トヨタ生産方式における業務改善に関する研究

M2004MM035 奥谷 弘樹
指導教員　澤木 勝茂

1　はじめに

不況と言われる昨今, 業務改善は急務である．現在, ひと昔前のように大量生産してもそれに対する付加価値がなければ物が売れない時代に移り変わっている．仮に商業を例にとってみると, 仕入れたものに一定のマージンを上乗せして売値をつける「安く買って高く売る」ことが儲けになる．しかし, 物を作って売る工業の場合の儲けは, 商業と同じように材料や部品を安く買って, 製品を高く売ることで儲かるのかを考えたとき, これは正しくない．工業の儲けは物を作る過程で, どれだけ付加価値を高めたかでなければならない．これは, 全ての工業に共通して言えることである．ここで,
(i) 利益＝売値−原価
の式は右辺が正値である限り
(ii) 売値＝原価＋利益
と書き換えられるが, トヨタでは (ii) という式は成立しない．原価主義という言葉があるが, これを貫いていくと, かかった原価は全て消費者の負担になってしまう．この, 競争の激しい時代では, この方式はとりたくても, とれない．一方, 車の売値は市場相場で, ほぼ決まっているので, (i) 式では, 利益を出すためには原価をできるだけ下げるという一点にこそ利益の源があるわけである．

本研究では, 原価をできるだけ下げるために 2 つのモデルについて考察する．1 つ目のモデルは, 多段階から成るサプライ・チェーンにおいて鞭効果と呼ばれるもので, 発注量の分散と需要量の分散の値を比較する．2 つ目のモデルは混合品種組み立てと呼ばれるもので, 多品種少量生産に適した組み立てラインについて定式化を行う．さらに, かんばんの特性について述べ, 最適かんばん枚数について考察する．

2　鞭効果

鞭効果とは, 小売店における最終顧客の需要がそれほどばらついていないにもかかわらず, メーカーに小売店から発注される需要量が大きくばらつくという現象である．一般に鞭効果は, サプライ・チェーンの上流 (メーカー側) にいくにしたがい, 需要のばらつきが増幅される．鞭効果の主な要因として以下の 4 つの事が挙げられる．

- 需要予測 … ここで小売店, 卸売業者, メーカーから成るサプライ・チェーンを考える．小売店は顧客の需要に基づいて 2 段階目の卸売業者に商品の発注を行う．卸売業者は小売店からくる注文の予測に基づいてメーカーへの商品の発注を行う．ここで, 卸売業者は顧客の需要データを入手出来なければ, 小売店からの注文をもとに需要予測をしなければならない．小売店からの注文量の変動は, 顧客の需要量の変動よりもはるかに大きいため, 卸売業者は小売店よりも多くの在庫を抱えるか, 小売店と同じサービスレベルを保つために, 小売店よりも取り扱い量を増やさざるを得ない．これらの現象はサプライ・チェーンの上流にいけばいくほど大きく見られる．このように, サプライ・チェーン下流からの発注量を下に需要予測を行うので発注量の変動が大きくなり, 鞭効果を増大させるのである．

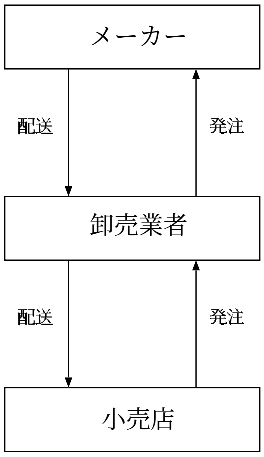

図 1　発注の流れ

- リード時間 … 在庫をもつ要因の 1 つに, 品切れに対する制御が挙げられる．品切れは, 発注をしてから商品が到着するまでの時間が長いほど発生しやすいので, 目標とする在庫レベルはリード時間に応じて大きめに設定される．発注量は, 目標とする在庫レベルに基づいて決められるので, 在庫量が大きいときには発注量も大きくなる．したがって, リード時間が長いほど鞭効果が増大される．
- バッチ発注 … 発注費用が固定の場合は, ミニマックス在庫方式を採用する必要があり, その結果バッチ発注をする．また, 輸送費用が大きい場合は, 運送費用を割引してもらうために発注量をまとめる．バッチ発注を行うと, 比較的ばらつきの少ない顧客需要も, 大きな発注の後に発注がまったくない期が続く, きわめてばらつきの大きい発注に変換されるため, 鞭効果を増大させることになる．
- 価格の変動 … 商品を値引きすることも鞭効果を起こしている重要な要因である．値引きしている間は, 通常価格の時とくらべて商品の売れ行きも良

いので, その分大量発注が行われる. しかし, 通常の価格に戻ると商品の売れ行きは通常の場合以下に落ち込むに違いない. このような需要の変動は, 発注量の変動につながり, 鞭効果を増大させるのである.

2.1 モデルの説明

ここでは鞭効果を説明するために 2 つのモデルを示す. １つめのモデルは 1 つの小売店と 1 つのメーカーから成る最も単純なモデルである. 移動平均, 指数平滑の需要予測方法に対して, 発注量の分散と需要量の分散の間の関係式を導く.

2 つめのモデルは複数の段階から構成される多段階モデルである. 全ての段階で顧客需要に関する情報を有する場合と, 何の情報ももたない場合の 2 つのモデルに対して発注量の分散と需要量の分散の間の関係式を導く.

2.2 記号の説明

モデルに必要な記号を以下に示す.

D_t：t 期における需要量
$\hat{d}_t$：t 期の需要の予測値
L：リード時間
$\hat{d}_t^L$：リード時間中における需要量の予測値
$\hat{\sigma}_t^L$：リード時間中における需要量の標準偏差の予測値
y_t：目標在庫レベル
q_t：t 期における発注量

2.3 定式化

記号の定義より, D_t は平均を表すパラメータ $d(\geq 0)$, 前期需要量との相関を表すパラメータ $\rho(-1 < \rho < 1)$, ならびに t 期における誤差を ϵ_t を用いて $D_t{=}d{+}\rho D_{t-1}{+}\epsilon_t$ と表すことができる.

また, p 期の移動平均法を用いた場合, の t 期の需要の予測値は,

$$\hat{d}_t = \frac{\sum_{j=1}^{p} D_{t-j}}{p} \tag{1}$$

ここで発注量 q_t は以下のように書くことができる.

$$\begin{aligned} q_t &= y_{t+1} - y_t + D_t \\ &= \frac{L\sum_{j=1}^{p} D_{t+1-j}}{p} + z\hat{\sigma}_{t+1}^L - \frac{L\sum_{j=1}^{p} D_{t-j}}{p} \\ &\quad - z\hat{\sigma}_t^L + D_t \end{aligned}$$

これらの式を用いて,

$$\begin{aligned} Var[q_t] &\geq \left(1+\frac{L}{p}\right)^2 VarD_t + \left(\frac{L}{p}\right)^2 Var[D_{t-p}] \\ &\quad - 2\left(1+\frac{L}{p}\right)\left(\frac{L}{p}\right) Cov[D_t, D_{t-p}] \\ &= \left\{1+\left(\frac{2L}{p}+\frac{2L^2}{p^2}\right)(1-\rho^p)\right\} Var[D_t] \end{aligned} \tag{2}$$

の関係を得る. よって, $Var[q_t]$ と $Var[D_t]$ の関係

$$\frac{Var[q_t]}{Var[D_t]} \geq 1 + \left(\frac{2L}{p}+\frac{2L^2}{p^2}\right)(1-\rho^p) \tag{3}$$

を得る.

また, 移動平均法の場合と同じように, 指数平滑法を用いたときの鞭効果の関係式を導出する. 平滑定数 α を用いた t 期の需要の予測値は,

$$\hat{d}_t = \alpha \sum_{j=1}^{\infty} = (1-\alpha)^{j-1} D_{t-j} \tag{4}$$

になり, 先程と同様に, 指数平滑法を用いた場合の発注量の分散 $Var[q_t]$ と需要量の分散 $Var[D_t]$ の関係を解析すると,

$$\frac{Var[q_t]}{Var[D_t]} \geq 1 + \left(2L\alpha + \frac{2L^2\alpha^2}{2-\alpha}\right)\left\{\frac{1-\rho^p}{1-(1-\alpha)\rho}\right\} \tag{5}$$

になる.

2.4 多段階モデル

次に, 基本モデルを多段階に拡張したモデルを扱う. ここで, 多段階とは, 部品メーカー→メーカー→卸売業者→小売業者のように発注が何段階にもわたって成されることを指す. この多段階モデルにおけるすべての段階で最終需要に関する情報が既知であるモデルを情報集中型多段階モデル, 需要に関する情報がまったく与えられておらず下流からの発注をもとに需要予測を行い, 調整を行うモデルを情報分散型多段階モデルと呼ぶことにする.

2.5 定式化

ここで, 基本モデルの記号に以下のものを追加する.

q_t^i：i 段階の t 期における発注量
L_i：i 段階におけるリード時間

また, 需要予測の方法として移動平均法を用いることにする. 基本モデルと同様の解析から, 発注量の分散と $Var[q_t^i]$ と需要量の分散 $Var[D_t]$ の関係である.

$$\frac{Var[q_t^i]}{Var[D_t]} = 1 + \frac{2\sum_{k=1}^{i} L_k}{p} + \frac{2\left(\sum_{k=1}^{i} L_k\right)^2}{p^2} \tag{6}$$

を得る. また情報分散型多段階モデルの場合には, i 段階での t 期の需要の予測値は,

$$\hat{d}_t^i = \begin{cases} \left(\sum_{j=1}^{p} D_{t-j}\right)/p & i=1\text{ のとき} \\ \left(\sum_{j=1}^{p} q_{t-j}^{i-1}\right)/p & i=2,3,\cdots,n \end{cases} \tag{7}$$

で与えられる. ここで, q_t^i は i 段階での t 期末における発注量であり,

$$q_t^i = \begin{cases} y_{t+1}^i - y_t^i + D_t & i=1\text{ のとき} \\ y_{t+1}^i - y_t^i + q_t^{i-1} & i=2,3,\cdots,n \end{cases} \tag{8}$$

である. 情報分散型多段階モデルの場合も基本モデルと同様に解析することによって, 発注量の分散 $Var[q_t^i]$ と需要量の分散 $Var[D_t]$ 関係

$$\frac{Var[q_t^i]}{Var[D_t]} = \prod_{k=1}^{i}\left(1+\frac{2L_k}{p}+\frac{2L_k^2}{p^2}\right) \tag{9}$$

を得る.

3 混合品種組立

混合品種組立ラインとは, 複数品種の製品が 1 つの組立ライン上を混流し, 同時平行して組み立てられていく生産方式である. この生産方式は, ライン切替え方式に比べて製品在庫と段取り替えが不要になる反面, 品種間での作業の違いによって起こる生産効率の低下が問題となる. これは, 品種間で作業時間は違うことからライン停止や手待ちが起こるためである. これら不具合を防いで作業効率を維持し, またライン側に配置する組立部品在庫少なくして作業スペースを確保するため, 製品投入順序を最適決定することが重要となる.
ここで, 問題を解決するための要素を以下に示す.

作業域…品種ごとに作業時間が異なることから, 作業時間の早遅を調整するための作業域が各工程に設定される. 指定された作業域の境界外に出て作業を行うことができる場合と境界外に出ることができない場合が考えられる. 境界外に出て作業を行うことが出来る場合においては, 時間のかかる品種のときは作業域を越えて作業を行い, 時間の短い品種のときに本来の作業域に戻るといった方法で, 品種間の負荷のバランスをとることができる.

作業遅れと手待ち…境界外に出て作業を行うことが出来ない場合において, 指定された作業域内で作業が終了できない状態を作業遅れと呼ぶ. 作業遅れが生じると, 残りの作業を補助作業者に任せて次のワークに取りかかる. そのような補助作業者を配置してない場合は, ライン停止が発生する. また, 各作業者は 1 つのワークについて作業を終了したとき, 工程の上流側境界線にまだ次のワークが到着していなければ, このワークの到着を待たなければならない. この待ち時間を手待ちと呼ぶ.

3.1 記号の説明

記号を以下のように定義する.
I：品種数
M：工程数
c：サイクルタイム (製品の投入間隔)
d_i：計画期間中の品種 i の生産数量, $i =, 1, \cdots, I$
K：計画期間中の総生産数量
t_{im}：品種 i の工程 m での作業時間
L_m 工程 m の作業の長さ
x_{ik}：品種 i を投入順序の k 番目に投入する場合は 1, そうでない場合は 0 をとる 0-1 変数
s_{mk}：k 番目のワークの工程 m における作業開始位置
ω_{mk}：k 番目のワークにおける m 工程における作業遅れ

3.2 定式化

計画期間中の作業遅れの総時間を最小化するための製品投入順序付け問題は以下のように定式化できる.

$$\sum_m \sum_k \omega_{mk} \rightarrow min \tag{10}$$

s,t

$$\sum_i x_{ik} = 1, k = 1, 2, \cdots, K \tag{11}$$

$$\sum_k x_{ik} = d_i, i = 1, 2, \cdots, I \tag{12}$$

$$s_{mk} + \sum_i t_{im}x_{ik} - \omega_{mk} - s_{m,k+1} \leq c, m = 1, \cdots, M \quad k = 1, \cdots, K \tag{13}$$

$$s_{mk} + \sum_i t_{im}x_{ik} - \omega_{mk} \leq L_m, m = 1, \cdots M; k = 1, \cdots K \tag{14}$$

$$s_{mk} \geq 0, \omega_{mk} \geq 0, x_{ik} \in \{0, 1\}$$

ただし, すべての工程 m において $s_{m,1}$=$s_{m,K+1}$=0

4 かんばん方式

かんばんとは反復して利用される製造指図書で, そこには, 生産品目, 生産量, 方法, 順序, 運搬量, 運搬先, 置場所, 容器等が指定される. かんばんは必ず現物とともにあり, そうでないときは製造指図または運搬指図をしている. ここでかんばんの動き方について説明する.1 つは後工程からとりにいくというものである. 普通生産は, 前工程から流し込み式に行われるが, かんばん方式では後工程から取りにいって初めて生産が始まる. ある工程の後に 1 枚のかんばんとそこに指定してある荷姿の一定個数の加工済み部品がある. この部品を後工程から取りに来て, つけてあるかんばんを外したとき当該工程は, その現物を失ったかんばんによって製造が指示されたとする. このときかんばんの第 2 の法則である「後工程が引き取った量だけ作る」が働く.
このような基本ルールを守るために前提となるべき条件は

- 不良品を後工程に送らない
- 生産をできるだけ平均化する
- 工程を安定, 合理化する

といったものを挙げることができる. かんばんはそれ自身が目的ではなく手段である. それは工程における総在庫量を規制し, 圧縮するための道具である. したがって目的である在庫の圧縮, そして究極的な狙いであるコストダウンは上に挙げた 3 つの条件とかんばん利用が連動して可能になる.

4.1 かんばんの枚数について

かんばんは総在庫量をコントロールする手段である. ここで

- K:かんばん枚数
- D:単位時間所容量
- T_p:生産または運搬時間
- T_w:かんばんの待ち時間
- b:容器あたりの収容数
- α:許容率

と記号を定義すると, かんばん枚数 K は次のように表される.

$$K = \frac{D(T_p + T_w)(1+\alpha)}{b} \tag{15}$$

ここでわかりやすくするために以下のように変形する.

$$K \cdot b = D(T_p + T_w)(1+\alpha) \tag{16}$$

とすると $K \cdot b$ はかんばんのカバーする範囲内の在庫量である.

5 考察

5.1 鞭効果の結果・考察

移動平均法による鞭効果の分散による定量化の結果から以下の結果が得られる.

- 移動平均をとる際のパラメータ p を増やすと, 発注量の分散は減少する.
- リード時間 L を増やすと, 発注量の分散は増大する.
- リード時間が 0 のときは鞭効果は発生しない.
- 需要が正の相関をもつとき ($\rho > 0$) には, ρ が大きくなるにつれて発注量の分散は減少する.

また, 指数平滑法における鞭効果の分散による定量化の結果から以下の結果が得られる.

- 指数平滑法のパラメータ α を小さくすると, 発注量の分散は減少する.
- リード時間 L を増やすと, 発注量の分散は増大する.
- リード時間が 0 のときは鞭効果は発生しない.
- $\frac{1-\rho^p}{1-(1-\alpha)\rho}$ の値は, $0 \leq \rho < 1$ のとき 1 以下であり, $-1 < \rho \leq 0$ のとき 1 以上であるので発注量の分散は, 需要の相関 ρ が大きくなるにつれて小さくなる.

さらに, 情報集中型多段階モデルと情報分散型多段階モデルの式から以下のことがわかる.

- 情報分散型他段階モデルでは, 段階が進むにつれ, リード時間の影響が積形式で蓄積される.
- 情報集中型段階モデルでは, 段階が進むにつれ, リード時間の影響は和の形で蓄積される. 鞭効果は情報分散型他段階モデルにおいて顕著であり, 鞭効果を減らすためには, 情報をすべての段階で共有する方法が有効である.

5.2 混合品種組み立ての結果・考察

数値計算を行う上での値を以下のように設定する.

$I=3$,$M=3$,$d_1=4$,$d_2=2$,$d_3=3$,$K=9$
$t_{11}=3$,$t_{12}=8$,$t_{13}=5$,$t_{21}=4$,$t_{22}=10$,$t_{23}=2$,$t_{31}=8$,$t_{32}=6$,$t_{33}=9$
$L_1=25$,$L_2=30$,$L_3=28$

表 1　混合品種組み立ての数値結果

x_{11}	x_{21}	x_{31}	x_{12}	x_{22}	x_{32}	x_{13}	x_{23}	x_{33}
0	1	0	0	0	1	0	0	1

x_{14}	x_{24}	x_{34}	x_{15}	x_{25}	x_{35}	x_{16}	x_{26}	x_{36}
0	0	1	1	0	0	0	1	0

x_{17}	x_{27}	x_{37}	x_{18}	x_{28}	x_{38}	x_{19}	x_{29}	x_{39}
1	0	0	1	0	0	1	0	0

数値計算結果より, 製品投入順序は製品 $2 \Rightarrow 3 \Rightarrow 3 \Rightarrow 3 \Rightarrow 1 \Rightarrow 2 \Rightarrow 1 \Rightarrow 1 \Rightarrow 1$ という順番が遅れ時間を最小にする最適な政策であることという結果が得られた.

5.3 かんばん方式の結果・考察

ここで 1 日 8 時間稼働すると仮定し,1 日で 1000 個必要であるとする. つまり,1 時間 (単位時間) あたり 125 個必要である. ここで生産または運搬時間とかんばんの待ち時間の和 $(T_p + T_w)$ を 90 分とする. そうすると, 許容率を考えないと総在庫量 $K \cdot b$ は 188 個になる. しかし, この場合は余裕を全然見ない場合で力の十分でない現場では少し不安である. ここで許容率 α を 0.2 とする. そうすると, 総在庫量 $K \cdot b$ は 225 個になり, 仮に容器あたりの収容数 b を 25 とするとかんばん枚数は 9 枚でよいことになる.

参考文献

[1] Frank Chen,Jennifer K. Ryan,David Simichi-Levi：The Impact of Exponential Smoothing Forecasts on the Bullwhip Effect, *Naval Research Logistics,Vol. 47(2000).*

[2] 門田安弘：トヨタの現場管理, 日本能率協会 (1986).

[3] 久保幹雄：ロジスティック工学, 朝倉書店 (2001).

[4] ジャストインタイム生産システム研究会：ジャストインタイム生産システム, 日刊工業新聞社.(2004)