

アルミニウム熱間圧延工程における計画立案支援システム

高柳 仁史*, 岡村 義英*, 宮地 和博*

Scheduling Support System for an Aluminum Hot Rolling Process

Hitoshi TAKAYANAGI*, Yoshihide OKAMURA*, Kazuhiro MIYAJI*

Abstract:

This paper describes the development of a scheduling support system for an aluminum hot rolling process. The above scheduling problem consists of three elements: a rolling schedule stage, a heat schedule stage and a slab arrangement stage. To solve this problem, skilled knowledge and much experience are required because there are many constraints and difficult demand. Consequently, only a skilled worker should be involved them. We then developed a new scheduling support system that functionally divides this problem, and applies a local search method and heuristic approach. This now makes it possible to practically solve a scheduling problem without a skilled worker.

Key words:

Scheduling Problem, Hot Rolling Problem, Local Search Method, Heuristic Approach

1. はじめに

アルミニウム製造業では、顧客ニーズの多様化、短納期化、品質要求レベルの向上により近年ますます厳しい条件下での操業が求められている。更に最近では、CO₂排出量削減に向けて自動車へのアルミニウム材適用の流れが進んでおり、今後はこれら新たな需要にも応えられる生産規模の拡大と、更なる高品質化を目指した体質強化が必要とされている。そのためには、製造設備の能力アップも重要な課題の一つであるが、最近では製造現場を陰で支える熟練ノウハウが注目されており、貴重なノウハウの伝承が重要課題と再認識され始めた。一方で2007年問題として取り上げられているような、団塊の世代が大量に現場を離れる時期を迎えており、技術伝承が円滑に進まない場合の競争力低下が問題視されている。アルミニウム製造工程においても、数多くの熟練ノウハウが活かされているが、そのなかでも特に生産計画業務における熟練者への依存度は極めて高く、技術伝承の必要性が最も大きい分野のひとつと考えられる。

本論文では、スケジューリング技術を活用した技術伝承の一例として、アルミニウム板製造工程における熱延計画問題を取り上げる。熱延計画とは、原料となるアルミニウム鋳塊（スラブ）を定められた温度まで加熱し、高温のスラブを圧延機で所定の板

厚まで薄く延ばす熱間圧延工程において、その加熱炉の操炉計画と圧延機へのスラブ投入順序を決定する作業である。これは、鉄鋼業¹⁻³⁾でも報告例のある比較的良く知られた計画問題であるが、アルミニウム製造プロセス特有の問題^{4), 5)}を抱えており、筆者らの知る限り実システムで適用された有効な解法の報告例はない。アルミニウム熱延計画問題では、鉄鋼業のそれと比較した特徴的な違いとして以下がある。

- ① 一度の熱延タイミングで製造する処理量は少ないが多くの品種が混在しており、品種毎の製造条件や品質要求を満足させる必要がある。
- ② いったん常温までスラブを冷却し表面手入れ後に再加熱するが、その加熱条件が鉄鋼と比べ多数存在する。
- ③ 形式（連続式、ピット式）、サイズ、加熱方式が異なる複数の加熱炉が存在しており、品質要求を満足させるための使用上の制約条件が多数存在する。
- ④ ピット炉内に配置できるスラブ本数は、スラブのサイズや取り出し順序により変化する。

このようにアルミニウムの場合には、加熱工程上の多数の制約条件への対処が必要な点が大きな特徴である。上述のような問題は既存の解法では取扱いが困難であるため、実用可能な新たな手法を研究する必要がある。加えて、技術伝承に必要な熟練ノウハウの明文化が十分に行なえないため、熟練者への依存状態が長い間続いているのが実状であった。

このような背景から、本論文では経験の浅い新任作業員（以下、非熟練者と称する）でもアルミニウ

* 住友軽金属工業(株) 名古屋千代 3-1-12

* Sumitomo Light Metal Ind, LTD. 3-1-12, Chitose, Nagoya
(Received August 29, 2007)

ム熱延計画を可能とする計画支援システムの開発を目標とし、実状に即したスケジューリング手法を研究することにした。

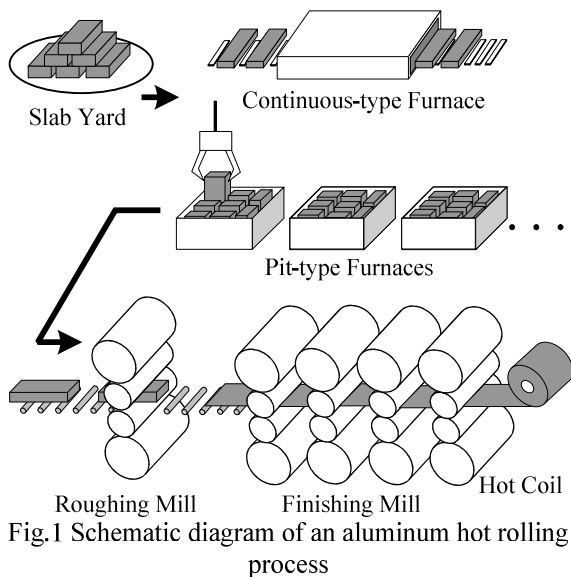
まず計画問題の扱い方としては、本計画の構成要素である圧延順序計画、操炉計画、スラブ配置計画に対し、圧延順序ステージと操炉—スラブ配置ステージの2つに分割し、それぞれに適したスケジューリング手法を提案する。

圧延順序ステージでは、操業の安定と品質確保を第一目標とし、スラブの属性情報に着目したグルーピングと、グループ単位での粗編成からスラブ単位での詳細編成と段階的に圧延順序を決定する。

操炉—スラブ配置ステージでは、連続稼働する加熱炉群のなかから、各スラブの圧延タイミングに遅延することなく、連続的な圧延が可能な加熱炉の操業パターンを局所探索法で選び出すとともに、ピット炉に最大数のスラブを装填できる配置をヒューリスティックスによる手法⁶⁾を用いて探索する。そして最終的には、上述の手法による自動計画エンジンをコアとし、状況に応じた人間系判断を反映するためのインターフェイス部と計画立案をサポートするためのインフォメーション部を備えた計画支援システムを構築した。そして本システムにより、これまで困難であった非熟練者による熱延計画の立案と、熟練ノウハウの円滑な継承が可能となった。

2. 熱延計画問題の概要

Fig. 1 に一般的なアルミニウム熱間圧延工程を示す。今回対象とした製造工程では、一日に約200本のスラブを処理しており、このなかには飲料容器材、箔地、エアコンフィン材、建築材、輸送機材などの多くの品種が含まれている。



2. 1 圧延順序計画での制約条件

熱間圧延機へのスラブ投入順を決定するものであり、品質の確保と操業の安定化のための制約条件を満足する必要がある。以下に代表的な制約条件の内容を示すとともに、Fig. 2 に制約の一例を示す。

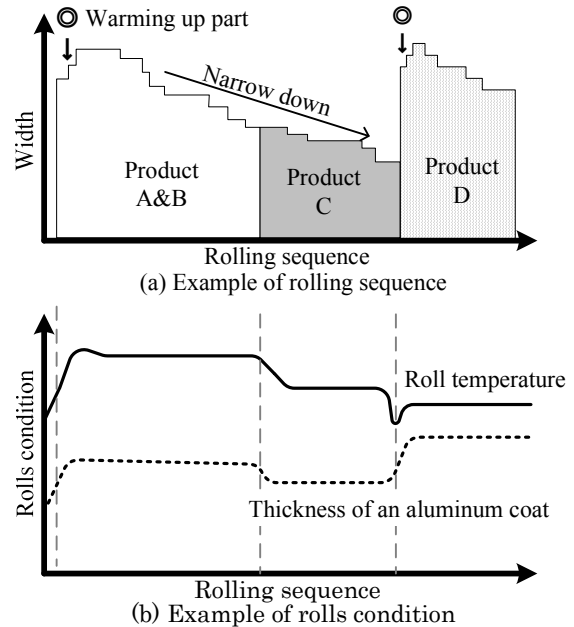


Fig.2 Constraints of the hot rolling sequence

<制約条件>

① 圧延幅の推移制約：

圧延ロールの表面には、圧延材であるスラブとの接触によりダメージが生じる。特に圧延材との接触端面のダメージは大きく、狭幅材の後に広幅材を圧延すると、前材の端部位置に生じたロールダメージが次材の板表面に悪影響を与える危険がある。したがって広幅から狭幅へと緩やかに推移させる必要がある (Fig. 2 (a))。ただし多少の幅戻りは許容され、更にロール手入れなどの段取りを加えれば再び広幅材からの圧延が可能となる。

② 品種の圧延位置制約：

たとえば、Fig. 2 (b) に示すように、変形抵抗の低い品種と高い品種では、圧延時に生じる加工発熱量が異なるため、ロールの熱膨張による変形に差が生じる。更にアルミニウム圧延特有の現象として、ロール表面に薄いアルミニウムの被膜が生成されるが、この被膜厚さも品種により変化する。この熱によるロール変形や被膜厚は、圧延材の形状や表面品質に大きく影響を与える因子であるため、性質の異なる品種をむやみに混合圧延することは許されない。

③ 特定注文の圧延位置制約：

操業面や品質面での問題から、特定の注文に対して圧延できる位置が限定される。たとえば、特定の

注文 D に対しては、注文 C の後でなければ圧延が許されないなど。

④ ウォームアップ材の配置制約：

上述したように、圧延の進行によりロールの熱膨張量が増えるため、ロール温度の安定化が非常に重要である。そのため、ロール温度が大きく下がる場合には、適度な温度とする目的で、ウォームアップ材を圧延する必要がある。このような処置が必要となるタイミングは、圧延スタート時や段取りからの再開時が主である。またウォーミングアップ材としては、Fig. 2 (a) の◎印に示すように、経験的には先頭材よりやや狭い幅が好まれる。

2. 2 操炉計画での制約条件と要求項目

操炉計画時に考慮すべき制約条件と操炉計画に対する要求項目は以下のとおり。

<制約条件>

① 加熱条件制約：

スラブ毎の与えられた加熱条件（温度、時間、加熱方式）により、使用できる加熱炉が限定される。

② 加熱条件の混合処理禁止：

異なる加熱条件のスラブを同一の加熱炉で処理することは禁止されている。

<要求項目>

① 使用炉数の最小化

ピット炉は小（4 炉）、中（4 炉）、大（3 炉）の 3 種類のサイズがあるため、同一加熱条件の複数のスラブを割当てする場合、仮に大型炉を選べば 1 炉で済むところが、小型炉を選択すると 2 炉必要となる可能性がある。燃料消費の観点からも同数のスラブを処理できるなら炉数を抑える選択が好ましい。

② 熱延中止材の最小化

注文に対して使用できる加熱炉が不足する場合、炉が割当てられないスラブの熱延は中止される。そのため、加熱工程が熱間圧延での生産能力を決定付けるネック工程となっており、生産量を上げるには、多くのスラブを加熱炉に割当てることが望まれる。

③ 圧延停止ロス最小化

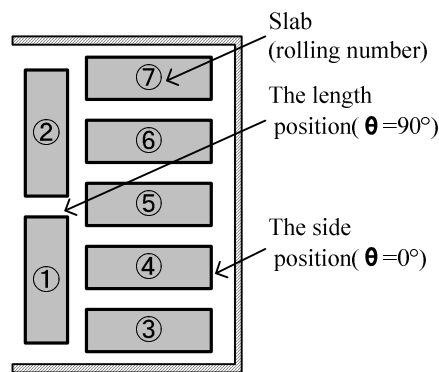
加熱炉は日々連続操業されるため、前日の操業から開放され使用可能となるタイミングは常に異なる。そのため炉の選択によっては、本来加熱を開始したいタイミングでは使用できず、圧延タイミングに間に合わなくなる可能性がある。この場合は、圧延機も停止して加熱完了を待つロスが発生する。生産性の向上のためにも、圧延停止ロスは低減したい。

2. 3 スラブ配置計画での制約条件

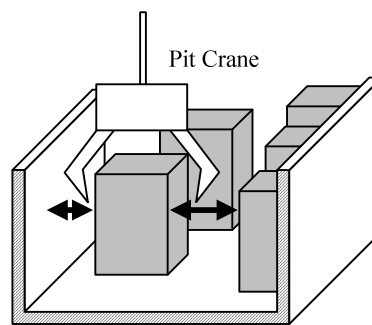
ピット炉は前述のように、小、中、大の 3 サイズがあり、装入候補となるスラブも幅、厚み、高さが異なるため、装入可能なスラブ数は常に変動する。

そのためピット炉を選択する場合は、制約条件を考慮した炉内でのスラブ配置を決定し、最大数装入できるスラブ本数を見極める必要がある。この問題は、板取り計画や方形パッキング問題と良く似た配置問題であるが、後述するように搬送用の隙間や取り出し順序の制約などがあり、更に取り出し順序に応じて隙間制約が動的に変化するため、一般的な配置問題とは大きく異なる。

また熱延計画業務に従事する熟練者は、頭のなかで加熱炉とスラブの三次元的なイメージを描き、長年の経験から培われた多数のスラブ配置パターンと照らし合わせ、それらに必要なに応じてアレンジを加えることで、最大数のスラブを装入可能なスラブ配置を短時間で決定できた。しかし、非熟練者には到底不可能であり、熟練者以外がこの業務を引き継がない最大の障害であった。スラブ配置に関する制約条件は以下のとおりである。



(a) Top view



(b) Side view

Fig.3 Constraints of slab arrangement

<制約条件>

① スラブの置き方制約

Fig. 3 (a) にピット炉内でのスラブ配置を上から見た場合の一例を示す。炉内でのスラブの置き方は、基本的に横置き ($\theta = 0^\circ$) と縦置き ($\theta = 90^\circ$) の 2 通りに限定される。

② 搬送用の隙間制約

スラブの搬送にはクレーンが用いられ、製品面を

傷つけないようにスラブの厚み面を掴んで行なわれるが、その際にクレーンの掴み隙間を考慮しなければならない。隙間は搬送するスラブと隣接するスラブ間、またスラブと炉壁の間に必要となり、それらはスラブそれ自身のサイズ、および隣接スラブのサイズによって変化する (Fig. 3 (b)).

③ 取り出し順序制約

加熱が完了したスラブは、圧延順序にしたがって取り出され圧延機に送られる。そのため、圧延順序通りに取り出し可能な配置でなければならない。Fig. 4には、スラブの配置は同じだが圧延順序が異なる2ケースを図示した。たとえば、Fig. 4の左図では圧延順序が3番目のスラブを取り出す際には、すでに1番目のスラブが取り除かれているため、必要な隙間が生まれ取り出しが可能となる。一方、右図では1番目のスラブを取り出そうにも6番目のスラブがあるため、必要な隙間が確保できず取り出し不可能となる。

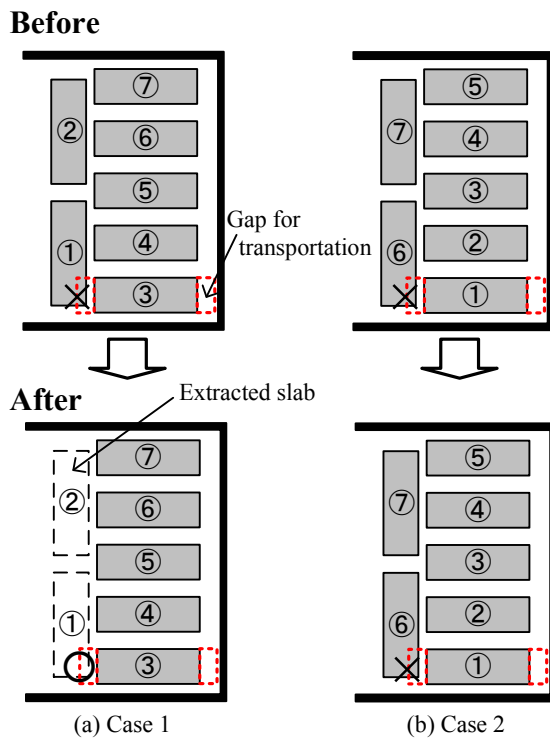


Fig4. Example of slabs arrangement

3. 計画支援システムの開発方針

熱延計画を調査し得られた上述の各種制約条件を用いて、筆者らによるハンドシミュレーションでの計画立案を試みた。そして得られた結果と熟練者の計画結果を比較したところ、多くの不一致な点が確認された。その主要因を分析したところ、以下のような原因が考えられた。

- ① 制約条件同士が競合するケースがあり、更に制約間の優先順位が状況により異なる。
- ② 操炉計画を有利にするため、あえて圧延順序計画の制約条件を緩和することがある。
- ③ 翌日以降の計画を有利にするため、今回はあえて不利な操炉計画を選択することがある。
- ④ ピット炉内でのスラブの配置には、斜め置きまで駆使して装入本数を稼ぐことがある。

このように、現実の計画は生き物であり、優先すべき計画要素や制約条件は時として変化する。場合によっては制約条件を故意に違反することも許され、更に計画対象日の前後も考えた判断とそのための情報収集も必要とされる。これらすべてを計算機で対処することは不可能であり、どうしても人間系での対応が必要とされる。そこで、今回目指すシステムとしては、計算機と人間が互いの弱点を補いながら、協力して計画を立案する協調型システムとする。後述するスケジューリングアルゴリズムでは、比較的優先度の高い主要な制約条件のみに絞り自動的な計画立案を担当する。そして、状況に応じた判断と計画修正は人間系で担当することとする。

ただし、作業者のスキル差を補うため、修正・変更結果に対して制約違反の有無をチェックし、該当箇所にはアラームで注意を促すフォロー機能や、試行錯誤により解決策を導き出すためのシミュレーション機能を用意するなど、サポート機能を充実させることとした。

4. スケジューリングアルゴリズム

熱延計画においては、圧延順序ステージと操炉—スラブ配置ステージは密接に関係しており、両者はトレードオフの関係にある。したがって本来であれば同期的に扱うことが好ましいが、処理が複雑となる点と、品質の確保を最優先とし、熟練者が築き上げた現状の圧延操業の流れを継承したい点から、同期的な扱いは部分的に考慮するものの、基本的には両ステージをそれぞれ独立して扱うこととした。

4. 1 圧延順序の決定手法

圧延順序計画では、品質の確保が最優先であるが、ある程度有利な操炉が組めるようにしておくことが望ましい。この有利な操炉とは、加熱炉に装入したスラブを圧延順序にしたがい取り出していく際に、最初のスラブを取り出し後、最後のスラブを取り出すまでの炉出し占有時間を短くすることを指す。これにより、炉温を保つための燃料消費が抑えられるメリットと、翌日以降の計画で、早く使用できるように炉を開放できるメリットがある。そこで Fig. 5 に示すように、スラブの持つ属性情報のうち加熱条件に注目して、圧延順序を決定する。

まず Step 1 では、加熱条件毎にスラブを集約して加熱グループを形成し、各グループ内での幅降順ソートを実施する。Step 2 では、品種毎の並び位置関係を考慮し、グループ単位での圧延位置を決定する。このグルーピングの利点の1つ目は、同じ加熱炉に入る可能性のあるスラブを集約することで、炉出し占有時間の短縮が見込まれる。2つ目は、加熱条件は主に品種毎に分かれているため、品種毎の圧延位置関係を考慮する場合にも有利に働く。そして Step 3 では各グループ間の繋がり、全体の幅推移とウォームアップ材の配置、特定注文への制約を満足するように、スラブ単位での圧延順序補正を加え圧延順序を完成させる。本手法では、組合せ的な試行は取り入れず、グルーピングと粗編成から詳細編成へと段階的に圧延順序を決定する方法を併用した。その理由として、品質確保のため圧延順序に与えられる自由度が極めて少ないこと、制約間の優先順序を機能的に取り扱えること、熟練ノウハウや今後新設される制約を容易に取り込めることを考慮した結果、シンプルな処理が相応しいと判断されたからである。

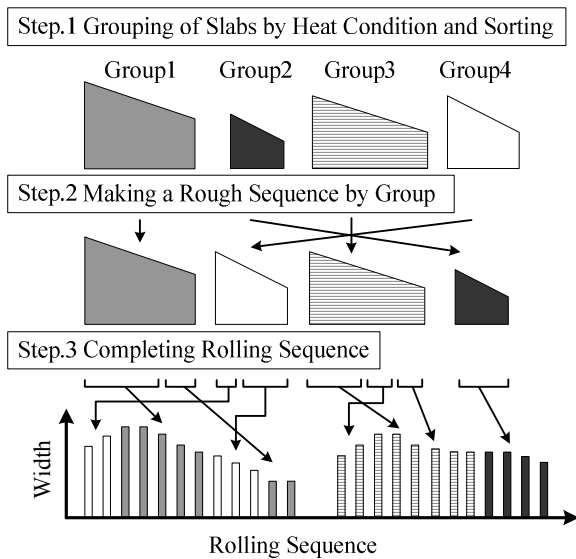


Fig.5 Proposal method for hot rolling sequence

4. 2 操炉の決定手法

加熱炉群は連続操作されているため、利用可能となるタイミングはすべて異なる。また加熱条件により加熱に必要な時間も変化する。そして各スラブの圧延タイミングも毎計画変化する。このように不確定な要素が多いなかで、今回の計画に相応しい加熱炉の選定とその使用順序の決定は、組み合わせ最適化問題と捉えることが出来る。そこで、この問題に対しては、局所探索法を用いることとした。この局所探索法では、後述するスラブ配置探索のためのヒューリスティクスを併用しながら、(1)式の目的

関数を最小化するように解探索を行なう。

$$f = w_1 \times N_{use} + w_2 \times T_{wait} + w_3 \times N_{cancel} \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、各記号は以下を示す。

- N_{use} : 使用炉数
- T_{wait} : 圧延停止ロス時間
- N_{cancel} : 圧延中止スラブ数
- w_i : 重み係数

4. 3 スラブ配置の決定手法

(1) スラブ配置探索手順

スラブ配置問題は複雑な組み合わせ問題の一種のため、求解手順によっては計算時間が長くなり、現実的な時間内で有効な解が得られない可能性がある。更に操炉の組み合わせ探索の過程で幾度となく行なわれるため、短時間で良質の解を効率良く求めることが重要となる。そこで、最大数のスラブを装入できる配置を決定する手順として、Fig.6 に示す手順を採用した。この手順では、確実に装入できる少ない初期候補数から開始する。まず初期候補での配置を探索し、1つでも発見できれば、圧延順序を保って候補数を増やし再度探索を行なう。そして装入不可能となる候補数まで繰り返し、最大装入可能本数とその配置を決定する。探索手法としては、極めて短時間で求解可能なヒューリスティクスによる方法を採用する。

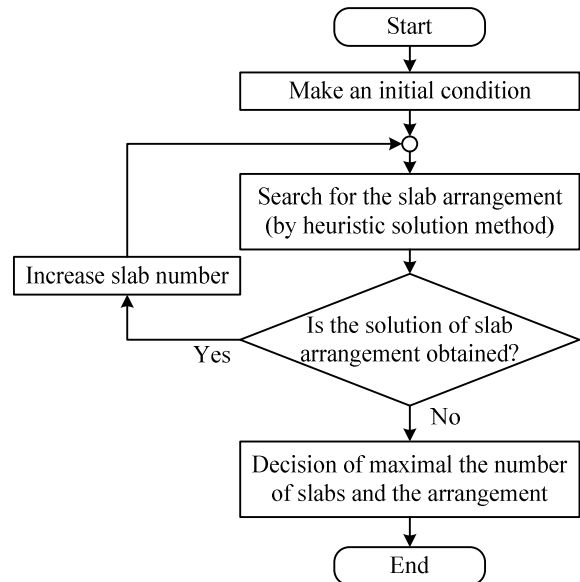


Fig.6 Procedure for slab arrangement search process

(2) ヒューリスティクスによる配置探索

ここでは“最大数のスラブが装入できる配置”という既存要求に加え、スラブ取出し時の作業ミス防

止の観点から，“規則正しく取り出しが行なえる配置”という新たな要求を追加し，ヒューリスティクス解法を設計した．この解法では，以下のようにスラブ配置を探索する．(Fig.7)

なお以下の説明においては， $i=1\cdots N$ は装入候補となるスラブの番号(炉内での圧延順序)， W と L は使用予定となる加熱炉の上から見た幅と長さ， w_i と t_i は上から見たスラブ i の幅と厚み， (x_i, y_i, θ_i) はスラブ i の左下頂点の座標と置き方， $f(i)$ はスラブ i に必要な隙間を求める関数を表すものとする．

Step1 : 横置きで1列分単位にグルーピング

最初に横置きで詰め込むことから試みる．現実の加熱炉の幅とスラブ幅の範囲から，加熱炉の幅方向へは横置きで最大4列配置できる可能性があるため，最大4グループまで編成する．ここでは圧延順序の遅いものから以下の基準でグループ分けする．

① 1グループ目の編成

$$\sum_{i=l_1}^N t_i + \alpha \times (N - l_1) \leq L \text{ となる最小の } l_1 \text{ を求めて } G_1 = \{l_1, \dots, N\} \text{ とする.}$$

② j グループ目の編成

$$\sum_{i=l_j}^{l_{j-1}-1} t_i + \alpha \times (l_{j-1} - l_j - 1) \leq L \text{ となる最小の } l_j \text{ を求めて } G_j = \{l_j, \dots, l_{j-1} - 1\} \text{ とする.}$$

③ ②の処理を最大4グループ編成するか，または装入候補がなくなるまで繰り返す．編成されたグループ総数を n とする．

ここで， α はスラブの厚み方向に確保する隙間(固定値)， l_j は j 番目の横列候補に分類されるスラブの開始番号， $G_{j(j=1\cdots n)}$ は j 番目の横列候補となるスラブの集団を表す．

Step2 : 加熱炉へ1番目の横列候補 (G_1) を配置

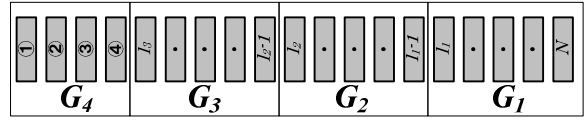
G_1 を構成する各スラブと炉壁間に必要な隙間 $f(i)_{i \in G_1}$ を確保してスラブ配置座標を確定する．

Step3 : 2番目以降の横列候補 ($G_{j=2\cdots n}$) の装入を，以下の2通りのパターンで並行して試行する．

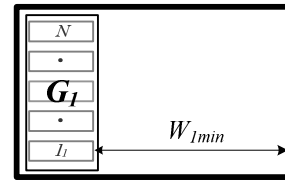
Step3A : 横列間に最小限必要な隙間のみを確保するケース (Case1)

① $G_{j(j=2\cdots n)}$ を構成する各スラブと左側の配置済

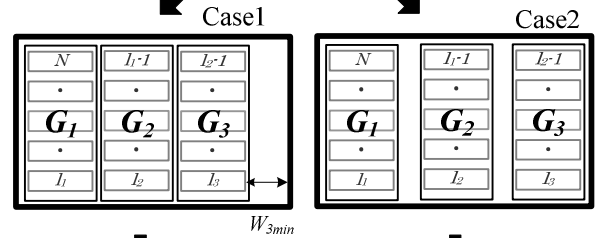
(1) Step1



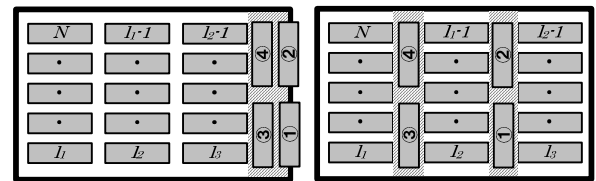
(2) Step2



(3) Step3



(4) Step4



(5) Step5

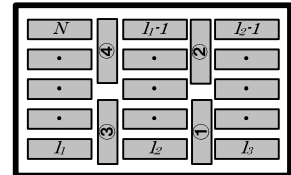


Fig7. Procedure for slab arrangement search process

みスラブ間に，必要な隙間 $f(i)_{i \in G_j}$ を確保してスラブ座標と置き方 $(x_i, y_i, \theta_i (= 0))_{i \in G_j}$ を求める．

② G_j を装入することで炉右側に残る空きスペースの最少幅 $W_{j \min}$ を求める．

$$W_{j \min} = W - \max(x_i + w_i)_{i \in G_j} \text{ となる } i \text{ を } k \text{ とする.}$$

③ スラブ k と右側の炉壁に必要な隙間 $f(k)$ が $W_{j \min}$ 以下であれば G_j は装入可能と判断し，Step3Aの①に戻り次グループの装入を試みる．

④ 装入不可能，または n 番目のグループまで試行が完了した場合は Step4 に移る．

Step3B: 横列間に平均的なスラブ厚と同量の間隙を故意に確保するケース (Case2)

- ① $G_{j(j=2\dots n)}$ を構成する各スラブと左側の配置済みスラブ間に、平均スラブ厚 $\bar{t}_{i=1\dots N}$ を確保してスラブ座標と置き方 $(x_i, y_i, \theta_i (= 0))_{i \in G_j}$ を求める。
- ② Step3A の②と同じ。
- ③ Step3A の③と同じ (戻り先は Step3B の①)。
- ④ Step3A の④と同じ。

Step4: 未配置スラブを縦置きして、残った空きスペースへ配置。縦置きの場合も以下の2通りを試行。

Step4A: Case 1 の場合、加熱炉の右側の空きスペース (Fig. 7 (4) の斜線部) を対象として、縦置きでの残りスラブの配置パターンを全列挙。

Step4B: Case 2 の場合、加熱炉の右側の空きスペースと配置済み横列間の隙間スペース (Fig. 7 (4) の斜線部) を対象として、縦置きでの残りスラブの配置パターンを全列挙。

なお、Step3 を終了した時点での未配置スラブ数は通常最大でも 6 本程度であり、更にサイズが近いスラブは同一サイズと見なし組合せの対称性を排除すると、全列挙しても計算時間は問題とならない範囲に収めることができる。また Step4 では、装入候補スラブがすべて配置可能な解が 1 つでも得られれば、その時点で探索を終了する。

Step5: Case 1, Case2 のうちより多くスラブを装入できた結果を採用する。

本手法で圧延順の遅いスラブから配置を決めた理由は、圧延順序通りの取り出し制約を満足させるためである。つまり装入できる順序であれば、当然その逆の順序であればなんの問題もなく取り出すことが可能となるため、動的に変化する隙間制約を暗に考慮した配置探索が実現できる。

Fig.8 に現実のスラブ配置計画に本手法を適用した結果を示す。この場合は横列間の隙間を利用し、より多くのスラブが装入できる Case2 の配置 (Fig.8 (h)) が採用される。

5. 適用結果

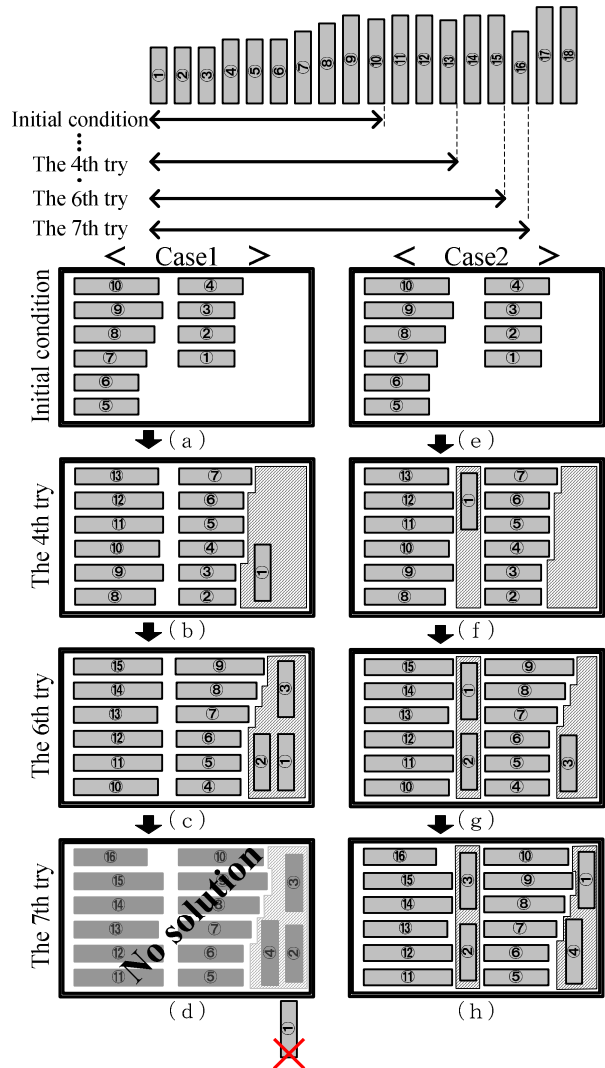


Fig.8 Result of slab arrangement by the proposal method

5. 1 熱延計画作成例と評価

前節で提案した計画支援システムを用いて、非熟練者による熱延計画の立案を試みた。Fig.9 に本システムと非熟練者で立案した計画結果を示す。

Fig.9 (a) の圧延順序計画結果は、品種毎に色分けして表示しており、各品種がむやみに混在することなく、同品種が集約された圧延順が作られている。更に、圧延材の幅も広幅から狭幅への推移が適度に繰り返されている。図中で△印で示した部分では、多少の幅戻りが生じているが、これは特定注文に対する圧延順序制約への対策であり問題はない。また図中の◎印の部分は、圧延ロールを適温にするためのウォームアップ材が装入された箇所である。このように各種制約条件が満足され、実行可能な圧延順序の立案が可能となった。

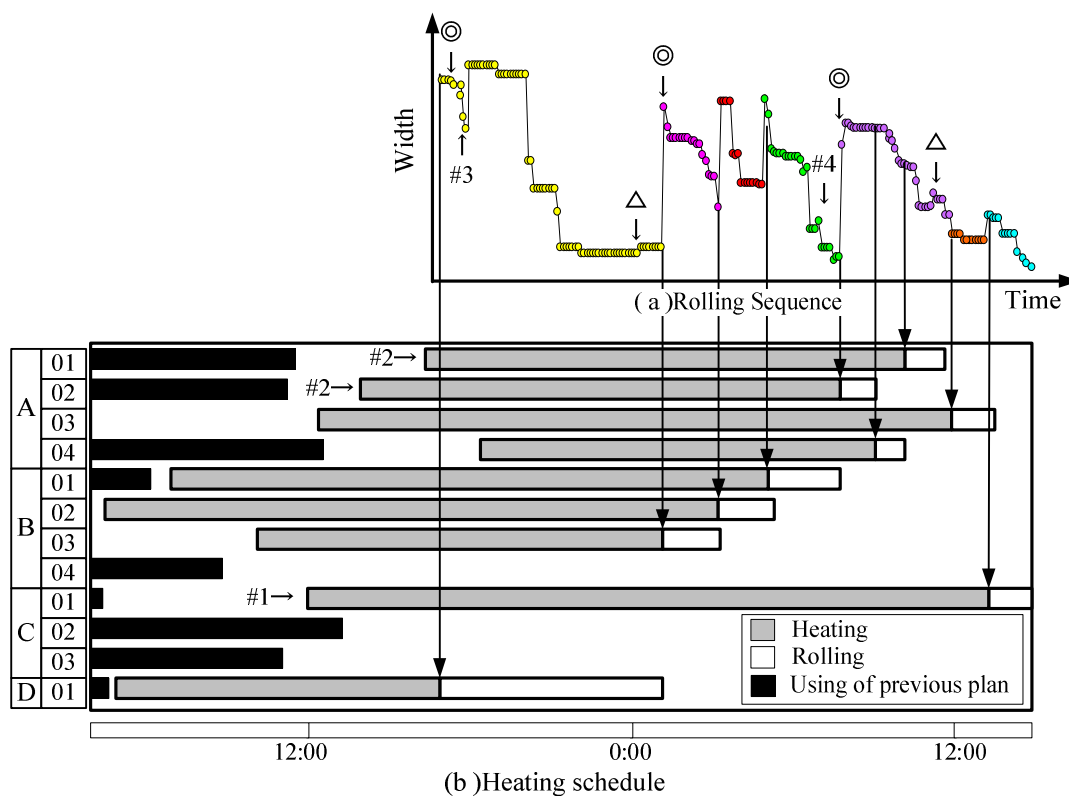


Fig.9 Result of an aluminum hot rolling plan

Fig.9 (b) は立案された圧延順序に対して、操炉計画を立案した結果を示す。図中のA, B, Cはピット炉であり、名称を変えてサイズの違いを区別している。またAと(B, C)では加熱方式が異なる。Dは唯一の連続炉である。前日操業での使用時間帯を黒色部、今回計画での加熱時間帯を灰色部、加熱完了後のスラブ取出し時間帯(炉出し占有時間)を白抜き部として、操炉結果を示している。この結果では、Fig.9 (a)での各品種先頭材の圧延タイミング

に間に合うよう、加熱炉選択が行なえており、無駄な圧延停止ロスが発生がないことが確認できる。更に圧延順序計画ステージでの加熱グルーピングにより、各炉の炉出し占有時間も必要以上に長くなり、燃料消費の点からも効率良い計画が実現されていると判断される。

また Table 1 に、熟練者と比較した本システムのスラブ配置計画の達成度を示す。最大限スラブを詰め込んだ状態を100%とすると、熟練者の日々の操業では、通常であれば60~100%程度の範囲で計画を作成しており、非熟練者による結果も同水準に達している。ここで60%とは、配置計画が悪いため多くのスラブを詰め込めなかった状態を意味するのではなく、装入候補となるスラブ本数が少ないため、結果として炉内に余裕を残した配置が行なわれたことを意味している。Table 1 で注目すべきは、最大数近くまで詰め込んだと考えられる95~100%の状態を多数の炉で実現出来ている点であり、熟練者が行なうのと同様の計画が実現されている。

なお、Fig.9の#印を付加した部分は、以下のように非熟練者が加えた修正・変更箇所であり、自動化で対応できない部分に対して適切なフォローが加えられている。

<非熟練者による修正内容>

Table1. Comparison of slab arrangement result

		Average of skilled worker[%]	Result of this system[%]
A	01	60 ~ 100	95
	02		95
	03		60
	04		100
B	01	60 ~ 100	100
	02		100
	03		80
	04		—
C	01	60 ~ 100	80
	02		—
	03		—
D	01	90 ~ 100	100

- ① 翌日計画のため、使用する炉を一部振り替え変更（当初はB04を割り当てたが、翌日に中型炉を残すためC01に振り替える）（#1）
- ② 同一加熱条件となる加熱炉間のスラブ配分を微調整（当初は、A02とA04が100%であったが、A01に余裕があったためA02から一部スラブを移動した）（#2）
- ③ ウォームアップ材として使用するスラブ本数を追加（#3）
- ④ 直近に生じた品質トラブルへの対応のため、圧延順序を一部並び替え（#4）

5.2 本システムの長期運用例

Fig.10に本システムを連続使用して、非熟練者により1ヵ月程度の計画を実施した結果の一例を示す。ここでは特に、非熟練者による計画が比較的困難であり、状況変化も大きいと考えられるスラブ配置計画に着目し、この間の計画達成度推移（Table1と同様に最大限スラブを詰め込んだ状態を100%とした場合に対する、非熟練者の計画結果）について検証した。これにより、図中◇印で示した一部の加熱炉へのスラブ充填率が、製造納期を考慮した結果60%以下となるケースが発生しているものの、全体を通して平均的には80%以上と高いスラブ充填率を確保出来ており、熟練者の計画レベルに匹敵する成績が得られることが確認された。

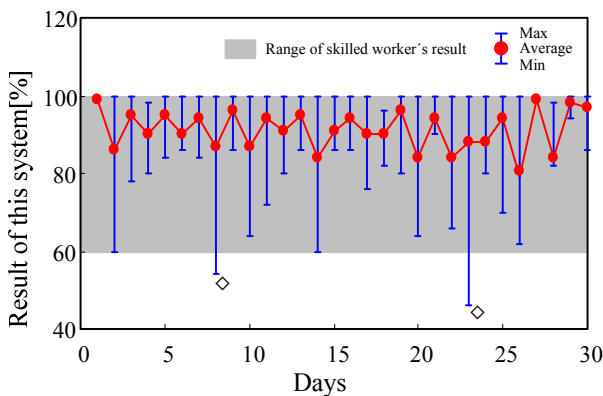


Fig.10 Change of slab arrangement result

以上のように、提案する計画立案システムを用いれば、非熟練者であっても難解な熱延計画の立案が可能となる。また一通りの自動計画に要する時間は数分程度であり、非熟練者による修正やシミュレーション機能による検討を加えても2時間程度で計画が可能となり、従来と比べ計画作業時間を50%減と大幅に短縮することが可能となった。したがって、これまでの計画作業の大半を、本システムがカバーできるようになったため、作業（非熟練者）は人間系で対応すべきポイントに絞った訓練により、技

術伝承が円滑に進められることとなり、短期間で実用的な計画が立案できるようになった。

5.3 実作業での評価

本システムは2001年より実使用を開始したが、これ以降、生産現場を取り巻く環境については、大規模な設備変更こそなかったものの、市場動向や要求品質の厳格化などとともに刻々と変化してきた。これに対して本システムは、小規模のルール追加などのメンテナンスを行ってきたものの、基本的にはシステム仕様を変更することなく、現在も現場の計画作業にとって不可欠なシステムとして日々使用されている。このように長期間にわたって実使用に十分耐えるシステム構築が出来たのは、本論文で示したように計画ステージを2段階として不必要に複雑化せず、各ステージでの本質的な役割を明確にすることで、ピンポイントな対処により即座に改善が可能であったことが大きいと考えている。

また当時の非熟練者も、本システムを用いた業務経験を通してスキルを磨いたことで、より完成度の高い計画立案を目指し、人間系介入の頻度を増やすようになった。これについては、3章でも触れたようなシミュレーションをベースとしたサポート機能によるところが大きい。これは基本的には、本システムで提案した各種計画アルゴリズムを利用して、計画者が様々なケースでの計画シミュレーションにより、比較検討を行なうことを可能としている。ただし突発的な圧延条件の変更など、状況によっては（1）式では必ずしも満足な解が得られない場合がある。そのような場合でも本システムでは、最適と考えられる1つの解のみを提供するだけでなく、探索の過程で獲得した様々なバリエーションの解候補も保持し、優先順位を付けて計画者に提示することとしている。これにより計画者は、実行可能な解候補のなかから、状況に応じた適切な解を選択することができ、使用を重ねることで計画者自身のスキルアップに繋がっているものと考えられる。このことも本システムが長期間にわたって実用性を維持する上で、非常に重要な役割を果たしていると考えられる。

6. おわりに

製造現場の技術伝承の一例として、アルミニウム熱間圧延工程の計画立案を支援するスケジューリングシステムの開発に取り組んだ。この問題は、複数の計画要素から構成され、多くの制約条件があり長年の経験が必要とされる非常に取扱いの難しい問題である。そのため、これまで後継者の育成が進まず、熟練者に強く依存した状態が長年続いていた。本論文では、この状態を打破するため、計算機と人間が

互いに協力して計画を立案する協調型システムを採用し、実用可能なスケジューリングアルゴリズムを提案した。その結果、非熟練者でも短期間の訓練により熟練者と同等の水準の計画立案を行なうことが可能となった。

最後になるが、今後の課題について少し触れておきたい。今回開発した計画支援システムでは、非熟練者においても実行可能な圧延計画を立案できるとともに、熟練者の持つ高度な技術を出来る限り解り易い形で伝承することを狙ったものであり、たとえば4章でも述べたように、本来であれば同期的に扱うことが好ましいとされる2つのステージを基本的に非同期としているなど、最適化の観点からみればまだ不十分な点も多い。これについては、メンテナンス性と計画者の意思介入から見れば有利な面があるものの、たとえば操炉決定方法で述べたような目的関数を圧延順制約にも拡張するような形で、両者のトレードオフを考慮しながら、より効率的な解を追求していく余地もあるものと考えられる。

参考文献

- 1) 上野：鉄鋼業における生産スケジューリングと最適化，システム／制御／情報，**37-4**，237/245 (1993)
- 2) 田村，永井ほか：鉄鋼薄板製造における二段階法を用いた機能分割型スケジューリング・システム，システム制御情報学会論文誌，**8-10**，592/601 (1995)
- 3) 三宮，喜田ほか：遺伝的アルゴリズムと最適化，システム制御情報ライブラリー17，166/179，朝倉書店 (1998)
- 4) 高柳，岡村ほか：制約論理プログラミングによる加熱炉へのスラブ装入本数最大化，システム制御情報学会論文誌，**15-8**，438/446 (2002)
- 5) Takayanagi, Okamura, et al.: Scheduling System Considering Heating Condition and Arrangement of Slabs for an Aluminum Hot Rolling Process, 2006 International Symposium on Flexible Automation (2006)
- 6) 田地，原田ほか：ヒューリスティックによる加熱炉へのアルミニウムスラブ装入本数最大化，第44回システム制御情報学会 研究発表講演会講演論文集，367/368 (2000)

【 著者紹介 】

高柳 仁史 (正会員)



1973年11月5日生。96年3月名古屋工業大学生産システム工学科卒業。同年4月住友軽金属工業(株)勤務。アルミニウム製造プロセスの制御技術、生産システムのスケジューリング技術の研究などに従事。2006年計測自動制御学会中部支部奨励賞受賞。スケジューリング学会などの会員。

岡村 義英 (正会員)



1965年1月25日生。89年豊田工業大学制御情報工学科卒業。2000年東京大学にて学位取得，博士(工学)。住友金属工業(株)勤務を経て，住友軽金属工業(株)研究開発センターに勤務。圧延機，押出機および抽伸機の制御技術，生産システムのスケジューリング

技術の研究に従事。96年 IFAC Congress Applications Paper Prize Finalist。98年科学技術庁第57回注目発明選定。99年計測自動制御学会中部支部技術賞など受賞。日本鉄鋼協会，スケジューリング学会などの会員。

宮地 和博



1964年6月30日生。87年立命館大学機械工学科卒業。同年4月住友軽金属工業(株)勤務。技術研究所プロセス研究部を経て，現在名古屋製造所板生産技術部圧延技術室室長。