

# 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

正員 梶原 宏之<sup>\*1</sup> 正員 中尾 洋一<sup>\*2</sup>

On scheduling ship-building lines based on discrete-event system theory

by Hiroyuki Kajiwara, Member Youichi Nakao, Member

## Summary

The paper presents an unified approach to scheduling problems on ship-building lines based on discrete event-driven system theory. The dynamics of the production lines are mathematically described using linear system representations based on Max-Plus algebra, which makes it possible to solve the problems to strictly keep delivery dates by model-predictive control theory adjusting arriving times of parts or materials. Specifically, for a dock of tandem-type, the dock process consisting of building up blocks, rigging and painting is successfully modeled by a Max-Plus-algebra-based linear system representation which determines the cyclic delivery dates for the block-assembling process. The process is consisting of making-up blocks ('Oo-gumi'), stocking them and gathering several blocks ('Sou-gumi') is also modeled by another Max-Plus-algebra-based linear system representation. Simulation results show that arriving times of parts to the block-assembling process can be determined by 1-step-ahead or 2-step-ahead model-predictive control methods. Furthermore, it is shown that the problem reducing stock periods can be formulated into linear programming problem.

## 1. 緒 言

我国の造船業は、これまでになく、その生産性向上のための方策を求められている。これには、未曾有の船舶需要の中にあって他国による激しい追い上げがあること、我国は少子高齢化の中にあって数年後には退職を迎える団塊世代に代わる後継労働者への技術伝承が容易ではないことなど、多様な事情がある。ちなみに我国の自動車業界の生産性は世界一と言っても過言ではなく、その生産管理技術を学ぶべきという意見は多いが、船舶生産システムについて、上流工程から下流工程まで一貫して、生産スケジューリングを行うことは至難の業であり、同様の生産管理体制を取れないのが現実である。しかしながら、昨今の造船業を取り巻く環境の変化は、船舶生産システムの生産性向上について、より科学的・体系的なアプローチを適用する機運を高めている。

本研究では、造船業における更なる生産性向上のための研究の一環として、造船ラインのスケジューリング問題について、モデルに基づく体系的なアプローチを確立することを試みる。関連する従来研究としては、野本・青山らの研究グループによるペトリネットを利用した造船工場シミュレータの構築に関する一連の先駆的な研究がある<sup>1)~3)</sup>。そこでは、生産資源の時間的・能力

的な制約条件を満足させることができるように、ペトリネットという離散事象システムのモデリングの枠組みが利用されている。造船工場を「ドック」「大組立て工場」「中組立て工場」「小組立て工場」「加工工場」に分けて、それぞれに変換・運搬・停滞などの活動をモデリングしている。また、それぞれの活動を作業のレベルまで詳細化し、多品種の生産計画への対応を可能にしている。さらに、定盤計画問題の検討も行っている。一般に、離散事象システムのモデリングの枠組みとしては、モデリングに有用なペトリネットによるものと、特性解析に有用なオートマトンによるものがある。著者は、オートマトンによるアプローチを試みたが、簡単なモデルを扱うレベルに留まっている。ところが、システム制御工学分野では、近年、Max-Plus 代数によるアプローチによって、モデリングと特性解析の双方を体系的に取り扱えることが明らかになってきている<sup>4)~8)</sup>。

そこで、本論文では、ブロック建造方式による造船ラインのダイナミクスを Max-Plus 代数表現された線形システムとして捉え、サイクリックなブロック搭載工程（ドック工程）にブロック組立工程を同期させ、ブロックのストック期間を減らす問題について、マクロ的な（個別のブロックまで詳細化しない）考察を行う。具体的には、まず、両工程のモデリングを行い、ジャストインタイムが実現されるように、ブロック組立開始日とストック期間を調整する制御規則を、モデル予測制御方式によって導出することを試みる。その有効性を、計算機シミュレーションにより、ガントチャートを出力させて示す。

<sup>\*1</sup> 九州大学大学院 工学研究院 海洋システム工学部門

<sup>\*2</sup> 株式会社大島造船所 設計部

## 2. 問題の記述

いま, ある  $k$  番船につき,  $n_b(k)$  個のブロックを一旦ストックし (先行艤装・塗装を含む), これらを  $m_b(k)$  個に総組するブロック組立工程を考える。これらはドック内で搭載・溶接され, 艤装・塗装を経て進水に至るものとする。このドック工程のピッチを維持するためには, その開始日前日までに,  $m_b(k)$  個の総組ブロックが揃っていなければならない。ところが, タンデム建造やパラレル建造 (Fig.2 参照) の場合, 平準化を考えると, 当該番船の大組や総組における各ブロックの開始時期をいつにしたらよいかは自明ではない。また, 各ブロックのストックについては, 所定のドック工程ピッチを維持するために, どの程度のストック日数が必要か, またどの程度のストックエリア ( $n_s$  個のブロックを収納可能) が必要かの検討ができることが望ましい。

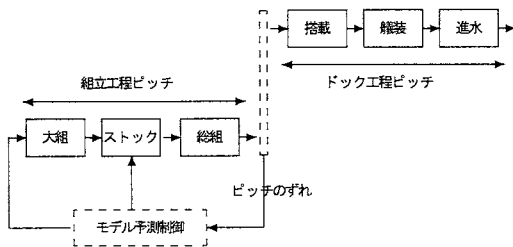


Fig.1 Scheduling Problem

このような問題を, 実際の生産管理計画に利用できる実用的な解として得るためには, 各工程についてかなり詳細な検討が必要である。たとえば, 組立工程におけるコンベアライン (流れ作業), ストックエリアの制限, 総組定盤の制限などについてである。しかしながら, 本論文では, その最初の研究段階として, 大枠としての計画に役立つことを目指して, Fig.1 のように, 問題とアプローチを限定して検討する。すなわち, まず, 所定のドック工程の開始日に間に合うように, ブロック組立工程の開始日を, モデル予測制御という手法によって決定する問題を考える。また, 工程の短縮が避けられない場合, たとえばストック日数を減らす必要があるが, 適切な削減日数を得るための線形計画問題として定式化することを考える。

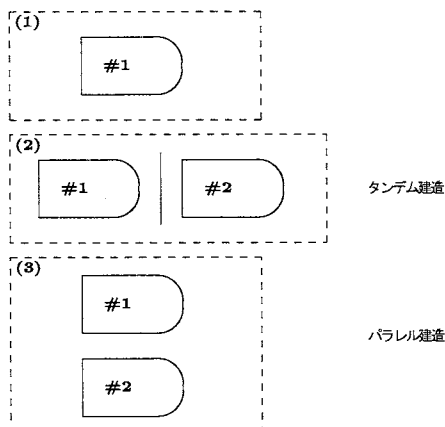


Fig.2 Ship Alignments in Docks

## 3. モデリング

いま, Fig.3 に示す1つの機械による部品の加工工程を考える。このダイナミクスは, 文献<sup>9)</sup>によれば, 次式で表される。

$$\begin{cases} x(k) = \max\{y(k-1), u(k)\} \\ y(k) = x(k) + d(k) \end{cases} \quad (1)$$

ここで,  $u(k)$  は機械への部材  $k$  の到着時刻,  $x(k)$  は機械での部材  $k$  の加工開始時刻,  $d(k)$  は機械での部材  $k$  の加工時間,  $y(k)$  は機械での部材  $k$  の加工完了時刻である。

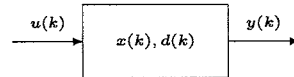


Fig.3 A Production System

(1) 式での演算は  $\max$  と  $+$  であるが, これらを改めてそれぞれ,  $\oplus$  と  $\otimes$  と表記して, 次のように書く。

$$\begin{cases} x(k) = y(k-1) \oplus u(k) \\ y(k) = d(k) \otimes x(k) \end{cases} \quad (2)$$

ここで,  $y(k-1) = x(k-1) + d(k-1)$  に注意し,  $\otimes$  記号を省略すると, 次を得る。

$$\begin{cases} x(k) = d(k-1)x(k-1) \oplus u(k) \\ y(k) = d(k)x(k) \end{cases} \quad (3)$$

これは,  $A(k) = d(k-1)$ ,  $B(k) = 0$ ,  $C(k) = d(k)$  とおくと, 形式上, 次式の線形システムとなっている。

$$\begin{cases} x(k) = A(k)x(k-1) \oplus B(k)u(k) \\ y(k) = C(k)x(k) \end{cases} \quad (4)$$

以下では, ブロック組立工程を, このような max-plus 代数表現された線形システムとしてモデリングする。ここで, (4) の第1式は状態方程式, 第2式は出力方程式と呼ばれる。状態  $x$ , 入力  $u$ , 出力  $y$  はそれぞれ, 各部分工程における作業開始日, 部材 (鋼板, ブロック等) の到着日, 作業完了日からなるベクトル,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  はそれぞれ適合するサイズの行列である。また, 演算  $\oplus$  の単位元を  $\epsilon = -\infty$  で, 演算  $\otimes$  の単位元を  $e = 0$  で表す。

まず, Fig.2 (1) のように, 1隻分のドックスペースを考える。この場合のブロック組立工程は, Fig.4 のように表される。ただし, ブロックの個数だけのストックエリアが確保されているものと仮定する ( $n_s = n_b$ )。

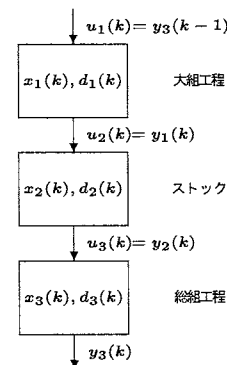


Fig.4 Block Assembly Production

いま、 $k$  番船の大組工程，ストック，総組工程における作業日数を，それぞれ  $d_1(k)$ ， $d_2(k)$ ， $d_3(k)$  とすると

$$\begin{cases} x_1(k) = \epsilon x_1(k-1) \oplus u_1(k) \\ y_1(k) = d_1(k)x_1(k) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_2(k) = \epsilon x_2(k-1) \oplus u_2(k) \\ y_2(k) = d_2(k)x_2(k) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_3(k) = \epsilon x_3(k-1) \oplus u_3(k) \\ y_3(k) = d_3(k)x_3(k) \end{cases} \quad (7)$$

および，結合関係式

$$\begin{cases} u_2(k) = y_1(k) \\ u_3(k) = y_2(k) \end{cases} \quad (8)$$

が成り立つ。これから，各工程の処理開始日が

$$\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e & & \\ & d_1(k) & \\ & d_1(k)d_2(k) & \end{bmatrix} u_1(k) \quad (9)$$

となるのは明らかである。 $k$  番船は  $k-1$  番船の工程が終了して始まるので，(9) 式に

$$u_1(k) = y_3(k-1) \oplus u'_1(k) \quad (10)$$

を代入して ( $u'_1(k)$  は新しい入力)，状態方程式として

$$\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \epsilon & \epsilon & d_3(k-1) \\ \epsilon & \epsilon & d_1(k)d_3(k-1) \\ \epsilon & \epsilon & d_1(k)d_2(k)d_3(k-1) \end{bmatrix}}_{A(k)} \otimes \begin{bmatrix} x_1(k-1) \\ x_2(k-1) \\ x_3(k-1) \end{bmatrix} \oplus \underbrace{\begin{bmatrix} e & & \\ & d_1(k) & \\ & d_1(k)d_2(k) & \end{bmatrix}}_{B(k)} u'_1(k) \quad (11)$$

を得る。また，出力方程式として，次式を得る。

$$y_3(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} \epsilon & \epsilon & d_3(k) \end{bmatrix}}_{C(k)} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

以下では，紙幅の節約のため，変数の  $k$  への依存性は省略し， $k-1$  への依存性は上付添字  $(-)$  を用いて表す。したがって，状態方程式 (11) と出力方程式 (12) を，次式のように表す。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \epsilon & \epsilon & d_3^{(-)} \\ \epsilon & \epsilon & d_1 d_3^{(-)} \\ \epsilon & \epsilon & d_1 d_2 d_3^{(-)} \end{bmatrix}}_{A(k)} \begin{bmatrix} x_1^{(-)} \\ x_2^{(-)} \\ x_3^{(-)} \end{bmatrix} \oplus \underbrace{\begin{bmatrix} e \\ d_1 \\ d_1 d_2 \end{bmatrix}}_{B(k)} u_1 \quad (13)$$

$$y_3 = \underbrace{\begin{bmatrix} \epsilon & \epsilon & d_3 \end{bmatrix}}_{C(k)} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ここで， $u'_1$  は改めて  $u_1$  とおいた。以下でも，このような記法を用いることにする。

#### 4. スケジューリング

2節のモデリングの枠組を用いて，造船ラインのモデルが (4) 式で表される線形システムとして得られたとして，まず，予測式の導出を行う。(4) 式の状態方程式を繰り返し使うことにより，次式が得られる。

$$\begin{cases} x(k) = A(k)x(k-1) \oplus B(k)u(k) \\ x(k+1) = A(k+1)x(k) \oplus B(k+1)u(k+1) \\ \quad = A(k+1)A(k)x(k-1) \oplus A(k+1)B(k)u(k) \\ \quad \oplus B(k+1)u(k+1) \\ \vdots \end{cases} \quad (15)$$

これから，(4) 式の出力方程式を用いて，次の予測式が得られる。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ \vdots \end{bmatrix}}_{Y(k)} = \Gamma(k)x(k-1) \oplus \Delta(k) \underbrace{\begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \end{bmatrix}}_{U(k)} \quad (16)$$

ここで， $\Gamma(k)$  と  $\Delta(k)$  は， $k$  番船だけに関わる1段予測制御の場合は

$$\begin{cases} \Gamma(k) = C(k)A(k) \\ \Delta(k) = C(k)B(k) \end{cases} \quad (17)$$

また， $k$  番船と  $k+1$  番船に関わる2段予測制御の場合は

$$\begin{cases} \Gamma(k) = \begin{bmatrix} C(k)A(k) \\ C(k+1)A(k+1)A(k) \end{bmatrix} \\ \Delta(k) = \begin{bmatrix} C(k)B(k) & \epsilon \\ C(k+1)A(k+1)B(k) & C(k+1)B(k+1) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

である。予測式 (16) は， $k$  番船以降の部材投入日を与えると， $k$  番船以降の組立工程完了日を計算できることを示している。

いま，ドック工程ピッチから， $k$  番船以降の組立工程完了日の目標系列が

$$R(k) = \begin{bmatrix} r(k) \\ r(k+1) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (19)$$

のように与えられるとする。このとき， $Y(k) = R(k)$  が満足されるように部材投入日の系列  $U(k)$  を決定したい。そのためには，方程式

$$R(k) = \Gamma(k)x(k-1) \oplus \Delta(k)U(k) \quad (20)$$

を  $U(k)$  に関して解けばよい。この方程式は

$$R(k) \geq \Gamma(k)x(k-1) \quad (21)$$

が成り立つときは

$$\Delta(k)U(k) = R(k) \quad (22)$$

となる。しかしながら，この解は常に存在するとは限らないので

$$\Delta(k)U(k) \leq R(k) \quad (23)$$

を満たす最大部分解を求めることが行われる。もし、条件 (21) が成り立たない (納期遅れの) ときは、作業時間を調整し、 $A$  行列、 $B$  行列、 $C$  行列を変更したあと、 $R(k) \geq \hat{\Gamma}(k)x(k-1)$  を成立させ、 $\hat{\Delta}(k)U(k) = R(k)$  を得て、 $\hat{\Delta}(k)U(k) \leq R(k)$  を満たす最大部分解を求める。

以上の方針に沿って、Fig.2 のケース (1) について、解の数式表現を求めておく。まず、1 段予測制御の場合、(17) 式より

$$\begin{cases} \Gamma(k) = \begin{bmatrix} \epsilon & \epsilon & d_1 d_2 d_3 d_3^{(-)} \\ \Delta(k) = d_1 d_2 d_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (24)$$

だから、条件 (21) は

$$\underbrace{r}_{R(k)} \geq \underbrace{d_1 d_2 d_3 d_3^{(-)} x_3^{(-)}}_{\Gamma(k)x(k-1)} = d_1 d_2 d_3 y_3^{(-)} = y_3 \quad (25)$$

となる。これが成立するならば、方程式 (22) は

$$\underbrace{d_1 d_2 d_3}_{\Delta(k)} \underbrace{u_1}_{U(k)} = \underbrace{r}_{R(k)} \quad (26)$$

となる。これから、 $u_1$  は、通常の演算による計算式

$$u_1 = r - (d_1 + d_2 + d_3) \quad (27)$$

によって決定され、このことは、Fig.5 に示すように、自明である。もし、(25) が満足されない場合は、ストック日数  $d_2(k)$  を短縮するなどの方策が必要である。

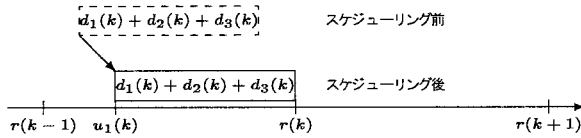


Fig.5 Scheduling by One-Step-Ahead Prediction

つぎに、 $k+1$  番船では、条件 (25) に相当する

$$r^{(+)} \geq y_3^{(+)} \quad (28)$$

が成り立たないとする。ここで、上付添字 (+) は、当該変数が  $k+1$  に依存することを表す。このとき、 $k$  番船と  $k+1$  番船を同時に考える 2 段予測制御を用いて解決できる場合がある。(18) 式より

$$\begin{cases} \Gamma(k) = \begin{bmatrix} \epsilon & \epsilon & d_1 d_2 d_3 d_3^{(-)} \\ \epsilon & \epsilon & d_1^{(+)} d_2^{(+)} d_3^{(+)} d_1 d_2 d_3 d_3^{(-)} \end{bmatrix} \\ \Delta(k) = \begin{bmatrix} d_1 d_2 d_3 & \epsilon \\ d_1^{(+)} d_2^{(+)} d_3^{(+)} d_1 d_2 d_3 & d_1^{(+)} d_2^{(+)} d_3^{(+)} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (29)$$

だから、条件 (21) は

$$\underbrace{\begin{bmatrix} r \\ r^{(+)} \end{bmatrix}}_{R(k)} \geq \underbrace{\begin{bmatrix} y_3 \\ d_1^{(+)} d_2^{(+)} d_3^{(+)} y_3 \end{bmatrix}}_{\Gamma(k)x(k-1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} y_3 \\ y_3^{(+)} \end{bmatrix}} \quad (30)$$

となる。これが成立するならば、方程式 (22) は

$$\Delta(k) \underbrace{\begin{bmatrix} u_1 \\ u_1^{(+)} \end{bmatrix}}_{U(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} r \\ r^{(+)} \end{bmatrix}}_{R(k)} \quad (31)$$

となる。これを解くと

$$-U(k) = \Delta^T(k)(-R(k)) \quad (32)$$

となる。すなわち、 $u_1$  と  $u_1^{(+)}$  は、通常の演算による計算式

$$\begin{cases} u_1 = \min\{r - (d_1 + d_2 + d_3), \\ r^{(+)} - (d_3^{(+)} + d_2^{(+)} + d_1^{(+)} + d_3 + d_2 + d_1)\} \\ u_1^{(+)} = r^{(+)} - (d_3^{(+)} + d_2^{(+)} + d_1^{(+)} \end{cases} \quad (33)$$

により与えられる (Fig.6 参照)。

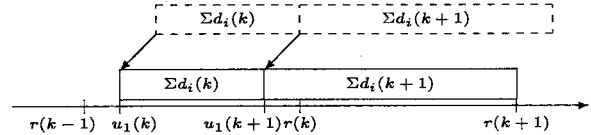


Fig.6 Scheduling by Two-Step-Ahead Prediction

## 5. タンDEM建造への応用

ここでは、これまで述べたきたアプローチを、Fig.2 (2) のように、 $k^{(1)}$  番船と  $k^{(2)}$  番船の2隻をタンDEM建造を行うドックの場合に適用した結果を示す。

### 5.1 モデリング

この場合のブロック組立工程は、Fig.7 のように表される。ここで、変数  $x_i, u_i, y_i$  はそれぞれ各工程の作業開始日、部材投入日、作業完了日、また変数  $d_i$  は作業日数を表し、 $k^{(1)}$  番船に関する変数には上付添字 (1) を、 $k^{(2)}$  番船に関する変数には上付添字 (2) を用いた。また、大組工程、ストック、総組工程のリソース (クレーンやストックエリアや定盤等の工作機械) は、1 隻分だけが確保されているものとする。そこで、リソースを管理する入力変数  $v_i$  と出力変数  $z_i$  を定義した。

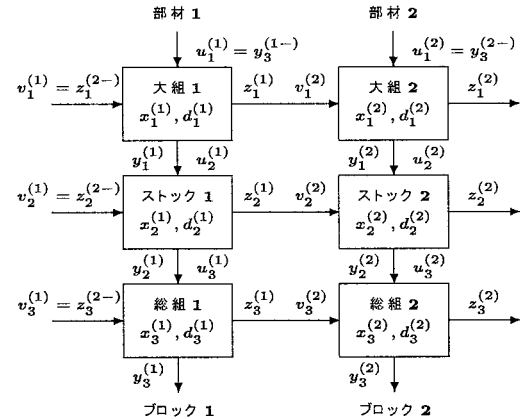


Fig.7 Block Assembly Production of Tandem Type

このブロック組立工程のダイナミクスは、(4) 式の形でモデリングでき、状態、入力、出力の各ベクトルは

$$\begin{cases} x(k) = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & x_3^{(1)} & x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & x_3^{(2)} \end{bmatrix}^T \\ u(k) = \begin{bmatrix} u_1^{(1)} & u_1^{(2)} \end{bmatrix}^T \\ y(k) = \begin{bmatrix} y_3^{(1)} & y_3^{(2)} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (34)$$

となる。 $A(k)$ 、 $B(k)$ 、 $C(k)$  は紙幅の関係で割愛する。

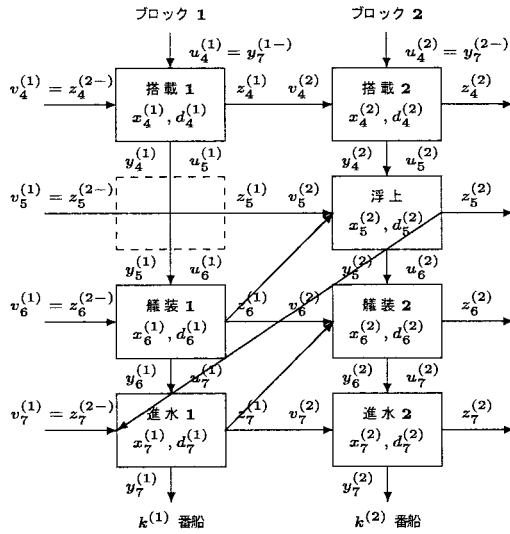


Fig.8 Dock Production of Tandem Type

一方、ブロック搭載工程は、Fig.8のように表される。ここで、 $k^{(1)}$  番船の艦装終了後、 $k^{(2)}$  番船を一旦浮上させ、 $k^{(1)}$  番船を進水させ、その後  $k^{(2)}$  番船の艦装を始めている。これおダイナミクスもまた、(4) 式の形でモデリングでき、状態、入力、出力の各ベクトルは

$$\begin{cases} x(k) = \begin{bmatrix} x_4^{(1)} & x_6^{(1)} & x_7^{(1)} & x_4^{(2)} & x_5^{(2)} & x_6^{(2)} & x_7^{(2)} \end{bmatrix}^T \\ u(k) = \begin{bmatrix} u_4^{(1)} & u_4^{(2)} \end{bmatrix}^T \\ y(k) = \begin{bmatrix} y_7^{(1)} & y_7^{(2)} \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (35)$$

となる。 $A(k)$ ,  $B(k)$ ,  $C(k)$  は紙幅の関係で割愛する。

本論文で取り扱う問題は、所定のドック工程の開始日に間に合うように、ブロック組立工程の開始日を決定する問題である。 $k$  番船のドック工程の開始日  $r(k)$  は、 $k-1$  番船の完了日  $y_d(k-1)$  であり、これは (35) 式の応答系列として与えられる。たとえば、 $d_4^{(1)} = d_4^{(2)} = 17$  日、 $d_5^{(2)} = 1$  日、 $d_6^{(1)} = d_6^{(2)} = 16$  日、 $d_7^{(1)} = d_7^{(2)} = 1$  日のとき、ドック工程をシミュレーションした結果を、Fig.9 と Fig.10 の上段に示す。いま、 $k-1$  番船に対しては、 $d_1^{(1)} = d_1^{(2)} = 14$  日、 $d_2^{(1)} = d_2^{(2)} = 8.75$  日、 $d_3^{(1)} = d_3^{(2)} = 8.75$  日の工期とする。

## 5.2 予測制御によるスケジューリング

まず、 $k$  番船に対しては  $k-1$  番船の 2 割減の工期、 $k+1$  番船に対しては  $k-1$  番船の 2 割増の工期を考える。Fig.9 の中段は、1 段予測制御でスケジューリングしたが、 $k+1$  番船に対しては、所定のピッチサイクルに収まらない様子を示している。しかしながら、これは、 $k$  番船のスケジューリング時に、 $k+1$  番船までも同時に勘案する 2 段予測制御を用いれば解決できることを、Fig.9 の下段に示している。

この 1 段予測によるスケジューリングは、条件 (21) の成立を前提にした方程式 (22) を解くことによって行われている。その

解析式は次のように表される。

$$u^{(1)} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{r^{(1)} - d_1^{(1)} - d_2^{(1)} - d_3^{(1)}}{r^{(2)} - d_1^{(2)} - d_2^{(2)} - d_3^{(2)} - d_1^{(1)}} \\ \frac{r^{(2)} - d_2^{(2)} - d_3^{(2)} - d_1^{(1)} - d_2^{(1)}}{r^{(2)} - d_3^{(2)} - d_1^{(1)} - d_2^{(1)} - d_3^{(1)}} \end{array} \right\} \quad (36)$$

$$u^{(2)} = r^{(2)} - d_1^{(2)} - d_2^{(2)} - d_3^{(2)} \quad (37)$$

ここで、 $u^{(2)}$  は、3 節で示した (27) と同様自明であるが、 $u^{(1)}$  についてはそうではなく、4 つの候補から選ばれることが分かる。また、2 段予測によるスケジューリングの場合の解析式はもっと複雑になるが、計算機を援用すれば簡単に求めることができる。これまででは、ある番船の大組工程が終われば、直ちに次船の大組工程に移るのが普通であったと思われるが、これではブロック置き場が溢れる可能性がある。ここに、上のように大組工程の開始時期を体系的に決定することの意義があると考えられる。

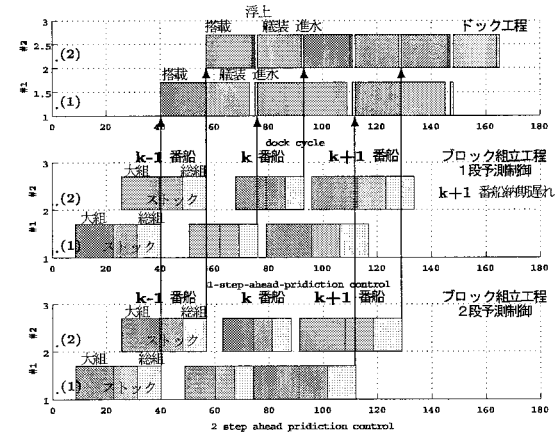


Fig.9 Scheduling by model predictive control

## 5.3 工期短縮を考慮したスケジューリング

一方、 $k$  番船に対しては  $k-1$  番船の 2 割増の工期、 $k+1$  番船に対しては  $k-1$  番船の 2 割減の工期の場合、Fig.10 の中段に示すように、 $k$  番船の工期短縮が避けられない。すなわち、

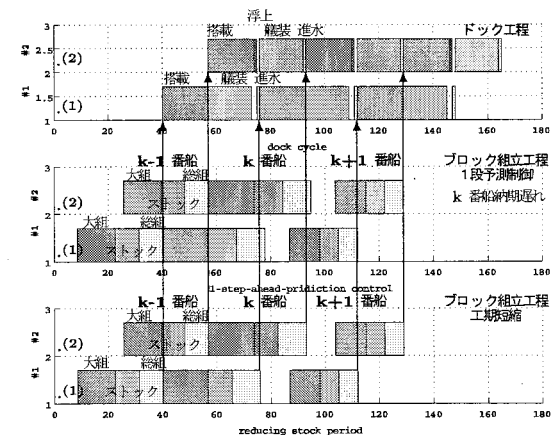


Fig.10 Scheduling by linear programming method

条件 (21) が成立しないので、たとえばストック期間  $d_2^{(1)}$ ,  $d_2^{(2)}$  を短縮し、これを満足させる必要がある。

これは、評価関数

$$J = -\alpha_1 d_2^{(1)} - \alpha_2 d_2^{(2)} + \beta_1 u_1 + \beta_2 u_2 \quad (38)$$

を、制約条件

$$\left\{ \begin{array}{l} H \begin{bmatrix} d_2^{(1)} \\ d_2^{(2)} \\ \mu^{(1)} \\ \mu^{(2)} \end{bmatrix} \leq g \\ d_2^{(1)} \leq d_2^{(1)} \leq \bar{d}_2^{(1)} \\ d_2^{(1)} \leq d_2^{(1)} \leq \bar{d}_2^{(1)} \\ \mu^{(1)} > 0 \\ \mu^{(2)} > 0 \end{array} \right. \quad (39)$$

ただし

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$g = \begin{bmatrix} r^{(1)} - d_1^{(1)} - d_3^{(1)} - y_3^{(1-)} \\ r^{(1)} - d_1^{(1)} - d_3^{(1)} - z_1^{(2-)} \\ r^{(1)} - d_3^{(1)} - z_2^{(2-)} \\ r^{(1)} - d_3^{(1)} - y_3^{(2-)} \\ r^{(2)} - d_1^{(1)} - d_1^{(2)} - d_3^{(2)} - y_3^{(1-)} \\ r^{(2)} - d_1^{(1)} - d_3^{(2)} - y_3^{(1-)} \\ r^{(2)} - d_1^{(1)} - d_3^{(1)} - d_3^{(2)} - y_3^{(1-)} \\ r^{(2)} - d_1^{(1)} - d_1^{(2)} - d_3^{(2)} - z_1^{(2-)} \\ r^{(2)} - d_1^{(1)} - d_3^{(2)} - z_1^{(2-)} \\ r^{(2)} - d_1^{(1)} - d_3^{(1)} - d_3^{(2)} - z_1^{(2-)} \\ r^{(2)} - d_3^{(2)} - z_2^{(2-)} \\ r^{(2)} - d_3^{(1)} - d_3^{(2)} - z_2^{(2-)} \\ r^{(2)} - d_1^{(2)} - d_3^{(2)} - y_3^{(2-)} \\ r^{(2)} - d_3^{(1)} - d_3^{(2)} - y_3^{(2-)} \end{bmatrix} \quad (41)$$

の下で、最小化する問題として定式化できる。 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 1000$ ,  $d_2^{(1)} = d_2^{(2)} = 1$ ,  $\bar{d}_2^{(1)} = \bar{d}_2^{(2)} = 8.75 \times 1.2$  としたとき、この不等式制約の下での最小化問題を線形計画法を用いて解いた結果を、Fig.10 の下段に示す。各番船とも、搭載開始までに総組が終了していることがわかる。

## 6. 結 言

本論文では、まず、所定のドック工程の開始日に間に合うように、ブロック組立工程の開始日を決定する問題に対して、ブロック組立工程を Max-Plus 代数に基づく線形システム表現し、モデル予測制御という手法によって考察した。また、工程の短縮が避けられない場合、たとえばストック日数を減らす必要があるが、適切な削減日数を得るための線形計画問題を定式化した。いずれも簡単な例題で有用性を示した。本論文で述べたアプローチを実際の造船ラインに適用するには、個別のブロックが管理できるようにモデルの次数を上げ、ストックエリアや定盤の制約をモデル化し、また、専用の計算ツールの開発を行う必要がある。すでに、実際規模のモデリングに成功しており、状態変数の数は約 600 個にも及んでいる。今後、造船ラインのスケジューリング問題への離散事象システム理論 (Max-Plus 代数表現された線形システム制御理論) に基づく統一のアプローチの有用性を、様々な視点から実証して行きたい。

## 参 考 文 献

- 1) 青山和浩, 野本敏治, 渡辺健太郎: ペトリネットを利用した造船工場シミュレータ, 日本造船学会論文集, 第 182 号, pp.795-807 (1997)
- 2) 青山和浩, 野本敏治, 猪上太: ペトリネットを利用した造船工場シミュレータ —第2報: 作業情報の詳細化に柔軟に対応する工場シミュレータの構築—, 日本造船学会論文集, 第 186 号, pp.673-682 (1999)
- 3) 武市庄司, 青山和浩, 小林真, 牧原一昭: ペトリネットを利用した造船工場シミュレータ —第3報: 定盤モデルを導入した工場シミュレータ—, 日本造船学会論文集, 第 190 号, pp.449-458 (2001)
- 4) F.Bacelli, G.Cohen et al.: Synchronization and linearity, Jhon Wiley & Son (1992)
- 5) B.De Schutter and Y.J.J. van den Boom: Model predictive control for max-plus-linear systems, Automatica, vol.37, No.7, pp.1049-1056 (2001)
- 6) 鈴木寛充, 増田士朗: Max 代数による離散事象システムの内部モデル制御に関する研究, システム情報学会論文誌, Vol.11, No.12, pp.678-694 (1998)
- 7) 増田士朗, 五島洋行, 雨宮孝, 竹安数博: 線形パラメータ表現された max-plus 線形システムの最適逆システム, システム情報学会論文誌, Vol.16, No.1, pp.44-53 (2003)
- 8) 五島洋行, 増田士朗, 雨宮孝, 竹安数博: 可調整パラメータを持つ max-plus 線形システムに対するモデル予測制御, システム情報学会論文誌, Vol.16, No.7, pp.347-355 (2003)
- 9) 平川保博: オペレーションマネージメント —ハイブリッド生産管理への誘い—, 森北出版 (2000)