

サプライチェーンを考慮した事業停止期間の確率論的リスク評価

Probabilistic Risk Assessment for Business Interruption Time of Supply Chain Systems

○福島誠一郎¹, 西川智², 矢代晴実³
Sei'ichiro FUKUSHIMA¹, Satoru NISHIKAWA² and Harumi YASHIRO³

¹東電設計株式会社

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

²国土交通省

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

³東京海上日動リスクコンサルティング

The Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd.

In order to draw BCP (Business Continuity Plan) for supply chain dependent enterprise, there is a need for a quantitative risk analysis method to evaluate such manufacturing system. The business interruption time is a crucial factor in terms of economic loss. Two model enterprises each with three factories connected through series and parallel supply chain patterns are applied in comparing and analyzing the risk. The annual exceedance probability of business interruption time of these enterprises are calculated and compared. Three alternative options, by provision of redundant nodes, for decreasing the risk are proposed. This risk analysis method is proven to be realistic and functional.

Key Words : Business continuity plan, Supply chain, Seismic risk, Business interruption time, Risk curve

1. まえがき

近年、日本の企業は、市場の動向に迅速に対応するため、また在庫コストを削減するために、部品の在庫を少なくし、ジャスト・イン・タイムによる調達・生産・販売システムにシフトしてきている。そのため、災害後に事業を再開するには、自社の復旧の他にサプライチェーン（以下、SC）で結ばれている他社の復旧が必要となる。2007年7月の新潟県中越沖地震では、柏崎市にある自動車部品メーカーの主力工場からの供給が停止したことにより、日本の主要自動車メーカー各社が1週間余の生産停止を余儀なくされたが、これは、BCPにおけるSCの重要性を示す実例となった。

このようなSCに依存した操業形態を有する企業の事業継続を考える上でのリスクの定量化のためには、複数個所の立地と、それぞれの地点での被害リスクを組み合わせたリスク評価手法が求められている。また、企業の物的損失のみならず、取引先の操業停止等の外部で発生する事象による企業活動の中断に伴う損失の評価が重要であることから、企業活動の業務停止期間を定量的に把握し、それを減少させる手段を評価する必要がある¹⁾。

本研究では以上を鑑み、SCの業務停止期間に関するリスク評価手法を提案するとともに、複数の拠点が直列型のSCで結ばれている企業の業務停止期間を減少させるための代替手段について検討を加える。

2. 業務停止期間の定量化

筆者らは、複数施設を有する企業の地震リスクマネジメントを対象として、ポートフォリオの地震リスク評価手法を構築・提案してきた²⁾。同手法は膨大な数のシナリオ地震（以下、イベント）毎に、個々の建物の損失の和としてポートフォリオの損失を求めるものである。このリスク評価手法を拡張し、複数拠点を有するSCの業務停止期間のリスク評価手法を提案する。

(1) 個々の拠点の業務停止期間

イベント*i*による拠点*j*の業務停止期間 $t_j(i)$ は、複数の限界状態に対する業務停止期間 $t_{j,k}(i)$ の条件付期待値として次式で求める。

$$t_j(i) = \sum_{k=0}^4 [p_{j,k}(i) \cdot t_{j,k}(i)] \quad (1)$$

ここに、 $p_{j,k}(i)$ は、 $t_{j,k}(i)$ に対応した条件付確率、 k は被害程度を表す変数で、 $k=0, \dots, 4$ は、無被害、小破、中破、大破、倒壊にそれぞれ対応する。なお、 $p_{j,k}(i)$ については、当該拠点のフラジリティ曲線より求める。

(2) サプライチェーンの業務停止期間

一方、SCの業務停止期間 $t_{SC}(i)$ は、個々の拠点の被害程度を分岐としたイベントツリーの期待値として次式で求める。

$$t_{SC}(i) = \sum_{l=1}^N f_l[p_l(i)] \cdot g_l[t_l(i)] \quad (2)$$

ここに、 l はイベントツリーのエンドブランチを表す変数、 N は総ブランチ数である。 $t_l(i)$ は、エンドブランチ*l*におけるSCを構成する拠点の業務停止期間 $t_{j,k}(i)$ からなるベクトル、 $p_l(i)$ は $t_l(i)$ に対応した条件付確率のベクトルである。

$f_l[\cdot]$ はエンドブランチ*l*が生じる条件付確率で、 $p_l(i)$ の関数として次式で定義する。

$$f_l[p_l(i)] = p_{1,k1} \times p_{2,k2} \times \dots \times p_{n,kn} \quad (3)$$

ここに、 n はSCを構成する拠点数である。

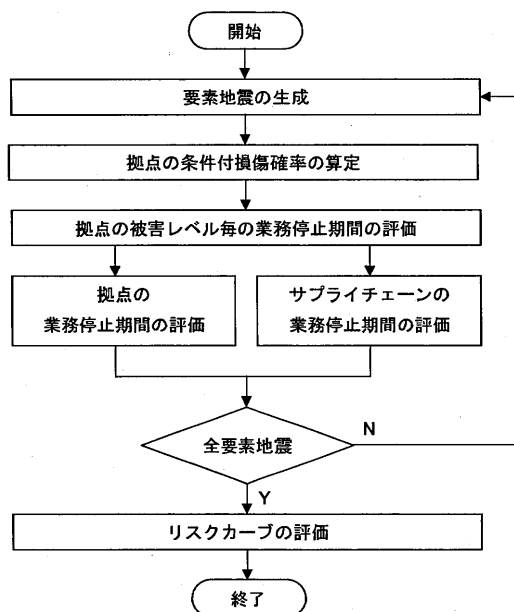
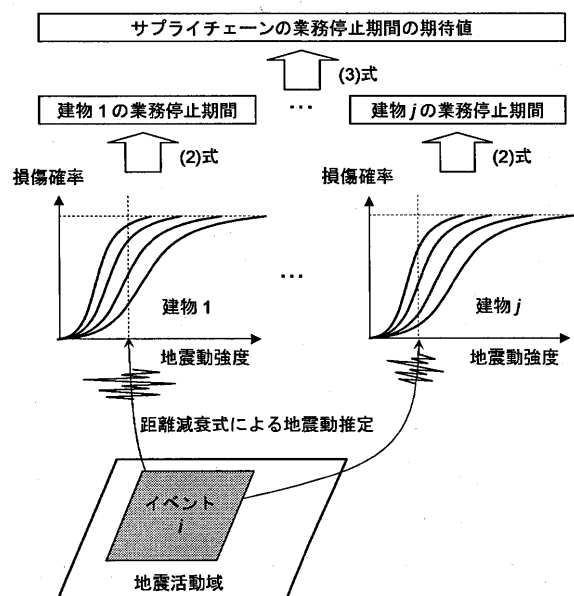
一方、 $g_l[\cdot]$ は当該エンドブランチに対するSCの業務停止期間で、 $t_l(i)$ の関数として表され、その関数形は、SCの組合せを基に設定される。本研究では、直列系では各拠点の業務停止期間の最大値を、並列系では最小値を取る。

イベントに対する業務停止期間の評価の概念を図 1 に示す。また、提案する業務停止期間のリスク評価の手順を図 2 に示す。なお、リスクカーブを求める際に不確実性を考慮するため、地震動強度や建物強度等を確率変数としたモンテカルロシミュレーションを採用する。

3. サプライチェーンへの適用試算

(1) サプライチェーンの設定

この定量化手法を適用する SC の例として、3 拠点からなる配置（さいたま市、横浜市、千葉市）を想定した。各拠点の位置を図 3 に示す。各拠点の耐震性能と業務停止期間については、文献 2)ならびに文献 3)に従い、表 1 のように設定した。また、3 拠点の連結性については、図 4 に示すように、直列系と並列系の 2 つを設定した。



(2) 地震活動モデルの設定

地震活動域モデルについては、文献 4)を用いて設定した。図 5 に設定した地震活動域を、表 2 に地震活動域の諸元を示す。

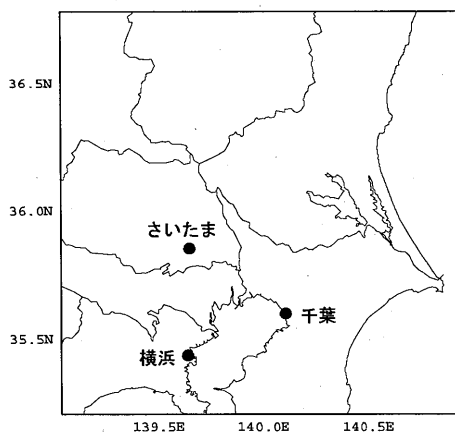


表 1 フラジリティ曲線の特性値と業務停止期間

被害レベル	フラジリティ曲線の特性値		業務停止期間 (日)
	中央値(cm/s/s)	対数標準偏差	
小破	200	0.4	3
中破	600	0.4	15
大破	1000	0.4	60
倒壊	1400	0.4	180

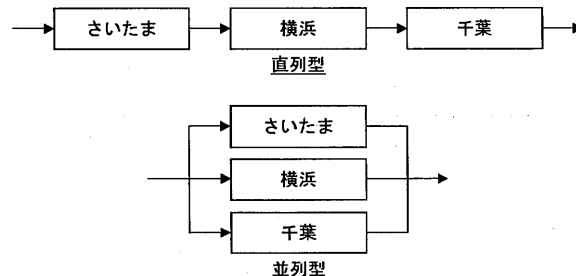


表 2 地震発生活動域の諸元

活動域番号	Mの範囲	発生間隔(年)	活動域番号	Mの範囲	発生間隔(年)
01	7.0-7.6	1182	02	6.9-7.3	5212
03	7.0-7.4	79283	04	6.8-7.2	5931
05	7.1-7.5	2842	06	7.0-7.4	2639
07	6.8-7.2	5676	08	7.1-7.5	8710
09	6.6-7.0	1365	10	6.9-7.3	7239
11	7.5-7.9	1625	12	7.1-7.5	877
13	6.8-7.2	1917	14	7.1-7.5	2851
S1	7.8-8.2	200	S2	7.8-8.2	1000
S3	6.8-7.2	73	N1	7.6-8.0	130
活動域番号	Mの範囲	A値	活動域番号	Mの範囲	A値
A1	5.0-7.0	2.344	A2	5.0-7.0	4.235
A3	5.0-7.0	1.645	A4	5.0-7.0	2.344

中小地震発生活動域の b 値は一律に 0.9 と設定

距離減衰式については、Annaka & Yashiro⁵⁾を参照し、以下の安中式を採用した。

$$\log a = 0.61M + 0.00501h - 2.203\log(d) + 1.377 \quad (4)$$

$$d = \sqrt{\Delta^2 + 0.45h^2} + 0.22\exp(0.699M)$$

ここに、 a は最大加速度 (cm/s/s), Δ は震央距離 (km), h は震源深さ (km), M はマグニチュードである。距離減衰式のばらつきを表す対数標準偏差は、自然対数で 0.5 と設定した。

(3) 業務停止期間のリスクカーブ

図 6 と図 7 に、業務停止期間のリスクカーブを示す。横軸は業務停止期間の 90%非超過値を、縦軸は業務停止期間に対する年超過確率を示しており、また、同図中で太線は SC に、細線は個別の拠点对応する。

直列型では、3つの拠点のうち1箇所が停止すれば SC 全体が停止する。そのため、SC のリスクカーブは、いずれの拠点のリスクカーブよりも大きくなる。一方、並列型では、3つの拠点が同時被災しない限り SC は停止しない。したがって SC のリスクカーブは、いずれの拠点のリスクカーブよりも小さい。

以上から明らかのように、サプライチェーンの拠点を並列化することは、リスク低減の観点からはきわめて効果的である。各拠点の業務停止期間を見ると、「横浜」のリスクカーブが最も大きいことがわかる。したがって、直列型の SC の業務停止リスクを低減するためには、「横浜」について対策を講じることが効果的である。

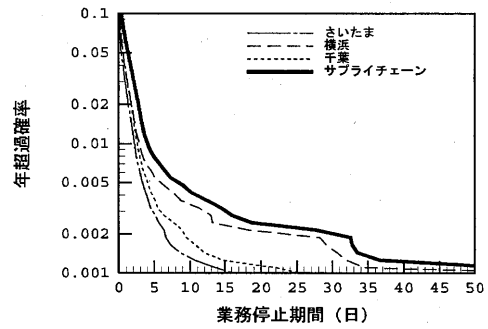


図 6 業務停止期間のリスクカーブ (直列型)

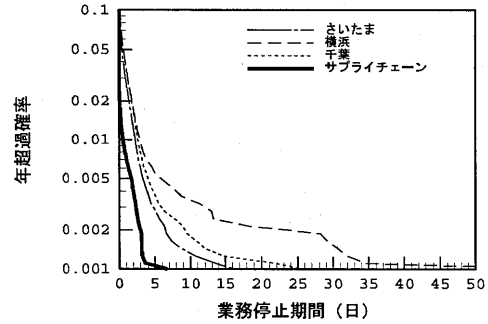


図 7 業務停止期間のリスクカーブ (並列型)

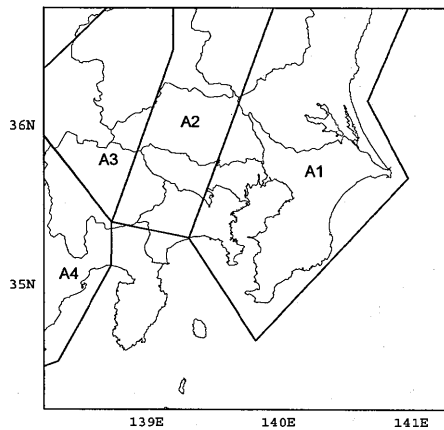
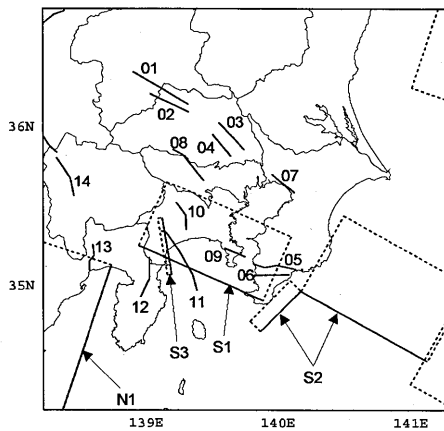


図 5 設定した地震発生活動域

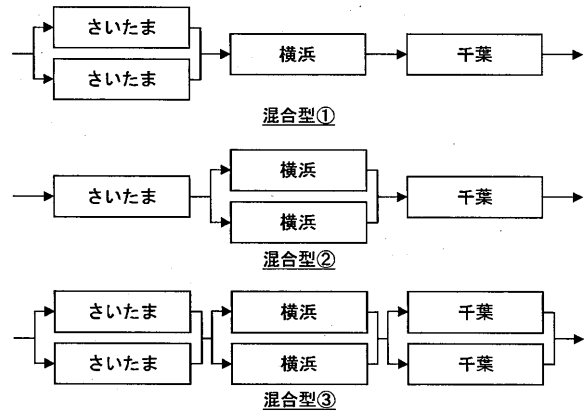


図 8 二重化された直列系 SC

4. 拠点の多重化によるリスク低減効果

(1) 低減対策の設定

前章において設定した 3 拠点からなる配置 (さいたま市、横浜市、千葉市) が直列型で連結されている SC を基に、その拠点のいくつかを二重化した SC を図 8 のように設定した。

(2) 二重化 SC による業務停止期間のリスクカーブ

図 9~11 に二重化された業務停止期間のリスクカーブを示す。この場合、それぞれの拠点の同一地点に同等の施設を二重化したものとしてリスクカーブを算出した。

二重化することにより、直列型に比べていずれもリスクカーブが低下する。これは、同一地点での二重化であっても、単一施設があるレベルの被害を受ける確率に比べ、2つの施設が同時に同一レベルの被害を受ける確率が低くなるからである。このサプライチェーンを構成す

る拠点のうち、横浜が最も地震リスクが高い地点であり、この地点を二重化することにより、大きくリスクカーブが低下する。これに対して、さいたまが最も地震リスクが低い地点であり、この地点のみを二重化した場合には、リスクカーブの著しい低下は見られない。3拠点の全てを二重化した場合にリスクカーブは最も低くなる。

(3) 二重化によるリスク低減の特性とBCPへの反映

SCを構成する各拠点の二重化によるリスク低下の効果を見るために、直列型のリスクカーブに対する二重化したもののリスクカーブの比(所与の年超過確率における業務停止期間の比)を図12に示す。

年超過確率が大きい領域では、混合型①と混合型②のリスク低減効果は大きくない。この領域では、高頻度・小規模の直下型地震(背景的地震)が支配的となるため、特定の拠点を二重化するだけでは、直列系のSCのリスク低減には繋がらない。混合型③では全拠点を二重化しており、リスクが大きく低減している。

年超過確率が小さい領域では、低頻度・大規模の地震(関東地震)が支配的となるため、その影響を大きく受ける「横浜」を二重化することで大きなリスク低減を達成することができる(混合型②)。反対に、関東地震の影響が小さい「さいたま」の二重化(混合型①)は、リスク低減の観点からは有効な施策ではない。混合型③によるリスク低減は、混合型②からは大きく改善されず、やはり有効な施策ではない。

5. まとめ

本研究では、サプライチェーンの業務停止期間を定量的に算出する方法を提案し、そのリスクカーブを示した。また、直列型で連結されているサプライチェーンの業務停止期間リスクを低減させる手段としての拠点の二重化の効果を定量的に評価する手法を提案し、実例を試算した。

これにより企業は、同一拠点での二重化するためのコストと自社にとっての「待てる」口数を超過する業務停止期間の数量的な低下を比較考慮しての判断が可能となる。今後は、さらに代替拠点の立地条件によるリスク低下の効果等についても明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 西川智, 福島誠一郎, 矢代晴実: 事業継続 (BCP) のためのサプライチェーンのリスク分析手法の提案, 地域安全学会梗概集 No21, pp.39-42, 2007.11
- 2) 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価, 日本建築学会計画系論文集, No.552, pp.169-176, 2002.2
- 3) 坂本成弘: 事業継続計画における復旧曲線の評価, 大成建設技術センター報 第39号, 2006
- 4) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, 2004.9
- 5) T. Annaka and H. Yashiro: A seismic source model with temporal dependencies of large earthquake occurrence for probabilistic seismic hazard analysis in Japan, Risk Analysis, WIT PRESS, pp.233-242, 1998

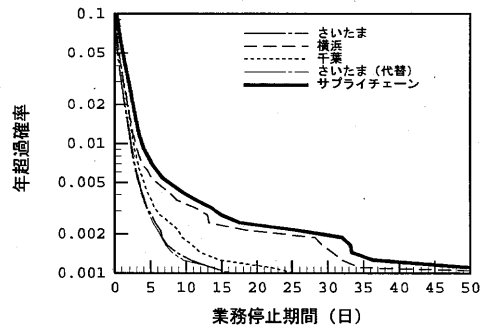


図9 二重化SCの業務停止期間のリスクカーブ(混合型①)

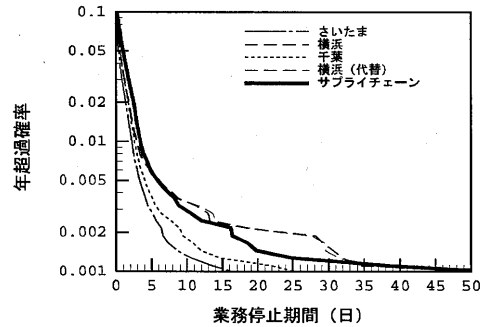


図10 二重化SCの業務停止期間のリスクカーブ(混合型②)

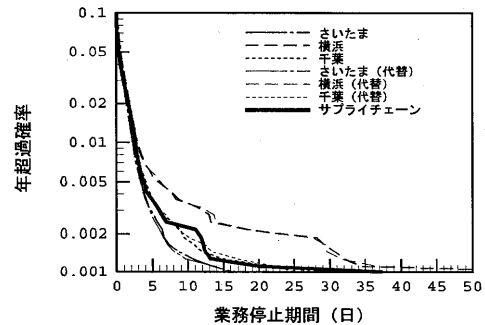


図11 二重化SCの業務停止期間のリスクカーブ(混合型③)

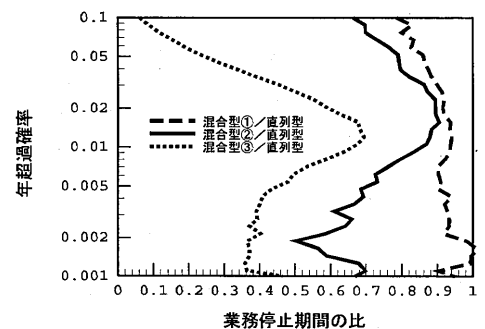


図12 二重化による業務停止リスクの低減