

分枝限定法を活用した製鉄所出荷バースの 操業スケジューリング

梅田 豊裕, 小西 正躬

製鉄所の鋼材出荷バースにおける船舶の荷役スケジューリング問題に、分枝限定法を適用する際のモデル化方法と実データによる検証結果について述べる。本方法では、探索途中における評価関数に未探索部分での予測コストを導入することにより、探索時間を大幅に高速化できることを確認した。また、探索空間の分割や作業バース移動など、実用性を高めるうえでのモデル化の工夫についても紹介する。

キーワード：分枝限定法, 探索, 評価関数, 製鉄所, 出荷バース, スケジューリング

1. 緒言

製鉄所における製品出荷業務では、近年、客先ニーズの多様化に伴い、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には精度面での限界があった。

船舶の出荷スケジュールは、船舶の作業バースと各バースでの作業順序を、所定の評価指標が最良となるように決定する組合せ最適化問題として扱うことができる。組合せ最適化問題の代表的解法としては、部分問題の生成・評価と部分問題の除去により、すべての組合せを評価することなく、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、モデルの複雑さや計算時間の膨大さのため、実用的なシステムの実現は困難であった。

本稿では、現実の製鉄所出荷バースにおける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する[2]。本手法では、ヒューリスティックを用いて得られた初期解が探索の過程で定量的評価に基づいて逐次改善される。さらに、探索途中における評価関数に未探索部分での予測コストを導入し、探索の高速化を図る。以下では、バース

うめだ とよひろ

㈱神戸製鋼所 電子技術研究所

〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5

こにし まさみ

岡山大学 工学部

〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

スケジューリングの概要とそのモデル化、スケジュール作成アルゴリズム、および予測コストの定義について述べ、実データによる機能の検証を行う。最後に実操業への適用に際しての、モデル化の工夫に触れる。

2. 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、上位システムで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問題である。今回計画対象とした鋼材出荷岸壁には、1日当たり30隻前後の内航船が入港し、6ヶ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を示す。図1に示すように、積み付ける製品は一つの倉庫にまとめて保管されているとは限らない。

バーススケジューリングにおいて、考慮すべき作業制約を次に示す。

作業バース制約：

品種や製品の形状、サイズにより作業可能なバースが限定される場合がある。

出港納期制約：

仕向け地での作業時間が事前に指定されている場合は、出荷側の港ではこの荷揚げ納期に間に合わせるため、航海時間を考慮して出港限界時刻が設定される。

作業人数制約：

製品の種類やクレーンの釣り具の形状により、荷役に必要な作業人数が異なる。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、全天候バ

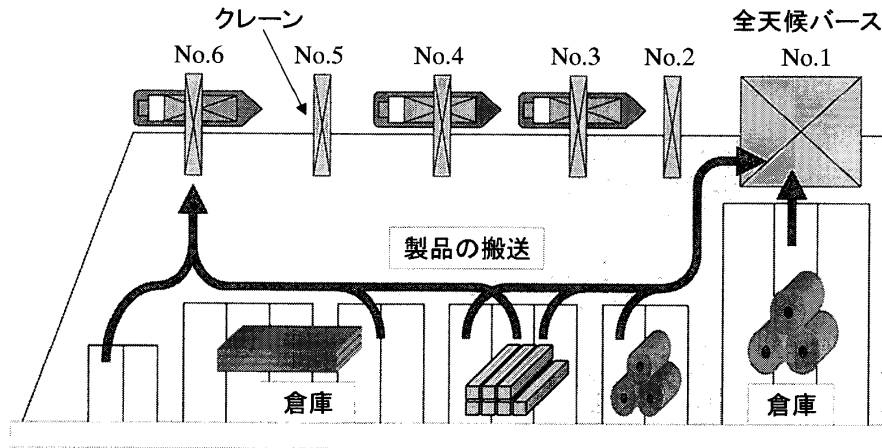


図1 製鉄所出荷バースの物流概要

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者の食事時間帯には荷役作業はできない。

3. バーススケジューリングのモデル化

3.1 決定変数と従属変数

上で述べたように、バーススケジューリングとは、上記の制約を満たしたうえで、所定の評価項目を最良にするように、各船舶の荷役バースと、各バースでの船舶の荷役開始・終了時刻を決定することであるが、今回のモデル化においては、

- ・各船舶の荷役バース
- ・船舶の荷役優先順序

を決定変数とする組合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バースに従って、各船舶をバースに割り振ることにより、各バースでの船舶の荷役順を決定する。さらに、船舶の到着時刻、荷役時間、作業者数、バースの修理時間などを考慮して、前詰めで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・終了時刻を決定する。

3.2 評価関数

バーススケジューリングにおける評価項目は、船舶の運行効率と岸壁での搬送作業効率の二つであるが、実行可能解を常に生成するため、出港納期制約の充足度を評価項目として加える。それぞれの評価項目の定量化に当たっては、単位を時間に統一し、以下のように評価指標を設定した。

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。

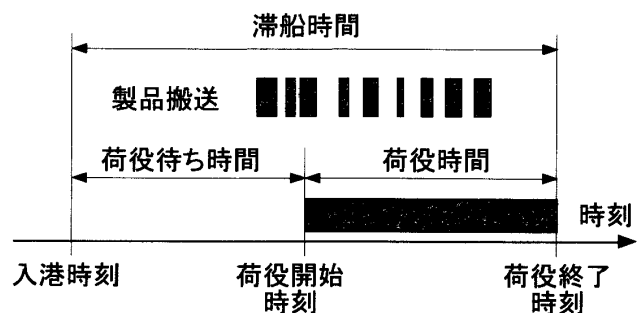


図2 荷役作業のタイムチャート

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。

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バースまで搬送するのに要する時間。

図2には、これらの評価指標を荷役作業におけるタイムチャート上で示す。

次に、得られたバ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。

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

ここで、 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、各船の評価関数 F_i は、次式のように定義する。

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

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として次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。

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

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を課す。

$$f_{2,i} = p_i(t_{e,i} - T_{L,i})$$

$$p_i = \begin{cases} 1 & (t_{e,i} \geq T_{L,i} \text{ のとき}) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (4)$$

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バ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バースに搬送する所要時間の総和を評価する。

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

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{船 } i \text{ がバース } j \text{ で作業するとき}) \\ 0 & (\text{船 } i \text{ がバース } j \text{ で作業しないとき}) \end{cases} \quad (5-2)$$

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

ただし、 N_s は計画対象船舶の総数、 N_B はバースの総数で、

M_{jk} ：倉庫*k*からバース*j*まで製品1個を運搬するのに要する時間

B_{ik} ：船*i*の積荷の中で、倉庫*k*に保管されている製品の個数

N_k ：倉庫の総数

である。また、 K_i は船*i*が使用可能なバースの集合である。

4. バーススケジュール作成アルゴリズム

4.1 全体の処理流れ

組合せの規模を極力小さくするため、本稿では、まず荷役優先順を決定し、次に得られた荷役優先順を固定して船舶の作業バースを決定する。作業バースの決定段階では、ヒューリスティック探索により実行可能な初期暫定解を一つ決定し、分枝限定法による縦型探索により暫定解を逐次更新しながら、最終的に評価関数が最小となるスケジュールを得る。図3にバーススケジュール作成の処理フローを示す。

4.2 船舶の荷役優先順の決定

今回対象とするバーススケジュールリングでは、初期

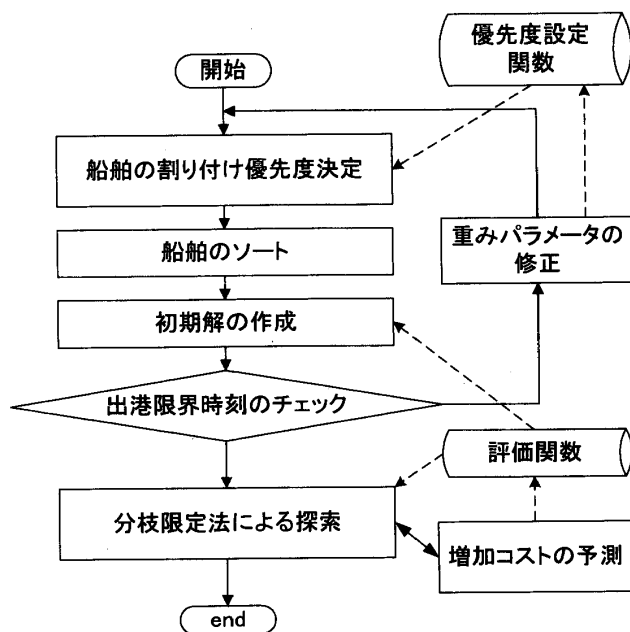


図3 バーススケジュールリングの流れ

状態で入港済み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)式に従って定量的に優先度を設定する。

$$\begin{cases} C_i = v_1 T_{0,i} + v_2 T_{R,i} + v_3 T_{w,i} \\ T_{R,i} = T_{L,i} - T_{0,i} \\ T_{w,i} = \max_{k \in K_i} (b_{ik}) \end{cases} \quad (6)$$

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*の最大荷役時間

$T_{L,i}$ ：船*i*の出港限界時刻

b_{ik} ：船*i*をバース*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。なお、最大荷役作業時間とは、荷役可能なバースのうち、最大の荷役時間である。すなわち、以下の基準により優先順を決定する。

(1) 入港時刻：早い船優先

滞船時間を減らし、バ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小さくする

ここで、出港限界余裕に対する重み v_2 は、次の初期解の決定段階で、どのバースに割り付けても出港限界時刻を守ることができない船が発生した場合、その値

を一定幅大きくし、再度荷役優先順の決定を行う。これは、入港時刻が早く、出港限界時刻が遅い船が必要以上に早い時刻に荷役を開始することにより、バーススケジューリング全体としての荷役効率が低下するのを防ぐことを目的としている。

4.3 作業バースの決定

4.3.1 初期解の決定

初期解は最適解探索を行ううえでの出発点である。できるだけ評価関数値の小さい初期解を決定することが、次のステップである最適解探索の効率を上げるうえで重要であるが、初期解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一隻ずつ評価値の増加が最小になるよう、荷役バースを逐次決定する方法をとった。これにより、ランダムに作成した場合に比べ、良質の初期解を短時間で生成することができる。

4.3.2 分枝限定法による探索

初期解を最初の暫定解とし、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、暫定解を逐次改良しながら評価関数が最小となる作業バースを

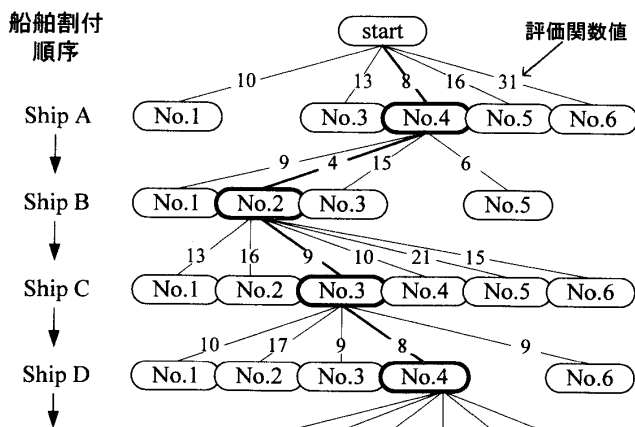


図4 初期スケジュールの生成

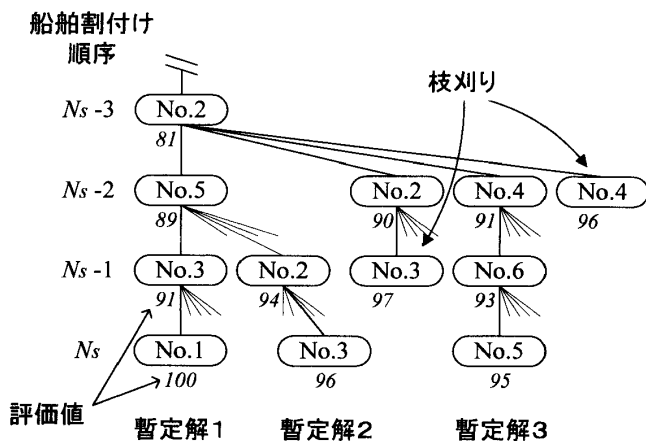


図5 分枝限定法による探索プロセス

探索する。探索のイメージを図5に示す。以下に探索の流れを示す。

- (1) 初期解を最初の暫定解とする。 $n=N_s-1$ とする。
- (2) 第 n ステップのバースを更新順序に従って一つ決定する。作業バースの更新順序は $n-1$ ステップの節点を展開した際に得られた各枝の評価関数値が小さい順とする。更新順が最後の場合は(6)へ。
- (3) 第 n ステップまでの評価関数 E_n を計算する。 E_n が暫定解の評価関数値 \bar{E} に対し、

$$E_n \geq \bar{E} \quad (7)$$
 を満たせば、以降の枝を展開せず(枝刈り)(7)へ。それ以外は(4)へ。
- (4) $n=N_s$ の場合は暫定解を更新し、(7)へ。それ以外の場合は(5)へ。
- (5) 第 n ステップの節点を展開する(分枝操作)。このとき、展開されたすべての枝に対して、第 $n+1$ ステップでの評価関数を計算し、バースの更新順序を決定する。 $n=n+1$ として(2)へ。
- (6) $n=1$ であれば、探索を終了する。それ以外は(7)へ。
- (7) $n=n-1$ として(2)に戻る(バックトラック)。

このように、本探索アルゴリズムでは、ヒューリスティックを用いて作成された初期解が逐次改良されるため、探索を途中で打ち切った場合でも、その時点までに探索した空間内の最良解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。

5. 探索の効率化

5.1 予測コストの導入

上で述べた分枝限定法による探索は、通常、船舶数の増加により指数的に探索空間が増大する。したがって、上の枝刈りをできるだけ上流のステップで行うことを可能にし、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、探索途中ステップの評価関数に、未展開部分の船舶に対する展開後の増加予測コストを導入し、枝刈りの効率化を図った。第 m ステップまで展開した際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。

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

$$\hat{P}_m = \begin{cases} \sum_{i=m+1}^{N_s} \min_{k \in K_i} (F_{ikm}), & (m=1, 2, \dots, N_s-1) \\ 0, & (m=N_s) \end{cases} \quad (8)$$

ただし、

E_m : 第 m ステップでの評価関数

\hat{P}_m : 第 m ステップでの増加予測コスト

F_{ikm} : 船 1 から船 m までを割り付けた状態において、未展開部分の船 i をバース k に仮に割り付けた場合の(2)式に示した評価関数 F_i の値

である。図 6 に増加予測コストのイメージを示す。ここで、未展開部分の船 $i (i \geq m+1)$ をバース k に仮に割り付ける際には、制約の範囲で前詰めに割り付け、他の未展開部分の船との干渉は考慮しない。すなわち、増加予測コストは、第 m ステップ以降の未探索部分における船舶が、以降の探索で少なくとも課されるコストの和である。したがって、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 [5]。

5.2 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かめるために、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。

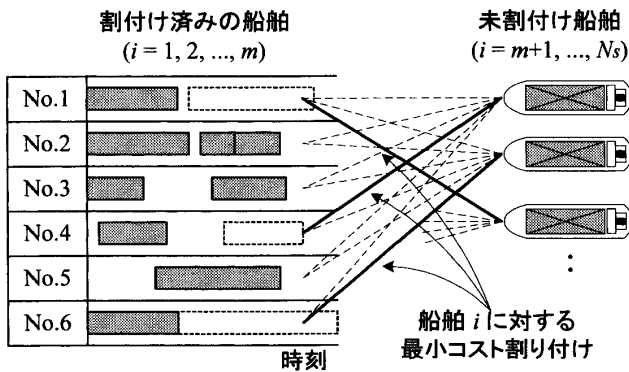


図 6 未割付け船舶に対する予測コスト

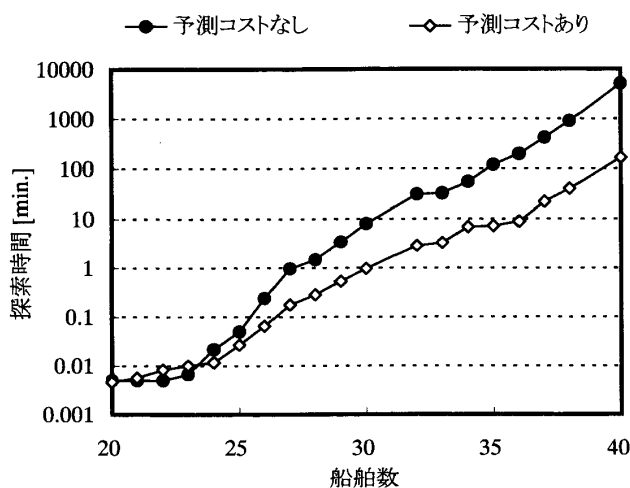


図 7 予測コストによる探索時間への影響

図 7 を見ると、対象船舶数の少ない場合は、予測コストに対する計算量の増加が卓越するため、予測コストを用いる場合の優位性は小さい。しかし、対象船舶が増加した場合には、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 隻前後である 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。

6. 実作業への適用

6.1 計画対象拡大への対応

荒天の翌日のように計画対象とす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。図 8 に分割探索のイメージを示す。図 8 から分かるように、前半と後半の船舶グループは、その境界部分で共通の船舶集合を含めている。これは、前半部分の探索に後半部分の影響を反映させるためである。

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、探索過程で暫定解をただ一つ保持するのではなく、評価値の上位一定数の解候補を暫定解集合として保持しておくことにより複数の解を得る。

後半グループの探索：

前半グループで得られた暫定解集合において、解候補の評価値の小さい順に、それぞれ後半船舶のバース

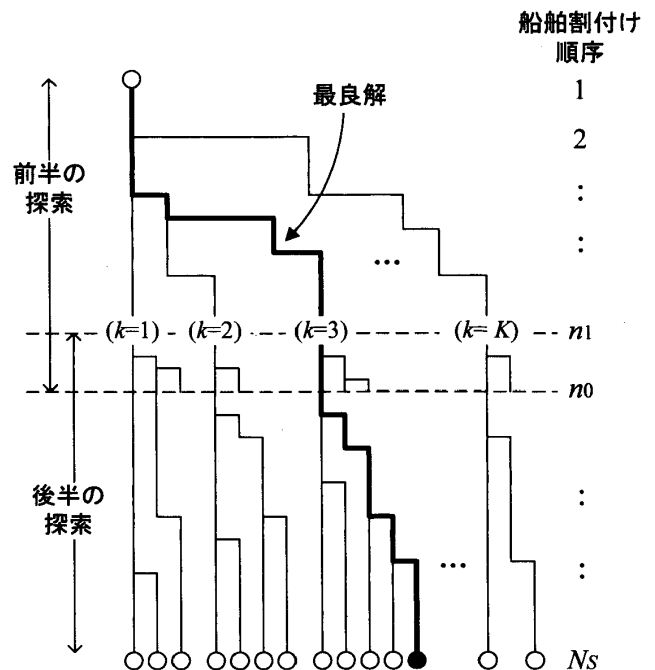


図 8 解空間の分割による探索方法

割り付けを探索する。これにより前半グループの第 n_1+1 ステップから第 n_0 ステップまでは後半グループの探索により、更新される可能性がある。また、前半の評価値に後半の評価値を加えたうえで解の評価を行うことにより、期間全体のスケジュールを評価する。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。

$$E_m^{(k)} = \sum_{i=1}^{n_1-1} F_i^{(k)} + \sum_{j=n_1}^m F_j + \hat{P}_m, \quad (m=n_1, n_1+1, \dots, N_S) \quad (9)$$

ただし、

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

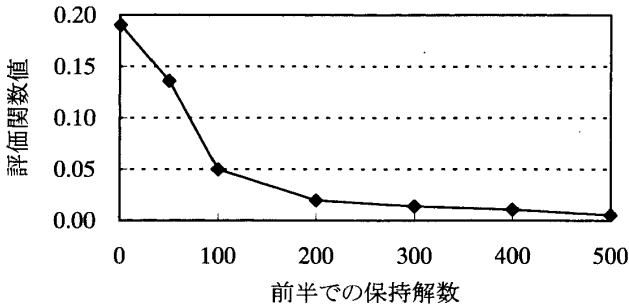
$F_i^{(k)}$: 前半グループの k 番目の解における船 i の評価関数値

である。

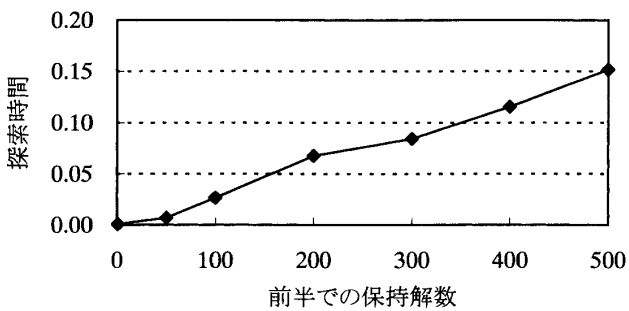
このように、分割探索では探索空間を縮小でき、探索時間が短縮できる反面、全体を一つの空間として探索を行った場合に比べて、解の質が劣化することが懸念される。そこで、対象船舶数が 60 隻の場合について、分割した場合の前半部分の解保持数と解の質の関係および計算時間の関係をそれぞれ調べ、その結果を図 9 に示す。解の質については、初期解のコストを 1、分割なしで得られた解のコストを 0 として規格化している。また、計算時間については、分割しない場合に要した計算時間を 1 としたときの比で規格化している。図 9 から、前半部分での保持解の数を必要以上に大きくすると、解の質の改善以上に計算時間の増加が大きくなり効率が落ちることが分かる。今回の計算例では、前半部分の解の保持数を 200 個程度にしておけば、分割しない場合と比較して、初期解からの改善率 95% 程度の解が得られている。

6.2 作業バース移動（バースシフト）への拡張

上記の計画方法は、船舶と作業バースが 1 対 1 であ



(a) 評価関数の変化



(b) 探索時間の変化

図 9 探索性能と前半部分で保持する解の数との関係

| 04月02日 | | | | | | | | | | | | | | 04月03日 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-----------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|------------------|--------|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------------|
| | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| No.1 | 8興安 81131 | | | | | | | | | | | | 23共進-B 441332 | | | | | | | | | | | | | | | | | 8大王-B 81082 |
| No.2 | 8蛭子 55134 | | | | | | | | | | | | 23共進-A 441331 | | | | | | | | | | | | | | | | | あげしお 20132 |
| No.3 | 16金生 7012 | | | | | | | | | | | | 8金毘羅 7012 | | | | | | | | | | | | | | | | | 31神鋼 0031 |
| No.4 | 7654 7D111 | | | | | | | | | | | | 11大福-A 50110 | | | | | | | | | | | | | | | | | 大誠 5E110 |
| No.5 | 11大福-B 50110 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 広和 81110 |
| No.5 | しんあさひ 55110 | | | | | | | | | | | | 5福吉 65111 | | | | | | | | | | | | | | | | | 大黒 84110 |
| No.6 | 3喜代 51182 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8幸吉 5060 |
| No.6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 神協 59182 |

図 10 バーススケジュールリング結果の一例

る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、荷役途中の作業バース変更（バースシフト）が行われている。バースシフト操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バースシフト対象船舶かどうかを判断する。
- ・バー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り当ても行う。
- ・仮想的に分割された船舶のそれぞれに対して、バースを決定する。
- ・船舶とバースの組合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あくように制約を加える。

図10にバー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、大王丸はNo.3バースからNo.1バースに移動している。また、No.4バースでは、大福丸が同一バースにバースシフトした結果、作業時間途中で、作業時間の短い大誠丸の作業が割り込んでいる。このような割り込み操業は、作業時間は短い、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操業ノウハウである。

7. 結言

本稿では、製鉄所出荷バースの操業スケジューリング問題を組合せ最適化問題としてモデル化し、分枝限定法を用いて求解する方法について述べた。その際、未展開部分に対するコスト増加の予測項を内包する評価関数を用いることで、探索効率を1桁向上できるこ

とが確認された。また、対象船舶の数が増加した場合を想定し、荷役優先度に従って、船舶を前半と後半の二つに分割する探索手法を導入することにより、解の精度を落とすことなく、計算時間を大幅に短縮できることが確認できた。さらに、船舶を仮想的に分割することにより、荷積みする製品の置場に依じて作業バースを途中変更するバースシフト操業への対応方法を開発した。これらの開発により、ルールの活用を中心とする従来のアプローチでは困難であった、計画全体の定量的評価と最適化が可能となっただけでなく、実システムに適用する際の実用性も確保することができた。今回、報告した技術は、製鉄所の出荷計画システムに組込まれ、日々の出荷バーススケジューリングに活用されている。今後は、船舶の到着遅れや、天候の急変に対応したリスケジューリング技術の開発が課題である。

参考文献

- [1] 茨木：岩波講座応用数学，離散最適化法とアルゴリズム，岩波書店，(1994)。
- [2] 梅田他：予測評価探索をともなう分枝限定法による出荷バースの操業スケジューリング；システム制御情報学会誌，Vol. 13, No. 4, pp. 194-203 (2000)。
- [3] 鍋島：数学ライブラリー 37 スケジューリング理論，森北出版，(1974)。
- [4] 茨木：スケジューリングの理論；システム/制御/情報，Vol. 41, No. 3, pp. 100-105 (1997)。
- [5] 岩井他：知識システム工学，計測自動制御学会，(1991)。