

サプライチェーン途絶リスクマネジメントに関する体系的な研究

平成28年3月

劉唐

概要

海外では9.11同時多発テロ事件以降、また日本では3.11東日本大震災以降、サプライチェーンの途絶を対処するためのサプライチェーン途絶リスクマネジメント(以下SCDRMと略す)に関する研究が注目を浴びるようになり、論文数も急増している。しかし、SCDRM分野の研究はまだ黎明期であり、主に実証研究と理論研究を展開するだけであり、体系的な研究はまだ至っていないことが現状である。

この背景を踏まえ、本研究では体系的なSCDRM研究を行うことを目的とし、途絶リスクに対する評価、及びマネジメント手法の開発に関する研究を行う。本論文は7つの章で構成されている。

第1章では、体系的なSCDRMに関する研究の背景と必要性を述べ、既存研究の概要と本研究の構成を述べている。第2章では、SCDRMに関する文献研究を行い、リスク、サプライチェーンリスク(SCR)、及びSCDRMに関する研究について、その特徴を抽出し、体系化を行っている。本章では、文献レビューを実施し、リスク、SCR、SCDRMの3つのカテゴリーに分け、その定義や分類の特徴を抽出し、体系化を行った。そのうち、特にSCRについては内部、外部、および環境の3つの大分類のもとで、さらに2段階の中分類を加えて独自の分類体系を提案し、既存研究との対応関係も示した。

第3章では、途絶リスクによるSC業務停止期間を推定するシミュレーションモデルを構築している。本章ではシナリオ地震を発生させ、東京近辺、太平洋、及び全国に生産施設を配置した3タイプのSCの業務停止期間を其々に算出する。そして、SCの発注方式と連結性が業務停止期間への影響を考察するため、「定期定量の直列型SC」、「定量発注の直列型SC」と「定量発注の並列型SC」の3つケースを分けてシミュレーション実験を行い、その結果、全国に生産施設が配置されている並列型SCは、直列型SCに比べて業務停止期間が短いことを示している。

第4章では、途絶リスクに対処するための方法としてSCレジリエンスを体系化することを目的とし、発表されているSCレジリエンスに関する論文100本に対してテキストマイニングを実施し、2階層からなるSCレジリエンスの構造モデル、即ち、俊敏性、柔軟性、冗長性、及び堅牢性を第1階層とし、見える化、速度、SCの情報の共有化、及びSCの協調性を俊敏性の構成要素、SCの協調性、分散型生産、速度、遅延差別化及び社員へのクロストレーニングを柔軟性の構成要素、SCの協調性、速度、多様性、及びバックアップシステムを冗長性の構成要素、速度、分散型生産、自己組織化、そしてSCの情報共有化を堅牢性の構成要素とした2段階のSCレジリエンスの構造モデルを構築している。

第5章では、SCレジリエンスの構成要素である俊敏性を強化するためにSCにおける物流経路と情報を見える化するシステムを構築し、3段階からなるSCを対象に、ロールプレーによる実験を行った。その結果、受発注の経験がない被験者でも本研究で開発したSC見える化システムを用いることにより、調達先や調達先の調達先が被災したために発生する損失を最小限に抑えることができ、SC見える化を用いない時に比べて利益を増やすことができたことを示している。特に、途絶先企業と直接繋がっていない企業も利益を

増やすことができたことは、川上と川下双方向の見える化の必要性を強くサポートするものであり、間接被害を防ぐためには調達先の調達先だけでなく、販売先の情報も把握する必要があることを示唆している。

第6章では、SCレジリエンスの構成要素である柔軟性、冗長性、及び堅牢性の強化策と柔軟性とその他の2つの強化策との組み合わせを加えた計5つの強化策に対してシミュレーションを行い、システムの平均利益を用いてSC途絶時の効果を分析している。その結果、柔軟性強化策と頑健性強化策の組み合わせが最も有効であることが分かり、代替企業が存在しない外部環境においては頑健性強化策がほかの強化策より1割以上利益を増やすことができ、ダイヤモンドSCの存在が確認できた場合には、生産施設を分散させるなど、2社購買同様な途絶リスクマネジメントの方策を取ることが有効であることを示している。第7章では、各章の内容をまとめ、本研究の成果を要約し、将来の展望に対しても言及した。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既存研究とその課題	2
1.2.1	サプライチェーン途絶リスクマネジメントに関する研究	2
1.2.2	地震によるサプライチェーン業務停止期間の予測	4
1.2.3	レジリエンスに関する研究	4
1.2.4	サプライチェーン見える化に関する研究	6
1.3	研究全体の枠組みと構成	7
1.3.1	研究全体の枠組み	7
1.3.2	研究の構成	8
第2章	サプライチェーンにおけるリスク	9
2.1	リスクとサプライチェーンリスク	9
2.1.1	リスク	9
2.1.2	サプライチェーンリスク	11
2.1.3	サプライチェーンリスクの特徴	12
2.2	サプライチェーンリスクの分類と体系化	13
2.2.1	既存研究におけるサプライチェーンリスクの分類	13
2.2.2	サプライチェーンリスクの分類方法の体系化	14
2.3	サプライチェーン途絶リスクマネジメント研究の分類	16
2.3.1	サプライチェーン途絶リスクマネジメントのプロセスの分類	16
2.3.2	サプライチェーン途絶リスクマネジメント研究手法の分類	17
2.4	まとめ	18
第3章	震災時のサプライチェーン業務停止期間リスクの解析	19
3.1	はじめに	19
3.2	業務停止期間の定量化手法の構築	19
3.2.1	計測震度の求め方	19
3.2.2	業務停止期間の算出	21
3.3	シミュレーションモデルの構築	22
3.3.1	シナリオ地震の設定	22
3.3.2	サプライチェーンの構造	24
3.3.3	施設の業務停止期間	28

3.4	シミュレーション実験	29
3.4.1	シミュレーションの結果	30
3.5	おわり	30
第4章	サプライチェーンレジリエンスモデルの構造分析	31
4.1	はじめに	31
4.2	既存研究におけるサプライチェーンレジリエンスの構成方法	32
4.3	研究方法	32
4.3.1	関連度の指標	33
4.3.2	分析の流れ	34
4.3.3	予備分析	34
4.4	本分析の結果	41
4.4.1	関連用語の抽出範囲の設定	41
4.4.2	テキストマイニングの結果	42
4.5	おわり	45
第5章	サプライチェーン見える化システム	47
5.1	はじめに	47
5.2	サプライチェーン見える化システム	48
5.2.1	BCMとサプライチェーン見える化	48
5.2.2	サプライチェーン見える化システムの構築	49
5.3	サプライチェーン見える化システム有効性の検証	50
5.3.1	実験結果と分析	53
5.4	終わり	56
第6章	サプライチェーン途絶リスク対策の解析	57
6.1	はじめに	57
6.2	実験の条件	57
6.2.1	サプライチェーン途絶リスク対策	57
6.2.2	サプライチェーンの構造	58
6.2.3	シミュレーションの条件	58
6.2.4	外部環境	59
6.3	実験	59
6.3.1	外部環境1	59
6.3.2	外部環境2	63
6.3.3	外部環境3	65
6.4	終わり	68
第7章	結論	69
7.1	前章までの総括	69
7.2	今後の課題	70

参考文献	72
付 録 A テキストマイニング分析用の論文リスト	82
A.1 予備分析用の論文リスト	82
A.2 本分析用の論文リスト	83
付 録 B 業績リスト	92
謝辞	93

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、サプライチェーンマネジメント（以下SCM）に途絶リスクの要素を取り入れたサプライチェーン途絶リスクマネジメント（以下SCDRM）が注目されている。生産物流過程における調達、製造、輸配送などのSC全体の効率を高めることを目的とするSCMの理論は、企業の現場で幅広く応用されており、現在の殆どのグローバル企業にSCMの専門部署が設置されている[1]。一方、リスクマネジメントは、19世紀にヨーロッパで始まって以来、その歴史は既に100年以上及ぶ[2]。2000年以降、各種の途絶リスクが頻発しているために、学界や産業界の注目を浴びている。例えば、2000年の狂牛病問題、2001年の9.11多発テロ事件、そして近年の地震、津波、洪水などの自然災害等々、SCMにおける途絶リスクは数多く存在する。また、情報技術の発展によって、企業を取り巻く環境は急速に変化している。更に、市場の多様化、技術変化の加速、競争のグローバル化などが加わって、失敗すればマーケットシェア喪失に追い込まれる可能性もある[1]。

このような企業の協力関係や業務プロセスの効率化、高いレベルの情報共有などを通じて途絶リスクの発生確率と影響を低減するのがSCDRMである。そして、自然災害、市場変化だけでなく、関連他社の被災の影響を受けた被害が連鎖的に発生することでSCDRMの重要性が高まっている。

東日本大震災では広い範囲で甚大な被害が発生したので、SCの途絶により企業の生産活動に大きな支障が生じた。被災地では地震や津波によって多くの工場が生産停止に陥り、そこから部品を調達していた工場も連鎖的に業務停止となり、SCの途絶へ発展した例もあった。更に、SCの構造が従来のピラミッド型の構造からダイヤモンド型の構造へと変わっていたことも被害の拡大を助長した[3]。このような震災の教訓から、

- 途絶リスクを評価する
- 事前に初期対応策を用意する
- 事後に素早く対策を打つ

の3つのアクションに構成されている体系的なSCDRMの構築が提唱されており、途絶リスクの評価、途絶リスクに強いSCレジリエンスの構築や途絶を早く察知して初期対応するのに役に立つSCの見える化システムの導入などが課題となっている。

また、東日本大震災以降、政府による被害評価の見直し、及びSCDR対策の構築を積極的に行われている。中央防災会議は東日本大震災の教訓を受け、SCDRは今後の防災の

重点の1つとする考え方を示し、2012年に予想される南海トラフ巨大地震の被害評価を公表し、2013年以降は、首都直下地震、東海地震、近畿圏・中部直下地震などの被害評価を相次いで実施している[4][5]。被害評価の目的は政府、企業の防災・減災対策の立案を推進することである[6]が、実際に震災によるマクロ経済に及ぼす影響の分析、及び防災政策の効果把握に留まっていることが現状である。企業が政府の被害評価を踏まえてSCDRMを行う前には、中央防災会議、各自治体から公表されたハザードマップ、震度分布データなどを活かし、独自のSC途絶リスク評価手法を開発する必要がある。

近年では、組織や企業の事業継続の力を表す概念であるレジリエンスが使われており、その延長線としてSCレジリエンスも注目されている。内閣府[7]は自然災害による被害を最小限に留めるとともに被害からいち早く立ち直り元のに戻らせるレジリエンスに関する総合的な施策の推進の在り方を検討するため、レジリエントな防災・減災機能の強化推進委員会を成立し、SC途絶による日本産業が機能不全に陥り、国際競争力を失う最悪の事態にならるように、施設の耐震性強化、情報共有システムの構築などの対策を提示されており、今後、SCレジリエンスは途絶リスク対策の重点の1つとして進められると考えられているが、国家レベルでも、企業レベルでもSCレジリエンスを評価する方法を提示していないので、SCレジリエンスを構築・強化する体系的な方法論が求められている。

そして、経産省は震災時におけるSCの業務継続を目的として、拠点や設備の二重化、生産施設・情報システムの堅牢性、調達の容易化・調達先の複数化などの東日本大震災、タイの大洪水の教訓を踏まえたSCDR対策を示している[8]。しかし、企業が途絶リスクから生き残るためには自社、及び自社部品の調達経路のリスクマネジメントだけでなく、SC全体を見渡した途絶リスクマネジメントが必要になっており、そのためには供給と需要の情報を全部把握できるSC見える化を実現し、SCDRに対して有効な対策を講じることが重要になる。

このような背景を踏まえて、本研究では企業の合理的なSCDRM行動を資するため、SCの途絶リスクに対する評価、及びマネジメント手法を開発し、体系的なSCDRM研究を行うことを目的とする。

1.2 既存研究とその課題

1.2.1 サプライチェーン途絶リスクマネジメントに関する研究

海外では2001年の9.11多発テロ事件以降、SCDRMに関する研究活発になっており、研究数が年々増えている。日本でも中越大地震以降、特に東日本大震災以降、多くの実地調査、実証研究が行われ、製造や物流だけでなく、交通や電気、水道など社会のインフラを含めた途絶リスクの総合マネジメント能力の向上が提唱されるようになってきている。

しかし、SCDRMに関する諸概念は、研究者の調査方法や着目している視点によってその定義が異なっており、まだ統一的な見解がない。特に、日本国内ではSCDRMの研究者がまだすくないため、基礎的な概念が統一されていないのが現状である。ここでは日本国内におけるSCDRM研究の現状と特徴を概説する。海外に関する研究の現状は第2章で詳しく述べる。

日本における SCDRM の研究は、その研究手法に着目した場合、(1) 概念的 research、(2) 実証的研究、および (3) 定量的研究の 3 つに大別できる。まず、定量的研究において多く見られるのは、地震による SC 途絶に関する研究である。例えば、大森と吉本 [9] は、リスク緩和の投資費用を最小化させる SC を設計することを目的とし、途絶を考慮したネットワークモデル、シミュレーションを用いたリスク評価手法、各拠点のリスク緩和方策の 3 点を提案している。鳥澤ら [10] は、震災による道路輸送網の途絶を焦点に、道路通行止め予測モデルとそれに基づく道路網の機能支障による SC への影響評価手法を提案している。西川ら [11] は、直列型で連結されている SC の業務停止期間を短縮させる 3 種類の対策、即ち、生産拠点の多重化、生産拠点の耐震補強、及び震災時の生産機能移転をシミュレーションの手法でリスク低下の効果と要するコスト定量的に比較し、企業に被災状況によりリスク対策を選ぶ基準を提案している。

実証的研究においては、機械振興協会経済研究所と [12]、IBM レポート [13] などが挙げられる。機械振興協会経済研究所は、SC の脆弱性への補完として BCP の導入を提案しており、日本では先駆的な BCP 研究であると言えよう。特に製造業 159 社に対するアンケート調査により、製造業における BCP 導入の実態、及び SCM と BCP の関係性などを分析した点においては実務的にも高く評価できる。IBM は、北米、西欧、アジア太平洋地域の企業の SC 戦略及びオペレーションを担当するエグゼグティブ約 400 名にインタビュー調査を行い、コスト削減、可視化、リスク、顧客との親密性とグローバル化の 5 つの面から、如何にスマートな SC を構築するかを論じている。

また、概念的 research としては曹、秋 [14]、森泉ら [1]、井上 [15] などがあげられる。曹、秋は、SCR に関する既存研究の調査に基づき、SC における 40 のリスクドライバーを列挙し、プロセスと属性の 2 つの軸を用いて分類し、リスクドライバーの分類表を作成した。森泉らは学術雑誌データベースから SCM 関連論文 555 本を収集し、テキストマイニング技法を用いてリスクドライバーを 33 個、ビジネス特性に対応するリスクドライバーを 52 個抽出し、SCR の構造及び波及を抑えるための方法を提案している。井上は 46 本の SCDRM に関する文献をピックアップし、文献レビューを実施しながらリスクマネジメント、システム理論、国際ビジネス、組織理論、SCM 理論など、既存の研究分野における SC 途絶リスクの定義を統合し、SCDRM 研究のアプローチを統合した。

以上の調査に基づき、日本における SCDRM 研究は、以下の 2 つ特徴がある。

第一に、自然災害、特に地震をリスク要因とする研究が多く見られている。海外では、地震だけをリスク要因とした SCDRM 研究が少ないのに対し、日本では、防災や災害予知システムの開発から、震災後の回復や損失推計などの研究が進んでおり、日本では地震など自然災害に対処するための研究が進んでいると言える。

第二に、研究対象である業種別から見ると、製造業を中心とする研究が多く見られ、インタビュー・アンケート調査などの実証的研究、実務問題の解決を目指す研究が多い。特に、東日本大震災以降、製造業 SC のレジリンス、BCP をテーマとする実証的研究が多く見られる [16]~[18]。

1.2.2 地震によるサプライチェーン業務停止期間の予測

SCの業務停止期間は、SCDRM分野で注目されているテーマの1つであり、これまでに定量的研究を中心に様々な研究が発表されている。

白田、吉澤 [19] は、供給量と物流コストを制約条件にSCの最適拠点配置を計算する汎用ソフトSFLOを利用し、SCを構成する製造拠点、配送拠点、輸送拠点の3機能それぞれに地震発生時の業務停止期間を予測するシステムを開発し、震災時の各拠点の緊急対応プランを提案している。

西川ら [20] は建物ポートフォリオのリスク解析に基づき、SCの被災による業務停止期間を定量的に把握する手法を提案し、更に直列型、並列型と併用型の3タイプのSCについて、東京23区内、関東地方内と東京300km圏内の3つのスケールの配置に当てはめて業務停止期間を評価している。また、福島ら [21] は、震災時において事業継続に必要な供給量は普段より少ないことや複数拠点からの同時供給により一拠点当たりの供給量を減らせることを考慮して、西川らの手法を改良し、震災時のSC業務停止期間を対象に、複数拠点からの供給を考慮したリスク評価手法を提案し、拠点の耐震補強を例として業務停止リスク対策の有効性を検証する手法を示している。

奈良岡ら [22] は、SC依存型企业においては、自社以外の施設も対象として地震リスク評価を行うことを提唱し、SCの施設ごとに許容停止期間を設定し、確率論を応用した個々の生産施設に対する地震リスク評価手法を開発し、SCの条件を考慮に入れ、簡易地震リスク評価方法について検討を行っている。

副島と目黒 [23] は、PERT/CPMを用いた復旧時間の定量化手法を利用し、地震による部品調達の停止時間を評価する手法を提案している。具体的には、部品調達工程を3つの工程、即ち、復旧・部品製造、輸送路復旧、及び輸送に分割して考え、部品工場ならびに輸送経路の地震被害予測からそれぞれの所要時間を評価している。

以上のように、地震によるSC業務停止期間を予測する研究はいくつか行われているが、単体施設、SCの一部、若しくは単ステージSCモデルを対象とした研究は中心である。このような単体施設、単ステージのモデルは一企業の立場として調達リスクを考慮する際には非常に有意義な知見を与えるものの、東日本大震災に見られたように2次以降のサプライヤーの被災により生産停止をせざるを得ないような多段階に影響を及ぼす途絶リスクのマネジメントには適用できない。

1.2.3 レジリエンスに関する研究

経済のグローバル化に伴い、現地製造や海外調達が増え、制度も文化も違う国を跨いだSCMは想像以上に難しい。その中でも、特に供給リードタイムの長さや、途絶のリスクは多くのグローバル企業のSCMにおける悩みであると言えよう。

途絶リスクの被害は特に発生頻度は小さいが一旦発生するとその影響が大きい想定外のリスク事象が発生した際に顕著に表れる。このような想定外のリスクに対処するすべく、近年レジリエンス、及びレジリエンスの延長線であるSCレジリエンスに関する研究が注目を浴びるようになってきている。

レジリエンスは元々物理学の用語であり、外力の動きにより物質が歪んだ時に元の状態に戻ろうとする力のことを指す [24]。心理学の分野においては 1970 年代から、戦争や自然災害などの強いショックに晒されたにもかかわらず、抑うつ症状や心的外傷後ストレス障害のような心理的な病気を発症しない人に保護的、緩衝的に作用している要因の解明のための研究に使われるようになった [25][26]。そして近年、米国における 9.11 同時多発テロ事件や、2008 年のリーマンショック、国内では 2011 年の東日本大震災などに伴う企業の生産途絶、業務停止を背景に、組織や企業の事業継続の力を表す用語として使われるようになっていく。

レジリエンスは「グローバルリスク報告書」[27]や「ものづくり白書」[28]などでは「弾力性」として翻訳されているが、レジリエンスを測定する方法はなく、その定義もあいまいであり、研究者らによりその定義が異なる。例えば、丸山 [29] はレジリエンスの構成要素として適応性、冗長性、多様性を取り上げ、Leena [30] らは適応性 (Adaptability)、俊敏性 (Agility)、同化性 (Assimilation) を取り上げている。このような構成要素また定義はいずれも著者らの主観によるものであり、客観的なものではない。さらに、冗長性や多様性など、レジリエンスを構成する要素はさらにどのような要素から構成されているのか、あるいはどのように測定すればよいのかは実践的にも大変重要な研究課題である。

SCDRM に関連したレジリエンスの構成要素についてもいくつかの研究がある。例えば、Christopher and Peck [31] は、SC レジリエンスの構成要素として

- SC の再構築
- SC の協調性
- SC の俊敏性
- リスクマネジメント型企業文化

の四つを挙げている。

ここで、SC の再構築とは、管理者がサプライヤーと顧客の関係をよく理解し、常に効率的な SC を考えているかということ、SC の協調性とは、サプライヤ間でどの程度情報共有ができていくかということ、SC の俊敏性とは、需要と供給の予想外の変化にどの程度機敏に対応できるかということ、リスクマネジメント型企業文化とは、普段のリスクマネジメント型企業文化がどの程度定着しているかということ、をそれぞれ表している。

他には、Rice and Caniato [32]、Sheffi [33] など挙げられているが、統一した定義と構成要素がないことは現状である。

国内におけるレジリエンスの研究においてもいくつかの研究が発表されている。例えば、統計数理研究所 [34] では情報システムを主軸とし、社会や生物など環境システムを含めて、一般的なシステムにおけるレジリエンスの定義を研究しており、レジリエンスを適応性、冗長性、多様性の三つの構成要素で特徴づけるものとして定義しようとしている。ここで、冗長性とは同じ機能をもつものを複数用意すること、例えば情報システムのストレージ・システムでディスク装置を複数用意することがそれにあたる。多様性とは、冗長構成の中でも異なったものを使うことである。例えば、情報システムにおいてハードディ

スクを冗長構成する場合、異なったメーカーのものを使うことが多いが、これはシステムに多様性を持たせるためである。適応性とは、状況に適応していく力であり、生物の環境適応のための進化がこれにあたる。

1.2.4 サプライチェーン見える化に関する研究

近年SC見える化に関する研究が注目を浴びている。特に、東日本大震災以降、ダイヤモンドSCの存在が明らかになり、調達先の所在地や経営状況を含めた情報収集が急ピッチで行われている。これは即ち、消費者に近い川下企業が素材に近い川上企業の情報を共有する供給の見える化である。

供給の見える化が実現できれば、川下企業はSC途絶を予測できる。例えば、ある部品製造企業が被災するとその部品を使用する川下企業が生産中止に追い込まれ、被害が連鎖的に広がる可能性がある。もし、川下のセットメーカーが事前に調達先の調達先が被災したことが分かれば、他の企業に緊急手配するなど、早めに手を打つことで自社の生産ラインの停止や減産を防ぐことができる [35][36]。しかし、供給の見える化においては概念的な研究が多くみられ、インタビュー・アンケート調査などの実証的研究 [37][38][39][13][40] が中心であるが、定量的研究はあまりない。

一方、供給の見える化に対してもう1種のSC見える化があり、それは川上企業が消費者に近い川下企業の情報を共有する需要の見える化である。近年経済活動のグローバル化に伴い、多くの製品が生産能力過剰になっており、従って顧客に近い川下企業の力が強い。一般的にバイヤーである川下企業はサプライヤーである川上企業との取引を有利にすすめるために、川上企業に対して自社の情報を隠す傾向がある。従って、需要の見える化においては戦略的提携など、情報共有のしくみを先に導入する必要がある [41]。例えば、Neelyら [41] と Leeら [42] は、キャンベルスープ社とウォルマート社がCRP (Continuous Replenishment Planning) システムを導入することにより、キャンベルスープ社がウォルマート社における自社商品の販売データをリアルタイムで観測でき、ウォルマート社が販促に買い溜めする必要がなくなり、ブルウィップ効果もなくなった Win-Win 関係を実現することができたことを論じている。

需要の見える化については、NeelyらやLeeら以外にもいくつかの研究がある。例えば、水野ら [43] はSCの各段階が上流側に発注を行う際に、下流側から受け取った最終需要情報を発注情報と併せて伝達するSCの見える化モデルを取り上げ、SC見える化によるブルウィップ効果の軽減を指摘している。また、手塚ら [44] は一般消費財メーカーでは数千種の製品を扱うため、各製品について在庫推移を確認し、異常を探し出すには膨大な時間が必要となる点に注目し、在庫推移の異常の早期発見を実現するために、縮小グラフ画像の一覧表示による在庫推移可視化システムの有効性を示している。

1.3 研究全体の枠組みと構成

1.3.1 研究全体の枠組み

本研究では、体系的な SCDRM 研究を行うことを目的とし、途絶リスクに対する評価手法の開発、及び途絶リスク対策の構築に関する研究を行う。研究全体の構成は図 1.4.1 に示す。

SCDR の評価では、SC 全体を対象に、途絶リスクを定性・定量的に分析する。SC は複数の生産施設に構成されており、一か所の小さなリスクが連鎖的に SC 全体の途絶へ発展した例が少なくないので、SCDR を評価するには、SCR の種類と SC の特性に着目して、途絶リスクによる SC の業務停止期間を評価することになる。SCR の特徴については、既存研究のレビューを通して、その特徴を洗い出して体系化を行い、途絶リスクを定量分析するための理論的土台を作る。SC の特性については、途絶リスクによる SC の業務停止期間を算出し、そして、SC の施設の配置方法・発注方式・連結性などが業務停止期間への影響を考察する。また、SCDR を考えるうえで、途絶リスクが発生しても生き延びる力である SC レジリエンスの評価と体系化手法を提案する。

SCDR 対策では、初期対応策と事後対策を提案して体系的な途絶リスク対策を構築する。初期対応策については、自社の部品の調達経路が見えるようにする SC 見える化システムを講じて、SC 途絶の早期予知と初期対応を実現する。しかし、初期対応だけでは対応できないことがあるので、その場合にはいくつの事後対策を講じてその効果を算出して、対策選定をサポートする手法を提案する。

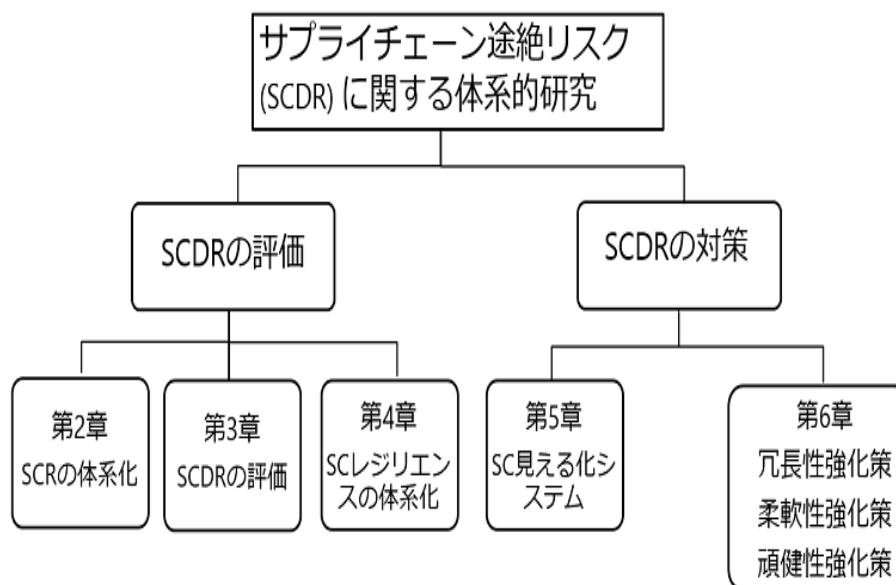


図 1.3.1: 研究全体の構成

1.3.2 研究の構成

本論文は全部で7章から構成されている。

第1章では、体系的なSCDRMに関する研究の背景と必要性を述べ、既存研究の概要と本研究の構成を述べる。

第2章では、SCRを定性的に評価することを目的として、既存研究のレビューを行い、リスク、サプライチェーンリスク(SCR)、及びSCDRMに関する研究について、その特徴を抽出し、体系化を行う。そのうち、特にSCRについては内部、外部、および環境の3つの大分類のもとで、さらに2段目の中分類を加えて独自の分類体系を提案し、既存研究との対応関係も示し、次の途絶リスクの定量化評価をするための理論的土台を作る。

第3章では、SCDRを定量的に評価することを目的として、途絶リスクによるSC業務停止期間を推定するシミュレーションモデルを構築する。本章ではシナリオ地震を発生させ、東京近辺、太平洋、及び全国に生産施設を配置した3タイプのSCの業務停止期間を其々に算出する。そして、SCの発注方式と連結性が業務停止期間への影響を考察する。

第4章では、途絶リスクに対処するための方法としてSCレジリエンスを評価すること目的として、発表されているSCレジリエンスに関する論文100本に対してテキストマイニングを実施し、SCレジリエンスの評価手法を客観的視点からその構成要素を明らかにし、更にSCレジリエンスの構成要素を構成する要素を含めてSCレジリエンスの階層化構造を明らかにする。

第5章では、SCDRの早期発見と初期対応に役に立つSC見える化システムを構築し、3階層からなるSCを対象に、ロールプレーによる実験を行い、見える化システムによるSCDRMへの効果を検証する。

第6章では、途絶リスクの事後対策をである冗長性強化策、柔軟性強化策と頑健性強化策などを構築し、それらによるSCDRMへの効果を検証し、対策選定をサポートする手法を提案する。

第7章では、各章の内容をまとめ、本研究の成果を要約し、将来の展望に対しても言及する。

第2章 サプライチェーンにおけるリスク¹

SCには、需要リスクや供給リスクなどが存在している。これらのリスクにはリスクを引き起こす原因があり、人災と天災に大別できる。例えば、原発事故やテロは人災であり、台風や地震は天災である。これらの原因によりリスク事象が誘発され、結果として需要の欠如や供給の途絶が発生し、SCが機能しなくなり、企業は損失を被るのである。近年は特に小さなリスクが連鎖的にSC全体へ波及し、結果として深刻な被害を与えるということが問題視されている。例えば、1997年ボーイング社は、2つの部品の納期遅れによって26億ドルの損失を被り[45]、また、Knight and Pretty [46]は、SC途絶の影響によって企業の株価が約8%下落し、復旧には50日間もかかったと指摘している。

近年、SCDRMに関する研究論文が増えている。海外では9.11同時多発テロ事件以降、また日本では東日本大震災以降、SC途絶リスクに関する研究が注目を浴びるようになり、論文数も急増している。一方、リスクに関する研究は歴史が長く、リスクに関する定義も一般的の定義から各分野への応用への広がりを経て、現在の分野ごとの定義および共通の特徴による新しい一般的な定義に発展してきている。

本章では、リスク、SCR、及びSCDRMの3つの視点で文献調査を実施し、理論の体系化を行い、体系的なSC途絶リスク対策を構築するための土台を作る。

2.1 リスクとサプライチェーンリスク

2.1.1 リスク

リスクの語源は、イタリア語の“risicare”に由来し、勇気を持って挑むことを意味している[47]。この意味からすると、リスクは運命というより選択であるといえる[48]。

リスク研究の始まりは、17世紀フランスの数学者であるPascalとFermatによるギャンブルに関する議論であると言われている[49]。その後、リスクに関する研究は、保険、財務、心理学、マネジメントなど多岐の分野に広がっていき、リスクの定義も、研究の分野や対象によって異なる定義が行われるようになった。例えば、保険分野では、リスクを傷害、損失、損害などの発生確率（特に分散）で評価しており[50]、財務におけるリスクは、期待収益率を実現する可能性と投資先を分散することによって得られる利得として定義されている[51]。Cox[52]は、マーケティングの視点からリスクを消費者の期待と購買

¹この章の一部は“INFORMATION”, Vol.18, No.6(A)に掲載されている

行動の結果のミスマッチであると定義し、また法務分野ではリスクを企業活動また個人生活において法令などに違反することから発生する損失として定義している [2]。また、心理学では、リスクを感情などの個人要素によって引き起こされる不確実性とその結果であると定義している [73]。

一方、マネジメント分野では Courtney らがリスクを確実に見通せる未来、他の可能性もある未来、可能性の範囲が見えている未来とまったく読めない未来に分類し、1つの枠組みとして定義している [14]。

このように、リスクに関する定義は各分野に広がっていったが、その後共通の性質を用いて一般的な定義としての再帰が見られるようになっていく。例えば、Harland ら [54] は、各分野におけるリスクの定義を概観し、リスクを危険、損害、傷害などの望ましくない結果が発生する可能性と定義しており、Kersten ら [55] は、ある主体が予期できない結果に遭遇する可能性を意味する概念であるとしている。また、Mitchell [56] によると、リスクとは事件あるいはその結果の発生確率と主体 (組織、個人) に与えるインパクトであり、発生確率とそのインパクトとを乗じたものの総和で定量的に測定することを提唱している。

このようにリスクに関する定義は様々であるが、筆者は今回の文献研究を通じて、以下のような共通特徴があることが分かった。

(1) リスクの普遍性

リスクは分野によって定義や要因などが異なるが、その存在は時空を超えて普遍的である。近年、自然と社会の環境変化は激しく、グローバル化の進展とともに、リスクはその要因の数と発生したときのインパクトも広く且つ大きくなっている。また、近代化と文明の進歩に伴い、人間は階層、階級、家族、男女差別から解放され、従来の標準的であった生き方が崩れ、個人にとっても失業・離婚・事件や事故といった多種多様なリスクが顕在化している [57]。

このように現代社会を取り巻く環境は、社会全体としても個人としても、リスクのない領域が無くなりつつあり、我々は既に超不確実社会、或いは超リスク社会を迎えてきたと言える [58]。

(2) 客観性と主観性の併存

リスクにおける客観性と主観性の論争は多くの研究から見られる。科学技術分野のリスクは、客観的計測可能なモノであった。例えば、The Royal Society は多くの工学者、物理学者がリスクを客観的に測定可能で制御できるものとしている [49]。

一方、社会学分野では、リスクを数理的手法で把握することは困難であり、経験や直感などの主観性を発揮する余地が存在すると主張している。Waring and Glendon [59] は、個人であっても専門家であっても、社会・政治・文化などの諸要因の影響を一様に受けており、リスクに対して主観的に認知すると指摘している。また、Williams ら [60] は、ギャンブルをする多くのベンチャー・ビジネス、投資プロジェクトなどのビジネスが成り立っているのは、この主観的認知のバラツキによるものであると指摘している。

また、一部の研究者は、科学的かつ客観的根拠をもとにした主観による情報選択や判断が必要であると主張している。例えば、ベックは、客観と主観が重複してリスク認知の正

確度が高まると指摘したうえで、そうしたリスク認知が社会的・政治的ダイナミズムを生じさせることを示している [57].

このように、リスクは、主観性と客観性の2面性を持っており、リスクに正しく対処するためには、その意思決定において、特定リスク要因の主観性および客観性の両方を詳しく分析する必要があることは言うまでもない。

(3) 損失と利益の併存

リスクは、「危険なもの」、「事故や事件発生の可能性」と認知される場合が多い。例えば、Schwing and Albers [61] はリスクを事故の発生確率とその重大な損失としており、また、Mitchell[56] はリスクの大きさは損失の重大さに等しいとしている。一方、保険理論ではリスクを損失発生の可能性、或いは事故発生の可能性としており、好ましくない状態の発生をリスクとしている [2].

また、“Risk Take” や冒険を好む人にとって、リスクは自ら覚悟して冒す危険という意味を持ち、積極的な行動を意味する。即ち、リスクはその語源にあるように勇気を持って挑むことを意味し、未知の世界に入り、大胆に挑戦することを意味する場合もある。その結果は損失を被る危険がある一方、大きな成功や利益を得る機会もある。High risk, high return(危険が大きいほど、高い利得が期待できる)という言葉は、リスクにおける損失と利得の併存を表す代表的な言葉であると言えよう [2].

以上のように、リスクの概念は数世紀に渡り、様々な定義が行われているが、普遍的で全ての分野を網羅する定義は存在せず、サプライチェーンリスクを考える場合も、上記3つの特性、即ち、リスクの普遍性(時間、空間、対象)、リスクの客観性と主観性(主体)、そしてリスクによる損失と利益の併存(結果)を分析の手掛かりとし、具体的なリスクをさらに分析、分類、測定することを提案する。

2.1.2 サプライチェーンリスク

SCRに関する研究は、Kraljicら [62]の研究から始まっていると言われている。その後、Elloitt-Shircore and Steele[63]が供給リスクを中心にKraljicの研究を拡張している。また、Min and Galle[64]とSmeltzer and Siferd[65]は納品遅れ、Morris and Calantone[66]はSCの財務的リスク、Bowenら [67]は自然災害リスク、Lonsdale[68]はアウトソーシングによるリスクを取り上げ、それぞれSCRの研究を発展させた。

2000年以降、大規模な人災(テロ、ストライキ、戦争)と自然災害が頻発し、SC途絶のリスクが顕著に高くなり、SCRの研究がさらに注目されるようになった。Brindley[69]によると、SCRに関する研究論文数は、2000年迄の20本未満から、2003年までの80本に急増している。研究が活発に行われている証拠でもあるが、SCRに関する定義は様々である。本研究では、いくつかの代表的な研究を取り上げ、SCRの構成要素を整理することにする。

Juttnerらの研究 [70]は、体系的にSCRを考察した最初の論文であると言える。Juttnerらは、March and Shapira[71]によるリスクの定義を参考に、SC機能要素を取り入れて拡

張を行い、SCRを供給と需要のミスマッチによる影響とその発生確率であると定義している。Zsidisin[72]は、Juttnerらと同じようにリスクの要素である発生確率とインパクトの大きさに着目し、SCの失敗と事故が起きる可能性及びそれが関連企業に及ぼす財務的損失と定義している。しかし、Juttnerらと違い、ZsidisinはSCRのマイナス面を強調し、望ましくない事象であるとしている。

SCR発生時のインパクトのみに着目した研究もある。例えば、Manuj and Mentzer[73]は、SCRは量的損失と質的損失の両方から構成されるとし、量的損失は財務損失、質的損失は顧客からの信頼失墜、サプライヤーとのビジネス関係の破綻を用いてSCRを測定することを提案している。Pfohlら[74]は、SCRを「部品・情報のフロー、ファイナンスネットワーク、及び社会ネットワークから生じる障害である」とし、その悪影響には、企業の業績悪化、顧客価値墜落、生産コストの増加、調達時間の遅れ、製品品質の低下があり、さらにその悪影響はSC全体に波及する特徴があることを指摘している。またKerstenら[55]によると、SCRはSCにおけるビジネス活動が妨害されることであるとし、KerstenらはSC全体のサービスレベル、適応力、及び関連コストを用いてSCRを評価すべきと主張している。

発生確率とインパクトの大きさ以外にも幾つかの研究がある。例えば、Ghadgeら[75]は、「SCRはSC途絶の原因として、サプライネットワーク全体の効率性に影響を与える」と指摘しており、Cranfield School of Management[76]では、「SCRはSCの脆弱性であり、SCにおける正常な活動を妨げ、コストを増加させ、さらにはSCの途絶を引き起こす原因である」としている。

2.1.3 サプライチェーンリスクの特徴

(1) 普遍性と客観性

近年、グローバル経営やコアコンピタンス経営の発展と共に、SCは広く長くなっており、ネットワークとして複雑に挙動している。従って、SCMにおいてSCRを無視することはできない。Tang and Musa[77]は、(1) 製品ライフサイクルの短縮と顧客需要の多様化、(2) グローバル化の進行とともにアウトソーシング生産方式の普及、(3) リーン生産方式の普及、および(4) 情報・通信技術 (ICT) の普及、といった4つの項目からSC脆弱性の高まりを解説している。また、Moeinzadeh and Hajfathaliha[78]が述べたように、リスクのないSCは存在しないと思われる。

一部のSCRについては、それを定量的に把握することができる[49]。例えば、SCRは損失の発生確率とインパクトの積で表すことができ、本研究ではこれをリスクの客観性と呼ぶことにする。また、この数十年間、FMEA(failure mode effect analysis)、CBA(cost benefit analysis)、RBA(risk benefit analysis)などのツールが開発され、SCRを定量的に評価する方法として有力なツールが存在している。測定できるものはマネジメントできる[79]という見地から、SCRはマネジメントできると言える。

(2) 相互接続性と波及性

Chopra and Sodhi[80]によると、SCRは常に因果関係を持っており、SCが物流、商流、金流でつながっているために、SC上で波及して行く。例えば、中越沖地震の時、エンジン部品のピストンリングと変速機部品のシール材を納入しているリケンの柏崎工場が被災したため、トヨタ、日産などの大手自動車メーカーの車組み立てラインが一時操業停止に追い込まれたことがあり、相互接続性と波及性の典型例であると言えよう。

近年、SCはグローバル化しており、多くの製造業者、運輸業者、倉庫業者、流通業者、販売業者の協業により、製品サービスを顧客に届けるようになっている。実世界におけるSCでは複数の業者が複雑につながっており、それぞれが一定の脆弱性を持ち、そのため小さなリスクでもSC上に波及していく過程においてそのインパクトが増幅し、システム全体の脆弱性が大きくなってしまう場合がある[45]。代表的な例として、1997年2月1日、大手自動車部品メーカーであるアイシン精機の刈谷工場の中央生産ラインから出火し、初期対応が遅れたため火災が拡大し、トヨタ向けのプロポーションング・バルブ生産が完全に停止し、トヨタに減産7万台の損失を与えたのである。

(3) 複雑性と多様性

1つのSCRには複数の原因があり、1つの原因には更に複数の原因があるという錯綜した複雑な構造をSCRの複雑性と呼ぶことにする。Kraljic[62]は、資源の枯渇や原材料の稀少、供給市場での政治混乱や政府介入、競争激化、技術変化の加速により、現代企業は前例のない複雑性に対応せざるを得なくなっていると指摘している。

リスクの原因をリスクドライバーと呼ぶことがある[14]。リスクドライバーは、直接・間接要因、内部・外部要因など多種多様であり、森泉ら[1]は、既存研究に頻繁に現れるSCRドライバー40種類をSCの機能とプロセスの2つの観点で分類している。また、ハンドフィールドとマコーマック[81]はリスクマップを作成し、財務リスク、災害リスク、オペレーショナルリスク、戦略リスク、及び企業リスクの5つの分野から、約70種類のSCRドライバーをリストマップし、SCRの多様性を解説している。

2.2 サプライチェーンリスクの分類と体系化

2.2.1 既存研究におけるサプライチェーンリスクの分類

既存研究を整理すると約30種類のリスク分類方法がある。しかし、良く吟味すると中には類似した方法が多く見られることから、筆者は30種類を14種類にまとめ、これをもとにSCRの分類と体系化を行った。

Davis[82]は生じるリスクを納期遅れ、機械故障、オーダーキャンセルと在庫増加に分類しており、Pearsonら[83]は、中国に生産拠点を移した企業に注目してSCRをサプライヤーによる責任感の欠如と納品信頼性の欠如の2種類に分類している。Smeltzer and Siferd[65]は、取引コストとリソースの依存関係をSCRとして取り上げ、Mason-Jones and Towill[84]は、供給リスク、生産プロセスリスク、コントロールシステムリスク、及び需要リスクに分類している。また、Svensson[85]は、川上企業の部品、原材料の供給不足を引

き起こす量的リスク、SC全体の部品、原材料の供給不足を引き起こす質的リスクに分類している。

2000年以降、自然災害だけでなく、テロ攻撃、ストライキ、PCウィルスなどの人災も増えており、SCの外部に生じるリスク事象をリスク分類に取り入れる研究が増えている。Juttnerら[70]は、自然災害、社会・政治の不安などである環境リスクを始めて取り上げ、環境リスク、ネットワークリスクと組織リスクという分類方法を提案している。Christopher and Peck[31]は、SCのプロセスに着目し、SCRを需要リスク、供給リスク、プロセスリスク、コントロールリスクと環境リスクに細分し、Juttnerらの研究を拡張している。

Gaonkar and Viswanadham[86]は、SC内在的リスクとSCの構造変化を引き起こす人災・自然災害などのSC全体を途絶させる想定外リスクに分類している。Chopra and Sodhi[80]は、納品遅れ、途絶、システムリスク、予測リスク、調達リスク、知的財産権リスク、顧客数と購買力リスク、在庫リスクとキャパシティリスクなど、9つのタイプに分類しており、Kleindorfer and Saad[87]はSCRを供給と需要のミスマッチによるリスクと途絶リスクとし、また途絶は、偶発的なオペレーショナルリスク、自然災害リスクと社会的リスクに分類している。

Tang and Tomlin[88]は、SCRを供給リスク、需要リスク、知的財産権リスク、プロセスリスク、企業・従業員行動リスク、社会・政治リスクに分類している。Moeinzadeh and Hajfathaliha[78]は、「リスクの分類索引」を作成し、SCRを計画とコントロールリスク、需要リスク、供給リスク、プロセスリスクと環境リスクに分類している。また、Oke and Gopalakrishnan[89]は、SCRを供給リスク、需要リスクとその他のリスクに分類しており、Pfohlら[74]は、全てのプロセスリスクとコントロールリスクを含む特定の企業内に潜んでいるリスク、供給リスクと需要リスクを取り入れた企業外のサプライチェーンの中に潜んでいるリスク、及び人災と自然災害を含むSCの外部に潜んでいるリスクに分類している。

2.2.2 サプライチェーンリスクの分類方法の体系化

前節の文献研究をもとに、ここではSCRをポジションと属性の2つの視点から2階層に分類し、図2.2.1に表すような階層モデルとして体系化を行う。

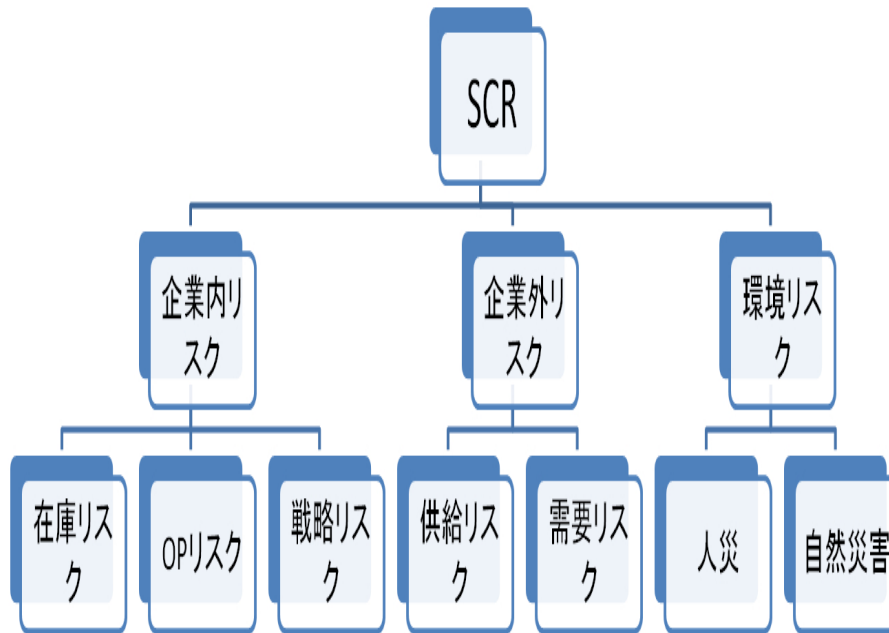
(1) 第一階層

SCRに対して1つの下の階層であり、企業内リスク、企業外リスク、環境リスクを含めた3つのポジション

(2) 第二階層

SCRに対して2つ下の階層であり、在庫リスク、オペレーショナルリスク、戦略リスク、供給リスク、需要リスク、人災、自然災害を表す7つの属性

また、14種類の既存のSCR分類方法との関連属性にチェックを入れる方法で、既存研究と提案体系化モデルとの関係を示した（表2.2.1参照）。



注：OP リスク＝オペレーショナルリスク

図 2.2.1: SCR の体系化

企業内リスクは、在庫リスク、オペレーショナルリスク、戦略リスクが含まれている。在庫リスクは、死蔵在庫による廃棄損失、在庫不足による機会損失を表し、特に「出来ちゃった在庫」が問題になっている。オペレーショナルリスクは、狭義的には、事務ミス、システム障害などにより損失を被るリスクを指し、広義的には、狭義的リスクに加えての他従業員の不正、コンプライアンス体制の不備、災害などによりオペレーションが中断して被る損失、さらにそれらに伴う評判の低下、訴訟などを受けるリスクのことを指すと定義できる [90]。これには、製品の設計・製造・流通などのプロセスに伴う損失であるプロセスリスク、意思決定の失敗などによって引き起こす損失であるコントロールリスクも含まれる。戦略リスクは、策定された商品企画、事業計画、設備投資などの経営戦略そのものに欠陥があるか、或いは想定された戦略の条件と現実にズレが生じることにより発生するリスクである。

企業外リスクは、企業間の相互作用によるリスクであり、主に供給リスクと需要リスクに分類できる。供給リスクは、サプライヤーのビジネスの失敗、製品の品質不良、サプライヤーの設備能力不足、技術革新の遅れ、製品デザインの突然変更などの原因により、部品やサービスの供給が途絶するリスクである。供給リスクについて、Kraljic[62]は、重要部材やコンポーネントの長期供給を確保し、供給障害を防ぐために供給側から生じる不確実性に対策を事前に考案すべきであると主張している。需要リスクには、顧客企業の倒産、物流の途絶、突発的需要などに起因する需要の急変や製品の供給と顧客の需要のミスマッチなどである。

表 2.2.1: SCR の分類の体系化

	企業内リスク			企業外リスク		環境リスク	
	在庫リスク	OPリスク	戦略リスク	供給リスク	需要リスク	人災	自然災害
Davis(1993)	×	×			×		
Pearson et al. (1998)	×			×			
Mason-Jones and Towill(1998)		×		×	×		
Smeltzer and Siferd(1998)			×	×			
Svensson(2000)	×		×	×			
Juttner et al. (2003)		×		×	×	×	×
Christopher and Peck(2004)	×	×	×	×	×	×	×
Gaonkar and Viswanadham(2004)				×	×	×	×
Chopra and Sodhi(2004)	×	×	×	×	×	×	×
Kleindorfer and Saad(2005)	×					×	×
Tang and Tomlin(2008)		×		×	×	×	
Moeinzadeh et al. (2009)		×	×	×	×	×	×
Oke and Gopalakrishnan(2009)				×	×		
Pfohl et al. (2010)		×	×	×	×	×	×

注：OPリスク=オペレーショナルリスク

環境リスクは自然災害，経済，政治，社会の不確実性により生じるリスクと定義することができる。環境リスクは，SCの外部で発生する天災や人災のリスクであるが，SC内部にも大きな影響を与える [70]。環境リスクの影響は，近年SCのグローバル化に伴い，局所的な途絶がドミノ現象的にSC全体に広がっていく傾向がある。

2.3 サプライチェーン途絶リスクマネジメント研究の分類

2.3.1 サプライチェーン途絶リスクマネジメントのプロセスの分類

SCDRMは，途絶リスクの発生可能性と影響を最小にすることを目的としている。SC-DRMの研究は，SCのプロセスに着目した場合，(1)途絶リスク特定，(2)途絶リスクの評価，(3)途絶リスクのコントロール，及び(4)途絶リスクからの回復に大別でき，ここではそれぞれの既存研究を概観し，特徴を分析する。

途絶リスクの特定は，SCに潜んでいるリスクドライバーを洗い出すプロセスであり，SCDRMの第一歩である [91]。この段階では定性的な手法が良く使われており，実証的研究も少なくない ([89]，[91]～[94])。

途絶リスクの評価は，洗い出されたリスクドライバーをインパクトの大きさと発生確率を測定するプロセスである。既存研究においては，リスクマッピングが多く使われている。例えば，Hallikasら [95] はリスク発生確率を，(1)とても起こりそうもない，(2)起こりそ

うもない, (3) 起こり得る, (4) 可なり起こり得る, の4つのカテゴリーに分類し, リスクインパクトの大きさを, (1) 取るに足りない, (2) 小さい, (3) 深刻, (4) 破壊的, の4つのカテゴリーに分類したうえで, 発生可能なリスクを総合的評価している. 一方, Norrman and Jansson[96] はリスクの影響を視覚的に分かりやすく表示する方法として, 発生確率を浅い色, 普通, 深い色の3種類に, また, インパクトをその大きさにより, 赤色, オレンジ色, 黄色, 緑色の4色に分け, 色の組み合わせによりリスクの影響を表示することを提案している.

途絶リスクコントロールは, 途絶リスクの発生を防止し, 発生した場合にはその影響を最小限に抑えるプロセスである. 既存途絶リスクコントロール関連研究を分析すると, これらのモデルは手法として分類した場合, (1) リスク移転, (2) リスク軽減, (3) リスクテイク, など3種類に分類することができる ([80] と [97]~[100]).

途絶リスクからの回復は, SCの被災から迅速に復旧するプロセスである. SCの回復力を高めるために, Sheffi[36] は冗長性, 柔軟性, およびRMの企業文化の3つの要素が必要であると主張している. そのうち, 冗長性は余分の在庫を持つことや, 輸送のマルチモード化, そして情報システムの多重化などを意味し, 被災時に素早くほかのモードに切り替えることにより, システムの機能低下を回避または迅速に復旧するためである. SCの柔軟性を高める方法には, 汎用部品を多く使うことや並行作業を増やすことなどの方法が挙げられる. また, リスクマネジメント型企業文化が良好な企業では, 従業員が普段から危機感を持って仕事をしており, 破壊的なリスクが発生しても早急に回復するシステム的能力を備えていると言える. 途絶リスクからの回復には, Sheffiによる3つの構成要素の他にも, 再構築, 俊敏性, 堅牢性などの分類や方法が提案されている ([101]~[104]).

2.3.2 サプライチェーン途絶リスクマネジメント研究手法の分類

また, SCDRMの研究は, その研究手法に着目した場合, (1) 概念的研究, (2) 実証的研究, および(3) 定量的研究の3つに大別でき, ここではそれぞれの既存研究について概観し, 特徴を分析する.

概念的研究の多くはSCDRMに関する基礎概念を明確にすることを目的としている. 例えば, Juttnerら [70] はSCRに関する諸概念を概観し, 研究の方向・課題を提示している. Manuj and Mentzer[73] は, SCのグローバル化により生じるリスク, 及び対処法を考察している. 概念的研究には, リスクマネジメントの手法を調査した研究もある. Gaonkar and Viswanadham[86] は, SCにおけるリスクを逸脱, 途絶とタカストロフィックの3種類に分類し, 戦略, 戦術とオペレーションの3つのレベルでそれらのリスクの対処方法を提案している. Cucchiella and Gastaldi[105] は, SCRによる損失を最小に抑えるためのフレームワークを構築し, SCの柔軟性を強化することで損失の発生確率を効果的に抑えることができる, “Risk Option” というアプローチを提案している.

実証的研究は, 文献研究と事例研究を含む. 筆者の調査において, 今までのSCDRMに関する研究論文で実証的研究が最も多いことが分かった. 例えば, 文献研究の代表例として, Tang and Musa[77], Ghadgeら [75], Meixell and Gargeya[106], Singhalら [107] な

どが挙げられる。これらの研究は、SCDRM 分野に関する文献をレビューし、年代別に発表された論文数、リスク分類手法、SCDRM 手法など様々な視点から SCDRM を概観したものである。また、事例研究においては、電子部品産業、自動車産業、玩具産業、化学産業など多くの産業の事例が報告されており、リスクに対処するための方法が提案されている ([83], [87], [96], [108])。

SCDRM に関する定量的研究には、Wu et al. [109], Chan and Kumar[110], Levary[111] らによる AHP 法を用いた研究, Han and Chan[112], Datta et al. [113], Sohn and Lim[114], Colicchia et al. [115] などによるシミュレーション手法を用いた研究, Li et al. [116], Hennen and Arda[117] などによるゲーム理論を用いた研究, Tomlin[118] によるマルコフ連鎖と Deleris et al.[119] による GSMP (Generalized Semi-Markov Process) などを用いた研究がある含まれる。

今までの SCDRM の研究には、概念的、実証的研究が多く、全体の 78% を占めている [99]。概念的な研究においては Juttner ら [70] の研究が代表的であり、分野全体に研究の土台を作り上げたといっても過言ではない。一方、定量的研究はまだ少なく、研究が始まったばかりであると言える。

2.4 まとめ

本章では、リスク、SCR、及び SCDRM の 3 つの視点で文献調査を実施し、それぞれの特徴を分析し、体系化を行った。筆者は 92 本の論文をピックアップし、文献レビューを実施しながらリスク、SCR、SCDRM の 3 つのカテゴリーに分類すると同時に、定義や分類の特徴を抽出し、体系化を行った。そのうち、特にリスクについては、(1) リスクの普遍性、(2) 客観性と主観性の併存、および (3) 損失と利益の併存、の 3 つの特性をまとめ、また、SCDRM の基礎となる SCR については、(1) 普遍性と客観性、(2) 相互接続性と波及性、(3) 複雑性と多様性、の 3 つの特性をまとめ、さらに、SCR の分類体系化においては、内部、外部、および環境からなる第 1 階層 (ポジション)、および、在庫リスク、オペレーショナルリスク、戦略リスク、供給リスク、需要リスク、人災、自然災害からなる第 2 階層 (属性) で構成される体系化モデルを構築し、既存研究と提案体系化モデルとの関係を示した。

SCDRM 研究については、プロセスと手法についてそれぞれ、(1) 途絶リスク特定、(2) 途絶リスク評価、(3) 途絶リスクコントロール、および (4) 途絶リスクからの回復、の 4 つのプロセス、および (1) 概念的な研究、(2) 実証的研究、および (3) 定量的研究、の 3 つの手法に分類して既存研究を概観し、特徴を分析した。その結果、いままでの SCDRM 研究においては概念的な研究および実証的研究が多い点、そして定量的研究は始まったばかりであることが分かった。

第3章 震災時のサプライチェーン業務停止期間リスクの解析

3.1 はじめに

1995年の阪神淡路大震災以降、日本では地震が相次ぎ、国内を拠点とする多くの企業にとって、地震はSCの業務継続を脅かす重要なリスクとなっている。今後のも数十年内には、首都直下型地震、南海トラフ地震、東海地震などの巨大地震が起こる確率は極めて高く、企業は地震リスクを避けることができない。このような状況に対し、地震などの途絶リスクによる業務停止の影響を軽減する仕組みとして、SCDRMが提唱されている。

2007年の中越池地震や2011年の東日本大震災では、被災地の多くの工場が地震によって生産停止に陥ったため、そこから原材料や部品を調達していた工場も連鎖的に業務を停止し、SC途絶が起こった。他社の被災が自社にどのような影響を及ぼすかを事前に評価することは途絶リスクを減らすために非常に重要であり、その意味で途絶リスクを定量的に評価することはSCDRMにおいて最初に取り組むべき重要な課題である。

しかし、従来の単体施設、単ステージSCモデル（供給者と顧客）での定量化手法では限界があり、SC全体を対象とする拠点・施設の業務停止期間を推定する手法が求められている。そこで、本章では全国、及び対象地域での発生が想定されるシナリオ地震に対してSC全体を考慮に入れて業務停止期間を求め、その結果をもとに途絶リスクによるSCの業務停止期間の推定手法を構築する。

3.2 業務停止期間の定量化手法の構築

本節では、既存研究に基づいて、シミュレーションに用いる距離減衰式、計測震度の求め方、及び業務停止期間の予測式を示す。

3.2.1 計測震度の求め方

工学的基盤における最大速度の距離減衰式

SCの業務停止期間を算出するためには、将来発生する地震による地震動強さを予測しておくことは重要である。地震動の強さを予測するには、距離減衰式が従来からしばしば用いられている。ここでは、司、翠川 [120] が提案した距離減衰式を採用する（式3.2.1）。

$$\log PGV = b - \log(X + c) - 0.002X \quad (3.2.1)$$

ここで、PGVは地震動最大速度、Xは断層最短距離である。係数b、cは式3.2.2と式3.2.3の回帰分析により求められる。

$$b = aM_w + hD + \sum d_i S_i + e + \varepsilon \quad (3.2.2)$$

$$c = 0.0028 \cdot 10^{0.5M_w} \quad (3.2.3)$$

ここで、 M_w はモーメントマグニチュード、 D は震源の深さ(km)、 S は断層タイプ、 e は定数項、 ε は標準偏差を其々表す。求められた距離減衰式の各係数の値は表3.2.1となる。

表 3.2.1: 距離減衰式の各係数の値

a	h	d			e
		地殻内地震	プレート間地震	プレート内地震	
0.58	0.0038	0	-0.02	0.12	-1.29

地表における最大速度の評価

地表における最大速度PGV400は、工学的基盤での最大速度PGVに対して、別途算定されている工学的基盤から地表までの地盤増幅度を乗じることにより得られる[122]。

地盤増幅率とは、地表面近くに堆積した地層の地震時の揺れの大きさを数値化したもので、地震に対する地盤の弱さを示す[121]。このデータは、防災科学研究所が公開しているシステム、地震ハザードステーション(以下J-SHIS)の日本全国の地震ハザードの共通情報基盤として利用されているJ-SHIS MAPから入手できる[121]。

計測震度の算出

計測震度は、翠川、藤本、松村[122]が示している最大速度と計測震度との関係式(式3.2.4)を用いて計算する。

$$I = 2.68 + 1.721 \log PGV_{400} (\pm 0.21) \quad (3.2.4)$$

ここで、Iは計測震度、PGV400は地表における最大速度である。

3.2.2 業務停止期間の算出

SCの業務停止期間には、鹿島建設、永田 [123] が示している計測震度と事業所の機能支障日数の関係式を用いて求められる。業務停止期間の予測式としては、未定係数 C 、 μ 、 σ を用いた式 3.2.5 を用いる。また、任意の計測震度に対する業務停止期間のばらつきは式 3.2.6 と式 3.2.7 の対数正規分布と仮定する。なお、式 3.2.5 式 3.2.7 の未定係数 C 、 μ 、 σ 、 ζ は、準ニュートン法により式 3.2.8 の対数尤度が最大になるように求める。

$$R^*(I_{JMA}) = C \cdot \Phi\left(\frac{I_{JMA} - \mu}{\sigma}\right) \quad (3.2.5)$$

$$f(R(I)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta \cdot R} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln R - \lambda}{\zeta}\right)^2} \quad (3.2.6)$$

$$\lambda = \ln(R^*I) - \frac{1}{2}\zeta^2 \quad (3.2.7)$$

$$\ln(L(C, \mu, \sigma, \zeta; R(I))) = \sum_{i=0}^n \ln(f(R_i(I))) \quad (3.2.8)$$

ただし、

I は計測震度、

$\Phi()$ は標準正規確率分布関数、

$R^*(I)$ は計測震度 I における機能支障日数の平均値、

C 、 μ 、 σ は式 3.2.8 によって求める未定係数、

$f()$ は計測震度 I における事業中断日数の確率分布 (対数正規分布を仮定)。

式 3.2.5 において $R^*(I)$ が求められるので、 $f()$ の平均値 λ が式 3.2.6 によって求められる。式 3.2.8 の $L()$ は尤度であり、 I 、 $R^*(I)$ を用いて計算した $f()$ から求める。

鹿島建設、永田 [123] が試算した計測震度の説明変数とする事業停止期間の予測式の結果を次表に示す。なお本研究では、製造業の SC を想定してシミュレーションを行うので、次表の製造業のパラメータを用いた。

表 3.2.2: 事業停止期間の予測式の係数

分類	C	μ	σ	ζ
製造業	20.4818	5.750	1.000	1.372
非製造業	17.128	6.151	1.000	1.306
大企業	16.739	5.750	1.000	1.406
中小企業	23.375	5.750	1.000	1.114

3.3 シミュレーションモデルの構築

本研究ではシミュレーション手法を用いて、シナリオ地震による SC 業務停止期間を推定し、SC の生産施設の配置方法、発注方式、及び連結性が業務停止期間への影響を考察する。なお、本研究で用いた業務停止期間は、SC の正常な生産活動を再開するまでの期間と考えられるため、復旧する期間も含まれている。シミュレーションには構造計画研究所の Artisoc を用いた。

3.3.1 シナリオ地震の設定

本章では、日本で想定される数多くの地震を対象として、発生確率で分かっただけでシナリオ地震として発生させる。シナリオ地震については、J-SHIS より、日本における主要活断層及び海溝型地震の中から、今後 30 年間でその断層若しくは海溝プレートの沈み込みによって発生する確率が 1 % 以上である 36 の地震を選択した (表 3.3.1)。

表 3.3.1: 各地震のパラメータ

	断層名(地震名)	緯度	経度	震源深さ(km)	マグニチュード(Mw)	発生確率(%)
1	首都直下型	139.88	35.63	10	8.5	83
2	南海地震	133.94	33.56	20	8.4	61.90
3	東南海地震	136.65	34.43	20	8.1	72.00
4	想定東海地震	138.33	35.23	20	8	87.50
5	糸魚川-静岡構造線断層帯	36.54	137.88	15	7.4	14.40
6	阿寺断層帯主部北部	35.84	137.22	17	6.4	8.45
7	三浦半島断層群主部武山断層帯	35.18	139.76	5	6.5	8.37
8	神縄・国府津-松田断層帯	35.36	139.16	10	6.9	4.37
9	黒松内低地断層帯	42.75	140.24	11	6.8	3.66
10	境峠・神谷断層帯主部	35.85	137.90	13	7	3.49
11	奈良盆地東縁断層帯	34.51	135.86	16	6.9	3.05
12	周防灘断層群主部	33.66	131.39	10	7	2.93
13	上町断層帯	34.41	135.42	14	7	2.89
14	十日町断層帯西部	37.27	138.73	17	6.8	2.87
15	安芸灘断層群主部	34.12	132.42	20	6.6	2.81
16	中央構造線断層帯和泉山脈南縁	34.42	135.62	15	7.1	2.53
17	高田平野東縁断層帯	36.96	138.36	17	6.7	2.48
18	糸魚川-静岡構造線断層帯 南部	35.81	138.27	10	7.3	2.47
19	大分平野-由布院断層帯西部	33.29	131.45	13	6.3	2.47
20	山崎断層帯主部南東部	34.78	135.00	14	6.7	2.25
21	山形盆地断層帯北部	38.68	140.33	12	6.8	2.18
22	警固断層帯南東部	33.66	130.31	10	6.7	1.94
23	邑知潟断層帯	36.67	136.76	16	7	1.92
24	橿形山脈断層帯	38.15	139.44	15	6.4	1.87
25	三浦半島断層群南部	35.12	139.75	13	7	1.86
26	温見断層南東部	35.80	136.48	17	6.6	1.75
27	雲仙断層群南東部	32.73	130.52	20	6.6	1.65
28	琵琶湖西岸断層帯	35.48	135.99	19	6.6	1.57
29	立川断層帯	35.66	139.45	13	6.8	1.35
30	霧訪山-奈良井断層帯	35.92	137.77	18	6.7	1.35
31	新庄盆地断層帯東部	38.62	140.35	15	6.6	1.27
32	雲仙断層群北部	32.73	130.06	16	6.8	1.24
33	山形盆地断層帯南部	38.41	140.24	18	6.8	1.19
34	曾根丘陵断層帯	35.52	138.50	11	6.8	1.19
35	砺波平野断層帯東部	36.45	136.95	12	6.6	1.09
36	大分平野-由布院断層帯東部	33.26	131.75	10	6.7	1.03

3.3.2 サプライチェーンの構造

生産施設の配置方法

シミュレーションに用いた SC は 3 階層，12 施設に構成されている．その生産施設の配置方法については，図 3.3.1, 図 3.3.2 と図 3.3.3 になる．また，各生産施設の経緯度と地盤増幅率は表 3.3.2, 表 3.3.3 と表 3.3.4 に示している．経緯度に関しては，10 進数表記に変換を行ったものを示す．地盤増幅率は防災科学研究所の J-SHIS MAP にてデータを取得する．

配置 1: 東京都近辺型（座間，小田原，厚木，太田，津久井，相模原，江戸川，追浜，湘南，武蔵野，横浜，品川）

配置 2: 太平洋型（湘南，埼玉，小田原，追浜，甲府，浜松，富士吉田，品川，名古屋，厚木，横浜，沼津）

配置 3: 全国型（千葉，福島，沼津，横浜，日立，小田原，北九州，長野，名古屋，浜松，神戸，島根）

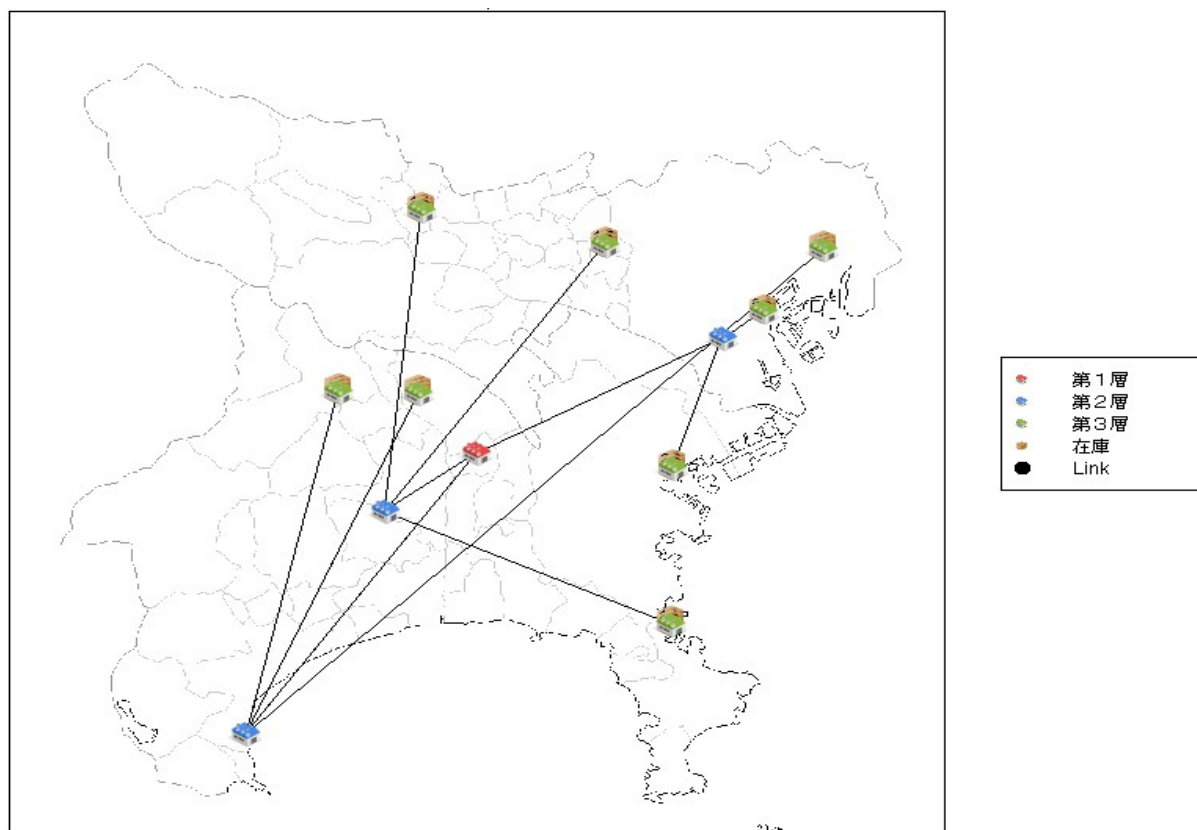


図 3.3.1: 東京都近辺型サプライチェーン構造

表 3.3.2: 東京都近辺型の施設の経緯度と地盤増幅率

施設名	緯度	経度	地盤増幅率
津久井工場	35.59	139.21	0.67
相模原工場	35.56	139.34	0.94
江戸川工場	35.72	139.87	2.41
追浜工場	35.32	139.64	1.48
湘南工場	35.34	139.35	1.44
武蔵野工場	35.66	139.48	1.22
横浜工場	35.48	139.66	2.07
品川工場	35.63	139.75	2.23
小田原工場	35.27	139.16	1.36
厚木工場	35.45	139.34	1.37
太田工場	35.60	139.71	1.58
座間工場	35.49	139.43	1.40

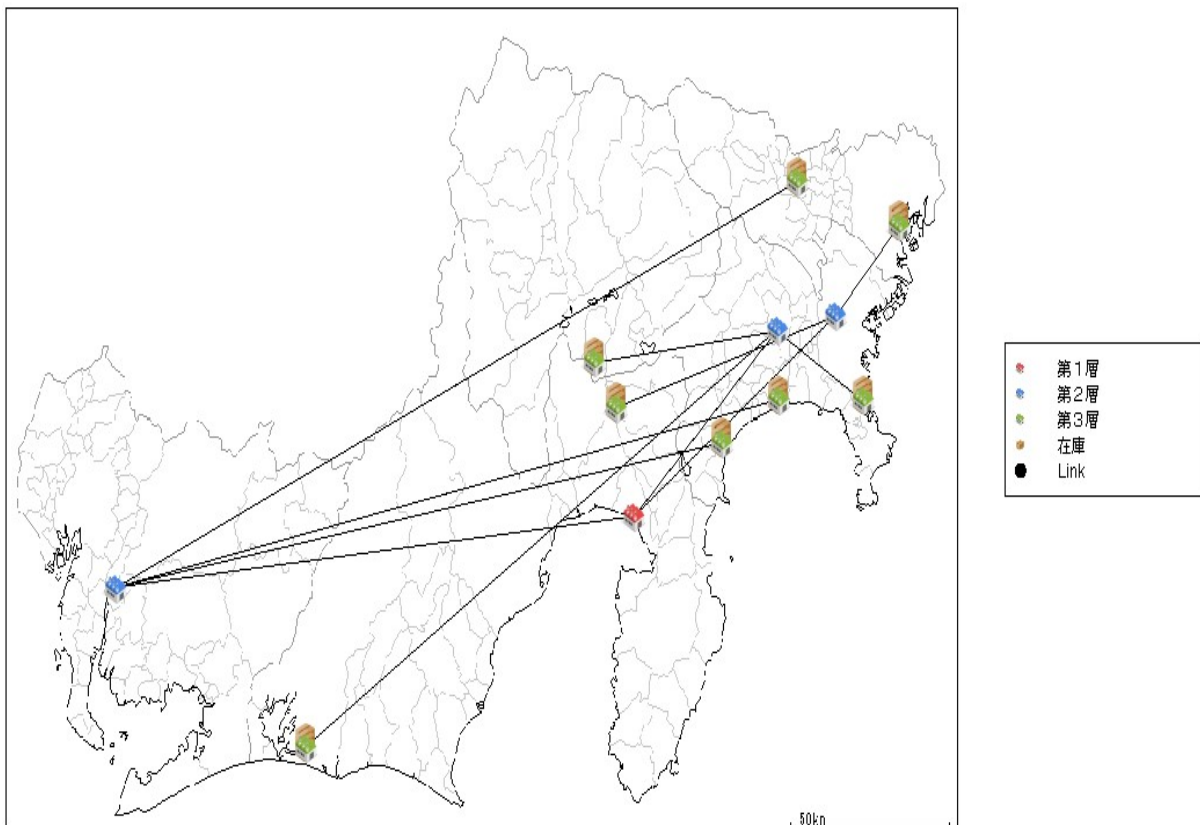


図 3.3.2: 太平洋型サプライチェーン構造

表 3.3.3: 太平洋型の施設の経緯度と地盤増幅率

施設名	緯度	経度	地盤増幅率
湘南工場	35.34	139.35	1.44
埼玉工場	36.17	139.57	2.25
小田原工場	35.27	139.16	1.36
追浜工場	35.32	139.64	1.48
甲府工場	35.59	138.53	1.95
浜松工場	35.33	139.90	2.12
富士吉田工場	35.46	138.53	1.27
品川工場	35.63	139.75	2.23
名古屋工場	35.21	136.96	2.12
厚木工場	35.45	139.34	1.37
横浜工場	35.48	139.66	2.07
沼津工場	35.15	138.83	1.24

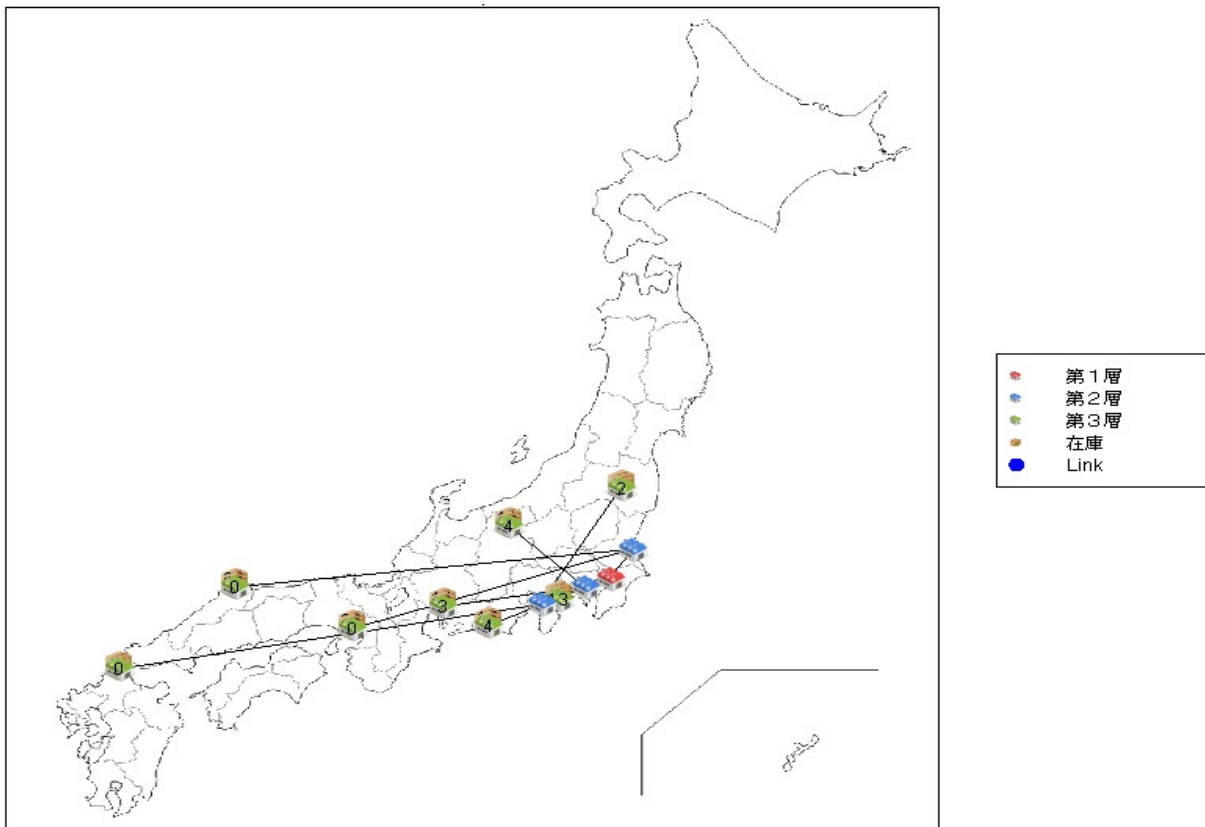


図 3.3.3: 全国型サプライチェーン構造

表 3.3.4: 全国型の施設の経緯度と地盤増幅率

施設名	緯度	経度	地盤増幅率
福島工場	37.20	140.40	1.44
小田原工場	35.27	139.16	2.25
北九州工場	33.94	130.79	1.36
長野工場	36.66	138.24	1.48
名古屋工場	35.21	136.96	1.95
浜松工場	35.33	139.90	2.12
神戸工場	34.67	135.18	1.27
島根工場	35.38	132.84	2.23
沼津工場	35.15	138.83	2.12
横浜工場	35.48	139.66	1.37
日立工場	36.59	140.64	2.07
千葉工場	35.66	140.12	1.24

SCの連結性

12 拠点の連結性については、直列型と並列型の 2 種類の形式を採用する。

直列型は、12 つの拠点間での代替性はなく、最終製品を作るまでに順次加工していく業態を表すモデルである。即ち、SC を構成する拠点の内の 1 つでも止まれば全体が停止する形式である。

並列型は、12 つの拠点間の完全な代替性があり、12 つの拠点の何れかが機能していれば、SC の機能は発揮される形式である。

SCの発注方式

SC の発注方式については、定期定量発注と定量発注方式を採用する。

定期定量発注とは、一定期間ごとに一定量の場合の発注管理に主に用いられる。この発注方式は発注量、発注時期が一定の場合の発注管理に主に用いられる。本研究においては発注期間を毎日 (1 ステップ)、発注量 (各生産施設の 1 ステップでの生産量) を 1 ロット (10 個)、最終製品の需要を 1 日で 1 ロットに設定し、生産・輸送リードタイムは表 3.3.5 である。

表 3.3.5: 生産・輸送リードタイム

	第1層 生産施設	第2層 生産施設	第3層 生産施設
生産リードタイム	2日	3日	3日
輸送リードタイム	なし	3日	3日

定量発注方式は「発注点方式」とも呼ばれ、在庫量が一定量まで減少したら一定量を発注し、適正在庫を保つ発注方式のことであり、その発注点は次式のように計算する。

$$\begin{aligned} \text{発注点} &= \text{調達期間中平均使用量} + \text{安全在庫} \\ &= 1 \text{日あたりの平均使用量} \times \text{調達期間} \\ &\quad + \text{安全在庫} \end{aligned} \tag{3.3.1}$$

本シミュレーションでは、

- 1日当たりの平均使用量：1ロット（固定）
- 調達期間：生産リードタイム（3日）＋輸送リードタイム（3日）＝6日
- 安全在庫：0（需要量が固定のため安全在庫を設定する必要がない）
- 発注点：1日あたりの平均使用量（1ロット）×調達期間（6日）＋安全在庫（0）＝6ロット

となる。本研究において在庫量は「有効在庫量」とし、6ロットとなった時に発注する。

3.3.3 施設の業務停止期間

各施設における、計測震度と業務停止期間の関係を次表に示す。この表は、計測震度毎に細分化して、業務停止期間を求めたものである。なお、業務停止期間の小数点以下は四捨五入している。各施設の計測震度を求めたうえで、次表を基に業務停止期間を決定する。

表 3.3.6: 施設における計測震度と業務停止期間の関係

計測震度	業務停止期間
4.0 以上 4.5 未満	1 日
4.5 以上 4.7 未満	2 日
4.7 以上 5.0 未満	3 日
5.0 以上 5.2 未満	4 日
5.2 以上 5.3 未満	5 日
5.3 以上 5.4 未満	6 日
5.4 以上 5.5 未満	7 日
5.5 以上 5.6 未満	8 日
5.6 以上 5.7 未満	9 日
5.7 以上 5.8 未満	10 日
5.9 以上 5.95 未満	11 日
5.95 以上 6.0 未満	12 日
6.0 以上 6.1 未満	13 日
6.1 以上 6.3 未満	14 日
6.3 以上 6.5 未満	15 日
6.5 以上 6.6 未満	16 日
6.6 以上 6.8 未満	17 日
6.8 以上	18 日

3.4 シミュレーション実験

シナリオ地震を発生させ、東京近辺、太平洋、及び全国に生産施設を配置した3タイプのSCの業務停止期間を其々に算出する。そして、SCの発注方式と連結性が業務停止期間への影響を考察するため、「定期定量の直列型SC」、「定量発注の直列型SC」と「定量発注の並列型SC」の3つケースを分けてシミュレーション実験を行う。

実験期間は80ステップとし、0ステップはシナリオ地震データを読み込み、1～29ステップは地震前の平常生産であり、各生産施設は正常に発注・生産・出荷を行う。30ステップではシナリオ地震を発生させ、各生産施設の計測震度と業務停止期間を算出し、31～79ステップは地震後の復旧生産であり、業務停止期間中の生産施設は生産・出荷を一切行わない。80ステップでは実験が終了する。生産施設の配置による業務停止期間への影響を考察するため、3つのケースとも東京近辺型、太平洋型、及び全国型に其々1000回のシミュレーションを行う。

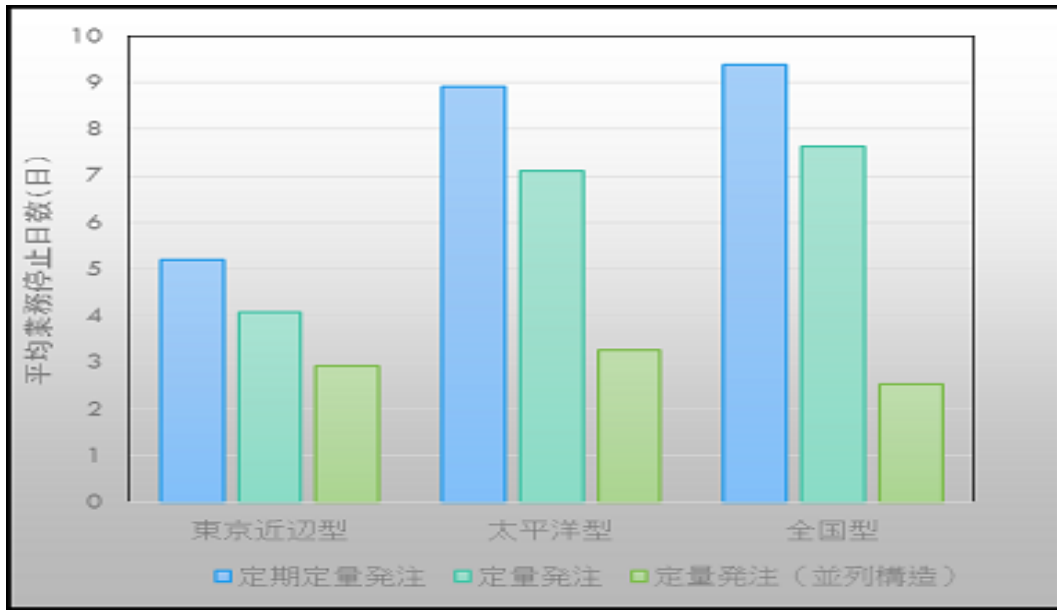


図 3.4.1: 実験の結果

3.4.1 シミュレーションの結果

実験の結果を図 3.4.1 に示す。図 3.4.1 から分かるように、定量発注の方が定期定量発注に比べて業務停止期間が短くなる。定量発注がより多くの在庫をもっていること、及び復旧時にもまとまった数の発注をできることは主因である。

また、図 3.4.1 から、直列型においては東京近辺が全国型に比べ、業務停止期間は短くなると分かる。その理由は、直列型により、施設が全国に散らばるほど多くの地震に対してどこかの施設が被災する可能性が大きくなり、1つの施設の被災がSC全体に影響与えてしまうのである。逆に、並列型においては全国の方が短くなる。これは、1つの生産施設が被災しても他の施設でその生産分を補うという並列モデルの長所が機能しているからである。

3.5 おわり

本章では、途絶リスクによるSC業務停止期間を推定するシミュレーションモデルを構築している。

具体的には、シナリオ地震を発生させ、東京近辺、太平洋、及び全国に生産施設を配置した3タイプのSCの業務停止期間を其々に算出する。そして、SCの発注方式と連結性が業務停止期間への影響を考察するため、「定期定量の直列型SC」、「定量発注の直列型SC」と「定量発注の並列型SC」の3つケースを分けてシミュレーション実験を行い、その結果、全国に生産施設が配置されている並列型SCは、直列型SCに比べて業務停止期間が短いことを示している。

第4章 サプライチェーンレジリエンスモデルの構造分析¹

4.1 はじめに

経済のグローバル化に伴い、生産を海外の拠点へ外部委託する企業が増えてきたために、SCは長くなり、ノードの数も増え、ネットワークの複雑さが幾何級数的に増やしており、需要のリスクに加えて、供給のリスク要因が多くなっている。2000年以降、9.11のような大規模テロ事件、SARSのような伝染病の流行、リーマンショックのような金融危機、あるいは自然災害のような可能性は低くても、一度起こると甚大な損失を及ぼす出来事が増えている。

このような天災と人災のような途絶リスクに対処すべく、体系的なSC途絶リスク対策の構築に関する研究が注目を浴びようになっている。特に、3.11東日本大震災ではダイヤモンドSCの存在が明らかになるなど、調達先の調達先まで把握し、被害が及ぶ前に食い止める堅牢なサプライチェーンの構築、被害が発生した際には素早く生産能力を復旧させる回復力を持ったサプライチェーンの構築、また十分な在庫を持つことで災害が起きてもその復旧期間中被害を最小限に留める冗長性を持ったSCの構築に関する研究の必要性が出ている。

このような堅牢性、回復力、および冗長性などはSCレジリエンスと呼ばれており、海外でも日本でも活発に研究が行われている。しかし、問題はSCレジリエンスの構造に関する研究が始まったばかりの上に、統一した定義や構造もなく、多段階構造に関する研究はあまりないことは現状である。例えば、Christopher and Peck[31]はSCの再構築、SCの協調性、俊敏性とリスクマネジメント型企業文化の3つとしているのに対して、Rice and Caniato[32]は柔軟性と冗長性の2つとしている。

そこで、本章では現在発表されているSCレジリエンスの論文に対してテキストマイニングを実施し、SCレジリエンス構造の全体像を明らかにし、途絶リスクに強いSCレジリエンスを構築することを目的とする。

¹この章の一部は“日本経営工学会論文誌”，Vol.66, No.2に掲載されている

4.2 既存研究におけるサプライチェーンレジリエンスの構成方法

2001年の9.11多発テロ事件から、SCレジリエンスに関する研究が始まり、2011年の3.11東日本大震災以降多くなっている。しかし、SCレジリエンスの定義と構造は、研究者の調査方法や着目している視点によって異なっている。ここでは、いくつかの代表的なSCレジリエンスの構造に関する研究を紹介する。

Muckstadtら[124]は、SCの協調性(SC Collaboration)を強化することによって、SCの不確実性を低減させ、SCレジリエンスを創出すると主張している。Rice and Caniano[32]は、柔軟性(Flexibility)と冗長性(Redundancy)を融合させた対策を取ることで、レジリエンスを強化できるとしており、Fiskel[125]は、多様性(Diversity)、適応性(Adaptability)と凝集力(Cohesion)を取り上げている。

Christopher and Peck[31]は、体系的にSCレジリエンスを考察した最初の論文であると言える。Christopher and Peckは、各分野におけるレジリエンスの構造を考察し、SCの再構築(SC Re-engineering)、SCの協調性、俊敏性(Agility)とリスクマネジメント型企業文化(Risk Management Culture)を提唱している。Lee[126]は、途絶への反応力である俊敏性、市場構造と戦略転換に伴う適応力、SCの協調性を取り上げ、効率的な構造方法を提案している。また、Sheffi[33]はSCレジリエンスの増強によってSCの競争優位の向上が期待できると主張し、冗長性の強化、柔軟性の向上とリスクマネジメント型企業文化の定着の構成方法を提唱している。

Ponomarov and Mary[103]は、制御システム(Control System)、整合力(Coherence)と連結力(Connectedness)を提案している。Juttner and Maklan[104]は、柔軟性、速度(Velocity)、見える化(Visibility)とSCの協調性を取り上げており、Deloitte[127]は、見える化、柔軟性、制御システムとSCの協調性を取り上げている。Ilmola and Casti[30]は、「Seven Shocks and Finland Project」のケーススタディを通じて適応性、俊敏性と融合性(Assimilation)を提案している。また、WEF[27]は、国家レベルに着目し、多様なグローバルリスクを低減させるための堅牢性、冗長性と臨機応変性(Resourcefulness)を提唱している。

本章では、これらの既存研究をもとにテキストマイニングを行うことで、できるだけ客観的にSCレジリエンスの構成要素を抽出し、さらにその構成要素を構成する要素を明らかにすることで、SCレジリエンスの多段階構造モデルを構築することを目的とする。また、本研究はあくまで既存研究のテキストからSCレジリエンスの構成要素を抽出し、構造モデルを構築することが目的であり、既存研究の真偽について議論するものではない。

4.3 研究方法

本章ではテキストマイニング手法を用いて、既存研究におけるSCレジリエンスの構成要素、及びその構成要素のさらなる構成要素を抽出し、SCレジリエンスの多段階構造モデルを構築する。

SCレジリエンスに関する研究については、Science Direct, EBSCO, Academic Journals, Inter Science, Emerald, IEEE Xplore, Oxford Journals, Springer Link の8つのアカデミック論文誌データベースから2014年までに発表された100本の英語論文を選択し、全てテキストに変換してデータベースを構築し、そのデータベースに対して注目語を設定しながら、逐次的にデータマイニングを実施した。テキストマイニングには株式会社NTT データ数理システムの Visual Mining Studio (元株式会社数理システムの TextMining Studio) を用いた。100本の英語論文のリストを付録に参照してください。

4.3.1 関連度の指標

テキストマイニングの手順としては、まず、「Resilience」を注目語に設定し、それと関連のある単語を抽出した。関連の度合いを判断する指標として

(1) 共起ルール数 (K_{ab})

(2) 信頼度 (L_{ab})

の2つを選択した。

ここで、共起ルール数とは、単語 a と単語 b が同時に現れている段落の数を表し、以下の式で計算される。

$$K_{ab} = \sum_{i=1}^N X_i^{ab} \quad (4.3.1)$$

但し、 i 段落目で単語 a と単語 b が同時に出現していれば、

$$X_i^{ab} = 1$$

となり、さもないければ

$$X_i^{ab} = 0$$

となる。従って、 K_{ab} は全段落数 N までに a と b が何回同時出現したかを表す指標であることがわかる。

また、信頼度とは、単語 b に対する単語 a の信頼度を表す指標であり、単語 b が出現したときに同段落中に単語 a が出現する頻度を集計し、次式で計算することができる。

$$L_{ab} = K_{ab} / \left(\sum_{i=1}^N X_i^{b} \right) \quad (4.3.2)$$

ここで i 段落目で単語 b が出現していれば

$$X_i^{b} = 1$$

となり，さもなければ

$$X_i^b = 0$$

となり， K_{ab} は(4.1)式で定義したように，単語 a と単語 b が同時に出現する回数を表す．分子は共起ルール数，分母は単語 b が出現する段落数を表しており，信頼度は b が出現したとき a も出現する確率を表している．

分析では，「Resilience」を注目語とした時の共起ルール数，および信頼度がそれぞれ一定値を上回っている単語のみを注目語と関連がある要素とし，その要素単語を新しい注目語としてさらにテキストマイニングを実施し，2段階に分けてSCレジリエンスの構造モデルを構築する．

4.3.2 分析の流れ

分析の流れは以下のとおりである．

ステップ1:

まず，注目語を「Resilience」に，関連用語を抽出する．関連用語の中から，共起ルール数，および信頼度の値が既定の水準を上回った単語のみを抽出する．

得られた関連語の中にはSCレジリエンスと関係のない単語が多く抽出されるので，これらの単語については明らかに関係のない用語を1つ1つ確認して削除し，残りの単語については共起ルール数と信頼度を用いて既定の水準を満たさない単語を削除する．

ステップ2:

SCレジリエンスの構成要素単語を1つずつ選び，注目語に設定してもう一度テキストマイニングを行う．この時，Resilienceはすでに注目語としてテキストマイニングが実施され，現在の注目語より上位の概念であるので，Text Mining Studioの関連語排除機能を用いて，それを排除(Exclude)した．

ここで，注意すべきことは，対象論文はSCレジリエンスを中心として書かれている論文であるために，2回目のテキストマイニングにおいてはSCレジリエンスの構成要素とその関連要素が同じ段落で出現する可能性が低くなる問題があり，従って，共起ルール数と信頼度水準を下げなければならないことである．構成要素抽出を1回目と同じ水準で行うとほとんどの関連用語が排除されるので，ここでは，第2階層におけるテキストマイニングにおいては共起ルール数と信頼度の水準を下げる．

4.3.3 予備分析

本節ではテキストマイニング手法と研究方法の有効性を検証するために，レジリエンスに関する日本語論文10本を対象に上記の分析の流れに沿って予備分析を行った．レジリエンスに関する日本語論文については，日本語の学術論文(CiNiiが収録しているものに限定)，政府公文書または政府関連または有力な民間機関の報告書など10本の論文を選択

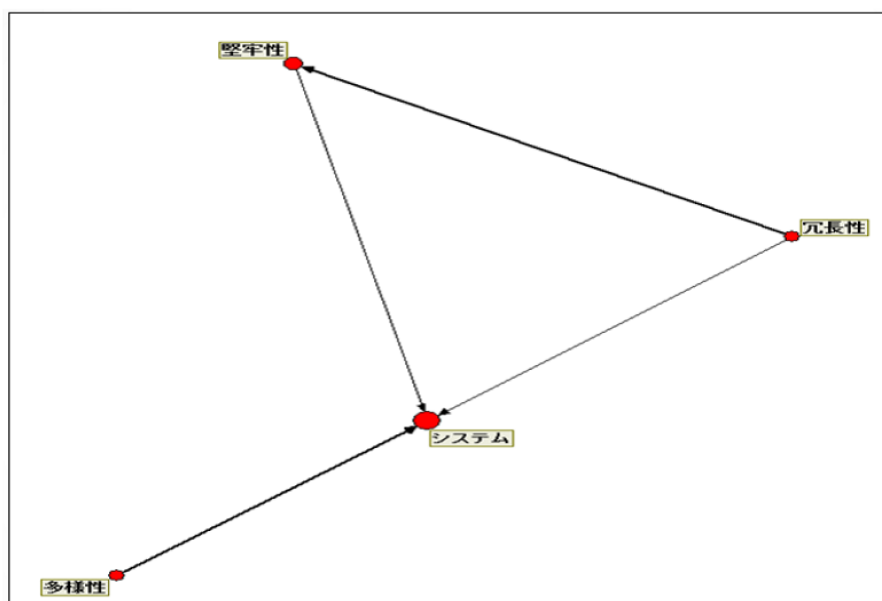


図 4.3.2: 第1階層におけるテキストマイニング結果

このように、第一階層では4つの構成要素単語が抽出されていたが、システムがあるからレジリエンスが高く(或は低く)なるとは言えないので、ここではレジリエンスの構成要素として、「多様性」、「冗長性」、及び「堅牢性」の3つを選択し、「システム」についてはあとでもう一度分析することにした。

表 4.3.1 にレジリエンスと3つの構成要素間の信頼度及び共起ルール数をまとめた。

表 4.3.1: 第1階層の共起ルール数および信頼度

注目語	構成要素	信頼度	共起ルール数
レジリエンス	多様性	57.14 %	12
レジリエンス	堅牢性	54.55 %	18
レジリエンス	冗長性	40.91 %	9

第二階層

第二階層では構成要素単語を選択する基準として共起ルール数を2に、信頼度を10%にそれぞれ設定し、第一階層で選ばれた「多様性」、「冗長性」、および「堅牢性」をそれぞれ注目語として設定してテキストマイニングを実施した。

但し、すでに抽出された上位概念である「レジリエンス」および第一階層のほかの構成要素単語については、現在の注目語の下位概念にならないように、ソフトの特定単語排除機能を用いて排除した。例えば「多様性」を注目語に設定する場合、「レジリエンス」、「冗長性」、および「堅牢性」がテキストマイニングの結果に出現しないようにこれらの単語を排除(exclude)単語リストに加えた。

(1) 多様性

まず、多様性について上記の方法でテキストマイニングを実施した結果、図 4.3.3 に示すような多数の構成要素単語が抽出され、Text Mining Studio のグラフで現れる方向性（矢印）をもとに、著者らが因果関係を分析し、上位7単語（コミュニティ、集団、電源、生態系、障害、エネルギー、生物）、下位7単語（コンピュータ、組み合わせ、プロジェクト、システム、戦略、情報通信、大規模）に分類した。

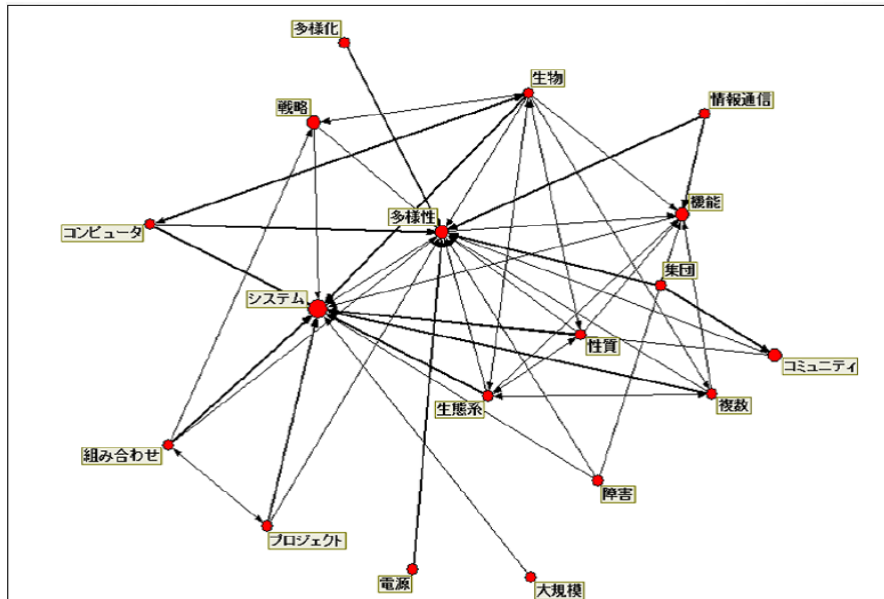


図 4.3.3: 多様性の関連語

(2) 冗長性

次に、「冗長性」についても「多様性」の構成要素単語の抽出と同様な手順でテキストマイニングを実施し、構成要素単語を抽出し、上位グループと下位グループに分類した。その結果、上位グループには、利益、継続、経済、適用、生産性、耐性、全体、適応など8個の単語、下位グループには、設計、組み合わせ、移転、システム、大規模、余剰、多重化、複数、重複、戦略など10個の単語が抽出された。

(3) 堅牢性

最後に、「堅牢性」についても同様な手順でテキストマイニングを実施し、構成要素単語を抽出し、上位グループと下位グループに分類した。その結果、上位グループには、効率性、企業、迅速、対策、サイバー攻撃、緊急時、地域、停止の8個の単語、下位グループには、セキュリティ、耐震、BCP、配置、強靱、分析、訓練、実効性、構築、リスク耐性、セキュリティ・システムのなど11個の単語が抽出された。

以上、まとめると、レジリエンスの第一階層には、多様性、冗長性、および堅牢性の3つの構成要素単語、第二階層には、多様性の構成要素単語7個（コンピュータ、組み合わせ、プロジェクト、システム、戦略、情報通信、大規模）、冗長性構成要素単語10個（設計、組み合わせ、移転、システム、大規模、余剰、多重化、複数、重複、戦略）、堅牢性

構成要素単語 11 個（セキュリティ、耐震、BCP、配置、強靱、分析、訓練、実効性、構築、リスク耐性、セキュリティ・システム）を抽出することができた。表 4-2 はレジリエンス構成要素単語を階層別にまとめたものである。

予備分析の結果

レジリエンスを構成する要素として、多様性、冗長性、および堅牢性、さらにこれらの要素を構成する第二階層の構成要素単語としてそれぞれ 7, 10, 11 の単語を抽出した。

しかし、第二階層の単語を観察すると類似した意味を持つ単語も多く、そのため第二階層では単語同士の関係を考慮してさらに分析し、簡潔にまとめることにした。

ここでは、まずテキストマイニングの結果として得られる「つながり図(ネットワーク図)」に基づいて主観的に分析し、多様性を以下の 4 つのグループに、

- (1) システム規模：システム、規模
- (2) システム機能：システム、機能、複数
- (3) システム設計：システム、設計、組み合わせ、多様化
- (4) 戦略組み合わせ：組み合わせ、戦略、プロジェクト

冗長性を以下の 4 つのグループに、

- (1) システムバックアップ：システム、複数、余剰、設計、重複
- (2) 施設のバックアップ：施設、多重化、移転
- (3) システム規模：システム、大規模
- (4) 戦略組み合わせ：組み合わせ、戦略

また、堅牢性を以下の 7 つのグループ

- (1) セキュリティソフト：システム、セキュリティ
- (2) システム環境：システム、環境
- (3) 施設強靱化：施設、強靱
- (4) 施設耐震性：施設、耐震、構築
- (5) BCP 実効性：実効性、BCP
- (6) BCP 訓練：BCP、訓練
- (7) リスクマネジメント：リスクマネジメント、分析

にそれぞれ分類した。

図 4.3.4, 図 4.3.5 と図 4.3.6 にそれぞれ多様性, 冗長性, および堅牢性の構成要素単語間の繋がりを示す。

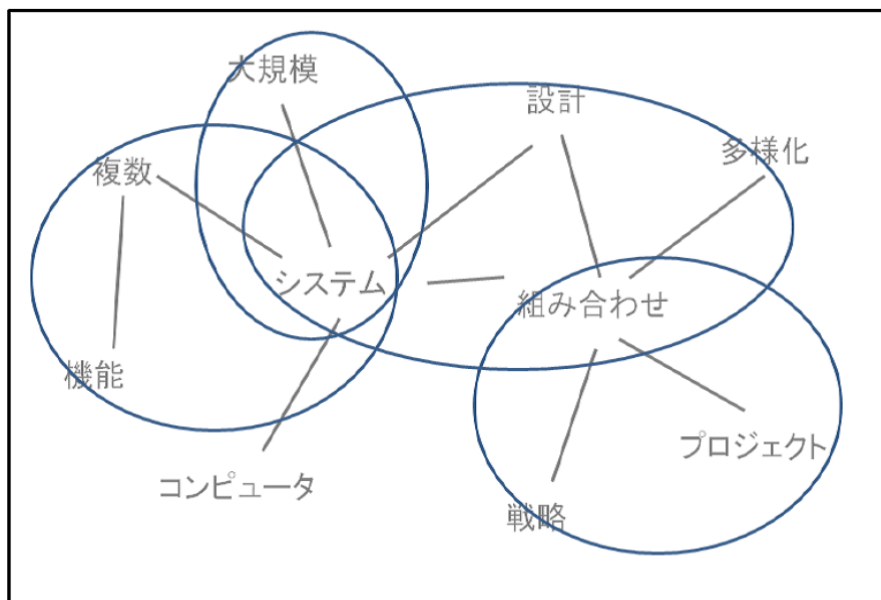


図 4.3.4: 多様性の構成要素単語の繋がり図

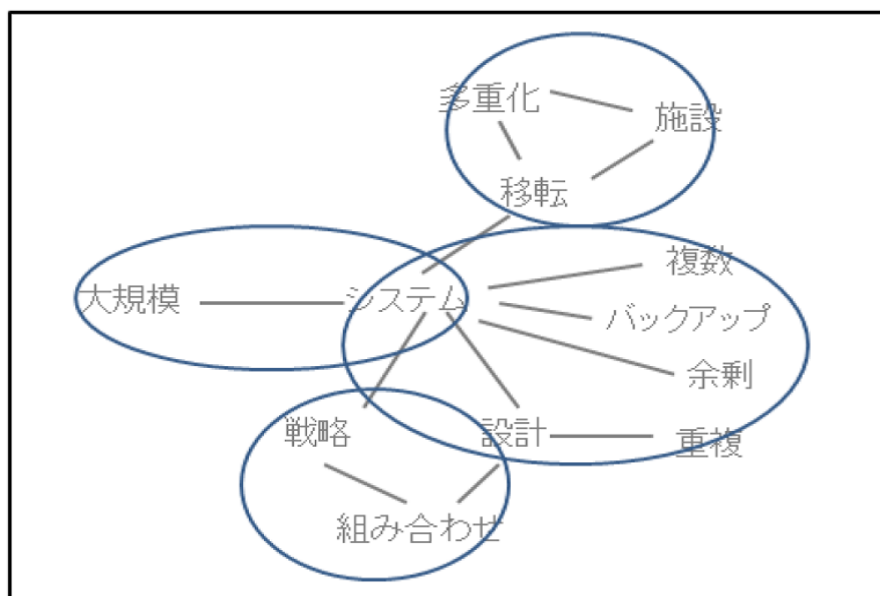


図 4.3.5: 冗長性の構成要素単語の繋がり図

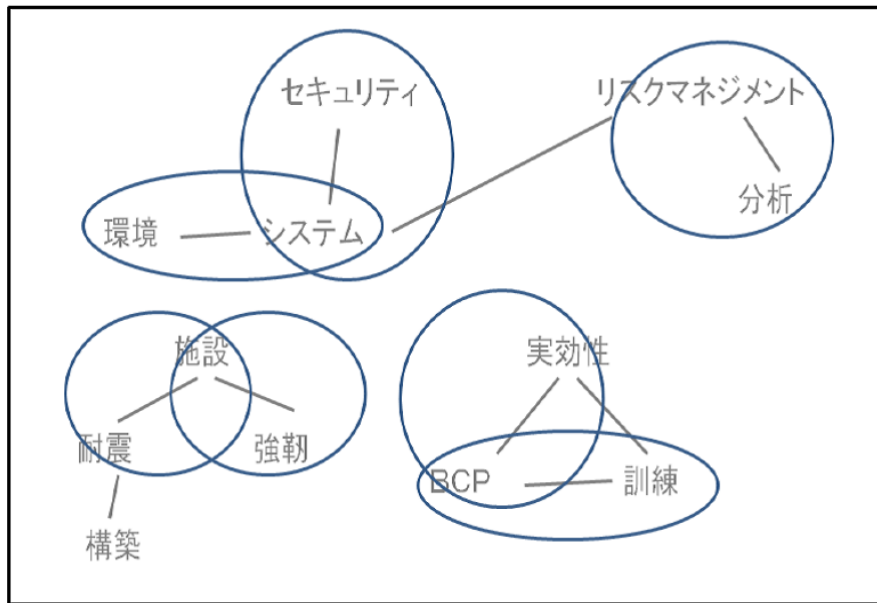


図 4.3.6: 堅牢性の構成要素単語の繋がり図

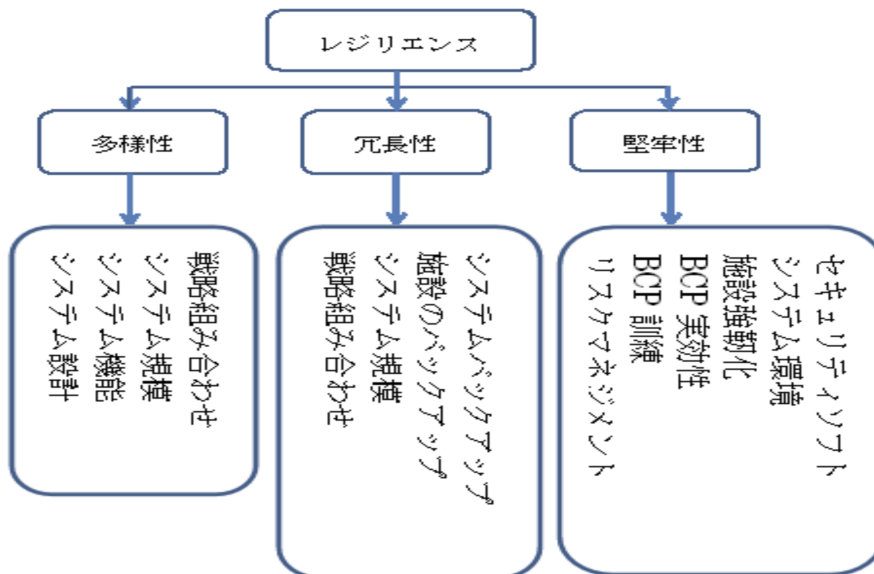


図 4.3.7: レジリエンス構造モデル

以上，予備分析の結果，レジリエンスの第一階層には，多様性，冗長性，および堅牢性の3つの構成要素を配置し，第二階層には，4つの多様性構成要素：(1) システム規模，(2) システム機能，(3) システム設計，(4) 戦略組み合わせ；4つの冗長性構成要素：(1) システムバックアップ，(2) 施設のバックアップ，(3) システム規模，(4) 戦略組み合わせ；

および7つの堅牢性構成要素：(1) セキュリティソフト、(2) システム環境、(3) 施設強靱化、(4) 施設耐震性、(5) BCP実効性、(6) BCP訓練、(7) リスクマネジメント；計14の構成要素をそれぞれ配置したレジリエンス構造モデルを構築した(図4.3.7参照)。

その他、Text Mining Studioには関係のない用語を削除する機能がないので、抽出された関連用語を視覚的に確認し、1つずつの削除を行った。特に、論文数を増えると抽出される関係のない用語の数が爆発的に多くなり、解釈できない解析できない因果関係も存在する問題があり、従って、次の本分析では関連用語の抽出範囲を設定し、範囲内に構成要素を抽出する。

4.4 本分析の結果

4.4.1 関連用語の抽出範囲の設定

関連用語の範囲設定については、「supply chain risk management」を注目語に設定し、100本の論文のデータベースにテキストマイニングを実施した。得られた関連語の中には「supply chain risk management」と関係ない単語が多く抽出されるので、それらの単語を削除し、残りの単語はSCレジリエンス構成要素の候補として、関連用語の抽出範囲に設定した。

(1) 柔軟性 (Flexibility), (2) 冗長性 (Redundancy), (3) 頑健性 (Robustness), (4) 俊敏性 (Agility), (5) 融合性 (Assimilation), (6) 凝集力 (Cohesion), (7) 臨機応変性 (Resourcefulness), (8) 多様性 (Diversity), (9) 制御力 (Control), (10) 整合力 (Coherence), (11) 連結力 (Connectedness), (12) 速度 (Velocity), (13) 見える化 (Visibility), (14) 余剰設備 (Surplus Capacity), (15) SCの再構築 (Supply Chain Re-engineering), (16) SCの協調性 (Supply Chain Collaboration) (17) 制御システム (Control System), (17) リスクマネジメント型企業文化 (Risk Management Culture), (18) リスク登録簿 (Risk Register), (19) バックアップ (Back-up), (20) 防火壁 (Firewalls), (21) フェイルセーフ (Fail-safes), (22) 権限の分散 (Distributive Power), (23) 監視システム (Monitoring System) (24) モジュールリティ (Modularity), (25) 余剰生産力 (Excess Capacity), (26) 自己組織化 (Self-organization), (27) 遅延差別化 (Postponement), (28) SCの情報共有化 (Supply Chain Communication), (29) 高速化 (Acceleration), (30) リスクマッピング (Risk Mapping), (31) 相互関連性 (Correlation), (32) 分散型生産 (Decentralization), (33) 安全措置 (Security), (34) リスク評価 (Risk Assessment), (35) 持続可能性 (Sustainability), (36) 回復力 (Recovery), (37) リスク予測 (Anticipation), (38) 信頼性 (Reliability), (39) 復旧能力 (Restoration), (40) 安定性 (Stability), (41) リスク特定 (Risk Identification) (42) 補給戦略 (Supply Base-Strategy), (43) BCP, (44) SCのインテリジェンス (Supply Chain Intelligence), (45) リーダーシップ (Leadership), (46) 交換機能 (Interchangeable), (47) リスクマネジメント訓練 (Risk Management Training), (48) 相互接続性 (Interconnection), (49) 相互運用性 (Interoperability), (50) 社員へのクロストレーニング (Cross-training), (51) SCへの理解 (Supply Chain Understanding), (52) 財務健全性 (Financial Strength), (53) リスクファイナンス (Risk Financing), (54) 生産プロセスの能率化 (Streamlined Process) (55) 仕事への熱意 (Passion)

for Work), (56) ジェネリックパーツ (Generic Parts), (57) サプライヤーとの関係 (Supplier Relationship), (58) 意思決定 (Decision Making), (59) 戦略在庫 (Stock Strategy), (60) レベニューマネジメント (Revenue Management), (61) 動的な品揃え計画 (Dynamic Assortment Planning), (62) クリティカルパス法 (Critical Path Analysis), (63) サプライチェーン拡充 (Supplier Development), (64) 包含的な参加 (Inclusive Participation), (65) リードタイムの短縮 (Reduced Lead-times)

4.4.2 テキストマイニングの結果

第1階層

第1階層では、注目語を「Resilience」に、共起ルール数2、信頼度40%の基準のもとで、4.4.1節に定められた抽出範囲に対して「Resilience」と関連がある用語を抽出した。その結果は表4.4.1のようになる。

表 4.4.1: 第1階層における頻出14要素と抽出数

初期構成要素	抽出数
Agility	146
Flexibility	127
Redundancy	82
Robustness	82
Adaptability	65
Risk Assessment	63
Sustainability	52
Supply Chain Collaboration	50
Diversity	49
Visibility	46
Recovery	46
Anticipation	37
Reliability	33
Stability	33

表4.4.1により、第1階層の構成要素に対する抽出数のばらつきが大きかったので、ここでは抽出数が82回以上の初期構成要素を第1階層の構成要素とする。即ち、俊敏性 (Agility)、柔軟性 (Flexibility)、冗長性 (Redundancy)、及び頑健性 (Robustness) を抽出した。

第2階層

第2階層では共起ルール数1、信頼度20%の基準のもとで、4.4.1節に定められた抽出範囲に対して第1階層で選ばれた「Agility」、「Flexibility」、「Redundancy」、及び「Robustness」をそれぞれ注目語として設定してテキストマイニングを実施した。

但し、既に抽出された「Resilience」及び第1階層の構成要素単語については、現在の注目語の下位概念にならないように、Text Mining Studioの関連用語排除機能を用いて、それを排除した。例えば、「Agility」を注目語に設定する場合、「Resilience」、「Flexibility」、「Redundancy」、及び「Robustness」がテキストマイニングの結果に出現しないようにこれらの単語を排除単語リストに加えた。

(1) 俊敏性

まず、俊敏性について上記の方法でテキストマイニングを実施した結果、表4.4.2に示すような多数の構成要素単語が抽出され、Text Mining Studioで現れる抽出数をもとに、5回以上を基準とし、見える化(Visibility)、速度(Velocity)、SCの協調性(Supply Chain Collaboration)、及びSCの情報共有化(Supply Chain Communication)の4個の単語が抽出された。

(2) 柔軟性

次に、柔軟性についても俊敏性の構成要素単語の抽出と同様な手順でテキストマイニングを実施し、構成要素単語を抽出し、抽出数の5回以上を基準に単語を選別した(表4.4.3)。その結果、SCの協調性(Supply Chain Collaboration)、分散型生産(Decentralization)、速度(Velocity)、遅延差別化(Postponement)、及び社員へのクロストレーニング(Cross-training)の5個の単語が抽出された。

(3) 冗長性

次に、冗長性についても同様の手順でテキストマイニングを実施し、構成要素単語を抽出し、抽出数の5回以上を基準に単語を選別した(表4.4.4)。その結果、SCの協調性(Supply Chain Collaboration)、速度(Velocity)、多様性(Diversity)、及びバックアップ(Back-up)の4個の単語が抽出された。

(4) 頑健性

最後に、頑健性についても同様の手順でテキストマイニングを実施し、構成要素単語を抽出し、抽出数の5回以上を基準に単語を選別した(表4.4.5)。その結果、速度(Velocity)、分散型生産(Decentralization)、SCの情報共有化(Supply Chain Communication)、及び自己組織化(Self-organization)の4個の単語が抽出された。

表 4.4.2: 俊敏性の構成要素と抽出数

抽出語	抽出数
Visibility	31
Velocity	16
Supply Chain Collaboration	9
Supply Chain Communication	6
Interoperability	5
Distribution	5
Rapidity	5
Correlation	4
Postponement	4
...	...
Critical Path Analysis	1
Financial Strength	1

表 4.4.3: 柔軟性の構成要素と抽出数

抽出語	抽出数
Supply Chain Collaboration	33
Decentralization	25
Velocity	11
Postponement	8
Cross-training	6
Supply Chain Communication	4
Diversity	3
Leadership	3
Back-up	3
...	...
Interchangeable	1
Risk Mapping	1

表 4.4.4: 冗長性の構成要素と抽出数

抽出語	抽出数
Supply Chain Collaboration	14
Velocity	9
Diversity	6
Back-up	6
Distribution	5
Rapidity	4
Postponement	3
Leadership	3
Excess Capacity	2
...	...
Interconnection	1
Supply Chain Understanding	1

表 4.4.5: 頑健性の構成要素と抽出数

抽出語	抽出数
Velocity	11
Decentralization	9
Supply Chain Communication	6
Self-organization	6
Rapidity	3
Visibility	2
Decision Making	2
Supply Chain Collaboration	2
Correlation	2
...	...
BCP	1
Continuity Strategy	1

以上、まとめると、SCレジリエンスの第1階層には、俊敏性、柔軟性、冗長性、及び頑健性の4個の構成要素を配置し、第2階層には、俊敏性の構成要素4個(見える化、速度、SCの協調性、及びSCの情報共有化)、柔軟性の構成要素5個(SCの協調性、分散型生産、速度、遅延差別化、及び社員へのクロストレーニング)、冗長性の構成要素4個(SCの協調性、速度、多様性、及びバックアップ)、頑健性の構成要素4個(速度、分散型生産、SCの情報共有化、及び自己組織化)、合計12の構成要素をそれぞれ配置したSCレジリエンスの構造モデルを提案する(図4.4.1)。

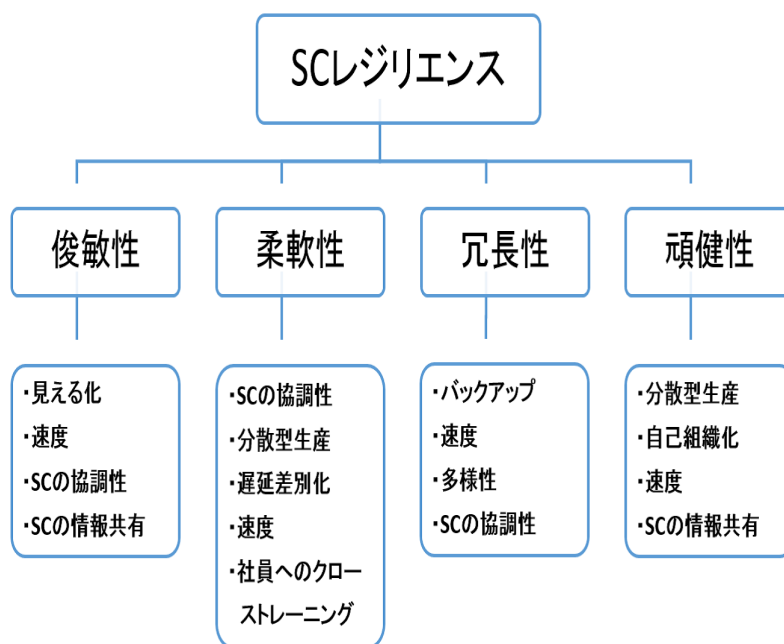


図 4.4.1: レジリエンスな SC の構造モデル

SCのレジリエンスを考えると、供給の途絶に直接関連する施設の耐震補強や在庫増やしだけが注目され勝ちであるが、本章のSCレジリエンスの構造モデルを用いると、頑健性強化や在庫増やしだけでなく、見える化システムの導入、SCの協調性の強化など、もう少し広い視野でSCレジリエンスを高めるための方法を考える必要があることが強調され、本章の成果を企業のSCのレジリエンスを評価するスコアカードの設計などに活用することも考えられる。

4.5 おわり

本章ではSCレジリエンスの構造を明らかにすべく、100本の英語論文を用いてテキストマイニングを実施し、SCレジリエンスを構成する第1階層として、俊敏性、柔軟性、冗長性、及び頑健性の4個の構成要素、第2階層の俊敏性の構成要素4個として見える化、速度、SCの情報の共有化、及びSCの協調性の4個、柔軟性の構成要素として、SCの協調性、分散型生産、速度、遅延差別化、及び社員へのクローストレーニングの5個、冗長性の構成要素としてSCの協調性、速度、多様性、及びバックアップの4個、頑健性の構成要素として、速度、分散型生産、自己組織化、及びSCの情報共有化の4個、合計10種類の構成要素からなるSCレジリエンス構造モデルを構築した。

本章で提案したSCレジリエンスの構造モデルは、企業のレジリエンスを向上させるための着眼点を与えるものであり、企業のSCのレジリエンスを評価するときの手がかりにもなる。

しかし、本研究で構築したSCレジリエンスの構造モデルはテキストマイニングを実施

するなど、できるだけ客観的にその構造を明らかにする努力はしたものの、構成要素の集め、抽出基準の設定やグルーピングにおいては依然として筆者の主観による部分があり、さらに、論文数が増えれば結果も変化する可能性がある。

より客観的にSCレジリエンスの構造モデルを構築するためには、論文数を増やすこと、因果関係や相関係数を用いた分析が必要であり、mecabなど構文解析ソフトも活用しながら独自の分析ツールを開発することも1つの課題である。

第5章 サプライチェーン見える化システム¹

5.1 はじめに

第2章と第3章ではSCDRの発見と評価する手法を構築した。途絶リスクを発見した際には、初期対応策を取るべきであるので、ここでは、第4章で提案したSCレジリエンス構造に基づき、俊敏性の強化策であるSC見える化を提案する。

SC見える化は需要の見える化と供給の見える化に構成されて実現できれば、ブルウィップ効果を抑えることで、物流効率を大幅にアップさせることができるとともに、途絶リスクを予知することで、SCの俊敏性を強化することができる。

しかし、経済産業省の調査[3]によると、東日本大震災の時に調達先の調達先を知っていた企業は6割程度で、SC全体を把握している企業はほとんどなかった。特に注目すべきことは、ダイヤモンド型SCの存在である。東日本大震災の前は誰もがSCはセットメーカーをトップに、ピラミッド型になっていると信じていたが、実際には最下層にある企業は激しい競争で淘汰が進み、生き残った会社は「うちしか作れない」部品を作る会社が多く、おおもとの1社が被災すると中間部品の製造会社が生産中止に追い込まれ、更にその中間部品を使用するセットメーカーのすべてが生産中止に追い込まれていき、被害が逆ピラミッド型に広がっていた。

近年、SCのグローバル化に伴い、地震、津波、台風などの天災、テロ、ストライキなどの人災による業務停止の頻度が高くなっており、10階層もある自動車産業においては、毎年多くの事業中断が発生していると言われている。途絶リスクが起きた際に、俊敏に初期対応することは業務停止のリスクを減らすために非常に重要であり、その意味でSC見える化はSCDR対策において真っ先に取組むべき課題である。

実際には、東日本大震災以降、日本の大手自動車メーカーでは、SC途絶リスクに対処すべく、積極的に部品調達経路の見える化、すなわち、SCネットワーク見える化を推進している。例えば、トヨタでは多くの労力を費やして部品調達経路を調べ、10次下請けまでの1万3千社の3万拠点の会社名、住所および緊急連絡先情報を含むデータベースを構築している[128]。

しかし、企業間契約やその他要因の変化により部品調達ネットワークは時間とともに変化し、情報は陳腐化する。常に正確な最新情報を維持するためには、継続的にメンテナンスを行う必要があり、人海戦術でSC見える化を維持することは必ずしも効率が良いとは

¹この章の一部は“日本経営工学会論文誌”に投稿中

言えない。効率よく調達ネットワーク情報を維持管理するためには、やはり標準化に基づいた新しい仕組みの設計や情報システムの道具が必要である。

この背景に踏まえて、この章ではSCDRの初期対応策であるSC見える化を効率的に実現する道具としてSC見える化システムを構築し、実験を通じてその有効性を検証することを目的とする。

5.2 サプライチェーン見える化システム

5.2.1 BCMとサプライチェーン見える化

9.11同時多発テロ事件以降、BCM(事業継続マネジメント)は米国の半導体業界を中心に注目され始めており[129]、リスクを頻度と影響度軸にリストアップしてから、其々のリスクに対するマネジメント計画及び緊急時対応マニュアルを作成し、更にリスクによって各種の事前訓練を行うことが提唱されている[130]。その同時に、BCMの標準化も進んでおり、現在BCMは国際規格ISO22301として批准されており、日本でも工業規格JISQ22301(社会セキュリティー事業継続マネジメントシステム—要求事項)に登録されている[131][132]。JISQ22301では、BCMを導入する組織が事業の中断を引き起こすリスクを特定し、その発生確率を低減し、発生した際の初期対応を行い、事業を早く復旧する計画の作成、実施、評価、改善などの要求事項を規定している[132]。

しかし、BCMにはSCRMに関する記述はなく、途絶リスクを体系的に分析するスキームもない。経営者にとって一番の悩みは需要のリスクとそれに起因する投資意思決定の失敗であり、人災や自然災害などの発生確率は小さいが影響が大きい途絶リスクについては、BCMを導入しても高いパフォーマンスが期待できない。なぜなら途絶リスクは突然にやってくるのではなく、SC上で時間をかけてゆっくり伝わってくる場合があるからである。実際に震災における被害の多くは調達先を把握できなかったために発生した間接被害である。調達先を把握するためには、自社の部品がどのような経路で調達されているかを見えるようにするSC見える化が求められる。

SC見える化は「アンドン」などの企業内部の見える化から発展してきて、見える化の主体により、需要の見える化と供給の見える化に分類することができる。需要の見える化が実現できれば、川上段階が川下段階における在庫情報、需要情報、及びリードタイム情報を知ることができ、エシェロン在庫を用いて最適な発注量および発注時期を決めることができ、SC上におけるブルウィップ効果を抑えることで、物流効率を大幅にアップさせることができる。

一方、東日本大震災後に問題になっているのは供給の見える化である。実現できれば、川下段階が川上段階の位置情報、リードタイム情報、在庫情報、取引時間と量の情報を知ることができ、川上段階において供給発注途絶が発生した場合に素早くそのリスクを評価し、対策を取ることができるので、損失を最小限に抑えることができる。従って、SC見える化は情報の共有ができる仕組みかつ効率よく情報を取得する道具であり、導入すれば需要と供給の想定外の変化に俊敏に対応でき、リスクの初期対応に役に立つ。

このように、SCにおいては、川上段階と川下段階における双方向の情報共有が重要であり、これを実現するためには先ず情報共有ができる仕組みとしての戦略的提携、つぎに効率よく情報を取得する手法としての見える化システムが必要である。本章では需要と供給の双方向の見える化を対象に、自動的にネットワーク見える化を実現するシステムを構築し、その有効性を検証する。

5.2.2 サプライチェーン見える化システムの構築

SC見える化システムでは企業内物流と企業間物流情報を繋げ、調達経路を明らかにする。企業内では調達BOMを用いて販売製品と調達部品の従属関係を明確にし、企業間では4種類の物流情報、すなわち、発注、受注、出荷、入荷情報に基づいて異なる会社において名前が異なる部品を結びつける必要がある。また、情報化が進んでいない中小零細企業では、先ず情報化を進めることが求められる。

見える化システムの導入には初期費用と運営費用が必要になるが、初期費用には、ソフトウェア費用とハードウェア費用があり、運営費用には人件費やシステム保守費用がある。筆者らはSC見える化と中小企業の情報化を同時に進めることを考えて、人手と新たな設備を増やさないことを前提に無料の実験用見える化システムを開発した。そこで、XMLをベースとした無料でシステム開発ができるツールであるXeadを用いることにした[133]。Xeadを用いると業務フロー、データモデリング、および機能設計の3要素分析を行い、Xeadモデラーで構築したシステムモデルをXeadエディターで読み込んでインタフェースを編集すればコーディングなしにSCVSを構築することができる。煩雑なコーディングが要らない分だけシステム構築効率が高く、システムのバージョンアップや保守の効率も高くなる。Xeadで構築したSC見える化システムの業務フローの一例を図5.2.1に示す。

見える化システムを導入した企業は、企業プロフィール、調達BOMを登録してから見える化システム用いて部品の発注と入荷、製品の受注と出荷の情報処理を行う。これらの物流に関連するデータはセンター経由で取引先企業に送られる。センターでは、保存した企業プロフィール、調達BOM、および受発注情報を用いて物流経路を自動生成する。この物流経路をSC-BOMと呼ぶ。SC-BOMには企業プロフィール、調達BOM、受発注情報、および出荷と入荷の情報が含まれるが、表示できるのは開示が許可された情報のみとする。情報開示についてはすべての企業が平等な立場で、他社の調達経路情報を知りたい場合には自社の調達関連情報を開示するものとする。

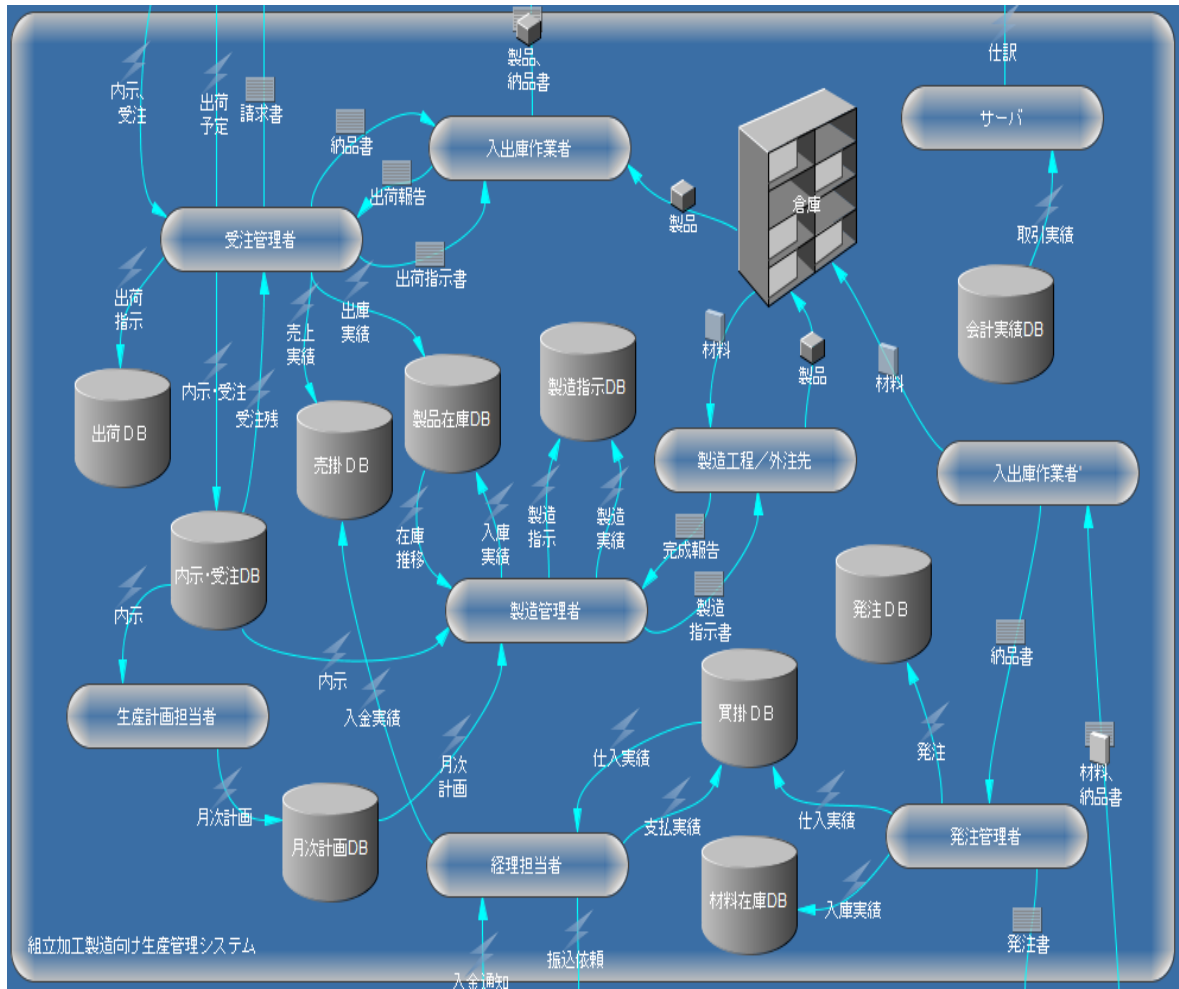


図 5.2.1: 生産管理の業務フロー

5.3 サプライチェーン見える化システム有効性の検証

実験では見える化システムを用いると、川下企業は自社製品と関連のある全ての川上企業における2種類の情報、すなわち、(1) 販売製品在庫情報、(2) リードタイム情報、が見えるようになると仮定し、何らかの災害によりSC上にある企業の生産が中断されるという「SC途絶あり」と「SC途絶なし」の2つのケースに分けて実験を行った。

SCは図5.3.1に示すような3段階7企業から構成し、2社購買はしないものとした。図5.3.1はA1企業の製品a1が部品b1 b4で構成され（内製部品は省略）、b1はc1とc3、b2はc2とc4、b3はc5とc7、b4はc6とc8で、それぞれ構成されていることを表し、SC見える化システムではこの構造が自動生成される(SC-BOM)。また、調達リードタイムは図5.3.2に示すように設定した。

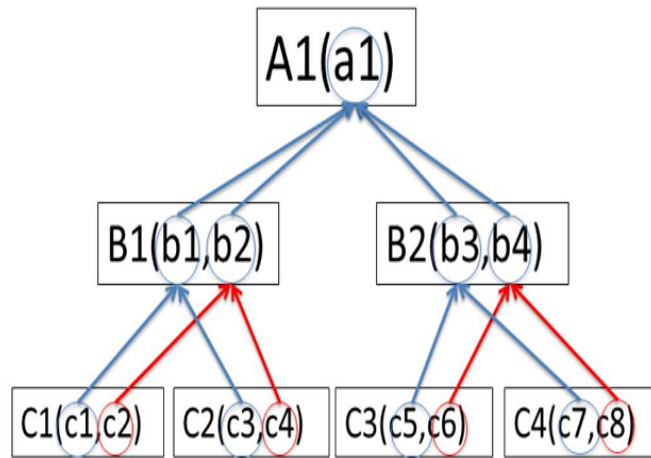


図 5.3.1: 実験対象 SC 構造 (SC-BOM)

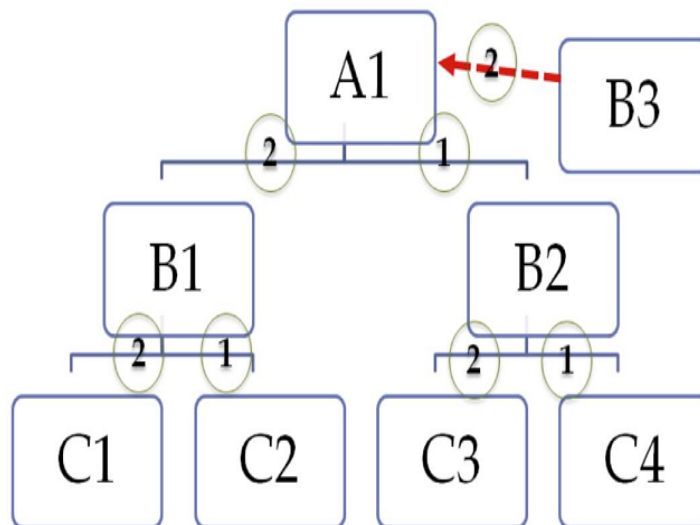


図 5.3.2: 調達リードタイムと A1 のバックアップサプライヤー

実験期間は 15 期とし、企業 A1 における需要は 1 期から 5 期まで平均 100、6 期から 10 期まで平均 160、11 期から 15 期まで平均 80 とし、標準偏差を 20 に固定してランダムに発生させた。被験者は販売データから需要の変動を予測するものとし、需要の分布を教えないことにした。ただし、見える化システムを導入した場合には全てのサプライヤーがセットメーカーの売上量（既に発生した需要）を見ることができ、SC 上の各企業のリードタイムの長さ、及び手持ち在庫情報を検索することができるようにした。

被験者は自社製品を販売して得た売上から部品調達コストを差し引いた利益を最大にするために最善の発注時期と発注量を決める。

実験は経営工学を専攻している大学院生 14 名に協力してもらい、1 人 1 社の受発注を担当してもらった。また、被験者が真剣に取り組んでもらえるように、上記の実験用 SC の受発注システムを 2 つ用意し、コンペティション形式で行った。この実験システムは内製部品に対しては受発注したら自動的に製造指示が出されるとし、被験者は外部企業との間での受発注だけに集中するようにした。パフォーマンスは利益で評価し、2 グループの対応企業担当者同士で競い合い、勝った者に図書券を差し上げることにした。

利益は下式で計算し、パラメータは表 5.3.1 の通りに設定した。

$$U_i = \sum_{t=1}^H \left\{ p_i \times q_{it} - \sum_{j=1}^{M_i} p_j \times q_{jit} \right. \quad (5.3.1)$$

$$\left. - K_i \times \delta(q_{jit}) - h_i I_{it} - c_i X_{it} \right\} \quad (5.3.2)$$

ここで、 U_i は i 企業の利益、 p_i は i 企業の製品の販売価格、 q_i は i 企業の計画期間 H 期間中の販売量、 M_i は i 企業の調達先企業数、 p_j は j 企業製品の販売価格、 q_{jit} は j 企業が t 期に i 企業への販売量、 K_i は i 企業の毎回の発注にかかる固定費用、 $\delta(x)$ は x の値がゼロより大きい場合に 1 の値を取るパルス関数、 h_i は i 企業の製品在庫保持単価、 I_{it} は i 企業の t 期における在庫数量、 c_i は i 企業の製造単価、 X_{it} は i 企業の t 期の生産数量をそれぞれ表す。

表 5.3.1: 実験のパラメータ設定

企業	A	B	C
発注コスト (円)	1500	1000	0
在庫コスト	15	10	5
製造コスト	500	300	100
部品価格	25000	3000	500

実験ではまず、構築した見える化システムを用いて受発注実験を行い、その有効性を検証することである実験目的の説明を行った後、受発注が習熟するまで練習を行い、その後 60 秒を 1 日とするペースで合図を送るとともに需要を発生させ、その需要情報に基づいてセットメーカー A1 が発注意思決定を行い、A1 からの注文を受けたサプライヤー B1 と B2 が自社の在庫状況とリードタイムを考慮してさらに下請け会社 C 1 ~ C4 に発注を行う。

「SC 途絶あり」のケースでは、5 期から 7 期までの 3 期間の間には企業 C4 が被災して製造が中断するとし、SC 見える化システムを導入することを全体に川下企業 C4 の生産中断情報 (SC 途絶情報) が川下企業の発注意思決定の画面に表示されるように設定した。SC 途絶が発生すると生産が中止した企業 C4 の受発注画面はブロックされ、受発注ができなくなる。

SCが途絶すれば、途絶企業での階層 (Tier) に属しているかに関わらず、その影響がSC全体に波及していくので、途絶状況が分かった時点で即座に緊急発注するなど対策を講じる必要がある。ここでは企業 A1 が企業 B3 (バックアップサプライヤー) に緊急発注できるものとし、緊急性を考慮して B 3 の部品販売価格を B1, B2 より高い 4500 円に設定し、1 回あたりの発注費用も割高の 2000 円に設定した。

5.3.1 実験結果と分析

「SC 途絶なし」のケース

前節で説明した「SC 途絶なし」の方法を用いて実験を行った結果を図 5.3.3, 図 5.3.4, 及び図 5.3.5 に示す。図 5.3.3, 図 5.3.4 からわかるように SC 見える化システムの導入により見える化を実現すると、機会損失と在庫コスト両方を小さくすることができる。これは見える化により、川上企業が最終顧客の需要情報やリードタイム情報を把握することができるので、製造 (調達) の意思決定を行う際に川下企業に在庫が多いときには製造 (調達) 量を減らし、在庫が少ないときには製造 (調達) 量を増やすことができたためである。

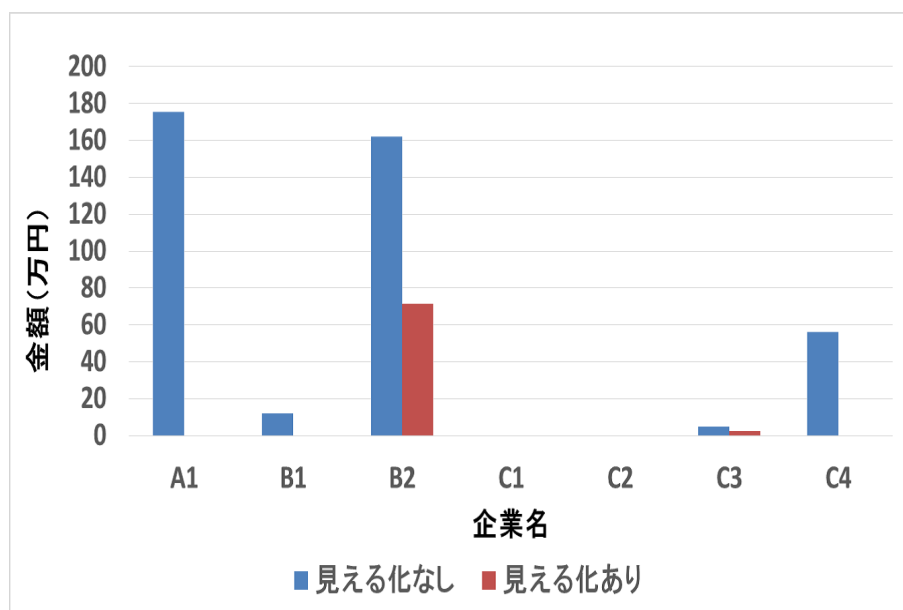


図 5.3.3: 「SC 途絶なし」のケースの機会の損失

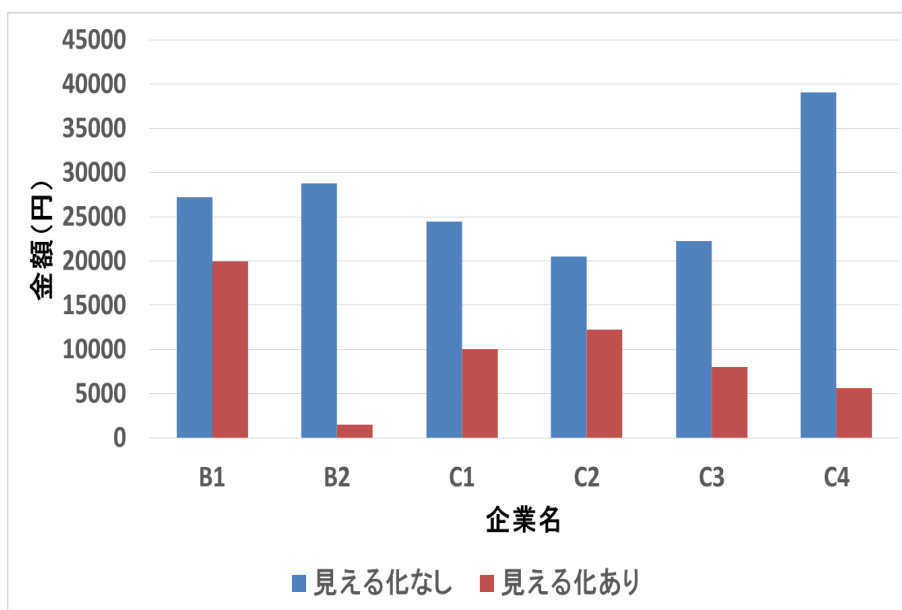


図 5.3.4: 「SC 途絶なし」のケースの在庫コスト

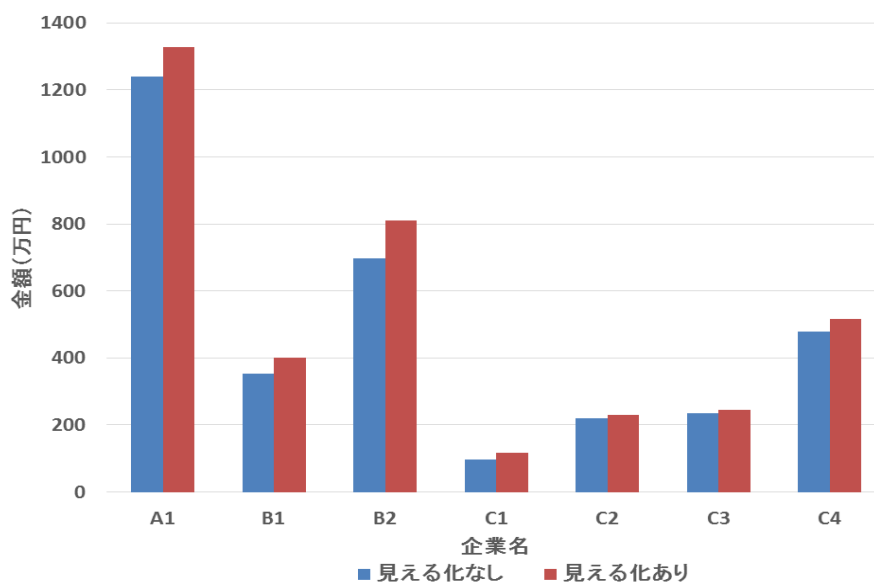


図 5.3.5: 「SC 途絶なし」のケースの最終利益

「SC 途絶あり」のケース

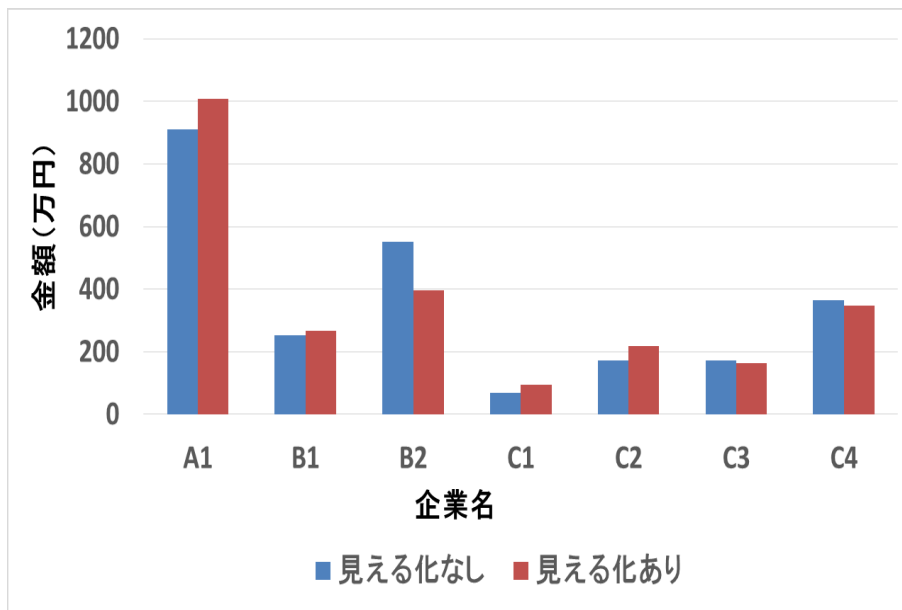


図 5.3.6: 「SC 途絶あり」のケースの最終利益

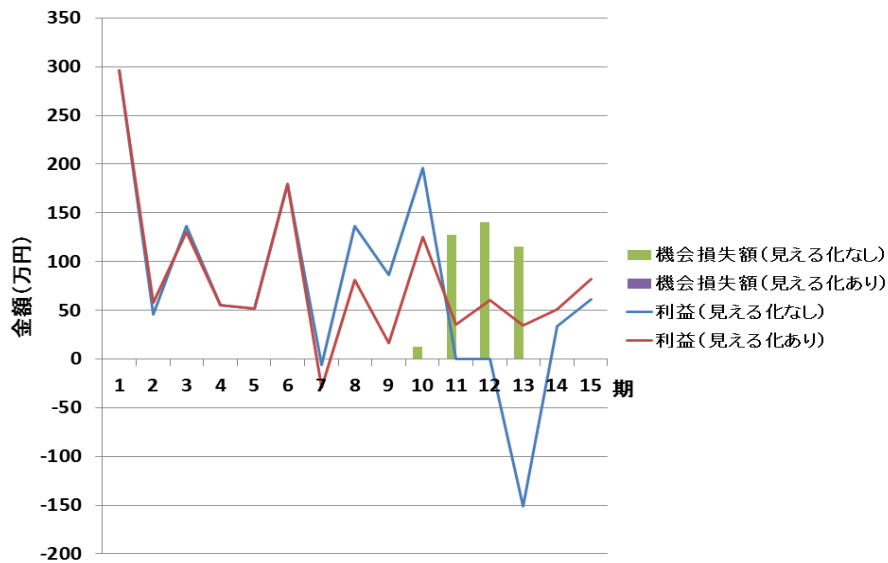


図 5.3.7: 「SC 途絶あり」のケースの最終利益推移

図 5.3.6 と図 5.3.7 に「SC 途絶あり」のケースの実験結果を示す。図 5.3.6 から分かるように、SC 見える化システムを導入すれば、企業 A1, B1, C1, C2 の最終利益が大きくなる。これは、企業 A1 が見える化システムを用いてタイムリーに調達経路の情報を収集し、途絶が発生した際にすばやく B3 に緊急手配をしたためである。

ここで、実験まえに、予想しなかったのは A1 の利益が増加しただけでなく、B1 や C1、C2 など、途絶した企業 C4 とは関係ないと思っていた企業の利益も増加したことである。

SCDRM を考えるとき、多くの会社では自社製品に使われている部品の調達ルート上の生産途絶だけに注目しがちであるが、自社製品を買ってくれる会社の生産ラインが止まったり、減産した場合にもその影響は決して小さくない。自社の調達経路に関係ない企業であっても、販売先の調達経路に含まれる企業が被災した場合には一定期間経過後にその影響が自社に伝わってくる可能性があるため、理想的には川下段階における情報の見える化、即ち販売先の調達経路情報の見える化も必要になる。

当然ながら、SCDRM において一番重要なのはセットメーカーの途絶リスクマネジメントであり、セットメーカーが継続的に操業できることで SC における部分的な途絶が他社に波及しなくなる。同じ原理は中間部品を製造する企業にも適用でき、途絶リスクに強い SC を構築するためには、SC 上のすべての企業が同時に途絶リスクマネジメントを実施することが理想的であることは言うまでもない。

また、図 5.3.7 から分かるように、途絶後のしばらくの間は SC 見える化システムを導入しなかった方が利益が大きくなっているが、その理由は SC の途絶により部品が手に入らなくなったので、在庫費用も製造費用も減ったためである。逆に、見える化システムを導入した場合、C4 の途絶発生が知った被験者たちが途絶期間が長く引くことを恐れて B3 に大量の緊急発注をしたためである。当然ながら、途絶していた企業が回復すると、見える化システムを導入した時の A1 から B3 への緊急発注量はゼロになる一方、見える化システムを導入しなかった時の A1 では在庫不足で機会損失を出してしまうので、利益はマイナスまで落ち込んでしまう。

5.4 終わり

この章では、SC の俊敏性を強化するための SC 見える化システムを構築し、実験をと通して、その有効性、及び途絶リスクへのマネジメント効果を検証した。

具体的には、XHEAD を用いて自動的に調達経路 (SC-BOM) を構築する SC 見える化システムを構築し、競争形式の実験 1 とコンピュータシミュレーションを用いた実験を行った。実験では、需要を 3 段階に変化させ、「SC 途絶なし」と「SC 途絶あり」の 2 つのケースについて、大学院生 14 名によるロールプレー式実験を行った。その結果、最終製品の製造を担当した被験者が見える化システムを活用することで、SC 途絶情報をリアルタイムで入手し、素早くバックアップサプライヤーに緊急発注を行うことで継続的に想像を行うことができ、見える化システムを導入しなかった時に比べて総利益を 1 割増やすことができた。特に、この最終製品の製造企業が継続的に操業できたことで、途絶企業とは関係ないと思われていたほかのサプライヤーの利益をあげることができ、SCDRM においては川上と川下の双方向の見える化が必要であることが分かった。

本章で構築した SC 見える化システムは川上と川下の双方向の見える化を支援するものであり、特に SC - BOM を自動構築することに大きなメリットがあり、今後途絶リスクマネジメントのツールとして実用化を目指したい。

第6章 サプライチェーン途絶リスク対策の解析¹

6.1 はじめに

東日本大震災後のSCを見れば分かるように、効率のみを追求したSCではなく、今後はリスクにも強いSCの構築が求められてくる。特にSCDRにより発生する巨額の損失額や業務停止による顧客からの信頼低下などを考えれば、途絶リスクにおけるSCの早期復旧は極めて重要である。SCDRによる損失を回避または軽減するためには、

- 途絶リスクを評価する
- 事前に初期対応策を用意する
- 事後に素早く対策を打つ

など3つのアクションが必要である。見える化システムは初期対応策として役に立つ。しかし、初期対応だけでは対応できないことがあるので、その場合には、SCレジリエンスの各対応策に基づいて事後対策を取るべきである。ここでは、第4章でのレジリエンス構造に基づいて事後対策とする冗長性、柔軟性、及び頑健性を講じ、シミュレーション実験により途絶リスクが発生した際の3つの対策を評価することを目的とする。

6.2 実験の条件

6.2.1 サプライチェーン途絶リスク対策

シミュレーション実験では冗長性、柔軟性、及び頑健性を以下のように具体化した。

- 冗長性強化策：想定外のリスクに備えて安全在庫水準を2倍にする方策
- 頑健性強化策：2社購買を行い(調達比率5:5)、1社が途絶しても他の1社から一部調達できるようにする方策
- 柔軟性許可策：バックアップサプライヤーを用意し、途絶が発生した際に調達量を他の方策に比べて2倍多く発注できるようにする方策

¹この章の一部は“日本経営工学会論文誌”に投稿中

及び上記の柔軟性強化策とその他の2つの強化策との組み合わせを含めた計5つの強化策に対して Vensim を用いてシミュレーションを行った。途絶が発生するといずれの強化策でも2週間以内に代替企業を探し、調達量を徐々に増やしていけるとした。なお、ここでは人員や新たな設備などを増やさないことを前提にシミュレーションを行った。

6.2.2 サプライチェーンの構造

実験ではSC強化策に焦点を絞るために、図6.2.1左に示すような直列型SCを用いた。また、図6.2.1の左部分は頑健性強化の構造(2社購買)を表し、右部分は柔軟性強化の構造(バックアップサプライヤー)を表す。

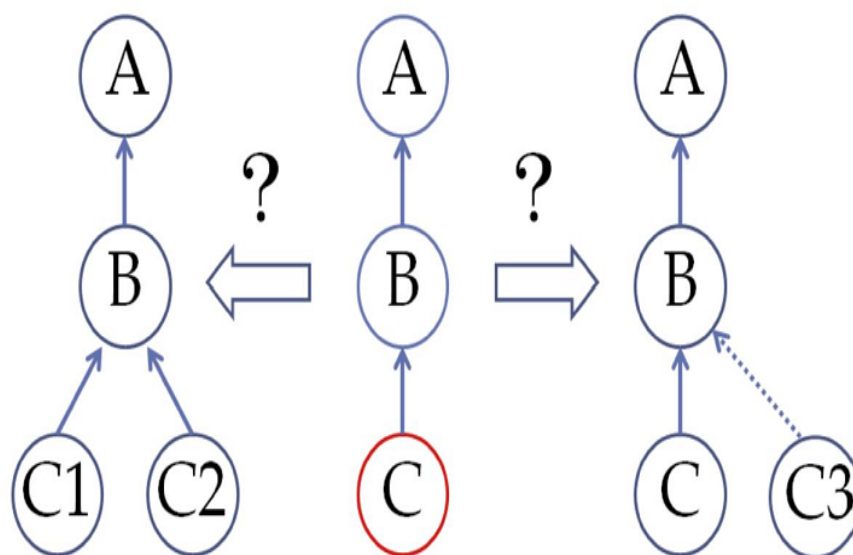


図 6.2.1: 実験で用いたSC構造

6.2.3 シミュレーションの条件

シミュレーションの条件は以下のように設定する。

- シミュレーション期間は5年間で、日々震災が起こる確率を

$$\frac{1}{5 \times 365} \times 100 \% \quad (6.2.1)$$

とする(1995年阪神淡路大震災, 2007年新潟中越沖地震, 2011年東日本大震災と約15年間で3度の大きな地震が起こっていることを念頭に設定した)

- 震災発生による途絶期間は3ヶ月(東日本大震災で注目を浴びたルネサスエレクトロニクスの事例を参考した)

- 対策に伴う追加コストは企業 A, B の 2 社で分割する
- 全ての企業が発注点方式を用いる
- 各条件で 10 回のシミュレーションを行い, 平均値を用いて比較する

6.2.4 外部環境

シミュレーションは以下の 3 つの外部環境,

- 外部環境 1 : 外部に供給が途絶した企業を完全代替する企業がある,
- 外部環境 2 : 外部に供給が途絶した企業を代替する企業はあるが, 技術提供が必要,
- 外部環境 3 : 外部に供給が途絶した企業を代替する企業がない,

に対して, 上記 5 つの強化策をそれぞれ適用したときのシミュレーションを行った.

6.3 実験

6.3.1 外部環境 1

外部環境 1 では, 代替サプライヤーを見つけることができる場合の条件のもとで以下の設定を行う.

実験のパラメータは表 6.3.1 のようにを設定する. 震災時に新しい調達先に発注する場合, 通常時と比較して困難が多いため C の部品価格を 30% 増加させている. 次に各対策を取った時のシナリオを見ていく.

表 6.3.1: 外部環境 1 のパラメータ設定

平均需要	5500
需要の標準偏差	800
企業 A の製造費	1850000
企業 A の販売価格	2500000
安全係数 A	1.65
企業 A の補充リードタイム	2
企業 A の発注費用	3000
企業 A の在庫コスト	500
企業 B の製造費	150000
企業 B の販売価格	300000
安全係数 B	1.65
企業 B の補充リードタイム	2
企業の B 発注費用	3000
企業 B の在庫コスト	300
企業 C の製造費	30000
企業 C の販売価格	100000
安全係数 C	1.65
企業 C の補充リードタイム	2
企業の C 発注費用	3000
企業 C の在庫コスト	100
企業 C の買取り価格	20000
途絶期間	90
震災時価格高騰率	30%
支援増加率	0.05
支援準備期間	14

現状

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 2 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 5% の量から始まり, 毎週 5% ずつ発注可能量が増加する)
- 旧ラインは 90 日後から再開する

冗長性強化策

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる

- 2週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の5%の量から始まり、毎週5%ずつ発注可能量が増加する)
- 旧ラインは90日後から再開する
- 企業Bは現状の2倍の在庫を持つ

頑健性強化

- 地震発生と同時に企業Cの在庫が0になる
- 震災時、企業C2(途絶していない方)では通常の1.2倍まで生産可能
- 2週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の5%の量から始まり、毎週5%ずつ発注可能量が増加する)
- 規模の経済などを考慮し、企業Cの部品価格が10%増加する
- 旧ラインは90日後から再開する

柔軟性強化

- 地震発生と同時に企業Cの在庫が0になる
- 1週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の10%の量から始まり、毎週10%ずつ発注可能量が増加する)
- 旧ラインは90日後から再開する

以上の条件のもとで、それぞれの対策を講じた最終利益が図6.3.1である。横軸は5つの組み合わせ、左縦軸は利益、右縦軸は機会損失をそれぞれ表す。

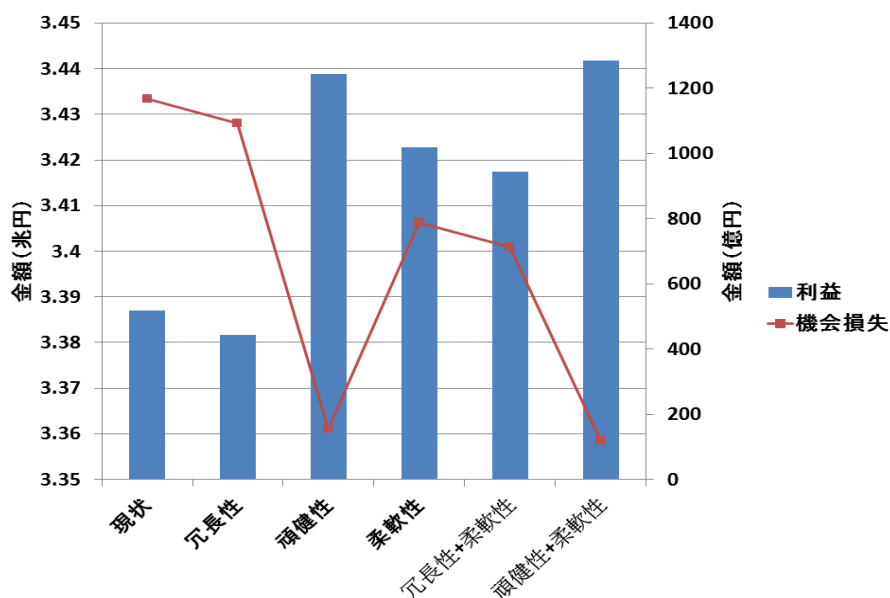


図 6.3.1: 外部環境 1 のシミュレーション結果

まず、冗長性強化策は、途絶直後のバッファーとして機会損失額を抑えることができる一方、余剰在庫にコストがかかってしまうために、総利益は小さくなっている。

次に、頑健性強化策については単一方策の中で最も効果的であることが分かる。SC 上全ての企業が 2 社購買を行えば、途絶リスクが軽減され、川下企業における生産停止のリスクが小さくなる。川下企業が操業し続けることができれば、SC 上の全ての企業が操業し続けることができ、従って最終製品の利益が高くなる。

次に、柔軟性強化策も現状と比較して利益を増やすことができている。このことから事前に SC の途絶リスクが高い箇所を特定し、しっかりとした SC 途絶リスク対策を策定することの重要性が分かる。また、柔軟性強化の機会損失額が冗長性強化の機会損失額より小さいことから、事前に多くの備えよりは、迅速に対応するようにしたほうがメリットが高くなることがわかる。

最後に、2 つの強化策の組み合わせでは、柔軟性強化策と頑健性強化策の組み合わせがより有効であることが分かる。これは本研究で設定したパラメータの値にも依存するが、2 社購買とバックアップサプライヤーの組み合わせにより、途絶が発生したさいに短期間で部品調達量を増やすことができたためである。例えば、頑健性の 2 社購買では 1 社が途絶した直後であっても 6 割調達でき、その 2 週間後バックアップサプライヤーのサポートを得て毎週 10% ずつ調達量を増やすことができるので、6 週間には元の生産量を回復することができる。一方、冗長性強化策では安全在庫を 2 倍持つとしてもリードタイムが 2 日と短く、途絶が発生したときに安全在庫で賄える需要は 1 日以下であり ($ss = 1.65 \times 2 \times \text{SQRT}(2) \times 800 = 3374.5500$)、途絶発生から回復までに 3 か月かかる。柔軟性と組み合わせても回復までの時間はほとんど変わらず、普段から在庫を多く持つ分のコストがかさむので総利益は柔軟性強化策に比べて少なくなる。

6.3.2 外部環境 2

ここでは、同一製品を製造している企業は存在しないが、設計情報や要望があれば作れる企業が存在する外部環境 2 のもとで以下の設定を行う。

実験のパラメータは表 6.3.2 のように設定する。

表 6.3.2: 外部環境 1 のパラメータ設定

平均需要	5500
需要の標準偏差	800
企業 A の製造費	1850000
企業 A の販売価格	2500000
安全係数 A	1.65
企業 A の補充リードタイム	2
企業 A の発注費用	3000
企業 A の在庫コスト	500
企業 B の製造費	150000
企業 B の販売価格	300000
安全係数 B	1.65
企業 B の補充リードタイム	2
企業の B 発注費用	3000
企業 B の在庫コスト	300
企業 C の製造費	30000
企業 C の販売価格	100000
安全係数 C	1.65
企業 C の補充リードタイム	2
企業の C 発注費用	3000
企業 C の在庫コスト	100
企業 C の買取り価格	20000
途絶期間	90
震災時価格高騰率	40%
支援増加率	0.05
支援準備期間	28

現状

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 4 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 5% の量から始まり、毎週 5% ずつ発注可能量が増加する)

- 旧ラインは 90 日後から再開する

冗長性強化策

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 4 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 5% の量から始まり, 毎週 5% ずつ発注可能量が増加する)
- 旧ラインは 90 日後から再開する
- 企業 B は現状の 2 倍の在庫を持つ

頑健性強化

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 震災時, 企業 C2(途絶していない方) では通常の 1.2 倍まで生産可能
- 4 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 5% の量から始まり, 毎週 5% ずつ発注可能量が増加する)
- 規模の経済などを考慮し, 企業 C の部品価格が 10% 増加する
- 旧ラインは 90 日後から再開する

柔軟性強化

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 1 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 10% の量から始まり, 毎週 10% ずつ発注可能量が増加する)
- 旧ラインは 90 日後から再開する

以上の条件のもとで, それぞれの強化策を講じた時の最終製品の利益が以下の図 6.3.2 である。

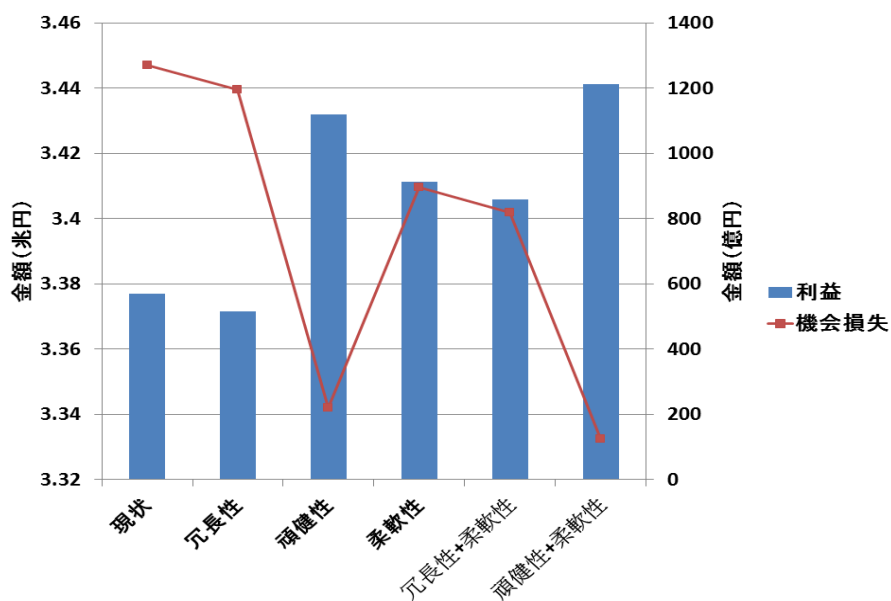


図 6.3.2: 外部環境 2 のシミュレーション結果

図 6.3.2 から分かるように，外部環境 2 の結果は外部環境 1 の結果とほぼ同じ形状であり，従って SC 強化策においても柔軟性強化策と頑健性強化策の組み合わせが一番よい強化策であると判断できる。

6.3.3 外部環境 3

外部環境 3 のその企業の設備がないと製造できないの条件設定は以下のとおりである。外部環境 3 のパラメータは表 6.3.3 のように設定する。

表 6.3.3: 外部環境 1 のパラメータ設定

平均需要	5500
需要の標準偏差	800
企業 A の製造費	1850000
企業 A の販売価格	2500000
安全係数 A	1.65
企業 A の補充リードタイム	2
企業 A の発注費用	3000
企業 A の在庫コスト	500
企業 B の製造費	150000
企業 B の販売価格	300000
安全係数 B	1.65
企業 B の補充リードタイム	2
企業の B 発注費用	3000
企業 B の在庫コスト	300
企業 C の製造費	30000
企業 C の販売価格	100000
安全係数 C	1.65
企業 C の補充リードタイム	2
企業の C 発注費用	3000
企業 C の在庫コスト	100
企業 C の買取り価格	20000
途絶期間	90

このケースでは企業 C の設備がないと製造できないとしているため、柔軟性強化の対策はできないものとする。ただ、今回のケースではその企業の設備がないと製造できないとしているので本来は頑健性強化策もできないはずだが、部材メーカーと協力して生産拠点を増やすという選択肢の可能性を考えるために頑健性強化も加えた。

現状

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 4 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 5% の量から始まり、毎週 5% ずつ発注可能量が増加する)
- 旧ラインは 90 日後から再開する

冗長性強化策

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 4 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 5% の量から始まり, 毎週 5% ずつ発注可能量が増加する)
- 旧ラインは 90 日後から再開する
- 企業 B は現状の 2 倍の在庫を持つ

頑健性強化

- 地震発生と同時に企業 C の在庫が 0 になる
- 震災時, 企業 C2(途絶していない方) では通常の 1.2 倍まで生産可能
- 4 週間後から他の調達先への発注可能 (ただし元の発注量の 5% の量から始まり, 毎週 5% ずつ発注可能量が増加する)
- 規模の経済などを考慮し, 企業 C の部品価格が 10% 増加する
- 旧ラインは 90 日後から再開する

以上の条件のもとで, それぞれの対策を講じた最終利益を図 6.3.3 に示す。

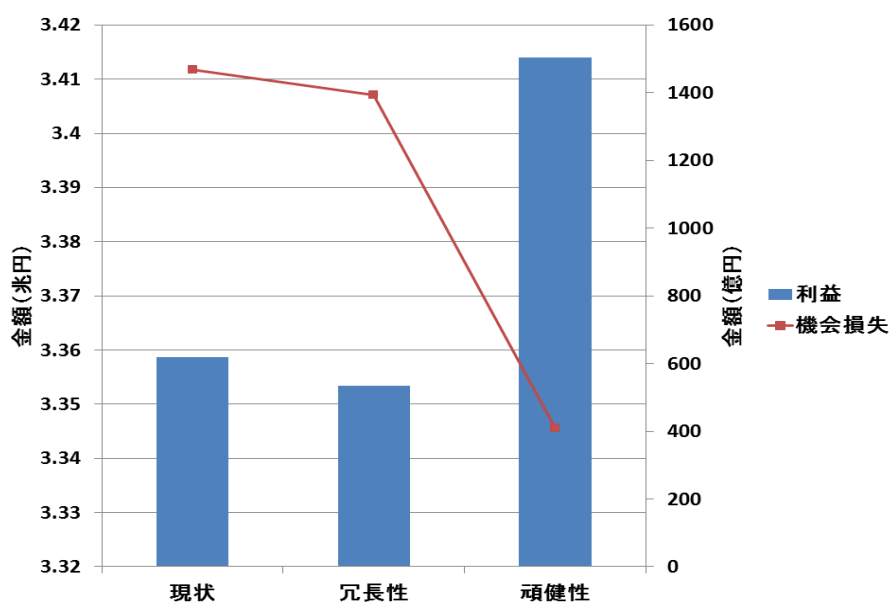


図 6.3.3: 外部環境 3 のシミュレーション結果

外部環境 3 でもほぼ同じ結果が得られ, 各強化策における利益および機会損失とも大きな違いは見られなかった。ただ, 図 6.3.3 からわかるように, 頑健性強化策の機会損失は

外部環境1と2の時に比べて2億円増えている。これはダイヤモンド型SCの存在を発見した際、すなわち川上(企業C)に部品供給会社が1社しか存在しないような外部環境のもとでは、その会社の製造拠点を2か所に増やすなど、2社購買と同じような供給体制を整える必要があることを意味する。

なお、外部環境3の場合には柔軟性強化ができないので、柔軟性と冗長性、柔軟性と頑健性の2つの組み合わせのシミュレーションは行わなかった。

6.4 終わり

本章では、SCレジリエンスの構成要素である冗長性、頑健性、および柔軟性の3つの強化策と柔軟性とその他の2つの強化策との組み合わせを加えた計5つの強化策を提案し、それによるSC途絶リスクへのマネジメント効果を考察した。

実験では5つの強化策を、外部に完全代替企業がある外部環境1、外部に代替企業があるが技術がない外部環境2、外部に代替企業がない外部環境3の計3つの外部環境に適用し、5×365日を1つのシミュレーション期間としてそれぞれ10回のシミュレーションを行った。その結果、柔軟性強化策と頑健性強化策の組み合わせが最も有効であることが分かった。また、外部環境3においては頑健性強化策がほかの強化策より1割以上利益を増やすことができ、ダイヤモンドSCの存在が確認できた場合には、生産施設を分散させるなど、2社購買同様な途絶リスクマネジメントの方策を取ることが有効であることが分かった。

第7章 結論

本研究では、SC 途絶リスク対策を構築するために、SC 全体を対象に、途絶リスクに対する評価、及びマネジメント手法の開発に関する体系的な研究を行った。各章で得られた成果をまとめ、今後の課題を提示することが本章の目的であり、本研究の結論とする。

7.1 前章までの総括

第2章から第7章までの成果を以下にまとめる。

第2章では、SCDRMに関する文献研究を行い、リスク、サプライチェーンリスク (SCR)、及びSCDRMに関する研究について、その特徴を抽出し、体系化を行っている。本章では、文献レビューを実施し、リスク、SCR、SCDRMの3つのカテゴリーに分け、その定義や分類の特徴を抽出し、体系化を行った。そのうち、特にSCRについては内部、外部、および環境の3つの大分類のもとで、さらに2段階の中分類を加えて独自の分類体系を提案し、既存研究との対応関係も示した。

第3章では、途絶リスクによるSC業務停止期間を推定するシミュレーションモデルを構築している。本章ではシナリオ地震を発生させ、東京近辺、太平洋、及び全国に生産施設を配置した3タイプのSCの業務停止期間を其々に算出する。そして、SCの発注方式と連結性が業務停止期間への影響を考察するため、「定期定量の直列型SC」、「定量発注の直列型SC」と「定量発注の並列型SC」の3つケースを分けてシミュレーション実験を行い、その結果、全国に生産施設が配置されている並列型SCは、直列型SCに比べて業務停止期間が短いことを示している。

第4章では、途絶リスクに対処するための方法としてSCレジリエンスを体系化することを目的とし、発表されているSCレジリエンスに関する論文100本に対してテキストマイニングを実施し、2階層からなるSCレジリエンスの構造モデル、即ち、俊敏性、柔軟性、冗長性、及び堅牢性を第1階層とし、見える化、速度、SCの情報の共有化、及びSCの協調性を俊敏性の構成要素、SCの協調性、分散型生産、速度、遅延差別化、及び社員へのクロストレーニングを柔軟性の構成要素、SCの協調性、速度、多様性、及びバックアップシステムを冗長性の構成要素、速度、分散型生産、自己組織化、そしてSCの情報共有化を堅牢性の構成要素とした2段階のSCレジリエンスの構造モデルを構築している。

第5章では、SCレジリエンスの構成要素である俊敏性を強化するためにSCにおける物流経路と情報が見える化するシステムを構築し、3段階からなるSCを対象に、ロールプレーによる実験を行った。その結果、受発注の経験がない被験者でも本研究で開発したSC見える化システムを用いることにより、調達先や調達先の調達先が被災したために発

生ずる損失を最小限に抑えることができ、SC見える化を用いない時に比べて利益を増やすことができたことを示している。特に、途絶先企業と直接繋がっていない企業も利益を増やすことができたことは、川上と川下双方向の見える化の必要性を強くサポートするものであり、間接被害を防ぐためには調達先の調達先だけでなく、販売先の情報も把握する必要があることを示唆している。

第6章では、SCレジリエンスの構成要素である柔軟性、冗長性、及び堅牢性の強化策と柔軟性とその他の2つの強化策との組み合わせを加えた計5つの強化策に対してシミュレーションを行い、システムの平均利益を用いてSC途絶時の効果を分析している。その結果、柔軟性強化策と頑健性強化策の組み合わせが最も有効であることが分かり、代替企業が存在しない外部環境においては頑健性強化策がほかの強化策より1割以上利益を増やすことができ、ダイヤモンドSCの存在が確認できた場合には、生産施設を分散させるなど、2社購買同様な途絶リスクマネジメントの方策を取ることが有効であることを示している。

7.2 今後の課題

今後の課題を以下にまとめる。

(1) 先ず、SCDRMの概念や手法を体系的にまとめ、SCDRMの理論体系を作り上げる必要があること、また、製造業だけでなく、販売、流通、輸送、倉庫など、SCのプロセス各段階を縦断的に、しかも統合的に調査し、ベストプラクティスを増やしていく努力が必要であること、

(2) 提案した手法で得られるSC業務停止期間の定量化手法について、東日本大震災などの過去の震災における事業中断被害事例などにに基づき、妥当性を検討する必要がある。また、地震によるSCの業務停止期間の予測では、道路やライフラインなどの要素も検討する必要がある。例えば、震災時の道路網の交通機能低下による物流の途絶が発生し、それがSCに及ぼす影響を評価するモデルを開発する。

(3) 本研究で構築したSCレジリエンスの構造モデルには依然として著者の主観による部分がある。今後、より客観的にレジリエンスの構造を構築するためには、論文数を増やすこと、因果関係や相関係数を用いた分析が必要であり、mecabなど構文解析ソフトも活用しながら独自の分析ツールを開発することも1つの課題である。

(4) 見える化システムについては、需要予測と連携するシステムを開発することは今後の課題である。実験では、需要変動がある場合を仮定して行ったが、需要予測と連携できれば、需要変動によるリスクを回避することができる。また、見える化システムの汎用性と実用性を高め、中小零細企業に配布することは今後の課題である。

(3) SCDR 対策については、先ず、冗長性強化策、柔軟性強化策と頑健性強化策などの途絶リスク対策が平常時の企業経営に与える影響を検討する必要がある。次には、SC 依存型の企業の SCDR 対策を選定支援するツールを開発することは今後の課題である。また、途絶リスク対策を分析するには、ポートフォリオ、確率計画、ロバスト計画などのオペレーションズ・リサーチでの手法の適用は勿論のこと、IT 技術やその他固有技術も活用したい、日本の地政学的な環境にもマッチした SCDR 対策の開発が急務であることを取り上げると同時に、これらの研究を今後の課題にしたいと考えている。最後に、SC における環境や社会に与える影響を考慮し、製造工程、輸送方法を革新したり、SC 上の関連企業との協力体制を強化したりすることを通して持続可能な SC を構築し、ビジネスと社会・環境の利益の最大化を実現する方法は今後の課題である。

参考文献

- [1] 森泉沙蘭, 秋奉成, 曹海燕, 松川弘明: テキストマイニング技法によるサプライチェーンリスクドライバーの抽出, INFORMATION, Vol.14, No.6, pp. 1935-1945, 2011
- [2] 上山道生: リスクマネジメントのしくみ, 中央経済社, 2002
- [3] 経済産業省: 東日本大震災後の我が国製造業の動向, 2011 モノ作り白書, 第2章, 2011
- [4] 中央防災会議: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告, 平成23年9月
- [5] 中央防災会議: 平成27年版防災白書, 平成27年
- [6] 中央防災会議: 南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告), 平成25年3月18日
- [7] 内閣府: SIP 「レジリエントな防災・減災機能の強化」 研究開発計画書, 2015年5月21日
- [8] 経済産業省: 事業継続ガイドライン(第三版), 2013年
- [9] 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. 12-22, 2015
- [10] 鳥澤一晃, 吉田聡, 佐土原聡: サプライチェーンのBCPのための道路網被害予測と事業継続への影響評価, 日本地震工学会論文集, Vol. 14, No.2, pp. 84-103, 2014
- [11] 西川智, 福島誠一郎, 矢代晴実: サプライチェーン依存型企業の地震時業務停止期間短縮手法の確率論的リスク評価, 地域安全学会梗概集, Vol, 23, pp. 89-92, 2008
- [12] 機械振興協会経済研究所: わが国製造業におけるSCM及びBCPの実態に関する調査研究, 機械工業経済研究報告書, H17-6-5A, 機械振興協会経済研究所, 2006
- [13] IBM: よりスマートな未来のサプライチェーン, IBM Global Chief Supply Chain Officer Study, 2009
- [14] 曹徳弼, 秋奉成: サプライチェーンリスクマネジメント, 経営システム, Vol.19, No.6, pp. 237-243, 2010
- [15] 井上葉子: サプライチェーンリスクの同定アプローチに関する研究, 商学集志, Vol.82, No.1, pp. 45-60, 2012

- [16] 王曉華：リコールから見たサプライチェーンリスクマネジメント：自動車のリコールを中心に，生産管理, Vol.19 No.2, pp. 160-165, 2013
- [17] 経済産業省：サプライチェーンの復旧に向けた産業界の取組，東日本大震災後の産業実態緊急調査，2011
- [18] 増田貴司：東日本大震災は日本の製造業に何をもたらしたのか，経営センサー，2011年5月，pp. 10-16, 2011
- [19] 臼田光一，吉澤睦博：サプライチェーンの地震リスク評価システム，日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集，pp.266-267, 2007
- [20] 西川智，福島誠一郎，矢代晴実：サプライチェーンを考慮した地震時事業継続のためのリスク解析手法の提案，日本建築学会環境系論文集，Vol.73, No. 630, pp. 1053-1060, 2008
- [21] 福島誠一郎，矢代晴実，吉川弘道：供給量を考慮したサプライチェーンの業務停止期間に関する地震リスク解析，日本建築学会環境系論文集 Vol.75, No.655, pp. 853-860, 2010
- [22] 奈良岡浩二，藤川智，奥村俊彦：サプライチェーンを考慮した地震被害予測と簡易地震リスク評価，清水建設研究報告，No.87, pp. 11-18, 2010
- [23] 副島紀代，目黒公郎：サプライチェーンを考慮した地震時の復旧時間推定手法，土木学会第64回年次学術講演会，pp.387-388, 2009
- [24] Davidson, J.R., Payne, V.M. and Connor, K.M.: Trauma, Resilience and Saliostasis: Effects of Treatment in Post-traumatic Stress Disorder. *Int Clin Psychopharmacol*, Vol. 20, pp.43-48, 2005
- [25] Luthar S.S., Cicchetti, B. and Becker, B.: The Construct of Resilience: A Critical Evaluation and Guidelines for Future Work, *Child Development*, Vol. 21, No.7, pp.543-562, 2000
- [26] Wagnild, G. M. and Young, H. M. : Development and Psychometric evaluation of the resilience scale, *Journal of Nursing Measurement*, Vol.1, No.2, pp.165-178, 1993
- [27] WEF: 2013年度グローバルリスク報告書，2013
- [28] 経済産業省：平成25年度ものづくり基盤技術の振興施策(ものづくり白書)，2014年
- [29] 丸山宏：レジリエンス科学，日本経営工学会平成25年度春季大会予稿集(基調講演)，2013
- [30] Leena, I. and John, C.: Case study: Seven Shocks and Finland, *Innovation and Supply Chain Management*, Vol.7, No.3, pp.112-124, 2013

- [31] Christopher, M. and Peck, H.: The Five Principles of Supply Chain Resilience, Logistics Europe, Vol.12, No.1, pp.16-21, 2004
- [32] Rice, J.B. and Caniato, F. : Building a Secure and Resilient Supply Network, Supply Chain Management Review Vol.7, No.5, pp. 274-297, 2003
- [33] Sheffi, Y. :Building a Resilient Supply Chain, Harvard Business Review, Vol.1, No.8, pp.1-4, 2005
- [34] 統計数理研究所：新領域融合プロジェクト システムズ・レジリエンス, <http://systemsresilience.org/> (2015年12月10日)
- [35] Christopher, M. and Lee, H.: Mitigating Supply Chain risk through Improved Confidence, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 34 Iss: 5, pp.388-396, 2004
- [36] Sheffi, Y. : The Resilient Enterprise ? Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage , The MIT Press, Cambridge, 2005
- [37] 根本敏則：見える化による交通インフラ, ロジスティクス, サプライチェーンの管理, 運輸と経済, Vol.71, No.8, pp.90-92, 2011
- [38] 小林幸一：グローバルサプライチェーン可視化の現状と課題, NRI パブリックマネジメントレビュー, Vol.98, pp.6-11, 2011
- [39] 高井英造：災害からのサプライチェーン復元力と可視化の役割, 流通ネットワークング, Vol.276, pp.24-28, 2013
- [40] IBM: Blueprint for Supply Chain Visibility, IBM Institute for Business Value, 2007
- [41] Andy Neely, Mike Gregory, Ken P.: Performance Measurement System Design: A Literature Review and Research Agenda, International Journal of Operations & Production Management, Vol.25, Iss: 12, pp.1228-1263, 2005
- [42] Lee, H.L, Padmanabhan, V. and Whang, S.: The Bullwhip Effect in Supply Chains¹, Sloan Management Review, Vol. 38, No. 3, pp. 93-102, 1997 Clark, T.H and JH Hammond: Reengineering Channel Reordering Processes to Improve Total Supply Chain Performance
- [43] 水野浩孝, 森山弘海, 羽田隆男：最終需要情報を共有するサプライチェーンにおいて共有情報伝達の遅れがブルウィップ効果抑制に及ぼす影響の分析, 日本経営工学会論文誌, Vol.65, N0.4, 2015
- [44] 手塚大, 宍戸政則, 菅居貞幸, 荒木協和：縮小グラフ画像を用いた在庫推移可視化による異常在庫の早期検出支援システム, 経営情報学会全国研究発表大会要旨集, 2008f, pp. 109-109, 2008

- [45] シェツフィ, Y. 著, 渡辺研司, 黄野吉博 訳 : 「企業のレジリエンシーと事業継続マネジメント」, 日刊工業新聞社, 2007
- [46] Knight, R. F. and Pretty, D. J. : The Impact of Catastrophes on Shareholder Value, The Oxford Executive Research Briefings, Templeton College, Oxford, 1996
- [47] Bernstein, P. : Against the Gods: The Remarkable Story of Risk , Wiley , 1996
- [48] ピーター, B. 著, 青山護 訳 : 「リスクー神々への反逆」, 日本経済新聞社, 1998
- [49] Khan, O. and Burnes, B. : Risk and supply chain management: creating a research agenda, The International Journal of Logistics Management, Vol.18, No.2, pp.197-216, 2007
- [50] Wagner, S. M. and Bode, C. : An Empirical Examination of Supply Chain Performance along Several Dimensions of Risk, Journal of Business Logistics, Vol.29, No.1, pp. 307-325, 2006
- [51] Beaver, W. H. : Financial Ratios as Predictors of Failure, Journal of Accounting Research, Vol.4, No.3, pp. 71-111, 1966
- [52] Cox, D. F. : Risk Taking and Information Handling in Consumer Behavior, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1967
- [53] Manuj, I. and Mentzer, J. T. : Global Supply Chain Risk Management, Journal of Business Logistics Vol.29, No.1, pp. 133-155, 2008
- [54] Harland, C., Brenchley, R. and Walker, H. : Risk in Supply Network, Journal of Purchasing and Supply Management, Vol.9, No.2, pp. 51-62, 2003
- [55] Kersten, W., Blecker, T. and Ringle, C. M. : Managing the Future Supply Chain, Josef Eul Verlag GmbH, 2012
- [56] Mitchell, V. W. : Organizational Risk Perception and Reduction: a literature Review, British Journal of Management, Vol.6, pp. 115-133, 1995
- [57] 阪口祐介 : リスクの社会的形成要因に関する考察, 大阪大学大学院人間科学研究紀要, Vol.37, pp.1-18, 2011
- [58] ベック, U. 著, 東廉, 伊藤美登里 訳 : 「危険社会」, 法政大学出版局, 1998
- [59] Waring, A. E. and Glendon, A. I. : Managing Risk, Thomson Business Press, 1998
- [60] Williams, Jr., Smith, L. and Young, C. : Risk Management and Insurance, McGraw-Hill , 1995

- [61] Schwing, R. C. and Albers, W. A. : How Safe is Safe Enough, Plenum Press, 1980
- [62] Kraljic, P. : Purchasing Must Become Supply Management, Harvard Business Review, No.83509, pp. 109-117, 1983
- [63] Elloitt-Shircore, T. I. and Steele, P. T. : Procurement Positioning Overview, Purchasing and Supply Management, December, pp. 23-24, 1985
- [64] Min, H. and Galle, W. P. : International Purchasing Strategies of Multinational US Firms, International Journal of Purchasing and Materials Management, Vol.27, No.3, 8-18, 1991
- [65] Smeltzer, L. R. and Siferd, S. P. : Proactive Supply Management: The Management of Risk, International Journal of Purchasing and Materials Management, Vol.34, No.4, 38-45, 1998
- [66] Morris, M. H. and Calantone R. G. : Redefining the Purchasing Function: an Entrepreneurial Perspective, International Journal of Purchasing and Materials Management, Vol.27, No.4, pp. 2-9, 1991
- [67] Bowen, F. E., Cousins, P. D. and Lamming, R. C. : The Role of Risk in Environment Related Supplier Initiatives, Proc. of the 7th Annual IPSERA Conference, April , London, pp. 58-68, 1998
- [68] Lonsdale, C. : Effectively Managing Vertical Supply Relationships: a Risk Management Model for Outsourcing, Supply Chain Management: An International Journal, Vol.4, No.4, pp. 176-183, 1999
- [69] Brindley, C. : Supply Chain Risk , Ashgate, 2004
- [70] Juttner, U., Peck, H. and Christopher, M. : Supply Chain Risk Management: Outlining an Agenda for Future Research, International Journal of Logistics Research and Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management, Vol.6, No.4, pp. 197-210, 2003
- [71] March, J. G. and Shapira, Z. : Managerial Perspectives on Risk and Risk Taking, Management Science, Vol.33 No.11, pp. 1404-1418, 1987
- [72] Zsidisin, G. A. : Managerial Perceptions of Supply Risk, Journal of Supply Chain Management, Vol.39, No.4, pp. 14-22, 2003
- [73] Manuj, I. and Mentzer, J. T. : Global Supply Chain Risk Management, Journal of Business Logistics Vol.29, No.1, pp. 133-155, 2008

- [74] Pfohl, H., Kohler, H. and Thomas, D.: State of the Art in Supply Chain Risk Management Research: Empirical and Conceptual Findings and a Roadmap for the Implementation in Practice, *Logistics Research*, Vol.2, No.1, pp. 33-44, 2010
- [75] Ghadge, A., Dani, R. and Kalawsky, R. : Supply Chain Risk Management: Present and Future Scope, *International Journal of Logistics Management*, Vol.23, No.3, pp. 313-339, 2012
- [76] Cranfield School of Management : Creating Resilient Supply Chains, DFT Publications, Wetherby, 2003
- [77] Tang, O. and Musa, N. S. : Identifying Risk Issues and Research Advancements in Supply Chain Risk Management, *International Journal of Production Economics*, Vol.133, No.1, pp. 25-34, 2001
- [78] Moeinzadeh, P. and Hajfathaliha, A. : A Combined Fuzzy Decision Making Approach to Supply Chain Risk Assessment, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No.60, pp. 519-535, 2009
- [79] Druker, P. F. : The Practice of Management, Harper Business, 2006
- [80] Chopra, S. and Sodhi, M. S. : Managing Risk to Avoid Supply Chain Breakdown, *MIT Sloan Management Review*, Vol.46 No.1, pp. 53-62, 2004
- [81] ハンドフィールド, R. B., マコーマック, K. 著, 東京海上日動リスクコンサルティングビジネスリスク事業部訳:「サプライチェーンリスクマネジメント入門:レジリエンスを高めるの方法」, 日科技連, 2010
- [82] Davis, T.:Effective Supply Chain Management, *Sloan Management Review*, Summer, pp. 35-46, 1993
- [83] Pearson, J. N., Carter, J. R. and Peng, L. : Alliances Logistics Barriers and Strategic Actions in the People's Republic Chain, *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol.34, No.2, pp. 27-36, 1998
- [84] Mason-Jone, R. and Towill, D. R. : Shrinking the Supply Chain Uncertainty Circle, *Control*, September, pp. 17-22, 1998
- [85] Svensson, G. : A Conceptual Framework for the Analysis of Vulnerability in Supply Chains, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol.30, No.9, pp. 731-750, 2000
- [86] Gaonkar, R. and Viswanadham, N. : A Conceptual and Analytical Framework for the Management of Risk in Supply Chains, *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2699-2704, 2004

- [87] Kleindorfer, P. R. and Saad, G. H. : Managing Disruption Risks in Supply Chains, *Production and Operations Management*, Vol.14, No.1, pp. 53-68, 2005
- [88] Tang, C. and Tomlin, B. : The Power of Flexibility for Mitigating Supply Chain Risks , *International Journal of Production Economics*, Vol.116, pp. 12-27, 2008
- [89] Oke, A. and Gopalakrishnan, M. : Managing Disruptions in Supply Chain: A Case Study of a Retail Supply Chain, *International Journal of Production Economics*, Vol.118, No.1, pp.168 -174, 2009
- [90] あずさ監査法人 (HP) : ナレッジ・ビジネスキーワード・オペレーショナルリスク, http://www.kpmg.com/jp/ja/knowledge/glossary/pages/r_or.aspx (2015年12月10日)
- [91] Rao, S. and Goldsby, T. G.:Supply Chain Risks a Review and Typology, *International Journal of Logistics Management*, Vol.20, No.1, pp. 97-123, 2009
- [92] Sinha, P. R., Whitman, L. E. and Malzahn, D. : Methodology to Mitigate Supplier Risk in an Aerospace Supply Chain, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol.9, No.2, pp. 154-168, 2004
- [93] Knemeyer, A. M., Zimm, W. and Eroglu, C. : Proactive Planning for Catastrophic Events in Supply Chains, *Journal of Operations Management*, Vol.27, No.2, pp. 141-153, 2009
- [94] Neiger, D., Rotara, K. and Churilov, L. : Supply Chain Risk Identification with Value Focused Process Engineering, *Journal of Operation Management*, Vol.27, No.2, pp. 154-168, 2009
- [95] Hallikas, J., Virolainen, V. M. and Tuominen, M. : Risk Analysis and Assessment in Network Environments A Dyadic Case Study, *International Journal of Production Economics* , Vol.78, No.1, pp. pp.45-55, 2002
- [96] Norrman, A. and Matsypura, D. : Ericsson's Proactive Supply Chain Risk Management Approach after a Serious Sub-Supplier Accident, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.34, No.5, pp. 434-456, 2004
- [97] Simatupang, T. M. and Sridharan. R.:The Collaborative Supply Chain , *International Journal of Logistics Management*, Vol.13, No.1, pp. 15-30, 2002
- [98] Faisal, M. N., Banwet, D. K. and Shankar, R. : Supply Chain Risk Mitigation: Modeling the Enablers , *Business Process Management Journal*, Vol.12, No.4,pp. 535-552, 2006

- [99] Tang, C. S. : Perspectives in Supply Chain Risk Management , International Journal of Production Economics, Vol.9, pp. 51-62, 2006
- [100] Narasimhan, R. and Talluri, S : Perspectives on Risk Management in Supply Chains, Journal of Operations Management, Vol.27, No.2, pp. 14-18 , 2009
- [101] Smith, R. : Operational Capabilities for the Resilient Supply Chain, Supply Chain Practice, Vol.6 No.2, pp. 24-35, 2004
- [102] Sheffi, Y. and Rice, J. B. : A Supply Chain View of the Resilient Enterprise, Sloan Management Review, Vol.47, No.1, pp. 41-48,2005
- [103] Ponomarov, S. and Holcomb, M. : Understanding the Concept of Supply Chain Resilience, The International Journal of Logistics Management, Vol.20, No.1, pp. 124-143, 2009
- [104] Juttner, U. and Maklan, S. : Supply Chain Resilience in the Global Financial Crisis: an Empirical Study, Supply Chain Management: An International Journal, Vol.16, No.4, pp. 246 -259,2011
- [105] Cucchiella, F. and Gastaldi, M. : Risk Management in Supply Chain a Real Option Approach, Journal of Manufacturing Technology Management, Vol.17, No.7, pp. 700-720, 2006
- [106] Meixell, M. J. and Gargeya, V. B. : Global supply chain design: A literature review and critique, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Vol.41, No.6, pp. 531-550, 2005
- [107] Singhal, P., Agarwal, G. and Mittal, M. L. : Supply Chain Risk Management: Review Classification and Future Research Directions, Journal of Business Science and Applied Management, Vol.6, No.3, pp. 16-41, 2011
- [108] Johnson, E. : Learning from Toys: Lessons in Managing Supply Chain Risk from the Toy Industry, California Management Review, Vol.43, No.3, pp.106-124, 2001
- [109] Wu, T. and Blackhurst, J. : Managing Supply Chain Risk and Vulnerability: Tools and Methods for Supply Chain Decision Makers, London : Springer London, 2009
- [110] Chan, F. T. S. and Kumar, N. : Global Supplier Development Considering Risk Factors Using Fuzzy Extended AHP-Based Approach, OMEGA, Vol.35, No.4, 417-431, 2007
- [111] Levary, R. R. : Using the Analytic Hierarchy Process to Rank Foreign Suppliers Based on Supply Risks, Computer and Industrial Engineering, Vol.55, No.2, pp. 535-542,2008

- [112] Han, M. and Chen, J. : Managing Operational Risk in Supply Chain, Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp. 4919-4922, 2007
- [113] Datta,P.P., Christopher,M., and Allen,P. : Agent-Based Modelling of Complex Production/Distribution Systems to Improve Resilience, International Journal of Logistics Research and Applications, Vol.10, No.3, pp. 187-203, 2007
- [114] Sohn, S. Y., and Lim, Y.:The Effect of Forecasting and Information Sharing in SCM for Multi-Generation Products, European Journal of Operational Research, Vol.186, No.1, 276-287, 2007
- [115] Colicchia, D., Dallari, F. and Melacini, M. : Increasing Supply Chain Resilience in a Global Sourcing Context, Production Planning & Control, Vol.21 No.7, pp. 680-694, 2010
- [116] Li, S. X., Huang, Z., Zhu, J. and Chau, P. Y. K. : Cooperative Advertising, Game Theory and Manufacturer Retailer Supply Chains, Moega, Vol.30, No.5, pp. 347-357, 2002
- [117] Hennet, J. C. and Arda, Y.:Supply Chain Coordination: A Game-Theory Approach, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.21, No.3, pp. 399-405, 2008
- [118] Tomlin, B. : On the Value of Mitigation and Contingency Strategies for Managing Supply Chain Disruption Risks, Management Science, Vol.52, No.5, pp. 639-657, 2006
- [119] Deleris, L. A., Elkins, D. and Pate-Cornell, M. E. : Analyzing Losses from Hazard Exposure: a Conservative Probabilistic Estimate Using Supply Chain Risk Simulation, Simulation Conference,Vol.2, pp. 1384-1391, 2004
- [120] 司宏俊, 翠川三郎, “断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式”, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp. 63-70 (1999)
- [121] 防災科学研究所 : J-SHIS 地震ハザードステーション <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2015年12月10日)
- [122] 翠川三郎, 藤本一雄, 松村郁栄, “計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係”, 地域安全学会論文集, Vol.1, pp.51-56 (1999)
- [123] 鹿島建設技術研究所, 永田茂, “ライフラインの復旧最適化による企業の事業継続性向上に関する研究”, 文部科学省委託研究, 首都直下地震防災・減災特別プロジェクト (平成19年~平成23年)

レジリエンス

- [124] Muckstadt, J. A., Murray, H. D., Rappold, J. A. and Collins, D. E. : "Guidelines for Collaborative Supply Chain System Design and Operation", Information Systems Frontiers, Vol.3, No.4, pp.427-453 (2001)
- [125] Fiksel, J. :Sustainability and Resilience : Toward a Systems Approach, Sustainability Science Practice and Policy, Vol.2, No.3, pp.14-21 (2006)
- [126] Lee, H. L. :The Triple-A Supply Chain, Harvard Business Review, Vol. 82, No. 10, pp. 102-112(2004)
- [127] Deloitte Consulting LLP : Supply Chain Resilience : A Risk Intelligent approach to managing global supply chains (2012)
- [128] 日本経済新聞, トヨタ災害時の情報網, 2015年3月9日
- [129] 黄野吉博 : 事業継続マネジメント (BCM) の考え方, 空気清浄, Vol.44, No.5, pp.1-5 (2007)
- [130] APEC : 中小企業 BCP 事業継続計画ガイドブック, 2013
- [131] 橋本幸曜 : JISQ22301 に基づく事業継続マネジメントシステム (BCMS) の構築について, TRC EYE, Vol. 289, pp.1-14 (2013)
- [132] 日本規格協会 : 社会セキュリティー事業継続マネジメントシステムー要求事項, 2013
- [133] 渡辺幸三 : 業務システムモデリング練習帳, 日経 BP 社, 2013

付録A テキストマイニング分析用の論文リスト

A.1 予備分析用の論文リスト

1. 丸山宏：レジリエンス科学，日本経営工学会平成 25 年度春季大会予稿集（基調講演），2013
2. 世界経済フォーラム：2013 年度グローバルリスク報告書，2013
3. 菊池博：重要インフラにおけるレジリエンス・マネジメントについて，公益財団法人防衛基盤整備協会，報告書番号：BSK 第 25-5 号，2013
4. 産業競争力懇談会 (COCN)：レジリエントエコノミーの構築，2012 年度最終報告書，2013
5. 藤井聡，久米功一，松永明，中野剛志：経済の強靱性 (Economic Resilience) に関する研究の展望，RIETI Policy Discussion Paper Series 12-P-008，2012
6. 日立製作所：サイバー攻撃動向等の環境変化を踏まえた重要インフラのシステムのけんろう化に関する調査，平成 22 年度内閣官房情報セキュリティセンター委託調査報告書，2012
7. 塩崎由人，加藤孝明：自然環境と関連分野におけるレジリエンス、脆弱性の定義について，生産研究 Vol.64, No.4, pp.643-646, 2012
8. 藤井聡，宮本卓次郎，高橋重雄，大脇崇：“国土強靱化に向けた海上輸送の課題と役割”，港湾，vol.90, No.8, pp.5-14, 2013
9. 東京大学大学院工学系研究科緊急工学ビジョン・ワーキンググループ：震災後の工学は何をめざすのか，報告書，2012
10. 土屋哲，多々納裕一，岡田憲夫：災害時のライフライン途絶に対する企業生産レジリエンスに関する考察，一般社団法人レジリエンス協会 HP(http://www1.gifu-u.ac.jp/ceip/iDRiM/forum01/idrim06_forum01_tsuchiya_paper.pdf，2015 年 12 月 2 日アクセス)，2010

A.2 本分析用の論文リスト

1. Abe, M. and Ye, L.: Building Resilient Supply Chains against Natural Disasters: The Cases of Japan and Thailand, *Global Business Review*, Vol.14, No. 4, pp.567-586, 2013
2. Azevedo, S., Kannan, G., Carvalho, H. and Cruz-Machado, V. G.: Resilient Index to Assess the Greenness and Resilience of the Automotive Supply Chain, *Discussion Papers on Business and Economics* No.8, pp. 13-14, 2011
3. Barroso, A. P., Machado, V. C. and Machado, V. H.: Supply Chain Resilience Using the Mapping Approach, In P. Li (Ed.), *Supply Chain Management*, pp.161-184, 2011
4. Barroso, A. P., Machado, V. H., Barros, A. R. and Machado, V. C.: Toward a Resilient Supply Chain with Supply Disturbances, In 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 245-249, 2010
5. Barroso, A. P., Machado, V. H., and Machado, V. C.: The Resilience Paradigm in the Supply Chain Management: A Case Study, In 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 928-932, 2011
6. Bhamra, R., Dani, S. and Burnard, K.: Resilience: the Concept, a Literature Review and Future Directions, *International Journal of Production Research*, Vol. 49, No.18, pp. 5375-5393, 2011
7. Blackhurst, J., Craighead, C. W., Elkins, D. and Handfield, R. B. An Empirically Derived Agenda of Critical Research Issues for Managing Supply-chain Disruptions. *International Journal of Production Research*, Vol. 43, No. 19, pp. 4067-4081, 2005
8. Blackhurst, J., Dunn, K. S., and Craighead, C. W.: An Empirically Derived Framework of Global Supply Resiliency, *Journal of Business Logistics*, Vol. 32, No.4, pp. 374-391, 2011
9. Bloomfield, R. E.: Resilient to the Unexpected, *IEEE Security & Privacy Magazine*, Vol. 9, No. 3, pp. 3-4, 2011
10. Briano, E., Caballini, C., and Revetria, R.: Literature Review about Supply Chain Vulnerability and Resiliency, In 8th WSEAS International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING, pp. 191-197, 2009
11. Cabral, I.: An Information Model for Lean, Agile, Resilient and Green Supply Chain Management, *Dissertacao para a obtencao de Grau de Mestre em Engenharia e Gestao Industrial*, Faculdade de Ciencias e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011

12. Cabral, I., and Espadinha-Cruz, P.: Decision-Making Models for Interoperable Lean, Agile, Resilient and Green Supply Chains, In Proceeding of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, pp. 1-6, 2011
13. Cabral, I., Grilo, A., and Cruz-Machado, V.: A Decision-making Model for Lean, Agile, Resilient and Green Supply Chain Management. International Journal of Production Research, Vol.50, ISS.17, pp, 4830-4845, 2012
14. Cabral, I., Grilo, A., Leal, R. P., and Machado, V. C. Modelling Lean , Agile , Resilient , and Green Supply Chain Management. In Information Technology Interfaces (ITI), Proceedings of the ITI 2011 33rd International Conference, pp. 365-370, 2011
15. Carvalho, H., Azevedo, S. G., and Cruz-Machado, V.: Agile and Resilient Approaches to Supply Chain Management: Influence on Performance and Competitiveness, Logistics Research, Vol. 4, Iss.1-2, pp. 49-62, 2012
16. Carvalho, H., Barroso, A. P., Machado, V. H., Azevedo, S., and Cruz-Machado, V.: Supply Chain Redesign for Resilience Using Simulation, Computers & Industrial Engineering, Vo.62, No. 1, pp. 329-341, 2012
17. Carvalho, H. and Cruz-Machado, V.:Integrating Lean , Agile , Resilience and Green Paradigms in Supply Chain, In P. Li (Ed.), Supply Chain Management, pp.27-48, 2011
18. Carvalho, H., Cruz-Machado, V., and Tavares, J. G.: A Mapping Framework for Assessing Supply Chain Resilience, International Journal of Logistics Systems and Management, Vol.12, No.3, pp. 354-373, 2012
19. Ceryno, P. S., and Scavarda, L. F.: Supply Chain Risk Management?: A Content Analysis Approach, International Journal of Industrial Engineering and Management, Vol.4, Iss3, pp. 141-149, 2013
20. Chowdhury, M., Dewan, N., and Quaddus, M.:Supply Chain Resilience To Mitigate Disruptions: A QFD Approach, Paper presented at the Pacific Asia Conference on Information Systems, Ho Chi Minh city, Vietnam, 2012
21. Christopher, B. M., and Rutherford, C.: Creating Supply Chain Resilience Through Agile Six Sigma, CriticalEYE,June - August, pp. 24-28, 2004
22. Christopher, M.: Creating Resilient Supply Chains, Advantage, Vol.11, pp. 18-19, 2004
23. Christopher, M.,and Peck, H.: Building the Resilient Supply Chain, International Journal of Logistics Management, Vol.15, Iss.2, pp. 1-13,2004

24. Colicchia, C., and Strozzi, F. : Supply Chain Risk Management: a New Methodology for a Systematic Literature Review, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 403-418, 2012
25. Comfort, L. K., Sungu, Y., Johnson, D., and Dunn, M.: Complex Systems in Crisis: Anticipation and Resilience in Dynamic Environments. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, Vol. 9, No. 3, 144-158, 2001
26. Conference, I. Q.:Resilience of Automotive Sector: A Case Study, In 4 th International Quality Conference , pp. 89-104, 2010 Craighead, C. W., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M. J. and Handfield, R. B.: The Severity of Supply Chain Disruptions: Design Characteristics and Mitigation Capabilities, *Decision Sciences*, Vol.38, Iss.1, pp. 131-156, 2007
27. Cudahy, B. G. C., George, M. O., Godfrey, G. R. and Rollman, M. J.: Preparing for the Unpredictable, *The Journal of High-Performance Business*, No.1, pp. 1-10, 2012
28. Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E. and Webb, J.: A place-based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters, *Global Environmental Change*, Vol. 18, No.4, pp. 598-606, 2008
29. Dalziell, E. P. and Mcmanus, S. T.: Resilience , Vulnerability , and Adaptive Capacity: Implications for System Performance, *Proc., Int. Forum for Engineering Decision Making (IFED)*, Switzerland, 2004
30. Deloitte Consulting: Supply Chain Resilience A Risk Intelligent Approach to Managing Global Supply Chains, (HP:www.deloitte.com/us/supplychainresilience, 2015年11月30日アクセス), 2012
31. Disraelly, D., Lowtan, D. and Lensing, R.: Supply Chain Response to Terrorism?: Creating Resilient and Secure Supply Chains, *Interim Report of Progress and Learnings August 8, 2003*, pp. 1-59, 2003
32. Edwards, C.: Resilient Nation, DEMOS, 2007
33. Espadinha-Cruz, P., Grilo, A., Puga-Leal, R. and Cruz-Machado, V.: A Model for Evaluating Lean, Agile, Resilient and Green Practices Interoperability in Supply Chains, In 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1209-1213, 2011
34. Falasca, M., Zobel, C., and Cook, D. : A Decision Support Framework to Assess Supply Chain Resilience, In Process of the 5th international ISCRAM Conference, pp. 596-605, 2008

35. Feliks, L. A. B. J.: Multi-dimensional Concept of Supply Chain Resilience, In CLC 2012: Carpathian Logistics Congress, pp.33- 40, 2012
36. Fiksel, J.: Designing Resilient, Sustainable Systems, Environmental Science & Technology, Vol. 37, Iss. 23, 5330-53309, 2003
37. Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., and Walker, B.: Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. Ambio, Vol. 31, No. 5, pp. 437-440, 2002
38. Goble, G., and President, V. : Resilient infrastructure: Improving Your Business Resilience, IBM Global Services, September, pp. 1-19, 2002
39. Gould, J. E., Macharis, C. and Haasis, H. D.: Emergence of Security in Supply Chain Management Literature, Journal of Transportation Security, Vol. 3, No. 4, pp. 287-302, 2010
40. GRAKOVA, E., and KRAUSOVA, E.: Resilient Supply Chain Based on Adaptation, In Carpathian logistic congress, pp.7-11, 2012
41. Hamel, G. and Valikangas, L.: The Quest for Resilience, Harvard Business Review, Vol. 81, Iss.9, pp. 52- 63, 2003
42. Harwood, I., Humby, S., and Harwood, A. : On the Resilience of Corporate Social Responsibility, European Management Journal, Vol. 29, Iss. 4, pp. 283-290, 2011
43. Hawkins, D. E.: Supply Chain Vulnerability: Resilience Versus Interdependence, In BCM World Conference, 2012
44. Haywood, M. and Peck, H.: Improving the Management of Supply Chain Vulnerability in UK Aerospace Manufacturing, In Proceedings of the 1st EUROMA/POMs Conference, pp. 1-10, 2003
45. Hintsä, J., and Gutierrez, X.: Supply Chain Security Management: An Overview, International Journal of Logistics Systems and Management, Vol. 5, Iss. 3-4/2009, pp. 344-355, 2009
46. Hudson, R.: Resilient Regions in an Uncertain World: Wishful Thinking or a Practical Reality, Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, Vol. 3, No. 1, pp. 11-25
47. Ingirige, B., Wedawatta, G., and Amaratunga, D.: Building up Resilience of Construction Sector SMEs and Their Supply Chains to Extreme Weather Events, International Journal of Strategic Property Management, Vol. 14, Iss.4, pp. 362-375, 2010

48. Juttner, U. and Maklan, S.: Supply Chain Resilience in the Global Financial Crisis: an Empirical Study, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 16, No.4, pp. 246-259, 2011
49. Klein, R. J. T., Nicholls, R. J. and Thomalla, F.: Resilience To Natural Hazards: How Useful Is This Concept? , *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 35-45, 2004
50. Klibi, W., Martel, A., and Guitouni, A.: The Design of Robust Value-Creating Supply Chain Networks: A Critical Review, *European Journal of Operational Research*, Vol. 203, No. 2, pp. 283-293, 2010
51. Kong, X. Y., and Xiang, Y. L.: Creating the Resilient Supply Chain: The Role of Knowledge Management Resources. In 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp.1-4, 2008
52. Lmola, L. I., and Asti, J. C.: Case study: Seven Shocks and Finland. *Innovation and Supply Chain Management*, Vol. 7, No. 3, pp. 112-124, 2013
53. Madhusudan, C., and Ganapathy, G. : Disaster Resilience of Transportation Infrastructure and Ports An Overview, *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 443-455, 2011
54. Mansouri, M., Sauser, B. and Boardman, J. : Applications of Systems Thinking for Resilience Study in Maritime Transportation System of Systems, In 2009 3rd Annual IEEE Systems Conference, pp. 211-217, 2009 Marshall, G., and Chapman, D. : Application Note Resilience, Reliability and Redundancy, Leonardo Energy Application Guide, 2011
55. McCann, J., Selsky, J. and Lee, J.: Building Agility, Resilience and Performance in Turbulent Environments, *People & Strategy*, Vol. 32, No. 3, pp. 45-51, 2009
56. McLellan, B., Zhang, Q., Farzaneh, H., Utama, N. A. and Ishihara, K. N. : Resilience, Sustainability and Risk Management: A Focus on Energy, Challenges, Vol. 3, Iss. 2, pp. 153-182, 2012
57. Mitra, K., Gudi, R., Patwardhan, S., and Sardar, G.: Towards Resilient Supply Chains: Uncertainty Analysis Using Fuzzy Mathematical Programming, In 18th ESCAPE Conference, pp. 967-981, 2008
58. Omer, M., Nilchiani, R. and Mostashari, A.: Measuring the Resilience of the Global Internet Infrastructure System. In 2009 3rd Annual IEEE Systems Conference, pp.156-162, 2009

59. Palin, P. J.: Supply Chain Resilience: Diversity + Self-organization = Adaptation, Homeland Security Affairs, Vol.9, No. 14, pp. 1-11
60. Party, C. : A Resilient Nation National Security Green Paper, 2012
61. Paton, D., Smith, L. and Violanti, J.: Disaster Response: Risk, Vulnerability and Resilience, Disaster Prevention and Management, Vol. 9, No. 3, pp. 173-180, 2010
62. Paulsson, U., Nilsson, C. and Wandel, S.: Estimation of Disruption Risk Exposure in Supply Chains, International Journal of Business Continuity and Risk Management, Vol.2, Iss. 1, pp. 1-19, 2011
63. Peck, H.: Drivers of Supply Chain Vulnerability: an Integrated Framework, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 35, No. 4, pp. 210-232, 2005
64. Peck, H.: Supply Chain Vulnerability Risk and Resilience, In D. Waters (Ed.), Global Logistics, pp. 192-207, 2010
65. Peck, H., Abley, J. and Christopher, M.: Creating Resilient Supply Chains: A Practical Guide, Logistics and Supply Chain, 2003
66. Pettit, T. J., Fiksel, J., and Croxton, K. L.: Ensuring Supply Chain Resilience: Development of A Conceptual Framework, Journal of Business Logistics, Vol. 31, No. 1, pp. 1-21, 2010
67. Pfohl, H.-C., Kohler, H., and Thomas, D.: State of the Art in Supply Chain Risk Management Research: Empirical and Conceptual Findings and a Roadmap for the Implementation in Practice, Logistics Research, Vol. 2, No. 1, pp. 33-44, 2010
68. Pike, A., Dawley, S. and Tomaney, J.: Resilience, Adaptation and Adaptability, Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, Vol. 3, No.1, pp. 59-70, 2010
69. Pitera, K.: Interpreting Resilience: An Examination of the Use of Resiliency Strategies within the Supply Chain and Consequences for the Freight Transportation System, In 50th Annual Transportation Research Forum, pp.492- 509, 2009
70. Ponis, S. T. and Koronis, E.: Supply Chain Resilience: Definition of Concept and Its Formative Elements, The Journal of Applied Business Research, Vol. 28, No. 5, pp. 921-930, 2009
71. Ponomarov, S. Y., and Holcomb, M. C.: Understanding the Concept of Supply Chain Resilience, The International Journal of Logistics Management, Vol. 20, No. 1, pp. 124-143, 2009

72. Ratick, S., Meacham, B. and Aoyama, Y.: Chain Disaster Resilience. Growth and Change, Vol. 39, No. 4, pp. 642-666, 2009
73. Reich, J. W.: Three Psychological Principles of Resilience in Natural Disasters, Disaster Prevention and Management, Vol. 15, No. 5, pp. 793-798, 2006
74. Revue, L. A., Association, O. D. E. L., Approvisionnement, C. D., and Logistique, E. T. : Can You Measure Your Supply Chain Resilience, Supply Chain and Logistic, Vol. 10, No. 1, pp. 21-22, 2008
75. Rice, B. J. B., and Caniato, F.: Building a Secure and Resilient Supply Network, Supply Chain Management Review, SEPTEMBER, pp. 22-30, 2003
76. Rose, A.: Economic Resilience to Disasters. Community and Regional Resilience Institute, Oak Ridge, TN, Report, N0.8, 2009
77. Rydzak, Felicjan, Piotr Magnuszewski, Jan Sendzimir, E. C.: A Concept of Resilience in Production Systems, In Proceedings of the 24th International Conference of the System Dynamics Society, pp. 1-26, 2006
78. Sawik, T. : Selection of Resilient Supply Portfolio Under Disruption Risks. Omega, Vol. 41, Iss. 2, 259-269, 2013
79. Sheffi, Y.: A Supply Chain View of the Resilient Enterprise A Supply Chain View of the Resilient Enterprise, MIT Sloan Management Review, Vol. 47, Iss.1, pp. 41-48, 2005
80. Sheffi, Y.: Resilience Reduces Risk, Logistic Quarterly.com, Vol. 12, No.1, pp. 12-14, 2006
81. Sheffi, Y.: Resilience: What It Is and How to Achieve It, The House Committee on Homeland Security “ The Resilient Homeland ? Broadening the Homeland Security Strategy ” , (HP:http://web.mit.edu/scresponse/repository/Sheffi_Congressional_Testimony.pdf., 2015年11月30日アクセス), 2008
82. Sheffi, Y., Jr, J. R., Fleck, J., and Caniato, F.: Supply Chain Response to Global Terrorism: a Situation Scan, Proceedings of EUROMA/POMS Conference, No. 22, pp. 121-130, 2003
83. Shirakawa, M.: Great East Japan Earthquake: Resilience of Society and Determination to Rebuild, In The Council on Foreign Relations in New York, 2011
84. Soni, U.,and Jain, V.: Minimizing the Vulnerabilities of Supply Chain: A New Framework for Enhancing the Resilience, In 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp.933-939,2011

85. Spiegler, V. L. M., Naim, M. M. and Wikner, J.: A Control Engineering Approach to the Assessment of Supply Chain Resilience, *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 21, pp. 6162-6187, 2012
86. Sullivan-Taylor, B. and Branicki, L.: Creating Resilient SMEs: Why One Size Might Not Fit All. *International Journal of Production Research*, Vol. 49, Iss.18, pp. 5565-5579, 2011
87. T Murino, E and Romano, L. S.: Supply Chain Performance Sustainability through Resilience Function, In *Proceedings of the Winter Simulation*, pp.1605-1616, 2011
88. Ta, C., Goodchild, A. V. and Pitera, K.: Structuring a Definition of Resilience for the Freight Transportation System, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 09-1124, pp. 19-25, 2009
89. Tang, C. S.: Perspectives in Supply Chain Risk Management, *International Journal of Production Economics*, Vol. 103, No. 2, pp. 451-488, 2006
90. Tang, C. and Tomlin, B.: The Power of Flexibility for Mitigating Supply Chain Risks. *International Journal of Production Economics*, Vol.16, No.1, pp. 12-27, 2008
91. Ulieru, M.: Design for Resilience of Networked Critical Infrastructures State of The Art, In *Digital EcoSystems and Technologies Conference* , pp. 540-545, 2007
92. Vugrin, E. and Turnquist, M.: Design for Resilience in Infrastructure Distribution Networks. *Environment Systems and Decisions*, Vol. 33, No. 1, pp. 104-120, 2013
93. Warren, C. M. J. : The Facilities Manager Preparing for Climate Change Related Disaster. *Facilities*, 28(11/12), pp. 502-513, 2010
94. White, C., Erera, A. and Savelsbergh, M.: A Research Agenda for Supply Chain Security and Productivity, Working paper, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2004
95. WICHER, P., LENORT, R., and KRAUSOVA, E.: Possible Applications of Resilience Concept in Metallurgical Supply Chains, In *METAL*, 2012
96. Williams, Z., Ponder, N. and Autry, C. W.: Supply Chain Security Culture: Measure Development and Validation, *The International Journal of Logistics Management*, 20(2), pp. 243-260, 2009
97. World Economic Forum, *Global Risks 2013 Eighth Edition*, 2013

98. Xu, J.: Managing the Risk of Supply Chain Disruption: Towards a Resilient Approach of Supply Chain Management, In 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, pp. 3-7, 2008
99. Zhao, K., Kumar, A., Harrison, T. P. and Yen, J.: Analyzing the Resilience of Complex Supply Network Topologies Against Random and Targeted Disruptions, IEEE Systems Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 28-39, 2011
100. Zsidisin, G. A. and Wagner, S. M.: Do Perceptions Become Reality the Moderating Role of Supply Chain Resiliency on Disruption Occurrence, Journal of Business Logistics, Vol.31, No. 2, pp. 1-20, 2010

付録B 業績リスト

査読論文

1. Tang LIU and Hiroaki MATSUKAWA : A Review and Classification on the Supply Chain Risk Management , INFORMATION, Vol.18, No.6(A), pp.2259 – 2274, 2015
2. 劉唐, 浦島陸郎, 松川弘明 : テキストマイニングによるレジリエンス構造モデルに関する研究, 日本経営工学会論文誌, Vol. 66, No. 2, pp. 67 – 74, 2015
3. Ruiqing XIA, Tang LIU and Hiroaki MATSUKAWA : Optimizing Supply Chain Configuration Considering Supply Disruption, Innovation and supply chain management, Vol.8, No.3, pp. 121 – 133, 2014

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方のご指導とご支援を頂き、心より感謝いたします。この場をかりしてお礼申し上げます。

指導教員の松川弘明先生には、博士課程の3年間、沢山のことを学ばせて頂きました。深くお礼申し上げます。松川先生は、博士課程から配属された私を快く受け入れて下さり、私が博士課程での生活を円滑に送られるよう常に気にかけて下さりました。また、どんなことに対しても親身に相談に乗って頂きました。論文の執筆では、至らない私に対して幅広い知識を教授して下さい、そのおかげで学術誌への掲載や学会での発表を行うことができました。これまでご迷惑をかけしてしまったことも多かったと思いますが、最後までご指導して下さい、心より感謝いたします。

大変お忙しい中、副査を快諾していただき、本論文の執筆にあたり有益で貴重なコメント及びご指導を頂いた、中野冠先生、増田靖先生、稲田周平先生、志田敬介先生には深く感謝申し上げます。

そして、頼りない私にも関わらず、辛抱強く研究に協力してくれた、浦島陸朗氏、近藤大輔氏、高橋麻由氏などの松川研究室の皆様には深く感謝いたします。皆様の存在が研究を進めていく上で心の支えになりました。共に同じ空間で研究を行う皆様からは、教えられることも多くありました。研究室で過ごした時間は、掛け替えのないものとして記憶に残り続けると思います。

また、3年間の研究生活を手厚く支援して頂いた大塚敏美育英奨学財団、日揮実吉奨学財団、慶應義塾先端科学技術研究センターに深く感謝いたします。

最後に、本研究の完成に向けて、これまで私を支え続けてくれた両親に心から感謝をこめて本論を捧げます。