

自己完結ラインの設計に関する一考察

A Study on Design of Autonomous Complete Assembly Lines

徐 祝 淇
Jo Shuki

《要 約》

自己完結ライン生産方式は、従来の1つの混合ラインを機能別いくつかの短いラインに分割し組立生産を行う方式であり、1990年代の初頭から一部の自動車最終組立工場に導入されており、生産システムの柔軟性や作業環境の改善などの面で大きな効果が得られているが、新しい生産管理技術の開発や改良については多くの問題が取り残されている。本研究では、自己完結ライン生産方式の管理技術に関する基礎研究の一環として、ラインの設計手順を示し、従来の研究を踏まえて、自己完結ラインの設計について考察を行う。

1. 自己完結ライン導入の背景

生産システムに適應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、塗装されたボディー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2,000～3,000点にのぼる部品と結合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(車種)を混合して組み立てる生産ラインである。1車種はさらに数種類(分類方法によって数十種類に分類される場合もある)の車型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には、製品品種の識

別、組み付け部品の確認、搬送(移動)、位置決め、結合、検査などの極めて複雑、多様な作業が含まれているので、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、やりがいの有無が生産性(稼働率)や製品の品質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キーワードとなりつつある。日本の自動車産業においては、1980年代の後半から、国内・海外市場と労働力の変化に対応するために、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]。

一部の日本の自動車メーカーは、1980年代の後半から90年代の前半をかけて、自動化率の比較的高い混合ラインの設計・建設を試みた(例えば、トヨタの田原工場、日産の九州工場、マツダの防府工場など)。しかし、このような「大規模自動化方式」は技術的にも、経済的にも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、工場の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、生産システムの柔軟性が失われ、モデルチェンジなどにより製品品種の変更に素早く対応することができなくなる。

- (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ことにつながる。

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、セル生産方式などで「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もので、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 [1]。

1990年代に入ると、日本の自動車産業を取り巻く製品市場・労働力環境に大きな変化が見られている。混合ライン設計の観点からみると、その特徴として次のいくつかの点を挙げることができる。

- (1) 国内自動車生産台数は1990年の約1,350万台をピークに、1995年の約1,000万台強、1999年の980万台まで減少し、企業間の競争がますます激しくなっている。企業は激しい競争のもとで、発展もしくは生き残るために、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) 製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。
- (3) 生産における無駄な要素を極力排除して、コストを低減し生産性を向上することが求められている。
- (4) 消費者が注文した製品の納期短縮を求める傾向が強まっている。また、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も、生産システムの柔軟性が求められている。
- (5) いわゆる3K職場を嫌う若者の製造業離れ、若年男子労働力の減少により、従業員の採用・維持が容易でない状況が顕在化し、労働時間の短縮、仕事へのやりがい・達成感の重視、女性の職場進出と高齢化などへの対策が一層深刻な問題となり、作業者にとって作業しやすい作業環境づくりが不可欠となっている。

以上のような新しい経済環境の変化に対応して、混合ラインの生産システムの再構築が必要となっている。混合ラインの設計にも大きな変化が見られており、さまざまな生産管理方式が提案され、新しい生産管理技術の開発も積極的に行われている。

2. 自己完結ラインの特徴

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、女性の職場進出などを考慮し、作業負担の低減・合理化を取り込んで、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。

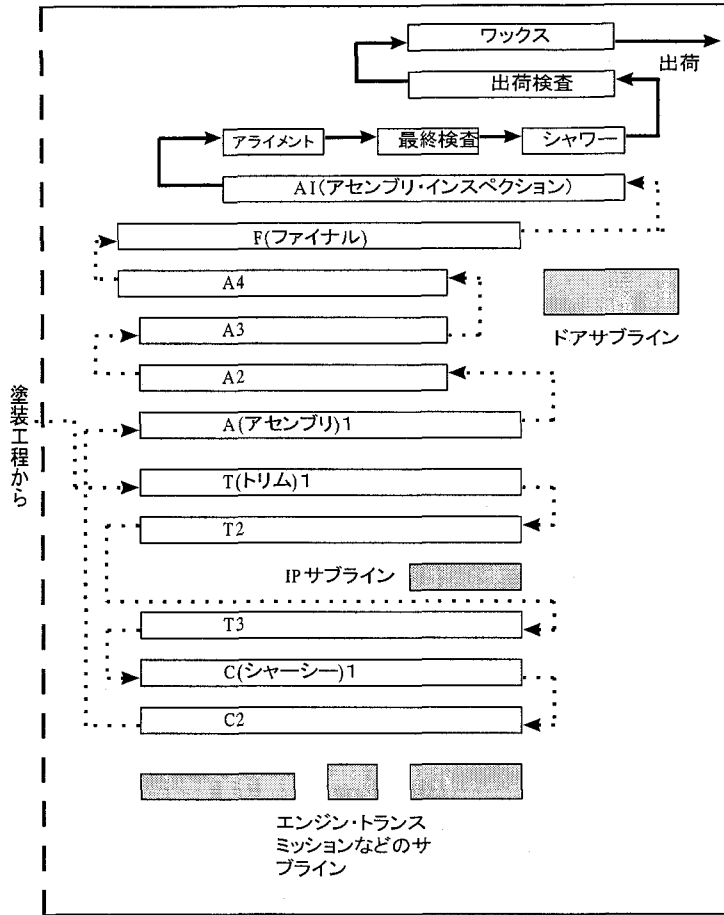


図1 トヨタ自動車九州・宮田工場の最終組立ラインのレイアウト (出所:文献 [3])

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1人1人の作業内容は必ずしも意味のある組み合わせとはかぎらなく、作業員に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が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作業仕組を示す。

自己完結ラインは、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にライン設計の観点からみた自己完結ライ

ンの主な特徴を示す。

3. 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計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

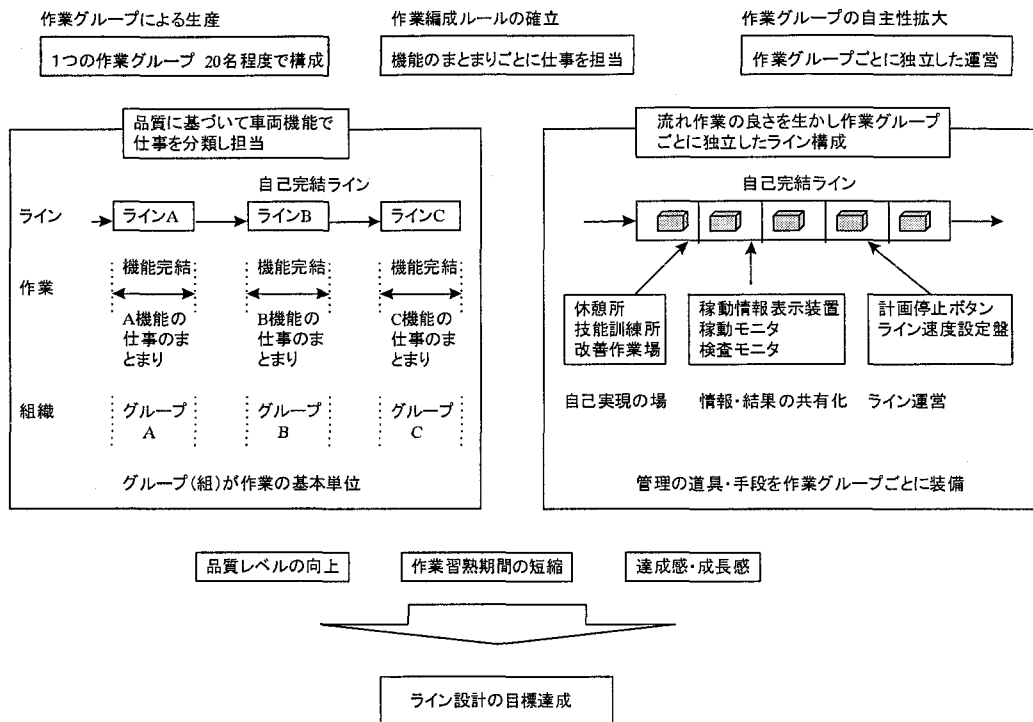


図2 自己完結ラインの作業仕組み (出所: 文献 [1])

表1 自己完結ラインの特徴

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て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可能
作業環境	普通	比較的良い
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
自己完結率	20%~30%	70%~80%

完結ラインの場合は、各ラインの機能別作業の自己完結率と従業員満足の上昇など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が考えられる。

- (1) サイクルタイムの決定
- (2) 自己完結ライン数の決定
- (3) 作業要素の機能別相関表の作成
- (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

ライン間のバッファの数量および型を設計する。

- (8) 投入順序の決定

- (9) 作業域・グループ作業の決定

本研究では、(7)と(8)について考察を行う。

4. ライン間のバッファ数の決定

従来の混合ラインでは、物理的に分割された数本の組立ラインがつながって1つの長いラインの両側に作業者を配置し部品の組み付け作業を行う。各作業者には一定の時間内で所定の作業を完成することが求められている。大幅の作業遅れが生じ、所定の時間（作業域）内で、所定の作業が完成できなくなったときに、作業者はラインを止めざるをえなくなる。したがって、1ヶ所の作業工程（1人の作業者）でトラブルが生じると、す

べての作業工程に影響を与えるほど問題を顕在化させられ、徹底的に改善を考えなければならない。このような「中間在庫を徹底的に減らし、作業効率を高める」ライン管理方針は、作業者の高い素質や緊張感が前提となっている。作業者の肉体的、精神的疲労の問題も指摘されている。

自己完結ラインでは、従来の1つのラインをいくつもの短いラインに分割している。グループ作業や人的バッファの設定によって、作業遅れ発生回数や程度も大幅に減少しているが、作業遅れやトラブルが生じた場合、作業者のラインだけが止められる。1つのラインで生じたラインストップがほかのラインに影響を与えないように、自己完結ライン間に新たにバッファ製品が設けられている。バッファ製品は、前ラインにとっては、組み付け済みの製品で、後ラインにとっては、組み付け待ちの製品である。図3にライン間のバッファを示している。バッファ製品の設定により、生産過程での中間在庫が増えるので、ライン間のバッファ製品の数にはできるだけ小さくする必要がある。

各製品の品種ごとに組み付け工数の違いや作業のバラツキなどの原因で、実際の作業工程での作業時間がそれぞれ特有の確率分布を形成している[5]。本節では、ライン間に必要最小限のバッファ製品の数を決定するために、各ラインの作業工程での作業時間の確率変動により生じたラインストップの発生を検討したうえで、数値実験を行い、必要なバッファ製品の数を決定する。（記号、数式モデル、数値実験方法などは省略する）

以下の前提条件・ルールで数値実験を行う。

- (1) バッファ製品数の決定にあたっては、前ラインと後ラインの作業工程だけを考慮する。

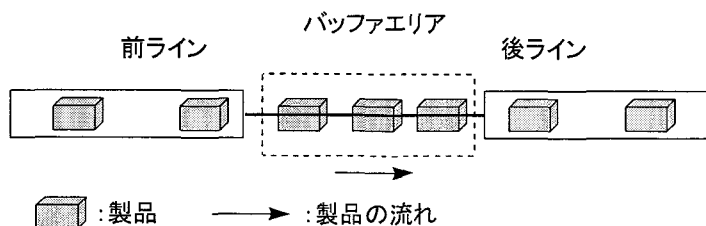


図3 自己完結ライン間のバッファ

- (2) 各ラインのサイクルタイムは一定である。
- (3) 前後ラインの作業遅れの差を吸収するために、ライン間のバッファ製品が設定される。
- (4) 作業時間の確率分布は正規分布に従う。
- (5) 前ラインと後ラインの作業工程数は同じである。
- (6) k 番目の作業は k 番目のサイクルタイムで始まる。

また、バッファ製品の欠品によるラインストップを完全に防ぐためには、多くのバッファ製品が必要となるので、バッファ製品の欠品によるラインストップ発生の許容率を考慮する。

数値実験のパラメータは以下の通りである。各作業工程の作業時間：平均は100秒、標準偏差は15, 12, 10の3通り、各ラインの作業工程数：6, 4, 2の3通り、ラインストップ発生の許容率：1%, 5%, 10%の3通りとする。

表2～表4に必要なバッファ数（時間単位：秒）を示している。s は標準偏差、p は許容率を示す。

表2 必要バッファ数（工程数＝6の場合）

バッファ数	s=15	s=12	s=10
p=1%	1,360	849	310
p=5%	1,306	805	285
p=10%	1,275	767	269

表3 必要バッファ数（工程数＝4の場合）

バッファ数	s=15	s=12	s=10
p=1%	459(5)	393(4)	299(3)
p=5%	436(5)	376(4)	285(3)
p=10%	421(5)	356(4)	265(3)

() はバッファ製品数を表す

表4 必要バッファ数（工程数＝2の場合）

バッファ数	s=15	s=12	s=10
p=1%	166	155	149
p=5%	144	141	136
p=10%	124	121	120

バッファの必要量

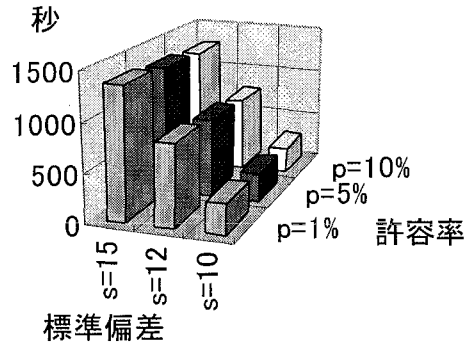


図4 表3のグラフ表示

数値実験の結果が少なくとも次の2点を明らかにしている。

- (1) 工程数が少ないほどバッファ製品の必要量が小さいので、グループ作業や共同作業や多能工の導入が望ましい。
- (2) 作業時間の標準偏差が大きいほどバッファ製品の必要量が大きいので、グループ内での技術伝達や指導や技能訓練による作業時間のバラツキの抑制が必要である。

図4は表3のグラフ表示である。

5. ライン間のバッファ型の決定

自己完結ライン生産システムを効率的に運営するためには、自己完結ラインへの各製品の適切な投入順序が必要である。図3は従来の直列型バッファを示している。直列型バッファの場合は、バッファエリアにレールが1つしか設定されていないので、製品の重量や体積などの理由で、バッファエリアのなかでの各製品の前後を入れ替えることが難しい。すなわち、各製品が直前のラインからバッファエリアに送られた順番で引き取られ、直後のラインへ投入される。それゆえ、各製品は同一の順序ですべての自己完結ラインを流れるため、その投入順序を決定する際に、すべての作業工程を同時に考慮しそれらの作業負荷の平準化もしくは生産の平準化をはかる方法が一般的に利用されている。

しかし、作業負荷の平準化もしくは生産の平準

化をいっそう高めるためには、各自己完結ラインを個別に考慮した投入順序が必要となる。それを実現するために、自己完結ライン間のバッファエリアにおいて、投入順序の調整できるバッファの設計が1つの有効な方法として考えられる。

徐・平木 [6]は従来の直列型バッファの代わりに並列型バッファの設定を提案し、数値実験を行い、並列型バッファが投入順序の調整に及ぼす影響を明らかにしている。図5に提案された並列型バッファを示している。

6. 投入順序の決定方法

自動車の混合ラインにおいては、各製品の投入順序を決定するにあたって、いままで主に次の2つの投入順序決定目標が考慮されてきた [7]。

- (1) 各作業工程での生産の平準化
- (2) 各作業工程での作業負荷の平準化

投入順序決定目標の選定は各企業の経営方針もしくは実際のボトルネックなどによって工場ごとに異なる。

徐・平木 [8] はまず並列型バッファを考慮した投入順序決定の数式モデルを構築している。この数式モデルでは、部品使用速度の平準化の最適化をはかり、各自己完結ラインへの投入順序を同時に決定している。これは、作業負荷・作業時間の変動の小さいライン（例えば、自動化率が比較的に高いライン）には有効に利用できるが、しかし、これを用いてすべての自己完結ラインを集中的に管理するには、すべての作業者が組み付け作

業を予定通り終了しなければならない。すでに4節で論じたように、作業時間の確率変動や突発的なトラブル等でラインストップが発生し、バッファエリアへの製品の到着が遅れた場合、現場では対応しにくくなる可能性がある。また、1つの自己完結ラインで投入順序が1ヶ所でも乱れた場合、下流のすべてのラインに大きな混乱を招く可能性がある。

したがって、投入順序決定の数式モデルに基づいて、最適な投入順序を決定すると、比較的複雑な計算を必要とするだけではなく、各ラインの実際の運営を考慮せず各投入順序を同時に決定してしまうことになるので、実際のラインの運営にとっては、必ずしも最も適切な投入順序決定方法とはかぎらない。

自己完結ライン生産システムの1つの特徴は、各作業グループがラインを自主運営することである。そのため、ライン運営の重要項目の1つである投入順序決定においても、並列型バッファを考慮し、各ラインの作業状況に応じて、それぞれのラインの投入順序を柔軟に決定する必要がある。

徐・平木 [8] は近似的な投入順序決定方法として、各ラインの投入順序を同時に決定するのではなく、各ライン個別に投入順序を決めていく決定手順を示している。

徐・平木 [9] は [8] で提案した投入順序決定手順を改良するために、投入順序決定の目的関数に調整係数の概念を導入し、より効果的な投入順序決定方法を提案し、その効果を示している。

さらに、徐・平木 [10] はラインストップを考

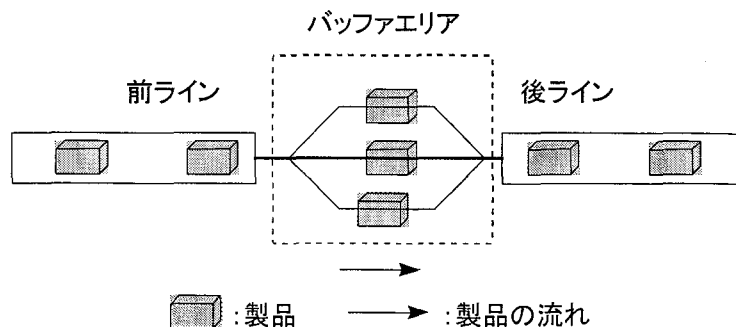


図5 並列型バッファ

慮した投入順序決定方法を提案している。

7. おわりに

本研究で取り上げた自己完結ラインは、1990年代の初頭からわずか数年の間に、多くの自動車の最終組立工場に注目されている。自己完結ライン生産システムの構築は、従来の1つの混合ラインを機能別にいくつかの短いラインに分割したものであり、ラインの柔軟性や作業環境の改善などの面で大きな効果が得られている。しかし、自己完結ライン生産システムに相応しい生産管理技術の開発・改良については多くの問題が残されている。

本研究では、自己完結ラインの設計に関する基礎研究の一環として、自己完結ラインの設計手順を示し、いままで行った研究を踏まえて、ライン間のバッファの設計と投入順序決定方法について考察を行った。自己完結ラインを適切に設計するためには、従来の設計手順に加えて、自己完結ライン数の決定、作業要素の相関表の作成、作業編成ルールの決定、工程設計、ライン間のバッファの設計など多くの項目を考慮しなければならない。これらについては、今後の課題としたい。

なお、本研究を進めるにあたり、文部省科学研究費の補助をうけたことを記し、ここに謝意を表す。

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]新美篤志他：“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のおのその応用」，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，pp.160-167（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，pp.104-111（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）