

かんばん方式の数理

小谷 重徳

1. はじめに

「トヨタ生産方式」は従来の生産方式、生産管理方式とは相当異なる、いわば常識の壁を破る独創的な考え方や手段を取り入れているため、本方式が紹介された当初は必ずしも正しく理解されなかった面がある。しかし、トヨタ生産方式が広く知られるようになって以来すでに久しく、今日では日本の代表的な生産方式の1つとして高く評価されている。

トヨタ生産方式の全体の解説は他書[1][2]にゆずるとして、ここではトヨタ生産方式の1つのサブシステムである「かんばん方式」の数理的側面について取り上げる。かんばんには、部品の仕掛けや運搬の指示と前工程に情報を伝達するという情報の指示伝達機能がある。この情報指示伝達機能は、一種のスケジューリングの機能であり、トヨタ生産方式の基本理念の1つである「ジャスト・イン・タイム」を実現するためのものである。以下、かんばんの情報指示伝達機能に注目し、かんばんの運営方法、かんばん枚数の計算、かんばん方式の特性、および、かんばん方式を支える「平準化」を実現するために最も重要である車両の投入順序計画の方法等について述べる。

こたに しげのり トヨタ自動車㈱
〒471 豊田市トヨタ町1

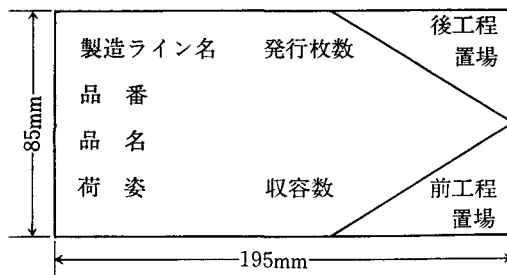


図1 かんばんの例

2. かんばん方式の概略

2.1 かんばん

かんばんにはいくつかの種類があるが、大別すると2種類になる。すなわち生産工程の仕掛け指示のための「仕掛けかんばん」と、前工程に部品をとりに行くための「引き取りかんばん」である。かんばんに仕掛けや引き取りの機能を持たせるためには、かんばんを見れば、何を・いつ・どれだけ・どのように造り・運搬したらよいか等がすべてわかる必要がある。したがって、かんばんには、①製造ライン名②品番③品名④荷姿⑤収容数⑥発行枚数⑦後工程と部品置場⑧前工程と部品置場等が記入されている。収容数とは部品何個当りにかんばん1枚をつけるかを示す。たとえば、収容数1とは部品1個にかんばん1枚をつけることを意味する。通常、部品はパレットに入っているため、収容数はパレットに入る部品数を示す。かんばんの標準的なフォームは図1のようでありビニールケースに入っているのが普通である。

2.2 かんばんの運営方法

次に、かんばんの回し方について、図にしたがって説明する。

(1) 仕掛けかんばん(図2)

①当該工程の加工が終了した部品は、パレットに入れられ、1パレットに1枚のかんばんが付けられて所定の場所に置かれる。

②後工程がこの部品を取りにきて持っていくときは、かんばんをはずして所定のかんばんポストに入れる。

③ポストに入れられたかんばんは逐次集められて、その工程のかんばんに掛けられる。

④かんばん掛けに掛けられた順番に

かんばんに記された品物を記入されている量(収容数)だけ生産する。かんばんはそのロットの先頭の品物とともに工程を流れる。かんばんがなければ生産はしない。

以上の①~④の手順を繰り返すことによって生産が行なわれる。

(2) 引き取りかんばん(図3)

引き取りかんばんの回し方は、運搬を1つの生産工程とみなした時の仕掛けかんばんの手順と同じである。ただし、前工程の部品を引き取る時、仕掛けかんばんをはずして持ってきた引き取りかんばんに付け替える(③)。かんばんがはずれていなければ、部品の引き取りは行なわれない。

(3) 信号かんばん(図4)

信号かんばんは仕掛けかんばんの一種でプレス等のロット生産工程の仕掛け指示に用いられている。

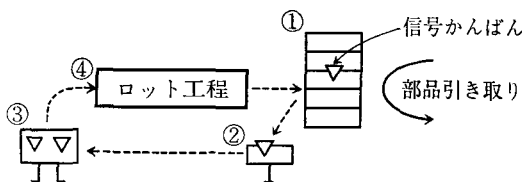


図4 信号かんばんの回し方

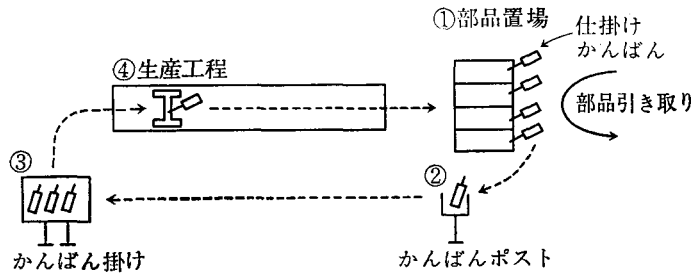


図2 仕掛けかんばんの回し方

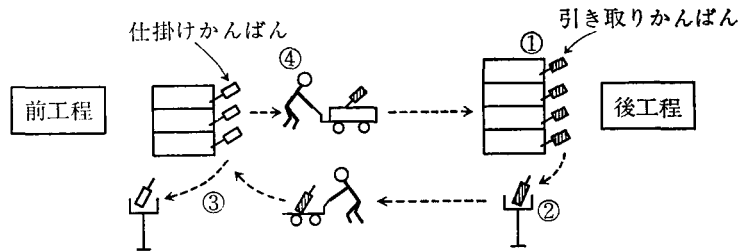


図3 引き取りかんばんの回し方

る。形状が図5のような三角形をしているので「三角かんばん」とも言われる。信号かんばんは部品の発注点に1枚のみ付けられている(①)。後工程が部品を引き取って発注点に達すると、かんばんがはずされてかんばん掛けに掛けられる(②)。これ以降は通常の仕掛けかんばんの運用と同一である。

2.3 かんばん方式

前に述べたかんばんの回し方からわかるようにかんばん方式とは、ある工程が引き取りかんばんによりその前工程から部品を引き取ると、部品を引き取られた工程は引き取られた分だけ補充生産するという方式である。したがって自動車産業のような多段階の生産工程においても、最終工程である車両の組立ラインに生産計画にもとづいた生産指示をすれば、そのすべての前工程は引き取りかんばんや仕掛けかんばんにより、次々と工程を

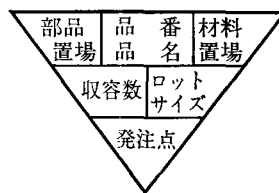


図5 信号かんばん

さかのぼって運搬指示や生産指示が行なわれる。よって組立ライン以外の前工程では生産計画にもとづいた生産指示は不要となる。これをモデル化して図示する

と図6のようになる。

かんばん方式では、はずれているかんばんが運搬指示や生産指示となるため、多段階の各工程への生産指示のために在庫量や注文残を調べる必要がない。かんばんの発行枚数を決めれば、最終工程である組立ラインでの部品の消費速度にしたがって、後はあるタイムラグに伴って自動的に部品の運搬量や生産量が決まる。また、はずれたかんばんがなければ運搬や生産が行なわれないので、各工程の在庫は発行されているかんばん枚数分を越えることはない。

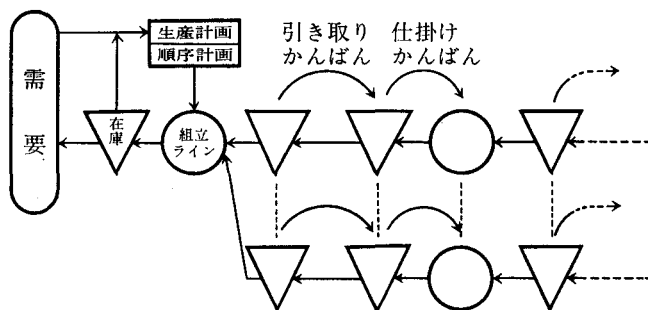


図6 生産指示構造の模式図

3. かんばん枚数の計算

かんばん枚数や発注点の計算は月次の車両の生産計画を立案した後、部品展開し、日当りレベルの部品必要数を求めて行なう。これにしたがって月次で一斉にかんばん枚数や発注点の変更を行なう。しかし、リードタイムの短縮やロットサイズの縮小等の改善や条件が変更になれば、そのつど変更する。

引き取りかんばんによる前工程からの部品の引き取りは、はずれたかんばんが、あらかじめ決められた枚数になれば引き取る「定量引き取り方式」と、定期的に引き取る「定期引き取り方式」の2種類がある。

3.1 仕掛けかんばん枚数

仕掛けかんばん枚数は、仕掛けかんばんの回し方から次式で計算できる。

$$\text{かんばん枚数} = [(\text{平均需要量} \times \text{仕掛けかんばんのリードタイム} + \text{安全係数}) / \text{収容数}]$$

ここで、 $[x]$ は実数 x 以上の最小の整数であり仕掛けかんばんのリードタイムとは、引き取りにより仕掛けかんばんがはずされてから生産が行なわれ所定の場所に置かれるまでの時間である。

3.2 定量引き取り方式のかんばん枚数

トヨタの工場内の工程間の引き取りは、定量引き取り方式を採用している。このとき、定量とは

1パレット分とか1台車分とかに等しい場合が多く、かんばん1枚に相当する。後工程が1パレット(かんばん1枚)分の部品を引き取ると、前工程では引き取られた部品を生産する。したがって、引き取りかんばんの総枚数は次式で計算できる。

$$\text{かんばん枚数} = [(\text{平均需要量} \times \text{定量引き取りのかんばんリードタイム} + \text{安全係数}) / \text{収容数}]$$

ここで定量引き取りのかんばんリードタイムとは、引き取りかんばんがはずれてから引き取りを開始し完了するまでの時間である。

3.3 定期引き取り方式のかんばん枚数

定期引き取り方式では、はずれているかんばん枚数分が引き取り量、すなわち発注量となる。したがって

発注量 = はずれているかんばん枚数 × 収容数となる。また発注量は次式のように表現できる。

$$\text{発注量} = (\text{総かんばん枚数} - \text{在庫につけられているかんばん枚数} - \text{前工程にあるかんばん枚数}) \times \text{収容数}$$

前工程にあるかんばん枚数は注文残であるので定期引き取り方式は注文残を考慮した引き取り方式と言える。

部品の前工程への引き取り間隔を発注間隔とすると、

$$\text{かんばん枚数} = [(\text{平均需要量} \times (\text{発注間隔} + \text{定期引き取りのかんばんリードタイム}) + \text{安全係数}) / \text{収容数}]$$

となる。ここで定期引き取りのかんばんリードタイムとは引き取りを開始して完了するまでの時間

である。

ところで、前工程が仕入先の場合は後工程が部品を引き取りに行かずに定期的に納入してもらう方式を採用している。この場合のかんばん枚数は次式で計算できる。

$$\text{かんばん枚数} = \left[\frac{\text{平均需要量} \times (\text{納入間隔} + \text{納入のリードタイム}) + \text{安全係数}}{\text{収容数}} \right]$$

ここで、納入のリードタイムとは納入指示から納入されるまでの時間である。しかしトヨタでは別の計算式を用いている。上式の納入間隔と納入のリードタイムとの合計を「納入サイクル」と呼び、 $a-b-c$ という3つの定数で表現している。すなわち a 日間に b 回、 c 回遅れで納入することを表わしている。 c 回遅れとは、納入時引き取ったかんばんをいつ納入するかを表わし、引き取り時点を t_n とすると t_{n+c} 時点で納入することになる。たとえば納入サイクル $1-1-1$ とは、毎日1回納入され、納入時引き取ったかんばん分は次回納入される。定数 a, b, c を使用すると、

$$\text{納入間隔} = a/b$$

$$\text{納入のリードタイム} = (a/b)c$$

となるので、これらを前述の式に代入すると、

$$\text{かんばん枚数} = \left[\frac{\text{平均需要量} \times \frac{a}{b} (1+c) + \text{安全係数}}{\text{収容数}} \right]$$

となる。

3.4 信号かんばんの発注点

ロット生産工程の仕掛けには信号かんばんを用いているので、ロット生産工程の運営においてはロットサイズと発注点を決める必要がある。ロットサイズ決定の考え方として、従来から、段取り費用+在庫費用を最小にするロットサイズが最も経済的で、最適ロットサイズとする考え方があつた。しかし、トヨタではこの考え方を採用していない。最初のロットサイズの決定は過去の値や他のラインを参考にして行なうが、その後は各種の改善により段取り時間を短縮し、ロットサイズをできる限り縮小するように従来から多大な努力を払ってきている。

発注点は次式で計算できる。

$$\text{発注点} \times \left[\frac{\text{平均需要量} \times \text{信号かんばんのリードタイム} + \text{安全係数}}{\text{収容数}} \right]$$

ここで、信号かんばんのリードタイムとは信号かんばんがはずれてから部品が生産され所定の場所に置かれるまでの時間である。トヨタでは信号かんばんのリードタイムは経験値を用いている。

次に信号かんばんのリードタイムについて少し理論的に考えてみる[3]。ロット生産工程(図4)では信号かんばんがはずれた順番に仕掛けをし生産するので、生産というサービスを行なっていると見なして、待ち行列の理論が適用できる。ロット生産工程で生産している部品点数を N 、部品 i の単位時間当りの後工程の消費量を P_i 、 L_i は部品 i のロットサイズとすると、単位時間当りの生産指示の平均回数 λ は、

$$\lambda \doteq \sum_{i=1}^N P_i / L_i$$

と表わせる。部品点数 N が十分大きく、かつ部品 i の後工程の消費量が独立している場合には、信号かんばんがはずれるタイミングはランダムと見なすことができる。したがって、ある時間間隔内にははずれる信号かんばんの枚数は、ポアソン分布にしたがうと言える。よって信号かんばんがはずれる間隔は平均が $1/\lambda$ の指数分布になる。

次にロット生産工程の生産というサービスを考える。サービスは段取りと生産とに分かれる。部品 i の段取り時間と生産時間との和を T_i とすると、

$$T_i = t_{si} + L_i \cdot t_{mi}$$

t_{si} ; 部品 i の段取り時間

t_{mi} ; 部品 i の1個当りの生産時間

である。部品 i の計画期間の要求量を R_i とすると部品 i の計画期間の段取り回数は R_i/L_i となる。したがって、サービス時間 T の分布は、平均と分散が次のような度数分布となる。

$$E(T) \equiv \frac{1}{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R_i}{L_i}}{\sum_{j=1}^N \frac{R_j}{L_j}} \cdot T_i$$

$$V(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{L_i} (T_i)^2 - \{E(T)\}^2$$

このサービス分布を一般分布とみなすと、仕掛け待ち時間 W の平均 $E(W)$ は、ポラツェック・ヒンチンの公式より、

$$E(W) = \lambda b_2 / \{2(1-\rho)\}$$

$$\text{ここで、 } \rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad b_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (t_{si} + L_i \cdot t_{mi})^2 \frac{R_i}{L_i}}{\sum_{j=1}^N \frac{R_j}{L_j}}$$

また仕掛け待ち時間の分散 $V(W)$ も求めることができる。以上から、信号かんばんのリードタイムの平均は次式で与えられる。

信号かんばんのリードタイム $= E(W) + E(T)$
 実際のラインの数値で計算してみると、信号かんばんのリードタイムの平均は0.5日以内となり、実際の値と同程度のレベルとなる。

4. かんばん方式の特性

かんばんを用いた多段階生産在庫システムの動特性については、シミュレーションにより研究されている。最終工程の生産変動が前工程の生産・在庫の量とその変動にどのような影響を与えるか特に収容数、引き取りの回数やそのリードタイムとの関連が興味深い。しかし、ここではごく簡単に触れるだけにとどめる。

今、時刻 t と $t+1$ の間における第 n 工程の生産量を P_t^n 、その前工程である第 $n+1$ 工程の時刻 t の仕掛け指示量を O_t^{n+1} 、かんばんがはずれてから仕掛けるまでのリードタイムを L_t^n 、収容数を M でそれぞれ表わし、かつ引き取りや仕掛け指示が時刻 t 毎に行なわれ、仕掛け残が発生しないとすれば、

$$O_t^{n+1} = \left[\frac{P_t^n - L_t^n}{M} \right] \cdot M$$

となる、第 $n+1$ 工程の生産のリードタイムを L_{n+1}^2 とすれば、

$$\begin{aligned} P_t^{n+1} &= O_{t-L_{n+1}^2}^{n+1} = \left[\frac{P_{t-L_{n+1}^2}^n}{M} \right] \cdot M \\ &= \left[\frac{1}{M} \left[\frac{P_{t-L_{n+1}^2}^{n-1}}{M} \right] \cdot M \right] \cdot M \\ &= \left[\frac{P_{t-L_{n+1}^2}^{n-1}}{M} \right] \cdot M \\ &\dots\dots\dots \\ &= \left[\frac{P_{t-L_{n+1}^2}^1}{M} \right] \cdot M, \\ L_t^{n+1} &= \sum_{i=0}^{n-1} (L_{n-i}^1 + L_{n+1-i}^2) \end{aligned}$$

となる。

したがって、第 $n+1$ 工程の生産量は、各工程間を通じて収容数が同一なら、第1工程の生産量が収容数の大きさに応じてリードタイム L^{n+1} の遅れを伴って伝達される。よって、前工程の生産変動を第1工程の生産変動より大きくしないためには、収容数をできるだけ小さくすることが望ましい。しかし、工程を第2、第3、…と前工程にさかのぼっても、前工程の生産変動が拡大していくということはない。

後工程の生産量は引き取りかんばんにより前工程に伝わるので、工程間の在庫を削減し、後工程の生産にタイミングよく追従してスムーズな生産をするためには、引き取り回数を多くすべきである。定量引き取り方式において、定量引き取りのかんばんリードタイムが十分小さく、かつ収容数 $=1$ 、安全在庫 $=0$ とすれば、前述の定量引き取りかんばん枚数の計算式より、引き取りかんばん枚数は1となる。同様の定義をすると、仕掛けかんばん枚数も1となり、この場合各工程の在庫は1個である。後工程が1個仕掛けると、前工程が補充するために1個仕掛けるというように同期化生産をすることになる。実際の定量引き取り方式では1パレットとか1台車とかのレベルであるが、実務上では満足できる状態である。一方、定期引き取り方式の場合は、工程間が離れているた

めに定量引き取り方式ほど小さきみな引き取りは困難な場合が多い。しかし、実務では部品の混載輸送等を工夫することにより、引き取り回数をできるかぎり多くすることに努力している。

5. 組立ラインへの投入順序付け

すでに述べたように、かんばん方式では最終工程である組立ラインで使用された部品の量がかんばんにより前工程に伝わる。したがって組立ラインへ部品を供給している前工程の生産量や運搬量の変動を小さくしたり、仕掛け在庫をできるかぎり少なくするには、組立ラインで使用される部品の単位時間当りの使用量(使用速度)をできるだけ一定にすることが望ましい。そのためには、製品(車両)の投入順序において、車両の各構成部品の出現する割合(出現率)をなるべく一定にすること(平準化)が必要である。以下、車両の投入順序計画の方法について述べる。

5.1 投入順序付け問題の定式化

製品 A_i ($i=1, 2, \dots, N$) の生産量を Q_i とすると、製品合計の生産量 Q は、

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i$$

となる。全生産量 Q を生産するために必要な部品 a_j ($j=1, 2, \dots, M$) の必要数を n_j とすると、製品 1 個当りの部品 a_j の平均必要数 m_j は次式で与えられる。

$$m_j = n_j / Q$$

したがって k 個の製品を生産するための部品 a_j の平均必要数は、 $k m_j$ である。この平均必要数を順序計画における部品 a_j の k 番目の「目標値」と呼ぶ。すでに決定されている投入順序の 1 番目から k 番目までの製品を生産するために必要な部品 a_j の必要数を x_{kj} とし、 x_{kj} を投入順序における部品 a_j の k 番目の「実績値」と呼ぶ。

ところで投入順序計画において、部品 a_j の出現率をできるだけ一定にするためには、部品 a_j の実績値 x_{kj} は目標値 $k m_j$ にできる限り近づけることが

望ましい。今、部品 a_j の k 番目の目標値 $k m_j$ を j 番目の要素とする点 (k 番目の「目標点」) を G_k 、部品 a_j の k 番目の実績値 x_{kj} を j 番目の要素とする点 (k 番目の「実績点」) を X_k と定義すると、

$$G_k = (k m_1, k m_2, \dots, k m_M)$$

$$X_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kM})$$

となる。順序計画において全部品の出現率を一定にするためには、点 X_k は点 G_k にできる限り近いことが要求される。点 X_k と点 G_k の近さの程度を

$$\text{距離 } D_k = \sqrt{\sum_{j=1}^M (k m_j - x_{kj})^2}$$

で評価すると、距離 D_k はすべての k に対して、できる限りゼロに近いことが必要である。

今、1 つの投入順序計画 P_i の k 番目の実績点を

$$X_k^{(i)} = (x_{k1}^{(i)}, x_{k2}^{(i)}, \dots, x_{kM}^{(i)})$$

と定義する。投入順序計画 P_i に対し、1 番目から Q 番目までの目標点と実績点との距離の和を $D^{(i)}$ とすれば、

$$D^{(i)} = \sum_{k=1}^Q D_k^{(i)} = \sum_{k=1}^Q \sqrt{\sum_{j=1}^M (k m_j - x_{kj}^{(i)})^2}$$

と表わせる。この距離 $D^{(i)}$ の和を最小にする投入順序計画を「最適解」と定義する。

5.2 投入順序付けの近似解法

k , Q , n_j はすべて整数であるが、 k 番目の目標値 $k m_j$ ($j=1, 2, \dots, M$) は必ずしも整数でない。一方、投入順序計画 P_i の k 番目の実績値 $x_{kj}^{(i)}$ ($j=1, 2, \dots, M$) は整数である。したがって、実数 $k m_j$ に最も近い整数を $[k m_j]$ と定義すると、明らかに次の命題が成立する。

<命題 1> すべての j , k に対して $x_{kj}^{(i)} = [k m_j]$ となる投入順序計画 P_i は最適解である。

一般に最適な投入順序を求めるには完全列挙法や分枝限定法等を用いなければならず、相当な計算手数を要する。そこでここでは近似解法を示す。説明する近似解法は、1 番目から $k-1$ 番目までの順序が決定したものと、単に k 番目の目標点と実績点との距離を最小にする製品を k 番目の

表 1 生産計画表

製品	A ₁	A ₂	A ₃
生産量	2	5	3

表 2 部品構成表

部品	製品		
	A ₁	A ₂	A ₃
a ₁	1		1
a ₂	1	1	
a ₃		1	1
a ₄	1		1

表 3 部品必要数

部 品	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
必要数	5	7	8	5

表 4 目標追跡法 I による投入順序付け

k	D _{k1}	D _{k2}	D _{k3}	k 番目の製品	x _{k1}	x _{k2}	x _{k3}	x _{k4}
1	1.11	0.79*	1.01	A ₂	0	1	1	0
2	0.85	1.59	0.57*	A ₃	1	1	2	1
3	0.82*	0.93	1.44	A ₁	2	2	2	2
4	1.87	0.28*	1.64	A ₂	2	3	3	2
5	1.32	0.87*	0.87	A ₂	2	4	4	2
6	3.84	1.64	0.28*	A ₃	3	4	5	3
7	0.93	0.82*	1.21	A ₂	3	5	6	3
8	0.57*	1.59	0.85	A ₁	4	6	6	4
9	—	1.01	0.79*	A ₃	5	6	7	5
10	—	0.*	—	A ₂	5	7	8	5

順序とする方法で、このような手順を繰

り返して 1 番目から Q 番目までの製品の順序を決定していく。具体的な手順は次のとおりである。

〈目標追跡法 I〉 製品 A_i (i = 1, 2, ..., N) を 1 台生産するのに必要な部品 a_j (j = 1, 2, ..., M) の必要数を b_{ij} とする。

(1) 初期値を設定する。

$$k = 1, x_{0j} = 0 (j = 1, 2, \dots, M), S_1 = \{1, 2, \dots, N\} \text{ とおく。}$$

(2) 次式の値 D_{ki}* を与える製品 A_i* を k 番目の製品とする。

$$D_{ki}^* = \min_{i \in S_k} D_{ki}$$

$$\text{ここで } D_{ki} = \sqrt{\sum_{j=1}^M (K_{mj} - x_{k-1,j} - b_{ij})^2}$$

である。

(3) 製品 A_i* がすべて順序付けられたら、

$$S_{k+1} = S_k - \{i^*\} \text{ とする。}$$

もしそうでなければ S_{k+1} = S_k とする。

(4) S_{k+1} = φ (空集合) なら、手順は終了する。

$$S_{k+1} \neq \phi \text{ なら, } x_{kj} = x_{k-1,j} + b_{i^*j} (j = 1, 2, \dots, M) \text{ を計算し, } k \text{ を } k + 1 \text{ とおいてステップ(2)へ戻る。}$$

〈例 1〉 製品 A₁, A₂, A₃ の生産量が表 1, 各製品の部品構成が表 2 のように与えられたとき、目標追跡法 I で投入順序を求める。各構成部品 a_j の必要数 n_j を求めると表 3 のようになる。したがって m₁ = 0.5, m₂ = 0.7, m₃ = 0.8, m₄ = 0.5 である。手順にしたがって距離 D_{ki} を求めると表 4 のようになり、k 番目で決定した製品は表 4 で * で示し

たとおりである。表 4 より投入順序は A₂A₃A₁A₂A₂A₃A₂A₁A₃A₂ となる。なお目標値 k_{mj} (j = 1, 2, 3, 4) と実績値 x_{kj} (k = 1, 2, ..., 10; j = 1, 2, 3, 4) とを図示すると図 7 のようになる。本例では得られた投入順序計画は最適解である。

目標追跡法 I のステップ(2)において、距離 D_{ki} を最小にする製品が 2 つ以上ある場合は任意の 1 つを選択しているが、これらの製品を k 番目の順序とするすべての順序を考え、k + 1 番目の順序決定にはすでに得られているすべての順序について計算していく方法をとれば、より最適解に近い順序計画が求められる。なお、目標追跡法 I の評価については、文献[6]を参照されたい。

一般的に考えると、全部品の出現率の一定化を図るといっても部品によりそのレベルが異なる。そこで、部品 a_j の重み付けを w_j として、点 X_k と点 G_k との距離 D'_k を

$$D'_k = \sqrt{\sum_{j=1}^M \{w_j (k_{mj} - x_{kj})\}^2}$$

と定義すると、部品の出現率のレベルを考慮した順序付け問題になる。部品の出現率の相対的レベルと重み w_j との関係はシミュレーションにより決定することができる。

ところで k 番目の順序を決定する場合、製品 A_i を採用したときの k 番目の実績点を X_{ki} とし、

$$X_{ki} = (x_{ki,1}, x_{ki,2}, \dots, x_{ki,M})$$

と定義する。同様に、製品 A_b を採用したときの

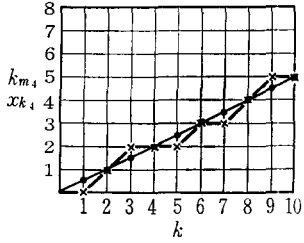
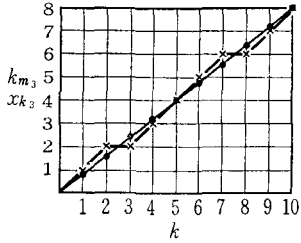
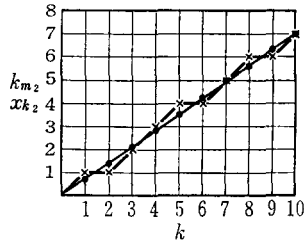
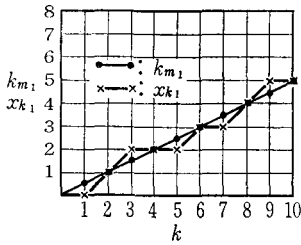


図 7 目標値 k_{mj} と実績値 x_{kj} とのグラフ

実績点 X_{kb} を、 $X_{kb} = (x_{kb,1}, x_{kb,2}, \dots, x_{kb,M})$ と定義する。各製品とも構成する部品数（構成部品点数）が同一で、かつ構成数がすべて同一で C 個とすると、次の命題が成立する。

〈命題 2〉[7] ある製品 A_b とその他の任意の製品 A_i とにおいて、

$$\sqrt{\sum_{j=1}^M \{w_j(k_{mj} - x_{kb,j})\}^2} \leq \sqrt{\sum_{j=1}^M \{w_j(k_{mj} - x_{ki,j})\}^2}$$

が成立することと、

$$\sum_{b_i \in B_b} w_{b_i}^2 (k_{mb_i} - x_{k-1, b_i}) \geq \sum_{i_i \in B_i} w_{i_i}^2 (k_{mi_i} - x_{k-1, i_i})$$

が成立することは同値である。ここで B_b, B_i はそれぞれ製品 A_b, A_i の構成部品の集合である。

この命題 2 を用いた投入順序付けの方法（目標追跡法 II）では目標追跡法 I より計算量を減少することができる。

例 1 の製品の構成部品点数は異なるが、次のように変更することにより仮の構成部品点数を同一にすることができる。表 5 のように部品 a_j ごとに構成部品としての有無に対応して仮の部品 b_j ($j = 1, 2, \dots, 8$) を設定すれば、すべての製品とも構成部品点数は 4 となり、構成部品点数を同一にす

表 5 仮の部品の設定

部品	構成の有無	仮の部品	製 品		
			A_1	A_2	A_3
a_1	有	b_1	1		1
	無	b_2		1	
a_2	有	b_3	1	1	
	無	b_4			1
a_3	有	b_5		1	1
	無	b_6	1		
a_4	有	b_7	1		1
	無	b_8		1	
構成部品点数			4	4	4

ることができる。

〈命題 3〉[6] 仮の部品 b_j を設定して目標追跡法 II を適用して求めた投入順序と真の部品で目標追跡法 I を適用して求めた投入順序とは同一である。

5.3 実務における投入順序付け

実務における投入順序付けでは、部品の出現率を一定にするだけでなく、組立ラインのラインストップを少なくするために、組立ラインの各作業ステーションの作業遅れをできるだけ発生しないように順序付ける必要がある。

部品の出現率一定化については、自動車の構成部品点数は約 2 万点あり、部品展開して目標追跡法 II を適用することは困難なので、ポデータタイプや各種サブアッソンの項目で部品を代表させる方法をとっている。代表させる項目の決定にはその項目の重要性だけでなく、車両のほとんどの構成部品が含まれるように考慮している。また、特に重要な部品については、その出現率をより一層一定化するために重み付けも行なっている。

車両の全組立工数は車両の種類によってかなり差があるので、車両の種類ごとに適正な作業編成を行なう必要がある。トヨタでは適正な作業編成の維持・改善のために、日々多大な努力を払っている。特に、トヨタでは作業ステーションで作業遅れが発生すれば、作業者がみずから組立ライン

を止める方法を採用し、問題点をラインストップという形で顕在化させ、即改善を行なうことによってラインバランスを図っている。そのために、車両の組立工数については作業ステーション別には考慮せず、車両の全組立工数により車両を分類し、部品の出現率一定化の考え方で処理をしている。また、組立工数が特に多い車両やある工

表 6 主な代表項目

No.	代表項目
1	ボデータイプ
2	エンジン
3	ミッション
4	グレード
5	フロントアクスル
6	リヤアクスル
7	フレーム
8	パンパ

程の設備能力に問題がある車両は、部品の出現率一定化に反する面があるが、連続して順序付けが行なわれないようなコントロールも行なっている。一部の作業ステーションにのみ多大な組立工数を要する場合などはバイパスラインを設置して対応することもある。さらに、設備の条件により、車種を一定の比率で計画しなければならないラインもあり、順序計画の条件も非常に複雑になっている。したがって、適切な順序計画を作るためには、実際のデータで何度もシミュレーションを行なって順序計画の条件を求める必要がある。

次に、車両の順序付けの例を示す。順序付けをする車両数(1日の生産計画台数)、車両の種類数はそれぞれ約500、約180である。部品を代表させる項目は約20で、主要なものは表6のとおりである。目標追跡法Ⅱで順序付けを行ない、これを16に等分割して、サブアッシの1つであるフロントアクスルの各種類が各分割に何個含まれるかを示したのが表7である。

ところで、部品の組立ラインへの運搬は、ほとんどの部品が数時間ごとでありまた運搬はパレット(パレットの収容数はほとんど数十以上)単位で行なわれるので、実際における部品の出現率の一定化は、計画レベルでは十分満足できる状態にある。

6. おわりに

かんぱん方式にまつわる数理的な側面、特にスケジューリングに関する話題を中心に述べたが、かんぱん方式の動特性や車両の投入順序付けの手

表 7 フロントアクスルの分割表

種類	分 割															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A	9	7	7	9	8	7	7	8	8	8	7	8	9	7	7	8
B	6	5	7	6	5	6	7	5	7	6	5	7	6	6	5	6
C	5	6	5	5	6	6	4	6	4	6	6	5	4	6	5	6
D	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3
E	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	1	3	2	2	2

順については、まだ残された課題は多い。いろいろと研究されることを期待したい。ここでは取り上げなかったが、補修用部品関係の生産指示の問題も一種のスケジューリングの問題である。文献[9],[10]はこれらの話題を扱っている。

参 考 文 献

- [1] 大野耐一, “トヨタ生産方式”, ダイアモンド社, '78
- [2] 内田安弘, “トヨタシステム”, 講談社, '85
- [3] 小谷重徳, “信号かんぱんによるロット工程の運営とその稼働特性の解析”, トヨタ技術, Vol.33, No.1('83)
- [4] Kimura, O. and Terada, H., “Design and Analysis of Pull System, a Method of Multi-stage Production Control”, Vth ICPR Free Paper Sessions, '79
- [5] 小谷重徳等, “多段生産工程における引張り方式による生産指示とその解析”, 日本経営工学会春季研究発表会予稿集, '80.5
- [6] 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, No.1('83)
内田安弘編, “トヨタ生産方式の新展開”, 日本能率協会, '83に転載
- [7] 小谷重徳, “トヨタ生産方式におけるスケジューリング”, 第7回数理計画シンポジウム論文集, '86.11
- [8] 小谷重徳, 田中吉弘, “混合ラインへの製品の投入順序付け(その2)”, 日本経営工学会秋季研究発表会予稿集, '82, 10
- [9] 小谷重徳, 田中吉弘, “指数平滑法を用いた生産指示方式の解析”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.30, No.4('85)
- [10] 小谷重徳, 田中吉弘, “生産指示における平準化計画の方法”, トヨタ技術, Vol.33, No.2('84)