

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 31 日現在

機関番号：54401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21510152

研究課題名（和文） 経営環境の不確実さをシナリオで考慮した対話型意思決定支援システムの開発

研究課題名（英文） Interactive Decision Support System for Finding Robust Optimal Solutions with Uncertainties in Manufacturing Circumstances

研究代表者

長澤 啓行 (NAGASAWA HIROYUKI)

大阪府立大学工業高等専門学校・校長

研究者番号：30117999

研究成果の概要（和文）：経営環境の運用的不確実性に対して、不確実さをシナリオの集合として表し、「シナリオ生起確率を考慮した確率論的順序関係による頑健な解を求める頑健な最適化法」を、シナリオが計画期間の最初に決まる静的な場合と計画途中で別のシナリオに変化する動的な場合、決定変数が連続/離散変数の場合、目的関数が単一目的/多目的の場合を対象に理論展開した。頑健な解（または解集合）の概念とその生成法を提案し、解の選定を支援する感度分析機能を備えた対話型意思決定支援システムを開発した。

研究成果の概要（英文）：This study addressed decision making problems under operational uncertainties in manufacturing circumstances. Uncertainties were expressed as a set of scenarios with occurrence probabilities. Concepts of a “robust optimal solution” in single-objective cases and a “robust set of nondominated solutions” in multiobjective cases were introduced on the basis of “stochastic ordering.” Robust optimization methods with either discrete variables or continuous variables were developed in static and dynamic cases, where one of scenarios was fixed at the beginning of a planning horizon in the static case and the scenario would change from the reference scenario to one of supposed scenarios once at any time over the planning horizon in the dynamic case. An interactive decision support system with sensitivity analysis was also developed for helping a decision maker to find robust optimal solutions.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2011年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム工学・社会システム工学・安全システム

キーワード：経営工学

1. 研究開始当初の背景

(1) サプライチェーンマネジメント(SCM)においては、顧客満足を最大にし、品質と価格を適正化し、国ごとに異なる環境基準を満た

すなどさまざまな目的を追求しながら、製品のライフサイクル短縮とグローバル化の中で一層高まる経営環境の不確実さに柔軟に対応できる生産計画・スケジューリ

ング法の開発が急務とされている。

(2) この問題に対し、2006～2008 年度科学研究費補助金・基盤研究(C)「SCM 環境下の動的不確実性に即応する階層的生産計画・スケジューリングシステム」(研究代表者：長澤啓行)では、経営環境の不確実さを構造的な不確実性、運用的な不確実性、突発的な不確実性の3種類に分類し、それぞれの特徴に即して戦略的意思決定、戦術的意思決定、現場的意思決定を行うという枠組みを提示し、この枠組みの下で頑健な生産計画・スケジュールを決定する階層的な意思決定システムを開発した。とくに運用的な不確実性に対する戦術的意思決定においては、不確実さを将来起こりうるシナリオの集合として表し、各シナリオの生起確率を考慮して確率論的順序関係に基づき頑健な解を求める「頑健な最適化」の手法を開発し、その有効性を示した。しかし、そこでの理論展開は離散変数最適化の単一目的なスケジューリングへの適用を想定したものであり、連続変数最適化や多目的最適化といったより一般的な計画問題を対象とした理論展開はまだ行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、経営環境の不確実さを構造的・運用的・突発的な不確実性の3種類に分類し、それぞれに対し戦略的・戦術的・現場意思決定によって対処するという枠組みの下、運用的な不確実性をいくつかのシナリオの集合として表し、戦術的意思決定の方法論を展開することである。具体的には、最適解はシナリオによって異なるが、どのシナリオの下でも各最適解に最も近いと総合的に判断される解を「頑健な解」と定義し、その「近さの総合的判断」を確率論的順序関係の考え方に基づいて定式化する。単一目的と多目的、離散変数と連続変数、計画の最初にシナリオが決まる静的な場合と計画途中で別のシナリオへ変化する動的な場合の全組合せに対して頑健な解の生成法を体系的に提案し、対話型意思決定支援システムを開発する。

3. 研究の方法

運用的な不確実さの下での戦術的意思決定に焦点を絞り、理論展開から対話型意思決定支援システムの開発までを視野に入れて、「経営環境の不確実さをシナリオで表し確率論的順序関係による頑健な解を求める頑健な最適化法(以下、「シナリオ最適化法」と略す)」の体系化をめざして以下の3項目を中心に研究を進めた。

(1)シナリオ最適化法の多目的なスケジューリングおよび動的なスケジューリングへの拡張については、単一目的・静的なスケジューリングにおける「確率論的順序関係に基づく頑健な最適解」の概念を多目的・静的なスケジュー

リングにおける「頑健な非劣解集合」の概念に発展させ、さらにこれを多目的・動的なスケジューリングにおける「動的に頑健な非劣解集合」の概念へ拡張した。また、これにシナリオ変化直後にリスケジューリングを行うというより現実的な条件を取り入れて「リスケジューリングを考慮した動的に頑健な非劣解集合」の概念へと発展させた。

(2)シナリオ最適化法の連続最適化問題への展開については、連続変数最適化問題の例としてリードタイムが不確実な定量発注方式における発注点(連続変数)決定問題を取り上げ、「頑健な最適発注点」の概念を与え、その生成法を提案した。さらにこれをリードタイムと需要量がともに不確実な場合へと拡張した。

(3)シナリオ最適化法の対話型意思決定支援システムの開発については、前述の2006～2008 年度科学研究費補助金・基盤研究(C)「SCM 環境下の動的な不確実性に即応する階層的な生産計画・スケジューリングシステム」で構築した Visual Basic による意思決定支援システムをベースとして、未完であった感度分析の理論を仕上げ、画像処理による頑健領域生成法を提案し、頑健な解の対話型意思決定支援システムを完成させた。

4. 研究成果

(1)シナリオ最適化法の多目的なスケジューリングおよび動的なスケジューリングへの理論展開

①頑健な非劣解集合の概念とその生成法の提案

単一目的・静的なスケジューリングにおける「シナリオ最適化法による頑健な最適解」の概念を拡張し、多目的・静的なスケジューリングにおける「頑健な非劣解集合」の概念を提案した。その考え方は以下のとおりである。

シナリオ α_i の下での非劣解集合 $N^{(i)}$ は、任意の解 \mathbf{x} のシナリオ $\alpha_i, i \in I$ (I はシナリオインデックスの集合)、の下での q 次元最小化目的関数値ベクトルを $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \alpha_i)$ とすると、次式で与えられる。

$$N^{(i)} = \{\mathbf{x}^{(i)} \mid \mathbf{x}^{(i)} \in X(\alpha_i), \forall \mathbf{x} \in X(\alpha_i) \text{ such that } \mathbf{f}(\mathbf{x}, \alpha_i) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(i)}, \alpha_i)\}, i \in I. \quad (1)$$

シナリオ α_i の下での、解 \mathbf{x} の非劣解集合 $N^{(i)}$ に対する近さを最悪点 $\mathbf{f}^W(\alpha_i)$ を基準とした点近接度として以下のように定義する。

$$WIPC(\mathbf{x}, \alpha_i) = \min_{\mathbf{y} \in N^{(i)}} \frac{|\mathbf{f}(\mathbf{x}, \alpha_i) - \mathbf{f}(\mathbf{y}, \alpha_i)|}{|\mathbf{f}^W(\alpha_i) - \mathbf{f}(\mathbf{y}, \alpha_i)|}. \quad (2)$$

ここで、最悪点 $\mathbf{f}^W(\alpha_i)$ の第 j 成分は $f_j^W(\alpha_i) = \max_{\mathbf{x} \in X} f_j(\mathbf{x}, \alpha_i)$ で与えられる。

単一目的モデルにおける近接度 $\varepsilon(\mathbf{x}, \alpha_i)$ を式(2)の点近接度 $WIPC(\mathbf{x}, \alpha_i)$ で置き換えることで、多目的モデルにおいても単一目的モデルの場合と同様に確率論的順序関係に

よる以下の理論展開が行える。

シナリオ $\alpha_i, i \in I$, の下での解 \mathbf{x} の点近接度が $WIPC(\mathbf{x}, \alpha_i)$ で与えられ, その生起確率が P_i であることより, 全シナリオに対する解 \mathbf{x} の点近接度 ξ の分布関数 $cdf(\xi: \mathbf{x})$ は次のように定義できる。

$$cdf(\xi: \mathbf{x}) \equiv \sum_{i \in I} P_i \delta(\xi - WIPC(\mathbf{x}, \alpha_i)) \quad (3)$$

ただし, $\delta(z)$ は $z \geq 0$ のときに $\delta(z) = 1$, それ以外の場合は $\delta(z) = 0$ とする。

確率論的順序関係の考え方を分布関数 $cdf(\xi: \mathbf{x})$ に適用すれば, 「解 \mathbf{x} が解 \mathbf{y} より点近接度において確率論的に小さい」ことは,

$$\mathbf{x} \leq^{\text{st}} \mathbf{y} \Leftrightarrow cdf(\xi: \mathbf{x}) \geq cdf(\xi: \mathbf{y}) \quad \forall \xi$$

と定義される。しかし, 頑健な非劣解の候補となる解 \mathbf{x} と \mathbf{y} の点近接度の分布関数は通常交差すると考えられ, そのような場合には 2 つの解の間に確率論的順序関係を定めることはできない。そこで, 次式で定義されるランク別基準分布関数 $G_k(\xi)$ を導入する。

P_i を降順に並べ, $P_{[1]} \geq P_{[2]} \geq \dots \geq P_{[|I|]}$ とし,

$$G_k(\xi) \equiv \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq \xi < \eta_{[1]} k \varepsilon_0; \\ \sum_{j=1}^l P_{[j]}, & \text{if } \eta_{[l]} k \varepsilon_0 \leq \xi < \eta_{[l+1]} k \varepsilon_0; \\ 1, & \text{if } \eta_{[|I|]} k \varepsilon_0 \leq \xi, \end{cases} \quad (4)$$

$$\eta_i \equiv \begin{cases} (1-\zeta) \frac{1-\nu}{|I| P_i} + \zeta, & i \in I_1; \\ (1-\zeta) \frac{1+\nu |I_1| / |I_2|}{|I| P_i} + \zeta, & i \in I_2. \end{cases} \quad (5)$$

$$I_1 \equiv \{i | P_i < 1/|I|\}, \quad I_2 \equiv I/I_1. \quad (6)$$

ただし, ε_0 はランクのステップ幅, $|I|$ はシナリオの総数, I_1 は生起確率が平均生起確率 ($=1/|I|$) より小さいシナリオのインデックス集合であり, I_2 は生起確率が平均生起確率以上となるシナリオのインデックス集合である。 η_i は基準分布関数の形状決定パラメータであり, その値は実数値 ζ ($0 \leq \zeta \leq 1$) と ν ($0 < \nu \leq 1$) によって変わる。 ζ と ν の値は意思決定者の選好判断に基づいて設定される。ただし, $\bar{\nu}$ は次式で定義される。

$$\bar{\nu} \equiv \left(1 - \frac{\max_{i \in I_1} P_i}{\min_{i \in I_2} P_i} \right) / \left(1 + \frac{|I_1| \max_{i \in I_1} P_i}{|I_2| \min_{i \in I_2} P_i} \right). \quad (7)$$

このランク別基準分布関数と各解の近接度の分布関数を比較することにより, 任意の解 \mathbf{x} の点近接度のランク値 $k(\mathbf{x})$ を, 分布関数と確率論的順序関係が成り立つ最小ランク値として

$$k(\mathbf{x}) \equiv \min \{k | cdf(\xi: \mathbf{x}) \geq G_k(\xi), \forall \xi \geq 0, k = 1, 2, \dots\} \quad (8)$$

により求める。このランク値によって意思決定者の選好判断に基づいた任意の解の間の確率論的順序関係が評価できるようになる。

頑健な解が満たすべきランク値の最大値 \tilde{k} を定め, 解集合 $N^{(r)}(\tilde{k})$ を $N^{(r)}(\tilde{k}) = \phi$ と初期化する。ランク値が \tilde{k} 以下の解をランク値の昇順に順次 $N^{(r)}(\tilde{k})$ の要素に加える。その際, 生起確率の最も大きい参照シナリオ α_r の下で $N^{(r)}(\tilde{k})$ 内のいずれかの要素に対して劣解となる解は $N^{(r)}(\tilde{k})$ に加えない。このようにして生成される解集合 $N^{(r)}(\tilde{k})$ を「頑健な非劣解集合」と定義した。まず,

すべての実行可能解を完全列挙して上述の理論に則り「頑健な非劣解集合」を厳密に生成する方法に加え, 頑健な非劣解の候補となる解を重点的に生成し, 「頑健な近似非劣解集合」を生成する方法を提案し, $n/1/(F, T_{\max})$ の多目的・静的スケジューリング問題に適用することによりその有効性を示した。

②多目的・動的スケジューリングにおける「動的に頑健な非劣解集合」の概念とその生成法の提案

①の成果をシナリオが計画期間中の任意の時刻に, 参照シナリオ α_r から想定シナリオ $\alpha_i, i \in I$, のいずれかに変化する動的な場合に発展させた。

多目的モデルにおいて, 時刻 t でシナリオが α_r から α_i へ変化するときの非劣解集合 $N^{[t]}_{(ri)}$ は, $\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f_{(ri)}(\mathbf{x}, t)$ の非劣解集合として得られる。ただし, $f_{(ri)}(\mathbf{x}, t)$ は時刻 t でシナリオが α_r から α_i へ変化した場合の解 \mathbf{x} の目的関数値ベクトルとする。この非劣解集合 $N^{[t]}_{(ri)}$ は, シナリオ変化時刻 t によって変わるが, ある解集合 N が任意の $t \in [0, T]$ (T は計画期間) に対して $N^{[t]}_{(ri)}$ に近いとき, N は動的に頑健であるという。

シナリオ変化時刻 t で, シナリオが α_r から α_i へ変化する場合の任意の解 \mathbf{x} および任意の解集合 N の非劣解集合 $N^{[t]}_{(ri)}$ に対する近さを, 点近接度 $WIPC_{(ri)}(\mathbf{x}, t)$ および集合近接度 $WNPC_{(ri)}(\mathbf{y}, N, t)$ としてそれぞれ次のように定義する。

$$WIPC_{(ri)}(\mathbf{x}, t) \equiv \min_{\mathbf{y} \in N^{[t]}_{(ri)}} \frac{|f_{(ri)}(\mathbf{y}, t) - f_{(ri)}(\mathbf{x}, t)|}{|f(\mathbf{y}, t) - f^W_{(ri)}(t)|}, \quad (10)$$

$$WNPC_{(ri)}(\mathbf{y}, N, t) \equiv \min_{\mathbf{x} \in N} \frac{|f_{(ri)}(\mathbf{y}, t) - f_{(ri)}(\mathbf{x}, t)|}{|f(\mathbf{y}, t) - f^W_{(ri)}(t)|}, \quad \mathbf{y} \in N^{[t]}_{(ri)}, i \in I. \quad (11)$$

これより, シナリオ変化時刻 t において, シナリオが α_r から任意の想定シナリオ $\alpha_i, i \in I$ へシナリオ生起確率 P_i で変化する場合の解 \mathbf{x} の点近接度 ξ の分布関数 $cdf(\xi: \mathbf{x}, t)$ は次のように定義できる。

$$cdf(\xi: \mathbf{x}, t) \equiv \sum_{i \in I} P_i \delta(\xi - WIPC_{(ri)}(\mathbf{x}, t)) \quad (12)$$

同様に, 任意の解集合 N について, シナリオ変化時刻 t でシナリオが参照シナリオ α_r から

ら想定シナリオ α_i へ変化する場合の集合近接度の分布関数 $cdf_{(ri)}(\xi: \mathbf{N}, t)$ を

$$\begin{aligned} & cdf_{(ri)}(\xi: \mathbf{N}, t) \\ & \equiv \sum_{y \in N_{(ri)}^{[t]} | N_{(ri)}^{[t]} |} \frac{1}{N_{(ri)}^{[t]} |} \delta(\xi - WNPC_{(ri)}(y, \mathbf{N}, t)), i \in I, \end{aligned} \quad (13)$$

で定義し、任意の想定シナリオ $\alpha_i, i \in I$ へシナリオ生起確率 P_i で変化する場合の解集合 \mathbf{N} の集合近接度の分布関数 $cdf(\xi: \mathbf{N}, t)$ を次式で定義する。

$$\begin{aligned} & cdf(\xi: \mathbf{N}, t) \equiv \sum_{i \in I} P_i cdf_{(ri)}(\xi: \mathbf{N}, t) \\ & = \sum_{i \in I} \frac{P_i}{N_{(ri)}^{[t]} |} \sum_{y \in N_{(ri)}^{[t]} |} \delta(\xi - WNPC_{(ri)}(y, \mathbf{N}, t)). \end{aligned} \quad (14)$$

①の場合と同様、ここでも任意の解の間の確率論的順序関係を評価できるようにするために、ランク別基準分布関数 $G_k(\xi)$ を導入し、近接度の分布関数 $cdf(\xi: \mathbf{x}, t)$ および $cdf(\xi: \mathbf{N}, t)$ と比較することにより、任意の解 \mathbf{x} および任意の解集合 \mathbf{N} に対して、シナリオ変化時刻 t における条件付きランク値 $k(\mathbf{x}, t)$ および $k(\mathbf{N}, t)$ を求める。

$$k(\mathbf{x}, t) \equiv \min\{k | cdf(\xi: \mathbf{x}, t) \geq G_k(\xi), \forall \xi \geq 0\}, \quad (15)$$

$$k(\mathbf{N}, t) \equiv \min\{k | cdf(\xi: \mathbf{N}, t) \geq G_k(\xi), \forall \xi \geq 0\}. \quad (16)$$

ただし、式(15)および(16)における k はいずれも正の実数である。

これらの条件付きランク値はシナリオ変化時刻 t の関数となる。そこで、その分布関数 $cdf(\kappa: \mathbf{x})$ および $cdf(\kappa: \mathbf{N})$ を次のように定める。

$$cdf(\kappa: \mathbf{x}) \equiv \frac{1}{T} \int_0^T \delta(\kappa - k(\mathbf{x}, t)) dt, \quad (17)$$

$$cdf(\kappa: \mathbf{N}) \equiv \frac{1}{T} \int_0^T \delta(\kappa - k(\mathbf{N}, t)) dt. \quad (18)$$

これより、シナリオが計画期間中の任意の時刻に変化する動的な場合における任意の解 \mathbf{x} および任意の解集合 \mathbf{N} の頑健さを表す動的ランク値が次式で定まる。

$$k_{dyn}(\mathbf{x}) \equiv \min\{k | cdf(\kappa: \mathbf{x}) \geq G_k(\kappa), \forall \kappa \geq 0\}, \quad (19)$$

$$k_{dyn}(\mathbf{N}) \equiv \min\{k | cdf(\kappa: \mathbf{N}) \geq G_k(\kappa), \forall \kappa \geq 0\}. \quad (20)$$

ただし、 $G_k(\kappa)$ は条件付きランク値に関する基準分布関数であり、近接度に関する基準分布関数 $G_k(\xi)$ における ξ を κ に、またステップ幅を ε_0 から ω_0 にそれぞれ置き換えたものである。

以上のようにシナリオ最適化法の理論展開を拡張し、参照シナリオ α_r のもとで非劣性を保つ実行可能な非劣解候補集合の中で動的ランク値 $k_{dyn}(\mathbf{N}_{robust})$ が最小になる非劣解

候補集合を「シナリオ生起確率を考慮した動的に頑健な非劣解集合」と定義した。

$$k_{dyn}(\mathbf{N}_{robust}) \equiv \min\{k(\mathbf{N}) | \mathbf{N} \in X, \mathbf{N} \text{ はシナリオ } \alpha_r \text{ の下で非劣性をもつ}\}. \quad (21)$$

動的に頑健な非劣解集合の要素となる解は式(19)の動的ランク値 $k_{dyn}(\mathbf{x})$ が小さいと期待されることから、動的ランク値の小さい順に解集合を生成していく「動的に頑健な非劣解集合の生成法」を提案した。

③「リスケジューリングを考慮した動的に頑健な非劣解集合」の概念とその生成法の提案

②に記した多目的・動的スケジューリングにおける「動的に頑健な非劣解集合」の概念を、シナリオが計画期間中の任意の時刻 t で変化した直後に未加工ジョブをリスケジューリングするというより現実的な状況を想定して拡張した。

シナリオ変化時刻 t で、シナリオが α_r から $\alpha_i, i \in I$ へ変化するとき、未加工ジョブについては変化後のシナリオ α_i の下で非劣解集合を生成するようリスケジューリングすることとし、このリスケジューリングを前提とした解 \mathbf{x} の目的関数値ベクトルを $f(\mathbf{x}, \alpha_i, t)$ とする。また、このときの非劣解集合を \mathbf{N}_i^t とする。

リスケジューリングを考慮した多目的・動的スケジューリングにおける任意の解 \mathbf{x} の非劣解集合 \mathbf{N}_i^t に対する近さ、および任意の解集合 \mathbf{N} の各非劣解 $y \in \mathbf{N}_i^t$ に対する近さをそれぞれ点近接度 $IPC_i(\mathbf{x}, t)$ および集合近接度 $NPC_i(y, \mathbf{N}, t)$ として次のように定義する。

$$IPC_i(\mathbf{x}, t) \equiv \min_{y \in \mathbf{N}_i^t} \frac{|f(y, \alpha_i, t) - f(\mathbf{x}, \alpha_i, t)|}{|f(y, \alpha_i, t) - f^W(\alpha_i, t)|}, \quad (22)$$

$$NPC_i(y, \mathbf{N}, t) \equiv \min_{x \in \mathbf{N}} \frac{|f(y, \alpha_i, t) - f(x, \alpha_i, t)|}{|f(y, \alpha_i, t) - f^W(\alpha_i, t)|}, \quad y \in \mathbf{N}_i^t. \quad (23)$$

これを式(10)および式(11)と置き換えることで、リスケジューリングを考慮した多目的・動的スケジューリングに対しても、②のリスケジューリングを考慮しない多目的・動的スケジューリングの場合と同様の理論展開が行える。これに基づき、「リスケジューリングを考慮した動的に頑健な非劣解集合」の概念を定義し、その生成法を提案した。

ここでは生産スケジューリング問題を適用例として取り上げ、提案した解の概念とその生成法について有効性を検証したが、これらの理論は不確実さをシナリオで表した離散的最適化問題に広く適用できる。

(2)シナリオ最適化法の連続最適化問題への理論展開

連続最適化問題では「確率論的順序関係による頑健な解」が連続変数になるため、離散

変数の中から頑健な解を選択していた離散変数最適化問題とは異なり，頑健な解を定量的に意思決定しなければならない。したがって，各解にランク値を与える離散的最適化問題での手法をそのまま適用することはできない。そこで，リードタイムと需要分布が不確実な定量発注方式における発注点(連続変数)決定問題を例としてとりあげ，許容欠品率満足化とコスト最小化の2つの場合における「頑健な最適発注点」の概念を与え，その設定法を提案した。以下では，許容欠品率満足化の場合について，シナリオ最適化法による考え方を示す。

リードタイムの不確実さをシナリオで表し，シナリオ $i, i \in I$ の下でのリードタイムを L_i ，その生起確率を P_i とする。発注される製品(または部品)の期間 j における需要量 D_j は正規分布 $N(\mu_j, \sigma_j)$ に従い，互いに独立とする。

各シナリオの下での，発注時刻 t における発注点 $s(t)$ によるシナリオ欠品率を $\alpha_i(s, t)$ とすると，全シナリオに対する欠品率 $\alpha(s, t)$ の分布関数 $cdf(\alpha : s, t)$ は次のように定義される。

$$cdf(\alpha : s, t) \equiv \sum_{i \in I} P_i \delta(\alpha - \alpha_i(s, t)). \quad (24)$$

確率論的順序関係の考え方によれば，「発注点 s_x が発注点 s_y より確率論的に良い」ことを次のように定義できる。

$s_x \leq^* s_y \Leftrightarrow cdf(\alpha : s_x, t) \geq cdf(\alpha : s_y, t)$ for $\forall \xi$
 $cdf(\alpha : s, t)$ は s の単調減少関数になるため，発注点 s が大きいほど欠品率は確率論的に良いといえるが， s が大きいほど在庫が増え，死在庫となる可能性が高まる。このため，ある程度の欠品率は許容され，とくにシナリオ生起確率が小さい場合に対してはやや大きな欠品率も許されると考えられる。

そこで，意思決定者の選好判断に基づいて，許容欠品率 α_0 に対する欠品率 α の基準分布関数 $G(\alpha)$ を次のように定め，これより確率論的に小さい発注点のうち最小のものを「頑健な最適発注点」とした。

シナリオ i の生起確率 P_i を降順に並べ，

$$P_{[1]} \geq P_{[2]} \geq \dots \geq P_{[|I|]} \text{ とし，}$$

$$G(\alpha) \equiv \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \leq \alpha < \eta_{[1]}\alpha_0; \\ \sum_{j=1}^t P_{[j]}, & \text{if } \eta_{[t]}\alpha_0 \leq \alpha < \eta_{[t+1]}\alpha_0, \\ 1, & \text{if } \eta_{[|I|]}\alpha_0 \leq \alpha. \end{cases} \quad (25)$$

式(25)は離散的最適化問題に対する式(4)に相当するが，ここではランクの概念は含まれていない。

この基準分布関数 $G(\alpha)$ と欠品率の分布関数 $cdf(\alpha : s, t)$ を確率論的順序関係の考え方をを用いて比較することにより，頑健な最適発注点 $s^*(t)$ を次のように決定する。

$$s^*(t) \equiv \max_{\ell \in I} \left\{ \sum_{\tau=t}^{t+L_{\ell-1}} \mu_{\tau} + \Phi^{-1}(1 - \mu_{i_{c(\ell)}} \alpha_0) \sqrt{\sum_{\tau=t}^{t+L_{\ell-1}} \sigma_{\tau}^2} \right\}, \quad (26)$$

$$i_{c(\ell)} \equiv \max \left\{ i \left| \sum_{j=1}^{i-1} P_{[j]} \leq P_{\Sigma}^{(\ell-1)}, 1 \leq i \leq |I| \right. \right\},$$

$$2 \leq \ell \leq |I|, i_{c(1)} \equiv 1. \quad (27)$$

ただし， $P_{\Sigma}^{(\ell)} = \sum_{j=1}^{\ell} P_j, 1 \geq \ell \leq |I|, P_{\Sigma}^{(0)} \equiv 0$ であり， $L_1 \leq L_2 \leq \dots \leq L_{|I|}$ と仮定している。

この「頑健な最適発注点」を，期待値最小化や最大成分最小化の考えに基づく従来の発注点設計法による発注点と比較し，その有効性を示した。また，需要分布が変動する動的な場合に対してこれを発展させ，「動的に頑健な最適発注点」の概念とその設定法も示した。

(3) シナリオ最適化法のための対話型意思決定支援システムの開発

シナリオ最適化法では，前述のとおり，任意の解 \mathbf{x} または任意の解集合 N の頑健さをこれらの解または解集合の近接度の分布関数を基準分布関数と比較することにより評価している。基準分布関数の形状は式(5)で定義されるパラメータ η_i の値によって決まるため，これを意思決定者の選好を反映して適切に設定することが重要である。この設定を容易にし，頑健な解の選定を支援するための対話型意思決定支援システムを開発した。本研究課題に先行して開発を進めていたプロトタイプを改善し，画面表示する情報を工夫して η_i の値を決定づける実数値 ζ と ν ($0 < \zeta < 1, 0 < \nu \leq \nu$) をさらに容易に設定できるようにしたことに加え，頑健さのランク値が等しい複数の解の中から最終的に一つの解を選択するために，各解について近接度の分布関数や実数値 ζ と ν の変化に対する感度分析結果を「頑健領域」としてグラフィック表示する機能を追加してシステムを完成させた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① M. Tamura, K. Morizawa, H. Nagasawa, Robust Optimal Reorder Points with Uncertain Lead Time, Journal of Japan Industrial Management Association: English Issue, 63(掲載決定), 2012, 査読有
- ② M. Tamura, K. Morizawa, H. Nagasawa, Dynamic Robust Optimal Reorder Point with Uncertain Lead Time and

- Changeable Demand Distribution, Journal of Zhejiang University - Science A, 11, 938-945, 2010, 査読有
- ③ H. Nagasawa, M. Kotani, K. Morizawa, Optimal Cooperative Harvesting Patterns of Agricultural Fresh Products in case of Multiple Farmers and Multiple Markets under Periodical Flowering, Journal of Operations Research Society of Japan, 52, 417-432, 2009, 査読有

[学会発表] (計 13 件)

- ① K. Morizawa, N. Hirabayashi, A Heuristic Method for Minimizing Makespan in M-Stage Hybrid Flowshop, ASME 2012 International Symposium on Flexible Automation, 2012 年 6 月 19 日 (発表確定), St. Louis, USA
- ② 平山大貴, 平林直樹, 異形状・異面積設備レイアウト問題への進化戦略の適用に関する研究, 日本経営工学会平成 23 年度秋季研究大会, 2011 年 11 月 12 日, 盛岡市
- ③ 加納正義, 森澤和子, 並列機械フローショップにおける平均滞留時間最小化スケジューリング, 日本経営工学会平成 23 年度秋季研究大会, 2011 年 11 月 12 日, 盛岡市
- ④ S. Hiyama, K. Morizawa, H. Nagasawa, Dynamic Robust Set of Nondominated Schedules with Rescheduling Following Scenario Change in an $n/1//(\bar{F}, T_{\max})$ Scheduling Problem, The 11th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, 2010 年 12 月 7 日, Melaka, Malaysia
- ⑤ M. Tamura, K. Morizawa, H. Nagasawa, Dynamic Robust Optimal Reorder Point with Uncertain Lead Time and Changeable Demand Distribution, The 11th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, 2010 年 12 月 7 日, Melaka, Malaysia
- ⑥ 吉田周平, 平林直樹, 平均滞留時間最小化・平均納期遅れ時間最小化の 2 目的リアルタイムスケジューリング, 日本経営工学会平成 22 年度秋季研究大会, 2010 年 10 月 23 日, 福岡市
- ⑦ 松永洋祐, 森澤和子, ハイブリッド・フローショップにおけるメイクスパン最小化スケジューリング, 日本経営工学会平成 22 年度秋季研究大会, 2010 年 10 月 23 日, 福岡市
- ⑧ S. Hiyama, K. Morizawa, H. Nagasawa, Dynamic Robust Optimal Schedule with

- Rescheduling Following Scenario Change to Minimize Mean Flow Time in Single Machine Scheduling, The 10th Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, 2009 年 12 月 14 日, 北九州市
- ⑨ M. Tamura, K. Morizawa, H. Nagasawa, Robust Optimal Reorder Points with Uncertain Lead Time, The 10th Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, 2009 年 12 月 14 日, 北九州市
- ⑩ Y. Uno, N. Hirabayashi, Facility Layout Method using Evolution Strategies with Correlated Mutations, The 10th Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, 2009 年 12 月 14 日, 北九州市
- ⑪ 檜山慧, 森澤和子, 長澤啓行, リスケジューリングを考慮した平均滞留時間最小化の頑健な最適スケジュール, 日本経営工学会平成 21 年度秋季研究大会, 2009 年 11 月 7 日, 豊田市
- ⑫ 田村正樹, 森澤和子, 長澤啓行, 調達期間の不確かさを考慮した発注点の設定法, 日本経営工学会平成 21 年度秋季研究大会, 2009 年 11 月 7 日, 豊田市
- ⑬ 宇野由宏, 平林直樹, 進化戦略による設備レイアウトにおける Correlated Mutation の影響, 日本経営工学会平成 21 年度秋季研究大会, 2009 年 11 月 7 日, 豊田市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長澤 啓行 (NAGASAWA HIROYUKI)
大阪府立大学工業高等専門学校・校長
研究者番号: 30117999

(2) 研究分担者

森澤 和子 (MORIZAWA KAZUKO)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60220050
平林 直樹 (HIRABAYASHI NAOKI)
大阪府立大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 80199091