

線香工場の繁忙期の生産スケジュールに関する研究

鷹箸 了介(沼田 一道 助教授, 田中 健一 助手)

1. はじめに

1.1. 本研究の背景

日本では葬式, 墓参りと人々が亡き人へ祈りをささげる際に, 広く線香が用いられている. その結果, 彼岸時における線香の消費量は, 年間消費量の相当な割合を占める.

北関東にある線香生産工場Aは, 近年, 従業員の高齢化や退職の影響により生産性が低下している. 線香工場Aでは, 通常期においても受注した商品をさばくだけが限界であり, 作り置きが難しい状況となっている. また, 繁忙期(2~3月, 7~8月)になると, 注文数が増加して生産が追いついていかないという問題が起っている.

線香工場Aでは, 注文別ではなく一日の生産予定分を製品種別にまとめて生産する. また, この工場の生産プロセスは, 複数の工程を原料が順に流れる「フローショップ」である. 注文を受け生産される製品種を, ジョブと呼ぶ. 全てのジョブは決められた工程順に加工され, 途中でジョブ同士の加工順序が変わる事はない.

繁忙期には新たに作業員を1人雇うなどして(以後追回し要員と呼ぶ)増産に対処している. 現状では, 追回し要員は1つの工程に配置されているので, その工程の時間短縮は図れるものの, 全体的に有効に活用されているとは言いがたい. また, 作業員の更なる増員は考えにくく, 状況の改善は難しい. そこで, ジョブの生産ラインへの投入順序と, 追回し要員の配置を適切に計画する事で, 生産性の向上が図れないかどうかを検討する.

1.2. 本研究の目的

本研究では, 線香工場Aの生産計画を「フローショップ・スケジューリング」+「追回し要員の配置」という形でモデル化し, 最適なジョブの投入順序と追回し要員の配置を決定する. また, 追回し要員を加える事での効果やより良い配置について検討する.

2. 問題設定

2.1. 線香工場Aの現状

線香工場Aでは, 従業員が5人働いていて, それぞれが決められた担当の仕事をこなしている. 工程は, ()原料混ぜと染色()捏ね()練り出し()乾燥作業()結束()紙巻()包装の7工程であり, 全ての製品は, この工程の順に生産される. つまり, 全設備がフローショップを構成しているといえる. また, 製品種は 杉のかをり(緑) 杉のかをり(茶) ラベンダー香 明德香 香の華 若葉香 浄雲香 供養香の8種である. 生産の投入順序は特に決まっておらず, 原則的には, ロット数の多い製品種から生産し, 各注文の製品がすべて生産された時点でそれぞれ出荷となる. 追回し要員は, 常に包装作業のみに従事し, 8品種に対して計8作業を救援している(実際にはどの作業も救援できる).

2.2. 記号化とモデルの概要

本研究で取り扱うモデルは, n 個のジョブと m 個の機械で構成されるフローショップである. これに対して1日の生産スケジュールを作り, 総処理時間の最小化を目指す. ジョブにはラベルとしてのジョブ番号 J_1, K, J_n が与えられる. ここで言うジョブとは, 一日の生産予定分の各製品種の事である. 同様に機械は M_1, K, M_m と表す. 工程順序はこの機械のラベル(番号)の順とする. 各作業の所要処理時

間を μ_{11}, K, μ_{nm} で表す． μ_{ij} は，機械 j がジョブ i を処理するのに必要な時間である．以下，各ジョブが各工程で施されるそれぞれの処理を「作業」と呼ぶ．フローショップ全体での総作業数は nm 個である．追回し要員が救援する事による処理時間の短縮率を ρ ，救援する作業(配置作業)の個数を c とする．追回し要員は，総作業数 nm 個の内， c 個の作業に配置される．これらのデータが与えられたもとで，ジョブの投入順序と追回し要員の配置を変化させて最適解を求める．前提として，このフローショップ設備を流れる各ジョブは，機械間を自動で移動するものとする．また，各ジョブは先行している他のジョブを追い抜いて作業を進めることはできない(追い抜き禁止)．さらに，各ジョブに対して，ある作業が始まる前にその1つ前の作業が完了していなければならない．本研究で考える追回し要員は1人であり，ある作業を救援する事で，その作業の処理時間を短縮できる．原則として，追回し要員は救援する作業の開始時刻からのみ割当てる事ができ，救援している作業が終了するまで他へ移る事はできないとする．なお，追回し要員の移動距離については本研究では考えない事とする．このように本研究では，フローショップ・スケジューリングに作業の所要処理時間を短縮できる追回し要員の配置を考慮したモデルを取り扱う．

3. 定式化

本研究で扱う問題を定式化する．ジョブ数を n ，機械数を m ，ジョブの投入順序を $i = (1, K, n)$ ， i 番目に投入するジョブのジョブ番号を $\pi(i)$ とする． $\pi = \{\pi(1), K, \pi(n)\}$ は，ジョブの投入順序を示す決定変数である．ジョブ $\pi(i)$ の第 j 機械における所要処理時間は $\mu_{\pi(i)j}$ である ($j = 1, K, m$)．また，ジョブ $\pi(i)$ の第 j 機械における開始時刻，終了時刻をそれぞれ $u_{\pi(i)j}$ ， $v_{\pi(i)j}$ とする． $x_{\pi(i)j}$ は，追回し要員がジョブ $\pi(i)$ の第 j 機械における作業を手伝うとき 1，それ以外は 0 をとる決定変数である．ここで $S(\tau)$ を， $\tau \geq 0$ ならば 1， $\tau < 0$ ならば 0 となるような関数とする．また， k, l はそれぞれ，ジョブの投入順序，機械番号を示す．定式化は以下ようになる．

$$\min_{\pi, x} v_{\pi(n)m} \quad (3.1)$$

$$\text{s.t. } x_{\pi(i)j} + x_{\pi(k)l} - 1 \leq S(u_{\pi(k)l} - v_{\pi(i)j}) + S(u_{\pi(i)j} - v_{\pi(k)l}) \quad (1 \leq i \neq k \leq n, \quad 1 \leq j \neq l \leq m) \quad (3.2)$$

$$x_{\pi(i)j} \in \{0, 1\} \quad (1 \leq i \leq n, \quad 1 \leq j \leq m) \quad (3.3)$$

$$\sum_{i,j} x_{\pi(i)j} = c \quad (3.4)$$

(3.1) 式は，目的関数の総処理完了時間を表している．(3.2) 式は，追回し要員が同時に複数の作業につく事は出来ないという制約条件を表している．(3.3) 式は， $x_{\pi(i)j}$ が 0 か 1 のどちらかであるという制約条件を表している．(3.4) 式は，追回し要員が決められた配置数だけ配置されるという制約条件を示している．また，(3.1) 式の $v_{\pi(n)m}$ は，以下の漸化式で与えられる．

$$u_{\pi(1)1} = 0, \quad u_{\pi(1)j} = v_{\pi(1)(j-1)}, \quad u_{\pi(i)1} = v_{\pi(i-1)1} \quad (i = 2, K, n, \quad j = 2, K, m) \quad (3.1.1)$$

$$u_{\pi(i)j} \geq \max(v_{\pi(i-1)j}, v_{\pi(i)(j-1)}) \quad (i = 2, K, n, \quad j = 2, K, m) \quad (3.1.2)$$

$$v_{\pi(i)j} = u_{\pi(i)j} + \mu_{\pi(i)j}(1 - \rho \cdot x_{\pi(i)j}) \quad (i = 1, K, n, \quad j = 1, K, m) \quad (3.1.3)$$

(3.1.1) 式は左から，「最初に流すジョブの1番目の機械の開始時刻」，「最初に流すジョブの各機械での開始時刻」，「1番目の機械での各ジョブの開始時刻」を表している．(3.1.2) 式は2番目以降に流すジョブの各機械での開始時刻を表している．(3.1.3) 式は各作業の終了時刻を表している．

4. 解法

投入順序と追回し要員の配置の組合せは、全部で $n!(\binom{n+m}{n} C_1 + \Lambda + \binom{n+m}{n+m} C_{n \times m})$ 通りとなる。 n, m の値を小さく設定して予備的問題を全列挙法により解いたところ、処理時間の短縮率 ρ が一定の場合、最適解は、追回し要員の配置無しの最適処理順について、追回し要員を配置した時に得られた。これは、 $\mu_{\pi(i)j}$ を様々変えて行った時も同様であった。したがって、本研究ではまず追回し要員無しで最適な投入順序を決定し、得られた投入順序についてのみ、追回し要員の配置を考える事とする。この方針を基に以下のステップで解を求める。

(1) 投入順序の決定

Step1: ジョブ数，機械数，各作業の所要処理時間を入力する。

Step2: S_n の元すべてを列挙したら終了。そうでなければ、新たな元を生成する。

Step3: 得られた元を投入順序とみなし，総処理完了時間を計算する。

Step4: Step3 で求めた総処理完了時間が最小ならば，その時の元を最適解とする Step2 へ戻る。

(2) 追回し要員の配置決定

Step1: ジョブ数，機械数，各作業の所要処理時間，追回し要員の配置作業数，処理時間の短縮率，(1)で求めたジョブの投入順序を入力する。

Step2: $\{1, K, n \times m\}$ の数字から c 個取る組合せの仕方について，すべての組合せを列挙したら終了。そうでなければ，新たな組合せを生成する。

Step3: c 個の数字に対応する作業の処理時間を短縮する。

Step4: 各作業の開始時刻，終了時刻と総処理完了時間を計算する。

Step5: 配置作業の開始時刻と終了時刻の間に，その他の配置作業の開始時刻が一つでもある場合，Step2 へ戻る。そうでなければ Step6 へ。

Step6: Step4 で求めた総処理完了時間が最小ならば，その時の配置作業を最適解とする。Step2 へ戻る。

5. 実験

5.1. 実験概要

本研究で作成したモデルを用いて，線香工場 A における最適なジョブの投入順序と追回し要員の配置を決定する。データは，製品種（ジョブ数）が 8 種，工程数（機械数）が 7 工程，処理時間の短縮率が 0.5 である。配置作業数は 8 個とした。各作業の所要処理時間は表 1 に，受注（生産予定）データを表 2 に示す。解法は Borland 社の Delphi6 で実装した。

表1: 製品種別10ロット(200把)当たりの各作業での所要処理時間(単位:分)

製品種	作業工程	M1:原料 混ぜと染	M2:捏ね	M3:練り出 し	M4:乾燥 作業	M5:結束	M6:紙巻	M7:包装
J 1:杉のかをり(緑)		15	20	20	15	40	20	10
J 2:杉のかをり(茶)		20	14	20	15	30	30	15
J 3:ラベンダー香		25	30	30	15	34	14	20
J 4:明德香		14	20	14	15	20	40	15
J 5:香の華		20	14	44	10	14	24	15
J 6:若葉香		15	24	22	20	20	30	20
J 7:浄雲香		20	18	24	25	30	28	30
J 8:供養香		14	18	30	10	20	22	25

表2: 受注データ

製品種	ロット数
杉のかをり(緑)	20
杉のかをり(茶)	20
ラベンダー香	10
明德香	20
香の華	10
若葉香	20
浄雲香	10
供養香	20

5.2. 実験結果と考察

現行の投入順序と配置位置から得られた目的関数値，投入順序のみを最適化し，配置位置が現行のままの場合の目的関数値，そして実験で得られた目的関数値，投入順序，配置位置をそれぞれ表 3 に示す。

表3 実験結果

	目的関数値	投入順序	配置位置
現行	556(569)	2,6,8,4,1,3,7,5	(1,7),(2,7),(3,7),(4,7),(5,7),(6,7),(7,7),(8,7)
投入順序のみ	515(525)	7,4,2,8,6,1,3,5	(1,7),(2,7),(3,7),(4,7),(5,7),(6,7),(7,7),(8,7)
最適化モデル	445(525)	7,4,2,8,6,1,3,5	(1,5),(2,3),(2,6),(4,1),(4,2),(6,3),(7,1),(8,6)

目的関数値のカッコ内の数値は追回し要員を配置する前の総処理完了時間を示している。この結果から、ジョブの最適な投入順序は7 4 2 8 6 1 3 5であり、現行と比べても44分短縮される事が分かった。追回し要員の効果は、現行では配置前と比べ、約2.3%ほどの短縮であるが、最適化モデルでは約15.2%も短縮された。また、投入順序のみを最適化し、配置位置が現行のままの場合は、配置前と比べ、約1.9%ほどの短縮であった。これより、最適化モデルの追回し要員の配置位置が、より効果的であることが分かった。そして、目的関数値は現行が556分、最適化モデルが445分であり、約2時間近くも短縮が見込める事が分かった。したがって、ジョブの投入順序と追回し要員の配置を変える事で、生産時間の短縮が十分に望めると考えられる。ここで、最適化モデルでの追回し要員の配置前後におけるガントチャートを図1に示す。それぞれの工程で作業待ちが起こるのは、ジョブが一つ前の工程の作業完了待ちをしているためである。それらを減らすために、最適化モデルでは、現行と違って様々な作業に配置される結果となっていると考えられる。特に、図1では明德香(ジョブ4)の作業待ちの減少が顕著に現れている。

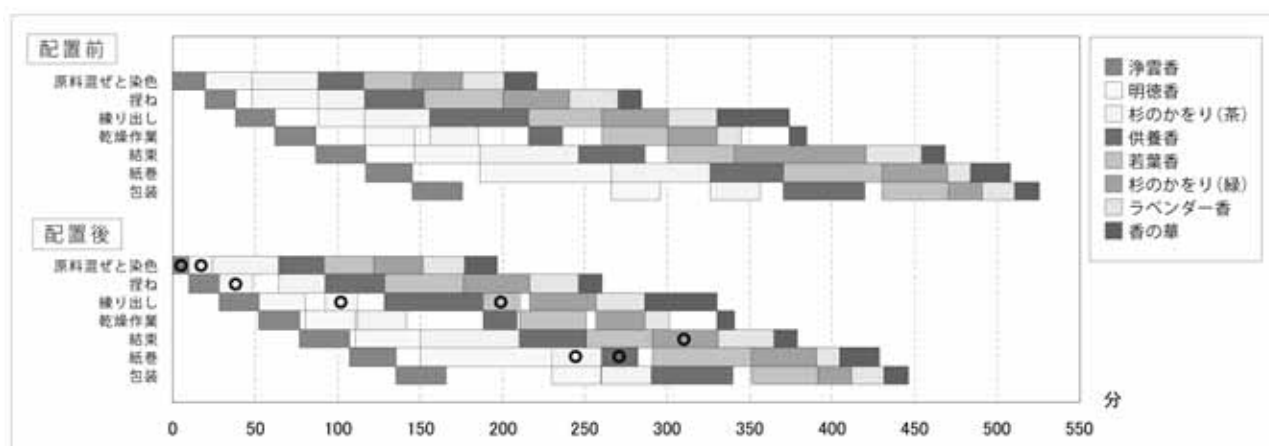


図1 最適化モデルのガントチャート

6. まとめ

本研究では、フローショップ設備におけるジョブの投入順序と追回し要員の配置を考えたモデルを作成した。それをを用いて線香工場Aの場合での実験を行った結果、現行よりも優位なスケジュールを与えるジョブの投入順序と追回し要員の配置位置を決定する事が出来た。

本研究では、追回し要員の配置数を現行と同じ値に設定したが、追回し要員をより活用するためにも、実際にはもっと多くの作業に配置する必要がある。そして、それを考えていく上でも救済に要する時間を改善することが今後の課題である。

主要参考文献

- [1] 黒田充・村松健児:「生産スケジューリング」, 朝倉書店, (2002)
- [2] 局所探索によるフローショップスケジューリングの最適化: (http://www.res.kutc.kansai-u.ac.jp/~murata/Labo/P_B_Scheduling_2.pdf)
- [3] 掌田津耶乃:「Delphi パーソナルプログラミング」, 毎日コミュニケーションズ, (2002)