Journal of the Faculty of Management and Information Systems,
Prefectural University of Hiroshima
2011 No.3 pp. 195 － 213

論　文

内示情報を用いた生産計画ソフトウェア MCPS

上 野 信 行・角 本 清 孝・奥 原 浩 之

Configuration of Mass Customization Production Planning & Management System with Advance Demand Information (MCPS)

Nobuyuki UENO, Kiyotaka KADOMOTO and Koji OKUHARA

要　約

最近の生産現場では，需要の不確実性の増大や納入リードタイムの短縮化，製品仕様の多様化が進んでいる。これらのマスカスタマイゼーション環境に対応した生産方式の確立が重要である。

この問題に対しては，不確実な需要に対し，「確率制約と線形の生産制約を満足し，製造コストと在庫コストの合計の期待値を最小化する生産計画を求める非線形確率計画問題」として定式化されている。そして，この問題に対して，MCPS（Mass Customization Production Planning & Management System with Advance Demand Information）という効率的な解法が開発されている。

本論文では，この解法を用いて生産計画を立案する「内示情報を用いた生産計画ソフトウェア（MCPS ソフトウェアという）」を紹介する。本ソフトウェアが解いている問題の記述と定式化，そしてその解法の手順を述べるとともに，その操作法を説明する。また，数値計算により精度を検証する。最後に，ケーススタディを示す。

Abstract

It’s is necessary to establish a new production system under uncertain customer demand, short lead-time and various items. In this paper, we explain a software which outputs the optimized production plan based on unfilled-order-rate and costs. And the formulation using advance demand information, solving procedure, operation instruction and the interface of this system are described. The accuracy of numerical computation is verified. Finally, an example is shown.

1．はじめに

最近の生産現場では，需要の不確実性の増大や納入リードタイムの短縮化，製品仕様の多様化

が進んでいる。この状況に対応するためにマスカスタマイゼーション［1, 2］に対応した生産方式の確立が重要である。

この問題に対しては，確率制約と線形の生産制約を満足し，製造コストと在庫コストの合計の期待値を最小化する生産計画を求める非線形確率計画問題として定式化され，MCPS（Mass Customization Production Planning & Management System）という効率的な解法が開発されている［3］。

本論文では，この解法を用いて生産計画を立案する「内示情報を用いた生産計画ソフトウェア（MCPS ソフトウェアという）」を紹介する。まず，本問題の記述と定式化を説明する。次に MCPS ソフトウェアの構成と機能，出力内容，そして操作方法を詳述する。また，MCPS ソフトウェアの計算値と文献で示された計算値を比較し，ソフトウェアの計算精度を確認する。最後に，MCPS ソフトウェアを使用して，生産計画を求めた数値例を示す。

2．マスカスタマイゼーション対応生産計画問題

ここでは，マスカスタマイゼーション対応生産計画問題について述べる。これは需要量の分布が正規分布である場合に対応したものであり，基本のモデルといえる。

2．1　未達率推定式の導出

計画期間中に納入未達が起こる比率を未達率という。ここでは未達率 SO_n（Stock Out ratio in n periods）の定義を述べ，未達率推定式を導出する［4-7］。

［記号］

i　：期（ただし $i \leq n$）

d_i　：第 i 期の需要量（納入指示）

$\overline{d}_i$　：第 i 期の平均値（内示）

x_i　：第 i 期の生産量

S_i　：第 i 期の在庫量。また，初期在庫量は S_0 とする。

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　：第 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

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

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

$$S_i = S_0 + \sum_{t=1}^{i} x_t - \sum_{t=1}^{i} d_t \tag{1}$$

であるから，

$$E\left[S_i\right] = S_0 + \sum_{t=1}^{i} x_t - \sum_{t=1}^{i} \overline{d}_t \overset{\Delta}{=} m_i \tag{2}$$

$$V\left[S_i\right] = E\left[\left\{S_i - E(S_i)\right\}^2\right] = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \cdots + \omega_n^2 \overset{\Delta}{=} \sigma_i^2 \tag{3}$$

$$Cov\left[S_i, S_j\right] = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \cdots + \omega_i^2 \quad \left(\forall j > i\right) \tag{4}$$

となる。(3)(4) 式から，分散共分散行列 Σ は，下記のように構成される。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \omega_1^2 & & \cdots & \omega_1^2 \\ \omega_1^2 & \omega_1^2+\omega_2^2 & & \cdots & \omega_1^2+\omega_2^2 \\ & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_i^2 & \ldots & \omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_i^2 \\ & & \vdots & \ddots & \\ \omega_1^2 & \omega_1^2+\omega_2^2 & \omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_i^2 & \cdots & \omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_n^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

また，

$$\rho_{ij} = Cov\left[S_i, S_j\right] / \sqrt{V\left[S_i\right]V\left[S_j\right]} = \sqrt{\sum_{t=1}^{i}\omega_t^2} \Big/ \sqrt{\sum_{t=1}^{j}\omega_t^2} = \gamma_i \big/ \gamma_j \tag{6}$$

ただし，

$$\gamma_i = \sqrt{\sum_{t=1}^{i}\omega_t^2} \tag{7}$$

である。相関行列の上半分を示すと下記のようになる。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2}} & \dfrac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2+\omega_3^2}} & \cdots & \dfrac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_n^2}} \\ & 1 & \dfrac{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2}}{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2+\omega_3^2}} & \cdots & \dfrac{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2}}{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_n^2}} \\ & & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & 1 & \dfrac{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_{n-1}^2}}{\sqrt{\omega_1^2+\omega_2^2+\cdots+\omega_n^2}} \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \overset{\Delta}{=} \left\{\rho_{ij}\right\} \tag{8}$$

2．2　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，$S = \left[S_1, S_2, S_3 \cdots\cdots S_n\right]$，$m = \left[m_1, m_2, m_3 \cdots\cdots m_n\right]$ と表現すると，(8) 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。

$$\begin{aligned} SO_n &\overset{\Delta}{=} 1 - \Pr ob\{S \mid \bigcap_{i=1}^{n}[S_i \geq 0, i = 1, 2, \cdots n]\} \\ &= 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty f(S; m, \Sigma) dS \end{aligned} \tag{9}$$

ここで，

$$f\left(S; m, \Sigma\right) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\right)^n \sqrt{|\Sigma|}} \exp^{-\frac{1}{2}\left[S-m\right]^T \Sigma^{-1} \left[S-m\right]} \tag{10}$$

である。

2．2．1 未達率指標 $SO_n(0)$

$SO_n(0)$ は「計画期間の各期の在庫量 $S_i, i=1,\cdots,n$ は，互いに独立である」と仮定した場合の未達率指標であり，

$$SO_n(0) = 1 - \prod_{i=1}^{n} \int_0^\infty f(S_i; m_i, \sigma_i^2) dS_i \tag{11}$$

となる。この数値計算は，1次元の正規確率分布計算を扱う。

2．2．2 未達率指標 SO_n

SO_n は「計画期間の各期の在庫量 $S_i, i=1,\cdots,n$ は，互いに相関がある」とした場合の指標である。R の要素が (6) 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 $\gamma_i, (i=1,\cdots,n)$ 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まることが知られている［4］。5期間の未達率 SO_5 を (12) 式に示す。

$$SO_n$$
$$= 1 - \int_{-\infty}^{h_2} F\left(\frac{h_1 - \gamma_1 y/\gamma_2}{\left(1-\gamma_1{}^2/\gamma_2{}^2\right)^{1/2}}\right)\left[\int_{-\infty}^{h_4'} F\left(\frac{h_3' - \gamma_3' z/\gamma_4'}{\left(1-\gamma_3'^2/\gamma_4'^2\right)^{1/2}}\right) F\left(\frac{h_5' - \gamma_4' z/\gamma_5'}{\left(1-\gamma_4'^2/\gamma_5'^2\right)^{1/2}}\right) f(z)dz\right] f(y)dy \tag{12}$$

ここで，$h_i = m_i/\sigma_i$, $h_i' = (h_i - \rho_{2i} y)/\left(1-\rho_{2i}{}^2\right)^{1/2}$, $\gamma_i' = (\gamma_i{}^2 - \gamma_2{}^2)^2$, $i = 1,2,\cdots 5$ である。

また SO_n の数値計算においては，モンテカルロ法［8］も参考値として併用した。

2．2．3 未達率指標 $SO_n(\rho_{\min})$

$SO_n(\rho_{\min})$ は「計画期間の各期の在庫量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」と仮定した場合の未達率指標である。

$$\rho_{\min} = \min_{i,j}(\rho_{ij}) , \forall i < j \tag{13}$$

として，新しく相関行列をその対角要素を除いて，

$$R_{\min} = \{\rho_{\min}\} \tag{14}$$

とおく。

$$SO_n(\rho_{\min}) \overset{\Delta}{=} 1 - \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty f\left(S; m, R_{\min}\right) dS$$
$$= 1 - \int_{-\infty}^\infty \prod_{i=1}^n \left[1 - \Phi\left(\frac{-m_i/\sigma_i + \sqrt{\rho_{\min}}\, z}{\sqrt{1-\rho_{\min}}}\right)\right] \phi(z)\, dz \tag{15}$$

のように，1重の数値積分で計算可能である［9］。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，正規分布 $N(0,1)$ の確率密度関数と分布関数である。

2. 3　生産計画の定式化・解法

未達率制約および生産制約のもとで，コストの期待値を最小化する確率計画問題として定式化した。

【定式化 1】

$$minimize \quad E(\sum_{i=1}^{n} p_i x_i + \sum_{i=1}^{n} h_i x_i) \tag{16}$$

$$s.t. \quad S_0 + \sum_{t=1}^{i} x_t - \sum_{t=1}^{i} \overline{d_t} \geq 0(\forall_i \leq n) \tag{17}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = r \tag{18}$$

$$SO_n \leq \beta \tag{19}$$

$$(x_1, x_2, \cdots, x_n) \in R \tag{20}$$

$$x_i \geq 0(\forall_i \leq n) \tag{21}$$

本問題は，サプライヤの製品（部品）個々に解くものとして， 1 品種問題である。ここで (16) 式は，期別の生産量 x_i を変数として，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あらわしており，(17) 式は，内示以下の需要の範囲では，在庫は，各期とも非負であることをあらわし，(18) 式は，合計生産量制約，(19) 式は，計画目標未達率制約，(20)(21) 式は，一般的な生産制約をあらわしている。また，(16) 式を展開すると，次のようになる。

【定式化 2】

$$minimize \quad h\sum_{i=1}^{n} (n-i+1)x_i \tag{22}$$

$$s.t. \quad S_0 + \sum_{t=1}^{i} x_t - \sum_{t=1}^{i} \overline{d_t} \geq 0(\forall_i \leq n) \tag{23}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = r \tag{24}$$

$$SO_n \leq \beta \tag{25}$$

$$(x_1, x_2, \cdots, x_n) \in R \tag{26}$$

$$x_i \geq 0(\forall_i \leq n) \tag{27}$$

ここで，リラクゼーション（relaxation）戦略を用いる。(25) 式を除いた問題を P 問題とする。

【P 問題】

$$minimize \quad h\sum_{i=1}^{n} (n-i+1)x_i \tag{28}$$

$$s.t. \quad S_0 + \sum_{t=1}^{i} x_t - \sum_{t=1}^{i} \overline{d_t} \geq 0(\forall_i \leq n) \tag{29}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = r \tag{30}$$

$$(x_1, x_2, \cdots, x_n) \in R \tag{31}$$

$$x_i \geq 0(\forall_i \leq n) \tag{32}$$

P 問題の最適解を $(x_1^o, x_2^o, \cdots, x_n^o)$ としたときに，$(x_1^o, x_2^o, \cdots, x_n^o)$ が，(25) 式を満たしていれば，$(x_1^o, x_2^o, \cdots, x_n^o)$ は，全体の最適解となる。(25) 式を満たさなければ，「特定の期 i^o の未達率がある目

標 β_{i^o} 以下になることを保証された MP 問題」を構成する。

【MP 問題】

$$minimize \quad h\sum_{i=1}^{n}(n-i+1)x_i \tag{33}$$

$$s.t. \quad S_0+\sum_{t=1}^{i}x_t-\sum_{t=1}^{i}\overline{d_t}\geq 0\ (\forall_i \leq n) \tag{34}$$

$$S_0+\sum_{t=1}^{i}x_t-\sum_{t=1}^{i}\overline{d_t}\geq K_i(\forall_i \leq B) \tag{35}$$

$$\sum_{i=1}^{n}x_i=r \tag{36}$$

$$(x_1,x_2,\cdots,x_n)\in R \tag{37}$$

$$x_i\geq 0(\forall_i \leq n) \tag{38}$$

MP 問題は，P 問題にくらべて，(35) を追加している。

MP 問題の (35) 式における K_i と集合 B について述べる。第 i 期の平均，分散は，(3) 式であらわされることから，「第 i 期の在庫量 S_i が未達率 β_i 以下である」ように，

$$\beta_i=\int_{-\infty}^{y}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i}e^{-\frac{(S_i-m_i)^2}{2\sigma_i^2}}dS_i \tag{39}$$

$$K_i=m_i-y_i \tag{40}$$

となる y_i，K_i を求め，未達率 β_i 以下となるためには，（在庫量 S_i の期待値）$\geq K_i$ を満足すればいい。

また，「SO_n は x_i に関して，単調減少である」ことから，(39) 式の未達率 β_i を生産量 x_i を介して，適宜に（減少するように）設定することにより，結果として SO_n は減少する。

一方，期のインデックスの集合を T，計画目標未達率が β_i 以下となる期のインデックスの集合を B とする。

計画目標未達率 β の各期の計画目標未達率 β_i を，

$$\beta_i=1-\sqrt[n]{1-\beta}$$

とし，MP 問題を解いたときの未達率を $\beta_i^{(0)}$ とする。

各期の計画目標未達率 $\beta_i^{(1)}$ と $i^{(1)}$ を，

$$\beta_i^{(1)}=\beta_i^{(0)}-\mathrm{sgn}(\beta_i^{(0)}-\beta_i)\times\frac{\left|\beta_i^{(0)}-\beta_i\right|}{INC} \tag{41}$$

$$i^{(1)}=\max_{i\leq n}(\beta_i^{(1)}) \tag{42}$$

と決め，$B=\{i^{(1)}\}$ とする。

$\beta_i^{(1)}$ に対して，(39)(40) 式から，

$$\beta_i^{(1)}=\int_{-\infty}^{y_i^{(1)}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i}e^{-\frac{(S_i-m_i)^2}{2\sigma_i^2}}dS_i \tag{43}$$

$$K_i^{(1)}=m_i-y_i^{(1)} \tag{44}$$

となる $K_i^{(1)}$，$i^{(1)} \in B$ を (35) 式に当てはめると，「第 $i^{(1)}$ 期の在庫量 S_i が，計画目標未達率 $\beta_i^{(1)}$ 以下となる」MP 問題を構成できる。

なお，(41) 式の期別計画目標未達率 β_{ij} の更新について，未達率更新幅設定パラメータ INC を導入する。以下，$INC = 4$ と設定している。

P 問題は，線形計画問題になることから，提案した解法は，もともとの確率計画問題を直接扱わず，その部分問題としての線形計画問題を逐次に解くことにより解を得ようとするものであり，効率的であるとともに，システム開発が容易である。また，各イテレーションで未達率とコストの代替性の比較ができることから，意思決定の判断材料が整っている点においても実際的である。

以下に，解法の手順を示す。

ステップ 1

$l = 1, T = \{1,2,\cdots,n\}, B = \{\}, \varepsilon = 0.0001$ とおく。

$$\beta_i = 1 - \sqrt[n]{1-\beta}\,(\forall_i \le n) \tag{45}$$

ステップ 2

P 問題（線形計画問題）を解く。MP 問題の最適解 $(x_1^o, x_2^o, \cdots, x_n^o)$，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　$\beta^{(l)} \le \beta$ の場合は，$(x_1^o, x_2^o, \cdots, x_n^o)$ は全体最適解である。（終了）

ⅱ　$\beta^{(l)} > \beta$ の場合は，

$$\beta_i^{(l+1)} = \beta_i^{(l)} - \mathrm{sgn}(\beta_i^{(l)} - \beta_i) \times \frac{\left|\beta_i^{(l)} - \beta_i\right|}{INC} \tag{46}$$

インデックス $i^{(l+1)}$ は，

$$i^{(l+1)} = \max_{i \le n}(\beta_i^{(l+1)}) \tag{47}$$

として，

$$\{B\} = \{B\} \oplus \{i^{(l+1)}\}, \{T\} = \{T\} - \{i^{(l+1)}\} \tag{48}$$

とする。

$$\beta_i^{(l+1)} = \int_{-\infty}^{y_i^{(l+1)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(S_i - m_i)^2}{2\sigma_i^2}} dS_i \tag{49}$$

$$K_i^{(l+1)} = m_i - y_i^{(l+1)} \tag{50}$$

となる $K_i^{(l+1)}$ および B を用いて，MP 問題（(33) ～ (38) 式）を構成する。

ステップ 4

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

$$\left|\beta^{(l+1)} - \beta^{(l)}\right| < \varepsilon \tag{51}$$

なら終了する。

ステップ 5

ⅰ　$\beta^{(l+1)} \leq \bar{\beta}$ の場合は，$(x_1^o, x_2^o, \cdots, x_n^o)$ は全体最適解である。

ⅱ　$\beta^{(l+1)} > \bar{\beta}$ の場合は，$l = l + 1$ として，ステップ 3 ⅱへいく。

プログラムの一連の流れを図 1 に示す。

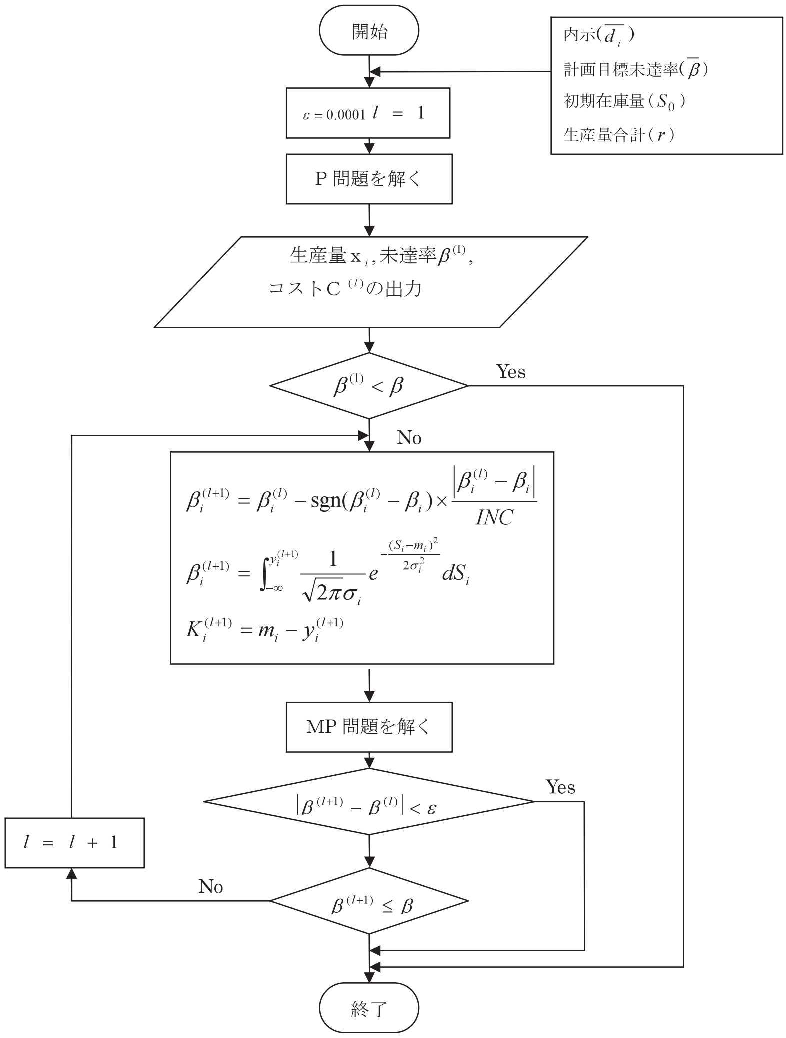

図 1　プログラム一連の流れ

3．MCPS ソフトウェア

MCPS ソフトウェアとは，「確率制約と線形の生産制約を満足し，製造コストと在庫コストの合計の期待値を最小化する生産計画を求めるソフトウェア」である。このソフトウェアはいくつかのモジュールによって構成されている。本章では，このソフトウェアの構成と操作法について説明を行う。

3．1　MCPS ソフトウェアの構成

MCPS ソフトウェアは 5 つのモジュールから構成されている。このソフトウェアのモジュールの構成を表 1 にまとめる。

表 1　実装しているモジュール

モジュール名	使用ソフト	説　　明
生産計画前提入力	Excel シート	生産計画立案に必要な情報（各期の内示やばらつき，生産合計数や計画目標未達率）の入力を行う。
未達率指標選択	入力画面	ばらつきと未達率指標の選択を行う。
生産計画結果出力	Excel シート	プログラムを実行した結果を出力する。
生産計画計算①	Excel シート	MCPS を作動させるために必要な計算式を保存する。
生産計画計算②	VBA	未達率計算や β の値を計算する。

以下に，各モジュールを説明する。

3．2　生産計画前提入力

本システムを稼働させるためには，Excel シート「生産計画前提入力用」にいくつかの前提条件の入力を行わなくてはならない。ここでは，入力項目を説明する（図 2）。

① 初期在庫量を入力する。
② 各期の需要量を入力する。
③ 各期のばらつきを入力する。
④ ばらつき係数を入力する。
⑤ 生産量合計を入力する。（購買型 MCPS では不要）
⑥ 計画目標未達率（ β ）を入力する。
⑦ ①～⑥の入力を確認した後で，「起動」ボタンを押す。

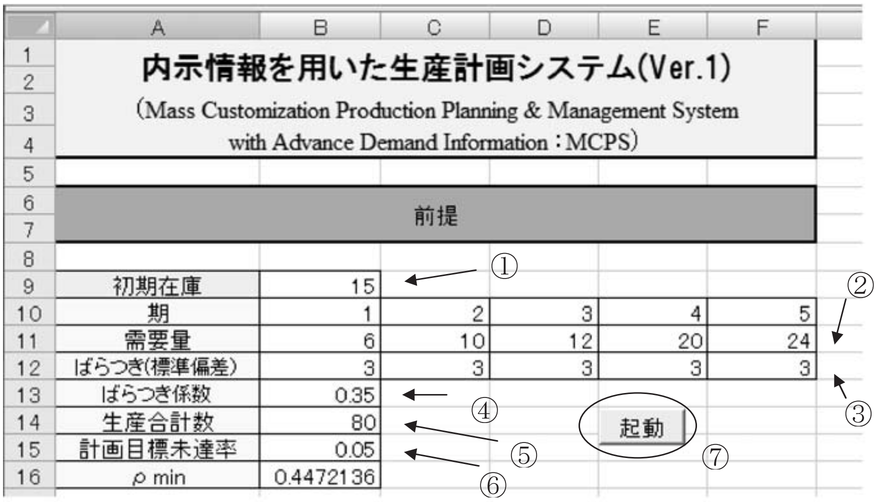

図 2　「生産計画前提入力用」画面

3．3　未達率指標選択

3．3．1　未達率指標選択の操作法

MCPS で計算を行う際には，使用する「ばらつき」と「未達率指標」を決定しなくてはならない。この作業はソフトウェア「未達率指標選択」で行うことになる（図3参照）。この画面において使用するばらつきと未達率指標を選択する。その方法は下記のとおりである。

①　「ばらつき選択」のラジオボタンのどちらかを選択後，「計算」ボタンを押す。

②　①の作業が終了後，使用する「未達率指標選択」のラジオボタンを選択し，「計算」ボタンを押す。

3．3．2　ばらつき

ばらつきの指定は以下の2つの方法を採用している。

(a)　ばらつき係数 : 標準偏差として「生産計画前提入力」の「需要量」にばらつき係数を乗算した値を取得する。

(b)　ばらつき（標準偏差）: 標準偏差として「生産計画前提入力」の「ばらつき（標準偏差）」で入力された値を取得する。

3．3．3　未達率指標

未達率指標は次の3つの方法を採用している［4]。

(a)　$SO_n(0)$: 各期在庫量が互いに独立であると仮定した場合の未達率指標

(b)　$SO_n(\rho_{\min})$: 厳密な未達率指標により近い上界値を与える未達率指標。(a)(b) の中間

(c)　SO_n : 各期の在庫量は互いに相関があるとした場合の未達率指標

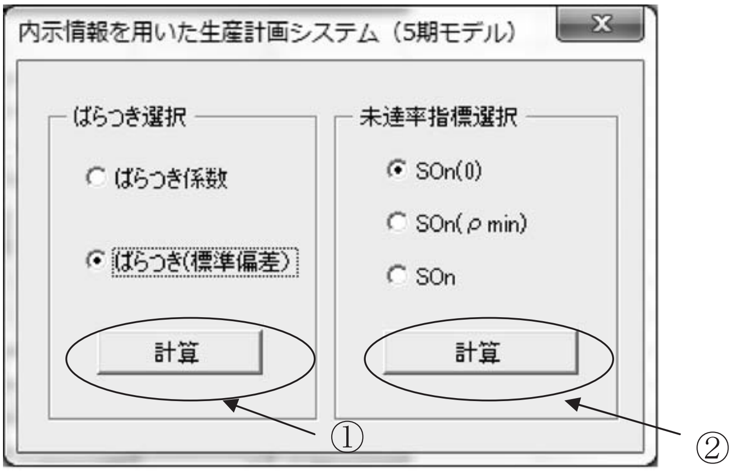

図3　ウィンドウ「未達率指標選択」

3．4　生産計画結果出力

本ソフトウェアの実行した結果は Excel シート「生産計画結果出力用」に出力される。この出力される内容を説明する（図4参照）。

① 前提条件を表示する。
② 計算で求まった生産計画の結果を出力する。
③ ばらつきに関する情報を出力する。
④ 期別未達率と達成率及び，未達率を表示する。また， 5 期の未達率は期間全体の未達率を表す。
⑤ 在庫コスト及び，累計在庫コストを表示する。

	生産計画出力（詳細）					
①	初期在庫	15	0.35			
	期	1	2	3	4	5
	需要量	5	25	18	12	12
②	生産量	0	24.01988	20.02717	13.95532	21.99763
	在庫量	10	9.019878	11.04705	13.00237	23
③	ωi	3	3	3	3	3
	ωi^2	9	9	9	9	9
	σ^2	9	18	27	36	45
	σ	3	4.242641	5.196152	6	6.708204
④	期別未達率	0.0004291	0.016751	0.016751	0.015115	0.000303
	期別達成率	0.9995709	0.983249	0.983249	0.984885	0.999697
	Π (1 − Mi)	0.9995709	0.982827	0.966363	0.951756	0.951468
	SOn(0)	0.0004291	0.017173	0.033637	0.048244	0.048532
⑤	在庫コスト	10	9.019878	11.04705	13.00237	23
	累計在庫コスト	10	19.01988	30.06693	43.06929	66.06929

図 4　Excel シート「計算結果出力用」画面

3. 5　生産計画計算用①

生産計画計算用①の画面例を図 5 に示す。生産計画が求められたあと，在庫コスト，累計在庫コスト，そして $SO_n(0)$ の計算が必要となる。これらの計算は，プログラムを組まずに，セルで計算を行う。この理由は，ユーザ指向のためである。すなわち，生産計画用画面は，使用者やタイミングによってチェックする項目が変化する。これに柔軟に対応するためにユーザが自由に追加，修正を可能にすることが望ましいと考えられる。

セル上の計算内容と記述例を表 2 に示す。また，表 2 の記述例は全て 3 列目（C 列）を採用している。

	A	B	C	D	E	F
1	初期在庫	15	0.35			
2	期	1	2	3	4	5
3	需要	10	20	24	6	12
4	生産量	1.740767	22.70839	26.12365	7.917268	21.50993
5	在庫量	6.740767	9.449153	11.5728	13.49007	23
6	ωi	3	3	3	3	3
7	ωi^2	9	9	9	9	9
8	σ^2	9	18	27	36	45
9	σ	3	4.242641	5.196152	6	6.708204
10	未達率	0.012322	0.012967	0.012967	0.012277	0.000303
11	si>0	0.987678	0.987033	0.987033	0.987723	0.999697
12	n期間＞0	0.987678	0.97487	0.962228	0.950415	0.950127
13	n期間未達	0.012322	0.02513	0.037772	0.049585	0.049873
14	在庫コスト	6.740767	9.449153	11.5728	13.49007	23
15	累計在庫	6.740767	16.18992	27.76272	41.25279	64.25279
16	βi	0.010206	0.010206	0.010206	0.010206	0.010206
17	βi(I)	0.011793	0.012277	0.012277	0.011759	0.002779
18	y	−0.05061	−0.08977	−0.10994	−0.09935	4.39964

図 5　MCPS　Excel シート「生産計画計算用」画面（一部）

表 2　記述内容（C 列の場合）

行数	記　述　例	式
9	＝ POWER(C8,0.5)	(3)式
10	＝ NORMDIST(0,C5,C9,TRUE)	(10)式
11	＝ 1 － B11	(11)式
12	＝ B12*C11	(11)式
13	＝ 1 － C12	(11)式
14	＝ C5	(1)式
15	＝ B15 ＋ C14	(1)式
16	＝ 1 － POWER(1 －生産前提入力用 !$B$15,1/5)	(45)式
17	＝ ROUNDDOWN(C10 － SIGN(C10 － C16)∗ABS(C10 － C16)/$O$3,7)	(46)式
18	＝ NORMINV(C17,C5,C9)	(49)式

3. 6　生産計画計算用②

本システムでは，Excel シート上から必要な変数を取得し，計算を行う機能を VBA（Visual Basic for Applications）で作成している。このソフトウェアのモジュールは以下の 7 つである。

① Userform :「ばらつき」と「未達率指標」を選択する。

② LP : 目的関数と制約式の設定を行い，「P 問題」の計算を行う。

③ sentaku : 生産量（購買量）を変化させる期を決定する。

④ MP :「MP 問題」の計算により生産量（購買量）の変化量を決定し，終了条件を確認する。

⑤ ρ min : シンプソンの公式を用いて 1 重の積分を行い，$SO_n(\rho_{\min})$ の値を計算する。

⑥　SOn：シンプソンの公式を用いて，SO_n の値を計算する。
⑦　La_k：計算した結果を Excel シート「計算用」に出力する。

また，ここに記述したモジュールの関係を図 6 に記述する。

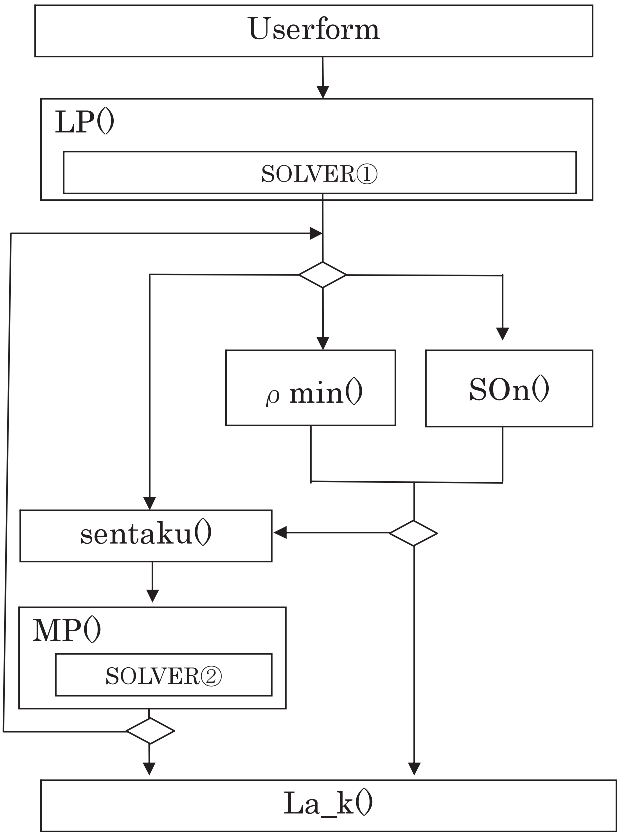

図 6　MCPS ソフトウェアのモジュールの構成

以下に，各モジュールを説明する。

3．6．1　モジュール「LP()」

ここでは，(28) 式～ (32) 式に記述している「P 問題」をソルバーを用いて解き，未達率指標選択の際に設定した指標が $SO_n(0)$ なら，sentaku（）に，$SO_n(\rho_{\min})$ ならρ min に，そして，SO_n なら SOn を実行させる。

また，このモジュールは VBA でソルバーを実行させる 2 つの機能がある。ここではそれら機能について説明を行う。

a．目的関数の設定

あらかじめ，セルに (28) 式を記述しておき，そのセルに記述した内容をソルバーを使って最小にする。Excel のソルバーモデルを VBA を用いて記述する場合は，Solverok 関数を使用する。

Solverok setcell:= Cells(24,1),maxminval:=2,valueof:="0"_,
bychange:=Range(Cells(4,2),Cells(4,6))

この関数は下記の 3 つの変数に値を与えることになる。
・SetCell：目的セルを指定する変数である。これは，(28) 式を記述したセルを指定する。
・MaxMinVal：特定の数値を与えることで，目的セルの値を最大値にするか，最小値にするか，もしくは，特定値にするかを決める変数。数値とその意味は表 3 に示す。ここで，目標セルを特定地にする場合には，変数 ValueOf を使い，指定する。今回は使用しないので，0 とする。

表 3　MaxMinVal の値と意味

数値	関係
1	最大値
2	最小値
3	特定値

・ByChange：変化させるセルの範囲を指定する。今回は，生産量セルを指定する。

b．制約条件の設定
「P 問題」の制約条件（(29) 式～ (32) 式）は Solveradd 関数を使用する。

SolverAdd cellref:=Cells(24,1), relation:=3,formulatext:=Cells(26.2)

Solveradd 関数は，以下の 3 つの変数に値を与える必要がある。
・Cellref：制約式の左辺の値を示す。
・Relation：制約式が使用する符号を数値で設定を行う。ここには，数値が入る。その数値の意味を表 4 に表す。

表 4　Relation の値と符号

数値	関係
1	≦
2	＝
3	≧

・Formulatext：制約式の右辺を表す。

3．6．2　モジュール「sentaku()」
ここでは，「MP 問題」での (46)(47) 式の i の値を決定している。

3．6．3　モジュール「MP()」
ここでは，「MP 問題」を解き，(50) 式を用いて未達率の改善を行う。制約条件の変更をする際

には Solverchange 関数を使用する。この関数は，Solveradd 関数と同様の構造をする。

Solverchange cellref:=Cells(), relation:=3,formulatext:=Cells(26.2)

3．6．4　モジュール「ρ min()」

(15) 式にもとづいた積分計算を行い，未達率 $SO_n(\rho_{\min})$ を計算する。

3．6．5　モジュール「SOn()」

(12) 式にもとづいた積分計算を行い，未達率 SO_n を計算する。

3．6．6　モジュール「La_k()」

計算結果を Excel シート「生産計画結果出力用」に記載する。

4．未達率指標計算モジュールの検証

$SO_n(\rho_{\min})$ および SO_n の値を計算する際には積分計算を行うことになる。ここでは，数値計算精度の検証を行う。

本ソフトウェアは，(12) 式に表わされる積分計算をシンプソンの公式を使用して行っている。

シンプソンの公式を以下に示す。

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3}\left[f(x_0) + 2\sum_{j=1}^{(n/2)-1} f(x_{2j}) + 4\sum_{j=1}^{n/2} f(x_{2j-1}) + f(x_n) \right] \tag{52}$$

ここで，x_i は x のサンプル点である。

4．1　未達率指標 $SO_n(\rho_{\min})$ の計算結果の検証

シンプソンの公式を使用して，実際に行った $SO_n(\rho_{\min})$ の計算結果と Tong［9］の計算結果と比較する。

Tong は，n 次元確率分布計算について相関行列が同一で，ρ であると表現され，かつ X_i の上限値 a が与えられたときの確率計算値（γ）を数表として示している。すなわち，下記に示される計算を行っている。

$$P\left[\bigcap_{i=1}^{n} \{X_i \le a\}\right] = \gamma \tag{53}$$

ここでは $a = 0$ とし，その他の変数 n, ρ を変えた場合で両者の比較を行った。その結果を表 5 に示す。(53) 式は，$1 - SO_n(\rho_{\min})$ と一致するはずであり，これと γ を比較している。

表 5　$SO_n(\rho_{min})$ 計算結果と Tong の解

ρ	指　標	n			
		2	3	4	5
0	$1-SO_n(\rho_{min})$	0.25000	0.12500	0.06250	0.03125
	γ	0.25000	0.12500	0.06250	0.03125
0.1	$1-SO_n(\rho_{min})$	0.26594	0.14891	0.08709	0.05286
	γ	0.26594	0.14891	0.08709	0.05286
0.2	$1-SO_n(\rho_{min})$	0.28205	0.17307	0.11301	0.07741
	γ	0.28205	0.17307	0.11301	0.07741
0.5	$1-SO_n(\rho_{min})$	0.33333	0.25000	0.20000	0.16667
	γ	0.33333	0.25000	0.20000	0.16667
0.7	$1-SO_n(\rho_{min})$	0.37341	0.31011	0.27069	0.24319
	γ	0.37341	0.31011	0.27069	0.24319
0.9	$1-SO_n(\rho_{min})$	0.42822	0.39233	0.36931	0.35274
	γ	0.42822	0.39233	0.36931	0.35274

この数値計算結果により，「$1-SO_n(\rho_{min})$」と γ は下 5 桁までの範囲で一致することがわかった。

4. 2　未達率指標 SO_n の計算結果の検証

SO_n の精度を確認する。5 次元確率分布計算であるので，モンテカルロ法［8］による計算との比較を行った。モンテカルロ法の精度は使用する乱数によって大きく影響を受けるので，ここでは一応参考値と考えている。この結果を表 6 に示す。

表 6　SO_n とモンテカルロの比較

ケース	内　　示	未　達　率	
		SO_n	モンテカルロ
1	［11,9,14,17,16］	5.0%	4.9%
2	［5,12,12,19,23］	5.0%	4.9%
3	［15,10,6,19,23］	5.0%	4.7%
4	［11,9,14,17,16］	5.0%	4.9%
5	［5,12,12,19,23］	5.0%	4.7%
6	［15,10,6,19,23］	5.0%	5.1%
7	［11,9,14,17,16］	5.0%	4.6%
8	［5,12,12,19,23］	5.0%	4.7%
9	［15,10,6,19,23］	5.0%	5.1%
10	［10,10,10,10,10］	5.0%	4.8%

（Microsoft Excel 2003　使用）

表 6 より，2 つの計算値は，「大きく異なることはなく，ほぼ同じである」ことが確認された。

5．MCPS の数値例

ここでは，本ソフトウェアの実行結果例を示す。

5．1　前提条件

初期在庫量 $S_0 = 15$，コストはそれぞれ $p_i = p = 1$，$h_i = h = 1(i = 1,\cdots,5)$，合計生産量制約 $r = 80$ とする。単位当たりの在庫コストについては，例えば，2 期間の在庫コストが 1 期間の在庫コストの 2 倍であることが分かればいいので，$h = 1$ 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）が期に依存せず一定（$p_i = p\,(i = 1,\cdots,5)$）の場合には，計画の結果は，未達率制約式を満足する最小必要な生産量を決めることになるので，p の値に影響されないので，$p = 1$ と基準化している。また，計画目標未達率は $\beta = 0.05$，各期の需要のばらつきは標準偏差を使用し，$\omega = 3$，内示は表 7 に示す。

表 7　内示

i	1	2	3	4	5
$\bar{d}$	10	20	24	6	12

5．2　実行結果

実行結果を表 8 に示す。

表 8　MCPS 実行結果

生産計画出力（詳細）					
初期在庫量	15				
期	1	2	3	4	5
需要量	10	20	24	6	12
生産量	1.7407666	22.70839	26.12365	7.917268	21.50993
在庫量	6.7407666	9.449153	11.5728	13.49007	23
ωi	3	3	3	3	3
ωi^2	9	9	9	9	9
σ^2	9	18	27	36	45
σ	3	4.242641	5.196152	6	6.708204
期別未達率	0.0123225	0.012967	0.012967	0.012277	0.000303
期別達成率	0.9876775	0.987033	0.987033	0.987723	0.999697
Π (1 − Mi)	0.9876775	0.97487	0.962228	0.950415	0.950127
SOn(0)	0.0123225	0.02513	0.037772	0.049585	0.049873
在庫コスト	6.7407666	9.449153	11.5728	13.49007	23
累計在庫コスト	6.7407666	16.18992	27.76272	41.25279	64.25279

表 8 より，5 期の $SO_n(0)$ の値が，計画目標未達率（$\beta = 0.05$）以下になっていることが分か

る。また，各期の生産量が求められている。

5．おわりに

本論文では，

（ⅰ）　Microsoft Excel を使用した MCPS ソフトウェアの構成，機能を詳述した。

（ⅱ）　MCPS ソフトウェアの操作法と出力内容を詳述した。

（ⅲ）　未達率指標の性能確認を行った。

(a)　5 期間を対象に，$SO_n(\rho_{\min})$ と Tong が示した γ の数値計算値を比較した。今回のケーススタディの範囲では，下 5 桁までの範囲で一致することがわかった。

(b)　5 期間を対象に，SO_n とモンテカルロ法による未達率値を比較し一応参考値ではあるとしても，ほぼ同一の値になることがわかった。

（ⅳ）　実際の内示を用いて，本 MCPS ソフトウェアにより，未達率制約を満足した実行結果が得られた。

今後は，MCPS の適用範囲を広げていく。

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］上野信行，川﨑雅也，奥原浩之：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誌，Vol.23, No.7, pp.147-156 (2010)

［4］上野信行，古田恭三，奥原浩之，渋木宏明，倉本敏明：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］上野信行，古田恭三，奥原浩之，渋木宏明，倉本敏明：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］伏見正則：UP 応用数学選書 12; 乱数，東京大学出版会（1994）

［9］Y.L.Tong: *The Multivariate Normal Distribution*, Springer-Verlag (1990)

［付録］

本システムは，Microsoft VBA でソルバーを実行している。この機能を実行するためには，初

回起動時に下記の操作を行わなくてはならない。なおこの操作は，Microsoft office 2007 での設定法である。

① SOLVER の使用許可の設定

1．（Microsoft Office ボタン）をクリックし，［Excel のオプション］をクリックする。

2．アドインをクリックし，一番下の管理の［コンボボックス］が［Excel アドイン］になっていることを確認して［設定］ボタンを押す。

3．ソルバーアドインと，分析ツールーVBA にチェックを入れて［OK］ボタンを押す。

② VBA からの SOLVER の許可の設定

1．［［開発］タブ］をクリックし，［Visual Basic］をクリックする。

2．ツールバーの［ツール］から参照設定を選ぶ。

3．参照ボタンを押す。

4．ファイルの場所の中から［C: /program files(x86)/Microsoft Office/office12/library/SOLVER］を選択する。

5．ファイルの種類を［すべてのファイル］にし，［SOLVER.XLAM］を選択して，［開く］ボタンを押す。