

部品使用量と作業負荷の平準化を二段階に分けて 考慮した投入順序決定方法

呼格 吉勒・平木 秀作

(受付 2007年5月7日)

[目 次]

1. ま え が き
2. 前 提 条 件
3. 部品使用量の平準化モデル
 - 3.1 記号の定義
 - 3.2 モデルの定式化
4. 作業負荷の平準化モデル
 - 4.1 記号の定義
 - 4.2 モデルの定式化
 - 4.3 計算手順
5. 数 値 実 験
 - 5.1 実験モデル
 - 5.2 数 値 例
6. ま と め

1. ま え が き

自動車の最終組み立てラインは、複数の品種の製品を一つのライン上に混流し組み立てるため、部品を供給するサプライヤーと最終組み立てライン上の作業者の都合を考慮した製品の投入順序を決定することが重要である。最終組み立てライン上の投入順序を決定する問題に関して、従来の研究では、主に次の3つの目標を考慮している。

- 1) サプライヤーへの部品の要求量を平準化するために、各部品の使用量の平準化を図る。
- 2) 最終組み立てライン上の作業遅れやラインストップを最小限にするために、各作業工程での作業負荷の平準化を図る。
- 3) 製品ごとに使用される部品の種類数と使用される量がほぼ等しい条件の下で、製品投入速度の平準化を図る。

目標1)を考慮した投入順序決定方法としては、門田[1]の目標追跡法がよく知られ、目標調整法と呼ばれるヒューリスティックアルゴリズムが開発されている。Miltenburg[2]は製品ごとに使用される部品種類数と使用量がほぼ等しい条件の下で、部品使用量平準化問題

を製品投入速度平準化問題へ定式化し、さらに、Miltenburg & Sinnamon [3] は多段階工程まで考慮して研究を行った。ほかにも、目標追跡法を応用した研究は、Caki & Inman [4], Steiner & Yeomans [5] などがある。

目標 2) を考慮した研究としては、平木・青木 [6] の各作業工程での作業者の移動軌跡を考慮した最大作業遅れの最小化、Thomopoulos [7] の全工程での Utility work 合計の最小化、または、Okamura & Yamashina [8], Tsai [9], Bard et al. [10] などの研究がある。

目標 3) を考慮した研究としては、生産比逆数方式 [11] は典型的である。Miltenburg [2], Inman & Bulfin [12] も製品ごとの総生産量での割合に近づけるように投入順序を決定し、製品投入速度の平準化を図った。

近年、二つの目標を同時に考慮して投入順序を決定する研究も進められてきた。徐・平木 [13] は、最終組み立てラインへの部品の供給が多回搬入方式で行われることに着目し、計画期間を部品の引取り時点に区切って、幾つかの小期間に分割し、第 1 段階で部品使用量の平準化を図り、小期間中の各製品の投入量を決定し、第 2 段階で最大作業遅れを最小化する投入順序決定方法を提案した。小谷 [14] は、車一台ごとに前後の入れ替えによる各作業工程での作業時間に及ぼす影響を重視し、部品使用量制約条件の下で、作業負荷の平準化を図った。Miltenburg & Goldstein [15] は、多段階生産工程での部品使用量の平準化と最終組み立てライン上の各作業工程での累積作業時間の平準化、Bard et al. [16] は製品投入速度の平準化とライン長さの最小化を図り、メタヒューリスティック解法を提案した。

本研究では、徐・平木 [13] の研究を基礎とした二段階の投入順序決定方法を示し、第 1 段階では、部品使用量の平準化を図るとともに、小期間中の各作業工程での累積作業時間を累積サイクル時間の $(1+\alpha)$ ($0 \leq \alpha \leq 1$ のパラメーター) 範囲内になるように小期間ごとの投入量を決め、第 2 段階では、作業負荷の平準化を図り、製品の投入順序を決定する。また、数値実験を行い、近傍アルゴリズムによる近似解を求め、二段階投入順序決定方法の有効性を確かめる。

以下、2. でモデルの前提条件、3. で部品使用量の平準化問題の定式化、4. で作業負荷の平準化問題の定式化及び計算手順、5. で数値実験を行い、6. で論文をまとめる。

2. 前 提 条 件

次の条件のもとに数式モデルを構築する。

- 1) 固定サイクル投入方式を用いる。
- 2) 部品の引取りは多回搬入方式による定期引取り方式で行われる。
- 3) 各作業工程での各製品の作業時間がすでに決定されている。

- 4) 各作業工程の作業域の長さがすでに決定され、各作業工程の前方線から後方線までの距離をその工程の作業域と呼ぶ。
- 5) 各作業工程の前方線をその工程の0スタート位置とする。各作業工程の作業者は隣接した作業工程で作業することができない。
- 6) 小期間1の各作業工程での作業者の作業開始位置は初期値で与えられる。
- 7) 小期間2以降、前の小期間の最後の製品の作業が終わって戻った位置を次の小期間の作業開始位置とする。
- 8) 作業者の移動時間は作業時間と比較して、十分小さいため考慮しない。

3. 部品使用量の平準化モデル

3.1 記号の定義

記号を次のように定義する。

I : 計画期間中に生産する製品の種類数

J : 計画期間中に使用される部品の種類数

i : 製品種類の番号 ($i=1, \dots, I$)

j : 部品種類の番号 ($j=1, \dots, J$)

d_i : 計画期間中の製品 i の生産量 ($i=1, \dots, I$)

a_{ij} : 製品 i を一つ生産するのに使用される部品 j の必要量 (部品表)

K : 計画期間中の製品の総生産量

$$K = \sum_{i=1, \dots, I} d_i$$

R_j : 計画期間中の部品 j の総必要量

$$R_j = \sum_{i=1, \dots, I} d_i \cdot a_{ij} \quad (j=1, \dots, J)$$

r_j : 計画期間中の部品 j の平均使用量

$$r_j = R_j / K \quad (j=1, \dots, J)$$

X_{ik} : 1番目から k 番目までに投入される製品 i の数

Y_{jk} : 1番目から k 番目までの製品が投入されたときに使用される部品 j の数

$$Y_{jk} = \sum_{i=1, \dots, I} X_{ik} \cdot a_{ij} \quad (j=1, \dots, J; k=1, \dots, K)$$

Z_{jk} : 部品 j の引取りが k 番目の製品を投入する時刻に行われるとき1, 行われないとき0となる定数

Q : 部品引取り時点の集合

$$Q = \{k \mid Z_{jk} = 1 \quad (j=1, \dots, J; k=1, \dots, K)\}$$

Q' : Q の元の大小順序の順序集合

q : 部品引取りを行う回数 $q = |Q|$

L_k : 引取り時点 k において引取りを行われる部品の集合

$$L_k = \{j \mid Z_{jk} = 1 \quad (j=1, \dots, J; k \in Q)\}$$

S : 作業工程数

s : 作業工程の番号 ($s=1, \dots, S$)

t_{is} : 製品 i の作業工程 s での作業時間

c : 製品が投入される間隔 (サイクルタイム)

3.2 モデルの定式化

最終組み立てライン上の部品の調達は多回搬入方式になることに注目し、問題の定式化は、部品の引取り時点に引取りを行われる部品の実際使用量とその時点での平均使用量との差の絶対値の和を最小化するように、小期間ごとの各製品の投入量を決定する。これは、式(2)–(6)の制約のもとに式(1)を最小化する問題に定式化される [13]。

評価関数(1) : 引取り時点での部品使用量の平準化

$$f_1 = \sum_{k \in Q} \sum_{j \in L_k} |k \cdot r_j - Y_{jk}| \quad (1)$$

制約条件

$$X_{ik} = d_i \quad (i=1, \dots, I) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1, \dots, I} X_{ik} = k \quad (k \in Q) \quad (3)$$

$$Y_{jk} = \sum_{i=1, \dots, I} X_{ik} \cdot a_{ij} \quad (j \in L_k; k \in Q) \quad (4)$$

$$X_{ik} \leq X_{ik'} \quad (i=1, \dots, I; k \in Q'; k' \in Q'; k \neq k') \quad (5)$$

(k' は順序集合 Q' で k の次の要素である)

$$X_{ik}, Y_{jk} \quad (i=1, \dots, I; j \in L_k; k \in Q) : \text{非負整数} \quad (6)$$

又は、線形計画問題に変更するため、次の式を追加している [17]。

$$\begin{aligned}
 b_{jk}^+ &= 1/2 \cdot \{|k \cdot r_j - Y_{jk}| + (k \cdot r_j - Y_{jk})\} \\
 b_{jk}^- &= 1/2 \cdot \{|k \cdot r_j - Y_{jk}| - (k \cdot r_j - Y_{jk})\} \\
 Y_{jk} + b_{jk}^+ - b_{jk}^- &= k \cdot r_j \quad (j \in L_k, k \in Q)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\text{評価関数 (2) : } \min f_1' = \sum_{k \in Q} \sum_{j \in L_k} (b_{jk}^+ + b_{jk}^-) \tag{8}$$

しかし、この従来の研究では、部品使用量の平準化のみを考慮し、製品ごとの総組み立て時間を考慮していない。つまり、ある小期間中に作業時間の長い製品が集中して投入され、ラインストップを引き起こす可能性が高くなることがある（後述の数値例、表3のモデル4）。これを防ぐために、本研究では、作業時間も考慮した制約式(9)を追加する。

$$\sum_{i=1, \dots, I} (X_{ik'} - X_{ik}) \cdot t_{is} \leq (1 + \alpha) \cdot (k' - k) \cdot c \tag{9}$$

第1小期間に対して $k=0$, $X_{i,0}=0$, k' は Q' の第1要素, 第2小期間以降 $k, k' \in Q', k \neq K_0$ 。式(9)では、 α は $0 \leq \alpha \leq 1$ のパラメーター, 各小期間中の引取り時点 $k (\in Q)$ までに投入される各製品の各作業工程での累積作業時間を累積サイクル時間の $(1 + \alpha)$ 範囲内で制約する。

以上で、問題の定式化は式(2)–式(7)及び式(9)の制約のもとに、式(8)を最小化する問題になる。

4. 作業負荷の平準化モデル

4.1 記号の定義

記号を次のように定義する。

l : 分割された小期間の番号 ($l=1, \dots, q$)

h_{il} : 小期間 l に投入される製品 i の数

h_l : 小期間 l に投入される製品の総数

$$h_l = \sum_{i=1, \dots, I} h_{il} \quad (l=1, \dots, q)$$

$sp_{i,s}^{(i)k}$: 小期間 l に作業工程 s で、 k 番目に製品 i が投入されるとき作業開始位置

$fp_{i,s}^{(i)k}$: 小期間 l に作業工程 s で、 k 番目に製品 i が投入されたときの作業終了位置

θ_l^k : 小期間 l の k 番目に投入された製品

$[\theta_l^1, \dots, \theta_l^h]$: 小期間 l の製品の投入順序

$i_{[\theta_l^1, \dots, \theta_l^{(k-1)}]}$: 小期間 l に $(k-1)$ 番目までの投入順序に含まれる製品 i の数

M_s : 作業工程 s の作業域の長さ

l_s : 作業工程 s の基準線, 作業工程 s の前方線より $v \cdot c$ 離れた線を作業工程 s の基準線とする, $l_s = v \cdot c$ ($s=1, \dots, S$)

$w_{l,s}^{(i)k}$: 小期間 l で k 番目に製品 i が投入されたとき, 作業工程 s の基準線より作業が遅れた距離, 作業遅れと呼ぶ

$uw_{l,s}^{(i)k}$: 小期間 l で k 番目に製品 i が投入されたとき, 作業工程 s の後方線より作業が遅れた距離, Utility 遅れと呼ぶ

$dw_{l,s}^{(i)k}$: 小期間 l に作業工程 s で, k 番目に製品 i が投入されたとき, 作業を終えて, 次の $(k+1)$ 番目の製品の到着を待つ時間と相当する距離, ユトリ距離と呼ぶ

v : 最終組み立てラインのスピード

\bar{t}_s : 作業工程 s の平均作業時間

$$\bar{t}_s = \frac{\sum_{i=1, \dots, I} d_i \cdot t_{is}}{K} \quad (s=1, \dots, S)$$

4.2 モデルの定式化

最終組み立てライン上の各作業工程の作業域は基準域とユトリ域から成り立ち, 基準域は作業工程の前方線から基準線までの距離, ユトリ域は基準線から作業工程の後方線までの距離である (図 1)。

本研究では, 作業者は自分の作業域のみで作業ができる場合を考慮し, 作業時間の長い製品が投入され, Utility 遅れが発生するとき, 作業者は自分の作業工程の後方線まで作業を行ったあと, 次の製品へ向い, 残りの Utility 遅れは Utility 作業者に任す。

ある小期間 l に作業工程 s で, k 番目に製品 i が投入されたときの作業者の移動軌跡は式 (10) と式 (11) で与えられる。

$$fp_{l,s}^{(i)k} = \min\{sp_{l,s}^{(i)k} + t_{is} \cdot v, M_s\} \quad (10)$$

$$sp_{l,s}^{(i)(k+1)} = \max\{fp_{l,s}^{(i)k} - v \cdot c, 0\} \quad (11)$$

ここで, $l=1, \dots, q$; $i=1, \dots, I$; $s=1, \dots, S$; $k=1, \dots, h_l$

$$sp_{l,s}^{(i)1} = \begin{cases} sp_{1,s}^{(i)1} & l=1 \\ \max\{fp_{(l-1),s}^{(i)h_{l-1}} - v \cdot c, 0\} & l=2, \dots, q \end{cases} \quad (12)$$

k 番目に投入される製品 $i(i=1, \dots, I)$ に対して, 作業開始位置 $sp_{l,s}^{(i)k}$ はすべて同じ値である。

k 番目に製品 i が投入されたとき, 作業工程 s に生じる作業遅れと Utility 遅れは, 式 (13) と式 (14) で与えられる。

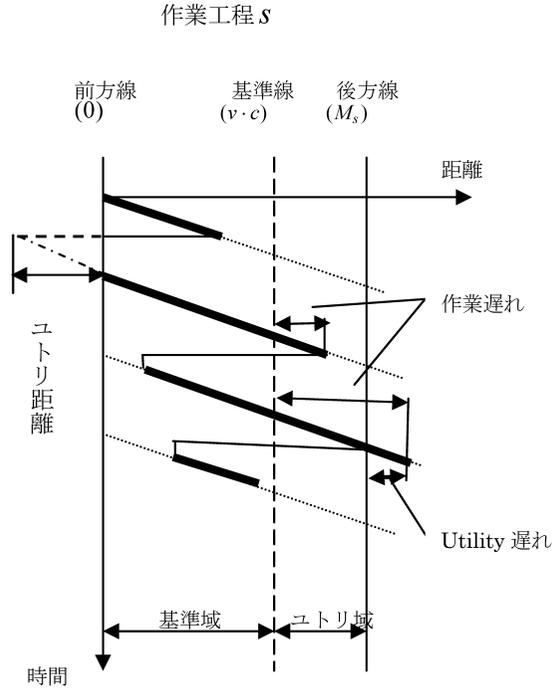


図1 作業者の移動軌跡

$$w_{l,s}^{(i)k} = \max\{(sp_{l,s}^{(i)k} + t_{is} \cdot v - c \cdot v), 0\} \quad (13)$$

$$uw_{l,s}^{(i)k} = \max\{(sp_{l,s}^{(i)k} + t_{is} \cdot v - M_s), 0\} \quad (14)$$

k 番目に製品 i が投入されたとき、作業を終えて次の $(k + 1)$ 番目の製品の到着を待つ時間に相当するユトリ距離は式(15)で与えられる。

$$dw_{l,s}^{(i)k} = \min\{[sp_{l,s}^{(i)k} + (t_{is} - c) \cdot v], 0\} \quad (15)$$

第2段階で、作業負荷平準化モデルの定式化は、最大作業遅れを最小化するように各小期間に投入される製品の投入順序を決定する。つまり、式(16)を最小化するように定式化される。

評価関数 (3) : 最大作業遅れの最小化

$$f_{2(l)} = \max_{k=1, \dots, h_l} (\max_{s=1, \dots, S} w_{l,s}^{(\theta^k)k}) \quad (16)$$

本研究では、小期間 l の各製品の投入順序を、最大作業遅れの下界式(17)を利用して、分枝限定法で近似解を求め、さらに近傍アルゴリズムを利用して近似解を改良する。

すなわち、小期間 l において、 $(k - 1)$ 番目までの投入順序 $[\theta^1, \dots, \theta^{(k-1)}]_l$ が定められ、 k 番

目に投入する製品 θ_l^k を決定する際、 $(h_{il} - i_{l_{\theta^1, \dots, \theta^{k-1}, l}}) > 0$ となる製品 i について、下界式(17)の値が最小となる製品 i^* を θ_l^k として、 k 番目に投入する。

$$LB([\theta^1, \dots, \theta^{(k-1)}, i_l]) = \max \left\{ \max_{s=1, \dots, S} \left[\max_{b=1, \dots, k-1} w_{l,s}^{(\theta_l^b)^b}, w_{l,s}^{(i_l)^k} \right], \max_{s=1, \dots, S} \left[\left(\sum_{b=1, \dots, k-1} dw_{l,s}^{(\theta_l^b)^b} \right) + dw_{l,s}^{(i_l)^k} \right] \right. \\ \left. + \left(\left(\sum_{i=1, \dots, I} h_{il} \cdot t_{is} \right) - h_l \cdot c \right) \cdot v \right\} \quad (17)$$

下界式(17)の第1項は k 番目までに投入された製品の最大作業遅れを、第2項は k 番目までの製品の投入順序が決められ、残りの $(h_l - k)$ 個の製品を全部投入終わったときの作業遅れの見積り値をそれぞれ計算している。

4.3 計算手順

最終組み立てライン上の投入順序決定問題は、組み合わせ問題であり、投入される製品の種類と数が多くなると、最適解を求めるのが困難である。Multenburg [2], Bard et al. [16] は幾つかのヒューリスティックアルゴリズムを提案した。

本論文では、平木・青木 [6] 研究の下界計算を基礎とした計算手順を示し、さらに、Bard et al. [16] のヒューリスティックアルゴリズムを基礎とした近傍アルゴリズムを用いて、近似解を求める。

小期間 l において、分枝限定法による投入順序計算手順：

ステップ1：初期データ $I, S, t_{is}, M_s, h_{il}, c, v$ を入力し、 $w_{l,s}^{(\theta_l^0)^0} = 0, dw_{l,s}^{(\theta_l^0)^0} = 0$ とする。

ステップ2：小期間 l において、 $k=1$ のとき、各作業工程での作業開始位置 $sp_{l,s}^{(\theta_l^1)^1}$ を式(12)で与える。各製品 $i(i=1, \dots, I)$ の各作業工程 $s(s=1, \dots, S)$ の作業遅れ $w_{l,s}^{(i)^1}$ 、ユトリ距離 $dw_{l,s}^{(i)^1}$ をそれぞれ式(13)、式(15)で計算する。

ステップ3：小期間 l において、 $k=1$ のとき、製品 $i(i=1, \dots, I)$ を1番目に投入したときの下限値を式(17)で計算し、値をそれぞれ $LB(i_l^1)$ として保存する。すべての製品 i に対して、 $LB(i_l^{*1}) \leq LB(i_l^1)$ となる製品 i^* (複数ある場合は総組立て時間の一番大きい製品を選ぶ) を1番目に投入する。 $\theta_l^1 = i^*$ とする。 $fp_{l,s}^{(\theta_l^1)^1}, sp_{l,s}^{(\theta_l^1)^2}$ は式(10)と式(11)で計算する。

ステップ4：小期間 l の $(k-1)$ 番目までの投入順序 $[\theta^1, \dots, \theta^{(k-1)}]_l$ が定められ、 k 番目の投入順序を決定するとき、 k 番目に $(h_{il} - i_{l_{\theta^1, \dots, \theta^{k-1}, l}}) > 0$ となる製品 i が投入されるときの $w_{l,s}^{(i)^k}, dw_{l,s}^{(i)^k}$ を計算するとともに、下限値を式(17)で計算し、 $LB(i_l^k)$ として保存する。 $(h_{il} - i_{l_{\theta^1, \dots, \theta^{k-1}, l}}) > 0$ となる製品 i に対して、 $LB(i_l^{*k}) \leq LB(i_l^k)$ となる製品 i^* を k 番目に投入する。 $\theta_l^k = i^*$ 。

- ステップ5: $k++$ とし, (a) $k \leq h_l - 1$ のとき, ステップ4へ。(b) $k = h_l$ のとき, $(h_{il} - i_{[\theta^1, \dots, \theta^{h_l}]}) > 0$ となる製品 i^* を最後に投入する。 $\theta_l^{h_l} = i^*$ となりステップ6へ。
- ステップ6: 一つの投入順序 $[\theta^1, \dots, \theta^{h_l}]_l$ が求められ, 下界値を LB_l とする。 $k = h_l - 2$ とする。
- ステップ7: 小期間 l の $(k-1)$ 番目までの投入順序 $[\theta^1, \dots, \theta^{(k-1)}]_l$ が定められ, k 番目に投入される製品を決定する際, $(h_{il} - i_{[\theta^1, \dots, \theta^{(k-1)}]_l}) > 0$ となる製品 i について, $LB([\theta^1, \dots, \theta^{(k-1)}]_l) < (LB_l - \beta)$ となる i^* が存在すれば, $\theta_l^k = i^*$ とし, ステップ8へ。そうでなければ, ステップ9へ¹⁾。
- ステップ8: $k++$ とし, (a) $k \leq h_l - 1$ のとき, ステップ7へ。(b) $k = h_l$ のとき, $(h_{il} - i_{[\theta^1, \dots, \theta^{h_l}]}) > 0$ となる製品 i^* を h_l 番目に投入する。 $\theta_l^{h_l} = i^*$ になり, ステップ6へ。
- ステップ9: $k--$, (a) $k \neq 0$ ならば, ステップ7へ, (b) $k = 0$ ならば, 計算は終了し, 小期間 l の投入順序 $[\theta^1, \dots, \theta^{h_l}]_l$ が求められ, 下界値が LB_l となる。

上述のアルゴリズムにより, 一つの投入順序の近似解が求められるが, さらに近傍アルゴリズムを利用して, 投入順序の改善を図る。

新たな記号を次のように定義する。

- γ : 投入順序が改善された回数
 ξ_γ : 回数 γ の時に作成される近傍の数
 $\pi_{\gamma,l}$: 小期間 l の回数 γ のときに選ばれた投入順序
 $\pi_{0,l}$ は初期投入順序 $[\theta^1, \dots, \theta^{h_l}]_l$ を表す。
 $f_2(\pi_{\gamma,l})$: 小期間 l の投入順序 $\pi_{\gamma,l}$ による最大作業遅れ
 $f_2(\pi_{0,l})$ は初期投入順序 $[\theta^1, \dots, \theta^{h_l}]_l$ の最大作業遅れ
 $\pi_{\gamma,l}^\sigma$: 投入順序 $\pi_{\gamma,l}$ の σ 番目の近傍
 $f_2(\pi_{\gamma,l}^\sigma)$: σ 番目の近傍の最大作業遅れ

近傍アルゴリズムの手順

- ステップ1: $\gamma = 0$ のとき, 初期投入順序を $\pi_{\gamma,l} = \pi_{0,l}$, 初期最大作業遅れを $f_2(\pi_{\gamma,l}) = f_2(\pi_{0,l})$ とする。

1) 分枝限定法の深さ優先による計算方法では, 解を探索した後, 一つの初期暫定解を求め, 逆戻りして, 分枝可能なすべての枝を調べ, 最適解を求めるが計算時間が長くなる。本研究では, 計算時間を短縮するため, 暫定解より β 以上小さい枝を分枝して, 近似解を求める。

ステップ2: $\pi_{\gamma,l}$ の近傍 $\pi_{\gamma,l}^{\sigma}$ ($\sigma=1, \dots, \xi_{\gamma}$) を作成する²⁾。

ステップ3: 近傍 $\pi_{\gamma,l}^{\sigma}$ ($\sigma=1, \dots, \xi_{\gamma}$) において, 作業者の移動軌跡を式(10)と式(11)で計算し, 各作業工程 s ($s=1, \dots, S$) の作業遅れを式(13)で計算する。

ステップ4: 近傍 $\pi_{\gamma,l}^{\sigma}$ ($\sigma=1, \dots, \xi_{\gamma}$) において, 評価関数式(16)を最小化する近傍 $\pi_{\gamma,l}^{\sigma^*}$ を見つけ, $f_2(\pi_{\gamma,l}^{\sigma^*}) \leq f_2(\pi_{\gamma,l})$ ならば, $\gamma++$ とし, $\pi_{\gamma,l} = \pi_{(\gamma-1),l}^{\sigma^*}$, $f_2(\pi_{\gamma,l}) = f_2(\pi_{(\gamma-1),l}^{\sigma^*})$ としてステップ2へ。そうでなければ, ステップ5へ。

ステップ5: 小期間 l の投入順序近似解 $\pi_{\gamma,l}$ が求められ, 最大作業遅れは $f_2(\pi_{\gamma,l})$ となる。

5. 数 値 実 験

5.1 実験モデル

本研究では, 以下の数値実験を行い, 本研究モデルと従来の4つの研究モデルを比較する。

1) モデル1: 目標追跡法 [1]。

($k-1$) 番目までの投入順序が決定され, k 番目に投入する製品を決定するとき, 式(18)を最小化する製品 i を選択する。

$$f_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1, \dots, J} (k \cdot r_j - Y_{j(k-1)} - a_{ij})^2} \quad (18)$$

$(i=1, \dots, I, k=1, 2, \dots, K)$

目標追跡法 [1] は実際に使用される部品の使用量を平均使用量に近づけるように製品の投入順序を一つずつ決定する近似解法である。

2) モデル2: 製品投入量平準化 [2]。

($k-1$) 番目までの投入順序が決定されたとき, k 番目に式(19)を最小化する製品 $i^* (\in \phi_k)$ を投入する。

2) 投入順序 $\pi_{\gamma,l} = [\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^h]_l$ において, 本研究では次のルールに従い近傍を作成する [16]。
 k ($k=2, \dots, h_l$) 番目の製品 θ_i^k が, 自分より λ 個前の製品 $\theta_i^{(k-\lambda)}$ から ($k-1$) 番目の製品 $\theta_i^{(k-1)}$ までの異なる製品と順次に入れ替えを行う。行うたびに一つの近傍が作成され, その近傍を保存する。保存が終わるたびに元の投入順序に戻る。ただし, λ は自分より前の製品と交換できる最大距離を示し, 任意に与える。 $(k-\lambda) < 1$ の場合1番目の製品から始める。例, 一つの投入順序 [1, 2, 1, 3, 1] において, $\lambda=2$ とする。 $k=2$ の場合, $(k-\lambda)=2-2=0 < 1$ になるので, 1番目の製品から始まり近傍 [2, 1, 1, 3, 1] が作成される。 $k=3$ の場合, 3番目が1番目と同じ製品になるため, 入れ替えを行わない。つぎに, 2番目の製品と交換し, 近傍 [1, 1, 2, 3, 1] が作成される。このようにして, $k=5$ までに選ばれるすべての近傍は, [2, 1, 1, 3, 1] [1, 1, 2, 3, 1] [1, 3, 1, 2, 1], [1, 2, 3, 1, 1], [1, 2, 1, 1, 3] となり, $\xi_{\gamma}=5$ となる。作成される近傍の数 ξ_{γ} は, $\pi_{\gamma,l}$ と λ により異なる。

$$f_{i^*k} = \sum_{i=1,\dots,J} (X_{i(k-1)} + \omega_i - k \cdot \frac{d_i}{K})^2 \quad (19)$$

$$\omega_i = \begin{cases} 1 & i^* = i \\ 0 & i^* \neq i \end{cases}, \quad k=1,2,\dots,K, \quad \phi_k = \{i \mid d_i - X_{i(k-1)} > 0\}$$

この方法は、 k 番目までに実際に投入される製品数を製品ごとの全製品での割合と近づけるように投入順序を決定する方法である。

3) モデル 3：文献 [15] と [16] を応用した多目的評価関数モデル。式(20)で定式化される。

$$\min g = \alpha \frac{g_1}{V_1} + (1-\alpha) \frac{g_2}{V_2} \quad (20)$$

ここで、 $0 \leq \alpha \leq 1$ のパラメーター

$$g_1: \text{部品使用量の平準化を図る評価関数} \quad g_1 = \sum_{k=1,\dots,K} \sqrt{\sum_{j=1,\dots,J} (k \cdot r_j - \sum_{i=1,\dots,J} X_{ik} \cdot a_{ij})^2}$$

$$g_2: \text{作業負荷の平準化を図る評価関数} \quad g_2 = \sum_{k=1,\dots,K} \sqrt{\sum_{s=1,\dots,S} (k \cdot \bar{t}_s - \sum_{i=1,\dots,J} X_{ik} \cdot t_{is})^2}$$

V_1 : 部品使用量平準化のみを考慮して投入順序を決定したとき、得られた投入順序に対する g_1 の値

V_2 : 作業負荷平準化のみを考慮して投入順序を決定したとき、得られた投入順序に対する g_2 の値

文献 [15] は累積部品使用量の平準化と各作業工程での累積作業時間の平準化を図るため、二つの目標を同時に考慮した研究である。これら二つの評価関数の計算単位が異なるため、文献 [16] を参考にし、二つの評価関数を基準化して、同じ単位で評価している。

4) モデル 4：二段階投入順序決定方法 [13]。

第 1 段階では部品引取り時点に置いて、部品使用量の平準化を図り、小期間の各製品の投入量を決め、第 2 段階では、小期間ごとの各製品の投入順序を決定する。

5) モデル 5: 本研究モデル。

5.2 数値例

製品種類数 $I = 4$ ，部品種類数 $J = 6$ ，総生産量 $K = 60$ ，サイクルタイム $c = 60$ 秒，コンベ

ヤスビード $v = 0.1$ メートル / 秒, 作業工程数 $S = 10$, 各作業工程の作業域 $M_s = 9$ メートル ($s = 1, \dots, 10$), 小期間 $l = 1$ のとき, 作業開始位置は $0, 0.1, 0.5, 0.4, 0.2, 0, 0.3, 0.6, 0.5, 0$ と仮定する。

表 1 は, 各製品の生産量 $20, 13, 17, 10$, 部品の引取り時点の集合 $Q = \{20, 30, 40, 60\}$, 製品ごとに使用される各部品の個数 (部品表), 引取り時点に引取りを行う部品の集合 $L_{20} = \{1, 5\}$, $L_{30} = \{3, 4\}$, $L_{40} = \{1, 5\}$, $L_{60} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ を示している。

表 2 は, 各製品の各作業工程での作業時間 (秒) を示している。

表 1 部品表と引き取り時点

製品種類		1	2	3	4	部品引取り時点			
生産量		20	13	17	10	20	30	40	60
部品表	1	1	0	2	1	1	0	1	1
	2	1	1	0	1	0	0	0	1
	3	0	1	2	0	0	1	0	1
	4	1	0	1	1	0	1	0	1
	5	1	2	1	0	1	0	1	1
	6	0	1	1	0	0	0	0	1

表 2 各製品の作業時間 (秒)

製品 \ 工程	工程									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	75	70	70	75	70	65	59	65	75	68
2	60	40	45	60	60	65	68	48	49	59
3	50	56	62	40	40	58	57	68	48	52
4	40	55	50	50	45	43	47	38	30	40

モデル 4 とモデル 5 は, 二段階に分けて投入順序を決定する。部品の引取りは 4 回行うので $q = 4$ となり, 生産期間は 4 つの小期間に分割される。第 1 段階では, モデル 4 は, 引取り時点での各部品の引取り量をなるべくその時点の平均使用量と近づけるように, 各小期間での各製品の投入量を決定する。モデル 5 は, 各作業工程での累積作業時間も考慮して, 部品使用量平準化モデルを利用して, 小期間ごとの各製品の投入量を決定する (表 3)。第 2 段階では, 各小期間の投入量のもとで, モデル 4 は分枝限定法を利用して, 最大作業遅れが最小になるように, 各製品の投入順序を決定する (表 4)。モデル 5 は, $\beta = 0.5, 1.0$ として, 分枝限定法と近傍アルゴリズムを利用し, 最大作業遅れが最小になるように投入順序の近似解を求める (表 5)。

表 3 に示しているように, モデル 4 は, 小期間 3 の製品 1 と 4 の投入量が 0, 一方, 小期間 4 の製品 1 の投入量が 14 となり, モデル 5 と比べると, 小期間ごとに投入される製品数の

表3 モデル4とモデル5の小期間ごとの投入量

小期間	モデル4				モデル5			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	5	5	6	4	7	4	6	3
2	1	1	3	5	3	2	3	2
3	0	5	5	0	3	3	2	2
4	14	2	3	1	7	4	6	3

表4 モデル4の小期間ごとの投入順序

小期間	投入順序	最大遅れ	Utility
1	41232341232413231431	1.5	0
2	4444132343	1.5	0
3	2232332332	2.5	0
4	11211211311311311411	4.5	1.5

表5 モデル5の小期間ごとの投入順序

小期間	分枝限定法による投入順序	近傍アルゴリズムによる改善した投入順序
$\beta = 0.5$		$\lambda = h_{it} - 1$ の場合
1	412311413213231413213 (2.0)	改善解はない
2	4123231431 (1.6)	改善解はない
3	4232131241 (2.2)	4232141231 (2.0)
4	41231413213231413213 (2.0)	改善解はない
$\beta = 1.0$		$\lambda = h_{it} - 1$ の場合
1	42132314123123314131 (2.6)	32132314123123414131 (2.2)
2	4231234131 (2.2)	4231231431 (2.0)
3	4232141231 (2.0)	改善解はない
4	42312312313412313141 (2.6)	42312312313413213141 (2.5)

注：黒い数字は製品の投入順序を、() の中は最大作業遅れを示す。

バラツキが大きい。この影響で、第2段階では、小期間4の最大作業遅れは4.5となり、Utility遅れが生じた(表4)。

表5は、モデル5の小期間ごとの投入順序を示す。 $\beta = 0.5$ のとき、分枝限定法による投入順序は、最大作業遅れが2.2となり、さらに近傍アルゴリズムを利用した結果、最大作業遅れは2.0まで改善された。 $\beta = 1.0$ のとき、最大作業遅れは2.6となるが、改善解では、それぞれ2.2と2.5に改善された。いずれの場合も、モデル4より最大作業遅れの小さい投入順序を

求めることができる。

次に、モデル 1, 2, 3 による数値例の結果を示す。

表 6 は、モデル 1 とモデル 2 による投入順序と最大作業遅れを示している。モデル 1 は、最大作業遅れ 4.0, Utility 遅れ 1.0 となり、作業負荷が平準化されてない。モデル 2 は、製品の平準化を図るため、作業負荷もある程度平準化され、最大作業遅れは 2.2 となった。

表 6 モデル 1 とモデル 2 の投入順序

	投 入 順 序	最大遅れ
モデル 1	13124312311312431243123413211312431234132413241321311324	4.0 (1.0)
モデル 2	132413213412314321312413213412314312314213123413214312314231	2.2 (0)

注：黒い数字は製品の投入順序を、() 中は Utility 遅れを示す。

モデル 3 は、モデル 1 とモデル 2 の投入順序を初期解として選び、近傍アルゴリズムを利用して、評価関数のより小さい値をとるように投入順序を決定する³⁾。表 7 に示すように、最大作業遅れは 2.6 となり、モデル 1 より改善された投入順序が得られたが、モデル 2 より悪い投入順序が求められた。

表 7 モデル 3 の投入順序

$V_1 = 62.53$ $V_2 = 1422.13$ $\lambda = 59$		
初期解	近傍アルゴリズムによる投入順序	最大遅れ
モデル 1	132413213412314312312413213412314312314213132413214312314213	2.6
モデル 2	132413213412314231312413213412314312314213132413214312314213	2.6

表 8 は、部品の引取り時点において、部品の平均使用量と各モデルの実際使用量を示している。モデル 1, 2, 3, 5 は、各引取り時点において、部品の実際使用量は平準化されている。モデル 4 は、部品の引取り時点において、引取りを行う部品使用量のバラツキが小さいが、引取りを行わない部品使用量のバラツキが大きくなっている。

上述の数値例の結果により、モデル 5 は部品使用量平準化と作業負荷平準化を図り、従来の研究と比べると、よりよい投入順序が求めることができる。

3) モデル 3 の計算方法は、まず、部品使用量平準化のみを考慮して投入順序を決定した場合の V_1 の値と作業負荷平準化のみを考慮して投入順序を決定した場合の V_2 の値を求める。パラメーター α の設定と解に及ぼす影響に関しては、文献 [3], [15] を参照のこと。本研究の数値例では $\alpha = 0.5$ とする。次に、モデル 1 とモデル 2 で求められた投入順序を初期解として与え、それぞれの投入順序による評価関数の値を式 (20) で計算する。最後は、 λ の値を与え、近傍アルゴリズムを利用して、評価関数値がより小さい投入順序を選ぶ。

表 8 引取り時点での部品使用量

部品	$k = 20$	$k = 30$	$k = 40$
1	(21.3) 22, 22, 22, 21, 22	(32) 33, 31, 31, 33, 33	(42.7) 42, 42, 42, 43, 42
2	(14.3) 14, 14, 14, 14, 14	(21.5) 21, 22, 22, 21, 21	(28.7) 29, 29, 29, 26, 29
3	(15.7) 16, 16, 16, 17, 16	(23.5) 24, 23, 23, 24, 24	(31.3) 31, 31, 31, 39, 31
4	(15.7) 16, 16, 16, 15, 16	(23.5) 24, 23, 23, 24, 24	(31.3) 31, 31, 31, 29, 31
5	(21) 21, 21, 21, 21, 21	(31.5) 31, 32, 32, 27, 31	(42) 43, 42, 42, 42, 42
6	(10) 10, 10, 10, 11, 10	(15) 15, 15, 15, 15, 15	(20) 20, 20, 20, 25, 20

注：() の数字は平均使用量，後の数字は，モデル 1 からモデル 5 の順番での実際使用量を示す。

6. ま と め

本研究では，部品使用量の平準化と作業負荷の平準化を 2 段階に分けて考慮した投入順序決定方法を示し，第 1 段階では，小期間に投入される製品の作業工程での累積作業時間も考慮して，部品使用量平準化モデルを構築し，文献 [13] を改良した。さらに第 2 段階では，最大作業遅れを最小化するように，分枝限定法と近傍アルゴリズムを利用して，小期間ごとの製品の投入順序を決定し，近似解を求めた。最後に，数値例で本研究モデルの有効性を検証した。

参 考 文 献

- [1] 門田安弘：「トヨタプロダクションシステム」，ダイヤモンド社 (2006)
- [2] Miltenburg, J.: “Level schedules for mixed model assembly lines in just-in-time production systems”, *Manage. Sci.*, Vol. 35, No. 2, pp. 192–207 (1989)
- [3] Miltenburg, J. and Sinnamon, G.: “Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 27, No. 9, pp. 1487–1509 (1989)
- [4] Caki, A. R. and Inman, R. R.: “Modified goal chasing for products with non-zero/one bills of material”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 31, No. 1, pp. 107–115 (1993)
- [5] Steiner, G. and Yeomans, S.: “Level schedules for mixed-model, just-in-time processes”, *Manage. Sci.*, Vol. 39, No. 6, pp. 728–735 (1993)
- [6] 平木秀作，青木兼一：“流れ作業システムのスケジューリングに関する研究”，日本機械学会論文集，第381号，pp. 1770–1777 (1978)
- [7] Tomopoulos, N. T.: “Line balancing sequencing for mixed-model assembly”, *Manage. Sci.*, Vol. 14, No. 2, pp. B59–B75 (1967)
- [8] Okamura, K. and Yamashina, H.: “A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 17, No. 3, pp. 233–247 (1979)
- [9] Tsai, L. H.: “Mixed-model sequencing to minimize work and the risk of conveyor stoppage”, *Manage. Sci.*, Vol. 41, No. 3, pp. 485–495 (1995)
- [10] Bard, J. F., Dar-e1, E. and Shtub, A.: “An analytic framework for sequencing mixed model assembly

- lines”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 30, No. 1, pp. 35–48 (1992)
- [11] 村松林太郎：「生産管理の基礎」, 国元書房 (1979)
- [12] Inman, R. R. and Bulfin, R. L.: “Sequencing JIT mixed-model assembly lines”, *Manage. Sci.*, Vol. 37, No. 7, pp. 901–904 (1991)
- [13] 徐 祝淇, 平木秀作：“生産の平準化と作業遅れを考慮した混合ラインの投入順序の決定方法”, *日本経営工学会誌*, Vol. 46, No. 6, pp. 614–622 (1996)
- [14] 小谷重徳：“最終車両組立ラインへのリアルタイム投入順序指示”, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 49, No. 4, pp. 245–255 (2004)
- [15] Miltenburg, J. and Goldstein, T.: “Developing production schedules which balance part usage and smooth production loads for just-in-time production systems”, *Nav. Res. Logistics*, Vol. 38, No. 6, pp. 893–910 (1991)
- [16] Bard, J. F, Shtub, A. and Joshi, S. B.: “Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 32, No. 10, pp. 2431–2454 (1994)
- [17] 坂和正敏：「線形システムの最適化〈一目的から多目的へ〉」, 森北出版 (1984)