

博 士 論 文

震災時の事業継続能力向上のための
サプライチェーン地震リスクマネジメント手法
*The method of seismic risk management
in supply chain for enhancement
of business continuity capability*

国立大学法人 横浜国立大学大学院
環境情報学府

鳥澤 一晃
Kazuaki Torisawa

2014年6月

(空白)

博 士 論 文

震災時の事業継続能力向上のための
サプライチェーン地震リスクマネジメント手法

*The method of seismic risk management
in supply chain for enhancement
of business continuity capability*

鳥澤 一晃

Kazuaki Torisawa

(空白)

目 次

	ページ
第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 研究の目的	3
1.3 研究の対象範囲	4
1.3.1 事業継続計画（BCP）	4
1.3.2 リスクマネジメント	5
1.3.3 事業中断被害	5
1.3.4 サプライチェーン	6
1.4 既往研究の概要	7
1.4.1 地震による事業中断被害予測	7
1.4.2 サプライチェーンの地震リスク	8
1.4.3 地震による設備の機能的被害予測	9
1.4.4 地震による道路網の機能的被害予測	10
1.5 研究の全体枠組み	12
1.6 論文の構成	13
第1章の参考文献	15
第2章 サプライチェーンのモデル化と事業中断リスク評価手法	19
2.1 はじめに	20
2.2 サプライチェーンの事業中断リスク評価モデル	21
2.2.1 サプライチェーンのモデル化のコンセプト	21
2.2.2 サプライチェーンの事業中断リスク評価モデル	23
2.3 サプライチェーンの事業中断期間の確率論的評価手法	25
2.4 まとめ	27
第2章の参考文献	28
第3章 震災時の設備システムの機能停止リスク解析	29
3.1 はじめに	30
3.2 設備システムの機能停止リスク評価手法	31
3.2.1 個々の設備機器の復旧期間の評価	31

	ページ
3.2.2 設備システムの機能停止期間の評価	33
3.3 適用計算	34
3.3.1 適用対象	34
3.3.2 計算におけるパラメータ等の設定	36
3.3.3 計算ケースとその計算結果	38
3.3.4 考察	41
3.4 まとめ	43
第3章の参考文献	44
第4章 東日本大震災のデータに基づく道路の機能的被害予測モデル	45
4.1 はじめに	46
4.2 東日本大震災における道路通行止めデータ	47
4.2.1 東日本大震災における道路通行止め情報の収集	47
4.2.2 予測モデル構築に用いた道路通行止めデータ	49
4.3 震災時の道路通行止め予測モデル	55
4.3.1 道路通行止め予測モデルの検討概要	55
4.3.2 通行止め確率のモデル構築	56
4.3.3 通行止め期間の確率分布のモデル構築	62
4.3.4 構築した予測モデルの適用範囲	72
4.4 まとめ	73
第4章の参考文献	74
第5章 震災時の道路網機能支障による工場の操業停止リスク解析	75
5.1 はじめに	76
5.2 震災時の道路網の機能支障評価手法	77
5.3 道路網の機能支障による工場の操業停止リスク評価手法	79
5.4 適用計算	81
5.4.1 適用対象と計算ケース	81
5.4.2 計算結果	82
5.5 まとめ	88
第5章の参考文献	89

	ページ
第6章 サプライチェーンの事業中断リスクマネジメント解析	91
6.1 はじめに	92
6.2 本研究における事業中断リスクマネジメントの考え方	92
6.3 事業中断リスクに基づくボトルネック評価手法	93
6.4 事業中断リスク低減対策のフォールトツリーにおけるモデル化	94
6.4.1 施設・設備等の耐震補強	94
6.4.2 調達先の複線化・分散化や代替拠点の確保	94
6.4.3 在庫の確保やライフラインのバックアップ	95
6.5 サプライチェーンの事業中断リスクマネジメントに関する事例解析	98
6.5.1 解析で対象とするサプライチェーン	98
6.5.2 サプライチェーンのフォールトツリーの構築	100
6.5.3 サプライチェーンの停止期間の確率論的評価	104
6.5.4 サプライチェーンのボトルネック特定と対策後の停止期間評価	105
6.5.5 リスク低減効果に基づく対策選定の意思決定	114
6.6 まとめ	118
第6章の参考文献	119
第7章 結論	121
発表論文	125
謝辞	

(空白)

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1 研究の背景

企業にとって、不測の事態に直面しても重要な業務を継続することは経営的課題である。その課題に対応するには事業継続計画（BCP）¹⁾の策定が有効である。BCPの特徴は、従来の防災活動で行なわれてきた人命安全と被害軽減に加えて、重要業務の継続・早期復旧を目的とする点である。災害時に事業を継続するためには、自社の拠点レベルでの機能確保だけでは不十分であり、調達先・供給先等を含むサプライチェーンでの機能維持が必要なため、サプライチェーンでのBCP策定の取組みが重要である。

東日本大震災では被災地が東北から北関東まで広範囲に渡ったため、サプライチェーン寸断により企業の事業活動が大きな影響を受けた。被災地では地震動や津波によって多くの工場が建物・設備に被害を受けて操業不能に陥り、そこから素材・部品を調達していた工場も連鎖的に生産停止となった。また、多数の工場が生産停止したことで、他の素材・部品の需要減少を引き起こし、関連産業全体が停滞する事態へ発展した例もあった。さらに、サプライチェーンの構造が従来の形から変わっていたことも被害を拡大させる要因となった²⁾。従来のサプライチェーンは、企業系列によりメーカーが分かれて広い裾野を形成するピラミッド型の構造であったが、近年のコスト競争の激化や要求技術の高度化のためにメーカーの淘汰が進み、中核素材・部品の生産が企業系列とは関係なく特定のメーカーに集中する形へと変化していた。それがボトルネックとなって、サプライチェーン寸断による事業中断被害の波及を助長した。そのような震災の教訓から、サプライチェーンでのBCPの強化・再構築が提唱されており^{3)~5)}、サプライチェーンの可視化やボトルネックの特定が課題となっている。

また、東日本大震災以後、国による被害想定に抜本的な見直しが行われたため、それを踏まえたBCPの策定や再検討などの動きが活発になりつつある。中央防災会議は、東日本大震災の教訓を受け、今後の防災対策ではあらゆる可能性を考慮した最大クラスの巨大な地震・津波を検討すべきとする考え方⁶⁾を示し、南海トラフ巨大地震^{7)、8)}および首都直下地震⁹⁾の被害想定を相次いで実施した。被害想定目的は、被害の全体像を明らかにして行政の防災・減災対策の基礎資料とするとともに、企業、地域、個人の防災・減災対策の取組みを促すことにあるが、実際に企業がBCP策定を行なうには別途詳細な検討が必要である。例えば、今回の被害想定では、サプライチェーン寸断による生産量減少を考慮した経済的被害額が推計され、BCPによりそれが回避されると仮定した場合の被害低減効果が算出されたが、全国単位のGDPによるマクロな評価であり、あくまで政策的な効果の把握に留まるものである。国による被害想定を踏まえて企業がBCPを策定するには、中央防災

会議から公表された震度分布・浸水域等のデータを活用して、対象企業の拠点やサプライチェーンの事業中断被害を適確に予測する手法が必要である。

サプライチェーンでの BCP 策定を念頭に置いて、日本経済団体連合会¹⁰⁾ は製造面・配送面・販売面の観点から東日本大震災における課題と具体的な対策事例を示した。例えば、製造面では工場の複数拠点化や資材調達先の複数確保、配送面では輸送ルートの複数確保や倉庫・設備機能の強靱化、販売面では販売状況・在庫情報の見える化などが挙げられているが、現実にはこれらの対策をすべて実行することは予算の制約等により不可能である。実際に BCP を策定するには、前述した事業中断被害の予測に基づき、対策ごとの被害低減効果を算出して、優先する対策を選定することが求められる。

最近では、事業継続能力に近い概念として「レジリエンス」という言葉も使われている。不測の事態に対して強くしなやかに対応する能力を指すものとして、事業継続能力を包含する、より広い概念として解釈されているが、レジリエンスを定義する模式図¹¹⁾には BCP における復旧曲線¹⁾と同様のものが示されることが多い。内閣官房は国土強靱化に関する総合的な施策の推進の在り方を検討するため、ナショナル・レジリエンス（防災・減災）懇談会¹²⁾を開催し、国土強靱化基本計画をまとめた。その中で「起きてはならない最悪の事態」の一つとして、サプライチェーンの寸断等による企業の生産力低下による国際競争力の低下が挙げられ、それに対する具体的な方策として、企業ごとの BCP の実効性向上と企業連携型 BCP の策定の推進が示された。今後は、サプライチェーンを構成する企業間で連携して BCP を策定することが国の施策としても重点的に進められると思われる。

1.2 研究の目的

本研究では、サプライチェーンを構成する企業の合理的な BCP 策定に資するため、地震によるサプライチェーンの事業中断リスク評価・管理手法を構築することを目的とする。

具体的には、サプライチェーンの構造を可視化して事業中断リスクを評価するモデルを構築し、それに基づき、想定地震におけるサプライチェーンの事業中断期間を確率論的に予測する手法を構築する。また、サプライチェーンの事業中断リスクへの影響度合いからサプライチェーンの構成要素におけるボトルネックを特定するとともに、ボトルネックへの対策によるリスク低減効果を算出して、企業の BCP 担当者の対策選定に関する意思決定を支援する手法を構築する。

1.3 研究の対象範囲

1.3.1 事業継続計画（BCP）

事業継続計画（BCP）は、内閣府による事業継続ガイドライン¹⁾では「大地震等の自然災害、感染症のまん延、テロ等の事件、大事故、サプライチェーン（供給網）の途絶、突発的な経営環境の変化など不測の事態が発生しても、重要な事業を中断させない、または中断しても可能な限り短い期間で復旧させるための方針、体制、手順等を示した計画」と定義され、図 1-1 に示す事業継続マネジメント（BCM）のプロセス¹⁾の一部を成すものである。

BCM のプロセスの「事業継続戦略・対策の検討」では幅広い観点での検討が求められるが、本研究では、その中でも最も優先して検討すべき「重要製品・サービスの供給継続・早期復旧」の観点に焦点を絞って、合理的な BCP 策定を検討することにした。

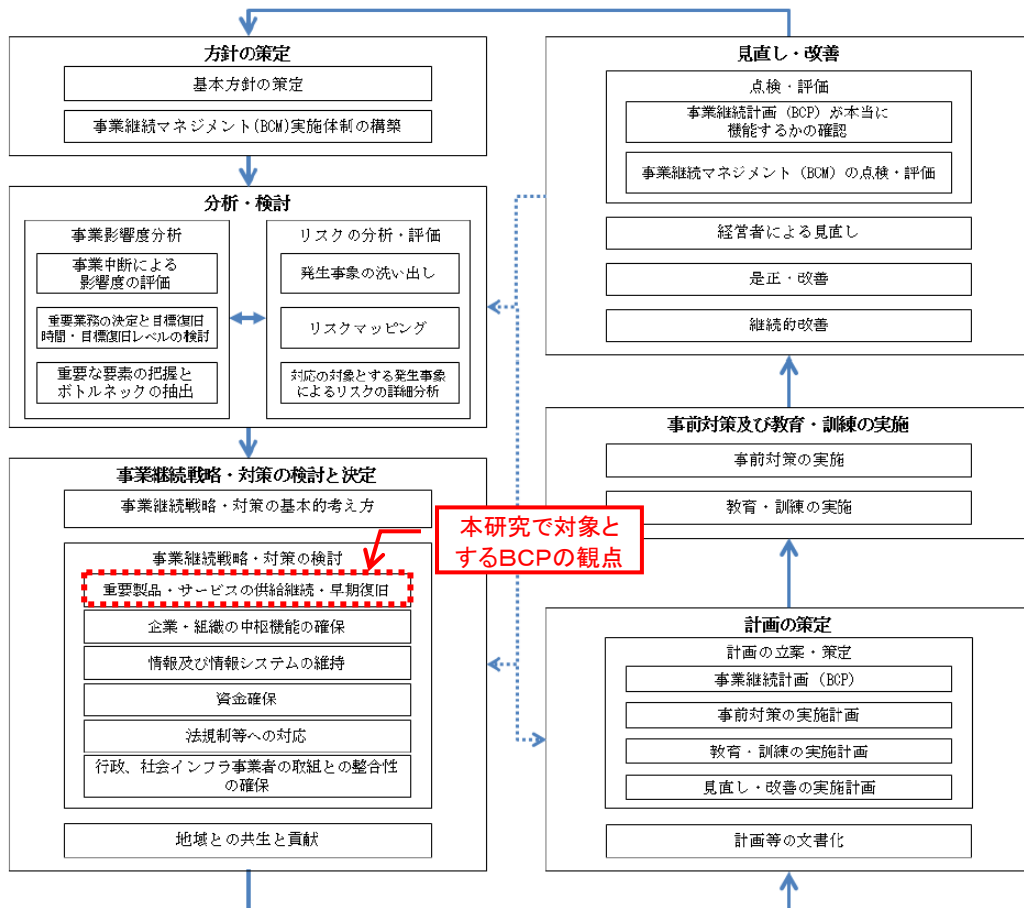


図 1-1 事業継続マネジメント（BCM）のプロセス¹⁾
 （文献 1 の図に本研究の対象範囲を加筆）

1.3.2 リスクマネジメント

本研究では、事業継続能力向上のためのリスクマネジメントとして、事業中断リスクの定量的評価とそれに基づく対策選定の意思決定に係る活動を対象とする。

従来からさまざまな産業・分野で行なわれてきたリスクマネジメントは、JISQ31000¹³⁾により標準化が図られ、リスクマネジメントのプロセスとして図 1-2 が示されている。図より、「組織の状況の確定」→「リスクアセスメント」→「リスク対応」→「モニタリング及びレビュー」までが一つのサイクルとなるが、「モニタリング及びレビュー」についてはそれ以前のプロセスの定期的・継続的な見直し・改善に関するものであり、他のプロセスとは実施時期も異なる。

リスクマネジメントの持続的な運用では「モニタリング及びレビュー」の循環プロセスが重要となるが、本研究では、BCP 策定に未着手の企業への適用も視野に入れて、「組織の状況の確定」→「リスクアセスメント」→「リスク対応」の部分 risks マネジメントに関する手法構築の対象範囲とした。

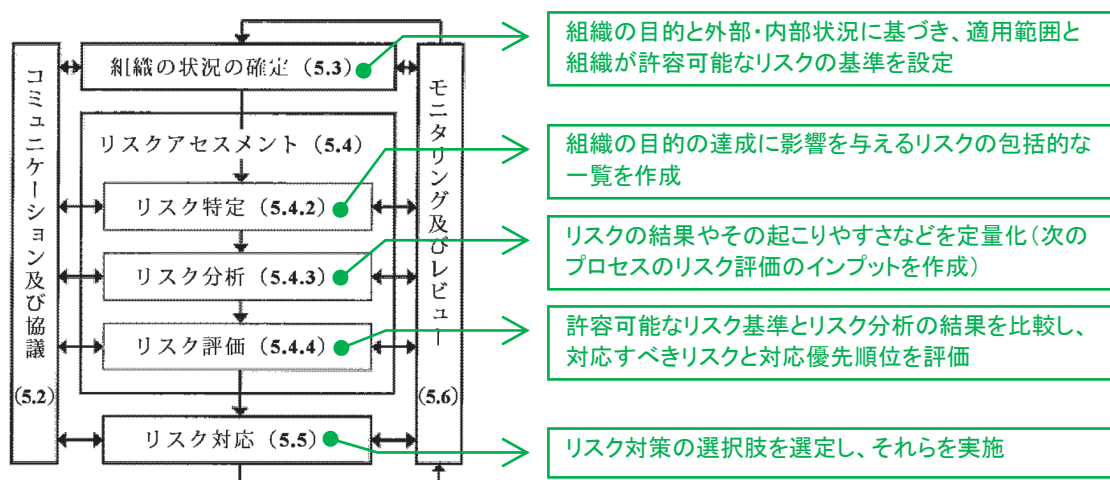


図 1-2 リスクマネジメントのプロセス¹³⁾
(文献 13 の図から抜粋し、各プロセスの概要を加筆)

1.3.3 事業中断被害

本研究では、事業中断被害は事業中断期間で表わすこととした。また、事業中断リスクはその確率的な評価結果を指すこととした。

一般には、事業中断被害を事業中断損失で表わすこともある。これは地震により事業が中断しなければ得られていたはずの 1 日当たりの金額に事業中断期間を乗じて求められる

が、金額として何をを用いるか（例えば、利益、売上高、生産額、出荷額など）は被害評価の目的に応じて異なるため、事業中断被害の評価では事業中断期間の定量化が重要である。

（事業中断していても支出しなければいけない固定費や地震後に事業継続のために臨時で支出する対応費（例えば、仮工場費用・移転広告費・外注費など）も事業中断損失として計上する場合があるが、それらの定量化のためには別途検討が必要になると思われる。）

なお、事業中断期間が長期間に渡ると、市場シェアの低下や株価の下落といった被害を生じる場合があるが、それらは現状では定量化が困難なため、本研究では対象外とした。

1.3.4 サプライチェーン

サプライチェーンの BCM に関わる規格としては、英国規格協会から PD25222¹⁴⁾ が発行されている。これは同協会による BCM の規格¹⁵⁾ におけるサプライチェーンの部分を補完するものであり、そこではサプライチェーンは「最終消費者に製品やサービスの形で価値を生み出すさまざまなプロセスや活動に、上流・下流のつながりで関与する組織のネットワーク」と記されている。

本研究においても、サプライチェーンの定義は、基本的にこれと同じである。

ただし、事業中断リスクに基づきボトルネックを特定して、対策によるリスク低減効果を算出するため、サプライチェーンにおける“プロセス”や“活動”をそれに必要な施設・設備・インフラなどに分解して捉えることが必要である。

本研究におけるサプライチェーンの事業中断リスク評価モデルの具体的な説明については、第2章で述べる。

1.4 既往研究の概要

1.4.1 地震による事業中断被害予測

地震による被害は、構造物等の物理的損傷による直接被害とそれに起因した機能的支障による間接被害に大別することができ、事業中断被害は間接被害に含まれると考えられる。

土木分野では、地震による社会へのインパクトを計量することを目的として、間接被害をマクロに評価する研究が多くされている。その先駆けとして、土木研究所の川島ら¹⁶⁾は地震が地域経済に与える影響を地震後の生産額の減少として捉えることを試みた。①生産基盤（工場・機械・インフラ）の被害による生産能力の低下、②交通基盤（道路・港湾・鉄道）の被害による輸送能力の低下、③製品・半製品・原材料の被害による生産量の低下、を主な要因として考慮して、産業連関分析に基づき地震後の生産減少額を算定する方法を検討し、1978年宮城県沖地震および1983年日本海中部地震に適用した。このような研究は1995年兵庫県南部地震における経済被害額推計¹⁷⁾で一定の成熟に達し、近年ではサプライチェーン寸断による被害波及の要因となる産業間の相互依存性を考慮した経済被害の評価手法¹⁸⁾などの研究例がある。

地震による建物の機能的支障を評価するには、建物の復旧期間を評価する必要がある。地震後の復旧期間を評価する手法については米国に研究事例が多い。FEMAが自然災害の被害予測ツールとして開発したHAZUS-MH¹⁹⁾では、構造的被災度に応じた建物復旧期間が建物用途ごとに定められており、簡易に建物復旧期間を算出可能である。建物復旧期間は建物補修時間と付加作業時間の合計として定義され、建物が単純で小規模な建物用途ほど時間が短くなるように専門家が決めている。また、ATC-58²⁰⁾では建物の耐震性能を地震による人的被害・復旧費用・復旧期間で評価する方法が構築され、建物の応答評価に基づきそれらを算出する。建物復旧期間は工事開始前の遅延と建物補修時間の合計で定義され、それぞれを確率論的に求める。前者の工事開始前の遅延にはさまざまな要因が含まれるが、応急危険度判定の調査時間として求めることとし、構造的被災度に応じた調査時間の確率分布が与えられている。また、後者の建物補修時間では部位ごとに被災度別の補修時間の確率分布が与えられており、被災度別の補修部位数に基づき、全体の補修時間を算出する。その他にComerio²¹⁾やMitrani-Reiser²²⁾による研究などがある。国内では、諏訪ら²³⁾が兵庫県南部地震における被災建物の補修期間を調査して、建物階数・延べ床面積・構造形式・建物用途と補修期間の関係および建設地の推定最大速度と補修期間の関係について考察し、地震被害データに基づく建物補修期間の予測法を検討した。また、建築研究所²⁴⁾では前述した米国のATC-58²⁰⁾と同様の目的で、地震後の機能維持を考慮した構造性能評価システムを検討し、建物の応答評価に基づき修復費用・修復時間を算出する方法を構築した。修復時間に関しては、部位ごとに単位損傷量当たりの修復人工をデータベース化して、それに損傷量を乗じて算出することが提案されている。

地震後に建物自体が健全であっても、周辺のライフラインに被害があれば、機能確保は困難である。能島ら²⁵⁾は兵庫県南部地震におけるライフラインの被害データの統計的分析から、震度に基づきライフラインの機能停止期間を確率論的に評価するモデルを提案した。地震後の機能停止期間の評価を、機能停止の有無の評価と停止した場合の機能停止期間の評価という二段階で行なうもので、ライフラインの施設ネットワークなどの詳細な情報は用いずに着目地点の震度のみから簡便に評価可能という特徴がある。提案されたモデルは、東日本大震災の被害事例による妥当性検証²⁶⁾などの検討も行われている。

事業継続計画（BCP）の策定に当たっては、重要業務の目標復旧時間や目標復旧レベルの設定が求められるため¹⁾、地震後の時間経過に伴う操業度の復旧推移、いわゆる復旧曲線の評価手法についても研究されている。坂本²⁷⁾は建物の各構成要素の耐力と復旧日数を設定して、建物の機能停止に関するシナリオごとに復旧曲線を求め、各シナリオの発生確率を考慮した平均復旧曲線进行评估した。また、中村ら²⁸⁾は建物に要求される機能を構成要素の連結によるシステムとして捉えて、構成要素の被害事象の相関を考慮してシステムごとに復旧期間を求め、平均復旧曲線进行评估した。いずれの研究も、構造体や設備機器への地震対策後に期待される復旧曲線を求めて、対策前後のそれを比較することで、対策の効果を定量化することについても検討している。

なお、1.1節で述べたとおり、地震による事業中断被害の予測ではサプライチェーン寸断による影響を考慮することが望ましい。サプライチェーンの地震リスクに関する既往研究については1.4.2節で述べる。また、サプライチェーンの地震リスク进行评估するには、建物やライフラインの機能停止に加えて、建物内の設備機器および建物間の道路網の機能停止に関する検討も重要と思われるが、それらの既往研究については1.4.3節および1.4.4節で述べる。

1.4.2 サプライチェーンの地震リスク

サプライチェーン寸断による企業の事業中断リスクの分析方法や対策の考え方については、前田²⁹⁾が簡潔かつ明快に解説している。事業中断リスクの分析では、ボトルネックの特定が最も重要であることが指摘され、そのためにはサプライチェーンの構成要素のうち復旧期間が長いものがどれかを把握することが必要である。

サプライチェーンの地震リスク評価に関しては特に産業界での関心が高く、次に述べる能島ら³⁰⁾の研究を除けば、民間企業が中心の研究である。

能島ら³⁰⁾はシステムダイナミクスを用いてサプライチェーンをモデル化し、想定地震に対して工場の生産活動の推移を評価した。地震によるサプライチェーンの構成要素の被害予測として、施設・設備、道路輸送、ライフラインを対象に地震直後の機能低下率とそれが通常状態まで回復するまでの復旧日数を評価しているが、施設・設備および道路輸送に関しては暫定的な設定で今後の課題とされている。

西川ら³¹⁾は建物ポートフォリオのリスク解析に基づき、サプライチェーンの停止期間の年超過確率曲線の評価を行なった。また、福島ら³²⁾は災害時の事業継続に必要な供給量は平常時の全供給量を下回る場合がある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³¹⁾の手法を改良した。いずれの検討においても、サプライチェーンの構成要素としては拠点の建物のみ考慮しており、ライフラインや道路については含まれていない。

奈良岡ら³³⁾はサプライチェーンの施設ごとに許容中断期間を設定し、地震後の復旧日数がそれを上回る地震動強さ（許容地震動）を求めて、地震ハザード評価に基づき対象施設のいずれかで許容地震動を上回る確率をサプライチェーンの事業中断確率として算出した。また、施設ごとの事業中断確率に基づき施設の影響度を求めて、ボトルネックとなる施設を抽出する方法を検討した。復旧日数の評価ではライフラインや道路の復旧期間についても考慮されている。

副島ら³⁴⁾は地震後の復旧日数を PERT により評価することを提案し、サプライチェーン寸断による影響を考慮する方法を検討した。具体的には、サプライヤの復旧・部品製造と輸送路の復旧が完了した後に部品の輸送が可能となることを評価モデルに組み込み、震災時の部品調達時間を推計する方法を示した。なお、PERT では各工程の所要時間のばらつきを考慮した確率論的評価も可能であるが、ここでは特に検討されていない。

白田ら³⁵⁾は物流コストを制約条件にサプライチェーンの最適な施設配置を計算する汎用ソフトを使用して、建物等の被害予測に基づき、震災時の各拠点の対応プラン（生産量や出荷量の増加、臨時的な倉庫の確保など）を策定するシステムを検討した。

以上のように、サプライチェーンの事業中断リスクを算出する研究はいくつか行われている。一方、サプライチェーンの事業中断リスクを低減する対策としては、例えば、拠点の耐震補強や分散配置、複数調達先の確保、在庫水準のかさ上げやライフラインのバックアップ保持などが挙げられるが、それぞれ性格が異なるために、従来は個別に評価されており、それらの中から合理的に対策を選定する方法について検討した例はあまりない。

1.4.3 地震による設備の機能的被害予測

地震後にも継続して建物を使用するには、構造体の安全性とともに設備の健全性の確保が必要である。また、設備は複数の機器が連結したシステムとして機能を発揮するため、地震後の機能継続には設備システムとして健全であることが求められる。

地震による設備の被害予測手法に関しては、あまり研究が進んでいないのが現状である。被害予測手法を構築するには、過去の震災の被害データから統計的に求める方法と、地震時の応答性状を考慮して解析的に求める方法などが考えられる。

前者の方法については、これまでの設備の被害調査が構造体のそれとは異なり、地震動と被害程度との関係を分析できるような形では行なわれてきていないことが課題となって

いる。学協会による被害調査では、一般的には被災地の設備施工業者等に対して地震後にアンケート形式で調査を行ない、設備種別ごとの被害件数の統計や主な被害事例の分析は報告されるが、対象建物での地震動や地震時の建物応答との関係については不明である。兵庫県南部地震における自家用発電設備の被害調査結果を、アンケートに記載された住所から推定した最大地動速度に基づく最大床応答速度との関係から分析して、被害率関数を検討した例³⁶⁾はあるが、その他の設備については検討されていない。一方、建設会社では顧客建物の被害調査結果を独自に分析して、建築設備の被害率曲線を評価する試みがある。諏訪ら³⁷⁾は、空調設備、衛生設備、電気設備、防災設備の一部（スプリンクラー）を重量機器、水槽類、天井取付器具、屋内配管の4種類に集約して、応答加速度および層間変形角に対する被害率曲線を構築した。被害ランクは、軽微な被害と重大な被害の2ランクである。1982年に「建築設備耐震設計・施工指針」³⁸⁾が制定されたため、建築年で1982年以前と1983年以降に分けている。また、金子ら³⁹⁾は、空調設備、衛生設備、電気設備を対象に、応答速度に対する被害率曲線を構築した。ただし、個別の機器に分類することはせず、設備として機能したかどうかで評価している。また、「機器・配管等の転倒や移動に対しては、速度が大きな影響を与えることも多いと考えられる」として応答速度を用いている。被害ランクは、被害度0（無被害）から被害度4（設備機能に重大な影響を与える被害であり、機器全般の更新が必要な被害）までの5ランクである。両者はいずれも、建築設備全般を対象に被害率曲線を検討した点で有効であるが、地震による設備被害をマクロに評価するもので、個別の機器の耐震性を評価するには至っていないため、設備システムの中で脆弱な機器（ボトルネック）を特定したり、機器への地震対策による効果を定量的に評価したりすることは困難である。

後者の方法については、個別の機器ごとに検討可能ではあるが、形状や取付方法などが多種多様であるため、対象を絞る必要性が生じる。また、解析から得られる機器の応答値と設備としての機能性との関係について現時点で知見がないことも課題である。中込ら⁴⁰⁾は配管を対象に建物応答との共振現象を考慮して、建物・横引配管連成系モデルに基づき解析的に被害発生確率を評価した。配管の相対変位に応じて被害発生を判定しているが、地震時の機能支障については評価されていない。

1.4.4 地震による道路網の機能的被害予測

震災時には多数の通行止めが発生することで道路網の交通機能が低下し、社会・経済に多大な影響を及ぼす。

震災時の道路網の交通機能については、被災した道路リンクの状態を通行可能か否かの二値変数で表し、道路網全体をシステムと考えて、道路網や2地点間の指標を用いた信頼性で評価する方法がある。評価指標には、連結信頼性および容量信頼性の2つがある⁴¹⁾。連結信頼性は個々の道路リンクがある確率で通行不能となる場合、対象の2地点間の経路

のうち少なくとも一つが連結している確率である。経路の連結は交通機能として必要条件と言えるが、連結していても迂回する距離には許容可能な上限があると考え、それを考慮した連結信頼性も提案されている⁴²⁾。一方、容量信頼性は個々の道路リンクの交通容量も考慮して、対象の2地点間の処理交通量が基準値を満足する確率である。これについては、震災時の交通需要の推定結果を用いて交通量を配分する方法⁴³⁾と交通需要は考慮せずに処理可能な最大交通量（最大フロー）を求める方法⁴⁴⁾の2通りがある。前者の方法は、通行止めの影響によるトリップの迂回、待機、中止といった道路利用者の交通挙動を考慮できるが、震災時の交通需要を推定する方法論がまだ確立していないという課題がある。それに対して、後者の方法による最大フローは必ずしも対象地点間の交通量を表わすものではないが、被災した道路網が保持する交通サービス水準と解釈することができ、未解明な点が多い震災時の交通需要には言及せずに評価が可能という利点もある。

また、震災時の道路網の交通機能低下による影響は、交通量や輸送量の変化として評価されることが多い。兵庫県南部地震⁴⁵⁾および新潟県中越地震⁴⁶⁾では震災時の道路網の機能支障の一例として、主要幹線道路における地震前後の断面交通量の変化が調査されている。また、梶谷ら^{47)、48)}は震災時の経済的被害評価を目的に、兵庫県南部地震および新潟県中越地震を例題として、地震後の貨物流動量の推計を試みている。米谷・梶⁴⁹⁾は、最大フローを最大輸送可能量とみなして震災時の輸送量を評価することを提案し、東京都区内の緊急輸送路網を対象に、地震被害想定における通行不能箇所への復旧順序の違いが輸送量にどのような影響を与えるかを評価している。これらは前述した容量信頼性の考え方で確率論的な評価が可能と思われる。例えば、能島ら⁴⁴⁾は最大フローの確率論的評価を検討しているが、そこで考慮されているのは道路の被害確率のみであるため、求めているのは地震発生直後の最大フローである。震災時の道路網の機能支障期間を評価するには、地震後の時間経過に伴う道路網の復旧過程を考慮して、最大フローを確率論的に評価できればよいが、既往研究にはそのような検討例はない。

1.5 研究の全体枠組み

本研究では、サプライチェーンを対象とした事業中断リスク評価と、それに基づく事業中断リスク管理に関して研究を行なう。本研究の全体枠組みを図 1-3 に示す。

事業中断リスク評価では、サプライチェーンをモデル化し、事業中断期間を定量化する。サプライチェーンを生産・物流プロセスと考えれば、その構成要素は単純には複数の施設とそれらをつなぐ物流として表現できる。すなわち、サプライチェーンの事業中断リスクを評価するには、施設を支える建物機能と物流に関わる道路網機能に着目して、機能停止リスクを評価することになる。施設の建物機能は、その構成要素をさらに分解すると設備システム・構造躯体・ライフラインとなる。本研究では、それらのうち、設備システムと物流（道路網機能）に焦点を絞って、地震による機能停止リスクの評価手法を構築する。なお、残りの構造躯体とライフラインに関しては、既往研究での知見を参考とする。また、サプライチェーンの事業中断を考える上で、バッファとしての在庫は重要な要素であり、それについても合わせて考慮する。

事業中断リスク管理では、サプライチェーンの事業中断リスクへの影響度合いから構成要素におけるボトルネックを特定するとともに、ボトルネックへの対策によるリスク低減効果を算出して、対策選定の意思決定を行なう。対象とする対策には、施設の耐震補強に加えて、分散調達や在庫確保といったサプライチェーンに特有のものも考慮として、従来は個別に評価されてきたものを、事業継続能力向上の観点から比較・選定する方法を検討する。

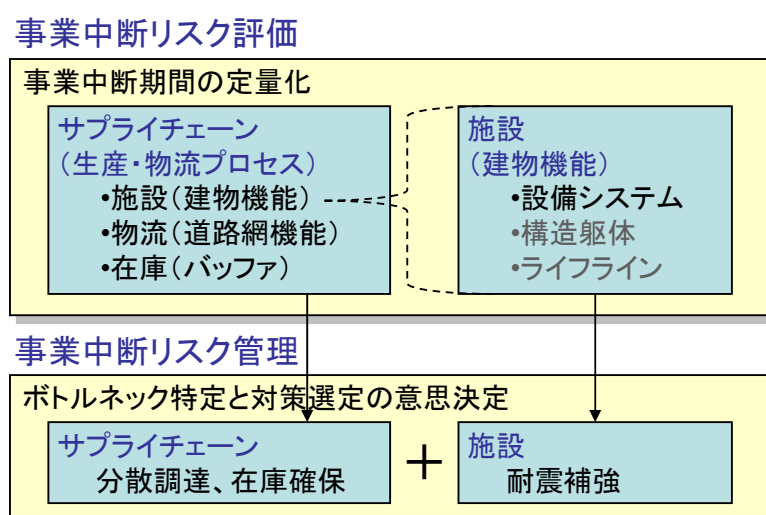


図 1-3 研究の全体枠組み

1.6 論文の構成

本論文は全部で7章から構成されている。

第1章は序論である。研究の背景、目的、対象範囲を記し、既往研究の概要と本研究の全体枠組みを述べる。

第2章では、サプライチェーンの事業中断リスク評価手法の考え方や理論構築を行なう。サプライチェーンの基本的なプロセスと構成要素を整理するとともに、サプライチェーンを各要素から構成される一つのシステムと考えてフォールトツリーによりモデル化する。また、フォールトツリー解析に基づき、サプライチェーンの事業中断期間の確率論的評価手法を定式化する。

第3章では、第2章で構築したサプライチェーンの構成要素の一つである設備システムについて、地震時の機能停止リスクを算出する手法を構築する。また、地震時の建物機能維持のために特に重要となる電源システムを対象とした事例解析を行なう。

第4章では、第2章で構築したサプライチェーンの構成要素の一つである物流について、地震時の道路ネットワークの機能支障によるサプライチェーンへの影響を評価するため、東日本大震災における道路通行止めデータを収集・整理し、それに基づき地震時の道路の通行止め被害予測モデルを構築する。

第5章では、第4章で構築した地震時の道路通行止め予測モデルに基づき、道路ネットワークの機能支障を評価するとともに、物流の途絶により工場が操業停止に陥るリスクを評価する手法を構築する。また、東日本大震災の被災地域での道路ネットワークを対象として、物流センターから工場への資材輸送に関する事例解析を行なう。

第6章では、第2章から第5章で構築したサプライチェーンの事業中断リスク評価手法とその要素技術を用いて、サプライチェーンの事業中断リスクマネジメントに関する事例解析を行なう。南海トラフ巨大地震の想定被災地域に設定した仮想のサプライチェーンを対象に、事業中断リスクを定量的に評価し、各種対策によるリスク低減効果に基づき合理的に対策を選定する方法について検討する。

第7章は結論である。本研究で得た知見をまとめ、今後の課題を述べる。

以上の論文の構成を図1-4に示す。

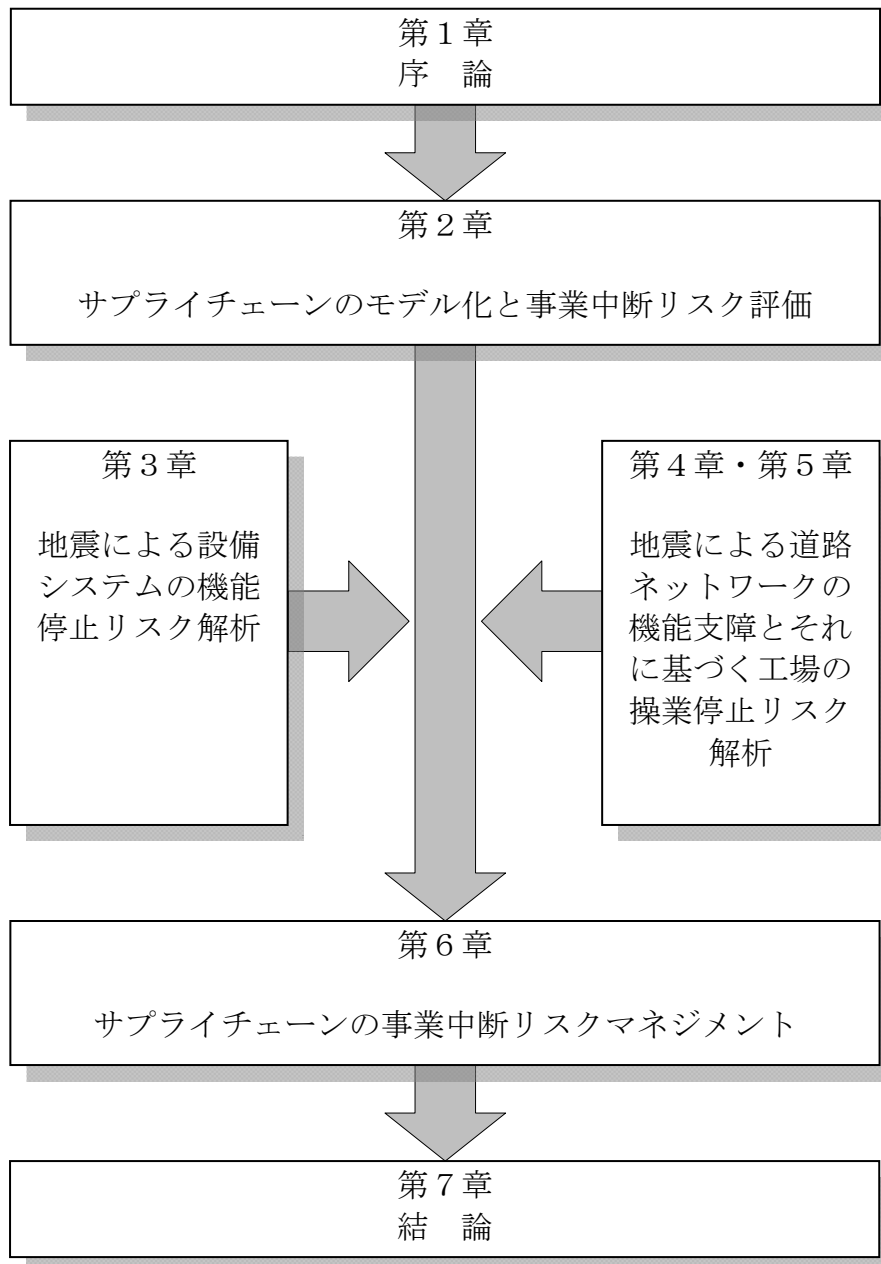


図 1-4 本論文の構成

第1章の参考文献

- 1) 内閣府（防災担当）：事業継続ガイドライン—あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応—、平成25年8月改定
- 2) 経済産業省：日本経済の新たな成長の実現を考える自動車戦略研究会中間取りまとめ、平成23年6月
- 3) 経済産業省：産業構造審議会産業競争力部会中間取りまとめ、大震災後の我が国の産業競争力に関する課題と対応～かつてない空洞化の危機を乗り越えるために～、平成23年6月
- 4) 内閣府（防災担当）：東日本大震災を踏まえた企業の事業継続への取組みに関する提言～企業の事業継続計画策定・運用、事業継続ガイドラインの改定に向けて～、平成24年3月
- 5) 日本経済団体連合会：企業の事業活動の継続性強化に向けて、2013年2月
- 6) 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
- 7) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告）、平成24年8月29日
- 8) 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）、平成25年3月18日
- 9) 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ：首都直下地震の被害想定と対策について（最終報告）、平成25年12月19日
- 10) 日本経済団体連合会：強靱な流通サプライチェーンの構築に向けて—3.11 東日本大震災からの教訓—、2012年7月
- 11) Bruneau, M., S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace, and D. von Winterfeldt. : A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, Vol.19, No.4, pp.733–752, 2003.
- 12) 内閣官房：ナショナル・レジリエンス（防災・減災）懇談会、<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/resilience/>
- 13) JIS Q31000 リスクマネジメント—原則及び指針、2010.
- 14) PD 25222 Business Continuity Management – Guidance on Supply Chain Continuity、2011.
- 15) BS 25999-1 Business Continuity Management – Code of Practice、2006.
- 16) 川島一彦、杉田秀樹、加藤尚史：地震による間接的な経済被害に関する研究、土木研究所報告、第186号-1、1991.
- 17) 高橋顕博、安藤朝夫、文世一：阪神・淡路大震災による経済被害推計、土木計画学研究・論文集、No.14、pp.149-156、1997.

- 18) 中野一慶、多々納裕一：産業間の相互依存性を考慮した自然災害による経済被害の整合的評価方法、土木計画学研究・論文集、No.25、No.1、pp.255-266、2008.
- 19) Federal Emergency Management Agency (FEMA)：HAZUS-MH MR1、Earthquake Model、2003.
- 20) Applied Technology Council (ATC)：ATC-58、Seismic Performance Assessment of Buildings、2012.
- 21) Comerio、M.C.：Estimating Downtime in Loss Modeling、Earthquake Spectra、Vol.22、No.2、pp.349-365、2006.
- 22) Mitrani-Reiser、J.：An Ounce of Prevention: Probabilistic Loss Estimation for Performance - Based Earthquake Engineering、PhD Thesis、California Institute of Technology、2007.
- 23) 諏訪仁、神田順：兵庫県南部地震の被害データを用いた建物補修期間の統計的検討、構造工学論文集、Vol.53B、pp.311-316、2007.
- 24) 向井智久、福山洋、森田高市、斉藤大樹、加藤博人：災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発 成果報告書、BRI Proceedings No.20、建築研究所、2011.
- 25) 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、No.724/I-62、pp.225-238、2003.
- 26) 能島暢呂、加藤宏紀：供給系ライフラインの地震時機能評価モデルの検証ー東日本大震災の被災事例に基づくー、地域安全学会論文集、No.18、pp.229-239、2012.
- 27) 坂本成弘：事務所ビルの地震後復旧曲線、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1、PP.65-66、2007.
- 28) 中村孝明、遠藤透：BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究、日本建築学会総合論文誌、No.7、pp.87-92、2009.
- 29) 前田祐治：事業中断リスクとその評価手法（シナリオ分析）、びわこ経済論集、Vol.2、No.1、pp.17-26、2003.
- 30) 能島暢呂、上野幸代、杉戸真太：サプライチェーンのシステムダイナミクス・モデルによる事業継続計画（BCP）の策定支援、東濃地震科学研究所報告、No.19、pp.73-88、2006.
- 31) 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、第73号、第630号、pp.1053-1060、2008.
- 32) 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、第75号、第655号、pp.853-860、2010.
- 33) 奈良岡浩二、藤川智、奥村俊彦、石川裕：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、第 87 号、pp.11-18、2010.
- 34) 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.
 - 35) 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、オペレーションズ・リサーチ、pp.664-667、2009.
 - 36) 出口嘉一、河野守、辻本誠：建築設備機器の被害関数、構造工学論文集、Vol.47B、pp.647-652、2001.
 - 37) 諏訪仁、神田順：兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 633 号、pp.1935-1941、2008.
 - 38) 日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針、2005.
 - 39) 金子美香、神原浩：兵庫県南部地震の被害データに基づく建築設備の被害関数、第 13 回日本地震工学シンポジウム、pp.3330-3335、2010.
 - 40) 中込あおい、小檜山雅之：建物・横引配管連成系の建物階数に応じた地震被害発生確率、第 13 回日本地震工学シンポジウム、pp.1678-1685、2010.
 - 41) 倉内文孝、宇野伸宏、嶋本寛、山崎浩気：交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向、土木計画学研究・講演集、Vol.35、論文番号 234、2007.
 - 42) 朝倉康夫、柏谷増男、藤原健一郎：交通ネットワークにおける迂回の限度を考慮した OD ペア間信頼度の指標、土木学会論文集、NO.555/IV-34、pp.41-49、1997.
 - 43) 能島暢呂：道路交通ネットワークの地震時機能評価モデルの開発、第 3 回都市直下地震防災総合シンポジウム論文集、pp.513-516、1998.
 - 44) 能島暢呂、山中敏裕：道路ネットワークの地震時機能信頼性解析に基づく施設改善の重要度評価、第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集、No.J-12、pp.3205-3210、1998.
 - 45) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会（土木学会）：阪神・淡路大震災調査報告、土木・地盤⑩、交通施設と農業施設の被害と復旧、1998 年 2 月
 - 46) 土木学会新潟県中越地震被害調査特別委員会：平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告書、2006 年 3 月
 - 47) 梶谷義雄、水上裕治、皆川勝、吉田郁政：交通ネットワーク上の貨物流動予測モデルを用いた自然災害の経済的影響評価に関する基礎的研究、土木計画学研究・論文集、Vol.26、No.1、pp.219-227、2009.
 - 48) 梶谷義雄：地震災害時におけるライフライン被害の産業部門への影響評価 小地域メッシュ統計を活用した 2004 年新潟県中越地震時の交通分析、日本地震工学会論文集、第 10 巻、第 2 号、pp.57-72、2010.
 - 49) 米谷英剛、梶秀樹：ネットワークの最大流にもとづく震災後の道路復旧プログラム評価モデルの開発、第 23 回日本都市計画学会学術研究論文集、論文番号 78、pp.463-468、1988.

(空白)

第2章

サプライチェーンのモデル化と 事業中断リスク評価手法

第2章 サプライチェーンのモデル化と事業中断リスク評価手法

2.1 はじめに

最近の地震災害では直接被害に加え、操業停止による事業中断の影響が顕在化する事例が目立っている。特にサプライチェーン寸断による事業中断の被害波及は、社会的影響も大きく、事業継続能力向上のためにも重要な課題の一つである。

事業中断被害とはいわゆる休業損失と同義のものであり、具体的には例えば、製造業における工場の停止期間と停止に伴う収益減少額を指す。ここでは、それぞれ事業中断期間および事業中断損失額と呼ぶ。事業中断損失額は、一般に地震が発生しなければ得られていたはずの1日当たりの金額を事業中断期間（日数）に乗じて求められるが、金額として何を用いるか（例えば、利益、売上高、生産額、出荷額など）は被害評価の目的に応じて異なるため、事業中断被害の評価では事業中断期間の定量化が重要である。

本章では、サプライチェーン寸断による事業中断リスク評価手法の構築を目的とする。事業中断リスクとしては、事業中断確率および事業中断期間の超過確率を評価対象とする。また、事業中断の原因としては、対象施設の建屋・設備の被害に加え、周辺ライフラインの被害や道路通行止めに伴う物流の停滞についても考慮する。

2.2 サプライチェーンの事業中断リスク評価モデル

2.2.1 サプライチェーンのモデル化のコンセプト

現実のサプライチェーンは、通常、一つの製品を生産するにも多くの部品や原料を必要とし、何段階もの工程を経て完成に至るため、複雑で広範にわたる。経営工学の分野では、このサプライチェーンを対象に、合理的な経営管理を行なうための実務的な研究として、サプライチェーン・マネジメントの研究が検討されており、その知見が蓄積されている。本研究では、サプライチェーン・マネジメント分野におけるサプライチェーンの考え方を参考にして、サプライチェーンのリスク評価モデルを独自に構築することを考えた。

米国の非営利団体サプライチェーンカウンシル¹⁾では、サプライチェーン・マネジメントを推進・実行する際にサプライチェーンのプロセスや機能を客観的に分析するためのモデルとして、SCOR（スコアー、Supply-Chain Operations Reference-model）を開発している。図 2-1 は SCOR においてサプライチェーンを構成するプロセスの考え方を示すものである。プロセスとしては以下の 5 つの項目が挙げられている。

- ①Plan：計画とマネジメント
- ②Source：調達
- ③Make：生産
- ④Deliver：出荷
- ⑤Return：返品

このうち、Source、Make、Deliver の 3 つのプロセスがサプライチェーンの実行プロセスであり、サプライヤの Deliver が自社の Source へ、自社の Deliver が顧客の Source へ、それぞれつながる。

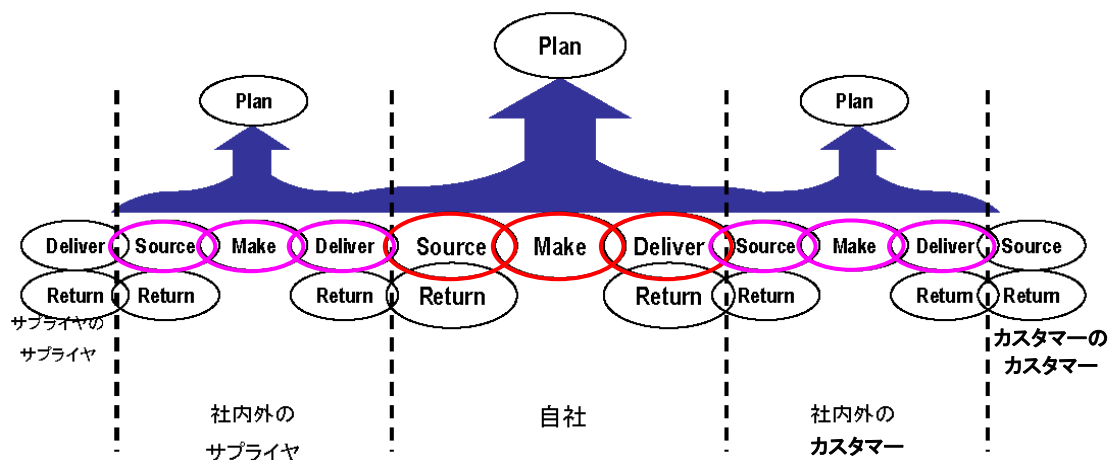


図 2-1 サプライチェーンモデル SCOR¹⁾（一部加筆）

そこで、これを参考にして、本研究におけるサプライチェーンの対象範囲を図 2-2 のように整理した。すなわち、自社内のサプライチェーンは原料調達、製品生産、製品出荷の 3 ステップと考えた。製品生産の部分は、工場の建物、設備、周辺のライフラインがその構成要素となる。原料調達では、仕入先のサプライヤと配送のための物流が構成要素となる。また、製品出荷では、納入先の顧客がある。これらサプライチェーンの構成要素のいずれか一つでも支障が生じると、サプライチェーンが途切れ、最終ステップの製品出荷に影響が出ることになる。サプライヤと自社、自社と顧客の間には、そのような不測の事態に備えたバッファとして、原料や製品の在庫がある。本研究では、このサプライチェーン全体を各要素から構成される一つのシステムと考え、フォールトツリーを用いてモデル化することにした。

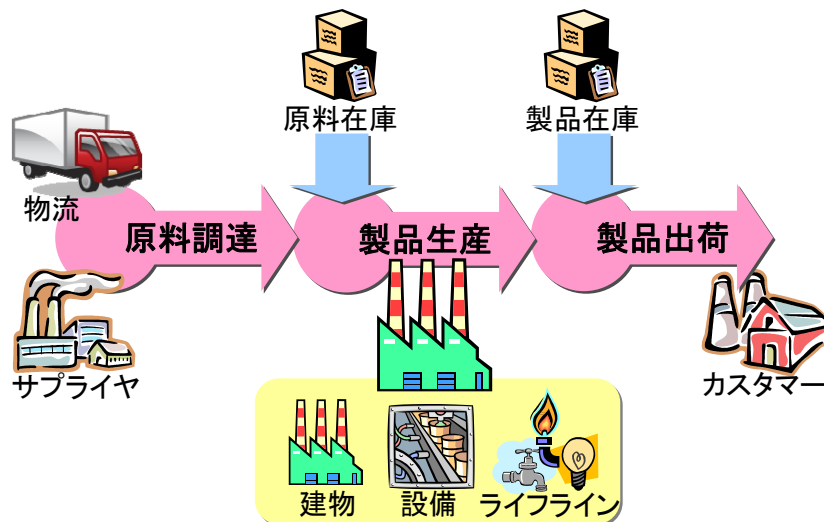


図 2-2 本研究におけるサプライチェーンの対象範囲とその構成要素

2.2.2 サプライチェーンの事業中断リスク評価モデル

フォールトツリー²⁾ (以下, FT) とは, 解析対象の災害事象とその原因事象をゲートで結んでモデルを構築するものである。ゲートは基本的には AND ゲート (論理積) および OR ゲート (論理和) の 2 種類である。単純な要素のみで構成するため, 逆に複雑なシステムを詳細に構築することも可能であり, 広範かつ多様な原因事象があるサプライチェーンのリスク評価に適したモデルと考えられる。

本研究で構築したサプライチェーン寸断による事業中断に関するフォールトツリーを図 2-3 に示す。サプライチェーンにおける, 調達 (Source), 生産 (Make), 出荷 (Deliver) のプロセスを軸に構成している。図中の赤字で示した部分が原料調達, 製品生産, 製品出荷の各ステップに対応し, 最終ステップである製品出荷の停止事象をフォールトツリーの頂上事象とした。また, 各ステップの間にはバッファとしての在庫が AND ゲートで接続する。AND ゲートはどちらか一方が健全であれば, その上位の停止事象は発生しないという関係を表わす。残りの要素はすべて OR ゲートで接続する。OR ゲートではいずれか一つでも支障が生じると, その上位の停止事象が発生するという関係を表わす。

なお, 図に示したフォールトツリーは, サプライヤ 1 社から 1 つの原料を調達して, 1 つの製品を生産し, カスタマー 1 社に出荷するという最も単純なサプライチェーンをモデル化したものである。現実のサプライチェーンでは, 複数の原料, 複数の製品, 複数の取引先との関係があるが, それらはこの基本モデルに項目を追加することで容易に拡張が可能と考えている。

また, 本モデルでは, カスタマーの機能停止による需要減が自社の出荷や生産の休止につながることも考慮しているが, リスクマネジメントの対応範囲としてカスタマーの被害までは考慮しないという場合には, 頂上事象から一つ下の階層までを評価対象とすることも考えられる。

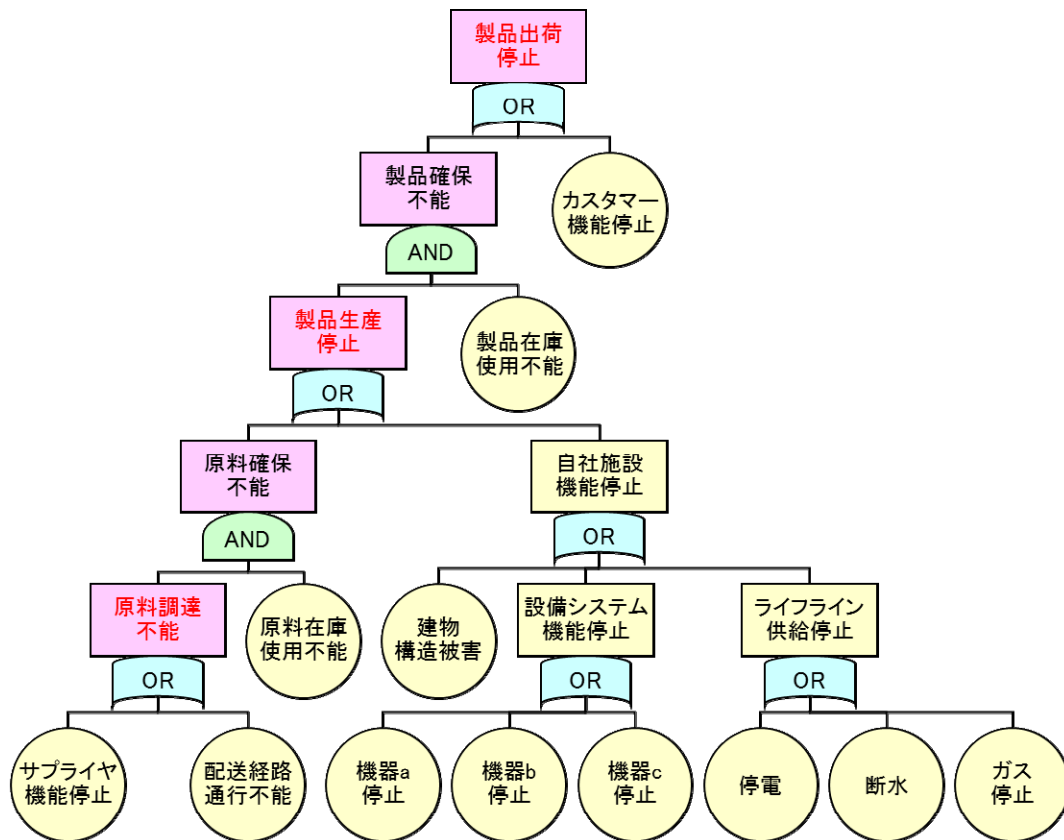


図 2-3 サプライチェーン寸断による事業中断に関するフォールトツリー

2.3 サプライチェーンの事業中断期間の確率論的評価手法

本研究では事業中断リスクとして、「事業中断確率」および「事業中断期間の超過確率」を評価対象とする。

事業中断確率に関しては、FTの末端にある事象（FTでは基本事象と呼ぶ）の生起確率を用いて、通常フォールトツリー解析²⁾（以下、FTA）の方法で算出できるため、ここでは省略する。

事業中断期間の超過確率に関しては、「すべての基本事象の復旧は同時に開始し、最短で完了する」という前提の下で、各基本事象の停止期間の確率関数を用いて、以下のように評価することができる。

FTのORゲートでは、上位事象の停止期間はその下位事象 i ($i=1\sim n$)の停止期間 S_i の最大値 T_n であり、地震動強さ x を所与の条件として次式で表わせる。

$$T_n|x = \max(S_1, S_2, \dots, S_n|x) \quad (2-1)$$

ここで、 S_i は確率変数であるため、 T_n は確率変数 S の最大値であり、各基本事象を独立と仮定すると、 T_n の確率分布関数は地震動強さ x の条件付きとして次式で表わせる。

$$F_{T_n}(t|x) = \prod_{i=1}^n F_{S_i}(t|x) \quad (2-2)$$

同様に、ANDゲートでは、上位事象の停止期間はその下位事象の停止期間の最小値 T_1 であり、次式で表わせる。

$$T_1|x = \min(S_1, S_2, \dots, S_n|x) \quad (2-3)$$

ここで、 T_1 は確率変数 S の最小値であり、各基本事象を独立と仮定すると、 T_1 の確率分布関数は地震動強さ x の条件付きとして次式で表わせる。

$$F_{T_1}(t|x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{S_i}(t|x)) \quad (2-4)$$

上式の(2-2)または(2-4)を各事象のゲートの種類に応じて選択して、フォールトツリーの基本事象から頂上事象に向かって順に計算することにより、地震動強さ x が発生したときの

サプライチェーン全体の事業中断期間の確率分布関数が得られる。

本研究では、サプライチェーンの各構成要素について停止期間が t 以下になる確率の確率分布関数をどのように求めるかが重要となる。

2.4 まとめ

本章では、地震によるサプライチェーンの事業中断リスク評価モデルを構築した。その主な特長は以下のとおりである。

- ①経営工学のサプライチェーン・マネジメントでの知見を参考にしてサプライチェーンを主要なプロセスに分解し、それを階層構造として捉えて、サプライチェーン全体の停止事象をフォールトツリーでモデル化したこと。
- ②サプライチェーンの構成要素について、地震被害により機能停止する確率と停止した場合の復旧期間の確率分布をそれぞれモデル化することで、サプライチェーン全体の停止期間をフォールトツリーに基づき確率論的に評価すること。

ただし、構築したモデルはサプライチェーンの基本的な骨格に関しては表現できていると思われるが、現実のサプライチェーンに適用するにはフォールトツリーの詳細化が必要である。第5章では、具体的な対象地域を想定して、現実のサプライチェーンを模擬したモデルを構築し、事業中断リスクマネジメントの適用事例について検討する。

第2章の参考文献

- 1) サプライチェーンカウンシル：SCOR Overview Ver.9.0 日本語版，2008.
- 2) 井上威恭 監修，総合安全工学研究所 編：FTA 安全工学，日刊工業新聞社，1979.

第3章

震災時の設備システムの 機能停止リスク解析

第3章 震災時の設備システムの機能停止リスク解析

3.1 はじめに

最近、事業継続計画（BCP）の考え方の普及に伴って、地震後にも継続して建物を使用するために、構造躯体の安全性とともに建築設備の健全性の確保が求められるようになってきた。それを背景に、建築設備の耐震性能評価を目的として、諏訪ら¹⁾や金子ら²⁾は兵庫県南部地震での建築設備の被害データに基づき、建物応答値と建築設備の被害確率の関係を表わすフラジリティ関数の構築を行なっている。しかし、建築設備は個々の設備機器の連結により構成される設備システムとして機能を発揮するため、地震後の機能維持には設備システムとして健全なことが必要である。既往研究では、神原ら³⁾が個々の設備機器の復旧期間から設備システムの機能停止期間を評価する方法についての考え方を整理している。また、坂本⁴⁾や遠藤ら⁵⁾は個々の設備機器の耐震性能を考慮して設備システムの機能停止期間を求め、地震後の復旧曲線（時間経過に伴う機能復旧率の推移）の予測について検討している。しかし、これまでに地震後の機能維持の観点から設備システムの耐震性能評価ができるような、設備システムの機能停止被害に関するフラジリティ関数については検討されていない。

BCPでは、あらかじめ目標復旧時間を定めて、地震時に見込まれる機能停止期間がそれを上回らないように事前対策や事後対応策を検討することから、地震動強さと設備システムの機能停止期間の関係についての情報は合理的なBCPの策定に資するものと考えられる。

そこで、本章では、複数の設備機器から構成される設備システムを対象に、地震による機能停止期間を確率論的に推定する手法を提案する。また、設備システムの中でも特に重要と考えられる電源システムを対象に適用計算を行ない、提案手法の有効性について検討する。

なお、設備機器間の被害には実際は相関があると思われるが、ここでは簡単のため、互いに独立と仮定した。機器間の被害事象を独立とすると、設備システムの停止確率を過大に評価する恐れはある⁵⁾が、例えば、BCP策定時の事前対策の検討などで条件設定が異なる複数の計算結果を比較するような場合はその影響は少ないと思われる。

3.2 設備システムの機能停止リスク評価手法

3.2.1 個々の設備機器の復旧期間の評価

まず、個々の設備機器の復旧期間について考える。

地震動強さが x のときに設備機器 i が停止する確率 $G_i(x)$ は、設備機器 i の耐力が対数正規分布に従うと仮定すると次式で表せる。

$$G_i(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta_i)}{\beta_i}\right) \quad (3-1)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数、 θ_i は設備機器 i の耐力の中央値、 β_i はその対数標準偏差である。

また、設備機器 i が停止したときに復旧期間が t 以下になる確率 $H_i(t)$ は、設備機器 i の復旧期間が対数正規分布に従うと仮定すると次式で表せる。

$$H_i(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t/q_i)}{b_i}\right) \quad (3-2)$$

ここで、 q_i は設備機器 i が停止したときの復旧期間の中央値、 b_i はその対数標準偏差である。

以上より、地震動強さ x が発生したときに設備機器 i の復旧期間が t 以下になる確率の確率分布関数は、図 3-1 に示すようになる。すなわち、設備機器 i が停止しない確率と停止したときに復旧期間が t 以下になる確率の和となり、次式のように表せる。

$$F_i(t|x) = H_i(t) \cdot G_i(x) + (1 - G_i(x)) \quad (3-3)$$

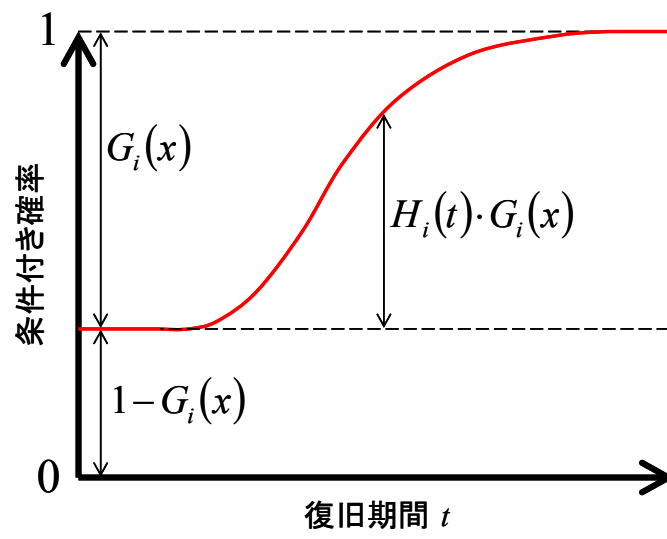


図 3-1 地震動強さ x が発生したときの設備機器 i の復旧期間 t の確率分布関数

3.2.2 設備システムの機能停止期間の評価

次に、設備システムの機能停止期間について考える。

個々の設備機器の停止事象に起因する設備システム全体の停止事象は、フォールトツリーを用いてモデル化することができる。すなわち、設備機器が直列に連結したサブシステムの停止事象（連結した設備機器のいずれか一つが停止すると当該部分が停止する）はORゲート、並列に連結したサブシステムの停止事象（連結した設備機器すべてが停止すると当該部分が停止する）はANDゲートでそれぞれ表現され、それらの組合せにより設備システム全体の停止事象を表現できる。

また、すべての復旧作業は同時に開始するという条件の下では、直列部分の機能停止期間は構成機器の中で最後に復旧する設備機器の復旧期間（構成機器の復旧期間の最大値）、並列部分の機能停止期間は構成機器の中で最初に復旧する設備機器の復旧期間（構成機器の復旧期間の最小値）となる。いま復旧期間は確率変数であるため、構成機器の復旧期間の最大値および最小値の確率分布は各設備機器の復旧期間が互いに独立と仮定すると次式で求められる⁶⁾。

$$\text{直列部分：} \quad F(t|x) = \prod_{i=1}^n F_i(t|x) \quad (3-4)$$

$$\text{並列部分：} \quad F(t|x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t|x)) \quad (3-5)$$

上式の(3-4)または(3-5)の計算を構成機器の連結の仕方に応じて選択して、フォールトツリーの基本事象から頂上事象に向かって順に行なうことにより、地震動強さ x が発生したときの設備システム全体の機能停止期間の確率分布関数が得られる。

3.3 適用計算

3.3.1 適用対象

以上にまとめた提案手法を，事務所ビルの AC 電源システムに適用した例を示す。

対象建物は新耐震基準による地下 1 階・地上 9 階建ての SRC 造のビルである。また，このビルでは文献 7 の方法に準拠して，耐震性の観点から設備機器の設置状況に関する調査が実施されている。当該ビルにおける電源システムの構成機器の一覧を表 3-1 に示す。調査により，冷却塔，冷却水ポンプおよび冷却水配管には設置状況の欠陥があることが判明している。具体的には，冷却水ポンプおよび冷却水配管では，当該機器・配管の設置固定や水平支持の度合いが不足していた。また，冷却塔では当該機器に問題はなかったが，地震時にその周辺の機器，配管，非構造壁等が衝突・落下する恐れがあった。

電源システムの停止に関するフォールトツリーを図 3-2 に示す。構成機器はすべて直列に連結されており，サブシステムとして電気室の空調システムを含む。なお，電源システムの停止は外部ライフラインの停電にも影響されるが，ここでは考慮していない。

表 3-1 対象建物における電源システムの構成機器一覧

設備機器名称	設置場所	設置階の分類	応答倍率	設置状況の欠陥*	耐力(g)				復旧期間(日)		
					現状		改善後		qi	bi	
					θ_i	β_i	θ'_i	β'_i			
引込(地中)		1階・地階	1.0	なし	2.5	0.5	—	—	0.6	0.3	
配電盤	電気室	1階・地階	1.0	なし	3.2	0.4	—	—	10	0.3	
高圧機器	電気室	1階・地階	1.0	なし	1.5	0.4	—	—	7	0.3	
幹線	電気室・EPS	上層階	2.0	なし	1.9	0.5	—	—	0.6	0.3	
動力盤・電灯盤	EPS	上層階	2.0	なし	3.0	0.4	—	—	30	0.3	
空調システム	室内機	電気室	1階・地階	1.0	なし	2.4	0.4	—	—	6	0.3
	冷却塔	屋上	上層階	2.0	タイプb	0.3	0.4	2.2	0.4	3	1
	冷却水ポンプ	屋上	上層階	2.0	タイプa	0.8	0.4	1.5	0.4	3	1
	冷却水配管	電気室・屋上・PS	上層階	2.0	タイプa	0.9	0.5	2.5	0.5	0.4	0.5
	ダクト	電気室	1階・地階	1.0	なし	1.9	0.5	—	—	3	2
	ドレン配管	電気室	1階・地階	1.0	なし	2.5	0.5	—	—	0.4	0.5

*設置状況の欠陥 タイプa: 当該機器の設置固定や水平支持が不足している

タイプb: 当該機器に問題はないが、その周辺の機器、配管、非構造壁等の衝突・落下の恐れがある

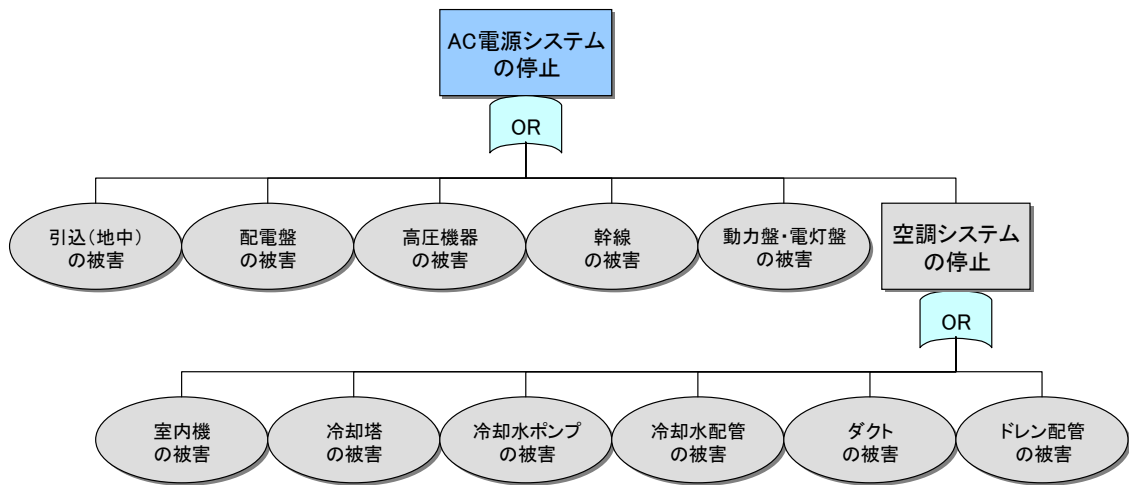


図 3-2 対象建物の電源システム停止に関するフォールトツリー

3.3.2 計算におけるパラメータ等の設定

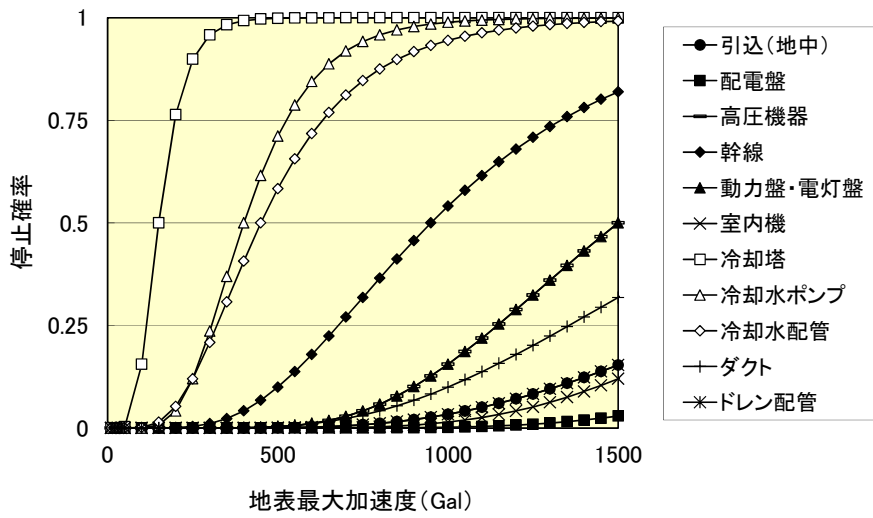
各構成機器のフラジリティ関数のパラメータは、設置状況の欠陥を考慮したモデル化がされている文献7，8より引用した。文献7は震災時の機能維持を目的とした建築設備システムの耐震性能に関する簡易調査方法をまとめたものであり，多数の設備機器について設置状況の欠陥タイプごとにフラジリティ関数が示されている。また，文献8は著者らが米国における最近の地震被害データを加えて，文献7のフラジリティ関数の一部を更新したものである。ここでは，文献8の検討結果を基本的に使用し，そこに示されていない設備機器については文献7から引用した。

復旧期間の確率分布に関しても，文献8の検討結果を使用した。文献8では設備機器ごとに代表的な地震被害に対する復旧内容を整理し，それに基づき復旧所要時間の中央値とばらつきを設定している。文献8に示されていない設備機器については，類似する機器の値を参考に著者が設定した。

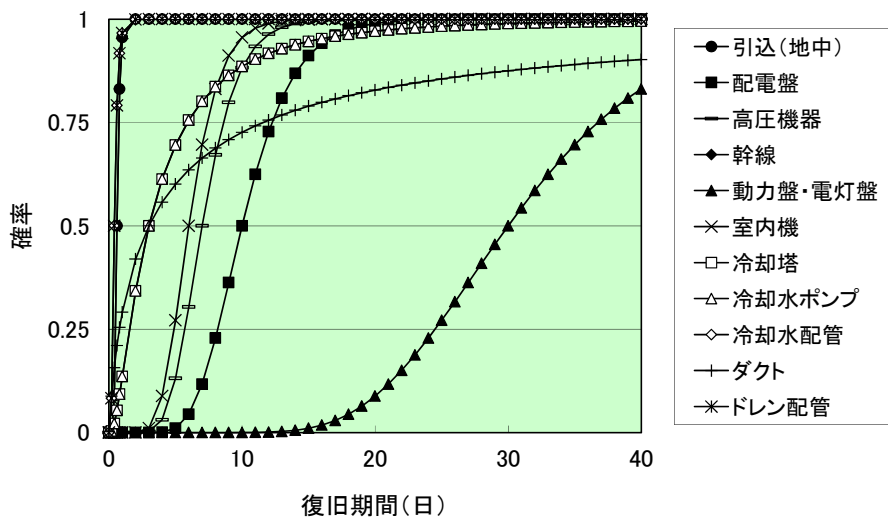
以上の方法で設定した各構成機器の耐力および復旧期間に関するパラメータは表 3-1 に示した（なお，改善後のパラメータは設置状況の欠陥があったもののみ）。

設備機器に作用する地震力については，ここでは建築設備の耐震設計で採用されている簡便な評価方法⁹⁾に倣って，建物全体を屋上・上層階，中間階，1階・地階の3層に分け，地表最大加速度に対する各層の応答倍率をそれぞれ2倍，1.5倍，1倍として求めた。なお，機器・配管等のうち，各階に設置されているものおよびEPS・PSに配置されて複数階を貫通しているものについては，今回は設備システム全体の機能停止期間の評価が目的であるため，最大応答となる上層階で評価した。表 3-1 には各構成機器の設置階の分類および地表最大加速度に対する応答倍率を示した。

以上に基づき求めた各構成機器の停止確率および復旧期間の確率分布関数を図 3-3 に示す。これより，構成機器の中で停止しやすい設備機器は設置状況の欠陥があった冷却塔，冷却水ポンプおよび冷却水配管であり，停止したとき復旧に長い時間を要する設備機器は動力盤・電灯盤であることが確認できる。



(a) 停止確率 (現状)



(b) 復旧期間の確率分布関数

図 3-3 各構成機器の停止確率および復旧期間の確率分布関数

3.3.3 計算ケースとその計算結果

適用計算は、前述した設置状況の欠陥のタイプを考慮して、以下の 4 ケースを設定して行なった。

[適用計算ケース]

- ①現状のまま
- ②冷却水ポンプ・配管の欠陥改善
- ③冷却塔の欠陥改善
- ④すべて改善

提案手法に基づき、各ケースについて電源システムの停止期間の確率分布関数を求めた。そのうち、「現状のまま」に対して求めた結果を図 3-4 に示す。図に示した確率分布関数のうち、1000Gal までのものは単純な形状の曲線であるが、1500Gal のときの曲線は変曲点を複数持つやや複雑な形状になっている。これについては 3.3.4 節で考察する。

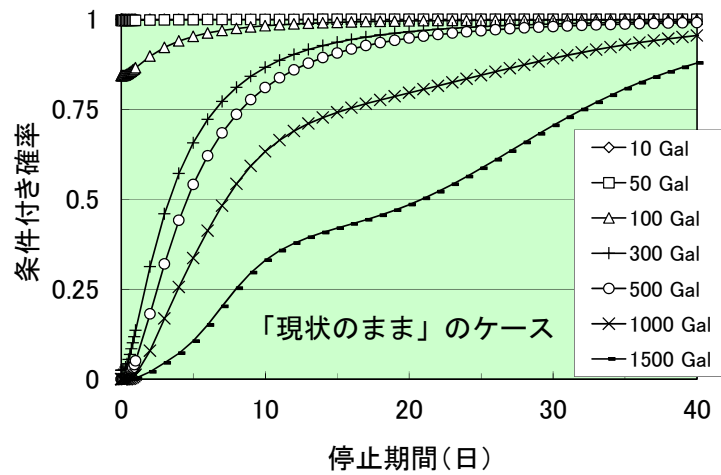


図 3-4 電源システムの停止期間の確率分布関数の評価結果
[「現状のまま」のケース]

得られた停止期間の確率分布関数を用いて、電源システムの平均停止期間を求めた。各ケースの結果を図 3-5 に示す。これより、設置状況の欠陥改善によって、平均停止期間が低減することが確認できる。また、地震動が非常に大きい場合には、欠陥改善の有無に関わらず同程度の平均停止期間を被ることが分かる。

同様に停止期間の確率分布関数を用いて、停止期間の長さごとに求めた停止事象の発生確率を図 3-6 に示す。これは停止期間の長さによって機能停止被害の重大さをランク分けしたもので、設備システムの機能停止被害に関するフラジリティ関数に相当するものと言える。次式により、地震動強さ x のときの停止期間 t の超過確率を算出し、それを地震動強さを横軸とするグラフにしたものである。

$$P(T > t|x) = 1 - F(t|x) \quad (3-6)$$

図中のすべての停止、1 週間以上の停止、1 ヶ月以上の停止は、それぞれ $t=0, 7, 30$ (日) の場合の結果である。これより、どの程度の停止期間を対象にするかによって、欠陥改善の効果は異なることが分かる。

計算結果を具体的に見ると、例えば地表最大加速度 500Gal のとき、平均停止期間 (図 3-5) は「現状のまま」では約 7 日、「すべて改善」では約 1 日となっている。同様に 500Gal のとき、1 週間以上の停止の確率 (図 3-6) は「現状のまま」では約 0.3、「すべて改善」では約 0.05 となっている。これらより、「現状のまま」に関しては直感的にやや過大評価の印象があるが、機器間の被害を独立とした仮定の影響や使用した設備機器のフラジリティ関数の妥当性について、今後検討が必要である。

なお、図 3-5 の平均停止期間および図 3-6 の 1 週間以上の停止の確率に関する各ケースの曲線のうち、「すべて改善」以外の 3 ケースの曲線は変曲点を複数持つ形状になっている。また、図 3-6 のすべての停止の確率に関する曲線においては、「冷却水ポンプ・配管の欠陥改善」が「現状のまま」とほぼ重なっており、「冷却水ポンプ・配管の欠陥改善」の効果がほとんど見られない。これらについては 3.3.4 節で考察を行なう。

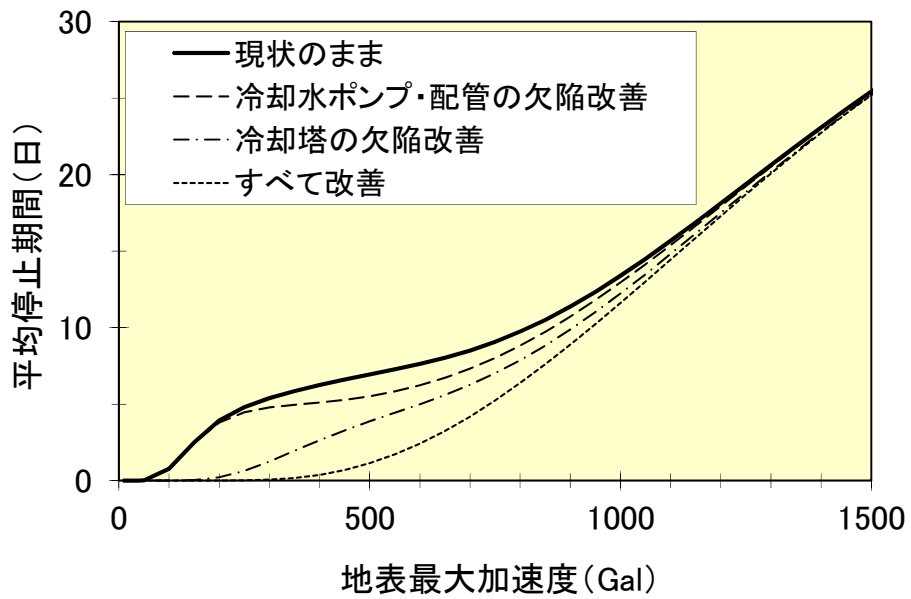


図 3-5 電源システムの平均停止期間

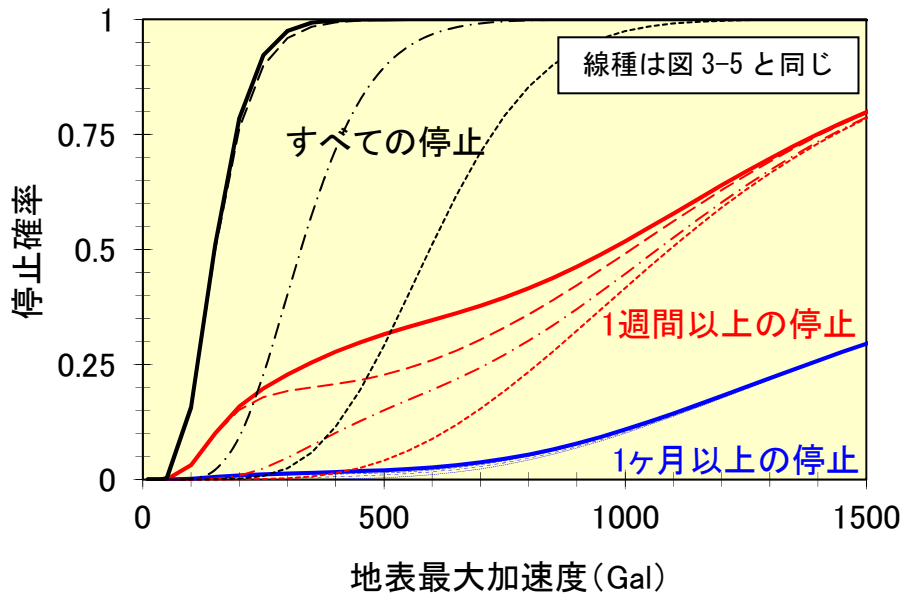


図 3-6 停止期間の長さごとに求めた電源システムの停止事象の発生確率

3.3.4 考察

まず、図 3-4 で示した電源システムの停止期間の確率分布関数の形状について考察を行なう。「現状のまま」のケースについて、地表最大加速度が 300, 500, 1000, 1500Gal のときの電源システムと構成機器の停止期間の条件付き確率を図 3-7 に示す。これより、300Gal および 500Gal では冷却塔や冷却水ポンプの影響がほぼ支配的であるのに対して、1000Gal になると動力盤・電灯盤の影響を受けるようになり、1500Gal においてはその影響がかなり大きくなる。表 3-1 および図 3-3 で示したように冷却塔および冷却水ポンプは停止しやすいが、停止しても復旧期間は短くて済むのに対して、動力盤・電灯盤は停止しにくい、停止すると復旧期間は長くかかる。地震動レベルが大きくなると、両方の復旧期間の影響が合成されて複雑な形状になることが分かる。

図 3-5 の平均停止期間および図 3-6 の 1 週間以上の停止の確率に関する曲線の形状についても、その原因は上記と同様と考えられる。

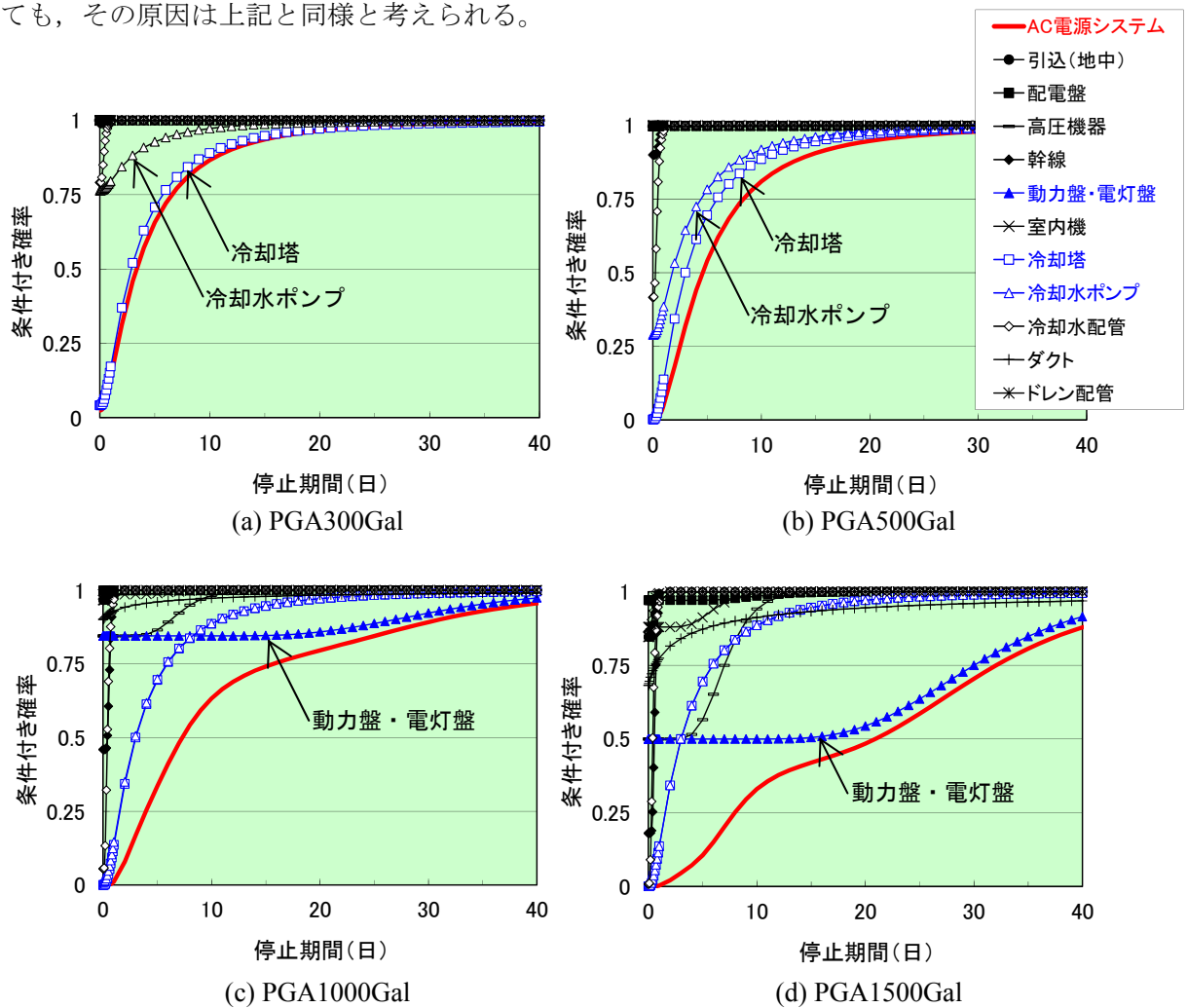


図 3-7 電源システムと構成機器の停止期間の条件付き確率

次に、図 3-6 のすべての停止の確率に関して、「冷却水ポンプ・配管の欠陥改善」が「現状のまま」とほぼ重なっていた点について考察を行なう。図 3-6 より、「冷却水ポンプ・配管の欠陥改善」はそれ単独ではほとんど効果が見られないが、「すべて改善」が「冷却塔の欠陥改善」に比べて大きく低減していることから、冷却水ポンプ・配管は冷却塔と合わせて欠陥改善を行なうことで効果が現れると考えられる。そこで、設備システムと構成機器の停止確率を図 3-8 に示す。ここでは図が煩雑になるのを避けるため、空調システムのレベルで結果を示した。これより、空調システムの停止確率では冷却塔の影響が支配的であり、冷却水ポンプ・配管の欠陥改善を行なうだけでは空調システムの停止確率はほとんど変わらないことが分かる。

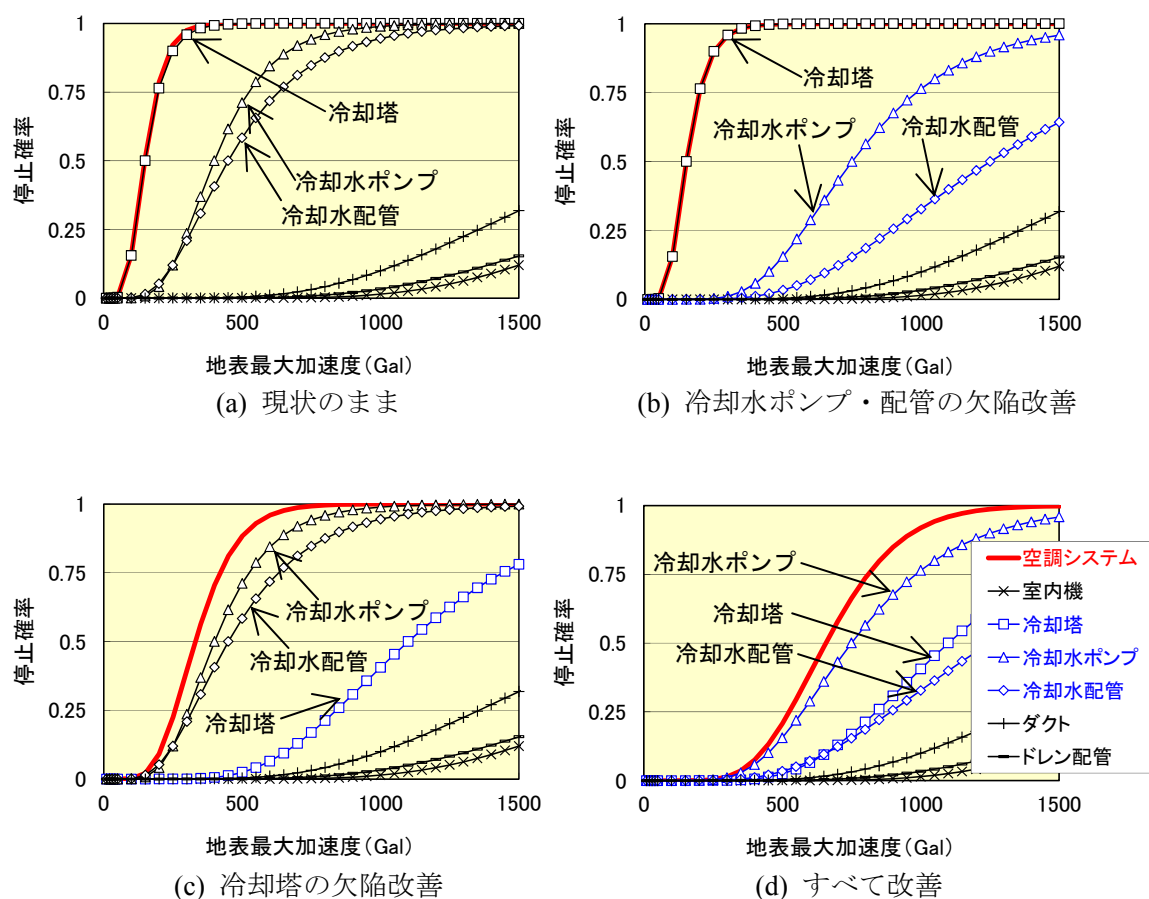


図 3-8 空調システムと構成機器の停止確率

3.4 まとめ

本章では、建築設備システムの地震被害による機能停止リスク評価手法を構築し、事務所ビルの電源システムへの適用計算を通じて手法の有効性を検討した。

本評価手法を用いることによって、個々の設備機器への耐震対策による設備システムの機能停止リスク低減効果を定量化することができる。また、地震動のレベルや停止期間の長さに応じて対策の効果が異なることが把握でき、BCPの策定等において合理的な対策の選定に資すると考えられる。

なお、本研究では地震動強さは所与の条件（確定値）として、設備システムの機能停止リスクを評価する手法を提案した。設備システムの機能停止被害に関する脆弱性関数として、想定した地震動強さに対する設備システムの機能停止期間を算出するものである。将来の一定期間内に、どの程度の機能停止期間がどの程度の確率で生じるかを算出する場合には、地震の発生確率やサイトの地震動評価の不確実性を考慮する必要がある。

また、構造躯体や内外装材の損傷によって機器・配管が被害を受けて、建物の設備機能が停止する場合もあるが、本研究では機器・配管そのものの耐力に基づき設備システムの機能停止期間を算出する手法を構築した。

今後は設備機器間の被害の相関性を考慮する方法を検討するとともに、過去の地震被害事例を参照して今回使用した設備機器の脆弱性関数や設備システムでの評価結果の妥当性を検討し、手法の実用性を高める予定である。

第3章の参考文献

- 1) 諏訪仁, 神田順: 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第633号, pp.1935-1941, 2008.
- 2) 金子美香, 神原浩: 兵庫県南部地震の被害データに基づく建築設備の被害関数, 第13回日本地震工学シンポジウム, pp.3330-3335, 2010.
- 3) 神原浩, 林康裕: 建築設備の地震被害による機能停止期間の評価法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.341-342, 2007.
- 4) 坂本成弘: 事務所ビルの地震後復旧曲線, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.65-66, 2007.
- 5) 遠藤透, 中村孝明, 萩原啓太, 大橋一正: 被害相関を考慮した建築設備の地震時復旧曲線の評価, 日本建築学会技術報告集, 第14巻, 第28号, pp.503-508, 2008.
- 6) 伊藤學, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三 共訳: 土木・建築のための確率・統計の応用, 1988.
- 7) Johnson, G.S., R.E. Sheppard, M.D. Quilici, S.J. Eder and C.R. Scawthorn: Seismic Reliability Assessment of Critical Facilities: A Handbook, Supporting Documentation, and Model Code Provisions, Technical Report MCEER-99-0008, 1999.
- 8) Porter, K., H. Ishida, K. Torisawa and M. Miyamura: Enhancing Nonstructural Fragility Analysis for Essential Facilities, CUREE-Kajima Joint Research Program, Phase 7, 2010.
- 9) 寺本隆幸: 建築設備耐震設計・施工指針と建築電気設備の耐震設計・施工マニュアルの基本的考え方, 電気設備学会誌, Vol.26, No.4, pp.248-251, 2006.

第4章

東日本大震災のデータに基づく 道路の機能的被害予測モデル

第4章 東日本大震災のデータに基づく道路の機能的被害予測モデル

4.1 はじめに

震災時の道路網寸断は、被災直後の救援救助に大きな影響を及ぼすだけでなく、その後の復旧活動や経済活動にも支障を来し、サプライチェーン途絶による事業中断被害の一因となる。サプライチェーンは、工場等の施設群とそれらをつなぐ物流により構成されるが、これまでのBCPの検討では各施設の被害は考慮されていても、施設間の道路網の機能支障がサプライチェーンに及ぼす影響についてはその評価手法自体が確立されていなかった。

そこで、本章では、震災時の道路網の機能支障予測を目的として、道路通行止めを道路の機能的被害と定義し、東日本大震災でのデータに基づき地震時の道路の機能的被害予測モデルについて検討する。なお、物流に係わるインフラには道路以外に港湾、空港、鉄道等があるが、本研究ではサプライチェーンの物流で大半を占める道路輸送に焦点を絞って検討する。

震災時の道路通行止めには、二次災害防止のためのものと緊急交通路確保のためのものの2種類がある。前者は道路の被害箇所での通行を規制するものであり、後者は人命救助や緊急物資輸送に係わる緊急車両の通行のために一般車両の通行を規制するものである。本研究では、地震動や津波による被害に起因した二次災害防止のための通行止めを対象とし、震災時の交通管理施策として実施される緊急交通路確保のための通行止めは対象外とした。

また、高速道路では、地震観測に基づく事前通行止めとして通行規制が実施されることから、地震動強さと走行上支障となる被害率との関係については多くの既往研究がある。一般道路においても、震災時の通行規制に関する分析はある程度行なわれてきているが、それを予測に使える形でモデル化した例はほとんどない。サプライチェーンにおける施設間の物流への影響を評価するためには、一般道路の通行止め予測は不可欠と思われるため、本研究では、一般道路（直轄国道および県管理道路）を対象に検討を行なうことにした。

4.2 東日本大震災における道路通行止めデータ

4.2.1 東日本大震災における道路通行止め情報の収集

東日本大震災では、沿岸部では津波によって落橋や橋桁流出等の甚大な被害が発生し、冠水や漂流物堆積等の被害も多数発生した。また、内陸部で津波の影響がなかった地域も、強い揺れにより路面亀裂・段差や橋台背面沈下等の被害が多数発生した。それらの影響で、直轄国道では 69 区間、県管理国道では 102 区間、県道等では 539 区間という非常に多くの通行止めが発生した¹⁾。

震災時の道路の通行規制情報は、各道路管理者のホームページから逐次公表された。通行規制情報は主に規制箇所（区間）、規制内容、規制原因、規制開始・解除日時であるが、その公表状況は道路管理者によってさまざまであった。本研究では、震災時の通行止め箇所と通行止め期間の予測モデルを構築するため、規制箇所と規制開始・解除日時を特定可能なデータが必要となる。道路管理者が通行規制情報を公表する目的は一般利用者の円滑な交通確保にあるため、規制箇所については必ず公表された。しかし、規制実施中の道路のみを示せば目的は果たせるため、規制が解除された道路の情報は残さない道路管理者もあり、その場合には規制開始日時は分かっても解除日時については不明となってしまう。

本研究では、地震後に直轄国道および県管理道路の各道路管理者のホームページを確認し、規制箇所と規制開始・解除日時について必要な情報が得られた直轄国道と岩手県管理道路について通行規制を分析することにした。対象とする規制内容は全面通行止めとした。片側通行規制は公表情報が不十分で分析不能であったため対象外とした。全面通行止めと比べて件数も少なく、影響は小さいと考えられる。直轄国道に関しては、東北地方整備局の青森、岩手、三陸、仙台、郡山、磐城、福島、秋田、湯沢、能代、山形、酒田の各（河川）国道事務所および関東地方整備局の常陸、宇都宮の各（河川）国道事務所の管轄道路を対象とした。なお、岩手県以外の県管理道路に関しては、宮城県、福島県、栃木県では規制解除後の道路の情報が得られなかった。茨城県では規制解除後の情報も残されていたが、地震後約 1 ヶ月間の規制箇所の情報が不十分であった。

収集した全面通行止め情報を規制原因に記された被害形態に基づき、震動被害と津波被害に大別して図 4-1 に示す。なお、公表された情報だけで震動被害と津波被害の判別が困難な場合は、後述する津波浸水域のデータを用いて、浸水域内にあるものは津波被害による全面通行止めと仮定した。解析対象とした全面通行止めは、直轄国道では震動被害および津波被害によるものはそれぞれ 22 件および 29 件、岩手県管理道路ではそれぞれ 29 件および 40 件である。解析対象外としたものは、原子力発電所事故に伴う緊急時避難準備区域内または警戒区域内で発生した通行規制箇所や、沿岸部で津波警報等の発令により通行規制された区間であり、それらは被害復旧とは別の要因が通行止め期間に影響していたため、解析では除外した。また、自動車専用道路のインターチェンジ間または全線で通行規制さ

れ、規制区間内の通行不能箇所の特定が困難であったものも解析対象外とした。

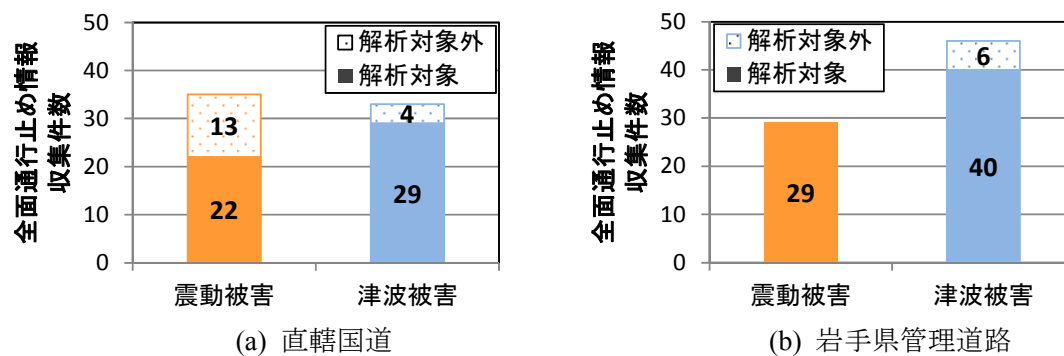


図 4-1 収集した全面通行止め情報の件数

4.2.2 予測モデル構築に用いた道路通行止めデータ

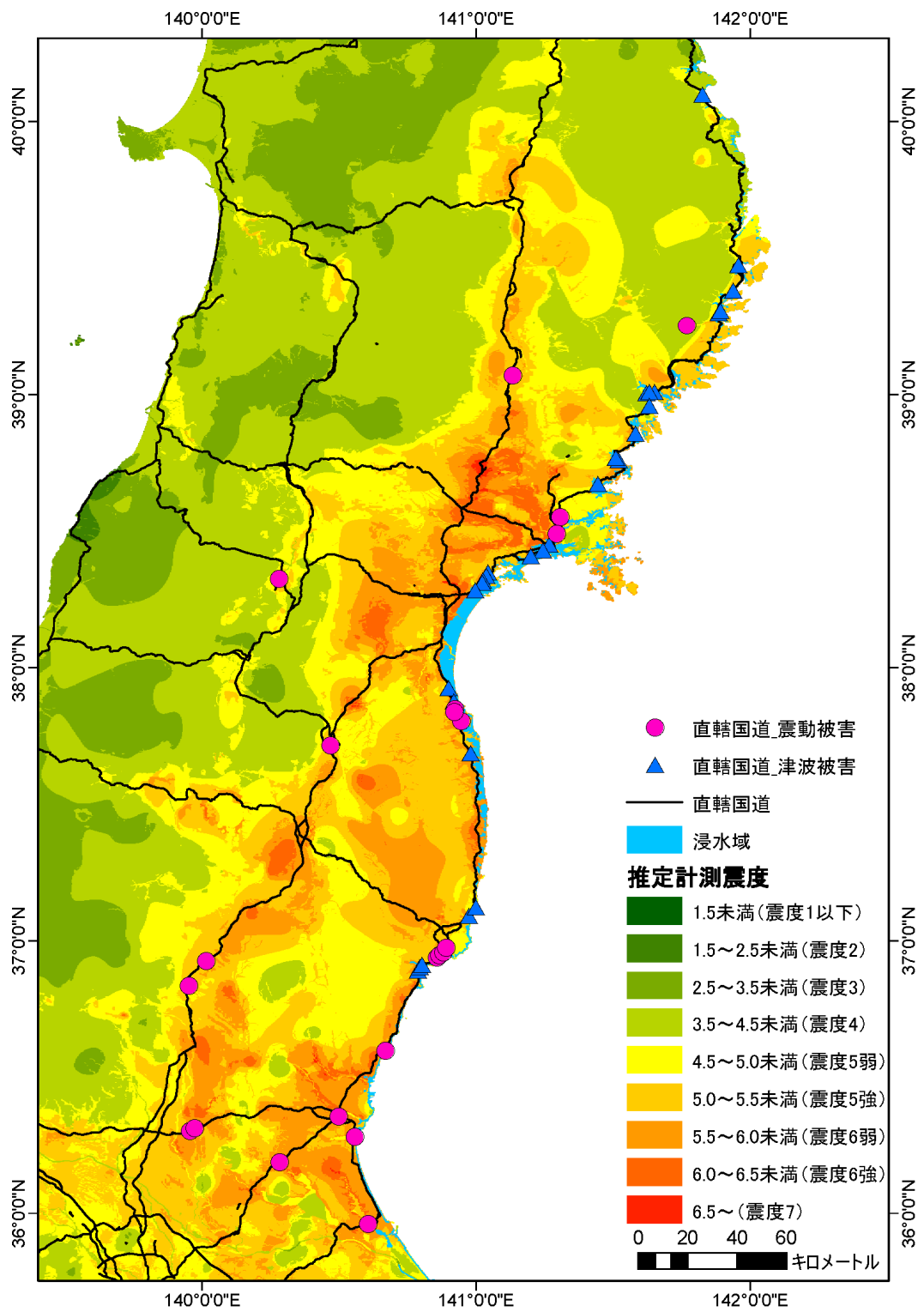
次節で述べる道路通行止め予測モデルの構築には、前述した解析対象の全面通行止めデータを用いた。

解析対象とした全面通行止めデータの分布を図 4-2 に示す。図には、対応する道路データ、本震時の推定計測震度、津波による浸水域（解析では浸水深を考慮）も合わせて示した。ここで、道路データには、日本デジタル道路地図協会の DRM（デジタル道路地図）を基に加工された市販の道路データを用いた。また、推定計測震度のメッシュデータには、気象庁・自治体・K-NET・KiK-net の観測点における計測震度に基づき、250m メッシュ単位の表層地盤による震度増分を考慮して面的に補間した結果²⁾を用いた。浸水域および浸水深のメッシュデータには、国土交通省都市局の復興支援調査アーカイブにおける 100m メッシュ単位の浸水深（GL からの浸水深）³⁾を用いた。

解析対象とした全面通行止めデータの被害形態の内訳を図 4-3 に示す。通行規制情報に記載された内容に基づき、震動被害は路面損傷・橋梁段差・法面崩落・その他の計 4 分類、津波被害は冠水・津波堆積物・道路損傷・背面盛土流出・落橋の計 5 分類に分けて集計した。これより、全面通行止めの規制原因として、震動被害では橋梁段差、津波被害では津波堆積物が最も多かった。なお、橋梁の震動被害としては橋脚損傷や支承損傷もあったが橋台背面沈下による段差が大部分を占めたため、ここではまとめて橋梁段差と表現した。また、津波被害は複数の被害形態が複合的に発生した場合があったが、ここでは被害程度の大きい方で代表させて分類した。

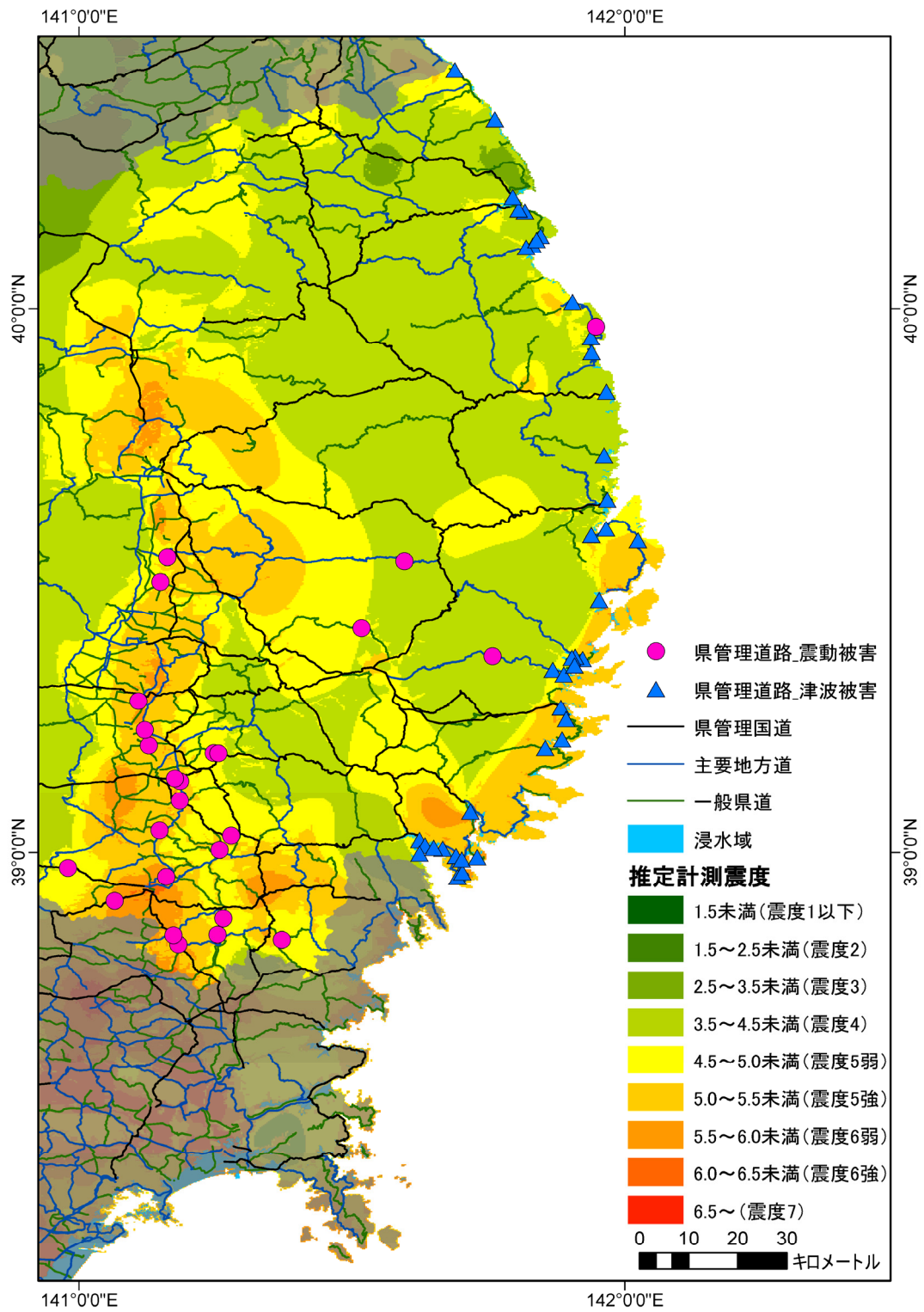
解析対象とした全面通行止めデータの震度階・浸水深の内訳を図 4-4 に示す。前述した計測震度・浸水深のメッシュデータから各通行止め個所での値を求めて集計したものである。これより、震動被害による全面通行止めでは震度 5 強が半数を占め、震度 5 弱以下も 1/4 程度あった。また、津波被害による全面通行止めでは浸水深 8.0m 超が最も多く、浸水深 1.0m 以下も 1/5 程度あった。

前述した被害形態の内訳を震度階別・浸水深別に集計したものを図 4-5 に示す。これより、震動被害では震度 5 弱以下においては法面崩落の割合が多く、橋梁段差は震度 5 強以上でその割合が多かった。また、津波被害では津波堆積物はいずれの浸水深においてもほぼ一定の割合を占めるが、道路損傷・背面盛土流出・落橋といった構造物の物的被害による全面通行止めは浸水深が深くなるほどその割合が多かった。ただし、震度 6 強や浸水深 0.5m ～1.0m 以下など一部の区分については母数となるデータ数が少ないことに留意する必要がある。



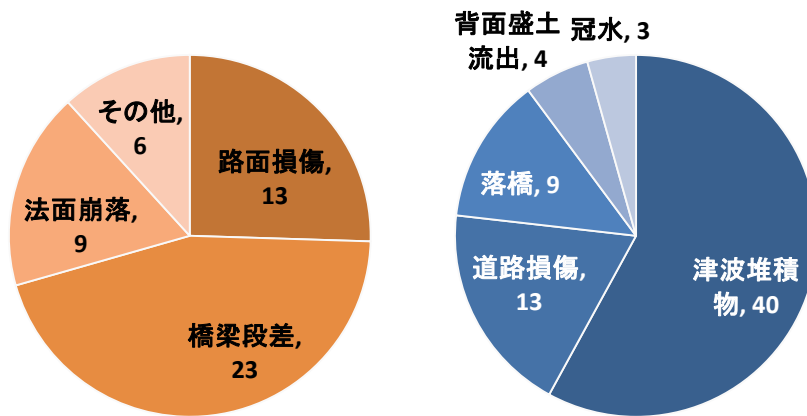
(a) 直轄国道

図 4-2 解析対象とした全面通行止めデータの分布



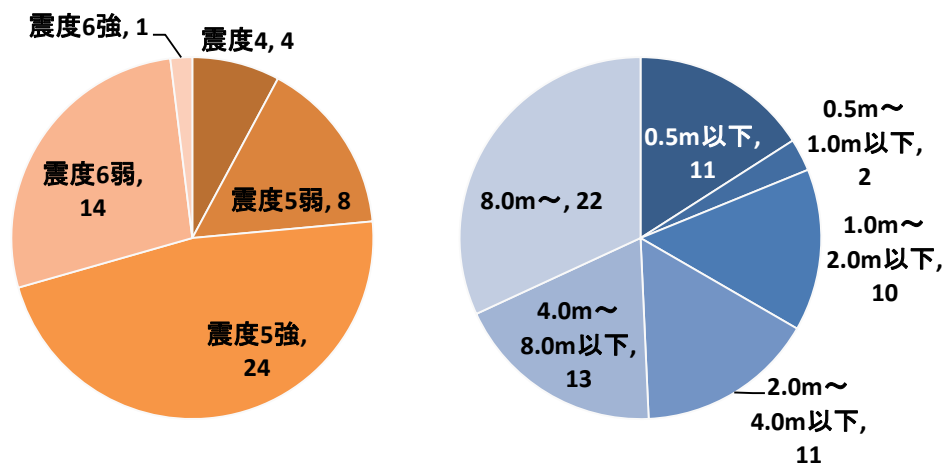
(b) 岩手県管理道路

図 4-2 解析対象とした全面通行止めデータの分布 (つづき)



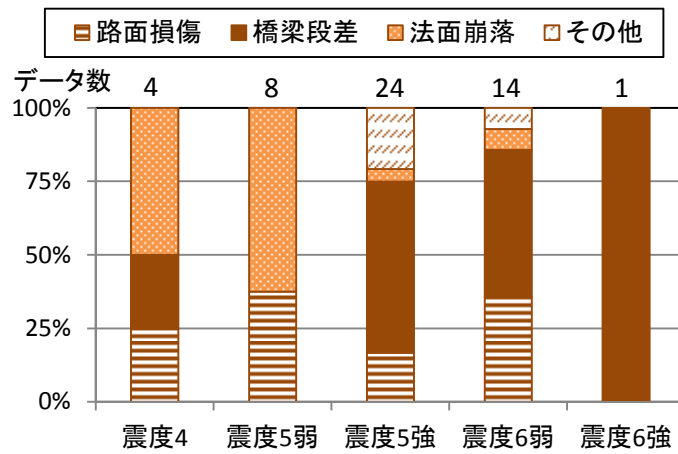
(a) 震動被害による全面通行止め (b) 津波被害による全面通行止め

図 4-3 全面通行止めデータの被害形態の内訳

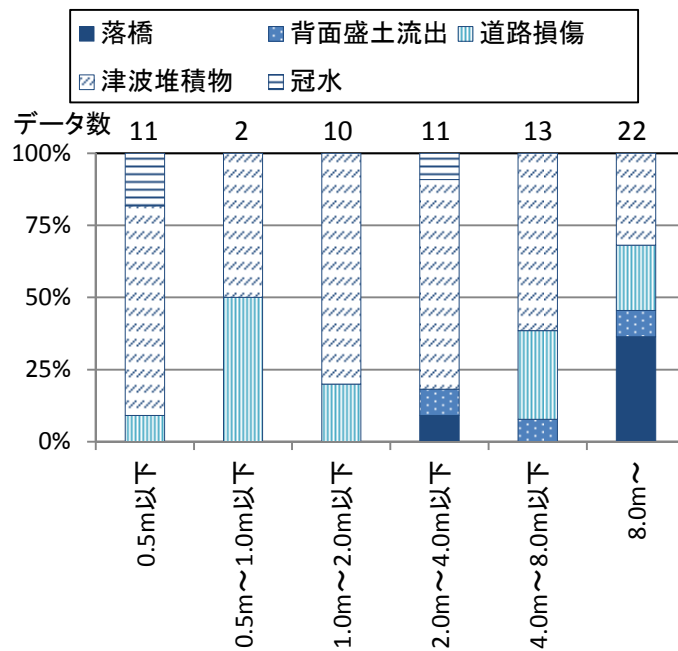


(a) 震動被害による全面通行止め (b) 津波被害による全面通行止め

図 4-4 全面通行止めデータの震度階・浸水深の内訳



(a) 震動被害による全面通行止め



(b) 津波被害による全面通行止め

図 4-5 全面通行止めデータの震度階別・浸水深別の被害形態の内訳

なお、東日本大震災の道路被害に関しては、庄司ら^{4, 5)}が本研究と同様の情報ソースに基づき、被害形態を分類して被害件数の分析を行なっているが、全面通行止めに限定せず、すべての道路被害を対象としている点が本研究とは異なる。そこで得られた結果を本研究と比較すると、津波被害に関してはほぼ同様の傾向であったが、震動被害に関しては多少傾向が異なり、橋梁段差より路面損傷の方が被害件数は多かった。このような結果の違いは対象データの違い（東北地方から関東地方の道路すべてを対象とし、高速道路も対象に含む）による影響が大きいと思われるが、その他の可能性として路面損傷では被害があっても全面通行止めに至るケースは少なかったということも考えられる。

4.3 震災時の道路通行止め予測モデル

4.3.1 道路通行止め予測モデルの検討概要

本研究では、震災時の道路通行止め事象を「通行止めが発生するか否か」および「通行止めが発生した場合に通行止め期間は何日間になるか」の二段階に分けて考え、それらを確率論的に評価するモデル（通行止め確率および通行止め期間の確率分布）を構築する。また、各確率モデルについては、東日本大震災における道路通行止めデータの統計的分析から導出する。検討対象は一般道路（直轄国道および県管理道路）とする。

また、過去の震災における道路通行規制の分析から、道路管理者や被害形態により通行規制の傾向が異なることが分かっており、本研究ではそれらの影響度合いを多変量解析で分析し、それを予測モデルへ反映させることも検討する。

予測モデルは企業での BCP 検討に用いることを勘案し、構造物の個別情報は用いずに、市販の道路データと計測震度や浸水深のみから簡便に適用可能なモデルとする。

4.3.2 通行止め確率のモデル構築

本研究では、通行止め確率として、対象道路リンクが地震動や津波により全面通行止めとなる確率を評価するモデルを構築する。全面通行止めの規制原因は前述のように被害形態で分類したが、震動被害では非常に大規模なものを除けば基本的に「点」で発生する被害であるのに対して、津波被害では落橋以外の被害は面的に発生して「線」状に影響が生じると言える。そこで、そのような特徴を考慮して、震動被害に関しては通行不能箇所の件数で分析し、津波被害に関しては通行不能区間の延長で分析することにした。

(1) 震動被害による通行止め確率

まず、震動被害による通行止め確率についてモデル化を行なう。震動被害では通行不能箇所の件数に基づき分析する。そのため、後述するように、データの回帰からは全面通行止め発生率（単位道路延長当たりの全面通行止め件数）をモデル化し、それをを用いて全面通行止め確率を求める。

前述の計測震度のメッシュデータを用いて、メッシュ内に含まれる浸水域外道路延長および全面通行止め件数を一定の計測震度の区間ごとに集計して、その比を取ると計測震度の区間ごとの単位道路延長当たりの全面通行止め件数が求まる。本研究では、それを計測震度の区間 i の震動被害による全面通行止め発生率 Q_{EQi} [件/km]として、(4-1)式のように定義した。

$$Q_{EQi} = N_{EQi} / L_{EQi} \quad (4-1)$$

ここで、 L_{EQi} および N_{EQi} はそれぞれ計測震度の区間 i で集計した浸水域外道路延長[km]および震動被害による全面通行止め件数[件]である。

直轄国道および岩手県管理道路を対象に、計測震度 0.1 刻みの区間で求めた震動被害による全面通行止め発生率を図 4-6 にプロットして示す。なお、図に示したデータより高震度のメッシュにも道路はあったが、道路延長が短く、全面通行止め件数はゼロであったため、信頼性が低いと考えて対象外とした。

本研究では、計測震度 x のときの震動被害による全面通行止め発生率 $Q_{EQ}(x)$ [件/km]を標準正規分布の累積分布関数 Φ を用いて、(4-2)式のようにモデル化することにした。このような定式化は被害予測関数ではよく使われるものである。なお、高速道路盛土の被害率[件/km]の予測式を検討した既往研究⁶⁾では、(4-2)式に係数を乗じてモデル化している。しかし、 μ_x と σ_x と合わせて 3 つの変数を回帰するにはデータ数が十分でないと考えられ、取りうる値も 1 よりかなり小さいことから、本研究では次式の形を採用した。

$$Q_{EQ}(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right) \quad (4-2)$$

ここで、 μ_x および σ_x はそれぞれ全面通行止めが発生する計測震度 x の平均値および標準偏差である。

μ_x および σ_x については、(4-3)式に示す ε_{EQ} を目的関数とした道路延長の重み付き最小二乗法によって求める。ここでは、道路延長による重みを考慮する場合としない場合に得られる回帰曲線を比較して、前者を採用した。

$$\varepsilon_{EQ} = \sum_i \left\{ L_{EQi} \cdot (Q_{EQi} - Q_{EQ}(x))^2 \right\} \quad (4-3)$$

ここで、 i は図 4-6 に示したデータの計測震度の区間で、直轄国道では計測震度 3.5～6.1 で 0.1 刻みの 26 区間 ($i=1, \dots, 26$)、岩手県管理道路では計測震度 3.5～5.8 で 0.1 刻みの 23 区間 ($i=1, \dots, 23$) である。計測震度 x には区間 i の中央値を用いる。

直轄国道および岩手県管理道路を対象に、それぞれ求めた震動被害による全面通行止め発生率関数を図 4-6 および表 4-1 に示す。得られたモデルはいずれも計測震度 4.5 付近まではほぼゼロを示し、そこから計測震度 5.2 付近まで両者の違いは少ないが、それより大きくなると岩手県管理道路の方が全面通行止め発生率は高くなり、例えば、計測震度 5.5～6.0 (震度 6 弱) では直轄国道は 0.01～0.03 件/km 程度、岩手県管理道路は 0.02～0.06 件/km 程度である。

以上で求めた全面通行止め発生率 (単位道路延長当たりの全面通行止め件数) を用いて、対象とする道路リンクの全面通行止め確率を求める。一定の道路区間で全面通行止めがランダムに発生すると仮定したとき、単位道路延長当たりの全面通行止め件数はポアソン分布に従うため、計測震度 x のときの震動被害による全面通行止め確率 $P_{EQ}(x)$ は、対象道路リンク (区間長 L [km]) の区間内で 1 件以上の通行止め箇所が発生する確率として、(4-2) 式の $Q_{EQ}(x)$ を用いて次式で求めることができる。

$$P_{EQ}(x) = 1 - \exp[-L \cdot Q_{EQ}(x)] \quad (4-4)$$

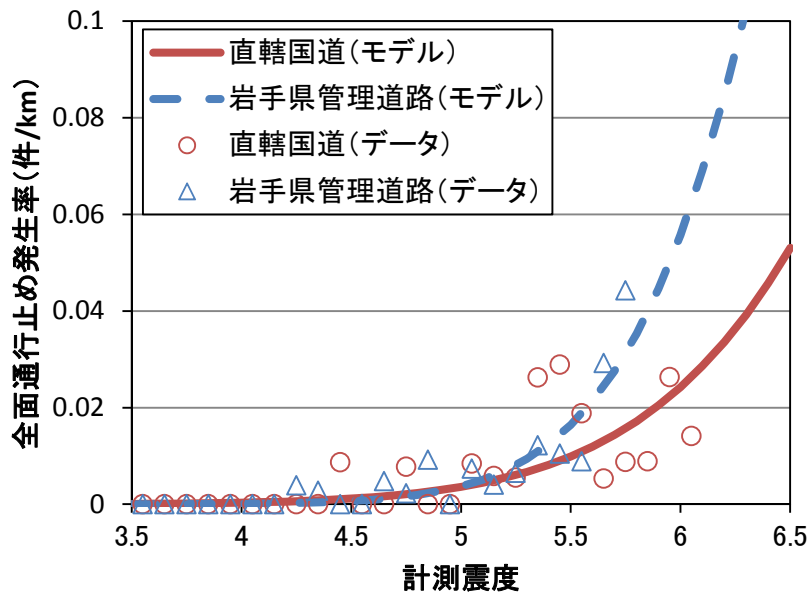


図 4-6 震動被害による全面通行止め発生率

表 4-1 震動被害による全面通行止め発生率関数のパラメータ ((4-2)式)

	μ_x	σ_x
直轄国道	8.76	1.40
岩手県管理道路	7.47	0.92

(2) 津波被害による通行止め確率

次に、津波被害による通行止め確率についてモデル化を行なう。津波被害では通行不能箇所の数ではなく、通行不能区間の延長に基づき分析する。落橋については、それ以外の津波被害と区別して、通行止め確率のモデル化に用いるデータからは除外した。落橋による通行不能箇所の予測には東日本大震災の被害データに基づき落橋発生確率をモデル化した研究事例⁷⁾があるため、別途それを用いる。

前述した浸水深のメッシュデータを用いて、メッシュ内に含まれる浸水域内道路延長および全面通行止め延長を一定の浸水深の区間ごとに集計して、その比を取ると浸水深の区間ごとの平均的な全面通行止め延長の比率が求まる。道路リンクの区間長が一定の場合には、全面通行止め延長の比率は全面通行止めとなる道路リンク数の比率とみなせるため、道路リンクの全面通行止め確率を求めることができる。実際は道路リンクの区間長に変動は多少あるが、本研究で用いたデータでみると、津波被害による全面通行止め延長（平均2km程度）に対して、その中の道路リンクは短いものが多かったため（平均0.1km）、本研究では一次近似として、道路リンクの区間長は一定と考えた。

本研究では、浸水深の区間 j の津波被害による全面通行止め確率 P_{TSj} を(4-5)式で求めることにする。

$$P_{TSj} = M_{TSj} / L_{TSj} \quad (4-5)$$

ここで、 L_{TSj} および M_{TSj} はそれぞれ浸水深の区間 j で集計した浸水域内道路延長[km]および津波被害による全面通行止め延長[km]である。

直轄国道および岩手県管理道路を対象に、浸水深 1m 刻みの区間で求めた津波被害による全面通行止め確率を図 4-7 にプロットして示す。なお、図に示したデータより浸水深が深いメッシュにも道路はあったが、道路延長が短く、全面通行止め確率のばらつきも大きかったため、信頼性が低いと考えて対象外とした。これより、全面通行止め確率の分布は、ある程度の浸水深までは（ばらつきは多少あるが）ほぼ一定の値を取り、それより深くなると増加するように見える。通行止めとなる原因が津波による構造物の物的被害のみであれば、浸水深がゼロに近いと、通行止め確率もほぼゼロになると思われるが、前述の図 4-5 に示したように全面通行止めの規制原因では津波堆積物の割合が大きく、それは浸水深によらず同程度であった。また、浸水深 30cm 以上で自動車の通行には支障が生じる⁸⁾ことから、使用した浸水深データの精度を考慮すれば、浸水域内では浸水深の深浅に関わらずほぼ一定の確率で通行止めに至っていたと推測される。つまり、図 4-7 に示したデータには、冠水・津波堆積物による通行支障と構造物の物的被害による通行支障の 2 つの事象が含まれていると考えられる。ある程度の浸水深までは津波による物的被害の影響が小さいために、冠

水・津波堆積物による通行支障の影響が支配的であるが、浸水深が深くなるにつれて物的被害の発生確率が高くなり、その影響が顕在化してくると解釈した。

そこで、本研究では、浸水深 d のときの津波被害による全面通行止め確率 $P_{TS}(d)$ を(4-6)式のように場合分けしてモデル化することにした。なお、適用範囲は浸水域を対象とするため、 $d > 0$ とする。

$$P_{TS}(d) = \begin{cases} C_{TS} & (C_{TS} > \Phi\left(\frac{\ln d - \lambda_d}{\zeta_d}\right) \text{ の場合}) \\ \Phi\left(\frac{\ln d - \lambda_d}{\zeta_d}\right) & (C_{TS} \leq \Phi\left(\frac{\ln d - \lambda_d}{\zeta_d}\right) \text{ の場合}) \end{cases} \quad (4-6)$$

ここで、 λ_d および ζ_d はそれぞれ全面通行止めが発生する浸水深 $\ln d$ の平均値および標準偏差、 C_{TS} は定数である。 C_{TS} は浸水深によらず全面通行止め確率が一定とみなせる範囲のデータから設定する。

λ_d および ζ_d については、(4-7)式に示す ε_{TS} を目的関数とした最小二乗法によって求める。

$$\varepsilon_{TS} = \sum_j (P_{TSj} - P_{TS}(d))^2 \quad (4-7)$$

ここで、 j は図 4-7 に示したデータの浸水深の区間で、直轄国道では浸水深 0m~15m で 1m 刻みの 15 区間 ($j=1, \dots, 15$)、岩手県管理道路では浸水深 0m~14m で 1m 刻みの 14 区間 ($j=1, \dots, 14$) である。浸水深 d には区間 j の中央値を用いる。

直轄国道および岩手県管理道路を対象に、それぞれ求めた津波被害による全面通行止め確率関数を図 4-7 および表 4-2 に示す。なお、図より浸水深 7m までを全面通行止め確率が概ね一定とみなして、その範囲のデータから定数 C_{TS} を設定し、(4-7)式による回帰についてはそれより深い範囲のデータを用いて行なった。得られたモデルは全体的に直轄国道より岩手県管理道路の方が全面通行止め確率は高く、回帰で求めた曲線の部分では浸水深の増加に伴って徐々に両者の差が縮まる。なお、浸水深 15m 以深で若干逆転するが、この範囲はデータがなく外挿された部分である。

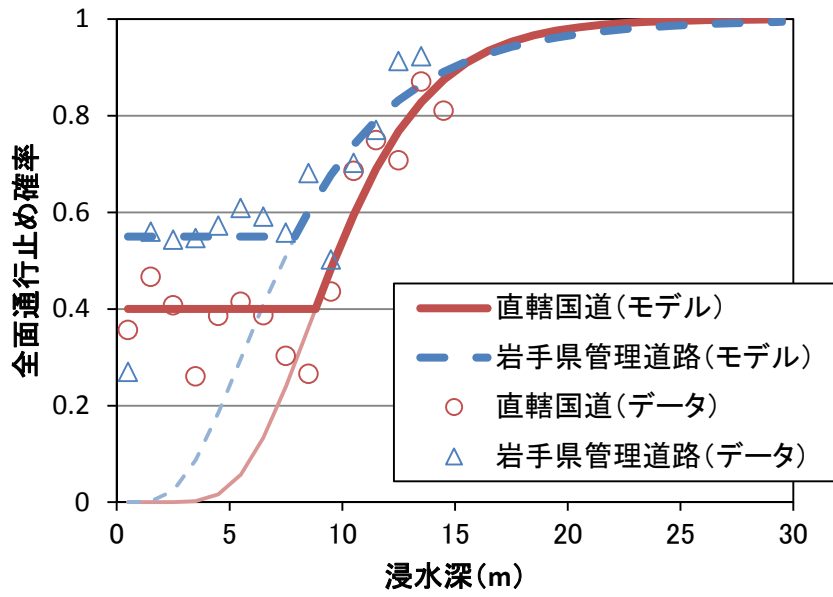


図 4-7 津波被害による全面通行止め確率

表 4-2 津波被害による全面通行止め確率関数のパラメータ ((4-6)式)

	C_{TS}	λ_d	ξ_d
直轄国道	0.40	2.27	0.36
岩手県管理道路	0.55	2.00	0.55

4.3.3 通行止め期間の確率分布のモデル構築

通行止めが発生した場合に通行止め期間が何日間になるかは、通行止め箇所の被害形態や被害規模、復旧優先順位、復旧人員の投入規模、資機材等の調達時間、被災地全体の被害程度、道路管理者の対応体制といった様々な要因が影響する。

これまでに震災時の道路網の交通機能低下と復旧過程を予測する研究⁹⁾はされてきているが、主な着眼点は復旧優先順位の考え方や復旧作業班の配分といった復旧戦略の検討にあり、本研究とは前提が異なるものである。本研究では、サプライチェーンを構成する企業がBCP策定のために道路利用者として得られる情報のみから震災時の道路網の機能支障を予測することを目的としており、通行止め期間に影響する要因のうちパラメータとして考慮できるものは限られている。そのため予測結果にある程度大きなばらつきが生じることは避けられないが、一定の信頼性の下で定量的に評価することが合理的なBCP策定のためには重要と考える。

本研究では、収集した全面通行止めデータから通行止め期間に影響すると思われる要因として、道路管理者、被害形態、震度階・浸水深の3項目を考慮して通行止め期間を分析する。

(1) 道路管理者別の通行止め期間の確率分布（震動被害・津波被害）

まず、通行止め確率のモデル化と同様に道路管理者別にデータを分析して、通行止め期間の確率分布のモデル化を検討する。

通行止め解除時期ごとの全面通行止め箇所数を図4-8に示す。ここで、横軸の通行止め解除時期の区間については、対数軸上でほぼ等間隔になるように設定した。

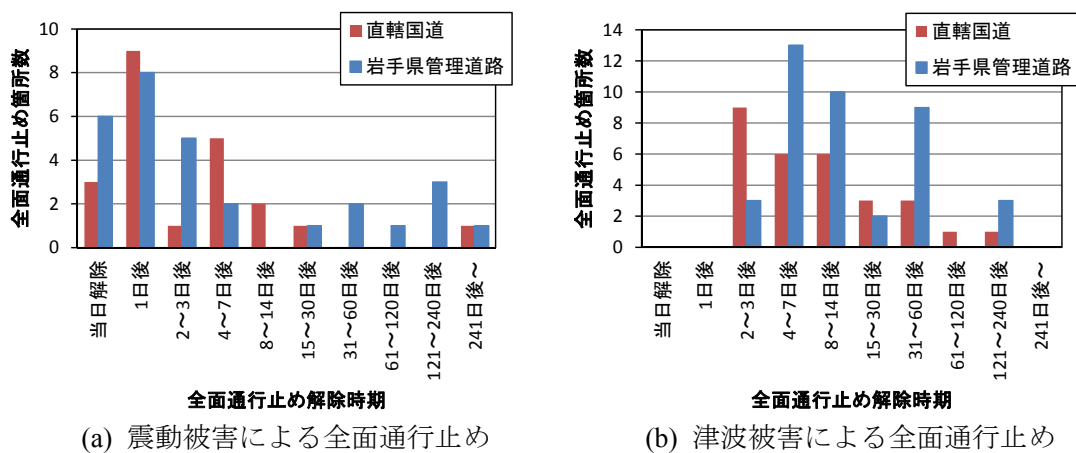


図4-8 通行止め解除時期ごとの全面通行止め箇所数

いずれも単純な分布形状ではないが、ここでは簡単のため、全面通行止め期間は対数正規分布に従うと仮定して、(4-8)式のように全面通行止め期間 y の確率密度関数 $f(y)$ を求めることにした。

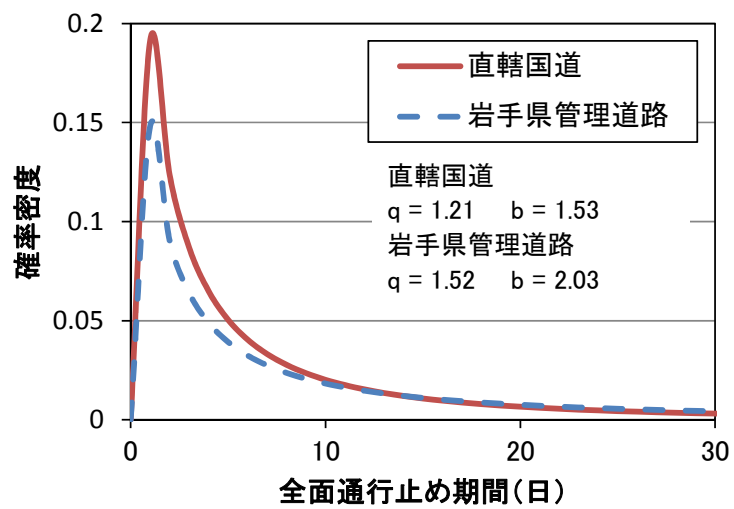
$$f(y) = \frac{1}{by} \Phi\left(\frac{\ln y - q}{b}\right) \quad (4-8)$$

ここで、 Φ は標準正規分布の累積分布関数、 q および b はそれぞれ全面通行止め期間 $\ln y$ の平均値および標準偏差である。

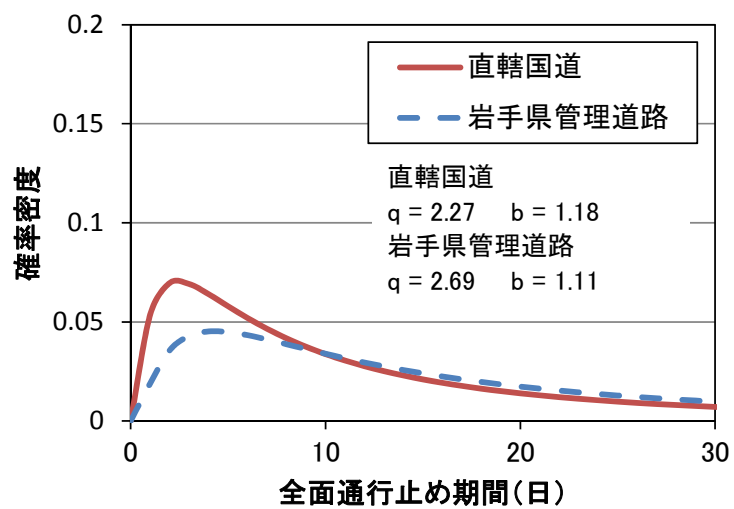
全面通行止め期間の確率密度関数のパラメータを最尤法で求めた結果を図 4-9 に示す。これより、震動被害では曲線のピークが 1 日付近にあり鋭く立ち上がった形状であるのに対し、津波被害ではピークは 2~4 日付近にあり傾斜がなだらかな形状をしている。それらは直轄国道と岩手県管理道路で比較すると、岩手県管理道路の方がピークの高さは低くばらつきが大きい傾向にあるとともに、平均もやや大きめとなっている。

東日本大震災では、津波被害により沿岸部での道路網の機能支障が著しく、また、一般に県管理道路の方が通行止め解除に時間を要したものが多かったが、構築したモデルではそれらが定量的に示されていると言える。

求めた全面通行止め期間の累積分布関数を被害データから得られる累積確率と比較して図 4-10 に示す。これより、求めたモデルは被害データと概ね整合していると思われるが、震動被害の岩手県管理道路に関しては図 4-8 に示したように対数正規分布から外れる部分があり、整合していないところも見られる。

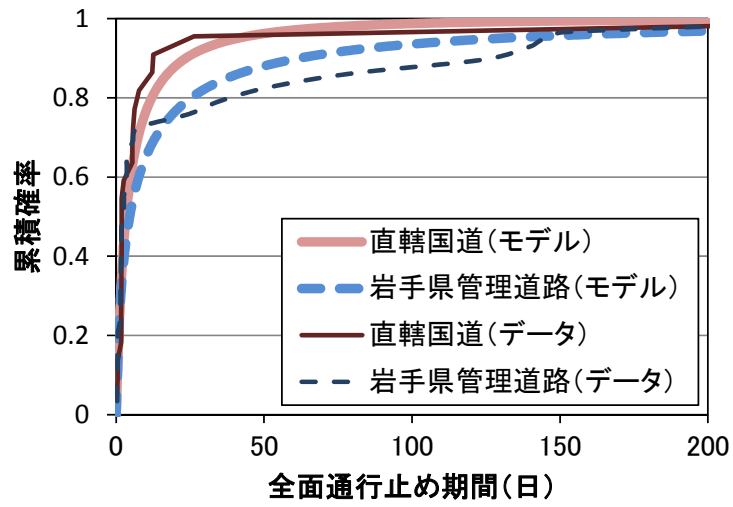


(a) 震動被害による全面通行止め

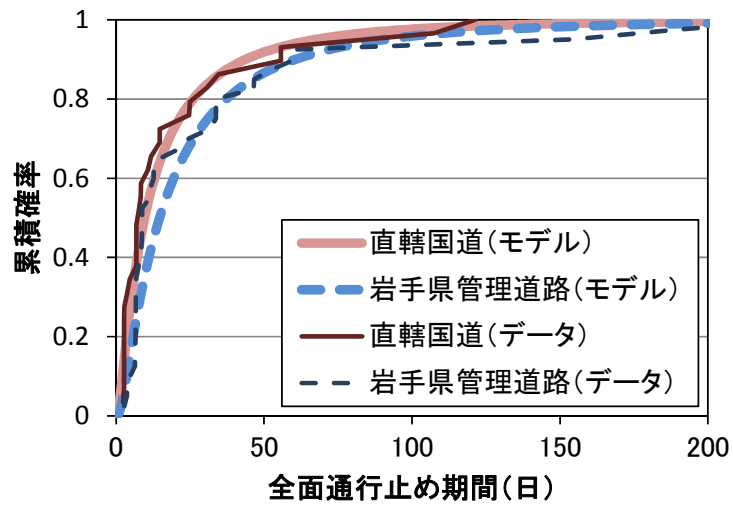


(b) 津波被害による全面通行止め

図 4-9 全面通行止め期間の確率密度関数



(a) 震動被害による全面通行止め



(b) 津波被害による全面通行止め

図 4-10 全面通行止め期間の累積分布関数と被害データによる累積確率の比較

(2) 震度階・浸水深を考慮した通行止め期間の確率分布の検討（震動被害・津波被害）

次に、道路管理者、被害形態、震度階・浸水深が通行止め期間の長さに及ぼす影響度合いを分析する。

道路管理者に関しては、直轄国道および岩手県管理道路で全面通行止め期間の平均やばらつきに違いが見られた。そこで、被害形態および震度階・浸水深に関しても、それぞれの区分で全面通行止め期間の対数平均および対数平均±対数標準偏差を求めて図 4-11 に示した。これより、浸水深については増加するほど全面通行止め期間の平均も大きくなる傾向にある。震度階についても同様な傾向にあるが、震度 5 弱の平均は全体の傾向からやや外れており、ばらつきも大きい。前述の図 4.4 に示したように、震度階および浸水深を区分に分類するとそれぞれのデータ数が少なくなり、単純に平均を取るだけでは区分ごとの影響度合いを適切に評価できない場合がある。また、震度階や浸水深の区分が同一であっても、被害形態によって復旧期間の長さに及ぼす影響も異なると考えられ、それら相互の影響を分離して分析する必要がある。

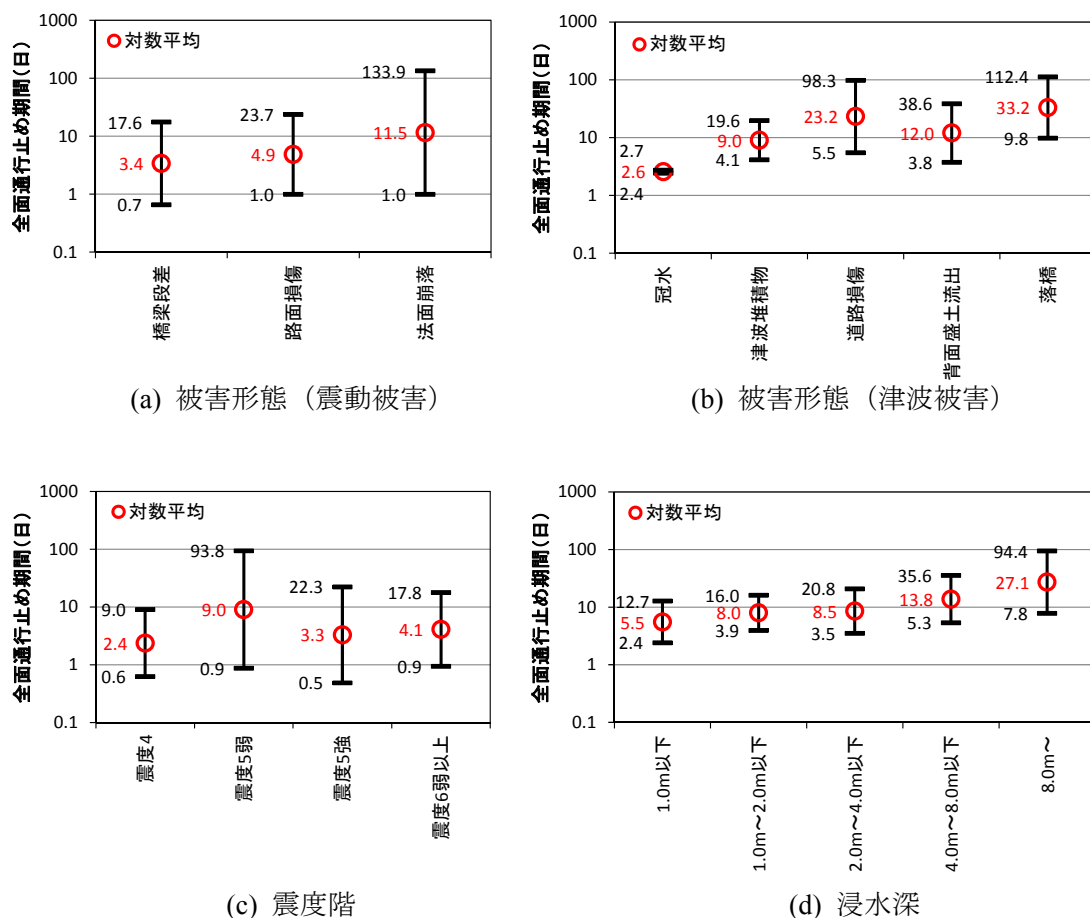


図 4-11 全面通行止め期間の対数平均および対数平均±対数標準偏差

そこで、数量化 I 類を用いて、各区分が全面通行止め期間の長さに与えた影響度合いを定量化する。数量化 I 類¹⁰⁾とは質的な説明変数で目的変数の数量を予測する手法で、説明変数がダミー変数の重回帰分析と考えればよい。説明変数として考慮する項目（アイテム）や項目中の分類区分（カテゴリー）が目的変数に及ぼす影響度合いを算出することができる。

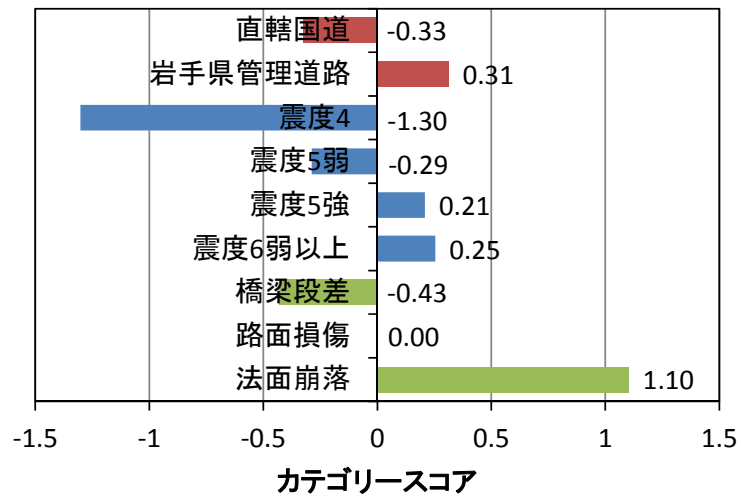
まず、カテゴリーごとの影響度合いを示すカテゴリースコアを検討する。アイテム l のカテゴリー m のカテゴリースコア a_{lm} は(4-9)式に示すものである。

$$z = \sum_m \sum_l a_{lm} \delta_{lm} + \bar{Z} \quad (4-9)$$

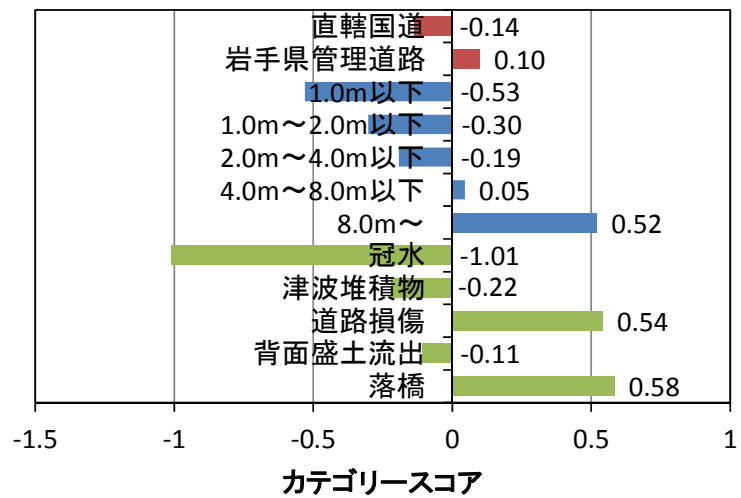
ここで、 δ_{lm} はアイテム l のカテゴリー m に該当する場合 1、該当しない場合 0、と定義したダミー変数、 \bar{Z} は全サンプルの平均である。

各カテゴリーのカテゴリースコアの算出結果を図 4-12 に示す。目的変数には全面通行止め期間の対数を用いたため、カテゴリースコア a_{lm} は全面通行止め期間の平均を $\exp[a_{lm}]$ 倍することを指す。これより、震度階および浸水深については増加するほどカテゴリースコアも大きくなり、前述した震度 5 弱の部分の不整合についても解消されている。震度階のカテゴリーについて詳しく見ると、震度 4、震度 5 弱、震度 5 強、震度 6 弱以上の場合、それぞれ平均の 0.3 倍、0.7 倍、1.2 倍、1.3 倍 ($\exp[-1.30]$ 、 $\exp[-0.29]$ 、 $\exp[0.21]$ 、 $\exp[0.25]$) となる。

次に、アイテムごとの影響度合いを示すレンジを検討する。レンジとはアイテムの感度を示すもので、アイテム内のカテゴリースコアの最大値と最小値の差である。各アイテムのレンジの算出結果を図 4-13 に示す。これより、道路管理者はレンジが小さく、震度階、浸水深、被害形態の方がレンジは大きい。



(a) 震動被害による全面通行止め



(b) 津波被害による全面通行止め

図 4-12 全面通行止め期間に対するカテゴリースコア（数量化Ⅰ類）
 [道路管理者、震度階・浸水深、被害形態によってグラフの色を変更]

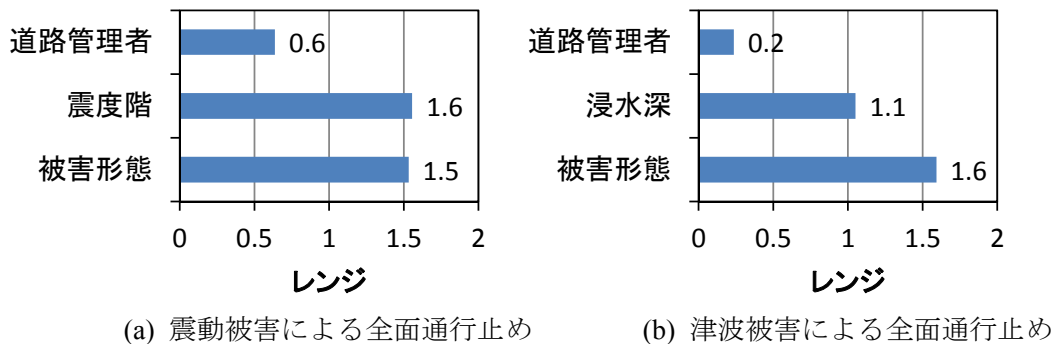


図 4-13 全面通行止め期間に対するレンジ (数量化 I 類)

限られたパラメータで全面通行止め期間をモデル化するには、できるだけ影響度合いが大きい項目を用いる方が望ましい。しかし、震度階・浸水深や被害形態の区分ではデータが細切れになってしまい、前述した道路管理者別の全面通行止め期間の確率分布 (図 4-9) と同様の方法ではモデルの信頼性が低くなる。そこで、全体の平均と各区分のカテゴリースコアを用いて区分ごとの平均的な全面通行止め期間を求め、それを確率分布の平均とみなしてモデル化することを考えた。

道路管理者と震度階・浸水深の区分ごとに求めた全面通行止め期間の確率分布を図 4-14 に示す。例えば、直轄国道・震度階のケースは、震動被害による全面通行止め期間の全サンプルの対数平均と直轄国道のカテゴリースコアの和に震度階の各区分のカテゴリースコアをそれぞれ加えたものを、直轄国道・震度階の各区分の対数平均 q としたものである。なお、対数標準偏差 b は図 4-9 に示した道路管理者別のモデルの値を用い、震度階・浸水深の区分によって変わらないと仮定した。各ケースのパラメータを表 4-3 に示す。

なお、図 4-13 に示したレンジの算出結果から、被害形態についてもモデル化で考慮すればさらに説明性の向上が望める可能性はあるが、それを用いた予測を行なうには被害形態の区分ごとの通行止め確率も必要となる。しかし、通行止め確率を求めるには、被害形態の区分ごとに通行止めに至らなかった箇所も含めて網羅的にデータを構築しなければならず、公表される道路被害情報のみでは困難と思われる。

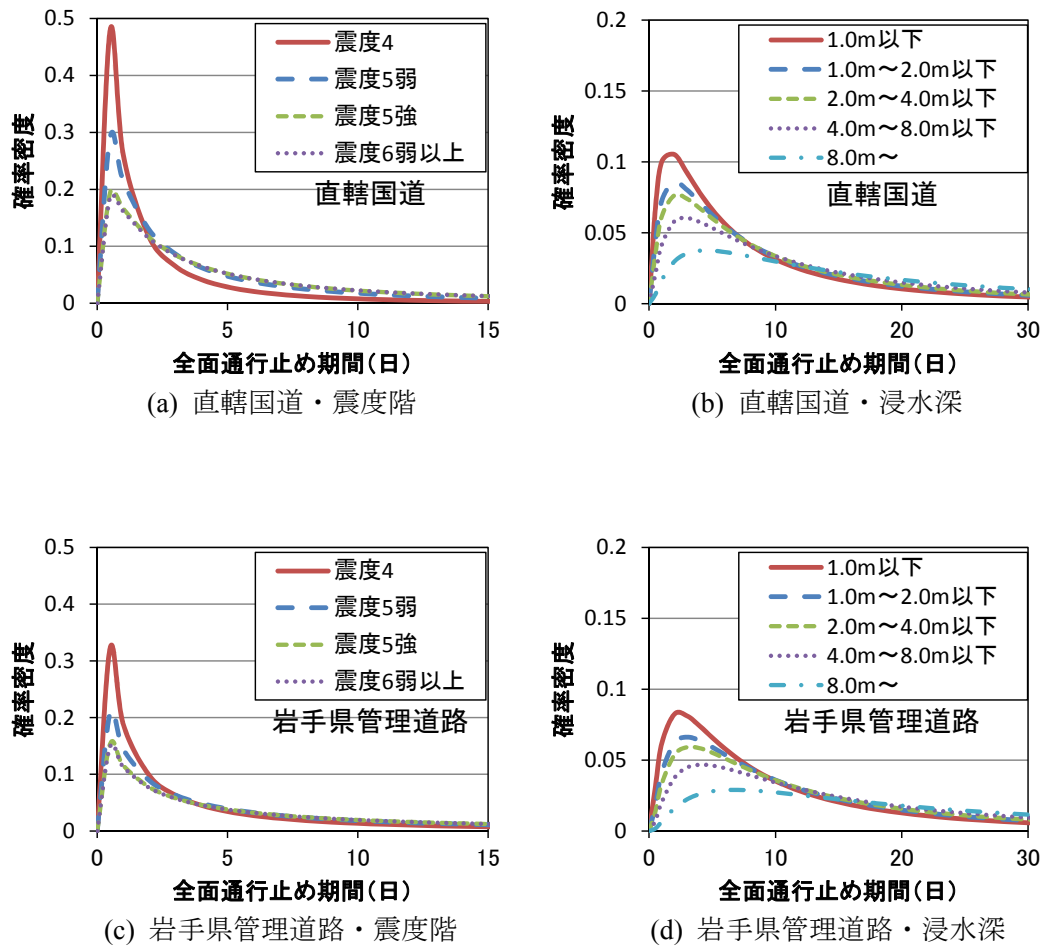


図 4-14 震度階・浸水深を考慮した全面通行止め期間の確率密度関数

表 4-3 震度階・浸水深を考慮した全面通行止め期間の確率分布のパラメータ ((4-8)式)

(a) 直轄国道

	q	b	exp[q]
震度4	-0.06	1.53	0.9
震度5弱	0.95	1.53	2.6
震度5強	1.45	1.53	4.3
震度6弱以上	1.50	1.53	4.5
浸水深1.0m以下	1.84	1.18	6.3
浸水深1.0m～2.0m以下	2.07	1.18	7.9
浸水深2.0m～4.0m以下	2.18	1.18	8.9
浸水深4.0m～8.0m以下	2.42	1.18	11.2
浸水深8.0m～	2.89	1.18	18.1

(b) 岩手県管理道路

	q	b	exp[q]
震度4	0.58	2.03	1.8
震度5弱	1.59	2.03	4.9
震度5強	2.09	2.03	8.1
震度6弱以上	2.13	2.03	8.5
浸水深1.0m以下	2.08	1.11	8.0
浸水深1.0m～2.0m以下	2.31	1.11	10.0
浸水深2.0m～4.0m以下	2.42	1.11	11.2
浸水深4.0m～8.0m以下	2.65	1.11	14.2
浸水深8.0m～	3.13	1.11	22.9

4.3.4 構築した予測モデルの適用範囲

今回構築した道路通行止め予測モデルの適用性について考える。

震動被害による通行止めに関しては、被災地が市街地か山間部かにより被害形態が異なることが指摘されている¹¹⁾。東日本大震災は被災地が広域であったため、今回使用したデータには市街地から山間部まで含まれるが、県管理道路は岩手県のみに限られるなどデータの偏りはある。また、市街地といっても地方都市であり、首都圏など大都市が被災した場合には被害形態は異なると思われる。地震タイプや震源深さによる地震動特性の違いが被害形態に影響を与えることも考えられる。以上より、被害予測における想定地震や対象地域によっては、今回構築したモデルの適用に別途検討を要すると考えられる。

津波被害による通行止めに関しては、沿岸部の地形の影響によって、同じ浸水深であっても通行止めの傾向は異なる可能性が考えられる。浸水深と建物被害率の関係についてはいくつか分析がされているが、国土交通省¹²⁾の調査ではリアス式海岸と平野部でその傾向に大きな違いは見られず、また、越村・郷右近¹³⁾の検討では地形条件に近い東松島市と石巻市で傾向が異なったことから地形以外の影響が指摘されている。沿岸部の地形の違いが道路通行止めには及ぼす影響は不明であるが、建物被害への影響からの類推では地形以外の条件を考慮することも重要と思われる。ただし、本研究の趣旨として、企業がBCP策定のために限られた情報から被害予測することを考えれば、沿岸部の地形が異なる地域へも今回構築したモデルを適用することは可能と考えられる。

4.4 まとめ

本章では、東日本大震災における道路通行規制情報を収集して GIS データ化し、東日本大震災の推定震度分布と浸水深分布のメッシュデータに結合させて、独自に道路通行止めデータを作成した。さらに、それに基づき、地震動や津波による通行止め個所と通行止め期間を確率論的に評価するモデルを構築した。

本予測モデルによる道路リンクごとの通行止め予測に踏まえた道路網の機能支障評価と、それがサプライチェーンに及ぼす影響の定量化については第 5 章で述べる。

第4章の参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道・防災課道路防災対策室：東日本大震災の道路の被災状況と復旧への対応、高速道路と自動車、第54巻、第9号、pp.32-35、2011.
- 2) 永田茂：東日本大震災における企業公開情報を用いた施設被害及び事業影響に関する分析、土木学会第4回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集、pp.21-29、2012.
- 3) 国土交通省都市局：復興支援調査アーカイブ、復興調査事業データ、<http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>
- 4) 庄司学、高橋和慎、中村友治、櫻井俊彰：2011年東北地方太平洋沖地震において地震動が主要因と考えられる道路構造物の被害、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.68、No.4 (地震工学論文集第31-b巻)、pp.I_1186-I_1193、2012.
- 5) 庄司学、中村友治、高橋和慎、櫻井俊彰：2011年東北地方太平洋沖地震において津波作用を受けた道路構造物の被害、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.68、No.4 (地震工学論文集第31-b巻)、pp.I_1300-I_1306、2012.
- 6) 丸山喜久、山崎文雄、用害比呂之、土屋良之：新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係、土木学会論文集 A、Vol.64、No.2、pp.208-216、2008.
- 7) 中村友治、庄司学、高橋和慎：津波被害想定に活用するための津波作用に関する橋梁の被害率曲線の構築とその利活用、地域安全学会東日本大震災特別論文集、No.1、pp.59-62、2012.
- 8) 国土交通省 河川事業の評価手法に関する研究会：第5回研究会配布資料、水害の被害指標分析の手引き(案)(H25.3月時点版)、2013年3月18日
- 9) 山田善一、野田茂、五十嵐晃：震後の道路交通機能の実用的な復旧予測シミュレーション、土木学会論文集、第392号、I-9、pp.385-394、1988.
- 10) 小林龍一：数量化理論入門、1981.
- 11) 大谷康史、杉田秀樹：幹線系道路の地震時交通状況に関する検討、土木計画学研究・講演集、No.23(2)、pp.545-548、2000.
- 12) 国土交通省都市局：東日本大震災による被災現況調査結果について(第1次報告)、2011年8月4日
- 13) 越村俊一、郷右近英臣：2011年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.68、No.2、pp.I_336-I_340、2012.

第5章

震災時の道路網機能支障による 工場の操業停止リスク解析

第5章 震災時の道路網機能支障による工場の操業停止リスク解析

5.1 はじめに

サプライチェーンの震災時の事業継続対策としては、例えば、生産拠点の分散化、資材調達の複線化、調達不足に備えた在庫確保等が挙げられるが、それらを実効性の高いものとするには、拠点の配置、輸送ルートを選択、資材の在庫量設定等について実状に即した被害予測も踏まえて検討することが望ましい。

本章では、第4章で構築した道路通行止め予測モデルに基づき道路網の機能支障を評価するとともに、それがサプライチェーンに及ぼす影響として、物流停滞による工場の操業停止リスクを評価する手法について検討する。

前述の道路通行止め予測モデルでは通行止め箇所と通行止め期間をペアで評価するため、地震後の時間経過に伴う道路網の復旧過程を定量化でき、工場の事業中断への影響を時系列で評価が可能となる。BCPの検討では事業中断期間を適切に推定することが重要であるため、本手法により道路網の機能支障を考慮して工場の事業中断期間を定量的に評価することは、サプライチェーンでのBCP策定に有効な情報提供になると思われる。

5.2 震災時の道路網の機能支障評価手法

本研究では、震災時の道路網の機能支障を最大フローの低下率（平常時に対する震災時の低下率）で表わし、それに基づきサプライチェーンを構成する施設間の輸送量への影響を評価する。

道路網における最大フローは、起点と終点の2地点間で処理可能な最大の交通量であり、各道路リンクの交通容量に基づき求められる。ここでは、代表的な解法である Goldberg and Tarjan¹⁾の方法を用いる。最大フロー低下率は、次式に示すように、震災時の最大フローがゼロのとき1となり、平常時の最大フローと同じとき0となるように定義した。

$$R(t) = (F_0 - F(t)) / F_0 \quad (5-1)$$

ここで、 $R(t)$ は地震後 t 日目の最大フロー低下率、 F_0 および $F(t)$ はそれぞれ平常時および地震後 t 日目の最大フローである。

震災時の最大フローは、第4章で構築した予測モデルを用いて、以下の手順により道路リンクの通行止めを二段階で確率論的に評価し、地震後 t 日目の最大フローの確率分布として算出する（図5-1）。

- ① まず、各道路リンクで通行止めが発生するか否かを判定する。道路リンク k の全面通行止め確率 P_k （浸水域外の道路は震動被害に関する(4-4)式、浸水域内の道路は津波被害に関する(4-6)式）を算出し、それと $0 \sim 1$ の範囲で発生させた一様乱数 u_k を比較して、 $P_k \geq u_k$ のとき、道路リンク k で通行止めが発生する、と判定する。
- ② 次に、各道路リンクで通行止めが発生した場合の通行止め期間を算出して、地震後 t 日目に通行止めの状態にあるか否かを判定する。道路リンク k の全面通行止め期間 T_k を全面通行止め期間の確率分布（(4-8)式）と $0 \sim 1$ の範囲で発生させた一様乱数 v_k から(5-2)式により算出し、 $T_k \geq t$ のとき、道路リンク k は地震後 t 日目に通行止めの状態にある、と判定する。

$$T_k = m \cdot \exp[b \cdot \Phi^{-1}(v_k)] \quad (5-2)$$

ここで、 Φ は標準正規分布の累積分布関数、 m および b はそれぞれ全面通行止め期間の確率分布における中央値（ $m = \exp[q]$ ）および対数標準偏差である（表4-3）。

- ③ 以上の二段階の判定をすべての道路リンクで実施すると、地震後 t 日目の全道路リンクにおける通行可否が設定される。これに基づき、起点と終点の間の最大フロー解析を行なって、地震後 t 日目の最大フローの1サンプルを得る。

④ 以上の処理を一定回数繰り返し試し、地震後 t 日目の最大フローの確率分布を得る。

繰り返し計算で得られる最大フローの各サンプルを用いて、最大フロー低下率を求めることにより、地震後 t 日目の最大フロー低下率の確率分布が得られる。

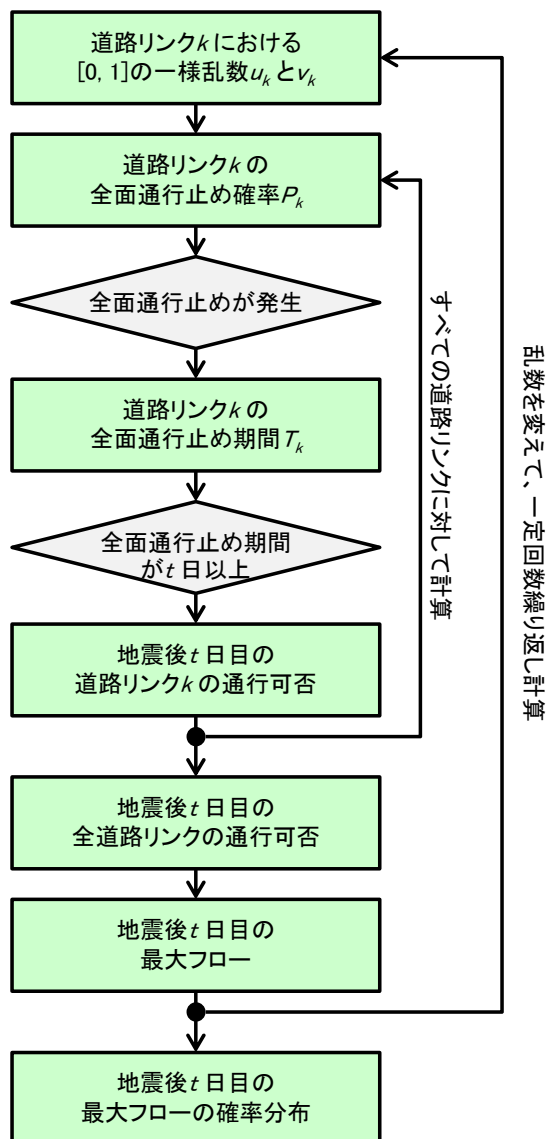


図 5-1 震災時の最大フローの確率論的評価の流れ

5.3 道路網の機能支障による工場の操業停止リスク評価手法

本研究では、最大フローを最大輸送可能量とみなして、最大フロー低下率により任意の2地点間の震災時の輸送量低下を評価するとともに、資材調達不足により工場が操業停止に陥るリスクを評価する。

まず、工場での資材投入量とそれに伴う製品生産量の関係は、非常に単純に考えれば、図5-2の左図のように原点を通る比例関係で表せる。また、製品生産量とそれに伴う製品利益の関係については、製品の種類や製法にも依ると思われるが、一定以上の効率で生産しなければ利益は得られないと考えられ、同図の中央のように製品生産量が一定量以上になれば製品利益が正となるような関係と思われる。そこで、それらの関係を踏まえると、資材投入量と製品利益の関係は同図の右図のように書くことができ、一定量以上の資材を投入しなければ製品利益は得られないと考えられる。平常時には、ある水準の利益（図中の目標利益）を確保するために必要な資材投入量（図中の目標投入量）があり、何らかの原因でそれを満たす量の資材が調達できない場合には、一定の利益が確保できない状態で操業は継続せずに、やむなく生産停止するという判断を下すことがあると思われる。震災時には、顧客への供給責任というCSRの観点から通常より利益の水準を落として対応することもありうるが、それでも利益がゼロとなるようなレベルで操業を継続することは企業として困難である。

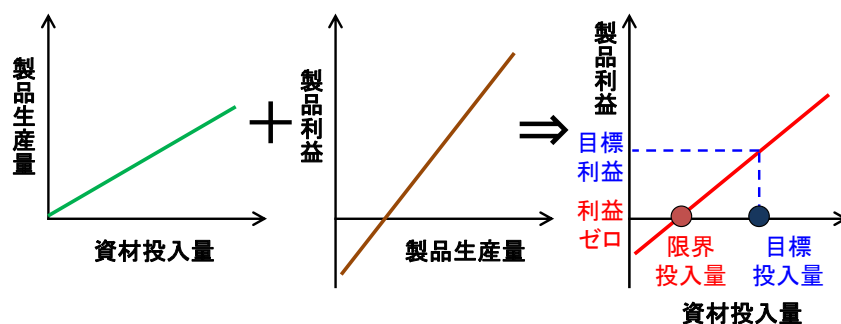


図5-2 本研究における資材投入量と製品生産量、製品利益との関係の考え方

本研究では最大フロー低下率が一定水準より大きくなると資材調達に支障が生じると仮定し、図5-2のような考え方で、工場は資材調達不足により生産停止（事業中断）に陥ると評価することにした。具体的には、事業中断に陥る最大フロー低下率の限界値を設定し、地震後 t 日目の最大フロー低下率がそれを超過する確率を、資材調達不足に起因する工場の事業中断確率と定義した。

評価に当たっては、地震後の時間経過に伴う最大フローの回復に基づき、事業が再開・継続する確率を評価することにし、(5-3)式のように1から事業中断確率を引いた事業継続

確率として算出する。

$$P_{BC}(t|R_0 = r) = 1 - p(r|t) \quad (5-3)$$

ここで、 R_0 は最大フロー低下率の限界値、 $P_{BC}(t|R_0 = r)$ は限界値が r のときの地震後 t 日目の事業継続確率、 $p(r|t)$ は地震後 t 日目の最大フロー低下率が r を超過する確率（事業中断確率）である。

なお、事業中断に陥る最大フロー低下率の限界値は、工場や製品などによって異なるものと考えられ、BCP策定における対象施設の特性が反映される部分である。

5.4 適用計算

5.4.1 適用対象と計算ケース

震災時の道路網の機能支障がサプライチェーンに及ぼす影響について、具体的な条件設定の下で事例解析を行ない、本研究で構築した手法の有効性を検討する。なお、本検討では道路網の機能支障による影響のみを対象とし、サプライチェーンを構成する個別施設やライフラインの被害による影響については対象外とした。これは考慮する要素を手法に係るものに絞った方が手法の有効性検討には明快な結果が得られると考えたためであり、実際の問題に適用する際にはそれらも対象に含める必要がある。

仮想の物流センターから工場への資材輸送を対象にして、震災時の最大フロー低下率を算出し、工場の事業継続への影響を評価するという例題を設定した。対象地域は岩手県とし、東日本大震災と同程度の震災が発生した場合を考えることにした。また、輸送の起点（物流センター）は共通で、終点（工場）の立地が異なる以下の2ケースを設定して、結果の比較を行なうことにした。

ケース1： 内陸部の花巻から沿岸部の宮古への最大フロー

ケース2： 内陸部の花巻から内陸部の一関への最大フロー

震災時の最大フローは地震後の任意の時点で評価可能であるが、本検討では地震当日、1日後、3日後、1週間後、2週間後、1ヶ月後の6時点で算出することにした。また、繰り返し計算の回数については、10回、20回、50回、100回、200回、500回、1000回で予備解析を行ない、解析結果の収束状況を考慮して、本検討では100回とした。

道路通行止め予測に用いる計測震度および浸水深には、前述の図4-2に示した東日本大震災における推定計測震度²⁾と浸水深³⁾のメッシュデータを使用した。また、道路データには、同図に示したDRM準拠の市販の道路データを使用し、直轄国道および県管理道路（県管理国道、主要地方道、一般県道）を対象とした。図4-2より、岩手県内の道路網の特徴は、直轄国道が内陸部（国道4号）と沿岸部（国道45号）を南北に通じ、その間を東西につなぐような形で県管理国道や主要地方道が通っている。

最大フローの解析には道路リンクの交通容量が必要となるが、市販の道路データにはその属性情報が含まれていない。そこで、本検討では、道路リンクのパラメータの簡易設定法⁴⁾を参考に、交通容量を車線数と単車線交通容量の積で求めることにした。車線数は道路データの属性情報にある道路幅員区分に基づき設定した（幅員13.0m以上は4車線、幅員5.5m以上13.0m未満は3車線、幅員3.0m以上5.5m未満は2車線、幅員3.0m未満は1車線）。また、単車線交通容量は道路構造令に従って道路種別ごとに設定した（直轄国道・県管理国道は18,000台/日、主要地方道は12,000台/日、一般県道は10,000台/日）。

5.4.2 計算結果

(1) ケース 1（内陸部→沿岸部）の計算結果

まず、ケース 1 として、内陸部の花巻から沿岸部の宮古への最大フローに基づく評価を行なった。

震災時のシミュレーション結果の一例（100 回の計算のうちの 1 サンプル）として「地震当日」の推定通行止め箇所（赤が震動被害、青が津波被害）とそれに基づく各道路リンクへのフロー配分結果を図 5-3 に示す（背景のコンターは推定計測震度で図 4-2 に示したものと同一）。これより、地震当日は多数の通行止めの影響により、大半の道路リンクはフローなしか、10,000 台/日を下回り、花巻から宮古への交通には著しい支障が生じていたと推定される。

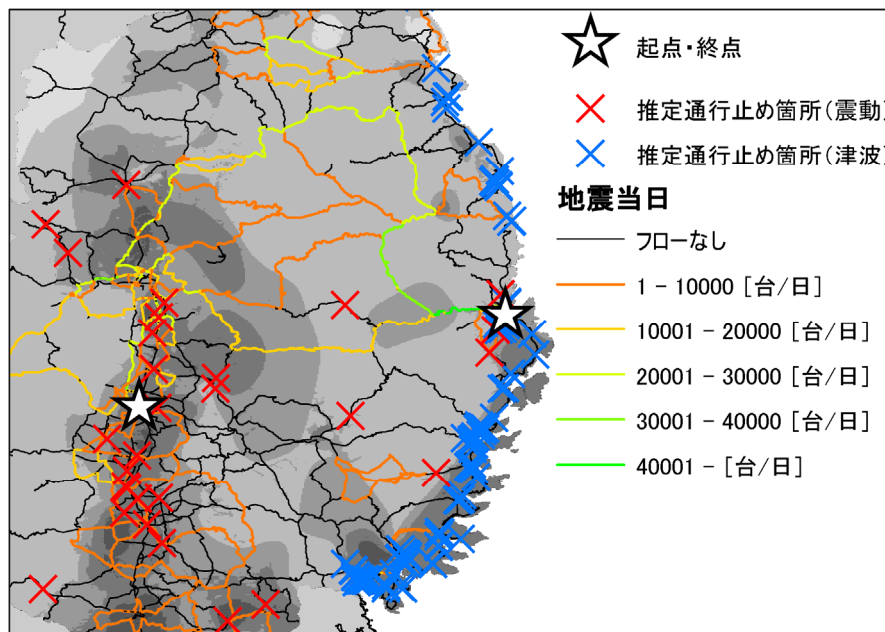


図 5-3 ケース 1（花巻→宮古）の各道路リンクへのフロー配分結果
[地震当日の推定通行止め箇所]
(背景は図 4-2 の推定計測震度と同じ)

地震後の各時点（地震当日、1 日後、3 日後、1 週間後、2 週間後、1 ヶ月後）での最大フローの発生比率（100 回に対する各最大フローの発生回数の比）を図 5-4 に示す。図から分かるように、最大フローの値は離散的に算出される。これは起点から終点へ到達するのに通行可能な道路リンクの交通容量の組合せによって、最大フローが求まるためである。図

より、地震後の時間経過に伴う最大フローの回復が分かる。地震当日から 3 日後までは 54,000 台/日と 74,000 台/日にピークがあるが、それ以後は徐々に 54,000 台/日の比率が減る一方で 102,000 台/日の比率が増えていき、1 ヶ月後には 74,000 台/日と 102,000 台/日にピークがある。なお、最大フローの上限値の 156,000 台/日は、花巻から宮古への平常時の最大フローである。

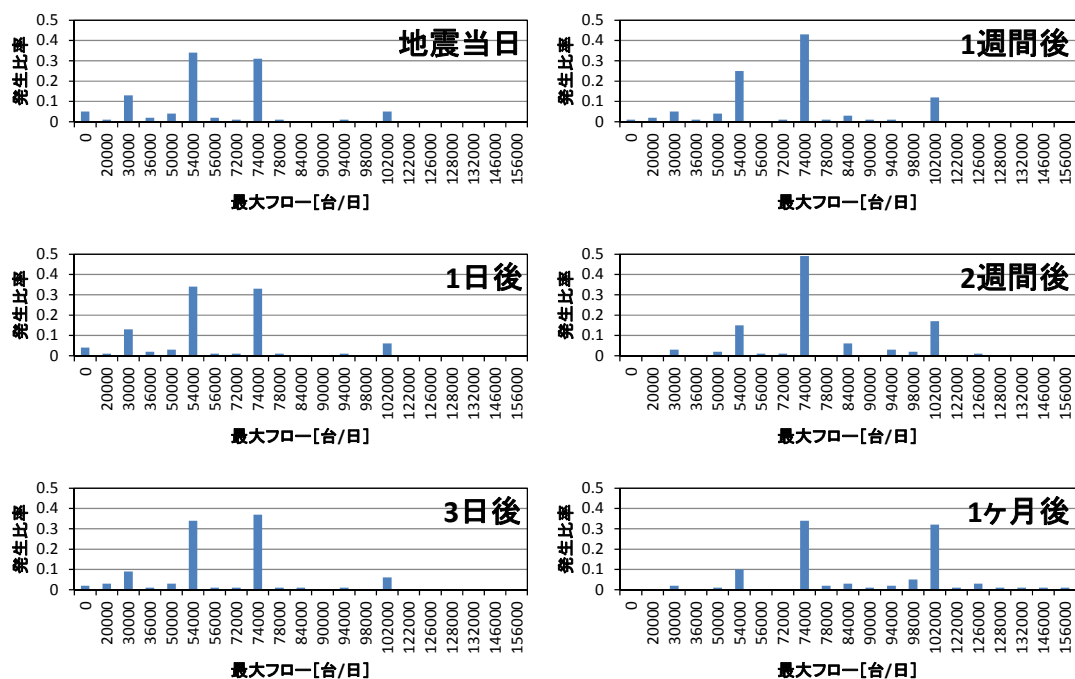


図 5-4 ケース 1（花巻→宮古）の地震後の各時点での最大フロー発生比率

地震後の各時点での最大フロー低下率の条件付き超過確率を図 5-5 に示す。この超過確率は前述の(5-1)式で求めた最大フロー低下率のサンプル 100 個を大きい順に並べて、各サンプルの発生確率 0.01 (=1/100) を累積したものである。すなわち、(5-3)式右辺の $p(r|t)$ であり、最大フロー低下率の限界値が r のときの地震後 t 日目の事業中断確率である。地震後の時間経過に伴い最大フローが回復するため、最大フロー低下率の超過確率は経過日数が長いほど小さくなる。図より、地震当日から 3 日後まではそれぞれの超過確率にほとんど差がないが、1 ヶ月後は大幅に超過確率が減少している。これはケース 1 では終点（宮古）が沿岸部のため津波被害の影響が大きく、通行止め解除に時間を要するためである。また、超過確率が急に大きく減少するところがあるが、それらは図 5-4 でピークが見られた最大フローに対応する部分である。

最大フロー低下率に基づく事業継続確率の時間的変化を図 5-6 に示す。これは(5-3)式で求めた地震後の各時点での事業継続確率を直線で結んだものである。事業中断に陥る最大フ

ロー低下率の限界値を 0.4、0.6、0.8 の 3 ケース設定して、結果を比較した。ここで、例えば、最大フロー低下率の限界値が 0.8 とは、資材調達量が平常時に比べて 8 割減になると事業中断に陥ることを指し、言い換えると資材調達量が平常時の 2 割あれば事業継続できることを意味する。すなわち、限界値が大きいほど、外部からの資材調達量の変化による影響を受けにくいことを表わす。図より、限界値によって地震直後の事業継続確率やその時間的变化は大きく異なる。これを用いれば、BCP の目標復旧時間における事業継続確率を評価できるとともに、資材の在庫量を増やすなどの限界値を大きくする対策の効果を定量化することができる。

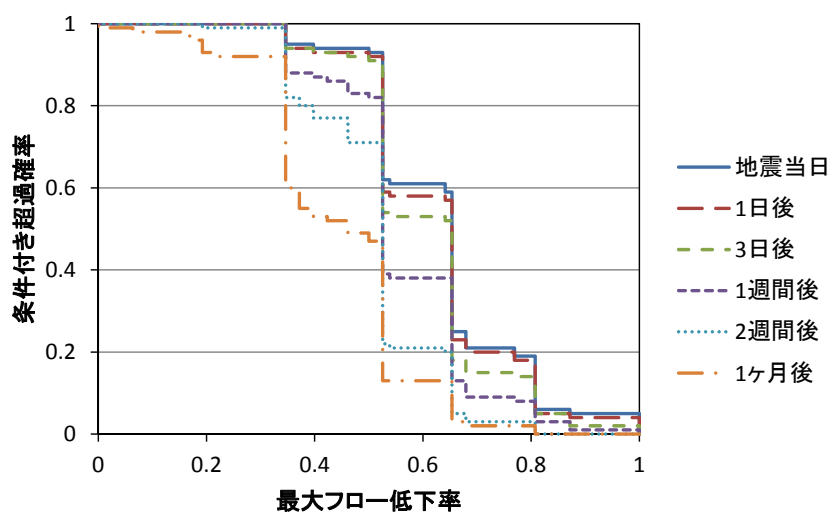


図 5-5 ケース 1（花巻→宮古）における最大フロー低下率の超過確率

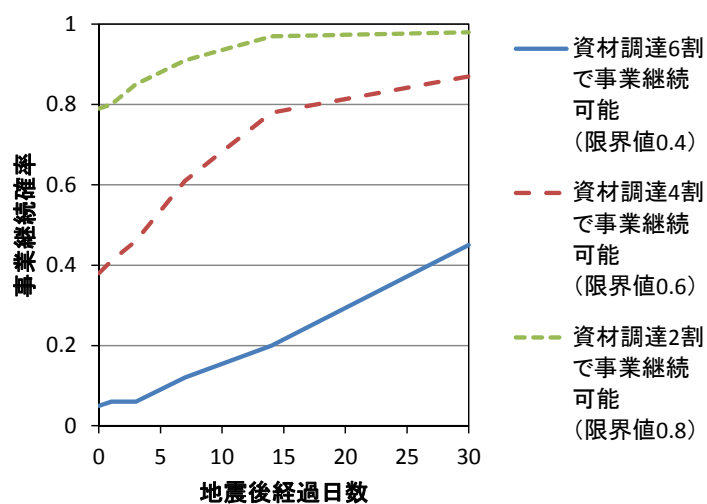


図 5-6 ケース 1（花巻→宮古）における事業継続確率の時間的变化

(2) ケース 2（内陸部→内陸部）の計算結果

次に、ケース 2 として、内陸部の花巻から内陸部の一関への最大フローに基づく評価を行ない、ケース 1 との違いに着目して分析した。ケース 2 では終点が内陸部のため津波被害の影響は小さいが、一関へのルート周辺で震度が比較的大きいため相対的に震動被害の影響がやや大きい条件設定となっている。

震災時のシミュレーション結果の一例として、ケース 1 と同じ乱数シードを用いて、図 5-3 と同一条件のときに得られるサンプルを図 5-7 に示す（推定通行止め箇所的位置はケース 1 と同じ）。これより、ケース 2 では終点の立地がケース 1 とは異なるため、各道路リンクへのフロー配分結果も図 5-3 とは異なっている。地震当日でも、花巻と一関の間で発生した多数の通行止め箇所を迂回するように、複数の道路リンクにフローが配分されている点が特徴的である。

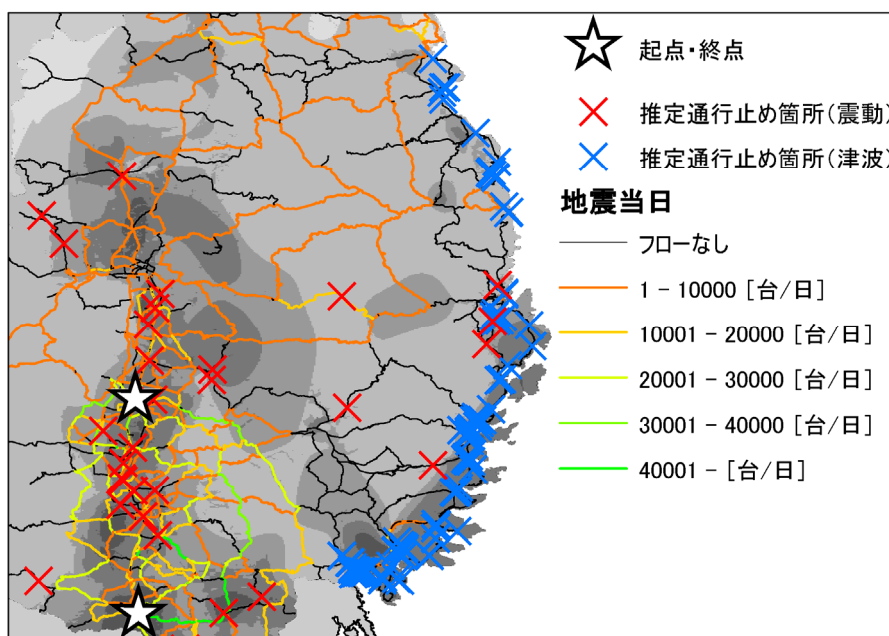


図 5-7 ケース 2（花巻→一関）の各道路リンクへのフロー配分結果
[地震当日の推定通行止め箇所]
(背景は図 4-2 の推定計測震度と同じ)

地震後の各時点での最大フローの発生比率を図 5-8 に示す。これより、ケース 2 ではすべての時点で最大フローの上限値の 156,000 台/日にピークがあり、時間経過に伴ってその比率が徐々に上がっている。156,000 台/日は花巻から一関への平常時の最大フローであるため、地震当日でも約 0.4 の確率で平常時と変わらない資材調達量を維持できると推定される。

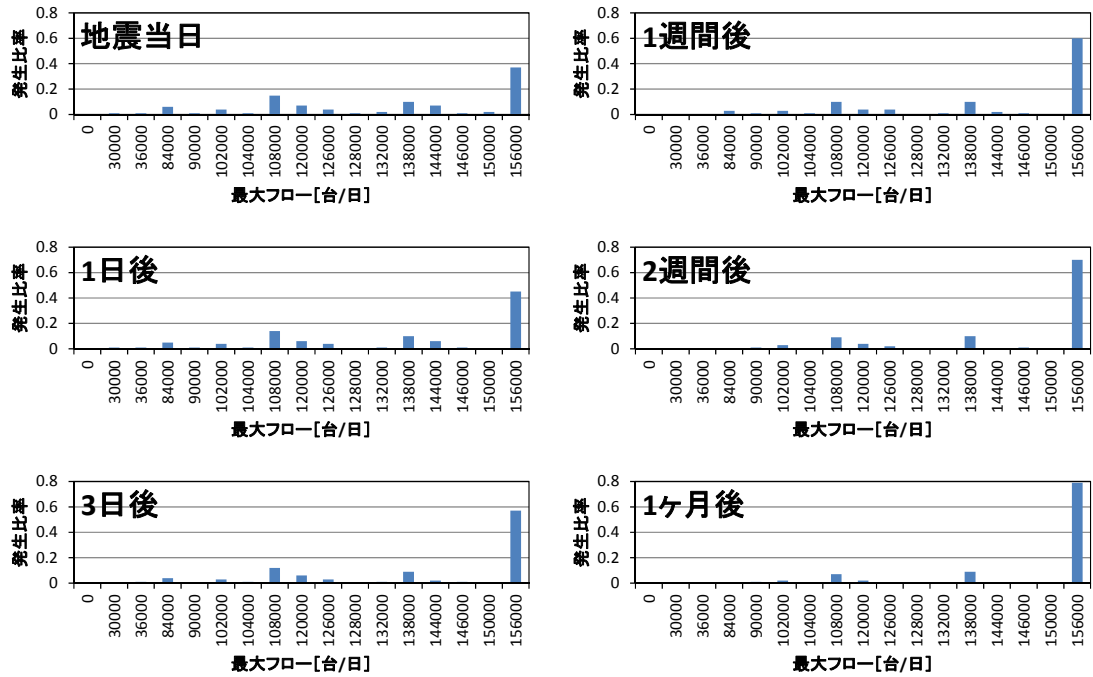


図 5-8 ケース 2（花巻→一関）の地震後の各時点での最大フロー発生比率

地震後の各時点での最大フロー低下率の条件付き超過確率を図 5-9 に示す。これより、ケース 2 では全体的にケース 1 に比べて超過確率が小さく、経過日数が長いほど超過確率が小さくなる傾向が明瞭である。

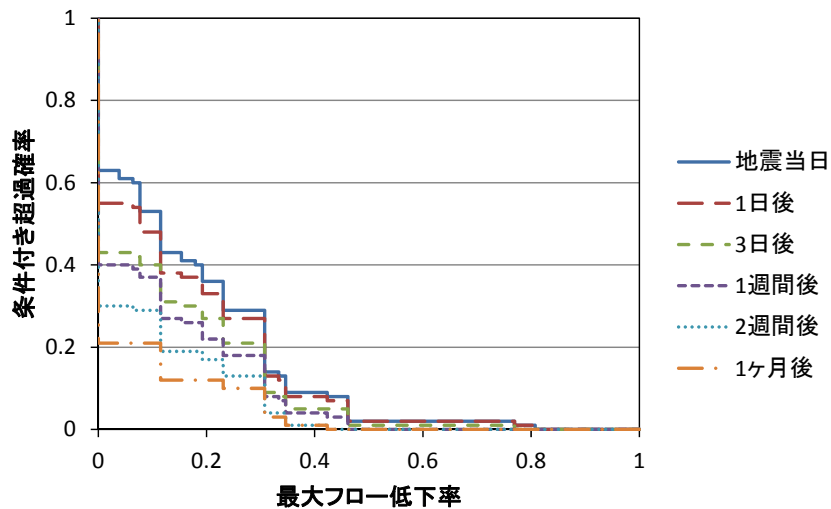


図 5-9 ケース 2（花巻→一関）における最大フロー低下率の超過確率

最大フロー低下率に基づく事業継続確率の時間的変化を図 5-10 に示す。これより、ケース 2 では全体的に事業継続確率が非常に高く、最大フロー低下率の限界値が 0.4 であっても地震当日から約 0.9 となっている。サプライチェーンでの BCP では工場の分散化も主要な対策の一つに挙げられるが、ケース 2 のように限界値が厳しいままでも工場の立地によっては高い事業継続確率を確保でき、本手法によって工場の分散化による効果も定量化できると言える。

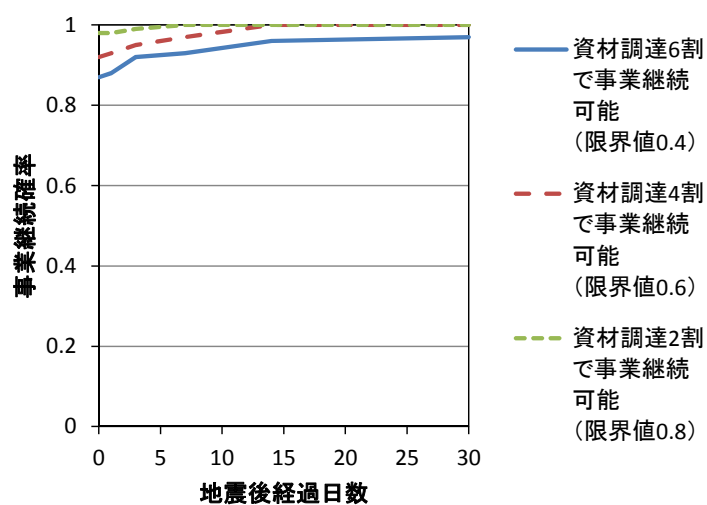


図 5-10 ケース 2 (花巻→一関) における事業継続確率の時間的変化

5.5 まとめ

本章では、震災時の道路網の機能支障によるサプライチェーンへの影響評価手法を構築した。

確率論的な通行止め予測を踏まえた道路ネットワーク解析に基づき、震災時の道路網の機能支障を最大フローの低下率の超過確率として求める手法を提案した。地震後の任意の時点に適用可能であり、連続した複数の時点で計算することにより、地震後の時間経過に伴う道路網の機能回復を確率論的に評価することができる。

また、最大フロー低下率の超過確率に基づき、震災時の資材調達不足により工場が事業中断に陥るリスクを評価する手法を提案した。提案手法の有効性を検討するため、実際の道路データを用いて物流センターから工場への資材輸送を想定した事例解析を行なった。工場の分散化や在庫量の増強といった事業継続対策の効果を定量化できることを示し、本手法がサプライチェーンでのBCP策定に有効な情報提供が可能であることを確認した。

なお、本手法に用いた最大フローは前述のように処理可能な最大交通量を表わすものであり、震災時の交通渋滞の影響は含まない。未解明な点が多い震災時の交通需要には言及せず、済む利点はあるが、首都圏など交通量の極めて多い大都市では震災時の深刻な道路交通麻痺が懸念されており、本手法を大都市に適用する場合には震災時の交通渋滞が物流に与える影響を検討することも必要と思われる。

第5章の参考文献

- 1) Goldberg, A. V. and Tarjan, R. E. : A New Approach to the Maximum-Flow Problem, Journal of the ACM, Vol.35, No.4, pp.921-940, 1988.
- 2) 永田茂：東日本大震災における企業公開情報を用いた施設被害及び事業影響に関する分析、土木学会第4回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム講演集、pp.21-29、2012.
- 3) 国土交通省都市局：復興支援調査アーカイブ、復興調査事業データ、
<http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>
- 4) 島川陽一、鹿島茂：交通量配分のための入力データの作成法、GIS—理論と応用、Vol.17、No.2、pp.69-75、2009.

(空白)

第6章

サプライチェーンの 事業中断リスクマネジメント解析

第6章 サプライチェーンの事業中断リスクマネジメント解析

6.1 はじめに

震災時のサプライチェーンの事業継続能力向上のために、合理的なリスクマネジメントを行なうには、全体最適の視点でボトルネックとなる要素を特定し、優先的に対策を実施することが望ましい。

また、サプライチェーンの事業中断リスクを低減する対策には、拠点の耐震補強や分散配置、複数調達先の確保、在庫水準のかさ上げやライフラインのバックアップ保持などが挙げられるが、それぞれ性格が異なるために、従来は個別に評価されてきており、それらの中から合理的に対策を選定する方法について検討した例はあまりない。

本章では、第2章から第5章で構築したサプライチェーンの事業中断リスク評価手法とその要素技術を用いて、具体的なサプライチェーンを対象に事業中断リスクマネジメントの事例解析を行なう。

6.2 本研究における事業中断リスクマネジメントの考え方

本研究では、サプライチェーンを構成する企業が、震災時の事業継続能力向上を目的に、事業中断リスクに基づきボトルネックとなる要素を特定するとともに、対策によるリスク低減効果に基づき対策を選定することを事業中断リスクマネジメントとした。

すなわち、BCPにおける目標復旧時間や目標復旧レベルの達成可否を、対策選定の判断基準とする、サプライチェーンの地震リスクマネジメントと考えることもできる。

また、目標復旧時間は事業中断期間の予測結果も考慮して設定するため、事業中断期間を確率論的に評価する場合、目標復旧時間についても確率値で表現することが考えられる。例えば、地震後30日以内に復旧する確率90%を目標復旧時間と設定した場合は、事業中断期間30日の累積確率が90%以上となる対策が目標を達成できる対策と判断される。

6.3 事業中断リスクに基づくボトルネック評価手法

BCP の策定プロセスにおける事業影響度分析 (BIA) では、事業継続に係るボトルネックをリスク評価に基づき把握することが求められている¹⁾。BCP におけるボトルネックとは、重要業務の早期復旧の阻害要因のうち主要なものを指す。したがって、事業中断リスクに基づき、ボトルネックとなる要素を定量的に特定する方法が必要である。

第 2 章では、サプライチェーンの事業中断期間を、その構成要素の停止確率と停止期間の確率分布を用いてフォールトツリーでモデル化し、確率論的に評価する方法を示した。フォールトツリー解析では、基本事象が頂上事象の発生にどの程度影響しているかを評価するのに確率重要度が用いられる²⁾。一般にそれは基本事象の停止確率を用いて評価されるが、本研究ではそれを拡張して、基本事象の停止期間の累積確率を用いて評価することを提案する。基本事象の停止期間の超過確率 (=1-累積確率) で考えれば、基本事象の停止確率は停止期間ゼロの超過確率と同義であるから、停止期間の超過確率を用いて確率重要度を求めることは通常定義の拡張である。

そこで、次式で評価される確率重要度 $I_{j,x}$ が最大のものをボトルネックと考える。

$$I_{j,x} = \frac{\partial p_x}{\partial q_{j,x}} \quad (6-1)$$

ここで、 p_x および $q_{j,x}$ はそれぞれ頂上事象および基本事象 j の停止期間 x の累積確率である。

6.4 事業中断リスク低減対策のフォールトツリーにおけるモデル化

サプライチェーンの事業中断リスク低減対策を本研究による事業中断リスク評価手法で考慮するため、それらのフォールトツリーにおけるモデル化について検討する。

事業中断リスク低減対策としては、「施設・設備等の耐震補強」、「調達先の複線化・分散化や代替拠点の確保」、「在庫の確保やライフラインのバックアップ」の3つを対象とすることにした。それらの対策はそれぞれ対象範囲や発現効果など性格が異なるものであるが、次に述べるようにフォールトツリーにおけるモデル化を行なうことで、対策後の事業中断リスク評価が可能となる。

6.4.1 施設・設備等の耐震補強

施設・設備等の耐震補強については、図 6-1 に示すように、例えば、フォールトツリーの工場の構造被害に関する評価で用いる被害率曲線を、耐震補強後の被害率曲線に変更することによって反映可能である。フォールトツリーの構造には特に変更は必要ない。

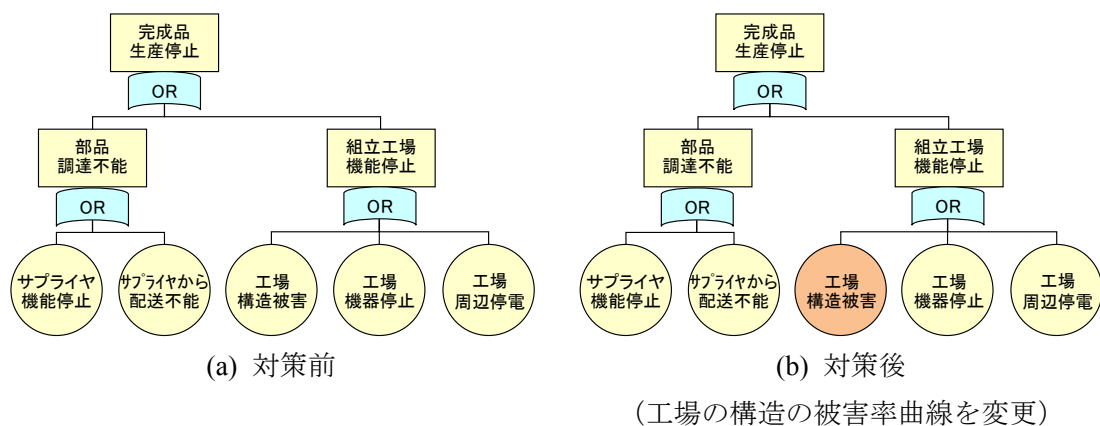


図 6-1 フォールトツリーにおける対策のモデル化（施設・設備等の耐震補強）

6.4.2 調達先の複線化・分散化や代替拠点の確保

調達先の複線化・分散化については、図 6-2 に示すように、フォールトツリーの素材調達に関する部分に、別のサプライヤからの素材調達に関する分岐を AND ゲートで新たに追加することによって反映可能である。また、代替拠点の確保についても同様に考えることができる。

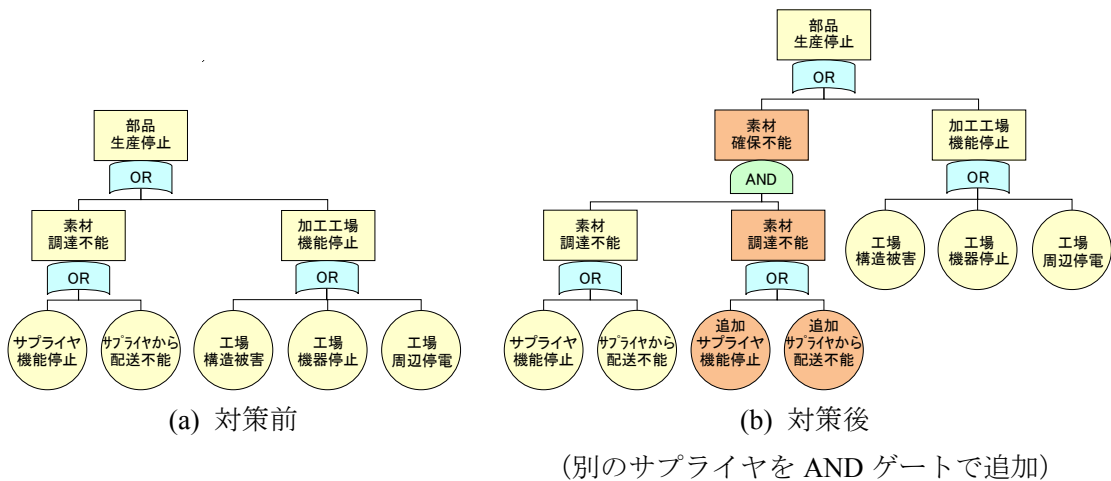


図 6-2 フォールトツリーにおける対策のモデル化（調達先の複線化・分散化）

6.4.3 在庫の確保やライフラインのバックアップ

在庫の確保については、図 6-3 に示すように、フォールトツリーの素材調達に関する部分に、在庫に関する分岐を AND ゲートで新たに追加することによって反映可能である。また、ライフラインのバックアップについても同様に考えることができる。

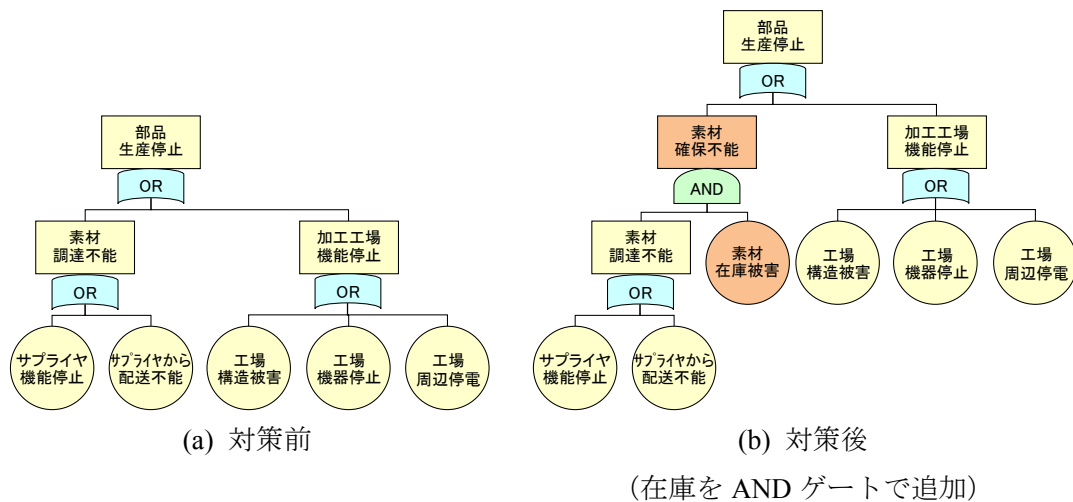


図 6-3 フォールトツリーにおける対策のモデル化（在庫の確保）

ただし、解析のためには、在庫の確保（またはライフラインのバックアップ）の効果を考慮した停止期間の確率分布を定義する必要がある。

震災時に確保される在庫の量は、地震後に使用可能な倉庫にその時点で保管されている

在庫の量である。また、在庫量を日数換算した在庫期間の分だけ、停止期間は縮減できる（つまり、（在庫ありの場合の停止期間）＝（在庫なしの場合の停止期間）－（在庫期間）となる）。ところで、倉庫に保管されている在庫量は需要に応じた発注量により決まるが、サプライチェーンの在庫問題に関する既往研究^{3), 4)}では、在庫量は需要の不確実性に伴って確率的に変動するものとして取り扱われている。

そこで、本研究では、在庫期間を確率変数とし、在庫により縮減される停止期間（在庫期間の負の値）の確率分布は、在庫期間の確率分布から対称原理⁵⁾により求めることを利用して、地震動強さ x が発生したときに倉庫 i の在庫により縮減される停止期間 t の確率分布を次式のようにモデル化することにした。

$$F_i(t|x) = (1 - K_i(t)) \cdot (1 - G_i(x)) \quad (6-2)$$

ここで、 $K_i(t)$ は倉庫 i の在庫期間が t 日以下である確率、 $G_i(x)$ は地震動強さが x のときに倉庫 i が使用不能となる確率である。

すなわち、倉庫が使用可能なときに在庫により縮減される停止期間が t 日を超える確率であり、図 6-4 に示すようになる。

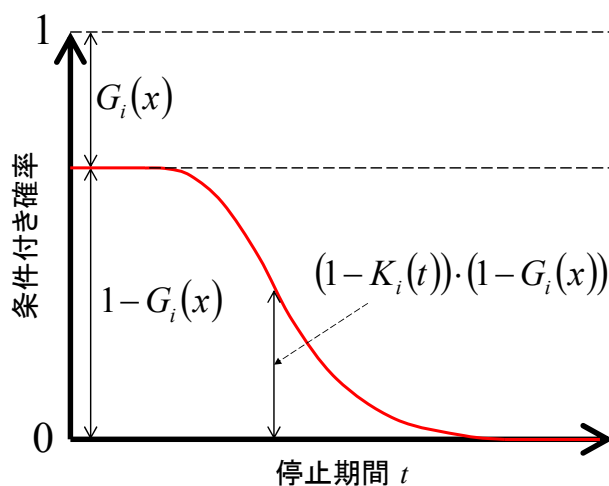


図 6-4 地震動強さ x が発生したときの倉庫 i の在庫により縮減される停止期間 t の確率分布関数

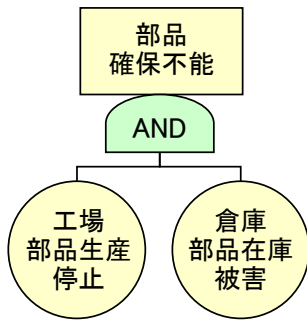
なお、ここでは、倉庫 i の在庫期間が t 日以下である確率 $K_i(t)$ は、在庫期間が対数正規分布に従うと仮定して次式のようにモデル化することにした。

$$K_i(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t/m_i)}{d_i}\right) \quad (6-3)$$

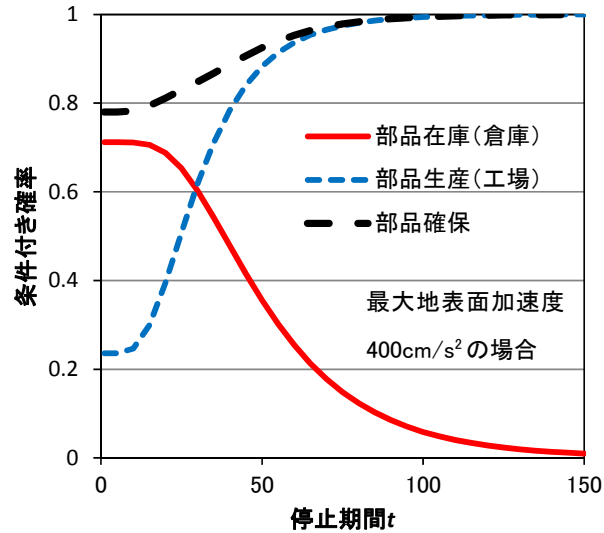
ここで、 m_i は倉庫 i の在庫期間の中央値、 d_i はその対数標準偏差である。

一方、地震動強さが x のときに倉庫 i が使用不能となる確率 $G_i(x)$ は、倉庫が使用不能となる被害程度に対応した被害率曲線を用いて評価することなどが考えられる。

簡単な適用例として、ある部品を生産する工場とその部品の在庫を保管する倉庫が同一敷地内にある場合を想定し、震災時の部品確保の停止期間に関する検討を行なった。例題として設定したフォールトツリーとそれに基づく停止期間の評価結果を図 6-5 に示す。なお、工場の停止期間の確率分布は、第 3 章に示した(3-1)~(3-3)式と同様の計算で求めた。



(a) 部品確保不能に関するフォールトツリー例



(b) 部品確保の停止期間の確率分布の評価例
(各施設の耐力、復旧期間、在庫期間は以下のように設定)

工場の耐力[cm/s^2]($\theta_1=300$ 、 $\beta_1=0.4$)、復旧期間[日]($q_1=30$ 、 $b_1=0.5$)

倉庫の耐力[cm/s^2]($\theta_2=500$ 、 $\beta_2=0.4$)、在庫期間[日]($m_2=50$ 、 $d_2=0.5$)

図 6-5 在庫による効果を考慮した部品確保の停止期間の確率分布の評価例

6.5 サプライチェーンの事業中断リスクマネジメントに関する事例解析

6.5.1 解析で対象とするサプライチェーン

東日本大震災以後、国による地震被害想定が相次いで見直されたため、企業の BCP 策定や再検討に関してもそれを踏まえて行なう必要性が生じている。

そこで、本検討では、中央防災会議による南海トラフの巨大地震の想定被災地域に仮想のサプライチェーンを設定して、事業中断リスクマネジメントに関するケーススタディを行なう。

対象とするサプライチェーンを図 6-6 に示す。素材 a および素材 b からそれぞれ部品 A および部品 B を加工し、それらを組み立てて完成品を生産するサプライチェーンである。ここで、素材 a は海外・国内から港湾を経て調達し、素材 b はサプライヤから調達するものとした。また、港湾から加工工場 A、サプライヤから加工工場 B、各加工工場から組立工場の各施設間の配送は道路輸送とした。海外・国内から港湾までの海上輸送については検討の対象外とした。

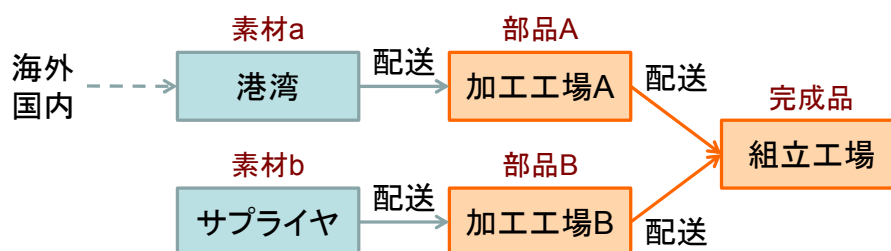


図 6-6 対象とするサプライチェーンの構成

対象とするサプライチェーンを構成する施設の配置を図 6-7 に示す。図には南海トラフの巨大地震⁶⁾での想定震度（陸側ケース）および津波浸水域（ケース①）の分布を重ねて示す。想定震度および津波浸水域はそれぞれ 250m メッシュおよび 10m メッシュのデータである。なお、想定震度および津波浸水域に使用したケースは、対象地域への影響の大きさを考慮して選定したものである。

各施設における条件設定の概要を表 6-1 に示す。部品 A・B の各加工工場および完成品の組立工場は自社施設とし、そのうち組立工場のみ耐震補強済みという設定とした。また、前述した南海トラフの巨大地震での想定震度および津波浸水域に係るメッシュデータから値を読み取ると、すべての施設が震度 6 弱以上の高震度域に立地し、港湾では津波高 5m であった。なお、図 6-7 および表 6-1 の「追加サプライヤ」は事業中断リスク低減対策に係る施設であり、これについては後述する。

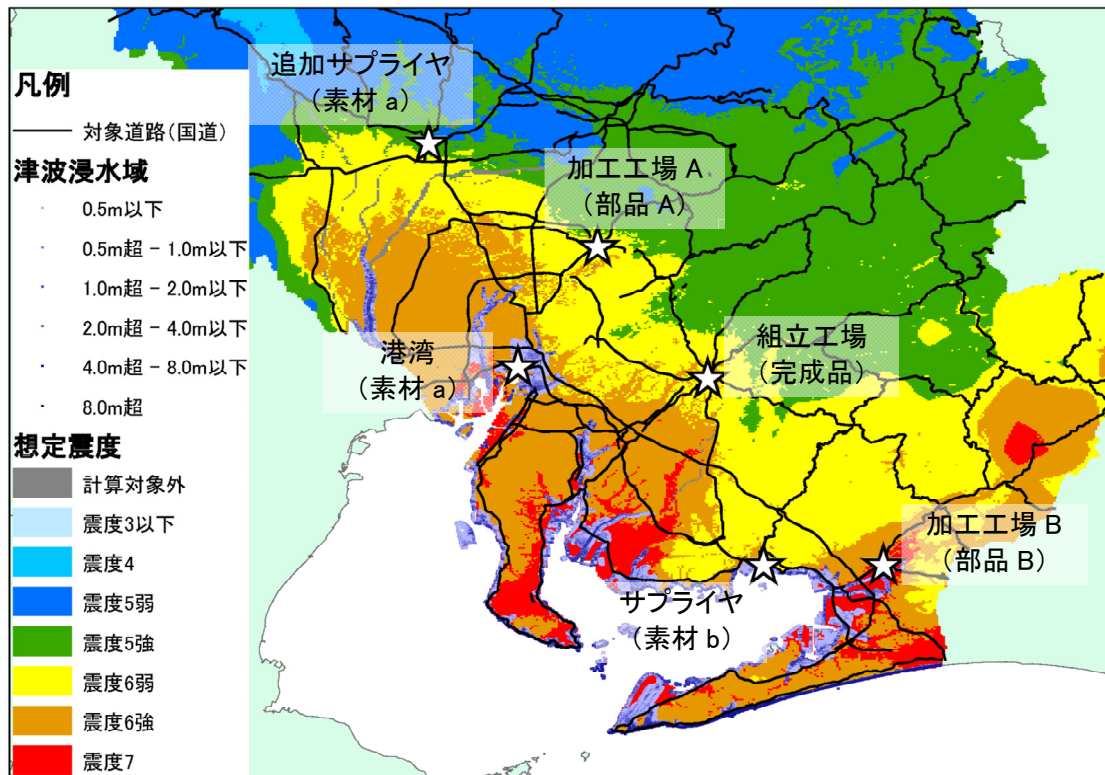


図 6-7 対象とするサプライチェーンの施設配置と南海トラフの巨大地震⁶⁾での想定震度および津波浸水域の分布

表 6-1 対象とするサプライチェーンの構成施設における条件設定

施設区分	サプライチェーン					素材 a 分散 調達で追加
	自社施設			公共施設	他社施設	他社施設
施設名	組立工場	加工工場 A	加工工場 B	港湾	サプライヤ	追加 サプライヤ
取扱内容	完成品	部品 A	部品 B	素材 a	素材 b	素材 a
耐震補強	補強済み	未補強	未補強	—	—	—
震度	震度 6 強 (6.0)	震度 6 弱 (5.6)	震度 7 (6.7)	震度 6 強 (6.2)	震度 6 強 (6.1)	震度 5 強 (5.1)
津波影響	影響なし	影響なし	影響なし	津波高 5m	影響なし	影響なし

※震度および津波影響は、各施設の配置地点で南海トラフの巨大地震⁶⁾での想定震度および津波浸水域に係るメッシュデータから読み取った値に基づくもの。

6.5.2 サプライチェーンのフォールトツリーの構築

本検討では、対象とするサプライチェーンの事業中断に関するフォールトツリーを図 6-8 のように設定した。フォールトツリーの頂上事象は完成品生産停止であり、前述した図 6-6 に従って、素材の調達、部品の生産、部品の調達、完成品の生産という階層構造となっている。また、サプライチェーンにおける各施設の関係は直列であるため、すべて OR ゲートで接続している。

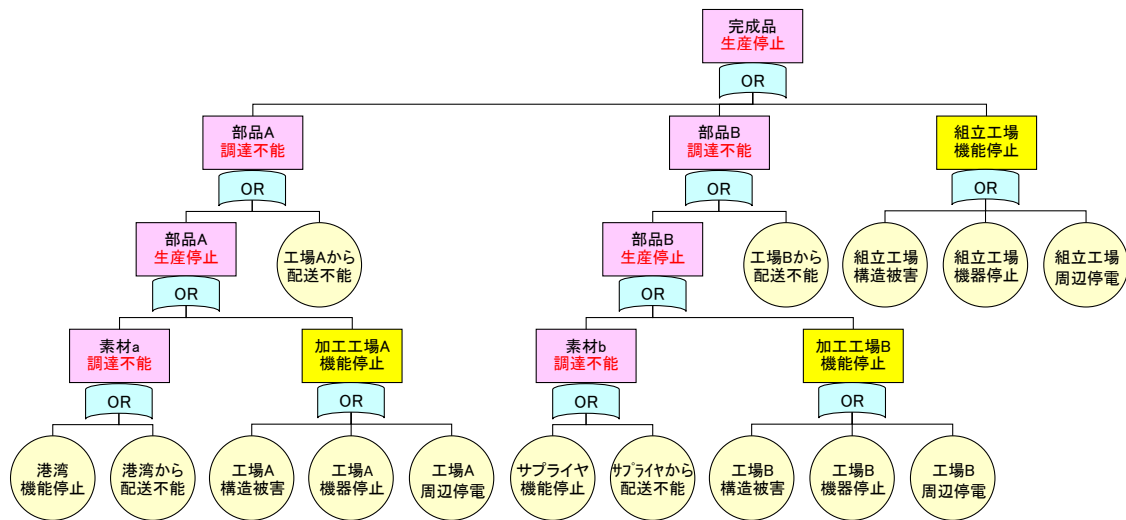


図 6-8 対象とするサプライチェーンの事業中断に関するフォールトツリー

サプライチェーンの地震被害予測では、構成要素ごとに得られる情報量が異なるため、それに応じたモデル化が必要である。

まず、自社施設である組立工場と加工工場では、ある程度詳細な情報が得られるとして、工場の構造被害、機器停止、周辺停電の 3 事象を対象とした。構造被害に係る耐力の設定については、工場等の骨組モデルの応答解析に基づき機能停止期間を検討した例⁷⁾を参考とし、組立工場は耐震補強後を想定したモデル、各加工工場は未補強状態を想定したモデルをそれぞれ用いた。機器停止および周辺停電についても同検討例⁷⁾を参考に設定した。また、それらの復旧期間についても同検討例⁷⁾を参考に設定した。なお、現実の工場における生産ラインは、複数の機器から構成されるシステムとして機能しているため、第 3 章で記した手法により設備システムの機能停止として評価すべきであるが、本検討では全体バランスを勘案して単純化して取り扱うことにした。また、周辺のライフラインに関しても、電力の他にガス、上水道、下水道などの機能支障が工場の機能停止に影響する可能性があるが、本検討では特に重要な電力を対象を絞って評価することにした。各工場の構造被害、機器停止、周辺停電に関して設定した、耐力および復旧期間の確率分布のパラメータを表 6-2 に

示す。

一方、自社施設ではないサプライヤと港湾については、限られた情報しか得られないと考えて、それぞれ地震動や津波を入力として統計的に機能停止期間を求めることにした。前者のサプライヤについては、地震動と事業所の操業能力低下の発生確率の関係に関する機能的フラジリティ曲線⁸⁾を用いた(表 6-2)。また、後者の港湾については、東日本大震災における港湾での復旧率の推移⁹⁾に基づき、港湾の機能停止に係る耐力と復旧期間を独自に表 6-3 のようにモデル化した。構築したモデルの妥当性を検討するため、宮古港および釜石港を対象に適用計算を行ない、実際の復旧率と比較した(図 6-9)。これより、経過日数 100 日程度まではやや精度が悪いが、震度と津波高の 2 つのパラメータのみで予測することを考慮すれば概ね妥当な結果が得られていると考えられる。

なお、既往研究に基づき設定した耐力には地震動指標が計測震度と異なるものがあるが、後述する被害予測においては、計測震度と最大加速度¹⁰⁾や SI 値¹¹⁾の関係に基づき計測震度を変換して用いた。

また、調達先からの配送不能については、第 4 章および第 5 章で記した手法に基づき、道路網の機能支障による事業継続確率を評価する。本検討では、事業継続に必要な調達量は平常時の 4 割とした(最大フロー低下率の限界値を 0.6 と設定した)。また、対象道路は図 6-7 に示した直轄国道とした。

表 6-2 組立工場、加工工場、サプライヤの機能停止事象の評価に係るパラメータ

		耐力 ^{※1}		復旧期間 ^{※2}		備考
		(PGA、cm/s ²)		(日)		
		中央値 θ	対数標準 偏差 β	中央値 q	対数標準 偏差 b	
組立工場 機能停止	構造被害	877	0.4	30	0.5	耐震補強後を想定
	機器停止	400	0.4	30	0.5	入力地震動は構造の 1/2
	周辺停電	500	0.4	3	0.5	
加工工場 機能停止	構造被害	215	0.4	30	0.5	未補強状態を想定
	機器停止	400	0.4	30	0.5	入力地震動は構造と同じ
	周辺停電	500	0.4	3	0.5	
		耐力 ^{※3}		復旧期間 ^{※2}		備考
		(SI 値、cm/s)		(日)		
		中央値 θ	対数標準 偏差 β	中央値 q	対数標準 偏差 b	
サプライヤ機能停止		4.137	0.512	30	0.5	

※1：工場の構造被害、機器停止、周辺停電に係る耐力については、すべて文献7に基づき設定した。本検討における構造被害は、主架構における中破以上の被害に対応するものとし、耐震補強後を想定したモデルには妻面ブレースを持つモデル（C03B）、未補強状態を想定したモデルには妻面ブレースのないモデル（C00）を用いた。

※2：工場の構造被害、機器停止、周辺停電に係る復旧期間についても文献7に基づき設定した（ただし、対数標準偏差は文献7では対象外のため、本検討で設定した）。また、サプライヤの機能停止に係る復旧期間は工場の構造被害と同じとした。

※3：サプライヤの機能停止に係る耐力については、文献8に基づき設定した。本検討における機能停止は、文献8による被害モードⅢ（操業能力の水準が平常時の33%以下に低下）に対応するものとした。また、加工組立型産業のモデルを用いた。

表 6-3 港湾の機能停止事象の評価に係るパラメータ

	耐力				復旧期間（日）			
	区分	中央値 θ	対数標準 偏差 β	処理 ※1	区分	中央値 q	対数標準 偏差 b	処理 ※1
港湾 機能 停止	地震動に よる被害率	計測震度 4.3	0.82	両者 の 平均	津波高 8.0m 未満	148	0.27	津波 高で 選択
	津波に よる被害率	津波高 5.6m	0.88		津波高 8.0m 以上	206	0.21	

※1：耐力に基づく停止確率は、地震動による被害率と津波による被害率をそれぞれ求め、その平均値を用いることとした。また、復旧期間の確率分布は、津波高の区分に応じて求めることとした。

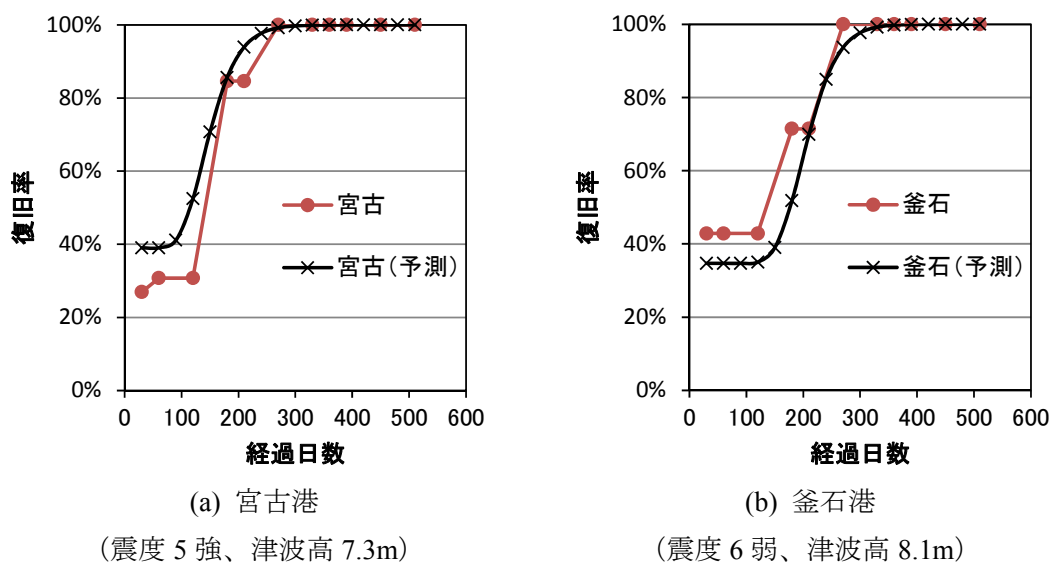


図 6-9 東日本大震災における港湾の復旧率と停止期間の累積確率の予測結果の比較

6.5.3 サプライチェーンの停止期間の確率論的評価

対象サプライチェーン全体とその構成要素における停止期間の累積確率の評価結果を図 6-10 に示す。ここで、調達先からの配送不能については、起終点の施設名を矢印(→)で結んで凡例に示した。また、組立工場、加工工場 A、加工工場 B の機能停止については、図が煩雑になるのを避けるため、工場の構造被害、機器停止、周辺停電に分けて示すことはしなかった。これより、サプライチェーン全体の停止期間の累積確率は、約 90 日程度を境にその傾向が異なっている。約 90 日以上での停止期間の領域では「港湾」の影響が支配的であるが、それより短い停止期間の領域では複数の構成要素が影響している。

次に、停止期間の累積確率に基づく各構成要素の確率重要度の評価結果を図 6-11 に示す。任意の停止期間に対して評価可能であるが、ここでは図 6-10 の結果を踏まえて、30 日間、60 日間、90 日間の 3 ケースとした。これより、30 日間では「加工工場 B」、60 日間および 90 日間では「港湾」がそれぞれボトルネックであることが分かる。

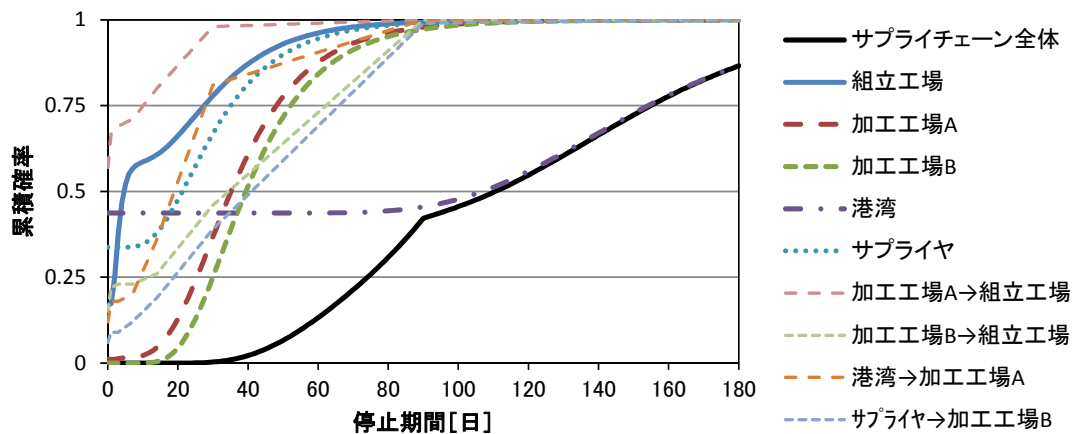


図 6-10 対象とするサプライチェーンの停止期間の累積確率（対策なし）

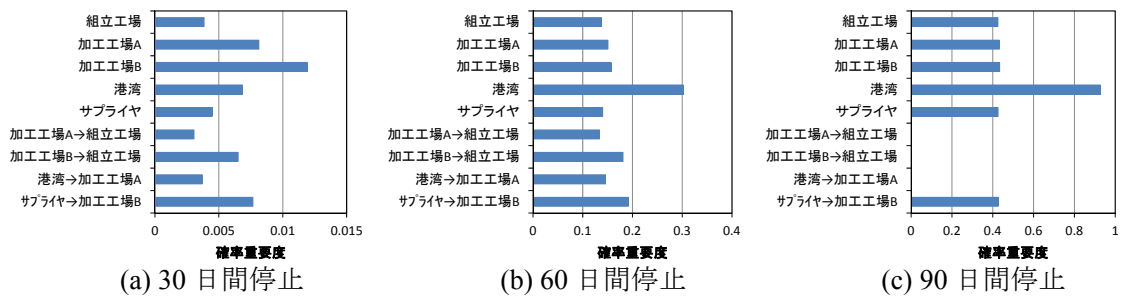


図 6-11 対象とするサプライチェーンのボトルネック評価（対策なし）

6.5.4 サプライチェーンのボトルネック特定と対策後の停止期間評価

(1) ボトルネック「港湾」に対する対策選定

対象サプライチェーンの初期条件（対策なし）では「港湾」が主なボトルネックとなることが分かった。ボトルネックに対する対策として、港湾の耐震性向上は企業には困難なため、港湾から調達する素材 a の在庫を確保する対策や港湾とは別の調達先を確保する対策が考えられる。

- 素材 a 在庫確保
 - ◇ 素材 a の在庫を加工工場 A の敷地内に確保する対策
 - ◇ 素材 a の在庫を保管する倉庫の耐力と在庫期間は表 6-4 のように設定

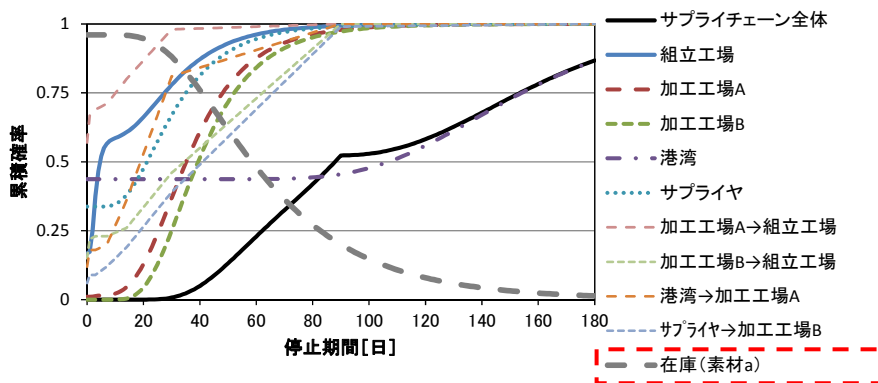
- 素材 a 分散調達
 - ◇ 素材 a の別の調達先として「追加サプライヤ」を確保する対策
 - ◇ 「追加サプライヤ」の配置および各種条件は図 6-7 および表 6-1 のように設定
 - ◇ 「追加サプライヤ」の耐力と復旧期間は表 6-2 の「サプライヤ」と同様に設定

表 6-4 在庫を保管する倉庫の耐力と在庫期間の設定

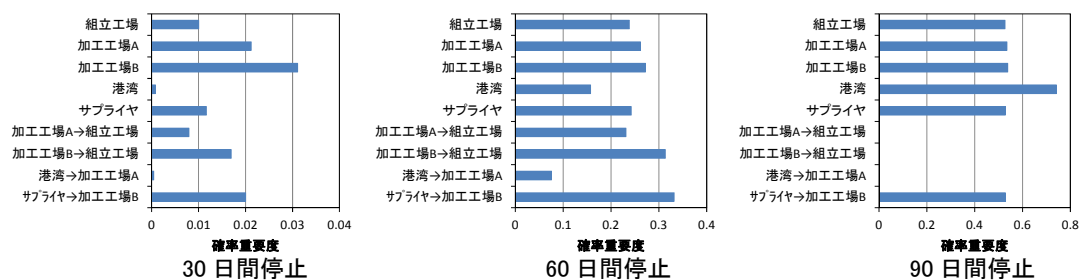
	耐力 (PGA、 cm/s^2)		在庫期間 (日)		備考
	中央値 θ	対数標準 偏差 β	中央値 m	対数標準 偏差 d	
	在庫被害	877	0.4	60	

素材 a 在庫確保および素材 a 分散調達について、対策後のサプライチェーンの停止期間をそれぞれ図 6-12 および図 6-13 に示す。これより、素材 a 在庫確保では、在庫期間に比べて港湾の停止期間が非常に長いため、サプライチェーン全体の停止期間の累積確率はあまり改善されない。一方、素材 a 分散調達では、追加サプライヤの敷地やその周辺では地震動が大きくないため、追加サプライヤ自体の機能停止や追加サプライヤからの配送不能が生じにくく、サプライチェーン全体の停止期間の累積確率は大きく改善される。

以上の結果より、対策には「素材 a 分散調達」を採用する。対策後のボトルネックは、30 日間では「加工工場 B」、60 日間では「サプライヤ→加工工場 B」と「加工工場 B→組立工場」である。対策として「素材 a 分散調達」を組み込んだフォールトツリーを図 6-14 に示す。また、対策後のサプライチェーン全体の停止期間の変化を図 6-15 に示す。

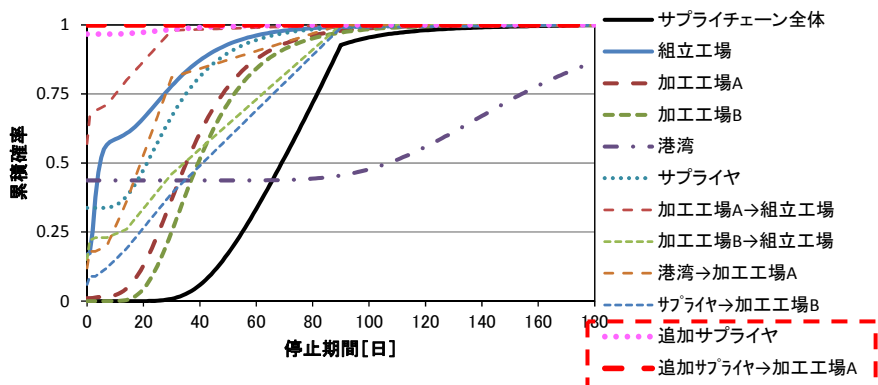


(a) 停止期間の累積確率

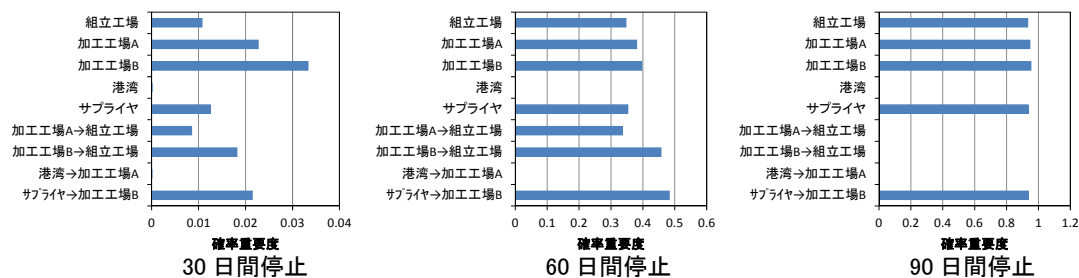


(b) 各停止期間でのボトルネック

図 6-12 対策後の停止期間 (素材 a 在庫確保)



(a) 停止期間の累積確率



(b) 各停止期間でのボトルネック

図 6-13 対策後の停止期間 (素材 a 分散調達)

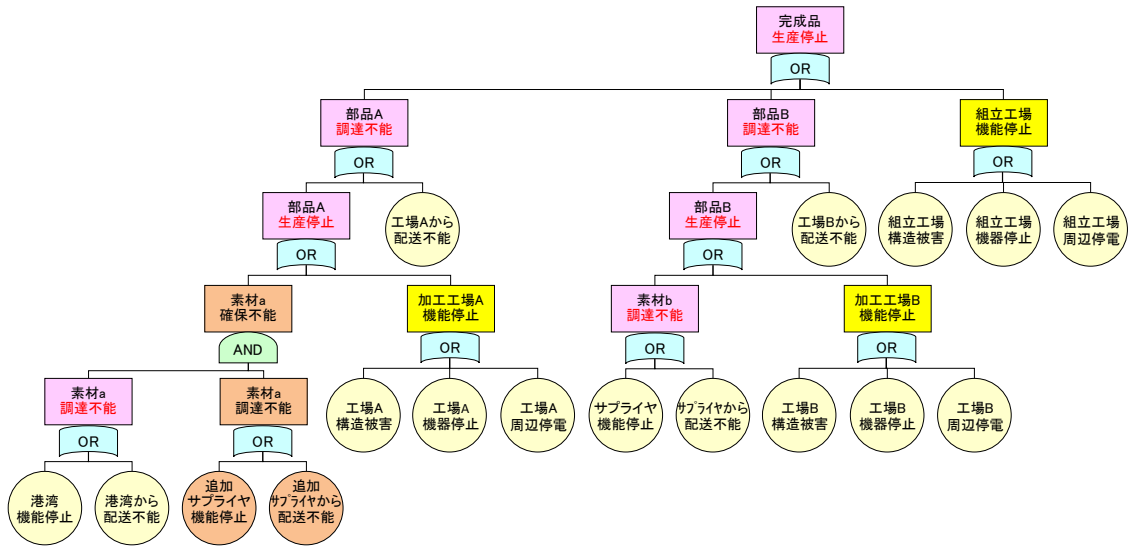


図 6-14 対策を構成要素として組み込んだフォールトツリー
(素材 a 分散調達)

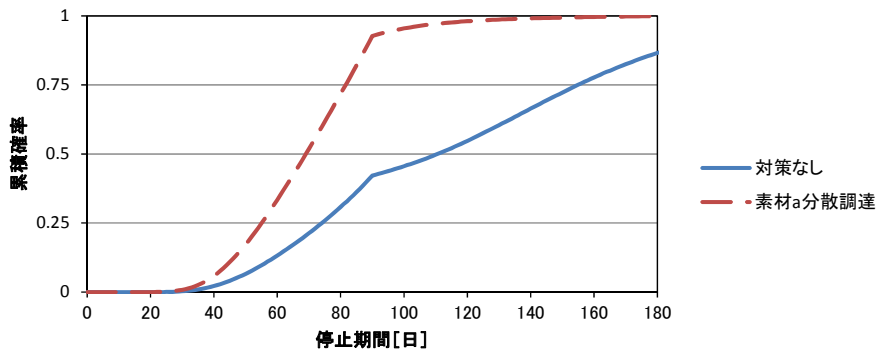


図 6-15 対策後のサプライチェーン全体の停止期間の累積確率の変化
(素材 a 分散調達)

(2) 「素材 a 分散調達」実施後のボトルネックに対する対策選定

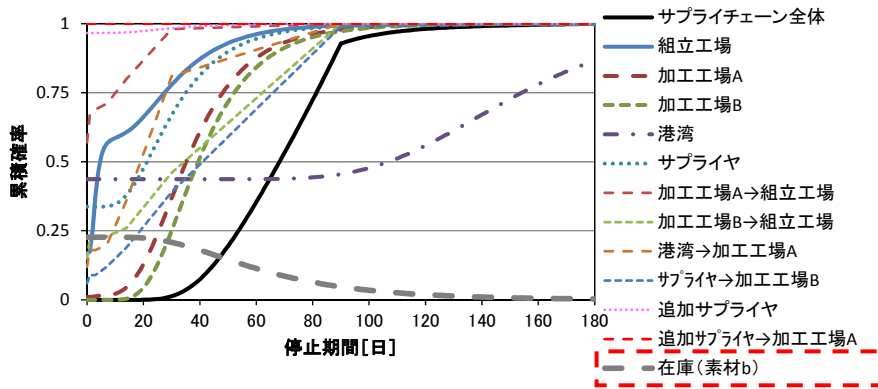
「素材 a 分散調達」実施後の条件では「サプライヤ→加工工場 B」や「加工工場 B→組立工場」といった素材 b や部品 B の配送に係る部分がボトルネックとなる。調達先からの配送不能に対する対策として、道路網の耐震性向上は企業には困難なため、サプライヤや加工工場 B からそれぞれ調達する素材 b や部品 B を在庫として確保する対策が考えられる。

- 素材 b 在庫確保
 - ◇素材 b の在庫を加工工場 B の敷地内に確保する対策
 - ◇素材 b の在庫を保管する倉庫の耐力と在庫期間は表 6-4 と同様に設定

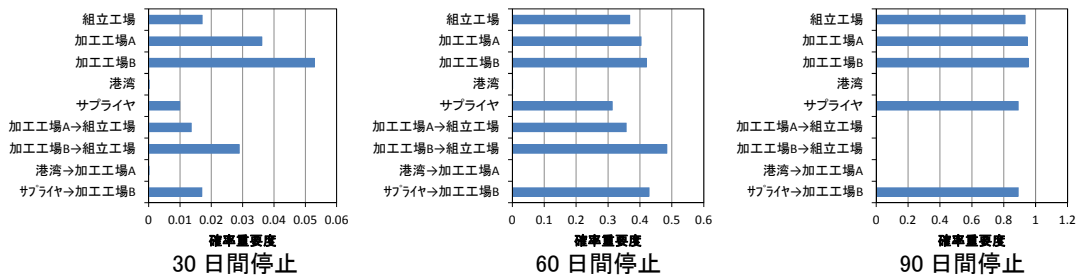
- 部品 B 在庫確保
 - ◇部品 B の在庫を組立工場の敷地内に確保する対策
 - ◇部品 B の在庫を保管する倉庫の耐力と在庫期間は表 6-4 と同様に設定

素材 b 在庫確保および部品 B 在庫確保について、対策後のサプライチェーンの停止期間をそれぞれ図 6-16 および図 6-17 に示す。両者はそれぞれ敷地が異なり、敷地での地震動の大小が結果に影響を与える。素材 b 在庫確保では、敷地の地震動が震度 7 のために倉庫の被害率が高くなり、サプライチェーン全体の停止期間の累積確率の改善にはほとんど寄与しない。一方、部品 B 在庫確保では、敷地の地震動は震度 6 強であるが 6 弱に近い 6 強であったため、それほど倉庫の被害率も高くなく、サプライチェーン全体の停止期間の累積確率には一定の改善が見られる。

以上の結果より、「素材 a 分散調達」実施後の対策には「部品 B 在庫確保」を採用する。対策後のボトルネックは、30 日間では「加工工場 A」と「サプライヤ→加工工場 B」、60 日間では「サプライヤ→加工工場 B」である。「部品 B 在庫確保」を実施した場合にもボトルネックには依然として「サプライヤ→加工工場 B」が残ることになるが、サプライチェーンとしてはそれより下流に当たる「部品 B 在庫確保」の実施によって、サプライチェーン全体の事業継続に対する一定の担保は確保できていると考えられる。対策として「素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保」を組み込んだフォールトツリーを図 6-18 に示す。また、対策後のサプライチェーン全体の停止期間の変化を図 6-19 に示す。

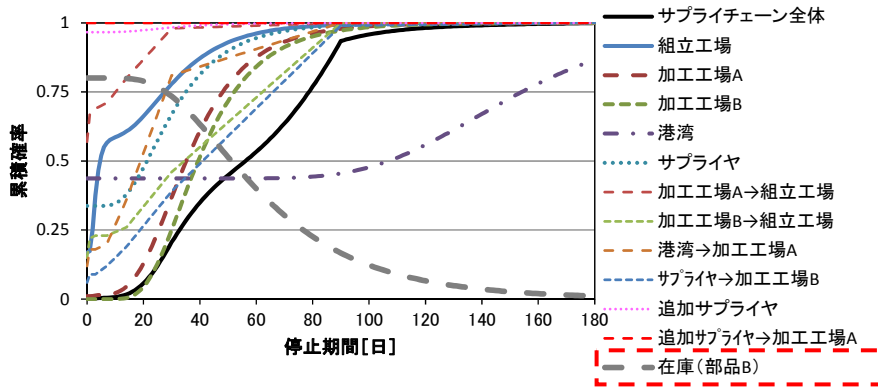


(a) 停止期間の累積確率

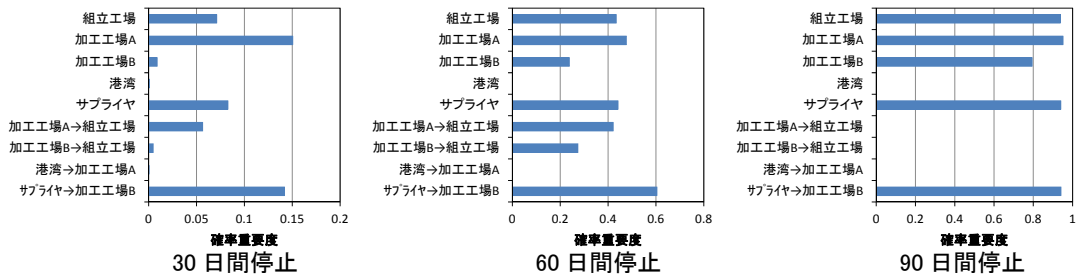


(b) 各停止期間でのボトルネック

図 6-16 対策後の停止期間（素材 a 分散調達・素材 b 在庫確保）



(a) 停止期間の累積確率



(b) 各停止期間でのボトルネック

図 6-17 対策後の停止期間（素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保）

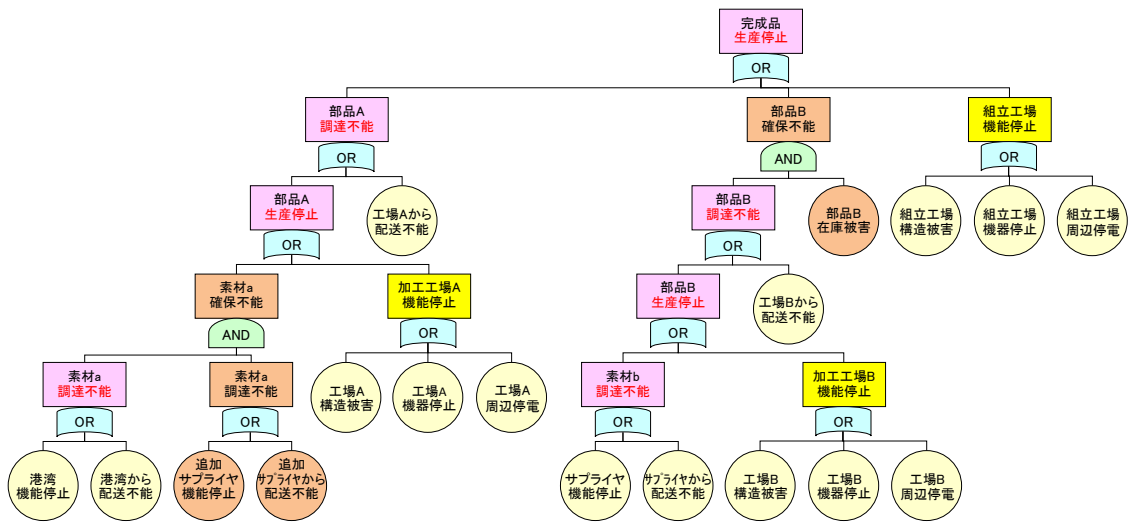


図 6-18 対策を構成要素として組み込んだフォールトツリー
(素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保)

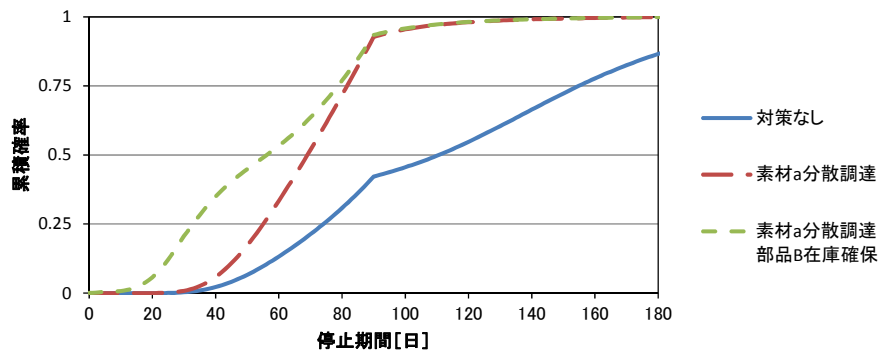


図 6-19 対策後のサプライチェーン全体の停止期間の累積確率の変化
(素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保)

(3) 「素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保」実施後のボトルネックに対する対策選定

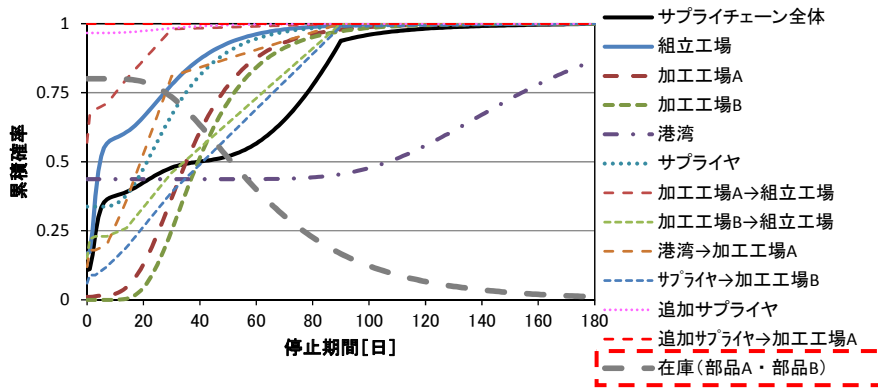
「素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保」実施後の条件においては「加工工場 A」がボトルネックに挙げられた。加工工場 A は自社施設のため、耐震性向上も可能である。また、他の選択肢として加工工場 A から調達する部品 A を在庫として確保する対策も考えられる。

- 部品 A 在庫確保
 - ◇ 部品 A の在庫を組立工場の敷地内に確保する対策
 - ◇ 部品 A の在庫を保管する倉庫の耐力と在庫期間は表 6-4 と同様に設定

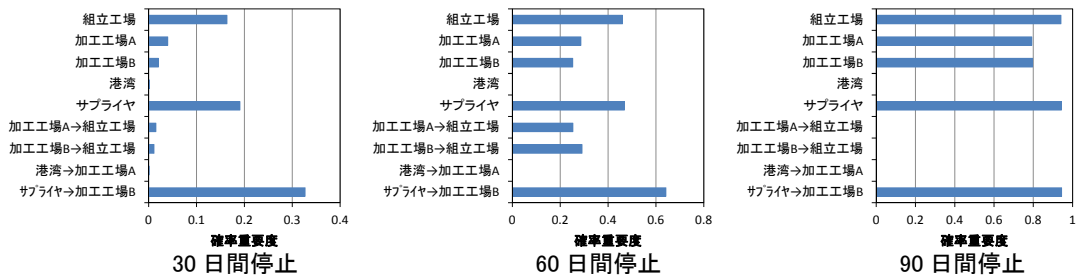
- 工場 A 耐震補強
 - ◇ 加工工場 A を耐震補強する対策
 - ◇ 耐震補強後の加工工場 A の耐力は表 6-2 の「組立工場」と同様に設定
 - ◇ 耐震補強により建物応答も低減すると考えて、(本来は応答解析を行なうところを本検討では簡便に) 機器停止の評価に用いる入力地震動を半減に設定

部品 A 在庫確保および工場 A 耐震補強について、対策後のサプライチェーンの停止期間をそれぞれ図 6-20 および図 6-21 に示す。これより、どちらの対策もサプライチェーン全体の停止期間の累積確率はほぼ同程度に改善されるが、約 5 日～30 日の停止期間の領域では部品 A 在庫確保の方が累積確率は高く（早く復旧する確率が高く）、約 30 日～60 日の停止期間の領域では工場 A 耐震補強の方が累積確率は高い。どちらの対策がより優れているかを客観的に判断するには、後述するように目標復旧時間の達成による対策選定などの検討が必要である。一方、すでに部品 B 在庫確保を対策として採用していることから、在庫をそれ以上増やすことなく事業中断リスクを低減することは重要と考えられる。

以上の結果より、「素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保」実施後の対策には「工場 A 耐震補強」を採用する。対策後のボトルネックは、30 日間および 60 日間では依然として「サプライヤ→加工工場 B」が挙げられるが、他に顕著なボトルネックは特にないため、ボトルネックに対する対策選定の検討は以上で終了することとする。対策として「工場 A 耐震補強」を組み込んだフォールトツリーを図 6-22 に示す。また、対策後のサプライチェーン全体の停止期間の変化を図 6-23 に示す。

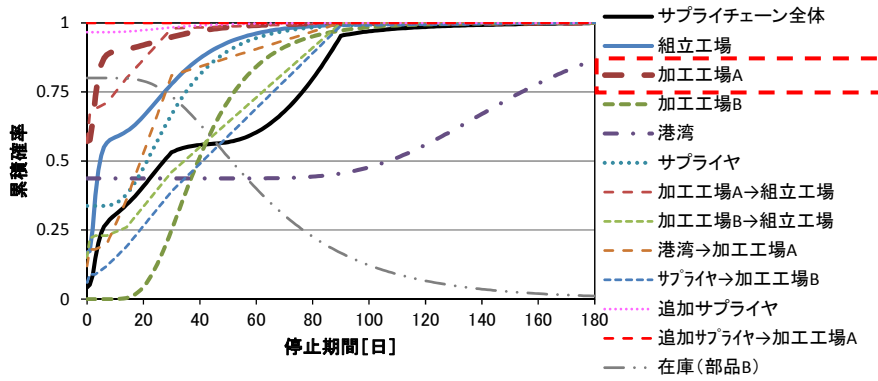


(a) 停止期間の累積確率

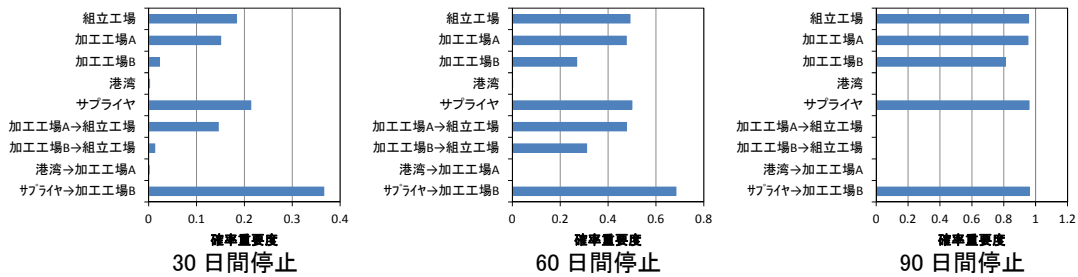


(b) 各停止期間でのボトルネック

図 6-20 対策後の停止期間 (素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保・部品 A 在庫確保)



(a) 停止期間の累積確率



(b) 各停止期間でのボトルネック

図 6-21 対策後の停止期間 (素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保・工場 A 耐震補強)

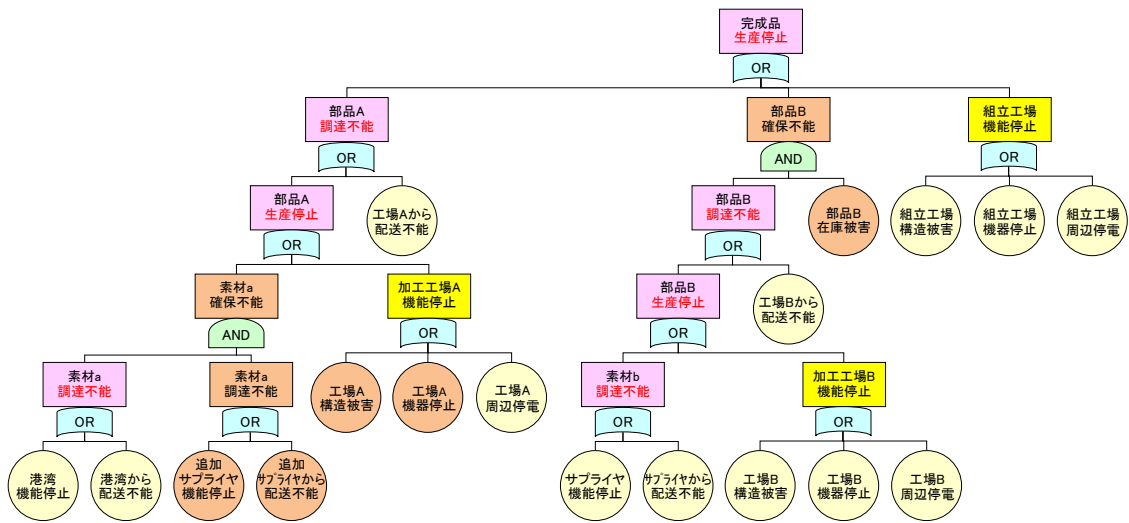


図 6-22 対策を構成要素として組み込んだフォールトツリー
(素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保・工場 A 耐震補強)

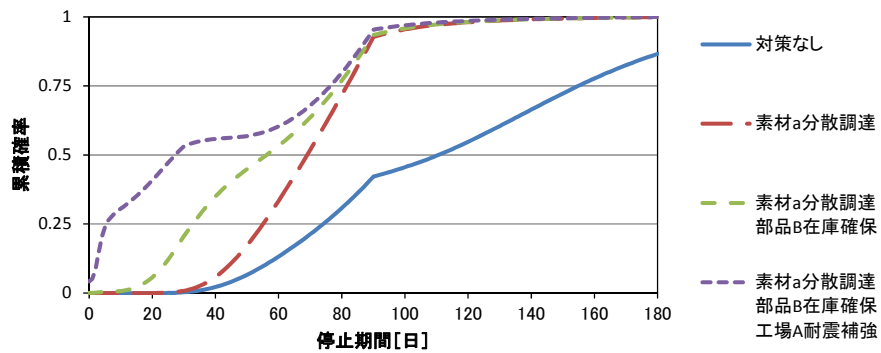


図 6-23 対策後のサプライチェーン全体の停止期間の累積確率の変化
(素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保・工場 A 耐震補強)

6.5.5 リスク低減効果に基づく対策選定の意思決定

(1) 目標復旧時間の達成による対策選定

事業中断リスクに基づきボトルネックを特定し、それに対する対策を段階的に選定したが、現実には選定した対策すべてを実施可能とは限らない。また、仮に実施可能であっても、すべて実施することが最善かどうかは分からない。

そこで、目標復旧時間の達成可否を判断基準として、どこまで対策を実施するかを意思決定に関する検討を行なう。

本検討では、図 6-23 に示したように、対策後のサプライチェーンの停止期間を確率論的に評価している。したがって、停止期間が目標復旧時間を下回るかどうかを判断するには、停止期間の期待値を求める方法と停止期間の累積確率のまま用いる方法があると思われる。

まず、停止期間の期待値で判断する方法について検討する。対策後の期待停止期間を図 6-24 に示す。当然ではあるが、対策を増やせば期待停止期間は低減する。目標復旧時間を 30 日、60 日、90 日の 3 ケース設定し、その達成可否をそれぞれ判定すると、30 日の場合はすべて対策を実施しても達成不能、60 日の場合は「素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保」まで実施すれば達成可能、90 日の場合は「素材 a 分散調達」のみ実施で達成可能である。

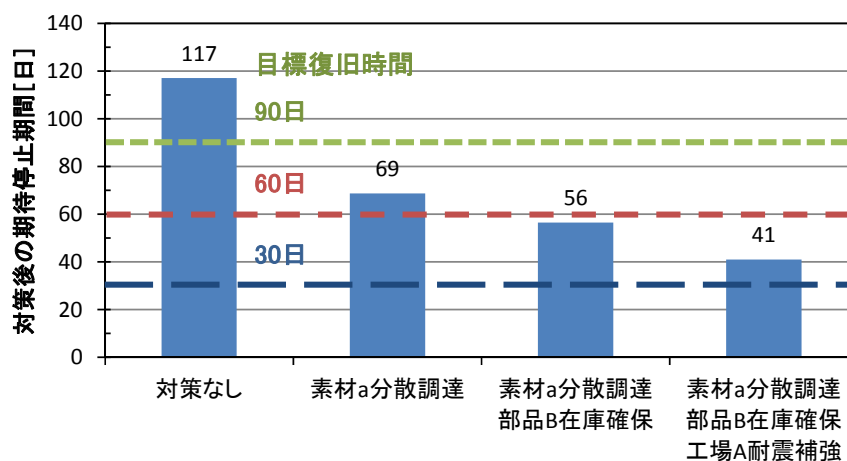


図 6-24 対策ごとの期待停止期間に基づく目標復旧時間達成の判定

次に、停止期間の累積確率に基づき判断する方法について検討する。図 6-25 に示すように、横軸が目標復旧時間の値に対応する停止期間の累積確率を読み取れば、対策後の停止期間が目標復旧時間を下回る確率（目標復旧時間の達成確率）が得られる。目標復旧時間を 30 日、60 日、90 日の 3 ケース設定し、それぞれの達成確率を図 6-26 に示す。これより、30 日以内に復旧する確率は「素材 a 分散調達」のみではほぼゼロであるが、それより対策

を増やせば最大 0.5 程度まで向上する。また、60 日以内に復旧する確率は「素材 a 分散調達」のみで 0.3 程度となり、さらに対策を増やしていけば徐々に向上する。一方、90 日以内に復旧する確率は、「素材 a 分散調達」のみで 0.9 程度となるが、それより対策を増やしてもほとんど変化がない。

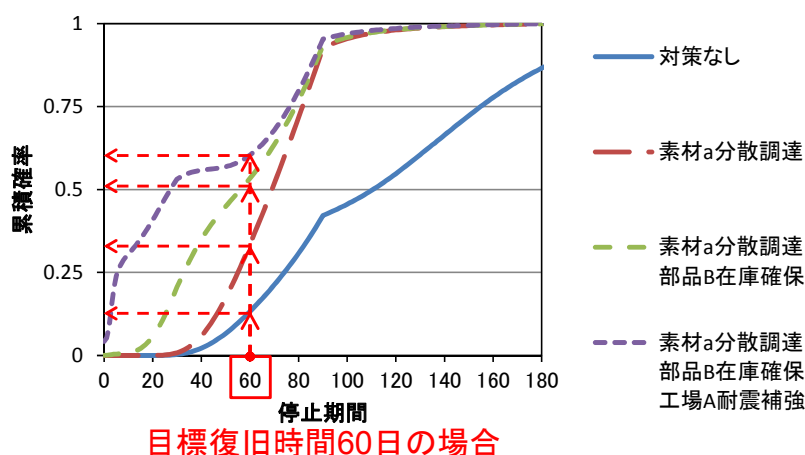


図 6-25 停止期間の累積確率に基づく目標復旧時間の達成確率

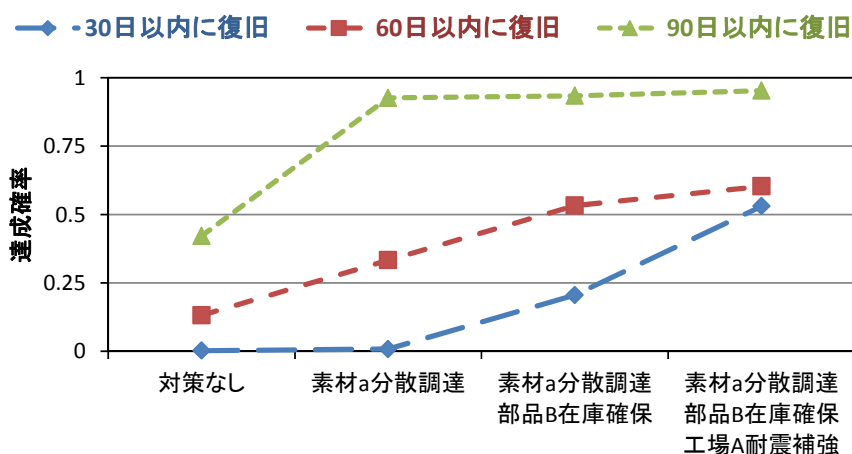


図 6-26 対策ごとの停止期間の累積確率に基づく目標復旧時間達成の判定

以上より、停止期間の累積確率により目標復旧時間の達成確率として評価すれば、目標復旧時間が 30 日であっても対策すべてを実施すれば 0.5 の確率で達成できることが分かり、一方で、目標復旧時間 90 日に対しては「素材 a 分散調達」より対策を増やしても達成可否は変わらないことを把握でき、より合理的な意思決定が可能となる。

(2) 期待総費用最小化による対策選定

一般に地震リスクマネジメントにおいては、期待総費用に基づき対策選定の意思決定を行なうこともされている。例えば、建物の耐震補強に関する地震リスクマネジメントでは、どの程度まで補強を行なうことが期待総費用の観点から最適であるかを命題として、対策費用と直接損失の合計が最小となるように対策選定することが検討されてきた。

本研究では、耐震補強に加えて、分散調達や在庫確保といったサプライチェーン特有のものも考慮して事業中断期間の評価を行なった。そこで、それぞれの対策費用の求め方を次のように考えて、期待総費用最小化を判断基準とした対策選定に関しても検討を行なう。

対策費用としては、耐震補強では補強工事費としてそれを実施する時点で発生する費用を考えるが、分散調達や在庫確保では一時点ではなく、その対策を止めるまでの期間中に連続的に繰り返し支出する経常費として考える必要があると思われる。本検討では、以下のように簡便に設定して、それぞれの対策費用を算出した。ただし、分散調達や在庫確保の対策費用設定の妥当性については今後の課題である。

● 耐震補強

◇補強工事費として次式により算出。

$$(\text{補強工事費}) = (\text{単位箇所当り工事費}) \times (\text{工事箇所数})$$

◇ただし、本検討では、対象建物の具体的な構造体や規模を設定していないため、鋼構造の構造物を対象とした補強工事事例等を参考に、1.5億円と仮定した。

● 分散調達

◇物流費を経常費として次式により算出。

$$(\text{物流費}) = (\text{単位距離当り輸送費}) \times (\text{輸送距離}) \times (\text{対象期間})$$

◇本検討では、追加サプライヤから加工工場 A までの輸送距離を約 40km、単位距離当りの輸送費を約 200 円/km、配送は一日一台一往復と仮定して、一年当りの輸送費を 600 万円とした。また、対象期間を 30 年間として、1.8 億円と求めた。

● 在庫確保

◇在庫管理費を経常費として次式により算出。

$$(\text{在庫管理費}) = (\text{単位価格当り管理費}) \times (\text{在庫価格}) \times (\text{対象期間})$$

◇本検討では、在庫価格は在庫期間の 60 日を考慮して 3000 万円、単位価格当りの在庫管理費を在庫価格の約 15%と仮定して、一年当りの在庫管理費を 450 万円とした。また、対象期間を 30 年間として、1.35 億円と求めた。

また、対象とした工場の日当りの利益額を 500 万円と設定し、これに期待停止期間を乗じて期待中断損失を求めることとした。対策なしの場合は停止期間 117 日で中断損失 5.9 億円、素材 a 分散調達の場合は 69 日で 3.4 億円、素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保の場合は 56 日で 2.8 億円、素材 a 分散調達・部品 B 在庫確保・工場 A 耐震補強の場合は 41 日で 2.0 億円となった。

以上のような仮定条件の下で算出した対策費用と期待中断損失の合計を図 6-27 に示す。前述のように、それぞれの設定の妥当性は未検討であり、また簡単な仮定の下で算出したものであるため、あくまで参考値として見る必要があるが、対策によっては、対策なしの場合よりも合計が大きくなるものがあり、期待総費用最小化に基づき対策選定を検討する重要性が示唆される。

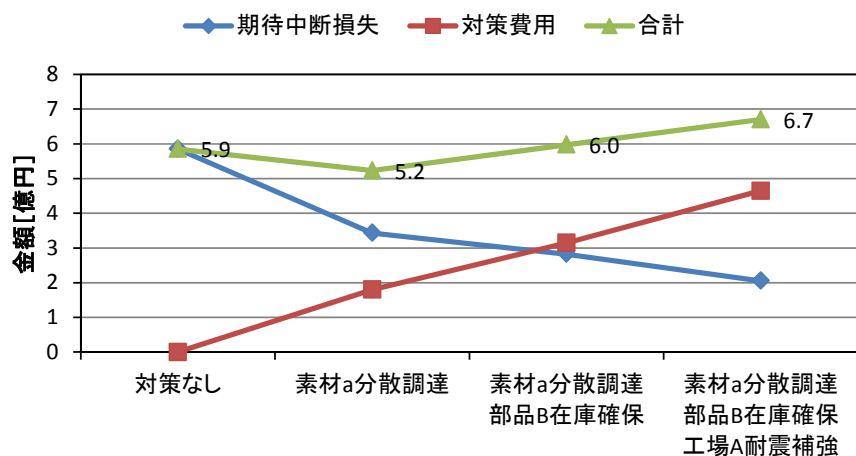


図 6-27 対策ごとの期待総費用の試算結果

6.6 まとめ

本章では、サプライチェーンの事業中断リスクマネジメントの考え方を整理した上で、事業中断リスクに基づきボトルネックを定量的に把握する手法を提案するとともに、対象範囲や発現効果の異なるさまざまな事業中断リスク低減対策をフォールトツリーに組み込むための具体的な方法を示した。

また、東日本大震災以後、国による地震被害想定が相次いで見直され、企業のBCP策定や再検討もそれを踏まえて実施する必要性が生じている現状を踏まえて、中央防災会議による南海トラフの巨大地震の想定被災地域に仮想のサプライチェーンを設定し、サプライチェーンの停止期間の確率論的評価に基づくボトルネック特定とそれに対する対策選定について事例解析を行なった。

サプライチェーンの事業中断リスクマネジメントでは、対策選定の意思決定は目標復旧時間の達成可否を判断基準に実施されるべきと考え、サプライチェーンの停止期間の累積確率に基づく対策選定手法を例示し、それによって、より合理的な意思決定が可能となることを明らかにした。

第 6 章の参考文献

- 1) 内閣府（防災担当）：事業継続ガイドライン—あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応—、平成 25 年 8 月改定
- 2) 井上威恭 監修：FTA 安全工学、日刊工業新聞社、1979.
- 3) 北岡正敏：サプライチェーンにおける鞭効果（ブルフィップ効果）の測定と制御法、神奈川大学工学研究所所報、第 32 号、pp.10-19、2009.
- 4) 山田忠史、繁田健、今井康治、谷口栄一：在庫費用を考慮したサプライチェーンネットワーク均衡モデル—消費需要の不確実性に伴う物資流動量とネットワーク効率性の変化—、土木学会論文集 D、Vol.66、No.3、pp.359-368、2010.
- 5) 伊藤學、亀田弘行、黒田勝彦、藤野陽三 共訳：土木・建築のための確率・統計の応用、1988.
- 6) 内閣府（防災担当）：南海トラフの巨大地震モデル検討会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ、2012.
- 7) 中澤祥二、加藤史郎、平野健太、立道郁生：機能停止期間を考慮した複数の耐震補強法の比較—工場・体育館などの空間構造への適用—、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1、pp.809-810、2007.
- 8) 中野一慶、梶谷義雄、多々納裕一：地震災害による産業部門の操業能力の低下を対象とした機能的フラジリティ曲線の推計、土木学会論文集 A1、Vol.69、No.1、pp.57-68、2013.
- 9) 小野憲司、赤倉康寛：東日本大震災における港湾物流へのインパクトと海運・港湾部門のレジリエンス機能、京都大学防災研究所年報、第 56 号 B、pp.23-36、2013.
- 10) 藤本一雄、翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法、地域安全学会論文集、No.7、pp.241-246、2005.
- 11) 童華南、山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係、生産研究、Vol.48、No.11、pp.547-550、1996.

(空白)

第 7 章

結 論

第7章 結論

本研究では、サプライチェーンを構成する企業の合理的な BCP 策定に資するため、地震によるサプライチェーンの事業中断リスクを定量化し、それに基づきボトルネックを特定して、合理的な対策選定の意思決定を支援する手法を構築した。

本研究の成果を以下にまとめる。

第2章では、サプライチェーン寸断による事業中断リスク評価モデルを構築した。まず、サプライチェーンのモデル化のために、経営工学でのサプライチェーン・マネジメントにおける知見を参考にして、基本的なプロセスと構成要素を整理した。すなわち、サプライチェーンは原料調達、製品生産、製品出荷の3プロセスと考えた。原料調達の部分では、仕入先のサプライヤと配送のための物流が構成要素となり、製品生産の部分では、工場の建物、設備、ライフラインが構成要素となる。製品出荷の部分では、納入先の顧客が構成要素である。これら構成要素のいずれか一つでも支障が生じるとサプライチェーンが途切れ、最終プロセスの製品出荷に影響が出ることになる。また、各プロセスの間には不測の事態に備えたバッファとして、在庫が考えられる。本研究では、サプライチェーン全体を各要素から構成される一つのシステムと考えて、フォールトツリーでモデル化した。次に、フォールトツリー解析に基づくサプライチェーンの事業中断リスク評価手法を定式化した。フォールトツリーは一般にシステムの停止確率を算出するために用いられるが、各要素の停止事象は互いに独立、かつ、その復旧作業は同時に開始という条件の下では、各要素の停止期間の確率分布を用いて、システムの停止期間の確率分布を算出できることを示した。

第3章では、第2章で構築したサプライチェーンの構成要素の一つである設備システムについて、システム構成機器の地震時の停止期間の確率分布の評価手法を構築した。具体的には、システム構成機器ごとに地震時に停止する確率と停止したときの停止期間の確率分布をそれぞれモデル化して、それらに基づき機器ごとの地震時の停止期間の確率分布を算出する方法を示した。なお、それらを用いた設備システム全体の停止期間の確率分布の算出については、第2章に示したとおりである。また、地震時の建物機能維持のために特に重要と考えられる電源システムを対象に事例解析を行ない、提案手法の有効性について確認した。

第4章では、第2章で構築したサプライチェーンの構成要素の一つである物流に関して、地震時の道路ネットワークの機能支障によるサプライチェーンへの影響を評価するために、

道路の通行止めを確率論的に予測する手法を構築した。従来の道路被害予測は物的被害が中心で、それに起因した通行止めを予測する研究例はほとんどない。本研究では、東日本大震災における道路通行止め情報を GIS データ化し、その回帰分析に基づき地震時の道路通行止め予測モデル（通行止め確率と通行止め期間の確率分布）を導出した。

第 5 章では、第 4 章で構築した地震時の道路通行止め予測モデルに基づき、道路ネットワークの機能支障を確率論的に予測する手法を構築し、それによるサプライチェーンへの影響を評価する手法を構築している。道路ネットワークの機能を示す指標には最大フローを用い、地震時の道路ネットワークの機能支障は最大フロー低下率で求めることとした。最大フローを最大輸送可能量とみなせば、最大フロー低下率によりサプライチェーンへの影響を定量化可能である。すなわち、最大フロー低下率に基づき、原料調達不足で工場が生産停止に陥る確率を評価する方法を提案した。また、東日本大震災と同程度の地震動と津波を想定して、岩手県を対象に内陸の物流拠点から沿岸部の工場への原料輸送に関する事例解析を行ない、提案手法の有効性について確認した。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で構築したサプライチェーンの事業中断リスク評価手法とその要素技術を用いて、サプライチェーンの事業中断リスクマネジメントに関する事例解析を行なった。合理的なリスクマネジメントのためには、全体最適の視点によりボトルネックとなる要素を特定し、それに対して優先的に対策を実施することが望ましい。そこで、フォールトツリー解析における確率重要度を拡張して、それを構成要素の停止期間の累積確率から算出し、値が大きいものをボトルネックと評価することを提案した。また、サプライチェーンの事業中断期間を低減する対策として、耐震補強、分散調達、在庫確保の 3 つのオプションを考慮し、それらをサプライチェーンのフォールトツリーに組み込む方法を具体的に示した。南海トラフ巨大地震で大きな被害が想定されている愛知県を対象に、仮想のサプライチェーンを設定して、確率重要度によりボトルネックを段階的に把握するとともに、対策実施後の事業中断期間の累積確率の変化を順次算出した。また、その結果に基づく対策選定について例示し、提案手法の有効性について確認した。

今後の課題を以下にまとめる。

- 1) 本研究で提案した手法で得られるサプライチェーンの事業中断期間について、過去の震災における事業中断被害事例等に基づき、妥当性を検討する必要がある。
- 2) 事業中断期間の評価モデルにおいて考慮できていない要因のうち、影響が大きいものを見極め、それらの取扱いについても検討する必要がある。例えば、復旧に要する人員・資機材調達の制約などの社会的な要因について、その影響度合いを検討する必要がある。

- 3) フォールトツリーでは独立に発生する停止事象のみ対象としたが、サプライチェーンでは共通原因故障など相関性のある停止事象も含まれると思われる。また、物理的な被害事象のみ対象としたが、ヒューマンエラーなど人的な要因による被害事象もあると思われ、それらを考慮する必要性について検討することも重要である。
- 4) より現実に即した形でサプライチェーンの事業中断期間を評価するには、以下の項目についても今後検討が必要と思われる。
 - a) 各要素の被害事象間の相関性の考慮（現状では互いに独立と仮定しており、事業中断期間を過大評価している恐れがある）
 - b) 各要素の復旧順序の制約の考慮（現状では同時に復旧開始と仮定しており、事業中断期間を過小評価している恐れがある）
- 5) サプライチェーンの事業中断期間の評価手法の高度化を図るには、生産設備の被害率や復旧日数のモデル化が必要である。また、首都圏など交通量の極めて多い大都市に適用するには、震災時の交通渋滞が物流に与える影響を検討することも必要である。
- 6) サプライチェーンの事業中断リスク低減対策のうち、拠点の分散化、調達先の複線化、在庫水準のかさ上げなどが平常時の経営に与える影響についても今後検討することが望ましい。
- 7) 事業中断リスクマネジメントとしてリスク低減のみを対象に検討を行なったが、地震保険等のリスク転嫁を含む検討についても重要と思われる。

発表論文

審査論文

1. 鳥澤一晃、石田寛：建築設備システムの地震被害による機能停止リスク評価手法、JCOSSAR2011 論文集（第7回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム）、A論文、pp.49-54、2011.
2. 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、第14巻、第2号、pp.84-103、2014.

一般論文（口頭発表）

3. 鳥澤一晃、石田寛：サプライチェーンを考慮した生産施設の地震時事業中断リスク評価モデル、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.217-218、2009.
4. 鳥澤一晃、石田寛：建築設備システムの地震による機能停止リスク評価手法、日本建築学会学術講演梗概集、B-1分冊、pp.195-196、2011.
5. 鳥澤一晃、吉田聡、佐土原聡：東日本大震災の被害データに基づく道路の機能的被害予測モデルー振動被害に起因した全面通行止めの確率論的評価ー、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、pp.1213-1214、2012.
6. 鳥澤一晃、佐土原聡：地震の揺れに起因した道路の機能的被害の確率論的評価モデルに関する検討、地域安全学会東日本大震災特別論文集、No.1、pp.55-58、2012.
7. 鳥澤一晃、吉田聡、佐土原聡：サプライチェーンの地震時事業中断リスクに基づくボトルネック評価、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、2014.（印刷中）

(空白)