

鉄鋼生産・物流計画における数理モデル

中川義之, 田村亮二, 永井恵, 谷崎隆士, 上野信行

住友金属工業(株)

鉄鋼業における生産・物流計画問題の多くは、数理モデルとして表現することができる。本稿では、最近実用化した薄板鋳込一圧延計画に対する新スケジューリングシステムについて紹介する。

本スケジューリング問題は、鋳込・圧延工程における注文の割当て及び順序付けを行なう大規模多目的計画問題であるが、これを効率的に解く為に、2段階スケジューリングアルゴリズムを開発した。即ち、第1ステップではグルーピングされた注文群の鋳込み順序を決定するマクロ計画であり、第2ステップは動的計画法を活用し、注文とスラブ(鉄鋼半製品)の詳細な作業順序を決定するマイクロ計画となっている。

上記解法は、数十秒で極めて良好な解を得ることができ、本解法を製鉄所内生産管理システムに組込むことにより計画作業工数の大幅削減など大きな効果をあげている。

MATHEMATICAL MODELS IN PRODUCTION AND PHYSICAL DISTRIBUTION PLANNING OF STEEL PRODUCTS

Yoshiyuki Nakagawa, Ryoji Tamura, Megumi Nagai,
Takashi Tanizaki, Nobuyuki Ueno

Sumitomo Metal Industries, Ltd.

2-16, Kitahama-Higashi, Chuo-ku, OSAKA, 540, JAPAN

A new scheduling system has been developed to improve efficiency for cast-to-roll scheduling in steel sheet manufacturing. The scheduling problem is a multi-objective assigning and sequencing one consisting of cast and roll scheduling. Because it is also large-scale, a new two-stage scheduling algorithm was developed in order to solve it quickly and synchronously. At the first macro-scheduling stage, rough sequence of groups of orders to be cast is determined. At the second micro-scheduling stage, detailed sequence of each order and slab with dynamic programming. The system equipped with this algorithm, which can create a rather reasonable schedule in several tens of seconds, has helped operators a great deal and has contributed to drastic reduction of planning time.

1. はじめに

近年、鉄鋼業においては高品質化、短納期化、多品種小ロット化等、顧客の要求が高まるにつれ、生産計画内容が非常に複雑になっている。特に薄板製造における鑄込・圧延工程に関する操業計画立案問題は、多目的・多制約の大規模組合せ最適化問題であり極めて複雑である。また鑄込計画と圧延計画とを個別に独立して立案する方式では良好な解を得ることが極めて難しく、鑄込計画においては圧延順序を考慮しながらロット編成を作成するという、鑄込計画と圧延計画の同期化が必要となる。そこで今回効率的かつ柔軟な解決を目指し、二段階解法を用いたワークステーション・ベースのシステムを開発した[1, 2, 3, 4, 5]。これはマクロ・スケジューリングとマイクロ・スケジューリングの二段階で構成され、鑄込計画と圧延計画を同期的に扱い、動的計画法にて高速に解くというものである。さらに、立案作業の効率化・容易化を図るため、操作性の良いマン・マシン・インターフェースを同時に開発した。システム構成はデータベース管理を行うホスト・コンピューターと計画立案作業を実際に行うワークステーションの分散形態である。本稿では、その解法を中心に報告する。

2. 薄板製造工程

薄板製品の主要製造工程は、製鉄・製鋼・鑄込

・熱延、冷延・表面処理の6工程である。

まず製鉄工程では、鉄鉱石・コークス・石灰石が高炉に投入され、熱風で還元され溶鉄となる。次に転炉（容量約300トン）で溶鉄に酸素を吹き付けて不純物を除去すると同時に、さらに還元していわゆる溶鋼を作る。ここで転炉一杯分の製鋼処理単位を1チャージという。溶鋼は連続鑄造機に運ばれて鑄込まれ、そこでスラブと呼ばれる鋼片に固められる。約5～7チャージ分（それぞれに組成成分の狙い値が異なる）の溶鋼が連続して鑄造されるが、この一連の鑄造単位を1トライという。スラブには、その後熱延工程に直送されるダイレクト・チャージ・スラブ、及び一旦スラブヤードや保温ピットに保存される在庫スラブがある。両スラブ共通熱炉を通過した後、厚みが約20mmを下回るまで圧延される。圧延ロール交換作業まで連続して何本かのスラブが圧延されるが、この熱延工程単位を1チャンスという。上で述べた製鋼の1トライ分が熱延1チャンス分の圧延量に相当する。圧延されたスラブには、熱延コイルとしてそのまま出荷されるものと、冷延工程に送られさらに薄く延ばされるものがある。冷延コイルはさらに表面処理を施されて薄板の最終製品となる。図1に鉄鋼の最終製品ができあがるまでの概略的な製造工程を示した。なお次章で詳しく述べるが、図1中点線で囲んだ部分が本稿の対象工程である。

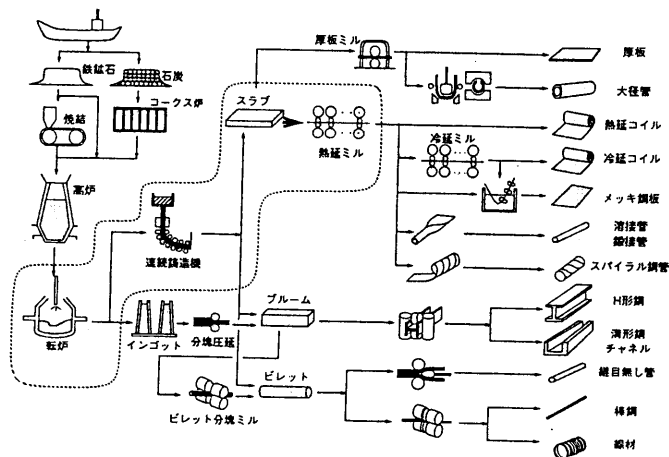


図1 鉄鋼製品の製造工程

3. 鋳込-圧延順序計画問題

3.1 問題の概要

鋳込-圧延順序計画(図2)においてはチャージ毎のロット編成を行う鋳込計画と熱延の圧延順序を決める圧延計画を同期化する必要がある。その理由は下記の通りである。

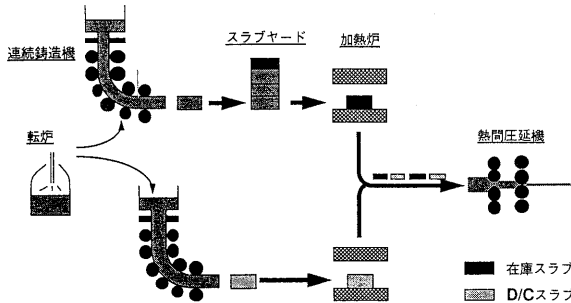


図2 スケジューリング対象工程

1トライ分の鋳込計画(各チャージの鋳込成分は、ほぼ同一)では各鋳込チャージにオーダーを割当て(即ち、鋳込ロット編成)が、特にダイレクト・チャージ・スラブ(以下D/Cスラブ)の場合は熱延工程に直送されるため、連続鋳造機から出てくるスラブ順番通りに圧延される。したがって、鋳込ロット編成時に圧延順も同時に考慮しておかなければならない。

なお、スラブにはD/Cスラブと在庫スラブとがあるが、熱延工程では稼働効率を最大にするため、これらのスラブを交互に圧延している。在庫スラブについては、すでに鋳込が完了済のため圧延計画のみ考えればよく、具体的には操業形態で変化する混合比率や他の制約にしたがって、どのD/Cスラブの間に挿入すれば良いかを決定する。

3.2 問題の特徴

本鋳込-圧延順序計画問題は、1)多目的、2)多制約、3)大規模という特徴をもつ。

(1) 多目的

- a) 納期遅れ最小化
- b) 設備負荷平準化：熱延工程より下流の工程への材料供給目標量を確保する。

- c) 鋳込ロット充足率最大化：極力オーダー以外の余剰部分の少ない鋳込ロットを作る。
- d) (適正作業順序による) 高品質維持

(2) 多制約

鋳込-圧延工程には、設備制約(鋳込制約・圧延制約)、品質維持のための製品制約がある(計300種)。これらの制約には相反するものが多く、物理的な絶対制約と緩和可能な制約とがある。

主要な鋳込制約(a)~c)、圧延制約(d)~g)を以下に示す。(図3)

- a) 1チャージの鋳込可能量は転炉容量以下。
- b) 同一チャージ内に鋳込めるオーダーの化学成分範囲が限定される。
- c) 鋳込巾は徐々に“広”から“狭”へ推移させる。
- d) 圧延巾は原則的に徐々に“広”から“狭”へ推移させる(但し少量の巾戻りは可)
- e) 圧延厚は“厚”と“薄”を交互に数回繰返し、急激な“厚”、“薄”への推移は避ける。
- f) 特定のオーダーは、1チャンス内の特定位置で圧延しなければならない。
- g) 特定のオーダーは、1チャンス内での総圧延量に制限がある。

(3) 大規模

製鉄所では、1日に5~7チャンスの圧延が行われており、これに相当する5~7トライ分の鋼が鋳込まれている。D/Cスラブの選択対象となる元のオーダー数は約5000、在庫スラブ数は3000であり、これらを選択・組合わせて1チャンス当たり約100本以上のスラブが圧延される。

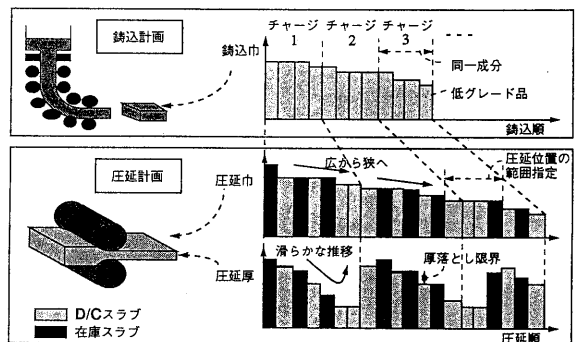


図3 鋳込制約と圧延制約の一例

4. 問題の定式化

4.1 鑄込計画の定式化

表1に鑄込計画の定式化を示した。

目的関数(4.1)では、第一項は転炉一杯分の鑄込ロットの中でオーダーの占める比率を表しており、これはスラブの生産効率の評価指標となる。第二項は鑄込時のオーダーの優先度、すなわち特定オーダーや至急品オーダーが計画に優先的に組み込まれているかどうかなどの尺度である。決定変数は(4.1)を最大にする、チャージjで鑄込まれるオーダーiの集合H_jである。

制約(4.2)は転炉の容量の限度を示しており、(4.3)、(4.4)はそれぞれ成分狙い値の範囲と、各チャージで要求される鑄込巾の範囲を示している。

4.2 圧延計画の定式化

表2に圧延計画の定式化を示した。なお、本節では、スラブと言えば、D/Cスラブと在庫スラブの総称を表すものとする。

表1 鑄込計画の定式化

目的関数	$A_1 \sum_{j=1}^J \sum_{i \in H_j} w_i / C_j + A_2 \sum_{j=1}^J \sum_{i \in H_j} p_i^{cast}$	(4.1)
制約条件	$\sum_{i \in H_j} w_i \leq C_j \quad (j=1, \dots, J)$	(4.2)
	$q_{ik}^{\min} \leq Q_{jk} \leq q_{ik}^{\max}$ (i ∈ H _j , j=1, ..., J, k=1, ..., K)	(4.3)
	$S_j^{\min} \leq S_j \leq S_j^{\max}$ (i ∈ H _j , j=1, ..., J)	(4.4)

ここで、

H_j チャージjで鑄込まれるオーダーiの集合;
 J チャージ数;
 w_i オーダーiの重量;
 C_j チャージjの(転炉の)最大容量;
 p_i^{cast} オーダーiの鑄込に関する優先度;
 q_{ik}^{min}, q_{ik}^{max} オーダーiに含まれる組成成分kの最小量および最大量;
 Q_{jk} チャージjに含まれる組成成分kの重量;
 K 1チャージに含まれる組成成分kの種類;
 S_j オーダーiの鑄込巾;
 S_j^{min}, S_j^{max} チャージjの鑄込巾の最小値および最大値;
 A₁, A₂ 重み付け係数

目的関数(4.5)の第一項は圧延に対するスラブの優先度、つまり至急品スラブが計画に組み込まれているかどうか、あるいは特定のロールタイプへの適合度などを表す尺度である。第二項は巾厚推移に伴う圧延の好ましさを評価し、第三項は下工程への目標供給量の達成度合いを評価する。決定変数は(4.5)を最大にする、X_nの並びである。

制約条件(4.6)は目標供給量に対する過剰な供給を避けるための制約を表す。(4.7)(4.8)は具体的なスラブ巾厚推移の許容量を示している。(4.9)は圧延位置制約、すなわち何本目から何本目の間にそのスラブが圧延されなければならないかを表す。(4.10)は鑄込時間と圧延時間が等しくなるための制約である。

表2 圧延計画の定式化

目的関数	$A_3 \sum_{n=1}^N p_{x_n}^{roll} + A_4 \sum_{n=1}^{N-1} a_{x_n x_{n+1}} + A_5 \sum_{k=1}^K \sum_{i \in E_k} w_i / G_k \rightarrow \text{MAX}$	(4.5)
制約条件	$\sum_{i \in E_k} w_i \leq G_k \times \alpha \quad (k=1, \dots, K)$	(4.6)
	$d_{x_{n+1}} - d_{x_n} \leq D^{\max} \quad (n=1, \dots, N-1)$	(4.7)
	$f_{x_n} - f_{x_{n+1}} \leq F^{\max} \quad (n=1, \dots, N-1)$	(4.8)
	$v_{x_n}^{\min} \leq n \leq v_{x_n}^{\max} \quad (n=1, \dots, N)$	(4.9)
	$\sum_{i \in R_1} t_i^{roll} + \sum_{i \in R_2} t_i^{roll} = \sum_{i \in R_1} t_i^{cast}$	(4.10)

ここで、

N 1チャンスに圧延されるスラブの総数;
 K 目標供給量を与えられている下工程の設備数;
 E_k 下工程設備kに供給されるスラブの集合;
 w_i スラブの重量;
 G_k 下工程設備kへの目標供給量;
 α 1以上の定数;
 x_n n番目に圧延されるスラブのインデックス;
 p_i^{roll} スラブの圧延に関する優先度;
 a_{xy} スラブxの後にスラブyを圧延する時の好ましさ、これは2つのスラブ間の巾厚推移の許容量から定義される;
 d_i スラブiの圧延巾;
 D^{max} "狭" から "広" への許容最大スラブ巾戻り量;
 f_i スラブiの圧延厚;
 F^{max} "厚" から "薄" への許容最大スラブ厚落とし量;
 v_i^{min} スラブiの許容最早圧延順、すなわちスラブiの前に、最低(v_i^{min}-1)本のスラブが圧延されなければならないことを示す;
 v_i^{max} スラブiの許容最遅圧延順、すなわちスラブiの前に、最大(v_i^{max}-1)本のスラブの圧延が終えられていることを示す;
 R₁ 1チャンス内に圧延されるD/Cスラブの集合;
 R₂ 1チャンス内に圧延される在庫スラブの集合;
 t_i^{roll} スラブiを圧延するのに必要な時間;
 t_i^{cast} オーダー(D/Cスラブ)iを鑄込むのに必要な時間;
 A₃, A₄, A₅ 重み付け係数

5. スケジューリング・アルゴリズム

5.1 アルゴリズムの基本概念

組合せ爆発をさけて、実用的時間内で解を得るために下記の特徴をもつ新解法を考案した。

(1) データ・グルーピング

オーダーを製造仕様（巾・厚・成分）をもとにグループ化し、この単位で下記スケジューリングを行なう。

(2) 二段階解法（図4）

第一段階では、スケジュールの全体的な流れを決定するための“マクロ・スケジューリング”を行う。第二段階では、第一段階で決められた流れに沿って、より細かく分割した小問題の詳細計画を立てる“ミクロ・スケジューリング”を行う。最終的に各小問題の結果を統合して所望の全体スケジュールを得る。

(3) 動的計画法

上述の各小問題は隣接する小問題に依存しており、多段ネットワーク最短経路問題との類似性を活かして、動的計画法を活用して解く。[6, 7]

5.2 マクロ・スケジューリング（図5-a）

マクロ・スケジューリングの目的は、大域的な最適性を失わないために、全体スケジュールの大筋を与えることである。これを“ルート”と呼ぶことにする。

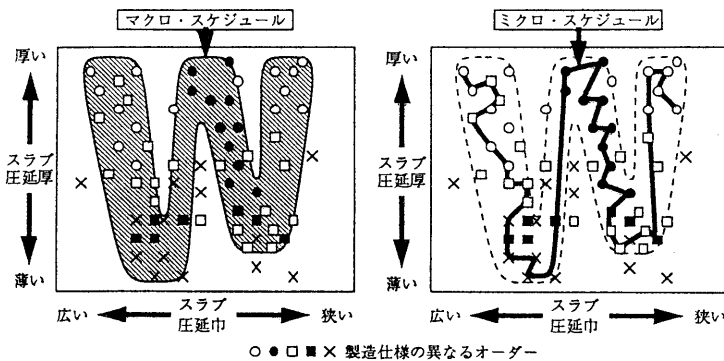


図4 二段階解法概念図

(ステップ1) 実行可能ルートの生成

まず最初に、鋳込成分値と圧延巾・圧延厚によって対象となるオーダーをグループ化（ブロック化）する。このブロックの並びを最重要制約である圧延スラブ巾厚推移制約（＝巾は広から狭へ、厚はなめらかに変化させる）を考慮しながら実行可能な範囲で生成する。

(ステップ2) オーダーの仮割当て

実行可能ルートのオーダーを、各ブロックの成分と巾厚の制約を満足し、かつ大枠の指標に従うよう各ブロックに仮割当てする。なお、大枠の指標は1チャージ内のオーダーの総重量で評価される。また、オーダー一本一本は、納期・目標供給量などから計算される優先度に従い選択される。

(ステップ3) 実行可能ルート生成の繰り返し

ステップ1, 2をすべての実行可能ルートを生成するまで繰り返す。

(ステップ4) 最適ルートの決定

ルート決定のための評価値は、そのルートに割当てられたオーダー優先度の加算にて計算され、この最大値をもつものが最適ルートとなる。最適ルートの決定はブロック並びの決定と同義である。本処理が終了すると、第二段階のミクロ・スケジューリングのための各ブロックに対する達成指標が設定される。具体的には、仮割当てされたオーダーを考慮して決められる本数と、下工程への目標供給量などである。

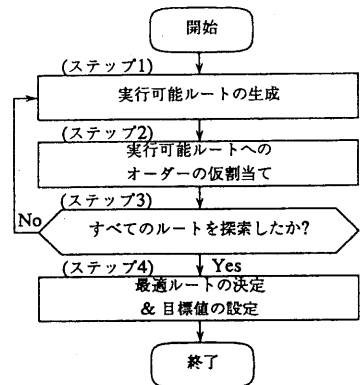


図5-a マクロ・スケジューリング

5.3 ミクロ・スケジューリング (図5)

ミクロ・スケジューリングの目的は、操業レベルでのスラブ (D/Cスラブと在庫スラブ) 順序を決定し、スケジュールを完成することである。この段階では、ブロックをさらに細分化した“セル”の並びである“パス”を決定する。

(ステップ1)ブロックの選択

最適ルート上のブロックを順に選択し、全ブロックが評価されるまで下記ステップを繰り返す。

(ステップ2)直前ブロックのメタ・パスの選択

本手法では各ブロックにおいて、新たに決定されたパスと、直前のブロックで決定されたメタ・パス (そのブロックに達するまでのパス列) が結合され、新しいメタ・パスが生成されるが、このステップでは、いくつかの候補の中から直前ブロックのメタ・パスが1つ選択される。

(ステップ3)実行可能パスの生成

(4.7)式と(4.8)式で表される巾厚推移制約をマクロ・スケジューリング段階より細かく設定し、それを順守するような実行可能パスを生成する。

(ステップ4)オーダーと在庫スラブの仮割当て

マクロ・スケジューリング時にセットされた指標に基づき、各セルの成分と巾厚の制限を満たすオーダーと在庫スラブを各セルに仮割当てする。もし達成されない指標があれば、ブロック毎に与えられた本数を満たすまで、優先度の高い順に異なるオーダー/在庫スラブを割当てていく。

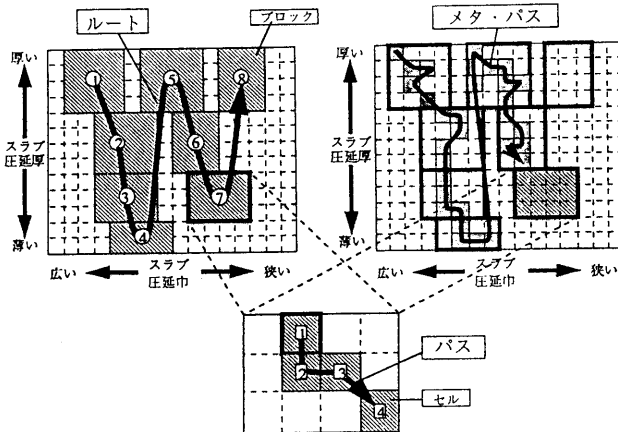


図6 ルート、パス、メタ・パスの関係

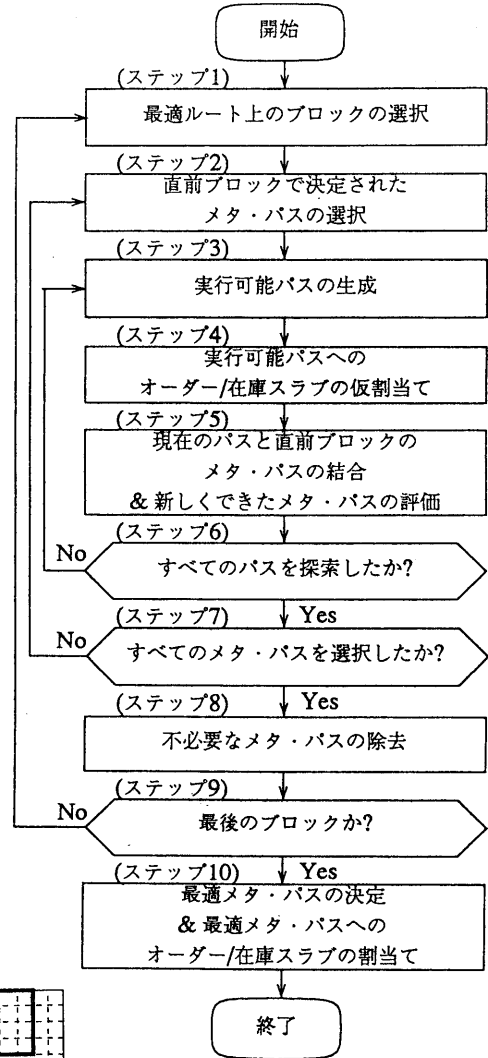


図5-b ミクロ・スケジューリング

(ステップ5)パスの結合とその評価

ステップ3の実行可能パスとステップ2で選択された1つ前のブロックのパスを結合し、新しいメタ・パスを生成する。ルート、パス、メタ・パスの関係を図6に示す。もし結合箇所において巾厚推移制約を違反すれば、そのメタ・パスは除外される。メタ・パスの評価式は表3のとおりである。

表3 メタ・パスの評価式

P_{new}^i	$= P_k^{i-1} + p_j^i + c_{kj}^i$	(5.1)
P_{new}^i	新しいメタ・パスの評価値;	
P_k^{i-1}	(i-1)番目ブロックのk番目のメタ・パスの評価値;	
p_j^i	i番目ブロックのj番目のパスの評価値;	
c_{kj}^i	(i-1)番目ブロックのk番目メタ・パスと、i番目ブロックのj番目パスとの結合の望ましき	

パスの評価値は、割当てられたオーダーや在庫スラブの優先度の加算にて得られる。なお、結合の望ましきさは直前ブロックのメタ・パスの最後のセルと、現在のパスの最初のセルとの間の巾厚推移にて決まる。

(ステップ6)すべての実行可能パスの評価

ステップ3~5を、すべての実行可能パスを評価するまで繰り返す。

(ステップ7)すべてのメタ・パスの評価

ステップ2~6を、すべての直前ブロックのメタ・パスを評価するまで繰り返す。

(ステップ8)メタ・パスの選抜

終端セルが同一のメタ・パスの中から最も評価値の高いものを選抜し、その他は除去する。

(5.1)式からわかるように、次のブロックとの結合は終端セルにのみ依存し、終端セルに至るまでの経路には依存しないため、この方法により最適なメタ・パスが選抜される。なお、最適シーケンスを決定する過程を図7に示した。)

(ステップ9)すべてのブロックの評価

ステップ1~8を、すべてのブロックを評価するまで繰り返す。

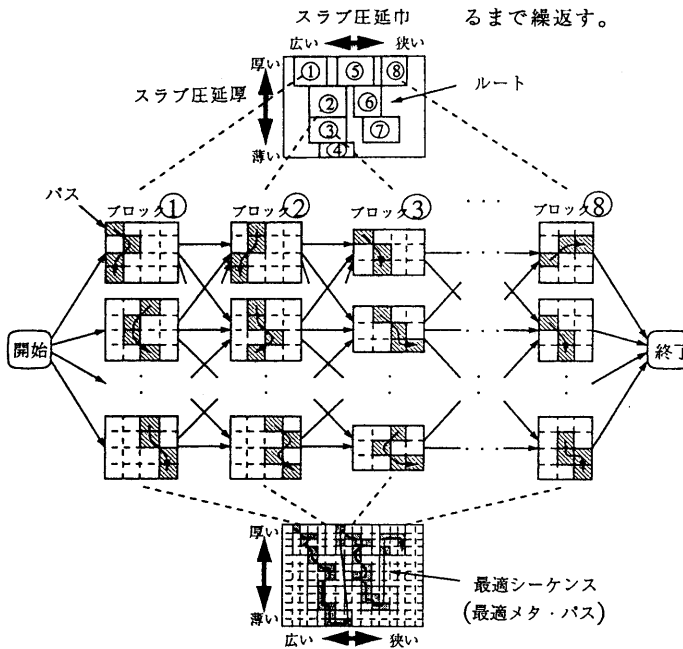


図7 最適シーケンスの決定過程

(ステップ10)最適スケジュールの決定

終端ブロックにおいて最も評価値の高いメタ・パスが全体の最適スケジュールとして決定される。各セルにおいて、優先度の高いオーダー／在庫スラブから順に既定本数に達するまで並べたものが鑄込・圧延スケジュール結果である。

(なお、システム化においては必要ならばオペレーターによる追加・削除・並べ換えなどのスケジュール修正も可能としている。)

5.4 スケジュール結果

本アルゴリズムの導入により、計画精度の向上と計画作業工数の大幅減を達成した。スケジュールリング結果の一例を図8に示す。

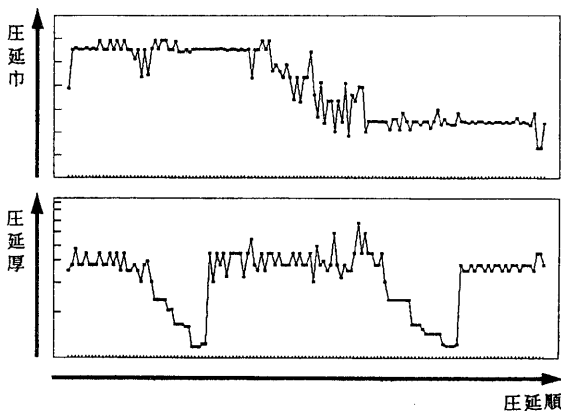


図8 巾厚推移から見たスケジュールリング結果の一例

6. おわりに

本稿では、鉄鋼の生産・物流計画における数理モデル(スケジュールリング)の一例を紹介した。解法としては、人の介入を効率的に行える、マン・マシン協調型を目指し、それを実現する二段階解法アルゴリズムの特徴と手順を詳説した。

本スケジュールリング法は、93年4月より当社鹿島製鉄所の薄板製造スケジュール立案に活用されており、立案時間の大幅な短縮化と計画精度の向上を実現している。

参考文献

- [1] R. Tamura, M. Nagai, Y. Nakagawa, T. Tanizaki, H. Nakajima, "Functionally Partitioned Scheduling System Equipped with Two-Stage Scheduling Algorithm in Steel Sheet Manufacturing," Proceedings of 1994 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Vol. 3, pp.1107-1113.
- [2] R. Tamura, M. Nagai, Y. Nakagawa, T. Tanizaki and H. Nakajima, 1994 Japan-U. S. A. Symposium on Flexible Automation (ISCIE, 1994), pp.1107-1113.
- [3] 永井恵、中島洋、田村亮二、谷崎隆士、中川義之、"鑄込・圧延操業計画立案システムの開発" 日本鉄鋼協会講演論文集 材料とプロセス、Vol. 7(1994), p. 339.
- [4] 田村亮二、永井恵、中川義之、谷崎隆士、中島洋、"鉄鋼薄板製造における機能分割型スケジュールリング・システム" 日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集(1994).
- [5] 中島洋、樽井賢治、"ライトサイジングによるCIM構築のアプローチ"、第32回IBMユーザー・シンポジウム論文集(1993)、pp. 205-221.
- [6] 西川禎一、三宮信夫、茨木俊秀、"岩波講座情報科学-19 最適化" 岩波書店
- [7] 岩本誠一、"動的計画論" 九州大学出版会