

# 博士論文

## 断層モデル地震波群を用いた 建物の確率論的機能損傷評価に関する研究

- 地震リスク寄与度による震源選定に基づく評価手法の効率化 -

Study on probabilistic evaluation of building functional loss using ground motions simulated with fault rupture models : Proposal of efficient evaluation method based on seismic-sources selection in terms of the seismic risk contribution

鈴木（五十嵐） さやか



## 論文の内容の要旨

論文題目 断層モデル地震波群を用いた建物の確率論的機能損傷評価に関する研究  
- 地震リスク寄与度による震源選定に基づく評価手法の効率化 -

氏名 鈴木（五十嵐） さやか

本論文は、近年急速に発展を遂げてきた断層モデルに基づく地震動シミュレーション技術を生かした新しい確率論的地震リスク評価手法について、評価地点の地震ハザードを表す時刻歴地震波群の作成から機器・配管システムを有する建物の機能損傷評価までの、地震リスク評価の一連の流れを実施することにより、従来手法に対する優位性を確認するとともに、実適用に向けた効率化手法を提案することを主題とする。

従来から一般的に用いられてきた地震リスク評価手法は、時刻歴応答解析を必要としない確率・統計論的手法と、発生頻度に関連付いた地震波群を入力とした時刻歴応答解析に基づく手法の大きく 2 つの種類に分類できる。

前者は、地震ハザード曲線と fragility 曲線に基づく地震リスク評価手法に代表される。地震ハザード曲線は、Cornell (1968) の手法に基づき地震動強さとその年超過頻度の関係として表される。通常、地震動強さは震源のマグニチュード  $M$  と震源距離  $X$  の関数として表される距離減衰式によって算定される。また、fragility 曲線は、建物や機器類の地震被害調査や振動台実験あるいは地震応答解析等で解析的に評価した結果に基づき、地震動強さの条件付き損傷確率分布として表される。ハザード曲線と fragility 曲線に基づく地震リスク評価手法は、建物の時刻歴応答解析など高度な解析技術を必要とせず、地震動強さを共通指標としたハザード曲線と fragility 曲線のコンボリューションにより容易に地震リスクを評価することができる。また、地震危険度や建物の損傷しやすさをひとつの地震動強さ指標によって表現するため、地震動や建物応答に関する専門知識を持たない相手とのリスクコミュニケーションがしやすく、現在においても最もよく用いられている手法である。一方で、地震動の本来の姿とも言える時刻歴波形の一部分の情報のみを用いて地震リスク評価を行うことにより、時刻歴波形に含まれる様々な地震動情報（周期特性や経時特性）によるリスクへの影響を無視してしまう恐れがある。また、地震ハザード曲線と fragility 曲線による地震リスク評価では、建物や地盤などの非線形性を陽には考慮することができず、地震リスク評価の不確実さを増やす原因にもなっている。

後者は、主に原子力施設の確率論的地震リスク評価に用いられている手法に代表される。前者の課題点を克服するために、評価地点に起こり得る地震波群を時刻歴波形として評価し、それらを入力地震動とした時刻歴応答解析に基づき地震リスクを評価する手法である。入力地震動には、評価地点における広帯域の地震動強さを評価することが可能な応答スペクトル距離減衰式に基づく一様ハザードスペクトル (Uniform Hazard Spectra ; UHS) に適合するように作成された模擬地震波群が用いられることが多い。UHS は応答スペクトル距離減衰式に基づく各周期の地震ハザード曲線の等確率値を結んだ

スペクトルであるため、UHS に適用するように作成した地震波には起こり得る全ての震源による地震動特性が包括的に反映されてはいるものの、具体的な震源断層による地震動特性を表す地震波とはなっていない。また、スペクトル適合模擬波であるため互いに関係のある 3 方向（水平 2 方向，上下方向）の地震波セットとしては評価することが困難であるという課題もある。

地震動予測の研究分野では、近年、断層モデルに基づく地震動評価手法が発展してきた。この手法は、震源断層の破壊性状や地震動の伝播特性を物理的モデルとして地震動評価に反映することができるため、実地震動の特性を比較的精度良く表現できる手法として時刻歴応答解析を必要とする高層建物の設計用地震動としても用いられている。断層モデルに基づく地震動評価は、1 つの断層モデルに基づく 3 方向成分の時刻歴波形を評価することができるため、3 次元有限要素モデルのような詳細な建物モデルの解析への適用性も高いと考えられる。

このような背景より、本論文では、地震動評価技術の最新知見である断層モデルに基づく地震動評価技術を活用した次世代に向けた新しい確率論的地震リスク評価手法を対象として種々の検討を行った。

次世代手法では、評価地点の地震ハザードを、断層モデルに基づく時刻歴地震波群の集合として評価し、それらを入力地震動とした建物・機器の時刻歴応答解析に基づく建物・機器の応答と耐力との比較により直接的に地震リスクを評価する。評価地点に起こり得る全ての地震波群を評価するために、断層モデルの震源特性の認識論的不確定性および偶然的な不確定性を考慮した多数の断層モデルのサンプルを生成し、その 1 つ 1 つの断層モデルに対して波形合成法を用いて断層モデル地震波群を作成する。このように時刻歴波形として作成された断層モデル地震波群は、地盤や建物の非線形解析にも適用可能であり、地盤や建物の非線形化を考慮したリスク評価も可能となる。また、個々の断層モデルの震源の違いや震源特性の違いが、断層モデル地震波群としての周波数特性や経時特性のばらつきに反映されることから、応答特性が異なる様々な機器で構成される機器システムを有する建物の地震リスク評価を行う場合にも、よりきめ細やかな地震リスク評価が期待できる。

また、震源～地震動～建物の応答～建物の損傷可能性の地震リスク評価の連の流れを一気通貫的に評価するため、各評価段階における情報を失うことなく地震リスクを評価することができる。また、得られた評価結果を震源まで遡ってトレースすることができることから、地震リスクが大きくなる場合の要因が特定しやすく、効果的な地震安全対策の策定にも有益であると考えられる。本論文では、短周期～長周期まで様々な周波数応答特性の機器類から構成された機器・配管システムを有する建物の機能損傷評価を対象として、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の優位性を確認することを目的の一つとする。

一方で、評価地点の地震ハザードを断層モデル地震波群を用いて評価するということは、地震波群作成の解析負荷が大きだけでなく、その後の時刻歴応答解析や損傷可能性評価の解析負荷も増大するため、次世代手法の実適用に向けては効率化手法を確立することが重要となる。本論文では、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の実適用に向けた解析負荷低減を目的として、最終的な地震リスクを最も良く表す地震動強さ指標に基づき地震リスクに影響を及ぼす震源を選定することによって、断層モデルの作成サンプル数を低減させる手法を提案する。

これまで、原子力施設向けの確率論的地震リスク手法の高精度化および信頼性向上を目的として、



西田ら（2013，2015）によって最大加速度を地震動強さ指標とする地震ハザードに寄与する震源を対象として断層モデル地震波群が作成されている。本論文ではそれらの地震波群を用いて検討を行った。

本論文は、全 6 章の構成とする。以下に、各章の検討内容と結果の概要を示す。

第 1 章では、地震リスク評価手法の変遷や関連研究について調査し、従来の地震リスク評価手法の内容と課題点について整理した。また、断層モデル地震波群に基づく新しい地震リスク評価手法の特長と課題点について概説した。最後に、本論文の目的である断層モデル地震波群の地震リスク評価の有効性の検証および実適用に向けた効率化手法の提案に関してその概要を述べた。

第 2 章では、本論文の検討に用いる断層モデル地震波群の作成手法について、西田ら（2013，2015）の論文を引用して概説した。また、断層モデル地震波群の作成結果に関して考察を行った。

第 3 章では、震源特性の不確定性を考慮して、ひとつの震源から作成した約 3000 波の断層モデル地震波群を対象として、断層モデルの震源特性の不確定性が、地震動強さや建物応答に及ぼす影響を感度解析した。重回帰分析の結果、地震モーメント、平均応力降下量、媒質の  $Q$  値の影響が大きく、断層モデル地震波群を作成する上で重要なパラメータであることを確認した。また、震源特性が震源スペクトルに及ぼす影響は、震源特性の種類毎に影響する振動数領域の範囲が異なることを確認した。

第 4 章では、実適用可能な地震波数として抽出された 250 波の断層モデル地震波群を対象として、地震波群の応答スペクトルのばらつきと周期間相関に着目し、地震リスク評価用地震波群の応答スペクトルのばらつきや周期間相関が、最終的な地震リスク評価結果にどのような影響を及ぼすのかを定量評価することによって、応答スペクトルのばらつきと周期間相関を実地震動に近い形で考慮できる断層モデル地震波群に基づく地震リスク評価手法の有効性を確認した。

第 5 章では、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の課題点である解析負荷の低減を目的とした効率化手法を提案した。提案手法は、時刻歴波形から算定することが可能な様々な地震動強さ指標の中から最終的な地震リスクを最も良く表すことができる地震動強さ指標を選定することにより、地震リスクに寄与する震源に照準を当てた地震波作成サンプル数の低減を図る手法である。この提案手法について、地震動評価位置、建物モデル、機器・配管システムの条件を変えた複数の解析ケースを対象として妥当な地震動強さ指標が選定されるか確認し、提案手法の妥当性を確認した。また、断層モデル地震波群を用いた地震リスク手法の効率化手法の適用フローを示し、効率化手法によって実適用可能な負荷で地震リスク評価できることを確認した。

第 6 章では、本論文の結論について述べた。また、本論文で得られた知見の一般性と今後の課題について言及した。

（要旨：3917 字）

## Summary

Title : Study on probabilistic evaluation of building functional loss  
using ground motions simulated with fault rupture models

: Proposal of efficient evaluation method based on seismic-sources selection in terms of the seismic risk contribution

Name Sayaka Suzuki (Igarashi)

The ground motion estimation methodology has been remarkably developed for the past few decades. In particular, the method based on the fault rupture model has attracted notice because it can include the physical characteristics of the fault and/or the ground-motion propagation into the waveform of simulated ground motion. Recently, the ground motions based on the fault rupture model have been used for a structural design of high-rise buildings. On the other hand, the probabilistic seismic risk such as a damage or functional loss of the building has been generally evaluated based on the stochastic approaches without considering the time history of ground motions, where the hazard curve and the fragility curve associated with the ground-motion intensity have been used. Even if the ground-motion time histories are considered, they are generated so as to fit to the spectra such as a uniform hazard spectra, therefore the detailed seismic-source characteristics are not incorporated in the generated ground motions.

This paper subjected the next-generation probabilistic seismic risk evaluation of building functional loss using simulated ground motions with fault rupture models. The seismic risk is evaluated based on the dynamic response analysis of a structure or its equipment, where the possible ground motions at the objected site are applied as input ground motions. The frequency of building functional loss induced by the ground motion is directly calculated with the occurrence frequency of each ground motions and the damage probability of the equipment system. One of the advantages of the next-generation methodology is that the ground motions with fault model have rich information, and also that the serial evaluation can be conducted from the seismic source to the building functional loss. These advantages enable to conduct more reliable risk evaluation.

However, it is difficult to generate all the possible ground motions at the objected site with fault rupture models in terms of the restriction of calculation times and costs.

The purposes of this study are shown as below :

- 1) The grasping the important seismic-source characteristics of the fault rupture models in order to generate ground motions for the risk evaluation
- 2) The clarification of the effectiveness of risk evaluation using ground motions with fault rupture models comparing with the spectra-fitted ground motions which have been used for conventional risk evaluation.
- 3) The proposal of the efficient evaluation method for generating ground motions with fault rupture models based on seismic-sources selection in terms of the seismic risk contribution.

In this study, the author conducted the building functional loss evaluation using ground motions simulated with fault rupture models, which correspond to the seismic hazard of the objected site. The fault rupture models

incorporate the uncertainties of the seismic-source characteristics based on Monte Carlo simulation and Logic tree, and the ground motions are evaluated by the synthesis method such as stochastic green's function method and wave number integration method. Then, the dynamic response analyses of general RC structure with these ground motions were conducted and the system damage frequencies of simple plumbing system, which consist of some equipment which show different vibration characteristics, were compared. Finally, the efficient method for generating ground motions which contribute to the seismic risk was proposed.

This paper consists of six chapters. The outline of each chapter is as follows :

The first chapter describes the seismic risk evaluation methodologies such as seismic hazard analysis, hazard disaggregation, and the strong motion estimation method and so on. In addition, some issues for the conventional risk evaluation and the expected advantages of the next-generation risk evaluation using the fault rupture model were mentioned. Lastly, the purposes of this study were expressed.

The second chapter explained the ground-motion generation method for probabilistic seismic risk evaluation with referring to the studies by Nishida (2013 ,2015). The ground motions were generated to be consistent with the seismic hazard at the target site, Oarai district. They are generated with fault models which are applied to the hazard-contributed seismic sources represented as a combination of magnitude  $M$  and distance  $X$ . T The second chapter also explained the some conditions for generating hazard-consistent ground motions considering the uncertainties of seismic-source characteristics.

The third chapter discussed the relationships between the uncertainties of seismic-source characteristics, seismic intensities and structural responses based on the sensitive analysis. The more important parameters for the ground motions for risk evaluation and their tendencies were grasped.

The forth chapter described the influence by the variance and/or inter-period correlation of response spectra of ground motions on the resulted damage probabilities of the plumbing system. Some sets of spectra-fitted ground motions were generated, which differ the conditions of realization of the variance and/or inter-period correlation of the response spectra. Their damage frequencies were compared to discuss the effectiveness of risk evaluation based on the ground motions with fault rupture models.

The fifth chapter proposed the efficient evaluation method based on the seismic-sources selection in terms of their seismic risk contributions. Concretely, the most properly seismic intensity index to represent the conclusive risk ( i.e. building functional loss) is selected from those of which can be calculate from the ground-motion time history, the seismic sources for ground motions generation are determined based on the selected intensity.

The sixth chapter described the conclusion of this study and some residual issues about the risk evaluation using ground motions with fault rupture models.

(Summary : 880 words)

(空白)

# 目次

## 第 1 章 序論..... 1

- 1.1 はじめに
- 1.2 地震リスク評価の必要性
  - 1.2.1 地震外力に対する建物の要求性能とリスク情報の活用
  - 1.2.1 地震リスク評価に用いる地震外力の位置付け
- 1.3 従来の地震リスク評価手法
  - 1.3.1 従来手法①：地震ハザード曲線と fragility 曲線に基づく評価手法
  - 1.3.2 従来手法②：UHS 適合地震波群を入力とした時刻歴応答解析に基づく評価手法
- 1.4 従来の地震リスク評価手法の課題
  - 1.4.1 従来の地震リスク評価手法に対する Sewell (2009) の提言
  - 1.4.2 従来の地震リスク評価に対する課題の整理
- 1.5 断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価の必要性
- 1.6 既往研究の調査
  - 1.6.1 地震動強さを指標とする地震ハザード評価手法に関する研究
  - 1.6.2 地震ハザードの時刻歴波形への拡張に関する研究
  - 1.6.3 断層モデルに基づく確定論的地震動評価手法に関する研究
  - 1.6.4 確率論的地震動評価手法とシナリオ地震の融合に関する研究
- 1.7 次世代に向けた新しい地震リスク評価手法
  - 1.7.1 次世代に向けた新しい確率論的地震リスク評価手法の目標像
  - 1.7.2 次世代地震リスク評価手法の特長
  - 1.7.3 次世代手法に対する現状の課題
- 1.8 本論文の目的
- 1.9 本論文の構成
- 1.10 本論文における用語の定義

## 第 2 章 震源特性の不確定性を考慮した断層モデル地震波群の作成..... 41

- 2.1 はじめに
- 2.2 ハザードに適合した断層モデル地震波群の作成手法
  - 2.2.1 地震ハザード評価
  - 2.2.2 地震ハザードの分解
  - 2.2.3 震源特性の不確定性の設定

- 2.2.4 断層モデルに基づく時刻歴地震動の評価
- 2.2.5 対象敷地の地震ハザードに調和させるための調整
- 2.2.6 抽出された断層モデル地震波群の発生頻度
- 2.3 本論文において対象とする地震波群
  - 2.3.1 地震ハザード評価の条件
  - 2.3.2 震源特性の不確定性の条件
  - 2.3.3 巨視的震源特性の不確定性の条件
  - 2.3.4 微視的震源特性の不確定性の条件
  - 2.3.5 地震動評価の条件
  - 2.3.6 断層モデル地震波群の作成結果
  - 2.3.7 断層モデル地震波群の位置付けの整理
- 2.4 断層モデル地震波作成手法に関する考察
  - 2.4.1 震源特性の不確定性設定に関する最新知見の整理
  - 2.4.2 断層モデルの設定手法の妥当性に関する考察
  - 2.4.3 統計的グリーン関数法と距離減衰式の差異について
- 2.5 まとめ

### **第 3 章 震源特性の不確定性が地震動特性や建物応答に及ぼす影響..... 89**

- 3.1 はじめに
- 3.2 断層モデルの震源特性と地震動応答に関する既往の知見
- 3.3 対象震源
- 3.4 対象建物および評価地点の地盤特性
  - 3.4.1 建物モデル
  - 3.4.2 地盤モデル
- 3.5 基礎底面における入力地震動評価
  - 3.5.1 地盤解析
  - 3.5.2 基礎底面における入力地震波の評価結果
- 3.6 地震動強さ指標
- 3.7 一つの震源で作成された地震波群の地震動特性
  - 3.7.1 時刻歴波形および応答スペクトル
  - 3.7.2 地震動強さの分布
- 3.8 地震動強さと建物最大応答の関係
  - 3.8.1 建物の応答指標
  - 3.8.2 地震動強さと建物最大応答の関係
  - 3.8.3 建物 fragility 評価
- 3.9 震源特性と地震動強さおよび建物応答の関係

- 3.9.1 重回帰分析
- 3.9.2 解析結果
- 3.10 断層モデルの震源特性の不確定性が地震動強さや建物応答に及ぼす影響
  - 3.10.1 震源から発生する地震動の加速度フーリエスペクトル
  - 3.10.2 地震モーメント  $M_0$  と地震動強さの関係
  - 3.10.3 平均応力降下量  $\Delta\sigma$ , 高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$ , Q 値係数  $C_{Qc}$  と地震動強さの関係
  - 3.10.4 アスペリティ面積比  $C_{Sa}$  と地震動強さの関係
  - 3.10.5 破壊伝播速度係数  $C_{Vr}$  およびライズタイム係数  $\alpha_r$  と地震動強さの関係
  - 3.10.6 アスペリティ位置と破壊開始点位置と地震動強さの関係
- 3.11 まとめ
  - (補足) 地震動のピークファクターによる震源特性と地震動強さの関係

## 第 4 章 断層モデル地震波群による建物機能損傷評価の有効性の検証..... 133

- 4.1 はじめに
- 4.2 応答スペクトルのばらつきや周期間相関に関する既往研究
  - 4.2.1 応答スペクトルのばらつきに関する既往研究
  - 4.2.2 応答スペクトルの周期間相関に関する既往研究
  - 4.2.3 建物の時刻歴応答解析に適用するための Conditional Mean Spectrum
- 4.3 対象敷地の地震ハザードに適合する断層モデル地震波群の地震動特性
  - 4.3.1 時刻歴波形および応答スペクトル
  - 4.3.2 応答スペクトルの中央値および自然対数標準偏差
  - 4.3.3 応答スペクトルの周期間相関
  - 4.3.4 地震動の継続時間
- 4.4 模擬地震波セットの作成
  - 4.4.1 地震波ケース
  - 4.4.2 応答スペクトルのばらつきおよび周期間相関を考慮した応答スペクトル群の作成
  - 4.4.3 スペクトル適合地震波の作成
  - 4.4.4 解放基盤における模擬地震波
- 4.5 基礎底面における入力地震動評価
  - 4.5.1 地盤解析
  - 4.5.2 基礎底面における入力地震波の統計値
- 4.6 建物の時刻歴応答解析
  - 4.6.1 建物モデル
  - 4.6.2 建物最大応答結果
  - 4.6.3 建物応答の相関
- 4.7 機器・配管システムの損傷確率評価

- 4.7.1 機器・配管システム
- 4.7.2 機器・配管システムの応答の相関
- 4.7.3 機器・配管システムの耐力の相関
- 4.7.4 機器・配管システムの損傷確率評価
- 4.7.5 機器・配管システムのフラジリティ評価
- 4.8 まとめ

## 第 5 章 断層モデル地震波による建物機能損傷評価の効率化手法の提案..... 191

- 5.1 はじめに
- 5.2 断層モデル地震波による建物機能損傷評価の効率化手法
- 5.3 地震リスクを良く表現する地震動強さ指標の選定方法の提案
  - 5.3.1 時刻歴地震波群による地震リスク評価手法と従来手法との関係
  - 5.3.2 地震リスクを良く表現する地震動強さ指標の選定手法の提案
- 5.4 地震動強さ指標の選定方法の妥当性の検証
  - 5.4.1 断層モデル地震波群
  - 5.4.2 機器・配管システム
  - 5.4.3 地震動強さ指標
  - 5.4.4 建物モデル
  - 5.4.5 解析ケース
  - 5.4.6 解析結果
- 5.5 地震動強さ指標の選定方法の複数震源への適用性
- 5.6 地震動強さ指標の選定に必要な地震波数の目安
- 5.7 効率化手法の適用フロー
- 5.8 効率化手法による解析負荷低減の目安
- 5.9 まとめ

## 第 6 章 結論..... 243

- 6.1 本論文の結論
- 6.2 本論文で得られた知見の一般性
- 6.3 今後の課題

研究活動リスト.....付 1

謝辞



## 第 1 章 序論

### 1.1 はじめに

本論文は、近年急速に発展を遂げてきた断層モデルに基づく地震動シミュレーション技術を生かした新しい確率論的地震リスク評価手法を対象として、評価地点の地震ハザードを表す時刻歴地震波群の評価から機器・配管システムを有する建物の機能損傷評価までの地震リスク評価の一連の流れを実施することにより、従来手法に対する優位性を確認するとともに、任意の建物を対象とした実適用に向けた効率化手法を提案することを主題とする。

従来の確率論的地震リスク評価手法では、評価地点の地震ハザードを地震動強さ指標とその超過頻度（または超過確率）の関係を表すハザード曲線と、ある地震動強さが作用した場合の条件付き損傷確率曲線として表わされる fragility 曲線のコンボリューションによって地震リスクを評価することが一般的に行われている。これに対して、本論文で対象とする新しい確率論的地震リスク評価手法（以降、次世代手法と記す）は、対象敷地の地震ハザードを、発生頻度と関連付いた断層モデル地震波群の集合として表現し、それらを入力地震動とした建物・機器の時刻歴応答解析から得られる建物・機器の応答とそれらの耐力との比較により直接的に損傷可能性を評価し、各地震波による建物・機器の損傷頻度を全地震波について総和することにより地震リスクを評価しようとするものである。この次世代手法は、評価地点に発生する可能性のある全ての地震波群を、断層の応力状態や破壊性状、伝播経路等の物理的な意味合いを考慮することが可能な断層モデルに基づいて詳細に評価することが可能であり、さらに、これらの地震波群は地盤・建物の解析モデルの最新知見である 3 次元モデルの時刻歴応答解析の入力地震動としても用いることが可能であるという観点から、建物の確率論的地震リスク評価の高精度化や信頼性の向上に向けた利活用が期待されている。

近年著しく発展してきた高度計算科学技術を活かしたより精緻で信頼性の高い確率論的地震リスク評価手法の開発やその実適用に向けた取り組みは、原子力安全分野を中心に積極的に行われており<sup>[1]</sup>、本論文において対象とする断層モデル地震波群による確率論的地震リスク評価手法は、そのような取り組みの一環で（国研）日本原子力研究開発機構（以降、原子力機構と記す。）を中心に検討されてきた。本論文は、原子力機構、東京都市大学、東京大学、大成建設(株)との共同研究課題「原子力施設の地震リスク評価手法の高度化に関する研究<sup>1</sup>」の中で、断層モデル地震波群を用いた確率論的地震リスク評価手法の一般化や適用範囲の拡張に関して、筆者が検討してきた内容をまとめたものである。

第 1 章では、本論文の導入部として、建物の確率論的地震リスク評価が社会的に必要とされるようになった背景や既往の関連研究についてレビューし、次世代に向けた新しい確率論的地震リスク評価の位置付けと本論文の目的についてまとめる。

---

<sup>1</sup> H27 年 6 月～H29 年 3 月

---

## 1.2 地震リスク評価の必要性

### 1.2.1 地震外力に対する建物の要求性能とリスク情報の活用

地震動をはじめとする自然外力に対して建物に要求される性能は、“人的安全性”、“資産保全性”、“機能保持性”の3つに大別されている<sup>[2],[3]</sup>。

“人的安全性”は、人命保護の観点から、地震時に建物に必要とされる最も重要な性能である。再現期間が数百年程度のごく稀に発生する地震に対して、人命被害に関わるような建物損傷状態に至らないように（終局状態を超えないように）、設計時における建築基準法や各種設計指針の遵守によって、その性能が担保されている。

“資産保全性”は、財産保護の観点から、地震動による建物損傷を抑制し、建物の資産価値を低下させないようにするために必要な性能である。2000年以降の不動産の証券化に伴い、リスク指標値である地震PML（Probable Maximum Loss）<sup>2</sup>や損失率とその年超過確率の関係を表すリスク曲線などに基づき、ある再現期間の地震動を受けた場合の建物の地震リスクを、経済損失額等のリスク情報として定量化することが一般的に行われるようになった<sup>[3]</sup>。

“機能保持性”は、自然災害や様々な事故時においても建物機能の喪失を防ぎ、災害後の建物機能を迅速に回復するのに必要な性能である。2006年の内閣府中央防災会議において「事業継続ガイドライン<sup>[4]</sup>」が策定され、地震災害等の不測の事態が発生しても事業を継続できるようにするための企業の事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan<sup>3</sup>）策定への取組みが求められるようになっている。2007年の新潟県中越沖地震や2016年の熊本地震の際には、サプライチェーンの機能停止や工場の操業停止によって企業活動全体に甚大な影響を及ぼしており、建物機能の回復率と復旧日数の関係を表す復旧曲線などの建物機能に関するリスク情報を活用した事前対策は、現在も重要視されている。

また、地震リスク情報の活用が重要視されている施設の一つには、商用原子力発電所をはじめとする原子力施設が挙げられる。原子力施設に関しては上記の3つの性能を確保するのはもちろんのこと、地震を起因とする重大事故（シビアアクシデント）による放射性物質の環境拡散や、それに伴う人的被害を防止する“公衆安全性”を確保することが非常に重要である。原子力施設の安全性の確保は「深層防護（Defense in Depth）」の考え方<sup>[5]</sup>で行われており、設計想定を上回る地震動に見舞われたとしても“公衆安全性”が確保されるように多重の安全対策が施されている<sup>[6]</sup>。

原子力施設の地震リスク評価は、確率論的地震リスク評価（Probabilistic Seismic Risk Assessment；地震PRA）と呼ばれており、設計想定を超える地震外力に対して、原子炉システムの機能喪失に繋がる全てのシナリオを想定し、各シナリオによる炉心損傷頻度（Core Damage Frequency；CDF）を評価す

---

<sup>2</sup> 予想最大損失であり、PMLの定義については複数の算出方法があるが、再現期間475年の地震動強さによる90%非超過値、再現期間475年の損失を生じさせる地震による90%非超過値、等で数値化される。

<sup>3</sup> BCPとは、「大地震等の自然災害、感染症のまん延、テロ等の事件、大事故、サプライチェーンの途絶、突発的な経営環境の変化など不測の事態が発生しても、重要な事業を中断させない、または中断しても可能な限り短い期間で復旧させるための方針、体制、手順等を示した計画（内閣府 事業継続ガイドライン（H25年8月改定 第三版より））」である。H17年10月に「民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査委員会」によってガイドライン第一版が策定され、2016年3月現在では第三版として改定されている。

ることが行われている。地震 PRA は、深層防護の考え方で実践された安全対策が「どの程度の安全性を確保するものなのか」という問いについて定量的な評価を行うための唯一の手法として位置付けられている。

経済産業省・総合資源エネルギー調査会における山口の報告<sup>[7]</sup>によれば、日本国内における原子力施設の確率論的リスク評価<sup>4</sup>は、リスク評価結果を原子力施設の安全対策に活用する目的で実施し、原子力施設の安全性向上のための一連の活動のひとつとしての位置付けられてきた。しかしながら、2011年の東北地方太平洋沖地震では、地震後の津波によって全電源喪失状態に至り、原子炉の冷却機能が失われたことによる重大事故<sup>[8]</sup>が、福島第一原子力発電所において発生した。確率論的地震リスク評価が安全対策に十分に活かしきれていなかった状況を受けて、原子力安全分野では、確率論的地震リスク評価の結果に基づき、現状残された地震リスク（残余のリスク）をさらに低減するための安全対策の立案に活用するなど、確率論的地震リスク評価を原子力施設の継続的な安全性向上に活用することの重要性が再確認され、その重要性は一層増している。

---

<sup>4</sup> 2011年の福島原発の事故以前は、日本国内の原子力施設向けのリスク評価は、“確率論的安全性評価（PSA ; Probabilistic Safety Assessment）”と呼ばれることが多かった。日本では社会的に「絶対的な安全性」が重要視されてきたという背景もあり、安全性評価という位置付けの方が国内では馴染みやすかったとも考えられる。現在は、“確率論的リスク評価（PRA ; Probabilistic Risk Assessment）”と呼ばれることが一般的である。

---

### 1.2.1 地震リスク評価に用いる地震外力の位置付け

日本国内における建物の設計用入力地震動は、一般的に確定論的な考え方に基づき設定されている。例えば、時刻歴応答解析が必要な超高層建築物<sup>5</sup>に関しては、告示波、サイト波、観測波から所定の地震波数を入力とした時刻歴応答解析が必要となっており<sup>9)</sup>、告示波については、基準加速度応答スペクトルに適合する模擬地震波、観測波については、過去の地震観測記録を速度基準化した地震波が用いられている。サイト波に関しては、評価地点の地震環境等を考慮し確定論的に設定した断層シナリオに対する断層モデル地震波が用いられており、断層シナリオを設定する際には、設計者の工学的判断に基づき比較的保守性のあるシナリオが選定されることが一般的である。また、このような設計用地震動を評価する際には、過去の地震記録に基づく日本各地の地震発生しやすさを反映する確率論的・リスク論的な考え方が地域係数  $Z$  に反映されているものの、確定論的に評価されたこれらの地震波には、対象敷地の地震ハザードと対応した発生頻度が関連付けられているわけではない。

これに対して、地震リスク評価用の時刻歴地震波群は、最終的にはそれらによる地震リスク（リスク＝発生頻度×影響度）を確率論的に算定するという目的から、個々の地震波には発生頻度が関連付けられている必要がある。また、確定論的に評価される設計用地震動は、地震動強さの不確実さを見込んで保守性を含む形で評価されるのに対して、地震リスク評価に用いる地震動は、評価地点に起こり得る個々の地震波を保守性を含まない現実的な地震波として評価し、その不確実さについては現実的な地震波の集合として見た場合の、地震動のばらつき幅として表すことが必要となる。

---

<sup>5</sup> 建築基準法第 20 条 1 項 1 号に該当する、高さ 60m を超える建築物。

### 1.3 従来の地震リスク評価手法

建物の地震リスク<sup>6</sup>は、評価地点に起こり得る全ての地震動の情報（地震ハザード）と、それらによる建物の損傷可能性に関する情報（建物脆弱性）を用いて評価される。本節では、従来から一般的に用いられている地震リスク評価手法について、以下の2種類の手法について整理する。従来手法①は、建物の時刻歴応答解析を必要としない最も簡便な評価手法であり、一般建物の地震リスク評価に多く適用されている手法である。従来手法②は、建物の時刻歴応答解析に基づくより高度な評価手法であり、原子力施設の地震リスク評価にも適用されている手法である。以下にそれぞれの手法の概要を示す。

#### 1.3.1 従来手法①：地震ハザード曲線と脆弱性曲線に基づく評価手法

地震リスク評価手法において、最も歴史が長く一般的に良く用いられているのが、地震ハザード曲線と脆弱性曲線に基づく地震リスク評価手法である。

地震ハザード曲線は、1.6節の既往研究の調査で後述する Cornell (1986) <sup>[10]</sup>による地震ハザード評価手法に基づき算定される。ハザード曲線は一般的に、評価地点において期間  $t$  の間に地震動強さ  $y$  を超過する頻度（または確率）として、図 1.1 に示すような右下がりの曲線として表現される。具体的には、評価地点の周辺の全ての震源域  $i$  ( $i=1 \sim N$  個) を対象に、地震の発生頻度  $v_i$ 、マグニチュードの確率密度関数  $f_M(m)$ 、震源距離の確率密度関数  $f_X(x)$ 、マグニチュードと震源距離の組合せ ( $M, X$ ) に対する地震動強さ  $y$  の確率密度関数  $f_Y(y|m,x)$  から成る Eq. 1.1 のように表される。Eq. 1.1 は、マグニチュード  $m$ 、震源距離  $x$  の地震が発生した場合に地震動強さが  $y$  を超える頻度を全震源に対して総和した式であり、マグニチュード  $m$  と震源距離  $x$  の発生確率の重み付けが考慮されている。地震動強さ  $y$  は、地表面最大加速度 PGA や地表面最大速度 PGV などの地震動強さ指標に関する距離減衰式<sup>例えば[11]</sup>に基づき評価される。

脆弱性曲線は、地震動強さ  $y$  に対する建物あるいは機器の条件付き損傷確率の関係を表した曲線であり、Eq. 1.2 のように表される。Eq. 1.2 は、応答  $R$ 、耐力  $C$  とした時の性能関数  $X = R - C > 0$  を損傷の条件とした式である。脆弱性曲線は、地震被害調査、振動台試験、あるいは解析モデルの時刻歴応答解析の結果などから得られる地震動強さと損傷確率の関係の離散値に対して、対数正規分布を仮定した最小二乗法や最尤法に基づき、図 1.1 に示すような右上がりの曲線として表現される。

ハザード曲線と脆弱性曲線に基づく地震リスク評価手法では、図 1.1 に示すように横軸の地震動強さ指標を共通指標としたハザード曲線と脆弱性曲線をコンボリューションすることにより、確率論・統計的に地震リスクを算定する。この手法は、時刻歴地震動の評価や建物の時刻歴応答解析などの高度な解析技術を必要とせず、地震リスクを容易に評価することができるため、一般建物の地震リスク評価に良く用いられている手法である。

<sup>6</sup>一般的に“リスク”は、“ある事象が発生する頻度”と“それによる損失の大きさの期待値”の組合せとして評価される。

$$v(Y > y) = \sum_i^N v_i \int_y^\infty \int_0^\infty \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} f_{M_i}(m) f_{X_i}(x) f_{Y_i}(y | m, x) dm dx dy \quad \text{Eq. 1.1}$$

$$F(y) = P(R > C | y) \quad \text{Eq. 1.2}$$

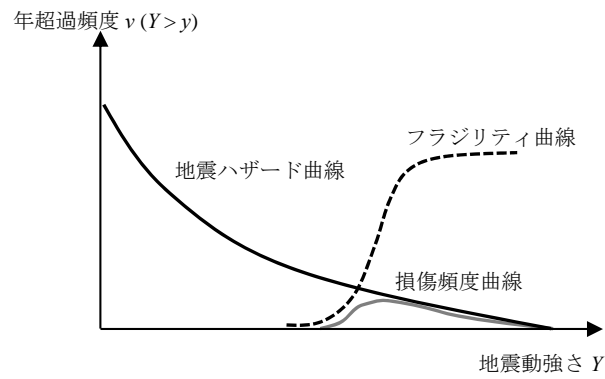


図 1.1 地震ハザード曲線とフラジリティ曲線と損傷頻度曲線の関係

### 1.3.2 従来手法②：UHS 適合地震波群を入力とした時刻歴応答解析に基づく評価手法

前述のハザード曲線と fragility 曲線に基づく地震リスク評価手法は、建物や機器などの時刻歴応答解析を実施することなくリスク評価結果を比較的容易に得られるのが特徴であるが、例えば、原子力施設のように、固有周期の異なる短周期～長周期の機器が複数含まれ、かつ、非常に高い耐震安全性が要求される建物では、図 1.2 に示すように時刻歴応答解析に基づくより高度な地震リスク評価が行われている。

時刻歴応答解析に基づく地震リスク評価では、入力地震動による建物・機器の応答と、それらの耐力を比較することにより、損傷の有無や損傷に至る可能性を算定する。地震リスク評価に用いる入力地震動は発生頻度（または発生確率）と関連付いている必要があるため、例えば一様ハザードスペクトル（Uniform Hazard Spectra ; UHS）に適合する模擬地震波群を作成し、それを入力地震動とすることが一般的である。UHS は、応答スペクトル距離減衰式<sup>例えば[12]~[14]</sup>の各周期に対して得られるハザード曲線について、年超過確率（または、年超過頻度）が等しい応答を全周期帯で結ぶことで得られるスペクトルである。このため、UHS に適合する模擬地震波群は、全周期帯においてターゲットとする発生頻度の地震動応答を満たす地震動の集合となっている。

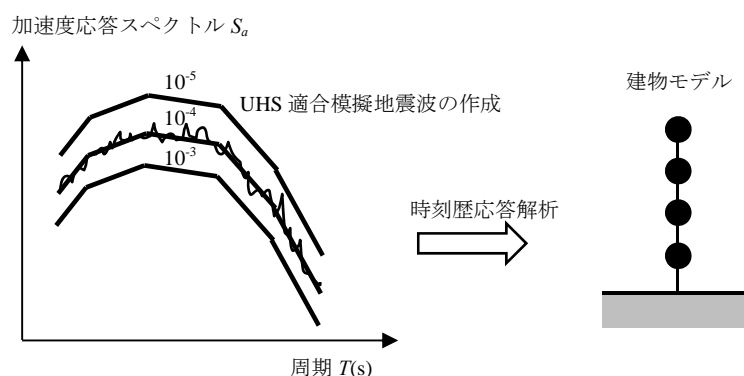


図 1.2 UHS 適合地震波群の地震リスク評価への適用

---

## 1.4 従来の地震リスク評価手法の課題

### 1.4.1 従来の地震リスク評価手法に対する Sewell（2009）の提言

距離減衰式に基づく地震動強さ指標を共通指標とした“地震動の発生頻度（地震ハザード）”と“地震動による建物・設備類の損傷程度（脆弱性）”を用いて評価する従来手法①に関しては、地震動の情報をひとつの地震動強さ指標（例えば、地震動強さの最大値）として代表させることにより複雑な計算技術を必要とせず、比較的容易に地震リスクを定量的に評価することができるという利点がある。また、地震動の情報をひとつの地震動強さ指標として代表させることにより、地震ハザードと建物脆弱性の関係を専門知識を持たない一般の人々に対しても分かりやすく説明することが可能であり、リスクコミュニケーションを行う上では非常に活用しやすいという利点もある。

このように、地震動の情報をあるひとつの地震動強さ指標として代表させるリスク評価手法には多くの有用性があるものの、一方で、時刻歴波形としての実体を有する地震動について、時刻歴波形に含まれる地震動情報の中のあるひとつの側面である地震動強さのみに焦点を当てて地震リスク評価を行うことの問題点については、様々な専門家によって指摘されている。

特に Sewell（2009）<sup>[15]</sup>は、建物の構造安全性に係る意思決定に至るまでの様々な評価段階を概観し、その問題点を非常に分かりやすく分析している。Sewell は、建物の耐震設計や地震リスク評価に関する意思決定の過程を、図 1.3 に示すように 4 つの評価段階に大別している。1 つ目は、地球科学の解釈（Earth Science Interpretations）、2 つ目は、確率論的ハザード評価（PSHA）、3 つ目は耐震工学とリスク評価（Seismic Engineering & Risk Analysis）、4 つ目は意思決定（Decision making）である。図 1.3 の菱形の各評価過程の並びは、意思決定に至るまでの評価段階を時間軸で表しており、Sewell は、この時間軸方向の情報の流れを“Body of Knowledge（情報の幹）”と呼んでいる。また、時間断面における菱形の幅は、評価段階における情報量を表しており、これを“Information pipe size（情報の幅）”と呼んでいる。Sewell は、建物の耐震設計や地震リスク評価に係る 4 つの評価段階において、最終的な意思決定に必要な様々な情報まで削ぎ落としてしまっている可能性があることを指摘しており、この各評価段階における情報量の狭窄点（情報が削ぎ落とされてしまう点）を“Pinch Point”と呼んでいる。

精度や信頼性の高い地震リスク評価を行うことを目標とする場合には、従来手法①のような、地震ハザード情報をひとつの地震動強さ指標に代表させる方法では、図 1.3 の PSHA と Seismic Engineering & Risk Analysis の評価間において、地震動情報や地震動による建物応答に関する Body of Knowledge を狭めている可能性があると考えられる。また、ハザード曲線と脆弱性曲線は、それぞれの曲線が統計的に独立に評価されることが一般的であり、地震動強さの軸は共通であるもののハザード曲線と脆弱性曲線の間には Body of Knowledge の連続性が必ずしもあるわけではないことも課題である。

従来手法②に関しては、周波数領域における地震動強さを考慮した時刻歴地震波を入力とした地震応答解析を行うという点では、従来手法①と比較して Body of Knowledge の幅は格段に広がることが期待できるが、一様ハザードスペクトルは距離減衰式に基づく等確率スペクトルであるため、具体的な



震源像を表現したスペクトルとはなっていないという点において、図 1.3 の Earth Science Interpretations と PSHA の評価間の Body of Knowledge の幅を狭めている可能性があると考えられる。

さらに、Sewell は、各評価段階における“Body of Knowledge”の幅をなるべく狭めないための方法として、最新の計算科学技術（解析ソフトウェアやハードウェア）を用いた評価手法の利活用を提言している。これは、最終的な意思決定に必要な情報量を各評価段階において確保するために、各評価段階において相応の分解能を有する手法を適切に選定する必要性を述べているものと考えられる。

近年では、地盤や建物モデルに関しても 3 次元モデルで検討するケースが行われてきている。3 次元モデルの時刻歴応答解析を行う場合には、3 方向の地震動が互いに関連性のある時刻歴地震波を適用する必要があると考えられ、従来手法②に示す UHS 適合地震波のようなスペクトル適合地震波群では、各方向の時刻歴波形の関係性を考慮することができないという点も課題のひとつであると言える。

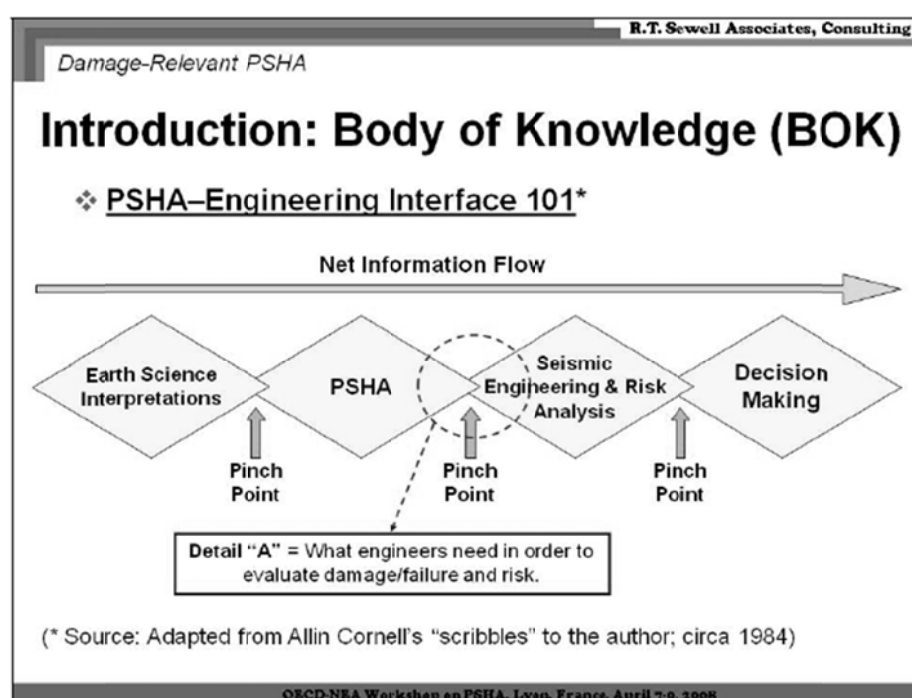


図 1.3 Sewell (2009) によるハザード解析における Body of Knowledge (文献<sup>[15]</sup>より引用抜粋)

---

#### 1.4.2 従来の地震リスク評価手法の課題の整理

Sewell (2009) <sup>[15]</sup>の提言に対して、従来の地震リスク評価手法の課題を整理すると、以下の3つの課題点が明らかになってくる。

- (1) 地震ハザードに時刻歴波形としての全地震動情報が反映されていない。
- (2) 地震動（地震ハザード）と建物の損傷可能性（ fragility ）が独立に評価されている。
- (3) 個々の震源や断層情報を反映した時刻歴地震動ではない。

(1)と(2)に関しては従来手法①に対する課題点、(3)に関しては従来手法②に対する課題点を簡潔に示している。

地震動評価技術に関しては、建物の設計用地震動の評価に対しては最新技術のひとつである断層モデルに基づく強震動シミュレーションが既に一般的に用いられている。一方で、地震リスク評価に関しては、現在も距離減衰式に基づく地震動評価に基づき地震ハザードが評価されるのが主流であり、断層モデルに基づく地震動評価手法を地震リスク評価に盛り込んだ検討は少ない。地震リスク評価の各評価段階においては、建物側に対して地震ハザード側の不確実性が大きいことが指摘されており、断層モデルに基づく最新の地震動シミュレーション技術に基づき地震ハザードをより現実的な地震波群の集合として評価することによって、上記の従来手法の課題にも対応できる可能性がある。

## 1.5 断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価の必要性

建物の地震リスク評価に要求される評価精度の基準ライン（最低ライン）は、地震リスク評価の対象項目（建物のみの評価か、建物に付随する個々の設備を含む評価か）、建物属性（個人所有建物か公共建物か）、損傷に至った場合の周囲への影響度合い、評価期間、予算費用によっても大きく変わることが想定され、場合によっては従来手法でも意思決定をするのに十分な評価精度が得られる場合も多い。

一方で、一旦重大事故が発生した場合に、公衆の安全に多大な影響を及ぼす可能性が考えられる原子力施設のような重要施設に関しては、2009年の柏崎刈羽原子力発電所のインシデントや2011年の東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故を受けて、地震リスク評価を活用した原子力発電所の安全対策の必要性が一段と高まっている。また、地震リスク評価手法自体についても、原子力安全性向上のために最新知見を踏まえた継続的なアップデートが求められている<sup>[16]</sup>ことから、従来の地震リスク評価手法の課題を克服する新しい地震リスク評価手法が必要である。

また、地震災害が発生した場合に防災拠点となる公共施設やライフラインに係る施設についても、地震時に建物機能が喪失しないことが非常に重要となることから、よりきめ細やかな地震リスク評価に基づき事前対策を施しておく必要があると考えられる。

本論文は、次世代に向けた新しい確率論的地震リスク評価手法の一つとして、評価地点の地震ハザードを断層モデル地震波群として評価し、それらを入力とした建物・機器の時刻歴応答解析に基づき地震リスクを評価する手法について検討している。断層モデル地震波群は、豊富な震源情報と断層破壊に関する物理的な意味合いを時刻歴波形に反映することができる。また、時刻歴応答解析に基づき評価することから、地震動と建物・機器の損傷可能性を連続性のある結果が得られる。次世代手法は、SewellのBody of Knowledgeをできるだけ狭めない手法として、従来の地震リスク評価手法の課題点を克服し、よりきめ細やかな地震リスク評価結果が得られる手法として期待できる。

## 1.6 既往研究の調査

本節では、断層モデル地震波群を用いた確率論的地震リスク評価手法に関連する既往研究について調査し、既往の地震リスク評価関連技術の概要と功績を整理する。表 1.1 に地震リスク評価関連技術の変遷を示す。

1950 年～1960 年代には、地震動強さを指標とする確率論的地震ハザード評価手法が確立された。また、1980 年～1990 年代には、地震動強さを指標とする地震ハザード評価を、地震動強さ以外の地震動情報に対しても拡張することを目的として、地震ハザードをマグニチュードと震源距離等に分解する手法が様々な研究者によって提案された。1980 年から 2000 年代には、確定論的地震動評価の分野において、断層モデルに基づく地震動評価手法に関する研究が盛んに行われ、特に 1995 年の兵庫県南部地震を契機とした地震観測網の整備によって、地震動シミュレーション結果の **Validation & Verification** が進捗したことから、現在では断層モデルに基づく地震動評価技術は、対象敷地の地震動像を良く評価できる手法として、建物の設計用地震動の作成にも実適用されている。確率論的地震動評価の分野においても、断層シナリオに基づく地震動評価技術を展開しようという取り組みが行われ、2000 年代以降、確率論的地震ハザード評価とシナリオ地震の融合の分野において、その研究成果が取りまとめられている。

表 1.1 地震リスク評価関連技術の変遷

年代	～1980 年代	1990 年代	2000 年代	2010 年代～現在
社会的背景	建物設計時の地震リスクの説明責任 不動産証券化 (2000) BCP ガイドライン策定 (2006) 柏崎刈羽インシデント (2007) 福島第 1 事故 (2011) 安全性向上評価 ガイドライン (2013) 地震リスク評価の高精度化・信頼性向上に対する要求			
技術的背景	Cornell(1968) 地震動強さ指標に基づく地震ハザード評価の理論体系化 亀田・石川(1988) ハザード適合時刻歴地震波 (スペクトル適合模擬波) Irikura (1983) 波形形成法の提案 釜江ほか(1991) 統計的グリーン関数法の妥当性 香川(2004) 統計的グリーン関数法の長周期拡張 石川・能島(2005) シナリオ地震と PSHA 融合 壇ほか(2006) 生起確率付シナリオ地震 McGuire (1995) ハザード分解手法の改良 西田ほか(2015) 地震リスク評価用 断層モデル地震波群の作成 解析ソフトウェア・ハードウェアの技術的進歩			
地震リスク評価手法	地震動強さ指標に基づく地震リスク評価 時刻歴地震波に基づく地震リスク評価 断層モデル地震波に基づく地震リスク評価			

### 1.6.1 地震動強さを指標とする地震ハザード評価手法に関する研究

#### (a) Kawasumi (1951) による地震ハザードマップの作成

日本における地震ハザード評価研究の先駆けに Kawasumi (1951)<sup>[17]</sup>の研究がある。1950 年の建築基準法の制定に際して、建物の設計用震度の基準を定めるために日本国内の地震危険度の定量的評価が必要とされた時代背景を受けて、Kawasumi は有史以来の歴史地震記録 (599 年～1949 年までの 342 地震, 有史期間  $T$ ) を用いて, Eq. 1.3 の震度  $I_0$  の年超過頻度として日本国内の地震危険度 (physical index of earthquake danger) を表した。 $n(I)$  は震度  $I$  に関する平均頻度関数であり Eq. 1.4 のように表される。震度  $I$  とマグニチュード  $M$  と距離  $X$  の関係 (いわゆる, 距離減衰式) は Eq. 1.5 に示す  $M$  と  $X$  の関数として表わされる。これらの式から, 342 地震の震源データおよび震度データの統計値を用いて  $n(I)$  が算定されている。また, Kawasumi は, Eq. 1.3～Eq. 1.6 および震度  $I$  と最大加速度の関係式から, 再現期間  $t = 75, 100, 200$  年における最大加速度の期待値のコンター図として地震ハザードマップを作成した。このハザードマップは, 当時, 建築構造物の供用期間に対する地震危険度に応じた設計基準の設定に用いられたことから, 地震リスク評価のための地震ハザード評価手法の先駆的研究と言える。

$$\text{physical index of earthquake danger} = \sum_{I_0}^{\infty} \frac{n(I)}{T} \quad \text{Eq. 1.3}$$

$$n(I) = C \times 10^{-aI} \quad \text{Eq. 1.4}$$

$$I = M_k + 2 \log_{10}(X_0 / X) + 2k \log_{10} e \cdot (X - X_0) \quad \text{Eq. 1.5}$$

$$\sum_{I_0}^{\infty} \frac{n(I) \cdot t}{T} = 1 \quad \text{Eq. 1.6}$$

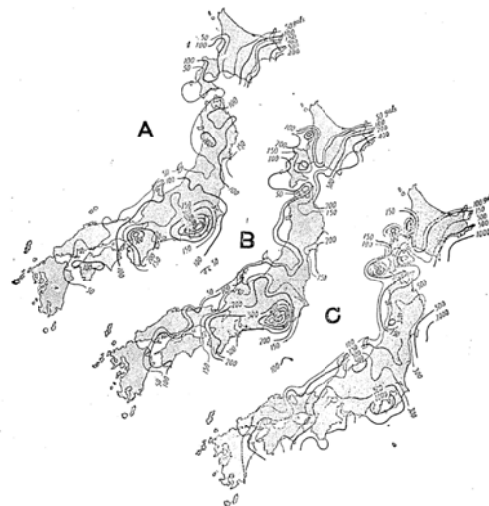


Fig. 3. Expectancy of maximum acceleration of earthquakes in 75 (A), 100 (B) and 200 (C) years.

図 1.4 Kawasumi による再現期間毎の予測最大加速度マップ<sup>[17]</sup>

(b) Cornell (1968) による地震ハザード評価の理論体系の確立

Kawasumi (1951) による地震ハザード評価では、過去に発生した地震の統計値を用いて、日本国内を概観する地震危険度を、ある再現期間に対するコンター図として表現している。これに対して、Cornell (1968)<sup>[10]</sup>は、建物設計に関わる工学技術者が、設計建物の地震リスク情報の説明責任を適切に果たせるよう、あるひとつの任意の評価地点における地震危険度を、地震動強さと平均再現期間の関係（いわゆる、ハザード曲線の形）として連続的に表すための理論体系を提案した。

Cornell は Eq. 1.7 に示すように、 $n$  個の複数震源による地震動強さ  $y$  の非超過確率  $P(Y > y)$  を定式化した。Eq. 1.7 の  $v_j$  は、震源  $j$  による単位面積当たりの平均発生頻度 (回/km<sup>2</sup>) を表している。 $C_j$  は、震源  $j$  におけるマグニチュード  $m$  の地震発生頻度に関する確率モデルを表す項であり、マグニチュードと地震発生頻度の関係を表す Gutenberg-Richter 式に基づき設定される。 $G_j$  は、震源  $j$  と対象敷地との距離  $x$  が  $d \sim r_0$  である時の発生頻度に関する確率モデルであり、図 1.6 に示すように、評価地点と震源との幾何学的な関係に基づき算定される。 $y$  はマグニチュード  $m$  と震源距離  $x$  によって決まる地震動強さであり、距離減衰式によって算定することが可能なひとつの地震動強さ指標を対象としている。

Cornell は、任意の敷地、任意の地震環境に対する地震ハザードを定式化し、汎用性の高い形で評価できる手法を確立したという点で、確率論的ハザード評価への貢献性は非常に大きい。また、評価地点に対して、地震動強さとその発生頻度の関係をハザード曲線として連続的に表現できるようになったことにより、建物の耐震設計や建物の地震リスクの説明に活用しやすい形で地震ハザードを表現できるようになり、現在、一般的に実施されている確率論的地震ハザード評価手法の基本形となっている。

$$P(Y > y) = \exp \left[ - \sum_{j=1}^n v_j C_j G_j y^{-\beta_j / b_{2j}} \right] \quad \text{Eq. 1.7}$$

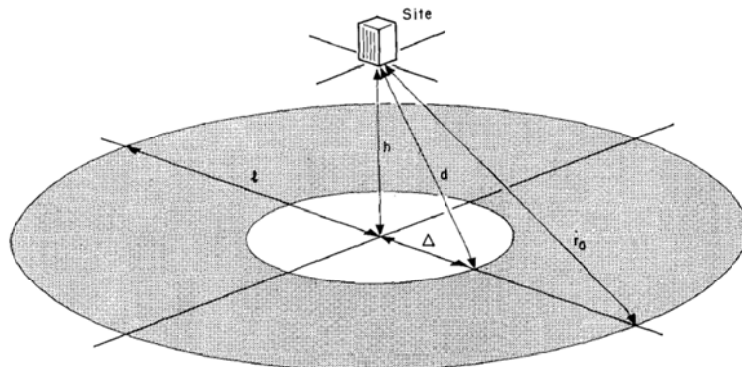
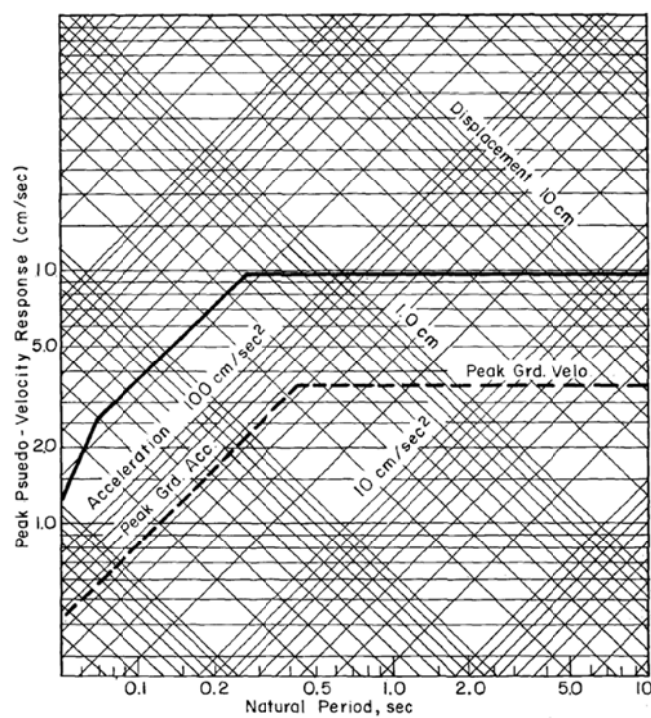


FIG. 6. Annular sources, perspective.

図 1.5 Cornell の手法による地震ハザード評価手法<sup>[10]</sup>

図 1.6 Cornell の手法による地震ハザード曲線<sup>[10]</sup>

### 1.6.2 地震ハザードの時刻歴波形への拡張に関する研究

#### (a) 亀田・石川（1988）によるハザード分解手法に関する研究

亀田・石川（1988）<sup>[18]</sup>は、Cornell が提案した距離減衰式から評価される地震動強さに関する地震ハザードを、地震動強さ以外の地震動特性（周期特性や継続時間）にも拡張するために、距離減衰式に基づいて評価された地震ハザード曲線を、任意の年超過確率となる地震動強さにおいて、Eq. 1.8 および Eq. 1.9 に示すマグニチュード・震源距離の期待値の組合せ（ $M^*$ 、 $X^*$ ）に分解（disaggregation）する手法を提案した。ハザード分解によって得られたマグニチュード  $M^*$ 、震源距離  $X^*$  は、それぞれ、“ハザード適合マグニチュード” および “ハザード適合震源距離” として位置づけられ、この（ $M^*$ 、 $X^*$ ）の組合せに対して、地震動強さ以外の地震動パラメータ、例えば、継続時間（包絡関数）、卓越振動数、スペクトル振幅（スペクトル形状）を（ $M^*$ 、 $X^*$ ）の関数として表すことにより、スペクトル適合模擬地震波を作成する要領で、評価地点の年超過確率に適合する時刻歴地震波群を作成することができるようになった。亀田・石川は、これらの地震波群を「リスク適合地震波」と呼んでおり、地震ハザードに関連付いた時刻歴地震波を作成する方法論として、日本において先駆けとなった研究である。

$$M^* = \frac{\sum_k v_k \cdot \sum_i \sum_j m_i \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, x_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P(x_j)}{\sum_k v_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, x_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P(x_j)} \quad \text{Eq. 1.8}$$

$$X^* = \frac{\sum_k v_k \cdot \sum_i \sum_j x_j \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, x_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P(x_j)}{\sum_k v_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, x_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P(x_j)} \quad \text{Eq. 1.9}$$

ここに、 $v_k$ ：震源  $k$  における年平均発生頻度、 $P_k(m_i)$ ：震源  $k$  においてマグニチュードが  $m_i$  となる確率、 $P_k(x_j)$ ：震源  $k$  において震源距離が  $x_j$  となる確率、 $P(Y \geq y(p) | m_i, x_j)$ ：マグニチュード  $m_i$ 、震源距離  $x_j$  となる時に、年超過確率  $p$  における地震動強さ  $y(p)$  を超える条件付き確率、である。

亀田・石川によるハザード分解の手法は、日本原子力学会の PRA 標準（2015）<sup>[19]</sup>において、原子力施設の地震 PRA における断層モデルに基づく入力地震動の作成手法の一つとしても示されている。前述の「ハザード適合マグニチュード」および「ハザード適合震源距離」は、PRA 標準では「地震ハザードの再分解によるマグニチュード・震源距離」と呼ばれている。



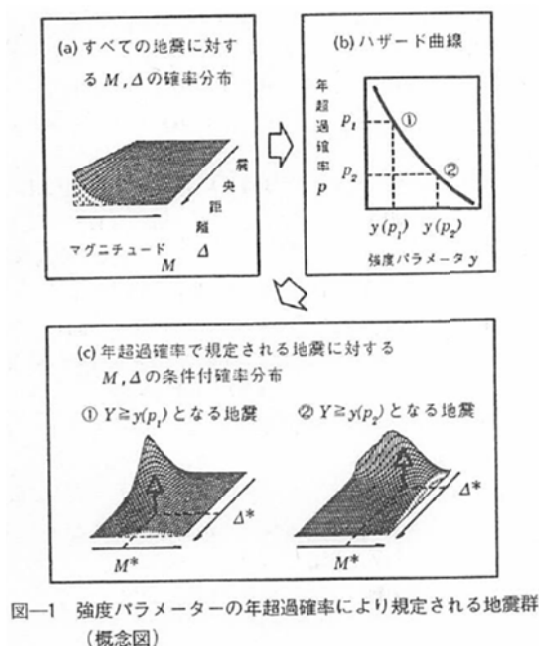


表-2 リスク適合地震動 (基底地震動) のパラメーター値

地点名	東京		大阪	
年超過確率 $p$	0.02	0.005	0.02	0.005
最大 rms 強度 $\gamma_g(p)$ (gal)	123.0	192.1	46.6	86.6
ハザード適合マグニチュード $M^*$	6.97	7.30	6.74	6.99
ハザード適合震央距離 $\Delta^*$ (km)	24.3	23.6	55.3	42.3
$M, \Delta$ の相関係数 $\rho$ (条件 $\gamma \geq \gamma_g(p)$ )	0.802	0.846	0.895	0.902
$t_m^*(p)$ (sec)	1次近似	3.84	4.93	3.65
	2次近似	3.99	4.99	4.28
	条件付期待値	4.04	5.01	4.28
$f_p^*(p)$ (Hz)	1次近似	3.92	3.85	3.70
	2次近似	3.92	3.85	3.71
	条件付期待値	3.89	3.84	3.71
$\beta_g^*(p)$	1次近似	1.00	1.02	0.98
	2次近似	1.00	1.02	0.99
	条件付期待値	1.00	1.02	0.99

1次近似: 式(14), 2次近似: 式(15), 条件付期待値: 式(13)

図 1.7 亀田・石川 (1988) による確率論的地震ハザード評価の拡張<sup>[18]</sup>

## (b) McGuire (1995) によるハザード分解手法に関する研究

米国では、確率論的地震ハザード評価によって得られる一様ハザードスペクトル (Uniform Hazard Spectrum, UHS) が建物の設計用スペクトルとして用いられているが、McGuire (1995)<sup>[20]</sup>は、UHS が確率論的地震ハザード評価 (PSHA) の等確率の点を結ぶスペクトル形状として表されているため、具体的な震源による地震イベントを対象としているのではなく、対象敷地に起こり得る地震イベントを代表する表現となっていることを問題点として挙げ、それを解決する策としてのハザード分解手法を提案している。UHS は、例えば 10000 年に 1 度の地震動レベルを持つスペクトルとして表され、設計用地震動は UHS に適合する模擬地震波として作成される。McGuire は、UHS 適合地震波には具体的な震源情報は組み込まれておらず、マグニチュードや震源距離によって決まる特定の地震像が失われていることを指摘している。このような背景から、McGuire は、確率論的地震ハザード評価と設計用地震動とを相互に関連付けることを目的として、ハザード分解により得られるマグニチュード  $M$  および震源距離  $X$  および距離減衰式に対する偏差  $\varepsilon$  から、地震動の継続時間や非定常性を含む、より正確な地震動像を表現する手法を提案している。McGuire のハザード分解手法の特長としては、Eq. 1.10 に示すようにハザード分解の対象パラメータをマグニチュード  $M$  と震源距離  $X$  に加えて、距離減衰式に対する偏差  $\varepsilon$  を導入した点にある。亀田・石川等により提案されていたハザード分解手法では、ひとつの  $M, X$  の組合せに対して、地震動強さは距離減衰式の平均的な振幅値を対象としているのに対して、McGuire の手法は、ひとつの  $M, X$  の組合せに対する地震動強さの不確定性を考慮することが可能となっている。

また、亀田・石川<sup>[18]</sup>の手法は、ハザード分解を地震動強さの超過確率に対して算定しているが、McGuire の手法では、超過確率  $P(Y>y|m,x,\varepsilon)$  の算定に、一般的な Heaviside の step 関数 (Eq. 1.11) の代わりに、Dirac の delta 関数 (Eq. 1.12) を適用することによって、あるひとつの値の地震動強さに対する  $(M, X, \varepsilon)$  の組合せを算定することが可能になっている。

$$v(y) = \sum_i^N v_i \iiint f_M(m) f_X(x) f_\varepsilon(\varepsilon) P(Y > y | m, x, \varepsilon) dm dx d\varepsilon \quad \text{Eq. 1.10}$$

$$P(Y > y | m, x, \varepsilon) = \delta \{ \ln Y(m, x, \varepsilon) - \ln y \} \quad \text{Eq. 1.11}$$

$$P(Y > y | m, x, \varepsilon) = H \{ \ln Y(m, x, \varepsilon) - \ln y \} \quad \text{Eq. 1.12}$$

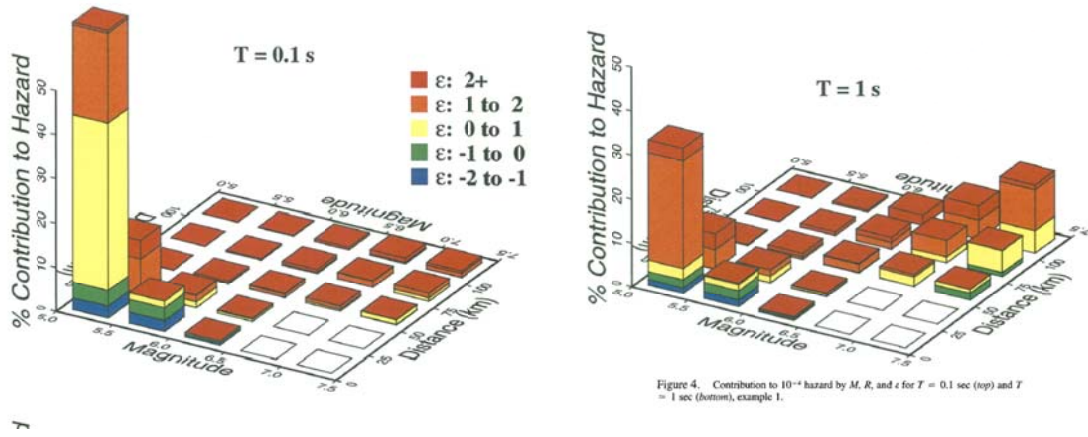


図 1.8 McGuire (1995) による周期  $T$  秒におけるハザード分解の結果 (左 :  $T=0.1$ s, 右 ;  $T=1$ s) <sup>[20]</sup>

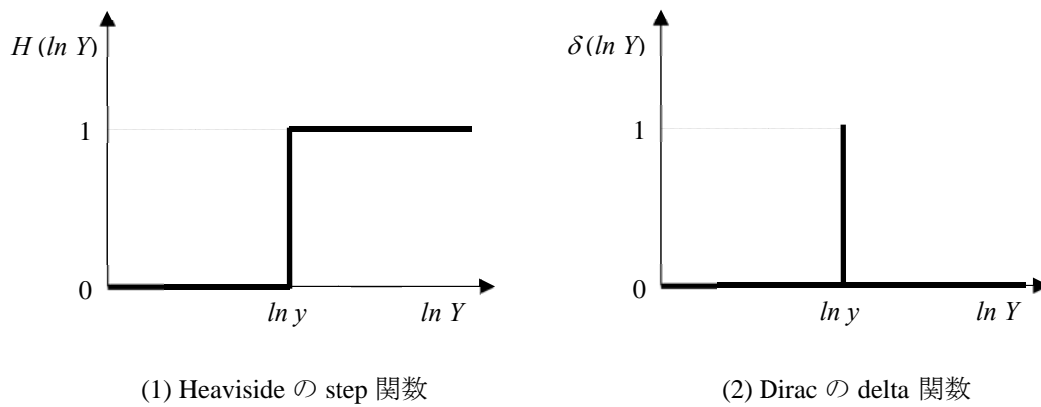


図 1.9 Heaviside の step 関数と Direc の delta 関数

## (c) 高田（2001）による種々のハザード分解手法に対する考察

高田ほか（2001）<sup>[21]</sup>は、既往の研究によって提案されている種々の確率論的想定地震の算定手法に関して、ハザード分解によるパラメータ（マグニチュード  $M$ 、震源距離  $X$ 、距離減衰式に対する偏差  $\varepsilon$ ）の選定方法の違いによる想定地震の特徴の違いについて、限界状態関数  $G$  および一次信頼性解析の概念を用いて説明している。高田らによれば、年超過確率が  $p_0$  となる地震動強さ  $y$  の確率論的想定地震を評価する場合に、亀田・石川が提案する地震動強さの年超過確率に対するパラメータの期待値から想定地震を評価する方法では、年超過確率が  $p_0$  となる地震動強さ  $y$  に対して常に想定地震の地震動強さが過大評価となることを指摘している。これは、限界状態関数  $G = \ln y - \ln Y(M, X, \varepsilon) < 0$  を満たす  $(M, X, \varepsilon)$  の期待値が想定地震の評価のパラメータとなるためであり、想定地震として本来評価したい地震動強さ  $y$  の想定地震に調和したパラメータを得るためには、限界状態関数  $G = \ln y - \ln Y(M, X, \varepsilon) = 0$  を満たす  $(M, X, \varepsilon)$  の期待値を選定するのが適切であると指摘している。

ここで、図 1.10 に、既往研究において提案されているハザード分解手法について、各震源のハザード寄与度を算定する際に参照している地震動強さの範囲を概念的に示す。亀田・石川<sup>[18]</sup>の手法が地震動強さ  $y_0$  を超過する地震動強さの範囲を対象としたハザード寄与度に基づき、マグニチュードや震源距離などのパラメータを決定しているのに対し、McGuire<sup>[20]</sup>の手法や高田らが望ましいとしている手法では、地震動強さ  $y_0$  におけるハザード寄与度に基づき、それらのパラメータを決定している。最終的に想定地震として作成したい地震波の地震動強さとその発生確率の関係によって、用いるべき手法は異なってくるが、本論文における断層モデル地震波群は、ある特定の地震動強さを生じさせる地震波群を作成するという目的から、McGuire や高田らの考え方により近い手法によってハザード分解を行っている。ただし、断層モデル地震波群の中から、対象とする地震動強さと正確に一致する地震波を断層モデルに基づいて作成することは困難であるため、本論文において対象とする地震波群は、(d)に示すように、地震動強さに若干の幅を考慮して、その範囲におけるハザード寄与度に基づいてパラメータを設定している。

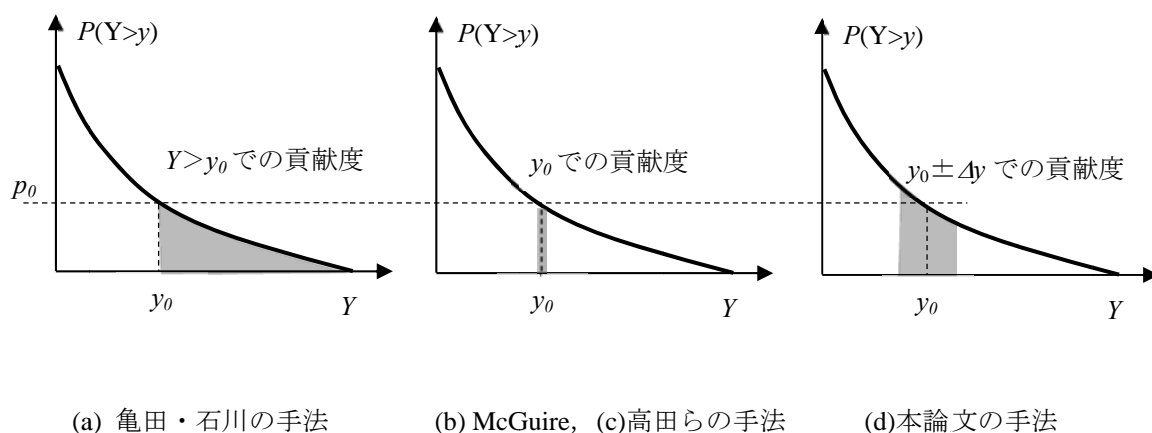


図 1.10 ハザード分解による各震源の貢献度算定におけるハザードの参照範囲

(d) 電中研（2001）による確率論的ハザードマップへの応用に関する研究

中島・石川・奥村の電中研グループ<sup>[22]</sup>は、亀田・石川（1988）のハザード分解手法に基づき、評価地点の想定地震を、ハザード分解による各震源の「貢献度」に基づいて設定する方法論について、再現期間別に、評価地点に最も「貢献度」の高い震源をマップとして表現している。亀田・石川（1988）のハザード分解手法を実サイトに対して適用した検討となっている。

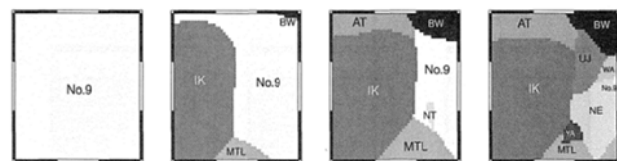
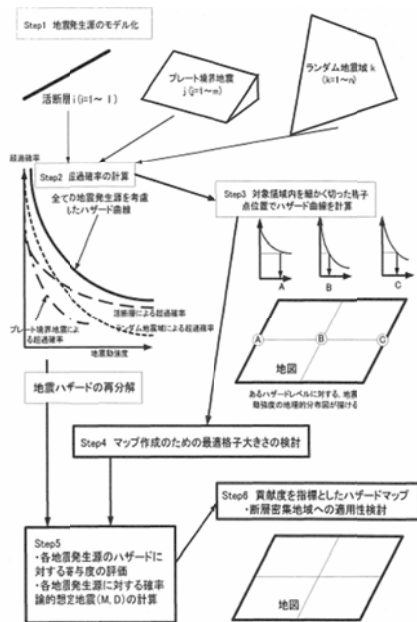


図 2-15 貢献度最大の地震発生源分布図（応答加速度周期：0.1sec）[図中の記号は、表 2-2 および表 2-5 に示す地震発生源の略称を示す]

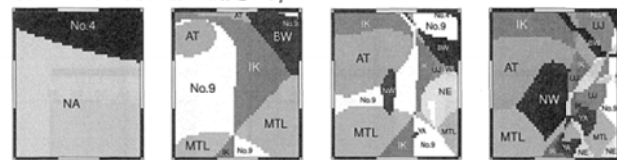


図 2-16 貢献度第 2 位の地震発生源分布図（応答加速度周期：0.1sec）[図中の記号は、表 2-2 および表 2-5 に示す地震発生源の略称を示す]

図 1.11 電中研（2001）のハザード分解による「貢献度」に基づく想定地震<sup>[22]</sup>

### 1.6.3 断層モデルに基づく確定論的地震動評価手法に関する研究

1980 年～2000 年代には、強震動予測技術として断層破壊の物理破壊とそれによる地震動伝播を表す断層モデルによる地震動評価手法が発展してきた。以下に波形合成法による地震動評価手法に関する既往研究についてレビューする。

(a) Irikura (1983), Irikura (1986) による小地震の観測記録を用いた波形合成法の提案

Irikura (1983) <sup>[23]</sup>は、観測可能な小地震の観測記録を用いた半経験的な波形合成による大地震の強震動予測手法を提案した。Irikura による波形合成法は、断層破壊面を想定した **Haskel** 型の地震運動学と地震の相似則に基づき、小地震を合成する手法である。Irikura (1986) <sup>[24]</sup>では、Irikura (1983) <sup>[23]</sup>で提案した波形合成法に関して、 $\omega^2$ モデルで記述される小地震の震源スペクトルに基づきながらも、大地震の地震モーメントにも調和するような波形合成法として、Eq. 1.13 に示す式として改良版を提案している。Eq. 1.13 の第 1 項目は、高振動数帯における $\omega^2$ モデルの震源スペクトルを表す項であり、高振動数帯の震源スペクトルを良く再現できる。また、第 2 項目は、 $\omega^3$ モデルの震源スペクトルを表現する項になっており、地震モーメントにも調和した（すなわち、長周期帯の震源スペクトルを良く再現できる）モデルとなっている。第 2 項目のすべり速度を表す項（ $k$ に関する項）については、短周期における振幅スペクトルのランダム性を再現できるように改良を行っている。

Irikura の波形合成法は、グリーン関数である小地震に経験的に得られる観測記録を適用する手法であることから、一般的に経験的グリーン関数法とも呼ばれている。伝播経路の特性がグリーン関数に既に反映されていることから、同震源における小地震の観測記録が得られていれば、大地震を精度良く評価できる手法となっている。

$$U(x, t) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \frac{FS_{ij}}{FS_0} \cdot \frac{r_0}{r_{ij}} \cdot u(x_0, t - t_\xi) + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{(n-1)n'} \frac{FS_{ij}}{FS_0} \cdot \frac{r_0}{r_{ij}} \cdot \frac{1}{n'} \cdot u(x_0, t - t_\xi - \frac{(k-1)\tau}{n \cdot n'}) \quad \text{Eq. 1.13}$$

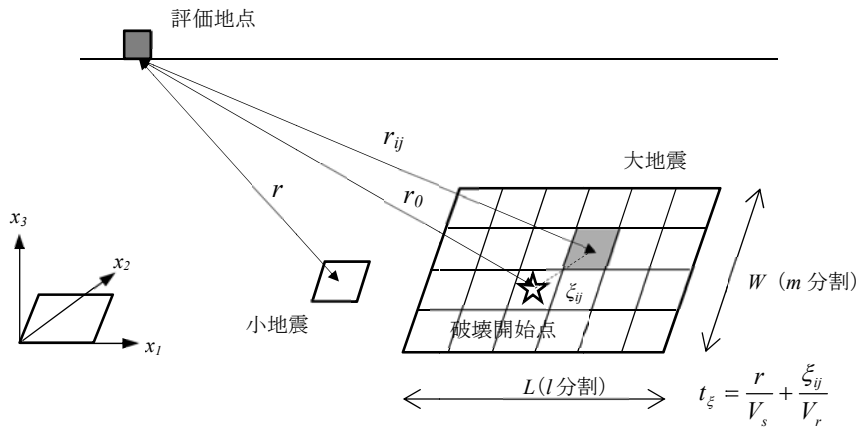


図 1.12 Irikura (1986) の波形合成法の概要図

---

(b) Boore (1983) による統計的グリーン関数の提案

Boore (1983) <sup>[25]</sup>は、統計的特性を有する震源スペクトルに適合する模擬地震波を評価する手法を提案した。Boore の震源スペクトルは、Eq. 1.14 で表され、地震モーメントや応力降下量、媒質の Q 値などの基本的なパラメータが判っていれば、平均的な震源スペクトル像を表現することができる。すなわち、前述の Irikura の波形合成法において、地震観測記録が経験的に得られていない場合にも、Boore の統計的震源スペクトルを地震動シミュレーションに適用することが可能になった。Eq. 1.14 に示す Boore の震源スペクトル自体は、断層面の破壊進展の時間遅れを反映した式ではないが、後述する釜江ほか (1991) <sup>[26]</sup>の検討によって、Boore の震源スペクトルをグリーン関数とした波形合成の適用性が確認され、このような統計的な震源スペクトルを用いた波形合成法は、一般的に統計的グリーン関数法と呼ばれている。

$$A(\omega) = C \cdot M_0 \cdot S(\omega, \omega_c) \cdot P(\omega, \omega_m) \frac{e^{-\omega X / 2QV_s}}{X} \quad \text{Eq. 1.14}$$

$$C = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRTITN}{4\pi\rho V_s^3} \quad \text{Eq. 1.15}$$

$$S(\omega, \omega_c) = \frac{\omega^2}{1 + (\omega / \omega_c)^2} \quad \text{Eq. 1.16}$$

$$P(\omega, \omega_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_m)^{2s}}} \quad \text{Eq. 1.17}$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 4.9 \times 10^6 \cdot V_s \cdot (\Delta\sigma / M_0)^{1/3} \quad \text{Eq. 1.18}$$

ここに、 $A(\omega)$ ：震源から発生する地震動の加速度振幅スペクトル、 $R_{\theta\phi}$ ：ラジエーションパターン係数、 $FS$ ：自由地盤の振幅係数、 $PRTITN$ ：地震動エネルギー水平 2 方向成分への分割係数、 $\rho$ ：地盤密度、 $V_s$ ：震源近傍地盤のせん断波速度、地震モーメント  $M_0$ 、 $S(\omega, \omega_c)$ ：震源スペクトル、 $\omega_c$ ：コーナー角振動数、 $\Delta\sigma$ ：平均応力降下量、 $P(\omega, \omega_m)$ ：高振動数遮断フィルタを表している。

## (c) 釜江・入倉・福知（1991）による統計的グリーン関数法による強震動予測手法の提案

釜江・入倉・福知（1991）<sup>[26]</sup>は、Irikura（1983, 1986）<sup>[23],[24]</sup>の小地震の観測記録を要素地震とした経験的グリーン関数法に関して、1990年にM7級の大地震の予測への適用性を検証した後、Boore（1983）<sup>[25]</sup>の統計的波形を要素地震とした統計的グリーン関数法に関しても、M7級の大地震の予測の適用性を確認した。釜江ほかは、Irikura（1986）<sup>[24]</sup>の波形合成法に対して、媒質のQ値を補正し、放射特性や高振動数遮断フィルタなどの補正を行うことにより、統計的グリーン関数法による強震動評価を実用的に利用可能なまでに精度向上させたという点で功績が大きい。

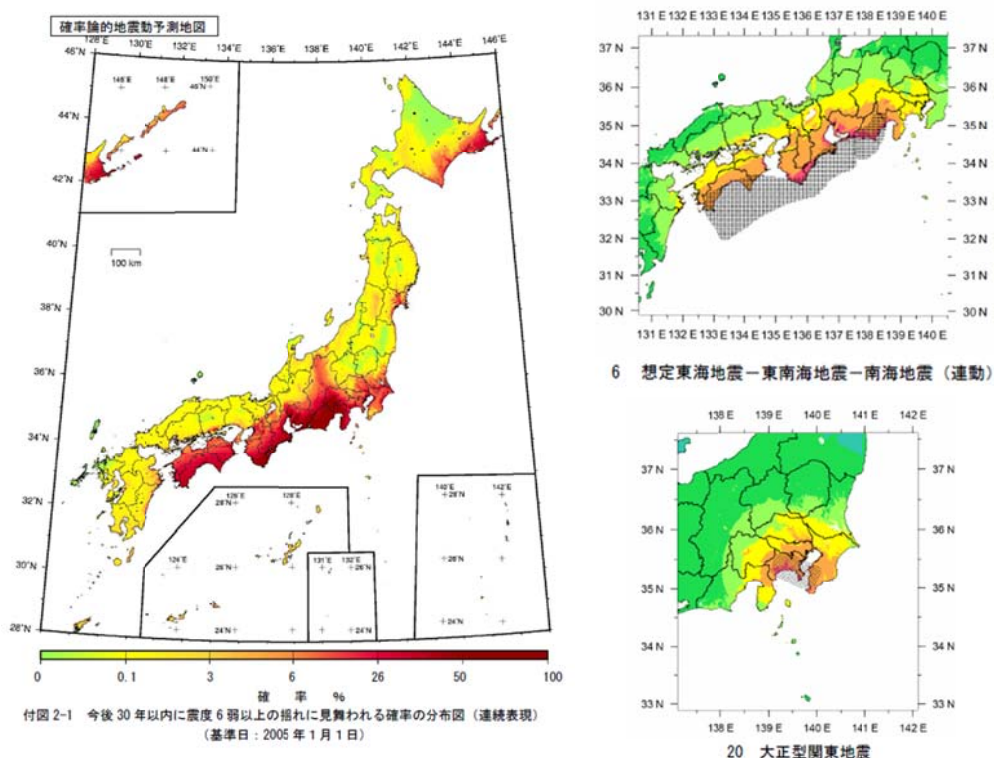
## (d) 香川（2004）による統計的グリーン関数法の長周期領域への適用拡張手法の提案

香川（2004）<sup>[27]</sup>は、波数積分法などの理論手法と統計的グリーン関数法のハイブリッド合成による強震動評価に関して、統計的グリーン関数法の適用範囲をより長周期領域へと拡張するために、位相がコヒーレントな要素地震を選択する手法を提案している。香川の方法によって地震動の短周期領域での統計的（ランダム）な性質と長周期領域での確定的な性質との遷移領域をより適切に表現できるようになり、波数積分法と統計的グリーン関数法のハイブリッド合成により、広帯域の地震動評価が可能になった。

#### 1.6.4 確率論的地震動評価手法とシナリオ地震の融合に関する研究

##### (a) 地震調査研究推進本部「全国地震動予測地図」

地震調査研究推進本部の全国地震動予測地図<sup>[28],[29]</sup>は、図 1.13 に示すような、確率論的地震動評価による「確率論的地震動予測地図」と確定論的地震動評価による「震源断層を特定した地震動予測地図」の 2 つの予測地図から成っている。「確率論的地震動予測地図」は、例えば、今後 30 年以内に震度  $I$  を超える可能性として表される地図であり、ある評価地点で、ある期間  $t$  に起こり得る地震動強さを把握するのに役立つ。ただし、「確率論的地震動予測地図」は、確率論的地震ハザード評価に基づき、全ての震源の地震動強さと発生確率を包含した結果として表現されるため、個々の震源像や地震動像が見えにくいという欠点もある。一方、「震源断層を特定した地震動予測地図」については、震源断層について、その破壊シナリオを断層モデルとして具体的に設定し、その断層の破壊シナリオによる地震動強さの分布として表される地図である。震源断層像とそれによる地震動強さが対応しているため、個々の震源像や地震動像が見えやすい。ただし、その地震の発生確率や設定シナリオの発生確率には関連付いていないという欠点もある。2 つの地震動予測地図は、地震動予測地図としての表現形式が異なっているため、使用目的に応じて相補的に使用していくことが想定されている<sup>[30]</sup>。



(a) 確率論的地震動予測地図

(b) 震源断層を特定した地震動予測地図

図 1.13 地震調査研究推進本部「全国地震動予測地図」<sup>[29]</sup>



## (b) 石川・能島（2005）によるシナリオ地震と確率論的地震ハザードの融合に関する研究

石川・能島（2005）<sup>[31]</sup>は、前述した地震調査研究推進本部の2つの地震動予測地図について、リスク定量化の社会的ニーズを背景として、両者の融合について検討を行っている。石川・能島は、「確率論的地震動予測地図」の評価手法である確率論的地震ハザード評価と、「震源断層を特定した地震動予測地図」の評価手法であるシナリオ型地震動評価の両者を含む概念を「地震ハザード」と定義し、両者の融合の方向性とそのためのフローを図1.14のように提示している。フローでは、地震・地震動に関する両者の共通の基礎情報からスタートする「確率表現」である確率論的地震ハザード評価と「震度表現」であるシナリオ型地震動評価の2つのルートに関して、最終アウトプットに至るまでに、一方の評価結果をもう一方の評価に利用するという双方の補間関係による融合を表している。

石川・能島をはじめとするシナリオ地震と確率論的地震ハザード評価の融合に関する研究成果は、2005年から運用が開始された防災科学技術研究所の公開システム「地震ハザードステーション J-SHIS」<sup>[32]</sup>に反映されており、共通の地震・地震動に関する基礎情報に基づき評価された確率表現または震度表現として表される地震ハザード情報を、システム上においてユーザーが任意に利用することが可能になっている。

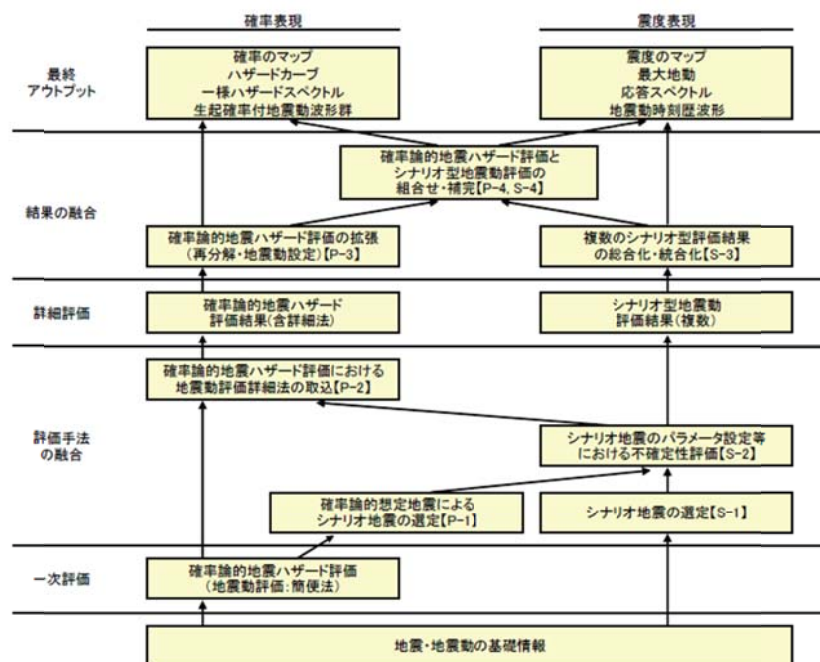


図 1.14 石川・能島（2005）による確率論的評価とシナリオ型評価の融合のフロー<sup>[31]</sup>

(c) 安中ほか（2005）による生起確率付きシナリオ地震の作成

安中ほか（2005）<sup>[33]</sup>は、レベル 2 設計用地震動の条件を満足する条件下において、建物のライフサイクルコストの期待値が最小となるような最適設計をするために、神戸の主要活断層および東南海地震、南海地震を対象としたシナリオ地震に対して、地震ハザードの分解によるハザード貢献度に応じた生起確率付の時刻歴地震波群を作成している。断層シナリオとしては、例えば図 1.15 に示すように断層モデルの震源特性の不確定性を反映した複数の断層シナリオが設定されており、アスペリティ位置、破壊開始点位置、アスペリティ面積比、地震モーメントまたはライズタイム、破壊伝播速度を不確定性要素とした数十シナリオの断層について、統計的グリーン関数法で時刻歴地震波群を作成している。安中ほかの断層群の震源特性の不確定性については、乱数でランダムに付与されているが、各震源特性の分布性状については特に言及されていない。

また、安中ほかによる検討では、距離減衰式に安中ほか（1997）<sup>[12]</sup>の式を用いている。シナリオ地震による加速度応答は、比較的震源距離の小さい内陸地殻地震に関しては、周期 1.0s 程度付近以外は距離減衰式と波形合成法による結果の整合性が比較的良く取れている結果が得られている。また、海溝型地震に関しては、応答スペクトル比が 1.0 を全体的に下回っており、波形合成法による地震動評価結果が距離減衰式よりも小さい傾向が示されている。

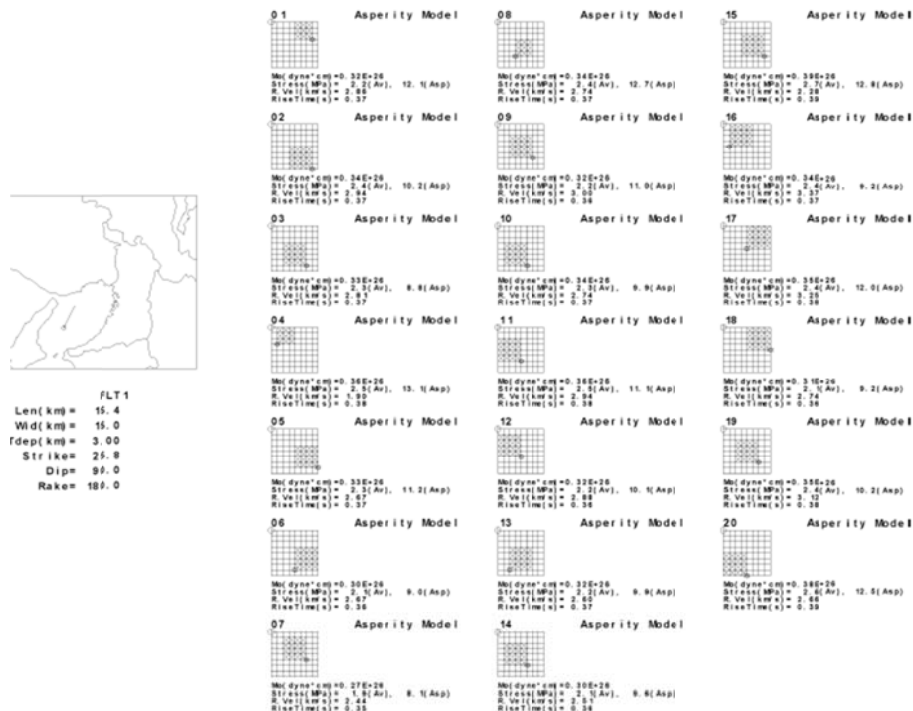


図-7 大阪湾断層（OSW）による 20 通りの断層破壊シナリオ

図 1.15 安中ほか（2005）による断層破壊シナリオの例<sup>[33]</sup>

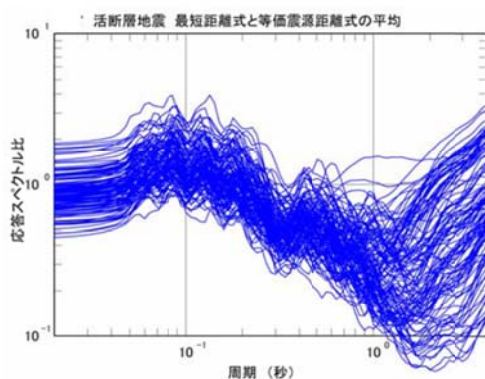


図-14 サイト1の応答スペクトル比  
(内陸活断層)

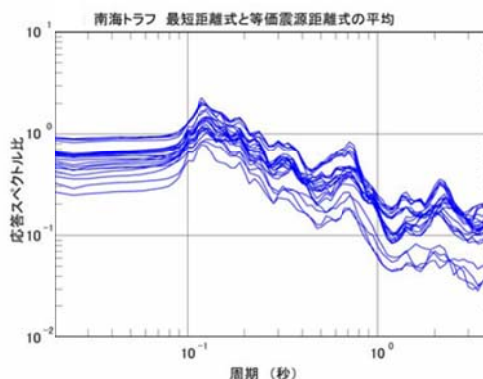


図-17 サイト2の応答スペクトル比  
(海溝型地震)

図 1.16 安中ほかによるシナリオ地震の応答スペクトル比（波形合成／距離減衰式）<sup>[33]</sup>

(d) 壇ほか（2006）による生起確率付シナリオ地震の作成

設計用地震動の検討のための生起確率付の地震波群作成手法に関して、壇ほか（2006）<sup>[34]</sup>は、特定震源および伏在断層に対する生起確率付の地震波群を震源特性の不確定性を考慮した断層モデルに基づいて評価している。

ハザード分解の方法は亀田・石川（1986）<sup>[18]</sup>の手法に基づいている。壇ほかは、想定東海地震については、要素断層に割り当てる要素地震を変えることで、特定震源の震源特性の不確定性を考慮しており、活断層地震に関しては、破壊開始点位置の不確定性を考慮している。また、震源を特定しにくい地震については、逆断層と横ずれ断層を対象として、マグニチュード、震源深さ、アスペリティの応力降下量（実効応力）を不確定要素とした地震動評価を行っている。壇ほかの震源特性の分布性状については、乱数を用いたランダムな分布が与えられており、マグニチュードや震源深さ、アスペリティの実効応力については、ロジックツリーの分岐のように離散的に震源特性の不確定性が考慮されている。

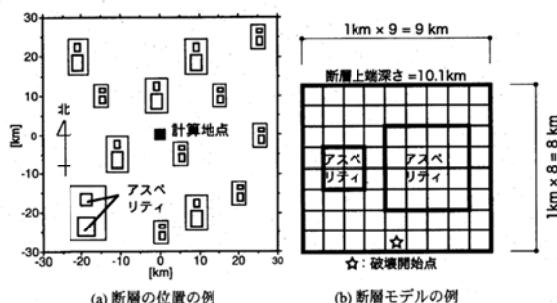


図4 逆断層による想定名古屋浅直下地震の断層モデルの設定例

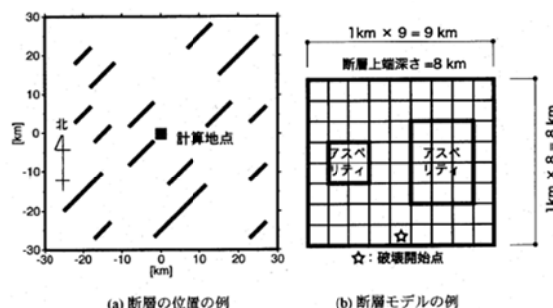


図5 横ずれ断層による想定名古屋浅直下地震の断層モデルの設定例

図 1.17 壇ほかによる断層破壊シナリオの例<sup>[34]</sup>

---

## 1.7 次世代に向けた新しい地震リスク評価手法

ここまで、従来の地震リスク評価の概要や課題点を示し、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価に関連する既往研究をレビューした。本節では、これらを踏まえて、次世代に向けた新しい確率論的地震リスク評価手法である「断層モデル地震波群を用いた確率論的地震リスク評価手法」の目標像を示す。ここで示す目標像とは、地震リスク評価に係る種々の制約（ソフト・ハード面や解析に必要とされる時間）が無い理想的な条件下における評価手法を指している。

### 1.7.1 次世代に向けた新しい確率論的地震リスク評価手法の目標像

目標とする次世代の地震リスク評価手法は、評価地点の地震ハザードを断層モデルに基づく時刻歴地震波群として表現し、それらを入力地震動とした時刻歴応答解析によって得られる建物あるいは機器の応答と耐力の比較から損傷可能性を直接的に評価する手法である。図 1.18 に次世代の地震リスク評価手法のイメージ図を示す。

次世代手法では、入力地震動群は評価地点周りの全ての震源を対象として、その 1 つ 1 つの震源に断層モデルをあてがい、波形合成法によって時刻歴地震波として評価することを目標としている。具体的には、評価地点周りの活断層を含む震源を特定する地震（特定震源）および震源を特定しにくい地震（領域地震）について、起こり得るマグニチュード  $M$  の範囲や評価地点に対する震源距離  $X$  を考慮し、 $(M, X)$  の組合せで表される全ての震源のパターンについて、各々断層面を想定する。この時、ある  $(M, X)$  の組合せで表されるひとつの震源に対して、断層モデルの震源特性（断層パラメータ）の不確定性を反映した多数の断層シナリオ想定し、ひとつの震源で起こり得る全ての地震波群を再現した地震動評価を行う。震源特性の不確定性に関しては、震源特性の評価式の違いをはじめとする認識論的要因による不確定性（Epistemic Uncertainty）および自然現象のランダム性などの偶然的要因による不確定性（Aleatory Uncertainty）を考慮し、前者については各評価式の分岐とその重み付けを表したロジックツリー（Logic Tree）に基づき反映し、後者については各震源特性を確率変数としたモンテカルロシミュレーション（Monte Carlo Simulation ; MCS）に基づき反映する。各震源に対して、震源特性の不確定性を考慮して作成された多数の地震波群は、震源特性の統計的分布を再現した地震波群として評価される。また、地震ハザード評価におけるマグニチュード  $M$  と震源距離  $X$  に関する発生頻度の関係と作成した地震波数に基づき、個々の地震波には発生頻度を関連付けることが可能である。

評価地点の地震ハザードとして評価された断層モデル地震波群全てに対して建物や機器の時刻歴応答解析を行い、得られた応答と耐力を直接比較することによって個々の地震波に対して損傷可能性を算定することができる。また、地震波の発生頻度と損傷可能性を全ての地震波群について合算することによって最終的な地震リスクを算定することができる。

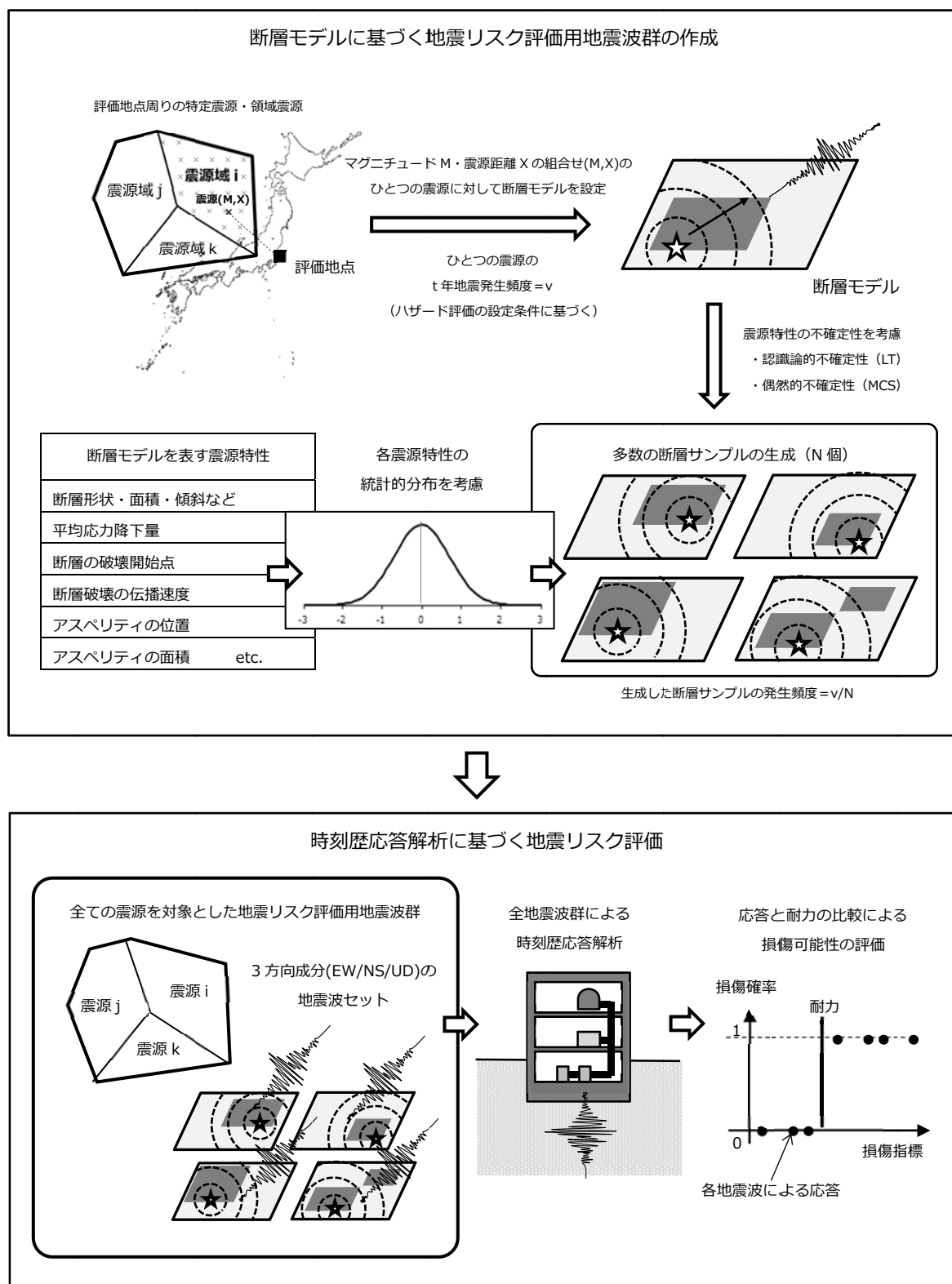


図 1.18 目標とする次世代の確率論的地震リスク評価手法のイメージ

---

### 1.7.2 次世代地震リスク評価手法の特長

断層モデル地震波群に基づく、次世代に向けた地震リスク評価によって期待されるメリットをまとめる。表 1.2 に地震動強さに基づく従来手法①と、断層モデル地震波群に基づく次世代手法の対比表を示す。

まず、非常に多くの震源情報を含む断層モデル地震波群を用いて地震リスクを評価する次世代手法は、震源～地震動～建物・機器の応答～建物・機器の損傷可能性に至るまでの一連の流れを一貫通貫的に評価することが可能である。従来手法のように地震ハザード評価と脆弱性評価を独立に評価するのではなく、互いに連続性のある評価が可能であるという点は、Sewell (2009) <sup>[16]</sup>が提言していたリスク評価の各評価段階における“Pinch Point”の問題点に関して、“Body of Knowledge”の幅をなるべく狭めることなく最終的な地震リスク結果を評価することが出来るようになると考えられ、リスク評価結果の高精度化や信頼性向上に貢献するものと言える。また、地震動の大元の原因となる震源情報と、建物応答やリスク結果を関連付けて考えることができるため、地震リスク評価結果のレビューがしやすいという利点もある。

さらに、評価地点に起こり得る全ての地震波群に対して、建物・機器の時刻歴応答解析を行い、直接的に損傷可能性を評価するため、従来の地震リスク評価手法のように、地震動強さの条件付き確率分布である脆弱性曲線を介する必要も無くなる。時刻歴応答解析に関しては、地盤・建物・機器の非線形解析に適用することも可能である。

震源特性の不確定性を考慮して作成された断層モデル地震波群は、震源情報の違いが周波数特性や経時特性のばらつきとして反映された形で評価される。このことにより、短周期～長周期の様々な機器が含まれる複雑なシステムを有する建物の地震リスクを評価する場合にも、よりきめ細やかな地震リスク評価結果が期待できる。

また、本論文では検討外としているが、断層モデルに基づいて作成された時刻歴地震波群は、1つの断層モデルから水平上下3方向の波形が作成されることから、互いに関連性のある地震動群として評価される。これらを3次元建物・機器モデルの入力とすることで、3方向同時入力による時刻歴応答解析にも適用することも可能である。

従来手法①では、脆弱性を対数正規分布などの確率分布で仮定することが一般的であるが、特に地震動強さが大きく発生確率の小さい分布の裾野の分布形状がリスク評価結果の不確実さを増やしてしまう要因になる可能性があるが、次世代手法では、断層モデル地震波を入力とした時刻歴応答解析に基づき、地震波ごとに損傷可能性を直接評価するため、そのような懸念が生じないことも特長のひとつと言える。

表 1.2 従来手法①と次世代手法（目標像）の比較

従来手法① ハザード曲線とフラジリティ曲線による手法		次世代手法（目標像） 断層モデル地震波群を入力とした時刻歴応答解析による方法	
ハザード評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全ての震源を対象とした<b>地震動強さ</b>の評価</li> <li>・<b>地震動強さと超過確率</b>の関係（ハザード曲線）</li> <li>・地震動のばらつきは、<b>距離減衰式</b>の中央値に対する残差項として評価</li> </ul>	起こり得る地震動群の評価↓時刻歴応答解析↓リスク値算定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全ての震源を対象とした<b>時刻歴地震波</b>の評価</li> <li>・<b>発生確率に関連付いた断層モデル地震動群</b></li> <li>・地震動のばらつきは、断層モデルの<b>震源特性の不確定性の結果</b>として評価</li> <li>・各震源特性の<b>現実的な統計的分布を反映</b></li> </ul>
フラジリティ評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震動強さの条件付き損傷確率分布（フラジリティ曲線）の評価</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・入力地震波群による建物・機器の<b>時刻歴応答解析</b></li> <li>・各地震波による<b>応答と耐力の比較</b>より損傷可能性を評価</li> </ul>
リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震動強さを共通指標としたハザード曲線とフラジリティ曲線のコンボリューションによる地震リスク算定</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震波群による損傷可能性×地震波の発生頻度を全ての地震波で合算することによる地震リスク算定</li> </ul>

### 1.7.3 次世代手法に対する現状の課題

断層モデルに基づく時刻歴地震波群を地震リスク評価手法へ適用しようという試みは、亀田・石川（1988）<sup>[18]</sup>や安中ほか（2005）<sup>[33]</sup>をはじめとする既往研究において検討されている。また、そのメリットについても既往の様々な研究によって認識されてはいるものの、現在においても、断層モデル地震波群を本格的に建物の地震リスク評価に適用した事例は多くはない。また、地震リスク評価への適用に向けた断層モデル地震波群の作成に関しても、断層モデルにおける震源特性のひとつひとつについて、現実的な統計的分布（中央値、ばらつき、分布形状）を再現した多数の地震波群を用いた検討はあまり行われてはいない。

その背景のひとつには、解析対象に対するソフトウェアやハードウェアの性能が追いついていなかったことが考えられる。しかしながら、近年はハードウェア・ソフトウェアの性能が著しく発展し、地盤や建物・機器類の3次元解析技術をはじめとする高度計算科学技術も目覚しく進歩しており、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法が可能な解析環境が整備されつつある。

一方で、地震リスク評価用の入力地震波群は、非常に低頻度の地震動を評価することが重要であるため、ひとつの震源に対しても作成しなければならない地震波数が非常に多くなる。また、全ての震源について作成した地震波群に対して建物の時刻歴応答解析を実施するという点では、時間的・量的負荷が非常に大きい解析を行うことは、解析環境が発展した現在においても、実適用は非常に困難であるということが課題である。

---

## 1.8 本論文の目的

このように、目標とする次世代の地震リスク評価手法は、地震リスク評価の精度向上や信頼性向上にも非常に貢献すると考えられる手法であるが、実適用していくためには課題も残存している。

本論文は、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の有効性を確認するとともに、目標とする次世代の地震リスク評価手法のメリットを活かしながら、実適用可能な方法論について検討を行ったものである。本論文は、以下の3点を大きな目的としている。

- (1) 地震リスク評価用地震波作成に対して重要な震源特性の把握
- (2) 断層モデル地震波群による地震リスク評価手法の従来手法に対する優位性の確認
- (3) 目標とする次世代地震リスク評価手法の効率化手法の提案

(1) に関しては、断層モデルの震源特性が地震動特性や建物応答に及ぼす影響を感度解析し、地震波群を作成する際に重要となる断層モデルの震源特性を把握するとともに、それらの不確定性の大きさが地震動のどの周波数成分に影響を及ぼすかを評価し、地震波作成時に重要となる震源特性とその影響範囲を把握することを目的とする。

(2) に関しては、震源情報を詳細に含み、断層破壊や地震動の伝播特性の物理モデルが考慮された断層モデルに基づく時刻歴地震波群を地震リスク評価に適用することによって、従来手法に対してどのような優位性があるかについて、地震波群の応答スペクトルのばらつきや周期間相関などの地震動特性に着目し、従来手法に対するリスク評価結果の違いを定量的に評価することを目的とする。

(3) に関しては、目標とする次世代の地震リスク評価手法の実適用のための効率化手法を提案することを目的とする。図 1.19 に、次世代地震リスク評価手法の目標像の評価ステップおよび本論文で対象とする効率化手法の評価ステップを示す。目標とする次世代手法は、全ての震源を対象とした地震波群について時刻歴応答解析を行うことを想定しているが、その場合には数十万～数百万波の地震波群が対象となり、解析負荷が非常に大きく実適用は現実的に困難である。一方で、最終的な地震リスクに影響する地震波は、評価地点に起こり得る全ての地震波群に対してはごく少数であると考えられる。このことから、実適用するためには何らかの基準によって、地震リスクに寄与する地震波を発生させる震源を選定することで地震波作成数を低減させることが実適用に向けて必要と考えられる。図 1.20 に地震動強さ指標による震源選定のイメージ図を示しているが、本論文では、従来の距離減衰式によるハザード曲線のハザード分解手法を活用することを想定し、最終的な地震リスクを良く表現できる地震動強さ指標をハザード評価の指標として適用することにより地震波作成の対象震源の選定を行い、次世代地震リスク評価手法を効率的に実施するための手法を提案することを目的とする。

表 1.3 には、次世代手法の目標像と本論文で対象とする効率化による次世代手法の比較を示す。網掛けが両者の違いを示しているが、効率化手法は、断層モデル地震波群を地震リスク評価に用いることの特長を確保しつつ、従来の距離減衰式によるハザード評価手法の特長を取り入れることにより、解析負荷を低減させる手法であることが分かる。



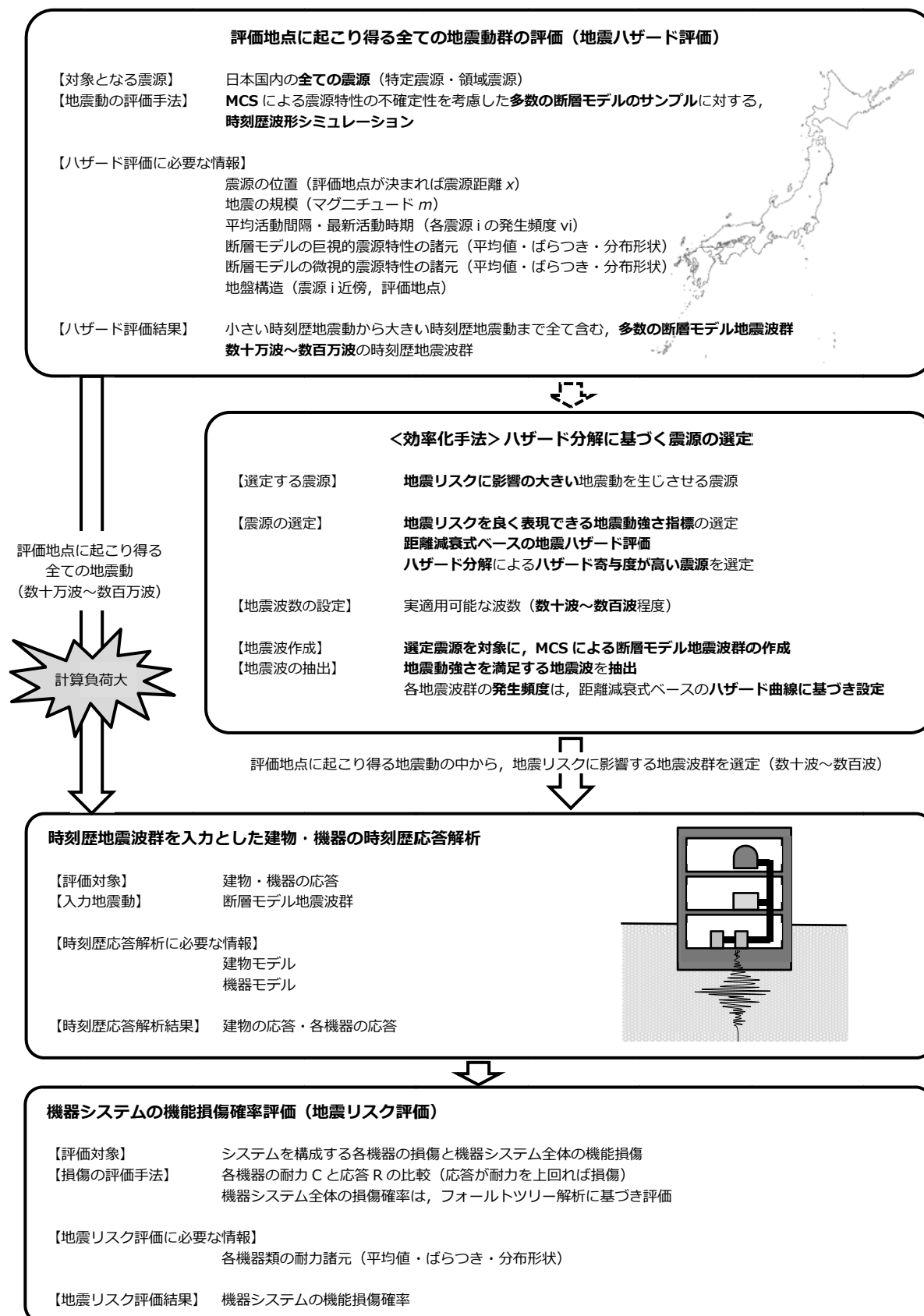
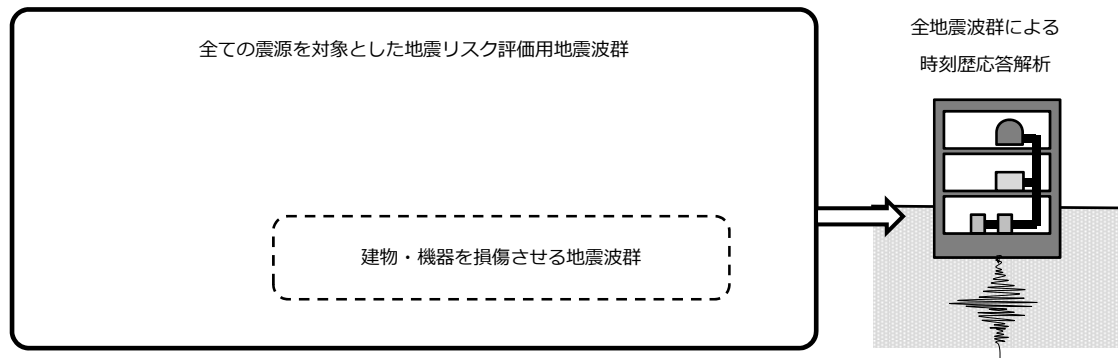
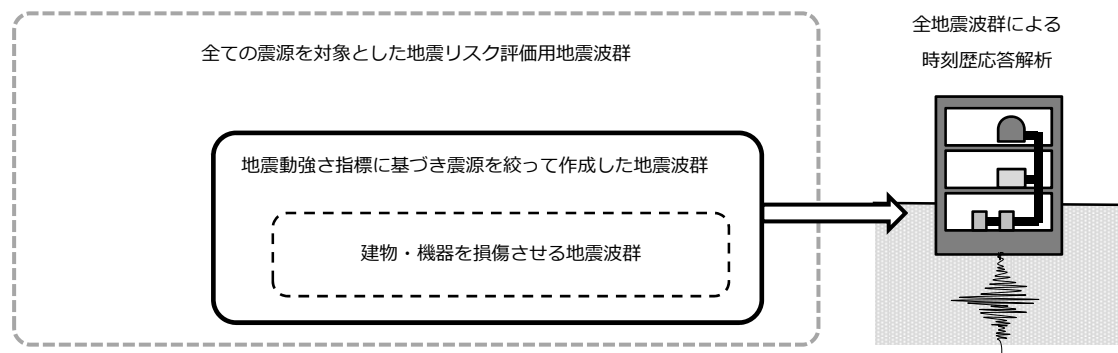


図 1.19 目標像と本論文で対象とする地震リスク評価法の評価ステップ



(a) 目標とする次世代地震リスク評価手法



(b) 本論文において対象とする次世代地震リスク評価手法

図 1.20 地震動強さ指標に基づく震源選定のイメージ

表 1.3 次世代手法の目標像と本論文の手法の比較（網掛：相違点）

断層モデル地震波群を入力とした時刻歴応答解析による方法	
次世代手法の目標像	本論文の手法（次世代手法の効率化手法）
起り得る地震動群の評価 ↓ 時刻歴応答解析 ↓ リスク値算定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地震リスクを良く表現できる地震動強さ指標に基づくハザード評価</li> <li>・ ハザード分解による震源の選定</li> <li>・ 地震リスクに寄与する震源を対象とした断層モデル地震波群の評価</li> <li>・ 地震動強さを満足する地震波群の抽出</li> <li>・ 抽出波数とハザード曲線に基づく各地震波の発生頻度の設定</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地震動のばらつきは、断層モデルの震源特性の不確定性の結果として評価</li> <li>・ 各震源特性の現実的な総計的分布を反映</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 入力地震波群による建物・機器の時刻歴応答解析</li> <li>・ 各地震波による応答と耐力の比較より損傷可能性を評価</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地震波群による損傷可能性×地震波の発生頻度を全ての地震波で合算することによる地震リスク算定</li> </ul>

---

## 1.9 本論文の構成

本論文は、全 6 章の構成とする。図 1.21 に論文の構成図を示す。

第 1 章では、社会的に地震リスク評価が必要とされるようになった背景やこれまでの地震リスク評価の利活用の現状を整理し、従来の地震リスク評価手法の概要とその課題点について整理する。また、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法に関連する既往研究をレビューし、本論文において対象とする断層モデル地震波群を用いた次世代地震リスク評価手法の目標像と課題点を示す。また、本論文の目的である、次世代手法の従来手法に対する優位性の確認、および、次世代手法の実適用に向けた効率化手法の提案について概要を示した。

第 2 章では、地震動強さ指標とした地震ハザードに調和する断層モデル地震波群の作成方法に関して、原子力機構殿の関連論文から引用する形でその概要を説明する。また、地震波群の作成結果について分析し、地震波作成の課題点等について考察を行う。

第 3 章では、断層モデルの震源特性と、作成地震波や建物応答との関係を確認することを目的として感度解析を行う。ひとつの震源を対象として、震源特性の不確定性を考慮して作成された断層モデル地震波群（約 3000 波）について 4 層 RC 建物の時刻歴応答解析を行い、断層モデルの各種震源特性の不確定性が、時刻歴地震波の地震動強さや周波数特性、および建物最大応答に及ぼす影響について、解析および考察した結果をまとめる。

第 4 章では、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の、従来手法に対する優位性を確認することを目的として、解放基盤における最大加速度を地震動強さ指標としたハザード曲線に適合する地震波群（最大加速度が  $500 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$  となる 250 波）について、時刻歴応答解析に基づく機器・配管システムの損傷確率を評価する。この時、地震波群の応答スペクトルのばらつきと周期間相関に着目し、それらをより現実的に反映することができる断層モデル地震波群と、それらを考慮していない地震波群による損傷確率の結果を比較することにより、断層モデル地震波群による損傷確率の評価の有効性について考察する。

第 5 章では、次世代地震リスク評価手法の実適用に向けた効率化手法の提案を目的として、第 3 章で用いた地震波群と、第 4 章の建物モデルおよび機器・配管システムを対象として、地震リスク（建物機能損傷の可能性）を最も良く表すことのできる地震動強さ指標の選定方法を提案する。さらに、その選定指標によるハザード評価、そのハザード分解手法による地震リスク評価用地震動の作成サンプル数の低減に関して、次世代地震リスク評価手法の実適用フローを示す。

第 6 章では、上記の各種検討によって得られた結果とその貢献性についてまとめる。また、残存する課題点や適用範囲について整理し、本論文の総括とする。

なお、第 2 章の地震波作成に関する各種条件設定は、(国研) 日本原子力研究開発機構殿に帰属する成果であり、本論文の成果には含まれないことにご留意頂きたい。また、本論文の検討に用いた断層モデル地震波群の波形データは、日本原子力研究開発機構殿から貸与して頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

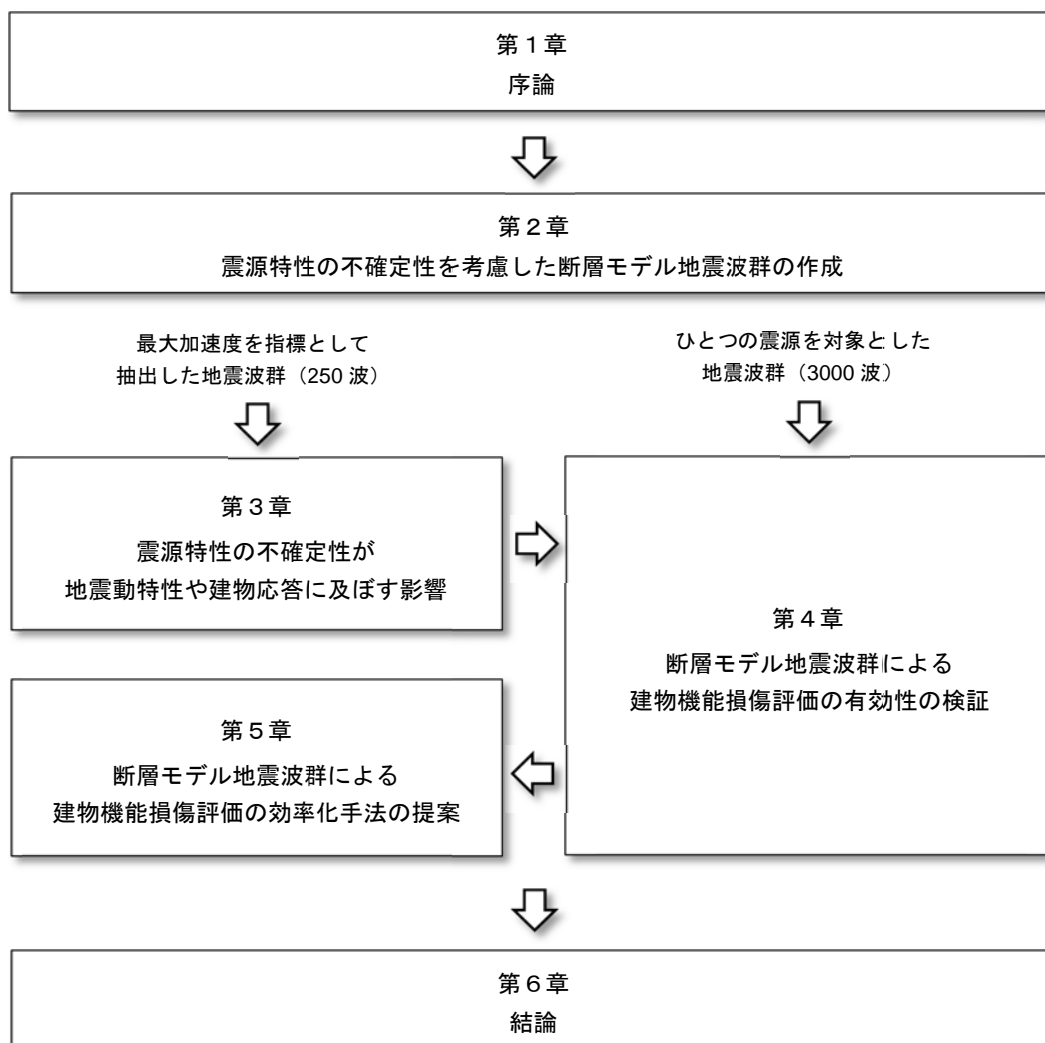


図 1.21 本論文の構成

## 1.10 本論文における用語の定義

本論文で用いる地震動、地震リスク評価に係る専門用語について、下記に整理する。

表 1.4 用語の定義

地震 PRA	確率論的地震リスク評価 (Probabilistic Seismic Risk Assessment) 論文中において「地震リスク評価」と単に表記している部分についても、基本的には「確率論的地震リスク評価」と同じ意味として記述している。
MCS	モンテカルロシミュレーション (Monte Carlo Simulation)
CDF	炉心損傷頻度 (Core Damage Frequency)
震源特性	断層長さや平均応力降下量をはじめとする、断層モデルに係る各種震源パラメータおよびその特性。(Seismic Source Characteristics)
巨視的震源特性	走向、傾斜角、すべり角、断層長さ等の断層位置や形状に係る震源パラメータ。(Macroscopic Source Characteristics, Outer fault Parameter)
微視的震源特性	平均応力降下量、高振動数遮断フィルタ、破壊伝播速度、破壊開始点位置など、断層の応力や震源スペクトルの特性、破壊伝播性状などに係わる震源パラメータ (Microscopic Source Characteristics, Inner fault Parameter)
不確定性	本論文では、地震動作成の入力パラメータである震源特性に関する不確実さを“不確定性”と呼ぶこととする。震源特性を入力パラメータとした各種解析結果から得られた地震動や建物応答の変動量については、“ばらつき”と呼び、区別して記載した。
UHS	一様ハザード (等確率) スペクトル (Uniform Hazard Spectrum)。応答スペクトル距離減衰式の各周期に対する地震ハザード曲線の、超過確率 (または超過頻度) が等しい線を結んで得られるスペクトル。
ハザード分解	地震ハザード評価で最終的に得られる 1 本のハザード曲線を、その算出過程におけるマグニチュードと震源距離 (および偏差) の組合せと、そのハザード寄与度に分解すること。ハザード分解により、ハザード曲線の横軸指標として用いた地震動強さに寄与する震源とそのハザードの寄与度を算定することができる。 確率論的ハザード評価の分野では“disaggregation of seismic hazard”の語彙で表される概念であり、日本語訳として「再分解」というテクニカルタームが使われてきた経緯がある。“disaggregation”の元々の意味としては「分解」することから、本論文では「ハザード再分解」ではなく、「ハザード分解」という表記法で用いることとする。

## 第1章 参考文献

- [1] 西田明美ほか：原子力施設のための3次元仮想振動台システムの研究開発への取り組み，(財)高度情報科学技術研究機構，RIST NEWS，No.54，2013.01
- [2] 坂本成弘：地震リスク評価，大成建設技術センター報，第44号，2011
- [3] 日本建築学会：地震リスク評価とリスクコミュニケーション，2011
- [4] 内閣府 中央防災会議：事業継続ガイドライン 第三版，2013.08  
[http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kigyoku/keizoku/sk\\_04.html](http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kigyoku/keizoku/sk_04.html)
- [5] 日本原子力学会 標準委員会技術レポート：原子力安全の基本的考え方について 第I編 別冊 深層防護の考え方，AESJ-SC-TR005 (ANX)，2013
- [6] 東京大学大学院工学研究科編：震災後の工学は何をめざすのか，内田老鶴圃
- [7] 山口彰：リスク評価の手法と活用，経済産業省，総合資源エネルギー調査会，電気・ガス事業分科会，原子力の自主的安全性向上 に関する WG 第3回会合 資料1，H25年9月11日  
[http://www.meti.go.jp/committee/gizi\\_8/21.html#anzen\\_wg](http://www.meti.go.jp/committee/gizi_8/21.html#anzen_wg)
- [8] 東京電力ホールディングス HP：[http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2\\_3-j.html](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/2_3-j.html)
- [9] 日本建築センター：時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書，BR 構-02-06
- [10] Cornell, C., A. : ENGINEERING SEISMIC RISK ANALYSIS, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606, 1968
- [11] 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp.51-56, 1999
- [12] 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
- [13] Noda, S., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M. and Watanabe, T. : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PORPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD/NEA Workshop, 2002
- [14] 内山泰生，翠川三郎：震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第606号，pp.81-88，2006
- [15] Sewell, R., T. : Damage-Relevant PSHA, Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis(PSHA) Methodologies and Applications, WORKSHOP PROCEEDINGS, NEA/CSNI/R(2009)1
- [16] 原子力規制委員会：実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド，2013.11
- [17] Kawasumi, H. : Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maxmum Intensity Throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity in Historical Times
- [18] 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，素朴学会論文集，第392号，I-9，pp.395-402，1988
- [19] 日本原子力学会標準：原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準
- [20] Robin K. McGuire : Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes : Closing the Loop,

- 
- Bulltin of the Society of America, Vol.85, No.5, pp.1275-1284, 1995
- [21] 高田毅士, 越智紗香, 神田順: 確率論的想定地震の選定方法に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文集, pp.53-59, 2003
- [22] 中島正人, 石川裕, 奥村俊彦: 確率論的地震ハザード解析に基づく想定地震の設定 —ハザードマップへの応用—, 電力中央研究所報告, 2001
- [23] Irikura, K. : Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions During Large Earthquakes, Bulletin Disaster Prevention Institute, Kyoto University, Vol.33, Part.2, No.298, 1983
- [24] Irikura, K. : PREDICTION OF STRONG ACCELERATION MOTIONS USING EMPIRICAL GREEN'S FUNCTION, Proc. of 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.151-156, 1986
- [25] Boore, D., M., : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. Bull. Seismol. Soc. Am. 73 (6), pp.1865-1894, 1983
- [26] 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福地保長: 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 430 号, 1991
- [27] 香川敬生: ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, 日本地震工学会論文集, 第 4 巻, 第 2 号, 2004
- [28] 地震調査研究推進本部: 全国地震動予測地図, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>
- [29] 地震調査研究推進本部: 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 2009
- [30] 地震調査研究推進本部: 地震調査研究推進本部政策委員会成果を社会に活かす部会報告—地震動予測地図を防災対策等に活用していくために—, 2005.03
- [31] 石川・能島: 地震ハザード評価の体系化に向けて, —シナリオ地震と確率論的地震ハザード評価の融合—, 土木学会地震工学論文集, 2005
- [32] 防災科学技術研究所: 「地震ハザードステーション J-SHIS」, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- [33] 安中正, 香川敬生, 石川裕, 江尻譲嗣, 西岡勉: 期待損失評価のための確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定方法, Proc. 28th JSCE Earthquake Engineering Symposium, 2005
- [34] 壇一男, 神原浩, 藤川智, 菊地優: 断層破壊のシナリオとその生起確率を考慮した地震ハザード解析に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 602 号, pp.119-128, 2006



## 第2章 震源特性の不確定性を考慮した断層モデル地震波群の作成

### 2.1 はじめに

第1章では、断層モデルに基づいて評価した時刻歴地震波群を用いた次世代に向けた新しい地震リスク評価手法について、手法の目標像およびその貢献性を示すとともに、次世代手法の実適用に向けた効率化手法の必要性に関して概要を述べた。

目標とする次世代地震リスク評価手法は、評価地点の地震ハザードを断層モデル地震波群の集合として評価し、その全ての地震波群に対して、建物や機器の時刻歴応答解析を実施することを想定している。評価地点周りの全ての震源を対象とした断層モデル地震波群の作成は、数多くの地震動シミュレーションが必要となるとともに、建物や機器の時刻歴応答解析の解析数も増大するため、地震リスク評価の解析負荷が実適用上は現実的ではないという課題がある。

これを解決するため、後述する第5章では、実適用に向けた次世代手法の効率化に関する検討を行っており、そこでは地震リスクを良く表すことができる地震動強さ指標に関する評価地点の地震ハザードをマグニチュード $M$ と震源距離 $X$ の組合せとそのハザード寄与度に分解し、地震リスクに寄与する震源に焦点を当てて断層モデル地震波群を作成することによる効率化を提案している。

本章において概説する断層モデル地震波群は、後述の各章の検討に用いた地震波群であり、西田ら<sup>[1],[2]</sup>によって作成されたものである。西田らの断層モデル地震波群は、原子力施設の地震リスク評価に適用することを目的として作成された地震波群であり、既往の地震リスク評価が、解放基盤における最大加速度を指標として行われてきたことから、西田ら<sup>[1],[2]</sup>は最大加速度を地震動強さ指標としたハザード分解による断層モデル地震波群の作成手法について提案している。

ハザード分解手法を活用した断層モデル地震波群の特長は、距離減衰式に基づき評価した評価地点の地震ハザードを分解することによって得られる $(M, X)$ の震源に対して断層モデルを当てはめるため、震源特性の不確定性を考慮して評価した断層モデル地震波群のうち、ハザード評価における地震動強さを満足する地震波群を抽出すれば、評価地点の地震ハザードに調和する地震波が作成できるという点にある。

本論文の第3章以降は、西田らが作成した断層モデル地震波群（(国研)日本原子力研究開発機構殿所有）の時刻歴波形データを貸与頂き、筆者が、断層モデル地震波群による次世代地震リスク評価手法の従来手法に対する優位性や実適用に向けた地震波群作成の効率化に関して検討した内容となっている。西田らによって作成された断層モデル地震波群のうち、対象敷地の解放基盤における最大加速度の地震ハザードに調和する地震波として抽出した断層モデル地震波群は特に「ハザード適合地震波 (Hazard-consistent ground motion)」と呼ばれている。最大加速度を指標とした原子力施設向けのハザード適合地震波の作成手法については、原子力機構殿に帰属する研究成果であり、本論文の成果の範

---

囲ではないものの、本論文の成果となる第3章以降の検討内容に密接に関連することから、本章では、西田らの文献<sup>[1],[2]</sup>を参照する形で、本論文の検討に用いた断層モデル地震波の作成手法の概要と諸条件を示しておく。

## 2.2 ハザードに適合した断層モデル地震波群の作成手法

### 2.2.1 地震ハザード評価

西田ら<sup>[1],[2]</sup>は、図 2.1 に示す茨城県大洗地区（北緯 36.26°，東経 140.55°）を対象敷地として断層モデル地震波群を作成しており、これまでに地震動作成条件の異なる 2 種類の地震波セットを作成した。本節では、1 つ目の地震波セットの作成手法を一例として、文献[1]および文献[2]を引用することで地震波作成の概要をまとめる。なお、第 3 章以降の検討は、2 つ目の地震波セットを用いて行っており、その地震波群作成の詳細については 2.3 節で説明する。

西田らのハザード適合地震波は、原子力施設の地震リスク評価用地震動として作成された。比較的短周期の建屋・機器システムで構成されていることから、最大加速度を地震動強さ指標としたハザード評価が行われており、作成した断層モデル地震波群の中から、ハザード適合地震波として最大加速度を地震動強さ指標とした地震ハザードに調和する地震波群を抽出している。



図 2.1 地震波作成の対象サイト（36.26° N, 140.55° E）

ここで、一般的に地震ハザード曲線は、地震動強さ  $Y$  と Eq. 2.1 に示す年超過頻度  $\nu(Y > y)$ （地震動強さ  $Y$  が  $y$  を超える地震動の年平均発生回数）の関係として表される。

$$\nu(Y > y) = \sum_i^N \nu_i \int_y^\infty \int_0^\infty \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} f_{M_i}(m) f_{X_i}(x) f_{Y_i}(y | m, x) dm dx dy \quad \text{Eq. 2.1}$$

ここに、 $i$ ：震源域の番号、 $\nu_i$ ：震源域  $i$  における地震の年平均発生頻度、 $Y$ ：解放基盤における地震動強さ、 $f_{M_i}(m)$ ：震源域  $i$  におけるマグニチュード  $M$  の確率密度関数、 $f_{X_i}(x)$ ：震源域  $i$  における震源距離  $X$  の確率密度関数、 $f(y|m,x)$ ：マグニチュードと震源距離の組合せが  $(m,x)$  の時の地震動強さ  $y$  の確率密度関数、である。また、マグニチュードと震源距離の組合せが  $(m,x)$  の震源の地震動強さ  $y$  は、Eq. 2.2 で表される距離減衰式とそのばらつき  $\sigma$  によって評価される。

$$y = f_{am}(m,x) + \sigma \quad \text{Eq. 2.2}$$

西田ら<sup>[1],[2]</sup>による 1 つ目のハザード適合地震波の作成では、対象敷地の地震ハザードを算定する際の距離減衰式に、地表面最大加速度  $PGA$  を地震動強さ指標とする司・翠川式<sup>[3]</sup>（常用対数標準偏差  $\zeta_{10} = 0.25$ ）を適用している。対象敷地の地震ハザードの算定は解放基盤面上に対して行っているため、地表面を基準とした司・翠川式を地盤増幅率相当の 1.4 で除すことにより、解放基盤における地震動強さに換算している。なお、西田ら<sup>[1],[2]</sup>による地震ハザード評価における、震源区分、各震源域のマグニチュードの上限値の設定、地震発生確率モデル（地震の時間軸発生分布）をはじめとするハザード解析の諸条件については、地震調査研究推進本部の地震動予測地図（2009）<sup>[4]</sup>に倣っている。

以上の条件により、対象敷地では図 2.2 に示す地震ハザード曲線が得られている。ハザード曲線の横軸は解放基盤における最大加速度、縦軸は年超過頻度である。西田らは、3 次元建屋・機器の応答解析による原子力施設の地震 PRA、すなわち、炉心損傷頻度（CDF, Core Damage Frequency）の評価に断層モデル地震波群を適用することを想定していることから、 $10^{-5}$  回／年程度と言われる CDF に対して最も影響度が大きいと考えられる、年超過頻度  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  程度の地震動を地震波作成の対象とした。 $10^{-4} \sim 10^{-5}$  程度の年超過頻度は、解放基盤における最大加速度が  $700 \sim 1100 \text{ cm/s}^2$  の地震動に該当する。西田ら<sup>[1],[2]</sup>は、解放基盤における最大加速度に寄与する震源を対象に、その震源特性の不確定性を考慮して作成された断層モデル地震波群の中から、3 次元建屋・機器モデルの地震応答解析に基づく地震 PRA 評価に適用可能な地震波数として、最大加速度  $700 \sim 1100 \text{ cm/s}^2$  の範囲の  $100 \text{ cm/s}^2$  の加速度範囲ごとに 50 波ずつ、計 200 波の断層モデル地震波をハザード適合地震波として抽出することとした。

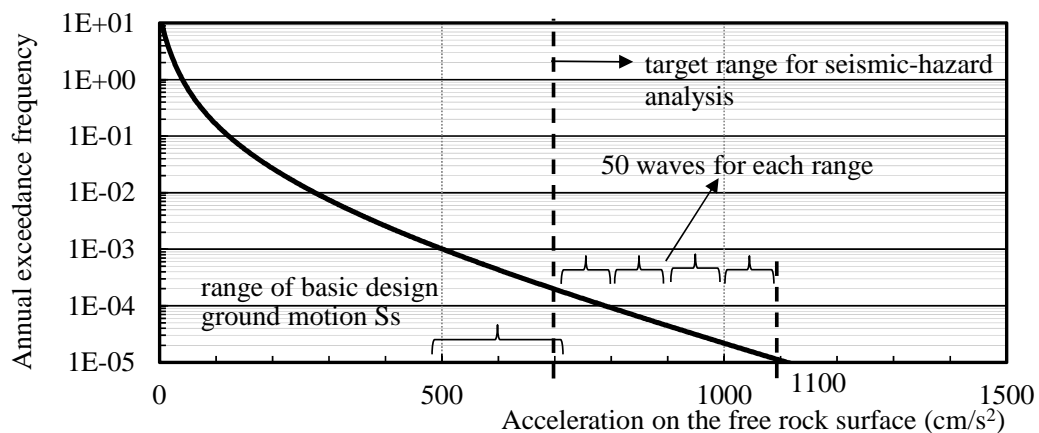


図 2.2 対象サイトの地震ハザード曲線 出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

### 2.2.2 地震ハザードの分解

地震ハザード曲線は、Eq. 2.1 に示したように、マグニチュードと震源距離の組合せ ( $M, X$ ) によって表される震源に対する地震動強さの年超過頻度を、全震源に対して合算することによって評価されることから、第1章で示した、亀田・石川(1988)やMcGuire(1995)のハザード分解方法に基づき、地震ハザードを震源域・マグニチュード・距離ごとに分解することができる。

まず、震源域に対して対象敷地の地震ハザードを分解すると、ハザードに対する各震源域によるハザードの寄与度を得ることができる。西田ら<sup>[1],[2]</sup>の地震波群作成においては、震源域ごとに図 2.3 のようなハザード寄与度が算定されている。対象敷地の地震ハザードに寄与する主な震源域としては、表 2.1 および図 2.4 に示す5つの震源域が挙げられており、その位置関係は図 2.5 に示す通りとなっている。以降、対象敷地の地震ハザードに寄与するこれらの震源域を、西田ら<sup>[1],[2]</sup>の表現に倣って“震源グループ”と呼ぶ。解放基盤における最大加速度を地震動強さ指標とする地震ハザードに対して寄与度の大きい震源域が選定されていることから、比較的对象敷地に近い震源域が選定されていることが確認できる。

最大加速度が  $700 \sim 1100 \text{ cm/s}^2$  の地震動に寄与する震源グループの中では、「震源グループ(1): 南関東の地震」の寄与度が最も高く、次いで「震源グループ(4): 震源を特定しない太平洋プレートの地震」の寄与度が高い結果となっている。また、表 2.2 は、各震源グループの寄与度から算定した地震波数の割合である。前項に示した通り、 $100 \text{ cm/s}^2$  刻みの各最大加速度の範囲ごとに50波のハザード適合地震波を抽出するため、50波を、各震源グループのハザード寄与度に応じた重み付けに応じて配分することによって、各震源グループの地震波数の内訳を決定している。

また、震源域に対するハザード分解による各震源グループは、震源グループ内での震源位置の違いによってさらに分解することができる。ここでは、震源グループ(1)を一例としてその概要を示す。

震源グループ(1)の南関東の地震に該当する震源域には、表 2.3 に示す震源位置の違い（フィリピン海プレート内、フィリピン海プレート間、太平洋プレート間）がある。図 2.6 には震源グループ(1)の震源位置の異なる各震源による地震ハザード曲線を示すが、震源位置ごとのハザード寄与度に応じて、表 2.3 に示すように、震源グループ(1)の地震波数が震源位置(1-1)～(1-3)ごとに配分される。

さらに、震源位置(1-1)を一例とすると、図 2.7 に示すようにマグニチュードおよび震源距離の違いによるハザード寄与度に応じて、表 2.4 に示すようにマグニチュード・距離の組合せ ( $M, X$ ) に応じた波数として配分することができる。

なお、本論文では、上述した地震ハザードの分解によるマグニチュード・震源距離の組合せ ( $M, X$ ) によって表される震源の一つひとつを、本論文では“震源”と呼ぶこととする。

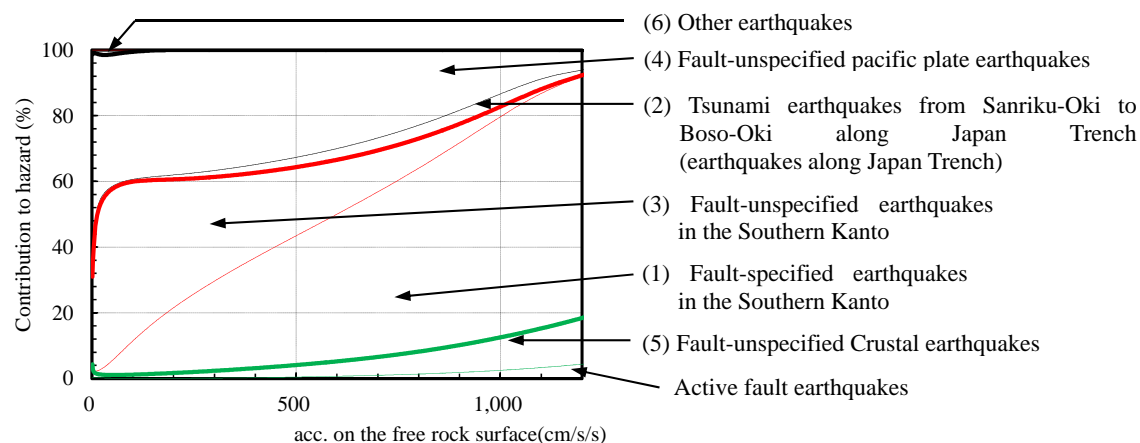
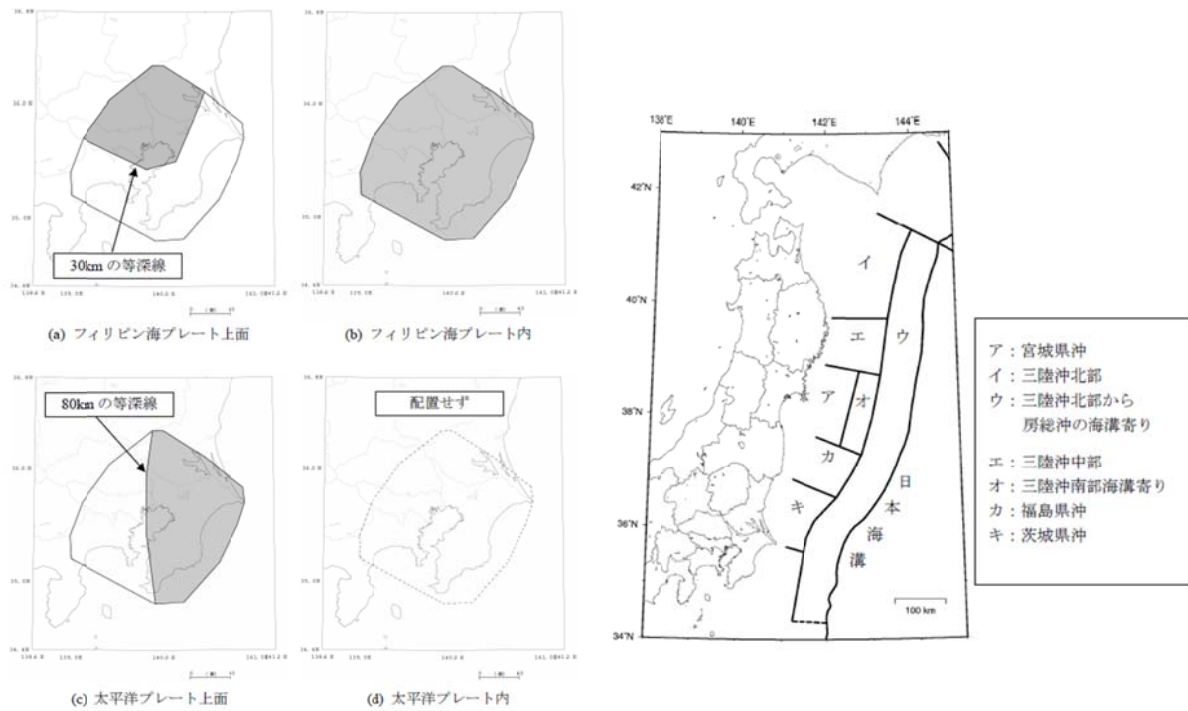


図 2.3 各震源域のハザード寄与度 出典) Nishida et al. (2015)<sup>[1]</sup>

表 2.1 最大加速度を指標とした地震ハザードに寄与する震源域<sup>[5]</sup>

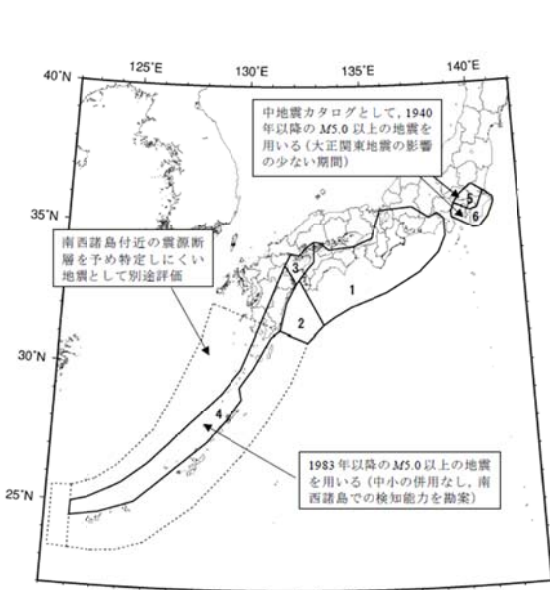
震源 グループ	本論文での略称	地震調査研究推進本部 による震源域名	震源位置	M
(1)	南関東の地震	3.3.2 海溝型地震, (6)相模トラフ沿いの地震, 2)その他の南関東で発生する M7 程度の地震	フィリピン海プレート内 フィリピン海プレート間 太平洋プレート間	M6.7~7.2
(2)	太平洋プレートの地震	3.3.2 海溝型地震, (2)宮城県沖地震および三陸沖から房総沖にかけての地震	三陸沖北部から房総沖の 海溝寄りのプレート内大地震	M8.2
(3)	震源を特定しにくい 南関東の地震	3.3.4 震源断層を予め特定しにくい地震, 3.3.4.3 太平洋プレートのプレート間及びプレート内の震源断層を予め特定しにくい地震 (地域区分 12 のプレート内地震)	地域区分 12 のプレート内地震	~M7.2
(4)	震源を特性しにくい 太平洋プレートの地震	3.3.4 震源断層を予め特定しにくい地震, 3.3.4.4 フィリピン海プレートのプレート間及びプレート内の震源断層を予め特定しにくい地震 (地域区分 5 及び地域区分 6 のプレート内地震)	地域区分 5 のプレート内地震 地域区分 6 のプレート内地震	~M6.6
(5)	陸域の地震	3.3.4 震源断層を予め特定しにくい地震, 3.3.4.3 太平洋プレートのプレート間及びプレート内の震源断層を予め特定しにくい地震 (地域区分 9 のプレート間地震)	地域区分 9 のプレート間地震	~M7.3
(6)	陸域の地震	陸域で発生する地震のうち活断層が特定されていない場所で発生する地震 (地域区分 7 の地震)	地域区分 7 の地震	M5.0~6.8

出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>の Table2 を, 地震調査研究推進本部の表記に倣い, 日本語として再表記した。また, ハザード評価におけるマグニチュードの範囲を加筆した。

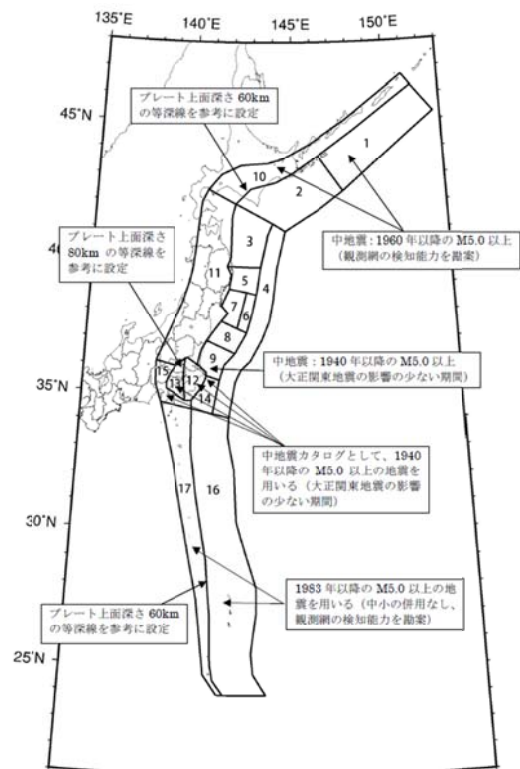


(1) その他の南関東で発生する M7 程度の地震

(2) 三陸沖北部から房総沖の海溝寄り

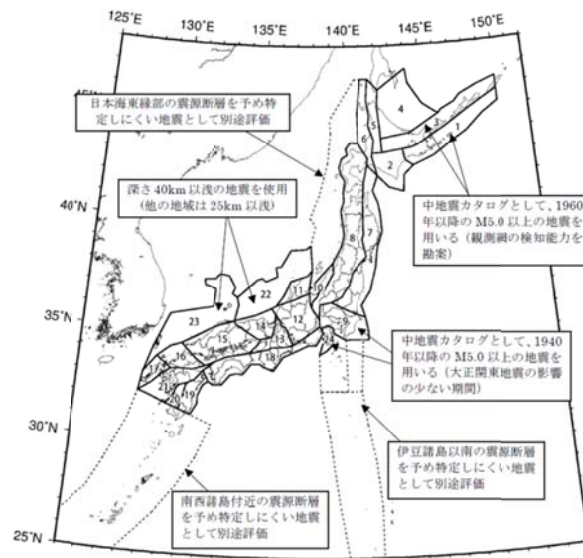


(3) フィリピン海プレートの震源を特定しにくい地震



(4) 太平洋プレートの震源を特定しにくい地震

図 2.4(1) 地震調査研究推進本部「全国を概観した地震動予測地図」の震源区分<sup>[5]</sup>



(5) 陸域で発生する地震

図 2.4(2) 地震調査研究推進本部「全国を概観した地震動予測地図」の震源区分<sup>[5]</sup>

表 2.2 地震ハザードに寄与する震源の寄与度と抽出した地震波数 出典) Nishida et al. (2015)<sup>[1]</sup>

Contribution ratios and the number of ground motions.

Source (groups)	700-800 (cm/s <sup>2</sup> )		800-900 (cm/s <sup>2</sup> )		900-1000 (cm/s <sup>2</sup> )		1000+ (cm/s <sup>2</sup> )	
	C (%)	N	C (%)	N	C (%)	N	C (%)	N
(1) Fault-specified earthquakes in the Southern Kanto region	45.4	23	50.5	25	56.2	28	67.1	33
(2) Tsunami earthquakes from Sanriku-Oki to Boso-Oki along the Japan Trench (earthquakes along the Japan Trench)	3.6	2	4.0	2	4.4	2	3.9	2
(3) Fault-unspecified earthquakes in the Southern Kanto region	15.8	8	12.0	6	8.4	4	3.1	2
(4) Fault-unspecified Pacific plate earthquakes	30.2	15	27.1	14	23.1	12	13.4	7
(5) Fault-unspecified crustal earthquakes	5.1	2	6.4	3	7.9	4	12.5	6
Total	100.0	50	100.0	50	100.0	50	100.0	50



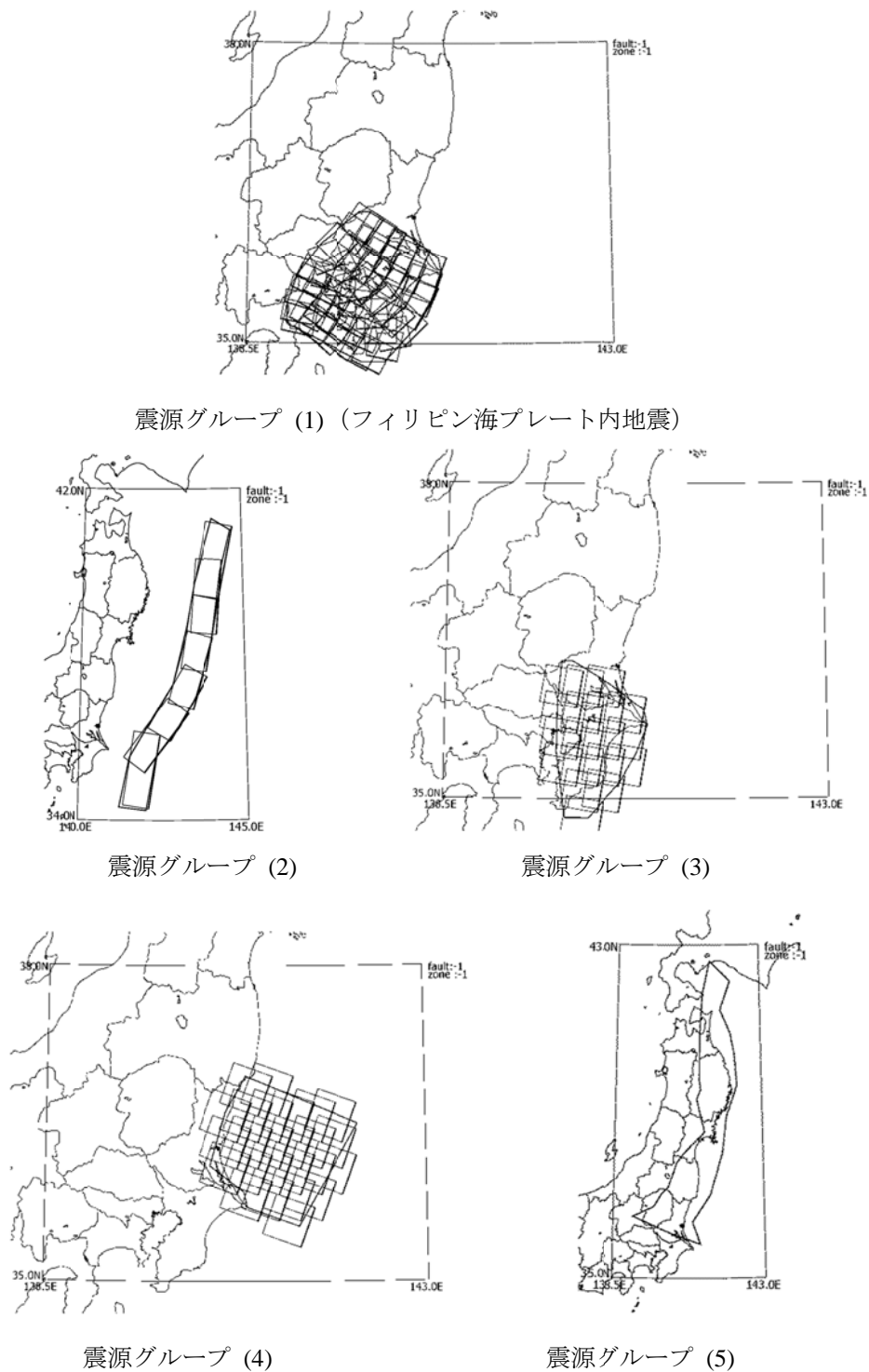


図 2.5 最大加速度を指標とした地震ハザードに寄与する震源域 出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

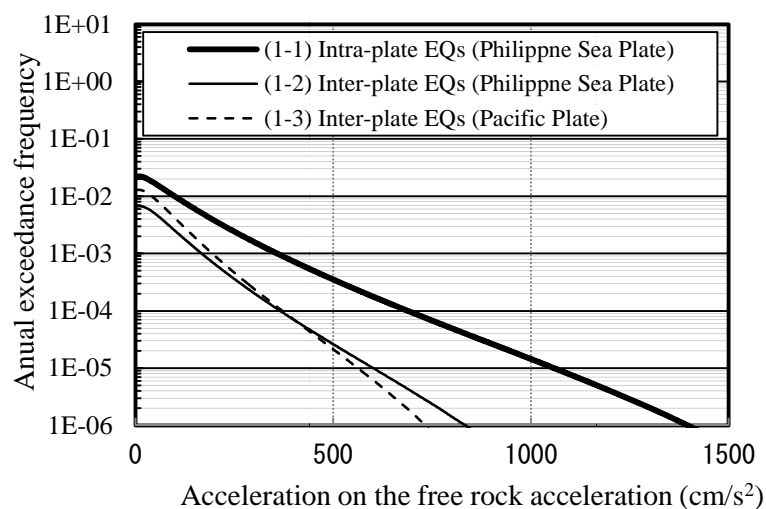


図 2.6 震源グループ(1)の各震源位置のハザード寄与度 出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

表 2.3 震源グループ(1)の各震源位置の寄与度と抽出した地震波数 出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

Contribution ratio and the number of ground motions for subdivided group 1 seismic sources.

Subdivided source in group 1	700-800 (cm/s <sup>2</sup> )		800-900 (cm/s <sup>2</sup> )		900-1000 (cm/s <sup>2</sup> )		1000+ (cm/s <sup>2</sup> )	
	C (%)	N	C (%)	N	C (%)	N	C (%)	N
(1-1) Intra-plate earthquakes (Philippine Sea Plate)	92.0	21	94.9	24	97.1	27	99.1	33
(1-2) Inter-plate earthquakes (Philippine Sea Plate)	5.2	1	3.9	1	2.7	1	0.9	0
(1-3) Intra-plate earthquakes (Pacific Plate)	2.8	1	1.2	0	0.2	0		
Total	100.0	23	100.0	25	100.0	28	100.0	33

C: Contribution to the hazard. N: Number of ground motions to be generated.

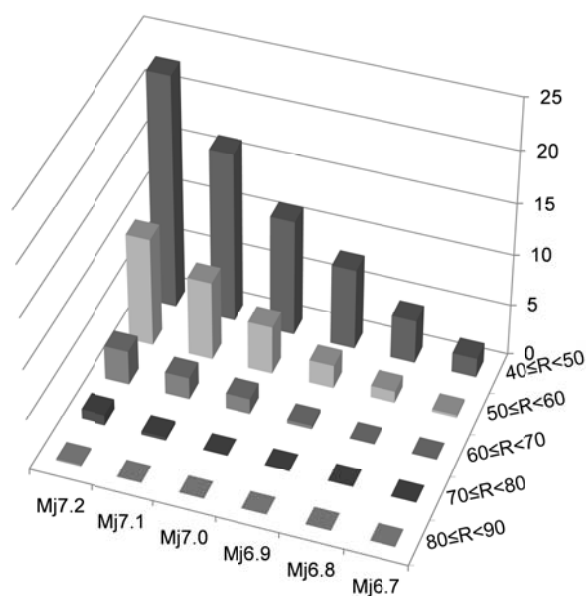


図 2.7 ハザード分解によるマグニチュード・震源距離に対応するハザード寄与度  
出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

表 2.4 震源グループ(1)のマグニチュード・距離別の寄与度と抽出した地震波数  
出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

Fault distance	JMA Magnitude $M_j$					
	6.7	6.8	6.9	7.0	7.1	7.2
$R = 40 - 50\text{km}$	1	1	3	4	5	7
$R = 50 - 60\text{km}$	0	0	1	2	3	4
$R = 60 - 70\text{km}$	0	0	0	0	1	1
$R = 70 - 80\text{km}$	0	0	0	0	0	0
$R = 80\text{km} -$	0	0	0	0	0	0
Total						33

### 2.2.3 震源特性の不確定性の設定

対象敷地の地震ハザードの分解によって、マグニチュード  $M$  と震源距離  $X$  の組合せ ( $M, X$ ) で表される各震源のハザード寄与度に応じた地震波数が決定される。断層モデル地震波群は、この ( $M, X$ ) の組合せで表される震源ひとつひとつについて断層モデルをあてがい、波形合成法に基づく地震動シミュレーションによって作成される。断層モデルは、その断層面の巨視的な特性に関する各種パラメータ（以下、巨視的震源特性と呼ぶ。例えば、断層面積や断層長さ、幅などが該当する。）および断層の応力状態や破壊伝播性状、断層破壊によって生じる地震波のスペクトル特性などの微視的な特性に関する各種パラメータ（以下、微視的震源特性と呼ぶ。例えば、応力降下量やアスペリティ面積比、高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$  などが該当する。）によって記述される。ひとつの ( $M, X$ ) の震源の断層モデルに関しても、これらの震源特性には不確定性が存在することから、断層モデル地震波群を作成する際には、それらの不確定性を現実在即した形で適切に地震動評価に組み入れることが重要となる。

ここで、工学における不確定性は、偶然的な不確定性（Aleatory Uncertainty）と認識論的不確定性（Epistemic Uncertainty）の2種類に分類できると言われている<sup>[6]</sup>。前者は事象のランダム性による不確定性であり、後者は、解析モデルの不完全さや知識不足による不確定性である。また、このような不確定性の性質上、偶然的な不確定性についてはそれ以上低減することができないが、認識論的不確定性については、知識の蓄積や解析モデルの改善などで不確定性の低減を図ることが可能であるものである。

西田ら<sup>[1],[2]</sup>による断層モデル地震波群の作成においても、震源特性の不確定性を考慮し、表 2.5 に示す断層モデルの微視的震源特性について、その偶然的な不確定性を地震波群に反映させている。具体的には、断層の平均応力降下量  $\Delta\sigma$  やアスペリティ面積比  $C_{sa}$ 、高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$ 、媒質の  $Q$  値等の震源特性の不確定性を考慮するパラメータを確率変数として、各震源特性の現実的な確率分布（中央値、ばらつき、分布形）を仮定し、それらを再現するような断層モデルのサンプルをモンテカルロシミュレーション（Monte Carlo Simulation ; MCS）によって多数生成している。

表 2.5 の再右列の値は、不確定性パラメータとした各震源特性の、地震動強さ（解放基盤における最大加速度）に対する感度を示している。これらは、図 2.8 に示す MCS によって得られた断層モデル地震波群の地震動強さ（解放基盤における最大加速度）と震源特性の関係に関する回帰直線の傾きを表している。西田ら<sup>[1],[2]</sup>による断層モデル地震波群に関しては、特に平均応力降下量  $\Delta\sigma$  および高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$  の感度が高いことが確認できる。

また、2.2.5 項に詳細を示すが、距離減衰式の地震ハザードに適合する地震波群と作成するという観点から、断層モデル地震波群の最大加速度のばらつきは、距離減衰式のばらつき（西田ら<sup>[1],[2]</sup>の手法では、距離減衰式として用いた司・翠川式<sup>[3]</sup>のばらつき、常用対数標準偏差  $\zeta_{10} = 0.25$ ）と整合が取れている必要がある。西田ら<sup>[1],[2]</sup>の報告によれば、各震源特性について表 2.5 に示す不確定性を考慮することにより、概ね、断層モデルによる地震波群の地震動強さについても、距離減衰式と同等のばらつきが得られることが確認されている。

表 2.5 震源特性の不確定性パラメータと地震動強さに対する感度 出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

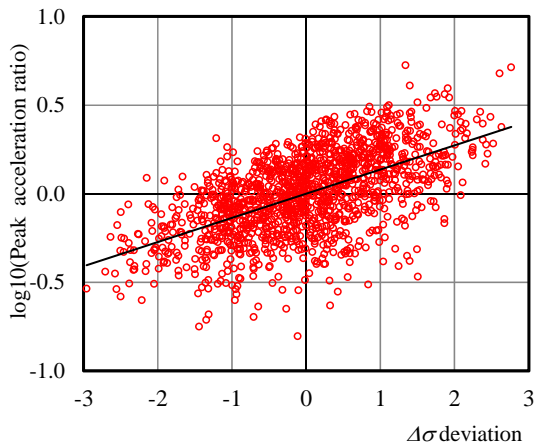
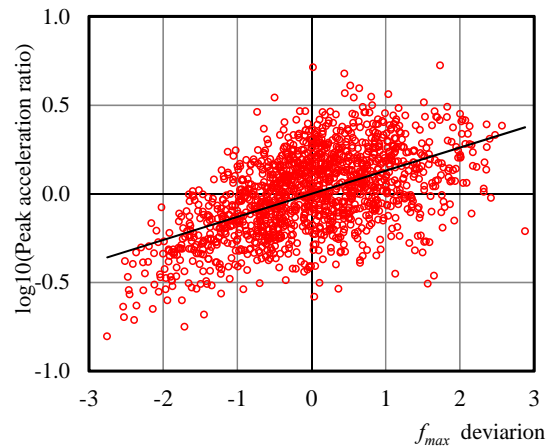
Stochastic parameters for seismic-source characteristics	Name	Unit	Distribution	$\lambda$ or $\mu$	$\zeta$ or $\sigma$			References	Example of Sensitivity
					Others	Japan Trench	Crustal		
Stress drop	$\Delta\sigma$	MPa	lognormal	3.0, 5.0, 14.0	0.60	0.42	0.48	Satoh(2004) Dan et al.(2001) Kawase et al.(2004) Tsurugi et al.(2006)	0.14
Shear-wave ratio to rupture velocity	$C_{Vr}$	---		0.72	0.10	0.07	0.08	Geller(1976)	0.014
Rise time of coefficient	$\alpha_{tr}$	---		0.5	0.20	0.14	0.16	HERP (2009)	$1.9 \times 10^{-3}$
Rupture starting points	$startX$	---	uniform	on the bottom of the asperity			Itoi et al.(2009)	0.017	
Location of the asperity	$aspX,$ $aspY$	---		in the fault plane			Mai et al.(2005)	-0.040 -0.012	
Asperity area ratio	$C_{Sa}$	---		normal	0.22	0.04	0.04	Masuda et al.(2006)	-0.034
Frequency for high-cut filter	$f_{max}$	Hz	lognormal	6.0, 13.5, 13.5	0.60	0.42	0.48	Satoh et al.(1994a) Satoh et al.(2000)	0.13
Q-value	$C_{Qc}$	---		110.0	0.20	0.14	0.16	AIJ(2004)	0.050
coefficient	$C_{Qp}$	---		0.69	0.20	0.14	0.16		0.081

$\lambda$ : median,  $\mu$ : average,  $\zeta$ : log-standard deviation,  $\sigma$ : standard deviation.

$\lambda$  ( $\mu$ ) of  $\Delta\sigma$  or  $f_{max}$  represents the value for crustal earthquakes, inter-plate earthquakes, and intra-plate earthquakes from the top.

The upper and lower limits of random variables are set as  $\pm 3\zeta$ .

<sup>a</sup> Others: sources groups 1, 3 and 4, Japan Trench: sources group 2, Crustal: sources group 5

(a) 平均応力降下量 $\Delta\sigma$ (b) 高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$ 図 2.8 震源特性と地震動強さの感度 出典) Nishida et al.(2015)<sup>[1]</sup>

## 2.2.4 断層モデルに基づく時刻歴地震動の評価

西田らの手法<sup>[1],[2]</sup>では、断層モデルに基づく時刻歴地震動評価について、波形合成法の半経験的手法の一つである統計的グリーン関数法 (Stochastic Green's Function Method) <sup>[7]~[12]</sup>を用いて、地震基盤面での時刻歴地震波群を作成し、1次元弾性波動解析によって算定した地震基盤から解放基盤までの地盤増幅率によって、解放基盤上における時刻歴地震波を評価している。なお、断層モデルの要素地震の統計的グリーン関数法における加速度スペクトル (震源スペクトル<sup>[9]</sup>) に関して、距離減衰式 (司・翠川式) において表現されている震源近傍における幾何減衰の飽和項と同等の効果を考慮している。また、時刻歴波形の包絡関数には、佐藤ほか (1994b) <sup>[8]</sup>を用いた。対象敷地の地盤構造モデルおよび地震動評価の詳細については、後述の 2.3 章に示す。

## 2.2.5 対象敷地の地震ハザードに調和させるための調整

2.2.4 項の統計的グリーン関数法によって評価された断層モデル地震波群は、そのままでは距離減衰式による地震ハザードとは完全には調和しない。そこで、西田らの手法<sup>[1],[2]</sup>では、時刻歴地震波群によるハザードの中央値が距離減衰式と調和するように、統計的グリーン関数法によって作成した地震波群の加速度振幅に一律乗数を乗じることで、距離減衰式による結果と波形合成法による結果の整合性をとっている。また、時刻歴地震波群によるハザードのばらつきが距離減衰式と調和するように、断層モデルの震源特性の不確定性によって MCS で再現される地震動強さのばらつきが、距離減衰式と同等となることを確認している。

図 2.10 および図 2.11 に、西田ら<sup>[1],[2]</sup>の手法によって断層モデルから作成された時刻歴地震波群の、距離減衰式による地震ハザードに調和するように加速度振幅に乘じた係数、および、震源特性の不確定性の設定により結果的に得られた時刻歴地震波群による地震ハザードのばらつきを示す。各プロットは、ハザード分解によって得られたマグニチュード  $M$  と震源距離  $X$  の組合せ ( $M, X$ ) に対応するひとつの震源の結果を表している。図 2.10 より、統計的グリーン関数法によって作成された断層モデル地震波群は、震源距離が 50km 程度においては乗じる係数が 1.0 程度と、距離減衰式と同等の最大加速度が得られているものの、震源距離が遠くなるほど乗じる係数が大きくなる傾向がある。これは、統計的グリーン関数法が比較的震源距離の短い震源に対する地震動評価に有効な波形合成法であるためであり、震源距離に対する波形合成法の適用性については、地震波作成の際に留意すべき点であると考えられる。結果として、震源距離が 120km 程度と大きい場合には、距離減衰式による地震ハザードに調和する時刻歴地震波群とするために、統計的グリーン関数法による地震波の加速度振幅に 3.5 程度の係数を乗じている。距離減衰式と統計的グリーン関数法の差異の要因については、後述の 2.4.3 項で分析している。

西田らの手法に基づいて作成された全ての断層モデル地震波群によるハザード曲線を図 2.12 に示す。解放基盤における最大加速度  $700 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$  の地震ハザードに寄与する震源のみを対象として断層モデル地震波群を作成しているため、最大加速度の小さい範囲では地震波群によるハザードは小さ

目の評価になっているが、最大加速度ハザード適合の対象とした解放基盤における最大加速度  $700 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$  の範囲では概ね地震ハザードと調和しているのが確認できる。この地震波群作成に関して、合計約 11 万波の断層モデル地震波群が作成されており、その中から最大加速度  $700 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$  となる 200 波をハザード適合地震波として抽出されている。

なお、西田らの手法では、距離減衰式による地震ハザードを正とし、統計的グリーン関数法によって作成した時刻歴地震波群による地震ハザードが距離減衰式による地震ハザードと調和するように調整をする、というような考え方で断層モデル地震波群を作成している。距離減衰式によるハザード評価結果と波形合成法によるハザード評価結果のどちらを正にすべきかについては現状では判断が難しく、検討条件に応じて吟味すべき内容であり、また、距離減衰式に関する知見の発展や今後の議論が必要となる部分であると考えられる。

## 2.2.6 抽出された断層モデル地震波群の発生頻度

実適用上は、地震ハザードへの寄与度に応じて震源を絞ったとしても、震源特性の不確定性を考慮して作成された数十万波の断層モデル地震波群について時刻歴応答解析を行うのは困難であるため、西田らの手法においても、実適用可能な波数として 200 波をハザード適合地震波として抽出している。

地震ハザード曲線の縦軸は年超過頻度  $\nu(Y > y)$  を表していることから、地震動強さの範囲  $y_1 < Y < y_2$  において、ハザード適合地震波として  $N$  波抽出された場合には、図 2.9 に示すように、その中の  $k$  番目の地震波の年発生頻度  $\nu_k$  (回/年・波) は、Eq. 2.3 で表すことができる。

$$\nu_k (y_1 < Y < y_2) = \frac{\nu(Y > y_1) - \nu(Y > y_2)}{N} \quad (y_2 > y_1) \quad \text{Eq. 2.3}$$

ここに、 $y_1, y_2$  : 地震動強さ範囲の最大値と最小値、 $\nu(Y > y)$  : 地震動強さ  $y$  の年超過頻度、である。

なお、西田らの手法<sup>[1],[2]</sup>において、西田らは、時刻歴波形の最大値指標による距離減衰式を適用しているが、応答スペクトル距離減衰式の  $f \text{ Hz}$  応答を地震動強さ指標として適用すれば、 $f \text{ Hz}$  応答による地震ハザードに調和した時刻歴地震波群を作成することも可能である。

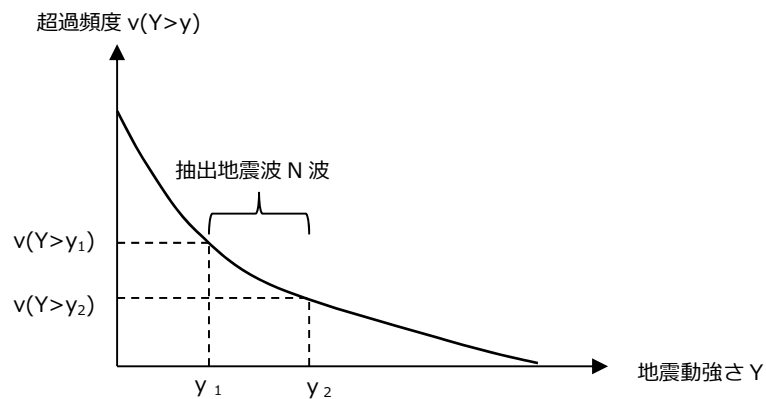


図 2.9 ハザード適合地震波として抽出された断層モデル地震波群の発生頻度

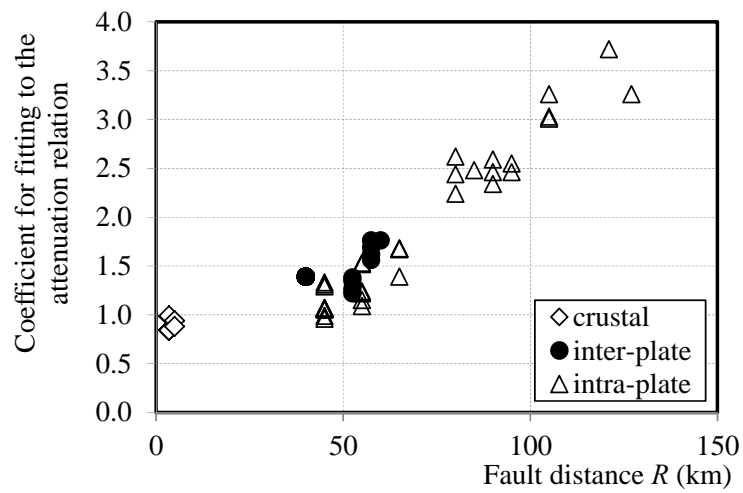


図 2.10 対象敷地の地震ハザードに調和するように時刻歴地震波群に乗じた係数

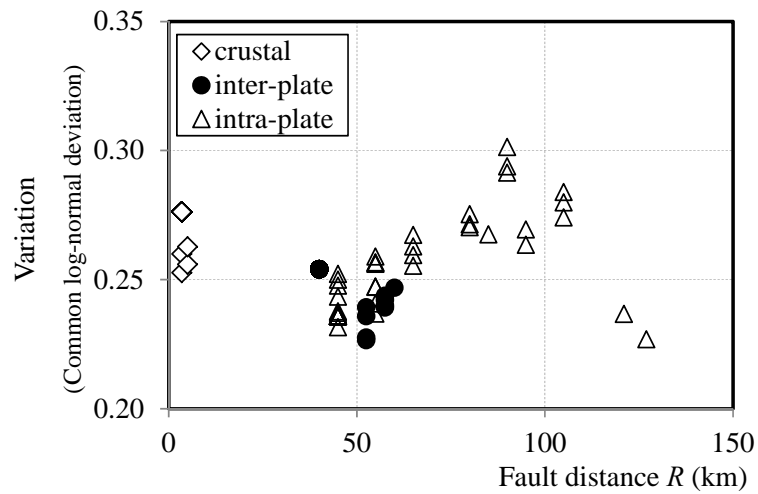


図 2.11 震源特性の不確定性による地震動強さのばらつき実現値

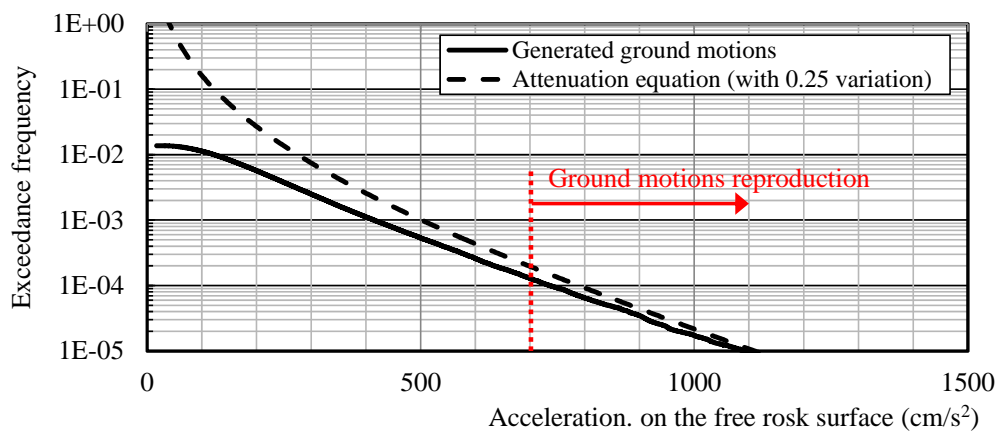


図 2.12 距離減衰式と地震波群によるハザード曲線の比較

(図 2.10～図 2.12 の出典 Nishida et al. (2015)<sup>[1]</sup>)



## 2.3 本論文の検討に用いる断層モデル地震波群

2.2 項に前述したとおり，西田らは図 2.13 に示す大洗地区を対象敷地として，震源特性の不確定性の取り扱い条件の異なる 2 種類のハザード適合地震波のセットを作成している。2.2 節では，西田らの論文を引用する形で 1 つ目の地震波セットについてその作成概要を述べた。本論文において分析対象とした断層モデル地震波群は 2 つ目の地震波セットである。2 つ目の地震波セットについても，西田ら<sup>[1],[2]</sup>の手法に基づいて作成されており，高田ら<sup>[13]</sup>によって「ケース B 地震波」として報告されている。基本的には 2.2 節と同様の手順に基づいて作成されているが，西田ら<sup>[1],[2]</sup>とは震源特性の不確定性の取り扱いや地震動評価の条件が若干 1 つ目の地震波セットは異なる部分も含まれるため，以下にその概要を示しておく。対象敷地は，1 つ目の地震波セットと同様で図 2.13 に示す大洗地区を対象としている。



図 2.13 地震波作成の対象サイト (36.26° N, 140.55° E) (再掲)

### 2.3.1 地震ハザード評価の条件

まず，ハザード評価における距離減衰式には，原子力施設の地震ハザード評価において良く用いられている応答スペクトル距離減衰式の一つである耐専スペクトル<sup>[14]</sup>を適用した。耐専スペクトルの距離減衰式のばらつきは自然対数標準偏差 $\zeta = 0.53$ （常用対数標準偏差 $\zeta_{10} = 0.23$ ）である。地震ハザード評価における地震動強さ指標には，解放基盤における 0.02 秒応答加速度を用いている。以降，本論文では 0.02 秒応答を最大加速度として扱うこととする。

耐専スペクトルは、マグニチュード  $M$  と等価震源距離  $X_{eq}$  で表される。等価震源距離  $X_{eq}$  は、ある断層面を持つ断層について、その地震波エネルギーが等価となる仮想点震源距離を表しており、Eq. 2.4 で表される<sup>[15]</sup>。

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\int e_m \cdot X_m^{-2} ds}{\int e_m ds} \quad \text{Eq. 2.4}$$

ここに、 $X_m$ ：観測点から断層面の各微小領域  $m$  への距離(km)、 $e_m$ ：断層面上の各微小領域  $m$  からの地震波エネルギーの相対的放出分布、 $ds$ ：断層面の微小領域  $m$  の面積(km<sup>2</sup>)、である。

なお、本論文で対象とする地震波群の作成においては、地震ハザード評価のマグニチュード  $M$  には、気象庁マグニチュード  $M_j$  を採用している。

また、解放基盤面上における平均応答スペクトルは、Eq. 2.5 で表される。

$$S(T) = S_b(T) \times \alpha(T) \times \beta(T) \quad \text{Eq. 2.5}$$

ここに、 $S_b(T)$ ：地震基盤における平均応答スペクトル、 $\alpha(T)$ ：地盤増幅率の補正係数、 $\beta(T)$ ：地盤の卓越周期の補正係数である。

耐専スペクトルの地震基盤における平均応答スペクトル  $S_b(T)$  は、せん断波速度  $V_s=2.2\text{km/s}$  程度の地盤を基準としたスペクトルであり、解放基盤の平均応答スペクトルは地盤に関する補正係数を乗じることで算定される。

地震波作成において地震ハザード評価の対象とする周期  $T=0.02\text{ s}$  では、Eq. 2.5 に示す地震基盤から解放基盤に至る地盤増幅率  $\alpha(T)$  および  $\beta(T)$  はいずれも 1.0 である。震源が地殻内地震（震源グループの(e)の場合）の場合には、NFRD 効果（震源近傍における破壊伝播効果）を考慮し、平均応答スペクトルに対して 0.6 倍掛した。

なお、ハザード評価における、震源の地域区分、マグニチュードの上限値の設定、地震発生確率モデル（地震の時間軸発生分布）などの地震ハザード評価における諸条件は、2.2 節の地震波セットと同様に、地震調査研究推進本部の地震動予測地図（2009）<sup>[4]</sup> に倣っている。

以上の条件で、距離減衰式に耐専スペクトルを適用した対象敷地の地震ハザード曲線を図 2.14 に示す。地震波作成のターゲットとする年超過頻度  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  の地震動強さは、解放基盤における最大加速度  $500 \sim 1000\text{cm/s}^2$  であり、実適用可能な波数の断層モデル地震波群として、 $100\text{cm/s}^2$  刻みの 5 つの最大加速度範囲から各 50 波、合計 250 波の断層モデル地震波をハザード適合地震波として抽出している。なお、対象敷地の地震ハザードに寄与する震源域の構成は 2.2 節と同様であるが、距離減衰式の違いにより、図 2.15 に示すように陸域の地震が寄与する割合が高い結果が得られている<sup>[13]</sup>。

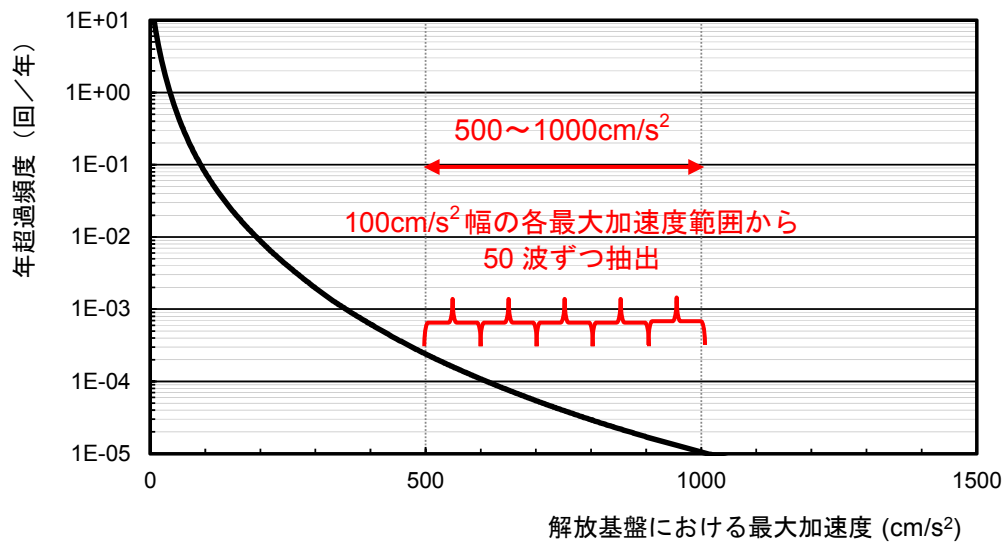


図 2.14 耐専スペクトルを距離減衰式とした評価地点の地震ハザード曲線 (JAEA より貸与)

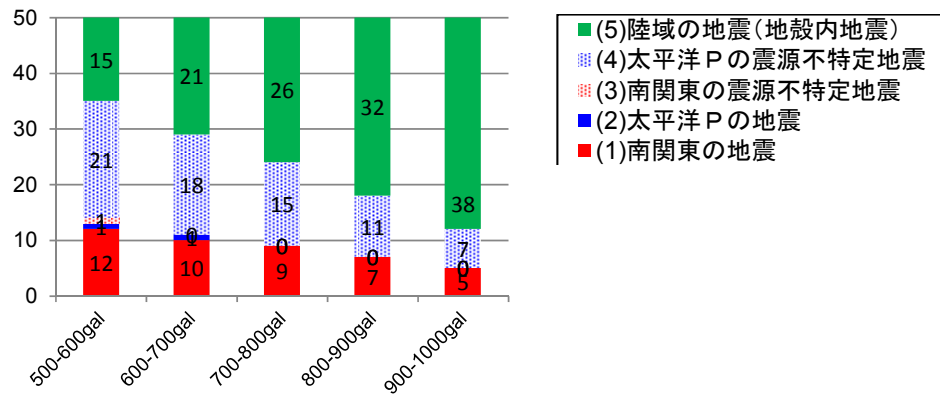


図 2.15 地震ハザードに寄与する震源域の構成 (文献<sup>[13]</sup>より引用抜粋)

### 2.3.2 震源特性の不確定性の条件

震源特性の不確定性の設定条件に関して、2.2 節の地震波群の作成では、断層モデルの微視的震源特性の不確定性のみを対象としていたのに対し、本論文において対象とする 2.3 節の地震波群は、微視的震源特性の不確定性に加えて、地震モーメントや断層長さ・面積といった断層モデルの巨視的震源特性の不確定性についても考慮している。巨視的震源特性の不確定性については、各震源特性の算定式の違いによる不確定性を認識論的不確定性としてロジックツリーを用いて評価し (Logic Tree Analysis)、ひとつの算定式内のばらつき (回帰係数のばらつき) については、偶然的な不確定性として MCS によって考慮した。なお、微視的震源特性の不確定性については、2.2 節の地震波作成と同様に MCS によって考慮した。また、地震動の発生確率モデルや波形合成法に係る諸式、震源から対象敷地に至るまでの地下構造モデル (地盤特性) については確定値として取り扱った。

原子力学会の地震 PRA 標準<sup>[16]</sup>に示されている地震ハザード評価における不確定性の分類例を参考に、表 2.6 に断層モデル地震波群の作成に関する不確定性を示す。また、断層モデルの微視的震源特性の不確定性については、観測記録の分析による統計値として既往の知見が種々得られている。主な既往知見は 2.4 節に示すが、本論文で対象とする地震波群の作成における微視的震源特性の不確定性の設定値については、既往知見と概ね同等の不確定性を考慮した内容となっている。また、断層モデル地震波群の作成においては、表 2.7 に示す分類で不確定性を考慮した項目を分類して考えている。

表 2.6 断層モデル地震波群の作成における不確定性の分類 (文献[16]の p.306 表を参考に作成)

認識論的不確定性	偶然的な不確定性	確定値・サイト固有値
(1) 震源モデル関連		
巨視的震源特性 ・ 傾斜角 ・ 断層長さを記述する諸式 ・ 断層面積を記述する諸式 ・ 断層形状 (アスペクト比)	巨視的震源特性 ・ 断層長さ・断層面積を記述する諸式に関するランダムなばらつき  微視的震源特性 ・ 平均応力降下量 ・ 破壊伝播速度 ・ ライズタイム ・ 破壊開始点位置 ・ アスペリティ位置 ・ アスペリティ面積比 ・ 高振動数遮断フィルタ ・ 媒質の Q 値	・ 震源の有無やその活動度 ・ 地体構造区分 ・ 地震発生確率モデル ・ 地震発生層の深さ、層厚 (地震調査研究推進本部:「地震動予測地図」)
(2) 地震動伝播モデル関連		
		・ 距離減衰式 ・ 震源距離算定方法 ・ 地下構造モデル ・ 波形合成法に係る諸式

表 2.7 断層モデル地震波群の作成に関する震源特性の不確定性の分類（JAEA より貸与）

認識論的不確定性 (ロジックツリー)		偶然的不確定性 (MCS)	
震源特性	不確定性の説明	震源特性	不確定性の説明
傾斜角	設定値の違い	要素地震の位相	個々の要素断層に対して乱数位相を与える。
地震モーメント	設定式の違い	平均応力降下量	対数正規分布
断層面積	設定式の違い	破壊伝播速度の せん断波速度比	対数正規分布
断層長さ	設定式の違い	ライズタイム係数比	対数正規分布
断層の縦横比	比率の違い	アスペリティ位置	断層内に一様分布
		アスペリティ面積比	正規分布
		破壊開始点位置	アスペリティ下端に一様分布
		高振動数遮断 フィルタ	対数正規分布
		媒質の Q 値	対数正規分布

### 2.3.3 巨視的震源特性の不確定性の条件

本項では、本論文において対象とする断層モデル地震波群の作成に関して、巨視的震源特性の不確定性の設定条件を示す。断層モデルの認識論的不確定性は、海溝型地震と地殻内地震の震源特性の違いを考慮して各々ロジックツリーを用いて設定されている。以下にその概要を示す。

#### (a) 海溝型地震：震源グループ(1)～(4)

図 2.16 に海溝型地震のロジックツリーを示す。海溝型地震の断層形状は矩形を仮定した。また、震源深さは地震動予測地図に従う値とした。断層走向および傾斜角については地震調査研究推進本部の地震動予測地図の設定値に基づき確定値とした。震源グループ(1)の南関東の地震（フィリピン海プレート内地震）については走向  $210^{\circ}$ 、傾斜角  $15^{\circ}$  とし、震源グループ(1)の南関東の地震（フィリピン海プレート間地震）については走向  $220^{\circ}$ 、傾斜角  $15^{\circ}$  とした。また、震源グループ(3)の震源を特定しにくい南関東の地震については、走向  $210^{\circ}$ 、傾斜角  $15^{\circ}$ 、震源グループ(4)の震源を特定しにくい太平洋プレートの地震については、走向  $210^{\circ}$ 、傾斜角  $20^{\circ}$  とした。断層のすべり角については、地震調査研究推進本部の地震動予測地図におけるハザード評価では考慮されていないため、ここではすべり角  $90^{\circ}$  の固定値とした。また、断層モデルの巨視的震源特性である地震モーメント  $M_0$ 、断層面積  $S$ 、断層長さとの比  $L/W$  については、震源のマグニチュード  $M_j$  をロジックツリーの分岐の開始点とし、ひとつのマグニチュード  $M_j$  に対する上記の各パラメータの認識論的不確定性をロジックツリーの分岐として表した。さらに、各パラメータの算定式内の偶然的な不確定性を確率変数  $b$  として MCS により考慮した。表 2.8 に海溝型地震の震源特性の不確定性の設定値をまとめる。

海溝型地震に関しては、表 2.9 と表 2.10 に示すように計 10 つのロジックツリーのパスに基づき不確定性を考慮した。各パスの重み付けは基本的に各パスの重み付けが等しくなるように設定した（等重みのパス数：12 パス）。

なお、認識論的不確定性を考慮したロジックツリーの各パスは、そのパスが異なれば地震ハザードの結果も異なってくる。前述したハザード評価では、ロジックツリーに基づき設定される断層モデルの全パスの中から平均的な地震ハザードとなる断層面を基準断層面（断層走向、傾斜角）として設定し、各震源のハザード寄与度を算定した。表 2.11 に地震ハザード評価に用いた基準断層面のパスの条件を示す。

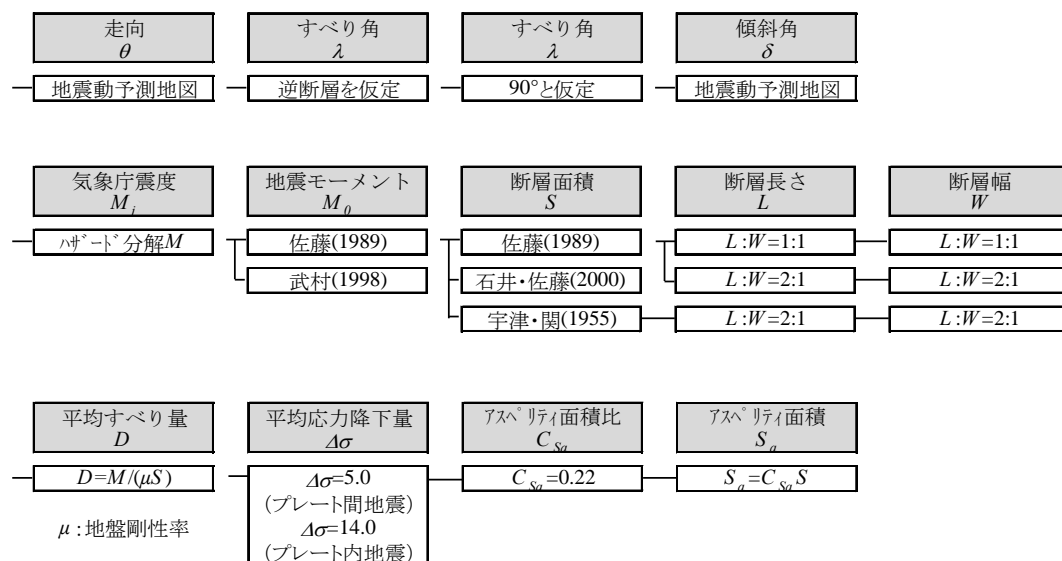


図 2.16 海溝型地震（震源グループ(1)~(4)）のロジックツリー（JAEA より貸与）

表 2.8 海溝型地震の巨視的震源特性の認識論的および偶然的な不確定性の設定（JAEA より貸与）

震源特性	算定式名	式と適用範囲	確率変数	$\lambda$	$\zeta$
地震モーメント $M_0$	佐藤式 <sup>[17]</sup>	$\log_{10}(M_0 \times 10^7) = 1.5M_j + b_1$ ( $3.9 \leq M_j \leq 8.4$ )	$b_1$	16.2	0.25
		$\log_{10}(M_0 \times 10^7) = 1.5(M_j + 0.2) + b_2$ ( $6.9 \leq M_j$ )	$b_2$	16.2	0.75
	武村式 <sup>[18]</sup>	$\log_{10}(M_0 \times 10^7) = 2.25M_j + b_3$ ( $6.2 \leq M_j \leq 6.9$ )	$b_3$	11.3	0.75
		$\log_{10}(M_0 \times 10^7) = 1.5(M_j - 0.2) + b_4$ ( $M_j \leq 6.2$ )	$b_4$	16.2	0.75
断層面積 $S$	佐藤式	$\log_{10} S = M_j + b_5$ ( $3.9 \leq M_j \leq 8.4$ )	$b_5$	-4.07	1.25
	石井・佐藤式 <sup>[19]</sup>	$\log_{10} S = (2/3) \cdot \log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_6$ ( $5.0 \times 10^{19} \leq M_0$ )	$b_6$	-14.319	0.50
	宇津・関式 <sup>[20]</sup>	$\log_{10} S = M_j + b_7$	$b_7$	-4.00	0.50
断層 長さ幅比 $L/W$	1.0	$L = \sqrt{S}$	-	-	-
	2.0	$L = \sqrt{2S}$	-	-	-

$\lambda$ および $\zeta$ ：確率変数の中央値および自然対数標準偏差

表 2.9 海溝型地震の巨視的震源特性の設定（JAEA より貸与）

震源	走向	すべり角	傾斜角	パスの重み
海溝型地震	地震動予測地図	90°	地震動予測地図	1/1

表 2.10 海溝型地震のロジックツリーの重み付け（JAEA より貸与）

No.	震源特性の算定式			パスの重み			パス重み
	地震モーメント $M_0$	断層面積 $S$	断層長さ/幅 $L/W$	$M_0$	$S$	$L/W$	
1	佐藤式 <sup>[17]</sup>	佐藤式 <sup>[17]</sup>	1.0	1/2	1/3	1/2	1/12
2			2.0			1/2	1/12
3		石井・佐藤式 <sup>[19]</sup>	1.0		1/3	1/2	1/12
4			2.0			1/2	1/12
5		宇津・関式 <sup>[20]</sup>	2.0		1/3	1/1	2/12
6	武村式 <sup>[18]</sup>	佐藤式	1.0	1/2	1/3	1/2	1/12
7			2.0			1/2	1/12
8		石井・佐藤式	1.0		1/3	1/2	1/12
9			2.0			1/2	1/12
10		宇津・関式	2.0		1/3	1/1	2/12

表 2.11 地震ハザード評価のための基準断層面（海溝型地震）（JAEA より貸与）

震源	震源グループ	震源域	走向	傾斜角	すべり角	断層面積	長さ幅比 $L:W$
海溝型 地震	(1) 南関東の地震	フィリピン海 P 内地震	210°	15°	90°	佐藤(1989) <sup>[17]</sup>	2:1
		フィリピン海 P 間地震	220°	15°	90°	佐藤(1989)	2:1
		太平洋 P 間地震	190°	25°	90°	佐藤(1989)	2:1
	(2) 太平洋プレート の地震	海溝寄りの プレート内大地震	217°	45°	90°	佐藤(1989)	2:1
	(3) 震源を特定しに くい南関東の地 震	地域区分 5 の プレート内地震	210°	15°	90°	佐藤(1989)	2:1
	(4) 震源を特定しに くい太平洋プレ ートの地震	地域区分 9 の プレート間地震	210°	20°	90°	佐藤(1989)	2:1

※ハザードに寄与する震源として、断層モデル地震波群作成対象となった震源域のみを記載



## (b) 内陸地殻内地震（震源を特定しない）：震源グループ(5)

図 2.17 に震源を特定しない地殻内地震のロジックツリーを示す。地殻内地震の断層形状は矩形を仮定した。震源グループ(5)は領域震源であるため、断層走向に不確定性があると考えられるが、後述における震源特性の不確定性分析の煩雑さを避けるため、本論文の地震波作成では断層走向は  $200^\circ$  に固定した。傾斜角およびすべり角については横ずれ断層および縦ずれ断層を想定した設定とし、横ずれ断層については、傾斜角  $90^\circ$ ，すべり角  $0^\circ$  とし、縦ずれ断層については、傾斜角  $30^\circ$ ， $45^\circ$ ， $60^\circ$ ，すべり角  $90^\circ$  と仮定し、ロジックツリーのパスを設定した。また、海溝型地震と同様に、地震モーメント  $M_0$ ，断層面積  $S$ ，断層長さ  $L$  および断層幅  $W$  について、ひとつのマグニチュード  $M_j$  に対する認識的不確定性をロジックツリーの分岐として表し、さらに算定式内の偶然的な不確定性を確率変数  $b$  として MCS によって考慮した。表 2.12 に、地殻内地震の震源特性の不確定性の設定値を示す。なお、Eshelby (1957)<sup>[25]</sup>による円形クラックの式からアスペリティ面積  $S_a$  を算定するパスと、地震調査研究推進本部<sup>[26]</sup>による平均応力降下量の設定値  $\Delta\sigma=3.0\text{MPa}$  からアスペリティ面積  $S_a$  を算定するパスを等重みとして設定した。表 2.13～表 2.15 には、各ロジックツリーの重み付けを示す。各パスの重み付けは、各パスの重み付けが等しくなるように配慮し、計 104 ケース（走向～傾斜角：4 ケース， $M_j$ ～断層長さ：13 ケース，平均応力降下量～アスペリティ面積：2 ケース，等重みのパス数：144 パス）を設定した。なお、海溝型地震と同様に、表 2.16 に地震ハザード評価に用いた基準断層面のパスの条件を示す。

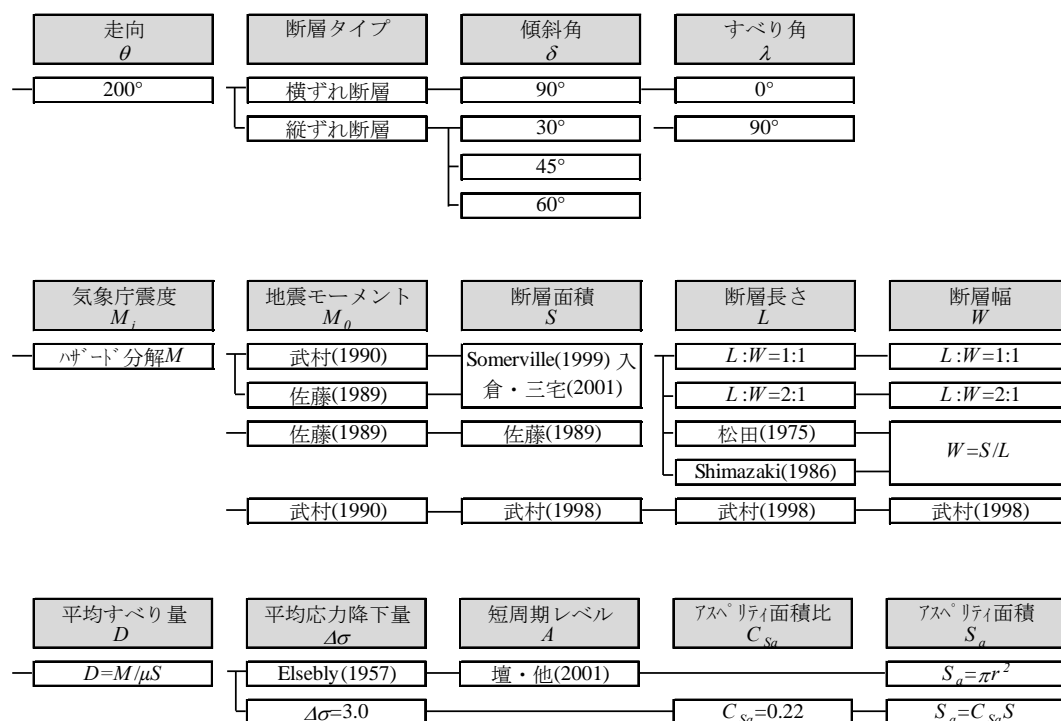


図 2.17 地殻内地震（震源グループ(5)）のロジックツリー（JAEA より貸与）

表 2.12 地殻内地震の巨視的震源特性の認識論的および偶然的な不確定性の設定（JAEA より貸与）

震源特性	算定式名	式と適用範囲		確率変数	$\lambda$	$\zeta$
地震モーメント $M_0$	佐藤式 <sup>[17]</sup>	$\log_{10}(M_0 \times 10^7) = 1.5M_j + b_8$	$(3.9 \leq M_j \leq 8.4)$	$b_8$	16.2	0.25
	武村式 <sup>[21]</sup>	$\log_{10}(M_0 \times 10^7) = 1.17M_j + b_9$	$(3.9 \leq M_j \leq 7.9)$	$b_9$	17.72	0.50
断層面積 $S$	Somerville et al. <sup>[22]</sup>	$\log_{10} S = (2/3)\log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{10}$ $(M_0 \leq 7.5 \times 10^{18})$		$b_{10}$	-14.65	0.50
		$\log_{10} S = (1/2)\log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{11}$ $(7.5 \times 10^{18} \leq M_0 \leq 1.0 \times 10^{21})$		$b_{11}$	-10.37	0.50
	佐藤式 <sup>[17]</sup>	$\log_{10} S = M_j + b_{12}$	$(3.9 \leq M_j \leq 8.4)$	$b_{12}$	-4.07	0.25
	武村式 <sup>[18]</sup>	$\log_{10} S = (2/3)\log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{13}$ $(M_0 \leq 7.5 \times 10^{18})$		$b_{13}$	-14.74	0.50
		$\log_{10} S = (1/2)\log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{14}$ $(7.5 \times 10^{18} \leq M_0 \leq 1.0 \times 10^{21})$		$b_{14}$	-10.71	0.50
断層長さ $L$	$L/W=1.0$	$L = \sqrt{S}$		-	-	-
	$L/W=2.0$	$L = \sqrt{2S}$		-	-	-
	松田式 <sup>[23]</sup>	$\log_{10} L = 0.6M_j + b_{15}$	$(6.2 \leq M_j \leq 8.4)$	$b_{15}$	-2.9	0.50
	Shimazaki 式 <sup>[24]</sup>	$\log_{10} L = 0.281 \log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{16}$ $(M_0 \leq 7.5 \times 10^{18})$		$b_{16}$	-5.98	0.50
		$\log_{10} L = 0.524 \log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{17}$ $(7.5 \times 10^{18} \leq M_0)$		$b_{17}$	-12.44	0.50
	武村式 <sup>[18]</sup>	$\log_{10} L = (1/3)\log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{18}$	$(M_0 \leq 7.5 \times 10^{18})$	$b_{18}$	-7.28	0.50
		$\log_{10} L = (1/2)\log_{10}(M_0 \times 10^7) + b_{19}$	$(7.5 \times 10^{18} \leq M_0)$	$b_{19}$	-11.82	0.50
断層幅 $W$	$L/W=1.0$	$W = L$		-	-	-
	$L/W=2.0$	$W = L/2$		-	-	-
	$W=S/L$	$W = S/L$ ( $S/L > T_s$ )		-	-	-
		$W = T_s / \sin \delta$ ( $S/L > T_s$ $T_s$ : 地震発生層厚さ )		-	-	-
	武村式 <sup>[18]</sup>	$W = (2/3)L$	$(M_0 \leq 7.5 \times 10^{18})$	-	-	-
		$W = 13km$	$(7.5 \times 10^{18} \leq M_0)$	-	-	-

$\lambda$ : 中央値,  $\zeta$ : 自然対数標準偏差

表 2.13 地殻内地震の巨視的震源特性の設定 (JAEA より貸与)

震源	走向	すべり角	傾斜角	パスの重み
地殻内地震	200°	0°	90°	1/2
		90°	30°	1/6
			45°	1/6
			60°	1/6

表 2.14 地殻内地震のロジックツリーの重み付け (JAEA より貸与)

No.	震源特性の算定式			パスの重み			パス重み
	$M_0$	$S$	$L$	$M_0$	$S$	$L$	
1	武村式 <sup>[21]</sup>	Somerville et al. <sup>[22]</sup> / 入倉・三宅式 <sup>[7]</sup>	$L/W=1.0$	2/6	1/1	1/4	2/24
2			$L/W=2.0$			1/4	2/24
3			松田式 <sup>[23]</sup>			1/4	2/24
4			Shimazaki 式 <sup>[24]</sup>			1/4	2/24
5	佐藤式 <sup>[17]</sup>	Somerville et al. <sup>[22]</sup> / 入倉・三宅式 <sup>[7]</sup>	$L/W=1.0$	1/6	1/1	1/4	1/24
6			$L/W=2.0$			1/4	1/24
7			松田式			1/4	1/24
8			Shimazaki 式			1/4	1/24
9	佐藤式	佐藤式	$L/W=1.0$	1/6	1/1	1/4	1/24
10			$L/W=2.0$			1/4	1/24
11			松田式			1/4	1/24
12			Shimazaki 式			1/4	1/24
13	武村式	武村式	武村式	2/6	1/1	1/1	8/24

表 2.15 地殻内地震の平均応力降下量の認識論的不確定性の設定 (JAEA より貸与)

震源	平均応力降下量	パスの重み
地殻内地震	地震調査研究推進本部「レンビ」 <sup>[25]</sup>	1/2
	円形クラックの式 <sup>[25]</sup>	1/2

表 2.16 地震ハザード評価のための基準断層面 (内陸地殻内地震) (JAEA より貸与)

震源	震源グループ	震源域	走向	傾斜角	すべり角	断層面積 断層長さ	断層幅
内陸 地殻内地震	(5) 陸域の地震	地域区分 7 の地震	200°	60°	90°	武村(1998)	面積／長さ

※ハザードに寄与する震源として、断層モデル地震波群作成対象となった震源域のみを記載

### 2.3.4 微視的震源特性の不確定性の条件

表 2.17 に、微視的震源特性の不確定性の条件を示す。2.2 節の 1 つ目の地震波セットに対して、2 つ目の地震波セットでは、震源特性の不確定性の設定条件の改善を講じているため若干の値の違いがあるが、基本的には 2.2 節と同じ震源特性について偶然的な不確定性を考慮している。各震源特性の断層面内におけるばらつきは、今回の断層モデル地震波群の作成では考慮しておらず、断層面内のすべり角、すべり量（背景領域に対するアスペリティのすべり量比）等については、断層面内で一様であると仮定した。なお、震源域の種類によって付与するばらつきの大きさが異なっているが、これは作成された地震波群のばらつきと距離減衰式のばらつきが同等となるように調整しているためである。

表 2.17 本論文の断層モデル地震波群の微視的震源特性の不確定性の設定（JAEA より貸与）

確率変数とした 震源特性	変数名	単位	分布 形状	中央値 (平均値)	対数標準偏差（標準偏差）			感度※
					陸域	海溝 寄り	その他	
要素地震の位相	1 つの断層モデルに対して乱数位相を与えるための初期シード値を 1 個設定した。 また、各要素地震には初期シード値を元に各々独立な乱数位相を与えた。 なお、SH 波（水平動算定用）、SV 波（上下動算定用）の位相についても独立に位相を与えた。							
平均応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	対数  正規	3.0（地殻内） 5.0（P 間） 14.0（P 内）	0.75	0.42	0.60	0.15
せん断波速度	$C_{lr}$	---		0.72	0.10	0.056	0.08	0.006
ライスタイム係数	$\alpha_{lr}$	---		0.5	0.20	0.112	0.16	$1.9\times10^{-3}$
破壊開始点	$startX$	---	一様	アスペリティ下端に一様分布				0.017
アスペリティ位置	$aspX,$	---		断層面内に一様分布				-0.093
	$aspY$							$-4.0\times10^{-4}$
アスペリティ面積比	$C_{Sa}$	---	正規	0.22	0.04	0.028	0.04	-0.02
高振動数遮断 フィルタ	$f_{max}$	Hz	対数  正規	6.0（地殻内） 13.5（P 間） 13.5（P 内）	0.22	0.126	0.18	0.02
Q 値（ $Q=C_{Qc}\times f^{C_{Qp}}$ ）	$C_{Qc}$	---		110.0	0.55	0.308	0.44	0.14
	$C_{Qp}$	---		0.69	-	-	-	-

※感度は、震源グループ(1)：南関東の地震（フィリピン海プレート内）のひとつの震源から作成した地震波群を対象として算定した。

### 2.3.5 地震動評価の条件

2.2 項で示した西田らの手法<sup>[1],[2]</sup>における1つ目の地震波群は、波形合成法に統計的グリーン関数法を採用していたが、本論文において検討対象とする2つ目の地震波群<sup>[13]</sup>は、短周期側を統計的グリーン関数法<sup>[7]~[12]</sup> (Stochastic Green's function method)、長周期側を理論的手法である波数積分法<sup>[28]</sup> (Wave number integration method) によってそれぞれ計算し、接続周期を2.0秒としてそれらをハイブリッド合成<sup>[32]</sup>した地震波群である。以下に地震動評価の解析条件を示す。

#### (a) 統計的グリーン関数法

統計的グリーン関数法では、地震基盤上における時刻歴地震波群を評価し、地震基盤～解放基盤の地盤構造モデルに基づく地盤増幅率を乗じることによって、解放基盤上での時刻歴地震波群を作成した。

まず、Boore (1983) <sup>[9]</sup>の手法を基本として、Eq. 2.6～Eq. 2.9により地震基盤における加速度フーリエスペクトル  $A(f)$  を作成した。

$$A(f) = \frac{R_{\theta\phi}(f) \cdot FS \cdot P_{RTTN}}{4\pi\rho V_s^3} \cdot M_0 \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1+(f/f_c)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_{\max})^m}} \cdot \frac{1}{X+C(f)} \exp\left(-\frac{\pi f \cdot X}{Q(f)V_s}\right) \sqrt{\frac{\rho V_s}{s\rho_s V_s}} \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \cdot V_s \left( \frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 2.7}$$

$$Q(f) = C_{Qc} \times f^{C_{Qp}} \quad \text{Eq. 2.8}$$

$$C(f) = \begin{cases} 0.0055 \times 10^{0.5M_w} & (f > 50\text{Hz}) \\ 6.85 \log_{10} f + 7.87 & (50\text{Hz} > f > 2\text{Hz}) \\ 0.0028 \times 10^{0.5M_w} & (2\text{Hz} > f) \end{cases} \quad \text{Eq. 2.9}$$

ここに、 $R_{\theta\phi}(f)$ : 放射特性を表す係数、 $FS$ : 自由地盤に対する振幅増幅率 (=2)、 $P_{RTTN}$ : 水平成分の地震動エネルギーの分割係数、 $\rho$ : 震源近傍の地盤密度、 $V_s$ : 震源近傍の地盤のせん断波速度、 $M_0$ : 要素断層の地震モーメント、 $f_c$ : コーナー周波数、 $f_{\max}$ : 高振動数遮断フィルタの設定振動数、 $X$ : 震源距離、 $m$ : 高振動数遮断フィルタの乗数、 $C(f)$ : 震源近傍におけるマグニチュード依存の距離減衰飽和項、 $Q(f)$ : 媒質のQ値 ( $Q(f)=C_{Qc} \times f^{C_{Qp}}$ ,  $C_{Qc}$ ,  $C_{Qp}$ は地盤構造に応じた定数)、 $s\rho$ : 地震基盤近傍の地盤密度、 $sV_s$ : 地震基盤近傍の地盤のせん断波速度、 $\Delta\sigma$ : 平均応力降下量、である。

本節の検討では、放射特性 (ラジエーションパターン) を考慮し、釜江ほか (1990) <sup>[10]</sup>に倣い、5.0Hz以上の短周期側は統計的に決まる等方的な放射特性 ( $\approx 0.445$ )、0.5Hz以下の長周期側は震源と評価地点との位置関係およびすべり方向によって決まる理論的な放射特性とし、5.0～0.5Hzの間で遷移する

放射特性モデルを適用した。また、Eq. 2.6 に示す距離減衰項の飽和項  $C(f)$  は司・翠川（1999）<sup>[3]</sup>を参照し、Eq. 2.9 に示す式を用いた。

Eq. 2.6～Eq. 2.9 に示す震源特性のうち、要素断層の地震モーメント  $M_0$ 、平均応力降下量  $\Delta\sigma$ 、高振動数遮断フィルタの設定振動数  $f_{max}$ 、媒質の  $Q$  値については、前節に示す不確定性パラメータとして設定した。高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$  の乗数  $m$  については、佐藤ほか（1994a）<sup>[8]</sup>に基づき 4.2 とした。また、震源近傍の地盤特性については、中央防災会議<sup>[30]</sup>や J-SHIS<sup>[31]</sup>等の地盤データに基づき、震源域毎に表 2.18 の値を確定値として用いた。

震源特性の不確定性を考慮して生成した 1 断層面につき、各要素地震の乱数位相を与える際の初期シード値を 1 個設定し、初期シード値を元に各要素断層に対し、独立な乱数位相を設定した。なお、SH 波および SV 波の位相も独立とした。震源と評価地点を直線で結んだ線と鉛直の角度に基づき、SV 波の水平方向成分と上下方向成分を作成した。概念図を図 2.18 に示す。なお、地震動の包絡関数（経時特性）には佐藤（1994a）<sup>[44]</sup>を適用した。

以上により作成した地震基盤における要素地震の地震波に対して、1 次元弾性波動解析により算定した地盤増幅率を乗じることによって、解放基盤上での時刻歴地震波群を作成した。地震基盤～解放基盤の地盤構造モデルを表 2.19 に示す。このとき、水平動に関しては S 波、上下動に関しては P 波の鉛直入射を仮定した地盤増幅率を適用した。図 2.20 に水平動および上下動の地盤増幅率を示す。なお、 $Q$  値に関しては、 $Q_s = Q_p$  とし、振動数依存性は考慮せず表 2.19 に示す値で一定値とした。

最後に、水平動（SH、SV 水平成分）を NS 方向成分および EW 方向成分に座標変換した後、入倉ほか（1997）<sup>[45],[46]</sup>による波形合成を行い、解放基盤上の地震動を評価した。波形合成に際しては、各要素断層の座標は断層中央としたが、各要素地震には独立な乱数位相を与えることにより、波形合成による特異な周波数成分が生じないようにした。

なお、統計的グリーン関数法による波形合成法では、震源特性の不確定性を考慮した断層モデルを作成することから、解析の便宜上、背景領域による時刻歴地震波とアスペリティによる地震波を個別に作成したのち、両者の加速度時刻歴波形を時間領域で足し合わせることによって 1 つの断層モデルに対する時刻歴地震波を作成した。また、背景領域およびアスペリティの要素分割数は最小分割数を 4 とし、各要素地震のモーメントマグニチュード  $M_w$  が、地殻内地震の場合は 5.0 以上、海溝型地震の場合は 5.5 以上となる最小メッシュ数で分割した。

表 2.18 統計的グリーン関数法で用いた震源近傍の地盤特性（JAEA より貸与）

震源	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (km/s)
南関東の地震（震源グループ (1),(3)）	2.8	3.5
太平洋プレートの地震（震源グループ (2),(4)）	3.0	4.0
内陸地殻内地震（震源グループ (5)）	2.7	3.6

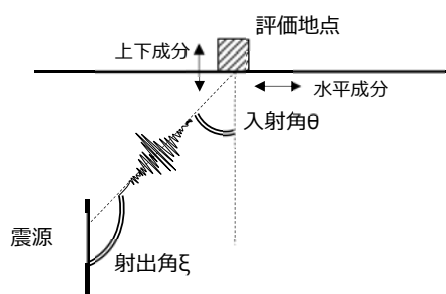


図 2.18 SV 波の水平・上下成分の分解の概念図

表 2.19 評価地点の地盤構造モデル（地震基盤～解放基盤）（JAEA より貸与）

No.	層厚さ(m)	$V_s$ (km/s)	$V_p$ (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Q$
1 (解放基盤)	15	0.59	1.68	1.86	100
2	100	1.01	2.17	1.98	100
3	350	1.186	2.585	2.11	100
4	670	2.086	4.095	2.44	100
5 (地震基盤)	-	3.052	5.754	2.68	100

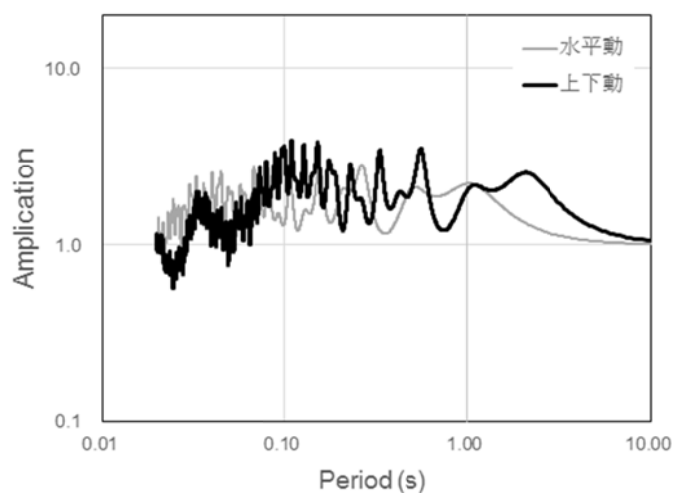


図 2.19 対象敷地の地盤増幅率（JAEA より貸与）

### (b) 波数積分法

波数積分法は、久田ほか<sup>[28]</sup>の手法に基づき、水平成層地盤におけるグリーン関数の波数積分により、震源断層から評価地点の解放基盤までの伝播解析を行い、解放基盤上での時刻歴地震波群を作成した。すべり速度関数は中村・宮武（2000）<sup>[29]</sup>に基づき、統計的グリーン関数法で用いた断層パラメータを用いて、アスペリティおよび背景領域それぞれに対して設定した。また、波数積分法による計算の際には、大洗研究開発センターの基準地震動の策定<sup>[27]</sup>に用いられた深部地盤データを参照した。表 2.20 に波数積分法で用いた深部地盤構造を示す。

表 2.20 評価地点の地盤構造モデル<sup>[27]</sup>（地震基盤以深）（JAEA より貸与）

No.	層厚さ(m)	$V_s$ (km/s)	$V_p$ (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Q$
5 (地震基盤)	2708	3.052	5.754	2.68	$110f^{0.69}$
6	11900	3.600	5.96	2.70	$110f^{0.69}$
7	14600	4.170	6.81	2.80	$110f^{0.69}$
8	-	4.320	7.64	3.20	$110f^{0.69}$

### (c) ハイブリッド合成

統計的グリーン関数法は主に短周期の地震動を精度良く評価する手法であるため、周期 1～2 秒のやや長周期の地震動を精度良く評価することが可能な波数積分法と組み合わせることによって、対象敷地に発生しうる地震波群をより広帯域で評価することができ、地盤応答の評価や長周期機器類の応答の評価の精度を向上させることが可能となる。ハイブリッド合成するにあたり、統計的グリーン関数法による地震波（短周期地震波）にはハイパスフィルタ、波数積分法による地震波（長周期地震波）にはローパスフィルタを施し、時間領域で重ね合わせて合成した。図 2.20 にフィルタ形状を示す。フィルタは周期 2 秒±0.1 秒の範囲で、1 から 0 となる形状としている。

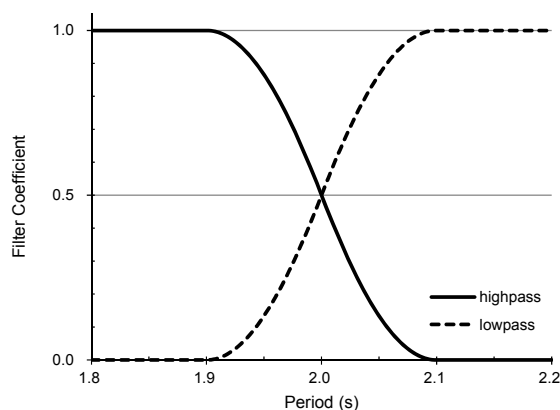


図 2.20 ハイブリッド合成において地震波に施したフィルタ（JAEA より貸与）



### 2.3.6 断層モデル地震波群の作成結果

2.3.1~2.3.3 項の解析条件の下，解放基盤の最大加速度  $500\sim1000\text{cm/s}^2$  の地震ハザードに寄与する震源を対象として，計 92,424 波の断層モデル地震波群が作成された。図 2.21 に，作成した全地震波群によるハザード曲線と，耐専スペクトルの距離減衰式による地震ハザード曲線を比較した結果を示す。

断層モデル地震波群の作成対象とする最大加速度の範囲  $500\sim1000\text{cm/s}^2$  においては，断層モデル地震波群による地震ハザードは，概ね距離減衰式に基づくハザード曲線と同等の結果が得られており，最大加速度  $500\sim1000\text{cm/s}^2$  を満たす断層モデル地震波群は，耐専スペクトルによる対象敷地の地震ハザードに調和する地震波であることが確認できる。断層モデル地震波群による地震ハザード曲線の裾野が距離減衰式と比較して多少長めとなっているのは，断層モデル地震波群によって再現された最大加速度のばらつきが，距離減衰式のばらつき（自然対数標準偏差 $\zeta=0.53$ ）に対して，結果的にやや大きくなってしまったことが要因である。なお，最大加速度が小さい範囲において，断層モデル地震波群によるハザード曲線が距離減衰式によるハザード曲線よりも小さくなっているのは，断層モデル地震波群の作成の際に，加速度の小さい範囲の地震ハザードに寄与する震源を考慮していないことによるもので，最大加速度  $500\sim1000\text{cm/s}^2$  のハザード適合地震波の作成に対して影響を及ぼすものではない。

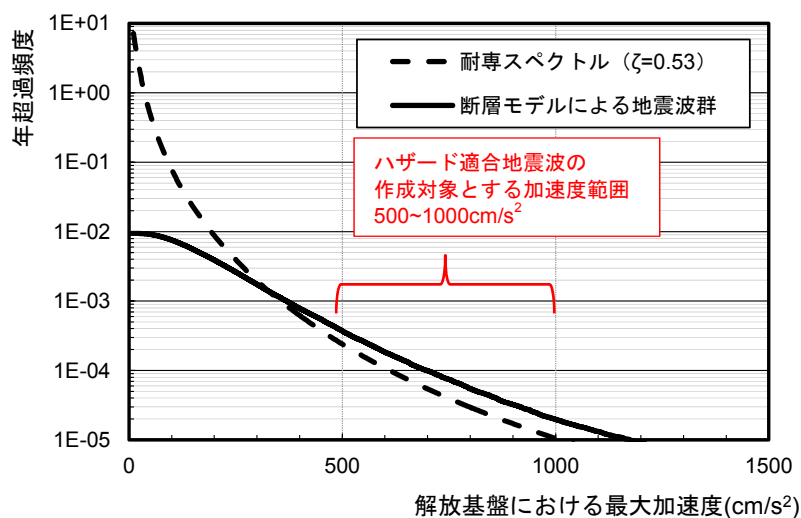


図 2.21 全地震波群による地震ハザード曲線（92,424 波）（JAEA より貸与）

### 2.3.7 断層モデル地震波群の位置付けの整理

西田らが作成した断層モデル地震波群は、原子力施設の地震リスク評価に適用するという観点から、最終的な地震リスク（炉心損傷頻度）に寄与する震源を対象として作成された断層モデル地震波群である。原子力施設の原子炉システムは比較的短周期の機器類で構成されているため、地震リスクは短周期の地震動強さ指標との相関が良いと考えられ、従来の原子力施設の地震 PRA においても最大加速度を地震動強さ指標とした評価が行われてきた。このことから、西田らは最大加速度を地震動強さ指標とした地震ハザードの分解手法に基づき、地震リスクに寄与する震源を対象として断層モデル地震波群を作成している。作成された約 10 万波の断層モデル地震波群は、原子力施設の地震リスクに寄与する最大加速度  $500\sim 1000\text{ cm/s}^2$  の地震動を生じさせる震源を対象として、震源特性の不確定性を考慮して作成された全ての地震波群である。

一方で、地震リスク評価への実適用においては、断層モデル地震波群を入力とした建物や機器類の時刻歴応答解析が必要となるが、約 10 万波の地震波群を全て時刻歴応答解析に適用するのは現実的ではない。そのため、10 万波の中から最大加速度  $500\sim 1000\text{ cm/s}^2$  となる地震波群（すなわち、最大加速度を指標とした地震ハザードに適合する地震波群）を抽出したのが 200 波あるいは 250 波の地震波群である。

本論文の第 5 章では、原子力施設のように予め建物の機能損傷が最大加速度によって決まることが想定できる建物だけでなく、一般建築設備などの固有周期の異なる複数の機器類で構成され、建物の機能損傷を良く表現できる地震動強さ指標が予め明らかではない任意のシステムに対しても、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価を適用可能にする地震リスク評価の効率化手法の提案を行っている。本章の西田らの断層モデル地震波群は、第 5 章の効率化手法において、地震リスクを良く表現できる地震動強さ指標として「解放基盤における最大加速度」が選定された場合の断層モデル地震波群作成の一例として、本論文では位置付けている。

図 2.22 に本論文の検討に用いた断層モデル地震波群の位置付けを図示する。前項では、 $500\sim 1000\text{ cm/s}^2$  の最大加速度に寄与する震源から約 10 万波の断層モデル地震波群が作成されている。地震ハザードに寄与する震源は震源域やマグニチュード  $M$  と震源距離  $X$  の組合せ  $(M, X)$  の異なる複数の震源で構成されており、 $(M, X)$  の組合せで表されるひとつの震源からそれぞれ約 3000 波程度の断層モデル地震波群が作成されている。それらの震源の中から地震ハザードに適合する地震波群として、最大加速度が  $500\sim 1000\text{ cm/s}^2$  の  $100\text{ cm/s}^2$  刻みの 5 つの加速度レベル毎に 50 波ずつ、計 250 波の地震波群を抽出している。この 50 波あるいは 250 波という波数は、時刻歴応答解析の解析負荷を考えた場合に実適用可能な地震波数の一例である。また、対象敷地の地震ハザードに寄与する震源から発生する地震波群をある程度の地震波群の多様性を確保できる地震波数であることを考慮して設定している。すなわち、50 波という地震波数自体は本論文の一例を示したに過ぎず、地震波数としては、地震波群の抽出による地震リスク評価結果への影響を軽減するために、可能な範囲でより多くの地震波数を設定することが本来は望ましいと考えられる。

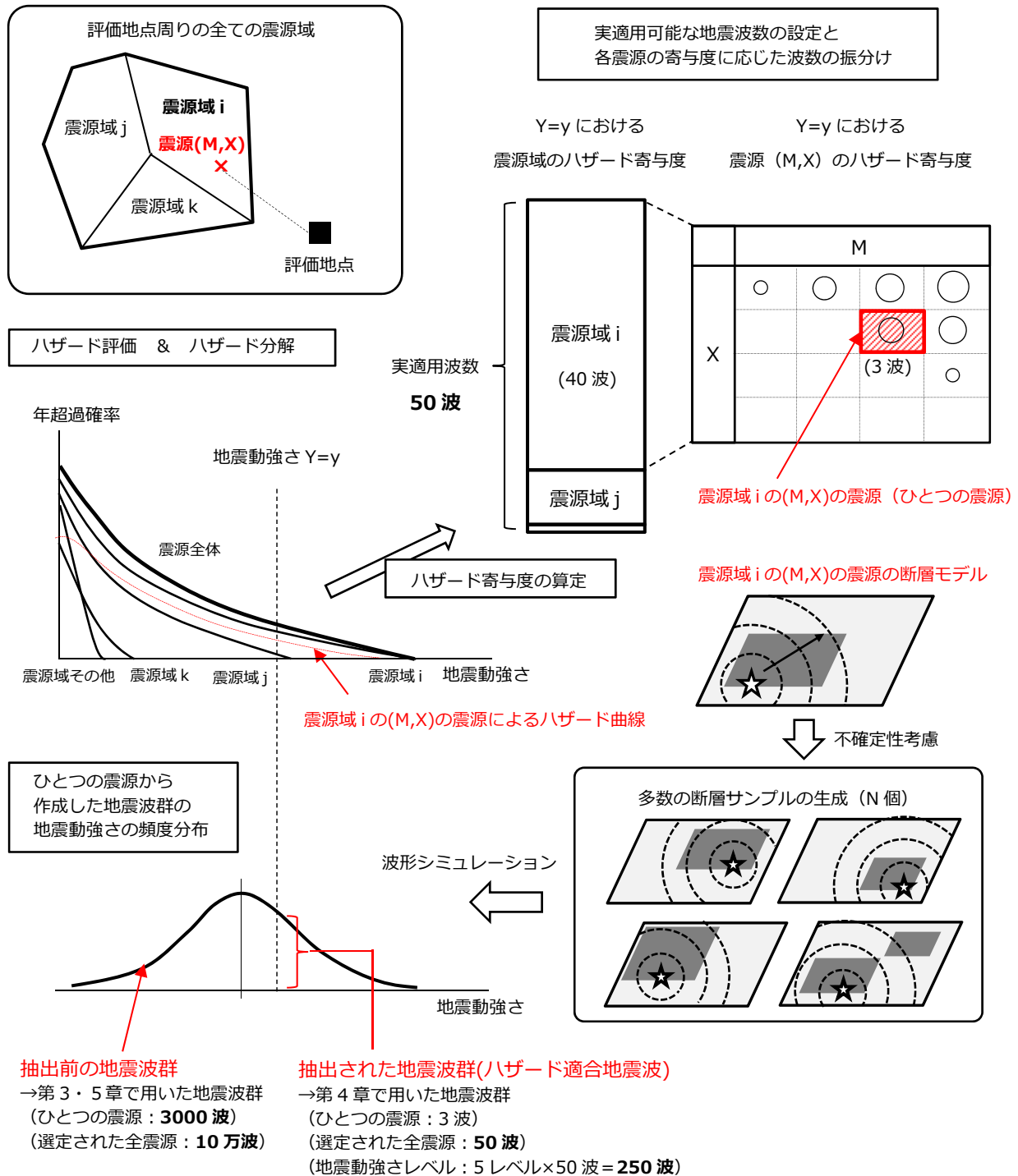


図 2.22 本論文の検討に用いた地震波群の位置付け

---

## 2.4 断層モデル地震波作成手法に関する考察

### 2.4.1 震源特性の不確定性設定に関する最新知見の整理

西田らのハザード適合地震波に関して、震源特性の不確定性の設定は、既往研究の成果に基づいて設定されている。西田らの震源特性の不確定性の設定根拠の他にも、最近の知見も得られていることから、断層モデルに関する不確定性設定に関する知見について整理した。分布形、平均、ばらつきを項目として論文から読み取れる情報を整理した。分布形状に関しては明確な記載がない場合には( - )と表記した。表に整理する際には、文献に記載された値をそのまま記載するようにした。ただし、特にばらつきに関しては文献によって算定内容が異なっていることから、注釈にてその内容を記載した。また、文献中の図表やデータを用いて筆者が別途算定した値については( )付で表中に示し、注釈にてその内容を記載した。震源特性の不確定性を考慮する際にどのような根拠に基づき設定すればよいか、また、不確定性の設定における留意点についてまとめておく。

#### (a) 断層の走向

断層の走向の不確定性の設定に関しては、震源を特定する地震については、走向が確定的に与えられている場合が多く、不確定性の大きさは比較的小さいと考えられる。一方で、震源を特定しない領域震源については、走向は現状推定することが難しいため、走向の不確定性は大きいと考えられ、既往の研究においても断層モデルの走向を設定する際は、任意性のある設定で検討されることが多い。

(b) 断層の平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 

断層の平均応力降下量 $\Delta\sigma$ の統計値に関しては表 2.21 が得られている。内陸地殻内地震では概ね 1～4MPa 程度、海溝型地震では 9～11MPa 程度と内陸地殻内地震よりも大きな値が得られている。

表 2.21 断層の平均応力降下量 $\Delta\sigma$ の統計値に関する既往知見

文献	分布形	平均	ばらつき	備考
強震動予測レシピ Fujii and Matsu'ura (2000) <sup>[33]</sup>	-	3.1MPa <sup>※2</sup>	-	内陸地殻内地震 (横ずれ)
鶴来ほか (2001) <sup>[34]</sup>	対数正規	9.9bar <sup>※3</sup>	2.0bar <sup>※3</sup>	内陸地殻内地震
川瀬・松尾 (2004) <sup>[35]</sup>	対数正規	11.2MPa <sup>※2</sup>	(0.79) <sup>※4</sup>	太平洋プレート間地震
		9.4MPa <sup>※2</sup>	(1.29) <sup>※4</sup>	太平洋プレート内地震
		1MPa <sup>※2</sup>	(0.80) <sup>※4</sup>	内陸地殻内地震
壇ほか (2011) <sup>[36]※1</sup> 壇ほか (2015) <sup>[37]※1</sup>	対数正規	3.4MPa	(0.75) <sup>※5</sup>	内陸地殻内地震 (長大横ずれ)

※1 壇ほか (2011)、壇ほか (2015) は、動力学的震源断層モデルの動的応力降下量を対象としている。

※2 文献中には平均的な値のみ記述されており、分布形には言及されていない。

※3 鶴来ほか (2001) によれば、平均の欄に記載している 9.9bar は  $e^{E[\ln X]}$  を表しており、ばらつきの欄に記載している 2.0bar は  $e^{Std[\ln X]}$  を表している。 $(X)$  は確率変数である平均応力降下量 $\Delta\sigma$ を表す。

※4 川瀬・松尾 (2004) の表 2 に記載されている平均 ( $e^{E[\ln X]}$ )、平均-1S.D ( $e^{E[\ln X]-Std[\ln X]}$ )、平均+1S.D ( $e^{E[\ln X]+Std[\ln X]}$ ) の値を用いて、筆者が換算した値で、 $Std[\ln X]$  を表している。

※5 壇ほか (2015) の表 3.1 に載されている地震データ (国内：9 地震、海外：13 地震) を用いて筆者が算定した値で、 $Std[\ln X]$  を表している。

## (c) アスペリティの個数

アスペリティの個数に関する既往知見は少ないものの、「レシピ」設定値の元となった Somerville et al. (1999) <sup>[22]</sup> では、検討対象とした 15 地震の地殻内地震では 1 個～6 個までばらついており、1 地震あたり平均 2.6 個の値が得られている。

表 2.22 アスペリティの個数

文献	分布形状	平均	ばらつき	備考
強震動予測レシピ Somerville et al. (1999) <sup>[22]</sup>	-	2.6 個	-	1 個～6 個程度 / 1 断層の ばらつきあり

#### (d) アスペリティ面積比

Somerville et al. (1999) <sup>[22]</sup>では、内陸地殻内地震を対象とした検討により、断層全体に対するアスペリティ面積比の平均的な値として、0.22 程度（22%程度）の値が示されており、地震調査研究推進本部の「レシピ」においてもこの値が標準で用いられている。この他にも、増田・横田（2006）<sup>[38]</sup>がアスペリティ面積比の頻度分布について分析しており、中央防災会議の東海・東南海地震の断層モデルの検討<sup>[40]</sup>にも用いられている。増田・横田（2006）の分布はほぼ正規分布に従っており、概ね Somerville et al. (1999) の結果とも整合性のある結果となっている。

表 2.23 アスペリティ面積比

文献	分布形状	平均	ばらつき	備考
強震動予測レシピ Somerville et al. (1999) <sup>[22]</sup>	正規	約 22%	-	内陸地殻内地震
増田・横田（2006） <sup>[38]</sup> 中央防災会議（2006） <sup>[40]</sup>	ヒストグラムは ほぼ正規分布	20～30%程度	(4%) ※ <sup>1</sup>	Mai et al. (2005) <sup>[39]</sup> のデータベースに基づく
Murotani (2008) <sup>[41]</sup>	-	≒内陸	-	プレート間地震
糸井ほか（2009） <sup>[42]</sup>	正規	19%	4% ※ <sup>2</sup>	内陸地殻内地震

※1 中央防災会議（2006）の図 2.4.3 のヒストグラムを用いて筆者が算定した値で、標準偏差  $Std[X]$  を表している。

※2 ばらつきの値は、標準偏差  $Std[X]$  を表している。

#### (e) 複数個のアスペリティの面積比

西田らのハザード適合地震波の作成では、アスペリティ個数は 1 個としていたが、アスペリティが複数個存在する場合の震源特性の比率に関しては、石井・佐藤（2000）<sup>[19]</sup>が検討を行っている。例えば、内陸地震に関しては下記の値が得られている。石井ほか（2000）<sup>[43]</sup>では、面積比の他に、すべり量、最大すべり速度、地震モーメント、地震モーメントの時間変化率、短周期レベルファクターに関しても、同様に複数個のアスペリティに対する統計値を求めており参考になる。

表 2.24 複数の面積比  $S_2/S_1$

文献	分布形状	平均	ばらつき	備考
石井・佐藤（2000） <sup>[19]</sup>	-	$S_2/S_1 = 0.48$	0.68 ※ <sup>1</sup>	内陸地殻内地震
石井ほか（2000） <sup>[43]</sup>		$S_3/S_2 = 0.54$	0.52 ※ <sup>1</sup>	

※1 ばらつきの欄に記載されている値は、変動係数を表している。

## (f) アスペリティのすべり量比

断層全体に対するアスペリティのすべり量比については, Somerville et al. (1999)<sup>[22]</sup>, 石井ほか(2000)<sup>[43]</sup>の検討結果を参照し, 「レシピ」では平均的値として 2.0 を設定している。ばらつきについては, 石井ほか(2000)において, 変動係数 0.34 が得られている。断層モデル地震波群の作成において, この変動係数を考慮してすべり量を MCS を行う場合には, ばらつきの範囲に留意が必要である。ばらつきの範囲を広く設定すると, アスペリティのすべり量が断層全体に対する平均すべり量を下回る場合が生じ, アスペリティの定義に整合しない断層モデルとなる可能性がある。

表 2.25 アスペリティのすべり量比

文献	分布形状	平均	ばらつき	備考
強震動予測レシピ° 石井ほか(2000) <sup>[43]</sup>	-	2.0 倍	0.34 <sup>※1</sup>	内陸地殻内地震

※1 ばらつきの欄に記載されている値は, 変動係数を表している。

(g) 高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$ 

震源スペクトルの高振動数遮断フィルタの設定振動数  $f_{max}$  については, 内陸地殻内地震に関しては鶴来ほか(1997)<sup>[47]</sup>, 海溝型地震に関しては佐藤ほか(1994a)<sup>[44]</sup>の知見が得られている。

表 2.26 高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$ (Hz)

文献	分布形状	平均	ばらつき	備考
佐藤ほか(1994a) <sup>[44]</sup>	対数正規	13.5Hz	0.097 <sup>※1</sup>	海溝型地震
強震動予測レシピ° 鶴来ほか(1997) <sup>[47]</sup>	-	6.0Hz	-	内陸地殻内地震

※1 ばらつきの欄に記載されている値は, 佐藤ほか(1994a)の Fig.14 より常用対数標準偏差  $Std[\log_{10}X]$  を表している。

## (h) 破壊伝播速度のせん断波速度に対する比

破壊伝播速度  $V_r$  (km/s) とせん断波速度  $V_s$  の関係は Eq. 2.10 で表される。破壊伝播速度  $V_r$  (km/s) のせん断波速度  $V_s$  (km/s) 比  $C_{V_r}$  については, Geller (1976)<sup>[48]</sup>, 山田ほか(2007)<sup>[49]</sup>によって, 概ね平均 0.7 程度の値が知見として得られている。

$$V_r = C_{V_r} \times V_s \quad \text{Eq. 2.10}$$

表 2.27 破壊伝播速度のせん断波速度に対する比  $V_r/V_s$ 

文献	分布形状	平均	ばらつき	備考
Geller (1976) <sup>[48]</sup>	-	0.72	-	世界各国の 中規模・大規模地震
山田ほか (2007) <sup>[49]</sup>	正規	0.694	0.078 <sup>※1</sup>	内陸地殻内地震

※1 ばらつきの欄に記載されている値は、標準偏差  $Std[X]$  を表している。

## (i) ライズタイム係数比

ライズタイム  $\tau$ (s) は断層幅  $W$ (km) および破壊伝播速度  $V_r$  により、Eq. 2.11 で算定される。ライズタイム係数比  $\alpha_r$  (単位：無し) については、片岡ほか (2003) の知見が得られている。「レシピ」では片岡ほか (2003) <sup>[50]</sup> の知見を受けて、ライズタイム係数比  $\alpha_r$  の設定値を 0.5 としている。

$$\tau = \alpha_r \times W / V_r \quad \text{Eq. 2.11}$$

表 2.28 ライズタイム係数

文献	分布形状	平均	ばらつき	備考
片岡ほか(2003) <sup>[50]</sup>	-	0.2~0.4 0.25~0.6	-	内陸地殻内地震 海溝型地震
強震動予測レシピ <sup>o</sup>	-	0.5	-	片岡ほか (2003) に基づく

## (j) 破壊開始点位置

破壊開始点位置については、Mai et al (2005) <sup>[51]</sup> や糸井ほか (2009) <sup>[42]</sup> の知見がある。非常にばらつきが大きいですが、アスペリティに対して下方に位置する傾向が強いことが言われている。

表 2.29 破壊開始点位置

文献	分布の傾向	備考
Mai et al.(2005) <sup>[51]</sup>	アスペリティ付近に破壊開始点が位置	内陸地殻内地震および 海溝型地震
強震動予測レシピ <sup>o</sup>	アスペリティ外部下端	-
糸井ほか (2009) <sup>[42]</sup>	最大アスペリティ下方	内陸地殻内地震



### 2.4.2 断層モデルの設定手法の妥当性に関する考察

断層モデルに基づく地震動評価を行う上で、断層モデルの震源特性を設定する方法としては、地震調査研究推進本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法「レシピ」」<sup>[26]</sup>が一般的に用いられている。「レシピ」による震源断層のモデル化では、活断層の場合には地表の断層長さ、海溝型地震の場合には断層面積をはじめとする巨視的震源特性から地震の規模（マグニチュード）を推定し、その断層面に対して微視的震源特性の平均的な値を設定することにより、平均的な地震動を生じる断層モデルを設定することができる。「レシピ」における各震源特性の評価式は、過去の地震記録から予想される震源特性の平均値に関する既往研究の成果に基づいたものであり、妥当性が検証され設定方法である。

西田らの断層モデル地震波群の作成においても「レシピ」に基づいて平均的な断層モデルを設定している。また、断層モデル地震波群を作成する際には、震源特性が非常に極端な値（例えば 3 $\sigma$ 程度の偏差）をとり得る状況も想定しているが、震源断層をモデル化する際には断層の物理モデルとしての整合性が確保されていることを確認しながら、適切なばらつき幅を設定している。

### 2.4.3 統計的グリーン関数法と距離減衰式の差異について

西田らのハザード適合地震波の作成では、統計的グリーン関数法の加速度中央値に一律係数を乗じている。これは、統計的グリーン関数法と距離減衰式が互いに異なる手法であり双方の結果がそのまま完全に合致することは難しいこと、一方で、距離減衰式によるハザード分解に基づく震源を対象として地震波群を作成しており、地震波群が距離減衰式と整合していることが必要であること、に対して行った解決策の一つである。

どちらの手法がより「正しい」かについては知見も少なく、判断することも非常に困難である。西田らの手法では、距離減衰式が過去の地震観測記録から算定した結果であるため、統計的グリーン関数法で算定される地震波群の地震動強さに係数を乗じることで、両者の整合性を確保している。

ハザード分解による、マグニチュードと震源距離の組合せ（ $M, X$ ）で表される震源に対して、断層モデルを適用して地震波群を作成する手法では、距離減衰式と波形合成法の結果について、両者で差異が生じる原因に関しては、明確にしておく必要があると考えられる。

要因の一つとしては、距離減衰式の評価地盤と大洗の評価地盤の違いの影響が考えられる。ハザード評価に用いた耐専スペクトルによる地震動評価では、 $V_s=2.2\text{km/s}$  相当の地震基盤面でスペクトルが定義されているため、解放基盤のスペクトルは地震基盤～解放基盤の地盤増幅率の係数を乗じることによって評価されている（適用範囲：解放基盤  $V_s=0.7\text{km/s}$  以上）。このとき、水平動の 0.02s 応答に対する地盤増幅率は 1.0 であり、評価上は地震基盤から解放基盤で地盤増幅しない設定である。

一方で、断層モデルの評価では、1 次元弾性波動解析に基づき、大洗の地震基盤～解放基盤までの地盤増幅率を算定している。大洗の地震基盤は  $V_s=$  約 3.0km/s 相当、解放基盤は  $V_s=$  約 0.6km/s 相当であ

り、0.02s に対しては図 2.19 に前述した地盤増幅率では概ね 1 に近い値となっており、地震基盤～解放基盤における 0.02s に対する地盤増幅率は両者とも小さい。従って、距離減衰式と波形合成法による結果の差異の要因は、地盤増幅率の違いというよりは、地震基盤における地震動応答そのものに差異があると考えられる。

ここでは、一検討として、2.2 節に概要を示した西田らのハザード適合地震波を対象として、距離減衰式として用いた司・翠川式と統計的グリーン関数法の差異について、距離減衰項に着目した考察を行った。なお、本論文において検討対象とした地震波群については、距離減衰式に耐専スペクトルを用いており陽には距離減衰項が得られないため、ここでは 2.2 節の地震波群を用いた検討とする。

Eq. 2.12 は、司・翠川<sup>[3]</sup>の距離減衰式、Eq. 2.13 は、統計的グリーン関数法において、Boore (1983)<sup>[9]</sup>による震源から生成する震源スペクトルの式を表している。ここでは、距離減衰式と統計的グリーン関数法による最大加速度（地震動強さ）の差異を、距離減衰項の表現方法の違いに着目して考察する。

$$\log_{10} PGA = 0.5M_w + 0.0043H + d + 0.61 - \log_{10}(X + 0.0055 \times 10^{0.5M_w}) - 0.003X \quad \text{Eq. 2.12}$$

$$A(f) = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot P_{RITIN}}{4\pi\rho\beta^3} \cdot M_0 \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\max})^m}} \cdot \frac{1}{X_c} \exp\left(-\frac{\pi f}{Q(f)\beta} \cdot X\right) \quad \text{Eq. 2.13}$$

$$Q(f) = C_{Q_s} \cdot f^{C_{Q_p}} \quad \text{Eq. 2.14}$$

Eq. 2.12 と Eq. 2.13 の震源距離  $X$  に関する項に関して、西田らのハザード適合地震波の作成では、距離減衰項の第 1 項に関しては両者同等の距離減衰特性を設定していることから、距離減衰式と統計的グリーン関数法の違いは第 2 項目に表れると考えられる。ここでは、距離減衰式の項を  $b_{atm}$ 、統計的グリーン関数法の項を  $b_{sgfm}$  として、西田らの手法で作成した以下の 2 式について、Eq. 2.17 のように加速度比をとり、距離減衰式と統計的グリーン関数法の距離減衰項による影響について考察する。

$$b_{atm} = 0.003 \quad \text{Eq. 2.15}$$

$$b_{sgfm} = \frac{\pi f}{Q(f) \cdot V_s} \quad \text{Eq. 2.16}$$

$$Ratio = 10^{\{(b_{atm} - \frac{b_{sgfm}}{\ln 10}) \cdot X\}} \quad \text{Eq. 2.17}$$

ここでは、 $f = 50\text{Hz}$ 、せん断波速度  $V_s = 3.051 \text{ km/s}$  とし、表 2.30 の条件について検討した。図 2.23 に Eq. 2.17 の結果を示す。プロットは、西田らのハザード曲線における最大加速度比であり、図 2.10 の逆数をプロットしたものである。図 2.23 において、西田らの方法（距離減衰式：司・翠川式、統計

的グリーン関数法の  $Q$  値モデル： $Q=110 \times f^{0.69}$ ）による最大加速比（黒実線）は、震源距離が大きくなる程 1.0 を急激に下回る傾向が確認され、地震波作成の結果についても同様の傾向を示していることから、距離減衰式と統計的グリーン関数法の差異は、距離減衰特性の違いが一つの要因として考えられる。

また、比較用として、片平・佐藤（2007）<sup>[52]</sup>の東日本の海溝型地震の距離減衰式を対象とした場合（ $b_{attn}=0.00502$ ）に、佐藤（2007）<sup>[53]</sup>において検討対象としている  $Q$  値モデルに対する傾向も合わせて図 2.23 に図示している。 $Q$  値モデルの違いによっては、最大加速度比の傾向が異なるケースも見られることから、ハザード評価用の距離減衰式と統計的グリーン関数法の  $Q$  値モデルの設定の仕方により傾向は変わるものと考えられる。なお、距離減衰特性に関しては、加速度振幅値だけではなく、佐藤（2007）<sup>[53]</sup>で議論しているように位相特性に係る距離減衰項の影響についても合わせて留意しておく必要があると考えられる。

表 2.30  $b_{sgfm}$  において検討する距離減衰項と  $Q$  値モデル

条件	西田ら	比較用			
$b_{attn}$	0.003 司・翠川（1997）	0.00502 片岡・佐藤（2007）			
$Q(f) = C_{Q_c} \times f^{C_{Q_p}}$	$Q=110 \times f^{0.69}$	$Q=154 \times f^{0.91}$	$Q=392 \times f^{0.37}$	$Q=114 \times f^{0.67}$	$Q=40 \times f^{1.00}$

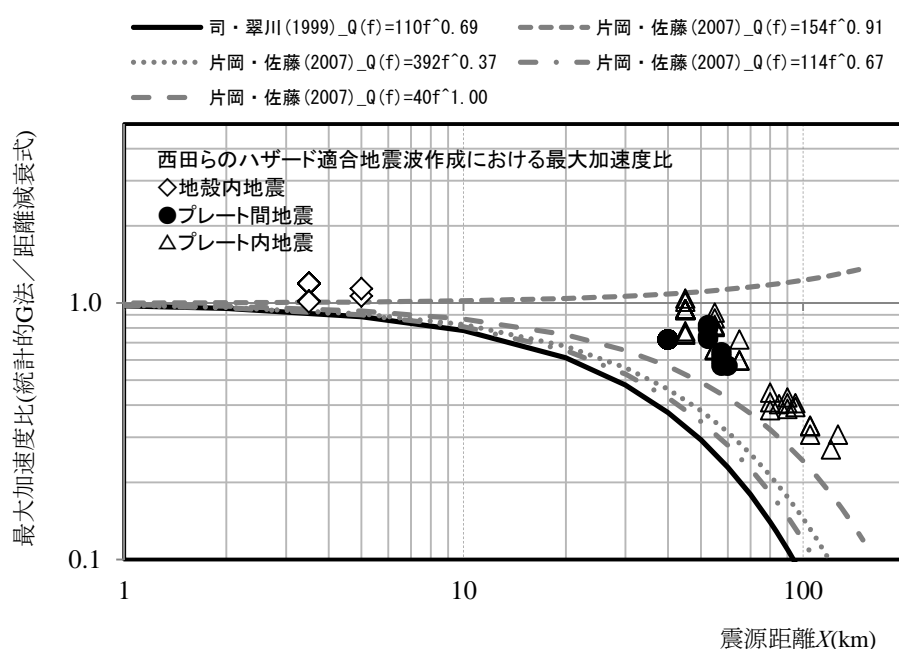


図 2.23 距離減衰式と統計的グリーン関数法の距離減衰項の違い

## 2.5 まとめ

本章では、断層モデルの震源特性の不確定性を考慮し、対象敷地の地震ハザードに適合する断層モデル地震波群（ハザード適合地震波）に関して、西田ら<sup>[1],[2]</sup>による地震波群作成手法の概要を示すとともに、第3章以降の検討に用いる断層モデル地震波群について、地震波作成に係る各種解析条件と地震波作成の結果を示した。

本論文の検討に用いる断層モデル地震波群は、解放基盤における最大加速度を地震動強さ指標とした地震ハザードに寄与する震源を対象に、震源特性の不確定性を考慮して作成された約10万波のうちの一部の地震波群である。地震ハザードに寄与する震源は、応答スペクトル距離減衰式の一つである耐専スペクトルに基づく地震ハザードの分解手法に基づき選定された。さらにこれらの断層モデル地震波群の中から、建物の時刻歴応答解析への実適用可能な地震波数として、地震ハザードに調和する地震波を250波抽出した。これらは、年超過確率が $10^{-4} \sim 10^{-5}$ に相当する解放基盤における最大加速度（応答スペクトルの0.02秒応答） $500 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$ を満たす断層モデル地震波群であり、各地震波の発生頻度はハザード曲線から算定することが可能である。

断層モデル地震波群は、広域帯に対してより精度良く地震動評価するために統計的グリーン関数法と波数積分法のハイブリッド合成により評価され、断層モデルの巨視的震源特性および微視的震源特性の不確定性を、認識論的要因または偶然的要因に分類し、それぞれロジックツリーおよびMCSを用いて、震源特性の不確定性を断層モデル地震波群に反映している。

合計約10万波弱の地震波群が作成され、それらは、地震リスク評価の対象とする年超過確率 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ の地震ハザード曲線を良く再現する集合となっていることを確認した。

第3章以降は、上記の断層モデル地震波群を対象として検討を行っている。第4章では、下記(1)の地震波群を対象とし、第3章および第5章では、(2)の地震波群を対象として検討を行う。各地震波群の地震動特性の詳細については、各章で説明する。

### (1) 地震リスク評価への実適用可能な地震波数として抽出した断層モデル地震波群

- 地震リスク評価の対象となる年発生頻度 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ の地震波群として、対象敷地の地震ハザードに寄与する震源から得られた、解放基盤における最大加速度 $500 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$ の時刻歴地震波群である。 $100 \text{ cm/s}^2$ 刻みの5つの最大加速度レベルに対して、各震源による地震ハザードの寄与度に応じた重み付けに応じた波数でそれぞれ50波、計250波の地震波群が抽出されている。

### (2) ハザードに寄与するひとつの震源に対して震源特性の不確定性を考慮した断層モデル地震波群

- 対象敷地の地震ハザードに寄与するひとつの震源（南関東の地震、 $M_j = 7.1$ ,  $X_{eq} = 45 \sim 65 \text{ km}$ の震源）で作成された全地震波群2736波である。これらの地震波群は、断層モデルの震源特性の不確定性を考慮して、ひとつの震源から作成された全での地震波である。

## 第2章 参考文献

- [1] Nishida, A., Igarashi, S., Sakamoto, S., Uchiyama, Y. Yamamoto, Y., Muramatsu, K.. and Takada, T. : Hazard-consistent ground motions generated with a stochastic fault-rupture model, Journal of Nuclear Engineering and Design, 2015
- [2] Nishida, A., Igarashi, S., Sakamoto, S., Uchiyama, Y. Yamamoto, Y., Muramatsu, K.. and Takada, T. : CHARACTERISTICS OF SIMULATED GROUND MOTION, SMiRT-22, 2013
- [3] 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.51-56, 1999
- [4] 地震調査研究推進本部: 全国地震動予測地図 技術報告書, 2009
- [5] 地震調査研究推進本部: 全国地震動予測地図 技術報告書 3.確率論的地震動予測地図, 2009
- [6] 丸善株式会社: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 2007
- [7] 入倉孝次郎, 三宅弘恵: シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110(6), pp.849-875, 2001
- [8] 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明: ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp.19-28, 1994b
- [9] Boore, D.,M., : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. Bull. Seismol. Soc. Am. 73 (6), pp.1865-1894, 1983
- [10] 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福和保長: 地震のスケーリング側に基づいた大地震時の強震動予測—統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, pp.1-9, 1991
- [11] 香川敬生: ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第2号, pp.21-32, 2004
- [12] 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, No.02, B25, 1997
- [13] 高田毅士, 西田明美, 村松健, 五十嵐さやか, 坂本成弘: ハザード適合地震波の作成方法の違いによる地震波特性の違い, 日本建築学会学術講演梗概集, 2014
- [14] Noda, S., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M. and Watanabe, T. : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PORPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD/NEA Workshop, 2002
- [15] (財)日本電気協会, 原子力規格委員会: 原子力発電所耐震設計技術指針 基準地震動作成・地質調査編, JEAG 4601-2007
- [16] 日本原子力学会: 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準, JESJ-SC-P006, 2015
- [17] 佐藤良輔: 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989
- [18] 武村雅之: 日本列島における地殻内地震のスケーリング則 - 地震断層の影響および地震被害との関連 -, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.211-228, 1998
- [19] 石井透, 佐藤俊明: 強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の面積とモーメントの関係, 日本地震学会講演予稿集, B09, 2000

- 
- [20] 宇津徳治, 関彰: 余震区域の面積と本震のエネルギーとの関係, 地震, 第2輯, 第7巻, pp.233-240, 1955
- [21] 武村雅之: 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震, 第2輯, 第43巻, pp.257-265, 1990
- [22] Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A.: Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, Seismological Research Letters, Vol.70, No.1, pp.59-80, 1999
- [23] 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2輯, 第28巻, pp.269-283, 1975
- [24] Shimazaki, K.: Small and large earthquakes. – The effects of the thickness of seismogenic layer and the free surface –, Earthquake Source Mechanics, Geophysical Monograph Series, Vol.37, pp.209-216, 1986
- [25] Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, Proc. of the Royal Society, A241, pp.376-396, 1957
- [26] 地震調査研究推進本部: 全国地震動予測地図 付録 3 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 2009
- [27] 文部科学省: 試験研究用原子炉施設耐震安全性評価妥当性確認ワーキンググループ(第4回)配布資料「平成23年1月18日大洗研究開発センター/試験研究炉 基準地震動  $S_s$  の策定について」, [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/019/shiryo/1302220.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/004/019/shiryo/1302220.htm)
- [28] 久田嘉章: 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集, 第501号, pp.49-56, 1997
- [29] 中村洋光, 宮武博: 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震, 第二輯, 第53巻, pp.1-9, 2000
- [30] 中央防災会議: 地震ワーキンググループ報告書, 中央防災会議首都直下地震対策専門調査会(第12回), 2004
- [31] 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション「J-SHIS」, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- [32] 入倉孝次郎, 釜江克宏: 1948年福井地震の強震動: ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現, 地震2, 第52巻, pp.129-150, 1999
- [33] Fujii, Y., and Matsu'ura, M.: Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, Pure and Applied Geophysics, Vol.157, pp.2283-2302, 2000
- [34] 鶴来雅人, 岡崎敦, 羽田浩二, 入倉孝次郎: 近畿地方で発生する地震の応力降下量の特徴, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.378-381, 2006
- [35] 川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各地特性の分離解析, 日本地震工学論文集, 第4巻, 第1号, 2004
- [36] 壇一男, 具典淑, 入江紀嘉, アルズペイマサマン, 石井やよい: 長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第670号, pp.2041-2050, 2011
- [37] 壇一男: 長大断層による内陸地震の強震動予測のための断層モデル設定方法の開発—動力学的断

- 層破壊シミュレーションを駆使して一，ORI 研究報告 15-01，2015
- [38] 増田徹，横田崇：アスペリティの特徴，D011，地震学会，2006
- [39] P. Martin Mai, P. Spudich, and J. Boatwright : Hypocenter Locations in Finite-Source Rupture Models, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.95, No.3, pp.965-980, 2005
- [40] 中央防災会議：第 26 回東南海，南海地震等に関する専門調査委員会，参考資料 断層のモデル化，2006
- [41] Murotani, S. et al. : Scaling of Characterized slip models for plate-boundary earthquakes, Earthquakes, Earth Planets Space, 60, pp.987-991, 2008
- [42] 糸井達哉，翠川三郎，鬼頭順三，三浦弘之，内山泰生，坂本成弘：統計的グリーン関数法で評価した地殻内地震の応答スペクトルのバラツキ，日本地震工学会論文集，第 9 巻，第 1 号，pp.128-142, 2009
- [43] 石井透，佐藤俊明，Paul G. Somerville：強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出，日本建築学会構造系論文集，第 527 号，pp.67-70，2000
- [44] 佐藤智美，川瀬博，佐藤俊明：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性，日本建築学会構造系論文集，第 462 号，pp.79-89，1994a
- [45] 入倉孝次郎，香川敬生，関口春子：経験的グリーン関数を用いた強振動予測方法の改良日本地震学会，B25，第 2 号，1997
- [46] Kojiro IRIKURA, Takao KAGAWA, and Haruko SEKIGUCHI : Revision of empirical Green' function method(in Japanese), English translation of the paper published on B25 of "PROGRAMME and ABSTRACTS" Seismological Society of Japan, Vol.2, 1997
- [47] 鶴来雅人，香川敬生，入倉孝次郎，古和田明：近畿地方で発生する地震の  $f_{max}$  に関する基礎的検討，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集，p.103，1997
- [48] Robert, J., Geller : SCALING RELATIONS FOR EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS AND MAGNITUDES : Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.66, No.5, pp. 1501-1523, 1976
- [49] 山田雅行，先名重樹，藤原広行：強震動予測レシピに基づく予測結果のバラツキ評価の検討～震源パラメータのバラツキについて～，日本地震工学会論文集，第 7 巻，第 1 号，pp.43-60，2007
- [50] 片岡正次郎，日下部毅明，村越潤，田村敬一：想定地震に基づくレベル 2 地震動の設定手法に関する研究，国土技術政策総合研究所研究報告，No.15, 2003
- [51] P. Martin Mai, P. Spudich, and J. Boatwright : Hypocenter Locations in Finite-Source Rupture Models, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.95, No.3, pp.965-980, 2005
- [52] 片岡正次郎，佐藤智美：海溝性地震を対象とした地震動強さの距離減衰特性の地域性に関する検討，第 10 回地震時耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.269-274，2007
- [53] 佐藤智美：統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰特性，日本地震工学会論文集，第 7 巻，第 6 号，2007

---



## 第3章 震源特性の不確定性が地震動特性や建物応答に及ぼす影響

### 3.1 はじめに

第2章で概説した震源特性の不確定性を考慮した断層モデル地震波群を地震リスク評価に適用することの特長の一つに、地震波1波1波が、それぞれ固有の震源特性を有しており、それらを建物の時刻歴応答解析に適用することによって、震源～入力地震動～建物応答～建物の構造的・機能的損傷までの一連の流れを各評価段階における情報を失うことなく評価することが可能であることが挙げられる。すなわち、建物の地震リスクに影響を及ぼす地震動や建物応答とそのような地震動や建物応答を生じさせる震源特性の関係について容易に関連付けることができることから、地震リスク評価結果に影響を及ぼす要因についてレビューがしやすい。震源特性自体については制御できるものではないが、建物の地震リスクに対して、断層モデルのどの震源特性の影響が大きいのか、震源特性の不確定性によって地震動のどの周期帯に影響があるかについて傾向を把握できれば、影響の大きい周期帯の機器の冗長性を確保するシステム設計とするなど安全対策に活かすことが可能になる。このように、断層モデル地震波群を作成する際に重要となる震源特性に関する情報は、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価に対して有益な情報となると考えられる。

本章では、一つの震源を対象として震源特性の不確定性を考慮して作成された全ての断層モデル地震波群を用いて、まず、従来から一般的に用いられている7種類の地震動強さ指標を地震波群の時刻歴波形から算定し、地震動強さ（地震ハザード）のばらつきの傾向について把握するとともに、4層RC造建物モデルの時刻歴応答解析から得られた建物の応答結果を用いて、地震動強さ指標の違いによる建物脆弱性のばらつきの傾向について評価した。

また、断層モデルの震源特性、地震波の各種地震動強さ、建物応答の関係について把握するために、重回帰分析により各震源特性の地震動強さおよび建物最大応答に対する感度を評価した。さらに、震源特性の不確定性が、作成される地震波の地震動強さや震源スペクトル形状に、どの程度の影響を及ぼすかを整理し、その要因を震源特性の定義や関連式および対象敷地と震源断層の位置関係から考察した。

### 3.2 断層モデルの震源特性と地震動応答に関する既往の知見

第 1 章において発生頻度に関連付いた断層モデルに基づく地震波群の作成に関する既往研究をレビューしたが、これに関連して、断層モデルを記述する各種震源特性の不確定性が、地震動応答結果にどの程度影響するのかというテーマについては、例えば、大塚ほか (1998) <sup>[1]</sup>、大淵 (2011) <sup>[2]</sup>をはじめとする既往研究において検討されている。また、震源特性の不確定性を考慮した地震動応答のばらつきを簡易的に評価する手法については、引田 (2015) <sup>[3]</sup>によって検討されている。

大塚ほか (1998) <sup>[1]</sup>は、1923 年関東地震の震源断層を対象として、破壊伝播速度、立ち上がり時間 (ライズタイム)、すべり量の断層面内分布、破壊開始点を震源特性の不確定性パラメータとした 960 波の地震波群をハイブリッド法により作成し、震源特性の変動と加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルの変動の傾向を確認している。大塚の結果によれば、上記の 4 つの震源特性のうち、立ち上がり時間 (ライズタイム) の影響が最も大きく、それに続き破壊伝播速度の影響が大きいことが示されており、これらの震源特性の不確定性による影響は長周期帯において大きい傾向が得られている。なお、すべり量の断層面内分布の影響は小さいという結果が得られている。

大淵ほか (2011) <sup>[2]</sup>は、震源特性と  $PGV$  および加速度応答スペクトル  $S_a$  の関係について回帰分析および応答局面法により検討している。震源特性の不確定性パラメータとして、断層長さ、断層に対するアスペリティのすべり量比・面積比・応力降下量比、破壊伝播速度、アスペリティ位置を対象として、 $PGV$  および加速度応答スペクトル  $S_a$  との感度解析を行っている。大淵らの応答局面法による検討結果によれば、 $PGV$  に対しては、断層に対するアスペリティの応力降下量比やアスペリティ面積比、 $S_a$  に対しては、応力降下量比やアスペリティ位置の影響が大きいという結果が得られている。

引田ほか (2015) <sup>[3]</sup>は、震源特性の不確定性を考慮した地震動応答のばらつきを評価するための手法として、計算負荷の高い統計的グリーン関数法による波形合成法に代わる方法として、Random Vibration Theory Method (RVTM) という手法を提案しており、その適用例として震源特性と地震動の加速度応答との関係について整理している。引田らの検討では、例えば、断層走向の延長上に対象地点がある場合には、アスペリティ位置、破壊開始点、破壊伝播速度の影響が大きいという結果が得られている。

本論文の断層モデル地震波群は、対象とした震源、不確定性パラメータとして取扱った震源特性、地震波群の作成手法が、上述の既往研究の条件とは異なっている部分もあるが、本章では、得られた結果について、これらの既往研究の知見との比較も行った。

### 3.3 対象震源

本章の検討に用いる断層モデル地震波群は、最大加速度を指標とした対象敷地の地震ハザードへの寄与率の高い、震源グループ(1)：南関東の地震、フィリピン海プレート内の地震、マグニチュード  $M_j = 7.1$ 、等価震源距離  $X_{eq} = 45 \sim 65\text{km}$  に該当する一つの震源から作成された地震波群である。この震源は、地震調査研究推進本部<sup>[4]</sup>の地震動予測地図における「3.3.2 海溝型地震、(6)相模トラフ沿いの地震、2)その他の南関東で発生する M7 程度の地震、b)フィリピン海プレート内」の地震に該当する。

図 3.1 に、この一つの震源における震源断層の例を示す。マグニチュード  $M_j = 7.1$ 、等価震源距離  $X_{eq} = 45 \sim 65\text{km}$  の断層群（19 断層）で構成されている。断層近傍の地盤特性は、中央防災会議（2004）<sup>[5]</sup>で用いられた値を参照し、せん断波速度  $V_s = 3.5\text{km/s}$ 、密度  $\rho = 2,800\text{kg/m}^3$  とし、断層走向  $210^\circ$ 、すべり角  $90^\circ$ 、傾斜角  $15^\circ$  の断層面について断層モデル地震波群が作成された。

図 3.1 に示す断層群は、地震モーメントや断層長さなどの巨視的震源特性の不確定性を考慮する前の断層位置を示しているが、本論文では、これらの  $(M_j, X_{eq}) = (7.1, 45 \sim 65\text{km})$  の震源断層群を  $(M, X)$  の組合せで決まる「一つの震源」と考え、検討を行った。地震波作成の際にはこれらの断層一つひとつに対して、第 2 章で前述した巨視的震源特性の不確定性および微視的震源特性について、ロジックツリーおよび MCS に基づき不確定性を考慮した断層モデル地震波群を作成した。この一つの震源に対して計 2736 波の時刻歴地震波群が作成された。

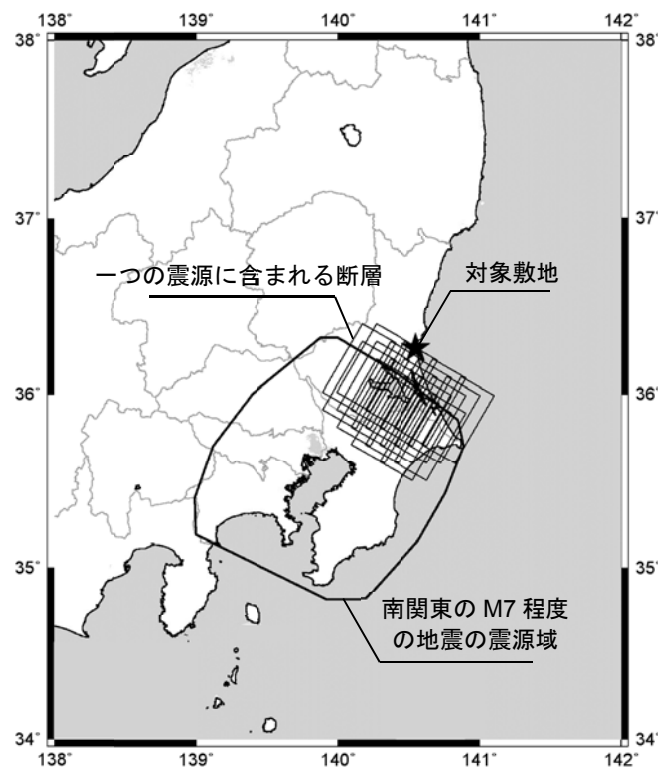


図 3.1 本章で対象とする一つの震源における震源断層の例

### 3.4 対象建物および評価地点の地盤特性

#### 3.4.1 建物モデル

時刻歴応答解析の対象とする建物は、一般的な4階建てRC造建物とし、各層重量および各層階高が一定（階高：2.9m，層重量：10000 kN）の多質点非線形せん断モデルとしてモデル化した。表 3.1 に建物モデルの諸元を示す。Ai 分布外力に対して各層変形が等しくなるように各層の剛性比を設定し、1 層の初期剛性を建物の弾性 1 次固有振動数が 4.3Hz となるように設定した。建物各層の復元力特性は Tri-linear（Takeda モデル<sup>[6]</sup>）とし、初期剛性に対する第 1 折点および第 2 折点における剛性低下率をそれぞれ 0.2，0.005 とした。図 3.2 に第 1 層の復元力特性の概要図を、図 3.3 に各層の復元力特性を示す。建物に付加する減衰は、減衰比 5%の要素減衰とした。

固有値解析の結果、建物 1 次～4 次の弾性固有振動数は表 3.2 に示す結果が得られており、比較的周期の短い建物であることが確認できる。

なお、建物モデルは後述の図 3.4 に示す通り、工学的基盤相当の地盤に基礎固定として設置した。また、時刻歴応答解析は、Newmark $\beta$ 法の等価速度法（ $\beta=0.25$ ）に基づき実施した。

表 3.1 建物モデル諸元

層	階高 $H(\text{m})$	階重量 $W(\text{KN})$	$\Sigma Wi$ (kN)	層剛性 $Ki(\text{kN/m})$	減衰 $h(\%)$	第 1 折点 $\delta_1(\text{m})$	第 2 折点 $\delta_2(\text{m})$	剛性低下率 $\alpha_1$	剛性低下率 $\alpha_2$
4	11.6	10000	10000	2.87E+06	0.05	1.01E-03	6.06E-03	0.200	0.005
3	8.7	10000	20000	4.85E+06	0.05	1.01E-03	6.06E-03	0.200	0.005
2	5.8	10000	30000	6.47E+06	0.05	1.01E-03	6.06E-03	0.200	0.005
1	2.9	10000	40000	7.76E+06	0.05	1.01E-03	6.06E-03	0.200	0.005

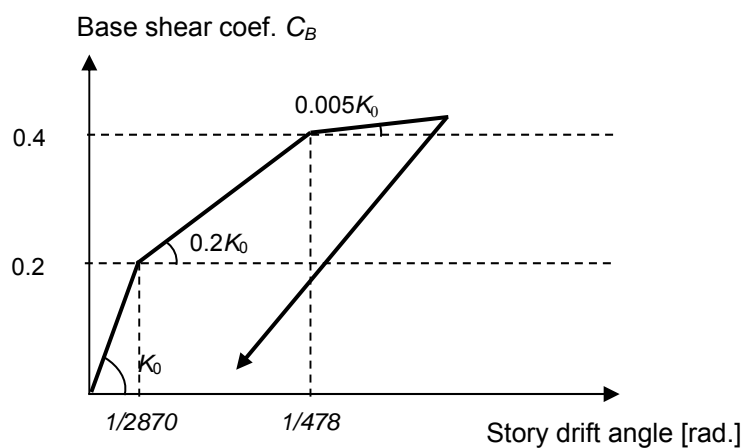


図 3.2 第1層の復元力特性の設定概要

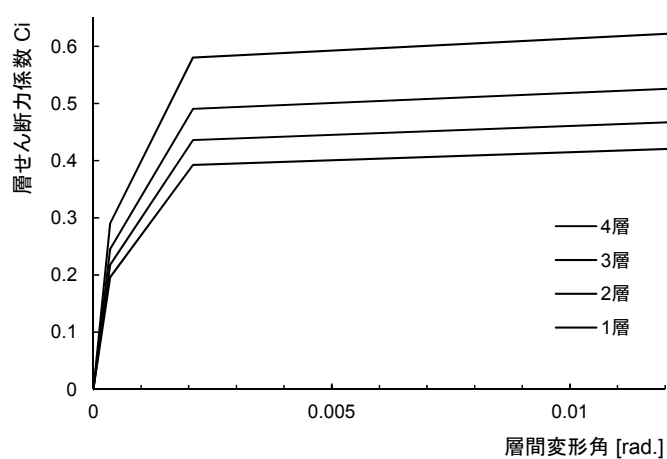


図 3.3 各層の復元力特性

表 3.2 建物モデル固有振動数

固有振動数（固有周期）	
1 次	4.30Hz (0.233s)
2 次	10.54Hz (0.095s)
3 次	16.53Hz (0.060s)
4 次	22.64Hz (0.044s)

### 3.4.2 地盤モデル

表 3.3 に、対象敷地における解放基盤から対象敷地の実地表面までの地盤特性を示す。No.1 の層上面が対象敷地の実地表面であり、No.7 の層上面が解放基盤に該当する。この地盤に対して、本解析では解放基盤で評価した断層モデル地震波群とそれらによる建物応答との関係を把握するという目的から、表層地盤による影響を可能な限り除いておくために、解析上は地表面を+15.00mに設定し、建物モデルの基礎底面の深さを 5m とすることにより、建物の基礎底面を工学的基盤 ( $V_s=400$  m/s) 相当の No.5 に設置した。

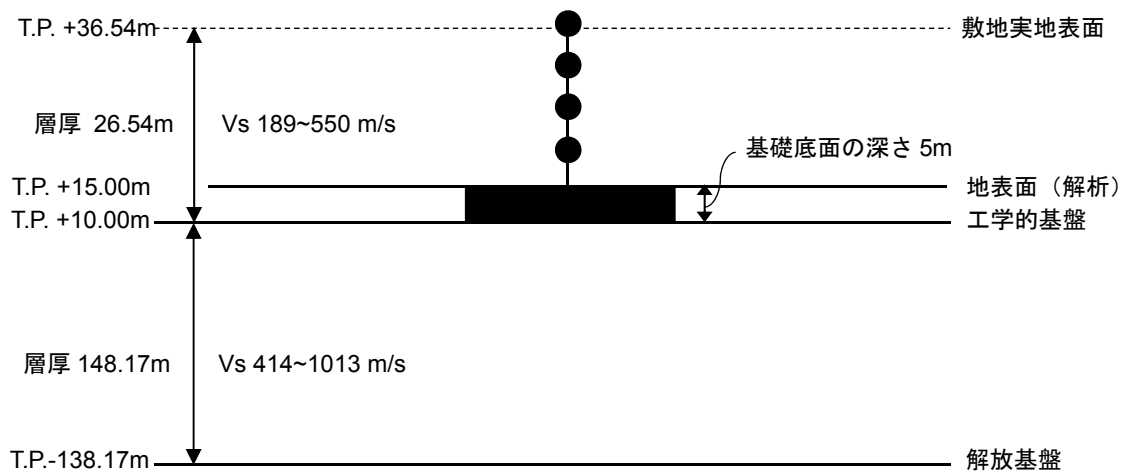


図 3.4 建物モデル設置状況

表 3.3 対象敷地の地盤特性（解放基盤～敷地実地表面）

No.	地層名	層厚 $H$ [m]	単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	せん断波速度 $V_s$ [m/s]	せん断弾性係数 $G_0$ [x10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup> ]	ポアソン比 $\nu$	減衰定数 $h$ [%]	備考
1	ローム	2.39	13.9	189	50.4	0.44	1.70	
2	見和層 (上部)	5.66	18.5	397	298	0.37	0.68	
3	見和層 (上部)	6.96	18.5~19.6	293~397	154~298	0.37~0.40	0.68~1.73	
4	見和層 (中部)	11.01	18.2~18.4	397~550	298~605	0.37~0.42	0.0~0.68	
5	石崎層	64.91	18.2~18.4	414~429	318~345	0.47	0.46~0.74	基礎底面
6	久米層	83.78	17.8	505~618	463~694	0.43~0.45	2.04	
7	多賀層	15	19.3	1013	2020	0.39	2.04	解放基盤

### 3.5 基礎底面における入力地震動評価

#### 3.5.1 地盤解析

南関東の地震の一つの震源について、解放基盤上で作成した 2736 波の断層モデル地震波群を、建物の基礎底面への入力とするために、解放基盤から基礎底面までの地盤特性と解放基盤面において評価した断層モデル地震波群（3 方向成分）について、基礎底面への入力地震動を評価した。

解放基盤から基礎底面に至る各層の地盤特性を初期値とした成層地盤の一次元重複反射理論に基づく等価線形解析を行い、地盤の等価剛性と等価減衰を算定した。なお、地盤増幅率は水平動については鉛直入射を仮定した S 波に基づき評価し、上下動については鉛直入射を仮定した P 波に基づき評価した。

また、水平動については、等価線形解析により剛性低下後のせん断弾性係数  $G$  と減衰定数  $h$  を算定し、上下動については、水平動について評価した水平 2 方向（EW および NS 方向）のせん断剛性および減衰定数をそれぞれ単純平均した値を上下動のせん断弾性係数  $G$  および減衰定数  $h$  とし、原子力発電所耐震設計技術規定 JEAC-4601-2008<sup>[7]</sup>に準拠した方法に関して、体積弾性係数  $K$  を一定（ $K$  は初期値  $K_0$  から算定）として地盤の弾性係数  $E$  を算定した。地盤解析に用いた諸式を Eq. 3.1～Eq. 3.9 に示す。また、図 3.5 に、解放基盤～基礎底面までの地盤のひずみ依存曲線を示す。

なお、等価線形解析から得られた 2736 波による解放基盤～基礎底面の地盤の最大ひずみの累積分布を図 3.6 に示す。2376 波による地盤の最大ひずみは概ね 0.1%以下となっており、図 3.7 に示す地盤のひずみと地盤解析法との対応関係と比較しても、等価線形解析の適用範囲内であることが確認できる。

なお、解析コードには「SHAKE」を用いており、各層中央の最大ひずみに対する有効ひずみの比は 0.65、収束判定は 5%とした。

図 3.8 に 2736 波の断層モデル地震波群のうち、解放基盤における最大加速度が上位 50 波となる地震波群に関して評価した地盤増幅率の統計値を示す。(a)は 50 波の地震波 1 波 1 波に対して評価した地盤増幅率を 50 波について平均した結果である。(b)は地震波群の加速度フーリエ振幅スペクトルに関して、地震波 1 波 1 波の解放基盤と基礎底面の比を 50 波について平均した結果である。(c)は地震波群の加速度フーリエ振幅スペクトルと位相スペクトルに関して、基礎底面で評価した 50 波の平均値と解放基盤で評価した 50 波の平均値の比を取った結果である。(c)についてはやや振幅が動く傾向があるが、統計値の計算方法による地盤増幅率の傾向は変わらないことを確認した。

---

弾性係数  $E$ ，ポアソン比  $\nu$ ，せん断弾性係数  $G$  の関係（定義式）は Eq. 3.1 で表される。

$$E = 2(1 + \nu)G \quad \text{Eq. 3.1}$$

また，弾性係数  $E$ ，せん断弾性係数の関係（定義式）は Eq. 3.2 で表される。

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad \text{Eq. 3.2}$$

これら 2 式および体積弾性係数  $K$  が一定条件 ( $K = K_0$ ) とすれば，ポアソン比  $\nu$  および体積弾性係数  $K_0$  は，Eq. 3.3 および Eq. 3.4 のように表される。

$$\nu = \frac{3K_0 - 2G}{2(3K_0 + G)} \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$K_0 = \frac{2(1 + \nu_0)}{3(1 - 2\nu_0)} G_0 \quad \text{Eq. 3.4}$$

また，鉛直動の等価な諸元は，水平動の諸元の単純平均として Eq. 3.5 および Eq. 3.6 で表される。

$$G = \frac{G_{EW} + G_{NS}}{2} \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$h = \frac{h_{EW} + h_{NS}}{2} \quad \text{Eq. 3.6}$$

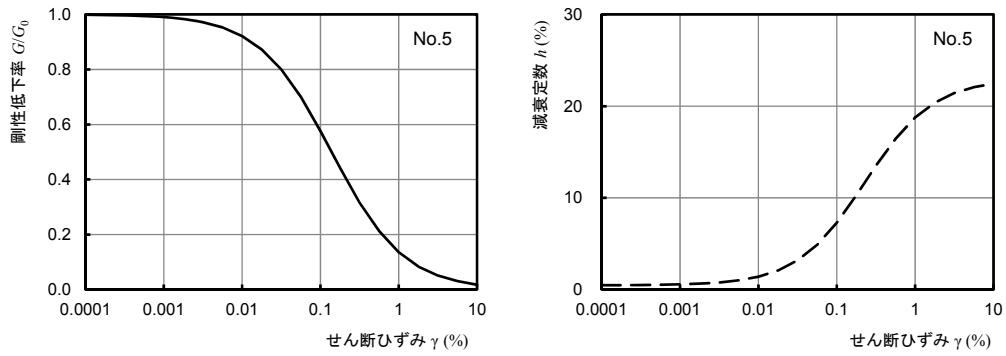
なお，JEAC-4601-2008<sup>[7]</sup>に基づき， $V_p$  と  $V_s$  の関係は Eq. 3.7 および Eq. 3.8 から，Eq. 3.9 として表される。

$$V_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( K + \frac{4}{3} G \right)} = \sqrt{\frac{2G}{\rho} \left( \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \right)} \quad \text{Eq. 3.7}$$

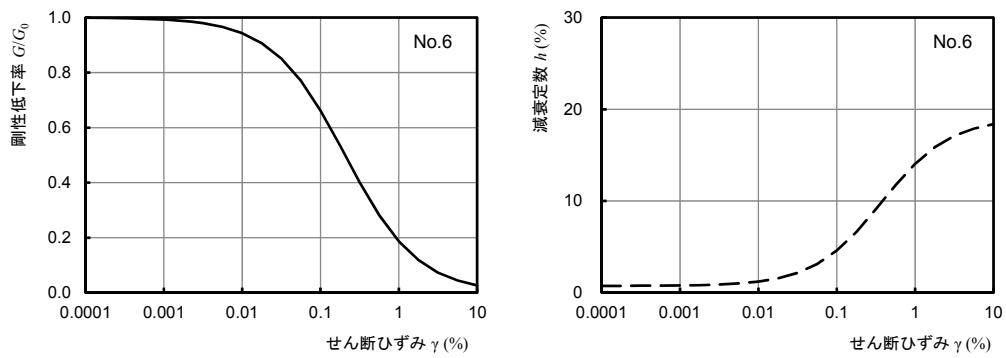
$$G = \rho V_s^2 \quad \text{Eq. 3.8}$$

$$V_p = V_s \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu}} \quad \text{Eq. 3.9}$$

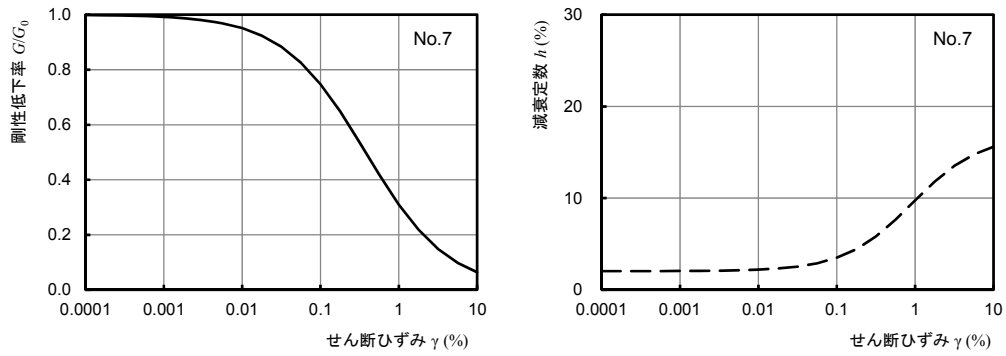




(1) No.5 地盤



(2) No.6 地盤



(3) No.7 地盤

図 3.5 地盤のひずみ依存曲線 ( $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ )

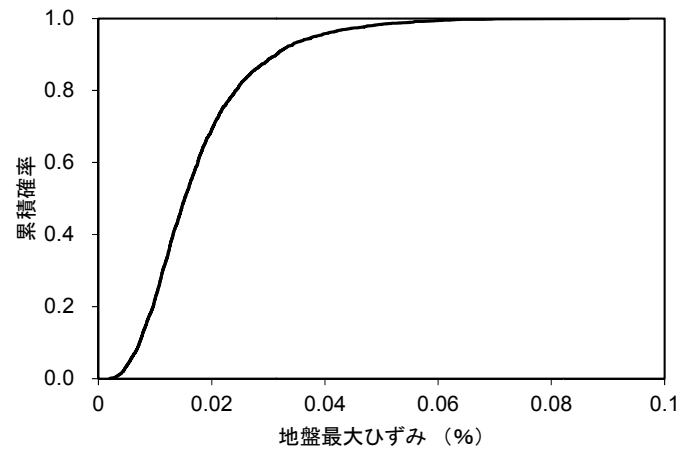


図 3.6 等価線形解析による 2736 波の解放基盤～基礎底面の最大地盤ひずみ

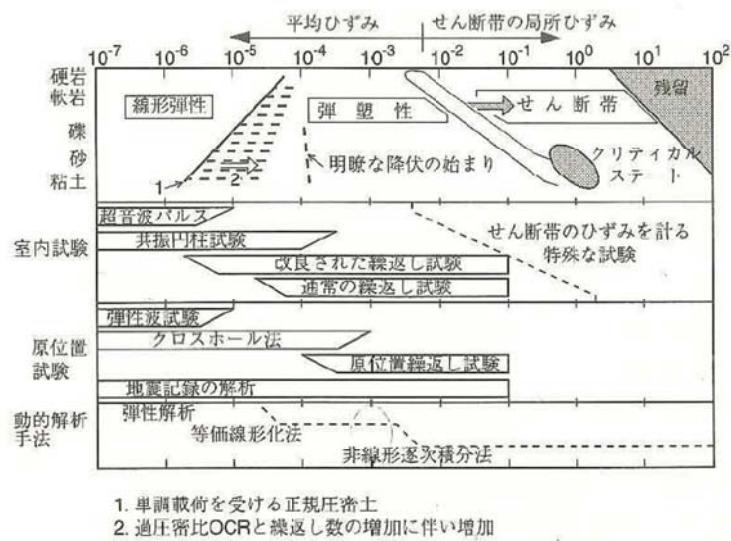


図 7.4.1 土のひずみ依存性と試験法、解析法との関係（石原<sup>276)</sup>および龍岡ら<sup>272)</sup>に加筆）

図 3.7 地盤のひずみと解析法の関係（文献[8]p.253 より抜粋）

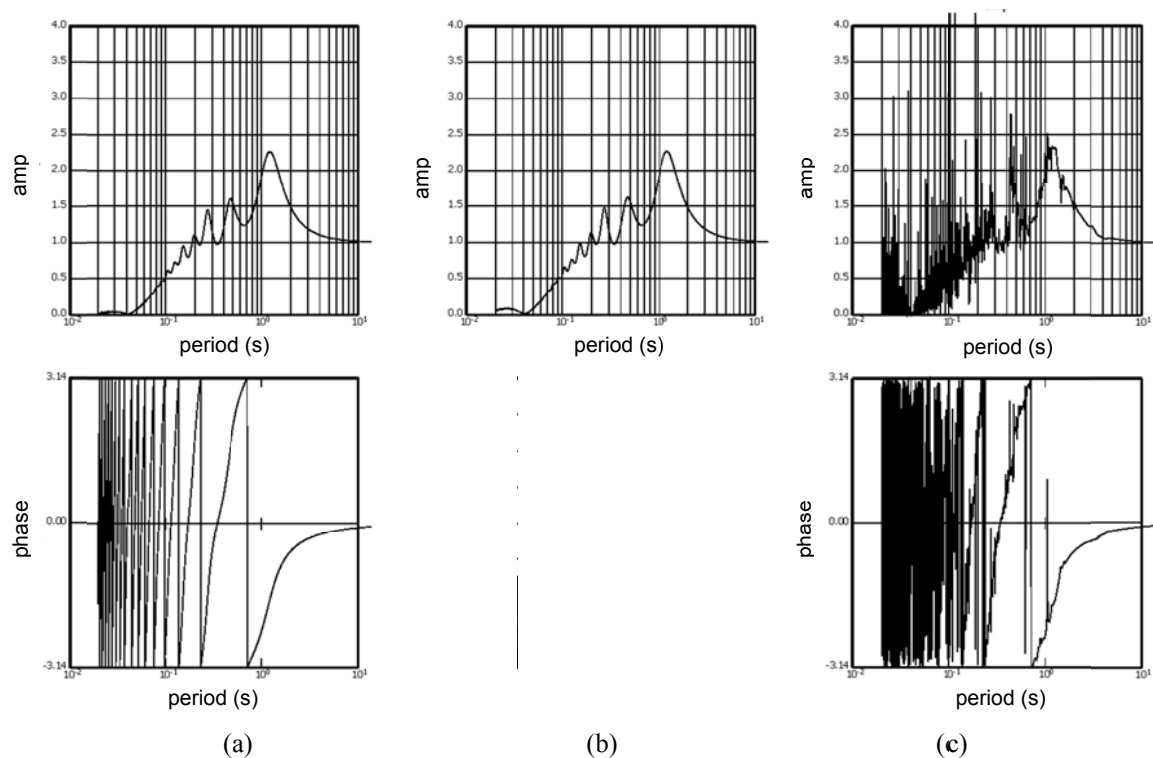


図 3.8 2736 波のうち最大加速度が上位 50 波の地震波による地盤増幅率

### 3.5.2 基礎底面における入力地震波の評価結果

前項の地盤解析に基づき、2736 波の断層モデル地震波群について基礎底面における入力地震波を算定した。図 3.9 に解放基盤における最大加速度が上位 50 波の地震波群の解放基盤および基礎底面における地震波のフーリエスペクトルを示す。加速度が大きい地震波群を対象とした図であるため、解放基盤と比較して、基礎底面における加速度フーリエ振幅のピークは大きくなる傾向が確認できる。位相特性に関しては、顕著な傾向の変化は確認されなかった。

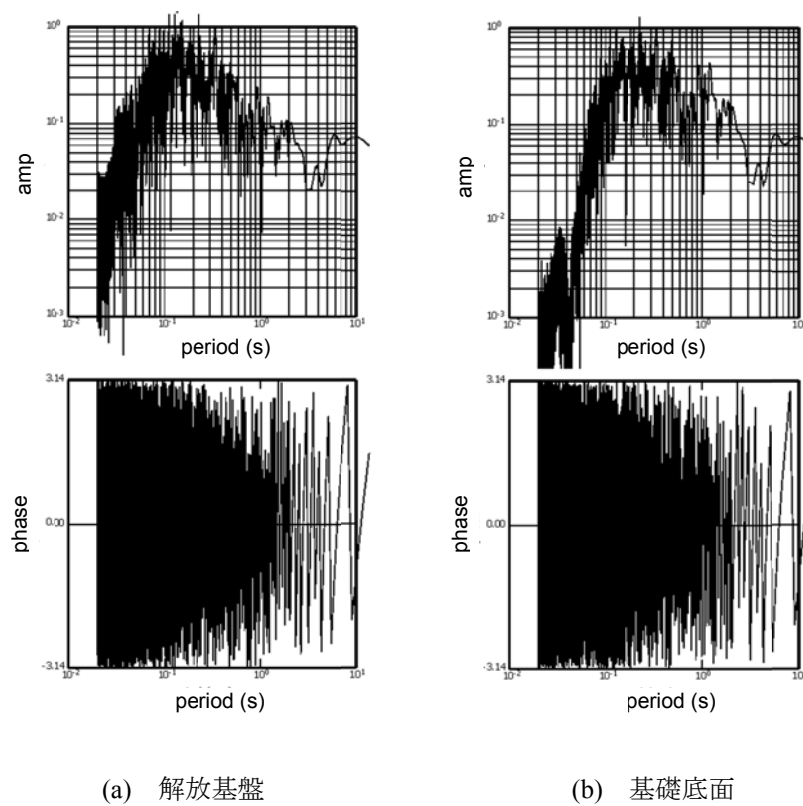


図 3.9 解放基盤における最大加速度が上位 50 波の地震波の、  
解放基盤および基礎底面フーリエ振幅・位相

### 3.6 地震動強さ指標

構造物の被害と関連の深い地震動強さ指標に関して、大井ら<sup>[9]</sup>は建物の被害想定に用いられている地震動強さ指標について整理している。これらの研究を参考に、本章では、表 3.4 に示す 7 つの地震動強さ指標について検討することとした。7 つの地震動強さ指標は、地震動の時刻歴波形のピーク指標、振幅の時間領域における累積指標、エネルギー指標、応答スペクトルの積分指標に関する地震動強さ指標である。それらの算定式を Eq. 3.10～Eq. 3.16 に示す。

これらの 7 つの指標のうち、最大加速度  $ACC$  および最大速度  $VEL$  は、時刻歴波形の時間領域におけるピーク指標である。ハザード評価に用いる地震動強さ指標として最もよく用いられている指標でもある。累積絶対速度  $CAV$  (Cumulative Absolute Velocity) は、加速度時刻歴波形の加速度絶対値の累積値であり、米国電力研究所 EPRI (1988) の報告書<sup>[10]</sup>において、原子力施設の損傷可能性と関連の深い指標値 (Damage Indicating Parameter : DIP) として定義されており、現在、日本国内における原子力施設の安全停止基準としても用いられている指標である。 $CAV$  は、時間領域において加速度がある閾値を超えた場合の加速度振幅の累積値として表されることから、地震動の継続時間との関係が深い指標である。 $CAV$  と機器の損傷の関係性については、落合 (2014) <sup>[11],[12]</sup>によって詳細な検討が行われており、日本国内で発生した地震に関する  $CAV$  と原子力施設機器の損傷についても高い相関があることが確認されている。なお、 $CAV$  算定の際には加速度の累積に係る加速度閾値を設定するが、本章での検討における  $CAV$  の算定では、加速度閾値を  $100\text{cm/s}^2$  とした。

平井・澤田 (2012) <sup>[13]</sup>は、比較的地震動強さのばらつきが小さい指標として、震源から放射される地震エネルギーの大きさを表す入射密度エネルギー  $E$  を提唱している。また、Housner (1965) <sup>[14]</sup>は地震動が構造物に及ぼす影響を大局的にとらえることを目的として、周期 0.1～2.5s における減衰 5% の速度応答スペクトルの積分値より算定されるスペクトル強度  $S.I.$  を提唱している。

小林ほか (1978) <sup>[15]</sup>は、Housner の加速度に関するスペクトル強度に関して、地震動の最大速度振幅との相関がより高い周期 0.1～0.5s における減衰 5% の加速度応答スペクトルの積分値より算定される修正スペクトル強度  $M.S.I.$  (Modified Spectra Intensity) を提案している。

気象庁の有効加速度  $A_{jma}$  は、気象庁計測震度  $I_{jma}$  を算定する際の有効加速度であり、文献<sup>[16]</sup>に基づいて算定した。 $A_{jma}$  は 0.6Hz 前後をピーク周期として 0.1Hz～10Hz 程度までの周波数帯の加速度応答に着目した値である。ただし、通常、気象庁震度を算定するための  $A_{jma}$  は時刻歴地震波 3 方向のベクトル合成により算定するが、本検討では、断層モデルから作成した水平 2 方向の波形のうち、強震方向となる 1 方向の地震波のみを用いて算定した。

表 3.4 検討対象とする地震動強さ指標

地震動強さ指標	記号	参考文献
最大加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	<i>ACC</i>	-
累積絶対速度 [m/s]	<i>CAV</i>	EPRI(1991) <sup>[10]</sup> , 落合(2014) <sup>[11],[12]</sup>
最大速度 [m/s]	<i>VEL</i>	-
入射密度エネルギー[N/m]	<i>E</i>	平井・澤田(2012) <sup>[13]</sup>
スペクトル強度 [m]	<i>S.I.</i>	Housner(1965) <sup>[14]</sup>
修正スペクトル強度 [m/s]	<i>M.S.I.</i>	小林・他(1978) <sup>[15]</sup>
有効加速度（気象庁）[cm/s <sup>2</sup> ]	<i>A<sub>jma</sub></i>	童・山崎(1996) <sup>[16],[17]</sup>

$$ACC = \max|a(t)| \quad \text{Eq. 3.10}$$

$$CAV = \sum_{i=1}^n \int_{t_i}^{t_{i+1}} |a(t)| dt \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$VEL = \max|v(t)| \quad \text{Eq. 3.12}$$

$$E = \rho V_s \int_0^{\infty} v^2(t) dt \quad \text{Eq. 3.13}$$

$$S.I. = \int_{0.1}^{2.5} S_{V,0.05}(T) dT \quad \text{Eq. 3.14}$$

$$M.S.I. = \int_{0.1}^{0.5} S_{A,0.05}(T) dT \quad \text{Eq. 3.15}$$

$$A_{jma} = 10^{(I_{jma} - 0.94)/2} \quad \text{Eq. 3.16}$$

ここに、 $a(t)$ ：加速度時刻歴、 $v(t)$ ：速度時刻歴、 $\rho$ ：地盤の密度、 $V_s$ ：地盤のせん断波速度、 $S_{V,0.05}(T)$ ：減衰 5% の速度応答スペクトル、 $S_{A,0.05}(T)$ ：減衰 5% の加速度応答スペクトル、 $I_{jma}$ ：気象庁計測震度、である。また、 $CAV$  の算定については  $t_i$  の間隔を 1.0 秒とし、 $|a(t)|$  の最大値が 100 cm/s<sup>2</sup> を超える場合について総和している。

### 3.7 一つの震源で作成された地震波群の地震動特性

#### 3.7.1 時刻歴波形および応答スペクトル

一つの震源から作成した断層モデル地震波群 2736 波について、前述の 7 つの地震動強さ指標を算定した。本章では、最大加速度の強震方向（水平 2 方向のうち、地震動強さが大きい方）の地震波を用いて検討することとし、統計的グリーン関数法と波数積分法のハイブリッド法によって作成されたそのままの時刻歴波形を使用した。すなわち、第 2 章で述べた、距離減衰式による対象敷地の地震ハザードに適合させるための調整係数を乗じる前の地震波群を用いて検討した。

一例として、図 3.10 に解放基盤における最大加速度  $ACC$  の分布を示す。震源特性の不確定性を考慮した 2736 波の最大加速度範囲は  $20 \sim 1540 \text{ cm/s}^2$  に分布している。詳細は後述するが、最大加速度の中央値および自然対数標準偏差として、2.61 および 0.57 の統計値が得られている。

また、図 3.11(1), (2)に、2736 波の地震波群のうち、各地震動強さが大きい上位 10 波の加速度時刻歴波形を示す。図は上から地震動強さ上位 1 位～10 位の地震波を示している。また、図 3.12(1), (2)には、各地震動強さが大きい上位 50 波の地震波群の応答スペクトル（減衰 5%）の重ね書きを示している。地震動強さ順に並べた場合に上位に来る地震波は、地震動強さ指標の違いによって異なり、その応答スペクトル特性も異なっているのが確認できる。

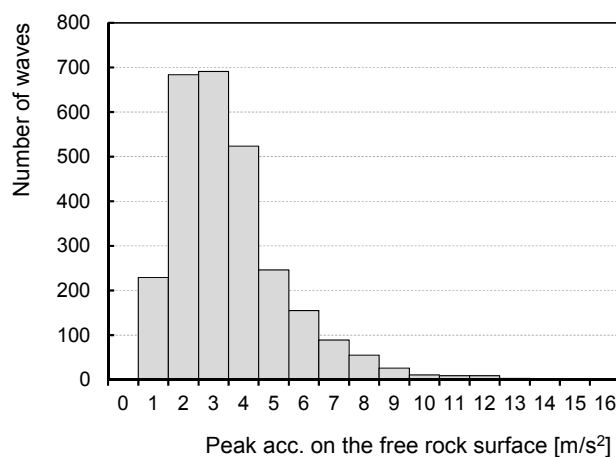


図 3.10 一つの震源から作成した地震波群の最大加速度分布

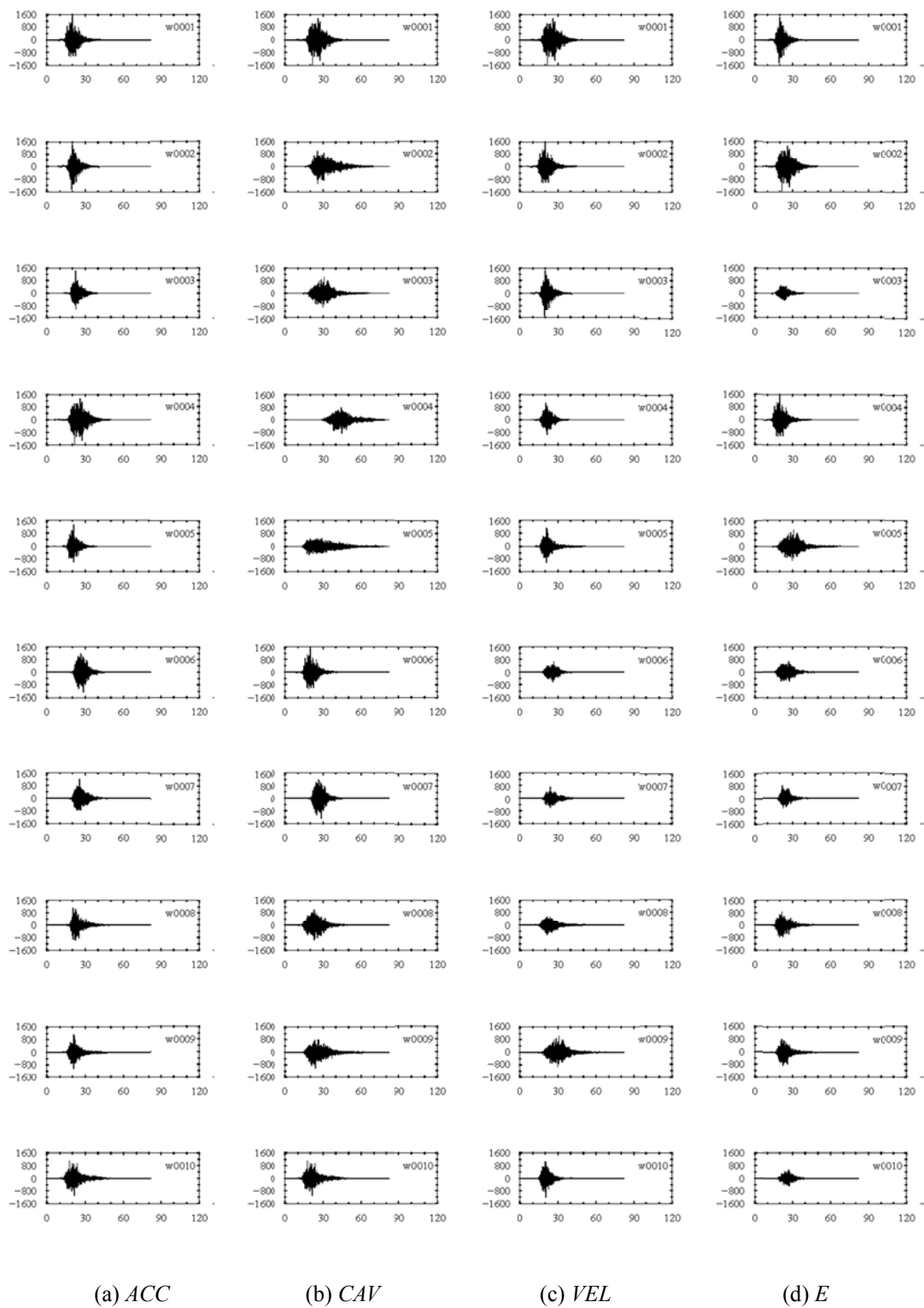


図 3.11(1) 地震動強さが上位 10 波となる時刻歴波形（解放基盤，強震方向）



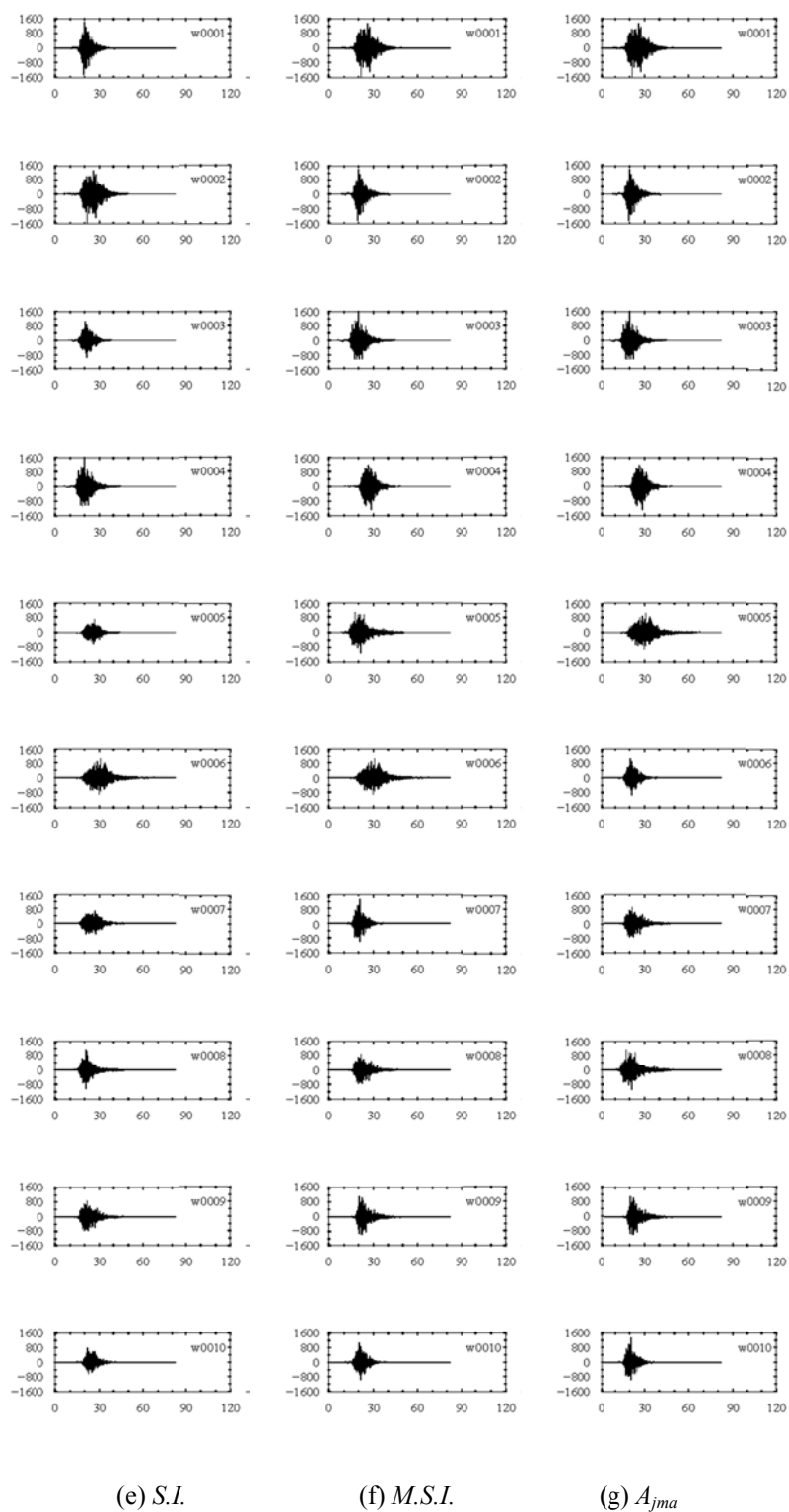


図 3.11(2) 地震動強さが上位 10 波となる時刻歴波形（解放基盤，強震方向）

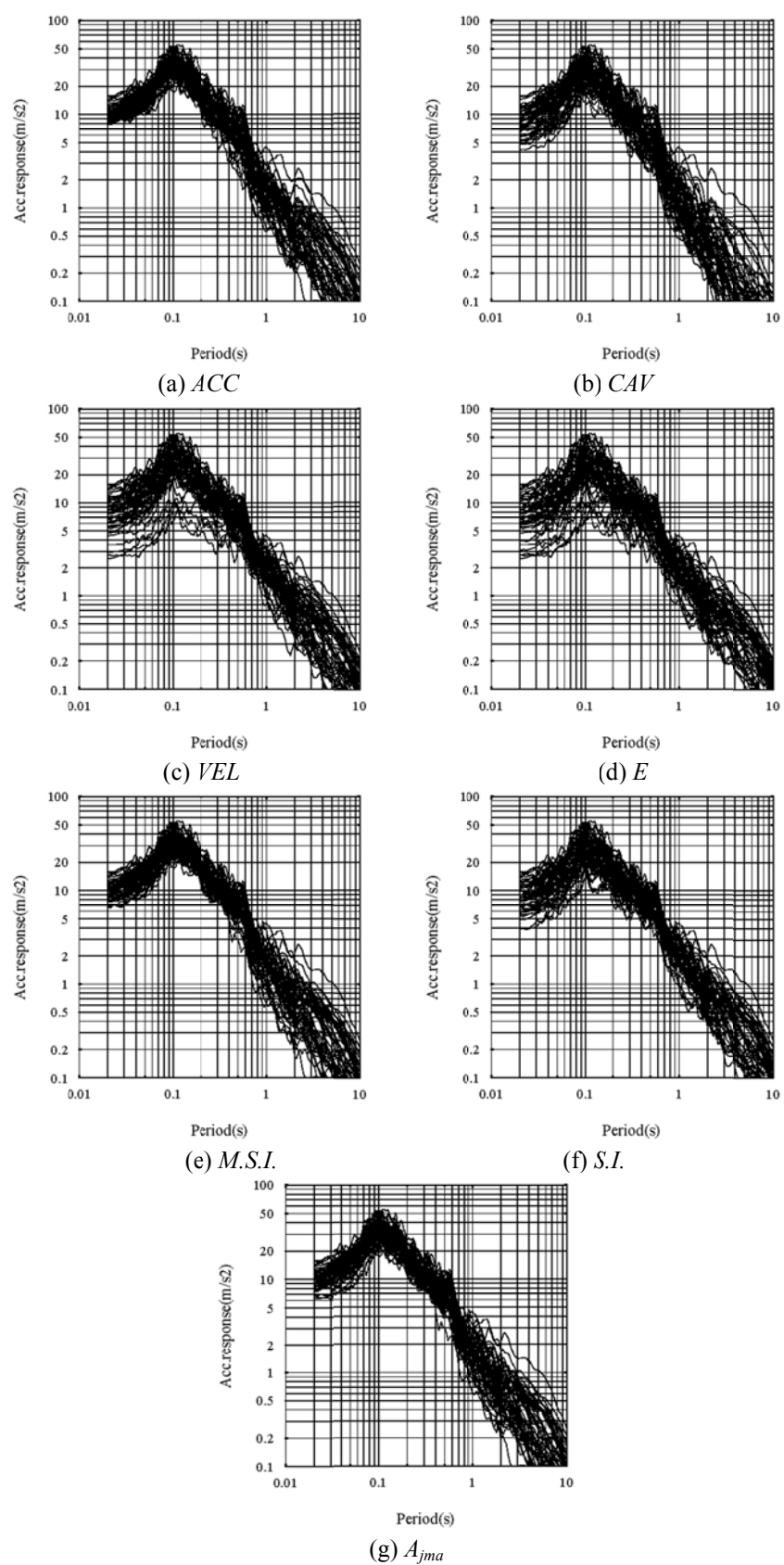


図 3.12(1) 地震動強さが上位 50 波の応答スペクトル（解放基盤，強震方向）

### 3.7.2 地震動強さの分布

一つの震源から作成された 2736 波について、解放基盤および基礎底面における時刻歴波形から 7 つの地震動強さを算定した。

はじめに、2736 波による各地震動強さ指標の分布形状を確認するため、2736 波による地震動強さの分布を対数正規確率紙にプロットした。図 3.13 に結果を示す。異なる地震動強さ指標について比較するために、横軸は地震波による地震動強さ分布の中央値に対する各地震波による地震動強さの比をとっており、縦軸は各地震動強さの累積確率を表している。すなわち、2736 波による各地震動強さの中央値は、横軸 1.0、縦軸の累積確率 50%の点に該当し、横軸の 1 以上の範囲は中央値よりも地震動強さが大きい範囲（分布の右側）、横軸の 1 以下の範囲は中央値よりも地震動強さが小さい範囲（分布の左側）を示している。

震源特性の不確定性を考慮して作成された地震波群の地震動強さ分布は、 $CAV$  以外は概ね対数正規確率紙上で直線的な傾向を示している。 $CAV$  については、 $100\text{cm/s}^2$  の閾値を超えた場合の加速度絶対値の累積値であることから、加速度波形が小さい場合には閾値を超えずに  $CAV=0$  となる場合もあり、分布の左側において対数正規分布から乖離する傾向があるが、どの指標も分布の右側については、対数正規確率紙上で直線的な傾向を示すことから対数正規分布に従うものとし、分布の右側の値を用いて表 3.5 に示す中央値および自然対数標準偏差を算定した。

また、図 3.13 の点線は表 3.5 の分布の中央値および対数標準偏差から算定した対数正規分布を表している。震源特性の不確定性を考慮して作成された地震波群の地震動強さ分布は、 $+2\zeta \sim 3\zeta$  程度まで対数確率紙上で直線的な傾向となっているが、 $+2\zeta \sim 3\zeta$  を超えるとプロットが立ち上がり対数正規分布から乖離する傾向がある。このことから、作成された地震波群は分布の裾野が対数正規分布に対してやや小さめの傾向があることが確認された。

なお、2736 波の地震波は、 $3\zeta$  の累積確率を再現するための最小サンプル数 740 波に対して、3.7 倍近い波数が得られていることから、地震動強さの対数正規分布からの乖離は、サンプル数不足による影響は少ないと考えられる。

また、解放基盤における各地震動強さのばらつきは、自然対数標準偏差で  $0.52 \sim 1.03$  となっている。最大加速度  $ACC$  を地震動強さ指標とした場合は  $0.57$  であり、ハザード適合の目安とした耐専スペクトルのばらつき  $0.53$  よりもやや大きめのばらつきとなっている。基礎底面における各地震動強さのばらつきは、解放基盤におけるばらつきとほぼ同等かやや小さめで  $0.47 \sim 1.02$  の値が得られている。解放基盤および基礎底面どちらにおいても、 $CAV$  と  $E$  はその他の指標と比べて、ばらつきが大きい傾向があることが確認された。

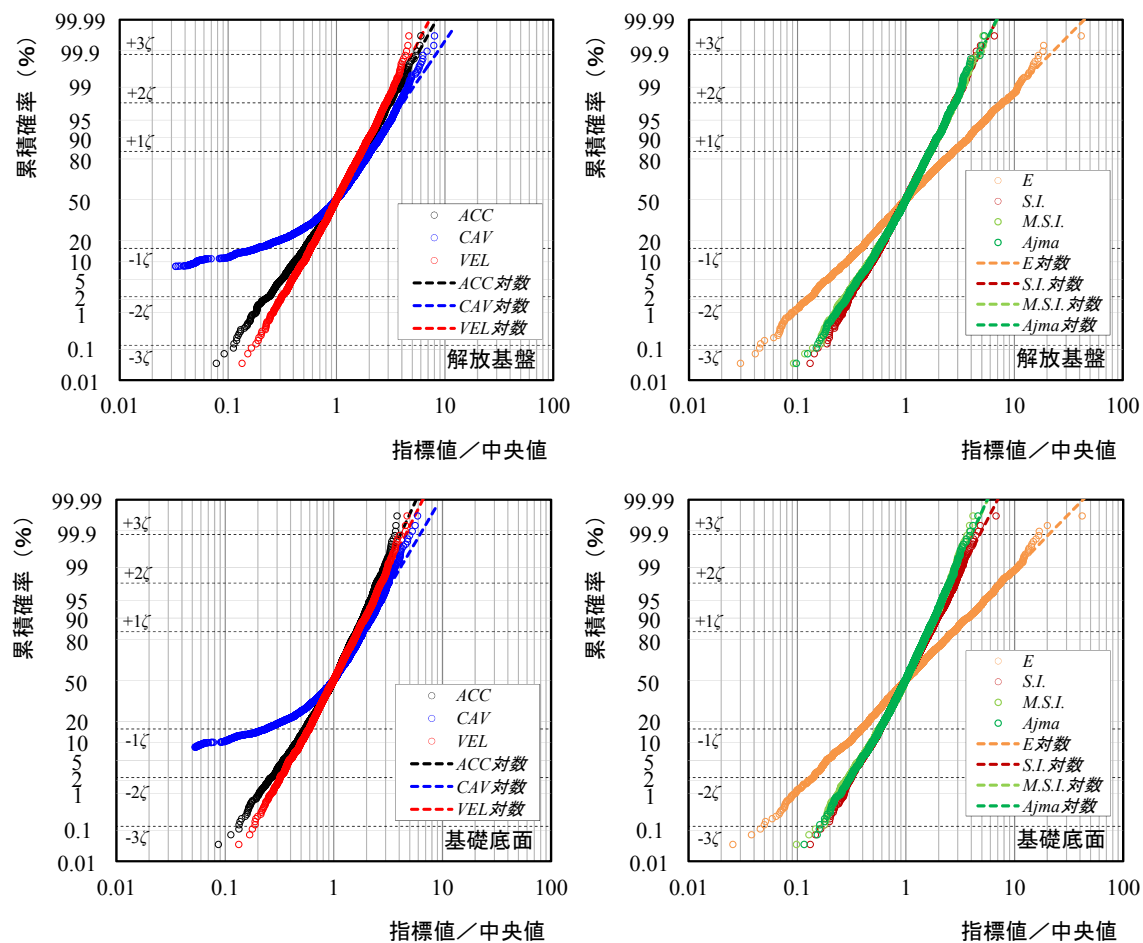


図 3.13 地震動強さ分布（上段：解放基盤，下段：基礎底面）

表 3.5 地震動強さの統計値（ $\lambda$ ：中央値， $\zeta$ ：自然対数標準偏差）

地震動強さ指標			解放基盤		基礎底面	
			$\lambda$	$\zeta$	$\lambda$	$\zeta$
最大加速度	ACC	m/s <sup>2</sup>	2.61	0.57	2.51	0.47
累積絶対速度	CAV	m/s	5.83	0.71	5.79	0.61
最大速度	VEL	m/s	0.084	0.54	0.108	0.51
入射密度エネルギー	E	N/m	0.011	1.03	0.018	1.02
スペクトル強度	S.I.	m	0.33	0.53	0.46	0.53
修正スペクトル強度	M.S.I.	m/s	1.66	0.52	1.97	0.47
有効加速度（気象庁）	A <sub>jma</sub>	cm/s <sup>2</sup>	56.2	0.52	69.2	0.46

### 3.8 地震動強さと建物最大応答の関係

#### 3.8.1 建物の応答指標

建物の時刻歴応答解析から評価される各階の時刻歴応答波形から、建物の最大応答指標を算定する。本検討では、建物の応答指標として、表 3.6 に示す最大応答加速度  $A_{str}$  および最大層間変形角  $R_{str}$  の 2 つについて検討した。これらの指標を選定した理由は、建物応答加速度  $A_{str}$  は建物床に設置された設備機器等への入力になること、建物層間変形角  $R_{str}$  は構造躯体の損傷との相関が高く、建物層間を跨いで設置される配管系統への入力となるためである。本検討における機器・配管の損傷は、これらの指標で表した建物応答に基づいて判定することとする。

表 3.6 建物の応答指標

建物の応答指標	記号
建物最大応答加速度 [m/s <sup>2</sup> ]	$A_{str}$
建物最大層間変形角 [1/100 rad.]	$R_{str}$

#### 3.8.2 地震動強さと建物最大応答の関係

図 3.14 に、解放基盤における地震動強さ指標と建物最大応答の関係を示す。図は 2736 波について、横軸を解放基盤における地震動強さ、縦軸を応答解析から得られた建物の  $A_{str}$  または  $R_{str}$  とした時の分布を示している。縦軸のマーカーの種類の違いは、最大応答を示す層の違いを表している。

建物の最大応答加速度  $A_{str}$  については、どの地震動強さ指標に関しても、概ね地震動強さの増大に伴い頭打ちとなる傾向が確認された。これは、建物が非線形化することで上層階まで入力が伝わらないことが要因と考えられる。また、最大応答となる層は、第 4 層または第 1 層に集中している傾向が見られており、建物の非線形化の程度により、上階まで強い入力が伝わったケースと下階の非線形化により上階まで入力が伝わらなかったケースがあることが要因として考えられる。

建物の層間変形角  $R_{str}$  については、概ね地震動強さの増大に伴い線形に増加する傾向が確認された。第 3 章で示した建物モデルの各層の復元力特性では、第 1 折点が 1/2738 rad.、第 2 折点が 1/478 rad. であるが、2736 波の地震動によって、全体の 85.2%にあたる 2332 波の地震波群によって、最大層間変形角が第 1 折点を超え、全体の 10.2%にあたる 280 波の地震波によって第 2 折点を超える結果となった。

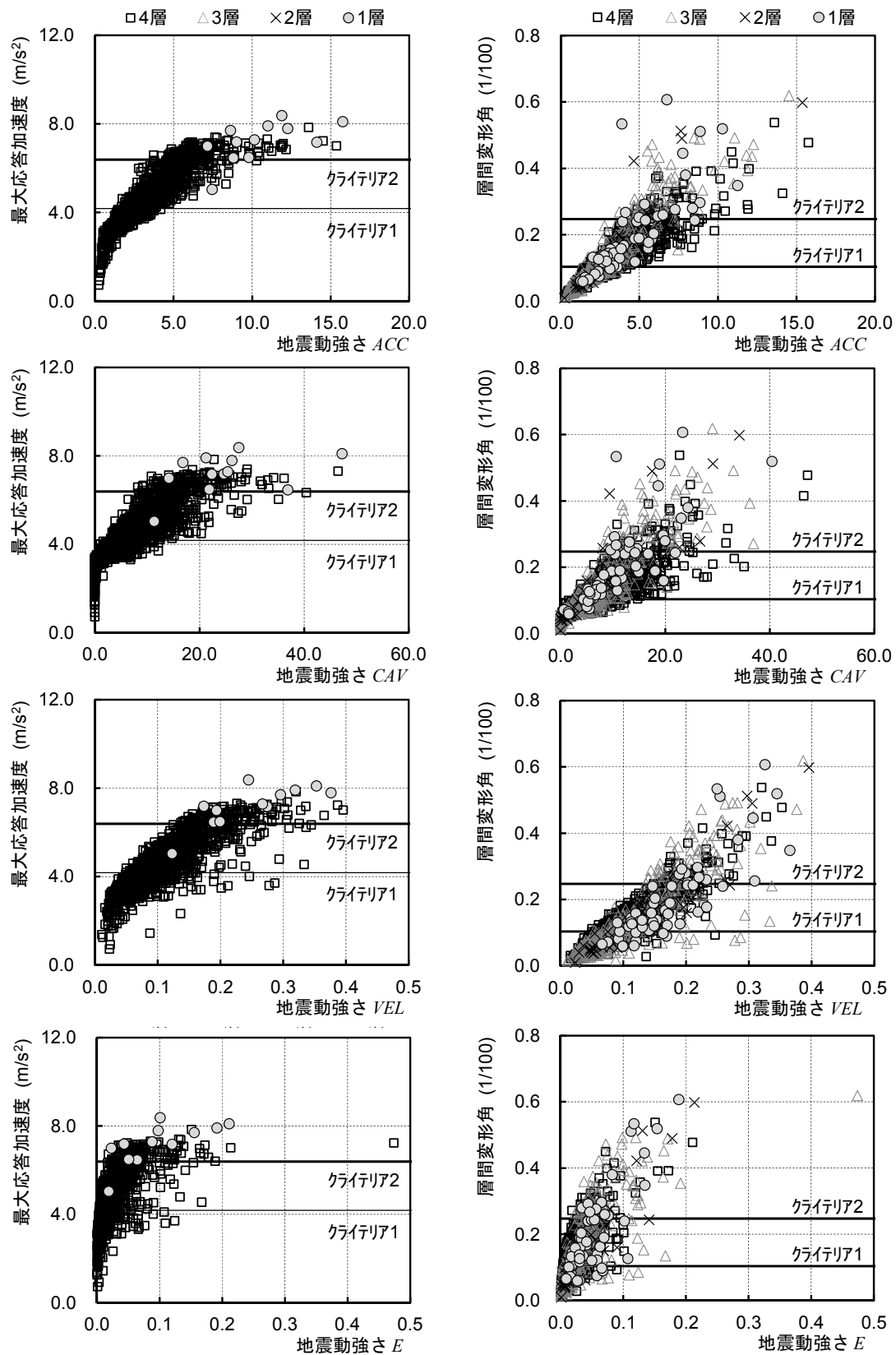


図 3.14 地震動強さ（解放基盤）と建物最大応答の関係

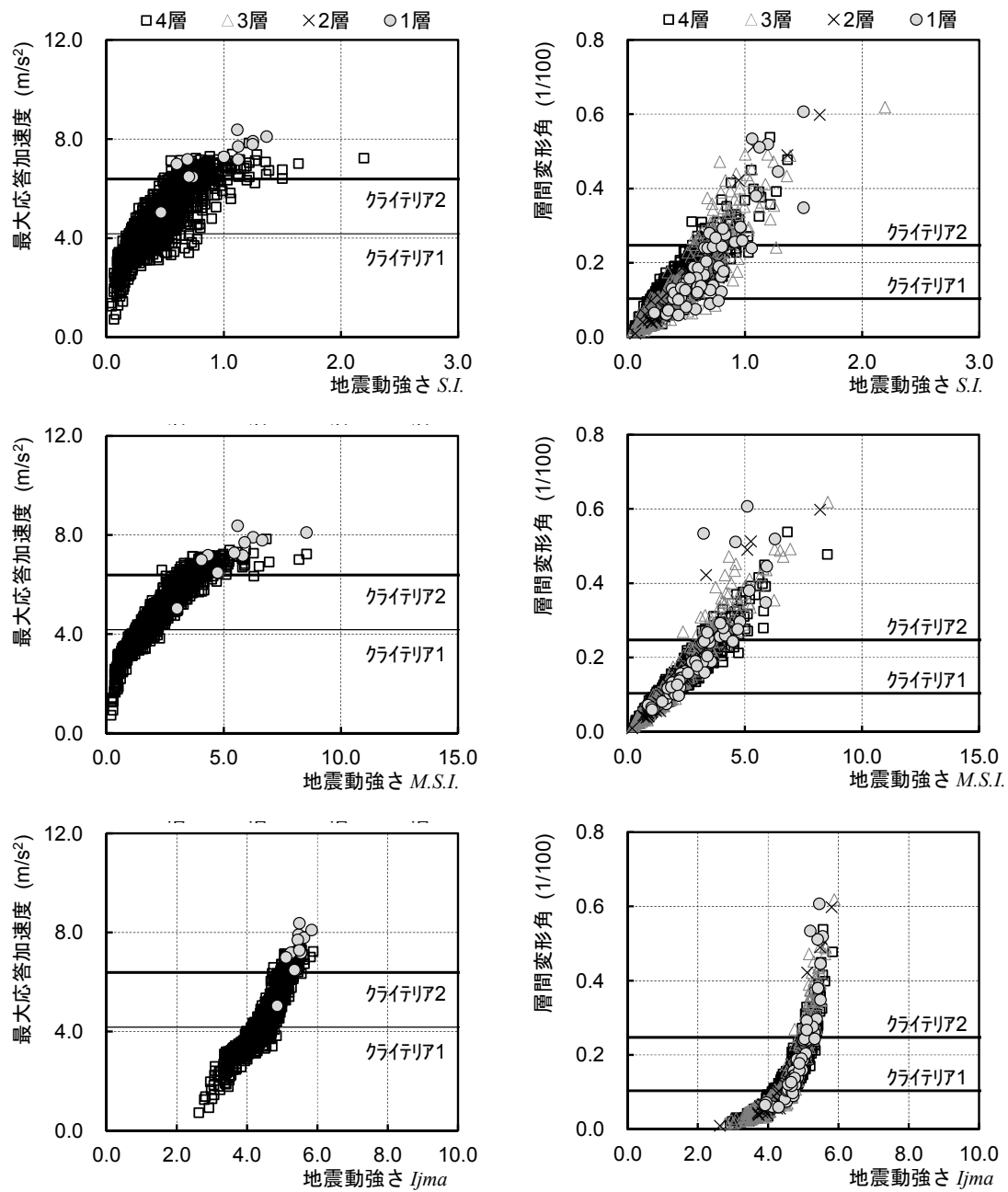


図 3.14 地震動強さ（解放基盤）と建物最大応答の関係（続き）

---

### 3.8.3 建物フラジリティ評価

2736 波による建物の地震応答解析結果を用いて、各地震動強さを横軸とした場合の建物フラジリティ曲線のばらつきの違いを評価するため、建物解放基盤または基礎底面における地震動強さを横軸にとった場合の建物フラジリティを、対数正規分布の仮定のもと、建物応答が損傷クライテリアを超えるか否かの二値の最尤法で算定した。

ここで、建物の損傷の有無を決定する損傷クライテリアは、建物最大応答の 50%超過値（2736 波のうち、1368 波によって超える建物最大応答）および 6.25%超過値（2736 波のうち、171 波によって超える建物最大応答）と仮定した。50%超過値をクライテリア 1、6.25%超過値をクライテリア 2 とする。

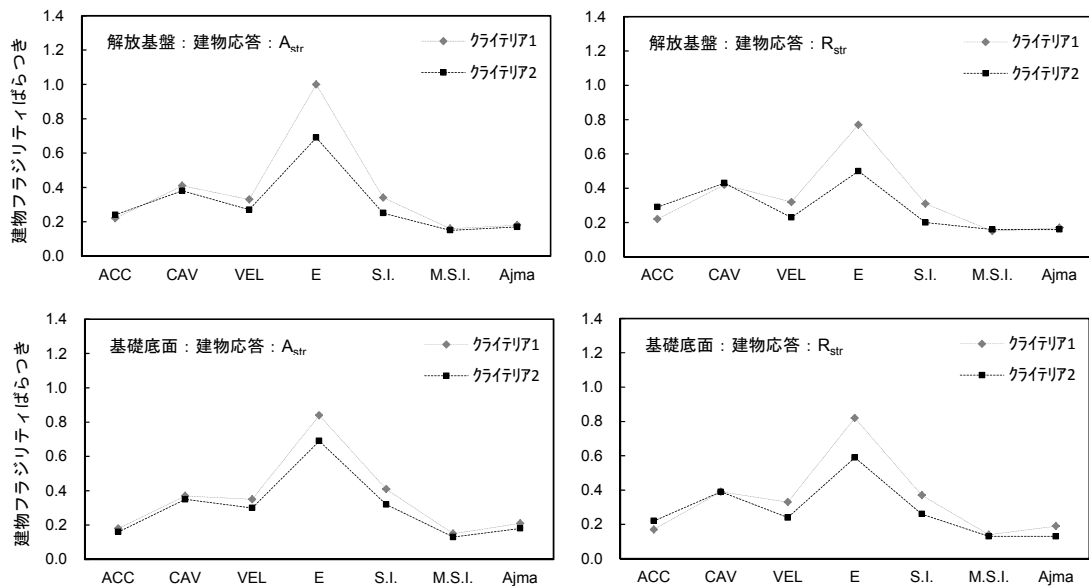
最大応答加速度  $A_{str}$  に対する損傷クライテリアは、クライテリア 1 が  $418 \text{ cm/s}^2$ 、クライテリア 2 が  $639 \text{ cm/s}^2$  である。また、最大層間変形角  $R_{str}$  に対する損傷クライテリアは、クライテリア 1 が  $1/962 \text{ rad.}$ 、クライテリア 2 が  $1/403 \text{ rad.}$  である。

表 3.7 に、最尤法による建物フラジリティのばらつき（自然対数標準偏差）の算定結果を示す。解放基盤、基礎底面に関わらず、 $M.S.I.$  や  $A_{jma}$  のばらつきは小さく、 $E$  や  $CAV$  のばらつきは大きい傾向が確認された。なお、表 3.7 の結果は、図 3.14 の損傷クライテリアに該当する応答面における地震動強さのばらつきの大きさに対応している。 $M.S.I.$  や  $A_{jma}$  は、ばらつきが小さく建物応答との相関関係が確認できる。一方で、 $E$  や  $CAV$  についてはばらつきが大きく、他の指標と比較して建物応答との相関が小さい傾向が確認された。



表 3.7 各地震動強さを指標とした建物フラジリティのばらつき

建物応答指標		建物最大応答加速度 $A_{str}$		建物最大層間変形角 $R_{str}$	
		クライテリア 1	クライテリア 2	クライテリア 1	クライテリア 2
地震動強さ指標		50%超過値 4.18 [m/s <sup>2</sup> ]	6.25%超過値 6.39 [m/s <sup>2</sup> ]	50%超過値 0.104 [1/100rad.]	6.25%超過値 0.248 [1/100rad.]
解放基盤	$ACC$	0.22	0.24	0.22	0.29
	$CAV$	0.41	0.38	0.42	0.43
	$VEL$	0.33	0.27	0.32	0.23
	$E$	1.00	0.69	0.77	0.50
	$S.I.$	0.34	0.25	0.31	0.20
	$M.S.I.$	0.16	0.15	0.15	0.16
	$A_{jma}$	0.18	0.17	0.17	0.16
基礎底面	$ACC$	0.18	0.16	0.17	0.22
	$CAV$	0.37	0.35	0.39	0.39
	$VEL$	0.35	0.30	0.33	0.24
	$E$	0.84	0.69	0.82	0.59
	$S.I.$	0.41	0.32	0.37	0.26
	$M.S.I.$	0.15	0.13	0.14	0.13
	$A_{jma}$	0.21	0.18	0.19	0.13



### 3.9 震源特性と地震動強さおよび建物応答の関係

本論文において対象とする時刻歴地震波群は、断層モデルの様々な震源特性（震源パラメータ）の不確定性を考慮して作成されている。同じ震源から作成された時刻歴地震波群であっても、震源特性の不確定性によってその地震動特性の傾向（スペクトル特性、経時特性等）が変わることから、震源特性の不確定性が地震波や建物応答に、どのような影響をどの程度及ぼすのかを整理しておくことは、効率的な地震波作成のための参考資料として有用である。ここでは、前述の地震動強さおよび建物応答の結果を用いて、震源特性と地震動強さ・建物応答の関係の大凡の傾向を重回帰分析によって把握するとともに、震源特性のばらつきが震源スペクトルに及ぼす影響を把握する。

#### 3.9.1 重回帰分析

一つの震源から作成した 2736 波の地震波群について、断層モデルの震源特性と得られた時刻歴地震波の地震動強さおよび建物応答の相関の強さの関係を評価するために、2736 波による地震動強さまたは建物応答を出力変数（従属変数） $Y$  とし、震源特性の各パラメータを入力変数（説明変数） $X$  とした線形の重回帰分析を行った。すなわち、2736 波の各地震波による地震動強さまたは建物最大応答を出力変数  $y$ 、震源特性を入力変数  $x$  として、Eq. 3.17 に示すように出力変数  $y$  が震源特性  $x$  の線形和と残差  $\varepsilon$  によって回帰できると仮定した。Eq. 3.17 における  $a_0 \sim a_m$  は回帰係数（定数）であり、重回帰解析においては、 $a_0 = 0$  として回帰直線が原点を通るものとして各回帰係数を評価した。

なお、出力変数は対数正規分布を仮定し、入力変数のうち対数正規分布に従うものについては、対数を取り正規化した。また、入力変数は出力変数に対する入力変数の感度を平等に取り扱うために、各出力変数および入力変数は、平均値 0、標準偏差 1 に基準化したものを変数とし、重回帰分析を実施した。

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_mx_m + \varepsilon \quad \text{Eq. 3.17}$$

表 3.8 に入力変数とした震源特性を示す。入力変数とする震源特性は、巨視的震源特性の地震モーメント  $M_0$  および第 2 章において偶然的な不確定性を考慮した微視的震源特性 9 個の計 10 個である。これらの震源特性のうち、アスペリティ面積比  $C_{Sa}$ 、アスペリティ位置  $aspX$ 、 $aspY$ 、破壊開始点位置  $startX$  については、正規分布または一様分布を仮定しており対数正規分布ではないため、Eq. 3.17 に示すように対数正規分布に従う他の震源特性との線形和で表すことは厳密には適切ではないと考えられるが、これらの震源特性は、図 3.15 に示すように、断層の幾何学的性質を表すパラメータであり、他の震源特性に対して性質の異なるパラメータであること、本検討では地震動強さおよび建物応答との定性的な関係を把握できれば良いことから、対数正規分布が仮定できる震源特性以外の震源特性についても線形和で記述できると仮定し、重回帰分析を行った。

表 3.8 重回帰分析の入力変数とした震源特性

No.	震源特性	記号
1	地震モーメント	$M_0$
2	平均応力降下量	$\Delta\sigma$
3	破壊伝播速度のせん断波速度比	$C_{Vr}$
4	ライズタイムの $W/V_r$ 比	$\alpha_{tr}$
5	破壊開始点位置	$startX$
6	アスペリティ位置	$aspX$
7		$aspY$
8	アスペリティ面積比	$C_{Sa}$
9	高振動数遮断フィルタ	$f_{max}$
10	媒質の $Q$ 値 乗数	$C_{Qc}$

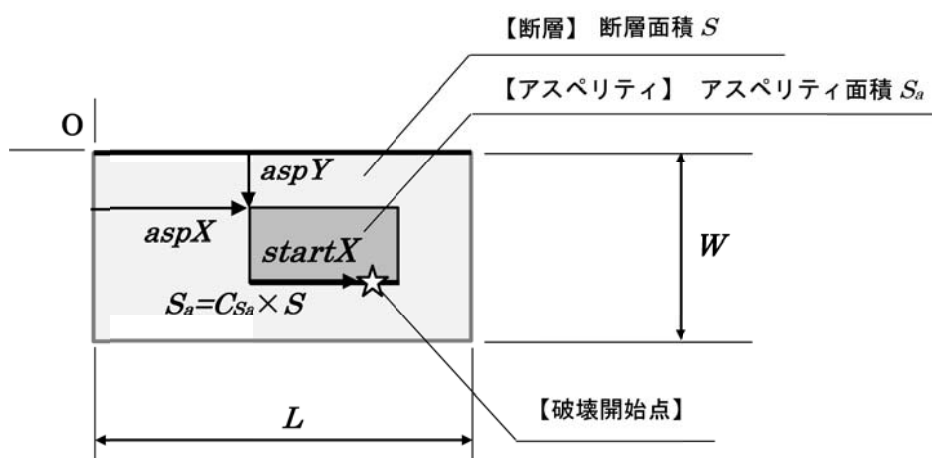


図 3.15 震源特性パラメータの概要図

### 3.9.2 解析結果

図 3.16 に重回帰分析の結果を示す。上から、震源特性と解放基盤における地震動強さの関係、震源特性と基礎底面における地震動強さの関係、震源特性と建物最大応答の関係を示している。横軸は入力変数とした震源特性であり、縦軸が回帰係数である。縦軸が+の場合は、その震源特性は地震動強さまたは建物応答と正の相関があることを示しており、縦軸が-の場合は、負の相関があることを示している。また回帰係数の絶対値が大きいほど相関が強いことを示している。

震源特性の中で、地震モーメント  $M_0$ 、平均応力降下量  $\Delta\sigma$ 、媒質の Q 値係数  $C_{Qc}$  については、他の震源特性と比較して回帰係数の絶対値が大きく、正の相関が強い傾向が確認された。一方で、アスペリティ位置の断層幅方向の位置を表す  $aspX$  には、やや強い負の相関の傾向が確認された。

比較的強い正の相関を示した  $M_0$ 、 $\Delta\sigma$ 、および  $C_{Qc}$  について、地震動強さの違いによる回帰係数の大小の傾向を見てみると、地震モーメント  $M_0$  については、地震動強さ指標の  $E$ 、 $VEL$ 、 $S.I.$ をはじめとする速度、変位・エネルギー系の地震動強さ指標との相関が高い傾向が確認できる。一方で、平均応力降下量  $\Delta\sigma$  および媒質の Q 値係数  $C_{Qc}$  は、 $ACC$ 、 $Aj_{ma}$ 、 $M.S.I.$ をはじめとする加速度系の地震動強さ指標と相関が高い傾向が確認された。

なお、建物最大応答については、応答指標の違いによる差異は明瞭には確認されなかった。また、出力変数が地震動強さであるか建物最大応答であるかに関わらず、震源特性との関係はほぼ似たような傾向が確認された。

表 3.9 に重回帰解析の残差の標準偏差を示す。残差の標準偏差は 0.45~0.94 と比較的大きな値となっており、震源特性と地震動強さ指標および建物最大応答の関係には大きなばらつきが確認された。この結果は、震源特性と地震動強さおよび建物応答の相関関係を線形和として表現することの限界を表しているものの、重回帰分析により震源特性と地震動強さおよび建物応答との大局的な相関関係を把握することができた。

3.2 節の既往の知見と比較しても、震源の条件や比較対象とした震源特性は異なっているものの、平均応力降下量やアスペリティ位置が地震動応答に対して比較的大きな影響を及ぼすという点に関しては、本検討においても同様の傾向が得られた。

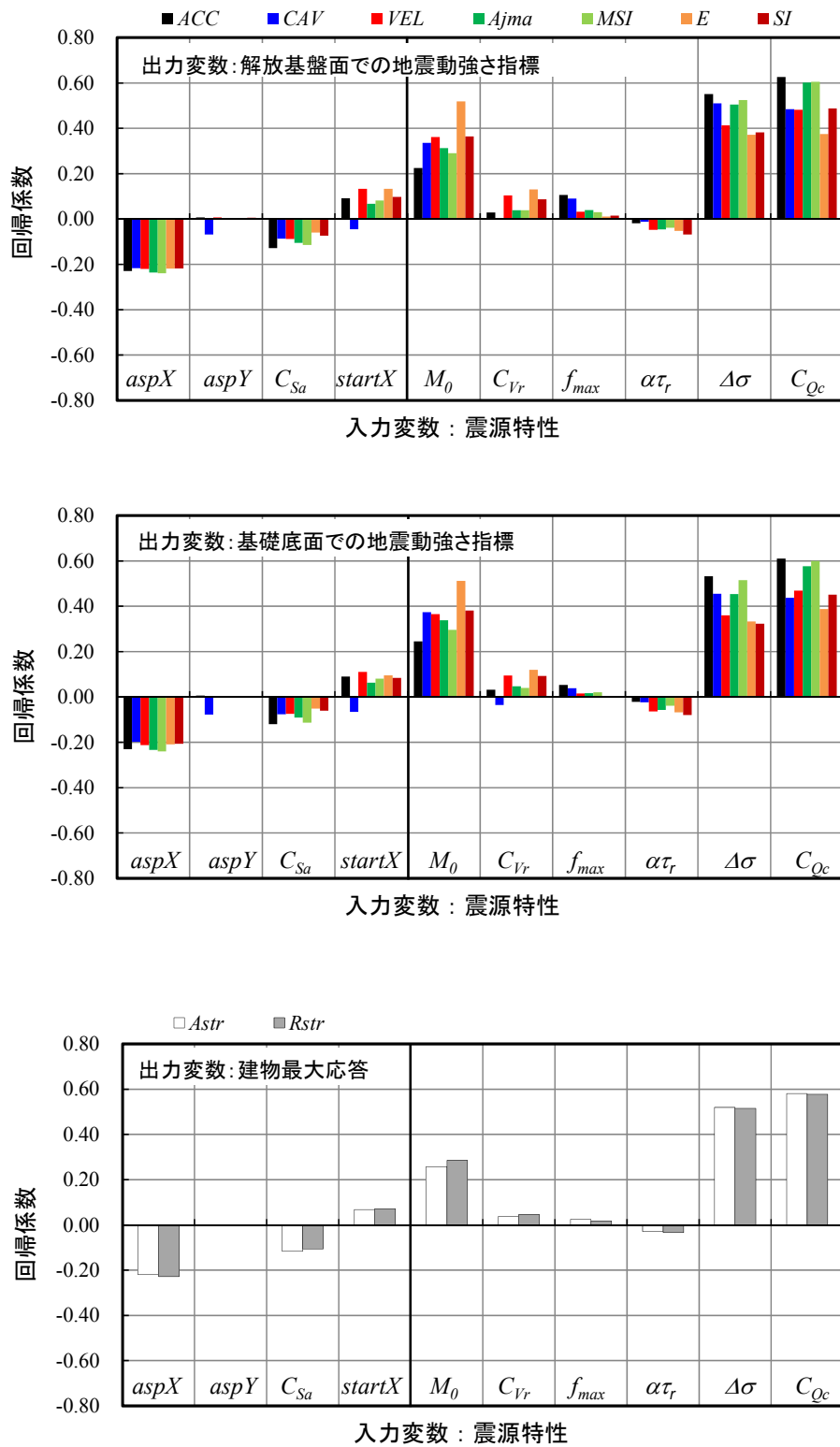


図 3.16 重回帰分析の結果

表 3.9 重回帰分析の標準誤差 $\varepsilon$

出力変数	入力変数	標準誤差 $\varepsilon$	
		解放基盤	基礎底面
地震動強さ指標	$ACC$	0.45	0.49
	$CAV$	0.94	0.94
	$VEL$	0.64	0.68
	$E$	0.62	0.65
	$S.I.$	0.66	0.71
	$M.S.I.$	0.48	0.49
	$A_{jma}$	0.50	0.55
建物最大応答	$A_{str}$	0.54	0.54
	$R_{str}$	0.53	0.53

### 3.10 断層モデルの震源特性の不確定性が地震動強さや建物応答に及ぼす影響

前節では、断層モデルの不確定性要因とした各震源特性が、地震動強さに対してどの程度の感度があるかについて傾向を把握した。その結果、震源特性の地震モーメント  $M_0$  については、 $E$ ,  $VEL$ ,  $S.I.$ をはじめとする速度、変位・エネルギー系の地震動強さ指標に対する感度が高く、平均応力降下量  $\Delta\sigma$  や媒質の  $Q$  値係数  $C_{Qc}$  については、 $ACC$ ,  $Aj_{ma}$ ,  $M.S.I.$ をはじめとする加速度系の地震動強さ指標に対する感度が高い傾向となっており、各震源特性が地震動強さ指標へ及ぼす影響の違いが確認された。このことは、各震源特性が時刻歴地震波へ及ぼす影響度合いが周期領域で異なっていることが要因の一つであると想定される。

また、アスペリティ面積比  $C_{Sa}$ , アスペリティ位置  $aspX$ , 破壊開始点  $startX$  をはじめとする幾何学的な震源特性に関する地震動強さとの相関の傾向については、震源と対象敷地との関係によって、相関の正負あるいは大小の関係が変化するものと考えられる。

本節では、前節で得られた震源特性と地震動強さとの感度および相関の結果について、震源から発生する地震動のスペクトルおよび震源と対象敷地との位置関係からその要因を整理する。また、各震源特性の不確定性の大きさが、震源から発生する地震動のスペクトルのどの周期帯に影響を及ぼすのかを、波形合成法における要素地震のスペクトルと震源特性の関係から考察する。

#### 3.10.1 震源から発生する地震動の加速度フーリエスペクトル

本論文において対象とする時刻歴地震波群は、その短周期成分については統計的グリーン関数法に基づいて地震動評価している。統計的グリーン関数法では、断層を要素小断層に分割し、各要素小断層から発生する地震波を破壊伝播の遅延時間を考慮して重ね合わせることで地震波を作成する。ここで、要素小断層から発生する地震動の加速度フーリエスペクトル（震源スペクトル）には Eq. 3.18 を適用した。これは、Boore (1983) <sup>[18]</sup>による震源から発生する地震動の統計的性質を表した加速度フーリエスペクトルに、震源近傍における地震動強さの飽和特性を考慮するため、Eq. 3.24 に示す距離減衰式と同等の飽和項  $C(f)$  を導入したものである。図 3.17 に震源距離が 8km の場合の幾何減衰の一例を示す。地震動の加速度フーリエスペクトル  $Acc(f)$  に関する諸式は、Eq. 3.18～Eq. 3.23 で表される。なお、時刻歴地震波の位相の包絡関数には佐藤 (1994) <sup>[19]</sup>を適用している。

$$Acc(f) = CM_{0e} S(f, f_c) P(f, f_{max}) \frac{1}{X + C(f)} \exp\left(\frac{-\pi f X}{Q(f) V_s}\right) \quad \text{Eq. 3.18}$$

$$C = \frac{R_{\theta\phi} \cdot F_s \cdot P_{RTTN}}{4\pi\rho V_s^3} \quad \text{Eq. 3.19}$$

$$S(f, f_c) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad \text{Eq. 3.20}$$

$$P(f, f_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\max})^m}} \quad \text{Eq. 3.21}$$

$$f_c = 4.9 \times 10^6 V_s (\Delta\sigma/M_0)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. 3.22}$$

$$Q(f) = C_{Qc} f^{C_{Qp}} \quad \text{Eq. 3.23}$$

$$C(f) = \begin{cases} 0.0055 \times 10^{0.5M_w} & (f > 50\text{Hz}) \\ 6.85 \log_{10} f + 7.87 & (50\text{Hz} > f > 2\text{Hz}) \\ 0.0028 \times 10^{0.5M_w} & (2\text{Hz} > f) \end{cases} \quad \text{Eq. 3.24}$$

ここに、 $M_{0c}$ : 要素小断層の地震モーメント、 $S(f, f_c)$ : 震源スペクトル、 $f_c$ : コーナー周波数、 $P(f, f_{\max})$ : 高振動数遮断フィルタ、 $f_{\max}$ : 高振動数遮断フィルタの設定振動数、 $X$ : 要素小断層からの距離、 $Q(f)$ : 媒質の Q 値、 $V_s$ : 地盤のせん断波速度、 $R_{\theta\phi}$ : ラディエーションパターン係数、 $F_S$ : 自由地盤表面における増幅率、 $P_{RITN}$ : 地震のエネルギーを水平 2 方向成分に分割するための低減係数、 $\rho$ : 地盤の密度、 $m$ : 高振動数における遅延率を表す係数、 $\Delta\sigma$ : 応力降下量、 $M_w$ : モーメントマグニチュードである。また、Eq. 3.24 の  $50\text{Hz} > f > 2\text{Hz}$  は振動数に対する対数線形補間を表した式である。

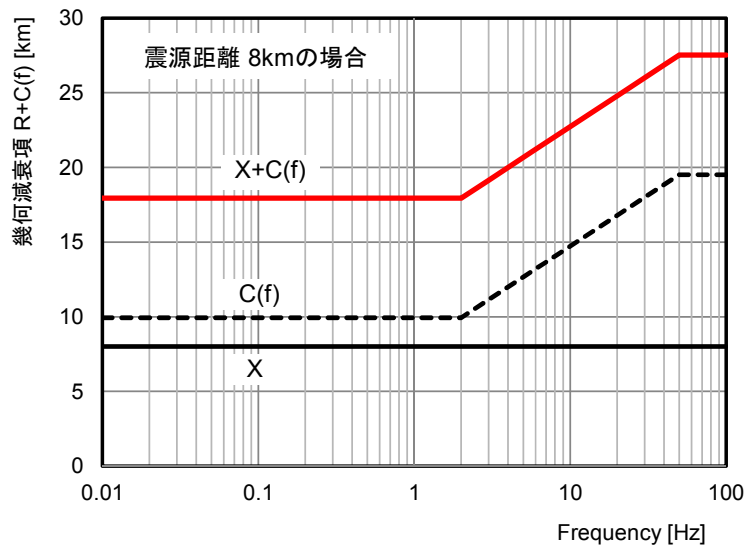


図 3.17 地震動評価に用いた幾何減衰の例（震源距離  $X=8\text{km}$  の場合）



### 3.10.2 地震モーメント $M_0$ と地震動強さの関係

地震モーメント  $M_0$  の不確定性については、算定式の違いによる不確定性を認識論的不確定性としてロジックツリーにより考慮し、算定式内の不確定性を偶然的な不確定性として MCS により考慮している。ここでは、2736 波の地震波群の地震モーメント  $M_0$  について、その中央値  $\lambda$  と自然対数標準偏差  $\zeta$  を算定し、 $M_0$  が  $\lambda$  および  $\lambda \pm 1\zeta$  の値をとる時の、Eq. 3.18 に示す震源から発生する地震動の加速度フーリエスペクトル  $Acc(f)$  の形状の模式的な変化を確認した。図 3.18(1)に結果を示す。

図の黒実線は震源特性が中央値  $\lambda$  をとる時の形状であり、青点線および赤点線は、それぞれ震源特性が  $\lambda + 1\zeta$ 、 $\lambda - 1\zeta$  をとる場合のスペクトル形状を示している。すなわち、図は地震モーメント  $M_0$  が  $\lambda \pm 1\zeta$  の範囲でばらついた場合の  $Acc(f)$  の定性的なばらつき幅を示している。なお、Eq. 3.18 は要素小断層を対象とした式であり、要素分割数に対応する地震モーメント  $M_{0e}$  の値で検討するべきであるが、ここでは断層全体の地震モーメント  $M_0$  を適用し、スペクトル形状の相対的な変化を模式的に確認している。また、検討対象とする震源特性以外の値については、2736 波による各震源特性の中央値を用いて算定した。

図 3.18(1)では、 $M_0$  が中央値に対して相対的に大きく（または、小さく）なる場合には、 $Acc(f)$  が全周期帯で大きく（または、小さく）なる傾向が確認でき、特に振動数 1Hz 以下の低振動数域において  $M_0$  の不確定性が  $Acc(f)$  に及ぼす影響が大きい結果となった。これは、 $M_0$  が地震動のスペクトルの周期無限大の値に対応するという定義とも調和しており、前述の重回帰分析の結果において、地震動の周期のやや長い範囲に着目している  $VEL$ 、 $S.I.$ 、 $E$  といった速度、変位、エネルギー系の地震動強さ指標との相関が高い傾向とも調和的な結果となっている。

### 3.10.3 平均応力降下量 $\Delta\sigma$ , 高振動数遮断フィルタ $f_{max}$ , Q 値係数 $C_{Qc}$ と地震動強さの関係

前述の地震モーメント $M_0$ の検討と同様に、図 3.18(2)～(4)には、平均応力降下量 $\Delta\sigma$ , 高振動数遮断フィルタ $f_{max}$ および媒質の Q 値係数 $C_{Qc}$ について、各震源特性が $\pm 1$ および $\pm 1/2$ の値をとる時の $Acc(f)$ の形状の変化を示す。 $\Delta\sigma$ ,  $f_{max}$ および $C_{Qc}$ が、それぞれの中央値に対して相対的に大きく（または、小さく）なる場合には、 $Acc(f)$ も大きく（または、小さく）なる傾向が確認できる。また、それぞれの震源特性によって $Acc(f)$ の形状の変化の傾向に違いがあることが確認できる。

平均応力降下量 $\Delta\sigma$ は、地震発生前後の断層内のせん断応力の差を表しており、高振動数帯でのスペクトルレベルに影響するパラメータの一つであるが、本検討では 1Hz 程度以上の比較的高振動数領域において $Acc(f)$ への影響が大きい傾向が確認できる。

また、高振動数遮断フィルタ $f_{max}$ は $Acc(f)$ の算定に係るハイカットフィルタの設定振動数であり、 $f_{max}$ が大きければ、スペクトルの高振動数帯の振幅が低減されにくくなるため、震源特性として設定した $f_{max}$ の振動数帯よりも高い振動数領域において $Acc(f)$ への影響が確認できる。

媒質の Q 値係数 $C_{Qc}$ は地盤の内部減衰（Q 値）に係るパラメータであり、減衰の大きさは Eq. 3.18 の指数項のように $C_{Qc}$ の逆数と振動数の関係として表されるが、本検討でも振動数帯全体で $Acc(f)$ への影響が見られ、特に建物 1 次振動数 4.3Hz 以上の振動数領域において影響が大きい傾向があることが確認された。

図 3.18(2)～(4)の縦軸のスケールは揃えて記述しているが、比較的広域帯において不確定性の影響が大きい平均応力降下量 $\Delta\sigma$ と Q 値係数 $C_{Qc}$ については回帰係数の絶対値が大きく、ごく短周期領域のみにおいて不確定性の影響が表れる高振動数遮断フィルタ $f_{max}$ については、回帰係数の絶対値が上記 2 つよりも小さくなっている。以上より、重回帰分析で確認された回帰係数の絶対値の差異は、各震源特性が地震動の加速度フーリエスペクトルの形状に及ぼす影響の違いによる起因するものと考えられる。

### 3.10.4 アスぺリティ面積比 $C_{Sa}$ と地震動強さの関係

上述の震源特性と同様に、Eq. 3.18 の地震動の加速度フーリエスペクトル  $Acc(f)$  の式をアスぺリティのみに適用することで、アスぺリティ面積比  $C_{Sa}$  の回帰結果を考察した。すなわち、アスぺリティ面積比  $C_{Sa}$  は Eq. 3.25, アスぺリティの平均応力降下量  $\Delta\sigma_a$  とアスぺリティ面積比  $C_{Sa}$  との関係は Eq. 3.27 で表される。また、Eq. 3.26 に示す断層の平均すべり量  $D$  に対するアスぺリティのすべり量  $D_a$  から、アスぺリティの地震モーメント  $M_{0a}$  が算定できる。これら  $\Delta\sigma_a$  と  $M_{0a}$  を用いて、Eq. 3.18 の  $Acc(f)$  の式をアスぺリティに対して適用した。なお、本検討では Eq. 3.26 におけるすべり量の比を表す係数は、2.0 の確定値として考慮することとした。

$$C_{Sa} = S_a / S \quad \text{Eq. 3.25}$$

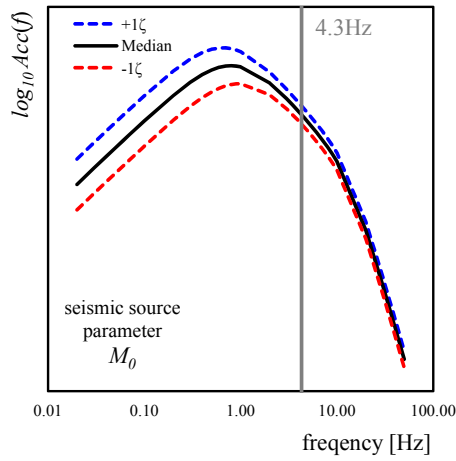
$$D_a = 2D \quad \text{Eq. 3.26}$$

$$\Delta\sigma_a = (1/C_{Sa}) \cdot \Delta\sigma \quad \text{Eq. 3.27}$$

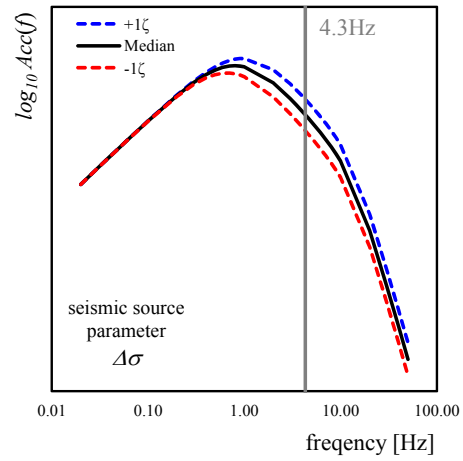
$$M_{0a} = \mu D_a S_a \quad \text{Eq. 3.28}$$

ここに、 $S_a$  : アスぺリティ面積、 $S$  : 断層面積、 $D_a$  : アスぺリティの平均すべり量、 $D$  : 断層の平均すべり量、 $\mu$  : 地盤せん断弾性係数、 $M_{0a}$  : アスぺリティの地震モーメント、である。

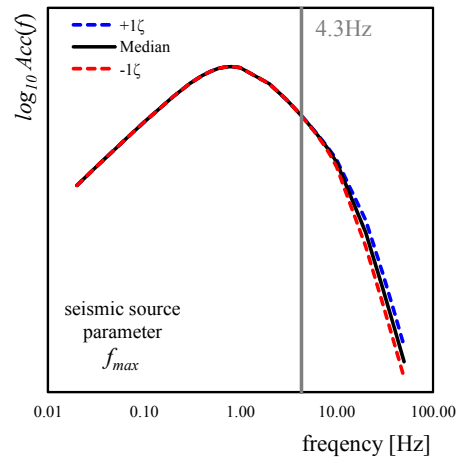
図 3.18(5)に、アスぺリティ面積比  $C_{Sa}$  が、平均値  $\mu$  および標準偏差  $\sigma$  に対し、 $\mu$  および  $\mu \pm 1\sigma$  の値をとる時の  $Acc(f)$  の形状の変化を示す。 $C_{Sa}$  が平均値に対して大きく（または、小さく）なる場合には、5Hz 以下の低周波数領域において  $Acc(f)$  が大きく（または、小さく）なる傾向が確認された。一方で、10Hz 付近を境に高周波数領域においては僅かにその傾向が逆転し、 $C_{Sa}$  が大きく（または、小さく）なる場合には、 $Acc(f)$  が小さく（または、大きく）なる傾向が確認された。 $C_{Sa}$  が大きくなれば、アスぺリティ面積が断層面積に対して相対的に大きくなり、アスぺリティの単位面積から解放される応力は小さくなるため、地震動強さも小さくなることが要因として考えられる。以上の傾向は、回帰分析における、地震動強さ指標および建物応答との間に弱い負の相関結果とも調和する結果となっている。



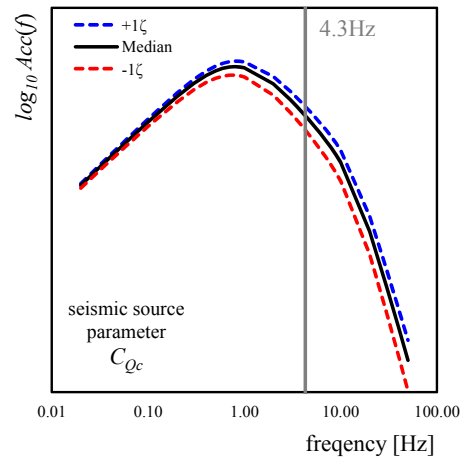
(1) 地震モーメント  $M_0$



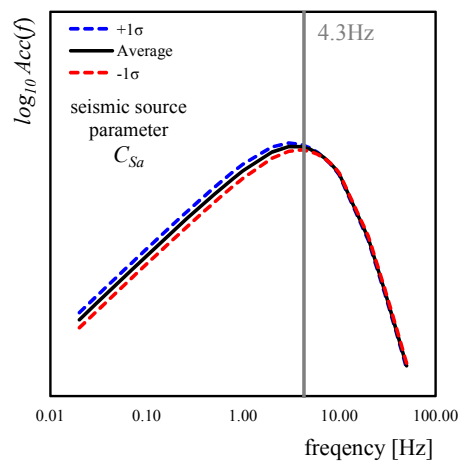
(2) 平均応力降下量  $\Delta\sigma$



(3) 高振動数遮断フィルタ  $f_{max}$



(4) 媒質の Q 値係数  $C_{Qc}$



(5) アスペリティ面積比  $C_{Sa}$

図 3.18 震源特性の不確実性が震源スペクトルに及ぼす影響

### 3.10.5 破壊伝播速度係数 $C_{V_r}$ およびライズタイム係数 $\alpha_{tr}$ と地震動強さの関係

断層の破壊伝播速度  $V_r$  とせん断波速度に対する係数  $C_{V_r}$  の関係は Eq. 3.29 で表される。また、ライズタイム  $\tau_r$  とライズタイム係数  $\alpha_{tr}$  の関係は Eq. 3.30 で表される。統計的グリーン関数法による時刻歴地震波群の作成において、要素地震の重ね合わせ法については香川（2004）<sup>[20]</sup>の手法を用いているが、香川（2004）によれば、大地震の加速度フーリエスペクトルは、各要素小断層から発生する小地震の重ね合わせによって Eq. 3.31 の式によって評価される。ここで、Eq. 3.31 の  $Acc_{mn}(f)$  は、要素小断層から発生する小地震の加速度フーリエスペクトルを表しており、Eq. 3.18 に相当する。Eq. 3.31 での第1項を表す Eq. 3.32 の  $C_1(f)$  は、断層面上での小地震の重ね合わせを表す項であり、重ね合わせの結果得られる大地震の加速度フーリエスペクトルと破壊伝播速度  $V_r$  との関係を表している。また、第2項を表す Eq. 3.33 の  $C_2(f)$  は断層のすべり方向に対する小地震の重ね合わせを表す項であり、重ね合わせの結果得られる大地震の加速度フーリエスペクトルとライズタイム  $\tau_r$  との関係を表している。

$$V_r = C_{V_r} \cdot V_s \quad \text{Eq. 3.29}$$

$$\tau_r = \alpha_{tr} W / V_r \quad \text{Eq. 3.30}$$

$$U(f) = \sum_{m=1}^{NL} \sum_{n=1}^{NW} \frac{1}{r_{mn}} \exp(-i 2\pi f t_{mn}) \left\{ 1 + \frac{1}{n'(1-e^{-1})} \sum_{k=1}^{(ND-1)n'} \exp\left(\frac{-(k-1)}{(ND-1)n'}\right) \exp\left(\frac{-i 2\pi f (k-1)\tau_r}{(ND-1)n'}\right) \right\} Acc_{mn}(f) \quad \text{Eq. 3.31}$$

$$C_1(f) = \sum_{m=1}^{NL} \sum_{n=1}^{NW} \frac{1}{r_{mn}} \exp(-i 2\pi f t_{mn}) \quad \text{Eq. 3.32}$$

$$C_2(f) = 1 + \frac{1}{n'(1-e^{-1})} \sum_{k=1}^{(ND-1)n'} \exp\left(\frac{-(k-1)}{(ND-1)n'}\right) \exp\left(\frac{-i 2\pi f (k-1)\tau_r}{(ND-1)n'}\right) \quad \text{Eq. 3.33}$$

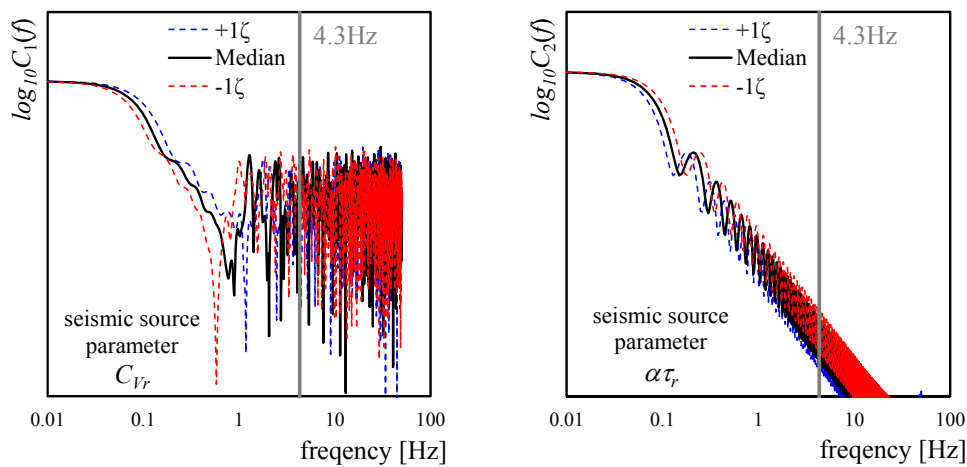
ここに、 $V_s$ ：地盤のせん断波速度、 $\tau_r$ ：ライズタイム、 $W$ ：断層幅、 $t_{mn}(f)$ ：要素地震波が破壊開始時刻からサイトに到達する時間、 $r_{mn}$ ：要素小断層の重心から対象敷地までの距離、である。なお、上記式の詳細については、香川（2004）<sup>[20]</sup>を参照されたい。

前項と同様に、破壊伝播速度係数  $C_{Vr}$  およびライズタイム係数  $\alpha_{tr}$  が中央値に対して変化した場合の、 $C_1(f)$  および  $C_2(f)$  の変化を図 3.19 に示す。

図 3.19 (1)は、破壊伝播速度  $C_{Vr}$  と大地震の加速度フーリエスペクトルの関係（断層面内方向における要素小地震の重ね合わせの関係）を表しているが、破壊伝播速度  $C_{Vr}$  が中央値に対して相対的に大きく（または、小さく）なる場合には、 $C_1(f)$  も大きく（または、小さく）なる傾向が確認できる。

一方で、図 3.19 (2)は、ライズタイム係数  $\alpha_{tr}$  と大地震の加速度フーリエスペクトルの関係（断層のすべり方向における要素小地震の重ね合わせの関係）を示しているが、ライズタイム係数  $\alpha_{tr}$  が中央値に対して大きく（または、小さく）なる場合には、 $C_2(f)$  は逆に小さく（または、大きく）なる傾向があることが確認された。破壊伝播速度が大きくなる場合やライズタイムが小さくなる場合には、各要素小地震の重ね合わせの時間間隔が短くなることから、重ね合わせによる大地震は、より強い地震動が生じやすくなると考えられる。

以上より、小地震の重ね合わせによる大地震の加速度フーリエスペクトルへの影響の観点から、破壊伝播速度係数  $C_{Vr}$  およびライズタイム係数  $\alpha_{tr}$  と地震動強さの関係を考察できることが確認された。また、この傾向は重回帰分析の結果とも調和的となっている。



(6) 破壊伝播速度のせん断波速度比  $C_{Vr}$

(7) ライズタイム係数比  $\alpha_{tr}$

図 3.19 震源特性の不確実性が震源スペクトルに及ぼす影響

## 3.10.6 アスぺリティ位置と破壊開始点位置と地震動強さの関係

アスぺリティ位置  $aspX$  および  $aspY$ 、破壊開始点位置  $startX$  と地震動強さの関係については、これらの震源特性が幾何学的なパラメータであることから、対象敷地と断層位置との関係から相関の結果に対する考察を行った。

図 3.20 に、対象とした一つの震源に関して、対象敷地と断層の位置関係を模式的に示す。断層走向は  $210^\circ$ 、断層傾斜角は  $15^\circ$  の確定値である。図 3.21 に断層およびアスぺリティの長さ方向に対する敷地位置の角度について概要図を示しているが、断層およびアスぺリティの長さ方向に対する敷地位置の角度をそれぞれ  $\theta_f$ 、 $\theta_a$  として、2736 断層について、対象敷地と断層の位置関係の分布を調べた。

図 3.22 に  $\theta_f$ 、 $\theta_a$  の分布の結果を示す。断層長さ方向と対象敷地への方向の角度  $\theta_f$  については、2736 断層のうち 72% を超える断層が  $\theta_f = 90 \sim 270^\circ$  の角度に位置している。この結果は、多くの断層が対象敷地の南側に位置していることを示している。

また、アスぺリティの断層長さ方向と対象敷地のなす角度  $\theta_a$  については、2736 断層のうち 80% を超えるアスぺリティが  $\theta_a = 90 \sim 270^\circ$  の角度に位置している。アスぺリティについても断層と同様に対象敷地の南側に位置する傾向にあることが分かる。

ここで、断層およびアスぺリティが対象敷地の南側に位置し、かつアスぺリティ位置  $aspX$  が正の値で増加する場合には、アスぺリティと敷地の位置関係はより距離が遠くなる関係となる。強震動を発生するアスぺリティが遠い位置にあれば地震動強さも小さくなることから、アスぺリティ位置と地震動強さには負の相関が表れたものと考えられる。また、破壊開始点  $startX$  が正の値で増加する場合には、断層破壊が対象敷地方向に向かって進展する位置関係にあることから、破壊開始点位置と地震動強さには正の相関が表れたものと考えられる。

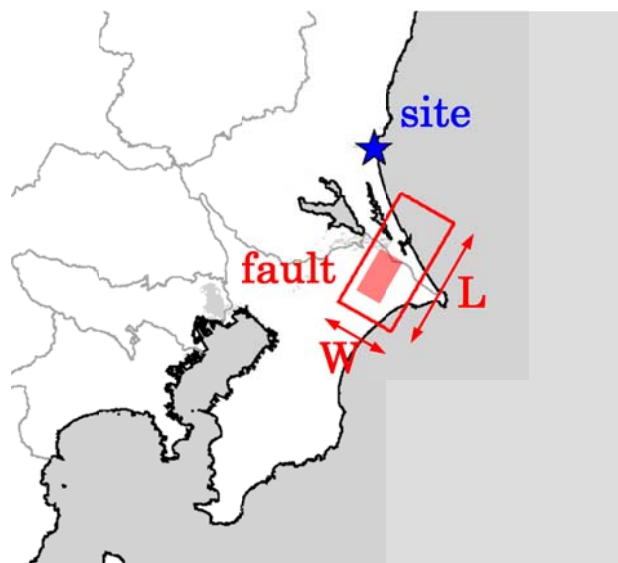


図 3.20 対象敷地と断層の位置関係

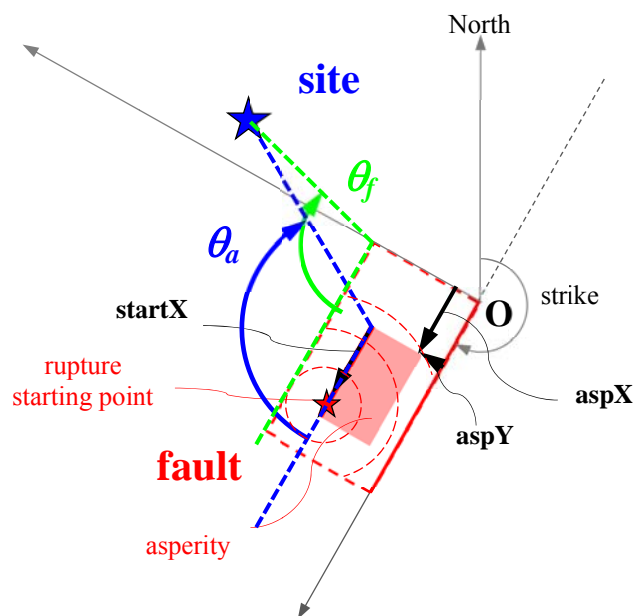


図 3.21 対象敷地と断層およびアスペリティのなす角度  $\theta_f$ ,  $\theta_a$

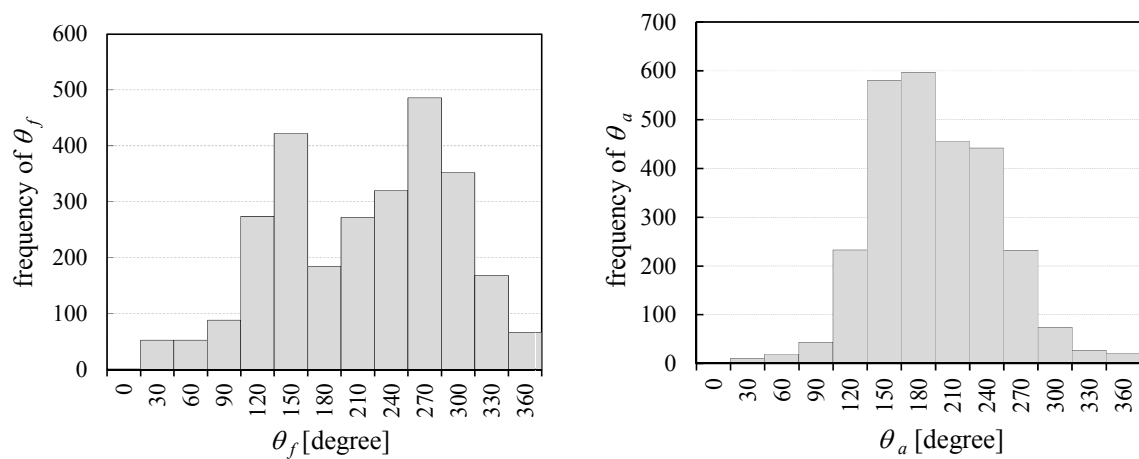


図 3.22 断層およびアスペリティの長さ方向に対する敷地位置の角度  $\theta_f$ ,  $\theta_a$  の分布



### 3.11 まとめ

本章では、一つの震源を対象として震源特性の不確定性を考慮して作成された断層モデル地震波群 2736 波について、一般的に用いられている 7 種類の地震動強さ指標を算定し、2736 波による地震動強さのばらつきの傾向を比較した。概ね、どの地震動強さ指標であっても対数正規分布に従う傾向が確認されたが、偏差が  $2 \sim 3\sigma$  を超える分布の裾野部分については、やや対数正規分布に対して小さい結果が得られた。7 つの地震動強さ指標のうち、気象庁震度算定のための有効加速度  $A_{jma}$  および修正スペクトル強度  $M.S.I.$  が、他の地震動強さ指標と比較して小さい結果となり、累積絶対速度  $CAV$  や入射密度エネルギー  $E$  についてはやや大きい結果が得られた。

また、後述の第 4 章の建物モデルを対象として 2736 波による時刻歴応答解析を行い、各地震動強さと建物 fragility のばらつきの関係を評価した。7 つの地震動強さ指標のうち  $A_{jma}$  および  $M.S.I.$  は、建物 fragility のばらつきが最も小さく、建物応答指標である最大応答加速度や最大層間変形角に対する相関が良い結果となった。

さらに、断層モデルの震源特性、地震波の各種地震動強さ、建物応答の関係について把握するために、震源特性を入力変数、地震動強さまたは建物最大応答を出力変数とした重回帰分析を行い、震源から発生する地震動の加速度スペクトル（震源スペクトル）および震源と対象敷地の位置関係から、重回帰分析の結果を考察した。

震源特性の不確定性が震源スペクトルに及ぼす影響は、震源特性の種類によって傾向が異なり、平均応力降下量  $\Delta\sigma$  や媒質の  $Q$  値係数  $C_{Qc}$  などの、スペクトルの短周期領域に影響を及ぼす震源特性については加速度系の地震動強さ指標に対する感度が高く、地震モーメント  $M_0$  などのやや周期の長い範囲に影響を及ぼす震源特性については、速度、エネルギー系の地震動強さ指標に対する感度が高い傾向が確認された。また、アスペリティ位置や破壊開始点と地震動強さの関係については、アスペリティ位置が対象敷地に対して相対的に近くなる場合、断層破壊の進展方向に敷地が位置する場合に、地震動強さが大きくなる傾向が確認された。

本章では、断層モデルの震源特性と地震動強さの相関関係を、震源から発生する地震動のスペクトルおよび震源と対象敷地に対する位置関係から説明できることを示した。これらの結果は、対象敷地と震源が異なる場合にも準用することが可能であると考えられ、任意の対象敷地に対する断層モデル地震波群の作成に対して有用な知見になると考えられる。

## (補足) 地震動のピークファクターによる震源特性と地震動強さの関係

本章では、断層モデル地震波群の震源特性と様々な指標で表された地震動強さの関係を、線形重回帰分析によって算定した。本論文では検討対象とはしていないが、Eq. 3.34 に示す地震動のピークファクター $k_p$ <sup>[21]</sup>と震源特性の相関を比較することによっても感度を算定することが可能である。

断層モデル地震波群は、解放基盤および基礎底面での加速度時刻歴波形、または、建物の各階の時刻歴加速度応答波形が得られているため、Eq. 3.35 に示すように、それらの時刻歴波形のパワースペクトル $G_a(f)$ （時間領域における 2 乗振幅値の振動数領域に関するスペクトル）の振動数領域に対する積分値から $\sigma_a(T, h)$ を算定することができる。また、時刻歴波形の減衰 $h$ に対する加速度応答スペクトル $S_a(T, h)$ も算定することができる。断層モデル地震波群 3000 波について、パワースペクトル $G_a(f)$ と応答スペクトル $S_a(T, h)$ を算定することで、Eq. 3.34 を用いてそれぞれの地震波に対してピークファクター $k_p(T, h)$ を算定することができる。ピークファクターと震源特性の相関を評価することによって、振動数領域に関する地震動強さについて、重回帰分析と同様の結果を得ることも可能である。

$$S_a(T, h) = k_p(T, h) \cdot \sigma_a(T, h) \quad \text{Eq. 3.34}$$

$$\sigma_a^2(T, h) = \int_0^\infty |H(f)|^2 G_a(f) df \quad \text{Eq. 3.35}$$

ここに、 $H(f)$ ：増幅率（伝達関数）、である。

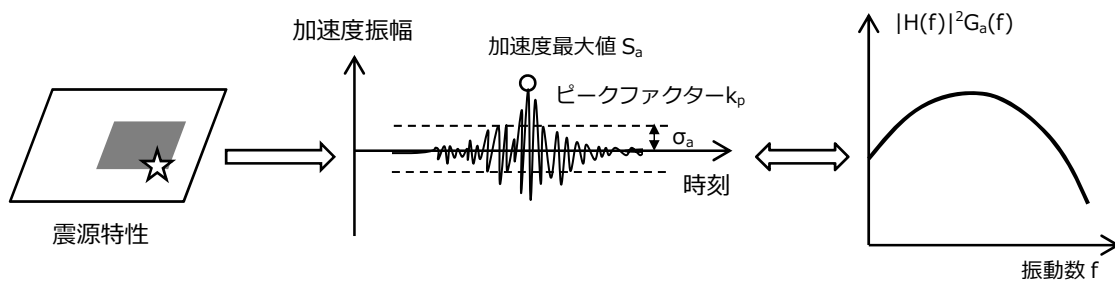


図 3.23 ピークファクターによる震源特性と地震動強さの相関の算定のイメージ

### 第3章 参考文献

- [1] 大塚久哲, R. G. Somerville, 佐藤俊明: 断層パラメータの予測誤差を考慮した広域地震動の評価, 土木学会論文集, No.584, I-42, pp.185-200, 1998
- [2] 大淵正博, 糸井達哉, 高田毅士: 構造物の性能水準と震源特性の関係に関する考察, JCOSAR, pp.129-134, 2011
- [3] 引田智樹, 池浦友則, 友澤裕介, 石田寛: 断層モデルに基づく地震動応答スペクトル予測法と予測結果のばらつきに関する検討, 日本建築学会, 第80巻, No.715, pp.1403-1413, 2015
- [4] 地震調査研究推進本部: 全国地震動予測地図 技術報告書, 2009
- [5] 中央防災会議: 地震ワーキンググループ報告書, 中央防災会議首都直下地震対策専門調査会 (第12回), 2004
- [6] Takeda, T., Sozen, M., A. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proc. ASCE, Vol.96, No.ST-12, 1970
- [7] (社)日本電気協会 原子力規格委員会: 原子力発電所耐震設計技術規 JEAC 4601-2008
- [8] 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996
- [9] 大井昌弘, 水谷守, 諏訪仁, 野畑有秀, 山田守, 藤原広行: 構造物の地震損傷度評価手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第237号, 2003
- [10] Electric Power Research Institute : Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, EPRI TR-100082, 1991.
- [11] 落合兼寛: 原子力発電所の耐震性能を知る 地震発生後の電力安定供給のために, 原子力学会誌, Vol.56, No.2, pp.70-71, 2014.4
- [12] 落合兼寛: 東北の復興に向けて (5) 原子炉プラントの耐震性について - 巨大地震を教訓として -, 日本原子力学会「2013年秋の大会」スライド資料, 2013
- [13] 平井俊之, 澤田純男: 地震動のエネルギー指標に基づく地震動予測結果の妥当性評価, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第1号, pp.31-42, 2012
- [14] Housner, W., G., : Intensity of Earthquake Ground Shaking Near The Causative Fault, Proc. of 3rd WCEE, pp.94-115, 1965
- [15] 小林啓美, 翠川三郎, 田鎖隆: 震源周辺での地震基盤からの入射波の強さについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.553-554, 1978
- [16] 童華南, 山崎文雄: 地震度強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, 第48巻, 第11号, pp.547-550, 1996.11
- [17] 国土交通省 気象庁 HP: 計測震度の算出方法,  
[http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc\\_sindo.htm](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm)
- [18] Boore, D., M.,: Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.73, No.6, pp. 1865-1894. 1983
- [19] 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明: ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤

- 
- 波の推定及びその統計的経時特性，日本建築学会構造系論文集，第 461 号，pp.19-28，1994
- [20] 香川敬生：ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張，日本地震工学論文集，第 4 巻，第 2 号，pp.21-32，2004
- [21] 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004

## 第4章 断層モデル地震波群による建物機能損傷評価の有効性の検証

### 4.1 はじめに

第2章の手法で作成した断層モデル地震波群は、震源の違いや断層モデルの震源特性との不確定性を考慮して作成されているため、その影響が地震波群の地震動特性に反映されている。

従来手法のような一つの地震動強さ指標ではなく、時刻歴地震波群として地震ハザードを表現することによって、広帯域の周波数特性や時刻歴波形の経時特性を考慮した地震リスク評価が可能となると考えられる。また、一様ハザードスペクトルに適合模擬地震波群と比較して、断層モデル地震波群は、断層破壊や地震動の伝播特性の物理的な意味合いを時刻歴地震波に反映できることから、地震動特性（例えば、応答スペクトルのばらつきや周期間相関）の傾向をより実現象に近い形として表現できる可能性がある。

地震リスク評価用の入力地震波群の応答スペクトルのばらつきは、建物や機器の応答のばらつきに直接的に影響を及ぼし、応答スペクトルの周期間相関については、複数機器の損傷の相関性に関連して建物や機器システムの損傷確率に影響を及ぼすと考えられることから、断層モデル地震波群を地震リスク評価用地震波群として用いることにより、従来手法に対してよりきめ細やかな地震リスク評価が可能になると考えられる。

本章では、震源特性との不確定性を考慮して作成された時刻歴地震波群の応答スペクトルのばらつきおよび周期間相関に着目し、それらが建物の地震リスクにどの程度の影響を及ぼすのかを解析的に評価し、断層モデル地震波群による地震リスク評価の有効性を検証する。

はじめに、応答スペクトルのばらつきおよび周期間相関が機器・配管システムの損傷確率（ fragility ）にどの程度の影響を及ぼすかを分析するため、解放基盤における最大加速度が  $500\sim 1000\text{cm/s}^2$  の断層モデル地震波として抽出された250波について、各最大加速度レベルで抽出した50波の応答スペクトル中央値および自然対数標準偏差、周期間相関を算定した。また、断層モデル地震波との比較ケースとして、応答スペクトルの中央値は断層モデル地震波と同じとし、応答スペクトルのばらつきと周期間相関の条件が異なるスペクトル適合模擬地震波群を3ケース作成し、それらの地震波群を入力とした場合に、複数の機器と配管で構成される機器・配管システムの損傷確率にどのような違いが現れるかを確認した。

---

## 4.2 応答スペクトルのばらつきや周期間相関に関する既往研究

本節では、応答スペクトルのばらつきや周期間相関に関する既往知見をまとめておく。

### 4.2.1 応答スペクトルのばらつきに関する既往研究

地震動強さや応答スペクトルのばらつきについては、特に距離減衰式のばらつきとして既往の研究でも様々に検討されている。例えば、地表面最大加速度 PGA に関する距離減衰式として一般的に用いられている司・翠川式<sup>[1]</sup>では、断層最短距離が 100km 以下の地震データに対して常用対数標準偏差 0.25（自然対数標準偏差 0.58）が得られており、また、耐専スペクトルでは全周期帯の平均的なばらつきとして自然対数標準偏差 0.53 が得られている<sup>[2]</sup>。このように、既往研究では、地震動応答のばらつきとして、概ね自然対数標準偏差 0.5 程度のばらつきが得られている。上記の距離減衰式のばらつきは、震源や観測地点を特定した結果ではないため、そのばらつきには震源や観測地点の違いによるばらつきも含まれている。そのような背景より、池浦・野田（2005）<sup>[3]</sup>のように、同一観測点において得られた、同一マグニチュードと同一震源距離の 2 地震に対して、震源や観測地点の違いによる誤差を含まない形で応答スペクトルのばらつきを算定した既往の研究成果も報告されている。池浦・野田（2005）によれば、震源位置を特定することにより、特に短周期側で自然対数標準偏差 0.4～0.5 程度と震源位置を特定しない場合よりもばらつきが低減することが示唆されている。

### 4.2.2 応答スペクトルの周期間相関に関する既往研究

応答スペクトルの周期間相関についても、既往の研究で様々検討されている。岡野ほか（2010）<sup>[4]</sup>は、それまでの既往研究においてまとめられた周期間相関の傾向について整理しており、概ねどの研究結果でも、対象周期に近いほど周期程相関が高く、対象周期から遠いほど相関が小さくなる傾向を示している。ただし、短周期側では応答スペクトルの周期間相関の増大現象についても確認されており、岡野ほか（2010）は、その理由について物理的な説明を加えることを目的として検討を行っている。岡野らは、地震動のパワースペクトル強度の周期間相関から応答スペクトルの相関を理論的に評価することにより、地震動そのものの周期間相関の傾向から、応答スペクトルの周期間相関で確認された短周期側での増大現象についても説明できることを示唆している。

また、坂本・高木（2009）<sup>[5]</sup>は、地震リスク評価に用いる地震動の応答スペクトルの周期間相関が建物応答へ及ぼす影響について考察している。対象とした入力地震動は地震観測記録であり、坂本ほか（2006）<sup>[6]</sup>によってその応答スペクトルの周期間相関が評価されている。坂本ほか（2006）において得られた周期間相関に関しても、岡野ほか（2010）が指摘した周期 0.1 秒以下で周期間相関の増大傾向がみられている確認されている。

### 4.2.3 建物の時刻歴応答解析に適用するための Conditional Mean Spectrum

米国においては、建物の設計用スペクトルとして一様ハザードスペクトル（Uniform Hazard Spectrum ; UHS）が用いられており、UHS に適合する地震波を入力とした時刻歴応答解析が行われている。UHS は地震ハザード曲線の等確率点を全周期について結んで得られるスペクトルであり、その中には既に各震源による応答スペクトルのばらつきが含まれている。そのため、発生確率が非常に小さい地震動（例えば、50 年非超過確率 2%あるいは 10%の UHS）を対象とする場合には、全周期帯において全体的に大きな振幅を有する UHS が得られることとなる。このように、UHS は実地震動のスペクトルでは無く、低発生確率の UHS は、実地震動に対して保守的な周波数特性になっている可能性が高い。このような背景に対して、Baker (2011)<sup>[7]</sup>は、UHS を建物の時刻歴応答解析に適用すると、建物設計が非常に保守的になることを示唆しており、建物の 1 次固有周期に該当する周期（設計時に最も重要な周期）に着目して、その着目周期では UHS と同等の非超過確率を持ちながら、その他の周期帯では UHS の保守性を解消することが可能な“Conditional Mean Spectra (CMS)”を提案している。Eq. 4.1 に CMS の評価式を示す。

$$\mu_{\ln S_a(T_i) | \ln S_a(T^*)} = \mu_{\ln S_a}(M, X, T_i) + \rho(T_i, T^*)\varepsilon(T^*)\sigma_{\ln S_a}(T_i) \quad \text{Eq. 4.1}$$

CMS は、周期間相関 $\rho(T_i, T^*)$ を考慮することによって、建物応答に最も重要な周期  $T^*$ においては、ターゲットとする非超過確率の地震ハザードとの関連性を保ちながら、その他の周期  $T_i$ については、マグニチュード  $M$ 、震源距離  $X$  の震源のより現実的な地震動応答を設定することができるという点が優れている。すなわち、CMS は、設計上重要となる周期では保守性を確保しつつ、UHS よりも実地震動に近い応答スペクトル特性を表現できるスペクトルと言える。

---

### 4.3 対象敷地の地震ハザードに適合する断層モデル地震波群の地震動特性

対象敷地の解放基盤における最大加速度を地震動強さ指標とした地震ハザードに寄与する震源から作成した断層モデル地震波群に関して、1つの断層モデルから生成される3方向成分の地震波の、水平2方向成分のどちらかが地震ハザードの最大加速度レベルを満たした場合に、その断層による3方向成分の地震波セットを対象敷地の地震ハザードに適合する地震波として抽出した。第2章に前述したとおり、対象敷地の最大加速度を指標とした地震ハザードに適合する断層モデル地震波群は計250波(×3方向成分)抽出されている。

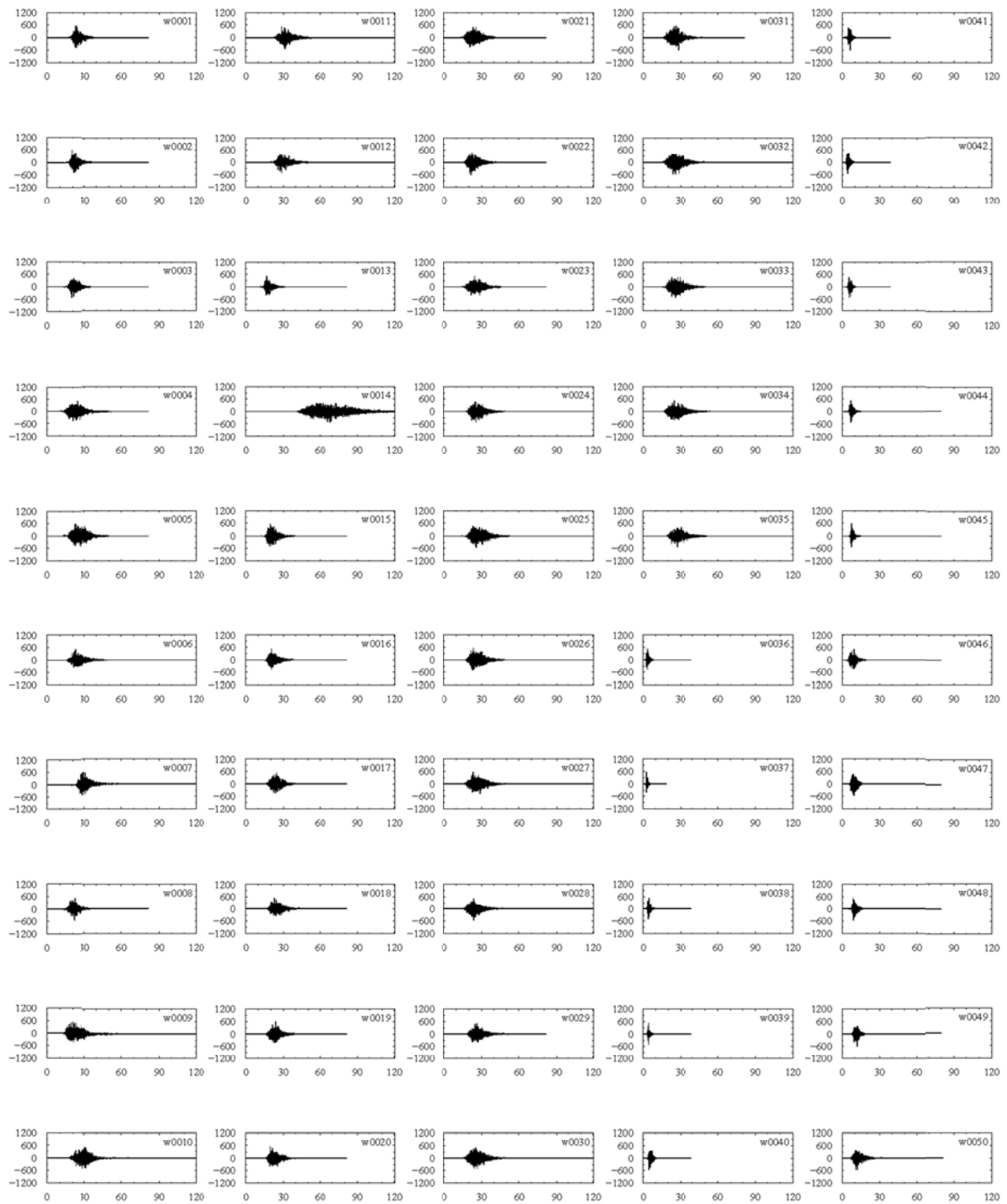
本章では、250個の断層モデルから作成された水平2方向の地震波のうち、強震方向の地震波を用いて地震動特性の統計値を算定した。本項では、各最大加速度レベルにおいて抽出された50波の地震波群の応答スペクトルを求め、その統計値(中央値および自然対数標準偏差)および応答スペクトルの周期間相関を算定した。以下にその概要を示す。

#### 4.3.1 時刻歴波形および応答スペクトル

図4.1(1)～(5)に、解放基盤における最大加速度が $500\sim 1000\text{ cm/s}^2$ となる断層モデル地震波群として各最大加速度レベルに対して50波ずつ抽出された計250波の加速度時刻歴波形を示す。同最大加速度レベルの50波の時刻歴波形を比較すると、最大加速度は同等であるが、経時特性はそれぞれ大きく異なっているのが確認できる。これは、各地震波の震源の違い、すなわち( $M$ ,  $X$ )の組合せの違いによる時刻歴波形の継続時間への影響が表れているためである。50波の中において継続時間が短い地震波は陸域の地震であるが、これは対象敷地に対して震源距離が短く、マグニチュードも比較的小さいためである。それに対して、継続時間が長い地震波は海溝型地震の地震であるが、これは対象敷地に対して震源距離が長く、マグニチュードが比較的大きいためである。

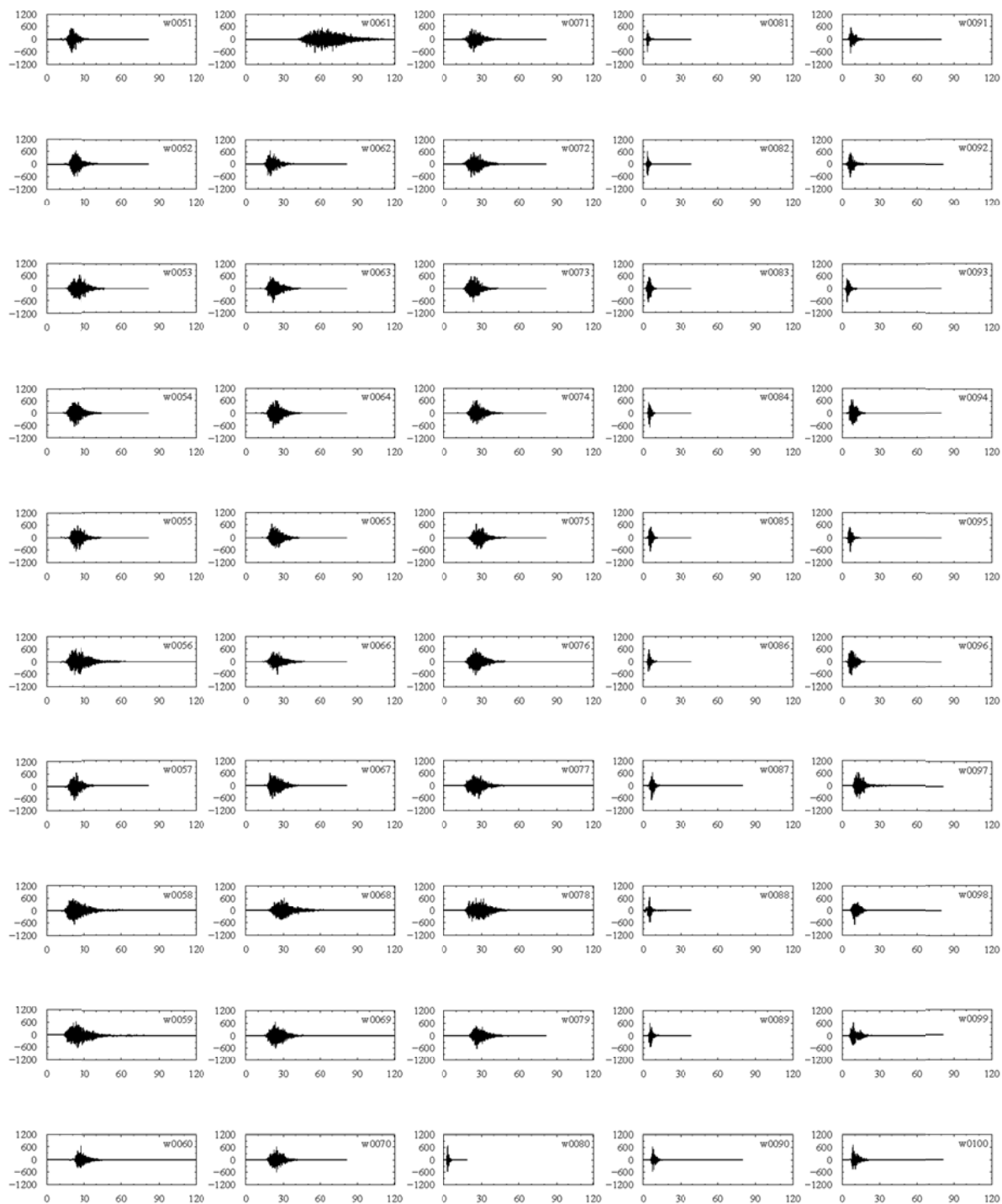
図4.2には、解放基盤において作成した断層モデル地震波群について、最大加速度レベル毎に50波の加速度応答スペクトル( $h=5\%$ )を重ね書いた結果を示す。最大加速度(応答スペクトルにおける0.02秒応答)をハザードの地震動強さ指標として抽出した50波であるため、周期0.02sにおける応答スペクトルのばらつきは $100\text{ cm/s}^2$ の範囲に収まっている。一方、その他の周期では応答スペクトルにばらつきが見られ、これについても震源の違いや震源特性の不確定性による影響が反映されている。





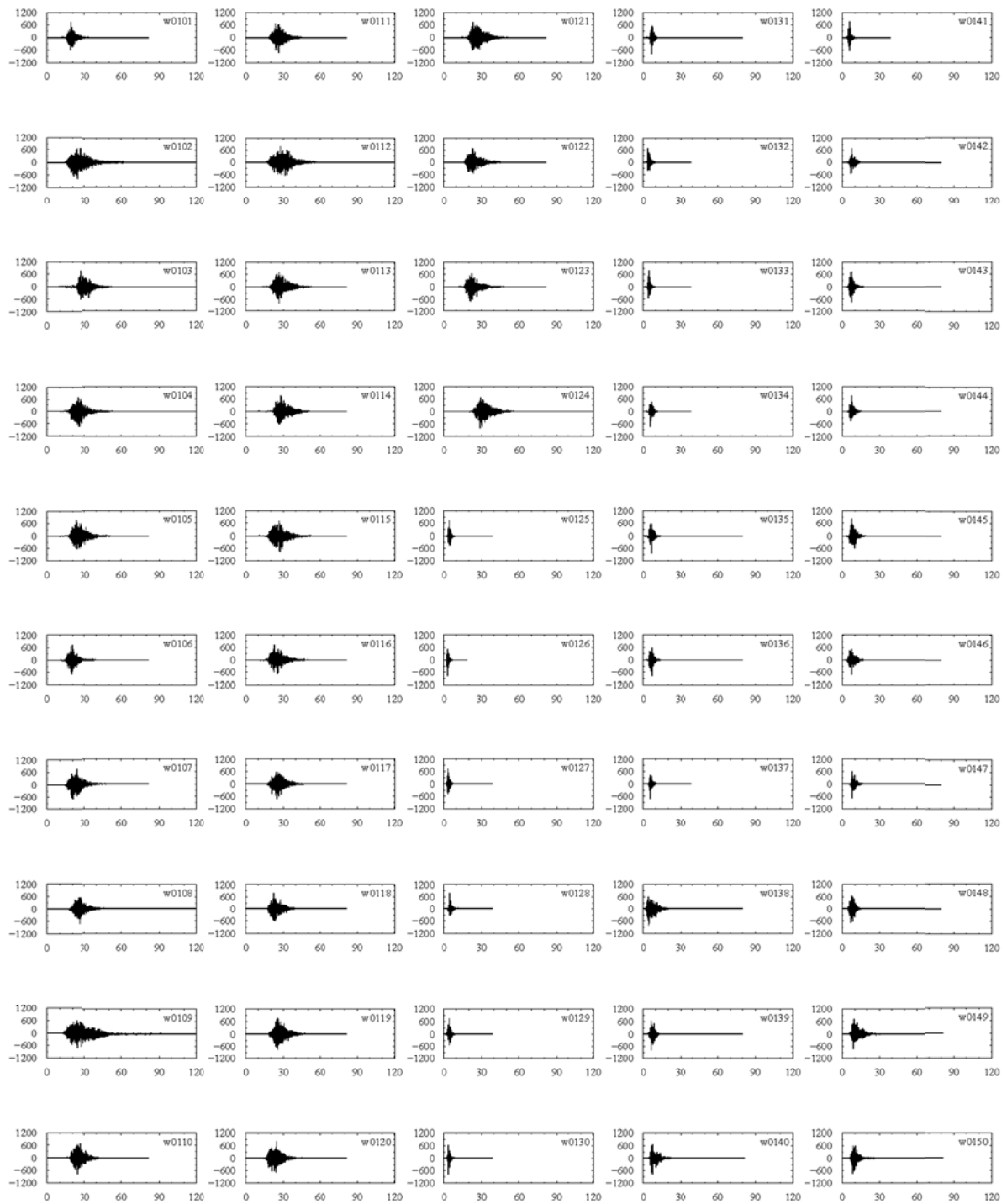
横軸：Time(s)，縦軸：Acceleration( $\text{cm/s}^2$ )

図 4.1 (1) ハザード適合地震波の加速度時刻歴波形（最大加速度レベル：500～600  $\text{cm/s}^2$  の50波）



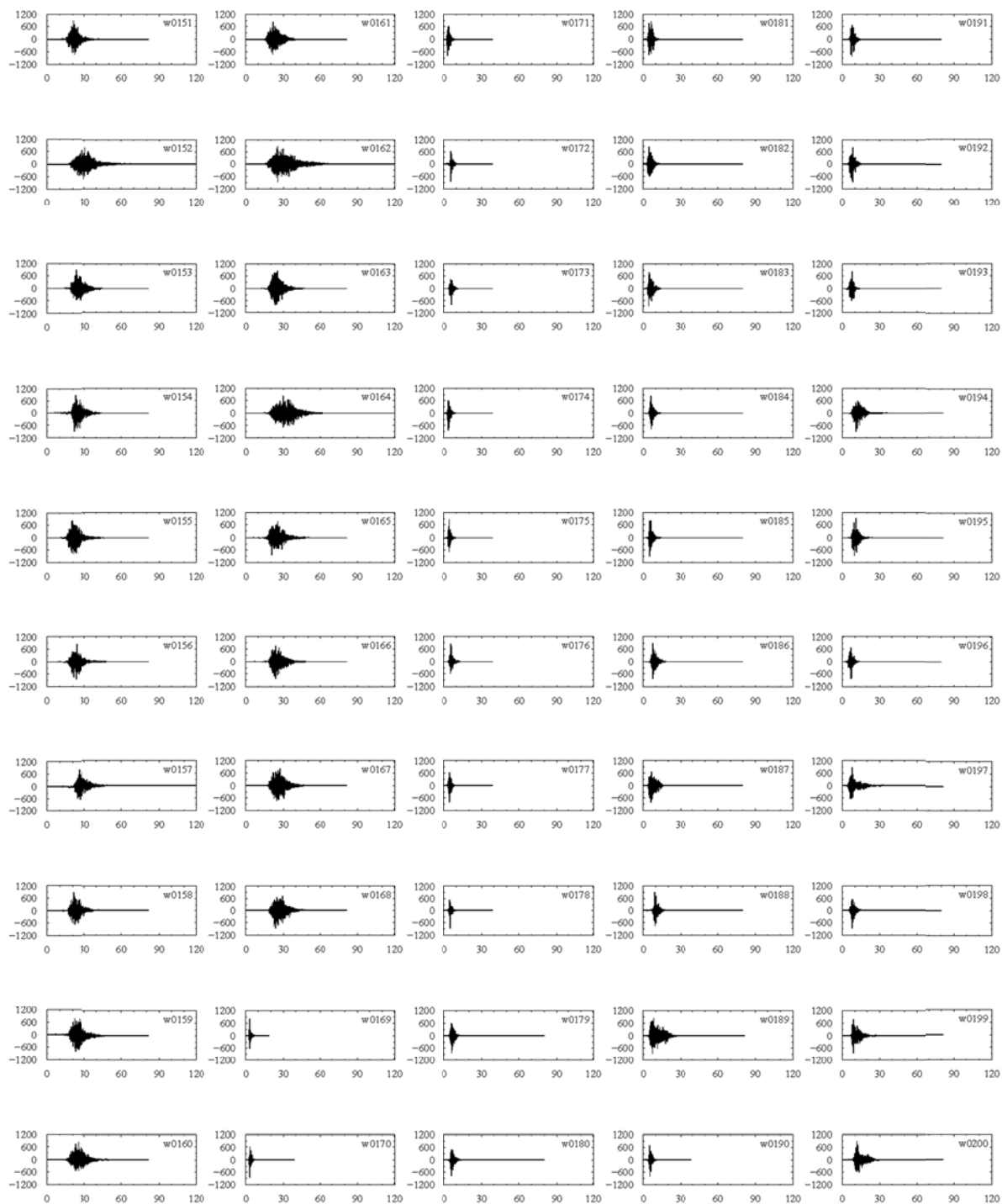
横軸：Time(s), 縦軸：Acceleration(cm/s<sup>2</sup>)

図 4.1 (2) ハザード適合地震波の加速度時刻歴波形（最大加速度レベル：600～700 cm/s<sup>2</sup>の50波）



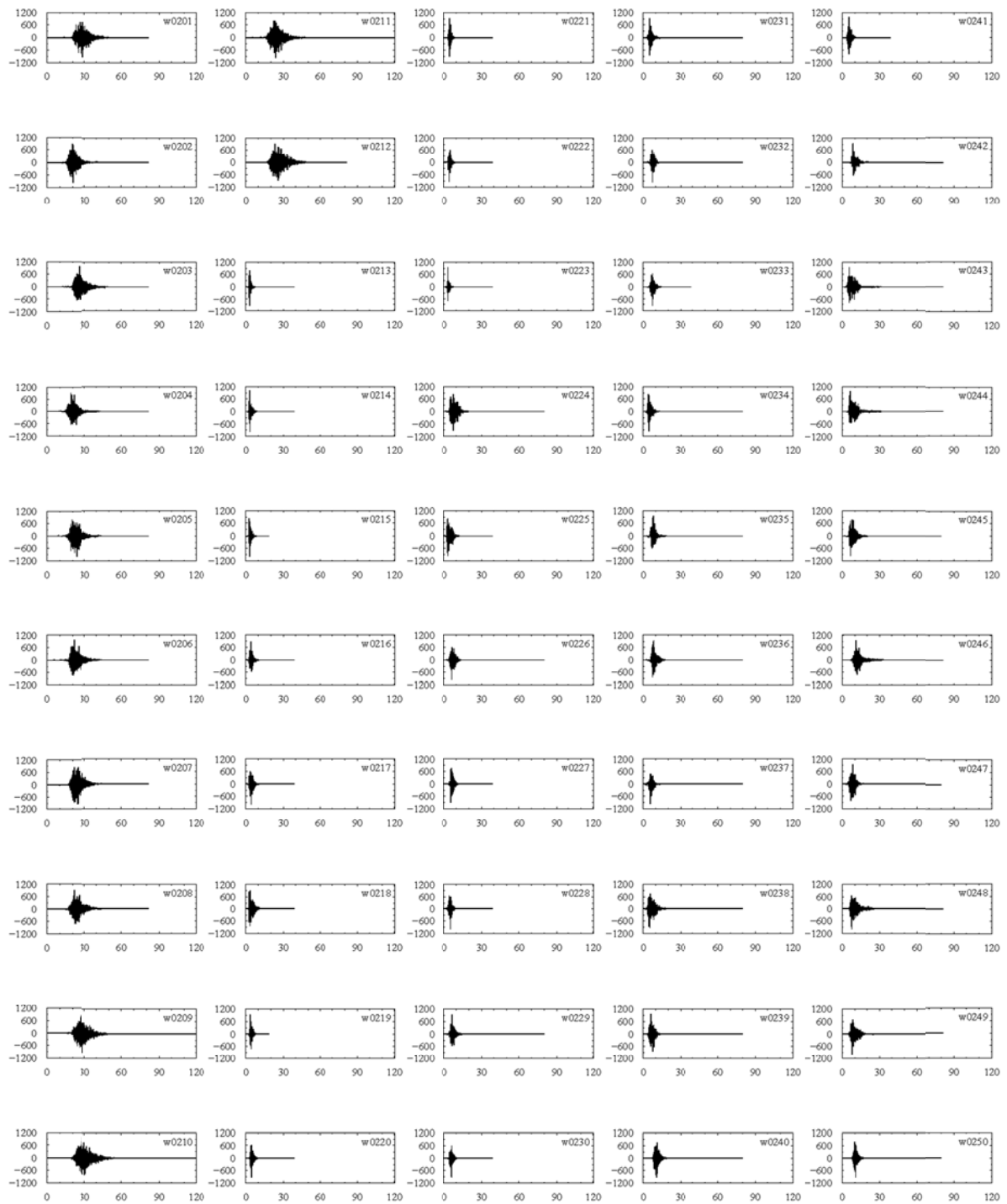
横軸：Time(s), 縦軸：Acceleration(cm/s<sup>2</sup>)

図 4.1 (3) ハザード適合地震波の加速度時刻歴波形（最大加速度レベル：700～800 cm/s<sup>2</sup> の50波）



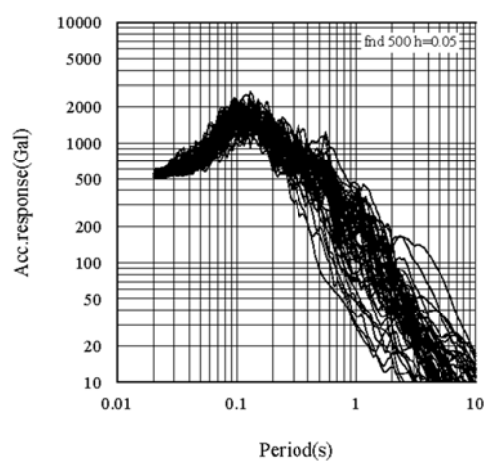
横軸：Time(s), 縦軸：Acceleration(cm/s<sup>2</sup>)

図 4.1 (4) ハザード適合地震波の加速度時刻歴波形（最大加速度レベル：800～900 cm/s<sup>2</sup> の50波）

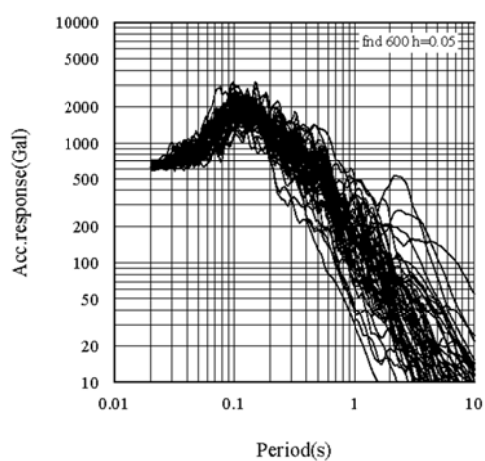


横軸：Time(s), 縦軸：Acceleration(cm/s<sup>2</sup>)

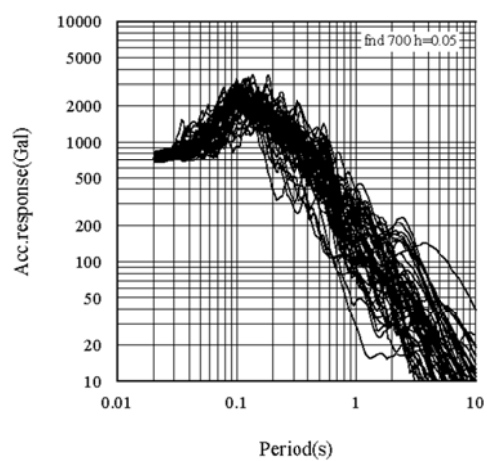
図 4.1 (5) ハザード適合地震波の加速度時刻歴波形（最大加速度レベル：900～1000 cm/s<sup>2</sup> の50波）



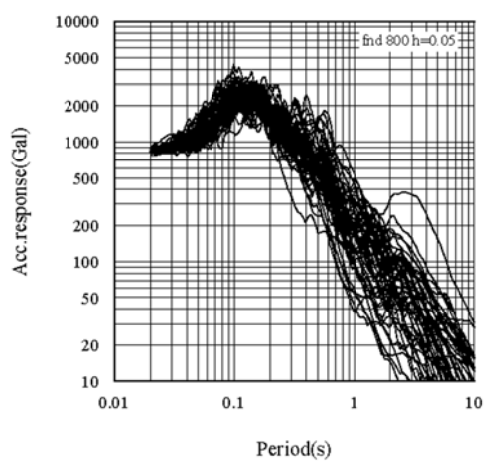
(a) 500~600cm/s<sup>2</sup>



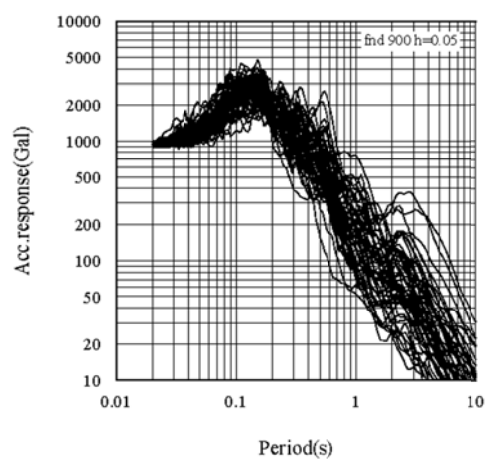
(b) 600~700cm/s<sup>2</sup>



(c) 700~800cm/s<sup>2</sup>



(d) 800~900cm/s<sup>2</sup>



(e) 900~1000cm/s<sup>2</sup>

図 4.2 ハザード適合地震波の応答スペクトル（解放基盤，h=5%）50 波重ね書き

### 4.3.2 応答スペクトルの中央値および自然対数標準偏差

500～1000cm/s<sup>2</sup>の5つの最大加速度レベルからそれぞれ抽出された50波の地震波群について、加速度応答スペクトル $S_a$ の中央値および自然対数標準偏差を算定した。応答スペクトルの中央値 $\lambda_{S_a}$ は、各最大加速度レベルの50波の周期 $T$ における応答加速度 $S_a(T)$ の自然対数 $\ln S_a(T)$ の平均値、自然対数標準偏差 $\zeta_{S_a}$ は、 $\ln S_a(T)$ の標準偏差であり、Eq. 4.2 および Eq. 4.3 として表される。なお、本論文における地震リスク評価では建物および機器類の応答に着目することから、応答スペクトルの算定にあたっては、減衰5%および減衰1%を対象とした。

$$\lambda_{S_a}(T) = \frac{\sum_{i=1}^n \ln S_{a,i}(T)}{n} \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$\zeta_{S_a}(T) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln S_{a,i}(T) - \lambda_{S_a}(T))^2} \quad \text{Eq. 4.3}$$

図 4.3 に解放基盤における減衰1%および5%の応答スペクトルの中央値および対数標準偏差を示す。応答スペクトルの中央値については、最大加速度レベルや減衰の違いに関わらず周期 0.1～0.2s 付近において応答スペクトルのピークがあり、スペクトル形状もほぼ相似形となった。本論文で対象とするハザード適合地震波は、ハザードの分解によって、ハザードへの寄与率の高い震源を対象としており、最大加速度レベルの違いによって寄与率が異なるため、震源構成が異なることによる応答スペクトルの形状の違いが現れる可能性もあったが、今回のハザード適合地震波に関しては、応答スペクトルへの影響はそれほど大きくないことが確認された。また、周期 0.5s 以下の短周期領域では、最大加速度レベルが大きい順に応答スペクトルの中央値が並ぶ傾向となっていることから、周期 0.5s 以下の短周期領域では最大加速度による地震波抽出の影響が表れていることが確認できる。周期 1.0s 以上のやや長周期領域についても、応答スペクトルの中央値は最大加速度レベルが大きい順になる傾向が確認できる。一方、周期 0.5～1.0s の領域では、最大加速度レベルによる中央値の差異はほとんど無く、最大加速度による地震波群の抽出の影響はほとんど確認されなかった。

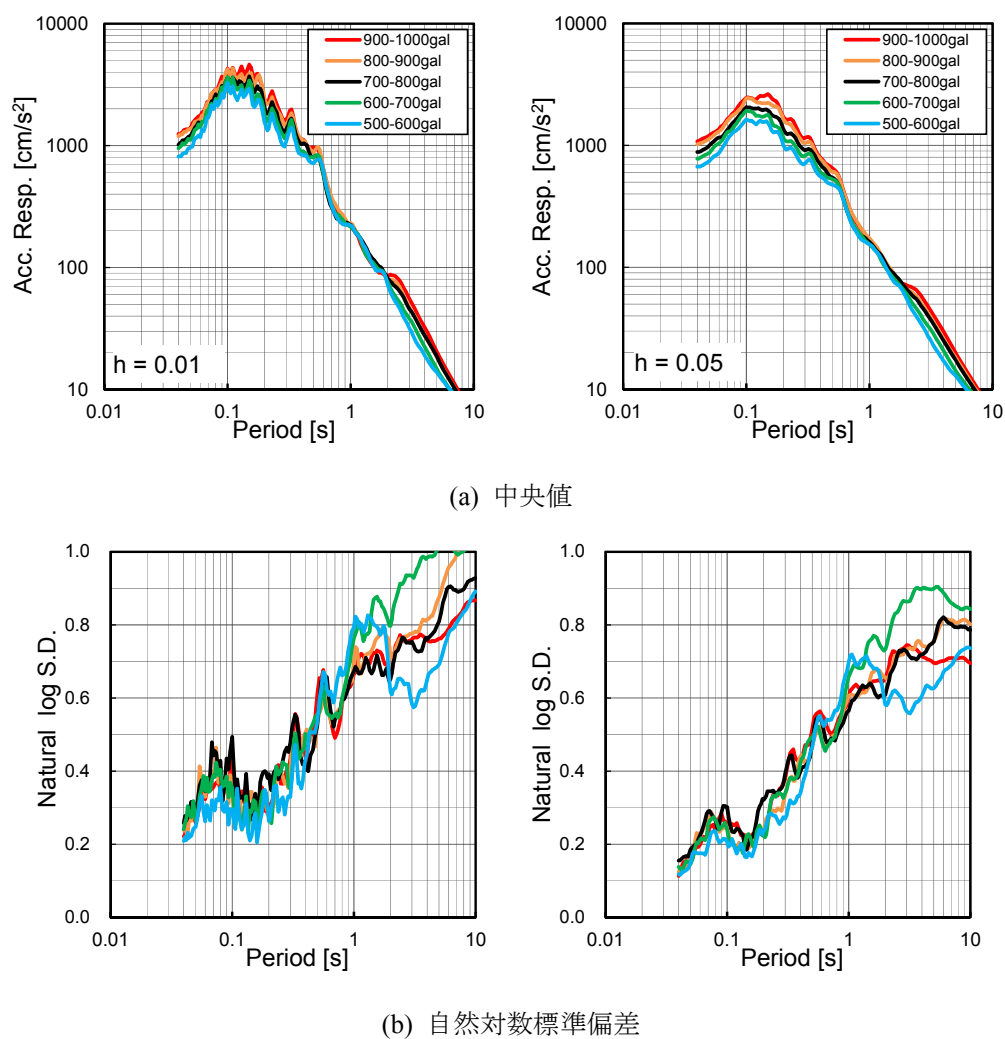
応答スペクトルのばらつきについては、ごく短周期の領域において、減衰1%では自然対数標準偏差が0.2程度、減衰5%では0.1程度と他周期のばらつきと比較して小さい傾向がある。また、長周期の領域においては、対数標準偏差は増加する傾向が見られ、周期1s程度においては、減衰1%では0.7～0.8程度、減衰5%では0.6～0.7程度と、非常にばらつきが大きい傾向がある。

ばらつきが増加する要因のひとつとして、最大加速度によって抽出された50波の地震波群は、マグニチュードが異なる複数の震源を対象として作成された地震波群であり、さらに、長周期領域の地震動強さに影響を及ぼす地震モーメント $M_0$ の不確定性を反映した50波であることが考えられる。

---

また、もう一つの要因としては、ごく短周期の領域では、MCSによって多数作成した地震波群の中から、最大加速度が 100gal 幅の限定的な範囲に収まる地震波群として 50 波を抽出しているため、最大加速度の抽出 ( $100\text{cm/s}^2$  幅) の影響を受けてばらつきが小さくなったと考えられる。一方で、長周期領域において大きなばらつきを示す要因としては、長周期領域では応答スペクトルの中央値が短周期領域と比較して相対的に非常に小さいため、ばらつきの感度が高くなったことが一つの要因として考えられる。応答スペクトルのピークとなる周期 0.1~0.2s においては、対数標準偏差は小さい傾向が確認され、これについても応答スペクトルの平均値が高く、ばらつきの感度が他の周期よりも低いことが要因として考えられる。





(1) 解放基盤,  $h=1\%$

(2) 解放基盤,  $h=5\%$

図 4.3 解放基盤における応答スペクトルの中央値・対数標準偏差

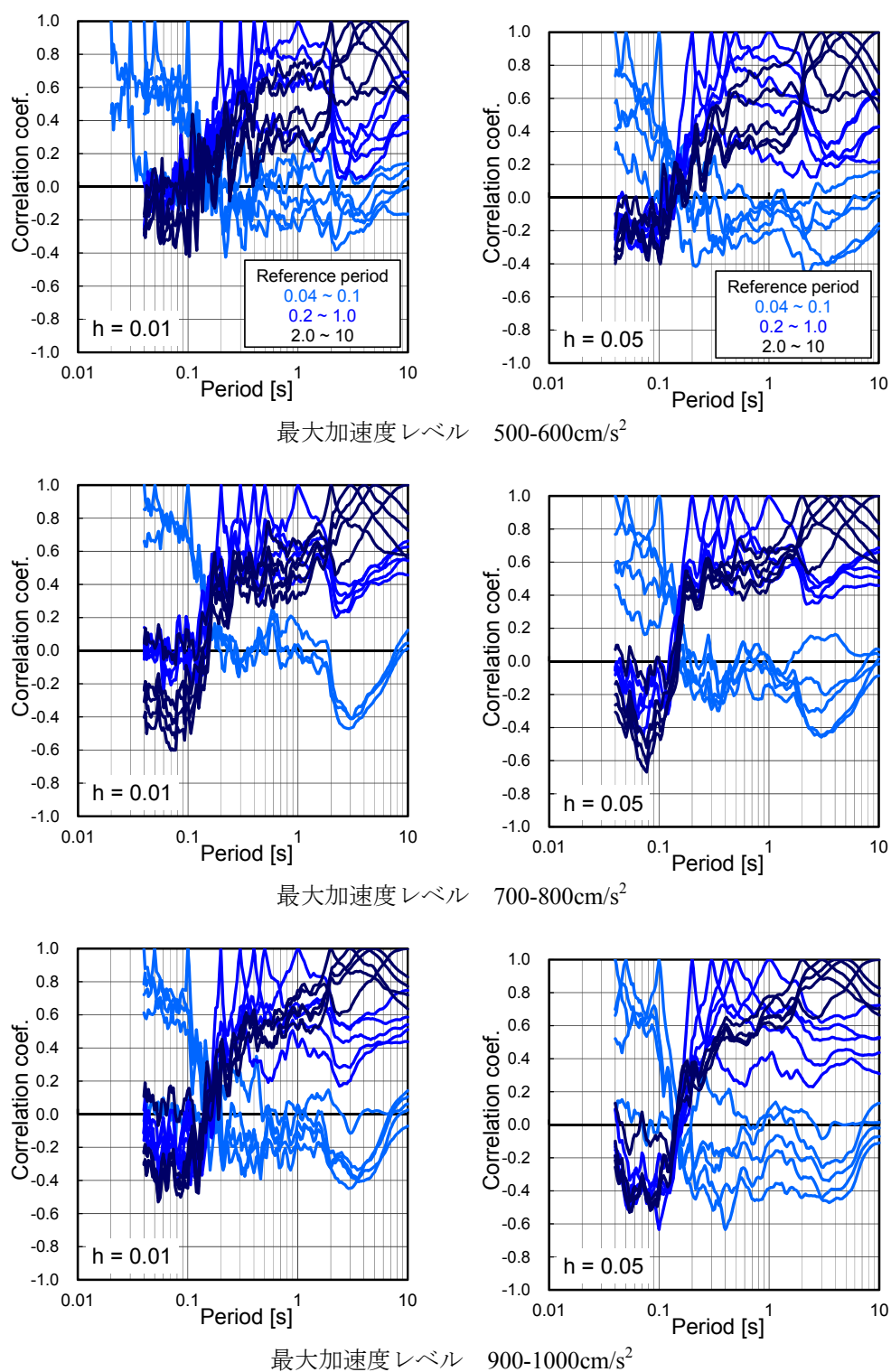
### 4.3.3 応答スペクトルの周期間相関

ある参照周期  $T_{ref}$  に対する任意の周期  $T$  の相関係数  $\rho(T_{ref}, T)$ ，すなわち，応答スペクトルの周期間相関は，確率変数  $X$  を  $\ln S_a(T_{ref})$ ，確率変数  $Y$  を  $\ln S_a(T)$  とすると Eq. 4.4 にて表される。なお，期待値  $E[\{X - \lambda_{S_a}(T_{ref})\}\{Y - \lambda_{S_a}(T)\}]$  は， $X$  と  $Y$  の共分散である。

$$\rho(T_{ref}, T) = \frac{E[\{X - \lambda_{S_a}(T_{ref})\}\{Y - \lambda_{S_a}(T)\}]}{\zeta_{S_a}(T_{ref})\zeta_{S_a}(T)} \quad \text{Eq. 4.4}$$

図 4.4 に，最大加速度レベル  $500\sim 600\text{cm/s}^2$ ， $700\sim 800\text{cm/s}^2$ ， $900\sim 1000\text{cm/s}^2$  の 3 つのレベルを一例として，50 波による応答スペクトルの周期間相関の結果を示す。図は周期  $0.02\sim 7.0\text{s}$  の 15 個の周期を参照周期としたときの周期間相関を示している。周期間相関の算定の対象とする解放基盤における応答スペクトルの減衰は 1% および 5% として算定した。減衰に関わらず，得られた周期間相関は参照周期に近ければ大きく，参照周期から離れるほど小さい傾向が確認された。これは，4.2 節に概説した既往知見とも同様の傾向を示している。一方で，周期  $0.16\text{s}$  付近において，周期間相関が局所的に小さい箇所（ここでは，“相関のくぼみ”と呼ぶ）が確認された。

この  $0.16\text{s}$  付近の周期は，丁度，加速度応答スペクトルのピークとなる周期とも一致している。また，この現象は地盤や震源特性によるものではなく，250 波において周期間相関を取った場合には，この相関のくぼみが見えにくい結果であることから，地震波群を最大加速度によって抽出した影響が含まれていると考えられる。



(c) 周期間相関

(1) 解放基盤,  $h=1\%$

(2) 解放基盤,  $h=5\%$

図 4.4 応答スペクトルの周期間相関（解放基盤）

#### 4.3.4 地震動の継続時間

各最大加速度レベルの 50 波について、継続時間を算定した。継続時間の算定は、加速度振幅が最大値の 5%を初めて超える時刻から最大値の 10%を最後に下回る時刻間として算定した。

全最大加速度範囲 500～1000cm/s<sup>2</sup> の 250 波による継続時間の中央値は 13.3s であり、最大加速度レベル毎に最大加速度レベルが大きい程、継続時間が短い傾向があることが確認できる。これは、第 2 章に記述したように、対象敷地の地震ハザードに寄与する各震源の寄与率が異なるためであり、最大加速度レベルが大きい 50 波は、震源距離の短くマグニチュードの小さい陸域の地震が最も寄与率が大きいものに対して、最大加速度レベルが小さい 50 波は、比較的震源距離が長くマグニチュードの大きい太平洋プレートの地震や南関東の地震の寄与率が大きくなるためである。4.3.2 項の応答スペクトルの比較では震源の違いの影響はほとんど見られなかったが、継続時間については震源特性の違いが影響する結果が確認された。

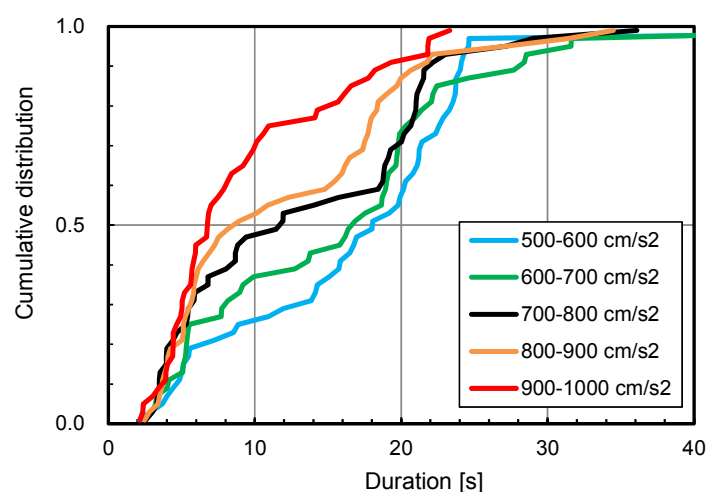


図 4.5 地震波群の継続時間

表 4.1 継続時間の平均値・最大値・最小値

加速度 レベル	500-1000 cm/s <sup>2</sup>	500-600 cm/s <sup>2</sup>	600-700 cm/s <sup>2</sup>	700-800 cm/s <sup>2</sup>	800-900 cm/s <sup>2</sup>	900-1000 cm/s <sup>2</sup>
継続時間 (秒)						
平均値	13.3	16.9	15.6	13.1	11.8	9.0
最大値	65.2	65.2	54.6	36.1	34.5	23.3
最小値	2.12	2.12	2.49	2.57	2.49	2.16

## 4.4 模擬地震波セットの作成

### 4.4.1 地震波ケース

断層モデル地震波群との比較用として、応答スペクトルのばらつきや周期間相関の条件を変えた 3 つの模擬地震波セットを作成した。表 4.2 に地震波ケースを示す。Case(r)は、最大加速度レベルにおいて抽出した断層モデル地震波群そのものである。Case(n)～Case(c)は、スペクトル適合模擬地震波群であり、応答スペクトルの中央値は Case(r)と同等であるが、応答スペクトルのばらつきや周期間相関の扱い方が異なるケースである。

Case(n)は、応答スペクトルのばらつきを考慮せずに、Case(r)の応答スペクトルの中央値に適合するように乱数を変えて作成した 50 波である。従来のスペクトル適合地震波による地震リスク評価において、あるスペクトルに適合し、位相の違いのみを考慮した地震波群を模擬したケースである。

Case(p)は、応答スペクトルのばらつきは Case(r)と同じとし、応答スペクトルの周期間相関を完全相関(相関係数=1.0)としたケースである。従来のスペクトル適合地震波による地震リスク評価において、あるスペクトルに適合し、ばらつきは考慮するものの周期間相関は完全相関とした地震波群を模擬したケースである。

Case(r)と Case(n)および Case(p)の比較により、断層破壊や地震動伝播特性の物理モデルを考慮できる断層モデル地震波群の、従来のスペクトル適合地震波群に対する優位性と断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価の有効性を確認する。

Case(c)は、応答スペクトルのばらつきは Case(r)と同じとし、応答スペクトルの周期間相関を Case(r)の周期間相関をモデル化したものを適用したケースであり、Case(r)と同等の結果が得られることを確認し、Case(n)および Case(p)の結果が応答スペクトルのばらつきと周期間相関によることを示す。

Case(r)と Case(n)の比較により、応答スペクトルのばらつきによる機器・配管システムの損傷確率への影響を確認し、Case(r)と Case(p)の比較により、応答スペクトルの周期間相関による機器・配管システムの損傷確率への影響を確認する。また、応答スペクトルのばらつきと周期間相関を Case(r)と同等の条件とした Case(c)が Case(r)と同等の結果が得られることにより、各ケースのシステム損傷確率の結果の違いが、地震波群の応答スペクトルのばらつきや周期間相関によることが確認できる。

表 4.2 地震波ケース

ケース	応答スペクトルの条件		
	中央値	ばらつき	周期間相関
Case (r)		ハザード適合地震波	
Case (n)	Case(r)の応答スペクトルの中央値と同じ	ばらつき無し	
Case (p)		Case(r)と同じ	完全相関（相関係数=1.0）
Case (c)		Case(r)と同じ	Case(r)の周期間相関をモデル化

#### 4.4.2 応答スペクトルのばらつきおよび周期間相関を考慮した応答スペクトル群の作成

Case(c)の模擬地震波群の作成では、Case(r)の周期間相関の傾向を簡易的に表した図 4.6 の周期間相関モデルを用いて、下記に示す手法<sup>[8]</sup>により、周期間相関を考慮した 50 波分の応答スペクトルを作成した。

図 4.6 でモデル化した周期間相関を考慮した応答スペクトルの、 $i$  番目の周期 ( $i = 1 \sim n$ ) における 50 波の応答値  $R_i$  が対数正規分布に従うと仮定すると、 $R_i$  は、50 波による応答の中央値（対数平均） $\mu_i$  と常用対数標準偏差  $\sigma_i$  を用いて Eq. 4.5 のように表される。

$$\log_{10} R_i = \mu_i + \sigma_i \cdot \gamma_i \quad \text{Eq. 4.5}$$

ここに、 $\gamma_i$  は、図 4.6 でモデル化した相関を有する標準正規分布で、Eq. 4.6 にて表される。

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n \sqrt{\lambda_j} \cdot v_{j,i} \cdot \xi_j \quad \text{Eq. 4.6}$$

ここで、 $\lambda_j$  は図 4.6 でモデル化した相関行列の固有値、 $v_{j,i}$  は相関行列の固有ベクトル、 $\xi_j$  は独立な標準正規分布、である。すなわち、乱数を用いて  $\xi_j$  を  $n$  個生成し、Eq. 4.6 から  $i$  番目の周期における  $\gamma_i$  を算定し、Eq. 4.5 から  $X_i$  を算定する。それを 50 回適用することにより、周期間相関を反映した 50 個の応答スペクトルを作成することができる。Case(p)の場合には、周期間相関のモデルを完全相関（相関係数=1.0）として、同様に 50 個の応答スペクトルを作成した。

模擬波作成の際には、これらの 50 個の応答スペクトルを目標スペクトルとして、スペクトル適合地震波を作成した。

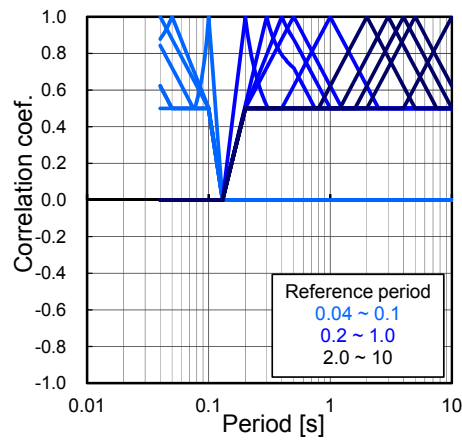


図 4.6 Case(c)に適用した周期間相関モデル

## 4.4.3 スペクトル適合地震波の作成

模擬地震波の作成に際しては、建物応答および機器応答の算定に適用することから、1%および5%の2価の減衰定数に適合（2価フィット）するような地震波群を作成した。また、包絡関数には図4.7のJennings型を用い、継続時間 $t_d$ はCase(r)の中央値を鑑みて一律10秒とした。包絡関数の $t_b$ および $t_c$ は、それぞれ1.2sおよび5.0sとした。

Jennings型の包絡関数は、

立ち上がり部	:	$e(t) = (t/t_b)^2$
強震部	:	$e(t) = 1.0$
減衰部	:	$e(t) = \exp\{\alpha(t - t_c)\}$

で表される。ただし、

$$\alpha = \ln 10 / (t_d - t_c)$$

である。すなわち、 $t_d$ (s)時の包絡関数は0.1となる。

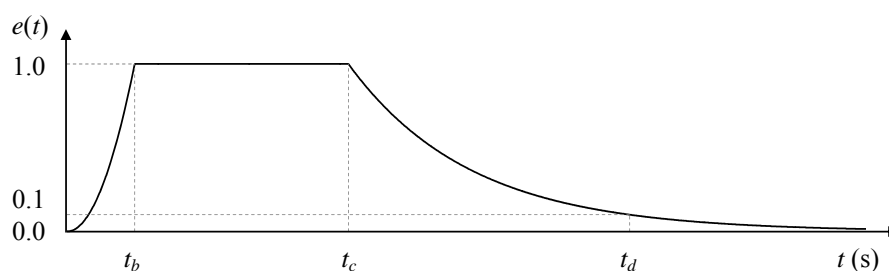


図 4.7 模擬地震波作成で用いた Jennings 型の包絡関数

---

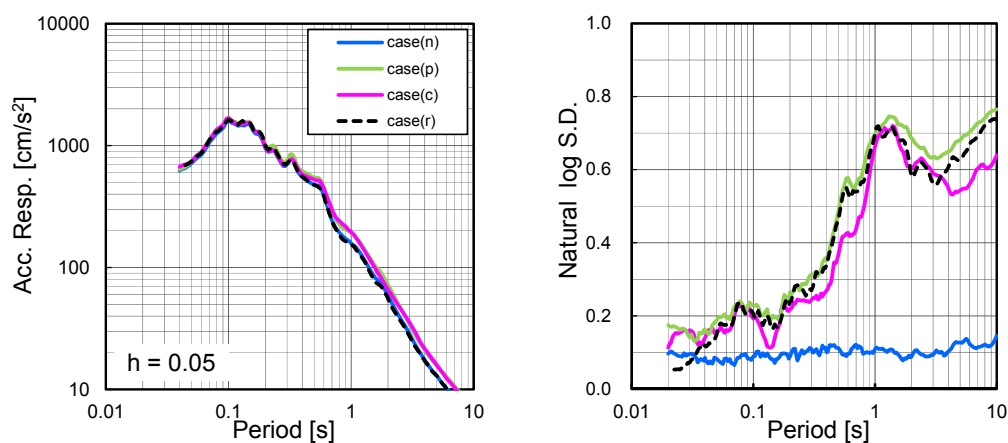
#### 4.4.4 解放基盤における模擬地震波

Case(n)～Case(c)の模擬地震波について、Case(r)の応答スペクトルの中央値および自然対数標準偏差に対して比較した結果を図 4.8 および図 4.9 に示す。

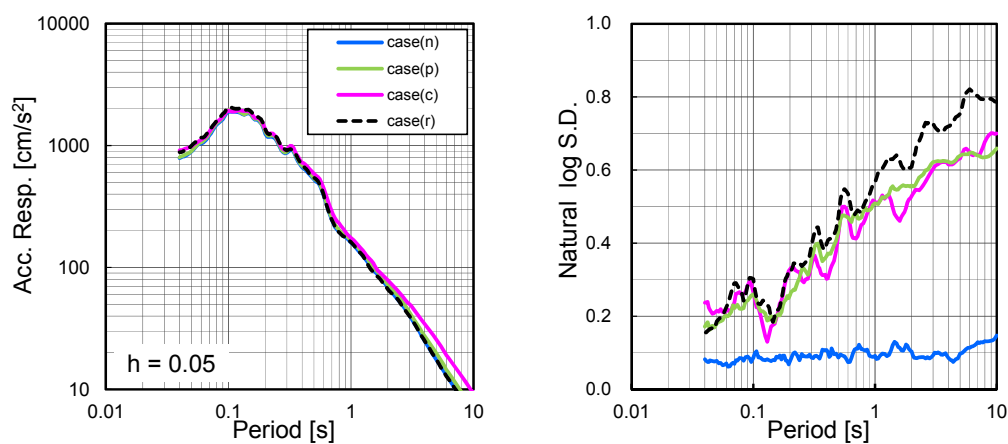
応答スペクトルの中央値は、周期がやや長い範囲ではやや Case(c)が大きくなってしまったが、概ねどのケースも Case(r)の応答スペクトルの中央値は再現できているのが確認できる。また、応答スペクトルの自然対数標準偏差に関しては、Case(p)および Case(c)では、Case(r)に対する対数標準偏差の適合度は周期によって若干の違いは見られるものの、概ね Case(r)のばらつきを再現できている。応答スペクトルのばらつきを考慮していない Case(n)については、自然対数標準偏差で 0.1 程度が残っているが、これは模擬地震波作成における誤差によるものである。

また、Case(c)で再現された模擬地震波による周期間相関の結果を図 4.10 に示す。概ねどの最大加速度レベルにおいても、モデル化した周期間相関を再現できていることが確認できる。

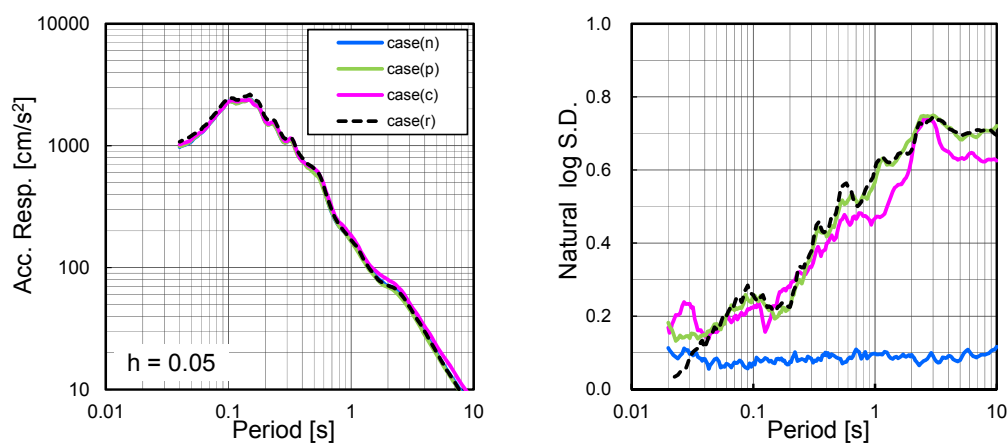




(1) 中央値 (500-600cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ ) (2) 自然対数標準偏差 (500-600cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ )

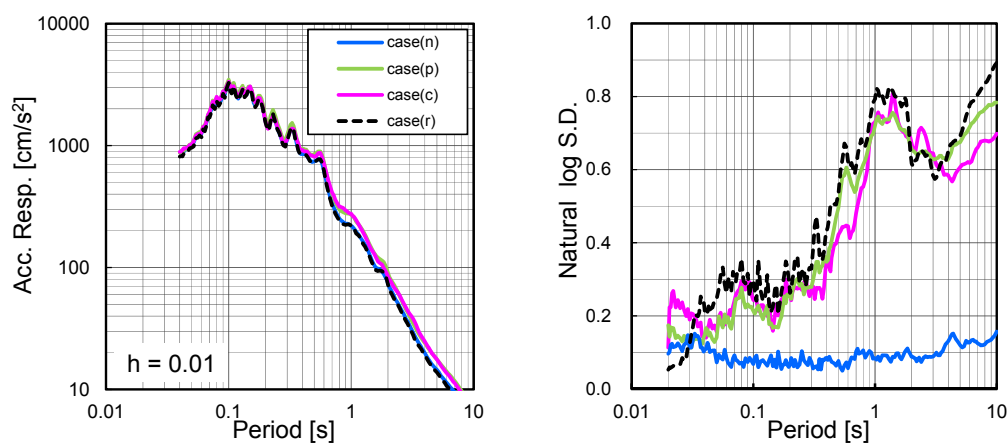


(3) 中央値 (700-800cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ ) (4) 自然対数標準偏差 (700-800cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ )

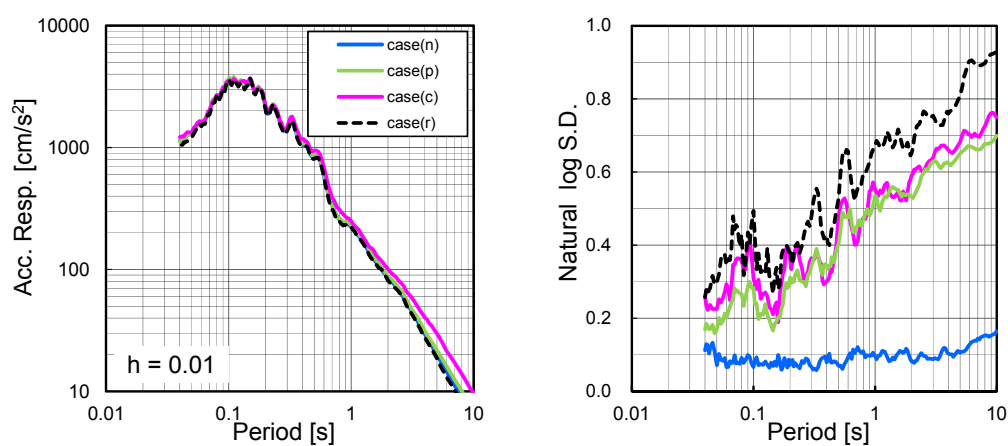


(5) 中央値 (900-1000cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ ) (6) 自然対数標準偏差 (900-1000cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ )

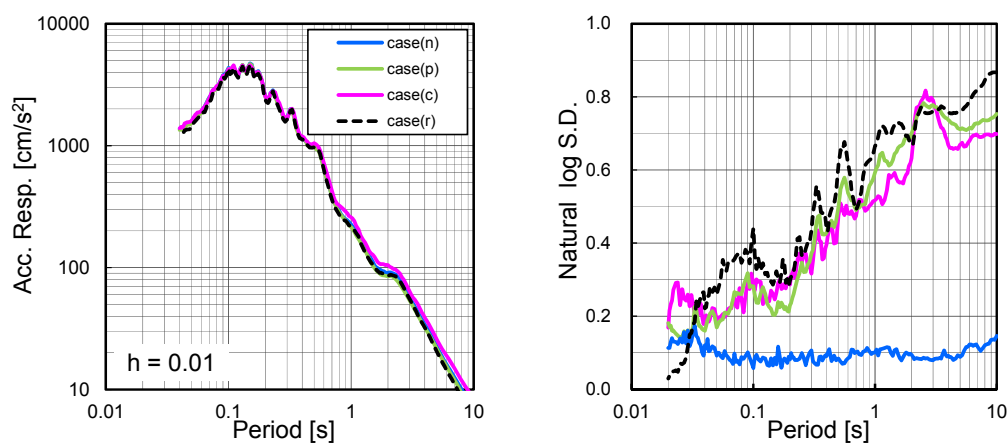
図 4.8 模擬地震波の応答スペクトルの中央値・対数標準偏差 (解放基盤,  $h=0.05$ )



(1) 中央値 (500-600cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )      (2) 自然対数標準偏差 (500-600cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )

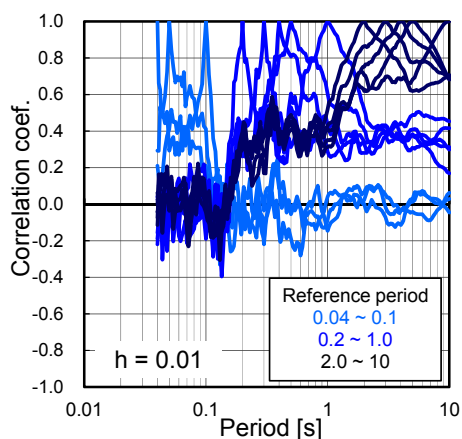


(3) 中央値 (700-800cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )      (4) 自然対数標準偏差 (700-800cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )

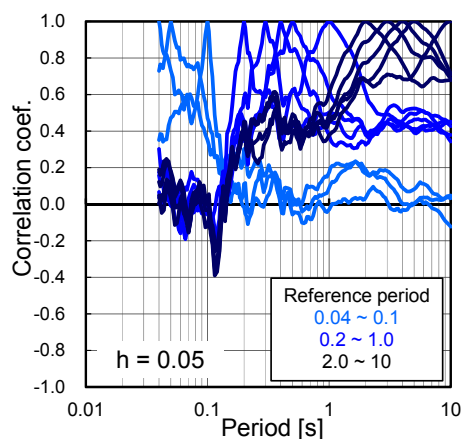


(5) 中央値 (900-1000cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )      (6) 自然対数標準偏差 (900-1000cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )

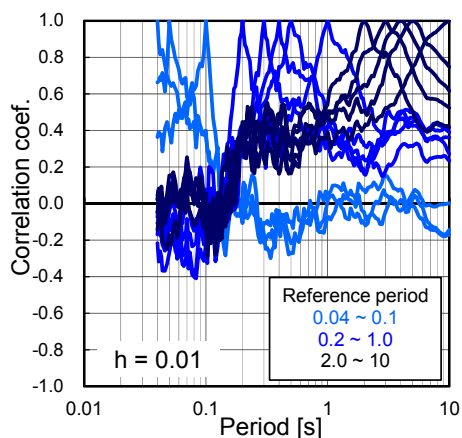
図 4.9 模擬地震波の応答スペクトルの中央値・対数標準偏差 (解放基盤,  $h=0.01$ )



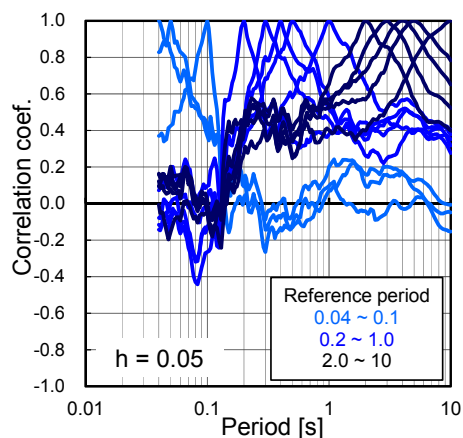
(1) 相関 (500-600cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )



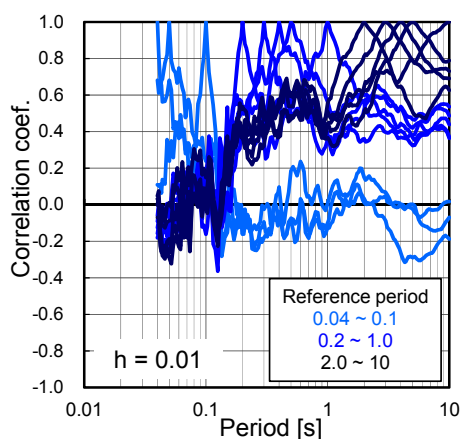
(2) 相関 (500-600cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ )



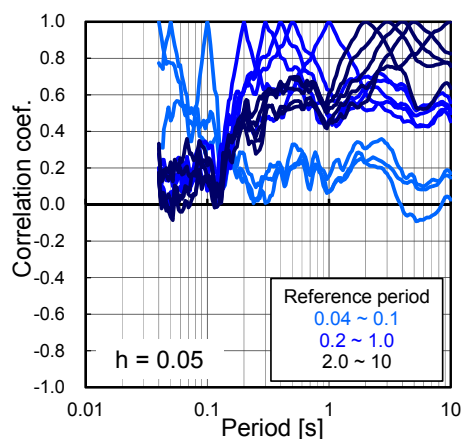
(3) 相関 (700-800cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )



(4) 相関 (700-800cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ )



(5) 相関 (900-1000cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )



(6) 相関 (900-1000cm/s<sup>2</sup>,  $h=5\%$ )

図 4.10 Case(c)で再現された解放基盤における応答スペクトルの周期間相関

## 4.5 基礎底面における入力地震動評価

### 4.5.1 地盤解析

解放基盤上で作成した Case(r)～Case(p)の地震波群を，建物基礎底面への入力とするために，解放基盤から基礎底面までの地盤特性を用いて，解放基盤面において評価した断層モデル地震波群（3 方向成分）を用いて，基礎底面への入力地震動を評価した。

対象敷地の地盤特性および地盤解析の条件は，第 3 章と同じ設定とした。図 4.11 に建物モデルの設置状況および表 4.3 に敷地の解放基盤から地表面までの地盤特性を再掲する。

第 2 章において，解放基盤における最大加速度を指標とした地震ハザードに適合する地震波群として， $500\sim1000\text{cm/s}^2$ の範囲で抽出された解放基盤面における地震波群 250 波（ $\times 3$  方向成分）について，第 3 章と同様に等価線形解析を行い，基礎底面の入力地震波群を評価した。図 4.12 に各最大加速度レベルの 50 波の断層モデル地震波群による地盤増幅率の結果を示す。加速度レベルによる地盤増幅率の差異は確認されず，概ねどのレベルでも周期 1～2 秒付近で 2 倍強の地盤増幅率を示した。

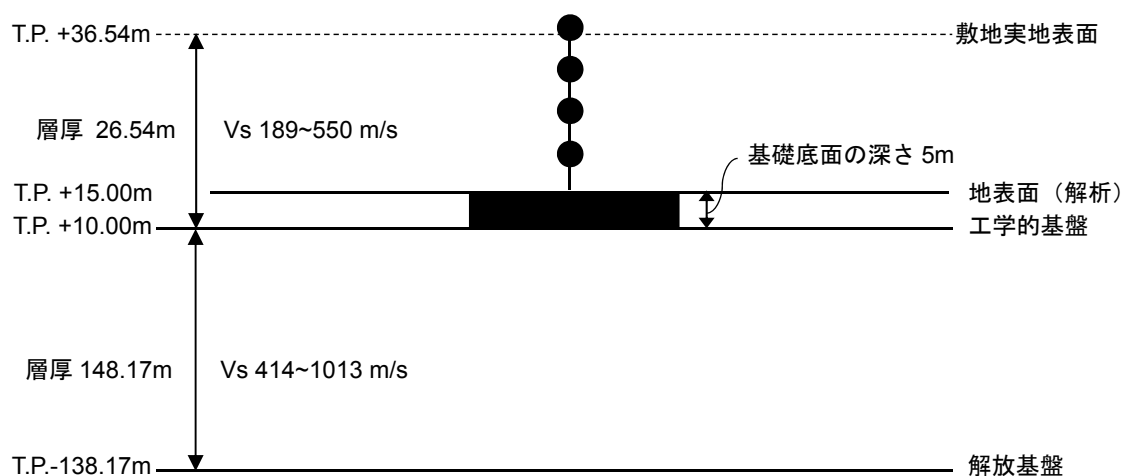
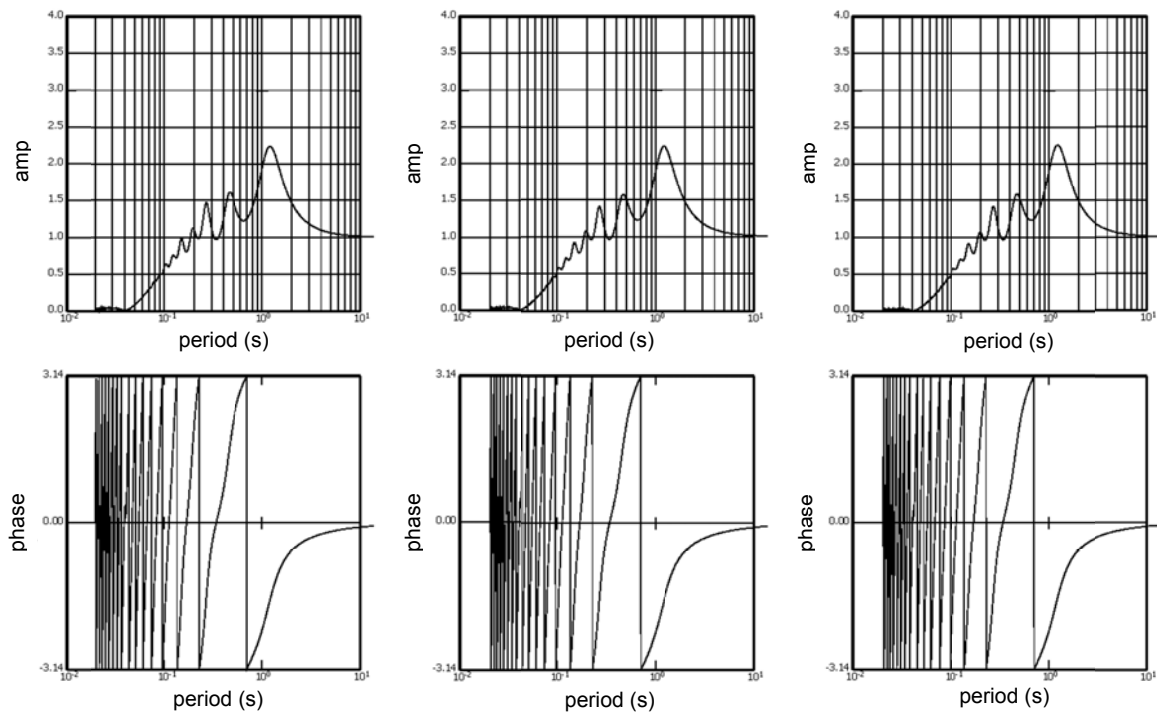


図 4.11 建物モデル設置状況（再掲）

表 4.3 敷地の解放基盤から敷地実地表面までの地盤特性（No.5～No.7 を再掲）

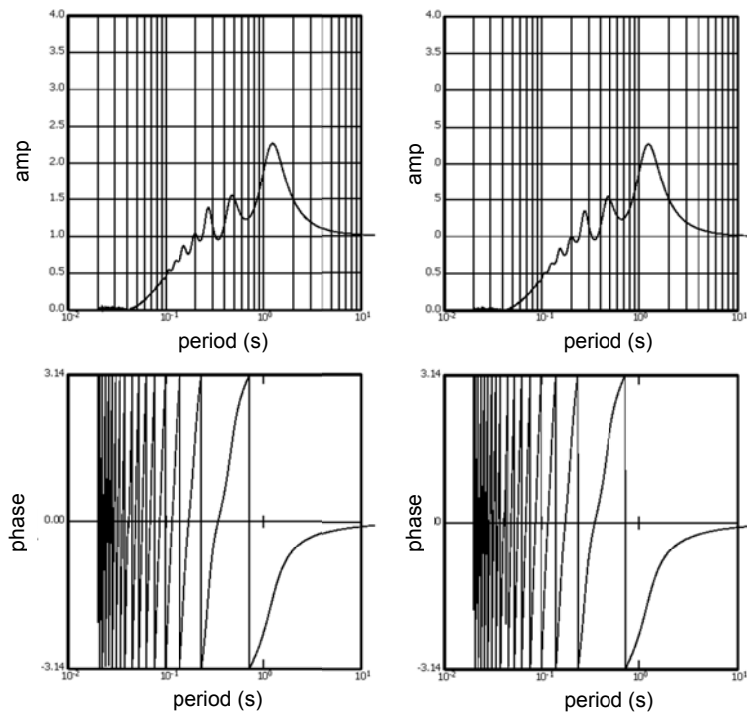
No.	地層名	層厚 $H$ [m]	単位体積重量 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	せん断波速度 $V_s$ [m/s]	せん断弾性係数 $G_0$ [ $\times 10^3$ kN/m <sup>2</sup> ]	ポアソン比 $\nu$	減衰定数 $h$ [%]	備考
5	石崎層	64.91	18.2~18.4	414~429	318~345	0.47	0.46~0.74	基礎底面
6	久米層	83.78	17.8	505~618	463~694	0.43~0.45	2.04	
7	多賀層	15	19.3	1013	2020	0.39	2.04	解放基盤



(a) 500-600  $\text{cm/s}^2$

(b) 600-700  $\text{cm/s}^2$

(c) 700-800  $\text{cm/s}^2$



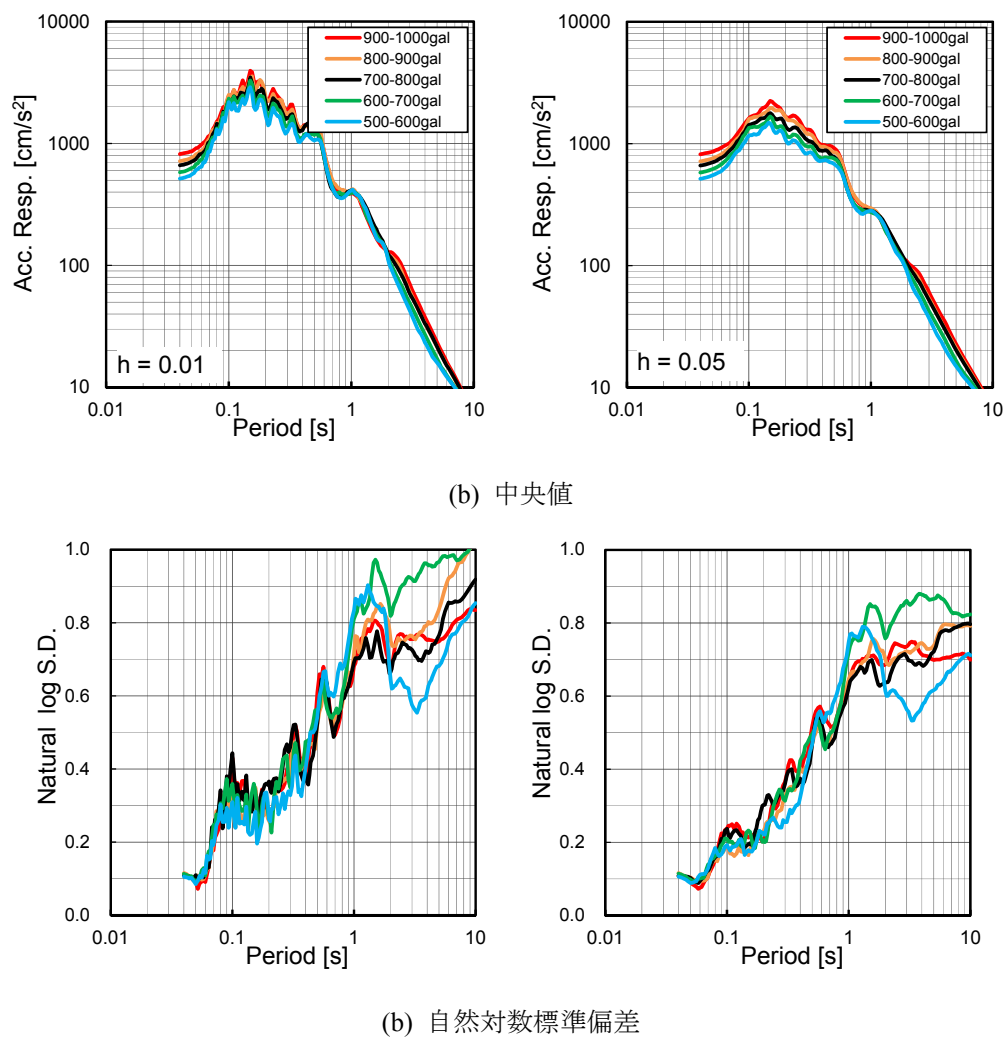
(d) 800-900  $\text{cm/s}^2$

(e) 900-1000  $\text{cm/s}^2$

図 4.12 各最大加速度レベルの 50 波の地盤増幅率

#### 4.5.2 基礎底面における入力地震波の統計値

前述の地盤解析により建物基礎底面における入力地震波を算定した。図 4.13 に各最大加速度レベルの 50 波の応答スペクトルの中央値および自然対数標準偏差，周期間相関の結果を示す。各最大加速度レベルの地震波群の応答スペクトル統計値への地盤による特異な影響は確認されなかった。



(1) 基礎底面,  $h=1\%$

(2) 基礎底面,  $h=5\%$

図 4.13 基礎底面における加速度応答スペクトルの中央値・対数標準偏差・周期間相関

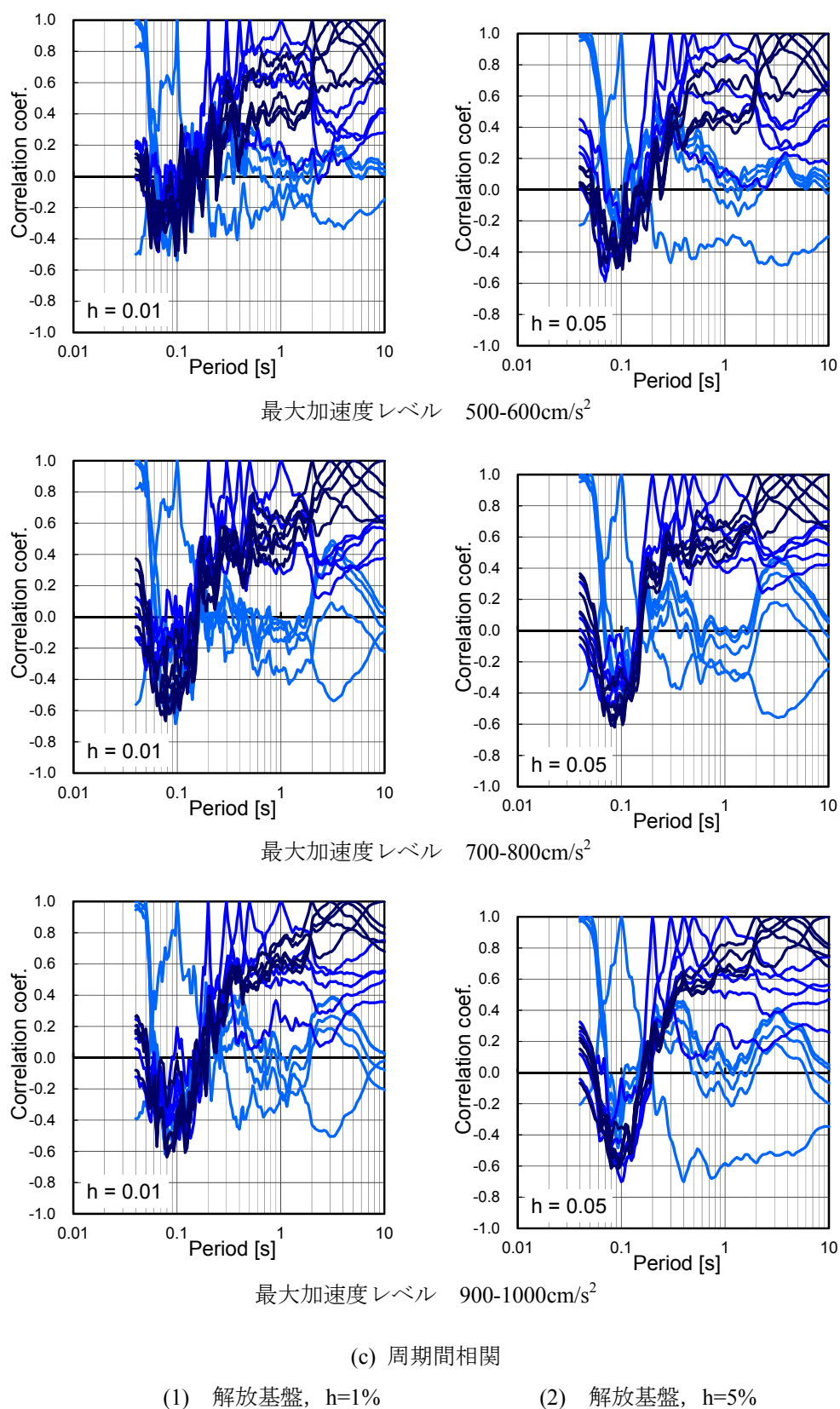


図 4.13 基礎底面における加速度応答スペクトルの中央値・対数標準偏差・周期間相関（続き）

---

## 4.6 建物の時刻歴応答解析

### 4.6.1 建物モデル

本章における建物モデルに関しても、第 3 章と同じ多質点非線形せん断モデルとし、基礎底面上で評価した 250 波の断層モデル地震波群を入力とした時刻歴応答解析を行った。なお、解析結果に関しては、各最大加速度レベルの 50 波毎に整理した。

### 4.6.2 建物最大応答結果

図 4.14 に、各ケースに関して、各最大加速度レベルによる建物の最大塑性率（各層のうち最も塑性率の大きい値）の累積分布を示す。また、図 4.15 に Case(r)～Case(c)の各ケースによる各階の建物最大変形を示す。塑性率に関しては、各層復元力特性の第 2 折点における変形に対する各層の最大層間変形の比として算定した。Case(r)については、最大加速度レベルが  $500\sim600\text{ cm/s}^2$  の 50 波のうち 75%程度の地震波によっていずれかの層が降伏する状態となっている。また、最大加速度レベルが  $900\sim1000\text{ cm/s}^2$  の 50 波では、ほとんどの地震波によっていずれかの層が降伏している状態となっている。最大塑性率については最大 6 程度を示しており、最大加速度が  $500\sim1000\text{ cm/s}^2$  となる 250 波の地震波群による建物応答は非常に大きくなる傾向がある。これは、地震リスク評価用として作成された非常に大きな地震動の地震波群を対象としているためであり、このような非常に大きな塑性率を生じる建物応答の評価に対する質点系モデルの適用性については別途議論する余地があると考えられる。しかしながら、FEM などの質点系モデル以外の建物解析モデルについても、大入力による建物挙動評価の妥当性については課題点が残存していると考えられるため、ここでは質点系モデルでの検討とした。

また、図 4.16 には、Case(r)～Case(c)について、最大加速度レベルが  $700\sim800\text{ cm/s}^2$  の 50 波による 1 階床および R 階床の周波数応答の累積分布を示す。各階の各周波数応答の中央値は、おおよそ各地震波ケースで同等の値を示している。



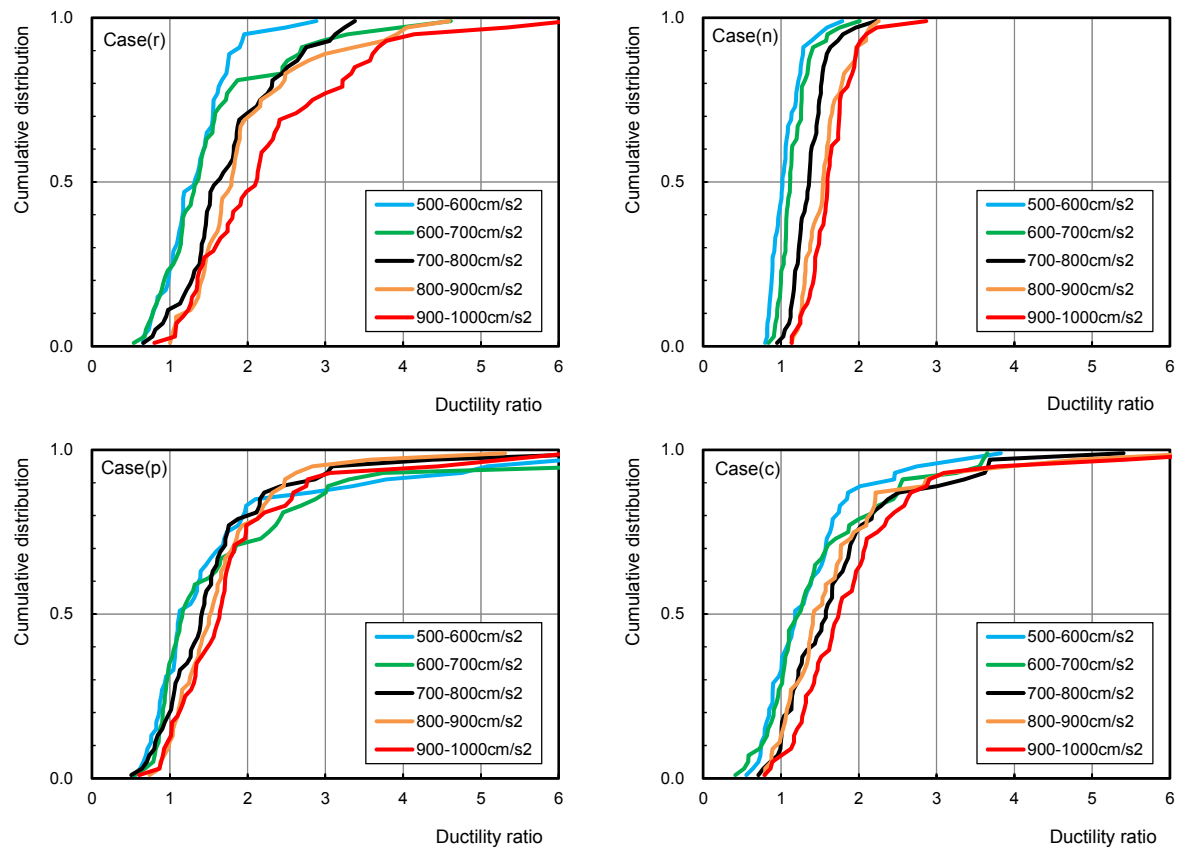


図 4.14 各ケースの建物最大塑性率の累積分布

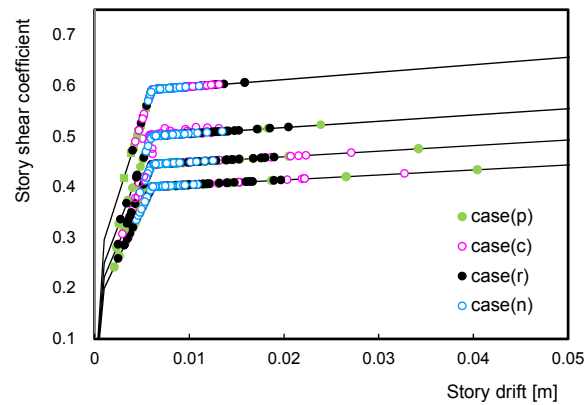
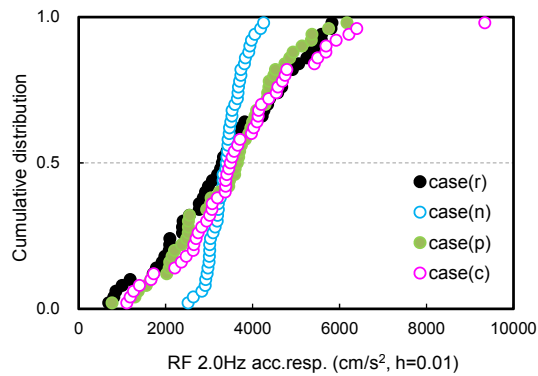
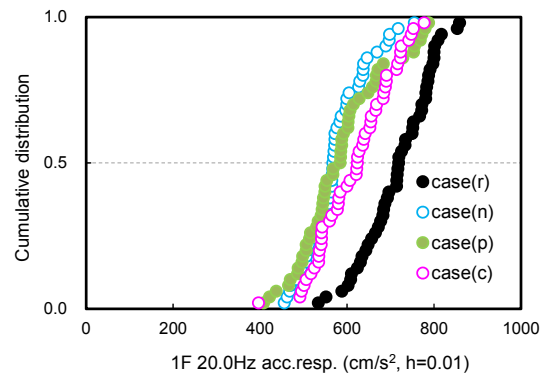


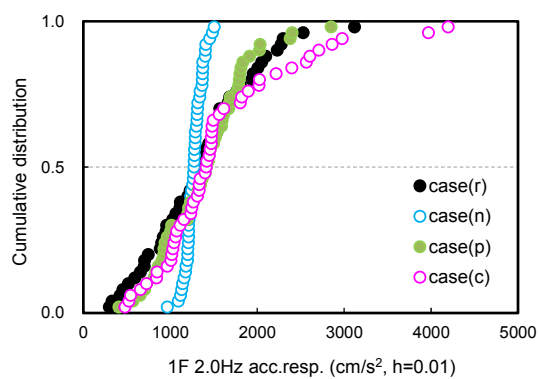
図 4.15 各ケースにおける最大層間変形



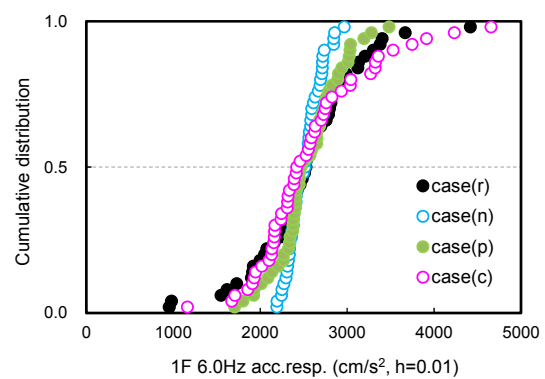
(1) R 階 2.0 Hz 加速度応答



(2) 1 階 20.0Hz 加速度応答



(3) 1 階 2.0 Hz 加速度応答



(4) 1 階 6.0Hz 加速度応答

図 4.16 最大加速度レベル 700~800cm/s<sup>2</sup> の 50 波による 1 階, R 階 f Hz 応答の累積分布

また、塑性化した建物がどの程度周期が増大するかどうかを評価するために、等価剛性および等価周期を算定した。なお、ここでは簡便のため、各層が同時に最大層間変形を取った場合を想定し、Eq. 4.7～Eq. 4.9 にて、等価剛性および等価周期を算定した。図 4.17 に各ケースの地震波群 250 波による等価剛性の最大値・最小値の結果、表 4.5 に建物の等価周期の範囲を示す。建物の弾性 1 次固有周期が 0.23s (4.3Hz) であり、どのケースも等価周期は増大しているが、応答のばらつきが大きい Case(p) は等価周期の上下限値の幅も大きいことが確認できる。

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{M_e}{K_e}} \quad \text{Eq. 4.7}$$

$$K_e = \frac{Q_1}{\delta_e} \quad \text{Eq. 4.8}$$

$$M_e = \frac{\left( \sum_i (m_i \cdot d_i) \right)^2}{\sum_i (m_i \cdot d_i^2)} \quad \delta_e = \frac{\sum_i (m_i \cdot d_i^2)}{\sum_i (m_i \cdot d_i)} \quad \text{Eq. 4.9}$$

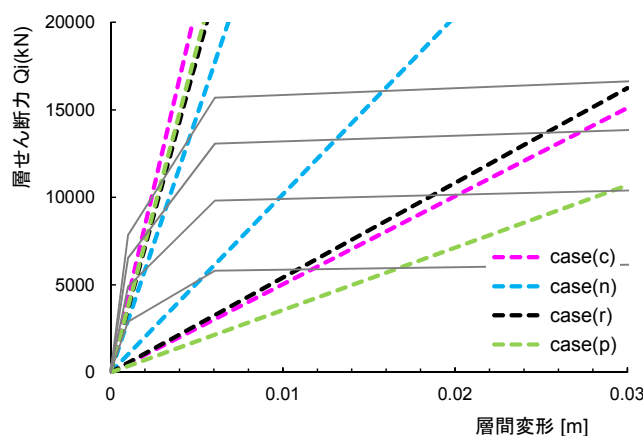


図 4.17 各層最大変形を取る条件での等価剛性の範囲

表 4.4 各地震波ケースによる塑性化後の建物の等価周期の範囲

ケース	等価周期 $T_e$ (T)	
	最小値	最大値
case (r)	0.66 s	1.65 s
case (n)	0.73 s	1.24 s
case (p)	0.65 s	1.93 s
case (c)	0.61 s	1.71 s

---

#### 4.6.3 建物応答の相関

本項では、Case(r)～Case(c)の地震波群による建物の地震応答解析から、結果的に得られた応答の相関の傾向を以下(a)および(b)にまとめる。

確率論的地震リスク評価に関する応答の相関に関する過去の知見としては、特に機器の応答の相関について検討が行われている。本節では、機器の応答は、各階の建物床応答に基づき算定することから、ここでは機器の応答の相関に関する知見との比較で考察を行うこととする。

固有振動数の異なる複数の機器類で構成される機器・配管システムの損傷確率を評価する場合には、機器間の損傷の相関（損傷の相似性）を考慮することにより、より現実に即した評価が可能であると考えられており、原子力施設の地震 PRA においても損傷の相関性を取り扱った評価を行うことが求められている<sup>[9]</sup>。ここで、機器の耐力および応答がある確率分布を有している場合、機器の損傷確率は応答が耐力を上回る条件付き確率として表されるため、機器間の損傷の相関を考慮する場合には、機器間の耐力の相関や応答の相関について考慮する必要がある。本検討では、耐力については無相関としているため、応答の相関性を詳細に検討することが重要となる。

ハザード適合地震波のように、ある地震動強さ指標の条件が同じ時刻歴地震波群を入力とする時刻歴応答解析により機器の損傷確率を算定する場合には、各機器の応答の分布は複数の地震波群による時刻歴応答解析から得られるため、機器間の損傷の相関についても、各機器の同時損傷確率から結果的に得ることができる。

一方で、時刻歴応答解析を用いずに、確率・統計論的に機器の損傷確率を算定する場合には、ある地震動強さにおける各機器の応答の分布を何らかの確率分布で仮定し、適切な機器の応答の相関を考慮する必要がある。

応答の相関については、1980 年代前半に米国 NRC の SSMRP (Seismic Safety Margins Research Program : 耐震安全裕度研究プログラム) において、Zion 原子力発電所を対象とした機器の応答の相関の詳細検討が行われている<sup>[10]</sup>。その後 1990 年に取り纏められた NUREG-1150 (米国の 5 原子力発電所を対象としたシビアアクシデントのリスク評価) では、SSMRP の結果に基づき、機器の設置個所やその固有振動数による条件で機器の損傷の相関係数のカテゴリー分類をしており<sup>[11]</sup>、その概要については JAERI-Research (1999) <sup>[12]</sup>でも報告されている (図 4.18)。原子力学会の地震 PRA 標準<sup>[9]</sup>では、表 4.5 および表 4.6 に示す機器の代表的な固有周期 (1 次固有周期) 間の相関係数、減衰定数間の相関係数、同一建物内での異なる階間の相関係数、異なる建物間の相関係数に関して、経験的な相関係数の値を適用することが示されており、実務上は応答の相関に関する既往知見を準用することによって、機器間の損傷の相関性を考慮している。

表Ⅱ.7.2-1 NUREG-1150で用いられた機器の応答の相関係数 ( $\rho_R$ )  
を定めるための規則

- 1) 同じフロアーに設置されスペクトル周波数領域が等しい (ZPA, 5-10Hz, 10-15Hz) 場合、 $\rho_R=1.0$ とし、スペクトル周波数領域が異なる場合は $\rho_R=0.5$ とする。
- 2) 同一建屋内の異なるフロアーに設置され、スペクトル周波数領域が同じ機器は $\rho_R=0.75$ とする。
- 3) 地面に設置されている機器については隣接建屋の同じレベルにあるとする。
- 4) 一連の弁は $\rho_R=1.0$ とする。
- 5) 以上に該当しない場合は $\rho_R=0$ とする。

ZPA : Zero Period Acceleration

図 4.18 JAERI-Research 99-035 より抜粋した機器の応答の相関係数の設定

表 4.5 実用上用いられている応答の相関係数 (PRA 標準<sup>[9]</sup>)

条件	相関係数
機器の固有周期が2倍以上異なる場合の相関	0.8
機器の減衰定数間の相関	1.0
同一建屋間の相関	1.0
隣接建屋間の相関	0.5

表 4.6 JNES における応答の相関の評価結果 (PRA 標準<sup>[9]</sup>)

機器間の応答の相関係数		機器の設置階	
		同じ	異なる
機器の固有周期	同じ	1.0	0.7~0.8
	異なる	0.6~0.7	0.5~0.6

---

(a) 建物の各階床加速度応答の相関

図 4.19～図 4.21 に、Case(r)～Case(c)の地震波ケースによる 1 階床応答加速度に対する 2～R 階の床加速度の相関係数を示す。

ハザード適合地震波 Case(r)では、周期 0.23s 付近および 0.07s 付近において、他周期と比較して相関が低くなる傾向が表れている。周期 0.23s は、建物の 1 次固有振動数 4.3Hz と対応する周期、0.07s は 2 次～4 次の固有振動数（10.54～22.64Hz）に対応する周期であることから、建物固有周期付近では、建物の応答の感度が高く、相関性が低くなったものと考えられる。応答スペクトルのばらつきおよび周期間相関を Case(r)と同等とした Case(c)については、応答の相関が Case(r)と似たような相関性を示している。Case(n)については、相関係数の周期帯における変化が Case(r)に比べ、不明瞭であり、全体的に相関係数が低い傾向となっている。Case(n)では、地震波作成において応答スペクトルの周期間相関が考慮されていないため、これが応答の相関性の低さに表れていると考えられる。Case(p)については、特に建物 1 次固有周期における相関係数が低くなっており、他の 3 ケースと比較して、応答の相関の表れ方の傾向が異なっている。

ここでの結果は、図 4.18 および表 4.6 において、同一建物内の異なるフロアに設置され、スペクトル周波数領域が同じ場合の相関に対応している。概ね 0.7～0.8 程度の相関が既往の知見から得られている。Case(r)～Case(c)の地震波ケースから得られた相関係数の結果は、周期全体でならした場合には 0.7～0.8 程度であるが、周期によって非常に大きなばらつきがある結果となっている。

図 4.27 には、Case(r)について建物モデルを弾性とした場合の結果を示すが、1 階床に対する各階の応答の相関係数は、弾性建物に対して、弾塑性建物のほうが、特に 3 階～R 階において相関が小さい傾向がある。これは 1 層において非線形化することにより、上階に入力が伝わらなくなったことがひとつの要因として考えられる。

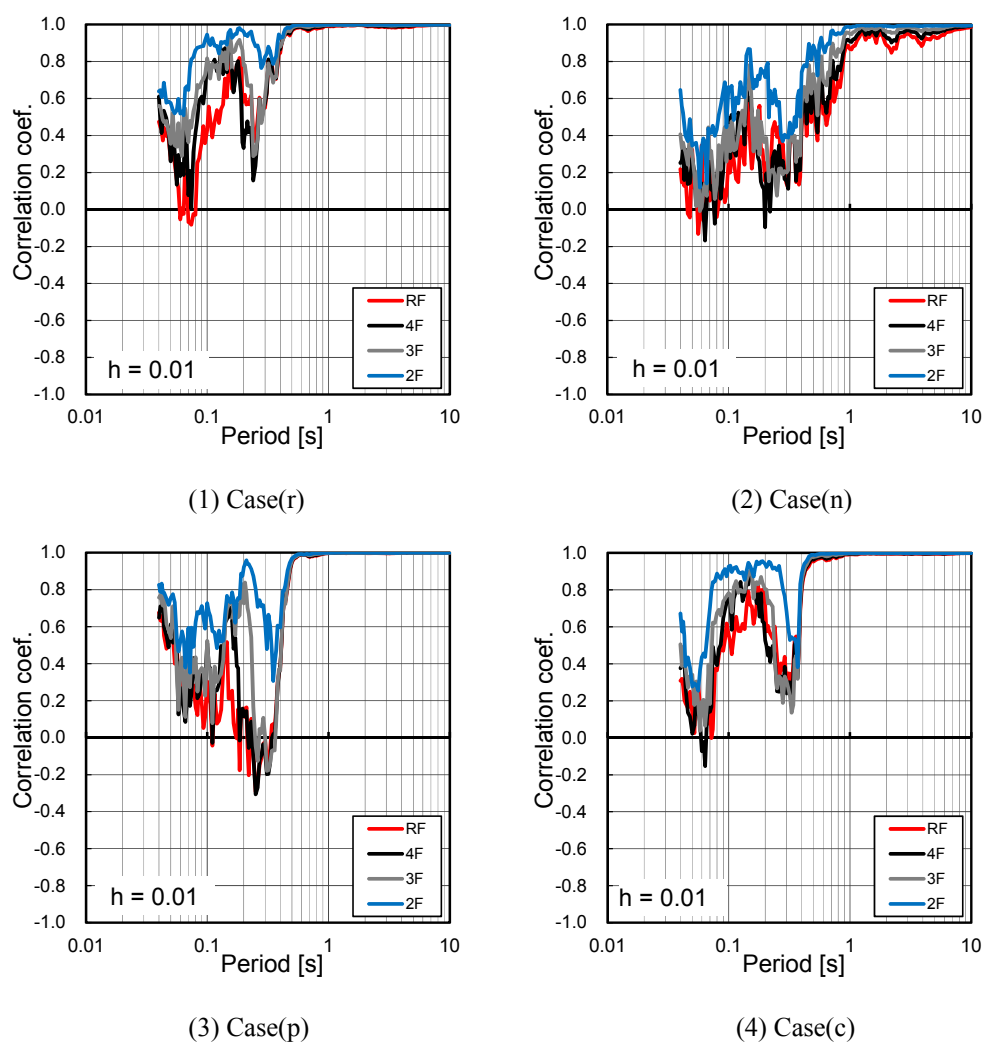
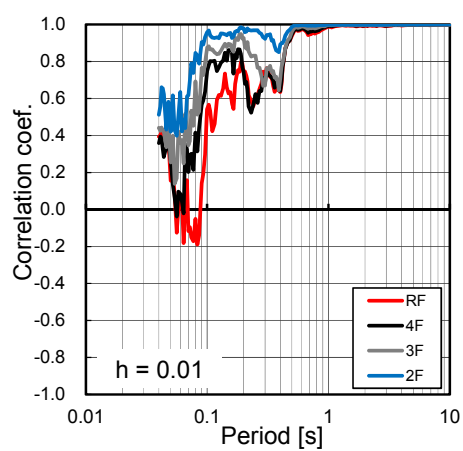
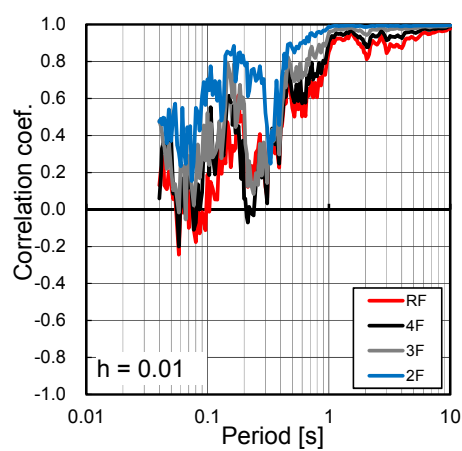


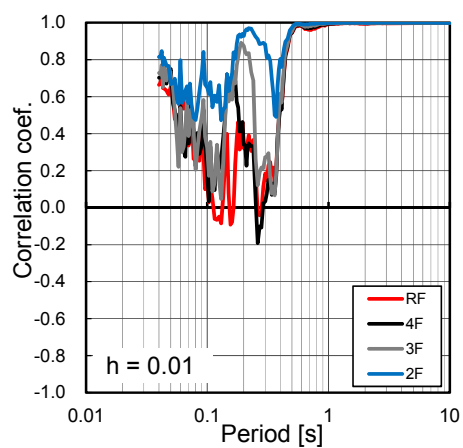
図 4.19 1 階床応答に対する各階床応答の相関（最大加速度  $500 \sim 600 \text{ cm/s}^2$ ,  $h=0.01$ ）



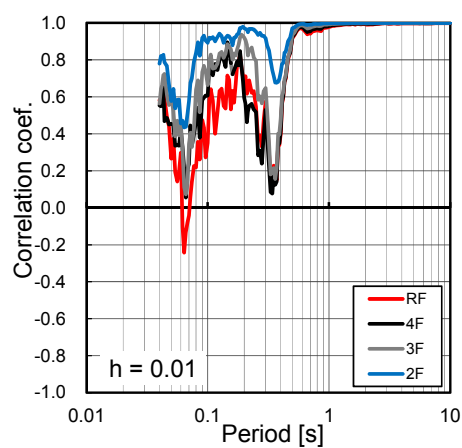
(1) Case(r)



(2) Case(n)



(3) Case(p)



(4) Case(c)

図 4.20 1 階床応答に対する各階床応答の相関（最大加速度  $700 \sim 800 \text{ cm/s}^2$ ,  $h=0.01$ ）



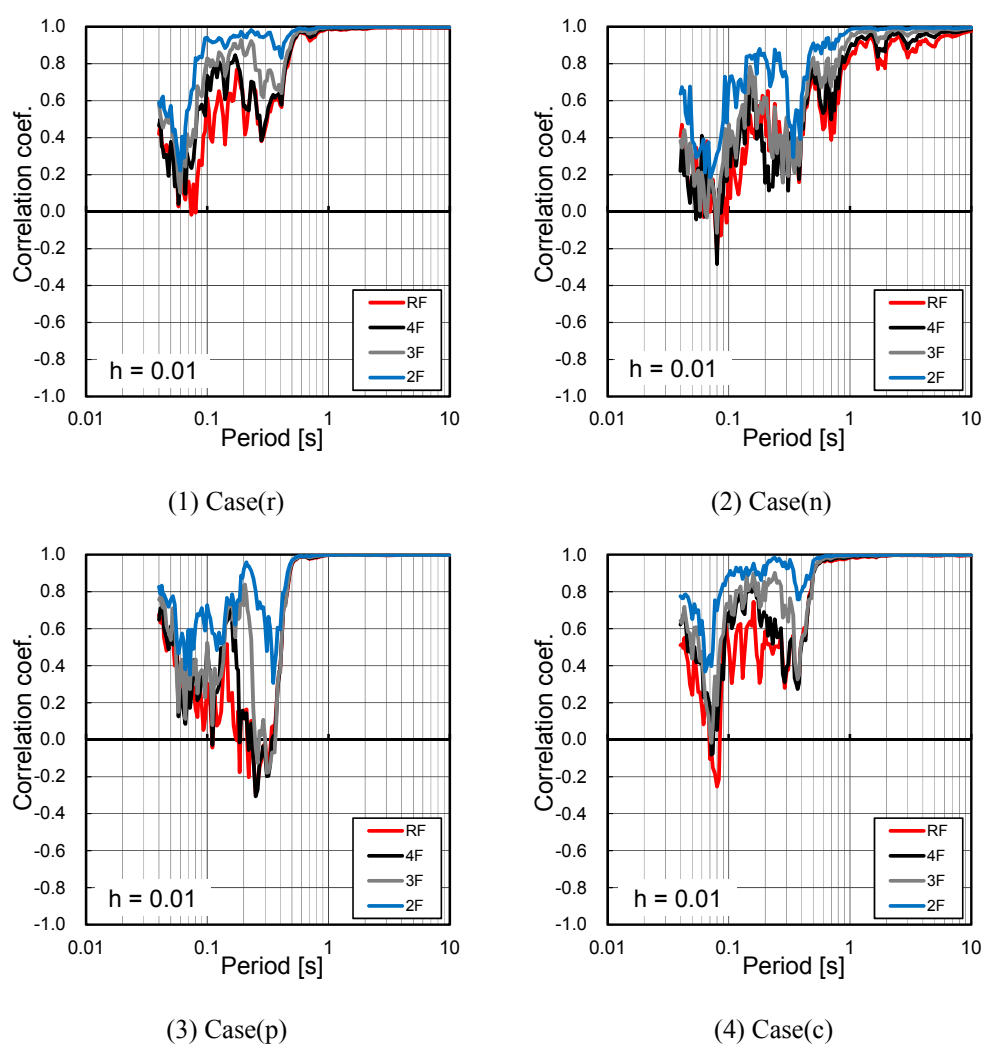
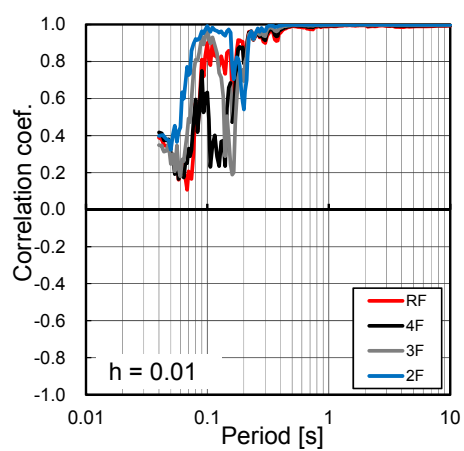
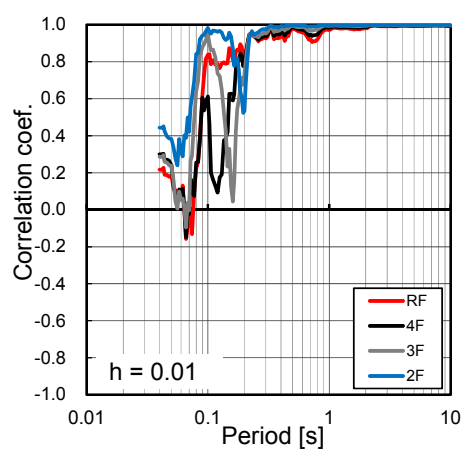


図 4.21 1 階床応答に対する各階床応答の相関（最大加速度  $900 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$ ,  $h=0.01$ ）



(1) 最大加速度 500~600cm/s<sup>2</sup>



(2) 最大加速度 900~1000cm/s<sup>2</sup>

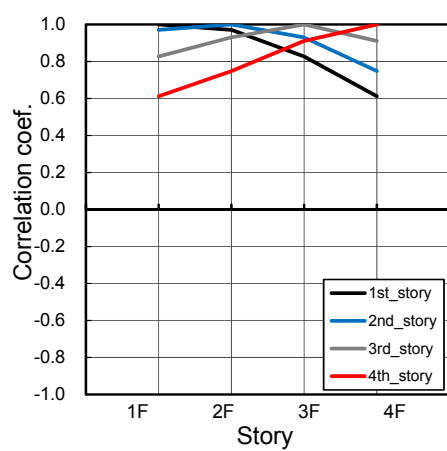
図 4.22 弾性建物での相関 (Case(r),  $h=0.01$ )

## (b) 建物の層間変形の相関

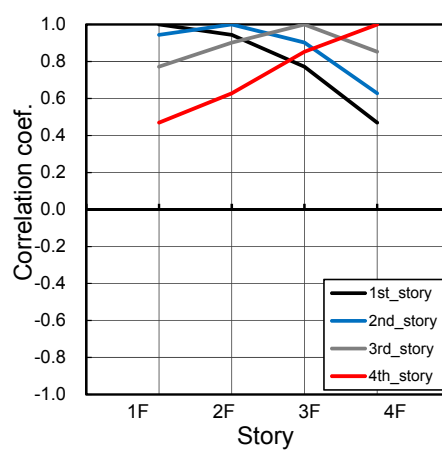
図 4.23～図 4.25 に、Case(r)～Case(c)の各層の層間変形の相関係数を示す。どのケースにおいても、隣接する層の相関係数は比較的高い傾向が確認された。また、応答スペクトルの周期間相関を考慮していない（無相関の）Case(n)については、層間変形の相関が全体的に低い傾向が確認された。応答スペクトルの周期間相関を完全相関とした Case(p)については、全体的に層間変形の相関が高い傾向が確認された。なお、Case(r)と Case(c)の相関係数は Case(n)と Case(p)の中間の傾向を示した。

図 4.28 には、Case(r)について、建物モデルを弾性建物とした時の結果を示すが、弾性建物では層間変形の相関は 1.0 に近い値が得られており、建物の非線形化によって層間変形の相関が小さくなることが確認された。

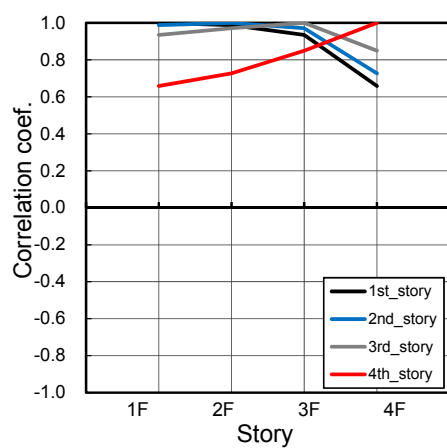
ここでの結果は、表 4.5 における同一建物内の相関とほぼ対応しており、表 4.5 では相関係数は 1.0 となっている。Case(r)～Case(c)の地震波ケースから得られた層間変形角の階の違いによる相関係数の結果は、0.6～1.0 程度であるが、弾性建物では 1.0 近くの相関係数となっており、表 4.5 の相関係数は、建物が非線形化しない条件における相関係数と近い傾向を示している。



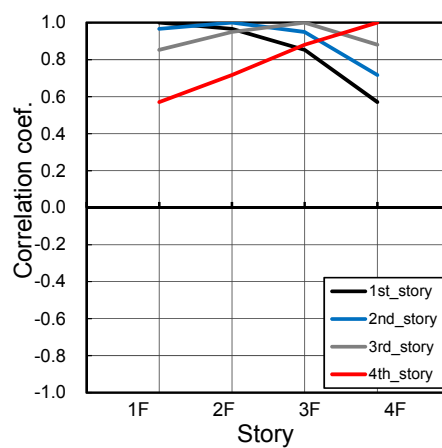
(1) Case(r)



(2) Case(n)



(3) Case(p)



(4) Case(c)

図 4.23 層間変形の相関（最大加速度 500~600cm/s<sup>2</sup>）

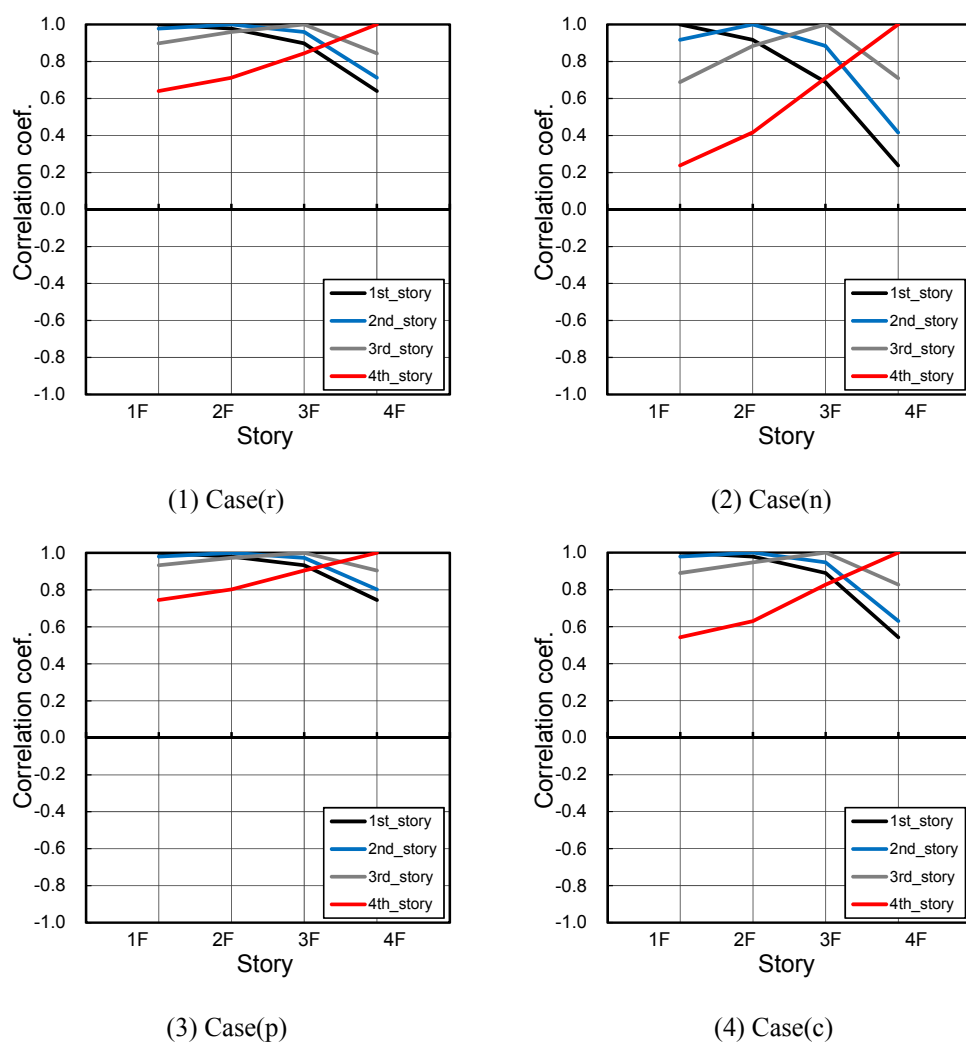
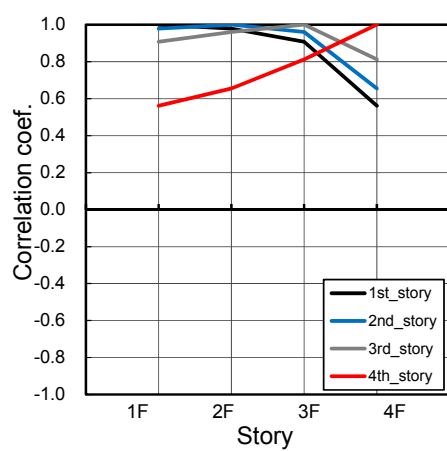
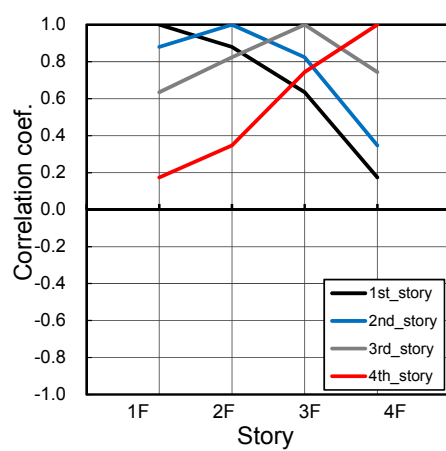


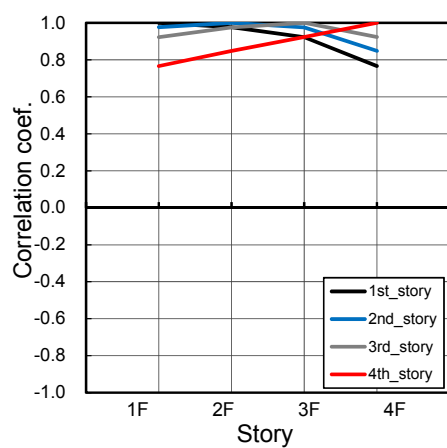
図 4.24 層間変形の相関（最大加速度  $700 \sim 800 \text{ cm/s}^2$ ）



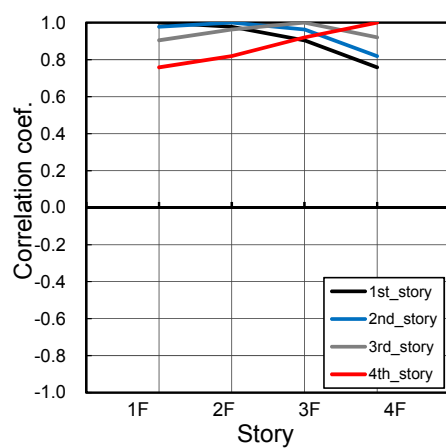
(1) Case(r)



(2) Case(n)

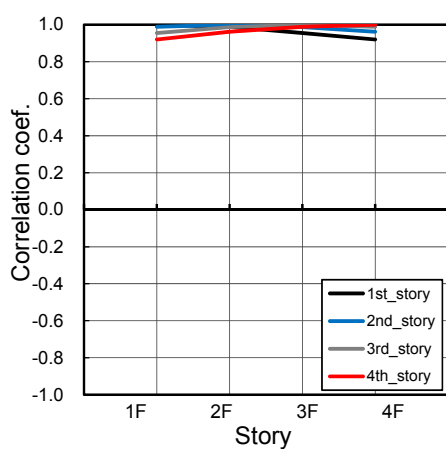


(3) Case(p)

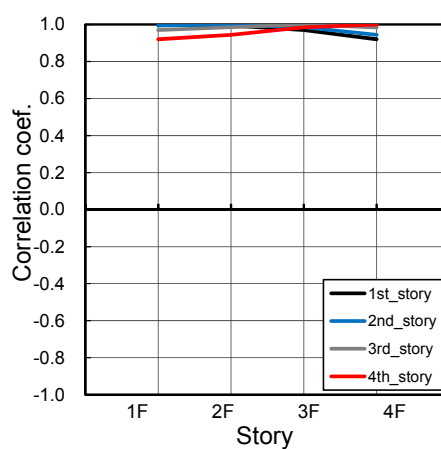


(4) Case(c)

図 4.25 層間変形の相関（最大加速度 900~1000cm/s<sup>2</sup>）

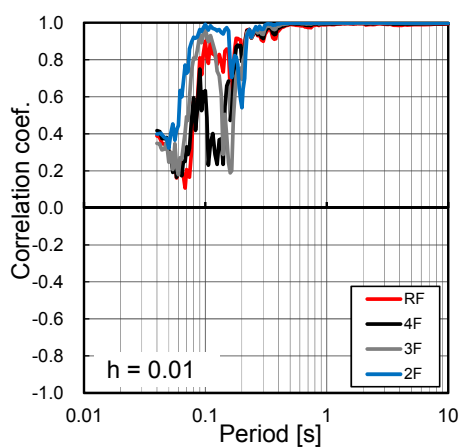


(1) 最大加速度  $500 \sim 600 \text{ cm/s}^2$

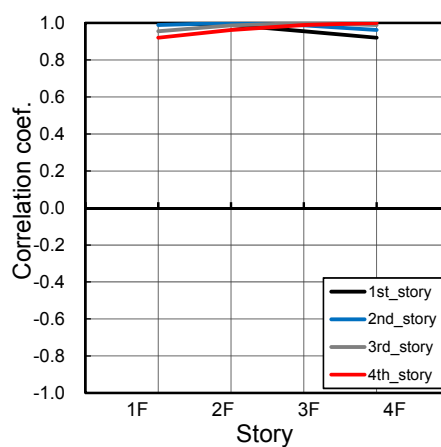


(2) 最大加速度  $900 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$

図 4.26 弾性建物での相関 (Case(r), 最大加速度  $900 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$ ,  $h=0.01$ )

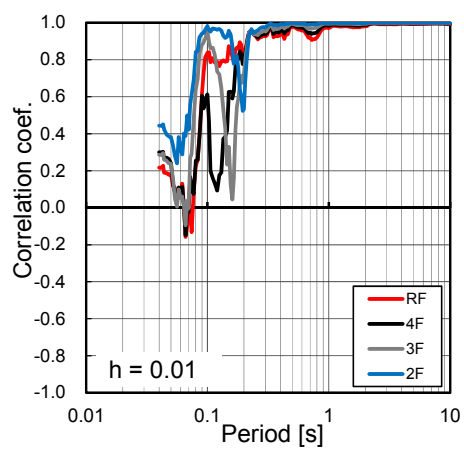


(1) 図 4.19 との比較

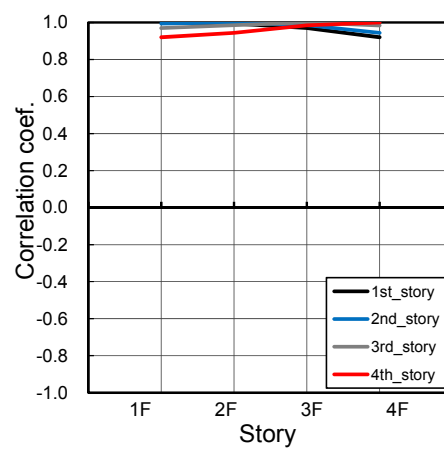


(2) 図 4.23 との比較

図 4.27 弾性建物 (Case(r), 最大加速度  $500 \sim 600 \text{ cm/s}^2$ ,  $h=0.01$ )



(1) 図 4.19 との比較



(2) 図 4.23 との比較

図 4.28 弾性建物 (Case(r), 最大加速度  $900 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$ ,  $h=0.01$ )



## 4.7 機器・配管システムの損傷確率評価

本節では、前述した建物モデルに、固有振動数や損傷指標が異なる機器・配管類で構成される給水設備が設置されていることを想定して、Case(r)~Case(c)の入力地震波による機器・配管システムの損傷確率の評価を行った。

### 4.7.1 機器・配管システム

図 4.31 に対象とする機器・配管システムを示す。システムは給水設備を模式化したもので、建物の各階に機器・配管が設置されている。1 階床に設置された 2 つの受水槽からポンプで揚水し、各階配管を経由して R 階の高置水槽に送水するシステムである。1 階床の 2 つの水槽が並列接続され、水槽、ポンプ、配管は直列接続されている。また、各機器はそれぞれ異なる固有振動数を有している。

本節における機器・配管システムの損傷確率評価では、建物モデルの時刻歴応答解析から算出された各階の加速度時刻歴応答が、各階の機器類の応答加速度と等しいと仮定し、その振幅最大値（応答）と機器の耐力との比較により、個々の損傷確率を評価した。

表 4.8 に各機器・配管システムの耐力設定値を示す。各機器の耐力のばらつきは対数正規分布に従うと仮定した。機器の損傷確率を決定づける指標は、水槽およびポンプについては、各機器の固有振動数に対応する設置階の床応答加速度とし、配管については、設置層の最大層間変形角とした。なお、各機器の耐力を設定する際には、「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>[13]</sup>の耐震 B クラス設備機器の設計用震度の 3.6 倍相当を想定した。ただし、1 階の並列接続の水槽 2 および 3 については、250 波による損傷確率が同等となるように水槽 2 の耐力中央値を水槽 3 の 2/3 倍とした。また、各水槽およびポンプの耐力のばらつきは、原子力学会の PRA 標準<sup>[9]</sup>を参考に、自然対数標準偏差で一律 0.15 を仮定した。各層の配管の耐力のばらつきについては、損傷時の層間変形角の目安値が文献では得られなかったため、中央値を 1/150 rad.とし、自然対数標準偏差 0.20 のばらつきを仮定した。

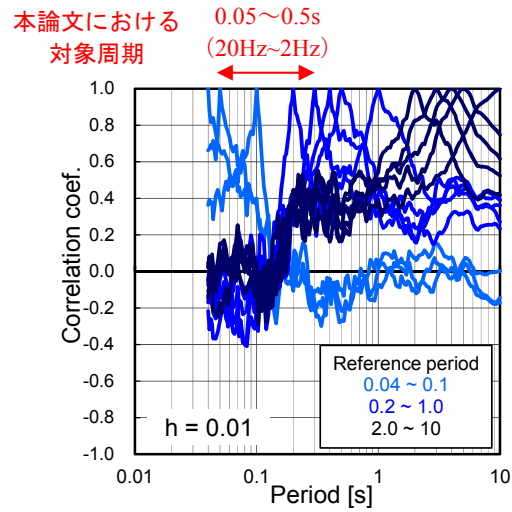
### 4.7.2 機器・配管システムの応答の相関

機器の応答の相関に関する過去の知見は、4.6.3 項に示す知見が得られており、原子力施設の確率論的地震リスク評価では、これらに基づき応答の相関を陽に考慮した評価が行われている。一方で、本論文では、断層モデル地震波群による応答の相関が暗に評価に反映されるというのが特徴である。本章の機器・配管システムの各機器の構成を設定するにあたり、相関の低い機器と相関の高い機器が両方含まれるような機器構成とした。すなわち、本章の機器・配管システムは、地震動による応答の周期間相関の影響が出やすいシステムになるように設定した。

図 4.29 に断層モデル地震波群 (Case(r)) の解放基盤における地震動の応答スペクトルの周期間相関、図 4.30 に相関マトリックス表を示しており、本章の機器・配管システムの各機器の周期は、赤の矢印

---

の範囲が対象となっている。図 4.30 では、オレンジ枠が今回のシステムの対象範囲となっているが、これが 10Hz 以上の短周期の機器のみの構成となったり、逆に、水系タンクや機器免震が施された機器のように長周期の機器のみの構成となったりすれば、**case(r)**における応答の相関は高くなり、**case(p)**との差異は小さくなるものと考えられる。



(3) 相関 (700-800cm/s<sup>2</sup>,  $h=1\%$ )

図 4.29 Case(r)で再現された解放基盤における地震動の応答スペクトルの周期間相関

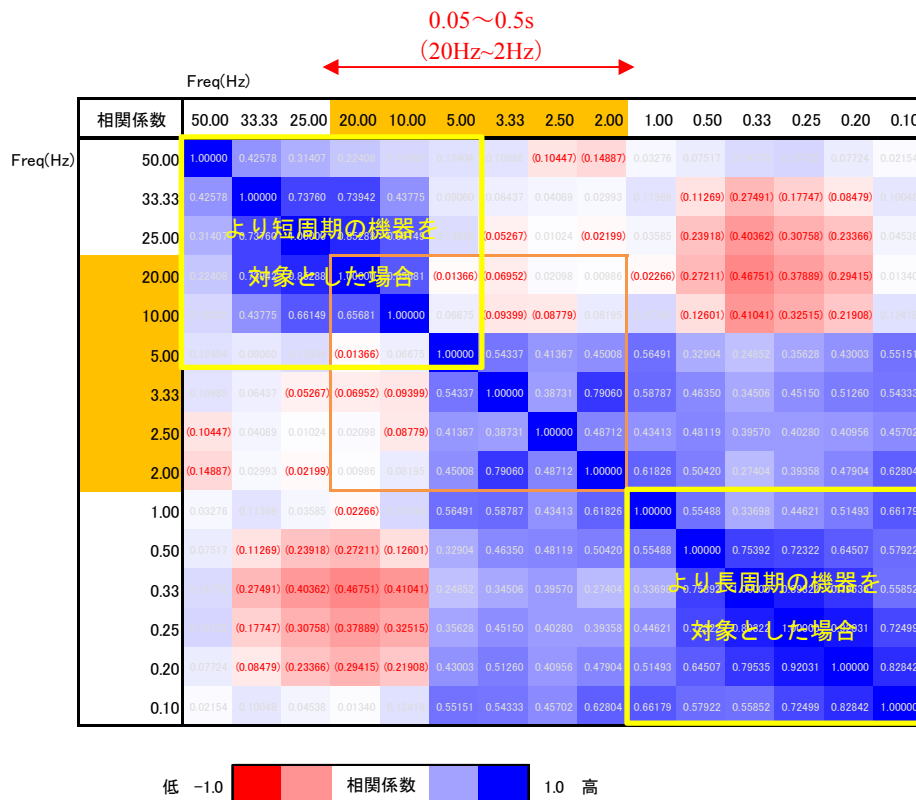


図 4.30 case(r)の地震波群の弾性応答( $h=1\%$ )による主要振動数に対する相関マトリクス

#### 4.7.3 機器・配管システムの耐力の相関

本検討における機器・配管システムの各機器類の耐力の相関については、Bohn and Lambridge (1990)<sup>[14]</sup>によって検討が行われており、米国の Surry 原子力発電所および Peach Bottom 原子力発電所を対象とした確率論的地震リスク評価 (NUREG-1150) にもその知見が適用されている。Bohn and Lambridge の検討では、2 個の機器の応答および耐力 (フラジリティ) の相関を考慮した損傷の相関  $\rho_{D1D2}$  を Eq. 4.10 で算定している。

$$\rho_{D1D2} = \frac{\zeta_{R1}\zeta_{R2}}{\sqrt{\zeta_{R1}^2 + \zeta_{C1}^2} \cdot \sqrt{\zeta_{R2}^2 + \zeta_{C2}^2}} \rho_{R1R2} + \frac{\zeta_{C1}\zeta_{C2}}{\sqrt{\zeta_{R1}^2 + \zeta_{C1}^2} \cdot \sqrt{\zeta_{R2}^2 + \zeta_{C2}^2}} \rho_{C1C2} \quad \text{Eq. 4.10}$$

ここに、 $R_1$ ,  $R_2$ : 機器 1, 機器 2 の応答,  $C_1$ ,  $C_2$ : 機器 1, 機器 2 の耐力 (フラジリティ),  $D_1$ ,  $D_2$ : 機器 1, 機器 2 の損傷,  $\zeta_x$ :  $X$  の対数標準偏差,  $\rho_x$ :  $X$  の相関係数, である。

これに関して Takada (2016)<sup>[15]</sup>は、機器 1 と機器 2 の損傷の相関  $\rho_{D1D2}$  と機器 1 と機器 2 の同時損傷確率の感度は、応答の分布と耐力の分布の距離によって変わること示唆している。すなわち、応答が大きく、耐力との差が小さい場合には、機器の同時損傷確率に対する機器 1 と機器 2 の損傷の相関  $\rho_{D1D2}$  の感度はそれほど大きくなく、応答が小さく、耐力との差が大きい場合には、 $\rho_{D1D2}$  の感度がおおきくなる傾向があることを指摘している。

本論文の検討では、対象とする機器・配管システムは、一部並列の機器が設けられているが、基本的には直列系のシステムであるため、機器の耐力を完全独立としている仮定に関しては、システムの損傷確率の評価としては安全側の評価になっている。しかしながら、より詳細な地震リスク評価結果を得るためには、各機器の現実的な耐力の相関を地震リスク評価に反映する必要があると考えられる。特に、並列機器システムが多用されている原子炉システムのような機器システムに関しては、機器の同時損傷によって機能停止に至らないようにする必要があることから、耐力の相関を適切に考慮した評価をする必要性が高い。

例えば、耐力の相関を考える場合には、同じ機能を有する複数の機器に関して、製造メーカーが異なれば耐力の相関は無相関であると考えられる。一方で、製造メーカーが同じで、その耐力設計も同じ機器であれば、耐力の相関は無相関であるとは言えず、ある程度の耐力の相関があると考えられる。また、製造メーカーが同じ、同機能の機器に関しては、製造ロットの違いなども耐力の相関に影響する可能性が考えられる。

本論文のような詳細は地震波群を用いた地震リスク評価を行う場合には、機器側の耐力の設定の不確実性が結果に大きく影響する可能性が考えられ、このような機器の耐力の相関に関しても、振動台実験等による耐力データの蓄積がされる必要があると考えられる。

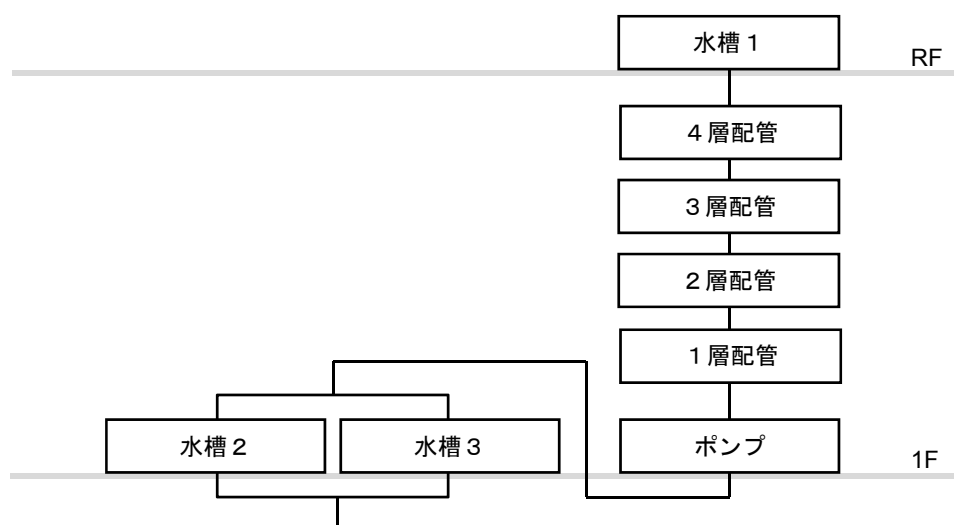


図 4.31 機器・配管システム（給水設備）

表 4.7 建築設備耐震設計・施工指針<sup>[13]</sup>に記載の設計用静的震度

設置階	建築設備機器のクラス		
	耐震クラス S	耐震クラス A	耐震クラス B
上層階，屋上および塔屋	2.0	1.5	1.0
中間階	1.5	1.0	0.6
地階および1階	1.0(1.5)	1.0(1.5)	0.4(0.6)

（ ）内の値は，地階および1階に設置する水槽に適用

表 4.8 機器・配管システムの耐力設定値

機器	設置階	指標	耐力	
			中央値	自然対数標準偏差
水槽 1	R 階	2 Hz 応答加速度	3500 (cm/s <sup>2</sup> )	0.15
配管	1~4 階	層間変形角	1/150 (rad.)	0.20
ポンプ	1 階	20Hz 応答加速度	1400 (cm/s <sup>2</sup> )	0.15
水槽 2	1 階	2 Hz 応答加速度	1400 (cm/s <sup>2</sup> )	0.15
水槽 3	1 階	6 Hz 応答加速度	2200 (cm/s <sup>2</sup> )	0.15

#### 4.7.4 機器・配管システムの損傷確率評価

各地震波による、各機器・配管システムの損傷確率は、各地震波を入力とした時刻歴応答解析による機器の応答値（本検討では、機器設置階または層の応答値）と表 4.8 で設定した機器の耐力分布から、応答  $R$  が耐力  $C$  を上回る確率として算定した。すなわち、機器  $i$  の損傷確率  $P_{f,i}$  は下記で表される。なお、各最大加速度レベルの地震波による各機器の損傷確率は、各地震波による各機器の損傷確率  $P_{f,i}$  を 50 波について累積した値を 50（波）で除した値、すなわち、50 波による機器の損傷確率の平均値として算定した。表 4.10 に 50 波によるシステム損傷確率の結果を示す。

$$P_{f,i} = P(R_i > C_i) \quad \text{Eq. 4.11}$$

また、複数の機器で構成される直列システムは、構成機器のいずれかが損傷した場合にシステム全体の損傷に至ることから、システム損傷確率  $P_{f,system}$  を Eq. 4.12 にて算定した。

$$P_{f,system} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{f,i}) \quad \text{Eq. 4.12}$$

さらに、複数の機器で構成される並列システムは、構成機器の全てが損傷した場合にシステム全体の損傷に至ることから、システム損傷確率  $P_{f,system}$  を Eq. 4.13 にて算定した。

$$P_{f,system} = \prod_{i=1}^N P_{f,i} \quad \text{Eq. 4.13}$$

ここに、 $N$ ：直列または並列接続された機器の個数、である。

さらに、表 4.9 にハザード評価結果から算定した、各最大加速度レベルの地震動の年発生頻度  $F_{hazard}$  を示す。最大加速度レベルが  $500 \sim 600 \text{ cm/s}^2$  となる地震動の発生頻度は、 $131 \times 10^{-6}$  回／年、 $900 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$  となる地震動の発生頻度は、 $6.6 \times 10^{-6}$  回／年と、本検討で用いた地震波群の発生確率は大きい加速度レベルと小さい加速度レベルで、およそ 2 オーダー程度の差が見られる。

各最大加速度レベルの 50 波による条件付きの機器・配管システム年損傷頻度  $F_{f,system}$  は、Eq. 4.14 にて算定した。

$$F_{f,system} = P_{f,system} \cdot F_{hazard} \quad \text{Eq. 4.14}$$

上記の方法で算定した機器・配管システムの年損傷頻度を表 4.12 の最右列に示す。Case(r)および Case(c)については、システム年損傷頻度は  $97 \sim 98 \times 10^{-6}$ （回／年）程度とほぼ同等の結果が得られた。また、応答スペクトルのばらつきを考慮していない Case(n)については、機器・配管システムの年損傷頻度が  $60 \times 10^{-6}$ （回／年）程度であり、Case(r)に比べ、年損傷頻度が小さく評価された。また、応答ス

ペクトルのばらつきを Case(r)と同じとし、周期間相関を完全相関とした Case(p)については、機器システムの年損傷頻度が  $111 \times 10^{-6}$  (回/年) 程度であり、Case(c)や Case(r)と比較しても若干大きめの値となっており、周期間相関を完全相関とした影響が表れていると考えられる。

以上の結果より、応答スペクトルのばらつきや周期間相関が機器・配管システムの年損傷頻度に影響することが確認され、本検討の範囲では、特に応答スペクトルのばらつきによる影響のほうが、周期間相関による影響よりも顕著であることが分かった。

表 4.9 ハザード評価による年地震発生頻度

解放基盤における最大加速度レベル	年発生頻度 $F_{hazard}$ ( $\times 10^{-6}$ )
500 ~ 600 $\text{cm/s}^2$	131.4
600 ~ 700 $\text{cm/s}^2$	54.1
700 ~ 800 $\text{cm/s}^2$	24.8
800 ~ 900 $\text{cm/s}^2$	12.4
900 ~ 1000 $\text{cm/s}^2$	6.6

表 4.10 50 波による機器・配管システムの損傷確率

最大加速度レベル	システム損傷確率 $P_{f, system}$			
	case (r)	case (n)	case (p)	case (c)
500 ~ 600 $\text{cm/s}^2$	0.359	0.093	0.438	0.387
600 ~ 700 $\text{cm/s}^2$	0.485	0.333	0.501	0.407
700 ~ 800 $\text{cm/s}^2$	0.512	0.527	0.579	0.581
800 ~ 900 $\text{cm/s}^2$	0.534	0.790	0.589	0.502
900 ~ 1000 $\text{cm/s}^2$	0.585	0.925	0.660	0.626

表 4.11 機器・配管システムの年損傷頻度

最大加速度レベル	システムの年損傷頻度 $F_{f, system}$ ( $\times 10^{-6}$ 回/年)			
	case (r)	case (n)	case (p)	case (c)
500~1000 $\text{cm/s}^2$	97	59	111	98



表 4.12 各機器・配管類の損傷確率結果

地震波 ケース	最大 加速度 レンジ	各機器の損傷確率								システム損傷確率					地震波	年損傷頻度	
		5階床 水槽 1 (2Hz)	1階床 ポンプ (20Hz)	1層 配管	2層 配管	3層 配管	4層 配管	1階床 水槽 2 (2 Hz)	1階床 水槽 3 (6Hz)	R 階	1階 ポンプ	配管	1階 並列 水槽	システム 全体 (A)	年発生 頻度 (B)	(A)×(B)	システム 年損傷頻度 Σ(A)×(B)
Case(r)	500-600gal	0.3305	0.0000	0.0086	0.0042	0.0010	0.0000	0.3322	0.3076	0.3305	0.0000	0.0124	0.1142	0.359	131.4E-06	47.2E-06	96.6E-06
	600-700gal	0.4460	0.0000	0.0640	0.0567	0.0303	0.0018	0.4244	0.3902	0.4460	0.0000	0.0913	0.1846	0.485	54.1E-06	26.2E-06	
	700-800gal	0.4346	0.0000	0.0407	0.0371	0.0359	0.0086	0.4296	0.7124	0.4346	0.0000	0.0926	0.3292	0.512	24.8E-06	12.7E-06	
	800-900gal	0.4552	0.0002	0.0812	0.0859	0.0775	0.0214	0.4113	0.7938	0.4552	0.0002	0.1391	0.3207	0.534	12.4E-06	6.6E-06	
	900-1000gal	0.4729	0.0017	0.1638	0.1552	0.1411	0.0469	0.5037	0.8454	0.4729	0.0017	0.2558	0.3989	0.585	6.6E-06	3.9E-06	
Case(n)	500-600gal	0.0780	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0771	0.2258	0.0780	0.0000	0.0001	0.0217	0.093	131.4E-06	12.2E-06	59.2E-06
	600-700gal	0.2605	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0000	0.2258	0.4476	0.2605	0.0000	0.0004	0.1051	0.333	54.1E-06	18.E-06	
	700-800gal	0.4123	0.0000	0.0001	0.0005	0.0010	0.0001	0.2717	0.8115	0.4123	0.0000	0.0016	0.2254	0.527	24.8E-06	13.1E-06	
	800-900gal	0.6737	0.0000	0.0007	0.0008	0.0021	0.0007	0.4939	0.9491	0.6737	0.0000	0.0042	0.4728	0.791	12.4E-06	9.8E-06	
	900-1000gal	0.8225	0.0000	0.0026	0.0058	0.0078	0.0015	0.6908	0.9903	0.8225	0.0000	0.0149	0.6843	0.925	6.6E-06	6.1E-06	
Case(p)	500-600gal	0.3876	0.0000	0.1133	0.0786	0.0322	0.0000	0.4294	0.2728	0.3876	0.0000	0.1194	0.1866	0.438	131.4E-06	57.6E-06	110.6E-06
	600-700gal	0.4167	0.0000	0.1163	0.0962	0.0707	0.0022	0.4620	0.5012	0.4167	0.0000	0.1413	0.3271	0.501	54.1E-06	27.1E-06	
	700-800gal	0.5035	0.0000	0.0521	0.0495	0.0359	0.0017	0.4821	0.7734	0.5035	0.0000	0.0810	0.4425	0.579	24.8E-06	14.4E-06	
	800-900gal	0.5103	0.0000	0.0392	0.0343	0.0362	0.0104	0.4661	0.9094	0.5103	0.0000	0.0668	0.4541	0.589	12.4E-06	7.3E-06	
	900-1000gal	0.5913	0.0001	0.0773	0.0710	0.0728	0.0142	0.5379	0.9580	0.5913	0.0001	0.1079	0.5355	0.660	6.6E-06	4.3E-06	
Case(c)	500-600gal	0.3468	0.0000	0.0363	0.0109	0.0016	0.0000	0.3471	0.3403	0.3468	0.0000	0.0438	0.1277	0.387	131.4E-06	50.8E-06	97.5E-06
	600-700gal	0.3597	0.0000	0.0635	0.0259	0.0122	0.0004	0.3598	0.4519	0.3597	0.0000	0.0804	0.1836	0.407	54.1E-06	22.E-06	
	700-800gal	0.5003	0.0000	0.0836	0.0785	0.0468	0.0016	0.4734	0.7062	0.5003	0.0000	0.1162	0.3717	0.581	24.8E-06	14.4E-06	
	800-900gal	0.4603	0.0001	0.0791	0.0646	0.0392	0.0019	0.4537	0.8115	0.4603	0.0001	0.0960	0.3839	0.502	12.4E-06	6.2E-06	
	900-1000gal	0.5645	0.0004	0.0795	0.0850	0.0839	0.0409	0.5393	0.5645	0.5645	0.0004	0.1319	0.5081	0.626	6.6E-06	4.1E-06	

---

#### 4.7.5 機器・配管システムのフラジリティ評価

前項の手順で算定された損傷確率は損傷確率として正しい結果と言えるが、本検討の対象は  $500 \sim 1000 \text{ cm/s}^2$  の一部の最大加速度レベルのみの結果しか得られていない。ここでは、参考までに算定された 5 つの最大加速度レベルでの機器・配管システムの損傷確率の結果から、全最大加速度範囲に対応する機器・配管システムのフラジリティ曲線を最尤法（Maximum Likelihood Evaluation）によって評価した。図 4.32 に、Case(r)～Case(c)について最尤法によって算定した機器・配管システムのフラジリティ曲線を示す。図のプロットは、5 つの最大加速度レベルでのシステム損傷確率（表 4.10 の値）であり、実線は対数正規分布を仮定した最尤法によって評価されたフラジリティ曲線である。表 4.13 にフラジリティの中央値および自然対数標準偏差を示す。応答スペクトルのばらつきと周期間相関の条件が同等な Case(r)と Case(c)は中央値および対数標準偏差がほぼ同等のフラジリティ曲線が得られた。また、周期間相関を完全相関とした Case(p)はフラジリティの中央値が Case(r)や Case(c)に対してやや小さく、応答スペクトルの周期間相関を完全相関としたことによる差異が表れているものと考えられる。応答スペクトルのばらつきを考慮していない Case(n)については、中央値は Case(r)や Case(c)と同等であったが、対数標準偏差はそれらに対して小さく、立ち上がりの急なフラジリティ曲線が得られた。

表 4.14 は、フラジリティ曲線とハザード曲線から算定した全加速度範囲での機器・配管システムの年損傷頻度である。Case(n)はフラジリティのばらつきが小さいため、他ケースと比較して、損傷確率は小さい評価となった。また、Case(c)については、フラジリティの中央値は Case(r)と同等であるが、ばらつきが Case(r)よりも小さいため、損傷確率は Case(r)よりもやや小さめに評価された。Case(p)についてはフラジリティの中央値が他の 3 ケースと比較して小さいため、損傷確率が大きく評価された。

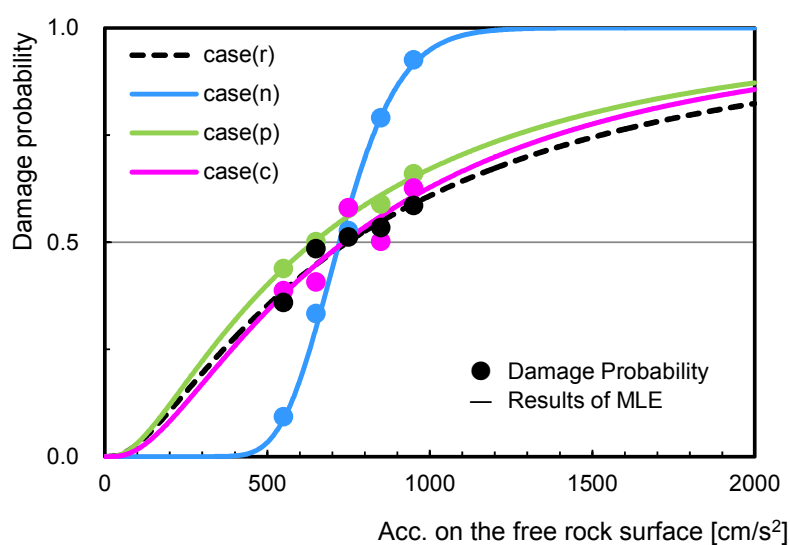


図 4.32 最尤法にて評価した機器・配管システムの fragility 曲線

表 4.13 機器・配管システムの fragility 曲線（横軸：解放基盤における最大加速度）

地震波ケース	case (r)	case (n)	case (p)	case (c)
中央値 [ $\text{cm/s}^2$ ]	746.7	721.7	642.4	735.5
自然対数標準偏差	1.06	0.20	1.00	0.94

表 4.14 fragility 曲線から算定した機器・配管システムの年機能損傷頻度（全加速度範囲）

地震波ケース	case (r)	case (n)	case (p)	case (c)
年機能損傷頻度 ( $\times 10^{-6}$ 回/年)	13700	70	14100	7100

---

## 4.8 まとめ

本章では、断層破壊や地震動の伝播特性の物理的な意味合いを反映することが可能な断層モデル地震波群による次世代地震リスク評価手法の有効性を検証することを目的として、建物の地震リスク評価に適用する入力地震波群の応答スペクトルのばらつきや周期間相関に着目し、それらが最終的な地震リスク評価結果にどのような影響を及ぼすのかを検討した。

第2章で概説したハザード適合地震波群 (Case(r)) の応答スペクトルの中央値を目標スペクトルとし、その応答スペクトルや周期間相関の条件を変えた Case(n)～Case(c)の3種類のスペクトル適合模擬地震波群を作成し、一般建物の給水設備を模した機器・配管システムの損傷確率を比較した。地震波ケースの概要は以下の通りである。

Case(r)：断層モデル地震波群そのもの（ハザード適合地震波）

Case(n)：Case(r)と中央値が等しく、ばらつきを考慮しない地震波ケース

Case(p)：Case(r)と中央値とばらつきが等しく、周期間相関を完全相関とした地震波ケース

Case(c)：Case(r)と中央値とばらつきが等しく、Case(r)と同等の周期間相関とした地震波ケース

Case(n)は、スペクトル適合波を用いた従来手法に関して、地震波群のばらつきを考慮せず位相の違いのみを反映した地震波群を模擬したケースである。Case(n)による機器・配管システムの各機器・配管の応答のばらつきはCase(r)よりも小さく、その結果、機器・システムの年損傷頻度も小さくなる結果となった。

Case(p)は、スペクトル適合波を用いた従来手法に関して、地震波群のばらつきを考慮し周期間相関を完全相関とした地震波群を模擬したケースである。今回の機器・配管システムでは fragility の中央値がCase(r)よりもやや小さめの評価となり、わずかではあるが断層モデル地震波群のCase(r)との差異が確認された。

Case(c)は、断層モデル地震波群のCase(r)と同等の応答スペクトルのばらつきや周期間相関を考慮したスペクトル適合波であり、Case(r)に対する、Case(n)およびCase(p)の結果の差異が、入力地震波群の応答スペクトルのばらつきと周期間相関によることを確認するためのケースである。Case(c)は、Case(r)とほぼ同等の機器・配管システムの fragility や年損傷頻度の結果が得られ、地震リスク評価に用いる入力地震波群の応答スペクトルのばらつきや周期間相関の条件の違いが、地震リスクに影響を及ぼすことを確認した。このことは、断層破壊や地震動の伝播特性の物理的な意味合いを含むばらつきや周期間相関を反映しにくい従来のスペクトル適合波に対する断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価の優位性を示す結果となっている。

本章の検討では、特に、応答スペクトルのばらつきが機器・配管システムの fragility に及ぼす影響は顕著であり、断層モデル地震波群を作成する場合には、応答スペクトルが現実的にどの程度ばらつくかに留意して作成することが重要であることが明らかになった。

なお、今回は断層モデル地震波群 Case(r)が既に得られており、そのばらつきや周期間相関が機知で

あったため、Case(r)と同等の地震波群を Case(c)のようにスペクトル適合波で再現することができたが、断層破壊や地震動の伝播特性などの物理的な意味合いをスペクトル適合波に反映することは条件設定の観点で難しく、それらを考慮するには断層モデル地震波群を用いることが実適用上も現実的であると考えられる。

---

#### 第4章 参考文献

- [1] 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp.51-56, 1999
- [2] 日本原子力学会標準：原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2015，AESJ-SC-P006:2015
- [3] 池浦友則，野田静男：同一地点における地震動応答スペクトルのばらつき，日本地震工学会論文集，第5巻，第3号，pp.12-30, 2005
- [4] 岡野創，石田寛，加藤研一：地震動予測式の残差の周期間相関に関する理論的検討—短周期側における相関の反転増大の原因—，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第655号，pp.1617-1624, 2010
- [5] 坂本成弘，高木政美：地震動ばらつきの相関が建物応答に及ぼす影響，大成建設技術センター報，第42号，2009
- [6] 坂本成弘，内山泰生，翠川三郎：応答スペクトルの距離減衰のばらつき，第12回地震工学シンポジウム，pp.362-365, 2006
- [7] Baker, J.W. : Conditional Mean Spectrum : Tool for ground motion selection, ASCE Journal of Structural Engineering, pp.1-25, 2011
- [8] 坂本成弘：Spectral Stochastic Methodによる非正規確率過程の再現，日本建築学会学術講演梗概集，B-1，構造I，pp.203-204, 2000
- [9] 日本原子力学会：原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準：2015，AESJ-SC-P006, 2015
- [10] U.S. Nuclear Regulatory Commission : Seismic Safety Margins Research Program Phase I Final Report – Overview, NUREG/CR-2015, Vol.1, 1981
- [11] U.S. Nuclear Regulatory Commission : Severe Accident Risks : An Assessment for Five U. S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150, 1990
- [12] 日本原子力研究所：軽水炉モデルプラント地震PSA報告書，JAERI-Research 99-035, 1999.05
- [13] (財)日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針，2005
- [14] M. P. Bohn and J. A. Lambright : Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analysis for NUREG-1150, NUREG/CR-4840, SAND88-3102, 1990
- [15] Takada Tsuyoshi : Understanding Correlation, Proceedings of Sub-TAC meeting, 2016

## 第5章 断層モデル地震波による建物機能損傷評価の効率化手法の提案

### 5.1 はじめに

次世代地震リスク評価手法の目標像は、評価地点に起こり得る全ての地震波群を断層モデルに基づき評価し、その全ての地震波群を対象とした建物・機器の時刻歴応答解析を行うことにより地震リスクを評価するという手法である。すなわち、評価地点周りの全ての震源を対象に、断層モデルの震源特性の不確定性を考慮して断層モデル地震波群を作成するため、数十万～数百万波の非常に多くの時刻歴地震波群を作成する必要がある。このような地震波群作成の解析負荷もさることながら、それらを入力とした建物・機器の時刻歴応答解析を行うのは、実適用上、時間やコストの制約が大きく、現状は困難である。このような背景より、次世代地震リスク評価手法の実適用に向けては、断層モデル地震波群の作成数を低減させる効率化手法を確立することが重要である。

本章では、固有周期の異なる複数の機器類から成る任意の機器システムが設置された建物の機能損傷を対象として、最終的に評価したい地震リスク（本章ではシステム損傷確率）を良く表すことができる地震動強さ指標に基づき、地震リスクに影響する震源を選定することにより地震波群の作成数の低減を図る効率化手法を提案する。

図 5.1 に地震動強さ指標の違いによる地震波作成対象の範囲の違いのイメージ図を示す。評価地点に発生し得る全ての地震波群のうち、地震リスクに影響する地震波群は一部である。このとき、最終的に評価したい地震リスクを良く表すことができる地震動強さに寄与する震源を選定することによって、地震リスクに影響する断層モデル地震波群を効率的に作成できるようになると考えられる。

第2章の西田らによる断層モデル地震波群の作成手法<sup>[1],[2]</sup>では、解放基盤における最大加速度を地震動強さ指標として、地震波群作成対象とする震源を選定している。これは、従来の原子力施設のハザード評価が最大加速度に基づいて評価されているという理由だけではなく、原子力施設の地震リスク評価の対象である炉心損傷が固有周期の短い機器・配管類で構成されるシステムの不成功により発生するため、地震動強さ指標の中では最大加速度が最終的な地震リスクを良く表すことができるためである。

本章では、周期の短い機器から周期の長い機器まで様々な振動特性を有する機器が混在する第4章の機器・配管システムのように、最終的な地震リスクを良く表す地震動強さ指標が予め明らかになっていない場合においても、少ない解析量で地震リスクを最も良く表すことができる地震動強さ指標を選定し、効率的に断層モデル地震波群を作成する手法を提案する。ここでは、一つの震源から作成された断層モデル地震波群を用いて、第4章の建物モデルおよび機器・配管システムの損傷条件を変えたケースに対して、提案手法に基づき最適な地震動強さ指標が選定できることを検証した。

また、地震動強さ指標の選定手法を用いた次世代地震リスク評価手法の効率化に関して、任意の機

器システムを有する建物の機能損傷評価を対象として、地震動強さ指標の選定から最終的な地震リスク評価までの適用フローを提案する。

なお、発生頻度に関連付いた断層モデル地震波群  $N$  波によるシステム損傷確率の期待値は、Eq. 5.1 によって表される。

$$v_{\text{system,allwaves}} = \sum_{k=1}^N P(D | \text{wave}_k) \cdot v(\text{wave}_k) \quad \text{Eq. 5.1}$$

ここに、 $v(\text{wave}_k)$ ：地震波番号  $k$  の断層モデル地震波の発生頻度、 $P(D | \text{wave}_k)$ ：地震波番号  $k$  の断層モデル地震波による機器・配管システムの損傷確率、である。

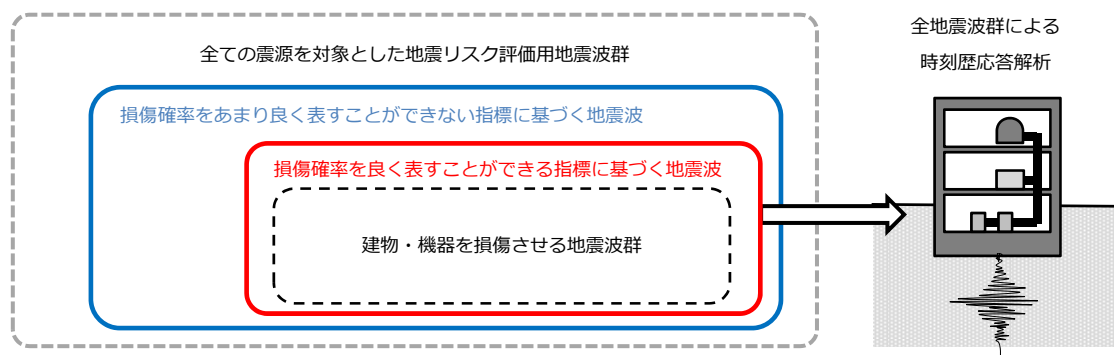


図 5.1 地震動強さ指標の違いによる地震波作成範囲のイメージ



## 5.2 断層モデル地震波による建物機能損傷評価の効率化手法

建物の機能損傷評価を対象として断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法（次世代手法）の効率化の概要を図 5.2 に示す。断層モデル地震波群作成の効率化手法は、最終的な地震リスクを最も良く表すことが可能な地震動強さ指標に基づく地震ハザードの分解に基づき、断層モデル地震波群を地震リスクに影響する震源に焦点を当てて作成することによって、断層モデル地震波群の作成サンプル数の低減を図る手法である。

図 5.2 は、短周期の機器類で構成された機器システム（すなわち、短周期の地震動強さ指標で損傷が決まるシステム）を有する建物を一例として示している。(a)に示すように、作成された断層モデル地震波群について、それらを入力地震動とした建物・機器の時刻歴応答解析を行い、応答と耐力の関係から機器システムの損傷確率を評価する。この時の地震波数に関しては、後述の 5.6 節に示すように、一つの震源から MCS によって作成された数十～数百波程度の地震波群があれば良い。各地震波に対してシステム損傷確率が算定できるが、断層モデル地震波の時刻歴波形から算定可能な様々な指標で表される地震動強さとシステム損傷確率の関係を(b)に示すような横軸を地震動強さとしたシステム損傷確率の分布として重ね書きし、断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布の正解値との誤差が最も小さい指標を、システム損傷確率を最も良く表現できる地震動強さ指標として選定する。(b)の△のプロットは、断層モデル地震波群の長周期指標の地震動強さとシステム損傷確率の分布を示しているが、ばらつきの大きい分布となっており長周期指標が機器システムの損傷をあまり良く表現できていないことを表している。それに対して、○のプロットは、短周期指標の地震動強さとシステム損傷確率の分布を示しているが、△のプロットに対してばらつきの小さい分布となっており、短周期指標が機器システム損傷を良く表現できていることを表している。

一方、(c)には評価地点の地震ハザード曲線を、ハザード分解に基づき各震源域に分解したハザード曲線として示しているが、○のプロットで示した短周期指標であれば、地震動強さが小さい範囲ではシステムが損傷しないため、地震リスク評価用の地震波群を作成する際には、地震動強さが大きい範囲のハザードに寄与する震源を対象に断層モデル地震波群を作成すれば十分である。一方で、△のプロットで示した長周期指標では、地震動強さが小さくてもシステムが損傷する可能性があり、小さい地震動強さを生じる震源についても地震波作成の対象となり、震源の数も多くなる。

このことから、断層モデル地震波群の作成の効率化のためには、最終的な地震リスク（ここでは、機器システムの損傷確率）を良く表現できる地震動強さ指標に基づくハザード分解を行い、震源を選定することが重要となる。

本章では、時刻歴波形から複数評価することができる地震動強さ指標の中から、最終的な地震リスクを最も良く表現できる指標を選定する方法を提案し、それにより断層モデル地震波群作成を効率化することについて検討する。

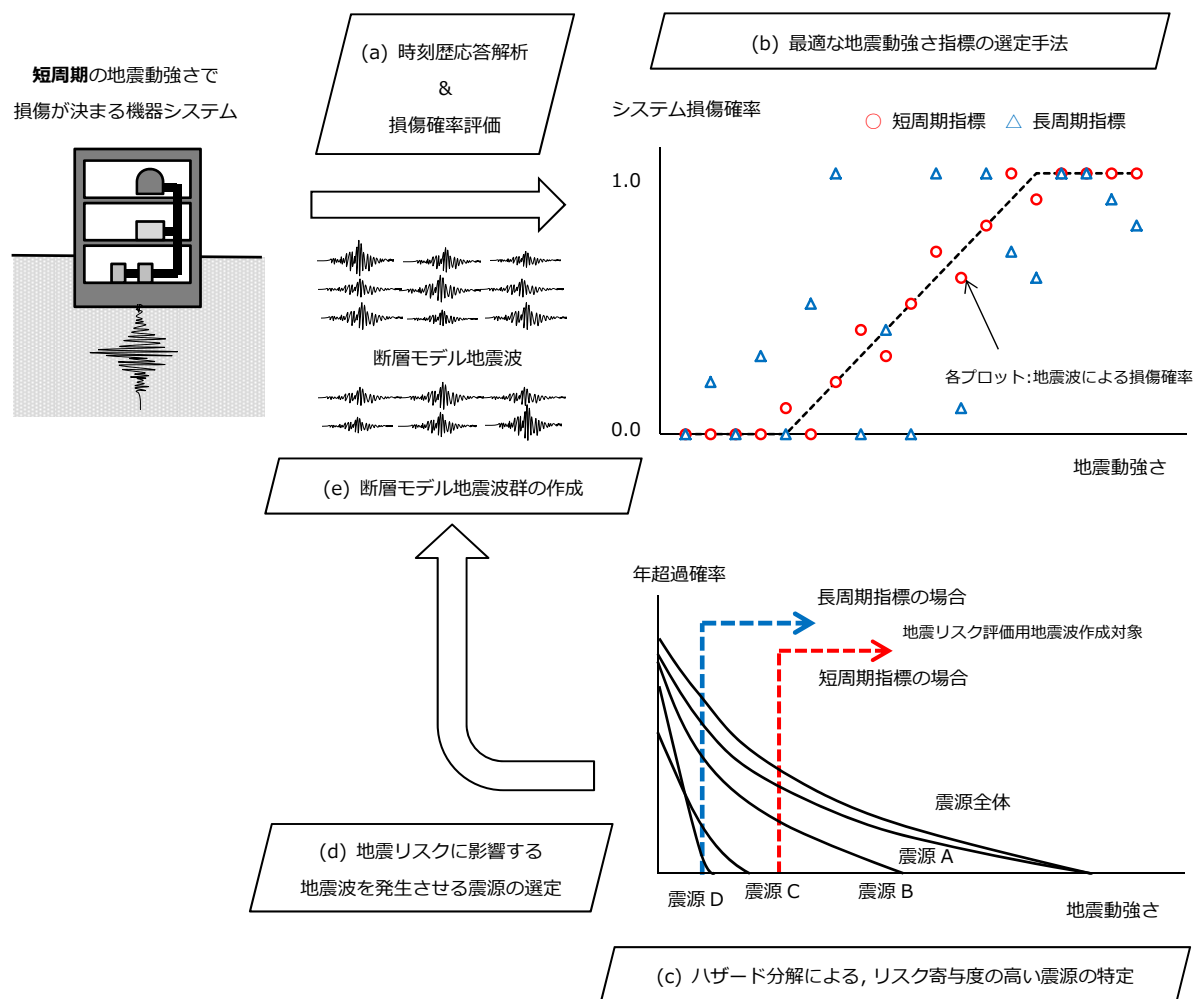


図 5.2 断層モデル地震波群による地震リスク評価の効率化手法の概要図

### 5.3 地震リスクを良く表現する地震動強さ指標の選定方法の提案

本節では、本論文で対象とする断層モデル地震波群による地震リスク評価手法と、従来のハザード曲線とフラジリティ曲線による地震リスク評価手法との関係を整理し、建物の地震リスクを良く表すことができる地震動強さ指標とはどのような指標かについて検討する。

#### 5.3.1 時刻歴地震波群による地震リスク評価手法と従来手法との関係

断層モデル地震波群による地震リスク評価手法の特長の一つに、時刻歴応答解析により、個々の地震波に対応する建物・機器システムの損傷確率を直接的に評価することができるという点が挙げられる。これに対して、時刻歴応答解析を行わない従来のハザード曲線と建物のフラジリティ曲線による地震リスク評価手法は、ある一つの地震動強さ指標を共通指標として、確率論・統計論的处理によって建物や機器システムの損傷確率を評価するため、得られる結果は最終的なリスク値のみである。

ここでは、断層モデル地震波群による地震リスク評価手法と従来手法の関係について整理するため、5.4.1 項に後述する震源(1)-PI から作成した地震波群 2736 波と、5.4.2 項に後述する機器・配管システムの「基本ケース」を対象とした断層モデル地震波群による地震リスク評価結果について、ハザード曲線と建物のフラジリティ曲線による従来手法との対応関係を確認した。なお、後述の検討と同様に、システムの各機器の耐力は確率分布として表しているため、地震リスク評価結果に関しては、「システムの損傷確率」として評価されている。

まず、地震動強さ指標を最大加速度  $ACC$  とした場合について、横軸を地震動強さ、縦軸を地震動強さの超過確率の関係で表すと、図 5.3 に示すハザード分布が得られる。これは、一つの震源から発生する 2736 波の断層モデル地震波群による、地震動強さ  $ACC$  を指標とした条件付きの地震ハザードを表している。

また、同様に地震動強さ指標を最大加速度  $ACC$  とした場合について、横軸を地震動強さ、縦軸をシステム損傷確率の関係で表すと、図 5.4(1)に示す右上がりの分布が得られる。これは、2736 波による機器・配管システムのフラジリティを表している。従来手法におけるフラジリティ曲線は、地震動強さと損傷確率の関係が対数正規分布に従うなどとした仮定の下で、1 本の累積分布曲線として表現される場合が多い。一方で、図 5.4 に示す 2736 波によるフラジリティは、ばらついた分布となっている。これは、地震動強さ指標として選定した  $ACC$  と時刻歴地震波群によるシステムの損傷確率が必ずしも線形関係になっていないことを表している。

ここで、図 5.5 は断層モデル地震波群 2736 波によるシステム損傷確率を、システム損傷確率順にプロットした関係を示している。仮に、システム損傷確率を良く表すことが可能な地震動強さ指標であれば、地震動強さ順に損傷確率を並べた場合にも図 5.5 のような滑らかな曲線が得られるものと考えられる。

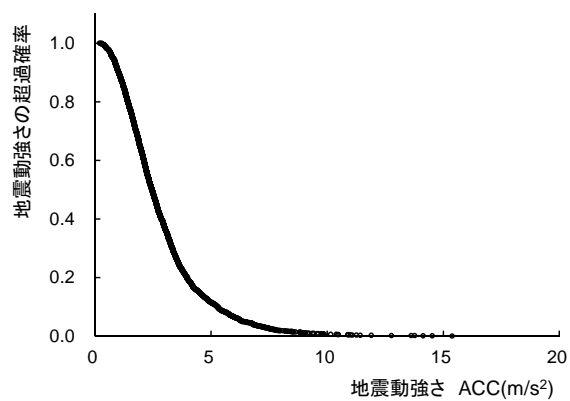


図 5.3 最大加速度を指標とした断層モデル地震波群 2736 波によるハザード表現

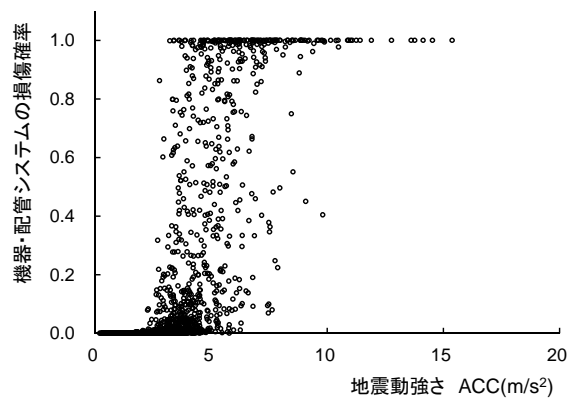


図 5.4 最大加速度を指標とした断層モデル地震波群 2736 波によるフラジリティ表現

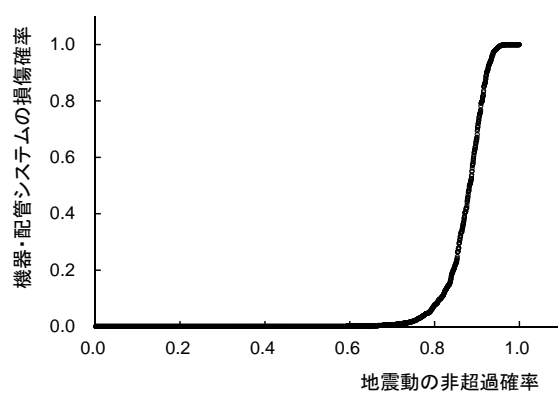


図 5.5 断層モデル地震波群 2736 波によるシステム損傷確率の分布

### 5.3.2 地震リスクを良く表現する地震動強さ指標の選定手法の提案

従来手法のように、ハザード曲線と fragility 曲線から最終的な地震リスク（例えば、システム損傷確率の期待値）を評価する場合には、ハザード曲線と fragility 曲線の横軸となる地震動強さ指標を共通指標とした曲線として表すということが行われる。

図 5.6(a)および(b)には、先に示した一つの震源から作成した断層モデル地震波群 2736 波による、一つの地震動強さに基づくハザード、fragility を示している。横軸の地震動強さは一例として解放基盤における最大加速度  $ACC$  を指標としている。また、(c)は、地震動強さを共通指標とし、縦軸を地震動強さの超過確率、横軸を機器・配管システムの損傷確率を示す。(c)の横軸に各損傷確率に応じた損失の大きさ（損失額など）を乗じた場合にはリスク曲線を表す分布を表している。(d)は(c)の軸を入れ替え、さらに超過確率を非超過確率に変更した分布であり、地震動強さ  $ACC$  の順にシステム損傷確率をプロットした分布となっている。従来手法と同様に、断層モデル地震波群に関しても、時刻歴波形から算定可能な地震動強さ指標を設定することによって、システム損傷確率の分布を表すことができる。

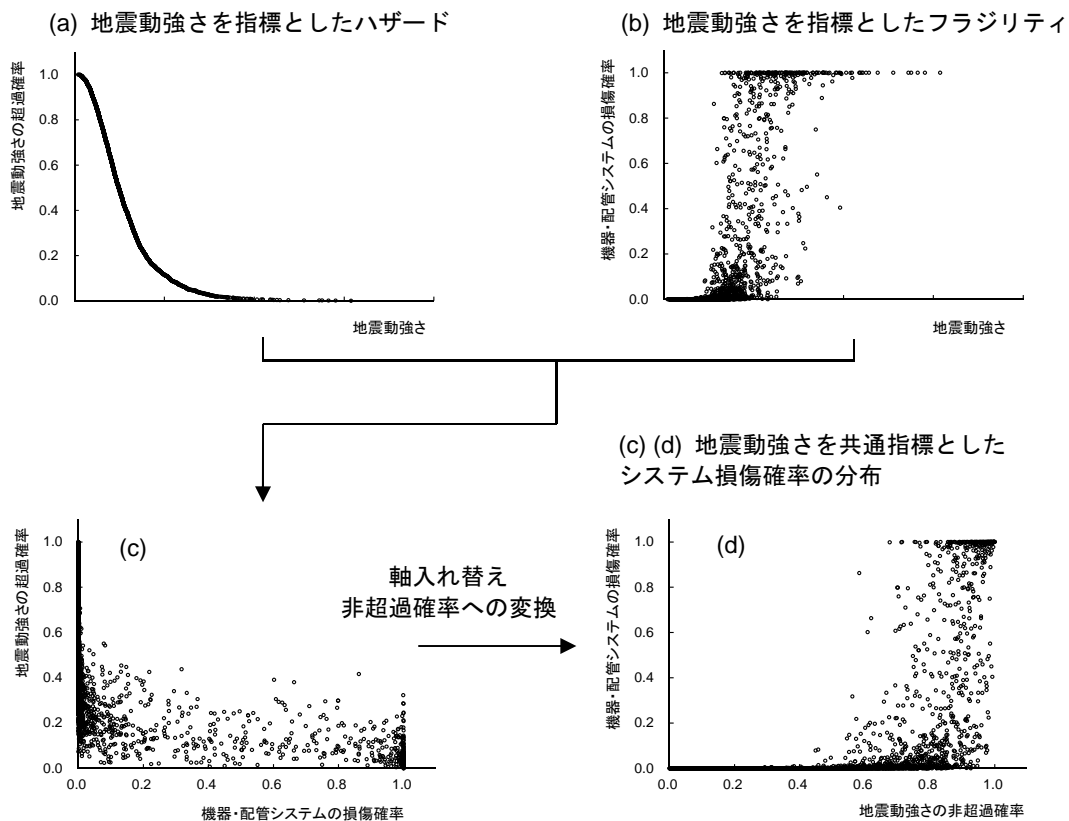


図 5.6 断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布

ここで、図 5.6 の(d)は、地震動強さの非超過確率を横軸とした場合のシステム損傷確率の分布を表している。これに対し、5.4.2 項の図 5.5 に示した地震動の非超過確率を横軸とした場合のシステム損傷確率の分布を表しており、「断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布」を表している。ここで、図 5.6 の(d)に関して、もし仮にシステム損傷確率を非常に精度良く評価できる地震動強さ指標が存在するとすれば、その地震動強さを指標としたシステム損傷確率の分布は、図 5.5 の断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布に対して、ばらつきの小さい分布になると考えられる。つまり、断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布に対する、地震動強さを指標としたシステム損傷確率の分布のばらつきがより小さくなる地震動強さ指標が、最終的な地震リスクであるシステム損傷確率を良く表すことができる指標であると考えられる。

図 5.7 は、断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布（実線）と地震動強さ（ACC）の非超過確率を横軸としたシステム損傷確率の分布（プロット値）を一例として示している。本章では、地震リスクを良く表すことができる地震動強さ指標の選定方法として、断層モデル地震波群の時刻歴波形から得られる複数の地震動強さ指標に対して、実線に対するプロットの偏差を Eq. 5.2 によって算定し、その偏差が最も小さくなるような地震動強さ指標（Eq. 5.3）を最適な地震動強さ指標として選定する手法について検討することとした。

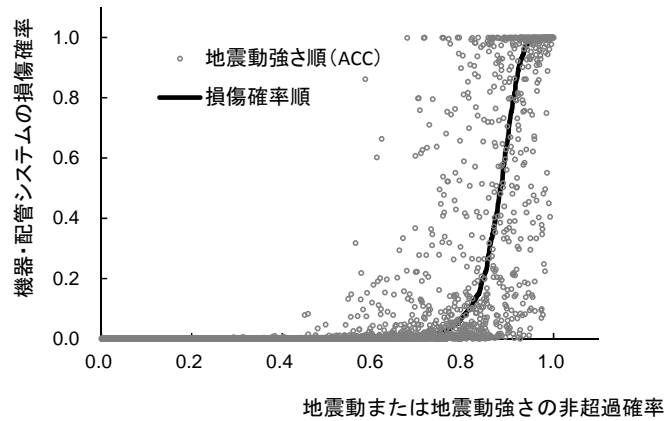


図 5.7 損傷確率順または地震動強さ順で並べた場合のシステム損傷確率の分布の比較

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (p_{dp,k} - p_{si,k})^2}{N-1}}, \quad j=1 \sim m \quad \text{Eq. 5.2}$$

$$\text{Appropriate Index} = \text{Seismic Intensity Index}[\min(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_j, \dots, \sigma_m)] \quad , \quad j=1 \sim m \quad \text{Eq. 5.3}$$

ここに、 $\sigma_j$ ：検討する  $j$  番目の地震動強さ指標による偏差（ $j=1 \sim m$ ）、 $k$ ：地震波の番号（ $k=1 \sim N$ ）、 $p_{dp,k}$ ：損傷確率順に並べた場合の  $k$  番目の地震波による損傷確率、 $p_{si,k}$ ：地震動強さ指標順に並べた場合の  $k$  番目の地震波による損傷確率、である。

ここで、図 5.7 のシステム損傷確率の分布について、その詳細を説明する。図 5.8 にマグニチュード  $M$ 、震源距離  $X$  の組合せ  $(M, X)$  で表される一つの震源を対象として作成された断層モデル地震波群  $N$  波によるシステム損傷確率の分布の作成による偏差  $\sigma$  の算定手順を示す。

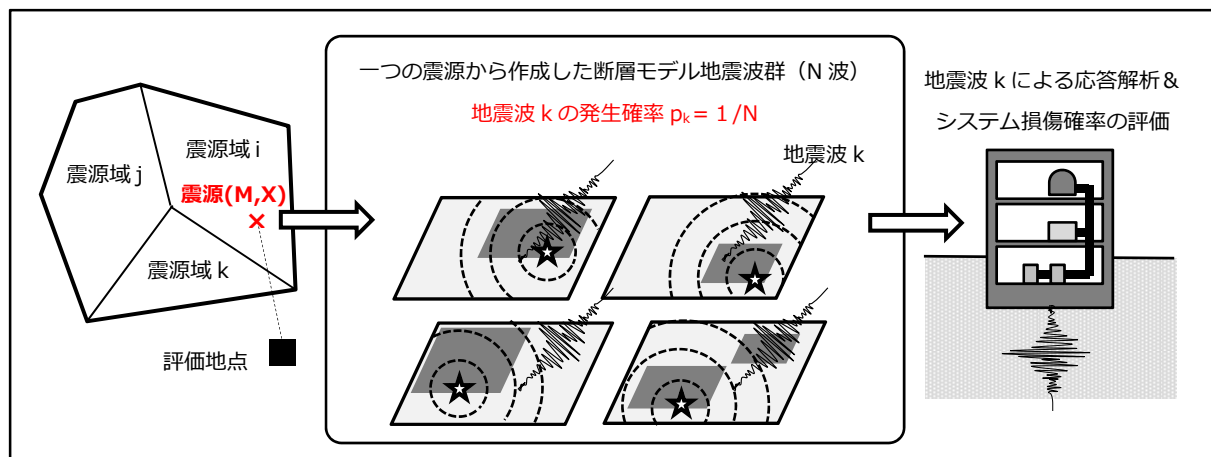
一つの震源から  $N$  波の断層モデル地震波群が MCS に基づき作成された場合、各地震波の発生確率が等しいことから、地震波  $k$  ( $k=1 \sim N$ ) の（条件付き）発生確率  $p_k$  は  $p_k = 1/N$  で表すことができる。また、各地震波に対して時刻歴応答解析を行うことによって各地震波によるシステム損傷確率を算定することができる。

図 5.5 の横軸の「地震動の非超過確率」は、「地震波  $k$  の（条件付き）発生確率  $p_k$  の累積確率」とも言い換えることができる。図 5.7 に示すシステム損傷確率の分布は、図 5.8 の左下図である (a+b1+b2) の分布に該当するが、これは(a), (b1), (b2)を重ね書いた分布である。(a), (b1), (b2)はそれぞれ、横軸を「地震波  $k$  の（条件付き）発生確率  $p_k$  の累積確率」としているが、その  $p_k$  の累積確率を算定する際の条件が異なっている。例えば、(a)はシステム損傷確率順に地震波  $k$  を並べた場合の条件付きの累積確率であり、(b1)および(b2)は地震動強さ順に地震波  $k$  を並べた場合の条件付きの累積確率である。これらを重ね書きできるのは、地震波群が MCS に基づき作成されており、一つの震源から作成した地震波群の各地震波の発生頻度が等確率であるためである。

地震リスクを最も良く表すことができる地震動強さ指標は、図 5.8 の左下図である (a+b1+b2) における(a)と(b1)の偏差あるいは(a)と(b2)の偏差を比較することにより、偏差が最も小さくなる指標を最適指標として選定している。

本提案手法の留意点は、偏差  $\sigma$  が最小となる地震動強さ指標は、時刻歴波形から算定可能な地震動強さ指標の候補として予め挙げていた地震動強さ指標の中における最適な指標として選定することはできるが、システム損傷確率を最も良く評価するための最適指標としては必ずしも十分ではないことに注意が必要であり、候補に挙げておく地震動強さ指標の内容が非常に重要となる。

以降の検討では、この提案手法によって選定された地震動強さ指標が、最終的な地震リスクを良く表す指標であるかどうかの妥当性を検証することとする。



地震波 k ( $k=1\sim N$ ) による  
システム損傷確率の分布の図示

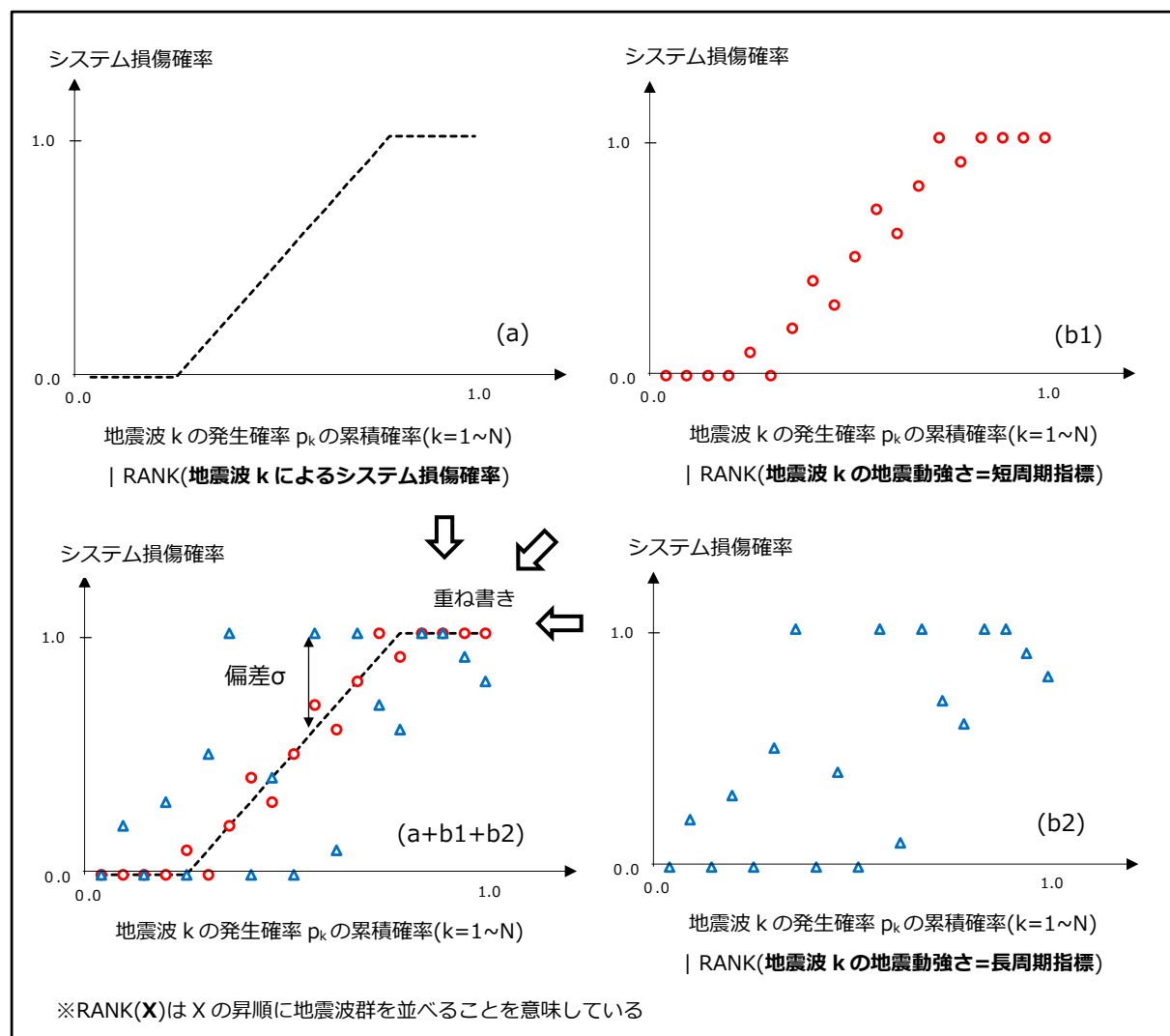


図 5.8 断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布を用いた偏差の算定



## 5.4 地震動強さ指標の選定方法の妥当性の検証

### 5.4.1 断層モデル地震波群

検討対象とする断層モデル地震波群は、一つの震源から震源特性の不確定性を考慮して作成された地震波群である。震源の違いによるシステム損傷確率への影響の違いの程度を確認するために、表 5.1 に示す 3 つの震源から作成された断層モデル地震波群についてそれぞれ同様の検討を行った。

震源 No.(1)-PI は、第 4 章においても用いた南関東の地震（プレート内）の 2,736 波である。震源 No.(1)-PU は、マグニチュードと震源距離がほぼ No.(1)-PI と同等で、地震タイプがプレート間地震である震源 No.(1)-PU の 3168 波である。震源 No.(5)は、内陸地殻内地震で、No.(1)-PI および No.(1)-PU と同等の地震波数が得られている震源グループ(5) 陸域の地震である。本節では主に、震源 No.(1)-PI の 2,736 波の地震波群を対象とした懸賞をメインとするが、比較用として No.(1)-PU および No.(5)の震源から作成された地震波群についても機器・配管システムの損傷確率を確認する。

表 5.1 検討用震源

No.	震源グループ	地震タイプ	$M_j$	$X_{eq}$	波数
(1)-PI	(1) 南関東の地震	プレート内	7.1	45 ~ 65km	2736 波
(1)-PU	(1) 南関東の地震	プレート間	7.1	50 ~ 65 km	3168 波
(5)	(5) 陸域の地震	内陸地殻内	6.5 ~ 6.8	6 ~8km	3096 波

各震源から作成された地震波群について、以降(a) ~ (c)に地震動特性の概要を示す。なお、各震源から作成された地震波群は、第 3 章と同様に波形合成法によって作成された地震波群そのものであり、対象敷地の地震ハザードに適合させるための係数は、加速度振幅に乗じていない。

図 5.9, 図 5.12, 図 5.15 に示す地震波の継続時間を比較すると、海溝型地震の震源 No.(1)-PI および No.(1)-PU よりも地殻内地震の No.(5)の方が短い傾向がある。また、加速度応答スペクトルは海溝型地震の震源 No.(1)-PI および No.(1)-PU は、周期 0.1s 付近でピークを示すが、地殻内地震の No.(5)は周期 0.15s 付近および周期 2~3s 付近にピークが確認できる。地殻内地震の No.(5)については、上位 50 波の応答スペクトルの特に周期が長い範囲において、大きくばらついているように見えるが、3000 波の応答スペクトルの統計値で見ると、海溝型地震と地殻内地震とでそれほど大きな傾向の違いは確認されなかった。

(a) 震源 No.(1)-PI：南関東の地震（プレート内地震）

震源 No.(1)-PI は、震源グループ(1)：南関東の地震のプレート内で発生する地震で、 $M_j = 7.1$ 、 $X_{eq} = 45\sim 65\text{km}$  である。この一つの震源から、合計 2736 波の地震波群が作成されている。解放基盤における最大加速度の上位 50 波の時刻歴波形と応答スペクトルを図 5.9 および図 5.10 に示す。また、2736 波による応答スペクトルの中央値および常用対数標準偏差を図 5.11 に示す。

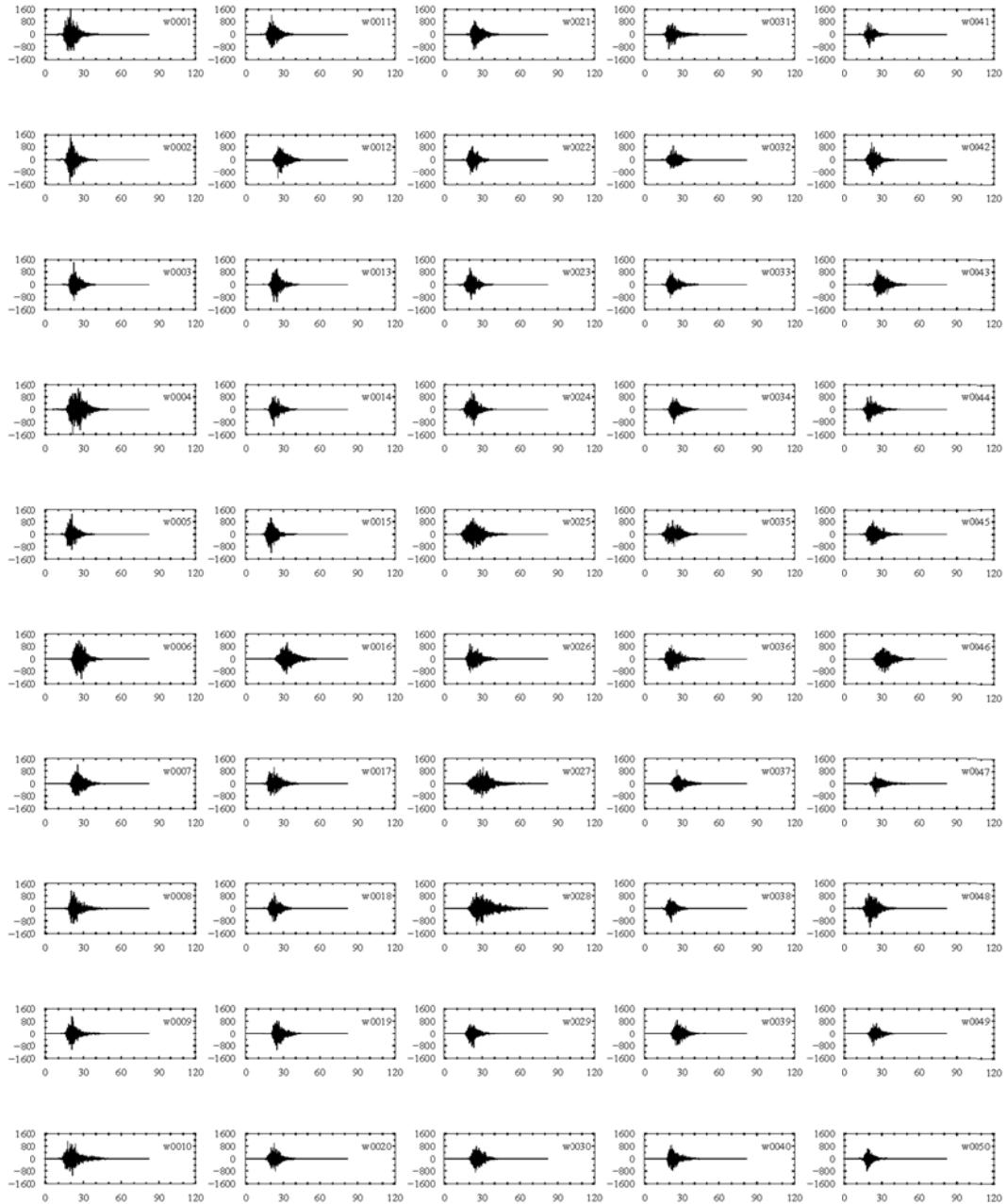


図 5.9 解放基盤における最大加速度上位 50 波の地震波群の時刻歴波形

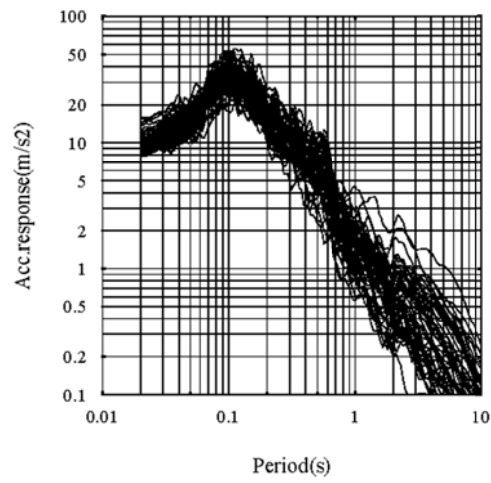


図 5.10 解放基盤における最大加速度上位 50 波の地震波群の応答スペクトル (h=5%)

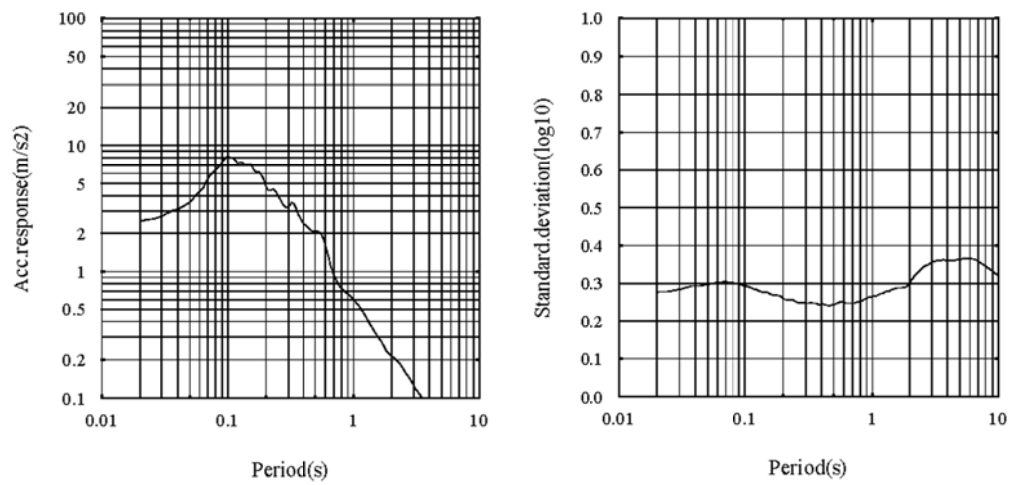


図 5.11 2736 波の地震波群の応答スペクトル中央値および対数標準偏差 (h=5%)

(b) 震源 No.(1)-PU：南関東の地震（プレート間地震）

震源 No.(1)-PU は、震源グループ(1)：南関東の地震のプレート間で発生する地震で、 $M_j = 7.1$ 、 $X_{eq} = 50 \sim 65 \text{km}$  である。この一つの震源から、合計 3168 波の地震波群が作成されている。解放基盤における最大加速度の上位 50 波の時刻歴波形と応答スペクトルを図 5.12 および図 5.13 に示す。また、3168 波による応答スペクトルの中央値および常用対数標準偏差を図 5.14 に示す。

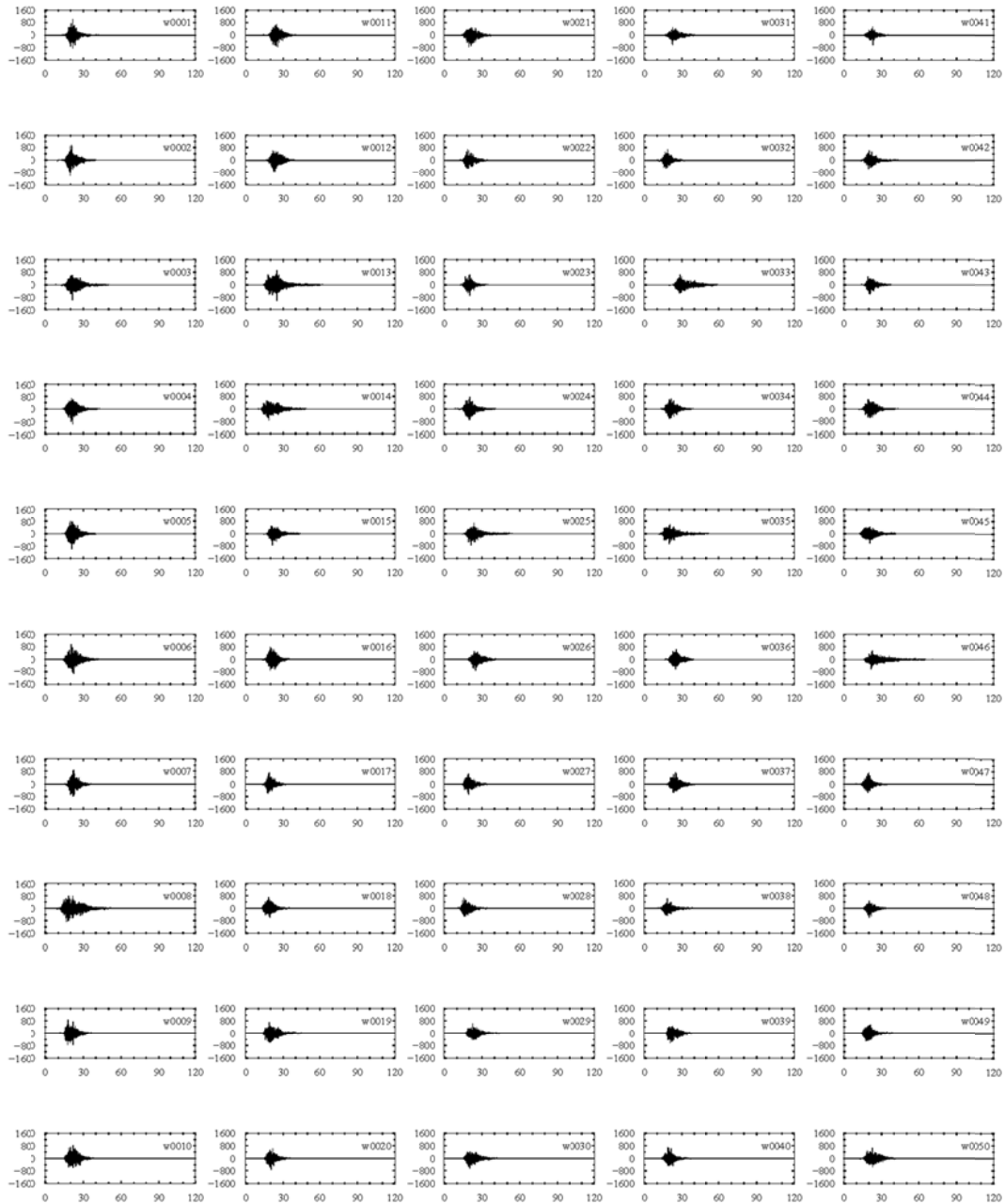


図 5.12 解放基盤における最大加速度上位 50 波の地震波群の時刻歴波形

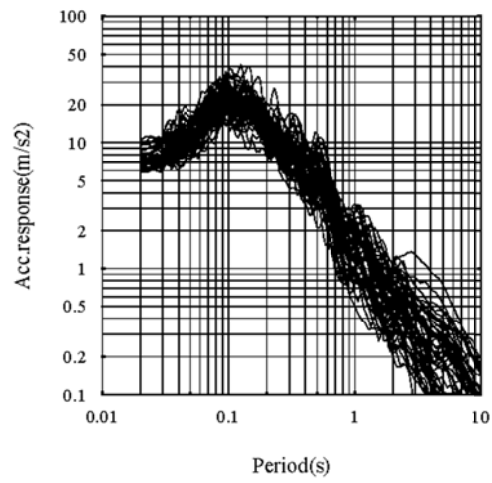


図 5.13 解放基盤における最大加速度上位 50 波の地震波群の応答スペクトル ( $h=5\%$ )

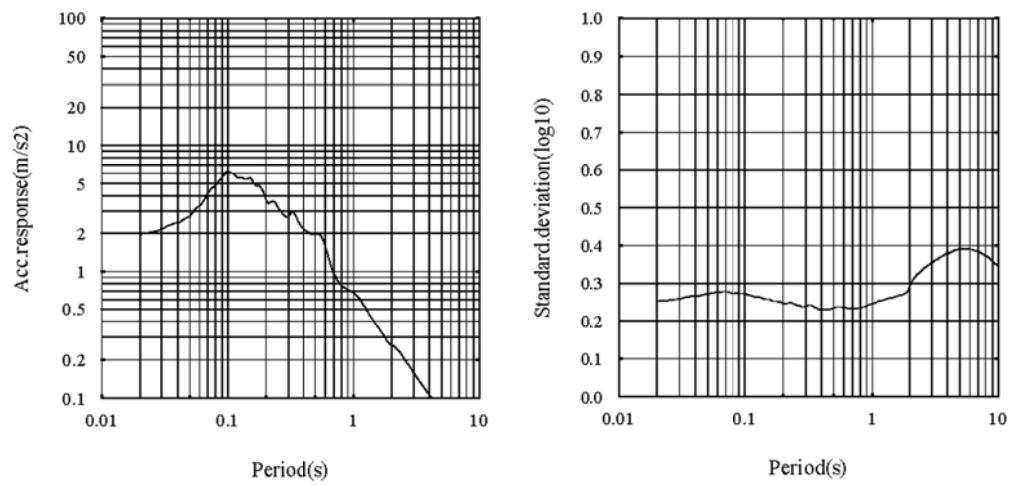


図 5.14 3168 波の地震波群の応答スペクトル中央値および対数標準偏差 ( $h=5\%$ )

(c) 震源 No.(5)：陸域の地震

震源 No.(5)は、震源グループ(5)：(震源を特定しない) 陸域の地震で、 $M_j = 6.5 \sim 6.8$ ,  $X_{eq} = 6 \sim 8\text{km}$  である。この一つの震源から、合計 3096 波の地震波群が作成されている。解放基盤における最大加速度の上位 50 波の時刻歴波形と応答スペクトルを図 5.15 および図 5.16 に示す。また、3096 波による応答スペクトルの中央値および常用対数標準偏差を図 5.17 に示す。

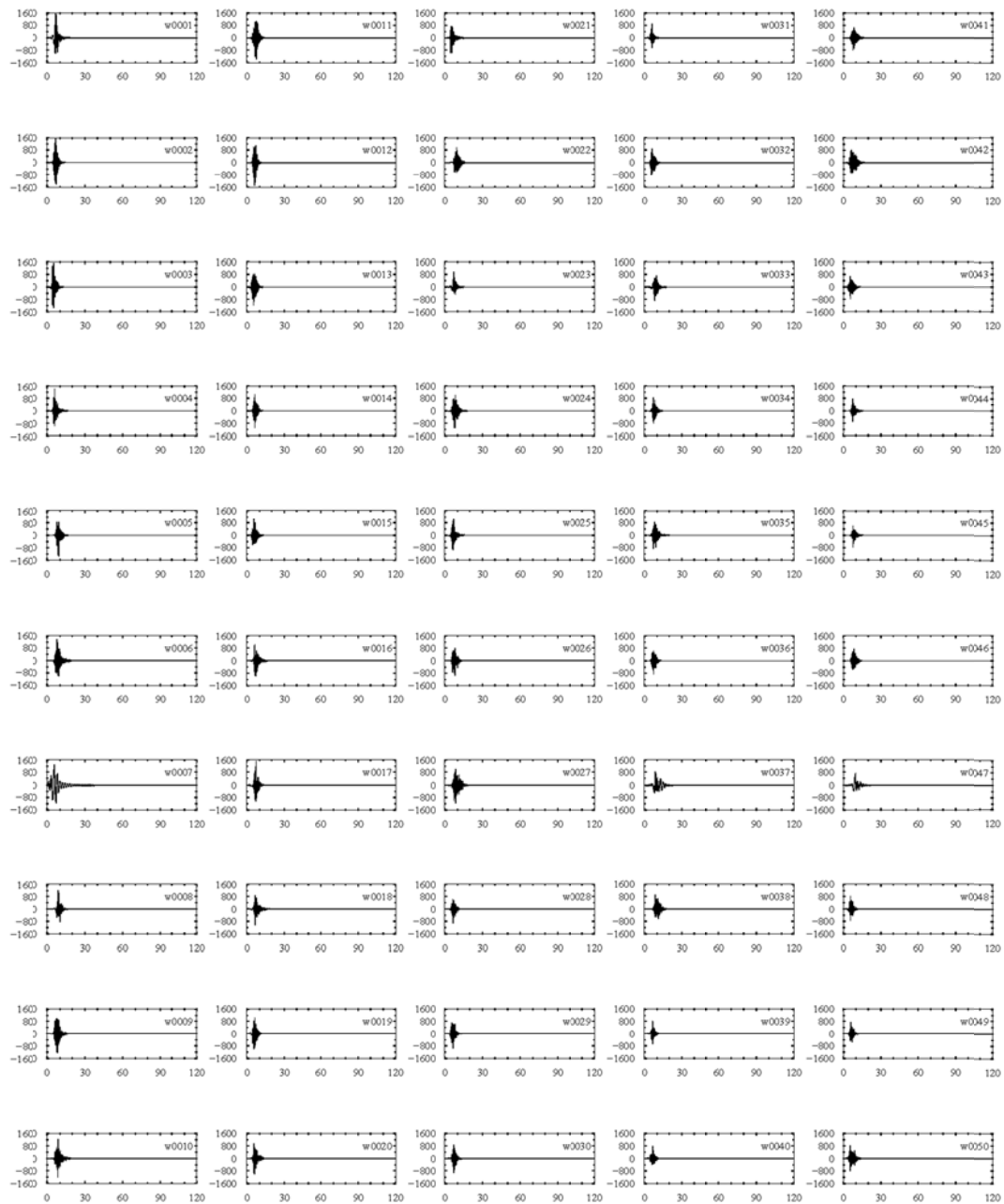


図 5.15 解放基盤における最大加速度上位 50 波の地震波群の時刻歴波形

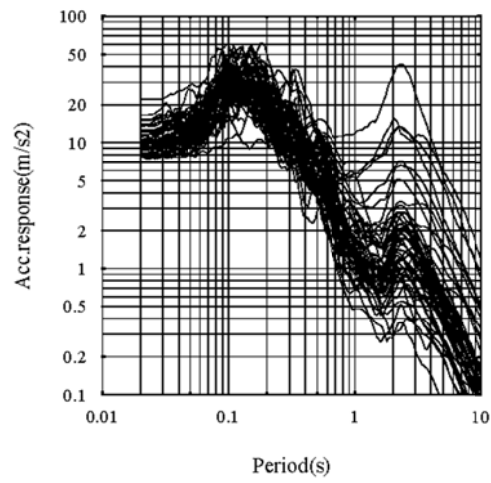


図 5.16 解放基盤における最大加速度上位 50 波の地震波群の応答スペクトル ( $h=5\%$ )

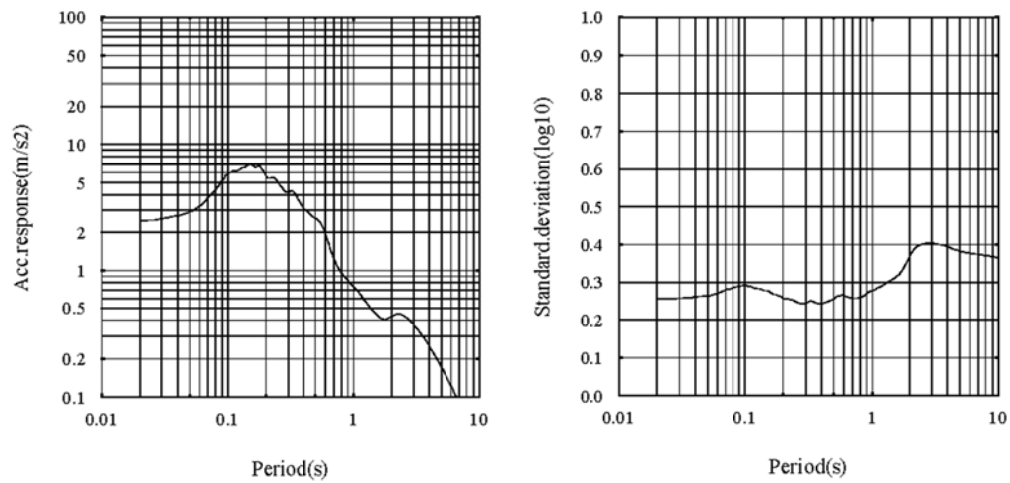


図 5.17 3096 波の地震波群の応答スペクトル中央値および対数標準偏差 ( $h=5\%$ )

#### 5.4.2 機器・配管システム

検討対象とする機器・配管システムは、第3章と同じ機器・配管システム構成とする。図 5.18 に機器・配管システムの各機器・配管の設置状況を示す。ただし、本章の検討では、機器・配管システムの任意性に配慮し、各機器・配管の耐力条件を変えてシステム損傷条件の異なる複数のケースを設定した。表 5.2 に検討するシステムケースと各機器・配管の耐力条件を示す。

「基本ケース」は、第3章のシステムと同じ耐力条件としたケースである。また、「均等ケース」は、各構成機器類のシステム損傷確率への寄与率をほぼ同等になるように各機器・配管の耐力中央値を調整したケースである。「均等ケース」以下のシステムケースは、「基本ケース」の各機器・配管の耐力中央値に乘じる係数を変えて、システム損傷に寄与する部位を変化させたケースとなっている。例えば、「配管ケース」は1階～4階の直列配管の耐力が相対的に弱く、1階～4階の直列配管の損傷によってシステム全体の損傷確率が決まるケースとなっている。

表 5.2 の各システムケースの耐力条件を設定する際、まずはじめに、システムケース「基本ケース」について、震源 No.(1)-PI の 2736 波の地震波群による各機器・配管のシステム損傷確率への寄与度の評価を行った。ここで、各機器・配管のシステム損傷確率への寄与度は、各機器・配管の損傷確率を損傷確率順に並べた場合の、各機器・配管のシステム損傷確率への影響程度から確認した。

図 5.19 に「基本ケース」のシステム全体および機器・配管ごとの損傷確率の結果を示す。図 5.19(a) の黒線は、震源 No.(1)-PI の 2736 波による機器・配管システム全体の損傷確率を表しており、これに対し、直列系の機器であれば機器の損傷確率順に並べた曲線がシステム損傷確率順に並べた曲線により近づく機器がシステム損傷確率に影響度の高い機器であり、並列系の機器であればシステム損傷確率順に並べた曲線からより離れる機器がシステム損傷確率に影響度の高い機器であると言える。図 5.19(a)は、直列系の機器・配管の損傷確率とシステム全体の損傷確率を示した図であることから、システム全体の損傷確率の曲線（黒線）に近い曲線となる部位がシステム全体の損傷確率に寄与する部位、すなわち、システムの中で最も脆弱な部位である。「基本ケース」のシステム損傷確率に最も寄与する部位は、図 5.19(a)の結果より1～4階の配管群であることが分かる。また、(b)の結果より3階、4階の配管が配管群全体の損傷確率への寄与度が高めであるものの、各階でそれほど大きな差異は見られないことが確認できる。また、1階の並列接続の水槽2と水槽3については、システム全体の損傷確率への寄与度は低いが、図 5.19(b)の結果と並列接続の関係より、水槽3の方が水槽2よりも並列水槽の損傷確率への寄与度が高いことが確認できる。

この「基本ケース」の結果を用いて各機器・配管の耐力中央値を調整したのが「均等ケース」である。図 5.3 には「均等ケース」のシステム全体および機器・配管ごとの損傷確率の結果を示している。直列系およびの機器・配管類のシステム損傷確率への寄与度が均等になっているのが確認できる。その他のシステムケースの機器・配管に乘じる係数は、この「均等モデル」を基に調整し、設定した。



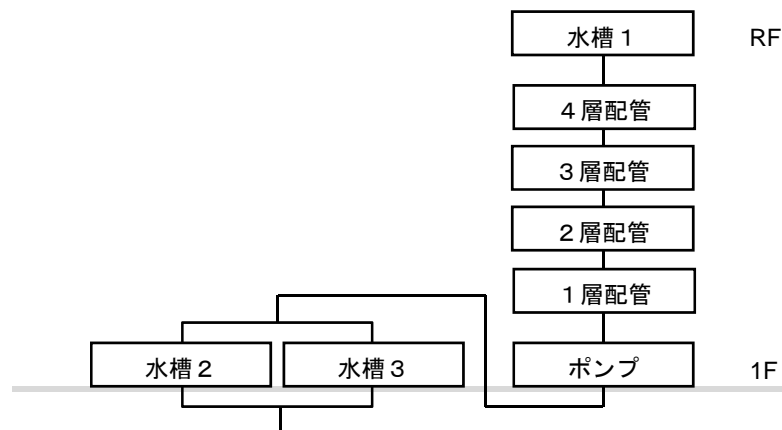
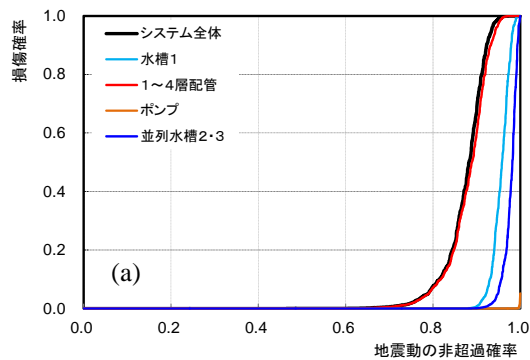


図 5.18 機器・配管システム構成

表 5.2 機器・配管システムケースの各機器・配管の耐力条件

機器・設置階	R 階 水槽 1	4 階 配管	3 階 配管	2 階 配管	1 階 配管	1 階 ポンプ	1 階 水槽 2	1 階 水槽 3
損傷指標	2Hz 応答	層間 変形角	層間 変形角	層間 変形角	層間 変形角	20Hz 応答	2Hz 応答	6Hz 応答
耐力	中央値 ばらつき	35 m/s <sup>2</sup> 0.15	1/150rad. 0.20	1/150rad. 0.20	1/150rad. 0.20	1/150rad. 0.20	14 m/s <sup>2</sup> 0.15	14 m/s <sup>2</sup> 0.15
システムケース								
耐力中央値に乗じる係数								
基本	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
均等	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.8	1.0
配管	1.0	0.75	0.75	0.75	0.75	0.5	0.8	1.0
1 階水槽	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.4	0.5
1 階ポンプ	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	0.25	0.8	1.0
R 階水槽 1	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.8	1.0
1 階配管	1.0	0.75	1.5	1.5	1.5	0.5	0.8	1.0
2 階配管	1.0	1.5	0.75	1.5	1.5	0.5	0.8	1.0
3 階配管	1.0	1.5	1.5	0.75	1.5	0.5	0.8	1.0
4 階配管	1.0	1.5	1.5	1.5	0.75	0.5	0.8	1.0
水槽 2	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.2	0.5
水槽 3	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.4	0.25



(a) 各機器・配管の損傷確率

(b) 1~4 階直列配管の各配管の損傷確率

(c) 1 階並列水槽の各水槽の損傷確率

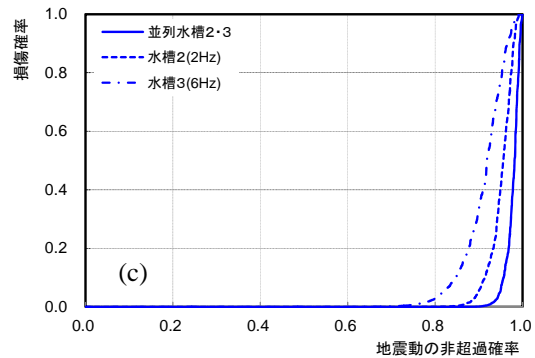
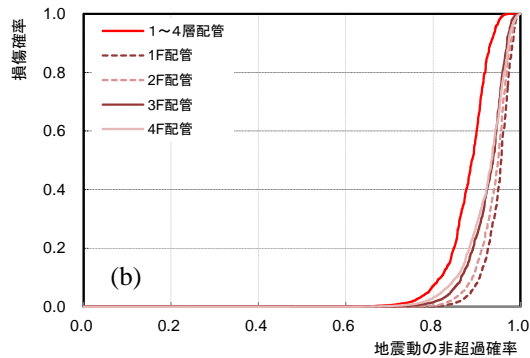
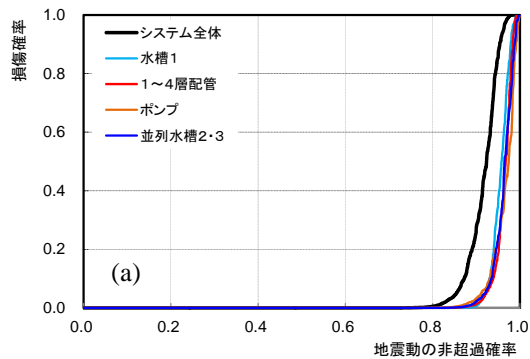


図 5.19 機器・配管システム「基本ケース」の各機器・配管の損傷確率



(a) 各機器・配管の損傷確率

(b) 1~4 階直列配管の各配管の損傷確率

(c) 1 階並列水槽の各水槽の損傷確率

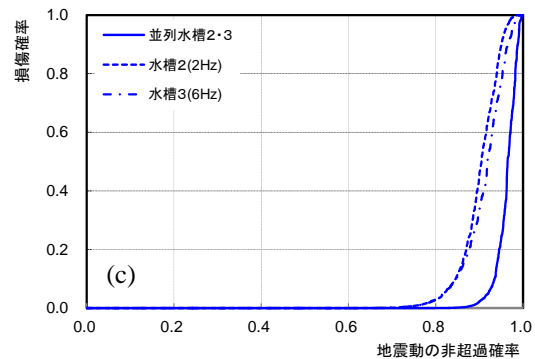
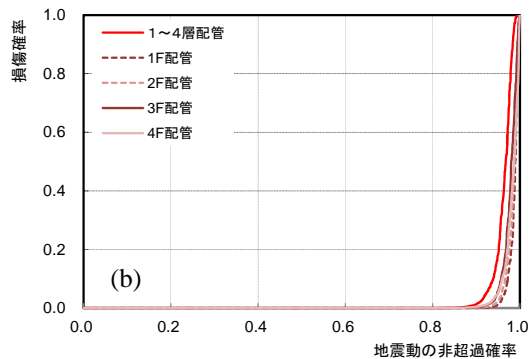


図 5.20 機器・配管システム「均等ケース」の各機器・配管の損傷確率

### 5.4.3 地震動強さ指標

時刻歴地震波から評価可能な地震動強さ指標として、第4章において対象とした7つの地震動強さ指標に加えて、周波数応答強さとして減衰5%の $f$ Hz 応答加速度 ( $f=0.1 \sim 50$  Hz) を対象とする。表 5.3 に地震動強さ指標の一覧を示す。なお、地震動強さの評価位置は解放基盤を基本とし、比較用として基礎底面についても検討する。

表 5.3 対象とする地震動強さ指標

<i>ACC</i>	最大加速度
<i>CAV</i>	最大速度
<i>VEL</i>	最大速度
<i>E</i>	入射エネルギー密度
<i>S.I.</i>	スペクトル強度
<i>M.S.I.</i>	修正スペクトル強度
$A_{jma}$	気象庁有効加速度
<i>RSP f</i>	$f$ Hz 応答加速度 ( $h=5\%$ )

### 5.4.4 建物モデル

建物モデルについては、第3章と同じ弾塑性建物モデルを基本とする。比較用として、1次固有振動数が同じ弾性建物モデルについても検討した。

### 5.4.5 解析ケース

第 4 章の機器・配管システム構成について，システム内の機器の耐力中央値を変動させることによってシステム内に脆弱な部位を予め設定した複数の解析ケースを対象として，5.3 節の提案手法の妥当性検証を行った。これらの解析ケースは，意図的に脆弱な部位を設けることによって，システムの損傷を最も良く表すことができる地震動強さ指標が予想可能なシステムとなっている。これらの解析ケースについて，提案手法に基づき偏差を算定し，選定された地震動強さ指標がシステム損傷を良く表す指標と一致しているかどうかを確認することにより提案手法の妥当性を検証する。なお，地盤や建物復元力特性による影響を確認のため，これらも解析条件の一つとして解析ケースを設定した。

表 5.4 に解析ケースを示す。システム損傷確率に寄与する部位，地震動強さの評価位置，建物の復元力特性の条件が異なる解析ケースについて，震源 No.(1)-PI の 2736 波の地震波群を入力地震動とした機器・配管システムの損傷確率評価を行い，断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布に対する偏差が最小となる地震動強さ指標を確認した。

表 5.4 偏差が最小となる地震動強さ指標（震源 No.(1)-PI）

解析ケース		解析条件		
		システム損傷確率に寄与する部位	地震動強さ評価位置	建物復元力特性
No.01	基本	1～4 階配管	解放基盤	弾塑性モデル
No.02	均等	—		
No.03	配管	1～4 階配管		
No.04	1 階水槽	1 階並列水槽（2Hz,6Hz）		
No.05	1 階ポンプ	1 階ポンプ（20Hz）		
No.06	R 階水槽 1	R 階水槽 1（2Hz）		
No.11	1 階配管	1 階配管		
No.12	2 階配管	2 階配管		
No.13	3 階配管	3 階配管		
No.14	4 階配管	4 階配管		
No.21	水槽 2	1 階水槽 2（2Hz）		
No.22	水槽 3	1 階水槽 3（6Hz）		
No.31	基本・弾性モデル	—	解放基盤	弾性モデル
No.32	基本・基礎底面	—	基礎底面	弾塑性モデル
No.41	1F ポンプ・弾性モデル	1 階ポンプ（20Hz）	解放基盤	弾性モデル
No.42	水槽 1・弾性モデル	R 階水槽 1（2Hz）	解放基盤	弾性モデル
No.51	1F ポンプ・基礎底面	1 階ポンプ（20Hz）	基礎底面	弾塑性モデル

#### 5.4.6 解析結果

各解析ケースについて、各地震動強さ指標のシステム損傷確率の分布に対する偏差の結果を表 5.5 に示す。また、図 5.21～図 5.37 には、システム全体の断層モデル地震波群による損傷確率の分布および各機器・配管の寄与度（左上図）、7つの地震動強さを指標の偏差の結果（左下図）および  $f$ Hz 応答加速度の偏差の結果（右上図、右下図）を示す。下段の 2 図に示す断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布に対する偏差の結果について、黒線はシステム全体で見た場合の偏差を示しており、その中で偏差が最小となる地震動強さ指標が提案手法によって導き出された最適地震動強さ指標である。

No.01「基本ケース」は、図 5.21 左上図から、直列配管が最もシステム損傷確率に寄与する部位であることが確認できるが、断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布に対する偏差は、 $M.S.I.$  および  $A_{jma}$  が最小となった。図 5.21 右上図に示す各配管の偏差の結果に着目すると、建物の弾性 1 次振動数 4.3H よりも小さい 2～4Hz の範囲において緩やかに偏差が小さくなっており、建物の非線形化の影響が確認できる。図 5.21 下 2 図に示すシステム全体の偏差に着目すると、配管群の偏差が小さくなる周波数成分をバランスよく含む  $M.S.I.$  および  $A_{jma}$  の偏差が小さく、システム損傷確率の評価により相応しい地震動強さ指標であることが読み取れる。

比較用に、No.01「基本ケース」について、建物モデルを弾性モデルとした No.31「基本・弾性ケース」についても評価したところ、図 5.33 に示すように、断層モデル地震波群によるシステムの損傷確率の分布に対する偏差は  $RSP4.2(\text{Hz})$  が最小となった。右上図に示す各配管の偏差の結果に着目すると、建物の 1 次固有周波数 4.3Hz において局所的に偏差が小さくなっている。このことから、弾性建物の場合で、配管のように建物最大応答（ここでは、最大層間変形）によって損傷が決まる機器がシステム損傷確率に寄与する場合には、建物の 1 次固有周波数に対応する地震動強さがシステム損傷確率の評価に相応しい指標であることが確認された。

No.02「均等ケース」は、図 5.22 左上図より、どの機器・配管もシステム損傷確率に同等の寄与度があることが確認できるが、断層モデル地震波群によるシステムの損傷確率の分布に対する偏差は  $A_{jma}$  が最小となった。 $A_{jma}$  は 0.1～10Hz 程度の周期帯を広く考慮した指標であり、様々な振動数を有する機器・配管類で構成されるシステムで、かつ、局所的に損傷に寄与する部位が無い場合には、構成機器の振動数帯を考慮した地震動強さ指標の偏差が小さくなる傾向が読み取れる。

No.03～No.06 の各解析ケースは、No.02「均等ケース」に用いたシステムケースに対して、直列系機器の一部分の耐力が相対的に小さくなるようにしたケースである。

No.03「配管ケース」は、直列接続された 1 階～4 階配管群の耐力を相対的に小さくなるようにしたケースであり、図 5.23 に示すように、偏差は  $M.S.I.$  が最小となり、直列配管でシステム損傷確率が決まる No.1 基本ケースとほぼ同様の傾向を示した。

No.04「1 階水槽ケース」は、1 階床上に並列接続された水槽 2（固有振動数 2.0 Hz）と水槽 3（固有振動数 6.0 Hz）の耐力を相対的に小さくするようにしたケースであり、偏差は  $M.S.I.$  が最小となった。図 5.24 右下図の  $RSP f \text{ Hz}$  の偏差の結果に着目すると、2.0Hz と 6.0Hz において偏差が極小値となることが確認できるが、一方で図 5.24 左下図の地震動強さ指標の結果に着目すると、それら 2 つの振動数を含む  $M.S.I.$  のほうがより偏差が小さくなっており、固有振動数が異なる複数の部位によってシステム全体の損傷確率が決まる場合には、それらの振動数を両方含む地震動強さ指標のほうがより相応しい指標となることが読み取れる。

No.05「1 階ポンプケース」は、1 階床上の揚水ポンプ（固有振動数 20Hz）の耐力を相対的に小さくするようにしたケースであり、予想では  $RSP20(\text{Hz})$  の偏差が最小となると考えられたが、 $ACC$  および  $RSP50(\text{Hz})$  の偏差が最小となった。地震動強さ  $RSP f \text{ Hz}$  について、基礎底面における応答スペクトル（減衰 5%）を用いて算定した No.51「1 階ポンプ・基礎底面ケース」についても同様に評価したところ、基礎底面では予想通り  $RSP20(\text{Hz})$  において最小となる結果が得られており、解放基盤～基礎底面までの地盤が影響した可能性が考えられる。なお、弾性建物とした No.41「1 階ポンプ・弾性ケース」においても No.05 と同様の指標が得られており、建物の復元力特性による影響ではないことを確認している。

No.06「R 階水槽 1 ケース」は、R 階の水槽 1（固有振動数 2Hz）の耐力を相対的に小さくするようにしたケースであり、偏差は  $RSP2.1(\text{Hz})$  が最小となった。これより、ある周波数応答で損傷が決まるような直列系機器がシステム損傷確率に最も寄与する場合には、該当周波数に対応する地震動強さ指標がより相応しい指標であることが読み取れる。また、弾性建物とした No.42「R 階水槽 1・弾性ケース」においても、No.06 と同様の指標が得られている。

No.11～No.14 の各解析ケースは、1 階～4 階の直列接続配管のある一つの配管の耐力を相対的に小さくするようにしたケースであり、断層モデル地震波群によるシステムの損傷確率の分布に対する偏差は、各ケースとも  $M.S.I.$  または  $A_{jma}$  が最小となった。図 5.27～図 5.30 右上図に示す各配管の偏差の結果に着目すると、耐力を相対的に小さくした層の配管において偏差が最小となる時の周波数が、システム全体において偏差が小さくなる周波数と一致しているのが確認できる。しかしながら、No.01 や No.03 のケースと同様に、偏差が小さくなる振動数帯を広く含む  $M.S.I.$  または  $A_{jma}$  の方が総合的には偏差が小さくなる傾向が確認された。

No.21～No.22 の各ケースは、1 階の並列水槽のある一つの水槽の耐力を相対的に小さくするようにしたケースであり、偏差は、水槽 2（固有振動数 2.0Hz）の水槽の耐力を小さくした No.21 については  $RSP5.9(\text{Hz})$ 、水槽 3（固有振動数 6.0Hz）の水槽の耐力を小さくした No.22 については  $RSP2.0(\text{Hz})$  が最小となった。これは、並列接続の場合には、耐力が相対的に大きい機器の方がシステム全体の損傷確率への寄与度が高いためで、並列接続された機器の場合についても、システム損傷確率に寄与する側の機器の応答を良く表す指標が選定されていることが確認された。

以上より、本章において提案した損傷確率分布による偏差に基づく最適地震動強さ指標の選定手法によって、システム損傷を良く表す指標，すなわち，システム損傷のボトルネックとなる機器の損傷を良く表す指標を選定できることを示した。また，ここで選定される指標は，建物挙動（弾性・弾塑性），地盤条件，建物応答の減衰の条件を加味した上での，最適指標が選定されることを確認した。

表 5.5 偏差が最小となる地震動強さ指標（震源 No.(1)-PI）

検討ケース	<i>ACC</i>	<i>CAV</i>	<i>VEL</i>	<i>E</i>	<i>S.I.</i>	<i>M.S.I</i>	<i>A<sub>jma</sub></i>	最小 <i>RSP f</i> (fHz)	
No.01 基本	0.191	0.231	0.157	0.185	0.153	<b>0.122</b>	<b>0.122</b>	0.145	(2.6Hz)
No.02 均等	0.152	0.188	0.148	0.166	0.146	0.111	<b>0.107</b>	0.143	(2.1Hz)
No.03 配管	0.201	0.255	0.195	0.236	0.199	<b>0.123</b>	0.136	0.150	(3.4Hz)
No.04 1 階水槽	0.268	0.281	0.275	0.292	0.272	<b>0.221</b>	0.225	0.241	(6.1Hz)
No.05 1 階ポンプ	<b>0.092</b>	0.223	0.260	0.306	0.280	0.155	0.172	<b>0.092</b>	<b>(50.0Hz)</b>
No.06 R 階水槽 1	0.269	0.289	0.227	0.239	0.217	0.214	0.207	<b>0.172</b>	<b>(2.1Hz)</b>
No.11 1 階配管	0.184	0.226	0.148	0.177	0.146	0.124	<b>0.121</b>	0.140	(2.6Hz)
No.12 2 階配管	0.187	0.230	0.154	0.184	0.152	<b>0.121</b>	0.121	0.142	(2.6Hz)
No.13 3 階配管	0.180	0.228	0.163	0.196	0.163	<b>0.111</b>	0.117	0.141	(3.4Hz)
No.14 4 階配管	0.157	0.213	0.173	0.211	0.181	<b>0.097</b>	0.108	0.139	(3.6Hz)
No.21 水槽 2	0.246	0.256	0.316	0.348	0.331	0.231	0.243	<b>0.172</b>	<b>(5.9Hz)</b>
No.22 水槽 3	0.361	0.362	0.309	0.313	0.294	0.317	0.305	<b>0.195</b>	<b>(2.0Hz)</b>
No.31 基本・弾性	0.153	0.187	0.180	0.199	0.182	0.121	0.132	<b>0.057</b>	<b>(4.2Hz)</b>
No.32 基本・基礎	0.181	0.235	0.177	0.194	0.183	0.118	<b>0.117</b>	0.142	(2.9Hz)
No.41 1 階ポンプ・弾性	<b>0.092</b>	0.223	0.261	0.306	0.281	0.156	0.174	<b>0.092</b>	<b>(50.0Hz)</b>
No.42 水槽 1・弾性	0.183	0.212	0.171	0.183	0.166	0.145	<b>0.141</b>	<b>0.141</b>	<b>(2.0Hz)</b>
No.51 1 階ポンプ・基礎	0.094	0.242	0.295	0.325	0.318	0.161	0.218	<b>0.060</b>	<b>(20.0Hz)</b>

※太線網掛：偏差が最小となる地震動強さ指標

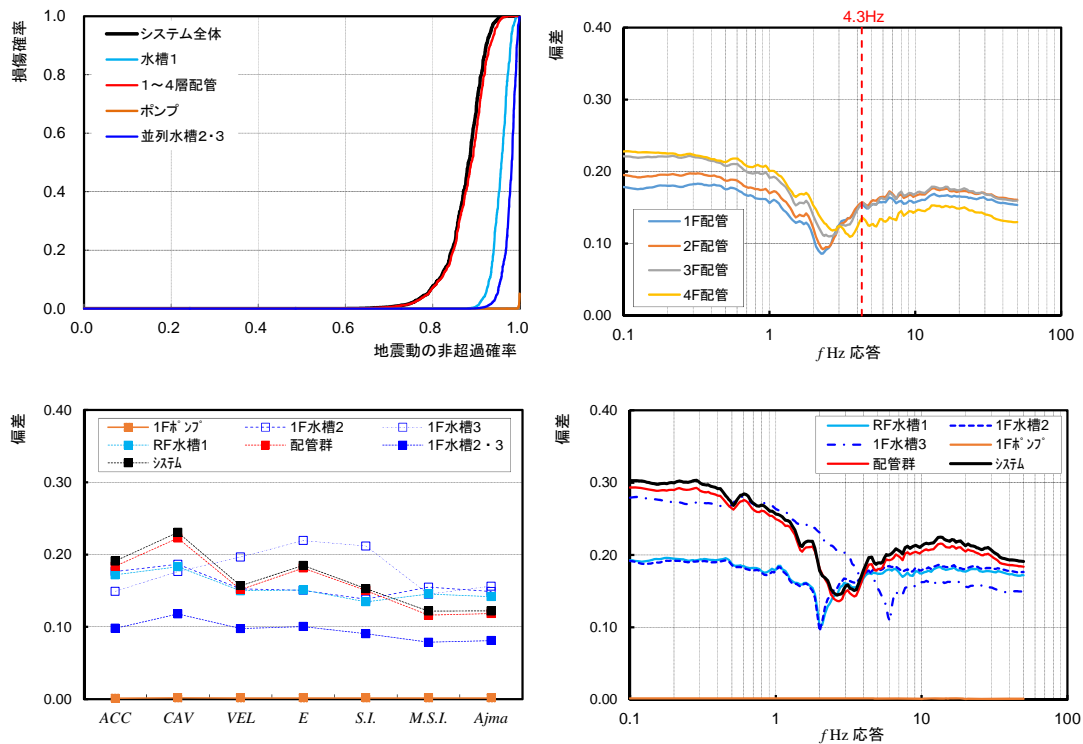


図 5.21 No.01 基本ケース（最適指標：M.S.I.,  $A_{jma}$ ）

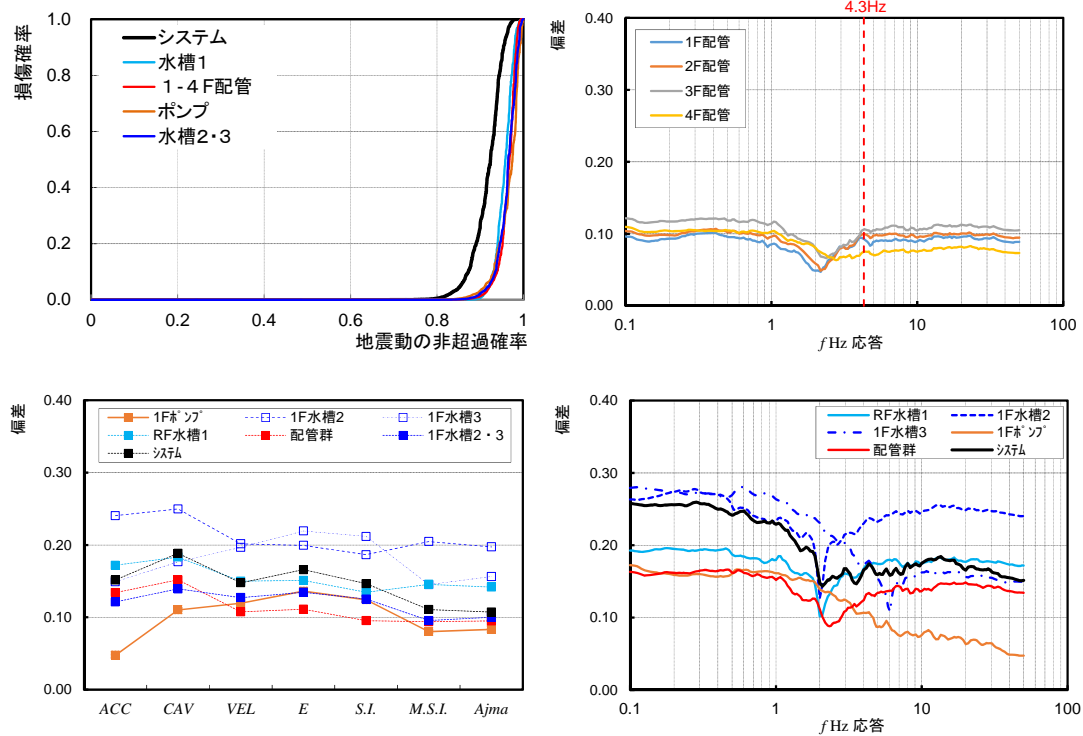


図 5.22 No.02 均等ケース（最適指標： $A_{jma}$ ）



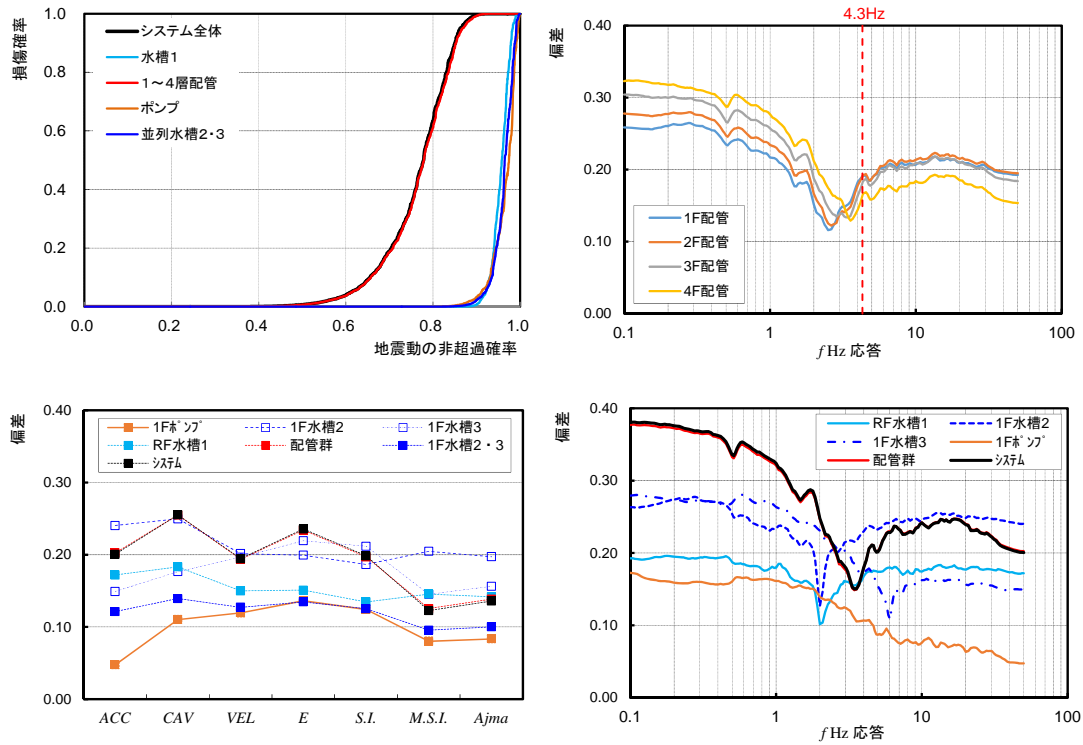


図 5.23 No.03 配管ケース（最適指標：M.S.I.）

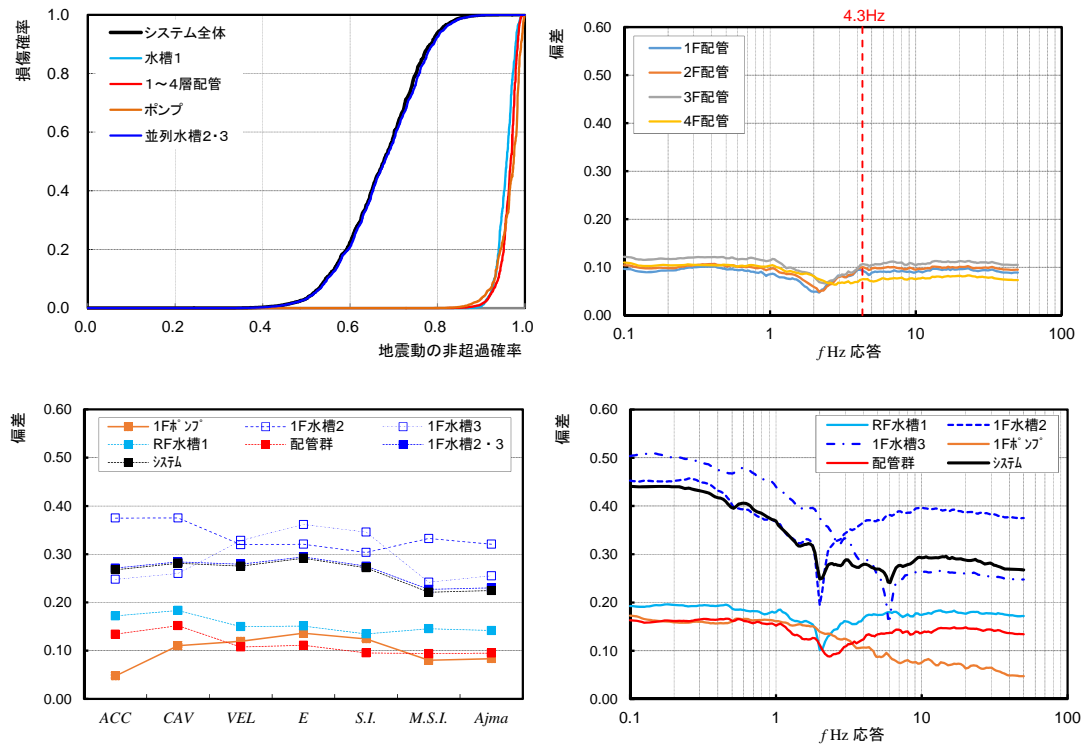


図 5.24 No.04 1 階水槽 2 (2Hz) · 3 (6Hz) ケース（最適指標：M.S.I.）

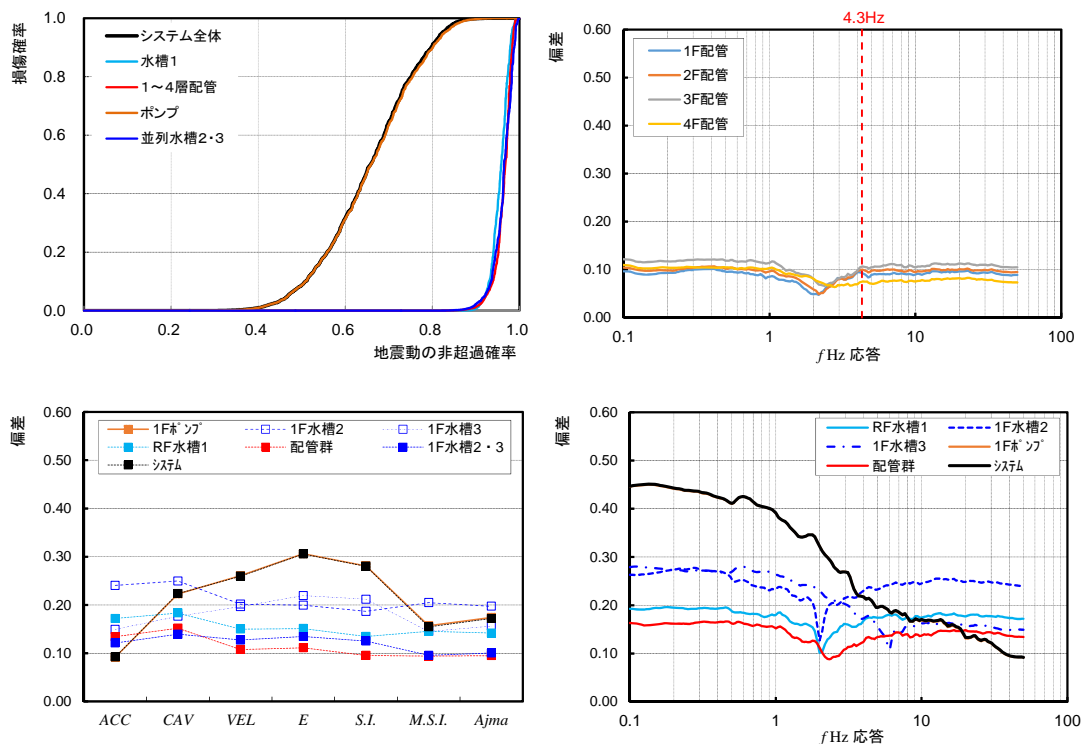


図 5.25 No.05 1 階ポンプ(20Hz) ケース (最適指標 : ACC, RSP50)

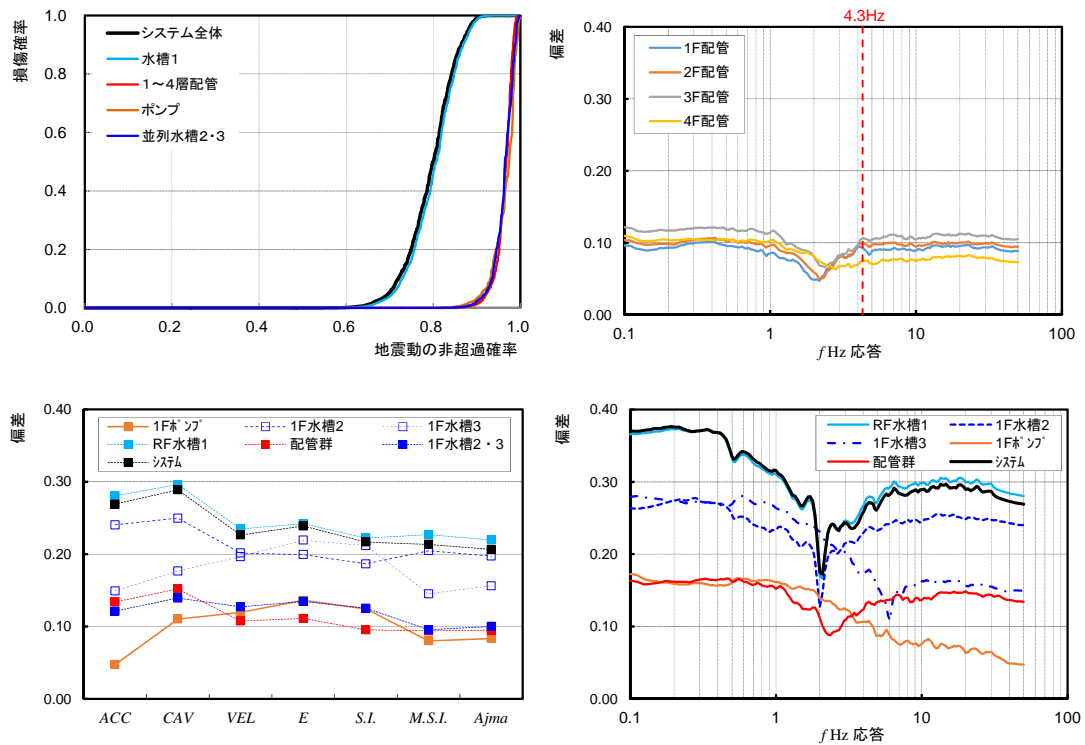


図 5.26 No.06 R 階水槽(2Hz) ケース (最適指標 : RSP2.1)

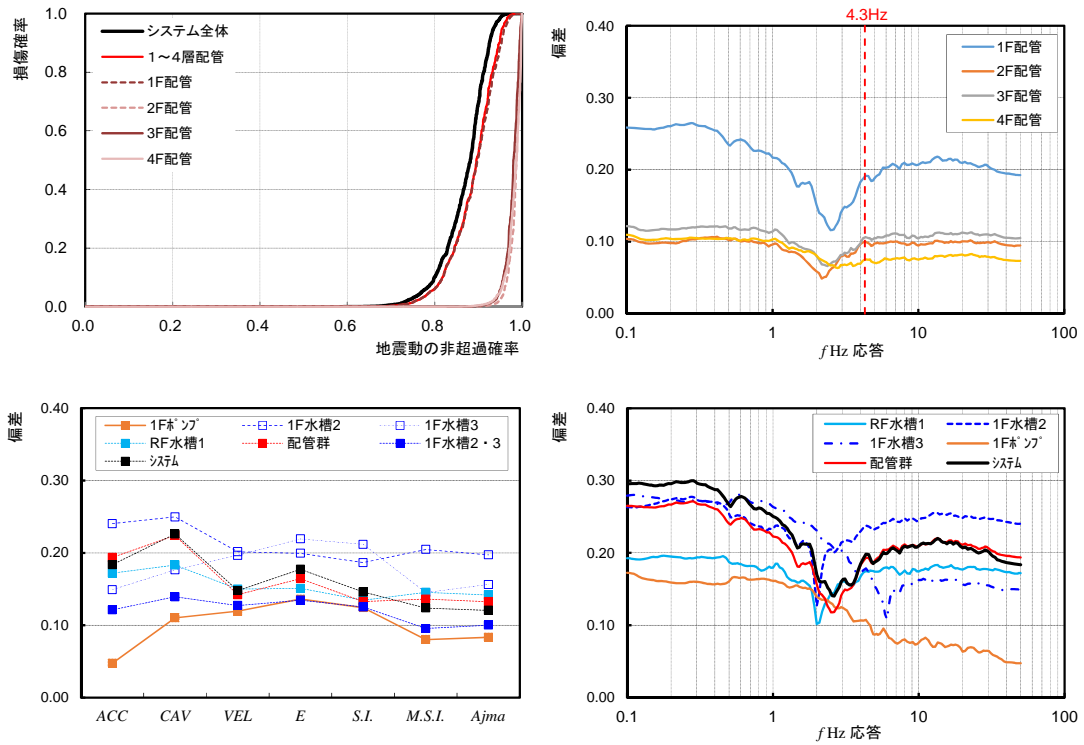


図 5.27 No.11 1階配管ケース（最適指標： $A_{jma}$ ）

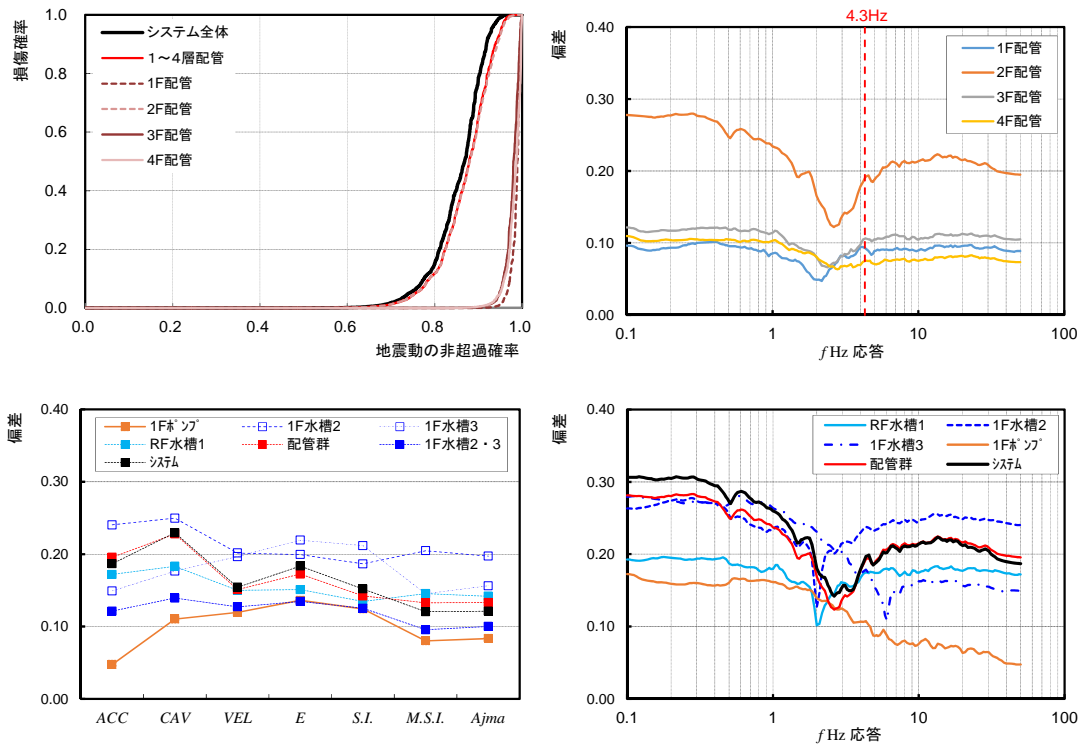


図 5.28 No.12 2階配管ケース（最適指標：M.S.I.）

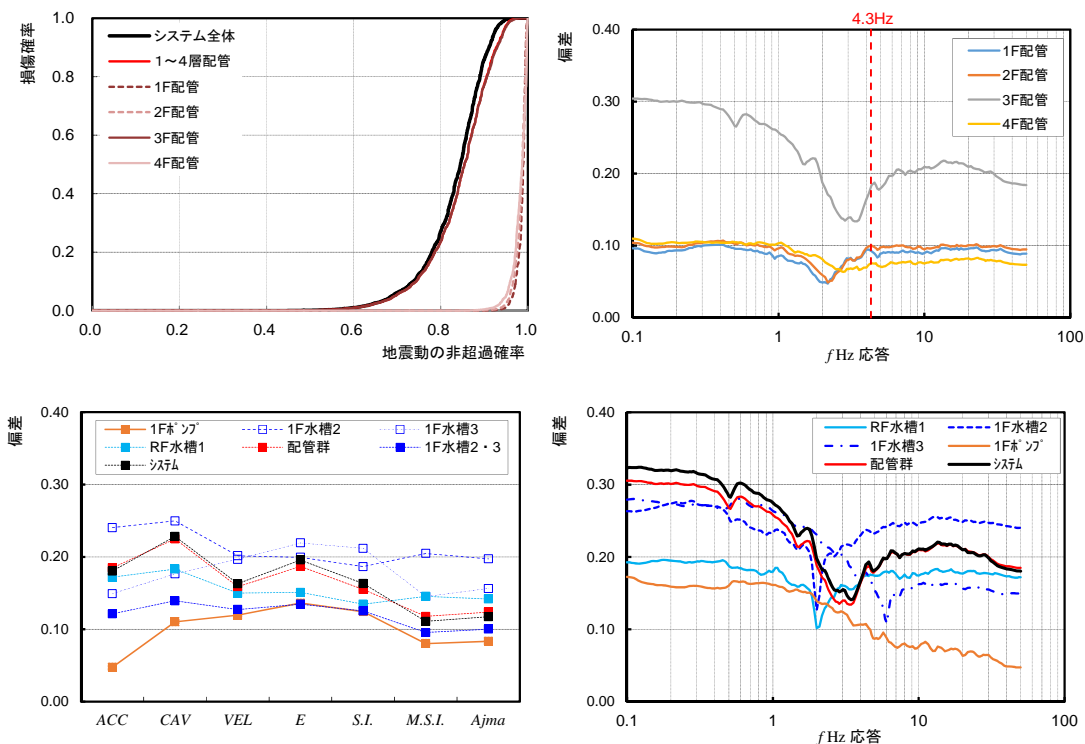


図 5.29 No.13 3 階配管ケース（最適指標：M.S.I.）

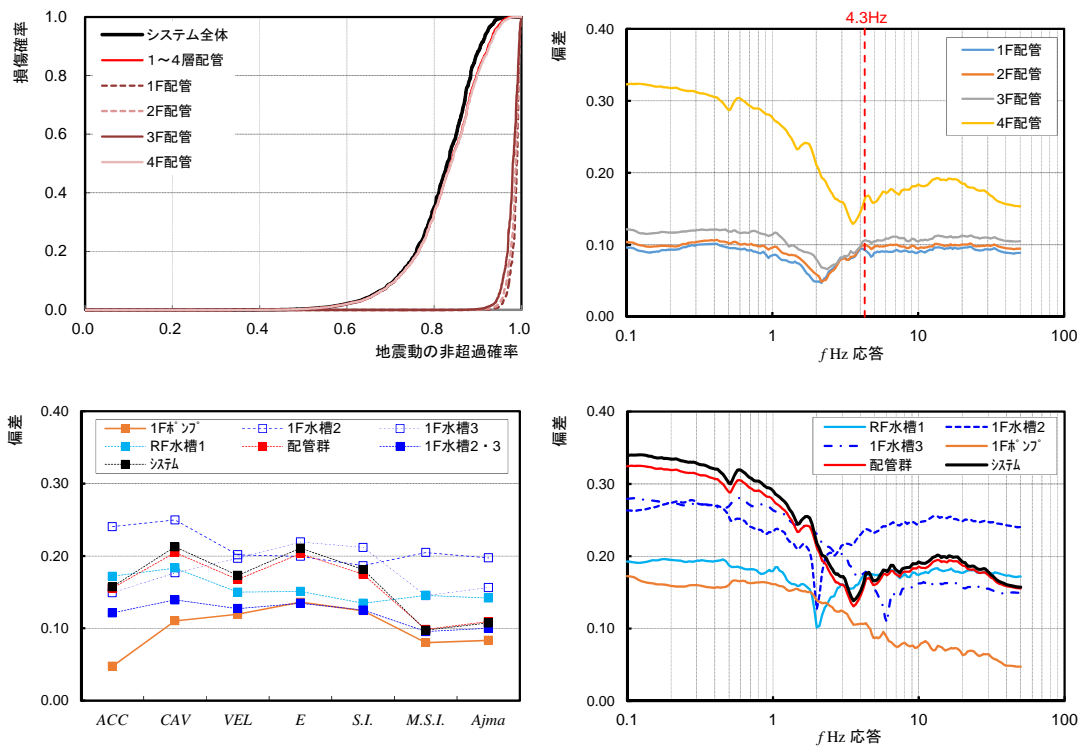


図 5.30 No.14 4 階配管ケース（最適指標：M.S.I.）

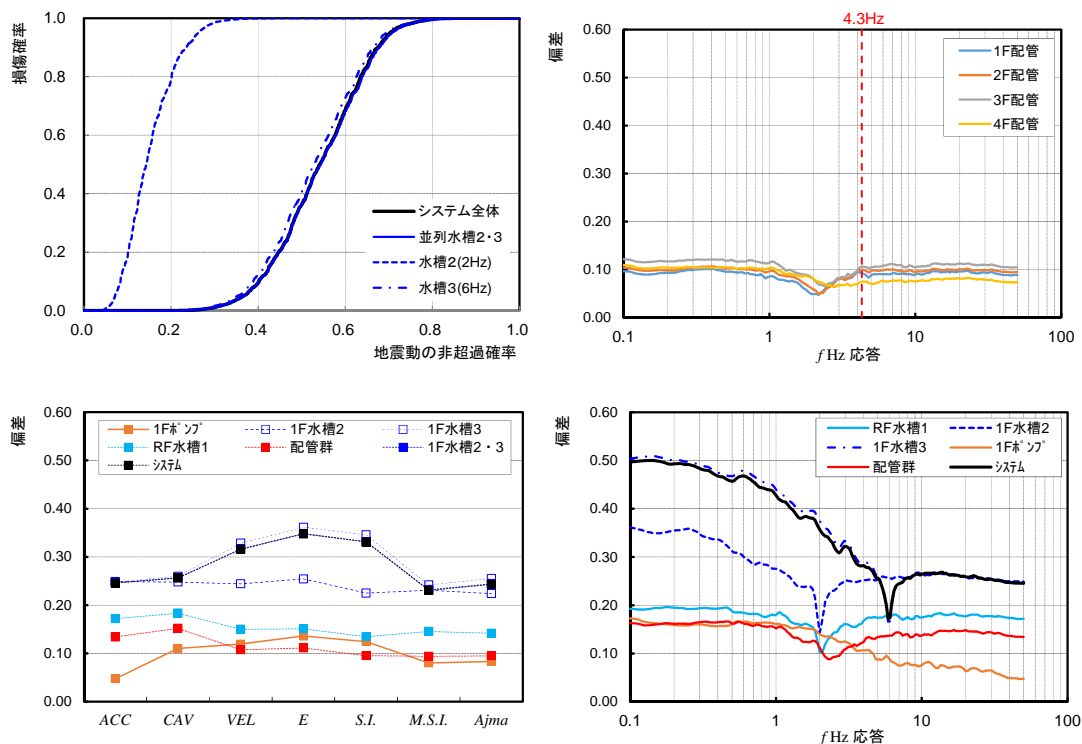


図 5.31 No.21 水槽 2 (2Hz) ケース (最適指標: RSP5.9)

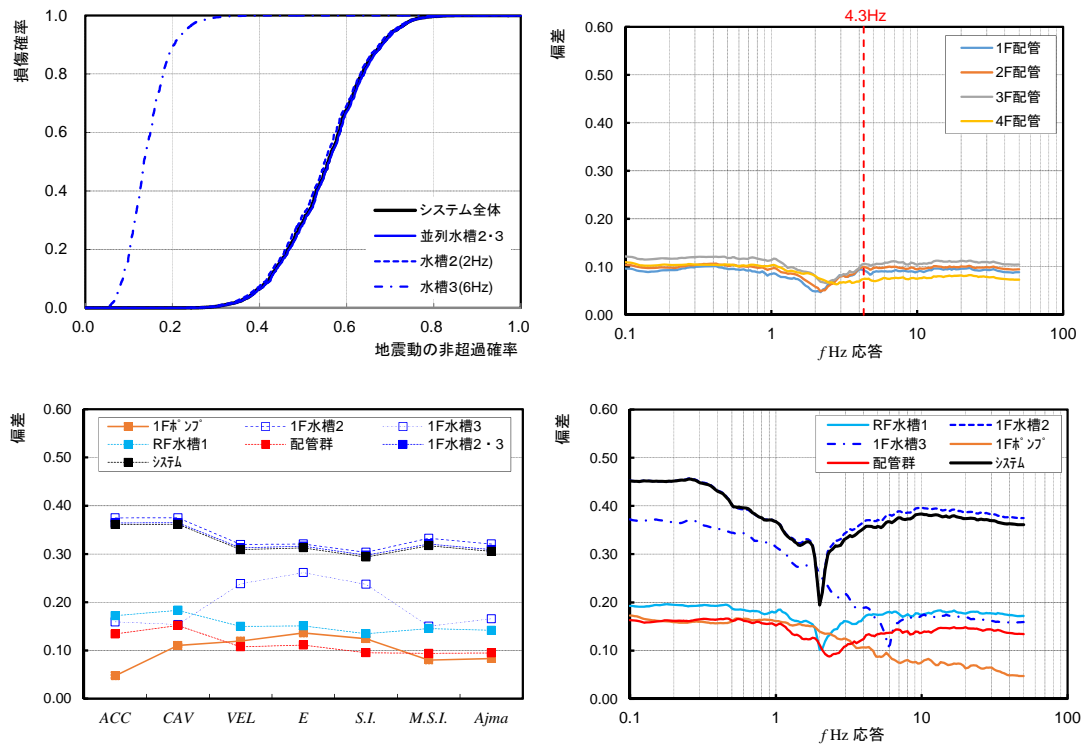


図 5.32 No.22 水槽 3 (6Hz) ケース (最適指標: RSP2.0)

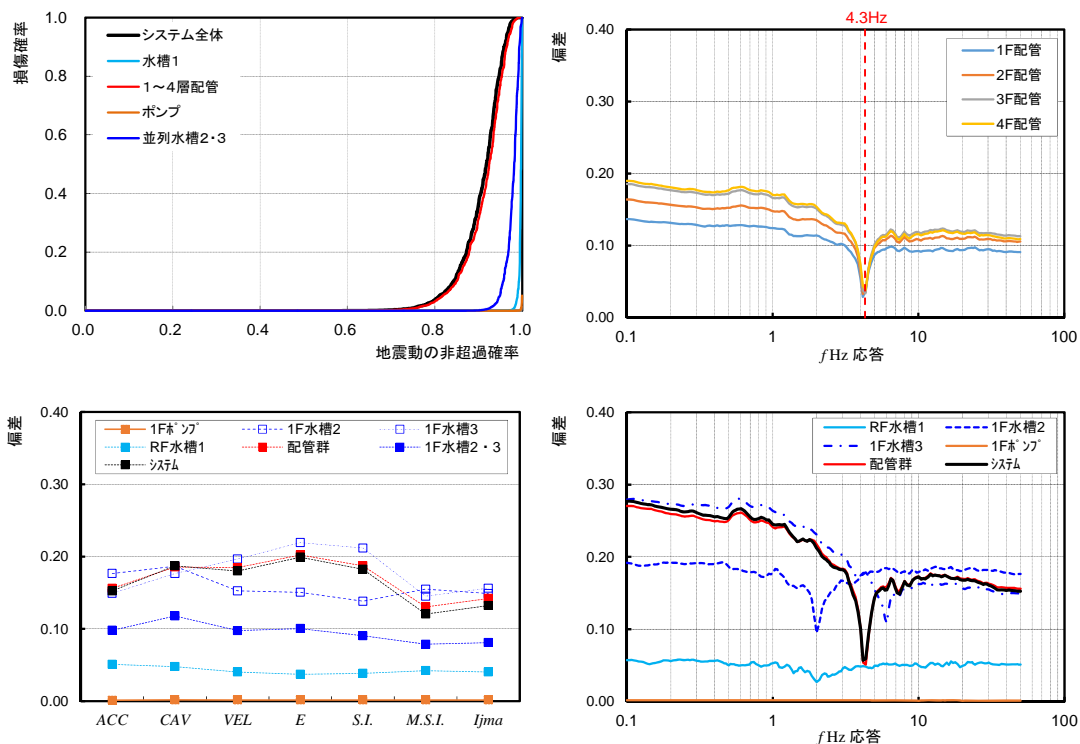


図 5.33 No.31 基本・弾性 ケース（最適指標：RSP4.2）

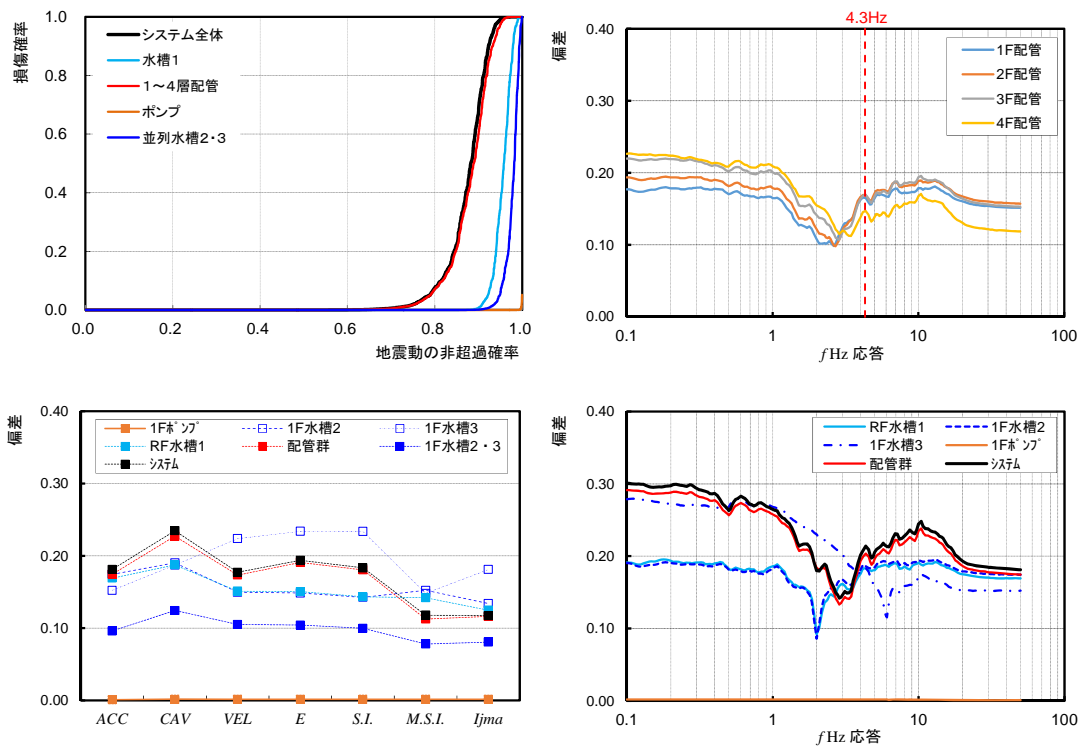


図 5.34 No.32 基本・基礎底面 ケース（最適指標： $A_{jma}$ ）

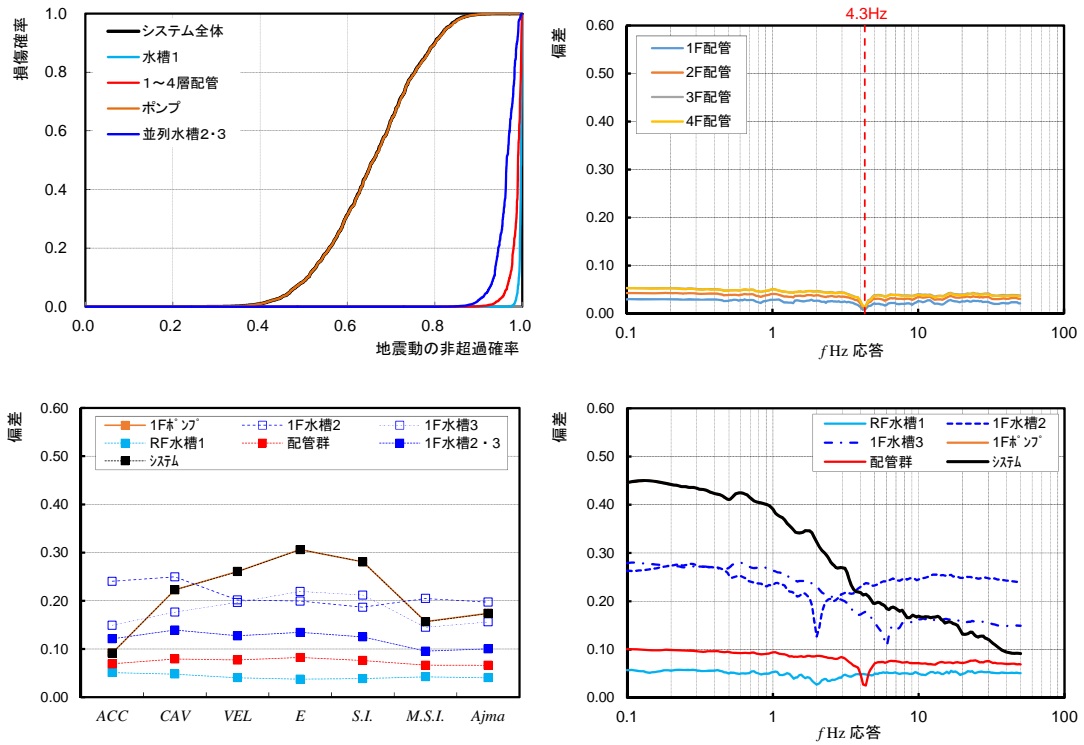


図 5.35 No.41 1 階ポンプ・弾性 ケース（最適指標：RSP50）

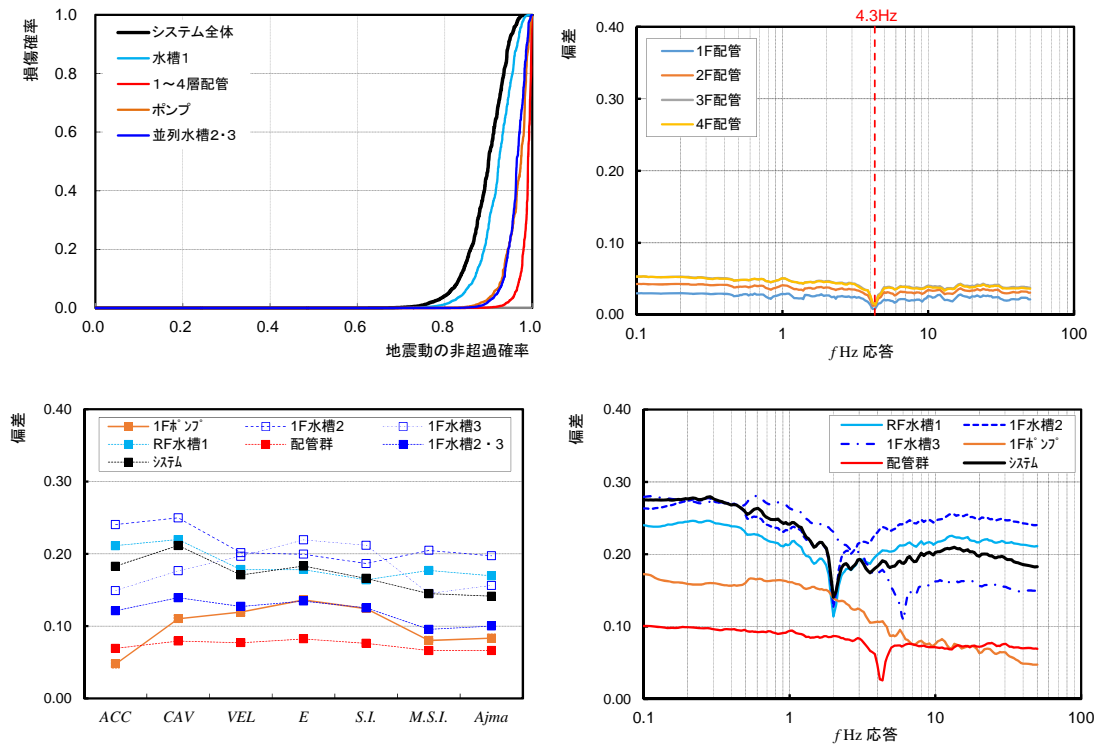


図 5.36 No.42 水槽 1 (2.0Hz)・弾性 ケース（最適指標： $A_{jma}$ , RSP2.0）

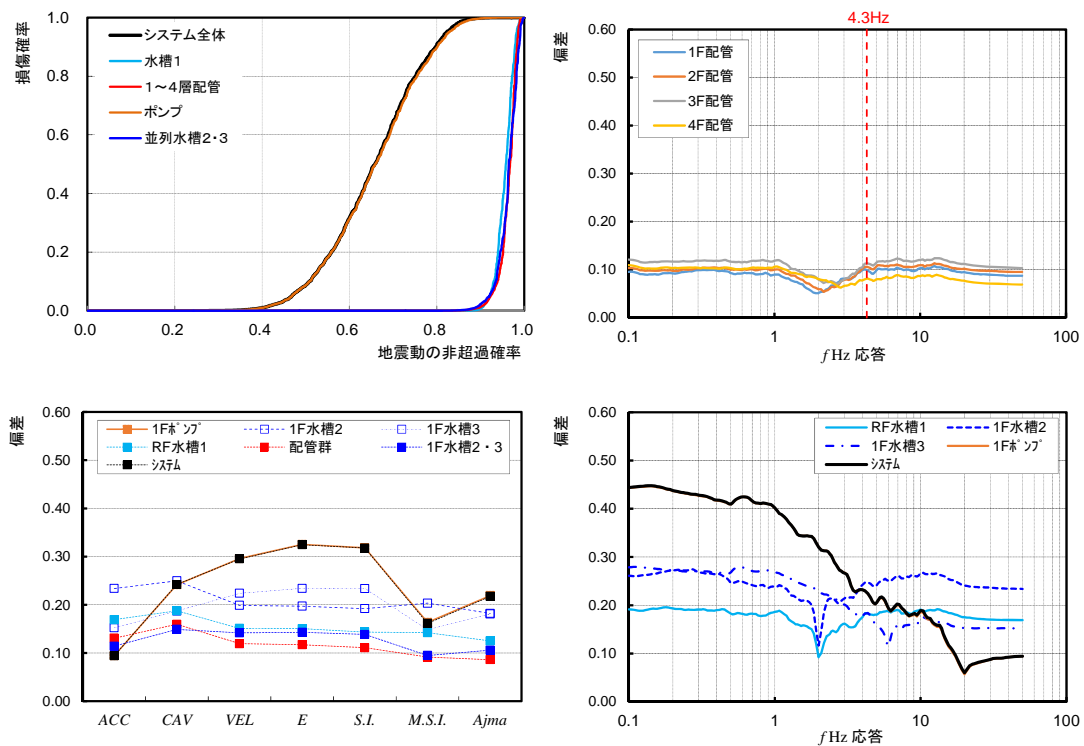


図 5.37 No.51 1F ポンプ・基礎底面 ケース (最適指標 : RSP50)



## 5.5 地震動強さ指標の選定方法の複数震源への適用性

前項までは、システム損傷確率を精度良く評価する地震動強さ指標を選定する手法として、断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布に対する偏差が最小となる地震動強さ指標を選定する方法を提案した。また、その妥当性を検証するため、一つの震源 No.(1)-PI から作成された地震波群 2736 波を対象として、システム損傷確率と提案手法による偏差を算定し、選定された地震動強さ指標がシステム損傷のボトルネックとなる部位の損傷を最も良く表す指標であることを確認した。

断層モデルに基づく地震リスク評価用地震波群を作成する際には、震源は複数個を対象として作成されることが通常であると考えられるため、本節では、複数震源に対する提案手法の適用性について考察する。

ここでは、表 5.1 の No.(1)-PU または No.(5) から作成した地震波群に対しても提案手法を適用し、同じシステムに対して No.(1)-PI から作成された地震波群 2736 波と結果を比較する。

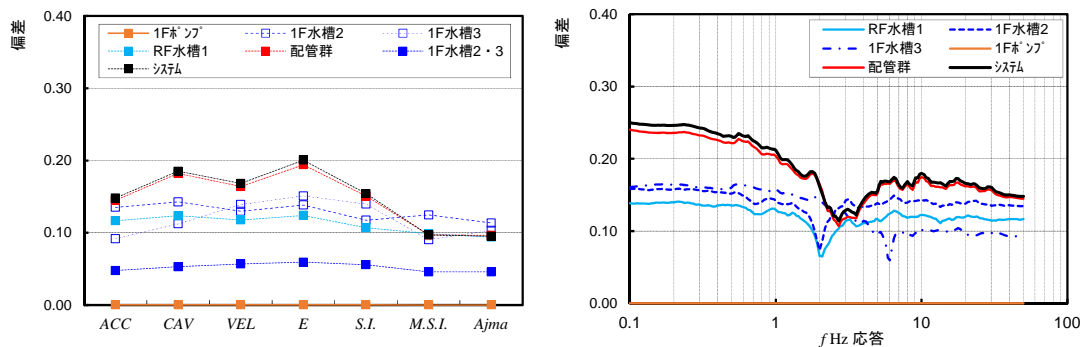
検討するシステムケースは、No.01「基本ケース」および No.02「均等ケース」に加え、システム損傷確率への寄与度を変えた No.05, No.11, No.21, No.22 とした。

図 5.38 および図 5.39 に、それぞれ震源 No.(1)-PU および震源 No.(5) の個々のケースにおける偏差の結果を示す。また、表 5.6 に各震源による偏差の一覧を示す。一覧の網掛けは、偏差が最小となる指標を示しているが、対象とした 3 つの震源については、震源が異なってもほぼ同じ最適指標が選定されることが確認された。また、図 5.40 には、各震源による偏差について偏差比<sup>1</sup>をとった結果を示す。各震源で偏差比が 1.0 となる指標は、震源の違いに係らずほぼ一致している。このことから、今回対象とした複数震源に関しては、震源が異なってもほぼ同じ最適指標が選定されることが確認された。

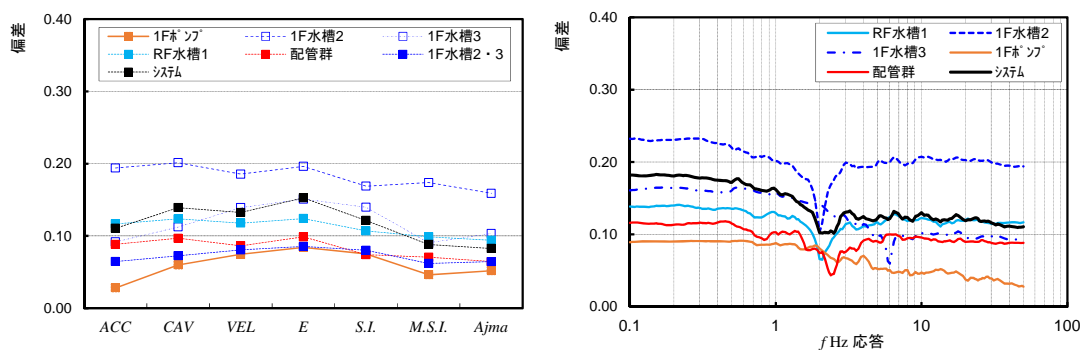
本論文において対象とする時刻歴地震波群に関して、各震源から作成された地震波群の地震動特性には、断層モデルの震源特性の不確定性の条件の違いが反映されているが、5.4.1 項に示したように、応答スペクトルについてはそれほど震源の違いによる影響は見られていない。また、今回対象としたシステムの機器・配管類の損傷が、最大層間変形や各解の周波数応答といった建物最大応答に関する指標によって決定づけられるシステム条件であったため、震源の違いによる影響が出にくかったものと考えられる。

一方で、地震波群の継続時間に関しては、5.4.1 項に示したように、震源の違いが顕著に表れていることから、例えば、システムを構成する機器・配管の中に、繰り返し疲労など継続時間に係る指標によって損傷によって損傷が決定づけられるようなシステム条件である場合には、震源の違いによって選定される地震動強さ指標が異なる可能性が高いと考えられる。ただし、ハザード評価においては、複数の指標を同時に扱うことは困難であることから、震源毎に選定される地震動強さ指標が異なる場合には、選定された指標を包括するような地震動強さ指標を改めて設定し、震源が異なっても同様の指標が選定されるように留意する必要があると考えられる。

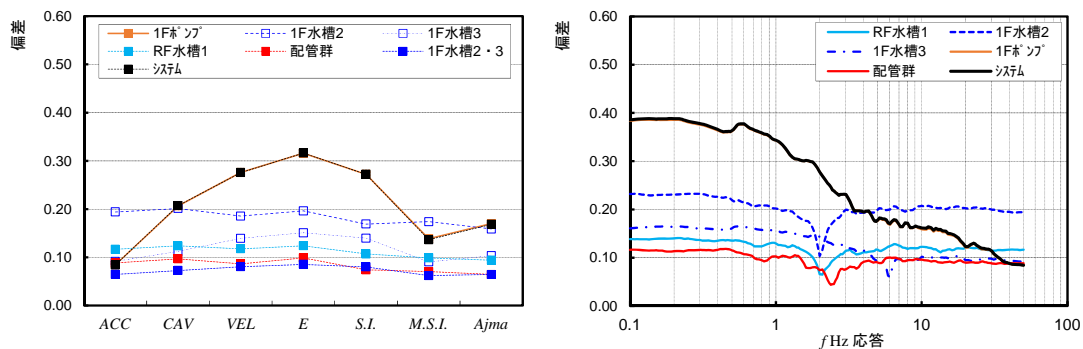
<sup>1</sup> 震源における偏差について最小偏差に対する比



(a) No.01 基本ケース（最適指標： $A_{jma}$ ）

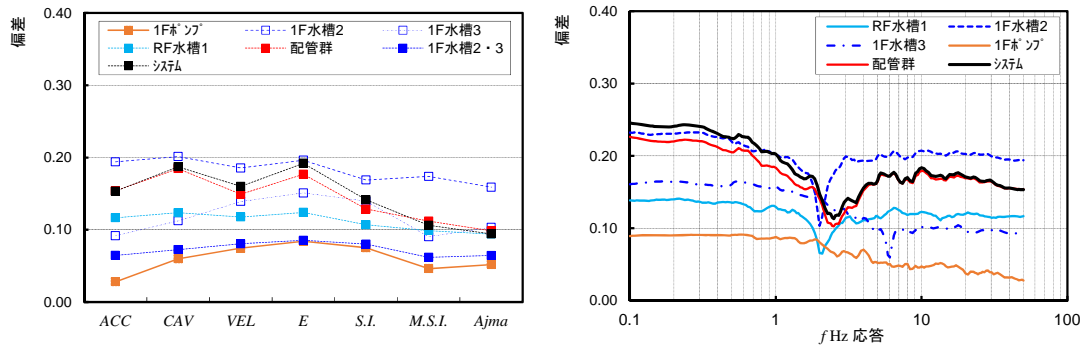


(b) No.02 均等ケース（最適指標： $A_{jma}$ ）

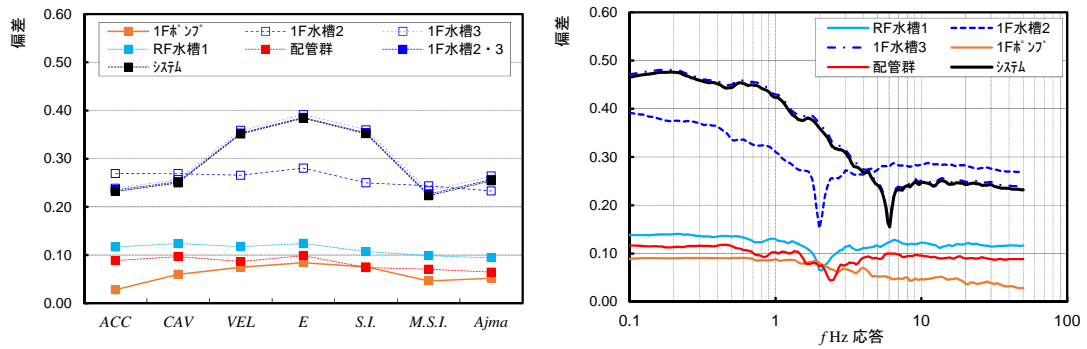


(c) No.05 1F ポンプケース（最適指標：ACC, RSP50）

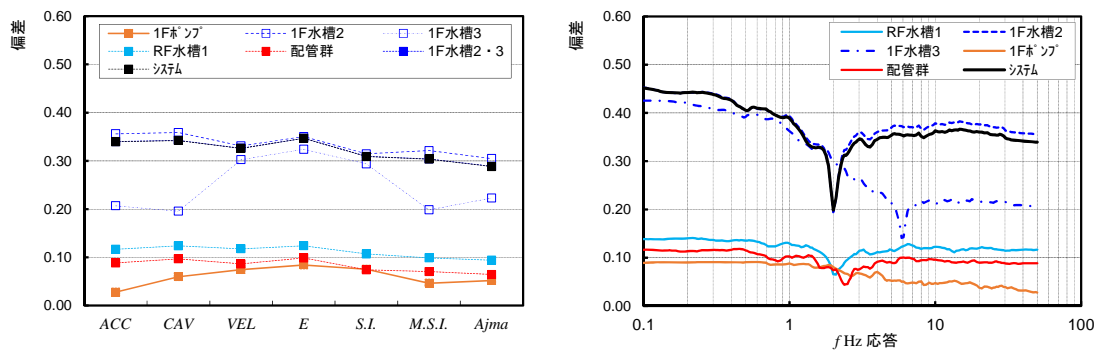
図 5.38 震源 No.(1)-PU に対する最適指標の結果(1)



(d) No.11 1階配管 ケース (最適指標:  $A_{jma}$ )

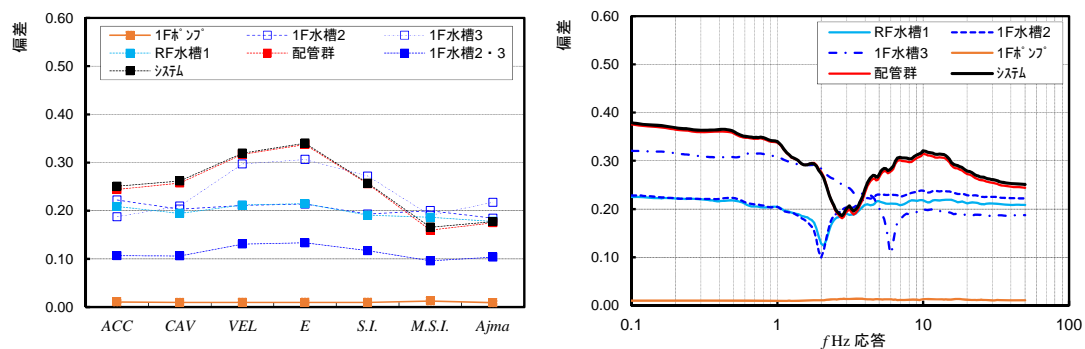


(e) No.21 水槽2 (2Hz) ケース (最適指標: RSP6.0)

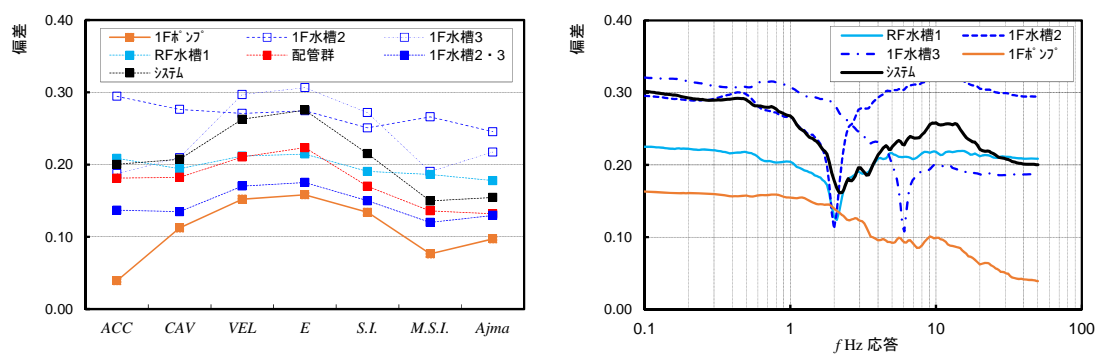


(f) No.22 水槽3 (6Hz) ケース (最適指標: RSP2.0)

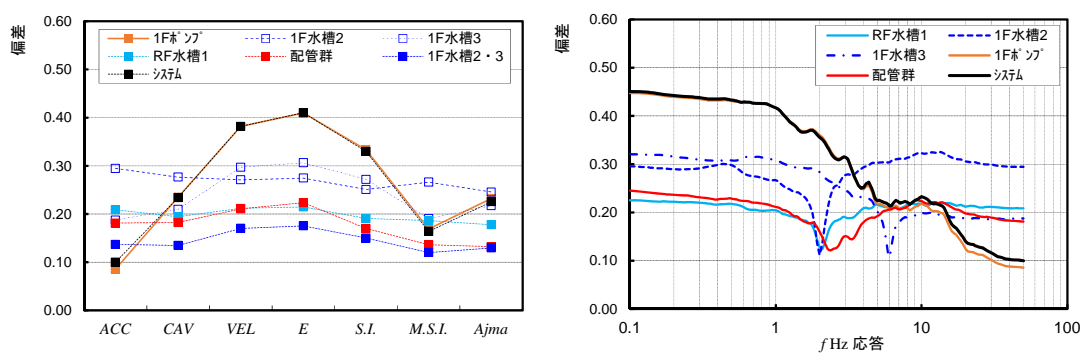
図 5.38 震源 No.(1)-PU に対する最適指標の結果(2)



(a) No.01 基本ケース (最適指標 : M.S.I.)

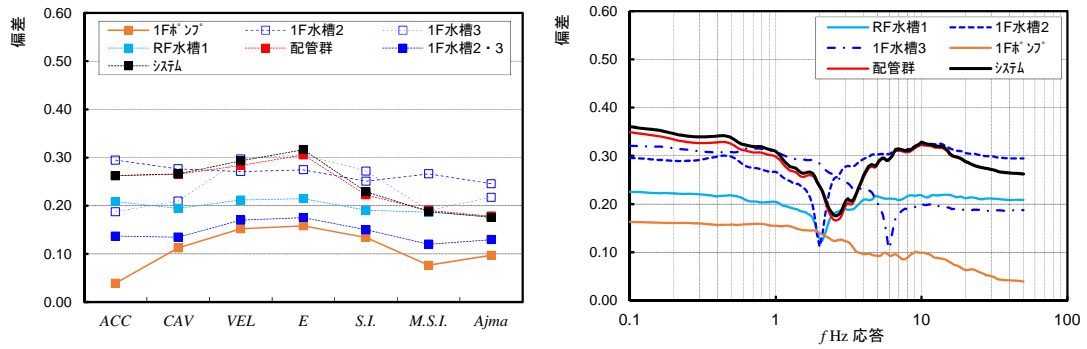


(b) No.02 均等ケース (最適指標 : M.S.I.)

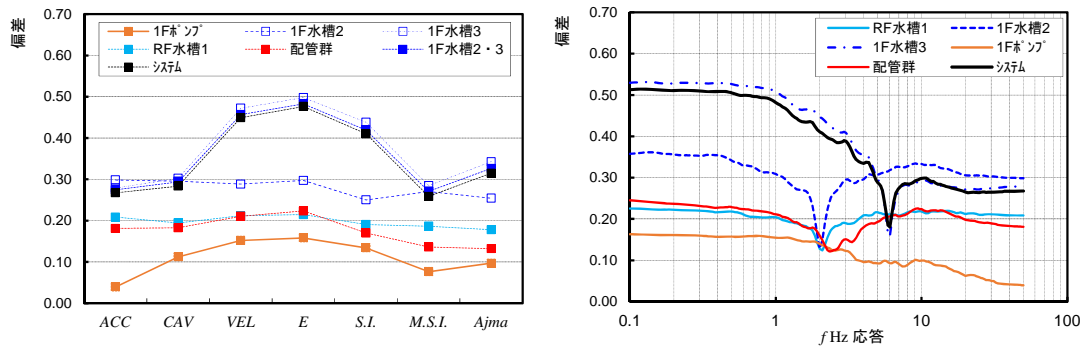


(c) No.05 1F ポンプ(20Hz) ケース (最適指標 : ACC, RSP50)

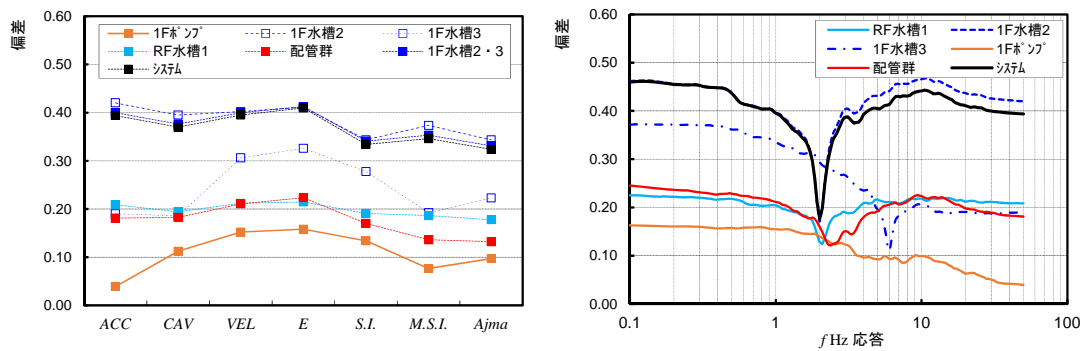
図 5.39 震源 No.(5)に対する最適指標の結果(1)



(d) No.11 1階配管ケース（最適指標： $A_{jma}$ ）



(e) No.21 水槽2 (2Hz) ケース（最適指標：RSP6.0）



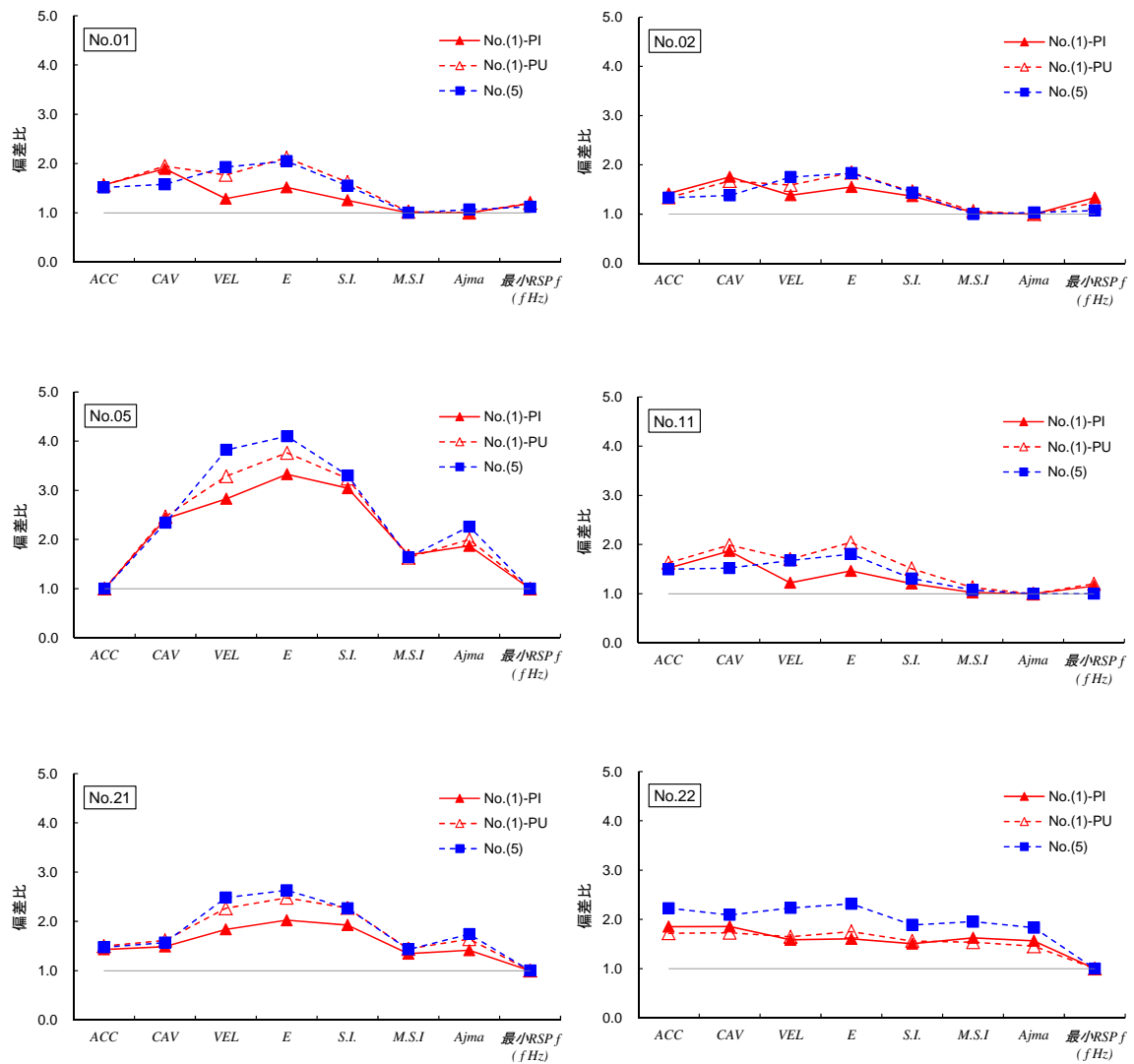
(f) No.22 水槽3 (6Hz) ケース（最適指標：RSP2.1）

図 5.39 震源 No.(5)に対する最適指標の結果(2)

表 5.6 震源の違いによる偏差および最適指標一覧

検討ケース	震源	<i>ACC</i>	<i>CAV</i>	<i>VEL</i>	<i>E</i>	<i>S.I.</i>	<i>M.S.I</i>	<i>A<sub>jma</sub></i>	最小 <i>RSP f</i> (fHz)	
No.01	基本	No.(1)-PI	0.191	0.231	0.157	0.185	0.153	<b>0.122</b>	<b>0.122</b>	0.145 (2.6Hz)
		No.(1)-PU	0.148	0.185	0.168	0.201	0.154	0.097	<b>0.095</b>	0.114 (2.7Hz)
		No.(5)	0.251	0.262	0.320	0.340	0.257	<b>0.166</b>	0.177	0.186 (2.8Hz)
No.02	均等	No.(1)-PI	0.152	0.188	0.148	0.166	0.146	0.111	<b>0.107</b>	0.143 (2.1Hz)
		No.(1)-PU	0.111	0.139	0.132	0.153	0.121	0.088	<b>0.083</b>	0.102 (2.5Hz)
		No.(5)	0.200	0.207	0.263	0.275	0.215	<b>0.150</b>	0.155	0.161 (2.2Hz)
No.05	1F ポンプ	No.(1)-PI	<b>0.092</b>	0.223	0.260	0.306	0.280	0.155	0.172	<b>0.092 (50.0Hz)</b>
		No.(1)-PU	<b>0.084</b>	0.207	0.276	0.316	0.272	0.137	0.168	<b>0.084 (50.0Hz)</b>
		No.(5)	<b>0.100</b>	0.234	0.382	0.410	0.330	0.164	0.226	<b>0.100 (50.0Hz)</b>
No.11	1 層配管	No.(1)-PI	0.184	0.226	0.148	0.177	0.146	0.124	<b>0.121</b>	0.140 (2.6Hz)
		No.(1)-PU	0.153	0.187	0.160	0.192	0.142	0.106	<b>0.094</b>	0.113 (2.5Hz)
		No.(5)	0.262	0.266	0.293	0.316	0.229	0.188	<b>0.175</b>	<b>0.175 (2.6Hz)</b>
No.21	水槽 2	No.(1)-PI	0.246	0.256	0.316	0.348	0.331	0.231	0.243	<b>0.172 (5.9Hz)</b>
		No.(1)-PU	0.232	0.250	0.351	0.384	0.352	0.223	0.254	<b>0.155 (6.1Hz)</b>
		No.(5)	0.267	0.284	0.449	0.476	0.410	0.259	0.315	<b>0.181 (6.1Hz)</b>
No.22	水槽 3	No.(1)-PI	0.361	0.362	0.309	0.313	0.294	0.317	0.305	<b>0.195 (2.0Hz)</b>
		No.(1)-PU	0.340	0.342	0.326	0.347	0.309	0.304	0.288	<b>0.198 (2.0Hz)</b>
		No.(5)	0.394	0.370	0.395	0.410	0.334	0.346	0.324	<b>0.177 (2.0Hz)</b>

※太線網掛：偏差が最小となる地震動強さ指標



※偏差比：偏差が最小となる地震動強さ指標における偏差に対するその他の指標における偏差の比。

図 5.40 震源が異なる場合の偏差の結果の比較

## 5.6 地震動強さ指標の選定に必要な地震波数の目安

提案手法に基づき最適な地震動強さ指標を選定するには、解析作業の効率化の観点から、システム損傷確率を精度良く評価できる地震動強さ指標をできる限り少ない地震波数で選定することが望ましい。本節では、地震動強さ指標の選定に必要な地震波数の目安について検討する。

はじめに、一つの震源 No.(1)-PI の 2736 波の地震波群について、乱数を用いてランダムに地震波群を抽出し、提案手法による偏差を算定した。抽出する地震波数は、3 波、4 波、10 波、20 波、50 波、100 波、300 波、500 波の 8 つのケースとし、同じ抽出波数について乱数を変えながら 10 回の試行を行った。図 5.41 および図 5.42 に、ケース No.01「基本ケース」および No.02「均等ケース」について 10 回の試行による各地震動強さ指標の偏差の結果を示す。10 回の試行では、乱数の違いによって抽出する波形番号を変え、抽出された波数について偏差を算定した。抽出された波数が、3 波、4 波と地震波数が少ない場合には、指標間の偏差が大きくばらつくため、偏差の大小の傾向が明瞭となっていないが、波数を 50 波～100 波程度まで増やすことによって、ケース No.01 については  $M.S.I.$  および  $A_{jma}$  の偏差が、ケース No.02 については  $A_{jma}$  の偏差が他の指標と比較して小さい傾向が読み取れそうである。定性的には、少なくとも 50 波程度の地震波数があれば、提案手法を用いて地震動強さ指標を選定することができそうである。

一方で、偏差の値は抽出されるサンプル数によって影響を受けるため、少ない抽出波数をもって地震リスク評価に最適な指標がどの指標かを判断するのに、最低必要な波数がどの程度かを見積もっておくことが望ましい。2736 波による偏差が最小となる地震動強さ指標が分かっていることから、ここでは 2736 波を地震波群の母集団とする統計的推測により、抽出地震波のサンプル数  $n$  として最低限どの程度必要なのかを、95%信頼区間として Eq. 5.4 に基づき算定した。

$$n = \frac{1}{w^2} (\sigma \cdot \Phi^{-1}(1-0.95/2))^2 \quad \text{Eq. 5.4}$$

ここに、 $n$ ：最適指標を算定するのに必要な地震波サンプル数、 $\sigma$ ：偏差、 $\Phi^{-1}(1-\alpha/2)$ ：標準正規確率の逆関数、 $\alpha$ ：信頼区間（ここでは 0.95）、である。 $w$  は半幅であり、本検討では、95%の信頼度で偏差を  $\pm 0.025$  の精度で得ることを目標として  $w = 0.025$  とした。表 5.6 の偏差の結果から偏差が最小となる最適指標の偏差に対して  $\pm 0.025$  程度の変動であれば、複数の地震動強さ指標のうち、定性的な傾向が逆転して不適合な指標が選定される可能性は低いと考え、 $w = 0.025$  を仮定した。

表 5.7 に地震動強さ指標ごとの必要サンプル数を示す。各地震動強さで必要なサンプル数には差があるが、大凡 100～300 波程度というサンプル数の結果が得られた。図 5.41 と図 5.42 で定性的に判断した 50 波よりもやや波数が多い結果となっているが、大凡 100～300 波程度あれば統計的信頼性のあるサンプル数が確保されるものと考えられる。

なお、本検討は、震源特性の不確定性を考慮した断層モデル地震波群を乱数に基づきランダムに MCS する場合の地震波数の目安を示しており、偏差算定に用いる地震波数のサンプリングを工夫することによって、さらに地震波数は低減することも可能と考えられる。



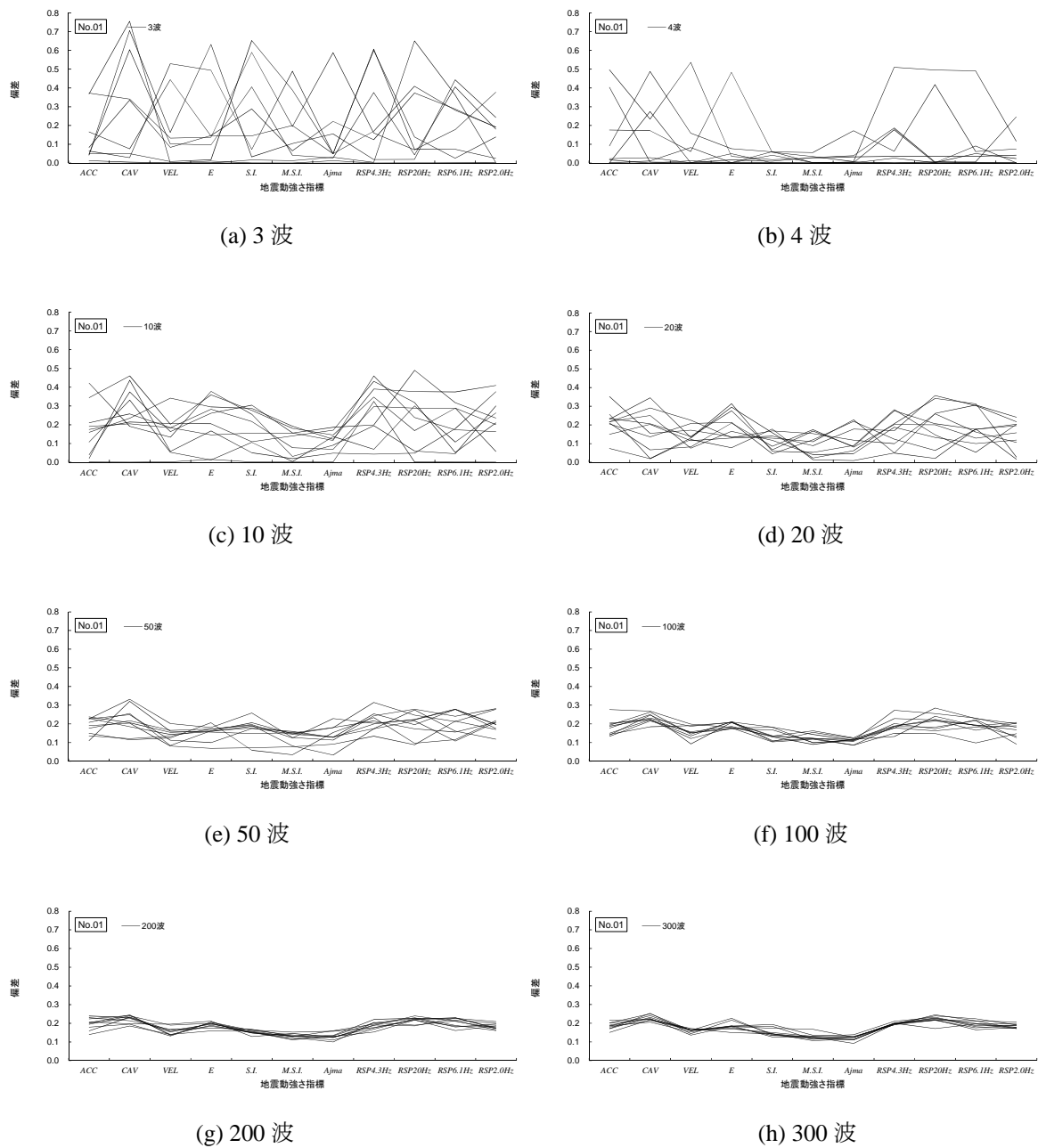
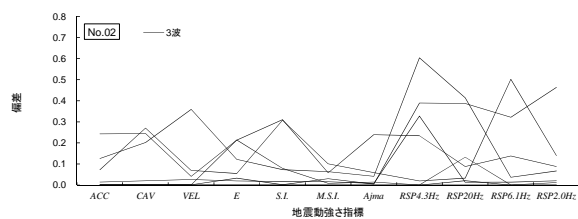
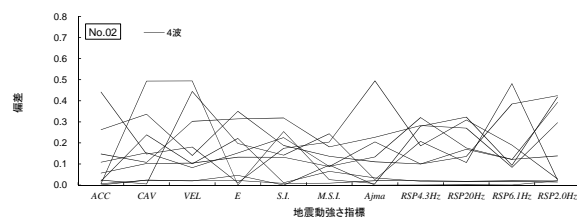


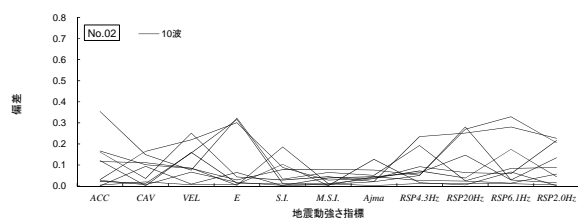
図 5.41 偏差の比較に必要な波数 (No.01「基本ケース」 最適指標 : M.S.I.または  $A_{jma}$ )



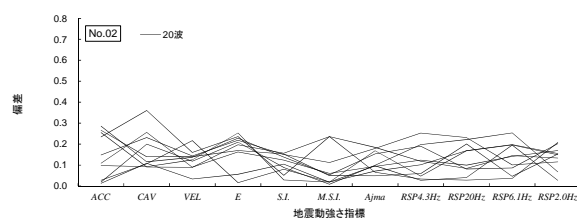
(a) 3 波



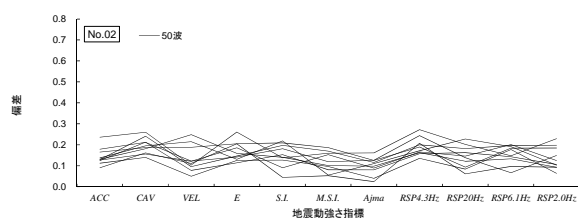
(b) 4 波



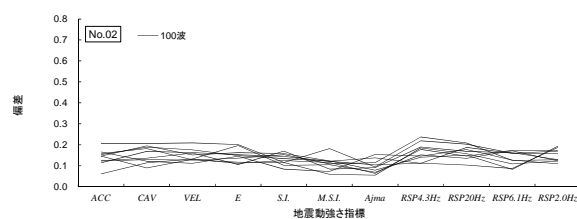
(c) 10 波



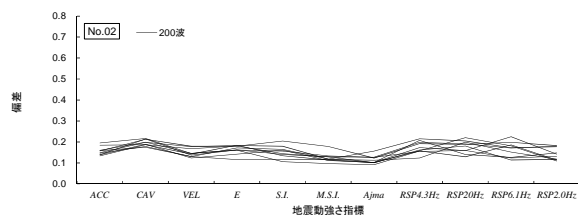
(d) 20 波



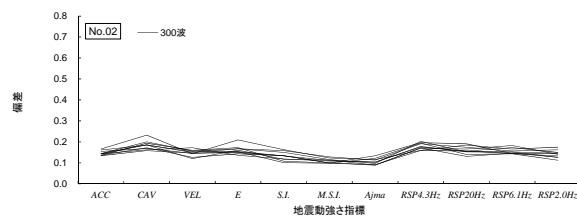
(e) 50 波



(f) 100 波



(g) 200 波



(h) 300 波

図 5.42 偏差の比較に必要な波数 (No.02「均等ケース」 最適指標:  $A_{jma}$ )

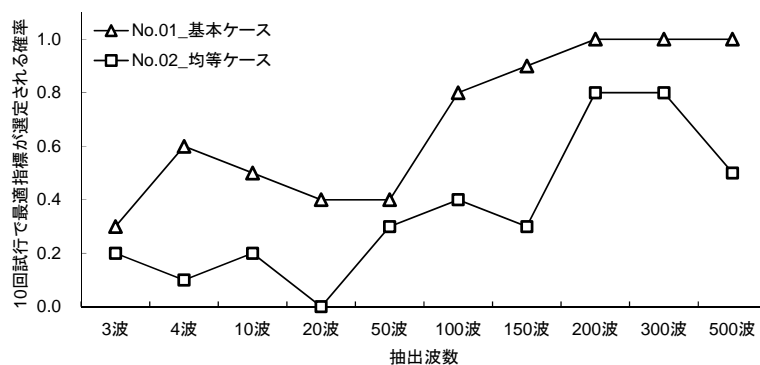


図 5.43 10回の試行で最適指標が選定される確率

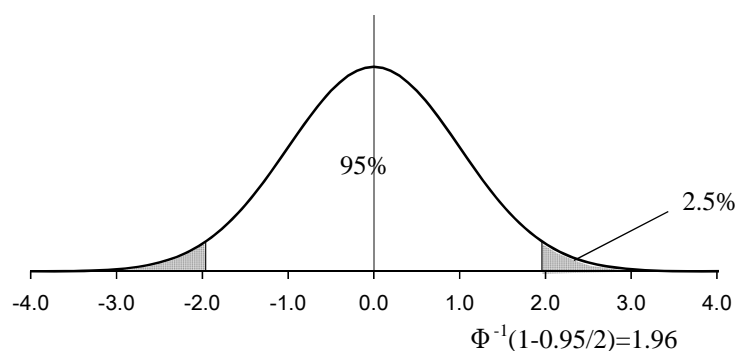


図 5.44 標準正規分布と95%信頼区間の棄却限界域

表 5.7(1) 各地震動強さ指標ごとの統計的推測による必要サンプル数 No.01「基本ケース」

指標	ACC	CAV	VEL	E	S.I.	M.S.I.	$A_{jma}$	RSP 4.3Hz	RSP 20Hz	RSP 6.1Hz	RSP 2.0Hz
$\sigma$	0.191	0.231	0.157	0.185	0.153	0.122	0.121	0.196	0.213	0.200	0.178
$n$	224	327	152	210	144	91	89	237	278	247	196
最大 $n$										327 波	
最小 $n$										89 波	

表 5.7(2) 各地震動強さ指標ごとの統計的推測による必要サンプル数 No.02「均等ケース」

指標	ACC	CAV	VEL	E	S.I.	M.S.I.	$A_{jma}$	RSP 4.3Hz	RSP 20Hz	RSP 6.1Hz	RSP 2.0Hz
$\sigma$	0.151	0.188	0.148	0.166	0.146	0.111	0.106	0.174	0.166	0.158	0.148
$n$	141	218	134	169	131	75	70	187	169	154	135
最大 $n$										218 波	
最小 $n$										70 波	

## 5.7 効率化手法の適用フロー

断層モデル地震波群を用いた次世代地震リスク評価手法について、本章において提案した実適用のための効率化手法を考慮した適用フローを図 5.45 に示す。適用フローは、任意の建物に対して、断層モデル地震波作成から地震リスク評価に至るまでの一連の流れを、効率的に行うことができることに配慮した。

なお、地震リスクの評価対象と項目（本論文では、4 層の RC 造一般建物、建物に設置された機器・配管システムの損傷確率）、評価項目に関する耐力条件（本論文では、システムを構成する各機器・配管の耐力の統計値および分布形）、ターゲットとする地震ハザードの年超過頻度の目安（本論文では、CDF に最も影響の大きい  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  / 回・年の地震ハザードを対象とした）、断層モデルの不確定性の設定など、地震リスク評価に関する基本的な情報については、予め得られていることを前提とする。

適用フローでは、はじめに、従来と同様に地震動強さ指標に基づく地震ハザードを評価する。地震動強さ指標は暫定的に設定してよいが、距離減衰式として簡易に表現されている指標で、かつ、最終的な地震リスクを良く表すことが可能と考えられる地震動強さ指標を暫定指標として選定することによって後の解析負荷を低減できる。例えば、原子力施設のように比較的短周期の指標が地震リスクに寄与すると考えられる場合には PGA を、一般建物の場合は一般的に PGA よりも PGV の方が fragility との適応性が良いと言われていることから PGV を暫定指標として用いることによって、後に評価される最適地震動強さ指標との乖離が少なくなり、図 5.45 の適用フローが円滑に適用できるものと考えられる。

ターゲットとする地震ハザードの年超過頻度から、断層モデル地震波群の作成対象とする地震動強さレベルを決定し、地震ハザードをマグニチュードと震源距離の組合せに対して分解することによってハザード寄与度の高い震源を選定する。ハザード分解に関しては、実務的には震源毎のハザード曲線を算定し、地震動強さレベルにおける各震源のハザード寄与度を比較する。

選定された震源に対して、震源特性の不確定性を考慮した断層モデル地震波群の作成とそれらを入力とした時刻歴応答解析および建物機能損傷評価を行う。この時、断層モデル地震波 1 波に対する応答解析、機能損傷評価および最適地震動強さの選定に関する偏差の評価を 1 ループとして実施し、断層モデル地震波が作成された順番にこのループを繰り返す。

地震波数が数十波程度あれば、最適地震動強さの選定に関する偏差の評価結果から地震リスクを最も良く表すことができる地震動強さ指標を選定することができる。

各震源について偏差が総じて小さくなる指標があれば、その指標は地震動強さ指標の候補の中では、地震リスクを最も良く表すことができる地震動強さ指標であると考えられる。異なる複数の震源について、偏差が最小となる地震動指標が異なる場合には、初期に挙げた地震動強さ指標の候補の中に地震リスクを良く表すことができる指標が含まれていないことを意味しており、指標の候補を別途追加して検討する必要がある。

上記で選定された地震動強さ指標が暫定指標と異なれば、選定された指標に基づきハザードを再評

価し、暫定指標と同じであれば断層モデル地震波群の作成を継続する。

各震源から作成した断層モデル地震波群の中で対象とする地震動強さを満たす地震波群をハザード適合地震波として抽出する。抽出する地震波数は実適用可能な波数とし、波数の重み付けは各震源のハザード寄与度に応じて配分する。実適用可能な波数を抽出する際には、対象敷地に起こりうる地震波群の集合を表現する十分な地震波数を抽出し、その応答スペクトルを従来の距離減衰式と比較するなどして、地震波群の集合としての妥当性は別途確認しておく必要があると考えられる。ハザード適合地震波の各地震波の発生頻度は、第2章に前述の通りハザード曲線から算定することが可能である。これらの断層モデル地震波による機能損傷確率と地震波の発生頻度を抽出した全地震波群に対して総和することで、地震リスク値を算定する。

なお、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価結果に基づき、脆弱な部位を設計変更もしくは補強した場合には相対的に他の部位が弱くなるため、再度、地震動強さ指標の選定を行う。最適な地震動強さ指標が前回と大きく異なる場合（例えば、短周期指標から長周期指標に変更になった場合）には、地震波作成対象の震源を再確認し、不足する震源があれば断層モデル地震波群を追加して作成するのが望ましい。

本適用フローで示した効率化手法は、地震動強さ指標の候補として予め多様な地震動強さ指標を候補として挙げておくことが非常に重要である。地震リスク評価の対象とするシステムの振動特性を考慮しながら、最大加速度や最大速度などの地震動のピーク指標だけでなく、地震リスクの評価項目に関連する周波数応答や地盤応答、建物応答に着目した指標についてもバランス良く候補として挙げることによって5.3節の提案手法による選定精度向上も期待できる。

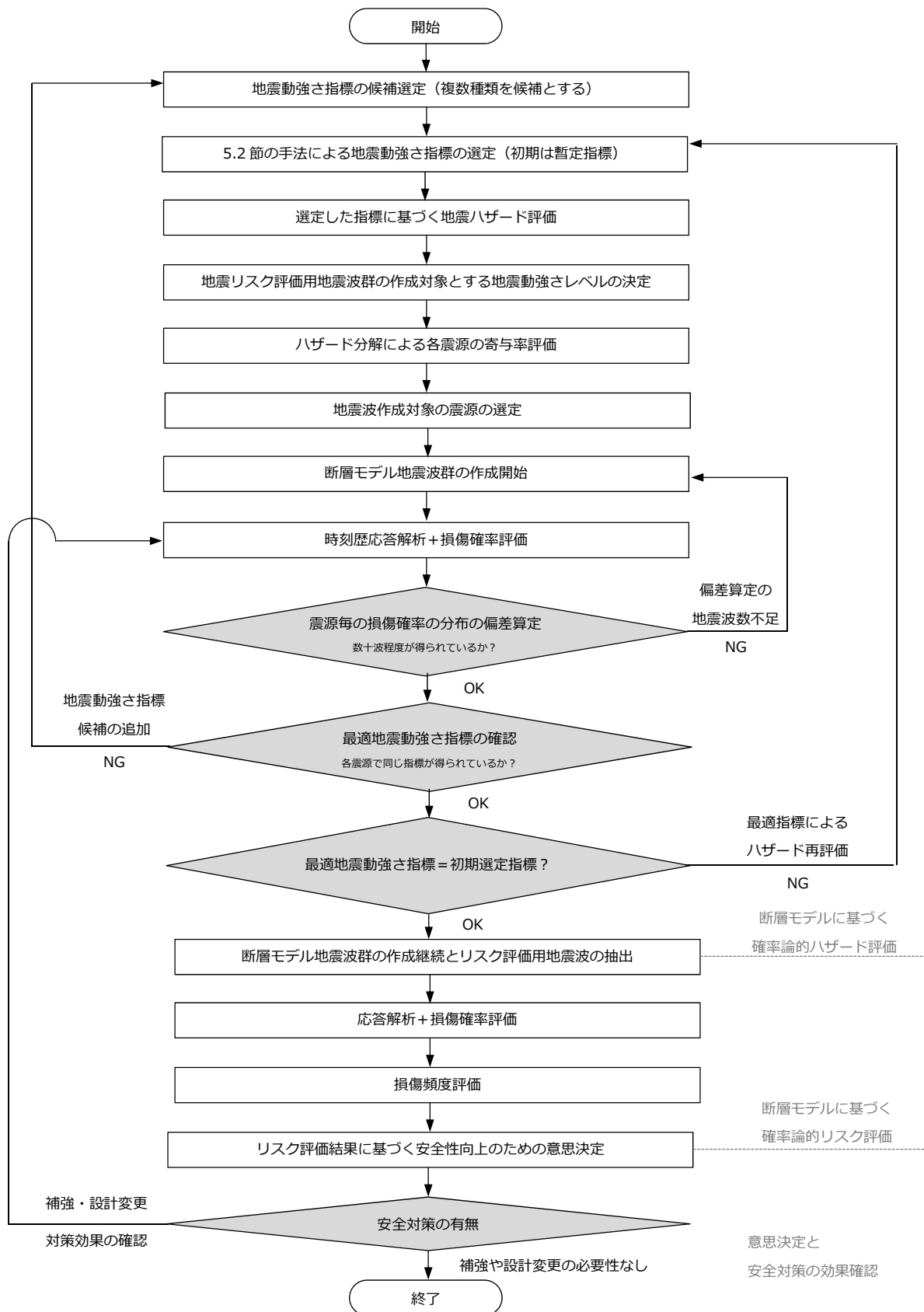


図 5.45 本手法を利用した地震リスク評価の流れ

## 5.8 効率化手法による解析負荷低減の目安

本章において検討した効率化手法により，具体的にどの程度効率化が図れるのかを解析時間を一例として，表 5.8 および表 5.9 に示す。

手法の違いとして，下記の3つのケースを示す。(a)は，断層モデル地震波群による地震リスク評価手法の目標像であり，(b)は西田らのハザード適合地震波群作成において作成した約10万波の全地震波群に該当し，最大加速度のハザードに寄与する震源に対して作成された全ての断層モデル地震波群であることから，ここでは広義での効率化手法と呼ぶ。(c)は，(b)の地震波群の中から，実務適用可能な地震波数を抽出し，各地震波にはハザード評価結果に基づく発生頻度を関連付ける手法で，ここでは狭義での効率化手法と呼ぶ。

- (a) 目標像：全震源に対する断層モデル地震波群による評価
- (b) 効率化手法（広義）：地震リスクに寄与する震源に対する断層モデル地震波群による評価
- (c) 効率化手法（狭義）：(b)の地震波群の中から対象敷地の地震ハザードに適合する断層モデル地震波群を実適用可能な波数を抽出，ハザード適合地震波による評価

(a) 次世代手法の目標像は，全ての震源を対象として起こり得る全ての地震波群を作成し，その全てについて時刻歴応答解析を行うことによって，地震リスク評価を評価する手法である。そのため，対象地点周りのすべての震源が対象となるため，震源数は数十個の多くの震源数が対象となる。それらの全ての震源に対して，地震リスク評価用の断層モデル地震波群を作成すると，数10万～数100万波の地震波数を作成する必要がある。

(b) 効率化手法（広義）は，ハザード評価に最終的な地震リスクを良く表現できる地震動強さ指標を導入することにより，地震リスクに寄与する震源として選定された数個の震源を対象として地震リスク評価用の断層モデル地震波群を作成すればよいので，地震波数は数10万波程度に低減することができる。

さらに，(c) 効率化手法（狭義）は，(b)で作成した10万波の中から，地震動強さを満たす地震波群を解析可能な波数だけ抽出することにより，地震波サンプル数を低減することが可能である。ハザード評価に基づく発生頻度を抽出地震波数で除すことにより，各地震波と発生頻度と関連付けることができる。(c)の効率化手法における断層モデル地震波群は，第2章の西田らのハザード適合地震波に該当し，断層モデル地震波群の作成およびそれらによる建物の時刻歴応答解析の解析時間の目安は半年間程度であり，十分に実用化に耐える解析負荷となっている。

表 5.8 次世代地震リスク評価手法の効率化手法による解析負荷低減の目安

比較項目	(a) 目標像	(b) 効率化手法（広義）	(c) 効率化手法（狭義）
震源数	数十～数百個	数個	数個
作成地震波数	数 10 万～100 万波	約 10 万波	
時刻歴応答解析に 適用する地震波数	数 10 万～100 万波 (全震源を対象に作成された 全地震波群)	約 10 万波 (地震リスクに寄与する震源を対象 に作成された全地震波群)	250 波 (b)の中からハザード適合地震波 として抽出された実適用可能な地 震波群)
時刻歴応答解析数	数 10 万～100 万回 ×建物モデル数	約 10 万回 ×建物モデル数	250 回 ×建物モデル数

表 5.9 解析時間の目安

比較項目		解析時間目安 (プリポスト処理除)	(b) 効率化手法（広義） 10 万波	(c) 効率化手法（狭義） 250 波
断層モデルによる波形合成法		数十秒～数分	70 日程度（平均 1 分／波）	
建物の 時刻歴応答解析	質点系モデル	数十秒～数分	70 日程度 (平均 1 分／個)	250 分 (平均 1 分／個)
	3 次元 FEM	数時間～数日間	数年程度 (平均 3h／個)	30 日程度 (平均 3h／個)



## 5.9 まとめ

本章では、断層モデル地震波群に基づく次世代地震リスク評価手法について、手法の実適用に向けた効率化を目的として検討を行った。

提案した効率化手法は、建物の地震リスクを良く表現することができる地震動強さ指標に基づくハザード寄与度が高い震源に照準を絞って地震波群を作成し解析可能な地震波数を抽出することによって、地震リスク評価に用いる断層モデル地震波群のサンプル数を低減するという手法である。短周期～長周期まで様々な固有周期の機器類で構成されるような複雑な機器システムの機能損傷のリスクを対象として、時刻歴波形から算定可能な地震動強さ指標の中から、地震リスクを良く表現できる地震動強さ指標を選定する手法を提案した。提案手法は、断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布を最も精度良く評価できる地震動強さ指標を選定する手法であり、複数の地震動強さ指標の候補の中から、システム損傷確率の分布と地震動強さを横軸としたシステム損傷確率の分布の偏差が最も小さくなる指標を選定する手法である。

本章では、提案手法によってシステム損傷を最も良く表す指標が適切に選定されるかどうかについて、第4章で用いた機器・配管システムを対象として妥当性の検証を行った。機器・配管システムを構成する各機器類の耐力条件を調整することにより、システムの脆弱部を変えた複数のシステムケースについて提案手法を適用し、各ケースに対して適切な指標が提案手法によって選定されるかどうか確認した。その結果、提案手法に基づき選定された地震動強さ指標がシステム全体の損傷に最も寄与する機器の損傷を表現できる指標と一致することを確認した。

また、なるべく少ない断層モデル地震波数に基づき地震リスクを良く表現できる地震動強さ指標を選定できることが、次世代地震リスク評価の効率化に繋がることから、提案手法における偏差の算定に必要な最小限の地震波数について検討したところ、50波～300波程度の地震波群があれば、概ね適切な地震動強さ指標が選定できそうであることを確認した。

最後に、本論文において対象とする断層モデル地震波群を用いた次世代地震リスク評価手法について、実適用するための適用フローを示した。

---

## 第5章 参考文献

- [1] Nishida, A., Igarashi, S., Sakamoto, S., Uchiyama, Y. Yamamoto, Y., Muramatsu, K.. and Takada, T. : Hazard-consistent ground motions generated with a stochastic fault-rupture model, Journal of Nuclear Engineering and Design, 2015
- [2] Nishida, A., Igarashi, S., Sakamoto, S., Uchiyama, Y. Yamamoto, Y., Muramatsu, K.. and Takada, T. : CHARACTERISTICS OF SIMULATED GROUND MOTION, SMiRT-22, 2013

## 第6章 結論

本章では、第1章～第5章を総括し、本論文の結論をまとめる。

### 6.1 本論文の結論

本論文は、地震動評価技術の最新知見である断層モデルに基づく時刻歴波形シミュレーション技術によって、評価地点の地震ハザードを断層モデル地震波群として表現し、それらを建物の地震リスク評価に適用する次世代に向けた新しい地震リスク評価手法の有効性を検証し、さらに、手法の効率化を提案したものである。本論文では、周波数応答特性の異なる複数の機器類で構成されたシステムが設置された建物の機能損傷評価を地震リスク評価の対象とした。

第1章では、地震リスク評価の従来手法として、地震動強さを共通指標としたハザード曲線と fragility 曲線に基づく評価手法と、一様ハザードスペクトル適合地震波群を用いた時刻歴応答解析に基づく評価手法を一例として挙げ、従来手法の課題点として、個々の震源情報や時刻歴波形としての地震動情報が欠落する可能性があること、地震動と建物応答が必ずしも連続性のある関係として表されていないなどが挙げられることを示した。

これに対し、従来手法の課題点を克服することが期待される断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の目標像を示し、震源から建物の機能損傷に至るまでの一連の評価の流れを各評価段階の連続性を確保しながら地震リスク評価することの意義についてまとめた。一方で、目標とする次世代地震リスク評価手法には、評価地点の地震ハザードを表現するための多数の地震波群の作成が必要になること、それらを入力地震動とした時刻歴応答解析は解析負荷が大きいこと、などの課題点も残存し、次世代地震リスク手法の実適用に向けては手法の効率化が必要であることについて言及した。また、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価に関連する既往研究についてレビューし、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価の特長と従来手法との相違点を示すとともに、本論文の目的および貢献性について整理した。

第2章では、断層モデル地震波群を原子力施設の地震リスク評価に適用することを目的として、解放基盤における最大加速度を地震動強さ指標とした場合の評価地点の地震ハザードに寄与する震源を対象として作成された断層モデル地震波群に関して、断層モデル地震波群の作成に関する各種解析条件（ハザード分解手法、震源特性の不確定性の設定条件、地震動評価手法など）を示した。また、作成した断層モデル地震波群の中から、時刻歴応答解析への適用が可能な波数の地震波群を抽出し、距離減衰式による地震ハザード評価の結果を用いて各地震波に発生頻度を関連付ける方法の概要を示した。

---

さらに、断層モデル地震波群の作成結果に関して、距離減衰式と波形合成法の結果に差異が生じる要因に関する考察を行い、両者の距離減衰特性の違いが要因の一つであることを確認した。

第 3 章では、断層モデルを表現する様々な震源特性の不確定性が、作成された断層モデル地震波群の地震動強さや建物応答に及ぼす影響を定量的に評価するために、重回帰分析に基づき、時刻歴波形から算定可能な様々な地震動強さ指標や建物の最大応答指標に対する各震源特性の感度解析を行った。重回帰分析によって得られた各震源特性と地震動強さや建物応答の相関関係は、各震源特性による震源スペクトルへの影響範囲や評価地点と断層との位置関係によって説明可能であることを確認した。

第 4 章では、断層モデル地震波群の特長の一つである、震源特性の違いや断層破壊・伝搬特性の物理的な意味合いを地震動特性に詳細に反映できるという点に関して、地震リスク評価に用いる時刻歴地震波群の応答スペクトルのばらつきや周期間相関に着目し、それらが最終的な地震リスク評価結果に及ぼす影響について検討した。従来の地震リスク評価に用いられているスペクトル適合地震波群を想定した地震波群ケースとして、断層モデル地震波群と応答スペクトルの中央値が等しく、ばらつきや周期間相関の条件が異なる 3 つのスペクトル適合模擬地震波セットを作成し、固有周期の異なる複数の機器類から成る機器・配管システムの損傷確率を断層モデル地震波群のセットと比較した。その結果、特に応答スペクトルのばらつきはシステム損傷確率へ及ぼす影響が大きいことを確認した。周期間相関に関しては、検討対象とした機器・配管システムに対して及ぼす影響は小さかったが、周期間相関の条件の違いによる損傷確率の明瞭な差異を確認した。このことから、断層モデル地震波群を地震リスク評価に適用することによって、従来のスペクトル適合地震波群では表現することが難しい地震動応答の現実的なばらつきや周期間相関の違いを反映したより決め細やかな地震リスク評価が可能になることを示した。

第 5 章では、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法の実適用に向けて、最終的な地震リスクを良く表すことが可能な地震動強さ指標を導入した震源の選定による、断層モデル地震波群作成の効率化手法を提案した。提案手法は、断層モデル地震波の時刻歴波形から算定可能な複数の地震動強さ指標の候補の中から建物の機能損傷を最も良く表現できる指標を選定する手法であり、最終的な地震リスクに寄与する地震波群を生じさせる震源に照準を絞ることによって断層モデル地震波群の作成サンプル数の低減を図るものである。第 5 章では、短周期～長周期の様々な振動特性を有する機器類で構成された任意のシステムを対象として、提案手法に基づき妥当な地震動強さ指標が選定されていることを確認した。また、提案手法を活用した断層モデル地震波群を用いた次世代地震リスク評価手法の効率化手法の適用フローを示した。

本論文では、断層モデル地震波群を用いた次世代に向けた地震リスク評価手法について、震源～地震動評価～建物の時刻歴応答解析～建物の機能損傷評価に至るまでの一連の評価を実施した。第 3 章では、断層モデル地震波群の震源特性と地震動強さおよび時刻歴応答解析から得られる建物応答との関係が、震源スペクトルや断層面と評価地点との位置関係から説明できること分かったが、これらの知見は、任意の対象敷地に対しても準用することが可能であり、断層モデル地震波群を作成する上で重要な震源特性に関して示唆を与える資料として有効に利用可能である。また、震源特性の不確定性により影響を受けやすい周期帯が明らかになることによって冗長性のある機器システムの設計に生か

すことも可能である。第4章では、個々の震源特性の違いや断層破壊・地震動伝播の物理モデルを地震動特性に反映できる断層モデル地震波群によって詳細に表現することが可能な応答スペクトルのばらつきや周期間相関に着目し、従来の地震リスク評価に用いられているスペクトル適合地震波群と地震リスク評価結果を比較することによって、応答スペクトルのばらつきや周期間相関の取り扱い方の違いが建物の機能損傷に影響を及ぼすことを確認し、地震リスク評価に用いる入力地震動に関しても、震源特性の違いや断層破壊の物理的な意味合いを詳細な考慮した地震波群を用いることが重要であることを示すことができた。第5章では、原子力施設の機器システムに係らず、一般建築物の建築設備などを含む任意のシステムに対しても断層モデル地震波群による地震リスク評価を効率的に実施する手法を提案し、断層モデル地震波群を用いたよりきめ細やかな地震リスク評価手法が汎用的に適用できることを示した点において、断層モデル地震波群を用いた地震リスク評価手法による、建物の機能損傷評価の精度向上や信頼性向上に貢献するものと考えている。

---

## 6.2 本論文で得られた知見の一般性

本論文において検討対象とした、断層モデルに基づく地震波群を用いた地震リスク評価手法や、第5章で検討した地震リスク評価手法の効率化のための地震動強さ指標の選定方法に関しては、解析対象に依らず、一般的に適用可能な手法である。

一方で、本論文で実施した個々の評価結果については、解析条件が異なれば評価結果の定性的傾向は変化する可能性がある。特に、地震動評価、地盤モデル、建物モデルおよび機器・配管システムの構成や耐力の設定に関しては、限定された設定条件で検討を行っているため、解析条件の違いが評価結果に影響する可能性がある。

例えば、地震動評価に関しては、最大加速度を地震動強さ指標としたハザードに寄与する震源を対象として地震波群を作成しており、評価地点に比較的近い震源が対象となっているが、短周期と長周期が両方考慮できる地震動強さ指標を用いた場合に、選定震源の範囲を効果的に絞れることができるのかという点や、機器・配管システムの損傷条件に関して最大応答値で損傷が決まるのではなく時刻歴地震波の継続時間で決まるような場合に、地震リスク評価結果にどのような影響があるのかという点については、本論文の範囲では十分に言及できていないため、今後検討が必要である。

なお、第5章の最適な地震動強さ指標の選定手法に関して、本論文では、システム損傷確率分布が0～1の範囲に広く分布するケースを対象としているが、例えば、機器・配管類の耐力のばらつきが無く、システム損傷確率の分布が0または1の値のみを取る場合にも、断層モデル地震波群によるシステム損傷確率の分布に対する適合度を算定するという観点から、最適な地震動強さ指標を得ることが可能である。

## 6.3 今後の課題

断層モデル地震波群を用いた次世代に向けた地震リスク評価手法は、地震動情報を損なわずに震源から建物機能損傷に至るまでの評価ができるため、地震リスク評価の高精度化や信頼性向上が期待できることが分かった。さらに、本論文の検討によって様々な機器から成るシステムの地震リスクを評価する場合には特に有効であることが明らかになった。一方で、次世代手法を展開していくためにはいくつかの課題も挙げられる。以下に、今後の課題を整理する。

### (1) 様々な地震動強さ指標の距離減衰式による表現

本論文において検討した次世代地震リスク評価手法の目標像は、評価地点に起こり得る全ての断層モデル地震波群が予め評価されていることが最も望ましい状況である。しかしながら、現状、実適用する場合には、はじめに、評価地点に起こり得る地震波群を作成する必要があるが、第5章において検討した地震波群作成に関する解析負荷の低減による効率化手法が必須である。

次世代地震リスク評価手法の効率化手法は、地震リスクを良く表すことができる地震動強さ指標に基づくハザード寄与度の高い震源に照準をあてて断層モデル地震波群を作成する手法である。すなわち、地震動強さはマグニチュードと震源距離をパラメータとした距離減衰式として容易に表現できる指標である必要がある。最大加速度や最大速度などは一般的に用いられている距離減衰式が既に数多く提案されているが、時刻歴波形の積分値である CAV 等の指標については知見が無い。様々な指標を距離減衰式として表すことできれば、地震動の継続時間が影響するようなシステムを対象とする場合でも、断層モデル地震波群を効率的に作成することが可能と考えられる。

## （２）震源特性の不確定性を考慮した断層モデル地震波群の作成に関する課題

本論文で対象とした断層モデル地震波群の作成では、震源特性の平均的な値は、地震調査研究推進本部の「強震動予測レシピ」に基づいて設定している。また、震源特性の不確定性は、既往研究の検討結果に基づき設定している。しかしながら、全ての震源特性に関して十分な知見が得られていないのが現状である。また、震源特性がばらついた場合の震源特性間の相関関係に関しても、断層破壊の物理モデルが成り立つように設定しているものの、それが現実的に起こり得る「正しい」断層モデルを表現できているかについては、今後十分な検証が必要であると考えられる。

---



## 研究活動リスト

### 1. 査読付き論文（筆頭著者）

- [1-1]五十嵐さやか, 曹炳玫, 前田匡樹：曲げ降伏先行型 RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, 2009
- [1-2]五十嵐さやか, 前田匡樹：曲げ降伏先行型 RC 柱・梁部材の損傷量に基づいた修復性能評価法の構築に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010
- [1-3]五十嵐さやか, 前田匡樹：曲げ降伏先行型 RC 柱・梁部材の損傷量評価に関する研究 その 1 ひび割れ長さ評価モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 652 号, 2010
- [1-4]Sayaka Igarashi, Masaki Maeda : Evaluation of Seismic Reparability Limit State of R/C Frame Structure Based on the Damage of Columns and Beams, 15th World Conference on Earthquake Engineering(15thWCEE), Paper No.702, 2012
- [1-5]五十嵐さやか, 中村正寿, 坂本成弘：マルチエージェントシミュレーションによる地震時避難に関する検討, 構造物の安全性および信頼性 (JCROSSAR2011), Vol.7, CD-ROM, pp.31-38, 2011
- [1-6]Sayaka Igarashi, Shigehiro Sakamoto, Akemi Nishida, Ken Muramatsu and Tsuyoshi Takada : Structural Response by Ground Motions from Sources with Stochastic Characteristics, Proc. of 23th International Conference on Nuclear Engineering, 2015
- [1-7]Sayaka Igarashi, Shigehiro Sakamoto, Yasuo Uchiyama, Yu Yamamoto, Akemi Nishida, Ken Muramatsu, and Tsuyoshi Takada : Seismic Damage Probability by Ground Motions Consistent with Seismic Hazard, Proc. of 23rd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-23), Division V, 2015.
- [1-8]五十嵐さやか, 坂本成弘, 西田明美, 村松健, 高田毅士：ハザード適合地震波による建物機能損傷の試算, 構造物の安全性および信頼性 (JCROSSAR2015), Vol.8, CD-ROM, pp.535-541, 2015

- 
- [1-9]五十嵐さやか, 坂本成弘, 西田明美, 村松健, 高田毅士: 震源特性の不確定性が地震動強さや建物応答に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 721 号, pp.425-435, 2016

## 2. 査読付き論文 (筆頭著者以外)

- [2-1]Akemi Nishida, Sayaka Igarashi, Shigehiro Sakamoto, Yasuo Uchiyama, Yu Yamamoto, Ken Muramatsu, and Tsuyoshi Takada : CHARACTERISTICS OF SIMULATED GROUND MOTIONS CONSISTENT WITH SEISMIC HAZARD, Proc. of 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT-22), Division IX, 2013.
- [2-2]Akemi Nishida, Sayaka Igarashi, Shigehiro Sakamoto, Yasuo Uchiyama, Yu Yamamoto, Ken Muramatsu, and Tsuyoshi Takada : Hazard-consistent ground motions generated with a stochastic fault-rupture model, Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol. 295, pp. 875-886, 2015.10
- [2-2] 西田明美, 五十嵐さやか, 坂本成弘, 村松健, 高田毅士: 原子力施設の地震リスク評価手法の高度化のための原子力施設建屋・機器の地震応答解析, 構造物の安全性および信頼性 (JCROSSAR2015), Vol.8, CD-ROM, pp.108-113, 2015

## 3. 査読無し論文 (筆頭著者)

- [3-1]五十嵐さやか, 松川和人, 三辻和弥, 前田匡樹, 五十嵐俊一: ポリエステル繊維織物の接着により耐震補強した木造架構の性能に関する実験的研究: その 2 実大木造架構の耐震性能の検証, 日本建築学会東北支部研究報告集, 2008
- [3-2]五十嵐さやか, 松川 和人, 三辻和弥, 前田 匡樹, 五十嵐俊一: ポリエステル繊維織物を用いた木造住宅の耐震補強効果に関する静的加力実験 その 2 力学性状の比較, 日本建築学会学術講演梗概集, 2008
- [3-3]五十嵐さやか, 前田匡樹, 三辻和弥, 迫田丈志, 松川和人: 2008 年岩手・宮城内陸地震により被災した学校建築物の調査と余震および常時微動観測記録 その 2 上野目小学校の被害と耐震性能, 日本地震工学会大会梗概集, 2008
- [3-4]五十嵐さやか, 曹炳玟, 前田匡樹: RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎研究 その 1 曲げ降伏先行型柱部材の損傷評価モデルの構築, 日本建築学会東北支部研究報告集, 2009

- [3-5]五十嵐さやか, 曹炳玟, 金順実, 前田匡樹: RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎的研究 その3 崩壊形式の異なる RC 造骨組の損傷量評価と比較, 2009
- [3-6]五十嵐さやか, 金順実, 曹炳玟, 前田匡樹: ひび割れ量評価モデルによる RC 造柱・梁部材の損傷評価, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 2011
- [3-7]五十嵐さやか, 曹炳玟, 金順実, 前田 匡樹: 地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験: その6 柱梁部材の損傷量評価モデルによる損傷量評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 2010
- [3-8]五十嵐さやか, 中村正寿, 坂本成弘: マルチエージェント型避難シミュレーションを用いた避難者特性を考慮した場合の群集流動性状の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 2011
- [3-9]五十嵐さやか, 中村正寿, 坂本成弘: 避難者特性のばらつきが開口部流動性状に及ぼす影響に関する解析的検討, 火災学会研究発表会, 2011
- [3-10]五十嵐さやか, 池畠由華, 坂本成弘, 野崎洋之: 火災報告に基づくエコ住宅の火災リスクに関する基礎的検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 2012
- [3-11]五十嵐さやか, 坂本成弘, 西田明美, 村松健, 高田毅士: 地震ハザードに適合する地震波の作成(その2) 作成した地震波の特性, 日本建築学会学術講演梗概集, 2013
- [3-12]五十嵐さやか, 坂本成弘, 西田明美, 村松健, 高田毅士: ハザード適合地震波による構造物の応答解析, 日本原子力学会(春の大会), 2013
- [3-13]五十嵐さやか, 坂本成弘, 西田明美, 村松健, 高田毅士: ハザード適合地震波による建物応答解析(その2) 地震波および構造性能による建物応答のばらつき性状, 日本建築学会学術講演梗概集, 2014
- [3-14]五十嵐さやか, 坂本成弘, 西田明美, 村松健, 高田毅士: 震源特性の不確定性が地震波の地震動強さや建物応答に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015

#### 4. 査読無し論文(筆頭著者以外)

- [4-1]前田匡樹, 三辻和弥, 菅原裕太, 中村匠, 五十嵐さやか: 2007年3月25日能登半島地震に

---

よる建築物の被害と強震観測記録，建築防災，2007

[4-2]菅原裕太，三辻和弥，前田匡樹，中村匠，五十嵐さやか：2007 年 3 月 25 日能登半島地震における建築物被害調査，日本建築学会学術講演梗概集，2007

[4-3]三辻和弥，五十嵐さやか，中村匠，前田匡樹，五十嵐俊一：ポリエステル繊維織物の接着により耐震補強した木造架構の性能に関する実験的研究 その 1 部材接合部の力学性能の検証，日本建築学会東北支部研究報告集，2008

[4-4]三辻和弥，五十嵐さやか，松川 和人，前田 匡樹，五十嵐俊一：ポリエステル繊維織物を用いた木造住宅の耐震補強効果に関する静的加力実験 その 1 実験概要および結果，日本建築学会学術講演梗概集，2008

[4-5]松川和人，前田匡樹，三辻和弥，五十嵐さやか，岡野創，山添正稔：2008 年岩手・宮城内陸地震により被災した学校建築物の調査と余震および常時微動観測記録 その 1 被害調査及び地震の概要，日本地震工学会大会梗概集，2008

[4-6]前田匡樹，三辻和弥，迫田丈志，五十嵐さやか，松川和人，中神宏昌：2008 年岩手・宮城内陸地震により被災した学校建築物の調査と余震および常時微動観測記録 その 3 岩ヶ崎高校の被害と耐震性能，日本地震工学会大会梗概集，2008

[4-7]曹炳玟，五十嵐さやか，前田匡樹，李晩在：RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎研究 その 2 セン断破壊型柱部材への適用，日本建築学会東北支部研究報告集，2009

[4-8]金順実，五十嵐さやか，曹炳玟，前田匡樹：RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎的研究 その 1 曲げ降伏先行型 RC 柱部材の残留ひび割れ量評価概要，日本建築学会学術講演梗概集，2009

[4-9]曹炳玟，五十嵐さやか，金順実，前田匡樹，李晩在：RC 柱部材の損傷量に基づく修復性評価モデルの構築に関する基礎的研究 その 2 セン断破壊型 RC 柱部材への適用，日本建築学会学術講演梗概集，2009

[4-10]金順実，五十嵐さやか，前田匡樹：2008 年中国四川大地震により被災した RC 造集合住宅の被害と耐震性能の検証，日本地震工学会大会梗概集，2009

[4-11]前田 匡樹，曹炳玟，五十嵐さやか，金順実，権淳日，高橋典之，加藤博人，田尻清太郎：

地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験：その 2 柱梁架構の計測計画，日本建築学会学術講演梗概集，2010

[4-12]曹炳玟，五十嵐さやか，金順実，前田 匡樹，権淳日，高橋典之，加藤博人，田尻清太郎，向井智久：地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験：その 3 柱梁躯体の破壊経過と損傷量，日本建築学会学術講演梗概集，2010

[4-13]金順実，五十嵐さやか，曹炳玟，前田 匡樹，権淳日，高橋典之，向井智久，加藤博人：地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験：その 4 柱梁のタイル仕上げ面の破壊経過と損傷量，日本建築学会学術講演梗概集，2010

[4-14]高橋典之，権淳日，前田 匡樹，五十嵐さやか，曹炳玟，金順実，田尻清太郎，向井智久：地震による RC 造建築物の損傷状況・機能維持に着目した実大試験体実験：その 5 画像処理手法を用いた柱梁部材のひび割れ量分析，日本建築学会学術講演梗概集，2010

[4-15]西田明美，五十嵐さやか，坂本成弘，村松健，高田毅士：地震ハザード評価の高度化のための地震動生成法，日本原子力学会（春の大会），2013

[4-16]西田明美，五十嵐さやか，坂本成弘，村松健，高田毅士：地震ハザードに適合する地震波の作成（その 1）地震波作成方法の概要，日本建築学会学術講演梗概集，2013

[4-17]高田毅士，西田明美，村松健，五十嵐さやか，坂本成弘：ハザード適合地震波の作成方法の違いによる地震波特性の比較，日本建築学会学術講演梗概集，2014

[4-18]坂本成弘，五十嵐さやか，西田明美，村松健，高田毅士：ハザード適合地震波による建物応答解析（その 1）地震動強さ指標と建物フラジリティ評価，日本建築学会学術講演梗概集，2014

[4-19]西田明美，五十嵐さやか，坂本成弘，村松健，高田毅士：ハザード適合地震波による建物機能損傷の試算（その 1）地震波および建物応答の周期間相関特性，日本建築学会学術講演梗概集，2015

[4-20]坂本成弘，五十嵐さやか，西田明美，村松健，高田毅士：ハザード適合地震波による建物機能損傷の試算（その 2），相関の違いが建物損傷に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集，2015

---

## 5. その他（研究活動を示すもの）

[5-1]2011 年 9 月～2012 年 3 月 日本建築学会 信頼性工学利用小委員会・信頼性工学に関する最新動向調査 WG 委員

[5-2]2013 年 4 月～2015 年 3 月 日本建築学会関東支部 構造専門研究委員会 荷重振動 WG 委員

## 謝辞

本博士論文は、(国研)原子力研究開発機構、東京都市大学、東京大学、大成建設技術センターとの共同研究課題「原子力施設の地震リスク評価手法の高度化に関する研究」において、筆者が実施した研究内容を取りまとめたものです。周りの皆様方の温かいご支援を賜り、無事博士論文をまとめることができました。

東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 高田毅士教授には、断層モデル地震波群を用いた確率論的地震リスク評価に係る諸検討を開始した2011年から継続的に懇切丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました。本論文に係る研究を開始した当初は、筆者自身の確率論的地震リスク評価に関する知識は非常に未熟なものでしたが、高田教授には確率論的地震リスク評価の基本事項や断層モデル地震波群を適用することの意義について分かりやすい言葉でご指導して下さいました。共同研究の内容で本博士論文を執筆したいという旨をお願いした際には主査を快くお引き受け頂き、研究の方向性について幾度も親身に相談に応じて頂きました。お蔭様で研究の目標を見失うことなく無事論文としてまとめる事ができました。心より深く感謝しております。

東京大学地震研究所 災害科学系研究部門 瀧瀬一起教授、東京大学生産技術研究所 中埜良昭教授、東京理科大学 理工学部建築学科 永野正行教授、東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 伊山潤准教授、東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻 糸井達哉准教授には、博士論文の内容について幾度も精査して頂き、非常に多くのご助言を頂きました。先生方に多角的な視点から貴重なご意見を頂いたことで、本論文内容における重要事項が明確になり、一層充実した検討内容にすることができました。心より感謝申し上げます。

本博士論文は、(国研)原子力研究開発機構、東京都市大学、東京大学との共同研究課題として行われた内容をまとめたものですが、共同研究に適用した地震リスク評価用の断層モデル地震波群のデータおよびその作成方法の詳細データについては、断層モデル地震波群の作成に携わられた(国研)原子力研究開発機構よりご提供頂いたものを使用させて頂きました。これらの貴重なデータの利用を快諾して頂きましたことを厚く御礼申し上げます。(国研)原子力研究開発機構 西田明美氏、原子力研究開発機構兼東京都市大学 村松健氏には、本博士論文の内容に関して、原子力施設の地震応答や地震リスク評価の観点から実務に直結する有用なご意見やアドバイスを頂きました。心より感謝申し上げます。

また、本博士研究は、大成建設(株)技術センターにおける調査研究業務の一環で行われました。筆者をこのような先進的業務に携わらせて頂くことを認めてくださった松井達彦技術センター長、建築技術研究所 長島一郎所長、防災研究室 坂本成弘室長に心より深く感謝申し上げます。筆者は2010年に技術センター配属として入社して以来、主に火災および地震等の自然災害に対するリスク研究に携わってきました。特に坂本室長にはリスク評価研究の先輩として基本的な事項から応用的な事項あるいはプログラミング等のデータ処理の手法まで、非常に丁寧なご指導を賜りました。リスク評価を

専門とする研究員として育てて頂いたことに心より深く感謝申し上げます。

また、大成建設（株）原子力本部原子力技術第二部 宇賀田健氏には、原子力施設の確率論的地震リスク評価の実務に携わられているご経験に基づいた数多くの貴重なご意見やアドバイスを頂きました。心より御礼申し上げます。

本博士論文の内容は、断層モデルに基づく地震動評価が基幹技術のひとつとなっています。大成建設技術センター 防災研究室 耐震チームの内山泰生氏、山本優氏には、2011 年から継続的に断層モデルに基づく地震動評価法や波形処理に関してご教示頂き、本研究を進めていく上でも貴重なご意見を数多く頂きました。特に震源特性と地震動評価結果の関係について、地震動評価の理論的・経験的知見に基づく的確なアドバイス頂いたことで、博士研究の検討をスムーズに行うことができました。また、高木政美氏、徳光亮一氏、安川真知子氏、廣石恒二氏、青木雅嗣氏には、本博士論文の執筆を温かく見守って頂き、業務の面でも多大なご支援を賜りました。心より深く感謝申し上げます。

また、修士課程まで筆者がご指導頂きました 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 前田匡樹教授には、大学院卒業後も博士研究への取組みに対して温かい激励を頂きました。筆者が現在研究職として博士論文をまとめ上げることができたのは、研究者としての基本的な考え方や取組みの姿勢を学ばせて頂いたことが非常に大きく、ここに深く感謝申し上げます。

最後になりますが、山形、福島、宮城の地から、筆者をいつも温かく見守りそして支えてくれた両親と家族に心からの感謝の気持ちを表し、本博士論文を執筆する上でお世話になった皆様方への感謝の挨拶とさせていただきます。

研究者としては未熟な部分も多々あるかと思いますが、本博士論文の執筆に際して皆様方から学ばせて頂いたことを、今後の研究業務や日頃の生活に活かしていく所存です。お世話になった皆様方に少しでも恩返しできるよう今後とも精進して参ります。

平成 29 年 1 月 18 日