

プラスチックワイヤー企業を対象とした見込環境下での 生産座席システムの基礎研究

林 千 宏

1. はじめに

本研究が対象とするプラスチックワイヤー企業 A 社の製造工程は、元網製作工程と完成品製作工程に大別され、前者は見込生産の要素が強い見込・注文複合生産形態に、後者はテーラーメイドの注文生産形態に基づいている。前者においては製織工程、後者においては織継工程という複数日に跨る製造リードタイムを要する工程が存在し、加工制約のある複数台の生産設備を効果的に稼働させなければならない。

特に製織工程について、生産設備は 15 台所有しているが、それぞれで製織可能な製品巾（約 8～15m）や製織速度（約 7～15m/day）が異なる。また、品質確認やトラブル対応のため作業員が 24 時間巡回しているが、員数都合のため同時に稼働できる織機台数にも限りがある。織機ごとにセッティングする縦糸の種類によって製織できる品種（例：粗い/細かい等）も異なるため、いつ・どの織機で・何の品種を織るかというスケジューリングが重要になる。

この様な制約条件の中で効果的なスケジューリングを行うため、同社では生産座席システムの適用を試行している。しかしながら、生産座席システムに関する過去の研究は注文生産形態に関するもの^{1, 2)}が大半であり、同社の元網製作工程の様な見込生産性の高い生産形態に同システムを適用するには基礎研究が不足していると考ええる。

生産座席システムとは飛行機や新幹線の座席予約に似た考え方に基づく生産計画法である。1 日の生産能力を座席に見立て、各座席に生産予定品種を割り当てていくスケジューリング法である³⁾が、見込生産形態においては品切れと在庫の双方を限りなく低く抑える必要があり、そのために座席数を過不足なく設定することが重要となる。

生産座席システムに関する先行研究は先に述べた通り注文生産形態に関するものが多く、納期充足率や品切れ率といった評価指標をある一定水準（目標水準）内に維持するための管理可能変数の範囲を明らかにし、システムの設計や制御方法に関する管理手法を提案している⁴⁾。しかし実際の製造現場では、その範囲の中で管理可能な変数をどの様な値に設定するかが課題であり、より効果的な意思決定が求められている。つまり、見込生産形態を対象とすること、より定量的な管理手法を提案すること、の 2 点が基礎研究として必要になると考える。

この様な背景や先行研究より、本研究では、見込生産環境を対象に、評価指標を目標水準

内に維持しつつ関連コストを可能な限り低く抑えた座席数の設定を行うための管理手法提案を目的とする。能力余力と基準在庫を設定する管理可能変数を用いて座席枠設定を行い、品切れに対するペナルティ費用と在庫保管料の総和（在庫コスト）を最小化する管理可能変数の推定手法を報告する。

2. 生産モデルの定式化

本節では次節のシミュレーション実験のために生産モデルの定式化を示す。表 1. は本書で用いる記号である。これらは先行研究⁵⁾に基づくものとなるが、新たな評価指標として在庫コストの概念を用いている。

まず前提条件について述べる。製品は I 種類の見込製品を対象とする。製品需要は毎日末に到着する。需要量の変動は各日で独立した正規分布に従うものとする。到着した製品需要分が在庫より出荷される。ただし、在庫量より多い需要が到着した場合、その不足分はバックオーダーではなく品切れとして計上される。製造リードタイムは 1 期あたりの日数と同じ L 日間とする。製造量は前日の需要量に依存し、バックオーダーは無いものとする。加えて、製造都合により製造ロットは分割できないものとする。完成品は即時倉庫に保管され、倉庫には十分な保管スペースがあるものとする。ただし、在庫量によって保管料が発生する。製造工程は M 工程からなる多段階フローショップであり、ボトルネック工程が存在する。ボトルネック工程は他工程に移動しないものとし、他工程は十分な生産能力を有することから、制約条件の理論（TOC）よりボトルネック工程にのみ生産座席システムを適用することとする。

次に生産計画は、座席枠設定を含む①基準生産計画と②各日の生産能力設定、そして③オーダー割付および生産指示の三段階で構成され、①②は上位の生産計画、③は下位の生産計画と層別される。

① 基準生産計画

座席枠設定としての基準生産計画では、第 $t-2$ 期末時点で式（1）に従い、第 t 期のボトルネック工程の稼動可能時間 MS_t を設定する。需要予測に基づく所要加工量と、基準在庫に基づく補充分の所要加工量の合計をボトルネック工程の所要加工量とし決定する。このとき、能力余力パラメータ ε と基準在庫パラメータ ϕ の 2 つの管理可能変数を導入し各期の生産能力として座席枠設定を行う。

$$MS_t = \bar{m}_b \times \sum_{i=1}^I \left\{ (1+\varepsilon) \hat{d}_{it} + SI_i - \hat{I}_{i,t-1} \right\} \quad (1)$$

$$SI_i = \bar{d}_i \times \phi \quad (2)$$

$$\hat{I}_{i,t-1} = I_{i,t-2} + \hat{p}_{i,t-1} - \hat{d}_{i,t-1} \quad (3)$$

$\bar{m}_b$ はボトルネック工程の平均加工時間、 $\hat{d}_{it}$ は第 t 期製品 i の需要予測量を示す。 SI_i は製品 i の基準在庫量を表し式（2）に従って計算され、第 $t-1$ 期末時点での製品 i 推定在

庫量 $\hat{I}_{i,t-1}$ は式 (3) により算出される．これらに用いられる $\bar{d}_i$ は製品 i の各期平均需要量， $I_{i,t-2}$ は第 $t-2$ 期末時点での製品 i 実在庫量， $\hat{p}_{i,t-1}$ は第 $t-1$ 期の生産予定量である．

② 各日生産能力設定

先に設けた基準生産計画（座席枠設定）を式 (4) に基づき，当該期（ L 日間）の各日に均等分配して第 j 日の座席数 SE_j を設定する．

$$SE_j = \frac{MS}{L} \quad (j=(r-1)L+1, (r-1)L+2, \dots, r \cdot L) \quad (4)$$

③ オーダ割付および生産指示

オーダ割付にはフォワード方式を適用する．各日に到着したオーダを翌日の未割付座席枠（空席）へ FCFS ルールに従って割付ける．オーダが当該日の空席を超える量の場合などで割付けられなかった分は以後の空席に同様のルールで割付ける．また，当該日に空席がある場合には，前日の実在庫と基準在庫から求める所要量により，各製品を比率配分して割付ける．ここで割付けた翌日分を確定し生産指示を行う．

最後に評価指標について述べる．本研究では製造のパフォーマンスを測る尺度として，品切れ率 α と平均在庫率 β および在庫コスト IC の 3 種を用いる．各々は次式に従い算出する．

$$\alpha = \sum_i \sum_t U_{i,t} / \sum_i \sum_t d_{i,t} \quad (5)$$

$$U_{i,t} = \begin{cases} 0 & , \hat{p}_{i,t} - d_{i,t} + I_{i,t-1} \geq 0 \\ |\hat{p}_{i,t} - \hat{d}_{i,t} + I_{i,t-1}|, \hat{p}_{i,t} - d_{i,t} + I_{i,t-1} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta = \sum_i \sum_t I_{i,t} / \sum_i \sum_t d_{i,t} \quad (7)$$

$$I_{i,t} = \begin{cases} \hat{p}_{i,t} - d_{i,t} + I_{i,t-1}, \hat{p}_{i,t} - d_{i,t} + I_{i,t-1} \geq 0 \\ 0 & , \hat{p}_{i,t} - d_{i,t} + I_{i,t-1} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$IC = \omega \cdot \sum_i \sum_t U_{i,t} + \sum_i \sum_t I_{i,t} \quad (9)$$

式 (5) で用いられる $U_{i,t}$ は第 t 期の製品 i 品切れ数， $d_{i,t}$ は第 t 期の製品 i 実需要量を表す．一方，式 (9) で用いられる ω は在庫保管料に対する品切れ発生時のペナルティを示す重み付け係数である．

3. シミュレーション実験

本節では前節の生産モデルに基づき実施したシミュレーション実験について説明する．まず実験条件を述べ，次に管理可能変数である能力余力パラメータ ε と基準在庫パラメータ φ が評価指標にどのような影響を及ぼすのかについて明らかにする．また，様々な生産環境において在庫コストを最小化する管理可能変数を探索し，次節のための基礎データも併せて実施し，結果の要約を述べる．

① 実験条件

- 各期の日数は 5 日間 ($L=5$)，製品種類は 3 種類 ($I=3$)，製造工程数は 3 工程 ($M=3$) とする

- 製品 i の各期平均需要予測量は 5,000 個 / 期 ($\bar{d}_i = 5,000$) とする
- 製品 i の各日の需要予測量は日に独立し、平均 ($\bar{d}_i / L$)、変動係数 CV の正規分布に従うものとする
- 製品 i の各日の実需要量も同様とする
- ボトルネック工程における各製品の加工時間は平均 ($\bar{m}_s = 1.0$)、フェイズ k のアーラン分布に従うものとする
- シミュレーション期間は 600 日間とし、初期 100 日を除いた 500 日間のデータを有効結果とする

② 管理可能変数が評価指標に及ぼす影響

これより実験結果について説明する。

まず図 1 は、能力余力パラメータ ε と基準在庫パラメータ φ が品切れ率に及ぼす影響を表している。能力余力、基準在庫共に品切れを減少させる効果があるのは自明であるが、能力余力の方が品切れ抑制に対して効果が高いことが解る。

次に図 2 は、品切れ率を 3% 以下に抑えるという条件下での能力余力パラメータ ε と基準在庫パラメータ φ が平均在庫率へ与える影響を示す。絶壁形状の箇所は品切れ率を 3% 以下に抑えられる管理可能変数値の境界を表しており、その値より小さい設定を

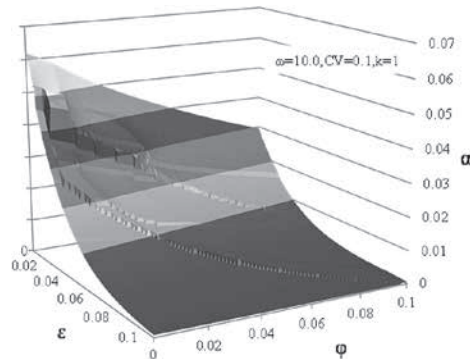


図 1. 管理可能変数と品切れ率の関係

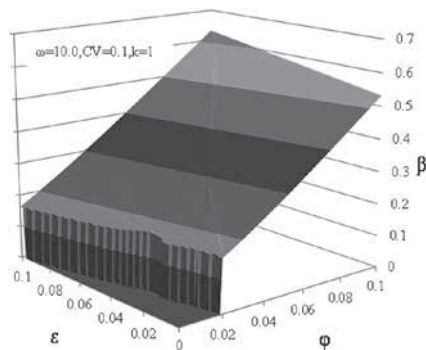


図 2. 品切れ率を 3% 以下に抑える条件下での管理可能変数と平均在庫率の関係

した場合はこの条件を満たすことができないことを意味する。基準在庫パラメータ φ を大きくした場合に在庫が増加することは自明であるが、能力余力を大きくした場合も基準在庫の比ではないが在庫増に繋がるのが解る。これは余力が過大になると空席が増加し、その空席を埋めるための生産が行われるためと考えられる。

これらより、能力余力と基準在庫の設定がそれぞれで品切れと在庫のトレードオフ関係に影響を及ぼすことが明らかとなった。これらを考慮し品切れと在庫をできるだけ低く抑える管理可能変数を次項で明らかにする。

③ 在庫コストを最小化する管理可能変数の探索

品切れと在庫のトレードオフ関係を同時評価する手法として、前節の式 (9) で定義した在庫コストを用いる。品切れ発生時にはそのペナルティをコストで捉え、在庫にも数量比例の保管コストを課することで同軸化を行い、更に重み付け係数を付することで様々な環境に適用できる仕様としている。

図 3 は、能力余力パラメータ ε と基準在庫パラメータ φ が在庫コスト IC に与える影響を示している。

まず基準在庫について、 φ の値が小さいときは前項の通り品切れ率が高くなってしまいうことから IC も大きくなる。反対に、 φ の値が大きいときは在庫保管料が増大してしまうため IC も大きくなる。

一方、能力余力について、 φ の値が小さいとき、 ε の値を大きくすることによって IC が小さくなっている。これは「 φ の値が小さい」＝「品切れが多い」という状況であるため、 ε を大きくすることで品切れが減少され、IC を小さくしているものと考えられる。反対に φ の値が大きい場合は、品切れではなく在庫保管料が IC の主要素となるため、 ε が大きくなることで更に在庫が増加し IC 増に繋がるものと考えられる。

IC の値は小さければ小さいほど製造のパフォーマンスが良いもの捉えることができるため、図 3 においては最も底面に近い箇所を指す ε と φ の値が最適な管理可能変数値と言え、その存在が明らかとなった。

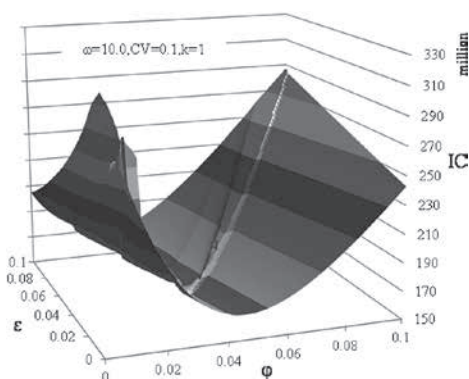


図 3. 管理可能変数と在庫コストの関係 ($\omega = 10.0, CV = 0.1, k = 1$)

続いて図4および図5について説明する。これらは図3と同様に、能力余力パラメータ ε および基準在庫パラメータ φ と在庫コスト IC の関係を示している。図3との違いは ω , CV および k の値が異なる点である。 ω は品切れペナルティと在庫保管料との重み付け係数, CV は需要予測量および実需要量の変動係数, k は加工時間のバラつきを表す係数であり、この3変数は製造環境を表す条件変数である。

図4, 図5共に、管理可能変数と在庫コストの関係は同様の傾向を示しているが、着目すべきは IC が最も底面に近い箇所を指す ε と φ の値が異なる点である。つまりこれらより、製造環境の違いによって在庫コストを最小化する管理可能変数の値が異なると言え、効果的な生産座席システムを構築するためにはその管理可能変数値の導出が必要であると考えられる。そこで次節ではその推定手法について論じていく。

④ 実験結果の要約

- ε と φ の値を大きくすることで品切れ率を低く抑えることが可能である
- 平均在庫率を低く抑えるにはできる限り ε と φ の値を小さく設定すべきである
- 製造環境条件によって品切れと在庫を最小化する ε と φ の値は異なる

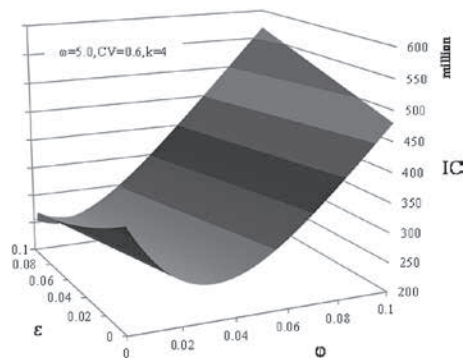


図4. 管理可能変数と在庫コストの関係 ($\omega = 5.0$, $CV = 0.6$, $k = 4$)

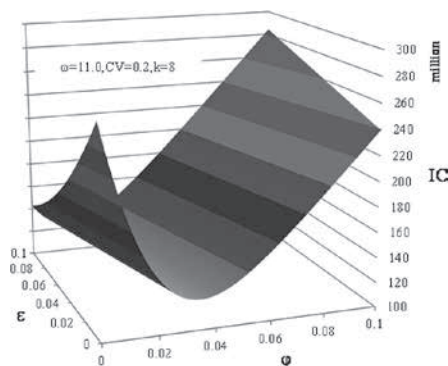


図5. 管理可能変数と在庫コストの関係 ($\omega = 11.0$, $CV = 0.2$, $k = 8$)

4. 重回帰分析

前節にて、それぞれの製造環境条件において在庫コストを最小化する管理可能変数を導出する必要性を述べたが、一つの工場を取り上げたとしても製造環境は時々刻々と変化するため、その都度それらを求めていくことは非常に困難である。そこで本研究では重回帰分析によりそれらを推定する手法を提案する。在庫コストを最小化する能力余力パラメータを ε^* 、同じく在庫コストを最小化する基準在庫パラメータを ϕ^* と定義し、重回帰分析を用いて $\varepsilon^* = f(a, \omega, CV, k)$ および $\phi^* = f(b, \omega, CV, k)$ を推定する手法である。分析手法、分析結果、考察について以下に記述する。

① 分析方法

目的変数は在庫コストを最小化する管理可能変数 ε^* と ϕ^* とし、各々をそれぞれ区別して分析する。これは前述の通り、能力余力と基準在庫が独立して評価指標に影響を与えているためである。

説明変数は前節でそれらへの影響が明らかとなった製造環境条件変数である品切れペナルティと在庫保管料との重み付け係数 ω 、需要予測量および実需要量の変動係数 CV および加工時間のバラつきを表す係数 k の3変数とする。

表1に前節で得られたシミュレーション実験結果の一部を示す。

② 分析結果

前項に従い分析した結果を式(10)および式(11)に記す。

$$\varepsilon^* = (2.724 + 3.533\omega + 0.167CV - 0.75k) \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

$$\phi^* = (5.768 + 8.258\omega + 12.443CV - 0.49k) \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

式(10)では $R^2 > 0.79$ 、式(11)では $R^2 > 0.70$ との決定係数が得られた。

表 1. シミュレーション実験結果の一部

ω	CV	k	ε	ϕ	IC
2.0	0.6	6	0.003	0.017	358,041,325
2.0	0.7	3	0.004	0.018	386,675,070
3.0	0.9	7	0.010	0.002	237,997,620
3.0	0.1	6	0.011	0.002	245,515,833
3.0	0.2	6	0.019	0.002	255,617,604
3.0	0.9	9	0.010	0.003	237,975,864
3.0	0.5	9	0.010	0.006	249,490,944
5.0	0.9	4	0.019	0.005	200,460,434
5.0	0.9	6	0.018	0.008	195,533,282
9.0	0.9	1	0.049	0.016	186,364,389
9.0	0.2	9	0.026	0.020	118,914,644
9.0	1.0	10	0.023	0.027	114,276,619
9.0	0.7	2	0.030	0.029	139,323,878
10.0	0.2	9	0.031	0.001	118,935,693
10.0	0.7	3	0.034	0.001	129,682,136
:	:	:	:	:	:
10.0	0.1	8	0.030	0.004	117,917,658
10.0	1.0	8	0.029	0.005	116,936,050

③ 考察

前述の分析結果より、製造環境条件変数を説明変数に用いた重回帰分析によって在庫コスト IC を最小化する管理可能変数を推定する手法に一定の信頼度を示すことができた。特に能力余力パラメータの推定については $R^2 > 0.79$ との高い決定係数が得られ、比較的正確な傾向を示していると言える。前節で述べた通り、適切に座席枠設定を行うためには基準在庫だけでなく能力余力についても十分考慮しなければならない。そのため、現時点ではまだ詳細について更に深く検証する必要があるが、今回得られた結果は十分効果的な座席枠設定の一助になるものと考ええる。

5. おわりに

本研究では、見込生産環境を対象に、評価指標を目標水準内に維持しつつ関連コストを可能な限り低く抑えた座席数の設定を行うための管理手法提案を目的とし、まずシミュレーション実験により能力余力と基準在庫を設定する管理可能変数が評価指標に与える影響について明らかにした。次に、その結果を用いて重回帰分析による効果的な座席枠設定を行うための管理可能変数の推定手法を提案し、その有効性を示した。これらより、本研究が見込生産性の高い生産形態に生産座席システムを適用するための基礎研究のひとつになるものと考ええる。

今後の課題として、見込生産形態の特色である固定ロットサイズ生産や在庫補充式生産指示を用いた生産モデルへの適用や、重回帰分析に代わるより信頼度の高い推定手法の検討、多段階製造工程における複数工程の生産座席連結などが挙げられる。

参考文献

- 1) 田村隆善, 藤田精一, 生産座席システムについての一考察, 経営システム, Vol.4, No.1, pp. 5-13, 1999 年.
- 2) 小林義和, 坪根斉: “多段階製造工程における生産座席枠システムの設計に関する研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol.53, No.4, pp.273-281, 2002.
- 3) “生産管理用語辞典”, 日本規格協会, 2002.
- 4) Tsubone, H., and Kobayashi, Y.,: “Production seat booking system for the combination of make-to-order and make-to-stock products,” Production Planning & Control, Vol.13, No.4, pp.394-400, 2002.
- 5) 大場允晶, 李慧子, 堀川三好, 中邨良樹: “見込生産環境における生産座席システムの研究”, 日本設備管理学会誌, Vol.26, No.2, pp.49-55, 2014.