

モンテカルロ手法に基づく地震ハザード曲線の不確定性評価方法

東電設計（株）技術開発本部 正会員 安中 正
東京電力（株）電力技術研究所 正会員 嶋田 昌義、弘重 智彦

1. まえがき 地震動の評価過程には種々の不確定性が含まれる。確率論的地震ハザード解析では、一般に、不確定性を偶然的な不確定性と認識論的不確定性の2つに分けて考えており、偶然的な不確定性は1本の地震ハザード曲線の計算で考慮されるのに対し、認識論的不確定性は地震ハザード曲線群のばらつきとして評価される。地震ハザード解析結果を判断材料として用いる場合には、得られた結果だけではなく、その結果がどの程度安定したものであるかという評価も重要な判断材料になる。認識論的不確定性を評価する手法としてロジックツリー手法が用いられており、判断が分かれる事項（分岐）に関して複数の選択肢あるいは連続的な確率分布が設定される。不連続的な分岐に対しては将来の正しさの可能性に基づき重みが設定される。本研究では、不連続的な分岐だけでなく、連続的な確率分布に対しても柔軟に対応できる方法として、モンテカルロ手法に基づき必要な数の地震ハザード曲線のサンプルを自動的に発生させることにより、地震ハザード曲線の不確定性を評価する方法（プログラム）を開発した。本研究の基本的な考え方は Annaka and Yashiro (2000)に基づいているが、カスケードモデルに関する部分の検討は新たに行った。

2. モンテカルロ手法に基づくプログラムの基本的な流れ プログラムは、モンテカルロ手法に基づき、地震ハザード曲線の多数のサンプルを自動的に計算できるように作成されている。

1 地点を対象にしてn本の地震ハザード曲線を計算する流れは次の通りである。

- (1) 地震動推定モデルをn個発生する。これは全活動域に共通である。
- (2) 1つ1つの「単位活動域」の地震発生モデルをn個発生し、それぞれのモデルと(1)の地震動推定モデルを組み合わせてn本のハザード曲線を計算する。
- (3) 全活動域について(2)を行い、共通の地震動推定モデルでまとめてn個のファイルを作成する。
- (4) 活動域に関するより大きな分岐（例えば背景的地震発生活動域の複数の活動域区分）と重みに基づき、各ファイルから最終的に用いる活動域のハザード曲線を抽出し、それらの和として全体のハザード曲線を求める。各ファイルから1本の曲線が得られ、全体としてn本の地震ハザード曲線が得られる。活動域によっては、計算しても、最終的に用いない場合がある。
- (5) n本のハザード曲線から、サンプルとして重みは同じであることを考慮して、フラクタイルハザード曲線（パーセンタイルハザード曲線）を求める。

3. 地震動推定モデルの不確定性評価方法 地震動推定モデルで不確定性を考慮できるようにしたのは、式の形、地点補正係数、ばらつきの3つである。式の形については、複数の式と重みをデータとして与え、一様乱数に基づいて用いる式を選定する方法を用いている。断層面の大きさを考慮した距離として、最短距離と等価震源距離を用いることが可能である。地点補正係数の不確定性は、正規分布で連続的に表現し、標準偏差を与え、正規乱数に基づいて値を設定する方法を用いている。ばらつきは、マグニチュードに依らず一定にする場合とマグニチュードに依存する場合の2つの形を取り扱う形になっている。そして式の場合と同様に、複数の選択肢と重みをデータとして与え、一様乱数に基づいて用いるばらつきを選定する方法を用いている。

4. 地震発生モデルの不確定性評価方法 大地震発生活動域と背景的地震発生活動域に分けて不確定性を評価できる方法を開発した。大地震発生活動域の形状の不確定性は、単位となる長方形毎に、基準点の位置、傾斜角、走向、断層面の長さや幅の不確定性を正規分布の形で考慮できるようにしている。マグニチュード

キーワード：地震ハザード解析、不確定性、モンテカルロ手法、ロジックツリー、カスケードモデル

連絡先：〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 TEL:03-4464-5562 FAX:03-4464-5595 (安中 正)

頻度分布の不確定性では、固有地震のマグニチュード分布形状（一様、正規、指数）と分布幅に関する分岐、中央マグニチュードのばらつき、平均発生間隔とばらつきの誤差、最新発生時期の不確定性を考慮できるようにしている。背景的地震発生活動域では、活動域区分の不確定性（複数の対案）を考慮できるようにしている。また、Gutenberg-Richter 式（b 値モデル）により与えられるマグニチュード頻度分布では、マグニチュード 5.0 以上の地震の年発生数、b 値、最大マグニチュードについて不確定性を考慮している。

5. カスケードモデル（連動セグメント）に関する不確定性の考慮方法 評価方法の基本的な流れは以上の通りであるが、本研究ではさらに、複数のセグメントから構成されていて、地震毎に連動するセグメントの組み合わせが変化しているような場合についても不確定性の考慮方法を検討した。そうしたモデルを WGCEP(1995)はカスケードモデル(直列モデル)、小田切・島崎(2000)は連動セグメントモデルと呼んでいる。本研究では、セグメントが明確に区分される場合と区分は明確になっていないが各種のセグメントの組み合わせで多様な地震が発生すると考えられる長大活断層の場合を区別した。

セグメントが明確に区分される場合、各セグメントの破壊確率は各セグメントの平均破壊間隔とばらつき、最新活動時期から求められる。それをセグメントの組み合わせ毎の発生確率に「変換」する方法は色々考えられるが、現状では次の2つを選択できるようにしている。

方法の1つは、WGCEP(1995)による方法（方法1）であり、(i)マルチセグメント地震には過去の発生頻度の半分を与える（T 年間に n 回発生していれば $0.5n/T$ を与える）、(ii)シングルセグメント地震には発生期待値の半分を与える、(iii)残りの部分は地震数が最小になるように大きな地震を優先して配分するという手順で決定される。これに対する対案として、手順の2番目を(ii)シングルセグメントの地震には発生期待値に過去のシングルで破壊した確率をかけた値を与えるという方法（方法2）を設定した。房総沖、相模湾内、西相模湾断裂の組み合わせ毎の平均的な発生頻度を評価した例を表-1 に示す。

セグメント区分が明確になっていない長大活断層については、(i)セグメント毎にしか破壊しない（連動しない）場合、(ii)全体が常に同時に活動する場合、(iii)各種のセグメントの組み合わせで地震が発生する場合の3つの可能性を分岐として考慮できるようにしている。(iii)の場合は Gutenberg-Richter 式でマグニチュード分布を与えるようにしている。これは、小田切・島崎(2000)が、b 値 0.7 の Gutenberg-Richter 式で既往地震のマグニチュード分布が説明できることを示していることに基づいている。

6. あとがき モンテカルロ手法に基づき地震ハザード曲線の不確定性を評価する方法（プログラム）を開発した。本方法により任意の数の地震ハザード曲線を自動的にサンプルとして発生させることが可能である。特にカスケードモデル（連動セグメントモデル）の不確定性も考慮できるようにしたことが本研究の新しい特徴である。

参考文献 Annaka and Yashiro(2000) RISK Analysis II, WIT PRESS, 369-378. WGCEP(1995) BSSA, 85, 379-439. 小田切・島崎(2000) 地震, 53, 45-56.

表-1 カスケードモデル（連動セグメントモデル）における発生頻度（1000年当り）の設定例

セグメント	方法 1			方法 2		
	A 房総沖	B 相模湾	C 西相模湾断裂	A 房総沖	B 相模湾	C 西相模湾断裂
破壊頻度	0.80	4.54	13.70	0.8	4.54	13.70
単独破壊	0.00	2.27	11.43	0.00	0.00	9.16
A+B	0.00		—	0.00		—
B+C	—	1.47		—	3.74	
A+B+C	0.80			0.80		