

サプライチェーンにおける途絶リスク管理のための研究

増田拓也^{*1}, 水野浩孝^{*2}

Study for Risk Management of Disruption in Supply Chains

by

Takuya MASUDA^{*1} and Hirotaka MIZUNO^{*2}

(received on Mar.27, 2017 & accepted on Jul.13, 2017)

あらまし

2011年3月11日の東日本大震災によってサプライチェーンが途絶された。サプライチェーンの途絶は、顧客流出や株価暴落による経営の悪化の原因となるため、途絶の原因となるリスクを取り除いておく必要がある。しかし、そのために、どのような運用方策をとるべきであるかを決定するためのスキルやノウハウがなく、サプライチェーン・リスク管理の課題とされている。そこで、途絶を考慮した場合のサプライチェーンの効率性と頑健性のバランスを最適化した運用方策を焼きなまし(SA)法と満足化トレードオフ法を用いて導出する手法を提案する。シミュレーション実験を行った結果から提案手法の有効性を確認した。

Abstract

By the massive earthquake, which hit east Japan area in March 2011, many supply chains are terribly destroyed and had been disrupted for a long period. Disruption of a supply chain leads to its financial difficulties. Reducing the risks of supply chain disruption is an important issue. However, there have not been effective ways for the disruption risk management. In this paper, we propose a method to determine the optimal policy that can balance the trade-off between efficiency and robustness in a supply chain. Simulation results show the validity of proposed method.

キーワード: サプライチェーン, 途絶リスク, リスク管理

Keywords: Supply Chain, Disruption Risk, Risk Management

1. はじめに

近年、日本のサプライチェーンにおいてリスク管理の重要性が高まってきている。これは、JIT (Just In Time) 生産の普及によるサプライチェーンの効率化の追求と、技術向上に伴うサプライチェーンの長距離化により、サプライチェーンの頑健性が低下してきているためである。これらに加え、近年自然災害の発生回数が増加傾向にあり、災害によるサプライチェーンの途絶リスクが高まってきているためである¹⁾。

実際に、2011年3月11日の東日本大震災によってサプライチェーンが途絶された。サプライチェーンの途絶の影響は、国内だけでなく海外にまで波及した。サプライチェーンの途絶は、顧客流出や株価暴落による経営の悪化の原因となるため、サプライチェーンの途絶の原因となるリスクを取り除いておく必要がある。しかし、そのためにどのような運用方策をとるべきであるかを決定するためのスキルやノウハウがなく、

く、サプライチェーン・リスク管理の課題とされている。

そこで本研究は、途絶リスクを考慮した場合のサプライチェーンの長期的な最適運用方策を導出するための手法について検討することを目的とする。サプライチェーンマネジメントの目的の一つに日常の効率性を高めることがある。対して、サプライチェーンにおけるリスク管理の目的は、機会損失の低減と事業継続計画(BCP: Business Continuity Plan)で定めた復旧期間以内に復旧できるよう頑健性を高めることである。機会損失の低減や復旧期間を短縮するためには、対策用に在庫を保有することや調達先の多様化などが有効であることが知られている。しかしこれらを行うことにより日常の効率性は低下してしまう。つまり、日常の効率性と頑健性はトレードオフの関係にある。そこで、途絶を考慮した場合のサプライチェーンの効率性と頑健性のバランスを最適化した運用方策を焼きなまし法(SA: Simulated Annealing)と満足化トレードオフ法を用いて導出する手法を提案する。そしてシミュレーションによってその有効性を検証する。

2. 先行研究

先行研究として大森らによる研究がある。大森らは、対策用在庫の保有、調達先の多様化、拠点の耐久力の強化を対象として、総費用(納期遅れのペナルティと

*1 情報通信学研究科情報通信学専攻 修士課程
Graduate School of Information and
Telecommunication Engineering, Course of
Information and Telecommunication Engineering,
Master's Program

*2 情報通信学部経営システム工学科 教授
School of Information and Telecommunication
Engineering, Department of Management Systems
Engineering, Professor

対策費用の和)の最小化を目的関数とした。そして、その目的関数が最小となる組み合わせを SA によって導出する手法を提案している²⁾。これらの研究は、総費用の最小化と利益の拡大に着目して行われており、災害からの復旧期間については考慮されていない。

しかし、企業はリスク管理において復旧期間を重要視している。リスク管理の重要な工程の一つにビジネスインパクト分析(BIA: Business Impact Analysis)がある。内閣府による BIA についてのアンケート調査によると、大企業、中堅企業ともに目標復旧期間を設定している企業が多いことが明らかにされている。また、同報告書によると目標復旧期間を設定している企業は平成 21 年度の調査時は 68%であったが、平成 23 年度の調査では 84%に増加している³⁾。このことから、利益の拡大や総費用の低減だけでなく、企業の供給責任として、目標復旧期以内に復旧させるようサプライチェーンの頑健性を高めることも重要であると考える。

3. 本研究のアプローチ

ここでは、サプライチェーン・リスク管理の要件を整理したのちに、本研究のアプローチについて述べる。

Table 1 に示すように、サプライチェーンマネジメントの目的の一つに無駄をなくし日常の効率性を高めることがある。これに対してサプライチェーン・リスク管理の目的は、機会損失を低減し、BCP で定めた復旧期間以内に復旧できるよう頑健性を高めることである。そして、サプライチェーンにおいて日常の効率性と頑健性はトレードオフの関係にある。このような環境下で、総費用の削減のみを目的として意思決定した場合、復旧期間を短縮するために投資するといったような意思決定ができない。また、復旧期間の最小化のみを目的として意思決定してしまうと過剰に投資してしまうことが考えられる。そのため、その両者間のバランスを最適化することができる手法が必要となる。そこで、途絶を考慮した場合のサプライチェーンの効率性と頑健性のバランスを最適化する手法を提案する。そしてシミュレーションによってその有効性を検証する。

Table 1 Requirements of Supply Chain Management and Supply Chain Risk Management

Item	Requirement	Relationship
Supply Chain Management	Increase efficiency	Trade-off
Supply Chain Risk Management	Reduce opportunity loss	
	Reduce restoration time	

4. 対象とするサプライチェーンとそのモデル化

4.1 対象とするサプライチェーン・モデルと前提条件

三菱 UFJ リサーチ&コンサルティングによる東日本大震災後の企業戦略の変化についての調査による

と、東日本大震災後の調達先の多様化と在庫最適化を行った企業が多いことが明らかにされている⁴⁾。そこで、リスク対策として以下の 2 つを対象とする。

- ・ 調達先の多様化
- ・ 対策用在庫の保有

そして、Fig.1 に示した 3 段階からなる直列型のサプライチェーンを基本構成モデルとする。各ストアの内部構成は Fig.2 とする。各ストアは生産拠点、輸送拠点、倉庫をそれぞれ保有しているものとする。このモデルの各段階が在庫を積み増しするか、調達先を多様化するかを選択する。本研究では、調達先の多様化は各段階にあるストアが調達先を 1 つのみ増やせるものとする。本論文では、サプライチェーンのネットワーク構造として Fig.1 と Fig.3~Fig.8 に示す 7 つのモデルを分析の対象とする。

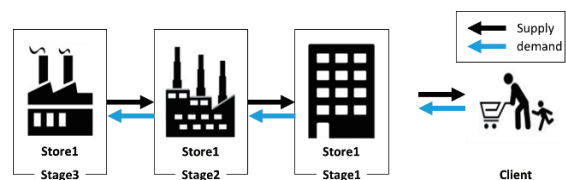


Fig.1 Three-layer of Cascade Model①
(Basic Model)

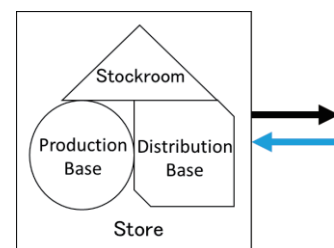


Fig.2 Inner Structure of Each Store

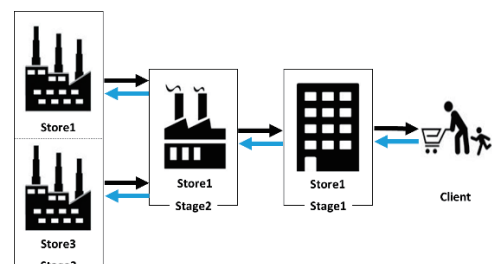


Fig.3 Three-layer Model②

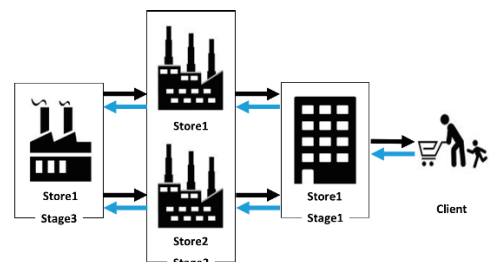


Fig.4 Three-layer Model③

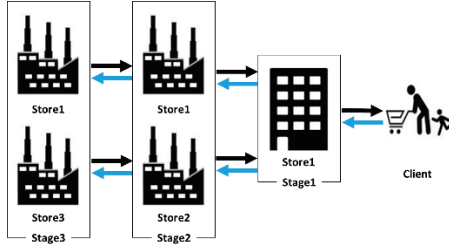


Fig.5 Three-layer Model④

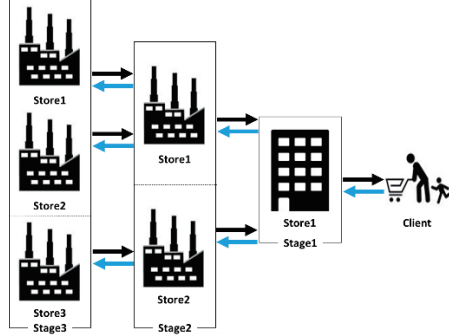


Fig.6 Three-layer Model⑤

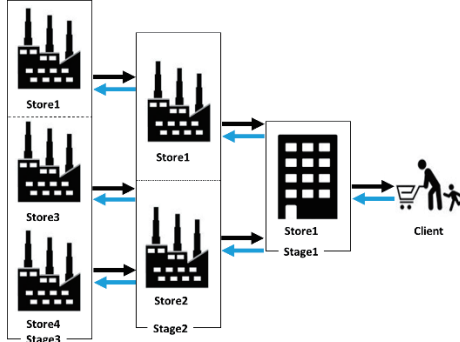


Fig.7 Three-layer Model⑥

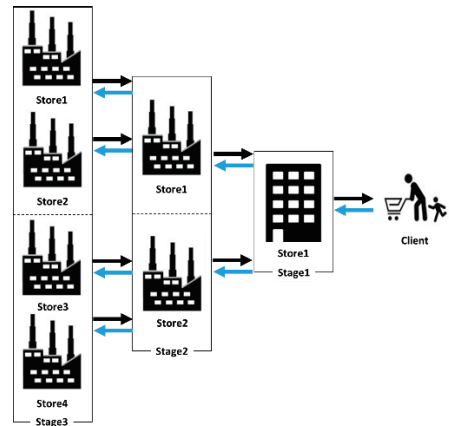


Fig.8 Three-layer Model⑦

7つのモデルの特徴は以下のとおりである。

- ・モデル①： 段階 1, 段階 2, 段階 3 とも 1 個の基本構成モデル
- ・モデル②： 段階 3 のみ 2 個に多様化（多重化）
- ・モデル③： 段階 2 のみ 2 個に多様化
- ・モデル④： 段階 2, 段階 3 とも 2 個に多様化

- ・モデル⑤と⑥： 段階 3 を 3 個, 段階 2 を 2 個に多様化（段階 2 の一方のストアのみが調達先を多様化）
- ・モデル⑦： 段階 3 を 4 個, 段階 2 を 2 個に多様化（段階 2 の 2 つのストアとも調達先を多様化）

4.2 本研究で用いる記号の定義とモデルの定式化

本論文のシミュレーション実験で使用する記号(変数)について定義し, 定式化する. i 段階のある調達 j をストア ij とし, 期間を t とする. この時, 各ストア ij は定期発注方式による発注を行い, 期間 t において以下のように行動するものとする.

1. 上流段階 $i+1$ から入荷量 $X_t^{(i,j)}$ が入荷
2. 下流段階 $i-1$ から需要量 $D_t^{(i,j)}$ を受注
3. 入荷した部品を使用して生産量 $P_t^{(i,j)}$ を生産
4. 下流段階 $i-1$ に対して出荷量 $Y_t^{(i,j)}$ を出荷
5. 上流段階 $i+1$ に対して発注量 $Q_t^{(i,j)}$ を発注

ストア ij の補充リードタイムを $L_{i,j}$ とする. この時,

$$X_t^{(i,j)} = \sum_j Y_{t-L_{i,j}}^{(i+1,j)} \quad (1)$$

が成り立つ.

また, 期間 t の最終需要量を d_t とし, 需要量 $D_{t,j}^{(i)}$ については次式の関係にあるものとする.

$$D_t^{(i,j)} = \begin{cases} d_t & (i=1) \\ \sum_j Q_{t-1}^{(i-1,j)} & (i \geq 2) \end{cases} \quad (2)$$

そして, スタ ij の部品の期末在庫量を $SP_t^{(i,j)}$, 製品の期末在庫量を $SM_t^{(i,j)}$, 安全在庫を $SS^{(i,j)}$, 対策のために保有する在庫を $SE^{(i,j)}$ とする. また, スタ ij の最大生産可能量を $PM^{(i,j)}$, 最大出荷可能量を $YM^{(i,j)}$, インフラの最大能力を $IM_t^{(i,j)}$ とする. さらに, 期間 t のストア ij の生産能力を $PA_t^{(i,j)}$, 出荷能力を $YA_t^{(i,j)}$, インフラ能力を $IA_t^{(i,j)}$ とする. そして, 期間 t のストア ij の生産能力の低下率を $PF_t^{(i,j)}$, 出荷能力の低下率 $YF_t^{(i,j)}$, インフラ能力の低下率 $IF_t^{(i,j)}$ とする. この時, 期間 t での各ストア ij の生産能力 $PA_t^{(i,j)}$ は, 最大生産可能量 $PM^{(i,j)}$ と生産能力の低下率 $PF_t^{(i,j)}$ によって求められる,

$$PA_t^{(i,j)} = PM^{(i,j)} \cdot \frac{(100 - PF_t^{(i,j)})}{100} \quad (3)$$

となる. ただし, 供給先が調達先を n 個に多様化した場合, スタ ij の最大生産可能量 $PM^{(i,j)}$ は,

$$PM^{(i,j)} = \frac{PM^{(i-1,j)}}{n} \quad (4)$$

となる. また, 期間 t での各ストア ij のインフラの能力 $IA_t^{(i,j)}$ は, インフラの最大能力 $IM^{(i,j)}$ とインフラ能力の低下率 $IF_t^{(i,j)}$ によって求められる,

$$IA_t^{(i,j)} = IM^{(i,j)} \cdot \frac{(100 - IF_t^{(i,j)})}{100} \quad (5)$$

となる。この時、供給先が調達先を n 個に多様化した場合、ストア ij の最大インフラ能力 $IM^{(i,j)}$ は、

$$IM^{(i,j)} = \frac{IM^{(i-1,j)}}{n} \quad (6)$$

となる。そして、期間 t の各ストア ij の生産量は、毎期可能な限り生産するものとする。1 つの部品から 1 つの製品が生産されるとすると、期間 t の期首在庫量と生産能力 $PA_t^{(i,j)}$ 、インフラ能力 $IA_t^{(i,j)}$ によって求められ、

$$P_t^{(i,j)} = \min \{ SP_{t-1}^{(i,j)} + X_t^{(i,j)}, IA_t^{(i,j)}, PA_t^{(i,j)} \} \geq 0 \quad (7)$$

となる。

また、期間 t の各ストア ij の出荷可能量は、最大出荷可能量 $YM^{(i,j)}$ と出荷能力の低下率 $YF_t^{(i,j)}$ によって求められ、

$$YA_t^{(i,j)} = YM^{(i,j)} \cdot \frac{(100 - YF_t^{(i,j)})}{100} \quad (8)$$

となる。ただし、供給先が調達先を n 個に多様化した場合、ストア ij の最大出荷可能量 $YM^{(i,j)}$ は、

$$YM^{(i,j)} = \frac{YM^{(i-1,j)}}{n} \quad (9)$$

となる。そして、期間 t の各ストア ij の出荷量 $Y_t^{(i,j)}$ は、その期の出荷可能量 $YA_t^{(i,j)}$ 、期末製品在庫 $SM_t^{(i,j)}$ 、需要量の最小値に依存するため、

$$Y_t^{(i,j)} = \min \{ D_t^{(i,j)}, YA_t^{(i,j)}, SM_t^{(i,j)} \} \geq 0 \quad (10)$$

となる。

続いて、期末在庫量について定式化する。震災が期首または $t-1$ 期末に発生する場合、 t 期の部品の期末在庫量 $SP_t^{(i,j)}$ と、1 期前の部品の期末在庫量 $SP_{t-1}^{(i,j)}$ との間には、

$$SP_t^{(i,j)} = SP_{t-1}^{(i,j)} + X_t^{(i,j)} - P_t^{(i,j)} \geq 0 \quad (11)$$

の関係にある。 t 期の製品の期末在庫量 $SM_t^{(i,j)}$ と、1 期前の製品の期末在庫 $SM_{t-1}^{(i,j)}$ とは、

$$SM_t^{(i,j)} = SM_{t-1}^{(i,j)} + P_t^{(i,j)} - Y_t^{(i,j)} \geq 0 \quad (12)$$

の関係にある。

また、需要予測値を $\hat{D}_t^{(i,j)}$ とすると、需要予測値 $\hat{D}_t^{(i,j)}$ は、期間 t での需要量の予測値であり、直近期間 p_{ij} 期の需要量の移動平均、

$$\hat{D}_t^{(i,j)} = \frac{1}{p_{ij}} \cdot \sum_{k=1}^{p_{ij}} D_{t-k+1}^{(i,j)} = \frac{1}{p_{ij}} \cdot \sum_{k=1}^{p_{ij}} Q_{t-k}^{(i,j)} \quad (13)$$

を用いるものとする。この時、リスク対策を行っていない場合の発注量は目標在庫量と有効在庫量の差と

して求める。

$$Q_t^{(i,j)} = \left((L+1) \hat{D}_t^{(i,j)} + SS^{(i,j)} \right) - \left(SP_t^{(i,j)} + SM_t^{(i,j)} + \sum_{k=1}^{L_t} Q_{t-k}^{(i,j)} \right) \quad (14)$$

(14)式を基本に、対策用に在庫を保有する場合の発注量は、対策用の在庫分多く発注する必要があるため、通常時の発注量に、対策用在庫量 $SE^{(i)}$ を加える。さらに対策用に在庫を保有し調達先を多様化する場合、多様化したストア数で発注量を単純に分配することとする。取引関係にあるストア数を n とすると、リスク対策を行う場合の発注量は、

$$Q_t^{(i,j)} = \left((L+1) \hat{D}_t^{(i,j)} + SS^{(i,j)} \right) - \left(SP_t^{(i,j)} + SM_t^{(i,j)} + \sum_{k=1}^{L_t} Q_{t-k}^{(i,j)} \right) + SE^{(i,j)} \quad (15)$$

によって求められる。この時、各ストア ij は上流段階 $i+1$ の調達先 j の平常時の最大出荷可能量を既知であるとし、その量を超えることはないものとする。

$$0 \leq Q_t^{(i,j)} \leq Y^{(i+1,j)} \quad (16)$$

5. 途絶リスクを考慮した場合のサプライチェーンの効率性と頑健性のバランスを最適化する手法の検討と提案

5.1 評価関数の検討と提案

サプライチェーンの最適化には、サプライチェーン全体を大局的にみて顧客への影響を最小化する全体最適と、サプライチェーンに存在する個々のストアの影響を最小化する個別最適がある。今回は、サプライチェーンの全体最適を目的とした指標について検討と提案を行う。

3章で述べたように、途絶リスクを考慮した場合のサプライチェーンの長期的な最適運用方策を決定する際、無駄をなくし日常の効率性を高めること、機会損失の低減と BCP で定めた復旧期間以内に復旧できるよう頑健性を高めることを意識する必要がある。BCP における復旧期間には目標復旧時間 (RTO: Recovery Time Objective) と最大中断許容期間 (MTD: Maximum Tolerable Period of Disruption) の 2 つが存在する。上記を踏まえ本研究では、途絶リスクを考慮したサプライチェーンの長期的な最適運用方策の決定問題を以下の 3 つを目的関数とした多目的な組み合わせ最適化問題として取り扱う。

- ・ 段階 1 の復旧期間の最小化
- ・ 段階 1 の復旧期間の最大値の最小化
- ・ サプライチェーン全体の総費用 (対策費用と段階 1 の機会損失の和) の最小化

復旧期間の定義には様々なものが考えられるため、

まず本研究における復旧期間の定義を明確にする．その後，上記の要件を踏まえ途絶リスクを考慮したサプライチェーンを評価するための指標について提案を行う．

5.1.1 限界状態のサプライチェーンへの適用

復旧期間を「供給が需要量を下回ってから需要量をまかなえる量の供給が可能になるまで」と定義しては定義が大きすぎるために正しい評価ができないことが考えられる．そこで，途絶からの復旧についてより正確に評価するためには復旧期間を細分化する必要があると考えた．細分化するにあたり，土木分野で地震動に対する構造物の強度を決定する際に用いられている限界状態を参考にした．構造物における限界状態とは，「構造物の施工および使用期間中にその構造物が遂行すると予期されている機能を全うしなくなる状態」のことである⁵⁾．この限界状態は3つのレベルに細分化されている．土木分野における限界状態の各レベルについて Table 2 に示す．これらの限界状態の考え方をサプライチェーンへと適用する．

サプライチェーンにおける限界状態を，「サプライチェーンがある一定期間中に供給すると予期されている量を供給できない状態」とする⁶⁾．さらに，サプライチェーンにおける限界状態の各レベルに適用したものを Table 3 に示す．サプライチェーンに適用した限界状態を用いて，サプライチェーンの災害の発生による途絶から復旧するまでの限界状態の遷移を表現したものを Fig.9 に示す．サプライチェーンは地震などの災害のよっていずれかのレベルの限界状態に陥り，徐々に機能を満たすことのできる限界状態へと移行すると考えられる．

以上のことをふまえて，本研究では復旧期間を「限界状態に陥ってから正常状態に戻るまでの期間」とする．

Table 2 Three Limit States
in Civil Engineering Field⁵⁾

分類	概要
疲労限界状態	構造物または部材が変動荷重の繰り返し作用により、疲労破壊する状態
使用限界状態	構造物または部材が過度のひび割れ、変位、変形、振動などを起こし、正常な使用ができなくなったり耐久性を損なったりする状態
終局限界状態	構造物または部材が破壊したり、転倒、座屈、大変形などを起こし、安定や機能を失う状態

Table 3 Three Limit States in Supply Chain⁶⁾

分類	概要
疲労限界状態	供給能力が低下し、需要量に大きな変動が生じた際に、需要を満たすことができない状態
使用限界状態	供給能力が低下し、例えば需要量の50%～80%しか満たすことができない状態
終局限界状態	供給能力が低下し、例えば需要量の0%～49%しか満たすことができない状態

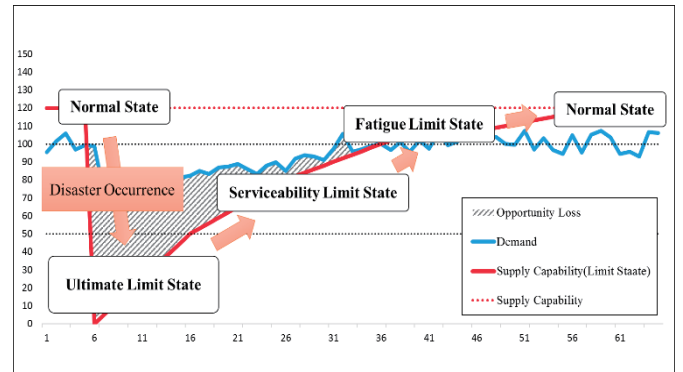


Fig.9 Transition between Limit States
In Restoration of Supply Chain

5.1.2 満足化トレードオフ法を用いた評価関数の提案

5.1 節の冒頭で述べたように，本研究では，途絶リスクを考慮した場合のサプライチェーンの最適運用方策決定問題を多目的最適化問題として扱う．このような多目的最適化問題の評価関数として線形加重和がよく利用されている．しかし，線形加重和ではパレート最適性が保証されないといった問題があることが明らかにされている．このような問題を解決した手法の一つに満足化トレードオフ法がある．本研究では，この満足化トレードオフ法を評価関数として用いる．

それぞれの目的関数を $f_k(x)$ とし，それぞれにける重み $w_k(x)$ とする．この時，満足化トレードオフ法は線形加重和を (17) 式のように変形したものを用いる． k 番目の目的関数に対する目標値を $\bar{f}_k$ とすると，満足化トレードオフ法は，

$$\max_{1 \leq k \leq r} w_k (f_k(x) - \bar{f}_k) + \alpha \sum_{k=1}^r w_k * f_k(x) \quad (17)$$

によって求められる．この時， k 番目の目的関数に対する理想値を f_k^* とし重み w_k を，

$$w_k = \frac{1}{\bar{f}_k - f_k^*} \quad (18)$$

とすることにより，(17)式の第一項に意味を持たせることができる．(17)式の第一項は理想値 f_k^* を基準として目標値 $\bar{f}_k$ までの不達成度とみなすことができる．ここで，(17)式を最小化するという事は，目標値を達成しても可能な限り $f_k(x)$ の値を最小化しようとするということになる．これがパレート最適性を保証する大きな原因となる．以上のことから，(17)式は，各目的関数を理想点と目標点をもとにスケールリングしたそれぞれの目的の不達成度をできる限り平等に最小化しようとしたものと解釈できる⁷⁾．

本研究では，目的関数 $f_k(x)$ として， T 期間分サプライチェーンのシミュレーションを N 回実行した際の平均値を用いるものとする．ただし x は解集合である．

各目的関数の定式化について以下に述べる．

(1) 各限界状態にある平均期間を求める関数

終局限界状態均期間を求める関数を $f_1(x)$ ，使用限界状態を $f_2(x)$ ，疲労限界状態を $f_3(x)$ とする．限界状態にある期間は，何らかの災害が発生した場合に RTO を超過しないようにすることが求められている．そのため， N 回試行した際の災害の発生回数の合計で除算することとする．試行 n 回目の各限界状態にある期間を LS_n^k ，災害の発生回数を CD_n とすると，各限界状態にある平均期間は，

$$f_k(x) = \frac{\sum_{n=1}^N LS_n^k}{\sum_{n=1}^N CD_n} \quad (19)$$

によって求められる．

(2) 復旧期間の最大値を求める関数

復旧期間の最大値 $f_4(x)$ とする．この時，試行 n 回目のサプライチェーンの復旧期間の最大値を R_n とすると，

$$f_4(x) = \max_{1 \leq n \leq N} R_n \quad (20)$$

によって求められる．

(3) 総費用の平均値を求める関数

総費用を求める関数を $f_5(x)$ とする．総費用は，復旧が生じない場合も考慮しなければならないため，試行回数で除算して平均値を求める．この時，試行 n 回目の機会損失を L_n とし，対策費用を SC とすると，

$$f_5(x) = SC + \frac{\sum_{n=1}^N L_n}{N} \quad (21)$$

によって求められる．このとき機会損失 L_n は，

$$L_n = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (D_t^{(i,j)} - Y_t^{(i,j)})}{N} (D_t^{(i,j)} > Y_t^{(i,j)}) \quad (22)$$

によって求められる．また対策費用 SC は，単位当たりの在庫の保管費 SEC と調達先の多様化にかかる費用 DC とすると，

$$SC = \sum_j^{Tj} SE^{(i,j)} * SEC + (Tj - 3) * DC \quad (23)$$

によって求められる．この時， SE は対策用在庫量， Tj はサプライチェーンに存在するストアの総数である．

5.2 途絶リスクを考慮したサプライチェーンの運用方策の決定問題の定式化

サプライチェーンの運用方策には，在庫を積み増すのか否か，調達先の多様化するのか否かなど様々な組

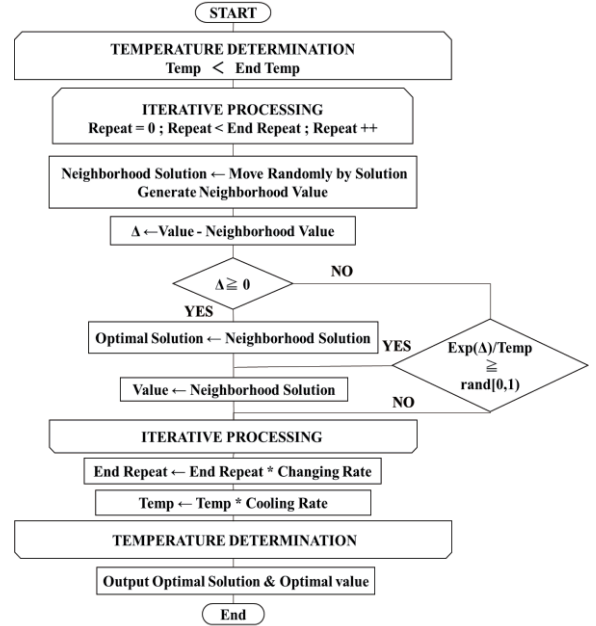


Fig.10 Flow of Simulated Annealing⁸⁾

み合わせが存在する．また，サプライチェーンが確率的に途絶すること，ネットワーク構造でつながっているために，サプライヤー同士が複雑に影響をうけあうことから，これらは計算が困難な組み合わせ問題として取り扱うことができる．このような問題の解法にメタヒューリスティクスがある．メタヒューリスティクスの代表的な手法には，局所探索法(LS : Local Search)や遺伝的アルゴリズム(GA : Genetic Algorithm)，焼きなまし法(SA : Simulated Annealing)などがある．今回は，LS よりも精度が高く，GA よりも比較的取り扱いやすい SA を用いる⁸⁾．本研究で用いる SA のフローを Fig.10 に示す．

6. シミュレーションによる最適化手法の有効性の検証

6.1 シミュレーション条件の概要と設定

本節ではシミュレーションの目的と設定について述べる．

(1) シミュレーションの目的

本シミュレーションは，提案手法によって途絶リスクを考慮した場合のサプライチェーンの運用方策を導出する．そして，以下の2つの検証を行うことを目的とする．

- ・ 提案した手法の有効性を検証
- ・ 総費用の最小化のみを目的関数とした場合(従来の手法)との結果の比較

(2) シミュレーションの基本設定

SA に用いるパラメータを Table 4 に示す．対策用在庫の解の候補集合は $\{0, 500, 1000, \dots\}$ ，ネットワーク構造の解の候補集合は $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ とする．そし

Table 4 Parameters of the Simulated Annealing in the Simulation

Item	Value
Number of Trial	1,500
Initial Temp	100
End Temp	0.01
Cooling Rate	0.92
Initial Repeat	100
Changing Rate	1.02

Table 5 Parameters of the Supply Chain Simulation Model

Item	value
Final Demand (Average)	3,500
Final Demand (Variance)	50
Safety Stock	1,000
moving average	5
Unit Price	1,000
Stock Holding Cost Per Unit Quantity	100
Cost for Diversification of Suppliers	5,00,000

Table 6 Definitions of Limit States in the Simulation

分類	概要
疲労限界状態	需要量の80%から100%未満しか供給できない状態
使用限界状態	需要量の50%から79%未満しか供給できない状態
終局限界状態	需要量の50%未満しか供給できない状態

て、現在の解の位置から平均 0、標準偏差 1.0 の正規乱数に従って移動するものとする。ただし、0 以外の値になるまで正規乱数の生成を繰り返すものとする。

(3) サプライチェーンの基本設定

シミュレーションで用いるサプライチェーンの基本的な条件の設定を Table 5 に、限界状態の設定を Table 6 に示す。

(4) 災害の発生頻度とその影響度の設定

災害は、ポアソン到着にしたがっていずれかのストア ij で発生するものとする。ただし、各期に複数のステージ ij が同時に被災することはないものとする。災害の発生頻度は 1000 期間に 1 度とする。災害は、災害からの復旧途中であっても発生するものとする。また、災害が発生した場合、需要量は最終需要量の平均値が 80% 低下し、元の水準に戻るまでに 80 期間かかるものとする。災害が発生した場合の各能力へ与える影響を 4 段階にわけた。災害が発生した場合の各影響とそれぞれの発生確率について Table 7, Table 8, Table 9 に示す。

(5) 実験環境

今回のシミュレーション開発環境を Table 10 に、実行環境を Table 11 に示す。

Table 7 Definitions of the Influence Productive Capacity Receives by Disaster

Classification	Rate of Capacity Degradation (%)	Restoration Properties (Time)	Probability (%)
Collapse	100	160	40
Serious Damage	80	130	50
Half Damage	50	100	5
Slight Damage	20	90	5

Table 8 Definitions of the Influence Transportation Capacity Receives by Disaster

Classification	Rate of Capacity Degradation (%)	Restoration Properties (Time)	Probability (%)
Collapse	100	160	40
Serious Damage	80	130	50
Half Damage	50	100	5
Slight Damage	20	90	5

Table 9 Definitions of the Influence Infrastructure Capacity Receives by Disaster

Classification	Rate of Capacity Degradation (%)	Restoration Properties (Time)	Probability (%)
Collapse	100	50	40
Serious Damage	80	40	50
Half Damage	50	25	5
Slight Damage	20	10	5

Table 10 Development Environment of the Simulator

Item	Definition
Development Tool	Microsoft Visual Studio Professional 2013
Development Language	Visual C# 2013

Table 11 Runtime Environment of the Simulator

Item	Definition
OS	Windows10 Pro
CPU	Intel® core(TM) i5-2400 CPU @ 3.10GHz
Memory	16.0GB
Kind of System	64bit Operating System x64BaseProcessor

6.2 シミュレーション結果

本節ではシミュレーションの結果について述べる。

(1) 初期解

基本モデルのすべてのストアの対策用在庫量を 0 とした状態を初期解とし、そのモデルに対して災害が発生させた場合の結果を初期解とし、その時の各目的関数の値を初期値とする。初期解を Fig.11 に、初期値のグラフを Fig.12 に示す。

(2) 従来手法(総費用の最小化)を目的とした場合の結果

先行研究と同じく、総費用(対策費用と機会損失の和)を評価関数として、途絶リスクを考慮しつつサプライチェーンの最適運用方策決定問題を解いた場合の近似最適解を Fig.13 に、近似最適値のグラフを Fig.14 に示す。

(3) 提案手法で最適化した場合の結果

初期解を基準に Table 12 のように目標値と理想値を設定した。従来手法で解いた場合の結果から、終局限界状態と使用限界状態にある期間を短縮することで疲労限界の期間が長期化することがあることがわ

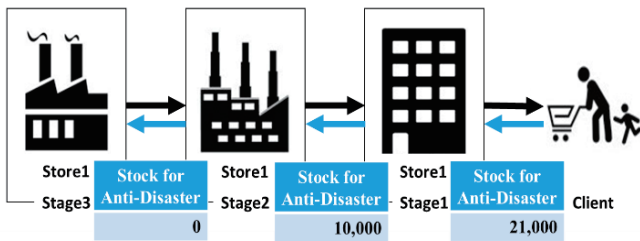


Fig.11 Initial Solution

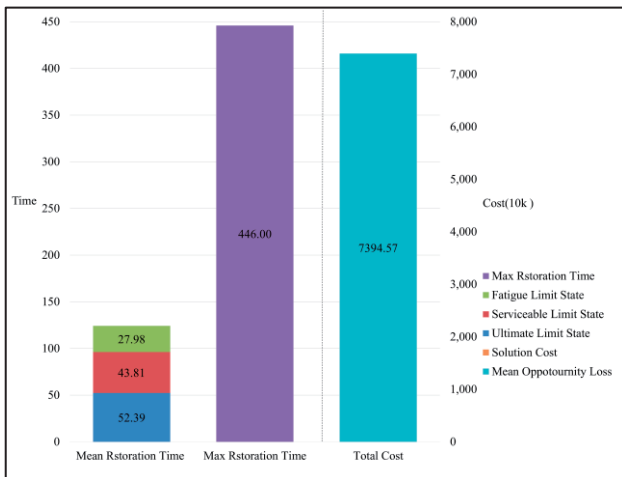


Fig.12 Initial Value

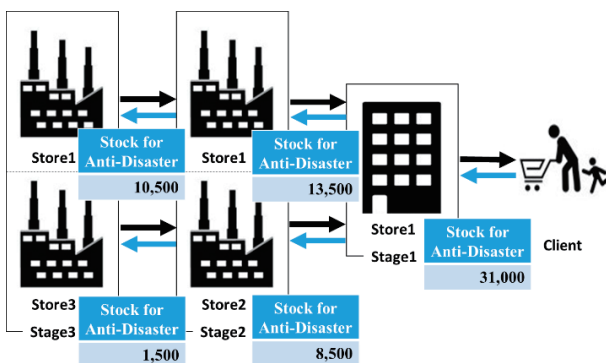


Fig.13 Approximately Optimal Solution by Previous Method

かったため、疲労限界状態に限り初期値よりも少し長い期間を目標値としている。この設定を基準に、提案手法を用いて途絶リスクを考慮した場合のサプライチェーンの最適運用方策決定問題を解いた場合の近似最適解を Fig.15 に、近似最適値のグラフを Fig.16 に示す。

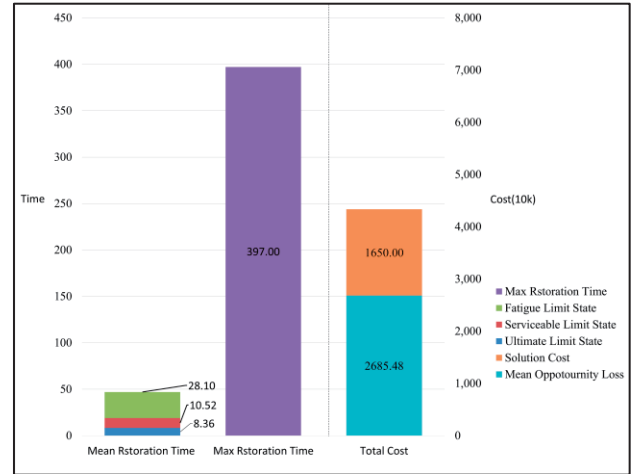


Fig.14 Approximately Optimal Value by Previous Method

Table 12 Target Values and Ideal Values

Item	Target Value	Ideal value
RTO(Fatigue Limit State)	30	0
RTO(Serviceability Limit State)	15	0
RTO(Ultimate Limit State)	5	0
MTPD	200	0
Total Cost	45,000,000	0

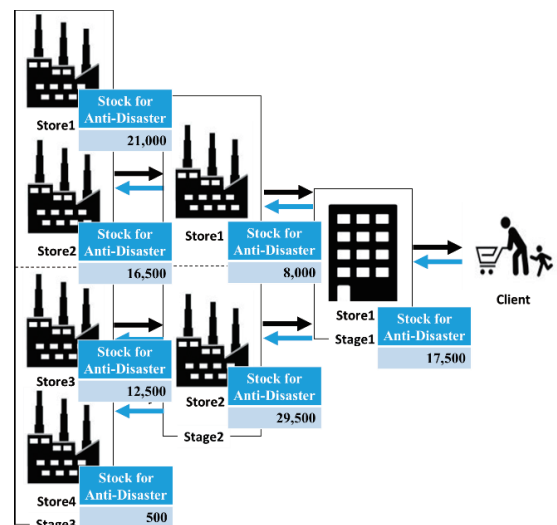


Fig.15 Approximately Optimal Solution by proposed Method

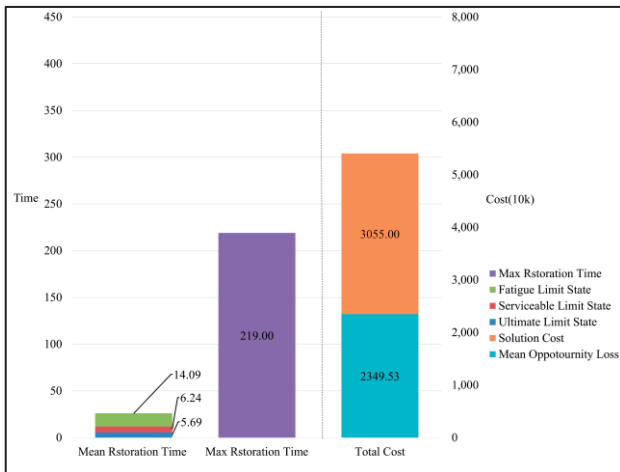


Fig.16 Approximately Optimal Value
by proposed Method

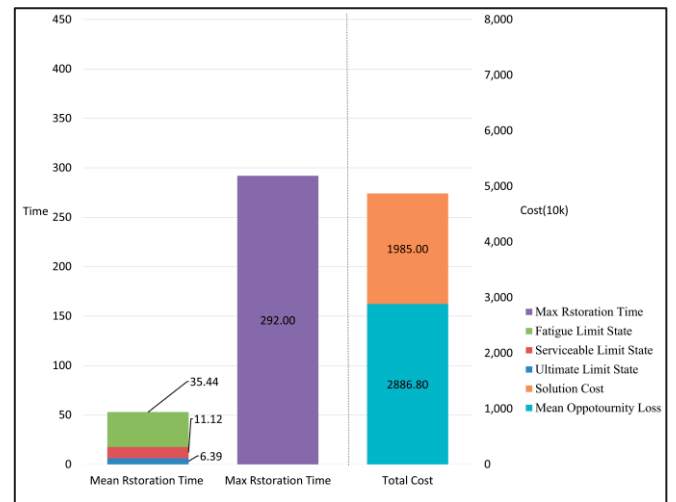


Fig.18 Approximately Optimal Value
by proposed Method
(Case of Moderating Restoration-Related Target Value)

(4) 復旧期間の目標値を緩和した場合の結果

Table 12 では復旧期間に関連する目標値をかなり厳しく設定した。その結果、復旧期間は短縮されたものの総費用が 25% 増加してしまった。そこで、復旧期間に関連する目標値のみ緩和して目標値を Table 13 のように設定した。Table 13 の設定を基準に、提案手法を用いて途絶リスクを考慮した場合のサプライチェーンの最適運用方策決定問題を解いた場合の近似最適解を Fig.17 に、近似最適値のグラフを Fig.18 に示す。

Table 13 Target Value and Ideal Value
(Case of Moderating Restoration-Related Target Value)

Item	Target Value	Ideal value
RTO(Fatigue Limit State)	40	0
RTO(Serviceability Limit State)	30	0
RTO(Ultimate Limit State)	10	0
MTPD	200	0
Total Cost	45,000,000	0

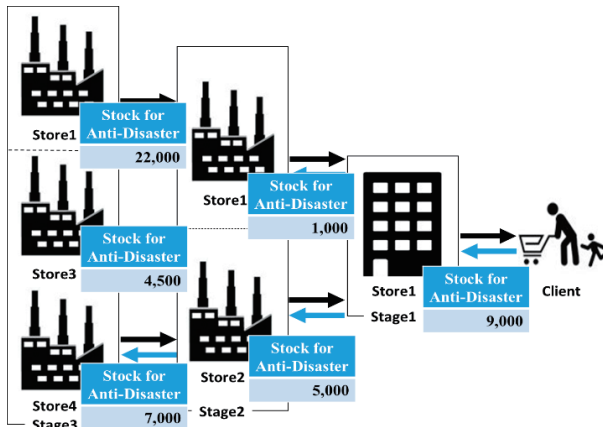


Fig.17 Approximately Optimal Solution
by proposed Method
(Case of Moderating Restoration-Related Target Value)

6.3 考察

前節のシミュレーション結果について考察する。

(1) 初期の結果と従来手法によって求められた結果の比較

Fig.11 と Fig.13 から、従来手法によって求められた近似最適解は、初期解より対策用在庫量が増加している。また、調達先も同様に増加している。このことから、リスク対策に投資していることがわかる。

Fig.12 と Fig.14 から、従来手法の近似最適値では、リスク対策に投資したことによって機会損失が約 64% 減少していることはわかる。その結果、総費用が約 41% 減少している。また、平均復旧期間に着目してみると、終局限界状態と使用限界状態にある期間は、それぞれ初期値に比べて約 84%、約 76% 短縮されている。その一方で、疲労限界状態にある期間は、1% 未満ではあるが長期化されている。これは、終局限界状態と使用限界状態を短縮したことによるしわ寄せがより影響度の低い疲労限界状態にきたためと考えられる。総合すると、平均復旧期間は約 72% 短縮されている。また、最大復旧期間に関しては約 21% 短縮されている。従って、従来手法は途絶リスクを考慮したサプライチェーンの最適運用方策の導出に有効であることが再確認できる。

(2) 初期の結果と提案手法によって求められた結果の比較

Fig.11 と Fig.15 から、提案手法により求めた近似最適解では、初期解に比べて対策用在庫量が増加している。同様に、調達先も増加している。このことから、リスク対策に投資していることがわかる。

Fig.12 と Fig.16 から、提案手法によって求められた近似最適値は、リスク対策に投資したことによって機会損失が約 68% 減少している。その結果、総費用が約 27% 減少している。また、平均復旧期間に着目して

ると、提案手法により求めた近似最適値は、各限界状態にある期間がすべて初期値よりも短縮されている。具体的には、終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態にある期間がそれぞれ初期値から約 89%、約 85%、約 50%短縮されている。総合すると平均復旧期間は約 79%短縮されている。また、最大復旧期間に関しても約 51%短縮されている。以上から、提案手法は途絶リスクを考慮したサプライチェーンの最適運用方策の導出に有効であることがわかる。

(3) 従来手法によって求められた結果と提案手法によって求められた結果の比較

Fig.13 と Fig.15 から、提案手法で求めた近似最適解は、従来手法で求めた近似最適解と比較して、対策用在庫量が増加している。また、調達先も同様に増加している。このことから、提案手法のほうが従来手法よりもリスク対策に多くの投資を行っていることがわかる。

Fig.14 と Fig.16 から、提案手法による近似最適値は、リスク対策に投資したことによって機会損失が従来手法による近似最適値に比べて約 13% 減少している。一方、対策費用が約 85%増加している。機会損失の減少幅より対策費用の増加幅の方が大きいため、結果として総費用が約 25%増加してしまっている。一方、復旧期間に着目すると、全ての限界状態にある期間が短縮されている。具体的には、終局限界状態、使用限界状態、そして疲労限界状態にある期間が、それぞれ約 32%、約 41%、約 50%に短縮されている。総合すると平均復旧期間は約 55%に短縮されている。また、最大復旧期間も約 45%に短縮されている。このことから、総費用の最小化と復旧期間の最小化は必ずしも一致しないことがわかった。

総費用を約 25%増加させることで、平均復旧期間と最大復旧期間がそれぞれ約 55%、約 45%短縮されていることを考えると、提案手法の方が従来手法よりも複数の目的関数値のバランスを図りながら意思決定できていると考えられる。このことは、効率性と頑健性のバランスを最適化することを目的とした場合、提案手法は従来手法よりも途絶リスクを考慮したサプライチェーンの最適運用方策の導出方法としてより有効であると考えられる。

(4) 復旧期間関連の目標値の設定の違いによる結果の比較

Fig.13、Fig.15 ならびに Fig.17 から、復旧期間関連の目標値を緩和した場合は、提案手法の結果は従来手法の結果に近づいていることがわかる。Fig.14 と Fig.16 を比較すると、復旧期間関連の目標値を緩和した場合の近似最適値では、緩和前から対策用在庫量が減少している。また、調達先も同様に減少している。このことから、復旧関連の目標値を下げるとリスク対策への投資を減らしていることがわかる。

Fig.16 と Fig.18 から復旧期間関連の目標値を緩和した場合の近似最適値は、緩和前よりリスク対策への投資を約 35%減少させたことで、機会損失が約 23%増加している。しかし、対策費用の減少幅よりも機会損

失の増加幅の方が小さく、結果として総費用が約 10%減少している。一方、復旧期間に着目すると、復旧期間関連の目標値を緩和した場合の近似最適値は、緩和前と比較して全ての限界状態にある期間が長期化されている。具体的には、終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態にある期間がそれぞれ約 12%、約 78%、約 150%長期化されている。これらを総合すると、平均復旧期間は約 100%長期化している。また、最大復旧期間に関しても約 33%長期化されている。大幅に長期化されているものの、各限界状態にある期間、最大復旧期間ともに目標値以下の水準になっており、目標値を基準に全体のバランスが最適化されていることがわかる。

7. おわりに

本研究では、SA と満足化トレードオフ法を用いて、途絶を考慮した場合のサプライチェーンの効率性と頑健性のバランスを最適化した運用方策を導出する手法を提案した。そしてシミュレーションによってその有効性を検証した。その結果、総費用の最小化と復旧期間の最小化は必ずしも一致しないことがわかった。また、目標値を基準として効率性と頑健性のバランスを最適化した意思決定が可能になった。

今後の課題を述べる。今回は、単一製品を取り扱う三段階の単純なチェーンを用いた。このため、複数の部品からなる製品を複数取り扱う、より現実的なモデルへと拡張する必要がある。また、今回は企業規模による対策への投資額の上限も考慮していないため、企業規模による対策への投資額の上限のあるモデルへと拡張する必要がある。

また、今回は、全体最適を目的としており、各企業のリスク対策への意識の差などが考慮されていない。しかし現実では、企業によってリスク対策への意識や企業規模によってリスク対策への投資額の上限が異なる。そのため、動的サプライチェーン・モデルなどを組み込むことで、各企業のリスク対策への意思を反映できるようにし、より精度の高い意思決定を可能にする必要があると考えている。また、ストア毎に個別最適を行った結果と全体最適を行った結果に違いがある場合のすり合わせをどのように行うのかについても考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 久保幹雄：「サプライチェーン最適化の新潮流」, p.117-136, 朝倉書店, 2011
- 2) 大森峻一, 吉本一穂：サプライチェーン途絶に対する最適リスク緩和方策, 日本経営工学会論文誌, Vol.66, No.1, pp.13-21, 2015
- 3) 内閣府：企業の事業継続の取組に関する実態調査－過去からの推移と東日本大震災の事業継続への影響－, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kigyotopics/pdf/kentoukai12_10.pdf (参照 2017/2/15)
- 4) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング：平成 23 年度

- 経済産業省委託調査 我が国ものづくり産業の競争力の源泉に関する調査 2012, http://www.bpfj.jp/act/download_file/68127081/18135416.pdf (参照 2017/2/15)
- 5) 赤石沢, 総光: リスクマネジメント手法を利用した土木構造物の LCC 評価の応用技術に関する研究, https://dspace.wul.waseda.ac.jp/dspace/bitstream/2065/5296/5/Honbun-4269_03.pdf (参照 2017/2/15)
- 6) 増田拓也, 水野浩孝, 森山弘海: サプライチェーンにおける途絶リスク管理のための指標の検討ー限界状態設計法のサプライチェーンへの適用ー, 日本経営システム学会第 56 回全国研究発表大会, pp.254-255, 日本経営システム学会, 2016
- 7) 中山弘隆: あれもこれもよくしたい多目的計画法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, http://www.orsj.or.jp/~archive/pdf/bul/Vol.41_06_343.pdf (参照 2017/2/15)
- 8) 安田恵一郎, 相吉栄太郎: 「メタヒューリスティクスとその応用」, p.129-146, オーム社, 2007