

内示情報を用いた未達率指標による生産計画システムの提案 (II)

— 未達率指標の特性解析と基点在庫方策との比較*

上野 信行[†]・角本 清孝[†]・奥原 浩之[‡]

Mass Customization Production Planning System by Advance Demand Information Based on Unfulfilled-order-rate II
— Performance Analysis of Unfulfilled-order-rates and Relationship to Base-stock Policy with Multi-period*

Nobuyuki UENO[†], Kiyotaka KADOMOTO[†] and Koji OKUHARA[‡]

In the previous paper, we proposed Mass Customization Production Planning & Management System (MCPS) based on unfulfilled-order-rate by using Advance Demand Information which is called 'Naiji System' as an unique corporation between a maker and suppliers in Japan, and 3 indicators to estimate the unfulfilled-order-rate. Applying these indicators to the model, we investigated the behavior of unfulfilled-order-rate at the final period in the planning horizon.

In this paper, we propose a new model for purchasing, and investigate the unfulfilled-order-rate at each period and the impact to the total inventory. We find that the total inventories become 5.9%–20.0% decreases by using SO_n rather than by using $SO_n(0)$. And we enhance a base-stock policy to a new one with multi-period. We prove that the MCPS model for purchasing by using $SO_n(0)$ is equivalent to the base-stock policy with multi-period under the specified condition. Under this condition, the proposed model by using SO_n decreases inventories more than the base-stock policy with multi-period.

1. はじめに

市場ニーズの多様化・個性化により、多くの種類の製品やそのバリエーションが市場にあふれ、顧客が製品仕様を選択できる範囲が広がっている。顧客の要望する納入リードタイムはますます短くなり、また個別の製品ごとには、受注量の変動が大きく、需要の不確実性がますます増大している。

このような中で、生産管理においては、受注後、その数量、製造仕様に基づいて生産開始する形態である「受注生産管理方式」の活用できる範囲は少なく、大半は、受注前から何がしかの情報あるいは不確実な予測値に基づいて中間品の生産を開始しておき、受注後、確定した製造仕様、数量に基づいて最終製品を生産する形態である「見込み生産管理方式」にならざるを得ない。このために、多様化するカスタマイズ製品 [1,2] に対して、不確

実な需要環境の中でも効率的な生産・納入を実現する生産管理方式の設計指針が不可欠である。

そこで、著者らは、製造業者からサプライヤに提示される内示情報に着目した。内示情報（以下、内示ともいう）とは、サプライヤが生産を開始するタイミング以前に受け取る生産数量、仕様、納期などの情報である。しかも、内示であるから、最終的には、仕様と数量が確定した注文情報（確定注文とよぶ）が伝達されるという意味で、内示情報は生産の予定値である。予定情報ではあるが間接的な判断に用いるマクロ統計のような情報ではなく、企業の発注部門、購買部門などから提示される事前の情報である。この内示情報を顧客から事前に示される先行需要情報ととらえ、これを用いた新しい生産計画モデルを提案した。すなわち、多期間の納入未達の度合いを表す指標を「未達率 (Unfulfilled-order-rate)」として定義し、内示情報を用いた生産計画問題を「多次元正規分布により表現される未達率制約と線形生産制約のもとで、在庫コストと製造コストの合計の期待値を最小にする確率計画問題」と定式化し、MCPS (Mass Customization Production Planning & Management System) とよぶ効率的な解法を提案した [3]。未達率指標としては、「各期の需要量は互いに独立であり、かつ計画期間の各期の在庫量も互い

* 原稿受付 2010年5月26日

[†] 県立広島大学 Prefectural University of Hiroshima; Ujina Higashi 1-1-71, Minami-ku, Hiroshima 734-8558, JAPAN

[‡] 大阪大学 Osaka University; Yamada, Kamii, Suita, Osaka

Key Words: production planning, unfulfilled-order-rate, base-stock policy, advance demand information, stochastic programming.

に独立である」[4-7],「各期の需要量は互いに独立であるが,計画期間の各期の在庫量は互いに相関がある」と仮定する場合の指標に加えて,新しく「計画期間の各期の在庫量は互いに相関があるが,その相関係数は同一であり,相関行列の非対角要素のうち最小値をとる」と仮定する場合の指標を含めて,三つの指標を提案した.そして,生産計画モデルの解法,収束性,三つの未達率指標間の関係を明らかにし,数値計算により計画期間の最終期の未達率の値や求解時間の比較を行った[3,8].

本論文は,前報[3]と密接に関連している.前報は,提案した指標の理論的考察を中心に行っているのに対して,本論文は,内示情報の産業応用・技術的な面における知見をまとめたものである.すなわち,内示情報の提示をうける自動車部品サプライヤの週間(5期間)の基準生産計画を想定して,(i)計画期間において,期ごとの未達率が漸増する挙動を明らかにする.生産管理者にとって,未達率の期ごとの増分や計画期間の最終期の未達率に対して,中間期の未達率を事前に想定できることは,日々の生産管理における在庫量目標とのブレの把握のうえで重要である.(ii)三つの未達率指標を使ったときの生産管理面の効果,とくに,在庫量低減の効果を明らかにする.内示変動,未達率目標値,需要量のばらつきによる在庫量への影響を数値計算により解析する.(iii)不確実な在庫補充問題を扱う既存手法として,基点在庫方策[9,10]がある.提案した生産計画モデルと基点在庫方策の関係を明らかにし,提案した生産計画モデルは,「一定の条件」が成立する場合には,基点在庫方策より必要な在庫量が少なく,優位であることを示す.

まず,従来の生産計画モデル(MCPSとよぶ)に対して,製造制約条件などを除き,未達率制約条件のもとでコストを最小にする問題(購買型MCPSとよぶ)を定義する.購買型MCPSは,生産計画モデル(MCPS)に包含できるが,固有の名前をつけて区別するのは,他のモデルとの比較や基礎的検討に適しているし,単独のモデルとして購買計画業務への適用拡大が可能であるからである.

つぎに,基点在庫方策を多期間に拡張した「多期間基点在庫モデル」を定義し,解法を示す.このモデルと購買型MCPSは,「一定の条件」が成立するのと同であることを証明する.そして,提案した在庫の相関性を考慮した未達率指標を用いる購買型MCPSは,多期間基点在庫モデルに比べて計画期間中の必要な在庫量は少なくなる結果が得られ,優位性があることを示す.

2. 内示情報を用いた生産計画モデル(MCPS)

2.1 内示情報と確定注文

内示情報とは,内示情報を受け取るサプライヤが生産を開始するタイミング以前に受け取る生産数量,仕様,納期などの予定情報である.内示情報は,それが作成さ

れた時点における製造業者の生産計画数量であり,それ以降に顧客の注文変更や生産予定の変動がなければ,その内示どおりに生産される数値である.したがって,確定注文は内示と同じはずであり,内示を中心としてその付近は出やすい.しかし,確定注文は内示とは異なり変動する.この変化は,内示が提示された後の製造業者における注文の変更や生産予定変更などの揺らぎが反映されて,確率的である.確定注文の表現としては,内示を平均とする正規分布を前提とする.

2.2 前提条件

- (1) 内示はあるが,確定注文は内示とは異なり変動する.需要量(確定注文)の分布は,内示を平均とし,標準偏差が既知の正規分布と仮定する.
- (2) サプライヤの製造リードタイムは,顧客の要求する納入リードタイムより長い.したがって,見込み生産をせざるを得ない.
- (3) 計画サイクルは,1回/週である.先1週間の計画を立案する.結果は,生産指示,購買計画などに活用する.
- (4) 計画目標未達率を考慮できる.未達率とは,顧客への納入回数のうち納入未達が発生した回数の比率である.

実際上は,サプライヤにとって,製品在庫がなく納入ができないケース(納入未達)は皆無である.納入できないと予想される場合は,サプライヤは,たとえば,緊急輸送により定時搬送時刻以外の特別便で搬送することや特急品として通常の製造リードタイムを大幅に短縮したリードタイムにて,生産し,納入する.しかし,これらの対策はコスト増につながるので極力避けたい.また,計画目標未達率を上回るほどに在庫量を下げるとは納入未達が頻発し,後追い対応ができず危険である.このことから,計画目標未達率は,標準のリードタイムのもとで,社内の生産管理レベルを決めるために許容される未達率目標値である.計画目標未達率の値は,たとえば,企業における管理指標である緊急輸送比率,特別輸送比率が使われる.3ヶ月に10回の緊急輸送がある場合には,計画目標未達率0.1(10%)などと決める.

- (5) 最終工程あるいは,ネック工程の製造制約,操業制約,各期の製造能力制約を考慮できる.
- (6) 単位あたりの在庫コスト,単位あたりの製造コストの合計の期待値を最小化する.

2.3 記号

単一品種の生産計画問題を定式化する.

[記号]

i : 期(ただし $i \leq n$, n は,計画期間)

d_i : 第 i 期の需要量(平均(内示) $\bar{d}_i$, 標準偏差 ω_i の正規分布に従い,互いに独立である.)

x_i : 第 i 期の生産量

S_i : 第 i 期の在庫量,初期在庫量は S_0

p_i : 第 i 期の単位あたりの製造コスト

h_i : 第 i 期の単位あたりの在庫コスト

r : n 期間の合計生産量

SO_n : 第 n 期までの未達率

β : 計画目標未達率

RC : 線形で表現される制約式のすべてを満たす実行可能領域に含まれる期別の生産量 x_i ($x_i, i=1, \dots, n$) (解) の集合. 必要な都度, 制約式を追加して構成できるという意味で, 一般的な表現としている.

2.4 定式化

生産計画問題として, 計画期間の内示 $\bar{d}_i$, 確定注文の分布のパラメータ ω_i , 計画目標未達率 β , 初期在庫量 S_0 , 合計生産量 r , 単位あたりの在庫コスト h_i , 単位あたりの製造コスト p_i が与えられたとき, コストの合計の期待値を最小にする各期の生産量を決定する問題を定式化する.

[T 問題]

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n h_i \cdot E[S_i] \quad (1)$$

$$\text{s.t. } S_0 + \sum_{t=1}^i x_t - \sum_{t=1}^i \bar{d}_t \geq 0 \quad (\forall i) \quad (2)$$

$$SO_n \leq \beta \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = r \quad (4)$$

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \in RC \quad (5)$$

$$x_i \geq 0 \quad (\forall i) \quad (6)$$

ここで, x_i は確定変数 (決定変数), S_i は確率変数である. また, (1) 式は, 製造コストと, 在庫コストの期待値 (Expectation) を最小化することを表しており, (2) 式は, 需要量が内示どおりであれば, 在庫量は各期とも非負であることを表し, (3) 式は未達率制約, (4) 式は期間内合計生産量制約, (5), (6) 式は線形の生産制約を表している.

3. 未達率の定義

3.1 第 i 期の在庫量 S_i とその期待値・分散共分散行列の導出

確定注文は, 内示 (平均) $\bar{d}_i$, 需要のばらつき (標準偏差) ω_i の正規分布であり, $d_i \sim N(\bar{d}_i, \omega_i^2)$ と表現する.

$d_i = \bar{d}_i + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim N(0, \omega_i^2)$. ここで, $E[\varepsilon_i^2] = \omega_i^2$, $E[\varepsilon_i \varepsilon_j] = 0, \forall i \neq j$ である. 第 i 期の在庫量は,

$$S_i = S_0 + \sum_{t=1}^i x_t - \sum_{t=1}^i d_t \quad (7)$$

であるから,

$$E[S_i] = S_0 + \sum_{t=1}^i x_t - \sum_{t=1}^i \bar{d}_t \triangleq m_i \quad (8)$$

$$V[S_i] = E[\{S_i - E[S_i]\}^2] = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2 \triangleq \sigma_i^2 \quad (9)$$

$$Cov[S_i, S_j] = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_i^2 \quad (\forall j > i) \quad (10)$$

となる. (9), (10) 式から, 分散共分散行列 Σ は, 下記のように構成される.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \omega_1^2 & \dots & \omega_1^2 \\ \omega_1^2 & \omega_1^2 + \omega_2^2 & \dots & \omega_1^2 + \omega_2^2 \\ & & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_i^2 & \dots & \omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_i^2 \\ & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_1^2 & \omega_1^2 + \omega_2^2 & \omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_i^2 & \dots & \omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

また,

$$\begin{aligned} \rho_{ij} &= Cov[S_i, S_j] / \sqrt{V[S_i] V[S_j]} \\ &= \sqrt{\sum_{t=1}^i \omega_t^2} / \sqrt{\sum_{t=1}^j \omega_t^2} = \gamma_i / \gamma_j \end{aligned} \quad (12)$$

ただし,

$$\gamma_i = \sqrt{\sum_{t=1}^i \omega_t^2} \quad (13)$$

である. 相関行列の上半分を示すと下記ようになる.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}} & \frac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2}} & \dots & \frac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}} \\ & 1 & \frac{\omega_2}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2}} & \dots & \frac{\omega_2}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}} \\ & & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & 1 & \frac{\omega_{n-1}}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}} \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \triangleq \{\rho_{ij}\} \quad (14)$$

3.2 未達率 SO_n の定義

n 期間における各期の在庫量とその期待値を n 次元ベクトルとして, $S = [S_1, S_2, S_3, \dots, S_n]$, $m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_n]$ と表現すると, (11) 式の分散共分散行列を用いて, 未達率 SO_n は, 下記のように定義される.

$$\begin{aligned} SO_n &\triangleq 1 - \text{Prob}\{S | \bigcap_{i=1}^n [S_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n]\} \\ &= 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \dots \int_0^\infty f(S; m, \Sigma) dS \end{aligned} \quad (15)$$

ここで,

$$f(S; m, \Sigma) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n \sqrt{|\Sigma|}} e^{-\frac{1}{2} [S-m]^T \Sigma^{-1} [S-m]} \quad (16)$$

である.

3.3 未達率 SO_n の数値計算

3.3.1 未達率指標 $SO_n(0)$

「計画期間の各期の在庫量 $S_i, i=1, \dots, n$ は, 互いに独立である」と仮定した場合の未達率である.

$$SO_n(0) = 1 - \prod_{i=1}^n \int_0^\infty f(S_i; m_i, \sigma_i^2) dS_i \quad (17)$$

となる. この数値計算は, 1次元の正規確率分布計算を扱えばよい.

3.3.2 未達率指標 SO_n

「計画期間の各期の在庫量 $S_i, i=1, \dots, n$ は, 互いに相関がある」とした場合である. R の要素が (12) 式のように $\rho_{ij} = \gamma_i / \gamma_j$ という形式で記述できるので, 相関行列を規定するパラメータ $\gamma_i, i=1, \dots, n$ が n 個である. この場合は, n 次元正規確率分布計算を $n/2$ あるいは, $(n-1)/2$ 重積分の数値計算で求められることが知られている [11,12]. SO_n の数値計算においては, モンテカルロ法 [13] も併用できる.

3.3.3 未達率指標 $SO_n(\rho_{\min})$

「計画期間の各期の在庫量 $S_i, i=1, \dots, n$ は互いに相関があるが, 相関係数は同一であり, 相関行列の非対角要素のうち最小値をとる」と仮定した場合である.

$$\rho_{\min} = \min_{i,j} (\rho_{ij}), \forall i < j \quad (18)$$

として, 新しく相関行列をその対角要素を除いて,

$$R_{\min} = \{\rho_{\min}\} \quad (19)$$

とおく.

$$\begin{aligned} SO_n(\rho_{\min}) &\triangleq 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \dots \int_0^\infty f(S; m, R_{\min}) dS \\ &= 1 - \int_{-\infty}^\infty \prod_{i=1}^n \left[1 - \Phi \left(\frac{-m_i / \sigma_i + \sqrt{\rho_{\min}} z}{\sqrt{1 - \rho_{\min}}} \right) \right] \phi(z) dz \end{aligned} \quad (20)$$

となり, 1重の数値積分で計算可能である [14]. ここで, $\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2}$, $\Phi(t) = \int_{-\infty}^t \phi(v) dv$ であり, それぞれ正規分布 $N(0,1)$ の確率密度関数, 分布関数である.

3.4 三つの指標の関係

【性質1】 三つの指標の関係は, $SO_n \leq SO_n(\rho_{\min}) \leq SO_n(0)$ である [3].

また, 下記の性質は, それぞれの指標の相関行列を比

較すれば, 明らかである.

【性質2】 $n=1$ の場合は, $SO_n = SO_n(\rho_{\min}) = SO_n(0)$ である.

【性質3】 $n=2$ の場合は, $SO_n = SO_n(\rho_{\min})$ である.

4. 内示情報を用いた購買計画モデル (購買型 MCPS)

生産計画モデル (MCPS) から製造制約条件を除き, 未達率制約のみの制約条件のもとでコストを最小にする問題 (購買型 MCPS) を定義する. この問題は, MCPS に比べて, 決定変数 x_i の「生産量」を「購買量」と解釈する.

するとこの問題は, 計画期間中の在庫コストと購買コストの合計の期待値を最小にする購買量を求める問題となる. 購買型 MCPS は, MCPS に包含できるが, 固有の名前をつけて区別するのは, 後述するように, モデルの基礎的な検討に適しており, 既存モデルとの対比が容易であるからである. また購買計画業務への適用も可能である.

4.1 前提条件

内示情報を用いた生産計画モデルについて述べた 2.2 の前提条件と同じである. ただし, (4), (5) 式の制約がない点が異なる.

【記号】

2.3 と同じである. ただし, 生産量を購買量, 製造コストを購買コストと読み替える. 在庫コストは同じである.

4.2 定式化

計画期間の内示 $\bar{d}_i$, 確定注文の分布のパラメータ ω_i , 計画目標未達率 β , 初期在庫量 S_0 , 単位あたりの在庫コスト h_i , 単位あたりの購買コスト p_i が与えられたとき, コストの合計の期待値を最小にする各期の購買量を決定する問題を定式化する.

【購買型 T 問題】

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n h_i \cdot E[S_i] \quad (21)$$

$$\text{s.t. } S_0 + \sum_{t=1}^i x_t - \sum_{t=1}^i \bar{d}_t \geq 0 \quad (\forall_i) \quad (22)$$

$$SO_n \leq \beta \quad (23)$$

$$x_i \geq 0 \quad (\forall_i) \quad (24)$$

ここで, x_i は決定変数 (決定変数), S_i は確率変数である. (22) 式は, 需要量が内示どおりであれば, 在庫切れは起こらないことを表している. (23) 式は未達率制約を表している. 上記の問題の解を x_i^0 とすれば, $\sum_{i=1}^n x_i^0$ は計画期間中に必要な購買量を表す. 発注業務の基礎となる数値である.

5. MCPS の計算手順

解法の手順を示す [3]. なお, T 問題, 購買型 T 問題から, それぞれ (3), (23) 式を除いた問題を, 「P 問題」, 「購買型 P 問題」といい, さらに, P 問題, 購買型 P 問題を逐次, (25) 式を追加した問題を「MP 問題」, 「購買型 MP 問題」という. K_i は, 解法の手順 (31) 式による.

$$S_0 + \sum_{t=1}^i x_t - \sum_{t=1}^i \bar{d}_t \geq K_i \quad (25)$$

下記の解法の手順は, MCPS の場合を示しているが, 購買型 MCPS の場合は, P 問題を購買型 P 問題, MP 問題を購買型 MP 問題と置き換えればよい. なお, 第 l 回目のイテレーションにおける未達率 $\beta^{(l)}$ を 3.3 で述べた三つの未達率指標を用いて計算している.

[解法の手順]

ステップ 1

$l=1, T=\{1, 2, \dots, n\}, B=\phi, \varepsilon=0.0000001$ とおく.

$$\beta_i = 1 - \sqrt[n]{1 - \beta} \quad (\forall i \leq n) \quad (26)$$

ステップ 2

P 問題 (線形計画問題) を解く. P 問題の最適解 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, コスト $C^{(l)}$, 未達率 $\beta^{(l)}$, 期別未達率 $\beta_i^{(l)}$ を得る.

ステップ 3

- (i) $\beta^{(l)} \leq \beta$ の場合は, $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ は全体の最適解である (終了).
- (ii) $\beta^{(l)} > \beta$ の場合は,

$$\beta_i^{(l+1)} = \beta_i^{(l)} - \text{sgn}(\beta_i^{(l)} - \beta_i) \times \frac{|\beta_i^{(l)} - \beta_i|}{INC} \quad (27)$$

インデックス $i^{(l+1)}$ は,

$$i^{(l+1)} = \arg \max_{i \leq n} (\beta_i^{(l+1)}) \quad (28)$$

として,

$$\{B\} = \{B\} \oplus \{i^{(l+1)}\}, \{T\} = \{T\} - \{i^{(l+1)}\} \quad (29)$$

とする.

$$\beta_i^{(l+1)} = \int_{-\infty}^{y^{(l+1)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(s_i - m_i)^2}{2\sigma_i^2}} dS_i \quad (30)$$

$$K_i^{(l+1)} = m_i - y^{(l+1)} \quad (31)$$

となる $K_i^{(l+1)}$ および B を用いて, MP 問題 (線形計画問題) を構成して解く.

ステップ 4

MP 問題の最適解を $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, コスト $C^{(l+1)}$, 未達率 $\beta^{(l+1)}$ を得る.

$$|\beta^{(l+1)} - \beta^{(l)}| < \varepsilon \quad (32)$$

なら終了する.

ステップ 5

- (i) $\beta^{(l+1)} \leq \beta$ の場合は, $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ は全体の解である.
- (ii) $\beta^{(l+1)} > \beta$ の場合は, $l=l+1$ として, ステップ 3 (ii) へいく.

以上

ステップ 1 では, 初期パラメータをセットしている. ステップ 2 では, P 問題を解いている. ステップ 3 では, 「最悪の未達率となる期」の未達率を新しい目標値に更新している. (30), (31) 式から $K_i^{(l+1)}$ を求めている. ステップ 4, 5 では, 終了判定を行っている. (32) 式では, 一つ前のイテレーションにおける未達率と今回の未達率との差が指定の誤差 (ε) 未満であれば, 終了する. ステップ 5 は, 未達率が計画目標未達率 β を満足しているかの最終判定を行う. 満足していなければ, 処理を継続する. なお, $INC=4$ としている.

6. 未達率を用いた生産計画モデルの特性解析

内示情報を用いた生産計画モデルの産業応用・技術的な面の知見を得る. そのために, 内示情報の提示をうける自動車部品サプライヤの基準生産計画への活用を想定し, 購買型 MCPS を用いて①計画期間内において期ごとの未達率が漸増する挙動, ②三つの未達率指標を用いた生産計画に対する必要な在庫量, ③未達率指標 $SO_n(\rho_{\min})$, SO_n を用いた場合による在庫量低減効果を数値計算により明らかにする.

6.1 数値計算の前提

内示情報の提示をうける自動車部品サプライヤの週間 (5 期間) 計画への活用を想定する. 前章で述べた第 l 回目のイテレーションにおける未達率 $\beta^{(l)}$ を計算するに際して, 計画期間の最終期 (5 期) の未達率に加え, 途中期 (1~4 期) の未達率を計算するプログラムを作成した.

6.1.1 ケーススタディの考え方

生産計画結果に影響を及ぼす要因は, 内示 $\bar{d}_i$, 需要のばらつき ω_i , 計画目標未達率 β , 初期在庫量 S_0 , 合計生産量 r , 単位あたりの在庫コスト h_i , 単位あたりの製造コスト p_i である. これらのパラメータは, 二つに大別できる. すなわち, 最終解 (生産量) x_i^0 に影響を与える要因は, $\bar{d}_i, \omega_i, \beta, S_0, r, h_i, p_i$ であるが, 一方, 最終解 (生産量) x^0 が決まった後の未達率の計算に影響を与える要因は, $x_i^0, S_0, \bar{d}_i, \omega_i, \rho_{\min}$ である.

ここで, $\rho_{\min}$ は, (14) 式の相関行列の非対角要素のうち最小値をとる相関係数であり, かつ正である. したがって, $\rho_{\min}$ が小さくなることは, 在庫の相関性の影響が小さくなることであるので, 未達率指標 $SO_n(\rho_{\min})$ は, $SO_n(0)$ に近い振舞いをするし, $\rho_{\min}$ が大きくなると, SO_n に近い振舞いをすることは自明である. また,

x_i^0, S_0 は, (8) 式よりわかるように, 在庫量の期待値をきめる要因であるが, 三つの未達率指標について共通である.

以上のことから, 未達率指標の特性解析としては, 内示 $\bar{d}_i$, 需要のばらつき ω_i , 計画目標未達率 β の影響を中心に, 期別の未達率, 必要な在庫量を算出する.

6.1.2 ケース設定

(1) 内示変動

内示としては, 内示変動型 (Case1), 内示一定型 (Case2), 内示漸増型 (Case3) の三つの内示変動パターンを想定する. Table 1 に具体的数値を示す.

Table 1 Cases of forecast order

	$\bar{d}_1$	$\bar{d}_2$	$\bar{d}_3$	$\bar{d}_4$	$\bar{d}_5$
Case1	10	20	24	6	12
Case2	14	14	14	14	14
Case3	6	10	12	20	24

なお, 需要のばらつき ω_i が期によらず一定の場合 ($\omega_i = \omega$) は, (14) 式より, 相関行列は ω に依存しない. 期の並びの変化にも影響を受けない. よって, 三つの未達率指標の値の解析を行うときには, 内示変動パターンに依存しないので, Case1 の場合のみを扱う.

(2) 需要のばらつきと計画目標未達率

対象とする業界, 品種により大いに異なる. ここでは, 前述した内示情報の提示をうける自動車部品サプライヤにおいて, 内示変動の比較的大きい中小ロットを対象にする. この分野では, $\omega_i = 3$ と考え, この前後のバリエーションを想定する. また, 計画目標未達率は, 社内の管理レベルを決めることであり, 通常 $\beta = 0.1$ と考え, この前後のバリエーションを想定する. したがって, $\omega_i = 1, 3, 5$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) の3ケース, $\beta = 0.05, 0.1, 0.2$ の3ケースを想定する.

(3) その他のパラメータ

初期在庫量 $S_0 = 15$, 単位あたりのコストはそれぞれ $p_i = p = 1$, $h_i = h = 1$ ($i = 1, \dots, 5$), 合計生産量 $r = 80$ とする. 単位あたりの在庫コストについては, たとえば, 2 期間の在庫コストが1 期間の在庫コストの2 倍であることがわかればよいので, $h = 1$ と基準化している. また, 単位あたりの製造コスト (購買コスト) が期によらず一定の場合には, 生産計画の結果は p の値に影響されないで, $p = 1$ と基準化している.

6.2 期別の未達率の挙動

計画期間内における未達率の漸増の挙動を明らかにする. 購買型MCPSを用いて, 内示変動型 (Case1) を対象に, $\omega = 3$ の場合で, $SO_n(0)$ を計画目標未達率0.1 とする場合と, SO_n を計画目標未達率0.1 とする場合の期別の未達率をそれぞれ Tables 2, 3 に示す. また, Figs. 1, 2 にグラフ化している.

つぎに, 計画期間の最終期 (5 期) の未達率の値に対して, 中間期 (3 期) の未達率を明らかにする. この必要性は, 生産管理者にとって, 未達率の期ごとの増分や計画期間の最終期の未達率に対して中間期の未達率の値を事前に想定でき, 中間期における在庫量目標とのズレを把握し, 計画期間の後半に向けての生産計画の修正の要否を判断したいなどのためである. SO_n を用いたときの最終期 (5 期) に対して, 中間期 (3 期) の未達率を Table 4 に示す.

(考察)

- (i) Table 2, Fig. 1 は, $SO_n(0)$ が計画目標未達率に達したら, 最終解としている. $SO_n(0)$ は, 0.1 に達していることがわかる. その途中の期別の未達率は, 期ごとの増分はほぼ一定であるのに比べて, SO_n は, 期ごとの増分は一定でない. 各期間に在庫の相関性の影響があるからである. $SO_n(\rho_{\min})$ は, 両者の中間である.
- (ii) Table 3, Fig. 2 より, SO_n が計画目標未達率に達したら, 最終解としている. SO_n は, ほぼ0.1 に達していることがわかる. $SO_n(0)$ では, その途中の期別の未達率は, 期ごとの増分はほぼ一定であるのに比べて, SO_n は, 期ごとの増分は一定でない. 最終期 (5 期) における未達率 SO_n と $SO_n(0)$ の乖離は大きい. $SO_n(\rho_{\min})$ は, 両者の中間である.
- (iii) Table 4 より, 各ケースについて, $SO_n(0)$ では, 中間期 (3 期) の未達率は, 最終期 (5 期) の未達率に対して 52-67%に達しており, SO_n では, 67%-82%である. すなわち, $SO_n(0)$ では, 中間期の未達率は, 最終期の未達率に対して約 60%であり, 期ごとの増分は, ほぼ一定である. 一方, SO_n では, 中間期の未達率は最終期の未達率の約 60%より大きく, 1 期から3 期の期ごとの増分は4

Table 2 Result of unfulfilled-order-rate at each period by indicator $SO_n(0)$ ($\beta = 0.1, \omega = 3$)

	1	2	3	4	5
$SO_n(0)$	0.021	0.041	0.061	0.081	0.100
$SO_n(\rho_{\min})$	0.021	0.035	0.051	0.066	0.081
SO_n	0.021	0.035	0.045	0.054	0.060

Table 3 Result of unfulfilled-order-rate at each period by indicator SO_n ($\beta = 0.1, \omega = 3$)

	1	2	3	4	5
$SO_n(0)$	0.036	0.071	0.104	0.137	0.168
$SO_n(\rho_{\min})$	0.036	0.059	0.084	0.108	0.131
SO_n	0.036	0.059	0.075	0.088	0.098

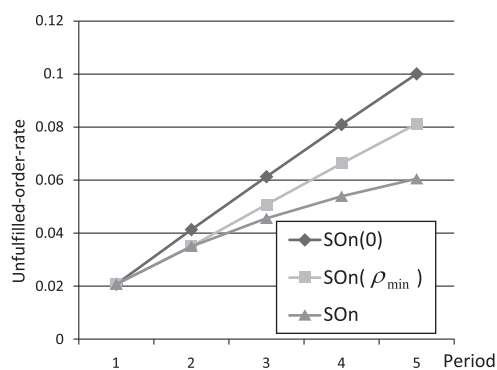


Fig. 1 Result of unfulfilled-order-rate at each period by indicator $SO_n(0)$ ($\beta=0.1$, $\omega=3$)

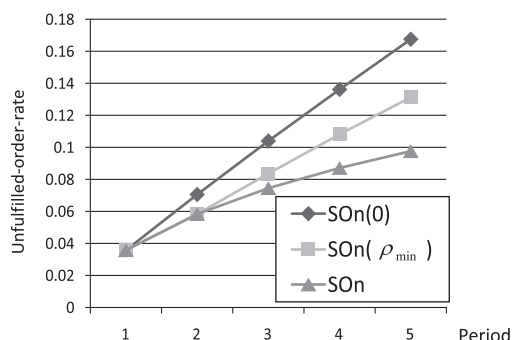


Fig. 2 Result of unfulfilled-order-rate at each period by indicator SO_n ($\beta=0.1$, $\omega=3$)

Table 4 Unfulfilled-order-rates at 3rd period and final period by indicator SO_n (Case1)

ω	β	3rd period			final period		
		$SO_n(0)$	$SO_n(\rho_{\min})$	SO_n	$SO_n(0)$	$SO_n(\rho_{\min})$	SO_n
1	0.05	0.043	0.039	0.034	0.082	0.069	0.049
	0.1	0.093	0.082	0.071	0.172	0.140	0.098
	0.2	0.198	0.169	0.148	0.346	0.271	0.195
3	0.05	0.050	0.041	0.037	0.081	0.067	0.050
	0.1	0.104	0.084	0.075	0.168	0.131	0.098
	0.2	0.224	0.176	0.155	0.356	0.269	0.198
5	0.05	0.049	0.041	0.037	0.081	0.066	0.049
	0.1	0.107	0.086	0.077	0.170	0.133	0.100
	0.2	0.237	0.183	0.164	0.351	0.263	0.199

期から5期の期ごとの増分より大きい。

6.3 在庫量低減の効果

三つの未達率指標を使ったときの在庫量低減の効果を明らかにする。購買型 MCPS を用いて、内示変動を3ケース、需要のばらつき ω を1, 3, 5, 計画目標未達率 β を0.05, 0.10, 0.20と変化させたときの在庫量合計の結果を Tables 5, 6, 7 に示す。

(考察)

(i) Tables 5, 6, 7 より、すべてのケースにおいて

(a) 需要のばらつき ω が一定のとき、計画目標未達率 β が増えるにつれて在庫量は減少する。

Table 5 Total quantity of inventory and ratio (Case1)

ω	β	Total quantity of inventory			Ratio(%)	
		(A) $SO_n(0)$	(B) $SO_n(\rho_{\min})$	(C) SO_n	$\frac{(A)-(B)}{(A)}$	$\frac{(A)-(C)}{(A)}$
1	0.05	21.53	21.07	20.02	2.13	7.00
	0.1	19.39	18.74	17.46	3.33	9.93
	0.2	16.89	15.93	14.47	5.67	14.32
3	0.05	58.31	56.59	53.45	2.95	8.33
	0.1	51.21	48.82	45.23	4.67	11.67
	0.2	43.00	39.17	34.41	8.90	19.98
5	0.05	97.18	94.43	89.14	2.83	8.27
	0.1	85.35	81.41	75.19	4.61	11.90
	0.2	71.66	65.80	58.24	8.18	18.73

Table 6 Total quantity of inventory and ratio (Case2)

ω	β	Total quantity of inventory			Ratio(%)	
		(A) $SO_n(0)$	(B) $SO_n(\rho_{\min})$	(C) SO_n	$\frac{(A)-(B)}{(A)}$	$\frac{(A)-(C)}{(A)}$
1	0.05	19.44	18.89	17.83	2.83	8.27
	0.1	17.07	16.28	15.04	4.61	11.90
	0.2	14.33	13.16	11.65	8.18	18.73
3	0.05	58.31	56.65	53.47	2.83	8.29
	0.1	51.21	48.83	45.25	4.65	11.64
	0.2	43.00	39.41	35.19	8.35	18.15
5	0.05	97.18	94.29	89.24	2.98	8.17
	0.1	85.35	81.45	75.28	4.57	11.80
	0.2	71.66	65.78	58.20	8.21	18.79

Table 7 Total quantity of inventory and ratio (Case3)

ω	β	Total quantity of inventory			Ratio(%)	
		(A) $SO_n(0)$	(B) $SO_n(\rho_{\min})$	(C) SO_n	$\frac{(A)-(B)}{(A)}$	$\frac{(A)-(C)}{(A)}$
1	0.05	25.53	25.07	24.02	1.80	5.91
	0.10	23.39	22.74	21.46	2.76	8.23
	0.20	20.89	19.93	18.47	4.58	11.57
3	0.05	58.79	57.42	54.07	2.34	8.04
	0.1	52.16	50.22	46.38	3.72	11.08
	0.2	44.67	41.79	37.41	6.43	16.24
5	0.05	97.18	94.44	89.16	2.82	8.25
	0.1	85.35	81.37	75.39	4.67	11.67
	0.2	71.41	65.50	57.24	8.28	19.84

(b) 計画目標未達率 β が一定のとき、需要のばらつき ω が増えるにつれて在庫量は増加する。

(ii) ケーススタディを行った範囲では、 $SO_n(0)$ に対して、 SO_n の指標を用いると 5.9–20.0% の在庫量低減効果が判明した。在庫の相関性の効果である。

(iii) ケーススタディを行った範囲では、 $SO_n(0)$ に対して、 $SO_n(\rho_{\min})$ の指標を用いると 1.8–8.9% の在庫量低減効果が判明した。在庫の相関性の効果である。

(iv) 需要のばらつき ω が一定の場合は、計画目標未達率 β が大きいほど、在庫量低減効果も大きいことが判明した。内示変動パターンによって、在庫量低減効果の差異は顕著ではない。

7. 多期間基点在庫モデル

既存手法として、基点在庫方策を取り上げ、多期間に拡張する。多期間基点在庫モデルは、平均在庫コストと平均在庫切れコストの期間合計の総平均コストを最小化問題であり、制約条件は、変数（生産量）が非負であることのみである。問題の前提条件は、購買型MCPSと同じであり、両モデルの比較検討が可能である。

【記号】

i : 期間（ただし、 $i \leq n$, n は計画期間）

z_i : 第 i 期の需要量（正規分布 $N(\bar{z}_i, \omega_i^2)$ に従う）

Z_i : 第 i 期までの累積需要量

x_i : 第 i 期での生産量, $\hat{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

S_0 : 初期在庫量

S_i : 第 i 期の在庫量（ただし、 $S_i = S_0 + \sum_{t=1}^i x_t - \sum_{t=1}^i z_t$ ）

h : 単位あたりの在庫コスト

b : 単位あたりの在庫切れコスト

7.1 多期間基点在庫モデルの定式化

$$Z_i = \sum_{t=1}^i z_t \quad (33)$$

であり、第 i 期までの累積需要量の分布関数を $F^{(i)}(Z_i)$, その確率密度関数を $f^{(i)}(Z_i)$ とする。また、

第 i 期までの累積需要量の平均 $\bar{Z}_i$ は、

$$\bar{Z}_i = E[Z_i] = E\left[\sum_{t=1}^i z_t\right] = \sum_{t=1}^i \bar{z}_t \quad (34)$$

であり、第 i 期までの累積需要量の分散は、

$$\sigma_i^2 = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_i^2 = \sum_{t=1}^i \omega_t^2 \quad (35)$$

である。

7.1.1 多期間の総平均コスト

平均在庫コストと平均在庫切れコストの期間合計の総平均コストを算出する。多期間の総平均コストは、

$$C = \sum_{i=1}^n \left[h \int_0^{S'_i} (S'_i - Z_i) f^{(i)}(Z_i) dZ_i + b \int_{S'_i}^{\infty} (Z_i - S'_i) f^{(i)}(Z_i) dZ_i \right] \quad (36)$$

となる。右辺の Σ のなかの第1項が、平均在庫コストであり、2項目が、平均在庫切れコストである。生産量は、非負制約 $x_i \geq 0$ を満足する必要がある。ここで、

$$S'_i = S_0 + \sum_{t=1}^i x_t \quad (37)$$

とする。総平均コスト C は、生産量 $\hat{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ の関数であるので、改めて $C(\hat{x})$ と表現する。

7.1.2 定式化と解法

非負制約 $x_i \geq 0$ を満足して、目的関数 (36) 式を最小化する問題として定式化することができ、最適生産量 $\hat{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ は、

$$x_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (38)$$

より得ることができる。(36) 式は凸関数であることから、各 x_i^* は (38) 式を満足する内点解あるいは、端点解として与えられ、この組合せにより、最適生産量 $\hat{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ が求められる [15]。

ここでは、最適生産量 $x_i^* > 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) の条件が成立する場合に、その値を求めることとする。

7.2 生産計画の求め方

需要量が正規分布に従う場合で、5 期間の生産計画を求める。

$$C(\hat{x}) = -b \sum_{i=1}^5 (5-i+1)x_i + (h+b) \sum_{i=1}^5 \int_0^{S'_i} (S'_i - Z_i) f^{(i)}(Z_i) dZ_i - b \sum_{i=1}^5 (S_0 - \bar{Z}_i) \quad (39)$$

となる。生産量 x_i , $i = 1, 2, \dots, 5$ で偏微分することにより

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C(\hat{x})}{\partial x_5} &= -b + (h+b)F^{(5)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^5 x_i\right) \\ \frac{\partial C(\hat{x})}{\partial x_4} &= -2b + (h+b)\left\{F^{(4)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^4 x_i\right) + F^{(5)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^5 x_i\right)\right\} \\ \frac{\partial C(\hat{x})}{\partial x_3} &= -3b + (h+b)\left\{F^{(3)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^3 x_i\right) + F^{(4)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^4 x_i\right) + F^{(5)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^5 x_i\right)\right\} \\ \frac{\partial C(\hat{x})}{\partial x_2} &= -4b + (h+b)\left\{F^{(2)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^2 x_i\right) + F^{(3)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^3 x_i\right) + F^{(4)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^4 x_i\right) + F^{(5)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^5 x_i\right)\right\} \\ \frac{\partial C(\hat{x})}{\partial x_1} &= -5b + (h+b)\left\{F^{(1)}(S_0 + x_1) + F^{(2)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^2 x_i\right) + F^{(3)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^3 x_i\right) + F^{(4)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^4 x_i\right) + F^{(5)}\left(S_0 + \sum_{i=1}^5 x_i\right)\right\} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

を得る。各式の右辺を 0 とおいて、式ごとに引き算をすると、生産量 x_i^* は、

$$x_1^* = -S_0 + \{F^{(1)}\}^{-1}\left(\frac{b}{h+b}\right) \quad (41)$$

$$x_i^* = \{F^{(i)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right) - \{F^{(i-1)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right), \quad (42)$$

$$\forall i = 2, 3, 4, 5$$

より求めることができる。ここで、 $\{F^{(i)}\}^{-1}$ は、 $F^{(i)}$ の逆関数である。

前項で述べた条件が成立することが前提であるから、(41), (42) 式が正となる場合に限る。

7.3 多期間基点在庫モデルと購買型 MCPS との類似性

7.3.1 モデルの類似性

購買型 MCPS の目的関数は、在庫コストと購買コストの期間合計の期待値であり、多期間基点在庫モデルは、平均在庫コストと平均在庫切れコストの期間合計の総平均コストであり、それぞれ目的関数が異なり、基本的には、異なった問題を解いているといえる。しかし、一定の条件のもとでは両方のモデルは同一である。

【性質 4】 $SO_n(0)$ を指標とする購買型 MCPS と多期間基点在庫モデルは、

$$\frac{b}{b+h} = \sqrt[n]{1-\beta} \quad (43)$$

が成立する場合には、各期の在庫量の期待値は等しくなる。

(証明)

多期間基点在庫モデルにおける最適生産量 $\hat{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, $x_i^* > 0$ ($\forall i$) が決まった場合における i 期の在庫量 S_i^* の期待値を求める。(8) 式に、(41), (42) 式を代入して、

$$\begin{aligned} E[S_i^*] &= m_i^* = S_0 + \sum_{t=1}^i x_t^* - \sum_{t=1}^i \bar{z}_t \\ &= S_0 + \left(-S_0 + \{F^{(1)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right) \right) \\ &\quad + \sum_{t=2}^i \left[\{F^{(t)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right) - \{F^{(t-1)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right) \right] - \bar{Z}_i \\ &= \{F^{(i)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right) - \bar{Z}_i \\ &= \{\tilde{F}^{(i)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right) \end{aligned} \quad (44)$$

ここで、 $F^{(i)}$ は、平均 $\bar{Z}_i$ 、分散 σ_i^2 の正規分布関数、 $\tilde{F}^{(i)}$ は平均 0、分散 σ_i^2 の正規分布関数である。

すると、

$$m_i^* = \{\tilde{F}^{(i)}\}^{-1} \left(\frac{b}{h+b} \right) \quad (45)$$

一方、 $SO_n(0)$ を指標とする購買型 MCPS の最終解が決まった場合における第 i 期の在庫量 S_i の期待値を求める。各期の未達率 β_i は、(26) 式より、 $1 - \sqrt[n]{1-\beta}$ を目標

として求解する。このときの、在庫量の期待値 m_i^{MCPS} は、

$$m_i^{MCPS} = \{\tilde{F}^{(i)}\}^{-1} (\sqrt[n]{1-\beta}) \quad (46)$$

である。(45), (46) 式を比較すると、

$$\frac{b}{b+h} = \sqrt[n]{1-\beta} \quad (47)$$

が成立する場合は、両方の在庫量の期待値が一致する。(証明終わり)

7.3.2 数値計算

内示変動型 (Case 1) の場合で、 $\omega = 3$, $\beta = 0.05$, 0.1 とした場合の多期間基点在庫モデルの結果を Table 8 に示す。購買型 MCPS の結果を Table 9 に示す。なお、Table 8 の期別の未達率はその期単独のものであり、Table 9 の期別の未達率はそれぞれに指標 $SO_i(0)$, $SO_i(\rho_{\min})$, SO_i , $i = 1, \dots, 5$ の値である。

(考察)

Table 8 における $b/(b+h)$ が 0.9898 と 0.9791 のそれぞれの期別の在庫量は、Table 9 における未達率指標 $SO_n(0)$ で、計画目標未達率 $\beta = 0.05$, 0.1 のときの期別の在庫量とほぼ一致していることがわかる。計画期間中の全在庫量と比較しても、ほぼ等しい。

7.3.3 比較

Table 9 より、 SO_n , $SO_n(\rho_{\min})$ の指標を用いた場合の方が、 $SO_n(0)$ の指標を用いた場合より、在庫量は少なくなる。結果として SO_n , $SO_n(\rho_{\min})$ の指標を用いた場合は多期間基点在庫モデルによる必要在庫量よりも少なくなる。

この理由を述べる。 $SO_n(0)$ は、需要量は互いに独立であり、また「計画期間の各期の在庫量は互いに独立である」という仮定のもとで導かれている。一方、多期間基点在庫モデルも、「各期の需要量は独立で、また在庫量も独立である」という仮定のもとで導出されているから、使っている需要量の分布特性は同じであり、一定条件のもとで両者は同一である。そのうえで、同じ条件で、多期間基点在庫モデルと SO_n , $SO_n(\rho_{\min})$ を指標とする購買型 MCPS の結果とを比較すると、 SO_n , $SO_n(\rho_{\min})$ を指標にする購買型 MCPS は、在庫の相関性を利用しているので、計画期間に必要な在庫量はより少なくなる。

8. おわりに

本論文では、

- (i) 内示情報を用いた生産計画モデル (MCPS) と購買計画モデル (購買型 MCPS) を定式化した。
- (ii) 5 期間の期別の未達率の軌跡は、 $SO_n(0)$ では、その途中の未達率の期ごとの増分は、ほぼ一定であるのに比べて、 SO_n では、期ごとの増分は一定でない。 $SO_n(0)$ では、中間期 (3 期) の未達率は最終期 (5 期) の未達率の約 60% に達している。一

Table 8 Case studies of base-stock policy with multi-period

Condition $b/(b+h)$	Unfulfilled-order-rate at each period					Quantity of inventory at each period					Total quantity of inventory
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
0.9898	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	6.97	9.85	12.07	13.94	15.58	58.40
0.9791	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	6.11	8.64	10.58	12.21	13.65	51.19

$$(\sqrt[5]{1-0.05}=0.9898, \sqrt[5]{1-0.10}=0.9791)$$

Table 9 Case studies of MCPS for purchasing

Indicator	Unfulfilled-order-rate (β)	Unfulfilled-order-rate					Quantity of inventory at each period					Total quantity of inventory
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
$SO_n(0)$	0.05	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	6.96	9.84	12.05	13.91	15.55	58.31
	0.1	0.021	0.041	0.061	0.081	0.100	6.11	8.64	10.58	12.22	13.66	51.21
$SO_n(\rho_{\min})$	0.05	0.012	0.021	0.031	0.040	0.05	6.79	9.54	11.68	13.49	15.08	56.59
	0.1	0.027	0.045	0.064	0.082	0.100	5.77	8.16	10.13	11.69	13.07	48.82
SO_n	0.05	0.017	0.029	0.037	0.044	0.05	6.37	9.02	11.05	12.76	14.26	53.45
	0.1	0.036	0.059	0.075	0.088	0.098	5.40	7.63	9.35	10.79	12.07	45.23

方, SO_n では, 中間期の未達率は最終期の未達率の約 60%より大きく, 1 期から 3 期の期ごとの増分は, 4 期から 5 期の期ごとの増分より大きい. $SO_n(\rho_{\min})$ は, 両者の中間である.

(iii) $SO_n(0)$ に対して, $SO_n(\rho_{\min})$, SO_n を組み込んだ購買型 MCPS は, すべてのケースにおいて

(a) 需要のばらつき ω が一定のとき, 計画目標未達率 β が増えるにつれて在庫量は減少する.

(b) 計画目標未達率 β が一定のとき, 需要のばらつき ω が増えるにつれて在庫量は増加する.

(iv) ケーススタディを行った範囲では, $SO_n(0)$ に対して, SO_n の指標を用いると 5.9%~20.0%の在庫量低減効果が判明した.

(v) 需要のばらつき ω が一定の場合は, 計画目標未達率 β が大きいほど, 在庫量低減効果も大きいことが判明した.

(vi) $SO_n(0)$ を指標とする購買型 MCPS と多期間基点在庫モデルは, 一定の条件のもとでは両方のモデルの結果が一致する. したがって, この条件で多期間基点在庫モデルと $SO_n(\rho_{\min})$, SO_n を指標とする購買型 MCPS とを比較すると, $SO_n(\rho_{\min})$, SO_n を指標とする購買型 MCPS の方が計画期間に必要な在庫量はより少なくなる.

以上のように, 購買型 MCPS は, 既存の手法とも類似性が高く, かつ既存のモデルと比較して, 在庫量低減効果が高い. また, MCPS, 購買型 MCPS は, ①多くの製造制約条件を組み込める, ②計量化しにくい在庫切れコストのデータを用いなくてよい, ③在庫に相関性がある条件も組み入れることができる, ④未達率とコストの代替性比較ができる, ⑤1 週間程度の生産計画につい

ては, EXCEL にて短時間で求解が可能であるなど, 実用性が高いと思われる.

本モデルは, 内示方式を採用している企業や見込み生産に内示情報を活用したいと考える企業の基準生産計画(マスタープロダクションスケジュール)作成業務において重要な役割を果たすと思われる.

今回は, 理論と数値シミュレーションにより提案手法の優位性を示したが, 今後は, さらに, 内示=確定注文として基準生産計画を作成し, 資材所要量計画により生産・資材発注を行うが, 注文のずれや設備故障等々の不確実性を吸収するために, 適当な工程に安全在庫を持って対応するやり方などとの比較検証を行い, 一層の適用拡大を図っていく.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり有益な助言, 情報提供などを賜りましたマツダ(株)の村上重道氏, 渋谷宏明氏, およびサプライヤの生産計画立案業務について貴重な教示をいただきました(株)ワイエヌエスの倉本敏明氏, 寺迫耕治氏をはじめ諸氏に深く感謝致します. レフリーには, 貴重なコメントをいただき, 深くお礼申し上げます. 数値計算には, 県立広島大学池田沙織君の協力を得た.

参考文献

- [1] B. J. Pine: *Mass Customization*, Harvard Business School Press (1993)
- [2] J. H. Gilmore and B. J. Pine: *Markets of One - Creating Customer Unique Value through Mass Customization*, Harvard Business School Press (2000)
- [3] 上野, 川崎, 奥原: 内示情報を用いた未達率指標による生産計画システムの提案; システム制御情報学会論文誌,

Vol. 23, No. 7, pp. 147-156 (2010)

- [4] 上野, 古田, 奥原, 渋谷, 倉本: マスカスタマイゼーション対応の生産管理システムの提案; システム制御情報学会論文誌, Vol. 17, No. 6, pp. 221-229 (2004)
- [5] 上野, 古田, 奥原, 渋谷, 倉本: マスカスタマイゼーション対応生産計画システムの多品種モデルへの拡張; システム制御情報学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp. 89-99 (2005)
- [6] N. Ueno, K. Okuhara, H. Ishii, H. Shibuki and T. Kuramoto: Multi-item production planning and management system based on unfulfilled order rate in supply chain; *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 50, No. 3, pp. 201-218 (2007)
- [7] N. Ueno, E. Domoto and K. Okuhara: Demand distribution-based mass customization production management by unfulfilled order rate; *International Journal of the Japan Association for Management Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 77-82 (2009)
- [8] 上野, 川崎, 矢後, 奥原: 内示情報を用いたマスカスタマイゼーション対応生産計画システム; スケジュールリングシンポジウム 2009, pp. 63-68 (2009)
- [9] D. Smichi-Levi, X. Chen and J. Bremel: *The Logic of Logistics-Theory, Algorithm and Application for Logistics and Supply Chain Management*, 2nd edition, Springer (1997)
- [10] 大野, 田村, 森, 中島: 生産管理システム, 朝倉書店 (2002)
- [11] R. N. Curnow and C. W. Dunnett: The numerical evaluation of certain multivariate normal integrals; *Ann. Math. Statist.*, Vol. 33, pp. 571-579 (1962)
- [12] S. S. Gupta :Probability integrals of multivariate normal and multivariate t; *Ann. Math. Statist.*, Vol. 34, pp. 792-828 (1963)
- [13] 伏見: 乱数, UP 応用数学選書 12, 東京大学出版会 (1994)
- [14] Y. L. Tong : *The Multivariate Normal Distribution*, Springer-Verlag (1990)
- [15] 川崎, 竹本, 上野, 有蘭: 限定された需要情報のもとの多期間生産計画に関する一考察; システム制御情報学会論文誌, Vol. 22, No. 11, pp. 396-398 (2009)

著者略歴

上野 信行 (正会員)



1948年12月28日生。1974年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月住友金属工業(株)に入社, 中央技術研究所, 本社情報化推進室, 和歌山システム部勤務。2001年4月広島県立大学経営学部経営情報学科教授, 2004年県立広島大学経営情報学部経営情報学科教授となり, 現在に至る。経営・生産分野へのオペレーションズ・リサーチ, サプライチェーンマネジメント, 生産情報システムの研究に従事。博士(工学), 1976年計測自動制御学会論文賞, 1991年日本オペレーションズ・リサーチ学会事例研究奨励賞, 1993年日本経営工学会日本マネジメント・ソフトウェア賞, 2006年スケジュールリング学会賞(技術賞)受賞。日本オペレーションズ・リサーチ学会, スケジュールリング学会, 日本経営システム学会, 経営情報学会などの各会員。日本オペレーションズ・リサーチ学会フェロー。

角本 清孝 (学生会員)



1986年5月30日生。2010年県立広島大学経営情報学部経営情報学科卒業, 同年4月県立広島大学大学院総合学術研究科修士課程入学, 現在に至る。生産管理, 経営情報システムの研究に従事。

奥原 浩之 (正会員)



1968年9月7日生。1991年岡山大学工学部情報工学科卒業, 1993年広島大学大学院工学研究科博士課程前期システム工学専攻修了, 1996年広島大学大学院工学研究科博士課程後期システム工学専攻修了。同年4月広島大学工学部第二類(電気系)助手, 1998年広島県立大学経営学部経営情報学科講師, 助教授を経て, 2006年大阪大学大学院情報科学研究科情報数理学専攻助教授, 准教授となり, 現在に至る。その間, 2006年大阪大学金融保険教育センター准教授兼任, 2007年台湾国立成功大学客員准教授。ソフトコンピューティング技術の理論と応用に関する研究に従事。博士(工学)。2006年スケジュールリング学会技術賞受賞。電子情報通信学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 日本知能情報ファジィ学会, 日本経営システム学会などの会員。