

(論文)

# 素材加工工程における生産計画作成のためのシミュレーション技術

松田浩一(工博)\*・梅田豊裕(工博)\*\*

\*鉄鋼部門・加古川製鉄所・生産管理部 \*\*技術開発本部・生産技術研究所

## Simulation Technology for Material Processing Line Production Planning

Dr. Koichi Matsuda・Dr. Toyohiro Umeda

In material processing factories, such as those for steel, aluminum and copper, the same type of order is grouped in one operation lot, based on the operating conditions specific to that process. Therefore, in order to make a production plan that considers both the due date and productivity, a technique to model lot grouping accurately is required. In this paper, four examples of material processing field production planning are introduced. In particular, simulation technology related to production planning is explained from the viewpoint of lot grouping.

まえがき = 近年製造業では、多様化する顧客ニーズに対応するため、大量生産から、多品種少量・変種変量生産に移行している。一方では、品質・納期などの顧客サービスの向上と、製造コストの低減を図ることが競争力を向上させる上で重要となっている。とりわけ、鉄鋼・アルミ・銅などに代表される素材加工産業では、一品一様に近い受注構成にもかかわらず、製造の各段階では品質や納期を満たしながら、設備の生産効率を極力高めるために、それらを複数まとめた形で処理を行う「ロット集約」が行われている。しかしながら、製造の各段階でロット集約(個別最適)を追求すると、工程全体では、中間在庫の増大や製造工期の増大を引起こすなど、全体最適となる結果を得ることは困難である。従って、素材加工系の生産システムを適切に管理・運用するには、個々の工程のロット集約と生産システム全体の挙動を迅速かつ正確に評価できるシミュレーション技術<sup>1)</sup>が不可欠となっている。さらには、種々の条件を考慮しながら各段階でのロット集約の方法そのものを適切化するためのシステム化技術が求められている。本稿では、まず素材加工工程の特徴を述べ、そこでの生産計画における課題を整理

する。次に、具体的なシステム開発事例を通して、課題達成のための技術を紹介する。特に、そこで活用されている生産計画技術とシミュレーション技術のかかわりを、素材系固有のロット集約という観点から解説する。

### 1. 素材系プロセスの特徴とシミュレーション

#### 1.1 物流面での特徴と課題

素材加工工程は、ほぼ共通の素材に対して、異なった方法の加工を行うことで、多様な仕様の製品を作り込むプロセスである。従って、マクロ的には下工程に行くほど、枝分かれが多くなる「A」型の生産形態となり、これは、一般的な組立型の生産ラインとは逆の形である。図1に鉄鋼・アルミ・銅などの一般的な素材加工のプロセスフローを示す。図1に示すように、ラインに投入された原料は素材としての母材(例えばスラブ)に铸造され、熱延、冷延、焼鈍を経て、所定の仕様に加工され、製品倉庫に搬入された後、船やトラックにより出荷される。また、上工程の方が下工程よりも生産の単位が大きいため、途中工程で半製品を分割または切断することにより、1種類の母材から複数種類の製品を作ることが行

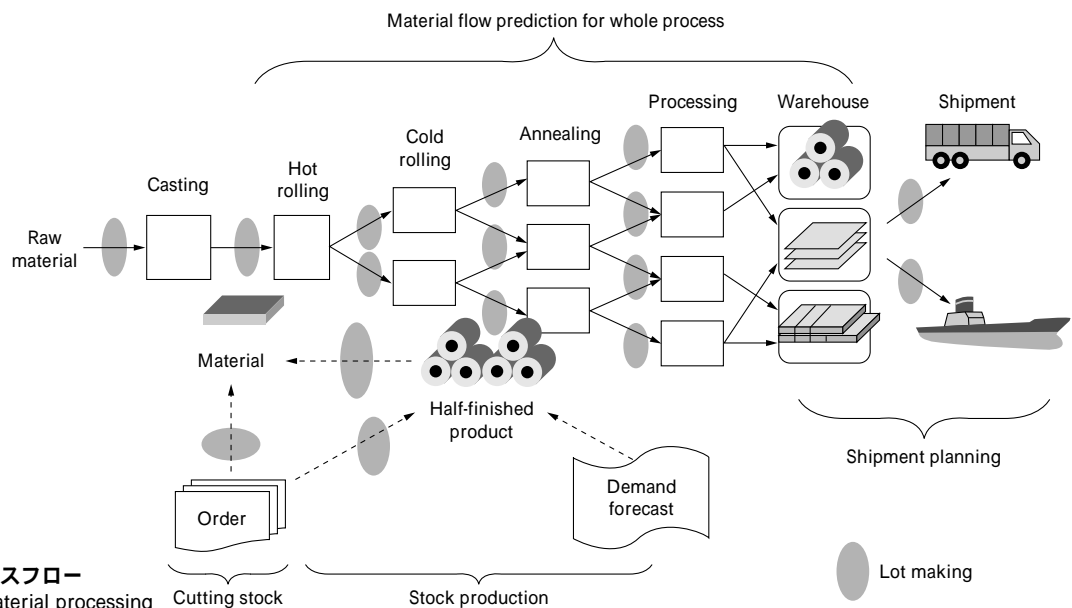


図1 素材加工のプロセスフロー  
Fig. 1 Process flow of material processing

われている。さらに、製品の種類により通過工程や使用設備が異なる上に、設備種類には、単品処理・バッチ処理・連続処理など種々のタイプが存在する。このため、素材加工工程での物流は非常に複雑で、物流の効率化には、工程全体の仕掛り状況や負荷状況を見通した上で、個々の工程の特徴を考慮しながら、きめ細かい物流コントロールを行う必要がある。

### 1.2 操業上の特徴と課題

素材加工工程では、通常1つの設備で種々の品種に対する処理を行う。その際、処理方法が異なるジョブが連続した場合は、段取替え時間が発生し、バッチ処理設備では、品質上異なる処理条件のジョブを同時に処理できないことが多い。そのため、同一あるいは類似の処理を行うジョブをまとめて処理する「ロット集約操業」が行われている。しかも、ジョブのまとめ方は設備により異なるため、このロットのまとめ方が、工場全体の生産効率に強い影響を与える。図1において、楕円形にハッチングした部分では、それぞれ異なった条件でロット集約が行われている。例えば鋳造設備では、同じ成分の素材がまとめて処理され、焼鈍設備では、同じ温度の半製品がまとめて処理される。また出荷時には、向け先や納期が近い製品がまとめて搬送される。一方、計画面でもロットまとめの考え方が存在する。例えば、半製品在庫量の変動をもとに素材を手配する場合、上工程で1回に生産する量だけまとめて手配される。また、複数の注文を1つの母材から製造する場合、品種や寸法をもとに複数注文が1つの母材にまとめられる。これらの特徴から、素材加工工場での操業や生産管理を高いレベルで維持するには、操業や計画の各段階で行われるロット集約に関して、高度な判断が必要となっている。

### 1.3 素材加工系の生産計画に求められるシミュレーション技術

上記のように、素材加工型の生産プロセスは物流が複雑な上に、操業や生産管理の各段階で種々のロット集約が行われている。従って、生産計画の立案においては、考慮すべき条件や制約が多く、既存手法によるシステム化が非常に難しい分野であった。そのため、熟練オペレータが自らの知識・経験・勘などを駆使して対応してきたが、市場環境変化に対する人間による判断能力の限界や、オペレータの高齢化による知識伝承などの問題も発生しつつある。このような問題を解決するには、素材系の特徴、特にロット集約を正確にモデル化した生産計画作成技術が不可欠となっている。一方、生産計画に対するプロセス全体への影響を正確に評価するには、人間の能力では限界があり、シミュレーション技術を活用する必要がある<sup>2)</sup>。図2に一般的な生産計画の立案とシミュレーションの関係を示す。以下にその要点をまとめる。

- 1) 計画の候補を立案する。
- 2) 計画候補に対するプロセスへの影響をシミュレータにより計算する。
- 3) シミュレータの計算結果をもとに、計画候補を評価する。
- 4) 評価結果に基づいて、計画候補を計画として採用す

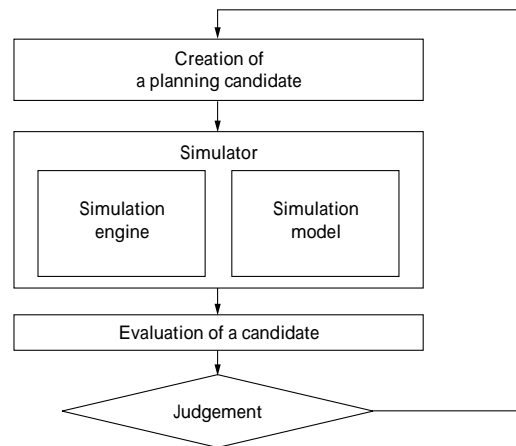


図2 生産計画立案とシミュレーションの関係  
Fig. 2 Relation between production planning and simulation

るかどうかを判断する。

- 5) より良い計画を得るため、1)~4)を繰返す。

このように、生産計画にとってシミュレーションは不可欠であり、生産計画で求められる精度や評価指標により、シミュレータに求められる仕様も異なる。いずれにしても、素材加工プロセスで精度の高い生産計画を立案するには、シミュレータ内にロットという概念をどのようにモデル化するか極めて重要となる。

本稿では、素材加工プロセスに存在する生産計画問題の代表例として、以下の4種類を示した。

#### 1) 板取り問題

納期要求や歩留まりを考慮し、仕様の異なる複数の注文に対する素材の組み合わせを決定する。

#### 2) 素材の見込み手配

歩留まり、生産性、在庫量を考慮し、中間製品と最終製品の組み合わせ、中間製品の製造量と製造時期を決定する。

#### 3) 多工程プロセス全体の物流予測

大規模工程を対象に、ラインへの投入計画に対する工程全体の物流を予測することにより、投入計画の作成を支援する。

#### 4) 出荷計画

出荷作業の効率や搬送コストを考慮し、出荷ロットに対する作業指示を行う。

次章では、それらの具体的事例をシミュレーションの活用とロット集約という観点から解説する。

## 2. 生産計画作成におけるシミュレーション活用事例

### 2.1 材料取合わせ問題へのシミュレーション技術の活用

本節では、長方形の母材から種々のオーダを取合わせる際に、歩留まりや納期を考慮しながら適正な取合わせ方法を決定する方法を紹介する<sup>3)</sup>。また、その中で用いられる2次元配置シミュレーション技術について述べる。

#### 2.1.1 問題の概要

材料取合わせ問題とは、様々な大きさの圧延前の母材と複数の矩形オーダの組み合わせ方(充当)、及び、母材上での矩形オーダの2次元配置を決める問題である。ここで、良い取合わせとは、納期の迫っているオーダをでき

るだけ多く充当し、充当された母材がなるべく効率的に利用されるよう、つまり、圧延後の板上でオーダを配置した時のロスがなるべく少なくなるようにオーダを充当、配置することである。本問題の対象は、数千の母材とオーダを充当するという非常に大規模な問題であり、ここでは、このような大規模組合せ問題を解く手法として有効とされている遺伝的アルゴリズム<sup>4)</sup>(以下、GA法と呼ぶ)を活用した。

GA法は複数の解候補を遺伝子と見なし、これらに対し、交叉やとうたといった遺伝子操作を加えながら評価関数が最小となる解(遺伝子)を生成する方法である。従って、GA法を適用する場合、解候補を遺伝子として表現(コーディング)し、その解を実際の充当・配置に解釈(シミュレーション)し、これを定量的に評価する必要がある。図3には、GA法による最適化のイメージ図を示す。以下では、本問題での具体的なコーディングとシミュレーション方法について述べる。

### 2.1.2 コーディング方法とシミュレーション手順

材料取合わせ問題では、コードによりオーダと母材の充当関係と、母材上でのオーダの配置を表現する必要がある。そこで、これらを遺伝子として表現する方法として、以下の様な2パートからなるコードを採用した。

4, 1, 3 : 6, 4 ..... (コード1)

ここで、コロンの左側が母材の充当順、右側がオーダの充当順を示す。以下では、例を用いて、上記コードを充当・配置に解釈するシミュレーション方法を示す。

まず、母材部のコード順にそれぞれの母材に対してどのオーダが充当できるかを示すテーブルを作成する(表

表1 充当可能リスト

Table 1 Allocatable material list

Material	Allocatable order
4	6, 4
1	4
3	4

表2 母材・オーダデータ例

Table 2 Material and order data

Material	Weight	Order	Quantity	Weight
1	4.0	4	3	3.0
3	5.2	6	2	3.2
4	8.0			

1)。

いま、表2に示すような重量と数量で母材、オーダが与えられているとする。この例では、まず母材4に対し、オーダ6(1枚目)を充当してみる。さらにこのとき、母材4には余裕があるため、さらにオーダ6(2枚目)を充当する。次に、オーダ6は充当が終了したので、次のオーダ4を母材4に充当しようとする。しかし、母材4にはオーダ4を充当する余裕がないので次の母材である母材1に充当を行う。これらを繰返すことにより、図4に示すような実配置が求まる。

### 2.1.3 評価関数

コードを翻訳し、実配置を求めた後、解を以下のように評価する。本問題において評価する項目としては、納期満足度とロス最小化の2つがあげられる。ここでは、最小化する評価関数を以下のように設定した。

$$C = a \cdot A + b \cdot B \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

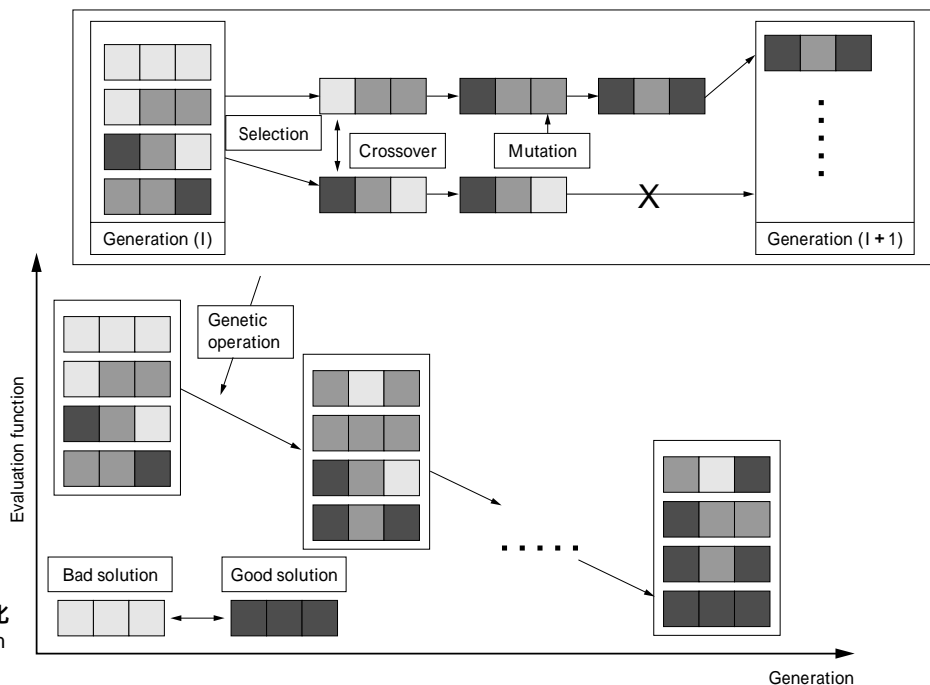


図3 遺伝的アルゴリズムによる最適化  
Fig. 3 Optimization by genetic algorithm

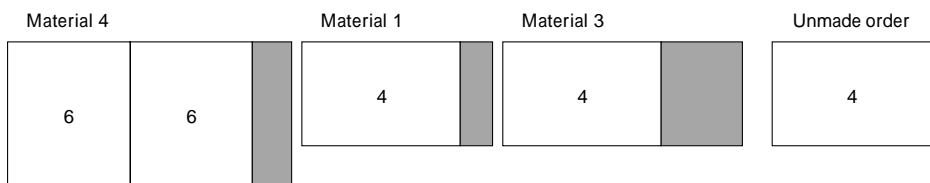


図4 コード1に対する充当結果  
Fig. 4 Allocation result for code 1

C : 最小化する評価関数

$a/b$  : 0以上の重みパラメータ

A : 納期指数 (早い納期のオーダーが充当されないと大きくなる指数)

B : 歩留指数 (充当した結果ロスになる部分の重量)であり,それぞれの指数は小さいほど望ましい。

### 2.1.4 材料取合わせシステムの有用性の評価

上記式(1)からわかるように,本問題において最小化する評価関数は,歩留指数と納期指数の2項目の重み和で構成されている。従って,この重みを調整することにより,歩留まり優先あるいは納期優先といったような戦略を充当結果に反映することができる。図5には, $a/b$ という納期,歩留まりに対する重み係数の比を変化させたときの各指数の値の変化を示す。この図より, $a/b$ を大きくする,つまり,納期指数の重みを大きくすることにより,納期指数が良くなり,歩留指数が悪くなっていることがわかる。逆に比を小さくすることにより,納期指数が悪くなり,歩留指数が良くなっていることがわかる。これは,納期の迫っているオーダーをなるべく充当しようとする,充当するオーダーのサイズが限定されるため歩留まりが下がり,歩留まりを上げようとする,充当し易いオーダーが充当に選ばれるため納期指数が悪くなるという納期と歩留まりにトレードオフ関係があることを示しており,重みによりこれらを調整することが可能であることがわかった。さらに,納期優先,歩留まり優先という戦略だけでなく,納期を守れる範囲内で極力歩留まりを上げたいという戦略に対しても,この例の場合, $a/b = 6 \sim 7$ に調整することにより,これを実現できることがわかった。

### 2.2 中間製品の見込み手配シミュレーション

本節では,受注予測に基づき,汎用的な中間製品の種類と生産タイミングを適正化する方法<sup>5)</sup>を紹介する。また,その中で用いられる在庫予測シミュレーション技術について説明する。

#### 2.2.1 問題の概要

近年素材産業においては,ユーザニーズの変化にともない短納期化,小口注文化への対応が求められている。このような短納期/小口化に対応するための方法としては,注文を受けてから製造を開始するのではなく,あらかじめ複数の最終製品を生産できる中間製品を見込みで

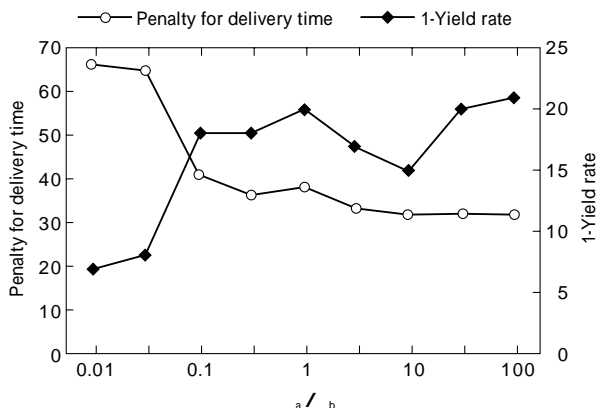


図5 重み係数調整結果  
Fig. 5 Weight tuning result

製造しておくことにより,受注から出荷までのリードタイムを短くする生産方式がある。例えば,アルミ板製造工程において,製造リードタイムを短縮するためには,製品を受注した後に先頭の工程である溶解工程から製造するのではなく,受注予測に基づき,見込みで中間製品である熱延コイル,または,冷延コイルを製造しておき,受注した製品に応じて中間製品を加工して生産することが必要となる。このような生産方式をとる場合,以下に示すような項目を満足する必要がある。

- 1) 中間製品の生産性を良くするために,製造する中間製品の種類はなるべく少なくする。
- 2) 受注予測と受注実績に差があっても,見込み手配した中間製品が利用できるように製造する中間製品は,なるべく多くの最終製品が製造できる汎用的なものにする。
- 3) 中間製品の在庫量を少なくするために,なるべく中間製品製造完了時期と最終製品製造開始時期を同期化する。

そこで,上記1),2)を満足するための,中間製品の種類を最適化するモデルと,これにより決められた中間製品と最終製品の組合わせを用いて,上記3)を満足する中間製品製造タイミングを決定する在庫シミュレーションシステムを構築した。

#### 2.2.2 中間製品の種類の最適化

まず,製造すべき中間製品の種類と,その中間製品から,どの最終製品を製造するかを決定する最適化モデルについて説明する。今,中間製品が  $m$  種,最終製品が  $n$  種類あるとすると,本問題は下記評価関数  $E$  を最小化する決定変数  $G_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ ) を求める問題となる。

$$E = W_1 \cdot E_1 + W_2 \cdot E_2 + W_3 \cdot E_3 \dots \dots \dots (2)$$

ここで,

$W_1, \dots, W_3$  : 0以上の重み係数

$E_1$  : 最終製品を中間製品からとった場合の幅ロス

$E_2$  : 中間製品の種類数

$E_3$  : 非汎用製品となる中間製品数

また,決定変数  $G_{ij}$  は,製品  $i$  に対して中間製品  $j$  を見込みで用意する場合は1,その他は0でとなる行列で,これが決まれば  $E_1 \sim E_3$  を計算することが可能となる。ここでは,評価関数  $E$  を最小化する方法として,SA (simulated annealing) 法<sup>6,7)</sup> という最適化アルゴリズムを活用した。

#### 2.2.3 見込み手配量,手配時期最適化シミュレーション

次に,上記結果を用いて,中間製品の見込み手配量と手配タイミングを決定する。本シミュレーションでは,以下の項目を満足する量・タイミングを決定することが必要となる。

- 1) 中間製品の在庫切れを起こさない。
- 2) 中間製品の在庫量が最小になる。
- 3) 中間製品の製造ロット,製造負荷を考慮する。

以下に,これらを満足する在庫シミュレーションの手順を示す。

初期在庫及び受注予測データと,どの製品をどの中間

製品から製造するかを表わす対応表（前項の手法で決定）、及びそれぞれの製品について、中間製品～最終製品までの歩留まり、リードタイムを読み込む。製品ごとに初期在庫から受注予測量を順次減算し、在庫補充のない場合の在庫推移を求める（図6 A～C参照）。この段階では、最終製品の製造量は0としているので、在庫が0を下回る結果となる。

の結果より、下限在庫（この例では0とする）に対する不足量を各日ごとに求める。例えば、製品Aの場合には、8日目に3t、9日目にさらに2t不足している。

で求めた不足量を補充するために製造すべき中間製品量と製造日を、不足の発生した日よりリードタイム分だけ逆上ることにより求める。例えば、製品Aは8日目に3t不足しており、これを補充するためには、リードタイムが5日であるので中間製品を3日目に最終製品相当で3t製造する必要がある。これをすべての最終製品について求め、中間製品製造日ごとに、その必要量を集計する。

で求めた製品換算の中間製品必要量を歩留まりで割り、各日の中間製品必要製造量を求める。この結果が図7である。

で求めた中間製品の製造量を製造チャンス（例えば、2日に1度）ごとに加算する。ここで、中間製品の製造チャンスは、中間製品の設備負荷を考慮したもので、ある期間に製造する品種が多いと生産性が落ちることから、このようなチャンスを決める。さらに、この足し合わせた量を超える最小の中間製品の製造単位（ロット）の整数倍の値をまとめ要求量とする。例えば、中間製品要求量が26tで製造単位が20tであれば、40t

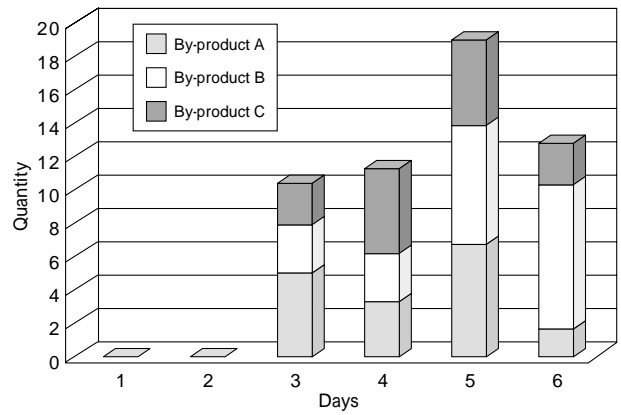


図7 歩留まりと製造リードタイムを考慮した中間製品製造要求量  
Fig. 7 Production requests for half-finished products

となる。これにより、中間製品の製造ロットを考慮することが可能となる。

で求めた、まとめ要求量のうちもっとも製造日の早いものを抽出し、製品の製造タイミング内での中間製品製造量（図7）の割合で分割する。

で分割した中間製品製造量に各製品の歩留まりをかけ、各製品の分配量を求める。

で求めた、各製品の分配量だけ各製品のリードタイム後の在庫を増加させる。この結果で各製品の日ごとの在庫推移を求める（図8）。

この結果、中間製品が製造されたことにより、在庫切れの起こるタイミングが後方にずれる。

これをもとに再度 に戻り計算を繰返すことにより、中間製品の製造ロットを考慮した在庫量最小の中間製品製造タイミング・製造量を求めることが可能となる。

### 2.3 アルミ板圧延工場の物流シミュレーション

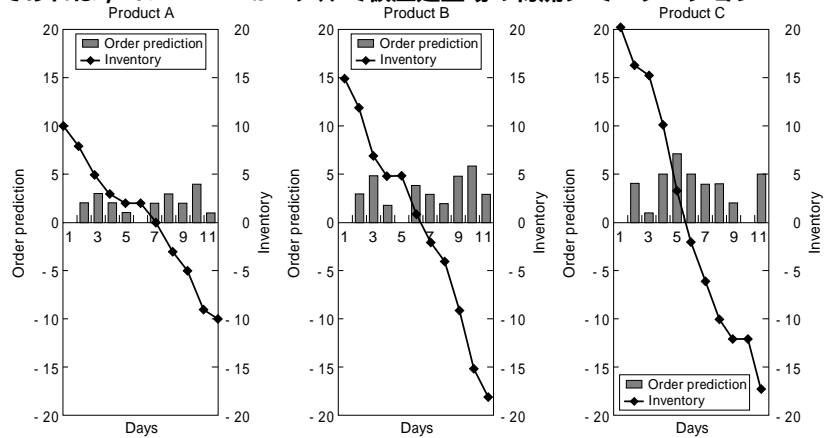


図6 生産がないと仮定した場合の在庫変化  
Fig. 6 Results of inventory simulation under no production

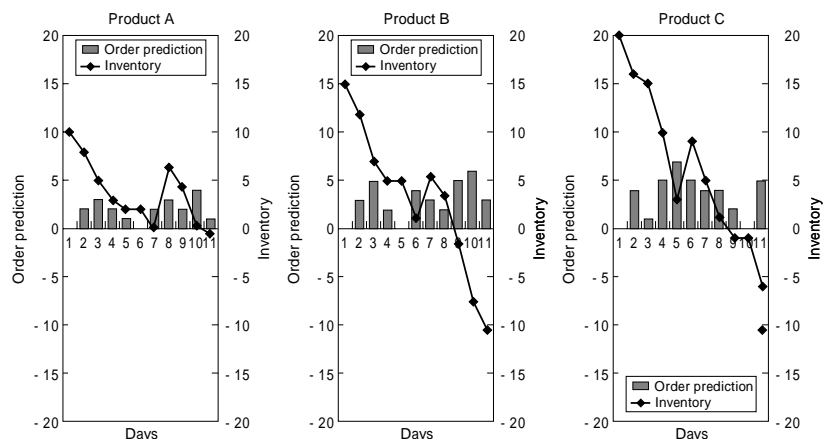


図8 中間製品製造後の在庫変化  
Fig. 8 Results of inventory simulation under half-finished

本節では大規模な素材加工工程全体の物流予測を、高速にかつ精度良く行うためのシミュレーション技術について、アルミ板圧延工場への適用例<sup>8)9)</sup>を紹介する。

### 2.3.1 問題の概要

アルミ圧延品は、近年、ユーザ要求の多様化から製品の仕様が詳細化しているが、操業面では、各工程で生産性向上や段取りロス抑制のため、同一の処理条件のジョブを複数集めて処理を行うロット集約操作を実施している。また、1つの工程には複数の下工程が存在するので、各工程でのロット集約方法、すなわちグルーピングされるジョブの優先付けとグループ間の優先付けが工程全体の物流に大きな影響を及ぼす。従って、以下の課題を解決するシミュレーションモデルが必要となる。

- ・工程ごとに異なる条件で動的にロットをまとめる機能と、その高速動作の実現
- ・ロットのまとめ方や優先順設定において、工程全体の物流を適正化する操業ノウハウの反映

### 2.3.2 対象工程

図9にアルミ板圧延工程の概略を示す。まず鋳造されたスラブを熱間圧延機で圧延しコイル状に巻取る。いったん冷却した後、冷間圧延機にて所定の厚みまでさらに圧延する。冷延工程が終了すると、精整工程で最終寸法に合わせた幅割りや切断、歪みの矯正、洗浄、各種表面処理、焼鈍を行い、検査、梱包を経て出荷される。ここで行われるロット集約の例を表3に示す。

### 2.3.3 ロット集約のためのモデル化

通常、待ち行列は各設備に対して1つ設定するのがモデル化の上で最も簡単であるが、効率良く、またきめ細かくロット集約を行うために、我々は設備に対してロット集約条件パラメータを導入し、このパラメータの値に応じて待ち行列を生成する仕組みを構築した。図10に待ち行列モデルの概要を示す。

図10に示すように本待ち行列モデルでは、それぞれの待ち行列に対して、集約量の下限と上限が与えられる。各待ち行列には、シミュレーションの進行に合わせて集約されたジョブの数量が集計され、この値が集約量の下限を超えると、このロットは集約完了状態となる。一方、

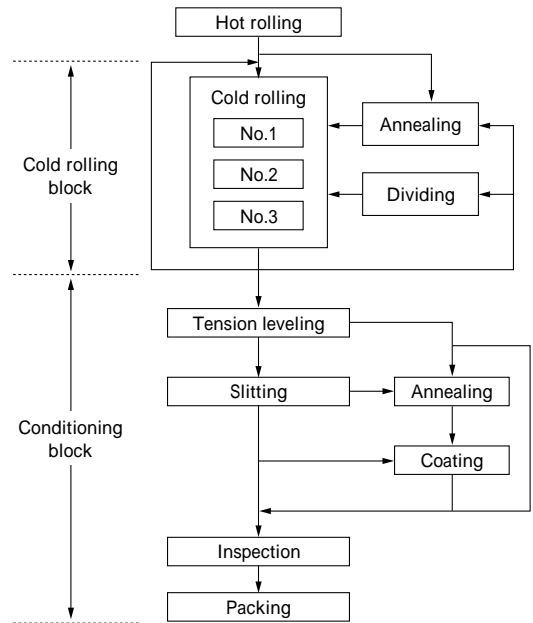


図9 アルミ板圧延工程の概要  
Fig. 9 Outline of aluminum rolling process

表3 アルミ圧延工程におけるロット集約操作の例  
Table 3 Examples of lot-making operations in aluminum rolling-processing

Stage	Lot-making condition
Cold rolling	Roll surface form
Annealing	Annealing temperature
Surface processing	Kind of paint or solution
Slitting	Product width

各設備は集約完了状態の待ち行列の中から1つを選び、次に処理するロットとする。

### 2.3.4 ロットスケジューリングによるノウハウ表現

物流制御のための操業方法という観点では、ジョブやロットの優先付け方法が重要となる。そこで、以下のように各工程の仕掛け量に基づいて優先度を設定した。

時刻  $t$  におけるジョブ  $i$  の自工程仕掛け量を  $p_i(t)$ 、次工程仕掛け量を  $n_i(t)$  とする。また、ジョブ  $i$  の現工程標準仕掛け量を  $p_i$ 、次工程標準仕掛け量を  $N_i$  とする。さらに、

$$d_i(t) = \left( \frac{P_i(t)}{p_i} \right) / \left( \frac{n_i(t)}{N_i} \right) \dots\dots\dots(3)$$

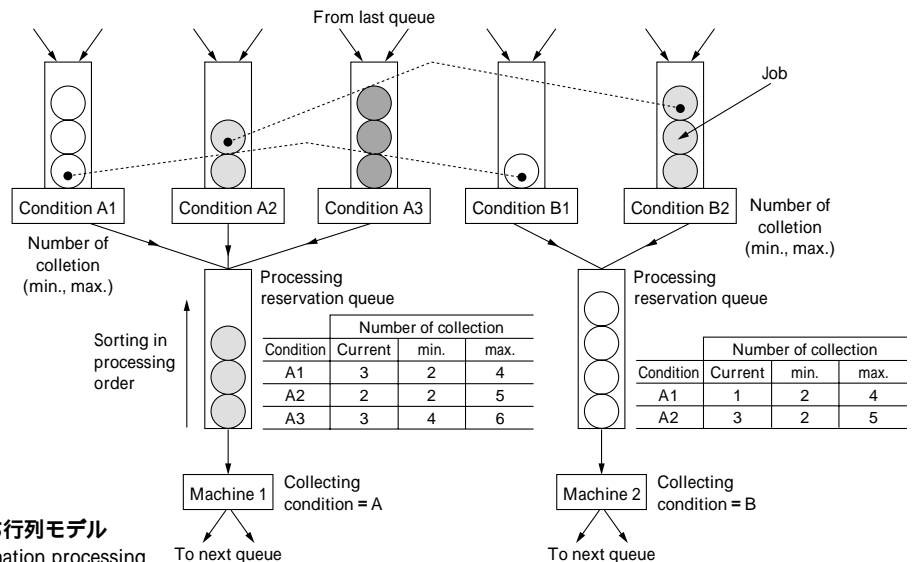


図10 ロット集約操作のための階層型待ち行列モデル  
Fig.10 Hierarchical queue model for lot formation processing

式(3)をジョブ*i*の平準化指数と定義する。これにより、工程間の滞留状況をジョブの優先度として定量化できる。すなわち、現工程の仕掛りが多く、次工程の仕掛りが少ないジョブは  $d_i(t)$  の値が大きくなり、優先して選択される。ロットの優先度も同様の考え方で設定する。

### 2.3.5 適用結果

提案モデルの効果を確かめるため、次の2ケースについて3カ月間のシミュレーションを行った。いずれのケースも図10に示す待ち行列モデルを用いた。

Case 1: ロットスケジューリングを行う。

Case 2: 到着順優先でジョブとロットを選択する。

図11に、冷延工程全体についての、1日ごとの仕掛りコイル本数の推移を、操業実績とともに示した。2つのケースと実績値を比較すると、ロットスケジューリングを行った場合には、仕掛りの推移が実績値のそれに極めて近いことが分かる。さらに、2つのケースでは、仕掛り推移のトレンドは類似しているが、ロットスケジューリングを行った場合の方が、より少ない仕掛り量で推移していることが分かる。さらに、ジョブの供給切れが低減されたため、冷延全体の生産性が向上することも分かる。

### 2.4 鋼材出荷パースのスケジューリング

本節では、製鉄所出荷パースでのスケジューリングを例に、シミュレーション技術を操業スケジューリングに活用する方法を述べる<sup>10)</sup>。

#### 2.4.1 問題の概要

対象とする内航船出荷パースは6カ所あり、1日に20から30隻の船が入港する。製品は岸壁倉庫から所定のパースに浜出しされ、各パースに設置されているクレーンにより船積みされる。パーススケジューリングでは、荷役予定の船舶に対する荷役作業パースと、各パースでの作業開始・終了時刻を決定する。

次に、考慮すべき制約条件の例を以下に示す。

- 1) 作業可能パース: 積荷の種類や寸法により作業パースが限定される。
- 2) 作業員数: 同時に岸壁で作業できる作業員数の合計には上限があり、時間帯により異なる。
- 3) 天候: 雨天時には屋根付きの全天候パース以外では荷役できない製品がある。
- 4) 作業時間帯: クレーンの修理や食事時間帯は荷役作業ができない。

スケジュールの評価指標を、船*i*に対する評価値の総和として式(4)のように定義する。

$$\begin{cases} E = \sum_i F_i & \text{minimize} \\ F_i = w_1 \cdot f_{1,i} + w_2 \cdot f_{2,i} + w_3 \cdot f_{3,i} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、

- $f_{1,i}$  (船舶の運行効率): 滞船時間、つまり、荷役完了時刻と入港時刻の差、
- $f_{2,i}$  (岸壁での作業性): 製品を保管場所から作業パースまで搬送するのに要する時間、
- $f_{3,i}$  (出航納期): 向け先での作業に合わせた所定の出港時刻からの遅れ時間、

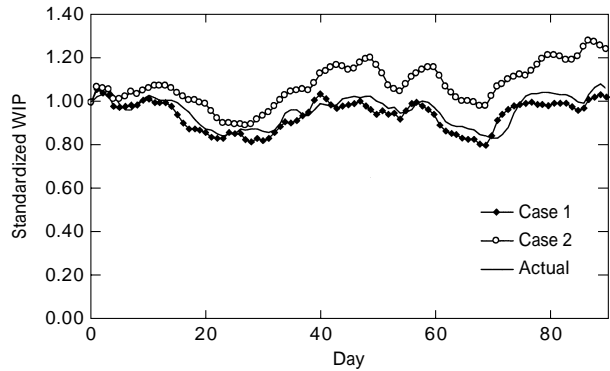


図11 冷延工程での仕掛り量の推移  
Fig.11 Total WIP transition in cold-rolling process

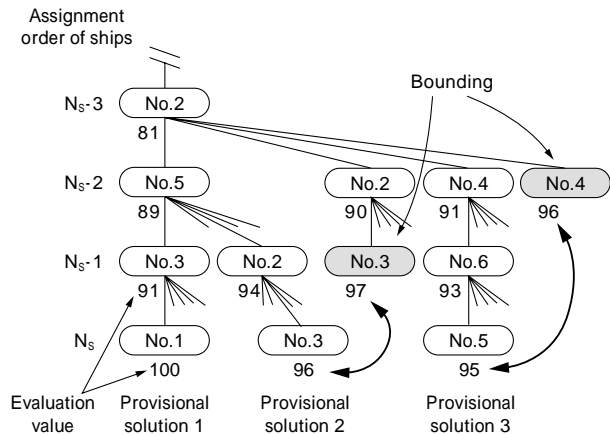


図12 分枝限定法による最適解の探索  
Fig.12 Optimal solution search by branch and bound

$w_1, w_2, w_3$  は0以上の重みパラメータである。

#### 2.4.2 パーススケジュール作成アルゴリズム

本問題は、パースと船舶の組み合わせ最適化問題であり、解法として分枝限定法を適用した。

まず、入港予定時刻、出港限界時刻、作業時間などをもとに、船舶の割付け優先順序と作業パースを決定する。ここで得られた初期解を荷役シミュレーションにより評価し、最初の暫定解とする。次に、分枝限定法の1つであるバックトラック計画法<sup>11)</sup>により解の探索を行う。すなわち、分枝操作を行うごとに、前項の操業制約に基づいて、船舶の作業開始・終了時刻を計算する荷役シミュレーションを実行し評価関数を得る。その値が暫定解の評価値を超えた場合は、それ以降の探索は行わず(枝刈り)再度分枝操作を行う。これは、船舶の割付けに対して評価関数が単調増加するために可能となる。探索のイメージを図12に示す。探索を高速化するには、枝刈りをできるだけ上流で行う工夫が必要となる。本方法では、未展開部分の船舶に対しても、仮割付けによる荷役シミュレーションを行うことにより、枝刈りの効率化を図った<sup>10)</sup>。

#### 2.5 操業ノウハウの活用

上で述べたモデル化では、1隻の船(ロット)は1つの作業パースで1回だけ作業することを前提にしていた。しかし実際の操業現場では、積荷の保管場所に合わせ、ロットを分割し、荷役の途中で作業パースを変更するパースシフトが行われている。これにより、岸壁での

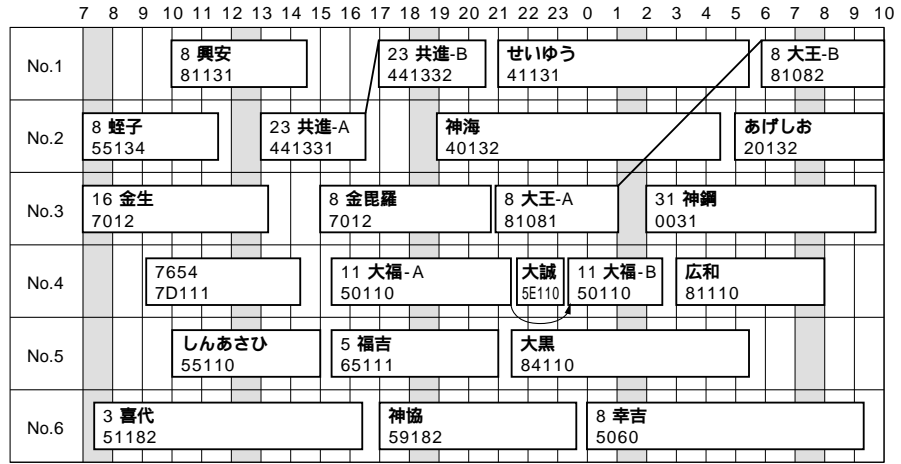


図13 パーススケジューリング結果の一例  
Fig.13 An example of berth scheduling

搬送効率が向上する。そこで本方法では、事前に決定したパースシフト対象の船を仮想的に2隻の船に分割した上で、作業時間が重複しない制約を加えることにより、上記探索手法をパースシフト操作に拡張した。図13にパースシフトに拡張したスケジューリング結果の一例を示す。例えば、大王丸はNo.3パースからNo.1パースに移動している。このように、事前に指定されたロットを分割することも、スケジューリングを改良する上で重要な要素となる場合がある。

むすび=素材加工工程における最適な生産計画の立案を支えるシミュレーション技術、とくに、素材加工工程の特徴であるロットという概念を取扱うためのシミュレーション・最適化技術について、例をあげながら解説した。

近年、SCM (supply chain management) という概念の元に、1企業だけでなく、複数の企業間で情報を共有化し、素材供給から消費者まで (supply chain) のリードタイム短縮を行ない、消費者の要求変動に敏感に反応するとともに、サプライチェーン全体の在庫圧縮を実現しようという試みがなされつつある。ここでは、納入先や流通の情報をフルに活用し、納入先の要望 (品質・納期・量) に応えながら、より低コストで製品を製造・納入するための計画システムの構築が求められている。それには、生産計画におけるシミュレーション技術に関して、以下の課題を達成することが不可欠である。

**素材工程全体の高速最適化モデルの開発**

素材工程の特定の工程だけでなく、全体を、生産ロット、生産コスト、納期を考慮して最適化、とくに短時間で、実行できるモデル

**ビジネスモデル検証用 WHAT-IF シミュレーション**

上記SCMを実現、とくにリードタイム短縮を行うためには、現状の営業・製造を含めた業務フロー、設備フロー、加工方法を前提に、計画を最適化するだけでは限界がある。このため、これらのフロー (ビジネスモデル) を変化させたときにどのような、利点、欠点があるかを検証できるシミュレータが必要になる。

**シミュレーションモデル構築の迅速化**

シミュレーションのキーポイントは言うまでもなく、

その精度 (再現性) である。製造工程には、様々な運用ルール、設備制約があり、これらをモデル化して、精度の良いシミュレータを開発する必要がある。本解説で述べた例や、上記、を実現するためにも、精度のよいモデル化を如何に早く実施できるかがポイントとなる。また、運用ルールや設備制約は変動することから、一度モデル化したシミュレータのメンテナンスも重要課題となる。

将来、シミュレーション技術をより実用的にしていくなめには、モデル化方法の標準化、運用ルールの操業実績からの学習の仕組みなどを取り入れていくことが必要である。今後は、以上のような課題に取り組みながら、シミュレーション技術のさらなる向上を目指していく所存である。

**参考文献**

- 1) 藤井進: 経営システム, Vol.1 (1992), p. 118.
- 2) 中野一夫: システム/制御/情報, Vol. 41, No.3 (1997) p. 106.
- 3) 松田浩一ほか: 計測自動制御学会論文集, vol.33, No.2 (1997) p.118.
- 4) Goldberg, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, (1989), Addison-Wesley.
- 5) 松田浩一ほか: システム制御情報学会論文誌, Vol.10, No.4 (1997) p.153.
- 6) S. Kirkpatrick: SCIENCE, No. 220 (1983) p.671.
- 7) M. D. Huang et al.: IEEE International Conference on Computer Aided Design (1986) p.381.
- 8) T. Umeda et al.: Proceeding of 5-th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process (1999) p.104.
- 9) 梅田豊裕ほか: 日本生産管理学会論文誌, Vol.7, No.2 (2001) p.30.
- 10) 梅田豊裕ほか: システム制御情報学会論文誌, Vol.13, No.4 (2000) p.194.
- 11) 鍋島一朗: 数学ライブラリー37スケジューリング理論 (1974) 森北出版.