

不確実な需要のもとでの供給計画のリスク可視化と意思決定支援

手塚 大^{†,††} 樋地 正 浩^{††}
棟 朝 雅 晴^{†††} 赤 間 清^{†††}

近年、パーソナルコンピュータや携帯電話など多くの製品でライフサイクルの短期化が進んでいる。ライフサイクルが短くなると、需要と供給に差がある場合に、販売機会損失や在庫破棄損失などのリスクが高まる。商品の製造や仕入れの数量と期日を決定する供給計画は需要予測に基づいて行われる。需要予測は過去の販売履歴などをもとに統計的に予測されるが、ここでもライフサイクルの短期化によって統計処理に必要なデータが少なくなり、予測精度の低下を引き起こす原因になっている。これまでは計画責任者の経験に基づいて供給量と期日が決められてきた。しかし、このような状況下では、次第に供給の意思決定が企業収益に与える影響が大きくなってきており、定量的評価に基づく意思決定が不可欠となっている。本論文では、需要と供給からどのように利益がもたらされるかをモデル化し、粗利益、機会損失、破棄在庫量などの指標をモンテカルロ法により分析し定量的に評価するシステムを提案する。このシステムを2つの事例に適用し、その有効性を示す。

Risk Visualization and Decision Support for Supply Planning under Uncertain Demand

MASARU TEZUKA,^{†,††} MASAHIRO HIJI,^{††} MASAHARU MUNETOMO^{†††}
and KIYOSHI AKAMA^{†††}

In recent years, the life-cycle of high-tech products such as personal computers and cellular phones is getting shortened. Shorter life-cycle makes the risk of opportunity loss and dead-stock disposal loss higher. Supply plan designates the quantity and the delivery date of products to supply. The plan is created based on forecasted demand in order to cover the demand. Statistical method is used to forecast, however, shorter life-cycle also makes it difficult to obtain enough amounts of historical record to conduct statistical analysis. Consequently, the forecast accuracy declines. Since the decision made on the supply plan has a greater impact on the profitability these days, the decision based on quantitative evaluation is essential to manufacturers and resellers. In this paper, the model which explains how the profit is produced from the demand and supply is constructed. Taking advantage of the model, gross profit, opportunity loss, and dead-stock disposal loss are analyzed with Monte-Carlo method and evaluated quantitatively. The application of the proposed system on two cases shows the effectiveness of the system.

1. はじめに

近年、パーソナルコンピュータや携帯電話など多くの製品でライフサイクルの短期化が進んでいる。中小企業白書¹⁾によれば、ヒット期間すなわち寿命が1年未満の商品は1990年代ではヒット商品全体の4.8%であったが2000年代では18.9%に増加している。ヒッ

ト期間が1年未満の商品と1~2年未満の商品を合わせると、2000年代では51.8%をしめるまでに増えている。

ライフサイクルが短くなると、供給が実際の需要よりも少なかった場合に、製造ラインを増強し供給量を増やそうとしても、ライン増強に時間がかかるため、増強が完了するときにはライフサイクルが終了して多大な機会損失を被る場合が増える。逆に供給が実需よりも多ければ、過剰な在庫をライフサイクル内で売り切ることが難しくなり、在庫の破棄損失が大きくなる。

このようなライフサイクルの短期化への対応策の1つに、リードタイムの短縮がある。リードタイムとは、供給の指示を行ってから商品が供給されるまでの時間

† 北海道大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Hokkaido University

†† 株式会社日立東日本ソリューションズ

Hitachi East Japan Solutions, Ltd.

††† 北海道大学情報基盤センター

Information Initiative Center, Hokkaido University

である．リードタイムが短くなると需要の変動に供給をすばやく追従させることができる．リードタイムの短縮のために、製造業では新製品の市場投入後に迅速に安定した量産体制を立ち上げる垂直立ち上げ²⁾や、開発プロセスの見直しによる生産性向上³⁾などが試みられている．しかし原料の調達から製品の完成までのリードタイムを短縮するには限界がある．そのため、供給指図が出る前に見込みで原料調達や前工程の作業を行うことは避けられない．この場合、どの時期にどの程度の供給を指示するかが課題となる．

これまで、このような供給量と期日は責任者の経験に基づいて決められてきた．しかしライフサイクルが短くなる中で、供給の意思決定が企業収益に与える影響が大きくなってきており、リスクの定量的評価に基づく意思決定が不可欠となっている．

金融の分野では、金融資産や金融商品の価値の予測値とそのボラティリティをもとに様々なリスクの指標を定量評価し、最適な投資計画を立案する研究が多く行われている^{4)~7)}．これに対し、製造、流通業の供給計画では、需要が確率的に変動する確率的在庫モデル^{8),9)}に基づいて、製品のサービスレベルを一定以上に保つように計画が立案されている．しかし、この方法では欠品の発生率の評価しか行われず、利益や機会損失の変動幅の分析はできない．

本論文で提案するシステムでは、金融分野で広く用いられているリスクの定量的評価の考え方を、供給計画の評価に導入する．これにより、従来の手法では実現できなかった、利益や機会損失の変動の大きさや、最悪の場合の利益額の定量的評価が可能となる．定量的評価に基づいた複数の代替計画案の比較を実現し、意思決定を支援する．

2. 需給計画業務と課題

2.1 需要予測

企業の需給計画部門では、商品の需要を予測し、この予測に基づいて供給量を決定する．需要予測は、過去の需要量の時系列データをもとに、指数平滑法、ARIMA(自己回帰和分移動平均)モデルや重回帰モデルなどの統計手法¹⁰⁾により行われる．しかし商品によっては需要に明確な規則性がない場合や、推定に必要なとされる十分なデータがない場合もある．このような場合には市場調査、景気動向や予測担当者の経験により予測が行われる．一部の商品では、マーケティング部門による販促活動などの需要を増加させる働きかけが行われる場合もある．この場合これらの要素を加味して担当者が予測値を決定する¹¹⁾．

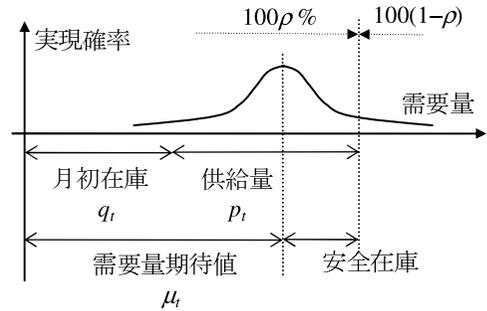


図1 安全在庫による供給量決定
Fig.1 Supply quantity fixed by buffer stock.

2.2 供給計画

供給計画の業務で最も多く使用されている方法が安全在庫⁸⁾に基づいた供給量決定である．この方法では、まず商品のサービスレベルを意思決定する．サービスレベルとは商品の機会損失が発生しない確率である．続いて、このサービスレベルを実現できる供給量を決定する．

ある商品の t 月の需要量が期待値 μ_t 、標準偏差 σ_t の正規分布 $N(\mu_t, \sigma_t)$ に従うと予測されたとする．また、 t 月の初めには、前月から引き継いだ q_t 個の在庫があり、 t 月に新たに供給する量を p_t とする．機会損失の発生を $100\rho\%$ の確率で防ぐには、図1に示すように $q_t + p_t$ が需要の確率分布の上位 $100(1-\rho)\%$ の点になる供給量 p_t を決定する．ここで、 $q_t + p_t$ から需要量の期待値 μ_t を引いた値を安全在庫量と呼ぶ．安全在庫量は需要の不確実性を吸収するための在庫量である．

2.3 需給計画業務の課題

従来の供給計画では、サービスレベルをもとに供給量を決定してきた．この場合、サービスレベルをどのように設定するかが課題となる．これまで機会損失(品切れ)防止に主眼が置かれてきたため、95%~99%と高いサービスレベルの設定が多く、過剰在庫が発生しやすい．しかし近年のライフサイクルの短縮化傾向のもとでは、過剰在庫を売り切る前に商品寿命に達し、多大な破棄損失が発生し、企業収益に大きな影響を与えてきている．

供給量を増やすことで機会損失が減り、収益が上昇する．しかし、ある量を超えると逆に死蔵在庫の破棄損失が増え、収益が低下する．この関係を正しく把握し、適切な供給量を決定することが重要になる．このため、収益の観点から適切な供給計画の立案を支援することが求められている．

3. リスク分析システムの提案

収益の観点を取り入れた供給計画を立案するには、需要の不確実性のもと、供給量の意思決定が利益に与える影響を分析、可視化し、意思決定者に提供する必要がある。

3.1 需給計画の利益構造のモデル化

リスク分析を行うには、需要と供給からどのように利益がもたらされるかを適切にモデル化する必要がある。商品のライフサイクルの長さを T 月とし、これを計画期間とする。また、以下の変数を用いる。

- d_t : t 月の需要量
- p_t : t 月の供給量
- q_t : t 月の月初在庫量
- s_t : t 月の販売量
- l_t : t 月の機会損失量
- u_t : t 月の販売単価
- v_t : t 月の供給コスト単価
- w_t : t 月の在庫保管コスト単価

月初在庫量とは、その月の開始時点に前の月から繰り越した在庫量である。また、その月の最後に残り、翌月に繰り越される在庫量を月末在庫量と呼ぶが、これが翌月の月初在庫量になる。

販売量 s_t は、供給量と月初在庫量の和もしくは、需要量のどちらか小さい値となるので次式で表される。

$$s_t = \min(d_t, p_t + q_t) \tag{1}$$

機会損失量は、需要量が販売量を上回った量であり、次式となる。

$$l_t = d_t - s_t \tag{2}$$

翌月の月初在庫量（つまり当月の月末在庫量）は次式となる。

$$q_{(t+1)} = p_t + q_t - s_t \tag{3}$$

販売量に販売単価を掛けた値が売上げ金額となる。また、供給量、在庫量にそれぞれコスト単価を掛けたものがコストとなる。売上げからコストを引いた値が粗利益となる。そこで計画期間を通しての粗利益は次式で与えられる。

$$G = \sum_{t=1}^T (s_t u_t - p_t v_t - q_t w_t) \tag{4}$$

この式の第 1 項は売上げ総額、第 2 項は供給コスト、第 3 項は在庫保管コストにあたる。なお、在庫保管コストは、月の平均在庫量または最大在庫量と、保管費用単価の積を用いるのが一般的であるが、ここでは月初在庫量と保管費用単価の積とした。実際には、システム利用者の実務に合わせて在庫保管コストの計算方

法を決定する。

機会損失額 L は、需要が供給を上回った場合に、もし十分な供給と在庫があれば得られた売上げ額で表され、次式になる。

$$L = \sum_{t=1}^T l_t u_t \tag{5}$$

ライフサイクルの最後に残った在庫量の合計を破棄在庫量 Q とする。これは $t = T$ となる月の月末在庫量の合計であり、次式となる。

$$Q = q_{(T+1)} \tag{6}$$

この中で、粗利益 G 、機会損失 L 、破棄在庫量 Q が供給計画の評価指標となる。

3.2 モンテカルロシミュレーションによるリスク分析

需要量 d_t は、予測された不確実な値のため確率変数になり、供給量 p_t が意思決定変数となる。需要量 d_t が確率変数なので、 G 、 L 、 Q の各指標も確率値となる。供給量 p_t を決定することで、これらの評価指標の分布形状が決定される。

リスク分析ではこれらの評価指標の分布の期待値、分散（または標準偏差）、信頼区間が使われる^{12),13)}。図 2 は横軸に評価指標の値、縦軸にその実現確率を示している。期待値は評価指標の平均的な値であり、分散は期待値のまわりでどの程度のばらつきがあるかを示す不確実性の指標として用いられる。100 γ %信頼区間は、評価指標が 100 γ %の確率でその範囲内の値になることを示している。したがって、信頼区間の上下限は最良、最悪の場合の評価指標値として用いられる。たとえば粗利益の 95% ($\gamma = 0.95$) 信頼区間の下限とは、下位 2.5 パーセントイルの粗利益額であり、粗利益がこの金額を下回る可能性が 2.5%しかないことを示している。これは最悪の場合の粗利益額ととらえることができる。もしこの金額が負すなわち損失の

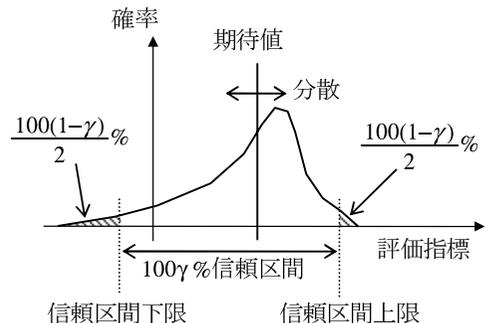


図 2 リスク分析で用いられる統計値
Fig.2 Statistics used in risk analysis.

発生となる場合、それを補えるだけの資金があるかどうかが意思決定の考慮点となる。

いくつかの供給計画案に対して、確率値である粗利益 G 、機会損失 L 、破棄在庫量 Q がどのような分布になるかを可視化し、各評価指標の期待値や標準偏差などの統計値を責任者に提供することで、その意思決定を支援する。

G, L, Q の統計値の算出にはモンテカルロ法を用いる。モンテカルロ法は不確実な要素を含むモデルについて、多量の乱数を用いてそのモデルの振舞いを調べる方法¹⁴⁾であり、リスク分析で広く用いられている¹³⁾。

G, L, Q の統計値は数値積分で求めることもできる。しかし対象とする問題の次元が 5 以上の場合には、モンテカルロ法は台形則による数値積分よりも効率が良い¹⁵⁾。たとえば 6 カ月の計画を立案する場合、需要量の次元は 6 となる。通常、供給計画は 6 カ月～1 年の期間で評価を行うため、本システムではモンテカルロ法を採用した。

モンテカルロ法により M 回のサンプリングを行い、すべての月の需要量を乱数でシミュレートする。 t 月の需要量の m 番目 ($m = 1, \dots, M$) のサンプルを $d_{t,m}$ とする。需要量が期待値 μ_t 、標準偏差 σ_t の正規分布と予測される場合、 $d_{t,m}$ を $N(\mu_t, \sigma_t)$ に従う乱数とする。このようにしてシミュレートされた需要量と、意思決定された p_t を、式 (1)～(6) に代入し、粗利益、機会損失、破棄在庫量のサンプル G_m, L_m, Q_m を計算する。

粗利益のサンプルを G_1, \dots, G_M とすると、期待値と分散は次式で推定される。

$$E[G] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M G_m \quad (7)$$

$$U[G] = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (G_m - E[G])^2 \quad (8)$$

粗利益のサンプルを昇順にソートしたものを $\{G_{(1)}, G_{(2)}, \dots, G_{(M)}\}$ とする。粗利益の $100\gamma\%$ 信頼区間の下限は $G_{((1-\gamma)M/2)}$ 、上限は $G_{((1+\gamma)M/2)}$ となる。ただし、 $(1 \pm \gamma)M/2$ が整数にならない場合は、1 次補間により信頼区間を求める。機会損失、破棄在庫量の統計値も同様に求める。

統計的手法で予測される需要量は一般に正規分布に従う。しかし、一部の商品では、マーケティング効果などにより需要予測関連部門によって予測量が修正される。たとえば、販促活動により需要量が増加すると

予想された場合、一般には、需要量の最大値（楽観シナリオ）、最小値（悲観シナリオ）と最頻値（最もありうるシナリオ）などが推定される。つまり、需要の予測量は、(1) 正規分布の期待値、標準偏差としてシステムに入力される場合、(2) 最大値、最頻値、最小値としてシステムに入力される場合、の 2 つがある。

Vose は、このような最大値、最頻値、最小値によって推定された予測量のシミュレーションにベータ分布を用いることを提案している¹⁶⁾。そこで、本システムでは需要のシミュレーションに、正規分布に加え、ベータ分布を導入した。ベータ分布の密度関数は次式で表される。

$$f(x) = \frac{(x - x_L)^{\alpha-1} (x_U - x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta) (x_U - x_L)^{\alpha+\beta-1}} \quad (9)$$

ここで、 α, β, x_U, x_L は分布の形状を決定するパラメータであり、 $B(\alpha, \beta)$ はベータ関数である。この分布の定義域は $x_L \leq x \leq x_U$ になる。ベータ分布の密度関数を 図 3 に示す。

最大値、最小値、最頻値、期待値をそれぞれ x_U, x_L, x_M, μ とすると、ベータ分布のパラメータは次式で求めることができる。

$$\mu = (x_U + x_L + 4x_M)/6 \quad (10)$$

$$\alpha = 6(\mu - x_L)/(x_U - x_L) \quad (11)$$

$$\beta = 6(x_U - \mu)/(x_U - x_L) \quad (12)$$

需要のシミュレーションにベータ分布乱数を用いることで、実際の需要予測業務から得られる情報を用いた供給計画の評価、リスク分析を可能とした。

このように本論文で提案するシステムは、

- (1) 金融分野で用いられている、標準偏差や信頼下限、上限などのリスク指標を供給計画の評価に導入し、
- (2) 粗利益、機会損失、破棄在庫量とこれらの関係を定量的に評価できる、

点が従来手法にない特長になる。これにより、単なるサービスレベルの維持しか実現できなかった従来のシステムと異なり、利益や機会損失といった経営指標の

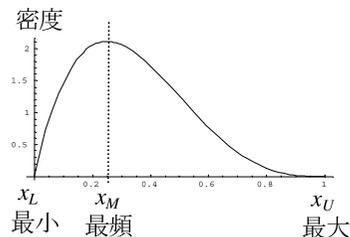


図 3 ベータ分布の密度関数

Fig. 3 Density function of Beta distribution.

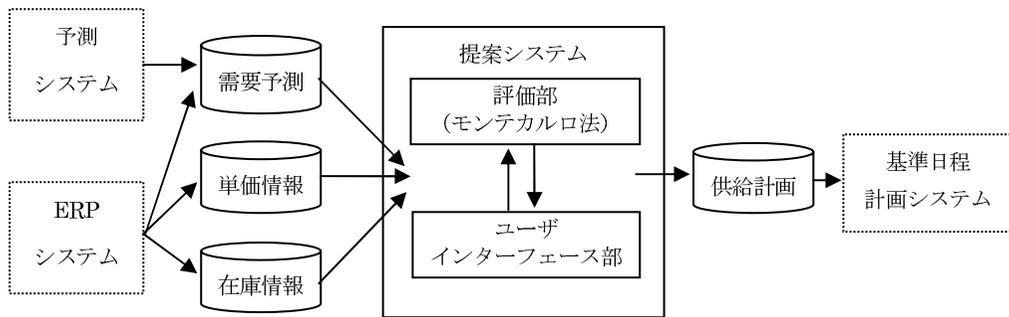


図 4 提案システムの構成
Fig. 4 Structure of proposed system.

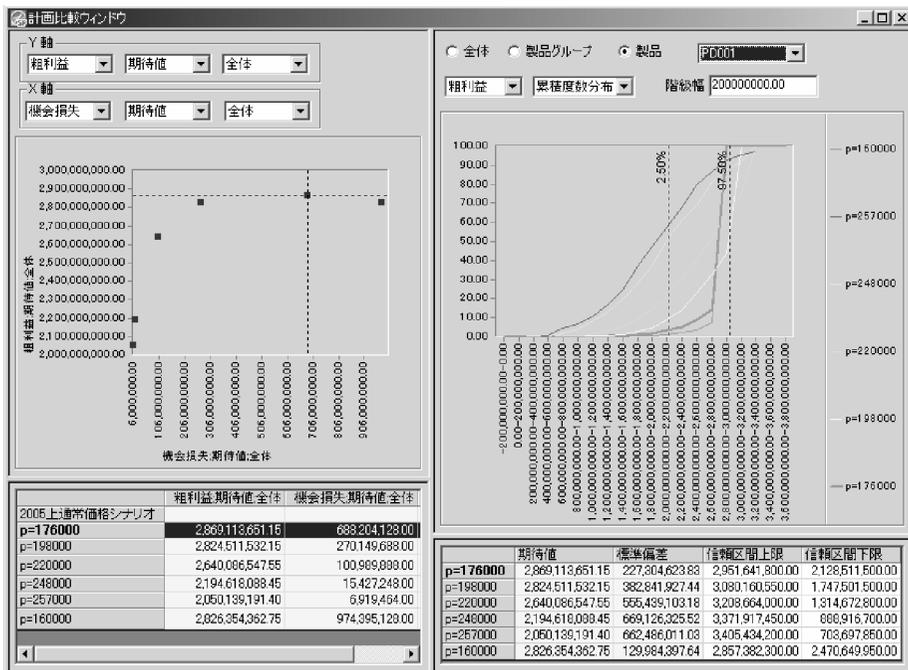


図 5 提案システムの画面例
Fig. 5 An example of the GUI of proposed system.

変動リスクなど経営の視点からの供給計画の評価が可能となる。

また、需要予測分布に正規分布だけでなくベータ分布も使えるようにすることで、マーケティングなどの需要関連部門による推定値を直接入力として扱える点も、本システムの特長である。

3.3 システムの構成

提案システムの構成を 図 4 に示す。本システムは需要予測システムで作成された需要予測データ、ERP (Enterprise Resources Planning) システムで管理されている需要実績、単価情報、在庫情報などを入力とする。これらの情報は提案システムの画面からも入力、

修正可能である。

システムは評価部、ユーザインタフェース部から構成され、評価部では前節で述べた利益モデルとモンテカルロ法を用いて、リスク指標の分析が行える。また、モンテカルロ法で生成したサンプルからヒストグラムを作成、表示することにより、これらの指標の確率分布形状を可視化することができる。以上の方法により、利益、機会損失、破棄在庫の関係やリスクの可視化と評価を実現し、収益の観点から適切な供給計画の立案を支援している。

提案システムのユーザインタフェースの例を 図 5 に示す。右側の画面は粗利益の累積度数を示したグラ

表 1 評価事例 1 (増産の意思決定)
Table 1 Case 1: Decision of production increase.

t	実績		予測, 計画			
	1	2	3	4	5	6
需要量期待値 μ_t (個)	100,000	95,000	90,000	85,000	80,000	70,000
標準偏差 σ_t	-	-	10,000	12,000	14,000	20,000
供給量 p_t (個)	160,000	160,000	?	0	0	0
月初在庫 q_t (個)	0	60,000	12,500	?	?	?
供給(製造)コスト単価 v_t (¥)	18,000	18,000	18,000	-	-	-
在庫保管コスト単価 w_t (¥)	50	50	50	50	50	50
販売単価 u_t (¥)	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000

で、複数の計画案を重ねて表示できる。その下段は期待値、標準偏差、信頼区間を表形式で表示する。左側は、横軸を粗利益、縦軸を機会損失としたグラフ上に各計画案をプロットした画面である。これらの画面で各計画案を比較できる。このほかに、需要予測量や供給量を変更する画面などもある。

本システムで評価され、実行の意思決定がされた供給計画は、基準日程計画システムに入力され、より詳細な日次レベルの生産スケジュールの立案に用いられる。

4. システムの評価

4.1 需要が予測を上回る事例の増産意思決定支援提案システムを、ある商品の供給計画に適用し、評価を行った。この事例で用いる各データの値を表 1 に示す。

この商品は市場投入から販売終了までの期間が 6 カ月である。最初の 3 カ月 ($t = 1, 2, 3$) に商品を製造し、残りの 3 カ月間 ($t = 4, 5, 6$) は在庫により需要を満たす計画となっている。6 カ月が経過した後、この商品とは別の新製品が市場に投入される。次の新製品の製造ライン立ち上げの準備のために、後半の 3 カ月はこの商品の新たな製造は行わない。

市場投入後 2 カ月が経過し、現在は $t = 2$ の時点であるとする。ここで、3 カ月目 ($t = 3$) の供給数量を意思決定を行う。当初は 3 カ月目も 160,000 個の製造を予定していたが、この商品は市場投入前の予測よりも多い需要で推移しており機会損失の可能性が高い。なお、需要予測はこれまでの需要の推移を加味して $t = 3, \dots, 6$ について再度行われている。需要は正規分布に従うものとして予測されている。予測は将来になるほど不確実であるため、標準偏差は t とともに増加している。

この商品は小型機器であり、在庫の保管コストが製造コストと比較して小さいという特徴を持つ。また、表 1 の ? マークの部分はこれから供給計画によって決

定する部分、および需要の変動によって変化する部分である。

まず、比較のために従来手法である安全在庫法によって供給量を求める。 $t = 3 \sim 6$ の期間の総需要は、正規分布に従う確率変数の和であるから、期待値が $\sum_{t=3}^6 \mu_t$ 、標準偏差が $\sqrt{\sum_{t=3}^6 \sigma_t^2}$ の正規分布に従う。サービスレベルを 95.0% に設定した場合、この期間の需要を満たすために必要な商品数は約 373,000 個になる。ここから、 $t = 3$ の月初在庫の数量を引くと、必要な製造量は 248,000 個になる。サービスレベルを 97.5% に設定すると、必要な製造量は 257,000 個になる。

次に提案システムによる供給計画の評価を行った。モンテカルロシミュレーションで用いるサンプル数 M は 1,000 とした。なお、サンプル数は必要とする分析の精度によって決定する。金融分野では高精度が求められるため数十万のサンプルを用いられる場合が多いが、今回のデータは 1 製品のみを扱っているので金額の規模が小さいためそれほど高い精度は必要とされない。今回のサンプル数は期待値と標準偏差の推定には十分な数である。また、95% 信頼区間の推定についてはサンプル数を 1,000 とすると、サンプルを昇順に並べた場合の 25 番目のサンプルと 975 番目のサンプル値が推定値となる。これらの推定値の 95% 信頼区間は、各サンプルを中心に上下約 10 サンプル (25 ± 10 , 975 ± 10) となる。今回の事例では、この精度で十分と判断された。 $t = 3$ の供給量 p_3 を 160,000 個、176,000 個、198,000 個、220,000 個、248,000 個 (サービスレベル 95.0%)、257,000 個 (サービスレベル 97.5%) とした 6 案について評価した。この結果を表 2 に示す。また、粗利益と機会損失の期待値のグラフを図 6 に示す。なお、信頼上限と下限は 95% 信頼区間の上下限である。

表 2 や 図 6 から、製造量が 176,000 個の場合に粗利益の期待値が最も高いことが分かる。従来の安全在

表 2 増産の意思決定の評価結果

Table 2 Result of case 1.

$t = 3$ の供給量	95.0%						97.5%
	160,000	176,000	198,000	220,000	248,000	257,000	
粗利益 (M¥)	期待値	2,817	2,852	2,802	2,599	2,173	2,017
	標準偏差	164	259	430	588	693	705
	信頼上限	2,858	2,952	3,080	3,209	3,372	3,372
	信頼下限	2,370	2,080	1,681	1,281	773	610
機会損失 (M¥)	期待値	965	639	290	93	11	4
	標準偏差	641	566	407	228	67	38
	信頼上限	2,277	1,893	1,365	837	165	0
	信頼下限	0	0	0	0	0	0
破棄在庫 (個)	期待値	1,542	3,974	11,445	25,239	49,810	58,529
	標準偏差	6,817	10,764	17,870	24,428	28,804	29,319
	信頼上限	19,937	35,937	57,937	79,937	107,937	116,937
	信頼下限	0	0	0	0	0	2,114

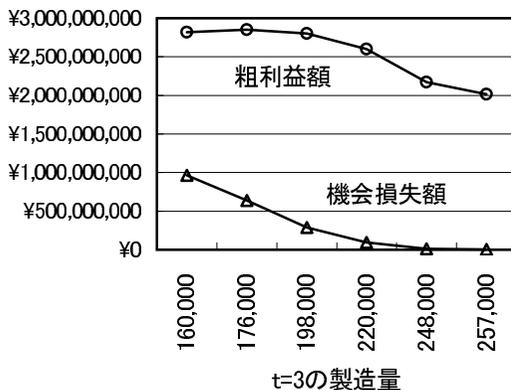


図 6 事例 1 の粗利益と機会損失の期待値

Fig. 6 Expected gross profit and opportunity loss in case 1.

庫法でサービスレベルを 95% に設定したときは、これよりも約 6 億 8 千万円少ない利益となる。さらに広く用いられている 97.5% に設定すると粗利益は約 8 億 4 千万円も少なくなる。粗利益を大きくするためには、ある程度の機会損失を受け入れる必要があることが分かる。

粗利益の標準偏差は、粗利益の期待値まわりのばらつき大きさ、つまり不確かさの指標となる。サービスレベルを 95.0% や 97.5% にする計画案は標準偏差が大きく、リスクの高い計画であることが分かる。また、これらの案は他の計画案と比較して粗利益の信頼下限が低い額であり、この点でもリスクが高いことが分かる。

4.2 需要が予測を下回る事例の減産および値引き意思決定支援

次に、需要が当初予測よりも少ない場合の意思決定に適用し、評価を行った。この評価で使用した各データを表 3 に示す。前節の事例と同様、最初の 3 カ月

間に商品を製造し、残りの 3 カ月を在庫により需要を満たす計画である。需要が当初予測より少なく推移しているため、最終の製造となる $t = 3$ の供給量を見直す。

この事例で、安全在庫法による供給量は、サービスレベル 95.0% の場合に 95,000 個、97.5% の場合に 101,000 個になる。

また、マーケティング部門より値引きによる需要の拡大策が提案されていた。そのため、表 3 の数値をもとに、これまでの値引きの実績などを考慮して、値引きを実施した場合の需要の最大値、最小値、最頻値が表 4 のように推定されている。販売単価を $t = 3$ 以降に 2 割引にして消費を刺激し、需要を 10% ~ 20% 増加させるという計画である。

以上の各データを用いて、提案システムによる供給計画の評価を行った。 $t = 3$ の供給量 p_3 を 20,000 個、35,000 個、50,000 個、65,000 個、80,000 個、95,000 個 (サービスレベル 95.0%)、101,000 個 (サービスレベル 97.5%) にした 7 案について評価を実施した。モンテカルロ法のサンプル数は 1,000 とした。値引きのない場合については需要量を正規分布に従う乱数で、値引きのある場合についてはベータ分布に従う乱数でシミュレートした。この結果を表 5、表 6 に示す。表 5 が値引きのない場合、表 6 が値引きのある場合の計画案の分析結果である。また、図 7 は粗利益と機会損失の期待値をグラフに示したものである。実線が値引きのない場合、点線が値引きのある場合を示している。

この結果から、値引きにより需要を拡大しても、利益の増加にはつながらないことが分かる。また、機会損失額は「値引きあり」と「値引きなし」で大きな違いは見られない。このことから、利益の観点からは

表 3 評価事例 2 (減産の意思決定)
Table 3 Case 2: Decision of reduction of production.

t	実績		予測, 計画			
	1	2	3	4	5	6
需要量期待値 μ_t (個)	80,000	80,000	75,000	65,000	50,000	35,000
標準偏差 σ_t	-	-	5,000	7,000	10,000	13,000
供給量 p_t (個)	160,000	160,000	?	0	0	0
月初在庫 q_t (個)	0	80,000	160,000	?	?	?
供給 (製造) コスト単価 v_t (¥)	18,000	18,000	18,000	-	-	-
在庫保管コスト単価 w_t (¥)	50	50	50	50	50	50
販売単価 u_t (¥)	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000

表 4 評価事例 3 (値引きのある場合)
Table 4 Case 3 (Discount sales price).

t	実績		予測, 計画			
	1	2	3	4	5	6
最大値 x_U (個)	80,000	80,000	93,000	90,000	80,000	72,000
最頻値 x_M (個)	80,000	80,000	85,000	80,000	65,000	40,000
最小値 x_L (個)	80,000	80,000	60,000	45,000	20,000	0
供給量 p_t (個)	160,000	160,000	?	0	0	0
月初在庫 q_t (個)	0	80,000	160,000	?	?	?
供給 (製造) コスト単価 v_t (¥)	18,000	18,000	18,000	-	-	-
在庫保管コスト単価 w_t (¥)	50	50	50	50	50	50
販売単価 u_t (¥)	24,000	24,000	19,200	19,200	19,200	19,200

表 5 減産の意思決定の評価結果
Table 5 Result of case 2.

$t = 3$ の供給量	95.0% 97.5%							
	20,000	35,000	50,000	65,000	80,000	95,000	101,000	
粗利益 (M¥)	期待値	2,012	2,069	2,047	1,925	1,688	1,424	1,305
	標準偏差	48	119	242	351	420	445	439
	信頼上限	2,020	2,109	2,197	2,284	2,372	2,296	2,176
	信頼下限	1,918	1,652	1,355	1,127	832	553	392
機会損失 (M¥)	期待値	756	454	216	66	12	1.4	0.7
	標準偏差	420	354	285	157	63	19	14
	信頼上限	1,603	1,210	942	537	176	0	0
	信頼下限	0	0	0	0	0	0	0

表 6 販売価格引きの意思決定の評価結果
Table 6 Result of case 3.

$t = 3$ の供給量	95.0% 97.5%							
	20,000	35,000	50,000	65,000	80,000	95,000	101,000	
粗利益 (M¥)	期待値	1,138	1,089	961	752	526	249	139
	標準偏差	67	159	258	333	361	377	381
	信頼上限	1,157	1,174	1,190	1,205	1,220	1,025	834
	信頼下限	890	628	324	63	-168	-456	-598
機会損失 (M¥)	期待値	474	240	107	29	5.3	0.4	0.1
	標準偏差	346	276	199	94	35	7.4	3.6
	信頼上限	1,181	871	704	355	46	0	0
	信頼下限	0	0	0	0	0	0	0

引きをしないで販売を続けるほうが良いと判断できる。また $t = 3$ の製造量を 35,000 個にした場合に最も高い粗利益が期待できる。

表 5 の粗利益の標準偏差や信頼下限から、安全在庫

法による案と比較し、製造量 35,000 個の計画案のほうがリスクが小さく、高い粗利益が期待できる計画であることが分かる。

また、表 6 で、値引きを行う場合に製造量を 80,000

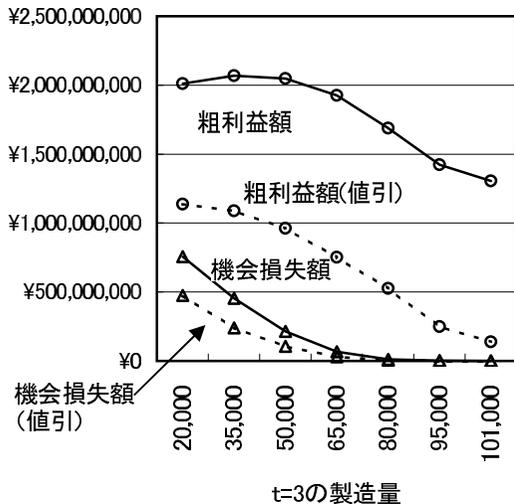


図7 事例2の粗利益と機会損失の期待値

Fig. 7 Expected gross profit and opportunity loss in case 2.

個以上とする計画案は粗利益の信頼下限が負の値である。これは、この計画案が最悪の場合には赤字になるリスクの高い案であることを示している。

4.3 分析機能の評価

4.1, 4.2 節の評価で示したように、従来から広く用いられているサービスレベルに基づく安全在庫法は供給計画案が企業の収益に与える影響を把握できず、結果としてリスクの高い計画案が採用される可能性がある。

本システムは、利益の変動の大きさや最悪の場合の利益額などの指標でリスクを定量的に分析、評価することを可能にした。また、複数の代替計画案の間の利益とリスクのトレードオフの関係の可視化を実現した。これにより、企業の体力に見合ったリスクを受け入れて、どこまで利益を追求できるかを把握できる。

4.4 他のアプローチとの比較

提案システムとは異なるアプローチによるライフサイクル短縮化への対応方法の1つに、米国のコンピュータ製造販売会社が導入した直販型ビジネスモデルがある¹⁷⁾。このビジネスモデルでは受注を受けてから生産する受注生産とすることで需要予測を不用とし、在庫を持たず、在庫の破棄損失を削減している。しかし、この方法は、ある程度のコンピュータの知識を持つアドバンスユーザー層をターゲットにした戦略であり、店頭で商品説明を聞いてコンピュータを購入する初心者顧客セグメントの切捨てになる¹⁸⁾。このため、回線契約をとまなうために店頭販売が前提となる携帯電話や、一般消費者をターゲットにした商品に適用す

ることはできない。

一般消費者向けに店頭販売を行う商品では、見込み供給が必須である。この場合、不確実な需要予測に基づく供給計画が収益に与える影響を適切にとらえ、経営への影響を考慮した意思決定が不可欠である。本システムはこのような要求に応えられること、さらに一般消費者を対象とする多くの製造業や小売業に広く適用可能である点で、優れている。

5. おわりに

本論文では、不確実な需要のもとで、収益という観点から供給計画を評価するシステムを提案した。需要の予測に誤差があることを前提に、その誤差によって計画の評価指標がどのように分布するかを可視化する。このために需要と供給を入力とする利益構造をモデル化し、そのモデルに基づいてモンテカルロシミュレーションにより、粗利益、機会損失、破棄在庫量の期待値、標準偏差、信頼区間を求める。また、需要のシミュレーションに正規分布に加えて、ベータ分布を利用できるようにすることで、販売促進活動による需要の増加効果などを加味して推定される需要の最大、最頻、最小値を扱える。これにより、実務上の様々なケースを容易に評価できる。

提案システムにより、供給計画案を収益の観点から分析、評価することを可能にした。本システムをライフサイクルが短い商品の事例に適用し、意思決定者に有用な評価指標を提供できることを確認した。

参考文献

- 1) 中小企業庁：中小企業白書（2005年版），ぎょうせい（2005）。
- 2) NDE Research：垂直立ち上げを実現するカギは開発・設計，日経デジタルエンジニアリング7月号，pp.52-53（2003）。
- 3) 足立 泰：DSMの基本情報の依存関係から本質を明確化，日経デジタルエンジニアリング2月号，pp.104-107（2004）。
- 4) Cai, X., Teo, K.L., Yang, X.Q. and Zhou, X.Y.: Portfolio Optimization under l_∞ Risk Measure, *Proc. 35th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.3682-3687（1996）。
- 5) Consiglio, A. and Zenios, S.A.: Designing Portfolios of Financial Products via Integrated Simulation and Optimization Models, *Operations Research*, Vol.47, No.2, pp.195-208（1999）。
- 6) Mulvey, J.M.: Introduction to financial optimization: Mathematical Programming Special Issue, *Mathematical Programming*, Vol.89,

No.B, pp.205-216 (2001).

- 7) 今野 浩：下方リスクモデルによるポートフォリオ最適化，オペレーションズ・リサーチ，Vol.46, No.11, pp.635-639 (2001).
- 8) 橋本文雄，黒澤敏郎，帆足辰雄，加藤 清：新編生産管理システム，共立出版 (1993).
- 9) 久保幹雄：ロジスティクス工学，朝倉書店 (2001).
- 10) Goodrich, R.L.: *Applied Statistical Forecasting*, Business Forecast Systems, Inc., Belmont, MA (1989).
- 11) Crum, C. and Palmatier, G.E.: *Demand Management Best Practices*, J. Ross Publishing, Inc (2003).
- 12) Evans, J.R. and Olson, D.L.: リスク分析・シミュレーション入門，共立出版 (1999).
- 13) Kammen, D.M. and Hassenzahl, D.M.: リスク解析学入門，シュプリンガー・フェアラーク東京 (2001).
- 14) 津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション，培風館 (1995).
- 15) 湯前祥二，鈴木輝好：モンテカルロ法の金融工学への応用，朝倉書店 (2000).
- 16) Vose, D.: *Distributions from expert opinion, Risk analysis for managers*, David Vose Consultancy, Dordogne, France (2002).
- 17) 藤野直明，姫野桂一：サプライチェーン・マネジメントに関するビジネスモデル：分析と設計理論の考察，経営情報学会誌，Vol.10, No.3, pp.3-20 (2001).
- 18) 松尾博文：米国にみるサプライチェーンマネジメントの事例とその考察，OR 学会統合オペレーション特別研究プロジェクト，戦略・マネジメント研究成果報告書，pp.31-36 (2003).

(平成 17 年 6 月 17 日受付)

(平成 18 年 1 月 6 日採録)



手塚 大 (学生会員)

1992 年大阪大学基礎工学部生物工学科卒業。1994 年同大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士前期課程修了。同年日立東北ソフトウェア(株)(現(株)日立東日本ソリューションズ)入社。2003 年より在職のまま北海道大学大学院工学研究科博士後期課程。アプリケーションソフトウェアの研究，開発に従事。



樋地 正浩 (正会員)

1986 年山形大学理学部物理学科卒業。同年日立東北ソフトウェア(株)(現(株)日立東日本ソリューションズ)入社。1997 年東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士課程修了。博士(情報科学)。2005 年より東北大学会計大学院教授を兼任。自律分散協調システム，リスクモデルの研究，開発に従事。電子情報通信学会，ソフトウェア科学会，ACM，IEEE/CS 各会員。



棟朝 雅晴 (正会員)

昭和 43 年生。平成 8 年北海道大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。同年同大学院工学研究科システム情報工学専攻助手。平成 10~11 年イリノイ大学基礎工学科遺伝的アルゴリズム研究室客員研究員。平成 11 年北海道大学情報メディア教育研究総合センター助教授。平成 15 年同大学情報基盤センター助教授。博士(工学)。遺伝的アルゴリズム，ネットワークシステム，分散処理システムに関する研究に従事。IEEE 会員。



赤間 清 (正会員)

昭和 48 年東京工業大学工学部制御工学科卒業。昭和 50 年同大学院修士課程修了。昭和 54 年同大学院博士課程単位修得退学。同年同大学助手。昭和 56 年北海道大学文理学部講師。平成元年同大学工学部助教授。平成 11 年より同大学情報メディア教育研究総合センター教授。平成 15 年同大学情報基盤センター教授。人工知能，知識処理，等価変換に基づく問題解決の研究に従事。工学博士。人工知能学会会員。