

分散環境によるマン・マシン協調型 スケジューリングシステムの構築

永井 恵, 田村 亮二, 中川 義之, 谷崎 隆士, 中島 洋

1. はじめに

現在, 鉄鋼業においては, 他の製造業と同様, 需要構造の多様化・高級化の進展に伴い, 多品種・小ロット・短納期・多頻度納入に対応した新しい生産システムを構築し, これにより製造コスト削減, 製造リードタイム短縮, 高品質確保等を実現することが不可欠となっている。最近では, CIM (Computer Integrated Manufacturing) の概念のもとに大規模なシステム構築が各企業で進められている [1]。

このような状況下で, 生産スケジューリングの果たす役割は大きい。上位のシステムからトップダウン的に意思決定された内容を具体化して製造現場に伝えていく階層構造において, 一貫工程の全体最適化のためには, 各段階での生産スケジュールの最適化が不可欠である。

生産スケジューリングは一般的に複雑な大規模組合せ問題であり, コンピュータ, つまり生産スケジューリング・システムの支援がなければ業務遂行が困難であるにもかかわらず, 生産スケジューリング・システムは導入から時間が経つにつれて利用率が低くなる傾向がある [2]。筆者らは, この原因がシステム自体のフレキシビリティの欠如にあることをつきとめ, この問題解決のために, マン・マシン協調を特徴とした生産スケジューリング・システムを構築した。

本稿では, 薄板生産管理システムの一環として開発した生産スケジューリング・システムについて報告するとともに, 生産スケジューリング業務に対するマン・マシン協調型システムの有効性および実用化のためのポイントについて述べる。

ながい めぐみ, たむら りょうじ, なかがわ よしゆき, たにざき たかし, なかじま ひろし 住友金属工業㈱

〒540 大阪市中央区北浜東2-16

2. 薄板生産管理の概要

2.1 鉄鋼生産構造の特徴

鉄鋼生産構造は, 大規模なバッチタイプの設備からなる「多段階製造工程」であり, 同じ溶銑から多材質の溶鋼を造り分け, さらに多様な中間製品, 最終製品へと加工・細分化していくいわゆる「ブレイクダウン (分割細分) 型」である。また, 各設備は厳しいチャンス条件 (同一段取替条件) をもち, 同一製造仕様をもつ注文を連続して処理することが望ましい。

このようなチャンス条件の厳しい設備を含む多段階製造工程の生産・物流管理方式としては, 品質の安定化や製造コスト低減の観点から段取替え最少の操業が望ましく, そのため工程間に適量の仕掛在庫を用意し, これをバッファとして各工程毎にロットまとめをおこない製造する方式が採用されてきた。しかし, 本方式で注文構成の多品種・小ロット化に対応しようとすると, 設備間に莫大な仕掛在庫をかかえ, また短納期化への対応も困難となり経営戦略上望ましくない。

そこで, 仕掛在庫減少, 製造リードタイム短縮のためには, 上～下工程一貫管理による効率的な生産・物流方式の構築が必須であり, 近年, 鉄鋼業では受注～製造～出荷を一貫管理する大規模なシステムが開発されている [3]。

2.2 薄板生産管理システム

図1に薄板生産管理システムの全体構成を示す。

薄板生産管理システムは, 受注に基づく材料計画や生産スケジュール立案および生産管理データ作成のための「生産計画・管理システム」と, 時々刻々の作業指示・操業実績把握のための「オンライン操業管理システム群」と, 計装機器を介して製造プロセスを制御する「プロセス・コンピュータ群」とが階層構造をなし, 通信回線を介して有機的に結合するように構成

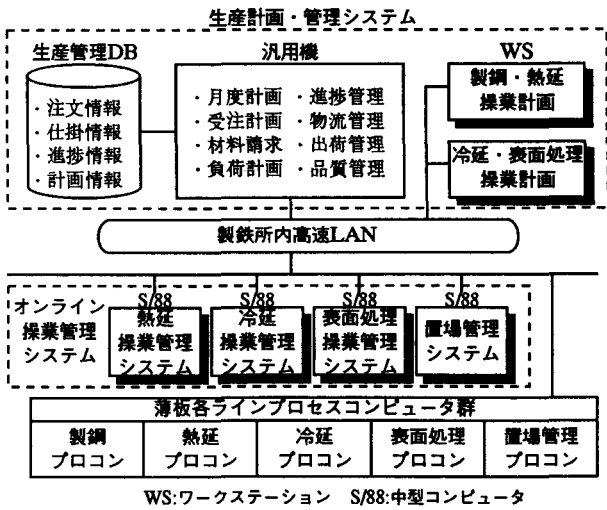


図1 薄板生産管理システム全体構成

されており、いわゆる CIM の形態をなしている [4]。

システムの特徴としては、従来、汎用機の機能であった操業スケジュール立案とオンライン操業管理（操業指示、製造実績収集）を他の計算機（中型コンピュータやワークステーション）に機能分散させ、処理効率向上および汎用機負荷の低減を図っている。

生産計画では、四半期計画、月度計画といった、大日程目標計画から次第に、週間計画、日々計画、操業スケジュールといった、小日程実行計画へと詳細化していくトップダウン方式が採用されている。計画は下位になるほど、即時性を要求され、高速スケジューリング解法が必要となる。今回、薄板製造工程の核となる製鋼～熱延工程における操業スケジュールを立案する製鋼・熱延操業計画システムを開発した [5]。

3. 製鋼・熱延操業計画システム

3.1 製鋼・熱延工程の特徴

図2に製鋼・熱延工程における製造フローを示す。製鋼工程では、製鉄工程で造られた溶銑から、精錬

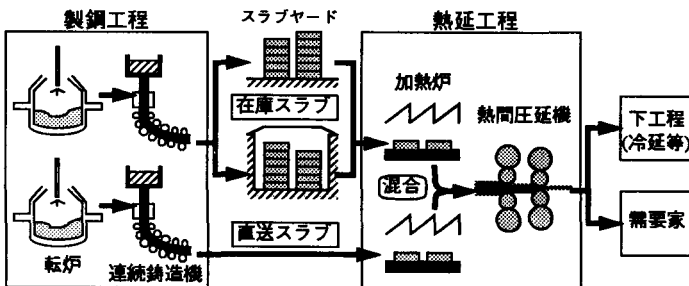


図2 製鋼・熱延工程の製造フロー

プロセスを通じて、所定成分を持った溶鋼が造られ、この溶鋼から連続鑄造機によってスラブと呼ばれる直方体の鋼塊が造られる。精錬は転炉を処理単位としてなされ、転炉1杯ごとに同一成分を持った溶鋼が造られる。この転炉1杯分の製鋼単位を「チャージ」と呼ぶ。また、連続鑄造機では、数チャージの溶鋼が連続して鑄込まれ、この一連の鑄造単位を「トライ」と呼ぶ。

熱延工程では、スラブが加熱炉で所定温度まで加熱され、熱間圧延機にて所定のサイズ（幅、厚み）に延ばされる。圧延用ロールは磨耗やキズにより製品品質が劣化するのを防止するため、一定タイミングで交換しなければならない。このようなロール交換から次のロール交換までの連続した圧延単位を「チャンス」と呼ぶ。

製鋼～熱延の物流では、仕掛在庫減少や加熱燃料原単位向上を狙いとして、おもに直送方式を採用している。つまり、連続鑄造機で造られたスラブをすぐに搬送し、冷めないうちに加熱炉に装入し、圧延する。また、熱延能力が鑄造能力より優っている場合には、在庫として保管していたスラブ（在庫スラブ）と直送スラブを交互圧延する、いわゆる混合圧延方式を採ることにより熱延稼働率の最大化を図る。そのため、直送スラブと在庫スラブの錯綜した複雑な物流となっている。

3.2 製鋼・熱延操業計画の概要

製鋼・熱延操業計画は製鋼工程における鑄込ロット編成と熱延工程における混合圧延順序計画の2つの計画を立案する(図3参照)。鑄込ロット編成では、同一成分を持った注文をチャージとして集め、さらにチャージを並べることにより鑄込トライを作成する。混合圧延順序計画では、鑄込ロット編成結果をもとに直送スラブの圧延順および混合すべき在庫スラブの挿入場所を決定し混合圧延順を決定する。これら2つの計画は、直送スラブについては鑄込順がそのまま圧延順となるため、同時に立案する必要がある。

本計画問題の主な目的は次のようなものである。

- ①納期遅れ最小化
- ②設備別供給目標量確保
- ③鑄込オーダー率最大化
- ④圧延サイズ（幅、厚みなど）推移を滑

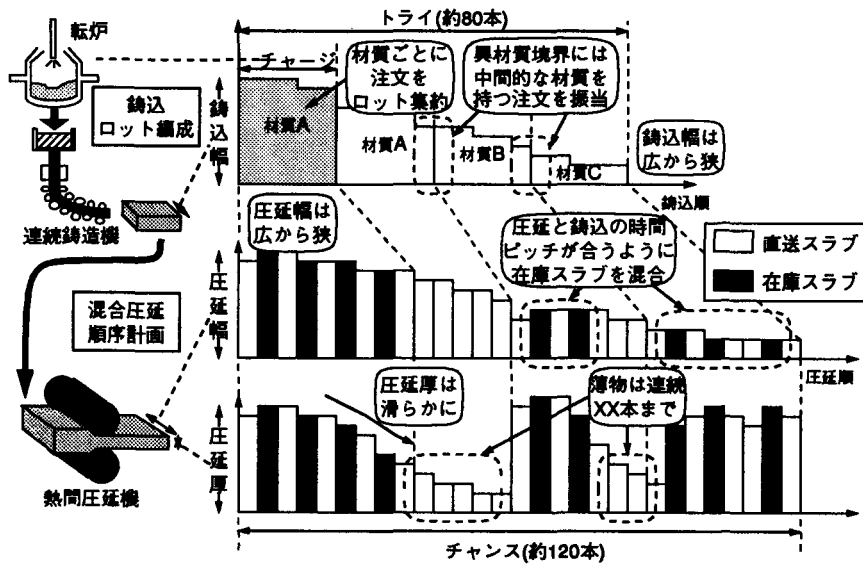


図3 製鋼・熱延操業計画のイメージ

らかに

①は短納期対応, ②は設備仕掛削減および適正操業維持, ③は製造コスト削減, ④は高品質確保をそれぞれ具体化した目的である。

また, 各工程ごとに次のような操業制約を持っている (主な制約を抜粋)。

A. 製鋼操業制約

- ①容量制約=チャージ (転炉 1 杯) 単位で同一成分を持つ溶鋼が製造される。
- ②铸込幅推移制約=トライ内では, 铸込幅 (スラブ幅) は広から狭に推移する。
- ③境界部振当制約=チャージのつなぎ部分 (境界部) では前後のチャージの溶鋼が混ざり合うため, 中間的な材質をもつ注文を振り当てる。

B. 熱延操業制約

- ①圧延幅推移制約=圧延幅は基本的に広から狭に推移する (铸込幅に対応)。
- ②圧延厚推移制約=圧延厚は許容量を超えて厚から薄に推移させない。
- ③圧延位置制約=特定の注文は, チャンス内の所定のタイミングで圧延しなければならない。
- ④連続圧延量制約=特定の注文は, 連続して圧延できる量が制限されている。

3.3 問題の特徴

本問題について以下の特徴があげられる。

①大規模

製鋼・熱延操業計画は, 約 5000 件の注文と約 3000 本

の在庫スラブをもとに, 1 トライ当たり約 80 本の直送スラブのロット編成および 1 チャンス当たり約 120 本の直送・在庫スラブの混合圧延順序決定を行なう。このように, 本計画問題は大規模組合せ問題である。

②多目的・多制約

前節 3.2 で述べたように, 本計画問題は非常に多くの操業制約のもとで解かなければならず, また複数の目的を同時に最適化する必要がある。

③複合型

铸込ロット編成は, チャージ, トライといった容量制約のもとで最も総評価値の大きくなる注文群を選択するという, いわゆるナップザック問題である。ただし, 境界部など铸込む場所によって成分が異なるため, 铸込順序も考慮する必要がある。

混合圧延順序計画は, 圧延幅と圧延厚を座標軸とした座標平面上で, どのような幅厚推移 (経路) で直送および在庫スラブを圧延すればよいかという, 2 次元経路決定問題である。

このように, 本計画問題は, 複数の組合せ問題を同時に解かなければならない, 複合型問題である。

3.4 マン・マシン協調型システム

本問題を取り扱うために, マン・マシン協調型の対話型システム構成を採用した [5] [6]。その理由は次のようなものである。

①人間, コンピュータそれぞれに得意とする分野があり, お互いに役割分担することにより効率的なスケジュールリングが可能。

②コンピュータ・アルゴリズムに将来起こる全ての事象をルール化して取り込むことは不可能。

③メンテナンス・フリーのフレキシブルなシステム構築が可能。

システム開発のアプローチとして、まず計画問題をその特徴から4つの部分に分割した(図4参照)[7]。具体的には、目的・制約のあいまいな部分と明確な部分、計画レベルのマクロな部分とマイクロな部分である。ここでマクロな部分とは全体バランス(納期や設備別供給目標量など)を考慮した目標レベルの計画を示し、マイクロな部分とは対象1本1本の順序を考慮した実行レベルの計画を示す。次にハンド・シミュレーションやプロトタイプ・システムを利用して計画担当者との議論を重ね、計画に必要な項目をそれぞれの部分に分類した。各部分に対しそれぞれ最適と思われる手法を採用し、さらにプロトタイピング方式により改良を加え、統合することによりシステムを構築した。

人間とコンピュータを結ぶ部分として、マン・マシン・インタフェース(MMI)が重要なポイントとなる。従来の汎用機ベースのシステムでは、MMIの扱いにくさが弱点の1つであった。そこで、本システムでは、スケジューリング機能をワークステーション

(WS)に分散することにより、WSの持つ多彩なグラフィカル・ユーザ・インタフェース(GUI)機能を利用した操作性の良いMMIを構築した。このMMIを用いて、計画担当者はスケジューリング・パラメータの入力や計画結果の評価・修正を簡単におこなうことができる。また、WSによる分散環境を実現するため、新たな通信システムの開発もおこなった[8]。本システムの運用手順は次のとおりである(図5参照)。

①立案直前に汎用機からWSに、スケジュール対象データを転送する(バッチ処理)。

②計画担当者が、参考情報画面を用いて、注文残状況、緊急品分布、在庫量、後工程供給過不足などのマクロ的な状況を判断し、鑄込材質、鑄込幅範囲、特定品指定などのスケジューリング・パラメータを設定する。

③スケジューリング・ロジックを起動する。

④計画担当者が、結果評価画面を用いて、緊急品取り込み状況、操業制約違反状況などを判断し、結果修正機能を用いて、注文、在庫スラブの追加・削除・交換などの処理により、スケジュール結果を修正する。また、計画の全体バランスが悪い場合には、②に戻りパラメータを再設定し、ロジックを起動する。

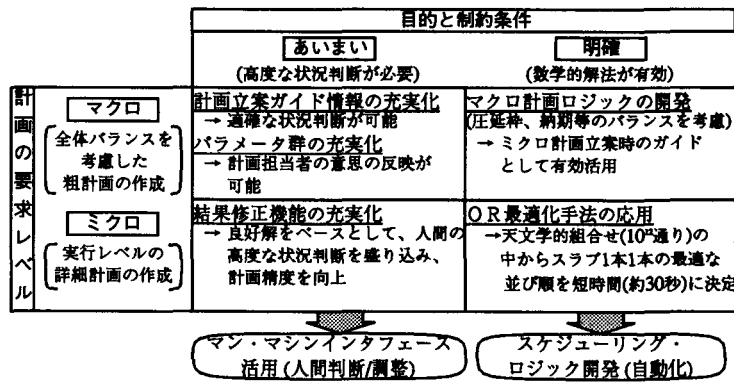


図4 計画問題の分類および解決策

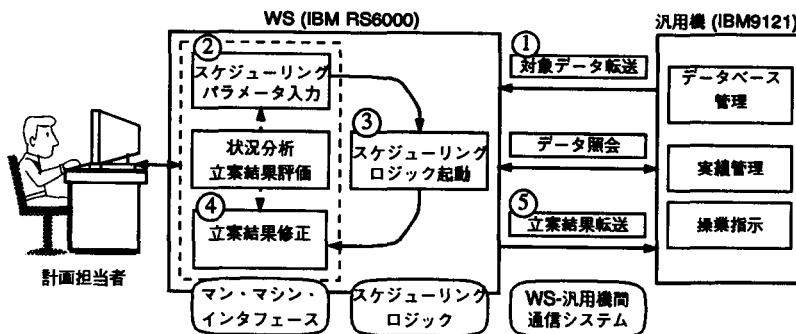


図5 システム構成および運用手順

⑤スケジュール結果をWSから汎用機に転送し、操業指示に用いる。

3.5 スケジューリング・ロジック

(1) 解法の基本的アプローチ

操業に直結した実行スケジュールを立案するということとスケジュール結果を人間が即時に評価・修正することから、スケジューリング・ロジックには高速性が要求される。ところが、3.3節で述べたように本問題は大規模複合型組合せ問題であり、単純に解いたのでは、要求時間を満たすのは不可能である。そこで、問題の特徴を利用して、次の工夫を取り入れた解法を考案した [9]。図6に解法の特徴を示す。

① 2段階解法

マクロ・ロジックとマイクロ・ロジックの2段階にて問題を解く。マクロ・ロジックでは、大まかな作業ロットの順序を求めることにより、問題領域の縮小および小問題への分割をおこなう。マイクロ・ロジックでは各小問題の範囲で、詳細な作業ロットの推移を求め、最終的に各小問題を統合して、全体スケジュールを得る。

② 動的計画法

上述の各小問題はそれぞれ独立ではなく、隣接する小問題との遷移関係に依存している。これは図6に示すように多段ネットワークの最短経路問題に類似しており、そこで計算時間を短縮するため動的計画法を利

用した。

(2) 解法の手順

A. マクロ・ロジック

本処理では、大域的な最適性を失わないために大枠の作業ロットの順序を決定し、次処理であるマイクロ・ロジックのガイドポストを作成する。

① ルートの仮決定

指定された鑄込材質、鑄込幅範囲をもとに、同一鑄込材質・鑄込幅範囲・圧延厚範囲・特定品区分（大口ユーザー向、小チャンス品など）で集約される「ブロック」の作業順（「ルート」と呼ぶ）を仮決定する。この際、鑄込幅推移制約（広から狭へ）や圧延厚推移制約（滑らかに）などを考慮して順序を決定する。

② ルートの評価値算定

仮決定されたルートに対し、各ブロックの制限（鑄込材質・鑄込幅範囲・圧延厚・特定向先）に適合する注文を仮振当する。この際、事前に各注文の優先度を納期、設備別供給要求度などから求めておき、この優先度順に従って、チャージ重量を満たすまで振り当てる。仮振当された注文をもとに、ルートの評価値 P_1 を計算する。

$$P_1 = W_1 \times \Sigma(\text{各注文の優先度}) + W_2 \times (\text{鑄込オーダ率})$$

ここで、 W_1 、 W_2 は各評価項目の重み、鑄込オーダ率とは全鑄込量（含余剰量）に対する仮振当された注文量の割合を示す。

③ 最適ルートの決定

①～②を可能なルートが見つかる限り繰り返し、最適ルートを決める。そして、そのルートに仮振当された注文量を集計し、各ブロックごとに、仕様（供給設備、サイズなど）別の目標量を設定する。

B. マイクロ・ロジック

本処理では、マクロ・ロジックの結果をもとに、さらに詳細な操業制約を考慮した順序計画を作成する。

① ブロックの選択

ルートにしたがって、順次ブロックを選択する（ブロック i とする）。

② 部分経路の選択

直前ブロック（ブロック $(i-1)$ ）までで生成された部分経路を1つ選択する（部分経路 k とする）。

③ パスの生成および評価

圧延サイズ推移制約を考慮しながら、ブロックをさらに幅、厚み方向に細分化した「セル」の作業順（「パス」と呼ぶ）を仮決定し（パス j とする）、マクロ・ロ

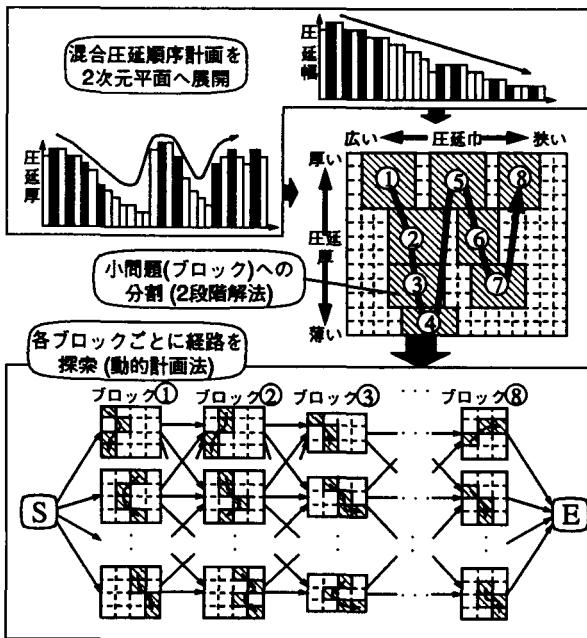


図6 解法の特徴

ジックで設定された仕様別目標量をもとに各セルに注文と在庫スラブを仮振当する。次に、セルのサイズ推移および仮振当された注文と在庫スラブをもとに、パス j の評価値 $p_{i,j}$ を計算する。

$$p_{i,j} = W_3 \times \Sigma(\text{各注文/在庫スラブの優先度}) + W_4 \times \Sigma(\text{各セル推移による圧延望ましき})$$

ここで、 W_3 , W_4 は各評価項目の重み、圧延望ましきはセル間の幅や厚みの差により計算される。

④部分経路とパスの結合および評価

部分経路 k とパス j を結合し、新しい部分経路の評価値 $P_{i,new}$ を計算する (図7参照)。

$$P_{i,new} = P_{i-1,k} + p_{i,j} + c_{i,k,j}$$

ここで、 $P_{i-1,k}$ は部分経路 k の評価値、 $c_{i,k,j}$ は部分経路 k とパス j の結合優先度で結合部分の幅や厚みの差により計算される。

⑤新しい部分経路の選抜

②~④をすべての部分経路と可能なパスの組合せについて繰り返し、同じ終端セルをもつ (同じ幅、厚みで終わっている) 部分経路の中で、最も評価値の大きい部分経路を選抜し、その他は除去する (動的計画法の応用)。

$$P_{i,*} = \max(P_{i-1,k} + p_{i,j} + c_{i,k,j})$$

(各終端セルについて)

ここで、*は終端セルに対しユニークに決定する自然数である。このようにして選抜された部分経路を新たな部分経路として、①に戻りのブロックについて同様の処理を行なう。

⑥スケジュールの完成

上記処理を最終ブロックまで繰り返し、最適経路を決定する。この最適経路に全体バランスを考慮しながら

注文と在庫スラブを振り当て、スケジュールを完成させる。

3.6 システム導入の効果

本システムは当社鹿島製鉄所の工程部管制室 (24時間3交替職場) にて、1日約7チャンス分の製鋼・熱延操業計画立案に活用されている。

その導入効果は、①計画立案時間の短縮 (50%)、②計画精度の向上、③ペーパーレス化、④技術伝承の容易化などが挙げられる。とくに②については、製造リードタイム短縮や設備仕掛減少などの経営課題に大きく貢献している。

4. おわりに

鉄鋼業における一貫生産管理システムの一環として開発した生産スケジューリング・システムの事例を紹介した。

本システムのポイントは、マン・マシン協調型システム構成である。業務の自動化・標準化を推進する一方で、スケジューリング業務での人間の状況判断能力の優位性を認め、人間とコンピュータをそれぞれ相互協調するシステムとして業務設計を行なった。マン・マシン協調型システムを実用化するためのポイントとして次の項目が挙げられる。

- ①人間とコンピュータとの効率的な業務分担。
- ②状況判断、結果評価のための十分な情報提示。
- ③操作性の良い結果修正機能。
- ④人間の意志が確実に反映できる高速スケジューリング・ロジック。

①については、問題の特徴に基づいて計画に必要な項目を分類し、それをもとに業務分担を行った。②、③については GUI による情報表示・修正機能の充実を図った。④については、人間の意志反映のためのスケジューリング・パラメータの充実を図るとともに、問題の特徴を利用したヒューリスティック解法ともいえる2段階解法により問題規模を縮小し、さらに理論解法である動的計画法を適用することにより高速化を実現した。

今回取り上げた製鋼・熱延操業計画システムは薄板一貫生産計画システムの階層構造において、よりマクロな観点から立案された上位システムの計画結果を受けてスケジューリングを行っており、本システムにおける最適化が、一貫製造工程における全体最適化実現の鍵となっている。このようにトップダウン的なシ

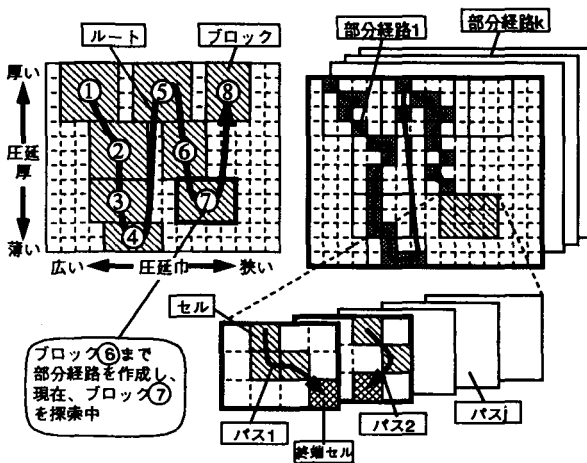


図7 経路探索の過程

システム構造の各階層において、生産スケジューリングの果たす役割は非常に大きく、その一手法としてのマン・マシン協調型システムの有効性を確認した。

本報告が今後のより効率的な生産管理システム構築の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] 岩田一明：新しい生産システム-CIM, システム/制御/情報, Vol. 34, No. 3, pp. 123-127 (1990)
- [2] 上野信行ほか：生産スケジューリングは役にたったか？-実際の生産スケジューリング問題の課題と解法アプローチについて-, 精密工学会誌, Vol. 60, No. 4, pp. 502-507 (1994)
- [3] 上野信行, 中川義之：シミュレーションと最適化手法の組合せによる生産・物流統合管理システム, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 35, No. 5, pp. 273-279 (1990)
- [4] 上野信行：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, Vol. 37, No. 4, pp. 47-55 (1993)
- [5] 永井恵ほか：鋳込-圧延操業計画立案システムの開発, 材料とプロセス, Vol. 7, p. 339 (1994)
- [6] 黒田充：生産スケジューリング研究の課題と展望, 生産スケジューリング・シンポジウム'94講演論文集 (日本OR学会), pp. 1-13
- [7] R. Tamura, et al: Functionally Partitioned Scheduling System Equipped with Two-stage Scheduling Algorithm in Steel Sheet Manufacturing, Proceeding of 1994 Japan-U. S. A. Symposium on Flexible Automation, Vol. 3, pp. 1107-1113 (1994)
- [8] 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, pp. 205-221 (1993)
- [9] 田村亮二ほか：鉄鋼薄板製造における機能分割型スケジューリング・システム, 日本OR学会1994年度秋季研究発表会予稿集

新時代のコンピュータ総合誌

Computer Today

5月号・特集 偶数月18日発売/定価930円

WWW

—インターネット利用ツールいろいろ—

これからのWWW/WWWの新しいサービス/スポーツイベントにおけるWWWサーバ/インターネットの生物学/初めてのHTML/WWW活用術

連載

スーパーテクニック for Macintosh/アルゴリズムの工具箱/QuickTime

月刊誌

数理科学

毎月20日発売/定価980円

6月号
特集

古典力学の輝き

古典力学の輝き。README
ケプラー問題の展開
3体問題の衝突軌道
非線形可積分系無限自由度と
離散時間への道標
積分不能性判定条件
シンプレクティック数値解法
太陽系の長期間数値積分
加速器科学における古典力学
ハミルトン力学系の周期解

吉田 春夫
岩井 敏洋
谷川 清隆
中村 佳正
梅野 健
吉田 春夫
木下 宙宏
中井 俊
平田 光司
伊藤 秀一

別冊・数理科学

B5・定価1900円

「力」とは何か

Ⅰ. 力の概念

力とはなにか/力学を考える/力の本質を秘める逆2乗則/力概念の成立史をめぐって

Ⅱ. 重力

重力概念のはじまり/一般相対論における力/反物質はどちらへ落ちる?/重力の遮蔽

Ⅲ. 電磁気力

電磁気力とはなにか/つりあっているテコが回る/分子間の力

Ⅳ. 素粒子と核力

核力をめぐって/クォーク幽閉/低次元のQED 他

Ⅴ. 回転系の力とコマ

コリオリ力/対称でないものは基本法則でない/地球というコマの上の力学/コワレフスカヤのコマ 他

Ⅵ. 身近な力

運動と摩擦力/ボートの力学/ヨットはなぜ進むか

サイエンス社

〒151 東京都渋谷区千駄ヶ谷1-3-25

☎ (03) 5474-8500 振替00170-7-2387