

バッファを考慮にいたしたジョブショップスケジューリング*

樋野 励^{*1}, 楠見 哲也^{*2}
柳 在 圭^{*1}, 清水 良 明^{*1}

Job Shop Scheduling Focusing on Role of Buffer

Rei HINO^{*3}, Tetsuya KUSUMI,
Jae-Kyu YOO and Yoshiaki SHIMIZU^{*3} Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology,
Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

A scheduling problem is formulated in order to consistently manage every production resource such as machine tool, assembly robot, AGV, storehouse, material shelf, and so on. The production resources are classified into three devices, which are producer, location, and mover. This paper especially focuses on a role of buffer, and the differences among these devices are analyzed. A unified scheduling formulation is derived from the results of the analysis based on the role of the devices. Scheduling procedures based on dispatching rules are also proposed in order to numerically evaluate job shop type production with finite buffer capacity. The influence of capacity of bottle necked production devices and the buffer on the productivity are discussed.

Key Words: Buffer Capacity, Scheduling, WIP (Work in Process), Bottle Neck

1. 結 言

製品の製造過程を複数の工程に分割した場合、個々の工程の処理に要する時間や、加工装置の使用順序の違いから、加工途中の半製品を一時的に保管する必要が生じる。保管のためには、棚などの生産設備が用いられることが多いが、工場によってはペイントで領域を限定した床に直接置くことも珍しくない。本論文では、このような材料、半製品、および製品の保管の役割を果たすものをバッファ(buffer)と呼び、このバッファの容量に制約がある場合のジョブショップスケジューリング問題を取り扱う。

バッファの容量に制約があるスケジューリング問題に対しては、これまでも幾つかの研究が行われている。たとえば、玉置らは、半製品の種類毎に専用のバッファがある場合について検討を行っている⁽¹⁾⁽²⁾。また、傅らは、半製品を共通に保管することができるバッファに対して検討を行っている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、これらの研究におけるバッファの役割は、実際の生産活動の視点からは特殊な前提条件と考えられる。

本論文は、より一般的な生産活動で用いられるバッファを前提にスケジューリング問題を定式化する。こ

のとき、バッファ、加工装置、および搬送装置の3種類の生産設備の視点から検討を行う。さらに、ディスパッチングルールを用いたスケジューリング手法を提案する。

2. 保管時間に着目したスケジューリング

2-1 用語の説明 本論文では、スケジュールの基本要素である仕事(job)を、製品(product)の立場からとらえた場合には工程(process)と呼び、生産設備(resource)の立場からとらえた場合には作業(operation)と呼ぶことにする。また、バッファが保管の対象とする材料、半製品あるいは製品に対しても特に区別する必要の無い場合は、仕事という語を用いる。

使用する記号の意味は次の通りである。製品あるいは生産設備の情報は、記号に対する添字によって表現する。ただし、それらの情報を示すことに意味がない場合には記載を省略する。ここに示した以外の記述法を用いる場合には、そのつど本文中で説明を行なう。

$j_{\eta,i}^{s,v}$: 生産設備 ζ が v 番目に処理を行う作業。
製品 η を製造するための i 番目の工程。
 $\bar{j}_{\eta,i}^{s,v}$: $j_{\eta,i}^{s,v}$ の保管
 s, f, p : 仕事 j の処理開始時刻, 処理終了時刻
および処理時間
 $\bar{s}, \bar{f}, \bar{p}$: 仕事 j の保管開始時刻, 保管終了時刻
および保管時間

* 原稿受付 2004年5月18日。

*1 正員, 豊橋技術科学大学生産システム工学系(☎441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘)。

*2 豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士課程前期[現:大昭和精機(株)]。

E-mail: hino@tutpse.tut.ac.jp

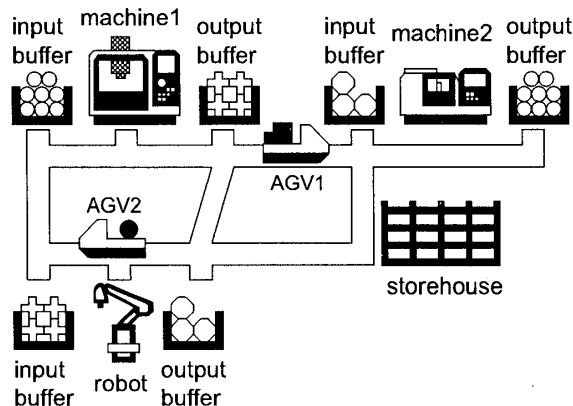


Fig. 1 Production system including buffer

さて、P.Gullander らは生産システムのモデル化のために、生産設備を次の3種類に分類している⁽⁵⁾。

- i) **producer** : 対象となる物の特性に対して、要求される物理的あるいは論理的な変化を与える。
- ii) **location** : 対象のいかなる特性も変えることなく保管のみを行う。
- iii) **mover** : producer と location の間の対象の搬送を行う。

本研究では、これらの3種類に分類した生産設備の視点からスケジューリング問題を分析し、それぞれの生産設備のスケジューリングにおける役割を明確にすることを試みる。この分類に従えば、producer は工作機械やロボットなどの加工装置を意味し、location は本研究で扱うバッファが該当する。また mover は、自動搬送装置 (AGV) やコンベアベルトなどを指す。また仕事をひとつだけ保管する生産設備として、コンテナ (container) という語を用いる。本論文では、バッファを複数のコンテナが集まった生産設備として扱う。すなわち、バッファの容量とは、バッファを構成するコンテナの個数に一致する。生産設備とは、これらの総称である。いいかえると生産システムを構成する生産設備はこの3つのいずれかに分類されると考える。

2.2 対象とする生産システムの基本構造 本研究で取り扱う生産システムを図1に模式的に示す。この図に示すように、それぞれの加工装置には、加工前の材料や半製品を保管するための入力バッファと、加工後の半製品や製品を保管するための出力バッファを考える。特に本研究では、加工装置は対象となる半製品をバッファから受け取る他に、搬送装置から直接受け取ることも考慮に入れる。また、加工後の半製品をバッファに保管することに加え、搬送装置に直接渡すことも考える。このような加工装置あるいは搬送装置

と、バッファの間以外での仕事の受渡しを考慮に入れることにより、バッファの保管容量がゼロの場合、すなわちバッファが存在しない場合についても検討を行う。なお、傳らが取り扱う共通バッファとは、図中に storehouse として模式的に示しているものを指しており、また搬送は考慮していない⁽³⁾⁽⁴⁾。

2.3 直前の作業の処理内容を考慮に入れたスケジューリング 一般的なスケジューリング問題では、ひとつの生産設備は一度にひとつの処理しかできないという条件の他に、次の2つの前提条件が重要である⁽⁶⁾。

- a) 製品製造のための機械の処理順序は既知。
- b) 各工程に要する機械による処理時間は既知。

これらの前提条件のもとで、加工装置 (producer) だけから成る生産システムのスケジューリング問題を取り扱うことができる。しかし、加工装置に加え、搬送装置 (mover) を扱う場合には注意が必要である。搬送装置の場合、搬送対象となる2つの加工装置 (条件 a) と、それらの間の搬送時間 (条件 b) の2つの条件が与えられれば、スケジュールを立案することができる。しかし、仕事を搭載していない搬送装置が仕事を受け取るために、加工装置が設置してある場所に移動するための時間は、搬送時間と同じオーダの時間を要する。そのため、移動を考慮しないで立案したスケジュールは正確ではない。この移動に要する時間は、搬送装置が対象とする搬送作業の直前に、どの加工装置に対する搬送を行うことを計画しているかに依存する。すなわち、移動時間はスケジューリングを行う過程で求められる値になる⁽⁷⁾。

このとき、搬送装置を加工装置と区別して取り扱うのではなく、加工装置を搬送装置の特別な場合と考えた方が便利である。すなわち、加工装置にも、搬送装置の移動に対応する時間がある。しかし、一般には加工装置に対するこの時間は無視できるほど小さいか、直前の作業に影響を受けず一定と考えて、仕事の処理時間 (条件 b) に含めることができると仮定する。

いいかえれば、この時間が生産設備の処理順序によって無視できないほど変化する場合、加工装置のスケジュールを立てる際にも、搬送装置と同じ処理を行う必要がある。塗装作業を例にあげれば、同色の塗装を続けて行う場合と異なる色に切替える場合では、個々の作業の直前に行わなければならない処理内容が大きく異なる。この場合、直前の作業の影響を考慮に入れて、スケジュールを立てなくてはならない。

2.4 直後の工程の処理開始時刻の影響を考慮に入れたスケジューリング バッファ (location) の役割は、

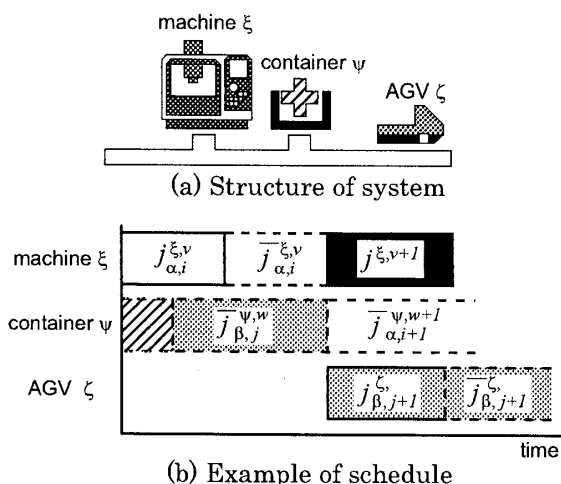


Fig. 2 Gantt chart focusing on reservation of job

加工前の材料, 加工中の半製品, そして加工後の製品の一時的な保管にある. この保管時間は, バッファが加工装置あるいは搬送装置から仕事を受け取り, 次の加工装置あるいは搬送装置に渡すまでの時間と考える. この場合, スケジューリング問題を解く前に保管時間を与えることはできないため, 前提条件 (条件 b) を満たさないことになる.

図 2(a) 生産システム内の生産設備の一部を抜粋して, 模式的に示す. ここでは, 加工装置 *machine* ξ が処理した仕事をコンテナ *container* ψ に保管し, 次に搬送車 *AGV* ζ により, 別の加工装置に搬送する場合を例にあげる. 図 2(b) から理解できるように, コンテナによる仕事 $j_{\beta,j}^{\psi,w}$ の保管時間は, 図 2(a) には示していない他の設備から仕事を受け取り, *AGV* ζ に渡すまでの時間である. また, バッファが保管できる仕事の数に制限がある場合, 加工装置や搬送装置は加工や搬送の処理を終えてもすぐに次の処理を開始することができない. たとえば, 図中に示した加工装置 *machine* ξ によって処理される仕事 $j_{\alpha,i+1}^{\xi,v}$ は, 直前の仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,v}$ の処理が終了してもすぐに作業を開始することはできない. コンテナ *container* ψ によって, 仕事 $j_{\alpha,i+1}^{\psi,w}$ の保管が行われてから, 加工装置 *machine* ξ による $j_{\alpha,i+1}^{\xi,v}$ の処理を始めることができる. このとき, 加工装置 *machine* ξ は, 図 2(b) において $j_{\alpha,i}^{\xi,v}$ で示されるように, 処理を終えた仕事を加工装置に取り付けたままになる. この状態は, バッファによる仕事の保管に対応する. いうまでもなく, この状態は搬送装置による仕事についても同じように生じる.

前節において, スケジューリングを行う際には, 加工装置と搬送装置とを区別せずに取り扱うることができることを述べている. 同様にバッファについても, 加

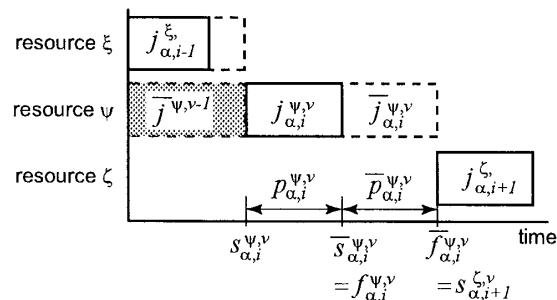


Fig. 3 Scheduling time decided among three resources

工装置や搬送装置と区別せずに取り扱うことができる. いかえれば加工装置や搬送装置についても, バッファにおける保管を考える必要がある. バッファに議論を戻せば, バッファは加工や搬送などの処理を行わない, すなわち仕事に対する処理時間がゼロの生産設備と考えることができる.

2.5 前処理と保管を考慮に入れた仕事の処理時刻
直前の作業の処理内容と直後の工程の処理開始時刻の影響を考慮に入れ, 生産設備に対する仕事の処理開始時刻, 保管時間, および処理終了時刻の定式化を行う. ここでの定式化は, 図 3 に示すような 3 台の生産設備の関係に基づいて行う.

まず, 直前の作業の保管終了時刻と, 別の生産設備による直前の工程の処理終了時刻のうち遅い方の時刻を求める. この時刻に, 直前に行うことにしている作業の内容と対象とする作業の内容によって求められる時間を加え, 対象とする作業の処理開始時刻とする. すなわち,

$$s_{\alpha,i}^{\psi,v} = \max(\bar{f}^{\psi,v-1}, f_{\alpha,i-1}^{\xi}) + F(j^{\psi,v-1}, j_{\alpha,i}^{\psi,v}). \quad (1)$$

ここで, $\max()$ は, 括弧内の時刻のうち, 大きい方の値を返す関数である. また $F()$ は, 2つの作業の処理内容によって求められる時間を返す関数であり, 生産設備毎に定義する必要がある. 一例として, 搬送装置に対しては次式で表される関数 $F()$ を与えることができる⁽⁷⁾.

$$F(j^{\psi,v-1}, j_{\alpha,i}^{\psi,v}) = l_{\nu,\mu}/v_{\psi}. \quad (2)$$

ここでは, $j^{\psi,v-1}$ は, 搬送装置 ψ に割り当てられた, ある生産設備から生産設備 ν への搬送を表す搬送であり, また $j_{\alpha,i}^{\psi,v}$ は生産設備 μ から別の生産設備への搬送と仮定する. $l_{\nu,\mu}$ は, 生産設備 ν から μ への移動距離であり, また v_{ψ} は, 搬送装置 ψ の移動速度である.

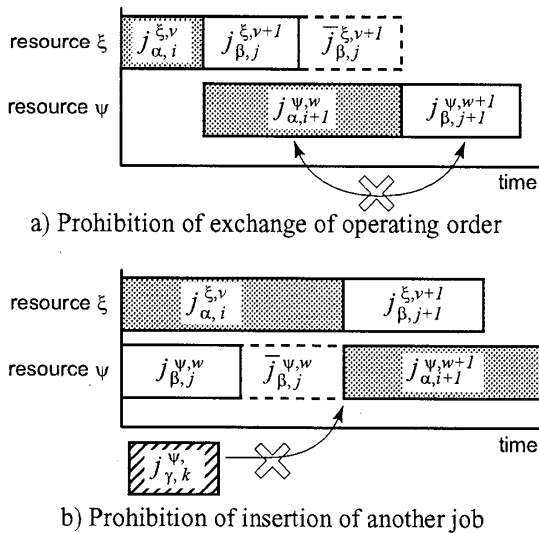


Fig. 4 Examples of procedure that causes infeasible schedule

仕事の処理終了時刻は、前提条件で与えられる処理時間の値を用いて次式で与えられる。

$$f_{\alpha,i}^{\psi,v} = s_{\alpha,i}^{\psi,v} + p_{\alpha,i}^{\psi,v}. \quad (3)$$

一方、仕事の保管開始時刻は、その作業の処理終了時刻に等しい。

$$\bar{s}_{\alpha,i}^{\psi,v} = f_{\alpha,i}^{\psi,v}. \quad (4)$$

仕事の保管終了時刻は、直後の工程を処理する生産設備による処理開始時刻に等しい。

$$\bar{f}_{\alpha,i}^{\psi,v} = s_{\alpha,i+1}^{\psi,v}. \quad (5)$$

最後に、仕事の保管時間は次式で与えられる。

$$\bar{p}_{\alpha,i}^{\psi,v} = \bar{f}_{\alpha,i}^{\psi,v} - \bar{s}_{\alpha,i}^{\psi,v}. \quad (6)$$

2.6 実行不可能なスケジュール 生産設備による作業の保管を考慮に入れた場合、作業の処理順序によっては作業の保管終了時刻を決めることができないことがあり得る。傅らは、バッファが存在しない場合あるいはバッファの容量に制約がある場合について、デッドロックと名付けた状況が生じることを指摘している⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、本論文で明らかにしているように、加工装置や搬送装置もバッファと同じように保管という状態があり得るため、視点を変えた議論が必要と考えられる。

図4(a)は、2台の生産設備の使用順序が等しい2つの製品に対するスケジュールの一例を示している。このとき、2台のうち一方だけが、処理順序を変えることはできない。たとえば、生産設備ξが図4(a)に示

す順序で作業を行うとき、生産設備ψが、作業 $j_{\beta,j+1}^{\psi}$ を w 番目に、また作業 $j_{\alpha,i+1}^{\psi}$ を $w+1$ 番目に処理することはできない。すなわち、生産設備ξが先に処理する仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi}$ を生産設備ψが受け取ってくれた後でないと、作業 $j_{\beta,j}^{\xi}$ の処理を始めることができない。それにもかかわらず、生産設備ψが、仕事 $j_{\beta,j+1}^{\psi}$ を仕事 $j_{\alpha,i+1}^{\psi}$ より先に受け取ろうと計画することは不可能である。このことは、生産設備ψがバッファでなく、加工装置や搬送装置の場合にも成り立つ。

図4(b)は、2台の生産設備のそれぞれが行っていた仕事を互いに交換する場合のスケジュールの一例を示している。たとえば、搬送装置が運んできた半製品と、加工装置が加工を終えた半製品とを互いに載せ変えるような状況が考えられる。傅らは、このような状況についても実行不可能と定義している⁽³⁾が、本論文ではこれを許す。しかし、図4(b)に示すように、仕事を交換する代わりに他の仕事を行うことはできない。これは、図4(a)に示す場合と同じ理由による。

3. 保管を考慮に入れたディスパッチングルール

生産設備による処理を終えた後の保管を考慮に入れた場合、割り付け順序によっては、実行不可能なスケジュールが立案される可能性がある。そのため、ディスパッチングルールを用いて、生産設備に割り付ける仕事を選ぶ場合、対象となる仕事にはあらかじめ、実行可能性を保証しておく必要がある。

原則として保管終了時刻の未定の仕事の直後には新しい仕事を割り付けることができない。しかし、対象とする仕事に対して、割り付けが可能な生産設備が1台もないときには、仕事を仮に割り付ける。ただし、1台の生産設備に2つ以上の仕事を仮に割り当てることはできない。一方、図4(b)に示したように、互いの次工程が仮に割り当てられる状態ならば、それらの仕事については実行可能性を保証することができる。

これらのことに基づいて、実行可能なスケジュールを保証するための仕事を選ぶ手順を提案する。

実行可能性を保証した仕事の選択

初期化 まず、仕事 j からなる集合 A 、 B および C を準備する。集合 A は、製品製造のための第1工程があるいは、前工程がすでに生産設備に割り付けられている仕事の集合とする。一方、集合 B は、実行可能性を保証した仕事の集合とし、初期状態では、 $B = \phi$ とする。さらに集合 C は、その集合に含まれる仕事を割り付けることによって、実行可能性が損なわれる仕事の集合とし、初期状態では、 $C = \phi$ とする。

step 1 集合 A から、仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ を選ぶ。ここで、右肩の添字 $*$ は、処理順序が未定であることを意味する。その仕事を処理する生産設備 ξ にすでに割り付けられた仕事のうち、最後の仕事を $j_{\beta,j}^{\xi,v}$ とする。 $j_{\beta,j}^{\xi,v}$ の保管終了時刻 $f_{\beta,j}^{\xi,v}$ が定められていたら、集合 A から仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ を取り出し、集合 B に含める。この操作を集合 A に含まれる全仕事について行う。

step 2 処理が可能な仕事のうち、生産設備に割り付けが可能な仕事が見つければ、次に述べるスケジューリング手順に従い、仕事を生産設備に割り当てる。対象とする設備がすべて、最後に予定している仕事の保管終了時刻が定まっていないために、割り当て可能な仕事が見つからない場合がある。この場合は Step 3 以降の手続きを行い、実行可能性を保証した仕事を選び出す。

すなわち、集合 $B \neq \phi$ ならば処理終了。集合 $B = \phi$ ならば Step 3 の手続きを行う。

Step 3 集合 A から仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ を取り出す。この仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ を j として記録し、Step 4 の手続きを行う。

Step 4 ξ が最後に処理する仕事 $j_{\beta,j}^{\xi,v}$ が、集合 B に含まれている場合、実行不可能なスケジュールになる。すなわち、 $j_{\beta,j}^{\xi,v} \in B$ ならば、Step 5 へ、 $j_{\beta,j}^{\xi,v} \notin B$ ならば、Step 6 の手続きを行う。

step 5 集合 A および B を Step 1 による手続きが終了した状態に戻す。次に、仕事 j を集合 A から取り出し、集合 C に加える。再度 Step 3 の手続きを行う。

step 6 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ を生産設備 ξ の $v+1$ 番目の作業として集合 B に追加する。

このとき、仕事を割り付けた生産設備 ξ の v 番目の仕事 $j_{\beta,j}^{\xi,v}$ の次工程 $j_{\beta,j+1}^{\psi,w}$ が B に含まれている場合、実行可能なスケジュールになる。すなわち、 $j_{\beta,j+1}^{\psi,w} \notin B$ ならば、Step 7 へ手続きを移す。 $j_{\beta,j+1}^{\psi,w} \in B$ ならば、手続き終了。次に述べるスケジューリング手順に従い、生産設備に仕事を割り付ける。

step 7 仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ を生産設備 ξ による $v+1$ 番目の作業として仮に割り付け、処理開始時刻 $s_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ 、処理終了時刻 $f_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ 、および保管開始時刻 $s_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ を仮に定める。そのとき、 ξ が最後に処理する仕事 $j_{\beta,j}^{\xi,v}$ の保管終了時刻 $f_{\beta,j}^{\xi,v}$ をその仕事の保管開始時刻 $s_{\beta,j}^{\xi,v}$ に等しいと仮定して時刻を求める。

割り当てた仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ の次工程 $j_{\alpha,i+1}^{\xi,*}$ があれば、集合 A に追加する。

さらに、仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ を割り当てた生産設備に着目し、直前の作業 $j_{\beta,j}^{\xi,v}$ を調べる。この仕事の次工程 $j_{\beta,j+1}^{\psi,*}$ を次に仮に割り当てる仕事として、 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ と読みかえ、手続きを Step 4 に戻す。

実行可能性を保証した仕事の集合 B の中から、一般的なディスパッチングルールを用いて仕事を選び、生産設備による保管を考慮に入れたスケジュールを立案することができる。具体的には次の手続きに従う。

スケジューリング手順

step 8 集合 B に含まれる仕事に対して、ディスパッチングルールを適用し、仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ を1つ選ぶ。

step 9 仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,*}$ の処理開始時刻 $s_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ 、処理終了時刻 $f_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ 、保管開始時刻 $s_{\alpha,i}^{\xi,v+1}$ をそれぞれ式 (1) (3) および (4) に従って計算する。

また、仕事 $j_{\alpha,i}^{\xi,v}$ の前工程 $j_{\alpha,i-1}^{\psi,w}$ が存在する場合には、その仕事の保管終了時刻 $f_{\alpha,i-1}^{\psi,w}$ を式 (5) により求める。

step 10 全ての仕事を割り付けたらスケジューリングを終了。未割り付けの仕事が残っている場合には、手続きを Step 1 に移し、実行可能性を保証する仕事の集合 B の情報を更新し、スケジュールを立案する。

Table 1 Job sequence

| | |
|------------|-----------------------------------|
| product 1: | resource 1 (10) → resource 3 (10) |
| product 2: | resource 2 (15) → resource 3 (20) |
| product 3: | resource 3 (20) → resource 2 (10) |

number in () shows processing time

実行可能性を保証した仕事の集合 B の作成方法について例を上げて説明する。例題として表 1 に示すような 3 製品 3 生産設備によるジョブショップスケジューリング問題を取り上げる。各製品は 3 台の生産設備のうち 2 台を使用する 2 工程の処理を必要とする。表中 () 内の数字は、それぞれの生産設備での処理時間を表している。

まず最初に集合 A には、それぞれの製品の第 1 工程が選ばれる。すなわち、 $A = \{j_{1,1}^{1,*}, j_{2,1}^{2,*}, j_{3,1}^{3,*}\}$ となる。これらの仕事を対象としている生産設備は、この時点ではまだ仕事が 1 つも割り当てられない状態であるため、 $B = A$ である。ここでは、例として最も早く処理を終えることができる仕事として $j_{1,1}^{1,*}$ を選ぶ。次に集合 B を作成するときには、 $j_{1,1}^{1,*}$ の次工程である $j_{1,2}^{3,*}$ を A に追加し、集合 $A = \{j_{1,2}^{3,*}, j_{2,1}^{2,*}, j_{3,1}^{3,*}\}$ として処理を続ける。

図 5(a) は、Step 1 および Step 2 の手続きにより 3 つの製品の第 1 工程が生産設備に割り付けられた状

態を示している。このとき集合 A に含まれる仕事が対象とする生産設備が、最後に処理する仕事の保管終了時刻は定まっていないため、集合 $B = \phi$ となる。したがって、Step 3 から始まる手続きによって、集合 B を求める。

まず $j_{1,2}^{3,*}$ を候補として選び、この仕事を $\check{j} = j_{1,2}^{3,*}$ とし記録するとともに集合 B に加える。この状態を図 5(b) に示す。次に、Step 4 および Step 6 の手続きを経て Step 7 において、この仕事の直前に resource 3 に割り付けられている仕事 $j_{3,1}^{3,1}$ の次工程 $j_{3,2}^{2,*}$ を選ぶ。この仕事を resource 2 に割り付け、同様の手続きにより、仕事 $j_{2,2}^{2,*}$ を選ぶ。

この時点で、 $j_{2,2}^{2,*}$ が割り付けられる生産設備 resource 3 が最後に処理する仕事は $j_{1,2}^{3,2}$ であり、この仕事は集合 B に含まれている。したがって、Step 4 により、これらの仕事を用いてスケジュールを作成した場合、実行不可能なスケジュールになると判断し、続く Step 5 の手続きにより仕事 $\check{j} = j_{1,2}^{3,*}$ を集合 C に加える。このときの状態を図 5(d) に示す。

なお、仕事 $\check{j} = j_{1,2}^{3,*}$ を仮に生産設備 resource 3 に割り付けた状態を、図 5(c) に示す。この状態は、図 4(b) で禁止した仕事を互いに交換するスケジュールに別の仕事を割り込ませる状態になっている。

次に図 5(e) は、仕事 \check{j} として、 $j_{3,2}^{2,*}$ を選び、手続きを行った結果を示している。このとき得られる集合 B は、Step 6 で示した実行可能なスケジュールを保証する仕事の集合になっている。

この後、仕事 $j_{1,2}^{3,*}$ を同様の手続きに従って生産設備に割り付け、最終的なスケジュールが得られる。

4. 数値計算例

生産設備の保管を考慮に入れたスケジューリングの有効性を確認するため、数値計算による検討を行う。ここでは簡単のため、搬送装置による仕事の搬送は考慮に入れない。その際、ある加工装置の出力バッファに保管された仕事が、次工程の加工装置の入力バッファに保管されるような、連続して保管が行われることを避ける。ここでは、図 6 に示すように、各加工装置は、それぞれ専用の入力バッファを持ち、出力バッファを設けない。したがって、加工装置による処理が終了した半製品は、次工程の加工装置に直接渡すか、あるいは次工程の加工装置の入力バッファに保管する。冒頭にも述べたように、バッファは、仕事をひとつだけ保管することができるコンテナが複数個集まった生産設備とし、それぞれの加工装置のバッファは、異なる個数のコンテナから構成されると考える。すなわち、各バッファの容量とは、そのバッファを構成するコンテ

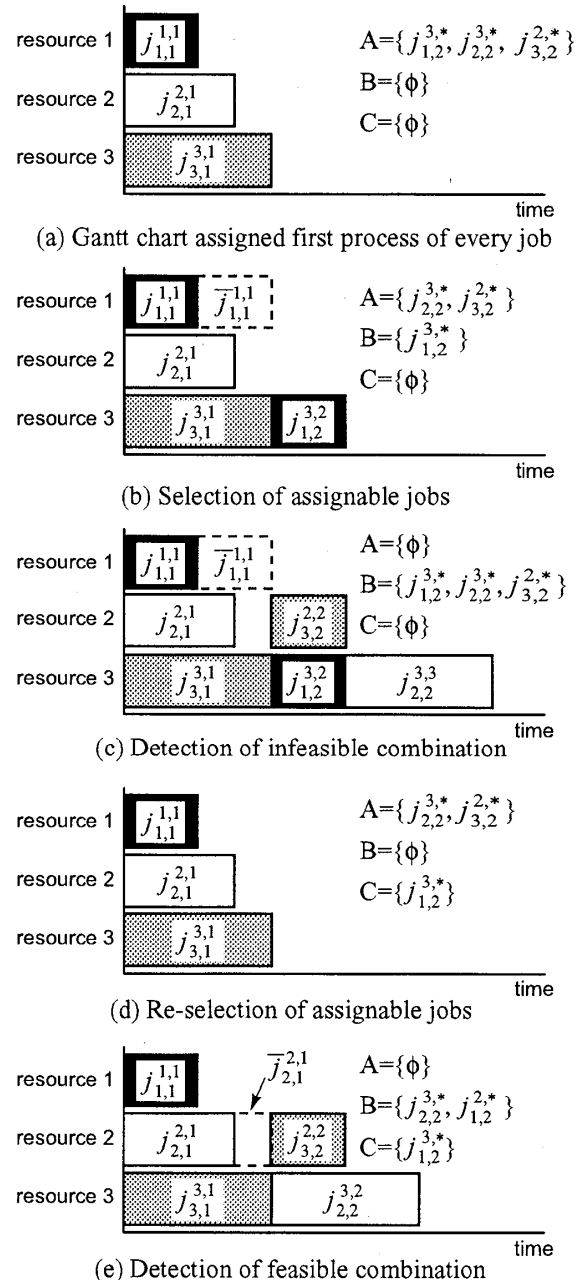


Fig. 5 Example of procedure according to proposed algorithm

ナの個数とする。また、製品の最後の工程を終えた加工装置は、完成した製品をバッファの一種である倉庫 (storehouse) に納めるものとする。この倉庫の容量は、少なくとも問題として扱う製品の数以上あることを前提条件とする。

スケジュールを立案する場合に、加工装置による処理を終えた仕事を、次工程の処理を受け持つ加工装置に直接渡すか、あるいはその加工装置の入力バッファに渡すかについては、結果としてその仕事をより良く処理できる方を選択する。ここでは、次工程の加工装

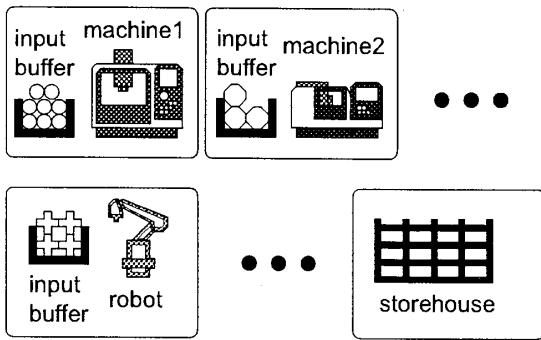


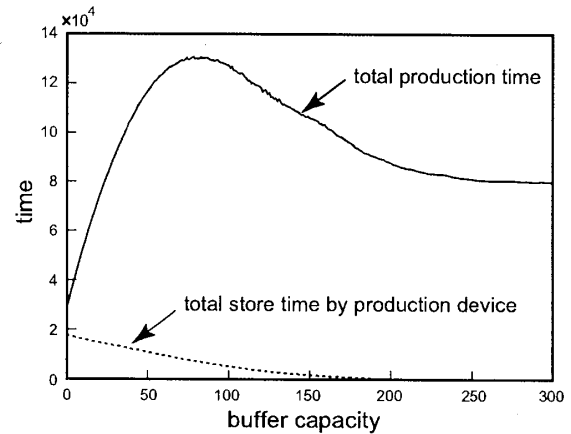
Fig. 6 An example of production system

置およびバッファについてスケジューリングの際に用いるディスパッチングルールによる評価を行い、最も良い生産設備を選択する。このとき、バッファが複数のコンテナから構成される場合は、すべてのコンテナについて評価を行う。ディスパッチングルールとしては、最も早く処理を終えることができる仕事を優先的に処理する、いわゆる“最早処理完了仕事優先規則”を採用する。

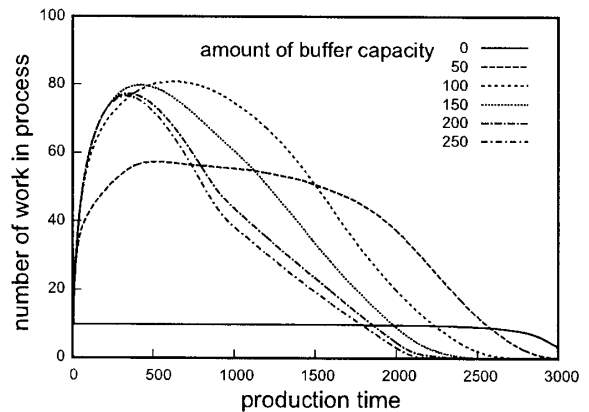
対象とする生産形態として、加工装置 10 台からなるジョブショップ型の生産を取り扱う。個々の製品の製造のためには 10 台の加工装置を一度だけ必ず使用する問題を乱数を用いて作成する。ここでは、製品数を 100 とした問題を一組とし、1000 組の問題に対する数値計算結果の平均値を評価の対象とする。また、10 台の加工装置のうち、一台の処理能力を他の加工装置に比べ低く設定しておく。具体的には、他の加工装置に与える仕事の平均処理時間に比べ、処理能力の低い加工装置に与える仕事の平均処理時間が 2 倍になるように問題を設定する。

また、個々の加工装置のバッファの容量、すなわちコンテナの個数は数値計算の過程で変化させ、バッファによる保管の役割を検討する。まず、全ての加工装置はバッファを持たない条件から計算を始める。次に、各加工装置による個々の仕事の保管時間を調べる。2 章での議論から明らかのように、生産設備の保管と呼ぶ状態は次工程の生産設備が仕事を受け取ることができないために生じる。そのため、この加工装置の仕事の保管時間を減らすためには、次工程の加工装置のバッファのコンテナ数を増やせば良い。

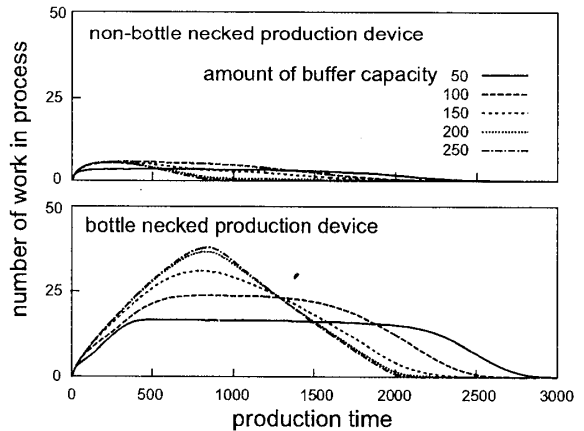
図 7 に計算結果を示す。図 7(a) から、バッファの容量を増やすことにより、加工装置による仕事の保管時間が短くなることが理解できる。また、製品倉庫に納められるまでの時間の総和である総製品加工時間は、一時的に増加したのち、加工装置による仕事の保管時間がゼロになった時点で変化しないことが確認で



a) Production time and store time



b) Transition of number of work in process



c) Transition of number of work in process on bottle necked and non-bottle necked production device

Fig. 7 Examples of simulation results

きる。図 7(b) に、各加工装置およびバッファに保管される半製品の個数の変化を、処理開始からの時間に対して示す。バッファを増やすことにより、全製品が処理を終えるまでの時間が短くなることを確認できる。また、バッファの増加に伴い、加工中に未完成の製品数が増えることも確認できる。これは、バッファを増やすことにより、個々の加工装置が処理を終えた半製品をバッファに保管できるようになるだけでなく、次

工程を受け持つ機械が、加工装置あるいはバッファに保管中の仕事の中からより早く終わることができる仕事を選択するため、逆に一部の製品の加工待ち時間が延びてしまうことを表している。このことは、図7(a)のバッファ容量が100のときに総製品滞留時間が最も大きくなることに対応している。

図7(c)に、総バッファ容量と加工中の半製品の個数の関係を、処理能力の高い加工装置と低い加工装置についてそれぞれ示す。処理能力の高い加工装置のバッファに比べて、処理能力の低い加工装置のバッファに多くの半製品が集まることを確認できる。しかし、バッファの容量が少ない場合には、加工装置の処理能力に関わらず、それぞれのバッファに保管される半製品の個数が一定量で推移することが分かる。これに対してバッファ容量を増やすと、処理能力の高い加工装置のバッファに保管される製品の個数は、加工直後にピークが生じ、処理能力が低い装置にも、すこし遅れた時刻にピークが生じる。これは、バッファの容量が少なく、保管することができる仕事の個数に制約がある場合には、処理能力に余裕があっても、次工程の加工装置が仕事を受け取ってくれなければ、次の仕事の処理を始めることができないためである。

以上のことから、バッファの容量を増やしても、全製品の加工を終えるまでの時間は必ずしも短縮できないことが理解できる。むしろバッファの量を制限し、仕事を引き取ってもらえない加工装置は、無理に新しい処理を始めない方が、加工中の半製品の個数を一定に保つこととなり、状況によっては好ましいと考えられる。このことは、トヨタ式生産システム⁽⁸⁾で行われる次工程からの指示に従って前工程が生産を行う状況に対応している。

一方、本論文で明らかにしているように、加工装置とバッファはスケジューリングの立場からは、同じ生産設備と考えることができる。ここでは、加工装置による仕事の保管時間を少なくするために、次工程の生産設備のバッファの容量を増やしている。本論文の場合、バッファの次工程は、そのバッファを専用を用いる加工装置にほかならない。そのため、バッファによって保管される製品の個数を少なくするための解決案は、バッファに付随する加工装置の処理能力を高める以外にない。これは、制約の理論(TOC: Theory of Constrains)⁽⁹⁾が指摘する通りである。

5. 結 言

一般に区別して取り扱われている生産設備である加工装置、搬送装置およびバッファについて、スケジュー

リングの立場から統一的な取り扱いを試みた。本論文の結論は次のようにまとめることができる。

- 1) 仕事の保管時間、および処理準備時間を考慮に入れることにより、加工装置、搬送装置およびバッファに対するスケジュールの立案に必要な処理時刻を統一的に取り扱うことが可能であることを示した。
- 2) 保管を考慮に入れてスケジュールを立案する際、実行可能性を保証する仕事の選択手順を提案した。
- 3) バッファの容量を調整しながら、スケジューリング問題を数値計算により求め、生産活動におけるバッファおよび加工装置の役割について議論した。一例として、バッファ容量を制限することで、仕掛在庫を一定に保つように生産を行うことが可能であることを示した。

文 献

- (1) 玉置久ほか、バッファ容量を考慮したスケジューリング問題のモデル化手法、計測自動制御学会論文誌, Vol.31, No.7(1995), pp.933-940
- (2) 玉置久ほか、バッファ容量を考慮したスケジューリング問題の解法、計測自動制御学会論文誌, Vol.31, No.8(1995), pp.1193-1201
- (3) 傅貴, 趙勇, 三宮信夫, バッファ無しジョブショップスケジューリング問題に対する遺伝アルゴリズムの適用, システム制御情報学会論文誌, Vol.16, No.5(2003), pp.234-241
- (4) 傅貴ほか, 共通バッファ制限付きジョブショップスケジューリング問題の解法, システム制御情報学会論文誌, Vol.17, No.3(2004), pp.113-121
- (5) P.Gullander, et.al, Generic Resource Models and a Message-Passing Structure in an FMS Controller, IEEE International Conference on Robotics and Automation (1995), pp.1447-1454
- (6) 関根智明監訳, スケジューリングの理論, 日刊工業新聞社 (1971)
- (7) 樋野励, 森脇俊道, スケジューリングに基づく生産設備の再配置(第1報)(設備配置に対する評価値としてのスケジュールの導入), 精密工学会誌, Vol.69, No.5(2003), pp.655-659
- (8) ジャストインタイム生産システム研究会編, ジャストインタイム生産システム, 日刊工業新聞社 (2004)
- (9) 小林英三, 制約理論(TOC)についてのノート, ラッセル社 (2000)