

# 鋼板水切り・仕分け場の離散事象駆動シミュレーション

学生員 宮本 雄亮\* 正員 梶原 宏之\*\*  
正員 木村 元\*\*

Discrete Event Simulation of a Steel Stockyard  
by Yusuke Miyamoto, *Student Member* Hiroyuki Kajiwara, *Member*  
Hajime Kimura, *Member*

**Key Words:** Steel Stockyard, Max-Plus Algebra, Heap Model

## 1. 緒言

製鉄所から納入される鋼板が切断日毎、番船毎、ブロック毎に水切りされることはまずあり得ない。近年の造船所の増産体制強化の一方策として、適当な仕分け場を確保し、クレーンなどの設備の効率的な運用をどのようにして行うかを検討することが急務となっている。

本研究は、このような鋼板水切り・仕分け場の問題分析に有用と思われる離散事象駆動シミュレーションの方法、特に max-plus algebra に基づく heap model を用いた方法について議論することを目的とする。

## 2. HEAP MODEL

heap model は、スケジューリング問題に用いられる max-plus algebra に基づくモデルの一つである。様々な形をしたピースを単純に積み重ねていくモデルで、横軸(列)に各機械などを表す Resource を縦軸に時間軸を設定する。

### 2.1 heap model のピース

Resource の集合を  $R$  で表す。

$$R = \{1,2,3,4,5\} \quad (1)$$

Fig.1~3 で表されるピースを考える。各ピースはモデル化対象の一工程を表しており、各 Resource の占有時間(作業時間)により構成されている。

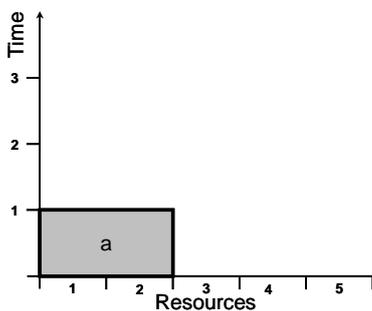


Fig.1 Piece a.

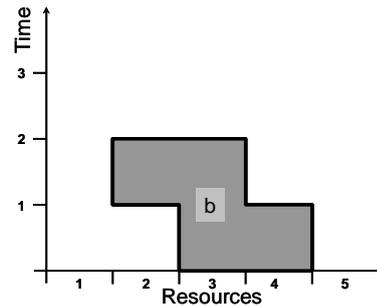


Fig.2 Piece b.

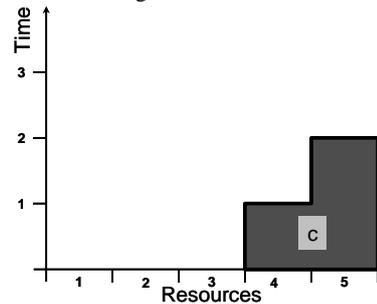


Fig.3 Piece c.

Fig.2 のピース b の場合、作業の開始時間を  $t$  とすると、Resource2 は  $t+1$  から  $t+2$  まで、Resource3 は  $t$  から  $t+2$  まで、Resource4 は  $t$  から  $t+1$  までを占めている。Resource1,5 はこの作業に関わることはない。ピース b の作業に関わる Resource を  $R(b)$  として表すと、

$$R(b) = \{2,3,4\} \quad (2)$$

となる。また、ピース b の各列における上界を  $u(b)$ 、下界を  $l(b)$  とすると、

$$u(b) = (\varepsilon, 2, 2, 1, \varepsilon)^T \quad (3)$$

$$l(b) = (\varepsilon, 1, e, e, \varepsilon)^T \quad (4)$$

と表すことができる。同様に、Fig.1 のピース a、Fig.3 のピース c も以下のように表現できる。

$$R(a) = \{1,2\} \quad (5)$$

$$u(a) = (1, 1, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon)^T \quad (6)$$

\*九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻  
\*\*九州大学大学院工学府海洋システム工学部門

$$l(a) = (\varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon)^T \quad (7)$$

$$R(c) = \{4, 5\} \quad (8)$$

$$u(c) = (\varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, 1, 2)^T \quad (9)$$

$$l(c) = (\varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon, \varepsilon)^T \quad (10)$$

## 2.2 ピースのマトリックス

$P$  をピースの集合とする。

$$P = \{a, b, c\} \quad (11)$$

$\eta \in P$  であるピース  $\eta$  の上界を  $u(\eta)$ , 下界を  $l(\eta)$ , ピース  $\eta$  の作業に関わる Resource を  $R(\eta)$ , Resource の数を  $n$  ( $n=1,2,3,\dots$ ) とする。 $u(\eta)$ ,  $l(\eta)$  は  $n$  次元の列ベクトルとする。 $r \in R(\eta)$  のとき,

$$0 \leq l_r(\eta) \leq u_r(\eta) < \infty \quad (12)$$

$r \notin R(\eta)$  のとき,

$$l_r(\eta) = u_r(\eta) = \varepsilon \quad (13)$$

ピース  $\eta$  に関連付けたマトリックス  $M(\eta)$  を以下のように定義付ける。

$$[M(\eta)]_{rs} = \begin{cases} u_r(\eta) - l_s(\eta) & \text{for } r, s \in R(\eta), \\ e & \text{for } s = r, r \notin R(\eta), \\ \varepsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

よって, 前述のピース a,b,c の場合は以下のようになる。

$$M(a) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ 1 & 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$M(b) = \begin{pmatrix} e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 1 & 2 & 2 & \varepsilon \\ \varepsilon & 1 & 2 & 2 & \varepsilon \\ \varepsilon & e & 1 & 1 & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$M(c) = \begin{pmatrix} e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 1 & 1 \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 2 & 2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

## 2.3 heap

$P$  内のピースが重なったものを heap と呼ぶ。例えば,  $w = a b a c b$  は heap である。heap  $w$  を Fig.4 に示す。

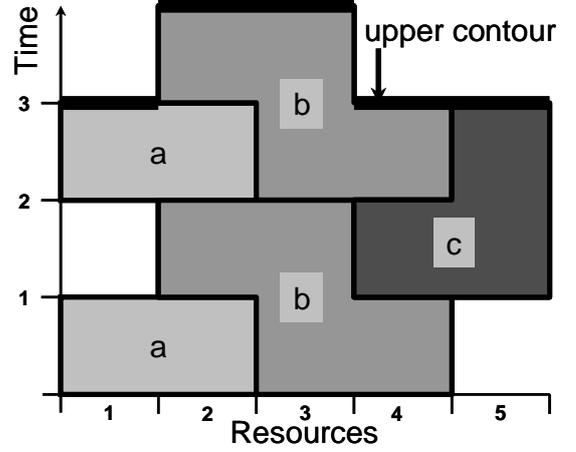


Fig.4 The heap  $w=abacb$ .

heap  $w$  の上界を  $n$  次元列ベクトル  $x_H(w)$  で表す。例えば,  $x_H(a b a c b) = (3, 4, 4, 3, 3)^T$  となる。

heap  $w$  の後にピース  $\eta$  を積み重ねた状態を  $w\eta$  で表す。その時の上界は以下のようになる。

$[x_H(w\eta)]_r = \bigoplus_{s \in R} [M(\eta)]_{rs} \otimes [x_H(w)]_s, r \in R, (18)$   
空の heap を  $\emptyset$  で表し,  $x_H(\emptyset) = u$  とする。(18)式を簡略化して(19)式とする。

$$x_H(w\eta) = M(\eta) \otimes x_H(w) \quad (19)$$

上記の関係を反復表現にする。

$\eta_i \in P, (i=1,2,\dots)$  として  $x_H(k) = x_H(\eta_1 \eta_2 \dots \eta_k)$ ,  $M(k) = M(\eta_k)$  とすると以下のように表される。

$$\begin{cases} x_H(k+1) = M(k+1) \otimes x_H(k), & k \geq 1, \\ x_H(0) = u \end{cases} \quad (20)$$

## 2.4 heap model の評価

heap model の評価に成長率と形状ベクトル  $s(w)$  を用いる。

$$(\text{成長率}) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} x_H(k) \quad (21)$$

$$s_r(w) = (x_H(w))_r - \min \{ (x_H(w))_p : p \in R \}, r \in R \quad (22)$$

成長率は 1 ピースあたりに増加する時間を表し, 形状ベクトルはスケジュールのバランスの良さを表す。

### 3. 水切り・仕分け場のモデル

#### 3.1 水切り・仕分け場

本研究でモデル化の対象とする鋼板の水切り・仕分け場を Fig.5 に示す。船から鋼板を水切り（陸揚げ）して、仕分けする。クレーン 1 は水切りを、クレーン 2 は仕分けを担当する。船上に鋼板が存在する場合は水切り作業を最優先して行う。安全のためクレーン同士が互いに近づき合う方向には移動できないこととする。

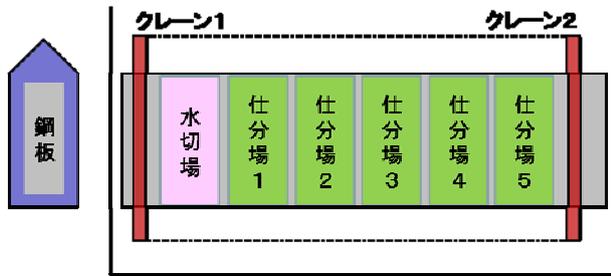


Fig.5 Steel Stockyard.

#### 3.2 モデル化

Fig.5 の水切り・仕分け場のクレーンの動きを heap model で表現する。

$$R = \{1,2,3,4\} \quad (23)$$

Resource1 はクレーン 1, Resource2 は水切り場での作業, Resource3 はクレーン 1 と 2 の干渉, Resource4 はクレーン 2 を表す。クレーンの下降・上昇に 2 単位時間, 鋼板運搬船と水切り場間の移動に 4 単位時間, 水切り場から仕分け場 5 までの隣り合う水切り・仕分け場間の移動に 1 単位時間かかるとして, Fig.6~13 に各ピースを示す。

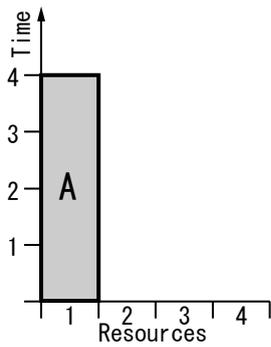


Fig.6 Piece A.

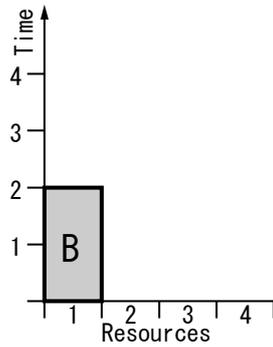


Fig.7 Piece B.

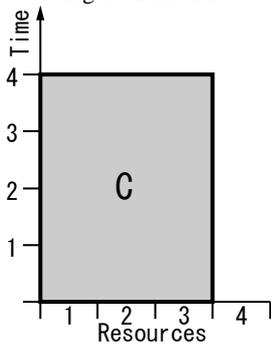


Fig.8 Piece C.

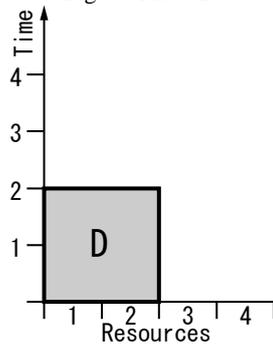


Fig.9 Piece D.

ピース A はクレーン 1 の鋼板運搬船への左移動, ピース B はクレーン 1 の鋼板運搬船上での下降・上昇, ピース C はクレーン 1 の水切り場への右移動, ピース D はクレーン 1 の水切り場での下降・上昇を表す。

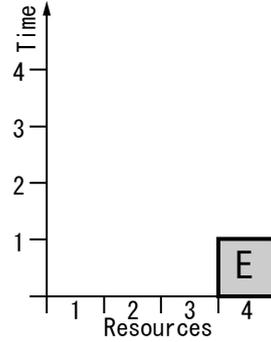


Fig.10 Piece E.

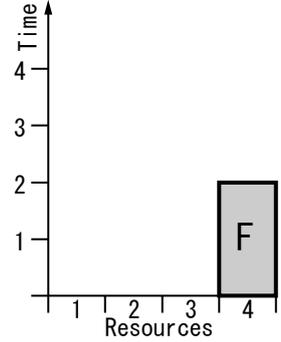


Fig.11 Piece F.

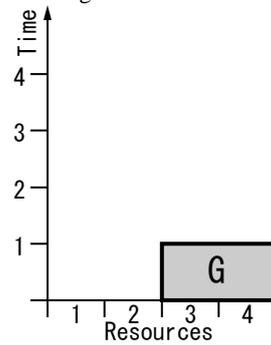


Fig.12 Piece G.

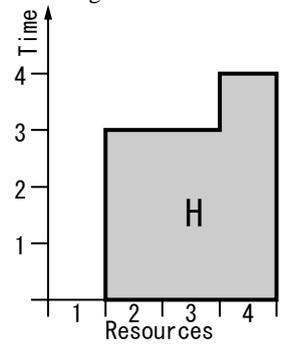


Fig.13 Piece H.

ピース E はクレーン 2 の水切り場以外での仕分け場での右隣への移動, ピース F はクレーン 2 の水切り場以外での仕分け場での下降・上昇, ピース G はクレーン 2 の水切り場以外での仕分け場での左隣への移動, ピース H はクレーン 2 の仕分け場 1 から水切り場への左移動, 水切り場での下降・上昇, 水切り場から仕分け場 1 への移動を表す。

このとき, 各ピースのマトリックスを次に示す。

$$M(A) = \begin{pmatrix} 4 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$M(B) = \begin{pmatrix} 2 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$M(C) = \begin{pmatrix} 4 & 4 & 4 & \varepsilon \\ 4 & 4 & 4 & \varepsilon \\ 4 & 4 & 4 & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$M(D) = \begin{pmatrix} 2 & 2 & \varepsilon & \varepsilon \\ 2 & 2 & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & e \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$M(E) = \begin{pmatrix} e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$M(F) = \begin{pmatrix} e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 2 \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$M(G) = \begin{pmatrix} e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & 1 & 1 \\ \varepsilon & \varepsilon & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$M(H) = \begin{pmatrix} e & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 3 & 3 & 3 \\ \varepsilon & 3 & 3 & 3 \\ \varepsilon & 4 & 4 & 4 \end{pmatrix} \quad (31)$$

### 3.3 水切り・仕分けシミュレーション

Table.1 のような 10 枚の鋼板を運搬船が運んできたとして、クレーン 1 の初期位置を水切り場に、クレーン 2 を仕分け場 5 としてシミュレーションを行う。

Table.1 Steel Data.

鋼板	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
行き先	3	2	5	1	5	4	2	1	3	4

#### (1) 水切り作業

水切りを最優先で行うので、まずクレーン 1 の水切り作業の heap  $w$  を生成する。

$$w = \{A B C D \dots A B C D A\} \quad (32)$$

{ABCD} を 1 サイクルとして 10 枚分繰り返して最後に水切り場から移動して水切り作業の終了とする。

#### (2) 仕分け作業

水切り作業で得た heap  $w$  からクレーン 2 の仕分け作業を決定し、最終的な heap とする。

まず、クレーン 2 は初期位置が仕分け場 5 なので水切り場に仕分けする鋼板を取りに行く。このときのクレーン 2 の heap を  $w_2$  とすると、

$$w_2 = \{G G G G H\} \quad (33)$$

となる。ここで  $w_2$  を  $w$  に組み込むことを考える。クレーン 1 の水切り作業の妨げにならないように組み込む。ここで、

$$R(A) = R(B) = \{1\} \quad (34)$$

$$R(C) = \{1,2,3\} \quad (35)$$

$$R(D) = \{1,2\} \quad (36)$$

$$R(E) = R(F) = \{4\} \quad (37)$$

$$R(G) = \{3,4\} \quad (38)$$

$$R(H) = \{2,3,4\} \quad (39)$$

なので、 $w$  に  $w_2$  を組み込む際にピース G はピース C に、ピース H はピース C とピース D に影響を与える可能性があることがわかる。つまり、ピース G を組み込むときは heap  $w$  において、次に出てくるピース C での Resource 1,2,3 の上界がピース G を組み込む前と後で変化しない場合は水切り作業の妨げとならないため組み込める。同様に、ピース H が組み込めるかどうかの判断も、次に出てくるピース C での上界の変化による。ピース H はピース D へも影響を与えるが、今回は、ピース C の直後にのみピース D が出てくるのでピース C とピース D の間にピース H を組み込むことはできないことは明らかであるため、ピース C のみを考慮する。また、heap  $w_2$  はピース H を heap  $w$  に組み込んだときにクレーン 2 がつかんだ鋼板の行き先により以後の heap を決定する。

## 4. 結 言

本研究では、造船所の簡単な鋼板水切り・仕分け場の作業を max-plus algebra に基づく heap model によりモデル化し、水切りを優先した効率的なクレーンの運用法を検討する可能性を示した。

今後の課題として、水切りが終わった後のクレーン 1 の仕分け作業への利用、後工程への鋼板の移動も考慮した heap model の開発が挙げられる。

## 謝 辞

本研究は、大島造船株式会社と九州大学との共同研究の一部として実施されたことを記し、関係各位に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Heidergott B., G.J.Olsder, J.Woude: Max Plus at Work: Modeling and Analysis of Synchronized Systems: A Course on Max-Plus Algebra and Its Applications, Princeton University Press, 2005
- 2) Stanczyk J.: Max-Plus Algebra Toolbox for MATLAB and GNU Octave, 2005
- 3) 梶原宏之, 中尾洋一: 離散事象システム理論に基づく造船ラインのスケジューリング, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 4 号, pp. 89-94, 2006