

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

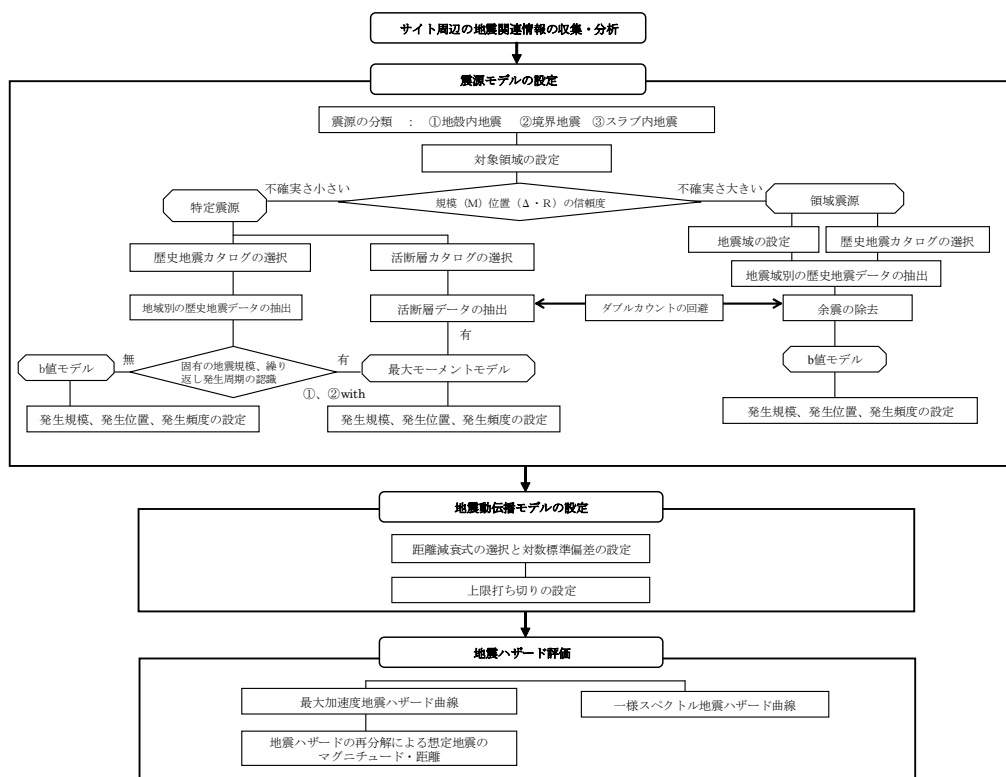


図 3.2.1 距離減衰式を用いた地震ハザード評価手順

(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 km以内の地域と3 km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 km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 km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概念図を図3.2.2に示す。サイト敷地から30 km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 km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。

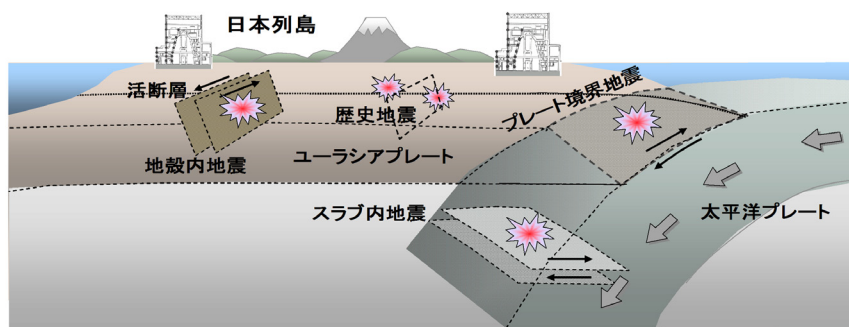


図 3. 2. 2 対象原子力サイト周辺における地震の発生様式概念図

・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、ダブルカウ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

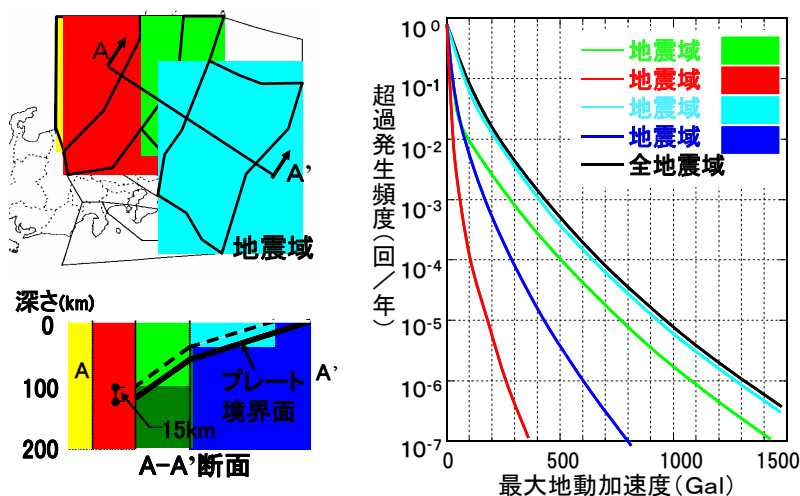


図 3.2.5 最大加速度をパラメータとした地震ハザード評価の例

3.2 確率モデルに基づく地震ハザード評価

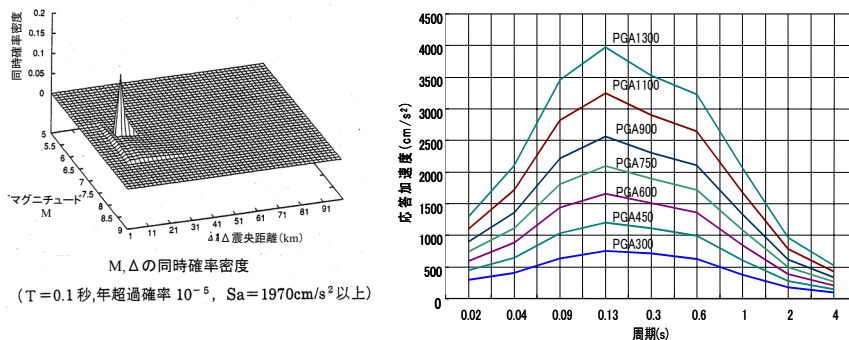


図 3.2.6 地震ハザードの再分解による想定地震のマグニチュード・距離と一様ハザードスペクトルの例

地震データ)の寄与が大きいかかわかるように、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。

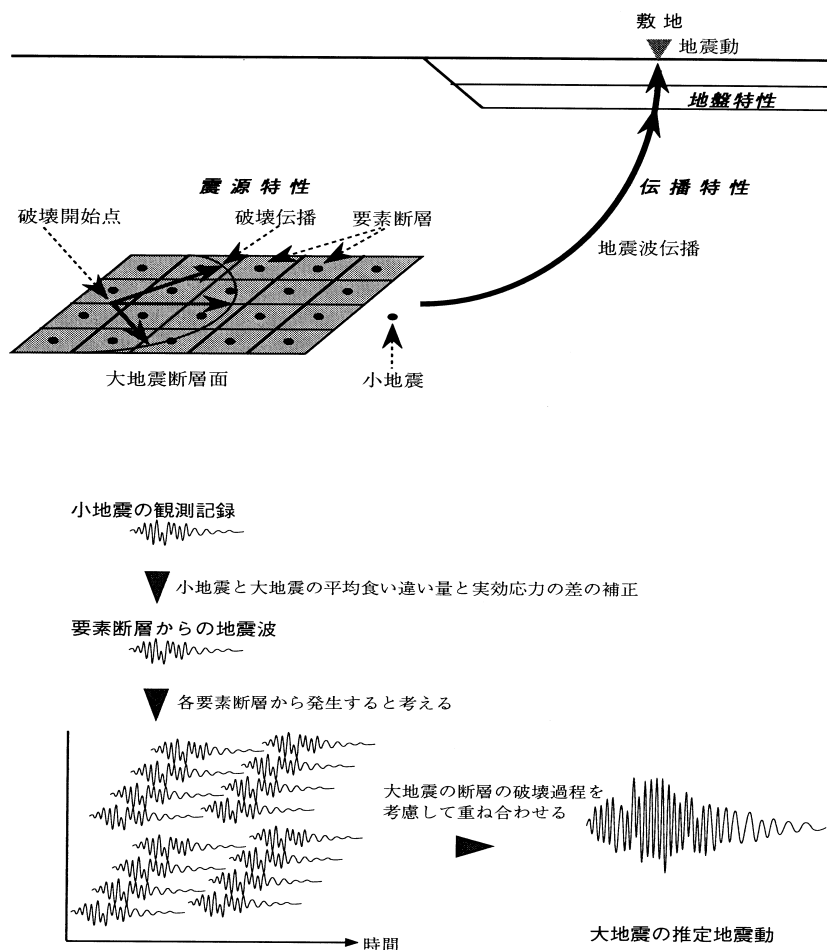


図 3.2.7 震源断層モデルを用いた地震動評価の概念図（半経験的波形合成法の場合）

(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

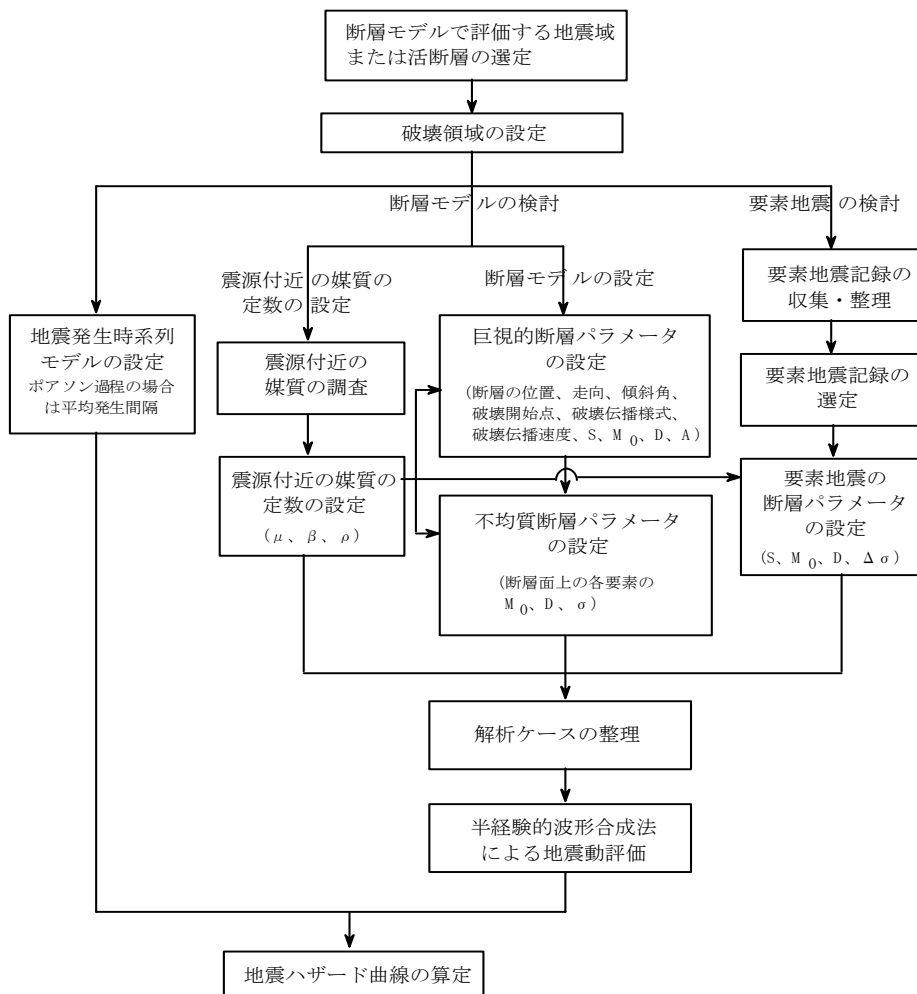


図 3.2.8 震源断層モデルを用いた地震ハザード評価手順

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ピ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か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进行评估する。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进行评估する。

(3) 評価例

上記⑤で述べたように、断層パラメータの不確かさを考慮して、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。

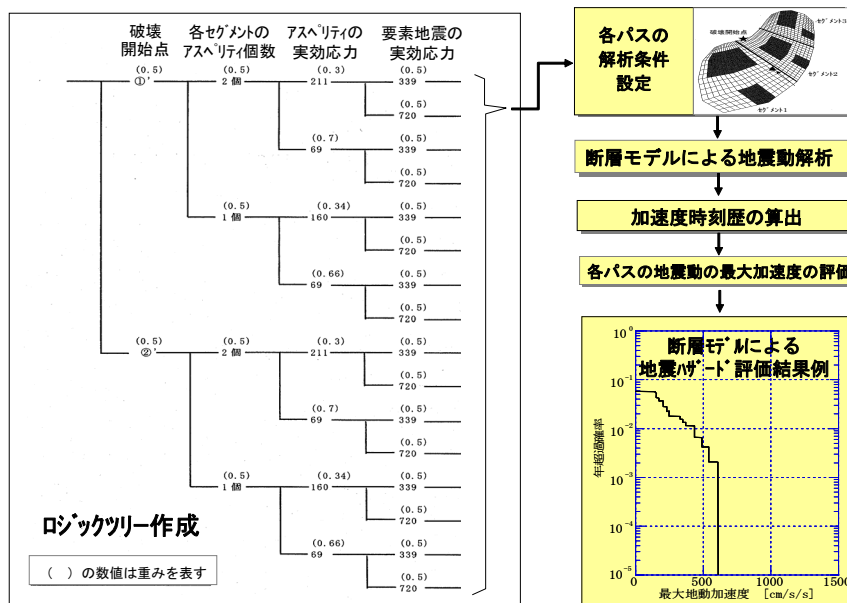


図 3.2.9 震源断層モデルを用いた地震ハザード評価の例

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。

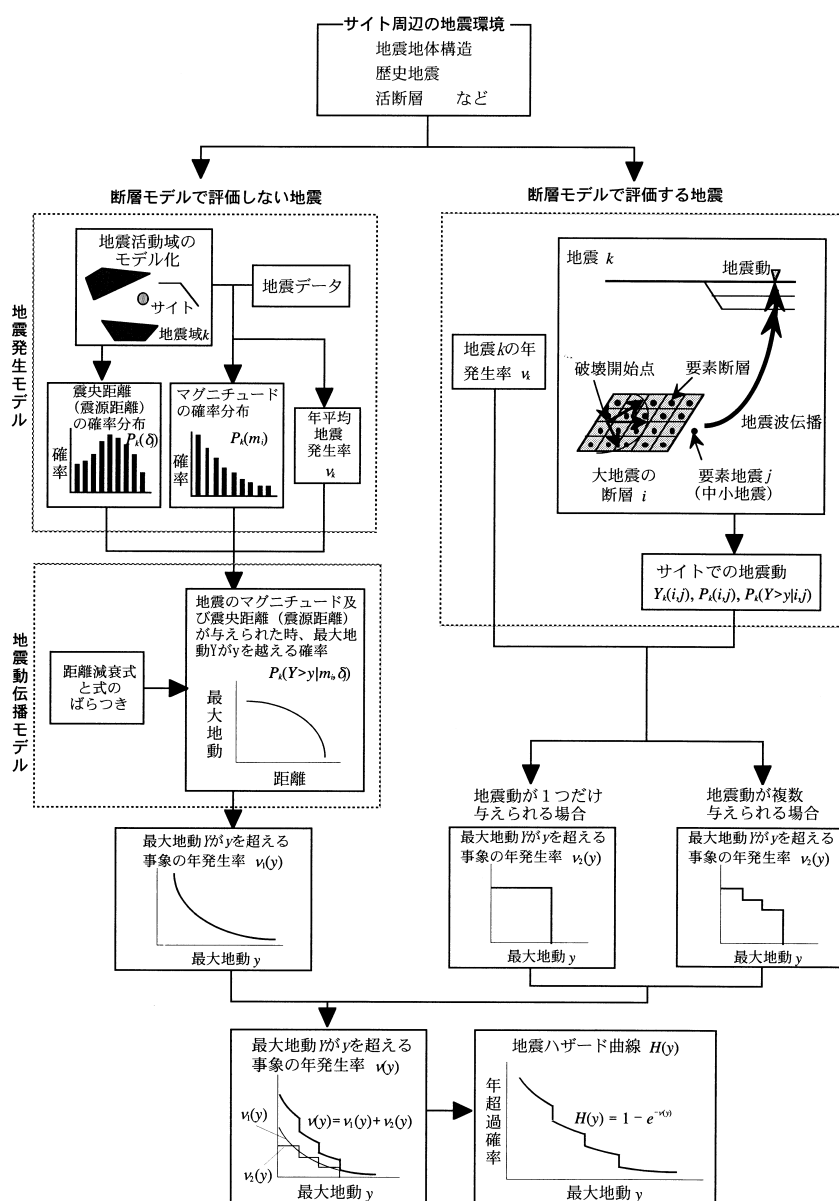


図 3.2.10 距離減衰式と震源断層モデルを用いた地震ハザードの組み合わせ手順

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月.
- 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

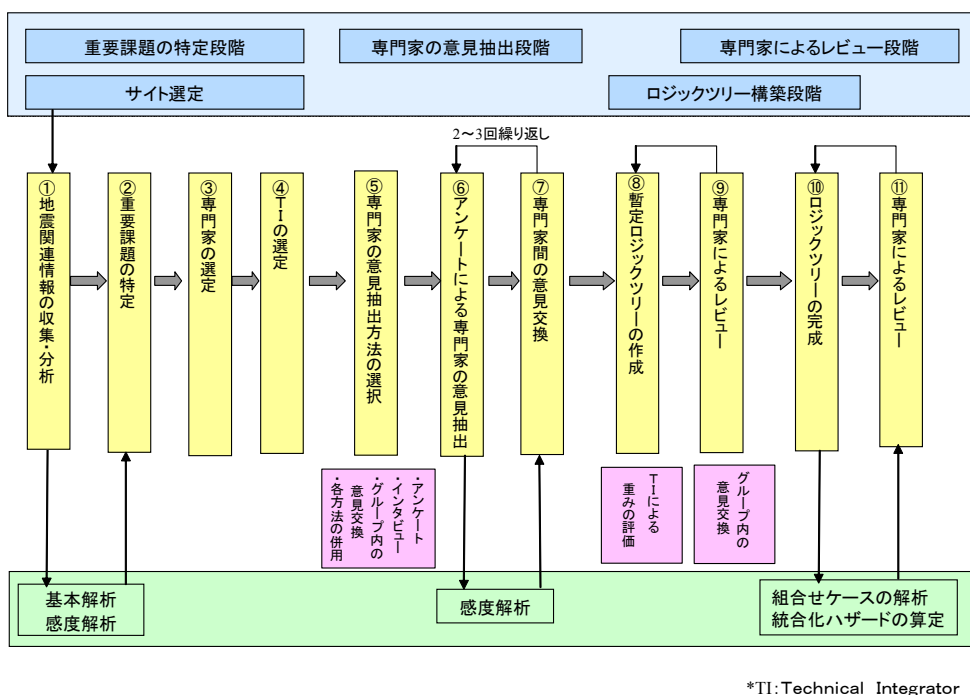


図 3.3.1 専門家意見の抽出・集約方法とロジックツリー作成手順

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

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

- ・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。

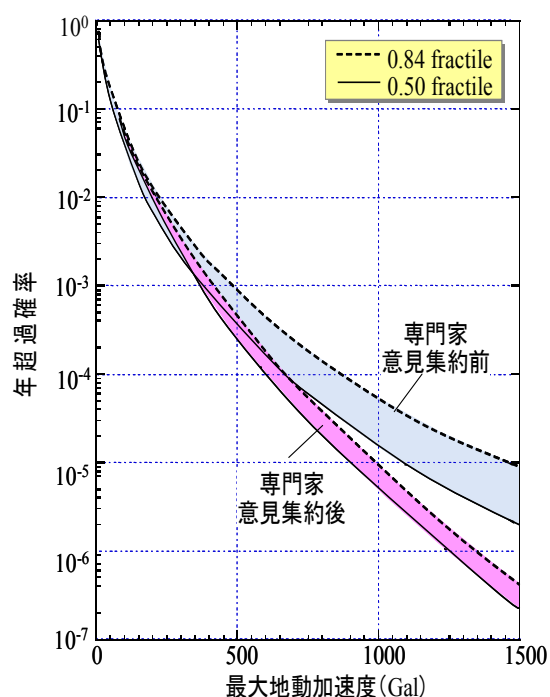


図 3.3.2 ロジックツリーを用いた地震ハザードの不確定性評価の例

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は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.