

Title	鉄鋼生産における離散事象物流システムの多目的最適化に関する研究
Author(s)	上野, 信行
Citation	大阪大学, 1991, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3058260">https://doi.org/10.11501/3058260</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

鉄鋼生産における離散事象物流システムの  
多目的最適化に関する研究

平成 3 年 5 月

上 野 信 行

鉄鋼生産における離散事象物流システムの  
多目的最適化に関する研究

平成 3 年 5 月

上 野 信 行

## まえがき

近年、鉄鋼業においては、需要構造の多様化・高級化の進展に伴い、多品種・小ロット・短納期に対応した新しい生産・物流管理方式の構築が不可欠となってきた。このような多品種・小ロットへの対応策としては、FMS, FA等の新設備・新機器の導入による機能向上、柔軟性確保が図られようとしているが、単に個別設備・工程改善にとどまらず、工場内の製造設備群とその基本操業法、物流システムの基本構成・方式の抜本的改善が必要であるとともに、これらの改善結果をベースとして、日々の注文の生産計画・物流計画を適正化し、品質・コスト・納期のバランスを考慮して生産計画管理を行うシステムの再構築が早急に求められている。

本論文は、このような課題に対して鉄鋼生産プロセスを離散事象物流システムととらえ、生産システム・物流システムの方式再設計における多目的最適化および生産・物流計画システムにおける多目的最適化に関する数理的方法論の提案とその実システムへの適用・評価による研究成果をまとめたものである。

具体的には、

- (1) 多品種・小ロットに対応した生産計画管理システムは、大規模複合型多目的スケジューリング問題であると規定し、問題の構造・特性を利用した実用的な解法の開発、
- (2) 製鋼工程計画問題を多目的計画問題であると規定し、満足化トレードオフ法を利用した実用的な解法の開発、
- (3) フローショップ型生産システム・輸送システム再設計に対して、シミュレーションと最適化技法を組合せた実用的な解法の開発、
- (4) 2段階切断工程材料取合せ問題に対する実用的な解法の開発、

に関して、解法案出の方法論とその適用結果をとりまとめたものである。

本研究は、数理工学・システム工学の生産分野における現場への適用・評価を通じて行われたものであり、いわば‘実践活動の場’から生まれたものといえる。

日本の鉄鋼業をはじめとする製造業が、今後とも世界に冠たるためには、製品の品質・コストの改善に加えて、その時代時代の環境に適合して‘タイミングよく、効率的に、かつフレキシブルに製品をつくる’運用計画管理技術がますます重要になってくると思われる。ここで得られた成果が、その発展に寄与するならば幸いである。



# 目 次

第1章 緒論 .....	1
1.1 背景 .....	1
1.2 鉄鋼生産構造の特徴と離散事象物流システム .....	1
1.3 鉄鋼生産プロセスにおける多目的最適化問題 .....	3
1.4 本研究の概要 .....	4
第2章 生産・物流計画システムにおける多目的最適化法 .....	8
2.1 緒言 .....	8
2.2 一貫操業計画システムの概要 .....	8
2.2.1 一貫操業計画システムの必要性 .....	8
2.2.2 一貫操業計画システムの概要 .....	10
2.3 圧延・精整操業計画システム .....	12
—並列設備選択を含む多制約多目的の $\gamma$ 型スケジューリング問題—	
2.3.1 問題の概念 .....	12
2.3.2 問題の特徴 .....	14
2.3.3 圧延・精整操業計画ロジック .....	14
2.3.4 結果 .....	20
2.4 素材生産計画システム .....	21
—フローショップ型多品種ラインバランシング問題—	
2.4.1 問題の概念 .....	21
2.4.2 素材生産計画ロジックの全体の構成 .....	23
2.4.3 鑄込・分塊計画の操業スケジューリングの特徴 .....	24
2.4.4 鑄込・分塊計画ロジック .....	25
2.4.5 結果 .....	28
2.5 出荷計画システム—大規模多目的割当問題— .....	30
2.5.1 問題の概念 .....	30
2.5.2 問題の定式化 .....	31
2.5.3 問題の特徴 .....	32
2.5.4 出荷計画ロジック .....	33
2.5.5 結果 .....	40

2.6	一貫操業計画システムの運用と効果	40
2.7	結言	41
第3章	トライ選択問題における多目的計画法	43
3.1	緒言	43
3.2	トライ選択問題	44
3.3	トライ選択問題の定式化	45
3.3.1	目標関数	46
3.3.2	制約条件	46
3.4	解法の基本的考え方	47
3.5	解法	47
3.5.1	目標関数の線形化	47
3.5.2	満足化トレードオフ法の適用	48
3.6	計算結果	50
3.7	考察と結言	52
第4章	生産システム設計における多目的最適化法	54
	—大規模フローショップ型生産システムの設備能力再設計法—	
4.1	緒言	54
4.2	大規模フローショップ型生産システムの特徴と検討課題	55
4.2.1	フローショップ型生産システムのモデル	55
4.2.2	生産システム再設計時の検討課題	56
4.3	ライン能率の算出法	56
4.3.1	新指標の定義とネック設備特定法	56
4.3.2	他指標との比較・評価	57
4.4	新指標に基づくライン能率改善シミュレーション手順	59
4.5	実システムへの適用	62
4.5.1	対象となる生産システム	62
4.5.2	シミュレーション・モデルの構成	63
4.5.3	数値計算結果(ケース・スタディ)	63
4.6	結言	67
第5章	物流システム設計における多目的最適化法	68
5.1	緒言	68

5.2	問題の概念	70
5.2.1	問題の記述	70
5.2.2	具体的検討課題	71
5.3	モデリング	71
5.3.1	製品発生分布の同定	72
5.3.2	輸送ルール	74
5.4	解法	78
5.4.1	問題の特徴	78
5.4.2	解法の基本的アプローチ	78
5.4.3	解法	78
5.5	結果	80
5.6	結言	83
第6章	材料取合せにおける多目的最適化法	85
6.1	緒言	85
6.2	材料取合せ問題の概要	85
6.2.1	材料の流れ	85
6.2.2	制約条件	86
6.3	解法	88
6.3.1	問題の特徴	88
6.3.2	解法の基本的骨子	89
6.4	材料取合せロジック	92
6.4.1	材料振当ロジック	92
6.4.2	材料切断ロジック	97
6.5	結果	103
6.6	結言	104
第7章	結論	105
謝 辞		110
参考文献		111
図表リスト		119

## 1.1 背景

近年、製造業においては、需要構造の多様化・高級化の進展に伴い、多品種・小ロットに対応した新しい生産・物流管理方式の構築が重要な経営課題になってきており、各業種は、それぞれの生産形態に適合した改善施策、例えば、CIM (Computer Integrated Manufacturing)、FMS (Flexible Manufacturing System)、カンバン方式、MRP (Material Requirement Planning) 等の構築を推進している<sup>1) 2) 3) 4) 5) 6)</sup>。鉄鋼業においても、注文構成の多品種・小ロット化、高級化、短納期化などが急速に進んでおり、これらに対応したより合理的な生産体制を整備することにより、製造コスト削減の徹底追求と製造期間短縮やJust-in-Time 納入などの非価格競争力向上とを図ることが不可欠である。

このような環境下において、鉄鋼業では、これまでコンピュータを活用した統合生産のシステム概念による生産管理システムを構築してきており、生産管理に必要な情報の収集・蓄積・伝達といういわゆる情報処理面の機能は充実しているが、製鉄所全体の“物の流れ”を一貫して計画・管理し、受注～生産～出荷～納入にかかわるすべての注文（現品）の動きの先読みを行って、製造・輸送・保管・納入活動全般にわたり最適化を指向するシステム（いわゆる生産・物流統合管理システム）はなく、早急に構築する必要がある。

また、上記のコンピュータシステムの構築のみならず、FMS、FA (Factory Automation) 等の新設備・機器の導入による機能向上、柔軟性確保が図られようとしているが、単に個別設備・工程改善にとどまらず、工場内の製造全設備群・物流システムの基本構成・方式の抜本的見直しも同時に行う必要がある。

## 1.2 鉄鋼生産構造の特徴と離散事象物流システム

鉄鋼生産形態は、図1.1に示すように、大規模なバッチタイプの設備（複数）が多段に連結されている製造プロセスであり、同じ溶鉄から多種類の材質の溶鋼をつくり、つぎに、連続鑄造機によって溶鋼からスラブ、ブルーム、ビレットという中間素材がつくられ、最終的に圧延工場にて製品（例えば、薄板コイル、厚板、条鋼）がつくられる。鉄鋼生産プロセスはこのように冶金上の所定性質をもつ溶鋼を分割・加工してゆくといういわゆるブレイクダウン型製造工程であり、加工・組立産業におけるアセンブリ型と大きく異なっている<sup>7) 8) 9)</sup>。

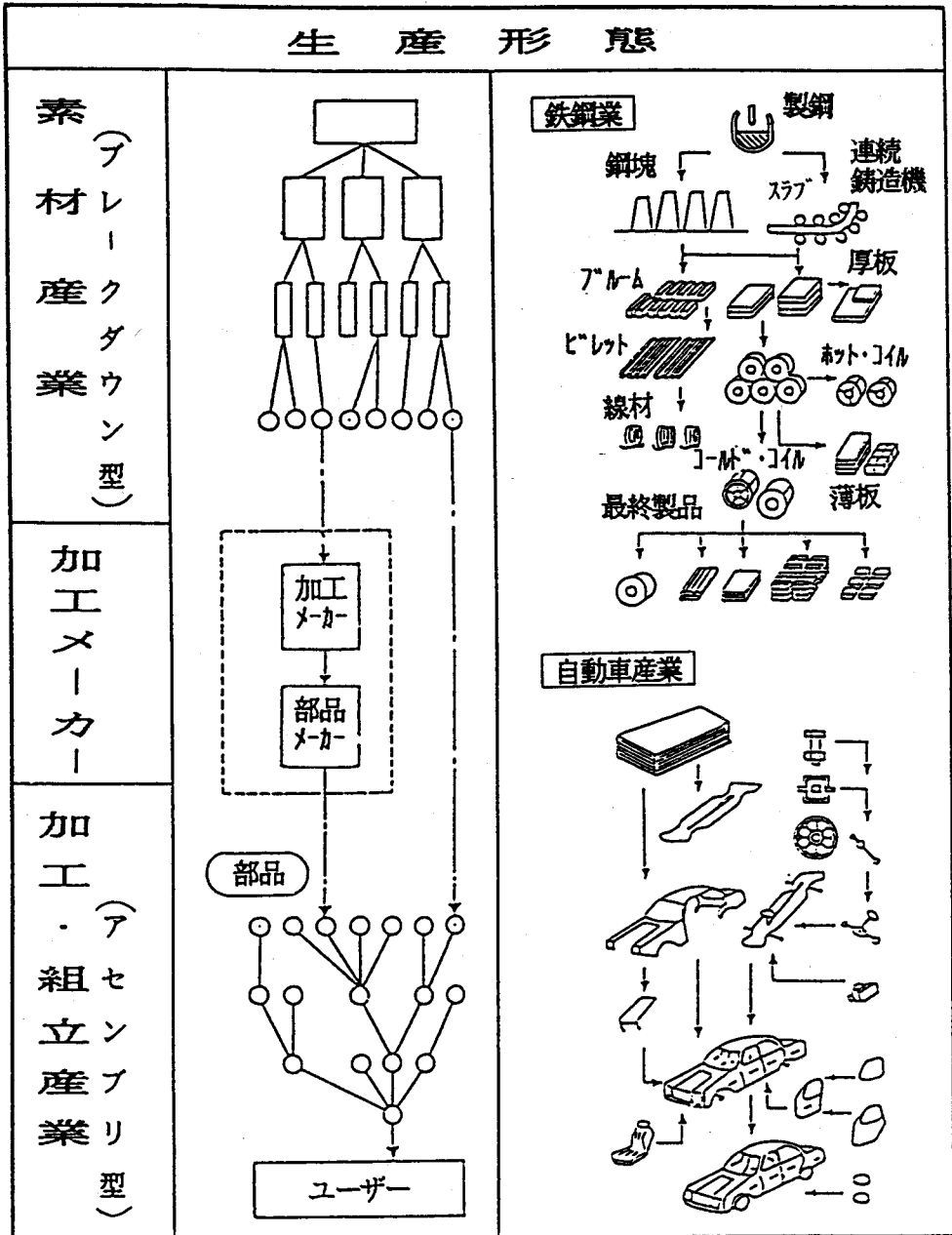


図 1.1 ブレークダウン型生産形態

一方、受注形態は、品種が多様でリピート性が少なく、品種構成変動も大きいという特徴がある。以上の鉄鋼生産構造の特徴は表1.1のようにまとめることができる。

表 1.1 鉄鋼生産構造の特徴

	生産形態面	受注形態面
特徴	① 多段階工程 ② ブレークダウン (分割細分化)型 ③ バッチ処理タイプの 大規模設備 ④ 段取替条件厳しい設備	① 多品種・小ロットの受注 生産 ② リピート性小 ③ 品種構成変動大

この鉄鋼生産プロセスを数理的視点からみると、注文という個体がある製造設備に①到着し、②処理開始、③処理終了、④次の設備への移動 という離散的事象を繰り返すことによって最終製品になってゆくと考えられる。この意味から、鉄鋼生産プロセスを離散事象物流システムととらえることができる。

### 1.3 鉄鋼生産プロセスにおける多目的最適化問題

1.1 節で述べたような環境下における対応策として、

(1) 日々に注文の生産計画・物流計画を適正化し、品質・コスト・納期のバランス良い操業計画を立案し、この計画に基づいて注文を製造管理するシステムの構築、すなわち、生産・物流計画管理システムの開発

(2) (1)のシステム構築の基盤として、工場の生産システム（設備群とその操業ノウハウ）、物流システムの基本構成・方式の抜本的リフレッシュ

が重要であることは既に述べた。

これらの開発・検討の局面には、いずれも多かれ少なかれ多目的最適化問題があらわれる。例えば、(1)の生産・物流計画管理システムにおいては、品質・納期・稼働率・仕掛・在庫量・運搬費等の評価項目を考慮しなければならず、また(2)の生産システム設計の局面では、稼働率・在庫・製造設備への投資を、物流システム設計の局面では、物流設備（運搬具・仕分場等）への投資、運搬費等の評価

項目を考慮しなければならない。

#### 1.4 本研究の概要

本論文は、鉄鋼プロセスを離散事象物流システムととらえ、数理的視点からのアプローチ<sup>10) -16)</sup>を行い、生産・物流計画システムにおける多目的最適化、生産システム・物流システムの方式再設計における多目的最適化に関する方法論の提案とその実システムへの適用・評価の研究成果を報告するものである。

第2章、第3章、第6章は計画モデルにおける多目的最適化問題を、第4章、第5章はシステム設計における多目的最適化問題を扱っている。

第2章では、多品種・小ロットに対応した大規模生産計画システムにおける多目的最適化法について述べる。ここでは、新しい生産・物流管理方式として、受注～生産～出荷にかかわるすべての注文（現品）の動きの先読みを行って、製鉄所全体の「物の流れ」を一貫して計画・管理する「生産・物流統合管理システム」と、その中核として全注文を対象に鑄込～圧延～精整～出荷までの全製造工程の一貫した操業計画を立案するシステムとして「一貫操業計画システム」を提案する。

- (1) まず、製造業における操業計画問題の特徴を明確化する。すなわち、
  - ① 対象となるロット数・種類が多く、通過工程も多岐にわたる（大規模・多品種・多段階工程）。
  - ② 設備・操業に関する制約条件が複雑かつ多数である（多制約）。
  - ③ 評価指標が複数である（多目的）。
  - ④ 日々の生産管理システムとして運用されるために、短時間求解が必須である。
- (2) つぎに、提案した一貫操業計画システムが素材生産計画システム、製品生産計画システム及び出荷計画システムの3つのサブシステムから構成されることを述べ、数理的視点からは、
  - ① 素材生産計画システム：フローショップ型多品種ラインバランシング問題
  - ② 製品生産計画システム：並列設備選択を含む多制約多目的ジョブショップ型スケジューリング問題
  - ③ 出荷計画システム：大規模多目的割当問題と性格づけられることを示す。
- (3) 一貫操業計画システムが複数のスケジューリング問題の結合であり、その内

部に組合せ問題をも包含する大規模複合型多目的スケジューリング問題であるとの認識の上で、問題の構造・特性を利用した実用的な解法の開発と解法案出の方法論を述べる。すなわち、

- ① 大規模な問題を生産形態・工程形態の視点から小問題に分割する
- ② ①の分割を用いても個々の小問題は依然大きく、かつ多目的・多制約であることから、シミュレーションによる解法を基本としつつも、
  - a) 問題のタイプにより効率のよいシミュレーション方式を選定する
  - b) スケジュール案の最終結果の先読みを行い、結果が悪くならないように途中のスケジュール結果をガイドする役目をもつヒューリスティックスを組込む

等である。

- (4) 最後に、結果の評価として、充分満足いく解が短時間（約20分）にて得られ、日々の生産管理システムとして実用的であることを述べる。

第3章では、鉄鋼生産プロセスのうち重要な工程である製鋼工程におけるトライ選択問題を多目的組合せ問題ととらえ、満足化トレードオフ法を適用した新しい多目的最適化法を提案する。すなわち、

- (1) トライ選択問題を複数の非線形目標関数をもつ0-1整数計画問題に定式化できることを示す。
- (2) 本問題が基本的には離散型組合せ問題であることを示し、問題の特性を利用して変換を行った上で、内部経路法を活用したMin-Max法と満足化トレードオフ法とを組合せた実用的解法を提案する。
- (3) 結果として、本方法が、希求水準として絶対値（例えば工程管理上の諸元値）を選定することで意思決定者の判断を容易に反映できるという点で、非常に有効性が高いことを示す。

第4章では、多品種・小ロット化環境下において、既存工場リフレッシュに対応した生産システムの再設計への合理的な方法論、特に、ライン設備能力の評価法として、実際規模の生産システムへの適用可能な新しい方法を提案する。

本方法は、最近急速に進歩している離散型シミュレーション技術を活用しており、シミュレーション技術の課題である試行錯誤的方法を回避し、かつ設備改善投資コストを最小化するという意味での最適化を図るためにネック設備を自動的に特定する新指標を考案している。

すなわち、

- (1) シミュレーションモデル作成の工数削減のために、シミュレーション専用言



語を使用し、従来型言語とのハイブリッド型構成とする。これにより、理論上は大規模・複雑な生産システムであってもその物の挙動は表現可能である。

- (2) シミュレーションの試行錯誤的方法の回避と設備改善投資コスト最小化という意味の最適化を図るために、ライン能率を律則する設備（ネック設備）を自動的に特定できる新指標を考案する。
- (3) そして、この新指標に基づいたライン設備能力再設計の一連のシミュレーション手順を確立し、本方法が実際の大規模フローショップ型生産システムの再設計に有効性が高いことを述べる。

第5章では、製鉄所における構内物流効率化に際し、物流システムの再設計・評価に関する多目的最適化法を提案する。

- (1) 大量輸送方式であるトレーラー&パレット輸送方式導入に伴い、ミルエンドにおくべきパレットの置場容量の決定を投資コスト・輸送コストを勘案して検討するに際し、「シミュレーションと線形探索法」を組合せた新しい設計法を提案する。
- (2) 一般的に、離散事象として表現される物流システムは、その挙動を事前に陽にかつ正確に表現できることが極めて少なく、このようなシステムの設計技法として、ここで考案した方法は非常に実用的であり、かつ適用範囲が広いことを述べる。

第6章では、注文の多品種・小ロットに対応した大規模材料計画システムについて、従来からオペレーションズ・リサーチの分野で「一次元材料切断問題」と扱われてきたものに対して実践的な視点から解法にヒューリスティックスを織り込んだ多目的最適化法を提案する。すなわち、

- (1) 材料取合せ問題は、鉄鋼業特有の問題形態と関連しており下記の特徴をもつ。
  - ① 単に材料切断問題だけでなく、材料の割当問題（材料振当という）を内在している複合型である（複雑・複合型）。
  - ② 評価基準が複数である（多目的）。
  - ③ 短時間求解が必要である。
- (2) (1)に示した大規模複合型の組合せ問題に対して問題の構造を利用して、ヒューリスティックスを組込んだ実用的な解法を提案し、有効性が高いことを示す。

なお、表1.2に、各章の内容の分類と数理的視点をまとめたものを示す。

表 1.2 各章の内容

	タイトル	分類		内 容	
		計画	設計	対象分野	数理的視点としての内容
第2章	生産・物流計画システムにおける多目的最適化法	○		生産・物流両分野	①70-3077型多品種ラインバラツキ問題における多目的最適化法 ②3077-3077型スケジューリング問題における多目的最適化法 ③大規模割当問題における多目的最適化法
第3章	トライ選択問題における多目的計画法	○		生産	離散型組合せ問題における満足化トレードオフ法
第4章	生産システム設計における多目的最適化法		○	生産	大規模70-3077型生産システム設計への新指標を組み込んだ離散型シミュレーションによる多目的最適化法
第5章	物流システム設計における多目的最適化法		○	物流	物流システム設計における離散型シミュレーションと線形探索法を組合せた多目的最適化法
第6章	材料取合せにおける多目的最適化法	○		生産	一次元組合せ問題へヒューリスティクスを組み込んだ多目的最適化法

## 第2章 生産・物流計画システム における多目的最適化法

### 2.1 緒言

需要構造の多様化・高級化の進展に伴い、多品種・小ロットに対応した新しい生産・物流管理方式の構築が重要な経営課題になってきており、新しい生産システムとしてのC I Mが提唱されている<sup>1)</sup>。鉄鋼業においても例外でなく、注文構成の多品種・小ロット化、高級化、短納期化などが急速に進んでおり、これらに対応したより合理的な生産体制を整備することによって、製造コスト削減、製造期間短縮、柔軟性確保を実現することが不可欠となつてきている。

鉄鋼業は、これまでコンピュータを用いた統合生産のシステム概念による生産管理システムを構築してきており、生産管理に必要な情報の収集・蓄積・伝達といういわゆる情報処理面の機能は充実しているが、操業の最適化は製造ライン個々のものにとどまっております、製鉄所全体の“物の流れ”を一貫して計画・管理し、受注～生産～出荷～納入にかかわるすべての注文（現品）の動きの‘先読み’を行って、製造・輸送・保管・納入活動全般にわたり総合的最適化を指向するシステム（いわゆる生産・物流統合管理システム）はなく、早急に構築する必要がある。

本章は、条鋼生産を担う製鉄所において完成させた新しい生産・物流管理方式としての「生産・物流統合管理システム」と、その中核として「全注文を対象に、鋳込～圧延～精整～出荷までの全製造工程の一貫した操業計画を立案するシステム（以下一貫操業計画システムという）」について報告するものである。本システムは3つのサブシステムから構成されており、これらは、数理的視点からは、大規模複合型多目的スケジューリング問題であるが、本章では、問題の構造・特性を利用し、「シミュレーションと最適化手法の組合せ」による実用性の高いアルゴリズムの開発と解法案出の方法論を述べる<sup>2) 3) 4) 5) 6)</sup>。

### 2.2 一貫操業計画システムの概要

#### 2.2.1 一貫操業計画システムの必要性

鉄鋼生産形態は、大規模なバッチタイプの設備（複数）からなる多段の製造プロセスであり、同じ溶鉄から多種類の材質の溶鋼を造り、これをさらに多様な中間製品に分割・加工してゆくいわゆるブレイクダウン型の製造工程をとっている。一方、受注形態は、品種が多様で、リピート性が少なく、品種構成変動が大きい

ことにより、受注生産方式を採用せざるを得ないなどの特徴があることは既に述べた。これらの多段階ブレイクダウン型生産工程を通る代表的な「注文の流れ」のイメージを図2.1にガントチャートで示す。注文は予め決められた製造設備を通じて最終製品となっていくが、各製造設備には厳しい段取替条件（例えば、鋳込工程では材質（成分、溶製法等）、圧延工程では圧延形状等）があり、各工程設備では同一の段取替条件をもつ注文を極力集中して製造することが、品質・製造コストの両面から望ましい。

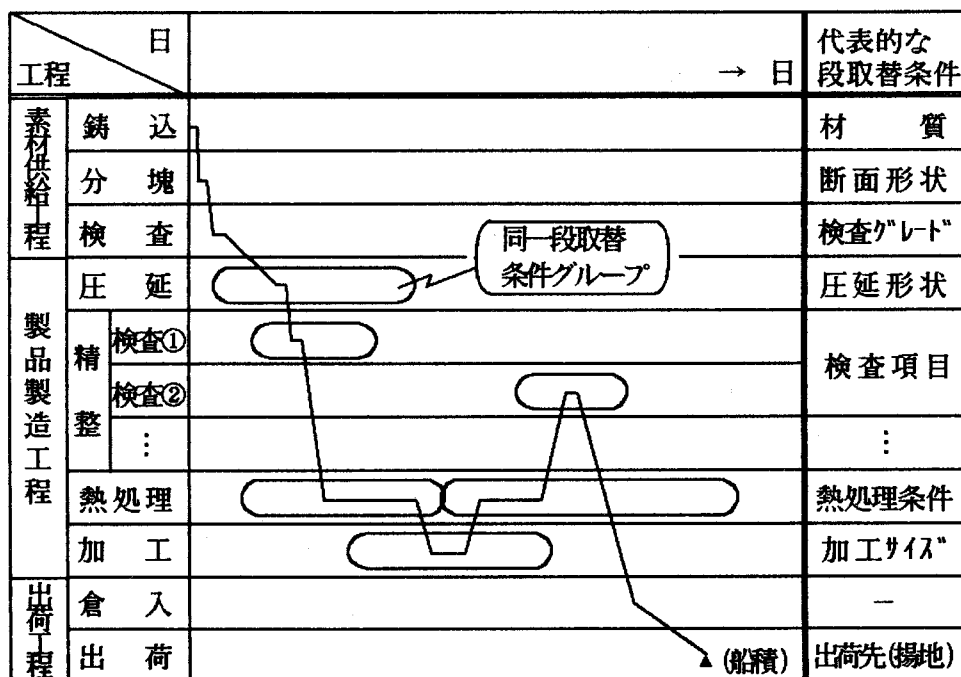


図 2.1 ある注文の流れ（イメージ）

このような段取替条件の厳しい設備を含む多段階生産工程の場合には、その生産・物流管理方式としては、品種の安定化と製造コスト低減の観点から段取替が最小となる操業が望ましいために、製造工程間に大量の仕掛在庫を置き、これをバッファとして製造設備相互の干渉を防止する方式を採用してきた。

しかし、近年の多品種・小ロット・短納期化に対して、この方式を継続したとすれば、各工程間に莫大な仕掛在庫を保有することになり、現実的でないことは明らかである。そこで、上～下工程を一貫して計画管理することとし、品質・コ

スト・納期のバランスよい操業計画を立案し、この計画に基づいて効率よく‘物を流す’という新しい方式を考案した。すなわち、「物流（輸送・保管）も製造の一部」、「製造も物流の一部」の発想により、生産と物流の統合化の考えに基づく一貫計画管理のためのシステム（生産・物流統合管理システム、図2.2参照）の構築を行った。

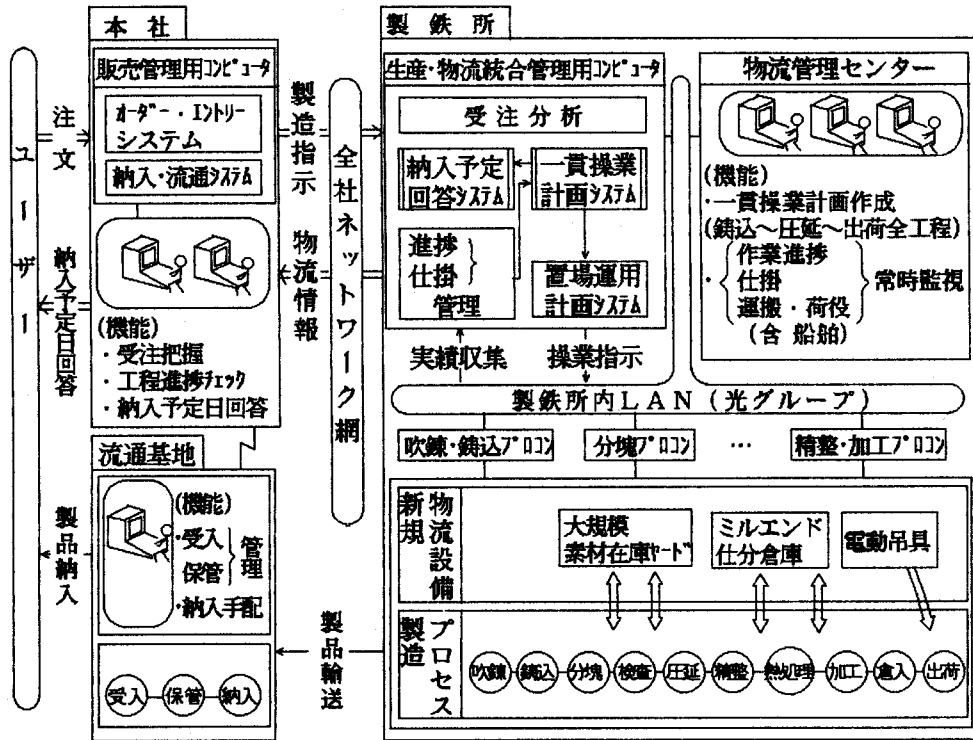


図 2.2 生産・物流統合管理システム

### 2.2.2 一貫操業計画システムの概要

この生産・物流統合管理システムの中核となるのは、一貫操業計画システムであり、基本的には、多段階生産工程における‘物の流し方’を計画・管理するコンピュータ援用のシステムである。その全体構成は図2.3に示すとおりである。

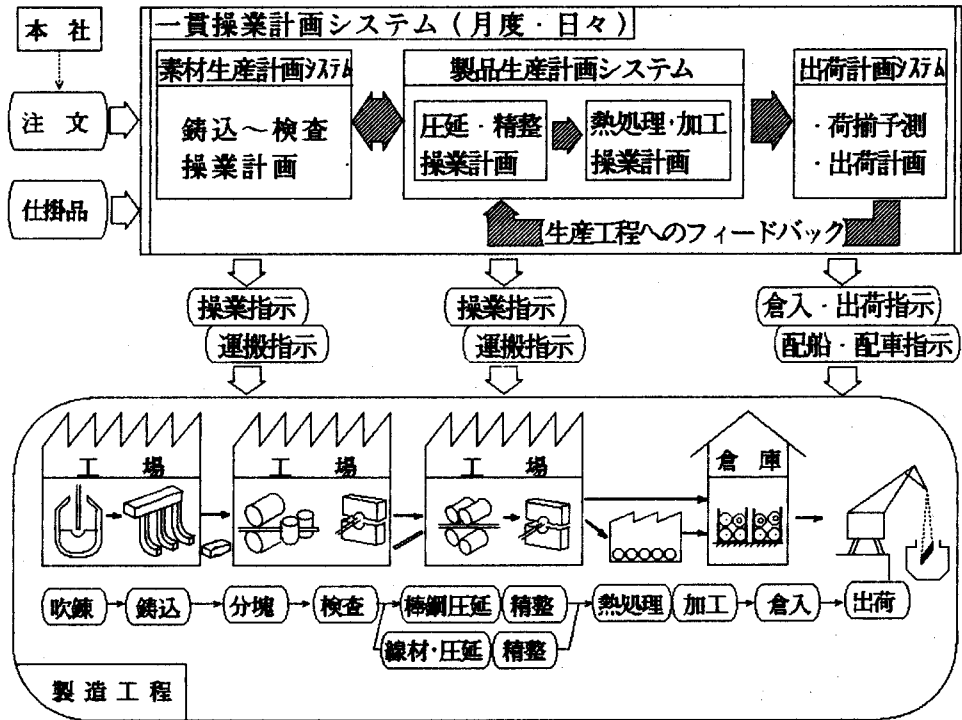


図 2.3 一貫操業計画システム

本システムは、新規注文と所内仕掛半成品とを合わせたすべての製造ロット（約3万件）を対象に、各工程の段取替条件等の制約条件を遵守し、①上から下工程への円滑な素材供給（材料供給遅れ最小化）、②各工程負荷平準化・出荷量平準化等を狙いとして、先1ヶ月の主要工程（鑄込～圧延～精整～出荷、約80工程）の操業負荷状況予想及び製造ロット個々の工程進捗予想（すなわち、各工程での作業予定日、倉入予定日、出荷予定日などの予想）を可能とするものであり、結果として月度及び日々の操業計画、出荷計画を立案する。

本システムは、素材生産計画、製品生産計画（圧延・精整操業計画と熱処理・加工操業計画よりなる）及び出荷計画の3つのサブシステムから構成されており、各サブシステムは、下記に示すようにそれぞれ異なったタイプの問題として定式化できる。

- (i) 素材生産計画：フローショップ型多品種ラインバランス問題<sup>7)</sup>
- (ii) 製品生産計画：並列設備選択を含む多制約多目的ジョブショップ型スケジューリング問題<sup>8)</sup>

(iii) 出荷計画：大規模多目的割当問題<sup>9)</sup>

次節以下にて，(ii)，(i)，(iii)の順に各サブシステムの問題とその解法について述べる。

2.3 圧延・精整操業計画システム<sup>5) 8)</sup>

— 並列設備選択を含む多制約多目的ジョブショップ型スケジューリング問題 —

2.3.1 問題の概念

製品生産計画の中核である圧延・精整操業計画につき説明する。圧延・精整工程においては，素材は条鋼孔型圧延機にて圧延され，精整工程で，A検査，B検査などの予め定められた複数の検査設備群を通過する。同工程での物流フローは，図2.4に示すように典型的なジョブショップ型である。また，各検査設備群は通常2～4の設備を有している並列設備群であり，これが本工程の特徴となっている。

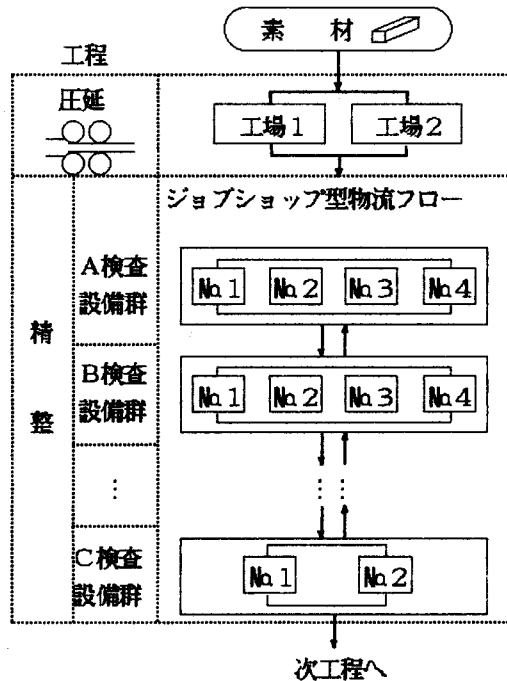


図 2.4 圧延・精整工程の概要

本操業計画問題は、図2.5に示すように、製造ロット別明細（製造ロットNo別のサイズ・量・通過工程等）、設備別仕掛明細、設備別稼動予定などを与件として、以下に述べる各工程種々の制約条件のもとで、①材料待ちによる操業ロス→Min、②設備前仕掛量ピーク→Min、③各設備での段取替ロス→Minを同時に実現するように各製造ロットの処理設備の選択及び各設備に対する作業順序の決定を行う問題である。

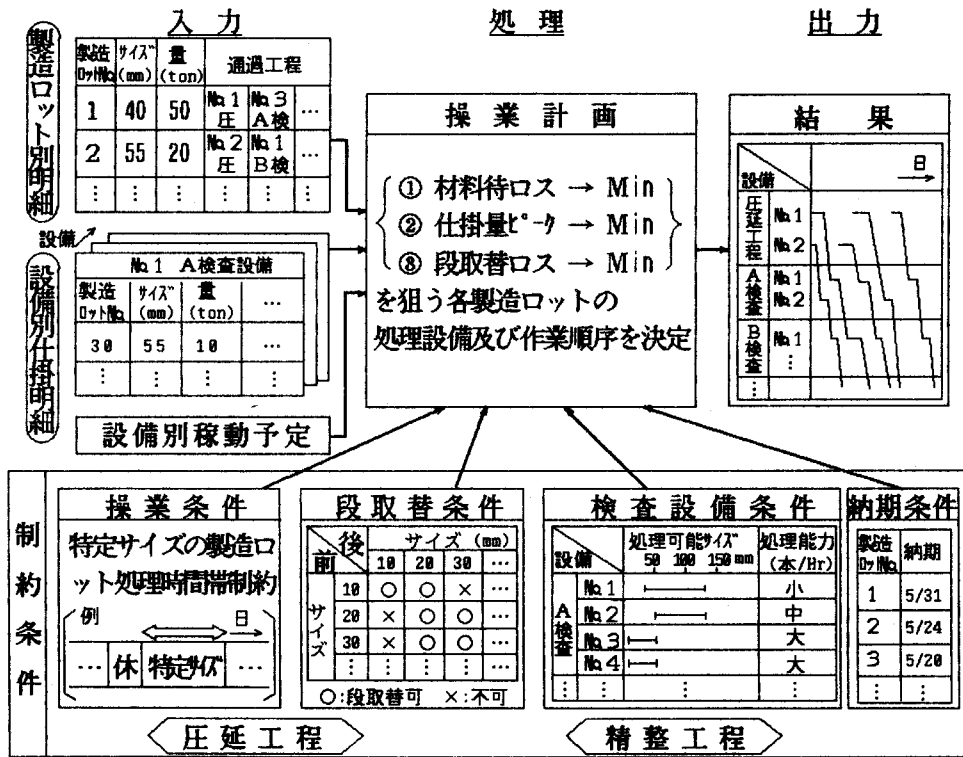


図 2.5 圧延・精整操業計画問題の概念

<目的関数>

- ① 材料待ちによる操業ロス → Min
- ② 設備前仕掛量ピーク → Min
- ③ 各設備での段取替ロス → Min

<制約条件>

- ① 圧延工程における操業条件



- a) 特定処理仕様の製造ロットは、予め定められた処理時間帯でのみ処理可能である
- b) 段取替時間を多大に要するサイズの製造ロットを続けて圧延してはならない。

② 精整工程における操業条件

検査工程には並列に設置されている複数設備があり、それらはそれぞれ処理能力や処理可能サイズ範囲などが異なる。

③ 製造ロットの納期遵守

各製造ロットのユーザー納入日を厳守する必要がある。

### 2.3.2 問題の特徴

圧延工程においては、予め定められている標準圧延段取順序（段取替ロスが最小となる圧延順序）にもとづいて圧延計画が作成されるため、操業計画のポイントは、精整工程のスケジューリングにある。本問題の特徴は以下の通りである。

- ① 全製造ロット（約3万件）は、圧延→精整の順に流れるが、精整工程（約40工程）の順序関係は必ずしも一定でなく、また精整内のある工程をスキップする製造ロットもある典型的な大規模・多品種・多段階のジョブショップ型スケジューリング問題である。
- ② 精整工程においては、大半の製造ロットが複数の設備（それぞれ処理能力が異なる）にて処理可能であり、このため、製造ロットの適正選択が非常に重要となる。
- ③ 複数の評価指標の最適化が必要である。

以上の特徴から、本問題は、「大規模ジョブショップ型の多目的スケジューリング問題」と特徴づけられる。

### 2.3.3 圧延・精整操業計画ロジック

#### 2.3.3.1 解法の基本的骨子

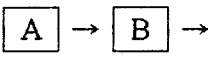
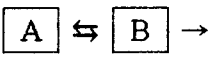
スケジューリング問題に対しては、次に示すような理論解法が開発されている

10) 11) 12) 13)

- (i) 2あるいは3機械フローショップ型問題 — Johnsonルール
- (ii) 2機械ジョブショップ型問題 — Jacksonルール
- (iii) 4機械以上のフローショップ型問題 } 全数列举法, 分枝限定法,
- 3機械以上のジョブショップ型問題 } 動的計画法

表2.1に分類を示す。

表 2.1 スケジューリング問題の理論解法

生産形態	2 機械	3 機械	4 機械以上
70-7077型 	Johnson's Rule	Johnson's Rule (但し条件有)	・全数列举法 ・分枝限定法 ・動的計画法
7077-7077型 	Jackson's Rule	—	

しかし、本問題に上で述べた理論解法を直接適用することは、計算時間からみて現実的でない。その理由としては、全数列举法を用いた場合、ロット数 $N$ 、機械数 $M$ としたときの組合せ数は $(N!)^M$ 通りになるのは明らかであるが、本問題が、前節2.3.2で述べたように、対象となる製造ロット数が30000、工程数が40であることを考えるとその組合せ総数が $(30000!)^{40}$  ( $\gg 10^{120}$ )となる。これは高速の計算機を活用したとしても、結果を得るまでに $10^{100}$ 年以上という天文学的時間が必要になり、現実的でないことは明らかである。

また、本問題の解法としては、システム運用上、短時間（せいぜい20分程度）で求解できることが必須条件である。

そこで、次のような解法案出の基本的骨子に基づき、新しい実用的解法を提案する。

- ① 組合せの自由度を大巾に減少させる目的で製造工程別に小問題に分割（圧延工程と精整工程を分離）し、段取替条件などの制約が厳しい工程、すなわちネック工程から順にスケジューリングを行うこととした。
- ② ①のような工夫を用いても個々の小問題の規模は依然大きい。そこで、
  - a) event to event 方式のシミュレーションによるスケジューリング（精整全工程の操業スケジュールを同時並行的に立案すること）を採用し、時間短縮化を図る。
  - b) 複数評価指標は、重みを付けてスカラー化し、これを最大化することとする。

- c) 解の最適性を向上させるために、スケジュール案の最終結果を先読みし、結果が悪くならない（良くなるように）スケジュールの途中結果をガイドする役目をもつヒューリスティックスを組込むこととした。

### 2.3.3.2 解法の手順

解法の手順を、図2.6に示す。同図からわかるように、本手順は3段階の処理から成り立っている。

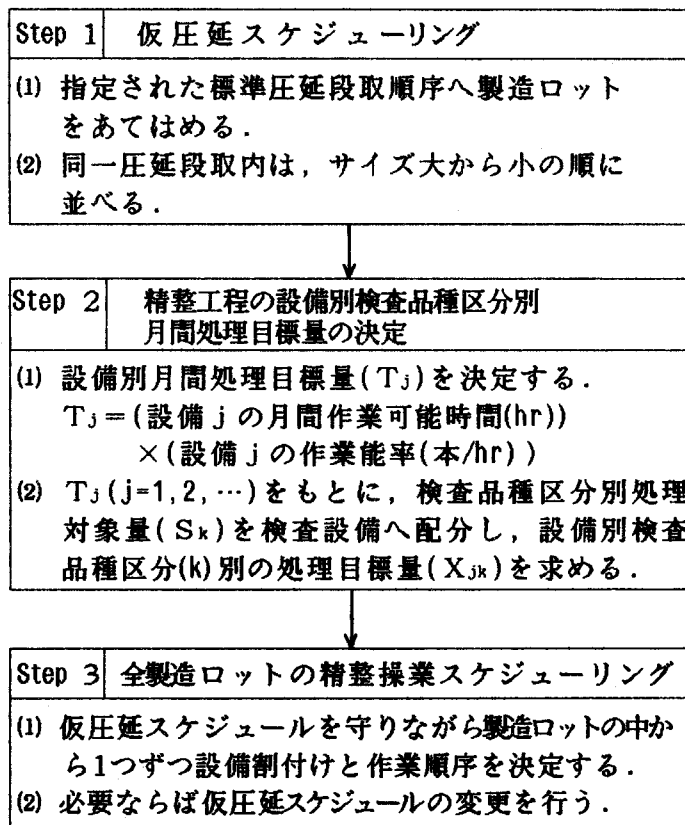


図 2.6 圧延・精整操業計画ロジック

また、本ロジックに基づく処理イメージを図2.7に示す。

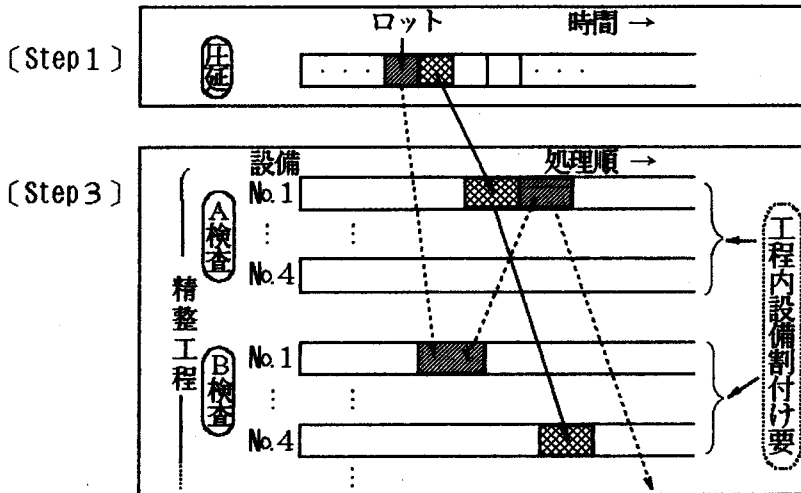


図 2.7 圧延・精整操業計画ロジックの処理イメージ

本ロジックは、まず、製造工程別に小問題に分割して解くという観点から圧延工程のスケジューリング (Step1) と精整工程のスケジューリング (Step3) を分離している。そして、精整工程のスケジューリングは、event to event 方式のシミュレーションにて、製造ロットを各設備に割りつけてゆくが、精整工程には同じ作業を行うことができる設備が複数あり、製造ロットをどの設備に割りつけるかが全体の解に大きく影響することがわかっている。そこで、解の最適性を向上させるために、Step2において、各処理設備別に月間処理目標量を決定しておき、これを極力遵守するように製造ロットを設備へ割付けることとした。

ここで、Step2は大規模スケジューリング問題の解の最適性を向上させるための一種のヒューリスティックスであるといえる。

以下、各手順の詳細な内容を説明する。

#### <アルゴリズム>

##### 〔Step1〕 (仮圧延スケジューリング)

指定された標準圧延段取順序に従い、製造ロットをそれにあてはめ、圧延スケジュールを仮決めする。

##### 〔Step2〕 (精整工程の設備別検査品種区分別月間処理目標量の決定)

本処理は、同一工程における各設備の月間処理時間の平準化を狙うものであり、Step 3の事前処理である。本Stepにおける問題は、

$S_k$  : 検査品種区分  $k$  なる製造ロットの月間処理対象量 (与件)

$T_j$  : 設備  $j$  の月間処理目標量 (与件)

として、設備別検査品種区分別の月間処理目標量  $X_{jk}$  を求めることである。すなわち、図 2.8 において、検査設備 No. 1, No. 2, ..., No. 4 の月間処理目標量を  $T_1, T_2, \dots, T_4$  とし、また検査品種区分別の処理対象量を  $S_1, S_2, \dots$  とし、各検査品種区分 ( $k$ ) 別の各検査設備 ( $j$ ) への配分量 ( $X_{11}, X_{12}, X_{22}, \dots$ ) を求めることといえる。

		j				計 (処理対象量)
		検査設備				
k		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
検査 品種 区分	No. 1 設備	$X_{11}$	X	X	X	$S_1$
	No. 1 設備 or No. 2 設備	$X_{12}$	$X_{22}$	X	X	$S_2$
	No. 2 設備 or No. 4 設備	X	$X_{23}$	X	$X_{43}$	$S_3$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
計 (処理目標量)		$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	

図 2.8 設備別検査品種区分別の  
処理目標量の決定

本問題は、特殊な輸送型線形計画問題<sup>14) 15) 16)</sup>であり、そのサイズは制約式約 20、変数 30 程度であるが、計算時間の短縮化から次のような近似解法とした。

処理目標量  $X_{jk}$  の決定手順は、以下の通りである。

- ①  $j, k$  の組 ( $j, k$ ) を 1 つ選択する。

<選択方法>・設備配分の自由度が小さい検査品種区分(k)を優先する  
 ・作業能率の高い設備(j)を優先する

②  $X_{jk}$ の値を計算する。

$$X_{jk} = \text{Min}(S_k, T_j)$$

同時に、 $T_j \leftarrow \text{Max}(0, T_j - X_{jk})$   
 $S_k \leftarrow \text{Max}(0, S_k - X_{jk})$  } にリセットする

③ 全ての $X_{jk}$ が求まるまで①、②を繰り返す。

[Step3] (全製造ロットの精整操業スケジューリング)

本処理は、Step1, 2の結果に基づき、設備別仕掛在庫量の平準化と段取時間の最小化を行うものである。図2.9に示すように2つのサブステップから構成され、event to event方式により設備前に到着している製造ロットの中から1つずつ選んでスケジュールされる。

① スケジュールすべき製造ロットの選択

前工程完了済製造ロットの中で、下記に示す評価関数 $P_i$ が最大(次の工程への到着最早、かつ納期余裕が最小)となる製造ロットを選択する。

$$P_i = a_1 \times f_1(\text{製造ロット } i \text{ の次工程到着時刻}) + a_2 \times f_2(\text{製造ロット } i \text{ の納期})$$

(ただし、 $f_1, f_2$ は線形変換式、 $a_1, a_2$ は重み係数) (2.1)

② 選択された製造ロットの設備割付け

①で選択された製造ロット*i*に対して下記に示す評価関数 $Q_j$ が最大となる設備*j*を割当てる。

$$Q_j = b_1 \times |X_{jk} - (\text{設備 } j \text{ での当該検査品種区分 } k \text{ の累積処理量})| \\ + b_2 \times |(\text{設備 } j \text{ 前仕掛量}) - (\text{設備 } j \text{ の仕掛量適正值})| \\ + b_3 \times |(\text{製造ロット } i \text{ のサイズ}) - (\text{設備 } j \text{ での直前処理サイズ})| \quad (2.2)$$

(ただし、 $b_1, b_2, b_3$ は重み係数)

ここで、 $X_{jk}$ は、Step2によって求められたものであり、スケジュールの途中結果をガイドするヒューリスティックスの機能をもつ。

③ 各設備別の仕掛量推移を算出し、仕掛量適正レンジに対する過不足をチェックする。

条件を満たしていれば①の処理へ。そうでなければ④の処理へ進む。

④ 仮圧延スケジュールの変更

既に精整工程でスケジュール済の製造ロット群の中で、最遅圧延となる製造ロットの圧延時刻よりも後の時間帯で圧延するようにスケジュールを変更し、

仕掛量の少ない設備へ製造ロットを割当てる。

(ただし、スケジュール変更は、同一圧延段取内に限る。)

図2.10に仮圧延スケジュール変更処理のイメージを示した。ここではA検査No.1設備前の仕掛量が極度に低くなるのが予想される場合には、製造ロットNo.⑨を製造ロットNo.⑥のつぎに圧延するように計画変更し、設備前仕掛量を適正化していることを示している。

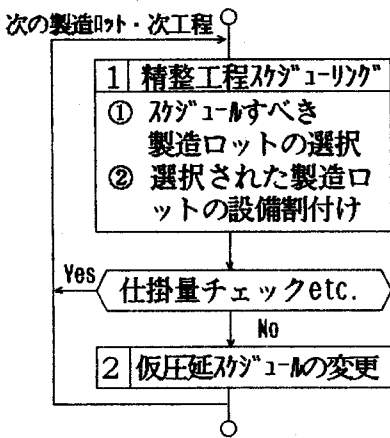


図 2.9 全製造ロットの精整作業スケジュールリング

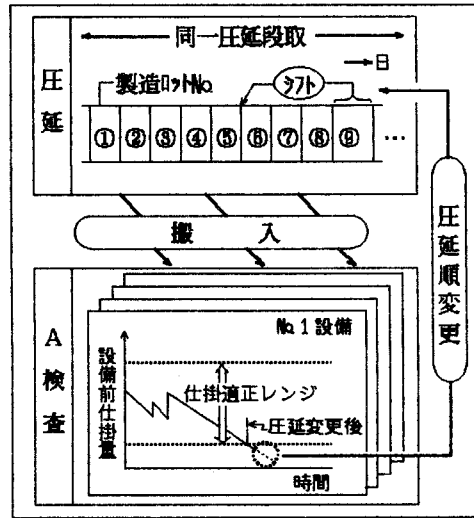
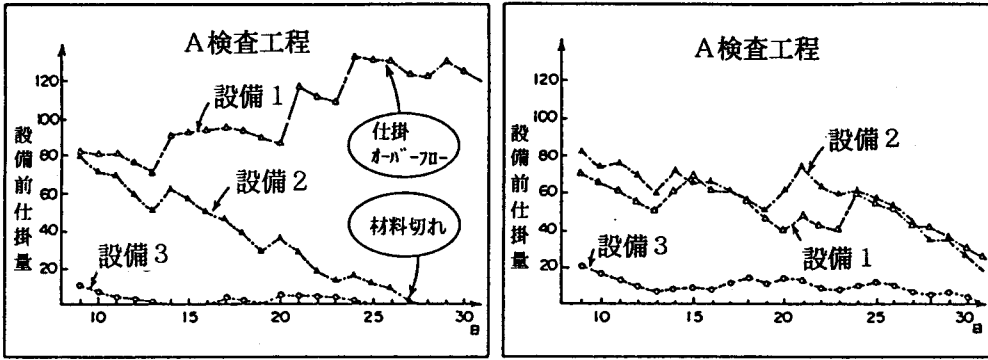


図 2.10 仮圧延スケジュール変更

ここで、Step2は特殊な線形計画問題であり、Step3は event to event 方式のシミュレーションをベースとした解法であることから、本アルゴリズムは、いわば最適化手法とシミュレーションの組合せによる実用的解法であるといえる。

#### 2.3.4 結果

従来法（ハンド）と新解法による結果の比較を図2.11に示しているが、この結果から新解法は従来法に比べ、仕掛オーバーフロー・材料切れの回避が達成されていることが明らかである。なお、求解時間は、約10分（IBM3083）である。



(a) 従来法 (ハンド)

(b) 新解法

図 2.11 設備別仕掛量推移

## 2.4 素材生産計画システム<sup>2)7)</sup>

### —フローショップ型多品種ラインバランシング問題—

#### 2.4.1 問題の概念

素材生産工程は、溶鋼を冷却しつつ中間素材を生産する工程であるが、連続鑄造機によりつくられる鑄造材料 (Continuous Casting 材, 以下CC材という) と造塊によりつくられる造塊材料 (Ingot 材, 以下インゴット材という) の2種類がある。これらは、加熱・分塊・徐冷 (必要時) により所定の品質・断面形状をもつ素材に仕上げ、検査後、指定の製品工場へ供給される。基本的には、10工程70設備をもつフローショップ型の多品種・多段階の生産形態をとり、その製造パターンとしては約25種類ある。

図2.12にこの素材生産工程と代表的操業要件を示している。特に、素材製造ラインの設備上の特徴は、①能力の異なる設備が多段階に連結し、②製造ピッチを遵守しなければならぬ鑄込工程が第1工程として存在することであるが、このために、後続の各工程に作業待ちが発生するという問題があった。



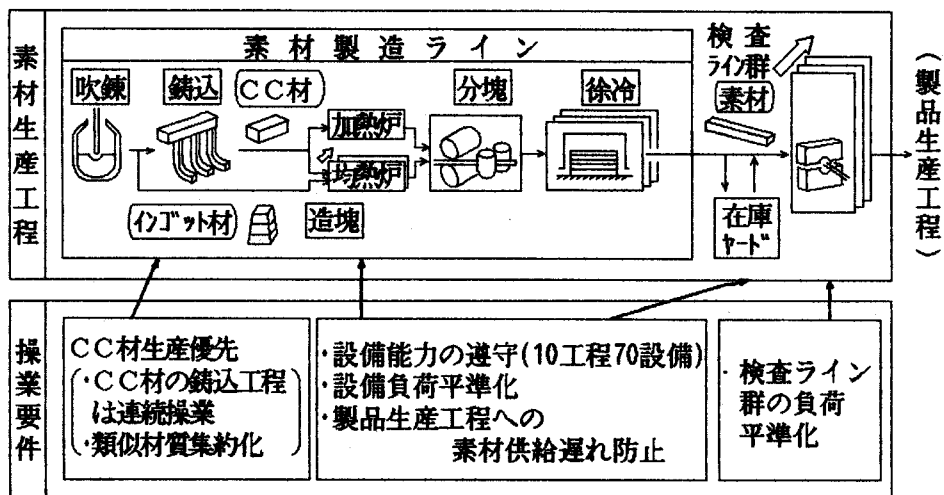


図 2.12 素材生産工程と代表的作業要件

本素材生産計画問題は、チャージ情報（転炉というバッチ型プロセスにおいて、1バッチに相当する単位がチャージであり、このチャージ別の材質、納期等）をもとに、下記の目的関数、制約条件のもとで、全設備の各チャージの作業順序を決定することといえる。

<目的関数>

- ① 下工程への素材供給遅れMin
- ② 設備負荷平準化（特に、素材製造ラインにおける作業待ち時間Min）
- ③ 検査ライン群の負荷平準化

<制約条件>

- ① 10工程70設備それぞれの設備能力の遵守
- ② CC材生産優先の考えとして、
  - a) CC材の鑄込工程は許容される上限値まで連続的に作業を行う
  - b) 類似材質を集約する

図2.13に本問題の概念を示す。

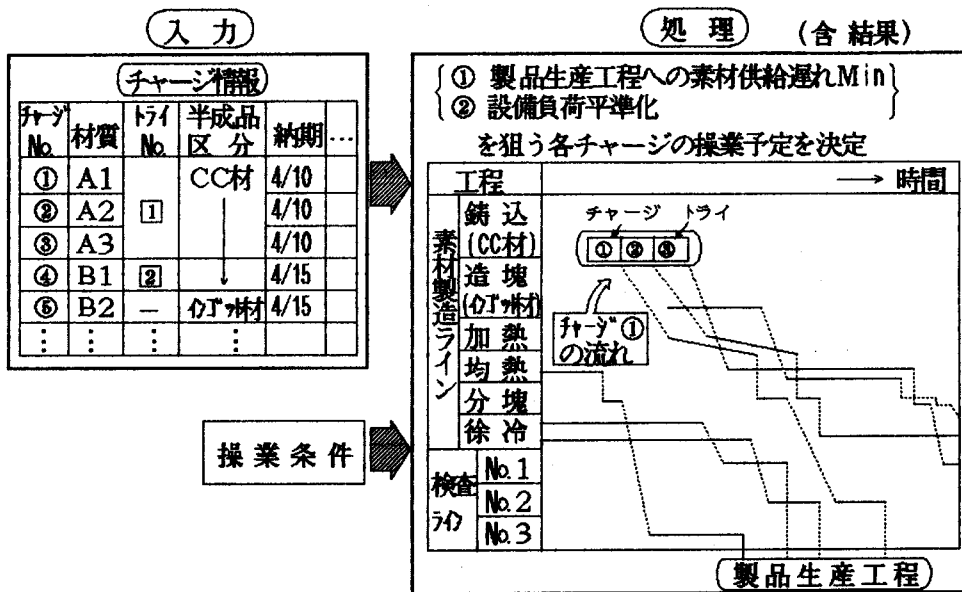


図 2.13 素材生産計画問題の概念

### 2.4.2 素材生産計画ロジックの全体の構成

素材製造ラインと検査ライン群は、仕掛在庫を介して関係しており、また、「物流の単位」も異なっている（素材製造ラインはチャージ単位、検査ライン群は素材1本単位である）。このために、素材製造ラインの操業スケジュールを立案する「鑄込・分塊操業計画」と検査ライン群の操業スケジュールを立案する「検査計画」を独立させ、また、CC材の生産を優先させるために、類似材質のチャージ集約を行うトライ編成の処理を先に行った後に、操業スケジュールを立案する方式としており、この考え方に基づく全体構成を図2.14に示す。

なお、ここでトライとは、製鋼工程における最小単位であるチャージのうちで鋼種・規格類似のチャージの集合のことであり、1つのトライ毎に段取替が発生する。また、トライ編成とは、チャージからトライを作成する計画処理のことである。



## 2.4.4 鑄込・分塊計画ロジック

### 2.4.4.1 解法の基本的骨子

このような多段階連結工程のスケジューリングにおいて、分枝限定法、動的計画法で代表される理論解法を用いたとすれば、膨大な計算時間がかかり、非現実的である。また、通常用いられる①上→下工程（設備）へ、単一工程毎にスケジュールする方法、②全設備並行して逐次スケジュールする event to event 法では計算時間の短縮化が期待できるが、下工程（分塊・徐冷工程）において想定される負荷オーバの事前対応が困難であるために、その結果は最適性に劣る。

そのために、各チャージ単位に、「上→下工程の順に最終工程までの設備割当と作業タイミング決定を行う方式」を用い、先頭工程の作業順であるトライ内チャージ順及びトライ順そのものを変更した複数ケースにつき操業スケジュールを立案し、その内から評価指標（納期遅れチャージ数、作業待ち時間）の最良のものを選択することにした。図2.16に解法のアプローチを示した。

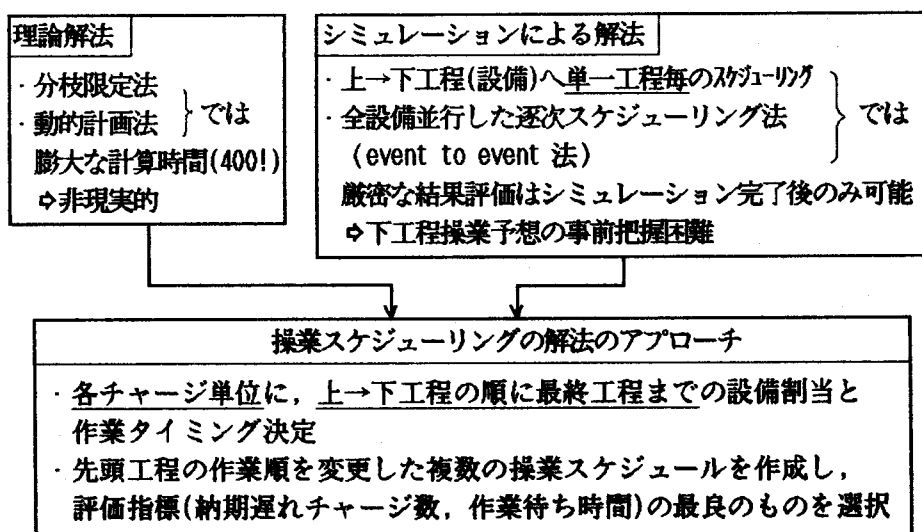


図 2.16 解法のアプローチ

### 2.4.4.2 解法の手順

図2.17に処理フローを示す。

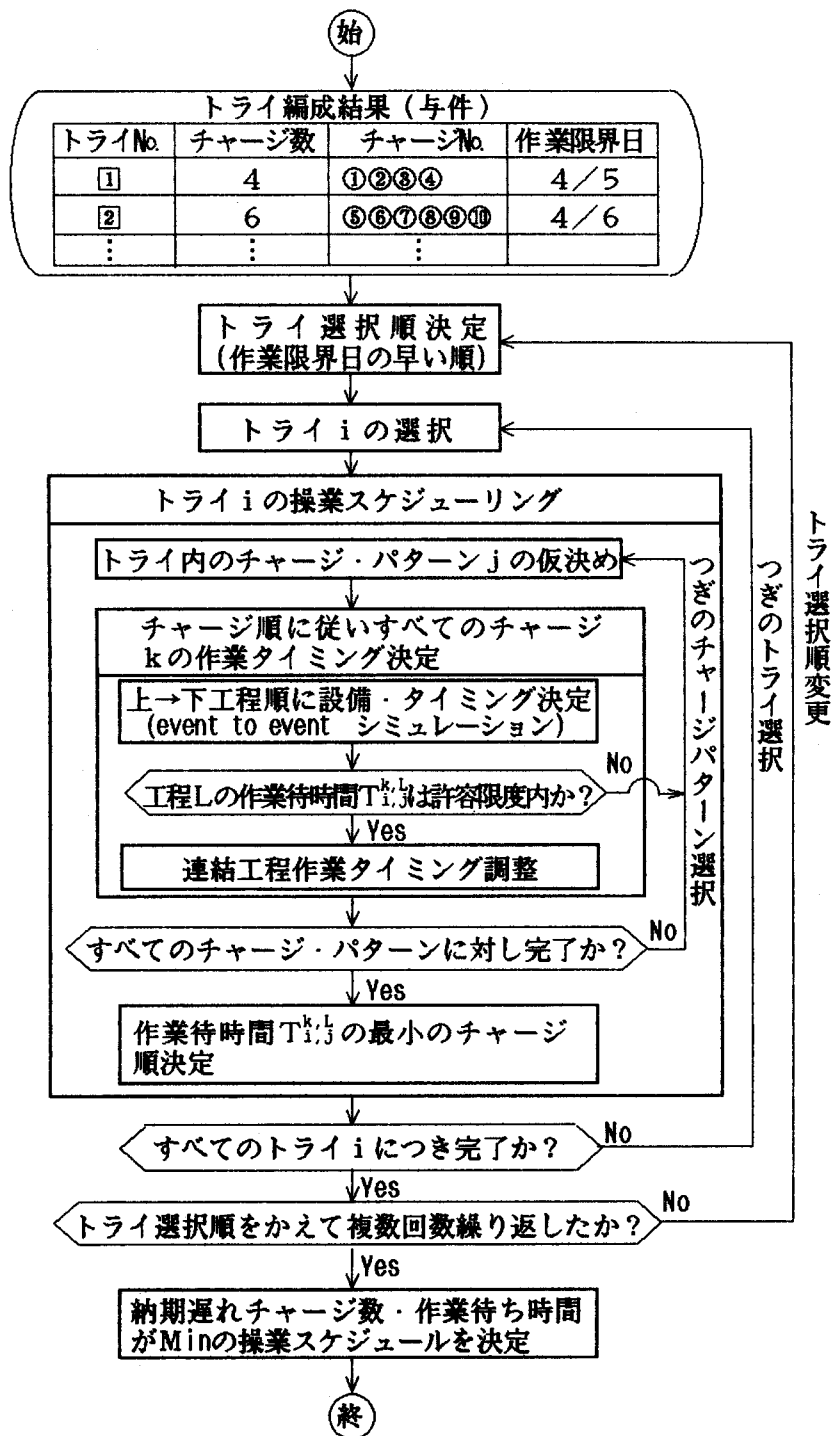


図 2.17 操作スケジューリングの全体処理フロー(CC材対象)

ここで、チャージ順候補の仮決めは、成分変動が許容できる範囲で複数回行い、トライ選択順変更では、同一作業限界日の範囲にてトライ順を入れ替えることとし、これらの処理により解の最適性を高めている。

また、作業待ちが発生した場合のタイミング調整法、すなわち操業コスト低減を図るための作業待ち時間の適正配分法を以下に示す。

すなわち、トライ  $i$ 、チャージ順候補  $j$  のチャージ  $k$  の作業待ちが発生した工程  $L$  の作業待ち時間を  $T_{i,j}^{k,L}$  とする（ただし、工程  $l$  の作業待ち許容限界(時間)を  $A_l$  とする）と、

(i)  $T_{i,j}^{k,L} > \sum_{l=1}^L A_l$  の場合は、調整不可であり、(ii)  $T_{i,j}^{k,L} \leq \sum_{l=1}^L A_l$  の場合は、調整可となり、調整可の場合には作業待ちが発生した工程  $L$  より以前の工程  $l$  ( $l = 1, \dots, L-1$ ) にてタイミングを調整することとした。すなわち、

第  $l$  工程での作業待ち時間

$$t_{i,j}^{k,l} = T_{i,j}^{k,L} \times \frac{W_l \cdot A_l}{\sum_{l=1}^L (W_l \cdot A_l)} \quad (2.3)$$

である。ただし、 $W_l$  は第  $l$  工程の重み係数で、操業コスト、品質等を反映したものである。なお、図2.18にこの方法によって調整した結果を事例にて示している。

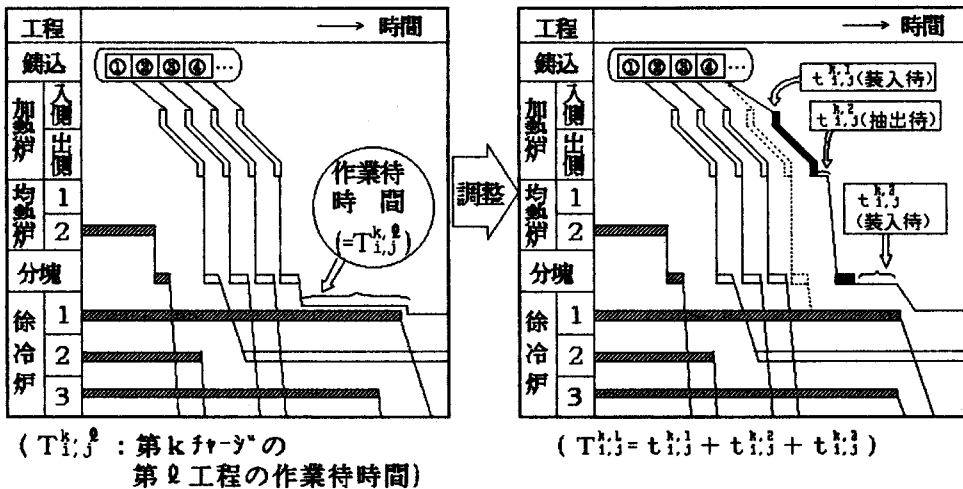


図 2.18 作業タイミング決定法

#### 2.4.5 結果

スケジューリング結果の一例を図2.19に示している。本計画により、素材の製品生産工程へ供給されるタイミングが事前に予想可能となり、素材供給遅れ回数の減少、素材在庫圧縮等に効果を発揮している。なお、求解時間は約10分（IBM 3083）である。

# スケジューリング結果例

## 物流ダイアグラム

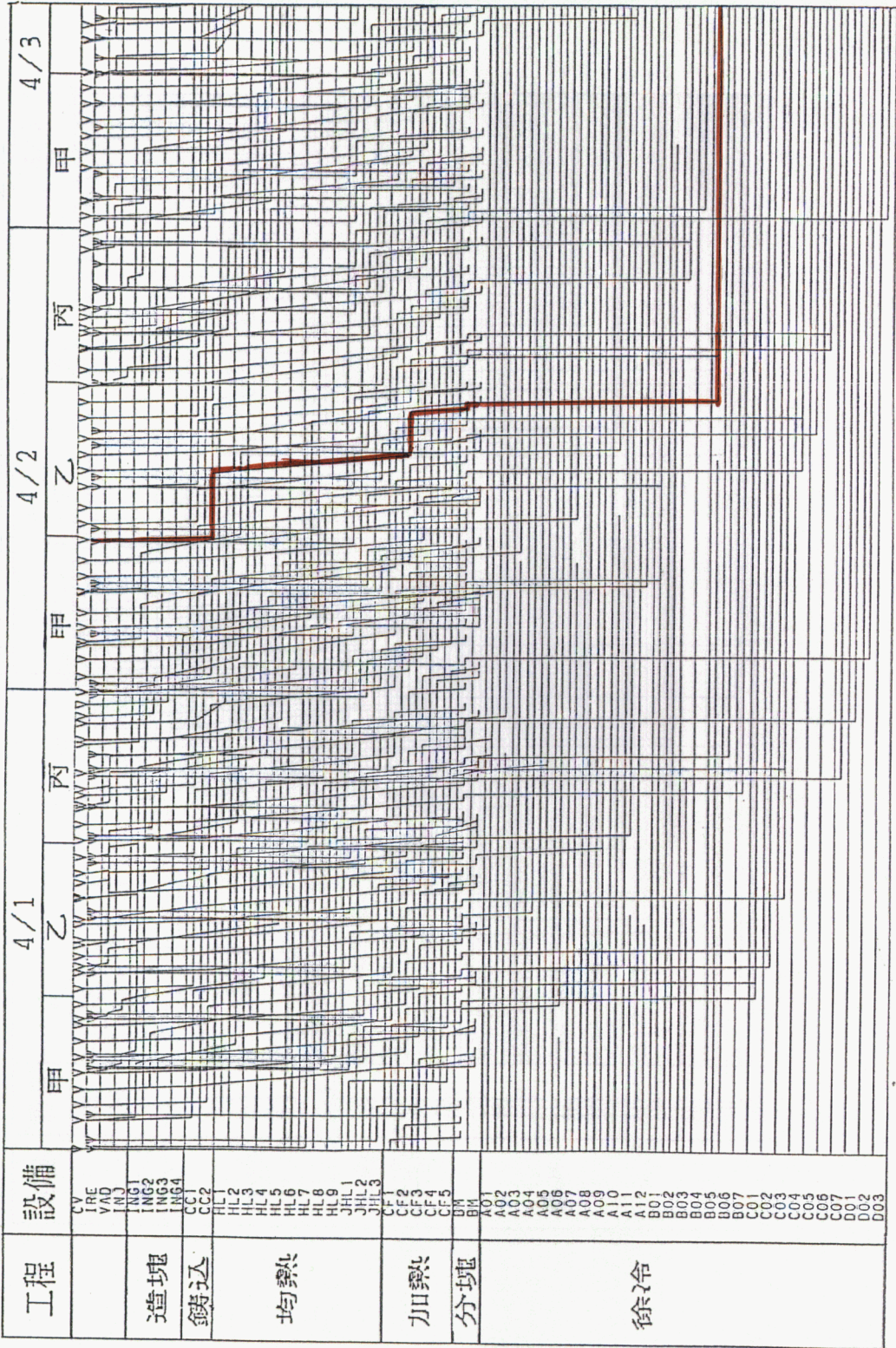


図 2.19 スケジューリング結果例



## 2.5 出荷計画システム<sup>2) 9)</sup> - 大規模多目的割当問題 -

### 2.5.1 問題の概念

出荷計画問題は、図2.20に示すように、製品生産計画システムにて算出された各製造ロットの荷揃予定（製造完了予定日、納期、重量、向け先（以下、揚港と呼ぶ）等の情報）及び入港船予定（船別入港予定日、積載能力等の情報）をもとに、船別積載制約、特定揚港への集中配船防止制約などの諸条件下で、

① 積載率（＝積載量／積載可能量）→ Max

② 二港揚回数 → Min

を同時に達成するように各船の揚港と各製造ロットの出荷タイミングを決定する問題である。出荷工程においては、製造ロットは、製造完了予定日、納期、揚港等で集約されているので、本節ではその最小単位を製造ロットと区別して、単にロットと呼ぶことにする。ここで、二港揚とは、一つの船で二つの揚港へ輸送することをいい、一つの揚港のロットだけでは、積載率が低い場合にのみ二港揚を採用するが、当然、輸送コスト高となるので、極力避けることが望ましい。

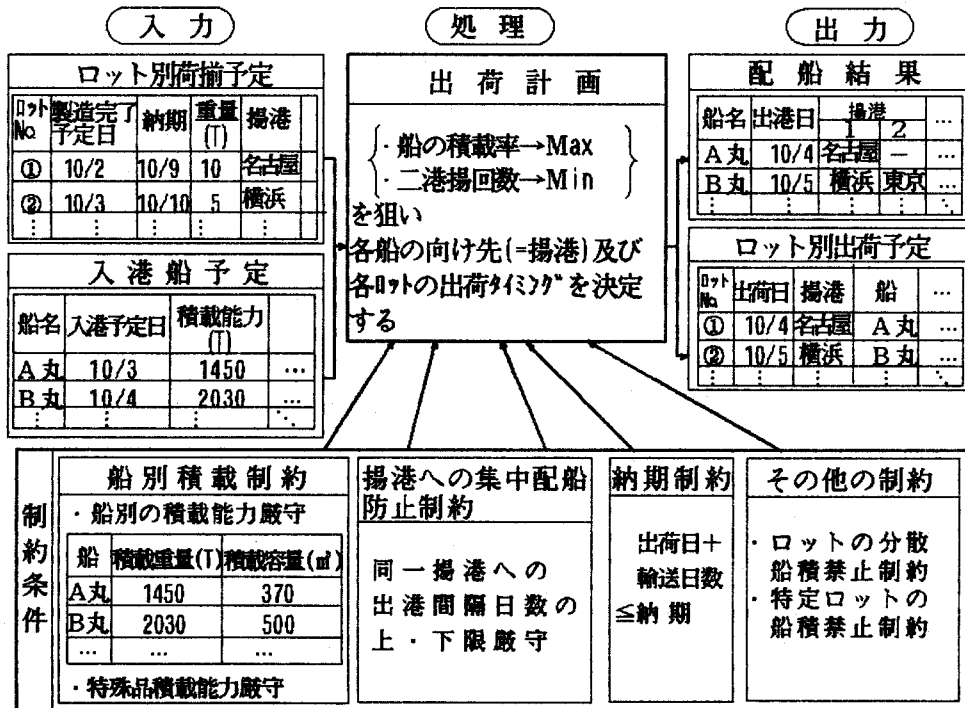


図 2.20 出荷計画問題の概念

## 2.5.2 問題の定式化

本問題は、大規模（対象ロット数30000，船舶数100隻，揚港数30）であり，かつ多目的（船の積載率最大化と二港揚回数最小化とを同時に狙う）であり，ロットと船の割付けに特別な制約（入港タイミングまでに製造が完了しないロットは，船積不可）をもつ割当問題として定式化できる．

### 2.5.2.1 記号の説明

$i$  = ロットNo. ( $i = 1, 2, \dots, I$ )

$j$  = 船No. ( $j = 1, 2, \dots, J$ )

$l$  = 揚港No. ( $l = 1, 2, \dots, L$ )

$W_i$  = ロット  $i$  の重量

$B_i$  = ロット  $i$  の容積換算率 (ロット  $i$  の容積 =  $B_i \times W_i$ )

$C_i$  = ロット  $i$  の特殊品区分 (特殊品 :  $C_i = 1$ , その他 :  $C_i = 0$ )

$f_{(i)}$  = ロット  $i$  の揚港

$D_j$  = 船  $j$  の積載可能重量

$E_j$  = 船  $j$  の積載可能容量

$Q_j$  = 船  $j$  の特殊品積載可能重量上限

$U_l (V_l)$  = 揚港  $l$  への出港間隔日数上限(下限)

$F_j$  = 船  $j$  に船積されるロットの揚港の集合 ( $F_j = \{ f_{(i)} \mid X_{ij} = 1 \}$ )

$\| F_j \|$  = 集合  $F_j$  の異なる要素の数

$X_{ij} = 0 - 1$  整数変数  $\begin{cases} \text{ロット } i \text{ を船 } j \text{ に積む場合 : } X_{ij} = 1 \\ \text{ロット } i \text{ を船 } j \text{ に積まない場合 : } X_{ij} = 0 \end{cases}$

### 2.5.2.2 問題の定式化

#### (1) 制約条件

$$\textcircled{1} \text{ 船別積載制約 : } \cdot \text{ 積載重量制約} \quad \sum_i W_i \cdot X_{ij} \leq D_j \quad (2.4)$$

$(j = 1, 2, \dots, J)$

$$\cdot \text{ 積載容量制約} \quad \sum_i B_i \cdot W_i \cdot X_{ij} \leq E_j \quad (2.5)$$

$(j = 1, 2, \dots, J)$

$$\cdot \text{ 特殊品積載制約} \quad \sum_i C_i \cdot W_i \cdot X_{ij} \leq Q_j \quad (2.6)$$

$(j = 1, 2, \dots, J)$

(特殊品の船内積場所が限定されることによる積載量制限を表す)

$$\textcircled{2} \text{ 特定揚港への集中配船防止制約 : } V_l \leq \text{揚港 } l \text{ への出荷間隔日数} \leq U_l \quad (2.7)$$

$(l = 1, 2, \dots, L)$

- ③ 納期制約：各ロットのユーザへの到着納期厳守
- ④ その他の制約：
  - ・ロットの分割船積禁止制約（各ロットとも2船以上にわけて船積できない）
  - ・特定ロット船積禁止制約（ロットの中には特定の船に積めないものがある）

(2) 目的関数<積載率最大化> 
$$\left( \frac{\sum_j (\sum_i B_i \cdot W_i \cdot X_{ij})}{\sum_j E_j} \right) \rightarrow \text{Max} \quad (2.8)$$

<二港揚回数最小化> 
$$\sum_j \| F_j \| \rightarrow \text{Min} \quad (2.9)$$

### 2.5.3 問題の特徴

本問題は、基本的には、図2.21に示すように船-ロット-揚港の割当（対応づけ）を行うものである。

この問題の特徴は次の点にある。

- ① 大規模（対象ロット数30000，船舶数100隻，揚港数30）割当問題であるために，ロットの船への割当処理を通常理論解法を用いて行うと莫大な計算時間がかかる。
- ② 入港する船によって，図2.21に示すように，船-ロット割当テーブルが変化する。  
すなわち，現在の船の割当（船-揚港）を行うとき，先の船の入港予定を考慮して決めなければならない。
- ③ 評価指標が船の積載率最大化，二港揚回数最小化のように複数ある多目的問題である。

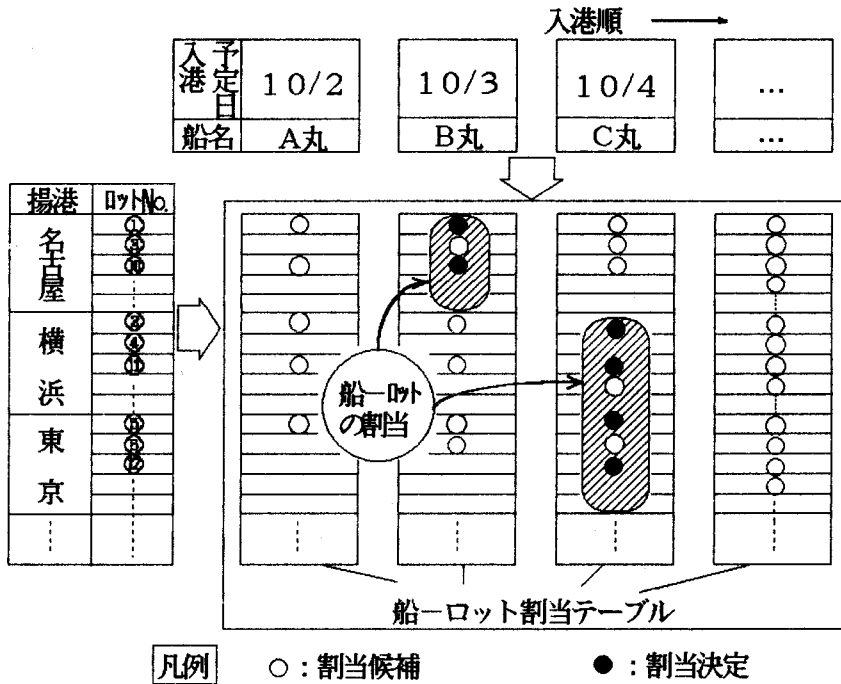


図 2.21 出荷計画問題  
(船-ロット-揚地割当イメージ)

### 2.5.4 出荷計画ロジック

#### 2.5.4.1 解法の基本的骨子

開発した解法は、短時間（約10分以内）にて解くという観点から、問題の特徴を活かしたヒューリスティックな方法となっている。

##### (1) 計算時間の短縮に関する工夫

- ① 原問題を、(i)船-揚港の割当問題と、(ii)船-ロットの割当問題（(i)で指定され揚港に対応するロットに限定）とに分離し、順次解くことにした。
- ② 次に、船-揚港の割当問題に関しては、船-揚港の対応候補を限定した。すなわち、揚港 $\ell$ に関する対応候補として、表2.2に示す5ケース想定できるが、二港揚回数を極力へらす方が望ましいという観点から第5のケースを除くこととした。

新解法の基本的骨子を図2.22に示す。

表 2.2 船-揚地の対応

		入港順 →					
揚港	船	—	A 丸		B 丸		...
	ケース	①	②	③	④	⑤	...
⋮							...
ℓ-1				●			...
ℓ			●	●	●	●	...
ℓ+1						●	...
⋮							...

ケース①：揚港 ℓ へは、配船しない

ケース②：揚港 ℓ は、船 A による一港揚

ケース③：揚港 ℓ と他の揚港とは、船 A による二港揚

ケース④：揚港 ℓ は、次入港船 B による一港揚

ケース⑤：揚港 ℓ と他の揚港とは、次入港船 B による二港揚

## (2) 多目的最適化に関する工夫

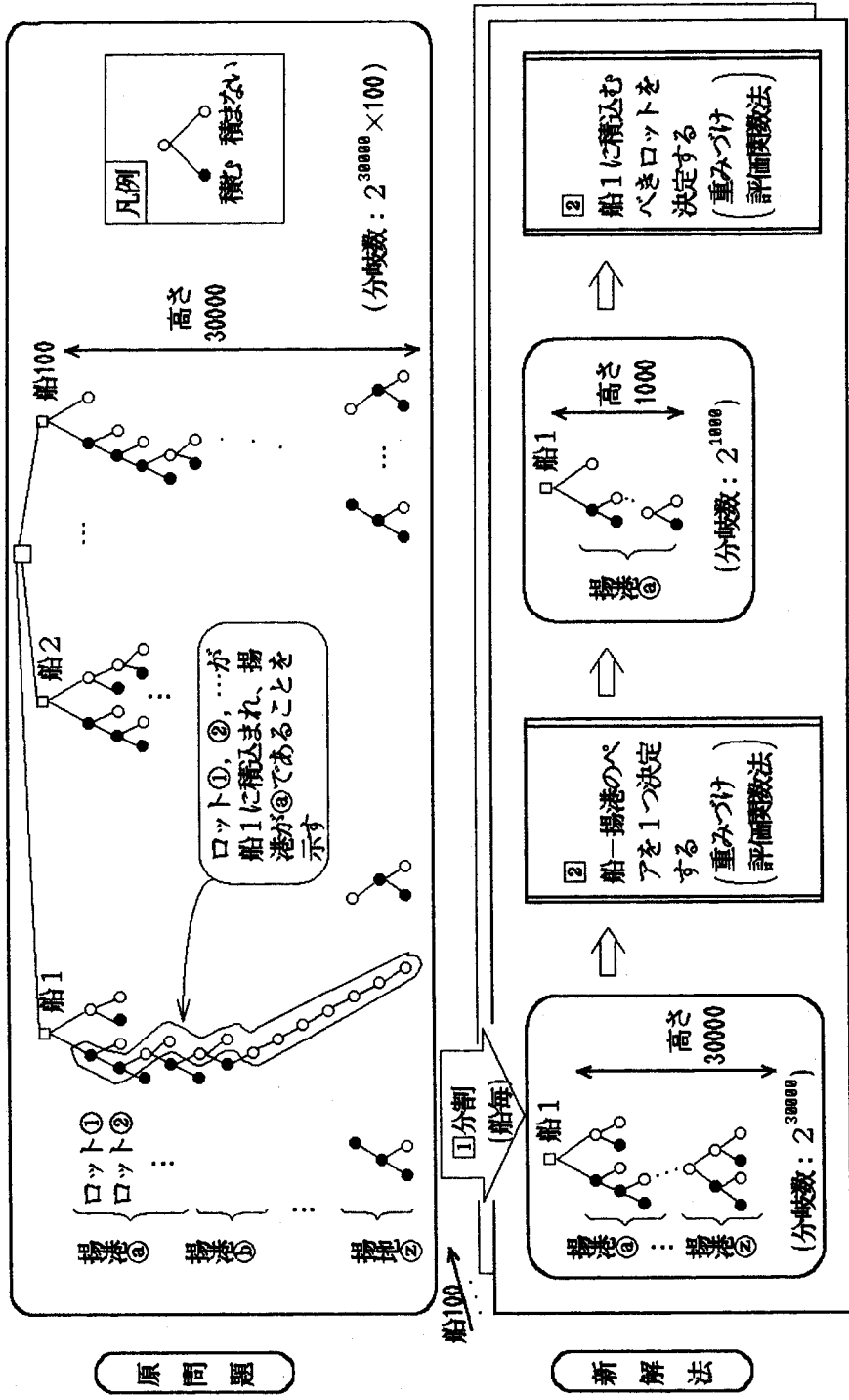
船-揚港の割当問題では、次に示す評価式 P を作成し、表 2.2 の⑤を除き①~④のケースの中から P を最大にする船-揚港ペアを選択することとした。

$$P = p_1 \times (\text{積載率}) + p_2 \times (\text{特殊品重量}) + p_3 \times (\text{出港間隔日数}) + p_4 \times (\text{納期}) + p_5 \times (\text{累積荷揃量})$$

ここで、 $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  は重み係数である。

### 2.5.4.2 解法の手順

開発した出荷計画ロジックを図 2.23 に、詳細な手順を図 2.24、図 2.25 に示す。特に、第 2 ステップである船-揚港割当処理の図的解釈を図 2.26 に示している。



新解法のポイントは、①大規模問題の小問題への分割 ②小問題の短時間解法である。

図 2.22 新解法の基本的骨子

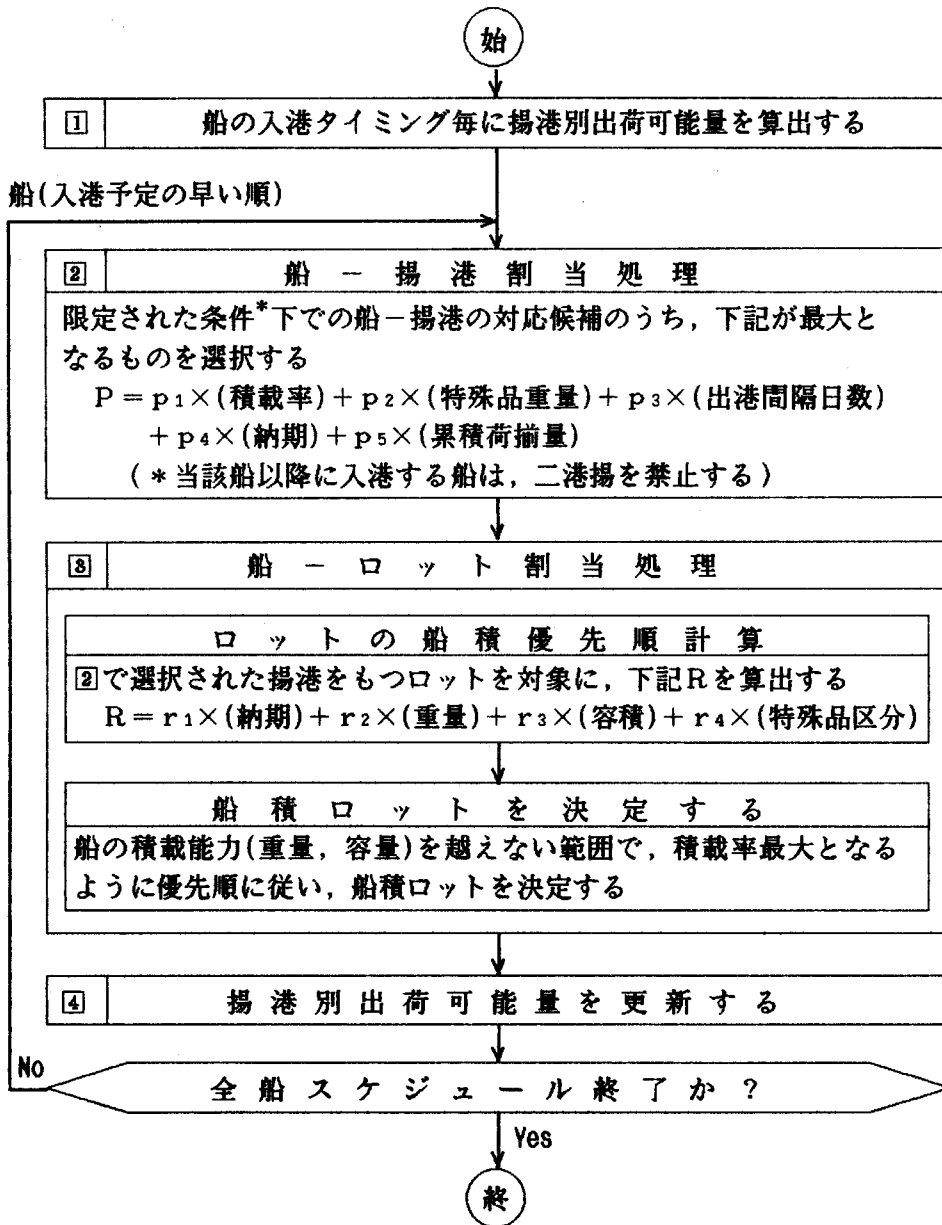


図 2.23 出荷計画ロジック

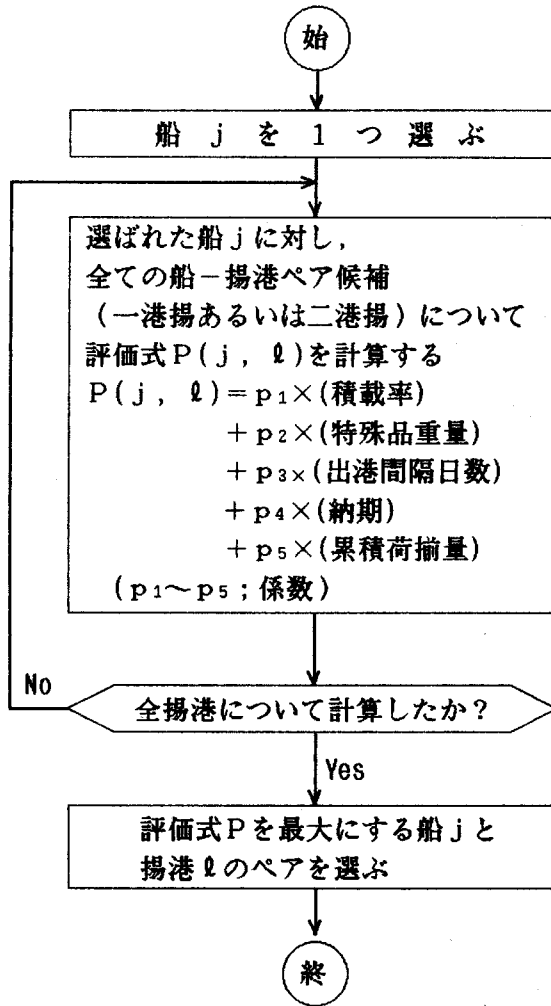


図 2.24 第2ステップ：船-揚港割当処理のフロー



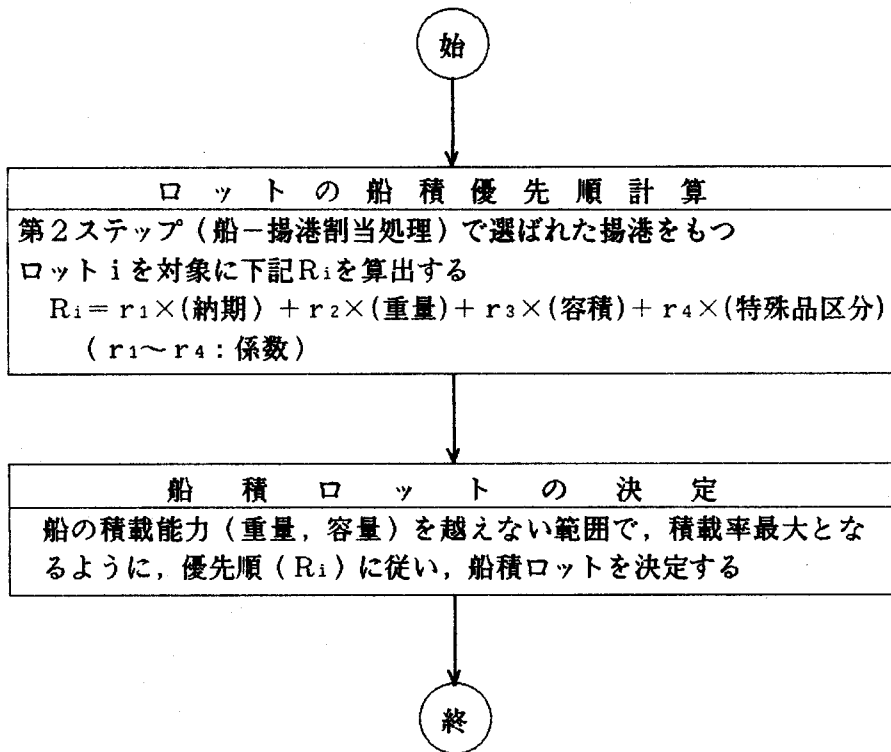


図 2.25 第3ステップ: 船-ロット割当処理のフロー

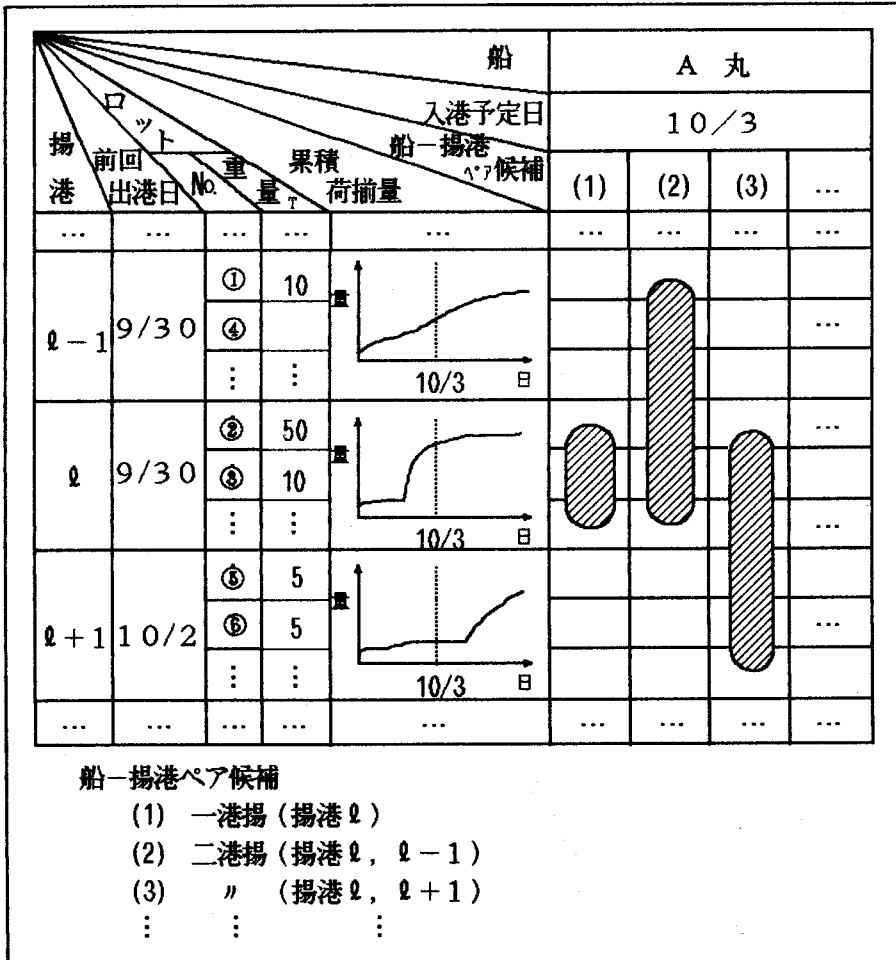


図 2.26 第2ステップの図的解釈  
(全ての揚港ペア候補の算出イメージ)

### 2.5.5 結果

本解法は、製鉄所の一貫操業計画システムに組入れられ、月度出荷計画から日々の船積指示に到るまで広範囲に活用されているとともに、素材・製品生産計画システムと連携して製鉄所全体の物流効率化、出荷量平準化管理に重要な役割を果たしている。

なお、本解法の求解時間は、約5分（IBM3083）である。

### 2.6 一貫操業計画システムの運用と効果

一貫操業計画システムは、月度生産計画（毎月末に作成する翌月の計画）、日々計画（先3～4日の計画）立案に運用され、各部門に必要な情報を提供しているが、この時、3つのサブシステムは互いに緊密に連携している。図2.27に3つのサブシステムの機能関連を示す。

通常、①まず、製品生産計画システムが稼動し、各注文の圧延予定日～製造完了予定日（倉入予定日）を算出する。②次に、圧延予定日は、素材生産計画システムにとっては、納期として扱われ、これをもとに鑄込～検査操業計画が作成され、指定された納期に対する素材供給日を算出する。圧延予定日と素材供給日の差異が大きい場合のように、結果が許容できない時は、再度見直しを行う。③素材生産計画・製品生産計画が確定すると、各注文の製造完了予定日も確定し、これをもとに出荷計画を作成する。④この段階で出荷平準化等が達成されないと予想される場合は、再度製品生産計画からやり直しする場合もある。

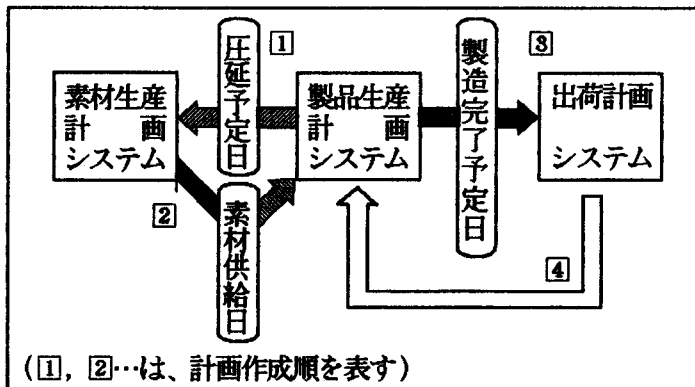


図 2.27 3つのサブシステムの機能関連

本システムの効果として、省力、輸送コスト削減、在庫量の圧縮等大幅な合理化を達成した。また、図2.28に示すように出荷量の平準化も実現し、これにより製品の安定供給が図れるようになった<sup>3)</sup>。

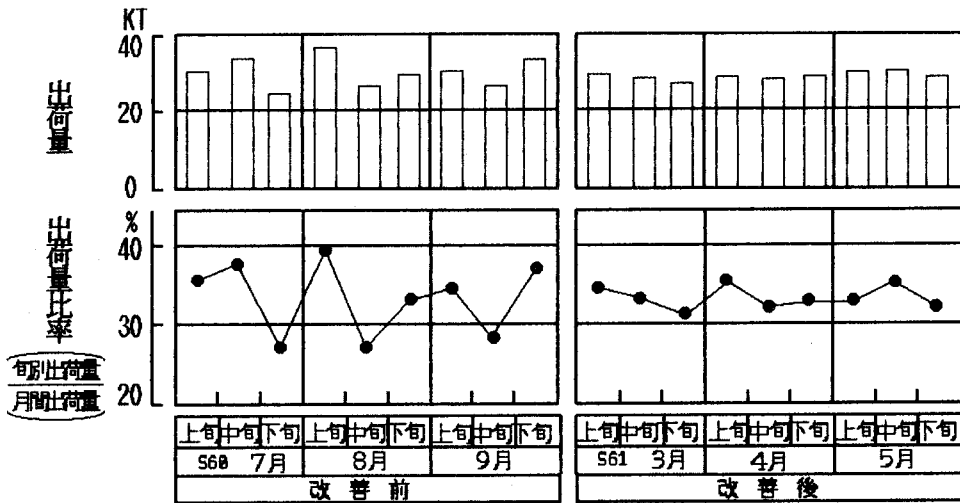


図 2.28 出荷量の平準化

## 2.7 結言

条鋼一貫製鉄所において完成した生産・物流統合管理システムと、その中核となる一貫操業計画システムにおける具体的な求解法について述べた。

鉄鋼業における生産・物流にかかわる計画問題<sup>17) 18) 19) 20) 21)</sup>は、従来から各製造ライン個々を対象に進められてきたが、最近では、多品種・小ロット化に対応した物流効率化をめざす観点から、製鉄所全体を対象にすることが多くなってきた。そのために、操業計画問題の特徴として、従来にも増して、

- ① 対象となるロット数・種類が多く、生産形態としては多段階ブレイクダウン型であり、通過工程も多岐にわたる（多品種・大規模・多段階）。
- ② 設備・操業条件が厳しくかつ複雑なものが多い（多制約）。
- ③ 評価指標が複数である（多目的）。
- ④ 数理的視点からみて問題のタイプが単一でなく、複数タイプのスケジューリング問題の結合であり、その内部に組合せ問題をも包含している（複合型ス

ケジューリング問題)。

- ⑤ 日々の生産管理システムに組込まれて運用されるので短時間求解が必須である。

本研究は、これらの問題に対して実務的立場から、

- ① 問題全体を一括して解かず、生産形態・管理形態により、素材生産計画、製品生産計画、出荷計画等に区分し、かつ全体は整合性あるものとした。
- ② 各サブシステム単独でも、計画問題は大規模・複雑であることから、組合せの自由度を大幅に減少させる目的で、生産形態・製造工程形態の視点から小問題に分割した。
- ③ ②の分割を用いても、個々の小問題の規模は依然大きくかつ多目的・多制約であることから通常の理論解法は適用できない。そこで、ジョブショップ・シミュレーション(シミュレーションによる解法)を基本としたが、問題のタイプによってシミュレーション方式を種々選別して使うことにより、短時間の求解を可能にした。この時、解の最適性を高めるために、解法の内、「スケジュールの最終結果を事前に予想しつつ、結果が悪くならないように途中のスケジュール結果をガイドする役目をもつヒューリスティックス」を組込んだ新しい方法を考案した。

結果として、充分満足いく解が短時間に得られており、しかもこれらの解法は、生産形態の変化による制約条件変更にも比較的柔軟に対応可であり、実用性が高い。また、現段階において大規模スケジューリング問題に対して、実用的な一般解法が見つからないとすれば、問題個々に、問題の特性を活かした解法を開発してゆかなければならないが、このような観点から、本研究の意義は高いと思われる。なお、本章の内容は、一貫操業計画システムを中心としたものであるが、実務的には、生産・物流統合管理システム構築に際して、物の流し方の基盤となる物流設備改善・運搬方式改善等もあわせて実施されたことを付記する<sup>3) 22)</sup>。

## 第3章 トライ選択問題における 多目的計画法

### 3.1 緒言

鉄鋼生産においては、ユーザーからの注文に基づき、冶金上の所定の性質をもつ中間素材を製造する製鋼工程は非常に重要なプロセスである。この製鋼工程の生産管理においては、注文の構成や同一製造スペック（化学成分等）をもつオーダ重量等が毎週、あるいは毎日変化するという状況下にもかかわらず、品質・生産性・納期等の多数の要因を考慮した適正な生産計画を立案する必要がある。すなわち、品質と生産性の観点からは、同一製造スペックをもつ製鋼工程における最小単位（以下、チャージという）を集めた同一性状のチャージの集合（以下、トライという）を出来るだけ連続して製造（鑄込という）することが望ましい。また、ユーザーサービスの観点からは、緊急品を含む短納期オーダをできるだけ多く、かつタイミング良く鑄込むことが望ましい。

本研究においては、このような製鋼工程における生産計画問題をトライ選択問題と定義する。すなわち、トライ選択問題とは、「多数のトライ候補群の中から、所定期間の生産計画を立てるに際し、品質・生産性・納期の各評価指標をより適正にするようなトライ候補を選択する」ことである。

これは、数理計画的にみれば多目的最適化問題<sup>1) 2)</sup>といえ、従来よりいくつかの解法が提案されている。例えば、ゴールプログラミング<sup>3) 4) 5)</sup>は、複数個の目標関数を重み付け結合し、単一目標関数問題に変換するものであるが、各目標関数の重み係数の調整が非常に困難である。一方、希求水準あるいは効用関数の考え方に基づく手法もいくつか提唱されている<sup>6) 7) 8)</sup>。とりわけ、DIDASS<sup>9)</sup>による希求水準の考え方に基づく対話型満足化法や満足化トレードオフ法<sup>10) 11)</sup> <sup>12)</sup>は、意思決定者が希求水準のみを設定するだけで良く、評価が容易でしかも迅速に解を得ることができる。

本章では、上記のトライ選択問題に満足化トレードオフ法を適用した結果を述べる。まず(1)トライ選択問題を複数の非線形目標関数をもつ0-1整数計画問題として定式化し、本問題が基本的には組合せ問題であると認識して、つぎに、(2)問題の特徴を利用して変換を行った上で、内部径路法を活用したMin-Max法と満足化トレードオフ法とを組合せた実用的解法<sup>13) 14) 15)</sup>を提案する。また、(3)その適用結果を示し、(4)最後に、本方法の有効性について述べる。

### 3.2 トライ選択問題

製鋼工程においては、図3.1に示す通り、①まず、転炉というバッチ型プロセスによって冶金上の所定性質をもつ溶鋼を一定量製造し、②次に連続鋳造機によって、溶鋼からスラブという中間素材が作られ、③最終的に圧延工場にて製品（例えば、薄板コイル、厚板等）がつくられる。

一方、鉄鋼業は、受注生産形態であり、顧客からの注文スペック（サイズ、鋼種、規格、納期等）がオーダー毎に異なっており、これらのオーダーをバッチ型プロセスの容量にマッチするように製造ロット集約する必要がある。製鋼工程において1バッチに相当する単位が「チャージ」であり、このような鋼種、規格同一の注文集約をチャージ編成と呼んでいる。1チャージにはオーダー分と非オーダー分が混在する場合があります。全体に対するオーダー分の比率を「オーダー率」と定義しており、製造コスト面からは高いオーダー率のチャージを鋳込むことが非常に重要である。

鋼種、規格類似のチャージの集約を「トライ」といい、この計画をトライ編成と呼んでいる。品質・生産性の面からは、1トライを構成するチャージ数（以下、連々指数という）が大きいほど良好となる。

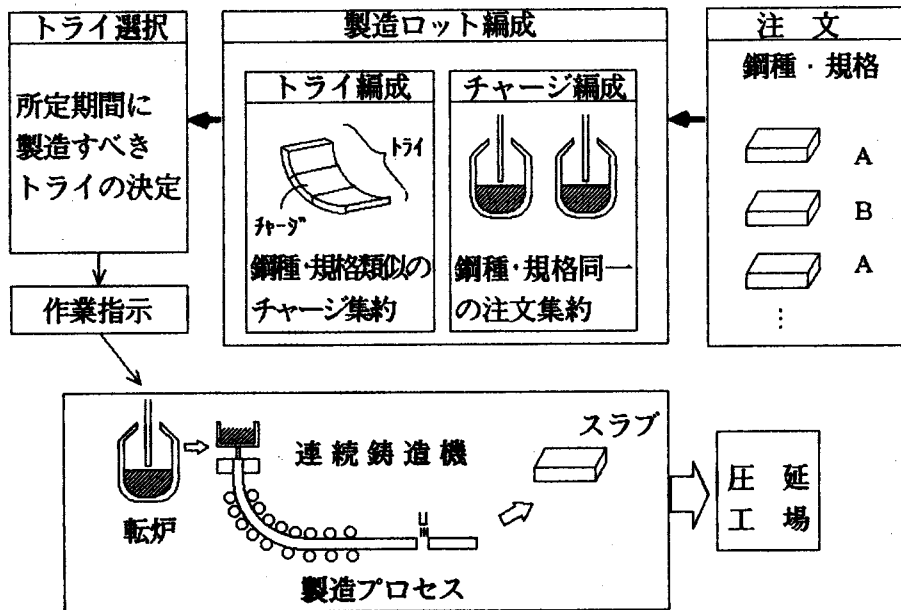


図 3.1 トライ選択問題

以上のことから、製鋼工程の生産管理面において重要な指標はオーダー率、連々指数、納期であるといえる。

そこで、トライ選択問題とは、「既に編成されている多数のトライ候補群の中から所定生産期間に生産するトライを選定するに際し、オーダー率、連々指数、納期の複数指標をより適正に決定すること」と定義できる。

以下、本問題の定式化、解法について述べる。

### 3.3 トライ選択問題の定式化

製造ロット編成においては、同一スペックをもつ受注オーダーがチャージに集約され、つぎに同一あるいは類似の製造スペックをもつ複数個のチャージがトライにまとめられる。したがって第 $i$ トライは、次の属性をもつことになる。

$C_i$  = 第 $i$ トライに含まれるチャージ数

$W_i^s$  = 第 $i$ トライの重量

$W_i^o$  = 第 $i$ トライ中のオーダー重量

$W_i^y$  = 第 $i$ トライ中の非オーダー重量 (=  $W_i^s - W_i^o$ )

$W_i^k$  = 第 $i$ トライ中の緊急オーダー重量

$a_i$  = 第 $i$ トライの鑄込緊急度

$H_i$  (あるいは、 $R_i, S_i, T_i, F_i$ ) = 第 $i$ トライ中において特殊スペック $H$ , (あるいは、 $R, S, T, F$ ) をもつチャージ数

最後の記号 $H_i$  (あるいは、 $R_i, \dots$ ) は、製鋼工程における品質高級化のための特殊作業をすべきチャージの数を表現している。

対象となるトライの数を $N$ としたトライ明細を表3.1に示す。

表 3.1 トライ明細

トライ連番	チャージ数	トライ重量 (ton)	トライ属性				特殊スペックのチャージ数				
			オーダー量 (ton)	余剰量 (ton)	緊急オーダー量 (ton)	緊急度	H/C	R/H	CaSi	手入	単鑄
1	3	835.9	755.3	80.6	86.1	2	0	2	0	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$i$	$C_i$	$W_i^s$	$W_i^o$	$W_i^y$	$W_i^k$	$a_i$	$H_i$	$R_i$	$S_i$	$T_i$	$F_i$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$N$	$C_N$	$W_N^s$	$W_N^o$	$W_N^y$	$W_N^k$	$a_N$	$H_N$	$R_N$	$S_N$	$T_N$	$F_N$



### 3.3.1 目標関数

第  $i$  トライの選択に関して 0-1 整数変数

$$z_i \begin{cases} = 1 & (\text{第 } i \text{ トライを選択した場合}) \\ = 0 & (\text{第 } i \text{ トライを選択しない場合}) \end{cases}$$

を導入すると、本問題の目標関数は次のようになる。

① トータルオーダー率  $f_1(z)$  :

$$\Sigma W_i^o \cdot z_i / \Sigma W_i^s \cdot z_i \rightarrow \text{Max} \quad (3.1)$$

② トータル緊急オーダー採用率  $f_2(z)$  :

$$\Sigma a_i \cdot W_i^k \cdot z_i / \Sigma W_i^s \cdot z_i \rightarrow \text{Max} \quad (3.2)$$

③ トータル連々指数  $f_3(z)$  :

$$\Sigma C_i \cdot z_i / \Sigma z_i \rightarrow \text{Max} \quad (3.3)$$

ここで、(3.1)式は、選択されたトライ全体の重量に対するオーダー重量の比率を表している。この比率は、材料の有効利用度合を表すものであり、これを高めることは非オーダー（余剰）の減少、コストダウンを意味する。(3.2)式は、選択されたトライ全体重量のうち緊急度の高いオーダーの重み付きの採用量の比率を表している。この比率を高めることは納期サービス度合を向上させることを意味している。(3.3)式は、選択されたトライ全体のうち、1トライ当りの平均チャージ数を表している。この値を高めることは、連続して（段取替なしで）製造できる度合が大きくなり、生産性（稼働率）向上、品質向上につながることを意味している。

### 3.3.2 制約条件

本問題での制約条件を次に示す。

① 所定期間内の鑄込チャージ数条件 :

$$|\Sigma C_i \cdot z_i - C| \leq \epsilon \quad (3.4)$$

ここで、 $C (> 0)$  は所定期間内に鑄込むべき目標チャージ数であり、 $\epsilon (\geq 0)$  は  $C$  の許容幅である。

② 所定期間内での特殊スペック鑄込チャージ数条件 :

$$\left. \begin{aligned} HH_u &\leq \Sigma H_i \cdot z_i \leq HH_l \\ RR_u &\leq \Sigma R_i \cdot z_i \leq RR_l \\ SS_u &\leq \Sigma S_i \cdot z_i \leq SS_l \\ TT_u &\leq \Sigma T_i \cdot z_i \leq TT_l \\ FF_u &\leq \Sigma F_i \cdot z_i \leq FF_l \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

なお、添字の  $u, l$  は所定期間内に鑄込み可能な特殊製造スペックのチャージ

数上・下限を示しているが、この制約は特殊スペックの製造能力に起因するものである。

ここで本問題の規模は、対象となるトライ数が約150、制約式が約15である。

### 3.4 解法の基本的考え方

トライ選択問題は、次に示す特徴をもつ。

① 目標関数が非線形（分数型）である。

② 0-1整数変数が多数存在する。

そこで、本問題を実用的な時間内で効率的に解くために、

① 問題の特徴を利用し、非線形の目標関数を線形化する。

② 多目的意思決定法については、満足化トレードオフ法をベースに、Min-Max問題を作成する。この結果、原問題の多目的0-1整数計画問題は混合整数計画問題<sup>16)17)</sup>となり、解法としては内部径路法<sup>18)19)</sup>を用いることを基本的骨子とする新しい解法を開発した。

### 3.5 解法

#### 3.5.1 目標関数の線形化

本問題は分数型の目標関数をもつが、問題の特徴を利用することにより、これらの目標関数は線形関数に変換できる。

(a) トータルオーダー率 ( $f_1(z)$ ) について

1チャージ当りの重量をL(定数)として、第iトライの重量( $W_i^0$ )は(チャージ数(C))×Lに等しいから、(3.4)式より、

$$|\sum W_i^0 \cdot z_i - LC| \leq Le \quad (3.6)$$

$Le$ は微小であるから、

$$\sum W_i^0 \cdot z_i \approx LC \text{ (定数)} \quad (3.7)$$

となり、(3.1)式の分母は定数と近似でき、次式のように変換される。

$$f_1(z) = \sum W_i^0 \cdot z_i \rightarrow \text{Max} \quad (3.8)$$

(b) トータル緊急オーダー採用率 ( $f_2(z)$ ) について

(3.2)式についても、(3.6)式が成り立つため、次式のように変換される。

$$f_2(z) = \sum a_i \cdot W_i^k \cdot z_i \rightarrow \text{Max} \quad (3.9)$$

(c) トータル連々指数 ( $f_3(z)$ ) について

選択されたトライに含まれるチャージ総数は、指定されているチャージ数の目

標値Cにほぼ等しいので次の式が成り立つ。

$$\sum C_i \cdot z_i \approx C \quad (3.10)$$

従って、(3.3)式は、次のように変換される。

$$f_3(z) = \sum z_i \rightarrow \text{Min} \quad (3.11)$$

### 3.5.2 満足化トレードオフ法の適用

前節3.5.1における3つの目標関数式の線形化により本問題は、線形の0-1整数計画問題として定式化され、この多目的0-1整数計画問題を効率的に解くため、満足化トレードオフ法を用いた下記6ステップからなる解法を開発した。

<アルゴリズム>

[Step1] 理想点の設定

各目標関数の理想的な値を、理想点  $f_j^*$  ( $j=1, 2, 3$ ) として設定する。ここで  $f_j^*$  は、

$$\left. \begin{aligned} f_1^* &= \text{Max} \{ f_1(z) \mid z \in \tilde{Z} \} + \delta, \\ f_2^* &= \text{Max} \{ f_2(z) \mid z \in \tilde{Z} \} + \delta, \\ f_3^* &= 0 \end{aligned} \right\} (3.12)$$

として良い。この  $f^*$  の値はそれぞれ全オーダ量総計 ( $\sum W_i^0$ )、全緊急オーダ重量の加重和 ( $\sum (a_i \cdot W_i^*)$ )、平均連々指数0となる。なぜなら、 $f_1(z)$  について、制約なしの最大化は、対象とするすべてのトライを採用する場合であって、 $z_i = 1 (\forall i)$  として  $f_1^* = \sum W_i^0$  となる。 $f_2(z)$  についても同様の考え方で求められ、これらは全ステップを通して一定値である。これらの内容を表3.2に示す。ここで  $\tilde{Z}$  は制約条件(3.4)、(3.5)式を満足する  $n$ 次元0-1整数ベクトルの集合であり、また、 $\delta > 0$  (定数)である。

表 3.2 理想点・希求水準の決定

目標関数	理想点 ( $f_j^*$ )	希求水準 ( $\hat{f}_j$ )	$\lambda_j$
$f_1$	$\Sigma W_1^0$	$p_1 \cdot C \cdot L$	$\frac{1}{f_1^* - \hat{f}_1}$
$f_2$	$\Sigma a_1 W_1^K$	$p_2 \cdot \Sigma a_1 W_1^K$	$\frac{1}{f_2^* - \hat{f}_2}$
$f_3$	0	$p_3 \cdot N$	$\frac{1}{f_3^* - \hat{f}_3}$

ただし、 $p_1$  : オーダ率希求水準設定パラメータ  
 $p_2$  : 緊急オーダ採用率希求水準パラメータ  
 $p_3$  : 連々指数希求水準パラメータ

[Step2] 希求水準の設定

第 $k$ イテレーションでの各目標関数の希求水準 $\hat{f}_j$ ( $j=1, 2, 3$ )を意思決定者により設定する。ここで希求水準とは、少なくともこの程度の目標関数値は確保したいという値で、理想点 $f_j^*$ との関係を次に示す。

$$\hat{f}_j < f_j^* \quad (j=1, 2)$$

$$\hat{f}_j > f_j^* \quad (j=3)$$

なお、ここでは意思決定者による希求水準値設定作業の平易化のために、表3.2に示すように、パラメータ( $p_1 \sim p_3$ )設定方式を採用した。

まず、 $k=1$ としておく。

[Step3] 正規化

$$\lambda_j = 1 / (f_j^* - \hat{f}_j) \quad (j=1, 2, 3) \quad (3.13)$$

として正規化を行う。

[Step4] パレート解導出 (Min-Max法)

理想点と希求水準をもとにしたMin-Max問題を設定する。

$$\text{Min}_{z \in Z} \text{Max}_{1 \leq j \leq 3} \lambda_j | f_j^* - f_j(z) | \quad (3.14)$$

あるいは、 $x$ を連続変数として、

$$x \rightarrow \text{Min} \quad (3.15)$$

s. t.

$$\lambda_1 \cdot (f_1^* - \Sigma W_1^0 \cdot z_1) \leq x \quad (3.16)$$

$$\lambda_2 \cdot (f_2^* - \Sigma a_1 \cdot W_1^K \cdot z_1) \leq x \quad (3.17)$$

$$\lambda_3 \cdot (f_3^* - \sum z_i) \leq \alpha \quad (3.18)$$

$$|\sum C_i \cdot z_i - C| \leq \epsilon \quad (3.4)$$

$$\left. \begin{aligned} HH_0 &\leq \sum H_i \cdot z_i \leq HH_u \\ RR_0 &\leq \sum R_i \cdot z_i \leq RR_u \\ SS_0 &\leq \sum S_i \cdot z_i \leq SS_u \\ TT_0 &\leq \sum T_i \cdot z_i \leq TT_u \\ FF_0 &\leq \sum F_i \cdot z_i \leq FF_u \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

となる。

本問題は、0-1変数の数が約150，連続変数1，制約式の数が約15となる0-1混合整数問題となる。最適解を求めようとする時、組合せ爆発が予想されるので、茨木氏らによる線形計画法を応用した内部径路法<sup>19)</sup>によって解くこととした。なお、(3.16)~(3.18)式は各目標関数値が理想点から同程度にずれる(正規化)解を求めるようにしたものである。このMin-Max問題の解を $z^*$ とする。

[Step5] トレードオフ

意思決定者が、 $f_j(z^*)$ の値をもとに、①もっと改善したい ②評価値を下げても良い ③希望通りである の3つの評価項目のクラスに分類する。各クラスの評価項目Noの集合をそれぞれ $I_1^k, I_2^k, I_3^k$ とおき、もし $I_1^k = \phi$ ならば終了。さもなければ、Step6へ行く。

[Step6] 希求水準の再設定

$I_1^k, I_2^k$ のクラスについては、新しい希求水準 $\hat{f}_j^{k+1}$ を設定し、 $j \in I_1^k$ なる $j$ については $\hat{f}_j^{k+1} = f_j(z^*)$ とおき、Step3へ戻る。

### 3.6 計算結果

満足化トレードオフ法を実際のトライ選択問題に適用し、その計算結果の一例を表3.3に示し、各イテレーション毎の各評価項目の変化を図3.2に示す。なお、求解時間は約1~2分/イテレーションである。

表 3.3 シミュレーション結果

	オーダー率		緊急オーダー採用率		連々指数	
	希求水準 (%)	結果 (%)	希求水準 ×10 (%)	結果 ×10 (%)	希求水準	結果
1	—	82.5	—	7.9	3.0	3.0
2	—	75.6	8.5	8.9	2.9	2.9
3	85.0	90.9	8.0	8.0	2.9	2.9
4	85.0	87.4	8.1	8.1	2.9	2.9

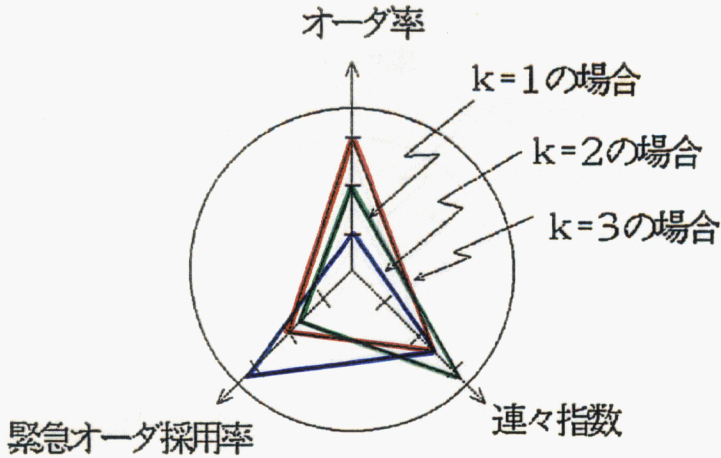


図 3.2 各イテレーション毎の評価項目の変化

表3.3は、各イテレーション・ステップにおける3種の希求水準値と評価項目値を示しており、各評価項目値が大きくなるほど望ましいことになる。実際のトライ選択計画においては、各評価項目の重要度の大小関係を決めるのは難しくない。即ち最初のイテレーション・ステップでは、重要度の一番高い評価項目（例えば連々指数）を選び出し、その希求水準を設定し、つぎにイテレーション結果に基づいて最初の希求水準を変更し、同時に新しい（次の）評価項目に対する希求水準を付加する。以上の操作を繰り返すことによりイテレーションを続ける。

イテレーション・ステップ1は、連々指数の希求水準のみを設定した時の結果であり、結果の値3.0は本問題における上限値である。イテレーション・ステップ2は、緊急オーダー採用率の希求水準を付加し、かつ連々指数の希求水準を3.0から2.9に緩めている。イテレーション・ステップ3では、前ステップにおけるオーダー率が低すぎるとの判断から、オーダー率の希求水準を新たに付加し、緊急オーダー採用率の希求水準を、 $8.5 \times 10$ から $8.0 \times 10$ に緩めた時の結果である。イテレーション・ステップ4では、再度緊急オーダー採用率の希求水準を $8.1 \times 10$ にまで上げてみたが、この結果、緊急オーダー採用率向上の代替として、オーダー率が低下している。

図3.3は、トライ選択結果を示す散布図であり、横軸は各トライ緊急度、縦軸は各トライのオーダー率を示す。また図中の×印は選択されたトライ、○印は非選択のトライを示している。また、緊急度、オーダー率によってトライをクラス分けし、各クラスに含まれるチャージ数を棒グラフで図3.3に示しており、棒グラフ中の斜線は選択されたトライ（×印に対応）に含まれるチャージを示している。

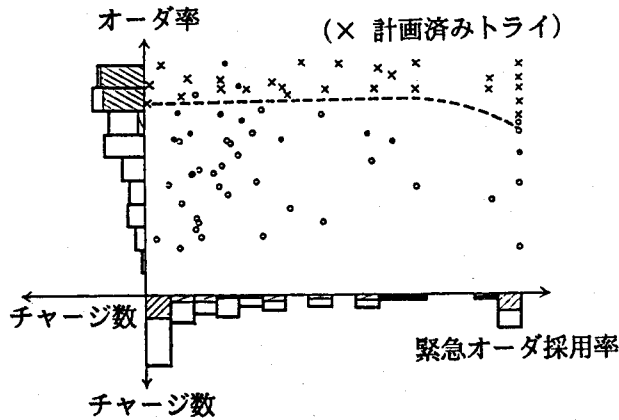


図 3.3 トライ選択結果 (k=3の場合)

### 3.7 考察と結言

満足化トレードオフ法を製鋼工程でのトライ選択問題に適用した。本解法の特徴としては、

- ① 理想点  $f^*$  の設定には、意思決定の解の候補となりうるすべて（もしくは大半）のパレート解を包含するような十分大きな（または小さな）値を設定すれば良い。

- ② 係数 $\lambda_j$  ( $j = 1, \dots, 3$ ) は, 理想点  $f^*$  と希求水準  $\hat{f}$  とから自動的に計算される(表3.2参照).  $\lambda_j \cdot (f_j^* - f_j(z))$  は正規化された理想点  $f_j^*$  との差であり, 評価項目間の次元差や数値上の桁数差について特別な注意は不要である.
- ③ 希求水準  $\hat{f}$  がfeasibleか否かによらず, 弱パレート解が得られる. すなわち, もし  $\hat{f}$  がfeasibleであれば, 得られるパレート解は評価項目に対し, (正規化された意味で)同等に  $\hat{f}$  より望ましい解となる. 一方もし  $\hat{f}$  がinfeasibleのときは, 各評価項目について, (正規化された意味で)同等に理想点に対し犠牲を払った弱パレート解が得られる.

ことである.

以上のように, 日々の生産状況やポリシーによって各評価項目の重要度の大小関係が変化するトライ選択問題には, 満足化トレードオフ法は, 希求水準として絶対値を選定するだけで, 意思決定者の判断を反映できるという点で, 非常に有効性が高い. 受注スペック(納期, 重量等)は多様で, 同一スペックのオーダー量も日あるいは週毎に変化する. したがって「ある時は緊急オーダー採用率よりもオーダー率を重視し, またある時はその逆であったりする」という環境下では, 本解法は非常に実用的である.



## 第4章 生産システム設計における 多目的最適化法

### —大規模フローショップ型 生産システムの設備能力再設計法—

#### 4.1 緒言

近年の多品種・小ロット・短納期に対応して、製造業においては、FMS、FA等を導入して既存工場のリフレッシュを図り、物流の効率化を行うことが非常に重要となってきた。

このような生産システム再設計に際しては、現有生産システムの能力算定・ネック設備の抽出、新設備・機器導入後の生産システムの評価・効果試算が事前検討として不可欠である<sup>1)~5)</sup>。

この生産システム再設計に際して行われるライン設備能力評価においては、従来から種々のアプローチがなされている。すなわち、

- (1) 製造ラインを構成する設備個々の処理能力のうち、最も処理能力の低い設備（いわゆるネック設備）に注目し、安全率を見込んでラインの能力とする方法  
〔静的解析〕
- (2) 製造ラインの挙動を表現するモデルを作成し、シミュレーションにより算定する方法〔動的解析〕<sup>4)</sup>
- (3) 理論的解法

である。しかし、(1)については、簡便ではあるが最近の多品種・小ロット化環境下においては、製造する品種によりネック設備がダイナミックに変動する状況にあり、解析法としては適当ではなく、またピーク時の検討も困難であるため、あくまで平均値的評価にとどまらざるを得ない。

(2)の場合は、(1)の欠点は改善されるものの、①シミュレーションモデルの作成、②シミュレーションモデルを使った試行錯誤的な多数のケース・スタディに工数がかかる。

(3)の理論的解法の場合は、有限なバッファを有し、各工程での処理時間が変動するフローショップ型システムを対象とした藤井らの論文<sup>6)</sup>、2工程・多工程ラインについての解析<sup>7) 8)</sup>、5つの条件を前提とした漸近的信頼性を保証する直列型生産システムの理論解析<sup>9)</sup>があるが、実際規模の事例に対しては、例えば、設備間のバッファ容量制限にともない、ある工程で処理を完了した製品が次の工程

へ進めなくなるというブロッキングが生じたり、各設備の段取替、ジョブの戻り等を考慮しなければならず、理論的解法の直接的適用は困難である。

そこで、本章では、基本的には(2)のシミュレーション方式を採用しつつ、上記課題を解決する新しい方法を開発した<sup>10)-14)</sup>。すなわち、シミュレーションをベースにして、

- ① シミュレーションモデル作成の工数削減のために、シミュレーション言語を使用し、従来型言語とシミュレーション言語<sup>15) 16)</sup>とのハイブリッド型として構成することにした
- ② シミュレーションのケース・スタディの効率的実施のために、ライン全体の能力(以下、ライン能率という)を律則する設備(ネック設備)を自動的に特定できる新指標を考案した
- ③ この新指標に基づいてライン設備能力再設計の一連のシミュレーション手順を確立した

ものである。

今回提案した方法を実際の大規模多段階フローショップ型生産システムの再設計に適用し、有効性を確認した。

## 4.2 大規模フローショップ型生産システムの特徴と検討課題

### 4.2.1 フローショップ型生産システムのモデル

対象として考えるフローショップ型生産ラインの規模・特徴は、下記の通りである。

- ① 工程・設備数は、10～100。
- ② ジョブ数は、約10000ジョブ/月、ジョブ種類数は、約1000種/月。
- ③ ライン構成は、基本的にはトランスファーラインで結合されたものであるが、並列設備、分岐設備、不良による再作業等がある。
- ④ ラインの特徴としては、
  - a) 設備間のトランスファーラインは、一種の有限バッファである。
  - b) 設備稼働時間は、ジョブの作業時間に比べて無視できない程度に大きい。
  - c) 各設備は段取替が必要であり、ジョブの作業時間に比べて無視できない程度に大きい。

なお、本方法の適用においては、各設備の故障の有無には依存しないが、ここでは説明上、故障なしと考えておくこととする。

#### 4.2.2 生産システム再設計時の検討課題

生産システムの再設計に際しては、以下の検討課題を明確にする必要がある。

- (1) 複数設備群のライン全体の能力試算とそれを律則する設備の特定化。
- (2) 目標ライン能力達成のためのネック設備の摘出と改善施策の作成，加えて投資コストが最小となる設備改善案の選定。
- (3) 操業適正化（工場内物流効率化）のための個別設備の操業法の改善案とその効果の試算。

#### 4.3 ライン能率の算出法

##### 4.3.1 新指標の定義とネック設備特定法

各設備 $m$ の操業時間（ $T_m$ ）は、下記の要素から構成されるとみなす。

$$T_m = Z_m + B_m + D_m + W_m + X_m \quad (4.1)$$

ここで、

$Z_m$ ：「加工素材到着待ち」による設備 $m$ の遊休時間総和

$B_m$ ：「加工素材進行停滞（ブロッキング）」による設備 $m$ の遊休時間総和

$D_m$ ：設備 $m$ での段取替時間総和

$W_m$ ：設備 $m$ での作業時間総和

$X_m$ ：前後設備の能率差以外の原因で発生する待ち時間総和

ここで、 $X_m$ はもどりによる再作業，ライン上の作業順序ルール等により発生する待ち時間を表し，現実規模の生産ラインにおいては，必ずといっていいほどあらわれるものである。

一般に，ライン能率はある特定設備にて律則されており，それ以外の設備では，固有の設備能率は充分あるが，前後設備の影響，例えば加工素材到着待ち，加工素材進行停滞（ブロッキング）から発生する遊休時間 $Z_m$ ， $B_m$ により見かけ上能率が低下しているとみなされる。そこで， $Z_m$ ， $B_m$ の影響を除いた下記指標を設備 $m$ の総合能率（ $E_m$ ）として定義する。

$$E_m = \frac{\Delta}{P_m} / (T_m - Z_m - B_m) \quad (4.2)$$

ここで， $P_m$ ：設備 $m$ での処理ジョブ数（もどり再作業分は除く）とする。

本指標は，基本的には，その値が大きくなると能率が高いということであるが，加工素材待ち，加工素材進行停滞等による遊休時間の総和が大きくなったとしても，値は小さくならない（大きくなる）。すなわち，設備固有の能率が高い場合，あるいは段取替時間が小さい場合には，たとえ遊休時間がふえ，見かけの能率が

下がったとしても当該設備については改善する必要が小さいとみなすことを意味していることになる。

これを用いて、ネック設備 $m^E$ の特定は、

$$m^E \stackrel{\Delta}{=} \{m \mid \min E_m\} = \{m \mid \min P_m / (T_m - Z_m - B_m)\} \quad (4.3)$$

にて行えばよい。なお、ライン全体の能率は、 $L_m = P_m / T_m$ にて表されるのは明らかである。

#### 4.3.2 他指標との比較・評価

(1) ライン能率 $L_m$ を用いた場合

$$L_m \stackrel{\Delta}{=} P_m / T_m \quad (4.4)$$

$$m^L \stackrel{\Delta}{=} \{m \mid \min L_m\} \quad (4.5)$$

(2) 公称能率 $N_m$ を用いた場合

$$N_m \stackrel{\Delta}{=} P_m / W_m \quad (4.6)$$

$$m^N \stackrel{\Delta}{=} \{m \mid \min N_m\} \quad (4.7)$$

を考える。

(1)の場合に、 $T_m$ は各設備によらずほぼ一定であるから $L_m$ も設備によらずほぼ一定となり、具体的にどの設備がネックか特定できない。また、(2)の場合には、 $N_m$ は各設備を単独で稼働させたときの正味の能率を表しているが、大規模な製造ラインでは当然現われる段取替時間の影響が反映されることがない。

ここで、提案した $E_m$ と $N_m$ との差異について述べる。一般性を失うことなく、説明を単純化するために、次の条件をもつA、B2つの設備について考える。

(条件1) 設備Aの作業時間総和 $W_A$ は $W_B$ より小さい。すなわち、

$$W_A = W_B - \delta \quad (\delta > 0, \text{定数}) \quad (4.8)$$

(条件2) 設備Aの段取替時間 $D_A$ は $D_B$ よりはなはだ大きい。すなわち、

$$D_A \gg D_B \quad (4.9)$$

これは、設備AがBに比べて作業能率は僅差であるが、段取替時間が極めて大きいことを表している。従って、設備再設計上は設備Aの方が改善を大きく図る必要があることがわかる。しかし、指標 $N_m$ を使った場合、

$$N_A \stackrel{\Delta}{=} \frac{P_A}{W_A} \quad N_B \stackrel{\Delta}{=} \frac{P_B}{W_B} \quad (4.10)$$

であり、ここで、 $P_A \approx P_B$ かつ $W_A = W_B - \delta$ より

$$N_A > N_B$$

となり、設備Bの改善の必要を示していることになる。 (4.11)

一方、指標 $E_m$ を使った場合には、

$$E_A = \frac{\Delta P_A}{T_A - Z_A - B_A} = \frac{P_A}{D_A + W_A + X_A} \quad (4.12)$$

$$E_B = \frac{\Delta P_B}{T_B - Z_B - B_B} = \frac{P_B}{D_B + W_B + X_B} \quad (4.13)$$

であり、 $P_A \approx P_B$ 、 $D_A \gg D_B$ とすれば、 $E_A < E_B$ となり、設備Aの改善の必要を示している。説明上の例題として、表4.1に2つの設備諸元内容と新指標による計算値と判定結果を示す。

表 4.1 2つの設備諸元内容と新指標による計算値

設備 項目	A	B	備 考 (判定結果)
$P_m$	1000本	1000本	
$W_m$	90hr	100hr	
$D_m$	} 50hr	20hr	
$X_m$			
$N_m$	11.1本/hr	10本/hr	$N_A > N_B$
$E_m$	7.1本/hr	8.1本/hr	$E_A < E_B$

以上のことから、提案した新指標 $E_m$ は、 $L_m$ 、 $N_m$ に比べ、段取替、もどり再作業、設備点検などのロスを含めた設備個々の能率を総合的に反映しているといえ、この指標は実工場の改善設備摘出・改善目標量の見積に資するものとして実用的かつ妥当性があるといえる。これらの関係を表4.2に示す。

表 4.2 各種指標によるネック設備特定法の比較

	ネック設備の特定方法	内 容	備 考
1	$m^L = \{m \mid \min L_m\}$ $= \{m \mid \min P_m/T_m\}$ ( $L_m$ ; ライン能率)		ネック設備 特定困難
2	$m^E = \{m \mid \min E_m\}$ $= \{m \mid \min P_m/(T_m - Z_m - B_m)\}$ ( $E_m$ ; 総合能率)		新指標により 特定可能
3	$m^N = \{m \mid \min N_m\}$ $= \{m \mid \min P_m/W_m\}$ ( $N_m$ ; 公称能率)		段取替時間によ り、 $m^N$ をネックと 誤解する場合有

#### 4.4 新指標に基づくライン能率改善シミュレーション手順

提案した指標を用いた一連の改善検討のシミュレーション手順を示すが、基本的には下記の5つのステップとなる。

[Step 1] 現状設備配置によるシミュレーションの実行

[Step 2] 算出した総合能率 $E_m$ をもとにネック設備 $m_0 = \{m \mid \min E_m\}$ の選択

[Step 3] ネック設備 $m_0$ の能率改善

$$N_{m_0} = N_{m_0} + \Delta N_{m_0}, \quad D_{m_0} = D_{m_0} - \Delta D_{m_0}$$

ここで、 $\Delta N_{m_0}$ は設備 $m$ の処理能率改善幅、 $\Delta D_{m_0}$ は設備 $m$ の段取替時間改善幅を表す。

[Step 4] シミュレーションの実行 (含 新指標 $E_m$ の算出)

[Step 5] ライン能率 $L$ が目標ライン能率 $L^*$ に達すれば ( $L \geq L^*$ )、終了。

未達 ( $L < L^*$ ) なら、Step 2へ戻る。

図4.1にシミュレーション・フローを示している。

なお、Step 3において、 $\Delta N_{m_0}$ 、 $\Delta D_{m_0}$ はそれぞれ処理能率、段取替時間の改善度合を表すものである。これらは設備設計上の知見から得られる改善可能性を示すものであり、例えば、処理加工スピードの向上度合、段取替の新装置による改善幅を表わしており、これらの改善幅は、シミュレーションの事前作業として設備設計部門から入手しておく必要がある。

Step 1, Step 4は、シミュレーション・モデルの実行であり、評価指標としては、通常用いられる指標 (例: 総作業時間、段取替時間など約10種) に加えて、

ここで提案した新指標を計算することになっている。

一般的に、設備改善の狙いとして、単に処理能率の向上（すなわち、稼働率向上）の他に、品質向上、作業員の安全性向上が考えられるが、本章では、処理能率と設備投資コストに注目し、「改善後のライン処理能率が予め決められた目標値を達成する中で設備投資コスト最小」という意味の最適化を図ることとした。

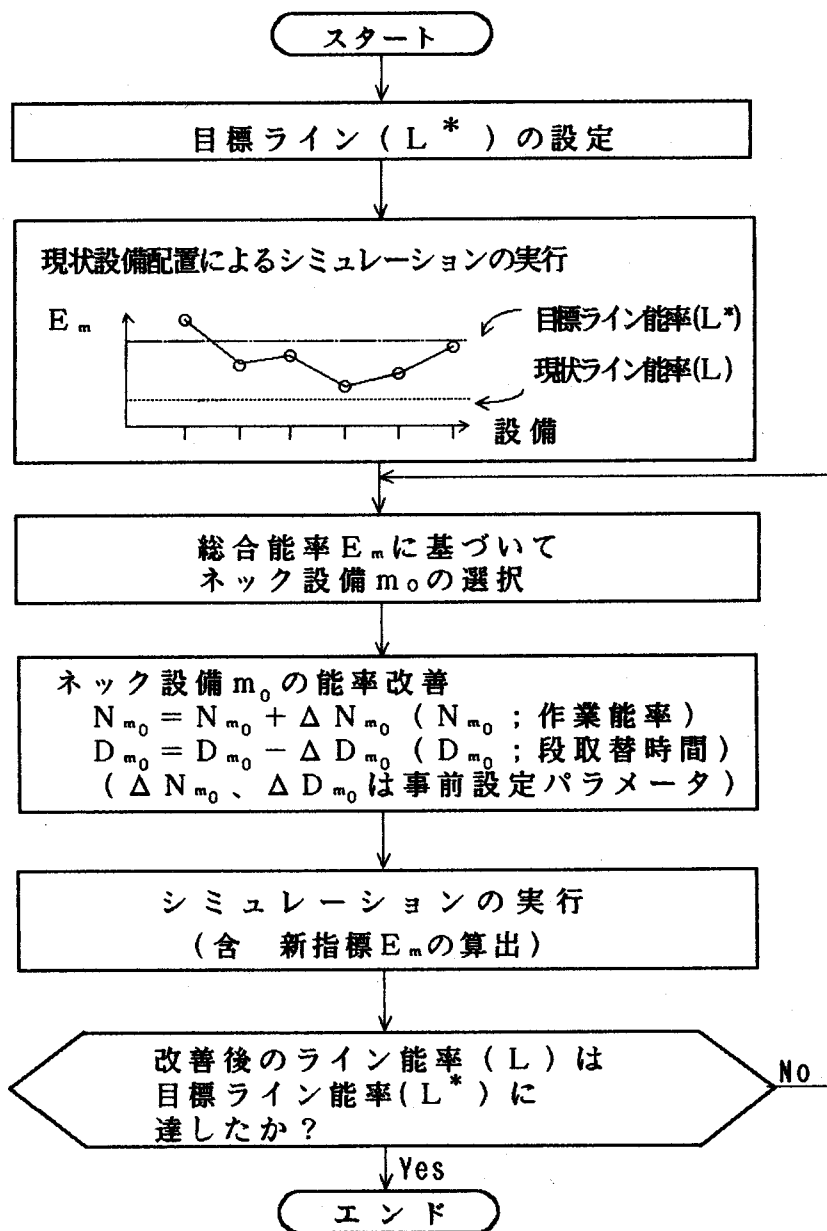


図 4.1 新指標 ( $E_m$ ) に基づくライン設備能力再設計シミュレーション手順



## 4.5 実システムへの適用

### 4.5.1 対象となる生産システム

対象とした生産システムは、図4.2に示すように、基本的にトランスファーラインで直結された複数設備群であるが、並列設備を有し、分岐、もどり（不良）、ラインオフなどが複雑に絡み合う約30工程40設備からなる多品種多段階フローショップ型ラインであり、約10000ジョブ／月が製造される。また、品種サイズにより段取替時間・作業時間の変動が非常に大きいという特徴がある。

先頭の設備の前には無限容量をもつ倉庫があり、常に十分な製品素材を在庫しており、この生産システムに搬入されるすべての素材は、これらの設備のすべてを決められた配置順に通過し、最後の設備での処理を完了した製品は直ちにシステム外へ搬出される（出荷）とする。

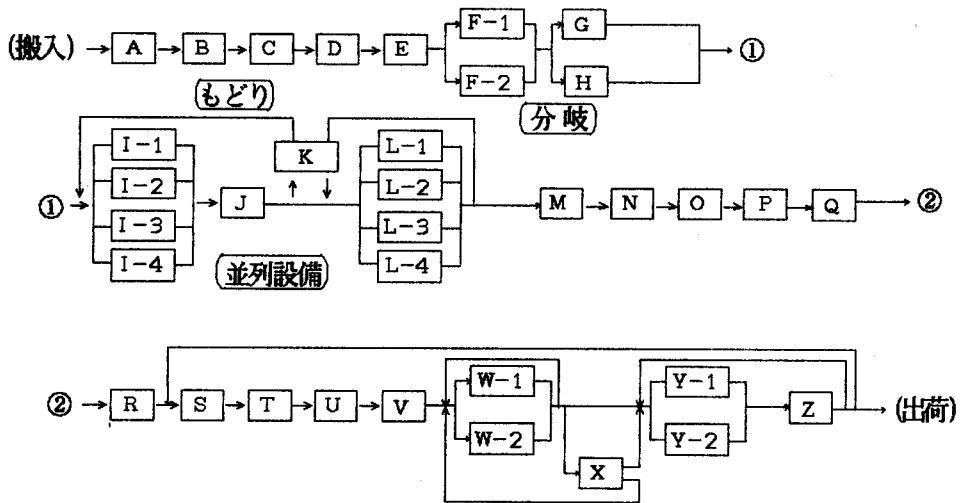


図 4.2 対象ラインレイアウト（大規模多段階フローショップ型工場）

本ラインの操業法としては、例えば並列設備では、要員面の制約から同時段取替の禁止や、設備遊休時間（材料待ち時間など）最小となるジョブの各設備への配分などがある。それらの主要操業ルールを以下に示す。

#### (1) ライン上の作業順序ルール

ジョブグループ（段取条件同一のジョブ）単位内における追い抜き禁止

(2) 並列設備でのルール

- ① 待ち時間最小となるジョブのライン配分
- ② 同時段取替禁止

(3) 分岐・もどりのルール

- ① 分岐点での比率配分は一定
- ② もどり品優先作業

(4) ラインオン・オフのルール

(5) その他

- ① 備品取替えルール
- ② 設備点検作業ルール

4.5.2 シミュレーション・モデルの構成

物の流し方の基本部分については、汎用シミュレーション言語(SLAM II<sup>15)</sup><sup>16)</sup>にて記述し、前節4.5.1で述べた各設備の操業ルールについては、ルール毎に固有のロジックを開発し、FORTRANにて記述した。特に、並列設備については、適正稼動設備数決定およびジョブの設備への適正配分機能を織込んでいる。シミュレーション・モデルの全体構成を図4.3に示す。

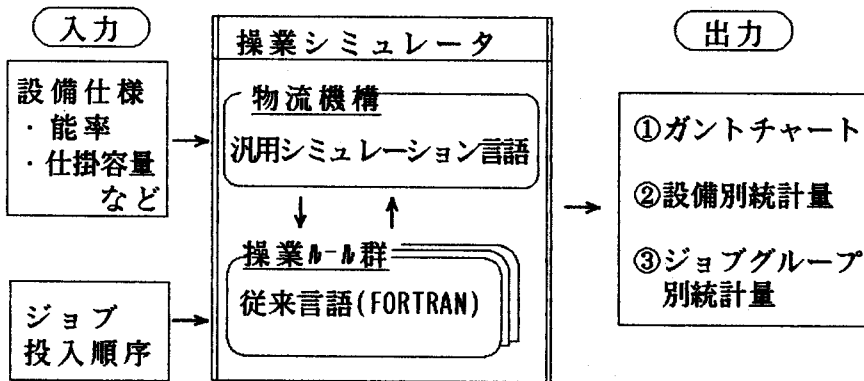


図 4.3 シミュレーションモデルの全体構成

4.5.3 数値計算結果 (ケース・スタディ)

ライン能率改善度PIを次のように定義する。

$$P I = \frac{\Delta \text{ 設備改善後のライン能率 } (\tilde{L}_{m_0})}{\text{設備改善前のライン能率 } (L_{m_0})} \times 100 (\%) \quad (4.15)$$

ここでは、ライン能率を30%アップする（すなわちPI=30）という条件下でのシミュレーション結果を図4.4に示す。

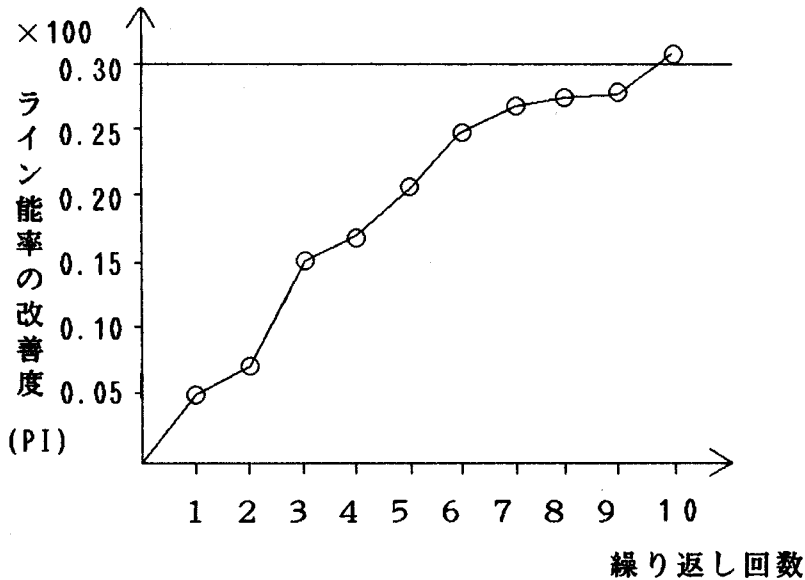


図 4.4 シミュレーション結果

これによりイテレーション毎にライン能率が改善されているのがわかる。またこのイテレーションは目標ラインに到達するまで続けられる。

改善前後における代表工程の総合能率を図4.5, 図4.6に示す。図4.6において、ボトルネックとなる設備の総合能率（あるいはライン能率 $L_m$ ）が上昇し、各設備間の総合能率が均等化していることがわかる。なお、シミュレーション時間は約25分/ケース（2MIPS級CPU）である。

改善検討においては、工場内の物の動きを視覚化して表現するアニメーションが検討の重要な武器となりうる。代表的なアニメーション画面例を図4.7に示しており、これにより、画面上で時々刻々の工場の操業状況（材料待ち、段取替え、作業中、再作業、進行待ち等）が一目で理解でき、ネック工程とその原因検討が効率化された。

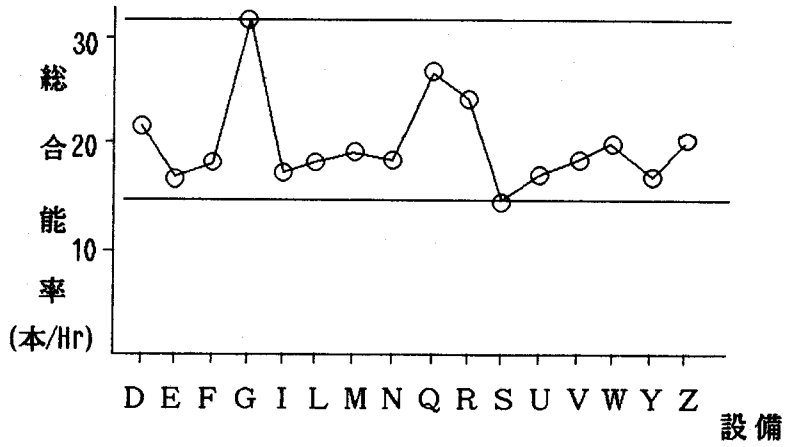


図 4.5 代表設備の総合能率 (改善前)

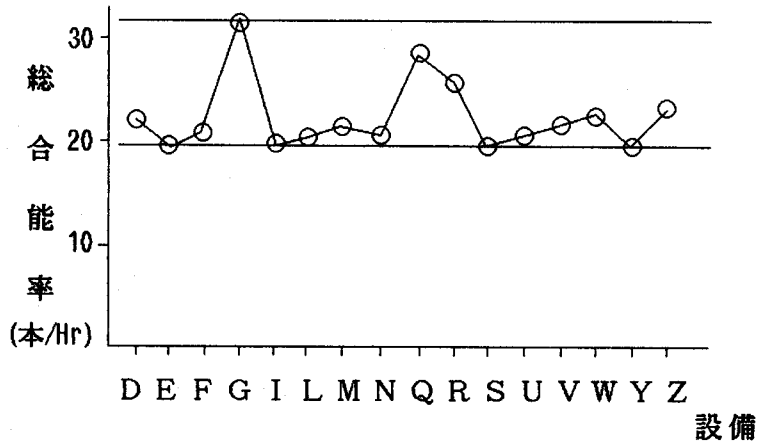


図 4.6 代表設備の総合能率 (改善後)

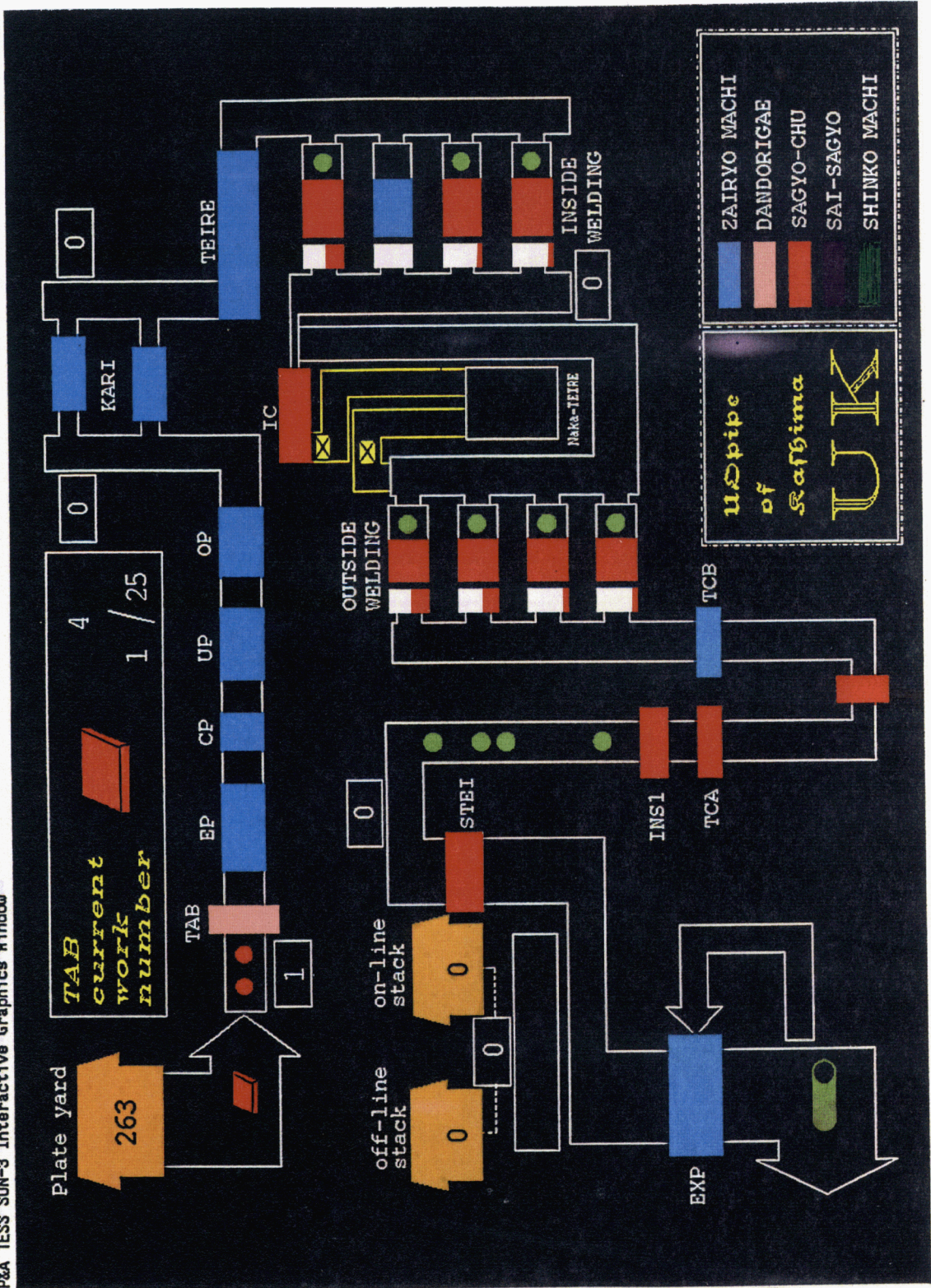


图 4.7 大规模フローショップ工場のアニメーション画面 (例)

#### 4.6 結言

FMS, FA分野において, 既存生産システムの再設計に必須である設備能力評価問題に対して, シミュレーションによる新しいアプローチを案出した. すなわち,

(1) ライン内でのネック設備を特定化する指標の案出

(2) 本指標に基づくライン能率改善のための一連のシミュレーション手順の開発である.

本アプローチを大規模フローショップ型生産ラインの能力算定・改善課題抽出へ応用した効果としては, まず, ①試行錯誤的なケース・スタディが大幅に削減できた ②検討結果として, 目標とするライン能率を最小投資コストにて達成する設備改善結果が得られた. また, 従来においては, 試行錯誤によるケース・スタディのみが有力方法であった改善検討を, ここで提案した方法によれば, システムティックに行うことができ, 非常に実際的であることが判明した.

なお, 大規模ジョブショップ型生産工場の再設計法<sup>17)</sup>, 離散事象システムにおいてシミュレーション言語へのルール記述の導入によるモデル開発工数の一層の短縮化<sup>18) 19)</sup>については, 今後の課題としたい.



## 第5章 物流システム設計における多目的最適化法

### 5.1 緒言

製造業においては、注文構成の多品種・小ロット・高級化・短納期化に対応したより合理的な生産体制・物流管理体制を整備することが重要な経営課題となっている。先進的な工場では、第2章で述べたように、生産・物流統合管理システムが開発されて、製造所全体の“物の流れ”を一貫して計画・管理し、受注～生産～出荷に関わるすべての注文の動きの先読みを行うことにより、適正な操業計画を立案し、これを遵守する作業を実施することにより構内物流効率化を図ろうとしている<sup>1)</sup>。本章においては、計画立案としての生産・物流統合管理システムと、その計画結果にもとづいた実作業としての運搬と保管に関する構内物流効率化に際して、物流システムの再設計における多目的最適化法について述べる<sup>2) 3) 4)</sup>。

製鉄所の出荷工程においては、製品は工場から払い出され、一時倉庫に保管されたり、直接岸壁に仮置された後に、船積が行われる。代表的な構内物流フローを図5.1に示す。具体的には、W工場、B工場という2つの製品工場、No.1～No.6の倉庫及びNo.1～No.6岸壁（バース）が主な物流設備であり、物流フローとしては、①仕分け②輸送③在庫④浜出しの順で行われる。

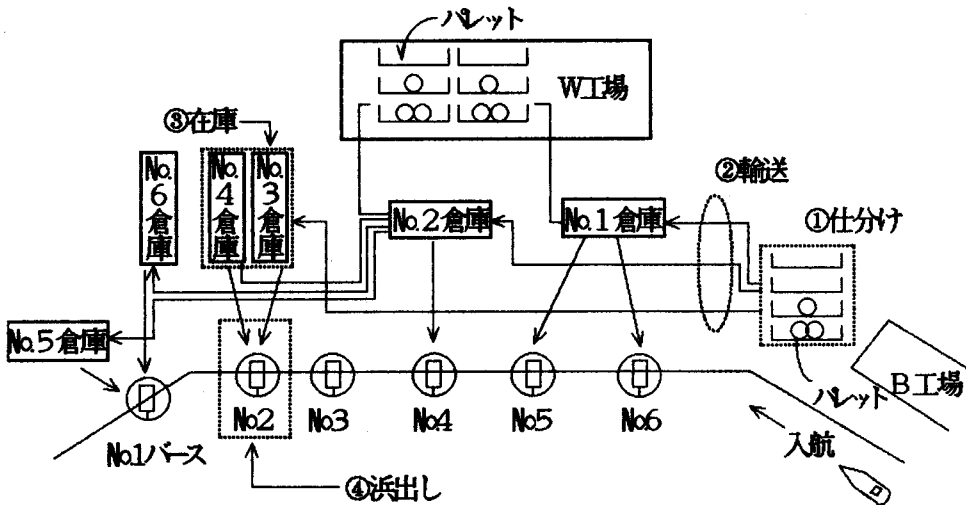


図 5.1 物流フロー（工場払い出し～倉庫保管～岸壁出荷）

条鋼製品の構内輸送においては、従来、リフトカーと呼ばれる小規模輸送方式、すなわち1回の輸送において高々2個の製品を輸送する方式を採用していたが、製品輸送効率アップのために、大量輸送方式としてトレーラーを導入するとともに、製品を工場から払い出す時に、パレットに仕分け、パレット単位に輸送する方式（以下、トレーラー&パレット輸送方式、T&P輸送方式と略す）を導入することになった。このトレーラー&パレット輸送方式導入の骨子を表5.1にまとめた。

表 5.1 トレーラー&パレット輸送方式導入骨子

分類	実施内容	狙い
ハード	<b>現状</b> 	・物流効率化
	<b>新方式</b> 	・品質保証
ソフト	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場搬出時における現品仕分け作業の自動化、効率化</li> <li>パレットの位置トラッキングおよびトレーラーの運行管理</li> <li>生産計画、出荷計画とリンクした置き場計画の立案</li> <li>フレキシブルな積み込み・運搬指示と総合的な在庫進捗管理</li> </ul>	・ダイナミックな置き場運用による運搬・倉庫の効率化

すなわち、構内物流効率化・品質保証強化を狙いとして、①工場～倉庫（含む屋外倉庫）～岸壁における製品輸送を、従来のリフトカーによる小規模輸送に加えて、パレットとトレーラーを導入するとともに②工場搬出時における現品仕分け作業の自動化・フレキシブルな積み込み・運搬指示等を実施するものである。本導入検討に際しての意思決定問題としては、

- (1) 新しく導入するT&P輸送方式のボトルネックを明確にすること
- (2) 必要物流設備（トレーラー台数、パレット枚数等）を算出すること
- (3) 結果として、T&P輸送方式の輸送ルール（輸送作業標準）を決定することである。特に検討の主ポイントは、ミルエンドに置くべきパレットの置場容量の決定と検討結果として輸送ルールである製品輸送・保管法の組合せの決定である。



本章は、新輸送方式の導入に際して、これを離散事象物流システムの多目的最適化問題ととらえ、シミュレーションと線形探索法を組み合わせた新しい設計手法を開発し、実際の物流システムの設備仕様・輸送ルールの設計（検討）へ適用し、有効性を確認した。

一般に、離散事象物流システムは、その挙動を事前に、陽に、正確に表現することが非常に困難であるので、ここで提案する方法は非常に実用的である。

## 5.2 問題の概念

### 5.2.1 問題の記述

T&P輸送方式においては、工場から払い出された製品はミルエンドの仕分場において、向け先別にパレットに仕分けされる。同じ向け先の製品は同一パレットに仕分けられ、通常20～30個の製品にてパレットがほぼ満杯になり、トレーラーにて輸送される。

本輸送方式においては、輸送一保管の組合せ(以下、輸送ルートという)として図5.2に示すように3つの選択肢がある。

すなわち、

- (i) 倉庫までリフトカーで輸送され、製品は倉庫の内で個々の状態にて保管（非パレット保管）され、岸壁までの輸送はリフトカーで行う（ルートA）
- (ii) 倉庫までトレーラーで輸送されるが、倉庫内でパレットから荷卸しされ、倉庫内では製品個々の状態にて保管（非パレット保管）する。そのために岸壁までの輸送はリフトカーで行う（ルートB）
- (iii) 倉庫までトレーラーで輸送され、倉庫内はパレットに積んだままの状態にて保管（パレット保管）し、船積時岸壁までトレーラーで運ぶ（ルートC）

である。

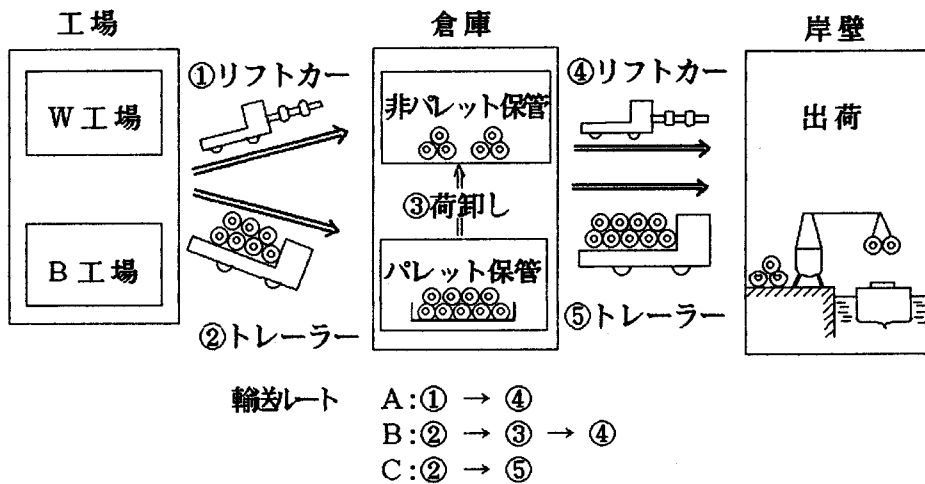


図 5.2 新輸送システム

ここで、従来ではルートAが唯一の方式であり、今回のT&P輸送方式によってルートB、ルートCが新しく考案されたものである。また、新方式では、基本的に、ルートCのみによる輸送が望ましいが、輸送対象量、工場搬出ピッチ（タイミング）によっては、ルートA、Bを採用せざるを得ない場合がある。したがって、輸送ルートである製品輸送・保管法の決定とは、この3つのルートの使い分けを明確に基準化（ルール化）することである。

### 5.2.2 具体的検討課題

具体的検討課題は、以下の通りである。

- ① 2つの工場のミルエンドに確保すべき空パレットの枚数の決定  
これは、必要となる仕分け置場容量の決定と同じ意味をあらわしている
  - ② 1パレットに運ぶ製品量の推定
  - ③ 異なる3つの輸送ルートA、B、Cの最適組合せ
  - ④ 輸送量にあわせた設備容量（トレーラー台数、パレット数）の決定
- である。

### 5.3 モデリング

モデリングに際しては、3つの重要な点がある。すなわち、①製品発生分布の同定、②輸送ルールの組込み、③シミュレーションを利用した多目的最適化法で

ある。次節で逐次説明してゆく。

### 5.3.1 製品発生分布の同定

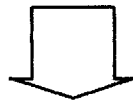
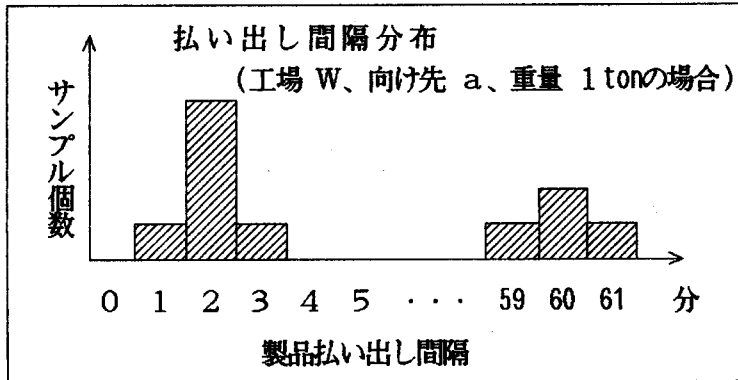
各工場からの製品発生は1～2分おきであり、これらは向け先、重量が異なるものが混在しているが、輸送方式検討の際には事前にクラス分けして分布を求める必要がある。そこで、各製品を発生工場、向け先、重量により分類して製品クラスとし、製品クラス別に発生分布を考えることにした。図5.3に製品クラス別の発生分布の決定手順を示す。

[ Step 1 ]

製品 No.	製品クラス			払い出し時刻
	工場	向け先	重量	
1	W	a	1	7:10
2	B	b	2	7:11
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	W	a	1	7:23
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



[ Step 2 ]



[ Step 3 ]

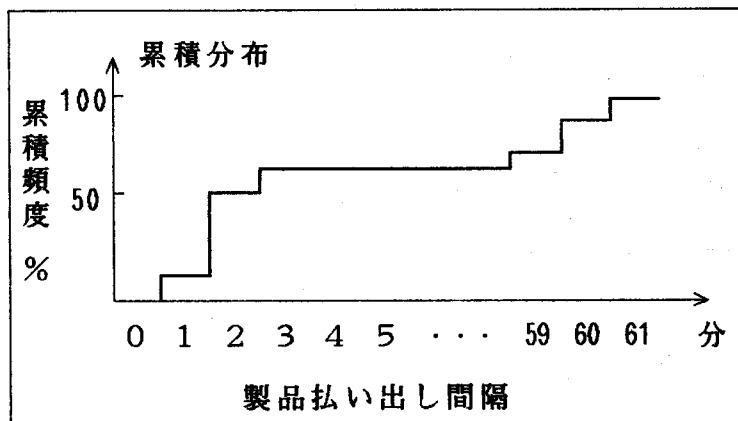


図 5.3 実データからの製品発生分布の決定法  
(製品クラス別)

### <製品発生分布計算手順>

#### [Step1] 実績データの収集

生産実績データ（約2ヶ月分の製品発生データ）を収集し，3つの特性（すなわち，発生工場，向け先，重量）により製品クラスに分ける．

#### [Step2] 確率分布の同定

Step1で求めた製品クラス別に工場払い出し実データから下記項目を算出する．

- ① 製品発生数（サンプル個数）
- ② 製品払い出し間隔
- ③ 製品の初期発生時刻

#### [Step3] 累積分布への変換

各製品クラス別に累積分布を求める．

### 5.3.2 輸送ルール

モデル構築に際し，下記の項目を明確にした．

#### (1) 物流設備とその間の移動時間

主要設備とその間の移動時間の標準値（測定値）を図5.4に簡略化して示す．

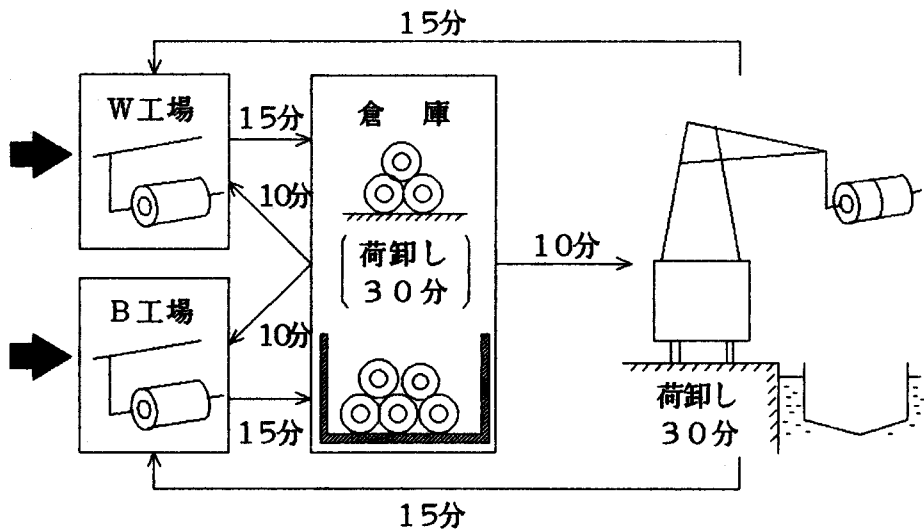


図 5.4 物流設備とその稼働時間

## (2) 輸送ルールの把握

### ① 工場払い出し～倉庫までの輸送作業ルール

図5.5に輸送作業ルールの模式図を示す。すなわち、本ルールは、コイル（揚地  $j$ ）が仕分場到着時に、同一揚地（ $j$ ）のパレットが仕分場になく、かつ空パレット、トレーラーが仕分場横に待機中なら、まずリフトカーにて当該コイルを倉庫へ運び、トレーラーは、空パレットを仕分場に運んだ後、積載量最大のパレット（揚地  $i$ ）を倉庫へ運ぶことを表している。すなわち、まずルートAの①を行った後に、ルートB、Cの②を行うことである。

### ② 倉庫でのパレット保管ルール

パレットが倉庫に到着したときに、ミルエンドの空パレットがある一定値（ $=N$ ）未満になっていれば、当該パレットは製品を卸し、ミルエンドへ戻される（ルートB）。

### ③ 倉庫から岸壁への輸送ルール

船が到着すると、パレットは岸壁に移動され、船積みが完了すると空パレットはミルエンドに戻される。製品がパレット化されていない時は、個々にリフトカーで岸壁まで輸送される。

### ④ その他のルール

- ・トレーラー戻りルール
- ・パレット戻りルール

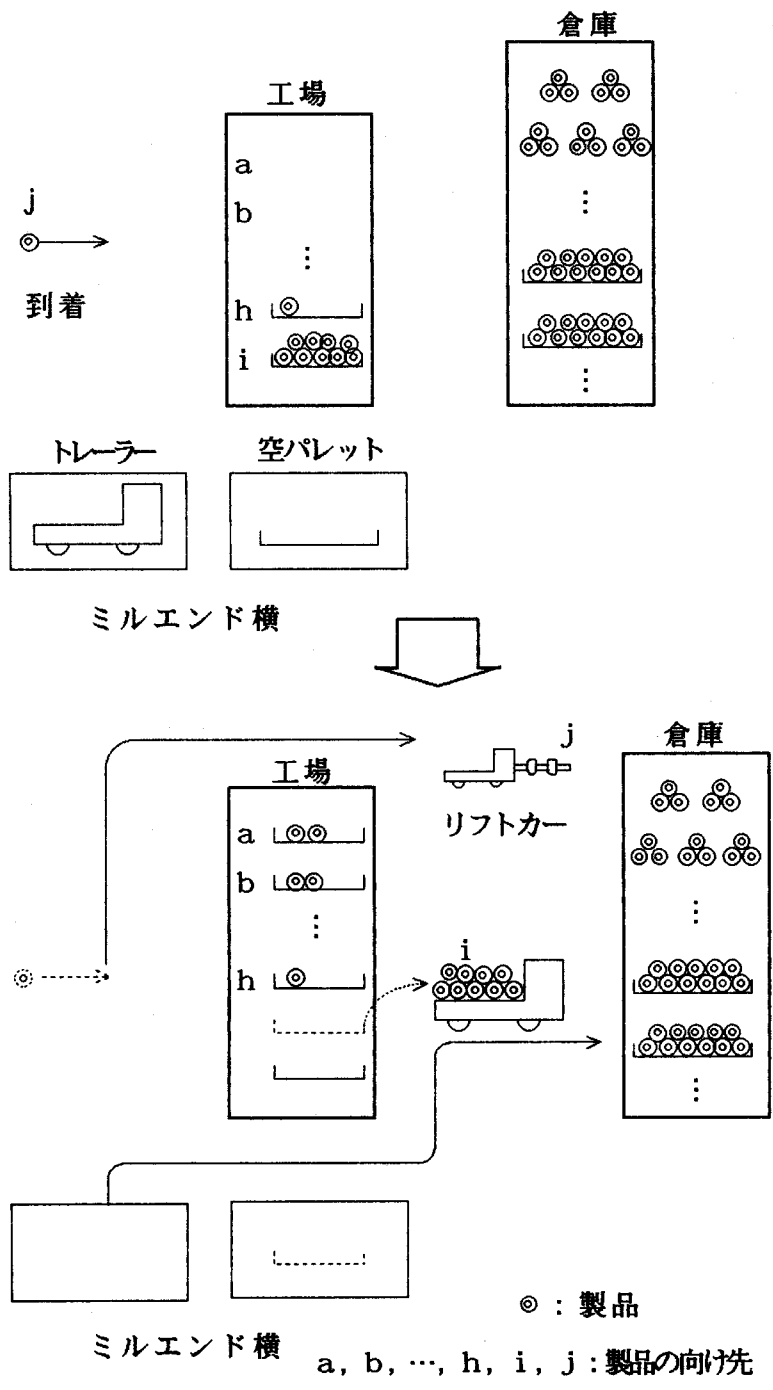


図 5.5 工場から倉庫への輸送ルール

なお、シミュレーション仕様を表5.2に示している。

表 5.2 シミュレーション仕様

項 目	仕 様
トレーラー台数	約 5
パレット枚数	約 150
リフトカー台数	約 100
パレット容量 (W工場用)	約 50ト
パレット容量 (B工場用)	約 70ト
向 け 先	約 10
工 場 数	約 2
シミュレーション期間	約 30日
製 品 数	約 25000



## 5.4 解法

### 5.4.1 問題の特徴

- ① 大規模（対象製品数 約25000）である。
- ② 時々刻々の動きを製品単位に把握する必要がある。
- ③ 輸送効率化（すなわち、リフトカーでの輸送を最小化）する設備仕様及び輸送ルートの設定を行う必要がある。

### 5.4.2 解法の基本的アプローチ

- ① 物の動きの精緻なモデリングを行う必要があることから、離散型シミュレーション・モデル<sup>5) 6)</sup>の開発を行うこととした。
- ② 設計パラメータの最適決定については、数理計画法の一つである線形探索法<sup>7) 8) 9)</sup>を活用することとした。

### 5.4.3 解法

必要物流設備の検討に関連して決定すべきパラメータは多く存在する。例えば、①トレーラー台数、②パレット数、③倉庫に保管すべきパレット数、④ミルエンドにおくべきパレット数である。しかし、本解法に際して、①、②は既に決定しているものとし、④の場合、すなわちミルエンドにおくべきパレット数の決定について記述する。

ミルエンドにおくべきパレット数を $N$ とする。今、ルート $A$ 、 $B$ 、 $C$ についての従来のルート $A$ のコストをベース（ $=a$ ）としてルート $B$ 、 $C$ のコストをそれぞれ $b$ 、 $c$ とする。そしてそれぞれの輸送量を $W_A$ 、 $W_B$ 、 $W_C$ とし、トータル輸送コストに相当する指標として、

$$\text{総合指標 } f \stackrel{\Delta}{=} a \times W_A + b \times W_B + c \times W_C \quad (5.1)$$

と定義する。なお、輸送法 $A$ 、 $B$ 、 $C$ の違いによるそれぞれの経済性評価は事前に行われており、 $a=1.0$ 、 $b=2.5$ 、 $c=1.0$ と考える。

このとき、このモデルにおいて、 $f$ とミルエンドにおくべきパレット数（ $N$ ）の関係はつぎのようになる。すなわち、

- ①  $N$ が小さい（ミルエンド仕分場にある空パレット数が少ない）場合には、工場から払い出された製品を直接パレットに仕分けることができず、リフトカーで運ばざるを得なくなり、輸送コストは大きい。
- ②  $N$ が漸次多くなる（ミルエンド仕分場にある空パレット数がやや多くなる）

場合には、 $N$ が小の場合に使っていた多数のリフトカーを使わなくてよくなり、輸送コストは下がる。

- ③ しかし、 $N$ が大きくなってくると全体のパレット枚数は制限があるのでパレットを強制的に仕分場へ戻すことが必要となり、倉庫でのパレット保管は少なくなる。したがって、パレットが倉庫到着時に即ちに、積卸して製品個々の状態にて保管することとなり、このため岸壁へはリフトカーで運ばなければならず、また輸送コストは増加してゆく。

以上のことから、総合指標  $f$  と  $N$  との関係は、図5.6に示す下に凸の非線形曲線と想定される。

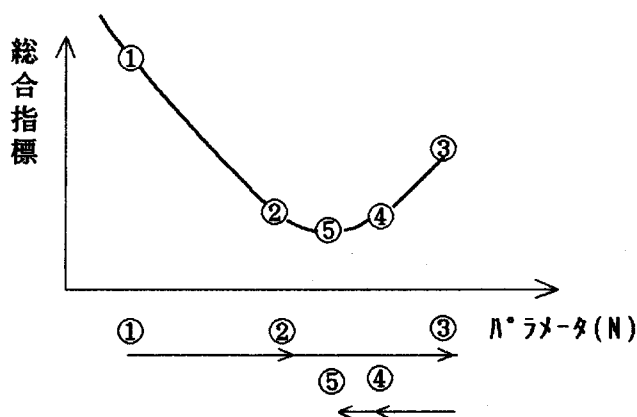


図 5.6 パラメータ  $N$  と総合指標の関係  
(①, ②, …は探索の順序)

一方、 $N$ はミルエンドにおくパレット保管数であり、これはミルエンドの保管スペースの確保、すなわち工場建屋延長工事としての建設費が必要となることから、 $N$ は極力小さいことが望ましい。よって解法の定式化としては、「 $f$ をMinとする極力小さい $N$  (非負整数)を求める」こととなる。そこで、 $N$ の決定に際して、離散事象物流システムの挙動をシミュレーション・モデルで記述することとし、離散型シミュレーションと線形探索を組合わせた新しい解法手順を開発した。

図5.7に新しい解法手順を示す。

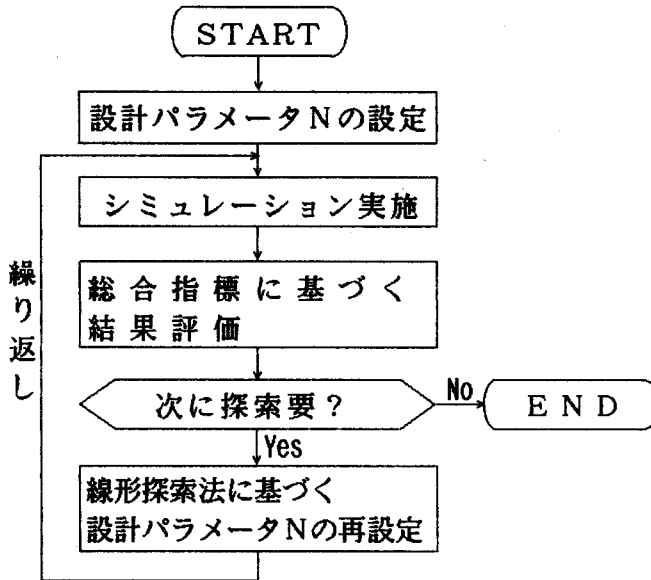


図 5.7 解法の手順

## 5.5 結果

シミュレーション結果を表5.3に示す。イテレーション1は、初期状況として、倉庫内でのパレットの積卸しが禁止されており、ミルエンドに空パレットが少ないので、約25.5%の製品がリフトカーで輸送されていることを示している。また、ミルエンドからT&P輸送方式で運ばれるすべてのパレットは、イテレーション1ではそのまま保管されることを表している。イテレーション2から6においては、3つの輸送ルートが組合せ選択されていることを示している。すなわち、ミルエンドにおけるパレットの数がNより小さくなれば、倉庫に新しく到着したパレットは製品を積卸し、ミルエンドに戻ることを示している。

表5.3の結果から、

- ① Nが大きくなれば (N=12の場合などは)、輸送ルートAの輸送量が少なくなっていることから、リフトカーで運ばれる製品量が少なくなること示しているが、一方、ルートBの輸送量が増加していることから、ミルエンドにおくべきNの設定が大きいために、倉庫において強制的にパレットの積卸しをしなければミルエンドにパレットが不足することを示しており、そのために、倉庫内では製品個々の状態で保管されることになり、岸壁までの輸送

をリフトカーで行わざるを得なくなることになる。

② またN=10の場合では、リフトカーで運搬される製品量の減少程度が低い（ルートAの輸送量が少し大きい）ことがわかる。

③ N=11の場合には、輸送ルートのA、Bなどのリフトカーで運ばれる比率が小さくなり、効率のよい輸送ルートCの比率が高くなっている。

以上のことから、ミルエンドにおくべきパレット数は少なくとも11必要であることを示している。なお、トータルコストもN=11の時が最小となっている。

表 5.3 シミュレーション結果

回数	輸送ルート (図)	輸送量比率 (%)				トータル コスト	平均利用率		倉庫内の平均 パレット数
		A (10)	B (2.5)	C (1)	計		リフトカー	トレーラ	
1	—	25.5	0.0	74.5	100.0	100.0	41.9	42.8	59.7
2	4	7.0	9.0	81.0	100.0	55.0	14.1	55.5	60.7
3	8	2.9	18.3	78.8	100.0	46.6	6.9	52.3	59.1
4	1 2	1.0	20.7	78.3	100.0	42.5	3.7	49.1	57.0
5	1 0	1.1	20.5	78.4	100.0	42.6	4.0	49.2	58.2
6	1 1	1.0	20.2	78.8	100.0	42.3	3.7	49.1	57.2


N : ミルエンドの空パレット数

— : 倉庫での積卸し不可（パレットの状態にて保管）の条件にてシミュレーション実施

本検討は、シミュレーション技術者と製品輸送作業のベテランによって行われたが、これらの結果は、導入後の新作業法の確立、作業安全チェックとしても活用される。なお、シミュレーション時間は、約20分/ケース（2MIPS級CPU）である。また、モデルの検討のために図5.8に示すアニメーション画面を作成し、シミュレーション技術者、現場運輸関係者の意志疎通の向上と検討の完璧さを図っている。

TRAILER & PALLET TRANSPORTATION SYSTEM

**WAREHOUSE**



WEIGHTS OF PALLET: 820  
WEIGHTS OF PIECEWISE: 20  
TOTAL WEIGHTS: 840

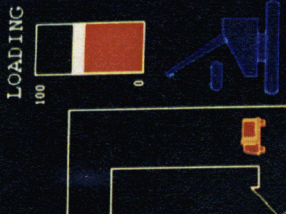
**WEIGHTS BY DESTINATIONS**

- ◆ ICHIKAWA: 0
- ◆ YOKOHAMA: 200
- ◆ NAGOYA: 0
- ◆ TOYOTA: 140
- ◆ TAGONOURA: 0
- ◆ SAKAI: 125
- ◆ TURUHAMA: 60
- ◆ NANKOU: 5
- ◆ KINKI: 60
- ◆ ELSE: 250


**EXPLANATORY NOTES**

- └ : PALLET
- └└ : TRAILER
- └└└ : LIFT CAR
- └└└└ : CRANE

**LOADING**



**SEA**



TRANSPORTATION MONITOR

ITEMS	ASSORTMENT	YARD	WORKING	WAREHOUSE	SHIPPING	TOTAL
PALLET	17	83	1	13	1	115
TRAILER	0	1	2	0	1	4
LIFT CAR	1	0	1	1	0	3

SHIPPING WEIGHTS

	SHIPPING	LOADING
PALLET	60	50
PIECEWISE	5	5
TOTAL	65	55

DO YOU WISH TO ENTER THE PAUSE PROCESSOR (YES/NO/EXIT) (NO)?

0.0      50.0      100.0      150.0      200.0

図 5.8 トレーラー&パレット輸送システムのアニメーション画面

## 5.6 結言

物流システム設計に関し、下記項目を実現した。

- (1) 物流設備仕様決定・物流コントロール法等の問題の解法として、離散型シミュレーションと線形探索法の結合による新しい設計技法の開発を行った。本技法は、特に離散型物流システムのように、その挙動を事前に、陽に、正確に同定できない対象について、シミュレーションによりシステムの挙動を明確にしつつ最適化を図ることができるという意味で、極めて実用的であることがわかった。
- (2) その効果として、①設備仕様の設計簡素化、②物流効率化が認められた。
- (3) また、シミュレーション・プロセスに関して、①汎用シミュレーション言語を適用することによりモデル作成期間の短縮が図られ、②代替案検討の容易化が実現した。

また、これらの検討により確立された輸送ルールは、置場指示・運行指示システムに組込まれて、日々の製品の仕分指示、輸送指示に活用可能である(図5.9参照)。



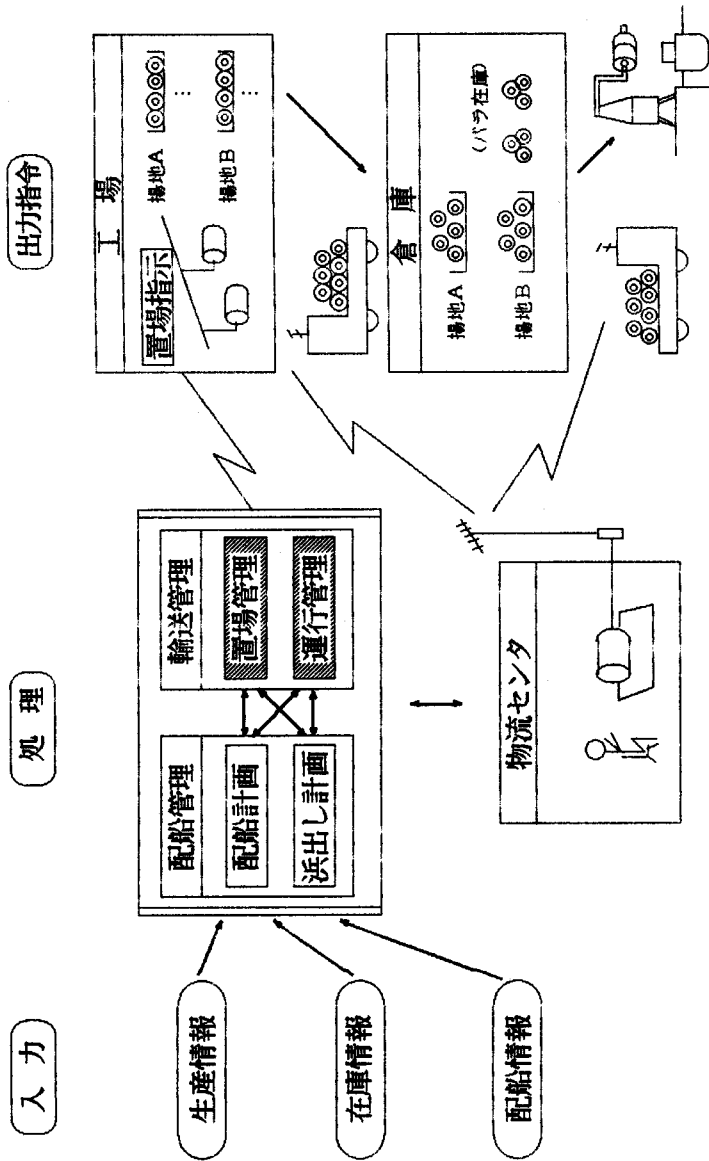


図5.9 置場指示・運行指示システム

## 第6章 材料取合せにおける 多目的最適化法

### 6.1 緒言

鉄鋼業は受注生産形態であり、顧客から種々の注文を受け、まず本社で要求される注文スペックの製造可否をチェックした後に製造所へ製造指示がなされる。製造所では、これらの注文の中で製造仕様が同一なものをロット編成し、各工程の生産設備の容量にマッチさせ、設備の稼働率と歩留を確保して製造コスト低減を図ることが重要である。このロット編成の集約方法は工程によって異なり、例えば、製鋼工程では材質（成分、溶製法等）、圧延工程では断面寸法などの区分で行われる。

本章では、上記ロット編成（以下材料取合せという）を行う実用的なロジックについて報告するものであり、従来からオペレーションズ・リサーチの分野で「材料切断問題」として扱われてきたものに対し、実際的な視点に立脚して本問題を組合せ型の多目的最適化問題と位置づけ、ヒューリスティックな手法ではあるが、極めて実用性の高いアルゴリズムを開発した<sup>1) - 6)</sup>。本アルゴリズムを継目無鋼管材料取合せに適用し、有効性を確認した。

### 6.2 材料取合せ問題の概要

#### 6.2.1 材料の流れ

継目無鋼管の素材を複数の熱間製管工場へ供給する役目を担う鋼材供給工程での鋼塊及びビレットを対象にした材料取合せについて報告する。

本工程における材料の流れは図6.1に示すように、鋼塊は、分塊ラインにおいて所定断面形状の長大円柱として製造され、左右両端の不良部を除き、第1次切断として2～10ヶのビレット（中間素材）に切断される。その後、第2次切断において最終の所定長さに切断され、複数の熱間製管工場に供給される。



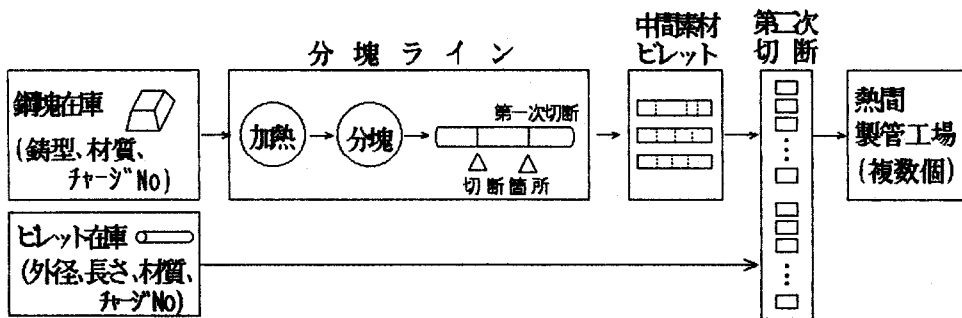


図 6.1 材料の流れ

### 6.2.2 制約条件

材料取合せは、単に切断箇所（あるいは長さ）を決定するのみならず、切断の前提として、在庫されている鋼塊あるいはビレットの性状が熱間工場からの材料請求内容（以下、注文という）の性状を満足していなければならない。したがって、材料取合せという問題の内には、図6.2に示すように次の2つの問題が内在している。すなわち、

- ① 性状の同じ鋼塊在庫あるいはビレットと注文をできるだけ材料使用効率を考慮して対応づけること（材料振当問題という）。
- ② 対応づけられた鋼塊在庫あるいはビレットから注文内容に基づき、歩留、作業性を考慮して所定長さに切断すること（材料切断問題という）。

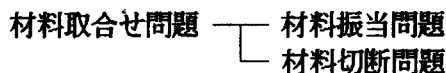


図 6.2 材料取合せ問題とその部分問題

以下、この2つに分けて説明する。

#### 6.2.2.1 材料振当問題における条件

##### ① 材料仕様のマッチング条件

- a) 注文と材料の材料仕様(材質、規格、グレード、成分仕様等)がマッチングすること
- b) 高級な品種には、品質管理の点から同一チャージの材料を振当てる。(これをチャージ分散防止条件と呼ぶ)

c) 注文に溶製法が指定されている場合は、指定の溶製法による材料を振当てる。

② オーバグレード防止

注文のグレードに対して、必要以上に高グレードの材料を振当てることは極力避ける。

③ 在庫使用優先条件

在庫管理の点から、優先的に使用すべき材料を早く使い切る。また、小口の余剰材の発生を極力避ける。

### 6.2.2.2 材料切断問題における条件

① 歩留最大化 (= クロップ最小化)

② 切断条件遵守

鋼塊は、第一次、第二次切断の二つの切断工程を経るので、次の条件を満足する必要がある (図6.3参照)。

a) 第一次切断条件

(i) ストップの移動可能条件 (切断許容範囲条件)

注文長さは、最小切断許容長さより短く、一本ごとには切断できないので、許容範囲まで注文長さを倍尺する必要がある (切断許容範囲に入る注文長さの倍数の長さを以下、倍尺長と呼ぶことにする)。

(ii) 切断能率条件

切断回数、ストップの移動が繁雑にならないように切断長さを決定する。

(iii) 仕分けベッド台数制限条件

b) 第二次切断条件

同一注文の切出し、異材混入防止を図るために、図6.3(C)のように一つの切断ビレットに異なる注文が含まれる場合を避けて、できるだけ同一注文長さの倍尺長となるようにする。

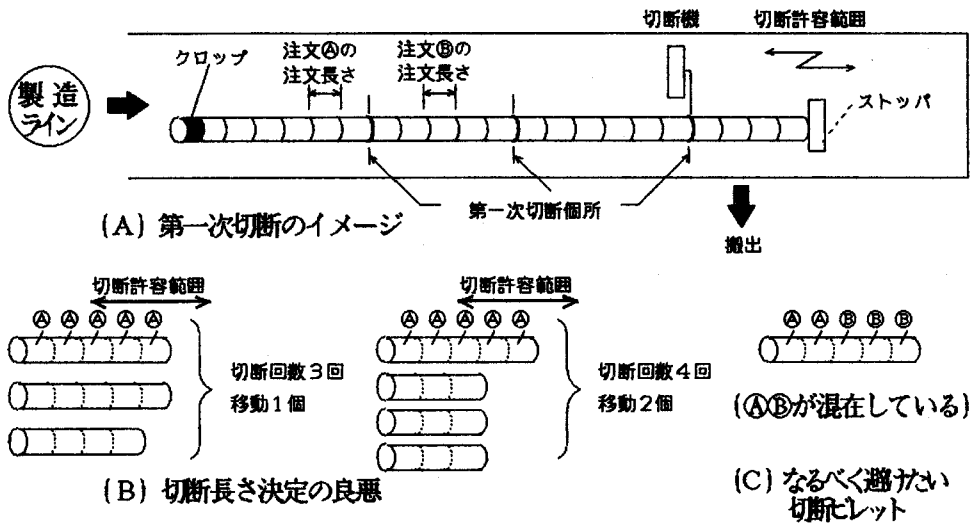


図 6.3 第一次、第二次切断条件

以上のことから、本材料取合せ問題は、第一次、第二次切断条件のもとで、①歩留最大化、②切断作業性（切断回数、ストップパ移動量等）最大化を図る切断パターン（切断長さあるいは切断個所）を決定する問題であり、「2段階切断工程をもつ材料取合せ問題」といえる。

## 6.3 解法

### 6.3.1 問題の特徴

材料取合せ問題は、鉄鋼業特有の生産形態と密接に関連しており、次のような特徴を有している。

① 問題の複雑度が高い

材料取合せ問題は、単に切断問題のみならず、材料振当問題を内在しており、この2つが結合した複合問題である。また、材料切断問題においては与えられた素材の長さは互いに異なっている。従来からの手法は、1種類の長さに対して、素材の必要本数を求めることであった<sup>7) - 11)</sup>。

② 評価基準が複数である

単に歩留最大化（使用素材の最小化）だけでなく、切断作業性（切断回数、ストップパ移動量等）も考慮しなければならない。

③ 短時間の求解が必要である。

### 6.3.2 解法の基本的骨子

本研究においては、以上のような特徴を背景として、次の視点から材料取合せロジックの開発を行った。

- (1) 広範囲で、複雑なモデルであり、全体を一度に解けないので図6.4に示すように一つ一つの部分最適化を積み重ねて全体の最適性を高める方法を採用する。すなわち、「材料振当問題」と「材料切断問題」を分離し、また材料切断問題では、素材一本一本の歩留最大化を狙うことにより、全体の歩留最大化を図る方法をとる。
- (2) 注文の取合せ順序により、最後に残る注文が影響を受け、この最後に残る注文のために全体の歩留が大幅にダウンする場合がある。これを回避するために実用上、計算時間の許す範囲内で注文の優先順を変えて全体の取合せ計算を複数回繰返し、最良のものを選択する方法も取り入れている。

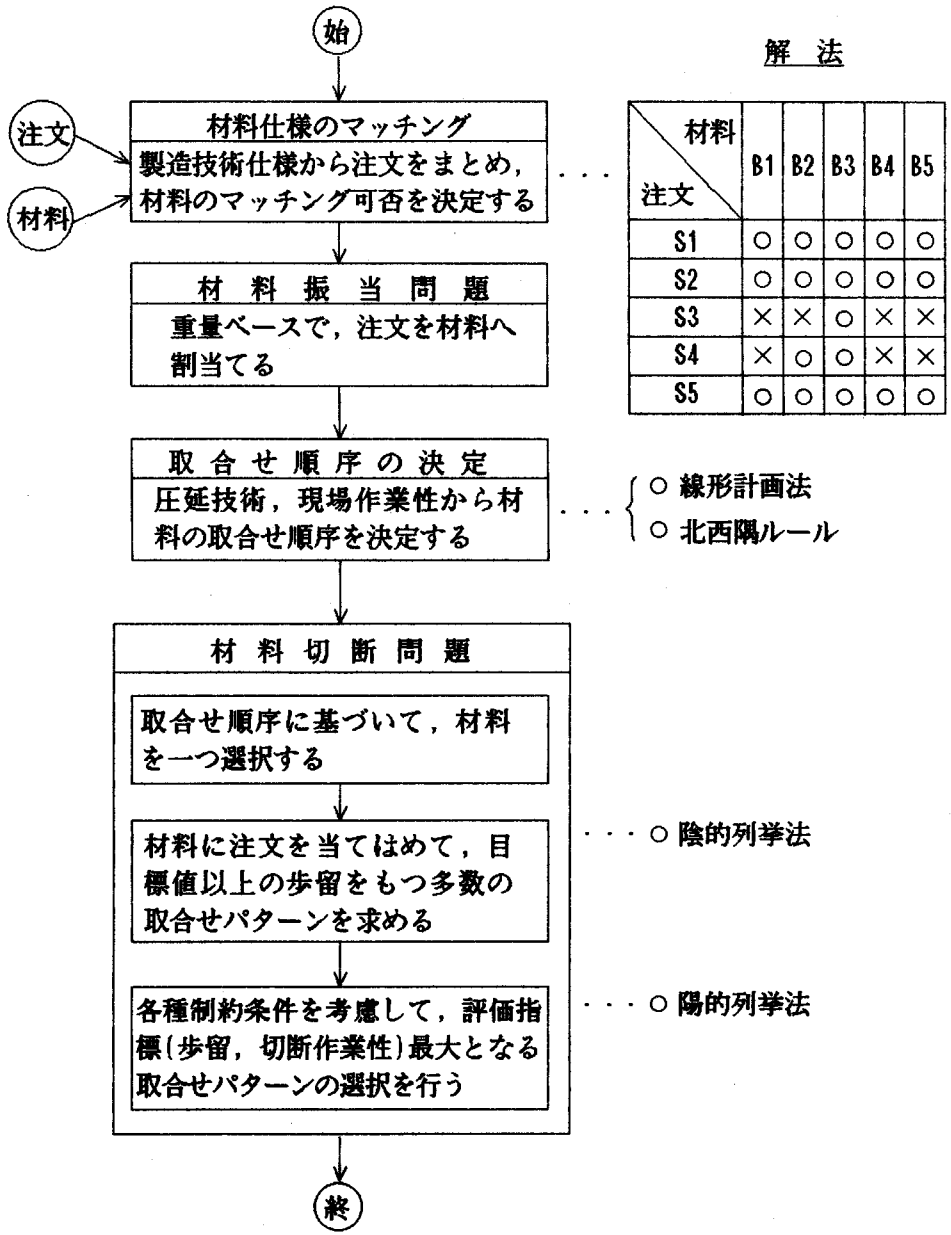


図 6.4 材料取合せロジックの基本構成

材料取合せ問題は、従来から各種の手法が開発されている。特にGilmore<sup>9) - 11)</sup>らは、線形計画法を解いて、各取合せパターンの必要本数を求めているが、本問題においては、

- (i) 線形計画法の解は、整数化時に問題がある。
  - (ii) 歩留と作業性を一元的に定式化することが困難である。
  - (iii) ラインの作業性をも考慮した取合せパターンを採用しなければならない。
  - (iv) 一本一本長さの異なる素材について取合せパターンを見出す必要がある。
- などの理由により、線形計画法の定式化が困難である。

そこで、ヒューリスティックではあるが、実用的なアルゴリズムを開発した。特に切断問題については、汎用的なプログラム・パッケージ (Sumitomo Cutting Stock Programming Package : SCOP) を完成させた<sup>1)</sup>。

## 6.4 材料取合せロジック

材料取合せロジックの全体フローを図6.5に示し、次節にてその処理概要を述べる。

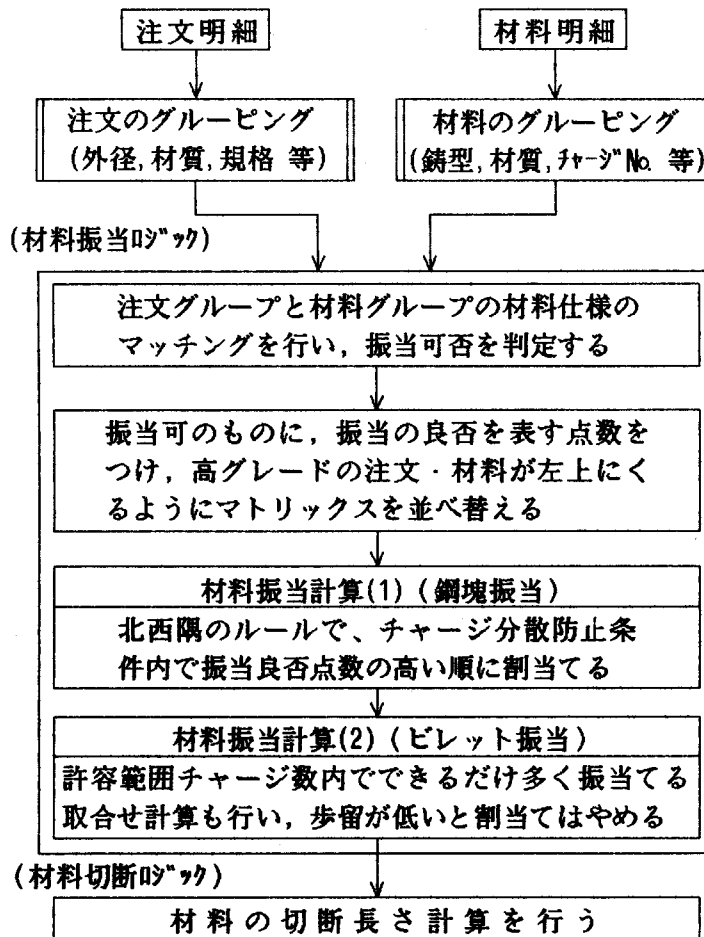


図 6.5 材料取合せロジックの全体フロー

### 6.4.1 材料振当ロジック

材料使用のマッチングが可能な取合せの内で、材料振当上の良否基準を点数化し、チャージ分散防止条件を守りながら重量ベースで振当を行うこととする。こ

の処理は、鋼塊を対象とする振当（以下、鋼塊振当という）とビレットを対象とする振当（以下、ビレット振当という）を2つに分離して行う2段階振当処理とした。

#### <アルゴリズム>

##### [Step1] 注文のグルーピング

ビレット外径，材料仕様（材質，規格，特殊仕様，溶製法など）の同一の注文を集約し，注文グループとする。

##### [Step2] 材料のグルーピング

鋼塊，ビレットを鑄型（あるいは外径），チャージ（溶製法，注入法）で集約し，材料グループとする。

##### [Step3] 振当良否点数付け

振当上の条件を考慮して，材料仕様のマッチングが可能なものについて振当良否点数をつけ，振当良否マトリックスを作成する。具体的には，振当良否点数付けのルールは，次の通りである。

###### (a) 注文の品質が高い場合

$$\begin{aligned} \text{振当良否点数} = & (\text{材料の使用優先点}) + (\text{注文の品質グレード点}) \\ & + (\text{材料の品質グレード点}) + (Z) \end{aligned}$$

###### (b) 注文の品質が比較的高い場合

$$\begin{aligned} \text{振当良否点数} = & (\text{材料の使用優先点}) - (\text{注文の品質グレード点}) \\ & - (\text{材料の品質グレード点}) \end{aligned}$$

ただし，(Z)は注文と材料の溶製法が一致したときに大きな値に設定されるとしている。また，材料の使用優先点，注文あるいは材料の品質グレード点は事前に既知であるとする。

この振当良否点数付けの結果からは，図6.6に示すように，振当点数は左上隅（北西隅）が大きくなることがわかる。



材料の品質 グレード 点 注文の 品質 グレード 点	大	中	小
大	大		
中		中	
小			小

図 6.6 振当良否点数付け体系

なお、振当良否マトリックスの例を図6.7に示す。

← 高グレード

注文グループ	材料グループ	鋼塊										ヒレット							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	51	52	53	54				
		A	A	B	A	A	C	C	A	A	B	B	C	A	A				
		下注	下注	下注	下注	下注	上注	上注	下注	下注	下注	下注	下注	下注	下注				
注文グループ	特別仕種	溶製法	注法	注法	注法	注法	注法	注法	注法	注法	注法	注法	注法	注法	注法				
①	A	-	A	257 ○	257 ○	×	256 ○	247 ○	148	147	×	×	×	×	×	145	×	230 ○	
②	B	A	-	155	155	×	154	145	146	145	×	×	×	×	×	140	143	128	
③	B	B	A	×	255 ○	×	254 ○	245 ○	146	145	×	×	×	×	×	×	×	228 ○	
④	B	C	C	×	×	×	×	×	246 ○	245 ○	×	×	×	×	×	×	×	×	
⑤	C	D	-	-79	-79	-83	-78	-73	-68	-67	-71	-72	×	×	×	-66	-64	-57	-64
⑥	D	-	-	-71	-71	-77	-70	-65	-60	-59	×	-64	×	×	×	-58	-56	-49	-56
⑦	E	-	-	-66	-66	-70	-65	-60	-55	-54	-58	-59	×	×	×	-53	-51	-44	-51
⑧	F	-	-	-65	-65	-69	-64	-59	-54	-53	-57	-58	-33	×	×	-52	-50	-43	-50

↑ 高グレード

凡例

⊗: 振当不可

○: 溶製法が一致するもの

図 6.7 振当良否マトリックス

[Step4] 鋼塊の振当処理（第一段階の振当処理）

振当良否点数の大きいペア（例えば図6.7の㊸-㊹）の順に①注文グループの重量を満足し，②注文のチャージ分散が少なく，かつ③少量の材料が残らないように各注文グループにどの材料が振当てられるかの計算処理を行い，チャージ数を求めておく（図6.8参照）。

[Step5] ビレットの振当・切断処理（第二段階の振当・切断処理）

〔処理A〕仮の対応づけ処理

ビレット在庫を対象として，振当良否マトリックスの振当良否点数の大きいペア（例えば図6.7では㊸-㊺）の順に注文グループと材料グループに仮の対応をつける。

〔処理B〕ビレットでの振当可能なチャージ数を計算する

仮の対応付けられた注文グループに含まれる注文別に，(i)現在までに振当てられたチャージ数（ $=C_A$ ），(ii)鋼塊の振当処理にて振当見込になったチャージ数（ $=C_N$ ），(iii)チャージ分散許容数（合計）（ $=C_L$ ）としたとき，ビレットでの振当可能なチャージ数は次式にて求めることができる。

$$\left[ \begin{array}{l} \text{ある注文のビレットでの} \\ \text{振当可能なチャージ数} \end{array} \right] \\ = \min \left\{ C_L - (C_A + C_N), \left[ \begin{array}{l} \text{ビレットでの振当} \\ \text{可能なチャージ数} \end{array} \right] \right\}$$

〔処理C〕ビレットの切断処理

各注文のビレットでの振当可能なチャージ数内で，ビレット1本ごとの取合せを行い，歩留が設定値（例えば98.5%）以上のとき振当決定とし，そうでないときは，振当をやめる。（ここでは後述する材料切断ロジックを使用している）

〔処理D〕すべての振当可能なペアについて行えば終了。そうでなければ，

〔処理A〕へ戻る。

注文グループ	特別仕様	材料重量 ton	製造法	材料重量 ton	材料グループ										量の対応	チャージ分散		
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		振当数	許容数	
					海製法	A	A	B	A	A	C	C	A	A				B
					注入法	下注	下注	下注	下注	下注	上注	上注	下注	下注				下注
					チャージ重量 ton	1	2	3	2	4	5	5	4	6				7
20.5	20.5	8.7	17.5	14.5	2.8	2.8	2.9	20.5	8.8									
①	A	-	A	2.2	2.2										OK	1	1	
②	B	A	-	0.7	0.7										OK	1	1	
③	B	B	A	0.9											OK	1	1	
④	B	C	C	3.7						2.8	0.9				OK	1	2	
⑤	C	D	-	2.2									2.2		OK	1	2	
⑥	D	-	-	6.9									6.9		OK	1	制約なし	
⑦	E	-	-	2.7									2.7		OK	1	制約なし	
⑧	F	-	-	12.2									2.9	0.5	8.8	OK	3	制約なし

図 6.8 振当結果  
(注文グループ-材料グループ対応付けと振当量)

## 6.4.2 材料切断ロジック

### 6.4.2.1 問題の概念

注文グループと振当処理により対応づけられた材料グループを前提に、各材料に対する切断箇所（あるいは切断長さ）を決定するものである。その際、前節6.2.2.2に述べた材料切断問題における条件を考慮することになる。

図6.9に問題の概念図を示す。

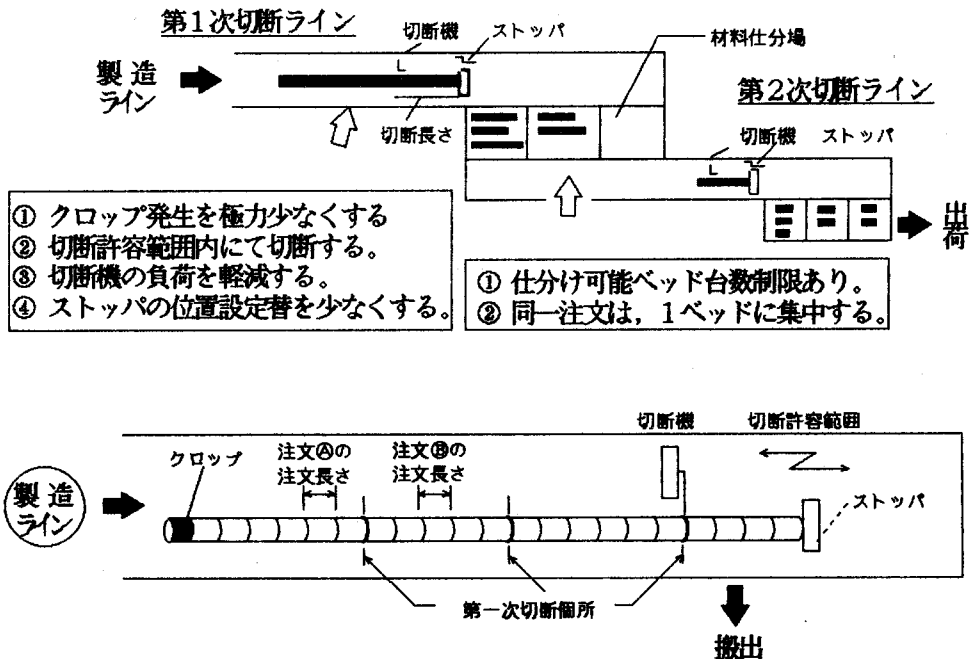


図 6.9 材料切断問題の概念図

### 6.4.2.2 問題の特徴

継目無鋼管を対象にした材料取合せにおいては、1本の材料長さに対して注文が約20個取合せられる。表6.1に取合せ計算の代表例を示す。解法としては、注文の優先順を種々かえて約10回繰返した後に、(i)チャージ分散防止条件を満足し、(ii)評価指標（歩留、切断作業性）が最大となる結果を得るという方法を基本としているが、これに加えてさらに、

- a) 取合せパターンは、注文長さではなく、注文長さの倍尺（倍尺長）を基にして決定されなければならない。

b) 注文長さは、最小切断許容長さより短いものがあるので、

(i) 表6.1の注文⑦のように小口の注文の場合、単独では第一次切断できないので図6.10のように他の注文と組合せる。

(ii) 注文①②③のように始めは、注文個数が多くても、取合せを進める途中（取合せ中）で、小口的残り方（残った注文単独では倍尺長にならない状態）になっては不可である。

ことも考慮しなければならない。

表 6.1 材料切断問題の例題

注 文 明 細			材 料 明 細		
注 文	注 文 長 さ (mm)	注 文 個 数 (本)	材 料	材 料 長 さ (mm)	本 数 (本)
①	450	32	①	13736*	5
②	530	45	②	13777	3
③	655	77	③	13696	3
④	735	91	④	13736	6
⑤	820	18			
⑥	940	58			
⑦	610	1			

\* 鋼塊重量よりの計算値

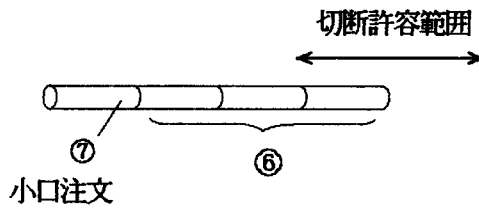


図 6.10 小口注文の取合せ

### 6.4.2.3 第一次切断長さ決定問題

評価指標が最大となる取合せパターンを求める時に、例えば図6.11のような結果が得られる場合があるが、これを第一次切断時の条件、例えば、切断許容範囲等を考慮して切断長さ（あるいは切断個所）を決定することが必要となる。

〈取合せ歩留が最大の取合せパターン〉

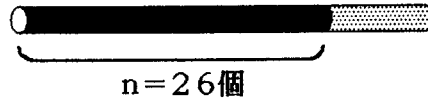


図 6.11 取合せパターン(例)

第一次切断長さの決定は、次に示す組合せ型の多目的最適化問題として定式化できる。

[第1次切断長さ決定問題]

$$\left. \begin{array}{l} n = \text{取合わされた注文本数 (正の整数)} \\ m = \text{倍尺数} \quad ( \quad // \quad ) \\ x = \text{切断回数} \quad ( \quad // \quad ) \end{array} \right\} \quad (6.1)$$

とする。

制約条件としては、

$$n = m \times x + r \quad (6.2)$$

ただし、 $r$ は切断端数であり、非負整数値である。

評価指標としては、①切断回数最小 ②ストッパの移動量最小、すなわち切断長さが揃っていることであるから、

$$\text{①の場合には} \quad x + 1 \rightarrow \text{Min} \quad (6.3)$$

$$\text{②の場合には} \quad |m - r| \rightarrow \text{Min} \quad (6.4)$$

となるべきである。すなわち、第一次切断長さ決定問題とは、(6.1)、(6.2)式及び切断許容範囲条件のもとで(6.3)、(6.4)式を最小化する問題である。

そこで、この2つを組合せて総合評価指標( $f$ )を作成することにした。

(i)  $r > 0$  (倍尺数 $m$ 未満で切断される) 場合

$$f \stackrel{\Delta}{=} (x + 1) \times (m - r) \quad (6.5)$$

(ii)  $r = 0$  (すべて倍尺数 $m$ にて切断される) 場合

$$f \stackrel{\Delta}{=} 2x - 1 \quad (6.6)$$

例えば、 $n=26$ の場合には、図6.12に示すように、切断パターン②の9, 9, 8が採用されるし、 $n=24$ の場合には、図6.13に示すように、切断パターン③の8, 8, 8が採用されたことを示している。

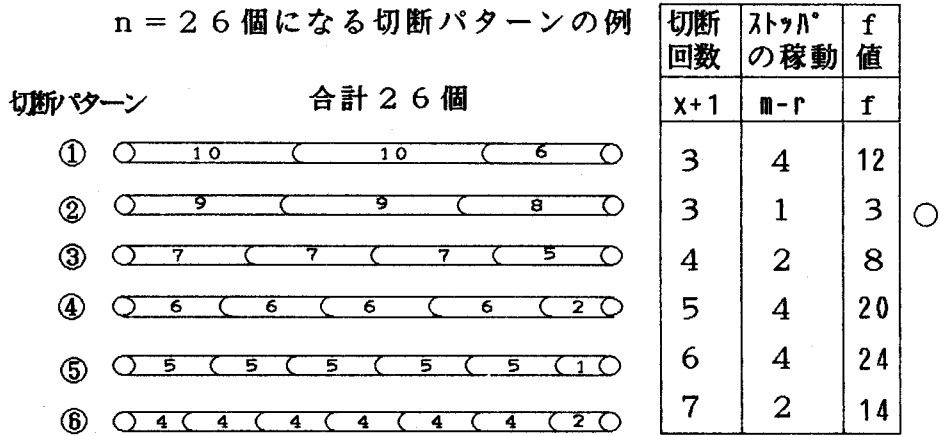


図 6.12 作業能率を考慮した第一次切断長さの決定( $n=26$ の場合)

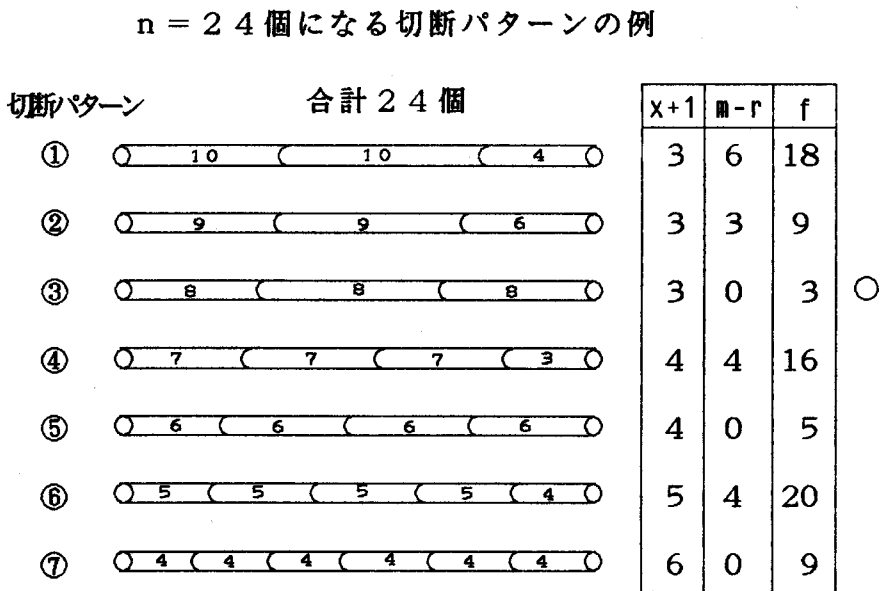


図 6.13 作業能率を考慮した第一次切断長さの決定( $n=24$ の場合)

#### 6.4.2.4 解法の手順

これらの継目無鋼管を対象とした材料切断ロジック・フローを図6.14に示す。これは、前節6.3.2で述べた汎用的プログラム・パッケージSCOOPの処理の基本フローといえるものであり、材料取合せ処理の一部として使用される場合以外に、単独にても使用可能である。



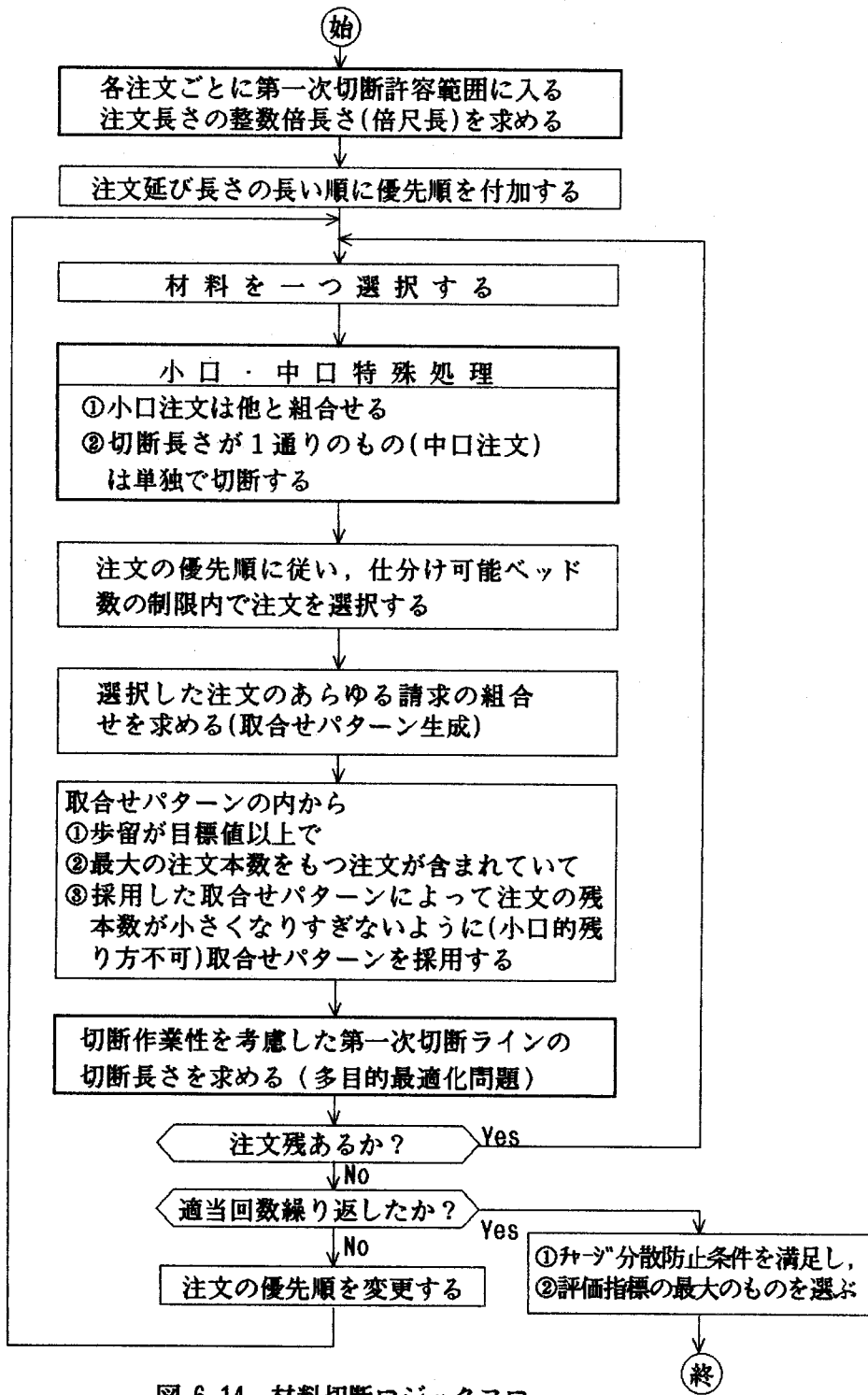


図 6.14 材料切断ロジックフロー

## 6.5 結果

前述(表6.1)の取合せ計算を行う。

第一次切断ラインの切断許容範囲を1200~4600, 仕分け可能ベッド台数を3としたときの取合せ結果を表6.3に示す。また, 種々のシミュレーション結果と計算時間を表6.4に示す。

表 6.2 数値例(再掲)

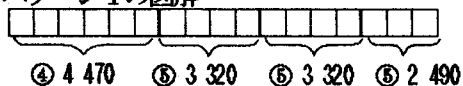
注文明細			材料明細		
注文	注文長さ(mm)	注文個数(本)	材料	材料長さ(mm)	本数(本)
①	450	32	①	13736*	5
②	530	45	②	13777	3
③	655	77	③	13696	3
④	735	91	④	13736	6
⑤	820	18			
⑥	940	58			
⑦	610	1			

\* 鋼塊重量よりの計算値

表 6.3 取合せ結果

パターン	材料長さ(mm)	取数	注文取数							成品合計長さ(mm)	1A*への歩留(%)	仕分台使用数(個)
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦			
1	13 736	1				6	1	1		13 600	99.01	2
2	↓	1				15	3			13 670	99.52	2
3	↓	1			2	12	4			13 590	98.94	2
4	↓	2			12	26				13 680	99.59	2
5	13 777	2			10	28				13 760	99.88	2
6	↓	1			16	4				13 620	98.86	1
7	13 696	2		4	0				6	13 650	99.66	3
8	↓	1		5	4				8	13 580	99.15	2
9	13 736	2			24				1	13 680	99.59	2
10	↓	1			9				8	13 590	98.94	1
11	↓	1	3						1	13 730	99.96	2
12	↓	1	7						1	13 670	99.52	1
13	↓	1	2	2					1	10 120	73.68	0
		17	32	45	77	91	18	58	1		97.41	

[参考] パターン1の図解



計画余材発生

表 6.4 シミュレーション結果

ケースNo.	注文の数	歩留 (%)	CPU時間 (秒*)
1	5	95.71	1.0
2	5	96.03	1.0
3	6	97.73	1.1
4	4	97.53	1.0
5	20	98.51	8.6

(\* UNIVAC 1106)

なお、表6.3の取合せ結果には、一定長さの切断代を考慮している。

## 6.6 結言

継目無鋼管素材を対象とした材料取合せ問題を「2段階切断工程をもつ材料取合せ問題」ととらえ、実用的なロジックの開発とその有効性を明らかにした。材料取合せの問題は、歩留Maxと現場作業性からくる種々の条件とをうまくバランスさせることが要求され、しかも後者については市況によりそのウェイトが変わり、また生産形態の変化により内容的にも変わってゆくものである。本ロジックは、ヒューリスティックな近似解法を採用しているが、従来の人による結果に比べて充分よい解が短時間で得られており、しかも上で述べた作業条件が変化した場合にも柔軟に対応できるので極めて実用性の高いアルゴリズムである<sup>12) 13) 14) 15)</sup>。

## 第7章 結 論

近年、製造業においては、需要構造の多様化・高級化の進展に伴い、多品種・小ロットに対応した新しい生産・物流管理方式の構築が不可欠となってきている。鉄鋼業においても例外でなく、注文構成の多品種化・小ロット化・短納期化が急速に進んでおり、これへの対応策が求められているが、単に新設備・新機器の導入による機能向上のみにとどまらず、工場内の設備群、物流方式そのものをリフレッシュし、かつそれを基盤として生産・物流管理システムを構築する必要がある。

本研究は、このような背景下にあつて、鉄鋼生産プロセスを離散事象物流システムととらえ、数理的視点からのアプローチを行い、

- (1) 既存工場、既存物流方式のリフレッシュに伴う生産システム・物流システムの再設計における多目的最適化の方法論の提案と実システム適用による評価
- (2) (1)によるシステム再設計の結果をベースとして、日々の注文の生産・物流に関する多目的最適化の方法論の提案とその実システム適用による評価を行ったものである。

以下に第1章から第6章までの内容と研究成果を要約する。

第1章では、本研究の背景・目的と意義及び各章の概要について述べた。

第2章では、多品種・小ロットに対応した大規模生産計画システムについて述べた。ここでは、新しい生産・物流管理方式として、受注～生産～出荷にかかわるすべての注文（現品）の動きの先読みを行って、製鉄所全体の‘物の流れ’を一貫して計画・管理する「生産・物流統合管理システム」と、その中核として全注文を対象に鑄込～圧延～精整～出荷までの全製造工程の一貫した操業計画を立案するシステムとして「一貫操業計画システム」を提案した。

以下にその内容と結果をまとめる。

(1) 製造業における操業計画問題の特徴を明確化した。

- ① 対象となるロット数・種類が多く、通過工程数も多岐にわたる（大規模・多品種・多段階工程）。
- ② 設備・操業に関する制約条件が複雑かつ多数である（多制約）。
- ③ 評価指標が複数である（多目的）。

- ④ 数理的視点から見て問題のタイプが単一でなく、複数のスケジューリング問題の結合であり、その内部に組合せ問題をも包含している場合もある（複合型スケジューリング問題）。
  - ⑤ 日々の生産管理システムとして運用されるために、短時間求解が必須である。
- (2) (1)に示した大規模複合型多目的スケジューリング問題について、問題の構造・特性を利用した実用的な解法の開発とその方法論を述べた。すなわち、
- ① 大規模な問題を生産形態・工程形態の視点から小問題に分割する
  - ② ①の分割を用いても個々の小問題は依然大きく、かつ多目的・多制約であることから、シミュレーションによる解法を基本として、
    - a) 問題のタイプにより効率の良いシミュレーション方式を選定する
    - b) スケジュール案の最終結果の先読みを行い、結果が悪くならないように途中のスケジュール結果をガイドする役目をもつヒューリスティックスを組込む
- 等である。
- (3) 結果として、充分満足いく解が短時間（約20分）にて得られ、日々の生産管理システムとして実用化されている。効果として、省力、輸送コスト削減・在庫量の圧縮等大幅な合理化を達成した。また、あわせて出荷平準化も可能であることを明らかにした。

第3章では、鉄鋼生産プロセスのうち重要な工程である製鋼工程におけるトライ選択問題を多目的組合せ最適化問題としてとらえ、満足化トレードオフ法を適用した新しい工程管理技法を提案したものである。すなわち

- (1) トライ選択問題を複数の非線形目標関数をもつ0-1整数計画問題に定式化できることを示した。
- (2) 本問題が基本的には組合せ問題であることを示し、問題の特性を利用して変換を行った上で、内部経路法を活用したMin-Max法と満足化トレードオフ法とを組合せた実用的解法を提案した。
- (3) 結果として、本方法が希求水準として絶対値（例えば工程管理上の諸元値）を選定することで、意思決定者の判断を反映できるという点で、非常に有効性が高いことを示した。

第4章では、多品種・小ロット化環境下において、既存工場リフレッシュに対応した生産システムの再設計への合理的方法論を提案したものである。特にライン設備能力の評価法として、実際規模の生産システムへの適用可能な方法を提案するものである。

本方法の技術的基盤として、最近急速に進歩しており、産業界への普及力の高い離散型シミュレーション技術を活用している。さらに、シミュレーション技術課題である試行錯誤的方法を回避し、かつ設備改善投資コストを最小化するという意味での最適化を図るためにネック設備を自動的に特定する新指標を開発した。

すなわち、

- (1) シミュレーションモデル作成の工数削減のために、シミュレーション専用言語を使用し、従来型言語とのハイブリッド型構成法とした。これにより、理論上は大規模・複雑な生産システムであってもその物の動きの挙動は表現可能である。
- (2) シミュレーションの試行錯誤的方法の回避と設備改善投資コスト最小化という意味の最適化を図るために、ライン能率を律則する設備（ネック設備）を自動的に特定できる新指標を考案した。
- (3) この新指標に基づいてライン設備能力再設計の一連のシミュレーション手順を確立した。
- (4) 本方法を実際の大規模フローショップ型生産システムの再設計に適用し、有効性を確認した。

第5章では、製鉄所における構内物流効率化に際し、物流システムの再設計に関する方法を提案した。すなわち、

- (1) 大量輸送方式であるトレーラー&パレット輸送方式導入に際し、ミルエンドに置くべきパレットの置場容量の決定を投資コスト・輸送コストを勘案して検討した。
- (2) 具体的には、「シミュレーションと線形探索法」を組合せた新しい設計法を提案し実システム設計に適用し、当初案に比べ物流コスト削減が可能であることを示している。
- (3) 一般的に、離散事象として表現される物流システムは、その挙動を陽に正確に表現できることが極めて少なく、このようなシステムの設計技法として、ここで提案した方法は非常に実用的であり、かつ適用範囲が広い。

第6章では、注文の多品種・小ロットに対応した大規模材料計画システムについて述べたものである。従来からオペレーションズ・リサーチの分野で「一次元材料切断問題」と扱われてきたものに対して実践的な視点から新方式を提案したものである。すなわち、

- (1) 材料計画問題は、鉄鋼業特有の問題形態と関連しており下記の特徴をもつ。
  - ① 単に材料切断問題だけでなく、材料の振当問題を内在している複合型である（複雑・複合型）。
  - ② 評価基準が複数である（多目的）。
  - ③ 短時間求解が必要である（短時間）。
- (2) (1)に示した大規模複合型の組合せ問題に対して問題の構造を利用した実用的な解法の開発と解法案出の方法論を述べた。すなわち、
  - ① 大規模な問題を「材料切断問題」と「材料振当問題」に分離した。
  - ② 材料切断問題では、素材単位の歩留最大化と作業性の確保を切り離した。まず、選択した注文のあらゆる請求の組合せを求め、その内から歩留が予め設定した目標値以上のものを一つ決める。そこで、つぎに切断能率、ストッパーの移動量等の複数の作業性を考慮した多目的最適化問題を解き、第一次切断長さを決定することとした。
- (3) 結果として、充分満足いく解が短時間で得られており、日々の生産システムとして、実用化されている。効果として、歩留向上、在庫圧縮を達成した。

以上のとおり、本研究は、多品種・小ロットに対応した新しい生産・物流管理方式の構築に関して、実際規模のシステムを対象とした数理的方法論の提案とその適用・評価を行ったもので、極めて実用的であり、その研究成果の意義は高いと思われる。

最後に、今後の研究課題を列挙すると、次のとおりである。

- ① 本論文では、大規模スケジューリング問題について解の最適性を向上させる狙いで、スケジュールの結果を「先読み」するヒューリスティックスの導入を提案したが、更に広範囲なスケジューリング問題に適用可能な「先読み」の技法の開発を行うこと。
- ② 本論文では、製鋼工程の多目的計画問題としてトライ選択問題を対象としたが、更にチャージ編成・トライ編成をも含めた製鋼生産計画全体を対象とした多目的最適化法の開発を行うこと。
- ③ 本論文では、生産システム設計について、フローショップ型生産システムに

対する合理的な方法を提案したが、この方法をジョブショップ型生産システムに対して拡張すること。

- ④ 本論文では、2段階切断工程を対象とした材料取合せ問題における多目的最適化法を提案したが、更に次元を拡張した計画問題、特に、輸送計画システムに関する三次元取合せ問題へ展開してゆくこと。



## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切な御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学工学部 田村坦之教授に深甚の謝意を表します。

本論文の完成にあたり、御多忙中にもかかわらず種々の有益な御教示を賜りました大阪大学工学部 岩田一明教授、井川直哉教授、辻毅一郎教授に厚く感謝の意を表します。

大阪大学の学部、大学院在学中より御指導・御教示を賜りました大阪大学工学部川邊秀昭教授、芳井熊安教授、片岡俊彦教授、梅野正隆教授、森 勇蔵教授、岸田敬三教授、そして多くの御助言と御支援を賜りました精密工学教室の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

本研究は、筆者が住友金属工業(株)中央技術研究所に入社以来行ってきた研究業務に関連するものであり、その間研究内容に関する深い御理解を示され、御指導・御支援を賜りました取締役システムエンジニアリング事業本部長 美坂佳助博士、同和歌山システム部部长 徳山博于博士に心より感謝の意を表しますとともに、本社・各所の関係各位に深く感謝致します。

特に、多目的計画法の研究について、多くの御助言・御指導を賜りました甲南大学 中山弘隆教授に謝意を表します。

また、シミュレーション技術の研究については、豊富な御助言・御指導を頂きました早稲田大学 森戸 晋教授、神戸大学 藤井 進教授に謝意を表します。

また、種々の問題解決に協力して当たり、御助言を頂いたシステムエンジニアリング事業本部 故家長吉行氏、安田秀一氏、樽井賢治氏、斎藤 肇氏、中川義之氏、外嶋成留氏、谷崎隆士氏、樫 保夫氏、武田甚一氏及び神谷陽子氏に併せて衷心より感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

### [第1章]

- 1) 岩田：新しい生産システム-CIM, システム制御情報, Vol. 34, No. 3, pp. 123-127, 1990
- 2) 大野：トヨタ生産方式, ダイヤモンド社, 1978
- 3) 大槻：トヨタの新かんばん方式, 中経出版, 1985
- 4) 藤本：アメリカ式かんばんシステム-MRPによる工場改革-, ダイヤモンド社, 1983
- 5) 人見ら：GTによる生産管理システム, 日刊工業新聞社, 1981
- 6) (財)流通システム開発センター編：多品種少量物流の実際, 流通システム開発センター, 1986
- 7) 岩田他：生産システム学, 精密工学講座13, コロナ社, 1982
- 8) 人見：生産管理工学, コロナ社, 1983
- 9) 人見：生産システム工学(第2版), 共立出版, 1983
- 10) 佐治, 白根, 横井, 大前：オペレーションズ・リサーチ理論と実際, 培風館, 1963
- 11) 加瀬, 森：コンピュータとOR, 日刊工業新聞社, 1970
- 12) 近藤：オペレーションズ・リサーチの手法, ORライブラリー2, 日科技連, 1973
- 13) 坂口：数理計画法, 数理科学シリーズ4, 培風館, 1968
- 14) 刀根：オペレーションズ・リサーチ読本, 日本評論社, 1984
- 15) 広中編集：現代数理科学辞典, 大阪書籍, 1991
- 16) 徳山, 家長, 上野, 大西：生産管理へのOR技術の適用, 住友金属, Vol. 38, No. 4, pp. 184-190, 1986

### [第2章]

- 1) 第1章の文献 1)
- 2) 上野, 中川, 樫：一貫製鉄所における生産・物流統合管理システム-多品種多段階工程操業スケジューリングの実用的解法, 第8回数理計画シンポジウム論文集, pp. 79-91, 1987

- 3) 室賀, 大野, 猪又, 石井, 上野: 小倉製鉄所における物流効率化システムの開発, 住友金属, Vol. 39, No. 1, pp. 65-75, 1987
- 4) N. Ueno, Y. Nakagawa, Y. Katagi and A. Inui: New Production & Material Flow Control System in Steel Works, 13th International Symposium on Mathematical Programming (Tokyo), 1988
- 5) 上野, 中川: シミュレーション最適化の組合せによる生産・物流統合管理システム, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 35, No. 5, pp. 273-279, 1990
- 6) 上野: 多品種少量生産工場の自動スケジューリング, 堺市先端科学技術シンポジウム テクノ・フュージョン'90 分科会テキスト, pp. 136-143, 1990
- 7) 上野, 樫ほか: 糸鋼素材生産工程における一貫操業スケジューリング, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会77"ストラク集, 1-E-4, pp. 125-126, 1987
- 8) 上野, 中川ほか: 設備選択問題を含む多品種多段操業スケジューリング, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会77"ストラク集, 2-D-11, pp. 238-239, 1986
- 9) 上野, 中川ほか: 大規模多目的割当問題の効率的解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会77"ストラク集, 2-C-4, pp. 134-135, 1986
- 10) R. W. Conway, W. L. Maxwell, L. W. Miller (関根監訳): スケジューリング理論, 日刊工業新聞社, 1971
- 11) 鍋島: スケジューリング理論, 森北出版, 1974
- 12) K. R. Baker: Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons Inc. N.Y., 1974
- 13) R. T. Nelson, R. K. Sarin, R. L. Daniels: Scheduling with Multiple Performance Measures - The One Machine Case, Management Sci., Vol. 32, pp. 464-479, 1986
- 14) S. I. Gass: Linear Programming-Methods and Applications, Third Edition, McGraw-Hill, 1969
- 15) W. Orchard-Hays (高橋・出居監修): コンピュータによる線形計画法, 培風館, 1973
- 16) 金田: ORによる輸送・運搬計画, 内田老鶴園新社, 1977
- 17) 徳山, 上野, 藤田: フローショップ型の多品種製造ライン操業スケジューリング, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会77"ストラク集, 2-E-5, pp. 233-234, 1982

- 18) 谷崎, 上野, 小坂, 谷本, 本間: 鉄鋼生産における大規模スケジューリング問題とその解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会77"ストラ外集, 2-B-4, pp. 152-153, 1990
- 19) 上野, 中川, 北野, 重岡, 末田, 宮崎: 鋳込ロット編成における割当て問題の効率的解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会77"ストラ外集, 2-E-1, pp. 218-219, 1990
- 20) 上野, 中川, 熊本: ファジィ理論の鉄鋼操業スケジューリングへの応用, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 中国四国支部 ファジィとOR研究部会, 1990
- 21) 中川, 上野, 茨木: ジョブショップ型多品種多段階生産計画問題における実用的解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会77"ストラ外集, 1-C-6, pp. 66-67, 1988
- 22) 上野, 中川: 物流効率化とシミュレーション, 日本OR学会, Vol. 34, No. 7, pp. 339-341, 1987

### [第3章]

- 1) 市川編: 多目的決定の理論と方法, 計測自動制御学会, 1980
- 2) R. L. Keeney, H. Raiffa (高原, 高橋, 中野監訳): 多目標問題解決の理論と実例, (株)構造計画研究所, 1980
- 3) A. Charnes and W. Cooper: Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, Vol. 1, Wiley, 1961
- 4) J. P. Ignizio: Linear Programming in Single and Multiple Objective Systems. Prentice Hall, 1982
- 5) J. Spronk: Interactive Multiple Goal Programming. Martinus Nijhoff Publishing, 1981
- 6) R. E. Steuer: Multiple Criteria Optimization Theory, Computation and Publication. Wiley, 1986
- 7) 田村: 多目的意思決定—理論と応用Ⅱ, Ⅲ, 効用理論(その1)(その2), システムと制御, Vol. 30, 1986
- 8) M. Zeleny: Multiple Criteria Decision Making. McGraw-Hill, 1982
- 9) M. Grauer, A. Lewandowsky and A. P. Wierzbicki: DIDASS-theory, Implementation and Experiences(eds. M. Grauer and A. P. Wierzbicki). Interactive Decision Analysis, 1984

- 10) 中山：多目的意思決定—理論と応用V，対話型計画法，システムと制御，Vol. 31, 1987
- 11) H. Nakayama and Y. Sawaragi : Satisficing Trade-off Method for Interactive Multiobjective Programming Methods (eds. M. Grauer and A. P. Wierzbicki). Interactive Decision Analysis, Springer, pp. 113-122, 1984
- 12) Y. Sawaragi, H. Nakayama, and T. Tanino : Theory of Multiobjective Optimization, Academic Press, 1985
- 13) 徳山, 上野, 中川, 中山, 田村：トライ選択問題における多目的計画法，日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会77"ストラク集，2-A-8, pp. 151-152, 1989
- 14) 上野, 中川, 徳山, 中山, 田村：鉄鋼製造プロセスにおけるトライ選択問題への多目的計画法の応用，オペレーションズ・リサーチ，Vol. 35, No. 12, pp. 656-661, 1990
- 15) N. Ueno, Y. Nakagawa, H. Tokuyama, H. Nakayama, H. Tamura : A Multi-Objective Planning for String Selection in Steel Manufacturing, European Journal of OR (Submitted)
- 16) T. C. Hu (伊理監訳)：整数計画法とネットワーク・フロー，培風館，1975
- 17) 今野：整数計画法（講座 数理計画法6），産業図書，1981
- 18) F. S. Hillier : Efficient Heuristic Procedures for Integer Linear Programming with an Interior. Operations Research, Vol. 17, pp. 600-636, 1969
- 19) T. Ibaraki, T. Ohashi and H. Mine : A Heuristic Algorithm for Mixed-Integer Programming Problem. Mathematical Programming Study, Vol. 2, pp. 115-136, 1974

#### [第4章]

- 1) G. G. Hegde and S. Kekre : Capacity Choice, Work-in-process Inventory and Throughput : A Simulation Study. Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference, pp. 662-666, 1988

- 2) M. Simizu and D.V. Zoest : Analysis of a Factory of the Future Using an Integrated Set of Software for Manufacturing Systems Modeling. Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference, pp. 671-677, 1988
- 3) 山口ら (鉄連 I E 委員会編) : 企画スタッフのための戦略課題解法へのアプローチ, 鉄連 I E 委員会, 1988
- 4) A.S. Kiran, A. Schloflen, D. Hawkins : An Integrated Simulation Approach to Design of Flexible Manufacturing Systems ; Simulation, Vol. 52, No. 2, pp. 47-52, 1989
- 5) 上野 : シミュレーション技術の生産システムへの適用, 計測と制御, Vol. 30, No. 2, pp. 134-137, 1991
- 6) 藤井 : フローショップ型生産システムの生産性と機械配置, 日本機械学会論文誌(C編), 48巻430号, (昭和57-6)
- 7) 井山, 石川 : 各工程が異なる機械台数を持つ自動化生産ライン (多工程ラインの近似解法と挙動分析), 日本機械学会論文誌(C編), 56巻529号(1990-1)
- 8) J.G. Shanthikumar and C.C Tien, Management Science, Vol. 29, No. 9, 1069, 1983
- 9) S.M. Meerkov and F. Top : Asymptotically Reliable Serial Production Lines-Analysis, Synthesis and a Case Study-, Preprints of 11th IFAC World Congress, August, pp. 11-13, 1990
- 10) 外嶋, 上野, 武田, 田中, 木村 : 大規模フローショップ型生産ラインの能力評価シミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会77"ストラク集, 2-F-1, pp. 245-246, 1989
- 11) N. Ueno, S. Sotojima, J. Takeda : Large Scale Simulation Model of a Multi-Stage Flow-Shop, TIMS, 1989
- 12) 外嶋, 上野 : 大規模フローショップ型工場のライン能力評価操業シミュレーション, '89.インテリジェントFAシンポジウム前刷集, pp. 47-50, 1989
- 13) N. Ueno, S. Sotojima, J. Takeka : Simulation-Based Approach to Design a Multi-Stage Flow-Shop in Steel Works, Proceedings of the 24th Annual Simulation Symposium, 1991 (to be published)
- 14) 上野, 外嶋, 武田 : 大規模フローショップ型生産工場の設備能力再設計法, システム制御情報学会論文誌 (投稿中)
- 15) A.A.B. Pritsker : Introduction to Simulation and SLAM II, Third Edition, Halsted Press, New York, 1986

- 16) 森戸, 相沢 : SLAM II によるシステムシミュレーション入門 ; 企画センター, 1986
- 17) 上野, 外嶋, 武田 : ジョブショップ型生産工場における搬送を考慮した能力評価シミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会77"ストラ外集, 2-C-9, pp. 192-193, 1990
- 18) 鳩野, 加藤, 外嶋, 上野, 山縣, 田村 : 離散事象システムにおけるシミュレーション言語へのルール記述の導入, '90システム制御情報学会春期大会前刷集, pp. 177-178, 1990
- 19) 鳩野, 加藤, 外嶋, 上野, 山縣, 田村 : 離散事象シミュレーション言語へのルール記述の導入, 第12回知能システムシンポジウム, pp. 25-28, 1990

#### [第5章]

- 1) 第2章の文献 2)
- 2) N. Ueno, N. Nakagawa, Y. Okuno, & S. Morito : Steel Product Transportation and Storage Simulation : A Combined Simulation/Optimization Approach, Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference, pp. 678-683, 1988
- 3) 上野, 中川 : パレット&トレーラー輸送方式検討シミュレーション, 日本オペレーションズ・リサーチ学会システム・シミュレーション部会, 1988
- 4) 第2章の文献 22)
- 5) 第4章の文献 15)
- 6) M. S. Meketon, : Optimization in Simulation : A Survey of Recent Results, Proceedings of 1987 Winter Simulation Conference (A. Thesen, H. Grant, W. David Kelton, eds.) AT&T Bell Laboratories, Holmdel, New Jersey, 58-67
- 7) O. L. Managasarian : Nonlinear Programming, McGraw-Hill, 1969
- 8) L. S. Lasdon (志水訳) : 大規模システムの最適化理論, 日刊工業新聞社, 1973
- 9) 志水 : システム制御と数理計画法—システム最適化の数学的手法, コロナ社, 1971

[第6章]

- 1) 徳山, 上野 : 汎用の一次元取合せプログラム(SCOOP) , 第21回自動制御連合講演会, 3085, 1978
- 2) 徳山, 上野 : 鉄鋼業における材料取合せの研究, 住友金属, Vol. 32, No. 3, pp. 197-216, 1980
- 3) 徳山, 上野 : 鉄鋼業における材料取合せの研究, 第1回数理計画シンポジウム論文集, pp95-104, 1980
- 4) H. Tokuyama, N. Ueno, : The Cutting Stock Problems in the Iron and Steel Industries, Proceedings of the Ninth IFORS International Conference on OR, pp. 809-823, 1981
- 5) H. Tokuyama, N. Ueno : The Cutting Stock Problem for Large Sections in the Iron and steel Industries, European Journal of OR, Vol. 22, pp. 280-292, 1985
- 6) 徳山, 上野, 豊田 : 鉄鋼業における材料取合せの研究, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 28, No. 2, pp. 64-70, 1983
- 7) C. B. Tilanus, C. Gerhart : An Application of Cutting Stock in the Steel Industries, Operational Research '75(Proc. IFORS 7th Congress), Amsterdam, North-Holland, 1976
- 8) P. C. Gilmore, R. E. Gomory : A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem, Opns, Res. 9, pp. 849, 1961
- 9) P. C. Gilmore, R. E. Gomory : A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem-PART II, Opns, Res. 11, pp. 863, 1963
- 10) P. C. Gilmore, R. E. Gomory : Multi-Stage Cutting Stock Problems of Two and More Dimensions, Opns, Res. 13, pp. 94, 1965
- 11) P. C. Gilmore, R. E. Gomory : The Theory and Computation of Knapsack Functions, Opns, Res. 14, pp. 1045, 1966
- 12) N. Christofides, C. Whitelock : An Algorithm for Two-Dimensional Cutting Problems, Opns, Res. 25, pp. 30, 1977
- 13) N. Ueno, H. Saito, Y. Kitano, H. Tokuyama : The Two-Dimensional Assortment Problem in the Production of Heavy Steel Plates, Proceedings of the 1st Conference of APORS, 25.1, pp. 289-304, 1988



- 14) 徳山, 上野, 斉藤 : 厚板ミルにおける二次元材料取合せ問題の解法, 日本パ  
レシヨス・リサーチ学会秋季研究発表会77"ストラ外集, 2-B-6, pp. 123-124, 1984
- 15) H. Tokuyama, N. Ueno, H. Saito : Advanced Slab Preparation Method for  
Heavy Plates, Transactions of ISIJ, Vol. 24, B-182, 1984

# 図表リスト

## 図リスト

### [第1章]

- 図 1.1 ブレークダウン型生産形態 ..... 2

### [第2章]

- 図 2.1 ある注文の流れ(イメージ) ..... 9
- 図 2.2 生産・物流統合管理システム ..... 10
- 図 2.3 一貫操業計画システム ..... 11
- 図 2.4 圧延・精整工程の概要 ..... 12
- 図 2.5 圧延・精整操業計画問題の概念 ..... 13
- 図 2.6 圧延・精整操業計画ロジック ..... 16
- 図 2.7 圧延・精整操業計画ロジックの処理イメージ ..... 17
- 図 2.8 設備別検査品種区別の処理目標量の決定 ..... 18
- 図 2.9 全製造ロットの精整操業スケジューリング ..... 20
- 図 2.10 仮圧延順序変更 ..... 20
- 図 2.11 設備別仕掛量推移 ..... 21
- 図 2.12 素材生産工程と代表的操業要件 ..... 22
- 図 2.13 素材生産計画問題の概念 ..... 23
- 図 2.14 素材生産計画ロジックの全体構成 ..... 24
- 図 2.15 素材生産形態の特徴 ..... 24
- 図 2.16 解法のアプローチ ..... 25
- 図 2.17 操業スケジューリングの全体処理フロー ..... 26
- 図 2.18 作業タイミング決定法 ..... 27
- 図 2.19 スケジューリング結果例 ..... 29
- 図 2.20 出荷計画問題の概念 ..... 30
- 図 2.21 出荷計画問題(船-ロット-揚地割当イメージ) ..... 33
- 図 2.22 新解法の基本的骨子 ..... 35
- 図 2.23 出荷計画ロジック ..... 36
- 図 2.24 第2ステップ:船-揚港割当処理のフロー ..... 37
- 図 2.25 第3ステップ:船-ロット割当処理のフロー ..... 38

☒ 2.26	第2ステップの図的解釈	39
☒ 2.27	3つのサブシステムの機能関連	40
☒ 2.28	出荷量の平準化	41
[第3章]		
☒ 3.1	トライ選択問題	44
☒ 3.2	各イテレーション毎の評価項目の変化	51
☒ 3.3	トライ選択結果	52
[第4章]		
☒ 4.1	新指標 ( $E_m$ ) に基づくライン設備能力 再設計シミュレーション手順	61
☒ 4.2	対象ラインレイアウト (大規模多段階フローショップ型工場)	62
☒ 4.3	シミュレーションモデルの全体構成	63
☒ 4.4	シミュレーション結果	64
☒ 4.5	代表設備の総合能率(改善前)	65
☒ 4.6	代表設備の総合能率(改善後)	65
☒ 4.7	大規模フローショップ型工場のアニメーション画面(例)	66
[第5章]		
☒ 5.1	物流フロー(工場払い出し~倉庫保管~岸壁出荷)	68
☒ 5.2	新輸送システム	71
☒ 5.3	実データからの製品発生分布の決定法(製品クラス別)	73
☒ 5.4	物流設備とその稼動時間	74
☒ 5.5	工場から倉庫への輸送ルール	76
☒ 5.6	パラメータNと総合指標の関係	79
☒ 5.7	解法の手順	80
☒ 5.8	トレーラー&パレット輸送システムのアニメーション画面	82
☒ 5.9	置場指示・運行指示システム	84

[第6章]

図 6.1	材料の流れ	86
図 6.2	材料取合せ問題とその部分問題	86
図 6.3	第一次, 第二次切断条件	88
図 6.4	材料取合せロジックの基本構成	90
図 6.5	材料取合せロジックの全体フロー	92
図 6.6	振当良否点数付け体系	94
図 6.7	振当良否マトリックス	94
図 6.8	振当結果	96
図 6.9	材料切断問題の概念図	97
図 6.10	小口注文の取合せ	98
図 6.11	取合せパターン(例)	99
図 6.12	作業能率を考慮した第一次切断長さの決定( $n=26$ の場合)	100
図 6.13	作業能率を考慮した第一次切断長さの決定( $n=24$ の場合)	100
図 6.14	材料切断ロジックフロー	102

表 リ ス ト

[第1章]

表 1.1	鉄鋼生産構造の特徴	3
表 1.2	各章の内容	7

[第2章]

表 2.1	スケジューリング問題の理論解法	15
表 2.2	船-揚地の対応	34

[第3章]

表 3.1	トライ明細	45
表 3.2	理想点・希求水準の決定	49
表 3.3	シミュレーション結果	51

[第4章]

表 4.1	2つの設備諸元内容と新指標による計算値	58
表 4.2	各種指標によるネック設備特定法の比較	59

[第5章]

表 5.1	トレーラー&パレット輸送方式導入の骨子	69
表 5.2	シミュレーション仕様	77
表 5.3	シミュレーション結果	81

[第6章]

表 6.1	材料切断問題の例題	98
表 6.2	数値例	103
表 6.3	取合せ結果	103
表 6.4	シミュレーション結果	104