

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：35402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350452

研究課題名(和文)レジリエンスに優れた内示生産システムの設計法

研究課題名(英文)Design of Naiji production system with resilience

研究代表者

上野 信行 (UENO, Nobuyuki)

広島経済大学・経済学研究科(研究院)・教授

研究者番号：50336913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：内示生産システムのレジリエンスを高める諸方策を提案した。非日常的に起こる低頻度で大きなリスクを評価するに適した指標として、AVaR (Value-at-risk)に着目し、この指標を多期間生産計画向けに拡張した。レジリエンスに優れた内示生産計画を得る手法を開発した。注文の不確実性の基で内示変動が起こったとしても、「期別の在庫量の期待値レベルを一定にする」というシンプルな在庫補充方策を導いた。計画期間初期における潜在的な供給リスク量を計量し、緊急時における他社からの調達量を基に自社保有在庫量の見積もりに資する製品在庫計画法を開発した。内示生産システムの体系化と基礎的特性の解明を進めた。

研究成果の概要(英文)：We proposed the replenishment policies for NAIJI production system with resilience. We paid an attention to AVaR (Average value-at-risk) in order to evaluate a big supply risk to happen at non-daily low frequency and expand this estimator to one for multi-period production planning. I developed the technique to make the flexible and resilient planning for NAIJI production system. Even if forecast is changing day by day under demand uncertainty, in the case that the sum of forecast for planning periods is same in all cases, we led the simple stock replenishment policy that is "We should keep the stock level at each periods being constant values without changing them case by case". We developed the technique to estimate the potential risk at start of the planning period and to evaluate initial stock level based on the quantity of procurement from other companies in emergency. We researched the classification of the NAIJI production system and basic characteristics.

研究分野：経営科学

キーワード：内示生産システム レジリエンス リスク評価尺度 多期間生産計画 ゲーム理論 需要の不確実性
在庫理論

1. 研究開始当初の背景

(1)「内示生産システム」は、サプライチェーンの下流の企業(発注者)が、上流のサプライヤー(受注者)に対して、生産開始日の一定期間前に内示情報を提示し生産準備を開始させ、納入直前には確定注文情報を伝達することからなる生産システムである。自動車業界をはじめ多くの産業で取り入れられ、「需要の不確実性」「顧客仕様の多様性」のもとで、「短納期」で安定的な原材料や部品供給を実現する巧妙なシステムである。

(2)しかし、企業においては災害などの外的要因、劣化や不確実性等の内的要因によるリスクに対応しては、従来の内示生産計画法による運用では脆弱である。制限的でない急激な変化に対して、その対応は対処療法的かつ試行錯誤的である。そこで、「レジリエンス」の視点から内示生産システムのリスク対応力の向上を図る必要がある。

2. 研究の目的

内示生産システムにおいて、「需要の不確実性」「顧客仕様の多様性」「短納期」「安定的供給」に加えて、レジリエンスの概念のもとで日常的・非日常的なリスクに対して対応力・継続力を有する内示生産システムの設計法を確立する。

3. 研究の方法

(1)「レジリエンス」をしなやかな回復力ととらえる。「しなやかな」とは、コスト、品質、納期を考慮し、妥当なかつ一過性でない対応という様相であり、「回復力」とは、リスクダメージから目標レベルへ挽回する力、目標を継続する力を表すとす [引用文献]。

(2)つぎに、従来の比較的高頻度で起こる「日常的なリスク」にくわえ、低頻度ではある「かなり大きく作用する非日常的リスク」を評価する指標に着目する。そして、内示生産システムは不確実な先行需要情報を利用した顧客への安定的かつ継続的な製品供給システムであるとしてとらえ、顧客への供給不足量をリスク量として計量する。

(3)これらを前提に、まず レジリエンスを評価する指標を定量化する。企業におけるダメージからの「回復限界量」の概念を明確にし、「回復限界量」制約下での生産計画法、在庫補充方法を確立する。

(4)内示生産システムをとりまくサプライチェーンリスクに対して、経験的に生み出された代表的な復旧対応策の知見を得る。企業参加型の研究会に参加していく。

(5)ストラテジックレベルのリスクを評価する指標として「回復投資資金」、復旧リード

タイム、供給断絶期間等の検討を行う。

4. 研究成果

(1)内示生産システムにおいてレジリエンスを評価する指標を導入し、この指標を多期間生産計画向けに拡張した [発表論文] [図書]。

供給不足を表すリスク指標として、従来の VaR(Value-at-risk)に対して、低頻度ではあるが「かなり大きく作用する非日常的リスク」を評価する指標として AVaR(Average value-at-risk) [引用文献] に着目し、レジリエンスを評価する指標と位置づけた。

VaR(value-at-risk)とは、リスク量の確率変数 X 、信頼水準 ε 、リスク量が $X = x$ の時の確率密度関数を $f(x)$ 、分布関数を $F(x)$ 、その逆関数を F^{-1} とすると、

$$\text{あるいは、} \quad \varepsilon = \int_{-\infty}^{-\text{VaR}_\varepsilon(X)} f(x)dx$$

と表される。 $\text{VaR}_\varepsilon(X) = -\inf\{F(x) \geq \varepsilon\} = -F^{-1}(\varepsilon)$

また、AVaR(Average value-at-risk)は、信頼水準 ε の時の VaR の平均値であり、

$$\text{AVaR}_\varepsilon(X) = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^\varepsilon \text{VaR}_p(X) dp$$

と表される。

生産在庫管理分野においては $\text{VaR}_\varepsilon(X)$ は、従来から安全在庫量等の算定にもちいられてきたものであり、例えば、在庫切れ率 5%、すなわち $\varepsilon = 0.05$ とすると、直感的に 100 回のうちに、ちょうど 5 回の在庫切れが起こる確率に相当するリスク量を表す。一方、 $\text{AVaR}_{0.05}(X)$ は、直感的に 100 回のうちに 5 回以下の在庫切れが起こる確率に相当するリスク量(在庫水準)であり、在庫切れ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顕示的に表現する評価尺度である。その為に、リスク量を VaR で評価する場合よりも値が大きく評価される。これを用いると、例えば 100 回のうちに 1 回などの低頻度で「かなり大きく作用する非日常的リスク」をも評価に加えることができる。

この指標を多期間生産計画向けに拡張を行い、 $\text{AVaR}_\varepsilon(0)$ を提案した [発表論文]。また、この指標を含む従来の指標を対象に、単一期間生産計画向けあるいは多期間生産計画向けに分類し、それぞれの位置づけと応用への留意点をまとめた [図書]。

(2) 内示生産システムにおいてレジリエンスに優れた生産計画法の定式化を行い、解法を確立し、特性を明らかにした [発表論文]。

AVaR(Average value-at-risk) を評価指標とする多期間の生産計画問題について、ゲーム理論を適用して解を求める方法を提案した。解法は、第 1 段階において、AVaR を評価指標として、計画期間全体に想定される需要量をゲーム理論におけるシャープレイ値

[引用文献]を用いて、各期に割り当て、期別の想定される需要量を決定する。つぎに、第2段階において、期別の想定される需要量を時系列に展開して期別の生産量を定めるものである。週間生産計画問題に適用した。

本手法の特徴は、従来の「確率で表現される目標値を制約にする方法」ではなく、信頼水準を所与としてリスク評価尺度に AVaR を用い、計画期間全体の想定される需要量を厳守するという意味で、「需要量のトータルな想定値を重視する方法」である。この需要量想定値に対して供給可能であると解釈できれば回復限界量であるとみなせる。従来手法では必須であった「在庫量あるいは、在庫品切れ量の多次元同時確率分布」の厳密なモデリングや複雑な計算法を必要としない利点がある。また、本手法は、需要が期ごとに互いに相関を持つ場合への拡張が容易である [発表論文]。

レジリエンス性に関して重要な知見を示した。すなわち、本手法を内示生産システムに用いれば「内示変動があったとしても、計画期間の内示量の合計が同じ場合には、期別の在庫量の期待値は変化しない」ことが分かった。すなわち、これは、注文の不確実性のもとで、内示変動が起こったとしても、「期別の在庫量の期待値レベルを一定にするように補充(生産)しておけばよい」ことを示しており、内示変動の影響を受けにくいことを意味している。レジリエンス性が高いことがわかる。また、在庫補充ルールは、きわめてシンプルである [発表論文]。

需要想定の特性などを反映できる制約を組み込んだ場合にも適用できるように、提案手法を拡張した AVaR とシャープレイ値を組み込んだ多期間の生産在庫計画問題と等価な2次計画問題を定式化し、これに制約条件を織り込んだ。解は、シャープレイ値とは異なるが、全体合理性条件、制約条件を満足し、個人合理性については、極力満たすような有効な解が得られることを示した [発表論文]。

「AVaR とシャープレイ値を組み込んだ多期間の生産在庫計画」と生産平準化計画の関係を解析し、数値計算の範囲では、両者が等しくなる解が存在することを示した。

(3) 企業間の契約による製品融通を考慮した在庫保有計画法を開発した [発表論文]。

トラブル発生時の対策として、自社在庫保有、代替設備振替、他社からの製品融通(事前の契約による製品調達)等により顧客へ製品供給の断絶を防ぎレジリエンスの向上を図る場合がある。在庫管理者が回復までの期間におけるリスク量(供給不足量)の把握ができ、事前に想定している回復限界量(外部からの調達可能量)の範囲内で顧客への製品供給を安定的に継続するために必要な自社保有の在庫量を求めておく必要がある。

まず、トラブルが起こった時に回復までの

間に想定できるリスク量(供給不足量)を算定できる指標(累積リスク評価尺度 $CR^{(i)}(y_i)$)を開発した。

・期別のリスク評価尺度 $R^{(i)}(y_i)$

i 期の需要量を d_i 、需要量の離散型確率関数を $f(d_i)$ とする。 i 期の在庫レベル y_i の時の期別のリスク評価尺度をつぎのように定義する。

$$R^{(i)}(y_i) \equiv E_{d_i} \{ \max(d_i - y_i, 0) \} = \sum_{d_i \geq y_i} (d_i - y_i) f(d_i)$$

ここで、 E は期待値をとることを表す。

・累積リスク評価尺度 $CR^{(i)}(y_i)$

i 期の在庫レベル y_i の時の i 期以降の累積リスク評価尺度を次のように定義する。右辺の第2項は、 $(i+1)$ 期における累積リスク評価値の期待値を表し、 $CR^{(i)}(y_i)$ は、漸化式の形式で表現している。

$$CR^{(i)}(y_i) \equiv R^{(i)}(y_i) + E_{d_i} CR^{(i+1)}(y_i - d_i)$$

その結果として、例えば、 $CR^{(1)}(y_1)$ は、1期における在庫レベルが y_1 であった場合に、回復までの期間における起こりうる在庫供給不足量の累積値を表している。すなわち、これは、計画期間の最初の日に、トラブルが発生して生産ができなくなった時に、計画期間内の顧客の注文要求に対する在庫不足量の期待値を表し、供給不足と予想される数量を意味していることになる。

累積リスク評価尺度 $CR^{(i)}(y_i)$ は、事前に動的計画法を用いてバックワードにより求めておく。1期目にトラブルが起こった時の供給量不足量は $CR^{(1)}(y_1)$ であるから、自社あるいは、他社からの契約による調達可能量 W とすると、 $CR^{(1)}(y_1) \leq W$ の場合は、供給不足量はなく、リスク対応可能であり、 $CR^{(1)}(y_1) > W$ の時は、供給不足に相当する在庫量を事前に備蓄しておかなくてはならないことを示している [発表論文]。

生産管理マネージャーは、日々の在庫補充量を算定するとともに、計画スタート時点における潜在的なリスク量を把握できる。また、必要な契約による調達量の算定が可能となる。

(4) 内示生産システムの体系を更新した [発表論文]。

従来の内示生産システムが内示情報項目と提示方法により分類していたものを更新し、さらに、

・内示情報の提示パターン

・内示注文と確定注文のプレパターン

・レジリエンスのためのリスク評価尺度

などを取り込んだ新しい基本属性(体系)を明らかにした。これは内示生産システムの設計パラメーターであり、強化を図るときの指針となる。

・内示情報項目ー内示数量 納期 仕様のメッシュ 期日のメッシュ
・提示方法ー内示提示タイミング 確定注文タイミング 提示パターン(タイプ、提示間隔、頻度)
・内示プレパターン
・レジリエンスーリスク評価尺度

図1 内示生産システムを規定する基本属性

(5) 内示生産システムが大きなリスクを受けた場合を想定して、レジリエンスの向上を図るために、システムの強化項目として、頑健性、柔軟性、強靭性等のそれぞれの面から有しておくべき特性を挙げ、対応方法を示した。

表1 内示生産システムの強化項目

	説明	生産システムとしてもつべき特性	対応方法
頑健性	乱れに耐える	不確実への対応	在庫保有、生産計画
柔軟性	影響をやわらげる	注文の多品種・小ロット・短納期化対応	可変能力の生産設備、負荷バランス、ライン配分
強靭性	状態を変えつつ目的を継続・回復する	注文量の増減に対する調整力、納期厳守	可変能力の生産設備、代替設備振替、他社調達

それぞれの対応方法ごとに、投資資金量の大きさの評価や復旧リードタイム、供給断絶期間等に対する資金量の評価は今後の課題である。

(6) 内示生産システムの挙動の基礎的検討を行った[発表論文]。

近年、海外立地先工場製品や中間部品を発注し、入手する場合にその発注・搬入・安全確保に関わる発注費用は大きくなる。また、大量搬入によるコスト削減のために搬入口が大きくなり、発注費用が大きくなる。このような場合における需要量の期待値の変動と最適な補充点・発注点の関係を調べた。

(7) 今後の展望を述べる。メーカーと1次サプライヤーにおける内示生産システムのレジリエンス向上の研究に引き続き、これをベースに2、3次及びそれより下位のサプライヤーをも含めかつレジリエンス、フレキシブル、ロバストなどの視点も取り入れた内示生産システムの強化の検討を進めていくことが重要である。

<引用文献>

E.Hollnagel, D.D.Woods, N.Leverson, 北村正晴(監訳), レジリエンスエンジニアリング概念と指針, 日科技連(2012)
S.T.Rachev, S.V.Stoyanov and F.

J.Fabozzi, Advanced Stochastic Models, Risk Assessment, and Portfolio Optimization, John Wiley & Sons, Inc. (2008)
中山幹夫, 舟木由喜彦, 武藤滋夫, 協力ゲーム理論, 勁草書房(2008)

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

A.O.N.Rene, N.Ueno, Y.Taguchi, K.Okuhara, Multi-Period Production Planning Using Shapley Value with Constraints, International Journal of Research & Surveys(ICIC-EL), Vol.10, No.2, pp.355-362(2016) (査読有)

上野信行, 田口雄基, 奥原浩之, AVaRに基づいた週間生産計画法の提案 ゲーム理論的アプローチ, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌 TORSJ, vol.58, pp.101-121(2015) (査読有)

上野信行, 李偉, 韓虎剛, 奥原浩之, レジリエンスを考慮した在庫補充モデルの提案, 日本経営システム学会誌, Vol.32, No.1, pp.67-75(2015.7) (査読有)

上野信行, 奥原浩之, レジリエンスに優れた内示生産システムの体系化についての考察 システム特性・分類・レジリエンスとその展開-, 県立広島大学論集, Vol.7, No.1, pp.191-202(2015.2)

上野信行, 李偉, 韓虎剛, 奥原浩之, 内示情報を用いた在庫補充方策の特性解析, 日本経営システム学会誌, Vol.31, pp.37-44(2014) (査読有)

上野信行, 栗栖優, 奥原浩之, 韓虎剛, 在庫管理におけるレジリエンス向上のためのリスク評価尺度の考案, 県立広島大学経営情報学部論集, Vol.6, pp.43-56(2014.2)

上野信行, 李偉, 韓虎剛, 奥原浩之, (s-S)方策における需要量の期待値の変動と補充点・発注点の関係, 日本経営システム学会誌, Vol.30, NO.2, pp.127-131(2013) (査読有)

[学会発表](計8件)

N.Ueno, K.Okuhara, H.Morita, Weekly Production Planning on the Basis of Average Value-at-risk by Shapley Value, INFORMS, (2015.10-11)

Pennsylvania Convention Center, Philadelphia, USA

A.O.N.Rene, N.Ueno, Y.Taguchi, K.Okuhara, Multi-Period Production Planning Considering Resilience Based on Constrained Shapley Value, 日本経営システム学会全国研究発表大会(2015.5) 共愛前橋国際大学, 群馬県前橋市

田口雄基, 奥原 浩之, 上野信行, AVaR
に基づく多期間リスク評価尺度の提案
内示生産システムにおけるレジリエンス
向上の為の指標づくり, 日本経営シ
ステム学会全国研究発表帯大会 (2014.10)
愛知工業大学, 愛知県名古屋市
上野信行, 内示生産システムの体系化につ
いての考察 -システム特性・分類・レジ
リエンスと展開-, 日本生産管理学会
(2014.9)名古屋市中小企業振興会館, 愛知
県名古屋市
田口雄基, 奥原 浩之, 上野信行, 小出哲
彰, Conditional Value-at-Risk によるリ
スクを考慮した多期間生産計画の解法, 第
13 回情報科学時術フォーラム (2014.9)筑
波大学, 茨城県つくば市
上野信行, 奥原浩之, 石井博昭, 企業間連
携における内示生産システムの特性-先行
需要情報を用いたサプライヤー生産計画-,
第5回横幹連合コンファレンス
(2013.12)香川大学, 香川県高松市
李偉, 上野信行, 宇野健, 奥原浩之, リス
ク指標をもとにレジリエンスを考慮した
(s-S)在庫補充モデルの提案, 日本経営シ
ステム学会全国研究発表帯大会
(2013.12) 広島経済大学, 広島県広島市
李偉, 上野信行, 宇野健, 奥原浩之, 内示
情報を活用した有限期間の製品在庫補充
方策の提案, システム制御情報学会研究発
表講演会 (2013.5) 兵庫県民会館, 兵庫県
神戸市

〔図書〕(計1件)

上野信行, 第5章内示生産システムにお
けるリスク評価尺度, 精密工学会総合生
産システム専門委員会レジリエントもの
づくりのための技術とマネジメント小委
員会(主査岩田一明)検討成果報告書, pp.
37-43(2015.3)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:

6. 研究組織

(1)研究代表者

上野 信行 (UENO, Nobuyuki)
広島経済大学・経済学研究科・教授
研究者番号: 50336913

(2)研究分担者

奥原 浩之 (OKUHARA, Koji)
大阪大学・情報科学研究科, 准教授
研究者番号: 40284161

(3)連携研究者 なし

()

研究者番号:

(4)研究協力者 なし

()

研究者番号: