

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

PROPOSAL OF RISK ANALYSIS METHOD TO EVALUATE BCP OF SUPPLY CHAIN DEPENDENT MANUFACTURING SYSTEM IN CASE OF EARTHQUAKES

西川 智*, 福島 誠一郎**, 矢代 晴実***

Satoru NISHIKAWA, Sei'ichiro FUKUSHIMA and Harumi YASHIRO

Business continuity is now being regarded as an important factor in management of enterprises. Most of the businesses are not stand-alone; they depend on supply chains, for their operations. The Cabinet Office of Japan recently issued a guide for considering business continuity where it shows a typical manufacturing enterprise operating with several factories connected by supply chain, which is well accepted as a good model. In order to draw BCP (business continuity plan) for such enterprise, there is a need for a risk analysis method to evaluate such supply chain dependent manufacturing system. The factories may be located in several distant locations where the seismic risks differ. Some of the factories may be alternatives. The business interruption period is a crucial factor in terms of economic loss. If an enterprise halts its supply of products over a consumer acceptable timeframe, the consumers will be quickly taken over by rival enterprises and if the business interruption time exceeds a certain limit, the enterprise will no longer be able to return to the previous market. Three model enterprises each with five factories connected through series, parallel and mixed supply chain patterns were applied in comparing and analyzing the risk. Three location patterns of the five factories were given for comparison. The annual exceedance probability of business interruption time of these enterprises are calculated and compared. This risk analysis method is proven to be realistic and functional.

Keywords: Business Continuity Plan, Supply Chain, Seismic Risk, Business Interruption Time

事業継続計画, サプライチェーン, 地震リスク, 業務停止期間

1. はじめに.

地震などの自然災害による経済的被害を軽減する予防的な取り組みとして、企業のBCP(事業継続計画)が重視され始めている。平成17年8月、事業体の減災と災害対応の向上を目的として、内閣府より「事業継続ガイドライン 第一版」¹⁾が示され、これに基づき様々な企業や産業団体が各々に適したBCP策定に動き出した。

内閣府では「事業継続ガイドライン 第一版」を受け、事業継続を日本の企業に広く普及することを目的に、同年10月に企業の防災の取り組みのPR文書「防災報告書」の案を公表し、その中で仮想の製造業の企業を見本として防災報告書のサンプルを提示している。この仮想の製造業の企業については、資本金2億円で本社と3つの工場が別々の場所に立地し、これらが部品供給等のサプライチェーンにより相互に結びつき、当該企業が操業するという想定でのサンプルとなっている。これは、企業関係者にとって各社で防災への取り組みを開始する際のわかりやすい仮想事例として受け止められている。

事業継続への具体的な取り組みは業種や業態に応じて異なる。企業の重要業務の継続と経営の存続が主眼であっても、小売業と製造業ではそれぞれ操業に必要な資機材や人員が異なる。このため、内閣府では現在、業種ごとの特性を踏まえた業種別のガイドライン作りを代表的な業界団体の参加を得て進めているところである。

このような中で、各企業がBCPを策定し、それに基づく対策を講じることによって得られる自社のリスクの軽減効果を定量的に把握することが求められている。

BCPを作成する際の重要なポイントの1つに、被害の想定範囲として当該企業の他に関連企業等のサプライチェーンを含めることが挙げられる。このことは、企業の事業継続を確保するためには、当該企業の物的損失(直接損害)のみならず、取引先の操業停止など当該企業の外部で発生する事象がもたらす企業活動の中断に伴う損失(間接損害)の評価が重要であることによる。このため、企業活動の中断期間(以下、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手法が必要である。

前出の事業継続ガイドラインには、サプライチェーンを含めた被害想定の方法として、想定地震による確定論な方法が記載されている。この方法は、考え方が明確であるとともに、従来の構造設計等における多くの手法が適用できるという利点がある。反面、地震が発生したという条件付きの評価であるため、地震の発生頻度を考慮したリスクマネジメントの枠組みには入らず、結果として、定量的な費用便益解析が困難である。このことは、確定論な方法ではBCPにおける対策選定の根拠を得ることができないことを示している。

ところで、筆者らは、複数の建物を対象とした確率論的な地震リス

* 国土交通省, 前内閣府(防災担当) 工修

** 東電設計(株) 博士(工学)

*** 東京海上日動リスクコンサルティング(株) 博士(工学)

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, M. Eng.

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

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

ク解析手法を提案してきた²⁾。同手法は、建物群の直接損害についてのリスクカーブを求めるものであるが、これを業務停止期間の評価に拡張することで、サプライチェーンを含めた企業の確率論的リスク評価が可能になると考えられる^{3),4)}。

本研究では、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に係るリスク解析手法を提案するとともに、サプライチェーンの選定が当該リスクに与える影響について検討する。

2. BCPのためのサプライチェーン地震リスク評価の必要性

2.1 最近の地震でのサプライチェーンへの被害

2004年10月の新潟県中越地震では、数多くの企業が被災した。小千谷市にある自動車や二輪車用メーターの製造会社が地震による被害のため操業を停止した。ここからメーターを調達していたY社、H社、K社は二輪車の生産の部分停止を余儀なくされ、H社は自動車の生産を2日間全面停止させられた。自社が被害を受けなくても、サプライチェーンの途絶による操業停止が発生した。

また、ある米菓製造会社では、本社は越路町、工場は長岡市、飯塚町、越路町に立地し、その中でも米菓のもとになる米菓用の生地の主力生産工場は飯塚町にあり、その生地を其他の工場に米菓の製品が生産されていた。したがって、米菓製造会社として操業を続けるためには、生地を作る工場と、米菓製品を作る工場が両方とも稼働し、かつ本社が機能することが必要であった。この会社では、飯塚町の工場が損傷を受けたため、北海道千歳にある工場で作った生地を新潟に取り寄せることなどにより、早期の事業再開に努力し約2週間で製品出荷を再開した。

2007年7月の新潟県中越沖地震でも、柏崎市を中心として数多くの企業が被災した。その中には、自動車エンジンのピストンリングで約5割、変速機部品のシールリングで約7割のシェアを持つ部品メーカーの主力工場が被災し、操業停止した。この工場で作られていた部品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、このため、この部品工場の復旧と生産再開の応援のため複数の自動車メーカーが自社の人員を派遣し、この工場の業務再開のために協力し、自社の操業の早期再開のために努力した。また、自動車メーカーの完成来車の生産ラインが停止したことにより、他の部品メーカーが部品の出荷を停止せざるを得なくなるという影響も出た。企業のBCPでは、自社の事業再開を考える上で、サプライチェーンで結ばれている他社の事業再開をその重要な要素としなければならないことを見せつけた事例となった。

2.2 サプライチェーンの地震リスク評価の必要性

1事業所単独での地震災害に対する事業継続を考える上では、その事業所の建物や付帯設備の耐震性、その事業所の要員確保、重要データの保全などが重要な要素となる。その事業所の立地する場所での地震動の想定、それによる被害の確率の想定が、リスクの定量化の基礎データとなる。しかしながら、多くの企業、特に製造業においては、1事業所で自己完結型の事業継続が成立するところは少ない。企業が数箇所に事業所を有し、それらの間の原材料や半製品のサプライチェーンがあってはじめて操業は可能となる。さらに、取引先からの部品の納入ルートや製品の出荷ルートが確保されてこそ企業としての事業継続は可能となる。

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。したがって、災害発生時に部品納入が停止してしまえば、仮に自分の工場に物的被害がなくても操業停止に追い込まれ、それだけで経済損失が発生してしまう。前述の2007年7月の新潟県中越沖地震での部品工場被災による自動車メーカーの操業停止は、この典型であった。このため、取引先に対してBCPへの取組みを要求する大手企業が増加してきている。このような企業が将来発生しうる災害による被害を最小化するためのBCPを作成し、自社の施設の補強、施設の地理的配置、部品供給元の複数化や代替ルートの選定、そして、それらにどのように投資するかといった経営上の判断を下す上での定量的な評価が求められている。

このため、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。

2.3 BCPの観点からのリスク評価の際の時間の要素の重要性

企業にとってBCP策定の目的は2つある。災害発生時に操業度をゼロに落とすことなく、許容される最低限以上のレベルで事業を継続させること、また、企業経営上許容される期間内に発災前の操業レベルに復旧させることである(図1)。

被災した企業の製品のユーザーから見ると、特に業務停止期間は重要であり、ユーザーから見て「待てる」期間内に製品供給の見込みがなければ、代替製品あるいは代替メーカーを探すことになる。ユーザーが「これ以上待てない」となれば、被災した企業は製品の販路を失い、相当期間経過後に製品供給が可能な状態に復旧したとしても、かつてのユーザーは他の企業に奪われ、新規のユーザーの開拓やユーザーの再獲得のために多大な営業コストを払う可能性があり、さらに長期化すれば、マーケットから退出させられる可能性もある。この「待てる」期間は、製品やその市場での需給関係によって異なるが、「待てる」期間を超えて長期化すれば被災した企業にとっては、「中断のコスト」、あるいは「市場復帰のためのコスト」は時間を追って大きくなり、さらに長期化すれば、マーケットへの復帰が不能、すなわち「中断のコスト」はその企業にとっては巨額なものとなる。

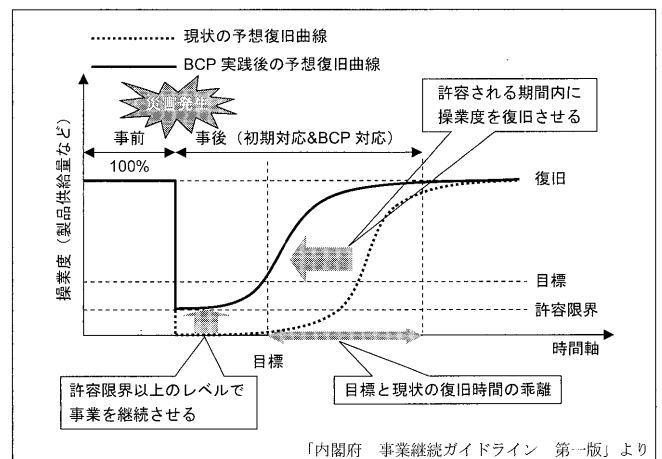


図1 事業継続計画(BCP)の概念

3. 業務停止期間の定量化手法の構築

3.1 直接損害に係るリスク評価手法

筆者らはこれまで、複数建物（以下、ポートフォリオ）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⁾。同手法では、地震ハザード解析に用いるような多数の要素地震（以下、イベント）を生成し、イベント毎に次式によりポートフォリオの直接損害 $l_D(i)$ を求める。

$$l_D(i) = \sum_{j=1}^n l_j(i) \quad (1)$$

ここに、 i はイベントを、 j は建物を表す変数である。また、 $l_j(i)$ は、イベント i による建物 j の直接損害を表す。直接損害については建物間の連関が無いことから、(1)式のような単純和が成り立つものとしている。

さらに、イベントの年間発生頻度 $\nu(i)$ と、(1)式で得られた $l_D(i)$ を全てのイベントについて求め、所与の損失を超過する年間頻度を求めることで、直接損害に係るリスクカーブが得られる。なお、筆者らの手法では、地震動評価や建物損失評価における不確実性を考慮するため、モンテカルロシミュレーションを援用している。また、年超過頻度については、ポアソン過程を仮定し、年超過確率に変換している。

同手法では、地震発生が空間的にランダムであること、同一地点でも施設の損失は完全相関ではないこと、等によりリスク分散の効果が自動的に反映される。なお、異なる地点間での地震動強度の相関については、林ら³⁾の方法により評価することが可能である。

3.2 業務停止期間に係るリスク評価への展開

ここでは、3.1 に示したポートフォリオの地震リスク評価手法を拡張し、(1)式のような単純和が成立しない業務停止期間のリスク評価方法を提案する。

イベント i による拠点 j の業務停止期間 $t_j(i)$ は、複数の被害レベル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定義する。

$$t_j(i) = \sum_{k=0}^4 [p_{j,k}(i) \cdot t_{j,k}(i)] \quad (2)$$

ここに、 $p_{j,k}(i)$ は、 $t_{j,k}(i)$ に対応した条件付確率、 k は被害レベルを表す変数で、 $k=0, \dots, 4$ は、無被害、小破、中破、大破、倒壊にそれぞれ対応する。

サプライチェーンの業務停止期間の期待値 $t_{SC}(i)$ は、次式により求められる。

$$t_{SC}(i) = \sum_{l=1}^N f[\mathbf{p}_l(i)] \cdot g[\mathbf{t}_l(i)] \quad (3)$$

ここに、 l は被害レベルの組み合わせを示す変数、 N は組み合わせ数である。被害レベルは、前述したように無被害から倒壊までの 5 レベルを考えていることから、組合せ数 N は、拠点数の 5 乗となる。 $\mathbf{t}_l(i)$ は、組み合わせ 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、 $\mathbf{p}_l(i)$ は $\mathbf{t}_l(i)$ に対応した条件付確率のベクトルである。

$f[\cdot]$ は組み合わせ l が生じる条件付確率で、 $\mathbf{p}_l(i)$ の関数として次式で定義する。

$$f[\mathbf{p}_l(i)] = p_{1,k1} \times p_{2,k2} \times \dots \times p_{n,kn} \quad (4)$$

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、 $g[\cdot]$ は当該組み合わせによるサプライチェーンの業務停止期間で、 $\mathbf{t}_l(i)$ 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。また、直列系と並列系の組み合わせに対しては、最大値と最小値を適宜組み合わせることとする。具体例については、注 1) に記載する。

イベントに対する業務停止期間の評価の概念を図 2 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 3 に示す。図 3 は単一のリスクカーブを求める手順を示しており、前述したように不確実性を考慮するためには、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援用する。

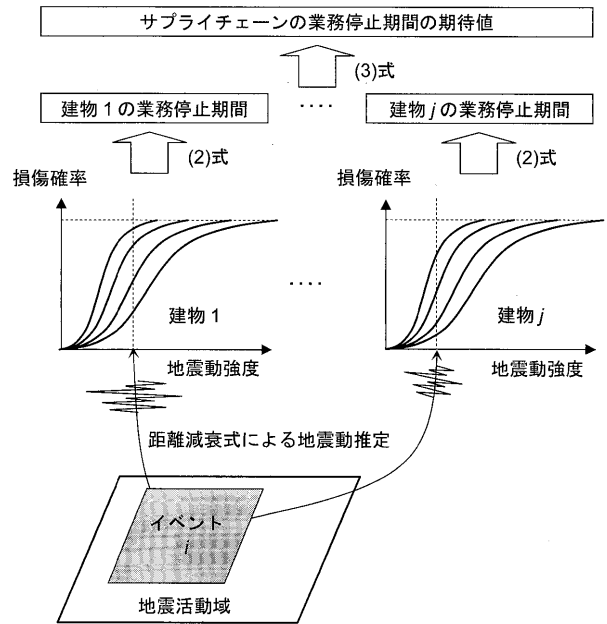


図 2 業務停止期間の評価の概念

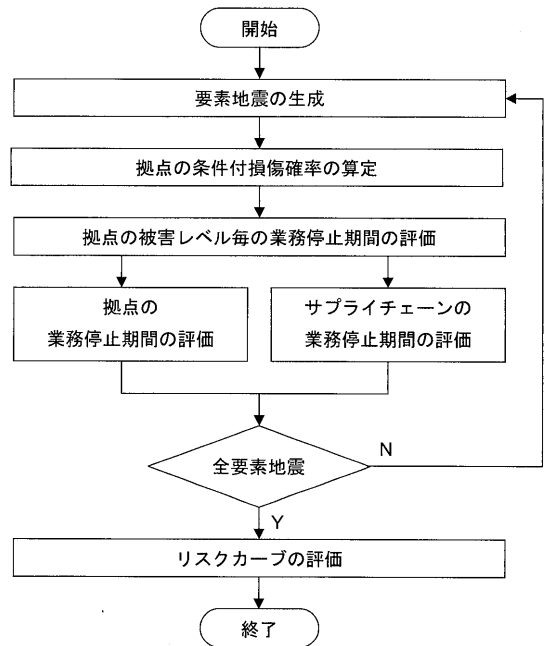


図 3 業務停止期間のリスク評価の手順

4. 適用試算

4.1 サプライチェーンを構成する拠点の特性の設定

サプライチェーンを構成する拠点の配置の相違がサプライチェーンの業務停止期間に与える影響を検討するため、5つの拠点を図4に示すように配置した。

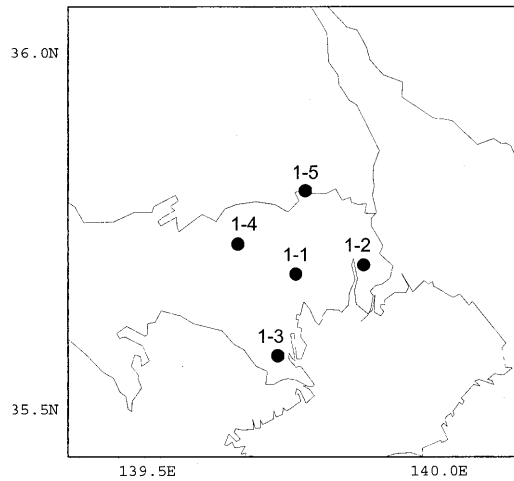


図4(1) 設定した拠点の配置 (配置1：東京23区内)

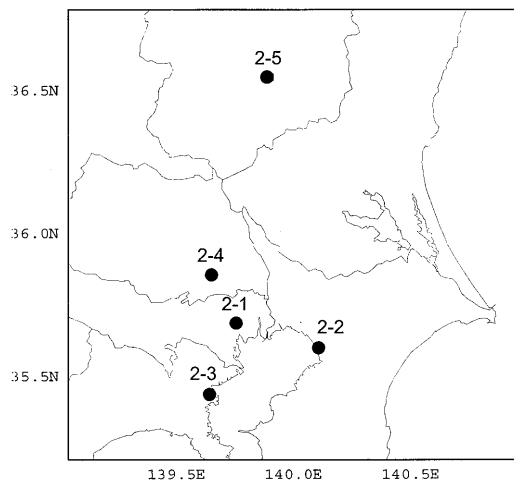


図4(2) 設定した拠点の配置 (配置2：関東地方内)

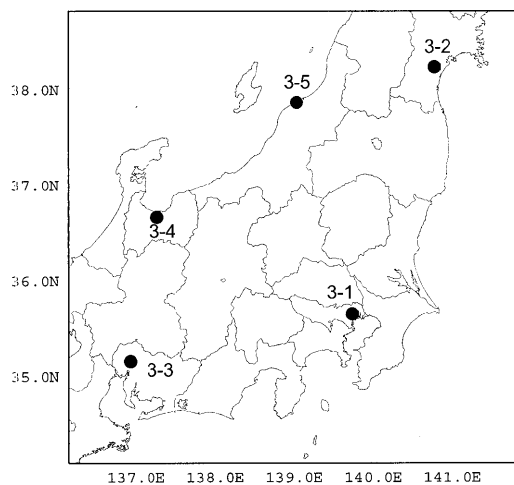


図4(3) 設定した拠点の配置 (配置3：東京300km圏内)

配置1：東京23区内（千代田，江戸川，大田，練馬，足立）
 配置2：関東地方内（千代田，千葉，横浜，さいたま，宇都宮）
 配置3：東京300km圏内（千代田，仙台，名古屋，富山，新潟）
 5つの拠点位置については便宜上それぞれ所在自治体の区市役所位置とした。

各拠点の耐震性能はフラジリティ曲線の特性値で定義し，文献2)に従い設定した。一方，各拠点での業務停止期間については，文献6)，7)を参照し，小破で3日程度，中破で2週間程度，大破で2ヶ月程度，倒壊で半年程度と設定した。被害レベルと業務停止期間の関係には，業種や業態により差異があり一律に設定するには不確実性が存在するが，このような単純化を行っても，本研究で提案するリスク解析手法の検証には問題はないと考えた。試算で用いた値を表1に示す。

なお，この手法を実際の企業のリスク評価に当てはめる場合には，個々の業種や業態の事情に応じた業務停止期間の設定を行えば良い。

表1 被害レベル別の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

4.2 サプライチェーンの連結性の設定

5拠点の連結性については，図5に示すような3種類の形式を採用した。

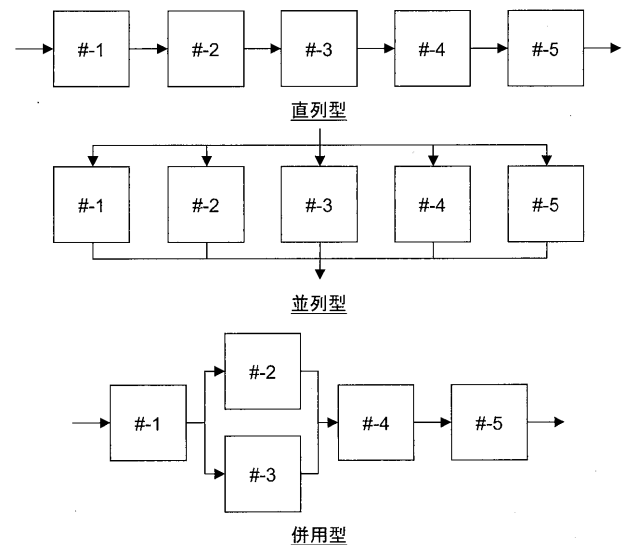


図5 設定したサプライチェーンの連結性

直列型：拠点#1から#5までの5つの拠点がサプライチェーンで直列に繋がっている型である。

5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。また，4つの全く異なる部品をそれぞれの拠点で製造し，最終組み立てを1拠点で行う場合もこのモデルで表現される。組み立て加工型産業で，主要部品の生産をそれぞれの拠点工場に特化させ，それらを集めてカンバン方式で最終製

品を組み立てるような業態を表現しており、サプライチェーン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。

並列型：拠点#-1から#-5までの5つの拠点がサプライチェーンで並列に繋がっている型である。

5つの拠点間の完全な代替性があり、5つの拠点のいずれかが機能していれば、サプライチェーンの機能は発揮される。規格化された製品を5つの工場で分散生産している型である。例えば、商品規格が定まっている「おにぎり」をコンビニチェーンが各地の工場生産させているような業態を表現している。

併用型：直列型と並列型が混在してサプライチェーンを構成しているものである。

本検討では、拠点#-2と#-3を並列に繋げ、その他の拠点とは直列に繋げたモデルを設定した。直列型と並列型の中間的な性格を持ち、多くのサプライチェーンはこの型やこれの派生型であるものと考えられる。

4.3 地震環境の設定

地震活動域モデルについては文献 8)を参照して、大地震発生域と中小地震発生域を設定した。設定した活動域モデル例を注2)に示す。なお、詳細な諸元については同文献を参照されたい。

また、距離減衰式は、(5)式の安中式⁹⁾を採用し、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。

$$\log a = 0.606M + 0.00459h - 2.136 \log(d) + 1.730 \quad (5)$$

$$d = \Delta + 0.334 \exp(0.653M)$$

ここに、 a は最大加速度 (cm/s/s)、 Δ は断面からの最短距離 (km)、 h は震源深さ (km)、 M はマグニチュードである。

4.4 評価結果

図6に、業務停止期間のリスクカーブ (横軸：業務停止期間の90%非超過値、縦軸：年超過確率)を示す。同図中で、太線はサプライチェーンに、細線は個別の拠点に、それぞれ対応する。

直列型では、5つの拠点の内1箇所が停止すればサプライチェーン全体が停止する。したがって、サプライチェーンのリスクカーブは、

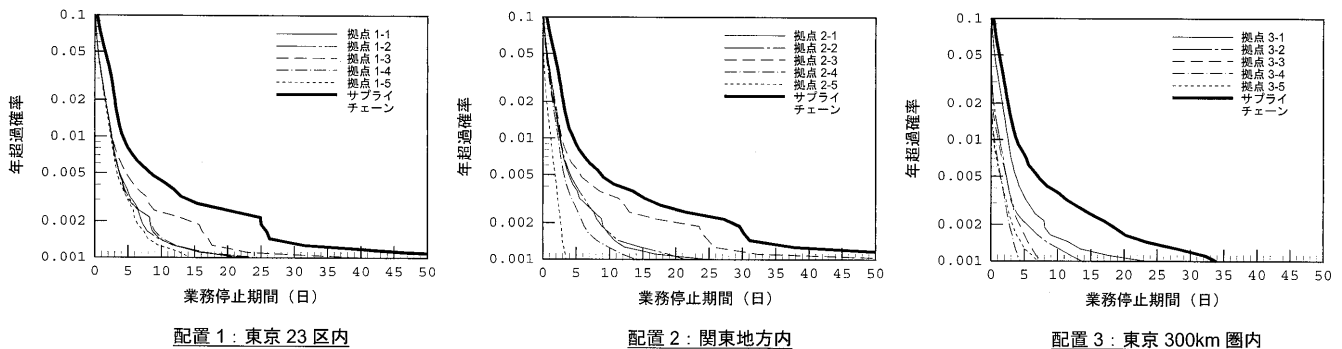


図 6(1) 業務停止期間のリスクカーブ (直列型)

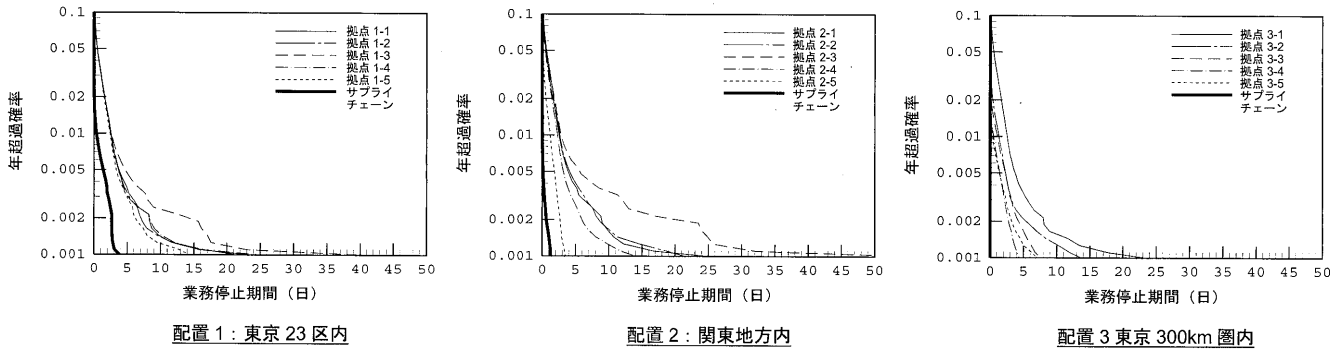


図 6(2) 業務停止期間のリスクカーブ (並列型)

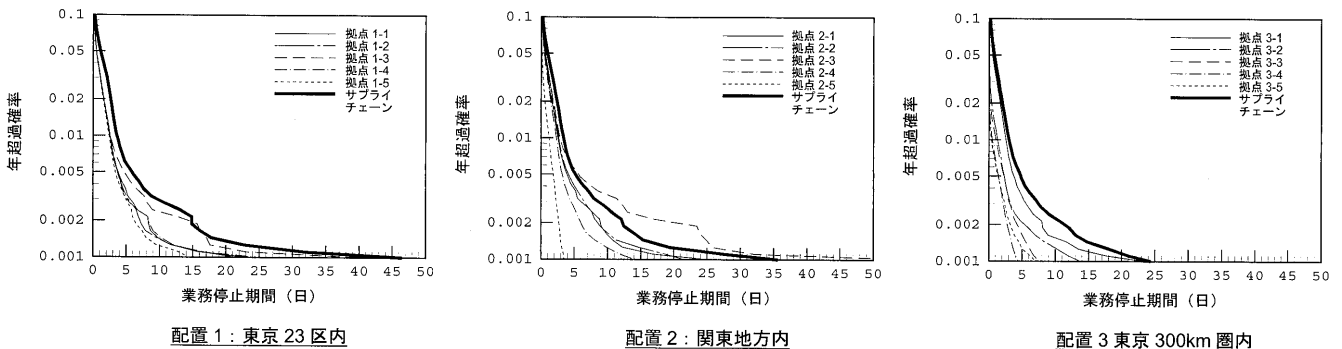


図 6(3) 業務停止期間のリスクカーブ (併用型)

いずれの拠点のリスクカーブよりも大きい。リスクカーブの大小関係は「配置3<配置1<配置2」となっている。地震発生確率が高い関東地方の中で分散配置すると、東京23区内での配置に比べ、拠点5つの内いずれかが地震に遭遇する確率が高くなり、いわば「地震に当たったのが広がるため」リスクカーブが大きくなる。東京300km圏内の場合には、5つの拠点の内4つが地震発生確率の高い関東地方外にあるため、リスクカーブは小さくなる。

並列型では、5つの拠点が同時被災しない限りサプライチェーンは停止しない。したがってサプライチェーンのリスクカーブは、いずれの拠点のリスクカーブよりも小さい。リスクカーブの大小関係は「配置3<配置2<配置1」となっている。広域に分散すればするほどサプライチェーンとしてはリスク低減効果があり、配置3では、サプライチェーンの業務停止期間は0.0となる。

併用型では、上記直列型と並列型の両方の性格を持ち、直列となっている要素のいずれかが被災すればサプライチェーンが停止するが、並列となっている2番目の要素の拠点2と拠点3が代替性を有しているために、両者が被災しない限りサプライチェーンの停止には繋がらない。リスクカーブの大小関係は「配置3<配置2<配置1」となっている。並列となっている拠点2と拠点3がより広域に分散するほど、リスク低下効果が高い。直列型と対比してみると併用型では、配置1と配置2のリスクカーブの大小が逆転し、配置2のほうが小さくなっていることがわかる。地震発生確率の高い関東地方の中であっても、拠点2-2と拠点2-3が並列になり、この2つの拠点の同時被災の確率は、配置1での並列部分である拠点1-2と拠点1-3の同時被災の確率よりも低いため、配置2のリスクカーブが低くなっており、サプライチェーンの一部の多重化と分散がリスク低下に寄与していることが定量的に読み取れる。

図5(1)直列型と図5(3)併用型の比較からわかるように、5拠点の内

2拠点を並列化するだけでも、事業停止期間のリスクカーブが大きく改善される。特に、関東地方内の配置2の直列型と併用型を対比してみると、サプライチェーンの構成拠点の中で最もリスクの大きい拠点2-3のリスクカーブよりも直列型のサプライチェーンのリスクカーブは大きくなるが、その工程を拠点2-2との並列にすることにより、サプライチェーンのリスクカーブは、年超過確率0.005以下の領域では、拠点2-3のリスクカーブよりも大幅に小さくなっている。このことは、直列型のサプライチェーンのリスクを低下させるには、構成する工程の中で最も脆弱なものを並列化し広域に分散させることが効果的であることを示している。

5. リスクカーブの振る舞い

5.1 拠点の配置とリスクカーブの関係

業務停止期間のリスクカーブは、拠点の配置（地震被害の同時発生の程度）及び連結性の他に、拠点位置の地震環境の影響を受けるため、拠点の広がりやリスクカーブの間には必ずしも単調な関係は見られない。そこで、本検討項目では拠点位置の地震環境の影響を除去するために、各拠点の業務停止期間の総和とサプライチェーンの業務停止期間を比較する。

両者の比較を図7に示す。同図中の細線は、各拠点の業務停止期間の総和のリスクカーブを示す。太線はサプライチェーンの業務停止期間のリスクカーブで、破線は直列型に、点線は並列型に、実線は併用型にそれぞれ対応する。

直列型の場合、拠点が広がるほどサプライチェーンの業務停止期間は各拠点の業務停止期間の総和に近づき、配置3では両者はほぼ一致する。これは、配置3では各拠点の被災はそれぞれ独立した地震によるため、直列型では拠点のいずれか1つでも被災すればサプライチェーン全体も停止するためである。これに対し、配置1や配置2のよう

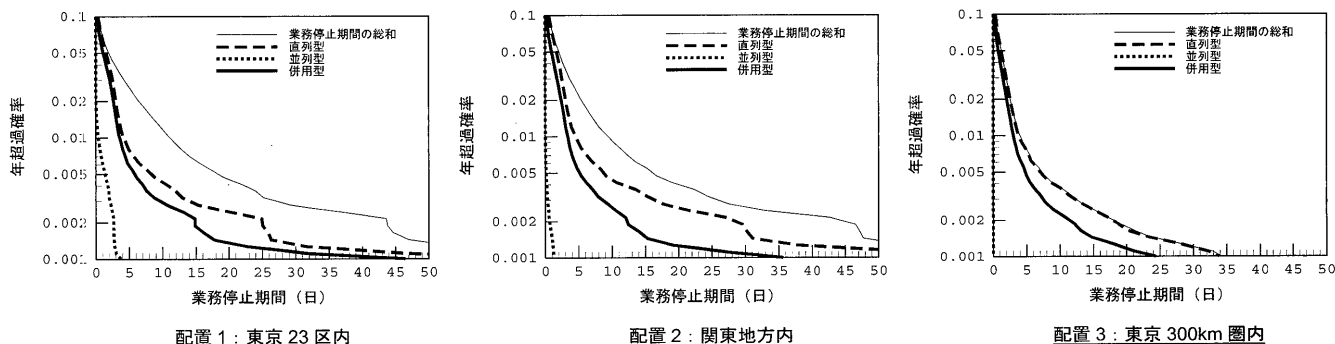


図7 サプライチェーンの業務停止期間と各拠点の業務停止期間の総和との比較

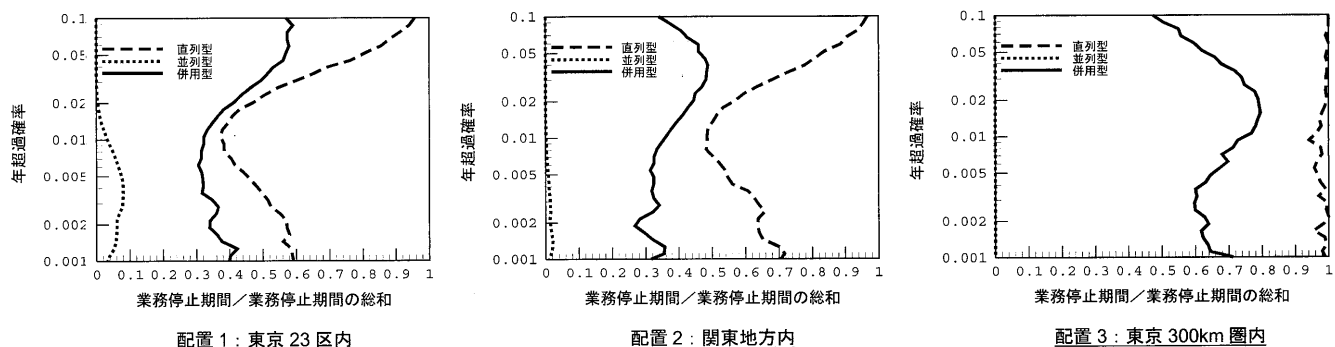


図8 サプライチェーンの業務停止期間と各拠点の業務停止期間の総和の比

に、拠点を狭い地域内に配置した場合には、1つの地震で複数の拠点が被災しうることから、サプライチェーンの業務停止期間は、各拠点の業務停止期間の総和よりも小さくなる。

並列型の場合、いずれの配置でもサプライチェーンの業務停止期間は、各拠点の業務停止期間の総和を大きく下回っており、拠点を配置が広がるほど、その程度が大きくなる。

併用型は、直列型と並列型の中間的なリスクカーブを示している。ただし、年超過確率が高い領域では直列型に近く、年超過確率が低くなるほど、並列型に近づいていく傾向が見られる。

5.2 年超過確率とリスクカーブとの関係

図7に示したように、各拠点の業務停止期間の総和とサプライチェーンの業務停止期間の関係は、参照する年超過確率によって異なる。そこで、両者の比（サプライチェーンの業務停止期間/各拠点の業務停止期間の総和）を指標として、年超過確率との関係を求めた。

得られた関係を図8に示す。破線は直列型に、点線は並列型に、実線は併用型にそれぞれ対応しており、直列型と並列型に見られた配置の広がりやサプライチェーンの業務停止期間との単調な関係を裏付けるものとなっている。

年超過確率が高い領域は、拠点直下の背景地震の影響が大きく現れるため、地震被災の同時発生の可能性が低くなる。このことは、拠点を配置を広げることと同様の効果を与えるため、年超過確率が高いほど、直列型ではサプライチェーンの業務停止期間は各拠点の業務停止期間の総和に近づき、一方、並列型では、サプライチェーンの業務停止期間はほぼ0.0となっている。併用型は直列型と並列型の中間的な傾向を示している。

年超過確率が0.002～0.02程度の領域では、関東地震の影響が支配的となるため、配置1と配置2では地震被災の同時発生の高くなる。そのため、年超過確率が高い場合とは反対に、直列型ではサプライチェーンの業務停止期間は各拠点の業務停止期間の総和の乖離が大きくなり、また、並列型でも事業中断が発生する。ただし、関東地震の影響が支配的とはならない配置3では、このような傾向は見られない。

年超過確率が0.002以下の領域では、関東地震以外の固有地震の寄与も大きくなることから、地震被災の同時発生の可能性が低く、その結果、年超過確率が高い領域と同様の傾向が現れていることがわかる。

6. まとめ

本研究では、企業のBCPを作成する際にはサプライチェーンの被災による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法を評価する手段が必要であることを指摘し、そのため、複数の拠点がサプライチェーンで結ばれている企業の企業活動の中断期間を確率論的に評価するリスク解析手法を提案した。これを、直列型、並列型、併用型の3タイプのサプライチェーンについて、東京を中心とした3つのスケールの配置に当てはめて分析を行い、以下の結果を得た。

- ① 従来、地理的に分散した複数の資産からなるポートフォリオのリスクカーブによる解析がなされてきたが、今回の手法では、地理的に分散した複数の拠点で構成されるサプライチェーンについてのリスクカーブによる解析が可能となる。

- ② この手法により、直列型、並列型、併用型といった様々なタイプのサプライチェーンの業務停止期間の確率論的な定量化、及び、サプライチェーンを構成する拠点の立地パターンごとの相違の定量的な比較分析が可能となる。

- ③ サプライチェーンに依存する企業は、従来定量的に考慮できなかった地震リスクの確率論的な比較が可能となる。例えば、直列系のサプライチェーンの中で、特にクリティカルな拠点について、その部分を並列にした場合の業務停止期間の定量的な軽減効果や、その並列にする拠点を地理的にどの地点に分散せるとどの程度軽減できるかが分析可能となる。

すなわち、このリスク解析手法は、サプライチェーンに依存する企業が地震リスクを考慮したBCPを考える上で、拠点をどのように配置するか、クリティカルな拠点をどのように多重化するか等の経営戦略を立てる上での有力なツールとなることを意味する。また、今回の解析例は東京を中心とした3つのスケールの配置を対象としたが、これに限定されるものではなく、他地域においても適用可能である。

この解析手法の応用としていくつかの課題が挙げられる。図5で示した直列型は5拠点がそれぞれ異なる要素であるが、この拠点の内の1つの要素を並列の2拠点到分散した場合（すなわち図5の併用型の#5の後ろにさらに#6を追加したもの）との定量的比較が挙げられる。今回の分析では、各拠点の地震動に対する脆弱性を同一としているが、さらに、応用形として、サプライチェーンの中の1拠点だけを耐震補強した場合の業務停止期間の軽減効果と、その拠点を並列化した場合の業務停止期間の軽減効果の定量的な比較が可能となる。すなわち、ある拠点を耐震補強する場合と、その拠点をもう1つ作り並列化する場合について、それぞれに要する費用と、業務停止期間の軽減効果を比較考慮することが可能となる。

今回のサプライチェーンの分析では、複数の拠点を結ぶ輸送手段の地震リスクは考慮していないが、これについても、図5に示した直列型や併用型の拠間に、「輸送路」という新たな要素を、拠点と同様に挿入して、その地震動に対する脆弱性をに入れて同様の解析を行うことによって輸送路も含めたサプライチェーンのリスク解析が可能となる。

また、今回のモデルでは、各拠点の被害レベルを指標として表1の業務停止期間を設定したが、各拠点での業務停止をもたらす要因（例：事業所の構造物、製造ライン、エネルギー供給システムなど）毎に詳細に見て、個々の要素毎に脆弱性曲線の特性値と業務停止期間を設定し、これら要因を直列のサプライチェーンで連結されている（すなわち、拠点内のいずれかの要素が欠けたら操業出来ない）という設定を行い、各拠点の業務停止期間を算定した上で、サプライチェーン全体のさらに精緻なリスク評価を行うことが可能である。

なお、今回のモデルでは、並列とした拠点の生産容量については考慮していないが、実際の企業においては、「許容される業務停止期間」と「許容される操業レベル」の組み合わせによりBCPを計画することから、最低限の生産容量を下回った場合には業務停止として扱うことも考えられる。

今回の分析手法の応用形をこのように考えることにより、さらに具体的にサプライチェーン依存型の企業のBCP策定のためのツールを開発することを今後の課題としたい。

注

注1) ポートフォリオの業務停止期間の期待値の評価例

業務停止期間の期待値の評価例として、2つの拠点からなるポートフォリオを取り上げる。単純化のため、被害レベルは、無被害、中破、倒壊の3レベルとした。イベントツリーの分岐における括弧内の数値は、(損傷確率/業務停止期間)を表している。

評価結果を図A1に示す。上図は直列系での評価を、下図は並列系での評価を示している。連結性の差異は各組合せにおける停止期間の評価に現れている。

拠点1 の被害	拠点2 の被害	組合せ の確率	停止期間 : 直列系	確率× 停止期間
無 (0.2/0)	無 (0.4/0)	0.08	×	0 = 0.00
中	中 (0.5/15)	0.10	×	15 = 1.50
	倒 (0.1/180)	0.02	×	180 = 3.60
	無 (0.4/0)	0.20	×	15 = 3.00
倒	中 (0.5/15)	0.25	×	15 = 3.75
	倒 (0.1/180)	0.05	×	180 = 9.00
	無 (0.4/0)	0.12	×	180 = 21.60
中	中 (0.5/15)	0.15	×	180 = 27.00
	倒 (0.1/180)	0.03	×	180 = 5.40
	無 (0.4/0)	0.08	×	0 = 0.00
期待業務停止期間				74.85

拠点1 の被害	拠点2 の被害	組合せ の確率	停止期間 : 並列系	確率× 停止期間
無 (0.2/0)	無 (0.4/0)	0.08	×	0 = 0.00
中	中 (0.5/15)	0.10	×	0 = 0.00
	倒 (0.1/180)	0.02	×	0 = 0.00
	無 (0.4/0)	0.20	×	0 = 0.00
倒	中 (0.5/15)	0.25	×	15 = 3.75
	倒 (0.1/180)	0.05	×	15 = 0.75
	無 (0.4/0)	0.12	×	0 = 0.00
中	中 (0.5/15)	0.15	×	15 = 2.25
	倒 (0.1/180)	0.03	×	180 = 5.40
	無 (0.4/0)	0.08	×	0 = 0.00
期待業務停止期間				12.15

図A1 業務停止期間の期待値の評価例

注2) 本検討で用いた地震活動域モデル

本検討で用いた地震活動域モデルの例を図A2に、その諸元を表A1に示す。

表A1 地震活動域諸元

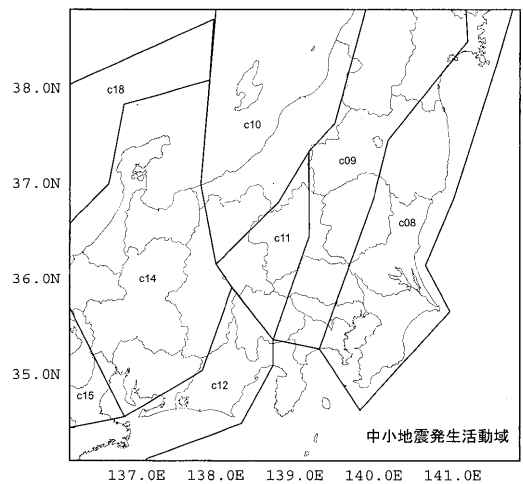
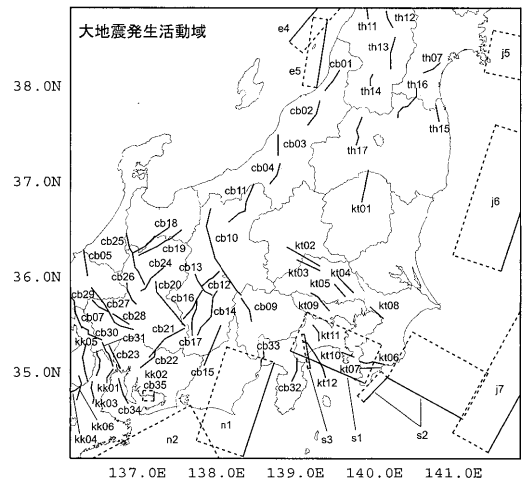
活動域 番号	最大M	発生間隔 (年)	活動域 番号	最大M	発生間隔 (年)	活動域 番号	最大M	発生間隔 (年)
th07	6.9-7.3	2 160	th11	6.8-7.2	3 380	th12	6.9-7.3	7 210
th13	7.0-7.5	2 040	th14	6.6-7.0	4 640	th15	6.8-7.2	5 930
th16	7.0-7.6	2 030	th17	6.9-7.3	1 710	-	-	-
kt01	7.0-7.5	2 030	kt02	7.0-7.6	1 180	kt03	6.9-7.3	5 210
kt04	7.0-7.4	79 300	kt05	6.8-7.2	5 930	kt06	7.1-7.5	2 840
kt07	7.0-7.4	2 640	kt08	6.8-7.2	5 680	kt09	7.1-7.5	8 710
kt10	6.6-7.0	1 370	kt11	6.9-7.3	7 240	kt12	7.5-7.9	1 630
cb01	7.1-7.5	9 120	cb02	7.2-7.6	10 800	cb03	7.0-7.4	2 630
cb04	7.0-7.4	2 400	cb05	7.1-7.5	9 500	cb07	6.8-7.2	5 960
cb09	7.1-7.5	2 850	cb10	8.1-8.5	1 070	cb11	7.4-7.8	1 090
cb12	7.0-7.4	2 400	cb13	7.2-7.6	1 070	cb14	7.6-8.0	1 820
cb15	7.0-7.7	1 160	cb16	7.3-7.7	3 700	cb17	7.3-7.7	3 620
cb18	7.5-7.9	5 020	cb19	7.6-8.0	1 820	cb20	7.7-8.1	2 210
cb21	7.0-7.7	1 090	cb22	7.1-7.5	9 640	cb23	7.1-7.5	8 940
cb24	7.3-7.7	12 000	cb25	7.7-8.1	7 060	cb26	7.1-7.5	9 400
cb27	7.7-8.1	1 940	cb28	6.9-7.3	6 890	cb29	6.9-7.3	6 770
cb30	7.1-7.5	2 830	cb31	7.1-7.5	8 650	cb32	7.1-7.5	880
cb33	6.8-7.2	1 920	cb34	7.1-7.5	8 490	cb35	6.4-6.8	32 700
kk01	6.8-7.2	6 350	kk02	7.1-7.5	8 770	kk03	7.0-7.4	7 750
kk04	7.1-7.5	8 680	kk05	7.0-7.6	1 170	kk06	7.1-7.5	9 030
e4	7.4-7.8	400	e5	7.3-7.7	400	-	-	-
j5	7.3-7.7	40	j6	7.4-7.8	400	j7	7.8-8.2	400
s1	7.8-8.2	200	s2	7.8-8.2	1 000	s3	7.3-7.7	630
n1	7.6-8.0	130	n2	7.9-8.3	130	-	-	-

活動域 番号	Mの範囲	A値	活動域 番号	Mの範囲	A値	活動域 番号	Mの範囲	A値
c08	5.0-7.0	2.34	c09	5.0-7.0	4.23	c10	5.0-7.5	4.32
c11	5.0-7.0	1.65	c12	5.0-7.0	2.34	c14	5.0-7.5	4.51
c15	5.0-7.0	3.69	c18	5.0-7.0	3.39	-	-	-

注: グーテンベルク・リヒター式のb値は、全活動域で0.9

参考文献

- 1) 内閣府防災担当、民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査会、企業評価・業務継続ワーキンググループ：事業継続ガイドライン第一版—わが国企業の減災と災害対応の向上のために—、2005.8
- 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) 西川智、福島誠一郎、矢代晴実：BCPのためのサプライチェーン地震リスク評価の提案、2007年度日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.637-638, 2007.8
- 4) 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
- 5) 林孝幸、福島誠一郎、矢代晴実：地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響、日本建築学会構造系論文集、No.600, pp.203-210, 2006.2
- 6) 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
- 7) 高橋郁夫、林孝幸、荏本孝久、宮村正光、福島誠一郎：BCP策定のための地震被害モードマトリクスに関する一考察、2007年地域安全学会梗概集No.21, pp.109-112, 2007.11
- 8) 日本建築学会編：建築物荷重指針・解説, 2004.9
- 9) 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A2 拠点周辺の地震活動域

(2007年12月10日原稿受理、2008年5月8日採用決定)