



レジリエンスな生産計画のためのリスク評価指標AVaRのShapley値による最適化

1815029 川口 晏璃 電子・情報工学科 指導教員 Antonio Oliveira Nzinga Rene

要約

本研究では、環境変化や不確実性にレジリエンスに対応できる先進的な生産計画手法を、リスク評価指標とゲーム理論を融合させた最適化問題により構築する。そこで、まず生産計画における日本独自の仕組みである生産内示を考慮した企業間連携をモデル化する。次に、従来、リスクは在庫が0を下回る累積分布関数の確率で見積もられていたのに対して、在庫が0を下回る量で見積もる評価指標をAVaRで導出した。さらに、Shapley値により合理的にリスクを期ごとに振り分ける最適化手法を開発した。

キーワード：

生産計画、レジリエンス、リスク評価指標、AVaR、Shapley値

1 はじめに

生産内示は、日本の製造業界の伝統的な情報共有のやり方であり、購買・生産における効率のよい企業間連携、すなわち日本独特のサプライチェーン・マネジメントである[1]。内示を先行需要情報と考えて、在庫補充政策を論じている研究がある[2]。いわゆる新聞売り子問題の拡張版であり、先行需要情報を情報として入手することは補充リードタイムを需要リードタイムの長さに応じて削減できることなどが示されている。また、MRP (Material Requirement Planning) における ATP (Available to Promise) システム[3]は、先行需要情報をとして注文を扱う点では似ているが、在庫予想と在庫への注文の割り当てが中心に議論されている。

一般的には、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方式の活用できる範囲は少ない。製造リードタイムは納入リードタイムより長く、そのために、確定注文を待ってからでは納入が間に合わない。したがって、確定注文が内示とズレる前提で内示情報にもとづいて見込みで中間製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方式にならざるを得ない。

近年では、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[3]。顧客の要望する納入りードタイムはますます短くなり、また個別の製品ごとに、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。このことが、サプライチェーン全体や調達先の都合をも含めた予想や発注を難しくしている。

そこで本研究では、MCPS (Mass Customization Production Planning & Management System) をさらに発展させ、環境の変化や不確実性にレジリエンスに対応できる生産計画手法を、リスク評価指標とゲーム理論を融合させた最適化問題により構築する。

2 レジリエンスな生産計画

2.1 生産計画とレジリエンス

生産計画とは、生産量と生産時期に関する計画であり、生産すべき製品の種類・数量・時期、製品の生産に要する原材料・部品、製造から出荷に至るまでの日程を計画することである。資金計画や人事計画など、そのほかの多くの計画は生産計画を基に立てられることからも、企業にとり最適化すべき重要な問題である。生産計画は製造業において、その他の生産管理（受注管理、発注管理、在庫管理、品質管理など）と同様に必要不可欠である。

レジリエンスとは、2021年版ものづくり白書に記載されたキーワードでもあり、リスクを予想しながら、予見される条件(想定される状況)下あるいは、予見されない条件(想定外の状況)下でも、求められている動作を継続する力あるいは、回復する力のことである。変化や不確実性に対応できるレジリエンスの高いオペレーションやサプライチェーンの構築は不可欠である。

2.2 安全在庫と未達率

生産管理においては、レジリエンスを備えつつ、在庫切れはできるだけ生じさせず、在庫はできるだけ持たない生産計画が求められる。適正在庫を決定する要素の一つに安全在庫がある。安全在庫の量が決まると、適正在庫の下限となる量が決定し、在庫の下限量を維持するよう努めれば、無駄な在庫を抱え込むことがなくなるうえ、在庫が不足するリスクもなくなり、余剰在庫によるキャッシュフローの悪化も防げる。安全在庫の計算では、安全係数の根拠や需要のばらつきに標準偏差を使うことなど不確実な需要の表現に正規分布を前提にしている場合が多い。

期間別生産計画における中日程計画は、中期生産計画(大日程計画)や実際の受注量に基づいて、週あるいは日単位でどの製品をどのくらい作るのか決める。期間の各期において少なくとも1度でも在庫切れが生じる確率を

未達率と定義する。生産計画期間中に許容される未達率が与えられた時、従来、在庫切れが生じるリスクは等確率となるように各期に割り振られている[4]。

安全在庫量と未達率

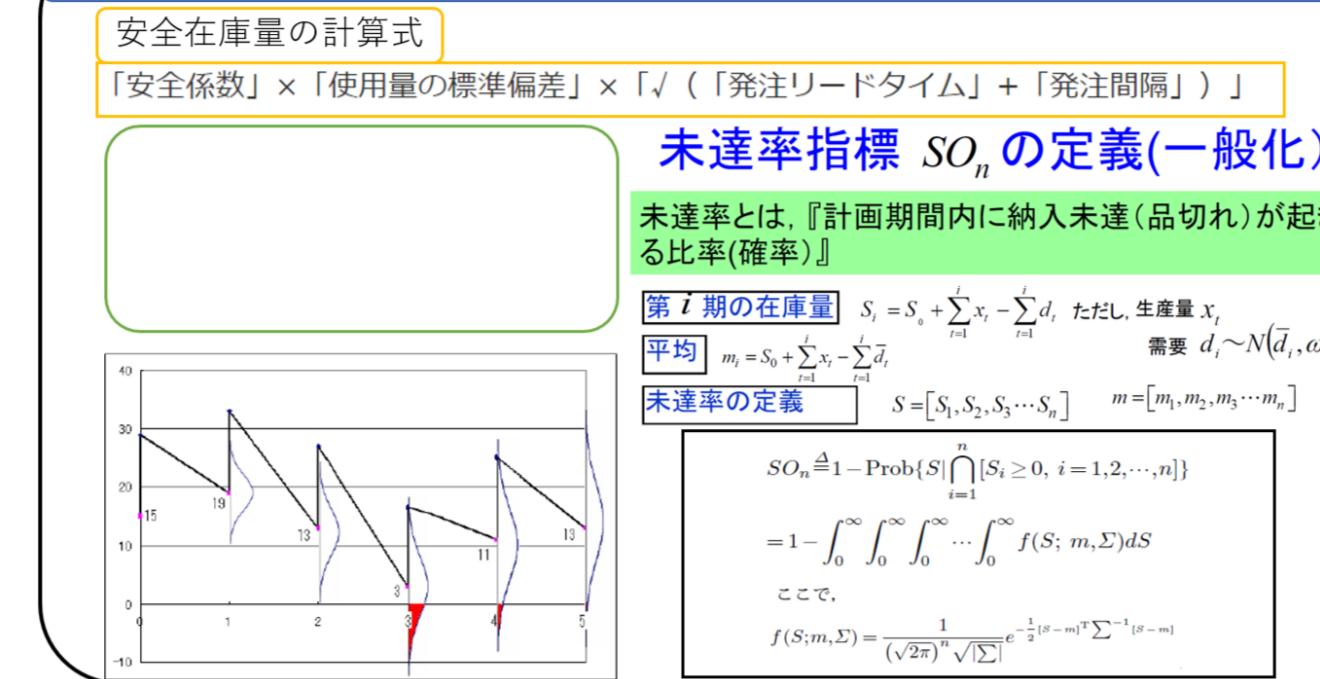


図1 安全在庫量と未達率

2.3 Shapley 値による合理的な配分

協力ゲームでは、プレイヤーが提携し、その提携によって獲得された報酬を分配する際に、提携への貢献度に応じた合理的な報酬の配分が求められる。Shapley 値は協力によって得られた利得を、個人合理性、全体合理性のもとで割り振ることができる。Shapley 値の導出には、重み付き二乗誤差最小化や線形計画法を適用することができる。

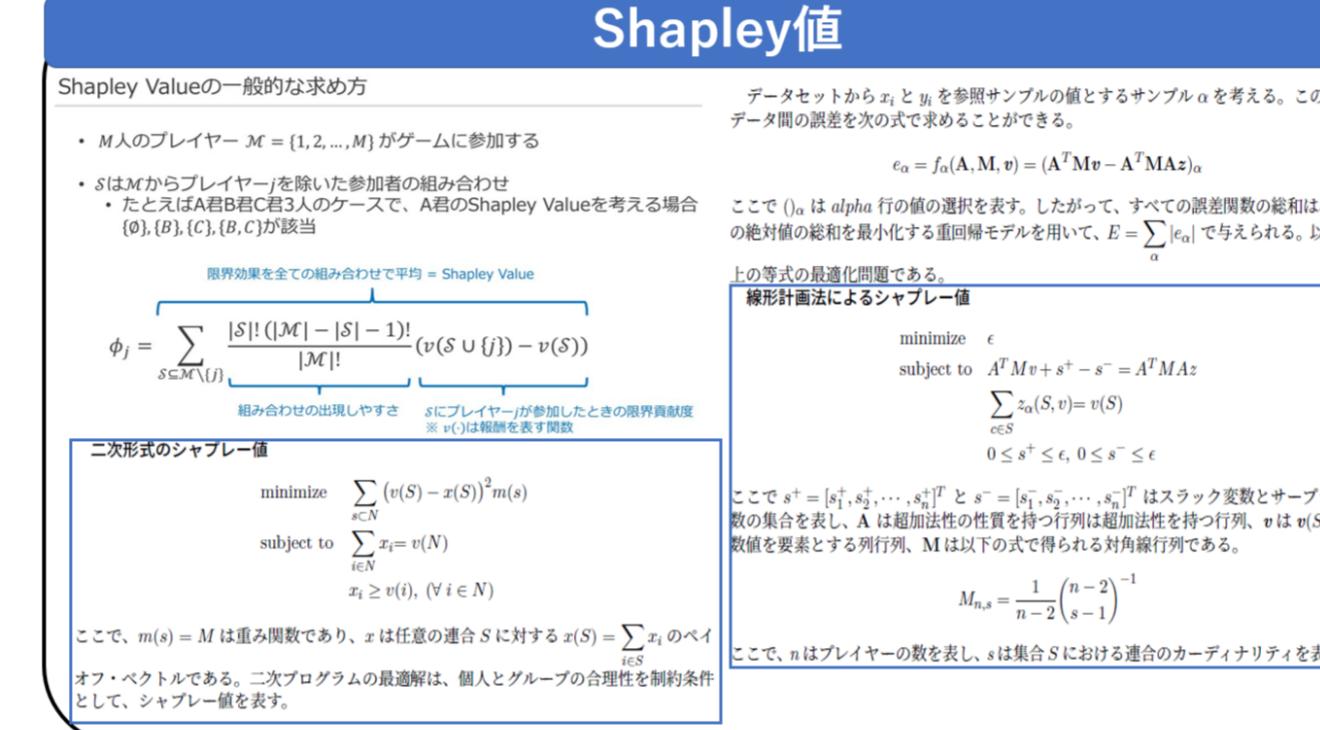


図2 Shapley 値と数理的な導出法

—3 リスク評価指標と合理的な配分—

3.1 リスク評価尺度の導入

VaR(Value at Risk)とは、リスク分析の手法の一つであり、現有資産の損失可能性を時価推移より測定する分析指標である。金融商品のポートフォリオを、現時点からある一定の期間保有するときに、リスク・ファクターの変動により、ある一定の確率で生じ得る最大損失額のことである。VaRを求めるることは、損益の分布の100 α 点を求めることがある。

VaRでは超過損失の程度について把握することはできない。分布の裾が厚い場合には超過損失が大きくなりやすく、このような場合の超過損失の平均はAVaR(Average Value at Risk)として把握される。AVaRはコヒーレントなリスク尺度の中で一番典型的なもので、アクチュアリーの分野ではExpected Shortfall, ファイナンスの世界ではCVaRとも呼ばれている。

本研究では、生産計画のリスクを未達率という確率で見積もるものではなく、AVaRによる超過損失の平均で見積もることを提案する。

VaRとAVaR	
在庫管理におけるリスク指標(単期間) 在庫管理におけるリスク指標(多期間)	
リスク基準	リスク表現
Var概念	・在庫量が0以下になる確率 $S \geq 1 - \text{Prob}(S_i \geq 0)$
AVaR概念	・在庫量がAVaR以下である確率 $S \geq 1 - \text{Prob}(S_i \geq AVaR)$
リスク基準	・未達率 $SO_n = 1 - \text{Prob}(S_i \leq 0)$
AVaR概念	・ $SO_n^{(\text{avg})} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SO_i$
確率表現	・安全在庫量と同額 例えは、在庫切れ率5%は、直感的に100個のうち1個(1%)の品切れが起こる確率 「この確率を「AVaR対応未達率」と呼ぶことにする
リスク表現	・未達率 $SO_n = 1 - \text{Prob}(S_i \leq 0)$
AVaR概念	・ $AVaR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AVaR_i$
確率表現	・安全在庫量と同額 例えは、在庫切れ率5%の時には、直感的に100個のうち1個(1%)の品切れが起こる確率 「この確率を「AVaR対応未達率」と呼ぶことにする

図3 リスク評価指標

3.2 Shapley 値による期ごとの配分

確定注文は、内示情報を平均とした分散を持つ確率の実現値であるとすると、生産計画期間における期首の在庫の分散に比べると期末の在庫の分散は、分散の加法性により増大している。それにも関わらず従来研究では、生産計画期間中に許容される未達率が与えられた時、各期の在庫切れが生じるリスクは等確率で割り振っていた。

本研究では、各期の特性に応じてShapley値により合理的に割り振る手法を提案する。

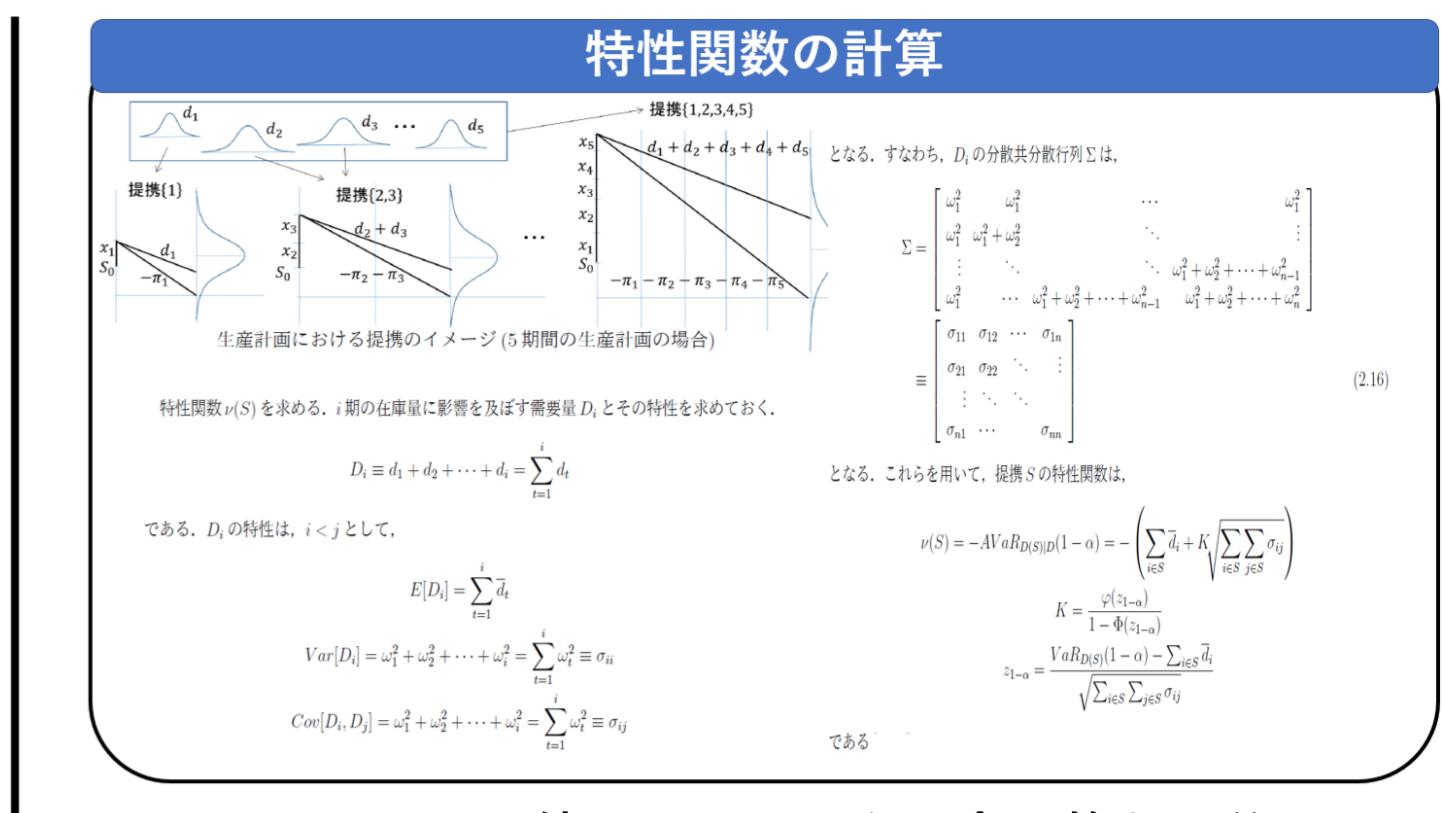


図4 Shapley 値によるリスクの合理的な配分

4 提案手法の概要

次月の月次内示は第3週の金曜日に出され、翌々週の週次内示は毎週の金曜日に出される。確定注文は3日前に提示される。週単位の生産計画の場合は5期間となる。提案手法は、信頼水準 α を所与として、多期間トータルの想定需要量がAVaRを満足する制約のもとで、期別に期首の在庫量目標と期別生産量を決定することができる。在庫品切れ確率を指標とした場合には現れない在庫量の分布のすそ野の大きさから生じるリスクを考慮できる。ただし、結果として在庫量が大きくなるが、リスクに対する耐性が増し、危険事態からの挽回が容易になり、レジリエンスな生産計画が実現できる。

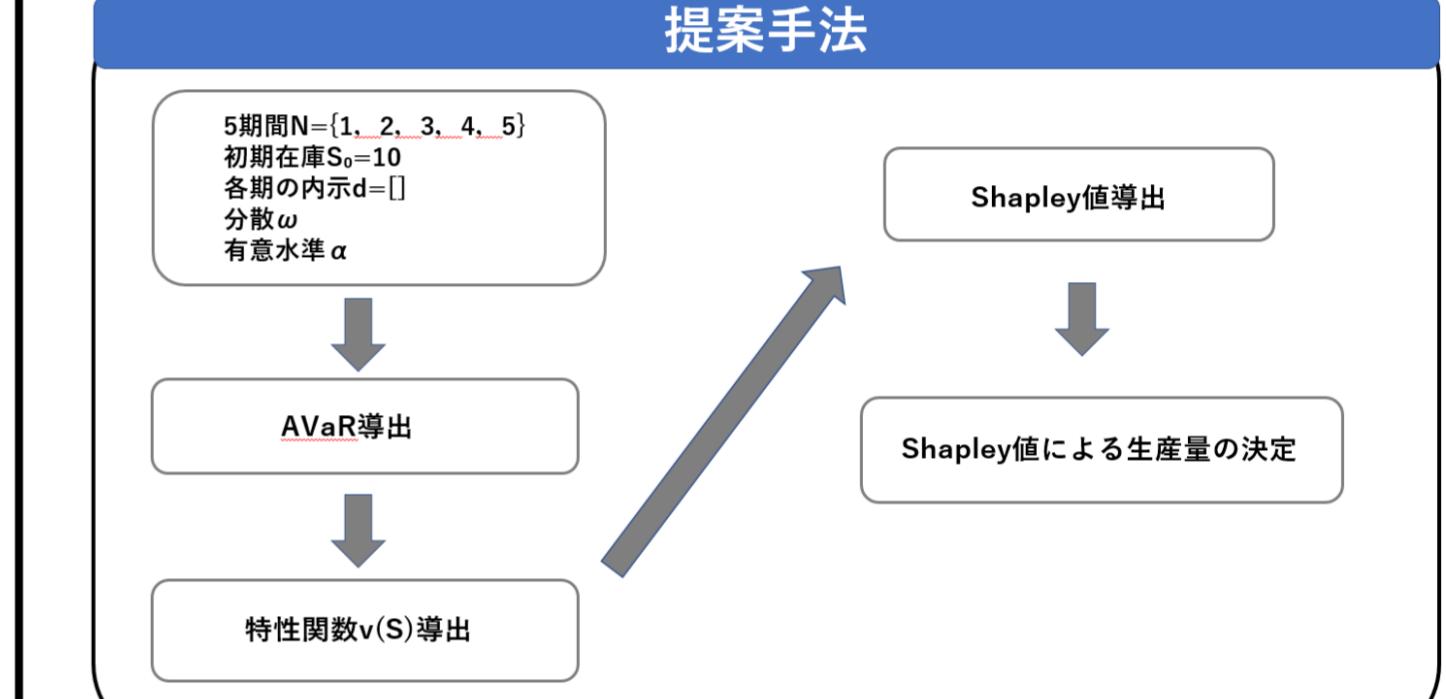


図5 提案手法によるレジリエンスな生産計画

5 数値実験並びに考察

ここで、5期間 $N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ の生産計画について、AVaRによるリスク評価指標のものと、特性関数の値を導出した結果を示す。初期在庫 S_0 は10として、各期の内示(需要)は $d = [10, 20, 24, 6, 12]$ で与えられるとする。ただし、確定注文は内示を平均として分散 $\omega = 3$ の不確実性があるものとする。有意水準は $\alpha = 0.01$ として数値実験した結果が図6である。

Table 2: Characteristic function $v(S)$ for a 5-period game	
Coalitions	$v(\emptyset)$
$v(\{1\})$	-17.9957
$v(\{2\})$	-31.3076
$v(\{3\})$	-37.8488
$v(\{4\})$	-21.9912
$v(\{5\})$	-29.7788
$v(\{1, 2\})$	-42.8935
$v(\{1, 3\})$	-49.9912
$v(\{1, 4\})$	-33.8788
$v(\{1, 5\})$	-41.5853
$v(\{2, 3\})$	-61.8788
$v(\{2, 4\})$	-45.5853
$v(\{2, 5\})$	-53.1545
$v(\{3, 4\})$	-51.1545
$v(\{3, 5\})$	-58.6151
$v(\{4, 5\})$	-41.9870
$v(\{1, 2, 3\})$	-73.5853
$v(\{1, 2, 4\})$	-57.1545
$v(\{1, 2, 5\})$	-64.6151
$v(\{1, 3, 4\})$	-62.6151
$v(\{1, 3, 5\})$	-69.9870
$v(\{1, 4, 5\})$	-53.2070
$v(\{2, 3, 4\})$	-72.8945
$v(\{2, 3, 5\})$	-81.2945
$v(\{2, 4, 5\})$	-64.5186
$v(\{3, 4, 5\})$	-69.6978
$v(\{1, 2, 3, 4\})$	-85.2845
$v(\{1, 2, 3, 5\})$	-75.6979
$v(\{1, 2, 4, 5\})$	-75.6979
$v(\{1, 3, 4, 5\})$	-80.8287
$v(\{2, 3, 4, 5\})$	-91.9169
$v(\{1, 2, 3, 4, 5\})$	-102.9670