

# 生産計画・物流計画への最適化技術の応用

## Application of an Optimization Technique to Production and Logistics Scheduling

藤井 聡 FUJII Satoshi JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(副部長)  
北條 成人 HOJO Shigeto JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(課長)  
吉成 有介 YOSHINARI Yusuke JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(課長)

### 要旨

鉄鋼製品の高級化・多品種化にともない製造工程が複雑化している。また、納期短縮のニーズも高まり、生産計画・物流計画の策定は、従来よりも困難となっている。日々の計画は、操業実績に合わせた修正や再計画も多いため、短時間で、精度の高い計画を自動生成することが必要であり、最適化技術への期待が大きい。本稿では、この日程計画に最適化手法の一つであるメタヒューリスティックスを適用し、オペレータよりも短時間で、より良い計画を策定した事例3件(出鋼順自動編成、構外薄板配車計画、自律分散システムを用いたロット編成)を紹介する。

### Abstract:

Production planning and logistics scheduling at complex steel works become challenging tasks to meet customer needs for quicker delivery. The application of an optimization technique is highly expected to cope with frequent changes of daily schedules. In this paper, one of optimization methods, meta-heuristics, is applied to the daily work scheduling. A good solution in few searches was obtained by the selection of search methods fitted for problems and devising solution execution.

### 1. はじめに

近年、鉄鋼製品は、顧客ニーズに合わせ高級化、多品種化し、その製造工程はより複雑化してきている。また、納期短縮のニーズも高くなっているため、生産計画・物流計画の策定は、従来にも増して困難になっている。これは、鉄鋼の生産が、受注生産をベースとしているため、納期、在庫、歩留まり、生産性などを評価しながら、注文をプロセスごとにロット集約し、その処理順を決定する必要があるからである。また、これらの評価項目は、トレードオフの関係にあり、またその時々々の操業環境に合わせてこれらの重要性が変化するのも要因である。

一方、昨今の計算機能力の飛躍的向上にともない、生産計画・物流計画策定において最適化技術の適用が広く試みられてきている<sup>1)</sup>。特に、日々の計画は、月次計画や期計画の能力や負荷の検証を目的とした計画とは異なり、操業を実行管制する基盤となるもので操業実績に合わせた修正や再計画も多いため、短時間で、精度の高い計画を自動

生成することが必要であり、最適化技術への期待が大きい。

本稿では、この日程計画に最適化手法の一つであるメタヒューリスティックス<sup>2)</sup>を適用し、オペレータよりも短時間で、より良い計画を策定した事例3件(出鋼順自動編成<sup>3)</sup>、構外薄板配車計画<sup>4)</sup>、自律分散システムを用いたロット編成<sup>5)</sup>)を紹介する。これらは、少ない探索で良い解に到達するように、問題に合わせた探索手法の選定と解き方の工夫を実施している。

出鋼順自動編成は、生産計画における順序問題で解法に遺伝的アルゴリズム(genetic algorithm, 以下, GA)を用いているが、制約を利用して探索空間を狭め、数分で手組み以上の解を求めることができる。構外薄板配車計画は、代表的物流計画問題で、反復局所探索法をベースに配車台数を積極的に削減するような探索を適用し、手組みより物流効率化を3%向上させている。厚板のロット編成問題には、従来、分枝限定法を用いていたが、多目的計画問題の求解および環境変化への柔軟な対応を目指して自律分散システムの適用を試みた。前二者の計画問題は、実用レベルにあり、後一者は、研究段階ではあるが、今後の生産計画

解法の方向を示すものと考えている。

## 2. 最適化技術応用事例

### 2.1 出鋼順自動編成

出鋼順自動編成は、転炉～二次精錬～連続铸造までの製鋼工程を、時間的な経路のダイヤグラムで明示した日程計画を作成する。

従来の JFE スチール 東日本製鉄所京浜地区の製鋼工程の日程計画システム<sup>6)</sup>は、1990年に開発されたもので、オペレータが製造順を決定した後、設備の競合を解消し、各設備の開始、終了時刻を決定しており、最適化を図った計画ではなかった。一方、高精度な実行向けの計画を短時間に作成することが要求されるようになってきた。そのため、制約条件を活用して探索空間を絞り込み、処理時間を短縮する GA を開発した。この最適化手法を用い、数分で手組み以上の解を求めることができる。

また、生産量確保の優先、操業コストの優先など、操業環境の変化へ柔軟に対応するため、環境変化の度に評価関数を変更しなくともいいように、最適解を含め他の実行可能解も合わせた複数解の中から選べる方式とすることで、現状の操業指標に適した日程計画の作成を可能にした。

#### 2.1.1 製鋼工程

製鉄所の工程は大きく、製銑、製鋼、圧延の工程に分けられる。その中で製鋼工程は、高炉で出銑された溶銑を転炉と二次精錬設備によって目的の成分と温度の溶鋼にし、連続铸造設備において薄板、厚板、管材となる素材の鋼片を次工程に供給する。

铸造順編成は、この工程の生産計画を作成するものである。この工程は、転炉の吹錬(約 300t)を 1 単位(チャージ)とするバッチプロセスであり、この中に複数の圧延注文(同一鋼種)を含んでいる。連続铸造設備において、鑄込み開始、終了部位を少なくし、歩留まりを上げるために、チャージを複数つないで铸造を行う(以下、連々鑄セット)。このため、各チャージが铸造設備でつながるように、転炉から铸造までの各設備における処理の開始、終了時刻を決定する。また、铸造される素材の鋼種成分に合わせた、二次精錬設備の選択が必要である。このため、これら設備の競合解消が必要となっている。京浜地区の製鋼工程では、転炉 1 機、二次精錬設備 7 機、連続铸造設備 3 機が稼働しており、これらの設備を対象とした出鋼順自動編成を開発した。

#### 2.1.2 出鋼順自動編成の概要

出鋼順自動編成は、各圧延工場からの铸造要望(圧延予定)に基づいて、転炉から連続铸造設備までの各工程の開始時刻および終了時刻をチャージごとに決定するものである。

これらの時刻を決定するときに、設備競合、設備休止、

特殊材の前後処理、複数同時铸造、時刻指定および前日との計画の接続などの制約条件を満たし、計画の評価指標の最適化を図る。

制約条件を満足した状態で各設備における処理の開始時刻、終了時刻を決定した計画結果を出鋼チャージ数、二次精錬の待ち時間、代替処理工程発生数の項目で評価し、最適化を目指す。

#### (1) 目標出鋼チャージ数確保

本来は制約条件であるが、目標チャージ数が得られない時は計画が作成できないため、評価指標として取り扱う。

#### (2) 二次精錬待ち時間最小化

待ち時間を短くした分、出鋼温度を下げることができ、耐火物原単位低減などの効果がある。

#### (3) 二次精錬設備の代替処理の最適化(低コストの通過工程選択率の最大化)

二次精錬設備は、複数の通過工程が設定されており、その中から設備競合しないように処理コストが低い工程を選択する。

#### 2.1.3 自動編成アルゴリズム

制約条件を活用して探索空間を絞り込むことにより、処理時間を短縮する GA の概要を、Fig. 1 に示す。以下に、初期個体群の生成、交叉、評価について説明する。

#### (1) 初期個体群の生成

一般に、GA による初期解の作成では、連々鑄セットをランダムに選択し出鋼ポジションを決定していくため、作成された計画に非実用解のものが多数発生する。このため、各制約条件を満足する初期個体群をルール型で作成している。

#### (2) 探索

初期個体群に基づいて、各個体内で 2 点交叉を実施している。このとき、交叉によって設備がラップし、設備競合、設備休止、特殊材の前後処理、複数同時铸造の各制約条件が維持されていない場合には、制約条件を満足できるようにルールで各処理設備の開始、終了時刻を移動させて修正する。これらの作成された解から評価の良いものを 10% (20 個体) 残し、その解

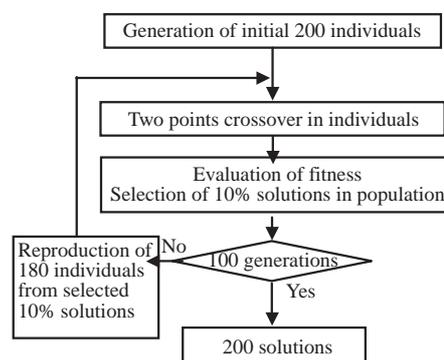


Fig. 1 Proposed algorithm

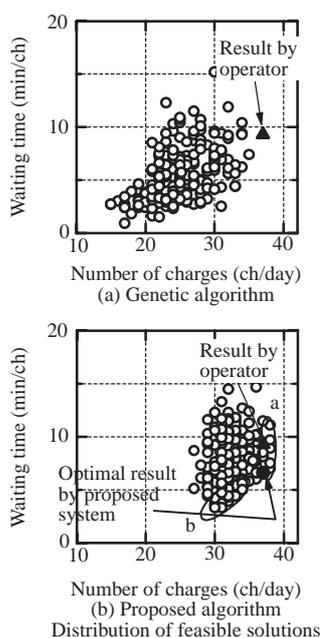


Fig. 2 Comparison with GA and proposed algorithm

に基づいて 180 の新しい個体を作成することを 100 世代繰り返す。

2.1.4 適用結果

(1) 従来 GA との比較

Fig. 2 に 1 日分の計画における、従来 GA<sup>7)</sup> と提案したアルゴリズムの同一回数探索後の 1 日の出鋼チャージ数と二次精錬の開始待ち時間で評価した比較結果を示す。ここでは、チャージ数が多く、待ち時間が小さい領域（図中、右下方向）を対象にしている。図中○は各アルゴリズムを適用した計画結果の 200 個の解分布、▲は手組みによる計画結果を表す。●は、この他、代替処理工程を考慮した最適解を表し、この結果が計画として採用される。ただし、図中では、二次精錬設備の代替処理の評価は示していない。

本手法は、従来 GA に比べ、同じ処理回数でチャージ数が多く、待ち時間が小さい解を多く得られることができ、処理時間の短縮につながることを確認できた。

(2) 応用

手組みと本システムの計画評価テストを 7 日分実施した平均値を Table 1 に示す。本システムは、1 日の出鋼チャージが手組みと同じで、二次精錬の待ち時間

Table 1 Scheduling results

	Number of charges per day		Process waiting time (min./ch)		Alternative process operation (ch/day)	
	Cs	Ps	Cs	Ps	Cs	Ps
Average	38	38	11	9	3	1.4

Cs: Results by operator  
Ps: Results by proposed system

が 2 min/charge 短縮している。また、二次精錬の標準工程以外の代替処理工程選択が 1.6 charge/日減り、処理コストを抑制している。

また、本システムでは、Fig. 2(b) に示すように複数解を作成するため、生産量確保を優先する場合は領域 a、操業コストを優先する場合は領域 bの中から解を選ぶことで操業環境の変化への柔軟な対応が可能となる。

これにより、種々の操業環境の変化にも対応でき、日々の操業に用いられている。

2.2 構外薄板配車計画

2.2.1 構外薄板配送問題

東日本製鉄所は首都圏に隣接しており、顧客が近距離に集中しているため、薄板配送にはセミトレーラ、トラックによる陸上輸送が中心である。例として、京浜地区における構外薄板配送問題の概要を Table 2 に示す。

京浜地区では翌日配送分のオーダーを午前中まで顧客より受け付け、約半日かけて手組みで作成している。計画担当者は顧客からの配送依頼の受け付け、積載量の過不足を補うための顧客との納入折衝、車両手配と並行して計画立案作業を行っている。計画を作成している最中にも配送オーダーが変化するので、計画の見直し、修正作業が頻発する。このような場合、配車済みの計画の一部手直し、新たな車両を手配するなどして対応している。このため、配車計画の自動作成には配送オーダーの変化に対応して、短時間にコスト最小となる計画を立案できる仕組みが要求される。

これらの課題に対して、優良な解を見つける能力の高い反復局所探索法<sup>2)</sup>をベースに車両台数を積極的に削減する探索と並列処理によって、短時間に計画を作成する配車計画エンジンを開発した。

Table 2 Outline of coil delivery

Restriction condition	Specification at delivery time
	Delivery model specification
	Delivery style of packing specification
	Compulsory working hours
	Vehicle loading weight
Objective function	Minimization of delivery cost
Delivery scale	Delivery region: Within 300 km from East Japan Works (Keihin)
	Number at delivery destination: 50-80 points/day
	Quantity of coil: 3 000-4 000 t/d
	Number of vehicle: 80-100 d <sup>-1</sup>

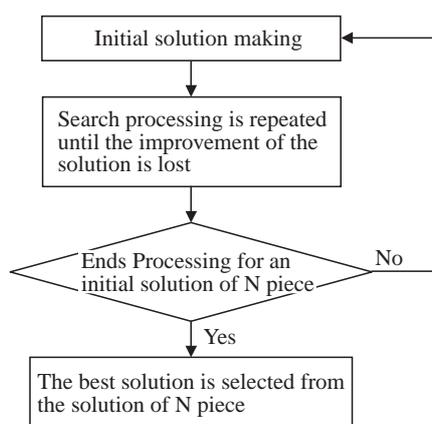


Fig.3 Proposed algorithm

### 2.2.2 最適化アルゴリズム

配車エンジンのアルゴリズムの概要を Fig. 3 に示す。このアルゴリズムは N 個の初期解に対して、それぞれ探索処理を繰り返すことにより、解を改善する。以下に初期解作成、探索処理、高速化のための並列処理に関して述べる。

#### (1) 初期解作成

配送拠点に近い順にソートされた配送オーダーを、ランダムに選択した車両に制約条件を満たすように割り付ける。配送オーダーがなくなるまでこの割り付けを繰り返し、初期解を作成する。

#### (2) 探索処理

Fig. 4 に示すように、車両台数が少なくなるよう、積荷の入れ替えを試行し、納入指定時刻制約下での最短ルートを求め、これ以上解の改善が起これなくなるまで繰り返す。

N 個の初期解に対してこの処理を実行し、N 個の最善解の中で最も評価関数の良いものを最適解として出力する。

#### (3) 並列処理

探索処理を複数の CPU に対して独立に計算させる方法で、計算の高速化を図った。

### 2.2.3 シミュレーション結果

配車担当者と配車計画エンジンによる実データを用いた比較結果を Table 3 に示す。車両台数を削減し、回転率を約 3% 向上させることにより、効率的な配送が可能であることが分かった。

並列処理によって、計算時間は約 40% 短縮が可能となり、いずれのケースも 5 分以内で計画を作成できる。

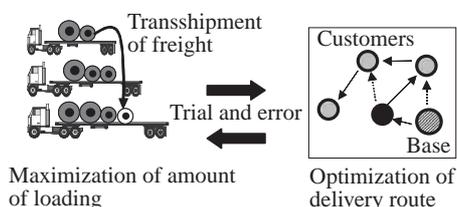


Fig.4 Search processing of proposed algorithm

Table 3 Simulation results

	Simulation data		Result by operator		Result by proposed system	
	Number of coils	Quantity of coil (t)	Number of vehicles	Vehicle turnover ratio	Number of vehicles	Vehicle turnover ratio
Case 1	198	1 963	44	1.32	41	1.46
Case 2	278	2 344	51	1.33	50	1.36
Case 3	229	1 761	46	1.15	42	1.26
Case 4	182	1 436	34	1.26	32	1.47

## 2.3 自律分散システムを用いたロット編成

### 2.3.1 自律分散システムの多目的計画問題への適用

自律分散システムは集中管理システムと対比される概念であり、システムを構成する要素（本稿では、以下エージェントとする）が自律的に行動し、局所的に相互作用を行いつつ、全体として秩序を形成するものである。メリットとしてシステムの堅牢性、拡張性などがある。

生産計画問題に対して自律分散システムを適用する期待として、以下の 2 項目を上げる。

#### (1) 多目的計画問題の求解

計画問題の大半は、複数の目的関数を同時に満足させたい多目的計画問題である。しかし一般に目的関数同士のトレードオフ関係により、すべてを同時に満足させることは非常に困難である。

ここで自律分散システムの特長である自律性と相互作用による秩序形成に着目する。単一の目的関数を充足させる処理をエージェントと定義すると、多目的計画問題の求解は、目的関数の異なる複数エージェント間の局所的な交渉によって解の一部を組み替え、目的関数をさらに向上させる仕組みに置き換えられる。

#### (2) 変化に対する柔軟性の確保

日程計画は日々の環境変化に左右されやすい。自律的な動作を行うエージェント群への機能修正・追加・削除によって変化に柔軟に対応することができれば、計画作成負荷の低減などが可能になる。

本稿では (1) の多目的計画問題への適用可否の検討結果について報告する。

### 2.3.2 厚板素材計算

自律分散システム適用対象の例題として、厚板素材計算のプロトタイプを試作した。問題の概要を Fig. 5 に示す。成分・板厚・納期が同一範囲にある複数の注文（小板）を、幅・長平面上で圧延ロットである大板に取り合わせる、代表的なロット編成問題である。目的関数として、歩留まり、生産性、作業性などを考慮する多目的計画問題であり、関数群は互いにトレードオフ関係にある。

### 2.3.3 従来のアプローチと問題点

多目的計画問題への一般的なアプローチは、目的関数と

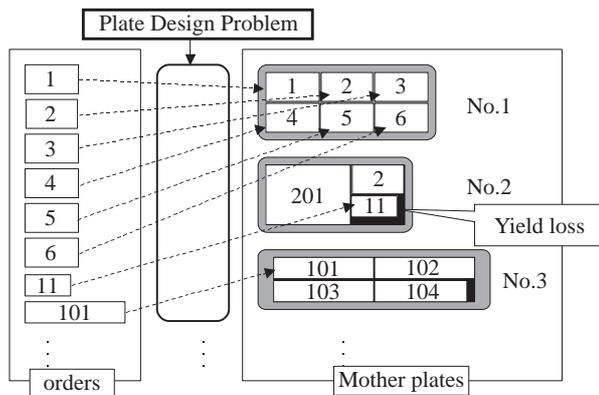


Fig. 5 Outline of plate design problem

重み係数の積の総和を新たな単一目的関数と設定する加重和最小化法である。求解には分枝限定法、メタヒューリスティックなどの最適化手法を用いる。

しかしながら目的関数の重み係数などのパラメータを合理的に決定する方法が不明であるため、試行錯誤で重み係数の調整を行う必要がある。

### 2.3.4 自律分散アプローチ

#### (1) 問題の定式化

目的関数

- (a) 歩留まり：(総注文重量 ÷ 総大板重量) 最大化
- (b) 生産性：平均大板重量最大化
- (c) 作業性：同一大板内への同一注文集約度最大化
- (d) 納期管理：納期余裕の小さい注文取込率最大化

制約条件

- (a) 製造設備制約：大板寸法上下限
- (b) 加工設備制約：幅方向2列まで注文配置可能
- (c) 緊急材：指定緊急注文は必ず編成

#### (2) 自律分散システムの構成

厚板素材計算向け自律分散システムの構成を Fig. 6 に示す。2.3.1 (1) 項で述べたように、単一の目的関数を充足させる大板を編成するプログラムをエージェントと定義する。

歩留まりについては、解の質を左右する最重要な要素であるので、独立したエージェントとはせず、各

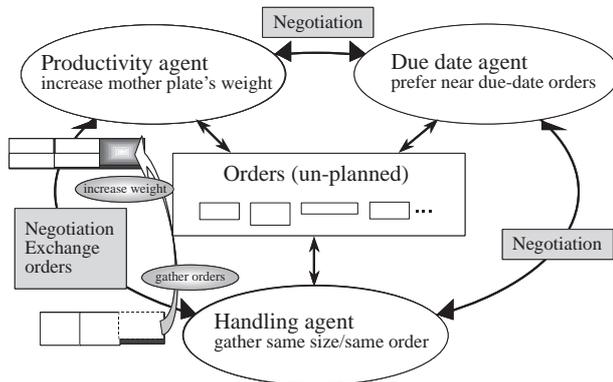


Fig. 6 Outline of autonomous decentralized system

エージェントが自らの目的関数の増減だけでなく歩留まりの増減も同時に評価した上で解を改善する仕組みとした。

各エージェントの目的関数としては、生産性・作業性・納期管理の3つを設定した。生産性エージェントは注文を幅・長平面上で取り合わせ、できるだけ重量の大きな大板を作成するプログラムである。作業性エージェントは同一属性の注文群をできるだけ同じ大板内に配置する。工期管理エージェントは納期余裕の小さい注文を集約する。各エージェントは他の目的関数を考慮せず、基本的に独立して動作するが、歩留まり評価は共通機能である。

#### (3) 目的関数の交渉力

環境変化にともなう各目的関数の重要度の優劣変化に対応するため、各エージェントの計画作成への影響力あるいは交渉力を表す編成権を導入する。ここで編成権とは、各エージェントにあらかじめ設定する計画枠(編成大板枚数)である。従来のアプローチにおける目的関数の重み係数に相当するが、編成権の方が直観的であり調整が容易である。

#### (4) 処理手順

目的関数別ルールに基づき実行可能な初期計画を作成する。初期解は各エージェントが順番に大板を作成していくので、最初の大板では目的関数値が良いがしだいに悪化する。エージェント間の局所的な交渉の繰り返しにより計画を改善する。交渉のルールは以下の3段階を経る。

##### (a) 交渉対象選択ルール

編成権が大きく当該エージェントの目的関数値の小さい大板、すなわち改善の余地が大きいものを優先的に選択する。

##### (b) 計画改善案提案ルール

当該エージェントの目的関数を向上させるように、対象大板に属する小板を部分的に入れ替える。交渉相手エージェントの大板の組み替えが必要になる場合は、当該目的関数を向上させる入れ替え案を作成する。

##### (c) 交渉判定ルール

以下の基準により交渉判定を行い、交渉が成立した場合に解の更新を行う。

- ・交渉主体エージェントの目的関数が向上
- ・全体目的関数(歩留まり)の悪化  $\leq \alpha$
- ・交渉相手エージェントの目的関数悪化  $\leq \beta$

なお、 $\alpha, \beta (\geq 0)$  は交渉回数とともに減少させる。所定回数の交渉をもって処理を終了する。

交渉例を Fig. 7 に示す。交渉主体(生産性)の大板が小板2枚を放出して未編成に戻し、代わりに交渉相手(作業性)の大板から小板1枚を取り込んで

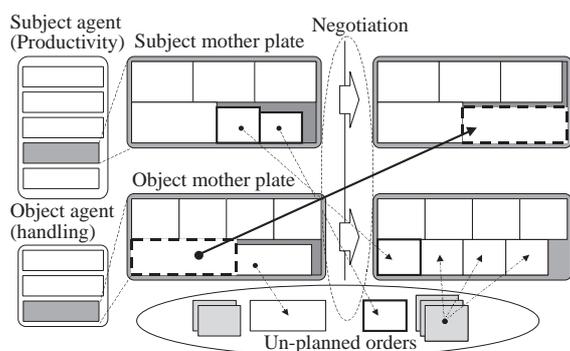


Fig.7 Example of negotiation

生産性を向上させている。交渉相手は放出された小板のうち1枚と未編成小板3枚を取り込んで、作業性を向上させている。

(5) 数値シミュレーション

編成権設定は生産性エージェントに大板10枚、以下同じく作業性に6枚、納期管理に4枚と設定した。交渉400回で数値実験を実施した。全大板(20枚)に関する各目的関数平均値の推移を Fig. 8 に示す。4つの目的関数が交渉回数にほぼ比例して向上しているが、交渉相手の目的関数と歩留まりに多少の悪化を許容しているため、特に前半部で関数値の変動が見られる。後半では悪化を許容しないため関数値は安定する。交渉400回終了時(Fig. 8の右端)の状態をエージェント別目的関数平均値に分類した結果を Fig. 9 に示す。各エージェントに設定した目的関数値が最も大きいことから、エージェントの主張(個性)が計画に明確に反映されていることが分かる。

編成権の変更が目的関数の調整手段として有効であることもシミュレーションで確認したが、結果は省略する。

自律分散システムの拡張性は、目的関数追加など問題の枠組が変化する際に効果を発揮する。また並列計算にも適しており、扱う問題規模の増大にも対応できる。

今後は本システムを実際の生産計画問題に適用し、2.3.1(2)項で述べた変化に対する柔軟性に関する検証を進めて

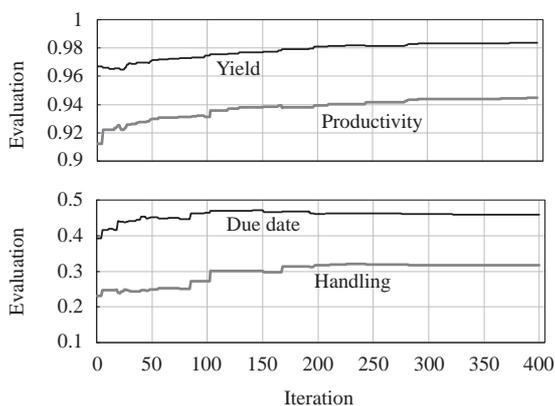


Fig.8 Improvement by iterative negotiation

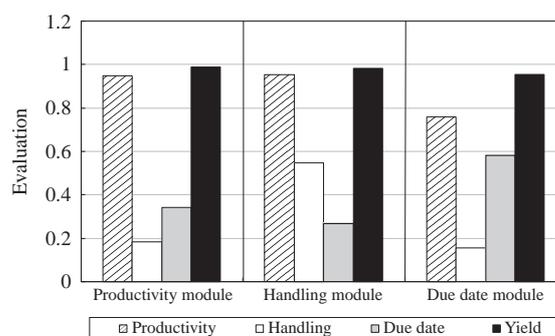


Fig.9 Objective function values of each agent

いく予定である。

なお、本研究はIMS国際共同研究プログラムのNGMSプロジェクトにより推進されたものである。

3. おわりに

計算機能力の進歩とともに最適化手法も進化してきているため、計画問題に合わせた最適化手法の選定と解き方を工夫することによって、短時間で精度の高い計画の自動生成が可能となってきている。その中でも貢献の大きい、生産計画・物流計画の自動化の事例を紹介した。生産・物流システムの間連各位の参考になれば幸いである。

今後も、これらの開発に鋭意努める所存である。

参考文献

- 1) 木村亮介. 鉄鋼物流における最適化およびシミュレーション技術の活用. オペレーションズ・リサーチ, vol.51, no.3, 2006, p.9-14.
- 2) 柳浦睦憲, 茨木俊秀. 組み合わせ最適化. 朝倉書店, 2001.
- 3) 藤井聡, 谷本直, 富山伸司, 木村亮介, 白井正明, 宮原弘明. 操業制約による遺伝的アルゴリズムの探索効率化と出鋼順編成への応用. 鉄と鋼, vol.89, no.12, 2003, p.1220-1226.
- 4) 吉成有介, 外岡英治, 安永伸一郎, 島村健児. 京浜地区薄板自動配車計画システムの開発. CAMP-ISIJ, vol.19, 2006, p.313.
- 5) 大川登志男, 北條成人. 自律分散手法による厚板圧延の多目的ロット編成. 鉄と鋼, vol.90, no.11, 2004, p.970-976.
- 6) 濱田洋行, 小倉康嗣, 田畑芳明, 山中昭博, 山田俊郎, 佐藤道之. AIを利用した鉄鋼圧一貫管理システムの構築. NKK技報, no.137, 1991, p.9-17.
- 7) Goldberg, D. E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. Massachusetts. Addison-Wesley. 1989.



藤井 聡



北條 成人



吉成 有介