

プラスチック容器製造工程における 階層型生産計画の最適化

林		千	宏
栢	木	紀	哉
西	岡	久	充
山	本	久	志

キーワード

生産管理
階層型生産計画システム
加工－組立フローショップ
ハイブリッドフローショップ

目 次

1. はじめに
2. 対象工程と製品構成
3. 加飾工程と組立工程の階層型生産計画モデル
 - 3.1 上位計画
 - 3.2 中位計画
 - 3.3 下位計画
 - 3.4 評価指標
4. 組立工程に関する最適解の導出および数値例
 - 4.1 前提条件
 - 4.2 品切れが無いと仮定した場合の最適解の導出
 - 4.3 数値例
5. 対象工程の最適化における課題と解決策
6. おわりに

1. はじめに

本研究は、加工－組立フローショップとハイブリッドフローショップの複合生産形態を持つプラスチック容器メーカーの製造工程を対象に、当該工程で使用されている階層型生産計画システムの最適化を目指す。

フローショップとは、全ての仕事（ジョブ）について機械設備や装置の利用順序が同一である生産形態を指す^[1]が、加工－組立フローショップおよびハイブリッドフローショップはその派生に該当する。加工－組立フローショップは、全ての部品の加工が完了するまで組立作業を開始できないフロー

ショップであり^[2]、ハイブリッドフローショップは、製品が異なるタイプの生産工程を経て一方に流れる生産形態である^[3]。1台の裁断機でフィルムを裁断するロット生産と、裁断されたフィルムを複数の機械でオーダ数量に合わせて包装する後工程の組み合わせが、ハイブリッドフローショップの一例である^[4]。一方、階層型生産計画システムは、生産能力と生産平準化を決定する長い計画周期の生産計画と短い計画周期の品目単位の生産計画を、階層構造の一連の意思決定プロセスとして構成する生産計画システムである^[5]。加工－組立フローショップにおける最大滞留時間を最小化する近似解の提案^[6]や、ハイブリッドフローショップにおける設備償却費用や稼働費用を考慮した設計の最適化^[7]、階層型生産計画を用いた単一工程に対する生産座席システム事例報告^[8]など、それぞれについての研究は多くあるが、実際の製造工程ではこれらが複合的に用いられており、その複合生産形態を対象とする研究はモデル構築自体が複雑であるため極めて少ない。

本研究では、実際のプラスチック容器製造工程を対象に、そこで用いられている加工－組立およびハイブリッド複合フローショップの階層型生産計画システムについて、品切れと在庫を同時に最小化する問題を取り扱う。当該工程は、需要予測に基づく生産計画を立案して製造を行い、実需要に対して製品を出荷する見込生産の割合が高いため、品切れを可能な限り低く抑える必要がある。一方、保管費用やモデルチェンジ等による死蔵化リスクの低減として、在庫を低く抑えることも同時に求められる。また、後工程の組立工程は前工程からの部品供給に依存するため、工程間の仕掛在庫や品切れも同様に低く抑えなければならず、多段階工程であればその管理対象範囲は増大する。当該工程は主に成形工程、加飾工程、組立工程、梱包および出荷工程の4段階で構成されている。これら全てをモデル化して品切れと在庫のトレードオフ関係を同時に最小化できれば最良であるが、現状は立案者の経験則に基づく生産計画であるため定式化されていない。加えて、製品構成や製造設備の都合上、前の2工程が独立したロット生産であるため、4つの工程を一元的にモデル化するにはハードルが高いのが実状である。

そこで本論文では、まず2章で対象となる工程と製品構成の詳細について述べる。3章では、対象工程の中でも特に重要と位置付けられる加飾工程と組立工程の2工程を対象とした階層型生産計画のモデルを説明する。4章では、先行研究^[9]で実施した3章のモデルに対する数理的アプローチによる最適解の導出について述べ、さらにその数値例を提示する。これを踏まえたうえでの課題と解決策を5章で整理し、6章では本論文における結論と今後の課題を示し総括する。以上より、実際の製造工程を対象とした加工－組立およびハイブリッド複合フローショップの階層型生産計画システムに対する一元的な最適化への道筋を示す。

2. 対象工程と製品構成

対象とする工程を有する企業は、洗剤、食品、飲料などを充填する様々なプラスチック容器を製造している。主な製品には、射出成形品、押出ブロー成形品、PETボトル、チューブ、食品用軽量薄肉容器などがあり、例えばシャンプーやリンス、ハンドソープなどを販売する企業が主な顧客となるBtoB企業である。また、同社は国内外に複数の生産拠点を持つ。各工場で生産する製品は異なるが、多くの工場で加工－組立のフローショップとハイブリッドフローショップを組み合わせた生産形態を採用している。

図1は、対象企業の工程フローの概略図である。対象工程は、成形、加飾、組立、梱包および出荷の複数工程で構成され、それぞれの工程は検査機能を有している。例えば、プッシュノズルのシャンプー・リンス容器を製造する場合、ベースとなるボトルだけでなく、ノズルやポンプ、さらにボトルとノズルを固定するキャップなど、様々な部品を異なる金型を使用して成形している。

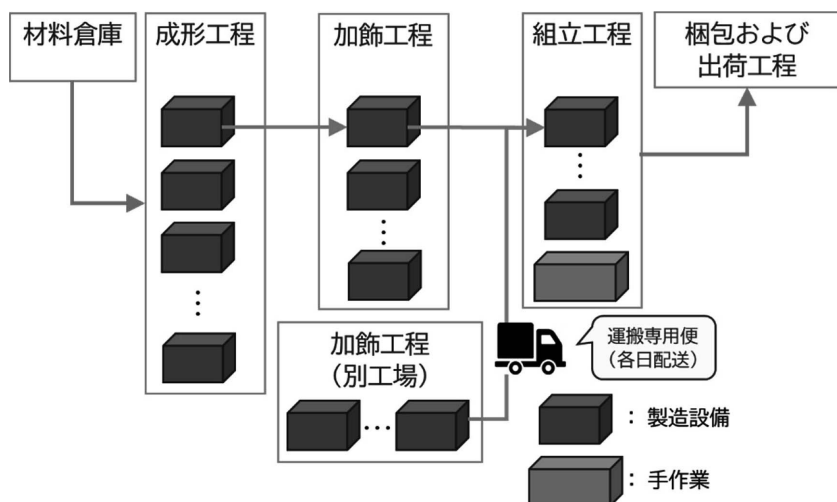


図1 対象企業の工程フローの概略図

図2に、シャンプー・リンス容器の製造を例とした各工程と製品構成の関係を示す。成形工程で成形された部品はそのまま使用されることもあるが、特にボトルなどの主要部品は加飾工程に送られる。加飾工程では、同じ仕様の塗装や印刷が施される部品もあれば、同じ成形部品に異なる塗装や印刷を施す場合もある。成形工程と加飾工程の部品は別々のロットサイズでロット生産され、最終的に組立工程へ送られる。組立工程では、個別の仕様に従って組み立てられることで最終製品が完成する。

このように対象工程は、成形工程と加飾工程が異なるロットで生産されるハイブリッドフローショップと、それらの工程で作られた部品が所要量を満たした後に最終製品として組み立てられる加工組立フローショップの複合生産形態である。なお、図1のように、一部の部品が別工場から専用便で搬入される場合もあるが、本論文では理解を深めるため、すべての部品が同一工場内で生産される場

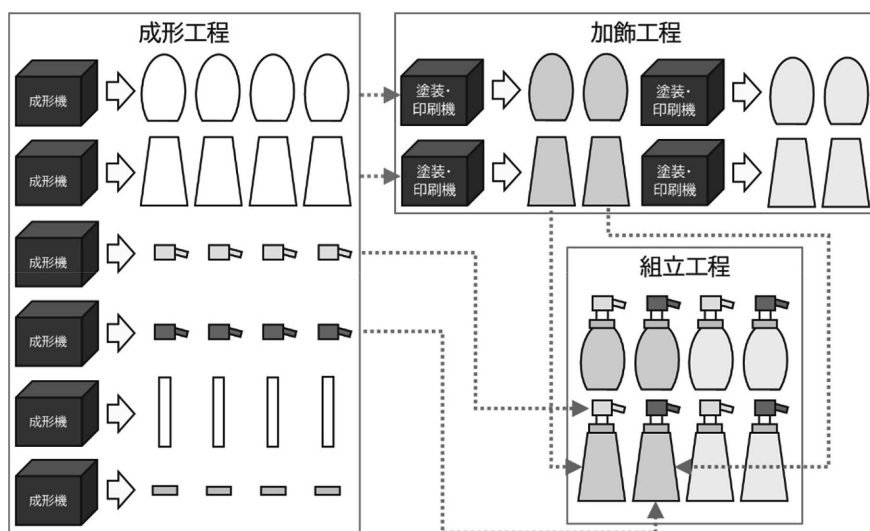


図2 各工程と製品構成の関係

合を前提とする。

対象企業は受注生産方式を採用していると公言するが、半月から1ヶ月サイクルで発注や内示を出す顧客もいれば、数ヶ月間隔で発注する顧客、全く内示を出さない顧客もいる。顧客ブランド商品は、感染症によるハンドソープなどの品切れの多発、SNSによる商品認知度の急上昇、飲料の新商品の販売不振など、急激な需要変動が起こるケースも多く、安定した受注告知や需要予測が難しい製品も多い。さらに、部品の仕掛在庫が揃わないと作業が開始できない加工-組立フローショップであるため、需要予測に基づく見込生産方式の割合が高いのが実状である。この場合、仕掛在庫に余裕があることが望ましいが、前述の通り急激な需要減もあり得るため過剰在庫のリスクが高い。他方、在庫切れが発生した場合は、バックオーダーとして受注が残る訳ではなく失注として扱われることが多いため、ビジネス機会の損失につながる。従って、最新の需要予測を考慮した短い計画サイクルで対応する必要がある。しかしながら、工場側としては、できるだけ生産を平準化するために長期的な生産計画を優先させたいとも考えており、このトレードオフ関係が現実の問題となっている。そのため、安全在庫をどの程度用意するか、直近の需要予測をどの程度優先するかなど、工程ごとに最適な生産スケジューリングが求められている。

3. 加飾工程と組立工程の階層型生産計画モデル

対象工程は成形工程、加飾工程、組立工程、梱包および出荷工程の4段階から成る。しかしながら、現状の生産計画が立案者の経験則に基づくものであることと、成形工程と加飾工程が独立したロット生産であることから、4工程を一元的にモデル化することは困難であるため、段階的にモデル化を行う。そこで本章では、特に重要視される加飾工程と組立工程に着目し、その階層型生産計画を定式化する。

後工程に該当する組立工程では、毎月の生産能力を計画する上位計画、 L 週ごとに生産能力を見直す中位計画、各週の生産数量を決定する下位計画の3段階からなる階層型生産計画を用いて生産スケジューリングを行っている。また、前工程に当たる加飾工程では、組立工程に部品を過不足なく供給するため、組立工程の中位計画が立案された直後に生産計画を立案している。組立工程の中位計画と加飾工程の生産計画は同時に作成されるため、前者を中位計画1、後者を中位計画2と呼ぶ。なお、これ以降の説明は、図2のようにシャンプー・リンス容器の製造を例として述べる。また、本章以降で使用する各種記号については巻末の付録を参照されたい。

上位計画は、翌月の組立工程の総合的な生産能力を決定する。この計画によっておおよその操業体制が確立される。この段階では、製品タイプごとの詳細な生産数量はまだ計画されておらず、作業員数や稼働日数、資材所要量などが見積もられる。組立工程の中位計画1では、上位計画で決定された生産能力を基に、より直近の需要予測を考慮しながら2週間ごとのボトルタイプごとの生産能力を計画する。加飾工程の中位計画2では、中位計画1で算出した組立工程のおおよその生産能力に対して、加飾済みボトルを過不足なく供給するための生産ロット数を計画する。中位計画が部品種類ごとの生産能力と生産ロット数に基づいているのに対し、最終的な下位計画は製品品種ごとの生産計画に基づいている。また、上位および中位計画における需要量や在庫量は予測数量に基づいて計画されるが、下位計画の生産量は直近の在庫量と実際の需要量に基づいて算出される。以上のように、対象プロセスでは詳細な生産計画を一度に行うのではなく、様々な準備を行うために段階的に詳細な計画へと移行する階層型生産計画を採用している。

図3に、各段階の計画立案のタイミングを示す。組立工程の上位計画および中位計画1は、加飾工程の製造リードタイム（約1週間）を考慮する必要があるため、対象期間の1週間前に立案される。

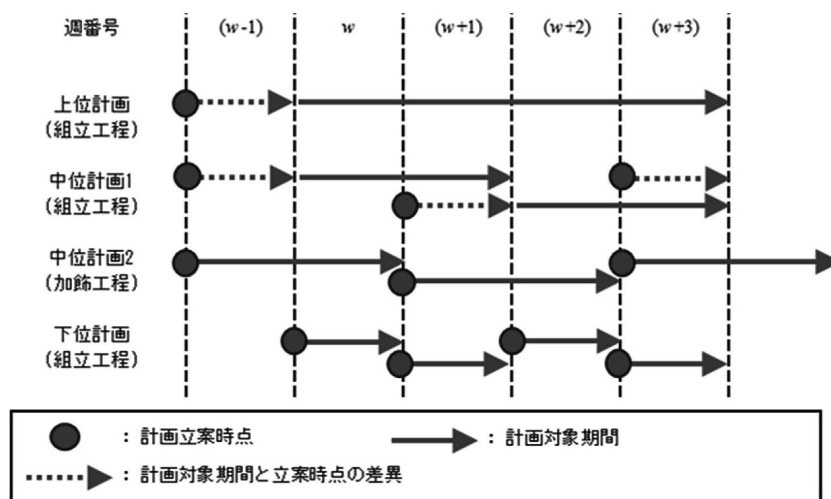


図3 各段階の計画立案のタイミング

上位計画は毎月、中位計画1は L 週間ごとに立案される。加飾工程の中位計画2も L 週ごとに作成され、中位計画1が作成された直後に作成される。組立工程の下位計画は、毎週末に直近の在庫量または品切れ量を用いて翌週の生産計画として立案される。ここで、月、期、週の関係を図4に示す。週番号 w および中位計画1の対象期間 L を基準として、上位計画の月番号は $m = \left\lceil \frac{w}{4} \right\rceil$ 、中位計画1の期番号は $l = \left\lfloor \frac{w}{L} \right\rfloor$ と表される。中位計画1の対象期間は $L = 1, 2, 4$ と任意に設定できるが、本論文では対象工程の実態に合わせて $L = 2$ とする。

組立後の製品種類を製品 (b, n) と表す。加飾工程で生産されたボトル b を使用して組み立てられる製品群をボトルタイプ b と定義し、同じボトル b を使用して組み立てられた製品であるが、ノズルの違いにより製品仕様が異なるものをノズルタイプ n と定義する。厳密には様々な製品タイプがあるため、両者の組み合わせで表すことは難しいが、理解を深めるために本論文では上記のように定義する。

3.1 上位計画

総合的な生産計画である上位計画では、生産平準化のために全製品種類を一括りにして翌月の生産計画を立案し、計画対象期間は1ヶ月（4週間）である。計画立案のタイミングは月末ではなく、図3の通り加飾工程のリードタイムを考慮して月末の1週間前としている。

図5に総合的な生産計画のイメージを示す。図中の各長方形の高さは、需要量と在庫量を表しており、これは図12まで同様である。横の長さは1週間分の生産量を表すように統一されているが、そ

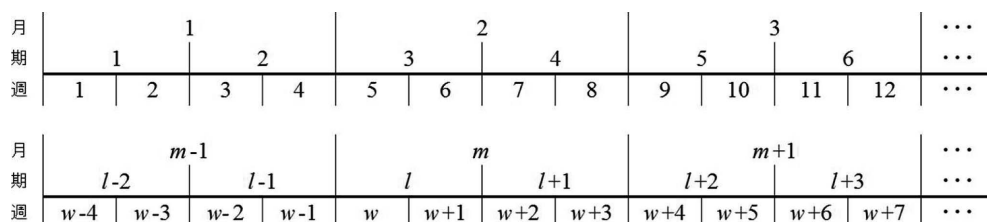


図4 月、期、週の関係

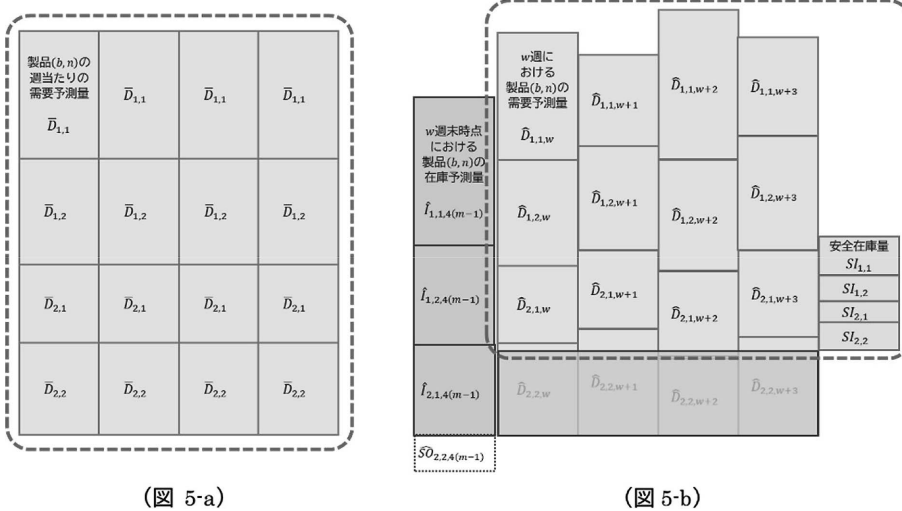


図5 総合的な生産計画のイメージ

これは需要量に関してのみであり、在庫量に関しては意味を持たない。図5-aの点線は安全在庫を考慮しない需要予測量のみに基づく生産能力を表し、製品(b,n)の週当たりの需要予測量予想週間需要 $\bar{D}_{b,n}$ は、計画期間4週間内の全製品の需要予測量の合計を表す。図5-bの点線は、安全在庫量 $SI_{b,n}$ とw週の製品(b,n)の需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ の合計から、前期末の在庫予測量 $\hat{I}_{b,n,4(m-1)}$ を減じて求める生産能力を表している。この場合、品切れ予測量 $\widehat{SO}_{b,n,4(m-1)}$ が発生すると見込まれてもその量は失注として扱われるため、総合的な生産計画には含まれず、大まかな月次計画となる。

安全在庫量と各種予測量の計算方法について説明する。計画立案者は需要予測優先パラメータ $\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$ を用いて、工場側の要望である長期的な生産平準化(図5-a)を優先するか、直近の在庫量と需要予測量による算出(図5-b)を優先するかを決定する。前者を優先すれば安定した工場運営が期待できるが、急激な需要変動に対応できないリスクがある。後者を優先すれば、需要の増減に対応した生産計画が期待できるが、作業員のシフトや製造設備の休止への対応などといった操業管理が難しくなる。計画立案者は工場の都合と販売側の意見の両方を考慮しながら、四半期毎あるいは半年毎に γ を決定している。

この上位計画においては、式(1)で示されるm月の総合生産能力 CP_m を決定する。

$$CP_m = 4(1 - \gamma) \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \bar{D}_{b,n} + \gamma \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} (SI_{b,n} - \hat{I}_{b,n,4(m-1)} + \sum_{w \in M} \hat{D}_{b,n,w}) \quad (1)$$

ここで、Bはボトルタイプの集合、 N_b はボトルタイプb内のノズルタイプの集合、 $M = \{w | 4(m-1) + 1 \leq w \leq 4m\}$ はm月における週番号wの集合を表す記号である。一方、製品(b,n)の週当たりの需要予測量 $\hat{D}_{b,n}$ は、前年度の出荷実績に基づいて週ごとに平均化したものであり、w週における製品(b,n)の需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ は、日々の営業活動やマーケティングによって得られた月次需要予測量を週単位に換算したものである。突発的な需要増に対応するための製品(b,n)の安全在庫量 $SI_{b,n} = \varepsilon \cdot \bar{D}_{b,n}$ は、 $\bar{D}_{b,n}$ に安全在庫設定パラメータ $\varepsilon (\varepsilon \geq 0)$ を乗じることで、計画立案者が決定する。ただし、この設定が大きすぎると過剰在庫を招くリスクがある。従って、 ε は需要予測優先パラメータ γ と同様に、需要変動に対応するための重要なパラメータである。計画立案者は、実際の在庫や品切れの状況を確認しながら、四半期毎あるいは半年毎に ε の値を再設定している。

式 (2) で示される w 週末時点における製品 (b, n) の在庫予測量 $\hat{I}_{b,n,w}$ は、計画時点から 1 週間後の予測値であり、計画時点の実際の在庫量 $I_{b,n,w-1}$ と、当該週の決定済み生産量 $P_{b,n,w}$ および需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ から計算される。

$$\hat{I}_{b,n,w} = \max\{P_{b,n,w} + I_{b,n,w-1} - \hat{D}_{b,n,w}, 0\} \quad (2)$$

なお、 w 週における製品 (b, n) の生産量 $P_{b,n,w}$ は 3.3 節の下位計画に、 $(w-1)$ 週末時点における製品 (b, n) の在庫量 $I_{b,n,w-1}$ は 4.4 節の評価尺度に後述する。

3.2 中位計画

中位計画ではまず、前述の上位計画に基づき、組立工程の中位計画 1 を立案する。その直後に、中位計画 1 を満足する加飾済み仕掛在庫を、過不足が無いように加飾工程の中位計画 2 として立案する。

3.2.1 中位計画 1 (組立工程)

前述の上位計画は大まかな月次計画であるため、組立工程の中位計画 1 では、ボトル種類ごとの在庫数量と $L=2$ 週間ごとの需要予測量を考慮し、より実態に即した生産計画を作成する。

まず、図 6 に示すように、上位計画で計画された m 月の総合生産能力 CP_m を各週に均等配分し、その L 週間分を l 期における全ボトルタイプの推定生産能力 $EP_l \left(= \frac{CP_m L}{4} \right)$ とする。

次に、上記の推定生産能力 EP_l とは別の尺度として、図 7 に示すように、 l 期における全ボトルタイプの所要量 SR_l を L 週間毎に計算する。 l 期におけるボトルタイプ b の所要量 $r_{b,l}$ を、 l 期内的各週における製品 (b, n) の安全在庫量 $SI_{b,n}$ と需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ から、前期末の在庫予測量 $\hat{I}_{b,n,L(l-1)}$ を減ずるか、品切れ予測量 $\widehat{SO}_{b,n,L(l-1)}$ を加えることで求め、その合計を l 期における全ボトルタイプの所要量 SR_l とし、これらは式 (3) および式 (4) で与えられる。

$$r_{b,l} = \max\left\{\sum_{n \in N_b} (SI_{b,n} L - \hat{I}_{b,n,L(l-1)} + \widehat{SO}_{b,n,L(l-1)} + \sum_{w \in Pe} \hat{D}_{b,n,w}), 0\right\} \quad (3)$$

$$SR_l = \sum_{b \in B} r_{b,l} \quad (4)$$

ここで、 $Pe (= \{w | L(l-1) + 1 \leq w \leq L \cdot l\})$ は、 l 期内の週番号 w の集合を表す記号である。余剰在

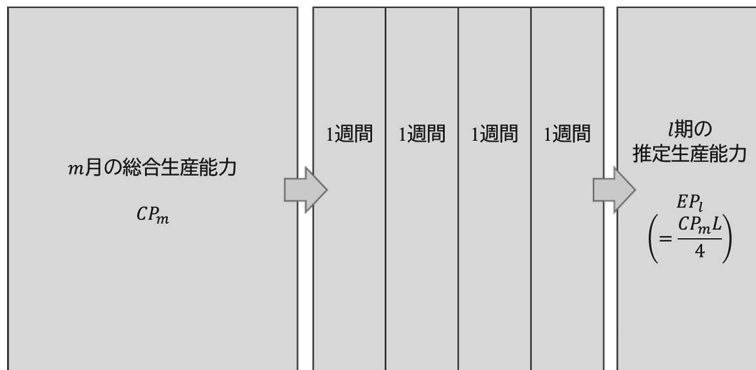
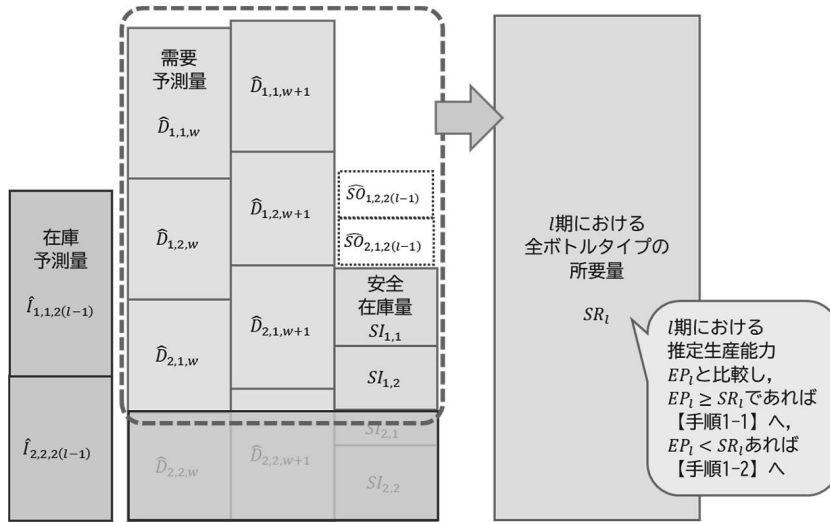


図 6 l 期における全ボトルタイプの推定生産能力 EP_l 算出イメージ

図7 l 期における全ボトルタイプの所要量 SR_l 算出イメージ

庫がある場合でも通常は在庫を廃棄することはないため、所要量 $r_{b,l}$ は常に非負である。また、組立工程の中位計画1は加飾工程の製造リードタイムを1週間先行させたものであり、加飾工程の中位計画2の基礎となる。従って、式(3)の前期末の在庫量と品切れ量は予測値になる。前期末時点での在庫予測量 $\hat{I}_{b,n,L(l-1)}$ は式(2)で与えられる。品切れ予測量 $\hat{SO}_{b,n,L(l-1)}$ も $\hat{I}_{b,n,L(l-1)}$ と同様に、計画時点における製品 (b,n) の実際の在庫量 $I_{b,n,w-1}$ と w 週における製品 (b,n) の生産量 $P_{b,n,w}$ および需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ を用いて、式(5)で与えられる。

$$\hat{SO}_{b,n,w} = \max\{\hat{D}_{b,n,w} - P_{b,n,w} - I_{b,n,w-1}, 0\} \quad (5)$$

なお、式(2)と同様に、 $P_{b,n,w}$ と $I_{b,n,w-1}$ の計算方法は3.3節以降で述べる。前述した上位計画では、品切れ予測量は失注として扱われるため含まれておらず、大まかな月次計画となっている。これに対し中位計画1では、品切れ予測量 $\hat{SO}_{b,n,w}$ を所要量 SR_l に加えている。これは、 $\hat{SO}_{b,n,w}$ があくまで予測値であることと、需要予測量にもバラつきがあるため、実際の需要が翌週以降にずれ込む場合もあり得ることから、生産能力のバッファとして加算している。ただし、これはあくまでバッファとしての扱いであり、バックオーダーとして扱うものではないことを留意されたい。

組立工程の中位計画1の最後として、 l 期における全ボトルタイプの生産能力 $P_{b,w}$ を決定する。ただし、前述の推定生産能力 EP_l と所要量 SR_l との比較結果によって処理が異なる。 EP_l が SR_l 以上であれば生産能力が余る見込みと考えられるため、次に述べる手順1-1に従って $P_{b,w}$ を決定する。一方、 EP_l が SR_l より小さい場合は需要を満たせないと考えられるため、後述の手順1-2に従って $P_{b,w}$ を決定する。

[手順1-1: $EP_l \geq SR_l$ の場合]

上位計画から得られる1期における全ボトルタイプの推定生産能力 EP_l が、 l 期における全ボトルタイプの所要量 SR_l 以上の場合、需要予測量と安全在庫量分を生産してもなお、生産能力に余裕があることが見込まれる。従って、計画立案者は図8に示すように、まず l 期におけるボトルタイプ b

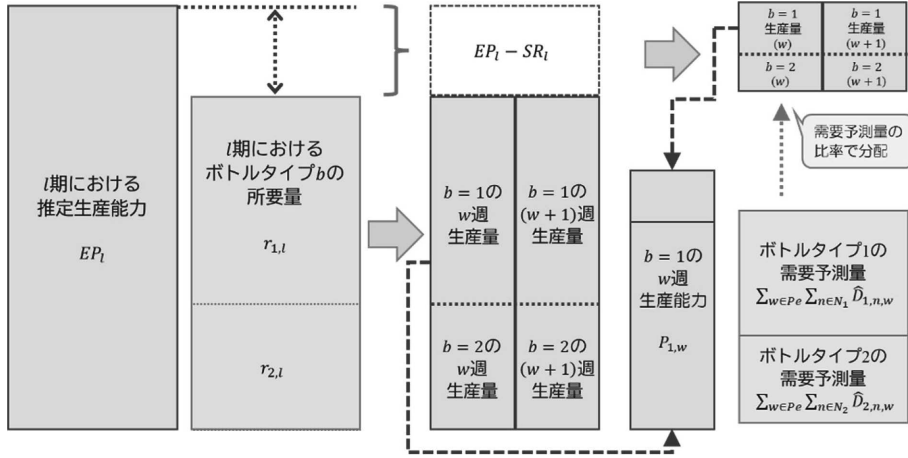


図8 手順 1-1 による w 週におけるボトルタイプ b の生産能力 $P_{b,w}$ 算出イメージ

の所要量 $r_{b,l}$ を生産能力に割り当て、さらに、 EP_l と SR_l の差分を対象期間におけるボトルタイプ別の需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ の比率で分配して生産能力に加える。 w 週におけるボトルタイプ b の生産量 $P_{b,w}$ は、上記の生産能力を週単位で均等配分したものであり、式 (6) で与えられる。

$$P_{b,w} = \frac{1}{L} \left\{ r_{b,l} + \frac{\sum_{w \in Pe} \sum_{n \in N_b} \hat{D}_{b,n,w}}{\sum_{w \in Pe} \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \hat{D}_{b,n,w}} (EP_l - SR_l) \right\} \quad (6)$$

[手順 1-2 : $EP_l < SR_l$ の場合]

この手順は、 l 期における全ボトルタイプの推定生産能力 EP_l が l 期における全ボトルタイプの所要量 SR_l を下回る場合のものであり、需要予測量または安全在庫量を充足できないことが見込まれる。このような場合は増産対応を行うべきであるが、上位計画で設定した推定生産能力 EP_l を増やすことは加飾工程以前の工程進捗や作業者の確保などの理由により困難である。そこで計画立案者は、図 9 に示すように EP_l から前期末の品切れ予測量である $SO_{b,n,L(l-1)}$ までの補充を優先して生産能力を割り当てる。残りの生産能力は SR_l に対するボトルタイプ別の所要量 $r_{b,l}$ の比率で分配する。

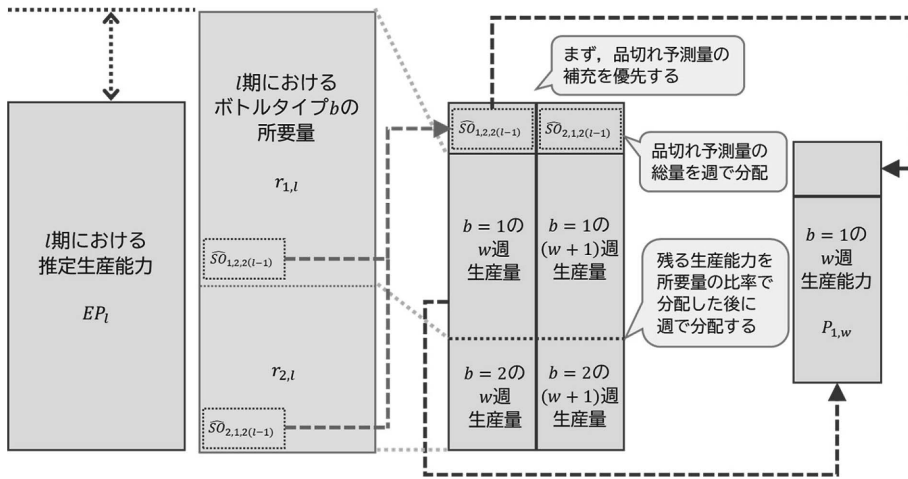


図9 手順 1-2 による w 週におけるボトルタイプ b の生産能力 $P_{b,w}$ 算出イメージ

w 週におけるボトルタイプ b の生産量 $P_{b,w}$ は、上記の生産能力を週単位で均等配分したものであり、式 (7) で与えられる。

$$P_{b,w} = \begin{cases} \frac{1}{L} \left\{ \frac{r_{b,l}}{SR_l} (EP_l - \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \widehat{SO}_{b,n,L(l-1)}) + \sum_{n \in N_b} \widehat{SO}_{b,n,L(l-1)} \right\} & (EP_l \geq \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \widehat{SO}_{b,n,L(l-1)}) \\ \frac{1}{L} \cdot \frac{r_{b,l}}{SR_l} EP_l & (EP_l < \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \widehat{SO}_{b,n,L(l-1)}) \end{cases} \quad (7)$$

上記の手順 1-1 または手順 1-2 による w 週におけるボトルタイプ b の生産量 $P_{b,w}$ の決定が中位計画 1 であり、これを加飾工程の中位計画 2 および組立工程の下位計画に適用する。

3.2.2 中位計画 2 (加飾工程)

組立工程の中位計画 1 を立案した直後に、加飾工程から組立工程にボトルを過不足なく供給するための中位計画 2 を立案する。塗装や蒸着、シルク印刷などを行う加飾工程は、段取替え作業などの都合上、ロット生産形態を採用しており、ここでの生産計画は生産数量ではなく生産ロット数を決定する。厳密には、加飾工程内に様々な工程があるため、加飾工程内でのスケジューリング問題も存在するが、本論文では加飾工程と組立工程の階層に着目することから、それらを一括りのものとして取り扱う。

図 3 に示すように、中位計画 2 の対象期間は中位計画 1 の 1 週間前から L 週間であり、加飾工程は計画立案後すぐに生産が開始される。従って、中位計画 2 の計画時点は $(l \cdot L - 3)$ 週末と表すことができる。各週の中位計画 2 は中位計画 1 の週番号 w に対応する L 週毎の計画であるため、中位計画 2 での週番号を $x (= \{w - 1 | w \in Pe\})$ と定義する。

まず、中位計画 1 で決定し組立工程の w 週におけるボトルタイプ b の生産量 $P_{b,w}$ から、計画対象期間内の週および全ボトルタイプの合計を求める。その値から、各ボトルタイプの $(l \cdot L - 3)$ 週末時点における加飾済み仕掛品の在庫量 $WIP_{b,l,L-3}$ を減ずる、または加飾済み仕掛品の品切れ量 $S_WIP_{b,l,L-3}$ を加えることで、 l 期の組立工程に対応する加飾工程の所要量を計算する。この所要量を中位計画 1 の対象期間 L で除することによって週毎の所要量に分配し、さらにロットサイズで除してロット数に換算する。以上より、各週のボトルタイプ b の加飾工程生産ロット数 $PL_{b,x}$ は式 (8) で与えられる。

$$PL_{b,x} = \left\lceil \frac{\sum_{w \in Pe} P_{b,w} - WIP_{b,l,L-3} + S_WIP_{b,l,L-3}}{\varphi \cdot L} \right\rceil \quad (8)$$

ここで、 φ は加飾工程のロットサイズを表すパラメータであり、ロットサイズパラメータと定義する。対象工程における φ の値はこれまで慣例に倣って一定とされていたが、加飾済み仕掛品に関する在庫量 $WIP_{b,l,L-3}$ や品切れ量 $S_WIP_{b,l,L-3}$ は対象工程全体の最適化問題に強く関係する評価指標となり得るため、パラメータのひとつとして取り扱うこととする。なお、 φ を大きく設定することで、手間のかかる塗料の交換や版の洗浄などの段取替え作業に関する負荷を低減できるが、大き過ぎると過剰在庫を招くだけでなく、品種切り替えの柔軟性が低下するため突発的な需要変動に対応することが難しくなる。反対に、 φ を小さくすることで需要変動に対応した過不足のない仕掛品在庫量の維持が期待できるが、過小だと段取替え作業負荷の増大や仕掛品の品切れを招く。また、ロット生産形態を採用する加飾工程においては、例えば塗料の容量や消費期限などの制約からロットサイズの変更自体が容易ではないため、他のパラメータと比較すると慎重な検討を要するパラメータである。

式 (8) に含まれる x 週末時点におけるボトルタイプ b の加飾済み仕掛品の在庫量 $WIP_{b,x}$ は、前週末の仕掛品在庫量 $WIP_{b,x-1}$ に生産量 $\varphi \cdot PL_{b,x}$ を加えたものから、組立工程の中位計画 1 で決定した翌週の各ボトルタイプの生産量 $\sum_{n \in N_b} P_{b,n,x+1}$ を減じて決定される。つまり、直前に決定した $\sum_{n \in N_b} P_{b,n,x+1}$ が加飾工程から組立工程へ翌週末までに払い出される量となるが、これが不足する場合は加飾済み仕掛品の品切れ量 $S_WIP_{b,x}$ となる。従って、 $WIP_{b,x-1}$ は式 (9) で、 $S_WIP_{b,x}$ は式 (10) でそれぞれ与えられ、これらはいずれも非負である。

$$WIP_{b,x} = \begin{cases} WIP_{b,0} & (x = 0) \\ \max(WIP_{b,x-1} + \varphi \cdot PL_{b,x} - \sum_{n \in N_b} P_{b,n,x+1}, 0) & (x > 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$S_WIP_{b,x} = \max(\sum_{n \in N_b} P_{b,n,x+1} - WIP_{b,x-1} - \varphi \cdot PL_{b,x}, 0) \quad (10)$$

なお、 $S_WIP_{b,x}$ が発生した場合、その不足分を補充するために式 (8) の右辺の分子に加算される。

3.3 下位計画

下位計画では、毎週末に直近の在庫や品切れ状況を確認した上で、組立工程の翌週における各製品の生産数量を決定する。

まず、 w 週におけるボトルタイプ b の所要量 $R_{b,w}$ を求める。 $R_{b,w}$ は、 w 週における製品 (b,n) の需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ と安全在庫 $SI_{b,n}$ の合計から前週末時点における製品 (b,n) の在庫量 $I_{b,n,w-1}$ を差し引いた所要量 $r_{b,n,w}$ から求められ、 $r_{b,n,w}$ は式 (11) で、 $R_{b,w}$ は式 (12) で与えられる。

$$r_{b,n,w} = \max(\hat{D}_{b,n,w} + SI_{b,n} - I_{b,n,w-1}, 0) \quad (11)$$

$$R_{b,w} = \sum_{n \in N_b} r_{b,n,w} \quad (12)$$

ここで、式 (11) は中位計画 1 の式 (3) と似ているが、式 (11) では実際の在庫量を用いる点と品切れ量を所要量に加えていない点異なる。特に後者について、中位計画 1 では品切れ予測量を計画に含めているが、下位計画では品切れ量が発生してもバックオーダーとして扱わず、純粋な失注として扱うため、品切れ量を所要量計算に含めていない。従って、本論文が取り扱うモデルは非線形モデルである。

以上に基づき、 w 週における製品 (b,n) の生産量 $P_{b,n,w}$ を決定する。ここでも中位計画 1 と同様に、 w 週におけるボトルタイプ b の所要量 $R_{b,w}$ と生産能力 $P_{b,w}$ の比較結果によって手順が異なる。中位計画 1 で決定した $P_{b,w}$ が $R_{b,w}$ 以上であれば、生産能力に余裕があると見込めるため手順 2-1 に従って計画を立案する。他方、 $P_{b,w}$ が $R_{b,w}$ より小さい場合は、需要を満たすことができない可能性があるため、それを考慮した手順 2-2 に従って計画を立案する。

[手順 2-1 : $P_{b,w} \geq R_{b,w}$ の場合]

w 週におけるボトルタイプ b の生産能力 $P_{b,w}$ が所要量 $R_{b,w}$ 以上の場合、所要量分の生産後も生産能力に残りがある可能性が高い。ここで、本手順に従った場合の w 週における製品 (b,n) の生産量 $P_{b,n,w}$ の求め方を図 10 に示す。図の左上部には、 w 週における製品 (b,n) の需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ と安全在庫 $SI_{b,n}$ 、前週末の在庫量 $I_{b,2,w-1}$ および品切れ予測量 $SO_{b,1,w-1}$ が示されている。これらから w 週における製品 (b,n) の所要量 $r_{b,n,w}$ が求められるが、中位計画 1 と異なるのは品切れが所要量に含

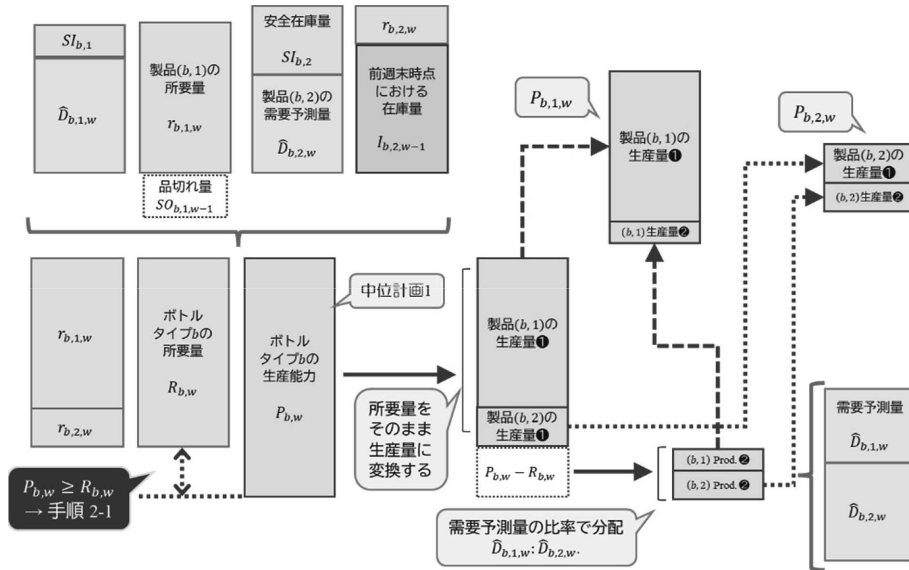


図10 手順2-1による w 週における製品 (b,n) の生産量 $P_{b,n,w}$ 算出イメージ

まれない点である。一方、図の左下部では、 w 週におけるボトルタイプ b の所要量 $R_{b,w}$ と中位計画1で決定した組立工程の生産能力 $P_{b,w}$ が比較され、 $P_{b,w} \geq R_{b,w}$ であることが示されている。この場合、各製品の所要量 $r_{b,n,w}$ はそのまま生産量に分配され、その後で余った生産能力が需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ の比率で分配されたうえで、各製品の生産量に加えられる。このようにして、 w 週における製品 (b,n) の生産量 $P_{b,n,w}$ を決定しており、これが式(13)で与えられる。

$$P_{b,n,w} = r_{b,n,w} + \frac{\hat{D}_{b,n,w}}{\sum_{n \in N_b} \hat{D}_{b,n,w}} (P_{b,w} - R_{b,w}) \quad (13)$$

[手順2-2: $P_{b,w} < R_{b,w}$ の場合]

w 週におけるボトルタイプ b の生産能力 $P_{b,w}$ が所要量 $R_{b,w}$ より小さい場合、所要量分を充足できないことが見込まれる。この手順では、図11に示すように、 w 週におけるボトルタイプ b の所要量 $R_{b,w}$ に対する各製品の所要量 $r_{b,n,w}$ の比率でボトルタイプ b の生産能力 $P_{b,w}$ を各製品に分配する。この過程によって w 週における製品 (b,n) の生産量 $P_{b,n,w}$ が決定され、式(14)で与えられる。

$$P_{b,n,w} = \frac{r_{b,n,w}}{R_{b,w}} P_{b,w} \quad (14)$$

この手順の場合、中位計画1節の手順1-2と同様に生産量が不足することが予測されるため、生産量を増やすための対策を講じる必要がある。しかしながら、計画立案直後から生産が始まるため、突発的に生産量を増やすことは難しい。

3.4 評価指標

加飾工程の評価指標は、前述の中位計画2で示した式(9)および式(10)の加飾済み仕掛品の在庫量 $WIP_{b,x}$ と品切れ量 $S_WIP_{b,x}$ であるが、組立工程の評価指標は組立後の各製品の在庫量と品切れ量である。

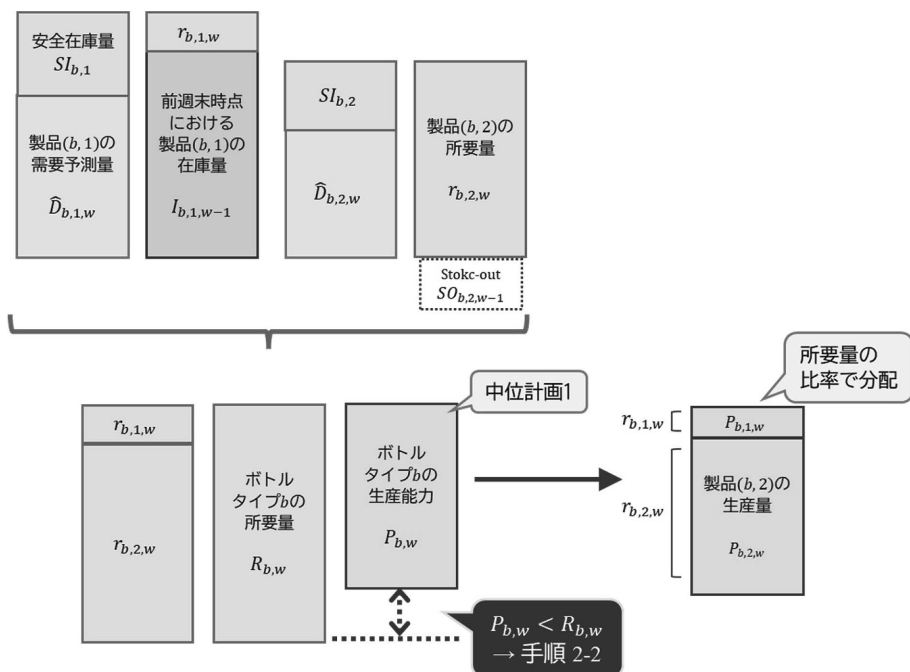


図 11 手順 2-2 による w 週における製品 (b, n) の生産量 $P_{b,n,w}$ 算出イメージ

図 12 に組立工程の在庫量と品切れ量の変動イメージを示す。図は、上段の左部から右方向へ時系列的に進んだうえで、下段の左部へ移り同様に進む。前週末の在庫量に当該週の生産量が加算され、

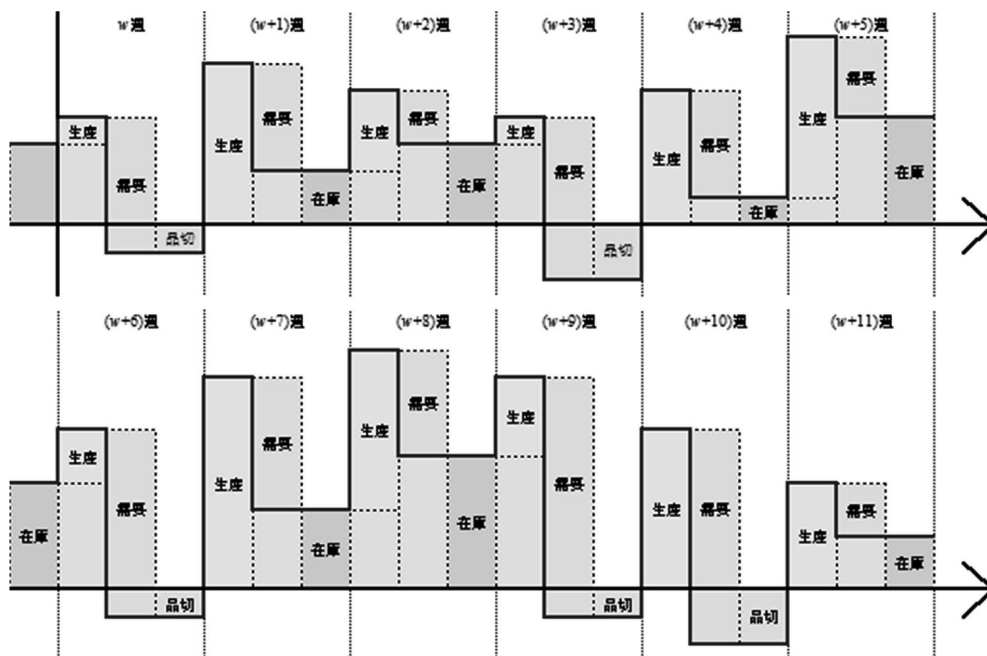


図 12 製品 (b, n) の在庫量および品切れ量の変動イメージ

需要分が出荷される。出荷後に在庫が残ればそのまま在庫量としてカウントされるが、0を下回った際は品切れ量としてカウントされ、在庫量は0にリセットされる。つまり、前述の階層型生産計画によって決定した各週における各製品の生産量 $P_{b,n,w}$ に、実際の需要量 $D_{b,n,w}$ が到着することによって在庫または品切れが決定される。前週末時点における製品 (b,n) の在庫量 $I_{b,n,w}$ に w 週における生産量 $P_{b,n,w}$ を加算してから需要量 $D_{b,n,w}$ を減じた値が正であれば在庫に、反対に負の値となれば品切れになる。このように決定される w 週末時点における製品 (b,n) の在庫量 $I_{b,n,w}$ は式 (15) で与えられ、品切れ量 $SO_{b,n,w}$ は式 (16) で与えられる。

$$I_{b,n,w} = \begin{cases} I_{b,n,0} & (w = 0) \\ \max(I_{b,n,w-1} + P_{b,n,w} - D_{b,n,w}, 0) & (w > 0) \end{cases} \quad (15)$$

$$SO_{b,n,w} = \max(D_{b,n,w} - I_{b,n,w-1} - P_{b,n,w}, 0) \quad (16)$$

なお、式 (15) に含まれる $I_{b,n,0}$ は製品 (b,n) の初期在庫量である。

これら評価指標の結果は翌週の実生産計画にフィードバックされ、計画サイクルが継続される。

4. 組立工程に関する最適解の導出および数値例

3章では、成形工程、加飾工程、組立工程、包装および出荷工程の4段階で構成される対象工程について、特に重要視される加飾工程と組立工程に着目し、その階層型生産計画を定式化したうえで、品切れが発生すると在庫がゼロにリセットされる非線形モデルであることを示した。本章では、次章で4工程を一元的にモデル化するための課題と解決策について整理するため、先行研究^[9]で実施した3章のモデルに対する数理的アプローチによる最適解の導出について述べ、さらに、その結果を考察するための数値例を提示する。

3章で示したモデルの最適化は、評価指標である加飾工程の x 週末時点におけるボトルタイプ b の加飾済み仕掛品の在庫量 $WIP_{b,x}$ と品切れ量 $S_WIP_{b,x}$ 、および組立工程の w 週末時点における製品 (b,n) の在庫量 $I_{b,n,w}$ と品切れ量 $SO_{b,n,w}$ のそれぞれの総量を同時に最小化する問題と見なすことができる。ただし、多くの目的変数を同時に最小化することは一般的に不可能なため、先行研究^[9]では組立工程の在庫と品切れに着目し、式 (17) で示される最小化問題を対象としている。

$$\text{Minimize } \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \sum_{k=1}^w I_{b,n,k} + \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \sum_{k=1}^w SO_{b,n,k} \quad (17)$$

ここで、 k は週を表すインデックスである。また、 $I_{b,n,w}$ と $SO_{b,n,w}$ は、3.4節の式 (15) と式 (16) に示すように、前週末時点における製品 (b,n) の在庫量 $I_{b,n,w-1}$ と w 週における生産量 $P_{b,n,w}$ および需要量 $D_{b,n,w}$ から製品毎に求められる。特に、3.3節の式 (13) または式 (14) から計算される $P_{b,n,w}$ に対しては、在庫予測量 $\hat{I}_{b,n,w}$ または品切れ予測量 $\widehat{SO}_{b,n,w}$ が使用され、例えば、 $P_{b,n,w}$ を計算する過程で必要となる式 (3) の l 期におけるボトルタイプ b の所要量 $r_{b,l}$ が使用される。 $P_{b,n,w}$ は、 w 週におけるボトルタイプ b の生産能力 $P_{b,w}$ と所要量 $R_{b,w}$ の比較から、階層型生産計画の各段階で異なる計算を行っている。また、在庫予測量と品切れ予測量の計算方法は、前週末に品切れが発生したか否かに依存する。従って、式 (17) の最小化問題を包括的に解くことは難しく、様々な条件を個別に検討する必要がある。

以上より、先行研究^[9]ではこの最小化問題を、品切れが発生する場合と発生しない場合に細分化したうえで、品切れが発生しない場合に着目して式 (18) で示される最小化問題の数理解析を行い、品

切れが発生する場合の解析は今後の課題としている。

$$\text{Minimize } \sum_{b \in B} \sum_{n \in N_b} \sum_{k=1}^w I_{b,n,k} \quad (18)$$

4.1 前提条件

式 (18) の最適化問題を数理的に解析するための前提条件は以下の通りである。

- (1) w 週における製品 (b, n) の需要量 $D_{b,n,w}$ と需要予測量 $\hat{D}_{b,n,w}$ は、週当たりの需要量期待値 $\bar{D}_{b,n}$ に等しいものとする
- (2) 需要予測優先パラメータ γ は $0 \leq \gamma \leq 1$ と設定できるが、直近の需要予測を考慮しない $\gamma = 0$ は実態にそぐわないため、 $0 < \gamma \leq 1$ とする
- (3) $I_{b,n,w-1} + P_{b,n,w} - D_{b,n,w} \geq 0$ が常に成立し、 $SO_{b,n,w} = \widehat{SO}_{b,n,w} = 0$ であると仮定する
- (4) 組立工程の生産のために必要な加飾済み仕掛在庫は品切れしないことと仮定する
- (5) 安全在庫設定パラメータ ε が在庫量 $I_{b,n,w}$ に与える影響を確認するため、製品 (b, n) の初期在庫量 $I_{b,n,0}$ と在庫予測量 $\hat{I}_{b,n,w}$ を、安全在庫とは独立に $I_{b,n,0} = \hat{I}_{b,n,w} = \bar{D}_{b,n}$ と設定する
- (6) 安全在庫設定パラメータ ε は $\varepsilon \geq 0$ に設定可能なパラメータであるが、安全在庫を全く持たないことは現実的でないため、 $\varepsilon > 0$ と仮定する
- (7) 需要予測優先度パラメータ γ と安全在庫設定パラメータ ε は、四半期または半期毎に見直されるのが実態だが、生産量と在庫量への影響を明確にするため、これらを一定とする
- (8) 中位計画 1 の対象期間は $L = 2$ であり、各期におけるボトルタイプ b の推定生産能力を $EP_l = \frac{CP_m}{2}$ で表す

実際の需要は季節変動だけでなく、ユーザブランド商品の突発的な需要変動も多いためランダムであるが、基本的な理解のために上記 (1) および (2) の通り仮定している。また、在庫切れが発生しない場合に限定する条件を上記 (3) および (4) の通り仮定し、上記 (5)～(7) のように初期設定と在庫予測に関する仮定も設けている。上記 (8) は中位計画 1 における計画対象期間に関する仮定である。先行研究^[9]はこれらを前提に数理解析を行っている。

4.2 品切れが無いと仮定した場合の最適解の導出

式 (18) の最小化問題は、 w 週末時点における製品 (b, n) の在庫量 $I_{b,n,w}$ の最小化であり、この $I_{b,n,w}$ は 3.4 節の式 (15) で与えられる。これに前提条件を適用することで漸化式を導くことができ、 $I_{b,n,w}$ を式 (19) のように変換することができる。

$$I_{b,n,w} = \sum_{k=1}^w P_{b,n,k} - (w-1)\bar{D}_{b,n} \quad (19)$$

この式 (19) の右辺の第 2 項 $(w-1)\bar{D}_{b,n}$ は、週番号 w と製品 (b, n) の週当たりの需要量期待値 $\bar{D}_{b,n}$ が所与の値であるため、右辺第 1 項 $\sum_{k=1}^w P_{b,n,k}$ の最小化問題に置換できる。3.3 節の式 (13) と式 (14) から得られる w 週における製品 (b, n) の生産量 $P_{b,n,w}$ に着目したうえで、前提条件や 3 章の各式を代入することによってさらなる式変換が行え、最終的に式 (20) を得る。

$$I_{b,n,w} = \left\{ 1 - \frac{\gamma(1-\varepsilon)}{4} w \right\} \bar{D}_{b,n} \quad (20)$$

これは、在庫量 $I_{b,n,w}$ を需要予測優先パラメータ γ と安全在庫設定パラメータ ε および週番号 w と製品 (b,n) の週当たりの需要量期待値 $D_{b,n}$ の4変数から求めることができることを示す。なお、この計算過程に関する詳細は先行研究^[9]を参照されたい。

品切れが無いと仮定した場合の在庫量を示す式 (20) は、品切れリスクを無視することができるため、理想的な在庫ゼロの状態 $I_{b,n,w} = 0$ を考えることができ、この場合は式 (20) から式 (21) を導くことができる。

$$\gamma(1-\varepsilon) = \frac{4}{w} \quad (21)$$

式 (21) から、 $I_{b,n,w} = 0$ を維持するためには、週 w が変化する（週が進む）につれて安全在庫設定パラメータ ε と需要予測優先パラメータ γ を都度調整する必要があることを意味する。しかしながら、実在庫 $I_{b,n,w}$ は非負であるため、 $\frac{\gamma(1-\varepsilon)}{4}w \leq 1$ という制約がある。一見すると、 $\gamma(1-\varepsilon) = \frac{4}{w}$ を満たすように毎回パラメータを変更すれば十分と思われるが、週毎にパラメータを変更することは工場が期待する生産の平準化と反対のアプローチであるため現実的ではない。需要予測優先パラメータ γ は、時々刻々と変化する需要状況に対応することを優先するか、生産の平準化を優先するかを決定するパラメータである。安全在庫パラメータ ε は、需要変動に対するバッファとして安全在庫を設定するために使用される。どちらのパラメータも低く設定し過ぎるのは明らかに良い決定ではないため、まずは現実的な需要予測優先パラメータ γ を設定したうえで、 $\frac{\gamma(1-\varepsilon)}{4}w$ を可能な限り1に近づけるような安全在庫パラメータ ε を、例えば四半期または半期毎に設定すべきと考える。先行研究^[9]はこの方法を在庫最小化に寄与する実現可能な解として提案している。

4.3 数値例

前述の通り、先行研究^[9]は現実的な需要予測優先パラメータ γ を設定したうえで、 $\frac{\gamma(1-\varepsilon)}{4}w$ を可能な限り1に近づけるような安全在庫パラメータ ε を、例えば四半期または半期毎に設定することを提案している。しかしながら、具体的にどのような値に設定すべきかが計画立案者にとっての実務上の課題であり、より定量的な助言が必要である。

そこで本節では、式 (20) に任意の数値を代入して製品 (b,n) の平均在庫量 $\bar{I}_{b,n}$ を試算し、需要予測優先パラメータ γ と安全在庫パラメータ ε が平均在庫量 $\bar{I}_{b,n}$ にどのような影響を及ぼすのかを定量的かつ視覚的に示す手法を提案する。代入する数値はそれぞれ、週当たりの製品 (b,n) の需要量期待値を $\bar{D}_{b,n} = 10,000$ 、週番号を $1 \leq w \leq 50$ 、需要予測優先パラメータを $0 \leq \gamma \leq 1$ 、安全在庫パラメータ $0 \leq \varepsilon \leq 1$ とし、計算結果を図13に記す。

図13は、需要予測優先パラメータ γ および安全在庫パラメータ ε を平面軸に、それらを変化させたときの製品 (b,n) の平均在庫量 $\bar{I}_{b,n}$ を縦軸に示す三次元グラフである。これより、需要予測優先パラメータ γ を0から1に大きくする、つまり工場側の要望である長期的な生産平準化より直近の在庫量と需要予測による算出を優先するにつれて、在庫量が低減されることがわかる。ただし、前述の通り、需要予測優先パラメータ γ を大きくすることで、需要の増減に対応した生産計画が期待できるが、作業員のシフトや製造設備の休止への対応などといった操業管理が難しくなる。反対に、突発的な需要増に対応するための安全在庫パラメータ ε ついては、1から0に小さくすることで在庫量が低減されている。これらの結果は自明であるが、各パラメータの値をどの程度変化させれば在庫量がどれほど変化するかを、定量的かつ視覚的に示すことが重要である。今回の試算結果は一例とな

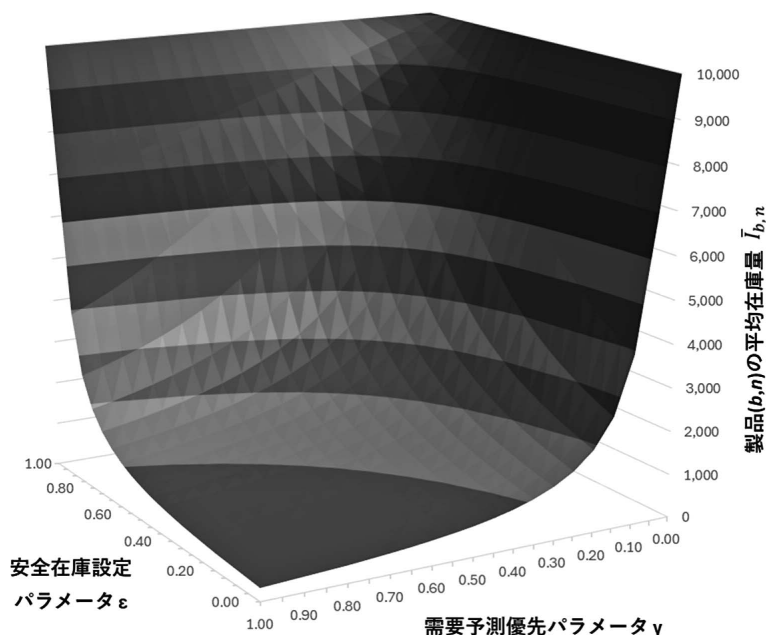


図 13 需要予測優先パラメータおよび安全在庫パラメータと平均在庫量の関係

るが、最終的なパラメータ値は計画立案者が決定することになるため、その設定理由を定量的に示すことが実務上必要であり、本節が示す手法はその一助になると考える。

5. 対象工程の最適化における課題と解決策

4章では、3章で定式化した階層型生産計画を基に、組立工程に関する最適解の導出および数値例の提示について述べた。加飾済み仕掛品が加飾工程から組立工程へ過不足なく提供されことや、組立後の製品において品切れが発生しないことなどの前提条件下ではあるが、計画立案者が管理可能な変数である需要予測優先パラメータと安全在庫パラメータによって在庫量を最小化できることを定量的に示し、さらに、パラメータ値設定の根拠を視覚的に示す手法を提案した。しかしながら、本研究では成形工程、加飾工程、組立工程、梱包および出荷工程の4工程で構成される階層型生産計画システムの最適化を目的としている。3章で示した非線形モデルは加飾工程と組立工程の2工程に着目したものであり、4章も特に組立工程における解析を述べている。従って本章では、これまでを踏まえたうえで、本研究が目的とする対象工程全体の最適化における課題と解決策を以下の通り整理する。

(1) 組立工程における数理解析の進展

4章では需要を一定として数理解析を行っているのに対し、需要が確率的に変化する場合を対象とした数値積分または畳み込み積分などによる解析が必要と考える。まずは下位計画のみを確率的に変化させる場合を考え、段階的に上位計画まで確率化する解析を検討している。また、品切れが発生しないという前提条件も設けているが、現実には品切れが発生する。品切れが頻繁に発生することは現実的ではないことから、4章の結果と品切れの発生確率を考慮して、ある週に品切れが発生すると仮定した場合の在庫推移を数理的に求めることも検討している。

(2) 加飾工程と組立工程の加工－組立フローショップ・スケジューリングの最適化

4章では、加飾工程から加飾済み仕掛品が不足することなく提供されることを前提としている。これは基本的な理解を得るための前提条件だが、特に中位計画2におけるロットサイズの設定が加飾済み仕掛品の品切れに大きく影響すると考えられる。加飾工程のロットサイズは慣例から一定とされているが、3章でこれを計画立案者が管理可能なパラメータとして定式化した。ロットサイズパラメータが加飾済み仕掛品の在庫量や品切れ量に及ぼす影響を定量的に示すことや、組立製品の在庫量および品切れ量と併せて加飾済み仕掛品の在庫量や品切れ量も最小化するパラメータ設定方法を提案し、ロットサイズ見直しの有効性を示したい。

(3) 加飾工程内の生産計画に対する定式化

上記(2)は2段階製造工程としての最適化を対象としているが、3章で述べた通り、加飾工程には塗装や蒸着、シルク印刷など様々な工程が存在する。一部の仕掛品には、例えば蒸着を行った後に印刷までを行うなど、加飾工程内に限ればジョブショップの生産形態と言える。ジョブショップスケジューリングに関する研究は、機械加工におけるメイクスパンの最小化問題^[10]などの製造業を対象としたものだけでなく、調理手順^[11]や人間ドッグ^[12]を対象とした研究など幅広く行われているが、加飾工程の詳細を定式化することで上記(2)に組み込むモデルの拡張を検討中である。

(4) 成形工程と加飾工程のハイブリッドフローショップ・スケジューリングの最適化

成形工程は、複数台の製造設備の中から計画立案者によって決定された設備に、金型を使用してボトルやノズルなどの加飾前仕掛品を製造する。加飾工程と同じロット生産ではあるが、その生産計画自体はシンプルである。しかしながら、ノズルやキャップなど、加飾前仕掛品をそのまま組立に使用する部品もあるため、加飾工程や組立工程との関連を考慮すると複雑なハイブリッドフローショップの生産計画となる。現状では、ある程度の後工程の生産計画を考慮しながらも、計画立案者の経験則に基づく生産計画が独立的に立案されている。従って、上記(3)と同様に成形工程内の生産計画をモデル化したうえで、加飾工程へ払い出す仕掛品と未加飾のまま組立工程へ払い出す仕掛品の生産計画を区別して、加飾前仕掛品の在庫量や品切れ量を最小化するように、それぞれの後工程の生産計画と関連付けることが求められる。

(5) シミュレーション実験による各種数理解析の検証および製品種類の拡張

上記(1)～(4)のそれぞれは、4章で示したような数理解析によって取り組むことを想定しているが、その結果についての検証が必要となる。得られた数式を計算する感度分析も一案であるが、4章のように基本的な理解を深めるためとして少ない製品種類で解析しているという課題もある。従って、定式化した生産計画を基にシミュレーション実験を行い、4章や上記(1)～(4)で得られた結果を検証する。また、製品種類を増やすなど、前提条件をより現実的な条件に近づけたうえでの解析を行うことも考えている。この方法は、実企業の生産座席システムを対象とした研究^[13]で有効性が示されており、実工程を対象とする本研究においても同様の効果が期待できる。さらに、シミュレーションによる検証を段階的に行うことで、対象工程全体の最適化についての確度が高まるものと考えている。なお、最終工程の梱包および出荷工程については、それ以前の3工程で最適化が叶えば、最終工程を含めなくても大勢に影響はないものと判断している。

(6) 習熟差を考慮した並列機械への作業員配置

上記(4)で対象に加えた成形工程では、使用する設備や金型によって、例えば金型の取付や初期動作の調整などの段取替え作業に関する習熟度がしばしば問題視される。泡タイプのハンドソープ容器などでは特に小さく精密な製造が求められるため、作業員によって段取替え作業の習熟度に差が生じているのが実状である。従って、習熟差を考慮した並列機械への作業員配置問題についても検討しなければならない。ライン作業を対象とした作業員配置問題に関しては、自己バラン斯拉イン^[14]や多期間制約サイクルモデル^[15]などを対象とした研究が見受けられるが、並列機械に対する作業員配置問題に関する研究はまだ少ないため、本研究が取り扱う成形工程を対象として適切な配置方法を提案したい。

(7) スケジューリングの習熟

実工程ではスケジューリングが計画立案者の経験則に基づかざるを得ない点を今後の課題としている。これは、例えば同型の成形機であっても金型や材料の種類によって歩留まりが異なるなど、いわゆる設備ごとのクセを把握して、より高い歩留まりでの生産を行うためのスケジューリング問題が存在するためである。生産計画の最適化に関する多くの研究は、同工程における複数の並列機械に設備ごとの歩留まり差を設けていないが、設備ごとのクセは現実的に存在するため、計画立案者の経験則に依存しない習熟方法の検討も今後の課題に挙げられる。

6. おわりに

本研究は、プラスチック容器メーカーの製造工程を対象に、当該工程で採用されている階層型生産計画システムの最適化を目的としている。この目的に対して本論文では、2章で対象工程と製品構成について述べ、対象工程が加工－組立フローショップとハイブリッドフローショップの複合生産形態であることを示した。具体的には、組立工程が前工程の成形工程および加飾工程からの仕掛品提供に依存する点が加工－組立フローショップであり、成形工程と加飾工程の独立したロット生産に組立工程が続く点がハイブリッドフローショップである。3章では、対象工程の中で特に重要視される加飾工程と組立工程の定式化について述べた。上位計画と2種の中位計画および下位計画からなる階層型生産計画と、在庫と品切れの評価指標を示すことで、対象工程が品切れ発生時に在庫がゼロにリセットされる非線形モデルであることを明らかにした。さらに、計画立案者が経験則に基づいて設定していた需要予測優先度と安全在庫量、および慣例に従って一定とされていたロットサイズを管理可能なパラメータとして定義している。4章では、先行研究^[9]が示す数理的アプローチによる最適解の導出について解説し、その数値例で提示した。限られた条件下ではあるが、計画立案者が管理可能な変数である需要予測優先パラメータと安全在庫パラメータによって在庫量を最小化することができることを定量的に示し、さらに、パラメータ値設定の根拠を視覚的に示す手法を提案した。5章では、以上を踏まえたうえで、本研究が目的とする対象製造工程全体の最適化における今後の課題を述べた。複雑な生産形態を有する対象工程の最適化について、段階的な課題とそれぞれへの解決案を提示したことにより、研究を円滑に進められることが期待できる。

以上より、加工－組立およびハイブリッド複合フローショップにおける階層型生産計画システムを最適化するための一助を得た。なお、今後の課題については5章を参照されたい。

謝辞

本研究は、龍谷大学経営学会における研究部会助成を受けた研究の一部である。

付録（記号説明）

本論文で用いる記号は以下のとおりである。

(1) 添え字および集合

w : 週番号

$m \left(= \left\lceil \frac{w}{4} \right\rceil \right)$: 月番号

$l \left(= \left\lceil \frac{w}{L} \right\rceil \right)$: 組立工程の中位計画 1 における記番号

L : 組立工程の中位計画 1 における計画対象期間

$M (= \{w | 4(m-1) + 1 \leq w \leq 4m\})$: m 月における週番号 w の集合

$Pe (= \{w | L(l-1) + 1 \leq w \leq L \cdot l\})$: l 期における週番号 w の集合

$b (\in B)$: ボトルタイプを表す添え字

B : ボトルタイプ b の集合

$n (\in N_b)$: ノズルタイプを表す添え字

N_b : ボトルタイプ b におけるノズルタイプ n の集合

(2) 外部環境変数

$D_{b,n,w}$: w 週における製品 (b, n) の需要量

$\hat{D}_{b,n,w}$: w 週における製品 (b, n) の需要予測量

$\bar{D}_{b,n}$: 週当たりの製品 (b, n) の需要量期待値

(3) 管理可能変数

$\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$: 需要予測優先パラメータ

$\epsilon (\geq 0)$: 安全在庫設定パラメータ

$SI_{b,n}$: 製品 (b, n) の安全在庫量

$\varphi (> 0)$: ロットサイズパラメータ

(4) 算出変数

CP_m : m 月の総合生産能力

EP_l : l 期における推定生産能力

SR_l : l 期における全ボトルタイプの所要量

$r_{b,l}$: l 期におけるボトルタイプ b の所要量

$R_{b,w}$: w 週におけるボトルタイプ b の所要量

$r_{b,n,w}$: w 週における製品 (b, n) の所要量

$P_{b,w}$: w 週におけるボトルタイプ b の生産能力

$P_{b,n,w}$: w 週における製品 (b, n) の生産量

$I_{b,n,w}$: w 週末時点における製品 (b, n) の在庫量

$I_{b,n,0}$: 製品 (b, n) の初期在庫量

$\hat{I}_{b,n,w}$: w 週末時点における製品 (b, n) の在庫予測量

$\bar{I}_{b,n}$: 数値解析における製品 (b, n) の平均在庫量

$SO_{b,n,w}$: w 週末時点における製品 (b, n) の品切れ量

$SO_{b,n,w}$: w 週末時点における製品 (b, n) の品切れ予測量

$PL_{b,w}$: w 週におけるボトルタイプ b の加飾工程生産ロット数

$WIP_{b,w}$: w 週末時点におけるボトルタイプ b の加飾済み仕掛品の在庫量

$WIP_{b,0}$: ボトルタイプ b の加飾済み仕掛品の初期在庫量

$S_WIP_{b,w}$: w 週末時点におけるボトルタイプ b の加飾済み仕掛品の品切れ量

参考文献

- [1] 社団法人 日本経営工学会（編）（2002）：生産管理用語辞典，日本規格協会。

- [2] 孫曦, 西浦明, 森澤和子, 長沢啓行 (1999): 機械指定型・加工－組立フローショップ・スケジューリング, 日本経営工学会論文誌, 50, 5, pp.283-289.
- [3] Narasimhan, S. L. and Mangiameli, P. M. (1987): A comparison of sequencing rules for a two-stage hybrid flow shop, *Decision Science*, 18, 2, pp.250-265.
- [4] 大場正明, 植竹俊文, 坪根斉 (1996): 生産能力と計画達成率との関係－ハイブリッド・フローショップの生産日程計画システムの研究－, 日本経営工学会誌, 46, 6, pp.557-564.
- [5] 坪根斉, 田中孝男 (1990): 階層型生産計画システムのための分析的研究, 日本経営工学会誌, 40, 6, pp.384-389.
- [6] 土本一成, 森澤和子, 長澤啓行 (2005): 機械非指定型・加工－組立フローショップ・スケジューリング, 日本経営工学会論文誌, 56, 5, pp.358-365.
- [7] 松本卓夫, 久保寺静, 志田敬介, 松川弘明 (2021): プロセスチーズ工場における2工程ライン設計問題に関する研究, 日本経営工学会論文誌, 72, 1, pp.65-74.
- [8] 林千宏 (2023): 生産座席システムにおける座席枠設定への階層分析法の適用, 日本生産管理学会論文誌, 30, 1, pp.31-40.
- [9] Hayashi, C.: Hierarchical production planning system for a plastic container manufacturer with a combined processing-assembly and hybrid flow shop, *Asian Journal of Management Science and Applications*, (掲載決定)
- [10] 青木陽輔, 森川克己, 長沢敬祐, 高橋勝彦 (2024): 休憩中の自動処理を考慮したジョブショップのメイクスパン最小化に対する遺伝的操作組込型局所探索法, 日本経営工学会論文誌, 75, 1, pp.19-27.
- [11] 周潔瑩, 坪井哲也, 長谷川大輔, 石川浩司, 木村恵介, 田中未来, 大関和典, 繁野麻衣子 (2018): 調理手順スケジューリングモデルに対するルール設計と検証, 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用 (TOM), 11, 2, pp.63-74.
- [12] 伊藤真理, 鈴木敦夫, 河原芳昭 (2015): 人間ドックにおける最適スケジュール作成について, 日本経営工学会論文誌, 66, 1, pp.49-58.
- [13] Hayashi, C., Yamamoto, H., Ohba, M. and Horikawa, M. (2017): A Study on the Seat Setting of the Production Seat Booking System "For the Make-To-Stock Manufacturing Process", *Journal of Japan Industrial Management Association*, 68, 2E, pp.139-148.
- [14] 広谷大助, 森川克己, 高橋勝彦 (2010): ボトルネック区間が存在する自己バラン斯拉インの解析, 日本経営工学会論文誌, 61, 1, pp.1-10.
- [15] 趙曉雯, 山本久志, 孫晶, 大岡龍佑 (2020): 3グループが存在するリセット多期間制約サイクルモデルにおける最適配置法則に関する研究, 日本経営工学会論文誌, 71, 3, pp.111-122.

(受理 2025年4月30日)