

最終車両組立ラインへのリアルタイムの投入指示問題

小谷 重徳

1. はじめに

車両の組立ラインは、一般に図1のような構成になっている。販売店や海外の代理店から注文された車両の生産は、まずボデーラインに生産指示され、ボデーライン、塗装ライン、最終組立ラインを経由して完成する。完成した車両は販売店や港に輸送される。車両のボデーラインへの投入順序づけは車両の組立ラインの運営目的によって異なるが、ボデーライン、塗装ライン、最終組立ラインの三つの生産ラインの条件が織り込まれて作成されるのが一般的である。車両の組立ラインへの投入順序づけ問題と呼ばれるものは、普通はボデーラインに生産指示する順序を作成する問題のことであり、この問題を投入順序づけ問題と呼ぶことにする。ボデーラインではほぼ生産指示どおりの順序で車両が完成し、塗装ラインに投入される。塗装ラインでは、

(1) ボデーラインや最終組立ラインとは異なり、ラインが1本の流れでなく、分岐合流が多くある複雑な構成である。

(2) 車両の仕様によっては通過する工程が異なり、生産のリードタイムが大きく異なる場合が多い。

(3) 車両の手直しなどでラインから外されるなどの要因で、生産順序が変更になることが多く、ボデーラインへの生産指示どおりの順序で車両が完成するとは限らないのが実態である。そこで、塗装ラインから出てきた車両は、バッファでいくつかの仕様ごとに分類されて一時保管される。最終組立ラインへの投入は、バッファで分類されて一時保管されている車両の中から最終組立ラインの投入条件をできるだけ満足する車両を選び、サイクルタイムに合わせて時々刻々

投入指示をしている。このバッファから最終組立ラインへの投入指示に関する問題をリアルタイムの投入指示問題と呼ぶことにする。投入順序づけ問題は古くから多くの研究があるが、これらは投入順序づけ問題の研究であり、リアルタイムの投入指示問題に関しては、ほとんど研究されていない。本論文はリアルタイムの投入指示問題を取り上げ、新しい考え方に基づく方法を提案する。本研究は、トヨタ自動車(株) (以下、トヨタと呼ぶ) の最終組立ラインに投入指示するシステムを開発するための前段階の研究として位置づけている。

本論文の構成は次のとおりである。節2ではリアルタイムの投入指示問題を明らかにする。節3では作業負荷の平準化を図るための実務的に新しい考え方を説明する。節4ではリアルタイムの投入指示問題を定式化し、アニーリング法 (Simulated Annealing) による投入指示方法を提案する。節5では数値例によって、提案した方法の有効性を示す。

2. リアルタイムの投入指示問題

トヨタでのボデーラインへの生産指示 (投入順序づけ) の目標は、図1で示されている三つのラインに対して作業負荷の平準化と主要な部品の消費速度の平準化を図ることである[1]。しかし、バッファに到着する車両の順序は生産指示どおりの順序でないので、最終組立ラインへの車両の投入指示においては、節1で述べたようにバッファを利用して、作業負荷の平準化と主な機能部品の消費速度の平準化の二つをできるだ

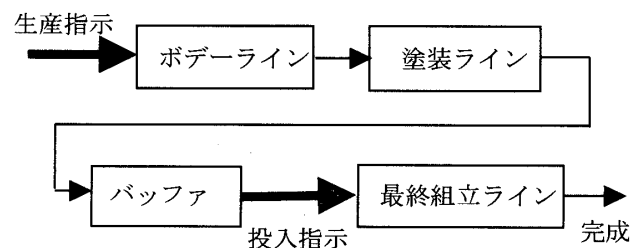


図1 組立ラインの構成

こたに しげのり
トヨタ自動車(株) コーポレート IT 部
〒471-8571 豊田市トヨタ町1
受付 03.7.2 採択 04.3.3

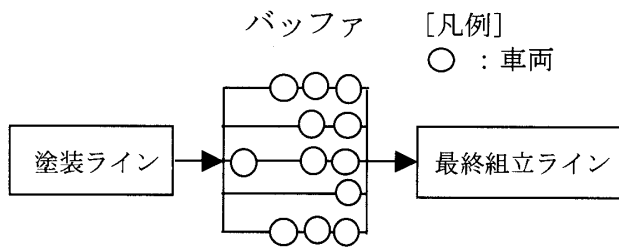


図2 バッファの構造

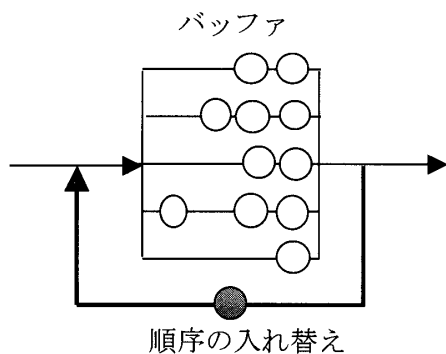


図3 バッファでの順序の入れ替え

け満足するように車両を投入している。バッファは図2のように5~6列で、各列5~6台の車両が待機できるようになっており、約30台の車両が一時保管できる。このため最終組立ラインへは、各列の先頭の車両の中から最も望ましい車両を選択して投入指示している。しかし、条件を満足する車両がその中に存在しない場合は、車両の入れ替えを行うこともできる(図3参照)が、入れ替え時間の問題もあり、あまり行われていないのが実情である。

以上のことから、最終組立ラインの投入順序づけの条件をきめ細かく織り込んだ投入順序を作成し、ボデーラインへ生産指示しても、最終組立ラインへの投入においては当初の順序と同じような順序で投入できないため、作業負荷の平準化は車両の総組立時間で平準化する程度にならざるを得ない状況といえる。実際、トヨタでの車両のボデーラインへの投入順序づけは、基本的には文献[1, 2]で示された方法で行われており、作業負荷の平準化は車両の総組立時間を用いて処理が行われている。最終組立ライン¹の各作業ステーションの作業時間が

車両の総組立時間/作業ステーション数

であれば、単一作業ステーションの問題と同じになり、車両の総組立時間の平準化の処理で各作業ステーションの作業負荷の平準化ができることになる。しかし、実際は各作業ステーションの作業時間が異なるため、車両の総組立時間による作業負荷の平準化では、作業

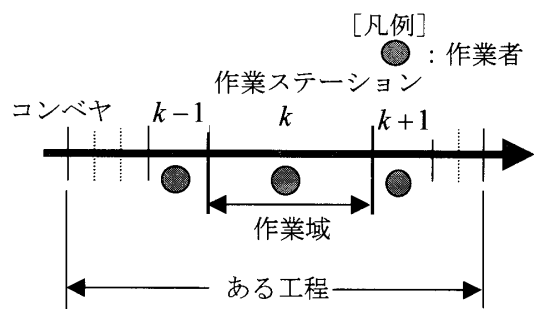


図4 最終組立ライン

ステーションの作業負荷の平準化は困難である。

最近サプライ・チェーン・マネジメント (SCM) の推進により、投入順序どおり造ることに注力してきた。例えば、次のような改善がある。

(1) 塗装ラインでの作業時間が多くかかる車両は、ボデーラインへの投入順序づけをした後、通常より作業時間が長い時間だけ早く生産指示をすることによって、塗装ラインで完成するときは当初の投入順序どおりになるようにする。

(2) 生産ラインで分岐合流がある場合も、できるだけ先入れ先出しができるように設備の改善をする。

(3) 品質の向上を図り、塗装ラインから外される車両を削減する。また、手直しが発生した場合でも遅れを最小に、かつ先入れ先出しができるように計画的に行う。そのための管理の仕組みを導入する。

これらの改善により、ボデーラインへの当初の生産指示順序どおりにより車両が完成することが大幅に向上した。また、図5のようなバッファの構造になり、従来は5~6台の中から選択しなければならなかったが、新しいバッファでは約30台の車両の中から任意の投入車両が決定できるようになった。このように、作業ステーション単位の作業負荷の平準化を図ることができる生産面の条件が整ってきた。

一方、最近車両の種類がたいへん多くなり、1車種当たりの生産台数は非常に少なくなっている。そのため車両の組立ラインは従来にまして多くの車種を生産している。これらの車種の総組立時間は車種間で大き

¹ 最終組立ラインを簡単に説明しておく。最終組立ラインはいくつかの工程から構成され、工程はあるまとまった組み付け作業をする。図4はある工程の例である。工程には約20の作業ステーションからなり、作業ステーションには1人の作業者が配置されている。作業ステーションに割り当てられた、組み付け作業をする組立ラインの場所を作業域と呼ぶ。本論文で扱う組立ラインでは、作業者は自分の作業域内でのみ組み付け作業をする。また、同一工程の作業者は同じ職場の組織(組という)に所属している。

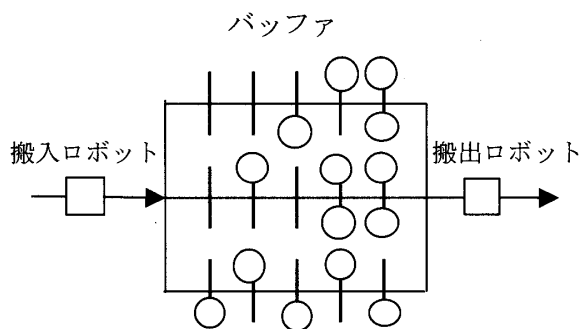


図5 新しいバッファの構造

な差があり、また同一車種でも仕様の多様化により、総組立時間の差は大きくなってきている。したがって、車両の組立ラインの運営においては、各作業ステーションの作業負荷の平準化がますます重要になっている。

以上のようなことから作業負荷の平準化について、作業ステーション単位に作業負荷の平準化を図る新しい取り組みをする時期を迎えたといえる。車両の最終組立ラインでは約300の作業ステーションがあり、作業ステーション単位に作業負荷の平準化を図るためには、これらの作業ステーションの作業時間を管理することが必要になる。しかし、車両の種類が非常に多く、仕様変更も頻繁であり、また常時作業改善や作業編成の見直しが行われているので、300の作業ステーションの作業時間データを適切に維持管理していくには、まだ環境が整っていないというのが実情である。そこで、最終組立ラインの300の作業ステーションを、作業時間が維持管理できる約15の作業ステーションで代表させることによって、300の作業ステーションの作業負荷の平準化を近似的に行うことを考える。この代表作業ステーションの作業負荷の平準化については、文献[3]を応用して定式化する。

最終組立ラインへの投入指示におけるもう一つの目標は、組立ラインでの部品の消費速度の平準化を図ることである。トヨタではかんばん方式や後補充生産をしているため、部品の消費速度の平準化は非常に重要である。部品の消費速度の平準化の定式化は文献[2]で与えられており、その後の部品の消費速度の平準化の研究ではこの定式化が主に採用されている[4, 5]が、本論文では新しい定式化を試みる。作業負荷の平準化では車両1台1台の並びがたいへん重要である。しかし、部品の消費速度の平準化では、例えば投入指示における2台の車両が入れ替わっても実際の組立ラインの運営では何も問題はない。このことに注目し、部品の消費速度の平準化は、例えば車両の5台ごとにいき、

1台1台の作業負荷の平準化を重視した、従来の研究にない新しい考え方で定式化を行う。

最終組立ラインへの投入指示における条件としては、車両の完成納期を守るためにバッファでの滞留時間がある一定時間以下にすること（滞留制約と呼ぶ）がある。以上のような二つの目標と一つの制約をもつリアルタイムの投入指示問題が本論文の問題である。ここで取り上げた二つの目標をもつ投入順序づけ問題は既に研究され[6, 7]、二つの評価関数の重み付けの和を最小にする近似解法が提案されている。しかし、本論文では部品消費速度の平準化を制約条件とし、滞留制約を含め、二つの制約のもとで作業負荷を平準化する投入指示を求める問題に定式化し、時々刻々投入指示をする、新しい考え方に基づいた方法を提案する。

3. 代表作業ステーションの考え方

労働集約的な組立ラインの運営においては、作業者の勤労意欲の維持向上は非常に重要である。そのためにトヨタでは従来からいろいろな取り組みをしてきたが、その一つに、グループ（職場の組織では、組と呼ぶ）や作業者にはできるだけまとまりのある作業を割り当てるように作業編成をする[8]という取り組みがある。これを完結工程づくりと呼んでいる。完結工程は作業品質や生産性の向上からは優れた方法であるが、どのようにラインバランスをとるかが課題である。現状の各組の作業のすべてが完結工程ということではないが、できるだけ完結工程の考え方を採用し、作業編成効率を上げるためだけの作業配分は排除している。

組立ラインにおける組の数は約15あり、車両の組立のある工程を担当しているのも、異なる車種間や同一車種の異なる仕様間での各工程の作業時間のバラツキは大きい。例えば、2輪駆動と4輪駆動の車両が流れている場合、4輪駆動の車両が流れてくると足回りの工程を担当している組では、その他の仕様が同一の2輪駆動の車両の作業時間と比較すると作業時間は相当長くなる。このように車両の仕様により、各組の作業時間はある範囲で異なっているのが実態である。組は約20人で構成されており、組内の作業ステーションへの作業の配分も完結工程の考え方で実施されているが、同一職場であることもあり、できるだけ同一の作業時間になるように配分されている。したがって、組間の作業時間のバラツキより、組内の作業時間のバラツキは遙かに小さくなる。そこで、作業ステーションの作業負荷の平準化を図るために、各組の作業ステ

ーションに対し、一つの作業ステーションで代表させて作業負荷の平準化を図れば、組内の作業ステーションの作業負荷の平準化を近似的に行うことができる。一方、各組の作業ステーションの作業域の長さは同じであり、代表作業ステーションの考え方を採用するにはたいへん都合である。

代表作業ステーションの考え方を簡単な例で考えてみる。作業ステーションの数が40で、作業域の長さが同じである組立ラインを考える。40の作業ステーションの作業時間がすべて同じなら、代表作業ステーションは一つになり、単一の作業ステーションの問題になる。作業ステーションが1から20までと、21から40までの作業時間がそれぞれ同じとすると、作業ステーションが1から20までを代表作業ステーション1で、21から40までの作業ステーションを代表作業ステーション2で表すと、この組立ラインは二つの代表作業ステーションで表すことができる。そこで、二つの代表作業ステーションで作業負荷の平準化を図れば、元の40の作業ステーションの作業負荷の平準化ができることになる。次に、作業ステーションが21から30までと、31から40までの作業時間がそれぞれ同じとすると、作業ステーションが21から30までを代表作業ステーション2で、31から40までの作業ステーションを代表作業ステーション3とし、組立ラインを三つの代表作業ステーションで表したとする。この場合は代表作業ステーション1と代表作業ステーション2および3の間で、対象とする作業ステーションの数が異なるので、代表作業ステーションでの作業遅れの重みが異なってくる。したがって、このことを考慮した作業負荷の平準化の定式化が必要である。代表作業ステーションで表した各作業ステーションの作業時間が異なるときは、代表作業ステーションで作業負荷の平準化を図ると各作業ステーションの作業負荷の平準化が近似的に行われることになる。代表作業ステーションによる作業負荷の平準化の近似の精度を上げるためには、代表作業ステーションで表した各作業ステーションの作業時間ができるだけ同一になっていることが望ましい。代表作業ステーションの作業時間として、代表作業ステーションが表す作業ステーションの最も長い作業時間を選択すると、安全サイドへの作業負荷の平準化ができることになる。

4. リアルタイムの投入指示問題の定式化とその解法

リアルタイムの投入指示問題はバッファでの車両の滞留時間がある一定以下にしたうえで、作業負荷の平準化と部品の消費速度の平準化を図りながら、バッファの中の約25台の車両から1台ずつ最終組立ラインに投入指示することである。このとき1台だけ投入車両を決定して投入指示する方法では、条件の良い車両が早期に投入され、条件の悪い車両はバッファ内の滞留制約を最優先して指示しなければならない場合が生じ、作業負荷の平準化が大きく崩れるケースが発生する可能性がある。そこで、バッファにあるすべての車両で投入指示のための望ましい投入順序を作り、投入順序の最初の v （連続投入指示台数と呼ぶ）台だけを投入指示する方法を採用する。そして、 v 台投入指示した後は、またバッファにあるすべての台数で投入指示のための望ましい投入順序を再度作り、最初の v 台を投入指示することを繰り返す。このとき既に投入指示した投入順序も考慮する。連続投入指示台数 v の値は、投入順序を計算するための時間などを考慮して決定する必要がある。

4.1 作業負荷の平準化の定式化

作業負荷の平準化の定式化のために最終組立ラインの定義をしておく。

- (1) 第1作業ステーションに投入指示の最初の車両が投入されて、作業が順次開始される。
- (2) 車両は一定のサイクルタイム t_c で投入される。
- (3) 作業者はコンベヤ上で車両の組み付けをし、作業が終了するとコンベヤからおり、次の車両に向かって作業域の上流に移動する。次の車両に向かうための作業者の歩行時間は、コンベヤ速度 v_c と比較して歩行速度は非常に早いので0とする。
- (4) 作業者は自分の作業域のみで作業をする。作業域で作業が終了しない場合は、作業遅れの作業は常にutility worker[3]によって支援され、組立ラインはストップしない。この場合、作業者は作業域の下流の境界で作業を終わり、残りの作業はutility workerに任せ次の車両に向かう。

次に、代表作業ステーションの作業負荷の平準化の定式化を考える。これ以降、代表という言葉を省略する。リアルタイムの投入指示問題ではバッファの台数で投入順序を決める問題を繰り返し解くことになるので、 i 回目の投入指示を決めるための投入順序づけ間

題を問題 P_i と呼ぶことにする。次に記号の説明をする。条件として与えられているものは、次のとおりである。

K : 作業ステーションの数

L_k : 作業ステーション k の作業域の長さ
($k=1, 2, \dots, K$)

N : 生産予定車両の台数

r : 車両を表すインデックス ($r=1, 2, \dots, N$)

t_r^k : 車両 r の作業ステーション k の作業時間

S : 投入順序の作成回数

n_i : 問題 P_i におけるバッファ内の車両台数
($i=1, 2, \dots, S$)

連続投入指示台数が v なので、

$$S = \lceil N/v \rceil$$

となる。ただし、

(1) $\lceil \beta \rceil$ は β 以上の最小の整数

(2) $n_i \geq v, i=1, 2, \dots, S-1$

とする。作業負荷の平準化で求めるものの記号は、以下のとおりである。

$\pi_i(j)$: 問題 P_i における投入順序の j 番目の車両

ps_{ij}^k : 問題 P_i における作業ステーション k の j 番目の作業の作業開始位置

pf_{ij}^k : 問題 P_i における作業ステーション k の j 番目の作業の作業終了位置

投入順序が決まれば、この順序に対応した作業開始位置と作業終了位置を求めることができる。最初の作業開始位置 ps_{i1}^k は、 $i=1$ の場合には、

$$ps_{i1}^k = 0$$

とする。 $i \geq 2$ の場合は、先回の問題 P_{i-1} の投入順序の v 番目の作業終了位置から求める必要があるので、

$$ps_{i1}^k = \max \{ pf_{i,v}^k - vct_c, 0 \}, i \geq 2$$

となる。2番目以降の作業の開始位置 ps_{ij}^k は、

$$ps_{ij}^k = \max \{ pf_{i,j-1}^k - vct_c, 0 \}, i, j \geq 2$$

となる。また、 j 番目の作業の作業終了位置 pf_{ij}^k は、

$$pf_{ij}^k = \min \{ ps_{ij}^k + vct_{\pi_i(j)}, L_k \}$$

となる。したがって、 $i, j \geq 2$ のとき

$$ps_{ij}^k = \max \{ \min \{ ps_{i,j-1}^k + vct_{\pi_i(j)}, L_k \} - vct_c, 0 \}$$

と表現できる。また、

$$ps_{ij}^k + vct_{\pi_i(j)} > L_k$$

の場合は、utility worker の支援を受けることになる。

このときの utility worker の作業 u_{ij}^k は、

$$u_{ij}^k = ps_{ij}^k + vct_{\pi_i(j)} - L_k$$

となり、 u_{ij}^k を utility 作業[3]と呼ぶ。

実際の最終組立ラインで作業遅れをなくし、ライン

ストップが発生しないようにするには、utility 作業ができるだけ少なくなるように投入順序づけることが必要である。すなわち、作業負荷の平準化を図るには、

$$UT = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^K w_k u_{ij}^k \rightarrow \min \quad (1)$$

となるような投入順序 $\pi_i(j)$ ($j=1, 2, \dots, n_i$) を求めることが必要である。ここで、 w_k は代表作業ステーションが対象とする作業ステーションの数が異なる場合があるので、代表作業ステーション k の重み付けを行う定数である。

4.2 部品消費速度の平準化の定式化

部品消費速度の平準化の定式化は文献[2]で与えられているが、従来の研究とは異なる考え方をするために以下詳しく議論する。最終組立ラインに投入指示する予定である N 台の車両を生産するのに必要な部品 l ($l=1, 2, \dots, M$ で、 M は部品の種類数) の数を m_l とすると、車両1台当たりの部品 l の必要数は m_l/N となる。したがって、 j 台の車両を生産するために必要な部品 l の平均必要数は jm_l/N となり、これを投入順序 j 番目の目標値と呼ぶ。一方、投入指示の1番目から j 番目までの車両を生産するために必要な部品 l の数を x_{ij} とする。また、ある投入順序の x_{ij} をその投入順序における部品 l の j 番目の実績値と呼ぶことにする。投入指示において部品 l の消費速度を平準化するためには、 x_{ij} はできるだけ jm_l/N に近いことが要求される。そこで、部品 l の消費速度の平準化の尺度として、 $|jm_l/N - x_{ij}|$ の大きさを考える。部品 l の消費速度の平準化のためには $|jm_l/N - x_{ij}|$ ができるだけ小さいことが望ましい。したがって、最終組立ラインへの投入指示において、 $|jm_l/N - x_{ij}|$ の値ができるだけ小さくなるように投入指示すればよい[2]。このことを図で表してみよう。図6(a)はある部品 l の jm_l/N を点線(目標線)で、投入指示後の x_{ij} を実線(実績線)で表したもので、点線と実線の上下の距離が $|jm_l/N - x_{ij}|$ を表している。図6(a)の場合は投入指示結果の部品 l の消費速度の平準化はかなり良好である。しかし、生産ラインで何かトラブルがあり、部品 l を構成部品として持つ車両がバッファに長時間存在しない場合は、目標値と実績値の差は小さくならない(図6(b)参照)。その後、トラブルが解消し部品 l を構成部品として持つ車両がバッファに入ってくると次々に投入指示され、一気に部品の消費速度の遅れを挽回する可能性がある。これはまた部品 l の時間当たりの消費が多くなり過ぎ、実際の運営では大きな問題になる。したがって、部品 l の消費速度の挽回も平準化し

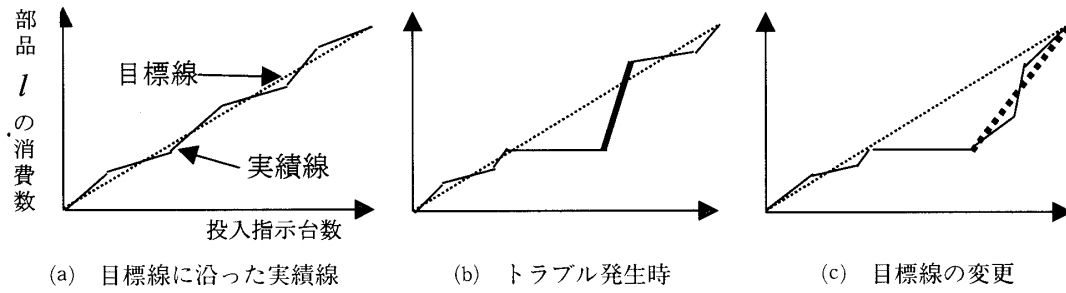


図6 目標と実績

て行う必要があり、このためには目標を変更する必要がある。図6(c)はこの目標の変更を表している。このように生産予定車両で目標を設定すると、実際にバッファに到着する車両によっては問題が発生する可能性がある。このことが投入順序づけ問題と大きく異なる点である。実際の投入指示はバッファ内の車両に対してしかできないので、リアルタイムの投入指示問題ではバッファにある車両で部品消費速度の平準化の目標値を設定することにする。バッファにある車両で目標値を設定すると、バッファに到着する車両の順序によって、問題 P_i の目標値が左右されることになる。したがって、バッファに到着する車両の順序が非常に重要になるが、トヨタではボデーラインへの生産指示どおりの車両が完成するようにいろいろな改善に努力しているので、このことが正に生きてくることになる。また、ボデーラインへの生産指示の順序（投入順序づけ問題）も重要になるが、本論文では適切な生産指示がなされているものとする。

以上の議論を踏まえ、部品消費速度の平準化を次のように定式化する。まず、記号を定める。

m_{li} : 問題 P_i の車両の生産に必要な部品 l の数

$G_{li}(j)$: 問題 P_i の投入順序における部品 l の j 番目の目標値

$J_{li}(j)$: 問題 P_i の投入順序における部品 l の j 番目の実績値

D_{li} : 問題 P_i の投入順序における部品 l の v 番目の目標値と実績値の差

x_{lv}^i : 問題 P_i の投入順序における j 番目までの車両に含まれる部品 l の数

問題 P_1 における部品 l の j 番目の目標値は

$$G_{l1}(j) = jm_{l1}/n_1$$

となる。本論文では車両の投入指示における部品消費速度の平準化は、 x_{lv}^i が次のような制約式を満足することによって達成することにする。すなわち、

$$(1 - b_{li}^-)G_{li}(j) \leq x_{lv}^i \leq (1 + b_{li}^+)G_{li}(j) \quad (2)$$

とする。ここで、 b_{li}^+ と b_{li}^- は 0 と 1 の間の定数である。なお、 b_{li}^+ と b_{li}^- は部品 l の平準化の目標レベルによって決定するが、 $G_{li}(j)$ の大きさも考慮する必要がある。また、生産予定車両での目標値 jm_{li}/N との大きさも考慮する必要がある。例えば、

$$jm_{li}/N > jm_{l1}/n_1$$

なら、下限設定の b_{li}^- は少し小さめにするなど、生産予定車両の目標に近づけるように工夫した設定が必要である。問題 P_1 を解いて投入順序が決まったとすると、

$$D_{l1} = J_{l1}(v) - G_{l1}(v) \quad (3)$$

となる。この値 D_{l1} を次の投入順序づけ問題 P_2 に引き継ぐとすると、問題 P_2 の部品消費速度の平準化の制約は式(2), (3)から次のようになる。

$$(1 - b_{l2}^-)G_{l2}(j) \leq x_{lv}^2 + D_{l1} \leq (1 + b_{l2}^+)G_{l2}(j)$$

ここで、 b_{l2}^+ と b_{l2}^- は 0 と 1 の間の定数である。また、問題 P_2 において、

$$D_{l2} = J_{l2}(v) - G_{l2}(v) + D_{l1}$$

となる。以上を繰り返すと、問題 $P_i (i \geq 3)$ では、

$$\begin{aligned} D_{li} &= J_{li}(v) - G_{li}(v) + D_{li-1} \\ &= J_{li}(v) - G_{li}(v) \\ &\quad + J_{li-1}(v) - G_{li-1}(v) + D_{li-2} \\ &= \sum_{p=1}^i \{J_{lp}(v) - G_{lp}(v)\} \end{aligned}$$

となる。 $D_{l0} = 0$ と定義すると、問題 P_i の部品消費速度の平準化の制約は次のようになる。

$$(1 - b_{li}^-)G_{li}(j) \leq x_{lv}^i + D_{li-1} \leq (1 + b_{li}^+)G_{li}(j) \quad (4)$$

$$l = 1, 2, \dots, M$$

ここで、 b_{li}^+ と b_{li}^- は 0 と 1 の間の定数である。

ところで、作業負荷の平準化では車両 1 台 1 台の並びの順序がたいへん重要である。しかし、部品の消費速度の平準化では、例えば 2 台の順序を入れ替えてもある部品がサイクルタイムだけ早く消費されたり、逆に遅く消費されたりするだけである。部品の納入に関しては、仕入先からトヨタへの納入は 1 日に平均 4 回である。トヨタ社内の工程間の引き取りの頻度はこれ

より遥かに多く、前工程から30~60分間隔で部品を引き取っている場合がほとんどである。また、最終組立ラインの車両の生産順序で部品を引き取る場合では、10~20分間隔で引き取っている。この10~20分間隔で引き取っている部品を生産するラインが最終組立ラインと同期化している部品生産ラインの場合には、最終組立ラインと同じ順序で部品を生産することが可能になっており、最終組立ラインと同じように考えることができる。また、最終組立ラインと同期化していない部品生産ラインの場合は他の組立ラインの部品も生産しているケースがほとんどで、この場合は引き取り間隔より部品生産ラインの仕掛けサイクルが長いので、部品生産ラインの条件に応じた仕掛けが可能になっている。したがって、通常の部品の引き取り間隔の30分と比較し十分小さな整数を Q として、最終組立ラインを流れる車両に対し Q 分ごとに部品の消費速度の平準化を図る方法を採用しても、最終組立ラインの前工程からの部品の引き取りに関して特に影響を与えることはない。今、最終組立ラインのサイクルタイムを1分とすると、投入順序に対して Q 台ごとに部品の消費速度の平準化を図る方法が採用できる。そこで、問題 P_1 における部品消費速度の平準化の制約を、

$$\left. \begin{aligned} (1-b_{ij}^-)G_{ij}(j) \leq x_{ij}^l \leq (1+b_{ij}^+)G_{ij}(j) \\ l=1, 2, \dots, M; j=Q, 2Q, \dots, \lfloor n_i/Q \rfloor Q \end{aligned} \right\}$$

とする。ここで、記号 $\lfloor \beta \rfloor$ は β 以下の最大の整数を表す。以上のように実際の工場運営に影響ない範囲で、部品消費速度の平準化の制約を緩和することによって、1台1台の車両の並び順序を重視した作業負荷の平準化を図ることとする。このように定式化した研究はなく、本論文の大きな特徴である。問題 P_2 における部品消費速度の平準化の制約の順序の位置は、実際の運用から $Q > v$ とすると、

$$j=Q-v, 2Q-v, \dots, \lfloor n_2/Q \rfloor Q - v \quad (5)$$

となる。次に、投入順序づけ問題 P_i における部品消費速度の平準化の制約の順序の位置を求める。今、 γ を整数とする。

$$(\gamma-1)Q - (i-1)v \leq 0$$

$$\gamma Q - (i-1)v > 0$$

とすると、

$$(i-1)v/Q < \gamma \leq (i-1)v/Q + 1 \quad (6)$$

となる。式(6)を満足する γ を γ_i とおくと、投入順序づけ問題 P_i における部品消費速度の平準化の制約式は、式(4)、(5)から次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} (1-b_{ij}^-)G_{ij}(j) \leq x_{ij}^l + D_{l,i-1} \leq (1+b_{ij}^+)G_{ij}(j) \\ l=1, 2, \dots, M \\ j=\gamma_i Q - (i-1)v, (\gamma_i+1)Q - (i-1)v, \\ \dots, (\gamma_i + \lfloor n_i/Q \rfloor - 1)Q - (i-1)v \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

4.3 リアルタイムの投入指示問題の定式化

本論文で取り上げたリアルタイムの投入指示問題の条件に、車両 r のバッファでの滞留時間が一定時間以下にするという制約がある。現在のバッファにある車両 r が I_r 台目までに投入指示されなければならないとする。車両 r がバッファに到着したときは、 $I_r = R$ とする。その後1台1台投入指示されるごとに、車両 r がバッファにある間、

$$I_r \leftarrow I_r - 1$$

とし、車両 r は I_r が正のときに投入指示されなければならないようにする。次に、この条件を式で表すことを考える。今、 z_{ij}^r を問題 P_i において車両 r が j 番目の投入順序に決定されたときは1、そうでなければ0を取る0-1変数とすると、問題 P_i における滞留制約は、次のように表すことができる。

$$\sum_{j=1}^{I_r} z_{ij}^r = 1, r \in B_i \quad (8)$$

ここで、

$$I_r = \begin{cases} I_r, & I_r \leq n_i \\ n_i, & I_r > n_i \end{cases}$$

B_i : 問題 P_i におけるバッファの車両 r の集合である。

ところで、utility作業の合計を最小にする投入順序づけ問題(式(1))は、混合整数計画問題に定式化できる[3]。この考え方を適用すると、リアルタイムの投入指示問題も混合整数計画問題に定式化できることになる。 a_{lr} を部品 l が車両 r の構成部品なら1、そうでなければ0とすると、問題 P_i の投入順序の p 番目における部品 l の数は、 $\sum_{r \in B_i} a_{lr} z_{ip}^r$ となる。したがって、問題 P_i における投入順序の1番目から p 番目までにおける部品 l の数 x_{ij}^l は、

$$x_{ij}^l = \sum_{p=1}^j \sum_{r \in B_i} a_{lr} z_{ip}^r \quad (9)$$

となる。そこで、式(9)を式(7)に代入すると、次のように書き換えられる。

$$\left. \begin{aligned} (1-b_{ij}^-)G_{ij}(j) \leq \sum_{p=1}^j \sum_{r \in B_i} a_{lr} z_{ip}^r + D_{l,i-1} \\ \leq (1+b_{ij}^+)G_{ij}(j) \\ l=1, 2, \dots, M \\ j=\gamma_i Q - (i-1)v, (\gamma_i+1)Q - (i-1)v, \\ \dots, (\gamma_i + \lfloor n_i/Q \rfloor - 1)Q - (i-1)v \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

以上の議論からリアルタイムの投入指示問題 P_i は、制約式(8)、(10)のうえに、utility作業の合計を最小に

する投入順序づけ問題の制約式である式(14)~(21)を追加することによって、0-1変数 z_{rj}^i と連続変数 u_{ij}^k と ps_{ij}^k をもつ、次のような utility 作業の合計を最小にする混合整数計画問題に定式化できる。

リアルタイムの投入指示問題 P_i :

$$\text{最小化 } UT = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^K w_k u_{ij}^k \rightarrow \min \quad (11)$$

制約条件

$$\sum_{j=1}^{n_i} z_{rj}^i, r \in B_i \quad (12)$$

$$I_r = \begin{cases} I_r, & I_r \leq n_i \\ n_i, & I_r > n_i \end{cases}$$

$$(1 - b_{li}^j) G_{li}(j) \leq \sum_{p=1}^j \sum_{r \in B_i} a_{lr} z_{rp}^i + D_{l,i-1} \leq (1 + b_{li}^j) G_{li}(j) \quad (13)$$

$$l = 1, 2, \dots, M$$

$$j = \gamma_i Q - (i-1)v, (\gamma_i + 1)Q - (i-1)v, \dots, (\gamma_i + \lfloor n_i/Q \rfloor - 1)Q - (i-1)v$$

$$\sum_{r \in B_i} z_{rj}^i = 1, j = 1, 2, \dots, n_i \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} z_{rj}^i = 1, r \in B_i \quad (15)$$

$$ps_{ij}^k + v_c \sum_{r \in B_i} t_r^k z_{rj}^i - u_{ij}^k - ps_{i,j+1}^k \leq v_{ctc} \quad (16)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, K$$

$$ps_{ij}^k + v_c \sum_{r \in B_i} t_r^k z_{rj}^i - u_{ij}^k \leq L_k \quad (17)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, K$$

$$ps_{ij}^k \geq 0, u_{ij}^k \geq 0, z_{rj}^i \in \{0, 1\} \quad (18)$$

$$j = 1, 2, \dots, n_i; k = 1, 2, \dots, K; r \in B_i$$

$$ps_{i,n_i+1}^k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K \quad (19)$$

さらに、

(1) $i=1$ のとき、

$$ps_{i1}^k = 0, k = 1, 2, \dots, K \quad (20)$$

(2) $i \geq 2$ のとき、

$$ps_{i1}^k = \max \{ \min \{ ps_{i-1,v}^k + v_{ct} t_{\pi_{i-1}(v)}^k, L_k \} - v_{ctc}, 0 \} \quad (21)$$

とする。また、 $i=1, 2, \dots, S$ である。

式(14)は投入順序の各位置に一つの車両を割り当てることの制約である。式(15)は車両の台数の制約である。

式(16)は作業ステーション k の j 番目の作業開始位置と $j+1$ 番目の作業開始位置の関係を表す。式(17)は作業域内で作業が終了しない場合に utility 作業が必要になることを表す。リアルタイムの投入指示問題 P_i から制約式(12), (13)を除いた問題は NP-困難な問題になる[3]なので、リアルタイムの投入指示問題 P_i も NP-困難な問題になる。しかし、問題の規模が小さいので、例を作成して市販のパッケージで解いてみる。 $n_i=10$ の場合には 15 秒程度で解けるが、 $n_i=25$ 場合は実用的な時間では解けない。一部の組立ラインでは $n_i=10 \sim 15$ のケースもあるが、基本的には $n_i=25 \sim$

30 となり、混合整数計画法が適応できないことになる。最近、組合せ問題にメタヒューリスティクスが盛んに使用されているので、リアルタイムの投入指示問題 P_i の解法として、メタヒューリスティクスを考える。問題 P_i は混合整数計画問題であるが、制約式(12), (13)を満足する投入順序の中で、目的関数式(11)を最小にする投入順序を求める問題であり、問題の規模も非常に小さいので、メタヒューリスティクスのどの手法を用いても最適解に近い解が求まるものと思われる。そこで、本論文ではアニーリング法を用いることにする[9, 10]。

4.5 アニーリング法

アニーリング法は既によく知られているので、ここでは詳しくは触れない。アニーリング法では近傍の解をどのように作るかが重要であるが、投入順序の任意の3台の車両の順序を入れ替えて新しい投入順序を作ることにする。コントロールパラメータである初期温度、終了温度(停止基準)、マルコフ連鎖の長さを、それぞれ c_0, c_f, L とする。また、投入順序 π_i の utility 作業の合計を $UT(\pi_i)$ とすると、アニーリング法のアルゴリズムは次のようになる。

[アニーリング法]

(1) コントロールパラメータ c_0, c_f, L を設定する。

(2) ランダムに制約式(12), (13)を満足する投入順序 π_0 を作り、 $i \leftarrow 0$ とおく。また、 $\pi \leftarrow \pi_0$ とおく。

(3) $h \leftarrow 0$ とおく。

(4) 投入順序 π_i の近傍として、 π_i の任意の3台の車両の順序を入れ替えて、制約式(12), (13)を満足する新しい投入順序 $\hat{\pi}_i$ を作る。

(a) $UT(\hat{\pi}_i) = 0$ の場合

$\pi \leftarrow \hat{\pi}_i$ とおき、最適解が得られたので終了する。

(b) $UT(\hat{\pi}_i) \neq 0$ の場合

$$\Delta UT = UT(\hat{\pi}_i) - UT(\pi_i)$$

を計算し、 $\Delta UT < 0$ なら $\pi \leftarrow \hat{\pi}_i$ とする。また、 $h \leftarrow h + 1$ とおく。もし、

$$\Delta UT \leq 0 \quad \text{または}$$

$$\Delta UT > 0 \ \& \ \exp(-\Delta UT/c_i) > \xi$$

ならば $\pi_i \leftarrow \hat{\pi}_i$ とおいて、ステップ(5)へ進む。ここで、 ξ は範囲 $[0, 1]$ の一様乱数である。もしそうでなければ、何もせずステップ(5)へ進む。

(5) もし、 $h < L$ ならステップ(4)へ戻る。そうでなければ、ステップ(6)へ進む。

(6) もし、 $c_i < c_f$ ならば終了する。そうでなければ、

$$c_{i+1} \leftarrow \alpha c_i, \pi_{i+1} \leftarrow \pi_i, i \leftarrow i + 1$$

とにおいて、ステップ(3)へ戻る。ここで、 α は0.90から0.99の値をとる定数である。

以上の手順で求められた π が解である。アニーリング法ではコントロールパラメータである c_0 , c_f , L , α の決定が重要であり、予備実験を通じてこれらの値を決定する。

5. 投入指示結果の評価

5.1 投入指示結果の評価

アニーリング法による投入指示の結果である投入順序のutility作業の合計 UT が、バッファへの車両の到着順でのutility作業の合計と比較してどの程度減少したかを評価することにする。表1のような条件をもつ投入順序づけ問題を一つ考える。表2は一部の車両の作業ステーションの作業時間である。その他の車両についても同じような作業時間である。この投入順序づけ問題のutility作業の合計がどの程度かを知るために、ランダムな投入順序を100個作りそれらのutility作業の合計の平均を求めると、63.76となった。 Q の値については実際の工場運営から $Q=10$ とする。バッファの台数は常に25台とする。また、バッファでの滞留制約は、バッファの容量の半分を作業負荷の

表1 投入順序づけ問題の条件

生産予定車両の台数 N	100
作業ステーション数 K	15
部品の総数 M	15
各車両の部品数	10
各作業域の長さ (m) L_k	7
サイクルタイム (分) t_c	6.2
コンベヤの速度 (m/分) v_c	1
$w_k (k=1,2,\dots,15)$	1

表2 一部の車両の作業時間

車両	作業ステーション						
	1	2	3	4	5	6	7
1	6.63	6.33	6.59	6.61	5.31	6.48	6.64
2	6.00	5.99	5.87	5.67	5.42	5.52	5.55
3	6.64	5.11	6.60	5.74	5.05	6.42	5.01
4	6.01	5.86	6.04	4.59	4.61	5.28	5.64
5	6.46	5.05	6.25	6.61	6.61	6.47	6.57
6	5.80	6.44	5.01	6.61	6.57	5.74	4.95
7	6.52	6.63	6.63	6.55	5.31	6.59	6.44
8	5.97	4.59	5.99	5.55	6.03	4.55	6.17
9	6.63	6.64	6.14	6.11	6.63	6.63	6.61
10	6.59	6.24	6.63	6.64	6.63	6.65	6.64

平準化に使用できるとして、

$$R=25+30/2=40$$

とする。連続指示台数は小さい方が望ましいが、アニーリング法の計算時間も考慮して決める必要がある。そこで、計算時間によって解にどの程度の差が出るかを実験で確かめてみる。投入順序づけ数が25で、部品の消費速度の平準化や滞留制約などがない作業負荷の平準化だけの投入順序づけ問題に対して、アニーリング法を適用する（前述のアニーリング法に対して、部品消費速度の平準化の制約と滞留制約を大きく緩和する）。この問題に対して、1, 2, 4, 6, 8分の各時間で計算を打ち切ったときの解のutility作業の合計を各々10ずつ求め、その平均を算出して計算時間が1分の場合を1.0としたときの結果は、表3のようになる。表3から分かるように、投入順序づけ問題が小規模のためあまり大きな差はない。そこで、連続投入指示台数 v の値については2, 4, 6の三つとする。また、部品消費速度の平準化の制約に関しては、実際の工場運営では10%程度の変動に対応する必要があるので、

$$b_{ij}^+ = b_{ij}^- = 0.05$$

とする。しかし、比率だけからの計算では部品消費速度の平準化の制約が厳しくなりすぎるので、

$$b_{ij}^+ G_u(j) = b_{ij}^- G_u(j) < 2$$

の場合は

$$b_{ij}^+ G_u(j) = b_{ij}^- G_u(j) = 2$$

とする。アニーリング法の投入指示結果は、バッファに到着する車両の順序によって差があると思われるので、次の二つの到着順序を考える。

(1) 部品の消費速度の平準化だけ考えて、目標追跡法を適用して求めた投入順序とする²。この順序のutility作業の合計は46.11となる。

(2) 作業負荷の平準化だけを考えると、目標追跡法を適用して求めた投入順序とする²。この順序のutility作業の合計は11.09となる。

表3 計算時間による解の差

計算時間(分)	1	2	4	6	8
比率	1.0	.954	.921	.910	.927

² 詳しくは文献[1, 2]を参照。簡単に述べると1番目から順次順序を決定する方法で、 j 番目の投入順序を決定するとき、 j 番目の目標値と実績値との距離、 $\sqrt{\sum_{i=1}^m (jm_i/N - x_{ij})^2}$ が最小になる車両を選ぶ方法である。部品の構成を作業ステーションの作業時間に置き換えたとき、作業負荷の平準化に関する目標追跡法になる。

表4 投入指示の結果

v	到着順序(1)		到着順序(2)	
	UT	減少率	UT	減少率
2	3.56	.923	3.41	.693
4	3.74	.919	3.60	.675
6	3.77	.918	2.73	.754

この二つの到着順序に対して、アニーリング法で投入指示をする。アニーリング法による解には少しバラツキが生じるので、問題 P_i ごとに2回計算し、その良い方を問題 P_i の解とする。また、計算時間は2分とする。各ケースにつき3回求め、その中で最も良い解の utility 作業の合計と到着順序の utility 作業の合計に対する減少率を求めると、表4のようになる（アニーリング法を適用するときは解を三つ求め、その中で最も良い解を解とするのは以下同様である）。表4から分かるように、 v の値による差はあまりない。したがって、 v の値は問題 P_i を解くために使用するコンピュータの性能によって決めればよい。到着順序(1)の場合では減少率は非常に大きい。到着順序(2)の方は作業負荷の平準化がかなりできている到着順序であるが、この到着順序に対しても、約70%の減少ができており、良好な結果であるといえる。また、到着順序(1)と(2)の両者とも utility 作業の合計はほとんど同じであることに注目すべきである。これはバッファの台数や滞留制約の値が十分大きいことを示している。本論文のテーマではないが、これらの値について必要最小限の値を求めることも重要なことである。特に、バッファの容量の縮小は工場内のスペースの節約や設備投資の削減に繋がるので、今後の課題としたい。

5.2 代表作業ステーションの評価

今回の定式化では代表作業ステーションという考え方を採用したので、代表作業ステーションによる作業負荷の平準化の近似レベルについて評価する。投入順序づけ問題の規模を半分にし、投入順序づけ数を50の問題に変更する。これはアニーリング法で最適解に近い解が求められるようにするためである。この問題の1~15の代表作業ステーションがすべて10個の作業ステーションを代表しているとする。この問題に対して、部品の制約を外し、utility 作業の合計を最小にする投入順序をアニーリング法で求めると、utility 作業の合計は0.67となる。この解である投入順序を J_{SA} と呼ぶ。代表作業ステーションを10個の作業ステーションに置き換え、150個の作業ステーションの

表5 代表作業ステーションの評価

ケース	1		2		3		4	
	1	1	2	1	2	1	2	
UT_j	6.70	0.08	0.00	4.76	4.47	96.49	97.10	
UT_{SA}	—	0.00	0.00	1.45	1.08	71.35	75.31	
UT_R	—	11.23	13.37	81.36	73.94	345.2	339.7	
誤差率	—	0.007	0.000	0.041	0.047	0.092	0.082	

投入順序づけ問題にしたときに、投入順序 J_{SA} の utility 作業の合計がどのようになるかによって、代表作業ステーションによる近似のレベルを評価する。そのために次のようなケースの実験を行うことにする。

(1) ケース1: 10個の作業ステーションの作業時間が、代表作業ステーションの作業時間とすべて同じとする。

(2) ケース2: 10個の作業ステーションの作業時間が、代表作業ステーションの作業時間の90~100%である一様分布に従うとする。

(3) ケース3: 10個の作業ステーションの作業時間が、代表作業ステーションの作業時間の92~102%である一様分布に従うとする。

(4) ケース4: 10個の作業ステーションの作業時間が、代表作業ステーションの作業時間の95~105%である一様分布に従うとする。

以上のような条件で、投入順序づけ数が50で150の作業ステーションの投入順序づけ問題を各々二つずつ作成し（ケース1の問題は一つ）、次の計算を行う。

(1) 代表作業ステーションで求めた投入順序 J_{SA} での utility 作業の合計 UT_j を求める。

(2) アニーリング法で解を求め、その utility 作業の合計 UT_{SA} を求める。

(3) 100個のランダムな投入順序の utility 作業の合計の平均 UT_R を求める。

(4) 次式で定義した誤差率を計算する。

$$\text{誤差率} = (UT_j - UT_{SA}) / (UT_R - UT_{SA})$$

明らかなように誤差率は投入順序 J_{SA} に対する精度の一つの評価尺度になる。

計算結果は表5のようになる。ケース1では utility 作業の合計は、

$$0.67 \times 10 = 6.7$$

となっている。この場合は代表作業ステーションで正確に表現できたことになる。表5から分かるように、誤差率は比較的小さく、代表作業ステーションの考え方が採用できることが分かる。また、代表作業ステ

ションの作業時間が10個の作業ステーションの作業時間の最大値より小さくなるに従って、代表作業ステーションの誤差率は大きくなっており、近似のレベルが悪くなっていることが分かる。したがって、表5から分かるように、代表作業ステーションに含まれる作業ステーションの作業時間のバラツキを小さくし、その作業時間の最大値を採用することによって、代表作業ステーションによる近似のレベルを良くすることができることになる。

なお、今回の計算にはCPUがPentium IIIの733MHzのパソコンを使用した。

6. おわりに

本論文は塗装ラインの後のバッファから、最終組立ラインに車両を投入指示するリアルタイムの投入指示問題を取り上げた。作業負荷の平準化のために、代表作業ステーションという新しい考え方で近似的に作業ステーションの作業負荷の平準化を図る方法を提案した。また、作業負荷の平準化は車両1台1台の並びがたいへん重要であるが、部品の消費速度の平準化では1台1台の並びはあまり重要ではなく、車両のある台数ごとに平準化していれば実務的に何ら問題がないことから従来の研究にない考え方を導入した。その結果、リアルタイムの投入指示問題を混合整数計画問題に定式化した。本論文の問題は小規模であるが、混合整数計画法で実用的な時間では解くことができないため、メタヒューリスティクスの一つであるアニーリング法を採用し、数値実験により、アニーリング法で良好な投入指示ができることを示した。

本研究はトヨタの新しいリアルタイム投入指示システムの開発をする前段階の研究であるが、今後は実際のデータを使用して新しい方法を評価し、その効果を見極めながらリアルタイム投入指示システムの開発の準備をすることが今後の課題である。

最後に、日頃ご指導をいただきます名古屋工業大学生産システム工学科の大野勝久教授に心より感謝致します。

参考文献

- [1] 門田安弘：新トヨタシステム，講談社，1991.
- [2] 小谷重徳：混合ラインへの投入順序付けの近似解法，トヨタ技術，Vol. 33，pp. 31-38，1983.
- [3] Scholl, A.: Balancing and sequencing of assembly lines, Physical-Verlag, 1995.
- [4] Kubiak, W.: Minimizing variation of production rates in just-in-time systems: A survey, *European J. of Operational Research*, Vol. 66, pp. 259-271, 1993.
- [5] Miltenburg, J.: Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems, *Management Science*, Vol. 35, pp. 192-207, 1989.
- [6] Miltenburg, J. and Goldstein, T.: Developing production schedules which balance part usage and smooth production loads for just-in-time production systems, *Naval Research Logistics*, Vol. 38, pp. 893-910, 1991..
- [7] Bard, J. F, Shtub, A., and Joshi, S. B.: Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length, *International J. of Production Research*, Vol 32, pp. 2431-2454, 1994.
- [8] 久田修義, 太田一郎: 働く人を中心に位置付けた自動車組立ラインの開発, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 42, pp. 72-76, 1997.
- [9] Van Laarhoven, P. J. M., and Aarta, E. H. L.: Simulated Annealing: Theory and Applications, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1987.
- [10] Juraj, H.: Algorithmics for Hard Problems (2nd Edition), Springer, Berlin, 2001.
- [11] 小谷重徳, 伊藤崇博, 大野勝久: “リリーフマンを考慮した混合車両組立ラインの投入順序づけ問題”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 54, No. 6, 2004 (掲載予定).