

供給量に着目したサプライチェーンの地震時業務停止期間に関する リスク評価

Risk Assessment of Business Interruption Time of Supply Chain Systems Focusing on Amount of Supply

○福島誠一郎¹, 矢代晴実², 吉川弘道³

Sei'ichiro FUKUSHIMA¹, Harumi YASHIRO² and Hiromichi YOSHIKAWA³

¹ 東電設計株式会社

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

² 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.

³ 東京都市大学

Tokyo City University

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. However, the business interruption time is depend on the amount of supply as well as on damage to the facilities, since necessary mount in disaster can be smaller than that in usual case. This paper proposes the framework of probabilistic risk analysis of supply chain system considering the amount of supply, followed by illustrative application using model enterprise. Through application, the relationship between the amount of supply and the business interruption time is examined.

Key Words : Business continuity plan, Seismic Risk, Supply chain, Business interruption time, Amount of supply, 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で結ばれている他社の復旧が必要となる。

また、このようなサプライチェーン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は、企業の物的損失のみならず、取引先の操業停止といった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。

そこで、筆者らはサプライチェーンの業務停止期間に関する確率論的リスク評価手法を提案するとともに、複数の拠点がサプライチェーン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てきた¹⁾。同手法は、被災度に応じた業務停止期間を拠点毎に設定し、各拠点の確率論的なリスク評価結果を基に業務停止期間と年超過確率の関係を求めるものである。なお、同手法では、業務停止期間は通常状態（平時の供給量が確保される状態）に復旧・復元するまでの期間としている。

ところで、事業継続のためには必ずしも通常状態の供給量を確保する必要はなく、事業継続に必要な最低限の供給量さえ確保できれば良い場合もある。すなわち、必要供給量を考慮して業務停止期間を設定することが、事業継続を考える上で重要となる。

本研究では以上を鑑み、供給量を変数としたリスク評価の枠組みを提案するとともに、同手法をモデル企業に適用して供給量と業務停止期間との関係を検討する。

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、複数拠点を有するサプライチェーン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 fragility 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、サプライチェーンの業務停止期間 $t_{sc}(i)$ 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。

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

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

におけるサプライチェーン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, $p_i(i)$ は $t_i(i)$ に対応した条件付確率のベクトルである。

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

$$f[p_i(i)] = p_{1,k1} \times p_{2,k2} \times \cdots \times p_{n,kn} \quad (3)$$

ここに, n はサプライチェーンを構成する拠点数である。

一方, $g[\cdot]$ は当該エンドブランチに対するサプライチェーンの業務停止期間で, $t_i(i)$ の関数として表され, その関数形は, サプライチェーン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) 供給量と業務停止期間の関係付け

通常時の供給量に対する必要供給量の比 (供給量比) を $r_{A,k}$ とする。また, 通常時の供給量における業務停止期間を $t_{j,k}^0(i)$ とし, 必要供給量における業務停止期間 $t_{j,k}(i)$ と $t_{j,k}^0(i)$ の比 (業務停止期間比) を $r_{T,k}$ とする。このとき, $(r_{A,k}, r_{T,k}) = (0,0) = (1,1)$ を満たす関数として, 次式を考える。

$$r_{T,k} = r_{A,k}^{(1-x)/x} \quad (4)$$

ここに, x は関数の形状を規定する変数で, $0 \leq x \leq 1$ の値を取る。 x に応じた関数の振る舞いを図 3 に示す。 $x=0.5$ であれば $r_{T,k}$ は $r_{A,k}$ に比例し, $x=1.0$ であれば半開区間 $(0,1]$ において $r_{T,k}=1.0$ である。また, $x=0.0$ であれば半開区間 $[0,1)$ において $r_{T,k}=0.0$ である。

以上より, 業務停止期間 $t_{j,k}(i)$ は供給量比を変数として次式で表すこととする。

$$t_{j,k}(i) = t_{j,k}^0(i) \times r_{A,k}^{(1-x)/x} \quad (5)$$

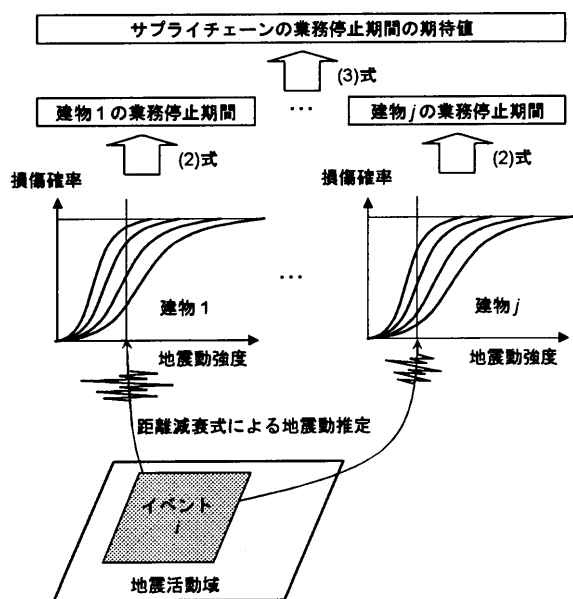


図 1 業務停止期間の評価の概念

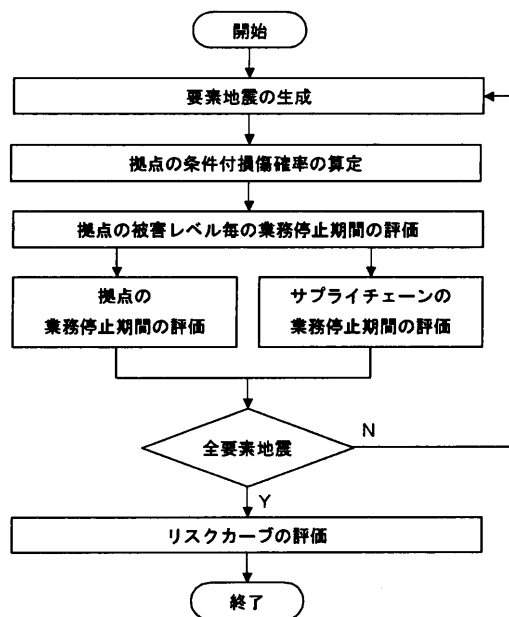


図 2 業務停止期間のリスク評価の手順

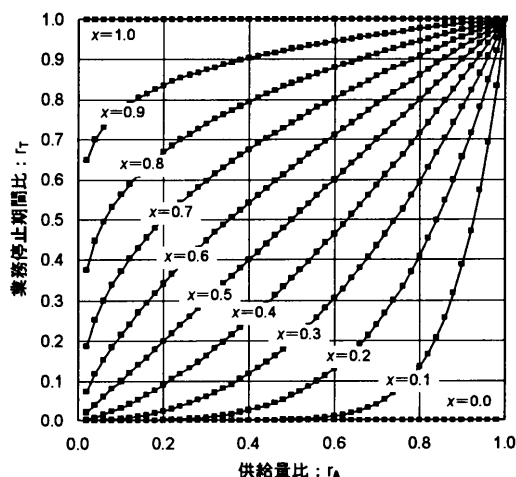


図 3 供給量比 r_A と業務停止期間比 r_T の関係

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

ここでは, 「さいたま市」, 「横浜市 (2 箇所)」, 「千葉市」の計 4 拠点からなるサプライチェーンを有するモデル企業を想定した。各拠点の位置とそれらの連結性を図 4, 図 5 にそれぞれ示す。各拠点の耐震性能と業務停止期間については, 既往文献^{3), 4)}を参照して表 1 のように設定した。

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		通常時供給量に 対する業務停止 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

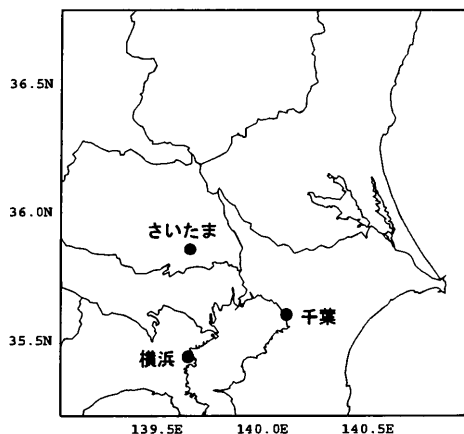


図4 サプライチェーンの拠点の配置

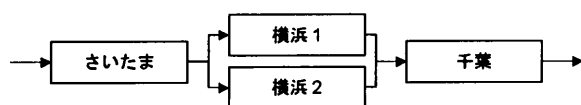


図5 サプライチェーンの連結性

(2) 地震活動モデルの設定

地震活動域モデルについては、建築物荷重指針⁵⁾を参照して設定した。距離減衰式については、Annaka & Yashiro⁶⁾を参照し、以下の安中式を採用した。

$$\log a = 0.61M + 0.00501h - 2.203\log(d) + 1.377 \quad (6)$$

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

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。距離減衰式の対数標準偏差は、自然対数で 0.5 と設定した。

(3) 感度解析結果：全拠点を対象とした場合

全拠点において一様に業務停止期間が変動するものとして、表 2 に示すような検討ケースを設定した。

ケース 1-1 は基本ケースとして設定した。ケース 1-2 は被害が小さい場合に供給が容易な（業務停止期間が短くなる）ケースであり、ケース 1-3 は被害が大きい場合に供給が容易なケースである。なお、供給量比 r_A は 0.5 から 1.0 まで 0.1 刻みで設定した。

得られたリスクカーブを図 6 に示す。同図中の太実線は、従来の検討結果に相当するものであり、ケース 1-1 が示すように、供給量比 r_A が小さくなるに従い全体的にリスクが低減する。

これに対し、ケース 1-2 では高頻度-短期間のリスクに、ケース 1-3 では低頻度-長期間のリスクに低減が見られる。これは業務停止期間に寄与する損傷モードが異なるためであり、表 2 で設定した被害モードと変数 x の関係に対して調和的である。

表2 検討ケース（全拠点を対象とした場合）

検討ケース	変数 x の値（全拠点共通）			
	小破	中破	大破	倒壊
ケース 1-1	0.5	0.5	0.5	0.5
ケース 1-2	0.4	0.5	0.7	1.0
ケース 1-3	1.0	0.7	0.5	0.4

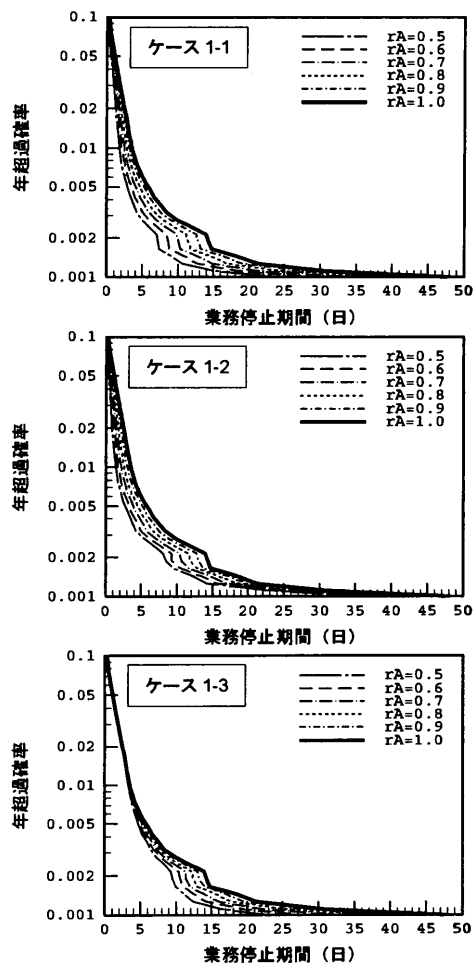


図6 感度解析結果：全拠点を対象とした場合

(4) 感度解析結果：一部の拠点を対象とした場合

個別の拠点の業務停止期間が変動するものとして、表 3 に示す検討ケースを設定した。

ケース 2-1 は基本ケースとして設定した。ケース 2-2 は直列系を構成する「さいたま」について、ケース 2-3 は並列系を構成する「横浜 1」について業務停止期間を変動させた。供給量比 r_A は 0.5 で一定とした。

得られたリスクカーブを図 7 に示す。同図中の太実線は、 $r_A = x = 0.5$ としたときのもの（基本ケース）に相当する。なお、ケース 2-1 については、他の供給量比 r_A についてのリスクカーブも併記している。

ケース 2-2 が示すように、直列系拠点のサプライチェーン全体のリスクに大きく影響し、「さいたま」のような地震危険度が相対的に小さい地点の変動でも、リスクカーブにその影響が現れる。

一方、ケース 2-3 に見られるように、並列系拠点の影響は小さい。

表3 検討ケース（一部の拠点を対象とした場合）

検討ケース	変数 x の値（全被害モード共通）			
	さいたま	横浜 1	横浜 2	千葉
ケース 2-1	0.5	0.5	0.5	0.5
ケース 2-2	0.4-1.0	0.5	0.5	0.5
ケース 2-3	0.5	0.4-1.0	0.5	0.5

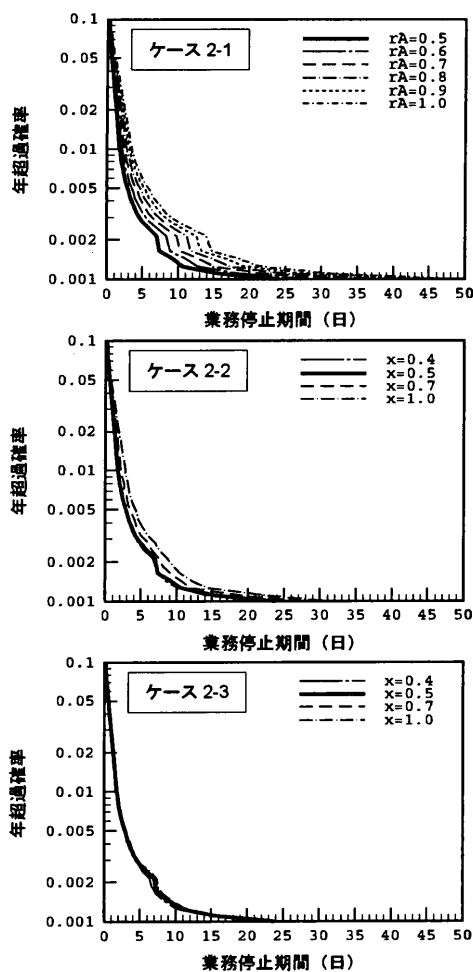


図7 感度解析結果：一部の拠点を対象とした場合

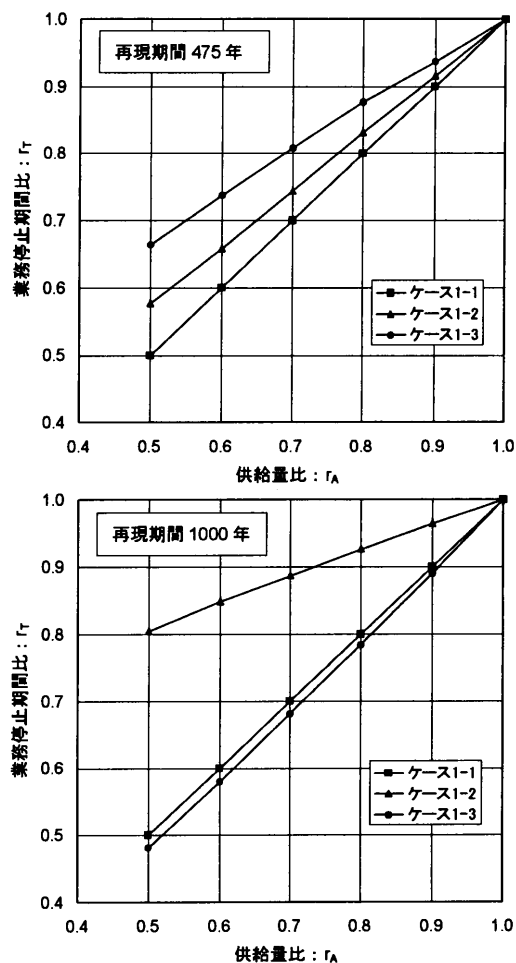


図8 供給量比と業務停止リスクとの関係

4. 供給量比が業務停止リスクに与える影響

ここでは、ケース 1-1～1-3 のリスクカーブを基に、供給量比がサプライチェーンの業務停止リスクに与える影響を検討する。なお、業務停止リスクとして、所与の再現期間（年超過確率の逆数）に対応する業務停止期間を採用する。

各リスク値を表 4 に、供給量比と業務停止期間比との関係を図 8 に、それぞれ示す。図 8 からは、再現期間 475 年では小破～中破の寄与がある程度大きいことから、ケース 1-2 の方がケース 1-3 よりもリスク低減効果が高い。一方、再現期間 1000 年では倒壊の寄与が支配的であるため、ケース 1-3 は 3 ケースの中で最もリスク低減効果が高くなっている。

表 4 業務停止リスク

供給量 比	再現期間 475 年			再現期間 1000 年		
	1-1	1-2	1-3	1-1	1-2	1-3
0.5	6.98	8.05	9.27	23.85	38.39	22.96
0.6	8.38	9.18	10.31	28.62	40.45	27.68
0.7	9.77	10.39	11.29	33.39	42.35	32.49
0.8	11.17	11.61	12.24	38.16	44.20	37.43
0.9	12.57	12.78	13.08	42.93	45.98	42.50
1.0	13.96	13.96	13.96	47.70	47.70	47.70

5. まとめ

本研究では、供給量を変数として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、直列系・並列系で連結されているサプライチェーンに対して試算を行うとともに、供給量が業務停止リスクに与える影響を検討した。

参考文献

- 1) 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, 2008 年地域安全学会梗概集 No.23, pp.89-92, 2008.11
- 2) 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 No.21, pp.39-42, 2007.11
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, 2004.9
- 6) 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