

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

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

川口 晏璃 (Anri Kawaguchi)
t815029@st.pu-toyama.ac.jp

富山県立大学 工学部 電子・情報工学科 情報基盤工学講座

Teams, 14:00-15:15 Wednesday, February 16, 2022.

1.1 本研究の背景

2/15

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。近年では、市場ニーズの多様化・個性化によりたくさんの種類の製品やそのバリエーションが増え、顧客が製品仕様をカスタマイズできるようになっている。これにより、納入リードタイムは短くなり製品ごとの受注量の変動が大きく、需要の不確実性が増大している。

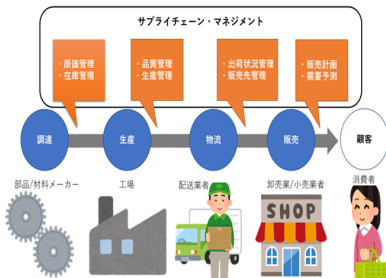


図1 サプライチェーン・マネジメント

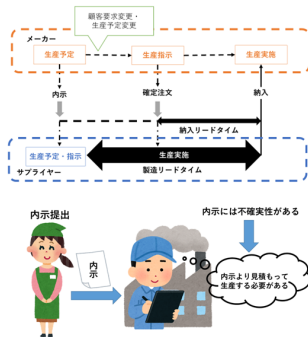


図2 内示情報

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

1.2 本研究の目的

3/15

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

一般的な製造業に対して，多品目多段階生産在庫システムを考え，需要量のリスクをアベレージ・バリュー・アット・リスク（Average Value-at-Risk: AVaR）で捉え，ゲーム理論の許可値を用いて各工程にリスクを配分し，最適な生産在庫システムを提案する．

2.1 単一品目・単一段階のロットサイズ決定問題

4/15

製品の構成部品を、ある加工・組立システムで生産する場合、必要な時に必要な量を作る生産計画法の1つとして、資材所要量計画（Material Requirement Planning: MRP）がある。

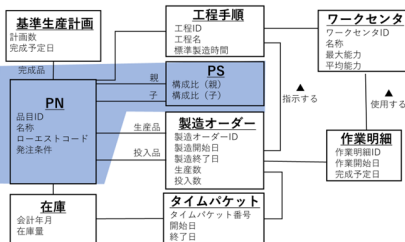


図3 MRPシステムの概念モデル



図4 BOMの例¹

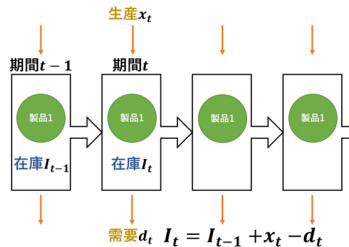


図5 単一品目・単一段階の概念図

部品展開表（Bill Of Materials: BOM）
通常品目情報（Parts Number: PN）
構成管理情報（Part Structure: PS）

¹PreSight, "BOM", <https://www.presight.co.jp/glossary/detail/bom.php>, 閲覧日 2022. 1. 15.

2.2 多品目多段階ロットサイズ決定問題とエシェロン在庫

5/15

多品目多段階ロットサイズ決定問題とは、取り扱われる各々の品目に対する処理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。多品目多段階の場合、段取り替え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合わせて、機械などを変更する作業のことである。エシェロン在庫とは、サプライチェーン全体の在庫のことをいう。

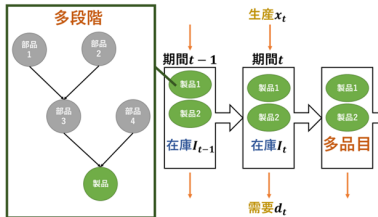


図6 多品目多段階の概念図



図7 段取り替え

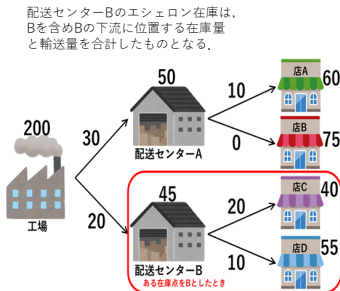


図8 エシェロン在庫の例

2.3 内示情報

6/15

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

製造業者から部品供給業者に提示される「内示」、販売業者からメーカに提示される「参考値」に着目し、これらを顧客から事前に示される生産参考情報、すなわち「内示情報」ととらえる。内示情報は事前の予定であるから、確定注文時には変動している。リードタイムの関係より確定注文を待ってからでは納入が間に合わない。

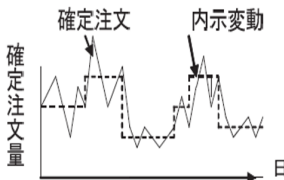


図9 内示変動と確定注文²

内示情報は不確実性を含むため、時間の経過につれて製造業者の必要量が変わることが当然生じる。確定注文は、時間変化する内示と内示情報からのばらつきが加わったものとなる。

図10は自動車メーカの生産計画の例である。現時点が3週間目の金曜日とすると、翌月の月次内示、翌々週の週次内示、先3日の確定注文が提示される。

		1M										2M									
		3W					4W					1W					2W				
		M	T	W	Th	F	M	T	W	Th	F	M	T	W	Th	F	M	T	W	Th	F
3W	F						▲	●	●	●	○	○	○	○	○	○					
4W	M						▲	●	●	●	○	○	○	○	○	○					
	T						▲	●	●	●	○	○	○	○	○	○					
	W						▲	●	●	●	○	○	○	○	○	○					
	Th						▲	●	●	●	○	○	○	○	○	○					
	F						▲	●	●	●	○	○	○	○	○	○					

▲：現時点 ●：確定注文 ○：週次内示 □：月次内示

図10 内示情報の例²

²上野信行, “大規模生産における内示情報を活用した生産計画-不確実な需要環境に対する先行需要情報の活用-”, 計測と制御, Vol. 50, No. 7, pp. 436-443, 2011.

3.1 在庫切れのリスク評価尺度

7/15

生産管理は、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。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。

安全在庫

不確定な要素による欠品が生じないように、最低限保管しておく在庫量が決まると、適正在庫の下限となる量が決定し、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。

安全在庫量の定義

安全在庫係数 $\times$ 在庫使用料の標準偏差 $\times \sqrt{\text{発注リードタイム} + \text{発注感覚}}$

表1 安全在庫係数

許容欠品率 (%)	安全在庫係数
0.1	3.10
1.0	2.33
2.0	2.06
5.0	2.06
10.0	1.29
20.0	0.85
30.0	0.53

未達率

計画期間において「少なくとも1つ以上の期の在庫量が0未満になる（在庫切れが起きる）確率」である。

未達率の定義

期間 $t = \{1, 2, \dots, T\}$ 、計画目標未達率を β とすると、

$$\beta_t = 1 - \sqrt[1-\beta]{\forall t \leq n}$$

1. 全期間の累積需要量 D に対する $AVaR$

$$D = D(N) = \sum_{i \in S} d_i \text{ に対する } AVaR \text{ は,}$$

$$AVaR_{D|D}(1-\alpha) = E[D|D > VaR_D(1-\alpha)]$$

2. i 期（提携 $\{i\}$ ）の需要量 d_i の $AVaR$

$$D(\{i\}) = d_i \text{ に対する } AVaR \text{ は,}$$

$$AVaR_{d_i|D}(1-\alpha) = E[d_i|D > VaR_D(1-\alpha)]$$

3. 合成期間（提携 S ）の累積需要量の $AVaR$

$$D(S) = \sum_{i \in S} d_i \text{ に対する } AVaR \text{ は,}$$

$$AVaR_{D(S)|D}(1-\alpha) = E[D(S)|D > VaR_D(1-\alpha)]$$

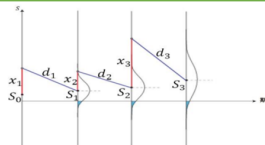


図11 期が進むごとの需要量のリスク³

³ 田口雄基, 上野信行, 奥原浩之, 小出哲彰 “Conditional-Value-at-Risk(CVaR) によるリスクを考慮した多期間生産計画の解法”, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 13, pp. 87-90, 2014.

3.2 Shapley 値によるリスクの配分

8/15

協力ゲームの理論では、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ような状況を考える。Shapley 値は、提携に対するプレイヤーの貢献度に応じた報酬を分配する方法である。

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

ゲーム理論における Shapley 値

任意の部分集合 S に対して

$$\phi_i(v) = \sum_{S \subset N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(n-|S|-1)!}{n!} (v(S \cup \{i\}) - v(S))$$

$$v(\emptyset) = 0$$

$$v(S \cup T) \geq v(S) + v(T)$$

▶ 個人合理性

すべてのプレイヤーに 1 人で提携を作るときの利得 $v(\{i\})$ 以上の利得を与える性質。

すなわち、 N のすべてのプレイヤー i に対して、

$$\phi_i(v) \geq v(\{i\})$$

が成り立つ。

▶ 全体合理性

N 全体の提携値は各プレイヤーの利得の総和である。

$$\sum_{i \in N} \phi_i(v) = v(N)$$

表2 限界貢献度

全体提携の形成過程	各プレイヤーの限界貢献度		
	1	2	3
1 ← 2 ← 3	0	18	21
1 ← 3 ← 2	0	21	18
2 ← 1 ← 3	18	0	21
2 ← 3 ← 1	18	0	21
3 ← 1 ← 2	18	21	0
3 ← 2 ← 1	18	21	0
シャープレイ値 $\phi(v)$	12	13.5	13.5

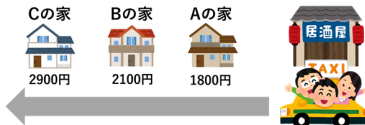


図12 Shapley値の例（タクシー代の振り分け）

Shapley 値で解く

各プレイヤーの Shapley 値は、

$\phi_1(v) = (18 \cdot 4)/6 = 12$, $\phi_2(v) = \phi_3(v) = (18 + 21 \cdot 3)/6 = 13.5$ となる。

したがって、A, B, C はそれぞれタクシー代を

$1800 - 1200 = 600$ 円, $2100 - 1350 = 750$ 円, $2900 - 1350 = 1550$ 円と負担することになる。

3.3 遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化

9/15

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm: GA）とは、解の候補であるデータを遺伝子で表した「個体」を複数体用意し、適応度関数によって計算された適応度の高い個体を優先して選択し、生命の進化過程である交叉、突然変異や淘汰などの操作を繰り返し行うことで最適な解の探索をする。

4.1 許可構造を伴うゲームと許可値

10/15

- はじめに
- 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
- レジリエンスな生産計画
- 提案手法
- 数値実験並びに考察
- おわりに

従来の提携型ゲームでは、すべてのプレイヤーのグループが提携を形成できると仮定していた。しかし、現実には提携の形成が不可能なグループも存在すると考えられる。許可構造は有向グラフによって与えられ、階層的な協力関係を表している。許可構造を反映することで、提携の実行可能性が定義され、制限ゲームが得られる。

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 $\mathcal{F}_D = \{S \subseteq N | T_D^-(i) \subseteq S, \forall i \in S\}$ と定義される。各 $S \subseteq N$ に対して、 S に包含される最大の実行可能提携を $\overline{S}$ とすると、 (N, v, D) に対する制限ゲーム v^D は以下のように定義される。各 $S \subseteq N$ に対して、

$$v^D(S) = v(\overline{S})$$

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 の Shapley 値によって定義される。

$$\rho(v, D) = \phi(v^D)$$

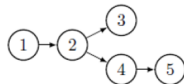


図13 許可構造⁴

$N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $a = (1, 2, 3, 3, 4)$ とし、各 $S \subseteq N$ に対して、提携値を $v(S) = \sum_{i \in S} a_i$ で与える。プレイヤー間に根付き木の許可構造 $D = \{(1, 2), (2, 3), (2, 4), (4, 5)\}$ があるとする。実行可能提携の集合は $\mathcal{F}_D = \{1, 12, 123, 124, 1234, 1245, 12345\}$ となる。制限がない場合の Shapley 値は $\phi(v) = a = (1, 2, 3, 3, 4)$ となる。許可値 $\rho(v, D)$ を求める。制限ゲーム v^D の Harsanyi 係数は、 $S \in \{1, 12, 123, 124, 1245\}$ に対しては、 $d_1 = 1$, $d_{12} = 2$, $d_{123} = 3$, $d_{124} = 3$, $d_{1245} = 4$ 、それ以外の提携では 0 になるため、許可値は $\rho(v, D) = (5, 4, 1, 2, 1)$ となる。許可構造を考慮することによって下位プレイヤーではなく上位のプレイヤーに報酬が集中することがわかる。

⁴楠木祥文, “提携の実現に制限のある協力ゲーム”, システム制御情報学会論文誌, Vol. 62, pp. 28-33, 2018.

4.2 許可値による多段階工程のリスク配分

11/15

引っ張り型生産指示方式は代表的なものとしてトヨタのカンバン方式がある。

< 引っ張り型生産指示方式の定式化 >

$$\text{minimize } u = \left\{ (z_r^+ - z_r^-), \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T z_t^{n+} \right\}$$

$$\text{subject to } \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^M \left(I_0^{n(i)} + \sum_{j=1}^{LH^n} P_{j-LH^n}^{n(i)} + U_0^{n(i)} + B_0^{n(i)} + \sum_{j=1}^{LH^n} d_{j-LH^n}^{n(i)} + V_0^{n(i)} \right) + (z_r^+ - z_r^-) = 0$$

$$\sum_{i=1}^M a^{n(i)} P_t^{n(i)} + \sum_{i=1}^M S^{n(i)} X_t^{n(i)} + (z_t^{n-} - z_t^{n+}) = W_t^n$$

$$n \in K; t = 1, 2, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^M a^{n(i)} P_t^{n(i)} + (z_t^{n-} - z_t^{n+}) = W_t^n$$

$$n \in J - K; t = 1, 2, \dots, T$$

$$I_t^{n(i)} = I_{t-1}^{n(i)} + P_{t-LH^n}^{n(i)} - d_t^{n(i)}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$B_t^{1(i)} = B_{t-1}^{1(i)} + d_{t-LH^1}^{1(i)} - D_t^{1(i)}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, T$$

$$B_t^{n(i)} = B_{t-1}^{n(i)} + d_{t-LH^n}^{n(i)} - e^{n(i)} P_t^{n(i)}$$

$$U_t^{n(i)} = U_{t-1}^{n(i)} - P_t^{n(i)} + d_t^{n(i)}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$V_t^{1(i)} = V_{t-1}^{1(i)} - d_t^{1(i)} + D_t^{1(i)}; i = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, T$$

$$V_t^{n(i)} = V_{t-1}^{n(i)} - d_t^{n(i)} + e^{n(i)} P_t^{n(i)}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$P_t^{n(i)} \leq U_{t-1}^{n(i)}; i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$d_t^{n(i)} \leq V_{t-1}^{n(i)}; i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$P_t^{n(i)} = L^{n(i)} X_t^{n(i)}; i = 1, 2, \dots, M; n \in K; t = 1, 2, \dots, T$$

ここで,

$$\sum_{i=1}^T P_t^{n(i)} \geq Q^{n(i)} \quad i = 1, 2, \dots, M; n \in J$$

$$\sum_{i=1}^T d_t^{n(i)} \geq R^n(i) \quad i = 1, 2, \dots, M; n \in J$$

$$R^{1(i)} = \max \left\{ 0, \sum_{t=1}^T D_t^{1(i)} - B_0^{1(i)} + S B_R^{1(i)} \right\}$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$$Q^{n(i)} = \max \left\{ 0, R^{n(i)} - I_0^{n(i)} + S I_T^{n(i)} \right\}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; n \in J$$

$$R^{n(i)} = \max \left\{ 0, e^{n(i)} Q^{n(i)} - B_0^{n(i)} + S B_R^{n(i)} \right\}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; n \in J1$$

$$B_t^{1(i)} \geq S B_R^{1(i)} \quad i = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, T$$

$$B_t^{n(i)} \geq S B_R^{n(i)} \quad i = 1, 2, \dots, M; n \in J1; t = 1, 2, \dots, T$$

$$I_t^{n(i)} \geq S I_T^{n(i)} \quad i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$X_t^{n(i)}: \text{非負の整数} \quad i = 1, 2, \dots, M; n \in K; t = 1, 2, \dots, T$$

$$P_t^{n(i)}, d_t^{n(i)}: \text{非負の整数}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$U_0^{n(i)}, V_0^{n(i)}: \text{非負の整数}$$

$$i = 1, 2, \dots, M; n \in J$$

$$z_r^+, z_r^- \geq 0 \quad n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

$$z_r^+, z_r^- \geq 0$$

4.3 提案手法のアルゴリズム

12/15

リスク評価指標 AVaR と許可値を用いたリスクを考慮した生産在庫システムのアルゴリズムについて提案する。

提案手法は、以下のような流れとなる。

Step1: AVaRの導出

各期間各品目で与えられる需要量から偏差 ω 、有意水準 α で AVaR を導出する。

Step2: 許可値の決定

多段階工程を許可構造とあてはめ、許可値を決定する。

Step3: 各工程に配分

Step1 で求めた AVaR を Step2 の許可値を用いて、各工程に配分する。

Step1 から Step3 までを全期間全品目について導出する。

定式化修正

$$B_t^{1(i)} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, T$$

$$B_t^{n(i)} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, M; n \in J1; t = 1, 2, \dots, T$$

$$I_t^{n(i)} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, M; n \in J; t = 1, 2, \dots, T$$

期初めに最終工程に与えられる需要量に分散でばらつきを与え、不確実性を考慮する。需要量を正規分布で表し、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。

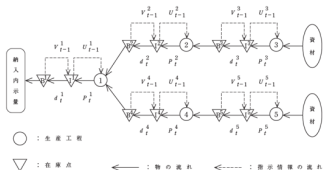


図14 引っ張り型生産指示方式のモデル⁵

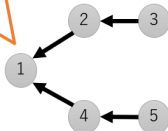


図15 モデルの許可構造

⁵ 渡辺展男, “モデリングシステムを用いた生産計画問題の解法 (2): 引っ張り型生産指示方式の多目標モデル”, 専修経営年報, Vol. 31, pp. 45-77, 2007.

5.1 数値実験の概要

13/15

- はじめに
- 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
- レジリエンスな生産計画
- 提案手法
- 数値実験並びに考察
- おわりに

数値実験では、多品目多段階の引っ張り型生産指示方式のモデルを用い、需要量から分散 ω^2 、有意水準 $\alpha = 0.05$ で AVaR を導出する。次に多段階工程を許可構造とあてはめ、許可値を導出する。求めた AVaR と許可値を用いて、各工程に配分を考える。

表3 10期間における3品目の需要量

品目 i	期間 t									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20	30	30	30	30	30	30	30	30	20
2	15	25	25	25	25	25	25	25	25	15
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

表4 10期間における3品目の分散

品目 i	期間 t									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	9	16	16	16	16	16	16	16	16	9
2	4	9	9	9	9	9	9	9	9	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

- 多段階工程は、 $n = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ とする。
- 計画期間は2週間とし、 $t = \{1, 2, \dots, 10\}$ とする。
- 各工程で生産する品目は、 $i = \{1, 2, 3\}$ とする。
- 段取り替えが必要な工程は $n = 2$ および $n = 3$ とする。
- $n = 1$ と $n = 2$ における生産リードタイムは1日であり、他の工程の生産リードタイムおよび全ての工程における引き取りリードタイムは十分に短いとする。
- 各期間各品目に対する需要量は表4.1に示す。
- 基準生産能力は $W_t^n = 420$ 分とする。
- 単位当たり加工時間は、 $a^{n(i)} = 6$ ($n = 1, 2$)、 $a^{n(i)} = 3$ ($n = 3, 4, 5$) とする。
- 段取り替え時間は、 $S^{2(i)} = 15$ 分、 $S^{3(i)} = 10$ 分とする。
- サブロットの大きさは、 $L^{2(i)} = 10$ 、 $L^{3(i)} = 10$ とする。
- 初期在庫量は、 $B_0^{n(1)} = 10$ 、 $B_0^{n(2)} = 12$ 、 $B_0^{n(3)} = 5$ 、 $I_0^{n(1)} = 14$ 、 $I_0^{n(2)} = 12$ 、 $I_0^{n(3)} = 5$ とする。
- 期末目標在庫は、 $SB_t^{n(i)} = 0$ 、 $SI_t^{n(i)} = 0$ とする。
- 生産仕掛量は、 $P_0^{1(1)} = 25$ 、 $P_0^{1(2)} = 20$ 、 $P_0^{1(3)} = 5$ 、 $P_0^{2(1)} = 30$ 、 $P_0^{2(2)} = 20$ 、 $P_0^{2(3)} = 0$ とする。
- $e^{sn(i)}$ は1である。

5.2 実験結果並びに考察

14/15

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

実験結果

考察

1. はじめに
2. 多品目多段階動的ロットサイズ決定問題
3. レジリエンスな生産計画
4. 提案手法
5. 数値実験並びに考察
6. おわりに

おわりに

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を提案した。
引っ張り型生産システムのモデルより、ゲーム理論の提携に制限のある協力ゲームを応用して許可構造を伴うゲームについて考えた。

期初めに各品目ごとに与えられる需要量に対して、分散と有意水準から不確実性をもたせた。
数値実験並びに考察では、不確実な需要量のAVaRを各工程に許可値によってAVaRを振り分け、在庫切れが起きない最低限の生産量と在庫量を決定し、最適化を行った。

今後の課題

- 引っ張り型生産システムの多目的最適化を解くにあたり、定式化の制約、変数が多かったため、数を減らすために定式化を見直す必要がある。
- 許可構造をより引っ張り型生産システムに近づけるために、段取り替えのある工程や生産リードタイムがかかる工程をどう扱っていくか。