

(論文)

製鉄所出荷バースの操業スケジューリング

Berth Assignment Scheduling for Iron and Steel Work Shipments



梅田豊裕*(工博)
Dr. Toyohiro Umeda



広瀬雄介**
Yusuke Hirose



金村真三***
Sinzo Kanamura

This paper introduces an algorithm for shipment berth in iron and steel works. To determine the optimal order of ships at each berth, an algorithm based on the branch and bound method was developed. To improve search efficiency, an estimation term was introduced in the evaluation function, and a rule-based search was used to obtain an initial solution. We also applied this practical solution for divided search space for larger problems. This algorithm provides practical scheduling results quickly.

まえがき = 製鉄所における製品出荷業務では、客先ニーズの多様化に伴う多品種小ロット輸送・ジャストインタイム納入の必要性から、主力である船舶の荷役作業の効率化が強く求められており、適正な出荷計画の作成が必要となっている。しかし、この分野のスケジューリングは、船舶の入港時刻、製品の保管状況、天候など考慮すべき条件が複雑で、人手に頼る計画作成では精度面での限界があった。

船舶の出荷スケジュールは、各船舶が使用する作業バースと各バースでの作業順序などを、所定の評価指標が最良となるように決定する組み合わせ最適化問題として扱うことができる。組み合わせ最適化問題の代表的解法としては、全ての組み合わせを評価せずに最適解を得ることができる分枝限定法¹⁾が古くから研究されているが、実際の製造現場では、計算時間の制約のため実用的なシステムの実現は困難であった。

本稿で述べる改善策は、出荷岸壁での各船舶の荷役バースの決定と、各荷役バースでの荷役順序の決定問題に分枝限定法を適用し、バースへの割付け変更と計画の定

量的評価を繰返す「探索操作」により、簡易的に作成した初期計画が逐次改善されるものである²⁾。さらに、
・ 定量的評価の際に「評価の予測値」を用いる、
・ 大規模な問題をより小さな問題に分割する、
などの工夫をすることにより、従来の分枝限定法に対して最適計画を得るまでの時間を大幅に短縮した。以下では、改善したバーススケジューリングの概要とそのスケジュール作成アルゴリズムについて述べ、実際のデータにより有効性の検証を行う。また、実操業へ適用する際のモデル化の工夫についても触れる。

1. バーススケジューリングの概要

バーススケジューリングとは、配船計画システムで事前に決定された使用船舶と仕向け地、およびそれぞれの船舶に積載する製品情報をもとに、船舶ごとの作業バースと各作業バースでの荷役時間帯を決定することである。今回計画対象とした鋼材出荷岸壁には、1日あたり30隻前後の内航船が入港し、6カ所の国内向け作業バースで荷役される。図1に出荷バースにおける物流の概要

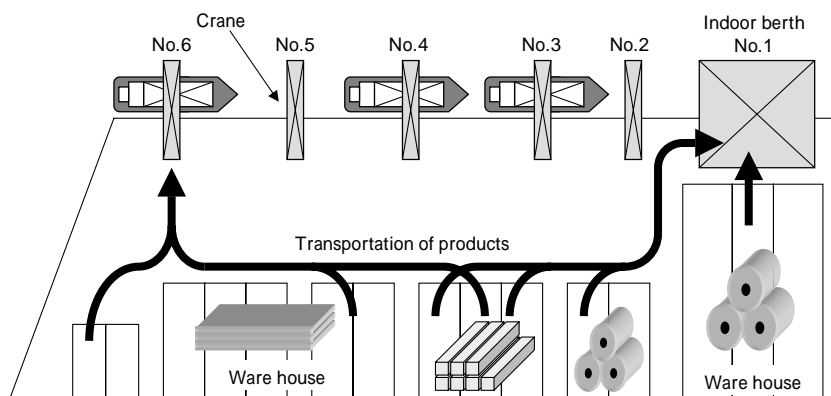


図1 製鉄所出荷バースの概要
Fig. 1 Layout of berth in iron and steel works

*技術開発本部 生産システム研究所 **鉄鋼部門 加古川製鉄所 工程・調達部 ***コベルコシステム(株) プロジェクト支援部

を示す。

パーススケジューリングにおいて、考慮すべき作業制約を以下に示す。

作業パース制約：

品種や製品の形状、サイズにより作業可能なパースが限定される場合がある。

出港納期制約：

仕向け地での荷揚げ時刻が事前に指定されている場合は、航海時間を考慮して出港限界時刻が設定される。

作業者数制約：

製品の種類やクレーンの吊具の形状により、荷役に必要な作業員数が異なる。一方、同時刻に岸壁で作業できる荷役作業員の合計人数には上限がある。

天候制約：

雨天時には、雨濡れ不可の製品の荷役は、全天候パース以外では行うことができない。

作業不可時間帯制約：

クレーンの修理や作業員の食事時間帯には荷役作業はできない。

2. パーススケジューリングのモデル化

2.1 決定変数と従属変数

上記の制約を満たすうえで、所定の評価項目を最良にするように、各船舶の荷役パースと、各パースでの船舶の荷役開始・終了時刻を決定するため、今回のモデル化においては、

- ・各船舶の荷役パース
- ・船舶の荷役優先順序

を決定変数とする組み合わせ最適化問題として扱った。すなわち、決定された荷役優先順と荷役パースに従って、各船舶をパースに割振ることにより、各パースでの船舶の荷役順を決定する。この荷役順をもとに、船舶の到着時刻、荷役時間、作業員数、パースの修理時間などの制約条件を満足するよう、荷役シミュレーションを行うことにより、従属変数として荷役開始・終了時刻を計算する。

2.2 評価関数

パーススケジューリングにおける評価項目として、船舶の運行効率、出港納期遅れ、および岸壁での搬送作業効率の3つの指標を採用した。各評価項目の定量化方法を以下に示す。

船舶の運行効率：

各船舶の滞船時間、すなわち荷役完了時刻と入港時刻の差（図2の(a)および後述の $f_{1,i}$ に対応）。この値が小さいほど船舶の運航効率が向上する。

出港納期の充足度：

出港納期遅れ、すなわち荷役完了時刻と出港納期との差（図2の(b)および後述の $f_{2,i}$ に対応）。この値が正の場合、向け先での荷役予定時刻に遅れる恐れが生じる。

岸壁での搬送作業効率：

すべての製品を保管場所から作業パースまで搬送するのに要する時間（図2の(c)および後述の $f_{3,i}$ に対応）。この値が小さいほど、岸壁での作業効率が向上する。

図2には、これらの評価指標を荷役作業におけるタイ

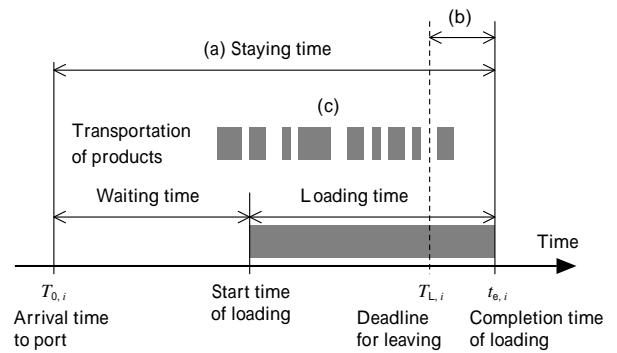


図2 荷役作業のタイムチャート
Fig. 2 Time chart of shipment

ムチャート上で示す。

次に、得られたパーススケジュール全体の良さを定量化する評価関数 E を次式のように表す。

$$E = \sum_{i=1}^{N_S} F_i \quad \text{minimize} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 N_S は計画対象船舶の総数、 F_i は船 i に対する評価関数である。このように、全体の評価関数は、各船の評価関数の和として表される。また、各船 i の評価関数 F_i は、(2) 式のように定義する。

$$F_i = w_1 f_{1,i} + w_2 f_{2,i} + w_3 f_{3,i} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $f_{1,i}$ 、 $f_{2,i}$ 、および $f_{3,i}$ はそれぞれ、各評価項目を定量化する関数で、以下のように定義される。また、 w_1 、 w_2 、および w_3 はそれぞれ0以上の重みパラメータである。

$f_{1,i}$ ：船舶の運行効率

(3) 式に示すように、各船の港での滞船時間を評価することにより、荷役待ちロスや作業ロスによる機会損失の削減を図る。

$$f_{1,i} = t_{e,i} - T_{0,i} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $t_{e,i}$ は船 i の荷役完了時刻、 $T_{0,i}$ は船 i の入港時刻である。

$f_{2,i}$ ：出港納期遅れ

(4) 式に示すように、荷役完了時刻が出港限界時刻から遅れた場合に、遅れ時間に応じたペナルティーを課す。

$$f_{2,i} = p_i \left(\begin{array}{l} t_{e,i} - T_{L,i} \\ 1(t_{e,i} \geq T_{L,i} \text{の時}) \\ \alpha \text{(その他)} \end{array} \right) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $T_{L,i}$ は船 i の出港限界時刻である。

$f_{3,i}$ ：岸壁での搬送作業効率

保管されている製品は、できるだけ保管場所に近いパースで荷役を行うことが岸壁での作業効率向上につながる。そこで、(5) 式に示すように、製品を倉庫から作業パースに搬送する所要時間の総和を評価する。

$$f_{3,i} = \sum_j \sum_{k=1}^{N_k} M_{jk} B_{ik} x_{ij} \dots \dots \dots (5-1)$$

$$x_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1(\text{船 } i \text{ がパース } j \text{ で作業する時}) \\ \alpha(\text{船 } i \text{ がパース } j \text{ で作業しない時}) \end{array} \right\} \dots \dots \dots (5-2)$$

$(i = 1, 2, \dots, N_S, j = 1, 2, \dots, N_B)$

ただし、

- K_i ：船 i が作業可能なパースの集合
- N_k ：倉庫の総数
- M_{jk} ：倉庫 k からパース j までの製品1個の搬送時間

B_{ik} : 船 i の製品のうち倉庫 k に保管されている個数
 N_S : 計画対象船舶の総数
 N_B : パースの総数

である。

3. パーススケジュール作成アルゴリズム

3.1 全体の処理流れ

図3にパーススケジュール作成の処理フローを示す。本方法では、まず船舶の荷役順優先度を決定し、次に得られた荷役順優先度に従った順番で、船舶の作業パースを決定する。作業パースの決定では、各船舶の評価関数が最良となるパースを逐次選択することにより、初期暫定計画を一つ決定する。その後、分枝限定法による探索により暫定計画を逐次更新しながら、最終的に全体の評価関数が最小となるスケジュールを得る。

3.2 船舶の荷役優先順の決定

通常は初期状態で入港済である船舶が少ない、という特徴があるため、先入れ先出し（入港時刻の早い船から荷役を行うこと）を基本として、(6)式に従って船 i の優先度 C_i を設定し、その値の小さい順にパースへの割当てを行うものとする。

$$C_i = v_1 T_{0,i} + v_2 T_{R,i} + v_3 T_{w,i} \dots \dots \dots (6)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} T_{R,i} &= T_{L,i} - T_{0,i} \\ T_{w,i} &= \max_k(b_{ik}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

である。ここで、

- $T_{0,i}$: 船 i の入港時刻
- $T_{R,i}$: 船 i の出港限界余裕時間
- $T_{w,i}$: 船 i の荷役時間
- $T_{L,i}$: 船 i の出港限界時刻
- b_{ik} : 船 i がパース k で荷役する場合の荷役時間
- v_1, v_2, v_3 : 非負の重みパラメータ

である。すなわち、割当て順の決定を下記の指標で行うこととなる。

- 1) 入港時刻：早い船優先
滞船時間を減らし、パースの稼働率を上げる。
- 2) 出港限界時刻：早い船優先
出港納期遅れを減らす。
- 3) 荷役作業時間：短い船優先
入港時刻が同程度の場合に、全体の荷役待ち時間を

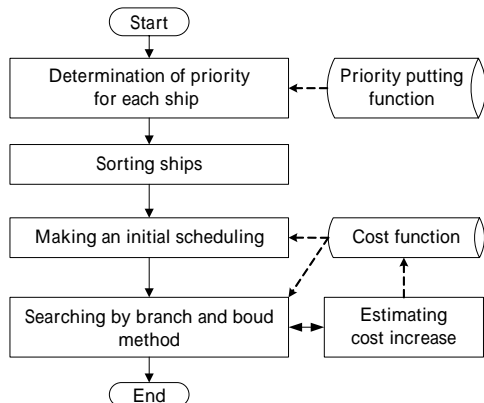


図3 パーススケジューリングの流れ
 Fig. 3 Flowchart of berth scheduling

小さくする。

なお、(6)式の重みパラメータ (v_1, v_2, v_3) は、

$$v_1 > v_2 > v_3 \dots \dots \dots (8)$$

となるように設定する。これは、下記のような優先関係に基づいて、オペレータが船の割当て優先度を設定していることに基づいている。

- ・まず、入港時刻が早い船を優先して割当てる、
- ・つぎに、入港時刻が同程度であれば、出航限界時刻が早い船を優先する、
- ・さらに、出航限界時刻が同程度であれば、荷役作業時間の短い船を優先する。

3.3 作業パースの決定

3.3.1 初期計画の決定

初期計画は最適計画の探索を行う際の出発点である。できるだけ良質な（評価関数値の小さい）初期計画を決定することが、次のステップである最適計画探索の効率を上げる上で重要であるが、初期計画の生成に多くの時間を費やすことは避ける必要がある。そこで、図4に示すように、船舶の荷役優先順に従って評価関数値の増加が最小になるよう、1隻ずつ荷役パースを決定する方法（ディスパッチング選択法）とした。

3.3.2 分枝限定法による探索

初期計画を最初の暫定計画とし、バックトラック³⁾と縦型探索をベースにした分枝限定法により、暫定計画を逐次改良しながら評価関数が最小となる作業パースを探索する。探索のイメージを図5に示す。以下に探索の流

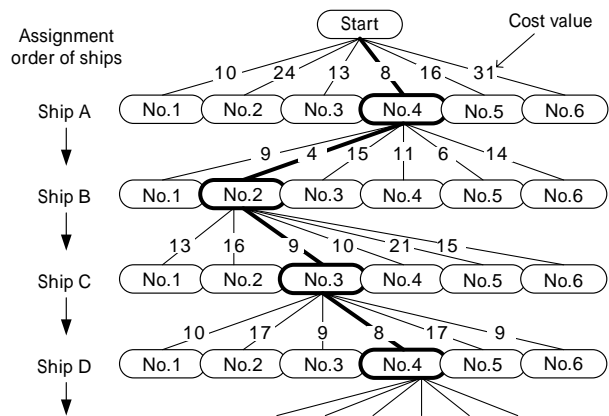


図4 初期スケジュールの生成
 Fig. 4 Creation of initial schedule

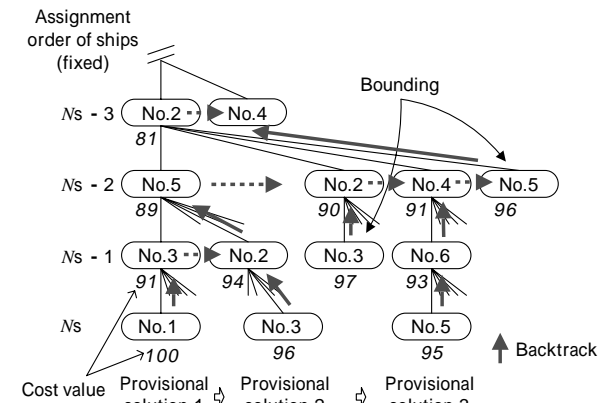


図5 分枝限定法による探索プロセス
 Fig. 5 Search process by branch and bound method

れを示す。

- (1) 初期計画を最初の暫定計画とし、その評価関数 \bar{E} を計算する。また、 $n = N_S - 1$ とする。ここで、 n は船の並び順を示しており、3.2 節で決定した船舶の割付け優先順である。
- (2) 第 n ステップのパスを暫定計画から別のパスに更新する(分枝操作)。例えば、図 5 では $N_S - 1$ ステップで、No.3 パスを No.2 パ스에更新する。可能なパスの全てに分枝操作を行い、これ以上更新できない場合は(5)へ。
- (3) 第 n ステップまでの評価関数 E_n を計算する。例えば、図 5 では評価関数値 E_n が 94 となる。 E_n が暫定計画の評価関数値 \bar{E} に対し、

$$E_n \geq \bar{E} \dots\dots\dots (9)$$
 を満たせば、以降のステップを評価せず(枝刈り)(5)へ。それ以外は(4)へ。例えば、図 5 では、 $N_S - 1$ ステップで評価値が 97 となった時点で、暫定計画 2 (Provisional solution 2) の評価値 96 より劣っているので、 N_S ステップを評価する必要が無く、枝刈りが行われている。
- (4) $n = N_S$ の場合は暫定計画を更新し、(5)へ。それ以外は $n = n + 1$ として(2)へ戻る。
- (5) $n = 1$ であれば探索を終了する。それ以外は $n = n - 1$ として(2)へ戻る(バックトラック)。例えば、図 5 では、暫定計画 2 の後は、 $N_S - 2$ ステップまでバックトラックし、暫定計画 3 の後は、 $N_S - 2$ ステップまでバックトラック後、分枝操作と枝狩りが行われ、 $N_S - 3$ ステップまでバックトラックしている。

このような分枝限定法では、「枝刈り」操作により全ての組合わせ(各船舶のパスへの割当て)を列挙することなく、最適な組合わせを得ることができる。また、探索を途中で打切った場合でも、その時点までに得られた最良計画が得られるという特徴を持ち、アルゴリズムの実用性を高めている。

4. 探索の効率化

4.1 予測評価コストの導入

上で述べた分枝限定法による探索は、船舶数の増加により指数的に組合わせの数が増大する。従って、上の枝刈りをできるだけパスに割付けた船舶の少ない早い段階で行い、探索を効率化するための工夫が必要である⁴⁾。本手法では、パスへの割付け途中段階の評価関数に、未割付け船舶に対する割付け後の増加予測コスト(評価関数の増加予測値)を導入し、枝刈りの効率化を図った。図 6 に増加予測コストのイメージを示す。第 m 番目の船までパスに割付けた際(第 m ステップ)の増加予測コストの定義と、予測コストを含めた評価関数を以下のように定式化する。

$$E_m = \sum_{i=1}^m F_i + \hat{P}_m (m=1, 2, \dots, N_S)$$

$$\hat{P}_m = \begin{cases} \sum_{i=m+1}^{N_S} \min_{K_i} (F_{ikm}) & (m=1, 2, \dots, N_S - 1) \\ \alpha & (m=N_S) \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

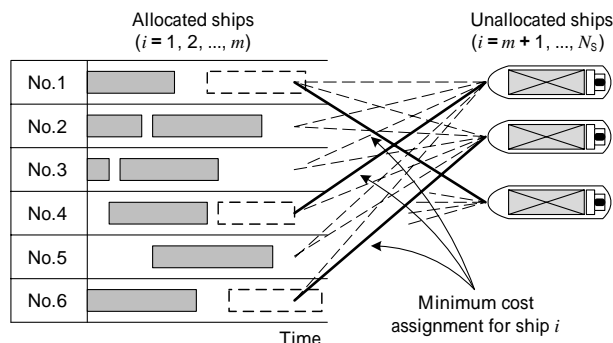


図 6 未割付け船舶に対する予測コスト
Fig. 6 Cost-increase estimation with unallocated ships

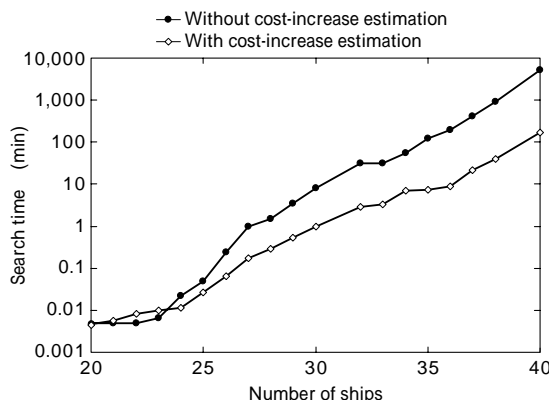


図 7 予測コストによる探索時間への影響
Fig. 7 Effect of cost-increase estimation to calculation time

ただし、

- E_m : 第 m ステップでの評価関数
- \hat{P}_m : 第 $m + 1$ ステップ以降で発生するコストの予測値
- F_{ikm} : 船 1 から船 m までを割付けた状態に対して、未割付けの船 i をパス k に仮に割付けた場合の(2)式に示した評価関数 F_i の値

である。ここで、未割付けの船 i ($i = m + 1$) をパス k に仮に割付ける際には、制約の範囲で前詰めに割付け、他の未割付け船との干渉は考慮しない。すなわち、発生コストの予測値は、第 $m + 1$ ステップ以降の未割付け船舶に、少なくとも課されるコストの和である。この予測コストを導入した探索結果と、第 m ステップまでの評価値のみを用いた探索結果は一致することが知られている⁵⁾。そのため、予測コストの導入により、割付け船舶がより少ない段階で枝狩りが可能となるだけでなく、得られた結果が最適計画となることが保証される。

4.2 効果の確認

予測コストを導入した場合の探索時間短縮効果を確認するために、実際の船舶データを用いて予測コストを用いない場合との計算時間の比較を行った。なお、計画対象とする船舶数は 20 隻から 40 隻まで変化させて比較を行った。図 7 に計算時間の比較結果を示す(実験には 100MHz 程度のワークステーションを使用)。図 7 を見ると、対象船舶数の少ない場合は、予測コスト計算に要する計算量の増加が際立つため、予測コストを用いる場合の高速化の効果は小さい。しかし、対象船舶が増加する場合には、予測コストの導入により、計算時間が 1/10 以下に短縮されており、通常 30 隻前後の 1 日の計画対象

であれば、数分程度で探索が完了することが分かる。

5. 実作業への適用

5.1 計画対象拡大への対応

荒天の翌日のような計画対象となる船の数が通常より増加する場合は、さらに探索空間を縮小して計算時間を短縮する必要がある。そこで、対象船の数が一定数以上であれば、船舶の荷役優先順に従って、前半と後半の二つのグループに分割して探索を行う分割探索方法を採用した。

前半グループの探索：

前半船舶グループにおける探索では、計画を評価が最も良い計画一つに決定せず、評価が良いほうから順に複数個の計画を得る。そのため、探索過程では、評価の良い暫定計画を複数個保持しておく。

後半グループの探索：

前半グループで得られた暫定計画の集合に対して、計画候補の評価値の良い（小さい）順に、それぞれ後半船舶のパス割付けを分枝限定法で探索する。このとき、前半の評価値に後半の評価値を加えたうえで評価を行うことにより、前半と後半を合わせた全体計画を評価する。すなわち、後半グループの評価関数は以下のように表される。

$$E_m^{(k)} = \sum_{i=1}^{n_1} F_i^{(k)} + \sum_{j=n_1+1}^m F_j + \hat{P}_m(m=n_1+1, n_1+2, \dots, N_s) \dots (11)$$

ただし、

n_1 : 前半グループに属する船舶数

$E_m^{(k)}$: 前半グループの k 番目の計画に対する後半グループの第 m ステップでの評価関数値

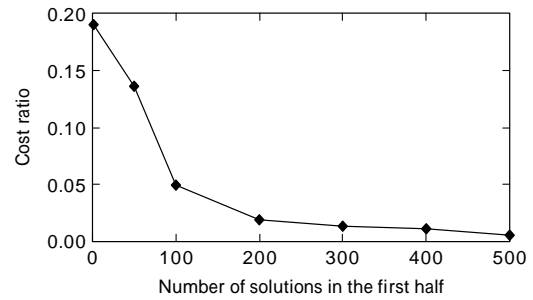
$F_i^{(k)}$: 前半グループの k 番目の計画における船 i の評価関数値

である。

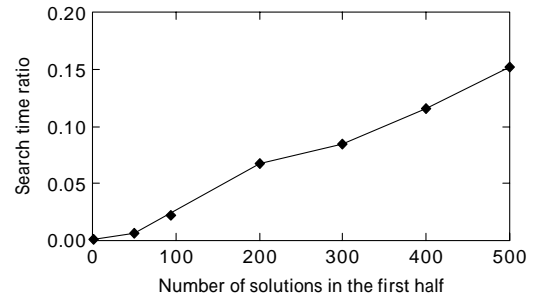
上記のように探索範囲を二つに分割することは、評価する組み合わせの総数を削減することを可能とする。その半面、前半グループで得た複数の計画候補から全体を通した最適計画が得られない場合もあり得るため、探索範囲を分割しない場合に比べて、計画の質が劣ることが懸念される。そこで、対象船舶数が通常の約2倍の60隻の場合について、分割した場合の「前半部分の計画候補の保持数」と「計画の質」の関係、および「計算時間」の関係をそれぞれ調べ、その結果を図8に示す。計画の質については、初期計画のコストを1、分割なしで得られた最適な計画のコストを0として正規化している。また、計算時間については、分割しない場合に要した計算時間を1とした時の比で正規化している。図8から、前半部分で保持する候補の数を必要以上に大きくすると、計画の質の改善以上に計算時間の増加が大きくなり効率が落ちることが分かる。今回の計算例では、前半部分の計画の保持数を200個程度にしておけば、分割しない場合と比較して、1/10以下の計算時間で、初期計画から最適計画までの改善率95%程度の計画が得られている。

5.2 作業パス移動（パスシフト）への拡張

上記の計画方法は、船舶と作業パスが1対1である



(a) Change of cost ratio



(b) Change of search time ratio

図8 探索性能と前半部分で保持する解の数の関係

Fig. 8 Relation between scheduling performance and number of solutions in the first half

ことを前提にしていたが、積荷の保管倉庫が離れている場合には、作業効率向上のため、荷役途中の作業パス変更（パスシフト）が行われている。パスシフト作業への拡張方法を以下に示す。

- ・積荷の量、保管場所の分布状況によりパスシフト対象船舶かどうかを判断する。
- ・パスシフト対象であれば仮想的に2隻に船を分割する。このとき、岸壁の作業性を考慮して分割後の2隻それぞれに対する積荷の割当ても行う。
- ・仮想的に分割された船舶のそれぞれに対して、パスを決定する。
- ・船舶とパスの組み合わせを時間軸上に展開する際は、分割船舶それぞれの作業時間帯が、船舶の移動に要する時間以上空くように制約を加える。

図9にパスシフトに拡張したスケジューリング結果の一例を示す。この例では、大丸丸(81081)はNo.3パスからNo.1パスに移動している。また、No.4パスでは、大福丸(50110)が同一パスにパスシフトした結果、作業時間途中で、作業時間の短い大誠丸の作業が割込んでいる。このような割込み作業は、作業時間は短いが入港時刻から出港限界時刻までの余裕が少ない船に対して採られる作業ノウハウである。

むすび = 本稿では、製鉄所出荷パスの作業スケジューリング問題を組み合わせ最適化問題としてモデル化し、分枝限定法を用いて解く方法について述べた。その際、計画の途中段階の評価に将来の悪化予測項を加えることにより、最適計画の探索効率を10倍以上向上できることを確認した。また、対象船舶の数が増加する場合を想定し、荷役優先度に従って船舶群を前半と後半の二つに分割した上で、それぞれの探索を連動させる方法を開発し

