

# 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

木村 亮介

鉄鋼の物流技術は、重量物・溶融物の搬送、設備の連続化や自動化において独自の進歩をしてきたが、近年では、計算機能力の飛躍的向上にともない、物流計画の多目的最適化や離散事象シミュレーションの適用等、システム面において幅広く応用開発が行われている。計画問題では、配車・配船計画、倉庫運用の個別計画から物の流れに沿ってSCMシステムを適用する一貫計画があり、また、物流シミュレーションでは、移動機等のプロセス個別の能力検証から工場内通過工程や構外物流網のネットワークの能力検証や最適化が行われている。本稿では、これらのシステム技術の概要を述べる。

キーワード：鉄鋼，物流計画，一貫計画，最適化，物流網，物流シミュレーション

## 1. はじめに

鉄鋼の物流システムは、原料の受け入れから各製造の流れに沿い顧客への商品配送までを範囲としており、製鉄所においては、製造工程の入出力を担うため生産システムと連携するか、その一部となっている。したがって、物流システムは、広域で、ほとんどのシステムと関連するため、これらの業務、技術、開発保守等における課題やシステム技術への期待は、あまりにも幅がひろい。ここでは、近年、計算機能力の向上にあわせて期待が高まっている計画系の業務に焦点を合わせたい。

鉄鋼の生産は、顧客の仕様に合わせて、鋼の成分、圧延の仕上げ寸法、熱処理方法、および鍍金方法等を決めなければならない。また、これらが多種多様であるため、受注生産を基本としている。したがって、効率的な生産を行うためには、注文を各製造工程の処理単位の複数倍になるように集約しなければならない。また、生産能率をあげるためには、このロットサイズを大きくすれば良いのであるが、トレードオフの関係にある納期や仕掛在庫量を配慮しなければならない。

この製造工程の処理はバッチであるため、その物流も、当然のことではあるが、待ちや干渉が生じる。このため、物流能力のシミュレーションには、離散系のモデルやシミュレータが必要であり、また物流計画の

策定には、メタ戦略等の探索手法が用いられている。以下に、これらの業務背景と適用事例を紹介する[1]。

## 2. 計画系の業務課題と解決手法

図1に、物流における計画・制御の対象の階層的分類と倉庫運用の計画業務のイメージを示す。従来は、運転における各種計画の策定と実行管制、また設備の自動制御が課題の主体であったが、近年、戦略、戦術分野におけるシミュレーションや最適化もシステム技術の進歩にあわせ、期待されるようになった。

### 2.1 戦略分野

戦略分野の課題には、基地、コイルセンター等の新設、および統廃合等における物流網の最適化や検証、また倉庫増強等の設備工事における能力や運転方法の検証がある。前者の解決には、ネットワーク最適化技術の応用[2]が期待されている。また後者には、離散事象のシミュレーション技術が用いられるが、この技術は確立しており、汎用ツールも販売され容易に製鉄所の設備改善、操業改善、物流改善の最良策導出が可能になっている。住友金属工業(株)は、これらの約100件のシミュレーションを実施し成果をあげた[3]。

### 2.2 戦術分野

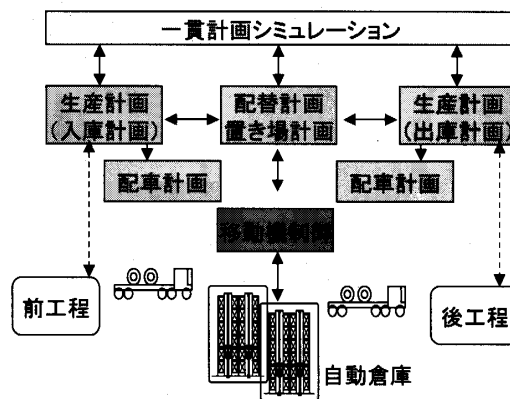
戦術分野では、週間から月次、期レベルの需要変動、生産変動にあわせた多工程間にわたる一貫計画シミュレーション、また倉庫運用においては、生産変動にあわせた置き場運用や輸送能力検証が期待される。これらの検証は、その期間における生産ロットの種類や量、また置き場ごとの在庫量や備車台数等の適正化をはか

きむら りょうすけ

JFE 技術(株) 計測制御研究部

〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1

	期間	計画・制御対象
戦略	必要時 (バッチ)	製鉄所レイアウト設計 物流基地の建設・運用最適化 (物流網最適化) 設備工事の能力・運転方案検証
戦術	週～期	一貫計画(生産計画連携) 陸送・海送シミュレーション (所要台数、ルート) 置き場運用シミュレーション
運転	分～日	配車・配船計画 積付計画・配替計画 入出庫計画・バース計画 (生産実績に合せた物流管制)
		自動倉庫 移動機自動運転 コンベア系統運用



倉庫運用に関する計画業務

図1 計画系の業務課題

り、日程計画における長期的負荷のバランスをとるものである。この検証の支援にはSCM (Supply Chain Management) ツール[4], [5]も適用されている。SCMは多工程にわたる製造情報の共有化により、在庫削減、製造リードタイムの短縮、適正なロット集約をはかる経営モデルである。鉄鋼では、SCM以前のCIM (Computer Integration Manufacturing) やSIS (Strategic Information System) が提唱された時代に、実績(進捗)情報の共有化が行われており、この進捗開示によるユーザの信頼獲得と納期管理の強化が期待された。SCMは、実績ではなく、注文または受注予測情報の共有化をベースとしている。注文情報は、実績情報と異なり、製造順編成またはロット(枠) 充当等の並び替えを行わないと活用が困難であったが、計算機の処理能力向上により、この並び替えが可能になった。

### 2.3 運転分野

運転においては、戦術的な検証結果に基づき各工程における各ロットへの注文充当や製造順等の生産計画が策定され、倉庫運用では、これらにあわせた、入出庫計画、またこの計画に連携する配替え計画、置き場計画、配車計画が策定される。これらの自動化、最適化、また実行管制のシステム支援は重要な課題であり、メタ戦略[6]と称される探索型の最適化手法が多く適用されている。1980年代に多く用いられたAI技術であるエキスパートシステムの適用は近年ほとんど見られない。メタ戦略は探索してよい解を求める分、開発が容易で保守性に優れるが、計算時間がかかる欠点がある。

この欠点を補うため、少ない探索で良い解を見つける種々の方法が提案されている。配車計画に適用された解法には、SA (Simulated Annealing) [7], 反復局所探索法[8]があり、メタ戦略ではないが分枝限定法[9]も用いられている。また、広い意味での配車計画である溶銑物流における通過工程選択と機関車スケジュール[10]にも分枝限定法が適用されている。配車計画の他、原料ヤード運用計画にGA (Genetic Algorithm) [11], バース計画に分枝限定法[12], 積み付け計画(ストエージプラン)にSA[13]が適用されている。

これらの適用における計算時間短縮のための探索量削減には、評価の高い初期解の作成、また制約を活用した探索空間の削減等、問題に合わせたエンジニアリングが行われている。バース計画[12]では、探索途中で未探索部分のコスト予測に基づいて分枝限定操作を行い、コスト予測が無い方式に比べ、探索時間を約1/10にしている。

### 2.4 制御分野

制御においては、自動倉庫や搬送機器のシーケンス制御、またクレーン等の移動機の自動運転が行われている。省力化の観点から、この自動化率向上、また有人同等の処理能率化への期待は大きい。とくにクレーンの自動化は、その数が製鉄所あたり100台を超すことが多く、自動化による省力化への効果が大きい。この自動化には、振れ止め制御が必須であり、目標位置で振れを止めるためのクレーン速度パターンを事前に計算するとともに、振れ角センサーによるフィードバ

ック制御が有効である[14].

### 3. 物流計画最適化事例

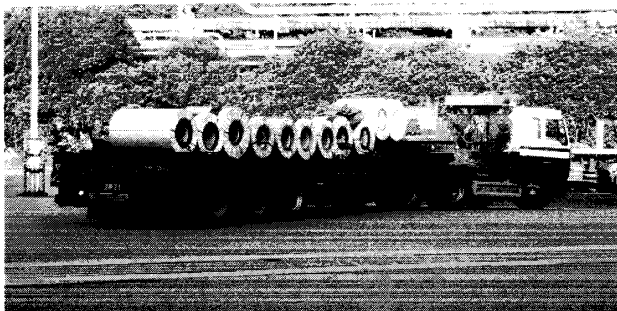
運転分野の事例として鋼材の配車計画、戦術の事例として製鉄所におけるSCMツールを用いた一貫計画、戦略の事例として物流網最適化を紹介する。

配車計画は、自動で作成することが可能であるが、他の一貫計画や物流網最適化は、より良い解にむけた対策（制約の緩和、条件の変更）のとり方が多様であるため、人の経験や知恵におうところが多く、自動化は一部でありシミュレータの域を出ない。

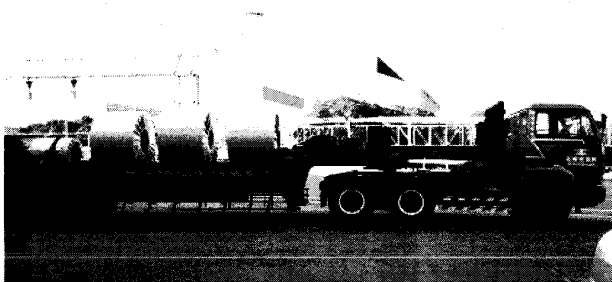
#### 3.1 配車計画

一般的な配車計画は、積載量の最大化と納品時刻制約をまもりながら走行距離の最短化をはかるものであるが、図2に示すような荷姿制約の配慮、また車種によっては回転率向上のために高速道路利用可否評価を行うこともある。

表1に、建材等を配送する計画事例[8]の概要を示す。配送先が工事現場であるため、配送ルートは日毎に大きく異なる。このため過去の配車ルートを参考に行うことができない。また、工事現場によっては搬入時刻の指定、荷下ろし設備の有無や周辺道路事情により運搬車種が限定されるなど、多くの制約がある。熟練配車マンもこれら全てを考慮した上でコストが最適



メガネ積み



鉄砲積み

図2 荷姿

な配車計画を立てることは困難である。この計画問題には図3に示す反復局所探索法を用いている。この処理は、積荷を積載率が向上するように試行錯誤的に乗せ替えながら、納品時間制約下での最短ルートを探し、局所解が得られるまで解の改善を繰り返し、さらにこの局所解にランダムな変形を加え再度この処理を繰り返しより良い解を探索するものである。

配送先は日本全国であるため、これらの積み合せを全国一括で探索することは、非効率である。このため

表1 鋼材配送事例

問題	翌日1日分のオーダに基づき、 車種台数と車種の決定 車種への配送オーダ割付と配送ルート決定
制約条件	車種指定、時刻指定、積載量
目的関数	積載率、走行距離
配送規模	50~150 都市 200~500トン/日 (100~300 オーダ/日) 50~100 車種/日 (4~15トン車、ユニック要否)

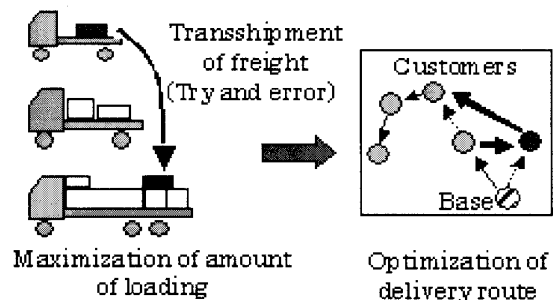


図3 配車計画処理概要

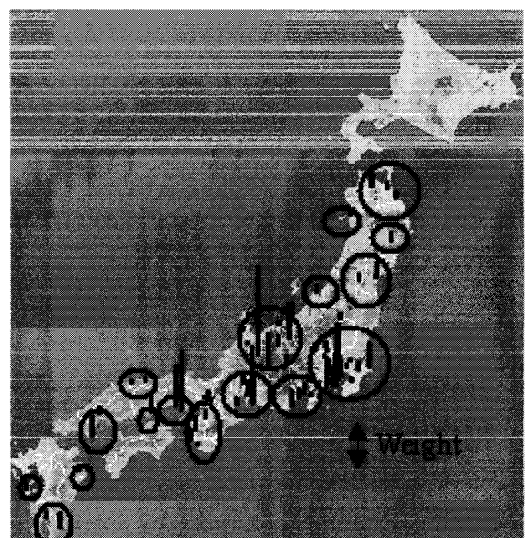


図4 配送先クラスタリング

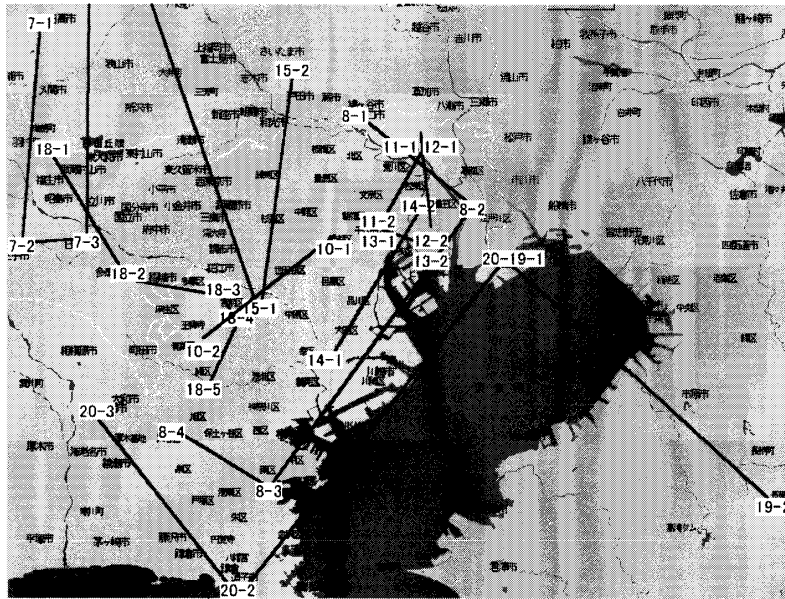


図5 配車計画結果例

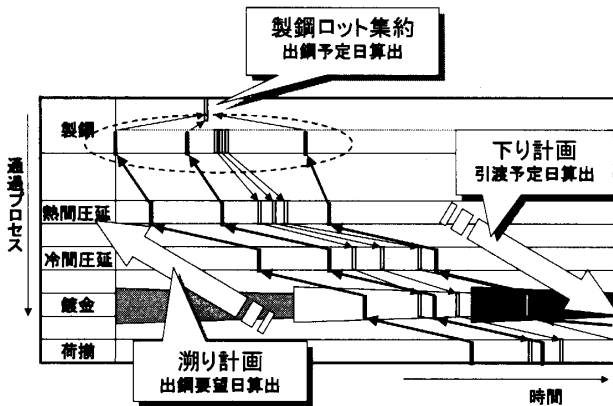


図6 一貫計画イメージ

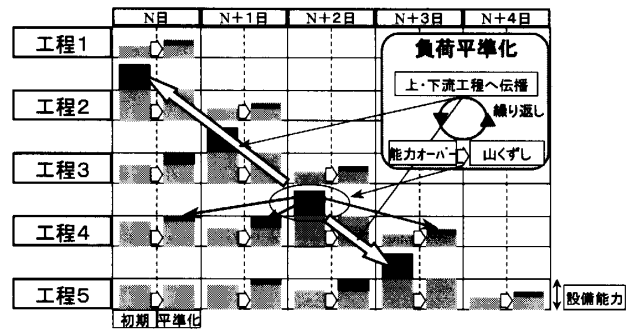


図7 一貫計画シミュレーション概要

図4に示すように配送先を一定距離内になるようにクラスタリングし、そのなかでの積み合せ探索を実施している。

図5は配車計画結果の一例(部分)を地図上にプロットしたもので、プロット脇の数字が車番と荷降ろし順である。

### 3.2 一貫計画

製鉄所における一貫計画は、注文に基づいて各製造プロセスの処理時期を決めるものである。ここでは、複数の部品から1つの商品を製造する組み立てプロセスとは異なり、数百トン製造単位とする溶鋼から数十kg~数十トンのパイプや板の複数商品を製造する。したがって、製造プロセスごとに複数の注文をロット集約する必要がある。図6は、鍍金鋼板の製造工程を例に一貫計画のイメージを示しており、縦軸が通過工程で、横軸が時間である。注文の納期にあわせた荷揃

から、製造の流れとは逆に遡り、鍍金、圧延および製鋼の各製造時期を仮決めする。製鋼では、この時期に合うように同一規格のロットを集約し出鋼予定日を算出する。この結果に従い製造の流れに沿って下り計画を作成し引渡し予定日を求める。この引渡し予定が納期をままれるように、各製造時期の調整を実施する。

この一連の計画策定のためのシミュレーションにSCMツールが用いられている。このツールは、高速化をはかるため、探索型ではなく多段ソートによるスケジューリングが一般的である。また、操業条件を種々変更して検証を行うため高度なヒューマンインターフェイスを有している。図7は、この機能の概要である。縦軸が処理工程、横軸が処理日であり、各処理は、1日で次工程へ進むものと簡略化している。注文の納期に従って下工程から遡りながら処理量を積み上げた結果を処理日欄の左側に示す。ここで、設備能力を超えた分を平準化した結果を処理日欄の右側に示すが、処理日より早い日に山くずしされたものは先作り

となり、遅い日にしか割り振れないと納期遅れとなる。この山くずしは、TOC (Theory Of Constraints) [15]に従いボトルネック工程から行うのが効率的である。検証者は、この結果を見ながら、直体制の見直し、他工程への振り替え、納期検討、等を行う。

図8は、SCMツールでのシミュレーション結果である(カラー表示を単色表示に変換)。2000年5月の熱延の計画であるが、前月末に落雷停電によるトラブルがあり、月初めには遅れが生じているが、その後は、遅れが回復しており、次月の受注枠削減等の対応が不要であることを示している。

なお、国内の鉄鋼においてはユーザや、コイルセンター等と企業間にわたりSCMシステムを構築した例[16]は少なく、多くは社内における一貫計画である。

### 3.3 物流網最適化

物流網最適化とは、図9に示すような工場、物流センター(中継基地)、および顧客で作られる物流ネットワークのコスト、すなわち配送、保管、仕分け等の物流にかかる費用のミニマム化をはかるものである[2]。この技術は、物流センターの統廃合、新設や増

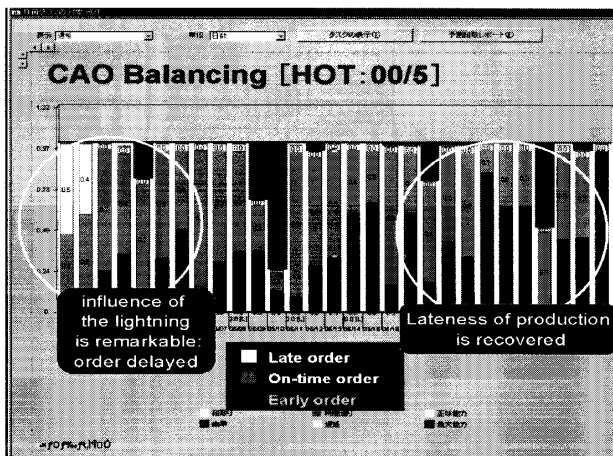


図8 SCMツールによる計画結果表示例

強、商品在庫の適正化、等の物流戦略策定支援に用いられる。図10は、この物流網シミュレーションの概要である。物流センター統廃合等の検討案にあわせ、その場所や能力、および顧客分布や要素コストをシミュレータに入力すると、物流コストミニマムの物流経路等が出力される。したがって、種々の案をシミュレーションすることにより、統廃合等における最適な戦略を得ることができる。

シミュレータの最適化計算は、顧客と物流センターの最適な組み合わせを逐次二次計画法[17]で求めるもので、この中の処理である配送計画は、処理時間を短くするため、Cheapest Insertion[18]を用いている。

表2は、物流網に関するシミュレーション例で、物流センターのG~Jを廃止し、Kをその分増強する案である。扱ひ量は、その合計値で、またコストは集約前の合計値で割り戻してある。輸送コストは、集約により増加するものの、保管仕分けコストは、Kセン

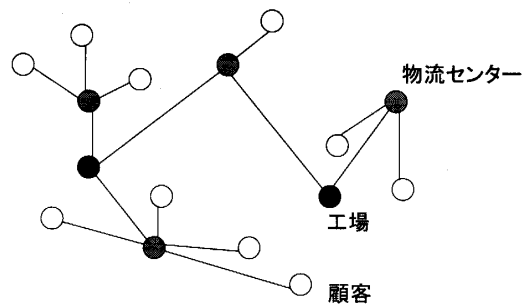


図9 物流ネットワーク

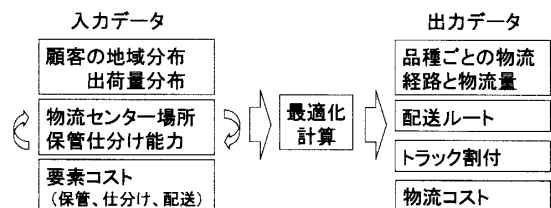
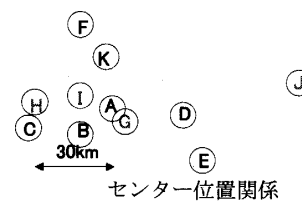


図10 物流網シミュレーション

表2 物流網シミュレーション結果例

物流センター	扱ひ量		輸送コスト		保管仕分けコスト		コスト合計	
	集約前	集約後	集約前	集約後	集約前	集約後	集約前	集約後
A	0.121	0.079	0.034	0.044	0.075	0.056	0.109	0.100
B	0.095	0.108	0.031	0.046	0.064	0.064	0.095	0.110
C	0.135	0.195	0.024	0.082	0.077	0.087	0.101	0.169
D	0.095	0.085	0.035	0.052	0.065	0.058	0.100	0.110
E	0.057	0.041	0.031	0.034	0.052	0.045	0.082	0.078
F	0.111	0.084	0.023	0.026	0.069	0.057	0.092	0.084
G(廃止)	0.070		0.025		0.052		0.077	
H(廃止)	0.109		0.018		0.078		0.097	
I(廃止)	0.065		0.030		0.050		0.080	
J(廃止)	0.024		0.024		0.036		0.060	
K(増強)	0.119	0.407	0.034	0.101	0.072	0.157	0.106	0.259
合計	1.000	1.000	0.310	0.386	0.690	0.523	1.000	0.909



センター位置関係

ターのスケールメリット（処理量により要素コストを変えている）とG~Jセンター廃止により削減している。なお、Kセンターの設備増強費用は計上していない。また、この例は、一般消費材を対象にしたものであるが、鉄鋼にも応用が可能と判断される。

#### 4. おわりに

システム技術の進歩は、物流コスト削減に貢献してきている。そのなかでも貢献の大きい、物流計画の最適化やそのシミュレーション事例を紹介した。これらの技術サーベイが、少しでも物流システム関連各位の役にたてば幸いである。システム技術が、進歩するに従い、課題解決のためのシステム技術の適確な応用は、さらに重要性が増すものと思われる。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：鉄鋼協会第56回白石記念講座，pp. 1-14 (2005)
- [2] 吉永陽一，田鍋実，大川登志男，阿瀬始，石川洋史，江藤信一郎：NKK 技報，No. 172，pp. 52-57 (2000)
- [3] 中川義之，上野信行，外嶋成留：住友金属，Vol. 47，No. 2，pp. 122-128 (1995)
- [4] 福島美明：サプライチェーン経営革命，日本経済新聞社 (1998)
- [5] 宮崎知明：オペレーションズ・リサーチ，Vol. 44，No. 6，pp. 24-27 (1999)
- [6] 柳浦睦憲，茨木俊秀：組み合わせ最適化，朝倉書店 (2001)
- [7] 室善一郎，濱口義正，高田みね，波元美保子：CANP-ISIJ，Vol. 13，pp. 205 (2000)
- [8] 藤井聡，大川登志男，石戸谷直樹：CANP-ISIJ，Vol. 17，pp. 957 (2004)
- [9] 中川義之，石塚美奈子，磯貝宏，畑野博：オペレーションズ・リサーチ，Vol. 39，No. 3，pp. 11-15 (1994)
- [10] 田村昌弘，稲葉祐三，古賀康彦，有菌徳美，河合登，入谷英樹：神戸製鋼技報，Vol. 46，No. 2，pp. 15-18 (1996)
- [11] 織田実，北川充宏，宮原弘明，松岡成典，大竹和則：CANP-ISIJ，Vol. 7，pp. 1258 (1994)
- [12] 梅田豊裕，小西正躬：オペレーションズ・リサーチ，Vol. 48，No. 8，pp. 9-15 (2003)
- [13] 長倉宇一郎，綿谷等，金村真三，広瀬雄介，小関巧，竹崎等：神戸製鋼技報，Vol. 46，No. 2，pp. 23-35 (1996)
- [14] 大川登志男，山口収，関根宏：NKK 技報，No. 149，pp. 40-45 (1995)
- [15] 竹之内隆：オペレーションズ・リサーチ，Vol. 44，No. 6，pp. 9-15 (1999)
- [16] 後川隆文：鉄鋼協会第56回白石記念講座 pp. 75-86 (2005)
- [17] 茨木俊秀，福島雅夫：最適化の手法，共立出版，(1993)
- [18] 山本芳嗣，久保幹雄：巡回セールスマン問題への招待，朝倉書店 (1997)