

不確実性下の供給リスク最適化システム Frontum/SP

Frontum /SP: Supply risk optimization system under uncertainty

供給計画は需要予測にもとづいて立案されるが、正確に需要を予測することは不可能であり、供給計画には不確実性が伴う。本報告で述べる供給計画最適化システムFrontum/SPは利益、機会損失、期末在庫量の標準偏差や信頼区間上下限などをリスクの指標として扱う。これらリスクの指標を解析的に計算するのは困難であるため、モンテカルロシミュレーションによってリスクの評価を行う。さらに遺伝的アルゴリズムを用いてリソース制約を充足しながら、リスクを最小化し、かつ利益を最大化する供給計画案を立案する。供給計画は多目的最適化問題であるため効率的フロンティア上に複数のパレート最適な計画案が存在する。Frontum/SPはこれら複数のパレート最適計画案を一度に立案する。複数の計画案から人間の意思決定者が事業戦略や財務状況に応じて最終的に実行する計画案を決定する。評価実験より、Frontum/SPが従来手法と比較し優れた計画案を立案することを確認した。

手塚 大 Tezuka Masaru
齋藤 邦夫 Saito Kunio
澤田美樹子 Sawada Mikiko

1 はじめに

製造業や商社では多数の製品を取り扱っている。この多数の製品の供給量と供給日時を決定するのが供給計画問題である。供給計画は需要予測にもとづいて立案されるが、正確な予測は不可能であり不確実性が伴う。

もし需要が供給よりも大きくなれば機会損失が発生するが、逆に供給過剰となれば在庫レベルが上昇し、長期滞留在庫や死蔵在庫の発生につながる。このような予測と現実の差異によって発生するリスクを最小化する必要がある。

供給計画問題最適化の指標は適用しようとする部門によって異なるが、経営レベルの観点では利益の最大化と不確実性の最小化となり、需給計画部門では機会損失発生最小化と過剰在庫の削減となる。このように適用部門は異なっても、供給計画問題は競合する複数の指標を最適化する多目的最適化であり、複数のパレート最適解^{1,2)}が存在する。これらの複数の解は意思決定者にとっての重要な選択肢となる。

(株)日立東日本ソリューションズでは、不確実性を考慮しながら複数のパレート最適な供給計画案を立案する技術の研究³⁾を実施し、その成果をもとに供給リスク最適化システムFrontum/SPの開発を実施した。本報告では

供給計画のリスクとは何か、そしてFrontum/SPがどのようにしてリスクを最適化するのかについて述べる。

2 供給計画のリスク

製品の売上量、在庫量、機会損失量は、不確実な値である需要量と、意思決定変数である供給量によって決まる。これらの値には以下の関係がある。

$$\begin{aligned} \text{売上量} &= \min(\text{需要量}, \text{供給量} + \text{期首在庫量}) \\ \text{期末在庫量} &= \text{供給量} + \text{期首在庫量} - \text{売上量} \\ \text{機会損失量} &= \text{需要量} - \text{売上量} \end{aligned}$$

$\min(a, b)$ は a か b のどちらか小さいほうを示す。これらの値は在庫を通して前の期から後の期に連鎖し、後の期になるほど不確実性が増大していく。

また、これらの量に販売単価、供給単価、在庫保管単価などを掛けると売上額、供給コスト、在庫コストが得られ、そこから利益の指標である粗利益額を計算することができる。

$$\text{粗利益} = \text{売上額} - (\text{供給コスト} + \text{在庫コスト})$$

需要が不確実な確率値であるため、売上、在庫、機会損失、粗利益なども確率値であり、幅を持った分布として表すことができる。分布の例を図1に示す。図では横軸が粗利益の額を示し、縦軸が、その粗利益額が実現される確率を示している。

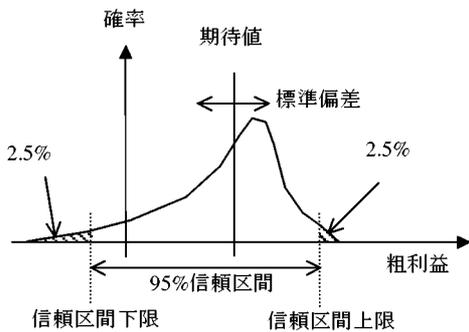


図1 粗利益の確率分布の例

この分布の標準偏差は、実現されるだろう粗利益額のばらつきを表している。したがって標準偏差をリスクの指標として使うことができる。また、図中に示した95%信頼区間の下限は、粗利益がこの額を下回る確率が2.5%しかないことを示している。したがって、この額を最悪のケースの利益と考えリスクの指標として使うことができる。期末在庫や機会損失の場合は少ないほどいいので、信頼区間上限がリスクの指標となる。

他にもリスク分析^{4,5)}ではいくつかの指標が用いられているが、Frontum/SPではここで挙げた標準偏差、信頼区間の上下限の他に、目標値と期待値の差をリスクの指標として用いている。なお、信頼区間の幅、目標値はユーザが任意に設定できる。

3 遺伝的アルゴリズムとモンテカルロシミュレーションによるリスク最適化

リスクの指標である粗利益、期末在庫、機会損失の期待値、標準偏差、信頼区間を解析的に求めることは困難である。そこで、Frontum/SPではモンテカルロシミュレーション⁶⁾を用いてこれらの値を計算している。

モンテカルロシミュレーションは多量の乱数を用いて複数のサンプルパスを生成し統計値を計算する手法である。多数の需要量のサンプルパスを生成し、各パス(シナリオ)ごとに粗利益、在庫量、機会損失の分布を計算している。Frontum/SPでは確率変数である需要量のサンプリングには、正規分布、対数正規分布、ベータ分布⁷⁾を使うことができる。

正規分布は在庫管理などで需要予測値の分布として広く使われている分布である⁸⁾。また対数正規分布は0以上の値しかとらない分布で、値の対数が正規分布をする。ForecastProなどの需要予測ソフトウェアで予測される需要の分布は正規分布か対数正規分布になる。

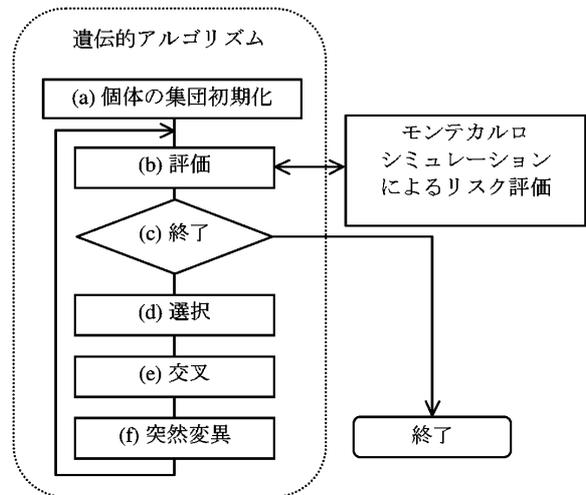


図2 遺伝的アルゴリズムとモンテカルロシミュレーションによるリスク最適化

ベータ分布は予想される需要量の最大値、最小値、最頻値(最も高確率で実現される需要量)で分布形状を決定する。営業会議などで人手によって予測された需要量を用いてFrontum/SPを使う場合にはベータ分布を使うとよい。

リスクの各指標をモンテカルロシミュレーションで求めるため、指標の微分情報などの探索空間に関する情報を得ることはできない。そこでFrontum/SPではリスクの最適化には指標の値そのものだけを用いて最適化を行うブラインドサーチ手法の一種である遺伝的アルゴリズム⁹⁾を導入した。

遺伝的アルゴリズムは生物の進化の仕組みをもとに考案された最適化アルゴリズムで、個体と呼ばれる単位を複数用いて選択、交叉、突然変異という操作を繰り返して並列的に多点探索を行う。この特徴から複数のパレート最適解を一度に求めることができ、多目的最適化に適していると考えられる¹⁰⁻¹²⁾。

図2に示すように遺伝的アルゴリズムの個体の評価にモンテカルロシミュレーションを用いて、リスクの最適化を実現した。各個体が一つの供給計画案に対応し、複数の供給計画案を交叉によって組合せたり、突然変異によって微調整したりすることにより複数のパレート最適解を求める。

なお、製品を供給するにはリソース(原材料、製造設備、輸送設備など)を消費するが、使用できるリソースには限りがある。そこで、リソース制約を満たすように最適化を行う。

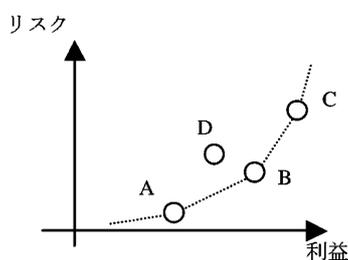


図3 パレート最適解と効率的フロンティア

4 リスク分析と効率的フロンティア

利益の最大化とリスクの最小化を行うと、あるレベルまでは利益とリスクの両方を改善することができるが、そのレベルを超えると、利益を大きくするにはリスクを受け入れなくてはならず、逆にリスクを小さくするには利益の増加をあきらめなくてはならないようになる。これは利益とリスクにはお互いにトレードオフの関係があるからである。このような、これ以上ある指標を改善するには他の指標を悪化させなくてはならないような解のことをパレート最適解という。

図3は横軸が利益、縦軸がリスクを示す座標上にAからDの四つの計画案をプロットしたものである。リスクは小さいほど良く、利益は大きいほどよいので右下にあるほど良い計画案である。この図で、計画案Dを見ると、これよりもリスクが小さく利益も大きい計画案Bが存在するため、計画案Dが意思決定の選択肢になることはない。しかし、計画案A, B, Cはそれぞれどちらかの指標で他の計画よりも優れているため、この三つでどれが一番優れているとは言えない。例えばBは利益ではAよりも優れ、リスクではCよりも優れている。この図のA, B, Cのような計画案をパレート最適な計画案と呼び、これらの計画案をつないだ図中の点線を効率的フロンティアと言う。意思決定では効率的フロンティア上にあるパレート最適解が選択肢となる。計画案Aはローリスク・ローリターン、Cはハイリスク・ハイリターン、Bはどちらもほどほどという計画案となっている。

これらのパレート最適解から、最終的に実行する計画案は人間の意思決定によって決まる。ビジネス戦略や財務状況などを勘案して最終的な決定が行われる。

5 最適化の評価

遺伝的アルゴリズムとモンテカルロシミュレーションによる提案手法を用いて供給計画の利益とリスクの最適

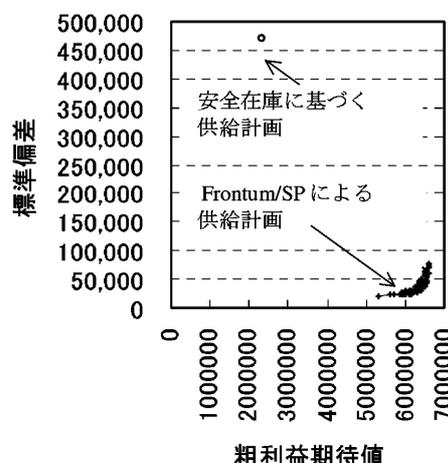


図4 利益期待値最大化と標準偏差最小化

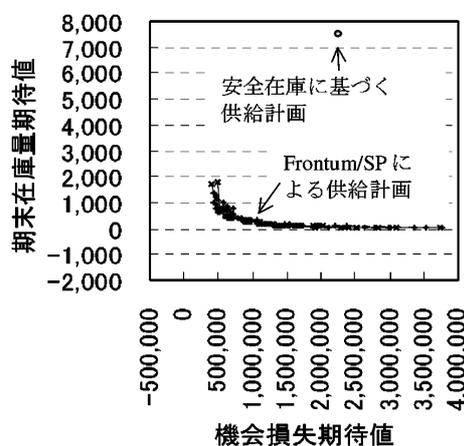


図5 機会損失と期末在庫の最小化

化を行った結果を図4および図5に示す。

図4は粗利益の期待値の最大化と、その不確実性の指標である標準偏差を最小化した結果である。横軸が利益、縦軸がリスクの指標であり、このグラフでは右下にあるほど良い計画となっている。右下に効率的フロンティアが形成されているのが分かる。比較のために安全在庫による供給計画立案結果を印で示した。Frontum/SPによる最適化の結果が従来手法である安全在庫法よりも良い計画案を作成できていることが確認できる。

図5は機会損失と期末在庫の最小化の結果である。どちらの指標も小さいほど良いので左下にあるほど良い計画案であることを示している。やはり従来手法よりも良い計画を立案できている。

実際の製品では図6に示すような画面によって複数の

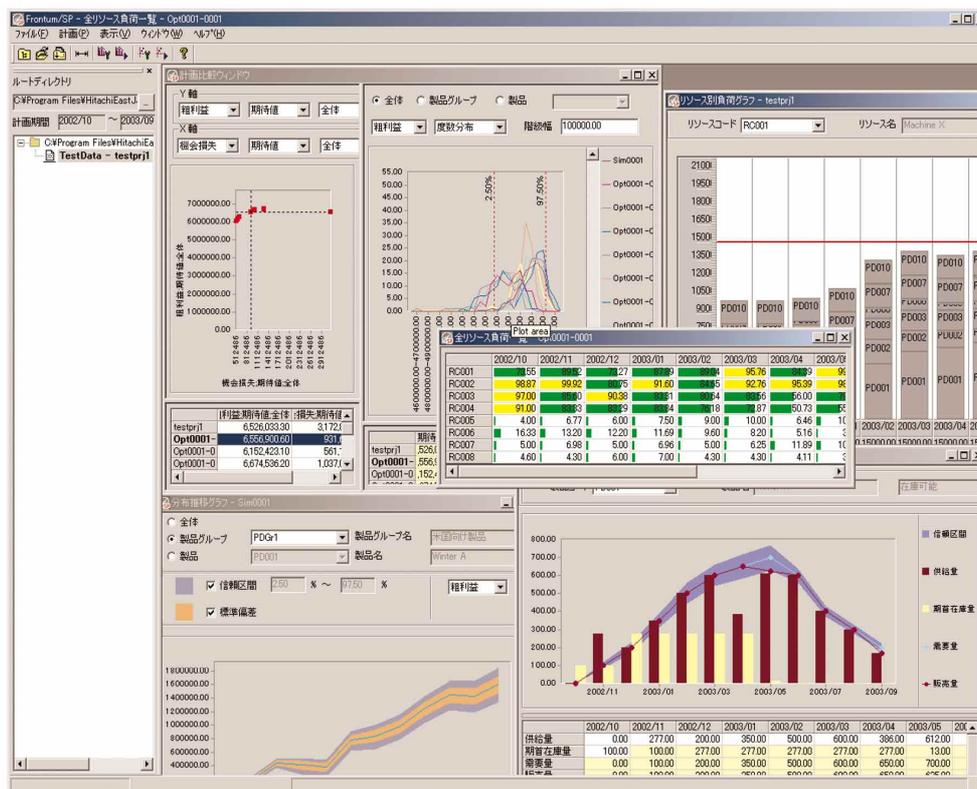


図6 Frontum/SP の画面例（開発中のもの）

計画案の比較や、各計画案の詳細情報（各種評価指標の値、製品ごとの供給量、リソースの消費量など）の確認ができる。

6 おわりに

本報告では、供給計画のリスクとは何か、また供給リスク最適化システムFrontum/SPが、それらのリスクが最小となる供給計画案を立案する手法について述べた。

予測される需要が不確実であるため、供給計画の評価指標である利益、機会損失や期末在庫量なども不確実性を伴う。したがって、これらの値は幅を持った分布として捉えることができる。Frontum/SPではこの分布から得られる標準偏差、信頼区間の上下限をリスクの指標として用いる。また、目標値と期待値の差をリスクとして扱うこともできる。

リスクの指標を解析的に計算することは困難である。そこで、モンテカルロシミュレーションを用いてリスクの評価を行う。Frontum/SPでは需要量のシミュレーションに正規分布、対数正規分布、ベータ分布を用いる。

モンテカルロシミュレーションによって計算された評価値をもとに、遺伝的アルゴリズムによって供給計画の

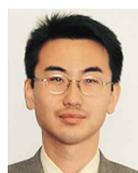
最適化を行う。Frontum/SPでは効率的フロンティア上にある複数のパレート最適解を一度に求めることができる。これら複数の解から、人間の意思決定者がビジネス戦略や財務状況に応じて最終的に実行する計画を選択、決定する。

評価実験から、Frontum/SPによって従来手法より優れた供給計画を立案できること、複数のパレート最適解を立案できることを確認した。

今後、不確実性下の意思決定支援・最適化技術を(株)日立東日本ソリューションズの新規事業の中核として位置付け、多くの分野への展開を行っていく予定である。

参考文献

- 1) Schaffer, J. D. : Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms, Proc. First Intl. Conf. Genetic Algorithms and their Applications, pp. 93 - 100 (1985).
- 2) 今野：線形計画法, 日科技連 (1987).
- 3) TEZUKA, M. et al. : Genetic Algorithm for Supply Planning Optimization under Uncertain Demand, Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conference 2003, pp. 2337 - 2346 (2003).
- 4) カーマン, D. M. 他：リスク解析学入門, シュプリンガー・フェアラーク東京 (2001)
- 5) エバンス, J. R., 他：リスク分析・シミュレーション入門, 共立出版 (1999)
- 6) 津田：モンテカルロ法とシミュレーション, 培風館 (1995)
- 7) Evans, M. et al. : Statistical Distributions, Third Edn., John Wiley & Sons, Inc. (2000)
- 8) 橋本, 他：新編生産管理システム, 共立出版 (1993)
- 9) ミッチェル, M. : 遺伝的アルゴリズムの方法, 東京電機大学出版局 (1997)
- 10) Fonseca, C. M. et al. : Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization : Formulation, Discussion and Generalization, Proc. Fifth Intl. Conf. Genetic Algorithms, pp. 416 - 423 (1993)
- 11) 玉置：遺伝的アルゴリズムと多目的最適化, 遺伝的アルゴリズム2 (北野 (編)), 産業図書 (1996)
- 12) Deb, K. : Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, John Wiley & Sons, Ltd. (2001)



手塚 大 1994年入社
研究開発第1グループ
意思決定支援, リスク分析, 最適化技術
の研究・開発
tezuka@hitachi-to.co.jp



齋藤 邦夫 1992年入社
研究開発第1グループ
意思決定支援, リスク分析, 最適化技術
の研究・開発
kuni@hitachi-to.co.jp



澤田美樹子 1991年入社
グローバル事業企画部
リスク分析に関する提案・コンサルティング
m-sawada@hitachi-to.co.jp