

最終組み立てライン上の投入順序決定に 関する比較研究

呼格 吉勒・平木 秀作

(受付 2007 年 10 月 11 日)

[目 次]

1. はじめに
2. 部品使用量の平準化(目標 1)を考慮した研究
 - 2.1 目標追跡法 I 【GC1】
 - 2.2 目標追跡法 II 【GC2】
 - 2.3 製品投入速度の平準化
3. 作業負荷の平準化(目標 2)を考慮した研究
 - 3.1 最大作業遅れの最小化, 最大トータルライン長さの最小化を図る
 - 3.2 Utility 作業の和の最小化
 - 3.3 トータルラインストップ時間の最小化
4. 部品使用量の平準化(目標 1)と作業負荷の平準化(目標 2)を同時に考慮した研究
 - 4.1 二つの目標を同時に考慮したモデルの定式化
 - 4.2 一つの目標を緩和するモデルの定式化
 - 4.3 二つの目標を二段階に分けて考慮したモデルの定式化
5. 数値例による比較
 - 5.1 部品使用量の平準化(目標 1)を考慮した投入順序結果
 - 5.2 作業負荷の平準化(目標 2)を考慮した投入順序結果
 - 5.3 二つの目標を同時に考慮した投入順序結果
6. ま と め
参考文献

1. はじめに

自動車製造会社をはじめ, 多くの製造業者は今後の厳しい環境に勝ち残るため, 品質と鮮度の高い製品を市場の多様なニーズに対応して供給できるように要求されている。

自動車製造会社は, 各販売会社の販売予測値に基づいて, 向こう 3 ヶ月の生産計画を立てるとともに, 第 1 ヶ月の生産計画(確定値)において, その月の稼働日, 生産能力などを考慮して, 日々の生産量を決定する。

また, 日々の生産量に基づき毎日の生産計画を立てる必要があり, その中で, 最終組み立てライン上の投入順序を決定する問題は重要である。

ジャストインタイム生産方式では, 最終組み立てライン上に使用される部品の引取りは前工程から頻繁に行われ, 自動車の組み立て工場や部品のサプライヤーの生産を安定させるた

め、単位時間当たりでの引取り量をなるべく一定に保つように製品の投入順序を決定する必要がある。つまり、部品使用量の平準化（目標 1）を図ることである。

また、最終組み立てラインにおいて、総組み立て時間の長い製品が連続投入されると、作業者の作業に遅れが生じ、ラインストップが発生する場合があるので、作業遅れやラインストップの発生を最小にするように投入順序を決定する必要がある。つまり、作業負荷の平準化（目標 2）を図ることである。

本研究では、上述した二つの目標のいずれか一つ、あるいは二つの目標を同時に考慮して最終組み立てライン上の投入順序を決定する従来の研究を調べるとともに、それぞれの研究の特徴を示し、数値例による比較、検証を行う。

以下、2. で部品使用量の平準化を考慮した研究、3. で作業負荷の平準化を考慮した研究、4. で部品使用量の平準化と作業負荷の平準化を同時に考慮した研究、5. で数値例による比較を行い、6. で本論文をまとめる。

2. 部品使用量の平準化（目標 1）を考慮した研究

表 1 に示すように、目標 1 を考慮した従来の研究では、部品使用量の平準化と最終組み立てライン上の製品の投入速度の平準化という二通りの評価基準を用いて、部品使用量を平準化するモデルを定式化し、ヒューリスティックアルゴリズムが提案されている。また、これらヒューリスティックアルゴリズムを数値実験で検証した比較研究も行われている。

記号の定義

I : 製品の種類数

J : 部品の種類数

i : 製品の種類の番号 ($i = 1, \dots, I$)

j : 部品の種類の番号 ($j = 1, \dots, J$)

d_i : 製品 i の生産量 ($i = 1, \dots, I$)

K : 製品の総生産量

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

a_{ij} : 製品 i を一つ生産するために使用される部品 j の使用量（部品表）

R_j : 部品 j の総使用量

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

表 1 目標 1 を考慮した従来の研究一覧表

	文献番号	著者名	内容と特徴
部品使用量の平準化	[1] ₁₉₈₃	小谷重徳	【GC1】 , 【GC2】
	[2] ₁₉₈₉	Miltenburg, J. and Sinnamon, G.	文献 [8] の考え方で, 多段階工程までの部品使用量の平準化を図る
	[3] ₁₉₈₉	Groeflin, H. et al.	ローカルサーチアルゴリズムの提案
	[4] ₁₉₉₂	Inman, R. R. and Bulfin, R. L.	文献 [9] のモデルを多段階工程まで広げた研究
	[5] ₁₉₉₃	Cakir, A. and Inman, R.	【MGC2】
	[6] ₁₉₉₉	Xiaobo, Z. and Zhou, Z.	多段階工程での部品使用量の平準化モデルを定式化し, 【MGC1】 アルゴリズムと 【SA】 アルゴリズムの提案
	[7] ₂₀₀₂	Kurashige, K. et al.	多段工程での 【TBGC】 の応用
製品投入速度平準化	[8] ₁₉₈₉	Miltenburg, J.	製品ごとに使用される部品種類数と数がほぼ同じ条件の下で, 最終組み立てライン上の製品投入速度の平準化を図り, 【MA1】 , 【MA2】 , 【MA3H1】 , 【MA3H2】 の提案
	[9] ₁₉₉₁	Inman, R. R. and Bulfin, R. L.	文献 [8] を応用して, 製品ごとの実際に納期される時刻を理想の投入時刻となるべく近づくような投入順序決定方法
比較研究	[10] ₁₉₉₀	Sumichrast, R. T. and Russell, R. S.	近似解法 【GC1】 , 【GC2】 , 【MA1】 , 【MA3H1】 , 【MA3H2】 の比較
	[11] ₁₉₉₂	Sumichrast, R. T. et al.	5つの解法 (【GC1】 , 【GC2】 , 【TS】 , 【Batch】 , 【MA3H2】) について, 4つの評価基準で比較
	[12] ₁₉₉₈	Duplaga, E. A. and Bragg, D. J.	6つのヒューリスティックアルゴリズムの比較 (【GC1】 , 【GC2】 , 【HH】 , 【MSH1】 , 【MSH2】 , 【EGC1】)

注: **【GC1】** (Goal Chasing 1), **【GC2】** (Goal Chasing 2), **【MGC1】** (Modified Goal Chasing 1), **【MGC2】** (Modified Goal chasing 2), **【SA】** (Simulated Annealing), **【TBGC】** (Time-Based Goal Chasing), **【MA1】** (Miltenburg's Algorithm 1), **【MA2】** (Miltenburg's Algorithm 2), **【MA3H1】** (Miltenburg's Algorithm 3 using Heuristic 1), **【MA3H2】** (Miltenburg's Algorithm3 using Heuristic 2), **【TS】** (Time-Spread), **【HH】** (Hyundai's Heuristic), **【MSH1】** (Miltenburg and Sinnamon's Heuristic1), **【MSH2】** (Miltenburg and Sinnamon's Heuristic2), **【EGC1】** (Extended Goal Chasing 1)

r_j : 製品 1 単位当たりの部品 j の平均使用量

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

k : 製品の投入順序番号 ($k = 1, \dots, K$)

θ_k : k 番目に投入される製品

$[\theta_1, \dots, \theta_K]$: 1 番目から K 番目までの投入順序

$X_{i,k}$: 1 番目から k 番目までの製品 i の投入量

$Y_{j,k}$: 1 番目から k 番目までの投入順序で使用される部品 j の数

$$Y_{j,k} = \sum_{i=1, \dots, I} X_{i,k} \cdot a_{ij}$$

2.1 目標追跡法 I 【GC1】

目標追跡法 I は、最終組み立てライン上に使用される各部品の実際使用量を平均使用量となるべく近づけるように製品の投入順序を決定する方法である。

k 番目に投入される製品を決めるには、 $k-1$ 番目までの投入順序 $[\theta_1, \dots, \theta_{(k-1)}]$ が決定したものとし、 k 番目の各部品の使用量の目標値と実績値との距離を最小にするように、評価関数式(2-1)を満たす製品 i^* を k 番目の投入順序とする。

$$\text{評価関数 } f_{i^*k} = \min_{i \in \alpha_k} \{f_{ik}\} \quad (2-1)$$

$$\text{ただし, } f_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1, \dots, J} (k \cdot r_j - Y_{j,k-1} - a_{ij})^2}, \quad \alpha_k = \{i \mid d_i - X_{i,k-1} > 0 \quad (i=1, \dots, I)\},$$

$$X_{i,0} = 0 \quad (i=1, \dots, I), \quad Y_{j,0} = 0 \quad (j=1, \dots, J), \quad k=1, \dots, K$$

2.2 目標追跡法 II 【GC2】

目標追跡法 I は部品や製品種類数の増大にともない計算時間が増大するため、実際の生産問題においては、目標追跡法 II (【GC2】) という単純化された手法を用いている。

k 番目の投入順序を決定するには、 $k-1$ 番目までの投入順序 $[\theta_1, \dots, \theta_{(k-1)}]$ が決定したものとし、評価関数式(2-2)を満たすような製品 i^* を k 番目に投入する。

$$\text{評価関数 } f_{i^*k} = \max_{i \in \alpha_k} \{f_{ik}\} \quad (2-2)$$

$$\text{ただし, } f_{ik} = \sum_{j \in \beta_i} (k \cdot r_j - Y_{j,k-1}), \quad k=1, \dots, K, \quad \alpha_k = \{i \mid d_i - X_{i,k-1} > 0 \quad (i=1, \dots, I)\},$$

$$\beta_i = \{j \mid a_{ij} > 0 \quad (j=1, \dots, J)\}, \quad X_{i,0} = 0 \quad (i=1, \dots, I), \quad Y_{j,0} = 0 \quad (j=1, \dots, J)$$

目標追跡法 II は、異なる製品間で使用される各部品種類数が同じ及び製品一単位に使用される異なる部品ごとの使用量も同じという前提条件の下で、実際部品使用量の重みが一番大きい製品を先に投入する方法である。

実際の問題では上述した条件が成立しない場合があるので、Cakir and Inman [5] は目標追跡法 II を修正した新たな手法 【MGC2】 を提案した。

k 番目の投入順序を決定するには、 $k-1$ 番目までの投入順序 $[\theta_1, \dots, \theta_{(k-1)}]$ が決定したものとし、評価関数式(2-3)を満たすような製品 i^* を k 番目に投入する。

$$\text{評価関数 } f_{i^*k} = \min_{i \in \alpha_k} \{f_{ik}\} \quad (2-3)$$

$$\text{ただし, } f_{ik} = [(d_i \cdot k / K) - X_{i,k-1}] \cdot \sum_{j \in \beta_i} a_{ij}, \quad k=1, \dots, K, \quad \alpha_k = \{i \mid d_i - X_{i,k-1} > 0 \quad (i=1, \dots, I)\}$$

$$\beta_i = \{j \mid a_{ij} > 0 \quad (j=1, \dots, J)\}, \quad X_{i,0} = 0 \quad (i=1, \dots, I)$$

2.3 製品投入速度の平準化

Miltenburg [8] は、各製品に使用される部品の数と種類数がほぼ同じという条件の下で、最終組み立てライン上で組み立てられる製品をできるだけ製品ごとの全製品での割合に近づけるように投入順序を決める方法を提案し、幾つかのヒューリスティックアルゴリズムを示した。

計画期間中に生産される製品 i の全製品での割合を $p_i = d_i / K$ (理想の割合) とすると、評価関数は式(2-4)～式(2-7)の4つの形で定式化される。

$$\min \sum_{k=1, \dots, K} \sum_{i=1, \dots, I} (X_{i,k} / k - p_i)^2 \quad (2-4)$$

$$\min \sum_{k=1, \dots, K} \sum_{i=1, \dots, I} (X_{i,k} - k \cdot p_i)^2 \quad (2-5)$$

$$\min \sum_{k=1, \dots, K} \sum_{i=1, \dots, I} |X_{i,k} / k - p_i| \quad (2-6)$$

$$\min \sum_{k=1, \dots, K} \sum_{i=1, \dots, I} |X_{i,k} - k \cdot p_i| \quad (2-7)$$

式(2-4)と式(2-6)は、製品ごとの理想の割合からの偏差の和の最小化、式(2-5)と式(2-7)は、製品ごとの理想の投入量からの偏差の和の最小化を図っている。

上述した問題を解くために、Miltenburg [8] は3つのアルゴリズムと2つのヒューリスティック解法を提案した。

図1のフローチャートでアルゴリズム1の計算手順を示す。 $m_{i,k} - m_{i,k-1} \geq 0$ ($i = 1, \dots, I$;

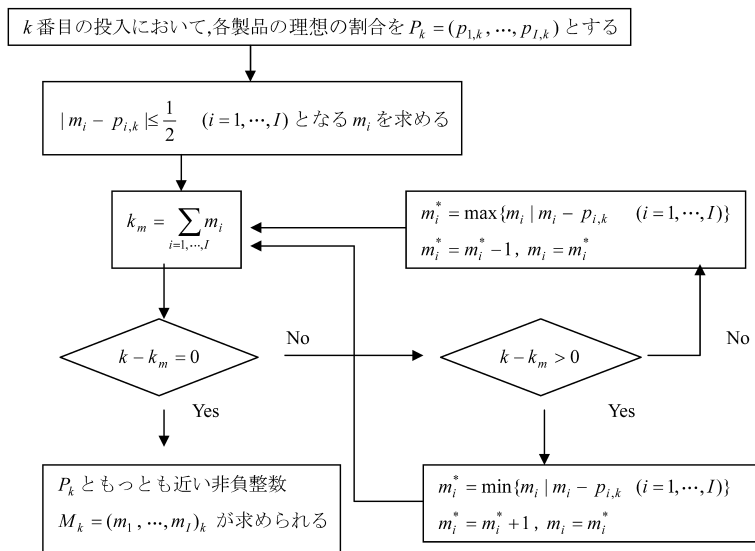


図1 アルゴリズム1のフローチャート

$k = 1, \dots, K$) ならば, 最適解が求められる。しかし, $m_{i,k} - m_{i,k-1} < 0$ ($i = 1, \dots, I; k = 1, \dots, K$) となる k が存在すれば, 実行不能解が求められる。この問題を解決するために, 【MA3H1】と【MA3H2】の近似解法を提案した。

3. 作業負荷の平準化 (目標 2) を考慮した研究

表 2 に示すように, 目標 2 を考慮した従来の研究では, ラインストップの発生を避けるための最大作業終了位置の最小化、最大作業遅れの最小化、最大トータルライン長さの最小化、Utility 作業の和の最小化とラインストップが発生する場合のトータルラインストップ時間の最小化を図るなどの方法がある。

最終組み立てライン上の作業工程を作業者の移動できる状態に基づいて, 次の 3 つのタイプに分ける。

- 1) 閉作業工程：作業域に制約がある場合, 作業者が隣接の作業工程域に入って作業できない工程。

表 2 目標 2 を考慮した従来の研究一覧表

ライン ストップ	文献番号	著 者 名	内 容 と 特 徴
発 生 を 避 け る	[13] ₁₉₆₇	Tomopoulos, N. T.	ラインバランシング問題と投入順序決定問題 (遊休時間, Utility 作業, 作業不足, 過剰な作業にペナルティを与え, ペナルティの合計の最小化を図る)
	[14] ₁₉₇₀	Tomopoulos, N. T.	作業者の作業がスムーズに行われるための混合製品のラインバランシング問題
	[15] ₁₉₇₅	Dar-EI, E. and Cother, R. F.	タイプ 1) とタイプ 2) の作業工程でトータルライン長さの最小化を図る
	[16] ₁₉₇₈	平木秀作, 青木兼一	タイプ 1) とタイプ 2) の作業工程を考慮し, 最大作業終了位置の最小化を図る
	[17] ₁₉₇₉	村松林太郎	生産比逆数方式
	[18] ₁₉₇₉	Okamura, K. and Yamashina, H.	単一工程での作業者の作業域の前方線よりの最大移動偏差の最小化を図り, 製品を挿入又は製品の交換で山と谷を崩すヒューリスティック解法の提案
	[19] ₁₉₉₁	Yano, C. A. and Rachamadugu, R.	Utility 作業合計の最小化
	[20] ₁₉₉₂	Bard, J. F. et al.	トータルライン長さの最小化
	[21] ₁₉₉₅	Tsai, L. H.	単一作業工程での Utility 作業合計の最小化と最大作業終了位置の最小化を図る
	[22] ₁₉₉₇	Bolat, A.	作業者のトータル残り作業を最小化するようなラインバランシング問題
発生する	[23] ₂₀₀₀	Xiaobo, Z. and Ohno, K.	トータルラインストップ時間の最小化

- 2) 開作業工程：作業域に制約がない場合，作業者は隣接の作業工程域に入って作業できる工程。
- 3) 半開半閉作業工程：タイプ1)とタイプ2)の合わせ，右開き左閉じと右閉じ左開きの2種類がある。

記号の定義

S ：作業工程の数

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

ul_s ：作業工程 s の後方線

ml_s ：作業工程 s の前方線

ll_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

sp_s^k ：作業工程 s で， k 番目に投入される製品の作業開始位置

fp_s^k ：作業工程 s で， k 番目に投入された製品の作業終了位置

Fp_s ：作業工程 s の最大作業終了位置

w_s^k ：作業工程 s で， k 番目に投入された製品の基準線 (ll_s) からの遅れ，作業遅れ

W^k ： k 番目に投入された製品の最大作業遅れ

uw_s^k ：作業工程 s で， k 番目に投入された製品の後方線 (ul_s) からの遅れ，Utility 作業

Uw^k ： k 番目に投入された製品の全作業工程での Utility 作業の和

$e_{i,k}$ ： k 番目に製品 i が投入されるときの 1，投入されないと 0 となる定数

T_s ：作業工程 s の平均作業時間

v ：最終組み立てラインのスピード

c ：製品が投入される間隔（サイクルタイム）

3.1 最大作業遅れの最小化，最大トータルライン長さの最小化を図る

タイプ1)の作業工程 s を対象とし， k 番目に投入される製品において，作業者の移動軌跡は式(3-4)と式(3-5)で与えられる。

$$\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} = 1 \quad (k=1, \dots, K) \quad (3-1)$$

$$\sum_{k=1, \dots, K} e_{i,k} = d_i \quad (i=1, \dots, I) \quad (3-2)$$

$$e_{i,k} (i=1, \dots, I; k=1, \dots, K) \in \{0, 1\} \quad (3-3)$$

$$fp_s^k = sp_s^k + \left(\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is} \right) \cdot v \quad (k=1, \dots, K; s=1, \dots, S) \quad (3-4)$$

$$sp_s^{(k+1)} = \max\{0, fp_s^k - v \cdot c\} \quad (k=1, \dots, K; s=1, \dots, S) \quad (3-5)$$

作業工程 s での作業遅れは式(3-6)で与えられる。

$$w_s^k = \max\{(fp_s^k - ll_s), 0\} \quad (k=1, \dots, K; s=1, \dots, S) \quad (3-6)$$

k 番目に投入された製品の最大作業遅れ W^k は式(3-7)で与えられる。

$$W^k = \max_{s=1, \dots, S} w_s^k \quad (k=1, \dots, K) \quad (3-7)$$

作業工程 s での最大作業終了位置は式(3-8)で与えられる。

$$Fp_s = \max_{k=1, \dots, K} fp_s^k \quad (s=1, \dots, S) \quad (3-8)$$

最大作業遅れの最小化は定義域 $E = \{e_{i,k} \mid e_{i,k} \ (i=1, \dots, I; k=1, \dots, K)\}$ において、式(3-1)～式(3-7)の制約のもとで、式(3-9)の最小化を図る。

$$f(E) = \max_{k=1, \dots, K} (W^k) \quad (3-9)$$

最大トータルライン長さの最小化は、定義域 $E = \{e_{i,k} \mid e_{i,k} \ (i=1, \dots, I; k=1, \dots, K)\}$ において、式(3-1)～式(3-5)と式(3-8)の制約のもとで、式(3-10)の最小化を図る。

$$f(E) = \sum_{s=1, \dots, S} (Fp_s) \quad (3-10)$$

3.2 Utility 作業の和の最小化

タイプ1)の作業工程を対象とする。作業時間の長い製品が流れてくると、作業者は自分の作業工程の後方線まで作業を行なった後、次の製品へ上流に向かい、残りの仕事は Utility 作業と呼び、Utility 作業により完成されるので、Utility 作業の和を最小化する。

作業工程 s で、 k 番目に投入される製品において、作業者の移動軌跡は式(3-11)と式(3-12)で与えられる。

$$fp_s^k = \min\{[sp_s^k + \left(\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is} \right) \cdot v], ul_s\} \quad (k=1, \dots, K; s=1, \dots, S) \quad (3-11)$$

$$sp_s^{(k+1)} = \max\{0, (fp_s^k - v \cdot c)\} \quad (k=1, \dots, K; s=1, \dots, S) \quad (3-12)$$

作業工程 s での Utility 作業は式(3-13)で与えられる。

$$uw_s^k = \max\{0, [sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v - ul_s]\} \quad (k=1, \dots, K; s=1, \dots, S) \quad (3-13)$$

k 番目に投入される製品の Utility 作業の和 Uw^k は式(3-14)で与えられる

$$Uw^k = \sum_{s=1, \dots, S} uw_s^k \quad (k=1, \dots, K) \quad (3-14)$$

Utility 作業の和の最小化は定義域 $E = \{e_{i,k} \mid e_{i,k} (i=1, \dots, I; k=1, \dots, K)\}$ において, 式(3-1)～式(3-3)と式(3-11)～式(3-14)の制約のもとで, 式(3-15)の最小化を図る。

$$f(E) = \sum_{k=1, \dots, K} Uw^k \quad (3-15)$$

3.3 トータルラインストップ時間の最小化

タイプ1) の作業工程を対象とし, 作業者が自分の作業域内で作業を終了できない場合, 作業域の後方線まで作業して, 残りの作業を完了するまでラインをストップするので, ラインストップ時間の最小化を図る。

z_s^k は作業工程 s で, k 番目に投入された製品のラインストップ時間とすると,

- 1) k 番目までに, ラインストップが発生してない場合, 作業者の移動軌跡は式(3-16)と(3-17)で与えられる。

$$fp_s^k = \min\{[sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v], ul_s\} = sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v \quad (3-16)$$

$$(s=1, \dots, S; k=1, \dots, K)$$

$$sp_s^{(k+1)} = \max\{0, (fp_s^k - v \cdot c)\} \quad (s=1, \dots, S; k=1, \dots, K) \quad (3-17)$$

$$z_s^k = \frac{1}{v} \max\{(sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v - ul_s), 0\} = 0 \quad (3-18)$$

$$(s=1, \dots, S; k=1, \dots, K)$$

- 2) k 番目の投入順序を決定するとき, 作業工程 s' で最初のラインストップが発生した場合, $s = s'$ のとき, 作業者の移動軌跡とラインストップ時間は式(3-19)～式(3-20)で与えられる。

$$fp_s^k = \min\{[sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v], ul_s\} = ul_s \quad (k=1, \dots, K) \quad (3-19)$$

$$sp_s^{(k+1)} = ul_s - v \cdot c \quad (k=1, \dots, K) \quad (3-20)$$

$$z_s^k = \frac{1}{v} \{sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v - ul_s\} \quad (k=1, \dots, K) \quad (3-21)$$

$s \neq s'$ のとき, 作業者の移動軌跡とラインストップの時間は5つのタイプに分けて分析している ([23])。

k 番目に投入された製品のトータルラインストップ時間を Z^k とし、式(3-22)で与えられる。

$$Z^k = \sum_{s=1, \dots, S} z_s^k \quad (k=1, \dots, K) \quad (3-22)$$

評価関数は定義域 $E = \{e_{i,k} \mid e_{i,k} (i=1, \dots, I; k=1, \dots, K)\}$ において、トータルラインストップ時間を最小化するように、式(3-23)の最小化を図る。

$$f(E) = \sum_{k=1, \dots, K} Z^k \quad (3-23)$$

4. 部品使用量の平準化（目標 1）と作業負荷の平準化（目標 2）を同時に考慮した研究

近年、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は、部品を供給するサブ

表 3 二つの目標を同時に考慮した従来の研究一覧表

分類	文献番号	著者	内容と特徴
二つの目標を同時に考慮する	[24] ₁₉₉₁	Miltenburg, J. and Goldstein, T.	目標 1：多段階工程（最終組み立てライン）での実際に生産される構成部品（製品）を構成部品（製品）ごとの各段階（最終組み立てライン）での全構成部品（全製品）での割合に近づけるように投入順序を決定する 目標 2：最終組み立てライン上の一つの代表的な作業工程を選択して、実際の累積作業時間をその工程の平均累積作業時間に近づけるように投入順序を決定する
	[25] ₁₉₉₄	Bard, J. et al.	目標 1：最終組み立てライン上の製品の実際投入量を製品ごとの割合と近づけるように投入順序を決定する 目標 2：最終組み立てラインの最大トータルライン長さを最小化するように投入順序を決定する
一つの目標を緩和する	[26] ₂₀₀₄	Kotani, S. et al.	目標 1：製品 g 台ごとの実際に使用される部品の量を平均使用量の $(1-\varepsilon^-)$ と $(1+\varepsilon^+)$ 倍の範囲内で制約する 目標 2：補助作業員を持つときのトータルラインストップ時間を最小化するように製品 u 台ごとの投入順序を決定する
	[27] ₂₀₀₄	小谷重徳	目標 1：文献 [26] と同様 目標 2：Utility 作業の和を最小化するように製品 u 台ごとの投入順序を決定する
二段階に分けて考慮する	[28] ₁₉₉₆	徐 祝淇, 平木秀作	第 1 段階：生産計画期間を部品の引取り時点で小期間に分割して、引き取り時点での部品の実際使用量を平均使用量と近づけるように小期間ごとの投入量を決定する（目標 1） 第 2 段階：タイプ 1), 2) の作業工程が組み合わせる場合、最大作業遅れを最小化するように、小期間ごとの投入順序を決定する（目標 2）
	[29] ₂₀₀₀	Zeramardini, W. et al.	第 1 段階：部品の引取り時点で小期間に分割して、【GC1】で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定する（目標 1） 第 2 段階：各小期間において、ラインストップを発生させないように、【ETS】解法と【IR】解法で改めて小期間の投入順序を決定する（目標 2）

注：【ETS】(Extended Time Spread), 【IR】(Interval Rule)

ライヤーと最終組み立てライン上の作業者の都合を同時に考慮した研究が中心となっている。二つの目標を同時に考慮した従来の研究については、表3に示す。

4.1 二つの目標を同時に考慮したモデルの定式化

モデルの定式化は、それぞれ目標の評価関数にパラメータ γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) をかけ、一つの評価関数で表す方法である。評価関数値をより正確に図るため、それぞれ目標の評価関数を基準化する手法が必要である。

4.1.1 文献 [24] のモデル定式化

文献 [24] に基づいた最終組み立てライン上の部品使用量の平準化と作業負荷の平準化を同時に図った定式化は、式(4-2)～式(4-8)の制約のもとで、式(4-1)の最小化を図る。

$$\text{評価関数: } f = \sum_{k=1, \dots, K} (\gamma \cdot f_{1,k}^2 + (1-\gamma) \cdot f_{2,k}^2) \quad (4-1)$$

$$\text{制約条件 } f_{1,k}^2 = [\omega_1 \cdot \sum_{i=1, \dots, I} (X_{i,k} - kp_i)]^2 \quad (k=1, \dots, K) \quad (4-2)$$

$$f_{2,k}^2 = \sum_s \omega_2^s [\sum_{i=1, \dots, I} t_{is} \cdot X_{i,k} - k \cdot T_s]^2 / (T_s)^2 \quad (k=1, \dots, K) \quad (4-3)$$

$$\sum_{i=1, \dots, I} X_{i,k} = k \quad (k=1, \dots, K) \quad (4-4)$$

$$X_{i,K} = d_i \quad (i=1, \dots, I) \quad (4-5)$$

$$X_{i,k} \geq X_{i,(k-1)} \quad (i=1, \dots, I; k=1, \dots, K) \quad (4-6)$$

$$X_{i,0} = 0 \quad (i=1, \dots, I) \quad (4-7)$$

$$T_s = (\sum_{i=1, \dots, I} t_{is} \cdot d_i) / \sum_{i=1, \dots, I} d_i \quad (s=1, \dots, S) \quad (4-8)$$

γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) はパラメータ、式(4-2)は累積投入量と累積割合の偏差の和を、式(4-3)は作業工程 s での累積作業時間と累積平均作業時間の偏差の和を示す。式(4-4)は k 番目までの各製品の投入量の和は投入された製品の数 k と等しくなる式を、式(4-5)は各製品の生産量を満たす式を、式(4-6)は一度に投入順序に得られると無効にはならない式を、式(4-7)は初期値を与え、式(4-8)は各作業工程での平均作業時間を表している。

文献 [24] では、上述した問題を解くために、文献 [2] の【MSH1】と【MSH2】の2つのヒューリスティックスを用いて、近似解を求めた。

【MSH1】は、 k 番目の投入順序を決定するには、 k 番目の評価関数値の最小となる製品 i^* を k 番目の投入順序として選ぶ近似解法である。

【MSH2】は、 k 番目の投入順序を決定するには、 k 番目に製品 i が投入され、 $(k+1)$ 番目

に製品 \bar{i} (【MSH1】により得られる) が投入されたと仮定し、 k 番目と $(k+1)$ 番目の評価関数の値の和を $F_{k,(k+1)}(\bar{i}, \bar{i})$ とする。すべての製品 $i(i=1, \dots, I)$, $\bar{i}(\bar{i}=1, \dots, I)$ において、 $\min_{i=1, \dots, I} \{F_{k,(k+1)}(i, \bar{i})\}$ となる製品 i^* を k 番目の投入順序として選ぶ近似解法である。

4.1.2 文献 [25] のモデル定式化

文献 [25] は、文献 [8] のモデル定式化を利用して部品使用量を平準化するとともに、最大トータルライン長さを最小化するように作業負荷の平準化を図る方法である。これは式 (4-10)～式 (4-15) の制約のもとで、式 (4-9) の最小化を図る。

$$\text{評価関数: } f = \gamma \cdot \left[\sum_{k=1, \dots, K} \sum_{i=1, \dots, I} \left| \sum_{q=1, \dots, k} \frac{e_{i,q}}{k} - p_i \right| \right] + (1-\gamma) \cdot \left[\sum_{s=1, \dots, S} Fp_s \right] \quad (4-9)$$

$$\text{制約条件 } \sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} = 1 \quad (k=1, \dots, K) \quad (4-10)$$

$$\sum_{k=1, \dots, K} e_{i,k} = d_i \quad (i=1, \dots, I) \quad (4-11)$$

$$fp_s^k = sp_s^k + \left(\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is} \right) \cdot v \quad (s=1, \dots, S; k=1, \dots, K) \quad (4-12)$$

$$sp_s^{k+1} = \max\{0, fp_s^k - v \cdot c\} \quad (s=1, \dots, S; k=1, \dots, K) \quad (4-13)$$

$$Fp_s = \max_{k=1, \dots, K} (fp_s^k) \quad (s=1, \dots, S) \quad (4-14)$$

$$Fp_s \leq ul_s \quad (s=1, \dots, S) \quad (4-15)$$

$\gamma(0 \leq \gamma \leq 1)$ はパラメータ、第 1 項目は実際の投入割合と製品ごとの理想の割合の差の絶対値の和を、第 2 項目は最大トータルライン長さを求めた式である。式 (4-12) と式 (4-13) は作業者の移動軌跡を示し、式 (4-14) は作業工程 s の作業域の長さを表す。

4.2 一つの目標を緩和するモデルの定式化

一つの目標を緩和するモデルの定式化は、作業負荷平準化を評価関数として残し、部品使用量平準化を平均使用量の $(1-\varepsilon^-)$, $(1+\varepsilon^+)$ 倍の範囲ないで制約条件に取り入れ、評価関数値のより小さい値を持つ投入順序を選ぶ方法である。

記号の定義

tz_n : n 番目のラインストップ時間

$TS(n)$: n 番目のラインストップが発生する時刻

$TF(n)$: n 番目のラインストップが終了する時刻

$Tsp_{s,k}^{(n)}$: n 番目のラインストップが発生した後、 k 番目の製品が作業工程 s に到着する時刻

- $Tfp_{s,k}^{(n)}$: n 番目のラインストップが発生した後, k 番目の製品が作業工程 s を離れる時刻
 $tsp_{s,k}$: k 番目の製品が作業工程 s に到着する時刻
 $tfp_{s,k}$: k 番目の製品が作業工程 s を離れる時刻
 $\lambda_{(k-1,k)}$: 作業者の $(k-1)$ 番目の製品に作業を終了して, k 番目の製品に作業が始まるまでの時間間隔
 $TR_{s,k}$: 作業工程 s で k 番目の製品の作業が終了できないとき, 補助作業者の到着する時刻
 u : 一回に投入する製品の数
 G : 生産計画中に投入順序の作成回数 $G = \lceil K/u \rceil$
 ϕ_π : π 回目の投入順序を決めるための投入順序付け問題 ($\pi = 1, \dots, G$)
 $B_{i,\pi}$: 問題 ϕ_π における製品 i の数
 $R_{j,\pi}$: 問題 ϕ_π における製品の生産に必要な部品 j の数
 $Y_{j,\pi}^k$: 問題 ϕ_π における k 番目の製品までに使用される部品 j の実際使用量
 $r_{j,\pi}^k$: 問題 ϕ_π における k 番目の製品までに使用される部品 j の累積平均使用量
 $D_{j,\pi}$: 問題 ϕ_π における部品 j の累積平均使用量と実際使用量の差 $D_{j,\pi} = |Y_{j,\pi}^u - r_{j,\pi}^u|$

4.2.1 文献 [26] のモデル定式化

文献 [26] は, 作業者の移動軌跡を距離ではなく, 時間で与え, トータルラインストップ時間を最小化するように定式化している。

n 番目のラインストップが発生した後, 作業工程 s での作業者の移動軌跡は式 (4-16) と式 (4-17) で与えられる。

$$\text{作業開始時刻 } tsp_{s,k} = \begin{cases} 0 & (s=1) \\ Tsp_{s,1}^{(n)} & (s \geq 2) \\ \max\{Tsp_{s,k}^{(n)}, tfp_{s,k-1} + \lambda_{(k-1,k)}\} & k \geq 2 \text{ の時} \end{cases} \quad (4-16)$$

$(s=1, \dots, S; k=1, \dots, K)$

$$wfp_{s,k} = tsp_{s,k} + \sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is} \quad (s=1, \dots, S; k=1, \dots, K) \text{ とすると,}$$

$$\text{作業終了時刻 } tfp_{s,k} = \begin{cases} wfp_{s,k} & wfp_{s,k} \leq Tfp_{s,k}^{(n)} \\ TR_{s,k} + (wfp_{s,k} - TR_{s,k})/2 & wfp_{s,k} > Tfp_{s,k}^{(n)} \end{cases} \quad (4-17)$$

$(s=1, \dots, S; k=1, \dots, K)$

ただし, 式(4-17)で Utility 作業量は二人で分割するように仮定されるので, Utility 作業に対する作業時間は半分まで減る。

$tfp_{s,k} \leq Tfp_{s,k}^{(n)}$ ならば, ラインストップが発生しない, $tfp_{s,k} > Tfp_{s,k}^{(n)}$ ならば, $(n+1)$ 番目の

ラインストップが発生し、 $(n+1)$ 番目のラインストップ時間は式(4-18)で与えられる。

$$tz_{n+1} = tfp_{s,k} - Tfp_{s,k}^{(n)} \quad (s=1, \dots, S; k=1, \dots, K; n=1, \dots, N) \quad (4-18)$$

部品使用量の平準化は g 台ごとに図り、式(4-19)で与えられる。

$$(1 - \varepsilon^-)r_{j,\pi}^k \leq Y_{j,\pi}^k \leq (1 + \varepsilon^+)r_{j,\pi}^k \quad (j=1, \dots, J; k=g, 2g, \dots, \lfloor K/g \rfloor g) \quad (4-19)$$

ただし、 $0 \leq \varepsilon^-, \varepsilon^+ \leq 1$ のパラメータ、 $\lfloor \alpha \rfloor$ は α より小さい最大整数を示す。

評価関数は u 台ごとにトータルラインストップ時間の最小化を図り、式(4-16)～(4-19)の制約のもとで、式(4-20)の最小化を図る。

$$\text{評価関数 } f([\theta_1, \dots, \theta_u]) = \sum_{n=1, \dots, N} tz_n \quad (4-20)$$

4.2.2 文献 [27] のモデル定式化

文献 [27] は、ラインストップが発生しないという前提条件を仮定し、部品使用量平準化の制約条件のもとで、すべての作業工程での Utility 作業の和を最小化するように u 台ずつ投入順序を決定する問題である。

π 回目の投入順序において、作業者の移動軌跡は式(4-24)と式(4-25)で与えられる。

$$\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} = 1 \quad (k=1, \dots, u) \quad (4-21)$$

$$\sum_{k=1, \dots, K} e_{i,k} = d_i \quad (i=1, \dots, I) \quad (4-22)$$

$$e_{i,k} (i=1, \dots, I; k=1, \dots, u) \in \{0, 1\} \quad (4-23)$$

$$fp_s^k = \min\{[sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v], ul_s\} \quad (4-24)$$

$$sp_s^{k+1} = \max\{\min\{[sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v], ul_s\} - v \cdot c, 0\} \quad (4-25)$$

作業工程 s で、 $[sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is})] > ul_s$ のとき、Utility 作業者の支援を受けることになり、Utility 作業は式(4-26)で与えられる。

$$uw_s^k = sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v - ul_s \quad (4-26)$$

投入順序 ϕ_π を作成するには、定義域 $E = \{e_{i,k} \mid e_{i,k} (i=1, \dots, I; k=1, \dots, K)\}$ において、式(4-19)と式(4-21)～式(4-26)の制約のもとで、すべての作業工程に生じる Utility 作業の和を

最小化するよう式(4-27)の最小化を図る。

$$f(E) = \sum_{k=1, \dots, u} \sum_{s=1, \dots, S} uw_s^k \quad (4-27)$$

4.3 二つの目標を二段階に分けて考慮したモデルの定式化

二つの目標を二段階に分けて考慮した研究の基本的な発想は、最終組み立てライン上の部品の調達が頻繁に行われることに注目し、部品の引取り時点で計画期間をいくつかの小期間に分割して、第1段階では部品使用量の平準化を考慮して、小期間の各製品の投入量を決定する。第2段階では、小期間ごとの各製品の投入量のもとで、作業負荷の平準化を図り各小期間での投入順序を決定する。

記号

σ : 部品引取り時点の集合

δ_k : 引取り時点において引取りを行われる部品番号の集合

l : 小期間の番号 ($l=1, \dots, L$)

LT_s^l : 小期間 l に、作業工程 s の総組み立て時間

$tt_{s(k-1)}^l$: 小期間 l に、作業工程 s の $(k-1)$ 番目の投入順序までの累積作業時間

h_i^l : 小期間 l の製品 i の投入量

h_l : 小期間 l の総投入量

4.3.1 文献 [28] のモデル定式化

第1段階では、各引取り時点で引取りが行われる部品の量とその時点ま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、各製品の引き取り時点までの投入量を決定する。これは式(4-29)～式(4-32)の制約のもとで、式(4-28)の最小化を図る。

$$\text{評価関数 } f = \sum_{k \in \sigma} \sum_{j \in \delta_k} |k \cdot r_j - Y_{j,k}| \quad (4-28)$$

$$\text{制約条件 } X_{i,k} = d_i \quad (i=1, \dots, I) \quad (4-29)$$

$$\sum_{i=1, \dots, I} X_{i,k} = k \quad (k \in \sigma) \quad (4-30)$$

$$Y_{j,k} = \sum_{i=1, \dots, I} X_{i,k} \cdot a_{ij} \quad (j \in \delta_k; k \in \sigma) \quad (4-31)$$

$$X_{i,k}, Y_{j,k} : \text{非負整数} \quad (4-32)$$

第2段階では、共同作業域という概念を用いて、タイプ1)とタイプ2)の2種類の作業工程における作業遅れを次のように定義した。

タイプ1)の場合：次の作業工程と共同作業域が存在しない、作業工程の基準線からの遅れを作業遅れと定義する

タイプ2)の場合：次の作業工程と共同作業域が存在し、次の作業工程の前方線からの遅れを作業遅れと定義する

ある小期間 l に投入される製品の作業負荷の平準化は、最大作業遅れを最小化するように、式(4-34)～式(4-40)の制約のもとで、式(4-33)の最小化を図る（小期間の番号 l は省略する）。

$$\text{評価関数： } f = (\max_{k=1, \dots, h} (W^k)) \quad (4-33)$$

$$\text{制約条件 } \sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} = 1 \quad (k=1, \dots, h) \quad (4-34)$$

$$\sum_{k=1, \dots, h} e_{i,k} = d_i \quad (i=1, \dots, I) \quad (4-35)$$

$$e_{i,k} (i=1, \dots, I; k=1, \dots, h) \in \{0, 1\} \quad (4-36)$$

$$fp_s^k = sp_s^k + (\sum_{i=1, \dots, I} e_{i,k} \cdot t_{is}) \cdot v \quad (k=1, \dots, h; s=1, \dots, S) \quad (4-37)$$

$$sp_s^{k+1} = \max[fp_{s-1}^{k+1}, ml_s, (fp_s^k - v \cdot c)] \quad (k=1, \dots, h; s=1, \dots, S) \quad (4-38)$$

$$w_s^k = \begin{cases} \max(0, (fp_s^k - ll_s)) & \text{タイプ1)の場合} \\ \max(0, (fp_s^k - ml_{s+1})) & \text{タイプ2)の場合} \end{cases} \quad (4-39)$$

$(k=1, \dots, h; s=1, \dots, S)$

$$W^k = \max_{s=1, \dots, S} w_s^k \quad (k=1, \dots, h) \quad (4-40)$$

作業者の移動軌跡は式(4-37)と式(4-38)で与えられ、式(4-39)と式(4-40)は作業遅れと最大作業遅れを計算している。

4.3.2 文献 [29] のモデル定式化

第1段階では、【GC1】の評価関数を用いて、【MSH2】の近似解法で部品使用量の平準化を図り、各小期間中の製品の投入量を決める。

第2段階では各小期間の各製品の投入量に基づいて、ラインストップを発生させないように、【ETS】解法を用いて改めて小期間ごとの投入順序を決定する。

【ETS】解法は【GC1】と同じ原理を用いて、累積作業時間の累積平均作業時間からの偏差の和を求める方法であり、式(4-41)で与えられる（小期間の番号 l は省略する）。計算方法

は第1段階と同じように、【MSH2】の近似解法を用いて、投入順序を求めた。

$$f_{ik} = \sqrt{\sum_{s=1, \dots, S} \left(\frac{k \cdot LT_s}{h} - tt_{s(k-1)} - t_{is} \right)^2} \quad (i=1, \dots, I; k=1, \dots, h) \quad (4-41)$$

5. 数値例による比較

本節では、上述した従来の研究に関して、数値例により比較し、検証する。

製品種類数 $I = 4$ 、各製品の生産量 $d_1 = 30, d_2 = 40, d_3 = 30, d_4 = 20$ 、部品種類数 $J = 6$ 、作業工程数 $S = 8$ 、サイクルタイム $c = 60$ 秒、コンベヤースピード $v = 0.1$ メートル/秒の問題を考える。表4は部品表と引取り時点を、表5は各製品の各作業工程での作業時間をそれぞれ示す。すべての作業工程での作業開始位置は作業工程の前方線から始まるとする。

表4 部品表と引取り時点

製品 部品	部品表 (1)				部品表 (2)				引取り時点			
	1	2	3	4	1	2	3	4	40	60	80	120
1	0	1	0	1	1	0	1	3	1	0	1	1
2	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
3	1	0	0	0	1	2	1	0	0	1	0	1
4	0	1	1	1	1	3	2	1	0	1	0	1
5	1	0	0	0	2	1	0	1	0	1	0	1
6	0	1	1	0	2	1	1	3	0	0	0	1

注：黒い数字は製品の番号を示す（以下同様）。

表5 製品ごとに各作業工程での作業時間（秒）

製品 工程	作業時間 (秒)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	65	67	70	62	70	65	68	65
2	60	68	45	60	48	65	50	48
3	50	40	62	40	70	58	57	65
4	40	55	50	35	45	35	50	52

5.1 部品使用量の平準化（目標1）を考慮した投入順序結果

製品の生産量はそれぞれ30, 40, 30, 20であり、その混合比は3:4:3:2となる。本数値例では計算を簡単にするため、混合比での投入順序を決定し、それを10回繰り返したものを計画期間の投入順序とする。部品使用量平準化を考慮した従来の研究において、【GC1】、【GC2】と【MA1】の3つの解法による投入順序結果を比較する。

表4の部品表(1)は製品ごとに使用される部品の種類数と数が同じという条件を満たすように作られたもので、部品表(2)は一般化された部品使用量となり、2つの部品表に基づいた、【GC1】、【GC2】、【MA1】による投入順序結果はそれぞれ表6(1)と表6(2)で示す。

表6(1)では、【GC1】と【GC2】は同じ投入順序結果を示し、【MA1】は評価関数の値が9.09の一番小さい値を持つ最適解が求められた。つまり、部品表(1)の条件を満たす場合、【GC2】と【MA1】を用いて投入順序を決定することで、計算を単純化し、効率を上げることがわかる。

表6(1) 部品表(1)に基づいた投入順序結果

解法	投入順序	$\sum_{k=1, \dots, 12} f_{i'k}$	$\max_{k=1, \dots, 12} W^k$ (メートル)	ライン長さ (メートル)
GC1	3 4 1 2 2 1 3 2 4 3 1 2	9.48	3.0	59.7
GC2	3 4 1 2 2 1 3 2 4 3 1 2	9.48	3.0	59.7
MA1	2 1 3 4 2 3 1 2 4 1 3 2	9.09	2.0	56.7

表6(2) 部品表(2)に基づいた投入順序結果

解法	投入順序	$\sum_{k=1, \dots, 12} f_{i'k}$	$\max_{k=1, \dots, 12} W^k$ (メートル)	ライン長さ (メートル)
GC1	3 1 2 4 2 1 3 3 1 2 4 2	13.63	4.0	62.2
GC2	2 4 2 4 2 1 2 1 3 3 1 3	21.03	5.0	66.2
MA1	2 1 3 4 2 3 1 2 4 1 3 2	15.81	2.0	56.7

しかし、表6(2)では、【GC1】は最小値の13.63の投入順序が求められたが、【GC2】と【MA1】はそれぞれ21.03と15.81の【GC1】より大きい値の投入順序が求められた。部品表(2)のように、一般化された場合は、【GC2】と【MA1】は部品の平均使用量からの偏差の大きい投入順序が得られる可能性がある。

また、最大作業遅れとラインの長さは、表6(1)の最大値はそれぞれ3.0と59.7メートル、表6(2)の最大値はそれぞれ5と66.2メートルとなり、作業負荷が大きいことがわかる。

5.2 作業負荷の平準化（目標2）を考慮した投入順序結果

作業負荷の平準化を考慮した従来の研究では、最大作業遅れの最小化、【ETS】、トータルライン長さの最小化と Utility 作業の和の最小化の4つの解法による投入順序結果を示す。

表7の評価関数の列では、Aは最大作業遅れの最小化を、Bは【ETS】を、Cはトータルライン長さの最小化を、DはUtility作業の和の最小化をそれぞれ示す。

A, CとD（すべての作業工程の作業域が6メートル）の場合、最大作業遅れは1.5メート

ル、ライン長さは54.8メートルの最適投入順序が求められた。B は作業者の移動軌跡を考慮しないで、各作業工程の累積作業時間の累積平均作業時間からの偏差の和の最小化で評価するため、最大作業遅れは2.0メートル、ライン長さは57.0メートルの少し大きい値の投入順序が求められた。D は Utility 作業の和の最小化を図り、作業域を小さくすれば、遅れの小さい投入順序（6メートルのとき最大作業遅れは1.5メートル）が得られ、作業域を大きくすれば、遅れの大きい投入順序（8メートルのとき最大作業遅れは2.0）が得られる。

また、表7の部品使用量の平均使用量から偏差の和は部品表(2)を用いて計算した結果を示し、表6(2)より大きい値が求められ、部品使用量の変動が大きいことがわかる。

表7 作業負荷の平準化を考慮した投入順序

評価関数	投入順序	$\sum_{k=1, \dots, 12} f_{i^k}$	$\max_{k=1, \dots, 12} W^k$ (メートル)	ライン長さ (メートル)	
A	2 3 2 1 4 3 2 1 4 3 2 1	21.85	1.5	54.8	
B	2 3 1 4 2 1 3 2 3 2 4 1	18.38	2.0	57.0	
C	2 3 2 1 4 3 2 1 4 3 2 1	21.85	1.5	54.8	
D	6 (メートル)	1 4 2 3 2 1 4 3 2 3 2 1	21.99	1.5	54.8
	7 (メートル)	1 4 1 4 1 2 3 2 3 2 3 2	52.32	1.9	55.8
	8 (メートル)	1 1 4 1 4 2 3 2 2 3 2 3	49.39	2.0	59.5

5.3 二つの目標を同時に考慮した投入順序結果

2つの目標を同時に考慮した従来の研究において、4.1.1の [24]、4.3.1の [28] と4.3.2の [29] の3つのモデルによる投入順序結果を示す。

表8(1)は、パラメータ $\gamma = 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1$ の場合、 k 番目の投入順序を決定するには、 k 番目の評価関数式(4-1)の値の最小値を持つ製品を選ぶ【MSH1】の方法を用いて、製品の投入順序を決定した結果を示す。 $\gamma = 0.2$ の場合、部品使用量偏差の和は12.68、最大作業遅れは2.5メートル、ライン長さは57.5メートルの一番よい投入順序が求められた。

表8(2)は、パラメータ $\gamma = 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1$ の場合、 k 番目の投入順序を決定するには、評価関数式(4-1)の値は k 番目と $(k+1)$ 番目の値の和の最小値を持つ製品を選ぶ【MSH2】の方法を用いて、投入順序を決定した結果を示す。評価関数は次の段階の影響まで考慮するため、 $\gamma = 0.2, 0.5, 0.8$ の場合、部品使用量偏差の和は12.68、最大作業遅れは2.5メートル、ライン長さは57.5メートルの投入順序が求められた。

表8(1)の $\gamma = 0.2$ と表8(2)の $\gamma = 0.2, 0.5, 0.8$ の場合、部品使用量の変動量と最大作業遅れは比較的に小さい値を持つ投入順序が求められた。

表 8(1) 4.1.1の [24] モデルによる投入順序 ([MSH1])

パラメータ	投入順序	$\sum_{k=1,\dots,12} f_{ik}$	$\max_{k=1,\dots,12} W^k$ (メートル)	ライン長さ (メートル)
$\lambda = 0$	231421323241	18.37	2.0	57.0
$\gamma = 0.2$	312421324213	12.68	2.5	57.5
$\gamma = 0.5$	312421331242	13.63	4.0	62.2
$\gamma = 0.8$	312421331242	13.63	4.0	62.2
$\gamma = 1$	312421331242	13.63	4.0	62.2

表 8(2) 4.1.1の [24] モデルによる投入順序 ([MSH2])

パラメータ	投入順序	$\sum_{k=1,\dots,12} f_{ik}$	$\max_{k=1,\dots,12} W^k$ (メートル)	ライン長さ (メートル)
$\gamma = 0$	231423124132	16.47	2.0	56.7
$\gamma = 0.2$	312421324213	12.68	2.5	57.5
$\gamma = 0.5$	312421324213	12.68	2.5	57.5
$\gamma = 0.8$	312421324213	12.68	2.5	57.5
$\gamma = 1$	312421331242	13.63	4.0	62.2

表 9(1), 表 9(2), 表 10(1), 表 10(2)は二段階にわけて投入順序を決定する方法による計算結果を示す。表 4 の部品の引取り時点は40, 60, 80, 120の 4 回で行われるので, 生産計画期間は4つの小期間に分割される。引取り時点で引取りを行われる部品の集合は $\delta_{40} = \{1,2\}$, $\delta_{60} = \{3,4,5\}$, $\delta_{80} = \{1,2\}$, $\delta_{120} = \{1,2,3,4,5,6\}$ となる。

表 9(1)と表 9(2)は, 4.3.1の [28] モデルによる第 1 段階での小期間の各製品の投入量と第 2 段階での小期間の各製品の投入順序をそれぞれ示す。

表 9(1)の引取り時点で, すべての部品の累積平均使用量からの偏差は6.46, 0, 6.46と 0 となり, トータルで12.92になるのが, 引取りを行われる部品の平均累積使用量からの偏差は 0 となり, 引取り時点で引取りを行われる部品は平準化されている。

表 9(1) 4.3.1の [28] モデルによる各小期間の各製品の投入量

小期間 \ 製品	1	2	3	4	引取り時点での部品使用量偏差
1	10	10	15	5	6.46 (0)
2	5	10	0	5	0 (0)
3	5	10	0	5	6.46 (0)
4	10	10	15	5	0 (0)

注: () 中の数字は引取り時点で, 引取りを行われる部品の累積平均使用量からの変動量を示す。

表 9 (2) 4.3.1の [28] モデルによる各小期間の投入順序

小期間	投入順序	$\max W^k$ (メートル)	ライン長さ (メートル)
1	1 2 3 2 3 1 4 3	2.0	56.8
2	2 1 4 2	1.8	54.8
3	1 2 3 2 3 1 4 3	2.0	56.8
4	2 1 4 2	1.8	54.8

表 9(2)は表 9(1)の小期間の投入量に基づいた小期間の投入量の混合比の投入順序結果を示し、小期間 1 と 3 の最大作業遅れは2.0メートル、小期間 2 と 4 の最大作業遅れは1.8メートルとなり、比較的作業遅れの小さい投入順序が求められた。

表10(1)と表10(2)は、4.3.2 [29] のモデルによる第 1 段階での小期間の各製品の投入量と第 2 段階での小期間の各製品の投入順序をそれぞれ示す。

表10(1)に示されているように、各引取り時点での部品使用量の偏差はそれぞれ1.53,0,1.53,0 となり、トータル偏差は2.82となる。

小期間ごとの投入順序は表10(2)に示す、最大作業遅れはそれぞれ2.0, 2.1, 3.1, 2.1メートルとなり、小期間 3 の作業遅れが少し大きい値となるが、ほかの小期間では最大作業遅れが比較的小さい投入順序が求められた。

表 10 (1) 4.3.2の [29] モデルによる各小期間の各製品の投入量

小期間 \ 製品	1	2	3	4	引取り時点での部品使用量偏差
1	10	13	10	7	1.53
2	5	7	5	3	0
3	5	6	6	3	1.29
4	10	14	9	7	0

表 10 (2) 4.3.2の [29] モデルによる各小期間の投入順序

小期間	投入順序	$\max_{k=1,\dots,h_i} W^k$ (メートル)	ライン長さ (メートル)
1	2314231241323214231241323241231421324132	2.0	57.1
2	23142132321423124132	2.1	57.6
3	32142313214231324123	3.1	58.9
4	2314213241232321414232132412321423123241	2.1	57.8

6. ま と め

本研究では、最終組み立てライン上の投入順序決定方法に関する従来の研究を調査するとともに、数値例により比較することで、以下の点を明らかにした。

- 1) 目標 1 を考慮した研究において、製品ごとに使用される部品の種類数と数がほぼ同じの場合、製品投入速度の平準化を図る方法は、計算を単純化し、よい投入順序が求められる。部品表が上述した条件を満たさない場合、部品使用量の平準化を図る方法は平均使用量からの偏差が小さい投入順序が求められる。ところで、部品使用量の平準化のみを図った投入順序に対しては、作業負荷が大きい値になる場合がある。
- 2) 目標 2 を考慮した研究において、最大作業遅れの最小化、【ETS】、トータルライン長さの最小化、Utility 作業の和の最小化、ラインストップ時間の最小化などの研究を示し、数値実験では最大作業遅れの最小化、トータルライン長さの最小化は作業遅れの小さい投入順序が得られた。しかし、作業負荷の平準化のみを図った投入順序に対しては、部品使用量の変動量が大きい場合がある。
- 3) 二つの目標を同時に考慮した研究において、部品使用量の変動と作業負荷が比較的に小さい投入順序が求められ、サプライヤーの生産を安定させるとともに、最終組み立てライン上の作業者の作業遅れも小さくすることがわかる。

参 考 文 献

- [1] 小谷重徳：(1983) “混合ラインへの投入順序付けの近似解法”，トヨタ技術，第33巻，第1号，pp. 31-38
- [2] Miltenburg, J. and Sinnamon, G.: (1989) “Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems”, Int. J. Prod. Res., Vol. 27, No. 9, pp. 1487-1509
- [3] Groeflin, H., Luss, H., Rosenwein, M. B. and Wahls, E. T.: (1989) “Final assembly sequencing for just-in-time manufacturing”, Int. J. Prod. Res., Vol. 27, No. 2, pp. 199-213
- [4] Inman, R. R. and Bulfin, R. L.: (1992) “Quick and dirty sequencing for mixed-model JIT systems”, Int. J. Prod. Res., Vol. 30, No. 9, pp. 2011-2018
- [5] Cakir, A. and Inman, R. R.: (1993) “Modified goal chasing for products with non-zero/one bills of material”, Int. J. Prod. Res., Vol. 31, No. 1, pp. 107-115
- [6] Xiaobo, Z. and Zhou, Z.: (1999) “Algorithms for toyota’s goal of sequencing mixed models on an assembly line with multiple workstations”, J. Opera. Res. Soc., Vol. 50, pp. 704-710
- [7] Kurashige, K., Yanagawa, Y., Miyazaki, S. and Kameyama, Y.: (2002) “Time-based goal chasing method for mixed-model assembly line problem with multiple work stations”, Prod. Plan. & Contr., Vol. 13, No. 8, pp. 735-745
- [8] Miltenburg, J.: (1989) “Level schedules for mixed model assembly lines in just-in-time production systems”, Manage. Sci., Vol. 35, No. 2, pp. 192-207
- [9] Inman, R. R. and Bulfin, R. L.: (1991) “Sequencing JIT mixed-model assembly lines”, Manage. Sci.,

- Vol. 37, No. 7, pp. 901–904
- [10] Sumichrast, R. T. and Russell, R. S.: (1990) “Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems”, *J. Opera. Manage.*, Vol. 9, No. 3, pp. 371–390
- [11] Sumichrast, R. T., Russell, R. S. and Taylor, B. W.: (1992) “A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in a just-in-time production system”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 30, No. 1, pp. 199–214
- [12] Duplaga, E. A. and Bragg, D. J.: (1998) “Mixed-model assembly line sequencing heuristics for smoothing component parts usage: a comparative analysis”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 36, No. 8, pp. 2209–2224
- [13] Tomopoulos, N. T.: (1967) “Line balancing sequencing for mixed-model assembly”, *Manage. Sci.*, Vol. 14, No. 2, pp. B59–B75
- [14] Tomopoulos, N. T.: (1970) “Mixed model line balancing with smoothed station assignments”, *Manage. Sci.*, Vol. 16, No. 9, pp. 593–603
- [15] Dar-EI, E. and Cother, R. F.: (1975) “Assembly line sequencing for model mix”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 13, No. 5, pp. 463–477
- [16] 平木秀作, 青木兼一: (1978) “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
- [17] 村松林太郎: (1979) 「生産管理の基礎」, 国元書房
- [18] Okamura, K. and Yamashina, H.: (1979) “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
- [19] Yano, C. A. and Rachamadugu, R.: (1991) “Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options”, *Manage. Sci.*, Vol. 37, No. 5, pp. 572–586
- [20] Bard, J. F., Dar-eI, E. and Shtub, A.: (1992) “An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 30, No. 1, pp. 35–48
- [21] Tsai, L. H.: (1995) “Mixed-model sequencing to minimize work and the risk of conveyor stoppage”, *Manage. Sci.*, Vol. 41, No. 3, pp. 485–495
- [22] Bolat, A.: (1997) “Efficient methods for sequencing minimum job sets on mixed model assembly lines”, *Nava. Res. Loges.*, Vol. 44, pp. 419–437
- [23] Xiaobo, Z. and Ohno, K.: (2000) “Properties of a sequencing problem for a mixed model assembly line with conveyor stoppages”, *Euro. J. Opera. Res.*, 124, pp. 560–570
- [24] Miltenburg, J. and Goldstein, T.: (1991) “Developing production schedules which balance part usage and smooth production loads for just-in-time production systems”, *Nav. Res. Log.*, Vol. 38, No. 6, pp. 893–910
- [25] Bard, J. F., Shtub, A. and Joshi, S. B.: (1994) “Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 32, No. 10, pp. 2431–2454
- [26] Kotani, S., Ito, T. and Ohno, K.: (2004) “Sequencing problem for a mixed-model assembly line in the Toyota production system”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 42, No. 23, pp. 4955–4974
- [27] 小谷重徳: (2004) “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
- [28] 徐 祝淇, 平木秀作: (1996) “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
- [29] Zeramdini, W., Aigbedo, H. and Monden, Y.: (2000) “Bicriteria sequencing for just-in-time mixed-model assembly lines”, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 38, No. 15, pp. 3451–3470