（第26回地震工学研究発表会講演論文集（2001年８月））

モンテカルロ手法に基づく関東及び周辺地域に対する地震ハザード曲線の不確定性評価モデル

安中正[1]・嶋田昌義[2]・弘重智彦[3]

[1]正会員　理修　東電設計株式会社　技術開発本部　（〒110-0015　東京都台東区東上野 3-3-3）
[2]正会員　東京電力株式会社　電力技術研究所　（〒230-8510　神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1）
[3]工修　東京電力株式会社　電力技術研究所　（〒230-8510　神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1）

関東及び周辺地域を対象として、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モデルを作成した。不確定性評価モデルを用いることにより、対象地域の任意の点に対して、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。不確定性評価モデルは、大地震発生活動域に対するモデル、背景的地震発生活動域に対するモデル、地震動推定に関するモデルから構成されている。地震ハザード曲線の不確定性は基本的にロジックツリー手法により評価されるが、モンテカルロ手法を用いることにより、分岐が複数の選択肢から構成されている場合だけでなく、連続的な確率分布で与えられる場合にも柔軟に対応することが可能である。

***Key Words:** Seismic hazard analysis, uncertainty, Monte Carlo approach, logic tree*

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 [1)]。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。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である [2) 3)]。

本研究では、関東及び周辺地域を対象に、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モデルを作成した。またその際に、既往モデル[4)]の改訂版として、①1995 年兵庫県南部地震以後の国や地方自治体による活断層調査の成果を取り入れること、②より現実的な地震ハザード評価とするために地震活動の時間的変化（大地震の発生サイクル）を考慮できるようにすることも目標とした。

2.　大地震発生活動域に対するモデル

大地震発生活動域は、歴史地震データと活断層データに基づき設定した。歴史地震データに基づき設定した活動域の分布を図-1 に、活断層データに基づき設定した活動域の分布を図-2 に示す。これらの活動域について、活動域形状、マグニチュード頻度分布、カスケードモデル（連動セグメントモデル）の発生頻度の設定に関して不確定性を考慮した。

活動域は、長方形の組み合わせで表現しており、形状パラメータは基準点の位置、傾斜角、走向、断層面の長さと幅である。これらの内、基準点の位置と傾斜角の不確定性を正規分布で考慮した [3)]。基準点位置の誤差の標準偏差は、図-1 の場合が面走向方向と面傾斜方向で 10km、面垂直方向で 2.5km、図-2 の場合が断層線走向方向で 5km、走向直交方向で 2.5km を基本とした。また、傾斜角の誤差の標準偏差は、図-2 の傾斜を考慮している断層で 15°を基本とした。

マグニチュード頻度分布は、固有地震モデルに基づいて設定しており、パラメータは分布形状、中央マグニチュード、発生間隔の平均とばらつき、最新発生年である。大地震の発生サイクルのモデル化には対数正規分布を用いた [5)]。

分布形状は、マグニチュード幅を 0.5 に固定し、一様分布と打ち切りのある正規分布の２つを分岐（重みは同じ）とした。中央マグニチュードは、打ち切りのある正規分布で連続的に表現し、標準偏差を 0.1、打ち切り範囲を±0.2 とした。発生間隔の平均の誤差とばらつきの誤差は、正規分布で連続的に表現した。平均発生間隔の誤差の標準偏差はデータの信頼度により 0.1～0.3 の範囲で設定した。ばらつきの誤差の標準偏差は基本的に 0.05 とした。最新発生年が範囲で与えられている場合は、現在まで地震

が発生していない確率を重みとして確率分布を設定した。図-2の活動域で平均発生間隔に関するデータがない場合は断層の活動度に基づき設定した[5]。

カスケードモデルとしてモデル化したのは、図-1の中の宮城県沖（陸寄り、海溝寄り）、相模トラフ沿い（房総沖、相模湾、西相模湾断裂）、南海トラフ沿い（図示していない南海道の2セグメントを含めた4セグメント）、図-2の糸静線を始めとした18活断層であり、セグメントが単独で破壊する場合と複数のセグメントが同時に破壊する場合を考慮した。ただし、セグメント区分が明確な場合（9個）と明確になっていない場合（12個）ではモデル化の方法を変えており、前者に対しては各セグメントの破壊確率からセグメントの組み合わせ毎の発生確率に変換する方法を分岐とし（2つの方法で重みは同じ）、後者に対しては全体としてのマグニチュード分布形（最大5個）を分岐とした[6]。図-1の場合、複数セグメント地震の気象庁マグニチュードは、単独セグメント地震の地震モーメントの和から求めたモーメントマグニチュードに基づき、2つのマグニチュード間の関係を考慮して設定した。その際、気象庁マグニチュードの上限を8.3とした。

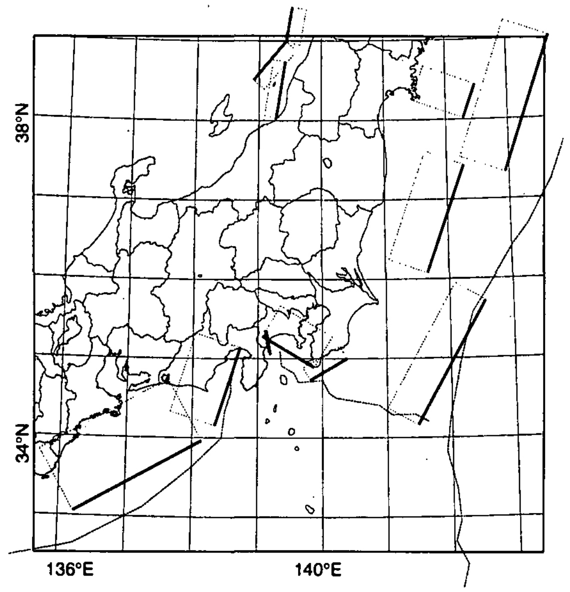

図-1　歴史地震に基づく大地震発生活動域の分布

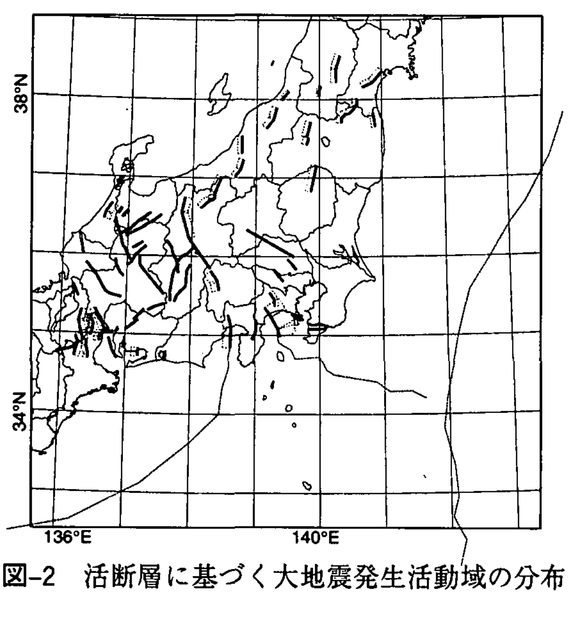

図-2　活断層に基づく大地震発生活動域の分布

以上の項目以外に分岐を設定したのは、南海トラフの駿河湾セグメントの平均破壊間隔が他のセグメントと同じ120年の場合と、他のセグメントよりも長い180年の場合を分岐としたこと、相模トラフ沿いの大地震に関係した鴨川低地断層帯、三浦半島断層群、神縄・国府津-松田断層帯、駿河トラフ沿いの大地震に関係した富士川河口断層帯が、大地震と独立に発生するとした場合と、必ず大地震に連動して発生するとした場合を分岐としたことである。

3. 背景的地震発生活動域に対するモデル

背景的地震発生活動域は、大地震発生活動域でモデル化した地震以外の中小地震が発生する活動域であり、大陸プレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートの上面に沿って連続的に設定した。その際に活動域の区分を分岐とし、サイスモテクトニクス（地震地体構造）や地震活動度の変化に基づいた区分（地体構造区分モデル）と機械的な区分（機械的区分モデル）を分岐として設定した。

(1) 地体構造区分モデル

地震活動の特徴等を考慮して設定した大陸プレート地殻内活動域、太平洋プレート上面付近活動域、フィリピン海プレート上面付近活動域の区分とマグニチュード頻度分布の評価に用いた1885年1月から2000年3月までのマグニチュード5.0以上の地震分布を図-3～図-5に示す。

各図の地震分布は、最初に地震データの中から独立でない地震を取り除き、次に大地震発生活動域の地震としてモデル化されているものを除き、最後に残りを大陸プレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートの活動に分離した結果である。独立でない地震（本震－余震系列及び群発地震系列）の識別には、「空間的な近接度」と「時間的な近接度」の積で評価する方法を用いた。

「空間的な近接度」は、地震間の距離が0kmの時に1.0、距離が断層長さの2.0倍以上で0.0とし、その間は距離に対して線形で補完した。「時間的な近接度」は、時間差が0.0日の時に1.0、t日以上で0.0とした。tはマグニチュードの関数とし、マグニチュード6.0以下でt=30日、マグニチュード7.5以上で365日とし、その間はマグニチュードに対して線形で補完した。地震系列であるかどうかを判断する基準値は、試行錯誤の結果、余震に関しては0.1以上、前震に関しては0.5以上とした。

区分された各活動域のマグニチュード頻度分布は、上限を有するGutenberg-Richter式（b値モデル）に基づき設定した。パラメータはマグニチュード5.0以上の地震の年発生数、b値、最大マグニチュードであり、地震の年発生数とb値の不確定性は正規分布により、最大マグニチュードの不確定性は打ち切

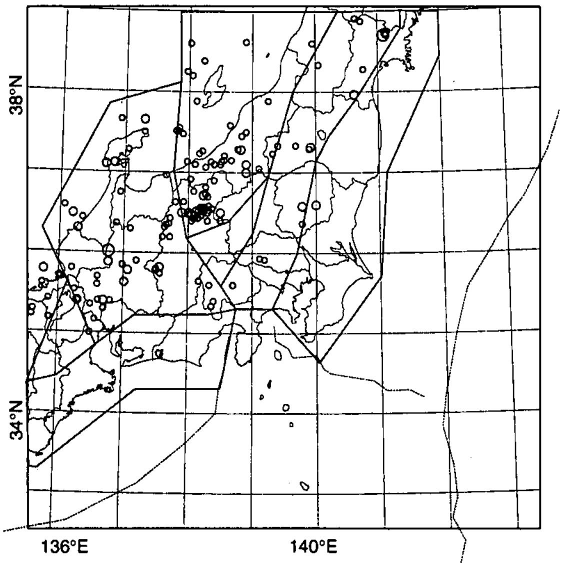

図-3　大陸プレート地殻内活動域の区分

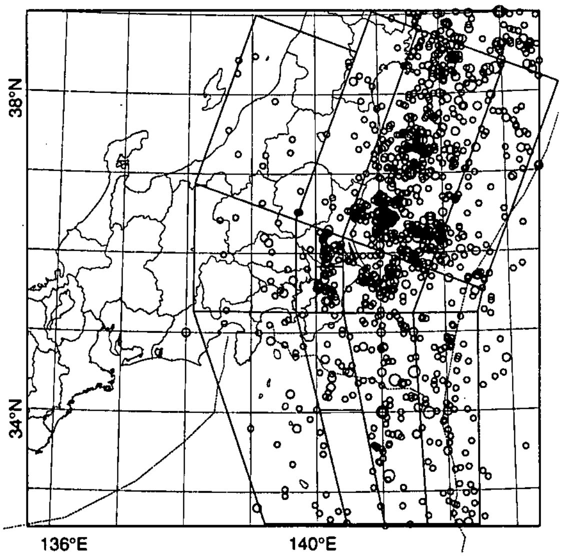

図-4　太平洋プレート上面付近活動域の区分

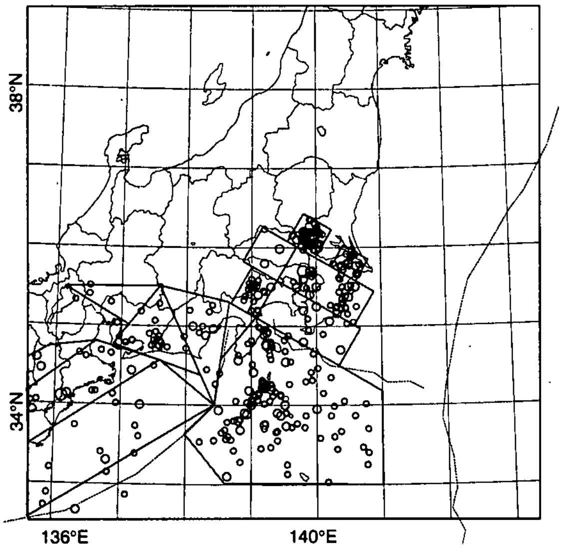

図-5　フィリピン海プレート上面付近活動域の区分

りのある正規分布で連続的に表現した[3)]。

マグニチュード頻度分布の中央値は、マグニチュード6.0以上の地震については1885～2000年のデータを用い、マグニチュード5.0～5.9の地震については1926～2000年のデータを用い、両者を結合して求めた。マグニチュード頻度分布のゆらぎ（地震数の標準偏差）は、ポアソン過程として評価した。

(2)　機械的区分モデル

機械的区分モデルによる大陸プレート地殻内活動域の区分とマグニチュード頻度分布の評価に用いた地震分布を図-6に示す。図-6の単位格子の大きさは30km×30kmであり、これを4個あわせた60km×60kmを1つの単位活動域とした。4個の組み合わせは4通りあり、区分分割として4ケース設定した。分岐の重みは、地体構造区分モデルを0.5、機械的区分モデルを0.5（4×0.125）とした。太平洋プレート上面付近活動域とフィリピン海プレート上面付近活動域の機械的区分モデルも同様に設定した。

単位活動域における地震の年発生数は、地震分布を直接用い、地震数を平滑化して求めた。活動域の深さは活動域の中央位置でのプレート上面の深さに基づき設定し、最大マグニチュードはその活動域の中央の点が含まれる地体構造区分モデルの値を用いた。また、b値も地体構造区分モデルの区分に基づいて機械的に割り振った。

4.　地震動推定に関する不確定性評価モデル

地震動推定では、推定式、地点補正係数、ばらつきについて不確定性を考慮した[3)]。

推定式は、気象庁87型強震計記録に基づく最短距離式と等価震源距離式[7)]を分岐とした。この2つの距離は断層面の大きさを考慮できる距離として用いられている。

地点補正係数の不確定性は正規分布で表現した。不確定性は、対象地点で観測記録がなければ大きく、

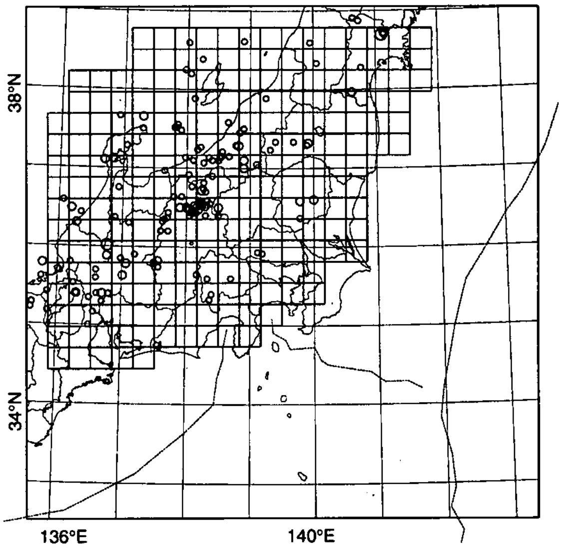

図-6　機械的区分モデルにおける区分

観測記録があれば小さくなると考えられる。

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つのモデルを分岐（重みは同じ）として設定し、ばらつきの値の不確定性は正規分布で表現した。

5. 地震ハザード曲線の不確定性の評価例

東京地点（35.67° N, 139.76° E）を対象として地震ハザード曲線の不確定性を評価した。プログラムは、モンテカルロ手法に基づき、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[6]。地点補正係数の不確定性はなしとした。

ポアソンを仮定した長期間の平均的な場合について、200 本のハザード曲線のサンプルを作成した結果を図-7 に、それを統計処理してフラクタイル（パーセンタイル）ハザード曲線の形にした結果を図-8 に、2001 年から 30 年間におけるフラクタイルハザード曲線を図-9 に示す。最大加速度が大きくなるとハザード曲線の不確定性が大きくなっている。また、相模トラフ沿いの大地震発生の可能性が当面低いことを反映して、長期間の平均的な場合に比べ 2001 年から 30 年間の場合のハザードが低くなっている。

6. あとがき

本研究で提案したモデルにより、対象地域の任意の点に対して、地震ハザード曲線の不確定性を容易に評価することが可能である。リスク解析など地震ハザードを用いて得られた結果を実際の判断材料として活用する際には、地震ハザードの不確定性も重要な判断要素になると考えられる。今後、そうした方向での活用が期待される。

参考文献

1) Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC): Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts, U.S. Nuclear Regulatory Commission, *NUREG/CR-6372*, Washington, DC., 1997.
2) Cramer, C. H., Petersen, M. D. and Reichle, M. S.: A Monte Carlo approach in estimating uncertainty for a seismic hazard assessment of Los Angels, Ventura and Orange counties, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, pp. 1681-1691, 1996.
3) Annaka, T. and H. Yashiro: Uncertainties in a probabilistic model for seismic hazard analysis in Japan, *Risk Analysis II*, WITPRESS, Boston, pp.369-378,2000.
4) Annaka, T and Y. Nozawa: A probabilistic model for seismic hazard estimation in The Kanto district, *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, II, pp.107～112, 1988.
5) 安中正, 矢代晴実: 大地震の発生サイクルを考慮した日本列島の地震危険度解析モデル, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.489-494, 1998.
6) 安中正, 嶋田昌義, 弘重智彦: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, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 2001.
7) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会論文集, pp.161-164, 1997.

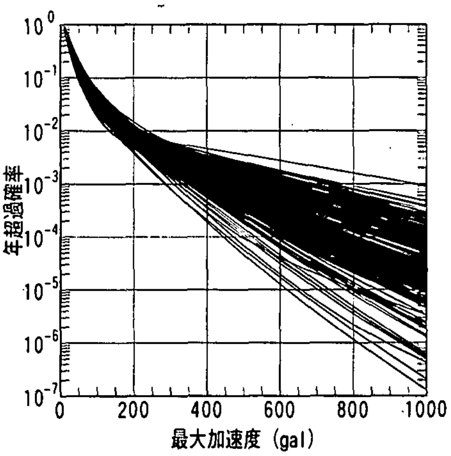

図-7 地震ハザード曲線のサンプル例

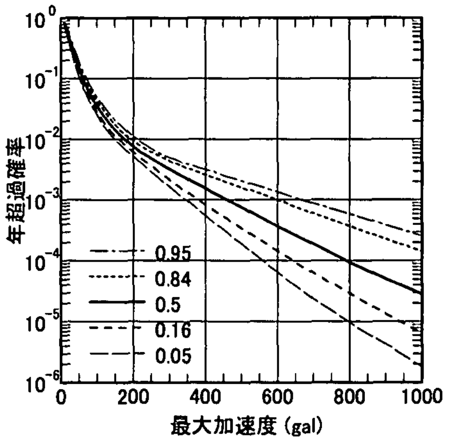

図-8 長期平均（ポアソン）の場合の東京のフラクタイルハザード曲線

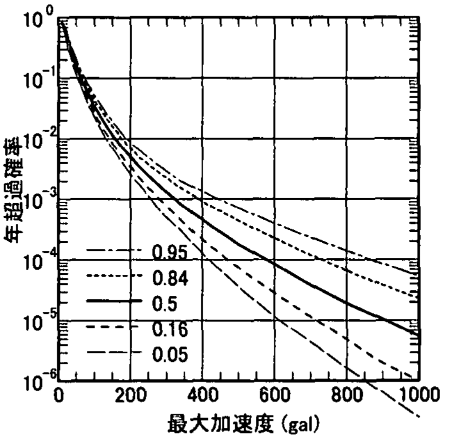

図-9 2001 年から 30 年間における東京のフラクタイルハザード曲線