造船所鋼板ストックヤードにおける仕分け作業の効率化

○正員　木村　　元*　　正員　中尾　洋一**
正員　梶原　宏之*

1　はじめに

造船所の水切り後のストックヤードでは、鋼板の大きさや形状・重量および造船所の敷地面積の都合上、鋼板を積み上げて保管せざるをえないのが実情である。鋼板の移動や取り出しは、クレーンによって最上段の鋼板から順に行わなければならない。ストックヤードの置場スペースが仕分け作業に対して不十分な場合は、置場の鋼板を一枚ずつ積み替えて必要な板を取り出す「板繰り」と呼ばれる膨大な作業を繰返す必要があり、これが造船工場の物流を停滞させる一因となっている。本稿はこれを解決するため、板繰り作業量を反映する簡便な評価関数を定式化し、この評価値を最小化するように仕分け作業方法を工夫することにより板繰り作業を減らす試みについて研究したものである。

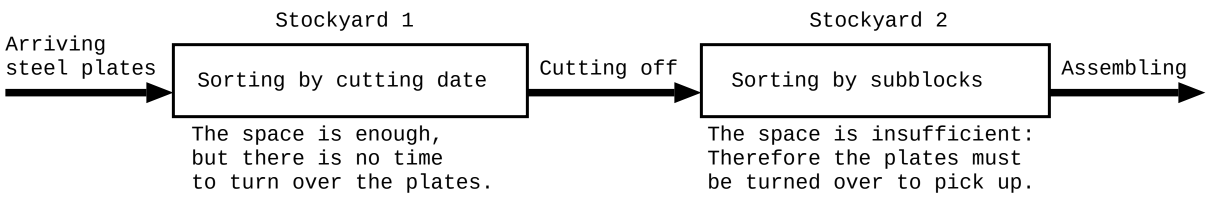


Fig. 1: An overview of the part of logistics in a shipyard in this research

造船所の水切り場から運ばれた鋼板は、ショット・切断加工された後、ブロック毎に建造される (Fig.1)。本稿の対象としている造船所では、各鋼板の切断日が決まっているため、水切りされた鋼板を切断日毎に仕分けて保管する Stockyard 1 が設けられている。また、板継ぎの前段階においても、切断後の鋼板をブロック毎に仕分けるための Stockyard 2 がある。切断日毎の仕分けを行う Stockyard 1 では、置場に比較的余裕があるものの、水切り後の鋼板の入庫と次工程への運び出し作業のため、板繰り作業を行う余裕はない。ブロック毎に仕分けする Stockyard 2 では、ブロックの種類に対して置場の大きさが不足しているため、集積された鋼板の山から必要な鋼板を板繰り作業によって取り出す。このとき、同一ブロックを構成する鋼板を探して取り出すので、該当する鋼板群が、積み上げられた全鋼板の並びの中において一箇所にかたまっていれば、板繰り作業が少なくなり都合が良い。本稿では、切断日毎に仕分ける Stockyard 1 における制約条件付きの余剰能力を利用し、ブロック毎に仕分ける Stockyard 2 の板繰り作業量低減を試みる。造船所関連における物流最適化の関連研究では、物の順番や配置は完全に観測可能である状況下でサーチ手法によって作業量を最小化する接近法が多い [1,2,3]。本稿で扱う問題は、ストックヤードに出入りする鋼板の種類や枚数は既知だが、順番はヤード入口に鋼板が到着した順でしか観測できないため、確率統計学的な扱いが求められる問題である。

2　ストックヤードの設定

あるストックヤードにおいて Fig.2(a) に示すように N 枚の鋼板が 1 枚ずつ順に入庫する。建造ブロックは B 種類存在し、各鋼板には対応する建造ブロックを示すラベル b が付けられている。ただし b は 1 から B までの整数

* 九州大学大学院工学研究院
** 株式会社大島造船所

で表される。各ラベル b で示されるブロックを構成する鋼板の枚数を n_b で表すと、$N = \sum_{b=1}^{B} n_b$ である。入庫される鋼板は、1 から Y までの整数 y で表される置場 y のいずれかへ積まれる。このときストックヤードでは入庫される鋼板の順序は予め知ることはできず、１枚ずつピックアップする時点で各鋼板を識別する。N 枚の全鋼板の入庫が終了すると、Fig.2(b) に示すように置場に積まれた鋼板を上から１枚ずつ取り上げて順に運び出す。このとき、番号が最小の置場にある鋼板から運び出し、その置場の鋼板が無くなったら次の置場から運び出すという作業を繰り返す。以下 $N > 1$、$B \geq 1$、$n_b \geq 1$ $(b = 1, \ldots, B)$、$Y \geq 1$ である。

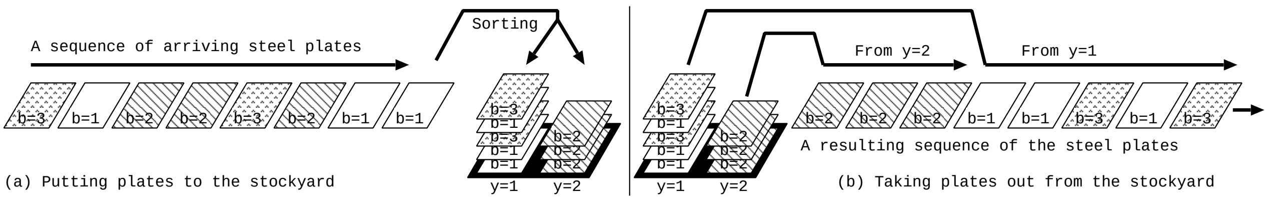


Fig. 2: An outline of the stockyard

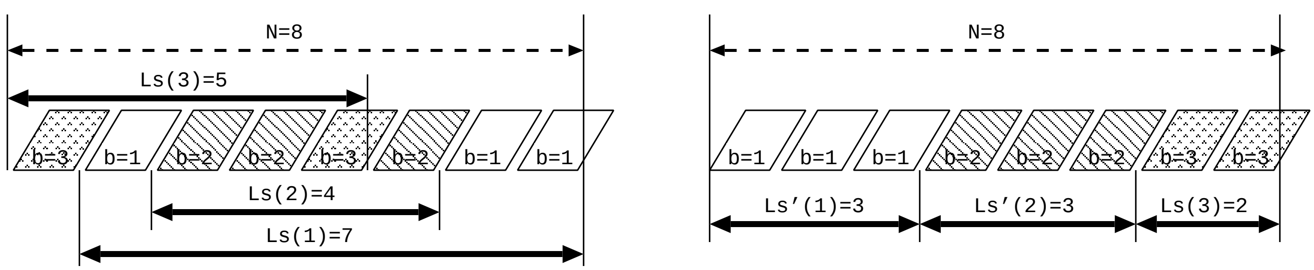
3 板繰り作業の定量化：コスト関数の定義

ストックヤードから出庫（または入庫）する鋼板の並び順に積まれた鋼板の山から、ブロック別に仕分けを行う作業を考える。必要最小限の仕分けスペースしかないストックヤードで上記の作業を行う場合、並び順の中で目標とする鋼板が含まれている区間長と同じ回数の板繰り回数が最小限でも必要である。そこで本稿では、板繰りに要する作業量の目安として、N 枚の全鋼板の並びにおける同一建造ブロックが含まれている区間長の合計をコスト関数として定義する。

全鋼板のある任意の並び順（以降シーケンスと呼ぶ）S のコスト関数 $C(S)$ を以下に定式化する。あるブロック b を構成する n_b 枚の鋼板は、ストックヤードに入庫する鋼板の並び順に端からインデックス i によって表す。ただし $1 \leq i \leq n_b$ である。ブロック b を構成しインデックス i で示されるある鋼板に対し、出庫（または入庫）する N 枚の全鋼板のシーケンス S における位置を関数 $I_S(b,i)$ と表す。$1 \leq I_S(b,i) \leq N$ ただし $b = 1, \ldots, B$, $i = 1, \ldots n_b$ である。このときブロック b が全鋼板のシーケンスに占める区間長を $L_S(b)$ と表すと $L_S(b) = I_S(b, n_b) - I_S(b, 1) + 1$ と表される。よってコスト関数 $C(S)$ は全ブロックに対してこの区間長を合計した値になる：

$$C(S) = \sum_{b=1}^{B} L_S(b) \tag{1}$$

Fig.3 は鋼板数 $N = 8$ での 2 通りのシーケンス S, S' の各ブロック区間長 $L_s(b)$ とコスト $C(S)$ の計算例を示す。



(a) Sequence S: Cost function C(S)=7+4+5=16.

(b) Sequence S′: Cost function C(S′)=3+3+2=8.

Fig. 3: An example calculation of the cost function ($N = 8$, $n_1 = 3$, $n_2 = 3$, $n_3 = 2$ and $B = 3$)

4 解析

N 枚の鋼板がランダムな順序で並んでいると仮定する。ある建造ブロック b を構成する鋼板のうち、全鋼板のシーケンスにおいて最も端の位置となる $I_S(b,1)$ の期待値は、以下の式によって与えられる：

$$\mathrm{E}\{I_S(b,1)\} = 1 + \sum_{j=1}^{N-n_b} j \, \frac{n_b}{N} \prod_{m=1}^{j} \frac{N-n_b-m+1}{N-m} \tag{2}$$

ただし $\mathrm{E}\{\cdot\}$ は期待値計算の操作を表す。分布はシーケンスの前後に対して対称なので、もう片方の端の位置である $I_S(b,n_b)$ の期待値は $\mathrm{E}\{I_S(b,n_b)\} = N - \mathrm{E}\{I_S(b,1)\} + 1$ である。よってブロック b が全鋼板のシーケンス S に占める区間長 $L_S(b)$ の期待値は

$$\mathrm{E}\{L_S(b)\} \;=\; \mathrm{E}\{I_S(b,n_b) - I_S(b,1) + 1\} \;=\; N - 2 \sum_{j=1}^{N-n_b} j \frac{n_b}{N} \prod_{m=1}^{j} \frac{N-n_b-m+1}{N-m} \tag{3}$$

式 (3) を用いて数値計算によって $N = 100$ の場合について数値計算した結果が Fig.4 左側である。ブロックの区間

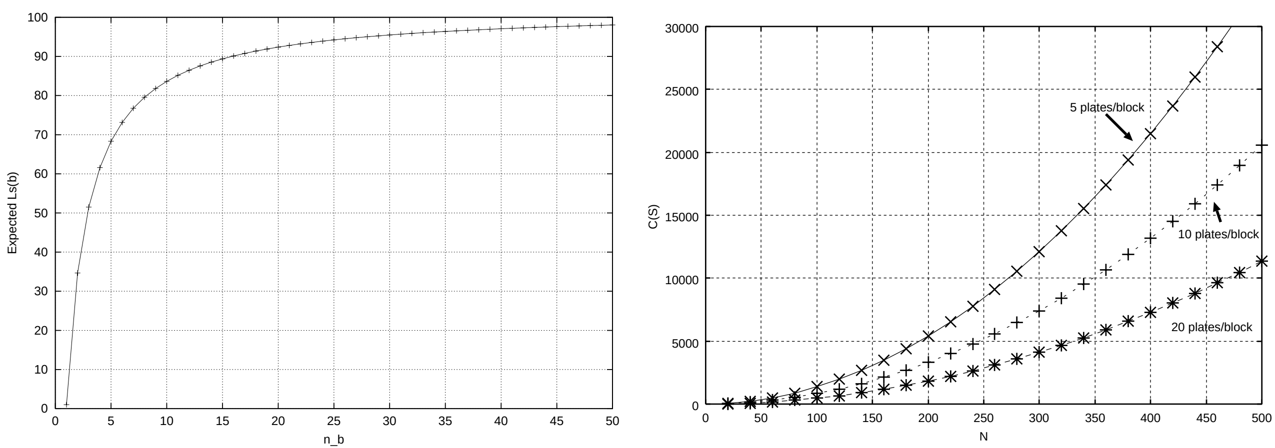


Fig. 4: Leftside: Expectation of the BlockLength $L_s(b)$ under the condition of random sequence at $N = 100$ varying the number of plates n_b of the block b; Rightside: Expectation of C(S) at random sequences varying N under the condition that $n_b = 5$, 10, or 20

長 $L_S(b)$ の期待値はブロックを構成する板の枚数 n_b が増加すると最初は急激に増加し、その後全鋼板枚数 N に漸近する性質を持つことが分かる。

1 ブロックあたりの鋼板枚数 n_b が全ての b において一定であると仮定し、全鋼板枚数 N が変化した場合においてコスト関数がどのように変化するかを考える。ブロックの種類 B は $B = N/n_b$ で表されるので、コスト関数は $C(S) = N/n_b \, \mathrm{E}\{L_S(b)\}$ で与えられる。式 (3) を利用し、$n_b = 5, 10, 20$ の 3 種類について数値計算を行った結果が Fig.4 の右側のグラフである。全鋼板数 N に対してコスト関数はほぼ N^2 のオーダーで増加する。

5 ストックヤードでの仕分けによる板繰り作業量低減の提案

本稿では、ストックヤードにおいて鋼板をブロックのグループ毎に仕分けする方法を提案し、これによるコスト関数の低減について解析する。当然ながらブロック毎に仕分けできれば理想的なのだが、置場 Y の大きさがブロックの種類 B に対して不十分、つまり一般に $Y < B$ であることが多い。そこで、ブロックの種類 B を Y 個のグループへ分割し、該当する鋼板をグループ分けされたそれぞれの置場へ仕分ける。Fig.5 は、全鋼板枚数 $N = 8$、ブロックの種類 $B = 3$ の場合において、置場 $Y = 2$ 種類のグループへ分割して仕分ける例を示す。

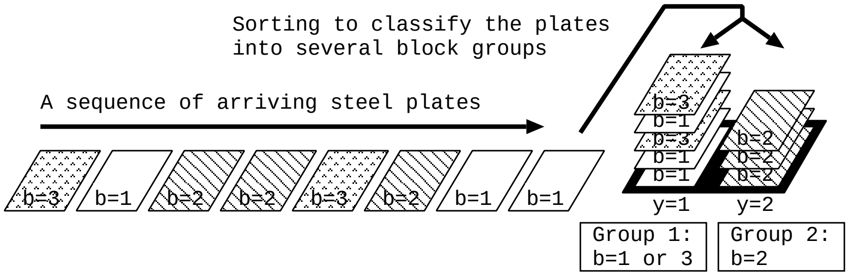


Fig. 5: Outlines of the sorting rules in the stockyard showing an example of $N = 8$, $B = 3$ and $Y = 2$

ストックヤードへ到着する鋼板のシーケンスを S、ヤードから出庫する鋼板のシーケンスを S' と表す。S' には各置場 $y = 1$ から順に $y = Y$ までに対応する区間が存在し、それぞれの置場 y に対応する部分列を S'_y と表す。置場 y へ置かれるブロックの集合を B_y と表す。本提案手法による仕分けでは、シーケンス S に含まれるブロック b の鋼板の並び方に注目すると、S' での b の鋼板の並び方は順序が逆になっているだけである。よって S においてブロック長 $L_S(b)$ を構成する鋼板のうち、$b \in B_y$ に所属する鋼板のみが S' において $L_{S'_y}(b)$ を構成する。ただし $b \in B_y$ である。よって常に以下が成り立つ。

$$L_S(b) \geq L_{S'_y}(b), \text{ where } b \in B_y \tag{4}$$

S' 中では部分列 S'_y の範囲以外の部分列中にはブロック b を構成する鋼板は存在しないので、

$$L_{S'}(b) = L_{S'_y}(b), \text{ where } b \in B_y \tag{5}$$

式 (4), (5) より

$$L_S(b) \geq L_{S'}(b) \tag{6}$$

よって式 (1), (6) より

$$\begin{aligned} C(S) = \sum_{b=1}^{B} L_S(b) \quad &\geq \quad \sum_{b=1}^{B} L_{S'}(b) = C(S') \\ C(S) \quad &\geq \quad C(S') \end{aligned} \tag{7}$$

以上より、本稿で提案する仕分け方法によるコストは、仕分け無しの場合のコスト以下になることが保障される。

Fig.6 は全鋼板数 $N = 100$ がランダムに並んでいる場合において１ブロックあたりの構成枚数 n_b を変化させたとき、$Y = 1$ すなわちグループに分割しない場合と $Y = 2$ すなわち 2 グループに分割した場合のコスト関数の期待値をプロットしたものである。それぞれのグループの鋼板の枚数がほぼ等しくなるようにブロックを２つのグループへ分割して仕分けることにより、コスト関数がほぼ半分（51～52 %）に減少することが分かる。

6　実データによるシミュレーション

ここでは造船所の水切り場における 39 日分の実データを用いてシミュレーションを行い、提案手法によりどの程度改善できるかを確認した。実データでは、加工日によって鋼板の処理枚数 $N = 25$～424 とかなり変動するが、1 日あたりの処理枚数は平均 107.5 枚（標準偏差 68.78）である。Fig.7 右側のグラフは加工日毎のそれぞれの仕分け方法によるコスト $C(S)$ を示す。Fig.7 左側のグラフは、結果を日ごとの処理枚数の降順に並び替えたものであるが、表示の都合上、例外的に大きなサンプル点 $N = 424$ のみをプロットしていない。グラフ中で”Not sorted

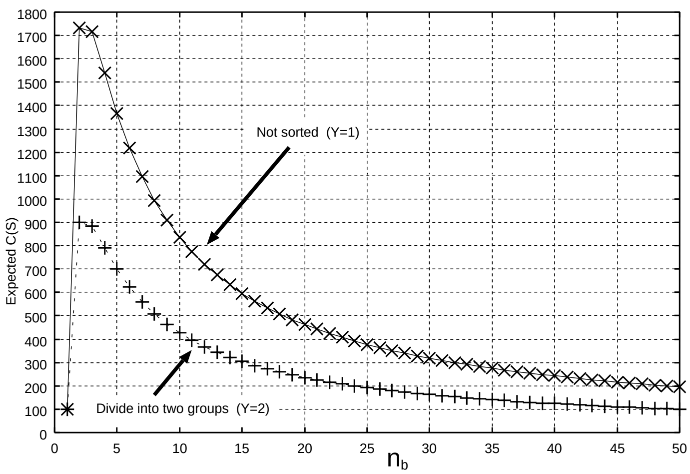


Fig. 6: Expectation of the cost functions compared $Y = 1$ with $Y = 2$ varying n_b from 1 to 50 in the condition of $N = 100$ ("Not sorted" shows $Y = 1$ that is the same as the arriving sequence, and "Divide in two classes" shows the case of $Y = 2$)

$(Y = 1)$"となっているのは、ブロックグループ毎に仕分けしない場合であり、現状のクレーンのオペレーション状況を表す。この仕分け無しの場合のコスト $C(S)$ は平均値 783.0（標準偏差 659.1）である。

"$Y = 2$"と表されているプロットは、ブロックグループを 2 種類に分割して仕分ける場合を表す。分割方法としては、ブロックを構成する鋼板の枚数の多いブロックと少ないブロックを降順に並べ、枚数の多いブロックのグループと枚数の少ないブロックのグループに分割した。このときそれぞれのグループに含まれる鋼板の合計数ができる限り等しくなるように分割するが、どうしても等しくならないときは枚数の少ないブロックのグループのほうが合計枚数が多くなるよう分割する。この分割による仕分けによって評価されるコスト $C(S')$ は平均値 470.5（標準偏差 442.1）である。仕分け無しの場合のコスト $C(S)$ と 2 グループに仕分けした場合のコスト $C(S')$ の比率の平均は 0.5998（標準偏差 0.08900) である。本手法により、コスト関数の値を約 40 %削減できた。

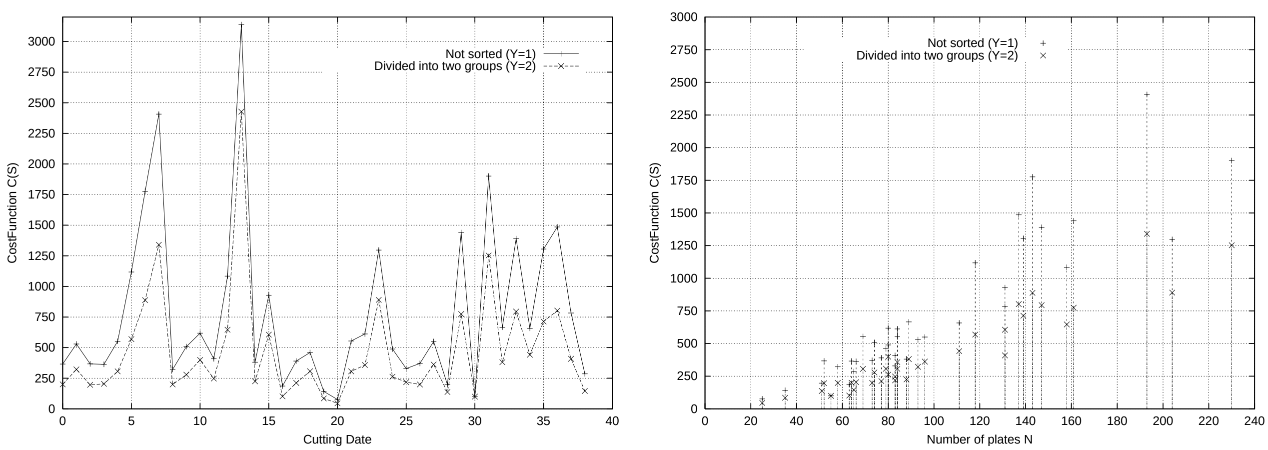


Fig. 7: Leftside: Cost function compared $Y = 1$ with $Y = 2$ where the x axis is sorted by the order of the cutting date; Rightside: The same cost function where the x axis is sorted by the size of N

7 考察

- 本稿では 2 グループに分割する場合のみ示したが、分割数を増やせばコスト関数はもっと小さくなる。
- 実問題ではブロックを構成する鋼板の枚数にはばらつきがあるので、ブロックグループへの仕分け方法には様々な方法が考えられる。本稿では、枚数の多いブロックのグループと枚数の少ないブロックの 2 グループに分割し、各グループでの合計枚数がほぼ等しくなるように分割したが、これが最善であるかどうかは不明である。他にも平均ブロック枚数が同じになるようにそろえたり、厳密に枚数が等しくなるよう分割する方法なども考えられ、最善の分割方法についての検討は今後の課題である。
- 本稿では、水切り後に入庫してくる鋼板の順序は未知で完全にランダムであると仮定しているが、実際には統計的なパターンがあると考えられる。例えば、板長が長いものが先に到着するなどが考えられている。このような傾向やパターンを利用することにより、統計学的に妥当な分割方法とすることも考えられる。
- 実データを用いたシミュレーションでは、切断日毎にのみ仕分けしていたストックヤード 1 において、切断日あたり 2 区画の置場を確保してある程度のブロック毎の仕分けを行うことにより、後工程での板繰り作業に関してコスト関数を 40 %程度削減できることを示した。だが、切断日毎に仕分けるストックヤードで従来の 2 倍の区画を確保することは非現実的である。幸いにも、切断日によって処理する鋼板枚数が大きく異なるので、これらのピークを持つ切断日のみ特別に区画を用意するのが最も現実的だろう。
- 板繰り作業を定量化するために式 (1) で示されるコスト関数を定義したが、実際の作業量は、全鋼板の中から取り出すブロックの順番や、Fig.1 の Stockyard 2 での設備能力によって大きく変わる。式 (1) で定義したコスト関数と、実際の板繰り作業量との相関についての詳しい調査は今後の課題である。

8 おわりに

ストックヤードから出庫される鋼板の並び方（シーケンス）に対して、板繰り作業量を反映するコスト関数を定義し、処理する板の枚数とコスト関数との関係について分析した。新しい簡便な仕分け方法を提案し、コスト関数が減ることを解析した。数値計算と実データを用いたシミュレーションにより、提案手法の有効性を示した。本研究で得られた知見は、実際の現場へ適用する予定である。実際の板繰り作業がどの程度軽減したのかを定量的に評価する方法の確立と実際の現場における本提案手法の有効性の検証は今後の課題である。

参考文献

[1] 荒井 誠，西原 弘之：造船業におけるクレーン問題への遺伝的最適化アルゴリズムの適用，日本造船学会講演会論文集 第 3 号 (2004)，pp.83–84.

[2] 奥本 泰久，井関 隆太郎：タブサーチ法による鋼板切断順序の最適化，西部造船会 第 106 回例会論文梗概 (2003)，pp.225–231.

[3] 西 竜志，山本 慎一郎，小西 正躬：製品移動回数と向先集約度を考慮した倉庫配置計画問題に対するビーム探索法の効率化，電気学会論文誌 電子情報システム部門誌，Vol.124, No.4 (2004), pp.1029–1035.