

JAERI-Research
2002-009



JP0250190



確率論的地震危険度評価に基づく
設計用想定地震の設定法

2002年3月

廣瀬 次郎・村松 健・奥村 俊彦*・瀧 諭*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

確率論的地震危険度評価に基づく設計用想定地震の設定法

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター原子炉安全工学部
廣瀬 次郎・村松 健・奥村 俊彦*・瀧 諭*

(2002年2月15日受理)

本報告書は、原研が実施してきた確率論的地震危険度評価に基づく設計用想定地震の設定法に関する研究成果をまとめたものである。

近年、米国原子力規制委員会や我が国の亀田、石川等により、地震に対する確率論的安全性評価手法（Seismic Probabilistic Safety Assessment: 地震 PSA）を構成する評価項目の1つである確率論的地震危険度解析（Probabilistic Seismic Hazard Analysis: PSHA）を拡張し、将来サイトに影響を及ぼす可能性のある地震の諸元（規模、距離）および地震動を評価する手法が提案されている。この手法では、確率論的地震危険度曲線上において与えた年超過確率に対する地震動強さ以上の地震動を生じさせる地震の集合から、発生確率が支配的となる地震諸元を設定する。このようにして設定される地震を確率論的想定地震(Probability-based Scenario Earthquakes: PBSEs)と呼ぶ。

本研究は、確率論的想定地震の概念に基づいて、その概念を定式化し国内サイトを対象とした想定地震の設定法を検討することと、そのことを通じて、耐震設計への有用性の見通しを得ることを目的とした。このため、①確率論的想定地震を設定するために必要な地震活動や地震動伝播特性等に関する評価手順の検討、②石川らの概念に基づくモデルサイトに対する想定地震設定に関する検討、③評価条件の不確実さに対する評価法の検討の計3項目に関する検討を行なった。

石川らの概念に基づいた確率論的想定地震設定法を検討した結果、以下のような研究成果が得られた。(a)想定地震は、与えた参照確率に対する地震諸元（規模、最短距離）として表現されるので、地震応答スペクトル形状など設計上考慮すべき地震に対する具体的な地震像の理解が得られ易い。(b)また与えた参照確率に対して、貢献度によって表される個々の地震がサイトに及ぼす寄与の程度によって、異なる特性の複数の想定地震が選定される。(c)評価条件の設定には多くの不確実さが含まれるので、多岐にわたる観点からの感度解析の結果、設計用想定地震を設定する際に有用である種々の知見が得られた。評価例のうち、特に代表的な不確実因子である距離減衰式選定の差異が地震諸元/貢献度の評価に及ぼす影響は、地震危険度曲線に及ぼす影響と比べて小さいことが明らかとなった。

これらの検討結果から、石川らの概念に基づく設定法は、原子力プラントサイトを対象として、評価条件の設定に伴う不確実さを考慮して確率論的に設計用想定地震を設定するための評価技術として有用であることが示された。

A Procedure for the Determination of Scenario Earthquakes for Seismic Design Based on Probabilistic
Seismic Hazard Analysis

Jiro HIROSE, Ken MURAMATSU, Toshihiko OKUMURA* and Satoshi TAKI*

Department of Reactor Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 15, 2002)

This report presents a study on the procedures for the determination of scenario earthquakes for seismic design of nuclear power plants(NPPs) based on probabilistic seismic hazard analysis (PSHA).

In the recent years, the use of PSHA, which is a part of seismic probabilistic safety assessment (PSA), to determine the design basis earthquake motions for NPPs has been proposed. The identified earthquakes are called probability-based scenario earthquakes (PBSEs). The concept of PBSEs originates both from the study of US NRC and from Ishikawa & Kameda. The assessment of PBSEs is composed of seismic hazard analysis and identification of dominant earthquakes.

The objectives of this study are to formulate the concept of PBSEs and to examine the procedures for determining the PBSEs for a domestic NPP site. This report consists of three parts, namely, procedures to compile analytical conditions for PBSEs, an assessment to identify PBSEs for a model site using the Ishikawa's concept and the examination of uncertainties involved in analytical conditions.

The results obtained from the examination of PBSEs using Ishikawa's concept are as follows.

- (a) Since PBSEs are expressed by hazard-consistent magnitude and distance in terms of a prescribed reference probability, it is easy to obtain a concrete image of earthquakes that determine the ground response spectrum to be considered in the design of NPPs.
- (b) Source contribution factors provide the information on the importance of the earthquake source regions and/or active faults, and allows the selection of a couple of PBSEs based on their importance to the site.

* Ohsaki Research Institute, Inc.

- (c) Since analytical conditions involve uncertainty, sensitivity analyses on uncertainties that would affect seismic hazard curves and identification of PBSEs were performed on various aspects and provided useful insights for assessment of PBSEs. A result from this sensitivity analysis was that, although the difference in selection of attenuation equations led to a significant difference in seismic hazard curves, no remarkable difference was found in the parameters of selected PBSEs.

The results from this study confirmed that the procedures based on Ishikawa's concept provide a useful evaluation technique to determine scenario earthquakes for seismic design considering uncertainties involved in analytical conditions.

Keyword: Seismic PSA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Scenario Earthquake, Control Earthquake, Basic Earthquake Ground Motions

This is a blank page.

目 次

1はじめに	1
2確率論的想定地震に関する評価手順の検討	4
2.1 評価条件の作成法	4
2.1.1 地震活動のモデル化	4
2.1.2 地震動伝播モデル	21
2.2 想定地震諸元の解析手法	25
2.2.1 地震危険度の評価方法	25
2.2.2 石川らの方法による想定地震の設定手法	27
2.2.3 米国の方針による想定地震の設定手法	29
2.3 参照確率の設定に関する知見の調査	32
2章の参考文献	37
3モデルサイトの想定地震設定に関する検討	39
3.1 評価条件	39
3.1.1 サイトの設定	39
3.1.2 評価条件の設定項目	42
3.1.3 地震活動域の設定	44
3.1.4 地震動の強さの指標と距離減衰式	58
3.1.5 基本モデルの設定	64
3.1.6 現行指針モデルの設定	72
3.2 解析結果	79
3.2.1 基本モデルの結果	79
3.2.2 現行指針モデルの結果	92
3.3 評価法の差異による想定地震諸元の比較検討	103
3.3.1 現行指針に基づいた想定地震の諸元	103
3.3.2 現行指針および確率論的手法に基づいた想定地震の諸元の比較	105
3.3.3 検討結果の考察	108
3章の参考文献	110
4評価条件の不確実さに関する評価方法の検討	111
4.1 不確実さを考慮した評価方法の調査	111
4.1.1 不確実性の要因	111
4.1.2 不確実さの評価方法に関する米国の研究	114
4.1.3 不確実さの評価方法に関する日本の研究	124
4.1.4 不確実さを考慮した評価結果の表現	125

4.1.5 検討の結果	126
4.2 不確実さに関する感度解析	127
4.2.1 解析条件	127
4.2.2 解析結果	132
4.2.3 検討結果の考察と今後の検討課題	185
4.3 想定地震設定法の設計への適用上の課題	189
4.3.1 確率論的想定地震と現行耐震設計指針との関係	189
4.3.2 今後の設計への適用上の課題	189
4章の参考文献	193
5 まとめ	194
6 得られた成果	195
7 今後の課題	199
8 おわりに	201
謝辞	201
付録1 地震リスク評価研究専門部会名簿	202
付録2 Summary in English	203

Contents

1	Introduction	1
2	Procedure for Assessment of PBSEs	4
2.1	Compilation of Analytical Conditions	4
2.1.1	Models of Earthquake Source Regions and Active Faults	4
2.1.2	Attenuation Model of Earthquake Ground Motion	21
2.2	Theoretical Background of PBSEs	25
2.2.1	Procedure of Seismic Hazard Analysis	25
2.2.2	Concept of Ishikawa and Kameda	27
2.2.3	Concept of RG 1.165	29
2.3	A Review of the Information on the Determination of Reference Probability	32
References of Chapter 2		37
3	Assessment of PBSEs for a Model Site	39
3.1	Conditions for Assessment of PBSEs	39
3.1.1	Location of the Model Site	39
3.1.2	Items on Analytical Conditions	42
3.1.3	Determination of Earthquake Source Region	44
3.1.4	Index for Intensity of Earthquake Ground Motions and Attenuation Equations	58
3.1.5	Base Model of PBSEs	64
3.1.6	Modified Model of PBSEs according to the Current Code	72
3.2	Analytical Results	79
3.2.1	Results of the Base Model	79
3.2.2	Results of the Modified Model According to the Current Code	92
3.3	Comparison of Scenario Earthquakes between the Deterministic Approach and PBSEs	103
3.3.1	Parameters of Scenario Earthquakes by Deterministic Approach	103
3.3.2	Comparison of Scenario Earthquakes between Two Approaches	105
3.3.3	Review of the Results	108
References of Chapter 3		110
4	Examination of Procedures to Assess Uncertainty due to Analytical Conditions	111
4.1	Investigation of Procedures to Assess Uncertainty Terms	111
4.1.1	Uncertainty Terms	111
4.1.2	Studies on the Procedures of Uncertainty Evaluation in the United States	114
4.1.3	Studies on the Procedures of Uncertainty Evaluation in Japan	124
4.1.4	Expression of the Procedure to Address Uncertainty Terms	125

4.1.5 Review of the Results	126
4.2 Sensitivity Analysis on Uncertainty	127
4.2.1 Analytical Conditions	127
4.2.2 Analytical Results	132
4.2.3 Review of Results and Technical Issues	185
4.3 Technical Issues in Incorporating PBSEs into Seismic Design	189
4.3.1 Relation between PBSEs and the Current Basic Earthquake Ground Motions	189
4.3.2 Technical Issues for Application to Seismic Design	189
References of Chapter 4	193
 5 Concluding Remarks	194
 6 Insights Gained from Research	195
 7 Technical Issues to be Considered	199
 8 Closing	201
 Acknowledgement	201
 Appendix 1 Subcommittee on Seismic Risk Assessment Research	202
 Appendix 2 Summary in English	203

確率論的想定地震の設定法に関する検討
図表リスト

2.1.1

- 表 2.1.1-1 代表的な地震カタログの特徴
 図 2.1.1-1 地震調査研究推進本部による基盤的調査観測対象活断層
 図 2.1.1-2 萩原による地震地体構造図
 図 2.1.1-3 垣見・他による地震地体構造図
 図 2.1.1-4 東北地方で発生する地震の震源深さ分布
 図 2.1.1-5 深発地震面の等深線
 図 2.1.1-6 奥村・石川が設定したランダム地震域
 図 2.1.1-7 b 値モデルと最大マグニチュードモデルの概念図

2.1.2

- 図 2.1.2-1 地震動の距離減衰のばらつきの例

2.3

- 表 2.3-1 運転状態と地震動との組合せの確率的評価
 図 2.3-1 米国の参考確率の設定根拠

3.1.1

- 図 3.1.1-1 モデルサイトの位置

3.1.3

- 図 3.1.3-1 1926～1982 年の気象庁のデータの震央分布 ($M \geq 5$)
 図 3.1.3-2 1926～1982 年の気象庁のデータの深さ別の震央分布 ($M \geq 5$)
 図 3.1.3-3 1983～1996 年の気象庁のデータの震央分布 ($M \geq 3$ 、深さ 100km 以下)
 図 3.1.3-4 1983～1996 年の気象庁のデータの深さ別の震央分布 ($M \geq 3$ 、深さ 100km 以下)
 図 3.1.3-5 1983～1996 年の気象庁のデータの深さ別の震央分布
 ($M \geq 5$; 深さ ≤ 100 km; 東経 139～143・北緯 37～38 度の範囲を南から見た図)
 図 3.1.3-6 萩原による地震地体構造区分
 図 3.1.3-7 サブダクションゾーンに対応する地震域
 図 3.1.3-8 地殻内地震に対応する地震域
 図 3.1.3-9 モデルサイトと各地震域の深さ方向に関する模式的な位置関係
 図 3.1.3-10 新編日本の活断層に記載されている確実度 II 以上の活断層の分布
 図 3.1.3-11 松田の起震断層
 図 3.1.3-12 モデルサイト周辺で考慮する活断層の分布
 (サイト周辺の拡大、断層 A の北部 18km をモデル化)

3.1.4

- 図 3.1.4-1 安中ら(1997)の加速度応答スペクトル（深さ=20km）
 図 3.1.4-2 安中ら(1997)の距離減衰式（最大加速度,深さ=20km）
 図 3.1.4-3 安中ら(1997)の距離減衰式（周期 0.15 秒の加速度応答スペクトル,深さ=20km）
 図 3.1.4-4 安中ら(1997)の距離減衰式（周期 0.71 秒の加速度応答スペクトル,深さ=20km）

3.1.5

- 表 3.1.5-1 各地震域における地震パラメータ
 表 3.1.5-2 モデルサイト周辺の主な活断層の諸元
 表 3.1.5-3 解析条件
 図 3.1.5-1 サブダクションゾーンに対応する各地震域での Gutenberg-Richter 式の関係
 図 3.1.5-2 地殻内地震に対応する各地震域での Gutenberg-Richter 式の関係

3.1.6

- 表 3.1.6-1 現行指針モデルにおける地震パラメータ
 表 3.1.6-2 海底活断層の位置（目測）
 表 3.1.6-3 サイトから海底活断層への最短距離
 表 3.1.6-4 海底活断層の長さ・マグニチュード・変位量
 表 3.1.6-5 断層一覧表
 表 3.1.6-6 地質層序
 表 3.1.6-7 対象地点周辺における段丘の対比と編年
 表 3.1.6-8 海底活断層の平均変位速度
 表 3.1.6-9 海底活断層の地震発生頻度
 図 3.1.6-1 現行指針モデルで考慮する活断層の分布

3.2.1

- 表 3.2.1-1 PGA（基本モデル）の各参考確率での加速度値
 表 3.2.1-2 PGA（基本モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハサード適合マグニチュード・ハサード適合距離
 表 3.2.1-3 PGA（基本モデル）の確率論的想定地震の諸元
 図 3.2.1-1 PGA（基本モデル）の地震危険度曲線
 図 3.2.1-2 PGA（基本モデル）の貢献度曲線
 図 3.2.1-3 PGA（基本モデル）の同時確率
 図 3.2.1-4 PGA（基本モデル）の同時確率（拡大）
 表 3.2.1-4 短周期（基本モデル）の各参考確率での加速度値
 表 3.2.1-5 短周期（基本モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハサード適合マグニチュード・ハサード

適合距離

表 3.2.1-6 短周期（基本モデル）の確率論的想定地震の諸元

図 3.2.1-5 短周期の地震危険度曲線

図 3.2.1-6 短周期（基本モデル）の貢献度曲線

図 3.2.1-7 短周期（基本モデル）の同時確率

図 3.2.1-8 短周期（基本モデル）の同時確率（拡大）

表 3.2.1-7 長周期（基本モデル）の各参照確率での加速度値

表 3.2.1-8 長周期（基本モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

表 3.2.1-9 長周期（基本モデル）の確率論的想定地震の諸元

図 3.2.1-9 長周期（基本モデル）の地震危険度曲線

図 3.2.1-10 長周期（基本モデル）の貢献度曲線

図 3.2.1-11 長周期（基本モデル）の同時確率

図 3.2.1-12 長周期（基本モデル）の同時確率（拡大）

図 3.2.1-13 目標応答スペクトル

3.2.2

表 3.2.2-1 PGA（現行指針モデル）の各参照確率での加速度値

表 3.2.2-2 PGA（現行指針モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

表 3.2.2-3 PGA（現行指針モデル）の確率論的想定地震の諸元

図 3.2.2-1 PGA（現行指針モデル）の地震危険度曲線

図 3.2.2-2 PGA（現行指針モデル）の貢献度曲線

図 3.2.2-3 PGA（現行指針モデル）の同時確率

図 3.2.2-4 PGA（現行指針モデル）の同時確率（拡大）

表 3.2.2-4 短周期（現行指針モデル）の各参照確率での加速度値

表 3.2.2-5 短周期（現行指針モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

表 3.2.2-6 短周期（現行指針モデル）の確率論的想定地震の諸元

図 3.2.2-5 短周期（現行指針モデル）の地震危険度曲線

図 3.2.2-6 短周期（現行指針モデル）の貢献度曲線

図 3.2.2-7 短周期（現行指針モデル）の同時確率

図 3.2.2-8 短周期（現行指針モデル）の同時確率（拡大）

表 3.2.2-7 長周期（現行指針モデル）の各参照確率での加速度値

表 3.2.2-8 長周期（現行指針モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

サード適合距離

- 表 3.2.2-9 長周期（現行指針モデル）の確率論的想定地震の諸元
- 図 3.2.2-9 長周期（現行指針モデル）の地震危険度曲線
- 図 3.2.2-10 長周期（現行指針モデル）の貢献度曲線
- 図 3.2.2-11 長周期（現行指針モデル）の同時確率
- 図 3.2.2-12 長周期（現行指針モデル）の同時確率（拡大）

3.3.1

- 表 3.3.1-1 現行指針に基づいて設定された地震諸元

3.3.2

- 表 3.3.2-1 現行指針および確率論的手法に基づいた想定地震の諸元の比較

3.3.3

- 図 3.3.3-1 海底活断層の貢献度曲線

4.1.2

- 図 4.1.2-1 Diablo Canyon 原子力発電所と周辺の断層分布
- 図 4.1.2-2 Diablo Canyon 原子力発電所の地震 PSA に用いられたロジックツリーの評価項目
- 図 4.1.2-3 Hosgri 断層のロジックツリー
- 図 4.1.2-4 Los Osos 断層のロジックツリー
- 図 4.1.2-5 San Luis Bay 断層のロジックツリー
- 図 4.1.2-6 地震動伝播モデルに関するロジックツリー
- 図 4.1.2-7 Hosgri 断層に対するフラクタル地盤危険度曲線
- 図 4.1.2-8 全統合化地盤危険度曲線
- 図 4.1.2-9 LLNL(1989), EPRI(1989), LLNL(1993)の地盤危険度曲線の比較(Pilgrim site)
- 図 4.1.2-10 LLNL(1989), EPRI(1989), LLNL(1993)の地盤危険度曲線の比較(Shearon Harris site)

4.2.1

- 表 4.2.1-1 地震域の最大マグニチュード
- 図 4.2.1-1 断層 A (一部)
- 図 4.2.1-2 断層 A (全長)
- 図 4.2.1-3 地震動強度におけるばらつきの概念
- 図 4.2.1-4 考慮するばらつきの範囲の概念

4.2.2

- 表 4.2.2-1 基本ケースの各参照確率に対する加速度値
 表 4.2.2-2 基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離
 表 4.2.2-3 基本ケースの確率論的想定地震諸元
 図 4.2.2-1 基本ケースの地震危険度曲線
 図 4.2.2-2 基本ケースの貢献度曲線
 図 4.2.2-3 基本ケースの同時確率
 図 4.2.2-4 基本ケースの同時確率（拡大）
- 表 4.2.2-4 ケース 1 の各参照確率に対する加速度値
 表 4.2.2-5 ケース 1 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離
 表 4.2.2-6 ケース 1 と基本ケースの確率論的想定地震諸元
 図 4.2.2-5 ケース 1 の地震危険度曲線
 図 4.2.2-6 ケース 1 と基本ケースの貢献度曲線
 図 4.2.2-7 ケース 1 と基本ケースの同時確率
 図 4.2.2-8 ケース 1 と基本ケースの同時確率（拡大）
- 表 4.2.2-7 ケース 2 の各参照確率に対する加速度値
 表 4.2.2-8 ケース 2 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離
 表 4.2.2-9 ケース 2 と基本ケースの確率論的想定地震諸元
 図 4.2.2-9 ケース 2 の地震危険度曲線
 図 4.2.2-10 ケース 2 の貢献度曲線
 図 4.2.2-11 ケース 2 と基本ケースの同時確率
 図 4.2.2-12 ケース 2 と基本ケースの同時確率（拡大）
- 表 4.2.2-10 ケース 3 の各参照確率に対する加速度値
 表 4.2.2-11 ケース 3 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離
 表 4.2.2-12 ケース 3 の確率論的想定地震諸元
 図 4.2.2-13 ケース 3 の地震危険度曲線
 図 4.2.2-14 ケース 3 の貢献度曲線
 図 4.2.2-15 ケース 3 と基本ケースの同時確率
 図 4.2.2-16 ケース 3 と基本ケースの同時確率（拡大）
- 表 4.2.2-13 ケース 4 の各参照確率に対する加速度値
 表 4.2.2-14 ケース 4 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

表 4.2.2-15 ケース 4 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

図 4.2.2-17 ケース 4 の地震危険度曲線

図 4.2.2-18 ケース 4 と基本ケースの貢献度曲線

図 4.2.2-19 ケース 4 と基本ケースの同時確率

図 4.2.2-20 ケース 4 と基本ケースの同時確率（拡大）

表 4.2.2-16 ケース 5 の各参照確率に対する加速度値

表 4.2.2-17 ケース 5 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

表 4.2.2-18 ケース 5 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

図 4.2.2-21 ケース 5 の地震危険度曲線

図 4.2.2-22 ケース 5 と基本ケースの貢献度曲線

図 4.2.2-23 ケース 5 と基本ケースの同時確率

図 4.2.2-24 ケース 5 と基本ケースの同時確率（拡大）

表 4.2.2-19 ケース 6 の各参照確率に対する加速度値

表 4.2.2-20 ケース 6 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

表 4.2.2-21 ケース 6 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

図 4.2.2-25 ケース 6 の地震危険度曲線

図 4.2.2-26 ケース 6 と基本ケースの貢献度曲線

図 4.2.2-27 ケース 6 と基本ケースの同時確率

図 4.2.2-28 ケース 6 と基本ケースの同時確率（拡大）

表 4.2.2-22 ケース 7 の各参照確率に対する加速度値

表 4.2.2-23 ケース 7 の基本ケースの主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

表 4.2.2-24 ケース 7 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

図 4.2.2-29 ケース 7 の地震危険度曲線

図 4.2.2-30 ケース 7 と基本ケースの貢献度曲線

図 4.2.2-31 ケース 7 と基本ケースの同時確率

図 4.2.2-32 ケース 7 と基本ケースの同時確率（拡大）

4.2.3

表 4.2.3-1 地震危険度および想定地震に対する感度

図 4.2.3-1 ロジックツリーの分岐の例

図 4.2.3-2 ロジックツリーの例

4.3

- 図 4.3-1 確率論的想定地震と現行耐震設計審査指針との関係
図 4.3-2 確率論的想定地震の設計への適用に関する検討フロー

付録 2

- 表 A3-1 短周期（基本モデル）の各参照確率での加速度値
表 A3-2 短周期（基本モデル）の確率論的想定地震の諸元
表 A3-3 決定論的手法及び確率論的手法に基づく想定地震諸元の比較
表 A3-4 2種類の距離減衰式に基づく想定地震諸元の比較
図 A2-1 確率論的想定地震の評価フロー
図 A3-1 地震地体構造区分（萩原、1991）
図 A3-2 サブダクションゾーンに対応する地震域
図 A3-3 地殻内地震に対応する地震域
図 A3-4 松田による起震断層の分布
図 A3-5 モデルサイトの短周期地震危険度曲線（T=0.15秒）
図 A3-6 短周期（基本モデル）の貢献度曲線
図 A3-7 目標応答スペクトル（参照確率 10^{-5} の場合）
図 A3-8 地震危険度曲線の比較
図 A3-9 2種類の距離減衰式に基づく貢献度曲線の比較
図 A4-1 確率論的想定地震と現行指針による地震動との関係
図 A4-2 確率論的想定地震の設計への適用に関する検討フロー

確率論的想定地震の設定法に関する検討
英略語リスト

G-R	Gutenberg-Richter	グーテンベルグ・リッヒター
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory	ローレンスリバモア国立研究所
LT	Logic Tree	ロジックツリー
NRC	Nuclear Regulatory Commission	原子力規制委員会
PBSE	Probability-based scenario earthquake	確率論的想定地震
PGA	Peak ground acceleration	最大地動加速度
PSA	Probabilistic Safety Assessment	確率論的安全性評価
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Analysis	確率論的地震危険度解析
RG	Regulatory Guide	規制指針
SSE	Safe Shutdown Earthquake	安全停止地震

1. はじめに

(1) 背景

日本原子力研究所（以下、原研と称する）は、確率論的安全評価に関する研究の一環として、軽水炉プラントにおける地震起因の炉心損傷頻度を評価する手法（以下、地震リスク評価手法という）を開発し、モデルプラントに適用してその有効性を示してきた。

近年、米国では地震に対する確率論的安全性評価手法（Seismic Probabilistic Safety Assessment: 地震 PSA）を構成する評価項目の1つである確率論的地震危険度解析（Probabilistic Seismic Hazard Analysis: PSHA）を拡張し、将来サイトに影響を及ぼす可能性のある地震の諸元（規模、距離）および地震動を評価する手法が提案¹⁾されている。この手法では、確率論的地震危険度曲線上において与えた年超過確率に対応する地震動強さ以上の地震動を生じさせる地震の集合から、発生確率が支配的となる地震の諸元（規模、距離）を設定する。ここでは、このようにして設定される地震を確率論的想定地震（Probability-based Scenario Earthquakes: PBSEs）と呼ぶ。

米国における耐震および立地に関する規準「原子力発電プラントのための耐震および地質に関する立地規準」Appendix A to 10CFR Part 100は、1973年に施行された。本規準は長年にわたり許認可手続きのために適用されてきたが、継続して行くためには、最近の科学技術の進歩に照らして、a) 最近の地球物理に関する進歩の反映、b) 規準に内在する柔軟性の欠如、c) 地震危険度の評価が確定論に基づいているため、震源の設定や地震動を評価する場合に不確実さを定量的に評価することができない状況であること、以上3項目におよぶ課題があることが指摘され改訂する必要が生じた。改訂作業の結果、1995年に運転中プラントに対する許認可手続きには、継続して Appendix A to 10CFR Part 100を適用し、新規に建設を申請するプラントに対してのみ新規準「地質および地震に関する立地要件」Section 100.23 of 10CFR Part 100（略称、10CFR100.23）を適用する方針が出され、1996年～1997年に関連する3種類の規準・指針類が施行された。

10CFR100.23では、安全停止地震(SSE)を策定する際不確実さが内在していることを認識し、これらの不確実さを、確率論的地震危険度解析や、適切な感度解析によって評価しなければならないとしている。これらの不確実さを処理するために、確率論的地震危険度解析を適用することが認められ、具体的な規定内容の記載は、別途施行した「震源の認知と特性、および安全停止地震動の策定」（Regulatory Guide 1.165¹⁾に移行された。

一方、我が国においては、従来の地震危険度解析で地震動強さとその年超過確率との関係以外に取扱うことができなかった周波数特性等の複数の地震動パラメータを、同時に評価することができる概念が石川および亀田らの研究^{2,3)}により開発された。また、耐震設計に用いる基準地震動は、決定論的な手法に基づいて策定されており、確率論的な概念に基づく評価手法の設計への適用はこれまで検討されなかった。

このような動向を踏まえて原研では、石川らの概念に基づく確率論的想定地震の設定法について、米国で提案された評価法をも参考としながら検討を実施することに至った。

(2) 目的と研究の位置付け

本研究は、確率論的地震危険度評価手法を拡張し、将来サイトに影響を及ぼす可能性のある想定地震の諸元を評価する方法である確率論的想定地震の概念に基づいて、その概念を定式化し国内サイトを対象とした想定地震の設定法を検討することと、そのことを通じて、耐震設計への有用性の見通しを得ることを目的とした。

上記で述べたような目的に沿って検討をするための解析評価においては、対象サイトを想定する必要がある。ここでは本設定法の耐震設計への適用を検討する際、確率論的に想定される地震と現行の耐震設計審査指針に基づく決定論な想定地震を比較検討できるようにすることを考慮して、対象サイトとして実プラントのサイトを選定することとした。具体的には、東北地方南部太平洋岸に面したサイトをモデルサイトとして選定した。

また本研究での成果は、対象サイトや評価パラメータに関して限られた条件に基づいて得られたものであるものの、評価条件を構成している評価パラメータの重要性や、評価結果の解釈に対する理解を深める上で有用であると考えられる。本報告は、今後各サイトにおける設計用想定地震を設定する際、評価技術の高度化を図るための知見として意義をなすものと期待される。

(3) 本研究の実施内容

本研究では、確率論的想定地震に関して次の3項目の検討を行なった。

- ① 確率論的想定地震に関する評価手順の検討
- ② モデルサイトの想定地震設定に関する検討
- ③ 評価条件の不確実さに対する評価法の検討

各項目の実施内容について、①では米国及び我が国の確率論的想定地震の概念を調査するとともに、国内の一般的なサイトを対象として確率論的想定地震を設定する際に必要とされる地震活動や地震伝播特性等に関する評価手順を作成した。②では石川らの概念に基づく確率論的想定地震の設定法を定式化し、モデルサイトを対象とした評価条件を設定した上で、確率論的想定の諸元を解析評価した。また、その結果を用いて現行の指針に基づいて決定論的に設定される地震諸元と、確率論的想定地震によって設定される地震諸元とを比較検討した。③では、評価条件の不確実さに関して日米で実施された既往研究の調査、ならびにモデルサイトに対する感度解析を行い、不確実さの定量化に関する検討を行なった。さらに、現行耐震設計指針に基づく基準地震動の選定と、評価の不確実さを考慮した確率論的想定地震との関係の検討、ならびに確率論的想定地震の今後の設計への適用上の課題について抽出検討した。

なお、研究の過程では、確率論的想定地震の概念に基づく設定法の定式化、モデルサイトに対する解析評価、および設計への適用上の課題に関する知見等の研究成果が得られている。これらは、本研究の中間報告として国内の関連分野の会合、国際会議等に発表てきており、必要に応じ本報告書の中で引用している。

(4) 本報告書の構成

本報告書の構成は、以下の通りである。

- 第1章 はじめに
- 第2章 確率論的想定地震に関する評価手順の検討
- 第3章 モデルサイトの想定地震設定に関する検討
- 第4章 評価条件の不確実さに対する評価法の検討
- 第5章 まとめ
- 第6章 得られた成果
- 第7章 今後の課題
- 第8章 おわりに

1章の参考文献

- 1)USNRC : Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide 1.165, 1997. 3.
- 2)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の拡張, 土木学会論文集, No. 392/I-9, pp.395-402, 1988.4.
- 3)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, No. 577/I-41, pp.75-87, 1997. 10.

2. 確率論的想定地震に関する評価手順の検討

2章では、確率論的想定地震の基本的考え方、及び確率論的想定地震を国内の任意の地点を対象として評価する場合の一般的な評価条件の作成手順の検討として、評価条件の作成法、想定地震諸元の解析手法、および参照確率の設定に関する知見の調査の3項目について述べている。評価条件の作成手順は、地震活動のモデル化と地震伝播モデルからなる構成とし、また想定地震諸元の解析手法として米国 の方法及び石川らの方法を定式化した。

2.1 評価条件の作成法

確率論的な地震危険度評価およびそれを応用した確率論的想定地震の評価に必要な確率モデルは、大別して、(a) 地震活動の確率モデルと、(b) 地震の諸元が与えられたときの地震動の推定の確率モデルから構成される。これら2つのモデルに基づいて、地震動の強さと特定期間内にそれを超過する確率の関係（地震危険度曲線あるいは地震ハザード曲線と呼ばれる）を評価するのが地震危険度評価であり、地震危険度曲線上のある1点に着目して、それに寄与する地震像を評価するのが確率論的想定地震である。

本節では、地震危険度評価や確率論的想定地震の評価に不可欠である「地震活動のモデル化」と「地震動推定の確率モデル（地震動伝播モデル）」に関して、その基本的な考え方と一般的な評価手順を示す。

2.1.1 地震活動のモデル化

地震活動のモデル化とは、対象とする地点の周辺で将来発生すると考えられる地震の「規模」「場所」「頻度（あるいは特定期間内の発生確率）」に関して、確率モデルを作成するものである。離散的な表現をすれば、規模が m_i の地震が距離 r_j のところである期間内に発生する確率を、規模と距離の全ての組み合わせについて評価することになる。

地震危険度や確率論的想定地震の評価の対象が将来発生する地震である以上、モデル化の対象もやはり将来の地震活動である。しかしながら、将来の地震について直接的にモデル化することが不可能な現状では、過去の地震活動を知った上で、それが将来も継続するとの仮定の下にモデル化がなされることが一般的であり、例えば、過去に発生した地震や地点周辺の活断層、さらにはプレートテクトニクスなど地球物理学的な知見が参考にされる。

以下では、地震活動のモデル化に関して、(1)地震活動のモデル化に用いられるデータベース、(2)地震活動域の設定の基本的な考え方と具体的な手順の例、(3)地震発生の時系列のモデル化、(4)地震の規模のモデル化、(5)距離の確率の評価、(6)過去の地震と活断層のデータの組み合わせについて、それぞれ整理する。

(1) データベース

- a) 過去に発生した地震に関するデータ

将来の地震活動を推定するためには、過去の地震活動の状況を知ることが重要であり、このために、過去に発生した地震を整理したデータベース、いわゆる地震カタログが用いられる。地震カタログは、過去に発生した地震の発生時期、場所、規模が記載されており、またカタログによってはその地震によって生じた被害の概要を知ることができる。地震カタログの使用方法としては、例えば以下のようなものが挙げられる。

- ・地震活動の特徴（例えば地震個数の多少）による領域分け
- ・特定の領域内における地震の規模別の発生頻度の算定
- ・特定地域（例えば南海トラフ沿い）における大規模な地震の繰り返し発生間隔の算定

地震カタログの代表的なものとしては、有史以来の被害地震をまとめた「新編日本被害地震総覧」¹⁾（宇佐美カタログとも呼ばれる）、1885年以降の被害地震とM6以上の地震を整理した宇津カタログ²⁾、気象庁から地震月報³⁾として発表される震源データなどがある。これらのデータベースには、表2.1.1-1に示すようにそれぞれに特徴があるため、使用目的に応じて適切な地震カタログを用いることが肝要である。

一方、いわゆる地震カタログとは異なるが、過去に発生した地震の断層モデルを整理したものとして「日本の地震断層パラメータハンドブック」⁴⁾がある。繰り返し発生することが知られている特定の地震をモデル化する場合などには、このような資料も有用な情報源となる。

b) 活断層に関するデータ

ここで用いる活断層とは、第四紀後期に繰返し発生した変位の痕跡が認められ、将来も同様な運動を行なう可能性が大きいと認められるものをいう。したがって、過去に地震が発生した記録が地震カタログに無くても、そこで発生すると考えられる地震の規模や発生頻度などが推定されれば、将来の地震活動を評価する上で有用な情報を提供することになる。その意味で、活断層のデータは、地震カタログを補う情報源と考えることもできる。ただし、活断層のデータに基づいてモデル化することが可能な地震は、陸域の浅いところで発生する中規模以上のものに限られており、海域のプレート境界で発生する地震や、陸域の深い地震でも規模の小さいものは対象外である。このように、活断層のデータに基づいてモデル化が可能な地震は、わが国の周辺で発生する地震のうちのごく一部のみであるが、内陸の深い地震は発生した場合の影響が大きいことから、活断層のデータを用いることの意味は大きい。

全国の活断層を統一された基準で認定して整理したものとして、1980年に刊行された「日本の活断層」⁵⁾があり、その後、「新編日本の活断層」⁶⁾として改訂された。これらの資料には、活断層の場所、長さ、確実度、活動度（あるいは平均変位速度の具体的な値）などが示されており、地震危険度評価には、これらの情報が地震の規模、地震の発生頻度といったパラメータに加工された上で用いられるのが一般的である。

「新編日本の活断層」や旧版の「日本の活断層」には、非常に多数の活断層がリストアップされている。松田⁷⁾は、これら一つ一つの活断層がそれぞれ独立して地震を発生するとは限らず、1つの大地震を起こす単位ごとにまとめたり（グループ化）あるいは分割（セグメント化）することが必要であるとの考え方から、起震断層の考え方を提案している。さらに、グループ化のための規則を設け、旧版の「日本の活断層」に基づいてマグニチュード6.5以上の地震に対応

する 237 本の起震断層を認定している。現実には、グループ化やセグメント化は松田が設定したような規則に基づいて機械的に行われるほど単純なものではないと考えられるが、起震断層の考え方自体は、活断層のデータを地震危険度評価に用いる上で非常に有効なものである。

その他の資料としては、「1:25,000 都市圏活断層図」⁸⁾や「200 万分の 1 日本列島活断層図」⁹⁾などがある。これらはいずれも、兵庫県南部地震以降に作成されたもので、従来よりも大縮尺の航空写真に基づく判読がなされていることもあり、場所の精度は「新編日本の活断層」よりもよいとされる。ただし、いずれも地図のみが提供されているために、活動性に関する情報を得ることはできない。

兵庫県南部地震以降、国や自治体によって精力的に活断層の調査が実施されており、それらの結果が公表されている^{例えば 10)~17)}。特に、図 2.1.1-1 に示される約 100 本の主要な活断層については、近年の調査結果や従来の研究成果等を踏まえた総合評価が政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会によってなされ、公式見解が順次公表されることとなっている。これらの結果についても、「新編日本の活断層」に代表される従来の活断層データを更新するものとして順次取り入れて行くべきものと考えられる。なお、地震調査委員会による活断層の評価は、平成 13 年 2 月現在で、以下の 7 断層について公表されている。

- ・糸魚川—静岡構造線活断層系 (平成 8 年 9 月 11 日)
- ・神縄・国府津—松田断層帯 (平成 9 年 8 月 6 日)
- ・富士川河口断層帯 (平成 10 年 10 月 14 日)
- ・鈴鹿東縁断層帯 (平成 12 年 8 月 9 日)
- ・元荒川断層帯 (平成 12 年 8 月 9 日)
- ・東京湾北縁断層 (平成 12 年 11 月 8 日)
- ・岐阜—一宮断層帯 (平成 13 年 1 月 10 日)

c) その他のデータ

地震活動のモデル化において多く参照される資料としていわゆる「地震地体構造図」がある。代表的なものとして、図 2.1.1-2 に示す、萩原¹⁸⁾による地震地体構造区分がある。これは、活断層の分布性状など第四紀テクトニクスや重力異常の地域的な特徴と過去に発生した地震の特徴などに基づいて全国を地域分けしたものであり、地震学、地形・地質学、地球物理学などの知見を統合して作成されている。同書には、地震地体構造区分とその作成過程が詳細に述べられているとともに、区分された各領域における地震活動の特徴などもまとめられている。地震地体構造区分と各領域での最大地震規模を整理したその後の成果としては、図 2.1.1-3 に示す垣見ら¹⁹⁾によるものもある。

これらの地体構造区分は、いずれも平面的な区分のみがされている。しかしながら、日本列島下には太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込んでおり、その上面あるいは内部で多くの地震が発生すると同時に、陸域の浅いところでも地震が発生していることが知られている。図 2.1.1-4 は、東北地方の地震の深さの分布²⁰⁾を示したものであるが、この図からも上記のことがはっきりと見て取れる。したがって、地震活動のモデル化には、このような深さごとに異なる活動の状況を考慮する必要があり、そのためには上記の地体構造区分だけでは不十分

と言える。それを補うものとしては、深さごとの震源分布や図 2.1.1-5 に示すプレートの深さを表す等深線²¹⁾などが挙げられる。

(2) 地震活動域の設定

一般に、解析の対象とする地点の周辺での地震活動は全く一様ではなく、場所ごとにそれぞれ特徴を持っている。したがって、対象地点周辺の地震活動をモデル化する際には、地震活動の特徴や得られている情報の量などに応じて複数のものに分割した上で、それぞれの地震活動をモデル化することになる。本報告書では、地震活動をモデル化する際に分割される単位のことを地震活動域と呼ぶ。この定義によれば、以下にも示すように、面に分割された領域だけでなく、個々の活断層もそれが地震活動域を構成する要素となる。

a) 地震活動域の分類

地震活動域の設定には様々な考え方があると思われるが、その基本的な考え方の例として、例えば以下のようないわゆるものが挙げられる。

まず、地震活動域は、後述の時系列モデル、規模のモデル、場所のモデルとの関連でいくつかの種類に分けることができる。地震危険度評価で一般的に用いられるランダム地震域では、地震の発生がその地震域内で一様であるとモデル化されるが、事前に場所や規模がある程度推定可能なものについては、それを別途モデル化することで、精度の向上が図られると考えられる。例えば、場所や規模に関して得られている情報に応じて、

- ・場所や規模がある程度限定できるもの：活断層、プレート境界の大規模地震
- ・それ以外のもの：ランダム地震域

といった分類が可能である。岐阜県を中心とした中部地方の内陸部を例にとって考えた場合に、ランダム地震域のみでモデル化したのであれば、濃尾地震のような M8 クラスの地震がどこでも発生しうることになる。しかし、活断層を別途考慮することにより、M8 クラスの地震は根尾谷断層や阿寺断層など長大な活断層でのみ発生し、活断層の存在が知られていないところでは、ある程度以下の規模の地震のみが発生するというモデル化が可能となる。

地震の発生する場所や規模が事前に推定可能なものとしては、上述のように、活断層とプレート境界の大規模地震が挙げられる。これらの地震は、ほぼ同程度の間隔で繰り返し発生すると考えられるものが多いため、場所や規模と同時に地震の発生確率を評価する上でも特別の扱いが可能である。一方、活断層とプレート境界の大規模地震だけでは、対象地点の周辺で発生する地震を全て表現することはできない。このため、どこで発生するかを事前に予測することが不可能な地震を表すものとして、ランダム地震域を設定することになる。なお、現行の耐震設計では、活断層の存在が知られていないところでも発生しうる地震のうち最大級のものとして、M6.5 の直下地震を基準地震動 S₂ で考慮することとなっている。確率論的想定地震の評価では、このタイプの地震はランダム地震域で発生する地震として扱われることになるため、直下地震に対応するような想定地震を確率論的に評価する上では、敷地近傍の浅いところで発生する地震の場所、規模、頻度の評価・モデル化が重要となる。

b) 活断層のモデル化

活断層をモデル化する際には、先に (1) b) で述べた活断層のデータベースが参照される。特に、一つ一つの地震に対応するものとしてモデル化がなされている起震断層の考え方は、工学的な観点から非常に有用と考えられる。また、近年の活断層調査から得られた知見等も活断層をモデル化する際の重要な根拠となる。特に地震調査委員会から公表される評価結果は、「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」を目標としており、積極的に取入れて行く必要がある。

実際のモデル化では、活断層の場所を地表面上の線分、あるいは矩形の断層面に単純化することが多い。ただし、一般には活断層の情報は地表面でのみ得られており、地下深部での傾斜角までを精度よく推定することは困難であるから、矩形の断層面としてモデル化する場合には、例えば鉛直の断層とすることもあり得る。ここで、線分でモデル化するか、矩形の断層面とするかは、地震動の推定に用いる距離減衰式との関連で決まる。断層面からの最短距離の式の場合には線分でのモデル化でもよいが、等価震源距離を指標とする式や、断層面の中心の深さがパラメータとして含まれる式を用いるような場合には、線震源では不十分であり、断層面まで設定しなければならない。

なお、(1)の b) で述べたように、活断層のグループ化やセグメント化は容易ではなく、様々な異なる見解が出される場合もあり得るので、必要に応じて複数のモデルを組み合わせて用いることも考慮すべきであると考えられる。

c) プレート境界の大規模地震のモデル化

活断層以外に、場所と規模が事前に予測可能な地震としては、プレート境界で繰り返し発生する大規模な地震が考えられる。その候補としては、駿河～南海トラフ沿いで発生する南海・東海地震タイプの地震、相模トラフ沿いで発生する関東地震タイプの地震、太平洋プレートの沈み込みに伴う北海道～東北地方の大規模地震などが挙げられる。これらの領域では、同一地域での地震の繰り返し間隔が数十年～数百年程度以内と考えられており、地震カタログに基づいて地震像を設定することが可能となる。この点は、繰り返し間隔が 1,000 年程度から数万年にも及ぶ活断層とは大きく異なる点である。

プレート境界の大規模地震のモデルは、それぞれの地震に対応する断層面を設定し、規模と将来の特定期間の地震発生確率を与えることにより行われる。断層面の設定には、過去に発生した地震の巨視的断層モデルを整理した断層パラメータハンドブックが参考になる。

地震調査研究推進本部地震調査委員会は、宮城県沖地震の評価を実施し、その結果を平成 12 年 11 月に公表した。これによれば、1978 年宮城県沖地震が発生した領域では、これまでに平均約 37 年の間隔で大規模な地震が繰り返し発生していること、地震の規模は通常は M7.3～7.5 の範囲にあるが、さらに日本海溝よりの領域と連動して M8 程度の地震となった場合があると考えられること、最新の活動である 1978 年宮城県沖地震から 22 年以上が経過しており、今後 20 年程度以内に次の地震が起こる可能性が高いことなどが指摘されている。これらは、今後のプレート境界地震のモデル化に際して取り入れるべき情報である。今後、他の地域についても同様の評価が行われることが予想されるため、それらについても考慮していく必要があ

る。

d) ランダム地震域のモデル化

ランダム地震域は、b)の活断層やc)のプレート境界の大規模地震ではモデル化されない地震を表すものである。これらの地震については、個々の地震の発生場所や規模を予め特定することが困難と考えられることから、地震活動がほぼ一様と見なせる複数のランダム地震域に区分した上で、各ランダム地震域内では、規模別の地震発生頻度は同一、地震の発生場所はランダムであるとしてモデル化する。

従来は、対象地域の周辺を平面で区分するランダム地震域が設定されるのが一般的であった。しかし、わが国周辺の地震活動の特徴を踏まえれば、太平洋プレートの沈み込み帯で発生する地震、フィリピン海プレートの沈み込み帯で発生する地震、北米・ユーラシアプレート内（上部地殻内）で発生する浅い地震、といったように分類した上で、それぞれをさらに複数のランダム地震域に分割することにより、現実の地震活動との対応が明確になる。この場合には、地表に投影した場合には重複するランダム地震域が、異なる深さに設定されることになる。例えば、奥村・石川²²⁾は、このような考えに基づき、3種類のランダム地震域を図2.1.1-6に示すように設定している。また、本研究でのランダム地震域も、太平洋プレートと上部地殻内の地震を分けて設定している。

ランダム地震域の区分は、地震地体構造区分や震源分布、プレートの等深線などを参考に設定される。特に、地震地体構造区分は、様々な分野の専門家の意見を統合したものであることや、最大マグニチュードを設定する際にも用いることができる等の理由から、これまでの事例でも多く参照されている。

(3) 地震発生時系列モデル

地震の発生を、蓄積されたひずみエネルギーの解放という物理現象としてとらえ、そのひずみの源がほぼ定常なプレート運動であることを考えれば、個々の活断層やプレート境界の同一地域の大規模地震の発生は、時間軸上でランダム（ポアソン過程）ではなく、ほぼ一定の間隔で発生すると考えるのが妥当であろう。このことは、例えば地震調査研究推進本部長期評価部会²³⁾による適用事例の中でも統計的に分析されており、南海トラフ沿いの巨大地震、宮城県沖地震、阿寺断層、丹那断層などを例に、ポアソン過程よりも対数正規分布やガンマ分布を仮定した再生過程の方が統計的にみて妥当であるとしている。

ポアソン過程と再生過程^{注1)}の違いは、地震危険度評価では以下のようになる。すなわち、ある期間を対象としたときに、ポアソン過程では前回の地震からの経過時間によらず一定の地震発生確率となるのに対して、対数正規分布等で活動間隔をモデル化した再生過程では、前回の地震からの経過時間が長くなるほど確率は高くなる。ただし、再生過程のモデルであっても、前回の地震の発生時期が不明であればほぼポアソン過程に近い振る舞いとなることが、奥村・他²⁴⁾によって示されている。

一方、上記のように特定の活断層や狭い地域を対象とするのではなく、ある程度の拡がりを持った領域で発生する中小を含めた地震を対象とした場合には、地震の発生をポアソン過程で

モデル化するのが一般的である。仮に、個々の事象が非定常モデルとしての再生過程に従うとしても、それらの集合体としての地震群は、互いの発生に強い相関がないとすれば時間軸上でランダムに発生しているとみなすことは可能であろうし、また、現実問題として、個々の地震に分解した上で、それらを全て再生過程でモデル化することは不可能である。

先に述べた地震活動域との対応で見れば、活断層とプレート境界の大規模地震のうちモデル化に必要な情報が得られているもの（例えば地震調査委員会による評価が行われたもの）については前回の活動からの経過時間を考慮した再生過程で、また、ランダム地震域として考慮する地震についてはポアソン過程でそれぞれモデル化するのが今後の方向として妥当と考えられる。

注) 再生過程（更新過程とも呼ばれる）とは、時間軸上での事象の発生間隔が互いに独立、すなわち毎回同じ分布に従うとする確率過程で、その特殊な場合として、事象の発生間隔が指数分布としたものがポアソン過程である。したがって、厳密には、ポアソン過程も再生過程の一つであるが、ポアソン過程だけは前回の事象発生からの経過時間にかかわらず次の事象の発生率が一定、すなわち定常なモデルとなる。ここでは、厳密性を欠くものの、再生過程と書いた場合にポアソン過程を除く非定常なモデルを指している。

(4) 地震の規模別発生頻度

ある拡がりを持った領域内で発生する地震の規模と発生個数の関係を見ると、規模が大きい地震ほど発生個数が少なく、いわゆる Gutenberg-Richter の関係（ b 値モデル）にはば従うことことが経験的に知られている。Gutenberg-Richter の式

$$\log_{10} N(M \geq m) = a - bm \quad (2.1.1-1)$$

の係数 b は、わが国周辺では概ね 1 前後の値をとるとされるが、この場合には、マグニチュードが 1.0 大きい地震の発生数は約 1/10 となる。

一方、個々の活断層やプレート境界の大規模地震に着目すると、上記のような関係は成立せず、それぞれに固有の規模の地震が繰り返し発生するとの考え方（固有地震説）が主流である。南海トラフ沿いで発生する巨大地震は、歴史地震の資料からマグニチュード 7.9～8.4 程度の範囲であることが知られており、また、糸魚川～静岡構造線中部断層帯や中央構造線四国断層帯など活動度の高い活断層で中小規模の地震が頻発していないことも、 b 値モデルが適用できない例として挙げられる。Wesnousky ら²⁵⁾は、個々の地震活動域で発生する地震の規模のモデルとして図 2.1.1-7 に示す 2 つを考え、日本の内陸で発生した地震のデータと活断層から推定される地震数との比較から、活断層については下段右端に示される最大マグニチュードモデルの方が適合性がよいとしている。

個々の地震活動域に b 値モデルと最大マグニチュードモデル（広い意味で固有地震モデルと呼ぶ場合もある）のどちらのモデルを適用するかは、地震活動域そのものを設定する際の方針や地震発生の時系列モデルとも関連するため、単独で議論することはできない。本項でこれまでに述べてきた流れに則れば、個々の活断層や個別にモデル化するプレート境界の大規模地震については最大マグニチュードモデルを、ランダム地震域では b 値モデルを適用するのが自然である。

プレート境界の大規模地震の場合には、規模と頻度（あるいは平均活動間隔）は、過去に発生した地震のデータに基づいて設定することになる。活断層の場合には、規模は断層の長さから設定し、頻度（平均活動間隔）は平均変位速度と1回の地震時の変位量との関係から松田式等に基づいて設定するのが一般的であるが、例えば地震モーメントを介して設定することも可能である。

ランダム地震域では、個々の地震域内で過去に発生した地震のデータから規模別の発生頻度を算定し、それを Gutenberg-Richter の式でモデル化して用いることになる。ただし、Gutenberg-Richter 式自体はマグニチュードの上限についての制約がないことから、それぞれの地震域で発生する地震の最大マグニチュードは別途設定することになる。この際の考え方としては、地震地体構造区ごとの値を参考したり、歴史上の最大値を基に設定するなどの方法がある。

(5) 距離の確率

モデル化したそれぞれの地震活動域で発生する地震と地点との距離の確率は、単純に両者の幾何学的な位置関係で決まる。個別にモデル化する活断層やプレート境界の大規模地震の場合には、地震発生時の断層面そのものが設定されているために、距離の評価は容易である。一方、ランダム地震域の場合についても、個々のランダム地震域での地震活動が一様であるとの条件を用いて距離の確率の評価が可能である。ただし、一般にランダム地震域の形状は任意であり、解析的に距離の確率を評価することができないため、実際には離散化した上で確率分布を数値的に評価することになる。

距離の指標として何を用いるのかは、後述の距離減衰式に依存するため、距離の確率の算定方法もそれに応じて異なることに注意が必要である。例えば、断層面からの最短距離を指標とする場合には、常に全長が活動する活断層との距離は確定値となるが、震源距離（断層の破壊開始点からの距離）が指標となつていれば確定値とはならず、何らかの確率分布を示すことになる。

(6) データの組み合わせ

「日本の活断層」⁵⁾の発行に伴い、活断層に関するデータが全国でほぼ均一に利用できるようになったことから、1980 年代の前半にはわが国でも活断層のデータに基づく地震危険度評価が試みられるようになった。この当時は、従来から行われてきた過去の地震データに基づく評価と活断層のデータに基づく評価がそれぞれ独立に行われ、両者の結果の違いに対する考察や結果の組み合わせ方法に関する検討がなされたりした。いわゆる「歴史地震データに基づく方法」と「活断層データに基づく方法」の組み合わせの問題であり、特に、両者で重複する部分の扱いが議論の中心であった。

一方、本項においてこれまでに述べてきた地震活動のモデル化の流れは、活断層とプレート境界の大規模地震は個別にモデル化し、それらで表現できない地震をランダム地震域としてモデル化するものである。したがって、地震の発生頻度や発生確率の評価には、過去の地震データだけでなく、必要に応じて活断層のデータも用いることになる。このように種類の異なる地

震活動域を設定する場合には、それぞれの地震活動域がどのような地震を対象としたものであるのかを明確にした上で、データを使い分けることが肝要である。

例えば、南海トラフ沿いで発生するマグニチュード8クラスの地震を別途モデル化する際には、それ以外の地震を表すランダム地震域の規模別発生頻度の算定に用いる地震データからM8クラスの地震を除いておく必要がある。同様に、陸域の地殻内の地震を表すランダム地震域では、別途モデル化されている活断層に対応する地震をデータから除く必要がある。さらに、上記いずれの場合にも、ランダム地震域に対する最大マグニチュードの設定にも何らかの配慮が必要である。このような取扱いがなされていれば、地震データと活断層データから算定されたものを足し合わせて考慮しても、両者の重複が避けられることになり、いわゆるダブルカウントの問題は生じないと考えられる。

表 2.1.1-1 代表的な地震カタログの特徴

地震カタログ名	期間	主な特徴	使用目的の例
宇佐美カタログ	679~1995	<ul style="list-style-type: none"> ・収録期間が長く、発生頻度の低い大規模な地震が多く含まれる。 ・古いものは古文書等の記述に基づく推定であり、時期や地域によって精度に大きな違いがある。 ・古いものほど、規模の小さいものほど漏れが多いと考えられる。 ・被害地震のみが収録されている。 ・近年のものを除き、深さの情報はない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・大規模な地震の発生頻度の推定 ・領域ごとの最大地震規模の推定
宇津カタログ	1885~1980	<ul style="list-style-type: none"> ・気象庁カタログよりは収録期間が長く、濃尾地震や関東地震が含まれる。 ・M6以上はほぼ網羅されていると考えられる。 ・古いものは深さの情報は大分類のみ。 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震活動が共通と考えられる領域の区分 ・M6以上の地震の規模別発生頻度の推定
気象庁カタログ	1926 以降	<ul style="list-style-type: none"> ・上記 2 つと比較して期間が短い。 ・計器観測に基づくため、精度はよい(期間による精度の差はある)。 ・期間によって異なるが、近年のものは微小地震まで含む。 ・震源深さの情報が含まれる(1982 年以前は 10km 単位、それ以降は 1km あるいはそれ以下の単位)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・中規模以上の地震の規模別発生頻度の推定 ・深さ方向の地震の発生状況の把握と頻度の推定 ・地震活動が共通と考えられる領域の区分

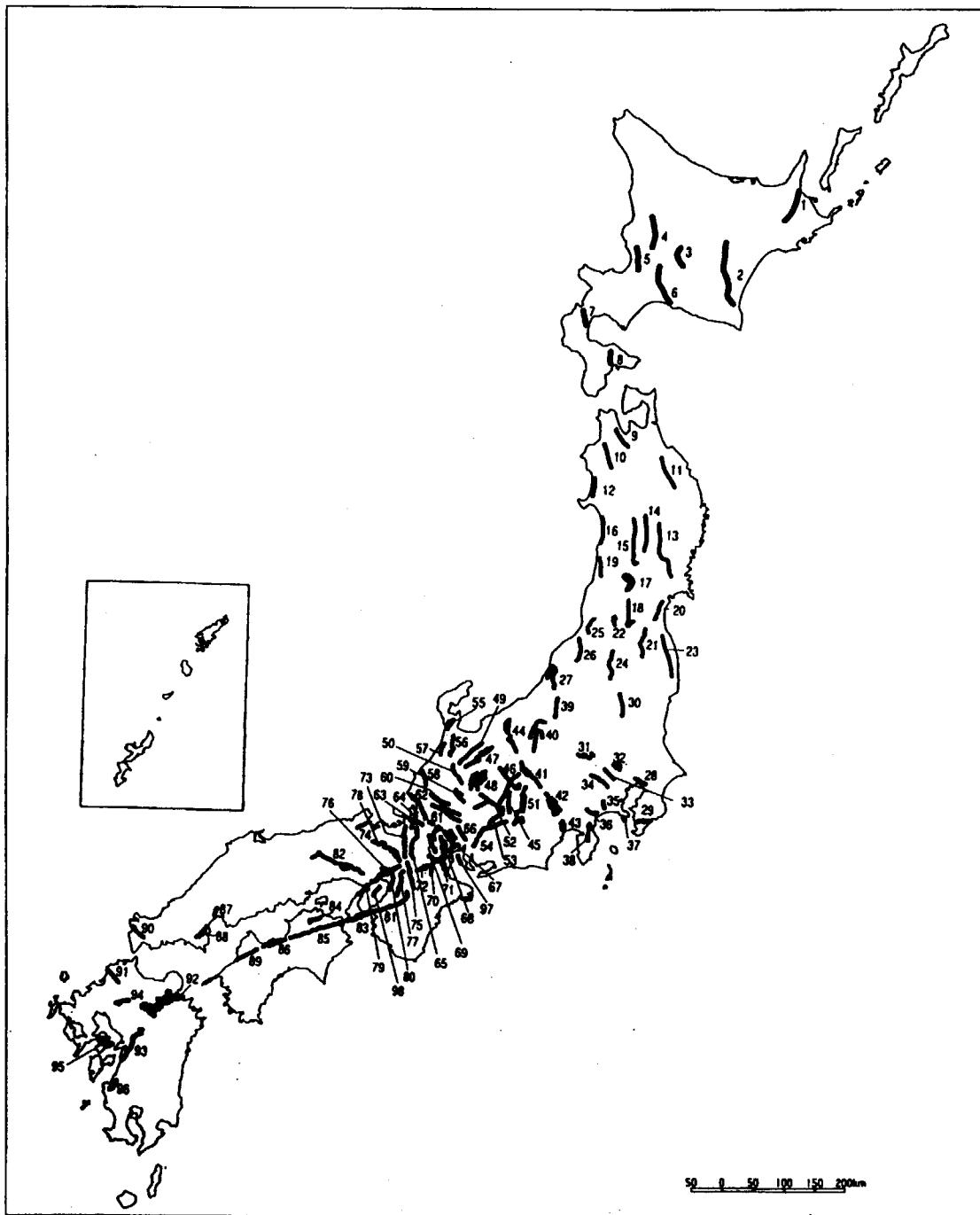


図 2.1.1-1 地震調査研究推進本部による基盤的調査観測対象活断層¹³⁾

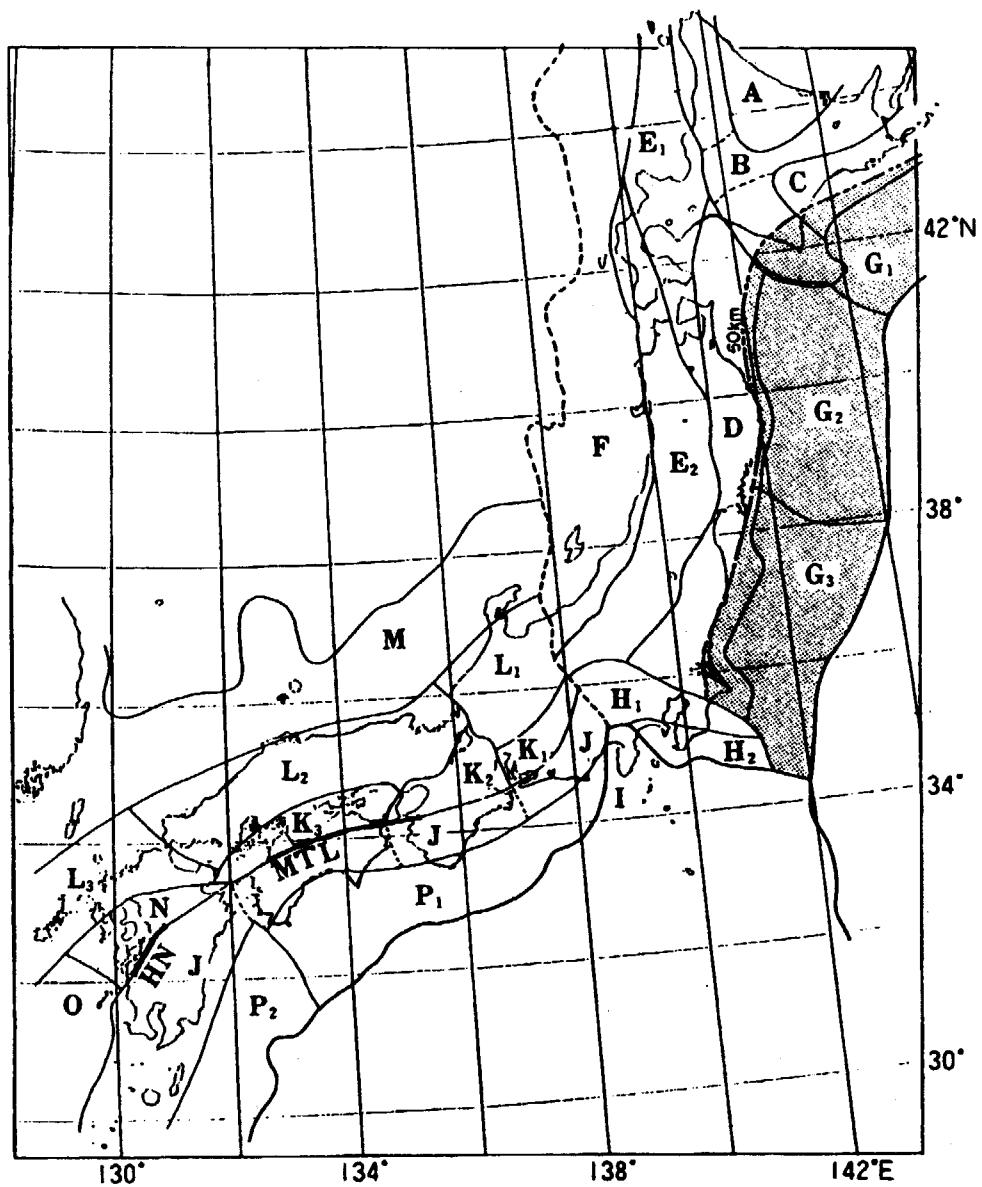


図 2.1.1-2 萩原による地震地体構造図¹⁸⁾

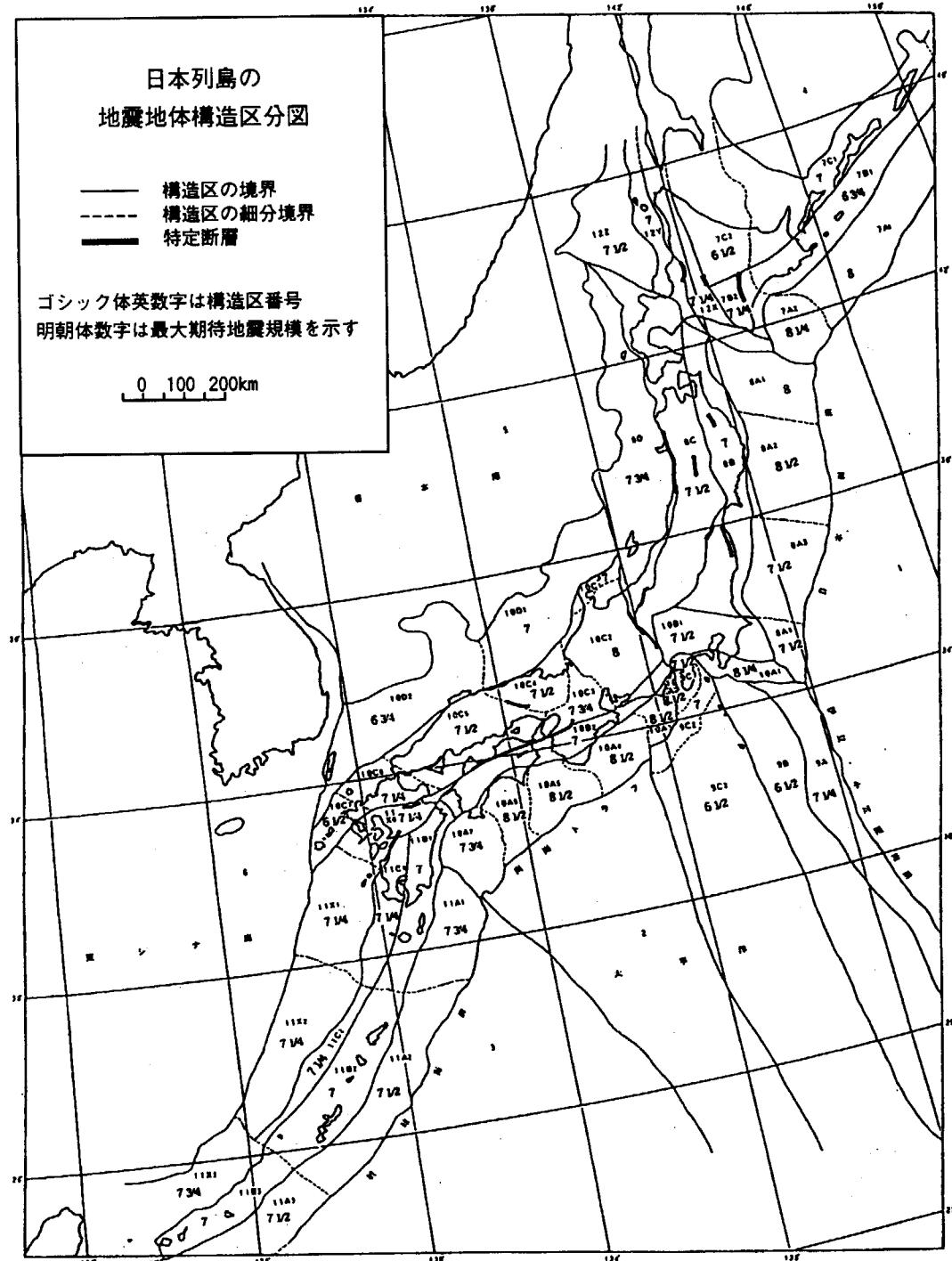


図 2.1.1-3 垣見・他による地震地体構造図¹⁹⁾

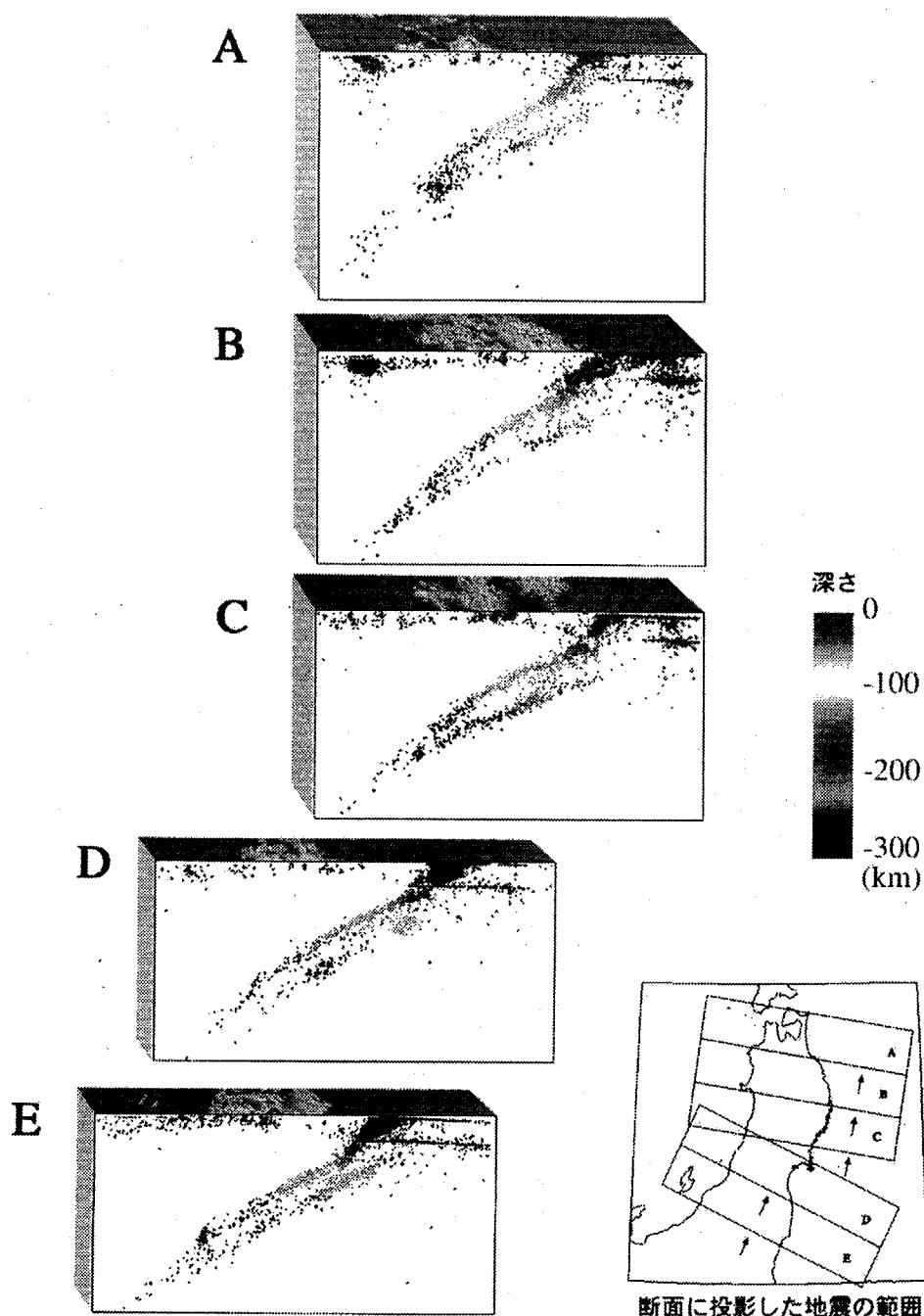


図4-3 東北地方の地震活動と太平洋プレートの沈み込み(M2以上、1975年5月～1995年4月、深さ300km以浅)

〔東北大大学、弘前大学データから作成〕

図の右上(東)の方から左下(西)へ傾き下がる地震活動は、沈み込む太平洋プレートに沿っている。このような地震の分布状況から太平洋プレートが東北地方の下に沈み込んでいる様子が見てとれる。なお、図の右上、太平洋側沖合の深さ0km及び約30kmに見られる水平の地震活動域は解析の誤差により生じた見かけのものである。

図 2.1.1-4 東北地方で発生する地震の震源深さ分布²⁰⁾

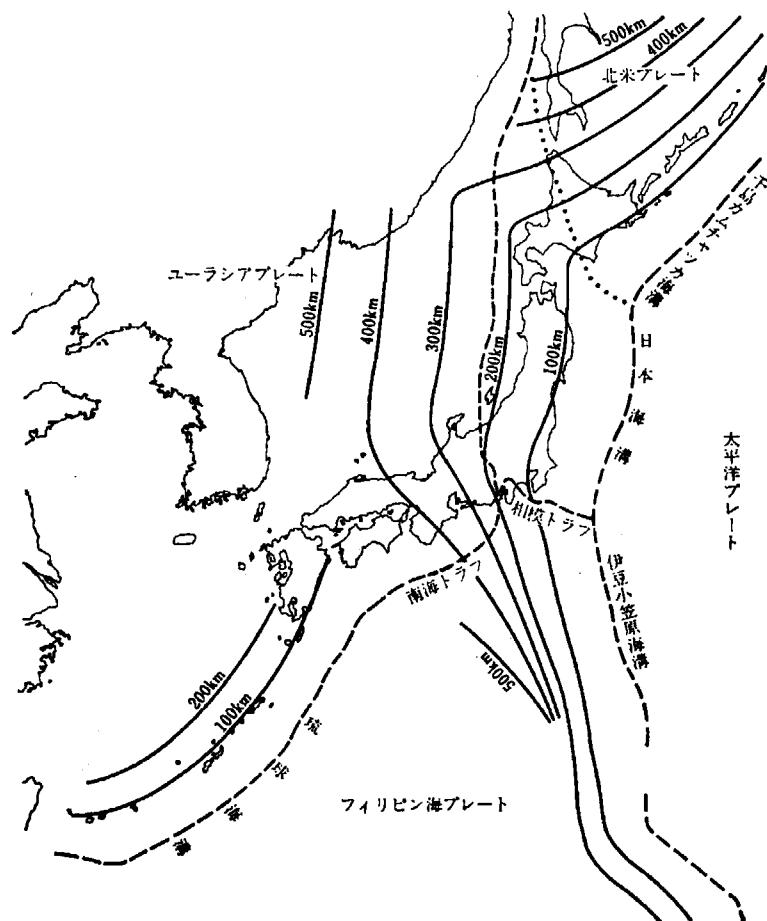


図 4.A 深発地震面の等深線

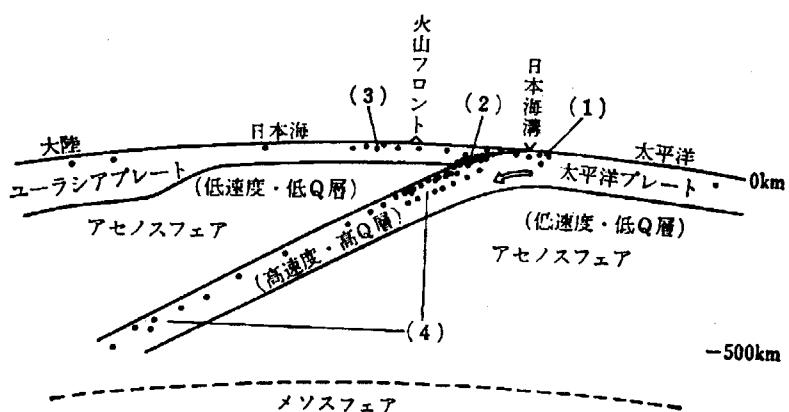
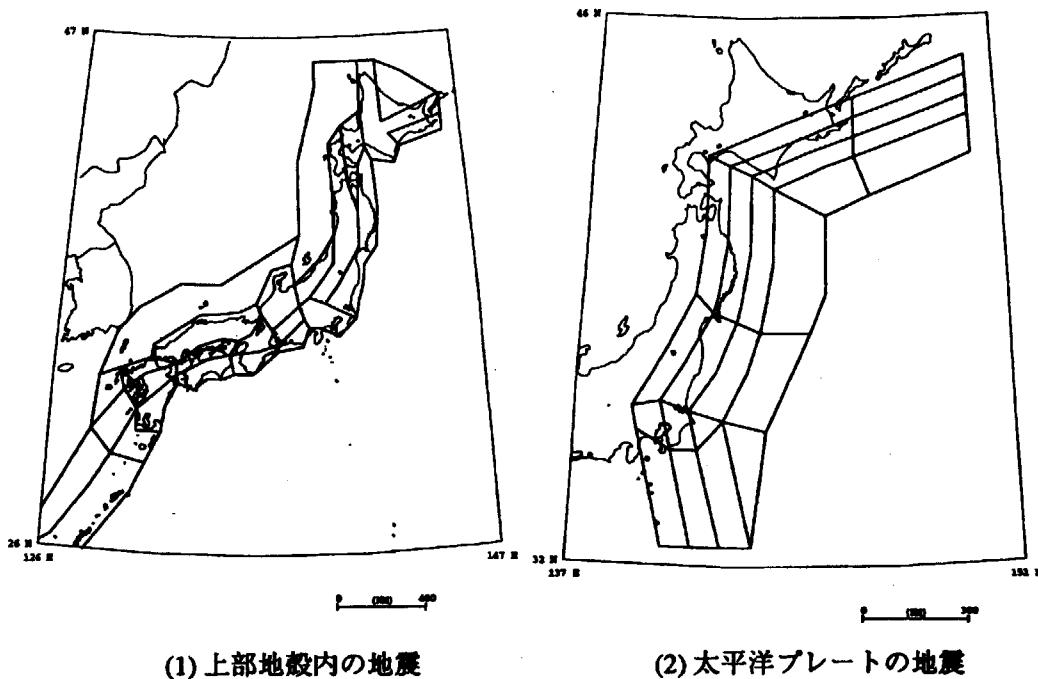


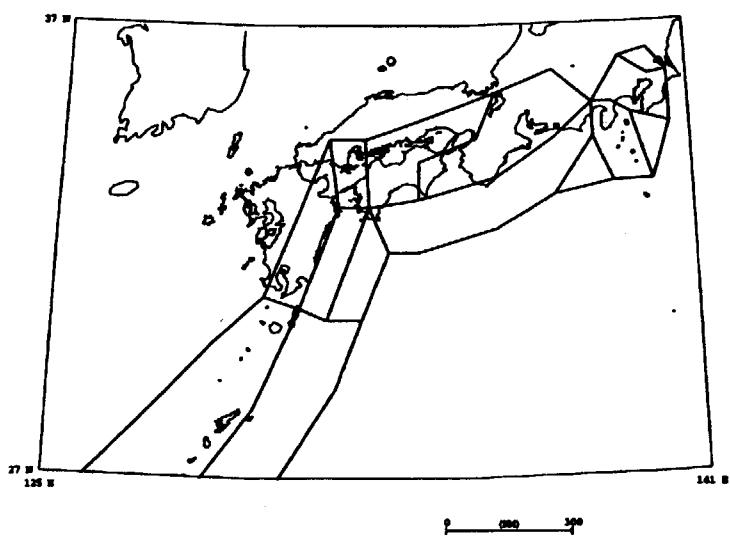
図 4.B 東北日本弧の鉛直断面モデル

図 2.1.1-5 深発地震面の等深線²¹⁾



(1) 上部地殻内の地震

(2) 太平洋プレートの地震



(3) フィリピン海プレートの地震

図 2.1.1-6 奥村・石川が設定したランダム地震域²²⁾

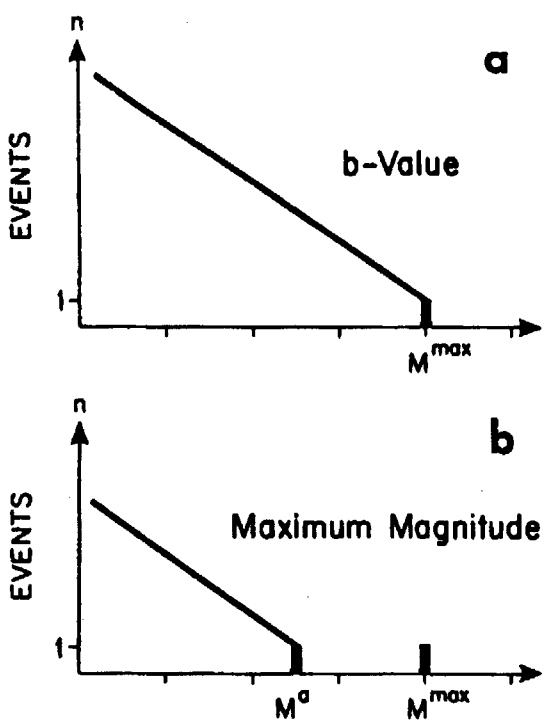


図 2.1.1-7 b 値モデルと最大マグニチュードモデルの概念図²⁵⁾

2.1.2 地震動伝播モデル

地震動伝播モデルは、地震の規模 m_i と距離 r_i が与えられた場合に、着目地点の地震動を評価するためのモデルであり、確率論的な地震危険度評価では、通常、距離減衰式とそのばらつきによって表現される。したがって、規模と距離が確定値として与えられても、地震動の強さ自体は確率変数として表現されることになる。

(1) 距離減衰式

地震動の評価手法には、理論的なものから半経験的なもの（波形合成法など）、経験的な統計モデルによるものなど様々なレベルのものがある。これらは、その目的に応じて使い分けられるが、確率論的な地震危険度評価では、これらのうち最も簡便な距離減衰式が用いられるのが一般的である。距離減衰式は、規模と距離を与えることによって地震動の強さを推定するものであり、観測された地震動の統計分析に基づいて作成される。

従来は、単純な重回帰分析によって算定されたものが多かったが、その後、回帰の方法、式の形状、係数の物理的な意味などに検討が加えられ、また震源近傍を含む強震観測記録の蓄積とも相まって、この10年ほどの間に格段の進歩を遂げた。このことは、福島・田中式²⁶⁾が、その発表後に発生した兵庫県南部地震の観測記録とよく整合することなどからも明らかであろう。従来の式との違いとしては、距離の指標として以前は震央距離や震源距離が多用されていたのに対して、近年のものは断層面からの最短距離や等価震源距離が用いられていること、震源近傍でも地震動の強さが無限に大きくならないような工夫がされていることなどが挙げられる。

もちろん、近年提案されている式の全てにそのような工夫がされているとは限らないため、距離減衰式の選定には、その作成過程も踏まえた吟味が必要である。本研究では、最大地動のみならず応答スペクトルも対象としていることから、電共研スペクトル²⁷⁾と安中ら(1997)の式²⁸⁾が選定の候補となつたが、距離の扱いの簡便さと震源深さの独立項が考慮されていることを理由に、最終的には安中ら(1997)の式を用いている。

(2) 適用地盤による補正

距離減衰式は、通常、多数の地点で得られた観測記録に基づいて作成される。したがって、距離減衰式で推定される地震動の強さは、それらの観測記録が得られた地点の平均的なものとなる。ところが、表層地盤の影響など地点固有の特性がその地点の地震動の特性に及ぼす影響はきわめて大きいことが知られているため、地点の特性を考慮した上で距離減衰式を適用することが望ましい。例えば、原子力施設は、岩盤上に立地することとなっているため、原子力施設を対象とした地震動の評価には、岩盤でとれた記録のみに基づいて作成された距離減衰式を用いるのが理想的である。しかしながら、今日のように高密度に地震計が配置されていても、厳密な意味で解放基盤相当の岩盤上に設置された地震計はきわめて少ないので現状である。

このように数少ない岩盤上の記録を補うための対応としては、大別して以下の2つが考えられる。

一つ目は、堆積層上で得られた記録を、解析的に基盤面まで戻し、その記録を用いて距離減衰式を作るものである。電共研スペクトルあるいは耐専スペクトルと通称されているものは、このようにして得られた地震基盤の地震動を基に作成されている。ただし、岩盤までの地盤データが得られていることが最低限の条件であり、精度よい評価のためには、地盤データに加えて地中の岩盤中にも地震計が設置されていることが望ましい。

もう一つは、既往の距離減衰式に何らかの係数を乗じることで、岩盤上の地震動に変換する方法である。例えば、福島・田中式では、元々の式に 0.6 を乗ずることで硬質地盤上の平均的な最大加速度が得られるとしている。これは、回帰に用いた記録のうち硬質地盤のものだけを見れば、回帰結果として得られた距離減衰式で推定される値と比較して平均的に約 6 割になっていることを根拠にしている。ここには、震源特性と伝播経路特性は地盤条件によらず一定であり、地点の特性は距離減衰式の中で最短距離の項で表されることが暗黙の条件として入っている。つまり、地震の規模や距離の係数に関する回帰が不要となるため、このような方法によれば、少数の岩盤記録を用いて地点特性を補正することも可能と考えられる。

(3) 評価式のばらつき

距離減衰式による地震動の推定には、かなりのばらつきがあることが知られている。例えば日本建築学会の「地震荷重—その現状と将来の展望」²⁹⁾には、距離減衰式のばらつきが対数軸上ではほぼ正規分布となることを示す図 2.1.2-1 とともに、対数標準偏差（自然対数の標準偏差）の算定例として 0.64, 0.75 といった数値が示されている。また、電共研の回帰スペクトル²⁷⁾の対数標準偏差は 0.5 程度とされている。前者は様々な地点でのデータに基づく結果と考えられるが、第三紀の岩盤上を対象とした電共研回帰スペクトルでも対数標準偏差 0.5 程度のばらつきがあることがわかる。このことから、今後良質の地震観測記録が多数蓄積されたとしても、地震の規模と距離の 2 つのパラメータを用いるという現行の方法による限りは、距離減衰式のばらつきそのものが極端に小さくなることは期待できないと推測される。逆の見方をすれば、推定値と観測値の違いを説明することのできる新たなパラメータを導入すれば、ばらつきを減少させることができる可能性がある。例えば、本研究で用いている安中らの式²⁸⁾には、震源深さの独立項が入っているが、これは、同じ規模・同じ距離でも、震源深さが深い方が平均的に大きな地震動となるという傾向を補正するためのものである。

(4) 最大加速度の上限値

従来提案されていた距離減衰式の中には、距離が 0 になると発散するものも見受けられたが、近年提案されている距離減衰式では、震源域での頭打ちが考慮されているため、このような不合理は生じない。したがって、距離減衰式の中央値としては、何らかの上限がすでに設定されていることになる。

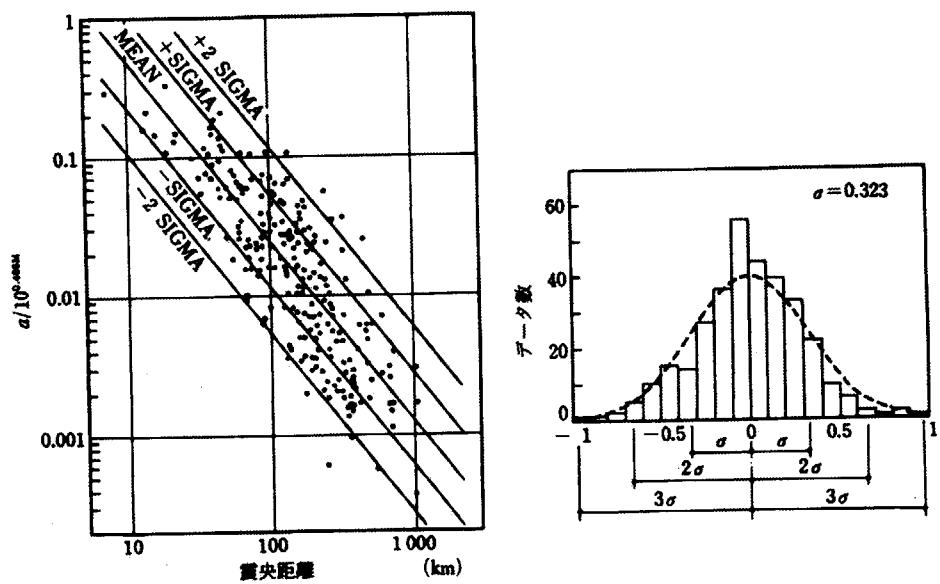
一方、距離減衰式のばらつきを対数正規分布とした場合には、理論上、無限大までの地震動の発生を想定することになる。現実には、地盤・岩盤の非線形挙動や破壊現象との関連などから、絶対値として何らかの上限値が存在するものと考えられるが、現在の知見では、その値を具体的に設定するのは容易ではない。

ばらつきの裾をどこまで認めるかの議論もあるが、先に示した図 2.1.2-1 では、 $\pm 3\sigma$ 程度隔たったところまではデータがプロットされている。ただし、これは、多数の地点のデータに基づく結果であろうから、地点特性の違いによる影響もばらつきとして含まれているため、厳密な議論には、同種の検討を单一の地点のデータに基づいて検討する必要がある。もちろん、ばらつきの裾の議論であるから、そのためには膨大な数の記録が必要となることはいうまでもない。

(5) 距離減衰式以外の地震動評価手法の利用

(1) の冒頭で述べたように、地震動の評価手法としては様々なものが提案されているが、確率論的な地震危険度評価では、きわめて多数の地震による地震動を評価する必要性から、最大地動や応答スペクトルを簡便に推定することができる距離減衰式が用いられている。一方、地震動の時刻歴波形まで評価する手法は、波形合成法に代表されるように近年大きな発展を遂げている。この背景には、震源断層の破壊過程に関する理解が深まったことに伴い不均質・非一様な断層破壊過程のモデル化が試みられるようになってきたこと、そして、それによって地震動の評価の精度が従来よりも格段に上がったことなどが挙げられよう。現時点では、断層パラメータを適切に設定することにより観測記録を極めて高い精度で再現することができることは示されているものの、将来発生する地震による地震動の予測には震源断層のモデル化が重要な課題となっており、そのための研究(例えば³⁰⁾)も進められている。

このような状況を踏まえれば、確率論的地震危険度評価の今後の方向性として、対象とする地震のうち地点に大きな影響を及ぼすものについては高度な手法を用いて地震動を評価し、従来型の距離減衰式で評価した他の地震の結果と統合することが考えられる。

図 3.17 地震動の減衰曲線のばらつきの例⁴⁴⁾図 2.1.2-1 地震動の距離減衰のばらつきの例²⁹⁾

2.2 想定地震諸元の解析手法

近年、米国では確率論的地震危険度評価に基づいた想定地震の概念を、新たに申請するプラントに対するサイト選定基準や設計用地震の評価に適用することが、1997年に公布された「震源の認知と特性、および安全停止地震動の策定に係る指針」³¹⁾において認められている。一方、我が国においては従来の地震危険度解析では地震動強さ以外に取扱うことが不可能であった周波数特性等の複数の地震動パラメーターを同時に評価することができる概念が、石川および亀田らの研究^{32, 33)}により開発された。

以下では、米国の方³¹⁾法および石川らの方^{32, 33)}法による確率論的想定地震の解析手法について述べる。

想定地震の諸元の算定手順は、大局的には両手法ともほぼ同じである。具体的に、両方法とも地震危険度解析をおこない地震危険度曲線を算定する。そして、与えられた参考確率に対して同曲線から求められる地震動強度を、マグニチュードと距離に関して再分解する。ところが、再分解および地震諸元（マグニチュード M と一般的な距離 D ）の設定方法が、それぞれの手法によって異なる。

両手法の差異の概要は、次のとおりである。米国の方³¹⁾法では、石川らの方法と比較して M と D について粗いビン（区間）を採用し、地震動強度の再分解をおこなう。また、想定地震の諸元となるマグニチュードと距離について、米国の方³¹⁾法では同時確率の重みを考慮し、短周期領域（場合によっては長周期領域も）に対して M と D それぞれの代表値を一意的に算定する。一方、石川らの方法では、それぞれの地震活動域（活断層および地震域）の貢献度 c_f 、ハザード適合マグニチュード M^* およびハザード適合距離 D^* を算定し、 c_f が規定した値よりも大きい地震活動度の M^* および D^* を想定地震の諸元とする。

2. 2. 1 地震危険度の評価方法

地震活動域 k で発生した地震により、対象サイトでの地震動強さが a を超える年発生頻度 $w_k(a)$ は、次式で算定される。

$$w_k(a) = \sum_i \sum_j \lambda_k P_k(m_i) P_k(d_j) P_k(a|m_i, d_j) \dots \quad (2.2.1-1)$$

ただし、

- | | |
|-------------------|---|
| $\lambda_k(a)$ | : 地震域 k で発生する地震の年平均発生率 |
| $P_k(m_i)$ | : 地震域 k で発生する地震でマグニチュードが m_i となる条件付き確率 |
| $P_k(d_j)$ | : 地震域 k で発生する地震で震源距離（あるいは震央距離）が d_j となる条件付き確率 |
| $P_k(a m_i, d_j)$ | : マグニチュードが m_i 、震源距離（震央距離）が d_j の地震で、対象地点の地震動強さが a を超える条件付き確率 |

なお、上式の P_k ($alm_i d_j$) は、距離減衰式のばらつきを考慮して求められる。距離減衰式がもつ地震動強さのばらつきは通常、対数正規分布にしたがうものと仮定される。

また、地点の周辺に k 個の地震活動域があるときに、評価対象地点で地震動強さが a を超える事象の年平均発生率は、次式で表される。

地震の発生をポアソン過程でモデル化する場合、1年間に地震動強さが a を超えるような事象の発生する確率すなわち年超過確率 $P(a)$ は、 $\lambda(a)$ を用いて次式のように算定される。

以上に示した式を用いて、 a と $P(a)$ の関係を算定する。その結果、得られる関係式が地震危険度曲線である。

2. 2. 2 石川らの方法による想定地震の設定手法

石川らの方法では、特定の年超過確率 p_0 に対応する地震動強さ $a(p_0)$ が決められた時に、それがどの地震活動域で発生した地震によってもたらせる可能性が高いかを表す指標である貢献度によって、重要地震活動域を抽出する。そして、重要地震活動域ごとに、地震動強さ $a(p_0)$ を超える地震が発生した場合における規模と距離の条件付期待値である M_k^* および D_k^* を算定することにより地震の諸元が設定される。

地震活動域 k に対する貢献度 $c_{fk}(a)$ は以下のようにして求める。 $c_{fk}(a)$ は、対象地点で a 以上の地震動が生じた時に、その地震が地震活動域 k で発生したものである条件付確率であり、式(2.2.1-1)を用いて算出される。

$$c_{f_k}(a) = \frac{w_k(a)}{\sum_k w_k(a)} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2.2-1)$$

実際の貢献度の算定においては、特定の年超過確率 p_0 に対応する地震動強さ $a(p_0)$ に対する貢献度を求めることになるので、式(2.2.2-1)は

と表現される。

石川らの方法では、地震活動域 k に対するハザード適合マグニチュード M_k^* およびハザード適合距離 D_k^* を想定地震の諸元とする。 M_k^* および D_k^* は、ある地震活動域 k で発生する地震で、サイトに $a(p_0)$ 以上の地震動が生じるときのマグニチュードと距離の条件付き期待値 $E_k(MA \geq a(p_0))$ 、 $E_k(DIA \geq a(p_0))$ として次式のように算定される。

$$M_k^* = E_k(M \mid A \geq a(p_0)) = \sum_i \sum_j m_i \cdot P_k(m_i, d_j \mid A \geq a(p_0)) \dots \dots \dots \quad (2.2.2-3)$$

$$\Delta_k^* = E_k(R \mid A \geq a(p_0)) = \sum_i \sum_j d_j \cdot P_k(m_i, d_j \mid A \geq a(p_0)) \dots \dots \dots \quad (2.2.2-4)$$

ただし、 A はサイトで発生する地震動の強さであり、 $P_k(m_i, d_j | A \geq a(p_0))$ は、サイトに $a(p_0)$ 以上の地震動が発生する場合に、その地震のマグニチュードと距離がそれぞれ m_i 、 d_j である条件付確率であり次式で求められる。

$$P_k(m_i, d_j | A \geq a(p_0)) = \frac{P_k(A \geq a(p_0) | m_i, d_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(d_j)}{P_k(A \geq a(p_0))} \quad \dots \dots \quad (2.2.2-5)$$

石川らの方法の特徴は、想定地震の諸元の組合せだけでなく、想定地震が発生する地震活動域が重要地震活動域として特定することにある。すなわち、地点周辺の地震活動の特徴や活断層に関する十分な調査・検討に基づいて地震活動域が設定されていれば、それらの結果が想定地震の設定に反映されることになり、あわせて、想定地震がより具体化されることになる。さらに、石川らの方法によれば、重要とされた地震活動域毎に、その地震諸元に応じて地震応答スペクトル形状を設定することも可能である。

2. 2. 3 米国による想定地震の設定手法

米国による想定地震諸元の設定方法は、米国立地規準内の規制指針 1.165 (Regulatory Guide 1.165 : R.G. 1.165)³¹⁾の付録 c に示されている。本項では、再分解の評価方法を概観する目的で、同文献に示されている想定地震の策定手順を整理する。

ステップ1 サイト固有の確率論的地震危険度解析の実施

- (a) LLNL の手法^{34,35)}あるいは EPRI の手法³⁶⁾に基づいて、確率論的地震危険度解析を実施する。
この際、岩盤条件あるいは仮想の岩盤条件とし、応答スペクトル(1, 2.5, 5, 10, 25Hz)および地表における最大地動加速度(Peak ground acceleration : PGA)に関する危険度曲線を算出する。地震域の下限地震マグニチュードは 5.0 が適切である。また、この確率論的地震危険度解析には不確定性の評価も含まれていなければならない。
- (b) 各々の地震動指標に対して、以下のパラメータの地震危険度曲線を求める。
 - ・中央値（信頼度 50%）の危険度曲線
 - ・平均値の危険度曲線
 - ・信頼度 85% の危険度曲線
 - ・信頼度 15% の危険度曲線

ステップ2 参照確率に対応する地震動強さの算定

- (a) R.G. 1.165³¹⁾の付録Bで定義されている参照確率($10^{-5}/\text{年}$)を用いて、ステップ1で求められた危険度曲線の中央値から、1, 2.5, 5, および 10 Hz での加速度スペクトルに応じた地震動レベルを評価する。
- (b) 1Hz および 2.5Hz のスペクトル加速度の平均値、および 5Hz と 10Hz のスペクトル加速度の平均値を算定する。

ステップ3 確率論的地震危険度解析結果の再分解

地震マグニチュードと距離区間のそれぞれの組について、確率論的地震危険度解析を実施する。

ステップ4 参照確率に相当する地震動レベルの評価

ステップ3の結果を再分配をし、各地震マグニチュード区間にに対して、ステップ2 (a)での 1, 2.5, 5, 10 Hz それぞれのスペクトル加速度に応じた地震動レベルを越える年超過確率の中央値を決定する。この値を H_{mdf} と表す。 H_{mdf} を用いて、1Hz および 2.5Hz の平均としての地震危険度曲線に対する、各地震マグニチュード区間および距離区間の寄与率 $P(m,d)_1$ を次式で計算する。

ここに、 $f=1$ および $f=2$ は、それぞれ 1Hz および 2.5Hz に対応した指標を表す。5Hz および 10Hz の平均としての地震危険度曲線に対する、各マグニチュード区間および距離区間の寄与率 $P(m,d)_2$ を次式で計算する。

ここに、 $f=1$ および $f=2$ は、それぞれ 5Hz および 10Hz に対応した指標を表す。

ステップ5 遠距離大地震の影響の把握

100km 以上離れた遠距離大地震の地震危険度曲線への寄与率が大きいかどうかを把握するため、1Hz および 2.5Hz の平均に対する地震マグニチュードと距離の寄与率の分布を調べる。もし、100km 以上の遠距離の地震の寄与率が 5% を越えている場合には、100km 以上の遠距離の地震マグニチュードと距離の分布 $P_{>100(m,d)}$ を用いて、支配地震を決めるための追加解析を行う。 $P_{>100(m,d)}$ は次式で計算される。

$$P_{>100}(m,d)_l = \frac{P(m,d)_l}{\sum_{d>100} \sum_l P(m,d)_l} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2.3-3)$$

上の計算の目的は応答スペクトルの低周波数領域を支配する可能性のある遠距離大地震を同定することである。

ステップ6 支配地震の平均マグニチュードおよび平均距離の算定

ステップ2で求めた 5Hz および 10Hz の平均のスペクトル加速度に対する寄与率の分布から、次式を用いて平均マグニチュード $M_a(5-10\text{Hz})$ を算出する。

ここに、 m は各マグニチュード区間の代表マグニチュード値とする。左辺は、参考確率(10⁻⁵/年)に対応する地震動レベルを超える地震動が発生する条件での寄与率で重み付けされたマグニチュードの条件付期待値である。

また、マグニチュードと距離の区間全体の寄与率の分布を表す行列の算出結果を用いて、支配地震の距離の対数平均を算出する。

ただし、 L_n は自然対数を表す。左辺は、参考確率(10⁻⁵/年)に対応する地震動レベルを超える地震動が発生する条件での寄与率で重み付けされた距離の対数に対する条件付き期待値である。

ステップ7 遠距離大地震の中に支配地震がある場合

もし、ステップ5で遠距離大地震の影響が寄与率で5%を越える場合には、ステップ2で決定された、1Hzおよび2.5Hzの平均に対する地震マグニチュードと距離の分布より、平均マグニチュードと距離の対数平均を次式で算出する。

ステップ8 支配地震に基づく SSE 応答スペクトルの評価

R.G. 1.165³¹⁾の付録Bに示された方法により、以上ステップで同定された支配地震から SSE (Safe Shutdown Earthquake) 応答スペクトルを決定する。

2.3 参照確率の設定に関する知見の調査

確率論的に想定地震を設定する際には、参照確率を設定する必要がある。本研究における想定地震の試算では、参考確率として 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} の 3 つの値を用いているが、この値は、米国での値 (10^{-5})などを参考に暫定的に決めたものであり、今後、確率論的な想定地震の設定を実用化していく上では、参考確率の設定について様々な観点からの検討が必要である。現時点では、参考確率の設定の参考となる知見として、以下のようなものが挙げられる。

(1) 米国における設定値

米国 NRC (Nuclear Regulatory Commission) の R.G. 1.165³¹⁾では、参考確率を 10^{-5} としている。これは、安全停止地震動 (Safe Shutdown Earthquake Ground Motion: SSE) を超える 1 年あたりの確率として許容できるものと位置付けられており、具体的には、現在運転中のプラントに対して SSE を超える確率を評価したときの中央値として定められている（図 2.3-1）。すなわち、参考確率の値は絶対値として独自に決められたのではなく、新たなプラントに対して運転中のプラントの SSE の超過確率の中央値を確保するように決められた相対的な値である。

(2) 現行の指針における設計用最強地震と設計用限界地震

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」では、重要度 As クラスの施設については、設計用最強地震および設計用限界地震による地震力に耐えることとされており、設計用最強地震と設計用限界地震は、それぞれ以下のような考え方に基づき選定されている。

1) 設計用最強地震

審査指針には、

「歴史的資料から過去において敷地又はその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起こり、敷地およびその周辺に同様の影響を与えるおそれのある地震、および近い将来敷地に影響を与えるおそれのある活動度の高い活断層による地震のうちから最も影響の大きいものを選定する。」と記述されている。活断層を評価する際の目安としては、解説に以下の記載がある。

- i) 歴史資料により、過去に地震を発生したと推定されるもの
- ii) A 級活断層に属し、10,000 年以前以降活動したもの、又は地震の再来期間が 10,000 年未満のもの
- iii) 微小地震の観測により、断層の現在の活動性が顕著に認められるもの

これらの記述から、参考確率との対応を考えてみる。

まず「歴史的資料に基づく最も大きな影響を与えた地震を考慮する」点についてみてみる。例えば「新編日本被害地震総覧」には、過去 1,000 年以上の被害地震が記載されているが年代や地域による精度の違いが大きいとされている。地方も含めた全国の顕著な被害地震がある程度網羅されるようになったのは、江戸時代以降の約 400 年程度と言われている。したがって、歴史資料に

基づく設計用最強地震に対応する参考確率は 2.5×10^{-3} 程度と考えることができる。

次に、活断層についてみると、「10,000 年以前以降活動したもの、又は地震の再来期間が 10,000 年未満のもの」を考慮することとなっており、対応する参考確率の最小値は 10^{-4} となる。

2) 設計用限界地震

審査指針には、

「地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質および地震地体構造に基づき工学的見地からの検討を加え、最も影響の大きいものを想定する。」

「基準地震動 S_2 には、直下地震によるものもこれに含む。」

と記述されている。活断層を評価する際の目安としては、解説に以下の記載がある。

- i) 1) ii) を除き A 級活断層に属するもの
 - ii) B および C 級活断層に属し、50,000 年以前以降活動したもの、又は地震の再来期間が 50,000 年未満のもの

上記のうち、発生頻度との対応がつけられるものは活断層に関するものだけである。i) については、10,000 年以上活動していない A 級活断層、あるいは再来期間が 10,000 年以上の A 級活断層と読み替えることができるが、後者に対応する参考確率は、 10^{-4} 以下と考えることができる。一方、ii) は、 2×10^{-5} が最小値となるが、最大値は B 級活断層で最も再来間隔が短いもので決まる。上記審査指針の解説には、再来期間 R (年) を、(2.3-1)式で推定することができるとしている。

ここで、 M （マグニチュード）、 S （平均変位速度、単位 mm/年）である。

この関係式を使うと、B 級活断層（平均変位速度 S が 0.1~1mm/年）で $M=6.5$ の場合には R は 794~7,940 年、 $M=7.0$ では 1,584~15,840 年、 $M=7.5$ では 3,160~31,600 年となる。つまり、B 級活断層の再来間隔の最小値は 1,000 年程度であり、対応する参考確率は 10^{-3} 程度となる。

(3) JEAG における基準地震動の発生確率

原子力発電所耐震設計技術指針(重要度分類・許容応力編: JEAG 4601・補-1984)³⁷⁾では、運転状態と地震動との組合せの確率的評価の項で、基準地震動 S_1 , S_2 の発生確率を示しており(表2.3-1)、これによれば、 S_1 の発生確率は $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4}$ 、 S_2 の発生確率は $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ とされている。

(4) IAEA の Safety Standard Series No. 50-SG-S1 の記述

IAEA の Safety Standard Series No. 50-SG-S1³⁸⁾ には、設計用地震動として 2 つの異なるレベル

(SL-1 と SL-2) を考慮することが一般的であると記述されている。SL-2 とは、終局の安全性確保(ultimate safety requirements)に対応するもので、施設の使用期間内に超過する確率がきわめて小さく、設計で用いる地震動として最大のレベルであり、一方、SL-1 は、SL-2 よりも発生可能性が高いが地震動の強さは低く、異なる要求性能 (SL-2 では安全性確保のみであった) に対応して決定しうるものであるとしている。その上で、それぞれのレベルと確率の対応の例として、以下のような記述がある。

- ・ SL-1 として、年超過確率 10^{-2} と対応づけている事例がある
- ・ SL-2 として、年超過確率 10^{-4} と対応づけている事例がある

表 2.3-1 運転状態と地震動との組合せの確率的評価³⁷⁾

表 I - 1 運転状態と地震動との組合せの確率的評価

発生確率		1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}						
運転状態の発生確率 (1/年)		I	II	III			IV										
基準地震動の発生確率 (1/年)				S_1	S_2												
基準地震動 S_1 と の組合せ	従属事象		S_1 従属														
	1分以内		$S_1 + II$														
	1時間以内		$S_1 + II$			$S_1 + III$			$S_1 + IV$								
	1日以内		$S_1 + II$			$S_1 + III$			$S_1 + IV$								
	1年以内		$S_1 + II$			$S_1 + III$			$S_1 + IV$								
基準地震動 S_2 と の組合せ	従属事象		S_2 従属														
	1分以内		($S_2 + II$ は 10^{-9} 以下となる)														
	1時間以内		$S_2 + II$			$S_2 + III$			$S_2 + IV$								
	1日以内		$S_2 + II$			$S_2 + III$			$S_2 + IV$								
	1年以内		$S_2 + II$			$S_2 + III$			$S_2 + IV$								

注 : (1) 発生確率から見て

← 組合せが必要なもの。

←··· 発生確率が 10^{-7} 以下となり組合せが不要となるもの。(2) 基準地震動 S_1 の発生確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ / サイト・年と推定されるが、ここでは $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ / サイト・年を用いた。

(3) 表に示す発生確率は現在の知見によるものである。

LLNL Median Hazard Values For the SSE
Average of 5 and 10 Hz

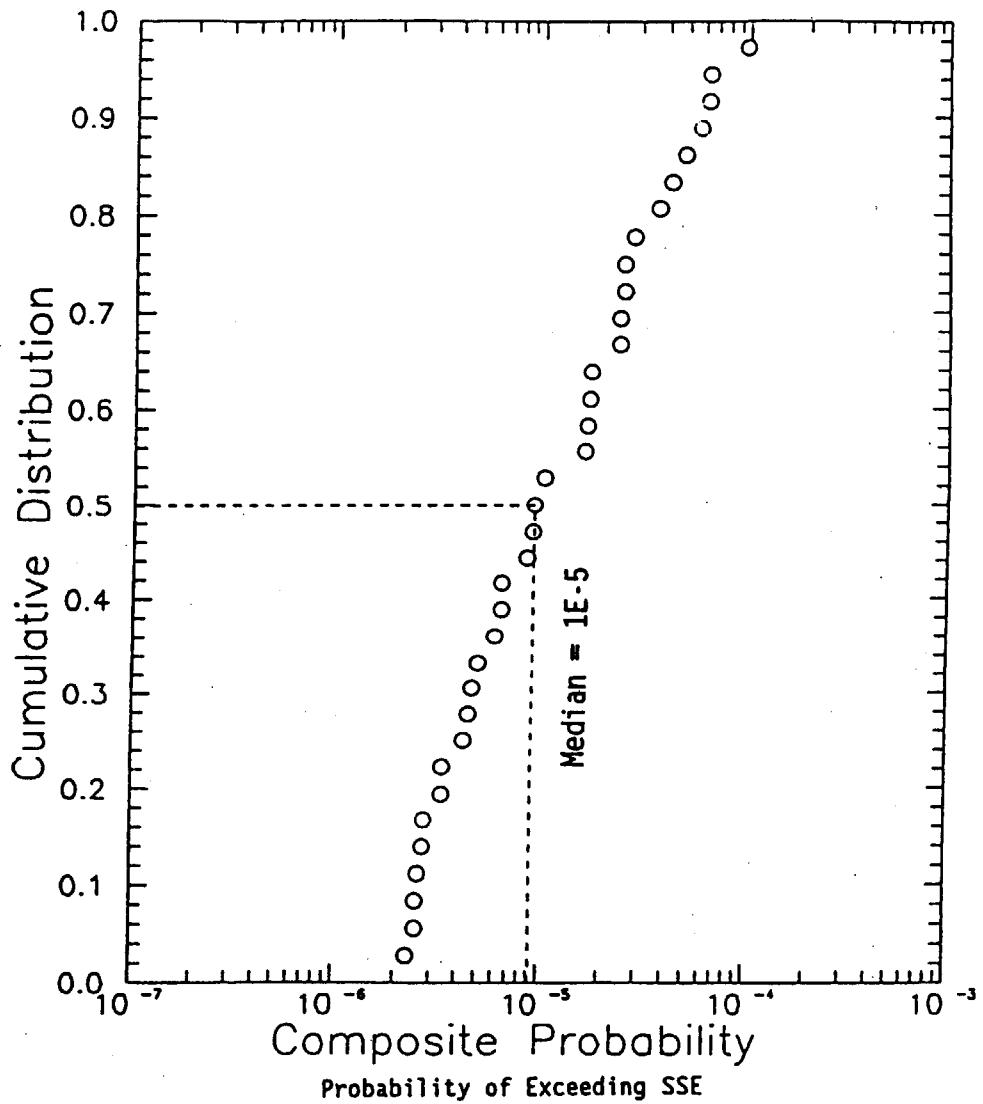


Figure B.2 Probability of Exceeding SSE using Median
LLNL Hazard Estimates

図 2.3-1 米国の参考確率の設定根拠³¹⁾

2章の参考文献

- 1) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧 [増補改訂版]，東京大学出版会, 1996.
- 2) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1885～1980年，地震研究所彙報，Vol. 57, pp. 401-463, 1982.
- 3) 気象庁：改訂日本付近の主要地震の表（1926～1960年），地震月報別冊第6号；および地震月報（1961年～），1982.
- 4) 佐藤良輔 編著：日本の地震断層パラメター・ハンドブック，鹿島出版会, 1989.
- 5) 活断層研究会 編：日本の活断層—分布図と資料，東京大学出版会, 1980.
- 6) 活断層研究会 編：新編日本の活断層—分布図と資料，東京大学出版会, 1991.
- 7) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分带図，地震研究所彙報，Vol. 65, pp. 289-319, 1990.
- 8) 建設省国土地理院：1:25,000 都市圏活断層図，（財）日本地図センター。
- 9) 200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ：「200万分の1日本列島活断層図」，活断層研究，第19号，活断層研究会, pp.3-12, および添付地図, 2000.
- 10) 科学技術庁：平成7年度・平成8年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集, 1997.9.
- 11) 科学技術庁：第2回活断層調査成果報告会予稿集, 1998. 11.
- 12) 科学技術庁：第3回活断層調査成果報告会予稿集, 1999. 11.
- 13) 科学技術庁：第4回活断層調査成果報告会予稿集, 2000. 11.
- 14) 工業技術院地質調査所：平成7年度 活断層研究調査概要報告書，地質調査所研究資料集, No. 259, 1996.7.
- 15) 工業技術院地質調査所：平成8年度 活断層研究調査概要報告書，地質調査所研究資料集, No. 303, 1997.8.
- 16) 工業技術院地質調査所：平成9年度 活断層・古地震研究調査概要報告書，地質調査所速報, no.EQ/98/1, 1998.8.
- 17) 工業技術院地質調査所：平成10年度 活断層・古地震研究調査概要報告書，地質調査所速報, no.EQ/99/3, 1999.9.
- 18) 萩原尊禮 編：日本列島の地震—地震工学と地震地体構造—，鹿島出版会, 1991.
- 19) 垣見俊弘・岡田篤正・衣笠義博・松田時彦・米倉伸之：日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模，地球惑星科学関連学会，1994年合同大会予稿集, p.302, 1994.
- 20) 地震調査研究推進本部地震調査委員会編：日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—<追補版>，（財）地震予知総合研究振興会, 1999.
- 21) 宇津徳治 総編集：地震の事典（第5刷），朝倉書店, 1990.
- 22) 奥村俊彦, 石川裕：最近の活断層調査結果を反映した地震ハザード評価モデル，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, I-B382, 2000.
- 23) 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会：(改訂試案) 長期的な地震発生確率の評価手法について, 1999.1.
- 24) 奥村俊彦・石川裕・亀田弘行：活断層の活動履歴に関する情報を考慮した地震危険度評価，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp. 49-56, 1997.

- 25) Wesnousky, S.G., Scholz, C.H., Shimazaki, K., and Matsuda, T.: Integration of Geological and Seismological Data for the Analysis of Seismic Hazard: A Case Study of Japan, BSSA, Vol. 74, No. 2, pp. 687-708, 1984.
- 26) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp.1-11, 1991.
- 27) 社団法人 日本電気協会 電機技術基準調査委員会：基準地震動の策定方法の見直しに関する調査報告書, 原子力発電耐震設計特別調査委員会調査報告書, Vol.22, 1994.
- 28) 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, 土木学会第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 161-164, 1997.
- 29) 日本建築学会：地震荷重—その現状と将来の展望, 3.2.2 (5), pp. 82-83, 1987.
- 30) 入倉孝次郎：特定の活断層を起震断層とした強震動の評価手法, 第 2 回地震調査研究と地震防災工学の連携ワークショップ「地震動予測地図の作成に向けて—現状と今後の課題—」予稿集, 文部科学省, p.29, 及び当日配付資料, 2001.
- 31) USNRC : Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide 1.165, 1997. 3.
- 32) 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の拡張, 土木学会論文集, No. 392/I-9, pp.395-402, 1988.4.
- 33) 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, No. 577/I-41, pp.75-87, 1997. 10.
- 34) Bernreuter, D. L. et al. : Seismic Hazard Analysis, Report NUREG/CR-1582, vols. 1-5, 1981.
- 35) Bernreuter, D. L., J. B. Savy, R. W. Mensing, and J. C. Chen : Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Plant Sites East of the Rocky Mountains, Report NUREG/CR-5250, vols. 1-8, 1989.
- 36) Electric Power Research Institute : Probabilistic Seismic Hazard Evaluations at Nuclear Power Plant Sites in the Central and Eastern United States : Resolution of the Charleston Earthquake Issue, EPRI Report NP-6395-D, 1989.
- 37) 社団法人 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編：JEAG 4601・補-1984）, pp. 37-38, 1984.
- 38) IAEA : Earthquakes and Associated Topics in relation to NPP Siting, IAEA Safety Standard Series No. 50-SG-S1 (Rev1), 1991.

3. モデルサイトの想定地震設定に関する検討

3章では、東北地方南部太平洋岸に面したサイトをモデルサイトとして評価条件を設定し、石川らの方法を用いて確率論的想定地震を設定するための評価を行なった。そして確率論的評価の結果から得られた想定地震の諸元と、現行の耐震設計審査指針に基づき決定論的評価から想定される地震の諸元を比較検討した。本検討の構成と実施内容は、以下の通りである。

3.1 節では、評価条件について述べる。

この検討では、地震発生モデルと地震伝播モデルに関する評価条件を設定する。地震発生モデルでは、太平洋プレートの沈み込みに起因するプレート上面付近の地震を表現する地震域、松田の起震断層に基づく活断層および地殻内地震を表現するランダム地震域の計3種類の地震活動域を設定し、地震発生の時系列モデルはボアソン過程とした。地震伝播モデルでは、距離減衰式として安中ら(1997)の式¹⁰⁾を用いることとし、その際の距離指標は最短距離とした。このような評価条件に基づく解析モデルを基本モデルと称する。さらに、解析モデルとして現行指針モデルと称するもう1種類を作成した。このモデルは、現行の耐震設計審査指針に基づく地震諸元を選定するために用いた地震データベースと共にするために、新たに海底活断層を考慮し、2種類の活断層を評価対象外とした地震データベースを作成し、それ以外の評価条件については基本モデルと同一とした。

3.2 節では、解析結果について述べる。

石川らの方法を用い、始めに基本モデルについて、地震動強さの指標をそれぞれ最大加速度(PGA)、短周期領域の加速度応答スペクトルおよび長周期領域の加速度応答スペクトルとした場合の確率論的想定地震の諸元を算定した。各地震動指標について、解析の結果得られた地震危険度曲線、貢献度曲線、マグニチュードと最短距離の寄与を表す同時確率、主な地震活動域に対する貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離、および貢献度10%以上の確率論的想定地震の諸元を示した。

次に現行指針モデルについて確率論的想定地震の諸元を算定し、基本モデルの場合と同様の地震評価パラメータを示した。

3.3 節では、評価法の差異による想定地震諸元の比較検討について述べる。

本検討では、始めに現行指針に基づいた想定地震の諸元を基準地震動 S_1, S_2 に対して示した。そしてこの決定論的な評価から選定された想定地震の諸元と、現行指針モデルに基づき算定した確率論的想定地震の諸元を比較検討した。ここに、現行指針では基準地震動 S_1, S_2 に対する年超過確率は明確には定義されていないので、参考文献に基づき年超過確率を仮定した。

3. 1. 評価条件

3. 1. 1 サイトの設定

本研究は、サイトに支配的な影響を及ぼすことが予測される想定地震を確率論的に設定する評価手法の定式化を目的としたものであるが、その検討をするための試解析において対象サイトを想定

する必要がある。本検討では、本評価手法の耐震設計への適用を検討する際、確率論的に想定される地震と現行の耐震設計審査指針に基づく決定論な想定地震を比較検討することを考慮して、対象サイトとして実プラントのサイトを選定することとした。本研究でモデルサイトの対象とする東北地方南部太平洋岸に面したサイトの位置を図 3.1.1-1 に示し、その経度・緯度を、それぞれ 141.03° E, 37.32° N とする。

同サイト付近では、太平洋プレートが北米プレートにもぐり込んでいるため、以下の地震活動の影響を考慮する必要がある。

- ① (太平洋プレートと北米プレートの) プレート上面付近の地震
- ② (北米プレートの) プレート内地震

①は、太平洋プレートのもぐり込みに起因するプレート上面付近の地震である。一方、②は上部地殻内の浅い場所で発生する地震である。

また、モデルサイト近傍の地盤特性概要は、以下のとおりである。

- ・ サイト付近の地質は、第三紀鮮新世の堆積岩である多賀層群富岡層の泥岩で構成されている。
- ・ サイトでの岩盤弾性波速度は、P 波で $1600\sim1900$ m/s、S 波で $450\sim500$ m/s である。

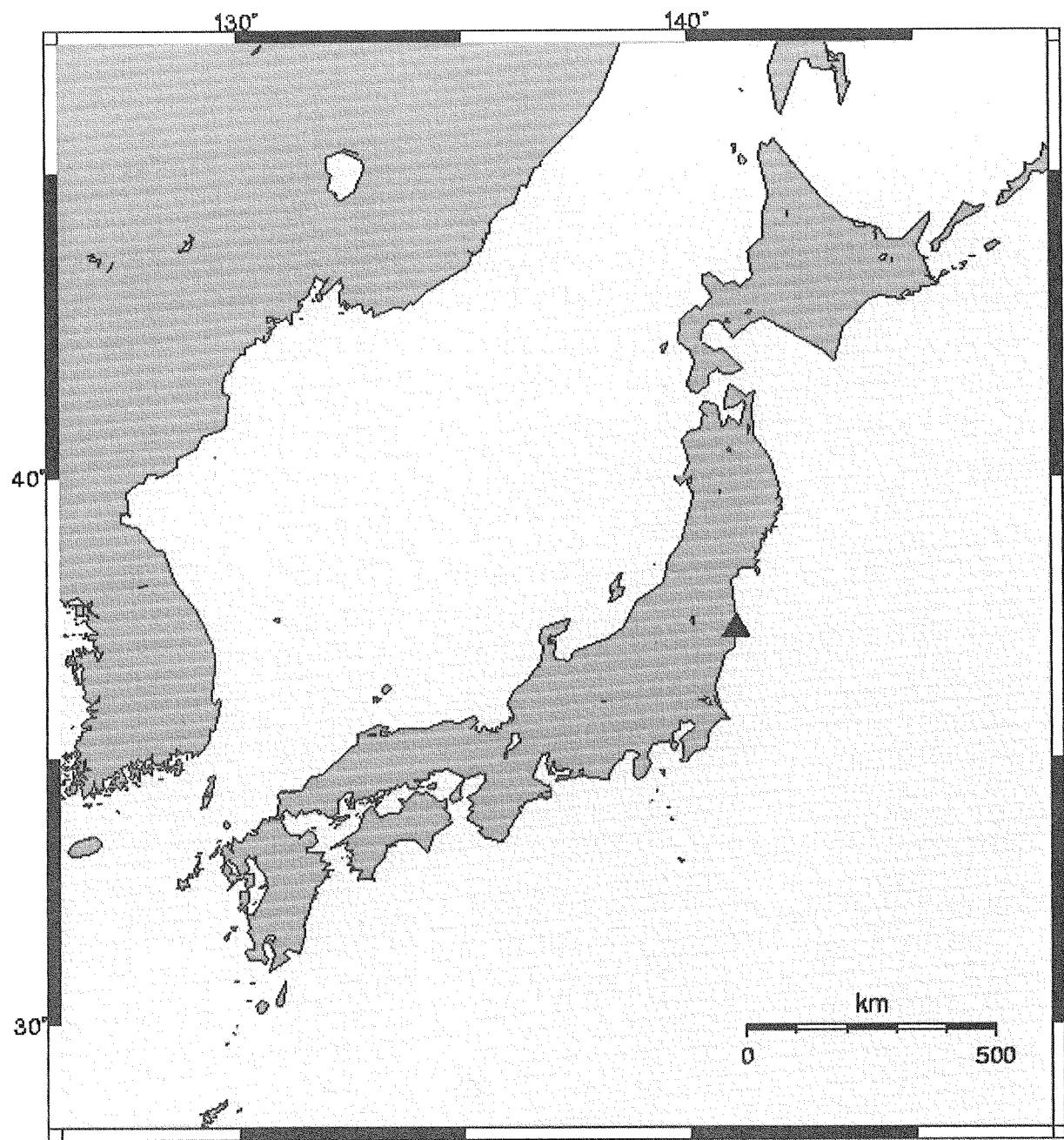


図 3.1.1-1 モデルサイトの位置

3. 1. 2 評価条件の設定項目

2.1 節で述べた手順にしたがって、以下、モデルサイトに対する評価条件を設定する。ここでは、条件を設定する項目を簡単に整理しなおす。

確率論的地震危険度解析を行うにあたり、「地震発生」および「地震動伝播」に関するモデル化が必要となる。これらは、それぞれ「地震発生モデル」および「地震動伝播モデル」とよばれる。地震発生モデルは、地震の発生位置・規模・頻度等の評価パラメータを設定するものである。一方、地震動伝播モデルは、震源からの距離と注目する地点の地震動強さの関係をモデル化するものである。確率論的地震危険度解析では、これらをモデル化することによって地震危険度曲線が算定される。

地震発生モデルについては、用いるデータベースが「歴史地震データ」であるか「活断層データ」であるかによって解析手法が区別される。本研究では、前者を用いる方法を「歴史地震に基づく方法」、後者を用いるものを「活断層データに基づく方法」とよぶこととする。地震発生モデルに関する標準的な解析条件項目として、以下があげられる。

- ① 地震活動域
- ② データベース
- ③ 地震発生の時系列モデル・発生頻度
- ④ 規模別の地震発生頻度
- ⑤ 距離
- ⑥ 結果の組合せ

①は、震源のモデル化（点や線など）や考慮すべき地震の位置を設定する項目である。また、歴史地震データに基づく方法では、地震域の分割に関するモデル化も必要となる。

②は、地震の位置・規模・頻度などを算定する時に用いるデータベースである。歴史地震に関する具体的なデータベースとして、有史以来の被害地震を収録した宇佐美カタログ¹⁾、1885年以降の被害地震とM6以上の地震を収録した宇津カタログ²⁾、1926年以降の観測記録に基づいた気象庁カタログ³⁾がある。また、活断層データに関するデータベースとして、『新編 日本の活断層』⁴⁾や松田による「起震断層」⁵⁾などがある。

③のうち時系列モデルは、地震発生の間隔を表現するためのモデル化である。同一の指數分布にしたがう場合を「ポアソン過程」、そうでない場合を「非ポアソン過程」とよぶ。非ポアソン過程の具体例として、対数正規分布やワイブル分布にしたがうモデルなどがある。また、発生頻度について、歴史地震データに基づく場合には上述のデータベースから、活断層データに基づく方法では断層固有の平均変位速度と地震時の単位変位量から、それぞれ算定される。

④は、地震の規模と発生確率（頻度）を表現するものである。歴史地震データに基づく方法では、Gutenberg-Richter式（以下、略して「G-R式」ともいう）に立脚したb値モデルが一般に用いられる。また、活断層データに基づく方法では、地震の規模は断層ごとに固有であるとし、規模の推定には松田式⁶⁾が用いられる場合が多い。

⑤は、震央距離、最短距離などの距離指標のうち、どれを採用するかに関する設定である。場合に

よっては深さの設定もなされる。また、歴史地震データに基づく方法では、距離の確率密度関数の作成が必要となる。

⑥は、「歴史地震データに基づく方法」および「活断層データに基づく方法」によって算定される各ハザード曲線から、最終的な結果を得るための方法に関する設定である。具体的には、それぞれの結果の単純な足合せや、両結果を包絡するような曲線を求めることが考えられる。

地震伝播モデルは、震源からサイトの距離と地震動強さとの関係について、パラメータを設定するものである。パラメータが設定される標準的な条件項目として、以下があげられる。

- ⑦ 距離減衰式
- ⑧ 評価式のばらつき
- ⑨ ばらつきの範囲

⑦は、地震の規模距離と地震動強さ指標の関係を表す距離減衰式に関する設定である。

⑧は、距離減衰式で選定される地震動強さ指標に対して、そのばらつきを表すための設定である。

⑨は、地震動強さ指標に関して、物理的に発生しうる上限値を考慮するための設定である。

これらの項目にパラメータをあたえることによって、確率論的地震危険度解析を実施する。

3. 1. 3 地震活動域の設定

(1) 地震活動域設定の基本的な考え方

本研究のモデルサイトに影響を及ぼす地震について、3. 1. 1 項で述べたように「プレート上面付近の地震」と「プレート内地震」を考慮する必要がある。これに関して、本研究では、「プレート上面付近の地震」は、深度の大きい場所で発生するため、活断層が地表や海底に現われにくいので、歴史地震データに基づく方法のみによって評価する。また、「プレート内地震」を歴史地震データおよび活断層に基づく両法によって評価する。この場合プレート内地震は、場所や規模がある程度限定できるものとして扱うことができる活断層やプレート境界の大規模地震ではモデル化されない地震を表すものとして、想定した地震域内では、規模別の地震発生頻度は同一、地震の発生場所は不規則であるとしたランダム地震域として設定する。

歴史地震データに基づく方法を適用するために、地震域を分割面で表現する「ランダム地震域」を設定する。このとき、水平面方向の分割には萩原⁷⁾の「地震地体構造」を用いる。さらに、プレート上面付近の地震に対して、深さ方向の分割も行う。

一方、活断層については、松田⁵⁾の「起震断層」にしたがったモデル化を行う。

(2) モデルサイト周辺の震央分布

図 3.1.3-1 は、1926～1982 年の気象庁データについて、マグニチュード 5 以上の地震の震央分布を示したものである。これらのデータについて、震源深さを (a) 20km 以浅、(b) 20～40km、(c) 40～60km、(d) 60～100km に区分したものを図 3.1.3-2 に示す。

ところで、1983 年以降の気象庁データは、震源深さの表示が 1km 刻みと細かくなった。1983～1996 年に発生したマグニチュード 3 以上のデータのうち、震源深さが 100km より浅い地震の震央分布を図 3.1.3-3 に示す。また、これらのデータを、震源深さを (a) 20km 以浅、(b) 20～40km、(c) 40～60km、(d) 60～100km に区分した場合の震央分布を図 3.1.3-4 に示す。図 3.1.3-5 は、同じデータのうち東経 139～143 度、北緯 37～38 度の領域で発生した地震の震源深さ分布を示したものである。

図 3.1.3-1～3.1.3-5 から、以下のことが推察できる。

- ・ 1926～1982 年に観測された気象庁データは、深さに対する震央の地域性の分離がよくない。これは、震源深さの精度が悪いことによるものと考えられる。
- ・ 1983～1996 年の気象庁データについて、太平洋側の海域で発生する地震の震源深さは、西側にいくほど深くなっている。
- ・ モデルサイトの直下では 60km より浅い地震は発生していない。
- ・ 1983～1996 年の気象庁データによれば、東北地方の内陸で発生した地震のうち 20km よりも深いものは非常に少ない。
- ・ 1983～1996 年の気象庁データについて、東北地方の内陸で発生した地震のうち、20km より浅いものの数は太平洋（東）側では少なくなっている。
- ・ 1983～1996 年の気象庁データによれば、内陸で発生する地震の平均的な震源深さは 10km 程度であると推測できる。

(3) 地震地体構造

図 3.1.3-6 は、萩原⁷⁾によるわが国の「地震地体構造区分」である。これは、活断層と第四紀テクトニクスによる区分を基本に、重力異常、震源メカニズムなどの地域性に基づいて修正が施されて作成されたものである。モデルサイトに近い G, D, E2 の各領域の特徴は、以下のようにまとめられる。

- ・G (東北日本太平洋斜面) の領域はサブダクションゾーンで、主として逆断層型の大～巨大地震の発生域。G2 には特に大きい地震が発生している。
- ・D (東北地方外帯) は第四紀の活動が安定した地域で、活断層が少なく浅い地震も不活発である。
- ・E2 (東北日本内帯陸域) は、盛岡一白河線および火山フロントよりも東側の領域で、逆断層型の活断層や褶曲帯となっている。活断層の密度は中程度であるが、かなり長大な断層群もある。

(4) ランダム地震域の設定

以上の資料をもとに、本研究でのランダム地震域を、図 3.1.3-7 および 3.1.3-8 のように設定する。図 3.1.3-7 は太平洋プレートのサブダクション・ゾーン、図 3.1.3-8 は東北内陸部の地殻内地震およびその他、のそれぞれの地震を表現するランダム地震域である。また、深さ方向に関するモデルサイトと各地震域の模式的な位置関係を、図 3.1.3-9 に示す。

これらは、図 3.1.3-6 の地震地体構造区分を基本に、震央分布を考慮した区分となっているが、サブダクション・ゾーンに関しては、深さと地震活動度の変化を表現するために東西方向に 4 つの区分を設定している。平均的な震源深さは、西側ほど深くなっていると考えられる。また、中央の 2 つの領域はその両側と比較して地震数が圧倒的に多い。

なお、各ランダム地震域の深さは、その領域で過去に発生した地震の平均的な深さで評価する。ただし、これを算定する際、震源深さの精度を勘案して 1983 年以降の気象庁データを用いることとする。

(5) モデルサイト周辺の活断層の分布

図 3.1.3-10 は、『新編 日本の活断層』⁴⁾に記載されている確実度 I および II の活断層の分布を示したものである。また、図 3.1.3-11 は、松田の起震断層を両端を結ぶ直線で表示したものである。起震断層とは、

「互いに近接して分布している活断層群は、その一つ一つが独立して地震を発生するのではなくて、その断層群全体が一つの大地震に対応している。」

との考え方から、『日本の活断層』(旧版)⁸⁾に記載されている断層を 1 つの地震に対応する単位にまとめたものであり、以下のいずれかの場合を「起震断層」と定義している。ただし、長さ 10km 未満の孤立した活断層と確実度 III の活断層は起震断層の設定に用いられていない。

- ① 5km 以内に他の活断層のない孤立した長さ 10km 以上の活断層
- ② 走行方向に 5km 以内の分布間隔をもって、ほぼ一線にならぶ同じ走行の複数の断層
- ③ 5km 以内の相互間隔をもって並走する幅 5km 以内の断層群
- ④ その断層線の中点の位置が主断層から 5km 以上離れている走行を異にする付随断層あるいは

分岐断層

このように、「起震断層」は活断層のデータをいわば機械的に処理したものであり、独立した地震発生源である保証はないが、個々の活断層に関する詳細な調査結果を早急に得るのが困難な現状においては現実的な取扱いである。特に、地震危険度の評価のように、地震の発生源として活断層を見る場合には有効であると考えられる。

(6) 活断層の設定

本研究における活断層は、基本的に図 3.1.3-11 に示した松田⁵⁾の起震断層を踏襲する。ただし、モデルサイトのごく近傍に存在する断層 A は、図 3.1.3-12 に示すように、北部の一部 18.5km のみを考慮する。これは、近年の活断層の調査結果⁹⁾により、中・南部では第四紀後期の活動が認められていないことによる。

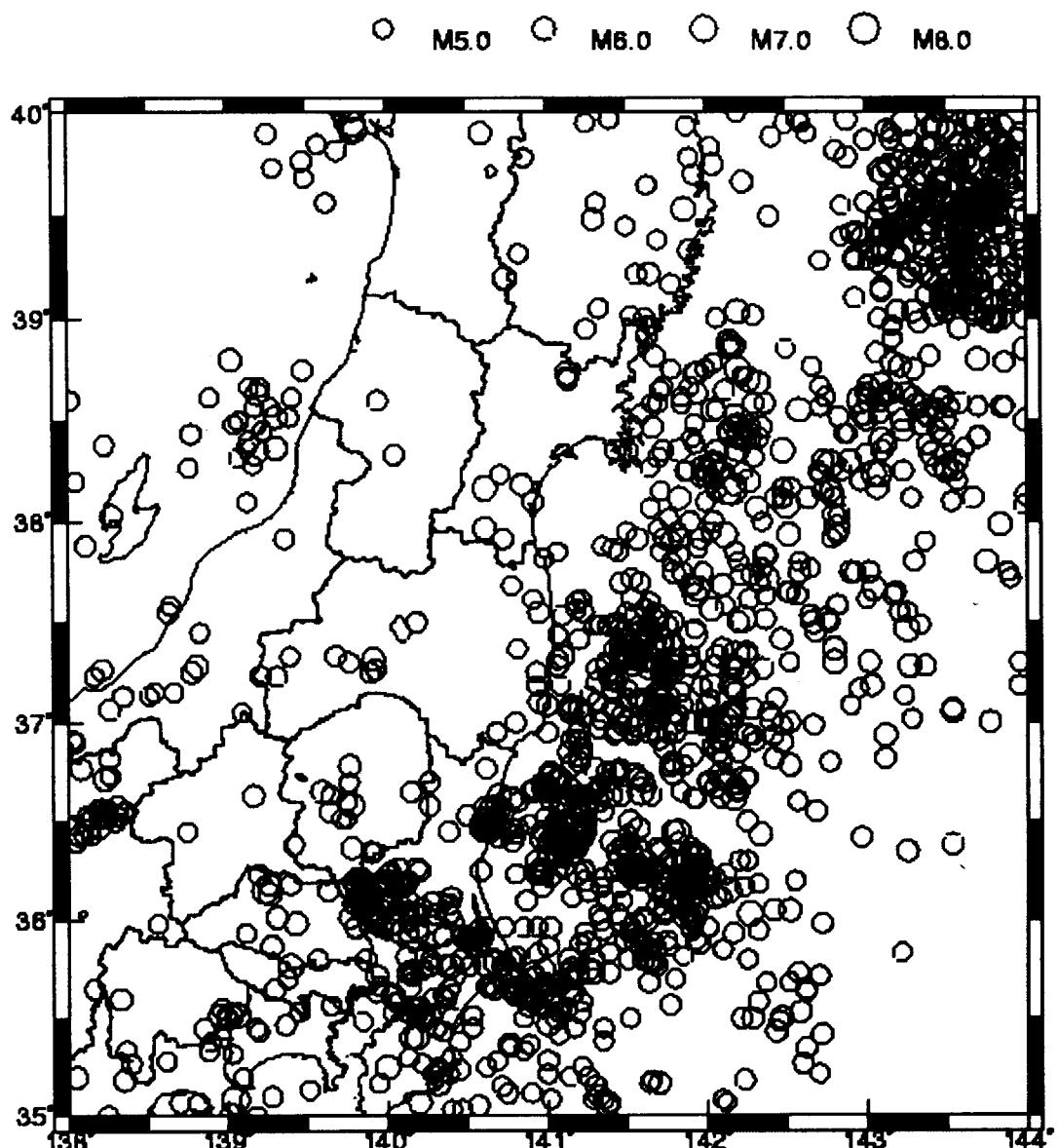


図 3.1.3-1 1926～1982 年の気象庁のデータ³⁾の震央分布 ($M \geq 5$)

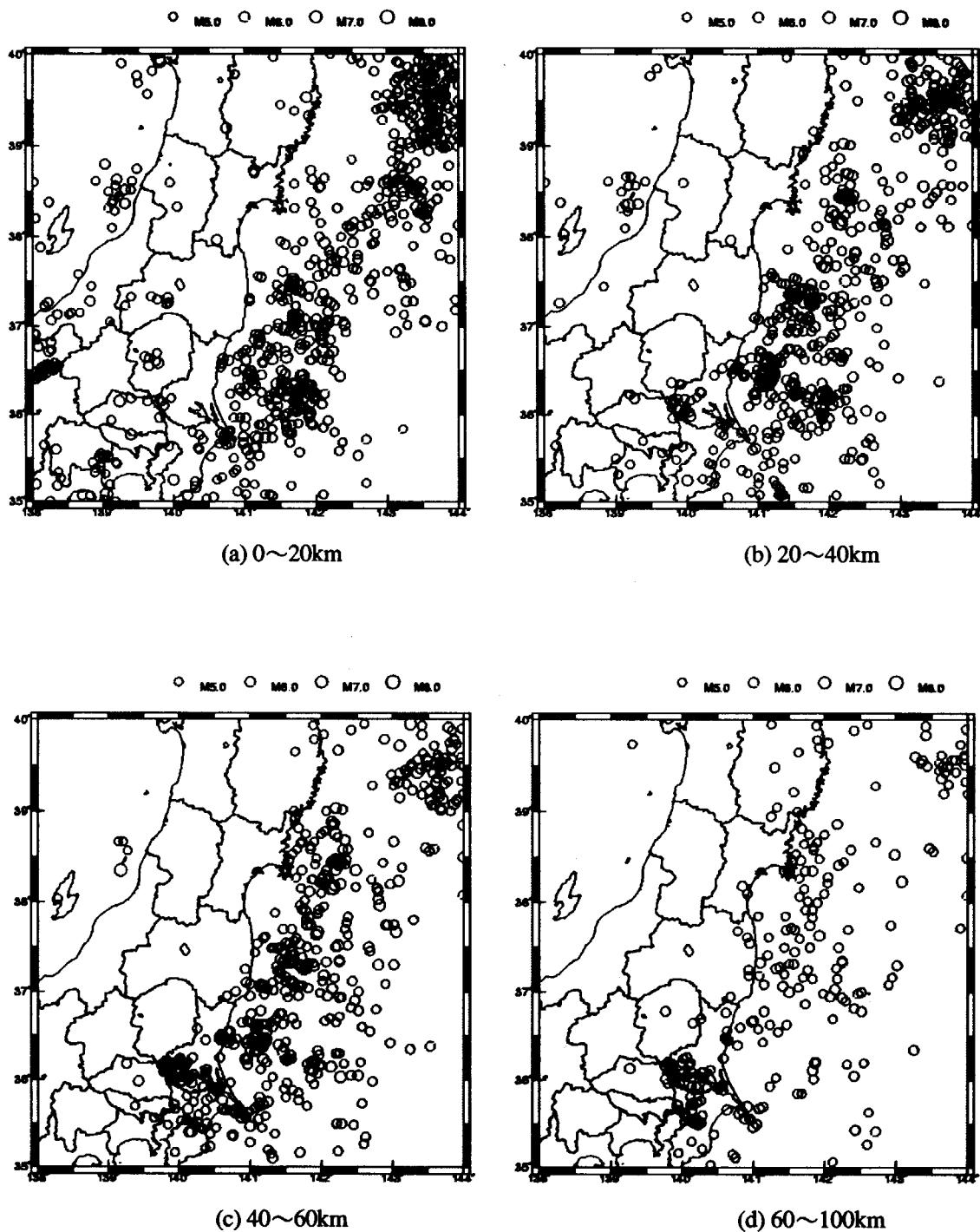


図 3.1.3-2 1926～1982 年の気象庁のデータ³⁾の深さ別の震央分布 ($M \geq 5$)

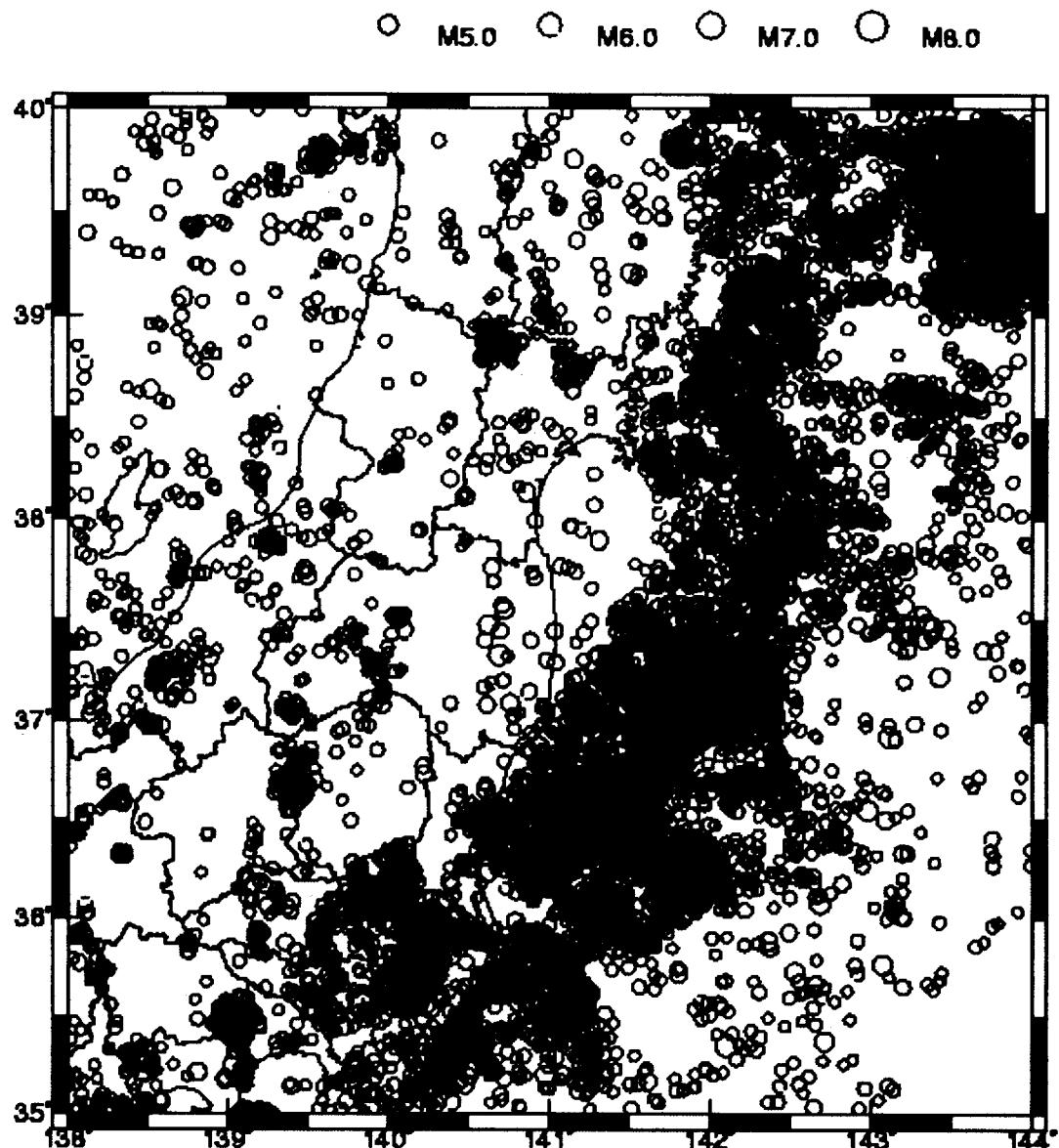


図 3.1.3-3 1983～1996 年の気象庁のデータ³⁾の震央分布 ($M \geq 3$ 、深さ 100km 以下)

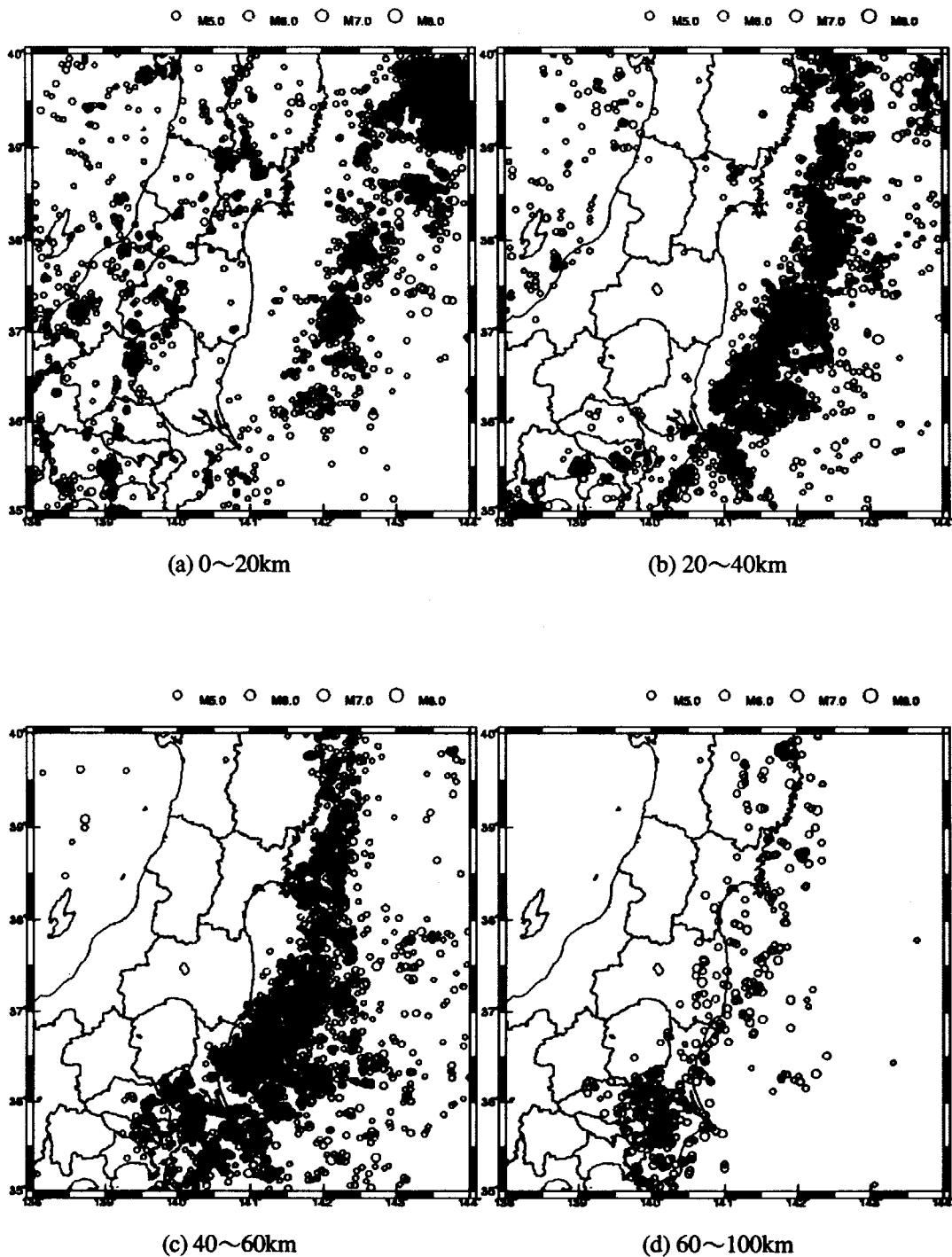


図 3.1.3-4 1983～1996 年の気象庁のデータ³⁾の深さ別の震央分布 ($M \geq 3$ 、深さ 100km 以下)

DESCRIPTION

PERIOD
1983 - 1996

DEPTH (KM)

LONGITUDE
E 139.0 - E 143.0

LATITUDE
N 37.0 - N 38.0

MAGNITUDE
M 3.0 - M 9.0

ORIENTATION
NORTH

- $8 \leq M$
- $7 \leq M < 8$
- $6 \leq M < 7$
- $5 \leq M < 6$
- $M < 5$

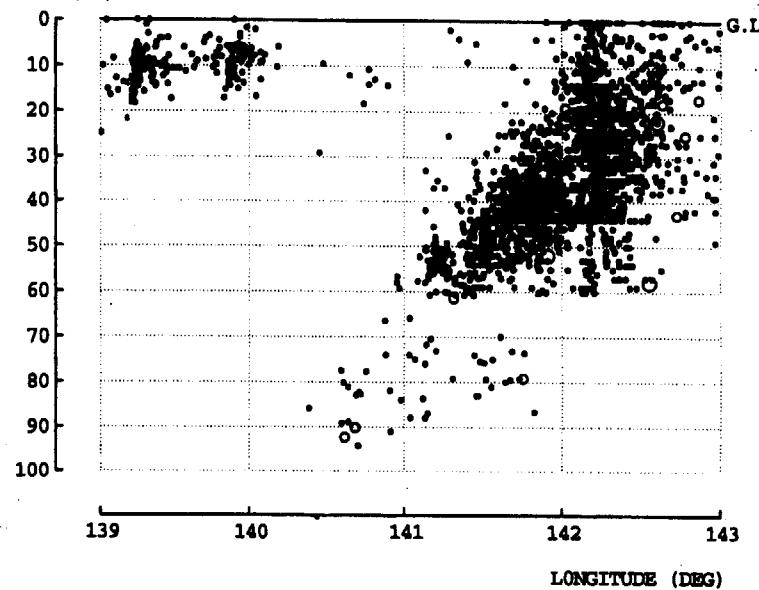


図 3.1.3-5 1983～1996 年の気象庁のデータ³⁾の深さ別の震央分布
($M \geq 5$; 深さ ≤ 100 km; 東経 139～143・北緯 37～38 度の範囲を南から見た図)

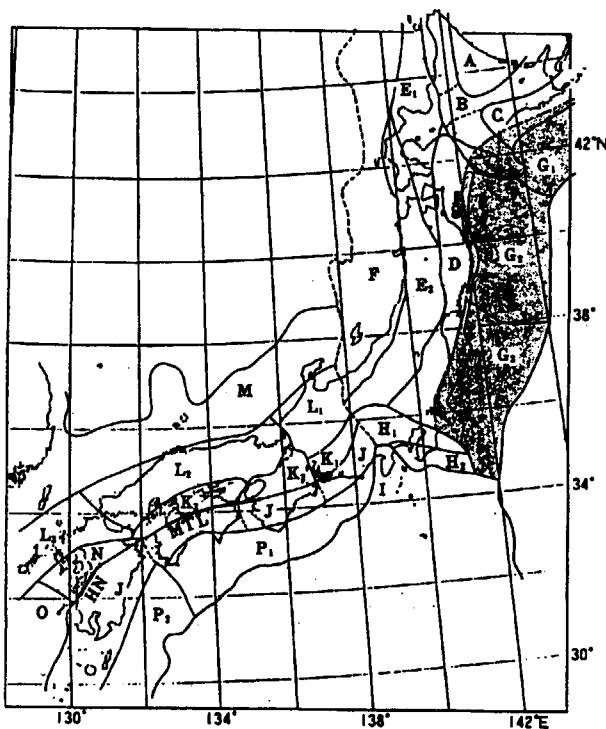


図 3.1.3-6 萩原による地震地体構造区分⁷⁾

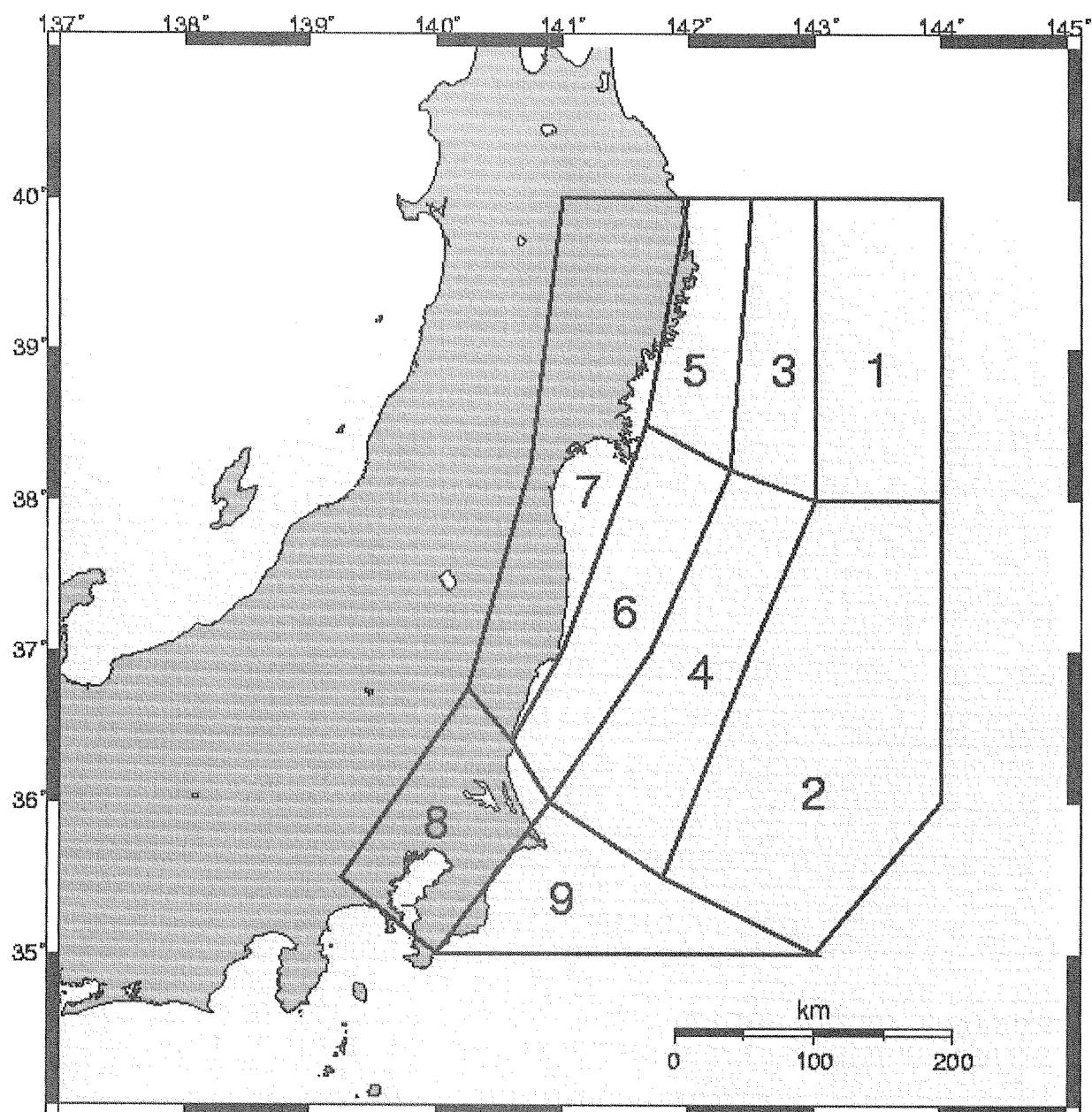


図 3.1.3-7 サブダクションゾーンに対応する地震域

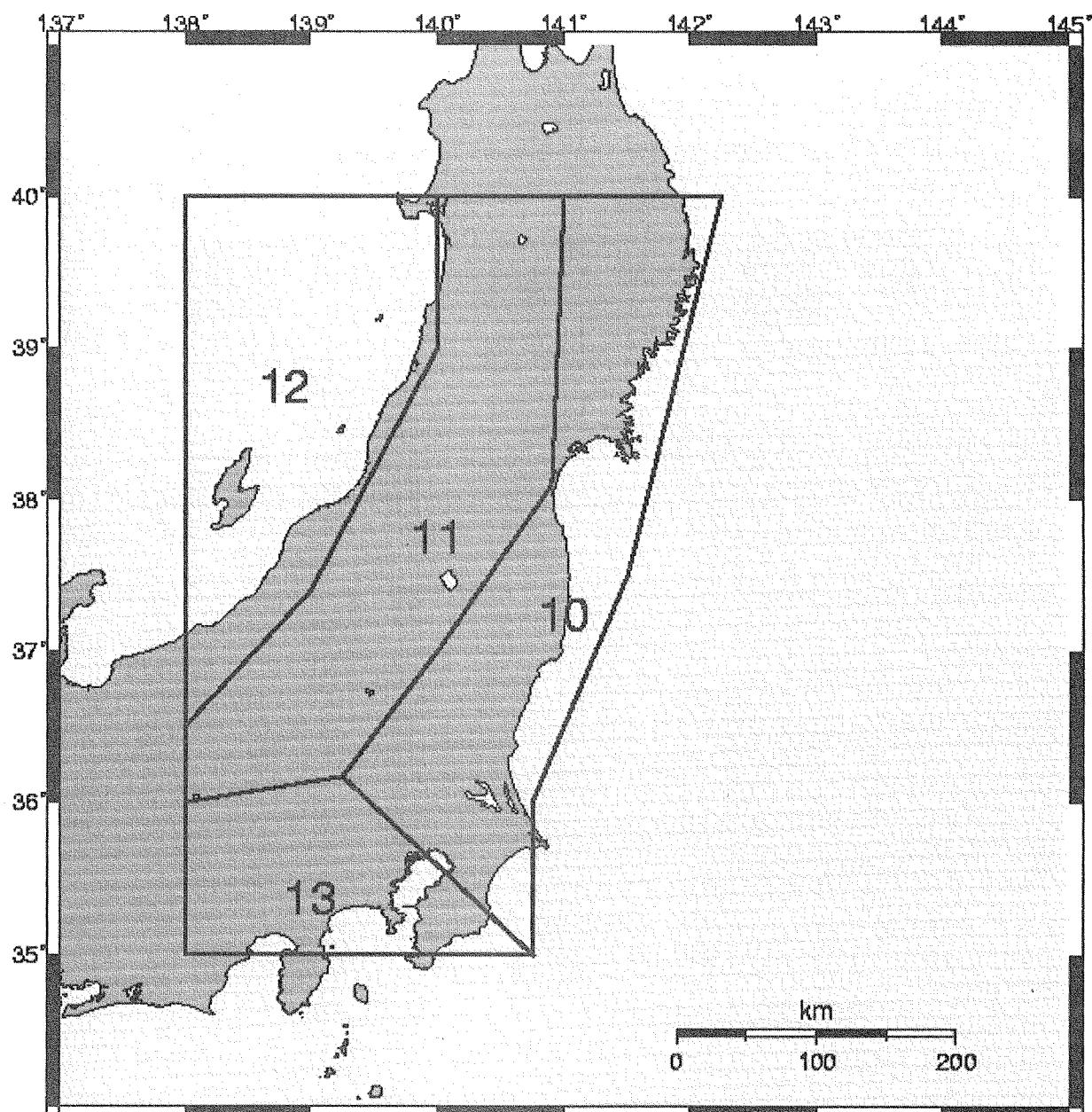


図 3.1.3-8 地殻内地震に対応する地震域

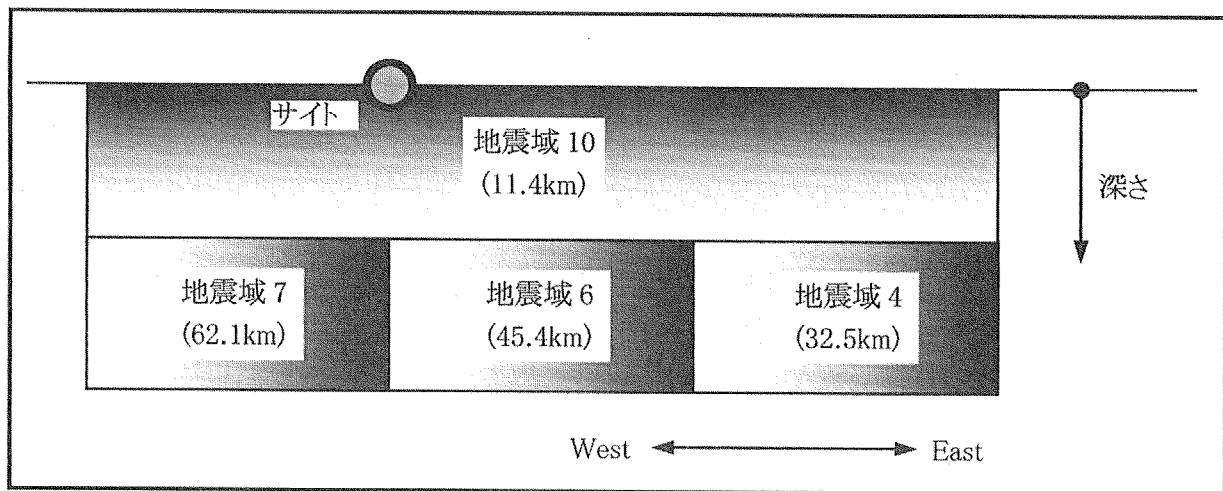


図 3.1.3-9 モデルサイトと各地震域の深さ方向に関する模式的な位置関係

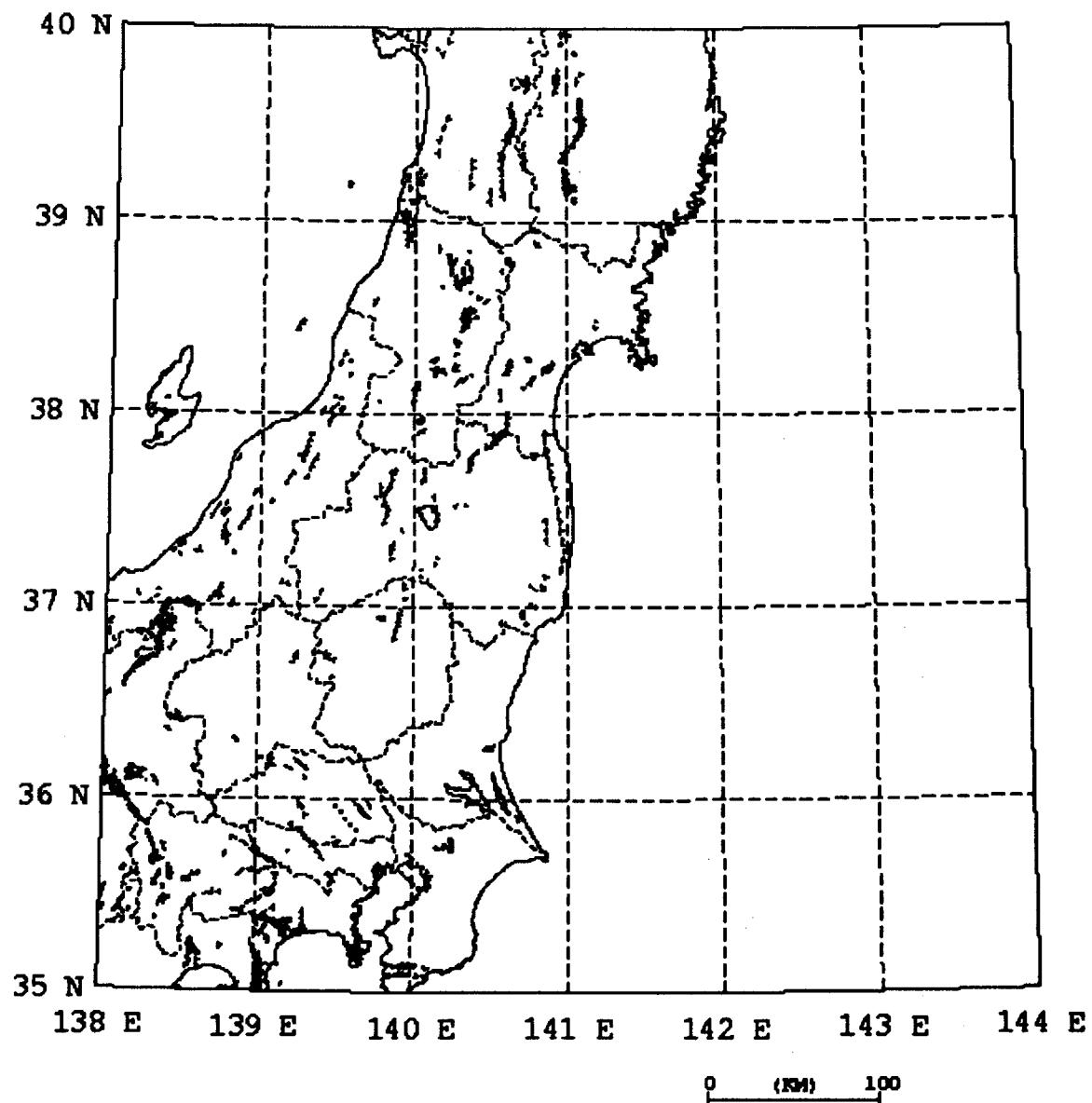


図 3.1.3-10 新編日本の活断層に記載されている確実度 II 以上の活断層の分布⁴⁾

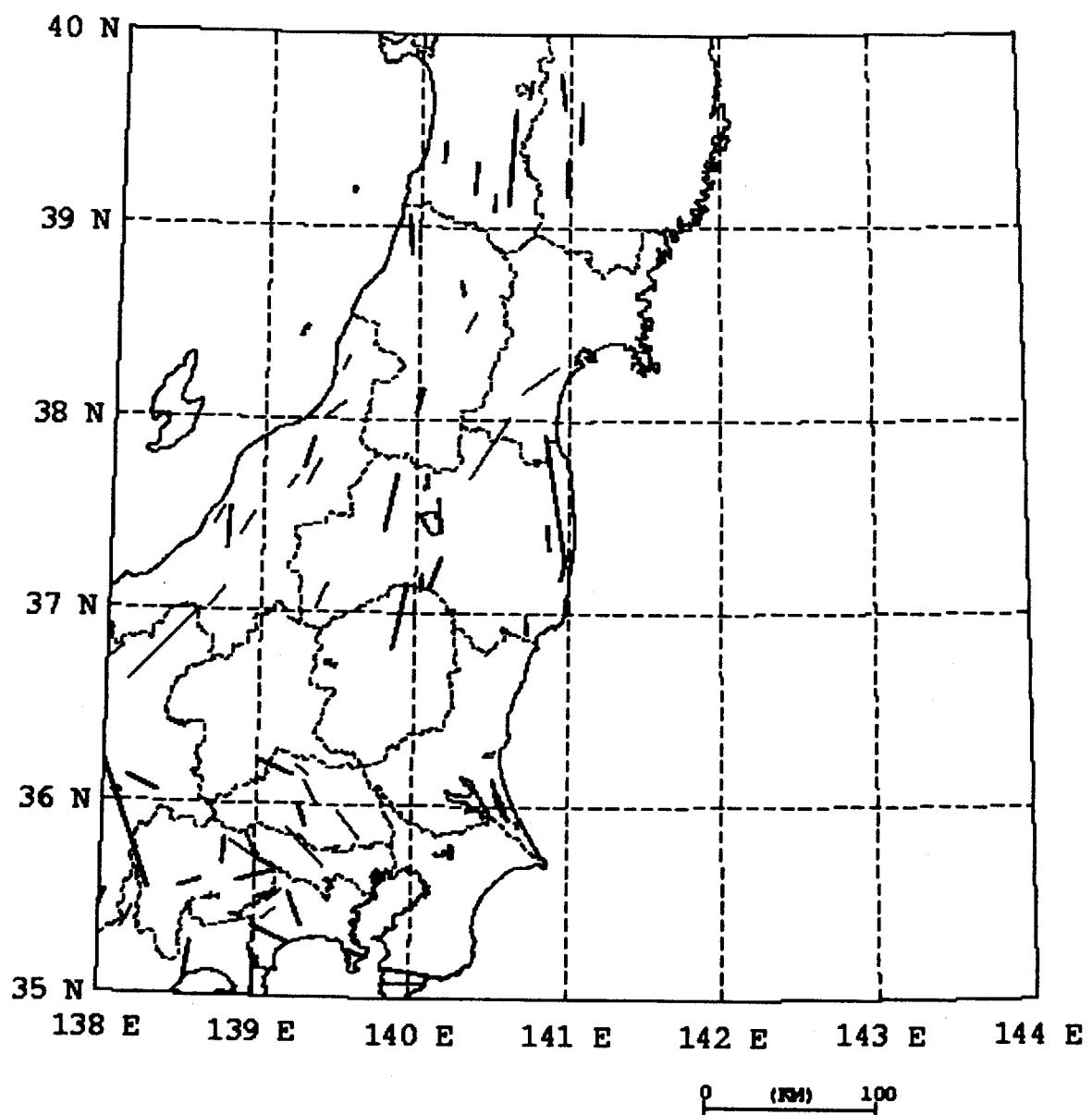


図 3.1.3-11 松田の起震断層⁵⁾

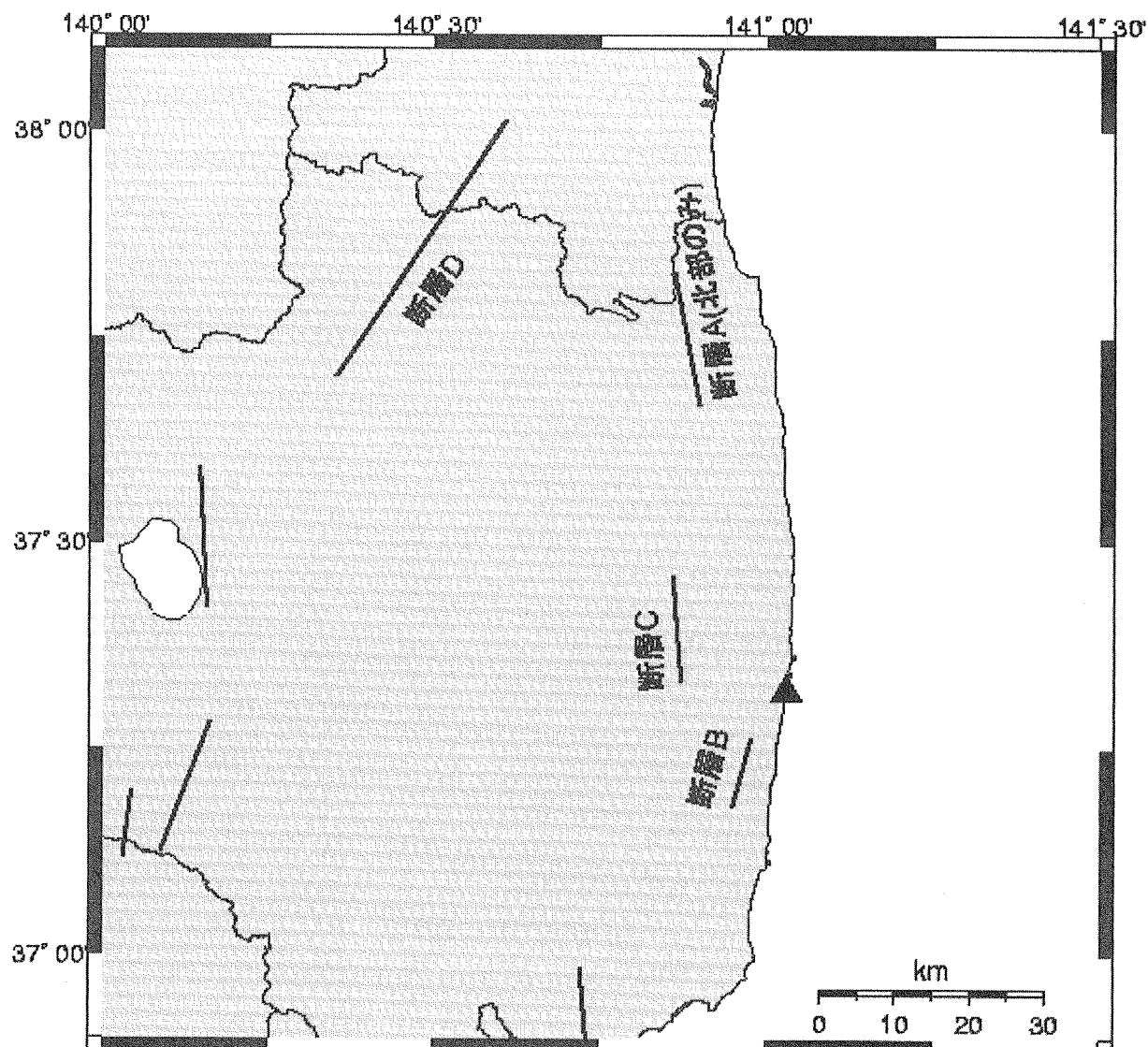


図 3.1.3-12 モデルサイト周辺で考慮する活断層の分布
(サイト周辺の拡大、断層 A の北部 18km をモデル化)

3. 1. 4 地震動の強さの指標と距離減衰式

(1) 地震動強さの指標

確率論的な地震危険度評価に基づく想定地震設定のために参考する地震動強さの指標として、最大加速度と周期 0.1~0.2 秒（振動数 5~10Hz）および周期 0.4~1 秒（振動数 1~2.5Hz）の加速度応答スペクトル ($h=5\%$) を用いる。

米国 の方法では、応答スペクトルについては上記の周期の範囲の平均をとることとなっている。しかし、本研究では、周期の範囲の平均的な値となるような代表的な周期として 0.15 秒と 0.7 秒を考え、平均操作は行わないこととする。実際の評価において、対象とする周期ポイントは、後述の距離減衰式において係数が算定されている周期のうちこれらに最も近い値である 0.150 秒および 0.711 秒を選択する。

(2) 距離減衰式

上記の指標を推定する距離減衰式として、安中ら¹⁰⁾による式を用いる。

安中ら(1997)の距離減衰式¹⁰⁾は、全国の気象庁 87 型強震計の記録を用いて作成されたものであり、断層面からの最短距離を用いることにより断層面の拡がりを考慮することができるようになっている。また、この式の特徴として、同じ距離の場合には震源深さが深いほど主として短周期成分が大きくなる傾向が表現されていることが挙げられる。この式で推定される最大加速度あるいは応答スペクトルは、S 波速度が 300~600m/s 程度の支持地盤の平均的なものとして用いることができるとされている。本研究で対象とする指標の距離減衰式は、以下のようになっている。

・最大加速度: A [単位 Gal]

$$\log A = 0.606M + 0.00459H - 2.136 \log(R + 0.334 \exp(0.653M)) + 1.730 \dots \dots \dots \quad (3.1.4-1)$$

・周期 0.150 秒の応答スペクトル: $Sa(0.150)$ [単位 Gal]

$$\begin{aligned} \log Sa(0.150) &= 0.580M + 0.00550H - 2.266 \log(R + 0.334 \exp(0.653M)) + 2.417 \\ &\dots \dots \dots \quad (3.1.4-2) \end{aligned}$$

・周期 0.711 秒の応答スペクトル: $Sa(0.711)$ [単位 Gal]

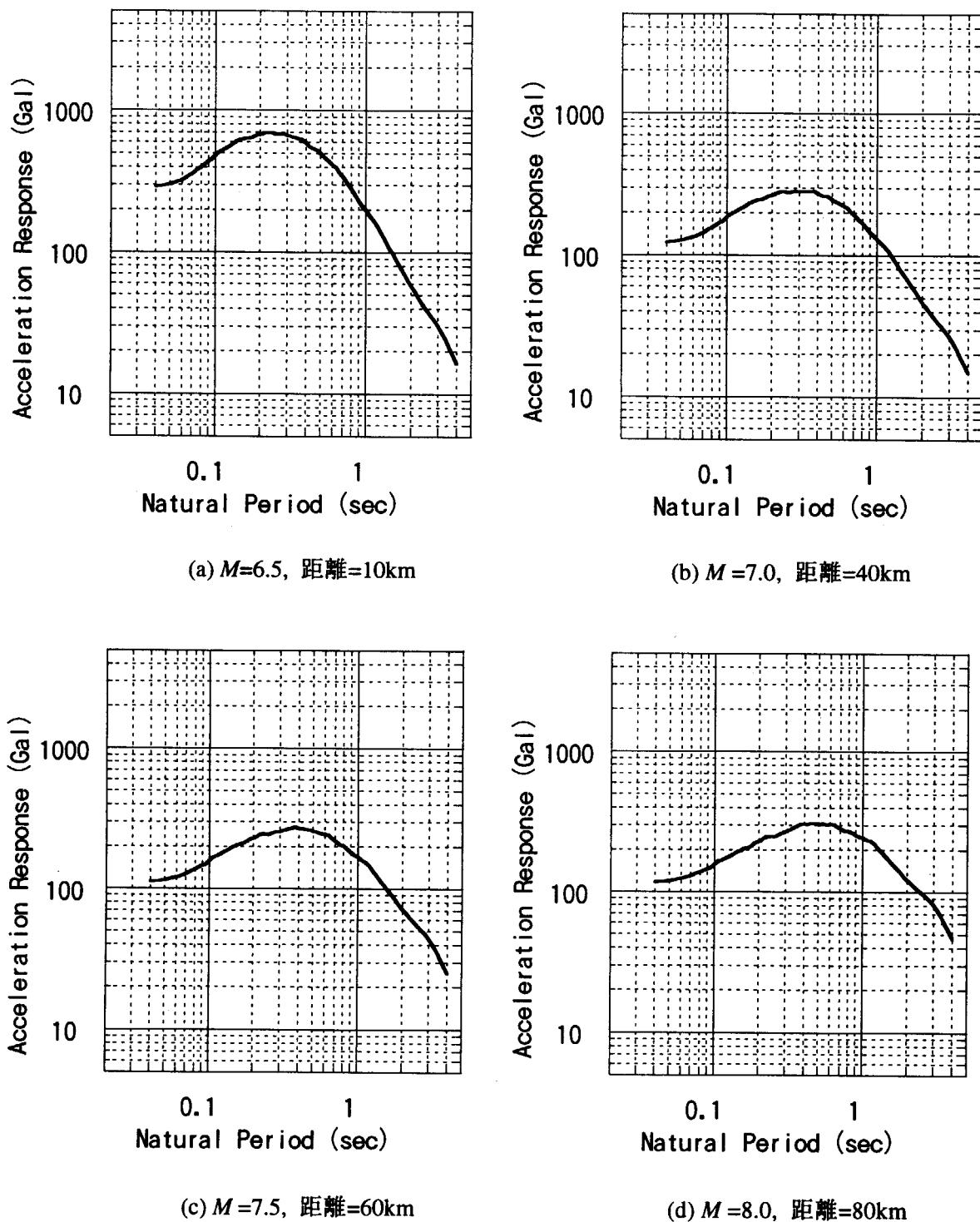
$$\begin{aligned} \log Sa(0.711) &= 0.721M + 0.00248H - 1.880 \log(R + 0.334 \exp(0.653M)) + 0.676 \\ &\dots \dots \dots \quad (3.1.4-3) \end{aligned}$$

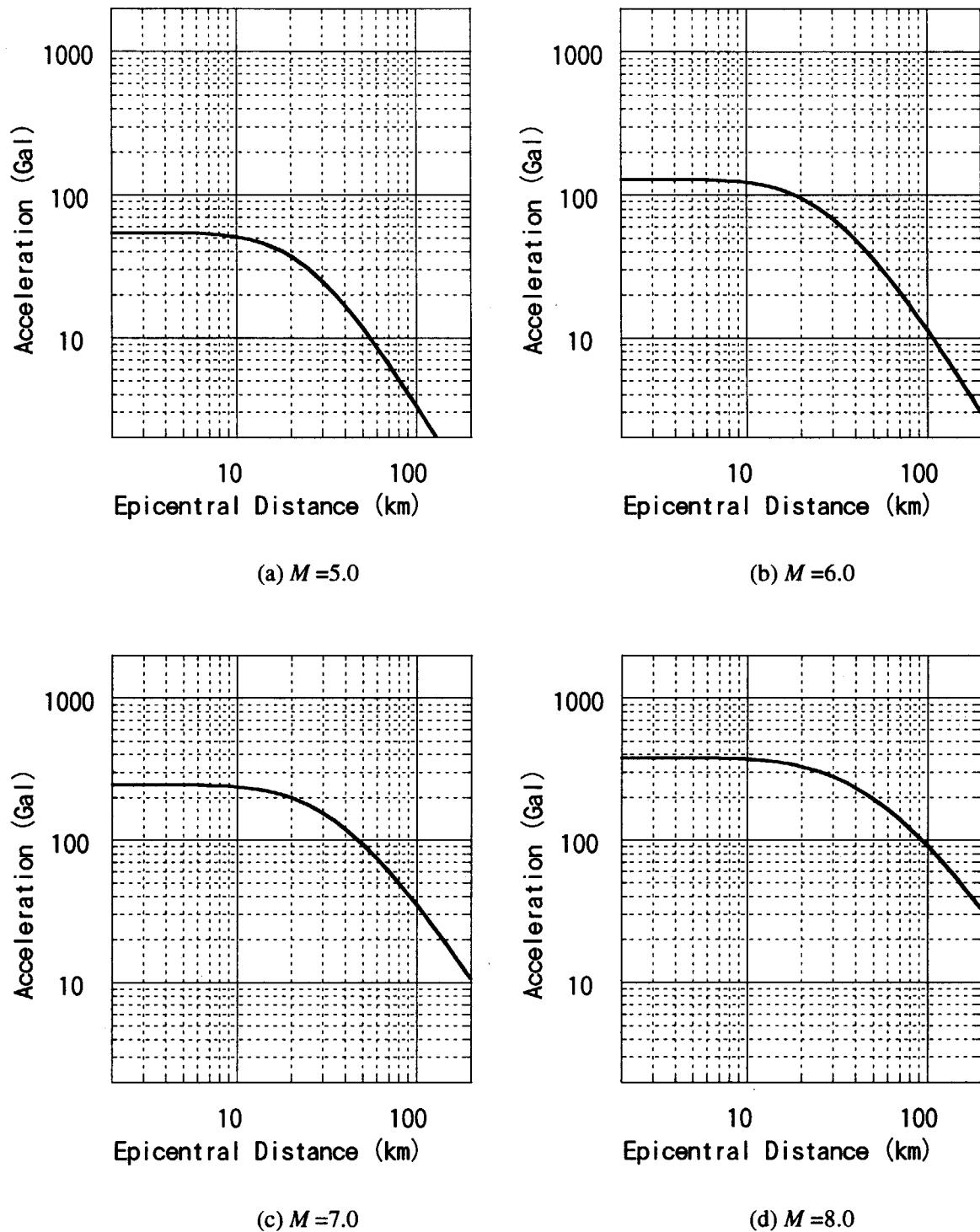
ただし、 M はマグニチュード、 H は断層面の中心の深さ(km)、 R は断層面までの最短距離(km)である。なお、安中ら(1997)¹⁰⁾の式では、上記の 3 つの各式についてばらつきを算定しており、その値は対数標準偏差で 0.62~0.69 程度となっている。しかし、これらの値は地盤条件の異なる全国多数の地点のデータをもとに算定されたものであり、これをそのままモデルサイトに適用すると過大評価となること

から、本検討ではいずれの式に対しても対数標準偏差を 0.5 とする。

図 3.1.4-1 は、マグニチュードと最短距離のいくつかの組合せに対する安中ら¹⁰⁾による加速度応答スペクトルを示したものである。同図から、周期 0.15 秒と 0.7 秒をそれぞれ周期 0.1~0.2 秒と 0.4~1.0 秒の代表値として用いても問題はないことがわかる。

図 3.1.4-2～図 3.1.4-4 は、上述した最大加速度と加速度応答スペクトルの距離減衰特性を示したものである。図の横軸は震央距離であり、震源深さ（断層中心深さ）を 20km に固定している。なお、安中の式では、断層面までの最短距離 R を用いる。このため、本研究では、震源を中心とした飯田の余震体積半径の $1/2$ を半径 r とする水平な円形断面を仮定して、 R を計算している。

図 3.1.4-1 安中ら(1997)¹⁰⁾の加速度応答スペクトル (深さ=20km)

図 3.1.4-2 安中ら(1997)の距離減衰式¹⁰⁾（最大加速度、深さ=20km）

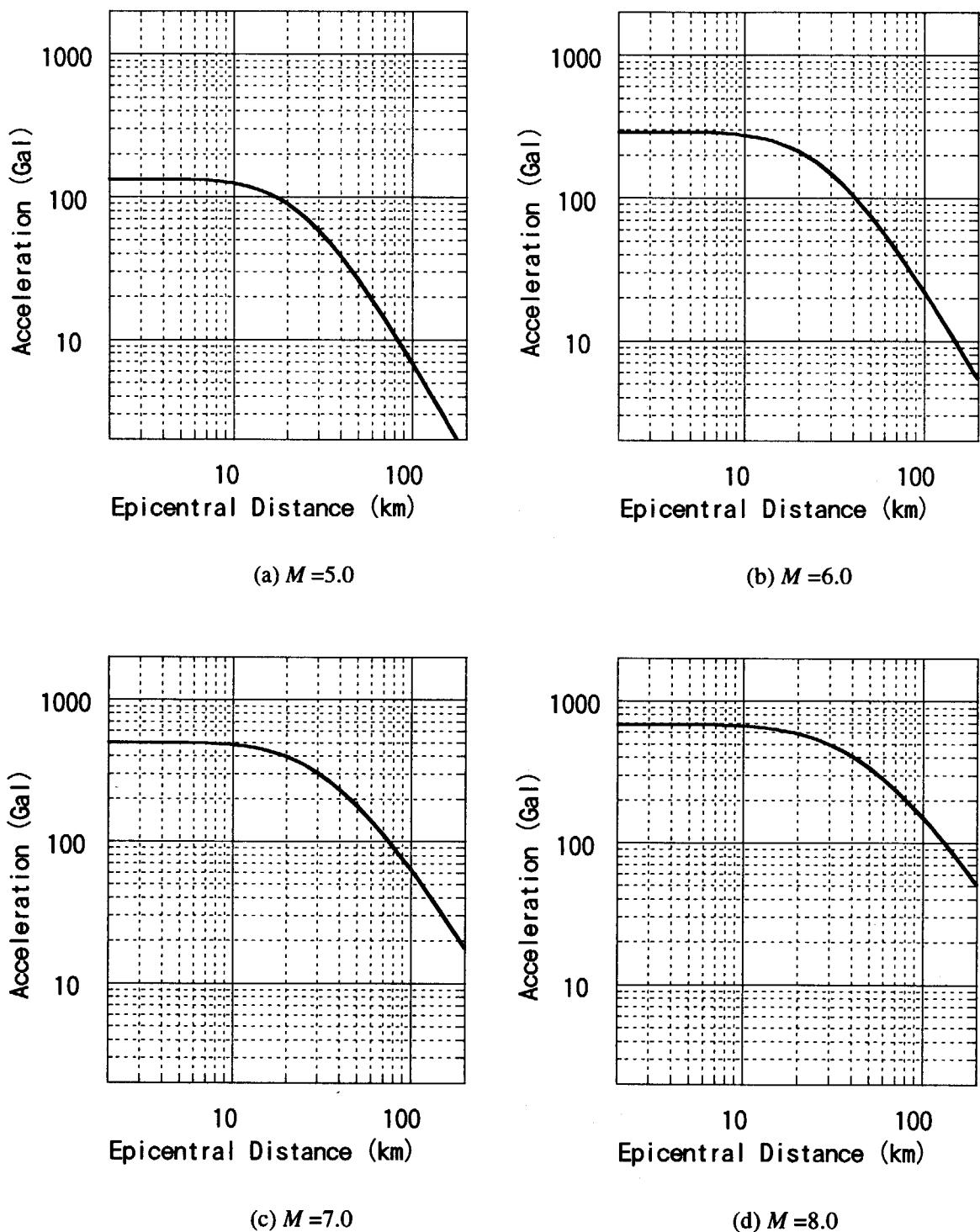


図 3.1.4-3 安中ら(1997)の距離減衰式¹⁰⁾ (周期 0.15 秒の加速度応答スペクトル, 深さ=20km)

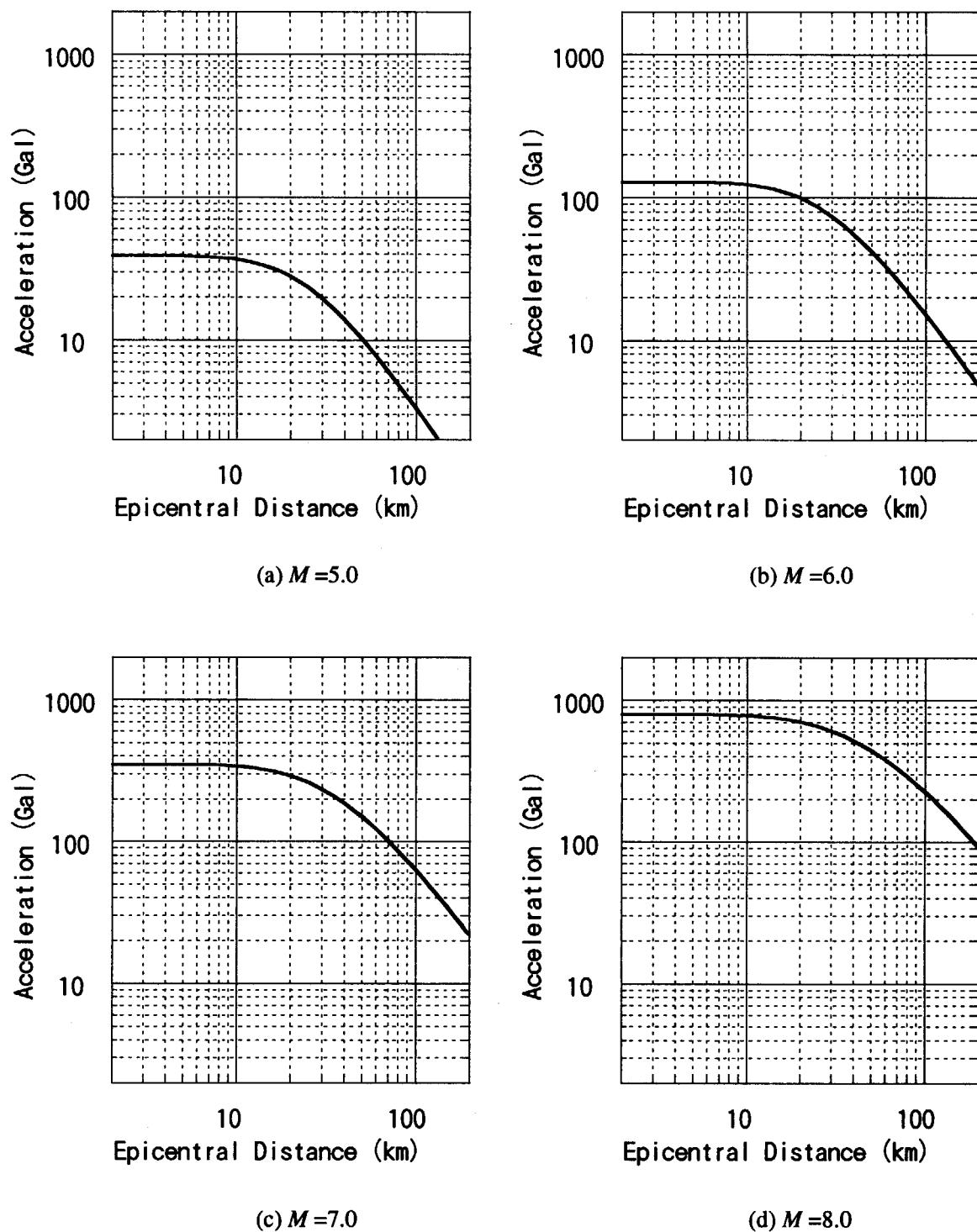


図 3.1.4-4 安中ら(1997)の距離減衰式¹⁰⁾（周期 0.71 秒の加速度応答スペクトル, 深さ=20km）

3. 1. 5 基本モデルの設定

(1) ランダム地震域における地震活動度の評価

ランダム地震域の地震活動度を評価するとき、地震カタログおよび地震活動度、最大・最小マグニチュードなどを選択あるいは設定する必要がある。ランダム地震域における地震活動度を評価するにあたり、設定もしくは選択する各評価項目について、以下に説明する。

a) 地震活動度のモデル

面的な拡がりを有するランダム地震域の地震活動度は、「 b 値モデル」によって評価する。 b 値モデルとは、Gutenberg-Richter (G-R) の関係によって、地震の規模とこれに対する累積発生頻度との関係を地震域ごとに評価するものである。本研究では、G-R 式の係数 (b 値) を地震カタログに基づいて設定する。

各ランダム地震域別に算定した G-R の関係のうち、サブダクションゾーンに対応するものを図 3.1.5-1 に、地殻内地震に対応するものを図 3.1.5-2 に、それぞれ示す。

b) 最大・最小マグニチュード

各ランダム地震域の最大マグニチュードは、基本的に「地震地体構造区分」⁷⁾に示された値を用いることとする。ただし、内陸の浅い地震に関しては、これまでに発生したマグニチュード 7.2 以上の地震では全て地震断層が地表に生じており、マグニチュード 7.2 以上の規模の地震はすべて活断層で考慮することができると考えられる。したがって、地殻内地震に対応するランダム地震域（活断層の存在しないところでも発生しうる地震を評価するために設定している）では、7.1 を上限マグニチュードとする。なお、地震危険度の評価で考慮する最小マグニチュードは 5.0 とする。ここで、最小マグニチュードを 5.0 とした理由を以下に示す通りである。一般に観測で得られた地震データ数は、マグニチュードが大きい地震よりも、マグニチュードが小さい地震の方がが多い傾向にある。一方地震危険度評価では、発生頻度が小さくとも、マグニチュードが大きく、地震動強さが大きい地震をできるだけ正確に評価する必要があるので、評価精度の観点から最小マグニチュードを設定するものである。

c) 使用する地震カタログ

地震カタログの代表的なものとしては、

- ・宇佐美カタログ¹⁾ (有史以来の被害地震)
- ・宇津カタログ²⁾ (1885 年以降の被害地震と M6 以上の地震)
- ・気象庁のデータ³⁾ (1926 年～)

がある。地震危険度の評価に用いるためには、記録の漏れが少ないほど、また、期間が長いほどよいが、全てを満足するカタログはない。ここでは、気象庁のデータを用いて G-R 式の係数を設定する。このように約 70 年と期間の短いデータを用いる場合の問題点は、まれに発生する大規模地震が十分に捕捉されていないことであるが、これについては、G-R 式でモデル化するのであれば、地震数の多い

中小規模の地震で式の係数を定め、最大マグニチュードだけを別の情報に基づいて設定することで解決することができる。

前項で設定した地震活動域は、地表面への投影面が部分的に重複している。したがって、G-R 式の係数を算定する際には、平面的な区分だけではなく震源深さによっても地震のデータを分けておかなければならぬ。そこで、図 3.1.3-8 に示した地殻内地震に対応するランダム地震域のうち、日本海側の海域部分（地震域 12）を除く領域では、震源深さが 25km より浅い地震のデータのみを用いて地震活動度を評価する。一方、図 3.1.3-7 に示したサブダクションゾーンのランダム地震域のうち地殻内地震との重複がある領域については、25km より浅い地震を除いたデータに基づいて地震活動度を評価する。

1926～1982 年の気象庁データは、震源深さの精度があまりよくないと考えられる。このため、各ランダム地震域の深さを設定する際、気象庁データのうち、震源深さの表示が 1km 刻みとなった 1983 年以降のものを用いる。

以上のようにして設定した、各ランダム地震域ごとの b 値および最大マグニチュード、深さを表 3.1.5-1 に整理しておく。

(2) 活断層における地震活動度の評価

a) 地震活動度のモデル

活断層で発生する地震については、松田^⑥による「固有地震説」に従うものとし、地震の規模と平均発生間隔を活断層のデータから評価する。

b) 活断層のパラメータと地震の規模、発生間隔の推定

断層の長さ L (km) から発生する地震のマグニチュード M を算定する際には、文献 6)に基づき次式で設定する。

$$M = (\log_{10}L + 2.9) / 0.6 \quad \dots \dots \dots \quad (3.1.5-1)$$

また、 M と 1 回の地震による断層の変位量 d (m) の関係は、同じく文献 6) で示されている次式から算定する。

$$\log_{10}d = 0.6M - 4.0 \quad \dots \dots \dots \quad (3.1.5-2)$$

なお、断層で発生する地震の平均発生間隔 R (年) は、 d (m) と活断層の平均変位速度 S (m/1000 年)との比から、次のように算定することができる。

$$R = d / S \quad \dots \dots \dots \quad (3.1.5-3)$$

c) モデルサイト周辺の活断層のモデル化

モデルサイト周辺において考慮すべき活断層の分布は、図 3.1.3-12 に示したとおりである。この分布は、前項で述べた松田の起震断層を踏襲している。これらの分布のうち、モデルサイトに大きく影響を及ぼす活断層として、断層 A、断層 B、断層 C および断層 D がある。

断層 A については、『新編 日本の活断層』⁴⁾に記載された部分の両端を結ぶと 72.7km となる。一方、文献 11)では同断層の北部の一部分のみを対象としている。3.1.3 (6)にも述べたように、断層 A について本研究では、北部の一部のみを対象とする。

表 3.1.5-2 は、モデルサイト周辺の主な活断層の諸元をまとめたものである。

(3) 地震発生の時系列モデル

ランダム地震域、活断層とともに、地震発生の時系列はポアソン過程に従うものとする。

(4) 想定地震の解析手法

想定地震の解析手法については、米国の方針と石川らの方法があり、両手法とも定量化がなされ、本研究で対象とした想定サイトに適用できることが既往研究^{12, 13)}で確認されている。本検討では、想定サイトのような太平洋プレートの沈み込みなどの複雑な地震発生様式を検討することに適した石川らの方法を用いる。

以上に設定した基本モデルに対する解析条件の概要を、表 3.1.5-3 にまとめる。なお、距離指標として最短距離を採用する。

表 3.1.5-1 各地震域における地震パラメータ

No.	単位面積当たりの年平均地震発生数(M>5)	b値	最大マグニチュード	深さ(km)
1	2.48×10^{-4}	0.764	8.3	4.6
2	2.76×10^{-5}	0.804	8.0	35.0
3	5.94×10^{-5}	0.805	8.3	24.3
4	1.66×10^{-4}	0.797	8.0	32.5
5	7.81×10^{-5}	0.719	8.3	45.5
6	1.89×10^{-4}	0.876	8.0	45.4
7	2.53×10^{-5}	1.011	7.8	62.1
8	1.22×10^{-4}	1.139	7.4	58.1
9	6.84×10^{-5}	0.94	8.1	45.0
10	1.48×10^{-5}	1.126	7.1	11.4
11	1.00×10^{-5}	1.288	7.1	9.4
12	1.02×10^{-5}	0.871	8.0	14.5
13	2.35×10^{-5}	0.724	7.3	13.6

表 3.1.5-2 モデルサイト周辺の主な活断層の諸元⁴⁾⁵⁾¹⁰⁾

No.	断層名	活動度	平均変位速度 (m/1000年)	平均活動間隔 (年)	断層長さ (km)	マグニチュード	最短距離(km)	最大加速度(Gal)
1	断層A(北部)	B	0.2	約7,400	18.5	6.9	40.2	106
2	断層B	B	0.25	約3,600	9.9	6.5	7.7	320
3	断層C	BC	0.22	約4,600	14.5	6.8	14.2	251
4	断層D	B	0.6	約5,500	41.5	7.5	73.5	80

- (注)
 - ・この表の活断層の諸元は松田の「起震断層」に基づく。但し、活断層は直線でモデル化しているため、一部の値は松田による文献の値と異なる。
 - ・平均変位速度の値は、「日本の活断層」に記載のある断層Aと断層Dはその値を、他の二つの断層は該当する活動度クラスの平均的な値（奥村・石川、1988）を用いている。
 - ・推定最大加速度は安中らの式
$$< \log A = 0.606 M + 0.00459 H - 2.136 \log(R + 0.34 \exp(0.653 M)) + 1.730 >$$

による。但し、Rは断層面までの最短距離、Hは断層中心深さである。

 - ・断層の上端深さは0kmと仮定している。
 - ・推定最大加速度の大きいものから順に4つの断層を記す。

表 3.1.5-3 解析条件

解析条件の設定項目	歴史地震データに基づく方法	活断層データに基づく方法
1)地震活動域	<ul style="list-style-type: none"> ランダムに地震が発生する地震域を、サイトより 200km 以上の範囲をカバーするように設定。 地震地体構造区分（萩原1991）に基づき分割し、一部、震源分布を参考として領域の見直し。 プレート境界の地震と上部地殻内の地震を区別。 各領域の深さは、1983年以降の地震の震源深さを基に設定。 	<ul style="list-style-type: none"> 松田の「起震断層」をもとに矩形の鉛直断層面でモデル化。 サイトより半径 200km 程度以内を対象。
2)データベース	<ul style="list-style-type: none"> 気象庁カタログ(1926~1995年)のうち $M \geq 5.0$ のもの。 	<ul style="list-style-type: none"> 原則として松田の「起震断層」に基づく。
3)地震発生時系列モデル	<ul style="list-style-type: none"> ポアソン過程。 	<ul style="list-style-type: none"> ポアソン過程。
4)規模別の地震発生頻度	<ul style="list-style-type: none"> b値モデル (G-R式) を適用し地震規模別に算定。 $5.0 \leq M \leq M_{max}$ M_{max}: 最大マグニチュード M_{max} は、上部地殻内地震では 7.1、他では地体構造区分に基づく。 	<ul style="list-style-type: none"> 最大マグニチュードモデル。 マグニチュード M : 断層長さ L (km) から次の松田式を用いて算出。 $M = (\log L + 2.9) / 0.6$ 発生頻度 $\nu = S/D$ $(S: \text{平均変位速度})$
5)距離	<ul style="list-style-type: none"> 地震域内で一様ランダムに地震の発生を仮定して距離の確率密度関数を作成。 円形断層を仮定した最短距離。 深さ：各地震域別に 1983 年以降の $M \geq 3.0$ の地震の平均深さを設定。 	<ul style="list-style-type: none"> 距離は断層面からの最短距離。 深さ : 0km と仮定。
6)結果の組合せ	<ul style="list-style-type: none"> 歴史地震データに基づく結果と活断層に基づく結果の単純足し合わせ。ただし、両者が重複しないような配慮がなされている。 	
7)距離減衰式	<ul style="list-style-type: none"> 気象庁 87 型強震計の記録を用いて作成された安中ら(1997)の式。 距離の指標は最短距離。 	
8)評価式のばらつき	<ul style="list-style-type: none"> 対数標準偏差 0.5 の対数正規分布。 	
9)地震動強さの上限値	<ul style="list-style-type: none"> 設定しない。 	

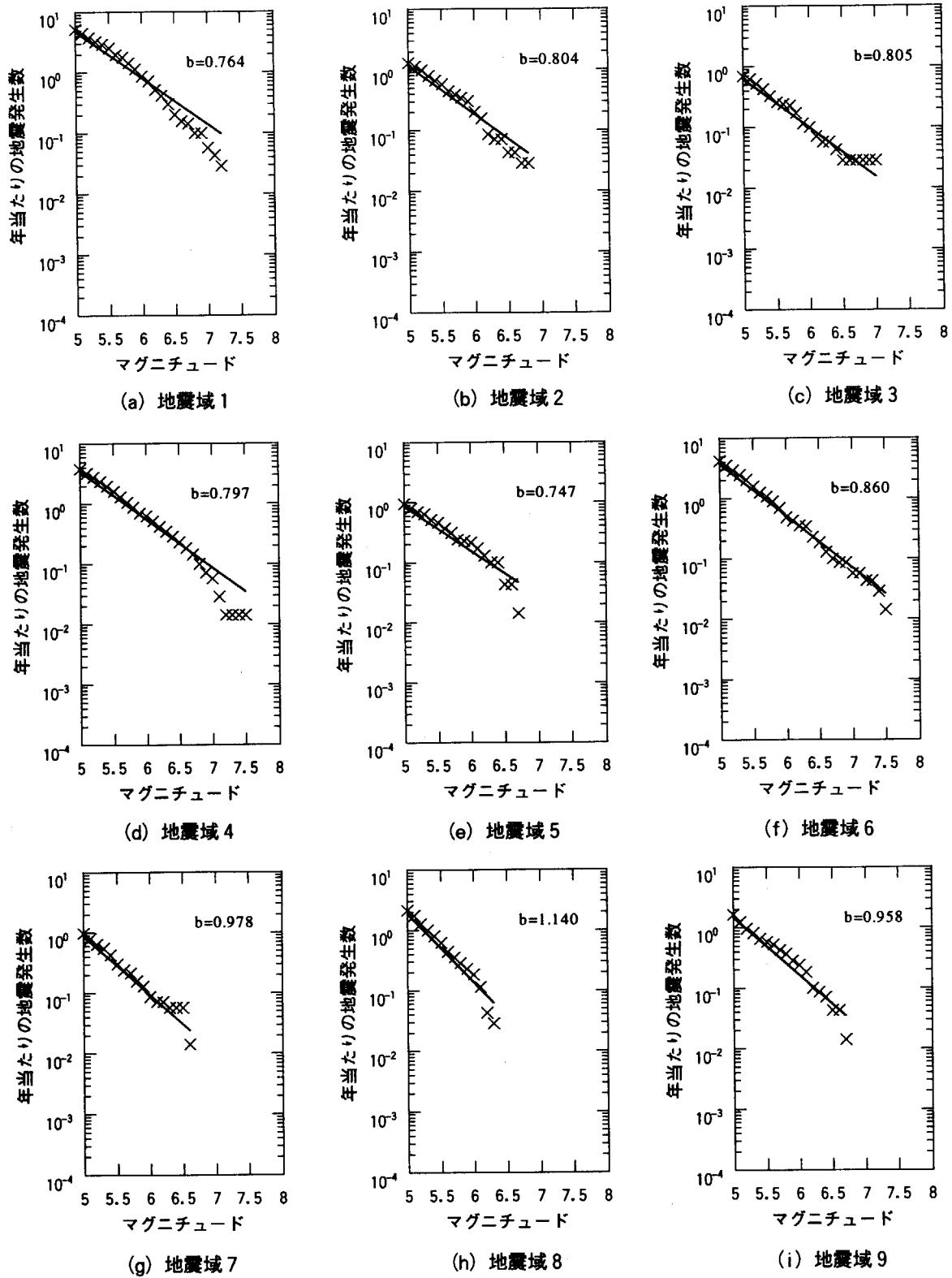


図 3.1.5-1 サブダクションゾーンに対応する各地震域での Gutenberg-Richter 式の関係

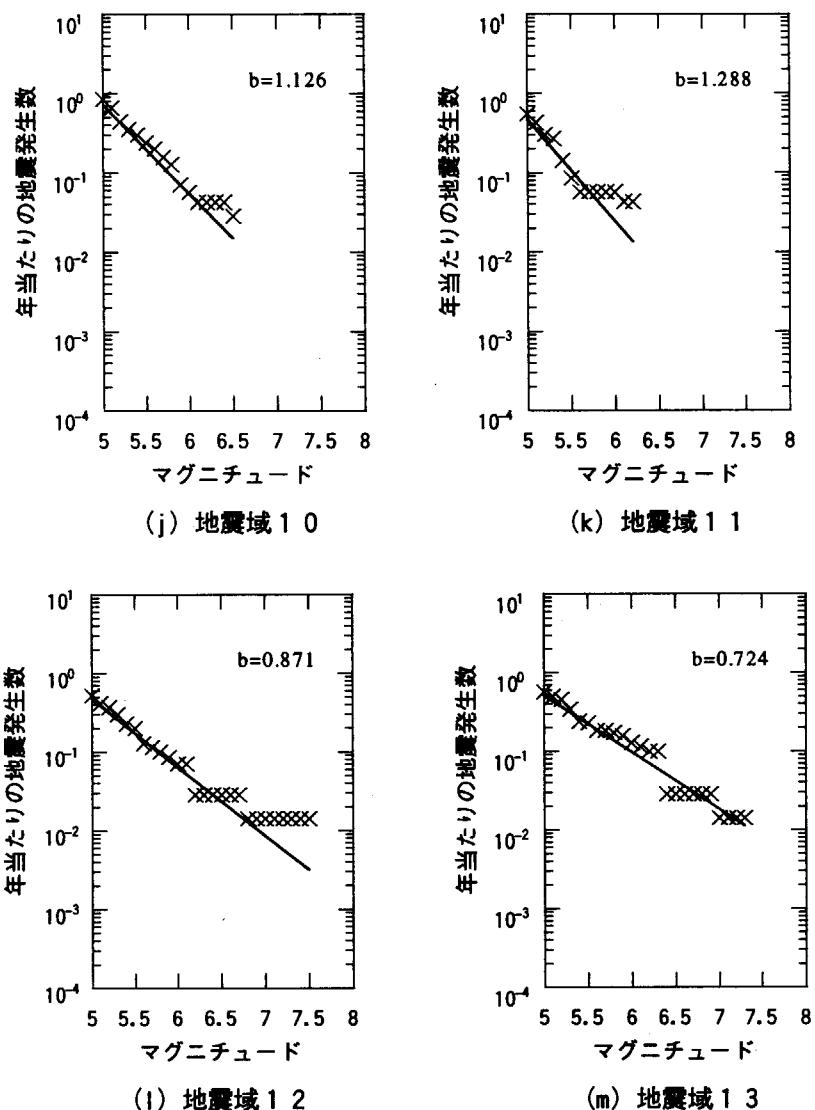


図 3.1.5-2 地殻内地震に対応する各地震域での Gutenberg-Richter 式の関係

3. 1. 6 現行指針モデルの設定

本研究では、確率論的な手法の耐震設計への適用を検討する一環として、確率論的に想定される地震と現行の耐震設計審査指針に基づく決定論な想定地震を比較検討することとしている。しかしながら、基本モデルでは、歴史地震データとして 1926~1995 年の間の気象庁カタログを使用し、活断層データについては松田の「起震断層」に基づいているのに対して、現行の耐震設計審査指針に基づく決定論な想定地震の評価を行った文献¹¹⁾は、データ収録期間や活断層の検討対象範囲などのデータベースが異なっている点がある。このため、本検討では解析モデルとして、基本モデルの他に現行指針モデルと称するもう 1 種類を作成する。現行指針モデルの評価条件については以下に詳述するが、結果としてこのモデルの基本モデルとの違いは、地震データベースを共通とするため、新たに海底活断層を考慮し、2 種類の活断層を評価対象外とした点であり、それ以外の評価条件については基本モデルと同一としている。

(1) ランダム地震域における地震活動度の評価

現行指針モデルにおけるランダム地震域の地震活動度は、基本モデルと同様として評価する。すなわち、a) 地震カタログおよび地震活動度、b) 最大・最小マグニチュード、c) 使用する地震カタログは、3.1.5 項で説明した基本モデルと同じものを使用する。

(2) 活断層における地震活動度の評価

a) 地震活動度のモデル

活断層で発生する地震については、基本モデルと同様に松田⁶⁾による「固有地震説」にしたがうものとし、地震の規模と平均発生間隔を活断層のデータから評価する。

b) 活断層のパラメータと地震の規模、発生間隔の推定

マグニチュード M の算定も、基本モデルと同様に、断層の長さ $L \text{ km}$ から松田⁶⁾に基づき設定する。

c) モデルサイト周辺の活断層のモデル化

文献 11)では、本研究で設定したモデルサイトと同一の地点を対象とし、陸域および海域それぞれの活断層を検討している。そのうち陸域の活断層については、断層 A および断層 D (図 3.1.6-1 参照) を考慮している。これにしたがい、現行指針モデルで考慮する断層は、断層 A および断層 D の 2 つとする。ただし、これらの断層の諸元は、3.1.5 項で与えたものと同一とし、その値を表 3.1.6-1 に示す。

一方、海域の活断層 (海底活断層ともよぶ) について、文献 11)では対象サイトを中心とし、沿岸方向 60km、沖合方向 30km の範囲の音波探査結果を示している。その結果、サイトの南東沖合 30km 近くに 4 つの正断層 (図 3.1.6-1 参照) が存在すると判定している。

ところが、文献 11)には、海底活断層の正確な位置データがあたえられていない。そこで、本研究では、文献 11)に示されているサイト周辺の海域海底地質平面図から、各海底断層の両端の緯度と経度を目測する。目測した結果を表 3.1.6-2 に示す。また、これらの結果から算定されるサイトからの最短距離を表 3.1.6-3 に示す。

海底断層の長さ L km は、起震断層の場合と同様に、断層の両端を結ぶ直線として算定する。また、各海底活断層のマグニチュード M および地震 1 回あたりの変位量 d m は、それぞれ式(3.1.5-1)および式(3.1.5-2)から算定する。算出された L および M 、 d を表 3.1.6-4 に示す。また、海底活断層についてその特徴や落差などを表した文献 11)の一覧を、表 3.1.6-5 に引用する。本研究では、各海底活断層の d として、表 3.1.6-5 の最大落差を仮定する。その場合、 $F_1 \sim F_4$ の d は、順に 18m, 18m, 50m, 25m となる。

文献 11)では、音波探査結果を基に、サイト前面海域の地層を A～E の 5 つに分類（表 3.1.6-6 参照）し、B 層中に海底活断層が存在するものと推定している。また、海底から採取された資料と陸上部の資料との対比から C 層を多賀層群富岡層と判定し、B 層および C 層の生成年代に大差がないことを推定している。サイト周辺における段丘の名称と編年を表 3.1.6-7 に引用する。同表によれば、多賀層群は 180 万年以前の新第三紀に形成されたことになる。この表を基に、本研究では海底活断層の形成を 180 万年前と仮定する。

以上から、海底活断層には、表 3.1.6-5 の最大落差の応じた変位 d が 180 万年の間に生じたものと仮定する。この場合、海底活断層の平均変位速度 S (m/1000 年)は、表 3.1.6-8 に示す値となる。 d および s を式(3.1.5-3)に代入することにより、地震発生頻度 ν は表 3.1.6-9 に示す値となる。

(3) 地震発生の時系列モデル

地震発生の時系列も、基本モデルと同様に、ランダム地震域、活断層ともにポアソン過程にしたがうものとする。

(4) 想定地震の解析手法

確率論的想定地震の諸元の算定には、基本モデルの場合と同様に石川らの方法を用いる。

表 3.1.6-1 現行指針モデルにおける地震パラメータ

No.	断層名	活動度	平均変位速度 S (m/1000年)	平均活動間隔 (年)	断層長さ L (km)	マグニチュード M	最短距離(km)	最大加速度(Gal)
1	断層A(北部)	B	0.2	約 7,400	18.5	6.9	40.2	106
2	断層D	B	0.6	約 5,500	41.5	7.5	73.5	80

表 3.1.6-2 海底活断層の位置(目測)

断層	南西端		北東端	
	東経(°)	北緯(°)	東経(°)	北緯(°)
F ₁	141.2311	37.1561	141.2586	37.2092
F ₂	141.2539	37.1533	141.2956	37.2033
F ₃	141.2731	37.0636	141.3872	37.1650
F ₄	141.2858	37.0622	141.3983	37.1533

表 3.1.6-3 サイトから海底活断層への最短距離

断層	最短距離(km)
F ₁	23.7
F ₂	26.8
F ₃	35.1
F ₄	36.3

表 3.1.6-4 海底活断層の長さ・マグニチュード・変位量

断層	断層長さ L (km)	マグニチュード M	地震1回当たり の変位量 d (m)
F ₁	6.37	6.1736	0.5060
F ₂	6.67	6.2069	0.5298
F ₃	15.15	6.8007	1.2034
F ₄	14.22	6.7548	1.1295

表 3.1.6-5 断層一覧表¹¹⁾

海底活断層	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
タイプ	正	正	正	正
落ちの方向	西	東	東	西
落差の平均値 (m)	15	10	31	15
落差の最大値 (m)	18	18	50	25
確認した側線 数	4	5	9	9
海底地形への 影響	なし	なし	大きい	小さい
地形段差の 平均			2m	0.3m

表 3.1.6-6 地質層序¹¹⁾

時代		地層	音波記録によ る分類	
第四紀	完新世		A	
	更新世		B	
新第三紀	鮮新世	後期	多賀層群	C
		前期		
	中新世	後期	高久層群	D
		中期	白土層群	
		前期	湯長谷層群	
古第三紀	漸新世	後期	白水層群	E
		中期		
		前期		
先第三紀	白亜紀	双葉層群		

表 3.1.6-7 対象地点周辺における段丘の対比と編年¹¹⁾

地域 地質時代		南関東	福島県海岸平野	編年
第四紀	完新世		海岸平野及び低位段丘堆積物	
				1万年
			立川段丘	第V段丘堆積物 3万年
			武藏野段丘	第IV段丘堆積物 6万年
			小原台段丘	第IVa段丘堆積物 8万年
				10万年
			下末吉段丘	第III段丘堆積物 12万年
更新世	後期		多摩段丘	第II段丘堆積物
			屏風ガ浦層 オシ沼砂礫層	
			長沼層	
				50~60万年
新第三紀 鮮新世	中期	三浦層群		
				180万年
			多賀層群	

表 3.1.6-8 海底活断層の平均変位速度

断層	落差の最大値 (m)	平均変位速度 S (m/1000年)
F_1	18	0.010
F_2	18	0.010
F_3	50	0.028
F_4	25	0.014

表 3.1.6-9 海底活断層の地震発生頻度

断層	地震発生頻度 ν (回/1万年)
F_1	0.198
F_2	0.189
F_3	0.233
F_4	0.124

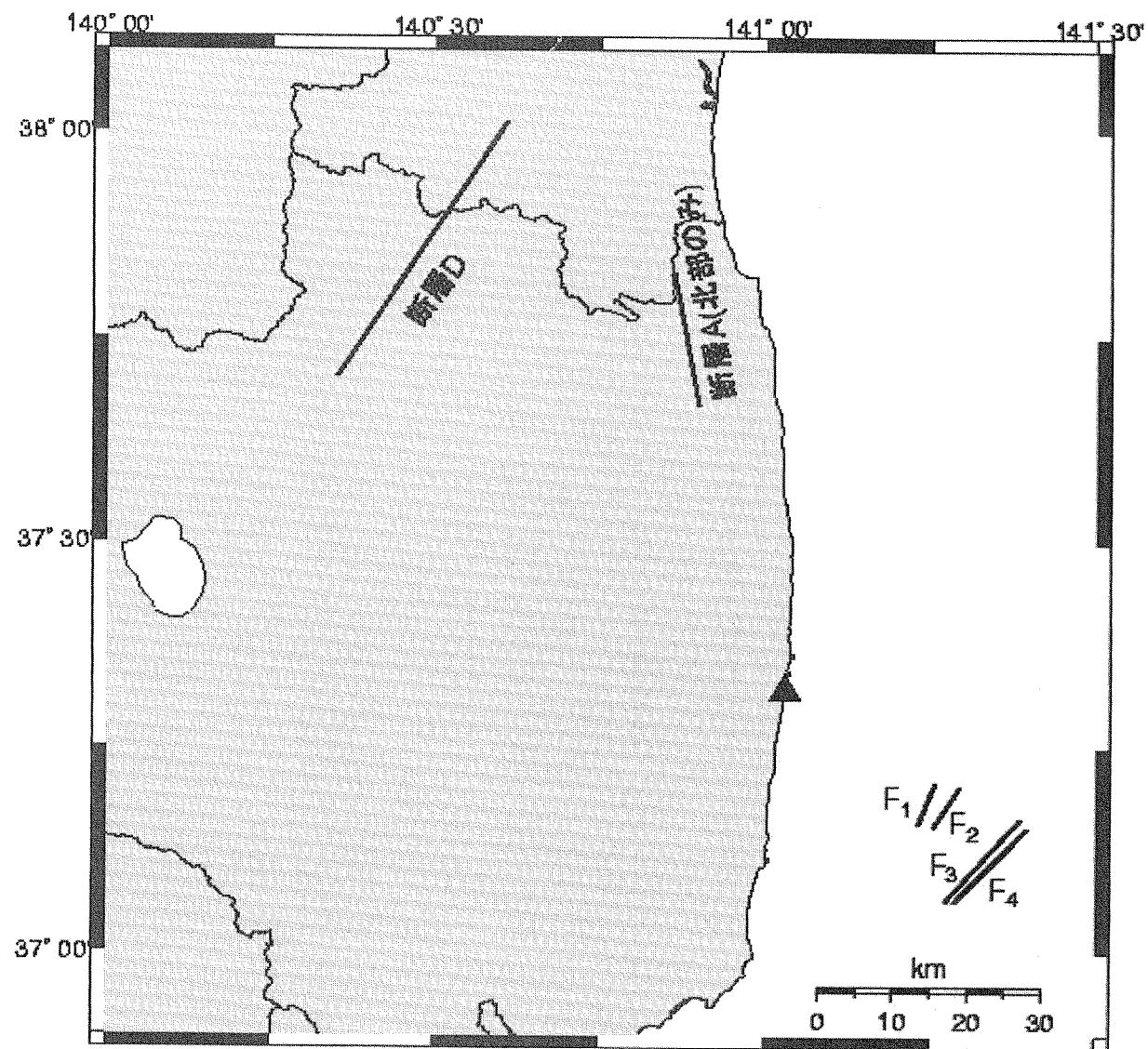


図 3.1.6-1 現行指針モデルで考慮する活断層の分布^{4) 9) 11)}

3.2 解析結果

3.2.1 基本モデルの結果

3.1.5 項で設定した基本モデルについて、地震動強さの指標をそれぞれ最大地動加速度(PGA)、短周期領域の加速度応答スペクトルおよび長周期領域の加速度応答スペクトルとした場合の、石川らの方法による確率論的な想定地震の諸元を算定する。

(1) 最大地動加速度の結果

PGA 対する算定結果を、図 3.2.1-1～図 3.2.1-4 および表 3.2.1-1～表 3.2.1-3 に示す。これらの図表のうち、図 3.2.1-1 は地震危険度曲線を示したものである。また、同図において、参考確率をそれぞれ 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} および 10^{-6} とした場合の加速度値を表 3.2.1-1 に示す。なお、参考確率が 10^{-6} の場合は参考のために示すものである。

主な地震活動域に対する貢献度を、図 3.2.1-2 に示す。同図から、年超過確率が $10^{-3} \sim 10^{-5}$ のレベルにおいて地震域 6、地震域 10 および断層 B の貢献度が大きいことがわかる。

図 3.2.1-3 に、参考確率 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} のそれぞれに対するマグニチュード M と最短距離 R の同時確率を示す。なお、同図では、 M については 5.0～8.0 を 0.1 の刻み、 R については 0～250km を 5km の刻みで、0.0～0.5 の範囲の同時確率を表してある。 $6.45 < M \leq 6.55$ で $5\text{km} < R \leq 10\text{km}$ の bin (区間) および $6.75 < M \leq 6.85$ で $10\text{km} < R \leq 15\text{km}$ の bin で、同時確率の値が突出している。これは、図 3.2.1-3(a)に示したように、それぞれ断層 B および断層 C の M 、 R を含む bin である。また、おおよそ M が 5.5～7.1 で R が 5～15km の領域、および M が 7.0～8.0 で R が 45～70km の領域において、同時確率の値は小さいものの連続かつ緩やかな分布が存在することがわかる。これらは、図 3.2.1-3(b)に示したように、それぞれ主に地震域 10 および地震域 6 の寄与が主となる領域である。

また、図 3.2.1-4 は、図 3.2.1-3 の同時確率を 0.0～0.05 の範囲に拡大して描いたものである。図 3.2.1-4 によって、図 3.2.1-3 ではとらえにくい各地震域に対する同時確率の分布が理解できる。これらの図から、参考確率が小さくなるにしたがって、活断層の諸元が含まれる bin での同時確率が小さくなること、地震域に対応する分布は近距離・大規模の領域に移行していくこと、が考察される。

表 3.2.1-2 は、主な地震活動域（地震域および活断層）に対して、参考確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} および 10^{-6} とした場合の、貢献度 c_f 、ハザード適合マグニチュード M^* 、ハザード適合（最短）距離 R^* を示したものである。また、表 3.2.1-3 は、表 3.2.1-2 に示した c_f が 10% 以上となる地震活動域について、各参考確率ごとに c_f が大きい順に地震諸元を表示したものである。同表から、基本モデルで地震動強度を PGA とした場合、いずれの参考確率に対しても地震域 6 および地震域 10 が想定地震の対象として選定されることがわかる。また、参考確率が小さくなるにしたがい断層 B の貢献度が大きくなり、参考確率が 10^{-4} 以下では断層 B も想定地震の対象となることがわかる。

(2) 短周期領域の結果

短周期領域の加速度応答スペクトルに対する算定結果を、図 3.2.1-5～図 3.2.1-8 および表 3.2.1-4～表 3.2.1-6 に示す。

地震危険度曲線を図 3.2.1-5 に示す。また、同図の曲線から得られるそれぞれの参照確率の場合の加速度値を表 3.2.1-4 に示す。

主な地震活動域に対する貢献度を、図 3.2.1-6 に示す。同図から、年超過確率が $10^{-3} \sim 10^{-5}$ のレベルにおいて、短周期領域に対しても地震域 6、地震域 10 および断層 B の貢献度が相対的に大きいことがわかる。

各参照確率に対する M と R の同時確率を図 3.2.1-7 に、図 3.2.1-7 の同時確率値を拡大したものを図 3.2.1-8 に示す。これらの図と、最大地動加速度に対する同時確率を比較すると、全般的には類似した傾向のあるものの、若干の差異があることがわかる。具体的には、短周期領域の同時確率は、断層 B に対応するビンでの同時確率が大きくなる傾向があること、地震域 6 よりも地震域 10 に対応する同時確率が相対的に大きくなる傾向があること、があげられる。

表 3.2.1-5 は、主な地震活動域に対して、参照確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} および 10^{-6} とした場合の貢献度 c_f 、ハザード適合マグニチュード M^* 、ハザード適合（最短）距離 R^* を示したものである。また、表 3.2.1-6 は、 c_f が 10% 以上となる地震活動域の地震諸元を、各参照確率ごとに c_f の値が大きいものから順に表示したものである。短周期領域および最大地動加速度の想定地震を比較すると、概ね同じ地震活動域に対する地震が想定されることがわかる。

(3) 長周期領域の結果

長周期領域の加速度応答スペクトルに対する算定結果を、図 3.2.1-9～図 3.2.1-12 および表 3.2.1-7～表 3.2.1-9 に示す。

地震危険度曲線を図 3.2.1-9 に示す。また、同図の曲線から得られる各参照確率に対する加速度値を表 3.2.1-7 に示す。

主な地震活動域に対する c_f を図 3.2.1-10 に示す。同図から、年超過確率が $10^{-3} \sim 10^{-5}$ のレベルにおいて、長周期領域に対しては地震域 6 の貢献度が支配的になることがわかる。

各参照確率に対する M と R の同時確率を図 3.2.1-11 に、図 3.2.1-11 の同時確率値を拡大したものを図 3.2.1-12 に、それぞれ示す。これらの図から、長周期領域においては地震域 6 に対する同時確率が著しく大きくなることがわかる。

主な地震活動域（地震域および活断層）に対して、参照確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} および 10^{-6} とした場合の c_f 、 M^* 、 R^* を表 3.2.1-8 に示す。また、長周期領域に対して選定される地震およびその諸元を表 3.2.1-9 示す。長周期領域に対しては、地震域 6 あるいは地震域 4 に対する地震が選ばれることがわかる。

(4) 加速度応答スペクトル形状

以上、(1)～(3)に示してきたように、石川らの方法によれば、地震動の強さの指標と参照確率ごとに支配的な地震活動域が特定され、また特定された地震活動域ごとに、条件付期待値としての地震諸元である M^* 、 R^* がそれぞれ算定される。

ここでは、一例として、短周期領域の加速度応答スペクトルを指標とし、参照確率を 10^{-5} とした

場合の確率論的想定地震について、その加速度応答スペクトルの形状を評価する。この条件での確率論的想定地震の諸元は表 3.2.1-5 の参照確率が 10^{-5} のところに示されているとおりであり、貢献度が 10%以上となる条件で選定した想定地震は以下の 3 地震となっている。

- ・地震域 6 で発生する $M=7.7, R=49.9\text{km}$ の地震
- ・地震域 10 で発生する $M=6.4, R=13.0\text{km}$ の地震
- ・断層 B で発生する $M=6.5, R=7.7\text{km}$ の地震

安中ら¹⁰⁾の式を用いてこれら 3 つの地震の加速度応答スペクトルを算定した結果を、図 3.2.1-13 に示す。この図から、地震域 6 の想定地震が他の 2 地震よりも長周期領域での応答スペクトルの値が大きいことなど、個々の地震の特徴を反映した応答スペクトルの形状が表現されていることがわかる。

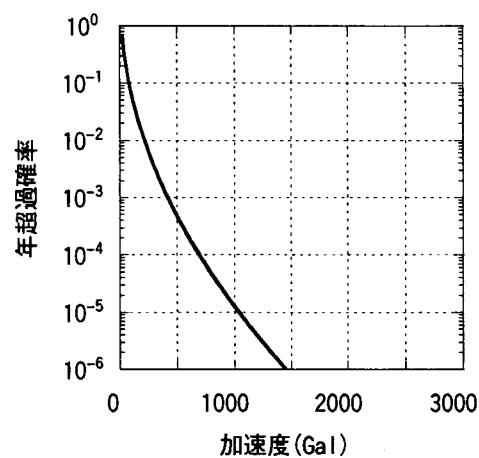


図 3.2.1-1 PGA（基本モデル）の地震危険度曲線

表 3.2.1-1 PGA（基本モデル）の各参照確率での加速度値

参照確率	加速度(Gal)
10^{-3}	420
10^{-4}	700
10^{-5}	1040
10^{-6}	1460

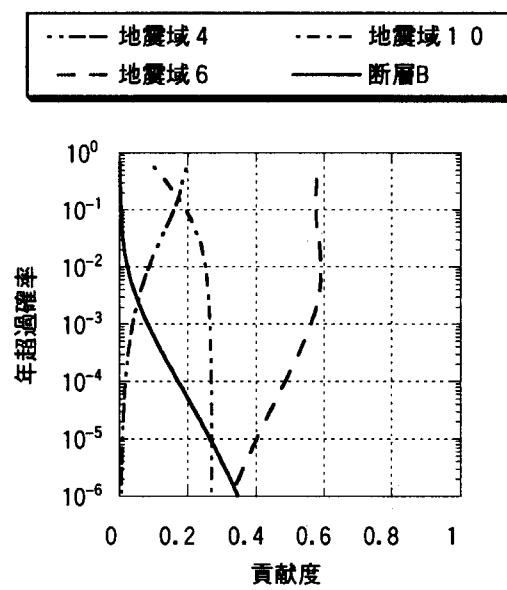


図 3.2.1-2 PGA（基本モデル）の貢献度曲線

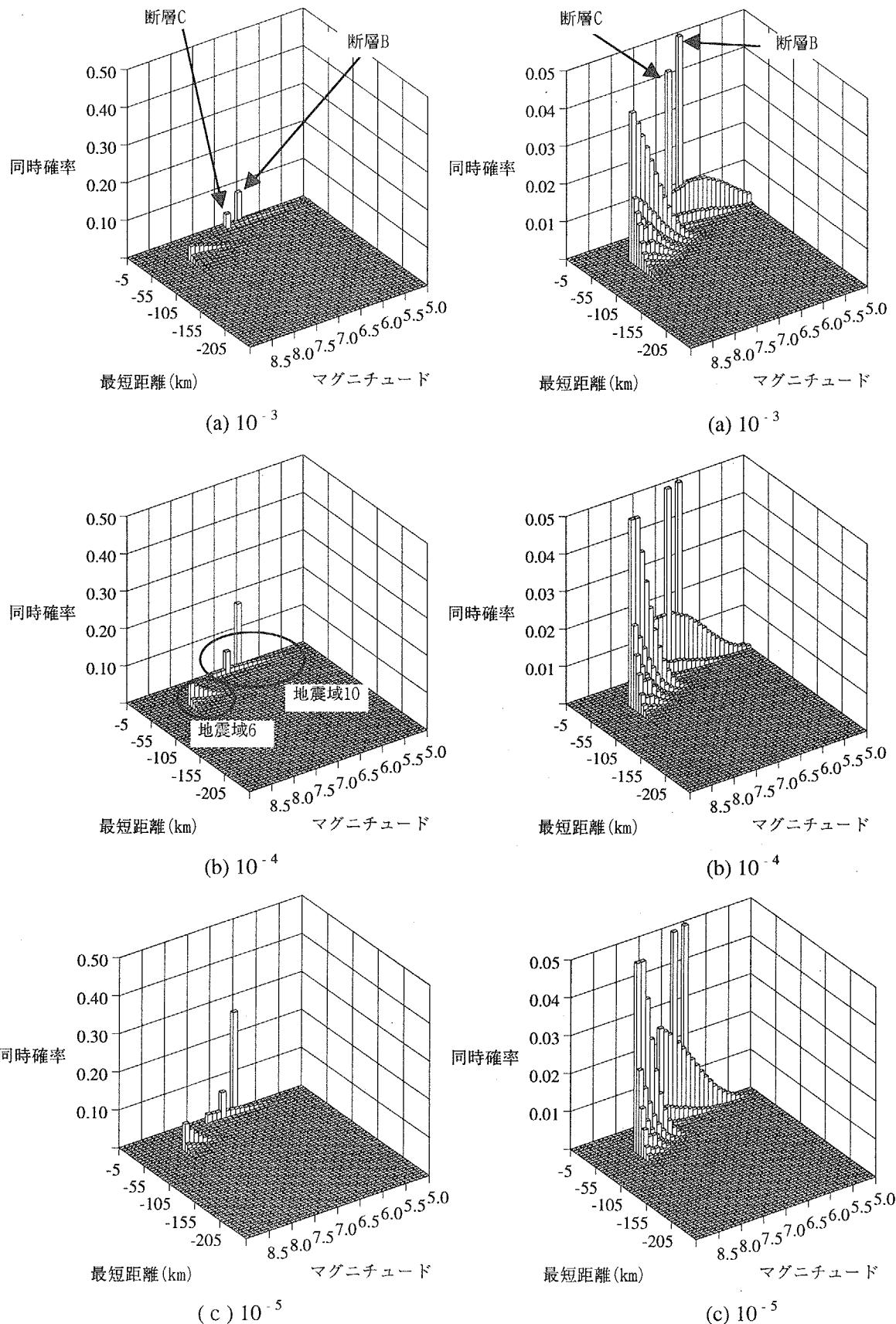


図 3.2.1-3 PGA（基本モデル）の同時確率 図 3.2.1-4 PGA（基本モデル）の同時確率（拡大）

表 3.2.1-2 PGA（基本モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード
・ハザード適合距離

地震活動域 参照確率度		地震域4	地震域6	地震域7	地震域10	断層C	断層B	断層A
10^{-3} (420Gal)	貢献度(%)	3.8	56.0	2.1	26.4	3.3	8.2	0.0
	M^*	7.8	7.6	7.5	6.2	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	74.0	53.8	67.5	14.6	14.2	7.7	—
10^{-4} (700Gal)	貢献度(%)	1.7	48.2	1.2	26.9	4.6	17.4	0.0
	M^*	7.8	7.7	7.6	6.5	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	69.8	51.7	66.2	13.7	14.2	7.7	—
10^{-5} (1040Gal)	貢献度(%)	0.0	39.9	0.0	27.0	5.0	26.6	0.0
	M^*	—	7.8	—	6.6	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	—	50.4	—	13.2	14.2	7.7	—
10^{-6} (1460Gal)	貢献度(%)	0.0	32.7	0.0	26.9	4.8	34.8	0.0
	M^*	—	7.8	—	6.7	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	—	49.6	—	12.9	14.2	7.7	—

表 3.2.1-3 PGA（基本モデル）の確率論的想定地震の諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (420Gal)	地震域6	7.6	53.8	56.0
	地震域10	6.2	14.6	26.4
10^{-4} (700Gal)	地震域6	7.7	51.7	48.2
	地震域10	6.5	13.7	26.9
	断層B	6.5	7.7	17.4
10^{-5} (1040Gal)	地震域6	7.8	50.4	39.9
	地震域10	6.6	13.2	27.0
	断層B	6.5	7.7	26.6
10^{-6} (1460Gal)	断層B	6.5	7.7	34.8
	地震域6	7.8	49.6	32.7
	地震域10	6.7	12.9	26.9

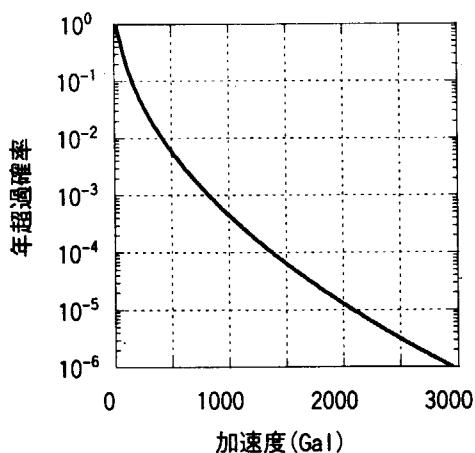


図 3.2.1-5 短周期の地震危険度曲線

表 3.2.1-4 短周期（基本モデル）の各参考確率での加速度値

参考確率	加速度(Gal)
10^{-3}	840
10^{-4}	1380
10^{-5}	2080
10^{-6}	2960

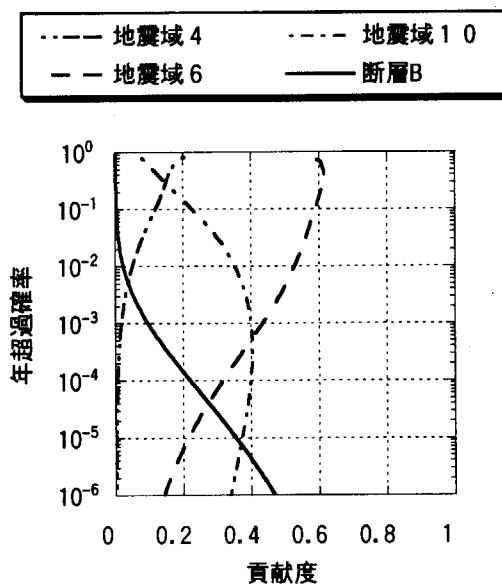


図 3.2.1-6 短周期（基本モデル）の貢献度曲線

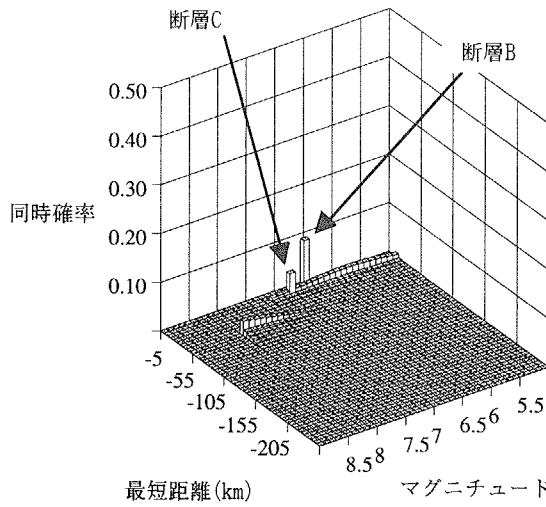
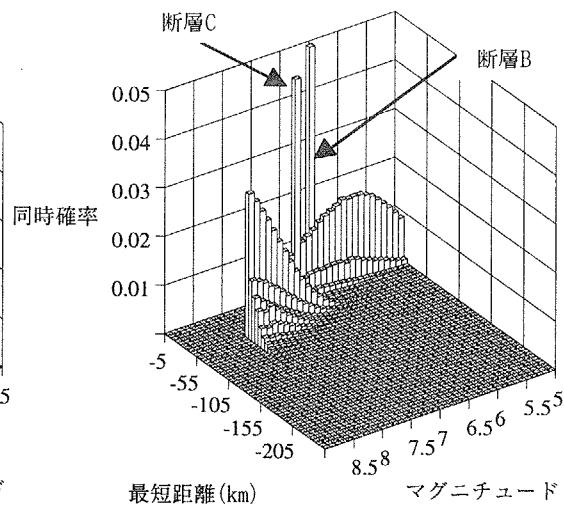
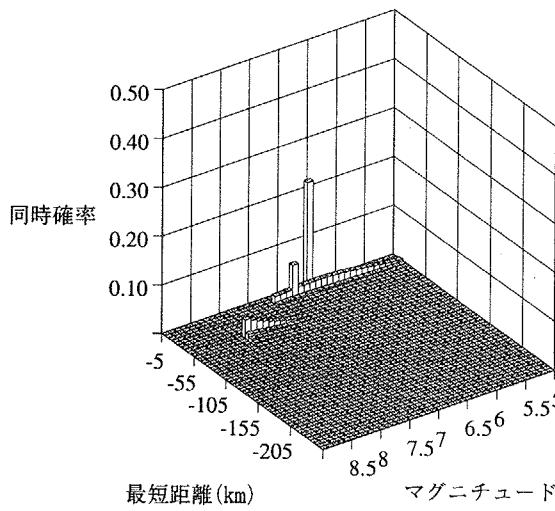
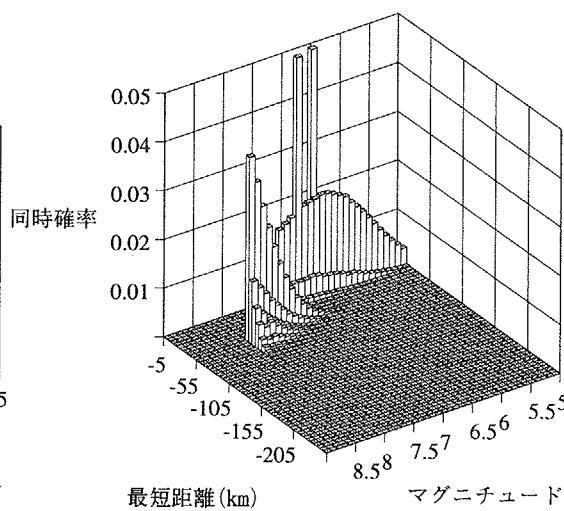
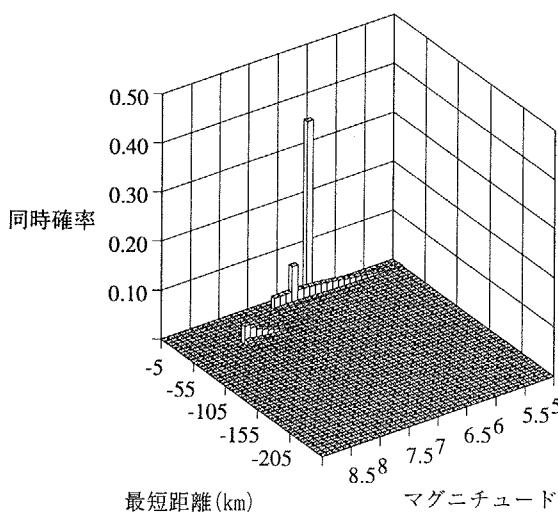
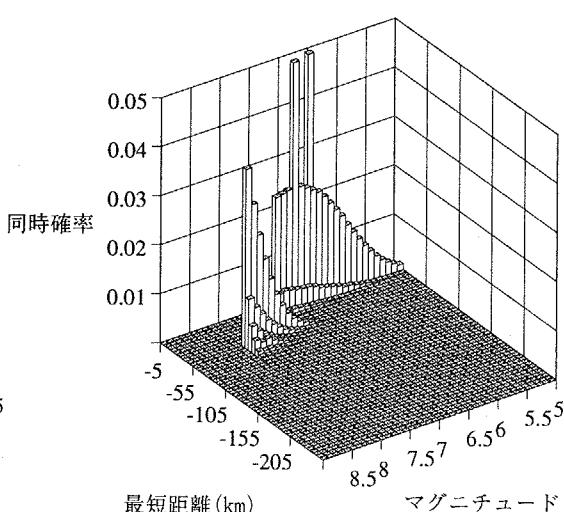
(a) 10^{-3} (a) 10^{-3} (b) 10^{-4} (b) 10^{-4} (c) 10^{-5} (c) 10^{-5}

図 3.2.1-7 短周期（基本モデル）の同時確率 図 3.2.1-8 短周期（基本モデル）の同時確率（拡大）

表 3.2.1-5 短周期（基本モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハサード適合マグニチュード
・ハサード適合距離

地震活動域 参照確率		地震域4	地震域6	地震域7	地震域10	断層C	断層B	断層A
10^{-3} (840Gal)	貢献度(%)	1.8	43.2	1.8	39.9	3.5	9.7	0.0
	M^*	7.8	7.6	7.4	6.1	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	71.9	52.9	67.0	14.3	14.2	7.7	—
10^{-4} (1380Gal)	貢献度(%)	0.0	31.7	0.0	39.9	4.9	21.9	0.0
	M^*	—	7.7	0.0	6.3	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	—	51.0	0.0	13.4	14.2	7.7	—
10^{-5} (2080Gal)	貢献度(%)	0.0	21.6	0.0	37.3	5.1	35.3	0.0
	M^*	—	7.7	0.0	6.4	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	—	49.9	0.0	13.0	14.2	7.7	—
10^{-6} (2960Gal)	貢献度(%)	0.0	14.3	0.0	33.9	4.6	46.9	0.0
	M^*	—	7.8	—	6.5	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	—	49.1	—	12.7	14.2	7.7	—

表 3.2.1-6 短周期（基本モデル）の確率論的想定地震の諸元

	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6
10^{-6} (2960Gal)	地震域10	6.5	7.7	46.9
	断層B	6.5	12.7	33.9
	地震域6	7.8	49.1	14.3

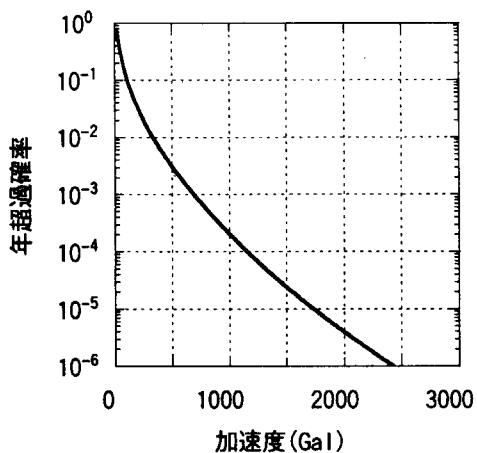


図 3.2.1-9 長周期（基本モデル）の地震危険度曲線

表 3.2.1-7 長周期（基本モデル）の各参照確率での加速度値

参照確率	加速度(Gal)
10 ⁻³	680
10 ⁻⁴	1160
10 ⁻⁵	1740
10 ⁻⁶	2420

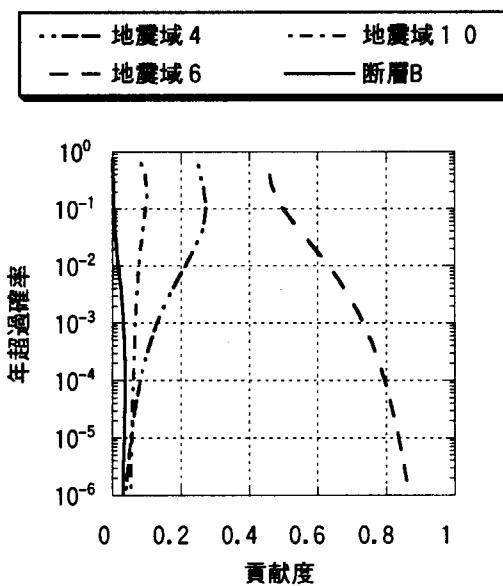


図 3.2.1-10 長周期（基本モデル）の貢献度曲線

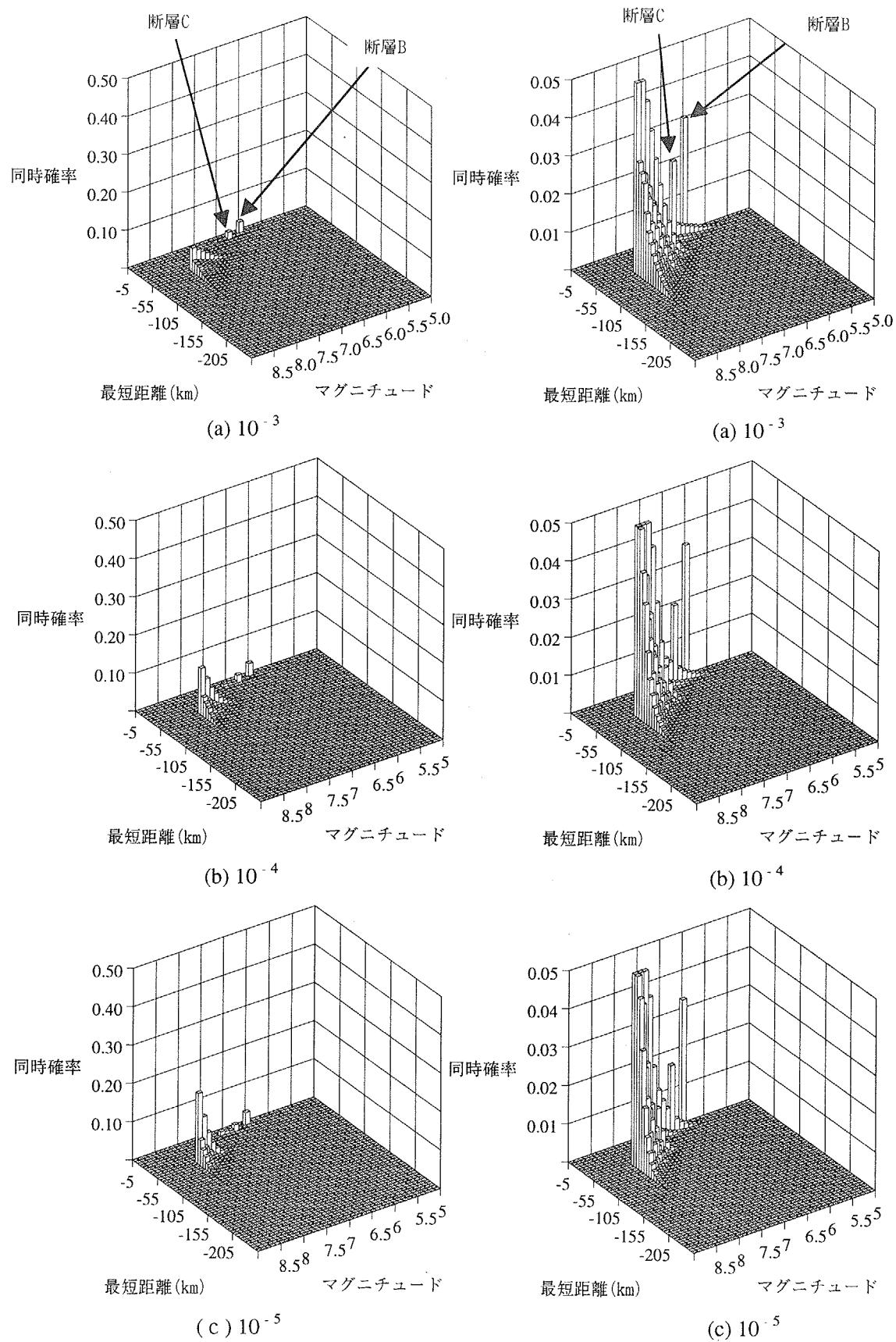


図 3.2.1-12 同(基本モデル)の同時確率（拡大）

表 3.2.1-8 長周期（基本モデル）の主な地震活動域の貢献度・ハザード適合マグニチュード
・ハザード適合距離

地震活動域 参照確率		地震域4	地震域6	地震域7	地震域10	断層C	断層B	断層A
10^{-3} (680Gal)	貢献度(%)	13.0	73.0	1.9	6.5	1.7	3.1	0.0
	M^*	7.8	7.7	7.6	6.7	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	79.0	56.1	68.6	15.5	14.2	7.7	—
10^{-4} (1140Gal)	貢献度(%)	8.1	79.4	1.2	6.0	1.6	3.5	0.0
	M^*	7.9	7.8	7.6	6.8	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	73.5	53.4	67.0	14.2	14.2	7.7	—
10^{-5} (1700Gal)	貢献度(%)	5.4	83.6	0.0	5.5	1.3	3.3	0.0
	M^*	7.9	7.8	—	6.9	6.8	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	70.4	51.8	—	13.6	14.2	7.7	—
10^{-6} (2420Gal)	貢献度(%)	3.7	86.7	0.0	5.2	0.0	2.9	0.0
	M^*	7.9	7.9	—	6.9	—	6.5	—
	$R^*(\text{km})$	68.2	50.7	—	13.1	—	7.7	—

表 3.2.1-9 長周期（基本モデル）の確率論的想定地震の諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (680Gal)	地震域6	7.7	56.1	73.0
	地震域4	7.8	79.0	13.0
10^{-4} (1140Gal)	地震域6	7.8	53.4	79.4
10^{-5} (1700Gal)	地震域6	7.8	51.8	83.6
10^{-6} (2420Gal)	地震域6	7.9	50.7	86.7

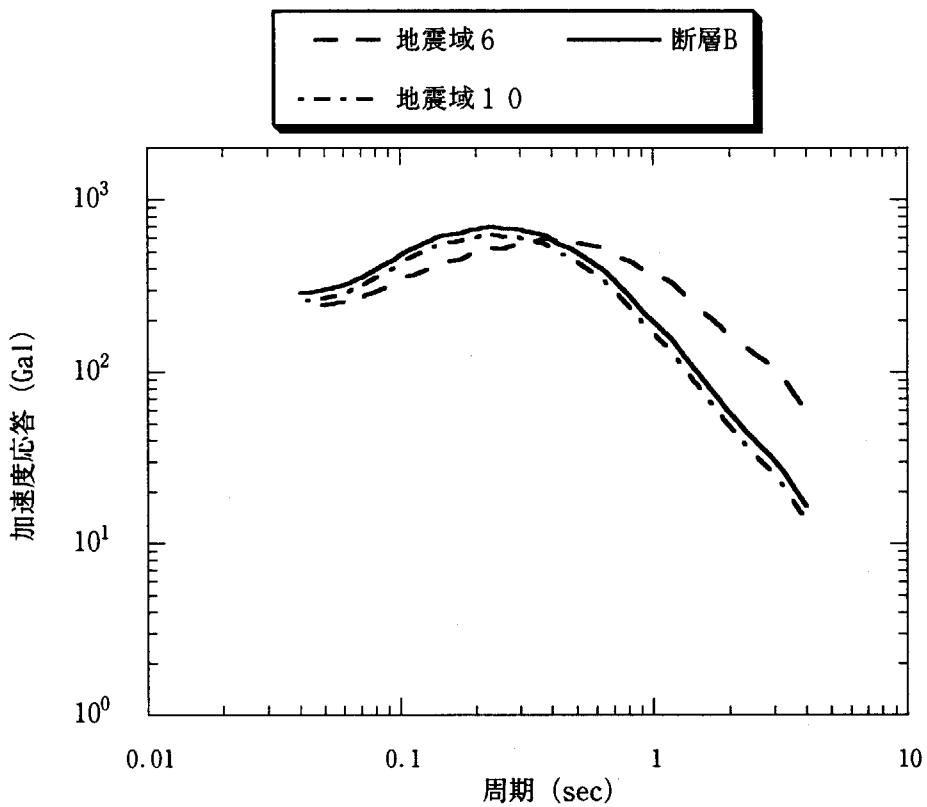


図 3.2.1-13 目標応答スペクトル

3.2.2 現行指針モデルの結果

基本モデルの結果と同様に、3.1.6 項で設定した現行指針モデルに対して、PGA、短周期領域および長周期領域のそれぞれの加速度応答スペクトルを地震動強度の指標とした場合の、石川らの方法による確率論的な想定地震の諸元を算定する。

(1) 最大地動加速度の結果

PGAに対する算定結果を、図 3.2.2-1～図 3.2.2-4 および表 3.2.2-1～表 3.2.2-3 に示す。これらの図表のうち、図 3.2.2-1 は地震危険度曲線を示したものである。同図の地震危険度曲線から得られる各参考確率ごとの加速度値を表 3.2.2-1 に示す。基本モデルの PGA の加速度値（表 3.2.2-1）と比較すると、現行指針モデルの方が 20～100Gal 小さいことがわかる。なお、ここでも参考値として、一部、参考確率 10^{-6} に対する結果も示す。

主な地震活動域に対する貢献度を、図 3.2.2-2 に示す。同図から、年超過確率が $10^{-3} \sim 10^{-5}$ のレベルにおいて、地震域 6、地震域 10 の貢献度が大きいことがわかる。PGA の結果について基本モデルの場合と比較すると、基本モデルでは参考確率が小さくなるにしたがい断層 B の貢献度が大きくなり、地震域 6 の値が減少した。これに対し、現行指針モデルでは、断層 B の影響がほとんどないため、地震域 6 の貢献度がそれ程低減しないことがわかる。

図 3.2.2-3 および図 3.2.2-4 に、参考確率をそれぞれに 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} としたときのマグニチュード M と最短距離 R の同時確率を示す。基本モデルの PGA の場合（図 3.2.1-3 および図 3.2.1-4）と比較すると、当然のことながら、現行指針モデルでは断層 B および断層 C に対応するビン（区間）での値が著しく小さくなっていることがわかる。

表 3.2.2-2 は、参考確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} および 10^{-6} とした場合のそれぞれの、主な地震活動域（地震域および活断層）に対する貢献度 c_f 、ハザード適合マグニチュード M^* 、ハザード適合（最短）距離 R^* を示したものである。また、表 3.2.2-3 は、 c_f が 10% 以上となる地震活動域の地震諸元を、 c_f が大きい順から各参考確率ごとに表示したものである。同表から、現行指針モデルの PGA について、各参考確率ごとの想定地震が読み取れる。

(2) 短周期領域の結果

短周期領域の加速度応答スペクトルに対する算定結果を、図 3.2.2-5～図 3.2.2-8 および表 3.2.2-4～表 3.2.2-6 に示す。

地震危険度曲線を図 3.2.2-5 に示す。また、同図の曲線から得られる各参考確率に対する加速度値を表 3.2.2-4 に示す。

主な地震活動域に対する貢献度を、図 3.2.2-6 に示す。同図から、年超過確率が $10^{-3} \sim 10^{-5}$ のレベルにおいて、短周期領域に対しても地震域 6 および地震域 10 の貢献度が支配的になることがわかる。

各参考確率に対する M と R の同時確率を図 3.2.2-7 に、図 3.2.2-7 の同時確率値を拡大したものを図 3.2.2-8 に示す。これらの同時確率と基本モデルの同時確率（図 3.2.1-7、図 3.2.1-8）とを比較すると、短周期領域の場合も活断層に対応したビンを除いて、概ね類似した分布となっている。

表 3.2.2-5 は、参考確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} および 10^{-6} とした場合の、主な地震活動域の c_f 、 M^* 、 R^* を示したものである。また、表 3.2.2-6 は、想定地震の貢献度および諸元を表示したものである。

(3) 長周期領域の結果

長周期領域の加速度応答スペクトルに対する算定結果を、図 3.2.2-9～図 3.2.2-12 および表 3.2.2-7～表 3.2.2-9 に示す。

地震危険度曲線を図 3.2.2-9 に示す。また、同図の曲線から得られる各参考確率に対する加速度値を表 3.2.2-7 に示す。表 3.2.2-7 の加速度値を基本モデルの長周期領域の値（表 3.2.2-9）と比較すると、両者にはほとんど差異が生じないことがわかる。

主な地震活動域に対する貢献度を図 3.2.2-10 に示す。同図から、現行指針モデルにおいても地震域 6 の貢献度が支配的になることがわかる。

各参考確率ごとの M と R の同時確率を図 3.2.2-11 および図 3.2.1-12 に示す。基本モデルの場合と同様に、長周期領域に対しては地震域 6 に対する領域 ($7.0 \leq M \leq 8.0$ 、 $45 \text{ km} \leq R \leq 70 \text{ km}$) で同時確率が大きくなることが考察できる。

参考確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} および 10^{-6} とした場合の、主な地震活動域に対する c_f 、 M^* 、 R^* を表 3.2.2-8 に示す。また、長周期領域に対して選定される地震およびその諸元を表 3.2.2-9 示す。長周期領域に関しては、現行指針モデルで選定される地震は基本モデルと同様の傾向があることがわかる。

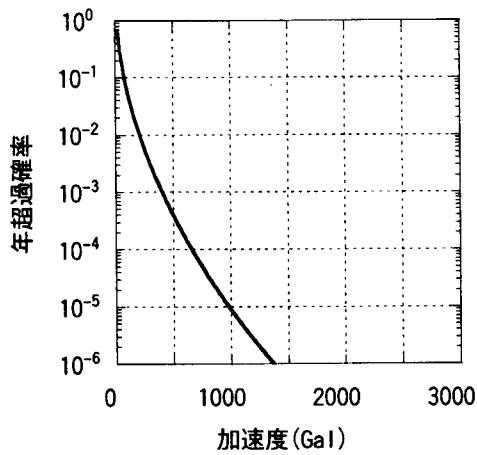


図 3.2.2-1 PGA（現行指針モデル）の地震危険度曲線

表 3.2.2-1 PGA（現行指針モデル）の各参照確率での加速度値

参照確率	加速度(Gal)
10^{-3}	400
10^{-4}	660
10^{-5}	980
10^{-6}	1360

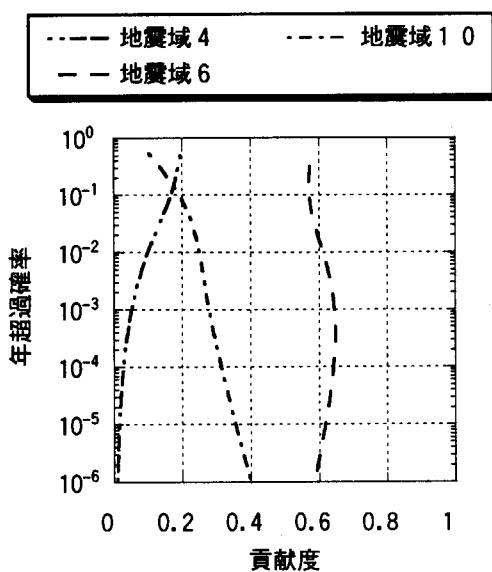


図 3.2.2-2 PGA（現行指針モデル）の貢献度曲線

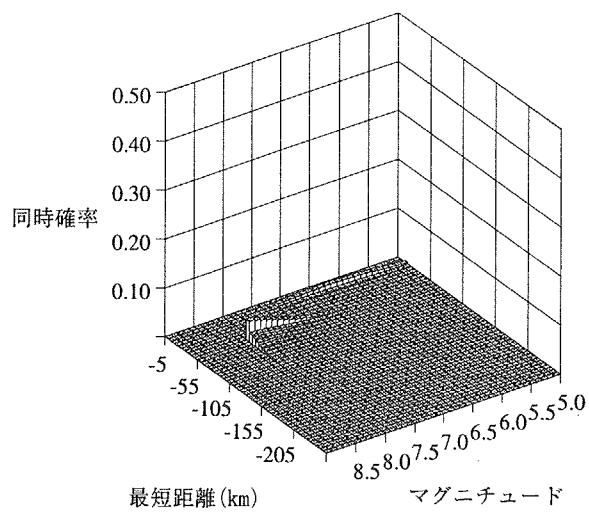
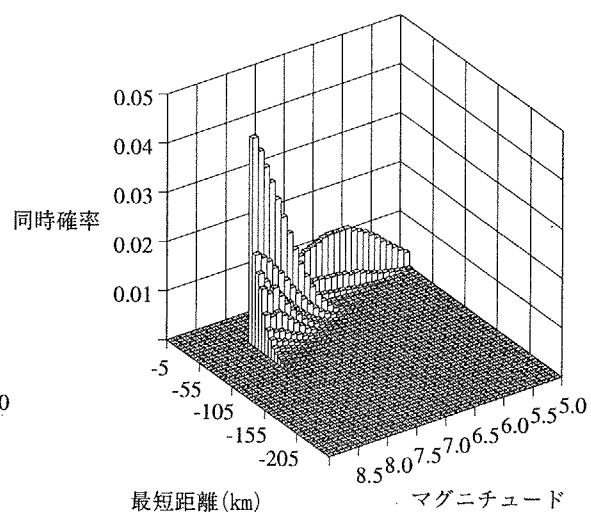
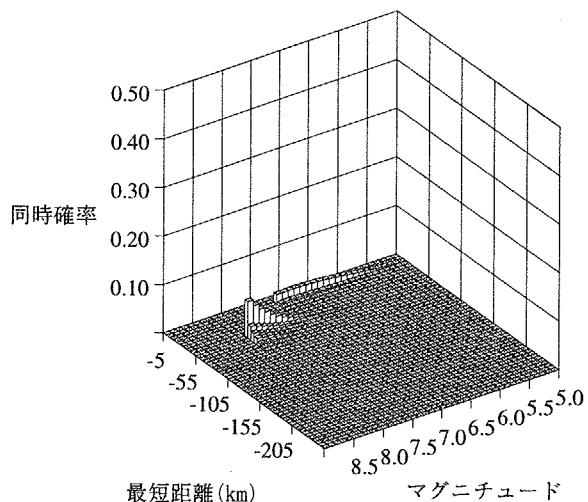
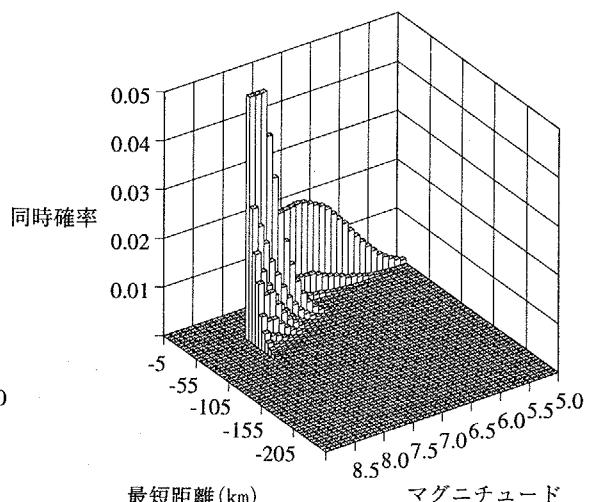
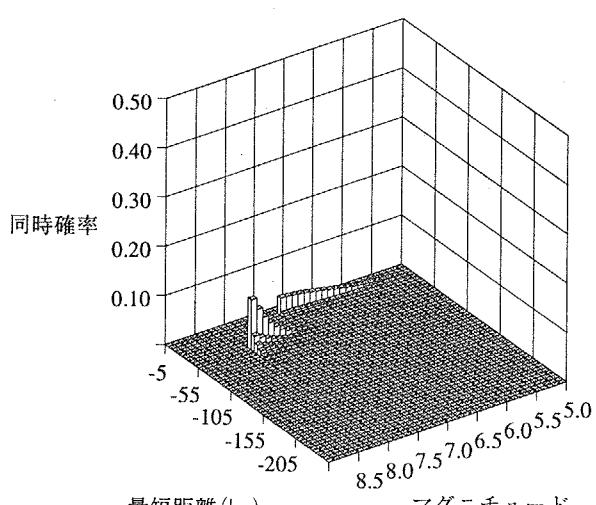
(a) 10^{-3} (a) 10^{-3} (b) 10^{-4} (b) 10^{-4} (c) 10^{-5}

図 3.2.2-3 PGA(現行指針モデル)の同時確率

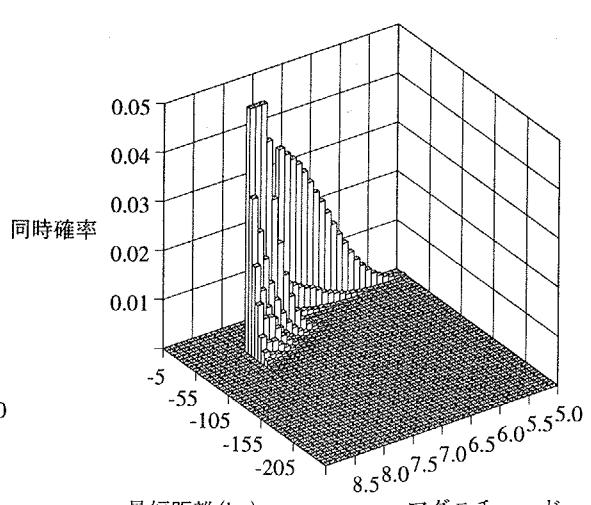
(c) 10^{-5}

図 3.2.2-4 PGA(同左モデル)の同時確率(拡大)

表 3.2.2-2 PGA（現行指針モデル）の主な地震活動域の
貢献度・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

地震活動域 参照確率		地震域4	地震域6	地震域7	地震域10	断層A
10^{-3} (400Gal)	貢献度(%)	4.6	63.3	2.4	29.5	0.0
	M^*	7.8	7.6	7.5	6.2	—
	$R^*(km)$	74.4	54.1	67.7	14.8	—
10^{-4} (660Gal)	貢献度(%)	2.3	62.2	1.7	33.8	0.0
	M^*	7.8	7.7	7.5	6.4	—
	$R^*(km)$	70.2	51.9	66.4	13.8	—
10^{-5} (980Gal)	貢献度(%)	1.3	59.0	1.1	38.6	0.0
	M^*	7.9	7.7	7.6	6.6	—
	$R^*(km)$	67.8	50.6	65.6	13.3	—
10^{-6} (1360Gal)	貢献度(%)	0.0	55.0	0.0	43.4	0.0
	M^*	—	7.8	—	6.6	—
	$R^*(km)$	—	49.8	—	12.9	—

表 3.2.2-3 PGA（現行指針モデル）の確率論的想定地震の諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(km)$	貢献度(%)
10^{-3} (400Gal)	地震域6	7.6	54.1	63.3
	地震域10	6.2	14.8	29.5
10^{-4} (660Gal)	地震域6	7.7	51.9	62.2
	地震域10	6.4	13.8	33.8
10^{-5} (980Gal)	地震域6	7.7	50.6	59.0
	地震域10	6.6	13.3	38.6
10^{-6} (1360Gal)	地震域6	7.8	49.8	55.0
	地震域10	6.7	12.9	43.4

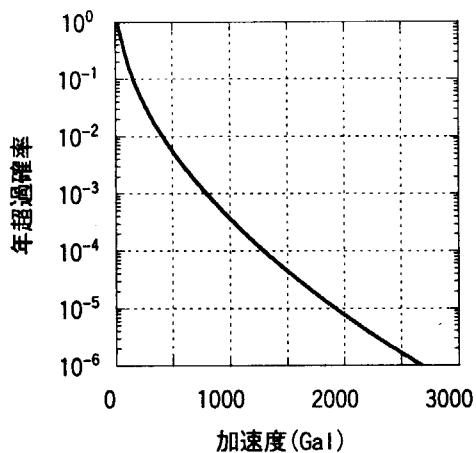


図 3.2.2-5 短周期（現行指針モデル）の地震危険度曲線

表 3.2.2-4 短周期（現行指針モデル）の各参照確率での加速度値

参照確率	加速度(Gal)
10^{-3}	800
10^{-4}	1300
10^{-5}	1920
10^{-6}	2680

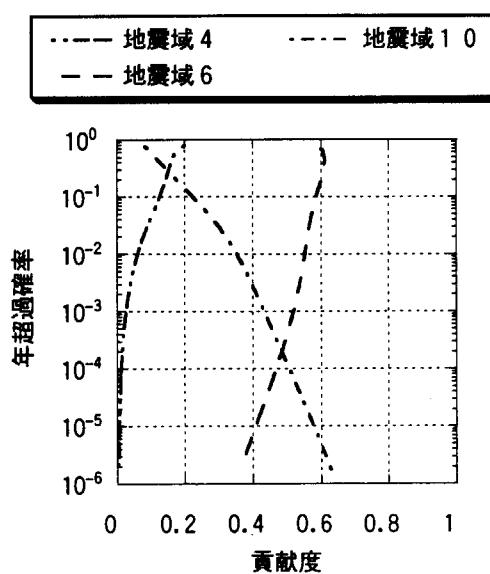


図 3.2.2-6 短周期（現行指針モデル）の貢献度曲線

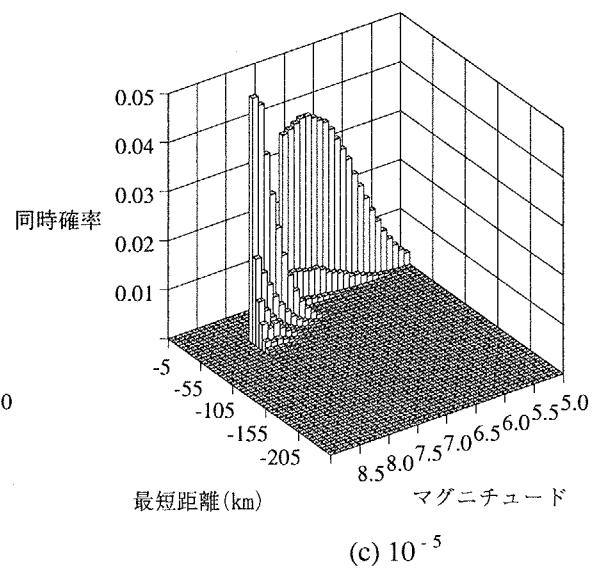
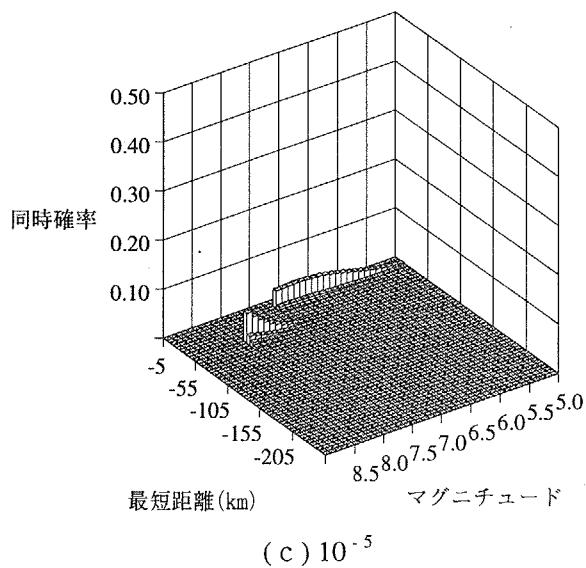
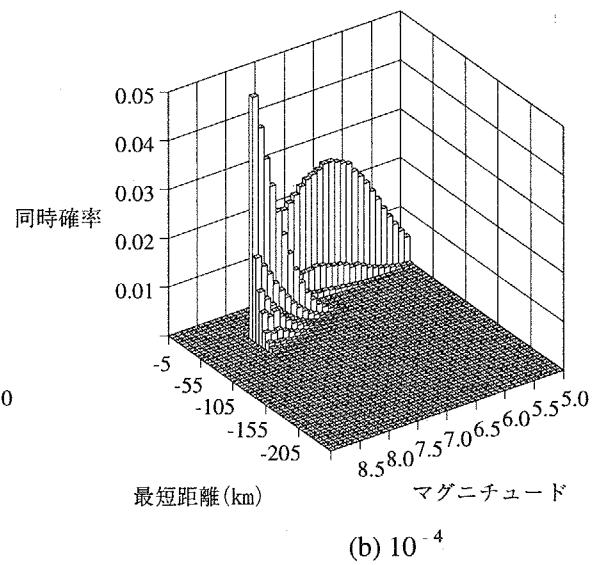
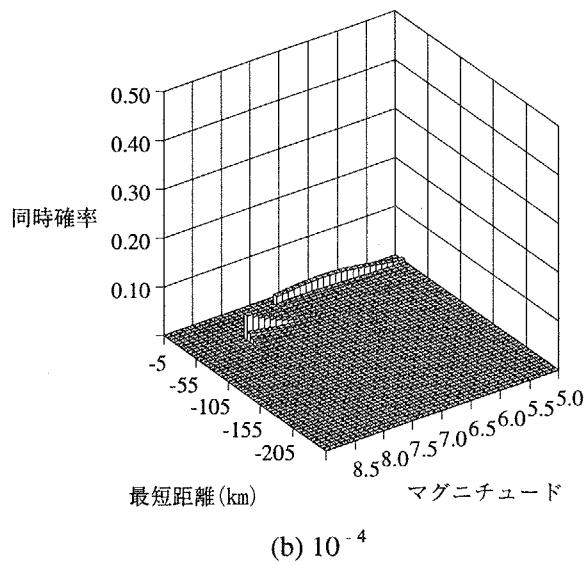
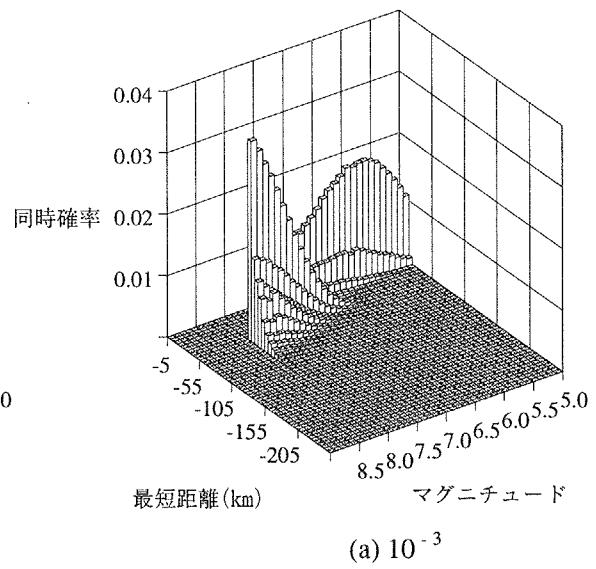
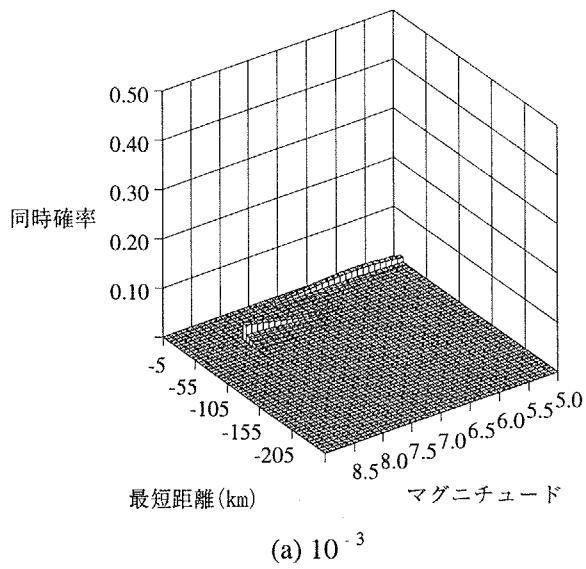


図 3.2.2-7 短周期(現行指針モデル)の同時確率 図 3.2.2-8 短周期(現行指針モデル)の同時確率(拡大)

表 3.2.2-5 短周期（現行指針モデル）の主な地震活動域の
貢献度・ハサード適合マグニチュード・ハサード適合距離

地震活動域 参照確率		地震域4	地震域6	地震域7	地震域10	断層A
10^{-3} (800Gal)	貢献度(%)	2.2	50.3	2.1	45.3	0.0
	M^*	7.8	7.5	7.4	6.1	—
	$R^*(km)$	72.3	53.1	67.1	14.3	—
10^{-4} (1300Gal)	貢献度(%)	0.0	44.2	1.4	53.4	0.0
	M^*	—	7.6	7.5	6.2	—
	$R^*(km)$	—	51.2	66.0	13.5	—
10^{-5} (1920Gal)	貢献度(%)	0.0	37.7	0.0	61.0	0.0
	M^*	—	7.7	—	6.4	—
	$R^*(km)$	—	50.1	—	13.1	—
10^{-6} (2680Gal)	貢献度(%)	0.0	31.4	0.0	67.8	0.0
	M^*	—	7.8	—	6.5	—
	$R^*(km)$	—	49.3	—	12.7	—

表 3.2.2-6 短周期（現行指針モデル）の確率論的想定地震の諸元

	地震活動域	M^*	$R^*(km)$	貢献度(%)
10^{-3} (800Gal)	地震域6	7.5	53.1	50.3
	地震域10	6.1	14.3	45.3
10^{-4} (1300Gal)	地震域10	6.2	13.5	53.4
	地震域6	7.6	51.2	44.2
10^{-5} (1920Gal)	地震域10	6.4	13.1	61.0
	地震域6	7.7	50.1	37.7
10^{-6} (2680Gal)	地震域10	6.5	12.7	67.8
	地震域6	7.8	31.4	31.4

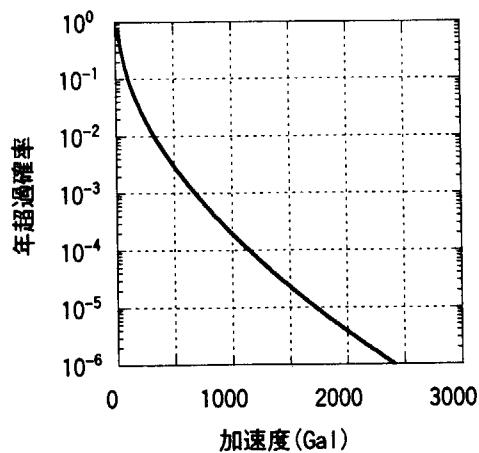


図 3.2.2-9 長周期（現行指針モデル）の地震危険度曲線

表 3.2.2-7 長周期（現行指針モデル）の各参照確率での加速度値

参照確率	加速度(Gal)
10^{-3}	680
10^{-4}	1140
10^{-5}	1720
10^{-6}	2420

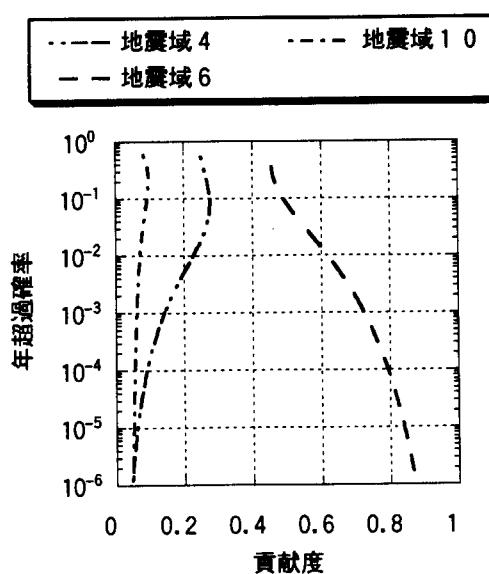


図 3.2.2-10 長周期（現行指針モデル）の貢献度曲線

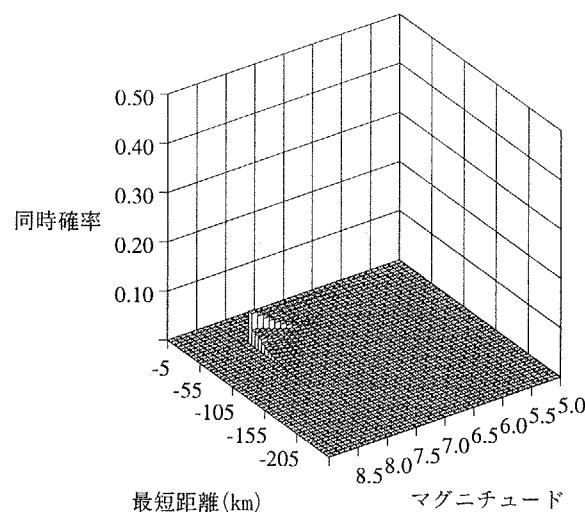
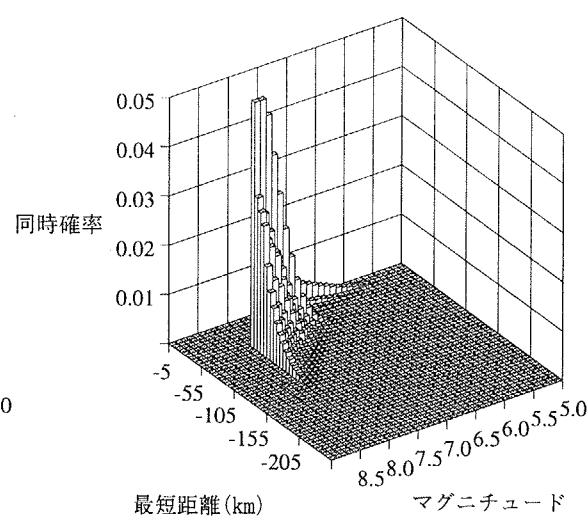
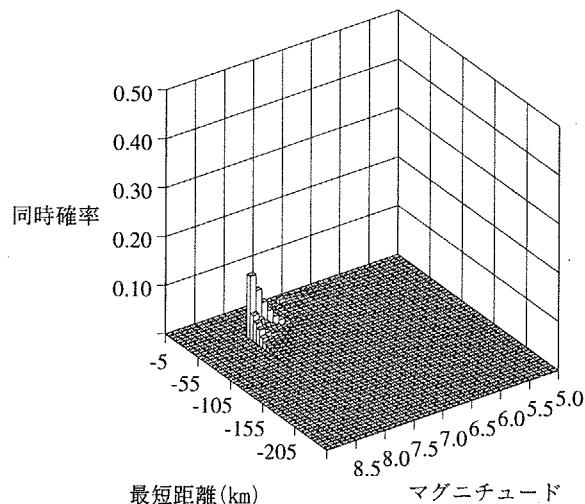
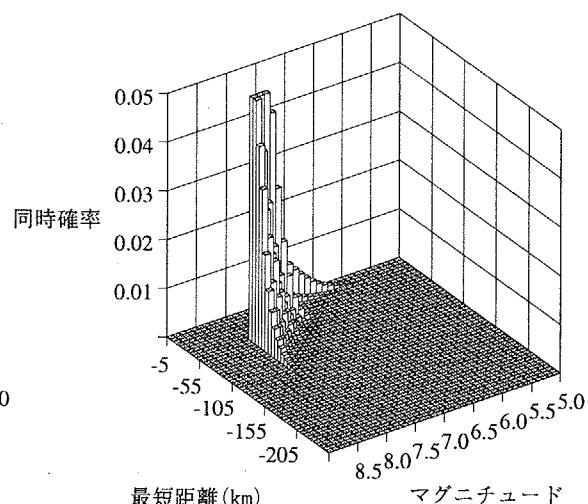
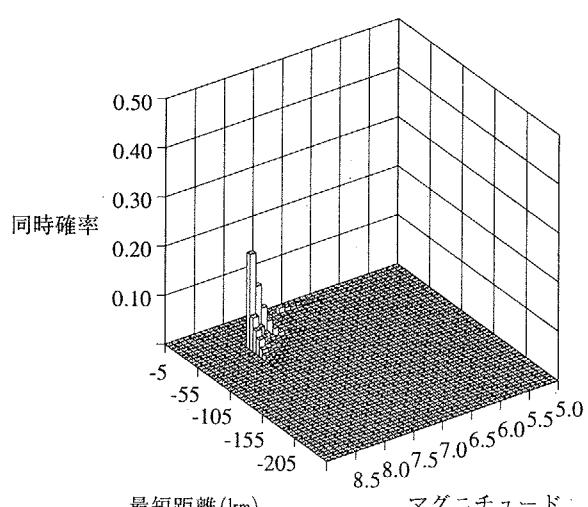
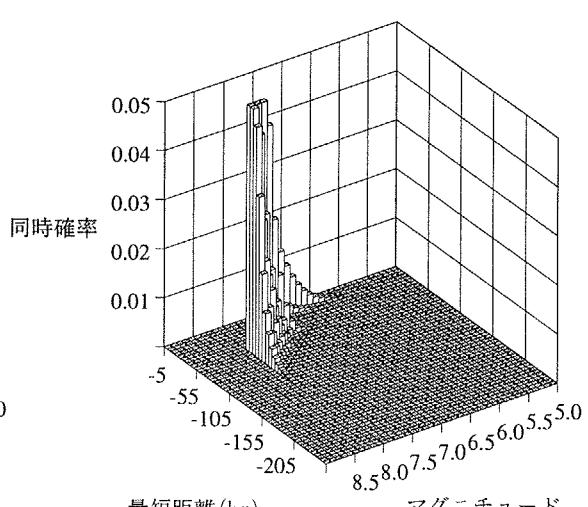
(a) 10^{-3} (a) 10^{-3} (b) 10^{-4} (b) 10^{-4} (c) 10^{-5} (c) 10^{-5}

図 3.2.2-11長周期(現行指針モデル)の同時確率 図 3.2.2-12長周期(現行指針モデル)の同時確率(拡大)

表 3.2.2-8 長周期（現行指針モデル）の主な地震活動域の
貢献度・ハサード適合マグニチュード・ハサード適合距離

地震活動域 参照確率		地震域4	地震域6	地震域7	地震域10	断層A
10^{-3} (680Gal)	貢献度(%)	13.6	76.7	2.0	6.9	0.0
	M^*	7.8	7.7	7.6	6.7	—
	$R^*(km)$	79.0	56.1	68.6	15.5	—
10^{-4} (1140Gal)	貢献度(%)	8.5	83.7	1.3	6.3	0.0
	M^*	7.9	7.8	7.6	6.8	—
	$R^*(km)$	73.5	53.4	67.0	14.2	—
10^{-5} (1700Gal)	貢献度(%)	5.6	87.6	0.0	5.8	0.0
	M^*	7.9	7.8	—	6.9	—
	$R^*(km)$	70.4	51.8	—	13.6	—
10^{-6} (2420Gal)	貢献度(%)	3.8	90.2	0.0	5.4	0.0
	M^*	7.9	7.9	—	6.9	—
	$R^*(km)$	68.2	50.7	—	13.1	—

表 3.2.2-9 長周期（現行指針モデル）の確率論的想定地震の諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(km)$	貢献度(%)
10^{-3} (680Gal)	地震域6	7.7	56.1	76.7
	地震域4	7.8	79.0	13.6
10^{-4} (1140Gal)	地震域6	7.8	53.4	83.7
	地震域6	7.8	51.8	87.6
10^{-5} (1700Gal)	地震域6	7.9	50.7	90.2

3. 3 評価法の差異による想定地震諸元の比較検討

3. 3. 1 現行指針に基づいた想定地震の諸元

(1) S_1 対象地震および S_2 対象地震

現行指針によれば、設計用基準地震動として基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 を設定する必要がある。基準地震動 S_1 をもたらす地震は、工学的な見地からその発生を予期することが適切であると考えられるものであり、設計用最強地震（以下、 S_1 対象地震）と呼ばれる。 S_1 対象地震では、次の 2 点を考慮の対象としている。

- ① 過去の地震（歴史地震）
- ② 活動度の高い活断層

基準地震動 S_2 をもたらす地震は、地震学的な見地から、 S_1 対象地震を超える地震の発生を否定できないとの考えに基づき設定されるものであり、設計用限界地震（以下、 S_2 対象地震）と呼ばれる。 S_2 対象地震は、発生し得る最大規模の地震とを考えることができ、これよりも規模の大きな地震は考慮しなくてもよいことになる。 S_2 対象地震では、次の 3 点が対象となる。

- ③ 活断層
- ④ 地震地帯構造
- ⑤ 直下地震（マグニチュード 6.5）

(2) 想定されている S_1 対象地震

モデルサイトで設定されている S_1 対象地震のうち、文献 11)では、①について『日本被害地震総覧』¹⁴⁾の地震のうちサイトからの震央距離が 200km 以内の地震から設定されている。地震の選定にあたり、まず金井式¹⁵⁾によって各地震の基盤における最大速度を計算し、最大加速度から気象庁震度階の区分を推定している。そして、震度 V となる地震 6 つを選んだうえで、対象サイトに最も近くで起きた 1677 年の地震 (S_{1-1} : $M7.4$, $\Delta=54\text{km}$) およびサイトに最も大きな影響をあたえたと考えられる 1938 年の地震 (S_{1-2} : $M7.7$, $\Delta=64\text{km}$) を選定している。ただし、 Δ は震源距離を意味する。

②について、海域の活断層（海底活断層）のうち F_3 および F_4 の検討をおこなっている。そして、両活断層においてはマグニチュード 6 以上の地震は発生しないものと推測されているものの、安全上の見地から、マグニチュード 7 に相当するとして地震 (S_{1-3}) を想定している。

(3) 想定されている S_2 対象地震

③について、文献 11)では断層 A および断層 D それぞれに対応する地震を設定している。そして、断層 A が断層 D の長さを、それぞれ 14km、40km している。この場合、式(3.1.5-1)に示した松田式より、各断層のマグニチュードは、それぞれ 6.8、7.5 となる。

④に基づく地震は、「海型」に関しては宮村¹⁴⁾の分類による本州弧外側地震帯のうち宮城県沖および福島県沖の部分、「陸型」に関しては同じく宮村¹⁴⁾の分類による東北中央地震帯を対象としており、「海型」について本州弧外側地震帯の中の過去の地震で最大規模の地震（マグニチュード7.8）を想定している。また、「陸型」については、東北中央地震帯での最大マグニチュード7.5の地震を、断層Dの位置において考慮している。

直下地震に関しては、震源距離10kmの位置にマグニチュード6.5の地震が発生するものと想定している。

以上によって設定されたS₁およびS₂対象地震の諸元を表3.3.1-1に示す。

表3.3.1-1 現行指針に基づいて設定された地震諸元

種別	考慮する地震		備考
	マグニチュード	震央距離(km)	
S ₁ -1	7.7	64	過去の地震
S ₁ -2	7.4	54	過去の地震
S ₁ -3	7	35	海底断層
S ₂ -1	7.8	50	地震地体構造
S ₂ -2	7.5	75	活断層；地震地体構造
S ₂ -3	6.8	43	活断層
S ₂ -4	6.5	7.23	直下地震

3. 3. 2 現行指針および確率論的手法に基づいた想定地震の諸元の比較

本検討では、モデルサイトを対象として、基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 毎に前節で算定した確率論的想定地震の諸元と、3.3.1 項で述べた決定論的想定地震の諸元を比較する。ここで、比較に用いた現行指針の手順に基づく決定論的手法と確率論的手法には、次に示すような基本的な概念の相違がある。

- ・ 現行の決定論的手法では、考慮すべき地震の範囲を再来期間で定め、その中から予測される震源に対する地震の規模と震央距離を過去のデータに基づくもののみならず、一部については先駆的に与えて、サイトに最大の影響を及ぼす地震を選定する手順をとる。これに対して、確率論的手法では、サイト周辺で、一定の条件の下で発生が予測される地震を網羅して、それらの地震の時刻、規模、位置等に関する情報に基づいて地震危険度を算定し、次に想定地震の貢献度を算定し、考慮した地震の中から与えた参照確率に対して、サイトに及ぼす影響が確率的に支配的な地震の諸元（規模、距離）を評価する手順をとる。
- ・ 確率論的手法では、評価条件として与える地震活動のモデル化に伴なう不確実さ、及び地震伝播モデル化に伴なう不確実さを、地震危険度という統一された指標を用いることによって、より明示的に一貫性ある方法で取扱うことができる。
- ・ 確率論的手法では、地震活動のモデル化に関して、地震の発生する場所や規模が事前に推定することが可能な活断層とプレート境界の大規模地震は個別にモデル化し、それらを表現できない地震をランダム地震域としてモデル化し設定する。一方、現行の耐震設計では、活断層の存在が知られていないところでも発生しうる地震のうち最大級のものとして、 $M=6.5$ の直下地震を基準地震動 S_2 で考慮することとしている。確率論的想定地震の評価では、このタイプの地震もランダム地震域として発生する地震として取扱うことができる。但し、現行の耐震設計における $M=6.5$ の直下地震の設定は、設計という観点から全国一律に考慮することを規定したものであり、確率論的手法で設定する地震の発生時刻、規模、位置などの評価条件とは、全く前提条件を異にしており、厳密には両者を比較して論することはできない点に留意する必要がある。

以上の両評価手法の比較から、与えられた評価条件に対する評価過程の一貫性及びサイトに及ぼすリスクの観点から確率論的手法の方が、合理的な評価手法であるといえる。

モデルサイトを対象とした検討では、以下の条件に基づいて検討を行なった。
ただし、前節では、最大地動加速度、短周期領域および長周期領域に対する地震諸元を算定しているが、ここでは、短周期領域の指標($S_a(T=0.15s)$)を対象とする。

S_1 地震動および S_2 地震動と参照確率との対応については、「原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編：JEAG4601・補-1984）¹⁶⁾」を参考に以下のように設定する。

- ・ S_1 地震動に対応する参照確率は、基準地震動の発生確率 $10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4}$ /年の中間的な値を参考に 10^{-3} とする。

- ・ S_2 地震動に対応する参考確率は、基準地震動の発生確率 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ /年の中間的な値を参考に 10^{-4} とする。

これらの参考確率によって、設定される確率論的想定地震および 3.3.1 での決定論的想定地震の諸元を表 3.3.2-1 にまとめて示す。同表から S_1 対象地震について以下の結果が得られた。

- ・ 想定地震のうち過去の地震に対する諸元は、確率論的想定地震のうちの地震域 6 に対応する諸元と概ね一致している。
- ・ 現行指針に基づく想定地震のうち海底活断層による地震は設定されているが、確率論的想定地震では設定されない。
- ・ 現行指針に基づく想定地震では、近距離中規模地震が選ばれていないのに対し、確率論的想定地震では選ばれている。

また、同じく表 3.3.2-1 から S_2 対象地震について以下の結果が得られた。

- ・ 現行指針に基づく想定地震のうち地震地体構造に対する諸元は、確率論的想定地震のうちの地震域 6 に対応する諸元と概ね一致している。
- ・ 現行指針に基づく想定地震で設定されている活断層・地震地体構造および活断層に対する地震は、確率論的想定地震では選ばれない。
- ・ 現行設計および現行指針に基づく想定地震では考慮されていない断層 B に対応する地震が、基本モデルを用いた確率論的想定地震では選ばれている。
- ・ 直下地震に関する確率論的想定地震の諸元は、現行指針に基づく想定地震の諸元に比較的近いものとなっている。

このように、決定論および確率論によって得られる地震諸元のうち支配的なものについてはほぼ同様の地震諸元が設定されるという結果が得られた。このことは、現行の決定論的手法は、より合理的とされる確率論的手法と結果的に類似の地震が選定されており、現行の手法による結果の適切さを裏付けるものとなった。

表 3.3.2-1 現行指針および確率論的手法に基づいた想定地震の諸元の比較

基 準 地 震 動	現行設計に基づいた地震			確率論定想定地震							
				基本モデル				現行指針モデル			
	M	Δ(km)	備考	M*	R*(km)	貢献度	備考	M*	R*(km)	貢献度	備考
S ₁	7.7	64	過去の地震	7.6	52.9	43.2	地震域6	7.5	53.1	50.3	地震域6
	7.4	54	過去の地震								
	7.0	35	海底活断層								
				6.1	14.3	39.9	地震域10	6.1	14.3	45.3	地震域10
S ₂	7.8	50	地震地体構造	7.7	51	31.7	地震域6	7.6	51.2	44.2	地震域6
	7.5	75	活断層・地震地体構造								
	6.8	43	活断層								
				6.5	7.7	21.9	断層B				
	6.5	7.23	直下地震	6.3	13.4	39.9	地震域10	6.2	13.5	53.4	地震域10

(注) : 基本モデルは、現行設計に基づいた地震とは、対象とする地震データベースが異なっている。

3.3.3 検討結果の考察

本章では、確率論的に想定される地震および現行指針に基づいた決定論的な想定地震を比較した。したがって、対象としたサイトや評価条件は、限定されたものとなっている。確率論的手法を用いることによって想定された地震に関して、以下の知見を得た。

(a) 現行指針モデルと基本モデルによる確率論的想定地震に関する比較

確率論的想定地震について、基本モデルおよび現行指針モデルそれぞれによって設定される地震について考察する。これら2つのモデルの違いは、基本モデルでは断層Bおよび断層Cを考慮しているに対し現行指針モデルでは考慮していないこと、基本モデルでは海底活断層を考慮していないのに対し現行指針モデルでは考慮していること、である。

基本モデルを用いた場合には、最大地動加速度および短周期領域では、断層Bに対する地震が選ばれる。そして、その貢献度は、参照確率が小さくなるにしたがって大きくなる。

また、海底活断層に対する貢献度を、図3.3.3-1に示す。同図から、4つの海底活断層の貢献度は、年超過確率が約 2×10^{-2} のときF₃に対応する地震で最大となる。しかし、その大きさは、 2.2×10^{-4} 程度であり、他の地震活動域に比べて、非常に小さい値となっている。

(b) 確率論的および決定論的な想定地震の差異に関する考察

確率論的想定地震のうち現行指針モデルに対して選定される地震と、決定論的に想定される地震を比較すると、両者の間には前項3.3.2で述べたような差異が生じる。しかし、現行指針によって設定されたS₁対象地震のうち、過去の地震に対応する(M7.7, 164km)の地震の影響が支配的であり、この地震は確率論的想定地震においても選定される。また、S₂対象地震についても同様であり、短周期領域での影響が支配的な直下地震と、長周期領域での影響が支配的な地震地体構造に対応する地震の両者は、いずれも確率論的想定地震としても選定される。

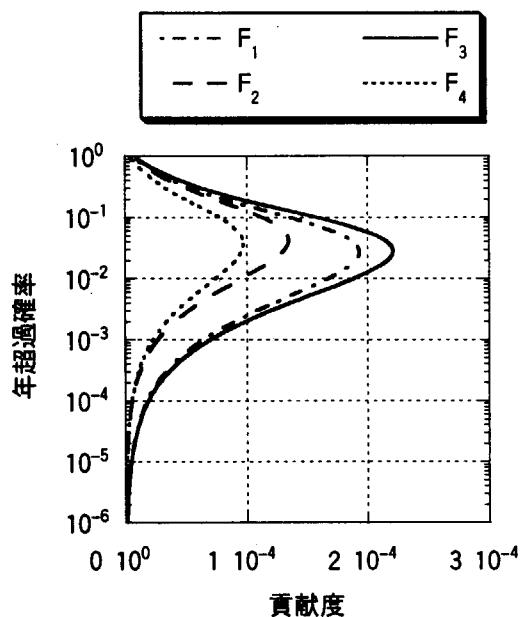


図 3.3.3-1 海底活断層の貢献度曲線

3章の参考文献

- 1) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧 [増補改訂版]，東京大学出版会, 1996.
- 2) 宇津徳治：日本付近の M6.0 以上の地震および被害地震の表：1885 年～1980 年、地震研究所彙報, Vol. 57, pp. 401-463, 1982.
- 3) 気象庁：改訂日本付近の主要地震の表, 1926～1960; 地震月報別冊, 第 6 号, 1982; 地震月報, 1961～.
- 4) 活断層研究会編：新編 日本の活断層一分布図と資料, 東京大学出版会, 1991.
- 5) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帶図, 地震研究所彙報, Vol. 65, pp. 289-319, 1990.
- 6) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 第 28 卷、pp. 269 - 283, 1975.
- 7) 萩原尊禮編：日本列島の地震—地震工学と地体構造—, 鹿島出版会, 1991.
- 8) 活断層研究会編：日本の活断層一分布図と資料, 東京大学出版会, 1980.
- 9) 科学技術庁：双葉断層に関する調査, 第 3 回活断層成果報告会予稿集, pp. 49-58, 1999.11.
- 10) 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講演論文集, pp. 161-164, 1997. 7.
- 11) 東京電力株式会社：福島第二原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書（3, 4 号原子炉の増設及び 1, 2 号原子炉施設の変更）, 1978. 8.
- 12) Takada T. et al. : Probabilistic Scenario Earthquakes for Seismic Design – Comparison of Two Identification Procedures, Proceedings of OECD/NEA/CSNI workshop on Seismic Risk, pp. 459-473, 1999.
- 13) Hirose J. et al. : Technical Issues on Incorporating Probability-based Scenario Earthquakes into Seismic Design of Nuclear Power Plants, Proceedings of 15th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM5), pp. 1383-1390, 2000.
- 14) 宇佐美龍男：資料 日本被害地震総覧, 東大出版会, 1975.
- 15) Kanaki, K. and Suzuki, T. : Expectancy of the Maximum Velocity Amplitude of Earthquake Ground Motions at Bedrock , Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, XLVI, 1968.
- 16) 宮村撰三： サイスモテクトニックス, 地震第 2 輯第 20 卷, 1967.
- 17) 社団法人 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針（重要度分類・許容応力編：JEAG 4601・補-1984）, pp. 37-38, 1984.

4. 評価条件の不確実さに関する評価方法の検討

確率論を用いて地震危険度を評価し想定地震諸元を算定するために、評価条件として設定する種々のパラメータには、多かれ少なかれいくらかの不確実さが含まれる。このような背景から4章では、地震危険度解析におけるモデル化の不確実さを考慮した評価をする上で標準となりうる手法の調査、モデルサイトを対象としてモデル化の不確実さ因子に関する感度解析を行なった。さらに不確実さを考慮に入れた上で確率論的想定地震設定法を設計へ適用する場合の有用性と検討課題を抽出整理した。本検討の構成と実施内容は、以下の通りである。

4.1節では、不確実さを考慮した評価方法の調査について述べる。

本節では、始めに不確実さに関する要因分析として、一般的な地震PSAの手順にしたがって、ランダム性に関する不確実さとモデル化に関する不確実さに大別し、このうち後者をさらに地震発生に係わる要因と地震動伝播に係わる要因に分類して、不確実さ要因を抽出した。次に地震危険度評価における不確実さの評価方法に関して、米国における研究動向に関する調査結果の概要を示し、引き続いて我が国における研究動向の調査結果の概要を示した。さらに、モデル化の不確実さ評価に用いられるロジックツリーの有用性と課題に関する検討結果を示した。

4.2節では、評価条件の不確実さに関する感度解析について述べる。

確率論的手法による地震危険度および想定地震の不確実さに対しする試験討として、モデルサイトを対象とした感度解析を実施した。不確実さに関する要因は、地震発生モデルと地震伝播モデルに大別し、それぞれに対して解析パラメータを設定した。感度解析結果に基づいて各不確実さに関する要因が、地震危険度曲線および想定地震の貢献度や地震諸元に与える影響について考察した。

4.3節では、想定地震設定法の設計への適用上の課題について述べる。

地震危険度評価および想定地震に関する評価に伴う不確実さを定量的に予測し得れば、確率論的評価手法を設計に適用する路が開かれることになる。このように評価には不確実さを伴うことを考慮にいれながら、設計への適用について、1)確率論的想定地震と現行耐震設計審査指針との関係、2)今後の設計への適用上の課題、計2つの観点から検討した結果を示した。

4. 1 不確実さを考慮した評価方法の調査

4. 1. 1 不確実性の要因

確率論を用いて地震危険度を評価し想定地震諸元を算定するために、解析条件に関する数多くの項目についてパラメータを設定する必要がある。そして、これらの解析条件やパラメータほとんどすべてに、いくらかの不確実さの要因が含まれている。確率論的地震危険度評価および確率論的想定地震の信頼性を高めるためには、不確実性の要因を明確にしたうえでそれらをできるだけ低減させる必要がある。

一般に不確実さは、ランダム性に関する不確実さおよびモデル化に関する不確定性に大別すること

ができる。前者は、自然界に存在する本質的なばらつきであり、偶然に支配される。一方、後者は、得られている知識やデータの不完全さによるものであり、データの取り扱いや対象とする事象のモデル化、解析手法の精度に支配される。これらの不確実さのうち、ランダム性に関する不確実さは絶対的に存在であるため、不確実の度合いを低減させることができない。したがって、この種の不確実さを評価するためには、それぞれの事象に応じた確率・統計的モデルを導入すればよい。一方、モデル化不確定性は、新たな知識や情報を取り込むことにより、その度合いの低減が可能である。ところで、新たな知識や情報によってモデル化不確実さの低減を行うには、前もって不確実さの定量化しておく必要がある。

確率論的な地震危険度や想定地震の評価をおこなうとき、条件のモデル化やパラメータの設定には多かれ少なかれ不確実さの要因が含まれる。これは、条件のモデル化をおこなうことによって、不確実さを有する要因に対するパラメータを設定すると換言こともできよう。前述した解析条件の設定にしたがって、確率論的地震危険度評価における不確実性を整理する。解析条件は次の2つに大きくモデル化された。

- ①地震発生
- ②地震動伝播

①に関しては、使用するデータベースが歴史地震なのか活断層なのかによって、評価条件は大きく影響される。そして、不確実さの含まれる要因として、i)地震活動域の設定、ii)データベース、iii)地震発生の時系列特性、iv)地震の発生頻度、v)震源とサイトとの距離特性、vi)各データベースによる結果の組合せに分類できる。i)～vi)のうち、i)の地震域の設定は、解析者の経験に基づく度合いが強く、主観の入りやすい項目である。特に、過去の地震に関するデータに乏しくかつ地震活動度が低い米国東部においては、この問題は顕著になる。また、近年では、活断層に関する調査も活発化しており、これらの成果が活断層のデータベースに関する不確実さの低減に大きく貢献するものと期待される。さらに、文科省地震調査研究推進本部の地震調査委員会長期評価部会では、地震発生の可能性を確率を用いて長期的な観点から評価する手法を検討している。そして、地震発生の時系列特性の定量的な評価手法を示している。その検討は、iii)の地震発生の時系列特性における不確実さを低減するものと期待される。

②に関しては、vii)距離減衰式、viii)評価式のばらつき、ix)地震強度の上限値の設定に分類される。vii)～ix)のうち、vii)の距離減衰式について、これまでに地震動伝播を評価する種々の経験式が提案されている。しかし、式によっては地震動強さに関する値は異なる場合があり、大きな不確実さが含まれているものと考えられる。さらに、viii)評価式のばらつきは各式ごとに算定されており、この項目にも大きな不確実さが含まれると考えられる。vii)、viii)での不確実さを低減するために、各式がどのような背景やデータに基づいて設定されたのかを検討し、対象とするサイトの地盤特性などと照合することも重要であると考えられる。

また、確率論的想定地震を評価は、地震危険度評価を基にして実施されるため、以上の不確実さに加えてさらに不確実さが存在するものと思われる。具体的には、米国の Regulatory Guide 1.165 にしたがうか、わが国で提案されている石川らの方法にしたがうかによって、得られる地震指標も大きく異

なる。米国 の方法では、短周期領域に対する想定地震の諸元が单一組（場合によっては、短周期および長周期の各領域に対して1組づつ）求められるのに対し、石川らの方法では、一般に主要な地震活動度（地震域および活断層）に対して複数組の諸元が求められる。また、地震動強度の再分解をおこなうにあたり、マグニチュードおよび距離指標のビン（刻み）としてどのような値を採用するかに不確実さは含まれるものと考えられる。

以上の不確実性に関する要因を定量的に評価し、不確定幅を低減することは、地震危険度評価における重要な検討課題である。

4. 1. 2 不確実さの評価方法に関する米国の研究

確率論的地震危険度評価における不確実さに関しては、米国において 1980 年代から調査されるようになった。

米国において詳細な地震危険度評価をおこなった代表例として、1986 年の PG&E(Pacific Gas and Electric Company)¹⁾による Diablo Canyon 原子力発電所の検討がある。同プラントの位置を図 4.1.2-1 に示す。同プラントは、Los Angeles と San Francisco の中間の海岸に位置し、わが国と同様に地震が多発する地域に設置されている。同プラントの地震危険度評価は、最初 1970 年後半に実施された。しかし、後にプラントの付近の海域に Hosgri 断層が発見されたため、1986 年、詳細な再評価が行われた。再評価における特徴は、モデル化の不確実さをロジックツリーとして構築したうえで、評価結果をフラクタル地震危険度曲線および全統合化地震危険度曲線として表示した点にある。ここに、フラクタル地震危険度曲線は、全ての地震危険度曲線に対する重み付きの割合を示したものである。一方、全統合化地震危険度曲線は、その特徴を表すいくつかの地震危険度曲線で代表させたものである。再評価でロジックツリーの分岐に用いられた評価項目を図 4.1.2-2 に示す。この図から、地震発生モデルについて 7 つ、地震動伝播モデルについて 2 つ、計 9 つの分岐が設定されたことがわかる。このうち、地震発生モデルについて Hosgri 断層、Los Oros 断層、San Luis Bay 断層のために設定された選択肢を、それぞれ図 4.1.2-3～図 4.1.2-5 に示す。また、地震伝播モデルに関する分岐および選択肢を図 4.1.2-6 に示す。また、最終的な評価結果であるフラクタル危険度曲線および全統合化地震危険度曲線を、図 4.1.2-7 および図 4.1.2-8 に示す。

専門化意見を抽出することによってモデル化不確実さを定量化させる検討は、1980 年米国の LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)²⁾によって開始された。LLNL の検討では、米国の中・東部にある原子力プラントを対象とし、①震源域の形状、②最大地震、③地震発生、④地震動伝播、⑤評価結果全般の 5 つの項目に関して、10 人の専門家の意見を整理している。そして、代表的な地震だけでなく、発生する可能性のある地震についても検討がなされた。そして、その結果は、序論、手法、比較、主観的入力、一定超過確率の 5 つのセクションからなる報告書にまとめられた。この検討は、一定超過確率スペクトルが示されていることが特徴的である。

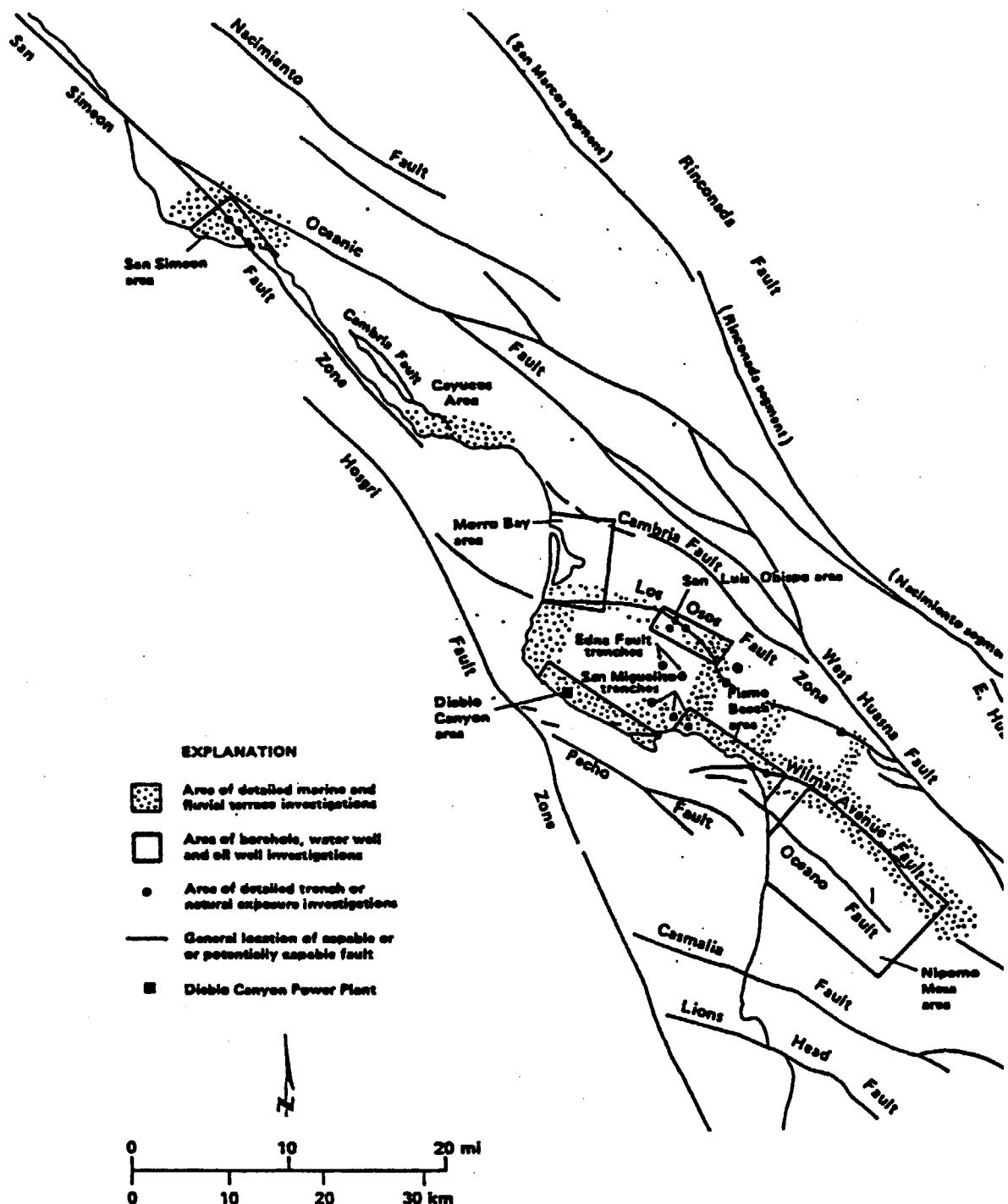
さらに、1989 年、LLNL³⁾はロッキー山脈より東部にある 69 の地点を対象として、専門化の意見抽出を用いた地震危険度評価を、米国 NRC(Nuclear Regulatory Commission)の委託により行った。そして、PGA および 5% 減衰の応答速度スペクトルに対する危険度評価を示した。この検討の特徴は、各専門家個人の意見を抽出し、2 回の専門家間の討議によってフィードバックすることにより、意見の変更をおこなった点にある。

一方、EPRI(Electric Power Research Institute)⁴⁾も、LLNL とは別に 1989 年にロッキー山脈より東部にある原子力プラントの地震危険度評価を行った。その検討では、地震に関する専門化のチーム 6 つを構成し、各チームごとにロジックツリーを構築し、独立した評価を行った。この検討においては、専門家の意見は各チームごとにロジックツリーとしてまとめられており、チーム間の意見交換によって、ロジックツリーの変更および各分岐における選択肢の重みを決定した点が特徴的である。

以上、1989 年の LLNL と EPRI の検討では、専門家の意見を抽出しモデル化不確実さを低減させようとする点では同様の手法を採用した。しかし、両者の評価結果には地域によっては、評価結果に著

しい差異が生じた。そこで、LLNL は専門家の意見抽出の見直しをおこない、地震危険度曲線の再評価をおこなった。再評価において、地震発生モデルについては、Gutenberg-Richter 式の係数および各地震活動域における地震の最大規模の評価が詳細に検討された。また、地震動伝播モデルについては、マグニチュード 5.0、震央距離 10km とする限定された条件に対して意見が抽出された。その結果、図 4.1.2-9 および図 4.1.2-10 に示すように LLNL の再評価によって得られた地震危険度曲線は、最初の評価結果と比較して大きく低減され、EPRI の結果に近づくことが示された。

一方、NRC は 1991 年、SSHAC(Senior Seismic Hazard Analysis Committee)を発足させ、LLNL と EPRI の結果の相違に関する詳細な検討を行った。そして、結果の相違は技術的な側面よりも、意見抽出の手順による影響が大きいとの報告を行っている。そこで検討成果は、「確率論的地震危険度解析への提案：不確定性と専門化の活用に関する指針」⁵⁾にまとめられた。同指針は、専門家の意見抽出についての新たな知見がまとめられたものと位置付けられる。技術的側面に関して同指針は、確率論的危険度の基準的な評価結果を①フラクタル地震危険度曲線および平均地震危険度曲線、②一定超過確率スペクトル(Uniform Hazard Spectrum:UHS)で表すことを必須としている。さらに、補足的に③全統合地震危険度曲線、④地動のコンタ図を示すことが望ましいことを提示している。

図 4.1.2-1 Diablo Canyon 原子力発電所と周辺の断層分布¹⁾

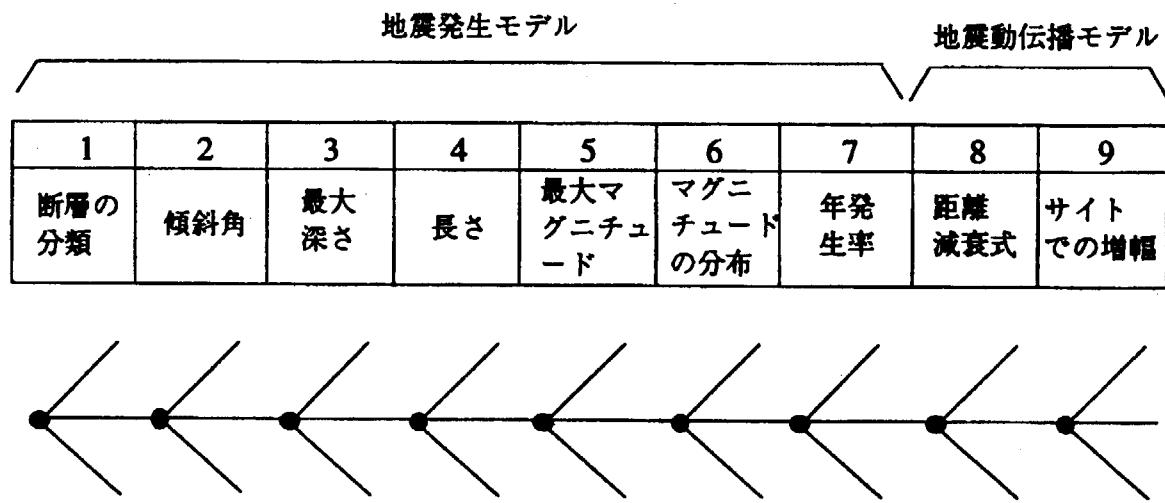
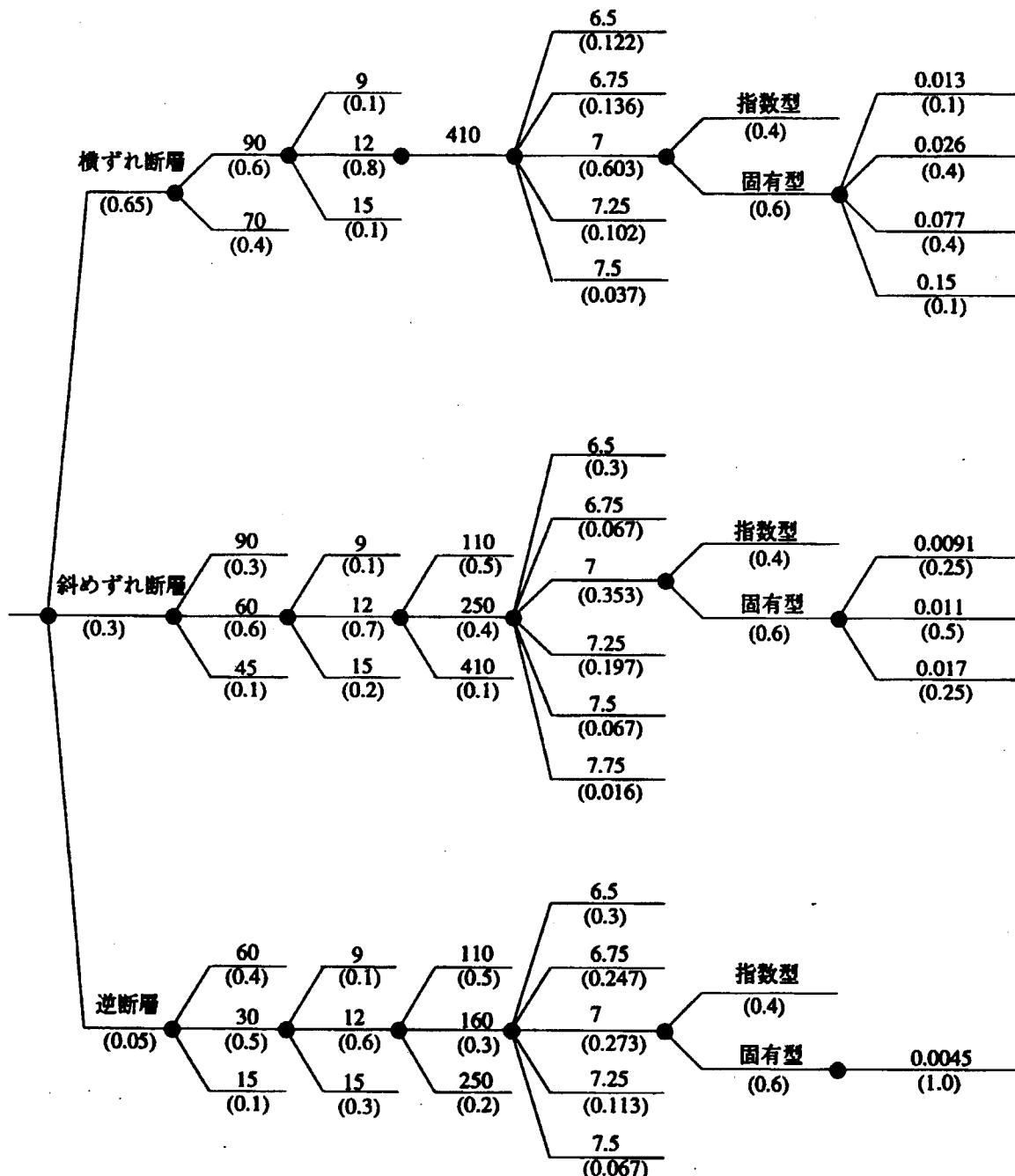
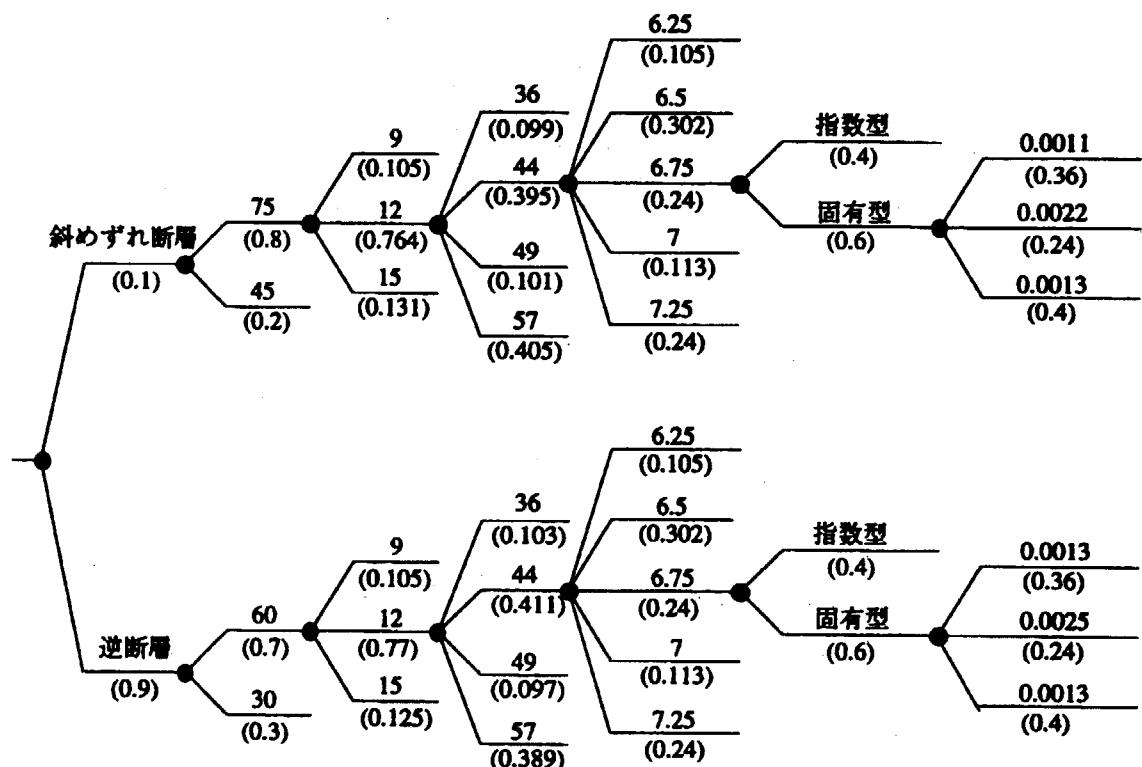


図 4.1.2-2 Diablo Canyon 原子力発電所の地震 PSA に用いられたロジックツリーの評価項目¹⁾

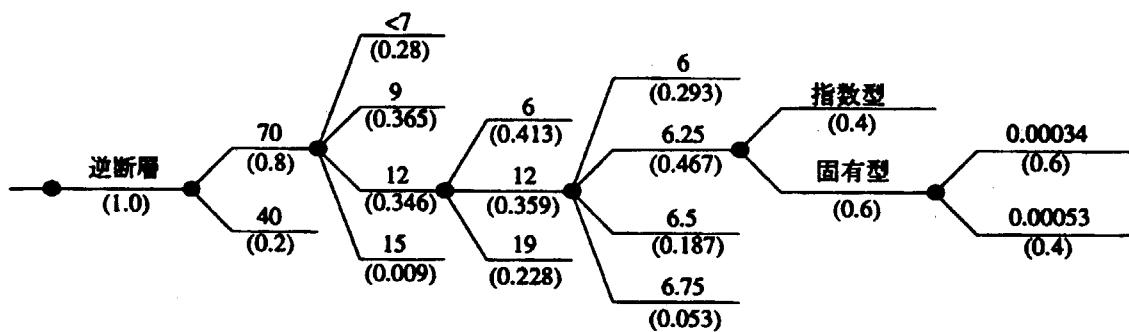
1 断層の 分類	2 傾斜角 (deg)	3 最大深さ (km)	4 長さ (km)	5 最大マグニ チュード	6 マグニチュード の分布	7 年発生率 (M>5.0)
----------------	-------------------	-------------------	-----------------	--------------------	---------------------	----------------------

図 4.1.2-3 Hosgri 断層のロジックツリー¹⁾

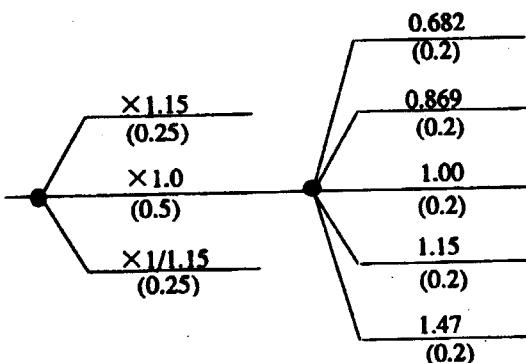
1 断層の 分類	2 傾斜角 (deg)	3 最大深さ (km)	4 長さ (km)	5 最大マグニ チュード	6 マグニチュード の分布	7 年発生率 (M>5.0)

図 4.1.2-4 Los Osos 断層のロジックツリー¹⁾

1	2	3	4	5	6	7
断層の分類	傾斜角(deg)	最大深さ(km)	長さ(km)	最大マグニチュード	マグニチュードの分布	年発生率(M>5.0)

図 4.1.2-5 San Luis Bay 断層のロジックツリー¹⁾

8	9
距離減衰式 (中央値)	サイトでの 増幅率

図 4.1.2-6 地震動伝播モデルに関するロジックツリー¹⁾

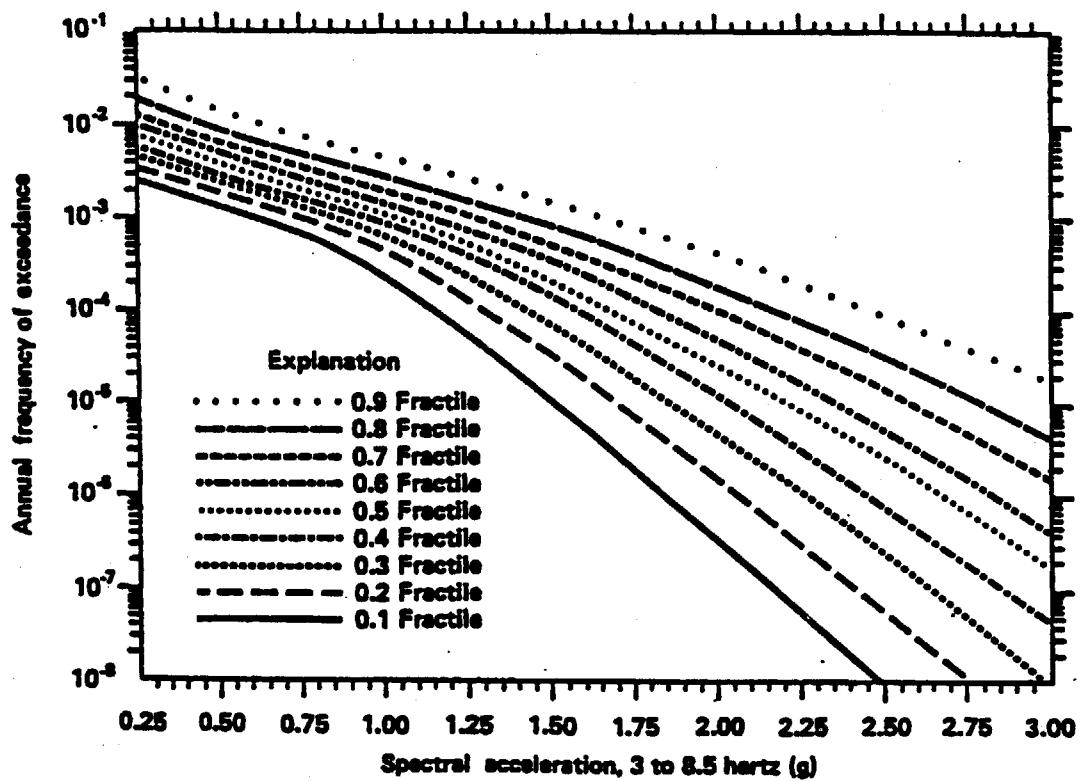
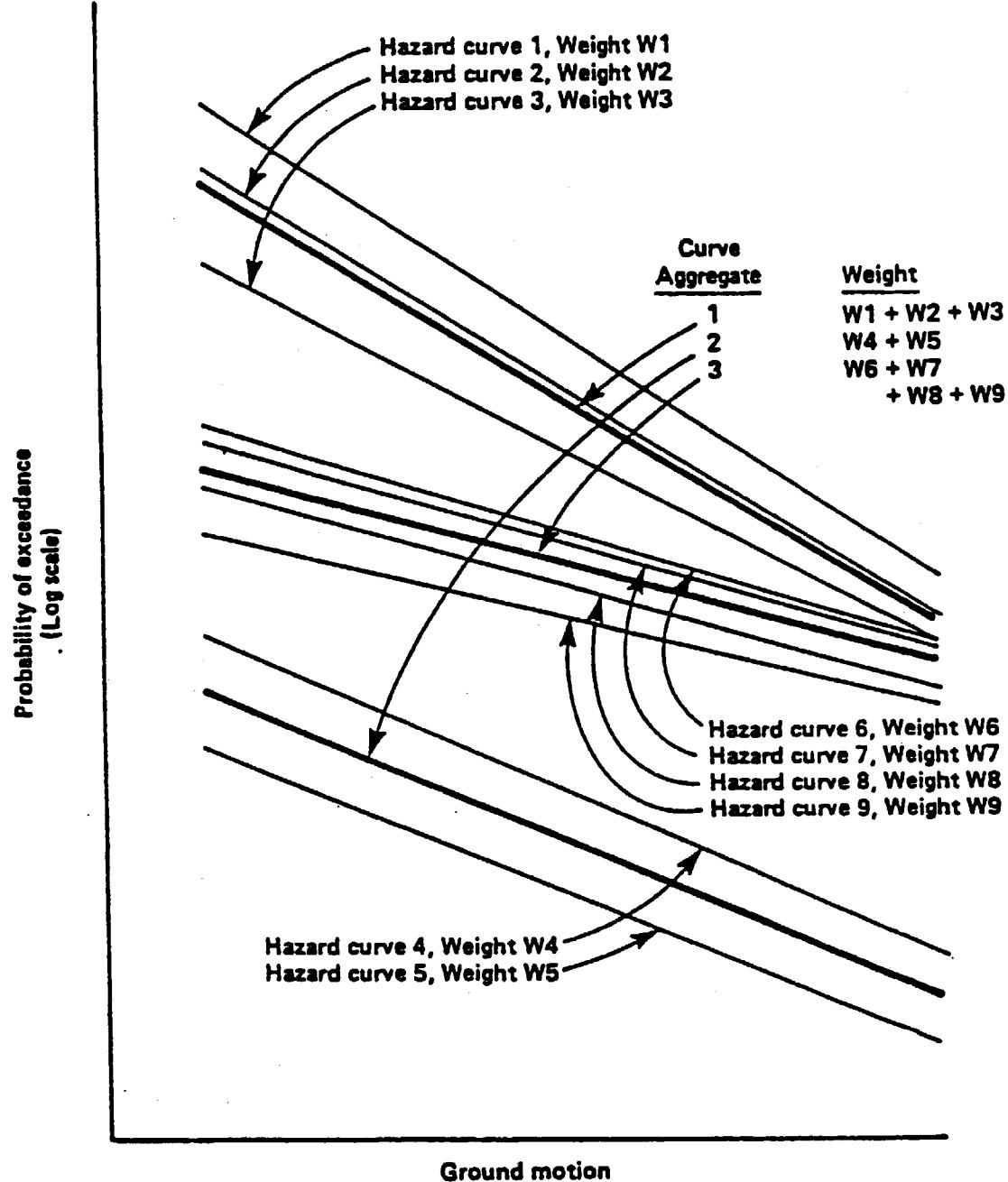
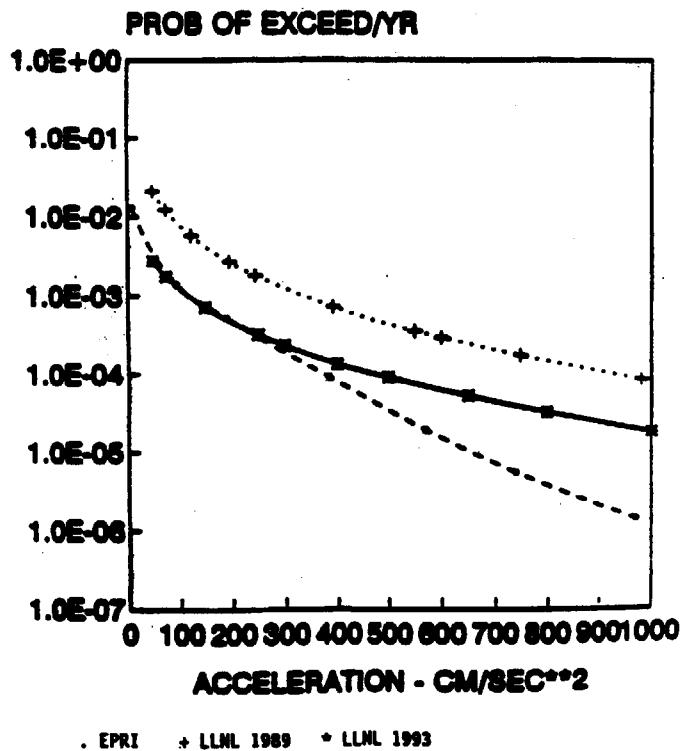
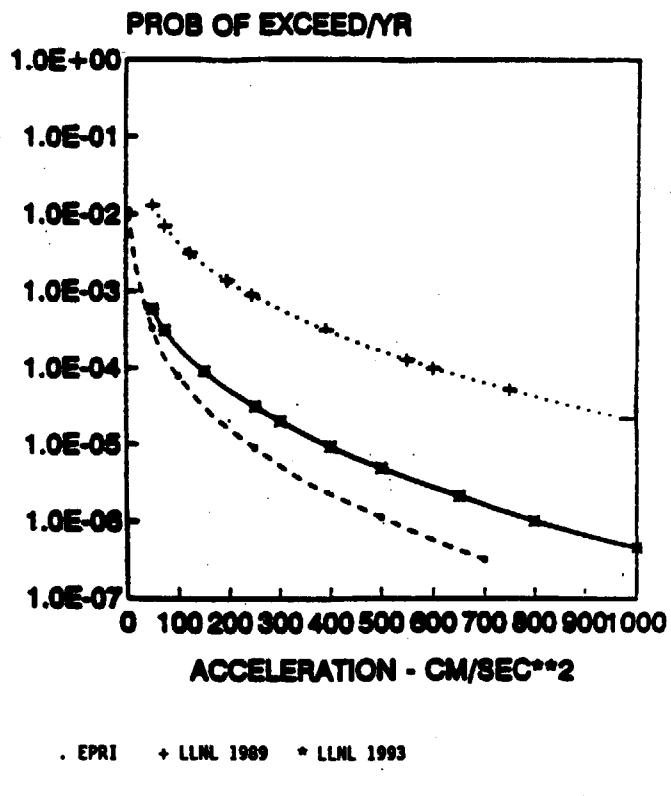


図 4.1.2-7 Hosgri 断層に対するフラクタイル地震危険度曲線¹⁾

図 4.1.2-8 全統合化地震危険度曲線¹⁾

図 4.1.2-9 LLNL(1989), EPRI(1989), LLNL(1993)の地震危険度曲線の比較(Pilgrim site)⁵⁾図 4.1.2-10 LLNL(1989), EPRI(1989), LLNL(1993)の地震危険度曲線の比較⁵⁾
(Shearon Harris site)

4. 1. 3 不確実さの評価方法に関する日本の研究

我が国の地震の活動は活発であり地震に関しての長い歴史を有することから、地震危険度評価の条件は米国におけるものとは異なる。米国のものと比較して、我が国の地震に関するデータベースは、豊富である。さらに、専門化意見の抽出・統合の方法についても、日米両国間には差異があるものと考えられる。以上を、背景として、原子力技術機構^{6,8)}では、専門化の意見抽出による地震危険度評価の、我が国への適用性を検討している。

原子力技術機構^{6,8)}は、アンケートと討議を組合せた方法で地震危険度解析をおこない、モデル化不確実さを評価している。詳細に、複数の地点を対象に、感度解析・ロジックツリーの構築・フラクタル地震危険度曲線・結果に対する専門家のコメントをパターンとし、1～3次の試解析を行っている。そして、専門家意見をフィードバックしながら、評価結果の推移を考察している。その結果、専門家間の意見をフードバックさせるにつれ、ロジックツリーにおける不確定幅（フラクタル地震危険度曲線から得られるある年超過確率に対する加速度の幅）は減少すること、各フラクタルの値は低減する傾向があることを述べている。

さらに原子力技術機構^{6,8)}は、一連の検討のまとめとして、わが国に適した地震 PSA の基本解析条件ならびに評価レベルに応じた 3 種類のフローを提案している。

4. 1. 4 不確実さを考慮した評価結果の表現

地震危険度解析における不確実さの定量化に関して、これまでに米国や日本においていくつかの検討が行われてきた。それらの検討の多くは、モデル化の不確定さ評価にロジックツリーを用いている。ロジックツリーを用いることの長所として、以下の点があげられる。

- ① 解析モデルやパラメータに関する複雑な組合せを、明快に記述できること。
- ② ロジックツリーの任意の分岐における各選択肢の重みを、自由に変えられること。
- ③ 地震危険度曲線などの評価結果に対して、容易に統計的な処理が行えること。

以上のロジックツリーを構築するためには、ツリーの分岐、選択肢（パラメータ）および重みを設定する必要がある。このとき、評価結果はロジックツリーの選択肢（パラメータ）および重みの与え方に大きく影響される。

不確実さの定量化のために、専門化意見を抽出する手法がある。これは、前述したとおり、1980年に米国の LLNL²⁾によってはじめて検討されたものであり、既往の検討においてその成果が報告されている。しかし、その適用性についてはいまだに多くの課題が残されており、任意のサイトに適用する場合、慎重な判断が必要となる。

ロジックツリーを構築して地震危険度評価を行う場合、分岐および選択肢の数に応じて、膨大なケースの評価を行う必要が生じる。ロジックツリー上の選択肢の組合せが多いとき、個々の地震危険度曲線を表示することは困難である。これを避けるために、ロジックツリーに関しては、フラクタル地震危険度曲線や全統合化地震危険度曲線が用いられる。

なお、4.1.2 項および 4.1.3 項で考察した既往の研究は、地震危険度曲線など確率論的地震危険度に対する不確実さを検討したものである。これに対し、確率論的想定地震に対する検討は、これまでにほとんど報告されていない。

4. 1. 5 検討の結果

本節を通じて、評価条件の不確実さの評価に対して有用と思われる知見を、以下に整理する。

- ・ 地震危険度の評価結果を見直すことにより、地震危険度曲線のばらつきは収束する傾向がある。また、中央値に対する地震危険度曲線の年超過確率が低減した事例もある。
- ・ 専門化の意見を導入する場合、専門技術的な側面のみならず、意見を抽出ための運用上の側面に対する重要性が指摘されている。
- ・ SSHAC が作成した指針⁵⁾では、フラクタル地震危険度曲線、平均地震危険度曲線およびユニホームハザードスペクトルの表示を必須としている。さらに、全統合化地震危険度曲線および地動のコンタマップによる補足的な評価も推奨している。
- ・ 我が国での専門化意見を抽出した検討では、標準的な地震危険度評価手順を示している。それにしたがえば、ロジックツリーにより専門化の意見を集約し、最終的な結果をフラクタル地震危険度曲線あるいは全統合化地震危険度曲線で示すこととしている。
- ・これまでに、地震危険度評価に対する感度解析は多くの検討されている。しかし、確率論的想定地震に対する感度解析は、ほとんどおこなわれていない。

4.2 不確実さに関する感度解析

4.2.1 解析条件

確率論手法による地震危険度および想定地震の不確実さに対する試験討として、感度解析を行う。そして、基準となるケース（以後、基本ケースと呼ぶ）を設定しその結果と各感度解析の結果とを比較する。なお、本節で設定する基本ケースは、3.1.5 項で設定した基本モデルと同一である。基本ケースにおける主なパラメータは、以下のとおりである。

- ・ 断層 A について北部の一部分のみを考慮する。
- ・ 海底活断層は考慮しない。
- ・ ランダム地震域の分割および最大マグニチュードは、萩原の『地震地体構造』⁹⁾に準拠する。
- ・ 距離減衰式は、安中ら(1997)¹⁰⁾の式の短周期領域での加速度応答スペクトルを用いる。
- ・ 距離減衰式のばらつきは、対数標準偏差で 0.5 とする。
- ・ 距離減衰式のばらつきの範囲に上下限は設定しない。

基本ケースに対し、1～7 の感度解析ケースを設定する。それらは、A)地震発生モデル、B)地震動伝播モデル別に、以下のとおりである。

A)地震発生に関する条件

- ①活断層データに基づく方法のデータベース（断層 A の取り扱い）
- ②活断層データに基づく方法のデータベース（海底活断層の取り扱い）
- ③歴史地震データに基づく方法の規模別の地震発生頻度（プレート境界の最大マグニチュード）

B)地震動伝播に関する条件

- ④地震動強度の指標（PGA、短周期 Sa、長周期 Sa）
- ⑤用いる距離減衰式
- ⑥距離減衰式のばらつきの値
- ⑦考慮するばらつきの範囲

上記①～⑦の各ケースにおいて、それぞれ以下のようなパラメータを設定する。

①断層 A の取り扱い

- | | |
|-----|------------------------|
| 基本 | ： 北部の一部分（図 4.2.1-1 参照） |
| 1 A | ： 全長（図 4.2.1-2 参照） |

②海底活断層の取り扱い（図 3.1.6-1 参照）

- | | |
|-----|------------------------|
| 基本 | ： 考慮しない |
| 2 A | ： $F_1 \sim F_4$ を考慮する |

③プレート境界で発生する地震の最大マグニチュード（表 4.2.1-1 参照）

基本 : 萩原の『地震地体構造』⁹⁾に基づく

3 A : 垣見ら¹¹⁾を参考に設定する

④地震動強度の指標

基本 : 短周期領域での加速度応答スペクトル

4 A : 最大地動加速度

4 B : 長周期領域での加速度応答スペクトル

ただし、震源深さを H [km]、最短距離を R [km]とするとき、最大地動加速度 A [Gal]、短周期の加速度応答スペクトル $S_a(0.15)$ [Gal]、長周期の加速度応答スペクトル $S_a(0.711)$ [Gal]は、それぞれ次式で表わされる。

$$\log A = 0.606M + 0.00459H - 2.136 \log(R + 0.334 \times e^{0.653M}) + 1.730 \quad \dots \dots \dots (4.2.1-1)$$

$$\log S_a(0.150) = 0.580M + 0.00550H - 2.266 \log(R + 0.334 \times e^{0.653M}) + 2.417 \quad \dots \dots \dots (4.2.1-2)$$

$$\log S_a(0.711) = 0.721M + 0.00248H - 1.880 \log(R + 0.334 \times e^{0.653M}) + 0.676 \quad \dots \dots \dots (4.2.1-3)$$

⑤用いる距離減衰式

基本 : 安中ら(1997)¹⁰⁾の式の最大加速度（ケース 4 A と同じ）

5 A : 福島・田中式^{12,13)}による最大加速度 A [Gal]（岩盤を考慮して 0.6 倍とする）

ただし、福島・田中式は次式で表わされる。

$$\log_{10} A = 0.51M - \log_{10}(R + 0.006 \times 10^{0.51M}) - 0.0034R + 0.59 \quad \dots \dots \dots (4.2.1-4)$$

ここに、 M (マグニチュード)、 R (最短距離、km) である。

⑥距離減衰式のばらつき (ξ) の値 (図 4.2.1-3 参照)

基本 : 0.5

6A : 0.1

6B : 0.3

6C : 0.7

(7) 考慮するばらつきの範囲(図4.2.1-4参照)

基本 : 全域(±10%)

7A : ±3%

7B : ±2%

想定地震は、3章の場合と同様に、参考確率が 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} それぞれに対して、貢献度が10%以上となるものを選定した。

表4.2.1-1 地震域の最大マグニチュード

地震域	萩原による M_{max}	垣見らによる M_{max}
1	8.3	8.3
2	8.0	8.0
3	8.3	8.3
4	8.0	7.5
5	8.3	8.3
6	8.0	7.5
7	7.8	7.4
8	7.4	7.4
9	8.1	8.1
10	7.1	7.1
11	7.1	7.1
12	8.0	8.0
13	7.3	7.3

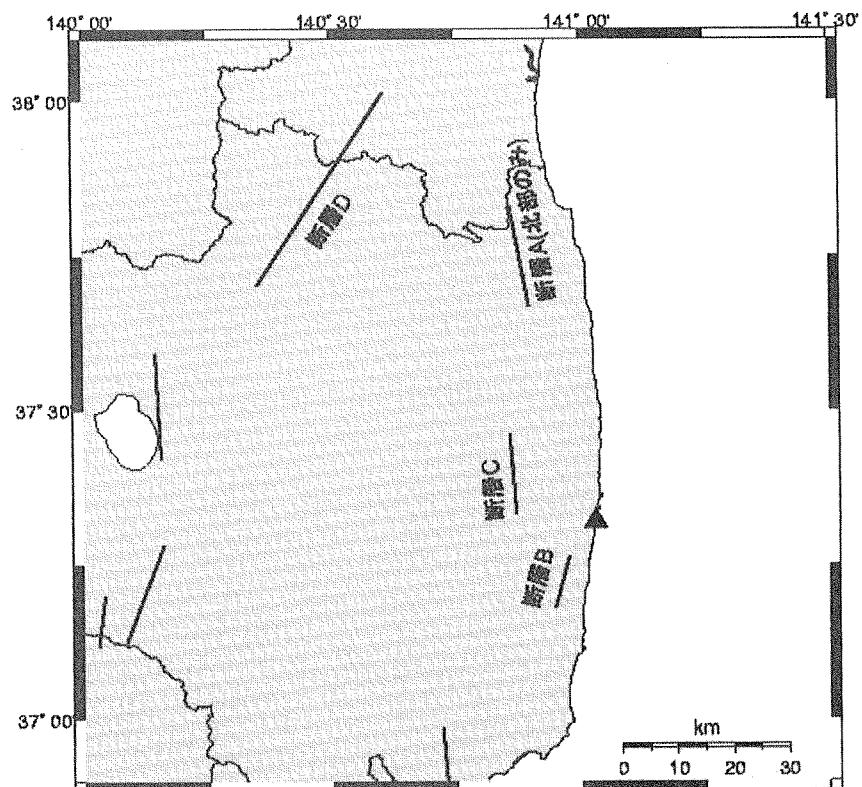


図 4.2.1-1 断層A（一部）

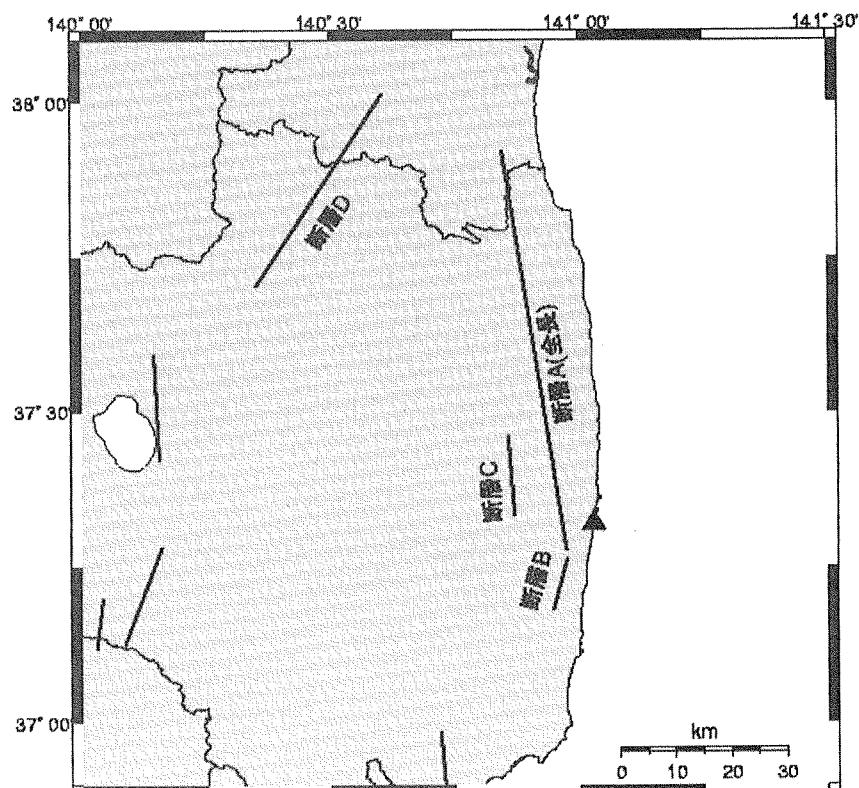


図 4.2.1-2 断層A（全長）

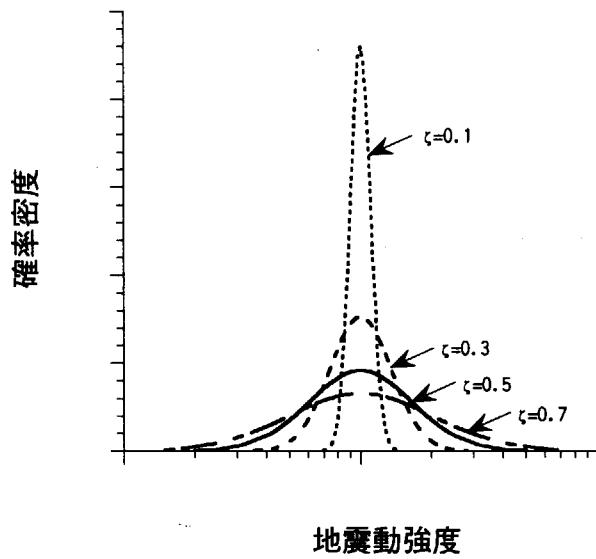


図 4.2.1-3 地震動強度におけるばらつきの概念

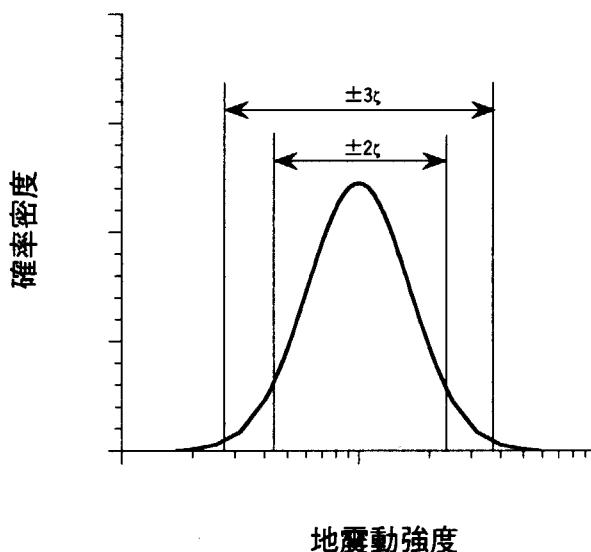


図 4.2.1-4 考慮するばらつき範囲の概念

4.2.2 解析結果

前項で設定した基本ケースおよび各感度解析ケースの結果を示す。

(1) 基本ケースの結果

基本ケースの結果を以下の図表に示す。

・地震危険度曲線	:	図 4.2.2-1
・参照確率を変化させたときの加速度値	:	表 4.2.2-1
・貢献度曲線	:	図 4.2.2-2
・マグニチュードと距離の同時確率	:	図 4.2.2-3
・マグニチュードと距離の同時確率（拡大）	:	図 4.2.2-4
・主な地震活動域の貢献度・ $M^* \cdot R^*$:	表 4.2.2-2
・確率論的想定地震の諸元	:	表 4.2.2-3

図 4.2.2-1 の地震危険度曲線上において、参照確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} としたとき、得られる加速度は図 4.2.2-1 に示す通りそれぞれ 840、1380、2080Gal である。

図 4.2.2-2 に示す貢献度曲線から、年超過確率が小さくなるにつれて、断層 B の貢献度は大きくなるのに対し、地震域 6 の貢献度は小さくなる傾向があることがわかる。また、地震域 10 については、貢献度は年超過確率が 10^{-3} のあたりまでは大きくなり、 10^{-3} のあたりを越えると小さくなる傾向があることがわかる。

図 4.2.2-3 および図 4.2.2-4 に示したマグニチュード M と最短距離 R の同時確率から、参照確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} としたいずれの場合も、 $6.45 < M \leq 6.55$ 、 $5 < R \leq 10$ (km) および $6.75 < M \leq 6.85$ 、 $10 \text{ km} < R \leq 15 \text{ km}$ の bin (区間) において、同時確率が突起状に大きくなっている。これは、3 章でも述べたとおり、前者の領域では断層 B、後者では断層 C それぞれの寄与が大きくなる bin である。また、値は小さいものの連続かつ緩やかな 2 群の分布が存在することがわかる。一方は、 M が 5.5~7.1、 R が 5~15(km) の範囲であり、地震域 10 の寄与が大きくなる領域である。他方は、 M が 7.0~8.0、 R が 45 km~70 km の範囲であり、地震域 6 の寄与が大きくなる領域である。そして、地震域 10 に対応する同時確率では、参照確率が小さくなるにつれてピークのマグニチュードが大きくなる傾向があることがわかる。一方、地震域 6 に対応する領域では、参照確率が小さくなるにつれて分布の範囲が狭くなる傾向があることがわかる。

主な地震活動域に対する貢献度、ハザード適合マグニチュード M^* 、ハザード適合距離 R^* を、各参照確率に対して示した表 4.2.2-2 から、地震域 4、地震域 7 および断層 A に対しては貢献度は零もしくは極めて小さい値となっていることがわかる。また、比較的に貢献度が大きくなる地震活動域のうち、地震域 6 では相対的に M^* 、 R^* が大きいこと、地震域 10 では相対的に小さいことがわかる。つまり、本研究で対象とした範囲の参照確率に対応する地震動強度に大きな影響を

与える地震の諸元は、地震域 6 では大規模かつ中距離程度の地震、地震域 10 では中規模かつ近距離の地震であるといえる。

表 4.2.2-3 から、基本ケースの想定地震として、地震域 6、地震域 10 および断層 B が選ばれることがわかる。

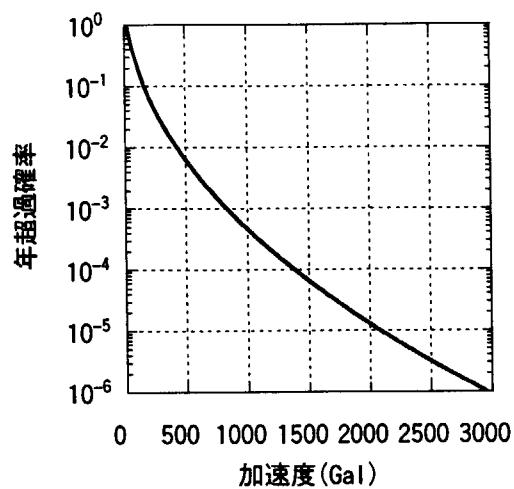


図 4.2.2-1 基本ケースの地震危険度曲線

表 4.2.2-1 基本ケースの各参照確率に対する加速度値

参照確率	基本ケース
10^{-3}	840
10^{-4}	1380
10^{-5}	2080

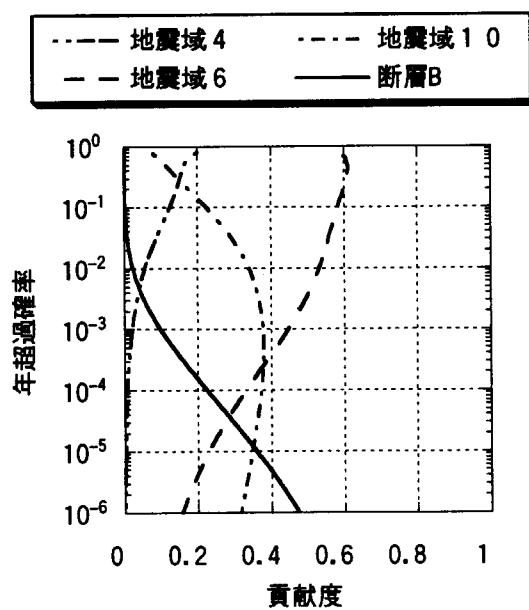


図 4.2.2-2 基本ケースの貢献度曲線

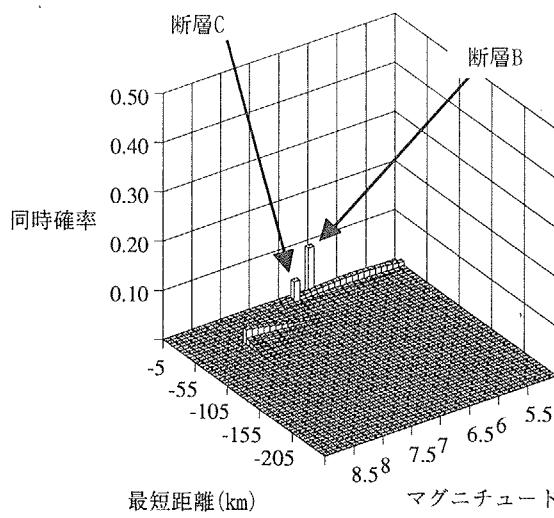
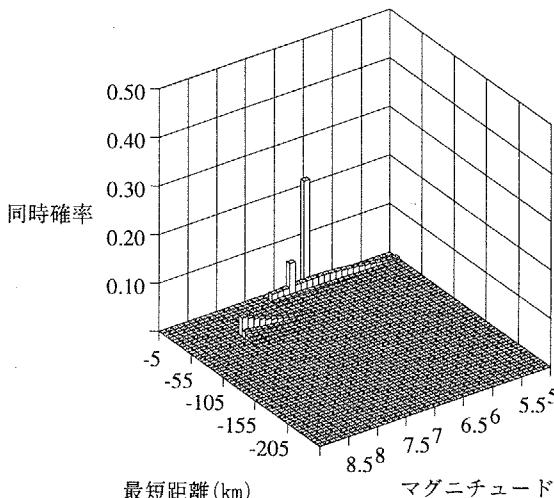
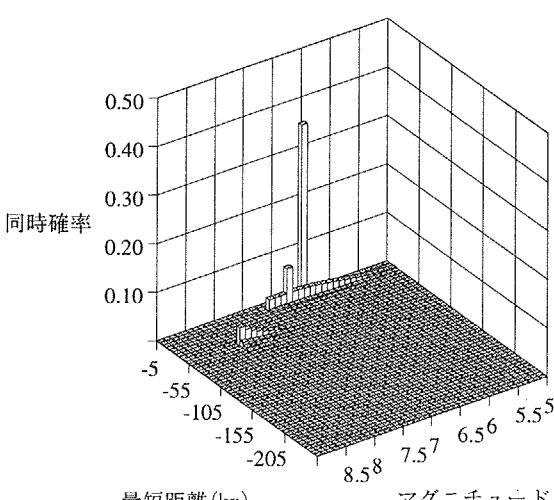
(a) 基本ケース； 10^{-3} (b) 基本ケース； 10^{-4} (c) 基本ケース； 10^{-5}

図 4.2.2-3 基本ケースの同時確率

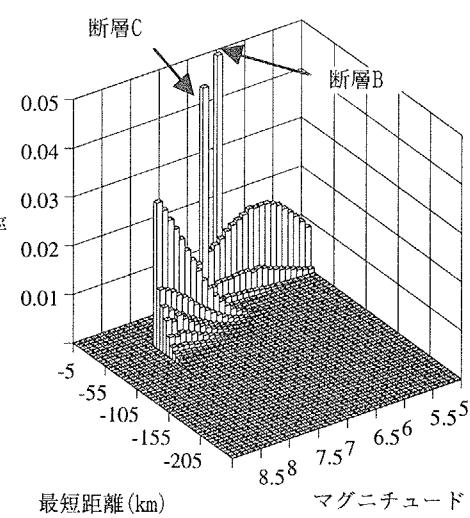
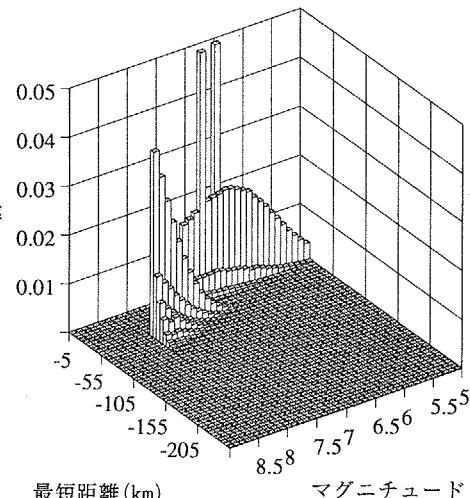
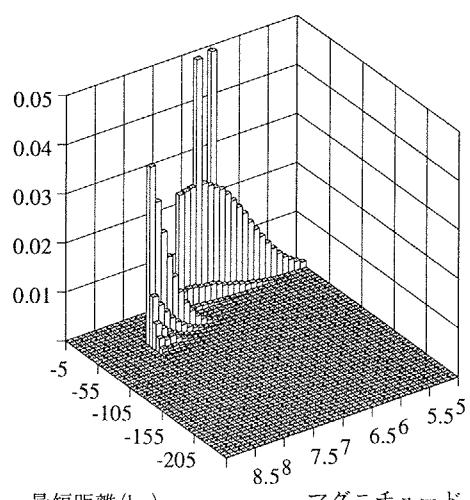
(a) 基本ケース； 10^{-3} (b) 基本ケース； 10^{-4} (c) 基本ケース； 10^{-5}

図 4.2.2-4 基本ケースの同時確率（拡大）

表 4.2.2-2 基本ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

地震活動域 参照確率		地震域4	地震域6	地震域7	地震域10	断層C	断層B	断層A
10^{-3} (840Gal)	貢献度(%)	1.8	43.2	1.8	39.9	3.5	9.7	0.0
	M^*	7.8	7.6	7.4	6.1	6.8	6.5	—
	$R^*(km)$	71.9	52.9	67.0	14.3	14.2	7.7	—
10^{-4} (1380Gal)	貢献度(%)	0.0	31.7	0.0	39.9	4.9	21.9	0.0
	M^*	—	7.7	0.0	6.3	6.8	6.5	—
	$R^*(km)$	—	51.0	0.0	13.4	14.2	7.7	—
10^{-5} (2080Gal)	貢献度(%)	0.0	21.6	0.0	37.3	5.1	35.3	0.0
	M^*	—	7.7	0.0	6.4	6.8	6.5	—
	$R^*(km)$	—	49.9	0.0	13.0	14.2	7.7	—

表 4.2.2-3 基本ケースの確率論的想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(km)$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(2) ケース 1 の結果

ケース 1 A (断層 A の全長を考慮) の結果を以下の図表に示し、基本ケース (断層 A の一部を考慮) の結果と比較する。

- ・ 地震危険度曲線 : 図 4.2.2-5
- ・ 参照確率を変化させたときの加速度値 : 表 4.2.2-4
- ・ 貢献度曲線 : 図 4.2.2-6
- ・ マグニチュードと距離の同時確率 : 図 4.2.2-7
- ・ マグニチュードと距離の同時確率 (拡大) : 図 4.2.2-8
- ・ 主な地震活動域の貢献度 $\cdot M^* \cdot R^*$: 表 4.2.2-5
- ・ 確率論的想定地震の諸元 : 表 4.2.2-6

図 4.2.2-5 および表 4.2.2-4 から、断層 A について全長を考慮するか北の一部分を考慮するかによる地震危険度曲線への影響は小さいことがわかる。

図 4.2.2-6 において、断層 A の一部分のみを考慮した場合 (基本ケース)、年超過確率の値に関係なく断層 A の貢献度はほぼ零のままである。一方、全長を考慮した場合 (ケース 1 A)、年超過確率が小さくなるにしたがって、断層 A の貢献度は次第に大きくなることがわかる。そして、断層 A の貢献度が増大する分だけ、他の地震活動域の貢献度の増加の度合いが小さくなることがわかる。中でも断層 B について、その傾向は大きい。

図 4.2.2-7 および図 4.2.2-8 から、基本ケースおよびケース 1 A の同時確率は、断層 A に対する区分を除いては、全体的に同様の傾向があることがわかる。

表 4.2.2-5 に示した貢献度のうち、年超過確率が小さくなるにしたがって、断層 A および断層 B の貢献度は大きくなり、地震域 6 および地震域 10 の貢献度は小さくなる傾向があることがわかる。一方、表 4.2.2-5 のハザード適合マグニチュードおよびハザード適合距離は、年超過確率に対してほとんど変化しないことがわかる。

表 4.2.2-6 に示した想定地震の諸元について、ケース 1 で選ばれる地震は概ね基本ケースの場合と同じである。ただし、参照確率が 10^{-5} のとき、ケース 1 では断層 A が選定される点が異なる。

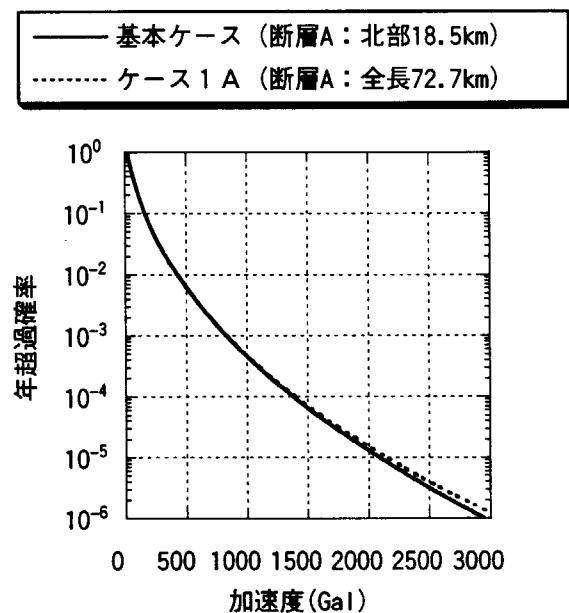
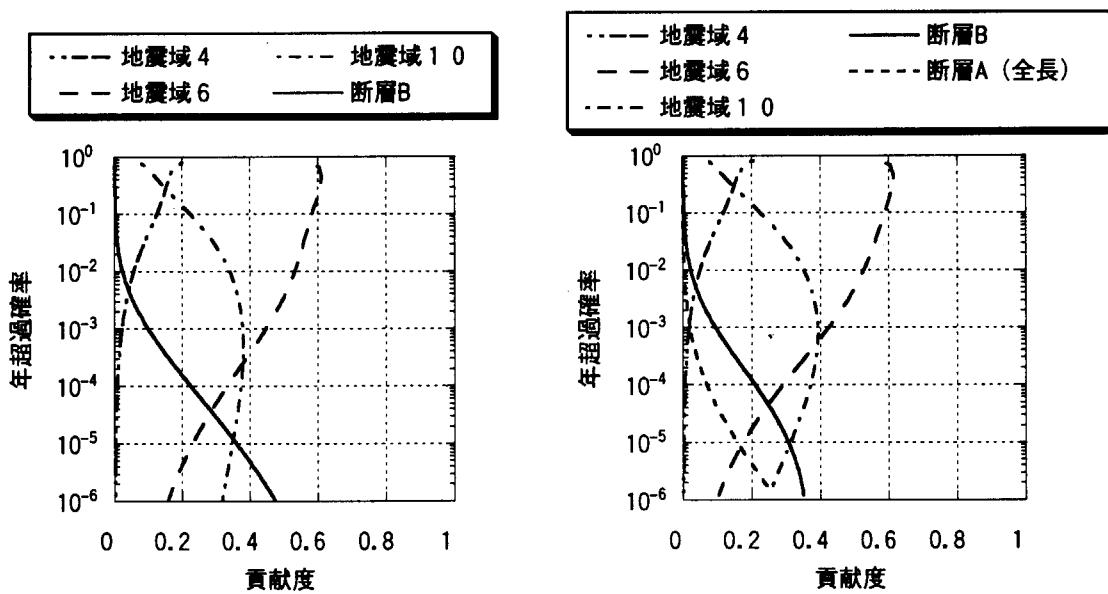


図 4.2.2-5 ケース 1 の地震危険度曲線

表 4.2.2-4 ケース 1 の各参照確率に対する加速度値

参照確率	基本ケース	ケース1A	最大-最小
10^{-3}	840	840	0
10^{-4}	1380	1400	20
10^{-5}	2080	2140	60



(a) 基本ケース

(b) ケース 1 A

図 4.2.2-6 ケース 1 と基本ケースの貢献度曲線

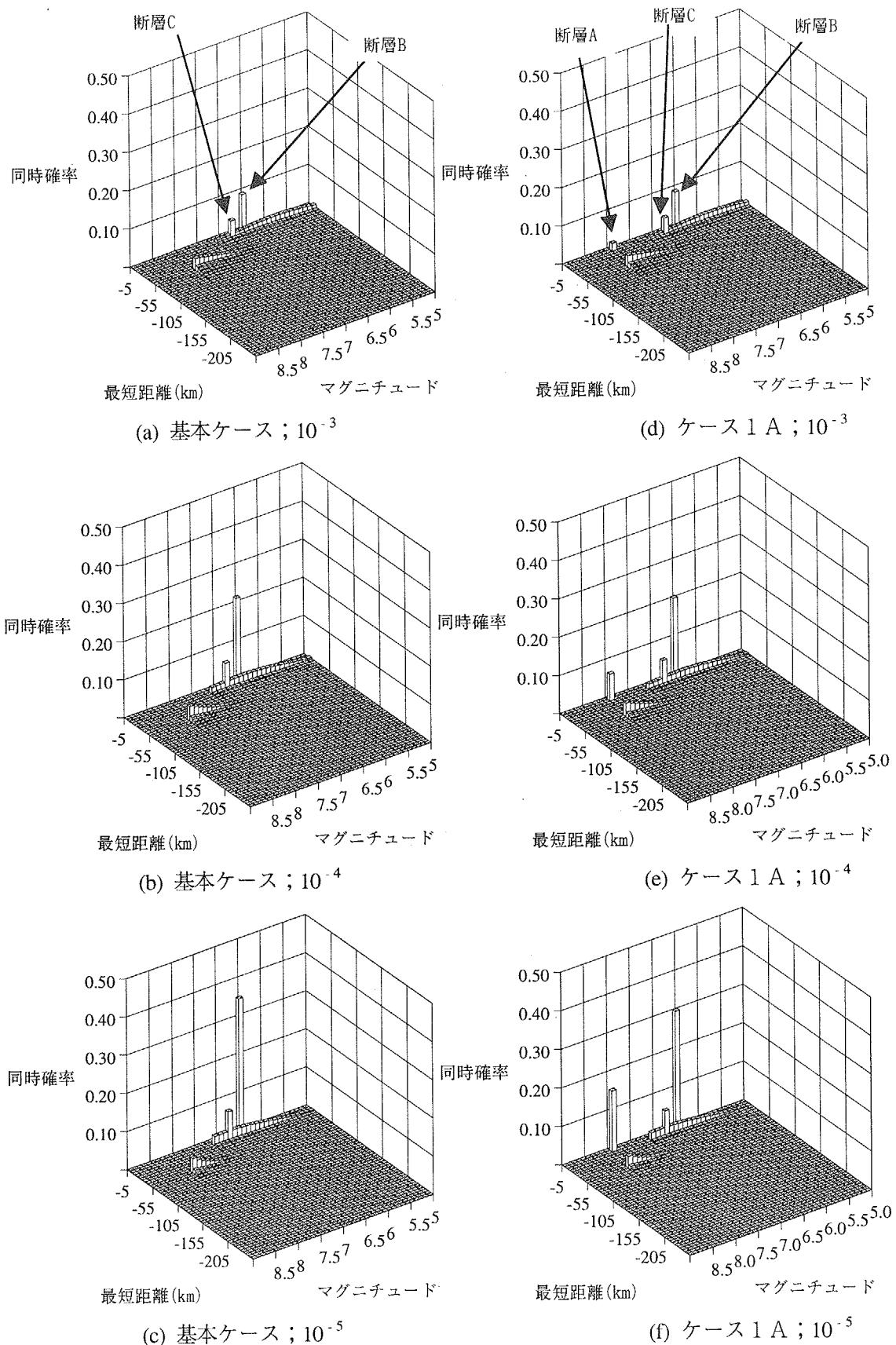


図 4.2.2-7 ケース 1 と基本ケースの同時確率

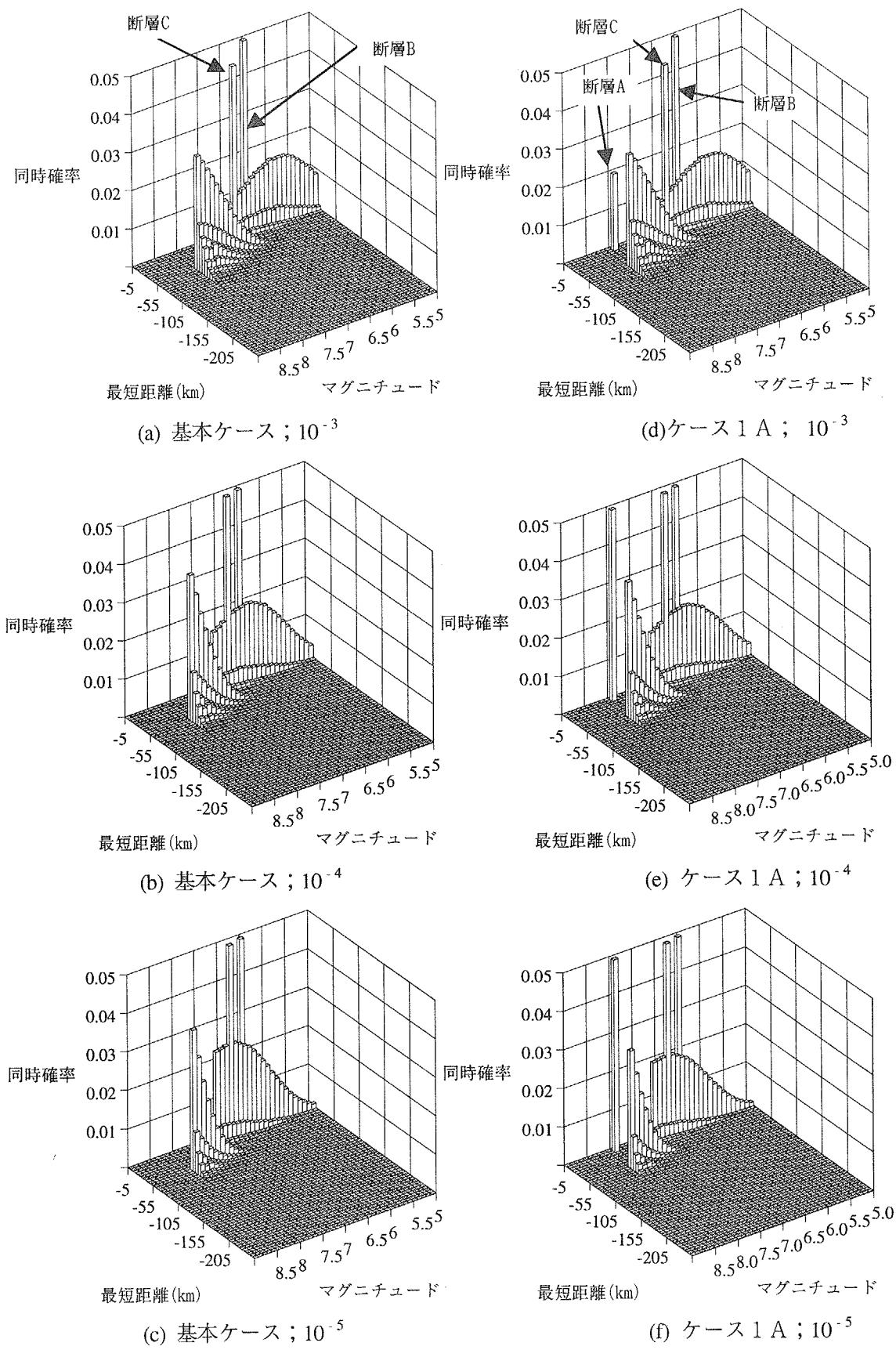


図 4.2.2-8 ケース 1 と基本ケースの同時確率（拡大）

表 4.2.2-5 ケース 1 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

地震活断域 参照確率		地震域6		地震域10		断層C		断層B		断層A	
		基本	1A	基本	1A	基本	1A	基本	1A	基本	1A
10^{-3}	貢献度(%)	43.2	42.4	39.9	39.2	3.5	3.4	9.7	9.5	0.0	2.0
	M^*	7.6	7.6	6.1	6.1	6.8	6.8	6.5	6.5	-	7.9
	$R^*(\text{km})$	52.9	52.9	14.3	14.3	14.2	14.2	7.7	7.7	-	5.6
10^{-4}	貢献度(%)	31.7	29.1	39.9	37.1	4.9	4.6	21.9	20.8	0.0	6.9
	M^*	7.7	7.7	6.3	6.3	6.8	6.8	6.5	6.5	-	7.9
	$R^*(\text{km})$	51.0	50.9	13.4	13.4	14.2	14.2	7.7	7.7	-	5.6
10^{-5}	貢献度(%)	21.6	17.6	37.3	31.2	5.1	4.3	35.3	30.5	0.0	15.8
	M^*	7.7	7.7	6.4	6.4	6.8	6.8	6.5	6.5	-	7.9
	$R^*(\text{km})$	49.9	49.8	13.0	12.9	14.2	14.2	7.7	7.7	-	5.6

表 4.2.2-6 ケース 1 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

(a) 基本ケース

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(b) ケース 1 A

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	42.4
	地震域10	6.1	14.3	39.2
10^{-4} (1400Gal)	地震域10	6.3	13.4	37.1
	地震域6	7.7	50.9	29.1
	断層B	6.5	7.7	20.8
10^{-5} (2140Gal)	地震域10	6.4	12.9	31.2
	断層B	6.5	7.7	30.5
	地震域6	7.7	49.8	17.6
	断層A	7.9	5.6	15.8

(3) ケース 2 の結果

ケース 2 A（海底活断層を考慮する）の結果を以下の図表に示し、基本ケース（海底活断層を考慮しない）の結果と比較する。

- ・ 地震危険度曲線 : 図 4.2.2-9
- ・ 参照確率を変化させたときの加速度値 : 表 4.2.2-7
- ・ 貢献度曲線 : 図 4.2.2-10
- ・ マグニチュードと距離の同時確率 : 図 4.2.2-11
- ・ マグニチュードと距離の同時確率（拡大） : 図 4.2.2-12
- ・ 主な地震活動域の貢献度・ $M^* \cdot R^*$: 表 4.2.2-8
- ・ 確率論的想定地震の諸元 : 表 4.2.2-9

図 4.2.2-9 から、基本ケースとケース 2 A の地震危険度曲線は、極めてよく一致していることがわかる。

参照確率をそれぞれ 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} としたときの基本ケースとケース 2 A の加速度値も、一致していることが表 4.2.2-7 からわかる。

図 4.2.2-10 から、基本ケースとケース 2 A の貢献度曲線も、一致していることがわかる。

図 4.2.2-11 および図 4.2.2-12 から、基本ケースとケース 2 A に対するマグニチュードと距離の同時確率は一致していることがわかる。

表 4.2.2-8 の基本ケースとケース 2 A に対する貢献度、ハザード適合マグニチュード、ハザード適合距離も一致している。

表 4.2.2-9 の各ケースに対する確率論的想定地震の諸元も、一致している。

以上から、地震危険度および想定地震の諸元は、本検討での対象地点に関する限り、地震海底断層に影響されないと考察される。

—— 基本ケース（海底活断層を考慮しない）
 - - - - ケース 2 A（海底活断層を考慮する）

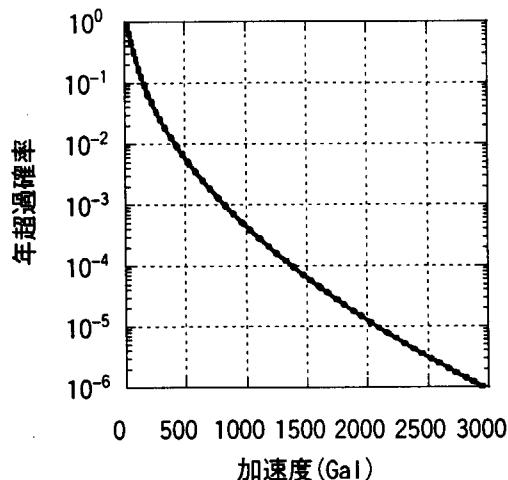
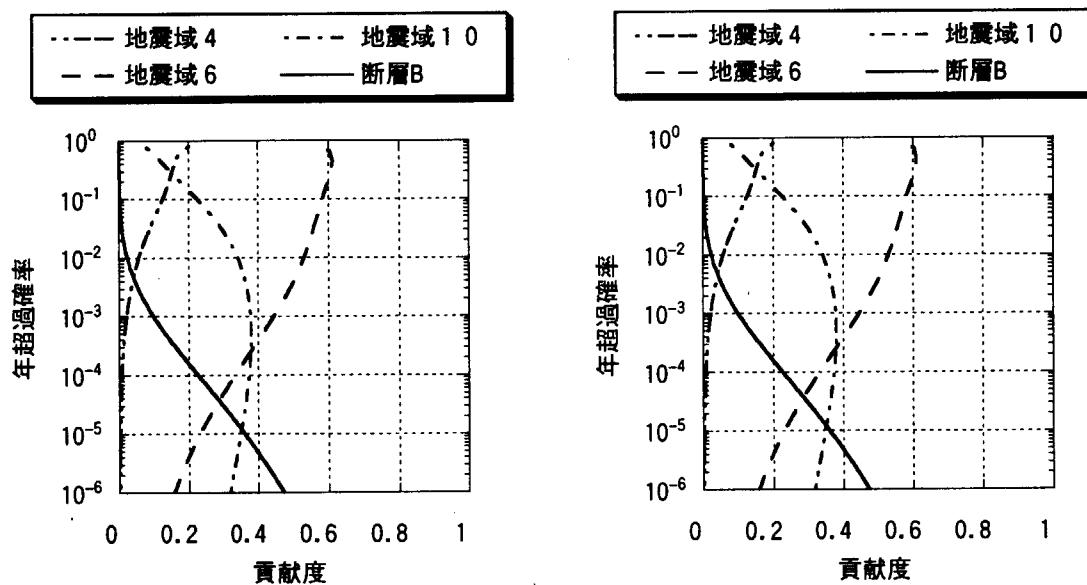


図 4.2.2-9 ケース 2 の地震危険度曲線

表 4.2.2-7 ケース 2 の各参考確率に対する加速度値

参考確率	基本ケース	ケース2A	最大-最小
10^{-3}	840	840	0
10^{-4}	1380	1380	0
10^{-5}	2080	2080	0



(a) 基本ケース

(b) ケース 2 A

図 4.2.2-10 ケース 2 の貢献度曲線

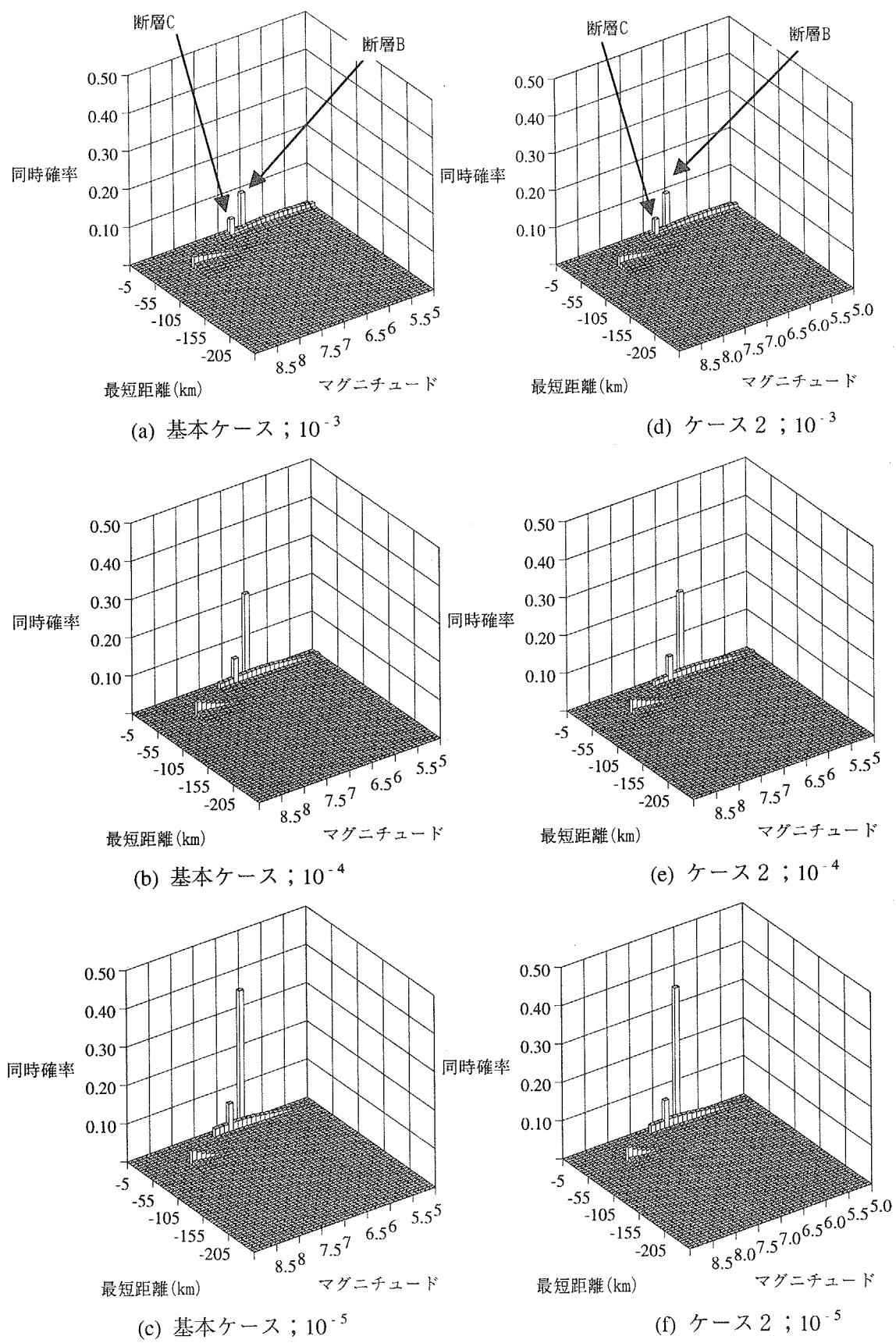


図 4.2.2-11 ケース 2 と基本ケースの同時確率

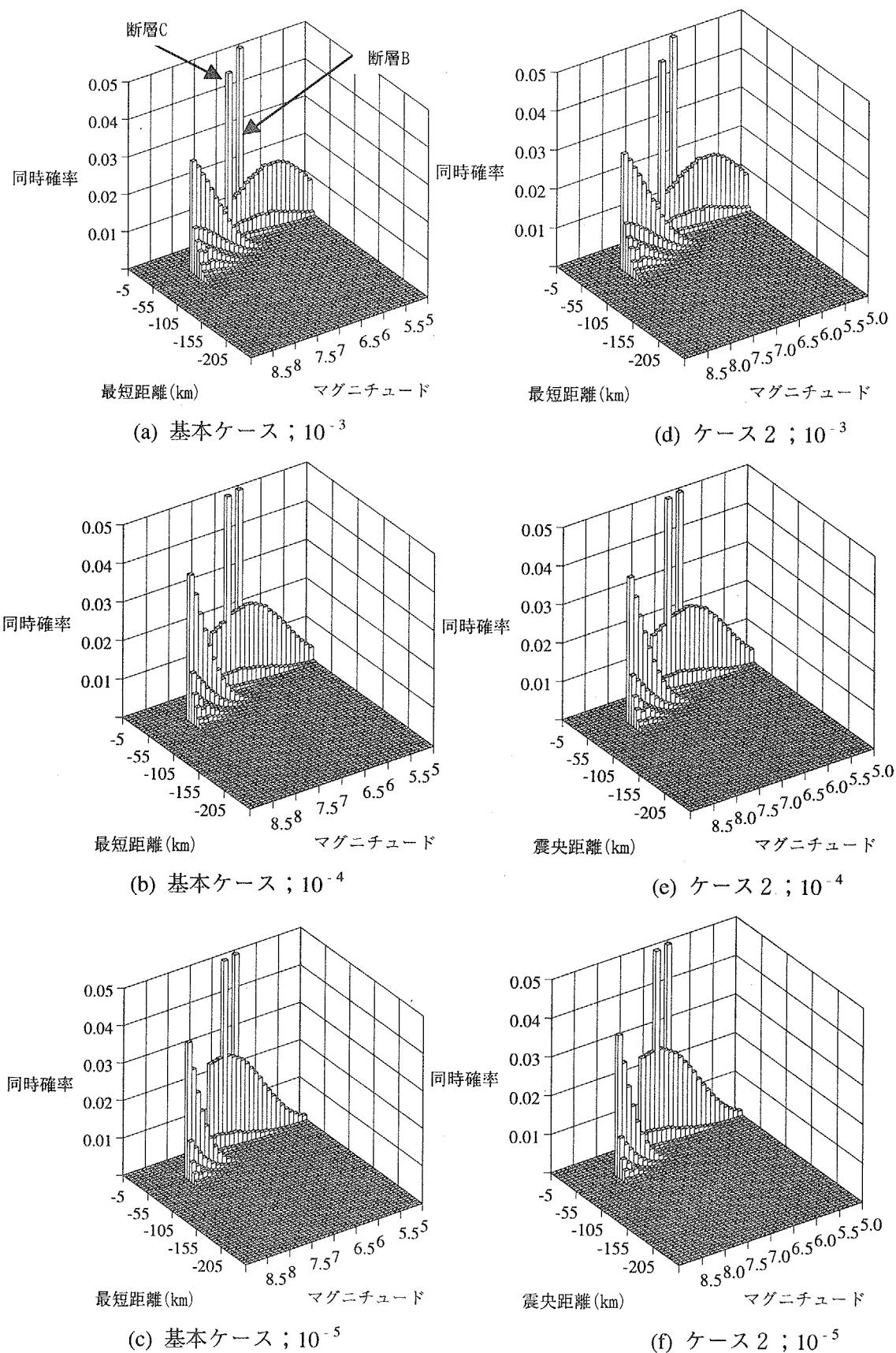


図 4.2.2-12 ケース 2 と基本ケースの同時確率 (拡大)

表 4.2.2-8 ケース 2 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

地震活断域 参照確率		地震域6		地震域10		断層C		断層B	
		基本	2A	基本	2A	基本	2A	基本	2A
10^{-3}	貢献度(%)	43.2	43.2	39.9	39.9	3.5	3.5	9.7	9.7
	M^*	7.6	7.6	6.1	6.1	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	52.9	52.9	14.3	14.3	14.2	14.2	7.7	7.7
10^{-4}	貢献度(%)	31.7	31.7	39.9	39.9	4.9	4.9	21.9	21.9
	M^*	7.7	7.7	6.3	6.3	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	51.0	51.0	13.4	13.4	14.2	14.2	7.7	7.7
10^{-5}	貢献度(%)	21.6	21.6	37.3	37.3	5.1	5.1	35.3	35.3
	M^*	7.7	7.7	6.4	6.4	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	49.9	49.9	13.0	13.0	14.2	14.2	7.7	7.7

表 4.2.2-9 ケース 2 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

(a) 基本ケースの想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(b) ケース 2 A の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(4) ケース 3 の結果

ケース 3 A (萩原⁹⁾に基づいた M_{max}) の結果を以下の図表に示し、基本ケース (垣見ら¹¹⁾を参考とした M_{max}) の結果と比較する。

- ・地震危険度曲線 : 図 4.2.2-13
- ・参照確率を変化させたときの加速度値 : 表 4.2.2-10
- ・貢献度曲線 : 図 4.2.2-14
- ・マグニチュードと距離の同時確率 : 図 4.2.2-15
- ・マグニチュードと距離の同時確率 (拡大) : 図 4.2.2-16
- ・主な地震活動域の貢献度 $\cdot M^* \cdot R^*$: 表 4.2.2-11
- ・確率論的想定地震の諸元 : 表 4.2.2-12

図 4.2.2-13 の基本ケースとケース 3 A の地震危険度曲線を比較すると、任意の年超過確率に対して得られる加速度値は、ケース 3 A の方が基本ケースよりも若干小さいことがわかる。また、参照確率をそれぞれ 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} とするとき、両ケースの加速度値の差はいずれも 80Gal となることが、表 4.2.2-10 からわかる。

図 4.2.2-14において、両ケースの貢献度曲線を比較すると、ケース 3 A では年超過確率が小さくなるにしたがい、地震域 6 での貢献度の低減度合いが大きいことがわかる。

図 4.2.2-15 および図 4.2.2-16 において両ケースの同時確率を比較すると、当然のことながら、ケース 3 A では $M > 7.6$ の領域に同時確率の分布が存在しないことがわかる。これは、基本ケースでは地震域 6 の最大マグニチュード M_{max} を 8.0 としているのに対し、ケース 3 A では $M_{max} = 7.5$ としていることによるものである。

表 4.2.2-11において、両ケース間の適合ハザードマグニチュード M^* および適合ハザード距離 R^* を比較すると、地震域 6 の M^* に相対的に大きな差が生じることがわかる。

表 4.2.2-12 での両ケースの想定地震のうち、ケース 3 A ではいずれの参照確率に対しても、断層 B が選定されていることがわかる。また、参照確率が 10^{-5} のとき、基本ケースでは地震域 6 に対する諸元が選ばれたのに対し、ケース 3 A では選ばれないことがわかる。

以上をまとめると、地震域 6 の最大マグニチュードを低減させても、地震ハザード曲線には大きな変化は生じない。一方、地震域 6 の貢献度および適合ハザードマグニチュードは、相対的に大きく低減する。そして、参照確率が 10^{-5} のとき基本ケースで選定されていた地震域 6 に対する想定地震は、ケース 3 A では選定されなくなる。

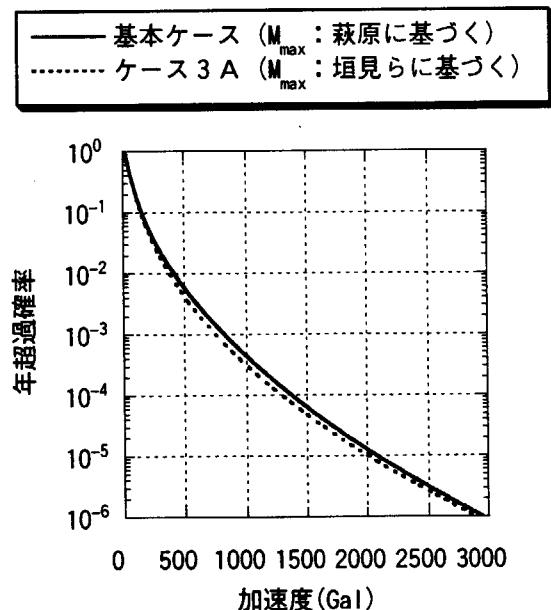


図 4.2.2-13 ケース 3 の地震危険度曲線

表 4.2.2-10 ケース 3 の各参照確率に対する加速度値

参照確率	基本ケース	ケース3A	最大-最小
10^{-3}	840	760	80
10^{-4}	1380	1300	80
10^{-5}	2080	2000	80

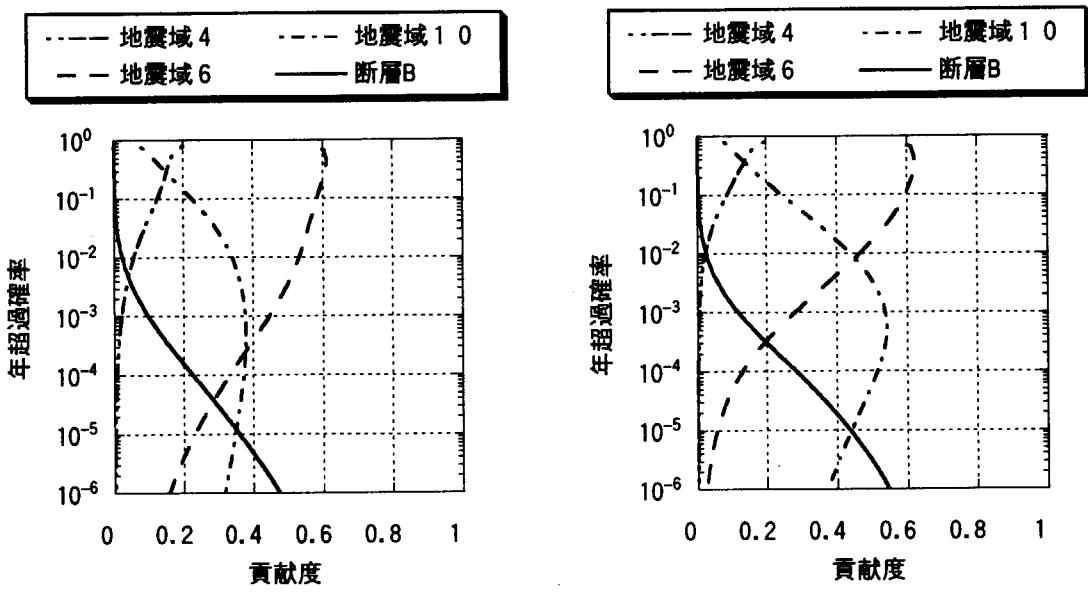


図 4.2.2-14 ケース 3 の貢献度曲線

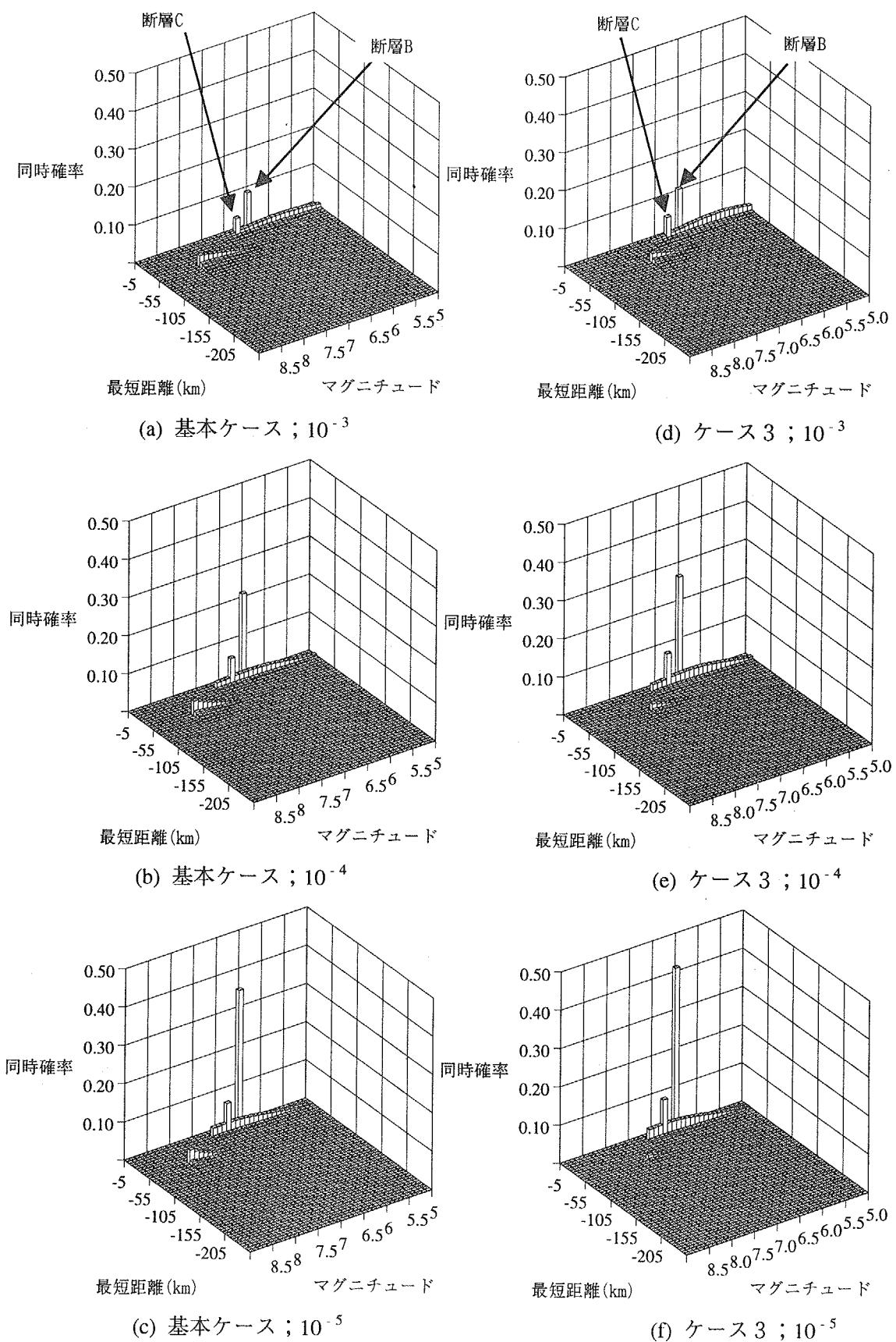


図 4.2.2-15 ケース 3 と基本ケースの同時確率

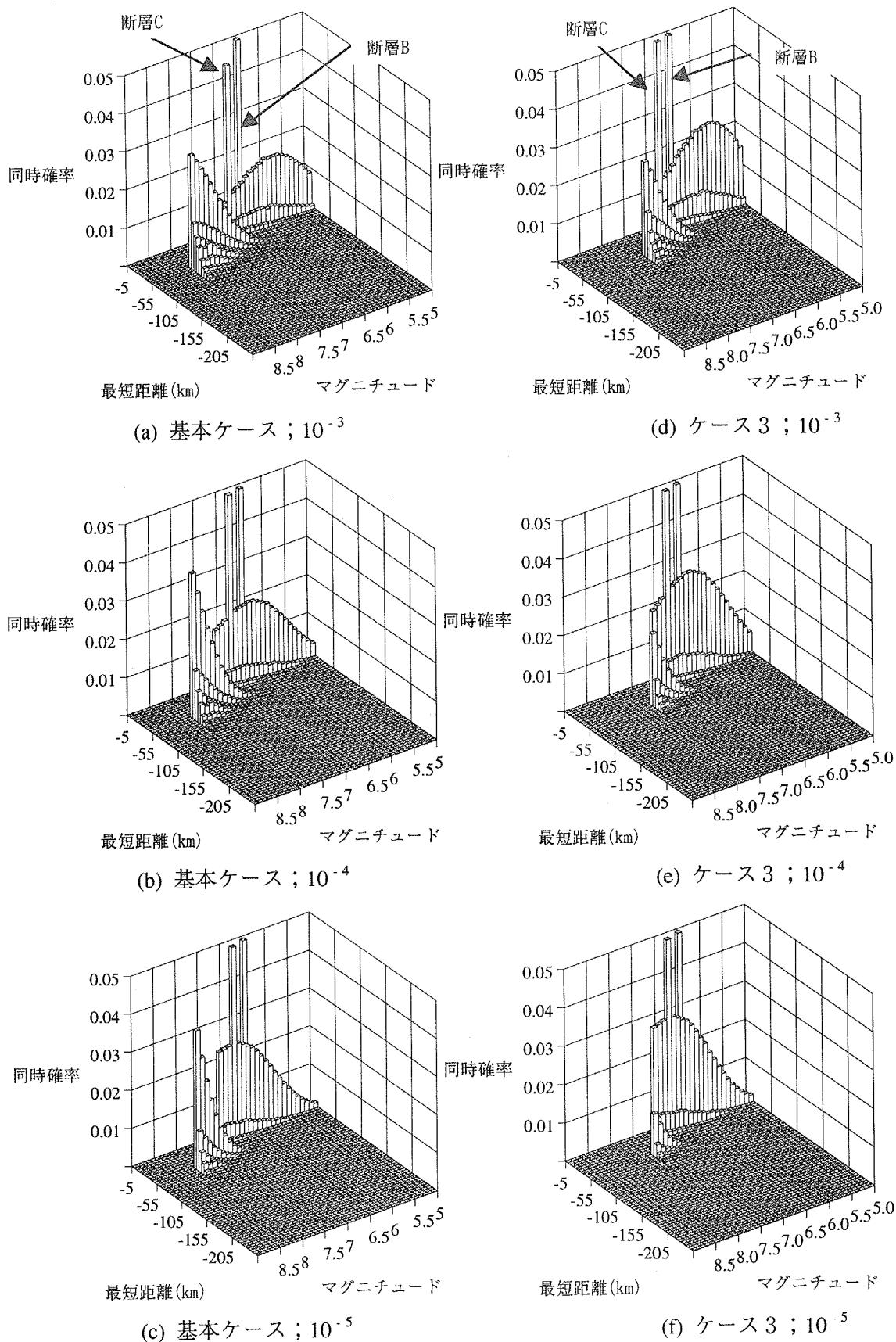


図 4.2.2-16 ケース 3 と基本ケースの同時確率（拡大）

表 4.2.2-11 ケース 3 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

地震活断域 参照確率		地震域6		地震域10		断層C		断層B	
		基本	3A	基本	3A	基本	3A	基本	3A
10^{-3}	貢献度(%)	43.2	26.0	39.9	56.5	3.5	4.5	9.7	11.4
	M^*	7.6	7.2	6.1	6.0	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	52.9	52.4	14.3	14.5	14.2	14.2	7.7	7.7
10^{-4}	貢献度(%)	31.7	11.5	39.9	54.2	4.9	6.5	21.9	27.3
	M^*	7.7	7.2	6.3	6.2	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	51.0	50.6	13.4	13.5	14.2	14.2	7.7	7.7
10^{-5}	貢献度(%)	21.6	4.8	37.3	46.6	5.1	6.4	35.3	42.1
	M^*	7.7	7.3	6.4	6.4	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	49.9	49.5	13.0	13.0	14.2	14.2	7.7	7.7

表 4.2.2-12 ケース 3 の確率論的想定地震諸元

(a) 基本ケースの想定地震諸

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(b) ケース 3 A の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (760Gal)	地震域10	6.0	14.5	56.5
	地震域6	7.2	52.4	26.0
	断層B	6.5	7.7	11.4
10^{-4} (1300Gal)	地震域10	6.2	13.5	54.2
	断層B	6.5	7.7	27.3
	地震域6	7.2	50.6	11.5
10^{-5} (2000Gal)	地震域10	6.4	13.0	46.6
	断層B	6.5	7.7	42.1

(5) ケース 4 の結果

ケース 4 A (地震動強の度指標: 短周期領域) およびケース 4 B (長周期領域) の結果を以下の図表に示し、基本ケース (最大地動加速度) の結果と比較する。

・ 地震危険度曲線	:	図 4.2.2-17
・ 参照確率を変化させたときの加速度値	:	表 4.2.2-13
・ 貢献度曲線	:	図 4.2.2-18
・ マグニチュードと距離の同時確率	:	図 4.2.2-19
・ マグニチュードと距離の同時確率 (拡大)	:	図 4.2.2-20
・ 主な地震活動域の貢献度 $\cdot M^* \cdot R^*$:	表 4.2.2-14
・ 確率論的想定地震の諸元	:	表 4.2.2-15

図 4.2.2-17 に示した基本ケース、ケース 4 A およびケース 4 B 間の地震ハザード曲線には、比較的に大きな差異が生じている。表 4.2.2-13 に示したように、3 つのケースに対する加速度値のうち最大値と最小値の差は、参照確率の値を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} とするとき、それぞれ 420Gal、680Gal、1040Gal である。

図 4.2.2-18 に示した各ケースの貢献度曲線を比較する。これらのうち、基本ケースとケース 4 A の貢献度を比較すると、年超過確率が小さくなるにしたがって、両ケースとも地震域 6 の値が小さくなり、断層 B の値が大きくなる傾向があることがわかる。そして、その傾向は、ケース 4 A よりも基本ケースの方が顕著である。一方、ケース 4 B の貢献度は他の 2 つのケースと著しく異なっている。そして、年超過確率が小さくなるにしたがい、地震域 6 の貢献度が大きくなり、他の地震活動域の値は小さくなる傾向がある。

図 4.2.2-19 および図 4.2.2-20 に示した各ケースの同時確率を比較する。地震域 1 0 に対応する領域の同時確率は基本ケースが最も大きく、次いでケース 4 A、ケース 4 B の順に小さくなることがわかる。特に、ケース 4 B では、地震域 1 0 に対応する領域の同時確率は、ほとんどなくなっていることがわかる。一方、地震域 6 に対する同時確率の値は、ケース 4 B が最も大きく、次いで、ケース 4 A、基本ケースの順になっていることがわかる。また、基本ケースおよびケース 4 A では、年超過確率が小さくなりつれて断層 B に対応するビンの同時確率の値は明確に大きくなる。これに対し、ケース 4 B では、年超過確率が変化しても、同ビンの同時確率の値はほとんど変化しない。

3 つのケースの貢献度、ハザード適合マグニチュード M^* およびハザード適合距離 R^* を表 4.2.2-14 に示す。同表から、地震域 4 の R^* および地震域 1 0 の M^* は、各ケースによって大きく異なる傾向がある。

表 4.2.2-15 の想定地震について、基本ケースおよびケース 4 A で選定される地震活動域は、順位に若干の差があるものの、互いにはほぼ同一である。これに対し、ケース 4 B の場合は他の 2 つのケースと大きく異なり、地震域 6 が支配的となっている。

以上を整理すると、地震動強度の指標に最大地動加速度、短周期の加速度応答スペクトル、あるいは長周期の加速度応答スペクトルのうちいずれを採用するかによって、地震危険度曲線および想定地震諸元は大きくことなることがわかる。

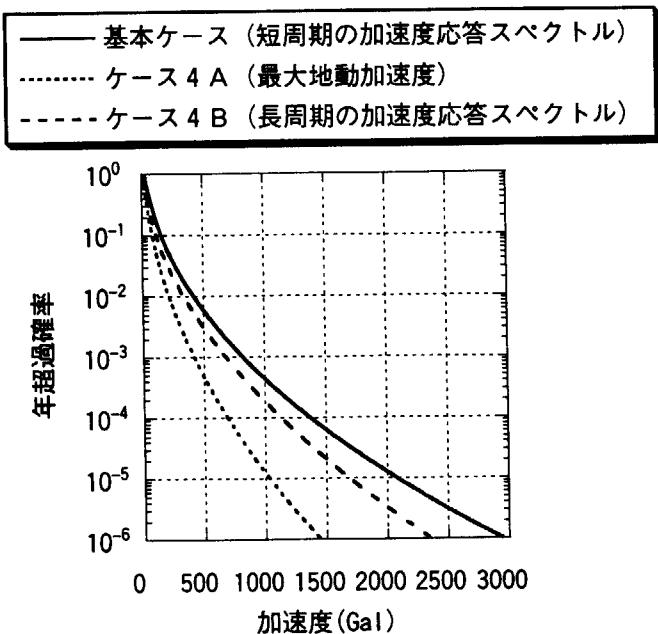
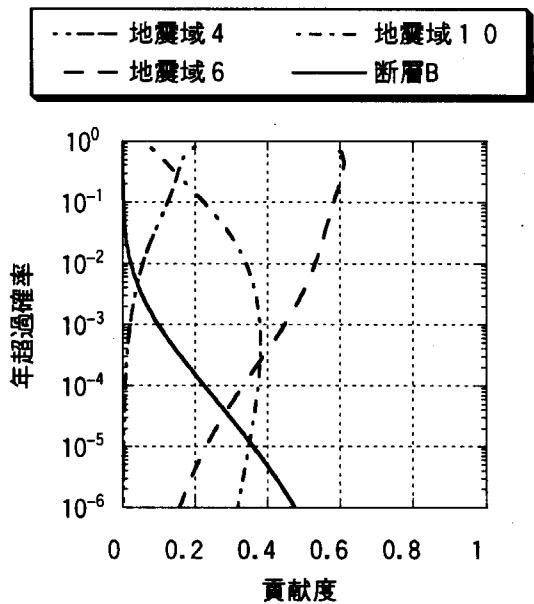


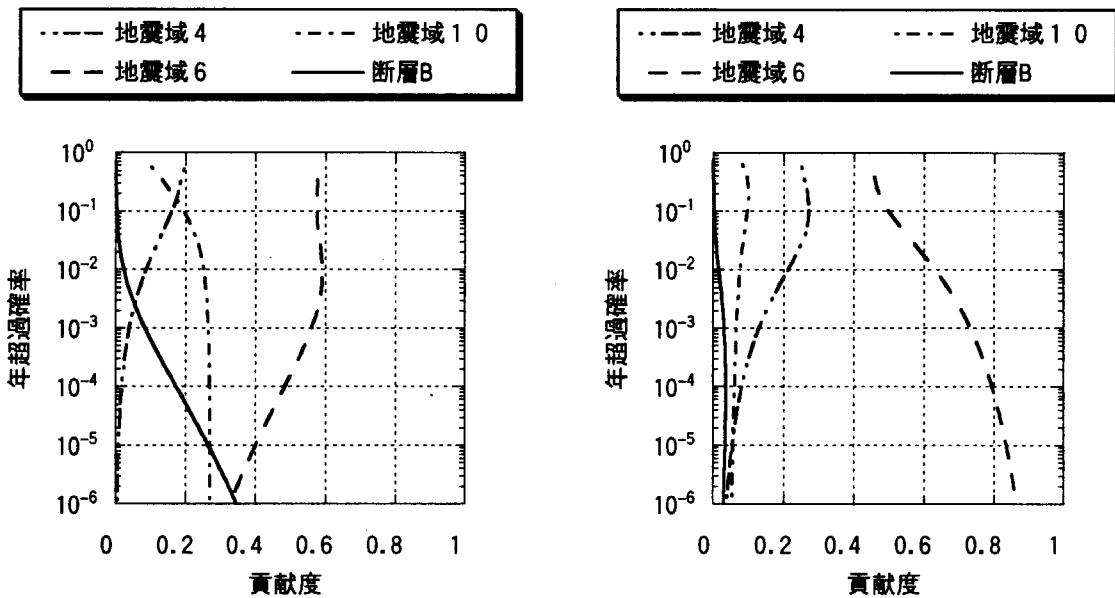
図 4.2.2-17 ケース 4 の地震危険度曲線

表 4.2.2-13 ケース 4 の各参照確率に対する加速度値

参照確率	基本ケース	ケース4A	ケース4B	最大-最小
10^{-3}	840	420	680	420
10^{-4}	1380	700	1140	680
10^{-5}	2080	1040	1700	1040



(a) 基本ケース（短周期領域の加速度応答スペクトル）



(b) ケース 4 A (最大地動加速度)

(c) ケース 4 B (長周期領域の加速度応答スペクトル)

図 4.2.2-18 ケース 4 と基本ケースの貢献度曲線

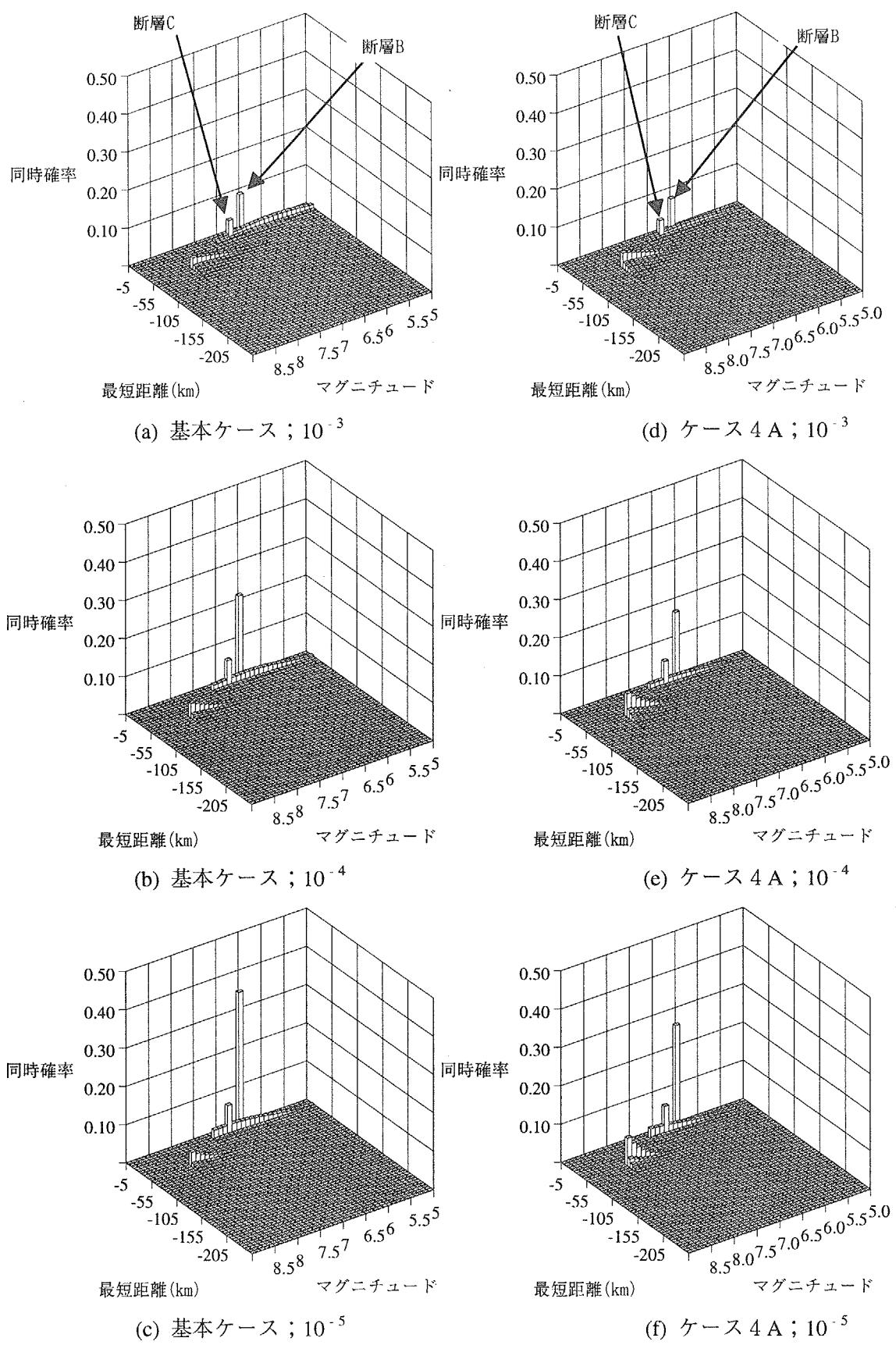


図 4.2.2-19 ケース 4 と基本ケースの同時確率

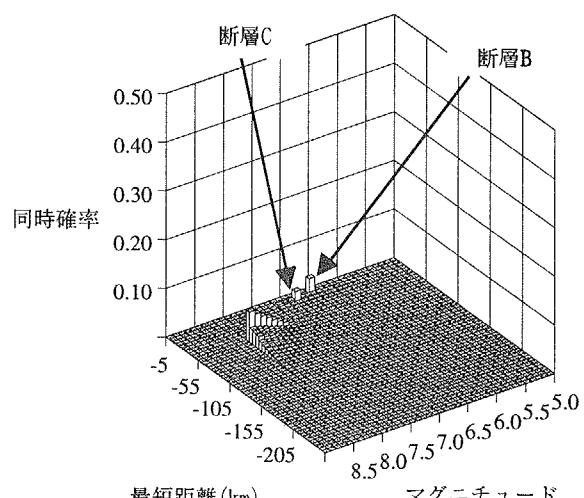
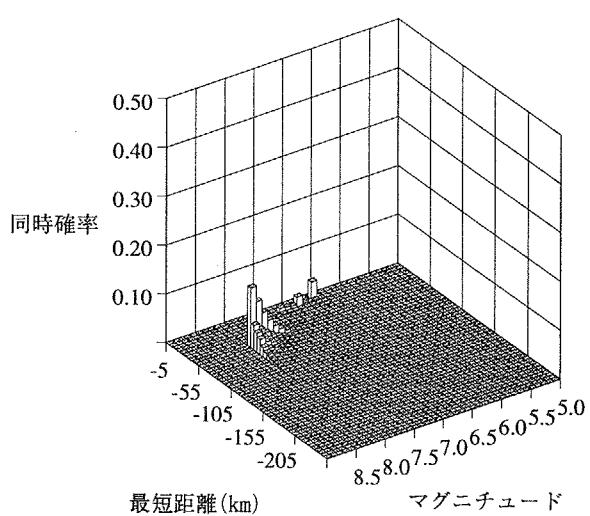
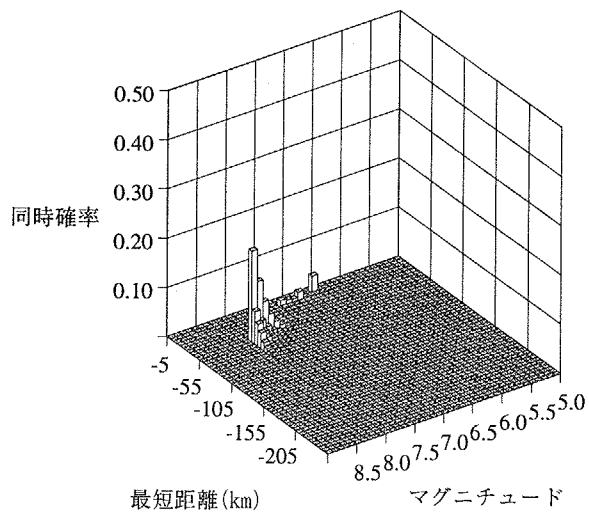
(g) ケース 4 B ; 10^{-3} (h) ケース 4 B ; 10^{-4} (i) ケース 4 B ; 10^{-5}

図 4.2.2-19 ケース 4 と基本ケースの同時確率（つづき）

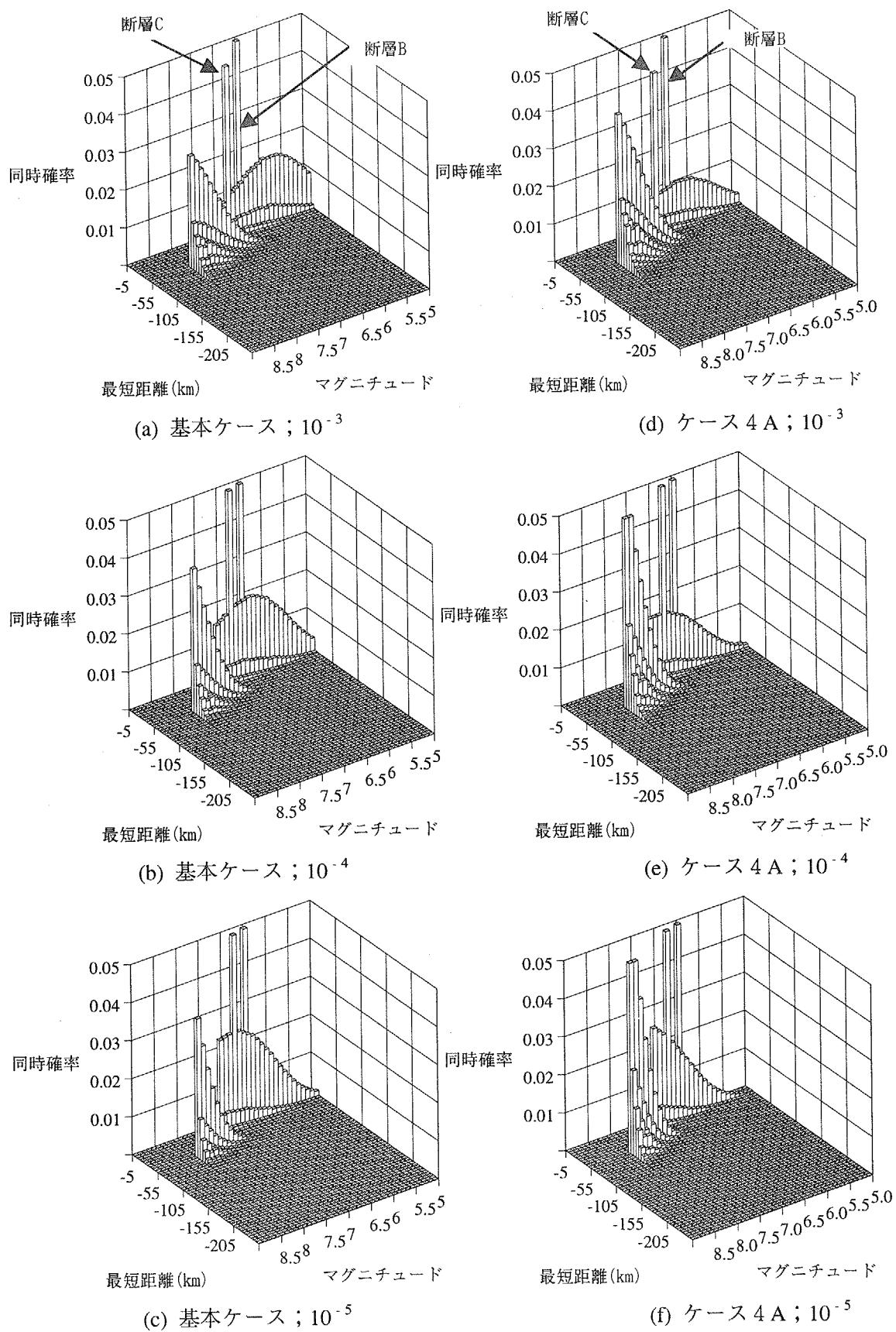


図 4.2.2-20 ケース 4 と基本ケースの同時確率（拡大）

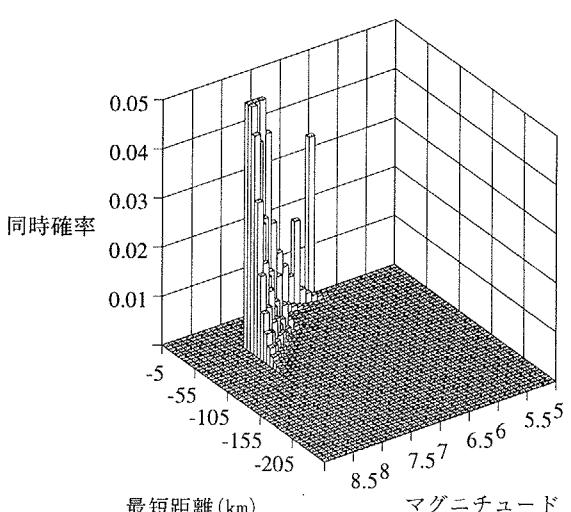
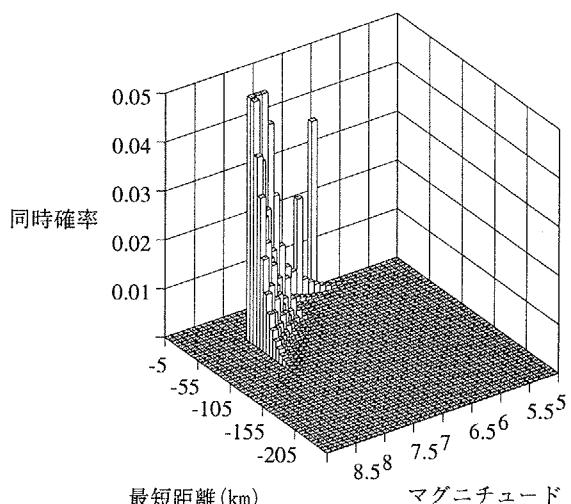
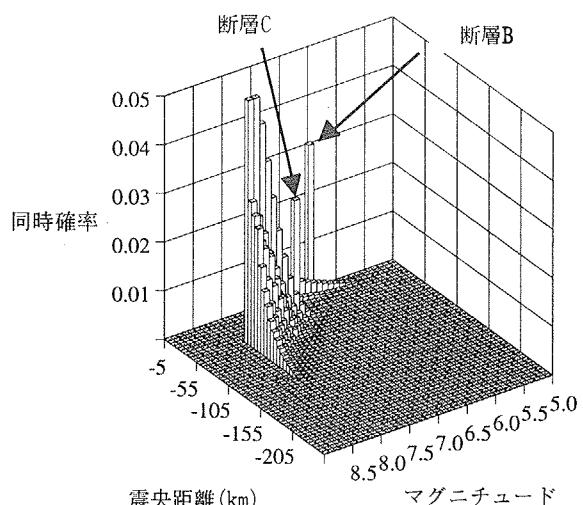


図 4.2.2-20 ケース 4 と基本ケースの同時確率（拡大；つづき）

表 4.2.2-14 ケース 4 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

(a) 地震域 4 ・ 地震域 6 および地震域 10

地震活動域		地震域4			地震域6			地震域10		
		基本	4A	4B	基本	4A	4B	基本	4A	4B
10^{-3}	貢献度(%)	1.8	3.8	13.0	43.2	56.0	73.0	39.9	26.4	6.5
	M^*	7.8	7.8	7.8	7.6	7.6	7.7	6.1	6.2	6.7
	$R^*(\text{km})$	71.9	74.0	79.0	52.9	53.8	56.1	14.3	14.6	15.5
10^{-4}	貢献度(%)	0.0	1.7	8.1	31.7	48.2	79.4	39.9	26.9	6.0
	M^*	—	7.8	7.9	7.7	7.7	7.8	6.3	6.5	6.8
	$R^*(\text{km})$	—	69.8	73.5	51.0	51.7	53.4	13.4	13.7	14.2
10^{-5}	貢献度(%)	0.0	0.0	5.4	21.6	39.9	83.6	37.3	27.0	5.5
	M^*	—	—	7.9	7.7	7.8	7.8	6.4	6.6	6.9
	$R^*(\text{km})$	—	—	70.4	49.9	50.4	51.8	13.0	13.2	13.6

(b) 断層 C および断層 B

地震活動域		断層C			断層B		
		基本	4A	4B	基本	4A	4B
10^{-3}	貢献度(%)	3.5	3.3	1.7	9.7	8.2	3.1
	M^*	6.8	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	14.2	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7
10^{-4}	貢献度(%)	4.9	4.6	1.6	21.9	17.4	3.5
	M^*	6.8	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	14.2	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7
10^{-5}	貢献度(%)	5.1	5.0	1.3	35.3	26.6	3.3
	M^*	6.8	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	14.2	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7

表 4.2.2-15 ケース 4 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

(a) 基本ケース

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(b) ケース 4 A

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (420Gal)	地震域6	7.6	53.8	56.0
	地震域10	6.2	14.6	26.4
10^{-4} (700Gal)	地震域6	7.7	51.7	48.2
	地震域10	6.5	13.7	26.9
	断層B	6.5	7.7	17.4
10^{-5} (1040Gal)	地震域6	7.8	50.4	39.9
	地震域10	6.6	13.2	27.0
	断層B	6.5	7.7	26.6

(c) ケース 4 B

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (680Gal)	地震域6	7.7	56.1	73.0
	地震域4	7.8	79.0	13.0
10^{-4} (1140Gal)	地震域6	7.8	53.4	79.4
10^{-5} (1700Gal)	地震域6	7.8	51.8	83.6

(6) ケース 5 の結果

ケース 5 A (福島・田中式^{12,13)}×0.6) の結果を以下の図表に示し、基本'ケース (安中ら¹⁰⁾の PGA に対する式) の結果と比較する。

- ・ 地震危険度曲線 : 図 4.2.2-21
- ・ 参照確率を変化させたときの加速度値 : 表 4.2.2-16
- ・ 貢献度曲線 : 図 4.2.2-22
- ・ マグニチュードと距離の同時確率 : 図 4.2.2-23
- ・ マグニチュードと距離の同時確率 (拡大) : 図 4.2.2-24
- ・ 主な地震活動域の貢献度・ $M^* \cdot R^*$: 表 4.2.2-17
- ・ 確率論的想定地震の諸元 : 表 4.2.2-18

基本'ケース、ケース 5 A の地震ハザード曲線を図 4.2.2-21 に、両ケースの加速度値を表 4.2.2-16 に示す。両ケースの加速度値の差は、参照確率を 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} としたときそれぞれ 140Gal、240Gal、340Gal である。これらの図表から、両ケースには、明らかな差異が生じていることがわかる。

図 4.2.2-22 に示した基本'ケース、ケース 5 A の貢献度曲線を比較すると、年超過確率が小さくなるにつれ、両ケースとも地震域 6 の貢献度が小さくなり、断層 B の貢献度が大きくなる傾向がある。その度合いは、基本'ケースよりもケース 5 A でより顕著であることがわかる。

図 4.2.2-23 および図 4.2.2-24 に示した同時確率を比較すると、参照確率の値にかかわらず両ケースの分布には概ね同じ傾向があることがわかる。ただし、地震域 6 に対する領域 ($7.0 \leq M \leq 8.0$ 、 $45 \text{ km} \leq R \leq 70 \text{ km}$) の同時確率は、ケース 5 A の方が基本'ケースよりも小さくなる傾向がある。

表 4.2.2-17 に示した貢献度・ハザード適合マグニチュード M^* およびハザード適合距離 R^* のうち、 M^* および R^* については、両ケース間に大きな差異は生じていない。

表 4.2.2-18 に示したように、選ばれる想定地震に大差はない。ただし、参照確率が 10^{-5} のとき、貢献度の大きさによって選ばれる地震の順番が異なる。これは、地震域 6 の貢献度が低減したことによるものである。

以上を整理すると、用いる距離減衰式によって、地震危険度曲線には無視できない差異が生じるもの、選定される想定地震には大差がないことが考察できる。

—— 基本' ケース (安中ら(1997)の式[PGA])
 ケース 5 A (福島・田中の式×0.6)

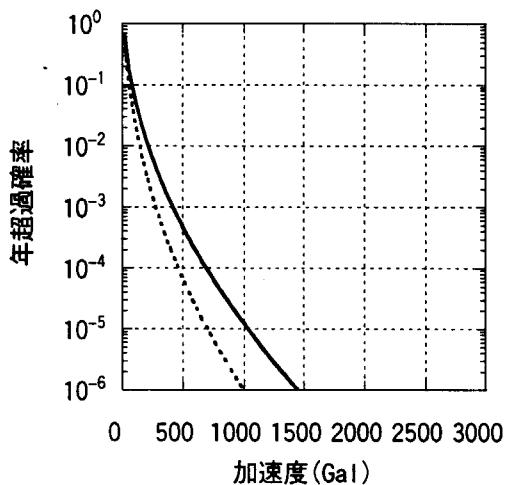
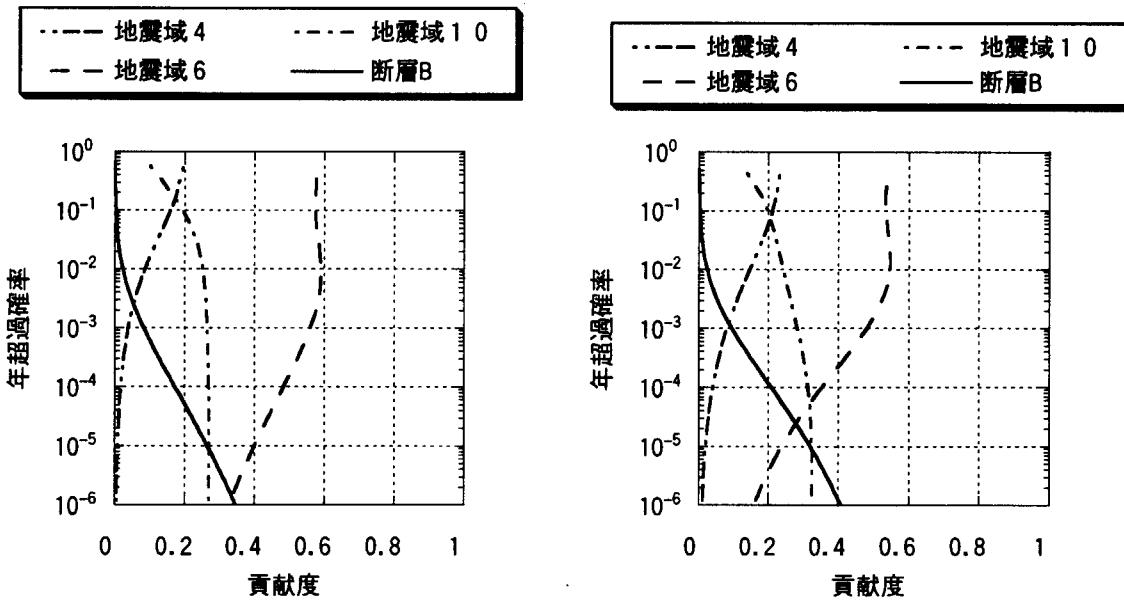


図 4.2.21 ケース 5 の地震危険度曲線

表 4.2.16 ケース 5 の各参照確率に対する加速度値

参照確率	基本' ケース	ケース 5 A	最大-最小
10^{-3}	420	280	140
10^{-4}	700	460	240
10^{-5}	1040	700	340



(a) 基本' ケース

(b) ケース 5 A

図 4.2.22 ケース 5 と基本' ケースの貢献度曲線

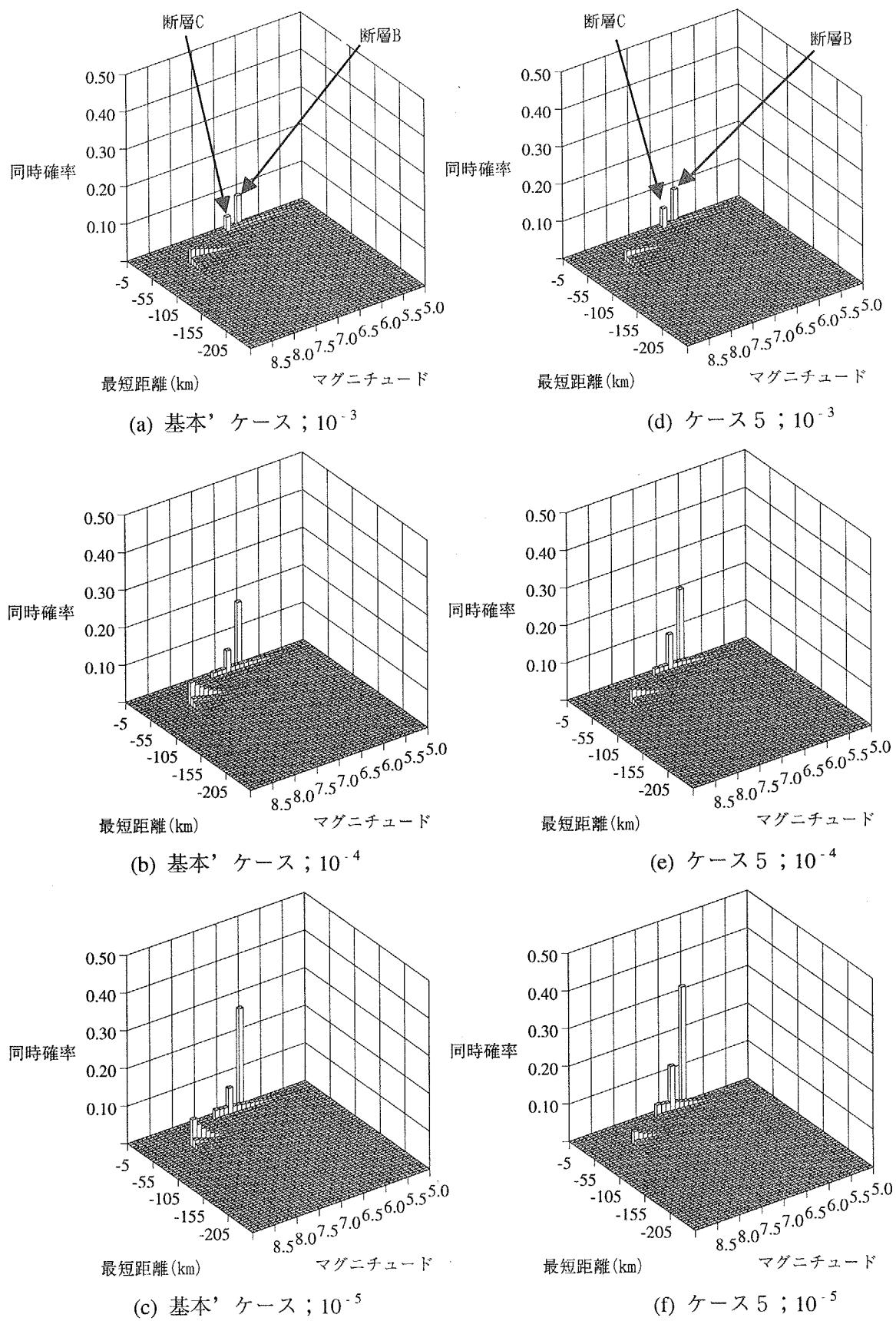


図 4.2.2-23 ケース 5 と基本' ケースの同時確率

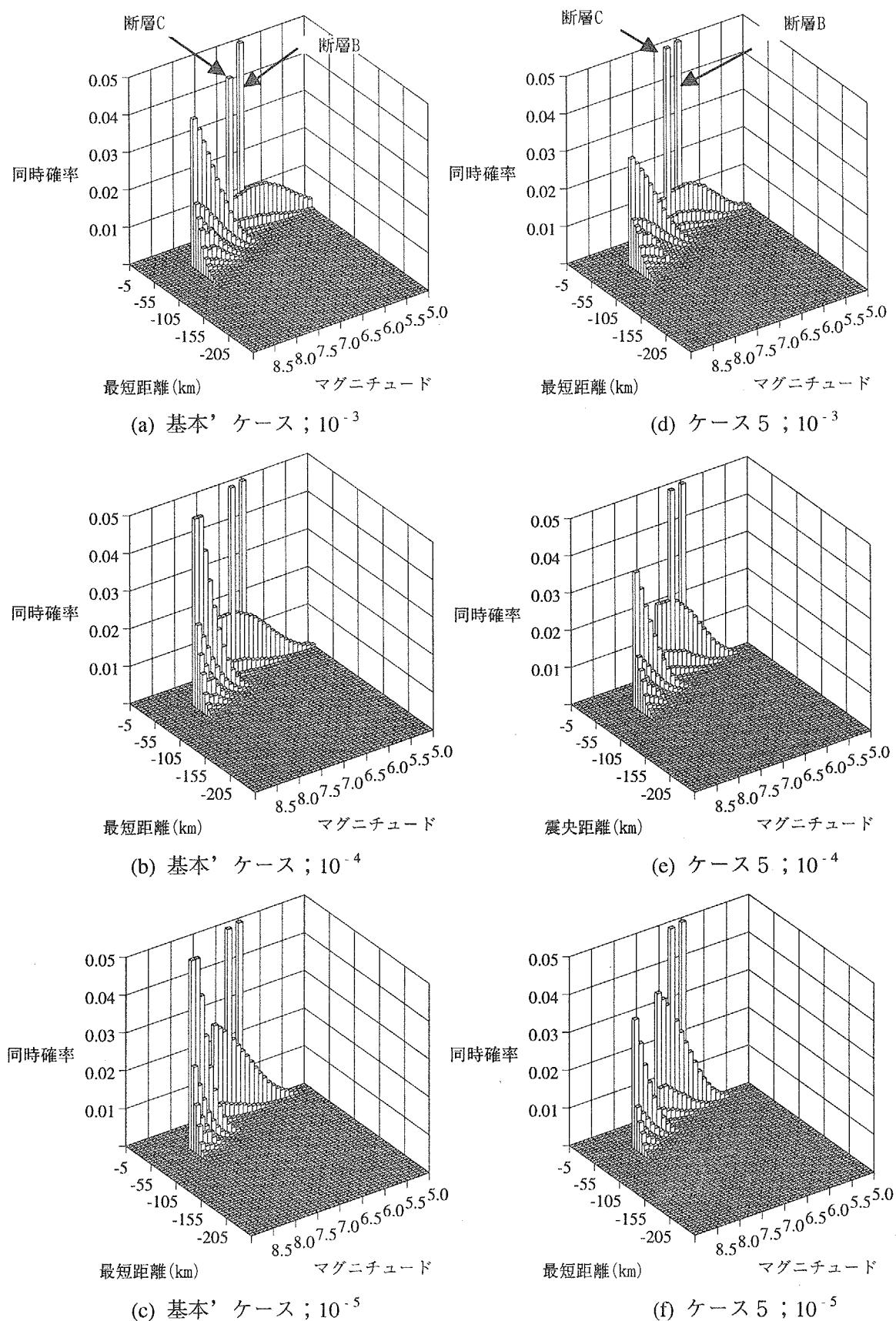


図 4.2.2-24 ケース 5 と基本' ケースの同時確率（拡大）

表 4.2.2-17 ケース 5 と基本'ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

地震活断域 参照確率		地震域6		地震域10		断層C		断層B	
		基本'	5A	基本'	5A	基本'	5A	基本'	5A
10^{-3}	貢献度(%)	56.0	47.5	26.4	30.1	3.3	4.7	8.2	9.2
	M^*	7.6	7.6	6.2	6.4	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	53.8	54.5	14.6	16.7	14.2	14.2	7.7	7.7
10^{-4}	貢献度(%)	48.2	34.7	26.9	33.1	4.6	7.9	17.4	20.3
	M^*	7.7	7.7	6.5	6.6	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	51.7	52.4	13.7	15.2	14.2	14.2	7.7	7.7
10^{-5}	貢献度(%)	39.9	22.8	27.0	34.0	5.0	9.6	26.6	31.8
	M^*	7.8	7.7	6.6	6.7	6.8	6.8	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	50.4	51.1	13.2	14.2	14.2	14.2	7.7	7.7

表 4.2.2-18 ケース 5 と基本'ケースの確率論的想定地震諸元

(a) 基本'ケースの想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (420Gal)	地震域6	7.6	53.8	56.0
	地震域10	6.2	14.6	26.4
10^{-4} (700Gal)	地震域6	7.7	51.7	48.2
	地震域10	6.5	13.7	26.9
	断層B	6.5	7.7	17.4
10^{-5} (1040Gal)	地震域6	7.8	50.4	39.9
	地震域10	6.6	13.2	27.0
	断層B	6.5	7.7	26.6

(b) ケース 5 A の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (280Gal)	地震域6	7.6	54.5	47.5
	地震域10	6.4	16.7	30.1
10^{-4} (460Gal)	地震域6	7.7	52.4	34.7
	地震域10	6.6	15.2	33.1
	断層B	6.5	7.7	20.3
10^{-5} (700Gal)	地震域10	6.7	14.2	34.0
	断層B	6.5	7.7	31.8
	地震域6	7.7	51.1	22.8

(7) ケース 6 の結果

ケース 6 A～6 C (順に、 $\zeta=0.1, 0.3, 0.7$) の結果を以下の図表に示し、基本ケース ($\zeta=0.5$) の結果と比較する。

- ・ 地震危険度曲線 : 図 4.2.2-25
- ・ 参照確率を変化させたときの加速度値 : 表 4.2.2-19
- ・ 貢献度曲線 : 図 4.2.2-26
- ・ マグニチュードと距離の同時確率 : 図 4.2.2-27
- ・ マグニチュードと距離の同時確率 (拡大) : 図 4.2.2-28
- ・ 主な地震活動域の貢献度・ $M^* \cdot R^*$: 表 4.2.2-20
- ・ 確率論的想定地震の諸元 : 表 4.2.2-21

図 4.2.2-25 に示した基本ケース、ケース 6 A、ケース 6 B およびケース 6 C の地震ハザード曲線には、顕著な格差があることがわかる。4 つのケースに対する加速度値のうち最大値と最小値の差は、参照確率の値を $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ とするとき、それぞれ 720Gal、1540Gal、2980Gal となることが、表 4.2.2-19 わかる。

図 4.2.2-26 に示した各ケースの貢献度曲線を比較すると、各ケース間の貢献度は互いに大きく異なることがわかる。中でも、ケース 6 A では年超過確率が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ の間で大きく貢献度が変化することが特徴的である。そして、 10^{-3} 以下において、年超過確率が小さくなるとともに断層 B の貢献度が大きくなり、他の地震活動域の貢献度は小さくなる。一方、ケース 6 C でも、年超過確率の減少とともに断層 B の貢献度が大きくなり、地震域 6 が小さくなる傾向があることがわかる。ただし、その変化はケース 6 A と比較して、緩やかになっている。

図 4.2.2-27 に示した同時確率を比較すると、参照確率を一定として距離減衰式のばらつき ζ を 0.7 (ケース 6 C)、0.5 (基本ケース)、0.3 (ケース 6 B)、0.1 (ケース 6 A) と小さくしていくと、断層 B に対応するビンの値が大きくなることがわかる。また、 ζ を一定とし参照確率を小さくしていくと、断層 B に対応するビンの同時確率は大きくなる傾向のあることが理解できる。

同時確率を拡大した図 4.2.2-28 から、 ζ を 0.7、0.5、0.3、0.1 と小さくしていくと、地震域 6 および地震域 10 に対応する領域での同時確率の値は小さくなることがわかる。そして、同時確率の分布は、狭い領域に集中する傾向があることがわかる。

地震域 6 および地震域 10 について、表 4.2.2-20 に示した貢献度、ハザード適合マグニチュードおよびハザード適合距離は、各ケースによって大きく異なることがわかる。

表 4.2.2-21 の選定される想定地震は、各ケース間によって大きく異なることがわかる。さらに、同じ値の参照確率に対して、同じ地震活動域に対する想定地震が選定されたとしても、その諸元は、ケースによって、無視できない程度の差異があることがわかる。

以上から、地震危険度曲線および想定地震は、距離減衰式のばらつきに大きく影響されることがわかる。

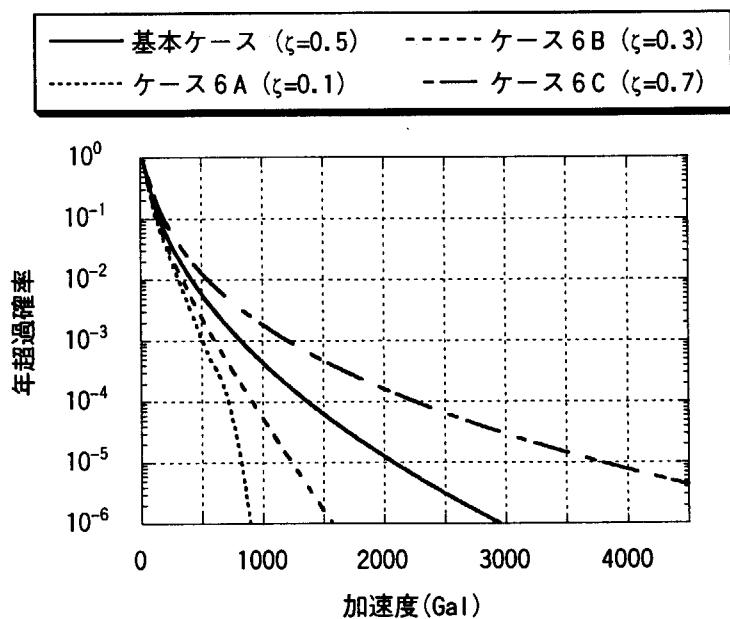


図 4.2.2-25 ケース 6 の地震危険度曲線

表 4.2.2-19 ケース 6 の各参照確率に対する加速度値

参照確率	基本ケース	ケース6A	ケース6B	ケース6C	最大-最小
10^{-3}	840	500	600	1220	720
10^{-4}	1380	720	920	2260	1540
10^{-5}	2080	820	1240	3800	2980

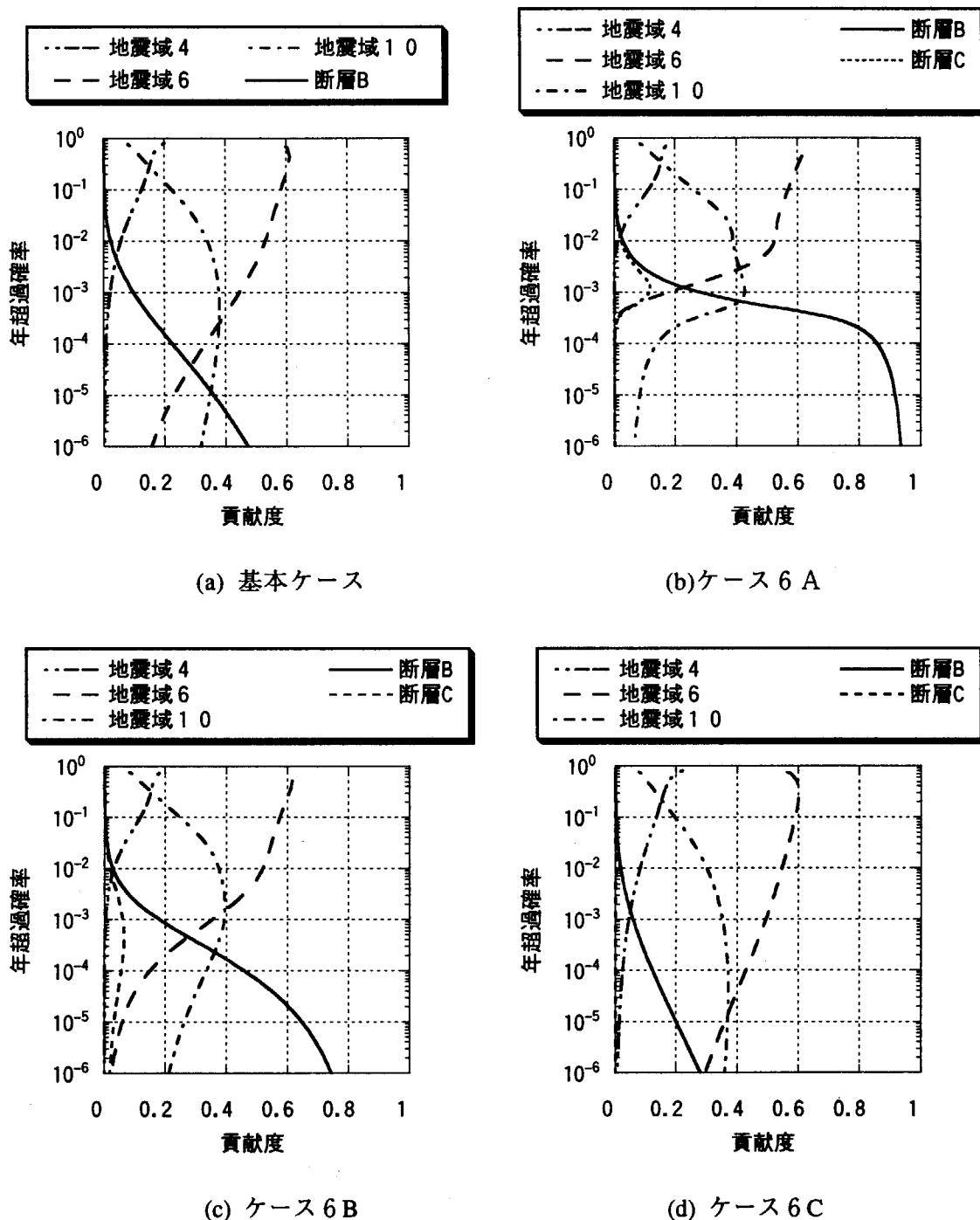


図 4.2.2-26 ケース 6 と基本ケースの貢献度曲線

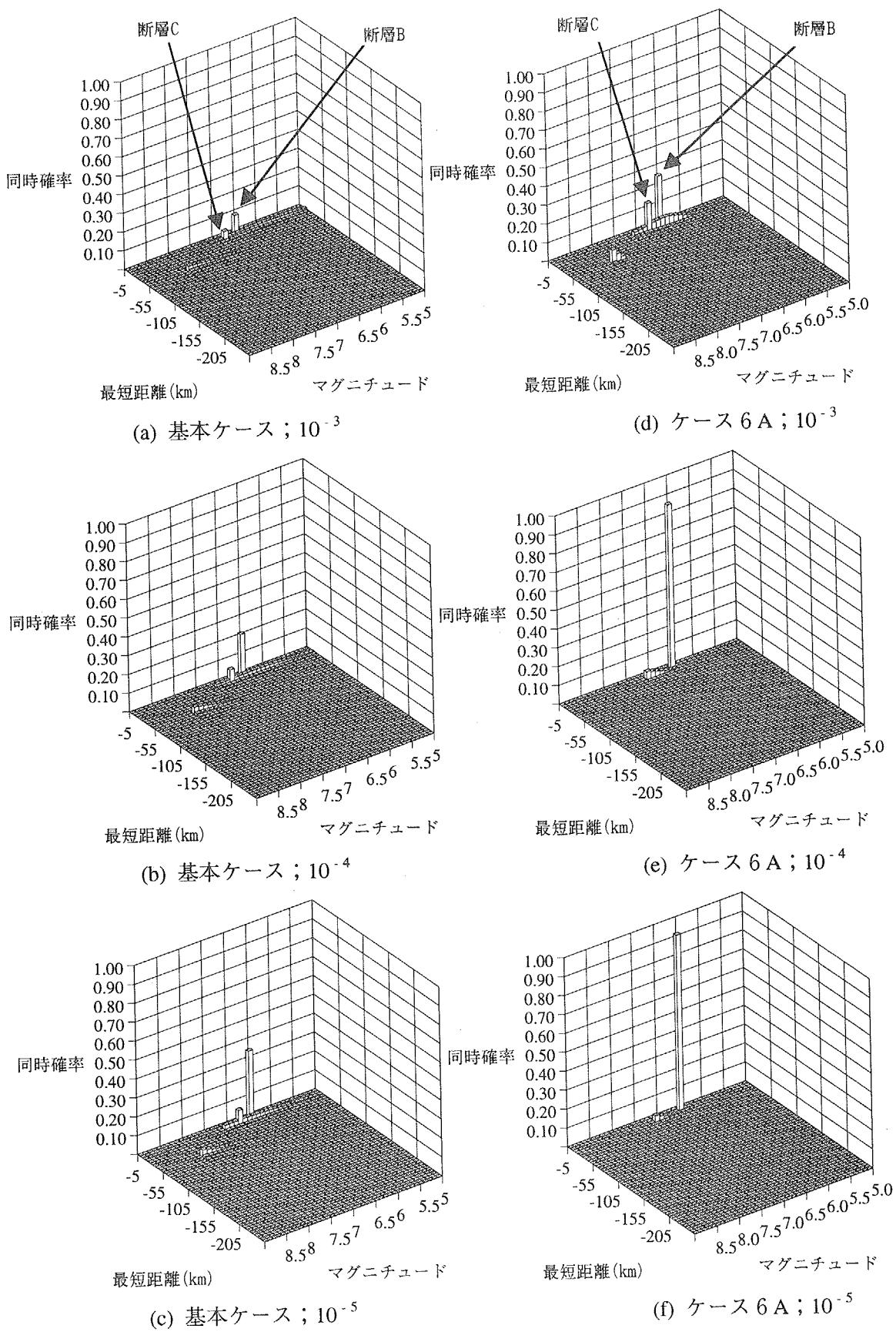


図 4.2.2-27 ケース 6 と基本ケースの同時確率

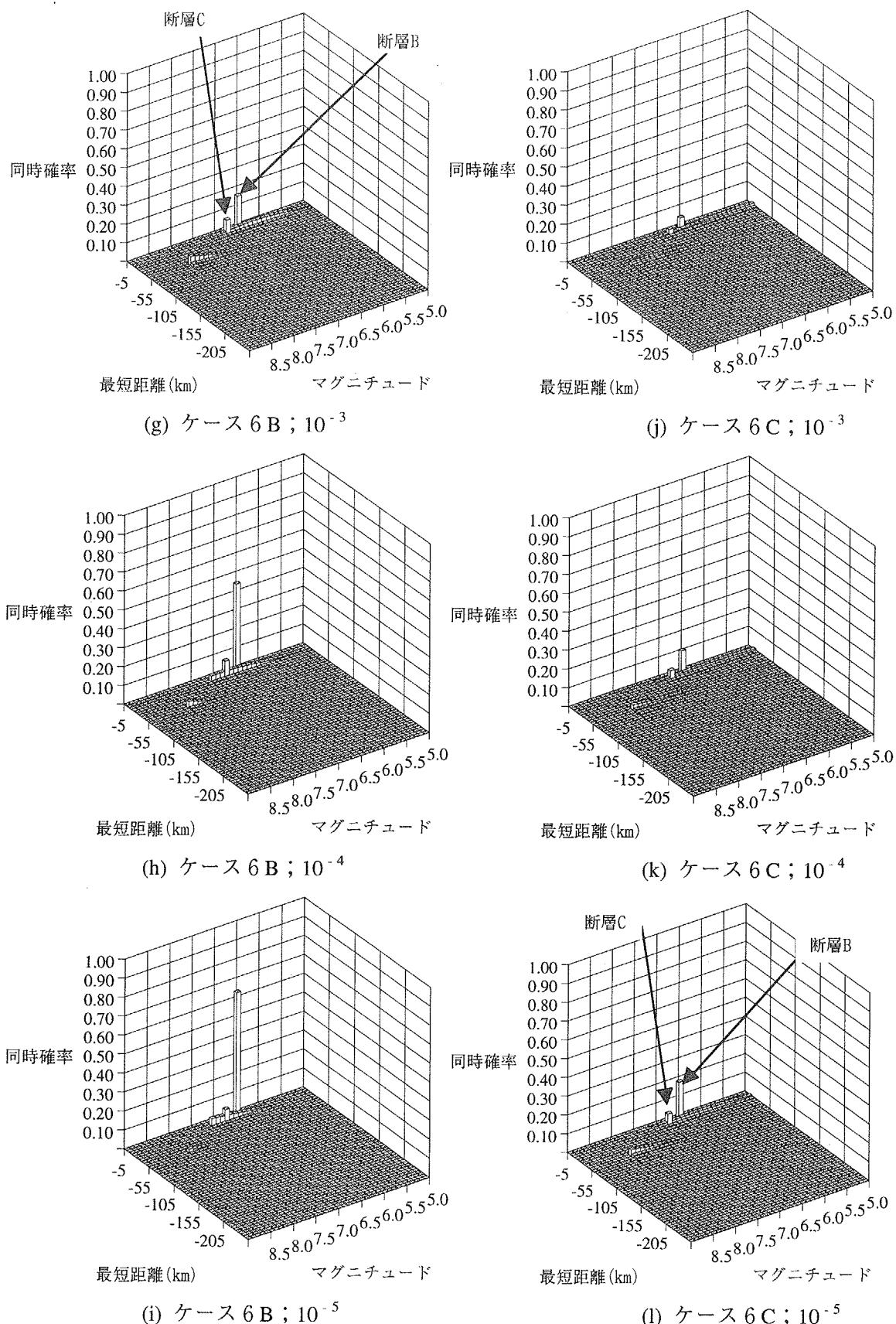


図 4.2.2-27 ケース 6 と基本ケースの同時確率 (つづき)

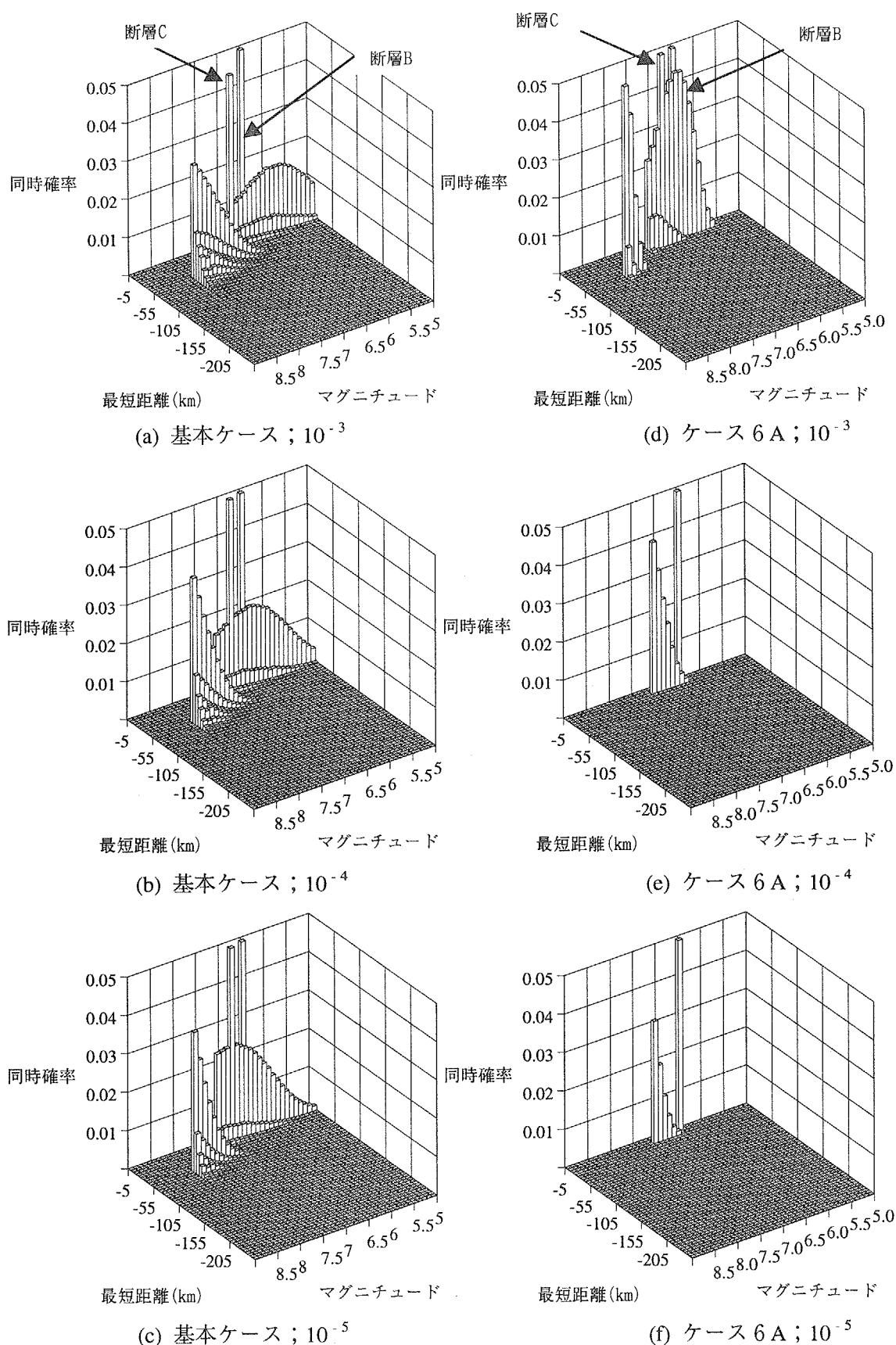


図 4.2.2-28 ケース 6 と基本ケースの同時確率（拡大）

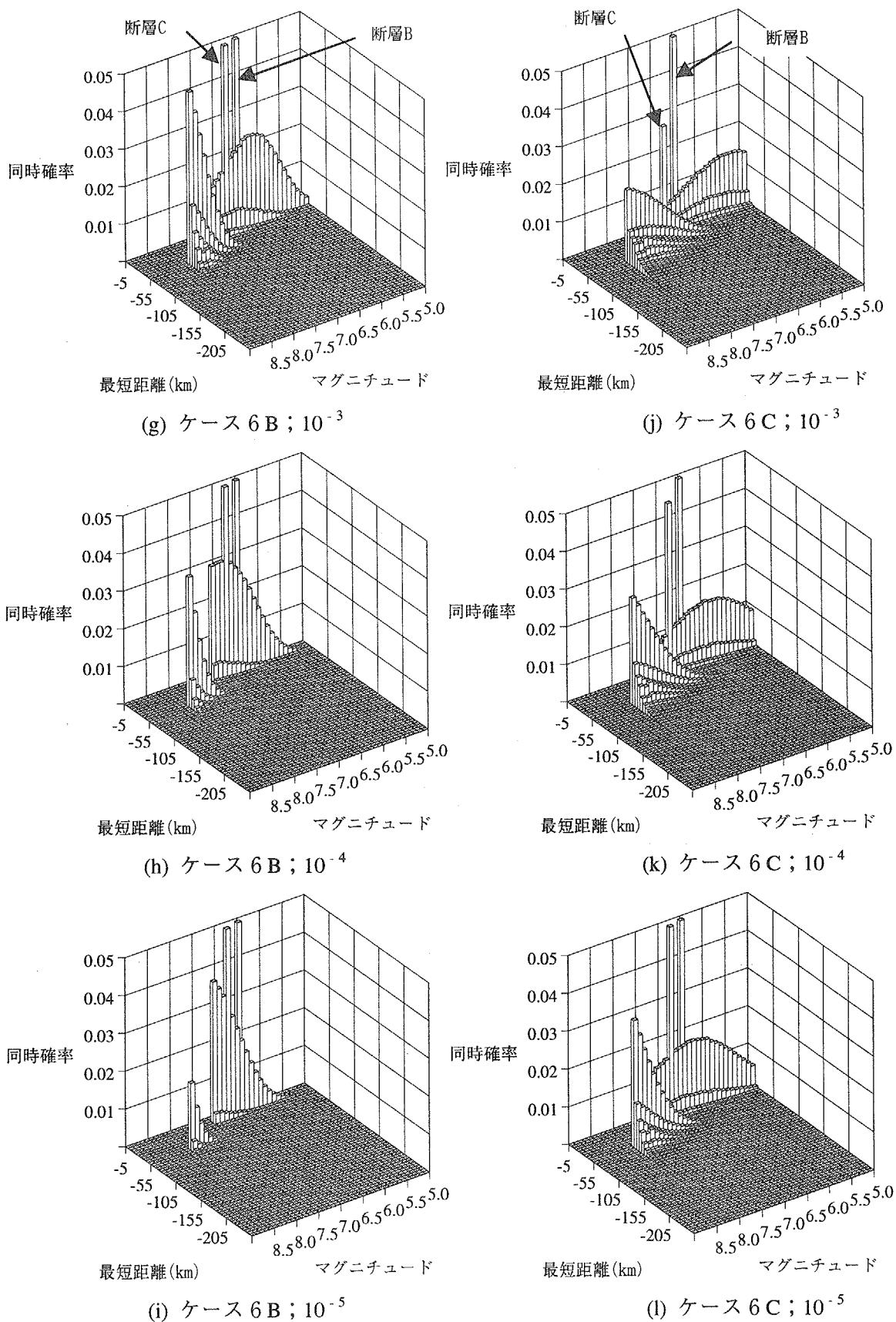


図 4.2.2-28 ケース 6 と基本ケースの同時確率（拡大；つづき）

表 4.2.2-20 ケース 6 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

(a) 地震域 6 および地震域 10

地震活断域		地震域6				地震域10			
		基本	6A	6B	6C	基本	6A	6B	6C
10^{-3}	貢献度(%)	43.2	15.6	33.9	49.0	39.9	46.9	42.2	36.5
	M^*	7.6	7.9	7.7	7.4	6.1	6.5	6.3	5.9
	$R^*(\text{km})$	52.9	46.9	50.1	55.4	14.3	12.6	13.4	15.4
10^{-4}	貢献度(%)	31.7	0.0	13.1	42.0	39.9	13.3	35.6	38.9
	M^*	7.7	—	7.8	7.5	6.3	6.9	6.5	6.1
	$R^*(\text{km})$	51.0	—	48.4	53.4	13.4	11.7	12.6	14.4
10^{-5}	貢献度(%)	21.6	0.0	4.9	34.8	37.3	7.3	27.5	39.2
	M^*	7.7	—	7.8	7.6	6.4	6.9	6.7	6.2
	$R^*(\text{km})$	49.9	—	47.6	52.0	13.0	11.6	12.2	13.7

(b) 断層 C および断層 B

地震活断域		断層C				断層B			
		基本	6A	6B	6C	基本	6A	6B	6C
10^{-3}	貢献度(%)	3.5	11.5	5.7	2.2	9.7	26.1	17.0	5.4
	M^*	6.8	6.8	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	14.2	14.2	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7	7.7
10^{-4}	貢献度(%)	4.9	0.0	5.3	3.4	21.9	86.6	45.8	11.6
	M^*	6.8	—	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	14.2	—	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7	7.7
10^{-5}	貢献度(%)	5.1	0.0	3.2	4.3	35.3	92.7	64.4	19.3
	M^*	6.8	—	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5	6.5
	$R^*(\text{km})$	14.2	—	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7	7.7

表 4.2.2-21 ケース 6 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

(a) 基本ケースの想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(b) ケース 6 A の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (500Gal)	地震域10	6.5	12.6	46.9
	断層B	6.5	7.7	26.1
	地震域6	7.9	46.9	15.6
10^{-4} (720Gal)	断層C	6.8	14.2	11.5
	断層B	6.5	7.7	86.6
10^{-5} (820Gal)	地震域10	6.9	11.7	13.3
	断層B	6.5	7.7	92.7

(c) ケース 6 B の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (600Gal)	地震域10	6.3	13.4	42.2
	地震域6	7.7	50.1	33.9
	断層B	6.5	7.7	17.0
10^{-4} (920Gal)	断層B	6.5	7.7	45.8
	地震域10	6.5	12.6	35.6
	地震域6	7.8	48.4	13.1
10^{-5} (1240Gal)	断層B	6.5	7.7	64.4
	地震域10	6.7	12.2	27.5

(d) ケース 6 C の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (1220Gal)	地震域6	7.4	55.4	49.0
	地震域10	5.9	15.4	36.5
10^{-4} (2260Gal)	地震域6	7.5	53.4	42.0
	地震域10	6.1	14.4	38.9
	断層B	6.5	7.7	11.6
10^{-5} (3800Gal)	地震域10	6.2	13.7	39.2
	地震域6	7.6	52.0	34.8
	断層B	6.5	7.7	19.3

(8) ケース 7 の結果

ケース 7 A (ばらつきの範囲: $\pm 3\%$) およびケース 7 B ($\pm 2\%$) の結果を以下の図表に示し、基本ケース（全領域）の結果と比較する。

・地震危険度曲線	:	図 4.2.2-29
・参照確率を変化させたときの加速度値	:	表 4.2.2-22
・貢献度曲線	:	図 4.2.2-30
・マグニチュードと距離の同時確率	:	図 4.2.2-31
・マグニチュードと距離の同時確率（拡大）	:	図 4.2.2-32
・主な地震活動域の貢献度・ $M^* \cdot R^*$:	表 4.2.2-23
・確率論的想定地震の諸元	:	表 4.2.2-24

参照確率が 10^{-3} 以下において、図 4.2.2-29 に示した基本ケース、ケース 7 A およびケース 7 B の地震危険度曲線には、比較的大きな格差が生じることがわかる。また、表 4.2.2-22 から、参照確率の値を $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ としたときの加速度の最大値と最小値の差は、それぞれ 120Gal、260Gal、540Gal となることがわかる。

図 4.2.2-30 に示した貢献度曲線から、参照確率が小さくなるにしたがって各ケースとも、断層 B に対するビンの同時確率が大きくなる傾向があることがわかる。また、同じ値の参照確率に対して、地震動強度の上下限が無制限の場合（基本ケース）、 3% （ケース 7 A）および 2% （ケース 7 B）それぞれの場合の順に、断層 B に対するビンの同時確率の値が大きくなることがわかる。

図 4.2.2-32 に示した同時確率の拡大図から、地震動強度の上下限に関する制約を厳しくするにしたがい、地震域 6 および地震域 10 に対応する同時確率の分布領域は狭くなることがわかる。

表 4.2.2-23 に示した貢献度、ハザード適合マグニチュードおよびハザード適合距離について、地震域 6 および地震域 10 での値には、それほど大きな格差は生じないことがわかる。

表 4.2.2-24 から、各ケースの想定地震は、互いに類似する傾向があることがわかる。ただし、上下限の制約をきびしくするにしたがい、選定される地震およびその貢献度は、断層 B の影響が強くなることがわかる。特に、参照確率が 10^{-5} のとき、基本ケースでは、地震域 10、断層 B、地震域 6 の順に選ばれこれらの貢献度は概ね同程度である。一方、ケース 7 B では、断層 B に対する地震の貢献度が 82.4% となっており、これが支配する度合いが強くなっていることがわかる。

以上を整理すると、地震危険度曲線および想定地震諸元は、距離減衰式の上下限に比較的大きく影響されることがわかる。

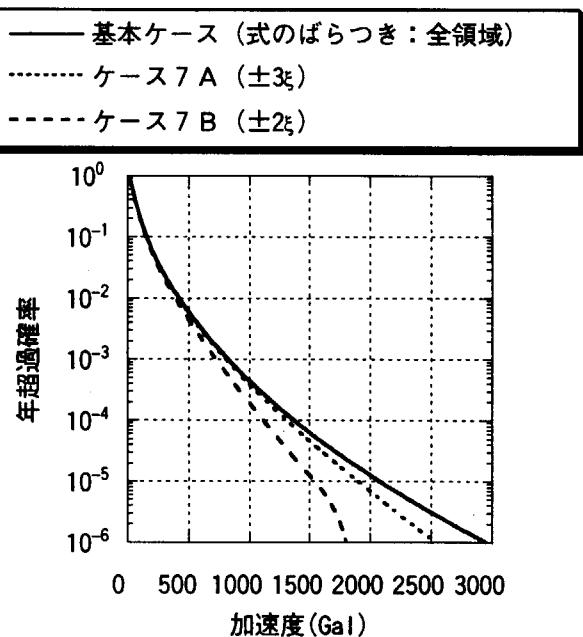
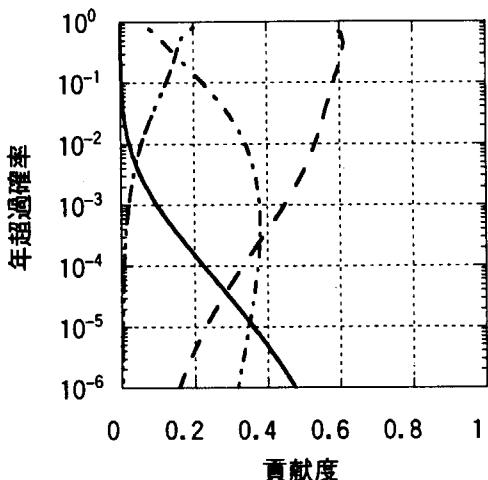
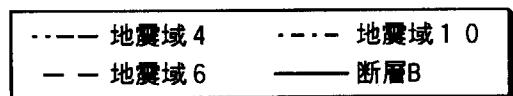


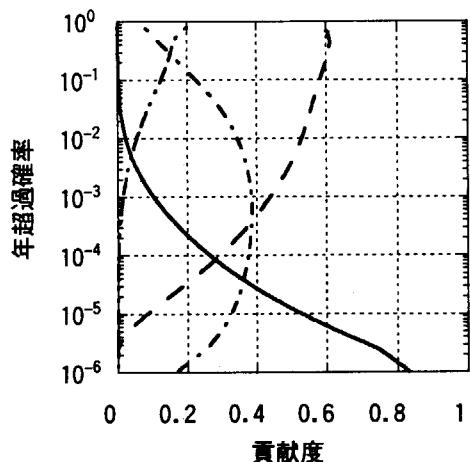
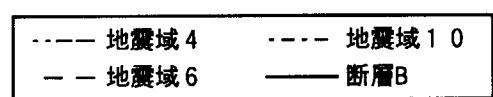
図 4.2.2-29 ケース 7 の地震危険度曲線

表 4.2.2-22 ケース 7 の各参照確率に対する加速度値

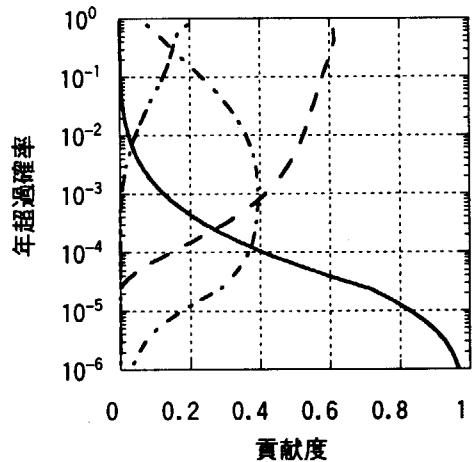
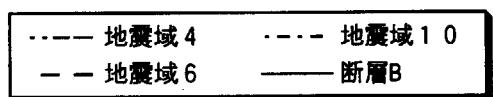
参照確率	基本ケース	ケース7A	ケース7B	最大-最小
10^{-3}	840	800	720	120
10^{-4}	1380	1320	1120	260
10^{-5}	2080	1900	1540	540



(a) 基本ケースの貢献度



(b) ケース 7 A の貢献度



(c) ケース 7 B の貢献度

図 4.2.2-30 ケース 7 と基本ケースの貢献度曲線

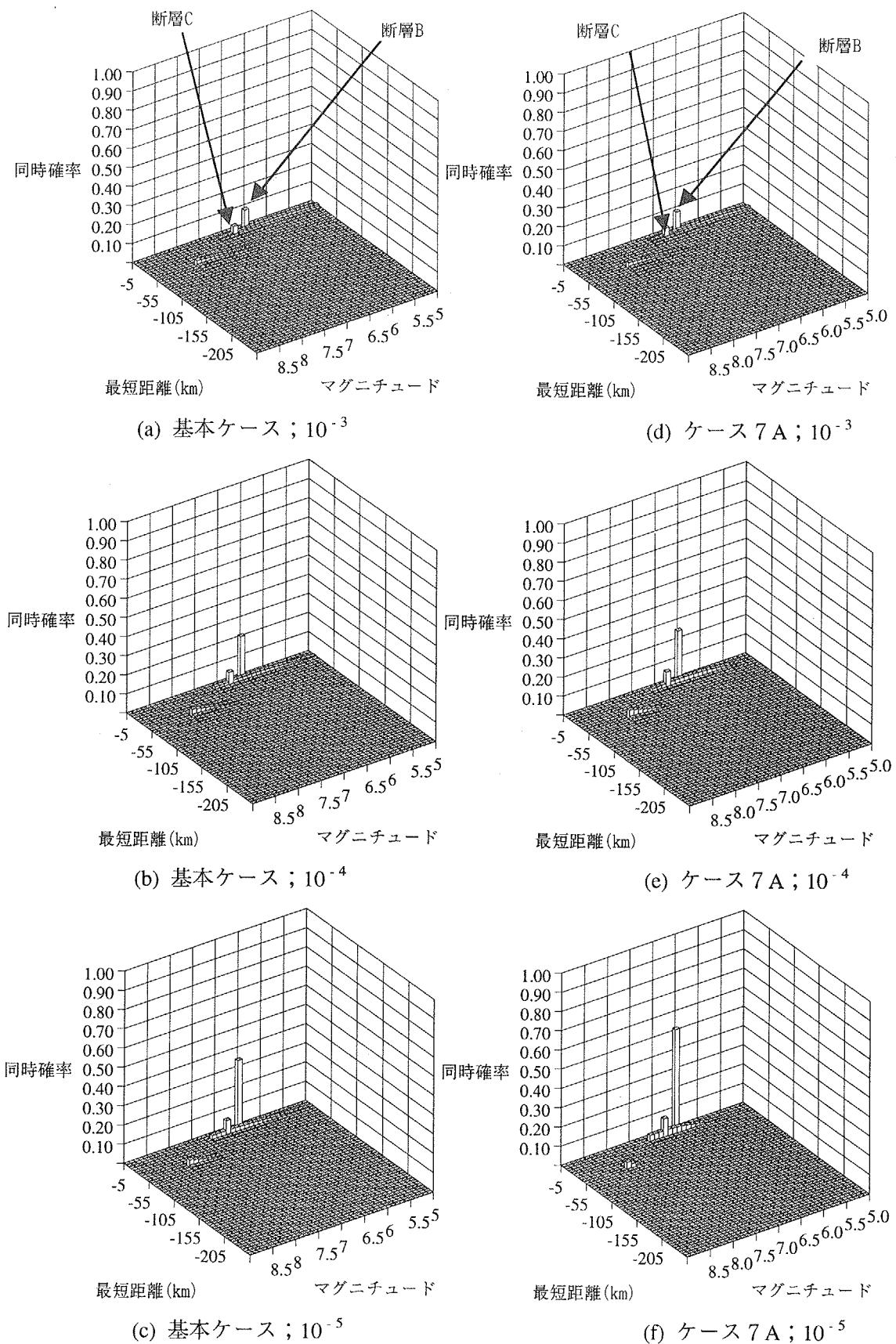


図 4.2.2-31 ケース 7 と基本ケースの同時確率

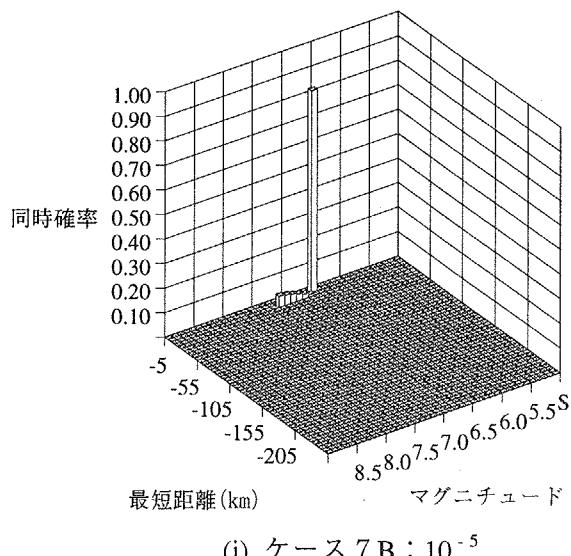
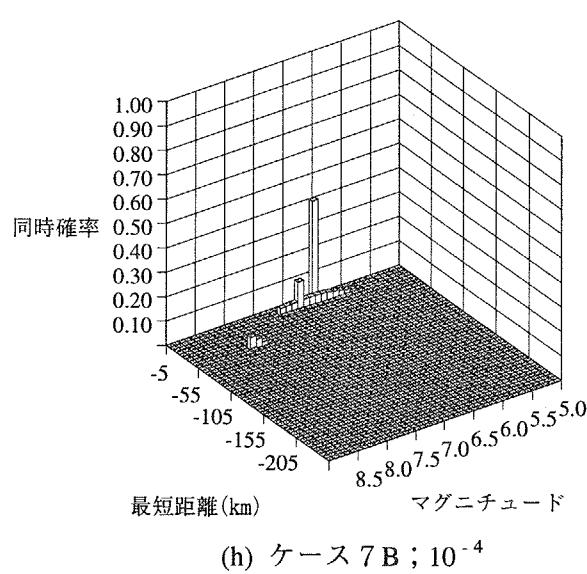
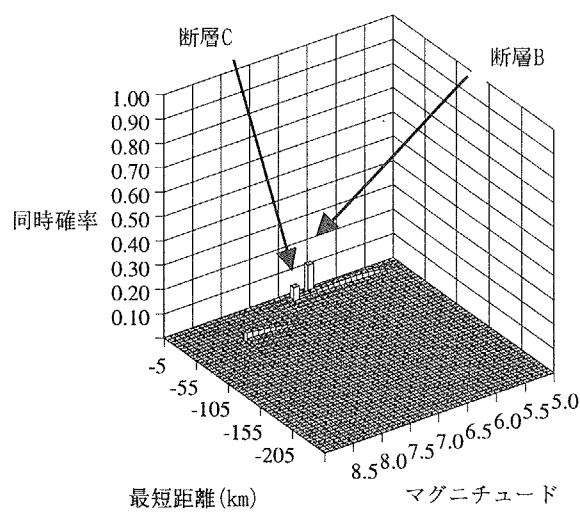


図 4.2.2-31 ケース 7 と基本ケースの同時確率 (つづき)

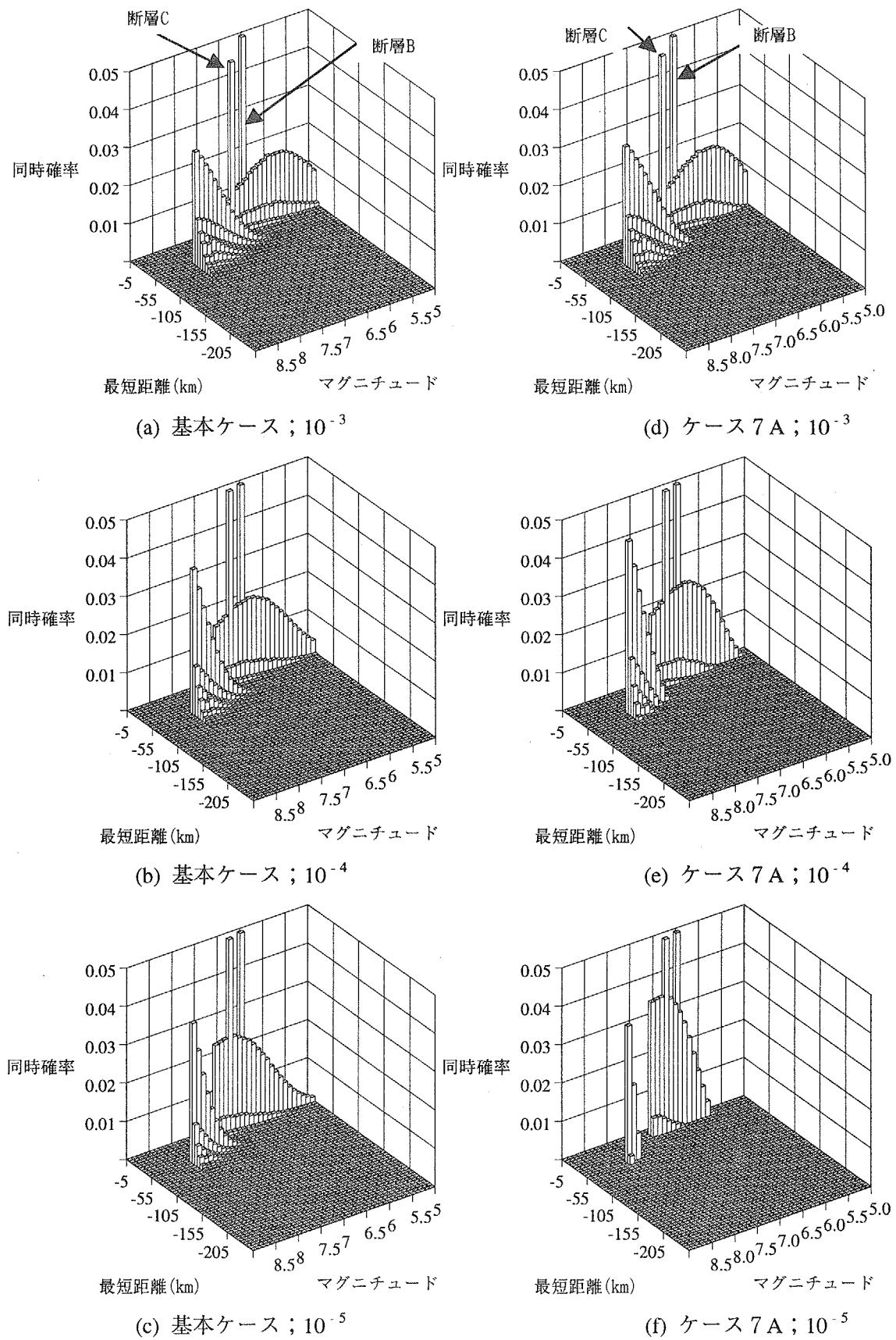


図 4.2.2-32 ケース 7 と基本ケースの同時確率（拡大）

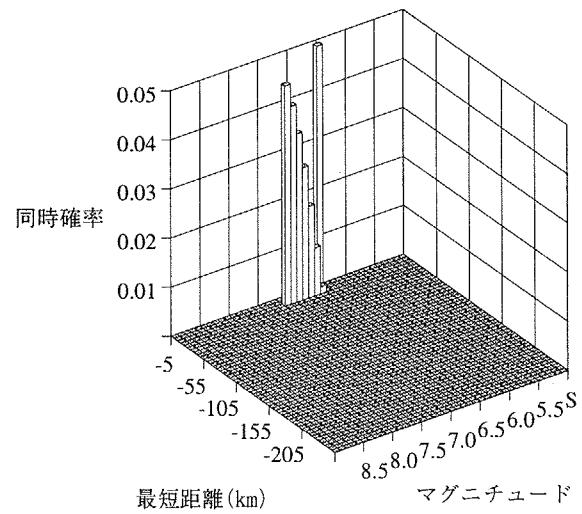
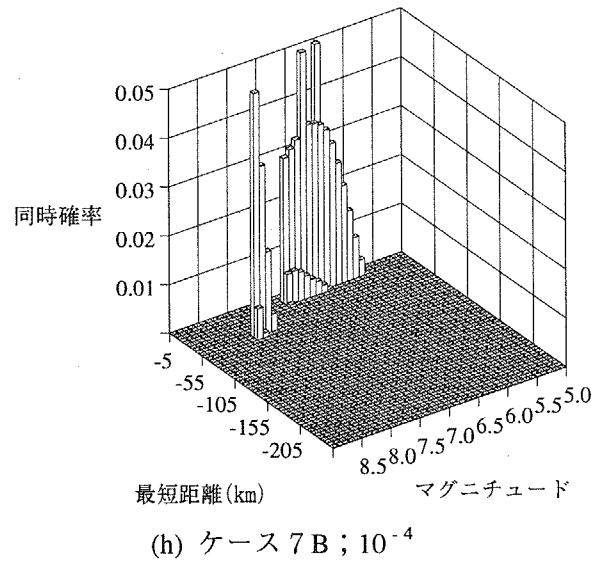
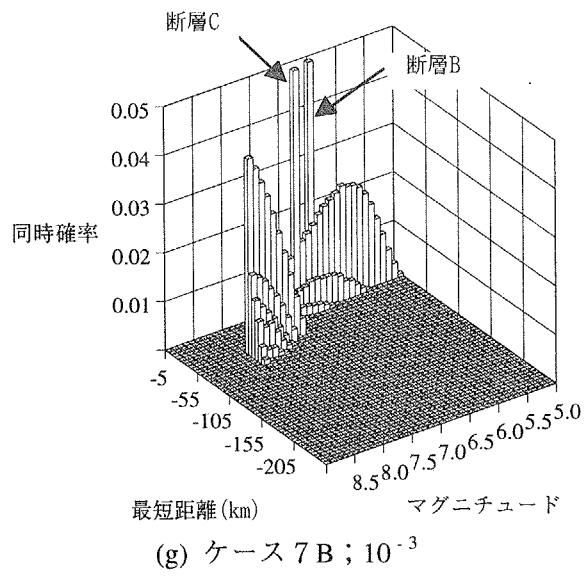


図 4.2.2-32 ケース 7 と基本ケースの同時確率（拡大；つづき）

表 4.2.2-23 ケース 7 と基本ケースの主な地震活動域の貢献度・
ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離

地震活断域		地震域6			地震域10			断層C			断層B		
		基本	7A	7B	基本	7A	7B	基本	7A	7B	基本	7A	7B
10^{-3}	貢献度(%)	43.2	43.0	39.9	39.9	40.7	42.1	3.5	3.6	4.7	9.7	9.7	11.9
	M^*	7.6	7.6	7.7	6.1	6.1	6.2	6.8	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5
	$R^*(km)$	52.9	52.3	50.5	14.3	14.1	13.6	14.2	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7
10^{-4}	貢献度(%)	31.7	27.0	11.4	39.9	40.4	39.5	4.9	5.9	7.9	21.9	26.2	41.1
	M^*	7.7	7.8	7.9	6.3	6.4	6.6	6.8	6.8	6.8	6.5	6.5	6.5
	$R^*(km)$	51.0	49.2	46.7	13.4	13.0	12.5	14.2	14.2	14.2	7.7	7.7	7.7
10^{-5}	貢献度(%)	21.6	6.4	0.0	37.3	34.8	17.6	5.1	6.1	0.0	35.3	52.6	82.4
	M^*	7.7	7.9	—	6.4	6.6	6.9	6.8	6.8	—	6.5	6.5	6.5
	$R^*(km)$	49.9	46.4	—	13.0	12.3	11.7	14.2	14.2	—	7.7	7.7	7.7

表 4.2.2-24 ケース 7 と基本ケースの確率論的想定地震諸元

(a) 基本ケース

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (840Gal)	地震域6	7.6	52.9	43.2
	地震域10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	地震域10	6.3	13.4	39.9
	地震域6	7.7	51.0	31.7
	断層B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	地震域10	6.4	13.0	37.3
	断層B	6.5	7.7	35.3
	地震域6	7.7	49.9	21.6

(b) ケース 7 A の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (800Gal)	地震域6	7.6	52.3	43.0
	地震域10	6.1	14.1	40.7
10^{-4} (1320Gal)	地震域10	6.4	13.0	40.4
	地震域6	7.8	49.2	27.0
	断層B	6.5	7.7	26.2
10^{-5} (1900Gal)	断層B	6.5	7.7	52.6
	地震域10	6.6	12.3	34.8

(c) ケース 7 B の想定地震諸元

参照確率	地震活動域	M^*	$R^*(\text{km})$	貢献度(%)
10^{-3} (720Gal)	地震域10	6.2	13.6	42.1
	地震域6	7.7	50.5	39.9
	断層B	6.5	7.7	11.9
10^{-4} (1120Gal)	断層B	6.5	7.7	41.1
	地震域10	6.6	12.5	39.5
	地震域6	7.9	46.7	11.4
10^{-5} (1540Gal)	断層B	6.5	7.7	82.4
	地震域10	6.9	11.7	17.6

4.2.3 検討結果の考察と今後の検討課題

はじめに、前項の感度解析結果をもとに、それぞれの項目の地震危険度曲線および想定地震に対する感度を考察する。

地震危険度曲線において、年超過確率が一定のときの基本ケースと各感度解析ケースの加速度値の幅(複数のパラメータを設定したケースについては基本ケースも含めた最大値と最小値の幅) ΔA に注目する。この値を不確実さの指標として感度を考察する。ここでは、参照確率を 10^{-5} としたときの ΔA を比較し、次のような感度の度合いを設定する。

$\Delta A \leq 100\text{Gal}$:	小
$100\text{Gal} < \Delta A \leq 600\text{Gal}$:	中
$600\text{Gal} < \Delta A$:	大

以上によって判定される地震危険度曲線の感度の度合いを、表 4.2.3-1 に示す。同表から、以下の事項が考察できる。

- ・ 地震発生に関する項目（ケース 1～3）に対して、地震危険度曲線はあまり敏感でない。
- ・ 地震伝播に関する条件（ケース 4～7）に対して、地震危険度曲線は敏感である。

次に、想定地震の貢献度および地震諸元（ハザード適合マグニチュードおよびハザード適合距離）に関する感度を考察した結果を表 4.2.3-1 に示す。なお、ここでも参照確率が 10^{-5} の場合の結果を対象としている。表 4.2.3-1 の考察結果を要約すると、以下のようになる。

- ① 「断層 A の長さ」および「海底活断層」に対して、確率的想定地震の貢献度および諸元は鈍感である。
- ② 「距離減衰式のばらつき」に対して、貢献度および諸元とも敏感である。
- ③ 一般に、地震危険度曲線には、選定された距離減衰式によって大きな差異が生じる。しかし、想定地震の諸元には、それほど大きな差異は生じない傾向がある。

従来より、距離減衰式の選定が地震危険度曲線に対して強く影響することは知られていたが、想定地震の諸元に着目して見た場合にはその影響がさほど大きないとする上記③は、非常に興味深い結果である。

次に、不確実さを考慮した評価手法について、今後の検討課題を整理する。

確率論的危険度および想定地震を評価するために、結果の統計処理をおこなう必要がある。そのために、ロジックツリー(LT)の利用が有効である。このとき、LT の分岐や各分岐の選択肢（パラメータ）を機械的に設定すると、全分岐に対する各パラメータの組合せは膨大となる。その結果、計算コストを増大しかつ結果全体の特性を理解することが困難になると予想される。これを防ぐために、以上で考察したような感度解析の結果を利用して、可能な限り LT を単純化するこ

とが望まれる。

本感度解析に基づいて LT の分岐を作成する場合、例えば、次の仮定を導入することが可能である。

- ・本来、距離減衰式のばらつきは、式の算定の際に得られるものである。したがって、「距離減衰式」および「距離減衰式のばらつき」に関しては、両者を独立に変動させるのではなく組合せて考えた分岐を設定する。
- ・「断層 A の長さ」および「海底活断層」は、地震危険度曲線および想定地震に与える影響が小さいため、これらに関する分岐を無視する。
- ・「地震動強度の指標」は、本来、対象とする構造物の特性に対して設定する条件であり、LT の分岐としては設定しない。

以上の仮定を考慮し、全般的な感度が大きいと思われる条件項目の順に分岐を設定すると、例えば図 4.2.3-1 に示すような LT が得られる。図 4.2.3-1 の分岐項目を基にすると、図 4.2.3-2 に示すような LT の例が得られる。なお、図 4.2.3-2 の各分岐において、破線枠で囲まれパラメータに対しても下位の分岐が存在する。

以上の考察は、特定のサイトに関するものであるが、一般のサイトでも危険度評価の前段階でこうした危険度解析を行なって、重要な不確実さ因子の選定を行なう方法は有効であろう。

不確実さを考慮した検討をおこなうには、この LT に選択肢およびその重みを設定する必要がある。そのためには、専門化の意見を反映させる方法が有効である。地震危険度評価において、専門化の意見を利用する標準的な手法は、既に提案されている。しかし、個々のサイトにその手法を適用するとき、サイトの特性を考慮したうえで専門化の意見を反映させる必要がある。さらに、専門化の意見によって確率論的想定地震を評価にした事例はほとんどない。これらの事項は今後の検討課題となる。

表 4.2.3-1 地震危険度および想定地震に対する感度

地震発生に関する評価条件			
解析ケース	地震危険度曲線	貢献度/地震諸元	考察
① 双葉断層の断層長さ	小	変動は小さいが、全長を考慮すると参照確率 10^{-5} で、断層Aの貢献度約16%に増加。	断層Aの断層長さの差異による影響は小さい。
② 海底活断層の考慮	小	地震諸元、貢献度ともに変化なし。	海底活断層の有無による差異は、僅少で無視し得る。
③ 最大マグニチュード	小	M_{max} の値を変更した地震域6の貢献度が低下し、参照確率 10^{-5} では5%未満となる。	M_{max} の設定は、想定地震の諸元に影響する。
地震伝播に関する評価条件			
解析ケース	地震危険度曲線	貢献度/地震諸元	考察
④ 地震動強度の指標	大	評価指標の差異は周波数特性を表しており、貢献度、地震諸元が大きく変化する。長周期では遠距離地震が卓越。	地震動の周波数特性に応じて、想定地震の諸元、貢献度は変化する。
⑤ 距離減衰式の選定	中	概ね同一の傾向である。但し、参照確率 10^{-5} では、地震域6の貢献度が低下し、距離減衰式の特性の差異による影響が見られる。	式の差異による影響は、地震危険度曲線の場合より貢献度/地震諸元の方が小さい。
⑥ 距離減衰式のばらつき	大	対数標準偏差 σ が減少するほど、近距離の活断層の貢献度が増加し、地震域6など遠距離地震域の貢献度が低下する傾向を示す。	近距離の地震と、遠距離の地震を比較すると、後者の方がばらつきの裾の部分の寄与が大きい。
⑦ 距離減衰式の上限設定（考慮するばらつきの範囲）	中	上限設定を減少させるほど、近距離の活断層の貢献度が増加し、地震域6など遠距離地震域の貢献度が低下する傾向を示す。	同上

〔備考〕

地震危険度曲線の感度については、以下に示す判定の目安に基づいて大中小で表現した。

参照確率 10^{-5} において

小： 100gal 未満

中： 100～600gal

大： 600gal より大

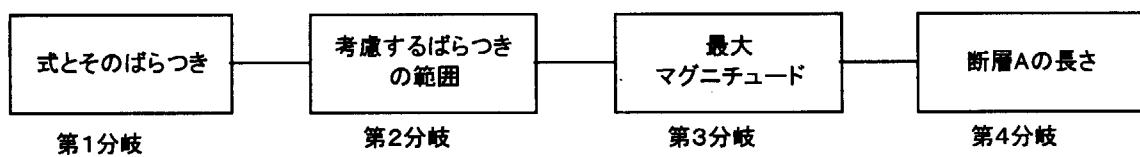


図 4.2.3-1 ロジックツリーの分岐の例

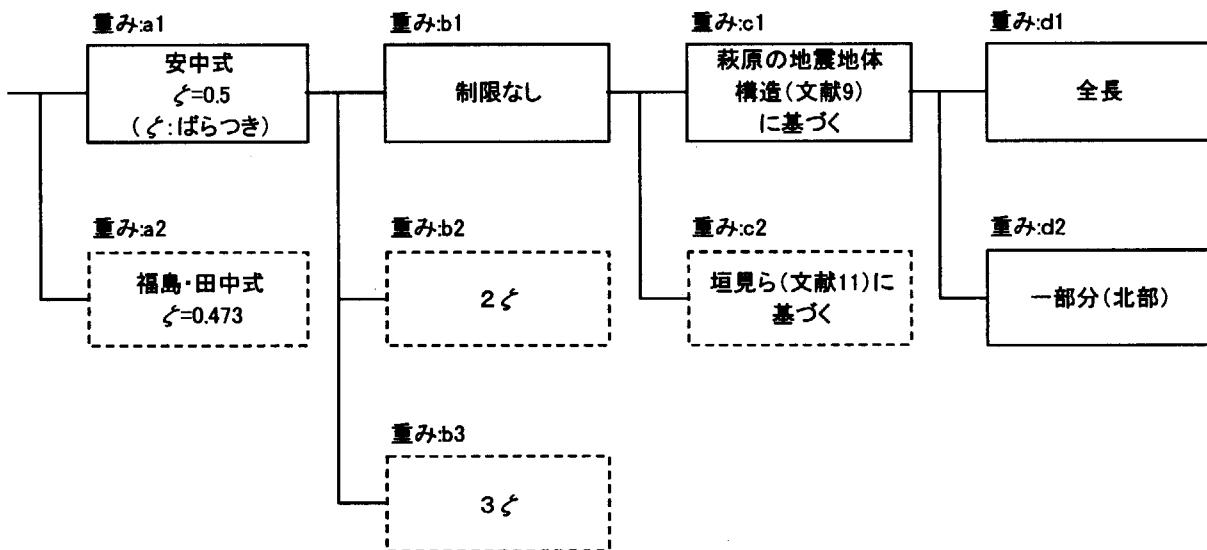


図 4.2.3-2 ロジックツリーの例

4.3 想定地震設定法の設計への適用上の課題

前項の感度解析結果に示すように、地震危険度評価および想定地震に関する評価には、不確実さを伴う。このような不確実さを定量的に予測し得れば、設計適用への路が開かれることとなる。このように評価には不確実さを伴うことを考慮にいれながら、確率論的想定地震の設計への適用について次の2つの観点から検討する。

- ① 確率論的想定地震と現行耐震設計指針との関係
- ② 今後の設計への適用上の課題

4.3.1 確率論的想定地震と現行耐震設計指針との関係

決定論的手法に基づき現行耐震設計指針で定めている基準地震動の概念と、確率論的手法に基づき設定される確率論的想定地震の概念との関係を示したフロー図を図4.3-1に示す。

確率論的想定地震は、参照確率に対してサイトで考慮すべき地震諸元（規模、最短距離）を与えるものであるので、現行指針に基づき決定論的に定める手法と、設計上考慮すべき地震を選定するという点で強い関連性を有している。このことは、確率論的手法に基づき、新たなサイトにおける想定地震を選定する方法に転換できることを示唆しているとともに、現行指針による決定論的手法に基づく基準地震動の選定結果を確率論の観点から再評価する手段ともなり得ることを示唆している。但し、サイト近傍のどこで発生するかを事前に予測することが不可能な地震については、ランダム地震域を設定することで評価し得ることが確認されたが、その結果に基づいて設計に用いる地震諸元を設定する場合には、マグニチュードの上限の設定に関して2000年10月に発生した鳥取県西部地震に対する震源域の現地調査の中間報告¹⁵⁾に見られるように、地表では不連続な地震断層の分布しか確認できない状況もあるので、さらに工学的な配慮を必要とする検討の余地が残されている。

次に、設定した想定地震の結果が、与えられた参照確率に対する地震諸元（規模、最短距離）で表現されることは、サイトに将来発生することが予想される具体的な地震像を得る上で理解が得られ易い。本モデルサイトの結果では、周波数特性の異なる複数の想定地震が貢献度に対する寄与が大きいことが定量的に示され、設計上考慮すべき地震として選定されることも特徴である。但し、本検討では貢献度10%以上の場合を想定地震としたが、有意とする貢献度の下限値の設定については今後の課題である。

現行指針では、選定された設計で考慮すべき地震の諸元から、距離減衰式の平均値に基づいて設計用地震動が設定されている。しかしながら確率論的想定地震から設計用地震動を作成する方法については、不確実さによる影響が大きいので今後の検討課題であり、その詳細については後述の4.3.2節(3)項に示す。

4.3.2 今後の設計への適用上の課題

確率論的想定地震設定法の今後の設計への適用に向けて抽出した検討課題の結果を、図4.3-2の確率論的想定地震の設計に関する検討フローの中に示す。

- (1) 参照確率の設定

この検討課題は、確率論的想定地震と現行指針で定める S_1 地震、 S_2 地震との関連を検討する際、どのようにして参照確率を設定するかということである。参照確率の設定は、地震の再来期間をどこまで考慮するかという設計上考慮すべき地震の基本的考え方と密接な関係を有する課題である。またその際、距離減衰式の評価指標として最大加速度のみならず応答スペクトルをも含めて考慮する必要がある。

(2) 詳細な震源断層のモデル化

活断層等震源を特定できる地震のうち大きな影響が予想されるものについては、詳細な震源断層のモデル化を行い、不均一・非一様な断層破壊過程に基づく検討を行い、直接震源近傍の入力地震動（水平、鉛直）まで評価する方法が最近の研究¹⁴⁾で得られており、その設計への適用を検討する必要がある。

(3) 設計地震動の評価

耐震設計に用いる入力地震動としては、例えば加速度時刻歴のような設計用時刻歴波を求める必要がある。しかしながら、確率論的手法に基づいて設計用地震動を作成する方法については不確実さの影響が大きく介在して來るので、その取り扱いが検討課題となっている。

(a) 設計地震動時刻歴波に求められる要件

現行指針において設計地震動は、i)地震動強さ ii)地震動の周波数特性 iii)継続時間と経時的変化の 3 要素に基づいて定義するとされている。このうち地震動の周波数特性と、継続時間及び経時的変化との関係には相関がある。即ち、近距離で発生した地震は、短周期成分が卓越し継続時間も短くなる特性があるのでに対して、遠距離で発生した地震は、長周期成分が卓越し継続時間も長く、振幅の大きな波形が数多く繰り返される経時変化を示す特性がある。したがって、構造物や機器が有する固有周期の大小に応じて、短周期成分の応答に対して鋭敏なものと長周期成分の応答に対して鋭敏なものとに大別される。また地震時の動的機能維持が要求される機器については、近距離地震動と遠距離地震動とでは地震時の挙動が異なってくるので、加速度、変位、衝撃力など評価対象となる物理量や対象部位に応じて評価が異なる。さらに、累積疲労が問題となる構造物については、地震動強さとその繰返し数に耐力評価が大きく左右される。

したがって、耐震安全性の評価に用いられる地震動は対象とする構造物や機器に応じて、上記に述べたような設計地震動時刻歴波に求められる多岐にわたる要件を考慮して設定される必要がある。このことは、必ずしも地震動強さが大きく、広帯域の周波数特性をもち、継続時間の長い地震動が、安全の観点から最適な設計地震動を与えるものとは限らないことを意味している。

(b) 設計地震動の検討手順

設計地震動を検討する手順は、想定地震に基づき設計地震動を作成する手順と詳細な震源断層モデルを用いて直接設計地震動を作成する手順に大別される。

① 想定地震に基づき設計地震動を作成する手順

最初に確率論的想定地震の設定法により想定地震諸元を求め、次にこの想定地震諸元に基づき設計地震動の作成する手順である。この手順は、想定地震の設定に距離減衰式を用いる

ので、広範囲の多様な地震活動様式に対して適用が容易であり、また距離減衰式の選定の差異に対し地震危険度には大きい不確実さが生ずるが、想定地震として得られる地震諸元（規模、距離）には大きい差異が現われないなどの特性を利用して、設計地震動を作成しようとする概念である。この概念に基づく方法としては、地震危険度と適合させて地震動強さを算定する方法や、震源近傍の地震活動域については、国内における震源近傍の観測データを集合した評価分析を行い、サイトに依存せず各サイトで共通して適用できる震源近傍用の評価モデルを作成し、このモデルを用いて地震動を作成する方法等が考えられる。

この課題については、我が国における地震活動の程度（サイスミシティ）の特徴、及び設計地震動の設定が建屋や機器の耐震裕度など対象プラント全体の安全性に与える影響の2つ観点から検討することが求められる。

② 詳細な震源断層モデルを用いて直接設計地震動まで作成する手順

震源が特定できることを前提として、上記(2)項で述べたような詳細な震源断層モデルを用いて直接震源近傍の地震動まで算定する方法である。その際、評価に用いる断層パラメータの不確実さの取り扱いを明確にする必要があり、不確実さの評価については今後の検討課題である。

(4) 設計地震動の統合

設計に適用する地震動については、前述の図4.3-2に示すように距離減衰式を用いて広範囲の多様な地震活動様式に対して適用できる確率論的想定地震に基づき作成した設計地震動と、震源近傍の地震動については詳細な震源断層モデルを用いて直接設計地震動を算定した結果とを統合する方法が有効であると考えられる。

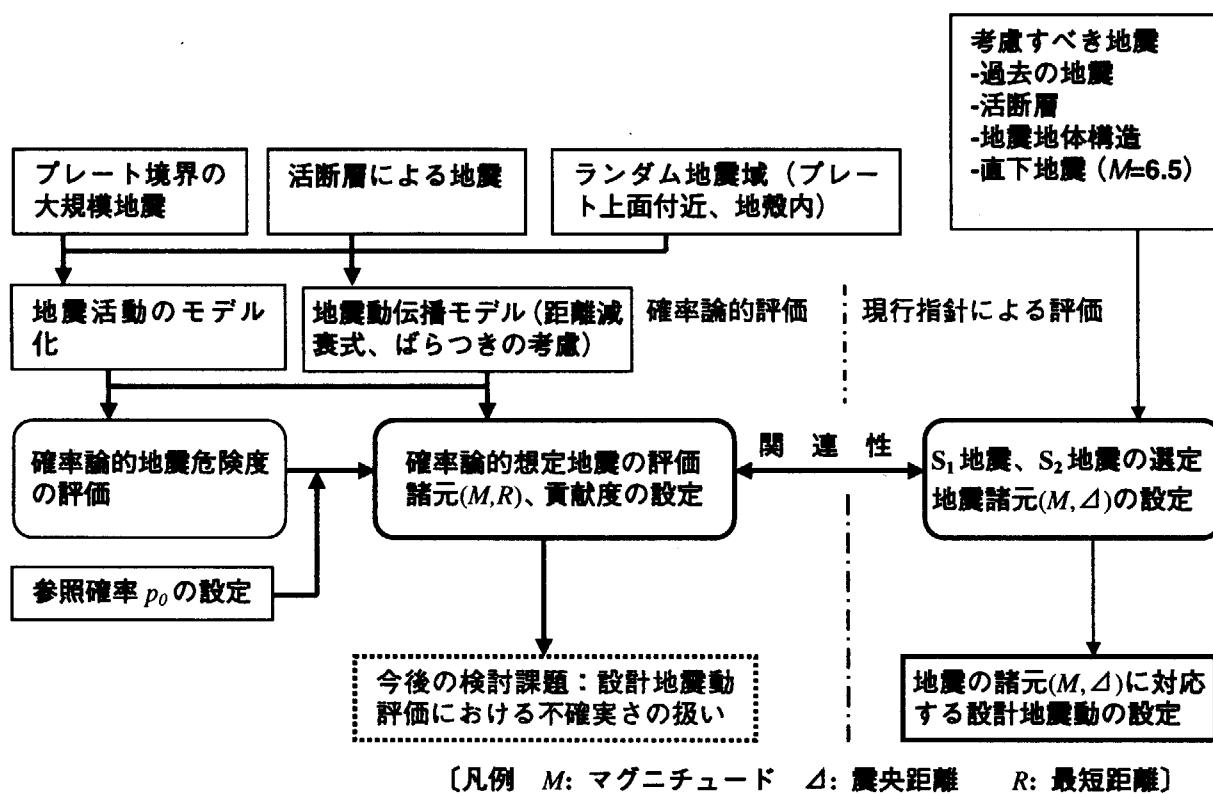


図 4.3-1 確率論的想定地震と現行耐震設計指針との関係

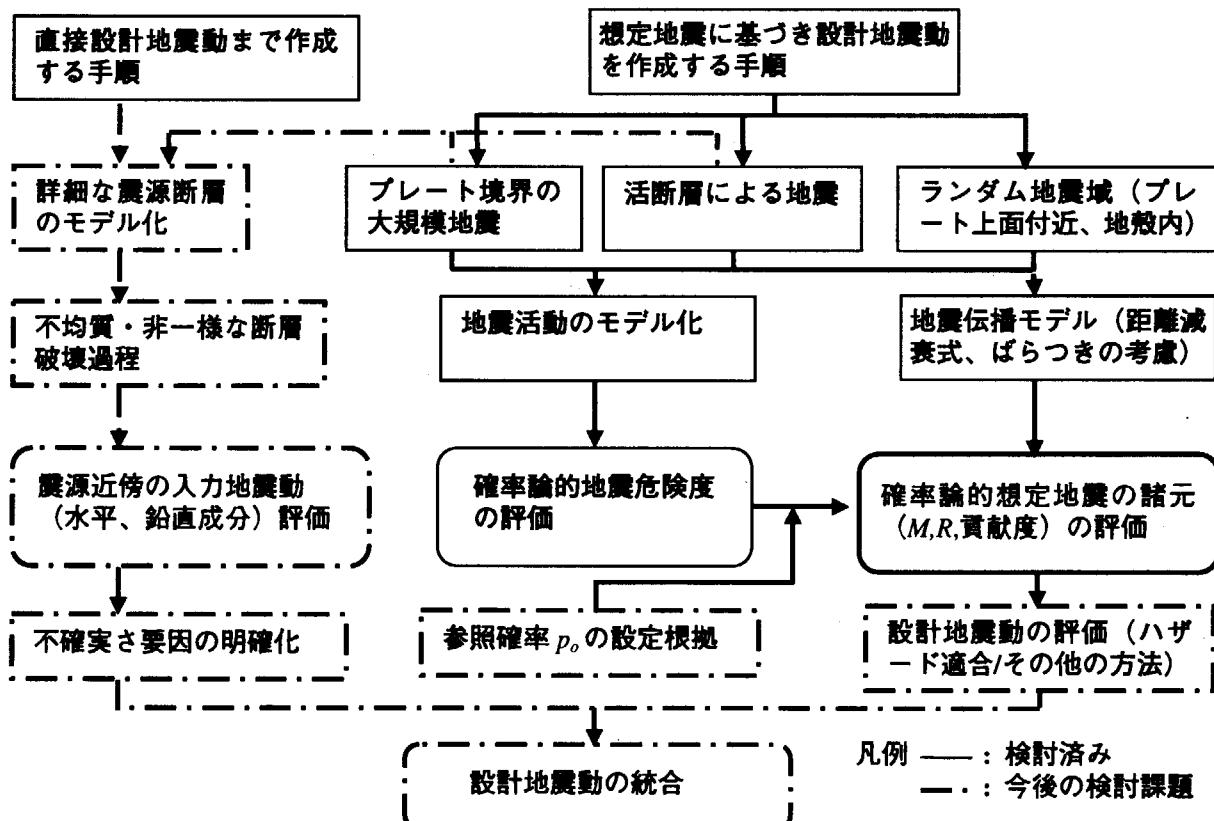


図 4.3-2 確率論的想定地震の設計への適用に関する検討フロー

4章の参考文献

- 1) Pacific Gas and Electric Company : Final Report of the Diablo Canyon Long-Term Seismic Program, U. S. Nuclear Regulatory Commission docket nos., 50-275 and 50-323, 1988.
- 2) Bernreuter, D. L. et al. : Seismic Hazard Analysis, Report NUREG/CR-1582, vols. 1-5, 1981.
- 3) Bernreuter, D. L., J. B. Savy, R. W. Mensing, and J. C. Chen : Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Plant Sites East of the Rocky Mountains, Report NUREG/CR-5250, vols. 1-8, 1989.
- 4) Electric Power Research Institute : Probabilistic Seismic Hazard Evaluations at Nuclear Power Plant Sites in the Central and Eastern United States : Resolution of the Charleston Earthquake Issue, EPRI Report NP-6395-D, 1989.
- 5) Senior Seismic Hazard Analysis Committee : Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis : Guidance on Uncertainty and Use of Experts, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 1, : Main Report, NUREG/CR-6372, August, 1995.
- 6) (財)原子力発電技術機構: 地震に係る確率論的安全性評価手法の整備(その6)に関する報告書, INS/CR-1112 M96-SE-P03, 1997.3.
- 7) (財)原子力発電技術機構: 地震に係る確率論的安全評価手法の整備(その1-2)に関する報告書=地震ハザード評価手法の整備=, INS/M97-17 M97-SE-P03, 1998.3.
- 8) (財)原子力発電技術機構: 地震に係る確率論的安全評価手法の整備(その1)=地震ハザードの試解析=に関する報告書, INS/M98-18, 1999.3.
- 9) 萩原尊禮編: 日本列島の地震—地震工学と地体構造—, 鹿島出版会, 1991.
- 10) 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講演論文集, pp. 161-164, 1997.7.
- 11) 垣見俊弘, 岡田篤正, 衣笠善博, 松田時彦, 米倉伸之 : 日本列島の地震地体構造区分と最大地震規模, 地球惑星科学関連学会, 1994 年合同大会予稿集, p. 302, 1994.3.
- 12) Fukushima, Y. and T. Tanaka : A New Attenuation of Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp. 1-11, 1991.
- 13) 福島美光 : 地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測, ORI 研究報告, pp. 93-07, 1994.3.
- 14) 入倉孝次郎 : 特定の活断層を起震断層とした強震動の評価手法, 第 2 回地震調査研究と地震防災工学の連携ワークショップ「地震動予測地図の作成に向けて—現状と今後の課題—」予稿集, 文部科学省, p.29, 及び当日配付資料, 2001.
- 15) 産業技術総合研究所活断層研究センター : 平成 12 年度に実施した活断層・地震断層調査の成果概要, 「2001 年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会」予稿集, 文部科学省, 2001.11.

5. まとめ

確率論的想定地震の設定法に関して実施した主な検討項目は、次のとおりである。

- ① 確率論的想定地震に関する評価手順の検討
- ② モデルサイトの想定地震設定に関する検討
- ③ 評価条件の不確実さに関する評価法の検討

①では、確率論的想定地震の基本的考え方、及び確率論的想定地震を国内の任意の地点を対象として設定する場合の一般的な評価条件の作成手順の検討として、評価条件の作成法の検討、想定地震諸元の解析手法の検討、および参照確率の設定に関する知見の調査を実施した。

評価条件の作成手順は、地震活動のモデル化と地震伝播モデルから構成される内容であり、また評価手法として米国 の方法及び石川らの方法を定式化した。

②では、モデルサイトを対象に地震発生モデルと地震伝播モデルに関する評価条件を検討した上で、石川らの概念に基づいて確率論的想定地震の諸元を評価した。解析結果として、設定した地震動強さの指標に対して、地震危険度曲線、貢献度曲線、マグニチュードと最短距離の寄与を表す同時確率、主な地震活動域に対する貢献度、ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離、及び貢献度 10%以上の確率論的想定地震の諸元を示した。

また、確率論的評価の結果得られた想定地震の諸元と、現行の耐震設計審査指針に基づき決定論的評価から想定される地震の諸元を比較検討した。

③では、評価条件の不確実さを考慮した検討を行なう上で標準的であると考えられる評価手法の調査、石川らの方法に基づいてモデルサイトを対象とした感度解析を行なった。

不確実さを考慮した評価方法の調査では、ランダム性に関する不確実さとモデル化に関する不確実さに大別し、このうち後者をさらに地震発生に係わる要因と地震伝播に係わる要因に分類して、不確実さ要因を抽出した。また、地震危険度評価における不確実さの評価方法について、米国及び我が国における研究動向を調査した。

評価条件の不確実さに関する感度解析では、不確実さに関する要因を地震発生モデルと地震伝播モデルに大別して解析パラメータを設定し、それらが地震危険度曲線および想定地震の貢献度や地震諸元に与える影響を検討した。

さらに本想定地震設定法の耐震設計への適用について、評価条件の設定には不確実さを伴なうことを前提とした上で、確率論的想定地震と現行耐震設計審査指針との関係、今後の設計への適用上の課題、計 2 つの観点から検討した。

6. 得られた成果

確率論的想定地震の設定に関して、本研究により得られた成果を以下に整理する。

(1) 確率論的想定地震に関する評価手順の検討

本検討では、(a)確率論的想定地震を評価するための評価条件の作成手法、(b)想定地震諸元の解析手法、(c)参照確率の設定に関する知見の調査を実施した。

(a)評価条件の作成手法では、国内の一般的なサイトを対象として検討する際の評価条件について、地震活動域のモデル化、地震動伝播モデルに大別し、評価に必要なデータの所在、評価モデルの考え方や評価方法に関する最新の知見を網羅するような検討を行い、評価手順として示した。(b)想定地震諸元の解析手法では、石川らの方法と、米国の方の2種類の確率論的手法について、解析理論の基本的考え方を明らかにし解析評価用に定式化した。(c)参照確率の設定に関する知見の調査では、本評価手法を我が国のサイトに対する検討に資する際、必要となる参照確率の設定に関する国内外の知見を調査した結果を示した。

以上の検討結果は、今後、一般のサイトを対象として確率論的想定地震を設定する際の評価手順を示す手引きとして役立ち得るものと考える。

(2) モデルサイトの想定地震設定に関する検討

石川らの方法に基づいて、モデルサイトを対象として確率論的想定地震の諸元を評価した。また、その結果を活用して現行指針の手順に基づいて選定されている設計用地震と確率論的手法によって設定される想定地震とを比較検討した。

(a) モデルサイトにおける想定地震の検討

本検討に際し地震動強さの指標としては、地震動最大加速度以外の指標として、地震危険度曲線の周波数特性による差異を考慮して、短周期及び長周期の応答スペクトルによる表示方法を採用した。確率論的想定地震の設定法に関しては、以下のような特徴が挙げられる。

- ・想定地震が、与えられた参照確率に対して地震活動域に対応した地震諸元（規模、最短距離）で表現されることは、例えば応答スペクトルなどにより、将来対象サイトに影響を及ぼす可能性があると予測される具体的な地震像を把握することができるようになるので、実用的な評価手段を提供するものとなる。

- ・参照確率を変化させると、サイトに支配的な影響を与える想定地震の諸元が、ランダム地震域から活断層に変化する場合が見られ、サイトに支配的な影響を及ぼす想定地震は、与える参照確率によって多少変化していく特性をもつことが分った。

- ・本設定法では、確率の観点から複数の想定地震の寄与程度が、貢献度として定量的に示される。モデルサイトの検討においても、周波数特性の異なる複数の想定地震が寄与していることが、明らかになった。なお、貢献度に関しどこまでを有意な地震として選定するかという点については、定められた判定値がなく今後の課題となっている。

(b) 現行指針および確率論的手法に基づいた想定地震諸元の比較

モデルサイトを対象として、基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 毎に両手法によって設定される地震諸元を比較検討した。比較に用いた現行指針の手順に基づく決定論的手法と確率論的手法

には、次に示すような基本的な概念の相違がある。

- ・ 現行の決定論的手法では、考慮すべき地震の範囲を再来期間で定め、その中から予測される震源に対する地震の規模と震央距離を過去のデータに基づくもののみならず、一部については先駆的に与えて、サイトに最大の影響を及ぼす地震を選定する手順をとる。これに対して、確率論的手法では、サイト周辺で、一定の条件の下で発生が予測される地震を網羅して、それらの地震の時刻、規模、位置等に関する情報に基づいて地震危険度を算定し、次に想定地震の貢献度を算定し、考慮した地震の中から与えた参照確率に対して、サイトに及ぼす影響が確率的に支配的な地震の諸元（規模、距離）を評価する手順をとる。
- ・ 確率論的手法では、評価条件として与える地震活動のモデル化に伴なう不確実さ、及び地震伝播モデル化に伴なう不確実さを、地震危険度という統一された指標を用いることによって、より明示的に一貫性ある方法で取扱うことができる。
- ・ 確率論的手法では、地震活動のモデル化に関して、地震の発生する場所や規模が事前に推定することが可能な活断層とプレート境界の大規模地震は個別にモデル化し、それらを表現できない地震をランダム地震域としてモデル化し設定する。一方、現行の耐震設計では、活断層の存在が知られていないところでも発生しうる地震のうち最大級のものとして、 $M=6.5$ の直下地震を基準地震動 S_2 で考慮することとしている。確率論的想定地震の評価では、このタイプの地震もランダム地震域として発生する地震として取扱うことができる。但し、現行の耐震設計における $M=6.5$ の直下地震の設定は、設計という観点から全国一律に考慮することを規定したものであり、確率論的手法で設定する地震の発生時刻、規模、位置などの評価条件とは、全く前提条件を異にしており、厳密には両者を比較して論ずることはできない点に留意する必要がある。

以上の両評価手法の比較から、与えられた評価条件に対する評価過程の一貫性及びサイトに及ぼすリスクの観点から確率論的手法の方が、合理的な評価手法であるといえる。

モデルサイトを対象として参考確率を 10^{-3} 及び 10^{-4} とした場合に、両手法による比較評価を行った結果、選定された地震諸元に次に示されるような傾向があることが明らかとなった。

- ・ S_1 対象地震のうち「過去の地震」に対応する地震と同程度の諸元を有する想定地震が、確率論的手法によって得られた。
- ・ S_2 地震については、「地震地体構造」および「直下地震」に対応する地震と同程度の諸元を有する想定地震が設定された。

このように、決定論および確率論によって得られる地震諸元のうち支配的なものについてはほぼ同様の地震諸元が設定されるという結果が得られた。このことは、現行の決定論的手法は、より合理的とされる確率論的手法と結果的に類似の地震が選定されており、現行の手法による結果の適切さを裏付けるものとなった。

(3) 評価条件の不確実さに関する評価法の検討

確率論的手法により地震危険度および想定地震を評価する際、評価条件の不確実さに関する種々の要因が存在する。このため、国内外の不確実さを考慮した評価方法の調査、およびモデルサイトを対象とした感度解析を実施した。

(a) 不確実さを考慮した評価方法の調査

参考文献に基づき、モデル化の不確実さを考慮した評価を行なうときの標準となりうる手法を調査した結果以下の知見を得た。

確率論的危険度および想定地震を評価するために、結果の統計処理を行なう必要があるが、そのためには、ロジックツリー(LT)の利用が有効であるとされている。この時、LTの分布や各分岐の選択肢(パラメータ)を機械的に設定すると、全分岐に対する組合せは膨大となる。その結果、計算コストを増大しかつ結果全体の特性を理解することが困難になると予想される。これを回避するためには、感度解析の結果を利用して可能な限り LT を単純化することが有効であると考えられる。

(b) モデルサイトを対象とした感度解析

モデルサイトを対象とした地震活動のモデル化に関する感度解析により以下の結果を得た。

- ・モデルサイトでは、サイト北方に存在する断層の断層長さや海底活断層の有無による評価条件の差異が、地震危険度や想定地震諸元、貢献度等に与える影響は小さい。
- ・太平洋プレートの沈込み上面のランダム地震域に対する最大マグニチュードを変化させた場合、最大マグニチュードに対する地震域の諸元が変化する。その結果、貢献度が変化し想定地震の順位に変動を生ずる。

モデルサイトを対象とした地震伝播モデル化に関する感度解析により以下の結果を得た。

- ・3種類の地震動強さの評価指標(最大加速度、短周期応答スペクトル、長周期応答スペクトル)は、地震動の周波数特性の差異を表現しており、周波数特性に応じて地震危険度曲線および想定地震の諸元が変動する。したがって、評価の目的に応じて最大加速度以外に応答スペクトルによる評価指標の適用を図ることが重要である。
- ・代表的な不確実さの因子である距離減衰式選定の差異は、地震危険度には大きい不確実さを生じさせるが、地震諸元/貢献度には大きい差異を生じさせることはない。すなわち、不確実さの影響は想定地震の設定に対してあまり大きく現われないという特徴を示すことが分った。
- ・距離減衰式のばらつきによる想定地震諸元に与える影響について、サイト周辺の地殻内地震域における地震と、太平洋プレートの沈込み上面のランダム地震域による地震とを地震諸元(規模、最短距離)に対する同時確率上で比較すると、後者の方が地震諸元(規模、最短距離)に関するばらつきの裾の部分の寄与が大きいことが分った。このことは、後者のような地震域では、地震の発生形態自体にばらつきを有しているので、距離減衰式のばらつきに対する精度向上にはある限度があることを示唆している。

(c) 確率論的想定地震と現行耐震指針との関係

確率論的想定地震の設定法は、現行耐震指針における考慮すべき地震の選定と目的を共通としており、かつ評価条件に対する不確実さの考慮や、評価過程の一貫性及びサイトに及ぼすリスクの観点から合理的な評価手法であり、将来の耐震設計への適用を検討する価値が十分ある考えられる。

なお、耐震設計では将来生起するであろう地震を予測する見地から、活断層の平均活動間隔や、地表では部分的で不連続な地震断層に対する規模の設定など評価項目によっては、設定した評価条件以外に、さらに余裕をとることを考慮すべきであるという考え方もあり、設計の位置付けについては今後の議論を待つ必要がある。設計における参考確率の採り方については、想定地震の設定のみならず、不確実さの大きい地震動強さの評価と合わせて検討する必要があり、後述の7章で今後の課題で取り上げている。

以上の検討結果から、確率論的に想定地震を設定する評価技術の耐震設計への有用性が示された。

7. 今後の課題

確率論的地震危険度および確率論的想定を評価する際、本研究を通して抽出された課題を以下に整理しておく。

(1) モデル化に関する不確実さの低減と定量評価

確率論的地震危険度および確率論的想定地震の評価において、種々の要因によるモデル化の不確実さが存在する。これらの不確実さに関する検討課題として、以下の2点が挙げられる。

i) データベースやモデルの更新

現時点において、不確実さの低減に有効となるであろう項目として、①活断層データ、②地震動の観測データ、③時系列モデルなどの更新があげられる。具体的に、①に関しては、兵庫県南部地震の発生後、地方自治体などにより勢力的に調査がおこなわれており、その成果が徐々に公表されつつある。②については、文部科学省や気象庁などによって、全国規模の地震観測記録が公開されている。③に関しては、地震調査研究推進本部の長期評価部会によって「長期的な地震発生確率の評価手法及びその適用例について」が発表されており、地震発生の時系列に関して種々の非定常な確率モデルが示されている。これらのデータや成果などを反映させていく必要がある。ただし、これらの成果をどのように取り込んでいくかも、検討が必要であろう。

ii) 不確実さの定量評価

上述したように、新たな成果や知見を導入することによって、モデル化に関する不確実さは、ある程度低減すると思われる。しかし、全ての要因に関して不確実さを除去することは困難であり、将来的にもいくらかの不確実さが残るものと予想されるため、その定量的評価が不可欠となる。このための方法として、例えば専門化の意見に基づくロジックツリーを構築する方法があり、我が国でも原子力発電技術機構において開発が進められている。ただし、専門化の意見の抽出には膨大な手間や時間などが必要となり、さらには意見を抽出する方法によっては評価結果がある程度大きく異なることも予想ため、具体的な方法の標準化が望まれる。

(2) 想定地震設定法の設計への適用上の課題

確率論的想定地震を今後の耐震設計に適用する場合の課題として以下に示す3点が挙げられる。

i) 参照確率の設定

確率論的想定地震を用いて基準地震動 S_1 、 S_2 を設定する際、参照確率の設定根拠をどのようにして定めるかという点である。また、その際原子力施設を構成している建屋や機器の耐震裕度との関係を考慮して、幅広い観点からの検討が必要である。

ii) サイト近傍の震源を予測することができない地震の扱い

サイト近傍のどこで発生するかを事前に予測することが不可能な地震については、サイト毎の評価条件に基づいてランダム地震域を設定することで想定地震諸元の期待値を評価し得ることが確認された。しかしながら、2000年10月に発生した鳥取県西部地震に関する震源域に見られるように、地表では不連続な地震断層の分布しか確認できない場合もあるので、サイト近傍の地震調査や地盤調査結果からそのような可能性が排除できない場合には、その本設定法に基づいて設計に用いる地震を設定するに際し、さらに工学的な配慮をする必要性についても検討課題として残される。

iii) 設計地震動設定における不確実さの扱い

選定した想定地震の諸元に対して、地震危険度の不確実さをどのように考慮して、今後設計地震動レベル（強さ）を設定するかという課題である。この課題については、我が国における地震活動の程度（サイスミシティ）の特徴、及び設計地震動の設定が建屋や機器の耐震裕度など対象プラント全体の安全性に与える影響の2つ観点から検討することが必要と考えられる。

iv) 詳細な震源断層モデルによる評価

震源を特定できる地震のうち重要なものについては、詳細な震源断層のモデル化を行ない、不均一・非一様な断層破壊過程に基づいて検討し、震源近傍の入力地震動（水平、鉛直）を評価する方法を適用することが考えられる。このような手法に対して、不確実さを明確にした上でこれまで検討して来た距離減衰式を用いた想定地震設定法により算定される設計地震動と統合することが有効であると考えられる。

8. おわりに

日本原子力研究所は、確率論的安全評価に関する研究の一環として、軽水炉プラントにおける地震起因の炉心損傷頻度を評価する手法（地震リスク評価手法）を開発し、モデルプラントに適用してその有効性を示してきた。

本報告書は、地震リスク評価手法を設計に適用するため研究の1つとして、原研が実施してきた確率論的地震危険度評価に基づく設計用想定地震の設定法に関する研究成果をまとめたものである。

本研究は、確率論的想定地震の概念に基づいて、その設定法を定式化し我が国のサイトに適用した場合の有用性と今後の検討課題を明らかにすることを目的としたものである。したがって、報告書の中でモデルサイトの評価例として示した結果は、地震データの収集時期など当該サイトの許認可資料として提出された評価結果と評価条件が相違している点もあり、直接関連性を有するものではない。

確率論的想定地震に関する評価手順に関する検討結果は、国内のサイトを対象として確率論的想定地震の評価を行なう場合に必要とされる一般的な評価条件や評価モデルの作成手順を示したもので、評価手順の手引き書としての活用が期待される。

一方、石川らの概念に基づくモデルサイトを対象とした基本モデルによる想定地震の検討結果や感度解析の結果は、検討対象が1プラントと限られたものであるものの、評価条件を構成している各評価パラメータの重要性や、評価結果の解釈に対する理解を深める上で有用であると考えられる。

本報告は、今後各サイトにおける設計用想定地震を設定する際、評価技術の高度化を図るために知見として意義をなすものと期待される。

謝辞

本研究の遂行においては、地震リスク評価研究専門部会の委員の方々からご指導・ご協力を頂いた。同委員会の方々を付録1に示し、深甚なる謝意を表する。

また、東大大学院工学系研究科高田毅士助教授には、研究の開始に際して多くのご指導をいただいたので、深甚の謝意を表する。

原子炉安全工学部内においては、阿部清治部長、元リスク評価解析室長であった現原研社会技術研究システム推進室・次長傍島眞氏、現安全評価研究室長平野雅司氏より、多くの助言、指導、激励を頂いたので、ここに深甚の謝意を表する。

付録1 地震リスク評価研究専門部会名簿

(平成14年2月現在) (所外委員のみ記載、敬称略)

	氏名	所属
部会長	柴田 碧	(財) 地震予知総合研究振興会 地震調査研究センター 副首席主任研究員
専門委員	姥沢 勝三	(財) 原子力発電技術機構原子力安全解析所 耐震解析室長
専門委員	岡村 弘之	東京理科大学学長
専門委員	加藤 宗明	日本原子力発電(株) 顧問
専門委員	亀田 弘行	京都大学防災研究所総合防災研究部門 防災社会構造分野 教授
専門委員	酒井 信介	東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 教授
専門委員	坂上 正治	(財) 原子力発電技術機構原子力安全解析所 副所長
専門委員	高田 毅士	東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻
専門委員	武田 正紀	清水建設(株) 技術研究所 主席研究員
専門委員	田南 達也	東京電力(株) 原子力技術部 副長
専門委員	成宮 祥介	関西電力(株) 原子力事業本部 安全技術グループマネージャー
専門委員	平田 和太	(財) 電力中央研究所我孫子研究所 地盤耐震部 上席研究員
委員	松岡 猛	独立法人海上技術安全研究所 システム技術部長
専門委員	水谷 守	(株) モダンエンジニアリングアンドデザイン 代表取締役
専門委員	山口 彰	核燃料サイクル開発機構大洗工学センター要素技術開発部流体計算 工学研究グループリーダー

Appendix 2 Summary in English

1. Background and Objectives

The Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) has been examining the usefulness of seismic PSA for application to seismic design as part of the five-year research programs for nuclear installations of the Nuclear Safety Commission of Japan.

The selection criteria for design basis earthquakes in the current design code for nuclear power plants (NPPs) of Japan [1] are based on a deterministic approach. On the other hand in the United States (US), a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) was recognized as an important basis to identify safe shutdown earthquakes (SSEs) by the NRC Regulatory Guide 1.165[2] in 1997. In parallel with the activity in the US, another probabilistic approach to identify design earthquakes had been developed by the study of Ishikawa and Kameda [3] in Japan and the earthquakes identified are called probability-based scenario earthquakes (PBSEs). Their proposals were not specifically for application to NPPs.

The objectives of this study are to formulate the procedures to determine the PBSEs based on their concepts and to demonstrate the feasibility of the use of PBSEs in NPP design through an application to a specific site in Japan. As part of this application study, technical issues in the use of PBSEs are discussed on the basis of a comparison of the probabilistic and deterministic approaches for determination of design earthquakes and a set of sensitivity calculations on the effects of uncertainty factors on the PBSEs.

It should be noted that this study deals with the determination of design earthquakes but the determination of the design earthquake motions at an NPP site is not in the scope of this study.

This report consists of the following contents:

- Chapter 2: Procedure for Determination of PBSEs,
- Chapter 3: Determination of PBSEs for a Model Site,
- Chapter 4: Technical Issues in Incorporating PBSEs into Seismic Design, and
- Chapter 5: Concluding Remarks.

2. Procedure for Assessment of PBSEs

2.1 Compilation of Analytical Conditions

Based on a survey of existing works on PSHA, a set of analytical conditions for determining the PBSEs were selected and compiled in this study. The conditions of the PSHA and the probabilistic model of PBSEs consist of modeling of earthquake source region and active faults, and attenuation model of earthquake ground motion. In PSHA, the relationship between the intensity of earthquake ground motion and annual probability of exceedance is assessed, and the result is expressed by a seismic hazard curve. Then, in the analysis of PBSEs, the expected values of the conditional earthquake magnitude and distance that correspond to a prescribed annual probability of exceedance are evaluated. The conceptual procedure of

PBSEs is depicted in Figure A2-1. The characteristics features of the compiled analytical conditions are summarized in this section.

(1) Models and data of earthquake source regions and active faults

Models, data and conditions compiled for earthquake source regions and active faults are as follows.

(a) Data base

Data of historical earthquakes are compiled for instance from the Usami's catalog (AD679~1995)[4], Utsu's catalog (1881~1980)[5] and JMA's catalog (1926 to present)[6]. Data of active faults are compiled for instance from "Active Faults in Japan (1991)"[7] and "Seismogenic Faults (Mastuda 1990)"[8].

(b) Earthquake source regions and active faults

Seismic source regions are categorized into a couple of types of source models according to earthquake source mechanisms. Inter-plate earthquakes, which are likely to occur at a subduction zone of the Pacific Plate, are modeled as earthquake source regions with uniform seismicity. Active faults are represented as line source models or rectangle source models. Since intra-plate earthquakes occurring in the upper crust cannot be distinguished as individual sources except for those known as active faults, the earthquakes of this type are modeled by random earthquake source regions.

(c) Occurrence rate and magnitude-frequency relation

In the case of historical earthquakes, magnitude-frequency relation is estimated using the b-value model derived from the Gutenberg and Richter's relation taking account of the limit of maximum magnitude, and the Poisson process is usually adopted as a recurrence model of earthquakes.

In the case of active faults, the hypothesis of maximum magnitude model (Wesnousky et al. 1983)[9] is adopted and occurrence rate is estimated based on geologically obtained parameters such as long term average slip rate using for instance the Matsuda's relationship [10]. The Poisson process is also adopted as a recurrence model of earthquakes.

(d) Probability distribution of distance

In each of the earthquake source regions, the probability distribution of the location of seismic source is assumed to be uniform. The depth of seismic source is assumed to be constant and is derived from the average depth of the past earthquakes that occurred in the earthquake source region. In the case of an active fault, the epicentral distance or the shortest distance is used.

(e) Combination of historical earthquakes and faults

The results due to historical earthquakes and those due to active faults are combined so that the same event may not be superposed.

(2) Attenuation model of earthquake ground motion

Attenuation model addresses the relation between the intensity of earthquake ground motion and the distance from source region to site.

(a) Selection of attenuation equation

Although mechanistic fault models and propagation equations have been proposed in recent years, empirical attenuation equations are widely used in PSHA because of simplicity of analysis. It is necessary to select the most appropriate one in view of characteristics of seismicity for the site of NPP out of a variety of types of attenuation equations.

(b) Deviation of attenuation equation

Since uncertainty is involved in empirical attenuation equations, the standard deviation of attenuation equation is estimated on the assumption of logarithmic normal distribution.

2.2 Theoretical Background

The concept of the PBSE originates both from McGuire's studies [2,11] and from Ishikawa and Kameda[12,13]. Both of the methods are composed of seismic hazard analysis and analysis of PBSEs. In the procedure presented in RG1.165, a PBSE is defined as the expected values of the conditional earthquake magnitude and distance when a specified annual probability of exceedance is assigned on a seismic hazard curve. In the Ishikawa's procedure, the PBSE is defined by "a source contribution factor" and "a hazard-consistent magnitude and distance" with respect to an earthquake source region, which are determined for the assigned annual probability of exceedance.

The source contribution factor means the conditional probability that, when an earthquake occurred at the site with a ground motion amplitude higher than the given amplitude a , the earthquake is generated by the k -th earthquake source region and is defined by equation (2.2-1),

$$c_k(a) = \frac{w_k(a)}{\sum_k w_k(a)} \quad (2.2-1)$$

where $w_k(a)$ is the annual rate for the k -th earthquake source region to produce a ground motion amplitude higher than the given amplitude a at the site. This definition is expressed by the following equation.

$$w_k(a) = \sum_i \sum_j \lambda_k P_k(m_i) P_k(r_j) P_k(a|m_i, r_j) \quad (2.2-2)$$

where λ_k is the annual rate of earthquakes in the k -th earthquake source region, and $P_k(m_i)$ and $P_k(r_j)$ are the probability density functions of magnitude and distance, respectively, at in the k -th earthquake source region. $P_k(a|m_i, r_j)$ is the conditional probability that an earthquake of magnitude m_i at distance r_j produces a ground motion amplitude at the k -th earthquake source region which is greater than a .

The total annual rate of the event that the ground motion amplitude exceeds the given amplitude a at the site can be described as an aggregation of $w_k(a)$.

$$\lambda(a) = \sum_k w_k(a) \quad (2.2-3)$$

In numerical analysis, since the source contribution factor is derived in terms of a ground motion amplitude $a(p_0)$ corresponding to the assigned annual probability of exceedance p_0 , the equation (2.2-1) is converted to equation (2.2-4).

$$c_k(a(p_0)) = \frac{w_k(a(p_0))}{\sum_k w_k(a(p_0))} \quad (2.2-4)$$

The magnitude and distance of the scenario earthquake of the k -th seismic source are expressed by conditional means M_k^* and Δ_k^* , namely, "a hazard-consistent magnitude and distance" defined by the following equation.

$$M_k^* = E_k(M|A \geq a(p_0)) = \sum_i \sum_j m_i \cdot P_k(m_i, r_j | A \geq a(p_0)) \quad (2.2-5)$$

$$\Delta_k^* = E_k(R|A \geq a(p_0)) = \sum_i \sum_j r_j \cdot P_k(m_i, r_j | A \geq a(p_0)) \quad (2.2-6)$$

Where $P_k(m_i, r_j | A \geq a(p_0))$ is a conditional probability that the magnitude and distance of the k -th earthquake source region respectively take m_i and r_j when the ground motion amplitude A exceeds $a(p_0)$.

3. Assessment of PBSEs for a Model Site

3.1 Conditions for Assessment of PBSEs

The assessment to identify PBSEs for the model site based on the Ishikawa's concept was performed. The model site is located in the eastern seashore of Japanese Island. The vicinity of the site has a threat both from inter-plate earthquakes occurring in offshore area and intra-plate ones occurring in the upper crust. The region around the site is divided according to the Hagiwara's seismo-tectonic structure [14] as shown in Figure A3-1. Figure A3-2 indicates the earthquake source region corresponding to the subduction zone, and Figure A3-3 shows the random earthquake source region in the upper crust due to intra-plate earthquakes. Figure A3-4 depicts the spatial distribution of seismogenic faults [8]. The data of earthquake source regions are assembled from the earthquake catalog compiled by JMA (1926 to 1995)[6], while those of seismic faults are evaluated based on the geological knowledge. Occurrence rate,

magnitude-frequency relation and probability distribution of distance are determined according to analytical conditions as previously described in section 2.1(1).

The following three expressions of the ground motion intensity are used: PGA (peak ground acceleration), and spectral responses at $T=0.15$ and 0.71 sec. The attenuation equations proposed by Annaka, et al.(1997)[15] are chosen for each index of expression. These attenuation equations are developed based on the observation data for the ground conditions of the range from 300 to 600m/s in shear velocity. The uncertainty of the attenuation equations is taken as the logarithmic standard deviation 0.5. The above set of analytical conditions is designated as the base model of PBSEs.

3.2 Analytical Results

The Ishikawa's concet was applied for the base model of PBSEs. Figure A3-5 shows the probabilistic seismic hazard curve for the case of spectral response at $T=0.15$ sec, whose response accelerations for three different reference probabilities 10^{-3} , 10^{-4} and 10^{-5} are shown in Table A3-1. Figure A3-6 shows the source contribution factors of the earthquake source regions and active faults for spectral response at $T=0.15$ sec. This figure indicates that dominant earthquake source regions vary depending on reference probabilities (10^{-3} , 10^{-4} , and 10^{-5}). Table A3-2 shows the PBSEs from those sources in terms of the hazard consistent magnitude and the shortest distance when source contribution factors not less than 10% are taken for the reference probabilities. It was confirmed that the Ishikawa's procedure could provide parameters of PBSEs reflecting the seismic source environment in the vicinity of the model site [16]. Target response spectra for these parameters were estimated using the mean of attenuation equation proposed by Annaka et al. (1997). Figure A3-7 depicts the shape of the target response spectra for the reference probability 10^{-5} . This result reveals that a couple of PBSEs with different characteristics could be identified [17].

3.3 Comparison of Identification for Design Earthquakes between the Deterministic Approach and PBSEs

A trial comparison was performed between the current deterministic approach and probabilistic approach using PBSEs. In Japan, evaluation of the seismic motion used for seismic design of nuclear reactor facilities is performed to satisfy "Evaluation Guidelines"[1]. The site-specific earthquake ground motions are called "the basic design earthquake ground motions" S_1 and S_2 . The maximum design earthquake S_1 is determined based on past earthquakes, earthquakes due to active faults with frequent activity. The extreme design earthquake S_2 is determined based on earthquakes due to active faults, earthquake based on the seismo-tectonic structure and a shallow earthquake, which is defined on the postulation that an earthquake of magnitude up to 6.5 could take place at any place in Japanese Island.

In the deterministic approach in this study, magnitude and distance for design earthquakes were selected by the same procedure as the basic design earthquake ground motions.

Prior to performing the analysis by the probabilistic approach, the data base of historical earthquakes and active faults was set up to be common to that of the deterministic approach. Then the data of the base

model were modified to consider just two active faults, fault A and fault D, among four active faults previously shown in Figure A3-3 and to consider additional active faults discovered in offshore area. Spectral responses at T=0.15sec were used as the index to express the ground motion intensity.

Furthermore the reference probabilities corresponding to the maximum design earthquake S_1 and the extreme design earthquake S_2 were assumed as follows according to "Evaluation Guidelines"[1].

- (a) Reference probability corresponding to the design earthquake S_1 :
 10^{-3} (the middle point of the annual probability range shown in Ref [1] 10^{-2} to 5×10^{-4}), and
- (b) Reference probability corresponding to the design earthquake S_2 :
 10^{-4} (the middle of the annual probability range shown in Ref [1] 5×10^{-4} to 10^{-5}).

The result of comparison is shown in Table A3-4 and is summarized as follows.

- 1) Concerning design earthquake S_1 , magnitude and distance of PBSEs were similar to those of the corresponding design earthquakes determined on the basis of earthquakes.
- 2) Concerning design earthquake S_2 , magnitude and distance of PBSEs were similar to those of the corresponding design earthquakes determined on the basis of selected from the earthquakes in the category of seismo-tectonic structure and that of shallow earthquake .

A discussion on the insight from this comparison will be given in chapter 4.

3.4 Sensitivity Analysis on Uncertainties in PSHA and PBSEs

Since uncertainty of analytical conditions may provide potential effect to PSHA and identification of PBSEs, it is recommended to perform uncertainty analysis. In recent years, methodology for uncertainty analysis in PSHA has been studied by many organizations and the use of logic trees with weighting functions based on the elicitation of expert's opinions has become a standard procedure. However, due to the relatively high cost of such analysis, a series of sensitivity studies on uncertainties that would affect PSHA and identification of PBSEs were performed from various aspects, and some useful insights for determining PBSEs were obtained. As one of sensitivity studies for uncertain terms, uncertainty involved in the process to select an attenuation equation was examined, and the analytical conditions and the results are summarized as follows.

(1) Analytical conditions

In this sensitivity study, PGA was used as the index to express the earthquake ground motion intensity in lieu of the index of spectral responses at 0.15sec, which was used in the base model as previously described in section 3.1. A model whose analytical conditions are the same as those of the base model except for the above index is prepared. This model is designated as the base model with the index of PGA .

Two types of attenuation equations are compared. One is the base model with the index of PGA of the attenuation equation by Annaka et al. (1997)[15]. The other one is the sensitivity analysis model with PGA of the attenuation equation by Fukushima-tanaka [18] using the value scaled by 0.6 times of the original values considering the condition of rock site.

Parameters of hazard-consistent magnitude and distance of which source contribution factors are not less than 10% are assessed for PBSEs for the reference probabilities 10^{-3} , 10^{-4} and 10^{-5} .

(2) Analytical results

Two seismic hazard curves derived from the base model and the sensitivity analysis model are compared in Figure A3-8 using PGA as an index. The comparison of the source contribution factors and parameters of PBSEs are shown in Figure A3-9 and Table A3-4, respectively.

A significant difference was found between two hazard curves as shown in Figure A3-8. On the other hand in the comparison of the source contribution factors in Figure A3-9, as the value of reference probability is reduced, the source contribution factor of the earthquake source region No.6 decreases and the contribution of fault B increases on the contrary. This trend is seen more clearly in the results from the sensitivity analysis model than in the base model.

Table A3-4 shows no remarkable difference between the results of selected PBSEs by two models except that the rank of source region No.6 was lowered at reference probability 10^{-5} .

As a result, although two seismic hazard curves showed a significant difference depending on the type of attenuation equation, no remarkable difference was found in the parameters of PBSEs between two models.

4. Technical Issues in Incorporating PBSEs into Seismic Design

(1) Relation between PBSEs and the basic earthquake ground motions

The procedure to determine PBSEs was compared with that to determine the basic earthquake ground motions prescribed in the selection criteria in the "Evaluation Guidelines" [1]. Relation between PBSEs and the basic earthquake ground motions is delineated in Figure A4-1. It is shown here that the probabilistic approach and the deterministic approach use essentially common data base for earthquake sources.

As compared with the deterministic approach, it may be stated that the probabilistic approach is a more rational approach because it reflects more directly the design purpose of prevention of accident at the plant site by earthquakes in the following aspects:

- (a) In the determination of design earthquakes by the current deterministic approach, the range of the earthquakes which should be taken into consideration is limited by the return periods of the earthquake sources, while, in the probabilistic approach in this study, all sources of earthquakes except for those that do not produce seismic motions larger than that corresponds to the response probability in the hazard curve.
- (b) The probabilistic method takes into account the effects of uncertainties in the models of earthquake sources and the attenuation relationship in an explicit and consistent manner using the hazard curve and the contribution factor as measures of contribution to the risk.

- (c) The probabilistic approach has a more sophisticated framework to consider the risk due to the possibility of existence of earthquake sources that are not in the historical records or not revealed by the faults but may affect the site in the future than the deterministic approach where such earthquakes are represented by a shallow earthquake with Magnitude 6.5 and depth of 10 km.

As described in section 3.3 above, the results from the two approaches had quite similar values of magnitude and distance when the reference probabilities of 10^{-3} and 10^{-4} were used. These results may be interpreted as, for this particular site, the current deterministic approach has been supported by the more rational approach. The reason for this similarity in the results may be explained partly by the commonality in the information basis for earthquake sources.

It should be noted that the use of Ishikawa and Kameda's methods, where the PBSEs are expressed by hazard-consistent magnitudes and distances, has merits that concrete images of earthquakes that produce the ground response spectrum predicted to threaten the site and that the source contribution factors indicates relative importance of each earthquake source region and active faults.

(2) Technical issues of PBSEs for application to seismic design

Examination to clarify technical issues in incorporating PBSEs into seismic design was performed. An overview of the result is shown schematically in Figure A4-2, and main technical issues are as follows.

- (a) How the values of reference probabilities corresponding to the design earthquakes S_1 and S_2 could be appropriately estimated?
- (b) Since intra-plate earthquakes of the upper crust occurring in the vicinity of a site cannot be distinguished except for those known as active faults, it was demonstrated through the analyses that this type of earthquake could be addressed as a random earthquake source region.
- (c) How the intensity of earthquake ground motion could be estimated in scaling an earthquake ground motion based on the parameters of PBSEs? This issue should be examined from the both aspects of characteristics of seismicity in Japan and the potential effect to total safety of the plant in view of the relation between design earthquake ground motion and seismic margins of structures and equipment.
- (d) It is recommended to use a more precise evaluation technology for the case where seismic source region can be identified. The method is one reflecting recent results of rapidly progressing researches in seismology based on rupture theory of source process in earthquake faults and

simulation techniques of wave propagation in irregular sedimentary layers. One of typical methods is the so called Empirical-Pseudo Green function method [19]. In this process, it is also necessary to account for uncertainty involved in parameters of rupture faults. One approach to reflect this procedure to the integration of design earthquake ground motions is to combine the result with that developed from PBSEs.

5. Concluding Remarks

Procedures to determine PBSEs were examined and the results obtained are summarized as follows.

(1) Procedures for assessment of PBSEs

The concept of PBSE proposed by Ishikawa and Kameda was examined and the procedures to compile analytical conditions for an arbitrary domestic site were developed. The procedures consist of modeling of earthquake source regions and active faults and that of ground motion attenuation. It is expected that these procedures will be useful as a guide for determination of PBSEs.

(2) Determination of PBSEs for a model site

The procedures for the determination of PBSEs based on the concept of Ishikawa and Kameda was applied to a model site located in the eastern seashore of Japanese Island. In the analysis, spectral response in addition to *PGA* was recognized to be important as an index to express ground motion intensity considering frequency characteristics. The analytical results revealed some characteristic features. Since the outcome of PBSEs is expressed by hazard-consistent magnitude and distance for prescribed reference probabilities, the concept has a merit that it gives us a concrete image of earthquakes predicted to threaten the site. The source contribution factor indicates relative importance of earthquake source regions and/or active faults, and the contributions of individual sources vary depending on prescribed reference probability.

(3) Comparison between the current deterministic approach and the probabilistic approach

A comparison was performed to identify the differences between the design earthquakes determined by the current deterministic approach and that by the probabilistic approach, i.e. PBSEs. Data base of historical earthquakes and active faults was set up to be common between two approaches, and reference probabilities were also assumed to be in the ranges similar to those of the design earthquakes S_1 and S_2 estimated in the Evaluation Guidelines[1].

For the case of design earthquake S_1 , the magnitude and distance of the PBSEs were close to those of the earthquakes selected by the deterministic approach for the category of past earthquakes and, for the case of design earthquake S_2 , the magnitude and distance of PBSEs were close to those of the earthquakes selected from the category of seismo-tectonic structure and that of shallow earthquake. The similarity in the results may be interpreted that the adequacy of the deterministic approach is demonstrated by a more rational approach under the condition that the occurrence frequencies of S_1 and S_2 estimated in the

Evaluation Guidelines[1] are adequate.

(4) Sensitivity analysis of uncertainties for PSHA and PBSEs

Since analytical conditions may involve uncertainties, sensitivity studies on uncertainty that would affect PSHA and identification of PBSEs were performed from various aspects. A useful result from this sensitivity analysis was that, although the difference in selection of attenuation equations led to a significant difference in seismic hazard curves, no remarkable difference was found in the parameters of selected PBSEs.

The sensitivity analyses in this study suggested that the procedures to obtain PBSEs based on the concept of Ishikawa and Kameda provide a useful evaluation technique to identify design earthquakes in the sense that it is not too sensitive to the uncertainties involved in data and modeling for seismic hazard analysis.

Concerning technical issues of PBSEs, the refinements of data and procedures are desirable especially in the area of incorporation of new active fault data, new observation data on earthquake ground motions and recurrence model of earthquakes.

6. References

- [1] Japan Electric Association: Technical Guidelines for Aseismic Design of Nuclear Power Plants, JEAG 4601-1987, 1987.
- [2] USNRC: Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, Regulatory Guide 1.165, 1997.
- [3] Ishikawa, Y., Kameda, H.: Hazard-consistent Magnitude and Distance for Extended Seismic Risk Analysis, Proc. of 9th WCEE, Vol.II, 1994.
- [4] Usami, T.: New Edition of Encyclopedia of Earthquakes with Damage in Japan (Amended Edition), Tokyo University Publishing House, 1986.
- [5] Utsu, T.: Table of M6.0 or Stronger Earthquakes and Earthquakes and Damage in Japan and Vicinity, 1885-1980, Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol.57, 401~463, 1882.
- [6] Meteorological Agency: Revised Edition of Table of Major Earthquakes in Japan and Vicinity (1926~1960), Earthquake Monthly of Meteorological Agency, Appendix No.6, 1982.
- [7] Research Group for Active Faults of Japan: Active Faults in Japan – Sheet Maps and Inventories (Revised Edition), Univ. Tokyo Press, 1991.
- [8] Matsuda, T.: Seismic Zoning Map of Japanese Island, with Maximum Magnitudes Derived from Active Faults Data, Bulletin of Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, Vol.65, 289-319, 1990 (in Japanese).
- [9] Wesnousky, S.G., Scholz, C.H., Shimazaki, K. and Matsuda, T.: Earthquake Frequency Distribution and the Mechanics of Faulting, J. of Geophysical Research, Vol.88, 9331-9340, 1983.

- [10] Matsuda, T.: Magnitude and Recurrence Interval of Earthquakes from a Fault, Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, Vol.28, 269-283, 1975 (in Japanese).
- [11] McGuire, R.K.: Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop, BSSA, Vol.85, No5, 1995.
- [12] Kameda, H., Ishikawa, Y.; Extended Seismic Risk Analysis by Hazard-consistent Magnitude and Distance, J. of JSCE, Vol.392, No.I-9, 395-402, 1988 (in Japanese).
- [13] Kameda, H., Ishikawa, Y., Okumura, T., Nakajima, M.: Probabilistic Scenario Earthquakes – Definition and Engineering Applications, J. of JSCE, Vol.577, No.I-41, 75-87, 1997 (in Japanese).
- [14] Hagiwara, S.: Earthquake in Japanese Island, Kajima Press, 1991.
- [15] Annaka,T., Yamazaki,M., Katahira,F.: Proposal of Attenuation Equation of Peak Ground Motion and Response Spectrum Based on JMA-87 Type Accelerogram, Proc. of 24th Conference on Earthquake Engineering, 1997.
- [16] Takada, T. et al.,: Probabilistic scenario earthquakes for seismic design-Comparison of two identification procedures, Proc. of OECD/NEA/CSNI Workshop on Seismic Risk, 1999.
- [17] Hirose, J. et al.,: Technical Issues on Incorporating Probability-Based Scenario Earthquakes for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Proceeding of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM-5), Osaka, Japan, Nov.27-Dec.1,2000.
- [18] Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation of Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, 1991.
- [19] Irikura,K.: Strong Ground Motion Estimation from Earthquake Caused by Active Fault, Proc. of OECD/NEA Workshop, BNL, Upton, N.Y.,1999, NEA/CSNIR(200)2(Jan,2001).
- [20] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology: Summary of the 2000 Fiscal Year Studies on Investigation of Active Faults and Seismic Faults, 2001 Congress on Investigation of Active Faults and Geological Survey of Subsurface Structure of Plains, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, 2001.

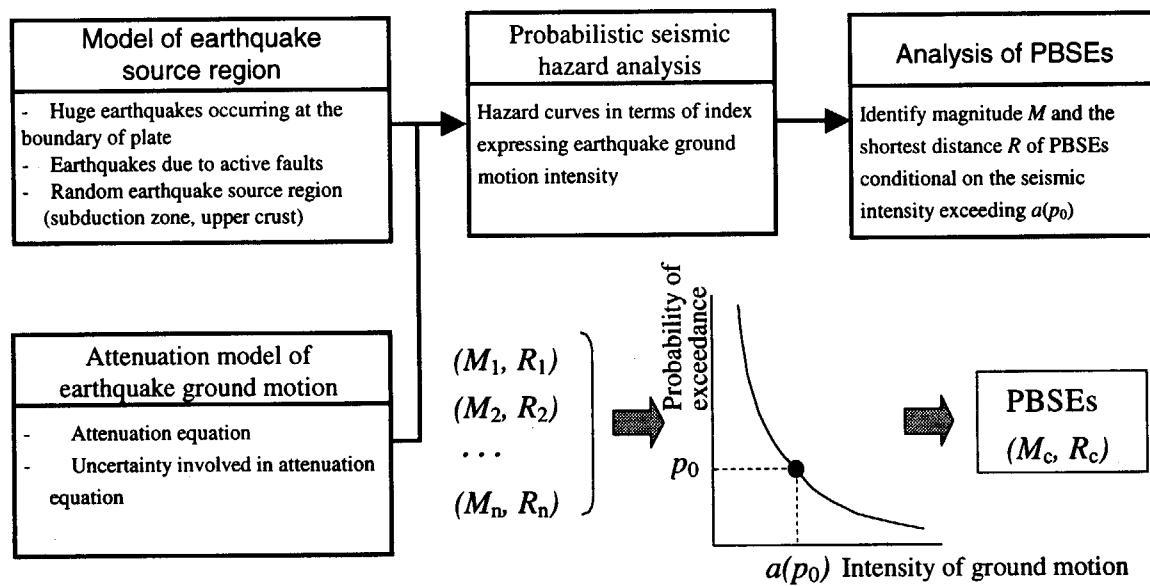


Figure A2-1 Procedure of probability-based scenario earthquakes

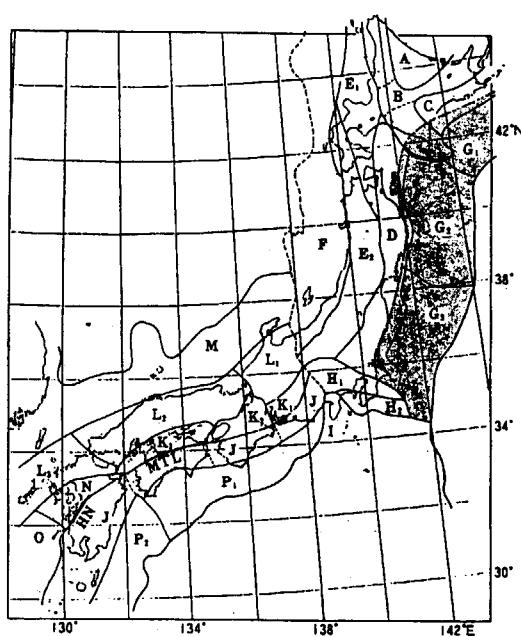


Figure A3-1 Seismo-tectonic structure
(Hagiwara, 1991)¹⁴⁾

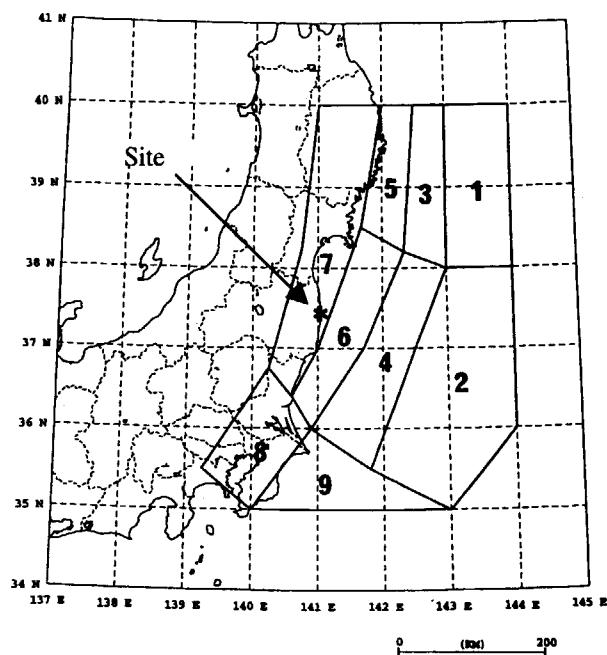


Figure A3-2 Earthquake source region in the
subduction zone

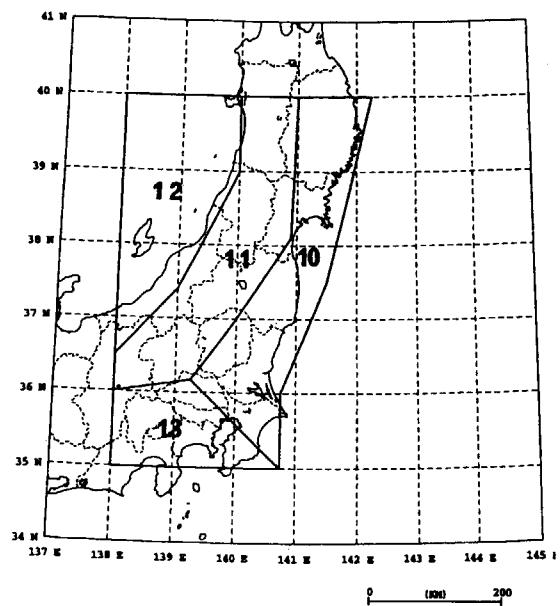


Figure A3-3 Earthquake source region in the
upper crust (intra-plate)

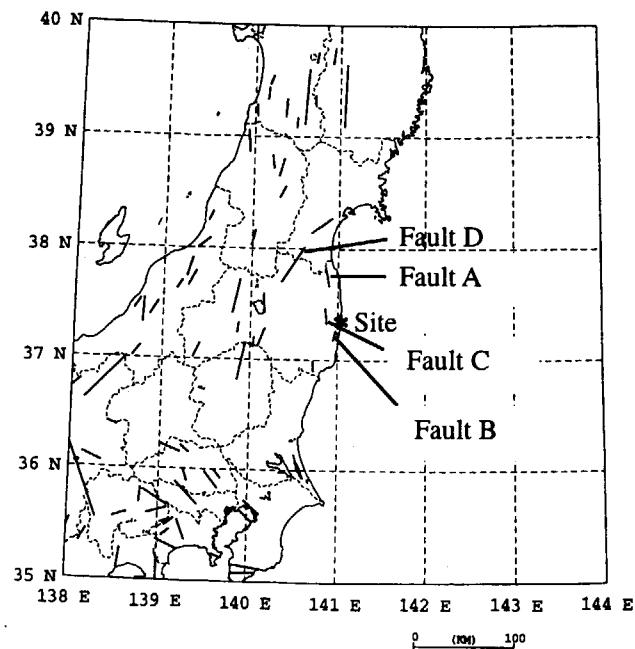


Figure A3-4 The spatial distribution of seismogenic
faults complied by Matsuda⁸⁾

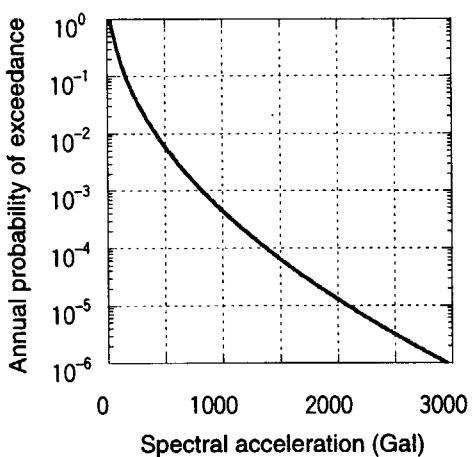
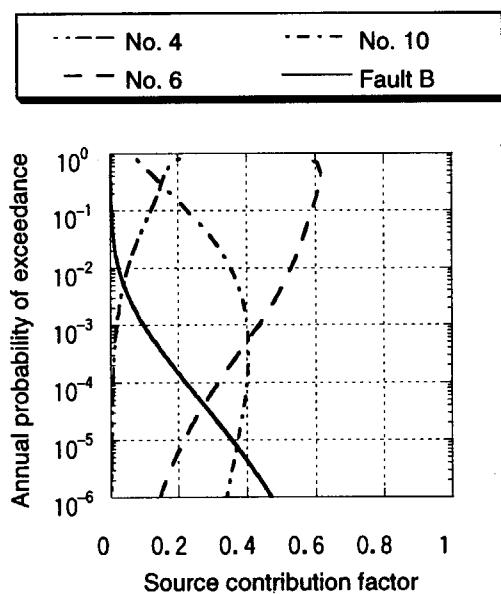


Figure A3-5 Seismic hazard curve of model site for spectral response at natural period $T = 0.15\text{sec}$

Table A3-1 Response accelerations at natural period $T=0.15\text{sec}$ for different reference probabilities
(Base model)

Reference probability	Acceleration (Gal)
10^{-3}	840
10^{-4}	1380
10^{-5}	2080



See Figs. A3-2 to A3-4

Figure A3-6 Source contribution factors at natural period $T=0.15\text{sec}$ (Base model)

Table A3-2 Parameters of PBSEs at natural period T=0.15sec (Base model)

Reference probability	Source region	M^*	R^* (km)	Contribution factor (%)
10^{-3} (840Gal)	No. 6	7.6	52.9	43.2
	No. 10	6.1	14.3	39.9
10^{-4} (1380Gal)	No. 10	6.3	13.4	39.9
	No. 6	7.7	51.0	31.7
	Fault B	6.5	7.7	21.9
10^{-5} (2080Gal)	No. 10	6.4	13.0	37.3
	Fault B	6.5	7.7	35.3
	No. 6	7.7	49.9	21.6

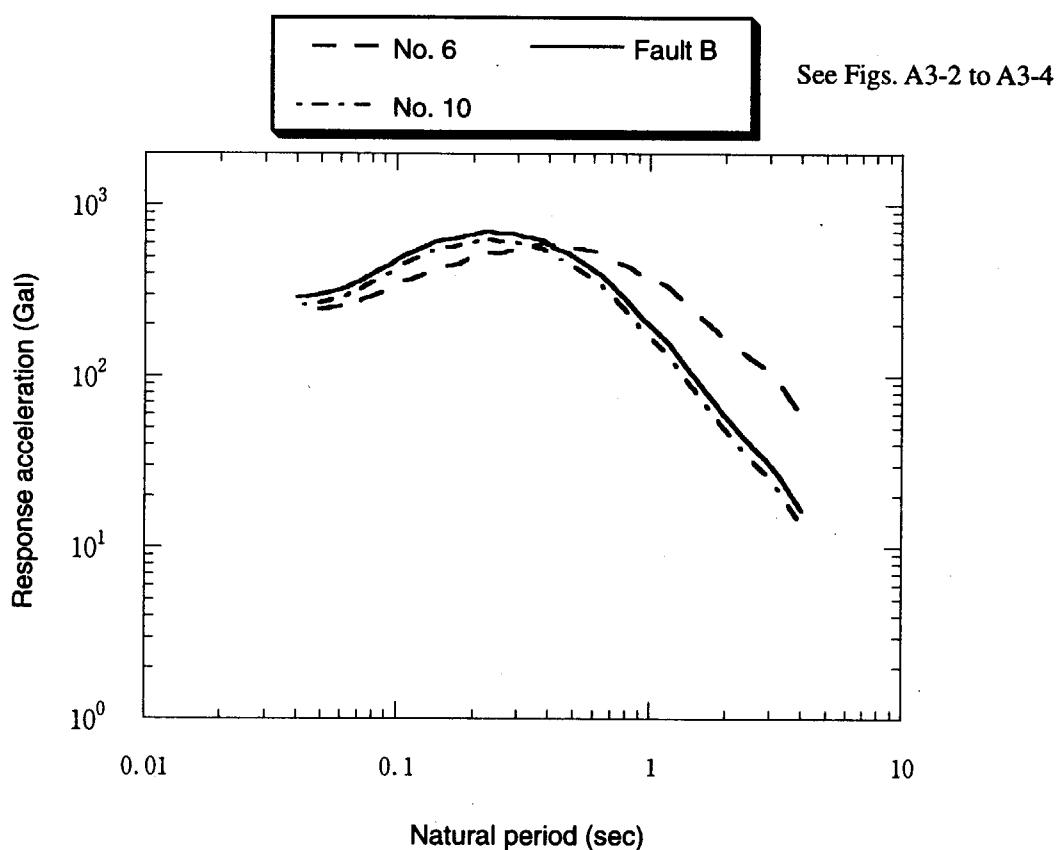
**Figure A3-7 Target response spectra at reference probability 10^{-5}**

Table A3-3 Comparison of parameters of the design earthquakes obtained by the current deterministic approach and those of by PBSEs

Basic earthquake ground motions	Parameters of earthquakes by deterministic approach			Parameters by PBSEs Assumption for reference probability $S_1: 10^{-3}, S_2: 10^{-4}$			
	M	Δ (km)	Remark	M^*	R*(km)	Contribution factor	Remarks
S_1	7.7	64	Past earthquake	7.5	53.1	50.3	No. 6
	7.4	54	Past earthquake				
	7.0	35	Active faults in offshore area				
				6.1	14.3	45.3	No. 10
S_2	7.8	50	Seismo-tectonic structure	7.6	51.2	44.2	No. 6
	7.5	75	Active faults & seismo-tectonic structure				
	6.8	43	Active faults in offshore area				
	6.5	7.23	Shallow earthquake	6.2	13.5	53.4	No. 10

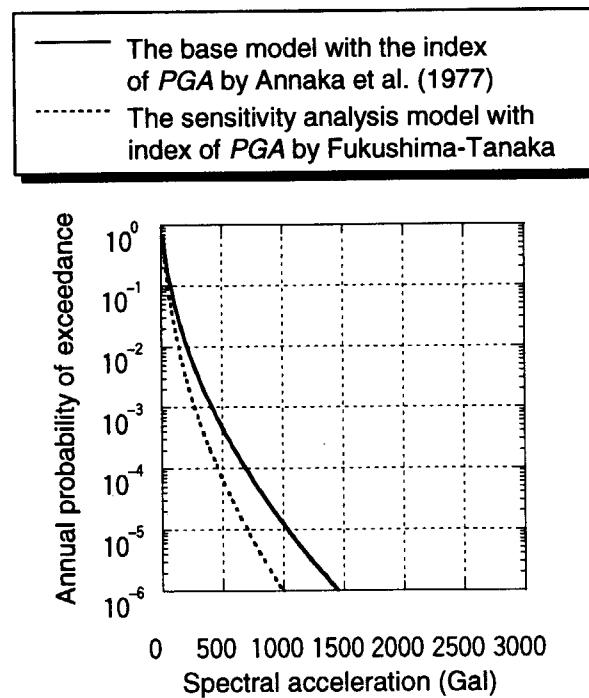


Figure A3-8 Comparison of probabilistic seismic hazard curves

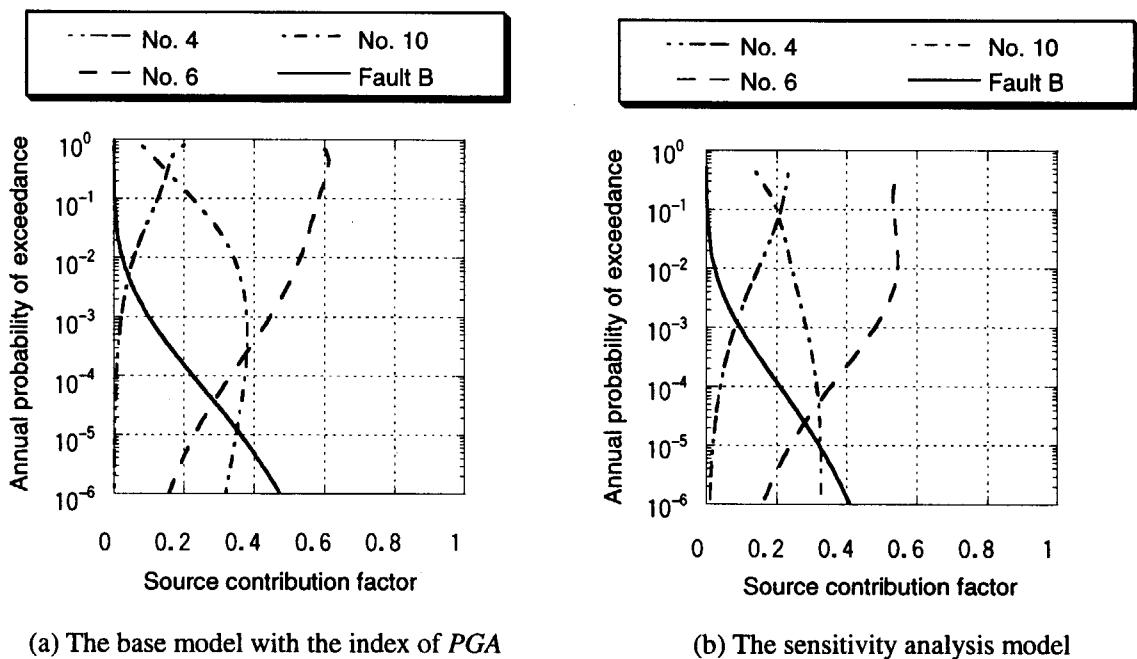


Figure A3-9 Comparison of source contribution factors of PBSEs between the model with the index of *PGA* by Annaka et al. (1977) and that with index of *PGA* by Fukushima-tanaka

Table A3-4 Comparison of the parameters of PBSEs obtained between the model with the index of *PGA* by Annaka et al. (1977) and that with index of *PGA* by Fukushima-tanaka

(a) The base model with the index of *PGA*

Reference probability	Source region	M^*	$R^*(\text{km})$	Contribution factor (%)
10^{-3} (420Gal)	No. 6	7.6	53.8	56.0
	No. 10	6.2	14.6	26.4
10^{-4} (700Gal)	No. 6	7.7	51.7	48.2
	No. 10	6.5	13.7	26.9
	Fault B	6.5	7.7	17.4
10^{-5} (1040Gal)	No. 6	7.8	50.4	39.9
	No. 10	6.6	13.2	27.0
	Fault B	6.5	7.7	26.6

(b) The sensitivity analysis model

Reference probability	Source region	M^*	$R^*(\text{km})$	Contribution factor (%)
10^{-3} (280Gal)	No. 6	7.6	54.5	47.5
	No. 10	6.4	16.7	30.1
10^{-4} (460Gal)	No. 6	7.7	52.4	34.7
	No. 10	6.6	15.2	33.1
	Fault B	6.5	7.7	20.3
10^{-5} (700Gal)	No. 10	6.7	14.2	34.0
	Fault B	6.5	7.7	31.8
	No. 6	7.7	51.1	22.8

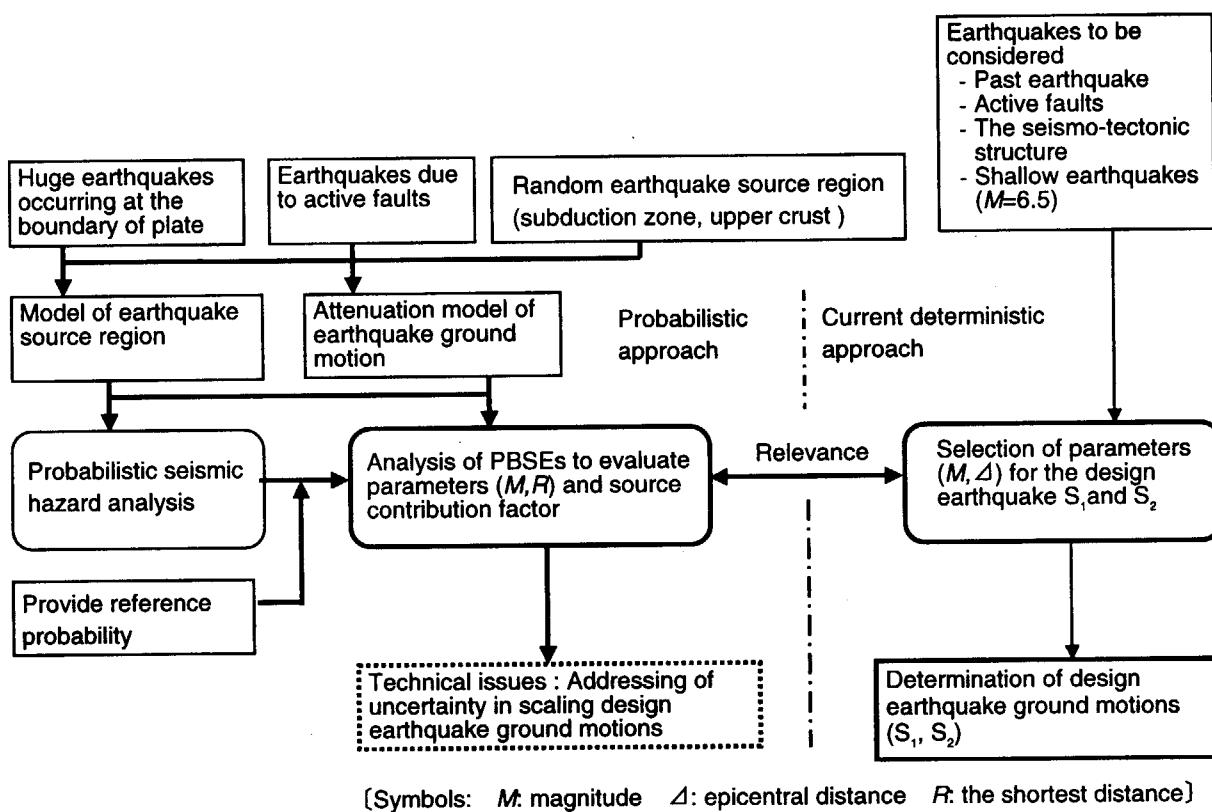


Figure A4-1 Relation between PBSEs and the current basic earthquake ground motions

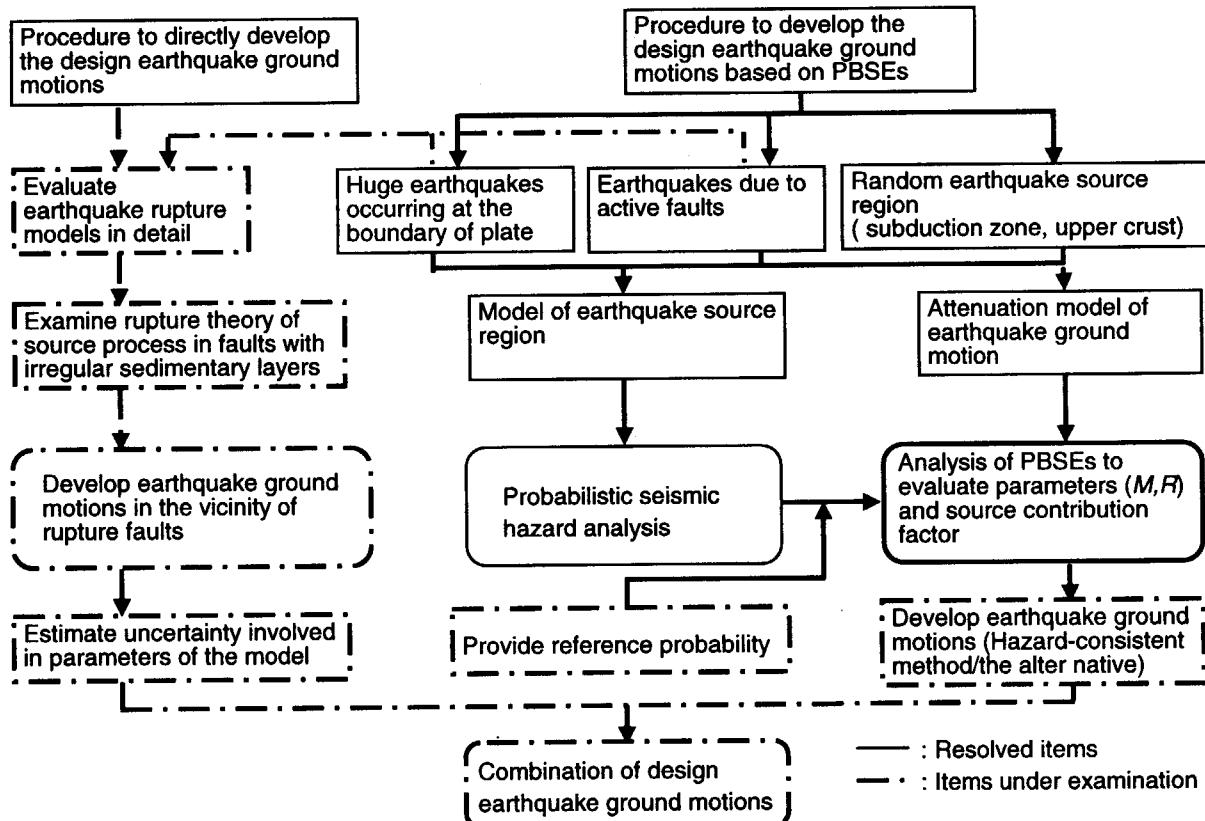


Figure A4-2 Technical issues in applying PBSEs to seismic design

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m^2
セルシウス温度	ヘンリエ	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
照度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
放射能	ルクス	lx	lm/m^2
吸収線量	ベクレル	Bq	s^{-1}
線量等量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	$^{\circ}, ', ''$
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 6.6054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	$N(=10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ボアズ})(\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス})(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa($=10 \text{ bar}$)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062 $\times 10^3$	145.038	
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	$J(=10^7 \text{ erg})$	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)	
								= 4.184J (熱化学)	= 4.1855J (15°C)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}		
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}		
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}		
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS (仮馬力)	
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499W	
	1.60218×10^{18}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad		
						1	2.70270×10^{-11}
	1			1	100		
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		

照射線量	C/kg	R		
			1	3876
			2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem		
			1	100
			0.01	1

(86年12月26日現在)

確率論的地震危険度評価に基づく設計用震度地盤の設定法

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています