

日本における確率論的津波ハザード解析法の開発

酒井俊朗、武田智吉、曾良岡宏、柳沢賢

東京電力株式会社、原子力技術・品質安全部

100-8560 日本国東京都千代田区内幸町1丁目1-3

安中正

東電設計株式会社

110-0015 日本国東京都台東区東上野3丁目3-3

要旨

津波評価では、耐震設計と同様に、設計基準を超える現象を評価することが有意義である。なぜなら、設計基準の津波高さを設定したとしても、津波という現象に関しては不確かさがあるため、依然として、津波高さが、設定した設計津波高さを超過する可能性があるからである。

確率論的津波リスク評価は、津波ハザードおよび構造物の脆弱性の推定とシステム解析の実行で構成される。本稿では、確率論的津波ハザード解析(PTHA)の手法を適用している。津波ハザード曲線(津波高さと超過確率の関係)を推定するためにロジックツリー手法を取り入れ、日本についての例を紹介する。津波ハザード曲線の例を示し、津波ハザードにおける不確かさを、5、16、50、84、95パーセントイル曲線および平均ハザード曲線で表す。PTHA

の結果は、沿岸地域に立地する重要施設の津波リスクを定量的に評価するために用いられることになるであろう。

津波ハザード曲線は、構造物解析やシステム解析の合理的な入力データである。ただし、構造物の脆弱性の推定法およびシステム解析の手順については現在開発されている途上である。

1. 緒言

津波評価では設計基準を超える現象を評価することが有意義である。なぜなら、設計基準の津波高さを設定したとしても、津波という現象に関しては不確かさがあるため、依然として、津波高さが、設定した設計津波高さを超過する可能性があるからである。確率論的リスク評価(PRA)が有効な手が

かりを与えることは明らかである。

確率論的地震ハザード解析 (PSHA) の方が確率論的津波ハザード解析 (PTHA) と比べてはるかに一般的である。PSHA とは、地震発生の確率論的モデルと地震に起因する地震動を組み合わせることにより、所与の未来の時間枠において所与の場所で地震動が特定のレベルを超過する確率を推定する手法のことである (WGCEP, 2002[1]; Power et al., 2005[2])。PSHA は PTHA の評価について有益な資料を与えてくれる。

確率論的津波リスク評価 (PTRA) は、津波ハザードおよび構造物の脆弱性の推定とシステム解析の実行で構成される。Annaka et al. (2005) [3]は、津波ハザード曲線 (津波高さと超過確率の関係) を推定するためにロジックツリー法 (Pacific Gas and Electric Company, 1988[4]など) を取り入れた確率論的津波ハザード解析 (PTHA) 法を提案した。

本稿の目的は、PSHA 分野のこれまでの成果を踏まえて、日本に確率論的津波ハザード解析 (PTHA) 法を適用してみることにある。本稿では、例として用いる対象地点として、日本の東北地方にある福島県の沿岸を選定した。

PTHA の結果は、沿岸地域に立地する重要施設の津波リスクを定量的に評価するために用いられることになるであろう。津波ハザード曲線は、構造物解析やシステム解析の合理的な入力データである。

2. 手法の概要

津波ハザード曲線を推定する確率論的モデルは、津波波源モデルと津波高さ推定モデルで構成される。ロジックツリーモデルは有効な推定手段である (Annaka et al.)。このモデルは津波波源域、津波を発生させる地震の規模と頻度、数値解析に用いる断層モデル、そして推定津波高さの標準誤差で構成される。津波高さの中央値の推定には、経験的關係ではなく数値解析を用いた。

自然現象における不確かさを考えるにあつ

ては、偶然的な不確定性と認識論的な不確定性の 2 種類の不確かさが区別される。偶然的な不確定性とは、地震発生とその影響のランダム性によるものである。認識論的な不確定性とは、地震プロセスに関する知識やデータの不十分さによるものである。ハザード曲線は、偶然的な不確定性の統合により求められる。また、ロジックツリー法を用いて認識論的な不確かさを示したモデルパラメータの組み合わせにより、多数のハザード曲線が求められる。

仮説や解釈の選択肢を示す離散的な分岐の重みは質問形式による調査により決定し、推定値の誤差の選択肢を示す離散的な分岐の重みは誤差評価に基づき決定する。津波ハザード曲線の例を示し、津波ハザードにおける不確かさを、5、16、50、84、95 パーセントイル曲線および平均ハザード曲線で表す。

3. ロジックツリー法

津波ハザードの不確かさを評価するためにロジックツリー法を用いる。PSHA で自然現象に伴う不確かさを考えるにあたっては、一般に、偶然的な不確定性と認識論的な不確定性の 2 種類の不確かさが区別される。偶然的な不確定性とは、地震発生とその影響のランダム性によるものである。認識論的な不確定性とは、地震プロセスに関する知識やデータの不十分さによるものである。ハザード曲線は、偶然的な不確定性の統合により求められる。また、ロジックツリー法を用いて認識論的な不確定性を示したモデルパラメータの組み合わせにより、多数のハザード曲線が求められる。

図1に、本稿で用いたロジックツリーの概略を示す。本ロジックツリーの分岐項目は、津波波源の組み合わせ、津波を発生させる地震のマグニチュード分布、それらの再来間隔、および数値解析に基づく津波高さ推定法と定義した。

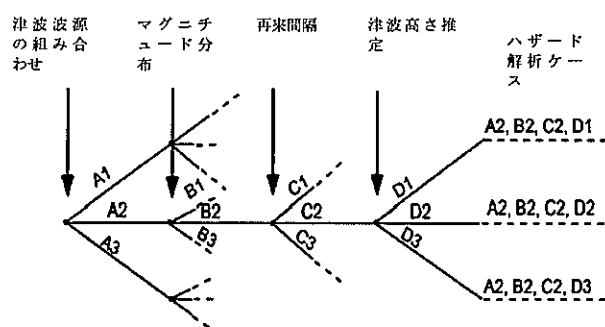


図1 不確かなパラメータのロジックツリー化

4. 津波波源モデル

4.1 対象津波波源の選定

日本列島は主にユーラシアプレートとオホーツクプレートの上にある。太平洋プレートとフィリピン海プレートは日本列島の下にそれぞれ西北西方向、北西方向に沈み込んでいる。日本およびその周辺で起きる地震活動は、この4つのプレートの相互作用により支配される。

津波波源域仮定のためのセグメント区分は地震地体構造の考えに基づき行った。日本列島およびその周辺域について、様々な視点に基づく地震地体構造を示す様々なセグメント区分図が提案されている。広く使われている区分図の一つに、Hagiwara (1991) [5]による地震地体構造のセグメント区分図がある。これは全海域を網羅しており、津波評価に用いることができる。Hagiwara (1991)による地震地体構造のセグメント区分図は、地形学的、地質学的、地球物理学的類似性に基づき、比較的大きく地質構造の区分を取って編纂されている。本稿では、海溝沿いの津波波源だけではなく、大陸プレートの内陸浅発地震も検討する。

海溝域、すなわちプレート境界については、波源の位置を特定することができる。図2に示す日本の東北地方沿岸の津波波源域は、主に大津波を起こした歴史的な大地震の断層モデルから特定した

(Tsunami Evaluation Subcommittee, Submitting [6])。

福島県沿岸の評価については、その位置とマグニチュードから、JTT系列、JTNR系列、JTS1、JTN2、およびJTN3が支配的となる。したがって、本稿では、JTT系列、JTNR系列、JTS1、JTN2、およびJTN3を近地津波の波源域として考慮する。環太平洋の遠地津波の波源の中からは、津波発生時に日本の東北地方沿岸での影響が顕著なものとして、図3に示す津波波源域を選定した。

4.2 プレート境界の条件設定

津波波源域の組み合わせおよび各波源域における地震の規模と頻度の組み合わせについてロジックツリーモデルを作成した。本ロジックツリーの分岐項目について、いくつかの例を下記に示す。

関与する波源域の組み合わせの分岐の一例を図4に示す。JTT系列における既往津波はJTT1とJTT3においてのみわかっており、JTT1の既往津波が1896年の明治三陸津波、JTT3の既往津波が1677年の延宝房総津波である。JTT系列はいずれも似通った沈み込み状態に沿って位置しているため、日本海溝沿いのすべてのJTT系列において津波地震が発生すると仮定してもよいのかもしれない。他方では、JTT2では既往津波が確認されていないことから、津波地震はJTT1とJTT3のみで発生すると仮定してもよいのかもしれない。沈み込みによるひずみは、JTS1、JTN2、JTN3の活動により吸収されるとも考えられる。したがって、図4に示す分岐を検討する。各津波波源域においては、固有の津波を発生させる地震が繰り返し発生すると仮定する。各地震イベントのマグニチュードは異なると考えられる。本稿では、マグニチュードのバンド幅は0.5または0.3と仮定する。モーメントマグニチュード (M_w) は津波発生に最も適切であると考えられることから、この尺度を使用する。各領域における既往最大 M_w を表1に示す。マグニチュード範囲に関する分岐の例を図5に示す。JTT1における既往津波の最大マグニチュードは1896年の明治三陸津波の $M_w=8.3$ である。しかし、既往

最大MwがJTT1における潜在的な最大Mwではない可能性がある。その可能性を取り入れるため、分岐(a)と分岐(b)を設定した。既往最大Mwが8.3だったことから、本稿では、潜在的な最大マグニチュードはMw=8.5と仮定する。

現時点における津波ハザードを評価するために、BPT (Brownian Passage Time) 分布を用いて再来間隔をモデル化する (Ellsworth et al., 1999 [7])。固有地震のマグニチュード-頻度関係の分布には、一様分布を用いた。再来間隔の分岐の一例を図6に示す。この例においては、1611年の慶長三陸津波を逆断層によるものと仮定する。JTNR1における既往津波は1896年の明治三陸津波と1611年の慶長三陸津波である。過去400年にわたる記録がそろっているとの前提で、これら津波の間隔は285年となる。ここで、再来間隔の分岐は210年、285年、380年と設定できる。

表1 既往最大Mw

		既往最大 Mw	津波発生年
近地 津波	JTT1	8.3	1896
	JTT2	過去の記録なし。JTT1 と同じ Mw と仮定される。	
	JTT3	過去の記録なし。JTT1 と同じ Mw と仮定される。	
	JTNR1	8.6	1611
	JTNR2	過去の記録なし。JTNR1 と同じ Mw と仮定される。	
	JTNR3	8.2	1677
	JTS1	7.9	1938
	JTN2	7.7	1978
	JTN3	8.2	1793
遠地 津波	P1	9.0	1868
	C1	8.8	1877
	C2	9.3	1960

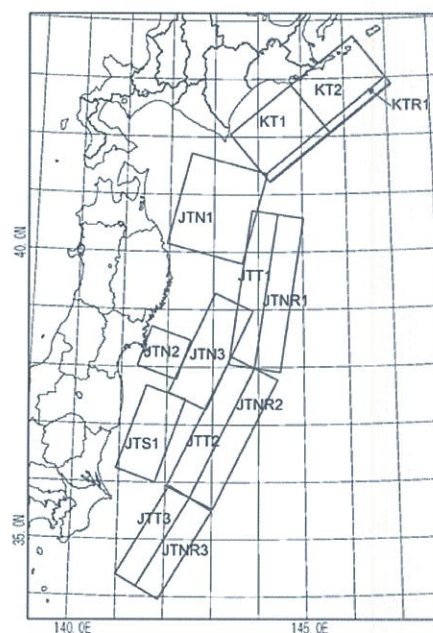


図2 近地津波波源域の分布

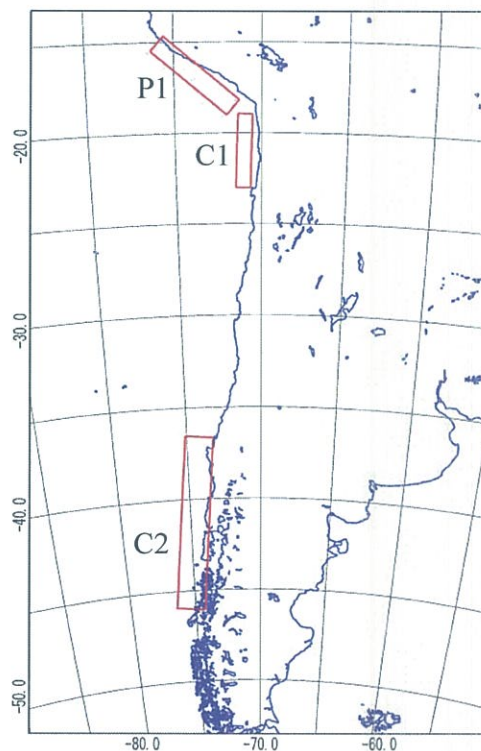


図3 遠地津波波源域の分布

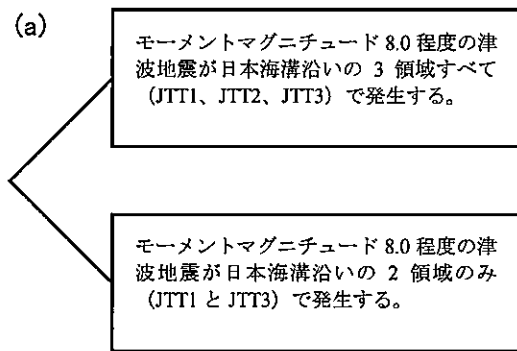


図4 津波波源の組み合わせに関する分岐項目の例

4.3 内陸地震の条件設定

海岸沿いの浅い海域における津波を起こす浅発地殻内地震については、津波波源の位置特定は難しい。よって、図7に示す福島県沿岸の津波波源域は、Hagiwara (1990) に基づき設定した。津波波源はこの領域の内のどこにでもありと仮定し、最大 M_w は 6.6 と設定する。図7における $M_w=6.6$ の津波波源の分布を用いて津波高さの推定を行った。

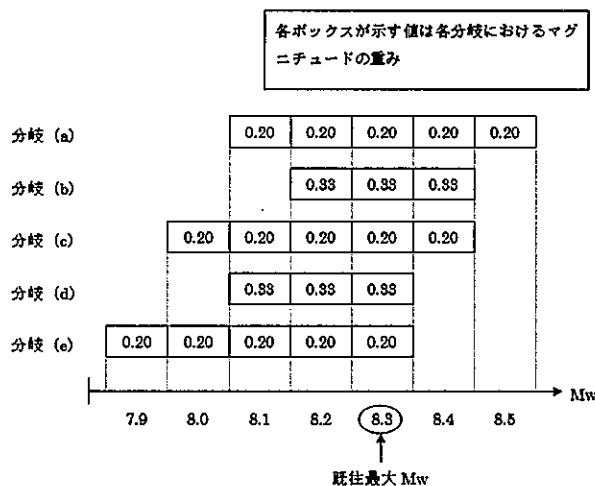


図5 JTT1におけるマグニチュード分布に関する分岐項目の例

5. 津波高さ推定モデル

津波高さの中央値推定には経験的關係性よりも数値解析の方が適しているであろう。数値解析に用いる断層モデルは、既往の津波を起こした地震の

最適な断層モデルからスケーリング則により決定した。日本海溝および千島海溝南部沿いの海域における津波の遡上高さデータから津波を再現する最適な断層モデルを決定することができる (Yanagisawa et al., 2005 [8])。

津波高さ推定のロジックツリーを図8に示す。数値解析には2つの手法、手法1と手法2を用いた。手法1では、所与の位置とマグニチュードについて1つの断層モデル (基準断層モデル) を用いた。手法2では、基準断層モデルにおける走向などの各パラメータの変動性を考慮した複数の断層モデルを用いた。中央値付近の津波高さの分布は対数正規を仮定した。対数正規分布の標準偏差に関する分岐として、4つの値を選定した。パラメータ β は、日本で Aida の κ と呼ばれる値と $\kappa = \exp(\beta)$ の関係がある (Aida, 1978 [9])。対数正規分布は $\pm 2.3\beta$ または $\pm 10\beta$ (実際上は打ち切りなし) で打ち切る。

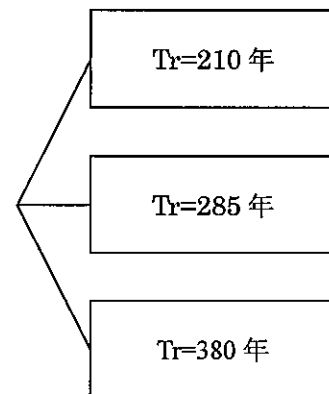


図6 JTNR1における再来間隔に関する分岐項目の例

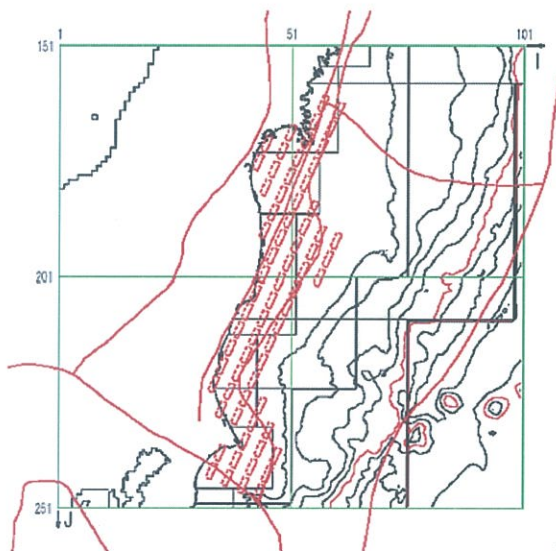


図7 大陸プレート内の津波波源域分布（線は Hagiwara (1990) による定義）

6. 津波ハザード計算

以上の津波波源モデルと津波高さ推定モデルを組み合わせると、津波ハザード曲線を計算することができる。長期の定常的な津波ハザードと現時点における津波ハザードを評価する。長期の定常的な津波ハザードの評価では、ポアソン過程を仮定する。一般的に、現時点における津波ハザードの評価では、経時的なモデルにより、津波波源域を2つのグループに分ける。一方はBPT分布を用いてモデル化し、もう一方はポアソン過程を用いてモデル化する。津波ハザードにおける不確かさは、フラクタイル（分位数）ハザード曲線で示す。各フラクタイル値の確率レベルは累積重み曲線により算定することができる。

各ハザード曲線の重みは、ロジックツリーの分岐項目すべての重みの積により与えられる。離散的分岐の重み（確率）は、仮説や解釈の選択肢を表す。本稿における重みは暫定的に評価されたものである。特定の重要施設に関する津波ハザードを評価するためには、津波や地震の専門家の質問形式による調査と専門家の意見が引き出され解釈されるような方法により、さらに慎重に重み付けがなされるべきであ

る。

潮汐のばらつきは、津波高さ分布への畳み込みにより計算に反映する。

7. 津波ハザード曲線

例として用いる福島の前点における津波ハザード曲線を評価する。津波ハザードにおける不確かさを、0.05、0.16、0.50、0.84、0.95 フラクタイルハザード曲線および平均ハザード曲線で表した。近地および遠地の津波波源の数値津波解析ケースはそれぞれ、約1,000と約75であった。

図9 (a) に、近地および遠地の津波波源から得られた長期の定常的なフラクタイルハザード曲線と平均ハザード曲線を示す。また、近地のみおよび遠地のみの津波波源から得られた曲線を、図9 (b) と9 (c) にそれぞれ示す。図9 (d) には、現時点における今後50年の津波ハザードを示す。今後50年の確率レベルと長期の確率レベルは、今般、例として用いる地点においてはほぼ等しかった。

8. 結言

津波ハザード曲線は、構造物解析やシステム解析の合理的な入力データである。ただし、構造物の脆弱性の推定法およびシステム解析の手順については現在開発されている途上である。著者らはまた、津波ハザードを合理的に説明することができるよう研究を続けている。

確率論的ハザード解析は、地震ハザード解析において広く活用されているが、津波ハザードにはめったに使われない。著者らは津波ハザード曲線（津波高さと超過確率の関係）を推定するためにロジックツリー法を適用し、日本についての例を紹介した。

[謝辞、参考文献は省略]

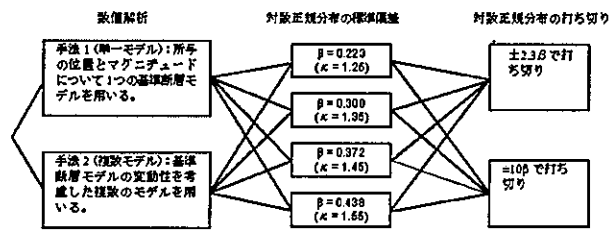
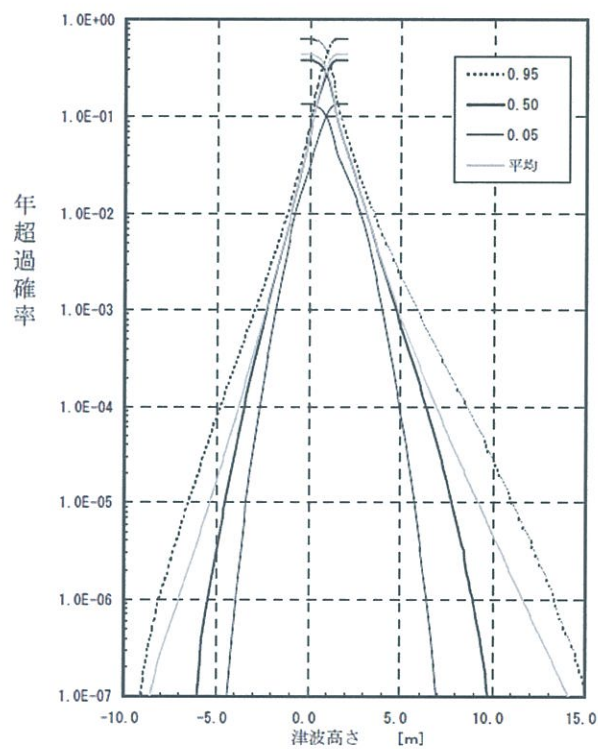
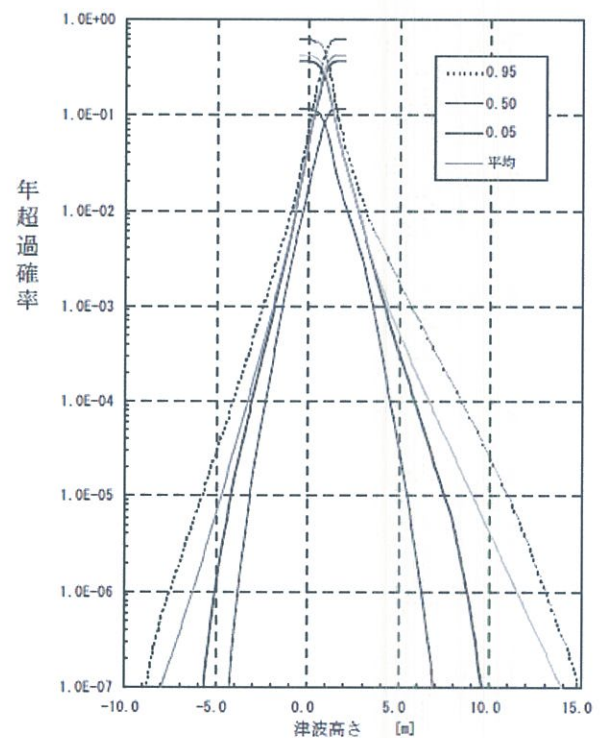


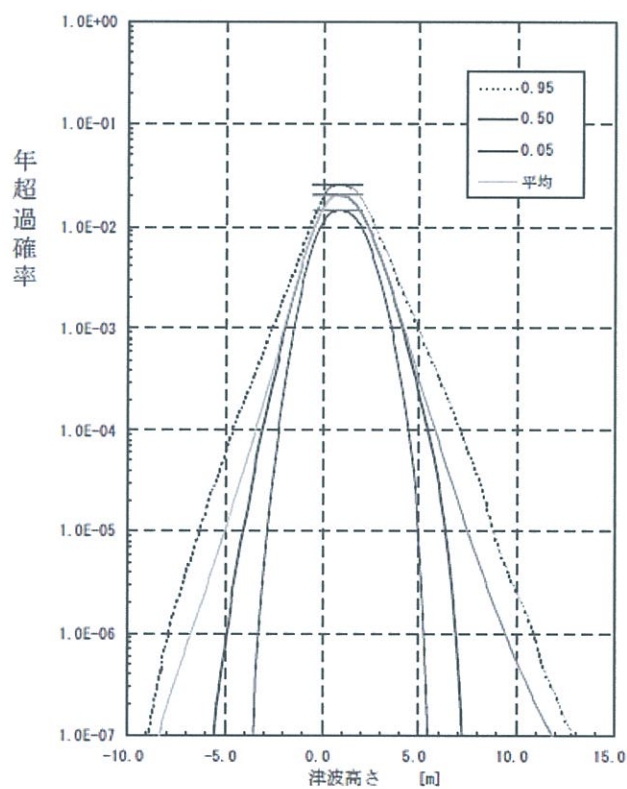
図8 津波高さ推定ロジックツリーの分岐項目



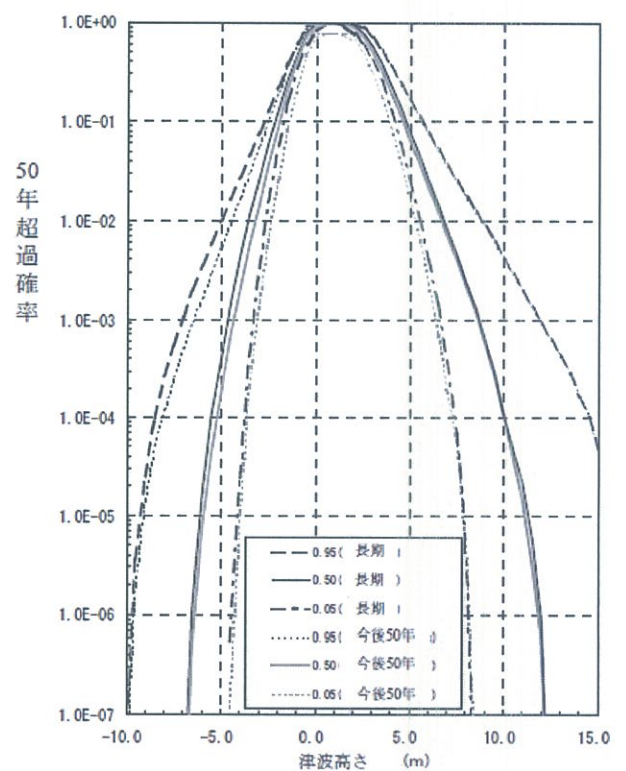
(a) 長期：近地+遠地



(b) 長期：近地



(c) 長期：遠地



(d) 長期と今後50年におけるフラクティルハザード曲線の比較

図9 確率論的津波ハザード解析の例