

卒業論文

レジリエンスな多品目多段階生産在庫システムにおける
リスク評価指標 AVaR と許可値による最適化

Optimization Using Risk Measure AVaR and Permission Value
in Resilience Multi-Item Multi-Level Production Inventory System

富山県立大学 工学部 電子・情報工学科

1815029 川口 晏璃

指導教員 Antonio Oliveira Nzinga Rene 講師

提出年月: 令和4年2月

目次

図一覧	iii
表一覧	iv
記号一覧	v
第1章 はじめに	1
§ 1.1 本研究の背景	1
§ 1.2 本研究の目的	2
§ 1.3 本論文の概要	2
第2章 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題	4
§ 2.1 単一品目・単段階動的ロットサイズ決定問題	4
§ 2.2 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題の制約条件	5
§ 2.3 サプライチェーンにおけるエシェロン在庫	6
第3章 レジリエンスな生産計画	8
§ 3.1 生産計画の在庫切れのリスク評価尺度	8
§ 3.2 Shapley 値によるリスクの配分	9
§ 3.3 許可構造を伴うゲームと許可値	9
第4章 提案手法	11
§ 4.1 多段階における許可値の導出	11
§ 4.2 許可値による多段階工程のリスクの配分	11
§ 4.3 提案手法のアルゴリズム	11
第5章 数値実験並びに考察	12
§ 5.1 数値実験の概要	12
§ 5.2 実験結果と考察	12
第6章 おわりに	13
謝辞	14
参考文献	15

付録	17
A. 1 Hello World を並列実行するソースコード	17
A. 2 円周率計算を並列分散処理するソースコード	17

図一覧

2.1 エシェロン在庫の例	7
-------------------------	---

表一覽

記号一覧

以下に本論文において用いられる用語と記号の対応表を示す.

用語	記号
インジケータの計算に使用する期間	$n, N, m,$
時刻 t の終値	p_t
標準偏差	σ
ボリンジャーバンドのレート	p
ボリンジャーバンドの期間中のレート	\bar{p}
過去 m 日間の最高値	p_{max}^m
過去 m 日間の最安値	p_{min}^m
2^n 直交表に割付けられた主効果と交互作用の効果	θ'
s 番目の効果	θ_s
実数	\mathbf{R}
線形模型	\mathbf{Y}
計画行列	\mathbf{A}
零ベクトル	$\mathbf{0}$
\mathbf{A} の i 番目の列ベクトル	\mathbf{A}_i
誤差ベクトル	ϵ
単位行列	\mathbf{I}
帰無仮説	$H_0^{(i)}$
未知母数の推定値	$\hat{\theta}$
k 番目の支店の効率性	η_k
k 番目の支店に対する変数	λ_k
k 番目の支店の m 番目の入力データ	x_{km}
k 番目の支店の n 番目の出力データ	$y_k \sim$

はじめに

§ 1.1 本研究の背景

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、内示情報を仲立ちとした企業間連携、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]. 内示情報とは発注者が製造者へ提示する事前注文予測量のことである。「内示方式」の詳細は、業界により、業種により、企業間の連携の仕方により異なる。すなわち内示は提示されるタイミングと提示される生産情報期間により多くの種類がある。たとえば、「毎週金曜日に提示、翌々週の月曜日から先1週間までの日別の生産量に関する参考情報」などである。また、数量が確定した注文情報（以下、確定注文という）は、納入日（納期）の数日前から当日までの間に提示されることが多い。したがって、基本形は、「内示情報（提示される期間と内示量の明細）」と「納入日に対して何日前に提示されるか」により規定される。内示情報は確定注文ではないため不確実性をもっている。こういったリスクに対してレジリエンスを考慮した生産・在庫管理が不可欠である。

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。いわゆる新聞売り子問題の拡張版であり、先行需要情報を入手することは補充リードタイムを需要リードタイムにに応じて削減できることなどが示されている。また製造業では、資材所要量計画（Material Requirement Planning: MRP）[2] が活用されている。MRP は生産計画に基づき、部品表を作成して必要資材の数を管理する手法である。導入する目的は、製品に必要な資材の量や納期を把握することによって、無駄の少ない生産を実現するためである。納期回答（Available to Promise: ATP）は、サプライチェーン・マネジメントでの重要な概念の一つで、注文を受けてから納品できる数量と納期を回答することである。サプライチェーンのグローバル化が進んだり、複雑な製造プロセスで製品が完成する企業においてはATPは難しくなっている。MRPにおけるATPシステムは、先行需要情報として注文を扱う点では似てはいるが、在庫予想と在庫への注文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、確定注文が内示とずれる前提で内示情報に基づいて見込み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、顧客が製品仕様を自由に選択できる範囲は広がっている。顧客の要望する納入リードタイムはますます短くなり、また個別の製品ごとには、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が難しくしている。

§ 1.2 本研究の目的

ある先行研究では、多期間における生産計画を考える際、在庫品切れ率（未達率）を定義し、その未達率を各期間に等分することによってリスクを振り分けていた。しかし、不確実な需要というものは正規分布を前提に表現されており、期間が進むにつれて、加法性により正規分布のすそは広がっていくことになる。そのため未達率を等分することは、各期間の内示情報や、在庫品切れの正規分布の加法性は考慮されていなかった。また、在庫切れのリスクを Average value-at-risk(以下、AVaR) で捉え、ゲーム理論の Shapley 値を用いて生産計画を考えている研究がある。この先行研究は、各期間の特性に応じたリスクの振り分けをされていたが、多期間で単一製品だけを取り扱ったものである。よって、加工などの工程が無視されており、一般的な製造業には適していないものであった。

そのため本研究では、一般的な製造業に対して、複数製品を取り扱う多段階工程の最適な生産・在庫管理を大きな目的としている。市場ニーズの多様化・個性化で顧客がカスタマイズできるようになった背景より、製品の需要の不確実性が増すこととなったため、その不確実性を考慮する。先行研究より、在庫切れのリスクを減らすために、工程ごとの在庫量の分布のすその大きさから生じるリスクを表現する AVaR を用いる。AVaR を反映した多期間の多品目多段階生産在庫システムについて、ゲーム理論を用いた定式化と解法を提案する。多段階の工程をゲーム理論の許可構造と捉え、工程ごとに許可値を導出することによって、各工程に重みを与える。

§ 1.3 本論文の概要

本論文は次のように構成される。

第1章 本研究の背景と目的について説明する。背景ではサプライチェーンと生産・在庫管理の研究の重要性について述べる。目的は多品目多段階生産在庫システムについてリスクを考慮した最適化について提案することを述べる。目的は多段階多品目の最適な生産計画について述べる。

第2章 多段階多品目動的ロットサイズについて説明する。基礎となる単一段階・単一品目についてまとめる。また、標準定式化とエシェロン在庫を用いた定式化について述べる。

第3章 単一段階・単一品目におけるリスク評価指標とゲーム理論を組み合わせたレジリエンスな生産計画について述べる。

第4章 提案手法のリスク評価指標の部分とリスクを配分する部分について述べる。その後、本研究の提案手法の流れについて述べる

第5章 提案手法に基づいて多段階多品目における生産計画の最適化を行う．そして，本研究の提案手法によって得られた結果が有意であることを示す．

第6章 本研究で述べている提案手法をまとめて説明する．また，今後の課題について述べる．

多品目多段階動的ロットサイズ決定問題

§ 2.1 単一品目・単一段階動的ロットサイズ決定問題

ここでは、複雑な実際問題の基礎となる単一品目・単一段階モデルを考える．単一品目・単一段階の動的ロットサイズ決定問題の基本形は、以下の仮定をもつ．

1. 期によって変動する需要量をもつ単一の品目を扱う．
2. 品目を生産する際には、生産量に依存しない固定費用と数量に比例する変動費用がかかる．
3. 計画期間はあらかじめ決められており、最初の期における在庫量（初期在庫量）は0とする．任意でも可能である．
4. 次の期に持ち越した品目の量に比例して在庫（保管）費用がかかる．
5. 生産時間は0とする．これは、生産を行ったその期にすぐに需要を満たすことができることを表す．発注を行う場合には、発注すればすぐに商品が届くこと、すなわちリードタイムが0である．
6. 各期の生産可能量には上限がある．
7. 生産固定費用、生産変動費用、ならびに在庫費用の合計を最小にするような生産方策を決める．

単一品目・単一段階動的ロットサイズ決定問題の定式化

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & \sum_{t=1}^T (f_t y_t + c_t x_t + h_t I_t) \end{array} \quad (2.1)$$

$$\begin{array}{ll} \text{subject to} & I_{t-1} + x_t - I_t = d_t \quad \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (2.2)$$

$$x_t \leq M_t y_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.3)$$

$$I_0 = 0 \quad (2.4)$$

$$x_t, I_t \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.5)$$

$$y_t \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.6)$$

上の定式化の制約条件 (2.2) 式は、各期における品目の在庫保存式である．前期からの繰り越しの在庫量 I_{t-1} に今期の生産量を加え、需要量 d_t を減らしたものが来期に持ち越す在庫量 I_t であることを意味する．(2.3) 式は、生産を行わない気における生産量が0であり、生産を行う期においてその上限が M_t 以下であることを表す式である．(2.4) 式は、初期在

庫量が0である。各期の生産可能量に制約がない場合には容量制約なしのロットサイズ決定モデルと呼ばれる。

容量制約なしの単一品目・単一段階のロットサイズ決定モデルは、動的最適化を適用することによって、効率的に解くことができる。

1, ..., j 期までの需要を満たすときの最小費用を $F(j)$ と書く。初期条件は、

$$F(0) = 0 \quad (2.7)$$

と書くことができる。再帰方程式は、期 j までの最小費用が期 $i (< j)$ までの最小費用に、期 $i+1$ に生産を行うことによって期 $i+1$ から j までの需要をまかなうときの費用 $f_{i+1} + c_{i+1}(\sum_{t=i+1}^j d_t) + \sum_{s=1}^{j-1} h_s \sum_{t=s+1}^j d_t$ を加えたものになる。よって、

$$F(j) = \min_{i \in \{1, \dots, j-1\}} \left\{ F(i) + f_{i+1} + c_{i+1} \left(\sum_{t=i+1}^j d_t \right) + \sum_{s=i+1}^{j-1} h_s \sum_{t=s+1}^j d_t \right\} \quad (2.8)$$

となる。上の再帰方程式を $j = 1, 2, \dots, T$ の順に計算することによって、もとの問題の最適費用 $F(T)$ を得ることができる。

§ 2.2 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題の制約条件

ここで、多段階にわたって多品目の製造を行うときのロットサイズ決定問題を考える。多品目多段階ロットサイズ決定問題とは、多品目多段階生産在庫システムにおいて取り扱われる各々の品目に対する処理（原材料の発注、半製品の加工、製品の組立など）のロットサイズをそれぞれいくらにするかを決定する問題である。

研究の視点は実際の処理に先立って各品目のロットサイズの目安を与えるという点にある。したがって実際の処理計画すなわちスケジューリングについては円滑な処理ができるようあらかじめ配慮しておく必要がある。具体的には、これは工程稼働率の状況に応じてバッファーとしての仕掛品在庫の量を調整することであるが、これは供給側と需要側の処理の位相を分析者が工程の状況に応じて設定して問題に与えることによって可能である。

多品目多段階では、部品展開を考える。その際、部品表を用いる。部品表（BOM: Bill Of Materials）は、製品を造るのに必要な部品を一覧にし、製品の製造に関する重要な情報について端的に示したものである。BOMは通常品目情報（PN: Parts Number）とPNの親子関係を管理する構成管理情報（PS: Part Structure）で構成される。こういったBOM情報を効率的に管理できるか、有効活用できるかが製造業にとって重要である。

また、多品目多段階の場合、段取り替え費用と段取り替え時間を考慮する必要がある。段取り替えとは、生産ラインに流す製品に似合わせて、加工機や装置の設定を変更する作業のことである。段取り替え時間をどこまで短縮できるかという点が生産効率に直結する。しかしながら、ほとんどの製造業では、単位時間あたりの生産性であったり、1人当たりの生産性を見た場合、段取り時間を短縮することが難しく、かえってコストが高くなることがある。そこで、多品目多段階ロットサイズ決定問題を考える際には、段取り替え時間と段取り替え費用も考慮する必要がある。以下は、多品目多段階動的ロットサイズの定式化である。

標準定式化

$$\begin{aligned}
& \text{minimize} && \sum_{t=1}^T \sum_{p \in P} (f_t^p y_t^p + c_t^p x_t^p + h_t^p I_t^p) \\
& \text{subject to} && I_{t-1}^p + x_t^p = d_t^o + \sum_{q \in \text{Parent}_p} \phi_{pq} x_t^p + I_t^p \quad \forall p \in P, t = 1, \dots, T \\
& && \sum_{p \in P_k} x_t^p + \sum_{p \in P_k} g_t^p y_t^p \leq M_t^k \quad \forall_k = K, t = 1, \dots, T \quad (2.9) \\
& && x_t^p \leq UB_t^p y_t^p \quad \forall_p \in P, t = 1, \dots, T \\
& && I_0^p = 0 \quad \forall_p \in P \\
& && x_t^p, I_t^p \geq 0 \quad \forall_p \in P, t = 1, \dots, T \\
& && y_t \in \{0, 1\} \quad \forall_t = 1, \dots, T
\end{aligned}$$

上の定式化で、最初の制約式は、各期および各品目に対する在庫の保存式を表す。より具体的には、品目 p の期 $t-1$ からの在庫量 I_{t-1}^p と生産量 x_t^p を加えたものが、期 t における需要量 d_t^o 、次の期への在庫量 I_t^p 、およびほかの品目を生産するときに必要な量 $\sum_{q \in \text{Parent}_p} \phi_{pq} x_t^q$ の和に等しいことを表す。2 番目の制約は、各期の生産時間の上限制約を表す。すべての品目の生産時間は、1 単位あたり 1 時間になるようにスケーリングしてあると仮定していたが、実際問題のモデル化の際には、品目 p を 1 単位生産されるときに、資源 r を使用する時間を y_t としたほうが汎用性がある。3 番目の制約式は、段取り替えをしない期は生産できないことを表す。

§ 2.3 サプライチェーンにおけるエシェロン在庫

近年、モノを作る世界では、消費量が減少したことから大量に生産することにリスクが生じ始め、社会が天然資源の枯渇問題および地球環境への負荷の低減のために、持続可能な循環型社会をめざしていることから、サプライチェーンマネジメント (Supply Chain Management: SCM) が注目されている。(参考論文) サプライチェーンとは、原材料・部品の調達から、配送までの製品の全体的な流れを 1 つの連続したシステムとして捉えることである。

サプライチェーンマネジメントは不確定な需要を満たすために、順序依存関係があり能力変動のあるオペレーションをマネジメントすることで最小のコストで最大のスループットを上げることが目的としている。

次にエシェロン在庫について述べる。「エシェロン」とは階層のことをいい、「エシェロン在庫」とは、ある特定のお店だけの在庫ではなく、サプライチェーン全体での在庫のことをいう。ある在庫点から見た場合は、ある在庫点を含めたサプライチェーン下流に位置する在庫量 (輸送中の数量を含む) の総和である。図 2.1 のエシェロン在庫の例で考えると、配送センター B のエシェロン在庫は、B を含め、B の下流に位置する在庫量と輸送量を合計したものとなる。

エシェロン在庫のメリットは、まず在庫管理が難しい場合に対応可能である。在庫管理を行う際、ある特定の企業の在庫の増減をすると、他の企業の在庫がその反動で在庫を増減

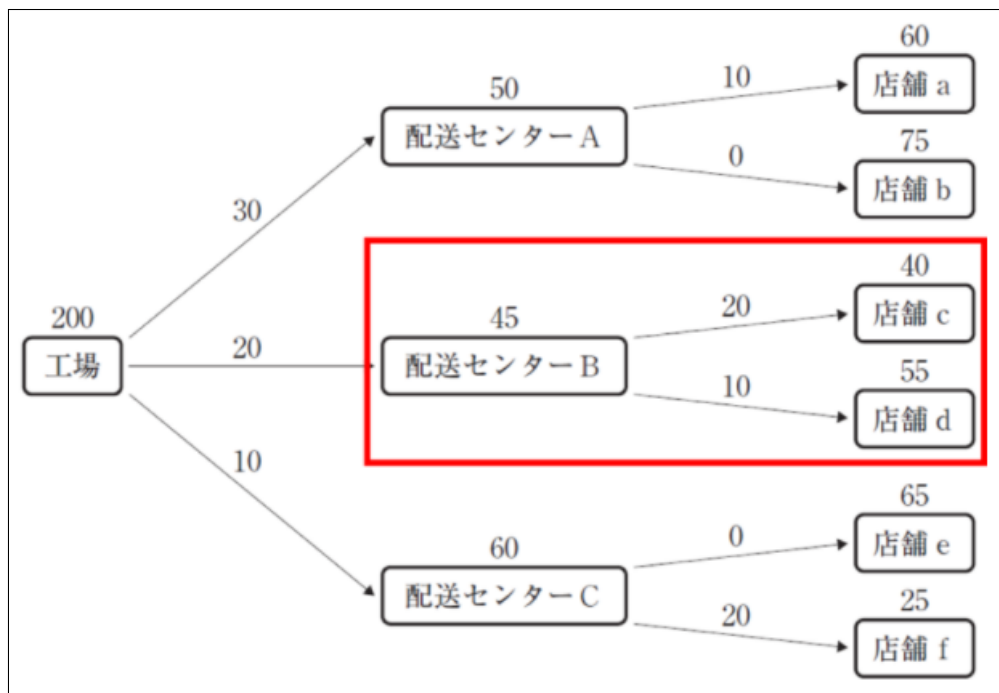


図 2.1: エシェロン在庫の例

させてしまうことがある。この場合、在庫管理が「部分的な最適解」になってしまい、サプライチェーン全体としては解決しないという事態が発生する。このような課題があるため、「在庫」を「エシェロン在庫」として考えると、ある特定の企業の在庫管理ではなく、サプライチェーン全体での在庫管理となる。2つ目は、マルチエシェロン在庫最適化である。マルチエシェロン在庫最適化とは、在庫を保管型倉庫に集約するのではなく、メーカーから保管型倉庫、小売りから各段階にわたって在庫を分散させて、サプライチェーン全体を効率化する考えのことである。マルチエシェロン在庫最適化のメリットは、店舗側の需要予測だけでなく物流センターなどの中間拠点でも受注データなどを用いて需要予測を行い、メーカーや店舗の需要予測と整合させることで全体を反映した需要予測をすることができる。

レジリエンスな生産計画

§ 3.1 生産計画の在庫切れのリスク評価尺度

生産管理においては、レジリエンスを備えつつ、在庫切れを生じさせず、在庫はできるだけ持たない生産計画が求められる。レジリエンスな生産計画を向上させるためには、リスクに対する高い認識が必要であり、リスクを計算するものとしてリスク評価尺度が重要である。従来より、適正在庫を決定する要素の1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ぐことができる。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要素の表現に正規分布を前提としている場合が多い。

安全在庫量の定義

安全在庫量の式

内示情報を用いた生産計画問題は、従来から不確実な需要に対して、単位当たりの在庫コストと単位あたりの在庫切れ機会損失を与えて、在庫コストと在庫切れ機会損失の合計の期待値を最小となるように在庫補充を行うモデルがある。しかし、上野らは、単位当たりの在庫切れ機会損失を軽量することは実務上、非常に困難であるとの認識から、これを使わず期間全体を通じての未達率を定義し、計画目標未達率を制約としてモデルに組み込むこととしている。未達率 (Unfulfilled-order-rate) とは、顧客への納入回数のうち納入未達が発生した回数の比率である。計画目標未達率は、標準のリードタイムのもとで許容される目標未達率である。在庫切れ機会損失を防ぐために安全在庫というものがある。上野らは単一品種の生産計画問題として定式化している。

未達率の定義

未達率 SO_n

代表的なリスク評価尺度としては Value-at-Risk (VaR), Average Value-at-Risk (AVaR) がある。VaR とは、リスク分析の手法の1つで、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うる最大損失額のことである。VaR を求めることは、損益の分布の 100α 点を求めることができるが、超過損失

の程度について把握することが困難であるという点や、劣加法性を満たさないという点が指摘されている。一方、AVaRでは、分布のすそが厚い場合には超過損失が大きくなりやすい場合の超過損失の平均はAVaRで把握することができる。AVaRは、単調性、劣加法性、正の同次性、平行移動不変性を満たしている。

VaRとAVaRは次のように定義されている。

VaRとAVaRの定義

$$\begin{aligned} VaR(\epsilon) &= -\inf(F(x) \geq \epsilon) = -F_x^{-1}(\epsilon) \\ AVaR(\epsilon) &= \frac{\epsilon}{1} \int_0^\epsilon VaR(p) dp \end{aligned} \quad (3.1)$$

生産計画を考えるときには、AVaRを用いることとする。ここで、AVaRに基づく生産計画問題について述べる。

AVaRに基づく週間生産計画問題

計画期間を n 期とする。 i ($\leq n$)期の不確実な需要を d_i 、需要量の期待値を \bar{d}_i 、需要量の分散を ω_i^2 とし、互いに独立な正規分布に従うとする。

$$\begin{aligned} d_i &\sim N(\bar{d}_i, \omega_i^2) \quad \forall_i \\ Cov(d_i, d_j) &= 0 \quad \forall i, j, i \neq j \end{aligned} \quad (3.2)$$

需要量の分散共分散行列 A は、

$$A = \quad (3.3)$$

§ 3.2 Shapley 値によるリスクの配分

確定注文は、内示情報を平均とした分散をもつ確率の実現値であるとする。生産計画期間における機首の在庫の分散に比べると期末の在庫の分散は、分散の加工性により増大している。ここでゲーム理論を適用して考える先行研究がある（参考文献）。特性関数を導出し、その各期の特性に応じてShapley値により合理的に割り振り、各期の需要量を決定する。

§ 3.3 許可構造を伴うゲームと許可値

許可構造はプレイヤーを頂点とする有向グラフ (N, D) で与えられる。ただし、 $D \subseteq \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$ は有向枝 (i, j) が D に含まれることはプレイヤー j が行動するためにはプレイヤー i の許可が必要であることを表している。許可構造を伴うゲームを (N, v, D) で表す。許可構造を伴うゲームにおける実行可能な提携を定義する。ある提携が実行可

能となるためには、そのメンバーの上位プレイヤーすべてがその提携に参加する必要があると仮定する．したがって、許可構造を (N, D) とすると、実行可能な提携の集合は $\mathcal{F}_d = \{S \subseteq N \mid \Gamma_D^-(i) \subseteq S, \forall i \in S\}$ と定義される．(参考文献)

提案手法

§ 4.1 多段階における許可値の導出

多段階工程をゲーム理論の許可構造と捉え、

§ 4.2 許可値による多段階工程のリスクの配分

許可構造を伴うゲーム (N, v, D) に対する許可値 $\rho(v, D)$ は制限ゲーム v^D は以下のように定義される []。各 $S \subseteq N$ に対して、

§ 4.3 提案手法のアルゴリズム

数値実験並びに考察

§ 5.1 数値実験の概要

本研究では，4.3 章で説明したように，多段階多品目の生産計画について，リスク評価尺度 AVaR とゲーム理論の許可構造を用いて，在庫切れのリスクを配分することによって，

§ 5.2 実験結果と考察

今回の実験結果により，提案手法で

おわりに

従来の生産計画では、不確実性をもっており、それを考慮するときに、在庫切れのリスクを各期間に等確率で割り振るものや、AVaR と Shapley 値を用いるものがあったが、単一段階・単一品目で考えられていた。しかし実際の製造業では、そうではないため多段階多品目に拡張した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多大なご指導と終始懇切丁寧なご鞭撻を賜った富山県立大学工学部電子・情報工学科情報基盤工学講座の奥原浩之教授，António Oliveira Nzinga René 講師，電子・情報工学科3年の大森一輝さんに深甚な謝意を表します．最後になりましたが，多大な協力をしていただいた研究室の同輩諸氏に感謝致します．

2022 年 2 月

川口 晏璃

参考文献

- [1] Sunil Chopra and Peter Meindl, “Supply Chain Management Strategy, Planning and Operations: Strategy, Planning and Operation ”, Prentice Hall, 2000.
- [2] Guillermo Gallego and Ozalp Ozer, “Optimal Use of Demand Information in Supply Chain Management ”, Economics, 2002.

付録

A. 1 Hello World を並列実行するソースコード

Raspberry Pi 3 を 8 台で Hello World を並列実行するソースコード A.1 を示す.

A. 2 円周率計算を並列分散処理するソースコード

Raspberry Pi 3 を 8 台で円周率計算を並列分散処理するソースコード A.2 を示す.