

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

奈良岡 浩二 藤川 智 奥村 俊彦 石川 裕
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術戦略室)

Estimation of Seismic Damage and Seismic Risk for Supply Chain

by Koji Naraoka, Satoshi Fujikawa, Toshihiko Okumura and Yutaka Ishikawa

Abstract

For a seismic risk management for supply chain, a seismic damage estimation system for a scenario earthquake and a probabilistic seismic risk estimation system are developed, and examples of the application are presented. The probabilistic seismic risk estimation system for supply chain is useful for nationwide facilities. By this system, we can estimate the probability of business interruption for entire facilities within a certain time period, and grasp relative weak points (bottlenecks) of the supply chain. The seismic damage estimation system is mainly applied to regionally located facilities. By this system, we can grasp the entire loss for a scenario earthquake and bottlenecks of the supply chain.

概要

サプライチェーンの地震リスクマネジメントを行うために、対象地域で想定される地震に対してサプライチェーンを考慮して総損失額を予測するシステムとサプライチェーンを考慮した地震リスクを確率論的に評価するシステムを開発し、適用例を示した。事業所が全国展開している場合は確率論的な地震リスク評価が有効であり、この方法により事業中断確率の評価や相対的な弱点（ボトルネック）となる施設の抽出が可能となる。事業所が特定の地域に集中している場合は、想定される地震に対する被害予測が有効であり、一回の地震による総損失額の把握やボトルネックの抽出が可能となる。

§ 1. はじめに

大地震などの自然災害後の事業の早期復旧を目的として、事業継続計画（BCP）に対する取り組みが多く企業で行われており、地震リスクマネジメントを中心とした検討が進められている。このような地震リスクマネジメントの多くは、施設単体を対象として対象敷地における地震ハザードを評価し、その評価結果に基づいて施設の地震リスクを評価し、最適な構造形式の選定や耐震補強などの対策を講じるものである。

このような事業継続計画への活用を目的として、今までに着目するピンポイントでの地震ハザード情報を迅速に提供するための「想定地震選定システム」¹⁾を開発している。このシステムでは、対象とする地点における地震動強さと発生確率の関係（ハザードカーブ）に加えて、強い揺れをもたらすとすればどの地震である可能性が高いかを示すことができる。また、個々の生産施設の地震リスクの評価については、事業中断損失を含めた評価の考え方についても検討を行っている²⁾。地震リスクの指標として、「予想最大リスク」と「ライフサイクルリスク」

の2つの概念を定義し、マネジメントの対象や目的に応じて使い分けていくことを提案している。

ところで、2007年新潟県中越沖地震では、自社施設以外の工場の被災により工場の操業停止に追い込まれた事例が生じている。このため、サプライチェーンを有する企業においては、自社以外の施設も対象として地震リスクマネジメントを行い、地震時の事業中断の可能性や改善すべき点を判定することが重要となると考えられる。

サプライチェーンの地震リスク評価に関する既往研究として、白田ら³⁾は、地震発生時にも顧客への物品供給体制を維持できるサプライチェーンマネジメントを検討するシステムを開発している。このシステムでは、地震による建物やサプライチェーンの被害を評価し、地震被災後の緊急時の最適なサプライチェーンを推定するものである。西川ら⁴⁾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ている。

複数施設に対するサプライチェーンを考慮した地震リスクマネジメントでは、サプライチェーンに対する地震リスクの評価、相対的な弱点（ボトルネック）となる施設の抽出、対策を講じるときの優先順位、および各種対

策の費用対効果の把握が重要となる。事業所が全国に展開している場合は、各施設に影響を与える地震が地域によって異なるため、全国の活断層や過去の地震情報に基づく確率論的な地震リスク評価が有効となると考えられる。一方、事業所がある地域に比較的集中している場合は、その地域で発生する可能性が高い地震によって生ずる被害をより詳細に予測することが重要と考えられる。ボトルネックの抽出には確率論的評価とシナリオ地震に対する被害予測が有効であり、また、一回の地震に対する総損失額の把握には、シナリオ地震に対する被害予測が有効となる。

本研究では、上記のような背景から対象としている地域で発生が想定されるシナリオ地震に対してサプライチェーンを考慮に入れて地震被害を予測するために開発したシステムを紹介し、適用例を示す。このシステムでは、地震被害としては、建物や生産装置などの物的被害による直接損失、施設被災による操業停止に伴う間接損失、サプライチェーンの被害による操業停止に伴う波及損失を予測する。ライフラインの影響として、電気、ガス、水道、道路の復旧期間を考慮している。また、道路被害による復旧期間を評価するために、予想震度分布と道路の位置情報から地震被害による道路の復旧期間を簡易的に評価する方法を構築し、システムに採用している。

次に、事業所が全国展開している場合を対象として、地震による事業中断確率やボトルネックとなる施設の抽出が可能となる確率論的手法によるサプライチェーンの簡易地震リスク評価方法を示し、適用例を紹介する。この方法は、確率論を応用した個々の施設に対する地震ハザード評価と地震リスク評価方法^{1), 2)}を発展させて、サプライチェーンの条件を考慮に入れたものである。

§ 2. シナリオ地震に対するサプライチェーンを考慮した地震被害予測システム

ここでは、想定される地震(シナリオ地震)に対して、サプライチェーンを考慮して地震被害を予測するシステムについて紹介する。

2.1 システム概要

本システムは、ある地域で想定される地震に対してサプライチェーンを考慮した総損失額を予測するものである。想定地震としては、任意の点震源・面震源の設定が可能である。想定地震に対する最大加速度と最大速度の予測には、司・翠川³⁾による距離減衰式を用いている。また、内閣府の中央防災会議から公表されている首都圏直下地震や東海地震などに対する予想震度分布を内蔵している。

2.2 応答・損傷度・復旧費用の評価

建物・設備・生産装置などの被害は、宮腰ら⁶⁾を参考として、応答加速度と層間変形角などの建物の応答値に基づいて評価する。応答値は、田村ら⁷⁾などによる応答の概算値を簡便に求めるための手法を用いている。

実被害データに基づく被害確率曲線を用いて脆弱リティ評価を行う方法(例えば、林ら⁸⁾)もあるが、生産施設のように床面積や階高などに個別性が強い建物では、当該建物の応答特性を踏まえた評価の方がより適切と考えられる。また、免震・制震構造や最近の生産装置などは被害事例に乏しいため、統計データに基づいて被害予測を行うのは難しく、応答値と関連づけて被害を評価する方が合理的である。

本システムでは、建物を内外装、躯体、設備、その他に、生産設備を生産装置とユーティリティにそれぞれ分類し、各部位ごとに評価した被害(復旧費用)を積み上げることによって施設全体の復旧費用を評価する。個々の部位ごとの被害の評価に関しては、過去の被害事例(例えば、文献9)に専門家の判断を交えて脆弱リティモデルならびに損失関数を構築している。

2.3 復旧期間の評価

復旧期間の評価では、建築・設備・生産装置などの被害によるものに加えて、ライフライン(電気・ガス・水道・道路)の復旧に要する期間を考慮する。電気・ガス・水道の復旧期間の評価に関しては、兵庫県南部地震の際の被害事例に基づく能島ら¹⁰⁾の研究を参考とした。また、対象施設によって電気・ガス・水道への依存性が異なる場合があるため、施設毎に各ライフラインの復旧期間を調整可能なようにしている。

道路被害による復旧期間は、想定した道路延長(経路)に沿った予想震度分布から被害箇所数を予測し、被害箇所数の経時変化を考慮することで評価する。

地震動と道路被害の関係に関しては、過去の被害調査に基づいた事例がいくつかある。これらの調査事例によると、道路種別・構造種別によりやや異なるが、震度5弱以下で被害はほとんどなく、5強以上で被害が生じる傾向があることが示されている。ここでは、常田ら¹¹⁾と酒井ら¹²⁾が2004年新潟県中越地震での被害調査から示した結果を参考に、計測震度と道路の通行止め率の関係を設定した。道路の通行止め率は、被害箇所数を道路延長距離(km)で除した値として定義する。モデル化した計測震度と通行止め率の関係を図-1に示す。通行止め率は、3次メッシュごとに予想震度分布から評価する。このとき、あるサプライチェーンの経路全体の通行止め箇所数 N_0 は、式(1)として評価される。

$$N_0 = \sum n_i = \sum r_i \cdot l_i \quad (1)$$

ここに、 N_0 は通行止め箇所数、 n_i は3次メッシュごとの通行止め箇所数、 r_i は3次メッシュごとの通行止め率、 l_i は3次メッシュごとの経路長さ(km)である。

道路の復旧日数は、通行止め箇所数の経時変化を基に評価する。常田ら¹⁴⁾は、2004年新潟県中越地震での被害データから、道路種別ごとの全面通行止め箇所数の経時変化を分析している。これを参考に、通行止め箇所が時間とともに修復され、減少していく経時変化を図-2に示すように指数関数で表す。

以上より、予想震度分布から予測される通行止め箇所数とその経時変化を求めることができる。道路の復旧期間は、通行止め箇所数があらかじめ設定した値 N_c となる経過日数 D_c に基づき、これに過去の被害例を参考に係数を乗ずることにより評価する。

上記のようなサプライチェーンに及ぼす道路被害の影響を考慮するためには、サプライチェーンの地理学的経路情報が必須の情報となる。サプライチェーンの地理学的経路情報は、道路位置を含むベースマップ上で経路を手動で指定する方法で求める。

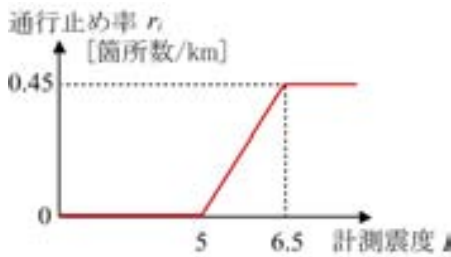


図-1 計測震度と通行止め率の関係

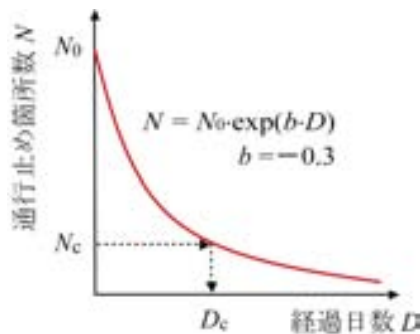


図-2 通行止め箇所数の経時変化

2.4 サプライチェーンの条件設定

サプライチェーンの条件としては、施設間での部品や原材料の供給の有無、在庫日数、供給が途絶えることによる供給先の事業所の一あたりの生産高の低減率、および代替施設の有無と代替施設がある場合はその施設を指定する。

2.5 損失額の評価

対象とする一事業所の地震による総損失額 L_T を式(2)のように表す。

$$L_T = L_D + L_I + L_S \quad (2)$$

$$L_I = VR_f \quad (3)$$

$$L_S = VR_s \quad (4)$$

ここに、 L_D は建物や生産装置などの被害による直接損失、 L_I は施設の操業停止に伴う間接損失、 L_S は他施設の被災により部品や原材料が供給停止となることに伴う波及損失である。また、 V は当該施設の一あたりの生産高、 R_f は当該施設のライフライン(電気・ガス・水道)を考慮した復旧日数、 R_s は対象としている事業所間の道路の復旧日数と供給元の施設の復旧日数の長い方から当該施設の復旧日数と在庫日数を引いた日数である。

2.6 適用例

2.6.1 適用例1

事業所が南関東に集中している例として、表-1に示す千葉部品工場、東京部品工場、埼玉事業所、東京事業所、神奈川事業所の計5施設を対象として、東京湾北部地震に対する被害予測を行う。東京湾北部地震に対する予想震度分布は、内閣府の中央防災会議から公表されているものを用いる。ライフラインとして、電気、水道、道路の影響を考慮する。部品供給の流れは、表-2に示すように千葉部品工場→東京部品工場、東京部品工場→

表-1 対象施設の諸元

施設名	建設年	構造	階数	再調達価格(億円)	1日あたりの生産高(百万円)
千葉部品工場	1981	S	2	25	5
東京部品工場	1981	S	3	17	5
埼玉事業所	1971	S	2	50	30
東京事業所	1981	S	3	50	70
神奈川事業所	1971	S	3	50	70

表-2 サプライチェーンの条件

供給元	供給先	在庫日数	生産高低減率
千葉部品工場	東京部品工場	3日	100%
東京部品工場	埼玉事業所	3日	100%
埼玉事業所	東京事業所	3日	100%
東京事業所	神奈川事業所	3日	100%

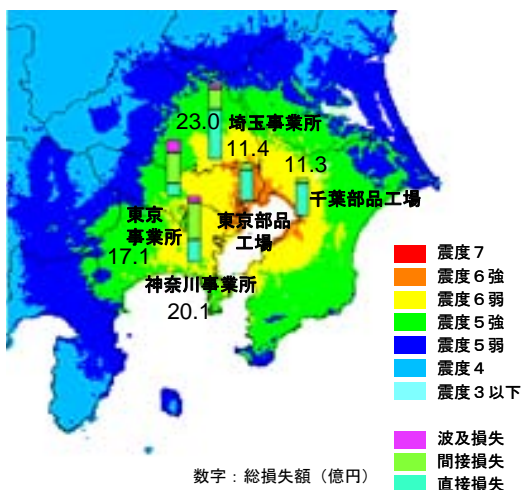


図-3 東京湾北部地震に対する被害予測例1

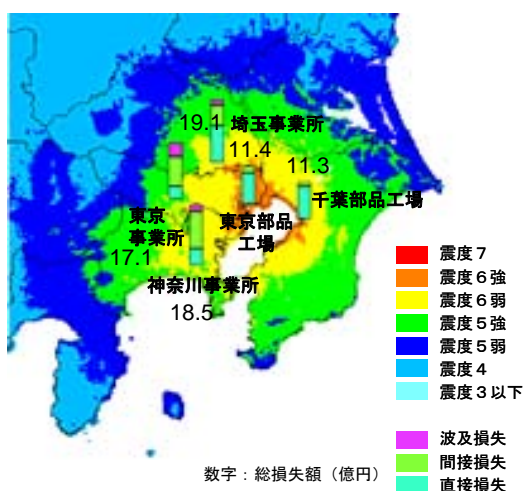


図-4 東京湾北部地震に対する被害予測例2

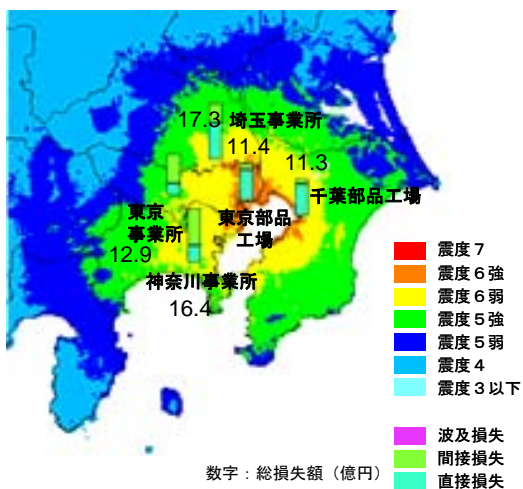


図-5 東京湾北部地震に対する被害予測例3

埼玉事業所、埼玉事業所→東京事業所、東京事業所→神奈川県事業所となっており、また各事業所の在庫日数は3日、部品供給停止による生産高低減率は100%としている。

被害予測結果を図-3に示す。図には、予測震度分布と各施設の総損失額（単位：億円）と直接損失、間接損失、波及損失の割合を表示している。東京部品工場の被災により部品供給が途絶えるため、埼玉事業所、東京事業所、神奈川県事業所で波及損失が生じることが予想されている。

地震被害を低減する方法としては、影響の大きい施設に対して耐震補強等の対策を施す方法と、在庫日数を増やす、あるいは別の場所に代替施設を設けるなどの方法がある。直接損失や間接損失を低減するために上記のケースに対して、旧耐震構造の埼玉事業所と神奈川県事業所の耐震補強を行った場合の結果を図-4に示す。直接損失と間接損失が低減されることが予想されている。また、各施設の在庫日数を3日から10日に増やした場合の結果を図-5に示す。在庫日数を増やすことにより、他施設の被災による波及損失が無くなり、地震被害が低減されることが予想されている。

2.6.2 適用例2

事業所が全国に展開している例として、表-3に示す6施設を対象とした被害予測を行う。埼玉事業所を最終的な組立工場とし、他の事業所を部品製造工場としている。サプライチェーンの設定条件を表-4に示す。ライフラインとして、電気、水道、道路の影響を考慮する。シナリオ地震としては、広域に影響を及ぼすことが予想されている東海地震、東南海地震、南海地震が連動するケースとし、内閣府の中央防災会議から公表されている予想震度分布に基づいて被害を予測した結果を図-6に示す。被災が予想されるのは大阪事業所だけであり、直接損失と間接損失が予想されている。また、道路被害を考慮した予想復旧日数が埼玉事業所における大阪事業所で生産した部品の在庫日数を下回ることから、埼玉事業所における波及損失の発生は予想されていない。

表-3 対象施設の諸元

施設名	建設年	構造	階数	再調達価格(億円)	1日あたりの生産高(百万円)
埼玉事業所	1981	S	4	50	20
栃木事業所	1981	S	2	30	5
茨城事業所	1981	S	3	30	5
群馬事業所	1981	S	3	50	10
大阪事業所	1981	S	2	30	5
富山事業所	1981	S	5	30	5

表-4 サプライチェーンの条件

供給元	供給先	在庫日数	生産高低減率
栃木事業所	埼玉事業所	6日	100%
茨城事業所	埼玉事業所	7日	100%
群馬事業所	埼玉事業所	7日	100%
大阪事業所	埼玉事業所	10日	100%
富山事業所	埼玉事業所	7日	100%

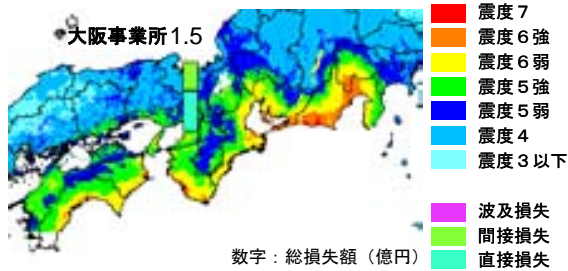


図-6 東海・東南海・南海地震に対する予想被害

§ 3. 確率論的手法によるサプライチェーンの地震リスク評価

表-3に示したような施設群では、事業継続に影響を及ぼす地震が多数あり、施設によって影響を受ける地震も異なるため、これらの全ての地震を対象として確率論的にサプライチェーンを考慮した事業中断の可能性を評価することが望ましい。以下では、確率論的手法によるサプライチェーンの地震リスク評価方法について述べる。

3.1 サプライチェーン地震リスク評価の概要

ここでは、事業継続の観点からサプライチェーンに対する地震リスクの指標として、今後のある評価期間（10年、30年、50年から選択）内に、サプライチェーン全体として事業が中断する確率を採用する。

サプライチェーンの地震リスク評価フローを図-7に示す。サプライチェーンに対する簡易地震リスク評価は、以下の手順に従って行う。

- (1) 施設の基本情報（住所、建設年、構造種別、階数、階高、在庫日数、許容中断期間、生産装置の耐震性など）を入力する。
- (2) ライフライン（電気・ガス・水道）の影響を考慮した地震リスク評価²⁾により、地震被害による復旧日数が各施設の許容中断期間を上回る地震動強さ（=許容地震動）を評価する。
- (3) 地震ハザードカーブと許容地震動から、評価期間内で許容地震動を上回る確率を評価する。

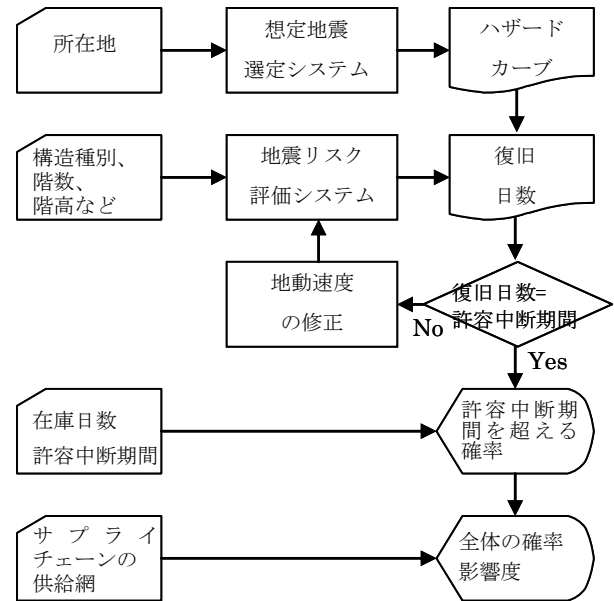


図-7 サプライチェーンの地震リスク評価フロー

- (4) サプライチェーンの供給網を考慮し、全施設のいずれかで許容中断期間を上回る確率を評価する。
- (5) 上記確率に対する各施設の影響度を評価する。
この評価方法により、以下の3項目を算定することができる。

- (1) 拠点施設別の許容中断期間を超える確率
- (2) サプライチェーン全体が評価期間内で事業中断する確率
- (3) サプライチェーンの中断に及ぼす各拠点施設の影響割合。

本評価方法による地震リスクの評価結果を踏まえて、サプライチェーン全体が抱えるリスクや、ウィークポイントがどの拠点施設にあるかなどを把握することが可能となる。事業継続計画を策定する上で、どの拠点施設を耐震補強すべきか、または代替生産施設の確保を優先すべきかなど、費用対効果を踏まえて多角的に検討することができる。

3.2 事業中断確率と各施設の影響度の評価

対象施設数を N とし、 i 番目の施設が今後のある評価期間（10年、30年、50年より選択）内に許容中断期間を上回る確率を $p(i)$ とすると、すべての施設が同時被害を受けることがなく、また、代替生産施設がない場合（以下では、直列と呼ぶ）は、最終的な組立工場において、許容中断期間を下回る確率は、以下のように表される。

$$\prod_{i=1}^N (1 - p(i)) \quad (5)$$

したがって、いずれかの施設が許容中断期間を上回る確率は、以下のようになる。

$$1 - \prod_{i=1}^N (1 - p(i)) \quad (6)$$

なお、 $p(i)$ は、図-7に示したように地震リスク評価システムにより地動速度と復旧日数の関係を調べ、許容中断日数に対応する許容地震動を求め、ハザードカーブから算出することになる。

i 番目と j 番目の施設が同じ部品や原材料を生産している場合(以下では、並列と呼ぶ)、この部分で許容中断期間を上回る確率は $p(i) \cdot p(j)$ となるため、並列箇所の確率を補正した後に式(5)を適用することになる。なお、同時被害を受ける可能性のある施設群に対しては、 $p(i)$ の従属性を考慮して式(5)を評価する必要がある。

次に、式(5)で表される全体の事業中断確率に対する各施設の影響度を表す指標 α_i を次式で定義する。

$$\alpha_i = \frac{p(i)}{\sum_{i=1}^N p'(i)} \times 100 \quad (7)$$

$p'(i)$ は、直列箇所では $p(i)$ であり、並列箇所では施設が同時に許容中断期間を上回る確率である。 N' は、並列箇所を直列系に置き換えた場合のサプライチェーン(施設)の数である。

なお、 i 番目と j 番目のサプライチェーンが並列の場合の影響度は、以下のようなになる。ここに、 m は並列箇所における並列数である。

$$\alpha_i = \frac{p(i)p(j)}{\sum_{i=1}^N p'(i)} \times \frac{1}{m} \times 100 \quad (8)$$

3.3 適用例

表-5に示す6つの事業所を対象として、本評価方法を適用する。地震ハザード評価は、2009年1月1日を起点として今後30年間に対して行う。ライフラインとしては、電気と水道の復旧期間を考慮する。埼玉事業所を最終的な生産工場、他の事業所を部品あるいは原材料の生産工場とし、各事業所の許容中断期間を表-5のように6~10日とした場合に、今後30年間にいずれかの施設が地震被災により事業中断期間が許容中断期間を超える確率とその確率に対する各施設の影響度、および各施設の許容中断期間を超える確率を評価した結果を図-8に示す。また、図中には部品や原材料の流れを矢印で示している。各事業所の円の大きさは、影響度の大きさに比例しており、色が塗られた部分と地図上の数字は、各事業所で今後30年間に許容中断期間を超える確率を示している。なお、復旧期間の評価においては、ライフラインと施設の復旧は並行して行われるものとし、それぞれの復旧期間の長い方を復旧期間としている。

事業中断リスクを低減する方法としては、影響度の大きい施設に対して耐震補強等の対策を施すことにより当

該施設の地震リスクを低減させる方法と、別の場所に代替施設を設けるなどの方法がある。

影響度が比較的大きい大阪と茨城の代替施設をそれぞれ富山と栃木とした場合の結果を図-9に示す。両方向の破線の矢印は、相互に代替生産が可能な施設を表している。代替施設ができることにより、2つの施設が地震によって同時被害を受ける確率が低くなるため、許容中断期間を超える確率が87%から54%に低減されている。

さらに、埼玉と群馬も相互に代替生産が可能な場合の結果を図-10に示す。許容中断期間を超える確率は11%までに低減されており、各施設に代替施設がある場合は、許容中断期間を超える確率が大きく低減されることがわかる。また、各施設の代替施設があることにより、各施設の影響度もほぼ同程度になり、弱点となる施設が解消されている。

次に、各施設の在庫日数を増やして許容中断期間をそれぞれ14日とした場合の結果を図-11に示す。各施設の許容中断期間を超える確率は低下し、サプライチェーン全体で事業中断する確率も87%から44%に低減されている。また、図-9と同様に栃木と茨城、および大阪と富山が代替生産可能とした場合の結果を図-12に示す。事業中断の確率は、21%に低減されている。栃木と茨城の施設の影響割合は1%以下と小さくなるが、図中の2施設に対する円の大きさは識別可能なように実際の影響割合よりも大きく表示している。さらに、埼玉と群馬も相互に代替生産が可能な場合の結果を図-13に示す。事業中断の確率は、1%までに大きく低減されている。

表-5 対象施設の諸元

施設名	建設年	構造	階数	許容中断期間
埼玉事業所	1981	S	4	10日
栃木事業所	1981	S	2	6日
茨城事業所	1981	S	3	7日
群馬事業所	1981	S	3	7日
大阪事業所	1981	S	2	10日
富山事業所	1981	S	5	7日

§4. まとめ

サプライチェーンを考慮した複数施設に対する事業継続計画への活用を目的として、対象地域で想定される地震に対してサプライチェーンを考慮して総損失額を予測するシステムとサプライチェーンを考慮した地震リスクを確率論的に評価するシステムを開発し、適用例を示した。事業所が全国展開している場合は、全国の活断層

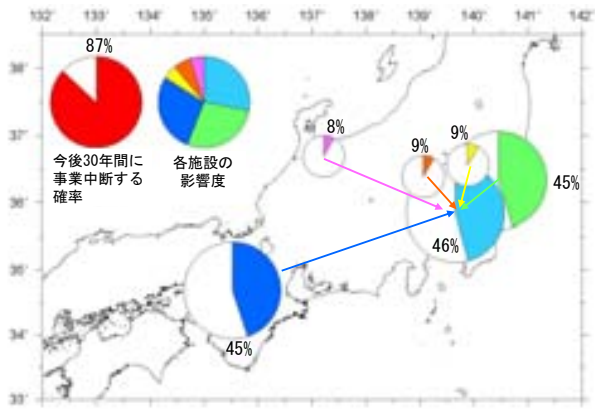


図-8 事業中断確率（代替施設がない場合）

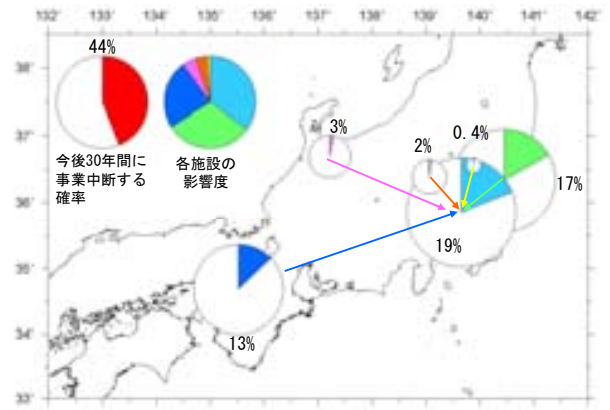


図-11 事業中断確率（全施設の在庫日数を14日として代替施設がない場合）

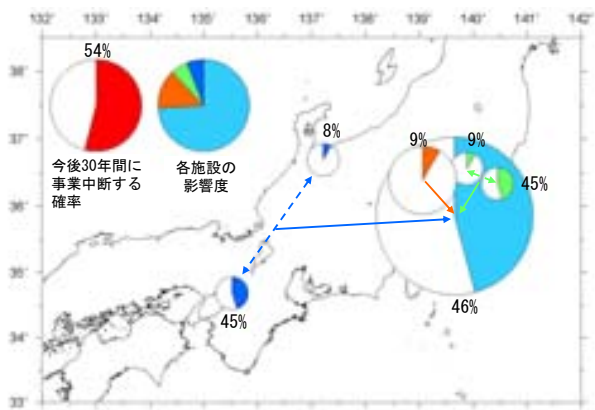


図-9 事業中断確率（栃木、茨城、大阪、富山がそれぞれ代替施設の場合）

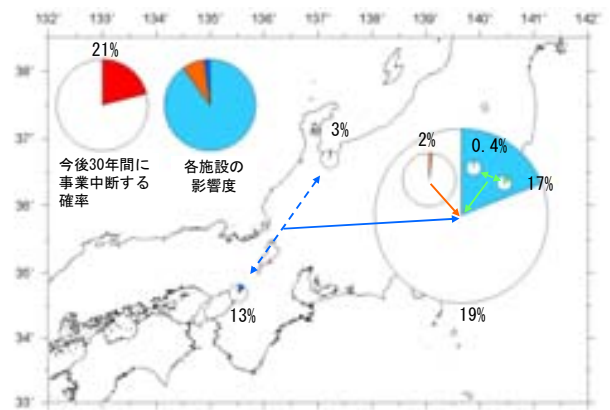


図-12 事業中断確率（全施設の在庫日数を14日として、栃木、茨城、大阪、富山がそれぞれ代替施設の場合）

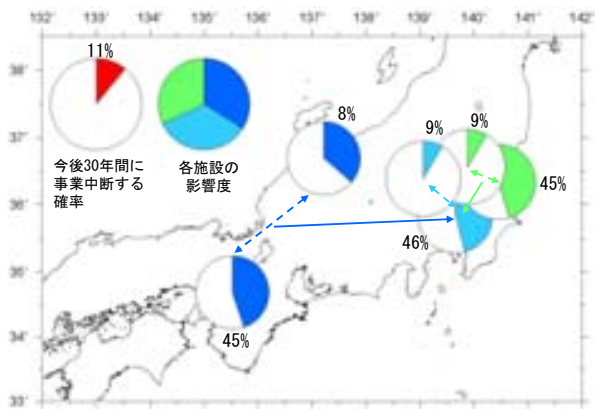


図-10 事業中断確率（栃木、茨城、大阪、富山、群馬、埼玉がそれぞれ代替施設の場合）

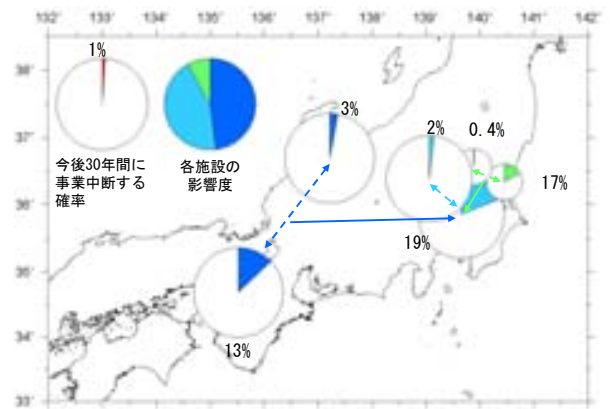


図-13 事業中断確率（全施設の在庫日数を14日として、栃木、茨城、大阪、富山、群馬、埼玉がそれぞれ代替施設の場合）

や過去の地震情報に基づく確率論的な地震リスク評価が有効であり、この方法により今後のある評価期間（10年、30年、50年から選択）内に事業中断する確率の評価や相対的な弱点（ボトルネック）となる施設の抽出が可能と

なる。事業所が特定の地域に集中している場合は、想定される地震に対する被害予測が有効であり、紹介した地震被害予測システムにより一回の地震による総損失額の把握とボトルネックの抽出が可能となる。

謝辞

サプライチェーンを考慮した地震被害予測システムの構築にあたり、技術研究所の田村和夫副所

長と南部世紀夫主任研究員の協力を頂きました。
末筆ながら感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1)石川裕, 奥村俊彦, 宮腰淳一, 斎藤知生: “想定地震選定システムの開発”, 清水建設研究報告, 第 83 号, pp.37~42, 2006.4.
- 2)石川裕, 奈良岡浩二, 渡辺泰志, 斎藤知生: “生産施設の地震リスク評価”, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp 1386~1389, 2006.
- 3)白田光一, 吉澤睦博: “サプライチェーンの地震リスク評価システム ISSOP-SCM”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2007 年秋季研究発表会アブストラクト集, pp.266~267, 2007.9
- 4)西川智, 福島誠一郎, 矢代晴実: “サプライチェーンに依存する企業の地震時 BCP 策定のためのリスク評価手法の提案”, 第 57 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.135~136, 2008.6
- 5)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, 第 523 号, pp.63~70, 1999.9.
- 6)宮腰淳一, 神原浩, 石井大吾, 田村和夫, 山口亮, 名取晶子, 吉村昌宏: “建物耐力と変形性能のばらつきを考慮した被害関数の作成方法”, 構造工学論文集, Vol. 51B, pp.105~110, 2005.
- 7)田村和夫, 中村豊, 金子美香, 神原浩: “高層建物内の地震時安全性評価技術の開発, その 1 全体概要と建物の簡易応答評価手法”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.623~624, 2005.
- 8)林康裕, 鈴木祥之, 宮腰淳一, 渡辺基史: “耐震診断結果を利用した既存 RC 造建築物の地震リスク表示”, 地域安全学会論文集, No. 2, pp.235~242, 2000.
- 9)阪神淡路大震災調査報告編集委員会: “阪神淡路大震災調査報告, 機械編: 機械設備の被害”, 1998.
- 10)能島暢呂, 杉戸真太, 鈴木康夫, 石川裕, 奥村俊彦: “震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル”, 土木学会論文集, 第 724 号/I-62, pp.225~238, 2003.1.
- 11)常田賢一, 小田和広, 鍋島康之, 江川祐輔: “新潟県中越地震における道路施設の被害水準と道路機能の特性”, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, No.9, 2005.
- 12)酒井久和, 長谷川浩一, ネルソン・ブリード, 佐藤忠信: “新潟県中越地震における強震動と道路被害の関係”, 構造工学論文集, Vol. 52A, No.1, pp.301~308, 2006.