

# シミュレーションと最適化手法の組合せによる 生産・物流統合管理システム

上野 信行, 中川 義之

## 1. 緒言

現在、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・短納期・多頻度納入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いる。各業種は、それぞれの生産形態に適合した改善施策、たとえば、CIM、FMS、カンバン方式、MRP等の構築を推進している。

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・物流体制を整備することによ

うえの のぶゆき, なかがわ よしゆき 住友金属工業㈱ 〒541 大阪市中央区北浜4-8-4

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を図ることが不可欠である。

そこで、近年、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が開発されている[1]。

このシステムは、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’を行なって、この結果にもとづいて‘物’を流す（製造・輸送・保管・納入）ことにより効率化を図ろうとするものである（図1参照）。

本稿は、当社の条鋼生産を担う一貫製鉄所において完成した上記生産・物流統合管理システムとその中核をなす「全注文を対象に製造～出荷までの全工程の一貫した

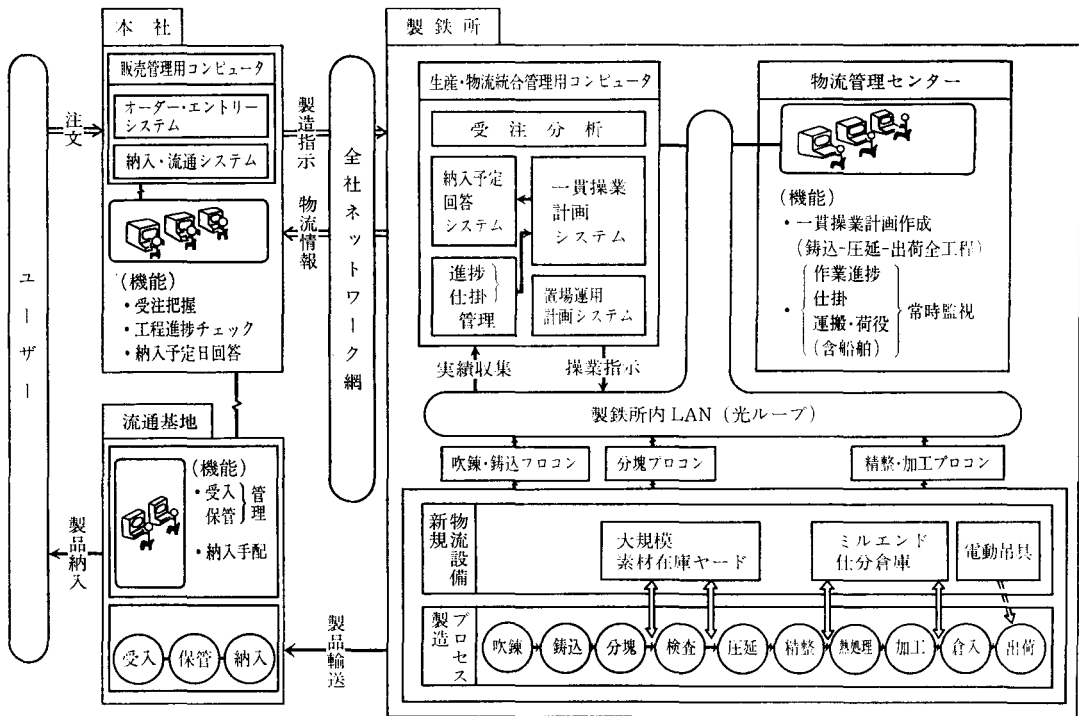


図1 生産・物流統合管理システム

操業計画を立案するシステム（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。本一貫操業計画システムは3つのサブシステムから構成されており、これらは、従来からJob-Shop スケジューリング問題として扱われてきたものである。筆者らは、生産形態の特性に着目し、「シミュレーションと最適化手法の組合せ」による非常に実用性の高いアルゴリズムを開発し、実用化した。

## 2. 鉄鋼生産構造の特徴と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からなる多段の製造プロセスであり、同じ溶鉄から多材質の溶鋼を造り、これをさらに多様な半成品に分割・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。また、各設備は厳しいチャンス条件——同一段取替条件（たとえば、圧延工程では、断面形状の同じ注文群が1つのチャンスとなる——）をもち、本質的には少品種大量生産型である。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。多段階生産工程を通る代表的な‘注文の流れ’のイメージを図2に示す。

このような、チャンス条件の厳しい設備を含む多段階生産工程の生産・物流管理方式としては、従来、個々の製造設備において品質の安定化・高級化と製造コスト低減の観点から段取替最少の操業が望ましいため、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・小ロット化・短納期化に対して、この方式を採用したとすれば、各工程間に莫大な仕掛を保有することになり現実的でない。

そこで、新方式として、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、この計画にもとづいて効率よく‘物を流す’という新しい方式を開発した。

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もとづくシステム（生産・物流管理システム）の構

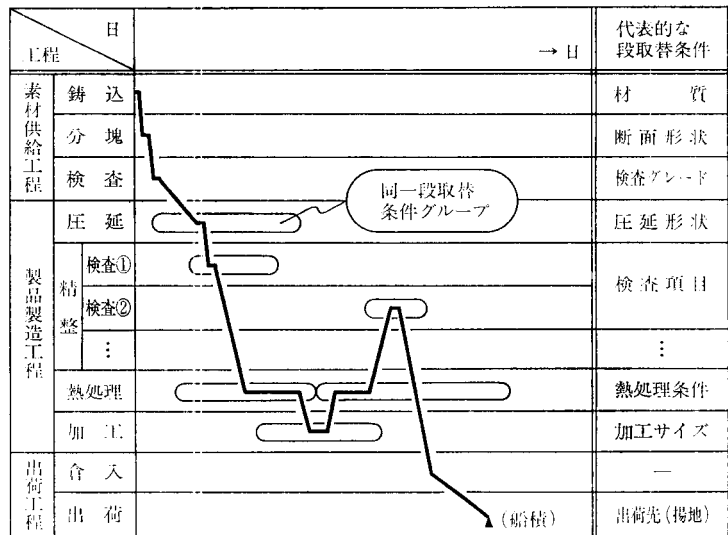


図2 ある注文の流れ

築を行なった。

## 3. 一貫操業計画システムの概要

生産管理統合システムの中核となる一貫操業計画システムについて述べる(図3参照)。

本システムは、基本的には、多段階生産工程における‘物の流し方’を計画管理するものである。

機能としては、新規注文と所内仕掛半製品とを合わせた全製造ロット(約3万件)を対象に、各工程のチャンス条件等の制約条件を厳守し、①上から下工程への円滑な素材供給、②各設備負荷平準化・出荷平準化を図るべく、先1カ月の全工程(約80工程)の操業負荷状況予想およ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)を行なうものである。結果として、月度および日々の操業計画・出荷計画を作成する。

本システムは、素材生産計画、製品生産計画および出荷計画の3つのサブシステムから構成されている。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。

- (1) 素材生産計画—多品種ラインバランス問題[2]
- (2) 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スケジューリング問題[3]
- (3) 出荷計画—大規模多目的割当問題[4]

以下では、代表事例として圧延・精整操業計画の概要

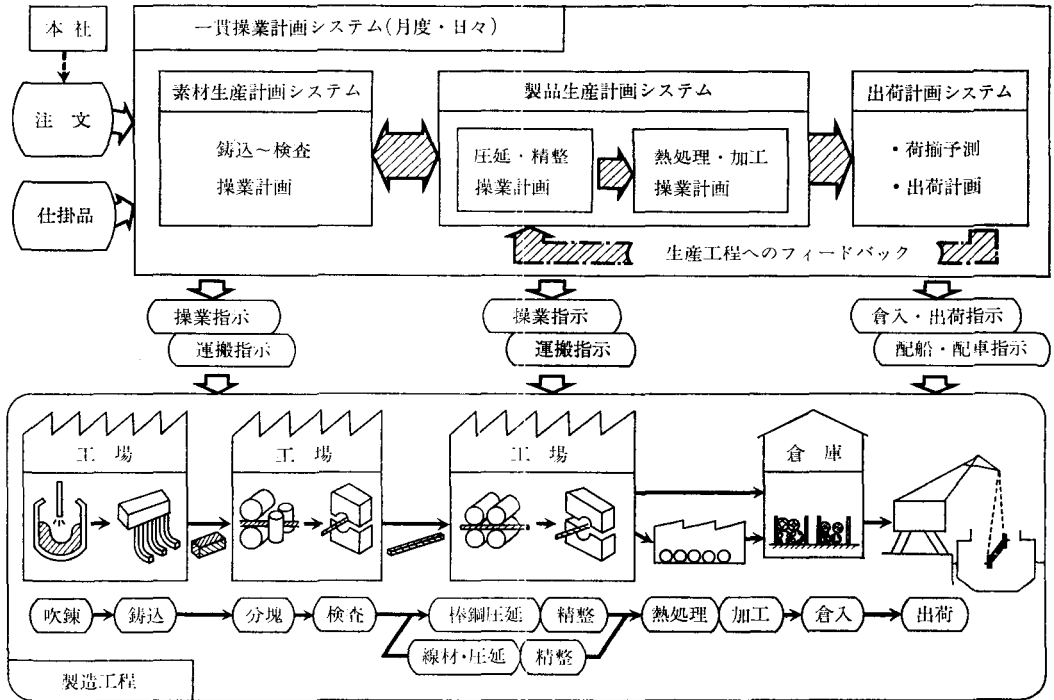


図 3 一貫操業計画システム

について述べる。

#### 4. 圧延・精整操業計画システム

##### 4.1 問題の概念

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、精整工程では、A検査、B検査などのあらかじめ定められた複数の検査工程群を通過する。物流フローとしては、典型的なジョブショップ型である。各検査工程は、通常複数(2-4)の設備を持ち、いわば、並列設備工程である(図4参照)。

本問題は、製造ロット明細(ロットNo.のサイズ・量・通過工程等)、設備別仕掛明細、設備稼働予定などを与件として、工程個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を極力満足するように各製造ロットの処理設備選択および各設備の作業順序決定を行なうものである(図5参照)。

<制約条件>

##### ①圧延工程における操業条件

- 特定処理仕様の製造ロットは、あらかじめ定められた処理時間帯にて処理される必要がある。
- 段取替時間を多大に要するサイズの製造ロットを

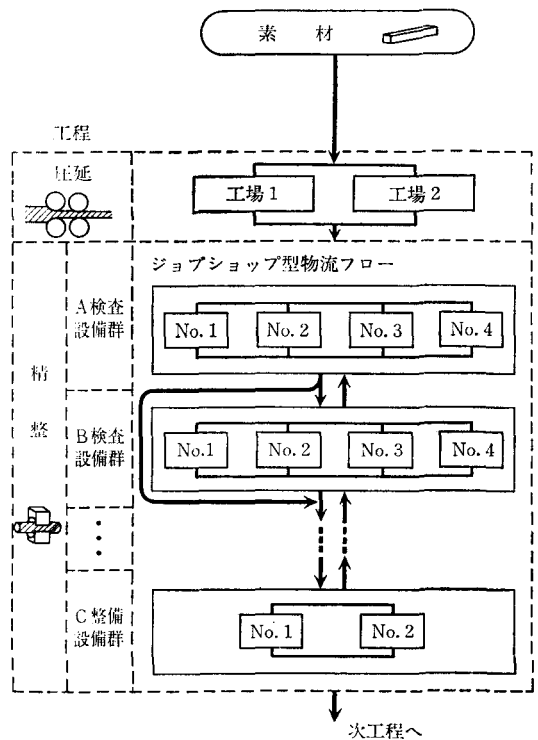


図 4 圧延・精整工程の概要

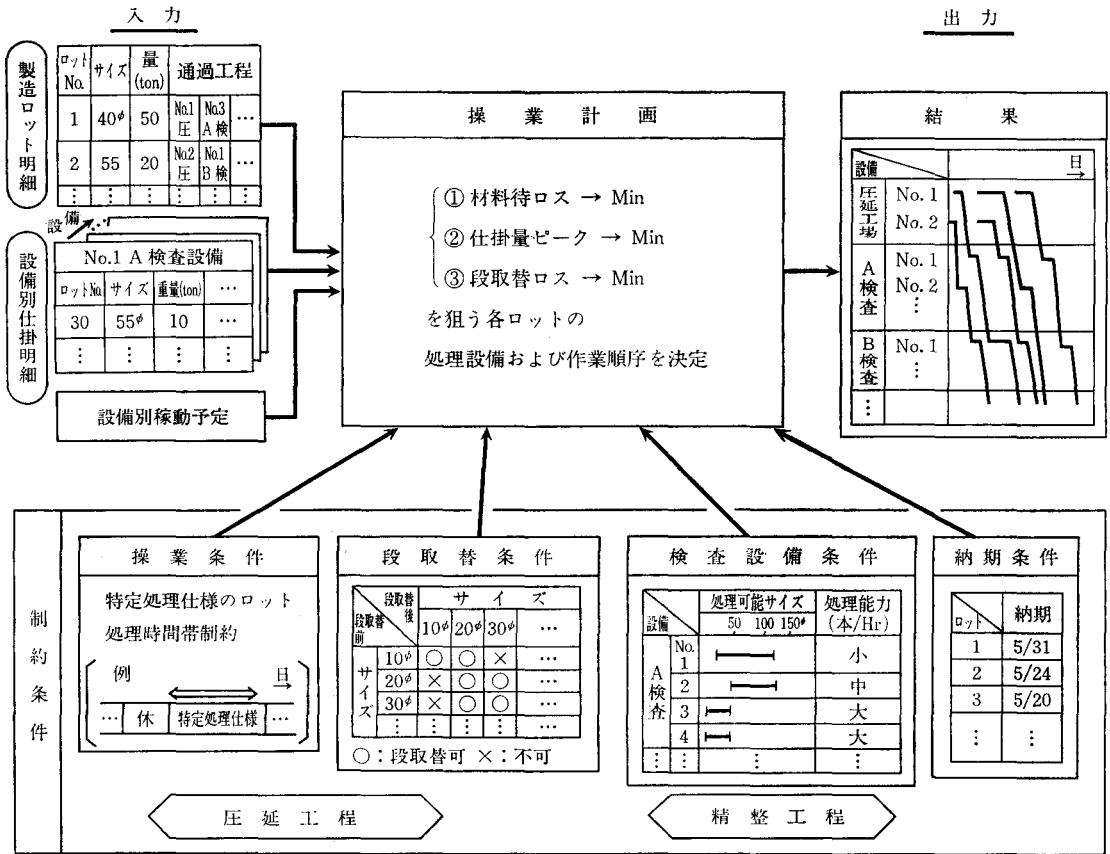


図 5 圧延・精整操業計画問題の概念

続けて交互に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、それらはそれぞれ能率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条件

各製造ロットのユーザー納入日を厳守する必要がある。

4.2 問題の特徴

圧延工程においては、あらかじめ定められている標準圧延段取順序（段取替ロス最少の順序）にはぼしたがって圧延されるため、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ごとくである。

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・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設備（それぞれ能率が異なる）にて処理可能である、このため、製造ロットの設備への適正選択が非常に重要となる。

③複数の評価指標の同時適正化が必要である。

4.3 圧延・精整操業計画ロジック

(1) 解法の基本的骨子

本問題の解法については、システム運用上、短時間（せいぜい10数分程度）で求解できることが必須条件である。しかし、本問題が前節4.2で述べた特徴を有し、かつ順序づけすべき製造ロット数が膨大であることから分枝限定法等による理論解法は、計算時間面からみて実用的でない。そこで問題の特徴を利用して以下のような工夫にもとづく解法を開発した。

①組合せの自由度を大幅に減少させる目的で製造工程別に小問題に分割し（圧延工程と精整工程を分離

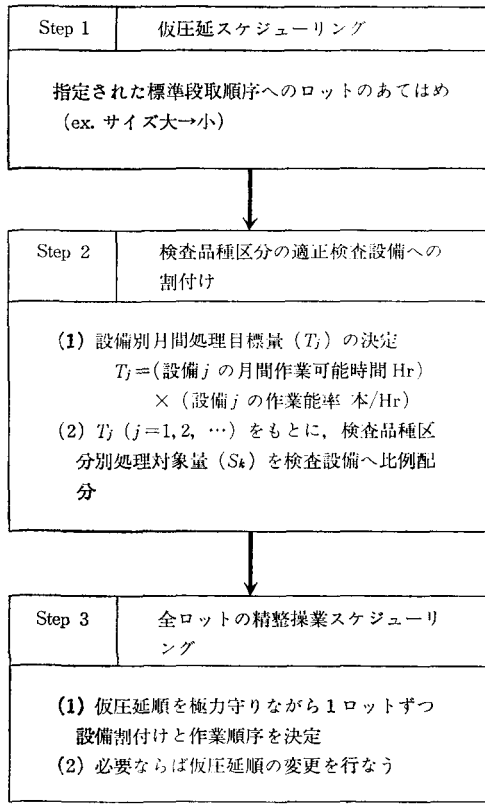


図 6 圧延・精整操業計画ロジック

し、段取替条件などの制約の厳しい、いわゆるネットワーク工程から順にスケジューリングを行なうこととした。また1カ月分の製造ロットを同時に対象とするのではなく、1日単位に逐次にくりかえすことにした。

②①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、重み付き評価関数法による設備選択と event to event 方式のシミュレーション(精整全工程の操業スケジュールを同時進行的に立案する)を組み合わせることにより短時間求解を可能とした。

(2) 解法の手順

解法として3段階処理とした。

図 6 に沿って説明する。

[Step 1] (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したがい、製造ロットの圧延スケジュールを仮決めする。

[Step 2] (精整工程の設備別検査品種区分別の処理目標量  $X_{jk}$  の決定。図 7 参照)

		検査設備				計 (処理対象量)
		No.1	No.2	No.3	No.4	
検査 品種 区分	No.1 設備 (A <sub>1</sub> )	本 $X_{11}$				本 $S_1$
	No.1 設備 or No.2 設備 (A <sub>12</sub> )	$X_{12}$	$X_{22}$			本 $S_2$
	No.2 設備 or No.4 設備 (A <sub>24</sub> )		$X_{23}$		$X_{43}$	本 $S_3$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
計 (処理目標量)		本 $T_1$	本 $T_2$	本 $T_3$	本 $T_4$	

図 7 設備別検査品種区分別の処理目標量決定

本処理は、同一工程における各設備の月間処理時間の標準化を狙うものであり step 3 の事前処理である。

$S_k$ : 検査品種区分  $k$  なる製造ロットの月間合計本数

$T_j$ : 設備  $j$  の月間処理目標量 (与件)

として、処理目標量  $X_{jk}$  を次の手順にて求める。

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

・作業能率の高い設備 ( $j$ ) を優先

②  $X_{jk}$  の値を計算する

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

$$\left. \begin{array}{l} \text{同時に, } T_j \leftarrow \text{Max}(0, T_j - X_{jk}) \\ S_k \leftarrow \text{Max}(0, S_k - X_{jk}) \end{array} \right\} \text{にリセット}$$

③ すべての  $X_{jk}$  が求まるまで①, ②をくりかえす。

この処理は、基本的には、特殊な線形計画問題の短時間解法といえる。

[Step 3] (全製品ロットの精整操業スケジューリング)

step 1, 2 の結果にもとづき、設備別仕掛在庫量の標準化と段取時間の最少化とを狙うものである。本処理は、図 8 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ロットの中から1ロット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

前工程完了済ロットの中で、評価関数  $P1$  が最大(次の工程への到着最早、かつ納期余裕が最小)となるロットを選択する。

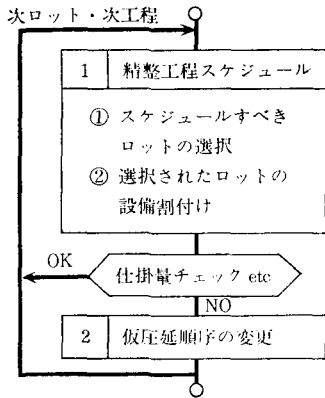


図 8 全製造ロットの精整操業スケジュールリング

$P_i = a_1 \times f_1$  (ロット  $i$  の次工程到着時刻) +  $a_2 \times f_2$  (ロット  $i$  の納期) (ただし,  $a_1, a_2$  は重み係数)

② 選択された製造ロットの設備割付け

① で選ばれた製造ロット  $i$  に対して評価関数  $Q_j$  最大となる設備  $j$  を割り当てる。

$Q_j = b_1 \times |X_{jk} - (\text{設備 } j \text{ での当該検査品種区分 } k \text{ の累積処理量})| + b_2 \times |(\text{設備 } j \text{ 前仕掛量}) - (\text{設備 } j \text{ の仕掛適正量})| + b_3 \times |(\text{ロット } i \text{ のサイズ}) - (\text{設備 } j \text{ での直前処理サイズ})|$  (ただし,  $b_1, b_2, b_3$  は重み係数)

③ 各設備別の仕掛量推移を算出し, 仕掛適正レンジに対する過不足をチェックする。条件を満足していれば①の処理へ, そうでなければ④の処理へ進む。

④ 仮圧延順序の変更

すでに精整工程でスケジュール済みのロット群の中で, 最遅圧延ロットの圧延時刻よりも後の時間帯でロットの圧延順を変更し, 仕掛の少ない設備へロットを割り当てる。(ただし, 順序変更は, 同一段取内に限る)

5. 一貫操業計画システムの運用と効果

本システムは, 月度生産計画 (月末に作成する翌1カ月の計画), 日々計画 (先3~4日の計画) に必要な情報を提供している。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9参照)。

- ① まず, 製品生産計画システムが稼働し, 各注文の圧延予定日-製造完了予定日を算出する。
- 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。

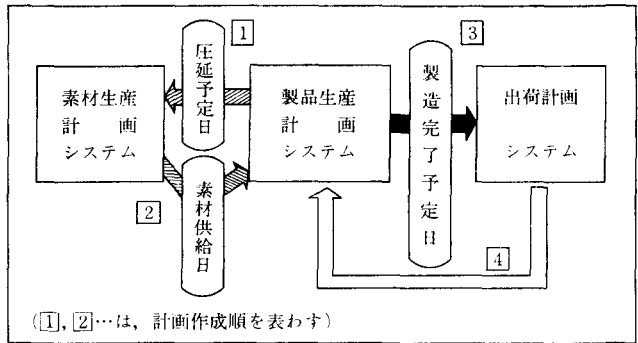


図 9 3つのサブシステムの機能関連

結果が許容できないときは, 再度見直しを行なう。

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 出荷平準化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をする場合もある。

生産・物流面における効果として, 省力, 輸送コスト削減, 在庫量の圧縮等年間9億円の合理化を達成した。またあわせて, 出荷量の平準化も実現し, 安定した製品の客先供給が可能になった。

6. 結言

鉄鋼業における生産・物流にかかわる計画問題は, 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。これらの問題に対して筆者らは実務的立場から

- ① 全体を一括して解くことはせず, 生産形態・物流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, 製品ロットの処理順序における組合せの自由度を大幅に減少させる目的で, たとえば製造工程別の小問題に問題を分割することにした。
- 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理論解法が適用できない。そこで, ジョブ・ショップ・シミュレーション[5]—[8] (シミュレーションによる解法) を基本とするも, 個別には線形計画問題を解いたり, 解の妥当性を高めるために, 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, 刻々のスケジュールリ

グ(設備選択, ロット選択, タイミング決定 etc)を行なう「ヒューリスティックス」を組み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, 生産形態の変更による制約条件変化にも比較的柔軟に対応可能であり, 実用性が高いと確信している。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, 本報告がその方法論確立の一助となれば幸いである。

今回の報告は, 一貫操業計画システムを中心に述べたが, 生産・物流統合管理システム構築にさいしては, 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[9]—[11]。

末尾ながら, 本研究・開発にさいし協力いただいた当社関係各位およびシステムエンジニアリング事業本部美坂博士(取締役 事業本部長), 徳山博子((和歌山)システム部長)に深く謝意を表する。

### 参 考 文 献

- [1] 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, 1987
- [2] 上野ほか: 条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OR学会, 1987年度春季研究発表会予稿集

- [3] 上野ほか: 設備選択を含む多品種多段階操業スケジューリング, 日本OR学会, 1986年度春季研究発表会予稿集
- [4] 上野ほか: 大規模多目的割当問題の効率的解法, 日本OR学会, 1986年度秋季研究発表会予稿集
- [5] 人見勝人: 生産管理工学, コロナ社(1983)
- [6] 鍋島一郎: スケジューリング理論, 森北出版(1974)
- [7] Baker, K. R.: Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons Inc. N. Y. (1974)
- [8] Nelson, R. T., Sarin, R. K., Daniels, R. L.: Scheduling with Multiple Performance Measures—The One Machine Case, *Management Sci.*, Vol. 32, 464/479(1986)
- [9] 室賀ほか: 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, 65/75(1987)
- [10] 上野・中川: 物流効率化とシミュレーション, 日本OR学会誌, Vol. 34, No. 7, 339/341(1989)
- [11] N. Ueno, N. Nakagawa, Y. Okuno & S. Morito: Steel Product Transportation and Storage Simulation; A Combined Simulation/Optimization Approach, '88 WSC Proceeding, 1988

### 会 合 記 録

編集委員会 (OR事例集)	3月2日(金)	7名
国際委員会	3月7日(水)	7名
庶務幹事会	3月8日(木)	6名
理事会	3月16日(金)	16名
編集委員会 (OR誌)	3月20日(火)	8名
研究普及委員会	3月23日(金)	8名
庶務幹事会	3月30日(金)	6名

### 第8回理事会議題

- 1. 平成元年度第5回理事会議事録の件
- 2. 入退会の件
- 3. 受託研究終了報告の件
- 4. 春季支部長会議開催の件
- 5. 日本工学会主催パネル討論会の件
- 6. 各委員会報告

- 平成元年度研究部会・グループ終了経過報告の件
- 第23回シンポジウム及び春季研究発表会, 見学会  
予算案並びに経過報告の件
- 平成元年度セミナー終了報告の件
- 平成元年度OR企業サロン終了報告及び平成2年度計画の件
- 会員増強活動推進の件
- I FORS(アテネ), CECOIA2(パリ)にかかる中間報告の件
- 平成元年度事業報告(案)及び収支見込みの件
- 平成2年度事業計画(案)及び収支予算(案)の件
- OR事典(事例集)編集委員会の件
- 学会賞授賞候補推薦の件
- 会友推薦の件
- 7. 平成2年度・3年度役員候補者の件
- 8. 新フェロー推薦の件