

(論文)

素材加工向け物流シミュレーション技術のアルミ板圧延加工ラインへの応用

Application of Material Manufacturing Simulation Model to Aluminum Rolling and Processing Line



梅田豊裕*(工博)
Dr. Toyohiro Umeda



石井総一郎**
Soichiro Ishii

In material processing factories, such as those for steel, aluminum and copper, at each separate manufacturing facility, the same type of processing is grouped into one operation lot based on the operating conditions specific to the facility. To support production planning in such processes, Kobe Steel developed a new simulator model, which has a parallel queue structure for each lot-making condition. The simulation system based on this model has been effectively used, as a daily support tool for production planning, in an aluminum rolling-processing factory.

まえがき = 多品種少量生産の進展にともない、大規模工場での生産管理業務は複雑化している。また、設備数、製品数、品種数が非常に多い上に、個々の製品の製造経路が注文の仕様により異なるため、工場内の将来の物流を正確に予測することも困難となっている。その一方で、製造リードタイムや中間仕掛り在庫のさらなる圧縮が要請されており、工場全体の適切な稼働計画を立案することは熟練スタッフの経験と勘を要しても困難となっている。

そこで、対象とする生産工程を正確にモデル化した物流シミュレーションシステムを構築した上で、前提条件を変化させた試行を何度か行い、適正と思われるシミュレーション結果を生産計画として活用する方法が用いられている¹⁾。今回対象とする素材加工工程では、その代表である鉄鋼プロセスを中心にシミュレータの活用事例²⁾³⁾が報告されているが、工程が複雑かつ大規模であるため、限定された工程での運用やラインの能力評価への適用に留まっている。

本稿では、まず、従来のシミュレーション技術を大規模な素材加工工程の生産計画に適用しようとした場合の課題について述べ、次に、これらの課題を解決するためのシミュレーションモデルを提案する。本シミュレーションモデルでは素材加工工程固有のロット集約(まとめ処理)操作に着目したモデル化を行い、さらに、工場全体の負荷状況に応じて処理の優先度を逐次決定するルールを組んだ。最後に、本シミュレーション手法の有効性について、アルミ板圧延・加工工場を対象とした適用例を通じて検証する。

1. 従来のシミュレーション技術と課題

1.1 既存のシミュレーション技術

生産システムにシミュレーション技術を適用する場合

合、図1に示すように設備や工程ごとに処理待ちジョブ(1回の作業)のバッファを設け、

- 1) その中から「一定のルール」(先入れ先出し, 納期順, 段取時間の短い順など)でジョブを選択し、
- 2) 選択したジョブに応じた時間を加算後、
- 3) 次工程の待ち行列にジョブを送る

という操作を繰り返す「待ち行列モデル」が通常用いられる。ここで、待ち行列からジョブを選択する単位やタイミングを変えることにより、単品処理、バッチ処理、連続処理などの種々の操業形態が表現できる。また、待ち行列内のジョブ数をカウントすることにより、任意の時点での仕掛り分布を予測することができる。

1.2 素材加工工程に適用時の課題

素材加工プロセスへのシミュレータの適用を困難にしている1つの要素として、複雑な「ロット集約操業」が挙げられる。すなわち、ユーザ側の条件として、製品の仕様が詳細化する一方、設備側の条件として、各工程で生産性向上や段取ロス抑制のために、同一の処理仕様のジョブをまとめて処理を行う操業が行われる⁴⁾。以下にロット集約操業の一例を挙げる。

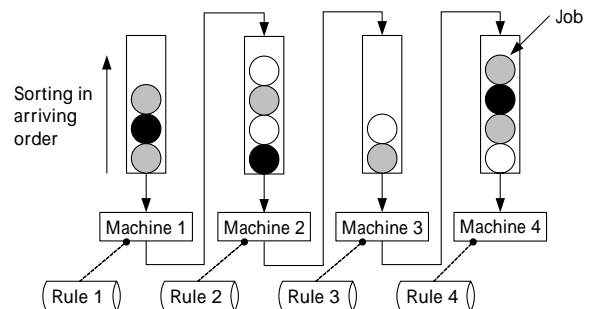


図1 従来の待ち行列モデル
Fig. 1 Conventional queue model

*技術開発本部 生産システム研究所 **アルミ・鋼カンパニー 真岡製造所 製造部

- ・焼鈍設備では焼鈍温度と焼鈍時間が同一のジョブをまとめる。
- ・圧延設備では使用する圧延ロールの表面形状が同一のジョブをまとめる。
- ・表面処理設備では、塗料の種類が同一のジョブをまとめる。

また、ロットの集約の方法にはノウハウも存在する。一般に1つの工程には複数の下流工程が存在するので、「どの工程向けのジョブを優先してグループにまとめるか?」、「まとめたグループの中でどのグループを優先して処理するか?」などの各工程でのロット集約方法が工程全体の物流に大きな影響を及ぼす。実際、現実の製造ラインでは、熟練スタッフが工場全体の負荷状況やジョブの仕様を考慮しながら、各工程でのロット集約やロットの優先付けを行っているが、ジョブの種類や工程数が多くなると、人手による判断だけでは限界が生じる。従来のシミュレーション技術を大規模素材加工工程に適用しようとした場合、このような熟練スタッフがやっているロット集約や優先付けをシミュレータが行う必要があるが、以下のような問題が生じる。

- ・シミュレーション過程で、工程ごとに異なる条件でロット集約や優先付けをルール化することが難しい。
- ・仮に、複雑なロットまとめの操作をルールにより書き下すことができたとしても、待ち行列内のジョブの検索や入替操作に多大な計算負荷を要する。そのため、シミュレーションの実行時間が増大する。また、複雑化したルールは汎用性や保守性に欠けるものとなる。
- ・ロット集約や優先順の設定において、工程ごとのローカルな判断ルールは作成できても、全体の物流を適正化する操業ノウハウを適用できない。

以上のように、従来のシミュレーション技術では、一品一様生産を行う大規模素材加工工程でのロット集約操業を効果的にモデル化することはできないことが分かる。したがって、大規模素材加工工程での生産計画に活用可能なシミュレーション技術については、以下の課題が存在することが分かる。

- ・設備単位のロットまとめを効率化するモデル化

- ・複雑な工程の物流を適正化するスケジューリング機能の実現

次項では、これらの課題を克服するためのシミュレーション技術について述べる。

2. シミュレーションモデルの構築

上で述べた従来のシミュレーション技術の課題を解決するには、スケジューリングのルールだけでなく、シミュレーションモデルの構造自体にロット集約を効率的に行う仕組みと、集約されたロットの優先順を工場全体の物流を考慮した上で決定できるモデル化技術が要求される。さらに、実用的なシステムとするためには、これらの仕組みが高速に動作する技術が必要である。本稿では、これらの条件を観点に基本となるモデル化を行い、優先付けロジックの組み込みを行った。以下にその概要を述べる。

2.1 ロット集約操業のための待ち行列モデル

既に述べたように、素材加工工程では設備ごとの操業形態に応じた固有の条件で、同一処理条件のロットをまとめて処理を行うロット集約操業を行っている。通常、待ち行列は各設備に対して1つ設定されるが、効率良く、またきめ細かくロット集約を行うには、各設備に対して集約条件ごとに待ち行列を持つ方法が有効と考えた。そこで、ここでは各設備に対して個別にロット集約条件を設定できるようにし、この設備ごとのロット集約条件に基づいて同種のジョブを分類できる「並列・階層型」の待ち行列モデルを開発した。図2に今回開発した待ち行列モデルの概要を示す。

図2に示すように本待ち行列モデルでは、設備ごとに固有のロット集約条件のタイプ(例えば焼鈍温度)、各タイプに属する条件の種類(例えば400度、500度など)、条件の種類ごとにロットとして処理可能な下限および上限のジョブ数が設定される。また、ここで指定された各集約条件の種類に対して待ち行列が構成される。例えば、集約条件のタイプが「焼鈍温度」であれば、焼鈍温度別に待ち行列が生成される。それぞれの待ち行列に対しては、集約量の下限と上限が与えられる。

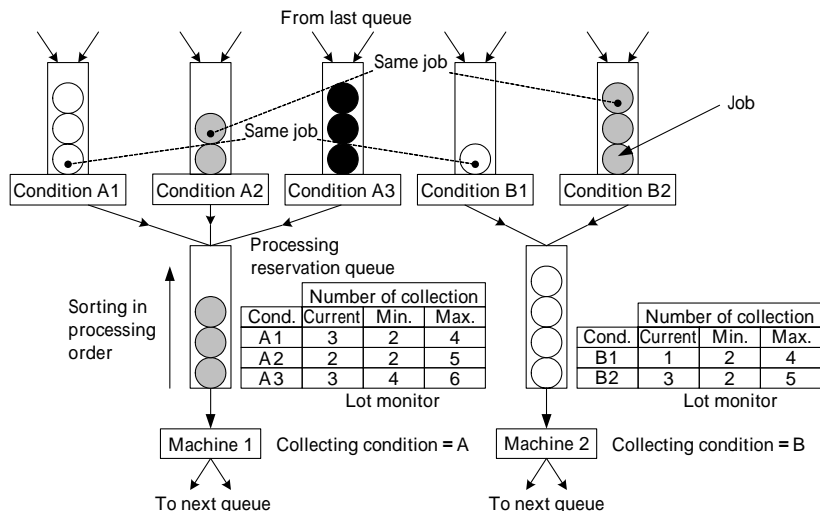


図2 ロット集約のための階層型待ち行列モデル
Fig. 2 Hierarchical queue model for lot formation

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、この値が下限を満たすと、このロットは集約完了となる。一方、各設備は次のロットが処理可能になった時点で、各々の待ち行列を検索し、集約完了状態の待ち行列の中でロット間の処理順序の制約を満足するロットを1つ選び、次に処理するロットとする。選ばれたロットに含まれるジョブは、単品処理設備の場合、操業制約を満たす処理順序（例えば板幅が広い順）に並び替えられた後、設備前の処理予約待ち行列に格納され、1ジョブずつ処理される（バッチ処理設備の場合は、並び替えをせずにまとめて処理される）。このように、従来のように単一の待ち行列に全てのジョブを格納するのではなく、集約条件ごとに待ち行列を配置し、それぞれの待ち行列にジョブを分配する構造とした。これにより、待ち行列内でのジョブの検索や入替えが最小限に抑えられ、「品種Aを20～30本まとめた上で、幅の広い順に圧延する」というようなロットの集約と処理順序の決定を高速に実行することが可能となった。

一方、ジョブの種類によっては、複数の設備で処理が可能な場合がある。このような場合は、同一のジョブを複数の待ち行列に格納し、それぞれを関連付けておくことにより、ある待ち行列で処理が行われた際、他の待ち行列から同一のジョブを削除するようにした。これにより、同一工程で複数の設備が利用可能な代替設備が存在する場合でも、ロットまとめを行うシミュレーションが可能となった。図2では、点線で結ばれたジョブが同一のジョブを示している。

2.2 設備負荷を調整する優先付けロジック

上で述べた待ち行列モデルにより、設備ごとに固有の条件でジョブを効率良くロットに集約することが可能となる。しかし、工場全体の物流を制御するという観点から、以下の2点が解決すべき課題として残る。

- 1) ロットに集約する際のジョブ間の優先付け
- 2) 集約完了状態のロットが競合した場合の、ロット間の優先付け

現実の生産ラインでは、工程全体の物流に大きな影響を及ぼす設備がいくつか存在する。これらの設備に対しては極力負荷を平準化することが必要であるため、オペレータが各工程の仕掛り状況を見ながら上記の優先度を決定している。このような製造現場で行われている工程ごとの負荷状況を考慮したロットやジョブの優先付けを再現するため、ここでは以下のように各工程の適正仕掛り量に対する比で優先度を設定した。

1) ロットに集約する際のジョブの優先付け

時刻 t におけるジョブ i の仕掛り工程および次工程をそれぞれ、 $p(t)$ および $n(t)$ とする。また、工程 s における時刻 t の仕掛り量を $f(s, t)$ 、標準仕掛り量を $F(s)$ とし、

$$d(t) = \left\{ \frac{f(p(t), t)}{F(p(t))} \right\} / \left\{ \frac{f(n(t), t)}{F(n(t))} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

をジョブ i の平準化指数と定義する。これは、仕掛り工程と次工程の負荷の比を示しており、 $d(t)$ の値が大きい（仕掛り工程の負荷が次工程より高い）ジョブを優先して

選択する。なお、工程 s の標準仕掛り量 $F(s)$ は、一定のペースで生産した場合に、前工程との間に確保すべき最低限の仕掛り量とし、前工程からの平均的なリードタイムと等しい時間分の生産量に相当する。すなわち、月次の生産計画に基づいた工程 s の1日の目標処理量を R_s (ton / 日)、工程 s の前工程から工程 s までの平均リードタイムを T_s (日) とすると、(2) 式のように定量化することができる。

$$F(s) = R_s T_s \dots \dots \dots (2)$$

上に述べたように、(1) 式では、現工程の仕掛り量が標準より多く、次工程の仕掛り量が標準より少ないジョブが優先して選択されることを表しているが、(3) 式の条件を満たす場合は、待ち行列に到着してからの待ち時間が長いジョブを優先してロットに集約する。つまり、 $d(t)$ の値が大きい順にジョブを並べた後、(3) 式を満たすジョブの部分列については、待ち行列に到着した順に並べ替える。

$$\frac{1}{a} \leq d(t) \leq a \quad (a \geq 1) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 a はシミュレーション前にあらかじめ設定する定数である。つまり、 a の値を1に近付ければ平準化指数優先でロット集約することに近くなり、 a の値を大きくすれば、待ち行列への到着順優先でロット集約することに近くなることを示している。

2) ロットの優先付け

ロットの優先度を決定するに当たっても、ジョブの優先付けと同様の考えを導入する。すなわち、集約完了状態のロット k について、ロット内に含まれるジョブの個数を M_k としたとき、

$$D_k(t) = \frac{1}{M_k} \sum_{i=1}^{M_k} d_i(t) \dots \dots \dots (4)$$

をロット k の標準化指数と定義し、 $D_k(t)$ の値が大きいロットを優先して選択する。ただし、

$$\frac{1}{A} \leq D_k(t) \leq A \quad (A \geq 1) \dots \dots \dots (5)$$

の場合は、集約完了状態になった時刻の早いロットを優先する。ここで、 A はシミュレーション前にあらかじめ設定する定数である。

2.3 シミュレーションの実行ロジック

上で述べた工程モデル、待ち行列モデル、およびジョブとロットの優先付けロジックに基づいて、イベント（ジョブの処理）の生成と消去を繰返すことで、シミュレーション計算を行う。以下に、シミュレーション実行プロセスの概要を示す。

1) 仕掛り状態の登録

シミュレーション開始時点で、工場内に存在する仕掛りジョブを待ち行列に登録する。

2) ロットまとめ

設備ごとのロットまとめの条件に従って、待ち行列内のジョブをロットにまとめる。

3) 処理するロットの決定

ロットまとめが完了しているロットの中で、優先度が最も高いロットを選択する。

4) シミュレーション時刻の更新

シミュレーション時刻を選択したロットの処理時間に応じて更新する。

5) 待ち行列の更新

3) で選択したロットの処理にともなって、待ち行列の内容を更新し、2) に戻る。

3. 提案モデルの検証

上述のように提案したシミュレーションモデルの効果を検証するため、大規模素材加工工程の1つであるアルミ板圧延加工工程のシミュレーションを行った。

3.1 対象工程

図3にアルミ板圧延加工工程の概略を示す。溶解・鋳造を経て製造されたスラブと呼ばれる直方体のアルミ塊を、まず均熱炉で加熱した後、熱間圧延(熱延)機にて数cmから数mmの厚さまで圧延し、コイル状に巻取る。このまま出荷される製品もあるが、一般には、一旦冷却した後、冷間圧延(冷延)機にて1mm以下の所定の厚さまでさらに圧延する。冷間圧延機は複数存在し、同一の製品が何度も通過する繰返し工程である。さらに、製品の種類により冷延の途中で焼鈍炉に入るケースや、スリッタで幅割りやトリミングを行うケースもある。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。また、ほぼ全ての設備で固有の条件でロット集約が行われる。ロット集約の例を表1に示す。

以上は加工設備に関する物流であるが、非加工設備と

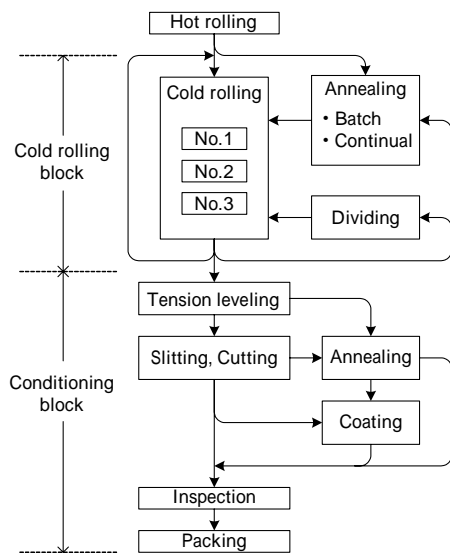


図3 アルミ板圧延加工工程の概要

Fig. 3 Outline of aluminum rolling process

表1 アルミ板圧延加工工程でのロット集約例

Table 1 Examples of lot-making operations in aluminum rolling process

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

しては、搬送用のクレーン、台車、トラック、およびフォークリフト、さらには焼鈍や圧延後の冷却、材料試験結果が出るまでの待ちが挙げられる。これら非加工設備も含めた工程全体の設備数は約200、投入されるジョブは月間4,000~6,000である。

3.2 操業実績との比較

今回提案した階層型の待ち行列構造や負荷の平準化を考慮したロットやジョブの優先付けの効果を確かめるため、上記のアルミ板圧延加工工程を例に、次の2種類について、3カ月間のケーススタディを行った。

Case1: 負荷平準化を優先

(3)式および(5)式において $a=1, A=1$ とする。

Case2: 到着順優先

(3)式および(5)式において $a=10, A=10$ とする。

なお、投入するジョブ(熱延での作業)、初期仕掛り状態および設備の休止時間は操業実績データをもとに作成した。図4に、冷延工程(図3参照)全体についての、1日ごとの仕掛りコイル本数の推移を示す。図4では、シミュレーション精度の検証のため、上の2ケースに加えて操業実績における仕掛り量の推移を示した。

また、図5には、ある冷間圧延機での(a)冷延前、(b)冷延前半(中間焼鈍前)、および(c)冷延後半(中間焼鈍後)の3種類の工程についての仕掛りコイル本数の推移を示す。図4から、2つのケースと実績値を比較すると、負荷平準化を優先した場合には、仕掛りの推移が実績値のそれに極めて近いことが明らかで、物流予測のツールとして有効であることが分かる。さらに、2つのケースでは、仕掛り推移の傾向は類似しているが、負荷平準化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。一方、図5から各工程の仕掛り量を比較すると、冷延工程前(a)については、熱延計画の影響を強く受けるため、2つのケースの差は小さいが、冷延工程内前半(b)および冷延工程内後半(c)では、負荷平準化を行った場合は仕掛り量のピークが小さくなっている。これは、負荷平準化に基づく処理の優先度により、各設備・工程へのジョブの供給が適切に調整され、特定工程でのジョブの滞留が抑えられたためと考えられる。特に板厚が厚い冷延前半部での差が大きく現れたの

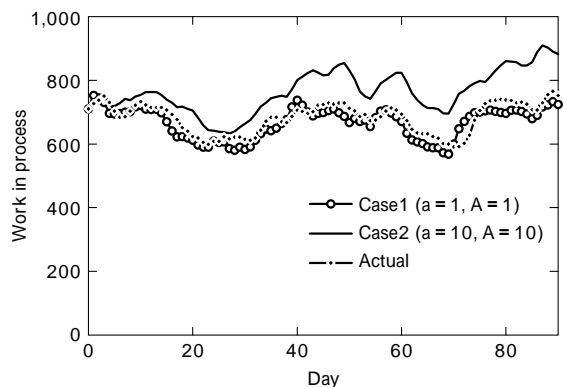


図4 冷延工程における仕掛り量の推移

Fig. 4 Total work in process in cold rolling block

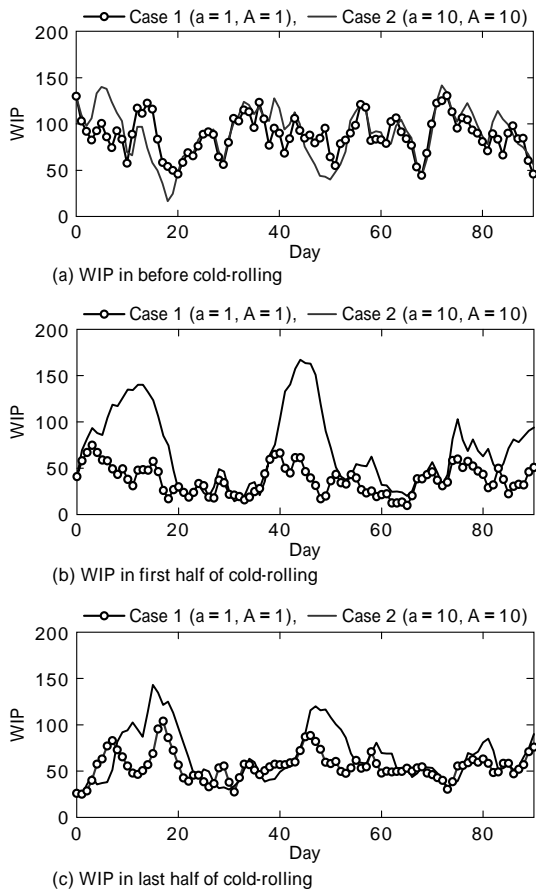


図5 冷延工程各エリアの仕掛推移

Fig. 5 Work In Process (WIP) of each process in cold rolling

は、圧延に関する処理順序の制約が緩く、負荷平準化のための調整しるが大きいことが要因と考えられる。さらに、ジョブの供給切れによる機会損失が減少したため、図4に示されるように、冷延全体の生産性が向上したと考えられる。

4. 実システムへの適用

4.1 開発システム

今回提案したシミュレーションモデルは、受注、工程

設計、仕掛・進捗情報とリンクさせ、生産計画の支援ツールとしてシステム化を行った。また、実注文を扱うにあたり、シミュレーションモデルには下記のように納期を反映できる改造を加えた。

- 1) 納期を基点に工程間の標準リードタイムを遡り、各ジョブに「工程納期」を設定する。
- 2) ロットに集約する際のジョブの優先付けでは、工程納期からの遅れを(1)式に基づく平準化指数に優先させる。
- 3) ロット内ジョブの工程納期のうち、その最大値をロットの工程納期遅れと定義し、ロットの優先付けにおいては、ロットの工程納期遅れを(4)式に基づく平準化指数に優先させる。

本システムは毎朝ホストコンピュータから与えられる製品や工程設計に関するデータと、シミュレータ内に定義したロット集約や処理の優先順に関するデータをもとに、熟延以降全工程のシミュレーションをコイル単位で行う。シミュレーション結果は工程仕掛りの推移や設備ごとの処理順序として、オペレータに対してグラフあるいは帳票形式で提供され、2～3週間先までの熟延計画を作成する際の判断情報として活用されている。図6に仕掛予測の出力例を示す。

4.2 適用結果

すでに述べたように、今回対象としたアルミ板圧延工程は極めて大規模であり、また、ほぼ完全受注生産であるために、ジョブの加工仕様や通過工程の種類が膨大となり、その物流は非常に複雑である。そのため、精度の高い物流予測が可能なシミュレーションツールは存在せず、将来状況を予測して生産計画を修正することは困難であった。今回開発したシミュレーションシステムは各種パラメータの調整の結果、熟延計画と初期仕掛りをもとに、各工程の仕掛り量の推移を正確に予測できるようになった。また、クロック周波数2GHz程度の性能のパソコンによる計算時間は予測期間が1カ月の場合でも30秒程度であり、実用レベルの高速化も達成した。本シス

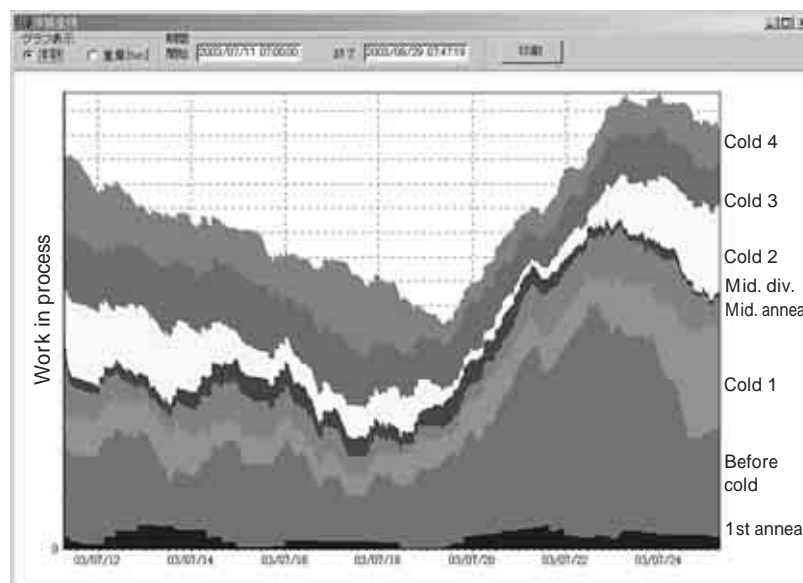


図6 仕掛予測ガイダンスの一例

Fig. 6 Example of WIP prediction guidance

テムは、日々の生産計画支援ツールとして活用されており、シミュレーション結果に基づいた熟延計画の調整や、主要工程への生産指示を行うことにより、中間仕掛りの削減や、製造リードタイム短縮などに寄与している。

なお、(3)式および(5)式の a および A の値については、設備ごとに異なる設定とすることで、より良いシミュレーション結果が得られる可能性があり、これらの適正値をシミュレーションにより決定し、それを現実の操業ルールや生産スケジュールにフィードバックすることにより、さらなる中間在庫の圧縮や製造リードタイムの短縮につなげる仕組みを検討中である。

むすび=本報告では、多品種少量化が進む大規模素材加工工程において、生産計画を支援するための物流シミュレーションモデルについて述べた。そのモデル化にあたり、設備固有の条件で同種の作業をまとめて実施する「ロット集約操業」を効率良く忠実に再現するため、各設備で操業条件別に待ち行列を設定するモデル化を行な

った。また、設備ごとの負荷状況を考慮した作業の優先付けを行うために、各工程の適正仕掛り量に対する比でジョブやロットの優先度を決定する機能を開発した。これらの技術は実工場でのデータを用いたケーススタディによりその有効性が確認された。また、本技術を実装したシミュレーションシステムは、アルミ板圧延加工工場において、生産計画支援ツールとして日々の業務で活用されている。今後は、受注予測情報を用いた、より長期間の意思決定支援や、圧延より上流の溶解・鑄造工程への拡張などが課題である。

参 考 文 献

- 1) 井上一郎ほか：計測と制御，Vol. 33, No.7 (1994) p.547.
- 2) 上野信行：計測と制御，Vol. 30, No.2 (1991) p.134.
- 3) 大村佳也子ほか：システム制御情報学会論文誌，Vol.6, No.3 (1993) p.119.
- 4) T. Umeda et al. : Proceedings of the 5th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process (1999) p.104.