

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25242031

研究課題名(和文) SC途絶リスクマネジメントの方法論およびシステム構築に関する研究

研究課題名(英文) A Research on Methodologies and System Development for Supply Chain Disruption Risk Management

研究代表者

松川 弘明 (Matsukawa, Hiroaki)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：30242275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,900,000円

研究成果の概要(和文)：サプライチェーン(SC)途絶リスクをマネジメントするための方法論とシステム開発を行った。方法論として、(1)リスクドライバーとその構造モデルの構築、(2)レジリエンスとその構造モデルの構築、(3)ロバストSCネットワーク設計モデルの構築、および(4)SC安全在庫の動的配置モデルの構築を行い、これらの手法を活用するためにSC見える化システムの開発を行った。研究成果は雑誌論文84本、会議論文182本、1冊の図書、その他多数の招待講演やシンポジウムを通じて社会に公表・発信を行った。特に、各種モデルを実用化するためにはSC見える化の実現が必要不可欠であることが分かり、現在その普及活動に取り組んでいる。

研究成果の概要(英文)：In this research we constructed a new supply chain disruption risk management system which consists of with four methodologies and one platform. Four methodologies are (1) the risk analysis and risk structure model, (2) the resilience analysis and associated structure model, (3) the robust supply network design model, and (4) the supply chain safety stock calculation and dynamic allocation model. One platform is the supply chain visualization system which enable data collection and value added information generation utilizing the four methodologies. Over hundred research achievements are published on journals and conference proceedings, while we distributed our research achievement to society through international conference, domestic conference, symposium, keio-techno-mall (exhibition), open lecture, and forum. We will develop an extended platform, the integrated supply chain visualization system for applying the methodologies to real business in the future.

研究分野：経営工学

キーワード：経営工学 サプライチェーンマネジメント サプライチェーン途絶 リスクマネジメント レジリエンス 安全在庫 SCRM SCDRM

## 1. 研究開始当初の背景

2011年以降、サプライチェーンリスクマネジメント(以下SCRM)に関する研究が注目を浴びている。SCRMではサプライチェーン(SC)上のリスクを不確実性の大小と被害の大小の組み合わせにより4種類に分類し、それぞれに対して対策を取ることが多い。9.11以後アメリカ半導体協会が進めているBCP(Business Continuity Planning)でもリスクを上記4種類に分類し、ERTを構築して組織的に対応することを提唱している。一方、今までの多くの定量的理論研究では、リスク要因を確率変数として各種対策を提案しているが、研究代表者らがScience Directなどのデータベースから収集した500編以上の学術論文のほとんどでは、被害の期待値を評価基準としており、しかも直接被害だけを対象としているために、発生確率が小さいが被害が大きいリスクの影響を正しく評価されてない。その主な原因はサプライチェーン途絶により発生する大きな間接被害の存在である。3.11東日本大地震時の自動車産業におけるSC途絶

(Disruption)による間接被害は5兆円と推測されており、全産業の16.9兆円の直接被害に比べてもその大きさは一目瞭然である。しかも3-6か月かけて思いもよらないところにまで継続的に波及し、海外企業、例えばGM、Ford、オベル、プジョーも操業停止や受注を取りやめる事態に陥ったのである。このように、サプライチェーン途絶は日本の産業に莫大な損失を与える重大問題であり、グローバル調達における各種リスクも含めて至急対策を講じる必要がある。経済産業省の「2011年版ものづくり白書」によると、日本の製造業では、自社製品のサプライチェーン途絶への対策として、「在庫を増やす」、「生産拠点を分散させる」、「早期再開に向けた方法の検討」がそれぞれ1、2、3位になっており、日本の産業全体が効率だけ追求したSCMを見直しており、サプライチェーン途絶に対処する方法論に対する期待は非常に高いことがわかる。

## 2. 研究の目的

本研究ではサプライチェーン途絶リスクマネジメントの方法論を、SC可視化システムの構築、リスクドライバーの特定およびリスク構造の解明、製品のSCDR評価、SCDRを考慮したSCロバスト計画、SCDRによる被害を軽減する在庫の最適配置と動的再配置(横持ち)モデルで構成し、産業界への実用化を目指す。

### (1) SC可視化システムの構築

サプライチェーン可視化を実現するためには、製品のBOMに基づき、各部品の調達企業が関連データを入力して部品全体のSC構造を自動作成するようにする。そのために、メーカーと各調達先の入力データの標準化コードを設計する。各社の部品管理コードは維持し、補助コードで統一する標準化手法を用いる。これについては国際標準化機構(ISO)「物流用データキャリアのインターフェース及びリターナブル容器へのダイレクトマーキング標準化委員会」で考案した物流階層や包装を考慮したRFID国際規格を参考に、部品調達階層識別子と親子識別子を含む標準化コードを設計する。そしてオントロジーと組み合わせやすいSC可視化システムを構築する。

### (2) リスクドライバー&リスク構造の解明

SCRMの研究では研究者が主観的にリスクを選択し、分析し、対策を考案することが多いが、研究代表者らはテキストマイニングを用いて一般的なリスクドライバーの抽出と相互の関係を分析してきた。本研究ではさらに論文の数を増やし、学術論文を対象にSCDRに限定してテキストマイニングを行い、客観的なSCDRマザー・リストを作成し、多変量解析手法を用いてクラスタリングを行い、リスクを引き起こす潜在リスクの存在を含めてリスク構造分析を行う。これをもとに、具体的な製品におけるリスクドライバーの抽出と構造分析を実務的CRT分析と合わせて実施することで、特定製品のリスクドライバーのリストおよびその構造を解明する。

### (3) 製品のSCDR評価

サプライチェーン途絶が起きた時の復旧までの応答時間はSC構造に強く依存する。本研究では製品のBOMとSC構造に基づいて製品のSCDR評価指標を設計し、部品点数に基づいて標準化された実験計画(途絶発生方法、実験回数)に基づいて複数回のテストを行い、その結果に基づいて製品SCDR評価指標を計算する。製品SCDR評価の過程では各種SC途絶シナリオに対応するSCのボトルネックも特定し、リスク回避の対策およびリスクの被害を軽減する対策を講じることで、サプライチェーン途絶リスクによる被害を最小限に抑えることを可能にする。

### (4) SCDRを考慮したSCロバスト計画

ロバスト最適化では既存のシステムを対象に、最悪ケースを含めてパラメータ設計をす

ることを目的とすることが多いが、本研究ではGravesらの単品種SC Configurationを発展的に組み込み、複数品種製造と部品調達におけるSCロバスト計画モデルを提案し、解法アルゴリズムを開発する。リスクをCourtneyらが提案した4分類 (Strategy under Uncertainty, Harvard Business Review, 1997) に分けてそれぞれロバスト計画モデルを構築し、不確実需要も考慮したSC ロバスト計画モデルの拡張を行い、4 分類の組み合わせに対してそれぞれ最適なSC構造を提案する。

#### (5) 在庫の動的配置

SCDR の被害を軽減することを考えると、在庫を分散させることが望ましい。しかし、どこにどれくらい配置し、サプライチェーン途絶が発生した際にどこから横持ちをするかについてはまだ研究が行われていない。研究代表者らは動的横持ちモデルの研究において需要の不確実性による在庫の偏在を対象に先駆的研究を行っており、本研究では既存研究を発展させて、SCDRを考慮した動的横持ちモデルと構築し、最適解を求める解法を提案する。

### 3. 研究の方法

本研究ではSCDRM の方法論を、SC可視化システム(V)をベースに、リスクドライバー(I)、リスク評価(A)、ロバスト計画(P)、動的配置(D)の4 本柱で構成する。可視化システム(V)ではSC上の各段階が入力するデータの標準化コードを設計し、SC-BOMの自動生成機能をベースとしたSC可視化システムを構築する。リスクドライバー(I)については学術論文のテキストマイニングからSCDR を抽出し、SCDR構造分析を行う。この構造分析をもとに、特定製品について、実務家とのCRT分析を経て対象製品の実態に合うSCDRおよびその構造を明らかにする。リスク評価(A)については製品BOMとSC構造から製品のSCDR 評価指標を設計し、ロバスト計画(P)においてはリスクを分類し、それぞれの組み合わせに対して頑健なSC 構造を設計、そして動的配置(D)においてはSC 上で在庫を最適に配置・再配置する動的配置モデルを構築する。

### 4. 研究成果

本年度はSCDRM の基盤となるSCM見える化システム構築を中心に研究を行った。SCM 見える化システムはSCVS(Supply Chain Visualization System)と呼ぶことにし、X-EAD (今はX-TEA)モジュラーおよびX-EADドライバーを用いて、生産指示と在庫管理を中心と

した生産管理システムに受発注機能を追加し、センター(クラウドコンピューティング)との間で同期化を行うことで、企業プロフィール、BOM データ(主にP-BOM: 調達 BOM)を用いてモノの流れを追跡できるようにするシステムを設計・開発し、慶應大学理工学部のSCM 授業でロールプレー式実験を行った。具体的には、川上企業の情報共有および川下企業の情報共有の二つの視点、およびサプライチェーン途絶ありとなしの二つのカテゴリーに分けて、2 グループ間のコンペ形式で4 回の実験を行い、見える化システムの有効性を確認した。実用化のために、組み立て産業用APP および農業用APP を開発し、KEIO-TECHNO-MALL で2 回展示した。しかし、BOM データの機密性がボトルネックとなり、まだ実用化に至っていない。今後はBOM データを必要としないサプライチェーン見える化APP を開発し、引き続き実用化の実現に向けて努力していきたい。

サプライチェーンリスク評価については、まず文献研究を行い、92 本の論文を読み、リスク、サプライチェーンリスク、サプライチェーンリスクマネジメントの3つのカテゴリーに分けてその定義や特徴を分析し、体系化を行った。これに関連して、サプライチェーンレジリエンスについても既存研究論文をレビューし、テキストマイニングを用いてレジリエンス構造モデルを構築し、与えられたサプライチェーンに対してそのレジリエンスを評価する基盤を構築した。レジリエンスについてはさらにレジリエンススコアカードを設計し、富士ゼロックスおよび荏原製作所のグローバルサプライチェーンマネジメント部と連携し、第一バージョンを設計した。ロバスト・サプライチェーンの設計については、Gravesらの既存研究を拡張し、2 社購買を導入したうえで、サプライチェーンが途絶しても損失を最小にできるモデルを構築し、動的最適化モデルの解法を提案し、数値実験を通じて有効性を確認した。

レジリエンスについては関連学術論文を収集し、日本語と英語に分けてテキストマイニング実施し、レジリエンスを構成するキーワード(注目語)を共起ルールと信頼度により抽出し、抽出された注目語を用いてさらにテキストマイニング実施することを通じてレジリエンスの構造を構築する方法論を提案した。この研究成果は大規模BCP導入をしながらも手軽に企業のレジリエンスの強化に貢献する仕組みを構築することを可能にするものであり、我々は日本の中小企業に向けて普及させていこうと考えている。

ロバスト計画においては、製品設計段階において、部品調達経路の途絶リスクも考慮した製品設計をサポートすることを目的とし、各部品メーカーの途絶リスクが分かった時に、システム全体、あるいは最終組み立て製品ラインの途絶確率を計算するモデルを構築し、2 社購買や冗長化などの手法を用いて最終製品の製造ラインが止まらないようにする方法を提案した。

動的配置については主に安全在庫の最適配置に焦点を当て、時間とともに変化するときの再配置についても研究を行った。安全在庫の最適配置については、いままで行われた研究とは違い、ネットワークにおける各ノードの安全在庫をお互いに従属性がある需要でつながっているときの不確実性を吸収するために必要な量とし、各ノードにおける需要の上限と下限の設置、および納品日の逐次確定、この二つの緩和的方法を用いて安全在庫を各ノードにどれくらい配置するかを全ノードに対して同時に、供給ネットワークの特性を考慮した配置方法を提案した。このモデルに対してもロバスト最適化手法を用いて最悪ケースを考慮したときの必要安全在庫を計算した結果、多くのケースでは安全在庫が増えるが、一部のケースでは安全在庫が減ることを確認した。この研究における問題はリードタイムを固定していることであり、今後リードタイムが発注量に依存する場合の最適配置を研究したい。

#### 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 84 件)

1. 黄 立群, 清水 友也, 松川 弘明, 供給契約における最適オプション価格に関する研究, 日本経営工学会論文誌, 査読あり, 68, 1, 2017, 23-32.
2. Ammar Y. ALQAGTABU, Surendra M. GUPTA, Kenichi NAKASHIMA, One-Dimensional Warranty Policies Analysis for Remanufactured Products in Reverse Supply Chain, Innovation and Supply Chain Management, 査読あり, 11, 2, 2017, 13-22.
3. Victor Cuesta, Masaru Nakano, Chain of Command: A Sustainable Supply Chain Management Serious Game, Int. J. of Automation Technology, 査読あり, 11, 4, 2017, 552-562.
4. Kamila Romejko, Masaru Nakano, "Portfolio analysis of alternative fuel vehicles considering technological advancement, energy security and policy", Journal of

Cleaner Production, 査読あり, 142, 1, 2017, 39-49.

5. Takeshi Morita, Chie Iijima, Wataru Okawara, Yoshitaro Enomoto, Takahira Yamaguchi, "Implementing Mobility Service with Japanese Linked Data", Special Issue on Data Science for Big Data, International Journal of Computational Intelligence Studies, 査読あり, 5, , 2017, 267-288.
  6. 久保幹雄, "ビッグデータ時代のサプライ・チェーン最適化(1)", 流通ネットワーク, 査読無し, 3・4月号, , 2017, 100-104.
  7. Satoru Adachi, Satoru Iwata, Yuji Nakatsukasa, and Akiko Takeda, "Solving the Trust-Region Subproblem by a Generalized Eigenvalue Problem", SIAM Journal on Optimization, 査読あり, 27, , 2017, .
- 他、77 件。

〔学会発表〕(計 162 件)

1. 松川弘明, XEAD を用いたサプライチェーン見える化システム, Keio Technomall, 査読無し, 2017,
2. 松川弘明, 村上幸一, 古市努, 農産物サプライチェーン見える化システム, Keio Technomall, 査読無し, 2017,
3. 松川弘明, ナショナル物流データセンターが切り開く世界, Keio Technomall, 査読無し, 2017,
4. 久保田 泰史, 松川弘明, スマート農業に向けた栽培環境の見える化システム, Keio Technomall, 査読無し, 2017,
5. 君塚大和, 松川弘明, 資源配置を考慮したプロジェクトスケジューリング問題, スケジューリングシンポジウム 2017 論文講演集, 査読無し, 2017, 14-18
6. 中塚昭宏, 松川弘明, 極値分析を用いた突発需要の予測方法に関する研究, 日本経営工学会 2017 春季大会予稿集, 査読無し, 2017, 107-108
7. 内山敬寛, 佐藤公俊, 中島健一, 「からくり改善」における発想力の向上, 日本経営工学会 2017 年春季大会, 査読無し, 2017,
8. 鄭聰, 佐藤公俊, 中島健一, 供給リスクを考慮した閉ループ・サプライチェーンに関する研究, 日本経営工学会 2017 年秋季大会, 査読無し, 2017,

9. 佐藤 みずほ, 水山 元, 中野 冠, 消費段階における野菜の廃棄量低減化を目指すためのゲーム作成, 日本シミュレーション&ゲーミング学会全国大会論文報告集, 査読無し, 2017, 36-39
10. 中村麗音, 橋本英樹, 久保幹雄, “災害時の避難計画における時空間ネットワークモデル”, スケジューリング学会人道支援ロジスティクス研究部会, 査読無し, 2017,
11. 西田 光甫, 武田 朗子, 岩田 覚, 木方真理子, 中山 功, “ライフスタイルデータの特徴選択による電力消費モデル”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年春季研究発表会, 査読無し, 2017,
12. Akiko Takeda, Katsuya Tono, Jun-ya Gotoh, “Efficient DC Algorithm for Sparse Optimization”, Numerical Analysis Group Internal Seminar University of Oxford, 査読無し, 2017,
13. Satoru Iwata, Yuji Nakatsukasa, Shinsaku Sakaue, Akiko Takeda, “Nonconvex Quadratic Optimization with One or Two Constraints”, CORMSIS Seminar, 査読無し, 2017,
14. Akiko Takeda, Katsuya Tono, Jun-ya Gotoh, “DC Formulations and Algorithms for Sparse Optimization Problems”, ECS Department Seminar, 査読無し, 2017,
15. 山田 慎二, 武田 朗子, “非凸二次計画問題に対する凸二次緩和反復解法”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年春季研究発表会, 査読無し, 2017,
16. 高松 瑞代, 武田 朗子, 岩田 覚, “電力需要予測への機械学習法の適用”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年春季研究発表会, 査読無し, 2017,
17. 伊藤 直紀, 武田 朗子, Kim-Chuan Toh, “実用的な加速近接勾配法の実装”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年春季研究発表会, 査読無し, 2017,
18. 阿部秀尚, 森田武史, 山口高平, “ROS環境上での機械学習実行モジュールの設計と実装”, 情報処理学会第79回全国大会, 査読無し, 2017,
19. 阿部秀尚, 森田武史, 山口高平, “ROS環境上における機械学習タスク実行モジュールの実装と評価”, 人工知能学会第110回知識ベースシステム研究会, 査読無し, 2017,
20. Shinji Yamada, Akiko Takeda, “Successive Lagrangian relaxation algorithm for nonconvex quadratic optimization”, Mathematical Engineering Technical Reports METR 2017-08, 査読無し, 2017,
21. Pablo Beiran<sup>1</sup>, Maria Pilar Martin-Romero<sup>1</sup>, Hiroaki Matsukawa<sup>1</sup>, “A ROBUST GUARANTEED-SERVICE MODEL TO DEAL WITH UNCERTAIN LEAD”, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017, 査読無し, 2017, 16-21
22. Akihiro Nakatsuka, Shota Asami, Hiroaki Matsukawa, TIME IN GENERAL ACYCLIC SUPPLY CHAINS”, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017, 査読無し, 2017, 22-25
23. Abir Trabelsi<sup>1</sup>, Tomoya Shimizu<sup>1</sup>, Hiroaki Matsukawa, “VOTING COLLECTIVE INTELLIGENCE METHOD FOR DEMAND FORECAST”, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017, 査読無し, 2017, 267-273
24. K. Nakashima and S.M.Gupta, “A Research on Building an Agriculture Operations Management System”, The 24th International Conference on Production Research, Poznan, Poland., 査読無し, 2017,
25. M. Kiuchi, and K. Nakashima, “Managing Preventive Maintenance on a Disassembly Line using Multi-Kanban Mechanism”, The 24th International Conference on Production Research, Poznan, Poland., 査読無し, 2017,
26. C. Zheng, K. Sato and K. Nakashima, “A Study on Grasping Flow of Information in Indirect Operations”, International Conference on Industry 4.0 and Production Economics, 査読無し, 2017,
27. H. Go and K. Nakashima, “Optimal production and procurement policies of closed-loop supply chain under uncertainties”, The 23rd International Symposium on Quality Function Deployment, 査読無し, 2017,

28. T. Uchiyama, K. Sato and K. Nakashima,  
“ A New Approach to Developing Human  
Resources Using QFD ”, The 18th Asia  
Pacific Industrial Engineering and  
Management Systems Conference, 査読  
無し, 2017,
29. Mizuho Sato, Manami Tsunoda, Hitomi  
Imamura, Hajime Mizuyama, Masaru  
Nakano, “ A New Framework of Karakuri  
System in Automobile Industry ”, The  
48th International Simulation and  
Gaming Association's conference  
(ISAGA), 査読無し, 2017,
30. Victor A. Cuesta Aguiar, Masaru Nakano,  
“ The Design and Evaluation of a  
Multi-Player Milk Supply Chain  
Management Game ”, The 49th  
International Simulation and Gaming  
Association's conference (ISAGA), 査  
読無し, 2017,
31. Christoph Roser, Hauke Meier, Masaru  
Nakano, “ A Model for the Development  
of Stealth Serious Games ”, APMS2017,  
査読無し, 2017, 382-389
32. Kamila Romejko, Masaru Nakano,  
“ Relationship between Variants and  
Inventory Under Consideration of the  
Replenishment Time ”, APMS2018, 査読  
無し, 2017, 390-398

他 130 件。

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

松川 弘明 (MATSUKAWA Hiroaki)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号 : 30242275

### (2)研究分担者

中野 冠 (NAKANO Masaru)  
慶應義塾大学・大学院システムデザイン・  
マネジメント研究科・教授  
研究者番号 : 10394454

### (3)研究分担者

山口 高平 (YAMAGUCHI Takahira)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号 : 20174617

### (4)研究分担者

鈴木 定省 (SUZUKI Sadami)  
東京工業大学・大学院社会理工学研究科・

准教授

研究者番号 : 50323811

### (5)研究分担者

渡辺 千仍 (WATANABE Chihiro)  
東京成徳大学・経営学部・教授  
研究者番号 : 60220901

### (6)研究分担者

久保 幹雄 (KUBO Mikio)  
東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授  
研究者番号 : 60225191

### (7)研究分担者

中島 健一 (NAKASIMA Kenichi)  
神奈川大学・大学院工学部・教授  
研究者番号 : 80278564

### (8)研究分担者

武田 朗子 (TAKEDA Akiko)  
東京大学・大学院情報理工学研究科・准教  
授  
研究者番号 : 80361799