

# ジョブの分岐を伴う2工程並列機械フローショップスケジューリングへの分割アプローチ

今泉 淳, 山越 康裕, 村上 元一, 森戸 晋

## 1. はじめに

組合せ最適化として扱われるフローショップスケジューリング問題やジョブショップスケジューリング問題は、ジョブ群の技術的加工順序や加工時間が与えられたときに、各機械上での作業の順序づけを行う単一の評価尺度の問題である。しかしながら、現実のショップがこれら理論モデルのような、単純かつ理想的な条件を満たすことは稀である。

本稿で扱う装置産業の生産システムも基本的にはフローショップであるが、工程間の重複生産が許され、ジョブが下流工程で異なるジョブに分岐するという特徴を有する上に、各工程が並列な代替機械からなるために各機械での各ジョブの加工量を決定した上で順序づけを行う必要がある、複数の評価尺度を有する問題である。また、問題の規模(変数や制約式の数)から考えても、直接的に解くことは難しい。

本研究では、装置産業の具体的事例を念頭に置いて、ジョブが分岐する2工程並列機械フローショップの複数尺度を持つスケジューリング問題を取り上げ、問題を複数の部分問題に分割して解くアプローチを検討する。具体的には、問題を階層的に分割し、既存の技法や知見を利用できるような部分問題に帰着させ、数理計画による機械割り当てを行った後、反復的手順によって順序づけを行なう方法を示し、実験的に評価する。

いまいずみ じゅん 東洋大学

〒351-8510 埼玉県朝霞市岡2-11-10

やまこし やすひろ NTT

〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-6

むらかみ もとかず 東邦ガス情報システム(株)

〒456-8511 愛知県名古屋市熱田区桜田町19-18

もりと すすむ 早稲田大学

〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1

受付96.12.26 採択98.7.2

## 2. 問題

### 2.1 システムの概要

- a) 2工程並列機械フローショップ 第1工程には能力の異なる機械が、第2工程には能力の等しい機械が、それぞれ並列に存在する。
- b) ジョブの特徴 全ジョブは第1工程で加工を受け、一部ジョブは第1工程のみで加工が終了する(図1)。
- c) ジョブの分岐 第2工程に進むジョブは、一般に複数のジョブに分岐し、分岐前の第1工程のジョブを第1工程ジョブ、分岐後の第2工程のジョブを第2工程ジョブと呼ぶ。一つの第1工程ジョブに対応して第2工程ジョブ群が一意に定まり、異なる第1工程ジョブを共有する第2工程ジョブは存在しない(図2)。
- d) 生産要求量 計画期間(通常1ヵ月=31日間)に対する第2工程ジョブ、および第1工程で加工を終了するジョブに対する要求量が与えられる。これらから第1工程ジョブの要求量が定まる。
- e) ジョブの行き先候補機械 第1工程ジョブ、第2工程ジョブとも、加工を受けられる候補機械が定められている。そのうちのどの機械でどれだけの量を加工するかは、自由に決められる。加工を複数台の機械に振り分けたり、ある機械上での加工を途中で中断することも許される。
- f) 中間在庫 第1工程と第2工程の間には第1工程ジョブ毎に専用の中間在庫置場があり、一定量以上の在庫の保有は望ましくない(図3)。
- g) 上下工程の重複生産 第1工程の加工と第2工程の加工は重複してよい。すなわち、第1工程ジョブの加工が完全に終わっていても、終了した「部分」があれば、第2工程ジョブの加工を開始できる(図3)。
- h) 段取り 第1工程では第1工程ジョブ毎に、第2

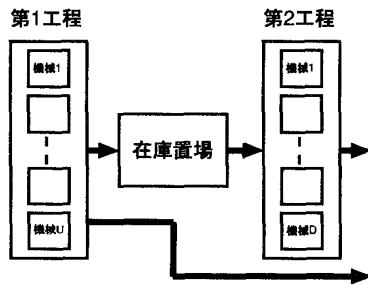


図 1 システムの概要

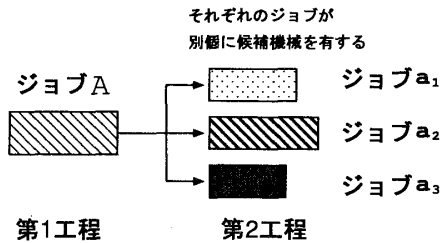


図 2 ジョブの分岐

工程では第2工程ジョブ毎に工具を必要とし、相前後するジョブの間で使用する工具が異なる場合には段取りを必要とする。

a) と関連して、第1工程の機械はそれぞれ同一種類の複数の「装置」から構成され、第1工程にはこの装置の装着台数が異なる機械が存在する。特定の台数が装着された機械(標準機械)を基準にすると、各機械の能力は装置の装着台数に比例して定まる。

## 2.2 評価尺度

所与の生産要求に対する計画期間内の日単位の計画の立案を行い、以下の点から評価をする。

- i) **需要の満足度** 各ジョブの要求量に対する計画期間内(図3)における実際の生産量の割合(%)のジョブに関する平均。100%に近いことが望ましい。なお、上位の生産計画から与えられる要求量は、計画期間内の生産能力に対して厳しく与えられるので、要求を100%満足するのは一般には困難である。
- ii) **段取り回数** 第1、第2両工程で行なった段取り回数。小さいことが望ましい。
- iii) **中間在庫量** 所与の上限(第1工程の各ジョブの標準機械における生産量3日分)を超えた在庫量(以下**超過在庫量**)。各ジョブ毎の毎日の超過在庫

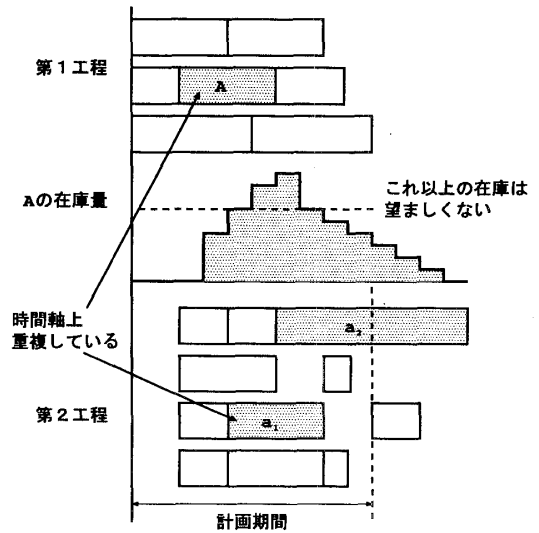


図 3 中間在庫と重複生産

量が小さいことが望ましい。

## 2.3 過去の研究と本研究の特徴

本研究が扱う問題の特徴に関して、既存のモデルとの関連を説明する。

**並列機械フローショップ** 一般にハイブリッドフローショップ [1] と呼ばれ、様々なモデルがある。

**段取り** ジョブの順序依存の段取り時間を伴うものが典型例で、1機械総所要時間最小化の場合は巡回セールスマン問題に帰着し、これ以外にもモデルは多数ある。

**複数の評価尺度** 1機械問題に集中し、フローショップの研究は少ない。さらに、在庫量や段取り回数を評価尺度に含む研究は無い。

**重複生産** ロットを更に小さく分割し、工程間の重複生産を許すことによって終了時刻関連尺度の改善を企図する lot streaming [4] と関連するが、扱いが異なる。

**ジョブの分岐** 第1工程のジョブの完了を待って第2工程が開始されるのであればジョブが分岐しても問題を生じないが、重複生産が許されたときに第2工程ジョブ同士の競合は問題を生じる。このような状況を扱った研究は存在しない。

本研究は、上記5つの特徴を含む実在のシステムをモデル化した問題を扱う。なお、これらすべての要因を同時に取り込んだ実際問題のモデルは筆者の知る

限り存在しない。一方、本問題の規模は、問題全体を一つの問題に定式化して解くには大きすぎる。そこで「問題の分割」を考える。

### 3. 問題の分割によるアプローチとそのバリエーション

#### 3.1 分割の視点

問題の分割では、分割された各問題（部分問題）の決定項目と評価尺度の組み合わせ方が大きなポイントとなる。

本問題の決定項目は、

- どの機械でどれだけの量を加工するか
- どのような順序で加工するか
- 第1工程・第2工程のどちらに関してか

に大別できる。第1工程から第2工程にものが流れるため、決定項目間に依存関係があると見るのが自然とはいえ、独立と見なす考え方もあり得る。

一方、「解法の都合」と「評価尺度の精度に対する要請」は必ずしも一致しないので、そのバランスを考慮することも重要である。

以上の視点を踏まえた上で、評価尺度の精度の劣化が少ない分割や決定項目の固定方法、部分問題間の情報の授受を考える。

#### 3.2 問題の分割アプローチとその特徴

##### (a) 工程毎に分割する

「どの機械で、どれだけの量」という決定と順序づけを同時に、ただし各工程ごとに行なう。在庫切れと過剰在庫への対処は、まず第1工程の問題を解きその情報をもとに第2工程を解く、あるいは交互反復的に各工程の問題を解く、などが考えられる(図4(a))。

**特徴** 各工程の問題は、段取りを減らすスケジューリング問題(例えば、Bruvold and Evans [2]のような整数計画問題)となるが、依然として規模が大きい<sup>1</sup>。

<sup>1</sup>Bruvold and Evans [2]の定式化の場合、少なくとも31日× $\sum_i$ (ジョブ*i*を加工可能な機械候補台数)個の0-1変数が必要で、段取りなどの条件を考えると更に変数が増え、本問題のジョブ数を考えると、解くのは極めて困難である。

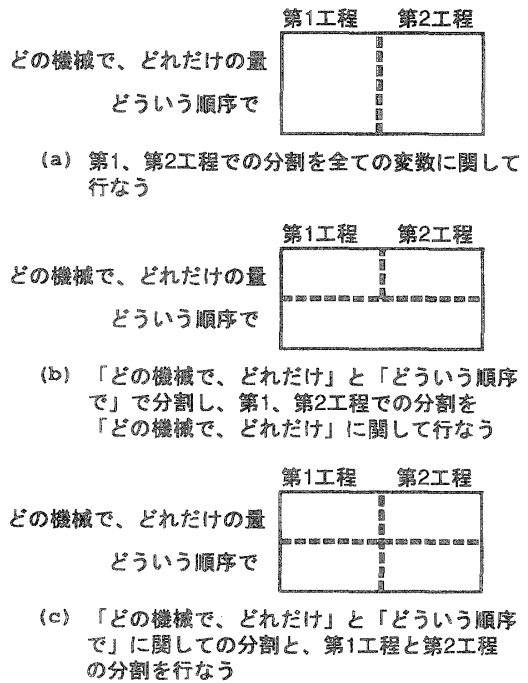


図4 問題の分割に関する代替案

(b)「どの機械で、どれだけの量」と「どのような順序で」を分割し、「どの機械で、どれだけの量」に関してさらに第1工程と第2工程を分割する

第1工程と第2工程で独立に「どの機械で、どれだけの量」を決定する。順序づけは、ものが第1工程から第2工程に流れることに注意しながら、第1工程と第2工程を同時に扱う(図4(b))。

**特徴** 各ジョブの候補機械での加工量が決れば、順序づけ問題とみなせる。しかし、依然として多目的問題であり、列挙法や近傍探索法の適用に工夫を要する。

(c)「どの機械で、どれだけの量」と「どのような順序で」の分割を第1、第2工程で施し、さらに第1、第2工程の変数の分割を施す

第1工程と第2工程でそれぞれ独立に「どの機械で、どれだけの量」を決定し、その結果を用いて第1工程で順序づけを行ない、引き続き第2工程で順序づけを行なう。これを反復しても良い(図4(c))。

**特徴** 問題を細分化するため、それぞれの問題の規模は縮小するが、分割の度合いが高いことから、各問題

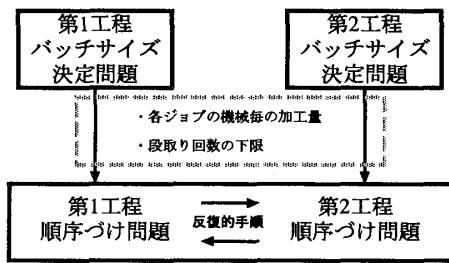


図 5 本研究が採るアプローチ

間での適切な情報の授受が必要となる。

### 3.3 本研究が採用したアプローチ

本研究では、前節のアプローチの中の (c) を採用する。具体的には

- 第1工程と第2工程が独立であるとの仮定の下で、各ジョブの各候補機械における仮の加工量を決定する機械割り当て・バッチサイズ決定問題 (以下、原則としてバッチサイズ決定問題と略記)
- 仮の加工量に基づき、第1工程に対する手順と第2工程に対する手順を反復する順序づけ問題

に分解し階層化する (図 5)。

問題の分割に伴い、各評価尺度をどの部分問題で扱うかを定める必要がある。以下では、基本的に段取り回数をバッチサイズ決定問題で、在庫量を順序づけ問題で扱い、需要の満足度はバッチサイズ決定問題と順序づけ問題の両方において取り扱う。

### 4. 機械割り当て・バッチサイズ決定問題

需要の満足度と段取り回数が評価尺度とするが、問題を扱いやすくするために、不足量と段取り回数の重みつき線形和を最小化する混合 0-1 計画問題として定式化する。なお、第1工程も第2工程も、基本的に同一の定式化で表現できる。ただし、ここで得られる加工量は「最大どれだけのジョブを詰め込めるか」を示し、順序づけ次第で計画期間内の加工量が減ったり段取り回数が増加することがあり得る。

定数	$a_{im}$	機械 $m$ でジョブ $i$ を加工可能ならば 1、さもなければ 0
	$D_i$	ジョブ $i$ の生産要求量
	$T$	計画期間 (日)
	$C_m$	機械 $m$ の能力の係数

	$\lambda$	不足量のペナルティの重み
	$M$	ある大きな数
集合	$g_k^m$	機械 $m$ で工具 $k$ を使うジョブの集合
変数	$x_{im}$	機械 $m$ での各ジョブ $i$ の仮の加工量
	$l_i$	ジョブ $i$ の不足量
	$y_k^m$	工具 $k$ を使うジョブ $i \in g_k^m$ が割り当てられているとき 1、さもなければ 0
	$z_m$	機械 $m$ の段取り回数

$$\min \sum_m z_m + \lambda \sum_i l_i \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_m a_{im} x_{im} + l_i = D_i, \forall i \quad (2)$$

$$C_m \sum_i a_{im} x_{im} \leq T, \forall m \quad (3)$$

$$M y_k^m \geq \sum_{i \in g_k^m} x_{im}, \forall m, k \quad (4)$$

$$z_m \geq \sum_k y_k^m - 1, \forall m \quad (5)$$

$$x_{im} \geq 0, z_m \geq 0, l_i \geq 0, y_k^m \in \{0, 1\}$$

(2) 式は各ジョブの要求量が加工量と不足量の和であることを表し、(3) 式は各機械の加工量の総和が計画期間に収まらなければならないことを表す。(4) 式はある機械で特定の工具が割り当てられている場合に、その工具を使うジョブ群の加工が許されることを表し、(5) 式は段取り回数が「工具の使用本数 - 1」と等しいことを表す。

### 5. 順序づけ問題

バッチサイズ決定問題で決定した各ジョブの仮の加工量をもとに、順序づけ問題は需要の満足度を高くしつつ在庫上限をなるべく上回らないスケジュールの作成を目指す。ここでは、同一の中間在庫から加工される第2工程ジョブの競合、すなわち在庫の奪い合いの解決が焦点となる。

その際、

1. 両工程とも機械上でのジョブの分割は考慮しない
2. 同一の工具を使用するジョブはまとめて処理する (第1工程のみ)<sup>2</sup>

という前提を置き、バッチサイズ決定問題で得た段取り回数の値を維持すると共に、対象となるスケジュールを限定する。上記の仮定は、あるジョブは同一機械

<sup>2</sup>第2工程は、実際のデータを用いてバッチサイズ決定問題を解いた結果、各機械の段取り回数が多い場合 0 ないしは 1 程度に抑えられるので、2. のような前提は置かない。

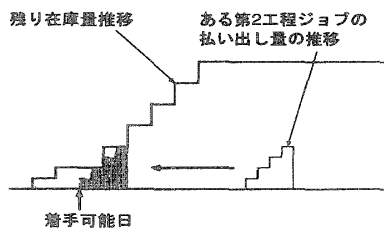


図 6 着手可能日の算出

上でさらに分割されることを本来許す 2.1節の e) 項に制限を加えている。

### 5.1 順序づけ問題に対する手順

手順の骨子は、以下の二つの手順 (5.2の手順 1 と 5.3の手順 2) を反復し、両工程間を媒介する在庫をなるべく少なく抑えつつ、在庫の情報を橋渡しに両工程の順序づけを行なう点にある (以下、手順 1 と手順 2 を併せて反復的手順と呼ぶ)。

#### 順序づけの反復的手順

step 1 適当な方法で生成した第 1 工程のスケジュールをもとに、step 2、step 3 を終了基準が満たされるまで反復する。

step 2 第 1 工程のスケジュールに基づき、手順 1 に従って、第 2 工程の順序づけを行う。

step 3 手順 2 に従って、第 1 工程の順序づけを行う。

### 5.2 第 2 工程の順序づけ:着手可能日付き 1 機械問題の繰り返し

第 1 工程の全ジョブの加工開始日が与えられると、各第 1 工程ジョブの累積生産量の時間的推移が確定する。これらをもとに、第 2 工程の各機械のスケジュールを順次固定する。この過程でスケジュールが固定された機械上のジョブにより払い出された量を差し引いた中間在庫の残り量の時系列的推移を、残り在庫量推移と呼ぶ (固定された機械が 1 台も無い場合は、累積生産量の推移を残り在庫量推移とする)。

機械上でのジョブの分割は許さないという前提を置いたので、第 2 工程の各ジョブの加工開始日以降の在庫の払い出し量の推移は一意に決る。よって、この推移と残り在庫量推移から、第 2 工程ジョブの着手可能日が得られる (図 6)。

そこで、スケジュールが未確定の機械毎に着手可能

日付き総所要日数最小化の 1 機械問題を解く。得られる総所要日数のもっとも大きい機械をボトルネック機械とみなし、ボトルネックの機械の総所要日数の悪化を防ぐために、その機械のスケジュールを固定する。

そして、スケジュールが固定された機械上の第 2 工程ジョブの払い出し量に基づき、残り在庫量推移を修正する。これをもとに、スケジュールが未確定な機械で処理されるジョブの着手可能日を求め直した上で 1 機械問題を解きなおし、順次第 2 工程のスケジュールを固定する。

ここに述べた手続きを、以下の手順にまとめる。

#### 手順 1:残り在庫量に着目した 1 機械問題の繰り返し手順

step 1 第 1 工程のスケジュールによる累積生産量の時間的推移をもとに、各第 2 工程ジョブの着手可能日を算出する。全機械のスケジュールが確定するまで、step 2 から 4 を繰り返す。

step 2 スケジュールが未確定の全機械に関して着手可能日付き 1 機械問題を解く

step 3 総所要日数の最も大きい機械のスケジュールを確定させる。

step 4 step 3 で固定されたスケジュールを反映させるために、残り在庫量推移と着手可能日を再計算し、step 2 に戻る。

### 5.3 第 1 工程の順序づけ:目標追跡法に基づくアプローチ

第 2 工程のスケジュールが定まると需要の満足度が決まる。需要の満足度を改善するには、各機械の遊休を 0 に近づければ良い。遊休を 0 にするためには、第 2 工程の加工に伴う在庫の「消費」に合わせて、第 1 工程からの在庫への「供給」が必要となる。ただし、第 1 工程からの在庫への供給が速すぎても超過在庫量が大きくなる。

これを実現する第 1 工程のスケジュールを生成するために、まず第 2 工程の各機械のジョブの順序を保ったまま、遊休をつくらないようにジョブを左詰めしたスケジュール (理想スケジュールと呼ぶ) を考える。

理想スケジュールを実現する第 1 工程からの在庫の供給の時間的推移を計算し、これを理想累積生産量と呼ぶ。そこで、目標追跡法 [5] を応用し、第 1 工程の生産量の推移が理想累積生産量になるべく近くなる

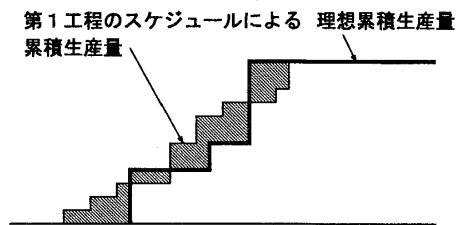


図 7 累積生産量と理想累積生産量

ように、すなわち、各第 1 工程ジョブに関する図 7 の斜線部の面積の総和を最小化するように第 1 工程を順序づける。ただし、この順序づけは第 1 工程の各機械で段取り回数を変えない範囲で行う (5 節冒頭の順序づけ問題の前提の第 2 項)。

本来、第 1 工程で考えられるすべてのスケジュールを対象に、上記の面積の総和が最小になるような各機械の順序づけを考えるべきであるが、組合せ数が膨大となるため、以下のような簡便な方法を用いる。

ジョブ数 (第 1 工程のバッチサイズ決定問題で得られた解におけるジョブの種類之和) が少ない機械ほど、加工量の大きいジョブが存在する可能性が高い。累積生産量を理想累積生産量に近付けるためには、ジョブの順序づけの自由度の少ない機械の順序を優先的に固定し、自由度の大きい機械で累積生産量の微調整を図るのが得策と考えられる。このような考え方に基つき、割り当てられたジョブ数の少ない機械から順次スケジュールを固定する。

ここに述べた手続きを、以下の手順にまとめる。

## 手順 2:理想累積生産量実現のための目標追跡法手順

- step 1 第 2 工程の理想スケジュールに基づき、第 1 工程の理想累積生産量を計算する
- step 2 ジョブの順序の再決定がされていない機械に対して、割り付けジョブ数の少ない機械順に、step 3 と 4 を繰り返す
- step 3 理想累積生産量とのずれが最小となる順序を定める
- step 4 step 3 で決定したスケジュールにしたがって、理想累積生産量を更新する

順序づけ問題では、手順 1 と手順 2 を反復的に繰り返して評価尺度の改善を図る。反復の終了基準は、所与の反復回数とする。

## 6. 数値実験

### 6.1 問題の規模

対象とする現場にあわせ、第 1 工程 24 機械、第 2 工程 29 機械、第 1 工程のジョブ 61 品種 (約半分が第 2 工程に進む)、第 2 工程のジョブ 75 品種での結果を示す。

なおバッチサイズ決定問題は、第 1 工程が 0-1 変数約 200 個、連続変数約 800 個、制約式が約 400 本で、計算には SPARCstation20(50MHz) を使用し、分枝限定法で約 30 分程度で計算を打ち切った暫定解を用いた。第 2 工程は、0-1 変数 50 個、連続変数が 700 個、制約式が約 400 本で、数分で最適解が得られる。

評価尺度の超過在庫量は、第 1 工程ジョブ毎の在庫量が上限値 (標準機械における 3 日分の生産量) を超えた量 (その加工に要する日数で換算する) を各日について計算し、それらの計画期間内全てのジョブに関する総和の超過在庫日数で評価する。

### 6.2 実験結果

#### 6.2.1 反復的手順の挙動

順序づけ問題に対する反復的手順の挙動を観察するために、バッチサイズ決定問題の結果が、第 1 工程の需要の満足度 99.5%、段取り回数 21、第 2 工程の需要の満足度 89.9%、段取り回数 4 の場合の例を示す。

初期解として第 1 工程のジョブの順序をランダムに 10 個与え、反復回数 10 回を終了基準とした場合の様子を図 8 に示す。各プロットは、第 1 工程のある初期解に対して、反復の手順によって超過在庫日数が改善されていく様子を示している。なお、終了基準の 10 回の反復に要する計算時間は 1 分程度に過ぎない。

そこでは、

- 超過在庫日数は、i) 初期解の平均 137.5 に対して、最終的な解の平均が 101 で、平均で約 25% 以上改善する、ii) 初期解の違いによる最終的な超過在庫日数のばらつきは大きい、iii) 反復とともに単調に減少するとは限らないが、多くの場合、初期解に依存したある一定のスケジュールに収束する
- 需要の満足度は、初期解の平均が 78.1%、反復終了後の平均 77.9% で概ね横ばいである
- 段取り回数は、第 1 工程が 21 回のまま、第 2 工程はスケジュールにもよるが、バッチサイズ決定問題に比べて段取りが高々 1 ~ 3 回増えるに過ぎない

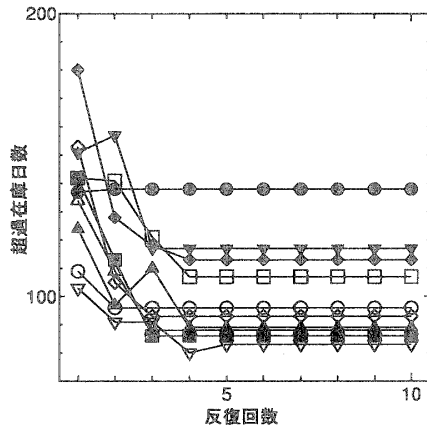


図 8 反復と超過在庫日数の変化

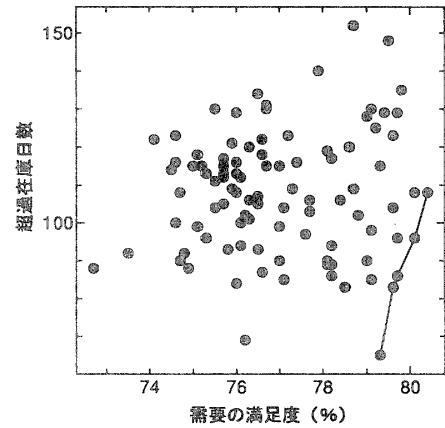


図 9 需要の満足度と超過在庫日数の分布

表 1: 第 1 工程のバッチサイズ決定問題の解と順序づけ問題の結果

バッチサイズ決定問題				順序づけ問題		
第 1 工程		第 2 工程		需要の満足度	超過在庫日数	第 2 工程段取り
満足度	段取り	満足度	段取り	満足度	在庫日数	段取り
97.3%	14	89.9%	4	79.7%	131.7	5 ~ 7
98.3%	16	89.9%	4	77.6%	120.9	5 ~ 7
99.5%	21	89.9%	4	77.9%	101.0	5 ~ 7

表 2: 第 2 工程のバッチサイズ決定問題の解と順序づけ問題の結果

バッチサイズ決定問題				順序づけ問題		
第 1 工程		第 2 工程		需要の満足度	超過在庫日数	第 2 工程段取り
満足度	段取り	満足度	段取り	満足度	在庫日数	段取り
99.5%	21	89.9%	4	77.9%	101.0	5 ~ 7
99.5%	21	96.5%	6	79.2%	110.5	8 ~ 12
99.5%	21	98.6%	7	82.7%	125.5	9 ~ 12

などの結果を得た。

現場での段取り回数の許容値は、第 1 工程が 30 回、第 2 工程が 5、6 回程度である。

### 6.2.2 バッチサイズ決定問題の解の組合せと順序づけ問題の結果

バッチサイズ決定問題は重みづけパラメータの変更で様々な解が得られ、また第 1 工程、第 2 工程のバッチサイズ決定問題の解の組合せによって、順序づけ問題の結果は異なる。そこで、第 1 工程のバッチサイズ決定問題の解を変えた結果を表 1 に、第 2 工程のバッチ

サイズ決定問題の解を変えた結果を表 2 に示す。それぞれは初期解 10 個に対する平均である。これらから、

- バッチサイズ決定問題では、第 1 工程、第 2 工程ともに満足度と段取り回数の間には自然なトレードオフ関係がある
- 表 1 では、第 1 工程のバッチサイズ決定問題の満足度の増加傾向が順序づけの満足度に現れているとは必ずしも言えないが、表 2 では第 2 工程のバッチサイズ決定問題の満足度の増加傾向がそのまま順序づけの満足度に現れている
- 在庫日数にも増加あるいは減少傾向があるとみさせるが、満足度の変動係数に比べて在庫日数の変動係数が一桁以上大きくばらつきが大きい

などの結果を得た。

### 6.2.3 反復的手順の繰り返しによるスケジュール生成

反復的手順により得られる超過在庫量が初期解に依存し、一定のスケジュールに短時間で収束することを考慮すると、初期解を変えて反復的手順を繰り返し実行し、その中から最良のスケジュールを選択する方法が考えられる。

6.2.1 節で用いたバッチサイズ決定問題の結果に対して、初期解 100 個を与えた場合の需要の満足度と超過在庫日数の分布を示したのが、図 9 である。反復的手順によって得た非劣解集合を実線で結んで示している。

表 3 問題の要因と部分問題における変数と評価尺度

		バッチサイズ 決定問題		順序づけ 問題	
		第1工程	第2工程	第1工程	第2工程
変数	加工量	▲	▲	←*	←**
	順序	×	×	△	△
尺度	満足度	▲	▲	○	○
	在庫量	×	×	○	○
	段取り	△	△	△	×
計算時間†		約30分	数分	反復一回で10秒以下	
方法 / 解法の骨子		混合 0-1 計画問題	混合 0-1 計画問題	目標 追跡法	1 機械問題 への分解

\*と\*\*は、各工程のバッチサイズ決定問題の結果にしたがうことを意味する

† SPARCstation20(50MHz)での時間

## 7. 結言:提案アプローチの利点と課題

### 7.1 本アプローチの利点

2節で説明した問題と、4節と5節のモデル(部分問題)および解法の対応関係を表3に整理する。表中、各問題において、○は考慮対象、△は元の問題の条件より厳しくする形で考慮、▲は元の問題の条件を緩めた形で考慮、×は考慮していないことを意味する。総括して、本アプローチは、

- 各部分問題は実用的な時間内で解ける規模になった
- 元の問題に比べて、各部分問題では目標(目的関数)や決定項目を限定しているため、既存の解法の利用が容易になっている
- バッチサイズ決定問題から得られる不足量や段取り回数を基準に、順序づけ問題の結果を評価できるなどの利点がある。

### 7.2 本アプローチの未解決な点と課題

本アプローチの未解決な部分を整理する。

順序づけ問題における制限: 第1工程、第2工程と

も、ジョブの中断・分割を禁止し、第1工程では同一工具を使用するジョブを一括して加工し、段取り回数をバッチサイズ決定問題で得た値に保っている。これらは、解法の構築を容易にするが、一方で対象のスケジュールを限定する。

分割された問題間の情報の授受: 順序づけ問題では工程間の情報の授受があるが、順序づけ問題からバッチサイズ決定問題への情報の還元はない。本アプローチにおいては、還元された情報に基づきバッチサイズ決定問題を解き直すことが考えられるが、そのためには、i) バッチサイズ決定問題の解と順序づけ問題の結果の関係、ii) 順序づけ問題の結果の何をよりどころにバッチサイズ決定問題の解を変更すれば良いか、の2点を明らかにする必要がある。

### 参考文献

- [1] S.A. Brah and J.L. Hunsucker. Branch and bound algorithm for the flow shop with multiple processors. *Eur.J.Opnl.Res.*, Vol. 51, pp. 88-99, 1991.
- [2] N.T. Bruvold and J.R. Evans. Flexible mixed-integer programming formulations for production scheduling problems. *IEE Transactions*, Vol. 17, No. 1, pp. 2-7, 1985.
- [3] J. Carlier. The one-machine sequencing problem. *Eur.J.Opnl.Res.*, Vol. 11, pp. 42-47, 1982.
- [4] S. Dauzère-Pérès and J.B.Lasserre. Lot streaming in job-shop scheduling. *Opns.Res.*, Vol. 45, No. 4, pp. 584-595, 1997.
- [5] T. Monden. *Toyota Production System*. Institute of Industrial Engineering, 1983. (邦訳) トヨタシステム, 講談社, 1985.

学会事務局年末年始休業のお知らせ

平成10年12月28日(月)～平成11年1月5日(火)