

防災科学技術研究所研究資料

第258号

Engineering Application of the National Seismic Hazard Program - Seismic Hazard Information Sharing Bases -

地震動予測地図の工学利用
—地震ハザードの共通情報基盤を目指して—
＜地震動予測地図工学利用検討委員会報告書＞
平成16年9月

September 2004



独立行政法人
防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

巻 頭 言

(独) 防災科学技術研究所

理事長 片山 恒雄

地震動予測地図の作成手法に関する研究とリアルタイム地震情報の利活用に関する研究は、最近数年間に防災科研で発足した2つの大切なプロジェクトである。このうち、特定プロジェクト「地震動予測地図作成手法の研究」は、地震調査研究推進本部地震調査委員会が、平成16年度末を目途として実施中の地震動予測地図作成プロジェクトに資するため、平成13年度より発足した。

兵庫県南部地震のあと、平成7年7月、地震防災対策特別措置法が議員立法によって制定され、行政施策に直結すべき地震調査研究を政府として一元的に推進するため地震調査研究推進本部（推本）が発足した。推本の活動目標は、①総合的かつ基本的な施策の立案、②関係行政機関の予算等の事務の調整、③総合的な調査観測計画の策定、④関係行政機関、大学等の調査結果等の収集、整理、分析及び総合的な評価、⑤上記の評価に基づく広報、と定められている。

これらのうち、例えば③は、地震観測網の構築として具体化し、いま、防災科研は、日本全国 2,000 地点に 3,000 台の地震計からなるネットワークを展開している。ところが、リストの一番目に挙げられた「総合的かつ基本的な施策の立案」には、なかなか手が着けられず、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」という報告書がまとめられたのは、平成11年4月のことであった。私は、この報告書とりまとめの座長を務めた。報告書は、

第1章 総合的かつ基本的な施策の策定にあたって

第2章 地震調査研究の推進方策

第3章 当面推進すべき地震調査研究

からなり、第3章で、今後10年間程度に推進すべき地震調査研究を4つの分野に整理した。すなわち、①活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成、②リアルタイムによる地震情報の伝達の推進、③大規模地震対策特別措置法に基づく地震防災対策強化地域及びその周辺における観測等の充実、④地震予知のための観測研究の推進、の4分野である。報告書をつくった当事者としては、例示程度の気持ちだったものが、その後の推進本部の活動に予想以上に大きな影響を及ぼす結果となっている。

一方、われわれとしては、報告書の柱のつもりで書いた第2章、とくに、「地震調査研究を行う者と地震防災に関係する者との対話、協力、連携をあらゆるレベルで推進すること」「地震調査研究はその成果として、どのような情報を、どのように出していけば地震防災に活かせるかを常に念頭に置くべきこと」「地震調査研究は、地震防災対策に関係する者からの要請を踏まえて企画、立案され、行われる必要があること」などは、あまりに当たり

前の発言と思われたのか、第3章ほどは重視されていない。

本報告書を作成した「地震動予測地図工学利用検討委員会」は、地震動予測地図作成プロジェクトの成果を工学分野で活用するための方策を討議するために、平成14年6月に本研究所に設置された。本報告書が、「地震調査研究と連携した地震防災工学研究の推進」のために、有効に使われることを心から祈りたい。

序

本報告書は、独立行政法人防災科学技術研究所に設置された地震動予測地図工学利用検討委員会の活動と得られた成果をとりまとめたものである。本委員会は、政府の地震調査研究推進本部の活動の一環として進められてきた地震動予測地図作成プロジェクトの成果を工学分野で活用する方策を討議するために、平成 14 年 6 月に設置された。

地震動予測地図作成プロジェクトは、我が国の地震防災力向上のために、以下の点で画期的な意味を持つ。

1. 阪神・淡路大震災以来継続されてきた地震調査研究の成果を社会に還元する事業であること。
2. これまで必ずしも「社会に役立つ」ことに積極的でなかった理学畑の専門家が、社会に向かって、地震学や地質学の最新の知見を動員して、その成果を「役に立つ」形で示そうとする働きかけであること。
3. 単に研究結果を出すだけでなく、政策委員会に「成果を社会に活かす部会」を設置して、社会との接点を積極的に討議する仕組みが作られ、それと作成側の長期評価部会・強震動評価部会との間で活発な意見交換が行われ、発信の方法に種々の工夫が行われてきたこと。

このように、地震動予測地図作成プロジェクトでは、社会の安全性向上に役立てるという、政策的使命を強く認識した活動が展開されてきたが、その中で、工学利用については専門的色彩が濃く、「成果を社会に活かす部会」のみでは議論を尽くすことは困難であること、しかも工学的利用はプロジェクトを活用できる大きな可能性を持つ分野であることから、文部科学省地震調査研究課（当時）の要請により、地震動予測地図の工学利用を集中的に討議するために、本委員会が設置されたものである。

委員会の形態としては、地震動予測地図作成の実質作業の多くを担当する防災科学技術研究所の委員会として、同研究所理事長達により設置された。これにより、行政的制約無く柔軟な討議を行う場が形成された。そして、委員会の成果をとりまとめて「成果を社会に活かす部会」に提言し、部会の討議に反映することにより、工学的利用の方向が地震動予測地図作成プロジェクトの中に適切に位置づけられるよう努めることとした。

本委員会は平成 14 年 6 月の設置以来、精力的な活動を行ってきたが、特に以下のような形で、地震動予測地図作成プロジェクトの推進に貢献したと考えられる。

1. 地震動予測地図作成プロジェクトの可能性と工学的利用のニーズの両面から詳細な検討を行い、地震動予測地図の作成手法の課題、工学的利用における課題を明確にし、それらを解決する方向性と具体的方法をできる限り明らかにした。
2. これらの課題を遂行するために、委員会内部の検討のみでなく、指導的な専門家との討議、公開ワークショップなどの活動を通して、地震動予測地図の工学的活用の可能性を出来る限り広い視野で討議した。

3. 委員会における検討結果をとりまとめ、①地震動予測地図の作成者への提言、② 成果を社会に活かす部会での検討事項の提言、および③ 工学利用側への提言からなる総合的な提言として、「成果を社会に活かす部会」に提出した。
4. 本委員会は地震動予測地図作成プロジェクトと同時進行で進めたものであるから、工学的ニーズに基づく要請については、地震動予測地図作成の立場にある委員によって直接実際の作業に反映される体制をとった。

本報告書は、これらの活動を総合的にとりまとめた記録であり、その主文は、冒頭に本委員会の提言を掲げた後、1. 総説、2. 地震動予測地図作成の意義、3. 地震ハザード評価の現状と問題点、4. 地震動予測地図の工学的ニーズと利用例、5. 地震動予測地図の工学利用の今後、で構成される。また付録として、今後の検討における参考のため、工学利用ワークショップの討議録その他の記録を収録した。

本委員会は、地震動予測地図作成プロジェクトと同時進行という、時間との競争の中で集中的な検討を行い所期の成果を達成することができた。これはひとえに、委員会の目標に向けて献身的な努力を払われた委員各位のご尽力の賜物である。また、委員会の会合にはいつも文部科学省から地震調査研究推進本部関連担当官のオブザーバー出席を頂き、実質的な討議に加わっていただいたことも委員会の活動を本来の目的に向かって舵取りするうえで大きな力となった。さらに、外部からの意見を吸収するための活動として実施した地震動予測地図工学利用ワークショップへの参加者各位、ならびに委員会との討議に応じて頂いた東京大学・島崎邦彦教授、立命館大学・土岐憲三教授をはじめとする専門家各位から頂いた多くの有益な討議は、本委員会の成果を導くために不可欠の資源となった。これら各位から頂いた貢献・ご助力に、心から敬意を表するものである。そして最後に、委員会の運営に常に適切に対応して頂いた防災科学技術研究所の委員会事務局のご努力に、深謝の意を表する次第である。

平成 16 年 9 月

地震動予測地図工学利用検討委員会
委員長・亀田弘行

目 次

巻頭言	(i)
序	(iii)
地震動予測地図の工学利用に関する提言	1
1. 総説（亀田弘行）	
1.1 地震動予測地図工学利用検討委員会設立の経緯	7
1.2 委員会の方針	7
1.3 地震動予測地図の工学利用に関する討議の要点	8
1.4 委員会の活動経過	9
1.5 政策委員会成果を社会に活かす部会への報告	12
1.6 委員会提言の骨子	12
1.7 むすび	13
2. 地震動予測地図作成の意義	
2.1 地震動予測地図作成の概要（藤原広行）	15
2.2 諸外国の地震ハザード評価（翠川三郎・井合進）	35
2.3 地震動予測地図に期待されるもの（当麻純一）	42
3. 地震ハザード評価の現状と課題（蛭沢勝三・藤原広行・亀田弘行）	
3.1 地震ハザード技術の進展	45
3.2 確率モデルに基づく地震ハザード評価	47
3.3 専門家の意見集約を組み込んだロジックツリーによる 地震ハザード評価手法	60
3.4 地震ハザード評価手法の高度化と実務への適用に向けて	64

4. 地震動予測地図の工学的ニーズと利用例	
4.1 地震動予測地図に関する工学的ニーズ（石川裕・能島暢呂）	67
4.2 学校施設の耐震化推進への利用（東貞成・久保哲夫）	72
4.3 建物の耐震設計・評価への利用（高田毅士）	79
4.4 土木構造物の耐震性能照査への利用（当麻純一）	89
4.5 ライフライン等への地震対策への利用（当麻純一）	102
4.6 地域防災計画への利用（福和伸夫）	108
4.7 地震リスクマネジメントへの利用（石川裕）	120
4.8 原子力プラント及び構成機器を対象とした 確率論的安全評価（PSA）への利用（蛭沢勝三）	126
4.9 地震動予測地図作成事業とその成果の利用（当麻純一）	138
5. 地震動予測地図の工学利用の今後（能島暢呂・石川裕）	
5.1 地震動予測地図に関する当面の課題	141
5.2 確率論的評価とシナリオ型評価の融合に向けて	144
5.3 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価を統合した 「地震ハザードステーション（仮称）」構想	155
おわりに	157
付録	
A：地震動予測地図工学利用検討委員会名簿	159
B：委員会開催及び関連活動記録	161
C：話題提供に関する議論のまとめ（新井洋）	165
D：「地震動予測地図工学利用ワークショップ」討議録（事務局）	177
E：地震動予測地図ワークショップ（文部科学省・防災科研主催）資料	263

地震動予測地図の工学利用に関する提言

地震動予測地図工学利用検討委員会で行ってきた検討をふまえて、地震動予測地図の活用へ向けて、以下に示す提言をとりまとめた。この提言は、当委員会における討議・外部からの意見吸収（当委員会主催の地震動予測地図工学利用ワークショップ、地震動予測地図の社会的影響に関する意見交換会）、および平成15年3月、16年3月の地震動予測地図ワークショップ（文科省・防災科研主催）などにおいて明確になった事項を体系的に整理した結果である。

当委員会は防災科学技術研究所に設置された委員会であると同時に、その検討内容は地震調査研究推進本部政策委員会の「成果を社会に活かす部会」に提言され、同部会の討議に付されるという趣旨で運営されてきた。従って、第一義的にはこの提言は成果を社会に活かす部会に向けて発せられるものである。しかしながら、提言の内容は同部会の直接的な検討課題を含むものの、むしろ地震動予測地図の作成者や、工学利用を実践する専門家へのメッセージが多くを占めている。こうした外部への発信についても、同部会で積極的に取り組まれることを要望するものである。

提言の主旨は、既製品としての地震動予測地図をどう使うかではなく、地震動予測地図の工学利用の可能性、そのために必要な事項に関する作成者への要請、これらが実現されたうえで工学利用の具体的方向、工学活動の社会的関連の課題などについて整理を行った結果であり、地震工学的活動を軸にしながら、関連する事項についてできるだけ広い視野を保持するよう努めた。その結果、提言の対象を整理すると、地震動予測地図作成者への提言、社会との係わりに関して成果を社会に活かす部会での検討事項の提言、および地震動予測地図の工学的利用者への提言からなる3部構成の提言とした。

以下に、地震動予測地図の全国概観図が平成16年度中の完成することを見通してとりまとめた提言を示す。

1. 地震動予測地図の作成者への提言（作成の技術的観点／今後に対する政策的観点）

1.1 地震ハザードの共通情報基盤としての意義―地震および基盤地震動について理学的に最高のものを。

- (1) 地震動予測地図作成の事業は、生成された地図を表示するだけでなく、地震ハザードの共通情報基盤を形成するデータベースとしての機能を果たすべきであり、そこに工学利用の大きな可能性がある。特に、地震および基盤地震動について、理学的に最高水準のものを実現すべきである。
- (2) 確率論的地震動予測地図は全国的な概観と相対的な地域間比較、シナリオ地震地図は特定の地震シナリオに対する詳細な地震動分布と、それぞれの目的に応じて作成されており、現段階では両者の間に方法論的なギャップがある。将来は、すべてを詳細法で計算し、これを加重平均することにより確率評価を行える状況、すなわち両者が方

法論を共有するシームレスな関係となるよう高度化の努力が傾注されるべきである。

- (3) 距離減衰式に関し、北日本版において異常震域の効果を考慮する新たな開発が行われた。簡易的手法においても、このような改善が必要な他地域について、同様の改善が進むことが期待される。
- (4) 地震動予測地図作成プロジェクトを通して形成されつつある理工学の協力の活動を将来にわたり育てて行くことが重要である。それは、評価手法に関する専門家間の合意形成と標準化の努力、学術や技術の進歩を適切に反映する更新の努力などが有効に機能する仕組みとすべきである。

1.2 表示項目の多様性—工学サイドで多様な技術的活動ができる（活動の自由度ある）インターフェースを。

- (1) 工学的利用において必要となる多様な地震動パラメータを発信すべきである。例えば、確率論的地震動予測地図については震度以外に最大加速度・最大速度・応答スペクトル・SI 値など、シナリオ地震地図ではこれらに加えて波形を含めること、などである。
- (2) 地震動予測地図の工学利用に係わる発信の対象は多様であり、1) 詳細な解析担当者（高度システム—建物・ライフライン・プラント関係者 etc.）、2) 一般エンジニア（設計・診断）、3) 防災担当者（主として行政）、4) 非専門家（政策決定者・地域リーダー・市民）等多岐にわたる。それに応じて、発信内容は1) 詳細情報（設定条件、基本データ、プロセス、不確定性情報、多様な地震動パラメータ）、2) 簡潔な情報（たとえば、基盤における速度の分布地図）、3) 定性的表現（ランクづけ etc）等、論理的整合性を保持しつつ多様な表現を用いることが重要である。
- (3) 工学利用においては、ハザードマップからリスクマップへの変換が重要である。そのためには、最終的な確率論的地震動予測地図だけでなく、算出過程に現れるパラメータに工学利用上重要な情報があるので、それらを発信情報に加えるべきである。例えば、特定サイトに対して、各地震ソースからの影響度（確率を固定する場合には地震動強度と個別ソースの影響度、地震動強度を固定する場合には全体確率と個別ソースの影響度）の数値を示すことなどである。
- (4) 確率論的地震動予測地図については、種類が異なる多様な震源の効果を集積するという長所を活かすとともに、個々の震源の影響が隠されるという欠点を補って、成果が誤解なく活用されるよう、きめ細かい情報提供が必要である。例えば海溝型地震と内陸活断層型地震では発生確率に大きな違いがあること、また両者では地震動の諸特性が異なることから、それらの影響を重ね合わせた確率論的地震動予測地図だけでなく、それぞれの分類毎の地図をあわせて提供し、またそれぞれの影響度を表す数値を示すべきである。特にこれら2つのタイプの地震の工学的影響は周期によって異なるので、周期別の影響度を示すことが工学利用の重要な基盤となる。

1.3 結果のみでなく、プロセスの開示ー不確定性評価のプロセスが分かるように。

- (1) プロセス開示の必要性：地震動予測地図を生成する基本として与えられているデータを示すべきである。これにより、現代的要請である性能ベースの設計、ライフサイクルコスト、保険金額の算定、などの地震防災ニーズに対して、現状の技術体系のもとで地震動予測地図を活用できる。
- (2) 確率論的地震動予測地図について：地震活動領域の諸元（M-N 関係のタイプとパラメーター、それぞれの変動係数など）地震動に関する諸元（距離減衰式に関する説明、係数に与えたばらつき、地震基盤から工学的基盤及び表層地盤へ至る動的地盤物性とそのばらつき、など）を開示する。
- (3) シナリオ地震地図について：シナリオ地震のソースパラメータ（断層位置・形状、アスペリティーの分布、断層の動的パラメータ、発生確率、地下構造、それらのばらつき、など）。シナリオ地震地図におけるシナリオ選定のルールを明示する。

1.4 公表システムの作成ー有効なユーザーインターフェイス形成へ／条件設定に関する吟味が可能なように。

- (1) 情報開示の手段は基本的にインターネットによるが、受け手の設備状況に応じて DVD など適切な媒体を組み合わせるべきである。
- (2) ハザード計算におけるプログラムをできる限り公開し、ユーザーが条件を変えて計算し直す環境を整備すべきである。具体的には、確率論的地震動予測地図の算出における地震ソース毎の条件を再設定した計算、詳細法によるシナリオ地震地図の対象になっていない活断層について簡便法（距離減衰式を用いる）によるシナリオ地震による地震動の概略推定地図の作成、といったサポートである。
- (3) 丁寧な解説が重要である。利用に関する可能なメニュー（網羅的でなく現実的に）、確率論的地震動予測地図とシナリオ地震地図の主旨と両者の関連（融合）、利用に関する質問・回答のページ設定など。

1.5 適切な更新の重要性ー学術・技術の進歩を反映できるように。

- (1) 学術的な進歩による発信情報の高度化、工学利用技術の進歩による発信内容の多様化等が実現するよう、地震ハザードの共通情報基盤としての地震動予測地図を定期的に更新する仕組みを確立すべきである。
- (2) サイエンスに基づく地震動予測地図と工学利用における地震リスク地図の関係が継続的に機能するためには、それぞれの作成条件と利用条件を明示して理解し合う関係を推進することが必須である。作る側と使う側が連携できる仕組みを作り、両者がすれ違いにならぬよう図るべきである。例えば、本報告書に提案する「地震ハザードステーション構想」はその参考になろう。

2. 成果を社会に活かす部会での検討事項の提言—地震動予測地図の理解において、低頻度巨大災害の視点/地震の特徴により変化する災害のクセへ正確な認識を育てる。

- (1) 内陸の活断層における地震の発生確率は地震動予測地図における超過確率に直接影響するから、地震動予測地図においても、一般国民向けの資料において、安心情報と受け取られる結果とならぬよう、その表現には細心の注意を払うことが必要である。すなわち、長期評価結果について、確率値とともに定性的表現を組み合わせるに至ったのと同主旨の検討を地震動予測地図についても行うべきである。
- (2) 一方、地震防災の専門家（1.2(2)において1)～3)が該当）に対しては、例えば30年の超過確率3%は決して低い確率ではなく、「低頻度巨大災害」の観点から対策に取り組む対象であるとの認識の普及に努力すべきである。
- (3) 発生頻度が高く広域的影響を持つ海溝型地震と低頻度で影響範囲が限られている内陸型（活断層）地震の影響を合成する結果後者の影響を消去してしまうことのないよう工夫が必要である。

3. 工学利用側への提言

3.1 基本的方針—理工学の有効な接点／地震ハザードの共通情報基盤としての活用

- (1) 地震動予測地図は、地震学の最新成果に基づく知見を共通基盤として生かそうとする、理学分野からの働きかけの意味を持つ。その成果を工学目的に活用することは、地震ハザード評価の分野に新たな展開をもたらす可能性が大きい。理工学の協力の場合として、これまでの個別課題毎の協力とは異なる包括的な枠組みの可能性を現実的に推進すべきである。
- (2) 工学的な地震危険度はハザードマップだけでなくリスク評価に結びつくことにより意義を持つが、異なる時代の間で共通性があるのは地震動であり、地震被害の内容は時代によっても構造物によっても変わる。従って、工学利用において、地震動をベースに考えることが地震リスクの正確な把握につながる。この意味で、地震動予測地図作成プロジェクトは工学的にも重要な意味を持つと考えるべきである。
- (3) 地震動予測地図の工学利用が可能な領域は、個別構造物や個別システムを対象とする設計・耐震性検証から、地域のマクロな被害想定や構造物・施設群の評価を伴う防災目標の設定や保険の評価など多岐にわたる。地震ハザードの共通情報基盤として地震動予測地図の積極的活用を図るべきである。

3.2 地震動予測地図の工学利用における評価の規範

- (1) 規範 I—個別構造物の耐震性能の絶対評価（安全性の明示）が求められる場合：個別構造物や個別システムの設計・耐震性能検証（サイトスペシフィックな課題）においては、一部に確率論的地震ハザード評価（確率論的地震動予測地図）を活用した事例が見られるようになりつつあるが、主としてシナリオ型地震動評価（シナリオ地震地図）が用いられてきた。特に、高度な動的解析等のシミュレーション技法を駆使して

耐震検討を行う場合には地震動の波形が必須条件となる。現段階の地震動予測地図では、このような条件はシナリオ地震地図においてのみ実現可能である。また、個別構造物や個別システムの設計における耐震性能の評価は、オーナーとの関係において絶対評価（安全性の明示）が求められることが多い。この状況下においては、決定論的に示されるシナリオ地震地図の方が理解が容易である。ただしこの場合でも、不確定性が高い地震現象を扱っていることを忘れるべきではない。対象とするシナリオ地震の発生確率や、震源メカニズムと地震動の生成・伝播における不確定性に基づく総合的な地震動の発生確率を、リスク認識に係わる情報として併せて活用すべきである。

- (2) 規範 II—包括的な防災目標設定や優先順位づけのために相対評価が求められる場合：日本全体や特定の地域において防災・減災の目標を設定する場合、防災投資やストック管理のためのリスク評価など、構造物群・システム群の耐震性能評価が求められる場合には、将来にわたり発生しうるすべての地震シナリオを考慮した地震ハザード評価とリスクの地域的分布の相対評価が求められる。また、マルチハザード評価の問題では、地震リスクと台風・水害・日常の事故などのリスクとの相対比較から重要なハザード要因を特定することが求められる。これらの状況の下では、確率論的地震動予測地図が必要なハザード情報を与えるものであり、その積極的活用を図るべきである。この場合でも、部分的な詳細検討が必要な場合にはシナリオ地震地図を併用することは有効である。

3.3 地震工学高度化の要請と地震動予測地図の活用

地震防災課題はすべて、地震ハザードに関する大きな不確定性のもとでの意思決定問題である。この問題に正面から取り組むことは地震リスク評価の問題であり、確率的評価が不可欠となる。それは工学システムの地震リスク評価においてすでに典型的に見られるものであり、個別構造物の設計の分野においても、性能設計の方向に時代が踏み出している以上避けて通れない問題である。この方針を追求していくうえで、地震動予測地図の活用は、これまで述べたように大きな可能性を持つと考えるべきである。

地震リスク評価の信頼性を向上させるために、地震ハザードについては 1.1(2) に述べた理学的な面での高度化の努力が要請される。一方、構造物の損傷評価に関しては、いまだ経験工学的性格が強いこと、構造物の真の強度については未だ不明な点が多いことなどから、設計モデルと被災する構造物の現実の間には少なからずギャップが存在する。より洗練された地震リスク評価を目指すためには、構造物の損傷評価においてもこのギャップを無くし、確率論的评价に耐える場を形成するという、地震工学高度化の努力が強く要請される。地震工学の分野は、すでに性能設計の時代に歩み始めており、そこでは構造物の耐震性能はリスク規範により評価されることから、これは重要な課題である。

以上

1. 総説

1.1 地震動予測地図工学利用検討委員会設立の経緯

独立行政法人防災科学技術研究所では、地震調査研究推進本部地震調査委員会が進めている地震動予測地図の作成に資するため、特定プロジェクト「地震動予測地図作成手法の研究」を平成13年度より行っている。これと並行して、地震動予測地図を有効に活用するための討議の一環として、所内に地震動予測地図工学利用検討委員会（以下、工学利用委員会と略称）を平成14年6月に設置した。委員会の目的は、地震動予測地図を工学目的に活用できる分野とその方法を具体的に検討することである。防災科学技術研究所内に設置された委員会であるが、その結果は、政策委員会の「成果を社会に活かす部会」（部会長：廣井 脩）に提言され、同部会の検討事項として討議されることが前提とされた。

1.2 委員会の方針

「地震動予測地図の作成」においては、（1）地震発生の不確定性を反映した地震動分布（確率論的地震動予測地図）、および（2）特定の震源メカニズムを想定した場合の地震動分布（シナリオ地震による地震動予測地図）の2種類の表現形式を取ることとして作業が進められている。両者とも、従来工学分野で多数の試みがなされ、ノウハウが蓄積されてきているが、工学目的の開発では、それぞれ目的別に手法が検討され、応用されることが多い。それは工学という実用的な目的行為においては当然のことであるが、個別に開発された手法の目的合理性を超えてそれらの相互関係が検討されることは少ないし、地震・地震動という共通の現象を対象にしながら、手法が持つ普遍性を追求する動きは活発とは言えなかった。

こうした状況のもとで、地震調査研究の一環として進む地震動予測地図は、地震学の最新成果に基づく知見を共通基盤として生かそうとする、理学分野からの働きかけの意味を持つもので、これが工学的活動とどう結びつくかを議論することは、地震ハザード評価の分野に新たな展開をもたらす可能性がある。工学分野からも、この議論を真剣に受け止めることが重要と考えられる。

このような観点から、工学利用委員会は、地震動予測地図が工学的に持ちうる意義と活用の可能性を検討し、そこから導かれる提言をとりまとめることを目標に活動を行ってきた。ただ、提言は、既製品として提供される地震動予測地図をそのままどう使うかということではなく、工学的活用というエンドユーザーの需要を満たすために、地震動予測地図の作成法やそこから提供されるべき情報の内容に対する提言と、それらが達成されればこういう活用が可能というユーザーへの提言からなる。

1.3 地震動予測地図の工学利用に関する討議の要点

地震動予測地図の工学利用を検討するに当たり、討議のポイントを以下のように整理した。

(1) 工学利用に必要な地震動情報の多様性

地震防災対策における工学の役割は多様であり、それに従って、必要な地震動情報の内容が異なる。すなわち、リスク評価に必要な発生確率情報を含む地震動分布、特定の重要施設の地震防災を扱うサイトスペシフィックな問題に必要な詳細な地震動情報、地域の被害予測やライフラインのような広がりを持つシステムの防災課題に必要なシナリオ型地震動など、多岐にわたる。そこで必要な地震動情報は、最大加速度／速度／震度、応答スペクトル、卓越周期、継続時間、非定常スペクトルなど多様である。

(2) 地震動と地震力の相違

自然現象としての地震動（地表面、工学的基盤、地震基盤などでの地震動）と、工学システムに作用する地震力（地盤—構造物基礎の相互作用、表層地盤の変形、液状化、地震荷重など）は同一ではない。地震動から地震力への変換の過程が不可欠であり、それが上記（1）に述べたような目的に応じた工学的活動への入力として意味を持つ。理学的に生成される地震動情報（地震動予測地図）が、工学的実践における地震力の評価に必要な情報を提供するか否かが地震動予測地図の工学利用の決め手となる。

(3) 確率論と決定論の確執の克服

地震防災は将来発生する地震への対策である。特定の活断層を見ても、数千年～数万年の地球物理学的時間スケールの中では地震は定常的に発生するとされるのに対し、地震防災が対象とする数十年～100 年という人間社会の時間スケールの中では、地震発生頻度は非定常に変化し、また発生時期も地震動強度もきわめて大きな不確定性を持つ。従って、地震防災の工学的実践は、常に「不確定性のもとでの意思決定」となる。このことから、不確定性を評価する手法が必要となる。不確定性を組織的に評価する手法には、確率論、ロジックツリー、ファジー理論などがあるが、その中で確率論は最も基本的な道具である。この意味で、地震動予測地図作成プロジェクトにおいて確率的に不確定性評価が行われることの意味は大きい。

工学の世界でも理学の世界でも、我が国では確率論を用いることへの抵抗が必ずある。それは、確率論という理論体系と現実に利用可能なデータ量のギャップに起因することが多い。しかしながら、不確定性の評価を恣意的でなく組織的に行うことの必要性を考えると、その道具としての確率論を忌避する理由はないと考える。ただし、「確率～%」という結果のみを示すだけでは工学的意義は薄く、確率的評価のプロセスを明確に示すことがきわめて重要である。これにより、工学で避けて通れない不確定性のもとでの意思決定に

1. 総説

組織的な評価方法を与えることになる。

(4) 多様な工学的実践をサポートするものであること

地震工学において、阪神・淡路大震災の教訓から、固定的に定められた地震荷重で工学システムの耐震性評価を縛る時代から、自然をありのままに再現して地震動シミュレーションを行い、これと構造特性との関係を厳密に解析して、これに基づき建物や社会基盤施設に作用する地震力を推定する努力が行われている。その手法は多岐にわたり、それは「地震工学の自由化の時代」といってよい。地震動予測地図作成プロジェクトは、こうした動きを制約するのではなくサポートする情報を提供することが強く望まれる。

こうした観点を浮き彫りにできるような討議を計画し、検討を重ねてきた。

1.4 委員会の活動経過

1.4.1 委員会における討議の概要

工学利用委員会が発足した平成14年6月から平成15年11月までは、地震動予測地図が持つ意義と地震動予測地図作成への要請事項を明確にすることを目的として、工学利用の可能性を持つ事例の掘り起こし、工学的ニーズの明確化、地震動予測地図作成手法への要請、不確定性評価のため確率論を用いることの意義、結果の発信法、いかにすればユーザー指向の内容とできるか、などの観点から討議を行った。その後はまとめに入り、委員会としての提言のとりまとめと報告書の作成に集中した。

工学利用委員会の討議で取り上げた課題を整理すると以下のようである。

a. 地震動予測地図作成に関する課題

- ・ 地震調査研究推進本部の概要及び活動状況（文科省・前田補佐）
- ・ 地震動予測地図作成プロジェクトの概要（藤原委員）
- ・ 活断層での地震発生確率の評価法（東大・島崎教授）
- ・ 距離減衰式（藤原委員）
- ・ 地震動予測地図の公開システム（藤原委員）

b. 地震動予測地図の工学利用に関する課題

- ・ 建築サイドの利用の立場から（福和委員）
- ・ 震災ポテンシャル評価のための曝露人口指標（能島委員）
- ・ 地震リスク評価への展開（石川委員）
- ・ ライフライン災害リスクマネジメントから見た地震動予測（当麻委員）
- ・ 原子力施設の確率論的安全性評価手法—地震 PSA（蛭沢委員）
- ・ 学校の耐震化推進における地震動予測地図の役割（東大・久保教授）
- ・ シナリオ型地震動予測の工学的応用事例（阪神高速道路公団・長沼課長）

- c. 学会の活動・国際的視点
 - ・ 日本建築学会における地震荷重検討（高田委員）
 - ・ 土木学会における設計地震動・地震荷重評価の動向（当麻委員）
 - ・ 米国における地震動予測地図プロジェクト（翠川委員）
 - ・ ISO 関連での設計地震動の考え方（井合委員）
- d. 地震動予測地図の作成・活用に関する包括的課題
 - ・ 地震動予測地図活用と社会への発信のありかた（立命館大・土岐教授）
 - ・ 地震動予測地図の作成・工学利用・社会との接点の包括的検討（ワークショップ^o参加者）

1.4.2 外部からの意見を吸収するための活動

（1）地震動予測地図工学利用ワークショップ

（平成15年10月29日：防災科学技術研究所研究交流棟にて／参加者157名）

工学利用委員会では、できる限り多くの人々に委員会活動の内容を報告し、意見を得る討議の場を持つことが重要と考え、以下のような4部構成からなる公開ワークショップを実施した（プログラムの詳細は付録D参照）。

- i) 地震動予測地図の作成手法について
- ii) 地震動予測地図の工学利用について
- iii) 特別講演（東京大学名誉教授・柴田 碧博士）
- iv) まとめ

このうち、i)、ii)では、それぞれの課題推進のリーダーの位置にある研究者と工学利用委員会のメンバーのそれぞれからの話題提供と、お願いした討議者からの発言をきっかけとして、フロアからの活発な意見を得て、有意義な意見交換が行われた。

iii)の特別講演では、柴田 碧先生の長年にわたる地震工学のご経歴で培われた地震動・地震荷重に関わる見解を、本ワークショップのテーマに縛られない自由な視点から披瀝して頂いた。

最後に iv) のまとめでは、i)、ii) で討議された内容をできる限り網羅的に抽出し、それを体系的に理解することを試みた。こうして集約されたワークショップでの記録をもとに、発言者全員へのフィードバックを行ったうえで討議録を作成した。

ワークショップにおいて提出された多岐にわたる論点は、それぞれについて具体的な理学的知見の現実、工学的実践、それらに基づく社会的対応の認識に立脚するものであり、きわめて包括的かつ現実的であった。以下のリストに、討議された課題の範囲を示す。それは、地震動予測地図の工学利用という専門性の高い領域に関する討議にあってもその内容はこれほどの広がりを持つことを確認させるものである。

1. 総説

- a. 地震動予測地図の工学利用に係わる人々
 - ・ 詳細な解析担当者（高度システム—建物・ライフライン・プラント etc.）
 - ・ 一般エンジニア（設計・診断）
 - ・ 防災担当者（主として行政）
 - ・ 非専門家（政策決定者・地域リーダー・市民）
- b. 地震動予測地図工学利用の領域
 - ・ 個別対象（設計・検証）
 - ・ 群としての評価（防災目標の設定・保険）
- c. 地震動予測地図の工学利用における評価基準
 - ・ 個別施設の絶対評価では決定論的方法が優位
 - ・ 施設群や地域における相対評価では確率論的方法が優位
- d. 地震動予測地図工学利用のための発信内容
 - ・ 詳細情報（設定条件、基本データ、プロセス、不確定性情報、多様な地震動パラメータ）
 - ・ 簡潔な情報（たとえば、基盤における速度の分布地図）
 - ・ 定性的表現（ランクづけ etc）

本ワークショップの討議内容は、テープ起こしの後、全発言者へのフィードバックを経て、討議録として本報告書の付録Dに収録した。

本ワークショップでは、地震動予測地図の作成手法への討議のみでなく、その活用について、工学的利用に関わる専門家から、現場に即した多くの意見が述べられ、またそれが地震工学の次の進歩を促すものであるとの展望も寄せられた。その内容は、委員会での確認を経て、本委員会の提言に生かされている。ワークショップの討議は、本委員会のその後の検討内容の幅を広げ、本委員会が真に作成者と利用者の橋渡しの役割を果たすべき論調へと舵を切る契機となった。

（2）地震動予測地図の社会的影響に関する意見交換会

当委員会は地震動予測地図の工学利用という専門性の高い課題を検討することを役割としているのであるが、上記ワークショップでの討議からも明らかなように、工学利用もその幅は広く、地震工学的に詳細な検討を行う専門的立場から防災行政に関わる担当技術者まで多くの立場がある。これらの立場によって一般社会との関わりの広さ、深さが異なる。このような視点に立てば、工学利用委員会においても、社会への発信法という視点をないがしろにすべきでないことが明かである。例えば数%という地震発生確率が安心情報として社会に伝わってしまうなどの問題は、当委員会においても、社会に向かう責任として明確な視点を持つべき課題である。

この点に関し、地震工学の専門家として国・自治体の防災行政に関わる幅広い活動を展

開される立命館大学・土岐憲三教授が明確な意見を多くの機会に率直に表明されていること、それは地震動予測地図の意義に大に関わるものであることを、かねてから認識していた。そこで、この問題に関する当委員会の視点形成に資するため、土岐教授との直接討議を企画し、幸い先生のご賛同を得て、平成 16 年 3 月 12 日に、2 時間余にわたり意見交換の機会を持った。

討議の焦点は、せつかくの調査研究の成果が、発信の方法が不適切なために、本来の目的である地震防災力向上への貢献とは逆の方向に安全情報として国民から受け止められる不合理さを防ぐことにあった。討議は具体的課題を俎上に乗せて進行し、その結果、i) 内陸の活断層における地震発生の長期予測評価の確率は地震動予測地図における超過確率に直接影響するから、地震動予測地図においても、一般国民向けの資料において、安心情報と受け取られる結果とならぬよう、その表現には細心の注意を払うことが必要である、ii) 発生頻度が高く広域的影響を持つ海溝型地震と低頻度で影響範囲が限られている内陸型（活断層）地震の影響を単純に重ね合わせて後者の影響を消去してしまうことのないよう工夫が必要である、という 2 点において、土岐教授と工学利用委員会の間で共通の認識を得るに至った。

この結果は、その後の工学利用委員会での検討と、成果を社会に活かす部会への課題提起などの活動に反映された。

1.5 政策委員会成果を社会に活かす部会への報告

冒頭に述べたように、本委員会の討議結果は成果を社会に活かす部会での討議に付されるという主旨で運営されてきた。委員会から同部会への報告は、平成 14 年 6 月 27 日（委員会発足の報告と方針説明）、平成 15 年 8 月 19 日（委員会討議の経過報告）、および平成 16 年 6 月 3 日（委員会の活動経過および提言内容の報告）の 3 回にわたり行われた。これらの報告と討議の結果、本委員会の検討結果は、成果を社会に活かす部会の報告書の中で、工学利用の方向性を示す形で取り入れられる見込みである。

1.6 委員会提言の骨子

以上に述べてきた活動をふまえて、委員会の提言をとりまとめた。提言はかなりの長文にわたるもので、その詳細については本報告書の冒頭を参照されたい。ここでは提言の骨子のみを示すこととする。

1. 地震動予測地図の作成者への提言（作成の技術的観点／今後に対する政策的観点）
 - 1.1 地震ハザードの共通情報基盤としての意義－地震および基盤地震動について理学的に最高のものを。
 - 1.2 表示項目の多様性－工学サイドで多様な技術的活動ができる（活動の自由度

1. 総説

ある) インターフェースを。

- 1.3 結果のみでなく、プロセスの開示—不確定性評価のプロセスが分かるように。
- 1.4 公表システムの作成—有効なユーザーインターフェイス形成へ／条件設定に関する吟味が可能なように。
- 1.5 適切な更新の重要性—学術・技術の進歩を反映できるように。
2. 成果を社会に活かす部会での検討事項の提言—地震動予測地図の理解において、低頻度巨大災害の視点/地震の特徴により変化する災害のクセへ正確な認識を育てる。
3. 工学利用側への提言
 - 3.1 基本的方針—理工学の有効な接点／地震ハザードの共通情報基盤としての活用
 - 3.2 地震動予測地図の工学利用における評価の規範
 - 3.3 地震工学高度化の要請と地震動予測地図の活用

1.7 むすび

以上、地震動予測地図工学利用検討委員会の活動経過とその意義を述べてきた。地震動予測地図は、広い活用の可能性を持つものであるが、委員会の発足当初は、その工学的利用という専門性が強い分野での検討を行うという認識が強かった。しかしながら、討議を重ねる中から、工学的利用の対象とその方法論は、実際は社会との繋がりの中で多様な姿を取ることが明確にされ、その結果本委員会もこうした多様性を視野に捉えながら個々の専門領域の整理を行うという視点を持つに至った。

さらに特筆すべきは、本委員会の討議が、真の意味での理工学の共同討議の場を形成してきたことである。この活動が、今回の地震動予測地図作成プロジェクトにとどまらず、今後の地震学と地震工学の協力関係を育てる契機となることを念願するものである。

参考文献

- 1) 亀田弘行:地震動予測地図の活用—工学利用について、平成 14 年度・地震動予測地図ワークショップ予稿集、平成 15 年 3 月 26 日、pp.85-88.
- 2) 亀田弘行:地震動予測地図の工学利用について—工学利用検討委員会の提言へ向けて—、平成 15 年度・地震動予測地図ワークショップ予稿集、平成 16 年 3 月 26 日、pp.105-113.
- 3) 藤原広行:防災科研における地震動予測地図作成手法の研究について、平成 14 年度・地震動予測地図ワークショップ予稿集、平成 15 年 3 月 26 日、pp.89-101.
- 4) 藤原広行:防災科研における地震動予測地図作成プロジェクトについて、平成 15 年度・地震動予測地図ワークショップ予稿集、平成 16 年 3 月 26 日、pp.73-94.

2. 地震動予測地図作成の意義

2.1 地震動予測地図作成の概要

2.1.1 背景

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、6,400名を超える犠牲者を出し、我が国の地震防災対策に関して多くの課題を残した。特に地震に関する調査研究に関しては、その研究成果が国民や防災機関に十分伝達される体制になっていないとの指摘がなされた。この地震の教訓を踏まえ、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、議員立法により、平成7年7月に地震防災対策特別措置法が制定された。同法に基づき、行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明確にし、これを政府として一元的に推進するため、政府の特別の機関として、地震調査研究推進本部が総理府に設置（現在：文部科学省に設置）された。地震調査研究推進本部には、政策委員会と地震調査委員会が設置され、(1)総合的かつ基本的な施策の立案、(2)関係行政機関の予算等の調整、(3)総合的な調査観測計画の策定、(4)関係行政機関、大学等の調査結果等の収集、整理、分析及び総合的な評価、及び(5)それらの評価に基づく広報がその役割とされた。

地震調査研究推進本部は、平成11年4月に、今後10年間程度にわたる地震調査研究の基本方針、活動の指針として、「地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策」（以下では総合基本施策と呼ぶ）を策定した。総合基本施策では、地震防災対策の強化、特に地震による被害の軽減に資する地震調査研究の推進を基本的な目標に掲げ、当面推進すべき地震調査研究として以下の4つを主要な課題とし、このために必要な調査観測や研究を推進するとした。その4つの課題とは、①活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成、②リアルタイムによる地震情報の伝達の推進、③大規模地震対策特別措置法に基づく地震防災対策強化地域及びその周辺における観測等の充実、及び④地震予知のための観測研究の推進である。

特に、地震動予測地図の作成は、推進すべき主要課題の筆頭に掲げられ、これに基づき地震調査研究推進本部地震調査委員会では、平成16年度末を目途として、「全国を概観した地震動予測地図」の作成が開始された。独立行政法人防災科学技術研究所では、「全国を概観した地震動予測地図」の作成に資するため、平成13年4月より、特定プロジェクト研究「地震動予測地図作成手法の研究」を立ち上げ、地震動予測地図の作成に資する技術的な検討及び地図の作成作業を行ってきた（図2.1.1）。本プロジェクト研究においては、地震動予測地図作成に必要な技術的問題に関しての研究開発、及び、地震調査委員会及び関連する部会・分科会の指導の下に、実際の地震動予測地図作成に関する作業を実施している。

地震動予測地図作成プロジェクトの位置づけ

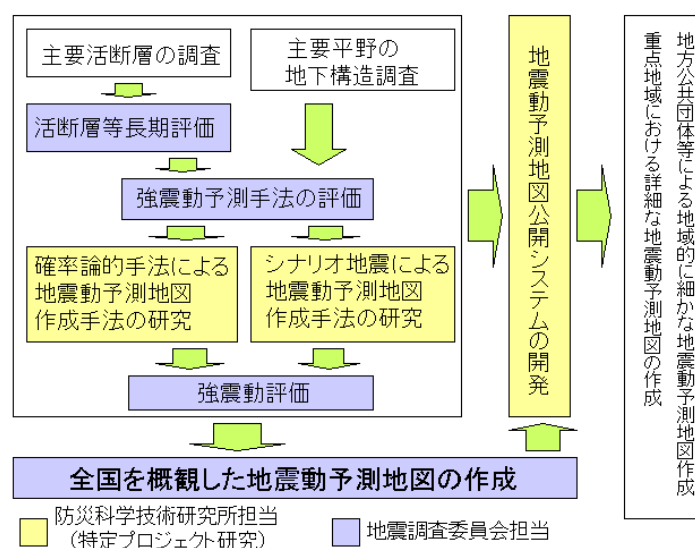


図 2.1.1 地震動予測地図作成プロジェクトの役割分担

2.1.2 地震動予測地図とは

「全国を概観した地震動予測地図」は、地震発生の一時的な確率評価と、地震が発生した時に生じる強震動の評価を組み合わせた「確率論的地震動予測地図」と、特定の地震に対して、ある想定されたシナリオに対する詳細な強震動評価に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」の2種類の性質の異なる地図から構成されている。

2.1.3 確率論的地震動予測地図

地震の発生及びそれに伴う地震動の評価（地震ハザード評価）は、現状では数多くの不確定要素を含んでいる。現状の地震学・地震工学のレベルでは、将来発生する可能性のある地震について、地震発生の日時、場所、規模、発生する地震動等について、決定論的に1つの答えを準備することは困難である。こうした不確定性を定量的に評価するための技術的枠組みとして有力と考えられているのが、確率論的手法である。地震調査委員会が進めている地震動予測地図の作成においては、地震発生の不確定性及び強震動評価の不確定性を確率論的手法を用いて評価する試みがなされている。

確率論的地震動予測地図を作成するために、以下に述べる手法に従った地震ハザード評価が採用されている。地震ハザード評価とは、ある地点において将来発生する「地震動の強さ」、「対象とする期間」、「対象とする確率」の3つの関係性を評価するものである。確率論的地震動予測地図作成における地震ハザード評価の大まかな手順は、以下に示す通りである。

表 2.1.1 地震活動のモデル化

地震の分類 (地震調査委員会による)	震源位置	地震規模	地震発生の 確率モデル
98 主要断層帯で発生する固有地震	震源を特定	固有地震	BPT 分布又は ポアソン過程
海溝型の大地震	震源を特定	固有地震	BPT 分布又は ポアソン過程
98 主要断層帯以外の活断層で発生する 地震 (グループ 1 の地震)	震源を特定	固有地震	ポアソン過程
98 主要断層帯に発生する固有地震以外 の地震 (グループ 2 の地震)	(グループ 5 の地震としてモデル化)		
海溝型プレート境界で発生する大地震 以外の地震 (グループ 3 の地震)	ランダムに分布	G-R 式	ポアソン過程
プレート内で発生する地震 (グループ 4 の地震)	ランダムに分布	G-R 式	ポアソン過程
内陸の地殻内で発生する地震のうち震 源を予め特定しにくい地震 (グループ 5 の地震)	ランダムに分布	G-R 式	ポアソン過程
その他の地震	ランダムに分布	G-R 式	ポアソン過程

- ① 地震調査委員会による地震の分類に従い (表 2.1.1)、対象地点周辺の地震活動をモデル化する。
- ② モデル化したそれぞれの地震について、地震規模の確率、対象地点からの距離の確率、地震の発生確率を評価する。
- ③ 地震の規模と距離が与えられた場合の地震動強さを推定する確率モデルを設定する。モデル化された各地震について、対象期間内にその地震により生じる地震動の強さが、ある値を超える確率を評価する。強震動評価手法としては、簡便法と呼ばれる手法を採用している。具体的には、対象地点から断層面までの最短距離を用いた距離減衰式に基づき、工学的基盤における最大速度を求め、これに表層地盤の速度増幅率を乗じることにより地表における最大速度を求め、最大速度と計測震度との関係式を用いて地表の震度を評価する。
- ④ 以上の操作をモデル化した地震の数だけ繰り返し、それらの結果を足し合わせることで、全ての地震を考慮した場合に、対象期間内に生じる地震動の強さが、ある値を少なくとも 1 度を超える確率を計算する。

このようにして、地点毎に地震ハザード評価を実施し、地震動の強さ・期間・確率のうち 2 つを固定して残る 1 つの値を求めた上で、それらの値の分布を示したものが「確率論的地震動予測地図」である。

具体的なハザード曲線の計算は、以下の手順に従って行う。着目地点において、その周辺で発生する地震 (あるいは地震群) によって t 年間に少なくとも 1 回地震動の強さが y を超える確率 $P(Y > y; t)$ を、一般にハザード曲線と呼ぶ。ハザード曲線は、地点の周辺で

発生するいずれの地震（群）によっても y 以下である確率を 1 から引くことにより、次式で評価される。

$$P(Y > y; t) = 1 - \prod_k \{1 - P_k(Y > y; t)\} \quad (2.1.1)$$

ここに、 $P_k(Y > y; t)$ は k 番目の地震（群）によって t 年間に少なくとも 1 回地震動の強さが y を超える確率であり、以下の (1) および (2) のように算定される。なお、以下の記述では、地震の規模と距離に関して離散的な表現としている。

(1) 震源を予め特定できる地震

これらの地震の発生確率は、過去の地震活動についてある程度の情報が得られている一部の地震については更新過程*あるいは時間予測モデルといった非定常な地震活動を表すモデルに基づき算定され、残りのものについては定常ポアソン過程を仮定して評価される。この場合、 k 番目の地震によって、地震動の強さが t 年間に少なくとも 1 回 y を超える確率 $P_k(Y > y; t)$ は、以下のようにして算定することができる。

a) 非定常な地震活動モデルに基づき地震発生確率が算定される場合

期間 t の間に複数回の地震発生を考慮する場合、それぞれの地震時の地震動の強さが互いに独立であると仮定すると、地震動の強さが t 年間に少なくとも 1 回 y を超える確率 $P_k(Y > y; t)$ は、

$$P_k(Y > y; t) = 1 - \sum_{l=0}^{\infty} \{P(E_k^{[l]}; t) [1 - P(Y > y | E_k)]^l\} \quad (2.1.2)$$

で表される。ただし、 $P(E_k^{[l]}; t)$ は期間 t の間に l 回地震が発生する確率、 $P(Y > y | E_k)$ は地震 k が 1 度発生した条件下で地震動の強さが y を超える条件付確率であり、

$$P(Y > y | E_k) = \sum_i \sum_j P(Y > y | m_i, r_j) P_k(m_i) P_k(r_j | m_i) \quad (2.1.3)$$

となる。ここに、 $P_k(m_i)$ は k 番目の地震における規模の確率関数、 $P_k(r_j | m_i)$ は規模が m_i の条件下での距離の確率関数、 $P(Y > y | m_i, r_j)$ は地震の規模が m_i 、距離が r_j の時に地震動の強さが y 以上となる条件付確率である。距離減衰式を用いて地震動の強さを評価する場合には、 $P(Y > y | m_i, r_j)$ は距離減衰式の中央値 $\bar{Y}(m_i, r_j)$ とそのばらつき（中央値を 1 とする対数正規変量 U で表されることが多い）を用いて、

$$P(Y > y | m_i, r_j) = 1 - F_U \left(\frac{y}{\bar{Y}(m_i, r_j)} \right) \quad (2.1.4)$$

* 互いに重ならない時間区間における変動が互いに独立に同一の確率分布に従うようなものをいう。更新過程のうち、指数分布に従うものをポアソン過程という。

となる。ただし、 $F_U(u)$ は U の累積分布関数である。

なお、期間 t に複数回の地震が発生する確率が無視できる場合には、式(2.1.2)は簡略化されて次式で表される。

$$\begin{aligned} P_k(Y > y; t) &= P(E_k; t)P(Y > y | E_k) \\ &= P(E_k; t) \sum_i \sum_j P(Y > y | m_i, r_j) P_k(m_i) P_k(r_j | m_i) \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

ただし、 $P(E_k; t)$ は k 番目の地震が t 年間に発生する確率であり、更新過程あるいは時間予測モデルに基づき、BPT 分布**を用いて評価される。

b) 地震の発生が定常ポアソン過程でモデル化される場合

地震の発生を定常ポアソン過程とした場合には、地震動の強さが t 年間に y を超える確率 $P_k(Y > y; t)$ は、

$$P_k(Y > y; t) = 1 - \exp\{-\nu_k(Y > y) \cdot t\} \quad (2.1.6)$$

となる。ただし、 $\nu_k(Y > y)$ は k 番目の地震によって地震動の強さが y を超える年あたりの頻度であり、

$$\begin{aligned} \nu_k(Y > y) &= \nu(E_k)P(Y > y | E_k) \\ &= \nu(E_k) \sum_i \sum_j P(Y > y | m_i, r_j) P_k(m_i) P_k(r_j | m_i) \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

となる。ここに、 $\nu(E_k)$ は k 番目の地震の年あたりの発生頻度、他はa)と同様である。

(2) 震源断層を予め特定しにくい地震

上記(1)と異なり、対象とする地震を複数の規模と距離の組み合わせから成る群として取り扱う必要がある。これらの地震は、地域区分する方法と地域区分しない方法とを併用して評価するが、地域区分する方法の場合には地震活動域ごと、地域区分しない方法ではメッシュごとに、それぞれ地震活動が一様としている。地震の規模の確率分布は上限値を有する Gutenberg-Richter の関係式から、また、距離の確率分布は地点と地震活動域あるいはメッシュとの幾何学的な位置関係からそれぞれ算定する。地震の発生時系列は、定常ポアソン過程でモデル化する。

** BPT は Brownian Passage Time の略。1次元のブラウン運動において、ある状態に注目したとき、その状態に初めて達するまでにかかる時間を T としたときに、 T が従う確率分布をいう。ここでは、ある地域で起こる一定の大きさ以上の地震の発生間隔に BPT 分布を仮定している。BPT 分布は、逆ガウス分布やワルド分布とも呼ばれている。

以上から、グループ n の地震によって、地震動の強さが t 年間に y を超える確率 $P_n(Y > y; t)$ は、次式によって算定することができる。

$$P_n(Y > y; t) = 1 - \exp(-v_n(Y > y) \cdot t) \quad (2.1.8)$$

ただし、 $v_n(Y > y)$ はグループ n の地震によって地震動の強さが y を超える年あたりの頻度であり、

$$\begin{aligned} v_n(Y > y) &= \sum_k v(E_k) P(Y > y | E_k) \\ &= \sum_k v(E_k) \sum_i \sum_j P(Y > y | m_i, r_j) P_k(m_i) P_k(r_j | m_i) \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

となる。ここに、 $v(E_k)$ はグループ n の地震を構成する k 番目の地震活動域またはメッシュにおける最小マグニチュード (=5.0) 以上の地震の年あたりの発生頻度、 $P(Y > y | E_k)$ はグループ n の地震を構成する k 番目の地震活動域またはメッシュで地震が 1 つ発生した場合に地点での地震動の強さが y を超える条件付確率、 $P_k(m_i)$ は k 番目の地震活動域またはメッシュにおける規模の確率関数、 $P_k(r_j | m_i)$ は規模が m_i の条件下での距離の確率関数、 $P(Y > y | m_i, r_j)$ は地震の規模が m_i 、距離が r_j の時に地震動の強さが y を超える条件付確率である。

なお、震源断層を予め特定しにくい地震では、上述のように、地震の規模の確率分布を、Gutenberg-Richter 式に従うモデル（いわゆる b 値モデル）でモデル化している。厳密には、領域ごとに最大マグニチュードを設定しているため、上限値を有する b 値モデル（truncated b 値モデル）となっている。マグニチュードの上限値（と下限値）を有する b 値モデルでは、

$$N(m_l \leq M \leq m_u) = N(M \geq m_l) - N(M \geq m_u) \quad (2.1.10)$$

$$N(m_l \leq M \leq m) = N(M \geq m_l) - N(M \geq m) \quad (2.1.11)$$

と、Gutenberg-Richter 式

$$N(M \geq m) = 10^{a-bm} \quad (2.1.12)$$

より、マグニチュード M の分布関数は、

$$\begin{aligned} F_M(m) &= P(M \leq m) \\ &= \frac{N(M \geq m_l) - N(M \geq m)}{N(M \geq m_l) - N(M \geq m_u)} \\ &= \frac{1 - 10^{-b(m-m_l)}}{1 - 10^{-b(m_u-m_l)}} \\ &= \frac{1 - \exp(-b \ln 10(m - m_l))}{1 - \exp(-b \ln 10(m_u - m_l))} \end{aligned} \quad (2.1.13)$$

となる。ここで、 m_l と m_u は最小と最大のマグニチュードであるが、一般にはマグニチュードの刻み Δm は 0.1 とすることが多く、この場合には、(0.1 刻みで表示された) 最小マグニチュードが 5.0 の場合、 m_l には $5.0 - \Delta m / 2 = 4.95$ が、同様に m_u には 0.1 刻みの最大マグニチュード $+ \Delta m / 2$ が用いられる。上記の式(2.1.13)を用いて、マグニチュード M が m_i となる確率は、 $m_i - \Delta m / 2 = m_1 \leq m_i < m_2 = m_i + \Delta m / 2$ として、

$$P(m_i) = P(m_1 \leq m_i \leq m_2) = F_M(m_2) - F_M(m_1) \quad (2.1.14)$$

となる。最大値を設定しない b 値モデルでは、規模別の累積発生頻度が片対数軸上で直線となるが、上限値が設定されている場合には、規模別の累積発生頻度は直線にはならないことに注意が必要である。

現在作成中の全国を概観した確率論的地震動予測地図では、日本全国を約 1km メッシュに分割し、工学的基盤 (S 波速度 400m/s) での最大速度、地表での最大速度、及び最大速度から変換した計測震度の計算を行っている。確率論的地震動予測地図作成のためには、将来発生する可能性のある全ての地震について、その発生確率及び地震が発生したときの強震動評価を、不確定性を考慮して行う必要がある。そのため、後述するシナリオ地震に対する強震動評価で用いる詳細な計算手法は、計算作業が膨大なものとなり、事実上採用することが不可能である。確率論的地震動予測地図の作成では、簡便な強震動評価手法として、経験的距離減衰式¹⁾が用いられている。図 2.1.2 に地震調査委員会より公表された北日本地域を対象とした確率論的地震動予測地図の試作例²⁾を示す。なお、作成手法の詳細な説明については防災科学技術研究所研究資料³⁾を参照頂きたい。

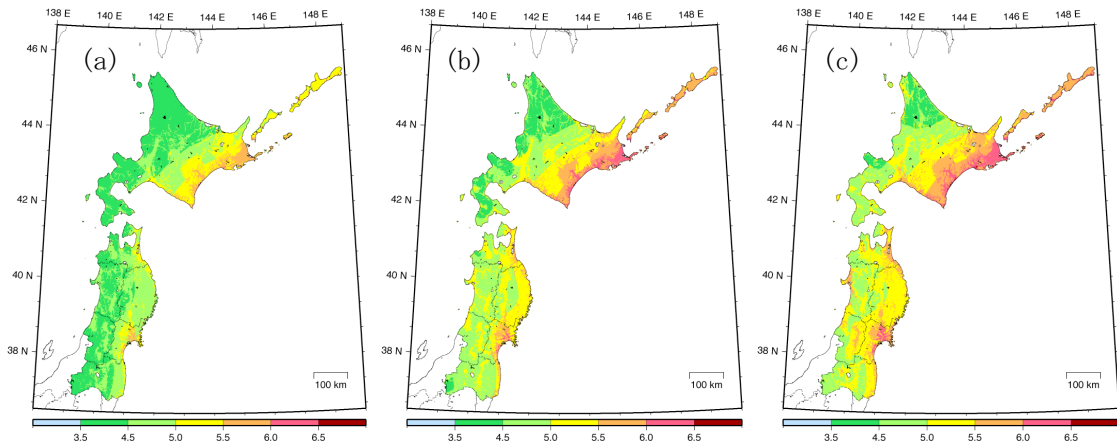


図 2.1.2 北日本地域を対象とした確率論的地震動予測地図の試作例
(50 年超過確率 (a) 39%、(b) 10%、(c) 5%の地表における震度)

2.1.4 シナリオ地震に対する強震動評価

地震調査研究推進本部地震調査委員会において進められている地震動予測地図の作成においては、地震発生の長期評価により発生確率が高いと評価された地震の一部については、確率論的な地震ハザード評価に加えて、あるシナリオを想定し、詳細な強震動評価手法を用いたシナリオ地震による地震動予測地図を作成している。これまでに評価した地震は、図2.1.3 に示すように、糸魚川－静岡構造線断層帯の地震、宮城県沖地震、森本・富樫断層帯の地震、布田川・日奈久断層帯の地震、三浦半島断層群の地震、山形盆地断層帯の地震、三陸沖北部の地震、砺波平野断層帯の地震、琵琶湖西岸断層帯の地震があり、さらに、現在評価中の地震として、石狩低地東縁断層帯の地震、高山・大原断層帯の地震、山崎断層帯の地震、中央構造線断層帯（金剛山地東縁－和泉山脈南縁）の地震、日向灘の地震についての強震動評価が実施されている。なお、詳細な強震動評価を行っていない残りの主要98活断層帯の地震等の震源断層が特定されている地震については、経験的な距離減衰式を用いた簡便な手法による個別の地震についての強震動評価の実施が検討されている。

これに加えて、2003年9月26日に発生した十勝沖地震については、海溝型地震に対する強震動評価手法の検証作業が進行中である。

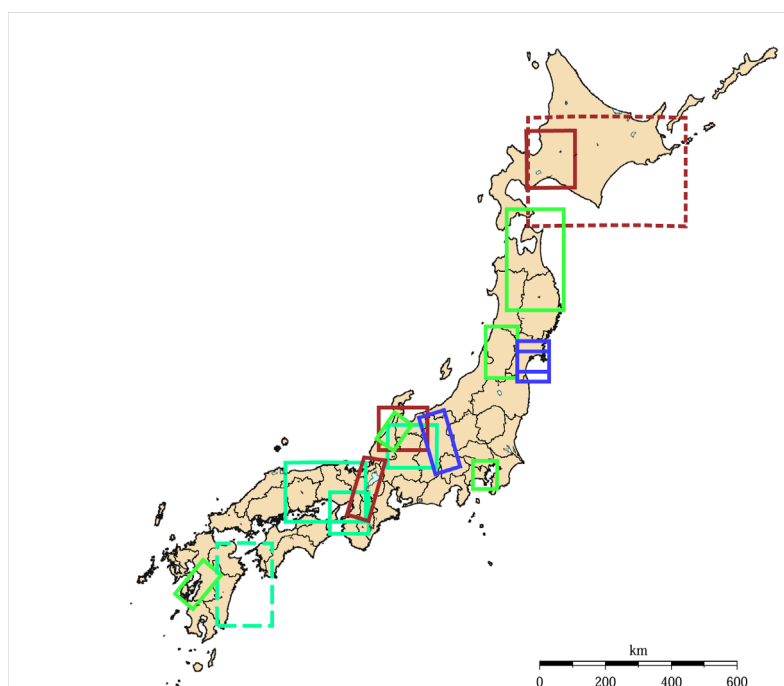


図 2.1.3 シナリオ地震に対する詳細な強震動評価・検証を実施
及び実施予定の地域

2.1 地震動予測地図作成の概要

詳細な強震動評価手法で計算されたシナリオ地震による地震動予測地図では、約1kmメッシュの分解能で、詳細法による計算のために設定した工学的基盤での時刻歴波形及び最大速度値、地表面での最大速度値及び最大速度値から求めた計測震度の分布を計算している（図2.1.4）。詳細な強震動評価としては、ハイブリッド法と呼ばれる地震波形の合成法が用いられている。ハイブリッド法は、複数の要素技術の組み合わせからなる複雑な波形合成法であるが、この手法をできるだけ標準化し、誰が計算を実施しても同じ結果が得られることを目標とした手法の検討が行われている。

以下では、地震動予測地図の作成において用いられているハイブリッド法について、地震調査委員会による「活断層で発生する地震の強震動評価のレシピ」⁴⁾及び「海溝型地震の強震動評価のレシピ」⁵⁾に基づき、その要素技術毎に技術的詳細をまとめる。

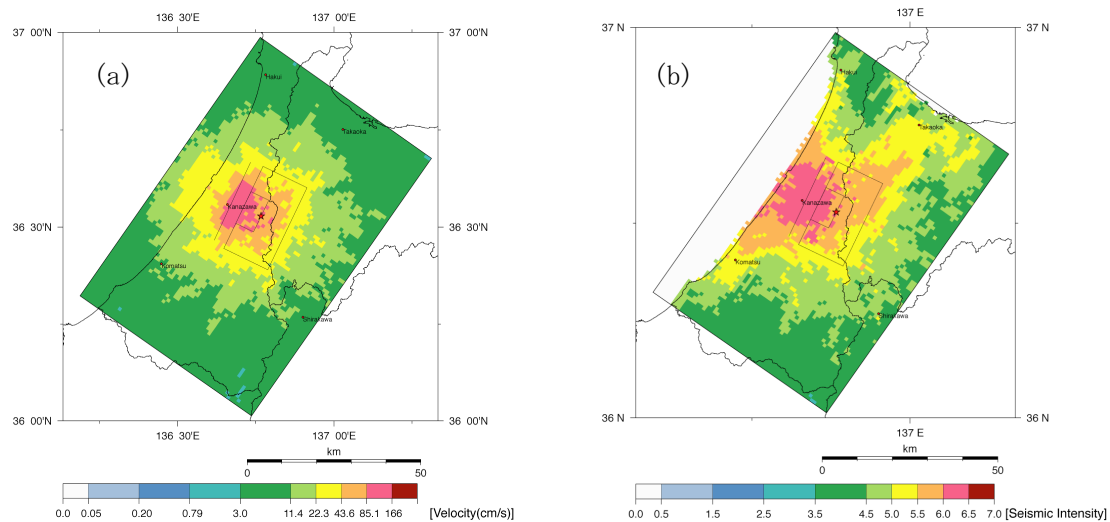


図 2.1.4 (a) 工学的基盤（S波速度700m/s）での最大速度分布図、(b) 地表面での計測震度分布図（森本・富樫断層帯の地震）

(1) 震源パラメータの設定（特性化震源モデル）

シナリオ地震による地震動予測地図の作成においては、ある特定のシナリオを選定する必要がある。現在行われている選定の基準では、評価すべき断層帯の地震について、長期評価の結果を基本として、将来最も起こる可能性が高いと考えられるシナリオを選定することを目指しており、与えられた断層規模に対しては、これまでの経験から得られている平均的な地震動を発生させるパラメータを与えることが基本となっている。従って、現在のシナリオ地震に対する強震動評価結果は、もっとも起こりうる可能性が高い地震に対する平均的な地震動評価となっている。しかしながら、通常、平均的なケースが1つに絞れない場合が多く、その場合には、複数のシナリオを想定することとしている。

強震動評価を実施するために必要な特性化震源モデルに対する震源パラメータの設定は、

大きく 3 つの部分に分けられる (図 2.1.5)。具体的には、断層全体の形状や規模を示す巨視的震源特性、主として震源断層の不均質性を示す微視的震源特性、破壊様式を示すその他の震源特性の設定である。

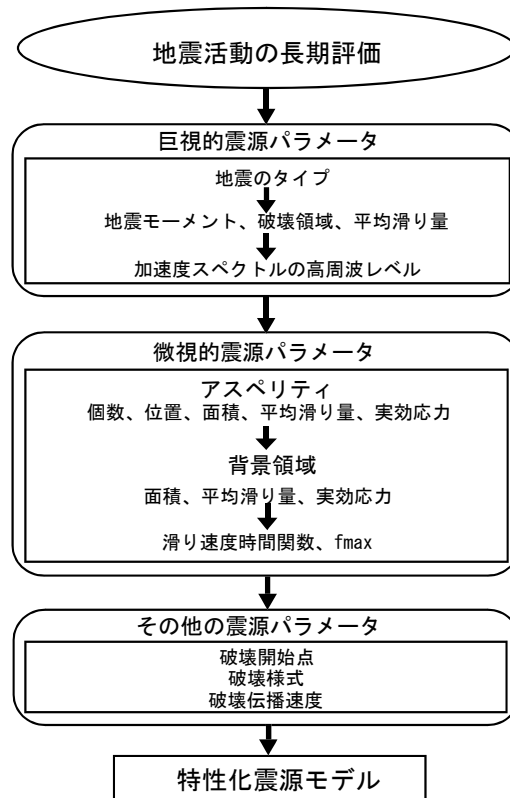


図 2.1.5 震源パラメータの設定

a) 巨視的震源特性

巨視的震源特性とは、断層の幾何学的位置、大きさ、深さ、地震の規模、断層の平均滑り量などである。

このうち断層の幾何学的位置、大きさ、深さについては、地震調査委員会による長期評価の結果に基づいてパラメータの設定を行う。地震の規模（地震モーメント M_0 (dyn・cm)）は、活断層で発生する地震に対しては、長期評価から見積もられた断層面積 S (km²) に対して、次式を用いて設定する^{6), 7), 8)}。

$$S = \begin{cases} 2.23 \cdot 10^{-15} \cdot M_0^{2/3}, & M_0 \leq 4.7 \cdot 10^{25} \\ 4.24 \cdot 10^{-11} \cdot M_0^{1/2}, & 4.7 \cdot 10^{25} < M_0 \leq 1.0 \cdot 10^{28} \end{cases} \quad (2.1.15)$$

ただし、海溝型の地震については、過去の地震のデータ等を用いて、それぞれの地震の特性に応じた設定を行う。

b) 微視的震源特性

震源断層の微視的パラメータとは、アスペリティの位置・個数及び面積、アスペリティ及び背景領域の平均滑り量・実効応力、 $f_{\max}$ 、滑り速度時間関数などがある。アスペリティの位置に関しては、トレンチ調査等で大きな変位量が観測された地点の付近に置くことを基本とする。また、アスペリティの個数は、1セグメントあたり1個または2個とする。

アスペリティの面積 S_a は、地震モーメントと加速度震源スペクトルの短周期レベル A ($\text{dyn} \cdot \text{cm}/\text{s}^2$) の経験的關係をもとに、次式を用いて求める。

$$\begin{aligned} S_a &= \pi r^2 \\ r &= \frac{7\pi}{4} \cdot \frac{M_0}{A \cdot R} \cdot \beta^2 \\ A &= 2.46 \cdot 10^{17} \cdot M_0^{1/3} \end{aligned} \quad (2.1.16)$$

ここで、 R は断層面積と面積が等しい円形クラックの半径、 β は震源域のS波速度。

アスペリティと背景領域でのそれぞれの平均滑り量 D_a 及び D_b の比は、2対1とする。

アスペリティでの平均応力降下量は、次式を用いて求める。

$$\Delta\sigma_a = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^2 R} \quad (2.1.17)$$

アスペリティでの実効応力 σ_a は、この平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ と等しいと仮定する。また、背景領域での実効応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{(D_b/W_b)}{(D_a/W_a)} \cdot \sigma_a \quad (2.1.18)$$

ここで、 W_a および W_b は、アスペリティ及び背景領域の幅を示す。

$f_{\max}$ については、地域性を考慮して地震毎に設定する。しかし、パラメータ推定のためのデータの蓄積は未だ十分ではない。

滑り時間関数としては、動力学的震源モデルに関する考察より得られた近似式⁹⁾を用いる。

c) その他の震源特性

その他の震源特性としては、破壊開始点、破壊形態、破壊伝播速度がある。

破壊開始点については、活断層の分岐形態が利用できる場合それにより推定し、アスペリティの外側に置く。内陸活断層の場合、特に情報がない場合、アスペリティの下部に置く。破壊の開始点とアスペリティの位置関係は、強震動分布に大きく影響するので、モデル設定の根拠が十分でない場合、複数のケースを想定する。破壊形態は、破壊開始点から一定速度で、同心円状に破壊が伝播するとする。破壊伝播速度は、 $V_r = 0.72\beta$ とする¹⁰⁾。

(2) 地下構造のモデル化

地下構造のモデル化では、上部マントルから地震基盤（S波速度3km/s相当層）までの地殻構造、地震基盤から工学的基盤（S波速度300m/s～700m/s相当層）までの深部地盤構造、工学的基盤から地表までの浅部地盤構造に分けてモデル化を行う（図2.1.6）。

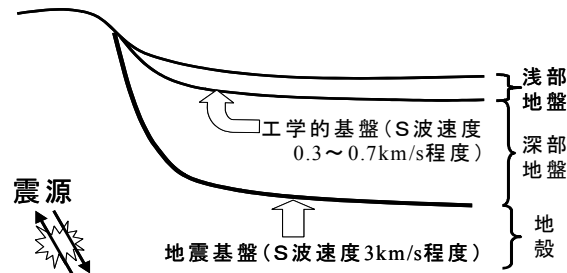


図 2.1.6 地下構造モデルの概念図

a) 地殻構造

地震学的手法により求められた地震波速度構造、地震波減衰構造を用いてモデルを作成する。内陸の活断層の地震では、深さ方向にモホ面を含む領域まで、また海溝型の地震では、プレートの構造をモデリングする必要がある。

b) 深部地盤構造

深部地盤構造は、地震動の比較的長周期部分の特性に大きな影響を与える地下構造であり、決定論的に扱える周波数領域での地震動の計算において重要な要因となる。図2.1.7に地下構造モデル作成の流れ図を示す。深部地盤構造モデリングのためのデータとしては、深層ボーリング、反射法・屈折法弾性波探査、微動探査、重力探査等がある。ただし、これらのデータは地域により様ではないため、地域ごとに、データの蓄積の状況に応じたモデル作成の考え方が必要となる。強震動評価のための地下構造モデリングにおいては、弾性波の速度構造が最も重要なパラメータとなる。従って、これらの値を直接的に求めることのできるデータが多く得られるほどモデル化の精度は高まると考えられる。十分なデータが利用できる場合、複数の深部ボーリングデータにより速度構造を各点毎に正確に把握し、広域的な形状は屈折法データ、山地境界部等の詳細な構造は、反射法探査データから推定し、それらの隙間を微動アレイ探査や重力探査、地質情報等を用いて補完することにより三次元構造モデルを作成する。実際の地震動観測記録とその構造モデルを用いた計算結果を比較することにより、作成した構造モデルの検証を行うことが望まれる。

しかし、実際には上述した手法により3次元構造モデルを作成するに足る情報が十分に得られていない場合が多い。このような場合、面的な情報として利用可能なものは、重力探査データ及び地質構造情報であり、これらを用いて間接的に速度構造を推定しなければ

2.1 地震動予測地図作成の概要

ならない。重力探査データは、密度構造を反映したものであり、重力探査データのみから速度構造を求めると不確定性が大きくなる。このため、これを補完するために地質構造情報を用いたモデリングを行うことも有効である。

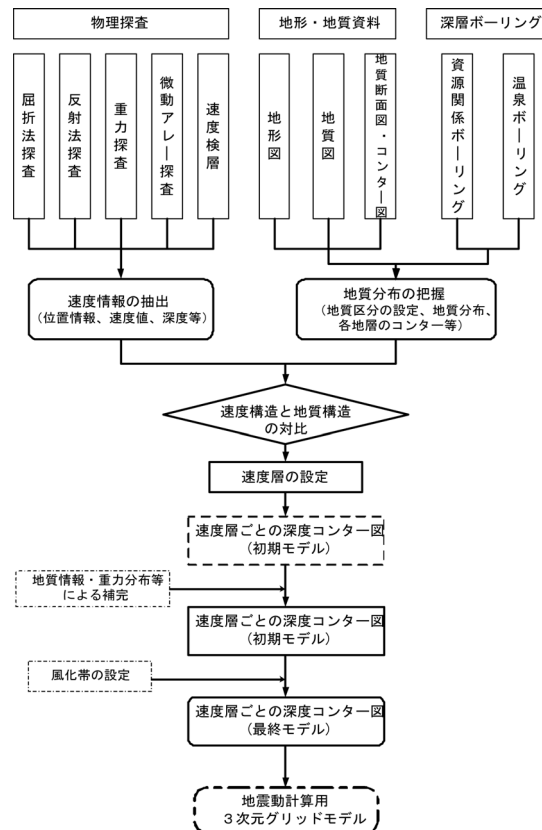


図 2.1.7 地下構造モデルの作成

c) 浅部地盤構造

浅部地盤構造のモデル化では、表層地質データやボーリングデータを用いて地盤構造モデルを作成することが基本となる。ただし、浅部地盤構造は局所的な変化が大きく、面的に精度良く広域を覆う浅部地盤モデルを作成するためには、膨大なデータ収集が必要となる。そのため、現在作成中の「全国を概観した地震動予測地図」においては、表層地盤の増幅特性の評価に関しては、広域での面的な評価に対応可能な、簡便な表層地盤増幅率の評価法として、国土数値情報を利用した手法¹⁾を用いている。具体的には、全国を網羅した3次メッシュ（約1kmメッシュ）の国土数値情報のうち、地形区分データ及び標高データ等に基づいて、微地形区分データを作成し、それぞれの微地形区分に対して標高や主要河川からの距離を考慮した経験式を用いて、表層30mの平均S波速度を計算し、次に、表層30mの平均S波速度と工学的基盤から表層への地震動の最大速度の増幅率との経験的な関係式を用いて、それぞれのメッシュ毎の浅部地盤による最大速度の増幅率を得る。

一方、浅部地盤に対する情報が十分に収集可能な場合は、より詳細なモデル化の手法と

して、多数のボーリングデータ及び地形・地質データを収集し、地形・地質から区分できる地域ごとに代表となるボーリング柱状図を抽出し、これをメッシュ毎に当てはめる方法等があり、より詳細な強震動評価に向けての検討課題となっている。

(3) 波形合成法（ハイブリッド法）

地震動の特性は、低周波数帯域では弾性波動論に基づいた決定論的な物理モデルによる理論的考察によりある程度定量的に説明可能であることが、過去に起きた地震動の記録を解析することにより明らかにされてきている。一方で、高周波数帯域では、震源のモデル化及び地下構造のモデル化の双方において、物理モデルに基づく理論的な予測に必要とされるパラメータ決定のための情報量が不足し、不確実性が急速に大きくなるため、事実上決定論的な予測が困難となり、統計的手法の導入が必要となる。詳細な手法による強震動評価では、周波数帯域が0.1Hz～10Hz程度の地震動を評価することを目指しており、この周波数帯域には、上述した低周波数帯域及び高周波数帯域の両方、そしてそれらの中間の遷移周波数帯域が含まれている。

このように物理的性質の違う2つ周波数帯域を含んだ広周波数帯域に対して強震動の評価を行うためには、それぞれの周波数帯域の特徴を活かした計算手法を用いることが最も効率的である。ハイブリッド法は、このような背景の中で提案された手法である。ハイブリッド法では、決定論的な取り扱いが有効な低周波数帯域に対しては、有限差分法^{12), 13)}や有限要素法¹⁴⁾により弾性波動論に基づいた理論的なモデルに対して波形計算を行い、統計的な取り扱いが必要な高周波数帯域に対しては、統計的グリーン関数法¹⁵⁾と呼ばれる半経験的な手法を用いて波形合成を行う。最後に遷移周波数領域においてそれぞれに対してマッチングフィルター処理を施して重ね合わせることで、全周波数帯域での計算を行う（図2.1.8）。

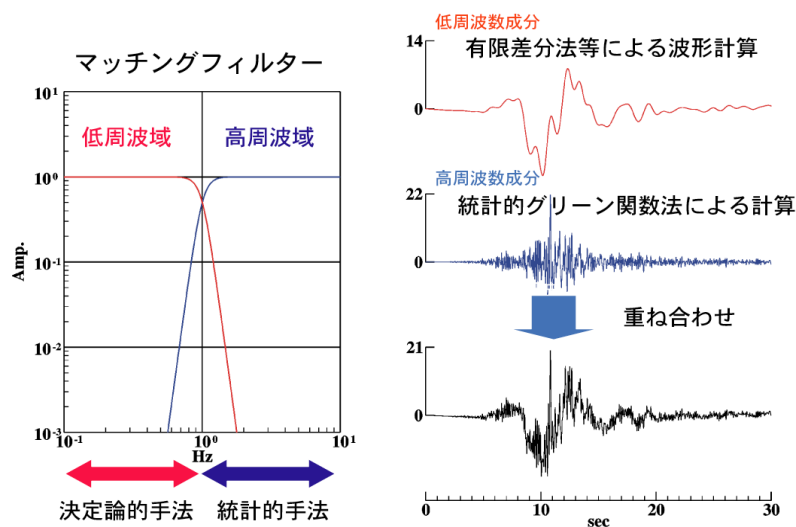


図 2.1.8 ハイブリッド法の概念図

a) 低周波数帯域での計算法

低周波数帯域での波形合成は、特性化震源モデルと地殻構造及び深部地盤構造モデルを組み合わせた物理モデルに対して、地震波動伝播を記述する弾性波動方程式を、有限差分法^{12), 13)}や有限要素法¹⁴⁾などの数値計算手法を用いて解くことにより行う。近年の計算機性能のめざましい進歩と計算手法そのものの高度化により、現在では、現実に近いモデルに対する計算が実施可能となりつつある。具体的には、例えば、森本・富樫断層帯の地震に対する強震動評価では、90km*60km*40kmの領域を地震基盤より上部を100mメッシュでモデル化した計算を、有限差分法を用いて行っているが、この場合の計算時間は、防災科学技術研究所の計算機（origin3800）で64cpuを用いた並列計算を行った場合、6000タイムステップの計算で4時間半程度を要した。計算量の見積もりの目安として、同一の領域に対して計算メッシュサイズが半分になるごとに、計算時間は16倍、計算に必要なメモリー容量は8倍となるため、計算機環境及び作業工程を踏まえたモデル作成が必要となる。

b) 高周波数帯域での計算法

高周波数帯域の計算で用いられる統計的グリーン関数法¹⁵⁾は、経験的グリーン関数法^{16), 17)}をもとに作り出された手法である。経験的グリーン関数法では、大地震による強震動を評価するために、大地震が発生する領域内で発生した中小規模の地震記録をグリーン関数として用い、大地震の波形を合成する手法であり、伝播経路や表層地盤の不均質構造の影響を強く受ける短周期地震動の評価に有効な手法と考えられている。しかし、現実には、強震動の評価を行う場合、評価すべき大地震に対して評価する領域内で適切な中小地震の記録が得られているとは限らない。このような場合にでも適用できる手法として提案された統計的グリーン関数法では、グリーン関数として中小地震の記録の代わりに、統計的に評価された関数をグリーン関数として用いることにより、データが十分得られていない場合でも評価可能となっている。ただし、統計的グリーン関数法は、グリーン関数が統計的に処理され平均化され、本来グリーン関数が持っている位相情報が失われているため、対象地域及び震源固有の特性を十分には反映しきれないという限界をもつ。特に断層の極近傍での波形合成に関しては、その精度向上が今後の重要な技術的課題である。

c) 2つの手法の重ね合わせ

ハイブリッド法による低周波数帯域と高周波数帯域の接続は、現状では1Hz程度の周波数を設定して、マッチングフィルターを用いて行っている。接続周波数の設定は、本来は、地震波動場の特性を考慮して、決定論的なモデリングが可能な周波数帯域と、統計的なモデリングが可能な周波数帯域の遷移周波数帯域内に設定すべきであるが、現状では、以下の3つの理由により、接続周波数が物理的な遷移周波数帯域よりも低周波側に設定される場合が多い。

- ① 計算機性能・計算技術の限界
- ② 震源のモデル化の限界
- ③ 地下構造のモデル化の限界

ここで、①の計算機性能・計算技術の限界については、今後数年程度で大幅な改善が期待でき、近い将来に上記問題点はある程度解決できる可能性がある。

一方、②及び③については、①と比較して解決が圧倒的に困難であると考えられる。これらの問題の解決のためには、地震観測網により得られる記録の蓄積や地下構造調査によるデータ収集、データベース化が不可欠であり、これらは長期間にわたる計画的な研究インフラの整備なくしては実現が困難である。長期的展望に立った問題解決のための戦略が必要であろう。

2.1.5 2種類の予測地図の融合

地震動予測地図は、「確率論的地震動予測地図」と「シナリオ地震による地震動予測地図（震源断層を特定した地震動予測地図）」の2種類の性質の違う地図を組み合わせたものとして公表される予定となっており、2つの地図の関連を明確にすること、あるいは「シナリオ地震による地震動予測地図」を「確率論的地震動予測地図」に取り込むことを「融合」と呼んでいる。地震動予測地図の融合については、2つの考え方が示され、議論が行われてきた。

- ① 2種類の地図は独立に作成されるが、それぞれの位置づけを解説し、相互に関連づける。
2種類の地図を関連づけるための方法論として、例えば、確率論的想定地震¹⁸⁾の概念を用いる。
- ② 「シナリオ地震による地震動予測地図」において用いられる詳細法による地震動評価を用いて、確率論的地震ハザード評価を行う。

考え方①で示されている2種類の地図の関連づけとは、ある対象地点において想定する全地震を考慮した地震ハザード評価において、個々のシナリオ地震がどのような位置づけにあるかを明確にすることである。確率論的想定地震とは、対象とする確率レベルに対応するような強さの地震動を起こしうる可能性が高い地震をシナリオ地震として選定するための方法論である。詳細な方法で評価されたシナリオ地震による地震動が、確率論的地震動予測地図においてどの程度の確率レベルに対応するかを示すことにより、両者の関係を明確にすることが可能となる。平成16年度末に公表する「全国を概観した地震動予測地図」においては、考え方①に沿って、「確率論的地震動予測地図」と「シナリオ地震による地震動予測地図」の位置づけを解説し、両者を関連づける方向で検討がなされている。考え方②で述べられている詳細法による地震動評価は、現状では、計算作業量及び計算に必要な情報量の不足のために地震動予測地図作成のための確率論的地震ハザード評価にお

いては用いられていない。しかし、よりきめ細かな強震動評価を行うためには、将来的には、詳細法による地震ハザード評価を確率論的地震ハザード評価に取り込むことが必要と考えられる。考え得るすべてのシナリオ地震に対して発生確率を割り振り、それらに対する強震動評価計算をハイブリッド法に代表される詳細法で行うことが理想的な状況としては考えられる。さらに、計算されたデータがすべてのシナリオ毎に独立に取り出せるようなデータ構造を持った地震ハザードデータベースが構築され、それに基づいた確率論的地震ハザード評価が行えるようになることが究極的な地震動予測地図作成になると考えられる。これが可能になれば、「シナリオ地震による地震動予測地図」を「確率論的地震動予測地図」における1つの事象として直接位置づけることが可能となり、両者の関係は大変わかりやすくなることが期待される。平成16年度までに作成される「全国を概観した地震動予測地図」は、本来あるべき地震ハザード評価に向けての最初の第一歩であり、今後の継続的な発展が望まれる。

2.1.6 地震動予測地図公開に向けての検討

現在作成が進められている「全国を概観した地震動予測地図」に対する要望として、結果として得られた予測地図のみならず、その作成の前提条件となった震源モデル及び地下構造モデルなどの評価プロセスに関わるデータを併せて公表すべきであるとの意見が強い。こうした要望に可能な限り応ずることができるように、現在データ公開に向けての技術的な検討が実施されている。

地震動予測地図は、単に地表での震度値のみを公表するだけでなく、確率論的地震動予測地図においては、様々な形態で表現された地図や、ハザード曲線のデータ、計算に用いた震源に関するデータ等、また、シナリオ地震による地震動予測地図においては、工学的基盤における最大速度、さらには時刻歴波形のデータ等についてもデータ公開手法の技術的な検討を実施している。

各種データは、基本的には地震動予測地図公開WEBによりインターネット上で公開することが検討されている(図2.1.9)。一方、インターネット経由でのデータ利用が困難な環境にいるユーザーに対しても広く地震動予測地図に関する情報を提供するため、データのビューア機能を含めたデータCDあるいはDVDを作成することも併せて検討がなされている。

地震ハザードに関する情報は多様であり、こうした多様性に十分対応できる公開システムを構築し、システムを継続的に発展させていくことが、理学的な地震調査研究の成果を効率的に工学分野での活動に生かすためには必要不可欠であると思われる。特に、前節で述べたような「確率論的地震動予測地図」と「シナリオ地震による地震動予測地図」を融合した、理想的な地震ハザードデータベースを構築し、データ公開を行うためには、膨大なデータ量になると予想される地震ハザード関連情報を如何に効率的に扱うか、また、継続的に更新・発展させていくのかと言うことが大変重要な技術的課題でもある。

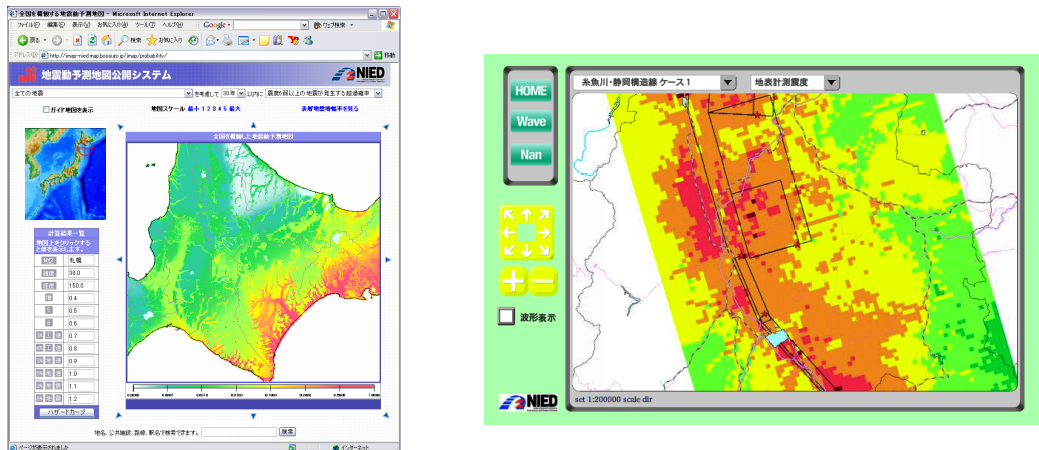


図 2.1.9 公開システムのイメージ図

2.1.7 今後の技術的課題

「全国を概観した地震動予測地図」が、平成16年度末完成を目指して作成されている。「全国を概観した地震動予測地図」の作成の基本となった総合基本施策は、平成11年4月に、今後10年程度の地震調査研究の基本として定められたものであり、「全国を概観した地震動予測地図」は、その前期の成果として位置づけられる。従って、平成16年度末に作成される「全国を概観した地震動予測地図」は、強震動評価の最終成果物でなく、今後も継続的に改良され、よりよいものとなっていくことが望まれる。以下では、強震動評価に関して、現在検討中、あるいは将来検討が望まれることについてまとめる。

確率論的ハザード評価における強震動評価の課題として、発生確率が高い地震に対する低確率の強震動評価の信頼性の問題がある。現状の評価では、強震動の生起確率の計算に距離減衰式のばらつきが用いられている。この場合、強震動レベルが、経験的距離減衰式のばらつきの裾野の形状で決まる場合があり、過大評価になる可能性が指摘されている。強震動評価のばらつきの要因についての整理及びばらつきの設定法についてのさらなる検討が必要である。さらに、距離減衰式のばらつきだけでなく、詳細法による各点毎のばらつき評価の検討も重要な課題である。

強震動レベルの上限値については、これまで試作されてきた地域を限定した地震動予測地図（北日本、西日本）においては特に設定されていない。現在検討中の課題である。

98主要内陸活断層の地震に対する地震活動の長期評価においては、BPT分布を用いた評価が行われているが、評価に必要な情報不足のため、最新活動時期及び平均発生間隔が幅を持って評価され、その結果として地震発生確率が幅を持って評価される場合が多い。確率論的地震動予測地図の作成においては、幅を持って評価された発生確率の扱いについて検討が行われ、発生確率の中央値及び最大値を用いた地震動予測地図作成が試みられている。地震活動の長期評価に必要な情報が不足しているため、確率論的手法の枠組みを機能させ

るために必要なパラメータが完全には推定しきれない状況にあり、さらなる調査による情報量の増加が望まれる。長期評価結果の公表に当たっては、パラメータ推定についての信頼度が併せて示されているが、現状では、暫定版の地震動予測地図には、信頼度についての評価結果は反映されておらず、今後の検討課題となっている。また、複数の異なった判断を扱うためのロジックツリーは、現在作成中の地震動予測地図作成には用いられていないが、その導入の必要性については、今後の検討課題である。

シナリオ地震による地震動予測地図の作成においては、ある特定のシナリオを選定する必要がある。現在行われている選定の基準では、将来最も起こる可能性が大きなシナリオを選定することになっている。しかし、将来発生する地震について、これまでの調査で得られた情報は限られており、シナリオの選定においては多くの不確定要因を抱えた状況での判断が必要となる。このため、パラメータ設定の不確定性に伴う評価結果のばらつきの評価が重要な課題となっている。

また、ハイブリッド法の精度を上げるためには、前述した3つの要因について、計算技術の高度化、震源モデルの高度化及び地下構造モデルの高精度化が不可欠である。このうち計算技術については、計算機性能の進歩及び計算科学技術の成果により、近い将来、ある程度問題が解決されることが期待できる。一方、震源及び地下構造に関しては、地震観測網の充実及び地下構造調査、地下構造情報のデータベース化が研究発展にとって不可欠である。これらは、地味で短期的な成果が上がりにくい分野であるが、長期点展望に立った、計画的で積極的な取り組みが望まれる。

理学的な地震調査研究に基づく地震動予測地図と工学的な利用に必要な地震リスク評価の関係が継続的に機能するためには、それぞれの作成条件と利用条件を明示して理解し合う関係を推進することが不可欠である。地震動予測地図の作成者側と利用者側が連携できる仕組みを作り、両者がすれ違わないような努力が必要となる。このためには、お互いを結びつけるインターフェースとして地震動予測地図公開システムの整備が不可欠である。また、学術的な進歩による発信情報の高度化、工学利用技術の進歩による発信内容の多様化等に即応できるよう、地震ハザード評価の共通基盤としての地震動予測地図が、定期的に更新・改良されていく仕組みを確立することが望まれる。

参考文献

- 1) 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, 63-70, 1999.
- 2) 地震調査委員会長期評価部会・強震動評価部会:確率論的地震動予測地図の試作版(地域限定—北日本), 2003.

- 3) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 石井透, 早川譲, 奥村俊彦, 功刀卓, 神野達夫, 森川信之, 小林京子, 大井昌弘, 原温子, 奥村直子: 北日本地域を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例, 防災科学技術研究所研究資料, 246, 2003.
- 4) 地震調査委員会: 糸魚川-静岡構造線断層帯(北部、中部)の地震を想定した強震動評価について, 2002.
- 5) 地震調査委員会: 宮城県沖地震を想定した強震動評価について, 2003.
- 6) Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, T., Kagawa, T., Smith, N., Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 59-80, 1999.
- 7) Wells, D.L. and Coppersmith, K.J.: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002, 1984.
- 8) 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110, 849-875, 2001.
- 9) 中村洋光, 宮武隆: 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, *地震*, 53, 1-9, 2000.
- 10) Geller, R.J.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1501-1523, 1976.
- 11) 翠川三郎, 松岡昌志: 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, *物理探査*, Vol. 48, No. 6, pp. 519-529, 1995.
- 12) Pitarka, A.: 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 54-68, 1999.
- 13) Aoi, S., and Fujiwara, H.: 3D finite-difference method using discontinuous grids, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 918-930, 1999.
- 14) 藤原広行, 藤枝忠臣: 3次元動弾性解析のためのボクセル有限要素法, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 94, 2002.
- 15) 壇一男, 佐藤俊明: 断層の非一様滑り破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, *日本建築学会構造系論文集*, 509, 49-60, 1998.
- 16) Irikura, K.: Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol.33, Part2, No.298, 63-104, 1983.
- 17) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, *Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium*, 151-156, 1986.
- 18) 亀田弘行, 石川裕, 奥村俊彦, 中島正人: 確率論的想定地震の概念と応用, *土木学会論文集*, 第577号, 75-87, 1997.

2.2 諸外国の地震ハザード評価

本節では、前節で述べた「確率論的地震動予測」および「シナリオ地震による地震動予測」に相当する2種類の手法が、諸外国の地震ハザード評価においてどのように適用されているかについて解説する。

2.2.1 世界地震ハザード評価プログラム

国連の国際防災の十年 (IDNDR) の一環として、世界地震ハザード評価プログラム (Global Seismic Hazard Assessment Program GSHAP) が 1992 年から 1999 年にかけて実施された。このプログラムでは「確率論的地震動予測」に相当する手法に基づいて、全世界をカバーする今後 50 年での超過確率 10% の最大加速度分布図が作成された。図 2.2.1 に全世界の地震ハザードマップを、図 2.2.2 にアジア地区のマップをそれぞれ示す。このプロジェクトに関する国際雑誌の特集号が刊行され¹⁾、ホームページ上でも結果が公開されている (<http://seismo.ethz.ch/GSHAP/>)。

GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP

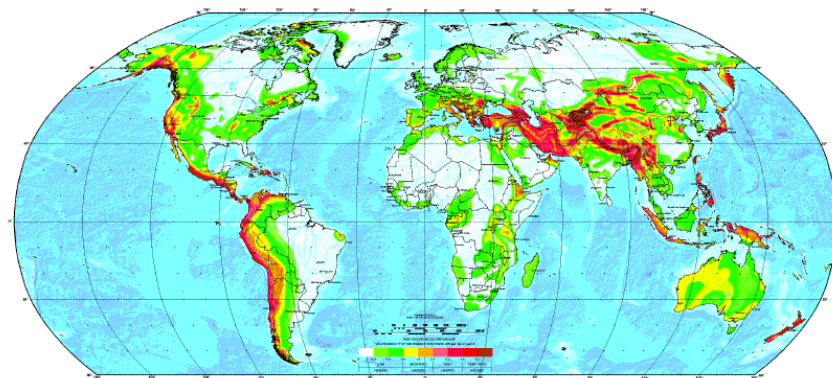


図 2.2.1 全世界の地震ハザードマップ

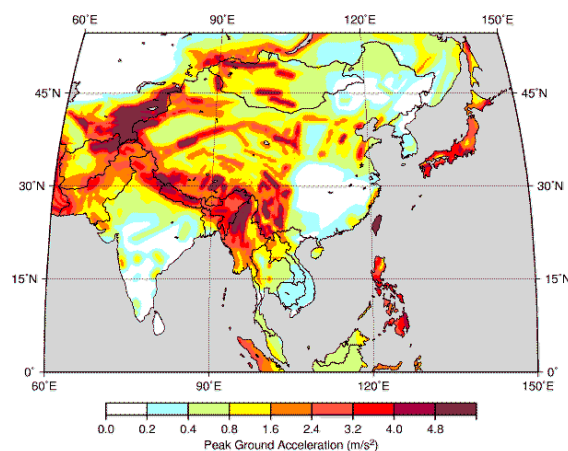


図 2.2.2 アジア地区の地震ハザードマップ

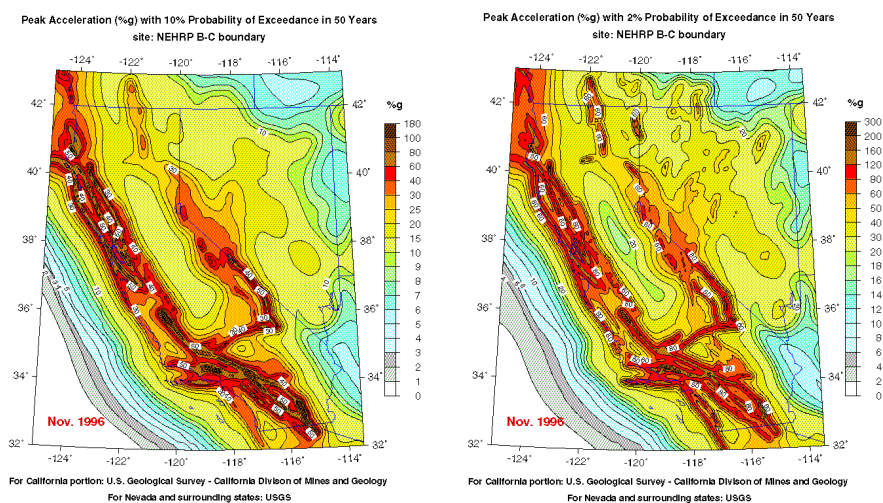
2.2.2 米国の地震ハザード地図プロジェクト²⁾

米国では、全国地震危険度軽減計画 (National Earthquake Hazards Reduction Program) の一環として、全米地質調査所の全国地震ハザード地図プロジェクト (USGS National Seismic Hazard Mapping Project) が 1990 年代に開始され、1996 年に米国本土の地図が、1997 年にアラスカ・ハワイの地図が公表された。

USGS 全国マップの計算法は「確率論的地震動予測」に相当する手法に基づいており、その概略は以下の通りである。まず、震源として、1) 歴史地震データを空間的にスムージングしたもの、2) バックグラウンド震源域として歴史地震はないが地質学的に比較的大きな地震を起こす可能性があるもの、3) 活断層 (約 450 個、再現期間を考慮、ポアソン過程) の 3 つを考慮している。距離減衰式については、西部アメリカの地殻内地震、プレート間地震、スラブ内地震に対するもの、中央部・東部アメリカに対するものを使い分けている。簡単なロジックツリーも導入されている。

作成された地図は、今後 50 年間の超過確率 2%、5%、10% (再現期間でそれぞれ約 2500 年、1000 年、500 年) に対応する岩盤での地震動強さ (最大加速度および周期 0.2、0.3、1.0 秒での加速度応答スペクトル) である。一例として、カリフォルニア・ネバダ州のものを図 2.2.3 に示す。

これらの地図はインターネット上 (<http://eqhazmaps.usgs.gov/>) で公開されており、地図の形だけでなく、緯度経度を与えると地震動予測結果がわかったり、郵便番号を与えると地震動予測結果がわかったりする。また関連するプログラムが公開されており、データを変えて計算をやり直すこともできる。これらの地図の更新も行われている。地震活動度の評価、距離減衰式の見直しなどにより、2002 年 6 月に地図が見直され、意見を求めた後、更新された。



(a) 50 年超過確率 10% の最大加速度

(b) 50 年超過確率 2% の最大加速度

図 2.2.3 カリフォルニア・ネバダ州での地震ハザードマップ

2.2.3 耐震設計用地震ハザードマップの作成³⁾

上述の全米地質調査所の全国地震ハザード地図作成の主な目的は耐震設計への利用であるが、この地図がそのまま耐震設計用に用いられている訳ではない。これらの地図の成果を取り入れて、耐震設計用マップ (Maximum Considered Earthquake Ground Motion Map) の作成が BSSC (Building Seismic Safety Council)、USGS、FEMA の協力で行われた。Maximum Considered Earthquake Ground Motion Map (MCE 地震動マップ) とは、考慮すべき最大地震動地図とでも訳すべきもので、この地図は 2000 年 International Building Code にとりいれられた。

この地図は、地震活動度の高い地域で、シナリオ地震地図の結果を工学的判断で取り入れて、この確率論的地震動地図を修正したものである。基本的には、50 年超過確率 2 % の地震動強さをを用いる。ただし、カリフォルニアなどの地震活動度の高い地域ではかなり大きな値となり、結果に不確実性が大きいので、最大級の地震が発生した場合に距離減衰式から得られる地震動強さの 1.5 倍の値をもって地震動強さの上限値とする。これによって断層付近では結果的に 50 年超過確率 10% の地震動強さと同等レベルになる。図 2.2.4 にこの修正のプロセスを示す。

このようにして得られた MCE 地震動マップを地震ハザードマップと比較して、図 2.2.5 に示す。このように、地震ハザードマップが目的に応じて工学的な判断のものに修正されて MCE 地震動マップとして耐震設計の分野で利用されている。

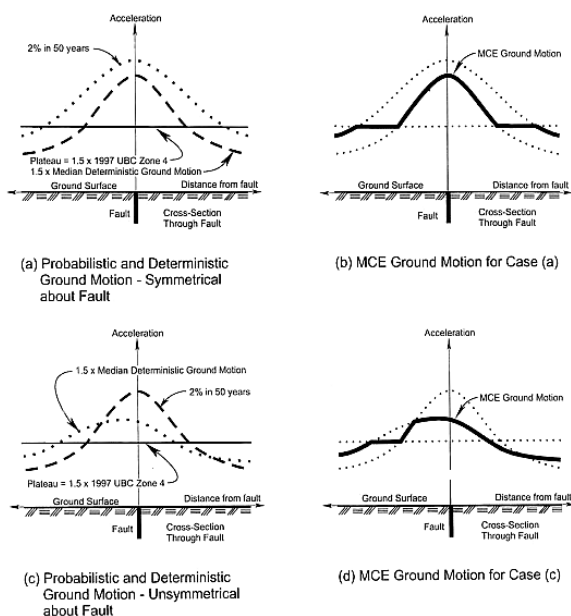


図 2.2.4 MCE 地震動の求め方

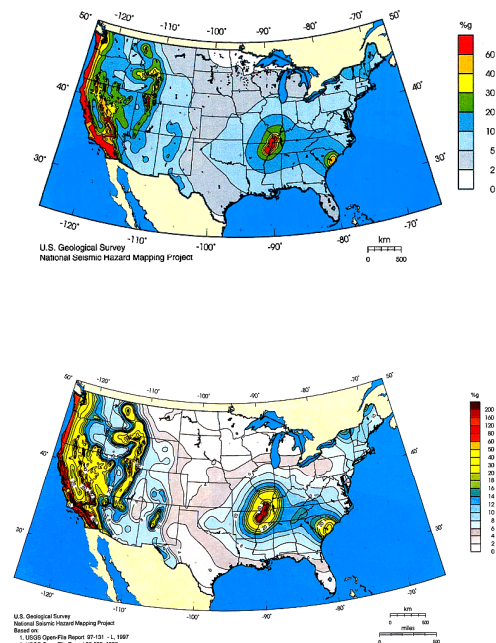


図 2.2.5 MCE 地震動マップ（上）と地震ハザードマップ（下）の比較

2.2.4 ISO23469 における地震ハザード解析⁴⁾

ISO23469 は「地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用」に関するガイドラインであり、ISO/TC98「設計の基本」内に設置されたワーキンググループ SC3/WG10 により 2002 年より策定作業が進められている。このワーキンググループは、わが国のリーダーシップのもとに設置されたものであり、研究レベルでは世界をリードするレベルにあるわが国の地震工学も、国際基準などの面では、これまでリーダー役を果たすことがあまりなかった点を踏まえたものである。

構造物の耐震設計における地震荷重の国際規格には、ISO3010「構造物への地震作用」がある。この国際規格は ISO/TC98「構造物の設計の基本」に所属するワーキンググループ(WG)が担当して作成したもので、2001 年には第 2 版が出版された。しかし、その適用範囲は建築物や類似の構造物に限られており、ライフライン施設のような地盤中の構造物やダム・堤防などの土構造物を対象としたものではない。このため、「地盤基礎構造物への地震作用」WG が発足した。この国際規格は、専門的な知識を有する設計技術者および基準策定関係者が、地盤基礎構造物 (Geotechnical works) の設計に用いる地震作用を定める際に遵守する一連の指針である。なお、「地震作用」とは、従来の基準類で用いている「地震荷重」の概念を一般化したもので、地盤の変位や液状化による影響などを含む。

本国際規格案では、地震作用を決定する際に、2 段階の手順を採用することとしている。第 1 段階では、地震作用を決定する際の基本変数を決定する。基本変数には、地震動、地震にともなって発生する液状化や地盤流動、断層変位などがある。第 2 段階では、第 1 段階で求めた基本変数を基に、地盤基礎構造物への地震作用を求める。

第 2 段階においては、地盤-構造物の相互作用の解析上の取扱いが中心的な役割を果たす。解析法種別は、等価静的／動的解析への分類と簡易／詳細法への分類との組合せによるもので、簡易／詳細法の分類は以下のとおりである。

- ・ 簡易法：全体系における地盤・構造物の相互作用を部分系への作用として取扱うもの
- ・ 詳細法：全体系における地盤・構造物の相互作用を一体解析するもの

本国際規格案では、地震動を設定するにあたって、まず、設計における地盤基礎構造物の目的と機能を明確にする。大まかな分類として、商用、公共、防災、などの利用分類がある。次に、耐震設計のための要求性能を、地震時あるいは地震後の機能に基づいて、以下のとおり設定する。

- ー地震時および地震後の使用性（以下使用性という）：社会・産業活動への影響軽微、構造物は許容変形内、機能維持もしくは経済的復旧可能
- ー地震時および地震後の安全性（以下安全性という）：人的・資産被害の最小化、危険物取扱い・緊急対応施設の機能維持、構造物は非崩壊

これらの要求性能に基づいて、参照地震動を以下のとおり設定する。

ー使用性照査地震動：設計供用期間内に発生する可能性が高い地震動

ー安全性照査地震動：稀な地震によるもので、当該地点で激しいゆれとなる地震動

これらの要求性能および参照地震動を基に、構造物の地震応答を表現する工学的パラメータを用いて性能規定を設定する。この際、施設の重要度、解析手法を考慮する。性能規定に基づく一つの方法として、限界状態設計法を示している。

本国際規格案では、地震ハザード解析により基準地震動を定める際には、使用性照査地震動は確率論的解析により、また、安全性照査地震動は、確率論または決定論的解析によることとし、活断層が近傍に位置する場合に、決定論的解析によることができるとしている。ここに、決定論的解析とは、シナリオ地震に基づく地震動評価法を意味するもので、地震の発生確率を陽に考慮しない点を除けば、シナリオ地震から地震動を評価する際に含まれる不確定性については評価するものである。わが国や米国西海岸などでの地震動評価には、広く用いられている手法である。

地震ハザード解析には、経験的方法、半経験的方法、理論的方法、複合的方法など、種々の方法があるが、これらは、構造物の重要度と建設地点周辺の活断層や地質構造に関する情報に応じて選択する。

本国際規格の上位規格には IS02394「構造物の信頼性に関する一般原則」があり、これと本国際規格での決定論的地震ハザード解析の位置づけについて、幅広い関係技術者・研究者間での議論を積重ねつつ、慎重な検討を続けている。

かつては、既往最大地震動を設計地震動としたり、想定地震のマグニチュードと距離減衰式を用いた設計地震動の設定が用いられたりした時期があり、このような簡易的手法のことを決定論的手法とよんでいた。その後、地震ハザード解析に確率論的手法が導入され、グーテンベルグ・リヒターによるマグニチュードと発生頻度の関係などをもとに設計地震動を設定する手法が広く用いられるようになった。確率論、決定論的地震ハザード解析として、過去には、このような簡易手法の相互比較の議論がなされていた時期があった。その後、断層近傍の地震動に関する研究が進み、広域データに基づくグーテンベルグ・リヒターの関係に見られるランダム事象モデルと対照的に、検討対象領域を断層近傍に絞りこむことにより、地震動発生の規則性（最大マグニチュードないし固有地震の存在やエネルギー蓄積と放出の時期の強い関連）が明らかになることがわかってきた。また、強地震動予測手法として、断層アスペリティーなどを含む発震機構や伝播経路特性を考慮した経験的グリーン関数法など、断層近傍の地震動の特徴を詳細に考慮できる手法が開発されてきた。本国際規格の作成における確率論、決定論の議論は、地震動予測に関するこのような新たな研究動向を踏まえた上で、展開されている点に注意したい。

決定論的解析の適用を支持する立場からの議論には、以下のようなものがある。

- (1) 現在までに開発されている実用的な地震ハザード解析法では、決定論的手法では、強地震動予測に関する最近の研究動向を踏まえた地震動評価を行うことが可能であるが、確

率論的手法においては、未だこれらの研究動向を取り込んだ新たな手法が整備されていない。

- (2) 確率論的手法では、不確定性の取扱いを確率を指標として陽に示すのに対して、決定論的手法では、個々の判断の積重ねによっている点が異なる。しかし、確率論的手法でも、モデルの作成やロジックツリーの作成における重みの設定では、個々の判断の積重ねが行われており、陽に示された確率にも、その影響が含まれている。
- (3) 活断層近傍などで脅威となる想定地震が存在する場合で、想定地震の設定に関する不確定性が小さい場合は、確率論的手法における低確率レベルでの推定値に確率分布のすそ野のばらつきに起因する大きな不確定性が存在することを考慮すると、決定論的解析による地震動の設定にも妥当性がある。
- (4) 確率の値をどのように設定するかによっては、活断層地震の影響が無視される恐れがある。

逆に、確率論的解析の適用を支持する立場からの議論には、以下のようなものがある。

- (1) 確率論的手法においても、強地震動予測に関する最近の研究動向を踏まえた地震動評価を行うことが可能であり、新たな手法の開発も期待される。
- (2) 確率論的手法は確率を指標として不確定性を陽に示すもので、その理論構成も明快であり、決定論的手法で不確定性の取扱いを個々の判断の積重ねによって行っているのに比べ、不確定性の評価に適している。
- (3) 活断層近傍などで脅威となる想定地震が存在する場合でも、最近の調査研究により、その発生確率が明らかにされるようになってきており、確率論的手法により取扱うことが可能である。
- (4) 確率の値をどのように設定するかについてしかるべき検討がなされれば、活断層地震の影響も適切に評価することができる。

これらの議論を経て、本国際規格案においては、さきに述べたとおり、安全性照査地震動の評価は確率論または決定論的解析によることとし、活断層が近傍に位置する場合に決定論的解析によることができるとしている。

以上、地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用に関する国際規格化に向けて、現在までにとりまとめられた方法論の骨子は以下のとおりである。

- (1) 地盤基礎構造物への地震作用には、地震動による慣性力とともに地盤の変位が著しい影響を与える点に特徴がある。地震作用を決定する際には、2 段階の手順を採用し、第 1 段階で地震動などの基本変数を、第 2 段階でこれを基に地震作用を求める。
- (2) この第 2 段階では、解析法種別を、等価静的／動的解析への分類および簡易／詳細法への分類との組合せで与え、簡易／詳細法の分類は以下のとおりとする。
 - ・ 簡易法：全体系における地盤・構造物の相互作用を部分系への作用として取扱うもの

- ・ 詳細法：全体系における地盤・構造物の相互作用を一体解析するもの
- (3) 安全性照査地震動の設定における地震ハザード解析は確率論または決定論的解析によることとし、活断層が近傍に位置する場合に決定論的解析によることができる。

参考文献

- 1) Istituto Nazionale di Geofisica: The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992-1999, Annali di Geofisica, Vol.42, No.6, 1999
- 2) Frankel, A.D., Mueller, C.S., Barnhard, T.P., Leyendecker, E.V., Wesson, R.L., Harmsen, S.C., Kellin, F.W., Perkins, D.M., Dickman, N.C., Hanson, S.L., and Hopper, M.G.: USGS national seismic hazard maps, Earthquake Spectra, Vol.16, No.1, 1-19, 2000
- 3) Leyendecker, E.V., Hunt, R.J., Frankel, A.D., and Rukstales, K.: Development of maximum considered earthquake ground motion maps, Earthquake Spectra, Vol.16, No.1, 21-40, 2000
- 4) Iai, S.: International Standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical works - an overview, Proc. 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering & 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.1, 302-209, 2004

2.3 地震動予測地図に期待されるもの

2.1 節では、平成 16 年度末の完成を目指して地震調査推進本部地震調査委員会で作成されている「全国を概観した地震動予測地図」の作成手法のあらましと、その結果が「確率論的地震動予測地図」と「シナリオ地震による地震動予測地図」の2種類の性質の違う地図の組み合わせたものとして公表される予定であること、その融合が課題であることなどが示された。さらに、2.2 節では、こうした問題に関しての国際標準化機構や米国での扱いの現状が示された。本節では、これらを踏まえ、「全国を概観した地震動予測地図」の工学利用に向けての視点から全般的な期待を述べる。工学面での個々のケースにおける適用可能性については、4 章で述べられる。

2.3.1 工学的利用の範囲

ここでいう地震動予測地図とは、2.1 節に示されているように、

- ① 確率論的地震動予測地図
- ② シナリオ地震による地震動予測地図

に具体的に役立てるということに集約される。

人命安全の目的を達するためには、対象とする構造物・施設がその存在期間中に被る可能性のある最大級の地震動に対して耐震性を確保することが最重要課題である。経済活動維持等の目的を達成するためには、人命安全を大前提としたうえで、費用対効果を考慮に入れた適正な水準の耐震対策を講じることが求められる。

2.3.2 工学的利用からの期待

このような工学的利用面から地震動予測地図へ期待を述べると以下のようなものである。

(1) 人命安全のための事前対策への利用

「防災基本計画（平成 7 年 7 月、中央防災会議）」によれば、構造物・施設等の耐震性の確保についての基本的考え方として、「供用期間中に 1 ～ 2 度程度発生する確率を持つ一般的な地震動、及び発生確率は低い直下型地震又は海溝型巨大地震に起因する更に高レベルの地震動とともに考慮の対象とする」とある。そして、「構造物・施設等は、一般的な地震動に際しては機能に重大な支障が生じず、かつ高レベルの地震動に際しても人命に重大な影響を与えないことを基本的な目標として設計する」とある。

将来起こりうるさまざまな大きさの地震動に対する現実的な対応策として、このような（少なくとも）2 段階の大きさの脅威に対して、具体的な対策を講じるというコンセプトは、土木、建築、機械など広い分野の耐震設計に導入されている。

人命安全のためには、このうち高レベル地震動が「起こることを前提として」諸対策がなされることが基本であると考ええる。この議論の際に、そのような地震動を前提とすることについて関係者（政策担当者、設計エンジニア、施工会社、利用者、地域住民など）が「説明できる。理解できる。納得できる。合意できる。」ということが大切である。

兵庫県南部地震以前の多くの設計基準書には、設計用地震力として、設計震度や標準応答スペクトルが示されていたが、設計エンジニアといえども、基準にある地震力の根拠を理解することは相当に困難であった。まして、彼らが周囲（たとえば家族やマスコミでもよい）にそれを説明することは不可能であった。自ら地震動を作成して確認するという行為も、データ不足や技術力の不足から、なされていなかった。そうした労力を歓迎する設計や発注システムも整備されていなかった。こうした地震動評価に関する長年の慣行は、日本の耐震技術に対する安全神話の形成を助長した一要因ともいえる。

このような反省から、高レベル地震動の概念が兵庫県南部地震を契機に広まったのである。たとえば、土木学会委員会では、これをレベル2地震動といい、「構造物の損傷過程に立ち入って安全性を照査するための地震動であり、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動」とし、「震源となる断層と対象地点を特定して設定することを原則とする」としている（「土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）」、地震工学委員会耐震基準小委員会、2001年9月）。現実的には、震源となる断層を特定することは高度な技術的問題であり、事前に特定できないこともある。また、特定できても、その断層の破壊過程や地震波の伝播を事前に予測するということには多くの不確定性を含む。

以上を踏まえると、人命安全を目的としたときに地震動予測地図に期待されるものは、高レベル地震動（またはレベル2地震動）の根拠となる基本情報を関係者に分かりやすく、利用しやすく提供するということに尽きる。こうした議論の中で、地震や地震動の発生確率に関する情報が、混乱なく、活用されることが望ましい。また、提供される情報は、調査研究の進展に応じた修正や更新が適切になされる「生きた」ものであることが期待される。理学、工学両面からのこうした調査研究努力が、自然現象の解明と防災対策とのギャップの解消となって「人命安全」の諸施策に結実すべきである。

(2) 経済活動維持、資産保全等のための事前対策への利用

これまで、経済活動維持や資産保全を明確な目的とした地震動利用が公に議論されることは少なかった。しかし実際、地震動には、(1)で述べた最大級の地震動よりも、それ以下の大きさの地震動が多く発生するのであり、それらの中には、対象構造物・施設に損傷を与える可能性があることは否定できない。構造物・施設の崩壊が防げて人命を確保できても、機能損傷によって経済活動が麻痺したり、資産を喪失したりすることがあれば、安心な社会とはいえない。特に、今日の我が国のように都市機能が複数の社会基盤施設の高度な相互依存により成り立っている状況下ではこの問題は重大である。

こうした問題に対処するためには、どの程度の地震の脅威に対して、社会は（あるいは、企業は、個人は、）どの程度のコストを負担して対応すべきか、という地震リスクマネジメ

ントが必要になる。これは、単に構造設計の問題に留まらず、事後の修復費用や補償、保険や債権、企業の社会的責任や信用、個人の価値観などの広い課題が関与する。

地震動予測地図のうち、確率論的地震動予測地図は、将来の地震動強度分布を示すものであるから、地震リスクマネジメントにおける基本情報として有用である。たとえば、構造設計においての利用側面としては、供用期間中に作用すると予想されるすべての地震動について、構造物の応答を調べ、損傷が予測される場合には、設計変更か、事後修復かを経済的な指標により判断し、最適な構造断面を決定する、という手法が整備されるべきであろう。ライフラインのようなネットワークシステムについても同様の手法が有効であろう。保険や債券において、災害の確率論的評価が活用されているのは周知のとおりである。

地震動予測地図をこうした将来課題解決に役立つ「地震ハザード評価の共通情報基盤」として関係者が共有することを期待する。

3. 地震ハザード評価の現状と課題

3.1 地震ハザード技術の進展

本章では、工学分野における確率論的方法による地震ハザード評価の現状と課題を整理する。第1章で論じたように、地震ハザード評価については従来から工学分野で多大の努力が払われ、多くの方法論が開発されてきた。特に、工学的課題が常に直面する「不確定性のもとでの意思決定」の命題を克服するため、確率論的地震ハザード評価法は、専ら工学分野で開発が進められてきたものである。我が国においては、河角による地震ハザードマップ¹⁾、データ収録期間を考慮したハザードマップ²⁾などの研究がこの分野の初期に行われた。一方、米国では、Cornell³⁾により確率論的地震危険度解析のプロトタイプとなる理論が発表され、これが世界的にその後の確率論的地震ハザード評価法発達の源流となった。我が国の研究が多分に統計的手法に依存していたのに対し、Cornellの方法は地震ハザード評価をシステム論的に筋の通った確率モデルとしたところにその後の発展の原動力があったと言える。

地震ハザード評価法は、工学的ニーズに従い多様な進展を遂げ、工学の実務に適用されてきた。しかし、地震・地震動という複雑で不確定性が高い現象に対して、詳細であるが定量的決定が困難な地震学的知見と、確率モデルによりシステム化されているが実際の現象を時には極端に単純化している工学的方法の間には相当な認識の隔たりと方法論的なギャップが存在した。

もちろんこうしたギャップが放置されていたわけではなく、物理的現象に関する最先端の知見を出来る限り吸収しつつ、不確定性評価を合理的に組み合わせる確率論的地震ハザード評価手法に脱皮する努力がたゆまず続けられてきた。こうした努力が最も厳しく要求されるのは原子力施設の地震リスク評価の分野である。この分野で開発されてきた最新の方法は、これまで工学分野で開発されてきた確率論的地震ハザード評価の方法を包含し、かつ地震学・地質学の最新の知見に最も肉迫する内容を備えるに至っている。

本章では、原子力の分野で開発されてきた地震ハザード評価手法を紹介するとともに、それらが今後展開すべき方向を論ずる。これにより前章で展開された確率論的地震動予測地図作成の方法論との共通点と相違点が浮き彫りにされ、今後の地震ハザード評価手法の展開において、理学と工学の相互理解と連携が進展することが期待される。

参考文献

- 1) Kawasumi, H., "Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity throughout Japan Inferred from Seismic Activity," Bulletin of Earthquake

Research Institute, University of Tokyo, Vol. 29, 1951, pp.469-482.

- 2) 後藤尚男・亀田弘行:地震時における最大地動の確率論的研究、土木学会論文集、第 159 号、1968.11, pp.1-12.
- 3) Cornell, C. A., "Engineering Seismic Risk Analysis," Bulletin of Seismological Society of America, Vol.58, 1968, pp.1583-1606.

3.2 確率モデルに基づく地震ハザード評価

本節では、原子力施設の地震リスク評価手法開発の一環として開発された確率モデルに基づく地震ハザード評価手法における次の3つの手法について述べる。

- ・ 距離減衰式を用いた地震ハザード評価手法
- ・ 震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法
- ・ 距離減衰式と震源断層モデルを組み合わせた地震ハザード評価手法

3.2.1 距離減衰式を用いた地震ハザード評価法

距離減衰式を用いた地震ハザード評価法における評価手順を図 3.2.1 に示す。この手順は、次の4ステップからなる。

- ・ 対象サイト周辺の地震関連情報の収集・分析
- ・ 震源モデルの設定
- ・ 地震動伝播モデルの設定
- ・ 地震ハザードの評価

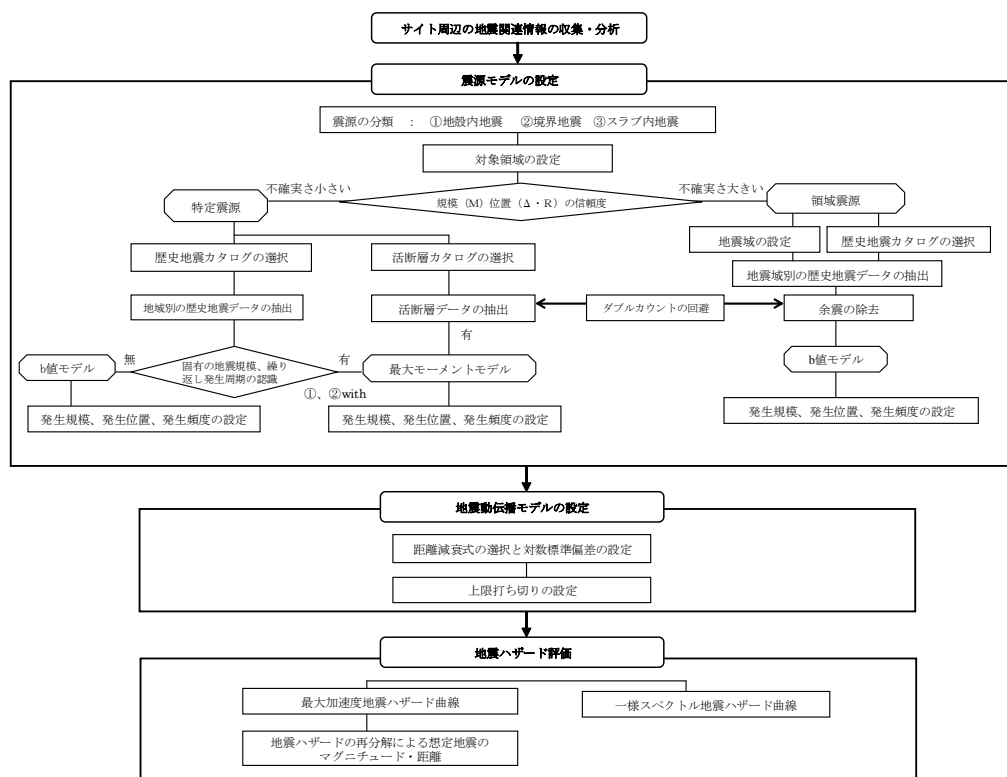


図 3.2.1 距離減衰式を用いた地震ハザード評価手順

(1) 対象サイト周辺の地震関連情報の収集・分析

原子力施設を対象とした地震ハザード評価では、任意の 1 つの原子力サイトを対象とするので、調査の範囲をある程度限定し詳細な調査ができる。原子力施設の設計・建設のために、サイト周辺の一般公開の地震関連情報の収集・分析に加え、サイトから 30 k m 以内の地域と 3 k m 以内の領域に分けて、調査・試験の内容や詳細さを分けて行っている。主な内容について述べる。

- ・一般公開情報
 - ・ サイト周辺における地震発生様式
 - ・ 地震地体構造図
 - ・ 地震空白域
 - ・ 活断層データ・歴史地震データ
 - ・ 活断層のセグメンテーション
 - ・ 地震動観測データ
 - ・ 距離減衰式
- ・ サイト敷地から 30 k m 以内の地域
 - ・ 地形・リニアメント調査
 - ・ 地表地質調査
 - ・ 海底地質調査
- ・ サイト敷地から 3 k m 以内の地域
 - ・ ボーリング調査
 - ・ 試掘坑調査
 - ・ 物理探査
 - ・ トレンチ調査

これらのうち、一般公開情報のうちのサイト周辺における地震発生様式の概念図を図 3. 2. 2 に示す。サイト敷地から 30 k m 以内地域における地形・リニアメント調査の例¹⁾を図 3. 2. 3 に、3 k m 以内地域におけるトレンチ調査の例²⁾を図 3. 2. 4 に示す。

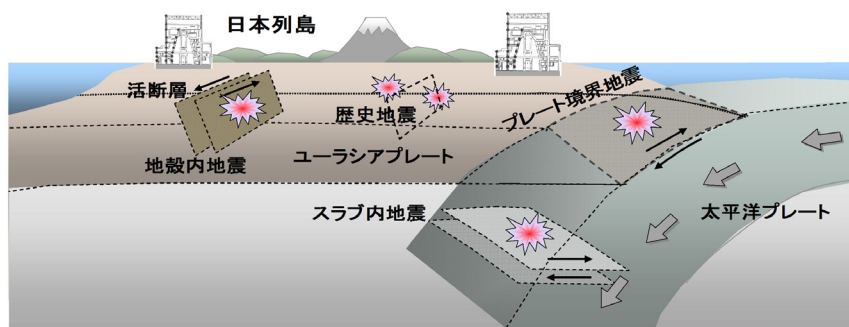


図 3. 2. 2 対象原子力サイト周辺における地震の発生様式の概念図

3.2 確率モデルに基づく地震ハザード評価

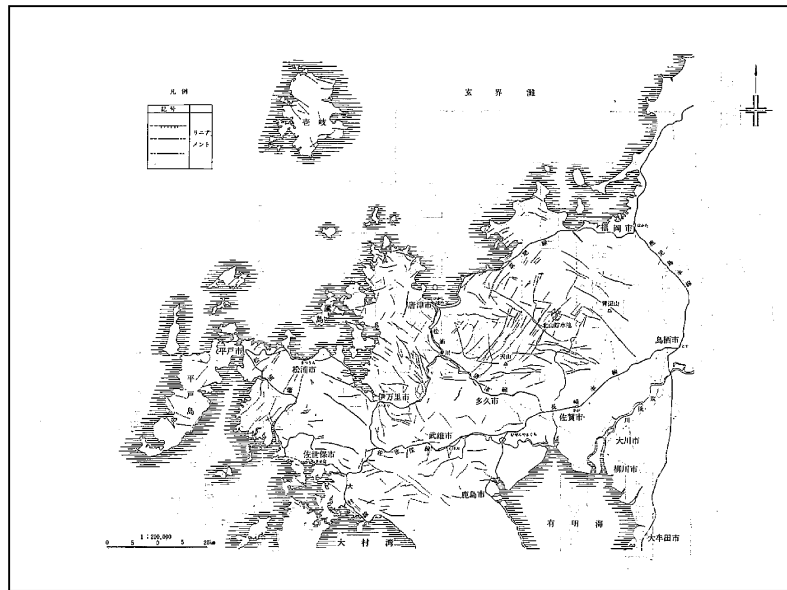


図 3.2.3 地形・リニアメント調査の例¹⁾

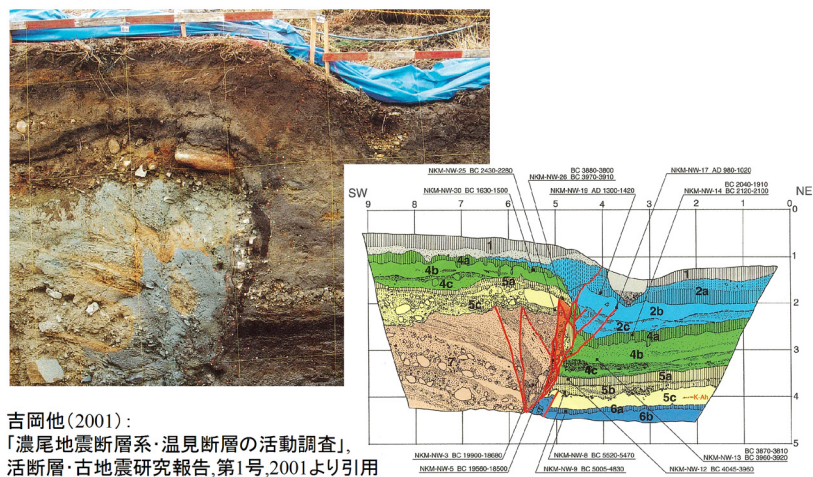


図 3.2.4 トレンチ調査の例²⁾

(2) 震源モデルの設定

震源モデルの設定では、まず、対象サイト周辺で発生する地震の発生様式に基づき、震源の分類を行うと共に、対象とする領域の設定を行う。次いで、対象とする震源毎の発生規模・位置・頻度のパラメータは活断層データや歴史地震データを用いて設定するが、設定方法として、発生規模及び頻度の設定根拠に関する不確実性の程度によって、次の2つの方法がある。

- ・ 特定震源

・領域震源

特定震源は、活断層から発生する地震の規模及び頻度を活断層データを用いて設定する場合に、不確実さが比較的に小さい震源に適用される。これに対し、領域震源は、地震の規模及び頻度を歴史地震データを用いて設定する場合に、不確実さが特定震源に比べ比較的大きい震源に適用される。以下、特定震源の場合と領域震源の場合に分けて、発生規模・位置・頻度の設定の仕方の概要について述べる。

1) 特定震源の場合

特定震源における発生規模・位置・頻度の設定では、まず、各種活断層カタログを選択し、これらから対象とする活断層データを抽出する。次いで、発生規模・位置・頻度を設定するが、その方法として、最大モーメントモデルを用いている。最大モーメントモデルは、対象活断層から固有の地震規模の地震が一定の繰り返し間隔で発生するとのモデルである。

①断層面形状（及び位置）

活断層資料に基づく活断層の位置及び形状や、地震観測記録が示す震源分布から断層面形状を設定する。断層線は直線、断層幅は断層長さと同じとする。

②地震規模（マグニチュード）

将来発生する地震の規模は、地表地震断層長さに応じて最大マグニチュードを定め、基本的に固有地震モデルとして評価する。

③地震発生頻度

地震発生頻度は、活断層の地震時断層変位 D と活断層の年平均変位速度 S の比 S/D により平均的な発生頻度として評価する。過去に繰り返し発生した地震の年代が評価可能なトレンチ調査結果等が存在する場合には、それらに基づいて発生頻度や地震発生の非定常性を評価する。

2) 領域震源

領域震源における発生規模・位置・頻度の設定では、地震域毎の歴史地震データを用いて、これらのパラメータを設定する。そこで、まず、地震地体構造マップの情報を用いて、地震域を設定する。次いで、各種歴史地震カタログを選択し、これらから地震域毎の歴史地震データを抽出する。更に、これらのデータから余震データを除去する。そして、余震データを除去したものをを用いて、発生規模・位置・頻度を設定するが、特定震源の場合と同様に次の 2 つの方法がある。

- ・ b 値モデル
- ・ 最大モーメントモデル

これらのうち、b 値モデルは、個々の震源の規模・位置・頻度を設定するのではなく、地震発生様式の類似の広い領域の地震域において、地震の発生規模と頻

度が b 値に従うとして、地震の発生規模と頻度を設定する。また、位置は地震域で一様分布とする。

一方、最大モーメントモデルは、繰り返し周期が認められている歴史地震（例えば、南海トラフで発生する地震）に適用する。これは、特定震源と同様に、固有の地震規模の地震が一定の繰り返し間隔で発生するとの考えから適用している。

①地震発生領域

地震地体構造区分図に基づき、任意な形状を有する面領域としてモデル化する。領域震源の深さは、各領域における地震の震源深さに基づき設定する。

②地震規模（マグニチュード）と地震発生頻度の関係

地震規模（マグニチュード）と地震発生頻度の関係は、マグニチュードが小さくなると地震の発生度数が指数関数的に増大するとした Gutenberg-Richter 式（G-R 式）に代表されるモデル（いわゆる b 値モデル）を用いて評価する。

評価にあたっては、領域震源と特定震源でそれぞれ考慮する地震のダブルカウントを避けるために、特定震源として考慮される過去の地震を評価に用いる地震資料から除去する。また、地震の発生はポアソン過程に従うとしていることから、余震については除去する。

3) ダブルカウントの回避

地震断層のように、活断層と歴史地震が対応している地震（例えば、根尾谷断層と濃尾地震・美濃地震との関係）に関しては、ダブルカントを避けるために、いずれかを選択するが、活断層データの方を選択する。その理由は、活断層データは数十万年オーダーの情報を有しているためである。

(3) 地震動伝播モデルの設定

地震動伝播モデルの設定では、地震動評価のための距離減衰式を選択すると共に、各式に示されている対数標準偏差を設定する。また、地震動の上限を設定するための打ち切りのために、打ち切り用の信頼度区間を設定することを基本としている。

地震動の上限の設定の有無を任意としている。これは、設定の根拠が乏しいためである。しかしながら、地震動の大きさが有限であることを踏まえると、上限を設定するモデルの方が現象に忠実である。

(4) 地震ハザード評価

1) 地震ハザードのパラメータ

地震 PSA における地震ハザードは、構造物・機器の応答評価やフラジリティ評価とセットで用いられ、使用目的によって次の 3 つのパラメータとして表される。

- ①最大加速度、速度及び震度
- ②一様応答スペクトル
- ③地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離

①は、後述 4.8 節で述べるように、原子力分野における最も過酷な炉心損傷の発生頻度評価に用いられる。最大加速度をパラメータとする地震ハザードの例を図 3.2.5 に示す。

②及び③は、構造物・機器の動的応答解析のための時刻歴波形を作成するために用いられる。図 3.2.6 に一様スペクトルと地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離の例を示す。これらの具体的な使用例について述べる。

・一様ハザードスペクトルの場合

応答スペクトル距離減衰式を用いて、一様ハザードスペクトルを求め、これを目標スペクトルとし時刻歴波形を評価する。

・地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離の場合

亀田・石川の方法³⁾、(財)原子力発電技術機構の方法⁴⁾等により、任意の超過確率に寄与する適合マグニチュード M と震源距離 Δ を求める。 $M \cdot \Delta$ と応答スペクトル距離減衰式を用いて目標スペクトルを求め、この目標スペクトルを満足するように時刻歴波形を求める。

2) 表示形式

地震ハザード曲線を表示する場合には、そのサイトのハザードがどのような震源によって寄与されているか、またどのような地震データ（活断層データ、歴史

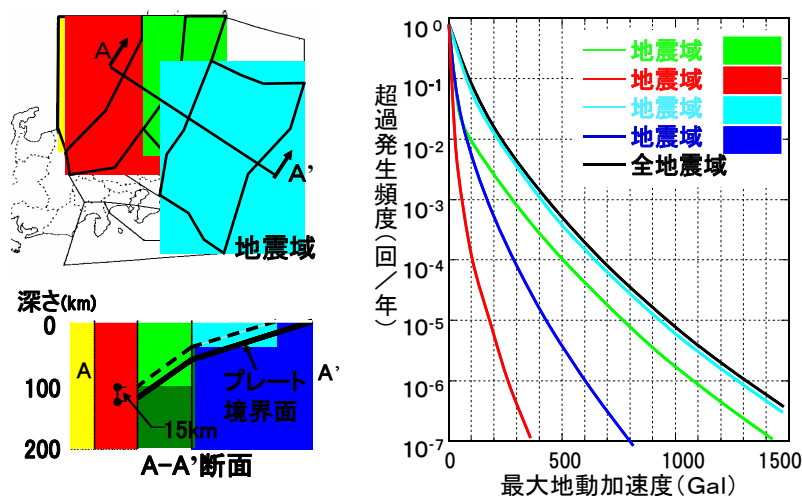


図 3.2.5 最大加速度をパラメータとした地震ハザード評価の例

3.2 確率モデルに基づく地震ハザード評価

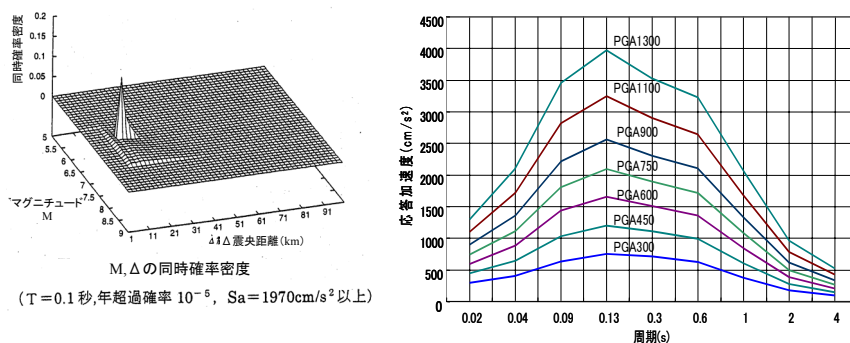


図 3.2.6 地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離と一様ハザードスペクトルの例

地震データ)の寄与が大きいかがわかるように、図 3.2.5 中に示すように震源別、地震データ別のハザード曲線も重ね書きする。

3.2.2 震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法

(1) 震源断層モデルを用いた地震動の評価手法

主な震源断層モデルの概要について示す。

①理論的方法

周期約 1 秒以上の長周期領域の地震動を理論的に評価するのに適した方法であるが、短周期領域の地震動の評価には適しない。

②経験的グリーン関数法

発震機構や波動伝播経路が大地震と共通する中小地震の観測波形をグリーン関数として考え、それを断層の破壊過程に合わせて重ね合わせるにより大地震の地震動を評価する方法である。

③統計的グリーン関数法

他地点で得られた多数の観測波形を統計処理して求めたスペクトルと経時特性を用いて作成した模擬波形を要素地震波形とし、②の方法と同様に大地震の地震動を評価すると共に、サイトの地盤特性を考慮して地震動を評価する方法である。

④半経験的波形合成法

①の方法による地震動の長期成分と②の方法による短期成分をハイブリットした方法である。その概要を図 3.2.7 に示す。

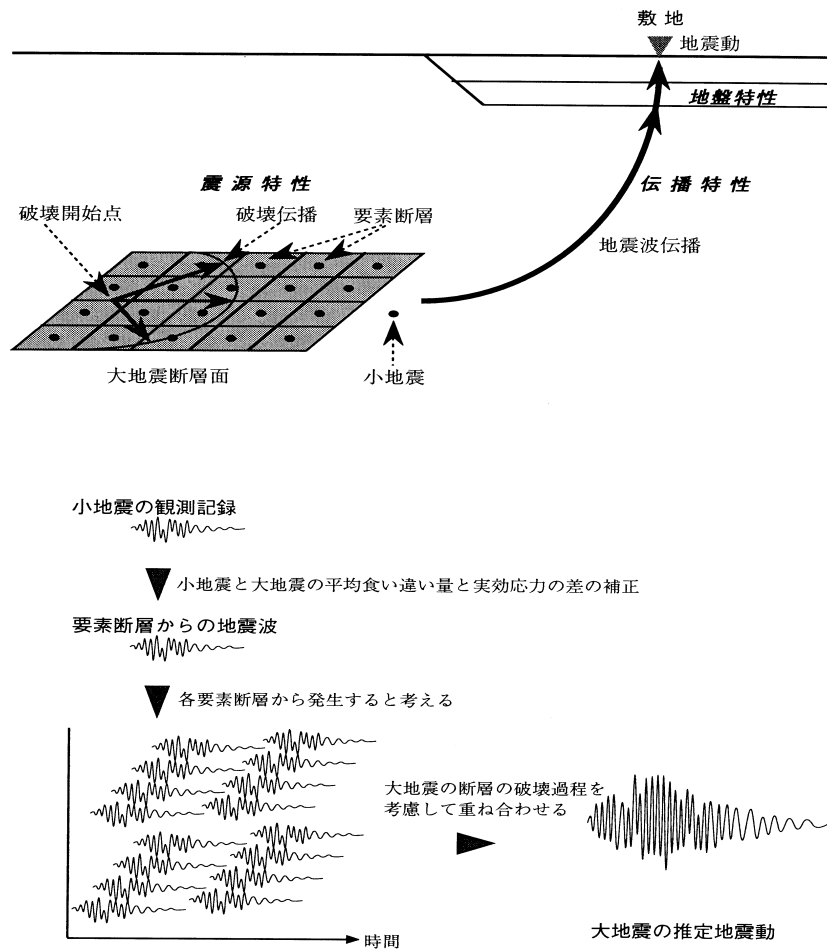


図 3.2.7 震源断層モデルを用いた地震動評価の概念図（半経験的波形合成法の場合）

（２）震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法

震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法としては、独立行政法人原子力安全基盤機構の手法⁵⁾が公開されている。同手法は、半経験的波形合成法を用いたものであり、その評価手順は図 3.2.8 に示す次の 6 ステップからなる。

- ① 震源断層の破壊領域の設定
- ② 破壊領域を対象にして、地震発生時系列モデルの設定
- ③ 震源断層モデルの設定
- ④ 要素地震の設定
- ⑤ 設定した震源断層モデルと要素地震を用いた地震動評価
- ⑥ 地震発生時系列モデルによる地震発生確率と組み合わせたハザード曲線の評価

3.2 確率モデルに基づく地震ハザード評価

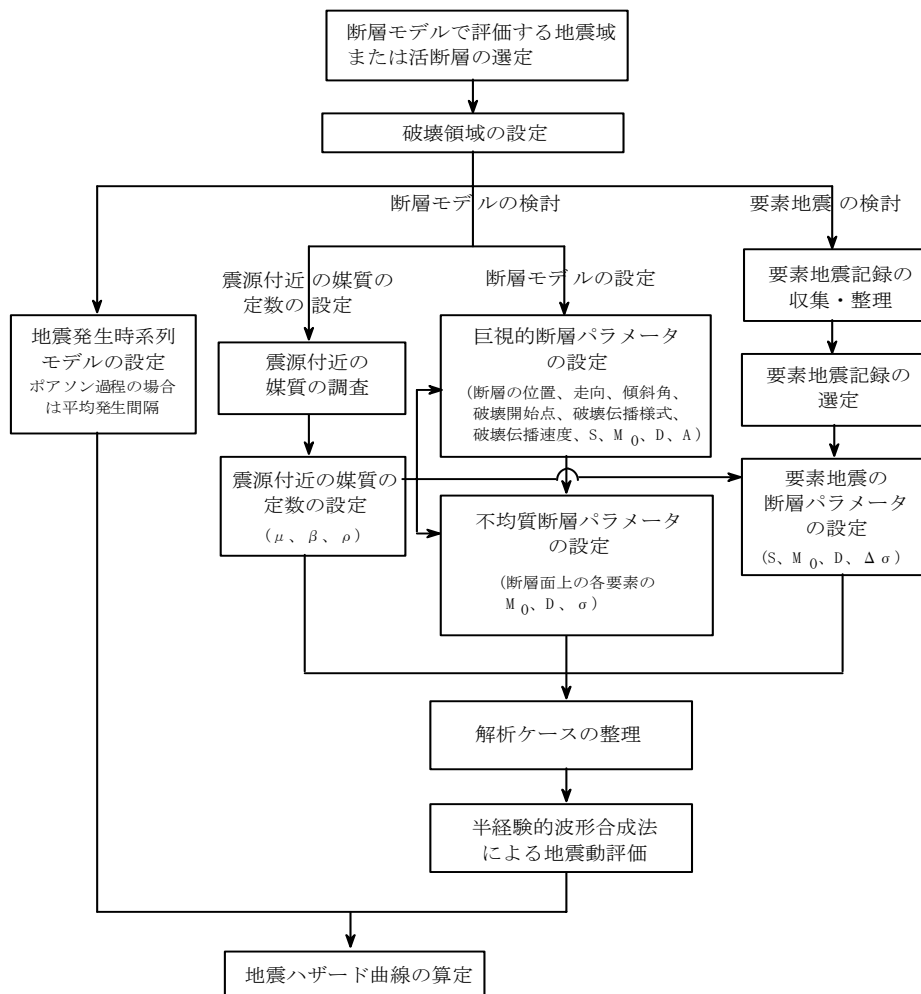


図 3.2.8 震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手順

①破壊領域の設定

地震ハザード評価に大きな影響を及ぼす震源断層は、サイトから近距離にあり、かなりの規模を有する断層が想定される。従って、活断層やプレート境界で発生する大規模な地震のように震源域が特定し易く、その規模も比較的に特定しやすい断層が対象となる。

②地震の発生確率の算定

地震の発生時系列モデルは、定常あるいは非定常ポアソン過程でモデル化される。

③震源断層モデルの検討

i) 震源付近での媒質の定数の設定

震源断層モデルにより地震動を評価する場合に必要な震源付近の媒質の定数は、せん断波速度 β 、密度 ρ 、剛性率 μ 及び Q 値である。これらの諸定数

については、既往の文献及び調査結果等を参考として設定する。

ii) 断層モデルの設定 (震源特性)

・巨視的断層パラメータの設定

巨視的断層パラメータは、修正強震動予測レシビ⁶⁾等によって設定する。

- ・断層面積 ($S=L \times W$) : 推定
- ・断層の位置 : 走向、傾斜角、すべり角
- ・破壊開始点 : 緯度、経度、深さ
- ・破壊伝播様式 : 例えば、同心円状
- ・静的応力降下量 ($\Delta \sigma$) : 例えば、海溝型地震の平均的な値 (30bar)
- ・地震モーメント (M_0) : $M_0 = (16 / (7 \times \pi^{1.5})) \times \Delta \sigma \times S^{1.5}$
- ・平均すべり量 (D) : $D = M_0 / (\mu S)$
- ・破壊伝播速度 (V_r) : 例えば、 $V_r = 0.72 \times \beta$
- ・立ち上がり時間 (τ) : 例えば、 $\tau = W / (2 \times V_r)$

・微視的断層パラメータの設定

アスペリティと背景領域における微視的断層モデルは、アスペリティの面積を与える方法によって設定する。

- ・アスペリティの個数・位置 : 推定
- ・アスペリティの総面積 (S_a) : 例えば、 S_a/S の平均値 0.248、標準偏差 0.076
- ・個々のアスペリティ (半径 r_i) での変位量 ($D_{m \text{ asp}}$) : プレーートの平均収束率や活断層調査等より推定
- ・個々のアスペリティの地震モーメント ($M_{0 \text{ asp}}$)

$$: M_{0 \text{ asp}} = \mu D_{m \text{ asp}} S_{m \text{ asp}}$$
- ・個々のアスペリティの応力降下量 ($\Delta \sigma_{m \text{ asp}}$)

$$: \Delta \sigma_{m \text{ asp}} = (7/16) \times (M_0 / (R r^2))$$

R は断層全体の面積を円に置換した時の等価半径、 r はアスペリティの総面積を円に置換した時の等価半径である。

- ・背景領域断層パラメータ (面積、平均すべり量、地震モーメント、応力降下量)

④ 要素地震の設定

要素地震の設定は、対象サイト周辺における観測波形から選択する。サイト周辺での中小地震の観測波形を用いる場合には、次の要素地震の断層パラメータを設定する。

- ・地震モーメント M_0 の設定

- ・ 臨界円振動数 ω_c の設定
- ・ 断層面積、平均すべり量、実効応力の算定
- ・ 立ち上がり時間の設定

⑤ 地震動評価

③の震源断層モデルと④の要素地震を用いて地震動を評価する。ハザード評価における地震動は、断層パラメータの不確実さを考慮して評価される。具体的な例としては、破壊開始点、各セグメントのアスペリティ個数及び位置、アスペリティの応力降下量、要素地震波の種類、高周波遮断特性等を対象としてこれらの組み合わせをロジックツリーとして表す。

⑥ 地震ハザード評価

②の地震発生確率と⑤の地震動の最大加速度からハザード曲線を評価する。評価した地震動の最大加速度あるいは応答スペクトルと年発生回数の対応表を作成し、その年発生回数を累積して年累積回数を求め、定常ポアソン近似してハザード曲線を評価する。

(3) 評価例

上記⑤で述べたように、断層パラメータの不確実さを考慮して、破壊開始点、各セグメントのアスペリティ個数及び位置、アスペリティの応力降下量を対象としたロジックツリーと、これに基づき作成した地震ハザード評価結果の例を図 3.2.9 に示す。

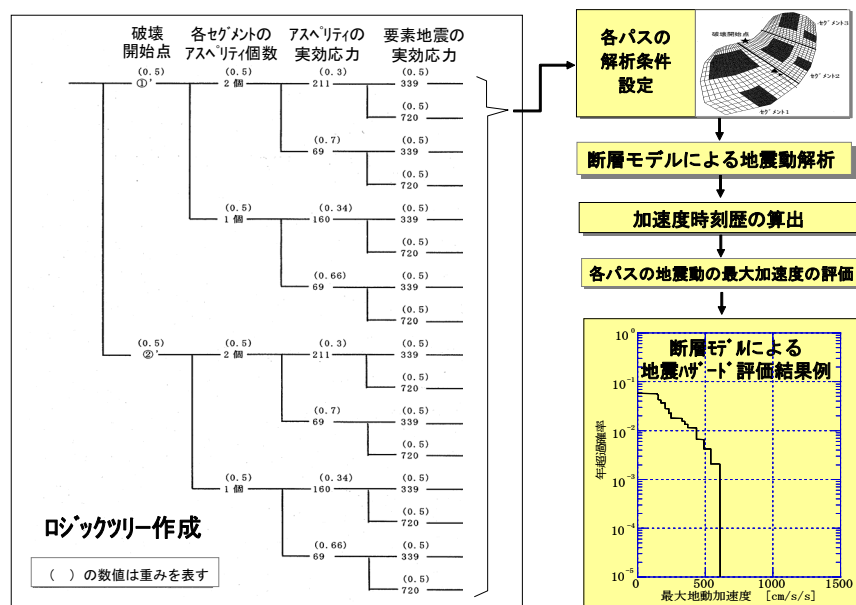


図 3.2.9 震源断層モデルを用いた地震ハザード評価の例

3.2.3 距離減衰式と震源断層モデルを組み合わせた地震ハザード評価手法

3.2.1 の距離減衰式を用いた地震ハザード評価手法と 3.2.2 の震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法を組み合わせた手法の手順⁵⁾を図 3.2.10 に示す。

同手順では、まず、震源断層モデルで評価する地震とそれ以外の地震に大別する。次に、それぞれの地震によるサイトでの地震動の最大加速度/応答スペクトルがある値 y を超える事象の年発生率 ν を求める。この時、震源断層モデルでの対象地震以外に対しては、従来通り距離減衰式を用いて地震動を評価する。そして、それぞれの地震による年発生率 ν を足し合わせて、サイトでの地震ハザード曲線を求める。

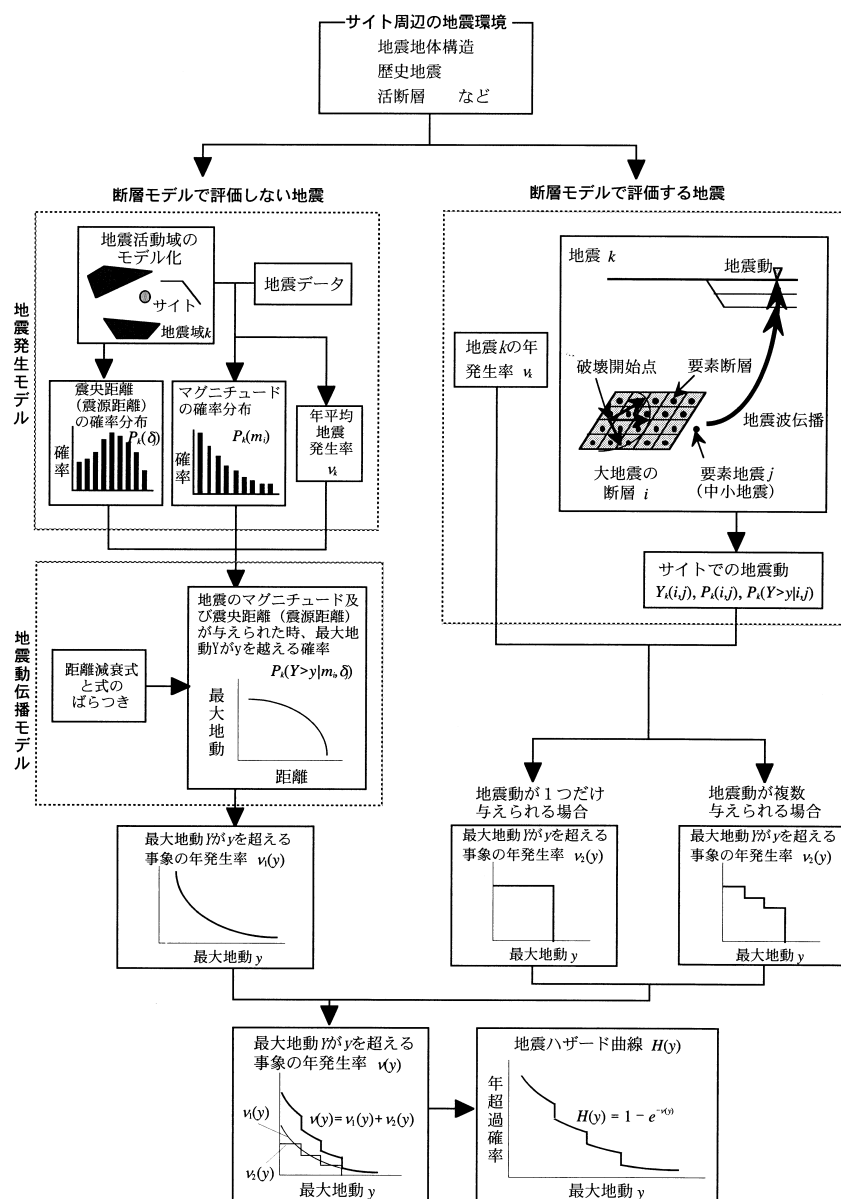


図 3.2.10 距離減衰式と震源断層モデルを用いた地震ハザードの組み合わせ手順

参考文献

- 1) (社)日本電気協会:原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987、p87.
- 2) 吉岡他:濃尾地震断層系・温見断層の活動調査、産業技術総合研究所地質調査総合センター、活断層・古地震研究報告、第1号、2001.
- 3) 亀田弘行・石川裕:ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析への拡張、土木学会論文集、No.392/I-9、pp.395-402(1988).
- 4) 原子力発電技術機構:13年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備(その2)に関する報告書—地震ハザードの試解析—、INS/M00-16、平成11年3.
- 5) 原子力発電技術機構:平成14年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備に関する報告書＝地震ハザードの試解析＝、INS/M02-13、平成13年3月.
- 6) 入倉孝次郎他:強震動予測のための修正レシピとその検証、第11回日本地震工学シンポジウム講演論文集、567-572、2002.

3.3 専門家の意見集約を組み込んだロジックツリーによる地震ハザード評価手法

3.3.1 地震ハザード評価における不確定性要因の整理

(1) 不確定性の要因

不確定性の要因は、物理現象固有のランダム性による不確定性と、知識や認識に係わる不確定性に大別される。前者は、物理現象固有のランダム性によるもので、その不確定性を許容せざるを得ないが、後者は知識や認識に係わるもので、科学の進歩等で不確定性の低減が可能である。後者の要因を対象として不確定性評価が行われる。

- ・物理現象固有のランダム性による不確定性 (aleatory uncertainty)
 - ・材料特性などに見られるように、対象とする物事が本来的に持つばらつき特性によるもので、ばらつきをそれ以上減じることができないものを指す。
 - ・物理的不確定性 (physical uncertainty) やランダム性、偶発性 (randomness) 等と呼ばれる性質によるものも含まれる。
- ・知識や認識に係わる不確定性 (epistemic uncertainty)
 - ・知識の欠如、モデル化や評価プロセスに含まれる不確定性、解釈の相違などを表し、将来対象とする物事についての知識の増加や科学の発展によりその不確定性を減じることが期待できるものを指す。
 - ・統計的不確定性やモデル化不確定性と呼ばれる性質によるものも含まれる。

(2) ロジックツリーの概要

ロジックツリーの基本的構成は、図 3.2.9 に示すように評価項目 (例えば、図中の破壊開始点、アスペリティ個数、アスペリティ実行応力、要素地震の実行応力)、分岐数及び、各分岐の重みからなる。重みは関連データの信頼性等 (必要に応じて専門家の意見を反映して) 設定する。各評価項目の分岐を連ねたパスごとに地震ハザード解析を行う。各パスの結果に重み付けを考慮して統計処理し、フラクタイル評価 (平均値、中央値、特定の信頼度等) して地震ハザード曲線を求める。

3.3.2 ロジックツリーを用いた地震ハザードの不確定性評価手法

不確定性の評価手法としては、独立行政法人原子力安全基盤機構がロジックツリーを用いた手法を提案しているので、この内容について記述する。

(1) 評価手順

同機構の評価手順は図 3.3.1 に示すように 11 ステップからなる¹⁾。

- ①対象サイトの地震関連情報の収集・分析
- ②重要課題の特定

3.3 専門家の意見集約を組み込んだロジックツリーによる地震ハザード評価手法

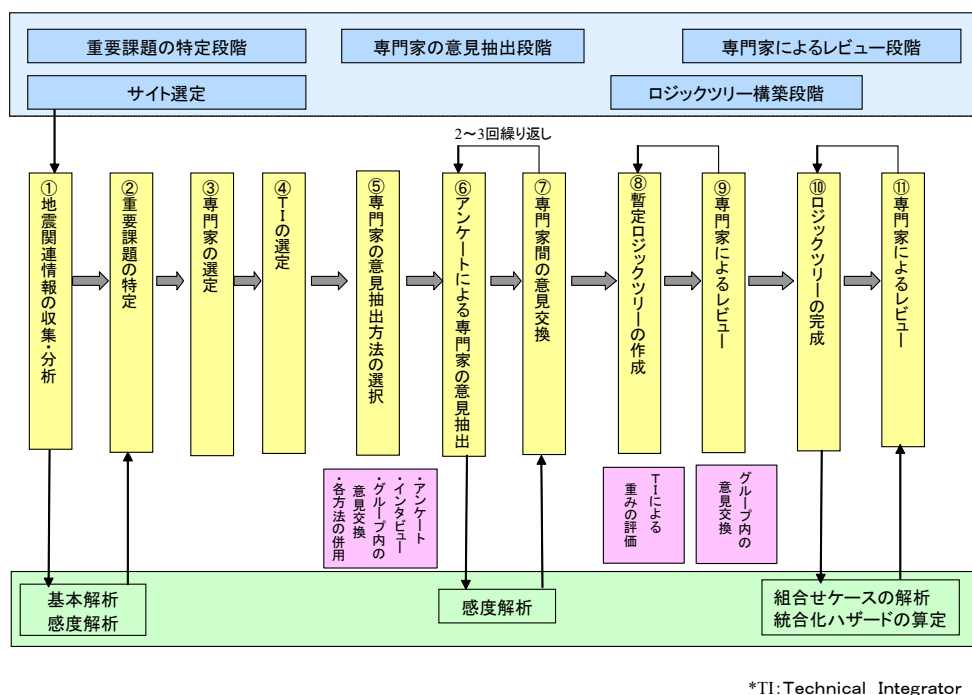


図 3.3.1 専門家意見の抽出・集約方法とロジックツリー作成手順

- ①の関連情報の収集・分析結果に基づき、不確定性の要因のうち重要課題を特定する。
 - ③専門家の選定
 - ②の重要課題に関する専門家を選定する。選定に当たっては特定の専門分野に限定せず、いくつかの専門分野の専門家を選定する。
 - ④TI (Technical Integrator) の選定
 - 専門家の意見の抽出・統合する重要な役割を果たす TI を選定する。
 - ⑤専門家の意見抽出方法の選択
 - 専門家の意見抽出方法を選択する。方法としては次のものがある。
 - ・ アンケート
 - ・ インタビュー
 - ・ グループ内の意見交換（少人数のワークショップも含む）
 - ・ 上記方法の併用
- 以下、アンケート調査方法に限定して述べる。
- ⑥アンケート調査による専門家意見の抽出
 - アンケート調査の設問は、具体的な回答が得られる設問とする。素案を示し修正を求める形式もある。自由回答ができるようにする。専門家の意見を収集する段階で、各専門家の意見が結果にどの程度影響するかを、感度解析を行い提示する。専門家から各項目に対し重み付けをしてもらう。

⑦専門家間の意見交換

専門家間の意見の相違を明確にするため、議事進行役を TI に依頼し、専門家間の意見の交換を実施する。⑥から⑦を 2～3 回程度繰り返し、意見を集約する。

⑧暫定ロジックツリーの作成

⑦の意見集約結果に基づき暫定ロジックツリーを作成し、各分岐の重みに関するアンケート調査結果から、各専門家がどの意見をどの程度支持しているのかを数字で把握する。しかしながら、単に平均をとるだけでなく、技術的な観点から重みを判断するという認識が重要である。各専門家の意見を統合して最終的なロジックツリーの分岐と重みを設定する方法としては、以下の 2 通りがある。

- ・地震ハザード実施者が専門家の意見を参照して行う方法
- ・ TI が行う方法

⑨暫定ロジックツリーの専門家によるレビュー

⑧の暫定ロジックツリーのレビューを受ける。

⑩最終に近いロジックツリーの作成

⑨の結果に基づき最終に近いロジックツリーを作成する。

⑪ロジックツリーの専門家によるレビュー

ロジックツリーを専門家によってレビューを受け、ロジックツリーを完成する。

(2) ロジックツリー作成上の留意事項

ロジックツリー作成上の留意事項について、専門家選定、アンケート調査、TI、意見交換及び意見集約の観点から述べる。

1) 専門家の選定

- ・多様な研究及び実務機関より専門家を選定
- ・課題ごとに専門家を選定

2) アンケートの調査

- ・質の高い情報の提供と回答項目の設定
- ・適切な文章表現による誤解・曖昧回答の回避
- ・自由回答欄を設け多様な意見の抽出

3) TI の役割

- ・ TI 選定の公平性
- ・意見強制の回避・公平な運営・妥協の回避
- ・積極的な討議の促進

4) 意見交換及び意見集約

- ・適切な人数（6～8 名程度）で、複数回意見交換

- ・アンケート結果に基づき要点・論点を整理した情報と素案の提示（デルファイ法の適用）
- ・感度解析結果による影響の小さい意見の削除
- ・強制を伴わない意見交換
- ・理学情報に基づいて工学判断するプロセスの合意
- ・意見交換プロセスの透明性・説明性の確保
- ・最後まで意見集約しない項目の明確化

3.3.3 ロジックツリーを用いた地震ハザード不確定性評価の例

ロジックツリーを用いた地震ハザードの不確定性評価の例¹⁾を図 3.3.2 に示す。図中には、上記手順における専門家間による意見の交換を行う前と後それぞれの地震ハザード評価結果を示している。図から、意見交換の後に不確定性が低減されていることが分かる。

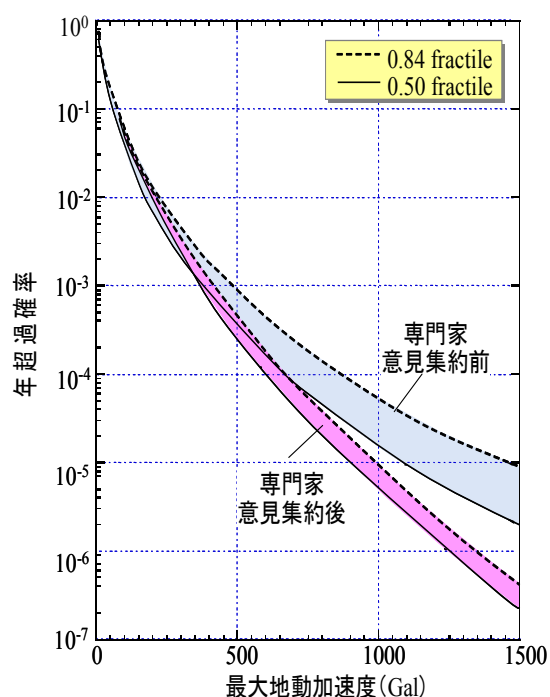


図 3.3.2 ロジックツリーを用いた地震ハザードの不確定性評価の例

参考文献

- 1) 蛭沢勝三:JNES における地震ハザード評価手法とロジックツリーの活用、独立行政法人原子力安全基盤機構地震ハザードワークショップ地震ハザード評価における不確定性の認識と克服—ロジックツリーの活用—予稿集、p2-1～2-30、平成 16 年 4 月 27 日。

3.4 地震ハザード評価手法の高度化と実務への適用に向けて

(1) 地震ハザード評価手法の高度化

- 1) 震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法は、3.2.2 で記述したように、特定の震源断層を対象に、地震・地震動という複雑で不確定性の高い現象の論理をロジックツリー (LT) として表し、LT 上の各分岐における断層パラメータを用いて震源断層モデルによって地震動を詳細に評価する。この評価には、地震動の発生頻度も考慮されている。

この手法は、地震・地震動に関する高度な理学情報を有効活用すると共に、発生頻度に関する工学情報も取り入れた理学と工学の連携が図られた好例であり、「確率論的地震動予測地図」と「シナリオ地震地震動予測地図」との融和の方向性を示すものであると考えられる。融和の促進のためにも、同手法を多くの特定活断層に適用し、手法の高度化を図る必要がある。

- 2) 地震ハザードを工学利用する場合には、「不確定性のもとでの意思決定」が必要のため、不確定性の取り扱いが不可避の課題である。3.3.1(1) で述べたように、不確定性の要因は、物理現象固有のランダム性によるものと知識や認識に係わるものに大別される。前者は現象そのものに起因し許容せざるを得ないものであるのに対し、後者は知識の進展によって低減できるものと認識する必要がある。また、後者の不確定性の合理的定量評価手法としては、ロジックツリーを用いた手法が提案されている。

同手法は、地震・地震動に関する高度な理学情報とこれらの情報を単純化して活用する工学情報との関係を明示できるものであり、理学・工学相互の理解の促進と連携を担う橋渡し役として大いに期待される。この手法の有効活用のためには、同手法を多くの事例に適用し、専門家の選定や専門家間の意見の抽出・集約に関する技術の蓄積等手法の高度化が必要である。

- 3) 地震動のばらつきに関する確率モデルとしては、ばらつきが対数正規分布に従うと仮定し、それを対数標準偏差として表すと共に、地震動の上限の設定の有無を任意としている。これは、設定の根拠が乏しいためである。しかしながら、地震動の大きさが有限であることを踏まえると、上限値を設定するモデルの方が現象に忠実である。

地震ハザード評価手法の高度化のためには、ばらつきを表す確率分布の仮定やその標準偏差の値の見直しに加え、地震動の上限の設定に関する検討も積極的に取り組む必要があると考えられる。

- 4) 距離減衰式を用いた地震ハザード評価のパラメータとしては、最大加速度に加え、一様ハザードスペクトル及び地震ハザードの再分解による想定地震のマグ

ニチュード・距離が表示できる。後者の2つは、構造物の動的応答解析用の時刻歴波形を求めるための目標応答スペクトルの作成に用いられ、構造物のフラジリティ評価に活用されている。

上記評価手法は、動的応答解析のために簡易な時刻歴波形の作成手法として、震源断層モデルによる詳細な時刻歴波形の作成手法と合わせて有効活用できると考えられるので、普及を図ることが重要と考えられる。

- 5) 原子力耐震設計審査指針の高度化の一環として、現行の「直下地震（マグニチュード 6.5、震源距離 10km を想定）」による地震動の評価手法に代わる最新知見を反映した手法が求められている。そこで、直下地震に代わる「震源が特定しにくい地震」による地震動の超過確率応答スペクトルを確率論的に評価する手法が開発された¹⁾。震源が特定しにくい地震は、活断層調査等を行っても、地表に断層変位等の明瞭な痕跡が見られない潜在断層による地震で、その位置・規模が予め特定しにくい地殻内の内陸地震である。同手法では、3.2.1 の地震動の超過発生確率の考え方を下地に、3.2.2 の震源断層モデルによる詳細な地震動評価の考え方を取り入れると共に、断層パラメータの設定に 3.3 の不確定性の考え方を組み込んでいる。

(2) 地震ハザードの実務への適用

確率論的地震ハザードの実務への適用を促進するためには、評価用コードをできる限り公開し、ユーザーが自由に活用できる環境を整備することが重要である。また、地震ハザードの品質保証のためには、標準マニュアルの作成が必須であり、ロジックツリー作成手法の標準化の考慮も必須事項であると考えられる。特に、ロジックツリーを考慮する場合には、不確定性要因やロジックツリー作成のプロセス等を陽に明示し、透明性、説明性を図ることは必須要件と考えられる。

我が国における地震ハザード評価コードの公開版としては、日本原子力研究所で開発した距離減衰式を用いた地震ハザード評価コード SHEAT (Seismic Hazard Evaluation for Assessing the Threat to a facility site) の大型計算機版²⁾と PC 版³⁾がある。また、地震ハザードの標準マニュアルとしては、現在、日本原子力学会において、地震 PSA 標準マニュアル策定の一環として、平成 17 年 3 月を目途に作成が進められており、この一部にはロジックツリーに係わるものも含まれている。

参考文献

- 1) 原子力発電技術機構：平成 15 年度震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書、INS/M03-14, 平成 15 年 9 月。

- 2) 蛭沢勝三・田中歳明・高荷道雄・近藤雅明・阿部清治：地震ハザード評価コード SHEAT の使用手引、JJAERI-Data/Code94-009、1994 年 8 月.
- 3) 山田博幸・堤英明・蛭沢勝三・鈴木雅秀：地震ハザード評価コード SHEAT(PC 版) の使用手引、LAERI-Data/Code2002-001、2002 年 3 月.

4. 地震動予測地図の工学的ニーズと利用例

本章では地震動予測地図の利用の現状について紹介する。まず、4.1 節において地震動予測地図の工学的ニーズを整理し、4.2 節以降において具体的な利用例について示す。

4.1 地震動予測地図に関する工学的ニーズ

地震動予測地図は確率論的地震動予測地図（確率論的地震ハザード評価）と震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ型地震動評価）に大別される。本節では次節以降で示される地震動予測地図の具体的な利用事例の前段として、それぞれの利用形態を整理しておく。なお、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価については、それぞれ別個の概念として用いられている現状にあるが、互いの関係や両者の融合の今後の方向性については5章において論じる。

4.1.1 確率論的地震ハザード評価の利用形態

確率論的地震ハザード評価の利用形態を表 4.1.1 に示す。表では縦横のマトリックスの形で利用形態を示している。横方向は利用の目的別に、a) 耐震設計・耐震補強、b) リスクマネジメント・LCC（ライフサイクルコスト）評価、c) 地域防災計画・国レベルのリスク評価、d) 不動産評価・地震保険（ファイナンス分野）、の4つのジャンルに分けている。縦方向は確率論的地震ハザード評価の利用形態を踏まえて、次の4つに分類した上で、アウトプットの種別によりさらに細分化している。なお、表 4.1.1 では現時点ですでに基準類や実務で利用されているもののみならず、今後の利用が期待されるものも含めている。

- ① 震源情報（断層諸元／発生確率）の利用
- ② 一地点でのハザード評価結果（ハザードカーブ／一様ハザードスペクトル／確率論的想定地震）の利用
- ③ ハザードマップ（ハザードカーブの点情報の地域分布）の利用
- ④ ハザード評価の展開としての地震リスク評価

以下、表 4.1.1 に基づき、確率論的地震ハザード評価の利用状況を①～④に分けて概観してみる。

① 震源情報（断層諸元／発生確率）の利用

耐震設計や地域防災計画ではまずターゲットとなる地震を想定する 경우가多いが、ここでは震源に関する種々の情報が参照される。地震発生確率に関する情報に関しては、地震の想定の際に「発生確率が××以上の地震を選ぶ」といった閾値が明確にされていないが、多くの場合、地震発生の可能性がまったく考慮されない訳でもない。すなわち、想定地震とその発生確率の関係はあいまいな状況にあると言える。

一方、個々の地震の発生確率情報をより定量的に活用している事例としては、地震保険の料率の評価あるいは複数建物のポートフォリオ地震リスク評価がある（④とも関連）（4.7 節）。将来的にはライフライン施設など空間的な広がりを持つ施設（群）の地震リスク評価への活用も考えられる（4.5 節）。これらの問題ではリスクの地域分散効果を正しく評価するために、個々の地点でのリスクの単なる足し合わせではなく、個々の地震ごとのリスク（損失）の総和にその地震の発生確率を掛け、それを全地震に対して積和させた評価が必要となる。したがって、個々の地点ごとのハザードカーブを用いるのではなく、発生確率も含めた震源情報が直接用いられる。

リスクファイナンスの分野では金融市場へのリスク移転の手段として、地震リスクの証券化（債券）や保険デリバティブといった手法が出てきているが、その際の災害指数（トリガー指標）として予め定められた領域内でのマグニチュードが用いられる場合があり、その商品設計ではマグニチュード別の地震発生確率が参照されている（4.7 節）。

② 一地点でのハザード評価結果（ハザードカーブ／一様ハザードスペクトル／確率論的想定地震）の利用

基本的に確率論的地震ハザード評価は個々の地点ごとに独立な評価が行われるため、個々の地点ごとの利用が最も一般的である。単一の地震動強さ指標を対象としたハザードカーブ、周期ごとのスペクトルのハザードカーブに基づき同一の超過確率に対する値を繋いだ一様ハザードスペクトル、ハザードの評価結果を再分解し支配的な地震を抽出した確率論的想定地震などがそのアウトプットの形式となっている。

それぞれ、個別地点における設計用地震動や耐震補強用地震動の設定、リスク評価・リスクマネジメントにおける外力情報、地震 PML（予想最大損失）評価における入力レベルの設定、等に活用されている（4.3 節、4.4 節、4.7 節）。特に個別地点での地震リスク評価では、ハザードカーブの微分値に fragility カurve あるいは loss curve を積和することでリスクカーブを得ることができるので、ハザードカーブはその基本情報となる（④に関連）。

一方、地域防災計画では地域の空間的な広がりを考慮したマネジメントが必要となるため、個別地点情報である確率論的地震ハザード評価は使いづらい。したがって、対象となる地震を予め想定した上でのシナリオ型地震動評価が用いられるのが一般的である。しかしながら、シナリオ型地震動評価では想定地震の選定方法の不透明さが問題とされる場合があり、確率論的地震ハザード情報とリンクさせた想定地震の選定方法として確率論的想定地震の概念が用いられる場合がある。

③ ハザードマップ（ハザードカーブの点情報の地域分布）の利用

確率論的地震ハザードマップ（確率論的地震動予測地図）の利用という意味ではこれ

が「主役」である。設計地震動のレベルの表示あるいは地域係数の表示といった直接的な地図表現に加えて、耐震補強の順位づけなど地点間の確率論的地震ハザードの相对比较としての利用が考えられる（4.2 節、4.4 節）。また、リスクマネジメントや地域防災計画においても、地震対策や防災投資の優先順位の決定などへの利用が考えられる。ただし、地震対策の意思決定問題へ活用していくには、ハザード情報のみでなく、それに被害情報を重ねたリスクマップの作成を目指す必要がある。なお、ハザードマップとして、地震動強さと超過確率の関係を地図で表現した従来型のマップに加えて、最近では上述した確率論的想定地震の貢献度の地域分布を示したマップや、個々の地点のハザードカーブの性状を指標化して示したマップなども提案されている¹⁾。

以上の利用は主として専門家あるいは技術者を対象とした話であるが、一般市民向けの利用という意味では、確率の値を直接表現するのではなく、それを翻訳して分かりやすい表現にしたマップが作成される必要がある。確率的な評価ではないが、類似のマップとしては東京都の地域危険度マップ²⁾がある。そこでは町丁目ごとに建物倒壊危険度、火災危険度、避難危険度、総合危険度が5段階評価で表示されている。確率論的地震ハザード評価の結果をマップの形で翻訳して表現する場合、ハザードカーブの特性は地点ごとに個別性が強いために、一つの確率レベルの結果のみで表現することは必ずしも適切ではないことに注意する必要がある。今後、議論を積み上げることによって、一般市民向けのわかりやすい確率論的地震ハザードマップを検討していく必要がある。

④ ハザード評価の展開としての地震リスク評価

確率論的地震ハザード評価の展開として、建物・構造物の被害予測を含めた確率論的な地震リスク評価がある。評価結果は被害もしくは損失とその発生確率（超過確率）の関係を示したリスクカーブや、特定の確率レベルに対する損失額を示した PML（予想最大損失）などで表わされる。個別建物・構造物のリスクカーブはハザードカーブの微分とロスカーブ（損失関数）を積和することによって評価することができるので、ハザードカーブの利用というように位置付けることもできる。確率論的地震リスク評価の適用例としては、原子力施設の安全性評価に用いられている（4.8 節）他、不動産評価の一環としての利用や最近では PML が設計目標として用いられる事例も出てきている（4.7 節）。また、地震リスクに基づいて構造物の供用期間中のライフサイクルコストを評価し、それに基づいて最適な構造設計や耐震投資を行おうとする試みも出てきている（4.4 節）。

リスク評価の結果を地図で表現することにより地域単位のリスクの比較を行うことが可能となるが、広域に及ぶ建物・構造物の被害を積み上げるには膨大な作業を伴うので、わが国ではこのような評価例はまだ見られない。また、広域の地震リスクを地図で表現する場合には、次項に示すリスクの地域分散効果をどのように考え、表現していくかという課題も残されている。ただし、わが国全体のリスクマネジメントのための地震リスクの定量化という観点からは早急に取り組むべき課題であると言える。こうした中で、

ある震度に曝される人口（震度曝露人口）のリスクを地域的に比較しようとする試みが見られる³⁾。

一方、広域を対象とした確率論的地震リスク評価の場合には、①でも触れたように、リスクの地域分散効果があるために、個々の地点でのリスクの単なる足し合わせではなく、個々の地震に対するリスクの総和にその地震の発生確率を積和させた評価が必要となる。こうした評価は複数の建物（資産）のポートフォリオ地震リスクの評価や、広域の地震リスクの証券化などに利用されている。また、一地点でのハザードレベルではなく、地域での被害（損失）を合算した集積リスクレベルに対する確率論的想定地震の概念も提案されている（4.7 節）。

4.1.2 シナリオ型地震動評価の利用形態

シナリオ型地震動評価は震源断層の諸元や地震規模などが明らかなシナリオ地震を設定することにより、断層の破壊メカニズムなどを考慮した形で詳細に地震動の定量評価を行えるという利点がある。また、広域的な防災対策では、地震によって「一度に」発生する地震動強さの地域分布を知る必要があるため、外力条件としてシナリオ地震を設定することが有効である。シナリオ型地震動評価では、まず対象地点、対象地域の地震環境を考慮した上で、対象とする地震を想定する。次に、その地震が発生した場合に予測される地震動あるいは被害の予測を行う。

表 4.1.1 では確率論的地震ハザード評価の利用形態を示しているが、この利用目的の a) ～d) のうち、a) 耐震設計・耐震補強ならびに c) 地域防災計画・国レベルでのリスク評価においては、確率論的地震ハザード評価よりむしろ、上述のような特徴を有するシナリオ型地震動評価が主として用いられている。

代表的な利用事例としては、i) 原子力施設、超高層建築、免震建築、長大橋梁などの重要構造物の設計用入力地震動の設定（4.3 節、4.4 節）、ii) 各構造物の耐震補強のための想定地震動の設定（4.2 節）、iii) 地域防災計画の基礎となる地震被害想定（4.6 節）、iv) ライフライン施設などの空間的な広がりを持つ施設の地震被害予測（4.5 節）、などがある。詳細については次節以降に示される。

参考文献

- 1) 石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一・能島暢呂・杉戸真太・久世益充：地震動予測マップの活用—その1：ハザード情報の利用—，土木学会地震工学論文集，2003.12.
- 2) 東京都都市計画局編集：あなたのまちの地域危険度，平成 14 年 10 月．
- 3) 能島暢呂・杉戸真太・久世益充・石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一：地震動予測マップの活用—その2：震度曝露人口の試算—，土木学会地震工学論文集，2003.12.

表 4.1.1 確率論的地震ハザード評価の利用形態

分類		アウトプット	利用目的と利用形態			
			a) 耐震設計 耐震補強	b) リスクマネジメント LCC 評価	c) 地域防災計画 国レベルのリスク評価	d) 不動産評価 地震保険
①震源情報 の利用		個別地震の 発生確率	想定地震の選定 (漠然とした認識)	想定地震の選定 (漠然とした認識)	想定地震の選定 (漠然とした認識)	—
		特定領域内での 規模別地震発生頻度	—	—	—	地震債権における トリガー指標
		すべての地震の震源情報 (断層諸元・発生確率)	—	ポートフォリオリスク 評価の入力	—	地震保険料率の評価
②一地点での ハザード評価結果 の利用		ハザードカーブ	設計地震動の レベルの設定	リスク評価の入力 対策の優先度決定	—	ハザードレベルの把握 (PML 評価の一環)
		一様ハザードスペクトル ／地震動波形	設計地震動の設定	リスク評価の入力	—	—
		確率論的想定地震 (ハザード適合想定地震)	設計想定地震の選定 (選定根拠の説明)	想定地震の選定 (選定根拠の説明)	想定地震の選定 (選定根拠の説明)	—
③ハザードマップ の利用		確率論的 地震ハザードマップ	地域係数の評価 補強の優先度決定	対策の優先度決定	対策の優先度決定	—
④地震 リスク 評価 への 展開	個別地点 での リスク 評価	リスクカーブ	リスク制御型設計 補強効果の定量評価	安全目標の検証(PSA) 対策投資の最適化	—	地震保険料率の評価
		PML (予想最大損失)	設計目標 補強目標	対策目標	—	不動産評価の一指標 投資意思決定
		リスクマップ	—	—	地域単位のリスク比較 震度曝露人口マップ	—
	広域 リスクの 評価	ポートフォリオリスクカーブ ポートフォリオ PML	—	対策投資の最適化	—	不動産評価の一指標 保険料率評価／証券化
		確率論的想定地震 (リスク適合想定地震)	—	地域での想定地震選定 (選定根拠の説明)	地域での想定地震選定 (選定根拠の説明)	—

4.2 学校施設の耐震化推進への利用

4.2.1 学校施設耐震化の現状と耐震化推進の経緯

学校は子供たちが多くの時間を過ごす教育の場として、地震時にも安全かつ安心な場所であることが必要である。同時に、学校や公民館などの公共施設は、非常災害発生時ににおける地域住民の応急的な避難場所として利用されたり、防災拠点としての機能を付与されたりするなど、地震防災および被災後の生活において重要な役割を果たすことが求められている。1995 年の兵庫県南部地震においては、昭和 56 年の建築基準法令の耐震設計に関する事項の改正前に計画、設計された、いわゆる既存不適格建物に大きな被害が認められた。それをうけ、昭和 56 年の建築基準法令の改正前に建てられた学校施設等の公共施設の耐震化の必要性が指摘され、対策が進められている。

しかしながら、文部科学省が平成 14 年 5 月に実施した全国の公立学校施設の耐震改修状況調査では、「昭和 56 年以前の基準で建築された建物のうち耐震診断を行ったものは、わずかに 3 割に過ぎず、公立学校施設全体では耐震性に問題がある建物は約 4 割と推計される」等の結果が報告された^{*1}。耐震化が進まない理由としては、負担する費用が大きいことのほか、対象建物が多数であり経費等の制約により一気に耐震化を図ることが困難であることや、管理する建物をどのような順で診断・改修していくべきかの策定方法が確立されていないことが挙げられている。

学校施設の耐震診断、耐震改修が進んでいない現状に鑑み、文部科学省は「学校施設の耐震化推進に関する調査研究協力者会議」（主査：岡田恒男東京大学名誉教授）を平成 14 年 10 月に組織して、耐震化に係る課題や耐震化推進計画の策定手法等について検討を行い、平成 15 年 4 月に報告書「学校施設の耐震化推進について」¹⁾をとりまとめた。この報告書では、耐震化推進の判断材料の一つとして、地震動予測地図から得られる当該地域の想定震度情報を活かすといった利用方法が示されている。

^{*1} 平成 15 年 4 月 1 日現在、2 階以上もしくは延べ面積が 200 m²を超える公立小中学校の非木造建物 131,482 棟の 53.4%に耐震性が確認されていないことが文部科学省によって報告されている。昭和 56 年以前の耐震基準以前の設計で建築された学校建物は 85,870 棟で 65.3%にのぼる。そのうち耐震診断済みは 30,096 棟であり、耐震診断実施率は 35.0%にとどまっている。なお、昭和 57 年以降建築の建物については全て耐震性があるものとしている²⁾。さらに平成 16 年 4 月現在の調査によれば、耐震診断実施率は 45.2%で平成 15 年 4 月に比べ 10.2 ポイント向上した。一方で耐震化率は 2.5 ポイント増にとどまり、50.9%の建物に耐震性が確認されていないことが報告されている。

4.2.2 報告書「学校施設の耐震化推進について」の概要

報告書は以下のような提言で 3 部構成になっている。

(1) 既存学校施設の耐震化推進に係る基本方針の提言

- ① 倒壊または大破する恐れのある学校施設の優先的な耐震化対策

- ② 学校施設の特性に適合する耐震診断の早期実施
- ③ 耐震診断結果や耐震化推進計画の公表
- ④ 学校施設の非構造部材等の耐震点検や耐震化対策の実施
- ⑤ 学校施設の質的向上と耐震化の推進
- ⑥ 耐震化推進計画の早期策定

(2) 既存学校施設の耐震化推進計画を策定する手法の提言

ここでは、「耐震化優先度調査」や「耐震診断結果の評価方法」等の新しい手法が提言され、耐震化推進計画策定から耐震化事業実施までの流れが具体的に述べられている。

耐震化推進計画を策定するための手法として、

- ① 行政担当者、学識経験者、教職員等で構成する学校施設の耐震化に関する検討組織の設置
- ② 耐震診断等の優先度を検討するための耐震化優先度調査の早期実施
- ③ 耐震診断結果に基づく耐震化事業の緊急度に関する評価方法
- ④ 地震調査研究推進本部が作成を進めている地震動予測地図の活用方法

等が提案され、図 4.2.1 のように計画策定のためのフローが作成されている。地震動予測地図の活用については、耐震化優先度調査の実施・評価および耐震化事業の緊急度の検討において述べられている。

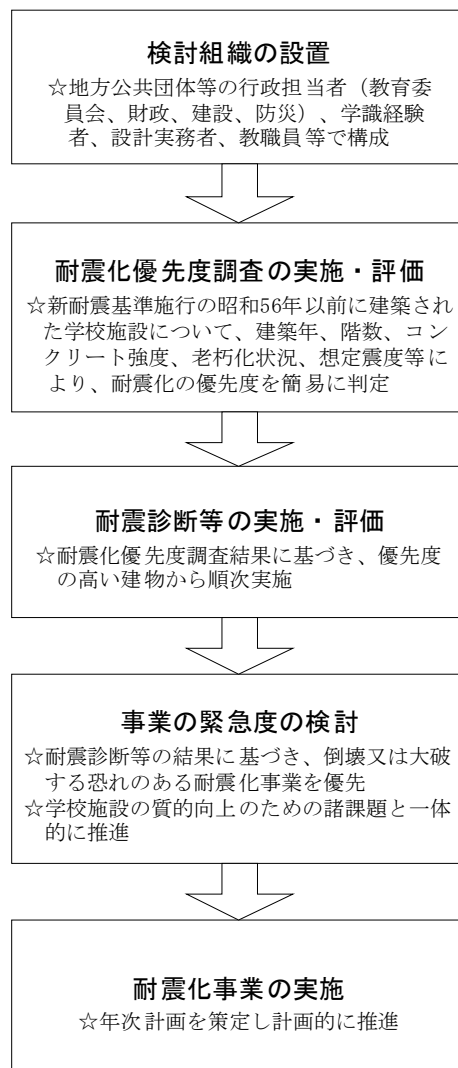


図 4.2.1 既存学校施設の耐震化推進計画策定フロー

(3) 学校施設の耐震化の推進に関する提言

- ① 学校施設の耐震化推進に関する指針の策定及び予算の措置
- ② 相談窓口の設置、研修会・セミナーの実施、手引書・広報資料の作成等の情報提供機能の充実

等が挙げられている。

4.2.3 地震動予測地図の利用内容

建物の耐震補強や改築には多額の費用がかかるため、まず耐震診断を実施することにな

るが、4.2.1 節で述べたように耐震診断自体が進んでいない現状がある。そこで、限られた予算を有効に利用して既存学校施設の耐震化を進めるために、図 4.2.1 に示したようなフローで耐震化推進計画の策定方法が例示されている。専門家を含めた検討組織を設置した上で、まず対象地域内にある建物の中で耐震診断又は耐力度調査を実施する順番を決めるために「耐震化優先度調査」を実施する。その結果にもとづき、優先順位の高い建物から耐震診断を実施して耐震補強あるいは改築といった耐震化事業の必要性を評価する。ただし、耐震化事業は多額の費用がかかることから、地震時に倒壊や大破の危険性がある緊急度の高い建物から先に事業を実施するように年次計画を策定する必要がある。

地震動予測地図の利用は、耐震診断の優先順位の調査、そして耐震化事業を実施する順番を決めるための緊急度調査において記述されている。以下にその具体的な内容について述べる。

(1) 耐震診断の優先順位を決める調査における利用

耐震化優先度調査は、どの学校施設から耐震診断又は耐力度調査を実施すべきかを効率的に決めるために、その優先度を 5 ランクに分類することを目的として実施される。調査方法は鉄筋コンクリート造校舎と鉄骨造屋内運動場とで次のように異なっているが、いずれも当該建物が立地している地域の想定震度を調査して優先度分類を行うこととされている。

① 鉄筋コンクリート造校舎

- i) 基本分類：建築年及び階数により I（優先度高い）～V（優先度低い）で分類される。
- ii) 補正項目：以下の各項目について A（優先度低い）～C（優先度高い）で分類される。
 - a) コンクリート強度（設計基準強度、強度試験値）
 - b) 老朽化（鉄筋腐食度、ひび割れ）
 - c) プラン（はり間スパン数、桁行スパン長）
 - d) 耐震壁の配置（下階壁抜け架構、はり間壁間隔、妻壁の有無）
 - e) 想定震度

A：震度 5 強以下、B：震度 6 弱、C：震度 6 強以上

ただし想定震度が設定されていない場合は分類を B とする。

② 鉄骨造屋内運動場

以下の各項目について A（優先度低い）～C（優先度高い）で分類される。

- a) 鉄骨軸組筋かい耐震性能
- b) 鉄骨腐食度
- c) 代表的軸組材の座屈状況
- d) 代表的ラーメン架構の柱梁溶接仕口部の溶接状況

e) 代表的軸組材及びその接合部の構造安全性

f) 壁材や天井材等、落下物等に係る安全性

g) 想定震度

A：震度 5 強以下、B：震度 6 弱、C：震度 6 強以上

ただし想定震度が設定されていない場合は分類をBとする。

(2) 耐震補強や改築の事業実施のための緊急度調査での利用

優先度の高い建物から耐震診断又は耐力度調査を実施した結果をもとに、耐震化事業の緊急度を検討して事業の年次計画の策定に資することを目的としている。地震時に倒壊又は大破する恐れのある建物を優先することとして、構造耐震指標と保有水平耐力に係る指標によって耐震化事業の緊急度を7段階にランク分けして事業の緊急度を判定することとしている。ただし、実情に応じて緊急度ランクの修正を行うことができるとして、報告書にはその修正例がいくつか挙げられている。想定震度に関する項は以下のとおりである。

当該建物が立地している地域の想定震度が6強以上に評価されている場合は、緊急度を1ランク程度上げてよい。

さらにその注記として、

想定される震度が7と評価される場合には、緊急度をさらに1ランク高めるなどの考慮を払うことが望ましい。震度7になる可能性のある地域とは、存在が確認されている断層トレースまでの距離が5km以下の断層線近隣の地域、建築基準法の第3種地盤に相当する堆積層の厚い地域、がけ地や盆地の縁などの地形効果により地震動が増幅される恐れのある地域などである。

と述べられている。

(3) その他

学校施設の耐震性能目標の設定においては、地震動予測地図の強震動評価結果を目標性能に反映させる等の直接的な利用方法については言及していない。間接的に、当該地域に予測される地震動の大きさを考慮することも大切であり、それには地震調査研究推進本部が作成する「全国を概観した地震動予測地図」をはじめ、中央防災会議や地方公共団体等が作成する地震動予測地図等を活用することが考えられる、というコメントが記述されている。

4.2.4 地震動予測地図の活用にあたっての課題事項

地震動予測地図の活用にあたっては、次のような課題事項が工学利用委員会での議論の中で挙げられた。

- ・ 確率論的地震動予測地図と震源断層を特定した地震動予測地図との使い分けや、確率

論的地震動予測地図の中でも 50 年超過確率 39%、10%、5%の地図のように提供情報に選択肢がある。そのうちどれを選択したらよいかを実施主体が判断するためのガイダンスが必要である。このためには判断に必要な（やさしくかみ砕いた）情報を提供する、あるいは実施主体において適切な技術委員会を設けるなどの対応が考えられる。

- ・ 耐震改修に際して必要とされる情報の精度レベルのスケールが異なる。改修補強の計画を立てる際に、例えば補強壁構面数を 3 構面とするか 5 構面とするかといった改修計画に対し、地震動予測地図により提供される地震動の精度がレベルを異にする（建物建設地点の地震動レベルが震度階もしくは最大加速度で与えられるが、確実度を含めた精度のレベルは補強構面数を 3 構面とするか 5 構面とするかを決定できるレベルで与えられていない）。
- ・ 学校施設を管理し、耐震化を進める行政体の単位は、多くは市町村レベルである。地震動予測地図においては各地域の地震動は、現状では 1km メッシュで与えられるが、このサイズの地震動評価の差異は地域のローカルな地盤条件によって与えられる影響が大きく、予測地図により与えられる地域に即した情報を十分に活用するためには、自治体を含めた体制によって、より詳細な地図の作成が望まれる。
- ・ 確率論的地震動予測地図では期間を設定した評価がなされるため、50 年超過確率 5%の地図にしても、その起点となる年によって想定震度が更新される。したがって、ある時点の地図に基づいて耐震改修した建物が、例えばその後 10 年経た後で、新しく評価される想定地震動に対しては再び既存不適格になる可能性がある。確率事象として捉えた場合の地震動評価の更新と、改修施策のある程度の期間にわたる継続性を考慮して、建物の残存期間も考慮した耐震改修のあり方を考える必要がある。

4.2.5 学校施設の耐震化推進のアフターケアについて

報告書が刊行された後、実際に学校施設の耐震化計画の策定が進むようにアフターケアの事業が行われている。

まず、実施主体となる教育委員会や実務者を対象に地震動予測地図の活用も含めた講習会が開催されたほか、相談窓口を設置しサポート体制が敷かれた。相談窓口には計画策定方法や国庫補助に関する質問のほか、どのような場合にどんな種類の地震動予測地図を用いたらよいか、などの質問が寄せられており、回答のための専門家の委員会が組織されている。

さらに平成 15 年度からは「学校施設の耐震化推進計画策定支援事業」として、モデル的にいくつかの教育委員会や学校法人等に策定事業を委嘱して実証的な検討を行い、その成果を全国的に指導・普及させることを目指している。現在のところモデル事業は 7 団体、市教育委員会や大学や私立の学校法人等において実施されている。

また、耐震化事業に係る経費に対する助成については既に行われてきている。公立学校施設の耐震化については、改築や補強に要する費用の 1/2 もしくは 1/3 を国から地方自治

体に補助しており、平成 16 年度は 1155 億円が予算計上されている。国立大学等についても整備計画にもとづいて耐震化事業が実施されているところである。私立学校についても施設整備事業が進められてきており、耐震化事業の 1/2 ないし 1/3 の国庫補助が行われている。

地震動予測地図の工学利用にあたっては、このように実証的な検討や利用者向けのサポート体制の充実が重要であろうと思われる。

4.2.6 その他の公共施設に対する地震動予測地図の工学利用の事例

学校施設と同様に、防災拠点となる公共施設の耐震化推進³⁾や県有施設の耐震改修⁴⁾において、耐震診断あるいは耐震化の優先順位を判定するために、対象施設の所在地において想定される震度を指標の一つとして用いることが提案されている。公共施設の耐震化の優先順位の判断にあたっては、地震動予測地図は有効に活用されることが考えられる。

(1) 耐震改修整備計画策定への利用例

総務省消防庁による防災拠点の耐震化を推進する施策において、耐震改修等の優先度を決定するにあたり対象施設の“構造体が保有すべき耐震性能（要求耐震性能）”と“耐震診断によりその施設の構造体が保有している耐震性能（保有耐震性能）”を比較し、当該施設の耐震性能を評価、分類することとなっている。その際、要求耐震性能を評価するにあたり、(i) 災害応急対策を実施する施設としての用途面の分類、(ii) 対象施設の所在地に想定される地震動（想定震度）の分類、の 2 項目を評価する。地震層の分類では、① 特に強い地震動が想定される場合（震度 6 強以上）、② 強い地震動が想定される場合（震度 6 弱）、③ 震度 5 強以下程度の地震動が想定される場合の 3 つに分けて評価することとしている（図 4.2.2）。

区分		想定される地震動（想定震度）		
		特に強い地震動が 想定される場合 （震度 6 強以上）	強い地震動が 想定される場合 （震度 6 弱）	震度 5 強以下 程度の地震動が 想定される場合
災害 応急 対策 を 実 施 す る 施 設 と し て の 用 途	I 類	1.50	1.25	1.00
	II 類	1.25	1.25	Z ^{注1}
	III 類	1.00	1.00	Z ^{注1}

注1] 要求構造指標（Iso）ならびに保有水平耐力に関わる係数 q の算定は、イ項によりその地域の地震加速度や想定する地震動の強さによる補正を含めずに評価する。

注2] Z：地震地域係数で、建設省昭和55年告示第1793号第1による。（昭和62年改正告示第1918号。）

図 4.2.2 防災拠点となる公共施設等の耐震化推進における想定される地震動の取り込み

(2) 耐震診断の優先順位ランクの評価への利用例

富山県の耐震改修では、耐震診断実施にあたり優先順位ランクを定めている。優先度のランク付けにあたり、建物建設地点における地震動レベルが想定震度によって優先度判定のフローに考慮されている。この評価においては、震度 6 強以上と震度 6 弱以下の 2 つのレベルとして評価され、優先度ランク判定に考慮される。なお、本計画では、地震動予測地図等による地域に想定される地震動レベルは診断実施の優先度に考慮することとしているが、耐震判定時の必要耐震性能の評価にあたっては、想定震度調査の進展に応じて再検討をすることとし、現段階（2003 年時点）では地震動レベルに応じて耐震判定指標を割り増しする提案はされていない。

参考文献

- 1) 学校施設の耐震化推進に関する調査研究協力者会議：学校施設の耐震化推進について，文部科学省大臣官房文教施設部施設企画課，2003.
- 2) 文部科学省大臣官房文教施設企画部施設助成課：一施設助成課・初級編一，～公立学校施設整備の現状～，http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/zyosei/syokyuu.htm，2003.
- 3) (財)日本建築防災協会 SRC 委員会：富山県耐震改修調査研究，富山県土木部営繕課，2003.
- 4) 防災拠点となる公共施設の耐震化推進検討委員会：防災拠点となる公共施設等の耐震化推進検討報告書，総務省消防庁，2002.

4.3 建物の耐震設計・評価への利用

建物・土木構造物等の耐震性能をどのようにとらえ、どのように表現し、どのように実現してゆくか、現在、建築界においても必ずしも共通の考え方が存在しない。ここでは、建築物の耐震性能に着目して、その捉え方、表現方法を示した後、確率論的地震動予測地図に限定して、その耐震設計・評価への利用について述べる。

4.3.1 建物の耐震性能の捉え方

「建物の耐震性能」という言葉は大変分かりにくく、曖昧な語句である。狭義には、構造物あるいは構造部材の保有するさまざまな耐震性を示していることが多いが、建物建設地点の地震環境を考慮に入れずに建物の耐震性能を論ずることは不十分である。すなわち、建物が建設される地域の地震動の起りやすさと建物の保有性能の両方を考慮に入れた上で、建物の耐震性能がはじめて議論できる。この当たり前のことが「建物の耐震性能」を議論する上での大前提である。本節では、建築物の耐震性能の基本的捉え方に焦点を当て、確率論的地震動予測地図の利用方法について以下に述べる。

建物の耐震設計をなぜ実施する必要があるかという極めて根源的な問いがある。この問いに対する回答としては、「将来の地震に対して安全な建物を構築するため」と考える人が多いであろう。もっと的確に答えるならば、「建物に要求される適切な耐震性能を付与するため」が挙げられる。建物に要求される性能を明確にした上で、それを実現する方策が耐震設計であるといえる。そうなれば、建物に要求される性能をどう捉え記述するかが重要な事項であり、耐震性能目標の記述と実現方法とも言い換えることができる。これは、想定する地震外力の大きさ（地震あるいは地震動の大きさ）と、その外力条件下でどのような設計を実施するかということと密接に関わる。

土木・建築の設計に関する原則¹⁾に従うと、建物に要求される耐震性能は以下の3つに分類される。

- ・ 安全性
- ・ 修復性
- ・ 使用性

安全性は人命保護のために要求される性能であり、建築分野では建物が倒壊しないこと、鉛直荷重が安定的に保持できることと同義とされる。修復性については、建物の損傷は許容するが修復が現実的に可能で継続使用できる範囲に収まる状態と記述される。修復性の背景には、1995年の阪神淡路大震災以降、建物が構造的にさほど被害を受けていなくても建物本来の機能が全く確保できなかった事例や、建物及び建物内に収用される財産の保全に関する要求が高まってきたことによる。使用性は、建物本来の機能が確保されている状態を表している。安全性については、建築構造体としての安定性の欠如という物理的状态と対応し他の性能に比べて工学的取り扱いが可能であり、欧米の限界状態設計法²⁾や

日本建築学会の限界状態設計指針³⁾においては、終局限界状態として取り扱われている。修復性や使用性については依然多様な捉え方が存在し、より物理状態と対応づけた限界状態の定義と明確化が今後必要となろう。

このように、建物の耐震性能に関して、建物の保有性能に加えて建物周辺の地震環境を同時に考える必要があること、性能と対応した建物の物理状態をできるだけ明確にする必要があること、の二点が性能に基づく耐震設計を考える上で最も重要な課題である。

4.3.2 耐震設計法における耐震性能確保の方法

いつ、どこで、どれくらいの大きさの地震が生じるかが事前に分かれば、どれほど耐震設計は楽であろう。しかしながら、こうしたことは極めて予測困難であり、確定的に取り扱うにはどうしても限界がある。これらの不確定性に対処する方法として、過去の地震データの分析や統計に頼らざるを得ないし、活断層などの新しい知見が得られればそれを活用することも必要である。確率論的地震動予測地図は、この要求に応えたものであり耐震設計・評価に有効に活用できる。

一方、建物の耐力についても良く分かっていない。兵庫県南部地震による建物被害が示しているように、同程度の地震力を受けたと思われる複数の建物においても、異なった被害状態を呈していることが報告されている。すなわち、建物の保有耐震性も不確定なものである。そうなれば、設計に際し、類似の既存建物の保有性能に関する統計データを用いてより実際の不確定性の取り扱いが可能である。

以上のように、将来起きる地震により発生する応力や変形などは不確定な量であること、建物耐力もまた不確定な量であることから、前者を総称して荷重効果 S 、後者の建物耐力 R と表すと、図 4.3.1 のようなふたつの確率分布を描くことができる。荷重効果 S の確率分布は地震外力の分布を表しているから、確率論的地震動地図の情報から直接得ることができる⁴⁾。

設計の基本原則が謳われている IS20304⁵⁾によると、このふたつの確率分布を用いて、建物に作用する荷重効果が建物の保有耐力を越えたときに破壊（不具合）が生じるものとして、その破壊確率に基づいて建物の耐震性能の良否の判定を行う必要があることが指摘されている。この方法を確率に基づく構造設計法と呼び、破壊確率の大小により性能水準を決めるものである。この方法は、以前はリスク評価などによく用いられたものであるが、IS20394⁵⁾で提唱している限界状態設計法でも推奨されている設計の方法である。実設計で確率の計算をする煩雑さは残るものの、最も分かりやすい手法である。

そこで、このふたつの確率分布と、従来の耐震設計法で用いられてきた設計クライテリア（設計用地震荷重と設計用耐力）との関係を以下に考えてみる。

図 4.3.1 は、地震による建物の荷重効果を S とし、ある建物の性能に関する耐力（変形でも良い）を R とし、建物あるいは構造部材の耐震安全性を確保する方法を分類・図示したものである。図にはいろいろな表現の設計クライテリアが記述されており、それぞれ

用いる設計法あるいは考え方により異なった表現方法があることを示唆している。

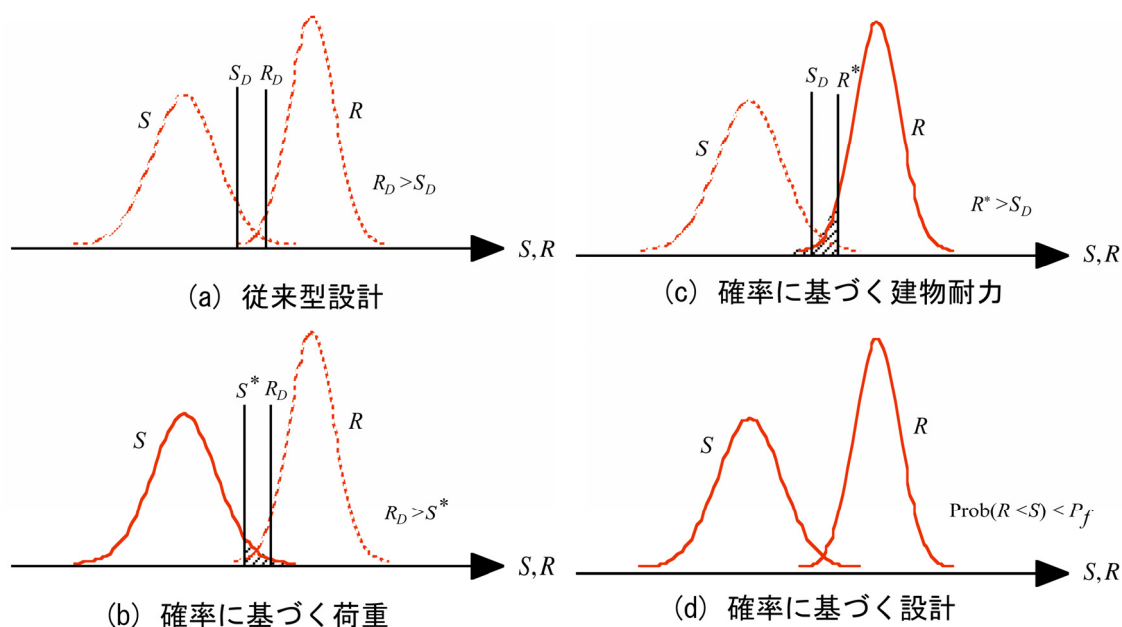


図 4.3.1 各種耐震設計法と設計クライテリアの設定⁴⁾

図中の(a)は、設計荷重 S_D と設計耐力 R_D を確定値として設計する従来型の方法であり、設計用地震荷重 S_D を経験的に定めた短期許容応力度設計法（現行一次設計）、終局強度設計法（現行二次設計）などはこの分類に入る。この設計法に用いる設計荷重 S_D や設計耐力 R_D は確率的なベースを持たないために、設計荷重や設計耐力の片方のみの議論に陥りやすい欠点がある。また、 S_D や R_D を統計的なデータに基づいて定めた方法に荷重・耐力係数設計法があり、建築学会の限界状態設計指針³⁾でも採用された方法であり、確率的な根拠付けに基づきつつも、設計法としての実用化に重点を置いた有効な方法である。

(b)は、建物の保有耐力については従来から用いてきた確定値を用い、地震荷重の確率分布を利用していくつかの設計用再現期間に対応した地震荷重の下で建物の耐震性能確保を行おうとするものである。再現期間を用いて地震荷重の大きさを記述するところが特徴的である。これは SEAOC の Vision2000⁶⁾で用いられた方法である。この方法では、建物耐力の不確実性が十分に反映できないところが弱点である。

(c)はあまり設計では用いられていないが、米国の原子力施設の安全性研究⁷⁾で以前用いられた手法である。建物の損傷度曲線あるいは脆弱性曲線から評価される高信頼度低損傷確率値(HCLPF 値: High-Confident and Low-Probability of Failure)から評価される建物耐力と別途定められた設計用地震荷重との大小関係を比較することにより建物の耐震性能を確保する考え方である。この場合、設計用地震荷重については統計的には定められていない。

図中の(d)は前述したように、二つの確率分布から荷重効果が耐力を上回る確率に基づいて構造物を設計する方法であり、「確率に基づく構造設計法」と呼ばれる。

こうした分類を行うことにより、理想的には確率論的地震動予測地図を直接用いられるという点、耐力側の不確定性も考慮できる点において、(d)の方法が実設計で用いられることが望ましいが、確率を直接用いる方法の煩雑さを軽減するための耐震性能確保の考え方には(a)～(c)のようないろいろな方法があることがわかる。次節では、これらの考え方と確率論的地震動予測地図との関わりについて述べる。

4.3.3 確率論的地震動予測地図の利用

(1) 耐震設計法への活用

図 4.3.1 に示した荷重効果 S の確率分布は建設地点に置ける地震動強さの確率分布に他ならない。確率論的地震動予測地図では、指定超過確率（例えば、今後 50 年間で○%）の下での地震動の大きさが計測震度を用いて表現されている。これを設計に用いる場合には、前節で示したように、地震動強さの確率分布形の情報が必要となる。これには、複数の指定超過確率と地震動の大きさの対応関係から、地震動の確率分布を近似的に評価できる。米国では、極値 II 型分布を仮定してその分布形を定めるパラメータを求め、耐震性評価に有効に用いている事例もある⁷⁾。

一旦、確率論的地震動予測地図を用いて、建設地点に置ける地震動強さの確率分布が得られたなら、図 4.3.1 に示した、(d) 確率に基づく設計が可能である。ただし、地震動として評価対象期間を設定し、当該期間の最大値の確率分布を用いることになる。日本建築学会の限界状態設計指針³⁾では、終局限界状態に対して 50 年最大値分布を、使用限界状態に対しては年最大値分布を用いている。当然ながら建物の供用期間が長い場合には、その供用期間に応じた地震動最大値の分布を用いることが望ましい。

(b)の方法では、設計用地震動の大きさを再現期間と対応させて設定する方法である。「再現期間△年の地震動強さ」の評価には、地震動がある閾値を超過する事象の発生をベルヌーイ試行列と仮定する方法が一般的である。具体的には、今後 T 年間で確率 p_T となる地震動強さは、下式を用いて T 年間でならした平均再現期間 $(1/p_1)$ と関連させることができる⁸⁾。

$$p_1 = 1 - (1 - p_T)^{1/T} \quad (4.3.1)$$

ここに、 p_1 は 1 年当たりの超過事象の確率であり、上式を用いれば表 4.3.1 のような平均再現期間との対応関係が得られる。

表 4.3.1 平均再現期間と超過確率

推本の表現	平均年超過確率	平均再現期間
今後 50 年間で 39%	0.01	100 年
今後 50 年間で 10%	0.002	500 年
今後 50 年間で 5%	0.001	1000 年
今後 50 年間で 2%	0.0004	2500 年
今後 T 年間で p_T	$p_1 = 1 - (1 - p_T)^{1/T}$	$\frac{1}{p_1}$

日本建築学会の荷重指針⁹⁾においては、再現期間 100 年に対応する値を、図 4.3.2 に示すように「荷重の基本値」として定義し、時間変動する荷重（地震、風、雪）の大きさの目安を与えている。ただし、限界状態設計に用いる場合には、地震動強さのばらつきも含めた確率分布形の情報が必要であることは言うまでもない。

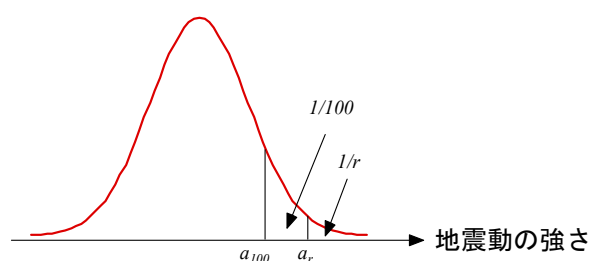


図 4.3.2 100 年再現期間に対する値

以下には、確率論的地震動予測地図の利用を考える上で、確率に基づく設計の具体事例をいくつか紹介する。

ISO の地震荷重規格¹⁰⁾

建築・土木構造物の地震荷重については、今年、国際標準化機構 (ISO) で一般構造物を対象にした地震荷重規格 (ISO3010) が改訂されたばかりであり地震荷重に関する世界共通の考え方が提示された。その骨子は、ISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則⁵⁾」の設計の基本に基づき、まず、1) ふたつの設計上重要となる終局、使用限界状態の定義を明確にしたこと、2) 夫々の限界状態に対して設計荷重の構成が示されていること、が特徴であろう。

本規格では、まず、耐震設計の基本的考え方が示されており、「耐震設計は、地震時における人身への危険防止、重要なサービスの維持、経済的な損失の最小化の目的で実施される」としている。そして、ふたつの限界状態に関しては、全ての地震から構造物を完全に守ることは経済的に不可能なために、起こるかも知れない大地震動に対しては構造物の

崩壊を防止し人命を守り〔終局限界状態〕、使用期間中に起こる中地震動に対しては構造物の被害を許容限界以内におさめる〔使用限界状態〕ことを目標にしている。この限界状態の考え方は、昨今の性能設計の根幹を成す重要な概念である。また、この規格の附則には、地震荷重の大きさを設定する考え方が示されており、確率・統計的な考え方がベースとなっている。表 4.3.2 及び 4.3.3 は、各々の限界状態に対して再現期間を定めて地震荷重の大きさを定めている。また、対象建物の重要度に応じて荷重係数を変化させている。

 表 4.3.2 IS03010 における荷重係数と代表値の例 ¹⁰⁾

限界状態	重要度	荷重係数	地震動強さの代表値	再現期間
終局限界状態	高	1.5～2.0	0.4G	500 年
	中	1.0		
	低	0.4～0.8		
使用限界状態	高	1.5～3.0	0.08G	20 年
	中	1.0		
	低	0.4～0.8		

 表 4.3.3 IS03010 における荷重係数と代表値の例 ¹⁰⁾

限界状態	重要度	荷重係数	地震動強さの代表値	再現期間
終局限界状態	高	3.0～4.0	0.2G	100 年
	中	2.0		
	低	0.8～1.6		
使用限界状態	高	0.6～1.2	0.2G	100 年
	中	0.4		
	低	0.16～0.32		

VISION2000⁶⁾

カリフォルニア構造技術者協会 (SEAOC: Structural Engineers Association of California) より「Vision 2000 - 性能に基づいた建築物の耐震工学⁶⁾」と題するレポートが発行され、性能明示型の新しい耐震設計体系の骨格と設計手法を提示している。これは、設計用地震荷重レベルをその地域の再現期間あるいは発生確率で複数定義し、それらの地震動レベルにおいて地震時の性能レベルを別途定めた性能マトリクスを目標に設計するものであり、それらの性能レベルは建物の被害状態と直接対応するようになっている。表 4.3.4 が Vision2000 で提案された耐震性能マトリクスである。この考え方は、米国統一耐震規定 IBC においても採用されている。

表 4.3.4 VISION2000 の耐震性能マトリクス⁶⁾

設計用地震動レベル		耐震性能レベル			
(再現期間)	超過確率	完全機能確保	機能確保	人命確保	崩壊寸前
しばしば (43 年)	50% in 30yrs	●	×	×	×
時々 (72 年)	50% in 50yrs	■	●	×	×
稀 (475 年)	10% in 50yrs	★	■	●	×
非常に稀 (970 年)	10% in 100yrs		★	■	●

日本建築学会の限界状態設計指針³⁾

日本建築学会では、建築物のより合理的な構造設計法確立を目指した活動を実施しており、その中で、建築物の限界状態設計指針³⁾が 2003 年に刊行された。これは建築物の構造形式〔鉄筋コンクリート造、鉄骨造、木造、など〕によらない統一的な共通の設計の枠組みを提供することを目的に、確率・統計的手法に基づいて目標安全水準を定めて設計荷重や設計耐力を決めてゆく合理的な方法である。ここでは、荷重・耐力係数設計法が採用され、荷重の発生頻度や荷重強さのばらつきを直接的に反映した設計式を用いている。

建築構造物に要求される条件として、安全性と使用性に関わるものがあるが、それらを設計で考慮する限界状態として定め、それらに対して、荷重・耐力係数を定めて、各部設計の荷重組合せ方法を示している。荷重係数は、荷重の種類や特性〔発生頻度は荷重作用時間〕に応じて荷重組合せ係数が定められる。なお、この設計式の一番の利点は、設計荷重や耐力が目標安全性水準と直接関連していることであり、現行設計法にはない重要な特徴である。

建築基準法における地震荷重の確率的評価¹¹⁾

1998 年 6 月に建築基準法が大幅改定・公布され、2000 年 6 月には基準法施行令が公布された。この改定の目的は、従来の仕様に基づく規定から性能に基づく規定への大幅改定であった。

要求耐震性能としては、最大級の地震に対して人命保護（各階の崩壊を生じさせない）、建物供用期間中に一度以上遭遇する地震に対しては、損傷防止（構造安全性の維持に支障のある損傷を生じさせない）となっており、前者に対しては、建物の変形量を評価するものとしており、等価線形化手法と応答スペクトル法を組み合わせた「限界耐力計算」と呼ばれる新たに開発された検証法を用いることが謳われている。残念ながら、地震荷重の大きさや表現については旧基準法のものと基本的に変わっておらず、確率・統計的な考え方を盛り込むことが今後の大きな課題となろう。

この改定に先駆けて、建設省主導で総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」が実施され、今後の建築設計において、建築物の安全水準をどう考え、どのように扱うべきかについて膨大な検討がなされた。図 4.3.3 は、全国 8 都市における旧建築基準法で定められる地震荷重を、建築学会の荷重指針の統計資料を用いて再現期間で表したもので、地域によって大きな差があることがわかる。同図より、建物の性能水準を全国で均一にするには、現行規準に用いられている地震地域係数 Z にもっと差をつける必要があることがわかる。これらは、確率論的地震動予測地図を用いて検討することができ、既往規準の不具合を確率的な視点から再評価することが可能である。

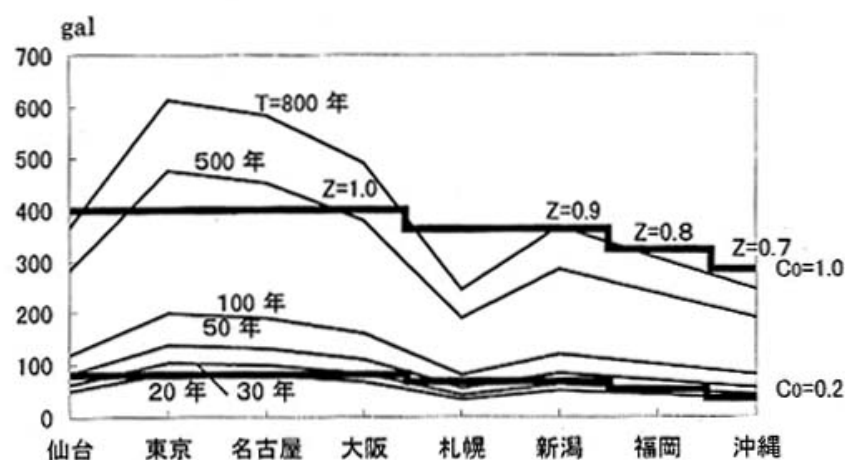


図 4.3.3 荷重指針⁹⁾のデータに基づく、全国各都市における地震荷重の再現期間
(Z :旧基準の地震地域係数)¹¹⁾

(2) 簡易建築物の耐震評価への活用

現在の確率論的地震動予測地図は地表面の計測震度に対して作成されている。これは国民が慣れ親しんでいる震度を用いることにより、国民の間に地震防災意識を喚起させる利点がある。地面の揺れを震度というわかりやすい表現を用いれば、個人住宅の耐震設計・診断に有効に活用できる。

個人住宅の耐震診断等においては、その評価は簡便な方が望ましい。そこで以下には、震度で表された確率論的地震動予測地図を用いて建物の簡易耐震診断が簡単にできる方法を紹介する。

個人住宅の耐震性能の内、建物の安全性を例にとって説明する。いま、建物が今後 50 年以内に地震により建物の安全性が損なわれ崩壊する確率 P_f は次式で評価することができる。

$$P_f = \sum_i \text{Prob}(I > i) \cdot \text{Prob}(R = i) \quad (4.3.2)$$

ここに、 $\text{Prob}(I > i)$ は今後 50 年間に建物建設地点の計測震度 I が i を超える確率、 $\text{Prob}(R = i)$

は対象建物の安全性を損なわせる地面の揺れが i となる確率であり、建物の強さを震度で表現したものである。計測震度 i に関する総和は、($i=3, 4, 5$ 弱, 5 強, 6 弱, 6 強, 7) とする。

確率論的地震動予測地図では対象地点において今後 50 年間に計測震度 I が i を超える確率 $\text{Prob}(I > i)$ が評価されており、計測震度に関するハザード曲線から容易に評価することができる。また、上式では対象建物の強さが地表面震度で表されている必要があるが、これは、建物の脆弱性曲線を計測震度で表したものに他ならず、既往の建物の脆弱性曲線に関する研究成果を活用することもできる。建物の耐震補強や新築建物の耐震設計においては、2003 年に施行された住宅の品確法や性能表示制度と関連づけられることが可能で、国民の住宅性能への関心度を高めることに役立つであろう。

4.3.4 確率論的地震動予測地図の利点

本節では、地図の耐震設計以外への利用を考える上で、確率論的地震動予測地図の特質を明確にし、今後のさらなる活用可能性への手がかりを示す。全国を概観した確率論的地震動予測地図の有用性は以下が挙げられる。

- (1) 全国の地震危険度の相対的評価が可能
- (2) 同一地域の建築物、土木構造物、他の施設の耐震設計、耐震性評価のための共通基盤となりうる
- (3) 他の自然災害（強風、雪、洪水、豪雨等）との危険度比較のための活用可能
- (4) 時間軸を取り込んだ評価となっていることから、将来の持続性に基づく設計、評価に活用可能

4.3.5 まとめ

本節では、建物の耐震設計への利用の視点から、耐震性能の捉え方、耐震設計の考え方、設計法への活用事例と今後の可能性について概説した。現在作成中の全国を概観した確率論的地震動予測地図は適用にあたって、建物の耐震設計においては工学的基盤における応答スペクトルなど、より詳細な情報の提示などが必要な場合もあるが、地図を活用する側が地図の利点を理解した上で、活用目的、対象範囲、評価の手間などを勘案して利用すれば、極めて合理的な意思決定ができる。確率論的地震動予測地図は今後の多様な展開可能性を秘めており、その有効性が今後幅広く認識されるはずである。

参考文献

- 1) 建設省、土木建築にかかる設計の基本、2000.12
- 2) CEN, EUROCODE-0 Basis of Design, 1999

- 3) 日本建築学会、建築物の限界状態設計指針、2003
- 4) 高田毅士、耐震性能の確率的表示と地震荷重、構造〔振動〕部門 PD 資料、1999.9
- 5) ISO2394, General Principles on Reliability for Structures, 1997
- 6) SEAOC, VISION 2000 – Performance Based Seismic Engineering of Buildings, April, 1995
- 7) R.C. Murray, et al., DOE Natural Phenomenal Hazards Design and Evaluation Criteria, Proc. of the 5th Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping, Orlando, Florida, 1994. 12
- 8) 高田毅士、新荷重指針・地震荷重の立場から、構造〔荷重〕部門 PD 資料、2004.8
- 9) 日本建築学会、建築物荷重指針・同解説、1993
- 10) ISO3010, Bases for design of structures – Seismic actions on structures, 2000
- 11) 建設省建築研究所、「新建築構造大系の開発」目標水準分科会報告書、建設省総合技術開発プロジェクト、平成 10 年 3 月

4.4 土木構造物の耐震性能照査への利用

4.4.1 はじめに

地震動予測技術の発展をベースに、地盤や構造物の2段階設計の枠組みが各分野の設計法として体系化されてきている。性能照査型設計法とあいまって、新技術の導入が促進され、従来よりも安全性が高く、かつ経済的な設計や維持管理が可能になるように期待される。ここでは、土木耐震分野で議論されている地震動予測技術の適用についてその動向を述べる。

4.4.2 耐震安全性照査に用いる地震動

本節では、土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会（委員長 西村昭彦氏、(株) テス（当時））が2001年9月に発行した「土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）－耐震基準作成のための手引き－」¹⁾（以下、ガイドラインと称する）におけるレベル2地震動について述べる。レベル2地震動は、構造物の耐震安全性照査に用いる地震動である。一方、地震後の使用性に係わる要求を経済的に満たすことを目的とした経済性照査（仮称）に用いる地震動は、これとは別に定める必要があり、それについては4.4.3で同・小委員会の試案を紹介する。

(1) 要求性能と設計入力地震動

土木学会では1995年兵庫県南部地震による阪神淡路大震災の後、同年5月と翌年1月の2回にわたって耐震基準等に関する「提言」を行った²⁾。その中で、今後、土木構造物の耐震性能の照査では、レベル1およびレベル2の2段階の地震動強さを用いるべきことが述べられ、レベル1地震動は原則としてそれが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準を示す、レベル2地震動はきわめて希であるが非常に強い地震動を定式化したもので構造物が損傷を受けることを考慮してその損傷過程にまで立ち入って構造物の耐震性能を照査する水準を示す、としている。

このうち、レベル2地震動の考え方については、土木構造物の耐震設計に関する特別委員会作業グループ(WG1)が地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会とともに調査検討した内容は2000年6月に第3次提言³⁾の一部として公表されるとともに、同小委員会の調査報告もまとめられている⁴⁾。すなわち、レベル2対象地震を先に選定し、これによる当該地点の地震動を評価することを原則としている。

「提言」でレベル2地震動は「極めて稀であるが非常に強い地震動」と表現されているが、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震と主要な活断層による内陸直下の地震は、大きな地震動強度を示す点では共通性があるが、再来期間は前者が100年オーダー、後者が1000年オーダーと大幅に異なっている。しかも全般的に特定の地震の再現期間に

関する情報は現時点では極めて不足しているため両者を同列に扱いにくいことから、ガイドラインでは地震危険度の情報も参照してレベル 2 対象地震を選定することとしたものの、地震危険度をレベル 2 地震動の評価に直接用いていない。

現在の科学技術は、震源断層の破壊プロセスが確定すれば地震動はかなりの高精度で評価できる段階にある。しかし将来の地震に関しては震源断層の破壊プロセスに不確定要因が多く、予測にはばらつきが不可避である。とりわけ、大きな破壊力を示す強い地震動の発生メカニズムに関しては、未解明ないし不確定の部分が多い。そのため、耐震機能と経済性のバランスのもとで合理的と判断される地震動強度を選定することが必要であり、その場合にレベル 2 地震動は物理的に発生可能と考えられる極限としての最大地震動強さを下回ることもある。レベル 2 地震動を最大級の強さをもつ地震動としたのは、このためである。強震動下における構造物の非線形挙動が脆性的であるか塑性的であるかによって、強震動が構造物の耐震性能に及ぼす影響は、大幅に相異することが知られている。構造物のこのような応答特性を重視する立場から、レベル 2 地震動を対象構造物の耐震性能に対して、深刻な影響を及ぼす可能性が強い地震動と言い換えると、この用語の意味はより厳密になる。

(2) レベル 2 対象地震の選定

レベル 2 地震動の設定に際しては、まず当該地点において最大級の強さの地震動をもたらし得る地震を選定する。この地震のことをここでは「レベル 2 対象地震」と呼ぶ。レベル 2 対象地震は、原則として地震規模（気象庁マグニチュード）と震源もしくは震源断層の位置により表現される。次に、レベル 2 対象地震が発生した場合の当該地点における地震動を最も適切な方法により評価する。

一般に、耐震設計における地震外力の設定では、主として地震発生の問題に関する対処方法として、確率論的地震ハザード評価と想定地震（シナリオ地震）による地震動評価の 2 つの考え方が用いられてきた。ここでのレベル 2 地震動評価の考え方はこのうちの想定地震による地震動評価に当たる。昨今の強震動地震学の知見によれば、震源の特性（断層の形状や断層の破壊特性など）、地震動の伝播経路特性、地盤による増幅特性などをより詳細にモデル化して地震動を予測することが可能となっており、こうした方法を駆使してレベル 2 地震動を評価するには地震の物理的イメージをあらかじめ想定しておくのが便利である。

土木学会の第二次提言の解説でも指摘されているように、地震荷重評価の観点からはできる限り共通の意思決定規範が用いられるべきであり、加えて性能照査型設計法への移行の趨勢を踏まれば、今後は種々の構造物が保有する地震リスクを定量化しようとする方向にあると考えられる。こうした観点からは、レベル 2 地震動が確率論的な地震ハザードレベルと系統的に対応した形で設定できれば理想的である。しかしながら、わが国の多くの活断層の活動による地震発生確率は、例えば 30 年確率では数%以下のものが大半である

が、一方で宮城県沖地震や糸魚川・静岡構造線断層帯の活動による地震の30年間での発生確率はそれぞれ90%以上、約14%と公表されており、両者の値は大きく異なる。すなわち、最大級の強さの地震動が発生する確率は対象とする地点ごとにさまざまであり、これが発生確率の水準を揃えてレベル2地震動を設定することを困難にさせる最大の要因となっている。

ガイドラインでは、震源断層が特定できる非常に強い地震動は、その発生確率の高低にかかわらずレベル2地震動の候補として評価している。レベル2地震動と当該地点でのハザードレベルとの関係は地点ごとにさまざまであり、確率レベルを揃えてレベル2地震動を設定するという形にはならない。しかし、確率の情報が不要なのではなく、構造物の耐震性能照査の基礎情報としてレベル2対象地震の発生確率あるいはレベル2地震動の発生確率を明示しておくことが重要であるとしている。なお、この点に関しては、ガイドライン作成後の技術の進展（地震調査研究推進本部などの検討）を踏まえて、議論が進められている。

(3) レベル2地震動の評価

従来の耐震設計基準は、大きな地震災害が発生するたびに改訂され、設計地震動もそのつど引き上げられてきた歴史を持つ。従って設計地震動は、「既往最大」の地震動の性格を与えられてきた。最近でも1995年兵庫県南部地震を受けて多くの構造物の耐震設計基準が改定され、その設計地震動は例えば道路橋示方書などのように同地震において観測された地震動を参考に設定されている場合が多い。また、地震動は震源や伝播経路およびそれぞれの地点の地盤構造によって大きく影響されるが、従来の基準ではこれらの影響を言わば平均した形で地震動が評価されてきた。例えば地盤を3～4種類に分類した上で、それぞれに平均的な地盤の影響を考慮する方法などである。

このような方法で設定されてきた設計地震動は、多くの場合において構造物の地震被害の抑止に有効に働いてきた。1995年兵庫県南部地震においても幅数km、長さ20km程度の所謂「震災の帯」の地域以外では、重大な地震被害はそれほど発生しなかった。震災の帯の地域の被害は、震源断層に近かったこと、深層地盤および浅層地盤の影響で特に地震動が増幅されたため、従来の設計地震動を大きく超える地震動が作用したために発生したと考えられている。すなわち、この地震も含めて過去の地震被害を詳細に調査すると、震源断層に近い、地盤構造によって大きく地震動が増幅されたなど、構造物建設地点の特殊な地震環境、地盤環境が、過去の震災事例にない条件や、平均化された条件よりはるかに異なる条件の場合に、重大な地震被害が発生している。

1995年兵庫県南部地震で観測された地震動を参考に設定された新しい基準で構造物が設計されれば、今後もし神戸で同じような地震が発生した場合には、被害は遙かに少なくなることは間違いない。しかし、兵庫県南部地震で観測された地震動の大きさは大変大きいので、日本の殆どの地域では発生するはずもない大きな設計地震動で構造物が設計される

ことになり、大変な不経済となる。またごく一部の地域ではあるが、兵庫県南部地震時の神戸の場合より悪い条件となり、もっと大きな地震動が作用する危険性もある。また、兵庫県南部地震において震災の帯のなかで観測された地震動は存在しないので、これらを参考に設定された設計地震動は、神戸の震災の帯の中では十分ではないかもしれない。

以上の点を考えると、既往最大かつ代表的な地震動で、日本中の構造物を設計する従来の考え方が、経済的に地震災害を軽減するには、最早有効ではないことがわかる。今後新たに耐震設計基準の改定をおこなう場合には、建設地点の地震環境や地盤環境を個別に的確に評価して設計する体系に変える必要がある。このためには震源となる断層と構造物の建設地点を特定して、構造物ごとに個別に地震動を評価することが必要となる。すなわち、設計地震動が震源依存 (Source specific) かつ地点依存 (Site specific) であることを前提とすることである。

設計地震動を地盤種別ごとに応答スペクトルなどで明示してきた従来の設計基準に比べると、震源依存地点依存で、構造物ごとに地震動を推定するのは煩雑であることは間違いない。特に重要度のそれほど高くない構造物に対しては、大きな負担となることも考えられる。この点を解決する方法としては、地方自治体などが十分な活断層や地盤の調査をしたのち、震源となる断層を想定し、これらの断層からの距離が同程度で地盤構造がほぼ同じと見なせる大きくても数十平方km程度の地域ごとに、予め設計地震動を推計しておくことが考えられる⁵⁾。

(4) 不確定性の評価

1) 地震動評価における不確定性

対象地震の選定において過去の地震の再来を考える場合、規模や位置をそのままやみくもに用いるのではなく、そこに含まれる不確定性を考慮する必要がある。例えば、過去に発生したのと同じようなタイプの地震でも、規模がより大きな地震が発生する可能性や、当該地点により近い場所で発生する可能性についても検討しておくことが重要である。また活断層に起因する地震動を評価する場合、現状の活断層情報から 1 回の地震で活動する震源断層を推定する際にも、不確定な要因が少なくない。

震源断層の破壊過程を考慮してレベル 2 地震動を設定する通常の場合には、不確定性は対象地震の断層面の位置や地震の規模に、また想定する震源断層の破壊過程や地震動の評価方法などに内在している。

2) 確率論的地震危険度解析における不確定性の区分

レベル 2 地震動の評価の過程では種々の不確定性が含まれるため、それを考慮した上での判断が要求される。こうした不確定性は、レベル 2 対象地震の規模や断層破壊過程のばらつきのように、現実には存在しているが、現状では予測不可能と考えられる

もの（偶然的な不確定性と呼ぶ）と、活断層であるかないかという問題や深部地下構造のように完全な調査をすれば確定できるが現状では予測不可能なもの（認識論的な不確定性と呼ぶ）の二種類に分けて考えることが出来る。このような不確定性を組織的に処理するための有用な方法として確率論的地震危険度解析がある。確率論的地震危険度解析では、前者は地震動の発生確率を表す地震ハザード曲線として、後者は地震ハザード曲線のばらつきとして評価される。そして後者の不確定性は、専門家間の判断の幅を考慮したロジックツリー手法などによって、評価できると言われている。

3) 確率論的地震危険度解析と決定論的地震危険度解析

確率論的地震危険度解析は、地震発生に関する確率モデルと地震時に生じる地震動特性に関する確率モデルを統合して、特定の地点で特定の期間に特定の地震動特性が生じる確率を決定するための方法である。世界的には、1992年～1999年にかけて実施された GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Project) により全世界的な地震危険度マップ（50年間の超過確率が10%の最大地動加速度の分布図）が作成され、マップや資料がインターネット等で公開されている。また、米国では米国地質調査所 (USGS) によりアラスカ・ハワイを含む新しい全米の地震危険度マップが作成され、インターネット等で公開されている。USGS によるマップは「1997年版新しい建物及び他の構造物に対する地震規則に関する NEHRP 勧告条項」で用いられている設計マップの確率的な要素の基礎となっている。設計マップは、最大考慮地震 (MCE: Maximum Considered Earthquake) 地動マップと呼ばれ、USGS の確率論的地震危険度マップに基づいているが、一部の地域における決定論的地動の導入や工学的判断の適用により修正されている。

確率論的地震危険度解析によれば、個々の地震は発生領域やマグニチュード、発生頻度が異なるさまざまな地震集合のうちの1サンプルと見なして確率評価されるので、地震危険度解析の結果と比較することにより、確定的に設定されたレベル2地震動が確率論的にどのような位置にあるかを評価することができる。逆に、発生確率や再現期間などの地震危険度レベルを指標としてレベル2地震動の強さを設定することもできるが、その場合にはレベル2地震動の適切な地震危険度レベルについての技術的判断、あるいは社会的合意が不可欠である。現状では、技術者が適切な地震危険度レベルを判断するのに十分な社会的合意は形成されているとは言えず、この点は今後の重要課題である。

4) 確率論的地震危険度解析に基づく地震動の設定方法

確率論的地震危険度解析による設計用入力地震動の決定方法としては2つの方法が考えられる。どちらも最初に加速度応答スペクトルを設定し、次にそれに適合した模

擬地震動を作成するものである。

1 つは、一様ハザード応答スペクトル（対象とする全周期帯で一様な超過確率を持つスペクトル）を用いる方法であり、もう 1 つは特定の周期における加速度応答値を再現期間から設定し、それとスペクトル形状を組み合わせるものである。後者の方法でどの周期を選ぶかは対象構造物の特性から判断する。また、スペクトル形状は、設定した加速度応答値を与える可能性が大きい地震の分布（貢献度）を検討し、貢献度の大きな地震（確定的手法の想定地震に相当する）の諸元に基づいて設定する。いずれの方法を用いるにせよ、評価された応答スペクトルに対する模擬地震動作成時の位相についても、貢献度が大きい地震の諸元に基づいて設定することができる。なお、一般的に確率論的地震危険度解析では、そこで用いる種々の確率モデルの条件によって結果が変動すること、また地震動の評価を一般的には経験式（距離減衰式）により行うため断層の破壊過程の取り扱い等が確定的なレベル 2 地震動の算定手法と異なる場合があることに留意する必要がある。

5) 感度解析

一方、より簡便に不確定性を評価する手法として感度解析も有効である。レベル 2 地震動を算定する過程で必要となる種々のパラメータを現実的な範囲で変化させた解析を積み上げることにより、例えば応答スペクトルのレベルの幅を認識することができるので、レベル 2 地震動を設定する際の最終的な判断を行うための基礎資料になる。

4.4.3 経済性照査に用いる地震動—新しいレベル 1 地震動の考え方—

レベル 2 地震動対応の設計法が高度に整備されてきている一方で、レベル 1 地震動対応の設計法が依然として十分な議論のないまま震度法由来の弾性設計の範囲に留まっていることには問題がある。何が問題かという点、従来の震度法由来の弾性設計は、もともと安全性照査であったはずなのだが、2 段階設計に移行した時点で使用性照査にすりかわったことである。このことの弊害はまだあまり表面化してはいないが、後述するように技術の健全な進歩を阻害する可能性がある。

土木学会地震工学委員会（耐震基準小委員会）では、この点に鑑みて、新しい設計体系への移行を検討しており、平成 15 年 11 月には「土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル 1 の考え方（案）」（ワーキンググループ主査：澤田純男 京大助教授）をとりまとめた。以下に、その報告書⁶⁾に基づいて要点を紹介する。この新しい設計体系の中では、シナリオ型地震動評価と確率論的地震ハザード評価の両方が有効に利用できる。

(1) レベル 1 地震動に対する性能目標とは

現在では、終局限界状態を照査するレベル 2 設計法が整備され、ほとんどの構造物の断

面がレベル2 で決められるようになってきているが、レベル1 設計が不要であるという意見は土木技術者からあまり聞かれない。たとえレベル2 設計で構造物系全体が崩壊しないように設計されていたとしても、レベル1 設計で弾性限界を規定することによって中小の地震での被害をコントロールすることが必要であると考えられているからであろう。

しかしながら、現在のレベル1 設計法が、この命題に対して合理的であるという根拠はない。レベル1 設計に用いる入力地震動として、「供用期間に1 ～2 回発生する確率を持つ地震動」という定義に従って例えば50 年期待値に対応する地震動を用いたとすると、50 年間に弾性限界を超えない確率がポアソン過程なら約37%になるように構造物を設計することになる。しかしながら、この確率が37%でなければならない根拠は明らかでない。また、弾性限界を超える確率が残り63%となるが、それがどの程度の被害となるのか、ほとんど補修を必要としない程度となる確率がどれぐらいか、建設コストに比べて十分に大きな復旧コストとなる確率がどれぐらいか、等は一切考慮されない。

実際にメンテナンス計画を考える上で重要なのは、無被害の確率よりも、被害が出たときにどれぐらいの被害となって、その復旧にどれぐらいのコストと日数が掛かるか、である。

レベル1 設計で実現すべきは、頻繁に弾性限界を超えることによって、点検コストや復旧コスト、さらには点検や復旧のために供用を一時停止することによる「経済的被害」が過大にならないように構造物を設計することである。すなわち、修復に伴う経済性の照査を求められているものと考えることが妥当である。

そこで、レベル1 に対する性能目標として、「地震時および地震後に、構造物の機能が、経済的に維持できる」とすることが提案されている。

(2) 現在のレベル1 設計法が技術的進歩の障害となっている点

ここでは簡単のため、構造物の設計を、弾性限界と許容塑性率を決めることと単純化して解説する。

弾性限界をコントロールするのは主に断面形状や断面積であり、場合によっては材料の選択によって調整することもある。許容塑性率を制御するのは、主に鋼構造、鉄筋コンクリート構造、複合構造などの構造形式であり、場合によっては帯鉄筋量などの構造細目によって調整することもある。現在の二段階設計法では、図4.4.1の太線で示されているように、レベル1 で弾性限界 (Y_1) を規定し、その断面でレベル2 地震動に対する最大応答 D_2 を求め、これによる塑性率 (D_2/E_1) が許容塑性率を超えないかを照査している。

ここで、図4.4.1の細線のように、弾性限界を Y_N に引き下げることを考える。弾性限界を引き下げれば小さな断面で済むので、剛性は小さくなり、弾性限界に対応する変形 E_N も E_1 より大きくなる。この断面のレベル2 地震動に対する最大応答はエネルギー一定則にほぼ従うと考えれば D_2 よりかなり大きくなり D_N となる。しかし、許容塑性率が十分大きくとれる構造形式を採用すれば、このときの塑性率 (D_N/E_N) を許容塑性率より小さくすること

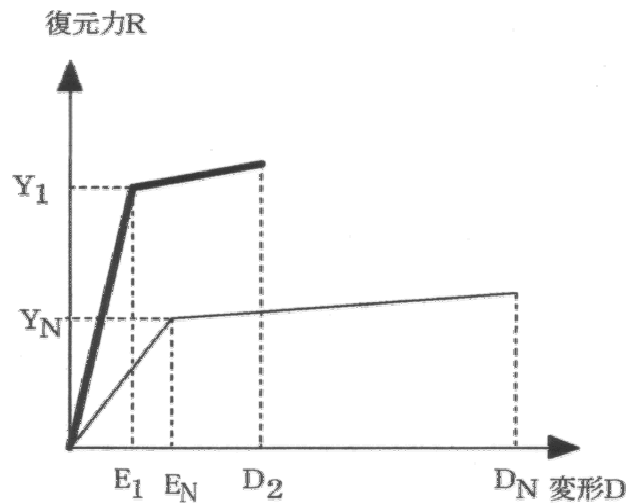


図 4.4.1 設計で決められる復元力－変形関係⁶⁾

が可能である。さらに変位一定則として良く知られているように、建設地点の地震動特性によっては、 D_N と D_2 はほぼ同じである場合も考えられる。この場合は特に構造形式を変更しなくても、断面を小さくすることによって何ら安全性を損なうことは無いどころか、反対に塑性率に余裕が生じることになる。

このように弾性限界を引き下げた設計をすることによって、建設コストを圧縮することができるが、これによって発生する問題は何か？ それは比較的小さな地震動に対しても弾性限界を簡単に超えて、損傷が発生する可能性があることである。それでは弾性限界を超えて損傷が発生すると、何が困るか？ それは損傷を補修する必要性が生じるので補修するためのコストが発生することと、補修のために供用を一時停止すると周辺社会に与える間接被害がコストとして発生することである。このような概念を表したのが図 4.4.2 である。

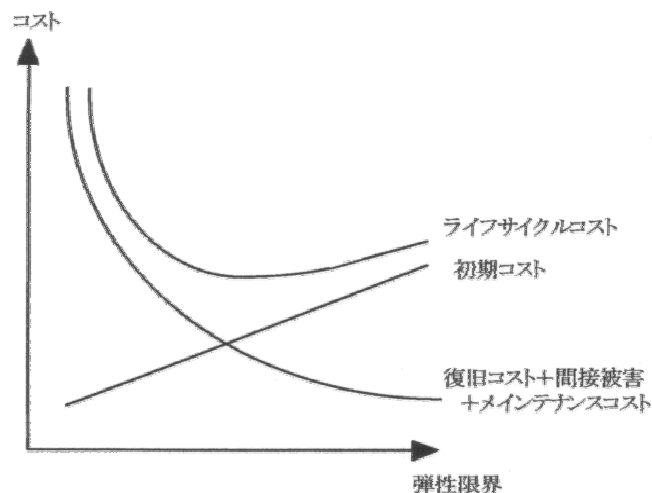


図 4.4.2 弾性限界を経済的理由から決める条件⁶⁾

図 4.4.2 の縦軸はコスト（金額）、横軸は弾性限界の大きさである。したがって、建設コスト（初期コスト）に加えて供用期間中に耐力を維持するためのメンテナンスコスト、供用期間中に発生するであろう地震被害に対する復旧コストと復旧期間中の供用停止による収入減（直接被害）と、供用停止が社会に与える経済的波及効果（間接被害）の総額（ライフサイクルコスト）が大きくなならないなら、断面を小さくして弾性範囲を引き下げることが可能であると考えられる。理想的にはライフサイクルコストが最小になるような断面設計をすればよい。

(3) 経済性照査の基本手順

現状のレベル 2 設計をそのままにして、弾性限界をどこまで下げられるのかを、あるいは弾性限界をどこまで上げなければならないかを、経済的視点から決めるべきというのが主張である。すなわち、性能目標としての「地震時および地震後に、構造物の機能が、経済的に維持できる」を満足しているかどうかを、初期建設コストと、ライフサイクル全期間に対する地震時および地震後の復旧コストと間接被害の期待値の和、すなわちライフサイクルコストを最小化させるような設計となっているかで照査することが提案されている。

1) ハザード曲線とフラジリティ曲線による経済性照査法

ここでは、地震動強度としてある指標 A を用いて解説する。地震動強度の確率分布 $F_H(A)$ を表すグラフは、ハザード曲線としてよく知られている。これは縦軸に年超過確率、横軸に地震動強度をとったもので、その例を図 4.4.3(a) に示す。また、確率分布を表すハザード曲線から次式の確率密度、

$$f_H(A) = -dF_H(A)/dA \quad (4.4.1)$$

に変換したものを図 4.4.3(b) に示す。

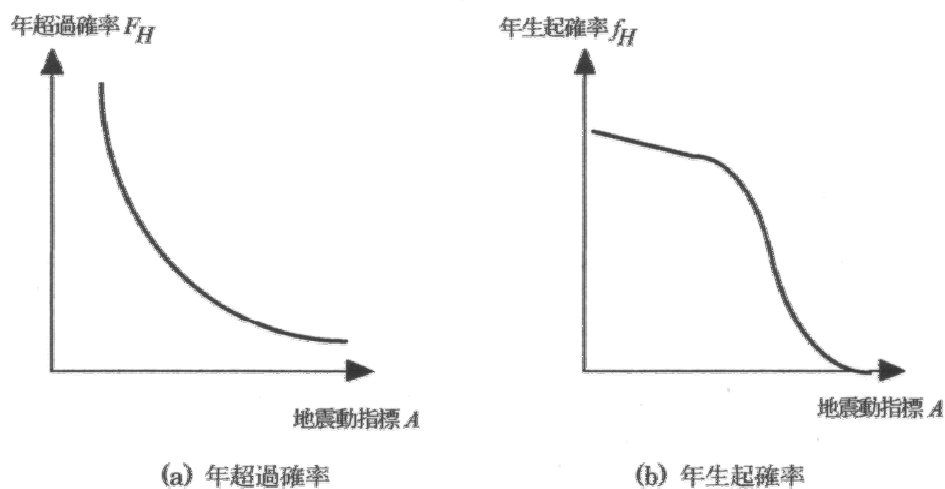
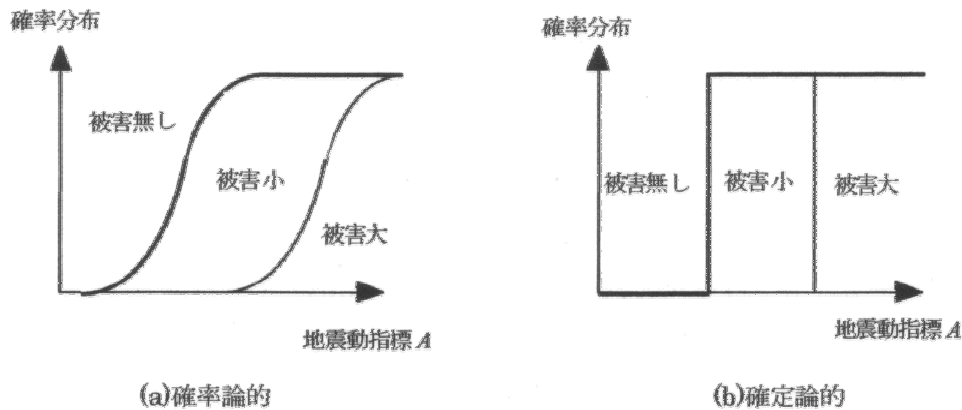


図 4.4.3 確率論的地震ハザード曲線⁶⁾


 図 4.4.4 フラジリティ曲線⁶⁾

一方、ある構造物の諸元 Si が与えられたときに、地震動強度と構造物の被害程度との関係は、フラジリティ曲線 $F_F(R_j, A; Si)$ として表されることが多い。これは横軸に地震動強度、縦軸に確率分布をとり、それぞれの被害ランク以上になる曲線が、図 4.4.4(a) のように示される。もし確定的に被害ランクを評価するとすれば図 4.4.4(b) のようになる。

ハザード曲線による地震動強度の確率密度 $f_H(A)$ と、フラジリティ曲線によって求められる被害ランク j となる確率の積をとることによって、その構造物が、ある地震動強度に対して、それぞれの被害ランクになる年生起確率が求められる。これを地震動強度で積分することにより、その構造物がそれぞれの被害ランク以上になる年生起確率 $P_j(Si)$ を求めることができる。

次に、ある被害ランクになった場合の直接被害額と間接被害額を考える。本来はこれらの値に対しても確率分布で表現すべきであるが、現状ではその確率分布を予測することが困難であるため、ここではそれぞれの被害ランク j に対する平均的な損失（直接被害額と間接被害額の和）が推定できるとする。最終的に、この構造物諸元 Si に対するライフサイクルコストの期待値は、

- ① 初期コスト、
- ② 設計供用年間のメンテナンスコスト、
- ③ 被害ランク j に対する平均的な損失と年生起確率の積

の総和として求められる（推定方法、事例、課題などについては報告書¹⁾に詳述されている）。なお、③については 1 年あたりの額を設計供用年間に変換する。上式を構造物諸元 Si を変えながら繰り返し計算し、ライフサイクルコストの期待値が最小になる構造物諸元 Si を求めればよい。

2) モンテカルロ・シミュレーションによる経済性照査法

地震動強度を表すのに単一の指標を用いるハザード曲線や fragility 曲線は、その概念を理解するのに便利であるが、構造物の非線形応答を考慮しなければならない関係上、地震動を例えば最大加速度のような単一の指標で表現するのには無理がある。また、fragility 曲線を用いて設計を行うためには、事前に fragility 曲線が構造物諸元 S_i の関数としてモデル化されている必要がある。しかしながら実際には、このような fragility 曲線のモデル化は大変困難であり、既往の研究成果も乏しい。そこで、ハザード曲線と fragility 曲線を用いずに、モンテカルロ・シミュレーションによる方法が望ましい。

この方法では、レベル 1 に対する入力地震動として、年生起確率と地震動波形の組を大量に作成する。その構造物がそれぞれの被害ランク以上になる年生起確率 $P_j(S_i)$ は、抽出されたサンプル入力地震動の下で、材料などのばらつきを考慮した非線形応答解析を実施することによって計算する。このようにして、前記 1) の③に相当する結果を得ることができる。このためには膨大な計算を伴うが、計算機能力の向上がそれを現実的なものとする可能性がある。そうした設計費用や労力に見合うだけの経済性（これもライフサイクルという意味で）の見通しが得られるならば、この方法を積極的に適用していくべきである。

3) レベル 2 設計と経済性照査のプロセス

レベル 2 設計は従来通り実施することとする。これは、経済合理的な地震動設定とは切り離して、レベル 2 地震動に対する人命安全性をまず確保する、という委員会の基本思想による。レベル 2 地震動は、原則として対象となる地震（レベル 2 対象地震）を選定した上で、そのような地震が発生した場合の地震動として設定する。これに加えて経済性照査を耐震設計に組み込むには、図 4.4.5 に示すように、次のプロセスに従えばよい。

- ① 構造形式と構造細目を仮定する。これらの条件から許容塑性率が設計条件として与えられる。
- ② 断面諸元を仮定する。これによって弾性限界や剛性が決められる。
- ③ レベル 2 地震動に対する応答を計算する。
- ④ 最大応答塑性率が許容塑性率以下であるかを調べ、もし満たさないなら 2) に戻って断面諸元を変更して再び照査する。レベル 2 条件を満たす断面諸元のうちで、最も断面の小さなものを見つけ出す。
- ⑤ 経済性照査のために、ライフサイクルコストを計算する。
- ⑥ ①に戻って別の構造形式、構造細目を仮定して、②～⑤のプロセスを繰り返す。
- ⑦ 仮定した構造形式、構造細目の中から、最もライフサイクルコストが小さなもの

を選択する。

以上の方法を用いれば、レベル 2 設計に関する性能（人命安全）を維持した上で、地震活動度と構造物の重要度（社会への影響度）に応じて、最も経済的な構造形式、構造細目や断面諸元を設計できる。

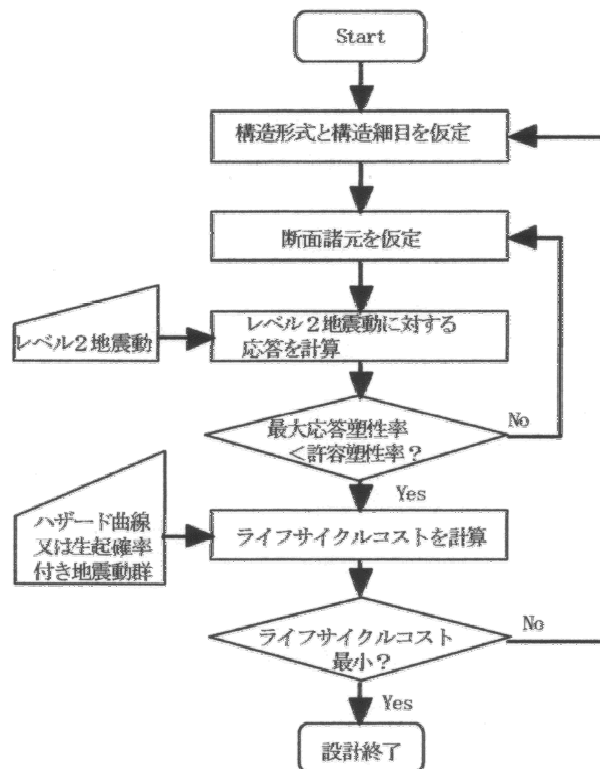


図 4.4.5 レベル 2 設計と経済性照査による耐震設計の流れ（案）⁶⁾

4.4.4 まとめ

- ・ 土木構造物は公共性が高く、その耐震性確保には地震動予測技術の発展を反映した性能照査型設計法が適用されつつある。
- ・ 土木構造物の耐震性能照査は、安全性に係わる照査と、経済性に係る照査とに分けて、それぞれにもっとも適切な地震動を用いることが望ましい。
- ・ 安全性に係わる照査に用いる地震動としては、震源断層と評価地点を特定した最大級の地震動を選ぶことが提案されている。推本の事業との関係では、「シナリオ型の地震動予測地図」の情報がこれに役立つ。また、対象とする震源断層を選定する際には、地震発生の長期評価結果が役立つ。
- ・ 経済性に係る照査に用いる地震動としては、対象構造物の供用期間におけるライフサイクルコストが重要になるため、地震動の発生頻度が重要になる。推本の事業との関係では、「確率論的地震動予測地図」の情報がこれに役立つ。

参考文献

- 1) 土木学会「土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)ー耐震基準作成のための手引きー」,地震工学委員会耐震基準小委員会のホームページに報告書全文が掲載
<http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/index.html>
- 2) 土木学会:土木学会耐震基準等に関する提言集, 1996.5.
- 3) 土木学会:土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会:土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説, 2000.6.
- 4) 地震工学委員会:レベル2地震動研究小委員会:レベル2地震動の明確化に向けて, 土木学会論文集 No.675/I-55, pp.15~25, 2001.4.
- 5) 大阪府土木部:大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, 1997.
- 6) 土木学会「土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案)」,
地震工学委員会耐震基準小委員会のホームページに報告書全文が掲載
<http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/index.html>

4.5 ライフライン等への地震対策への利用

4.5.1 ライフラインの地震対策上の特徴と耐震性能

ライフラインの地震対策は都市や地域の地震防災のうえで重要な意味をもつ。特に、震災直後から復旧に至る間、ライフラインの機能の低下や回復は被災地域の復旧そのものに大きな影響を及ぼす。広義に、ライフラインには次の施設が含まれる。

- ・供給系： 水道、電気、燃料（ガス、LNG、石油等パイプライン）
- ・情報系： 通信、放送
- ・交通系： 陸上（道路、鉄道等）、海上（港湾）、航空（空港）
- ・処理系： 下水道

ライフラインに共通する特徴は、広域に設置される施設であること、ネットワークシステムとして機能を発揮することである。このため、地震の影響を受ける施設範囲が広く、ネットワークシステムの構成要素が「同時に」「複数が」「異なる程度で」被害を受ける可能性を考慮しなければならない。また、ライフラインには埋設管のように地中に長く敷設される構造物を含む場合が多いので、地震の影響として、地盤加速度の大きさそのものでなく、速度振幅や、地震動の水平方向への伝播に伴う位相差が重要な地震動指標になることがある。

兵庫県南部地震以前には、これらライフラインに対する耐震設計用の地震荷重として、工学的基盤での設計震度 0.15 程度を標準の大きさとする設計法が体系化され、対象構造物によって設計法は、震度法、応答変位法などが使い分けられていた。動的解析法は、これら簡易法が適用しにくい特殊な地盤や構造物の条件の場合に適用されたり、簡易法によって設計された構造物の詳細照査や被害想定に適用されたりしていた。

兵庫県南部地震以降、その観測地震動を踏まえての耐震診断や、設計基準の見直しがなされた。設計基準の見直しでは、大部分の場合、設計用地震動としてレベル 1 地震動とレベル 2 地震動の 2 段階が導入されている。レベル 1 地震動は、それ以前の標準設計震度 0.15 と同等の大きさとされているのが一般的である。一方、レベル 2 地震動は将来起こりうる最大級の地震動とされ、周期特性の大きく異なる海溝型地震と活断層型地震とが考慮されている。地震動予測地図との関連では、このレベル 2 地震動の策定法がシナリオ型地震動に大きく関係していると考えられるが、一般的な設計の実務では詳細な地震動予測を行わずに、基準や文献に記載の標準的な応答スペクトルやそれに適合する地震動が用いられることも多い。

レベル 1 地震動に対しては無損傷か軽微な損傷に留まる耐震性能を要求している一方で、レベル 2 地震動に対しては対象構造物の機能や重要度に応じて要求する耐震性能に違いが見られる。たとえば、ハザードの高い燃料の輸送施設（ガスパイプラインなど）や関連貯蔵施設（タンクなど）では、レベル 2 地震動に対して内容物が外部へ漏洩したり爆発したりしない「安全性」が耐震性能になるが、施設自体のハザードが低い水道施設、港湾施設、

送変電施設などでは、一部が損傷しても広域や長時間の機能低下（断水、停電）にならない「使用性」がレベル2地震動に対する耐震性能になる。実際には、ライフラインの「使用性」が被災地域の人命の「安全性」に直結するシナリオもあるので、それほど単純ではないが、ライフラインの地震対策と地震動レベルを考えるうえでこのような認識をもつことは必要である。「使用性」を問題とする場合、損傷を受けたライフラインシステムの機能（供給機能、交通機能など）を評価しなければならず、「安全性」の照査とは異なった難しさがあり、研究途上の課題も多くある。

4.5.2 ライフラインの地震リスクマネジメントー電力流通設備を例としてー

ここでは、ライフラインの特徴である「使用性」に注目して補強の箇所や優先度を検討する地震リスクマネジメントについて最近の考え方¹⁾を述べる。その中で、地震動予測（シナリオ型地震動、確率論的な地震動）がどのように適用できるのかを考察する。事例として電力流通設備を構成する変電設備を対象とする。変電設備は、主回路と呼ばれる重要機器では動的地震力（地表面で0.3G）による設計が1970年代の終わりころから適用されている。兵庫県南部地震を含め、この設計法によった機器の被害が重大な供給支障につながった例はないが、今後予想される地震動のレベルが設計基準で考慮している動的地震力を超過する可能性がある場合には、適切な補強対策などが求められる。

以下にはレベルの異なる5段階のリスクマネジメント手法を提案する。レベルが進むにつれて、より詳細手法となるが、解析に必要なデータも増える。

(1) レベル0

レベル0は、現行の設計地震力を設備に作用させた場合、最も応力が集中する部位に生じる発生応力（ $STRSS^{occur}$ ）と許容応力（ $STRSS^{accept}$ ）との関係で、補強・更新の判断を行う方法である。現実の電力流通設備は膨大な数であり、その中には現行の設計基準の適用以前に設置された設備も多くあることから、現行基準を満たしているか否かのスクリーニングをするには有効な手法といえる。補強・更新の判定は、式(4.5.1)の判定式により行う。

$$Z = \frac{STRSS^{occur}}{STRSS^{accept}} \begin{cases} Z \geq 1 & (\text{耐震補強・更新が必要}) \\ Z < 1 & (\text{耐震補強・更新の必要なし}) \end{cases} \quad (4.5.1)$$

ここで、Zは、補強・更新の判断をする指標となる。

この方法の範囲では地震動を予測することは不要である。しかしながら、近年、設計地震力として想定されている加速度レベルを越える加速度が数多く記録されていることを考えると、特に断層近傍の地域に位置する設備の耐震性は保証できない。また、問題がある設備を特定できたとしても、耐震補強・更新の対象となる設備数が多い場合、対策の優先順位の決定を客観的に行うことが難しい。

(2) レベル 1

レベル 1 は、対象となる地域にシナリオ地震を設定し、確定的に被害想定を行う方法である。一般に自治体やライフライン事業体における被害想定に用いられる方法である。シナリオ地震をもとに、各設備に作用する地震動強度（地表面最大加速度など）を想定し、設備に発生する応力等を推定する。損傷の有無の判断は式(4.5.1)と同様である。この方法によれば、補強・更新の対象となる設備をある程度絞り込むことが可能となる。ただし、対象となる地域に支配的となるシナリオ地震を特定できない場合はこの方法は適用しにくいので、レベル 0 の方法に準拠するなどする。

(3) レベル 2

レベル 2 は、レベル 1 の方法論を確率的に扱ったものである。対象となる設備に作用する地震動強度を推定するために、シナリオ地震または確率論的な地震動を導入した評価を行う。一方、想定される地震動強度に対する各設備の被害の可能性は、各設備の部材（がいしなど）の材料強度のばらつきを考慮したり、既往の地震被害の統計データを活用したりして確率的に評価する（一般に、脆弱性評価と呼ばれる）。ハザードおよび脆弱性の評価から個々の設備の被害確率を計算し、その値がある閾値を超えているかどうかで、損傷の判定を行う。式(4.5.2)に被害確率の定義を示す。

$$P_i(R < S) = \int_0^{\infty} f_{Ri}(r) \left\{ \int_r^{\infty} f_{Si}(s) ds \right\} dr = \int_0^{\infty} f_{Ri}(r) \{1 - F_{Si}(r)\} dr \quad (4.5.2)$$

ここで、 $P_i(R < S)$ は、対象となる設備 i 直下に作用する地震動強度 S が、設備耐力 R （本論では、地表面の地震動強度の関数として与える）を超える確率を示す。 $f_{Ri}(r)$ は、設備 i 直下に作用する地震動強度の関数として与えられる設備耐力 R の確率密度関数を示す。 $f_{Si}(s)$ は、設備 i 直下に作用する地震動強度 S の確率密度関数を示す。 $F_{Si}(r)$ は、地震動強度 S の確率分布関数を示す。なお、 $1 - F_{Si}(r)$ は地震動強度の超過確率に相当する。

上記で示したレベル 0 ～ 2 は、部材に発生する最大応力が許容応力を超えているかどうかを判断基準にする考え方である。すなわち、想定地震力に対して設備に被害が生じないように補強・更新対策を行うことを前提とする。ただし、レベル 2 の方法論では、個々の設備に対する被害の生じやすさが確率値として評価されるが、補強・更新を行う判断基準（許容する被害確率）は予め明確にしておく必要がある。

(4) レベル 3

レベル 3 は、耐震対策以外の効果も総合的に評価して、補強・更新すべき設備の優先順位を決定することを主な目的としている。すなわち、設備の耐震性、システムの持つ冗長性および事後の復旧対応能力を考慮した地震後のシステム性能評価を基に、個々の設備の補強・更新がシステム性能に与える影響の感度を見ながら優先順位を設定することを意図している。

この場合、地震動強度の確率分布 $F_{si}(r)$ は、確率論的な地震動のような地震の発生頻度を考慮しないで、シナリオ地震による強度分布として定義される場合が扱いやすい。その理由は、確率論的な地震動では、複数の地震の影響が同時に広域のライフライン施設への地震動として現れるので、ライフラインのシステムとしての機能損傷が正確に求められないことによる。これを克服するためには、影響の大きい（ライフラインシステムのどこかにレベル2地震動を与えらると思われる）複数の地震シナリオを確率論的地震ハザードの再分解の方法などにより設定し、それらに対して個別にネットワークの機能損傷評価を行い、システムに影響の大きな地震シナリオを抽出する。

システムの性能は、リスクカーブによって評価する。図4.5.1は、リスクカーブの概念図を示す。本論では、対象とする電力システムの供給支障電力とその超過確率との関係を定義した曲線を、リスクカーブと呼ぶ。たとえば、想定地震力に対して発生した供給支障電力が、補強・更新により低減されると、リスクカーブは左下方にシフトする。このため、リスクカーブの相対的な比較から、補強・更新すべき設備の優先順位を決定することが可能となる。

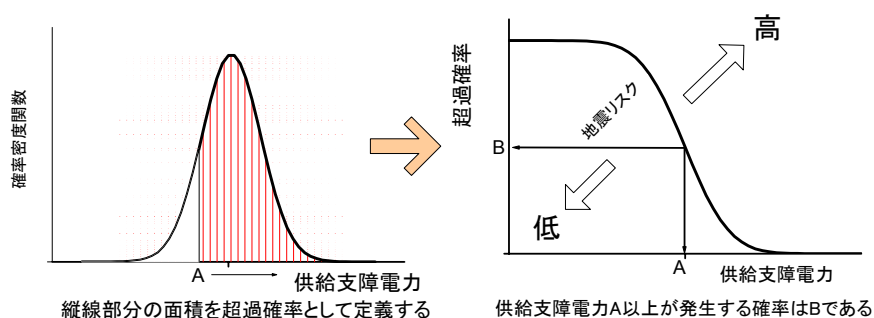


図4.5.1 リスクカーブの概念¹⁾

(5) レベル4

レベル4はライフサイクルマネジメントであり、レベル3の考え方をさらに進め、コスト評価に基づく費用対効果分析にポイントをおいた考え方である。想定地震力に対する地震対策コストと損失との間にはトレードオフの関係がある。地震対策コストを多くとれば、リスクレベルは低くなり、損失も小さく抑えることができる。逆に、地震対策コストを少なくすれば、リスクレベルは高いままとなり、損失が大きくなってしまう。このような地震対策コストと損失の関係を定量的に分析することで、適切な設備投資を実現する補強・更新戦略が策定できる。

図4.5.2は、コスト評価で一般に必要な費用項目を示す。地震対策コストは、事前対策費用・事後対策費用およびリスク転嫁費用からなる。被害コストは、供給者サイドと需要家サイドに二分される。供給者サイドに生じる被害コストは、復旧コスト・地震被害により生じる電力販売収入減（損失）および供給支障により需要家に支払わなければならない

い補償コストからなる。需要家サイドに生じる被害コストは、停電コストである。こうしたコスト評価を行い、費用負担が発生する対象者（電気事業者や電力市場）が誰になるのかを明確にして、それらに関わる総費用がもっとも少なくなるように補強・更新を検討することが、レベル4の基本的考え方となる。

なお、実務の現状では、電力流通設備の更新戦略を策定する場合、低頻度で発生する地震リスクは、更新優先順位決定に反映されていない。これを改善するために、レベル4の考え方では、地震リスクはもとより、経年劣化や塩害など通常の更新計画で考慮されるリスクに対処するため、トレードオフの関係にある費用構造を他の災害事象（マルチハザードと呼ぶ）に対しても検討する。すなわち、レベル4では、設備のライフサイクルにわたって問題となるマルチハザードを対象として、費用対効果分析が可能となることを目標としている。現状では、マルチハザードについての研究は途上であり、ハザードによる影響が互いに独立であると仮定しての扱いは可能な段階にあるが、複数ハザードによる影響に関係が認められるようなケース（たとえば、地震＋津波、地震＋火災）の扱いについては今後の課題である。

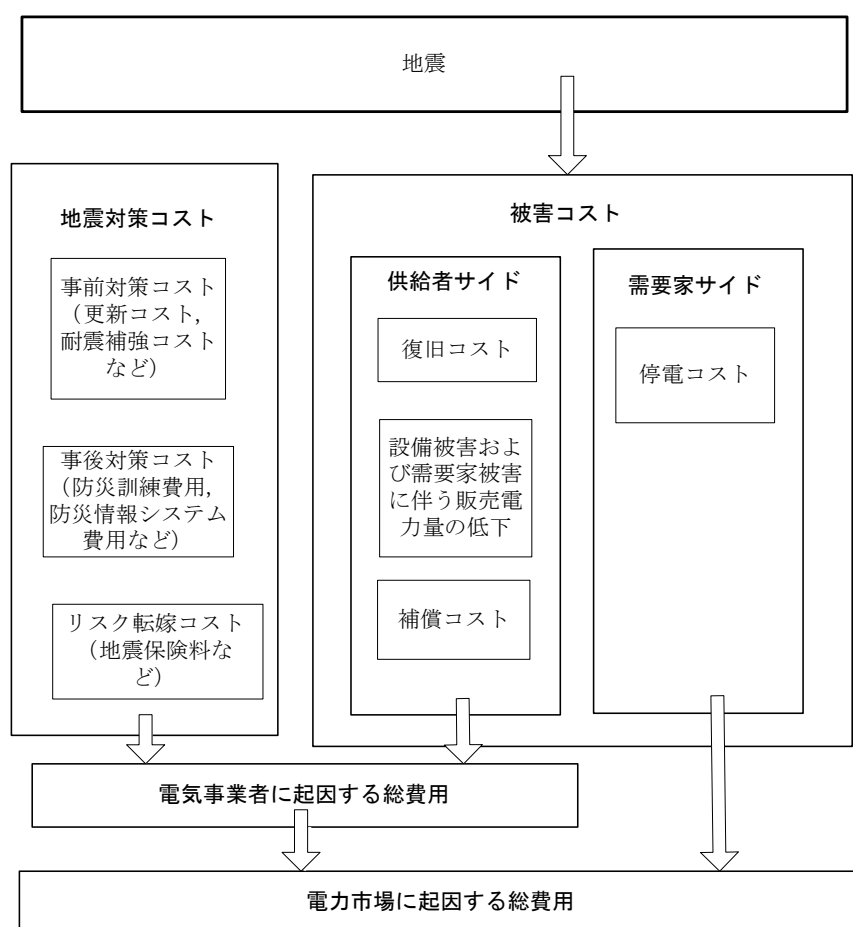


図 4.5.2 レベル4で考慮する地震に関わる費用項目¹⁾

マルチハザードに対してリスクマネジメントを計画する場合、それぞれのハザードに対してのリスク指標が共通であることが望ましい。たとえば、停電の場合であれば、年間の停電発生時間が分かりやすい指標になる（通常、供給信頼度と呼ばれる）。そのためには、ハザードに関しても、年発生確率の情報が必要である。塩害によるがれき汚損であれば、過去の統計からの台風の襲来確率がベースとなる。劣化であれば、常時の事故統計やメンテナンス記録から、対象機器の年間故障率がベースとなる。地震の場合についても、ここで発生頻度の導入が必要になる。研究途上の課題ではあるが、対象のライフラインシステムに脅威となるシナリオ地震の発生頻度分布や最新活動時期などの研究成果を反映していくことが期待される。

4.5.3 まとめ

- ・ ライフラインの耐震性能評価のための地震動指標としては、地震動の位相差や地盤ひずみが問題となることがあり、予測地震動に関してはそのような指標への変換ができることが必要である。
- ・ ライフラインは、その機能上の特性に応じて、レベル2地震動に対しての安全性照査もしくは機能性照査を適切に行う必要がある。
- ・ ライフラインの地震リスクマネジメントには5つの異なったレベルの手法を提案することができる。
- ・ 地震リスクマネジメントのレベルに応じて、地震動予測地図におけるシナリオ型地震動や確率論的な地震動を適切に用いる。
- ・ ライフライン構成要素個々の耐震対策のためにはシナリオ型地震動や確率論的な地震動を用いることができる。
- ・ ライフラインのシステム機能を問題とする場合では、構成要素全体の同時損傷が問題となるので、シナリオ型地震動が有用である。この場合、複数のシナリオを検討することが望ましく、地震シナリオの設定には発生確率、貢献度、再分解などの情報が活用できる。
- ・ マルチハザードに対するライフラインのマネジメントを計画する場合には、供給信頼度のような共通リスク指標が必要であり、確率論的な地震動の情報が有用になる。

参考文献

- 1) 朱牟田善治:リスクマネジメントによる電力施設の保生(第3回)－電力流通設備のリスクマネジメント－, 電力土木, 2003, No.306, pp.81-84.

4.6 地域防災計画への利用

4.6.1 地域防災計画と地震動予測

自治体が策定する地域防災計画は、災害による住民の被害軽減を目的として策定されるものであり、災害対策基本法により、策定が義務づけられている。地域防災計画は、都道府県や市町村の地域について、地域の実情に即して、地域の防災機関が防災のために処理すべき業務などを具体的に定める計画であり、各地方防災会議または市町村長が防災基本計画に基づき作成することになっている。すなわち、都道府県及び市町村では、防災会議が地域防災計画を策定し、それに基づいて、防災担当部局が減災のための施策を推進する。

一例として、愛知県の地域防災計画の一部である、地震災害対策計画の目次を表 4.6.1 に示す。災害対策基本法の条文に則って、予防、応急対策、復旧の三本柱についての記述がされており、加えて、地震防災対策強化地域に指定されている東海地震に対する事項が記されている。

この中で、地震動予測地図が直接的・間接的に関与しそうな項目に下線を記す。表から分かるように、地震動予測地図の利用は、災害予防が主になる。

災害予防計画を策定するに当たっては、まず、各自治体で予想される地震災害の様相や

表 4.6.1 地域防災計画における地震災害対策計画の主な項目（愛知県のものを参考）

第1編 総則	第1章 総則	第16章 環境汚染防止及び廃棄物処理
第1章 計画の目的・方針等	第2章 地震災害警戒本部等の設置及び要員の参集	第17章 危険性物質対策
第2章 各機関の実施責任と処理すべき事務又は業務の大綱	第3章 警戒宣言発令時等の情報伝達・収集及び広報	第18章 応急教育
第3章 本県の特質と災害要因	第4章 発災に備えた資機材、人員等の配備手配	第19章 ボランティアの受入
第4章 予想される地震災害	第5章 発災に備えた直前対策	第20章 帰宅困難者対策
第2編 災害予防	第6章 県が管理又は運営する施設に関する対策	第21章 緊急輸送道路の確保
第1章 震災に関する調査研究	第7章 他機関に対する応援要請	第22章 緊急輸送手段の確保
第2章 都市の防災化	第8章 県民のとるべき措置	第23章 道路交通規制
第3章 地盤災害の予防	第4編 災害応急対策	第24章 鉄道施設対策
第4章 公共施設の安全確保	第1章 活動態勢(組織の動員配備)	第25章 港湾・漁港及び空港施設対策
第5章 建築物の耐震推進	第2章 通信の運用	第26章 電力施設対策
第6章 危険性物質の防災	第3章 津波予報・地震情報等の伝達	第27章 都市ガス施設対策
第7章 産業廃棄物の処理対策	第4章 被害状況等の収集・伝達	第28章 LPガス施設対策
第8章 火災予防対策	第5章 広報	第29章 上水道対策
第9章 津波予防	第6章 自衛隊の災害派遣	第30章 工業用水道対策
第10章 災害時要援護者の安全対策	第7章 消防活動	第31章 下水道対策
第11章 自主防災組織・ボランティアとの連携	第8章 災害警備	第32章 応急仮設住宅の建設と住宅の応急修理
第12章 広域応援体制の整備	第9章 避難・救出	第33章 公共賃貸住宅への一時入居
第13章 避難対策	第10章 浸水対策	第34章 被災建築物・被災地地の応急危険度判定
第14章 防災施設等の整備	第11章 津波応急対策	第35章 金融対策
第15章 防災訓練及び防災意識の向上	第12章 医療救護	第36章 広域協力及び応援要請
第16章 地震防災上緊急に整備すべき施設等の整備	第13章 救援	第37章 防災活動拠点の確保
第17章 文化財の保護	第14章 死体の埋火葬	第38章 防災ヘリコプターの活用
第18章 災害救助基金の管理	第15章 防疫・保健衛生	第5編 災害復旧
第3編 東海地震に関する事前対策		第1章 民生安定のための緊急措置
		第2章 激甚災害の指定

災害規模を想定することが基本になる。すなわち、自治体として対策をすべき災害の素因と、災害時の被害量の想定である。このため、地震災害対策計画の最初の部分に、予想される地震災害に関する項目が記されている。通常は、地震の発生危険度と、災害の影響度に応じて、自治体毎に想定すべき具体的な地震を設定する。従来は、過去の被害地震や、周辺に存在する活断層の活動度などを参考に決めていたが、最近では、地震調査委員会が公表する長期評価などを参考にする場合もある。そして、想定地震に対してシナリオ型の地震動予測を行い、被害予測を行う。さらに、この被害数量を基礎として、災害予防計画を策定する。

災害予防としては、①準備すべき備蓄量、消防力、避難所、②被害軽減のための都市の防災化、③公共建築物の耐震化、④民間建築物・個人住宅の耐震化、⑤被害の広域性に伴う相互協力、などの計画が記されている。これらの計画作りには、地震動予測地図や地震被害想定結果が直接的・間接的に用いられる。①に関しては、被害想定で推定された被害数量が直接の根拠になっている。②については、被害集中地域への重点的な都市計画施策の根拠となる。③については、震度や被害の地域差に応じた建築物の耐震化の優先順位付けや、予測震度に応じた耐震改修目標などに利用できる。④では、ハザードマップを利用して、住民を啓発し、耐震診断・改修を促進することが考えられる。⑤については、県域を超える被害に対しての、広域圏での相互協力の基礎資料となる。

現時点では、庁内や住民への説明のしやすさから、シナリオ型の地震動予測が基本となっている。特に、南海トラフでの東海・東南海・南海地震や、宮城県沖地震、首都圏直下地震など、具体的な地震像が明確な大地震対策では、シナリオ型の地震動予測が一般的である。その他の想定地震についても、対策をすべき具体的な地震を示した方が、住民を啓発したり、発災時のシナリオを描きやすかったりするために、シナリオ型の地震動予測は、今後も被害想定を中心を成すと思われる。ただし、想定地震を定める際には、確率論的地震動予測地図への各地震の貢献度が参考になる。また、地域内の相対的な地震危険度の差を示したり、公共建物の耐震化の優先順位を付けたりする戦略的な検討の際に、確率論的地震動予測地図の地域による相対的な震度差が有用な情報になる。

ちなみに、図 4.6.1 は、愛知県が実施した東海地震・東南海地震連動時の予測震度分布である。断層震源モデルは中央防災会議によるモデルと同一であり、統計的グリーン関数法と 3 次元差分法とのハイブリッド法を用いて 500m メッシュで予測をしている。地下構造モデルは、最新の地下構造調査結果や浅層ボーリングデータを用いて作り直している。図 4.6.2 は、名古屋市による予測震度であり、愛知県の工学的基盤面での予測結果を用いて、50m メッシュの予測をしている。ここでは、市内の 30000 本弱のボーリングデータをデータベース化するとともに、切盛分布図を新たに作成して、50m メッシュで浅層地盤モデルを構築し、詳細な震度分布を求めている。さらに、図 4.6.3 は、国土交通省中部地方整備局・愛知県・名古屋市が共同で予測した名古屋市三の丸地区での東海・東南海地震連動時の予測波形である。ここでは、豊富な強震観測記録が有ったので、経験的グリーン関数法

により予測を行っている。地域が限定されるに従って、用いることができるデータの質や量が豊富になるために、より解像度や精度の良い予測が可能になる。これらは、地域におけるシナリオ型地震動予測地図のアドバンスマップ作りに相当する。

図 4.6.1 は、地震防災対策強化地域指定後の愛知県の防災対策策定のための基本情報を得ることを目的として策定された¹⁾。すなわち、前出の①～⑤を意図している。図 4.6.2 は、市民の耐震化・防災行動を誘導する啓発を意図しており、我が家の揺れを実感できるよう、区別にハザードマップを作成し各戸配布する²⁾。ここでは、④に関わる啓発を重視している。図 4.6.3 は、国・県・市の保有する庁舎の免震改修設計のための設計用入力地震動として策定したものであり、揺れの周期や継続時間の再現性に細心の注意を払って予測されている³⁾。即ち、具体的な防災拠点の耐震化を念頭に③を重視している。

さらに、図 4.6.4 は、東海・東南海地震に加え、周辺の活断層、予め震源が特定できな

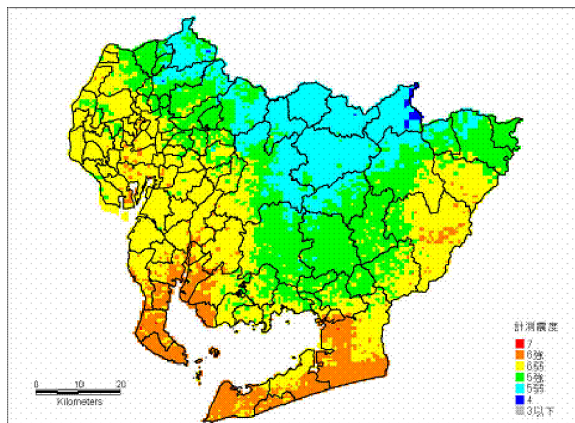


図 4.6.1 愛知県が推定した東海・東南海地震連動時の震度

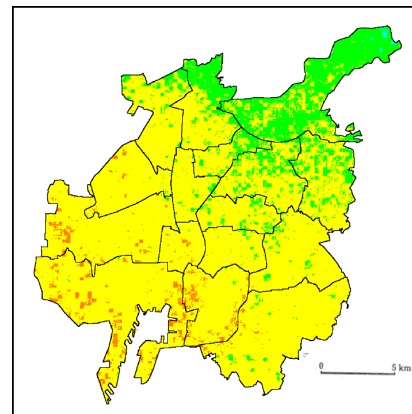


図 4.6.2 名古屋市による同左に対する震度

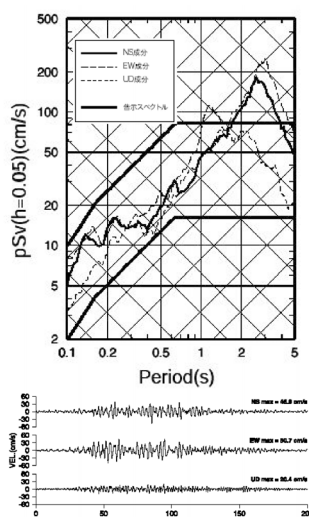


図 4.6.3 市による東海・東南海地震連動時の三の丸地区の設計用入力地震動

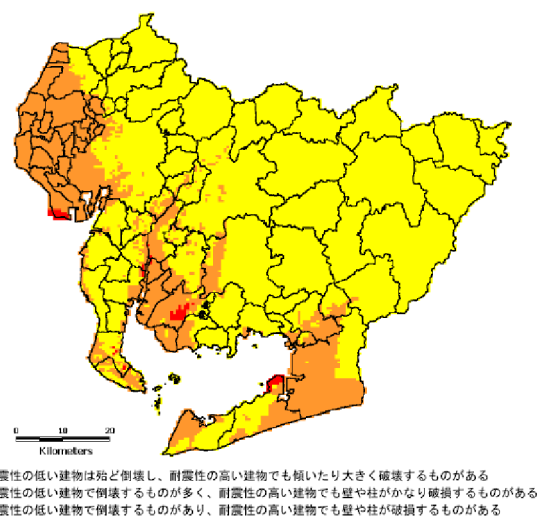


図 4.6.4 県の最大揺れやすさマップ

い直下の地震などを全て想定したときの愛知県下の揺れやすさマップであり、想定し得る最悪の揺れを示している¹⁾。このマップは、県民の意識啓発を主たる目標として作成したもので、活断層の存在や、地盤の良否の違いを実感しやすくしている。これは、再現期間無限大の時の確率論的地震動予測地図に相当する。

このように、地域防災計画への利用と言っても、地震動予測地図の利用目的には多面性がある。

平成16年度の防災白書には、新たな防災行政の視点が明確に記述されている⁴⁾。要約すると、「東海地震等の海溝型巨大地震や被害の波及の大きい大都市地震については、想定される被害が甚大かつ深刻であるのに関わらず、地震防災施設の整備状況は必ずしも十分ではない。想定される被害を事前に軽減する「減災対策」、特に、住宅・建築物の耐震化等を、緊急かつ重点的に実施する必要がある。防災対策を実効性あるものにするため、「成果重視の行政運営」の考え方を、防災の分野により明確かつ積極的に取り入れ、政策目標を明示し、社会全体で共有することが重要となる。当面緊急に取り組むべき課題と目標を特定し、各種施策をよりメリハリのある形で重点的に実施することが望ましい。」一方、昨年度の防災白書には、「生活から考えるまち作り」を通して、長続きする防災対策の大事さが指摘されている。

すなわち、減災のための耐震化の重要性と、成果重視による政策目標の明示の必要性、まち作りの視点での防災活動の大事さが指摘されていると言える。これらには、住民の意識啓発や、具体的な目標設定と達成度チェックのための定量的な情報が重要になる。地震動予測地図の役割は大きい。

4.6.2 地震動予測地図を受け取る地域の現状

地震動予測地図を地域防災に活用するために必要となる、地域の持つ特性を考えてみる^{5～6)}。

a. 人の視点

まず、人の問題を考えてみる。首都圏に比べ、地方では、防災活動を担う技術者の人的資源が限られている。一例として、建築技術者の都道府県別の技術者の人的構成の違いを図4.6.5に示す。図は、建設労務作業員、2級建築士、1級建築士、建築学会員、建築構造士の人口当たりの各技術者数を、全国平均値に対する比として示している。これらは、順に、専門分化した技術者となっており、それぞれの人数は300万人、66万人、31万人、3万4千人、2.5千人である。建設労務作業員は都道府県差が小さいのに比較して、専門的な業務になるに従って東京一極集中が著しくなっている。例えば、建築物の構造設計を専門とする建築構造技術士は、東京都には1000人以上居るのに対して、愛知県には150人、三重県には9人、和歌山県には1人しかいない。このことは、地方県の重要建築物の耐震診断・改修設計は、県外の技術者を中心に行われていることを意味する。

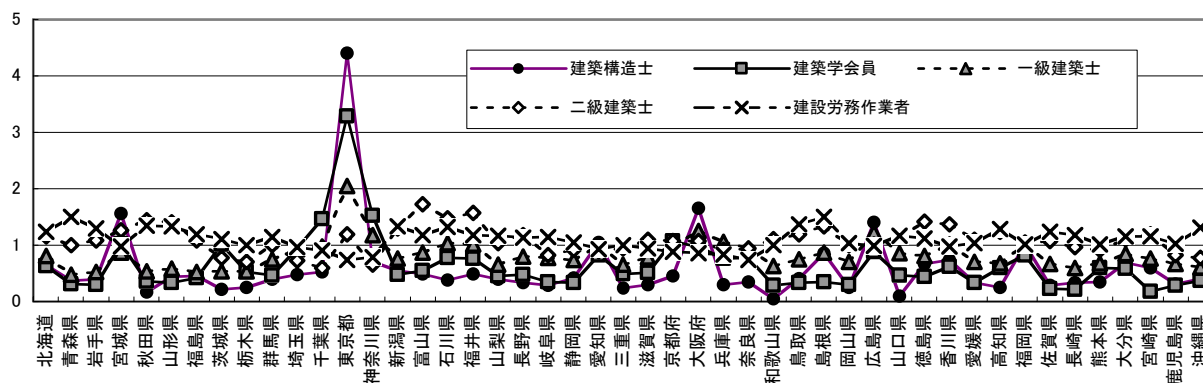


図 4.6.5 建築関係技術者・労働者人数の全国平均に対する各都道府県の比

専門技術者の多寡は、各地域の耐震化の動きにも影響を与えるようだ。図 4.6.6 に、2004 年 2 月に消防庁防災課がまとめた「防災拠点となる公共施設等の耐震化推進調査結果概要」⁷⁾に記された各都道府県の公共施設の耐震化率を示す。専門技術者が多く居る都道府県の耐震化率が高いことが分かる。専門技術者が、各地域で耐震化の重要性を訴えることが、耐震化を後押ししているとも考えられる。

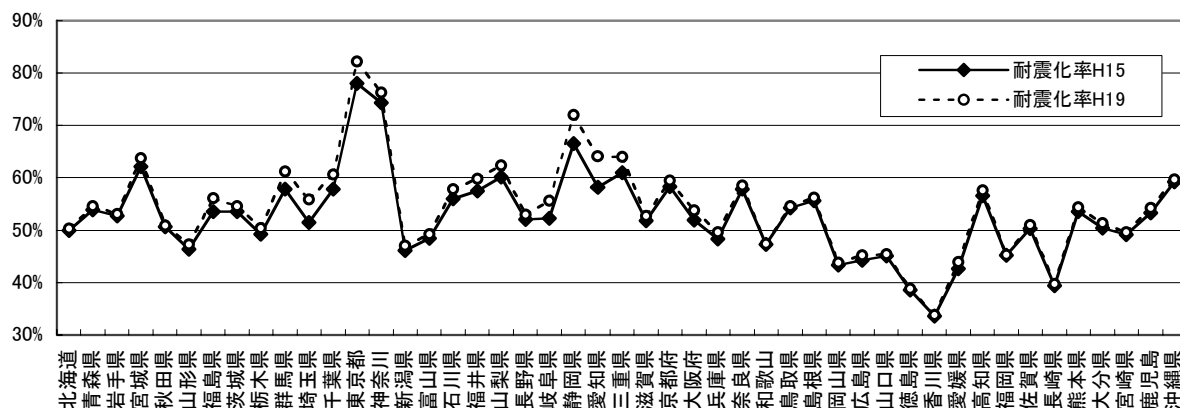


図 4.6.6 公共施設の耐震化率の都道府県比較（消防庁防災課）

地方では実務的仕事が多いため、地震動予測地図とは無縁の技術者が殆どである。地震動予測地図を地域として受け入れ、活用するには、地図の意味を理解する専門家が多く育たなければいけない。地方では、民間に専門技術者が少ないため、行政組織の技術者と大学研究者の果たす役割が大きい。研究者・技術者・防災行政担当者などの専門家が集う場を作って地域の人的資源の質・量を改善する必要がある。

市町村レベルでは行政マンのやる気次第で耐震化や防災意識啓発は全く異なったものになる。図 4.6.7 は、愛知県下の全市町村の既存不適格木造住宅の耐震診断・耐震改修実施率を示している。図のように、市町村による差は大きい。行政マンが頑張れば、自主防

災会や消防団も地区毎で活発に動く。新興住宅地などでは、防災リーダーや防災ボランティアの影響力が大きい。また、全国に100万人（愛知県下には4.5万人）いる小・中・高等学校の教員が防災教育に目覚めれば、その影響力は絶大である。企業では企業防災を担う総務系の防災担当者と労働組合の力が大きい。そして、各家庭にくまなく入り込んでいる生協や農協の影響力は特に農村部では絶大である。テレビ・新聞などのマスメディアの報道姿勢は、地方の雰囲気作りを左右する。各地域で、これら、媒介してくれる人たちに、地震への関心を高めてもらい、地震に関わる正しい情報を市民に提供してもらえ環境を作っていくことが、住民一人一人を動かす力の源泉となる。専門家と住民とを繋いでくれる人たちに、地震に関わる正確な情報を修得してもらい、広く市民に伝えてもらう必要がある。

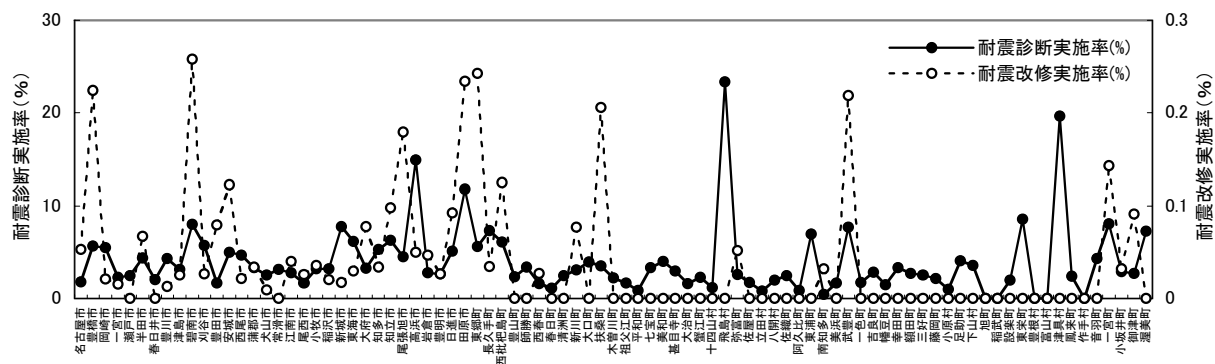


図 4.6.7 愛知県下の木造戸建住宅の耐震診断実施率と耐震改修実施率（H15.11 時点）

b. データの視点

地震動予測結果の精度は、用いるデータの良否にかかっていると言っても過言ではない。どんな高精度な予測手法も、データの質・量が不十分であれば無力である。強震動予測手法の進展に伴って、必要とされるデータの質・量が格段に増大し、結果に対するデータのセンシティブリティも大きくなった。しかし、データの質・量が十分にある地域は限られている。近年、国が主導して活断層調査や地下構造調査が精力的に行われており、震源や深い地下構造のデータは着実に改善されてきている。しかし、未だ十分ではない。特に、地域で対応すべき浅層ボーリングデータや温泉井戸などの既存資料の収集・整理、常時微動データの蓄積、強震観測の整備などは、不十分な状況であり、地域で継続してデータを収集・蓄積することが望まれる。また、これらのデータをコンパイルして地盤モデルを作成し、強震動予測を行って既存の地震動記録と照合し、さらに地盤モデルを改良していくといった一連のループが繰り返す必要がある。本当に信頼できる結果を示すには地盤データと強震観測データが命であり、この整備に尽きる。

基礎データの整備は、強震動予測の基本であり、地域で主体的に実施していくべきことであり、自治体と地元研究者が一致協力して行うと共に、各地域で、地道なデータ作りを

担う研究者を増やしたり、最新の知見を常に修得しながら強震動予測を行える研究者を育成する必要がある。

c. 知識・技術の視点

地域では研究者比率が低く、モノ作りに直接繋がる実務的技術者が多い。大学は有っても、規模が小さいので、教育上欠かせない研究分野の研究者比率が高く、応用・総合的色彩の強い地震防災や基礎的な地震学・地震工学に関わる研究者の数が少ない。防災に関しては、技術を支える数も、研究を推進する数も共に不足気味である。例えば、建築物の構造技術者に関して言えば、一般建築物の設計に携わる技術者が殆どであり、規基準に準拠した構造計算が業務の大半を占める。このため、規基準を疑問も持たずに利用している場合が多い。地震・地盤のことや、建物の動的挙動を意識しながら設計活動をしている技術者は、高層建築や免震建築の設計に携わる少数の専門技術者に限られ、首都圏に偏在している。従って、地震動予測地図の地方での高度な利用は限定されがちになる。まずは、技術者に建築物の耐震設計の基本が地震時動的挙動の把握にあることを分かってもらい、地震動評価の重要性を訴え、技術者の入力地震動軽視といった現況を抜本的に変えることが必要である。

なお、専門技術者が限られた人数しか居ない地域の現況を考えると、先ずは、地域の技術を支える専門家が協働する体制を作り、その上で、地域研究を促進し、各地域の知力・技術力の向上に結び付けて行くべきである。また、地域に根付いた研究を評価する雰囲気も形作っていく必要があるだろう。

さらに、広く地域防災に活かすために、各地域での研究者の文理連携を促進し、地震学・地震工学・都市計画学・社会学・心理学などの様々な分野の研究者が協働して地域の安全に責任を持つ体制を作ることが必要である。これによって、地震動予測地図を地域防災に活かす道筋を作ることができる。

4.6.3 地震動予測地図を地域防災に活用していくには

地震動予測地図の地域でのユーザーは誰だろうか。単に「研究者への基礎データや地震動の提供」なのか、地方自治体の「地域防災計画策定のための地震被害想定」や「一般市民への防災意識啓発」への活用なのか、あるいは技術者の利用を念頭に置いた「建築物などの耐震設計や耐震診断における設計用入力地震動や地震荷重策定」まで念頭におくのか、利用形態によってアウトプットの仕方、質や精度も異なる。ここでは、主題が地域防災計画への活用なので、「地域防災計画策定のための地震被害想定」と「一般市民への防災意識啓発」を中心に、活用法を考えてみる。

a. 地方自治体の防災部局での地震被害予測への活用

地震被害予測に地震動予測地図を用いる場合、3つの利用の仕方があると思われる。第1は、地震動予測地図をそのまま地震被害想定に利用する場合で、地表の揺れをそのまま用いる場合である。第2は、工学的基盤面での揺れを用いて表層地盤の解析以降を自治体が詳細に行う場合、第3は、地震動予測地図作成に用いられた基礎データを活用して自治体で震源にまで遡って全体を再計算する場合である。第1の場合には、現状は1kmメッシュが前提となり、第2・第3の場合には地域のデータを加味することにより、より高解像度のアウトプットが可能になる。ただし、第2の場合には、表層地盤の応答解析を実施するので、時刻歴波形を必要とする。シナリオ型地震動予測地図では、波形計算をしているので問題は無いが、確率論的地震動予測地図の場合には表層地盤の応答増幅を算定する方法を別途作らなければならない。力のある自治体は第3の道を選ぶ可能性が高い。この場合には、基礎データの公開度を高めることが重要になる。

地震動予測地図に対する自治体の捉え方についても、考えておく必要がある。現状は、地震動予測の精度向上が自治体の防災行政上有用であることを、十分に説明しえていない。地震動予測に続く、被害数量の予測、さらには、社会・経済・心理的影響評価、シナリオ構築、それに基づく防災施策立案は、科学的な側面のみから行えるものではない。多くの場合、防災行政担当者は、地震動予測に対して距離感を感じており、特に、確率アレルギーは強い。単に、地図を提示するのではなく、利用の仕方も含めて提示し、意義を理解してもらう努力が必要である。

b. 地方自治体の建設部局での耐震化促進への活用

地震動予測地図は、耐震設計や耐震改修の設計目標を考える上で極めて有用な資料を与えてくれる。まず、営繕行政の面では、地震危険度に応じた、耐震性能目標の設定や、耐震改修の優先順位付けなどに利用できる。また、建築指導行政では地震動予測地図に基づくサイト特性の考慮などが考えられる。2000年6月に改訂された新しい建築耐震基準では、従来の仕様規定型の基準に加え、性能規定型の基準が導入された。今後は、性能設計的な考え方が社会的に根付いていくと思われ、建築主との合意の下、建物の耐震性能を保証していく必要がある。その際に地震動予測地図は有用な説明資料となる。

これらへの利用を促進するには、行政や建築設計者が安心して利用できる地震動予測地図である必要がある。即ち、予測地図における地震危険度の違いを担当者が納得して説明できる説明性のある地図であるべきである。例えば、各地域の地震活動度と地盤特性との関係や、地域ごとの地震環境や地域で想定すべき地震像、各地震の性格に関わる資料が提示されることが望まれる。地域ごとの表層地盤増幅度マップや、各地震の貢献度マップなどが準備され、これと地形・地質図、各断層の活動度などの情報と共にアウトプットされると良い。

c. 住民の啓発育成のための利用

民間建物の耐震化促進や防災まち作りのための住民の意識啓発は地域防災力向上の基本である。残念ながら、究極の目的である住宅の耐震化は遅々として進んでいない。図 4.6.6～4.6.7 に示したように、地域によって進捗度の差も大きい。これは、住民や行政職員の啓発レベルの差によるところが大きい。

地震動予測地図は、住民の啓発・育成にどんな形で利用できるだろうか。地図の提供方法は、各戸配布、ホームページ公開のように直接的に市民に示す方法と、マスコミを介して解説付で示す方法、行政体が防災施策と一緒に提示する方法、教育機関が防災教育の一環として示す方法など、色々想定される。

住民の立場からは、自分の家の揺れ（震度）や被害を知りたいと思うだろう。しかし、震度は表層の微地形によって相当変動するので、表層地盤の取り扱いが比較的ラフな概観地図は十分な精度を持っていない。データも予測手法も進化の途上であり、地図も随時成長する必要がある。従って、十分な解説付でホームページ公開する方法が良いと思われる。一方的・画一的な公表は、間違った理解を助長する懸念があるので、結果だけが一人歩きしないように、地図の見方の解説を添付して公表することが必要である。

そこで、重要になるのは、市民との接点になるマスメディアや教育者・行政職員・防災リーダーなどの力量である。地図が内在する限界や、地図が意味するところを十分に理解してもらって、報道や、防災施策、防災教育、住民啓発に繋げていってもらう必要がある。このためには、市民との間を介在してくれる方々が地震に関して興味を持ってくれるよう、地図策定側が工夫をし、地震や地震動の勉強をする機会を作ったり、分かりやすい資料・教材を作ったりすることが必要になる。

地震動予測地図の最終目標は、住民の意識啓発をし、住民が適切に耐震対策することを促すことにある。従って、一軒一軒の揺れや建物・人的被害の可能性を住民に意識させる地図を、行政の耐震化誘導施策や耐震化方法と合わせて提示することが望まれる。その先駆的な試みを横浜市⁸⁾や名古屋市²⁾が実施している。詳細な予測マップと、耐震改修補助などの行政施策を一枚の地図に示している。

4.6.4 自治体での利用を念頭に置いた地震動予測地図の公開のあり方

今後は、地震動予測地図を単に示すだけではなく、ハザードマップを住民に適切に受けいれてもらい、住民の防災行動を誘導し、地域の防災力を向上する仕組みを作っていく必要がある。このためには、利用できるデータに応じて、身近な地域とそこに住む自分を意識しながら、ハザードを実感できる高解像度のハザードマップを作ることが必要となる。さらに、地域の防災力を点検できる防災マイマップを作って地域でのワークショップを支援したり、ハザードマップを利用したネットワークDIG（DIG：Disaster Imagination Game、災害図上訓練）を実現したりして、地域の防災活動を誘導すると共に、具体的な防

災対策の方法に関する情報を提供し、耐震診断や改修を促す教育・啓発シミュレータを開発することも必要になる。また、社会学・心理学的な研究手法を導入して、住民のハザード情報受容に関する検討を行い、住民の地域特性や意識啓発レベルに応じた段階的な情報提供モデルを構築したりすることも必要になる。

ハザードマップは単にメッシュを細かくしても防災には活きない。等身大の情報になればなるほど「精度」に関する説明責任や、プライバシー問題が生じやすい。行政は、住民のネガティブな反応を恐れて詳細なハザード情報を公表しにくい側面も持っている。このため、情報伝達と受容のモデルを考えることが重要になる。理学・工学のみならず地理学・社会学・心理学との有機的な連携研究が不可欠である。情報利用・情報伝達、合意形成等に関する社会的・心理学的研究成果に基づいて、住民の地域特性・意識特性を踏まえながら、最適な情報提供法を模索し、行政・住民が安心して利用できるハザード情報提供モデルを構築する必要がある。

参考のために、図 4.6.8 に、地震動予測地図を料理に例えた場合に、周辺で実施すべき事柄をまとめると共に、図 4.6.9 に、高解像度の地震動予測地図を利用したシステムの開発例について示しておく。

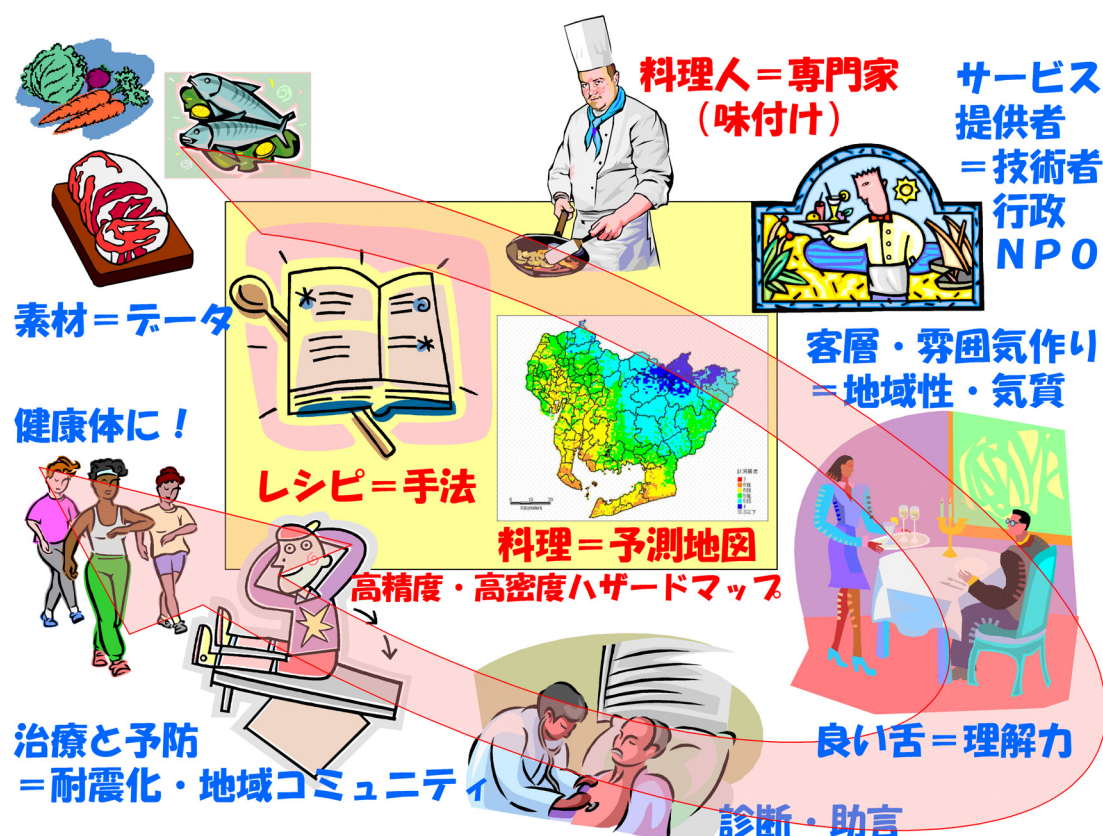


図 4.6.8 地震動予測地図の活用に必要な周辺環境の整備



図 4.6.9 地震動予測地図を地域防災力向上に活用するシステムイメージ

4.6.5 まとめ

地震動予測地図を地域防災計画や地域での防災活動に活用するために以下のようなことが望まれる。

- ・ 地震防災計画の根拠とする数字の裏付けとするためには、絶対値としての信頼性が必要になる。現状は、住民や行政への説明性の観点から、特定の想定地震に対してのシナリオ型の地震動予測結果が好まれると考えられる。
- ・ 公共建築物の耐震改修の優先順位付けを行う場合のように、地震防災対策の戦略を練る場合には、揺れの強さや発生頻度に関する相対的な地域差が重要となる。この場合には、確率論的地震動予測地図が有効に利用できると考えられる。
- ・ 地震動予測地図が行政に広く利用されるためには、予測結果の説明性が十分にあることが重要であり、これによって行政が安心して住民に地図を提供することができるようになる。
- ・ 地震動予測地図の結果を住民の防災行動につなげるには、住民が地図をリアリティを持って、納得して受入れることが条件となる。このためには、住民が身近に感じられる解像度が必要であり、土地の改変などと揺れとの関連を実感できる必要がある。

- ・ 地震動予測地図を、ワークショップを通した住民の啓発や、防災教育の道具として利用する方策を考える必要がある。その際には、防災の視点に留まることなく、地域を知るという視点や、環境・福祉・まち作りの視点を大事にする必要がある。
- ・ 地震動予測地図を、親和性を持ったウェブ GIS と組み合わせ、様々な都市情報と共に、双方向で情報交換できるネットワーク DIG や E ラーニングシステムへと進化させる必要がある。
- ・ 地域の防災力を点検したり、防災力の向上度合いをモニタリングできるようにし、防災対策効果を常時把握できるシステムであることが望まれる。例えば、耐震診断・改修状況や、啓発度のモニタリングができると良い。
- ・ 幅広くユーザーの要望を聞き取り、ユーザーの望む形で結果を示すことが望まれる。その際に、専門家、住民、両者をつなぐ媒介者の3つの視点を忘れないようにすると共に、効果的に結果を出す方法について、社会学・心理学的な検討を行う必要がある。
- ・ 力のあるユーザーにとっては、地震動予測地図の結果よりも、地図作成に用いた基礎データの方が有用な場合が多い。各地域でのアドバンスマップ作りを促すためにも、基礎データの公開が不可欠である。
- ・ 地図の精度向上のためには、特に表層地盤データの充実が最重要課題であり、各地域での地盤データ整備の推進が必要である。
- ・ 目的の異なる多種類のハザードマップが様々な機関から示されることによる自治体や住民の混乱を避けるために、個々のハザードマップの特性を第三者評価する場が必要である。

参考文献及び参考 URL

- 1) 愛知県防災局:東海地震・東南海地震等被害予測調査報告書、2004
- 2) 名古屋市消防局防災部:地震マップ、2004.
- 3) 中田猛、福和伸夫、藤川智他:名古屋市三の丸地区における耐震改修用の地震動作成(その1)～(その3)、日本建築学会学術講演梗概集 B-2、構造 II、2004
- 4) 内閣府編:防災白書平成16年版、国立印刷局、2004
- 5) 福和伸夫:地震動予測地図の地域防災への活用、地震動予測地図ワーク ショップ-地震調査研究と地震防災工学・社会科学との連携, pp.73-84, 2002.3
- 6) 福和伸夫, 飛田潤, 鈴木康弘:中京圏における地震防災力向上のための大学研究者による実践研究, No.6, 10p, 2004.11
- 7) http://www.fdma.go.jp/html/new/pdf/1602_bosai_a.pdf
- 8) http://www.city.yokohama.jp/me/bousai/jisin_map.html

4.7 地震リスクマネジメントへの利用

本節では、確率論的地震ハザード評価のリスクマネジメントへの利用例として、建物の地震リスク (PML) 評価への適用と、地震リスクファイナンス分野への適用の問題について述べる。元来、工学分野で開発されてきた確率論的地震ハザード・リスク評価技術が領域拡大し、不動産や金融の分野でも活用されるようになった事例である。

4.7.1 建物の地震 PML 評価への適用

(1) 背景

バブル経済の崩壊に伴い、不動産投資に対する考え方は大きく変わりつつある。従来の右肩上がりの経済下では値上がり益（キャピタルゲイン）が重視されたのに対して、現在ではそこから生み出されるキャッシュフローにより不動産の価値が評価されるようになっている。併せて、関連法制度の整備もあいまって、不動産証券化や不動産投資信託（J-REIT）などの新しい不動産投資の仕組みが登場している。

キャッシュフローにより不動産価値を評価するためには、単なる収益の評価のみでなく、不動産に係わる種々のリスクも適正に評価しておく必要がある。とりわけわが国では地震に対するリスクを無視し得ないため、建物の地震リスクの定量評価へのニーズが顕在化している。

投資不動産に対する詳細な物件調査（デューデリジェンス）の中で、建物に関する物的な調査を報告書にまとめたものはエンジニアリングレポートと呼ばれている¹⁾。エンジニアリングレポートに記載される標準的な項目を表 4.7.1 に示すが、その一つに地震リスク診断があり、そこで標準的に用いられている指標が地震 PML である。

表 4.7.1 エンジニアリング
レポートの構成

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ 物件概要 ・ 建築物診断 ・ 遵法性 ・ 修繕更新費用 ・ 再調達価格 ・ 環境リスク診断 ・ 地震リスク診断 |
|---|

(注) 文献 1) より項目のみを抜粋

(2) PML の定義と評価方法

建物の地震リスクの表現方法にはさまざまなものがあるが²⁾、基本的には対象期間内の損失と超過確率の関係を示したリスクカーブで表わすのが合理的である。しかしながら、簡便さや利便性の観点からは一つの数値でリスクが表現される方が望ましく、こうした立場から定義されたリスク指標の一つが PML (Probable Maximum Loss : 予想最大損失) である。

不動産評価（エンジニアリングレポート）で標準的に用いられている PML を文献 1) では次のように定義している。「対象施設あるいは施設群に対し最大の損失をもたらす再現期間 475 年相当の地震が発生し、その場合の 90%非超過確率に相当する物的損失額の再調達価格に対する割合」

建物の地震リスク評価のフローを図 4.7.1 に示す^{3) 4)}。手順としては、建物の立場所での地震環境の評価（確率論的地震ハザード評価）、当該建物の耐震脆弱性評価（フラジリティ評価）、被害の損失コストへの換算（ロス評価）に分けられ、必要に応じて地震火災による損失評価が加わる⁵⁾。それぞれ確率統計的に評価された結果が統合されリスクカーブを得ることができる。

上記の定義の PML を求める場合には、確率論的地震ハザード評価で 50 年超過確率 10%（再現期間 475 年相当）の地震動強さを求め、それに対する損失の 90%非超過値が PML として算出される。この手順においては、50 年超過確率 10%に対応する確率論的地震動予測地図が活用できる。

一方、不動産評価では複数の建物を対象とした地震リスクの評価も重要であり、こうした評価は集積リスク評価あるいはポートフォリオリスク評価と呼ばれている⁴⁾。ポートフォリオリスクを対象とする場合、リスクを損失比（建物の再調達価格に対する損失の割合）で見ると、全建物の損失を合算したリスクは個々の建物単独のリスクより小さくなる場合があり得る。その理由の一つは地域分散効果であり、立地場所が離れることによって同じ地震により複数の建物が同時に被害を受ける可能性が小さくなる。また、比較的近接した建物であっても、建物ごとの諸特性の独立性により、大数の法則によるリスク低減効果が考えられる。

ポートフォリオ地震リスクの評価では、個々の地震ごとに当該建物に生じる可能性がある損失を合算していくため、確率論的地震ハザードマップ（確率論的地震動予測地図）や個別地点でのハザードカーブではなく、その基の震源データの確率モデルが必要となる。

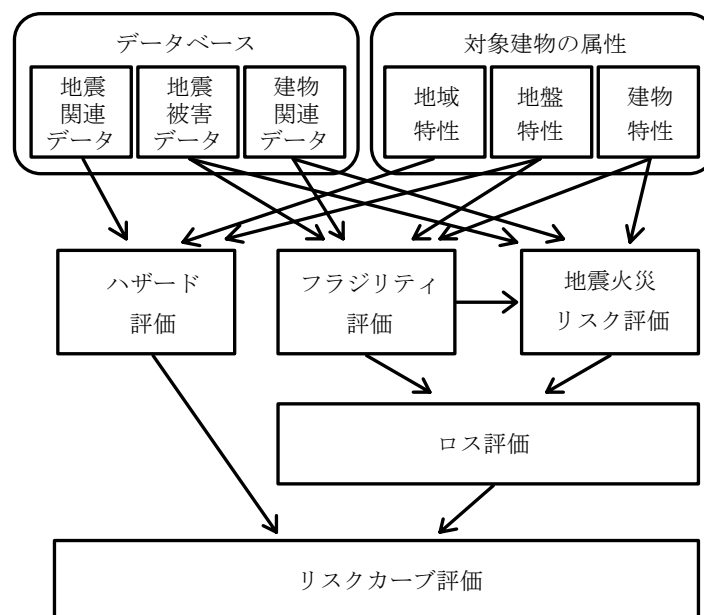


図 4.7.1 建物の地震リスク評価のフロー³⁾

確率論的地震ハザード評価の再分解（シナリオ型地震動評価との融合の一つ）の方法として「確率論的想定地震」の概念⁶⁾があるが、ハザード（地震動強さ）に適合した従来の概念を発展させ、リスク（損失）に適合した確率論的想定地震の選定法についても提案されている⁷⁾。この場合、損失を合算することによって、地域的な集積度を考慮した想定地震を選定できることが新たな特徴である。

（３）PML の評価例

エンジニアリングレポートをチェックする場合の耐震性の目安として、建物の再調達価格に対する比で表した場合の PML が 15%を超えると耐震性に疑問が生じ、20%以上になると例えば証券化などの場合には地震保険の付保が要求されるケースが多いとされている⁸⁾。

では、具体的に PML がどの程度の数値になっているかを見てみる。表 4.7.2 は現在上場されている不動産投資信託（J-REIT）の各物件の PML を整理したものである。表には個別の物件の PML 値の範囲とポートフォリオ全体での PML 値を示している。各物件は立地場所（地域）、地盤、用途、建築年代、構造などがさまざまであるため、PML 値はそれなりに幅を有する。PML 値が相対的に高い物件の中には地震保険が付保されているものもある。また、ポートフォリオ全体での PML 値はいずれも 10%以下となっている。

表 4.7.2 J-REIT の建物の PML

投資法人	個別 PML	ポートフォリオ PML
日本ビルファンド投資法人	1.5～17%	4.1%
ジャパンリアルエステイト投資法人	非開示	5.3%
日本リテールファンド投資法人	0.8～15%	2.7%
オリックス不動産投資法人	4～21%	8.3%
日本プライムリアルティ投資法人	0.8～29%	4.4%
プレミアム投資法人	2～13%	6.8%
東急リアルエステート投資法人	5～14%	5.7%
グローバル・ワン投資法人	3～7%	3.2%
野村不動産オフィスファンド投資法人	5～19%	7.6%
ユナイテッド・アーバン投資法人	1～18%	9.0%
森トラスト総合リート投資法人	5～14%	5.7%
日本レジデンシャル投資法人	1.4～20%	5.9%
東京グロースリート投資法人	7～23%	9.1%

（注）2004 年 6 月時点で各投資法人のホームページ上で公表されている情報に基づく。
 売買により物件は随時入れ替わるため、上記の数値は必ずしも最新のデータではない可能性がある。PML 値はいずれも建物の再調達価格に対する比率で示されている。

4.7.2 リスクファイナンスへの適用

リスクマネジメントにおけるリスクの処理方策としてはリスクコントロールとリスクファイナンスに大別される。構造物などのハード面での地震リスクマネジメントとしては、耐震補強等によるリスクコントロール（リスク軽減）が基本であることは論を待たないが、その一方で地震災害は低頻度であるがゆえにファイナンスの面からのリスクマネジメントも一つの有力な方策である。

リスクファイナンスの代表格は保険である。ただし、地震は低頻度巨大災害であるため大数の法則にのりにくく、保険商品として馴染みにくい性格を有する。わが国の地震保険は制度上、住宅を対象としたもの（家計地震保険）と事務所や工場などを対象としたものに分けられる（共済は除く）。後者の企業向けの地震保険は、日本の保険会社は従来非常に厳しい引受規制を行ってきたが、損害保険の自由化に伴って激しい競争が繰り上げられる趨勢にある⁹⁾。しかしながら、上述した地震災害の特徴に加えて、巨大リスクに対する保険市場の引受能力に限りがあることが制約となっている。

一方、家計地震保険は 1966 年に制定された「地震保険に関する法律」の下で、政府が再保険を受ける形で運用されている制度である¹⁰⁾。地震保険への加入は火災保険とセットであり、保険金額も火災保険の保険金額の 30～50%の範囲内で設定するよう定められている。2001 年 10 月の改定により、建築年割引と耐震等級割引制度が導入されている。ちなみに、全国の世帯加入率は兵庫県南部地震前は 10%前後であったのに対して、平成 15 年末では 17%程度となっている¹¹⁾。

現行の家計地震保険の地域別の保険料は、都道府県単位で 4 つに区分されている¹⁰⁾。地震保険料率の算定は確率論的地震ハザード評価や地震リスク評価と密接に関わっているが、地域ごとの世帯数や家屋の耐震性にも強く影響されるため、料率の地域分布は確率論的地震ハザードマップと単純に整合するものではないことに注意が必要である。現在の家計地震保険の料率は過去約 500 年間に発生した約 400 の地震の再来を前提とした場合の支払い保険金の推定値に基づいて算出されている¹⁰⁾。なお、地震調査研究推進本部の地震動予測地図の動きを受けて、家計地震保険の料率算定にその成果を反映させていく動きも出はじめている¹²⁾。

この 10 年、巨大災害の頻発に伴う伝統的保険市場の引受能力の縮小と金融技術の発達があいまって、金融市場へリスクを移転する手段が台頭してきている。こうした手段はリスクの証券化、保険デリバティブ、あるいはより広い概念で代替的リスク移転（ART：Alternative Risk Transfer）などと呼ばれている^{9) 13) 14)}。保険市場より規模が大きな金融市場へリスクが移転できれば、安定的なコストでリスクヘッジが可能となり、保険会社の引受能力の拡大につながることを期待できる。ちなみに、自然災害および天候リスクを対象とした災害リスク証券の 2001 年現在の発行残高は総額で 25 億ドルを上回る水準となっている⁹⁾。

日本の地震を対象とした地震債券（カタストロフィボンド、Cat Bond などと呼ばれる）も 1997 年に東京海上火災が発行して以降、元受保険会社あるいは再保険会社がいくつか手がけている。また、2003 年には JA 共済連が地震と台風を組み合わせた証券により約 550 億円の再保険カバーを確保している¹⁵⁾。また、こうした手段を事業会社が活用した事例としては 1999 年に発行されたオリエントランドの地震債券が著名である。施設自体の被害に加えて、営業中断や需要低下に伴う営業損失もカバーし得る点で従来の保険商品にはない利点を有している。この地震債券はディズニーランドの所在地である舞浜を中心とする半径 10km、50km、75km の円とリング内で地震が発生した場合に、マグニチュードの大きさに応じた割合で元本の減額あるいは社債購入が行われる¹⁴⁾。トリガーとしては気象庁マグニチュードが用いられており、地震債券の商品設計では上記の各領域におけるマグニチュード別の地震発生確率の評価がベースとなっている。

4.7.3 確率論的地震動予測地図への期待

確率論手法を用いた地震リスク評価に対するニーズは今後とも増大していくことが予想される。確率論的地震リスク評価は、地震活動のモデル化、地震動予測、建物・構造物の応答・損傷評価、損失評価（直接被害、間接被害）という一連の手順を総合的に行う必要がある。各評価プロセスには種々の不確定性が含まれると同時に、評価結果には多くの判断が内包されている。したがって、例えば建物の PML の評価においても、同じ建物であっても評価者（評価機関）によって結果が異なるというのはしばしば見られる事実である。また、評価機関によって震源データの確率モデルが異なるため、保険料率の算定や地震債券の商品設計に際してのリスク評価においても差異が出てくる可能性がある。こうしたリスク評価に対する信頼性の問題が地震債券等のリスクプレミアムの割高感につながっているとの指摘もある⁹⁾。

地震リスク評価は将来予測の問題であるので、評価者によりその判断が分かれるというのは必ずしも否定されるべき話ではない。しかしながら、例えば地震活動のモデル化などは高度に専門的な知見が要請される問題であり、多くの専門家が認めているにもかかわらず、異なった判断を下す場合にはしかるべき説明がなされる必要があると思われる。

地震リスク評価の一連のプロセスのうち、地震ハザードの問題（地震活動のモデル化、地震動予測）は基本的に自然現象であり、主要な評価モデルの構築には理学分野の研究成果や専門的知見に依拠するところが大きい。評価の信頼性を担保する意味で、地震動予測地図が確率論的地震ハザード評価の共通情報基盤として、国のしかるべき機関で体系的にまとめられ、公表される意義は非常に大きいと考えられる。また、確率論的地震リスク評価では単なる地図情報（ハザードマップ）に加えて、ハザードカーブ情報あるいはより遡った震源情報の数値データが必要とされる場合が多い。したがって、これらの情報についても地図とセットで開示されることが望まれる。

参考文献

- 1) (社)建築・設備維持保全推進協会・(社)日本ビルデング協会連合会:不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン, 2001.
- 2) 損害保険料率算出機構:地震 PML の現状と将来, RISK, No.66, pp.6-12, 2002.
- 3) 石川 裕・武田正紀・奥村俊彦・林 康裕・掛川秀史:建物の地震リスクの評価方法, 日本建築学会技術報告集, 第 11 号, pp275-278, 2000.
- 4) 石川 裕・奥村俊彦:複数建物の集積地震リスク評価, JCROSSAR2000 論文集, 34-B, pp.205-208, 2000.
- 5) 掛川秀史・石川 裕:事業所の地震火災リスク評価手法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 3104, pp.241-242, 2001.
- 6) 亀田弘行・石川 裕・奥村俊彦・中島正人:確率論的想定地震の概念と応用, 土木学会論文集, 第 577 号/ I-41, pp.75-87, 1997.
- 7) 石川 裕・奥村俊彦:地域の集積リスクを考慮した想定地震の選定方法, 地域安全学会論文集, No.3, pp.199-206, 2001.
- 8) 田辺信之著・日経不動産マーケット情報編:基礎から学ぶ不動産投資ビジネス, 日経 BP 社, 2004.
- 9) 斉藤正彦:ART の現状と課題, 損害保険研究, 第 64 巻第 1 号, pp.129-154, 2002.
- 10) 損害保険料率算定会:日本の地震保険, 平成 14 年 4 月 24 日発行.
- 11) 損害保険料率算出機構ニュースリリース, 2004 年 8 月 12 日:
<http://www.nliro.or.jp/news/index.html>
- 12) 損害保険料率算出機構:確率論的地震動予測地図の地震保険料率への適用に関して, 地震調査研究推進本部政策委員会第 13 回成果を社会に活かす部会資料, 資料 成 13-(7), 平成 15 年 7 月 29 日.(<http://www.jishin.go.jp/main/>)
- 13) 日吉信弘著:代替的リスク移転(ART), 保険毎日新聞社, 2000.
- 14) 土方 薫著:総解説・保険デリバティブ, 日本経済新聞社, 2001.
- 15) 全国共済農業協同組合連合会(JA 共済連)ニュースリリース, 平成 15 年 6 月 27 日.

4.8 原子力プラント及び構成機器を対象とした確率論的安全評価（PSA）への利用

4.8.1 原子力施設の確率論的安全評価

原子力プラントの確率論的安全評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment)では、原子力プラントで最も過酷な炉心損傷に至る有意な事故について発生頻度と発生時の影響を評価する。事故の発端となるトラブルの中には、原子力施設内の機器のランダムな故障や運転員の誤操作等、プラントやシステムに内在する原因によって起きる内的事象や、地震や火災・航空機の墜落等、外部からの衝撃によって起きる外的事象とがある。外的事象のうち、地震事象を対象とした PSA の 1 タスクとして確率論的地震ハザード（以下地震ハザードという）評価が用いられている。

PSA は、図 4.8.1 に示すように評価の内容によってレベル 1 ～ 3 の 3 レベルに大別される。レベル 1 PSA は、炉心損傷事故の発生頻度(CDF: Core Damage Frequency)を評価する。レベル 2 PSA は、炉心損傷によって放出される放射性物質の挙動を評価する。レベル 3 PSA は、CDF と放射性物質の挙動を用いて公衆の被曝量を評価する。これらのうち、レベル 2 及び 3 PSA 手法は、上記内的及び外的事象の全てに共通に用いられるものであるが、レベル 1 PSA 手法は対象とする事象毎に評価手法が異なる。

原子力安全委員会では、原子力施設の安全目標の検討を進め、「原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の 1 程度を越えないように抑制されるべきである」ことを中間報告として取りまとめた¹⁾。また、安全目標に対応する性能目標としての放射性物質の早期大量放出(LERF: Large Early Release Frequency)や CDF に関する検討も進めている。安全目標がレベル 3 PSA、LERF がレベル 2 PSA、CDF がレベル 1 PSA に対応するもので、これらがレベル 1 ～ 3 PSA の各段階でのリスクの目安となることが想定される。

以下、レベル 1 地震 PSA（以下地震 PSA という）手法及びその適用例について、地震ハザードの観点に着目して記述する。

4.8.2 地震 PSA 手法

（1）地震 PSA 手順及び不確定性評価

1) 地震 PSA 手順

地震 PSA 手順を図 4.8.1 内に示す。同手順は、① 地震ハザード評価、② 構造物・機器の現実的応答・耐力・フラジリティー評価、③ 事故シーケンス・炉心損傷事故発生頻度評価の各タスクからなる²⁾。

CDF は、地震ハザード $H(\alpha)$ (回/年) と炉心損傷発生確率 $CDP(\alpha)$ を用いて次式で評価される。

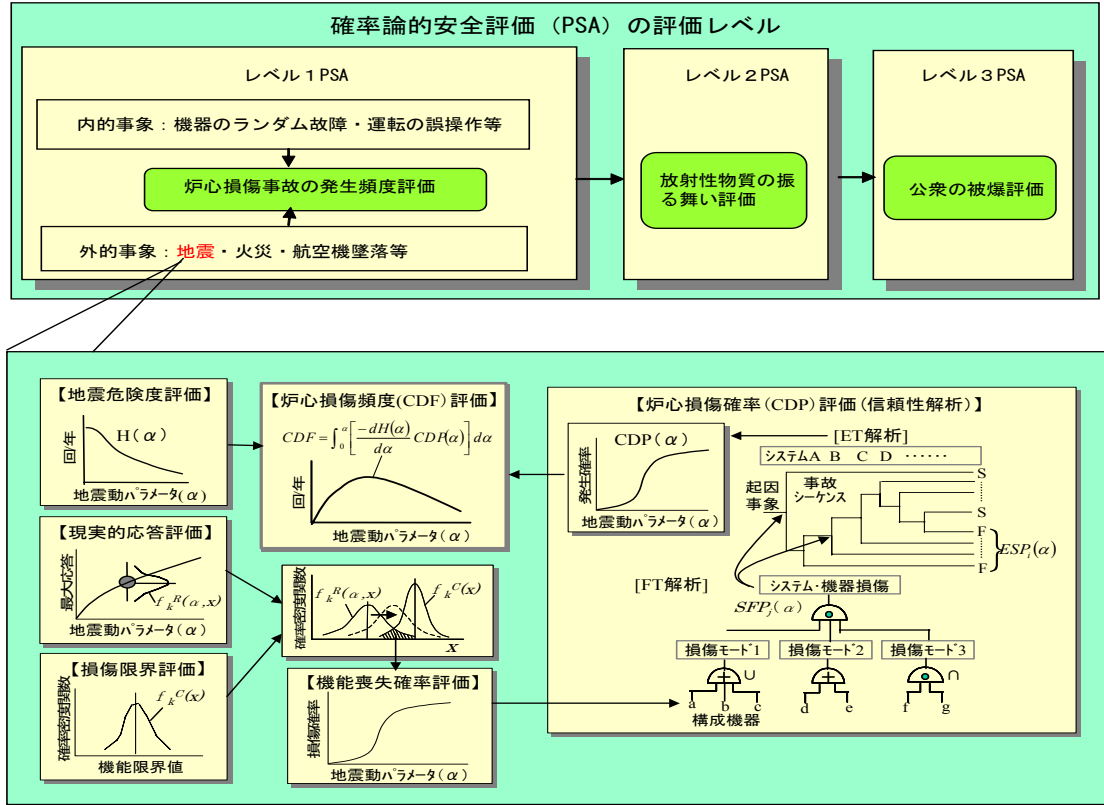


図 4.8.1 原子力施設の確率論的安全評価（PSA）のレベルと地震 PSA 手順

$$CDF = \int_0^{\alpha} \left[\frac{-dH(\alpha)}{d\alpha} CDP(\alpha) \right] d\alpha \quad (4.8.1)$$

ここで、 $H(\alpha)$ （回/年）は解放基盤での最大加速度等の地震動パラメータ (α) の年超過発生頻度を、 $CDP(\alpha)$ は α に対する炉心損傷発生確率を表す。また、 $CDP(\alpha)$ は、炉心損傷事故をもたらす事故シーケンス i の発生確率 $ESP_i(\alpha)$ の総和として次式で求められる。

$$CDP(\alpha) = \sum_{i=1}^n ESP_i(\alpha) \quad (4.8.2)$$

$ESP_i(\alpha)$ は、事故の進展過程を表すイベントツリー（ET: Event Tree）と ET 内の緩和系 j の機能喪失確率 $SFP_j(\alpha)$ を用いて ET 解析で求められる。 $SFP_j(\alpha)$ は、図 4.8.1 中に示したように、緩和系の機能喪失過程を表すフォールトツリー（FT: Fault Tree）と FT を構成する機器 k の機能喪失確率 $CFP_k(\alpha)$ を用いて FT 解析で求められる。 $CFP_k(\alpha)$ は、機器 k の現実的応答 $f_k^R(\alpha, x)$ が機能喪失限界 $f_k^C(x)$ を上回る時の条件付き損傷確率として次式で求められる。

$$CFP_k(\alpha) = \int_0^{\infty} f_k^R(\alpha, x) \left[\int_0^x f_k^C(x) dx \right] dx \quad (4.8.3)$$

(4.8.3)式において、 $f_k^R(\alpha, x)$ と $f_k^C(x)$ は互いに独立な対数正規分布で表されると仮定し、それぞれ次式で表わされる。

$$f_k^R(\alpha, x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_R x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln M_R)^2}{2\beta_R^2}\right] \quad (4.8.4)$$

$$f_k^C(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_k^C x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln M_k^C)^2}{2(\beta_k^C)^2}\right] \quad (4.8.5)$$

ここで、 M_R 及び β_R と M^C 及び β^C は、 $f_k^R(\alpha, x)$ 及び $f_k^C(x)$ の中央値及び対数標準偏差を表し、 x は加速度や応力等応答や機能喪失限界を表わすパラメータである。

2) 不確定性評価

地震 PSA では、地震ハザード評価、構造物・機器の現実的応答・耐力・フラジリティ評価、事故シーケンス・炉心損傷事故発生頻度評価における不確定性をもたらす要因を次の 2 つに大別される。これらのうち、後者の要因を対象として不確定性評価が行われる。

- ・物理現象固有のランダム性による不確定性
 - ・材料特性などに見られるように、対象とする物事が本来的に持つばらつき特性によるもので、ばらつきをそれ以上減じることができないものを指す。
 - ・物理的不確定性 (physical uncertainty) やランダム性、偶発性 (randomness) 等と呼ばれる性質によるものも含まれる。
 - ・知識や認識に係わる不確定性
 - ・知識の欠如、モデル化や評価プロセスに含まれる不確定性、解釈の相違などを表し、将来対象とする物事についての知識の増加や科学の発展によりその不確定性を減じることが期待できるものを指す。
 - ・統計的不確定性やモデル化不確定性と呼ばれる性質によるものも含まれる。
- 地震ハザード評価における不確定性評価は、ロジックツリーを用いて行われる。ロジックツリーの内容については、前述の 3 章で記述する通りである。

(2) 各タスクの概要

上記①～③の各タスクの概要について、地震ハザードに係わる内容を中心に述べる。

1) 地震ハザード評価

地震ハザードは、任意の基盤での地震動の大きさ（最大加速度、速度、等）とその年超過確率/年超過頻度（回/年）との関係で定義され、図 4.8.1 中に示すような地震

ハザード曲線として表される。地震 PSA における地震ハザードの役割としては、次の 2 つがある。

イ) 炉心損傷頻度評価のための入力

ロ) 構造物・機器のフラジリティー評価における地震応答評価のための入力

イ) については、前述の(4.8.1)式に示されるように、最大加速度をパラメータとする地震ハザードとして用いられる。ロ) については、(4.8.3)式で表す構造物・機器のフラジリティー評価における応答項、即ち、(4.8.4)式で表す現実的応答分布を求めるための入力として用いられる。ロ) においては、構造物・機器のフラジリティー評価手法の違いによって、地震ハザードの用いられ方が異なり、地震ハザードとしては、次の 3 つの表示が行われる。これらの具体的な内容については、後述の 2) で述べる。

イ) 構造物・機器フラジリティー評価手法における詳細法³⁾として用いる場合

- ・一様ハザードスペクトルとして表示
- ・地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離として表示

ロ) 構造物・機器フラジリティー評価手法における簡易法³⁾（安全係数法³⁾ともいう）として用いる場合

- ・最大加速度として表示

2) 構造物・機器の現実的応答・耐力・フラジリティー評価

構造物・機器のフラジリティー評価手法には、次の 2 つの手法が提案されており³⁾、(4.8.3)式で表される現実的応答分布の求め方が異なる。

①現実的応答を詳細法で評価する場合

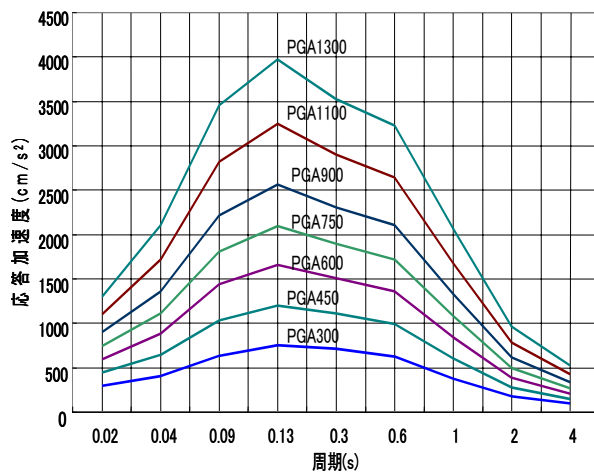
②現実的応答を簡易法で評価する場合

①の場合では、現実的応答を時刻歴波形と振動モデルを用いて求めるので、時刻歴波形が必要となる。この波形は、目標スペクトルを設定し、これを満足するような正弦波の合成から求められる。この目標スペクトルの作成方法には、図 4.8.2 の例に示すように次の 2 つの方法がある。

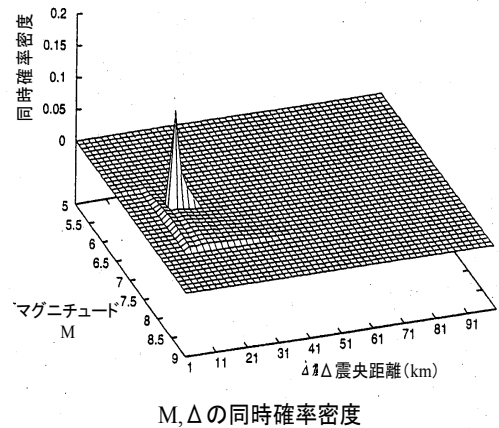
①-1 一様ハザードスペクトルを用いる場合

応答スペクトル距離減衰式を用いて、一様ハザードスペクトルを求める。
これを目標スペクトルとし、時刻歴波形を評価する。

①-2 地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離を用いる場合
亀田・石川の方法⁴⁾、McGuire の方法⁵⁾、NUPEC の方法⁶⁾等により、任意の超過確率に寄与する想定地震のマグニチュードと距離を求める。これらと応答スペクトル距離減衰式を用いて目標スペクトルを求める。この目標スペクトルを満足するように時刻歴波を求める。



(a) 一様ハザードスペクトル



M, Δ の同時確率密度
($T=0.1$ 秒, 年超過確率 10^{-5} , $S_a=1970\text{cm/s}^2$ 以上)

(b) 地震ハザード再分解による想定
地震の規模・距離

図 4.8.2 時刻歴波作成用目標応答スペクトルの設定方法

②の場合では、現時的応答を設計応答値と応答係数（設計応答値の保守性を係数で表したもの）を用いて表す。応答係数評価の一環として、設計用地震動の保守性に係わる応答係数は、設計用応答スペクトルと地震ハザードから求めた応答スペクトルとの比として求められる^{3),7)}。この応答スペクトルの評価に活用される。

以上のように地震 PSA における地震ハザードは、構造物・機器のフラジリティー評価における応答評価とセットで用いられる。

3) 事故シーケンス・炉心損傷事故発生頻度評価

事故シーケンス発生頻度評価では、まず、炉心損傷に至るあらゆる事故シーケンスを同定する。事故シーケンスは、炉心損傷事故の引き金となる起因事象毎に、事故の拡大を抑えるための緩和系それぞれの機能が成功するか失敗するかどうかで場合分けを行って定義される。事故シーケンスを系統図にイベントツリーを用いて表す。各緩和系が機能喪失に至る系統図をフォールトツリーを用いて表す。炉心損傷に至る事故シーケンスの発生頻度を合計して炉心損傷頻度を評価する。一連の評価では、不確定性評価も行うが、不確定性評価には一般的にモンテカルロサンプリングが用いられる。

地震 PSA の事故シーケンス評価では、内的事象と異なる特有の取り扱いが行われるが、地震ハザードに関連するものを挙げる。強地震動下では、複数の機器が同時に損傷する、いわゆる共通原因損傷が生じると考えられる。そのため、地震 PSA では、事故シーケンス評価でのフォールトツリー解析において、複数機器間の損傷の相関^{8),9)}を考慮する必要がある。機器の損傷の相関は、機器間の応答の相関と耐力の相関によ

って表されるが、耐力の相関は完全独立と仮定されるので、応答の相関だけが考慮される。

応答の相関は、入力動の周波数特性と機器の振動特性による共振挙動の相関として表されるので、それに影響を及ぼす要因（入力地震動の周波数特性・振幅、機器設置建屋の違い、同一建屋内での機器設置階の違い、機器の減衰定数・固有周期の違い）を考慮する必要がある⁹⁾。これらの要因のうちの入力地震動の周波数特性は、前述 2) の構造物・機器のフラジリティー評価における詳細法によって地震ハザード曲線から求められる。

4.8.3 地震 PSA 手法の適用例

地震 PSA 手法の適用例として、原子力施設の CDF の評価例と、機器免震技術による地震リスクの低減効果に関する評価例を記述する。

（1）原子力施設の地震リスク評価の例

日本原子力研究所（原研）や独立行政法人原子力安全基盤機構（原安機構）では、前述の 4.8.2(1)の地震 PSA 手法を用いて CDF を評価しているので、それらの概要について述べる。原研では、我が国の東北地方の太平洋岸サイトに 110 万 kWe 級の沸騰水型原子炉プラントを仮想して、軽水炉モデルプラントの地震 PSA を実施した。そして、重要事故シーケンスとしては、崩壊熱除去失敗シーケンスや全交流電源喪失シーケンスが、重要機器としては、碍管付き起動変圧器、電気盤、非常用ディーゼル発電機が同定されたこと等が挙げられている¹⁰⁾。

一方、原安機構では、代表的な沸騰水型及び加圧水型原子炉プラントを対象とした CDF の評価を実施している。重要機器としては、横置きポンプ、電気盤、制御棒等が挙げられている¹¹⁾。

（2）機器免震性能設計法と機器免震技術による地震リスク低減の評価

1) 評価手法

原研では、地震リスク低減技術として機器免震技術に着目した研究を行った。同研究では、地震 PSA で同定された安全上重要な機器に免震技術を導入した場合の有効性評価手法⁸⁾及び評価コード¹²⁾を開発した。また、同手法の高度化のために、2次元及び3次元機器免震システムを設計・製作し、振動台試験や自然地震動による試験を実施して、動的応答挙動や免震効果を明らかにした^{13)～15)}。更に、機器免震系の機能限界評価手法を提案すると共に、限界試験を行い限界値の定量評価を行った²⁾。これらの高度化を通し、CDF を性能目標とした確率論的手法に基づく機器免震性能設計法を開発すると共に、機器免震化による地震リスクの低減効果を評価した²⁾。

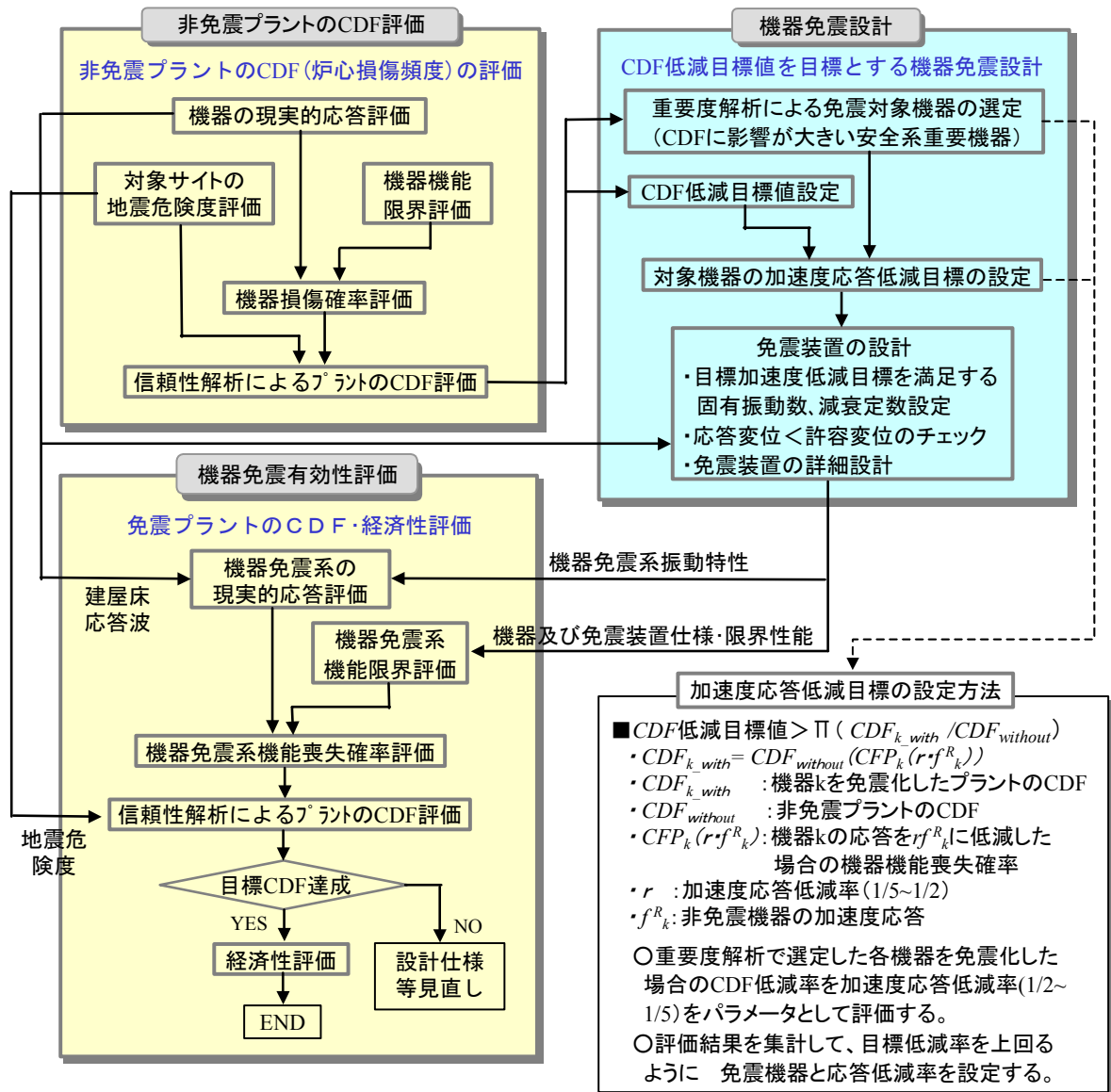


図 4. 8. 3 機器免震性能設計及び地震リスク低減評価手順

機器免震性能設計法と地震リスク低減評価の手順は、図 4. 8. 3 に示すように以下の通りである。

- ① 地震 PSA 手法を用いて、上記 (1) のように非免震プラントの炉心損傷頻度 ($CDF_{without}$) を評価する。
- ② プラントの安全目標が炉心損傷頻度 CDF_{target} として与えられると仮定して、 CDF_{target} と $CDF_{without}$ との比を機器免震の設計目標性能として設定する。
- ③ $CDF_{without}$ に大きく寄与する安全上重要な機器を対象として免震対象機器を選定する。
- ④ 選定した機器の加速度応答低減率 (免震機器の加速度応答/非免震機器の加速度

応答）をパラメータとして、CDF の設計目標性能を満足するように、各機器の加速度応答低減率を設定する。

- ⑤ 加速度応答低減率を満足する固有振動数及び減衰定数を設定し、与条件を考慮して免震系を設計する。
- ⑥ 免震対象機器について、応答、機能限界及び損傷確率を評価し、免震プラントの CDF_{with} を求める。CDF の低減目標値を満足していない場合は、対象機器の追加・見直しや、機器免震系の振動特性を修正する等再設計を行う。
- ⑦ 非免震機器と比較して、コストを評価する（コスト評価手法の内容を後述の(3)で述べる）。

2) 評価例

原研では、仮想原子力プラントを想定し、外部電源喪失事象を対象として、安全係数法を用いて試評価を行い、安全上重要な機器を同定した。これらの機器を免震化した場合の非免震プラントに対する炉心損傷頻度低減効果を評価した。評価の結果、重要機器のうち、特に外管付き起動変圧器と非常用ディーゼル発電器を免震化した場合に、炉心損傷頻度の低減効果が大きく、免震化により加速度応答が非免震機器の 1/5 に低減されることや、CDF が 1/10 程度まで低減できる可能性があることが明らかにされた²⁾。

また、評価精度の向上を図るために、評価手法の高度化の 1 つとして、サイト近傍地震動を詳細に評価する、震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手法の開発が示されている。

(3) 機器免震技術のコスト評価

1) 手法の概要

原研では、図 4.8.4 に示す機器免震技術のコスト評価手法を開発した¹⁶⁾。同手法は、供用期間中の非免震機器の総期待費用と免震化した機器の総期待費用を比較して、機器免震のコストを評価するものであり、後述の機器供用期間中の損傷確率評価に地震ハザード評価が用いられている。

非免震機器の総期待費用 $TC_{without}$ は次式で表わされる。

$$TC_{without} = IC_{without}^C + FP_{without} (FC_{without}^C + FC^{ID_1} + FC^{ID_2}) \quad (4.8.6)$$

ここで、右辺第 1 項の $IC_{without}^C$ は、非免震機器の初期費を表わす。第 2 項のカッコ内は地震による損害費用を表し、 $FC_{without}^C$ は機器の直接損害費、 FC^{ID_1} は間接被害として、電力や運輸基盤等の要因の損失によりもたらされる直接的な第 1 次生産の減少費、 FC^{ID_2} は第 1 生産減少の波及によって生じる 2 次的な生産減少費を表す。 $FP_{without}$ は非免震機器の供用期間中での損傷確率で、供用期間 t (年) での損傷頻度 CDF (回/年)

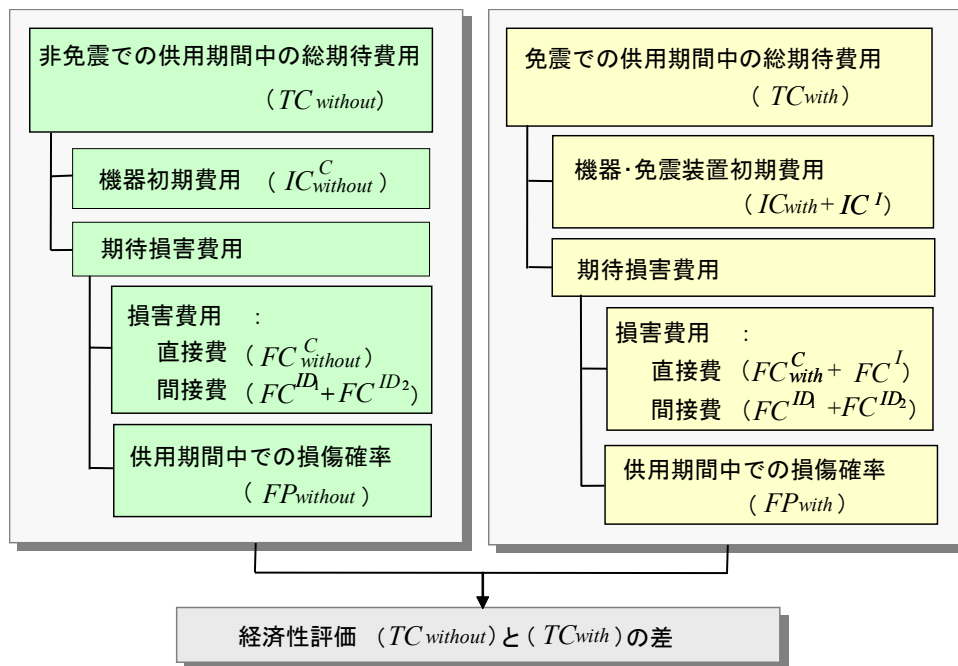


図 4.8.4 機器免震のコスト評価手法

を用いて次式で表される。CDF 評価の中に (4.8.1) 式に示す地震ハザード評価が用いられている。

$$FP_{without}(t) = 1 - \exp(-CDF \ t) \quad (4.8.7)$$

免震機器の総期待費用 TC_{with} は次式で表される。

$$TC_{with} = IC_{with}^C + IC^I + FP_{with} (FC_{with}^C + FC^I + FC^{ID_1} + FC^{ID_2}) \quad (4.8.8)$$

ここで、第 1 項及び 2 項は初期費で、 IC_{with}^C は機器費、 IC^I は免震装置費を表す。第 3 項のカッコ内は損害費を表し、 FC_{with}^C は機器の直接損害費、 FC^I は免震装置の損害費である。 FP_{with} は免震機器供用期間中の機能喪失確率を表わし、非免震機器の場合と同様に (4.8.7) から求める。

2) 評価例

地震 PSA で安全上重要な機器の 1 つとして同定された碍管付き起動変圧器を対象として、機器免震のコストが評価された。その結果、免震構造での期待損害費は、供用期間中での損傷確率が非常に小さいので無視できる。そのため、免震構造化のコストは、間接被害を除いた場合、免震装置費と非免震構造での期待被害費の違いに帰着し、機器免震のコストパフォーマンスが高いことが示されている¹⁶⁾。

4.8.4 まとめ及び確率論的地震動予測地図への期待

（１）まとめ

原子力施設を対象とした地震 PSA における地震ハザードの利用について要約する。

- 1) 原子力施設の PSA は、内的事象（原子力施設内の機器のランダムな故障や運転員の誤操作等に内在する原因によるもの）や、外的事象（地震や航空機墜落等、外部からの衝撃によるもの）を対象として行われ、外的事象 PSA のうちの地震 PSA の 1 タスクとして地震ハザード評価が用いられている。
- 2) 地震 PSA における地震ハザード評価は、任意の 1 サイトを対象として、ローカルな最新情報をできるだけ取り入れ精緻に評価する必要がある。そのために、物理的現象に関する最先端の知見を出来る限り吸収しつつ、不確定性評価を合理的に組み合わせた評価手法を開発してきた。これらの手法は、これまで工学分野で開発されてきた確率論的地震ハザード評価の方法を包含し、かつ地震学・地質学の最新の知見に最も肉迫する内容を備えている。最新の地震ハザード評価手法としては、サイト近傍の強地震動を詳細に評価するために、震源断層モデルを用いた評価を行っている。また、地震ハザードの不確定性評価のために、ロジックツリーを用いた評価も行っている。
- 3) 地震ハザード評価は、構造物・機器のフラジリティー評価のための応答評価用入力地震動の作成にも使用される。そのために、地震ハザードは、最大加速度・速度等のパラメータ表示に加え、一様ハザードスペクトルや地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離としても表示される。これらは、時刻歴波を作成するための目標スペクトルの作成に用いられる。
- 4) 地震ハザードは、更に、強地震動下での複数の機器が同時に損傷する共通原因損傷の誘因となる複数機器の応答の相関評価のための入力地震動の作成にも用いられる。
- 5) 地震ハザードは、地震 PSA の利用の一環として、機器免震性能設計、機器免震技術による地震リスク低減、機器免震コスト評価のために利用されている。機器免震技術は、地震リスク低減策の重要な実用技術の 1 つとして、今後の活用が期待されている。

（２）確率論的地震動予測地図への期待

我が国の原子力施設を対象とした地震 PSA 手法の開発は、昭和 60 年頃に着手され、20 年程度経過している。地震ハザード評価手法も含めた PSA 手法に対する理解・認識は、これまで必ずしも十分でなかったが、最近非常に高まってきている。このような状況を反映し、内閣府原子力安全委員会の耐震設計審査指針高度化の検討において、耐震安全性評価手法の 1 つとして、地震ハザードも含めた地震 PSA 手法の活用が審議されている。

一方、確率論的地震動予測地図事業の活発な活動や耐震設計分野における性能設計への期待と相まって、地震ハザードへの期待が高まっている。このような動向は、市民の地震ハ

ザードへの認識の向上に繋がり、強いては、原子力分野における地震ハザードへの認識向上にも繋がるとも考えられるので、予測地図の有用性を積極的に発信することが極めて重要と考えられる。

加えて、次の観点の情報を正確に市民に発信することが重要と考えられる。確率論的地震動予測地図では、全国を対象とした平均的な評価を行うのに対し、原子力サイトの地震ハザード評価では、任意の 1 地点を対象とした精緻な評価を行う。このように両者は、対象領域及び評価精度に対する要求内容が異なる。そのために、評価結果の公開に当たっては、評価条件等を明確にし、誤解を与えないように丁寧な説明が重要と考えられる。

参考文献

- 1) 原子力安全委員会:安全目標案に関する調査審議状況の中間とりまとめ、安全目標専門部会、平成 15 年 12 月。
- 2) 堤英明・蛭沢勝三・山田博幸・柴田勝之・藤本滋:確率論的手法による機器免震性能設計及び有効性評価手法、JCROSSAR2003 論文集、F2-05、pp.829-836,2003.
- 3) 蛭沢勝三・神野邦彦・中村英孝・伊東守・阿部清治:建屋及び機器の現実的応答評価法と応用、日本原子力研究所報告書、JAERI-Research96-059、1996.
- 4) 亀田弘行・石川裕:ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析への拡張、土木学会論文集、No.392/I-9、pp.395-402(1988).
- 5) Robin K McGuire: Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquake Closing the Loop, Bulletin of Seismological Society of America Vol.85 No.5 (October 1995).
- 6) 原子力発電技術機構:13 年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備(その2)に関する報告書—地震ハザードの試解析—、INS/M00-16、平成 11 年 3.
- 7) K.Ebisawa et al.; Evaluation of response factors for seismic probabilistic safety assessment of nuclear power plants, Nuclear Engineering and Design, Vol.147, 1994.
- 8) K.Ebisawa and T.Uga: Evaluation methodology for seismic base isolation of nuclear equipments, Nuclear Engineering and Design, Vol.142,1993.
- 9) 蛭沢勝三・山本幹夫・本橋章平・坂上正治:地震動下での機器損傷評価における応答の相関係数評価手法の整備、日本原子力学会「2004 秋の大会」、2004 年 9 月。
- 10) 日本原子力研究所リスク評価解析研究室:軽水炉モデルプラント地震 PSA 報告書、JAERI-Research 99-035、1999 年。
- 11) 独立行政法人原子力安全基盤機構:13 年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備(その2)に関する報告書—地震ハザードの試解析—、INS/M00-16、平成 11 年 3.
- 12) 蛭沢勝三:機器免震の有効性評価法と評価コード EBISA, RIST ニュース、No. 20、1994.
- 13) K.Ebisawa et al.: Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components, Nuclear Engineering and Design, Vol.198,2000.

- 14) H.Tsutsumi,etal.:Dynamic Response of Base Isolation Test System for Nuclear Component under Natural Seismic Motion, Presented at the 2000 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol. 402-1 Seismic Engineering-2000-, Vol.1, pp141-146, Seattle, 2000.
- 15) 堤英明他:3次元機器免震試験システムの動的挙動および免震効果、第2回免震制振コロキウム、2000年11月.
- 16) 蛭沢勝三:機器免震の経済性評価法とその応用, JCROSSAR'95、1995.

4.9 地震動予測地図作成事業とその成果の利用

地震調査研究推進本部（以下「推本」と略称）による地震動予測地図作成の成果が工学的にどのように利用されるか、その場合の課題は何か、という視点から本章で議論された内容を以下にまとめる。

- （１）地震動予測地図は確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震ハザード評価に大別される、それぞれに応じた利用形態がある。
- （２）確率論的地震ハザード評価においては、利用目的に応じて、大別して、①震源情報（断層諸元、発生確率）の利用、②特定地点でのハザード評価結果（ハザードカーブ、一様ハザードスペクトル、確率論的想定地震）の利用、ハザードマップ（ハザードカーブの点情報の地域分布）の利用のニーズがある。
- （３）確率論的地震ハザード評価の結果について、確率の値を直接表現することは工学的に重要であるが、取えて確率表現を避け、翻訳した指標を用いることが適切な場合もある。また、広域的な防災対策においては、地域特性に応じて適切な確率レベルに基づいた工学利用をはかるべきである。
- （４）シナリオ型地震ハザード評価においては、断層の破壊メカニズムなどを考慮した詳細な地震動評価が行える。特定した地震によって「一度に」発生する地震動の地域分布を知ることができる。このため、震源メカニズムが特定できる地震に対して、工学利用面からのニーズや期待は現実的に大きい。ただし、評価対象の震源を特定した場合でも、対象地点の地震動に及ぼす不確定要因に対する考慮が必要である。これについては原子力施設のような重要施設を対象に検討がなされているが一般への普及はこれからである。
- （５）文部科学省による学校施設の耐震化推進の提言においては、耐震診断の優先順位を決める調査の段階で「当該建物が立地している地域の想定震度」を調査して優先度分類を行い、さらに、想定震度が 6 強以上の場合には緊急度を上げる、というような震度予測の活用が示されている。「全国を概観した地震動予測地図」がこの目的のために利用可能と考えられるが、行政単位（市町村）内での複数建物の耐震化優先度の判断には、よりきめ細かい震度マップ（アドバンスドマップ）が必要となろう。
- （６）建築建物を主な対象とした耐震設計では、確率論的な手法が導入されつつある。ISO3010 では、限界状態に対応する再現期間を定めて地震荷重の大きさを提示している。日本建築学会では、荷重・耐力係数設計法において荷重の発生頻度やばらつきを直接的に反映した設計式を提案しており、推本の事業の成果が直接・間接に活用される機運にあるといえる。ただし、現行の建築基準法では、地震荷重の大きさや表現について確率・統計的な考え方が盛り込まれておらず、今後の課題とされている。
- （７）土木学会では、2001 年に、「現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の

強さをもつ地震動」をレベル2地震動と称し、構造物の安全性の照査に用いること、そして、震源の特定できる非常に強い地震動は、その発生確率の高低に拘わらずレベル2地震動の候補として評価することが提言された。これは推本の事業のうちシナリオ型地震動にあたる。その後、これに加えて、地震動の発生確率を考慮した経済性照査の概念が具体化されつつあり、推本の確率論的地震ハザード評価の利用が期待される。

- (8) ライフラインのように広域に広がり、かつそれらがネットワークシステムとして機能している施設では、「一度にどの程度の被害が生じるか」が防災上の視点となる。したがって、推本のシナリオ型地震ハザード評価が直接役に立つ。施設の敷設地域が広くなればなるほど、また、供用期間が長くなればなるほど、ライフサイクルにわたって考慮すべき地震シナリオが増えるため、複数のシナリオ地震動に対する各々の想定被害に対して対策を講じることが必要になる。その解決策として、シナリオ型地震によるリスクを発生確率に応じて重畳するという評価手法も検討されつつあり。これはシナリオ型地震ハザード評価と確率論的地震ハザード評価の融合利用の一形態を示すものであろう。
- (9) 自治体による地域防災計画では、庁内や住民への説明のしやすさから、シナリオ型の地震動予測が現状では基本になっており、今後も被害想定を中心をなすと考えられている。地域のアドバンスドマップ作りのためには、推本の事業で得られた基礎情報の公開が不可欠である。想定地震を定める際には、確率論的地震動予測地図への各地震の貢献度が参考になる。また、地域内の相対的な地震危険度の差を示したり、公共建物の耐震化の優先順位を付けたりする戦略的な検討の際に、確率論的地震動予測地図の地域による相対的な震度差が有用な情報になる。
- (10) 不動産運用や金融・保険の分野において地震リスクマネジメントの重要性が増している。建物の予想損失(PML)は不動産投資上のリスク指標の代表であり、これを求めるためには確率論的地震ハザード評価が不可欠である。保険の分野では、推本の活動を受けて、家計地震保険の料率算定にその成果を反映させる動向がある。これらについて、評価の信頼性を担保する意味で、地震動予測地図が公的機関から体系的にまとめられ公表される意義は大きい。
- (11) 推本の事業は全国概観を目指しているのに対し、原子力発電所の地震 PSA における地震ハザード評価では、対象が超重要施設であること、サイトが限定されることなどの理由で、地球物理学的な知見をできるだけ生のまま活かした高度な評価手法の適用が検討されている。プラントの確率的な安全目標や震源を特定しにくい地震の評価についても検討が進められている。

以上、地震動予測地図作成の成果が、工学的に多様な利用可能性を持っていることを示した。確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震ハザード評価の、それぞれの特長を活か

した利用方法や、さらには両者をシームレスに活用する方向性も見えてきた。

予測地図という性格上、一般には視覚的な地図形式の結果表現のみが採り上げられる傾向があるが、その工学的利用価値をさらに高めるには、本節で例示されたような専門ニーズに適した内容や形態での成果提供が望まれる。予測地図に至るまでの作成側の膨大な作業から産まれた各プロセスでのさまざまなデータや手法こそが、地震動予測地図作成事業から工学が享受すべき貴重な知的財産なのである。

5. 地震動予測地図の工学利用の今後

前章までに地震動予測地図の概要や具体的な利用の現状に関して述べてきた。確率論的地震動予測地図（確率論的地震ハザード評価）と震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ型地震動評価）を別個の概念として扱うのではなく、それぞれの特徴を理解した上で、両者を組み合わせて活用していくことはこれからの重要な課題である。最後に本章では、こうした視点の下に、地震動予測地図を一層活用していくための課題と方向性について論じる。

5.1 地震動予測地図に関する当面の課題

現在、政府の地震調査研究推進本部で推進されている地震動予測地図は確率論的地震動予測地図（確率論的地震ハザード評価）と震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ型地震動評価）に分けられるが、現時点での認識として基本的に両者は別個のものとして利用されている。両手法の特徴ならびに両者の融合の方向性に関しては5.2節以降で論じるが、本節ではまず、利用の観点からそれぞれの地図に対する現時点での要望事項を整理する。

（1）評価条件やデータ処理のプロセスの明確化

個々の地震の長期評価も含めて、少なくとも資料レベルでは地震動予測地図に関する多くの情報が開示されており、これに関しては満足し得る水準にあると考えられるが、今後も継続して種々の情報が公表されることが望まれる。特に、震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ型地震動評価）では評価条件（シナリオ）の選定プロセスや選定根拠に客観性と説明責任が求められており、その点に関する手続きの標準化が必要である。

一方、確率論的地震動予測地図（確率論的地震ハザード評価）においても、種々の評価条件を設定する際に様々な判断が必要となるが、その手続きについて可能な限り標準化を目指す必要がある。低確率のハザード評価結果には地震動強さの確率分布の特性や大振幅入力に対する地盤増幅率（非線形応答を考慮していない）の問題が反映されている可能性がある。評価結果のデジタル値を公表する以上、やみくもに外挿したモデルを用いるのではなく、専門家の判断に基づく適切な処理が施される必要がある。また、種々の不確定性を処理するためにロジックツリーの活用が今後期待されるが、重みの設定プロセスを明確にするために専門家の意見の集約方法に関する研究が必要である。

（2）地震動指標の多様性

確率論的地震動予測地図（確率論的地震ハザード評価）では単一の地震動強さが対象

であり、現時点の地図では最大速度（工学的基盤、地表）と震度階（地表）が指標として用いられている。耐震設計等の工学利用ではそれ以外の地震動指標についても求められており、それに対する評価が検討される必要がある。具体的には最大加速度、応答スペクトルなどである。ただし、これらの指標を対象とした距離減衰式の開発や、地表での評価を行うには表層地盤の増幅をいかに考慮するかといった作成手法側の課題がまず解決される必要がある。

また、確率論的な意思決定問題の中で、各種動的解析の普及に伴い、確率論的地震ハザード評価に基づいた時刻歴波形の作成についてもニーズが出てきている。一様ハザードスペクトルや確率論的想定地震といった方法があるが、それぞれ長所、短所が指摘されている。確率論的な指標と対応づけられた時刻歴波形の作成手法に関する研究開発も必要である。

（３）地図の公表に際しての説明

現在公表されている地震動予測地図は確率論的地震動予測地図と震源断層を特定した地震動予測地図が別々に示されており、互いの関係や個々の利用目的に応じた標準的な活用手順については十分に整理されていない状況にある。特に確率論的地震動予測地図は期間、確率レベル、対象地震が異なる多数の地図が示されており、利用の観点からは、具体的な問題に対してどの地図をどのように活用していくのかについて議論を重ね、提示していくことが急務である。併せて、専門外の人へのわかりやすい説明に関して工夫していく必要がある。特に低い確率値をそのまま公表することは「安心情報」と受け取られる恐れがあり、地震ハザードの相対値としての地図表現あるいは他のリスクとの比較など、わかりやすい表現のあり方を検討していく必要がある。

（４）諸データやプログラムの公開

確率論的地震動予測地図、震源断層を特定した地震動予測地図のいずれも、評価手法、評価条件、評価結果は資料レベルでは公表されているが、それと併せて評価に用いられた諸データや評価結果のデジタル値も公開されることが望まれる。特に確率論的なリスク評価を行うには、地図としての評価結果よりもむしろハザードカーブ情報や、より遡った震源情報などの数値データが必要となる。また、シナリオ型地震動評価でも評価条件を変えた検討を行う場合など、基本情報のデジタルデータが活用される場面も多い。なお、これらの諸データ等を継続して管理・運用していくためには特に予算面での継続的な裏づけが不可欠であり、管理・運用体制のあり方と併せた検討が必要である。

加えて、確率論的地震動予測地図ならびに震源断層を特定した地震動予測地図の作成に用いられたプログラムの公開を望む声もある。評価手法やプログラムの標準化を目指すことは均質な結果を供給するという点で有用であるが、地震動の評価技術は日進月歩であり、評価手法やプログラムに「国のお墨付き」を与えることに対する批判的な意見

もある。したがって、こうした情報の公開に際しては技術の進歩を柔軟に取り込める枠組みを併せて構築しておくことが不可欠である。

(5) 地図の定期的な更新

基本的に地震活動は非定常な現象であり、特に周期的に発生する地震は時間の経過とともに地震発生確率は高くなる。よって、本質的に確率論的な地震ハザードは時々刻々変化するものである。また、昨年9月の十勝沖地震のように震源が予め特定できる地震が実際に発生した場合には、将来の地震発生確率は更新されることになる。さらに当然のことながら、地震に関する知見や種々の評価手法についても進歩していくため、一旦作成された地震動予測地図は時間の経過に伴って陳腐化していくことになる。したがって、地震動予測地図は一度作成すれば終わりではなく、継続的に活用していくために定期的な更新を行っていくことが必須の要件である。(4)でも指摘したが、そのための体制を整備しておく必要がある。なお、規模が大きな地震が発生した場合には、地震ハザードの再計算はもとより、実際に発生した地震と事前に想定していたものとの相似性の検証に多くの労力を要するため、地震の事後評価の体制に関しても併せて検討が必要である。

(6) 地震被害を取込んだリスクマップへの展開

地震動予測地図の重要性は言うまでもないが、最終的に地震被害の軽減へつなげるためには、地震被害情報を重ねた予測地図（リスクマップ）への展開を図るべきである。種々の構造物や施設はそれぞれ所有者が異なるため、被害を含めた予測地図を作成するには均質な情報入手の困難さとともに、リスク情報の開示に伴う個人のプライバシーの問題等が障害となる可能性があるが、地震被害軽減のために可能なところから着手すべき課題であると考えられる。深く掘り下げた議論が望まれる。

5.2 確率論的評価とシナリオ型評価の融合に向けて

5.2.1 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の特徴と使い分け

確率論的地震ハザード評価（確率論的地震動予測地図）とシナリオ型地震動評価（震源断層を特定した地震動予測地図）の特徴を比較した表を表 5.2.1 に示す。

確率論的地震ハザード評価は、地震の発生や地震動の予測に関わる種々の不確定性を確率モデルで表現することにより、全体の不確定性を組織的に定量評価し、不確定性のもとでの意思決定という地震外力設定の問題に対処しようとするものである。その結果は通常ハザードカーブや一様ハザードスペクトルなど、発生確率に対応する地震動強さで表現される。確率論的地震動予測地図は地震ハザード評価結果に基づいて、超過確率のレベルを揃えた場合の地震動強さもしくは地震動強さのレベルを揃えた場合の超過確率の地域的な分布を地図として表現したものである。地震ハザード評価は、予測される地震動の強さとその発生確率との関係（ハザードレベル）を明確にできることが最大の特徴である。

これに対して、シナリオ型地震動評価は過去の地震歴や活断層の分布などの情報を参考にして、将来発生しそうな地震の物理的な諸元をあらかじめ特定の値に設定し、それに基づき地震動の予測を行うものである。構造物の設計用入力地震動を時刻歴波形や応答スペクトルなどにより定める場合、震源断層の諸元やサイトとの位置関係などが明らかなシナリオ地震を設定することにより、断層の破壊様式なども含めて地震動の定量評価を行えるという利点がある。特に兵庫県南部地震で経験したように、被害に結びつく地震動には強い局所性があり、このような地震動の性質を把握するにはシナリオ型地震動評価が有用である。また、広域的な防災対策では、地震によって「一度に」発生する地震動強さの地域分布を知る必要があるため、外力条件としてシナリオ地震を設定することが有効である。確率論的地震動予測地図はサイトごとに独立に解析した結果を地図の形で示したものであって、広域的に「一度に」発生する地震動の分布を表したものではないことに注意が必要である。なお、シナリオ型の地震動予測地図にも「同時（同一時刻）」の地震動分布を示したもの（スナップショット）と、「一度（特定の地震に対する最大）」の地震動分布を示したものがあるが、一般的には後者が利用されている。また、「一度」の地震動分布の中にも単一の評価条件での地震動強さの分布を示したものと、同じ地震で破壊開始点やアスペリティ位置などの一部の条件を変えた複数の評価結果に基づいてその中の最大の地震動強さ（包絡値）を地点ごとに拾い出し、その分布を示したものがある。

個別地点を対象として将来の地震動を予測する場合、地震動の不確定性を考慮できるという点で確率論的地震ハザード評価は有用な手法と考えられる。全国の地震ハザードを同じ尺度で比較するには確率論的な手法に拠らざるを得ない。また、リスクマネジメントへの展開や、地震以外のリスクとの定量比較を行う場合にも確率論的手法が有用である。特に欧米を中心とする諸外国では様々なリスクが確率論的に評価されており、国際化の視点からも確率論的手法を忌避することはもはや許されない趨勢となっている。

表 5.2.1 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の特徴

	確率論的地震ハザード評価	シナリオ型地震動評価
評価の手順	影響するすべての地震の発生確率とその地震による地震動強さの超過確率を積和する	想定した特定の地震（シナリオ地震）が発生した場合の地震動を評価する
対象とする地震	影響するすべての地震 震源断層を予め特定しにくい地震も含まれる	特定の一つの地震 震源断層が予め特定できる地震が主たる対象
地震の発生確率	すべての地震の発生確率が評価結果に反映される	地震の選定の際に考慮されるが、評価結果には含まれない
地震動の評価方法	簡便法（距離減衰式） 一部に詳細法の適用も見られる	断層の破壊様式を考慮した詳細法 簡便法（距離減衰式）の地図もある
地震動評価における不確定性の扱い	対数正規分布などの確率分布で処理される	各パラメータの設定において考慮されるが、個別判断に委ねられておりあいまいな状況である
個々の地点での評価結果	ハザードカーブ 一様ハザードスペクトル	地震動の時刻歴波形 応答スペクトル、フーリエスペクトル
地震動強さマップの作成方法	期間と超過確率を固定した場合の地震動強さを地図で表示する	その地震が発生した場合の最大地震動強さの地域分布、あるいは同一時刻における地震動強さの地域分布（スナップショット）を地図で表示する
地震動強さマップの意味	各地点での結果は独立であり、発生する事象の同時性や一度のイベントでの地震動強さを表わすものではない	想定した地震が発生した際の最大または同時の地震動強さを表わす
広域の地図としての理解の容易性	ハザードの地域的な相対比較については容易に理解できる 個々の地震のイメージが見えないために事象の同時性については理解できない どの確率レベルの地図を用いればよいのかが目的ごとに標準化されていない	特定の地震時の現象を扱っているために事象の同時性については理解しやすい 条件の違いによって同じ地震であっても複数の地図ができるが、その使い分けについて目的ごとに標準化されていない

しかしながら、確率論的地震ハザード評価を具体的に利用するにあたっては解決を要する課題も多い。まず、利用目的に応じて意思決定に用いる確率レベルを具体的にいくつにすればよいのかという問題に関して議論が進んでいない。特に兵庫県南部地震のような低頻度の問題に対して確率が利用できるのか、あるいはどのように利用していくのかについて、専門家の間でもコンセンサスが得られていない。関連して、確率論的地震ハザード評価の結果では相対的に発生確率が低い地震による地震動の特徴が反映されにくいという性質があるが、これに対してはシナリオ型地震動評価の補完が必要と思われる。加えて、地震動評価が簡便法にとどまっているという問題も今後解決していく必要がある。

一方、広域を対象とした場合には特定の地震が発生した場合の被害の特徴や被害量の総和を把握したいというニーズが強いが、こうした目的にはシナリオ型地震動評価が有効である。確率論的地震ハザード評価に基づくポートフォリオリスク評価では被害量と対象期間での発生確率の関係を把握することができるが、特定の地震に対する被害をイメージできないという問題点がある。しかしながら、シナリオ型地震動評価では想定地震や震源メカニズム等を選定する手続きに任意性があり、設定したシナリオがどの程度の確率で生じするのかを含めて、設定したシナリオの妥当性をいかに説明するかが課題とされている。こうした点を解決していくために、当面は確率論的想定地震など確率論的地震ハザード評価の再分解の結果とシナリオ地震との関係の明確化や、シナリオ型地震動評価の結果を確率論的地震ハザードの観点からレビューすることで互いの関係を定量評価していくことが重要である。こうした事例を積み上げることによって、確率論的地震ハザード評価を活用していく場合に要請される確率レベルの具体化に対する理解も深まっていくことが期待される。

5.2.2 実地震の震度分布との対比による 2 種類の地震動予測地図の特徴比較

確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定－北日本）¹⁾が 2003 年 3 月に公表されたのち、東北・北海道地方において複数の被害地震が発生し、多くの地点で震度 6 弱、6 強を観測した。ここでは、これらの地震において震度 6 弱以上を記録した地点と北日本の確率論的地震動予測地図ならびに代表的なシナリオ型地震動予測地図（震源断層を特定した地震動予測地図）を比較し、双方の地図の意義を考察した。

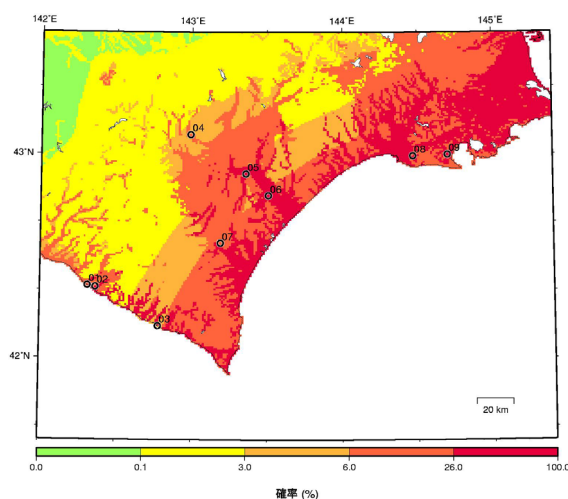
ここで対象とした地震は次のとおりであり、そのいずれかで震度 6 弱以上を記録した地点を各地図上に重ねた。

- ・ 2003 年 5 月 26 日 18 時 24 分 : 宮城県沖の地震 ($M_j=7.1$)
- ・ 2003 年 7 月 26 日 0 時 13 分 : 宮城県北部の地震 ($M_j=5.6$)
- ・ 2003 年 7 月 26 日 7 時 13 分 : 宮城県北部の地震 ($M_j=6.4$)
- ・ 2003 年 7 月 26 日 16 時 56 分 : 宮城県北部の地震 ($M_j=5.5$)
- ・ 2003 年 9 月 26 日 4 時 50 分 : 平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震 ($M_j=8.0$)
- ・ 2003 年 9 月 26 日 6 時 8 分 : 十勝沖の地震 ($M_j=7.1$)

図 5.2.1(a) は北日本の確率論的地震動予測地図のうち、全地震を考慮したトータルのハザードマップ (2003 年から 30 年間に震度 6 弱以上を受ける確率) と 9 月 26 日の十勝沖地震で震度 6 弱を記録した地点を比較したものである。この図より震度 6 弱を記録した地点の大半は今後 30 年に震度 6 弱以上を受ける確率が 6% 以上と高かったことがわかる。すなわち、これらの地点においては、確率論的地震動予測地図はその危険度を適切に指摘していたと評価される。

(a) 確率論的地震動予測地図

(30年間に震度6弱以上を受ける確率)



(b) シナリオ型地震動予測地図

(十勝沖地震：簡便法)

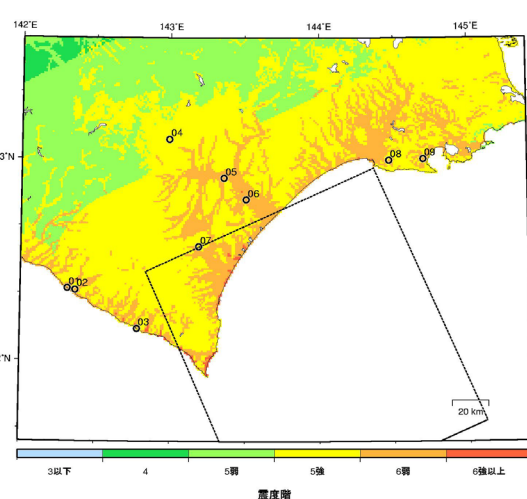
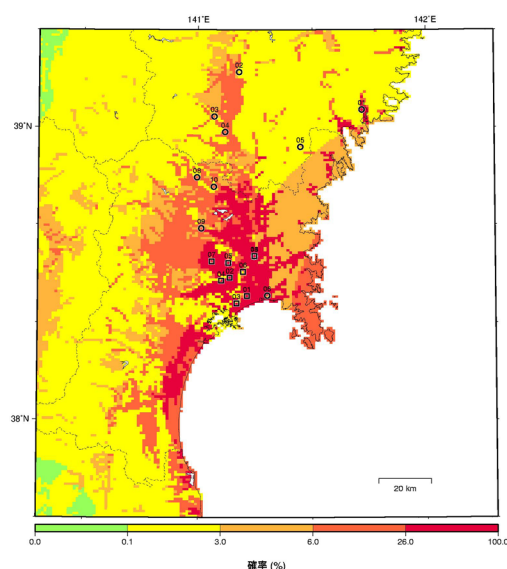


図 5.2.1 平成 15 年（2003 年）十勝沖地震で震度 6 弱を記録した地点（○印）と地震動予測地図の関係

(a) 確率論的地震動予測地図

(30年間に震度6弱以上を受ける確率)



(b) シナリオ型地震動予測地図

(宮城県沖地震：簡便法)

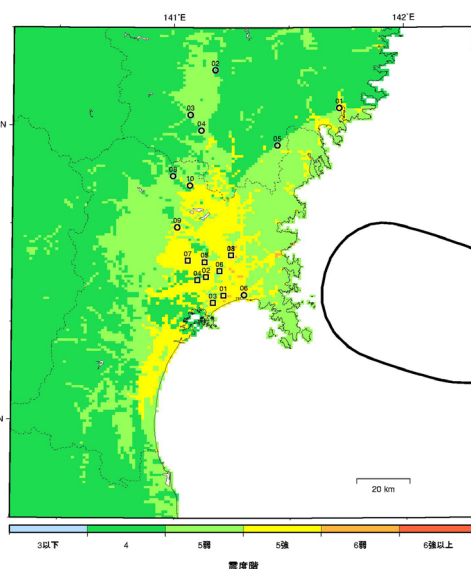


図 5.2.2 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震と同年 7 月 26 日の宮城県北部の地震で震度 6 弱・6 強を記録した地点（5/26：○印、7/26：□印）と地震動予測地図の関係

(注) ここで示したシナリオ型地震動予測地図は簡便法（距離減衰式の中央値）に基づくものである。特に宮城県沖地震は 1978 年宮城県沖地震の観測記録から距離減衰式の中央値より強い地震動をもたらす可能性が指摘されており²⁾、図 5.2.2(b)の地震動強さは過小評価となっている可能性がある。

しかしながら逆に、確率論的地震動予測地図で震度 6 弱以上を受ける確率が 6%以上の地域がすべて十勝沖地震で震度 6 弱以上を受けた訳ではないことに注意する必要がある。

5.2.1 で述べたように、確率論的地震動予測地図は「一度に」発生する地震動の分布を示したのではないためである。十勝沖地震は長期評価で事前に想定されていた地震とほぼ同じであったことが明らかにされており³⁾、こうしたケースではシナリオ型地震動予測地図(図 5.2.1(b))の方が「一度に」発生する地震動の分布としてより実情に近い震度分布を与えてくれることになる。

図 5.2.2(a)は全地震を考慮したトータルのハザードマップと昨年 5 月 26 日の宮城県沖の地震(○印)と昨年 7 月 26 日の 3 つの宮城県北部の地震(□印)で震度 6 弱以上を記録した地点を比較したものである。この図からも、震度 6 弱以上を記録した地点の大半は今後 30 年に震度 6 弱以上を受ける確率が 3%以上であり、多くの地点では 6%以上であったことがわかる。確率論的地震動予測地図の有用性を支持する結果である。

宮城県沖地震の発生確率が高いことから、宮城県周辺では同地震がシナリオ地震として想定されるのが一般的である。しかしながら、昨年 5 月と 7 月に実際に発生したのは宮城県沖地震とは異なる地震であった。宮城県沖地震の発生を前提としたシナリオ型地震動予測地図(図 5.2.2(b)：簡便法に基づく)によれば、昨年 5 月 26 日の宮城県沖の地震と 7 月 26 日の 3 つの宮城県北部の地震で震度 6 弱以上を記録した地点のいくつかでは、宮城県沖地震では震度 6 弱に至らないことが明らかになっている。したがって、昨年起こった事実は特定のシナリオ地震を想定するのみでは実際に発生する地震動の評価として不十分な場合があることを示している。

一方、確率論的地震動予測地図では可能性があるすべての地震を考慮しており、特定のシナリオ地震以外の地震による地震動もカバーしている。図 5.2.2(a)から明らかなように、昨年の地震で震度 6 弱以上を記録した地点の多くにおいて相対的にハザード(今後 30 年に震度 6 弱以上を受ける確率)が高いことを事前に指摘していた。その意味では、ここで示した事例は、確率論的地震動予測地図がシナリオ型地震動予測地図を補完する役割を十分に果たし得ることを示している。

5.2.3 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合

上記 5.2.1 で述べたように、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の手法は、それぞれの特徴を踏まえて、目的に応じて使い分けられている。一方、地震動評価に対するニーズは多様化・高度化する方向にあり、各評価手法を「典型的な手順」にのっとって適用するだけでは、ニーズを十分に満たせない場合もある。これまで、両評価手法の対立構造が強調されるきらいがあったが、「確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合」という技術的課題に取り組むことによって、「使用データ」「評価手法」および「評価結果」の共有化あるいは相互乗り入れを推進し、それぞれの弱点を克服できるよう努力することが必要である。

なお「融合」という用語は、現在は、i) 確率論的想定地震の概念を用いて二種類の地図の位置付けを解説すること、ii) シナリオ型地震動評価で用いられている詳細な地震動予測法を確率論的地震動予測地図に取込むこと、の2つの意味で用いられているが⁴⁾、以下ではより組織的・体系的に両手法を活用していくことをイメージしている。

両評価手法の融合を目指す過程で考慮すべき事項は、以下の6(3×2)項目に集約されることが考えられる。

- (a) シナリオ型地震動評価における確率論的要素の導入
- (b) シナリオ型地震動評価における評価結果の総合化・統合化
- (c) シナリオ型地震動評価による確率論的地震ハザード評価の補完
- (d) 確率論的地震ハザード評価における決定論的要素の導入
- (e) 確率論的地震ハザード評価における評価結果の再分解
- (f) 確率論的地震ハザード評価によるシナリオ型地震動評価の補完

これら「確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合」に関する具体的な方向性について、以下では、それぞれの評価手法の立場から説明する。なお図5.2.3は、地震動予測地図へのニーズの多様化と関連付けて、両評価手法の融合について説明したものであり、図5.2.4は、「使用データレベル」「評価手法レベル」および「評価結果レベル」の3層からなる階層構造上に、項目を整理したものである。

まずシナリオ型地震動評価の立場からみた方向性は、以下の通りである。

(S-1) シナリオ地震の選定方法の検証と発生確率評価の必要性【主として(a)に関連】

無数の候補のなかから一つまたは複数のシナリオ地震を選定することは、地震発生の可能性を「ゼロ／イチ」で評価して取捨選択することに相当するため、その選定基準および選定結果の妥当性を十分に検証しておく必要がある。想定外の地震（震源を予め特定できるもの・特定しにくいものを含めて）の影響を考慮できないため、場合によっては、最低限の地震動強度を想定外力として担保するための工夫が別途必要となる。後に示すように、確率論的地震ハザードマップの利用は有力な手段である。地震リスクマネジメントのためには地震発生確率の情報が不可欠であるし、地震防災の実務サイドからの要請として、シナリオ地震に発生確率を付与することが求められる場面も多い。

なお、発生確率が付与された場合には、シナリオ型評価においても「シナリオを採択するための確率の閾値をいくつにするか」という問題や、「低い確率が安心情報と受け取られかねない」という問題など、確率論的な評価で現在広く議論されている課題が同じように付随してくることに注意が必要である。

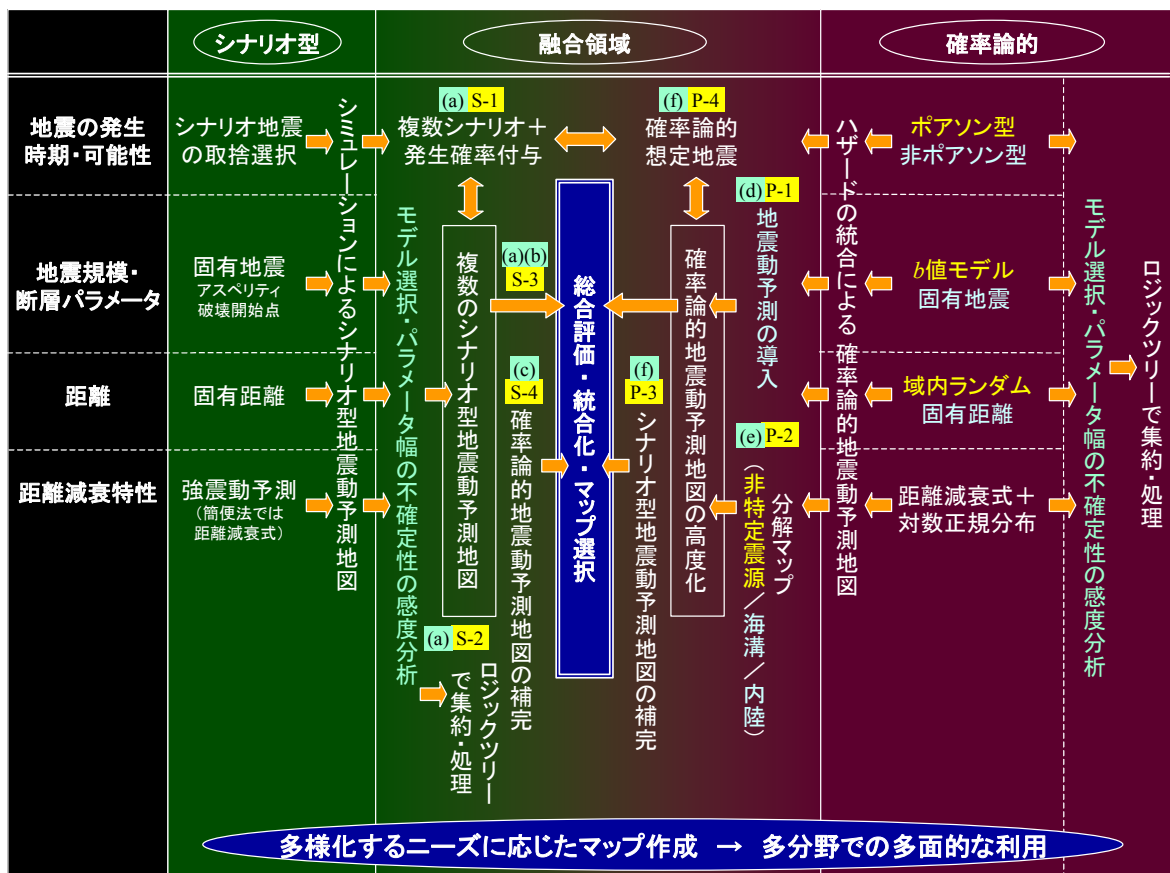


図 5.2.3 地震動予測図へのニーズの多様化とシナリオ型地図・確率論的地図の融合
(図中の記号は本文中の記号に対応している)

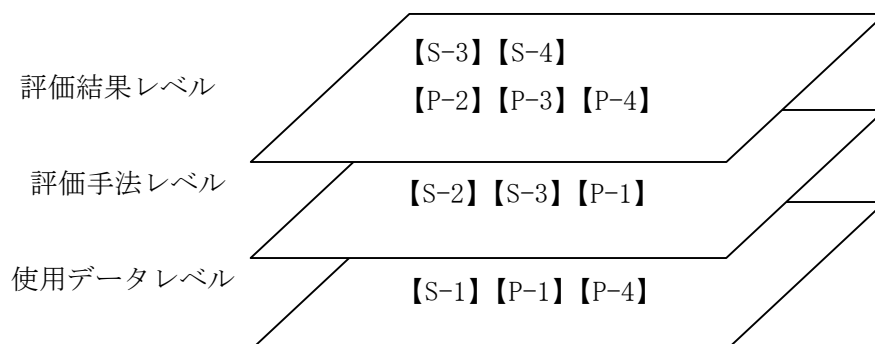


図 5.2.4 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合における階層構造

(S-2) シナリオ地震のパラメータ設定法の検証【主として(a)に関連】 例えば5)～9)

シナリオ型地震動評価においては、詳細なデータに基づいて細部の条件を設定し、高度な地震動予測手法を適用することによって、高い精度で物理現象を記述することが可能である。一方、地震動の将来予測という面では、厳密に規定された条件下での確定的評価とは異なり、未知要因や偶発的要因に何らかの方法で対処しなければならない。アスペリティの配置パターンや断層破壊開始点の設定などに起因する不確定性は、確率分布として扱えないためにロジックツリーなどの活用が考えられる。最終的には種々の条件を変化させたパラメータスタディの結果を確率統計的に処理することによって、地震動強さの幅を表現することができる。

(S-3) 複数の評価結果の総合化・統合化の必要性【(a) (b)に関連】 例えば9)

上記(S-1) (S-2)によって、複数のシナリオ地震により得られた評価結果、あるいは複数の条件でのパラメータ設定により得られた評価結果は、それぞれ個別に利用可能であるが、複数の地震動予測の評価結果をマップ1枚で表現するなど、何らかの集約が求められる場合もある。各地点において複数ケースの最大値を選択したマップを作成する方法はその一つであり、これは、シミュレーションにより推定された実現値を順序統計量として扱うことに相当する。確率統計的方法による総合化・統合化は、シナリオ型地震動評価の大きな課題である。

(S-4) シナリオ型地震動予測地図による地震ハザードマップの補完【(c)に関連】

地震動は、深部基盤構造や表層地盤の非線形増幅の影響で、非常に強い局所性を示す場合がある。兵庫県南部地震の際のいわゆる「震災の帯」はその典型例といえる。詳細法によりシナリオ地震動評価を行うことの利点の一つは、こうした局所性を物理現象として再現可能などにある。一方、確率論的地震ハザード評価では、距離減衰式に不確定性を付与したうえで、確率レベルによって評価結果をパラメトリックに解釈するという扱いをしているため、局所的な地震動特性をマップ表現することができない。従って、地震ハザードマップの公表の際に、代表的なシナリオ型地震動予測地図を添付資料とするなど、補完的な利用形態を検討する必要があると考えられる。

次に、確率論的地震ハザード評価の立場からみた方向性は、以下の通りである。

(P-1) 強震動予測手法などの決定論的手法の導入【(d)に関連】 例えば10)

震源を予め特定しにくい地震については、「ポアソン型地震発生モデル・ b 値モデル・距離減衰式」の組み合わせによるハザード評価が一般的である。しかし調査研究が進んで対象が明確な震源を特定できる地震に関しては、「非ポアソン型地震発生モデル・固有規模・固有距離」の組み合わせで、一部に決定論的手法を導入し、高精度な強震動予測および地

盤増幅特性の評価結果を適用できる。3章で触れたように、震源を特定できる地震に対して、シナリオ型地震動評価として用いられている詳細な地震動予測法を確率論的地震ハザード評価に組み込もうとする試みも一部始められている。これにより、距離減衰式や簡便な地盤増幅度を用いた評価よりも、不確定性が低減されることが期待できる。

(P-2) 確率論的地震ハザード評価の再分解の方向性【(e)に関連】 例えば 11)～15)

確率論的地震ハザード評価の手法は、種々の不確定要因を組織的に定量評価することが特徴であり、評価結果は考慮した地震の影響を統合化したものである。この特徴が逆に、結果の解釈を困難にしたり信頼性を低下させたりする原因ともなっており、「背景にある地震像が見えない」とか「低頻度地震の長期確率評価には統計的意味が希薄」といった批判的見方もある。このため、統合化されたハザード評価結果を再分解した結果（ないしは評価過程における中間的結果）を示すことによって、解釈を容易にする試みがなされている。震源タイプ別（海溝型地震、内陸活断層、震源を予め特定しにくい地震）あるいは震源別に分解した確率論的地震ハザードマップや貢献度マップなどは、その例である。

(P-3) 地震ハザードマップによるシナリオ型地震動予測地図の補完【(f)に関連】

シナリオ型地震動予測地図において、考慮されるイベントには限界がある。特に、中部日本や近畿地方のような活断層密集地域では、シナリオ地震の選定過程で多くのハザード源が除外されてしまうのが実状である。全国的に見ても、近年、鳥取県西部地震、宮城県沖（三陸南）の地震、宮城県北部地震など、震源が予め特定しにくい地震が幾度も発生している。性能設計や地震リスクマネジメントを背景として地震防災対策を推進する潮流の中では、実際に生じた地震動強さの事後評価が求められる場面が増えると考えられる。5.2.2でも述べたが、この点で、シナリオに選定されない地震の影響を考慮できることは、確率論的地震ハザード評価の大きな利点である。例えば、シナリオ型地震動予測地図の公表の際に、地震ハザードマップを添付資料とするなど、実効性のある活用形態を検討する必要がある。

(P-4) 確率論的想定地震の同定【(f)に関連】 例えば 14)

地震ハザード解析の手法を応用して、震源を予め特定しにくい地震の地震域において期待される平均的な地震像を、「確率論的想定地震」として同定する方法が開発されている。前項(P-3)と関連して、シナリオ地震の設定方法に関して重要な示唆を与えるものである。

なお、確率論的地震ハザード評価に用いられるパラメータの中には、その評価値が幅を持って与えられることがある。活断層の長期的な地震発生確率はその代表例である。また、距離減衰式などのモデル選択や、地震動強さの上限設定の有無など、評価の過程で下される専門的判断に関連して、意見を合理的に集約する必要性が生じることもある。確率論的

地震ハザード評価においては、ロジックツリーを用いてこうした不確定性を処理すると、ロジックツリーの分岐パターンに相当する数のハザード曲線が得られるが、その後処理には確率統計的方法がとられ、地震ハザード評価の幅がフラクタイル値で表現される（図 5.2.3 最右欄）（例えば 16） 17）。

以上、「確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の融合」に関する具体的な方向性に関して説明した。両者は一体化すべき性質のものではなく、図 5.2.3 や図 5.2.4 に示したように、共有化や相互乗り入れを通じてお互いの弱点を補完するとともに、地震ハザードに関する多面的理解を深め、地震動予測地図の総合評価、統合化、あるいはマップ選択のための基礎資料となるべきものである。

こうした技術課題については、実務および調査研究の両面において従来から認識されていたものの、これまでは個々の事情や目的に応じて個別に処理されていたといえる^{5)~17)}。上記のような方向性を踏まえた調査研究として、岐阜県を対象としたケーススタディを行い、種々のハザードマップの作成を試みた例も見られる^{18)~20)}。しかし体系化を目指すには議論はまだ十分とはいえず、ここに示した基本的概念を具体化したシステムを構築し、実践を重ねる必要がある。5.3 節では、その方向性を明確に打ち出したシステム構想について述べる。

参考文献

- 1) 地震調査委員会長期評価部会・強震動評価部会:確率論的地震動予測地図の試作版(地域限定ー北日本),平成15年3月25日.
- 2) 地震調査委員会:宮城県沖地震を想定した強震動評価について,平成15年6月18日.
- 3) 地震調査委員会:千島海溝沿いの地震活動の長期評価について,平成15年3月24日公表,平成15年11月12日変更.
- 4) 防災科学技術研究所:北日本地域を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例,防災科学技術研究所研究資料第246号,2003.
- 5) 中尾吉宏・田村敬一・本田利器・千葉光:断層パラメータの設定が推定地震動に与える影響,第10回日本地震工学シンポジウム論文集,pp.667-672,1998.
- 6) 岡田成幸・戸松誠:都市直下地震を想定した入力地震動の考え方と地域防災計画への指針 ～震源パラメータの不確定性がもたらす地震動入力及び被害評価への影響～,日本建築学会構造系論文集,第530号,pp.37-44,2000.
- 7) 片岡正次郎・田村敬一:想定地震に基づくレベル2地震動の試算,第26回地震工学研究発表会講演論文集,土木学会地震工学委員会,pp.401-404,2001.
- 8) 山田雅行・藤原広行・先名重樹:シナリオ地震動予測におけるバラツキの検討,地球惑星科学関連学会2004年合同大会予稿集,S046-009,2004.

- 9) 中央防災会議:東海地震に関する専門調査会報告(平成 13 年 12 月 11 日資料 2-2), 2001.
- 10) 長尾 毅・山田雅行:地震ハザードにおける統計的グリーン関数法適用の試み, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, 12, pp.59-64, 2002.
- 11) 石川 裕・亀田弘行:地震危険度解析に基づく想定地震の設定法, 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.79-84, 1990.
- 12) 亀田弘行・石川 裕・中島正人:想定地震の工学的設定法に関する研究, 都市耐震センター報告 14 号, 京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センター, 1994.
- 13) McGuire, R. K. : Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.85, pp.1275-1284, 1995.
- 14) 亀田弘行・石川 裕・奥村俊彦・中島正人:確率論的想定地震の概念と応用, 土木学会論文集, 第 577 号/I-41, pp.75-87, 1997.
- 15) 奥村俊彦・石川 裕:地震ハザードの再分解による想定地震の位置づけの明確化, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会地震工学委員会, pp.125-128, 2001.
- 16) Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts; Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC), NUREG/CR-6372, April 1997.
- 17) (財)原子力発電技術機構原子力安全解析所:平成 15 年度地震に係わる確率論的安全評価手法の整備に関する報告書＝地震ハザードの試解析＝, INS/M03-11, 2003.9.
- 18) 石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一・斎藤知生:地震動予測・地震被害予測マップの新メニュー, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 21046, pp.91-92, 2003.
- 19) 石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一・能島暢呂・杉戸真太・久世益充:地震動予測マップの活用ーその1:ハザード情報の利用ー, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, No.36, 2003.
- 20) 能島暢呂・杉戸真太・久世益充・石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一:地震動予測マップの活用ーその2:震度曝露人口の試算ー, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, No.58, 2003.

5.3 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価を統合した「地震ハザードステーション（仮称）」構想

5.3 確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価を統合した「地震ハザードステーション（仮称）」構想

現在は別個の概念として用いられている確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価であるが、対象地点あるいは対象地域における将来の地震動の予測という点において両手法の目的は同じである。今後は両手法の利点を生かしながら、対象地点（地域）における将来の地震動をインタラクティブに評価、設定するための支援システム（ここでは「地震ハザードステーション」と称す）の開発を目指していく必要がある。

「地震ハザードステーション」の要件として、確率論的地震ハザード評価と代表的な想定地震に対するシナリオ型地震動評価の結果（地図や諸データ）が格納されているのみでなく、5.2.3 で論じたような両評価の欠点を補完し、互いの特徴を理解するための仕掛けと、それに基づき将来の地震動を客観的に設定、説明するための手続きが組込まれる必要がある。加えて、各地震の長期評価結果、過去の地震の情報、活断層などの地形・地質情報、深部・浅部の地下構造情報、地震観測記録、地震被害記録などの各種データベースとのリンクを構築することで、対象地点（地域）周辺における地震環境が容易に理解できる仕組みを目指す必要がある。

こうしたシステムを実現するためには、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価の互いの長所、短所について専門家間での議論を深めるとともに、融合に関する技術的な課題を解決していく必要がある。当然のことながら、現時点で問題点として残されている評価手法の高度化についても並行して解決していく必要がある。

また、ユーザーの専門性に応じた使い易さの観点から階層別に利用できる仕組みが必要である。専門家や技術者が種々の防災対策や耐震問題に活用していくことはもとより、最終的に専門外のユーザーの活用までを目指す（例えば住宅の売買における重要事項説明書に地震・地震動や地盤の所見が盛り込まれるようになる）ことによって、国民全体の地震・地震動に対する知識の底上げにつなげることができる。

「地震ハザードステーション」の開発においては、関連して国が進めている各種プロジェクトの成果を網羅的に取り入れて十分に活用し、その成果を広く国民が享受できるように配慮しなければならない。そこで重要なことは以下の4点である。

- 1) 膨大な基礎データを一元的に維持管理すること
- 2) 評価結果が客観的かつ公平なものであり説明責任を果たせること
- 3) ユーザー・フレンドリな成果公表体制を長期にわたって持続できること
- 4) システムを統括する責任体制を明確化すること

一方、諸外国（特に米国）においては、第2章2.2節でも述べられているように、地震ハザード評価や地震リスク評価など、地震リスクマネジメントに関する取り組みが、国家的なプロジェクトとして位置付けられており、関連する情報が広く公表されている。

以上のような状況を踏まえつつ、産官学の協調的体勢のもとに「地震ハザードステーション」のシステム開発を計画的・継続的に推進するのが適切であるといえる。

わが国では、兵庫県南部地震から 10 年を迎えようとしており、この間に精力的に実施してきた理学・工学分野における地震調査研究の成果を社会に還元し結実させてしかるべき時期にきている。その過程において、一連の処理プロセスがブラックボックスとなっていては、多様化・高度化するニーズに応えることはできない。地震防災や地震リスクマネジメントは自然科学（理学や工学）と人文・社会科学の領域を超えた協力が不可欠であり、それを戦略的に進めるための共通基盤となる地震動評価に関して、透明性の高い支援システムを構築することが重要である。

おわりに

この活動の使命は、地震動予測地図を工学目的に活用できる分野とその方法を具体的に検討し、その成果を社会に活かすべく提言することであった。非専門家から見れば、何をいまさら、と不思議に思われるかもしれない。社会からの、そして地震防災工学からの必要性に応じて、そのベースとなるハザードマップを作成しているのではないか。これが一般人の感覚であろう。

しかし、委員会における当初の議論から、ことはそれほど単純ではないことに思い至った。歴史があるのである。まず、阪神・淡路大震災を転機とし、地震の直前予知研究の偏重から地震発生 の長期評価研究への転換があった。そして、この長期評価の成果を地震動予測の評価に関連付けようとする流れがあった。一方では、発生頻度の大小はあえて問わず、震源を特定して地震動を詳細に予測する技術が、震災を境に高度化され、かつ実用に耐えるよう工夫がなされ、地震被害想定などに工学利用される機運が広まってきた。こうして、確率論的地震ハザード評価と、決定論的地震ハザード評価が、この10年の間にさまざまな場面で社会に発信されるようになった。このことは、歓迎すべきことであるけれども、受け手側にある種の混乱を招いた。

こうしたことを背景として、委員会での議論が始まった。決定論的地震ハザード評価が地域の防災計画や構造物の耐震検討に直接に活用されつつあるのに対して、確率論的地震ハザード評価の活用のされ方はいまひとつである。それはなぜか、両手法の優劣はなにか、地震ハザード評価の理想像はなにか、ということが議論の出発点であった。委員の間で共有された認識は、確率論と決定論の対立の図式から来る従来の不毛な議論の繰り返しを避けること、理想像構築に向けての建設的な議論をすること、不確定性のもとでの意思決定という実務の要請に正面から向き合うこと、などであった。議論の過程では、理学からの最先端技術による地震動予測結果を活かせるほど構造設計法は高度化されていない、という厳しい認識も示された。

今般、委員をはじめ関係者の献身的な努力で、こうした議論のプロセスから得た知見をとりまとめることができた。地震動予測地図は地震防災対策に関係する方に広く使われてこそ意味がある。工学利用はその重要なところを占める。この報告書が、関係者間での対話、協力、連携の手がかりとなれば幸いであり、その意味で、ようやく新たなスタート地点に立ったと思っている。

地震動予測地図工学利用検討委員会
委員長代理 当麻純一

