ラインへの各製品の投入順序の2段階決定法を利用し、生産の平準化と作業遅れの最小化という2つの目標を同時に実現したことが数値例で確認した。

本論文では、なるべく実際の生産管理の課題を取り込んで実用性のある研究を進めようとした。自己完結ライン間の多チャンネル型バッファの設計と投入順序の2段階決定方法は、比較的生産現場の実状に即した改良方法だと思われる。また、作業工程間の共同作業域の設計は、一定の前提条件のもとで行ったものであった。

自己完結型混合ラインの柔軟性を高めるためには、混合ラインの経済性を考慮したバッファの設計、作業研究、部品の共通化など多くの分野にわたって、理論、実践の両面で自己完結型混合ラインシステムを科学的に設計する必要があり、なお多くの課題が残されているといえよう。

第1章の参考文献

- [1] 五十嵐瞭：「多品種少量生産の生産管理改善－第2版－」，日刊工業新聞社，(1988)
- [2] 大崎紘一，梶原康博，平野元士郎，名倉国広，佐原良夫，金 薫，藤原恒昭：“ロボットによる多品種組立ライン設計手法に関する研究”，日本経営工学会誌，pp. 28-34, Vol. 46, No. 1, (1995)
- [3] 大野勝久，大竹裕一，趙 暁波，木瀬 洋：“ライン停止を考慮した混合品種組立ラインの順序づけ問題”，日本経営工学会誌，pp. 187-193, Vol. 46, No. 3, (1995)
- [4] 加藤勝人：“乗用車生産方式の現状と今後”，日本経営工学会平成6年度秋季研究大会予稿集，pp. 7-10, (1994)
- [5] 黒田 充：“ラインバランシングとその応用”，日刊工業新聞社，(1984)
- [6] 「工場管理」編集部：“これが「新」トヨタ生産システムだ！”，工場管理，pp. 18-47, Vol. 40, No. 11, (1994)
- [7] 小嶋健史：“超リーン革命“モノ作り”維新が始まった”，日本経済新聞社，(1994)
- [8] 小谷重徳：“混合ラインへの投入順序付けの近似解法”，大野耐一監修：“トヨタ生産方式の新展開”，日本能率協会，pp. 93-115, (1983)
- [9] 坪根 斉，松浦春樹：“生産システムの柔軟性について”，日本経営工学会誌，pp. 1-12, Vol. 46, No. 1, (1995)
- [10] 天田三郎：“ワークの姿勢変更ルールを持つロボット化混合品種ラインの設計法”，日本経営工学会誌，pp. 159-165, Vol. 46, No. 2, (1995)
- [11] 徳安博之，黒田 充：“ユニット住宅生産ラインにおけるユニット投入順序計画”，生産スケジューリングシンポジウム講演論文集，日本機械学会，pp. 81-84, (1993)
- [12] 平木秀作：“工程間バッファの設計方法の数値解析－混合ラインの工程間バッファの設計に関する研究（第4報）”，日本経営工学会誌，pp. 9-15, Vol. 31, No. 1, (1980)
- [13] 門田安弘：“新トヨタ生産システム”，講談社，(1991)
- [14] Cakir, A. and Inman, R.R. : “Modified goal chasing for products with non-zero/one bills of material ” , *Int. J. Prod. Res.* , pp.107-115 , Vol.31 , No.1 , (1993)

- [15] Miltenburg, J. : “ Level Schedules for Mixed-model Assembly Lines in Just-in-Time Production Systems ” , *Manage. Sci.* , pp.192-207 , Vol.35 , No.2, (1989)
- [16] Miltenburg, J. and Sinnamoni, G. : “ Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems ” , *Int. J. Prod. Res.* , pp.1487-1509 , Vol.27 , No.9 , (1989)
- [17] Mitsumori, S. : “ Optimum Schedule Control of Conveyer Line ” , *IEEE. Trans.* , pp.633-639 , Vol.AC-14 , No.6 , (1969)
- [18] Steiner, G. and Yeomans, S. : “ Level Schedules for Mixed-model, Just-in-Time Processes ” , *Manage. Sci.* , pp.728-735 , Vol.39 , No.6 , (1993)
- [19] Thomopoulos, N.T. : “ Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly ” , *Manage. Sci.* , pp.59-75 , Vol.14 , No.2 , (1967)

第2章の参考文献

- [1] 秋庭雅夫, 黒田 充, 田部 勉, 石井和克, 宮沢晴夫, 市村隆哉 : 「生産管理システムの設計—その研究と活用」, 日本能率協会, (1986)
- [2] 大野耐一, 門田安弘 : 「トヨタ生産方式の新展開」, 日本能率協会, (1983)
- [3] 加藤勝人 : “乗用車生産方式の現状と今後” , 日本経営工学会平成6年度秋季研究大会予稿集, pp.7-10, (1994)
- [4] 黒田 充, 田部 勉, 圓川隆夫, 中根甚一郎編 : 「生産管理」, 朝倉書店, (1989)
- [5] CIM研究グループ : 「生産革命CIM —構築のアプローチ—」, 工業調査会, (1988)
- [6] 関根憲一, 岩崎澄男, 新井啓介 : 「組立人員1/2化」, 日刊工業新聞社, (1992)
- [7] 宋 相載, 崔 貞姫 : “フレキシブルな統合化生産の基本概念, その設計, 及び最適意思決定” , 日本経営工学会誌, pp.417-429, Vol.45, No.5, (1994)
- [8] 坪根 斉, 松浦春樹 : “生産システムの柔軟性について” , 日本経営工学会誌, pp.1-12, Vol.46, No.1, (1995)

- [9] 中山秀祐：“生産計画立案とフレキシビリティ”，経営システム，pp. 88-92, Vol. 3, No. 2, (1993)
- [10] 人見勝人：「生産システム工学」，共立出版，(1991)
- [11] 村松林太郎：「新版生産管理の基礎」，国元書房，(1979)
- [12] 門田安弘：「新トヨタ生産システム」，講談社，(1991)
- [13] 山田善教：“生産管理と生産技術の統合”，日本機械学会誌，pp. 1522-1526, Vol. 90, No. 829, (1987)
- [14] 山田善教：“生産システムのフレキシビリティ”，経営システム，pp. 81-87, Vol. 3, No. 2, (1993)
- [15] Osullivan, D. : “Developing and Operation of a Flexible Manufacturing Using Structured Techniques” , *J. Prod. Plan. and Cont.* , pp.122-134 , Vol.2 , No.2 , (1991)
- [16] Slack, N. : “The Flexibility of Manufacturing System” , *Int. J. Oper. Manage* , pp.35-45 , Vol.7 , No.4, (1987)

第3章の参考文献

- [1] 「工場管理」編集部：“これが「新」トヨタ生産システムだ！”，工場管理，pp. 18-47, Vol. 40, No. 11, (1994)
- [2] 小谷重徳：“混合ラインへの投入順序付けの近似解法”，大野耐一監修：「トヨタ生産方式の新展開」，日本能率協会，pp. 93-115, (1983)
- [3] 徐 祝淇，平木秀作：“生産の平準化と作業遅れを考慮した混合ラインへの投入順序の決定方法”，日本経営工学会誌，pp. 614-622, Vol. 46, No. 6, (1996)
- [4] 門田安弘：「新トヨタ生産システム」，講談社，(1991)
- [5] Cakir, A. and Inman, R.R. : “Modified goal chasing for products with non-zero/ one bills of material” , *Int. J. Prod. Res.* , pp.107-115 , Vol.31 , No.1 , (1993)
- [6] Miltenburg, J. : “Level Schedules for Mixed-model Assembly Lines in Just-in-Time Production systems” , *Manage. Sci.* , pp.192-207 , Vol.35 , No.2 , (1989)
- [7] Ng, W.C. and Mak, K.L. : “A Branch and Bound Algorithm for Scheduling Just-in-Time Mixed-Model Assembly Lines” , *Int. J. Prod. Eco.* , pp.169-183 , Vol. 33 , (1994)

- [8] Steiner,G. and Yeomans,S. : “ Level Schedules for Mixed-model , Just-in-Time Processes ” , *Manage. Sci.* , pp.728-735 , Vol.39 , No.6 , (1993)

第4章の参考文献

- [1] 大野勝久, 大竹裕一, 趙 暁波, 木瀬 洋 : “ライン停止を考慮した混合品種組立ラインの順序づけ問題” , 日本経営工学会誌, pp. 187-193, Vol. 46, No. 3, (1995)
- [2] 黒田 充 : 「ラインバランシングとその応用」, 日刊工業新聞社, (1984)
- [3] 小谷重徳 : “混合ラインへの投入順序付けの近似解法” , 大野耐一監修 : 「トヨタ生産方式の新展開」, 日本能率協会, pp. 93-115, (1983)
- [4] 徳安博之, 黒田 充 : “ユニット住宅生産ラインにおけるユニット投入順序計画” , 生産スケジューリングシンポジウム講演論文集, 日本機械学会, pp. 81-84, (1993)
- [5] 平木秀作 : “工程間バッファの設計方法の理論的解析—混合ラインの工程間バッファの設計に関する研究(第3報)” , 日本経営工学会誌, pp. 312-317, Vol. 28, No. 3, (1977)
- [6] 平木秀作 : “工程間バッファの設計方法の数値解析—混合ラインの工程間バッファの設計に関する研究(第4報)” , 日本経営工学会誌, pp. 9-15, Vol. 31, No. 1, (1980)
- [7] 村松林太郎 : 「新版生産管理の基礎」, 国元書房, (1979)
- [8] 門田安弘 : 「新トヨタ生産システム」, 講談社, (1991)
- [9] Mitsumori, S. : “ Optimal Schedule Control of Conveyer Line ” , *IEEE Trans.* , pp.633-639 , Vol. AC-14 , No.6 , (1969)

第5章の参考文献

- [1] 大野勝久, 大竹裕一, 趙 暁波, 木瀬 洋 : “ライン停止を考慮した混合品種組立ラインの順序づけ問題” , 日本経営工学会誌, pp. 187-193, Vol. 46, No. 3, (1995)
- [2] 大野耐一, 門田安弘 : 「トヨタ生産方式の新展開」, 日本能率協会, (1983)
- [3] 黒田 充 : 「ラインバランシングとその応用」, 日刊工業新聞社, (1984)

- [4] 小谷重徳：“混合ラインへの投入順序付けの近似解法”，大野耐一監修：「トヨタ生産方式の新展開」，日本能率協会，pp.93-115，(1983)
- [5] 坂和正敏：「線形システムの最適化<—目的から多目的へ>」，森北出版，(1984)
- [6] 徳安博之，黒田 充：“ユニット住宅生産ラインにおけるユニット投入順序計画”，生産スケジューリングシンポジウム講演論文集，日本機械学会，pp.81-84，(1993)
- [7] 平木秀作，青木兼一：“流れ作業生産システムのスケジューリングに関する研究”，日本機械学会論文集，pp.1770-1777，Vol.44，No.381，(1978)
- [8] 村松林太郎：「新版生産管理の基礎」，国元書房，(1979)
- [9] 門田安弘：「新トヨタ生産システム」，講談社，(1991)
- [10] Cakir, A. and Inman, R.R.：“Modified goal chasing for products with non-zero/ one bills of material”，*Int. J. Prod. Res.*，pp.107-115，Vol.31，No.1，(1993)
- [11] Inman, R.R. and Bulfin, R.L.：“Sequencing JIT Mixed-Model Assembly Lines”，*Manage. Sci.*，pp.901-904，Vol.37，No.7，(1991)
- [12] Kubiak, W. and Sethi, S.：“Optimal Level Schedules for Flexible Assembly Lines in JIT Production Systems”，*Working paper, Faculty of Management, University of Toronto, May*，(1989)
- [13] Kubiak, W. and Sethi, S.：“Level Schedules for Mixed-model Assembly Lines in Just-in-Time Production Systems”，*Manage. Sci.*，pp.121-122，Vol.37，No.1，(1991)
- [14] Miltenburg, J.：“Level Schedules for Mixed-model Assembly Lines in Just-in-Time Production Systems”，*Manage. Sci.*，pp.192-207，Vol.35，No.2，(1989)
- [15] Miltenburg, J. and Sinnamon, G.：“Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems”，*Int. J. Prod. Res.*，pp.1487-1509，Vol.27，No.9，(1989)
- [16] Mitsumori, S.：“Optimal Schedule Control of Conveyor Line”，*IEEE Trans.*，pp.633-639，Vol. AC-14，No.6，(1969)
- [17] Ng, W.C. and Mak, K.L.：“A Branch and Bound Algorithm for Scheduling Just-in-Time Mixed-Model Assembly Lines”，*Int. J. Prod. Eco.*，pp.169-183，Vol. 33，(1994)
- [18] Okamura, K. and Yamashina, H.：“A Heuristic Algorithm for the Assembly Line Model-Mix Sequencing Problem to Minimize the Risk of Stopping the Conveyor”，*Int. J. Prod. Res.*，pp.233-247，Vol.17，No.3，(1979)

- [19] Steiner, G. and Yeomans, S. : “ Level Schedules for Mixed–model, Just–in–Time Processes ” , *Manage. Sci.* , pp.728–735 , Vol.39 , No.6 , (1993)
- [20] Sumichrast, R.T. and Russell, R.S. : “ Evaluating Mixed–Model Assembly Line Sequencing Heurtistics for Just–in–Time Production Systems ” , *Int.J. Oper. Manage.* , pp.371–390 , Vol.9 , No.3 , (1990)
- [21] Thomopoulos, N.T. : “ Line Balancing–Sequencing for Mixed–Model Assembly ” , *Manage. Sci.* , pp.59–75 , Vol.14 , No.2 , (1967)