

鉄鋼における生産管理技術の開発と展開

小西 正躬*

Development of Production Management Technologies in Steel Industry

Masami KONISHI

Synopsis : Production management technologies such as production planning and scheduling are reviewed together with planning and scheduling for logistics of products in steel industry. First, research topics in last decade on fundamental theories and related technologies concerning optimization such as scheduling, meta-heuristic methods for optimization, branch and bound method, Lagrange relaxation, multi agents and inference system by AI are described. Next, applications of optimization technologies to production planning and scheduling in steel industry are introduced. Reports on production managements for steel industry such as iron and steel making, rolling, surface finishing and inventory management together with transportation of steel products are reviewed. These technologies have been applied to production management of steel industry in various ways from single individual process to combined plural production processes. Finally, future challenge items are proposed. These are intelligence for production system, large scale optimization for production management cooperating plural processes, supply chain management system for steel production and accumulation and reuse of human knowledge for advanced steel production.

Key words : production management; planning; scheduling; logistics; optimization; simulation.

1. まえがき

21世紀に入り、日本製造業の再生が叫ばれる中、情報通信技術の発展を踏まえ、生産におけるシステム技術の活用が盛んになっている。鉄鋼業においても、生産管理の先進技術開発や適用を行い、コスト競争力を強化する活動が行われている。たとえば、熟練者の介在により作成されてきた生産計画や生産スケジュールの作成を、高速小型化したコンピュータで代替させようという動きである。本稿では、刊行物から最近の生産管理技術の研究状況を紹介するとともに、日本鉄鋼業におけるこれら技術の応用展開について概観し、さらに今後の開発課題を考える。

2. システム最適化技術と生産管理の新たなニーズ

近年、コンピュータの高速化により大規模な計算が短時間でできるようになっている。生産管理の技術分野では、これと歩調を合わせOR（オペレーションズ・リサーチ）手法を用いた最適化や、GA（遺伝アルゴリズム）などのメタ・ヒューリスティック手法を利用した組み合わせ最適化の技術が進展してきた。適用面でも、従来個別システムの最適化に限られていたものが、最近では複合した大規模システムとしての最適化が試みられている。大規模な問題を取り扱うための計画技術として、多目的最適化や自律分

散型のスケジューリング法が研究され、生産面にとどまらず物流・搬送面での活用も行われつつある。すなわち、社会活動のグローバル化にとまない、従来個別の企業内で閉じていた生産管理を上流と下流にも広げ、在庫の圧縮と生産リードタイムの短縮などの効果を求める動きである。さらに、原料供給系と製造系の情報統合、生産系と流通系の情報統合にとどまらず、サプライチェーンとして物流を含めた需給の全体系を取り扱う生産管理が進展しつつある。

一方、生産活動を行う上で、原材料の供給と製品の市場への搬送といった物流業務の果たす役割はきわめて重要である。近年、社会の各分野で生産の効率化と経済性を追求して来た結果、物流や移送など配送システム効率化の重要性が飛躍的に増している。しかし、物流や移送のシステム運用は、従来から人間の知恵による解決がはかられてきた。物流や移送の管理は、完全な自動化が難しく人間が必ず介在することから、人間との親和性の高いシステムの構築が必要であるにも関わらず、そのための一般的な方法論が存在しないからである。情報化時代の幕開けとともに、物流情報や移送情報の授受が迅速に行われるようになり、配送システムの運用最適化のための方法論の構築や適用例の報告なども増加しており解決への糸口が得られつつある。

3. 生産管理技術とスケジューリング技術

以下では、生産管理とスケジューリングの方法論に関する

る基礎研究を振り返る。従来から、生産管理関係の課題として、ロット編成、箱詰めナップザック問題、巡回セールスマン問題、物流、施設配置、サプライチェーンなどが取り上げられてきた¹⁻⁷⁾。これらの課題を解決するために、各種の方法論や新技術が研究されている。システム最適化技術と総称されるこれらの方法論としては、生産シミュレーション、最適化メタ戦略、遺伝的アルゴリズム、分枝限定法、ラグランジュ分解調整法、マルチエージェント法、ディスパッチング・ヒューリスティック・スケジューリング、多目的最適化法、JIT生産、TOCなどが挙げられる。以下、これらの方法を概観する。

3.1 生産シミュレーション技術

シミュレーション技術を用いた生産計画やスケジューリングはきわめて実用的であると考えられるが、最適化を指向した方法ではない。しかし、シミュレーションプログラムは操作性に優れ人間の介入が容易であるため、人間がシミュレーション結果の評価をおこない、改善策を検討して再度シミュレーションをおこなうことにより改善策の妥当性についての予備検討が可能である。このことから、シミュレーションによる生産計画やスケジューリングの研究が広く行われている。すなわち、スケジュール生成のためのディスパッチング・ヒューリスティックルールの研究や、バックワードシミュレーションとフォワードシミュレーションを組み合わせることによる納期重視型スケジューリングの研究が行われており、ジョブショップ型生産スケジューリングを対象にして種々の提案が行われている⁸⁻¹⁰⁾。

3.2 最適化メタ戦略

組み合わせ最適化問題を解く場合、厳密な最適解を求めることはきわめて困難であることが理論的に明らかにされている。実際、多くの組み合わせ最適化問題を考えると、比較的小規模な問題でも厳密に解くことは極めて困難である。すなわち、解を求めるための処理時間と所用メモリ量のオーダを設計してみると、組み合わせの数が指数関数的に増大してしまい、どうしても実用的なものが得られないことが知られている。このような最適化問題のことを、NP-完全問題あるいはNP-困難問題と呼んでいる。ところで、現実の問題を解く場合、最適との保証はなくとも十分に精度の高い解が求められれば満足できることが多い。近似解法や発見的方法がこの目的のために用いられている。近年、計算機の高速化にともない、より精度の高い近似解を求める方法が研究されており、最適化メタ戦略と呼ばれる枠組みが開発されてきた。遺伝的アルゴリズム(GA)あるいは進化型計算、シミュレーテッド・アニーリング(SA)法、タブーサーチなどがこれに該当する¹¹⁻¹⁶⁾。これらの解法では、初期解の生成と解の改善過程を繰り返すことが基本である。理論的な点で未解明な部分が残っているものの、きわめて実用的な最適化法と言える。3次元の箱詰め問題や

収集計画問題などの例題での研究報告がある。

3.3 分枝限定法

分枝限定法は、制約式が整数変数からなる整数計画・組み合わせ最適化問題の解法として確立している方法である。この方法は、探索木を辿りつつ変数の組み合わせに対応する解候補を対応させたノードを経由し、最終的に最適解にたどり着くもので、探索中のバックトラック機能や分枝禁止条件の設定、さらに無駄な枝探索を防ぎ早期に最適解に到達する方法が提案されている¹⁷⁻¹⁹⁾。

3.4 ラグランジュ緩和法

ラグランジュ緩和法は、問題に付随する制約をラグランジュ乗数により緩和した問題を作成した後、ラグランジュ乗数を劣勾配法などで設定して緩和問題を解くものである。この方法では、最小化問題では元の問題の良い下界値が、最大化問題では良い上界値が求まる。問題によっては、大規模な問題を同型の部分問題群に分解して解くことができ、高速な求解が可能となる。なお、どのような問題でも解ける訳ではなく、対象の問題がラグランジュ緩和法で解ける型に当てはまっているかどうかの判断が必要である。本方法は、施設配置問題や巡回セールスマン問題などの多く組み合わせ問題での適用報告がある²⁰⁻²⁴⁾。

3.5 マルチエージェント法

マルチエージェント法は、計画対象を構成する複数のシステム要素(エージェント)が自律的に最適化を目指して行動する。その際、エージェント同士は必要な情報交換を行いつつ全体としての最適化を指向する²⁵⁾。通常、大規模な系の最適化を行う場合、統合最適化を行うことはきわめて困難であるが、系の構成要素毎の最適化を行いつつ、全体として情報交換を行うマルチエージェント法はきわめて現実的な方法と考えられる。生産計画や搬送計画の分野で種々の研究が行われている。

3.6 AI・ヒューリスティクス

生産計画問題は大規模な組み合わせ問題であるが、問題の要因をすべて正確に定式化することは難しい。このような場合に対応する方法として、ルールベース推論を用いた生産計画用エキスパートシステムやヒューリスティック・知識ベースシステムが開発されている。このように、AIエキスパートシステムは知識獲得の面で課題があるものの、適用し易いため多くの応用事例が報告されている^{26,27)}。ところで、専門家は保有している経験・知識を意識せずに用い、あいまいさを含む判断をすることがある。このため、ルール表現を正確に行うことはかなり難しい。上記の問題点を解決する方法として、与えられた問題に関わる過去の事例を直接利用して解を求める枠組みが提案されている²⁸⁾。この方法は、事例ベース推論(CBR: Case-Based Reasoning)と呼ばれ、応用分野も診断、計画、設計など多岐に亘っている。

3.7 JIT生産

近年、JIT(Just In Time)生産が多くの企業で導入され生産の効率化に利用されている。JIT生産は、その運営にかんばん方式を用い平準化生産を前提とした在庫運用を想定している。組み立てスケジューリング問題について基礎的な研究が行われている。この問題では、後工程に引き取られる部品量にしたがって、前工程の多様な部品加工工程から部品を供給する。これら前工程で作られる部品の量を平準化するために、組み立て工程で消費される部品の消費速度を一定に保とうとする。JIT生産は企業の現場での工夫から生まれた方式であることから、理論的な検討が十分とは言えなかった。近年、JIT生産の理論的体系化を目指し、製品種、部品種、使用部品構成、組み立て時間、製品需要個数などの要因についての最適設計法が研究されている²⁹⁻³⁴⁾。

3.8 TOC

TOC (Theory of Constraint: 制約理論)³⁵⁾は、人員スケジューリング、トラックスケジューリング、生産スケジューリングなど製造業での応用例が多い。TOCは、線形計画法、整数計画法、混合整数計画法でのモデル化が難しい問題や、目的関数が定義されていない問題を解くことが可能である。TOCはイスラエルの物理学者Goldrattが提案し、生産スケジュール問題から出発したもので、システムの目的達成を阻害する制約条件(ボトルネック)を発見してそれを克服しようとする方法論である。TOCは全体最適化を目指した方法で、生産スケジューリング法と問題分析/改善法から成る。TOCでは最適性を求めないため、多様な複数解を算出することが可能な生産管理手法と考えることもできる。

4. 鉄鋼業における生産管理技術の利用

大量の原料と製品を扱う鉄鋼業では、古くから先端的な情報処理技術を導入し、個別プロセスでの運用により目覚ましい効果を得てきた。平成7年度に発足した日本鉄鋼協会学術部門計測・制御・システム工学部会の中に、鉄鋼生産管理に関わる研究母体としてシステムフォーラムが組織された。以来、大学と製鉄各社の協同による生産管理の先端技術調査と活用研究が行われてきた。この結果、最適化メタ戦略の鉄鋼業への技術展開や、複数プロセスを連ねた生産管理への試みがなされている。

製鉄所での工程は、原料、製鉄製鋼、圧延、表面処理・精整工程に大別される。また、材料や製品の横持ちを考えると、構内物流と構外物流・出荷業務がある。製鉄所の生産管理では、これら工程や物流に対して、業務の効率化や生産および、物流コスト削減のためのシステム開発が行われてきた。原料工程では、鉄鋼原料計画・購買管理、石炭需給計画、焼結操業管理、原料ヤード運用計画のシステム

化が行われている。製鉄製鋼工程では、原料配合、出鋼順編成の最適化システムが開発されている。圧延工程では、スラブ編成、厚板チャージ編成、厚板板取計画、熱延圧延計画、薄板一貫計画の最適化システムがある。表面処理・精整工程では、連続焼鈍ラインの生産管理、連続焼鈍でのコイル投入順編成計画、塗装鋼板スケジューリングシステムがある。

一方、鉄鋼業は製鉄所内での材料や製品の横持ちが日々大量に行われることと、海外に原料を依存し製品を国内各所に搬送する他、製品輸出も行うことから物流コストが巨額なものとなっている。生産管理の分野で培った技術を鉄鋼物流に生かし、生産システム全体を最適化したいとの期待が大きい。構内物流については、溶銑物流や銑鋼物流管制、熱延製品倉庫クレーン無人化がある。また、構外物流・出荷業務については原料船配船荷役管理システム、庸車輸送管理、薄板出荷業務のシステム化が行われている。以下では、これらの事例について紹介する。

4.1 原料工程におけるシステム化

主原料購入においては、原料コスト最小化と複数製鉄所への原料配分を行うことが望まれる。JFE(旧川鉄)では、原料の購買業務の短期・中期・長期購入計画において、処理設備の能力をモデル化し非線形最適化法によりコストミニマムな銘柄選択を行っている。なお、このシステムと連動して原料船の入船計画と配船調整を行うシステムが開発されている³⁶⁾。

4.2 製鉄製鋼工程におけるシステム化

転炉により精錬処理された溶鋼は、二次処理が加えられ用途に応じた性状に整えられ、後工程である鑄造工程に送られる。後工程は複数の連続鑄造機と造塊設備から成るので、これらの後工程の計画と連動して転炉出鋼順の最適化が必要である。この計画では、転炉や後工程における設備制約や品質の制約の下に、出鋼杯数の最大化、二次精錬の待ち時間最小化、代替処理発生数の最小化を目指す。この問題に対し、GA法を適用して出鋼順の自動作成システムが開発されている³⁷⁾。GA法の適用に際して、人間の保有する経験と知識を利用して、解の探索空間を絞り込むことにより高速な計画が可能となっている。連続鑄造における操業スケジューリングは、工程管理の専門知識以外に冶金や設備制約に関する知識を必要とするため、従来から人手に頼った業務となっている。住金では、人間の業務知識を整理してルール化したスラブ連続鑄造の操業スケジュールエキスパートシステムを開発している³⁸⁾。

4.3 圧延工程におけるシステム化

厚板の生産ロット編成計画では、生産性、作業性の向上および、納期管理という複数の目的を達成することが求められる。このような多目的最適化問題に対し、JFE(旧NKK)では、生産最適化モジュール、作業モジュールおよび、納期管理モジュールの3つのサブシステムが情報交

換を行いつつ厚板ロット編成を行う、自律分散型計画技術とプロトタイプシステムを開発した³⁹⁾。また、日新製鋼ではエキスパートシステムを用いて製鋼におけるロット編成と熱延での圧延計画システムを開発している⁴⁰⁾。エキスパートシステムは圧延工程でも利用されており、JFE（旧川鉄）では小径継目無鋼管工場の操業計画作成システムが開発されている⁴¹⁾。板取問題は、母材を切断して取り合わせ可能な注文を充当するものであり、数理計画法でのモデル化が可能である。住金では、混合整数計画問題を解いて板取計画を作成している⁴²⁾。神鋼では、この問題をSA法により解いている⁴³⁾。

4.4 表面処理工程におけるシステム化

塗装鋼板においては、CCL（連続コーティングライン）の色替え回数、ロール換え回数、継ぎコイル本数、洗浄待ち時間の評価関数を最小にするための製品コイルの投入順決定問題がある。従来、人手により作成していたスケジュール作成を自動化するために、新日鐵ではGA法を用いてこれらの評価関数の最小化問題を解いている⁴⁴⁾。なお、モデルに取り込めない経験的なファクタを加味することにより熟練者を上回る計画を作成している。連続焼鈍ラインへのコイル投入順の計画では、幅変動による品質への影響最小化、後処理回数最小化による操業負担の低減、ダミー枚数最小化・速度変化最小化などの生産性を同時に指向する必要がある。神鋼では、コイル投入順の問題に対し、操業ノウハウを利用して複数のTSP（Traveling Salesman Problem：巡回セールスマン問題）にモデル化し、それらを分枝限定法で解く連続焼鈍計画システムを開発している⁴⁵⁾。

4.5 構内物流におけるシステム化

高炉から出銑した溶銑輸送をおこなう溶銑鍋の運行計画の自動化が行われている^{46,47)}。近年の製鉄所では、溶銑段階で鍋内の脱磷・脱硫・脱珪処理をおこない、次工程の転炉に輸送する。この溶銑予備処理をうまく計画しないと出鋼計画との整合が崩れ、後工程での生産計画が実施できなくなる。このため、JFE（旧NKK）では溶銑鍋の運行状況無線通信で把握しシミュレーション技術により進捗を推定して、必要に応じて処理計画を修正するシステムを開発し実用化した⁴⁸⁾。神鋼では、高炉と転炉間の輸送用機関車の配車を行う際に、分枝限定法を用いて、機関車の単機走行時間が最小となる計画を立案するシステムを開発している⁴⁹⁾。厚板工場では、精整ヤードでの複数台クレーンによる搬送制御が行われている^{50,51)}。新日鐵では、納期に合わせた仕掛かり製品の管理と複数台クレーンの運転について業務経験をルール化して利用するエキスパートシステムが開発されている⁵²⁾。

4.6 構外・出荷業務におけるシステム化

原料船運行について考えるには、積載容量、運行所要時間など原料船に関する条件と、バースの利用可能期間に関

する条件、受け入れ先の製鉄所における原料銘柄の需要量や保有在庫量などの条件を考慮して、原料船の運航に関するコストを最小にすることが必要である。この問題は、大きな遅れ時間を伴う計画問題であることから、原料船の運航に関する予測や、製鉄所における各種銘柄原料の消費予測を行いつつ、コスト最小となる複数原料船の運用法を計画するものである^{53,54)}。神鋼では、シミュレーション技術とSA法による評価関数最小化を組み合わせた計画技術が開発されている⁵⁵⁾。鋼材の配送計画は、積載重量の異なる複数の車両を適切に選択することにより朝一番に集中する車両稼働台数を少なくする問題である。JFE（旧川鉄）では、SA法を基本としつつ、地図情報とリンクさせた鋼材配送計画システムを開発した。また、エキスパートシステムの応用にも取り組んでおり、製品出荷のトラック配車計画と内航船への製品の積み込み（ストウエージ）計画に適用している⁵⁶⁾。新日鐵では、客先に製品を配送する配送車両の配車計画をGA法により立案するシステムを開発している⁵⁷⁾。

以上に述べたように、我が国では製鉄所での生産活動を効率化する目的で広範なシステム開発が進められてきた。鉄鋼業では、従来から新規技術を受け入れ利用できる素地があるため、分枝限定法による最適化やSA法およびGA法など最先端のシステム最適化技術の適用が盛んである。しかし、特筆すべきは、いずれの事例でもこれら最適化法を単体で適用しているのではなく、必ず操業ノウハウとの組み合わせが行われていることである。たとえば、最適化における探索範囲の絞り込みに操業知識を役立て計算時間を短縮しリアルタイム性を高めている。また、鉄鋼業ではシミュレーション技術とエキスパートシステムの応用が多く見られる。これは、鉄鋼業においては、人間による業務改善努力が継続的に進められて来た経緯があるためである。従来から製造現場では、技術蓄積を生かす意味で、計画作成のためのディスパッチング・ルールと、シミュレーションを組み合わせたスケジューリングや、エキスパートシステムによる複数工程の総合生産計画が行われてきたように思われる。エキスパートシステムについては、一旦システム化したルールが操業環境の変化に対応出来にくいとの課題が克服されていない。新しい知能化学習技術の導入によりエキスパートルールの再構築が待たれる。

一方、日本鉄鋼協会では、大学の基礎技術を積極的に活用し鉄鋼生産管理の高度化を図るため調査研究を行って来た。前述のシステムフォーラムでは、発足当初から「鉄鋼業における生産システムのフレキシブル化」、「鉄鋼業のCIM・FA化のためのシステム技術」、「鉄鋼業を革新するフレキシブルなシステム化技術」などの課題を掲げて、調査研究活動が行われている。最近では、平成11年度から13年度にかけて、「鉄鋼生産・運用・物流計画問題のモデリングと最適化—大規模複雑系へのシステムズ・アプロー

チー」の研究プロジェクトが設置され、大規模システムとして製鉄所複数プロセスの統合最適化についての研究が行われた。

5. 鉄鋼業における今後の課題

日本鉄鋼業では、従来から製鉄所の各工程における生産管理を中心にシステム化が図られ、業務改善とコスト削減などの生産合理化の分野で多くの実績を持っている。しかし、これに甘んじることなく、今後一層多様化が予想される市場ニーズに対応できる生産管理を確立することが望まれる。さて、製鉄所全体の生産管理や運営をシステムとして見たときには、複数プロセスに亘る大規模システムとしての一貫最適化、設備異常や緊急性の高い注文の発生などの需要変動に対する再スケジューリング、あるいは人間の持つ多様な価値観を反映できるダイナミックな生産管理など、いくつかの大きな課題が残されている。早期に、新規な技術開発の努力が実ることが望まれる所以である。以下では、このような観点に立って、製鉄業の生産管理に関する今後の課題を展望する。

5.1 知能化によるシステム技術の改善

現在の生産管理システムやスケジューリングシステムは、各製鉄所における各工程の、開発当時の課題解決に特化（カスタム化）した形で構築されている。生産環境が変化し生産管理に関わる制約条件が変化すると、システムの性能が劣化し所期の性能を発揮できないことが多い。人間が持っている知能をシステム技術に反映し、環境変化があっても柔軟に対応できる知能化されたシステム技術の実現が望まれる。

5.2 複数工程の連携による大規模生産計画システム

単一工程での生産管理システムをベースにしつつ、複数工程を連ねた大規模な生産計画システムが今後の課題である。過去に構築した各工程システムの資源を生かしつつ、他工程との連携を行う総合的な生産計画やスケジューリング技術の実現が待たれる。

5.3 生産と物流の情報が連携した多面的生産管理

生産材は、ある工程で加工された後、構内を搬送され次工程で加工される。生産管理としては、生産情報を取り扱うだけでは不十分であり、物流情報と連携の取れた形で生産計画やスケジューリングが行われるべきである。すなわち、生産と物流の連携が取れた形で製鉄所全体としての在庫管理や生産管理を実現することが必要である。

5.4 鉄鋼のサプライチェーン・マネジメント

顧客へのサービスや市場の需要変化に迅速に対応すること、また在庫圧縮によるコスト削減など短納期の実現を目指すためには、製鉄所のみならず、原料調達や顧客への配送など上流と下流の企業を含めた鉄鋼におけるサプライチェーン・マネジメントの実現が必要である。

5.5 人間知識の蓄積再利用と人間・機械協調システム

生産管理においては、時々刻々変化する需要状況や設備環境に対応しなければならない。従来は、生産管理の経験豊かなベテランがこれらの状況変化での計画変更を行ってきた。人間は、コンピュータの作成した生産計画を元に、環境変化に対応して計画を適正な形に修正し適用する能力を持っている。この人間知識は、熟練者の頭脳にノウハウの形で蓄積されているのみで他人が共有することができない。この人間知識の蓄積再利用や、人間が介在しやすい生産管理システムの実現が望まれる。

6. むすび

本稿では、生産管理に関連するシステム最適化の方法論とその展開、鉄鋼業における生産管理の事例について展望した。生産管理技術は飛躍的に進展しているが、今後鉄鋼業でも単一工程から複合工程の生産管理に、また原料購入先と製鉄所および、製品供給先との連携による鉄鋼のサプライチェーン的運営が求められると考えられる。また、コスト優先だけではなく環境にも配慮した生産管理が求められるようになり、また多様化する市場のニーズにも柔軟に対応できる技術が必要になると考えられる。是非とも、人間の優れた経験・知識に裏付けられた知恵を生産管理システムに付与し、時代の要請に応えたいものである。

本稿をまとめるに当たり、資料の収集や鉄鋼業での課題整理について、日本鉄鋼協会計測・制御・システム工学部会システムフォーラムの谷野哲三（座長、大阪大学）、同フォーラムの企業幹事である、加地孝行（代表幹事、JFEスチール）、屋地靖人（新日鐵）、岩村健（住友金属）、岩谷敏治（神戸製鋼）の各氏に多大のご支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) M.Kuroda: Preprint of 32nd Symp. on Operations Research of Japan, Operations Society Japan, Tokyo, (1994), 1.
- 2) S.Mouri: Preprint of Scheduling Symposium, Scheduling Society of Japan, Kyoto, (2001), 5.
- 3) M.Kuroda: Preprint of Scheduling Symposium, Scheduling Society of Japan, Kyoto, (2002), 2.
- 4) Y.Yamamoto: *J. Operations Res. Jpn.*, **44** (1999), 226.
- 5) T.Miyazaki: *J. Operations Res. Jpn.*, **44** (1999), 300.
- 6) H.Nonobe: *J. Operations Res. Jpn.*, **45** (2000), 118.
- 7) T.Nishi, M.Konishi, Y.Hattori and S.Hasebe: *Trans. Ins. Systems, Control and Inf. En.*, **12** (2003), 628.
- 8) M.Fuyuki and I.Inoue: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 144.
- 9) M.Fuyuki, M.Arakawa, Y.Furuichi and I.Inoue: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **48** (1998), 371.
- 10) M.Arakawa, M.Fuyuki and I.Inoue: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **51** (2001), 81.
- 11) M.Yanagiura, H.Nonobe and H.Ibaraki: Preprint of Scheduling Symposium., Scheduling Society of Japan, Kyoto, (2000), 11.
- 12) M.Itoh, K.Aoki, M.Kanesashi and Y.Satou: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **44** (1994), 197.
- 13) M.Asano, S.Arai and H.Ota: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45**

- (1995), 581.
- 14) M.Gen, K.Ida and Y.Li: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 446.
- 15) K.Oono, S.Seki and K.Oishi: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **49** (1999), 199.
- 16) S.Seki, T.Ito and K.Oono: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **52** (2002), 221.
- 17) M.Asano and H.Ota: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 355.
- 18) M.Asano and H.Ohta: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 379.
- 19) T.Kuno: *J. Operations Res. Soc. Jpn.*, **44** (1999), 232.
- 20) K.Yoneda: Proc. of Scheduling Symposium, Scheduling Society of Japan, Kyoto, (2000), 17.
- 21) N.Katayama and H.Kasugai: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 21.
- 22) K.Muramatsu: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **51** (2001), 314.
- 23) K.Muramatsu and A.Wallman: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **52** (2002), 386.
- 24) K.Muramatsu: *J. Operations Res. Soc. Jpn.*, **45** (2000), 270.
- 25) M.Wooldridge: An Introduction to Multiagent Systems, John Wiley & Sons, West Sussex, (2002), 15.
- 26) H.Fukui and F.Hashimoto: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 248.
- 27) Y.Dong, M.Kitaoka and H.Ohta: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 433.
- 28) Y.Dong, H.Ohta and M.Kitaoka: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **46** (1996), 165.
- 29) T.Nakajima, Y.Yanagawa and S.Miyazaki: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **45** (1995), 284.
- 30) P.Wangwatsin, Y.Yanagawa and S.Miyazaki: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **42** (1992), 84.
- 31) K.Nakajima and K.Ohno: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **46** (1996), 100.
- 32) Y.Shimizu and Z.Yu: *J. Jpn. Ind. Management Assoc.*, **53** (2003), 195.
- 33) K.Ohno: *J. Operations Res. Soc. Jpn.*, **43** (1998), 272.
- 34) K.Oono: *J. Operations Res. Soc. Jpn.*, **48** (2003), 634.
- 35) T.Mochizuki: *J. Operations Res. Soc. Jpn.*, **48** (2003), 656.
- 36) H.Shimazu and H.Okajima: *Kawasaki Steel Giho*, **27** (1995), 80.
- 37) S.Kubota, K.Hori, H.Hashikawa, H.Araki and H.Imamura: *Sumitomo Met.*, **45** (1993), 51.
- 38) S.Fujii, H.Miyahara and K.Fujikawa: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 1000.
- 39) H.Yamada, S.Iwasaki, W.Morita and S.Akasako: *Nisshin Steel Tech. Rep.*, **No. 73** (1996), 63.
- 40) M.Akehi, K.Mihata and T.Kanno: *Kawasaki Steel Giho*, **27** (1995), 101.
- 41) K.Matsuda, Y.Takai, M.Nishimura, Y.Sawada and K.Yoshida: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **46** (1996), 44.
- 42) Y.Nakagawa, K.Kumamoto, N.Konishi, H.Nisida and N.Sakai: *J. Operations Res. Soc. Jpn.*, **43** (1998), 593.
- 43) S.Hojo and T.Okawa: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 209.
- 44) T.Iwatani and M.Konishi: *J. Operations Res. Soc. Jpn.*, **44** (1999), 610.
- 45) Y.Yaji and N.Komiyama: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 204.
- 46) T.Baba and Y.Matsuo: *Nippon Steel Tech. Rep.*, **No. 385** (1996), 12.
- 47) T.Iwaya, T.Kaga, S.Otsuka and M.Kunimoto: *Nippon Steel Tech. Rep.*, **No. 358** (1996), 19.
- 48) T.Yasunami, T.Hirata, R.Okamoto and T.Baba: *Nippon Steel Tech. Rep.*, **No. 364** (1997), 30.
- 49) Y.Takai, T.Kishino and T.Ueno: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **44** (1994), 2.
- 50) M.Tamura, Y.Inaba, Y.Koga, Y.Arizonono, N.Kawai and H.Iria: *Kobe Steel Eng. Rep.*, **46** (1996), 15.
- 51) M.Miyakita, K.Akinaga and M.Fukazawa: *Sumitomo Met.*, **49** (1997), 42.
- 52) S.Wakamatsu, Y.Matsuda, S.Kodaira, K.Kodaira and H.Denma: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 965.
- 53) Y.Yoshinaga, M.Tanabe, T.Okawa, H.Ase, H.Ishikawa and S.Eto: *NKK Tech. Rep.*, **No. 12** (2000), 52.
- 54) T.Umeda, N.Tomochika and M.Konishi: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1008.
- 55) K.Matsuda, T.Ohkata, T.Hoshino, I.Kakisaka and T.Orikata: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 256.
- 56) T.Sakamoto, S.Komatsu and M.Yasumoto: *Kawasaki Steel Giho*, **26** (1994), 203.
- 57) I.Muroyoshi, Y.Hamaguchi, M.Takada and M.Namimoto: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 205.