

多品種多段階工程生産工場の操業 計画システム——継目無鋼管熱間工場の例——

家長 吉行・茨木 俊秀・徳山 博子・竹安 数博

1. はじめに

受注生産を原則とする鉄鋼業において、その生産管理上の重要課題が大きくなって2つある。

第1に、需要家からの種々の注文について、製鋼から圧延・精整の各工程で製造仕様の同一のものを、生産設備に適合させてロット編成を行なうことである。その第2は、これらのロットについて納期や設備条件のもとで作業順序の最適化（たとえば段取替時間最少化）をはかるスケジュール問題である。

ところで、近年は鉄鋼製品注文の小ロット化、多品種化が進展している状況にあり、上記の問題はいっそう大規模化して適正な操業計画の立案をむずかしくしている。

本稿で紹介する継目無鋼管熱間工場もその例外ではなく、その中でも特に多段階ジョブショップ型の生産形態をもつ精整工程では、より効率的操業確保のため、従来手作業であった作業順序（操業）スケジュールのシステム化を進めてきた。

このスケジュールは、納期や仕掛置場制約のもとで、製造仕様や通過工程の異なる多品種の注文

群につき各段の生産設備群への振り当てと作業順序を稼働率最大となるように決定する問題であるといえる。ただし、この結果は、設備ごとの運用計画（稼働可能期間の設定）に大きく影響を受けるところから、この設備運用計画の調整などを対話処理としており込んだ2段階のヒューリスティック解法を採用した。以下その概要を報告する。

2. 継目無鋼管熱間工場の操業計画問題

2.1 製造工程の概要

継目無鋼管熱間工場は、主に石油井戸用やボイラー熱交換器用など、特に高い性能を要求される鋼管の製造を行なっており、その製造工程は製管圧延工程と精整工程とからなっている。製管圧延工程では、加熱された丸鋼を穿孔機にてくり抜いたあと、これを熱間圧延して所定の寸法（外径・肉厚）の素管を製造する。次に精整工程では注文の製品規格に対応して、継手接続のための管端厚肉化（アプセット）やネジ切の加工処理、また強度などの性能確保のための熱処理を行なって製品出荷を行なっている。

他の鉄鋼製品と同様に、継目無鋼管も需要家からの多種多様な注文を受け、寸法や加工法の異なる月間約150種以上の品種を生産する必要があり、典型的な多品種多段階生産形態となっている。

本報では、物流が複雑に錯綜し、しばしば工程ネックをひきおこす精整工程での操業計画をとり

いえなが よしゆき 住友金属工業㈱ 制御技術センター 制御OR部
いばらき としひで 豊橋技術科学大学
とくやま ひろゆき 住友金属工業㈱ 制御技術センター 制御OR部
たけやす かずひろ 住友金属工業㈱ 海南鋼管製造所

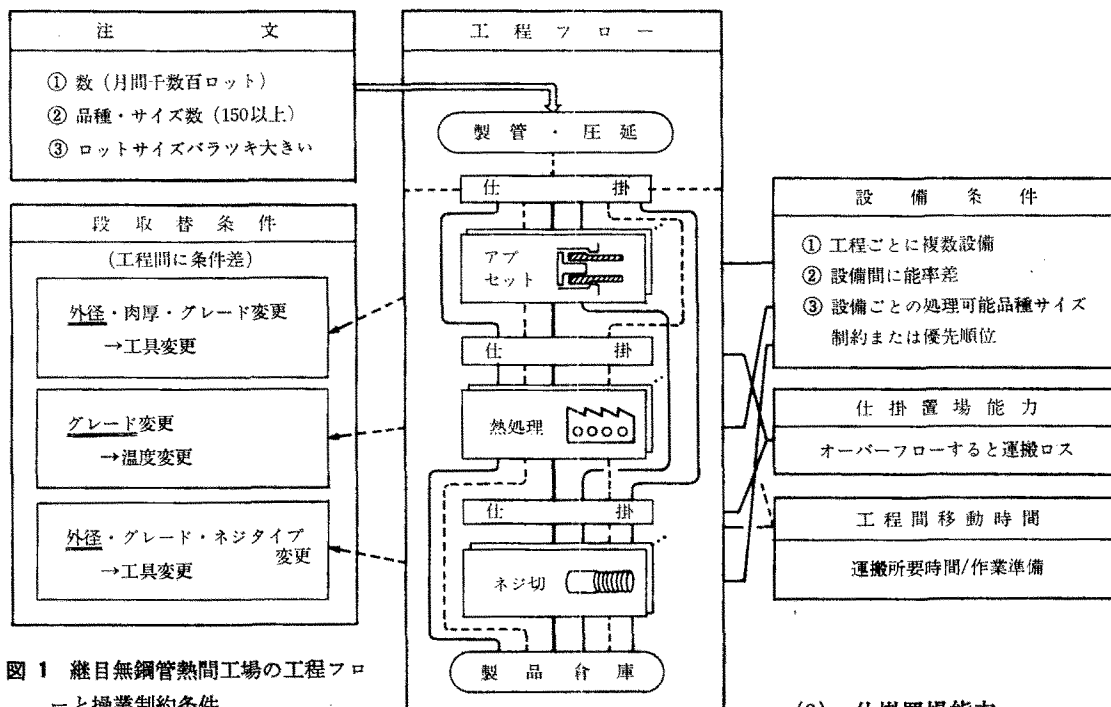


図1 継目無鋼管熱間工場の工程フローと操業制約条件

(3) 仕掛置場能力

各工程（または設備）はそれぞれ

所定容量の仕掛置場を有しているが、これを越えて材料供給を行なうと、仕掛品の仮置や配置替による運搬ロスが発生し望ましくない。（しかし、これにより上工程が停止することはない）

(4) 工程間移動時間

ある注文ロットが前工程での処理を終えたあと次工程で処理を開始するまでに運搬などのための時間が必要である。また特定の品種については、試験結果の確認やその他の準備作業のために、一定時間もしくは注文ロット本数に比例する時間が確保されていなくてはならない。

(5) 注文ロット

精整工程で処理される注文ロット数は月間千数百であるが、各ロットには数量や納期のほかに、①通過工程（品種ごとに異なる）と各工程での処理仕様、②各工程での設備振り当ての優先順位および各設備での処理能率、などの情報が与えられている。

2.3 計画の狙い

以上の諸条件のもとで、精整工程操業計画とは

あつかう。通常はこの計画にもとづき、所要材料請求と製管圧延計画が行なわれる。

2.2 精整工程の操業制約条件（図1）

(1) 設備条件

精整工程は、主な工程としてアプセット、熱処理およびネジ切りにより構成され、その工程フローは図1に示すとおりである。各工程には複数の設備があり、これらのあいだには能率差がある場合が多く、また付帯する検査設備などの制約から処理可能な品種や寸法の範囲が異なっている。

(2) 段取条件

素管の加工を行なう工程では、品種・外径・肉厚・グレード（強度）そして加工法のいずれかが異なる鋼管を処理する場合に、工具交換のための段取替が必要である。この所要時間は段取順序により異なっており、外径を変更する場合に最も長い時間を要し、その他の場合は比較的短くてすむ。

一方、熱処理工程では、鋼管のグレードに対応して熱処理温度を変更する必要があるため、このため所要時間は温度差により決まる。

次の項目を決定することである。

- (1)各工程各設備の運用計画および段取計画。
- (2)各工程で処理される注文に対する設備の振り当て、および各設備での作業順序。

そして、この計画の狙いは、次の操業諸元(指標)を最大限高位に実現することにある。

- (1) 稼働率の最大化、すなわち段取替時間と、特に下流側工程での材料待ちによる工程停機時間の最少化をはかる。
- (2) 仕掛コストの低減および運搬作業の輻輳にともなう操業外乱(計画の乱れ)防止のための仕掛量最少化を実現する。
- (3) 納期確保

さらに、これらの目標の他に、計画に対する評価として、工場側より次のような要請がある。

- (1) 計画立案後に、小ロット短納期注文を処理するさいに、外乱を極力少なくする目的から段取順序はサイクリックであることがのぞましい。
- (2) 熱処理工程では休日の前後に低い温度処理を行なうような温度変更の計画が省エネルギー上も有利である。

3. 操業計画法

3.1 操業計画法の概要

計画立案においては、前述のごとく考慮すべき操業制約が多く、また狙いも多目的であることから、そのシステム化に当っては、工程担当者との対話処理を前提においた検討を行なった。その結果、図2に示す2段階の逐次決定に問題を展開し、ヒューリスティックに解く方法を採用した。

すなわち第1段では、注文データと仮の精整設備運用計画案を入力として、マクロ的に稼働率最大化を狙った段取計画を立案する。ここで言う段取計画とは、各設備の稼働休止も含めて、2つの加工工程では外径変更について、また熱処理工程では温度変更のタイミングを与えるものである。第2段では、この段取計画を時間軸のはいたネットワークフローに展開し、これに注文1件ごと

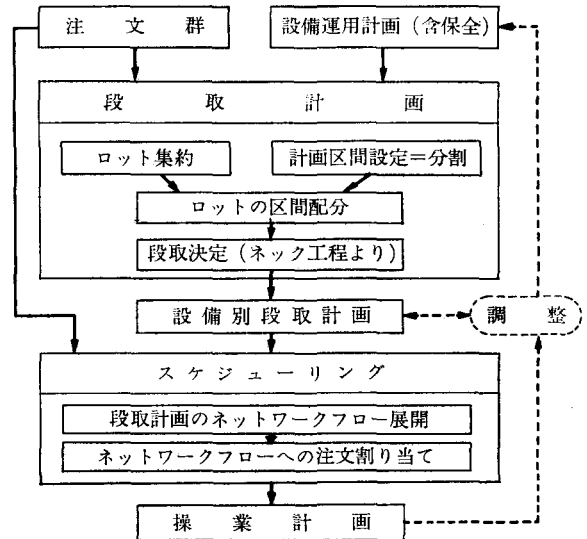


図2 操業計画法の構成

のフローを仕掛期間最短となるように割り当てることで作業順序を決定していく。

この2段階解法の狙いは、計画立案作業の中での設備運用計画の決定を、工程担当者に分担させるところにある。たとえば第1段の段取計画結果を受けて、工程担当者は次のような設備運用計画、もしくは段取計画そのものの調整を行なう。

- (1) 工程停機時間抑制のための保全日程の調整。
- (2) 仕掛品の品種構成の時間的推移に対応して稼働させる設備の計画期間中途での切り換え。

(以上は第1段を再起動するもの)

- (3) 加工工程の各設備で準備する工具数の削減や、熱処理工程で高い温度で処理する段取を減らして省エネルギーをはかることを狙った特定設備への段取の集約。(段取計画の強制変更)

このように、工程担当者が第1段、第2段の計画結果に介入しながら再計画をくりかえし、いわゆる満足のいく操業計画作成を可能にすることを狙っているわけである。このため各段での求解を短時間で行なうことが重要となってくる。

3.2 段取計画法

多段工程において設備の稼働率向上をはかるためには、段取替時間の削減のほかに、上下工程間

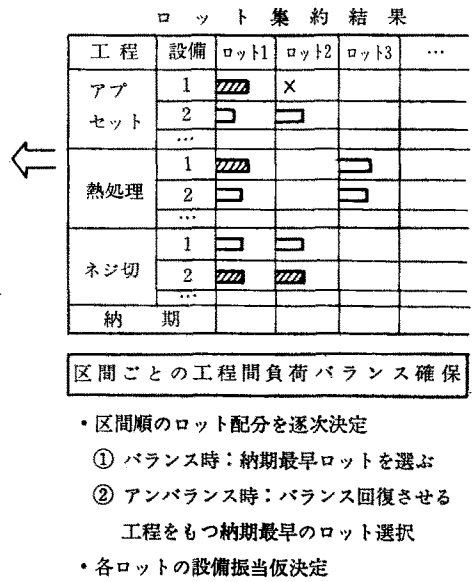
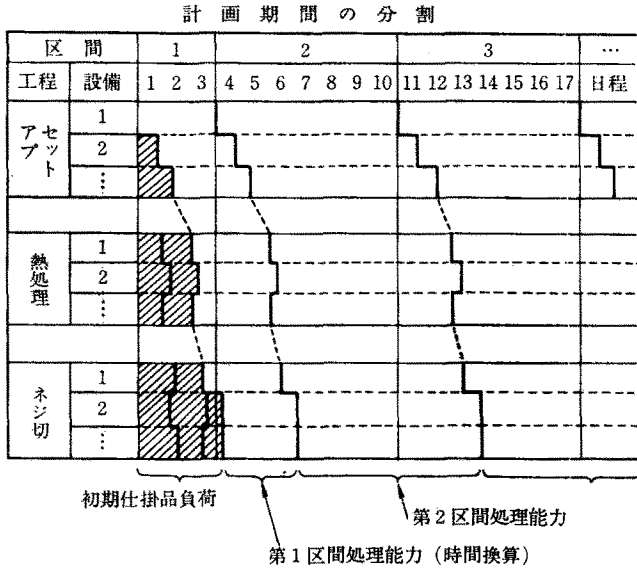


図 3 ロットの区間配分

の処理量（負荷）をバランスさせて下工程側の材料待時間（工程停機）の削減がより重要である。このため計画期間を区間分割したうえで、注文ロットの区間配分（山崩し）を行ない、この条件下で段取替時間最少化をはかる方法をとった。以下その内容について述べる。

• ステップ1：ロット集約

類似仕様（経由工程と各工程の段取が同一）をもち、かつ納期が近接している注文群を集約する。以下これを単にロットと呼ぶ。

• ステップ2：ロットの区間配分（図3）

段取順序のサイクリック性を考慮して、計画期間を原則として週間単位に分割する。各区間ごとに、次の手順にて各ロットを処理すべき区間および設備を仮に決定する。

- (1) 計画の初期での仕掛ロットをまず配分したあと、次に第1区間より以下の処理をくりかえす。
- (2) 対象区間の処理時間余力を工程ごとに算出する。もし工程間の余力がバランスしている場合は納期最早のロットを選んで当該区間に配分する。余力がアンバランスのときは、これを回復するような経由工程をもつロットの中から納期最早のロ

ットを選んで配分する。それぞれの場合に、振り当てる設備を、ロットの第1優先設備より順にチェックして仮決定する。ただし決定不可能の場合は、そのロットを次区間以降の対象とし、別に改善のロットを選ぶ。

- (3) 全工程に余力がなくなるまで(2)の処理をくりかえし、その後次区間へ進む。

• ステップ3：中間工程（熱処理）段取計画

ロットの区間配分結果を前提にして、段取計画は各工程ごとに逐次立案するが、能力的に最もネックとなっているのが熱処理工程とした場合の計画手順は以下のとおりである。（図4）

- (1) まず第1区間から、各設備ごとに振り当てられたロットを温度の昇順にならべる。同一温度のロットについては、外径などの仕様が極力同一のものがらぶようにする。

- (2) 各設備について、このロットのならばの先頭（温度の低いロット）より次順の処理可否を、以下に示す条件で検討したうえで、処理期間を決定する。

• 上工程からくるロットについては、熱処理のタイミングに間に合わせられること。具体的には、

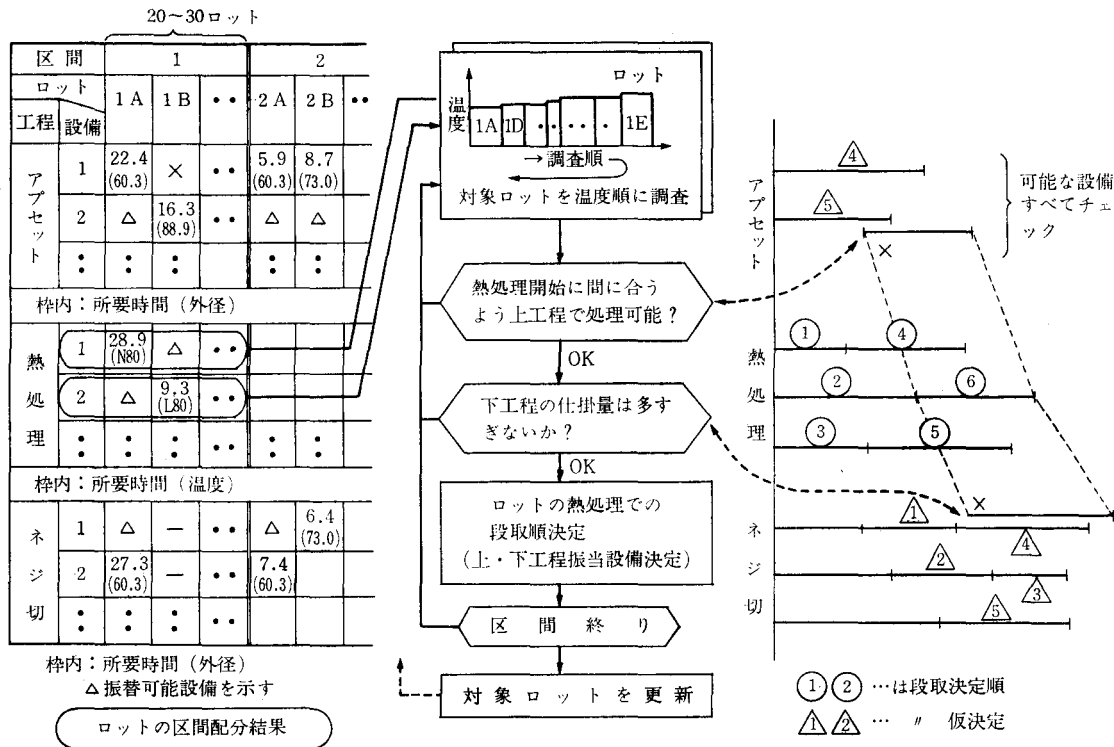


図 4 段取計画法(熱処理工程)

上工程のいずれかの設備で最遅作業完了時刻にて山積みし、処理能力と比較する。

• 下工程へ送るロットは、このロットも含んで仕掛量が過剰とならないこと。この場合は最早処理開始時刻で山積みして能力と比較する。

この条件は当該のロットを処理できる上下工程設備につきすべて検討し、これによって設備振り当てを確定する。条件を満たすことができなかった場合には、次のロットを検討する。

(3) 最も温度の高い最後のロットまで作業順を検討したあと、手順(2)で条件を満たすことのできなかったロット群を対象にして、逆に温度の降順に作業順序を検討する。これによって、いわゆる山なりの最適な温度変更順序が期待できる。

(4) 以上の手順終了後も区間の計画が完了しない場合は、次区間以降の対象ロットより温度推移に適合するロットを選んで区間計画の完了を期す。不成功の場合は工程停機とし、残ったロット

は次区間の対象としてくりこす。

上記(2)~(4)の手順は、計画済期間の短い設備より逐次選んで行ない各設備の計画が併行して進むようにしておく。

(5) 各設備ごとに、同一温度でつづけて処理されるロット群の作業時間帯をまとめて、段取計画を完成する。

ステップ4：上工程（アセット）段取計画

この工程での段取計画は、最遅作業完了時が与えられたロット群（熱処理品）と処理区間が指定されたロット群（非熱処理品）を対象とし、段取替時間最少化をはかるスケジュール問題となる。

ここでは、中間工程を経由せずに下工程に送られる品種の仕掛負荷を考慮する必要がある。そこで熱処理の場合と同様に各設備併行してロットを逐次選択する作業順序決定と、これを外径変更の段取計画にまとめる方法を採用した。

ロットの逐次選択(図5)では、先行するロット

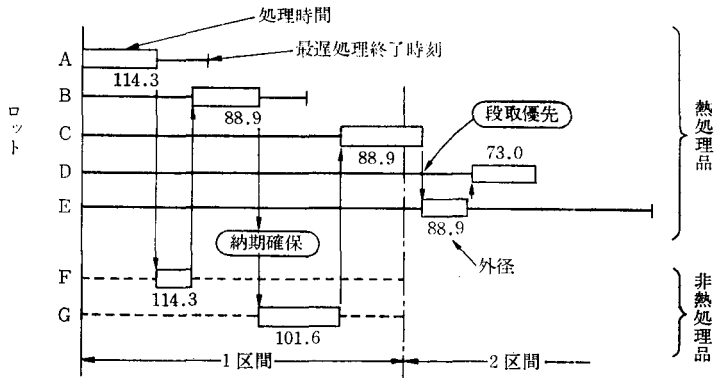


図5 上工程の段取計画

トに対して、下記条件を満たすロット群の中から段取替時間最少のロットを次順の作業として決定していく。

- 当該ロットを処理することで他のロットの中に最遅処理完了時刻に遅れるか、または指定区間で処理ができなくなるものが発生しないこと。
- 下工程に送られるロットについては、熱処理品も含めて仕掛量が過剰とならないこと。

ステップ5：下工程（ネジ切）段取計画

上工程段取計画とは逆に、最早処理開始時刻が与えられるロット群と、処理区間が指定されたネジ切単独工程処理品を対象としたスケジュール問題となるが、ここでの記述は略す。

以上述べてきた段取計画法は、基本的にはネットワークとなりやすい中間工程すなわち熱処理の最適段取計画をまず立案し、この条件下で上下工程の段取計画を立案する近似解法である。この方法は、非常に効率がよいという有利さはもっているものの、一方で設備間の段取集約や設備運用計画を適正に決定することがむず

かしいという問題をかかえている。これが、前述のごとく工程担当者の介入を受けたうえで、改めて詳細なスケジュールを立てる方法をとった理由の大きな一因となっている。

3.3 スケジュール

この節では、精整各工程・設備において、時間軸上に既定された段取計画と、注文が与えられたとき、仕掛量を最少化する問題を扱

うが、いっぽうで工程担当者の介入をうけた段取計画そのものの実用可能性を検討できるようにすることも大きな課題である。

以下は、この問題をネットワークフローとして解く方法について述べる。

図6は段取計画のネットワークの一例である。スケジュールすなわちこのネットワークフロー上への注文割り当ては概略次の手順で行なわれる。

- (1) 注文をネットワークフローに割り合てるさいの優先順位は、①納期順、②通過工程の多少、③注引量（本数）とし、逐次ロットを選択する。
- (2) 割り合てるさいは、段取計画と同じく、ネ

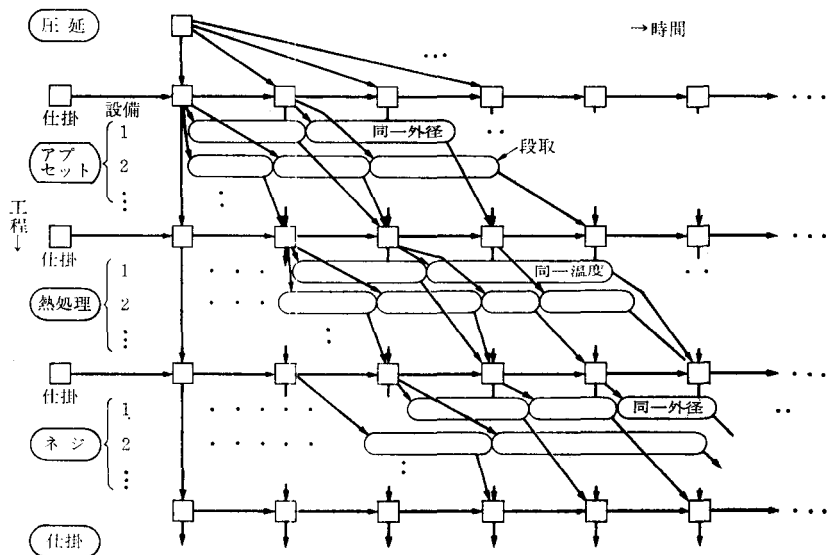


図6 ネットワークフロー

ック工程より探索し、段取条件が注文仕様と合致してかつ処理時間の残容量がある段取の中で最早のものに割り合てる。

(3) 上下工程については、決定済工程の段取に最も近い段取を仕掛置場容量も考慮して探索し、割り当てる。

(4) 仕掛容量条件にて上下工程の段取を探索できない場合は、ネック工程の段取探索からやりなおす。なお、納期遅れが予想される注文が発生したときには、割り合

てのいれかえや、段取の処理時間容量のアローワンスを変更して解を改良する方法もあるが、ここでも工程担当者に警告を出して段取計画の変更をうながす方法をとっている。

(6) 実行可能解が得られた場合には、各段取内での作業順序を決定してスケジュールを終了する。

以上の手順による結果は、注文の割り当て優先順に影響を受けると思われるが、大口の注文を中心に仕掛期間を短縮するという意味で、今回採用した優先順は、比較的良好な結果を与えている。

4. システムの実用化と効果

本稿の操業計画法は、当社海南鋼管製造所の生産管理システムに導入され、昭和58年8月より、月度精整工程計画用として実用化されている。図7はその計画出力例である。

計画法の処理時間は各段約1分前後（ACOS 550）であり、計画の比較代案を検討するのに十分な効率もっている。

このシステムの導入効果は、計画立案の所要時間を大幅に短縮したことのほか、各精整設備の運用計画や段取計画の代案検討を十分に実施可能にしたことで、実用化以降の稼働率向上、熱処理炉の省エネルギー、仕掛量の削減について、各々数

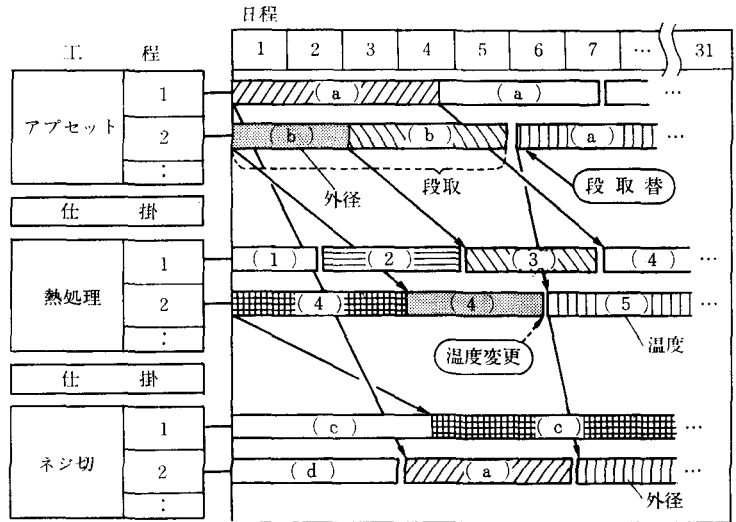


図7 操業計画出力例

パーセントの寄与を果たしたところにある。

5. おわりに

鉄鋼業では、鋼管工場を含めて多品種多段の生産形態をもつ工場が多い。また、これらの工場は例外なく、近年の注文の多品種少ロット化に対して、効率的操業確保のために生産管理システムの改善にせまられているのが現状である。この意味で今回開発した操業計画法の応用範囲も広い。

残された問題は、さらに大規模な多段プロセスの問題に対し、部分的最適化の積み上げとしての段取計画法の改善である。たとえば、複数の工場にまたがる操業計画問題への適用を念頭において改善をはかっていきたい。

参考文献

- [1] 家長，奥野，竹安，岡村：多品種多段階生産工場（縫目無鋼管熱間工場）の操業計画システム，日本OR学会1984年度春季研究発表会アブストラクト集
- [2] T. Ibaraki, M. Hosono, T. Hasegawa: Network flow approach to multi-item multi-stage production scheduling, 京大数理工学レポート, 1982