

製鉄所における入出荷計画問題と最適化技術

岩谷 敏治

本稿では、まず、日本の一貫型製鉄所における物流問題の規模とそのコスト削減の重要性を示す。つぎに、製鉄所の原料入荷業務と製品出荷業務に共通する計画問題である、船舶へのバース（棧橋）割当問題への最適化システム開発例を示す。いずれの問題に対しても、探索的な最適化技術を利用して解を求めているが、用いた最適化手法や高速化のための工夫の違い、そして求解可能な問題規模の違いを示す。最後に、本開発例や過去の製鉄所における物流計画問題のシステム化例、さらには情報化技術の発展を考慮しながら、今後の鉄鋼業、および製造業の計画問題における最適化技術に対するニーズを議論する。

キーワード：鉄鋼業、物流、最適化

1. はじめに

製鉄所における物流といっても、一般読者にはその規模は容易に想像できないであろう。年間生産量 800 万 t 規模の大型一貫製鉄所を例に、その構内物流を考えてみる。1 日当たりの生産量は 2 万 t 以上となり、製鉄プロセスは、製銑、製鋼、鑄造、圧延、熱処理、表面処理、等の多工程から構成されるので、各工程間を様々な形態（原材料、溶銑、溶鋼、スラブ、ピレット、コイル、ワイヤ、等）で 2 万 t の物質が毎日移動することになる。もし、それらの物流を全て 20 トントラックで対応するならば、1,000 台以上が終日走り回る必要がある。おそらく他の製造業では類を見ない規模の物流規模ではないだろうか。実際には、数百トン、数十トンの容量を持つ溶銑鍋、溶鋼鍋、台車に製品、半製品を積載し、それらを機関車、特殊車両、コンベア、天井クレーン、等で搬送している。搬送設備を増設する場合の投資額は数億円～数十億円に上るので、設備投資コスト最小化のために物流の最適化が重要となる。

ここで述べた、構内物流以上に重要なものが、製鉄所への入出荷物流である。実際、鉄鋼業ではそれらのコストが売上高の 4~5% を占めており、そのコスト削減は常に重要な経営課題となっている。特に、我が国の一貫製鉄所は臨海部に立地しているため、原料入荷と海外への製品出荷のほぼ 100%、および国内への製品出荷の約 80% は船舶を利用[1]しており、物流問

題における船舶の比重は非常に高い。

本稿では、入出荷計画問題への最適化手法の活用方法について、開発事例に基づき議論を行う。まず、節 2 では鉄鋼業における入出荷物流の経済的影響を例示する。次に節 3、節 4 ではそれぞれ、原料入荷計画問題、製品出荷計画問題に対するシステム化例について紹介する。ここでは、比較を容易にするために、双方に共通する船舶用バース（=製鉄所内の棧橋）の割当て問題を取り上げる。そして、それらの内容に基づき節 5 では考察を行う。入荷計画問題と出荷計画問題の比較、他産業との比較、そして今後の入出荷計画問題に対する IT 技術の適用展望について議論する。

2. 入出荷計画問題の概要

2.1 入出荷業務を構成する問題

入荷、出荷業務とも様々な計画問題から構成される。例えば、入荷業務の場合、原料手配、運搬船手配問題があり、出荷業務では、船舶への製品の振分け、あるいはその積載位置も課題となる。それらに対する最適化システム開発事例については参考文献[2]-[7]を参照頂きたい。

2.2 バース割当て問題の経済的影響

本稿で取り上げるのは、入荷、出荷業務に共通する船舶へのバース割当て問題である。問題詳細は、節 3、節 4 で示すが、ここではその経済的影響を示す。

まず、原料入荷について考える。一般に、一貫製鉄所では生産量の 2 倍の原料が必要であるが、年間 1,000 万 t の原料を入荷する製鉄所を考える。1 隻の積載量が平均 10 万 t とすれば年間 100 隻の原料船が入港することになる。船舶輸送には滞船料と呼ばれる

いわたに としはる

(株)神戸製鋼所

〒 651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5

コストが存在する。これは、製鉄所側の原因で船舶を予定よりも長期間拘束した場合に船会社に支払うペナルティである。各船の滞在日数はバース割当ての巧拙で変化する。滞船料は、契約形態にも依存するので一概に決められないが、2百万円/(1日×1隻)と仮定する。もし、全船舶を平均1日滞船させてしまうと2億円/年の滞船料が発生することになる。

次に、製品出荷の場合であるが、バース割当てに問題があると製品積載作業が遅延し、出航日に間に合わない製品が発生する。この場合、船は予定通り出港させて遅れた製品をトラックにより緊急陸送して対応する。陸送コストを50円/(ton×km)と仮定する。輸送距離が平均500km、4,000t/年の緊急陸送を実施すれば、そのコストは1億円/年を超過する。

以上、概算ではあるが、入出荷バース割当て問題の解レベルが低いと、年間数億円単位の無駄なコストが発生する事、そして、最適化技術によるそのコスト削減効果が大きい事を理解して頂けるであろう。

3. 原料船バース割当て問題への最適化手法の適用

3.1 問題概要

当社加古川製鉄所で利用する鉄鉱石、石炭、副原料(ドロマイト、マンガン鉱石、等)を積載した原料船のうち、1年に数百隻が3箇所のバース(E3, E4, E5)を利用する。それらは、製鉄所沖に到着後、利用予定バースを他船舶が占有中であれば沖で待機し、利用可能になれば入港、着岸する。その後、数日間アンローダ等で原料を揚陸した後、離岸、出航する。バース割当て問題とは、沖到着日が与えられた百数十隻の原料船に対して、滞船料が最小となるように3箇所のバースの割当てを決定する問題であり(図1)単純な解法では組合せの爆発が発生して実用時間内の求解は容易ではない。

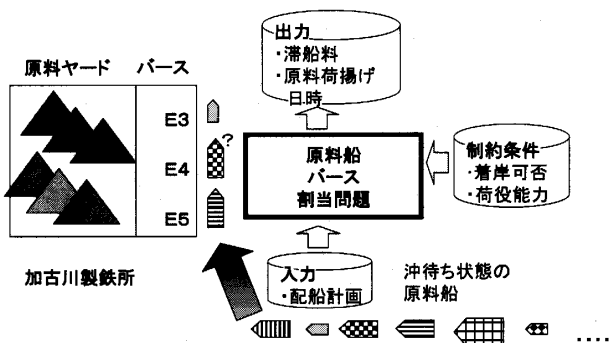


図1 原料船バース割当て問題

3.2 経験的ルールによる決定

今 N 隻のバース割当て問題を考える。また、 N 隻の船舶を製鉄所沖到着日の早い順に並べておき、その順に、バースを決定するものとする。熟練作業者は、船舶の種類、積荷種類、その量、およびバースの稼働状況に応じてバースを決定する経験知識を持つ。この割付け知識を抽出して、全てそれに基づいて各船舶のバースを決定する方法を検討した。この手法であれば、 N 隻の計画問題であれば“IF THEN”処理を N 回実施するだけなので、求解に必要な計算量は N に比例するだけなので、膨大な量にならず非常に高速に解を導出できる(図2(a))。

しかし、本手法を適用したバーススケジュールでは、熟練者が作成するレベルの解は導出できなかった。熟練者は割付け知識に基づいて数隻のバースを決定した後、滞船料が多ければ見直しを行い、割付け知識が導く結論とは異なるバース決定を実施している。その見直し方が真の経験知識であった。つまり、どの程度の滞船料が発生していれば見直しを行い、どこをどのように変更するかが、計画問題における熟練者の真の経験知識といえる(図2(b))。そのような経験知識は、人間の思考プロセスを表現しており、その抽出や計算機での実現は困難であった。

3.3 開発した手法

k 番目の船舶のバースを決定する場合、1番目から k 番目の割付結果だけ評価して、コスト(=滞船料)が最小のバースを選択すると良い解は得られない。その理由は容易にわかるように、 $k+1$ 番目~ N 番目の船で発生するコストが考慮されていないためである。しかし、 $k+1$ 番目~ N 番目まで全ての船のバースを最適に決定した場合のコストを求めるには、 $N-k$ 隻のバース決定問題を解くことになり組合せの爆発が発

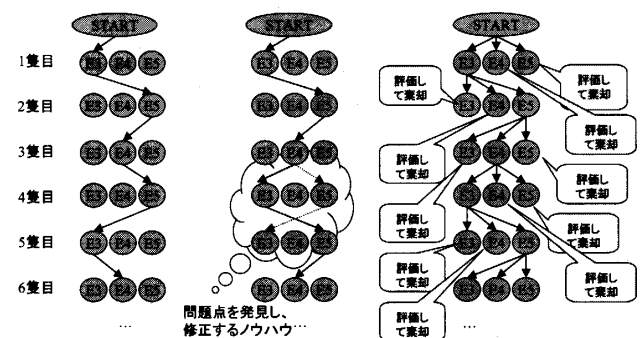


図2 各種解法のイメージ

表1 各種解法の適用結果

スケジューリング方法	計算時間	滞船料*
開発ロジック	0.2秒	0.98
熟練者ハンド設定	30分	1.00
ルール利用(ツール)	0.7秒	2.08

*滞船料は熟練者ハンド設定で正規化

生ずる。

したがって、 k 番目の船舶のバースを決定する際に、 $k+1$ 番目～ N 番目の船で発生するコストを簡易な計算で精度良く予測し、バース選択に利用できれば、高速で最適に近い解を導出できることになる。その予測に前項で示した割付けルールを利用した、 k 番目の船舶のバースを決定する場合を考える。3通りのバース候補(E3, E4, E5)を割り当てたそれぞれの場合に対して、残りの $N-k$ 隻のバース決定問題をバース割付けルールで決定し、そのとき発生する滞船料が最小となるバース候補を選択する。 $k+1$ 番目以下の船舶のバースを決定する場合も同様である(図2(c))。この手法だと計算量は N^2 に比例するので、組合せの爆発は発生しない。

3.4 適用結果

表1に約100隻の船舶に対するバース決定問題に、各種手法を適用した結果を示す。開発ロジックはC言語で記述し、ルールによる決定は市販のスケジューリングツールを利用した。そのため、計算時間が開発した手法よりも長くかかっている。また、比較のために熟練作業者の計画結果とも同時に比較した。これに示すように、開発ロジックは、非常に高速に熟練作業者並みの解を導出することが分かった。

4. 出荷船バース割当問題への最適化手法の適用

4.1 問題概要

図3に加古川製鉄所における、内航船用出荷岸壁関連設備を示す。出荷製品は、構内に点在する倉庫に保管されており、積載される船舶が接岸したバースに対し、トラック、等で運搬され、その後クレーンで船舶に積載される。出荷用バースは6箇所あり、1日あたり数十隻の船舶が入港する。製品出荷船のバース割当て問題とは、数日単位でこれら船舶が利用するバースを6箇所から決定する問題である。また、原料船の場

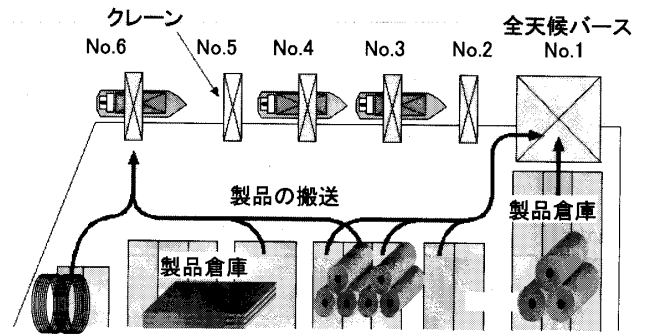


図3 出荷岸壁周辺

合と違い、先に到着した船を優先する必要はなく、向け先への出航限界時刻に近い船舶を優先して作業開始する。本稿では、原料入荷船のバース割当て問題との対比を中心に記述するので、詳細については文献[8]を参照のこと。

4.2 評価指標

原料船の場合と同様に滞船時間は最小化する必要があるが、出荷船の問題の場合にはさらに2項目が追加される。ひとつは、出航限界時刻遅れであり、これはユーザ等への納期遅れの原因となるので最小化する必要がある。今ひとつは、出荷製品の倉庫からバースまでの輸送作業量であり、これも最小化が望まれる。したがって、製品出荷船のバース決定問題において最小化を目指す評価指標 E は以下の形となる。

$$E = \sum_{i=1}^N F_i \quad (1)$$

$$F_i = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_3 f_3$$

f_1 : 船舶 i の滞船時間

f_2 : 船舶 i の出航限界時刻遅れ

f_3 : 船舶に積載する製品の、倉庫⇒バース間の移動作業量

ω_i : 重み

4.3 制約条件

原料入荷の場合と同様に、各船舶が利用できるバースに制約がある。この制約は、船舶サイズにより利用不可能なバースがある事と、積載する製品の品種、形状、サイズによって利用可能なクレーン(=バースに附属)が制約されるためである。また、作業者の制約もあり、同時に作業できる人数には上限があるので、バースには接岸しているが作業が行われない場合も発生する。

4.4 分枝限定法の適用とその有効性

出荷船の問題では、バースの数が多いため、また、積載製品を保管している倉庫の位置なども評価指標に

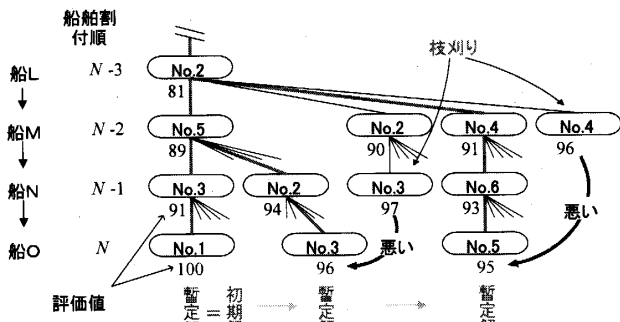


図4 分枝限定アルゴリズム

関係するため、船舶種類と積荷だけでバースを決定する経験知識が十分ではなかった。そのため、本問題に対しては分枝限定法[12]を適用した。分枝限定法の基本は列挙法であるが、最適解が存在しないと証明できる領域の探索は省略することによって探索効率化を狙うものである。図4に分枝限定法の具体例を示す。

図4では、初期解があり、船L, M, N, Oの順に、バースNo.2, No.5, No.3, No.1に割り付けられており、評価値は100である。これを暫定解1と呼ぶ。この初期解から、各船舶へのバース割り当てを変更した場合の評価を行い、その時点での評価が暫定解の評価値より良い場合は、さらに次の船舶の変更を行うが、悪い場合は、その先の変更は行わず元にもどす。例えば、船舶NをNo.2に変更した場合のN-1番目の船舶までの評価値は94であるため、暫定解1よりも良いので、さらに次の船舶、船Oの変更も行う。船OをNo.3に割り当てた場合の評価値、すなわち全体としての解が暫定解1の100よりもよいので、これは新しい暫定解2となる。

その後、例えば船MをNo.2に船NをNo.3に割り当てた場合のN-1番目までの評価値は97であり、暫定解2の評価値よりも悪いので、その先の変更は行わない。これを繰り返す、徐々に早い段階の船の割付を変更した場合の評価値も検証し、そのときの暫定解よりも悪くなれば棄却、よければそれより後の船の変更も検証する、というアルゴリズムを用いれば、実質上、全実行可能解の比較ができる。そして、棄却できる変更が多ければ高速に探索が完了する。

4.5 経験知識による予測コストの導入

上記アルゴリズムでは、 k 番目の船のバース変更をした場合、1番目～ k 番目の船舶のスケジュール結果を評価関数とし、暫定解と比べている。容易に分かるように、 k の値が小さいうちに暫定解よりも評価が悪くなれば、効率的な解探索ができる。しかし、 k が小

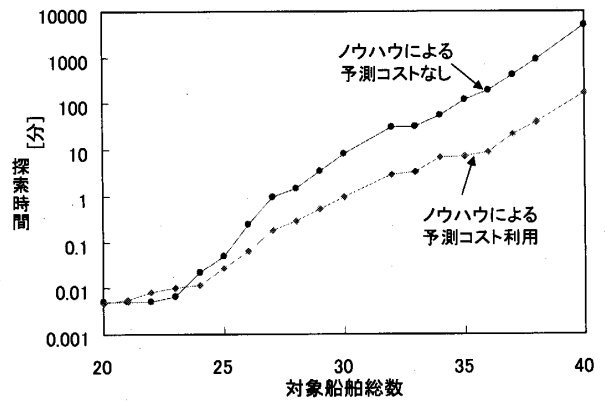


図5 経験知識利用の効果

さいと k 番目までの評価値が、暫定解よりも悪くなることは少ない。したがって、 k 番目の船のバースを変更した段階で、残りの船舶のコストを評価し、 k 番目までの評価値との和をとり、暫定解と比較すれば解の探索が効率的となる。以下に、 k 番目の船まで展開した場合の評価値をノウハウ的に求める方法を示す。

$$E_k = \sum_{i=1}^k F_i + \hat{P}(k=1, 2, \dots, N)$$

$$\hat{P}_k = \sum_{i=k+1}^N \min_j (F_{ijk}) \quad (k=1, 2, \dots, N-1)$$

$$= 0 \quad k=N$$

ここで、 E_k : 第 k 番目の船舶を割り付けた時点での全体の評価値

\hat{P}_k : 第 $k+1$ 番目～ N 番目の船舶の予想コスト

F_{ijk} : 船舶1～ k を割り付けた段階で、残りの船舶 i をバース j に仮に割付けた場合の評価関数 F_i の値

式(2)の意味を定性的に述べると、 k 番目の船舶を割り付けた時点で、残る $k+1 \sim N$ 番目の船を一隻割り付けた場合に発生する最低限の評価関数の和である。残りの船舶を割付た場合の評価指標増加分は、最低この値が必要となる。この値を k 番目までの評価関数に和して得た、 E_k は k 番目の船舶を割り付けた時点で予想される、全体の評価関数の下限値といえる。この値と、暫定解の値を比べ、暫定解よりも悪ければ k 番目までの船舶の割付が最適解の一部を構成していないことは自明である。

図5に、分枝限定法による求解速度と、それと本節で示した経験知識による予測コストを導入した場合の求解速度の比較を示す。その差はバース割付の対象となる船舶の数が多くなると顕著になり、10倍以上の高速化が実現できていることがわかる。

5. 考察

5.1 入荷と出荷の違い…経験知識の精度の違い…

両システム共に、最適化手法の中に経験知識を用いることで、求解速度を高速化している。しかし、その方法と有効性は異なっている。原料船の場合には経験知識に基づいて $k+1$ 番目以降の船舶のバースを決定して評価関数を導出し、それが最小となるように k 番目の船のバースを選択している。これに対し、出荷船の場合も式(2)に示すように、 $k+1$ 番目以降の各船舶の最小コストを経験知識により予測して求めているが、バースの空き待ち、等の本問題の重要な要素が考慮できていない。そのため、実際に残りの船舶で発生する評価関数とはかなり異なる値となる。したがって、この値の大小による相対評価では k 番目のバースは決定せず、暫定解との絶対比較で最適解の見込みが無くなった候補を削除する手段を採るしかなかった。しかし、この予測による評価であっても k が全船数 N に比べて小さい時は、下界値は暫定解の評価値よりも悪くなりにくいために、探索領域をなかなか削減できない。

実際に、原料入荷船では百数十隻の問題を秒単位で熟練者並の解を導出できたが、製品出荷船の場合は、40~50 隻の問題が実用上の限界となっている。これは原料船の場合の、経験知識のレベルが高い事を示している。原料入荷船のほうが、入港数、さらには船舶の種類が少ないため、船舶の着岸バース決定に関する経験知識が深く蓄積されていたことが理由と考えられる。

具体的な比較は、ここで述べた入出荷に共通するバース割当て問題でしか実施していないが、経験知識の活用を図る場合、問題の規模や多様性が原因となり、製品出荷問題は原料入荷問題よりも格段に困難であると考えられる。

5.2 他産業との比較

本稿で述べてきた、船舶が関係する原料入荷業務、製品出荷業務のシステム化の課題は鉄鋼業だけに限られる問題ではなく、公共の港湾における事例紹介[9]や、自動車の船舶への積み込み支援の事例[10]などが見られる。また、バーススケジュールに関しては、港湾一般に共有される典型的な組合せ最適化問題であり、他産業における研究例[11]もある。しかし、鉄鋼業のように、関連する計画業務のシステム化事例も含めて、節2で示したように多くの開発事例が報告されている

例はない。その理由としては、やはり経済効果の大きさといえる。節2.2で示したように、入出荷業務最適化の経済効果は年間数億円に上る。仮に、システム構築に1億円費やしても1年で回収可能である。筆者が勤務する神戸製鋼所は、溶接棒、非鉄金属(アルミ、銅)、産業機械、等の部門から構成されるが、他部門では入出荷物流だけでこのようなシステム化投資を採算にのせる事は容易ではない。

5.3 IT技術革新と最適化技術

80年代に知識工学手法、90年代前半はメタ戦略[13]、90年代後半からはSCMと鉄鋼業界における業務系のシステム化技術にも多くの変化があった。しかしこれらの理論は、脚光を浴びる以前からも存在していた。その時期に注目を集めた理由は、情報処理(IT)ハードウェアの進歩に関係している。例えば、パソコン、ワークステーションの普及は知識工学手法の、それらハードウェアの高速化はメタ戦略の、そして、ネットワーク化はSCMが普及するための必要条件になっていた(図6)。

言うまでもなく、この10年間の、コンピュータの高速化、大容量化、さらにはネットワーク化には目覚ましいものがあった。また、携帯電話やIP電話の普及による通信手段の変革も同様である。これらの進歩は、今後共、加速することはあっても減速することはない。その究極の姿として、必要な情報と計算機パワーをいつでも、どこでも活用できるという、ユビキタスコンピューティング、グリッドコンピューティング社会の到来が予想されている。このようなIT技術革新が製造業の生産計画業務に波及した場合、鉄鋼業の入出荷業務はどのように変化するのだろうか。例えば、計算速度が1,000~10,000倍程度になれば、解の導出速度、解のレベル、同時に最適化できる工程の数、等が劇的に変化する可能性を持つ。つまり、より大規模、複雑な問題への最適化技術の適用手法確立が鉄鋼業における今後の課題と言える。

また、前節では、鉄鋼業以外の製造業でも物流への最適化技術のニーズはあるが、コストパフォーマンス

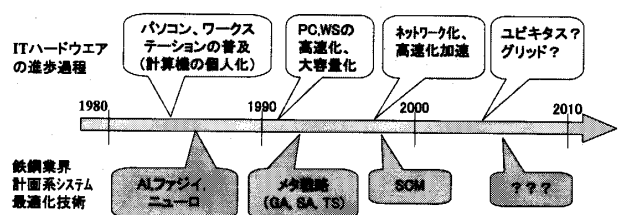


図6 IT技術と最適化手法技術

の関係で十分な適用ができていない事に触れた。しかし、上記のIT技術革新により、より少ない労力で物流問題に対する最適化システム構築が実現できる可能性がある。つまり、最適化技術にとって実用的な適用先が広がると言えるのではないだろうか。

6. おわりに

本稿では、まず、原料入荷業務、製品出荷業務の経済的影響量を示した。そして、原料入荷船と製品出荷船に対するバース割り当て問題へ最適化手法の適用方法について具体的なシステム開発例を示した。いずれの問題においても、高速化には経験的知識を利用している。最後に、それらに基づいて、入出荷業務の特徴、他業界との比較、IT技術発展との関連について考察を行った。

日本の鉄鋼業において、過去数十年がそうであったように、未来においても原料を船舶で入荷し、製品の多くを船舶で出荷するという形態は変化しないであろう。つまり、船舶に数個のバースを割り当てるといふ、非常に単純ではあるが、難しく、しかも経済的価値を持つ問題が常に存在する事になる。本稿で紹介したシステム構築例で用いた手法はどちらかと言えば、古典的な手法である。これを読み、オペレーションズ・リサーチの優秀な読者が興味を持つ事でより有効な最適

化手法が確立されれば、本稿も多少の価値があったことになる。

参考文献

- [1] 内航海運から見た素材産業の物流コスト効率化に関する調査報告書, 日本内航海運組合総連合会, (2003).
- [2] 坂本, 他: 川崎製鉄技報, 26 (1994), 203.
- [3] 島津, 他: 川崎製鉄技報, 27 (1995), 80.
- [4] 塩田, 他: 製鉄研究, 339 (1990), 1.
- [5] T. Umeda, et al.: ISIJ Int., 41 (2001), 446.
- [6] 中川, 他: オペレーションズ・リサーチ, 39 (1994), 131.
- [7] 高, 他: 生産スケジューリング・シンポジウム'94 論文集 (1994), 106.
- [8] 梅田, 他: システム制御情報学会論文誌, 13 (2000), 194.
- [9] 早川, 他: NKK 技報, 155 (1996), 25.
- [10] 斎藤, 他: オペレーションズ・リサーチ, 48 (2003), 216.
- [11] E. Nishimura, et al.: European J. of Operational Research, Vol. 131 (2001), 282.
- [12] 茨木: 組合せ最適化一分枝限定法を中心として一, 産業図書, (1983).
- [13] 柳浦, 他: 組合せ最適化一メタ戦略を中心として一, 朝倉書店, (2001).