

自己完結型混合ラインの設計に関する研究

徐 祝 淇

1. 経済環境の変化

近年、自動車産業を取り巻く経済環境には、大きな変化が見られる。自動車生産ラインの設計・運営に関する特徴として、つぎのいくつかの点を挙げることができる。

(1) 自動車産業のグローバル化が進み、企業間の国際競争がますます激しくなっている。企業は高品質の製品を低価格で迅速に市場へ提供しなければならない。

(2) 商品のライフサイクルが短縮化され、製品がますます多仕様化・多品種化されている。また環境負荷の低減につながる新商品の開発も進み、新商品の開発・生産準備期間の大幅な短縮が求められている。

(3) 生産における無駄な要素を極力排除し、コストを低減し生産性を向上することが求められる。

(4) 消費者が注文した製品の納期の短縮が求められている。市場ニーズにあった多品種の製品を迅速に提供するために、生産システムの柔軟性が求められる。

(5) 若者の製造業離れ、若年男子労働力の減少、離職率の上昇による人手不足、労働時間の短縮、仕事への達成感の重視、女性や中高年の製造現場の進出などへの対策が一層深刻な問題となり、作業員にとって作業しやすい作業環境づくりが不可欠となる。

上述のような経済環境の変化のなかで、各自動車メーカーは、低コストで高品質と高収益を確保するためには、ひたすら生産能力の増大や高度自動化などを中心として従来のシステムを経済環境の変化に適応できる柔軟な生産システムに変えなければならない。

2. 混合ラインの柔軟性

自動車産業では、さまざまな観点から自動車組

立ラインの柔軟性を高めようとしている。生産システムの柔軟性は以下の7つのタイプに分類できる。

- (1) 機械設備の柔軟性
- (2) 加工手順の柔軟性
- (3) 作業の柔軟性
- (4) 製品の柔軟性
- (5) 作業工程の柔軟性
- (6) 生産量の柔軟性
- (7) 品種構成の柔軟性

1. で論じた自動車産業を取り巻く経済環境の変化のもとで、製品の多仕様化・多品種化を汎用機械や部品の共通化などで対応する必要があるが、自動車組立ラインの設計にあたっては、作業工程の柔軟性を講じる必要がある。

(1) 品種指示の方法としては、ボディに吊した車種・部品指示紙やバーコード、ICタグなどでさまざまなメディアや方式が導入されている。

(2) 複数の作業工程で各種の部品の組み付けの標準作業をマスターした多能工が求められている。

(3) 製品の多品種によって負荷のアンバランスが生じる。負荷をなるべく平準化する必要がある。

このような工夫・改善によって、多品種の製品（車）が混合品種組立ラインに流れ、さまざまな部品の組み付け作業が比較的順調に行われるような生産システムが構築される。さらに、エンジンやシートなどの多品種部品もあらかじめ提示された順序でラインサイドに提供する部品供給システムが構築されている。

3. 自己完結型混合ラインの導入

生産システムに適応する生産管理方式を設計するためには、生産システムの構成要素を総合的に考慮しなければならない。業種・工場によってこれらの構成要素の性質が異なるので、各生産工場の生産管理方式もそれぞれの特徴を持つ。さら

に、業種・工場を取り巻く経済環境の変化に伴い、構成要素の性質が常に変化するので、生産システムや生産管理方式も常に変化している。

日本の自動車産業においては、自動車の最終組立工場が混合ラインを用いて完成車の組立を行っている。自動車の最終組立ラインでは、塗装されたボディにさまざまなサブアセンブリされた部品（例えばエンジン、トランスミッション、フレーム、タイヤ、計器盤、ドアなど、以下単に部品とよぶ）を組み付けて、車両検査を経て自動車を完成させる。一台の乗用車は、通常2000～3000点にのぼるこれらの部品と、それらの締結部品から組み立てられる[1]。混合ラインとは、1つのラインで数種類の車種の車を混合して組み立てる生産ラインである。1車種の車はさらに数種類（分類方法によって数十種類に分類される場合もある）の車種の製品への対応が必要である。製品の多品種化によって、実際の混合ラインにおいては、数千種類の部品が在庫・管理されている。

混合ラインでの組立作業は、製品品種を識別したうえで、組み付け部品の確認、搬送（移動）、位置決め、結合、検査など極めて複雑、多様な作業が含まれており、柔軟性が高く、人しかできない作業も多く存在するので、人が組立作業の中心とならざるをえない。そのため、作業者のやる気、やりがいの有無が製品の品質や生産性に大きな影響を与えている。労働集約型である混合ラインでは、生産性を高めるために、「従業員満足」が生産システムの設計や生産管理方式の改善の重要な一因となりつつある。1980年代の後半から、国内・海外市場と労働力の変化に対応して、日本の自動車産業においては、生産システムの再構築が行われ、いくつかの新しい生産管理方式も提案された[1][2]。

トヨタ自動車を始め、一部の日本の自動車メーカーは、1980年代後半から90年代の前半をかけて、「魅力ある生産現場」を指向した自動化率の比較的高い混合ラインの設計・建設を試みた。しかし、このような「大規模な自動化方式」は技術的にも、経済的に自動化の範囲に限界があり、いくつかの問題点も指摘された[3]。

(1) 設備投資の増大とともに、工場スペースやメンテナンス人員の確保が必要となり、結果的に高い生産コストがかかる。

(2) 自動化設備があまりに複雑、高度、巨大になりすぎると、モデルチェンジなどにより製品品種の変化に素早く対応する生産システムの柔軟性が失われる可能性がある。

(3) 高度な専門知識が必要になるとともに、作業の単純化が進み、作業者の労働意欲が低下し、仕事へのやりがいや達成感も感じられなくなる可能性がある。

他方、一部の欧米の自動車メーカーがコンベア生産方式の代わりに、グループ作業によるセル生産方式などの「脱コンベア生産方式」を導入している。生産性と品質の低下や部品・製品在庫の拡大につながる可能性があるので、日本国内の自動車の最終組立工場においては、現時点では完全な「脱コンベア生産方式」の導入が難しい。

太田[1]は自動車産業を取り巻く経済環境の変化に対応し、これからの新しい混合ラインの設計のコンセプトとして、次の4つの要点を指摘している。

(1) 作業者の動機を高める生産ラインを設計する。

(2) 職場の高齢化、女性の職場進出を考慮し、作業負担の低減・合理化を取り込んだ作業者に優しい生産ラインを設計する。

(3) 人と設備の関わり方を見直すことで、作業者と設備が共存し、働く意欲につながる自動化を考慮する。

(4) 社会の豊かさの向上に対応した形で作業環境を構築する。

このような状況のなかで、1990年代の初頭から、一部の自動車の最終組立工場において、従来の混合ラインの改良と拡張として自己完結型混合ライン（自律完結ラインまたは自律分散ラインともよばれるが、以下は自己完結ラインとよぶ）が導入されている。

自己完結ラインは、すべての作業工程が1つのコンベアラインでつながる従来の混合ラインを、車の機能別にいくつかの短いラインに分割し、複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式である。各ラインの作業グループは所定の作業をまとめ、自らのラインを自己完結的に管理する。自己完結ライン間にはバッファエリアが新たに設定されている。

図1に自己完結ラインのレイアウトを示す。

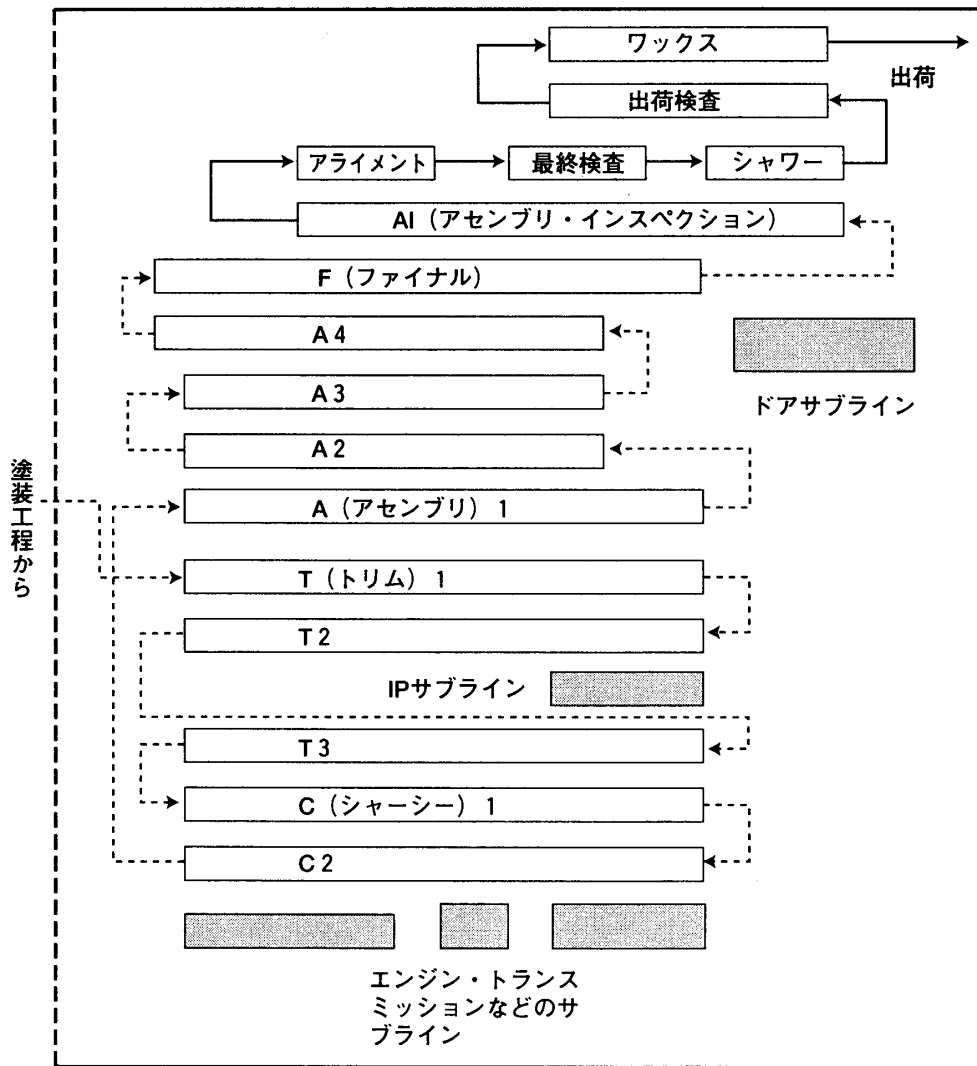


図1 トヨタ自動車九州・宮田工場の最終組立ラインのレイアウト（出所：文献[1]）

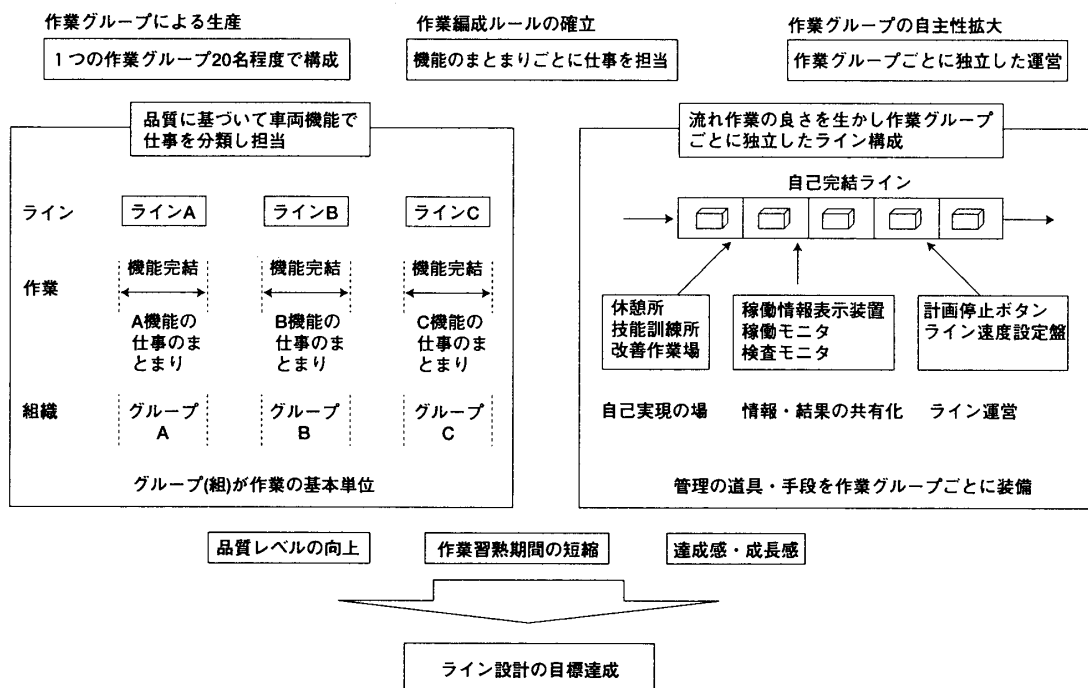


図2 自己完結ラインの作業仕組み（出所：文献[1]）

従来の混合ラインでは、ラインの編成効率を高めるように、細分化された組み付けの作業要素を各作業工程に配分する。そのため、作業員一人一人の作業内容は必ずしも意味のある組み合わせとは限らず、作業員は組み付け作業の意義や目的が明瞭ではない。自己完結ラインの場合は、機能別の組み付け作業は各作業グループの自主的な運営にまかされている。図2に自己完結ラインのグループ作業の特徴を示す。

自己完結ラインを導入することによって、従来の混合ラインの長所を取り入れ、低コストで高品質の多品種製品づくりの生産管理技術を継承したうえで、柔軟性のある混合ライン生産システムの構築や作業しやすい作業環境づくりなどの面で効果が得られている。表1に自己完結ラインの主な特徴を示す。

4. 自己完結ラインの設計手順

村松[4]は従来の混合ラインの設計手順を以下のように示している。

- (1) サイクルタイムの決定
- (2) 最小作業工程数の算定
- (3) 統合先行順位図の作成
- (4) 作業編成
- (5) 投入順序の決定
- (6) 作業域の決定

従来の混合ラインの設定は混合ライン全体で生じる作業員の遊び時間を最小にするように作業要素を配分する問題として定式化されている。自己完結ラインの場合は、各ラインでの組み付け作業の自己完結率と従業員満足の向上を前提に各ラインへの作業要素を配分しなければならないので、従来の設計手順を修正・追加しなければならない。

自己完結ラインの設計手順としては、次のようなステップを提案する。

- (1) サイクルタイムの決定
- (2) 自己完結ライン数の決定
- (3) 作業要素の相関表の作成
- (4) 統合先行順位図の作成
- (5) 作業編成ルールの確定
- (6) 工程設計：評価関数として自己完結率、従業員満足度、編成効率を総合的に考慮する。
- (7) ライン間のバッファの設計
- (8) 各ラインでのリリースマンの設定
- (9) 投入順序の決定
- (10) 作業域・グループ作業の決定

(7)および(9)について若干の考察を行ったが[6][8]、本研究では、(1)と(8)について自己完結型混合ラインの設計方法を考察する。なお、記号定義などについては、重複部分がある。式番号も節単位でまとめる。

表1 自己完結型ラインの特徴

項 目	従来の混合ライン	自己完結ライン
生 産 方 式	作業方法や内容がほぼ等しい複数品種の製品を生産するために、あらかじめ準備された1つの組立ラインでその複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式	製品の機能別にわけたいいくつかの自己完結した混合ラインを用いて、複数品種の製品を混合して連続的に生産する方式
ライン間のバッファ	設定しない	設定する
ライン内のバッファ	設定する	設定する
投 入 順 序	全ラインにわたる投入順序の変更はできない	ライン間のバッファを利用すれば、各ラインへの投入順序の一部を変更することができる
作 業 環 境	普通	比較的良好
品 質 管 理	ラインの最後部で集中管理	ラインごとに分散管理
干 渉	トラブルの発生は全作業工程に影響を及ぼす	トラブルの発生はほかのラインに影響を及ぼさない
ラ イ ン の 速 度	全作業工程が同じ	ラインごとに微調整が可能
ラ イ ン の 編 成 目 標	編成効率を高める	編成効率、自己完結率を同時に考慮
自 己 完 結 率	20%～30%	70%～80%

5. サイクルタイムの調整

5. 1 総作業時間の最小化

自己完結ラインを含めたライン生産のサイクルタイムは生産計画期間（稼動予定時間）を当計画期間の生産計画量で割って計算される。サイクルタイムに基づいて作業編成等が行われる。

しかし、編成された自己完結ラインを運営する際に、サイクルタイムの微調整が現実に認められている。

自己完結ラインシステムはいくつかの短い自己完結ラインによって構成され、複数品種の製品を混合して組立作業を行う。各自己完結ラインはコンベア等でつながる複数の作業工程から編成される。各作業工程の作業域が物理的に決まっており、作業者は作業域内で所定の作業を終了できない場合はラインストップが発生する。

各作業工程での各製品の作業時間（標準作業時間）は品種ごとに異なる。作業時間の長い製品が連続して投入されると、作業者の作業終了位置が作業域の後方へずれてゆく。作業域の最後尾に製品が到達しても組立作業が終了できないときにラインストップが発生する。

各製品の生産量が変動する。特に作業時間が比較的長い製品の生産量が増えると、ラインストップが発生しやすくなり、総生産所要時間も大きくなる。

現実の組立作業では同一の作業を繰り返し行うときの作業時間が確率的に変動し、なんらかの確率分布にしたがうことが知られているが、本節では作業時間の確率変動を考慮しないことを前提とする。また、突発的なトラブル（設備故障、欠品など）による生じるラインストップを考慮しないことを前提とする。

ラインストップの発生を抑えるためには、作業遅れをできるだけ小さくする必要がある。そのために、以下のようなファクタを考慮する。

- (1) 各製品の投入順序によって各作業工程での作業負荷が変動する。作業遅れをなるべく小さくするためには、作業負荷の平準化をはかる適切な投入順序が必要である。本節では目標調整法を利用し各製品の投入順序を決定する。
- (2) サイクルタイムが比較的長く設定すると、作業遅れやラインストップが減少するが、総生産所要時間の増大につながるため、適切なサイクルタイムの決定が必要である。
- (3) リリーフマンを活用し、発生したラインストップ時間の短縮をはかる。
- (4) ラインストップがほかのラインに与える影響を防ぐために、ライン間のバッファ製品が設置されるが、バッファ製品が増え、総生産所要時間が長くなるので、バッファ製品の適切な配置が必要である。

本節では、総生産所要時間の短縮化をはかる数式モデルを構築し、数値実験を行い、サイクルタイム、リリーフマンおよびバッファ製品の適切な設計方法を検討する。

図3にライン間のバッファ製品の設定を示している。

5. 2 数式モデル

本節の前提条件は以下のとおりである。

- (1) 全ラインのサイクルタイムが同じである。
- (2) リリーフマンはラインストップが発生した作業工程へ直ちに移動し、その作業工程の作業者とともに組立作業を行う。ただし、各ラインのリリーフマンは1人であり、複数の作業工程で同時にラインストップが生じた場合は、

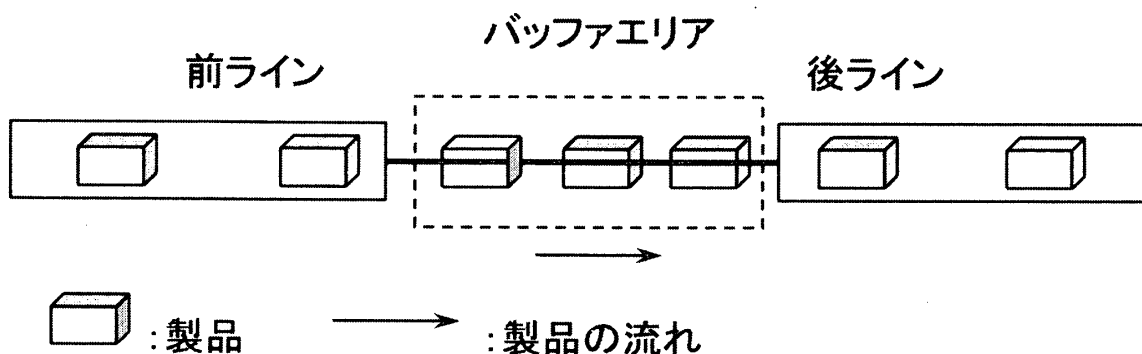


図3 ライン間のバッファ製品

ラインストップの必要時間の大きい作業工程にリリーフマンが優先的に配置される。作業者が他の作業工程の作業域に進入することができない。

- (3) すべての作業工程の作業域の長さが同じである。
(4) 作業者やリリーフマンの移動時間が無視できるほど小さいものとする。

記号（作業工程を工程と略する）は以下のとおり：

i ：製品の番号

d_i ：製品 i の生産量

K ：総生産量

s ：工程の番号($s=1,2,\dots,S$)

r ：ラインの番号

c ：サイクルタイム

Rr ：ライン r の作業工程の集合

t_{is} ：工程 s での製品 i の作業時間

k ：製品の投入順番

l_i ：製品間の長さ

v ：ライン速度 $v = \frac{l_i}{c}$

j_{ks} ：工程 s での k 番目に投入する製品

Y_{ks} ：工程 s での k 番目の製品の作業時間

L ：作業域の長さ

t ：時間単位(秒)

BS ：バッファ製品数

n_{ts} ： t 時刻に工程 s での作業の対象製品

Un_{ts} ： t 時刻に工程 s での作業の対象製品の作業累積時間

m_{ts} ： t 時刻に工程 s での作業者の位置

P_t ： t 時刻にライン r のラインストップ状態を表す0-1変数

TP ：ライン r でのラインストップの合計

$$TP = \sum_{i=1}^I P_i$$

定式化は以下のとおりである。

目的関数：

$$\max_{r=1,2,\dots,R} (TP) + \frac{L^* S^* c^*}{l_i} + c^* \sum BS \rightarrow \min.$$

制約式：

(以下の式番号はそれぞれ(1-1),(1-2))

$$n_{ts} = n_{t-1s} + 1 (Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, m_{ts} \geq l_i)$$

$$n_{ts} = n_{t-1s} (Un_{t-1s} < Yn_{t-1s} \text{ or } m_{ts} < l_i)$$

(以下の式番号はそれぞれ(2-1)～(2-6)、 $s \in Rr$)

$$m_{ts} = m_{t-1s} + v (Un_{t-1s} < Yn_{t-1s}, P_t = 0)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s} (Un_{t-1s} < Yn_{t-1s}, P_t = 1)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s} - l_i (Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, m_{t-1s} \geq l_i)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s}$$

$$(Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, P_t = 1, m_{t-1s} < l_i)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s} + v$$

$$(Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, P_t = 0, m_{t-1s} < l_i)$$

$$m_{os} = L^* s - \lceil \frac{L^* s}{c^* v} \rceil^* s$$

$$Un_{ts} = Un_{t-1s} + 1 \quad (n_{ts} = n_{t-1s}, n_{ts} \neq e_t) \quad (3-1)$$

$$Un_{ts} = 1 \quad (n_{ts} = n_{t-1s}, n_{ts} \neq e_t) \quad (3-2)$$

$$Un_{ts} = Un_{t-1s} +, \quad (n_{ts} = e_t) \quad (3-3)$$

$$Et = \{s \mid m_{t-1s} > l_i + l_2\} \quad (4-1)$$

$$e_t = s^*, (Y_{t-1s^*} - U_{t-1s^*} \geq Y_{t-1s} - U_{t-1s}, s, s^* \in Et, s \neq s^*) \quad (4-2)$$

$$P_t = 1 \quad (E_{t-1} \neq \Phi) \quad (5-1)$$

$$P_t = 0 \quad (E_{t-1} = \Phi) \quad (5-2)$$

$$BS = \frac{\max (\sum_{i=1}^I P_i - \sum_{i=1}^I P^{+1}, 0)}{c} \quad (6)$$

5. 3 数値実験の結果

以下のような初期条件で数値実験を行う。

ライン数：2

ラインバッファ製品数：3

各製品の生産量：表2（一日）

ラインでの作業工程数：10

各作業工程での標準作業時間：表3

投入順序：表4

作業者の初期位置：表5

数値実験の結果は表6に示している

数値実験の結果としてはサイクルタイムが約50秒に設定すると、リリーフマンが最大に活用され、サイクルタイムを予定の60秒より大幅に減少していることがわかる。しかし、現実問題ではリリーフは通常ライン管理その他の業務にも従事するので、作業遅れやラインストップへの補助作業には限度があり、サイクルタイムの調整もある程度に限定される。

表 2 各製品の生産量

生産量	450	混合比
製品 1	50	1
製品 2	100	2
製品 3	50	1
製品 4	150	3
製品 5	100	2

表 3 各作業工程の標準作業時間

番号	工程 1	工程 2	工程 3	工程 4	工程 5	工程 6	工程 7	工程 8	工程 9	工程10	平均
1	58	53	62	68	58	58	53	58	55	53	57.6
2	69	60	59	51	62	55	58	67	65	67	61.3
3	63	69	53	59	62	62	67	57	56	50	59.8
4	50	62	61	66	58	66	55	59	63	63	60.3
5	62	55	59	56	61	56	69	57	55	54	58.4
平均	60.4	59.8	58.8	60	60.2	59.4	60.4	59.6	58.8	57.4	
加重平均	59.2	59.8	59.3	59.9	60.0	60.0	59.9	60.0	60.0	59.3	

表 4 各製品の混合比の投入順序

1 番目	2 番目	3 番目	4 番目	5 番目	6 番目	7 番目	8 番目	9 番目
製品 4	製品 2	製品 5	製品 4	製品 1	製品 2	製品 4	製品 5	製品 3

表 5 作業者の作業位置（初期値）

順番	位置A	位置B	順序	工程番号	作業状況
1	0	0	13	1	作業中
2	6	6	12	1	済
3	12	12	11	2	作業中
4	18	18	10	3	作業中
5	24	24	9	4	作業中
6	30	30	8	4	済
7	36	36	7	5	作業中
8	42	42	6	6	作業中
9	48	48	5	7	作業中
10	54	54	4	7	済
11	60	60	3	8	作業中
12	66	66	2	9	作業中
13	72	72	1	10	作業中
14	78				前期最終

表6 サイクルタイムおよびリリーフマンの最適解

サイクルタイム	49.968113(s)	stop time	196(s)
リリーフマン	1(人)	ラインの長さ	73.6146(m)
速度	0.1200766(m/s)	通過時間	613.0638(s)
作業域基準	6(m)	今期総時間	1708.49(s)
バッファ域	1.36146(m)		
作業域全長	7.36146(m)		

6. 自己完結ラインのリリーフマンの設定

実際の組立工場においては、ラインごとにチームリーダーとしてリリーフマンが配置され、作業遅れやラインストップへの対応などを行う役割を果たしている。本節では、リリーフマンを考慮し、各作業工程での作業遅れおよびラインストップを把握したうえで、数値実験を行い、サイクルタイムの増加がラインストップに与える影響を明らかにする。

6. 1 作業時間の確率変動

製品の各作業工程での標準作業時間は品種ごとに異なる。現実の組立作業では同一の作業を繰り返し行うときの所要時間がなんらかの確率分布にしたがうことが知られている[5]。本節では標準作業時間とその確率変動部分の和を各作業工程での実作業時間と見なす。また、自己完結ラインの稼働時、実作業時間の長い製品が連続して流れてくると、作業者の作業終了位置が作業域の後方へずれてゆく。各作業工程の作業域は通常、基準域とバッファ域から構成される。本節では、製品が基準域を越えても組立作業が終了できないときに、作業遅れの発生と見なす。作業域の最後尾に製品が到達しても組立作業が終了できないときにラインストップが発生する。

また、本節も突発的なトラブル（設備故障、欠品など）による生じるラインストップを考慮しないことを前提に議論をすすめる。

ラインストップの発生を抑えるためには、作業遅れをできるだけ小さくする必要がある。そのために、以下のような工夫が考えられる。

- (1) 各作業工程での作業負荷の平準化をはかる適切な投入順序を決定する。
- (2) 作業時間の確率変動をなるべく小さくする。
- (3) リリーフマンを活用し、発生した作業遅れの

回復やラインストップ時間の短縮をはかる。

本節では、(1)について、目標調整法[7]を利用し各作業工程での作業負荷の平準化をはかる。(2)については、自己完結ラインシステムの特徴とねらいを考慮し、ある程度の確率変動を認める。また、本節では、作業時間の確率変動を正規分布にしたがうものとする。(3)についてリリーフマンは多能工として自己完結ラインにおいてはすべての作業工程での組立作業に従事できるものとする。

6. 2 ラインストップの算出

本節の前提条件は以下のとおりである。

- (1) 各ラインのリリーフマンの人数は1人である。
- (2) リリーフマンは作業遅れが発生した作業工程へ直ちに移動し、その作業工程の作業者とともに組立作業を行う。ただし、複数の作業工程で同時に作業遅れが生じた場合は、最大作業遅れが発生する作業工程の方を選択する。
- (3) 作業者が他の作業工程の作業域に進入することができない。
- (4) すべての作業工程の基準域、バッファ域の長さが同じである。
- (5) 作業者やリリーフマンの移動時間が無視できるほど小さいものとする。

記号（作業工程を工程と略する）は以下のとおり：

i ：製品の番号

d_i ：製品 i の生産量

K ：総生産量

s ：工程の番号

t_{is} ：工程 s での製品 i の標準作業時間

c ：サイクルタイム

k ：製品の投入順番

j_{ks} ：工程 s での k 番目に投入する製品

x_{ks} ：工程 s での k 番目の製品の標準作業時間

z_{ks} : 工程 s での k 番目の製品の確率変動部分

Y_{ks} : 工程 s での k 番目の製品の実作業時間

$Y_{ks} = x_{ks} + z_{ks}$

v : ライン速度

l_1 : 工程の基準域の長さ ($l_1 = v \cdot c$)

l_2 : 工程のバッファ域の長さ

L : 作業域の長さ ($L = l_1 + l_2$)

t : 時間単位 (秒)

n_{ts} : t 時刻に工程 s での作業の対象製品

Un_{ts} : t 時刻に工程 s での作業の対象製品の作業累積時間

m_{ts} : t 時刻に工程 s での作業者の位置

P_t : t 時刻にラインストップを表す 0-1 変数

TP : ラインストップの合計 $TP = \sum_{t=1}^T P_t$

計算式は以下のとおり:

(以下の式番号はそれぞれ (1-1), (1-2))

$$n_{ts} = n_{t-1s} + 1 \quad (Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, m_{ts} \geq l_1)$$

$$n_{ts} = n_{t-1s} \quad (Un_{t-1s} < Yn_{t-1s} \text{ or } m_{ts} < l_1)$$

(以下の式番号はそれぞれ (2-1) ~ (2-6))

$$m_{ts} = m_{t-1s} + v \quad (Un_{t-1s} < Yn_{t-1s}, P_t = 0)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s} \quad (Un_{t-1s} < Yn_{t-1s}, P_t = 1)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s} - l_1 \quad (Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, m_{t-1s} \geq l_1)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s}$$

$$(Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, P_t = 1, m_{t-1s} < l_1)$$

$$m_{ts} = m_{t-1s} + v$$

$$(Un_{t-1s} \geq Yn_{t-1s}, P_t = 0, m_{t-1s} < l_1)$$

$$m_{os} = L \cdot s - \left\lceil \frac{L \cdot s}{c \cdot v} \right\rceil \cdot s$$

$$Un_{ts} = Un_{t-1s} + 1 \quad (n_{ts} = n_{t-1s}, n_{ts} \neq e_t)$$

$$Un_{ts} = 1 \quad (n_{ts} = n_{t-1s}, n_{ts} \neq e_t)$$

$$Un_{ts} = Un_{t-1s} + 2 \quad (n_{ts} = e_t)$$

$$Et = \{s \mid m_{t-1s} > l_1 + l_2\} \quad (4-1)$$

$$e_t = s^*, (Y_{t-1s} - U_{t-1s} \geq Y_{t-1s} - U_{t-1s}, s, s^* \in Et, s \neq s^*) \quad (4-2)$$

$$P_t = 1 \quad (E_{t-1} \neq \Phi) \quad (5-1)$$

$$P_t = 0 \quad (Et = \Phi) \quad (5-2)$$

(以下の式番号はそれぞれ (3-1) ~ (3-3))

6. 3 数値実験の結果

初期条件は下記のとおりである。

各製品の生産量: 表 2

ラインでの作業工程数: 10

各作業工程での標準作業時間: 表 3

投入順序: 表 4

サイクルタイム、バッファ域: 表 7

数値実験の結果は以下のとおりである。

表 8 に各作業工程での作業位置の初期値を示している。

表 9 および図 4 に作業時間の変動がラインストップに与える影響を示している。

表 7 サイクルタイムおよびバッファ域

サイクルタイム	60秒
ライン速度	0.1メートル/秒
作業域基準	6メートル
バッファ域	2メートル

表 8 作業者の初期作業位置

順番	位置	製品	作業工程	作業状態
13	0	4	1	作業中
12	6	5	1	終了
11	12	2	2	作業中
10	18	4	3	作業中
9	24	3	4	作業中
8	30	5	4	終了
7	36	4	5	作業中
6	42	2	6	作業中
5	48	1	7	作業中
4	54	4	7	終了
3	60	5	8	作業中
2	66	2	9	作業中
1	72	4	10	作業中
	78	前期最終		

表9 作業時間の確率変動がラインストップに与える影響

標準偏差	6	7	8	9	10
1回目	256	301	392	432	597
2回目	251	247	312	422	442
3回目	234	259	421	483	522
4回目	263	294	378	415	494
5回目	247	308	318	420	455
平均	250.2	281.8	364.2	434.4	502
ラインストップ率	4.17%	4.70%	6.07%	7.24%	8.37%

数値実験は各回6000回を行った。
数値はラインストップ時間（秒）を表す

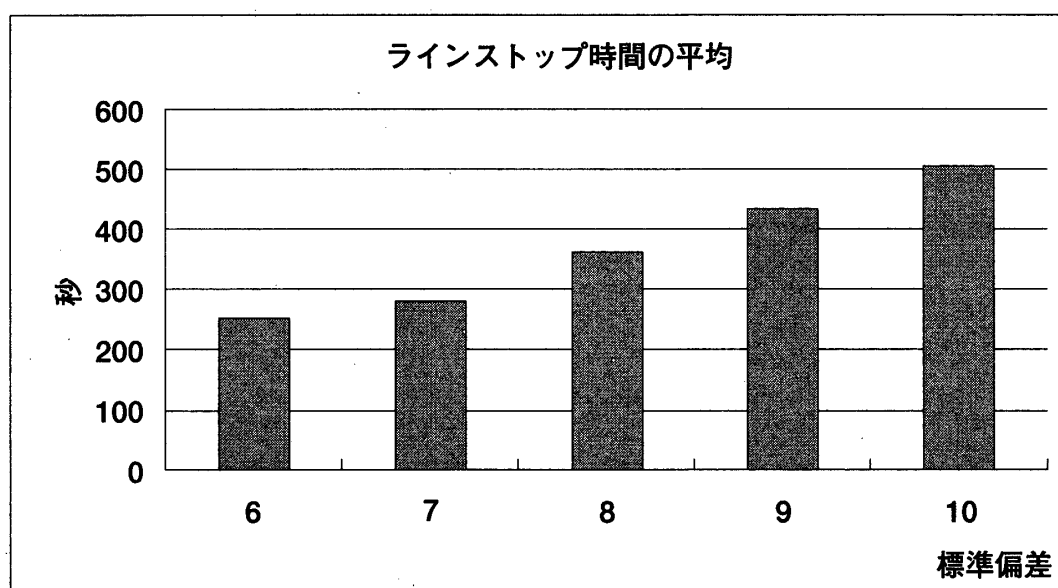


図4 ラインストップ時間の平均

7. 結び

自動車産業を取り巻く労働環境の変化はますます厳しくなっている。最終組立ラインにおいては、製造業離れや労働力の減少などによる深刻な人手不足、仕事へのやりがいの重視、女性の製造現場の進出や高齢化傾向がますます強まっている。

このような状況においては、「働きやすく、しかもやりがいや達成感の感じられる」、「作業者が主体の、作業者を大切にする」混合ライン生産システムの構築が行われている。

一方、製品の多品種化、短納期化が目立つ。そのため、ひたすら生産能力を増大させ、生産の効率化を中心とした従来の生産システムでは市場ニーズに迅速に対応することができなくなっている。従来の1つの混合ラインの分割やセル生産の導入が行われている。

本研究では、自己完結型混合ラインの管理技術に関する基礎研究の一環として、混合ラインの柔軟性を高めるために、自己完結型混合ラインの設計方法について考察した。

サイクルタイムの決定においては、従来の設計手順に従い適切なサイクルタイムを決定した後、数値実験の結果が示しているとおり、リリーフマンの活用により、サイクルタイムの調整が全作業時間を短くすることができるという知見が得た。

従来の作業者は標準作業時間を厳守しなければ作業遅れやラインストップが発生し、生産計画に多大な影響を与えるが、自己完結ラインの場合は、その影響が比較的に少ない。またライン間のバッファ製品の導入やリリーフマンの設定によって、作業遅れやラインストップを吸収することができる。数値実験により、作業者の作業時間の確率変動がラインストップに与える影響を明らかにした。

しかし、本研究では混合ライン生産システムの設計のごく一部を限定し、一部の実態に合わない前提条件のもとで研究を進めたものであった。なお多くの研究課題が残されている。

最後に、筆者の恩師である平木秀作先生に懇切丁寧なご指導・ご鞭撻を頂いていることを記し、深甚の謝意を表し厚く御礼申しあげる。先生の益々のご活躍とご健康を心よりお祈り申し上げます。

参考文献：

- [1] 太田一郎：“新しい自動車組立ラインの開発”、日本設備管理学会誌、Vol.7、No.3、pp.198-205(1995)
- [2] 新美篤志ら：“自動車組立ラインにおける自律型完結工程の確立”、TOYOTA Technical Review、Vol.44、No.2、pp.86-91(1994)
- [3] 工場管理編集部：“これが「新」トヨタ生産システムだ”、工場管理、Vol.40、No.11、pp.18-47(1994)
- [4] 村松林太郎：「新版生産管理の基礎」、国元書房(1979)
- [5] 黒田充：「ラインバランシングとその応用」、日刊工業新聞社(1984)
- [6] 徐祝淇、平木秀作：“自己完結ライン間のバッファの設計に関する研究”、日本経営工学会論文誌、Vol.49、No.3、pp160-167(1998)
- [7] 門田安弘：「新トヨタ生産システム」、講談社(1991)
- [8] 徐祝淇、平木秀作：“自己完結ラインにおける投入順序決定方法に関する研究”、日本経営工学会論文誌、Vol.50、No.2、pp104-111(1999)
- [9] 徐祝淇、平木秀作：“調整係数を考慮した投入順序決定手順に関する研究”、日本経営工学会平成11年度春季研究大会予稿集、pp.203-204(1999)
- [10] 徐祝淇、平木秀作：“自己完結ラインの投入順序決定方法に関する研究”、日本経営工学会平成10年度秋季研究大会予稿集、pp.171-172(1999)