RREP-2024-4003

## 安全研究成果報告

## S/NRA/R Research Report

# 震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化 に関する研究

**Research on Improvement of Near-Source Seismic Hazard Evaluation Methods** 

## 呉 長江 儘田 豊 田島 礼子 菅谷 勝則 藤田 雅俊 森木 ひかる

WU Changjiang, MAMADA Yutaka, TAJIMA Reiko, SUGAYA Katsunori, FUJITA Masatoshi, and MORIKI Hikaru

## 地震·津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

## 原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

> 令和6年6月 June 2024

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子 カ規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門 〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル 電話:03-5114-2226 ファックス:03-5114-2236 震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究

## 原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ

#### 地震·津波研究部門

呉 長江 儘田 豊 田島 礼子 菅谷 勝則 藤田 雅俊森木ひかる

#### 要 旨

規制基準では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定 する地震動」をそれぞれ評価し、基準地震動を策定するとともに、策定した地震動の超過 確率を参照することを求めており、最新の研究動向等を踏まえて地震動評価の精度向上を 図り、規制判断の根拠になる知見を蓄積することが重要である。本研究では、震源近傍の 地震ハザード評価手法を高度化することを目的に、断層モデル法による地震動及び震源を 特定せず策定する地震動の評価の精度向上に資する技術的知見を蓄積するとともに、確率 論的地震ハザード評価の精緻化及び断層変位評価に係る知見を蓄積した。

断層モデル法の精度向上に係る研究として、主に一般財団法人地域地盤環境研究所及び 株式会社大崎総合研究所への委託により、国内外で起きた地震を対象に地震動解析を行い、 震源断層パラメータに係る知見を蓄積した。また、内陸型地震及び海溝型地震のうち、破 壊が地表まで伝播した地震を対象に、震源断層モデルを構築して地震動評価を実施するこ とにより、浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルの設定に係る知見を得た。

震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る研究として、新たな観測記録の収集・ 追加解析を実施し、標準応答スペクトルへの影響はないことを確認するとともに、最新知 見を考慮した複数のはぎとり手法を用いた試解析による手法の特徴把握及び比較的硬質な 地盤の増幅率を考慮可能な距離減衰式の構築に係る知見の蓄積を行った。

確率論的地震ハザード評価の高度化に係る研究として、震源特性について、地震規模と 発生頻度の不確かさを考慮した活断層の地震発生モデルの構築を行った。さらに、地震動 特性については、地盤特性における不確かさを考慮した距離減衰式の補正を行い、確率論 的地震ハザード評価に与える影響を把握した。

断層変位評価に係る研究として、株式会社パスコへの委託により、副断層に着目したト レンチ調査、室内模擬実験及び数値解析を実施し、衛星データ及び画像の解析において副 断層の変位を客観的・定量的に評価する手法を開発した。それに基づいた断層変位のデー タを用いて変位評価式の改良等を行い、断層変位評価の精度向上に資する知見を蓄積した。

i

#### Research on methodological improvement of near-source seismic hazard analysis

WU Changjiang, MAMADA Yutaka, TAJIMA Reiko, SUGAYA Katsunori, FUJITA Masatoshi, and MORIKI Hikaru

> Division of Research for Earthquake and Tsunami, Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

#### Abstract

The NRA regulation requires that design basis ground motions (DBGMs) shall be developed by using the site-specific ground motions evaluated from identified seismic sources and ground motions evaluated without identifying seismic sources. It is also required that the exceedance probability of each DBGM shall be referenced. It is important to improve methods of ground-motion evaluation taking into consideration the latest scientific and technological findings and to accumulate relevant knowledge in support of regulation revision. To improve near-source seismic hazard evaluation using fault rupture modeling method for identified seismic sources and of ground motion evaluation without identifying seismic sources. We also report findings about the refinement of probabilistic seismic hazard analysis and the evaluation of fault displacement.

A study on fault rupture modeling mainly undertaken by Geo-Research Institute and Ohsaki Research Institute, Inc., under the auspices of the NRA, accumulated technological findings on fault parameters through conducting ground motion evaluation for earthquakes occurring in Japan and abroad. In particular, findings on the development of characterized source models considering surface ruptures are acquired through building characterized source models for both continentalcrust earthquakes and plate boundary earthquakes associated with surface ruptures and through performing ground motion evaluation.

Regarding the study on improvement of ground motion evaluation without identifying seismic sources, new ground motion records were collected, and free-field ground motions at depth were determined and analyzed. Then, the effects of including new data on the NRA Standard Response Spectra were confirmed to be negligible. Based on the latest knowledge, several methods for determining free-field motions at depth were surveyed, testing of method application was conducted, and their features were comprehended. Using such free-field ground motions at depth, we also acquired findings on ground motion prediction equations (GMPEs) which are applicable to

relatively hard-ground sites.

Models of earthquake occurrences for capable faults were developed for the refinement of probabilistic seismic hazard analysis. These models considered the uncertainties in magnitude and occurrence frequency. Furthermore, GMPEs of a specific site were calibrated by evaluating the repeatable site-specific amplification effects as a site correction term, and their effects on PSHA were clarified.

The study on fault displacement evaluation targeting secondary fault displacements, accomplished by PASCO Corporation under the auspices of the NRA, conducted trenching survey, analogue experiments, and numerical simulation, and developed an objective and quantitative evaluation method of secondary fault displacements using interference analysis and image correction analysis of satellite data. Fault displacement evaluation equations were improved using fault displacement data accumulated by the developed method, and the knowledge on fault displacement evaluation has been accumulated.

## 目 次

1.	序論	∑ ∄		1
	1.1	背景	<u>1</u> 1	. 1
	1.2	目的	5	. 2
	1.3	全体	よ行程	. 2
2.	本諸	∑ ∄		4
	2.1	断層	<b></b> 音モデル法の精度向上に係る検討	. 4
	2.1	.1	内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積	. 4
	2.1	.2	海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積	12
	2.2	震渡	原を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討	17
	2.2	2.1	新たな観測記録の収集及び追加解析	18
	2.2	2.2	はぎとり解析の精度向上	21
	2.2	.3	最近の観測記録に基づく距離減衰式の検討	25
	2.3	確率	<sup>図</sup> 論的地震ハザード評価(PSHA)に係る不確かさの検討	28
	2.3	.1	地震規模等の不確かさの検討	28
	2.3	.2	地震動の不確かさの検討	33
	2.4	断層	<b>習変位評価に係る知見の蓄積</b>	37
3.	結論	à		42
	3.1	成果	その要点	42
	3.2	目的	りの達成状況	44
	3.3	成果	その公表等	44
	3.3	.1 ,	原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表	44
	3.3	.2	委託先による公表	45
	3.4	成果	その活用等	46
	3.5	今後	その課題等	47
参	考文南	犬一覧	<u></u>	50
執	筆者-	-覧		56

## 表 目 次

表 2.1	本研究で検討した地震一覧表	(Mwの降順)	
表 2.2	比較対象としたはぎとり手法		

図目次

図 1.1	研究の作業工程
図 2.1	余震記録を用いた地下構造モデルの改良(2019 年 Ridgecrest 地震)
図 2.2	2019 年 Ridgecrest 地震の震源モデル及び SMGA モデルの構築
図 2.3	短周期レベルのスケーリング則との比較7
図 2.4	シミュレーションデータと断層面積のスケーリング則との比較7
図 2.5	すべり速度時間関数の分布9
図 2.6	1999 年台湾集集地震における特性化震源モデルの構築10
図 2.7	代表地点(TCU052)で計算した加速度波形及び永久変位の比較11
図 2.8	対象領域のプレート間地震の観測記録(応答値)と国内地震に基づく距離減衰式
による	予測値の平均残差(赤丸)の周期分布の例14
図 2.9	プレート間地震及び海洋プレート内地震の地震モーメント(M <sub>0</sub> )と短周期レベル
(A) 0,	)関係の回帰分析結果の例15
図 2.10	KiK-net 釜石(IWTH23)観測点を対象とした(a)経験的グリーン関数法及び(b)波
数積分割	去による計算結果の例(擬似速度応答スペクトル)16
図 2.11	対象地震の規模(M <sub>w</sub> )別頻度分布19
図 2.12	非超過確率別応答スペクトルの算出例:全データ及び M <sub>w</sub> 6.5 未満のデータを用
いた2ク	rースの比較19
図 2.13	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較例(標準応答スペク
トル策に	Eに使用された代表的な2ケース)
図 2.14	はぎとり手法ごとの地震動の入力と出力のイメージ23
図 2.15	地中観測記録に対する立ち上げ・はぎとり解析結果の例:2014年11月22日長
野県北部	Rの地震(M <sub>w</sub> 6.3)の KiK-net 戸隠(NGNH28)観測点(震央距離 18.4 km)24
図 2.16	代表周期(T)における基本式(Vs 2500 m/s 以上の地盤対象)による加速度応
答の予測	則値と観測値の比較例: 2016 年 4 月 16 日熊本地震(M <sub>w</sub> 7.0)
図 2.17	代表周期(T)におけるサイト増幅率の(a)地盤速度及び(b)地震基盤深さに対す
る依存性	生の回帰結果の例
図 2.18	回帰に用いたデータによる地盤速度依存のサイト増幅率(Gv)の予測値の変化
図 2.19	糸魚川静岡構造線北部における地震ハザード曲線の計算地点(断層最短距離:
10, 25, 5	0 km)
図 2.20	特定震源の地震ハザード曲線(PGA、左から断層最短距離:10,25,50 km)30
図 2.21	特定震源と領域震源の地震ハザード曲線(PGA、左から断層最短距離 10,25,50
km)	
図 2.22	地震規模(M <sub>w</sub> )、平均変位速度、平均活動間隔の相関関係

义	2.23	逆断層の地震規模と平均活動間隔のばらつきを糸魚川静岡構造線北部に適用し	
た	地震ハ	ザード曲線	32
义	2.24	距離減衰式と予測値の残差に含まれる不確かさの分離	35
义	2.25	代表観測点のサイト係数及び単一評価地点の標準偏差	35
义	2.26	MF13'及び JN13 を対象とした全観測点の平均的な単一評価地点の標準偏差?	36
义	2.27	KiK-net 住田(IWTH04)観測点における代表周期の地震ハザード曲線及び一様	k
ハ	ザード	スペクトル	36
ハ <sup>、</sup> 図	ザード 2.28	スペクトル 布田川断層周辺における変位境界分布	36 39
ハ 図 図	ザード 2.28 2.29	スペクトル 布田川断層周辺における変位境界分布 室内模擬実験で得られた断層変位と実観測データとの比較	36 39 39
ハ 図 図 図	ザード 2.28 2.29 2.30	スペクトル 布田川断層周辺における変位境界分布 室内模擬実験で得られた断層変位と実観測データとの比較 室内模擬実験と数値解析結果の比較(傾斜角 60°)	36 39 39 40
ハ 図 図 図 図	ザード 2.28 2.29 2.30 2.31	スペクトル 布田川断層周辺における変位境界分布 室内模擬実験で得られた断層変位と実観測データとの比較 室内模擬実験と数値解析結果の比較(傾斜角 60°) 断層変位評価式(赤線・青線・緑線:本研究、破線:過年度事業)	36 39 39 40 41

### 略語表

DEM	Digital Elevation Model (数値標高モデル)		
GMPE	Ground Motion Prediction Equation (地震動予測式)		
GMM	Ground Motion Model (地震動モデル)		
IAEA	International Atomic Energy Agency(国際原子力機関)		
LC-InSAR	Low Coherence Interferometric Synthetic Aperture Radar (低コヒーレンス干		
	渉合成開口レーダー)		
LMGA	Long-period Motion Generation Area (長周期地震動生成域)		
NGA-Sub	Next Generation Attenuation for Subduction zone regions (沈み込み帯地域の		
	次世代距離減衰)		
PGA	Peak Ground Acceleration (表面最大加速度)		
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Assessment (確率論的地震ハザード評価)		
SAR	Synthetic Aperture Radar (合成開口レーダー)		
SMGA	Strong Motion Generation Area (強震動生成域)		

## 用語の定義

アスペリティ	断層面上で、通常は強く固着していて、ある時に急激にずれて(す
	べって) 地震波を出す領域のうち、周囲に比べて特にすべり量が
	大きい領域のことをいう。
応答スペクトル	1 つの地震動に対して、減衰定数が一定である、様々な固有周期
	(T)を有する1自由度系の応答を計算し、その応答の時刻歴波
	形の最大値を縦軸に、Tを横軸にとったグラフで表したものをい
	う。応答スペクトルは、応答の時刻歴波形のタイプによって、変
	位応答スペクトル(Sd)、速度応答スペクトル(Sv)及び加速度
	応答スペクトル(Sa)の3種類がある。
応力降下量	地震の発生前後のせん断応力の差のことをいう。高周波放射エネ
	ルギーの大きさを表すため、特性化震源モデルの1つのパラメー
	タとして使われている。
解放基盤表面	基準地震動を策定するために基盤面上の表層や構造物が無いも
	のとして仮想的に設定する自由表面であり、概ねせん断波(S波)
	速度(Vs)700 m/s 以上の地層をいう。
海洋プレート内地震	沈み込む(沈み込んだ)海洋プレート内部で発生する地震をいう。
拡散波動場	発震源からの波動(振動)が地盤内でランダムに拡散された状態
	をいう。本研究では地震を発震源とした波動を対象とする。
確率論的地震—	
ハザード評価	ある地点に対して影響を及ぼす地震及びその地震動の予測に含
	まれる不確かさを定量的に考慮し、将来発生する地震動の強さと
	超過確率の関係を評価することをいう。本研究では「PSHA」と
	いう。
擬似速度—	
応答スペクトル	加速度応答スペクトル(Sa)を基に、Sv=Sa×T/2πの近似式で換
	算したものを擬似速度応答スペクトル(pSv)と呼ぶ。pSv は、
	特に短周期側の速度応答スペクトルのレベルを把握できるほか、
	模擬地震動に用いる Sa も上記式から逆算可能であり、基準地震
	動の指標の一つとして使われている。
基準地震動	耐震重要施設の供用中に当該施設に大きな影響を及ぼすおそれ
	がある地震による地震動をいう。耐震重要施設は、基準地震動に
	よる地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないもので
	なければならない <sup>1</sup> 。
強震動生成域	断層面の中で特に強い揺れ(強震動)を発生させる領域をいう。

距離減衰式 地震の揺れの強さについて地震規模、震源からの距離等との関係 式として表したものであり、「地震動予測式(GMPE)」又は「地 震動モデル(GMM)」とも呼ばれる。

- 経験的グリーン関数法 評価対象地点において、評価対象とする大地震の震源断層面の近 傍で起きた小地震の観測記録が得られている場合に、これを重ね 合わせることにより、大地震による対象地点の地震動を計算する 方法をいう。なお、この重ね合わせに用いられる小地震記録は経 験的グリーン関数と呼ばれる。
- 合成開口レーダー 人工衛星、航空機にレーダー等を搭載して飛行し、移動中に地表 へのマイクロ波の照射と地表からの反射波の受信を行い、その情 報を合成することにより、大型アンテナと同等の高い分解能を実 現したレーダーシステムのことをいう。本研究では「SAR」とい う。
- 地震基盤地震波が地盤の影響を大きく受けない Vs 3000 m/s 程度以上の地 層をいう。
- 地震基盤相当面 地震基盤からの地盤増幅率が小さく、地震動としては地震基盤面 と同等とみなすことができる地盤の解放面をいう。本研究では Vs 2200 m/s 以上の地層とする。

震源を特定せず—

策定する地震動 敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお 敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全 てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、敷地近傍にお ける詳細な調査の結果にかかわらず考慮すべき地震動をいう。こ の地震動には、「全国共通に考慮すべき地震動」及び「地域性を 考慮する地震動」の2種類がある。

水平成層—

- 速度モデル 地盤の構造を、水平方向に速度が均質な地層が複数堆積したもの と仮定して、1次元で単純に表現したモデルをいう。
- スケーリング則 物理量の間に見られる相関関係をいう。例えば、震源パラメータ のスケーリング則には、地震規模の指標である地震モーメント (M<sub>0</sub>)(又はモーメントマグニチュード(M<sub>w</sub>))と断層面積の比 例関係を表したものがある。
- 短周期レベル 短周期領域における加速度震源スペクトルのレベルを指し、原子 力施設の耐震設計における必要な周期帯域の振幅レベルを決め る重要なパラメータである。

断層モデル法 特性化震源モデル及びグリーン関数を用いて地震動を詳細に評

Х

価する手法であり、地震調査研究推進本部地震調査委員会では、 「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」を標 準的な方法論として公表しており、「強震動予測レシピ」もしく は「レシピ」とも呼ぶ。

合成開口レーダーの

- 低コヒーレンス干渉 本研究では、干渉合成開口レーダー(干渉 SAR)による干渉縞、 低コヒーレンス値分布図、及び数値標高モデルデータに基づく傾 斜量図を重ねることにより地表変状箇所を検出している。この手 法のことを「LC-InSAR」と称している。
- 統計的グリーン関数法 評価対象とする大地震の震源断層面を小断層に分割し、評価対象 地点において、各小断層に対応するような小地震の地震動(要素 地震波)を統計的手法により作成し、これを重ね合わせることに より、大地震による対象地点の地震動を計算する方法をいう。こ の方法は、対象地震の近傍において適切な小地震記録(経験的グ リーン関数)が得られていない場合に有効な方法である。
- 特性化震源モデル 強震動を再現するために必要な震源の特性を主要なパラメータ で表した震源モデルをいう。
- 特定震源
   地震調査研究推進本部による確率論的地震動予測地図で対象と
   されている「震源を予め特定できる地震(主要活断層で発生する
   地震、海溝型地震、主要活断層帯以外の活断層で発生する地震)」
   のうち、本研究では「主要活断層で発生する地震」のことをいう。
   内陸地殻内地震
   陸のプレートの上部地殻地震発生層に生じる地震をいい、海岸の
   やや沖合で起こるものを含む。
- 年超過確率
  地震動の年超過確率は評価対象地点において、その地点に影響を
  与える様々な地震を考慮した場合に、1年間に少なくとも1回地
  震動の強さがあるレベルを超える確率のことをいう。確率論的地
  震ハザード解析では、地震動の強さ(例えば最大加速度)を指定して年超過確率を表示する場合と、年超過確率を指定して対応す
  る地震動の強さを表示する場合がある。前者の関係を示したもの
  をハザード曲線といい、後者の関係として例えば地震動の強さを
  周期別の加速度応答値として、指定した年超過確率に対応する加
  速度応答値を周期別に読み取り、横軸に周期、縦軸に加速度応答
  値として示したものを一様ハザードスペクトルという。
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*
  \*</li

xi

対応する領域をいう。

はぎとり解析 地中に設置された地震計よりも上の地盤をモデル化し、その影響 を解析的に除去して露頭面での地震動(露頭波)を算出する解析 をいう。

非超過確率 超過確率はある大きさを超える確率であることに対し、非超過確 率はある大きさを超えない確率をいう(例えば、超過確率が10% の場合、非超過確率は90%となる)。本研究では、地震動の大き さの指標として応答スペクトルを対象とし、周期ごとに求めた幾 何平均と標準偏差を用いて、統計モデルとして対数正規分布を仮 定して確率密度分布を求め、非超過確率ごとの応答スペクトルを 算出している。

標準応答スペクトル 原子力規制委員会が設置した「震源を特定せず策定する地震動に 関する検討チーム」において、「震源を特定せず策定する地震動」 の「全国共通に考慮すべき地震動」(M<sub>w</sub>6.5 程度未満の地震)を 対象に、震源近傍の多数の地震動記録に基づいて地震基盤相当面 において策定した標準的な応答スペクトルをいう。

プレート間地震 相接する2つのプレートの境界面で発生する地震をいう。

領域震源
 特定震源の他にも、実際には数多くの地震(例えば、活断層が知られていないところで発生する内陸の浅い地震、繰り返し発生する固有地震として評価されていないプレート間の中小地震等)が発生するため、確率論的地震ハザード評価の際に、このような地震の発生場所を既往知見等に基づいて区分した領域として設定し、その中に対象地震が分布すると仮定した震源のことをいう。

#### 1. 序論

#### 1.1 背景

規制基準<sup>1</sup>では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず 策定する地震動」をそれぞれ評価し、基準地震動を策定するとともに、策定した地震動の 超過確率を参照することを求めており、最新の研究動向等を踏まえて地震動評価の精度向 上を図り、規制上の判断の根拠となる知見を蓄積することが重要である。

上記規則解釈では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」を評価する際、「敷 地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的なパラメータについて分 析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手法を用いて考慮するこ と」、また、「内陸地殻内地震について選定した検討用地震のうち、震源が敷地に極めて 近い場合は、地表に変位を伴う断層全体を考慮」することを求めている。そのため、平成 28 年熊本地震(以下「熊本地震」という。)等に係る最新知見を踏まえて、断層浅部破壊 を考慮した特性化震源モデルの設定手法を考案し、震源近傍の地震動評価の高度化を行う とともに、国内外の地震に対して、断層モデル法に基づく検証解析等を行い、震源近傍の 地震動評価に係る知見を拡充することが重要である。

「震源を特定せず策定する地震動」のうち全国共通に考慮すべき地震(M<sub>w</sub>6.5 程度未満の地震)については、原子力規制委員会が外部専門家を含む「震源を特定せず策定する地 震動検討チーム」を設置し、同検討チームは震源近傍の多数の地震動記録に対する統計処 理結果等に基づき「標準応答スペクトル」を策定して報告書をまとめた<sup>2</sup>。この報告書で は、将来的な課題として、新たに起きた地震の観測記録の収集・分析による標準応答スペ クトルへの影響確認、統計処理に用いる地震基盤相当面における地震動記録の評価手法の 精度向上、補正処理等に用いる距離減衰式の調査・研究等の重要性を挙げており、これら の課題について継続的に検討することが重要である。

地震動評価において、上記の決定論的手法の他に、各サイトにおいて確率論的地震ハザ ード評価(以下「PSHA」という。)も行われている。PSHA は基準地震動の超過確率の情 報を提示するほか、地震に対する確率論的リスク評価の構成要素となっている。確率論的 リスク評価は、発電用原子炉施設の安全性向上評価に活用されている。一方で、例として 国内の PSHA で用いられる活断層の地震発生モデルは、海外の事例に比べて単純化したモ デルを採用する傾向が見られる。そのため、震源近傍の地震ハザード評価に着目し、海外 の最新動向を踏まえて複数セグメントを有する活断層による地震発生モデル等を取り入れ ることが重要である。

規制基準<sup>1</sup>では、耐震重要施設を変位が生ずるおそれがない地盤に設けることを要求し ているため、地震ハザード評価の観点からは、地震による地盤の変位(ずれ)の評価も重 要である。また、地盤に変位を与える要因として、「震源として考慮する活断層のほか、 地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべ り面を含む」としている。このため、地震活動に伴う地盤の永久変位の有無について観測

1

データを基に適切に評価する必要があるが、震源近傍の断層変位のデータは限られており、 知見を継続的に蓄積していくことが重要である。なお、国際原子力機関(IAEA)のガイド <sup>3</sup>において確率論的断層変位ハザード解析について記載されており、確率論的手法の調査 も重要である。

#### 1.2 目的

本研究では、断層モデル法による地震動及び震源を特定せず策定する地震動の評価の精 度向上を行って技術的知見を蓄積するとともに、確率論的地震ハザード評価の精緻化及び 断層変位評価に係る知見の蓄積を行い、震源近傍の地震ハザード評価手法を高度化するこ とを目的とし、以下の研究課題((1)~(4))に取り組んだ。

なお、巻末の「主な執筆者一覧」に各研究課題の主な担当者を示す。

(1) 断層モデル法の精度向上に係る検討

熊本地震の知見を踏まえ、断層浅部破壊を考慮した特性化震源モデルの設定手法について調査するとともに、検証解析やパラメータ分析を行い、特性化震源モデルの不確か さに係る知見を蓄積することにより、断層モデル法の精度向上を図る。

(2) 震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討

震源を特定せず策定する地震動に関する新たな観測記録を収集して追加解析を行う とともに、最新知見を考慮した評価手法に係る調査・試解析等を行い、地震動評価の精 度向上を図る。

(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討

活断層による地震の規模と発生頻度及び地震動の不確かさの取り扱い方法について 調査し、確率論的地震ハザード評価への影響度合いを把握し精度向上を図る。

(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積

断層変位として特に識別可能な副断層に着目し、室内模擬実験及び数値解析を実施す るとともに、断層変位の観測データの分析や断層変位評価のためのモデル化を行うこと により、断層変位評価における不確かさの低減を図る。

#### 1.3 全体行程

本研究は令和2年度から令和5年度にかけて実施したものであり、得られた成果を本報告書にまとめる。全体行程を図 1.1 に示す。

なお、図 1.1(1)①内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積は一般財団法人地域 地盤環境研究所(令和2年度から令和4年度まで)及び応用地質株式会社(令和5年度)、 図 1.1(1)②海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積は株式会社大崎総合研究所

(令和2年度から令和4年度まで)及び応用地質株式会社(令和5年度)、並びに図 1.1(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積は株式会社パスコ(令和2年度から令和5年度まで)に委 託し、実施したものである。



図 1.1 研究の作業工程

Fig. 1.1 Overall schedule of the research program

#### 2. 本論

#### 2.1 断層モデル法の精度向上に係る検討

基準地震動策定のための地震動評価には、断層モデルを用いた手法(以下「断層モデル 法」という。)及び応答スペクトルに基づく手法(以下「応答スペクトル法」という。)の 2 つの手法がある。比較的簡易な経験式を用いた応答スペクトル法とは異なり、断層モデ ル法は、強震動を再現するために必要な震源の特性を主要なパラメータで表した震源モデ ルを「特性化震源モデル」として設定することにより、震源を特定して策定する地震動を 詳細に評価できる手法である。規制基準<sup>1</sup>では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震 動」を評価する際、「敷地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的な パラメータについて分析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手 法を用いて考慮すること」とされている。一方で、断層モデル法の方法論である地震調査 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>4</sup>は、最新の知 見に基づき最も生じ得る地震と地震動を評価するためのものであり、上記のパラメータの 不確かさの分析や組み合わせの考慮については定めていない。

そこで、本節では、内陸地殻内地震(以下「内陸型地震」という。)並びにプレート間地 震及び海洋プレート内地震(以下「海溝型地震」という。)を対象に、特に熊本地震等の知 見を踏まえ、断層浅部破壊を考慮した特性化震源モデルの設定手法について調査するとと もに、検証解析やパラメータ分析を行い、特性化震源モデルの不確かさに係る知見を蓄積 することにより、断層モデル法の精度向上を図る。

#### 2.1.1 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

断層モデル法は、既往研究で提案されたスケーリング則に基づき、特性化震源モデルの パラメータを設定している<sup>5</sup>。しかし、断層モデル法の基になったデータは、主に 1995 年 兵庫県南部地震以前に発生した M7 程度までの米国カリフォルニア州の地震の強震動記録 を用いた解析結果<sup>6</sup>であった。これを踏まえ、近年発生した国内の内陸型地震に対する強 震動再現解析により、それらのスケーリング則の妥当性の確認に関する研究を令和元年度 まで実施してきた<sup>7</sup>。しかしながら、断層モデル法に基づいた地震動解析については、海外 の地震への適用例が少ない。また、熊本地震のように地表に断層が現れた国内の地震は限 られているため、海外の断層近傍の地震動記録に関して各種の解析を行い、特性化震源モ デルに係る知見を蓄積することは重要である。

そこで、本項では、国内外の内陸型地震を対象に、特性化震源モデルの各パラメータの 不確かさに着目した以下の検討を実施した。

- (1) 特性化震源モデルのパラメータの不確かさの検証
- (2) 浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルの検討

なお、本項は、令和2年度から令和4年度にかけて実施した一般財団法人地域地盤環境研究所への委託による成果<sup>8,9,10</sup>をまとめたものである。

4

(1) 特性化震源モデルのパラメータの不確かさの検証

本項では、表 2.1 に示す 8 つの内陸型地震を対象として、周期 1 秒程度以上のやや長周 期側の波形逆解析による震源モデル及び周期 1 秒程度以下の短周期側に着目した強震動生 成域(以下「SMGA」という。)モデルを構築した。

まず、波形逆解析に必要な理論グリーン関数を高精度化するため、図 2.1 に示すように 対象地震の震源域で起きた中小規模地震の地震動記録を活用し、周期1秒程度までの精度 を有する地下構造モデルに高度化することができた<sup>7</sup>。この地下構造モデルを基に、強震 動記録を用いた波形逆解析による震源モデルを構築し、断層面上のすべり分布及び破壊伝 播過程を明らかにした。次に、この震源モデルを参照して、経験的グリーン関数を用いた 震源の順解析から、SMGA モデルの構築を行った。その結果、図 2.2b に示すように、 0.2~10Hz 周波数帯域の短周期地震動を再現することができた<sup>8</sup>。

表 2.1 本研究で検討した地震一覧表(Mwの降順)

地震名	規模	断層タイプ	実施年度
2002 年アラスカ Denali 地震	M <sub>w</sub> 7.9	横ずれ	令和3年度
2023 年トルコ・シリア地震	M <sub>w</sub> 7.8	横ずれ	令和5年度
1999 年米国 Hector Mine 地震	M <sub>w</sub> 7.1	横ずれ	令和4年度
2019 年米国 Ridgecrest 地震	M <sub>w</sub> 7.1	横ずれ	令和2年度
2010 年ニュージーランド Darfield 地震	M <sub>w</sub> 7.0	横ずれ	令和2年度
2022年台湾池上地震	M <sub>w</sub> 7.0	逆断層	令和5年度
2008年新潟県中越沖地震	M <sub>w</sub> 6.6	逆断層	令和4年度
2019 年米国 Ridgecrest 地震(余震)	M <sub>w</sub> 6.4	横ずれ	令和3年度

Table 2.1 List of earthquakes analyzed in this study

さらに、内陸型地震における断層面積と地震モーメントのスケーリング則<sup>11</sup>(地震モー メントによって3段階の傾きがあるため、本項では以下通称「3ステージモデル」という。 図 2.4 参照)の検証として、既往研究で提案された特性化の規範<sup>6</sup>に従って、上記震源モ デルから断層面積等のパラメータを抽出・比較し、3ステージモデルと整合的であること を確認した<sup>10</sup>。特に、上記 SMGA モデルの面積及び応力降下量のパラメータから算出した 対象地震の短周期レベル(地震動の短周期の大きさに寄与するパラメータ)の値は、図 2.3 に示すように、レシピに採用されたスケーリング則<sup>11</sup>と整合的であることが確認された。 ただし、こうした解析事例の多くは、M<sub>w</sub>7.0程度未満の地震に限定され、特に図 2.3 に示 す3つの折れ線モデルのような提案式(藤堂・他 2022式)<sup>15</sup>と比較すると、折れ曲がり点 近傍の M<sub>w</sub>7.5 前後の地震の解析事例が乏しく、今後、解析データを蓄積し検証する必要が ある。

断層面積のスケーリングである3ステージモデルの中で、特に第2ステージから第3ス テージへの遷移を検証する際、限られた解析事例の影響が顕在化し、より広範囲の震源モ デルを生成できる動力学的シミュレーションを活用することが重要である。そこで本研究 では、令和元年度まで検討した横ずれ断層<sup>12</sup>に加え、縦ずれ断層を対象として、速度状態 依存摩擦則<sup>13</sup>に基づき、地震前の応力蓄積及び地震時の応力解放に関して、大地震の破壊 過程を含めた地震発生サイクルに係る動力学シミュレーションを実施した。その結果、図 2.4 に示すように、得られた動力学震源モデルの多数は M<sub>w</sub>7.5 前後の地震に対応しており、 それらのモデルから抽出した震源断層パラメータは、実際の地震観測データに基づいたス ケーリング則の特徴、第3ステージへの遷移に伴う傾きの変化を再現できた<sup>7,9</sup>。



出典)一般財団法人地域地盤環境研究所(2021)<sup>8</sup>を基に作成

図 2.1 余震記録を用いた地下構造モデルの改良(2019 年 Ridgecrest 地震)

Fig. 2.1 Improvement of the velocity structure model using records of aftershocks for the 2019 Ridgecrest earthquake



図 2.2 2019 年 Ridgecrest 地震の震源モデル及び SMGA モデルの構築







Fig. 2.3 Comparison of the short-period acceleration source level with the empirical scaling law





Fig. 2.4 Comparison of the simulated rupture area data with the empirical scaling law Black lines: simulated data; dotted and broken lines: curves fitted by the Yoffe function in time and frequency domain, respectively

(2) 浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルの検討

主に短周期地震動に着目した熊本地震の地震動再現解析では、SMGA モデルの有効性が示されている<sup>16</sup>。また、同地震の断層近傍の観測点の永久変位を含む2秒以上の長周期地震動についても、断層浅部に長周期地震動の生成域(以下「LMGA」という。)を設定した特性化震源モデルで観測記録を概ね再現可能であることが示されている<sup>17,18</sup>。しかしながら、規模が大きいほど、内陸型地震の再来周期が長くなり、地表に断層が現れた地震が希であることに加え、強震動観測網の整備の制限で解析事例が限られている。そのため本項では、浅部断層破壊の動力学的知見及び活断層の変動地形学的データを活用し、浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルの構築手法を調査した上で、地表に断層が現れた海外の内陸型地震を対象に、LMGA モデルを構築し地震動解析を行った。

動力学的知見の活用について、横ずれ断層を対象とし、速度状態依存摩擦則に基づいた 地震発生サイクルの動力学シミュレーションの結果から、破壊が地表に伝播した動力学震 源モデルを抽出し、すべり速度時間の分析を行った<sup>9</sup>。その結果、図 2.5 に示すように、深 部断層の場合、破壊開始点(同図の×印)の周辺を除いてほとんどの要素断層(図 2.5bの HRA)では、すべり速度が急上昇し、その後数秒で漸減し、最終的に振幅がほぼゼロにな る。対照的に、浅部断層の場合、すべり速度の立ち上がりが深部に比べて緩やかになって いることが分かった。これは、図 2.5(b')~(d')に示すように、地震動生成領域は深さによっ て異なる周期帯の地震動を生成する傾向を示唆しており、地震動評価に有益な情報である。

変動地形学的データの活用について、浅部断層のモデル化に必要な LMGA の長さを設定 するため、本項では、地震時地表地震断層が現す国内外の地震のデータを収集し、地表地 震断層の変位量の分布に基づいた LMGA の長さ(*L<sub>LMGA</sub>*)と地表地震断層長さ(*L<sub>SF</sub>*)のデ ータとの相関関係を調べた結果、下記の経験式を提案した<sup>8</sup>。

 $log_{10}(L_{LMGA}) = 0.99 log_{10}(L_{SF}) - 0.21 \qquad L_{SF} \le 100 km \qquad (2.1)$ 

 $log_{10}(L_{LMGA}) = 0.88 log_{10}(L_{SF}) - 0.04$   $L_{SF} > 100 km$  .....(2.2)

そして、地表に断層が現れた内陸型地震を対象に、地震発生層内に配置した SMGA モデ ルに加え、上記の経験式を参照し、浅部に LMGA モデルを設ける特性化震源モデルを構築 し地震動評価を行った。地震動評価手法は、長周期側は一次元の水平成層速度モデルを用 いた理論的手法、短周期側は半無限弾性媒質の統計的グリーン関数法で評価し、最終的に はハイブリッド合成法により広帯域の地震動評価を行う。ただし、前述のとおり、従来の SMGA モデルで熊本地震の短周期地震動を再現できているとの知見を踏まえ、浅部のモデ ルには長周期側の理論計算のみで、統計的グリーン関数法は適用しないとしている。図 2.6 は 1999 年台湾集集地震を例とし、構築した SMGA 及び LMGA モデルを示す。観測波形と 合成波形の最大振幅及びそれぞれの応答スペクトルを比較した結果、断層極近傍の観測点 の地震動の特徴を概ね説明できることが確認された。。

また、浅部断層の考慮に当たって、従来の手法に従って設定される深部 SMGA に浅部 LMGA を追加したモデルを設定する方法(A法)、若しくは浅部断層を背景領域と見なし

8

て地表から深部までの全体の面積から震源の巨視的なパラメータを決めてから LMGA 及 び SMGA モデルを設定する方法(B法)の2つの設定手法がある<sup>(注1)</sup>。それぞれ手法によ る計算で求めた地震動の相違を調べた結果、永久変位を含めて長周期地震動は地震モーメ ントの違いを反映してA法よりもB法の方が大きいが、短周期地震動は応力降下量に大き な違いがないため、どちらも大きな差異は認められなかった(図 2.7)。LMGA を設定しな い場合に比べて、それを設定することで、地表の断層近傍の速度波形や永久変位を含む変 位波形の説明性を向上することになっている<sup>9</sup>。



出典) 一般財団法人地域地盤環境研究所(2022)<sup>9</sup>を基に作成 図 2.5 すべり速度時間関数の分布

(a)シミュレーションで得た断層面上のすべり速度時間関数の分布、(b)~(d) 規格した Yoffe
 関数<sup>18</sup>での近似、(b')~(d') フーリエスペクトル

Fig. 2.5 Distribution of slip rate functions

(a) Simulated slip rate functions; (b)~(d) Approximation using regularized Yoffe functions<sup>18</sup>;
 (b')~(d') Fourier spectra of the simulated and approximated slip rate functions.

<sup>(</sup>注1) 浅部断層破壊の考慮について、地震調査研究推進本部「2016 年熊本地震(MJ 7.3)の観測記録に基づく強 震動評価手法の検証について(中間報告)」では、同様に2手法を用いて地震発生層より浅い領域へ拡張 したモデルを検討しているが、浅部断層のモデル化については、観測事実や震源物理等の取り入れに課 題があるとされている。



(a) The finite fault model projected to the surface. (b) and (c) t characterized source models using the approach A and B, respectively.



(a) and (c) are calculated from approach A, (b) and (d) from approach B, respectively

11

#### 2.1.2 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

海溝型地震であるプレート間地震及び海洋プレート内地震に関しては、規制基準<sup>1</sup>にお いて「国内のみならず世界で起きた大規模な地震を踏まえ、地震の発生機構及びテクトニ クス的背景の類似性を考慮した上で震源領域の設定を行うこと」としており、国内外で起 きた海溝型地震に関する研究から得られた知見を反映する必要がある。

プレート間地震については、M<sub>w</sub>8 程度以上の巨大地震(以下「プレート間巨大地震」と いう。)は、発生頻度が低いため国内の事例が少ない。さらに、断層破壊が浅部の海溝軸付 近まで達するような M<sub>w</sub>9 程度以上のプレート間巨大地震になると、断層の幅(プレート沈 み込み方向への破壊)が飽和して断層面積と地震規模のスケーリング関係が変化すること <sup>19</sup>、短周期と長周期の地震動を生成する領域が深さに応じて分離する傾向があり<sup>20</sup>、深部の 比較的短周期の強震動を生成する SMGA、断層面上でのすべりが大きく長周期の地震動を 生成する領域(以下「大すべり域」という。)、及び浅部のすべりが非常に大きく超長周期 の地震動や大きな津波を生成する領域(以下「超大すべり域」という。)が震源断層面(背 景領域)上に分布するような構造<sup>21</sup>がみられることが指摘されている。しかし、強震動予 測レシピ<sup>4</sup>にはこれらの知見を反映した具体的な手法は示されていない。

海洋プレート内地震については、他のタイプの同規模の地震に比べて、短周期において 大きな加速度の地震動を生じることが知られているが、震源深さが深く発生場所や周期の 特定が困難であるため、より多くの事例を収集することが望ましい。

これらを踏まえ、本項では、国内外の海溝型地震を対象に、以下の検討を実施した。

(1) 海溝型地震の震源パラメータ及び地震動の地域性の調査・分析

(2) プレート間巨大地震の特性化震源モデルの設定方法の高度化

なお、本項は、令和2年度から令和4年度にかけて実施した株式会社大崎総合研究所への委託による成果<sup>22,23,24</sup>をまとめたものである。

(1) 海溝型地震の震源パラメータ及び地震動の地域性の調査・分析

本項では、国内は太平洋プレート及びフィリピン海プレート、国外は主にチリ中部、中 米、カスカディア(北米太平洋岸の北西部)等の地域で発生した海溝型地震を対象に、特 性化震源モデルに係る震源パラメータ及び地震動に関する調査、比較分析を行い、地域性 を把握した<sup>22,23,24</sup>。

まず、震源パラメータについては、文献調査に基づく国内外の震源パラメータのデータ ベース<sup>23</sup>を基に、地域ごとの震源パラメータ(短周期レベル、断層面積等)のスケーリン グ関係の比較分析を行った。ここでは、委託事業<sup>22~27</sup>において実施した地震動解析結果か ら推定した震源断層パラメータのデータを整理し、分析結果との対応関係も確認した。

次に、地震動特性について、同地域を対象に、米国 NGA-sub プロジェクトのデータベース<sup>28</sup>に収録されている各地域の地震の観測記録の応答スペクトルに対して、同データベー ス内の国内地震のデータを用いて構築された距離減衰式<sup>29</sup>による予測値との平均残差を計 算し、地震動強さの地域性を確認した(例えば、図 2.8)。

その結果、プレート間地震については、断層面積(全体)に対する SMGA の面積割合は、 地域に依らず、大すべり域(従来のアスペリティ <sup>6</sup>と対応するすべり量が大きい領域)の 同面積割合の概ね 1/2 倍程度であること等が分かった。また、地震動の短周期の大きさに 寄与するパラメータである短周期レベルは、国内の地震の方が国外の地震や既往のスケー リング関係<sup>14</sup>よりもやや大きい一方で、地域ごとではチリ中部、太平洋プレートの順に大 きい傾向があり(図 2.9 a)、距離減衰式に基づく地震動の特徴とも整合的であった(図 2.8)。 しかし、地震数が少ないことにより分析ができない又は結果の精度が低いと考えられる地 域もあったため、今後新たに起こる地震等のデータを蓄積することが重要と考えられる。

海洋プレート内地震については、いずれの地域でも M<sub>w</sub>6 以上の地震の短周期レベルは同 程度であり、壇・他(2001)<sup>14</sup>のスケーリング関係よりも大きく笹谷・他(2006)<sup>30</sup>の関係と整 合的であることが分かった(図 2.9 b)。一方、カスカディア及び中米では距離減衰式との 比較による地震動特性は相対的に小さくなる傾向があること等が分かった。今後、国外の 地震のデータを拡充して、この傾向の妥当性を確認することが重要と考えられる。

(2) プレート間巨大地震の特性化震源モデルの設定方法の高度化

本項では、複数のプレート間巨大地震に係る既往研究の調査・試解析を実施した上で、 2011 年東北地方太平洋沖地震(M<sub>w</sub>9.0)を対象に、複数の地震動の放出領域(SMGA、大す べり域、超大すべり域及び背景領域)を考慮した特性化震源モデル(図 2.10の右上)を構 築して地震動評価(対象周期 0.01~100 秒)を行い、各領域と地震動の周期特性を分析し た<sup>24,31</sup>。

特性化震源モデルの設定において、SMGAのパラメータは、詳細なパラメータが示され ている既往のフォワードモデリングの結果<sup>32</sup>を用いて設定した。巨視的断層・大すべり域・ 超大すべり域のパラメータは、既往の波形インバージョンの結果<sup>32</sup>を用いて、津波予測レ シピ<sup>34</sup>を参考に、領域内のすべり量の平均値が断層全体の平均すべり量の2倍となる領域 を大すべり域に、4倍となる領域を超大すべり域に設定した。設定した大すべり域と超大 すべり域の各面積が断層全体の面積に占める割合は約24%と約3%であり、超大すべり域 の面積比は津波予測レシピが示す面積比10%に比べて小さい。これは、震源インバージョ ン結果と津波インバージョン結果におけるすべり量の違いによるものと考えられる。断層 全体の平均応力降下量(Δσ)は、波形インバージョン<sup>32</sup>によるすべり速度分布を基に弾性 運動方程式を介して推定した結果<sup>23,35</sup>を用いた。

大すべり域及び超大すべり域の  $\Delta \sigma$  については、既往研究による知見の蓄積が十分では なく、地震動の予測を目的とした値を直接的に推定して設定することは困難である。そこ で、暫定的に、未知数である大すべり域と超大すべり域に同等の  $\Delta \sigma$  があるものと仮定し て、「断層全体の面積と  $\Delta \sigma$  の積」が「アスペリティと背景領域の各面積と  $\Delta \sigma$  の積の総和」 と同等であるとする強震動予測レシピにおける「力のつり合い式」考え方を拡張し、アス

13

ペリティ部分を SMGA・大すべり域・超大すべり域に分解した関係式を用いて逆算することにより、大すべり域と超大すべり域の Δσ を求めた。

次に、上記で設定した特性化震源モデルを用いて、経験的グリーン関数法により周期 0.01 ~10 秒の比較的短周期の地震動(図 2.10 a)を、波数積分法による理論的手法により周期 10~100 秒の長周期の地震動(図 2.10 b)を計算し、擬似速度応答スペクトルを比較して、 各領域から放出される地震動の周期的な特性について分析した。その結果、以下の特徴が あることが分かった。

- 周期 10 秒以下の周期帯では、SMGA から発生する地震動が支配的である。
- 周期20秒付近~100秒では、大すべり域及び背景領域からの地震動が支配的である。
- 超大すべり域から発生した地震動は、周期 50 秒付近にピークを持つが、全体の地震 動への影響は小さい。

大すべり域、超大すべり域及び背景領域が影響を及ぼす周期は約10秒以上である。
 ただし、本項で得られた周期特性は今回対象とした地震の震源モデルに限定したものであり、海溝付近(浅部)の領域については現状では評価地点からの距離が遠いために断層
 モデルの影響を詳細に確認することが難しい等の課題がある。特性化震源モデルの設定手法の汎用性を確認するためには、M<sub>w</sub>8~9 クラスの他の地震の(将来的には海底地震計を含む)観測記録を対象に、更なる感度解析・検証を行うことが重要と考えられる。



出典)株式会社大崎総合研究所(2022)<sup>24</sup>を基に作成

図 2.8 対象領域のプレート間地震の観測記録(応答値)と国内地震に基づく距離減衰式 による予測値の平均残差(赤丸)の周期分布の例

Fig. 2.8 Example of the periodic distribution of the average residual (red circle) between observed records (response values) of interplate earthquakes in the target area and ground-motion prediction equation<sup>29</sup> based on earthquakes in Japan



出典)株式会社大崎総合研究所(2022)24を基に作成



Fig. 2.9 Example of regression analysis results of the relationship between seismic moment (M<sub>0</sub>) and short-period level (A) for interplate earthquakes and oceanic intraplate earthquakes



(a) 経験的グリーン関数法による結果(周期 0.01~10 秒のフィルタ処理): 地中記録対象



16

#### 2.2 震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討

規制基準<sup>1</sup>では、「震源を特定せず策定する地震動」については、「震源と活断層を関連 づけることが困難な過去の内陸地殻内地震について得られた震源近傍における観測記録を 基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定 すること」とし、その中で、「全国共通に考慮すべき地震動」及び「地域性を考慮する地震 動」の2種類を検討対象とすることを求めている。

「全国共通に考慮すべき地震動」については、地表地震断層が出現しない可能性がある Mw6.5 程度未満の地震を検討対象とし、このような地震は事前に震源の位置・規模を推定 することが困難であり、全国のどこでも起こりうることから、全国共通に考慮すべきもの と位置づけられている。しかしながら、事業者は、過去の新規制基準適合性審査において 今後取り組むべき中長期課題として整理した一部の検討対象地震の観測記録に係る地盤調 査等に時間を要していた。そこで、原子力規制委員会は、全国の原子力発電所等において 共通に適用できる地震動の策定方法を早期に明示することが望ましいと考え、平成 29 年 11 月に「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」(以下「検討チーム」とい う。)を設置し<sup>36</sup>、令和元年8月に検討チームにおいて「全国共通に考慮すべき地震動」の 標準応答スペクトルを策定した<sup>2</sup>。令和3年4月には規制基準<sup>1</sup>及び審査ガイド<sup>37</sup>の一部を 改正して標準応答スペクトルを規制に取り入れた<sup>38</sup>。

検討チームによる標準応答スペクトル策定においては、2000年から2017年までの18年 間に全国で起きた M<sub>w</sub>5.0~6.5程度の内陸地殻内地震の観測記録を網羅的に収集し、はぎと り解析・補正処理を施し、地震基盤相当面における震源近傍の多数の地震動記録に対して 統計処理を行った<sup>2,39</sup>。そして、算出した非超過確率97.7%(平均+2o)の応答スペクトル 及び各種の妥当性確認結果に基づき、標準応答スペクトルを策定した<sup>2</sup>。

一方、検討チームでは、標準応答スペクトルに係る以下のような技術的な課題について も議論され、中長期的にこれらの課題に取り組むべきとの整理がなされた。

- 地震及び記録の数が限られるため継続的なデータの蓄積・確認が重要であること
- はぎとり解析の精度が低い場合があるため精度向上が重要であること
- 補正処理、妥当性確認等に使用した距離減衰式には最近の観測記録が使用されていない等の課題があるため最新知見を考慮した調査・研究が重要であること

これらを踏まえ、本節では、以下の研究を実施した。なお、2.2.1 項の研究成果は NRA 技術ノート<sup>40</sup>として公表した。2.2.2 項及び 2.2.3 項の研究成果については、今後、論文等として公表を予定している。

- 新たな観測記録の収集及び追加解析(2.2.1 項)
- はぎとり解析の精度向上(2.2.2 項)
- 最近の観測記録に基づく距離減衰式の検討(2.2.3 項)

#### 2.2.1 新たな観測記録の収集及び追加解析

検討チームによる標準応答スペクトル策定に係る研究<sup>2</sup>(以下「従来研究」という。)に おいては、日本全国の内陸地殻内地震を対象として、硬質地盤に設置された KiK-net 観測 点の地中観測記録を従来研究と同様の条件で収集・整理して解析に使用した。そのため、 観測記録の収集可能な期間は、KiK-net 観測網<sup>41</sup>が全国的に整備された 2000 年から 2017 年の18年間に起きた 89 地震の記録(水平動 614 記録、上下動 304 記録)に限られた(図 2.11の青色)。検討チームでは、今後取り組むべき中長期的課題として、新たに起きた収集 対象地震の観測記録の収集・分析を継続的に行い、定期的に標準応答スペクトルへの影響 の確認等を行うことが重要であるとの議論がなされた。

そこで、本項では、以下のとおり、検討チームと同様の条件及び手法<sup>2,39</sup>により、新た な観測記録の収集及び追加解析を行い、従来研究の統計処理結果(特に非超過確率 97.7% の応答スペクトル)と比較して、標準応答スペクトルへの影響を確認した。

まず、2018 年から 2022 年までの 5 年間に全国で起きた M<sub>w</sub>5.0~6.6 の内陸地殻内地震の 観測記録を収集・整理し、15 地震の観測記録(水平動 100 記録、上下動 51 記録)を追加 解析対象とした(図 2.11 の橙色)。

次に、整理した観測記録に対して、はぎとり解析を実施して地中地震計よりも上の地盤の影響を除去した露頭波(以下「はぎとり波」という。)を算出した。さらに、はぎとり波の応答スペクトルに震源距離及び地盤物性の補正を施し、震源近傍(半径 10 km 程度以内の領域)での地震基盤相当面における応答スペクトルを推定した(図 2.12 の青線)。

上記で推定したはぎとり波のデータを、従来研究の18年間(2000年~2017年)のデー タセットに追加して、23年間(2000年~2022年)に起きた104地震の記録(水平動714 記録、上下動355記録)からなるデータセットを整理した。その上で、データの選定条件、 重み付け等を変えた複数のケースで、対数正規分布を仮定した統計処理を行い、非超過確 率50%(平均)、84.1%(平均+1σ)及び97.7%(平均+2σ)の擬似速度応答スペクトル(以 下「非超過確率別応答スペクトル」という。)を算出した(例えば、図 2.12)。

さらに、本研究で算出した超過確率別応答スペクトルを従来研究の結果と比較した。その結果、いずれのケースにおいても、本研究と従来研究の非超過確率別応答スペクトルはほぼ同等の結果となった(図 2.13)。ただし、周期 1 秒よりも長周期側においては、わずかに本研究の結果の方が小さい傾向があることが分かった。これには、本研究で追加した地震には M<sub>w</sub>5 クラスの地震が多く、M<sub>w</sub>6.4 の 1 地震以外は M<sub>w</sub> が 5.6 以下であることが影響したと考えられる(図 2.11)。

以上より、本研究において新たに 2018 年から 2022 年までの 5 年間に起きた地震の観測 記録を統計処理に追加することが、標準応答スペクトルの策定結果に与える影響はないこ とを確認することができた。

18



Fig. 2.11 Frequency distribution by magnitude (M<sub>w</sub>) of targeted earthquakes



図 2.12 非超過確率別応答スペクトルの算出例:全データ及び M<sub>w</sub> 6.5 未満のデータを用 いた 2 ケースの比較

Fig. 2.12 Example of calculating response spectra for each non-exceedance probability: comparison between two cases using whole data and data with  $M_w < 6.5$ 



トル策定に使用された代表的な2ケース)

Fig. 2.13 Comparison example of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this and previous studies (two typical cases used for standard response spectrum determination)

#### 2.2.2 はぎとり解析の精度向上

検討チームによる標準応答スペクトル策定<sup>2</sup>においては、統計処理に使用するデータセット確認の一環として、震源距離と地盤物性の補正処理を行う前のはぎとり波について、 既往の距離減衰式の予測値との比較により応答スペクトルの特徴を確認・分析した。その 結果、一部の記録(特に上下動)については、はぎとり解析の精度が低いことにより特徴 的なピーク等が生じることが確認されたため、中長期的に解析精度の向上に係る調査・研 究を実施することが重要であるとの議論がなされた。

そこで、本項では、最新の文献を調査した上で、複数手法(表 2.2 に示す8手法)による結果を比較して各手法の特徴及び課題を把握するために、以下の研究を実施した。

(1) 従来の地中地震計位置でのはぎとり波算出手法の精度向上(手法 1~4)

(2) 地震基盤面のはぎとり波を算出する新たな手法の試行(手法5・6)

(1) 従来の地中地震計位置でのはぎとり波算出手法の精度向上(手法1~4)

検討チームで採用した従来手法(表 2.2 の手法 la)<sup>2</sup>では、KiK-net で公開されている地 盤情報を用いて地中地震計から地表地震計の間の一次元地盤モデルを設定し、その地盤モ デルに平面波が鉛直下方から入射することを仮定して重複反射理論により線形の応答解析 を行い、地中地震計位置におけるはぎとり波を算出していた(図 2.14(1)①)。さらに、地 盤物性補正により地震基盤相当面におけるはぎとり波を推定していた(図 2.14(1)②)。

本項では、前者のはぎとり解析手法の精度向上を目的に、表 2.2 に示す手法 1b~4 を、 従来研究で対象とした観測記録の一部(11 観測点 42 記録)に試験的に適用し、各手法か ら算出した擬似速度応答スペクトル(pSv)の結果を比較した(例えば、図 2.15(a)、(b))。 ここで、はぎとり解析結果(図 2.15(b))の精度は、地中観測記録を地表に立ち上げた結果 と地表観測記録との整合度合い(図 2.15(a))により判断した。

その結果、観測伝達関数に合うように地盤モデルを最適化して従来手法と同様の解析を 行った手法 lb は、水平動・上下動ともに、観測点によって程度は異なるものの精度が改善 する傾向があることが分かった。地震基盤への斜め入射を仮定した手法 2 は、斜め入射の 影響が大きいと考えられる上下動の観測記録に対しては、手法 lb よりも解析精度が改善 する傾向があることが分かった。等価線形化法において有効せん断ひずみ係数を最適化し た手法 3 は、地盤の非線形性の影響が大きい水平動 8 記録に適用した結果、今回は歪依存 特性の情報の制約等により解析精度が改善しない場合も多かったが、はぎとり結果への影 響は小さいこと、非線形性の影響を地盤モデルの物性値に反映させた手法 lb と類似の結 果となること等が分かった。手法 lb の地盤モデルのうち浅部の物性値(速度)にゆらぎを 与えた手法 4 は、解析精度への影響は小さいことが分かった。

以上より、観測記録の特性(斜め入射の影響、地盤の非線形性の影響等)に応じて適切 に手法を選定することにより、はぎとり解析精度が向上する可能性が示唆されるため、今 後、適用性の確認・整理を行うことが重要と考えられる。 (2) 地震基盤面のはぎとり波を算出する新たな手法の試行(手法5・6)

上記(1)のはぎとり解析手法では、地盤モデルの設定、入射の仮定等の計算条件の影響を 受け、また、地中地震計位置から地震基盤相当面に補正する処理も別途必要となる。そこ で、結果の妥当性を確認するための新たなアプローチを試行した。表 2.2 に示す手法 5・6 により、経験的又は半経験的に地震基盤面から対象観測点までの地盤増幅率(サイト増幅 率)を推定し、観測スペクトルを推定したサイト増幅率で除することにより、地震基盤面 でのスペクトルを推定(逆算)し(図 2.14 (2))、上記(1)の手法 1~4 によるはぎとり波を 地震基盤相当面に補正した pSv の結果と比較した(例えば、図 2.15 (c))。

なお、手法 5a については、水平動に加えて上下動のサイト増幅率を推定可能となるよう に手法を改良した。また、手法 5a・5b ともに、サイト増幅率推定の際の基準となる観測点 の選定・設定方法の影響が小さくなるような工夫を行った。

その結果、手法 5a・5b による「地震基盤面から地中地震計位置までの経験的サイト増幅 率」を用いて地中観測記録から地震基盤面でのはぎとり波を逆算した結果は、概ね類似す るが、手法 5b の推定精度が低い可能性がある周期 0.1 秒程度以下ではやや差異が大きい傾 向があることが分かった。手法 6 による「地震基盤面から地表までの半経験的サイト増幅 率」を用いて地表記録から地震基盤面でのはぎとり波を逆算した結果は、特に非線形地盤 の影響が大きな記録では、記録によっては手法 5 との差異が大きくなる傾向があった。こ れには、地表記録を入力値としていること、単一記録の水平/上下スペクトル比を用いる ことによる拡散波動場仮定の成立性の低下等が影響している可能性が考えられる。

また、手法 5・6 と手法 1~4 のはぎとり結果を比較した場合、大局的には以下のような 場合に両者の整合性が高い傾向があることが分かった。

手法1~4の解析精度(立ち上げ波の地表観測記録の再現性)が高い場合

• 地中地震計位置の Vs が地震基盤に近い(地盤物性補正の影響が小さい)場合

• 水平動でなく上下動で比較した場合(水平動のみ対象の手法6は除く)

ただし、地震基盤が比較的深い(堆積層の影響が大きい)観測点においては、手法 5a・ 5b の結果は、周期 1 秒より長周期帯域で手法 1~4 の結果との差異が大きい傾向があった (例えば、図 2.15 (c))。これには、手法 1~4 で地震基盤相当面に補正する際に一般化さ れた地盤増幅率の経験式<sup>42</sup>を用いており地域性を詳細に考慮できないこと、手法 5a・5b の データセットに表面波による増幅率が含まれていること等が影響している可能性が考えら れる。

以上より、手法5・6は、手法1~4と地盤物性補正に基づく地震基盤相当面でのはぎと り結果の妥当性を確認する手段として活用できる可能性が示唆された。しかし、適用に当 たっては、手法における仮定の成立性、得られる結果に潜在するばらつき、手法5では基 準観測点の設定等がはぎとり結果に及ぼす影響に留意することが重要と考えられる。

	手法*1	対象地震動	はぎとり波 算出面
1a	鉛直入射を仮定した手法:地盤最適化なし(従来手法)	水平動・上下動	
1b	鉛直入射を仮定した手法:地盤最適化あり	水平動・上下動	地中地震計
2	SV 波の斜め入射を考慮した手法 (吉田・宮腰, 2019 <sup>43</sup> 参考)	上下動	位置の地盤面 (地盤物性補正
3	地盤の非線形性を考慮した手法 (佐藤・他, 2019 <sup>44</sup> 参考)	水平動	後は地震基盤相 当面 <sup>※2</sup> )
4	浅部地盤物性のゆらぎを考慮した手法 (Shible <i>et al.</i> , 2018 <sup>45</sup> 参考)	水平動・上下動	
5a	スペクトルインバージョンによる経験的サイト増幅率 を用いた手法 (友澤・他,2019 <sup>46</sup> 参考)	水平動・上下動	
5b	隣接2地点法による経験的サイト増幅率を用いた手法 (池浦・加藤,2011 <sup>47</sup> 参考)	水平動・上下動	地震基盤面
6	拡散波動場を仮定した半経験的サイト増幅率を用いた 手法(長嶋・川瀬, 2022 <sup>48</sup> 及び Ito <i>et al.</i> , 2020 <sup>49</sup> 参考)	水平動	

#### 表 2.2 比較対象としたはぎとり手法

#### Table 2.2 Outcropping methods considered on comparison

※1:各手法は括弧内の文献を参考にしたが本研究の目的・条件に応じて変更を加えている。

※2:Noda et al. (2002)<sup>42</sup>による地盤増幅率の経験式を使用して応答スペクトルをS波速度(Vs) 2200
 m/s及びP波速度(Vp) 4200 m/s の地盤に相当する大きさに補正する。



図 2.14 はぎとり手法ごとの地震動の入力と出力のイメージ

Fig. 2.14 Image of seismic ground motion input and output for each outcropping method



図 2.15 地中観測記録に対する立ち上げ・はぎとり解析結果の例:2014年11月22日長 野県北部の地震(M<sub>w</sub>6.3)のKiK-net 戸隠(NGNH28)観測点(震央距離18.4 km) Fig. 2.15 Example result of amplifying and outcropping analyses targeted for a downfall record: the KiK-net Togakushi (NGNH28) station during the Northern Nagano earthquake (M<sub>w</sub>6.3) on November 22, 2014 (epicentral distance 18.4 km)

#### 2.2.3 最近の観測記録に基づく距離減衰式の検討

検討チームによる標準応答スペクトル策定<sup>2</sup>においては、統計処理のデータとなるはぎ とり波の応答スペクトルの補正(震源距離、地盤物性)、及び設定した標準応答スペクトル レベルの妥当性確認において、複数の既往の距離減衰式<sup>42,51 等</sup>が使用された。また、最近の 観測記録に基づいた距離減衰式の研究開発が国内外で進んでいることも踏まえて、距離減 衰式に関して中長期的に調査・研究を行っていくことが重要であるとの議論がなされた。

そこで、本項では、新たに文献調査を行い、検討チームでも議論された以下のような課題があることを再認識した上で、最近の観測記録のはぎとり波を用いて比較的硬質な地盤のサイト増幅率を考慮可能な水平動・上下動の距離減衰式を試作し、今後改善すべき課題等を整理した。

- 標準応答スペクトル策定の過程で使用したような「①水平動及び上下動の両方の地 震動を予測可能」かつ「②硬質地盤から地震基盤相当面まで適用可能」な応答スペ クトルの距離減衰式が非常に乏しいこと
- Noda et al. (2002)<sup>42</sup>による距離減衰式は上記①②の条件を満たすが、最近の観測記録が用いられていないこと

まず、1997年1月~2022年3月に国内で起きた M<sub>w</sub>5.5以上の地震を対象に KiK-net の地 中地震計(Vs 500~3500 m/s 程度の地盤)の観測記録を収集し、2.2.2 項の手法 1b と同様 の方法により地盤モデルの最適化及びはぎとり解析を実施し、はぎとり波の応答スペクト ルからなるデータ(111 地震の約 4000 記録)を整備した。なお、火山フロントの影響が大 きいと判断した記録(500 記録程度)は以降の研究では除外した。また、整備したデータ は 2.3.2 項においても使用した。

次に、地震基盤相当の基準地盤における基本式を試作するために、既往の距離減衰式<sup>29,</sup> <sup>51</sup>を参考に、Vs 2500 m/s 以上の地盤におけるはぎとり波のデータ(104 地震の約 750 記録) に対して複数の回帰分析を行い、減衰特性(幾何減衰、非弾性減衰、震源近傍での頭打ち 効果等を考慮)及び震源特性(震源規模、震源深さ、地震タイプ等の依存性を考慮)のモ デル化を試行した。図 2.16 に試作した基本式と観測データの比較例を示す。試作した基本 式により概ね観測記録を再現可能であることを確認した。ただし、現状では、特に震源近 傍における Vs 2500 m/s 以上の地盤のデータが少なく、一部の回帰結果が安定していない 可能性があるため、今後、収集条件、補正処理等を行い基本式構築に利用可能なデータを 拡充した上で、観測記録による検証を行い、基本式における震源・減衰特性のモデルを高 精度化することが重要と考えられる。

最後に、基準地盤(Vs 2500 m/s 以上)よりも遅い速度の地盤において地震動を予測する ための地盤補正項のモデル化を試行した。まず、上記で対象とした 104 地震のうち、Vs 2500 m/s 未満の地盤の観測点も含めて断層最短距離 100 km 以内で3 観測点以上の記録がある地 震のはぎとり波のデータ(93 地震の約 1300 記録)を対象に、各観測点でのサイト増幅率 (基準地盤での回帰結果からの平均残差)を推定した。そして、地震基盤深さ(Z)の影響 が比較的小さいと考えられる観測点(Z 0.5 km 以下)のデータのみを対象に「サイト増幅 率の地盤速度(V)に対する依存性(Gv)」を回帰により求め(図 2.17(a))モデル化した 上で、さらに、全観測点のデータを対象に「Gv の寄与を差し引いた増幅率のZに対する依 存性(Gz)」を回帰により求め(図 2.17(b))モデル化した。回帰に用いたデータによるGv の予測値の変化を図 2.18に示す。この図より、Gv の回帰データをZ 0.5 km 以下の観測点 に限定した今回の試作結果は、全観測点のデータを用いた場合よりも、周期 0.5 秒程度以 上の長周期側で増幅率が小さくなっており、Gz の寄与が低減されたと考えられるが(図 2.18)、十分にGv と Gz が分離できていない可能性がある。また、図 2.17(a)に示すように、 Gv の回帰においてデータを限定したことにより 1/V が大きい(V が遅い)データが少なく なったために、回帰分析の精度が低下している可能性もある。したがって、地盤補正項に ついては、今後、基本式と併せて、データを拡充するとともにモデル化方法等の改善を図 ることが重要と考えられる。



図 2.16 代表周期(T)における基本式(Vs 2500 m/s 以上の地盤対象)による加速度応 答の予測値と観測値の比較例: 2016 年 4 月 16 日熊本地震(M<sub>w</sub>7.0)

Fig. 2.16 Comparison example of the predicted and observed values of acceleration response using the basic formula (ground target of Vs 2500 m/s or more) in the representative period (T): the 2016 Kumamoto earthquake on April 16 (M<sub>w</sub>7.0)



る依存性の回帰結果の例

Fig. 2.17 Example of regression results of dependence of site amplification factor on (a) ground velocity and (b) hard bedrock depth in representative period (T)



Fig. 2.18 Changes in the predicted value of ground velocity dependent site amplification factor (Gv) depending on the data used for regression

#### 2.3 確率論的地震ハザード評価(PSHA)に係る不確かさの検討

確率論的地震ハザード評価 PSHA では、評価地点において考慮しうるあらゆる地震の発 生位置、地震規模、発生確率などを評価し、1 年間当たりに少なくとも1回地震動の強さ があるレベルを超過する確率を計算する。

地震動の年超過確率の計算には、震源特性(対象地震の発生位置、地震規模及び発生確 率)と地震動特性(評価地点における地震動の強さの中央値とばらつき)の評価が必要に なる。

本研究では震源特性の評価に関する検討として、原子力サイトにおける PSHA で重要と なる内陸の活断層を対象とした地震規模と発生確率について、海外の研究事例を参照し、 不確かさのモデル化を検討した。さらに、地震動特性の評価に関する検討としては、PSHA に影響の大きい距離減衰式の中央値と標準偏差について、従来の様々な複数の評価地点を 対象とした地震動の中央値と標準偏差を持つ距離減衰式に対して、単一評価地点の地震動 の中央値と標準偏差を分析し、PSHA への影響について検討した。なお、本研究の成果の 一部は、今後、論文として公表を予定している。

#### 2.3.1 地震規模等の不確かさの検討

米国等のPSHAでは、震源断層で発生する大地震(固有地震)の規模の不確かさに加え て中小地震の規模も考慮したモデルが一般的である。一方、国内のPSHAでは、大地震に ついては規模の不確かさを含めないモデルとするのが主流であり、地震規模や発生頻度の 不確かさ評価を取り入れたPSHAの事例が少ない。そこで、国内の活断層を対象に、海外 における地震規模とそれに応じた発生頻度のモデル化の方法(地震発生モデル)を適用し たPSHAを行い、国内で適用されている従来モデルと比較し、モデル間の違いによるハザ ードレベルの差異を把握した。また、国内活断層の地震規模・発生頻度の不確かさを評価 し、その評価結果を考慮した地震発生モデルを設定したPSHAを行い、従来の国内のモデ ルによるハザードレベルとの差異を把握した。

図 2.19 に示す糸魚川静岡構造線北部(最大規模は M<sub>w</sub>7.1)の主要活断層帯を対象に、国内のモデルとして地震調査研究推進本部の確率論的地震動予測地図 <sup>50</sup>(以下「地震本部モデル」という。)に適用されている特定震源と領域震源(断層周辺 5 km まで)によるモデル化を行った。海外で適用されているモデルとして Youngs and Coppersmith (1985)<sup>52</sup>の Characteristic Earthquake Model(以下「YC85 モデル」という。)を用いて断層面で発生する大地震及び中小地震を含めたモデル化及び領域震源のモデル化を行った。その上で、これら国内外のモデル化の違いによるハザード解析結果に与える影響について整理した。

まず、特定震源による結果のみを比較するために、Morikawa and Fujiwara (2013)<sup>53</sup>の距離 減衰式を用いて断層最短距離 10 km、25 km、50 km の計算結果(最大加速度(PGA))を図 2.20 に示す。年超過確率が高い部分では YC85 モデルの地震動の影響が高くなっており、 これは断層面で発生する中小地震も考慮した影響であるが、低確率側になると地震本部モ

28

デルと YC85 モデルではほぼ同程度であることが分かった。次に、特定震源と領域震源に よる結果を統合した地震ハザード曲線を比較すると、地震本部モデルと YC85 モデルの両 者の結果に顕著な違いはみられなかった(図 2.21)。これには、年超過確率が高い部分で は、統合した場合には特定震源よりも領域震源によるハザードへの寄与度が数倍程度大き いことが影響しているものと考えられる。ただし、YC85 モデルに含めた中小規模の地震 を領域震源にも含めてモデル化を行うと、中小地震をダブルカウントして PSHA を行うこ ととなるため、中小地震を領域震源でモデル化するか YC85 モデルの中で扱うかを明確に して、ダブルカウントを防ぐ処理が必要である。

また、個々の断層では過去のイベントの記録が限られ、地震規模・年発生頻度は推定の 信頼性に欠けるため、類似する複数の断層の長期評価結果を基に地震規模・発生頻度の認 識論的不確かさを評価し、評価結果を個別の断層に応用することを試みた。

まず、主要活断層帯のうち、東北日本の逆断層(セグメント)を対象に、特に信頼性の 高いトレンチ調査結果を重視しながら、地震調査研究推進本部の長期評価結果の調査を行 い、地震規模、平均活動間隔及び平均変位速度の相関性及びばらつき(標準偏差)を分析 した。その結果、標準偏差については、地震規模の標準偏差 0.25、平均活動間隔(の逆数) の標準偏差 1.6×10<sup>-4</sup>を求めた。一方、相関性については、図 2.22 に示すように、地震規模、 平均変位速度及び平均活動間隔の間に、いずれも弱い相関か相関がないため、それらの一 つのパラメータからほかのパラメータを推定するのが困難であることが分かった。なお、 地震規模 M<sub>w</sub> は、活断層長から推定する方法 <sup>54,55</sup> 及び断層面積から推定する入倉・三宅 (2001)<sup>5</sup> の二つの方法で求めたが、相関性や標準偏差への明瞭な影響が認められなかった。

次に、東北日本に位置する逆断層を対象として推定した地震規模と平均活動間隔のばら つき(標準偏差)を糸魚川静岡構造線北部に適用した PSHA を行った。地震本部の長期評 価による最大規模 M<sub>w</sub>7.1 と地震規模の標準偏差 0.25 を用いて、ケース1では M<sub>w</sub>の中央値 を 7.1 - 0.25 = 6.85 として 6.85±0.25 の範囲(6.6~7.1)でモデル化し、ケース2では M<sub>w</sub>の 中央値を 7.1 として、7.1±0.25 の範囲(6.85~7.35)でモデル化した。また、平均活動間隔 は地震本部の長期評価の平均ケースの値 1700 年を用い、これに加え、上記の活動間隔の標 準偏差から推定した 670 年及び 2700 年の 3 通りを設定した。PSHA の結果を図 2.23 に示 す。地震規模と平均活動間隔の不確かさの評価結果を個別の断層に適用したハザードを地 震本部の従来手法と比較した場合、地震規模の不確かさはハザード曲線の年超過確率の低 確率側に影響を与えるが、年超過確率に作用する平均活動間隔の不確かさはハザード曲線



図 2.19 糸魚川静岡構造線北部における地震ハザード曲線の計算地点(断層最短距離: 10,25,50 km)

Fig. 2.19 Calculation points of seismic hazard curves in the northern part of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line (Fault distances: 10, 25, and 50km)



図 2.20 特定震源の地震ハザード曲線 (PGA、左から断層最短距離:10, 25, 50 km) Fig. 2.20 Seismic hazard curves for specific source model (PGA, Fault distances: from left to right, 10, 25, and 50 km, respectively)



Fig. 2.21 Seismic hazard curves for specific source and regional source models (PGA, Fault distances: from left to right, 10, 25, and 50km, respectively)



地震規模と平均変位速度の相関関係

Fig. 2.22 Correlation between magnitude (M<sub>w</sub>), slip rate (mm/yr), and average return period (yr)



図 2.23 逆断層の地震規模と平均活動間隔のばらつきを糸魚川静岡構造線北部に適用した地震ハザード曲線

Fig. 2.23 Seismic hazard curves for the northern part of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line based on the variation of magnitude and average return period of reverse faults in Japan

#### 2.3.2 地震動の不確かさの検討

従来の距離減衰式は一般的に、広域の複数の観測点、震源及び伝播経路を含むデータセットを使用して作成されるため、その中央値の推定に用いる観測値は大きくばらつく。これは、 従来の式のばらつき(不確かさ)には、観測データの制限及び式の簡略化による不確かさが 含まれており、原子力サイトのような単一地点の地震動評価に用いる場合には過大評価され ていることが考えられる。近年の研究では、観測点、震源及び伝播経路の地震動特性が同じ と見なせる観測記録を十分に収集することができれば、各地震動特性の不確かさを低減させ ることが可能となり、距離減衰式の標準偏差が小さくなることが示されている<sup>56,57</sup>(図 2.24)。 そこで、本項では距離減衰式におけるサイト特性及び震源特性の不確かさを補正し、特にサ イト特性に着目して中央値及び標準偏差をより精緻に評価した上で PSHA への影響を確認 するために、以下の検討を実施した。

(1) 距離減衰式の単一評価地点への補正

(2) 単一評価地点の距離減衰式が PSHA に与える影響

(1) 距離減衰式の単一評価地点への補正

本項では、既往研究 <sup>57,58</sup>を参考に、観測値と距離減衰式の残差から、地盤特性及び震源 特性のモデル化における不確かさをサイト係数 ( $\alpha_s$ )及びイベント係数 ( $\beta_e$ )として推定し、  $\alpha_s$ を用いて既往の距離減衰式(中央値)を単一観測点に補正した(図 2.24)。また、補正 後の距離減衰式と観測値の残差からの単一観測点の標準偏差 ( $\sigma_{SS,s}$ )を推定した。データは、 2.2.3 項で整備したはぎとり波のデータのうち、少なくとも5 地震以上の記録がある観測点 でかつ、少なくとも5 観測点で記録されている地震のデータを選定した(104 地震の約 2400 記録)。補正対象の既往の距離減衰式は、Morikawa and Fujiwara (2013)<sup>53</sup>に地盤増幅の補正 項等を追加した式<sup>59,60</sup>(以下「MF13'」という。)及び原子力安全基盤機構(2013)<sup>51</sup>による 式(以下「JN13」という。)を選定した。

地中地震計位置の Vs が異なる多数の KiK-net 観測点(Vs 400~3000 m/s 程度の約 190 地 点)において、*as*を用いて距離減衰式を補正した結果、ほとんどの観測点で観測記録の説 明性が向上し、*as*を用いて距離減衰式を補正した結果、ほとんどの観測点で観測記録の説 のためにし、*as*について見ると、周期1秒程度のやや長周期では地盤の Vs が 2500 m/s 程度以下 の観測点において Vs と負の相関があるが、周期 0.1 秒の短周期では地盤の Vs との相関は 明瞭でない。

各観測点における  $\sigma_{SS,s}$  を全地点で平均した標準偏差( $\sigma_{SS}$ )と既往の距離減衰式の標準偏差を比較すると、 $\alpha_s$ の補正により  $\sigma_{SS}$ は周期 0.1~1.0 秒で 35%程度減少し、その他いずれの周期でも減少することを確認した(図 2.26)。これは、各観測点における残差のうち、主に距離減衰式の地盤特性のモデル化に内在する不確かさが  $\alpha_s$ で補正されたことにより観測点全体に対して補正後の距離減衰式の予測値が向上したためと考えられる。なお、MF13'と JN13 の  $\sigma_{SS}$ には差異がみられた。これは、距離減衰式対象とする式の選択が不確

かさとなりうることを示唆しており、PSHAの実施において適切に不確かさを考慮する観 点から、複数の距離減衰式を用いて評価することが重要と考えられる。

(2) 単一評価地点の距離減衰式が PSHA に与える影響

本項では、単一評価地点に補正した距離減衰式を用いた場合の PSHA に与える影響を検 討するため、「補正なし」、「補正あり」及び「中央値のみ補正あり」の 3 ケースについて PSHA を行い、地震動の年超過確率と一様ハザードスペクトルを算出した(例えば、図 2.27)。 PSHA の計算では、藤原・他(2015)<sup>59</sup>を参考に、地震動のばらつきは対数正規分布を仮定し、 上限は対数標準偏差の 3 倍までとした。また、PSHA の評価地点は、国内の原子力サイト の解放地盤の Vs を考慮して地中地震計位置の Vs を参照し、KiK-net 矢吹(FKSH11: Vs 700 m/s)、KiK-net 名川(AOMH17: Vs 1450 m/s)及び KiK-net 住田(IWTH04: Vs 2300 m/s) の 3 観測点とした。地震の震源は、各評価地点から断層最短距離が 10 km となる位置に Mw6.5 の仮想断層を置き、地震の平均活動間隔は 5000 年に設定した。

次に、3 ケースの PSHA の結果を比較し、距離減衰式の中央値と標準偏差を特定の単一 評価地点に補正することが PSHA に与える影響を確認した。その結果、大局的には「補正 あり」のハザード曲線は「補正なし」よりもハザードレベルが顕著に小さくなる傾向があ ることを確認した(例えば、図 2.27 a)

さらに、標準偏差の違いが PSHA に与える影響を確認するために、中央値が同様の値で ある「補正あり」及び「中央値のみ補正あり」のケースの地震ハザード曲線を比較すると、 いずれの観測点においても年超過確率が 10<sup>4</sup> 程度の高頻度側では大きな差はないが、10<sup>-5</sup> 程度以下の低頻度側で差が顕著になり、標準偏差が多数の記録から評価されている「補正 なし」のケースでは顕著に大きなハザードレベルとなる傾向があることを確認した(例え ば、図 2.27 a)。なお、「中央値のみ補正あり」のケースでは、標準偏差は複数地点を対象 として推定された標準偏差をそのまま用いるため、標準偏差の中に中央値の不確かさを残 すこととなり、中央値・標準偏差の補正に係る距離減衰式の精緻化が不十分であることに 留意されたい。

また、中央値の違いが PSHA に与える影響を確認するために、標準偏差が同じで中央値 が異なる「補正なし」及び「中央値のみ補正あり」のケースを比較すると、例えば、KiKnet 住田の地点では、一様ハザードスペクトルは補正後の中央値が増加する「中央値のみ補 正あり」の方が「補正なし」に比べて全体的に大きくなった。この傾向は、*as*による補正 で中央値が大小いずれの補正となるかに依存するため観測点によって結果が変化するが、 この例では、年超過確率 10<sup>-4</sup>の一様ハザードスペクトルの1 秒程度以下の強震動領域にお いて、補正前の距離減衰式を用いた「補正なし」が「補正あり」に比べ過小評価となる。

以上より、PSHA においては、複数の距離減衰式を対象に、標準偏差のみならず中央値 を補正することは、適切に不確かさを考慮する観点で重要であると考えられる。



Fig. 2.24 Decomposition of residual between ground motion predicted by attenuation relationships and observed ground motion into various uncertainties



図 2.25 代表観測点のサイト係数及び単一評価地点の標準偏差

Fig. 2.25 Site terms and single-station standard deviations for representative stations



図 2.26 MF13'及び JN13 を対象とした全観測点の平均的な単一評価地点の標準偏差 Fig. 2.26 Single-station standard deviations estimated at all stations for MF13' and JN13



S 2.27 Kik-net 住田 (IWIH04) 観測点における代表同期の地長パリード曲線及い一体 ハザードスペクトル

Fig. 2.27 Annual seismic hazard curves for typical periods and uniform hazard spectra at the KiK-net Sumita (IWTH04) station

#### 2.4 断層変位評価に係る知見の蓄積

規制基準<sup>1</sup>では、耐震重要施設を変位が生ずるおそれがない地盤に設けることを要求し ているため、地震ハザード評価の観点からは、地震動の評価に加え、地震による地盤の変 位(ずれ)の評価も重要である。また、同基準では、地盤に変位を与える要因として、「震 源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地 盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面を含む」としており、これまで、国際原子力機関

(IAEA)のガイド<sup>3</sup>における確率論的断層変位ハザード解析に関する記載及び熊本地震の 知見を踏まえて国内外の断層変位データを収集・分析し、断層変位に係る知見を得てきた <sup>7</sup>。

地震活動に伴う地盤の永久変位の有無を適切に評価する必要があるが、震源が敷地に近 い場合の断層変位のデータは限られているため、引き続き、知見を蓄積していくことが重 要である。そこで、本研究では、断層変位として特に識別可能な副断層(主断層トレース から外れた場所で連続性が乏しく副次的に生じる断層)に着目し、トレンチ調査、室内模 擬実験及び数値解析を実施するとともに、断層変位の観測データの解析手法の検討や断層 変位評価のためのモデル化を行うことにより、断層変位評価における不確かさの低減に係 る知見を取りまとめる。なお、本節は、令和2年度から令和5年度にかけて実施した株式 会社パスコへの委託研究<sup>61,62,63,64</sup>の成果をまとめたものである。

主断層及び副断層の分布を把握するために熊本地震発生前後の合成開口レーダー(SAR) 衛星データを用いた干渉解析(以下「干渉 SAR 解析」という。)及び光学衛星データを用 いた画像相関解析を行い、地表変状発生場所の定量的な抽出方法の検討を行うとともに、 同地震震源域及びその周辺における地表変状の分布を明らかにした(図 2.28)。地表変状 発生場所は、干渉 SAR 解析による干渉縞、低コヒーレンス値分布図及び数値標高モデル (DEM) データによる傾斜量図を重ねた図(以下「LC-InSAR 図」という。)を用いて検出 した 65,66。この LC-InSAR 図を用いることで、現地調査では確認できない程度の微小な変 位の地表地震断層も含めて面的な分布の把握が期待される。LC-InSAR 図では cm 単位の微 小な変位を把握することができるが、変位勾配が大きい領域では地表変状箇所の把握は困 難である。一方で、画像相関解析では変位勾配が大きくても地表変状箇所の把握はできる ものの cm 単位の微小な変位の把握は困難である。そのため、震源域及びその周辺におい ては LC-InSAR 及び画像相関解析両方を用いることが重要であることが確認された。また、 地表変状箇所抽出に当たり、これまでは目視判読であったことから判読者の主観に左右さ れることや幅を持った地表変状箇所を線として抽出していた課題に対して、目視判読デー タから統計値を取得・設定した閾値を用いて画像処理を行い、より定量的かつ客観的に幅 を持った地表変状箇所を抽出できるようになった。

LC-InSAR 図、地中レーダー探査結果等をもとに副断層と考えられる地表変状箇所から 7地点(上陳東、下町、出ノロ、小園、平川馬場、河原団地及び下野)でトレンチ調査を実施した結果、今回の熊本地震だけでなく、同地震に先行する断層活動イベントが認められ

37

た地点が複数認められた。例えば、出ノロトレンチでは 11,202~9,909 cal BP<sup>(注2)</sup>、7.3 ka~ 1,879 cal BP、1,289 cal BP 以降の計 3 回、小園トレンチでは 15,925 cal BP 以降、最低でも 2 回の断層活動イベントがそれぞれ識別された。これらの活動年代は布田川断層本体の活 動年代とも整合的であり、断層本体と同時に活動している可能性がある。一方で、副断層 の断層活動イベントとして確認された時期には布田川断層本体のイベントの認定がないケ ース、あるいは布田川断層本体でのイベントがあるにもかかわらず、副断層のトレンチ内 で断層活動イベントが確認できないケースも認められた。

前フェーズ(地震ハザード評価の信頼性向上に関する研究:平成29年度~令和元年度) における課題として、副断層に関する情報が乏しいことから、トレンチ調査の展開に加え、 室内模擬実験及び数値解析による検討も重要であるとされていた。本研究では、副断層を 含めて地表地震断層の形成メカニズムに係る知見及び確率論的断層変位ハザード解析 67,68 で使用する断層変位評価式の改良に必要なデータを蓄積するため、小麦粉を模擬地盤とし て横ずれ断層型並びに縦ずれの正断層型及び逆断層型の室内模擬実験を実施し、個別要素 法を用いて再現解析を行った。室内模擬実験では、模擬地盤における亀裂進展及び変状形 態が断層タイプによって異なる傾向が認められた。例えば、逆断層の場合、傾斜角が低角 の実験結果はおよそ模擬地盤底面の基底断層延長上で副断層が広く分布している傾向であ るが、高角の場合は模擬地盤中で低角度となり、より下盤側に出現する傾向が認められた。 室内模擬実験で得られた逆断層の副断層データを既往の確率論的断層変位ハザード解析で 整理されている実際に観察された副断層データ 60 と比較したところ (図 2.29)、ばらつき は大きいものの実観測データの分布域に室内模擬実験データが分布し、両者は整合的な関 係を示した。数値解析で得られた亀裂進展及び変状形態は、特に正断層の場合、室内模擬 実験結果と概ね整合的である。ただし、傾斜角が高角な逆断層の数値解析(図 2.30)につ いては、室内模擬実験における主断層の傾斜角の方が小さい傾向にある。これは底部から 発達するせん断帯が表層で屈曲する影響だけでなく、底部から浅い角度で破壊が進展して いるためと考えられる。

本研究では、LC-InSAR 解析で得られた熊本地震の断層変位のデータを用いて、過年度 事業の断層変位評価式<sup>69</sup>を改良した(図 2.31)。さらに、この断層変位評価式を用いて確 率論的断層変位ハザードの試算を実施し、過年度事業の結果との比較を行った。(図 2.32)。 LC-InSAR 解析で得られた断層変位データの拡充は、過年度事業の結果に比べ副断層の出 現率を高くする一方で、副断層変位量は小さくなるため、年超過確率は断層変位量が小さ い領域では高く、大きい領域では小さくなる傾向が確認された。

<sup>(</sup>注2) cal BP とは、炭素 14 年代測定で得られた年代を暦年代に較正し、1950 年を基点にして何年前かを示した年代である。



出典)株式会社パスコ(2023)<sup>63</sup>より抜粋 図 2.28 布田川断層周辺における変位境界分布

Fig. 2.28 Distribution of displacement boundary around the Futagawa fault





Fig. 2.29 Comparison between fault displacements obtained by analog experiment and natural

data



1mm 断層変位時



Fig. 2.30 Comparison between analog experiment and numerical simulation (dip angle 60°)



出典)株式会社パスコ(2024)<sup>64</sup>より抜粋

図 2.31 断層変位評価式(赤線・青線・緑線:本研究、破線:過年度事業)

Fig. 2.31 Fault displacement evaluation equations (Red, blue and green lines: this study, broken line: previous study)



図 2.32 モデルの違いによる年超過確率の比較(赤:本研究、黒:過年度事業) Fig. 2.32 Comparison of annual exceedance probabilities with different models (Red: this study, black: previous study)

#### 3. 結論

#### 3.1 成果の要点

本研究では、断層モデル法による地震動及び震源を特定せず策定する地震動の評価の精 度向上を図るとともに、確率論的地震ハザード評価の精緻化及び断層変位評価に係る技術 的知見の蓄積を行い、震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化を実施した。各研究項目 において、以下の成果を得た。なお、(1)①は主に一般財団法人地域地盤環境研究所への委 託、(1)②は主に株式会社大崎総合研究所への委託、(4)は株式会社パスコへの委託により実 施したものである。

- (1) 断層モデル法の精度向上に係る検討
- ①内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

近年得られた国内外の内陸型地震の強震動記録を用いて、震源破壊モデルの逆解析及 び強震動再現解析並びに動力学的シミュレーションを行うことにより、震源断層パラメ ータの知見を蓄積するとともに、それらのパラメータの不確かさや既往経験式との整合 性を明確にした。また、動力学的知見及び変動地形学的データを活用し、浅部断層破壊 のモデル化手法について調査するとともに、断層が地表に現れた国内外の地震を対象に、 浅部断層破壊を考慮した特性化震源モデルを構築し、地震動評価に係る検証解析を実施 した結果、浅部にLMGAを設定することで、地表の断層近傍の速度波形や永久変位を含 む変位波形の説明性が向上することを確認した。

② 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

国内外で発生した海溝型地震(プレート間地震、海洋プレート内地震)を対象に、地 域ごとに既往の文献及びデータベースを調査・分析するとともに、最近発生した地震の 地震動解析を実施し、震源パラメータ及び地震動の地域性に係る知見を蓄積した。また、 プレート間巨大地震について、複数の地震を対象に調査・試解析を実施した上で、2011 年東北地方太平洋沖地震(M<sub>w</sub>9.0)を対象に、SMGA、大すべり域、超大すべり域及び背 景領域を考慮した特性化震源モデルを構築して地震動評価を行い、周期 20 秒程度より 長周期では大すべり域及び背景領域からの地震動の寄与が大きいこと等の知見を得た。

(2) 震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討

現在規制に取り入れられている標準応答スペクトルに係る中長期課題に対する取組として、原子力規制庁の職員(請負事業を含む)が以下の調査・解析等を実施した。

新たな観測記録の収集及び追加解析

標準応答スペクトル策定の際の対象期間よりも後に起きた地震の観測記録の影響を 確認して規制の適切性判断に資することを目的に、検討チームと同様の条件及び手法に より、5年間(2018年~2022年)に起きた地震の観測記録を収集して解析等を行い、従 来の18年間(2000年~2017年)のデータに追加し、合わせて23年間(2000年~2022 年)のデータを用いて統計処理を行った。その結果を従来研究の統計処理結果と比較し、 新たに5年間のデータを追加したことが標準応答スペクトルに与える影響はないことを 確認した。

② はぎとり解析の精度向上

標準応答スペクトル策定の過程で採用していた従来の地中地震計位置におけるはぎ とり波算出手法の精度向上を目的に、最新知見を考慮した4手法を用いたはぎとり解析 を試行し、各手法によるはぎとり解析精度の改善度合い等を把握した。また、地震基盤 面におけるはぎとり波を算出する新たな手法を試行し、従来の地震基盤相当面でのはぎ とり波算出手法(はぎとり解析と地盤物性補正を組み合わせた方法)の妥当性を確認す る手段として活用できる可能性があることを把握した。

③最近の観測記録に基づく距離減衰式の検討

最近の既往文献を調査し、標準応答スペクトル策定の過程で使用したような「水平動 及び上下動の両方の地震動を予測可能」かつ「硬質地盤から地震基盤相当面まで適用可 能」という条件を満たす応答スペクトルの距離減衰式に係る既往研究が非常に乏しいこ とを把握した。その上で、最近の観測記録を対象に硬質地盤における多数のはぎとり波 のデータを整備し、地盤補正項を考慮した水平動と上下動の距離減衰式を試作して、今 後改善すべき課題等を整理し、距離減衰式の精度向上に資する知見を蓄積した。

(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討

確率論的リスク評価が発電用原子炉施設の安全性向上評価に活用されていることを踏まえ、原子力規制庁の職員(請負事業を含む)が地震 PRA 手法の高度化の一環として、以下の調査・解析等を実施した。

①地震規模等の不確かさの検討

国内の活断層を対象に、地震規模の不確かさを考慮した地震発生モデルに基づく PSHA を行い、従来の単一規模のモデルと比較し、モデル間の違いによるハザードの差 異を把握した。また、国内活断層の地震規模・発生頻度の不確かさを評価し、その評価 結果を考慮した地震発生モデルを設定した PSHA を行い、従来の国内のモデルによるハ ザードの差異を把握した。

② 地震動の不確かさの検討

既往の距離減衰式を特定の単一評価地点における PSHA に適用するために、(2)③で整備したはぎとり波を含む多数の観測記録を用いて各観測点の地盤特性に起因する不確かさを補正した結果、ほとんどの観測点で中央値は観測値に近づき標準偏差は顕著に小さくなるが、対象とする距離減衰式によって結果に差異が生じることを把握した。補正前後の距離減衰式を用いて PSHA を実施した結果、補正した場合には標準偏差が小さくなった影響によりハザードレベルも顕著に小さくなる傾向があるが、中央値の補正結果の影響もみられた。したがって、PSHA においては、複数の距離減衰式を対象に、標準

偏差のみならず中央値を補正することは、適切に不確かさを考慮する観点で重要である との知見を得た。

#### (4) 断層変位評価に係る知見の蓄積

衛星データの干渉解析及び画像解析より、地震時地表変状箇所を客観的に識別し、副断 層の変位を定量的に評価する手法を開発するとともに、副断層を対象としたトレンチ調査 から、複数の地点で複数の断層活動イベントを有する活動履歴が明らかになった。室内模 擬実験及び数値解析を実施することにより、断層傾斜角が副断層生成へ与える影響を確認 した。さらに、衛星データの解析に基づいた断層変位のデータを用いて断層変位評価式を 改良し、確率論的断層変位評価に係る知見を蓄積した。

#### 3.2 目的の達成状況

本研究は、下記のとおり、4つの項目の令和2年度から令和5年度までの4年間の実施 計画で設けた全ての目的を達成した。

(1) 断層モデル法の精度向上に係る検討

熊本地震の知見を踏まえ、断層浅部破壊を考慮した特性化震源モデルの設定手法を調 査するとともに、検証解析やパラメータ分析を行い、特性化震源モデルの不確かさに係 る知見を蓄積した。

(2) 震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討

震源を特定せず策定する地震動に関する新たな観測記録を収集して追加解析を行う とともに、最新知見を考慮した評価手法に係る調査・試解析等を行い、震源を特定せず 策定する地震動の精度向上に係る知見を得た。

(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討

活断層による地震の規模と発生頻度及び地震動不確かさの取扱い方法を調査し、確率 論的地震ハザード評価への影響度合いを把握した。

(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積

断層変位として特に識別可能な副断層に着目し、室内模擬実験及び数値解析を実施す るとともに、断層変位の観測データの分析や断層変位評価式の改良を行い、断層変位評 価に係る知見を蓄積した。

#### **3.3** 成果の公表等

#### 3.3.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

- NRA 技術ノート
- ① 田島礼子、"震源を特定せず策定する地震動の標準応答スペクトルの妥当性確認 —
   2018 年から 2022 年の観測記録の追加—"、127 p.、2024.

- (2) 論文(査読なし)
- 入江紀嘉、宮腰研、ドルジャパラム・サロル、岡田康男、鳥田晴彦、佐藤俊明、<u>田島礼</u> <u>子</u>、"マルチスケール・アスペリティを考慮したM9クラスのプレート間地震の特性化 震源モデル -2011 年東北地方太平洋沖地震の既往震源モデルに基づいた検討-"、第 16回日本地震工学シンポジウム論文集、Day1-G417-05、10 p.、2023.

#### 3.3.2 委託先による公表

- (1) 論文(査読付)
- 吉田邦一、染井一寛、宮腰研、"レシーバー関数による石狩低地帯南東部の堆積層構造の推定"、地震第2輯、75、pp.145-161、2022.
- (2) 国際会議のプロシーディング(査読付)
- Dorjpalam, S., Y. Okada, K. Irie, and H. Torita, "Study on the Strong Ground Motion Prediction Method by HERP, Japan, to 2010 M<sub>w</sub>8.8 Maule Earthquake, Chile", 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-26), 8 p., 2022.
- (3) その他
- 染井一寛、宮腰研、"2019 年 Ridgecrest 地震(Mw7.1)の強震動生成域と地震動シミュレーション"、日本地震学会 2020 年度秋季大会、S15P-06、2020.
- ② Petukhin, A., P. Galvez, P. Somerville, K. Miyakoshi, K. Irikura, "Correlation of Kinematic Source Parameters from Rupture Models Simulated by the Full Dynamic Earthquake Cycles," 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, SSS11-12, 2021.
- ③ Galvez, P., A. Petukhin, P. Somerville, J-P Ampuero, K. Miyakoshi, D. Peter, K. Irikura, "Earthquake multi-cycle modeling for realistic heterogeneous rupture parameters," General Assembly of the European Seismological Commission, 392, 2021.
- ④ 吉田邦一、宮腰研、入倉孝次郎、"動力学破壊シミュレーションにおける浅部応力場の 設定に関する検討"、2021年度日本建築学会大会(東海)梗概集、21139、2021.
- ⑤ 岡田康男、ルイス・ダルガー、ドルジャパラム・サロル、具典淑、鳥田晴彦、"2011年 東北地方太平洋沖地震の静的応力降下量分布の推定"、2021年度日本建築学会大会(東 海)梗概集、pp. 265-266、2021.
- ⑥ 具 典淑、ドルジャパラム・サロル、岡田康男、鳥田晴彦、"2010 年チリ Maule 地震を 対象としたプレート間地震の強震動予測レシピの検証(その1)SMGA モデルの設定お よび地震動評価"、2021 年度日本建築学会大会(東海)梗概集、pp. 399-400、2021.
- ⑦ 鳥田晴彦、ドルジャパラム・サロル、具典淑、岡田康男、"2010年チリ Maule 地震を対象としたプレート間地震の強震動予測レシピの検証(その2)アスペリティモデルの設定および地震動評価"、2021年度日本建築学会大会(東海)梗概集、pp.401-402、2021.

- ⑧ 宮腰研、郭雨佳、吉田邦一、入江紀嘉、"国内のプレート間地震を対象にした震源スケ ーリング則の再検討"、日本地震学会 2021 年度秋季大会予稿集、S15P-07、1 p.、2021.
- ⑨ 入江紀嘉、吉田昌平、岡田康男、宮腰研、染井一寛、鳥田晴彦、"2021 年福島県沖の地震(Mj7.3)の強震動評価に基づいた強震動予測手法の適用性評価"、日本地震学会 2021 年度秋季大会予稿集、S15P-06、2 p.、2021.
- ⑩ 吉田邦一、宮腰研、入倉孝次郎、"動力学破壊シミュレーションにおける浅部応力場の 設定に関する検討"、日本地震工学会大会 2021、T2021-093、2021.
- 郭雨佳、吉田邦一、宮腰研、"2016年チリ沖 Chiloé プレート間地震(M<sub>w</sub>7.6)の広帯域 震源特性"、日本地球惑星科学連合 2022 年大会予稿集、SSS10-P05、2 p.、2022.
- ② 郭雨佳、宮腰研、吉田邦一、入江紀嘉、"東北日本/チリ沖のプレート間地震の震源特性の地域性"、日本地球惑星科学連合 2022 年大会予稿集、SSS10-P05、2 p.、2022.
- (i) Petukhin Anatoly、Galvez Percy、Somerville Paul、吉田邦一、宮腰研、入倉孝次郎、"マ ルチサイクル地震シミュレーションに見られるマルチハイポセンター破壊伝播に関す る考察"、日本地球惑星科学連合 2022 年大会予稿集、SSS10-02、2022.
- ④ 染井一寛、宮腰研、Petukhin Anatoly、Galvez Percy、"運動学的震源モデルから推定した 断層面上の破壊伝播速度の不均質"、日本地球惑星科学連合 2022 年大会予稿集、SSS10-P02、2022.
- Detukhin Anatoly、Galvez Percy、染井一寛、Somerville Paul、宮腰研、"動的サイクル震源モデルから推定した断層面上の破壊伝播速度の不均質性"、日本地球惑星科学連合2022年大会予稿集、SSS10-P03、2022.
- (1) 岡田康男、ルイス・ダルガー、ドルジャパラム・サロル、入江紀嘉、鳥田晴彦、"2011 年東北地方太平洋沖地震の動的震源パラメータの推定"、2022 年度日本建築学会大会 (北海道) 梗概集、pp. 23-24、2022.
- ① 入江紀嘉、ドルジャパラム・サロル、岡田康男、鳥田晴彦、"2010年チリ Maule 地震を 対象としたプレート間地震の強震動予測レシピの検証(その3)アスペリティモデルに よる地震動の再評価"、2022年度日本建築学会大会(北海道)梗概集、pp.43-44、2022.
- ⑧ 吉田邦一、染井一寛、宮腰研、"レシーバー関数法により求めた勇払平野の堆積層構造 と地震動増幅特性"、日本地震学会 2022 年度秋季大会、S15P-11、2022.
- ⑨ 郭雨佳・染井一寛・吉田邦一・宮腰研、2007 年新潟県中越沖地震 (Mw 6.6)の広帯域震 源モデルの再検討、日本地球惑星科学連合 2023 年大会予稿集、SSS09-P09、2 p.、2023.
- ② 郭雨佳、吉田邦一、宮腰研、"2021年アラスカ Chignik プレート間地震(Mw8.2)の広帯域 震源特性"、日本地球惑星科学連合 2023年大会予稿集、SSS09-P10、2 p.、2023. 等

#### **3.4** 成果の活用等

基準地震動を策定するための地震動評価に当たっては、各種の不確かさによる地震動評価への影響の分析、及び必要に応じた不確かさの組合せを考慮することが求められている。

そのため、本研究の項目「(1) 断層モデル法の精度向上に係る検討」では、平成28年熊本 地震の知見を踏まえて、国内外で起きた地震を対象に地震動解析を実施して震源断層モデ ルのパラメータの不確かさを調査し、それらの不確かさを考慮することによる地震動評価 への影響等に係る知見を蓄積した。委託先が今後公表する論文等を含めて得られた成果を 規制への活用の観点から分析・評価し、NRA 技術報告等としての公表を目指す。ただし、 熊本地震のように地表に断層が現れた地震の検討事例は限られるため、令和6年能登半島 地震の検討を含めて、引き続き事例を蓄積する必要がある。今後、こうした検討事例にて 蓄積した震源極近傍の地震動評価に係る知見について、基準地震動審査ガイドにおける地 震動評価に関する記載の更新に資する。

本研究の項目「(2) 震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討」では、5年間 の観測記録の収集・追加解析を実施し、規制に取り入れられている標準応答スペクトルへ の影響はないことを確認し、NRA技術ノートとして公表した。今後、最新知見として技術 情報検討会等に報告することにより、標準応答スペクトルの見直しの要否の判断における 参考情報として活用されることが見込まれる。また、標準応答スペクトル策定過程で用い られたはぎとり解析手法及び距離減衰式に係る中長期課題に関して調査・試検討を行った 結果については、今後、残された課題を解決した上で、成果を論文等として公表すること により、上記と同様に、標準応答スペクトルの見直しの要否の判断における参考情報とし て活用されることが見込まれる。

本研究項目「(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討」では、地震の規模別 発生頻度の評価においては海外のモデルの考え方を、地震動の評価においては単一地点の ばらつきを取り込んだPSHAを実施し、従来の結果と比較した結果、それぞれがPSHAに与 える影響を把握できた。今後、これら成果の一部を論文等として公表することにより、安 全性向上評価における地震PRAの適切性を確認する際の参考情報として活用されることが 見込まれる。

本研究項目「(4) 断層変位評価に係る知見の蓄積」では、衛星データの干渉解析及び画像 解析から、地震時の主断層及び副断層を機械的に抽出し、変位量を客観的に評価すること により、断層変位データを蓄積した。今後、このような解析手法を地表に断層が現れる内 陸地殻内地震に適用することにより、断層変位データを一層蓄積し、確率論的断層変位ハ ザード解析の高度化に活用されることが見込まれる。

#### 3.5 今後の課題等

各研究実施項目における成果を踏まえて、今後の課題を以下のとおり整理した。

- (1) 断層モデル法の精度向上に係る検討
  - 内陸型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積
     内陸型地震の震源断層パラメータの不確かさや震源断層パラメータの既往の経験式

との整合性等に関する知見を蓄積してきたものの、それら不確かさの取扱いについては、 主要パラメータの不確かさを考慮したモデルを構築して地震動解析を行い現行手法の 保守性を検証する決定論的な解析に留まっており、全体を俯瞰したモデル設定の合理的 な説明が不足しているとの課題がある。そのため、確率論的な視点から、パラメータ間 の相関性等を合理的に考慮することにより、観測地震動のばらつきと調和させた地震動 評価を行うことが重要である。また、断層極近傍の地震動評価において、地震調査研究 推進本部で公表した 2016 年熊本地震の観測記録に基づく断層モデル法の検証に係る中 間報告では、浅部断層破壊のモデル化を含めて断層極近傍へ適用可能な地震動評価手法 の検討が課題として挙げられており、令和6年能登半島地震の調査結果を含めて関連の 研究動向を反映した評価手法を適時に検討することが重要である。

② 海溝型地震の特性化震源モデルに係る知見の蓄積

プレート間巨大地震の特性化震源モデルの設定方法の高度化では、2011年東北地方太 平洋沖地震(M<sub>w</sub>9.0)を対象とした検討を行い、周期特性の特徴を把握することができた が、今後、同規模の地震が起きた場合、同様な解析を実施し検証を行うことが重要と考 えられる。

- (2) 震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討
  - 新たな観測記録の収集及び追加解析

2018 年から 2022 年までに起きた地震の観測記録を統計処理に追加することが標準応 答スペクトルの策定結果に与える影響はないことを確認することができたが、5 年間の データ追加に留まるため、今後も継続的にデータを蓄積して影響を確認していくことが 重要と考えられる。

② はぎとり解析の精度向上

地中地震計位置又は地震基盤相当面におけるはぎとり波の算出手法について、複数の 手法を試験的に観測記録に適用し、観測記録の特性等に応じて適切に手法を選定するこ との重要性、及び新たなアプローチによる妥当性確認の有効性が示唆されたことから、 今後、更なる適用性の確認・整理を行い、標準応答スペクトル策定で使用された記録に 改良手法を適用して統計処理結果への影響を確認すること等が重要と考えられる。

③最近の観測記録に基づく距離減衰式の検討

最近の観測記録のはぎとり波のデータを整備し、標準応答スペクトル策定における地 盤物性補正等に使用可能な比較的硬質な地盤のサイト増幅率を考慮した水平動・上下動 の距離減衰式を試作したが、データの拡充、モデル化方法等に関して改善すべき課題が あることから、今後も継続して距離減衰式構築に向けた調査・研究を実施することが重 要と考えられる。

(3) 確率論的地震ハザード評価に係る不確かさの検討

#### 地震規模等の不確かさの検討

活断層による地震について、想定の固有地震を対象に規模や発生頻度の不確かさを考 慮した地震発生モデルに係る知見を蓄積したが、近年、固有規模よりも一回り小さい地 震も発生しており、地震活動全体のモデル化について調査することが重要と考えられる。 ② 地震動の不確かさの検討

KiK-net 観測点を対象に国内での適用例がある手法を参考に、既往の距離減衰式をあ る特定の単一地点に補正して不確かさを分析することを試みたが、今後、原子力施設の 立地サイトに適用する距離減衰式の精緻化の一環として、(2)③で拡充予定のデータ、距 離減衰式の構築結果等の活用を含めて単一サイトのばらつき評価を実施することが重 要と考えられる。

#### (4) 断層変位評価に係る知見の蓄積

大地震発生直後の地表地震断層に対して、従来、研究者が現地を踏査し断層変位の情報 を点的に収集してきた。一方で、本報告で示すように、衛星データを活用することにより、 "面"的にデータを把握することができる。今後、このような面的なデータを十分に蓄積し、 それらデータを基に確率論的断層変位ハザード解析の高度化を行うことが重要と考えられ る。

#### 参考文献一覧

- 原子力規制委員会、"実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の 基準に関する規則の解釈"、2013.
- 原子力規制委員会、"全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に 関する検討"、震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム報告書、2019.
- 3 International Atomic Energy Agency, "Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations: specific safety guide. IAEA safety standards series", ISSN 1020-525X; no.SSG 9 (Rev. 1), 2022.
- 4 地震調査研究推進本部地震調査委員会、"震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)"、2020、

https://www.jishin.go.jp/evaluation/strong\_motion\_recipe/(2023 年 12 月 2 日確認).

- 5 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、Vol. 110、pp. 849-875、2001.
- 6 Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada, "Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion", Seismological Research Letters, Vol. 70, pp. 59-80, 1999.
- 7 呉長江、内田淳一、田島礼子、儘田豊、小林源裕、菅谷勝則、藤田雅俊、佐津川 貴子、林茉莉花、"地震ハザード評価の信頼性向上に関する研究"、安全研究成果 報告 RREP-2020-4001、2020
- 8 一般財団法人地域地盤環境研究所、"令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費 (内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討)事業業務報告書"、2021.
- 9 一般財団法人地域地盤環境研究所、"令和 3 年度原子力施設等防災対策等委託費 (内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討)事業業務報告書"、2022.
- 10 一般財団法人地域地盤環境研究所、"令和 4 年度原子力施設等防災対策等委託費 (内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討)事業成果報告書"、2023.
- 11 Irikura, K., and H. Miyake, "Recipe for predicting strong ground motion from crustal earthquake scenarios", Pure and Applied Geophysics, Vol. 168, pp. 85-104, 2011.
- 一般財団法人地域地盤環境研究所、"平成 31 年度原子力施設等防災対策等委託費 (内陸型地震による地震動の評価手法の検討)事業成果報告書"、2020.
- 13 Dieterich, J.H., and B.D. Kilgore, "Direct observation of frictional contacts: New insights for state-dependent properties", Pure and Applied Geophysics, Vol. 143, pp. 283-302, 1994.
- 14 壇一男、渡辺基史、佐藤俊明、石井透、"断層の非一様すべり破壊モデルから算定 される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層の モデル化"、日本建築学会構造系論文集、第66巻、第545号、pp.51-62、2001.

- 15 藤堂正喜・新井健介・宮腰淳一・佐藤俊明・藤原広行・森川信之、"内陸地殻内地 震の3ステージモデルに適合した短周期レベルのスケーリング則の提案"、日本地 震工学会論文集、第22巻、第5号、pp.43-59、2022.
- 16 一般財団法人地域地盤環境研究所、"平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費 (地震動評価における不確かさの評価手法の検討)事業成果報告書"、2017.
- 17 一般財団法人地域地盤環境研究所、"平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費 (内陸型地震による地震動の評価手法の検討)事業成果報告書"、2019.
- 18 Tinti, E, E. Fukuyama, A. Piatanesi, and M. Cocco, "A Kinematic Source-Time Function Compatible with Earthquake Dynamics," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, pp. 1211–1223, 2005.
- 19 田島礼子、松元康広、司宏俊、入倉孝次郎、"内陸地殻内および沈み込みプレート 境界で発生する巨大地震の震源パラメータに関するスケーリング則の比較研究"、 地震、第2輯、第66巻、pp. 31-45、2013.
- Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, K. D. Koper, A.R. Hutko, L. Ye, H. Yue, and T. M. Rushing, "Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults", Journal of Geophysical Research, Vol. 117, B04311, 2012.
- 21 壇 一男、"強震動予測に用いられる学術用語としての「アスペリティ」について"、 日本建築学会構造系論文集、第85巻、第778号、pp. 1533-1543、2020.
- 22 株式会社大崎総合研究所、"令和2年度原子力施設等防災対策等委託費(海溝型地 震の特性化震源モデルに係る検討)事業成果報告書"、2021.
- 23 株式会社大崎総合研究所、"令和3年度原子力施設等防災対策等委託費(海溝型地 震の特性化震源モデルに係る検討)事業成果報告書"、2022.
- 24 株式会社大崎総合研究所、"令和4年度原子力施設等防災対策等委託費(海溝型地 震の特性化震源モデルに係る検討)事業成果報告書"、2023.
- 25 株式会社大崎総合研究所、"平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費(海溝型 地震による地震動の評価手法の検討)事業成果報告書"、2018.
- 26 株式会社大崎総合研究所、"平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費(海溝型 地震による地震動の評価手法の検討)事業成果報告書"、2019.
- 27 株式会社大崎総合研究所、"令和元年度原子力施設等防災対策等委託費(海溝型地 震による地震動の評価手法の検討)事業成果報告書"、2020.
- 28 Mazzoni, S., T. Kishida, J.P. Stewart, V. Contreras, R. B. Darragh, T.D. Ancheta, B.S.J. Chiou, W.J. Silva, Y. Bozorgnia "Relational database used for ground-motion model development in the NGA-sub project", Earthquake Spectra, Vol. 38, pp.1529-1548, 2022.
- Si, H., S. Midorikawa, T. Kishida, "Development of NGA-Sub ground-motion model of 5%-damped pseudo-spectral acceleration based on database for subduction earthquakes in Japan", Earthquake Spectra, Vol. 38, pp. 2682-2706, 2022.

- 30 笹谷努、森川信之、前田宣浩、"スラブ内地震の震源特性"、北海道大学地球物理
   学研究報告、No. 69、pp. 123-134、2006.
- 31 入江紀嘉、宮腰研、ドルジャパラム・サロル、岡田康男、鳥田晴彦、佐藤俊明、田島礼子、"マルチスケール・アスペリティを考慮したM9クラスのプレート間地 震の特性化震源モデル -2011 年東北地方太平洋沖地震の既往震源モデルに基づいた検討-"、第 16 回日本地震工学シンポジウム論文集、Day1-G417-05、10 p.、 2023.
- 32 川辺秀憲・釜江克宏、"2011 年東北地方太平洋沖地震の震源のモデル化"、日本地 震工学会論文集、第13巻、第2号(特集号)、pp. 75-87、2013.
- 33 Suzuki W., S. Aoi, H. Sekiguchi, and T. Kunugi, "Rupture process of the 2011 Tohoku oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data", Geophysical Research Letters, Vol. 38, L00G16, 6 p., 2011.
- 34 地震調査研究推進本部地震調査委員会、"波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波レシピ)"、2017、

https://www.jishin.go.jp/evaluation/tsunami\_evaluation/tsunami\_recipe (2023 年 12 月 1 日確認).

- 35 岡田康男、ルイス・ダルガー、ドルジャパラム・サロル、入江紀嘉、鳥田晴彦、
   "2011 年東北地方太平洋沖地震の動的震源パラメータの推定"、2022 年度日本建築
   学会大会(北海道)梗概集、pp. 23-24、2022.
- 36 原子力規制委員会、"「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」について(案)"、平成29年度第52回原子力規制委員会、資料4、平成29年11月29日、2017.
- 37 原子力規制委員会、"基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド"、2013.
- 38 原子力規制委員会、"標準応答スペクトルの規制への取り入れのための実用発電用 原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一 部改正 -改正案に対する意見募集の結果及びこれを踏まえた修正並びに今後の 対応-"、令和3年度第5回原子力規制委員会、資料1、令和3年4月21日、2021.
- 39 Tajima, R., H. Tanaka, and C. Wu., "An Empirical Method for Estimating Source Vicinity Ground-Motion Levels on Hard Bedrock and Annual Exceedance Probabilities for Inland Crustal Earthquakes with Sources Difficult to Identify in Advance", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 111, pp. 2408-2425, 2021.
- 40 田島礼子、"震源を特定せず策定する地震動の標準応答スペクトルの妥当性確認
   −2018 年から 2022 年の観測記録の追加─"、NRA 技術ノート、127 p.、2024.
- 41 国立研究開発法人防災科学技術研究所、"強震観測網(K-NET, KiK-net)"、
   https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/(2023年11月30日確認).

- 42 Noda, S., K. Yasiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Watanabe, "Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites", OECD Workshop on the Relations between Seismological DATA and Seismic Engineering, pp. 399-408, 2002.
- 43 吉田邦一、宮腰研、"S 波部分上下動の地盤の地震動応答特性に入射波動場が及ぼ す影響"、日本地震工学会論文集、第11巻、第4号、pp. 52-70、2019.
- 44 佐藤浩章、東貞成、芝良昭、藤原広行、功刀卓、"等価線形解析による非線形サイト特性評価のための有効ひずみ係数の最適化"、日本建築学会構造系論文集、第84巻、第760号、pp.781-791、2019.
- 45 Shible, H., A. Laurendeau, P.-Y. Bard, and F. Hollender, "Importance of local scattering in high frequency motion lessons from interpacific project sites, application to the kik-net database and derivation of new hard-rock GMPE", 16th European Conference on Earthquake Engineering, cea-02338932, 13 p., 2018.
- 46 友澤裕介、加藤研一、野尻揮一朗、"地震動の伝播経路特性の領域分割に着目した 不均質減衰構造・震源特性・サイト増幅特性の推定 2008 年岩手・宮城内陸地震 の震源域を対象とした検討"、日本建築学会構造系論文集、第 84 巻、第 756 号、 pp. 171-181、2019.
- 47 池浦友則、加藤研一、"隣接2地点ペアのネットワークに基づく相対地盤増幅率の 広域評価 - 東北地方太平洋側のK-NET・KiK-net サイトへの適用 -"、日本地 震工学会論文集、第11巻、第4号、pp.48-67、2011.
- 48 長嶋史明、川瀬博、"拡散波動場理論に基づく強震時水平増幅特性および地震基盤 入射スペクトルの推定"、日本地震工学会論文集、第22巻、第2号、pp. 17-36、 2022.
- Ito, E., K. Nakano, F. Nagashima, and H. Kawase, "A Method to Directly Estimate S-Wave Site Amplification Factor from Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Earthquakes (eHVSRs)", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 110, pp. 2892-2911, 2020.
- 50 国立研究開発法人防災科学技術研究所、"地震ハザードステーション(J-SHIS)"、 https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/(2023年12月1日確認).
- 51 原子力安全基盤機構、"平成 24 年度 地震基盤における応答スペクトルの距離減衰 式に適用する地盤増幅特性評価手法の検討 付録 E「平成 20~23 年までに作成さ れた硬質岩盤上距離減衰式のアップデート」"、2013.
- 52 Youngs, R.R. and K.J. Coppersmith, "Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, pp. 939-964, 1985.

- 53 Morikawa, N. and Fujiwara, H., "A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake", Journal of Disaster Research, Vol. 8, pp. 878-888, 2013.
- 54 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.
- 55 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.
- Atkinson, G. M., "Single station sigma", Bulletin of the Seismological Society of America,
   Vol. 96, No. 2, pp.446-455, 2006.
- 57 Morikawa, N., Kanno, T., Narita, A. Fujiwara, H., Okumura, T., Fukushima, Y., and Guerpinar, A., "Strong motion uncertainty determined from observed records by dense network in Japan", Journal of Seismology, Vol. 12, pp.529-546, 2008.
- 58 亀田弘行、隈元崇、藤原広行、奥村晃史、佃栄吉、堤英明、堤浩之、遠田晋次、徳 山英一、蛯沢勝三、香川敬生、司宏俊、古村孝志、三宅弘恵、森川信之、奥村俊 彦、宮腰淳一、"伊方 SSHAC プロジェクト 最終報告書"、四国電力、2020、 https://www.yonden.co.jp/energy/atom/safety/sshac\_project/index.html(2023年12月1 日確認)
- 59 藤原広行、森川信之、河合伸一、青井真、先名重樹、前田宜浩、東宏樹、はお憲生、 岩城麻子、若松加寿江、井元政二郎、長谷川信介、奥村俊彦、早川俊彦、高橋真 理、"東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良"、防災科学技術研究所 研究資料、No.399、2015.
- 60 藤原広行、森川信之、前田宜浩、岩城麻子、先名重樹、河合伸一、東宏樹、はお憲 生、井元政二郎、若松加寿江、宮腰淳一、森井雄史、島津奈緒未、高橋真理、赤 塚正樹、"東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良(その2)"、防災 科学技術研究所研究資料、No.489、2023.
- 61 株式会社パスコ、"令和2年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査)事業成果報告書"、2021.
- 62 株式会社パスコ、"令和3年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係 る調査)事業成果報告書"、2022.
- 63 株式会社パスコ、"令和4年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係 る調査)事業成果報告書"、2023.
- 64 株式会社パスコ、"令和5年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変位評価に係る調査)事業成果報告書"、2024.
- 65 三五大輔、小俣雅志、郡谷順英、"干渉 SAR 解析と地形表現図とを組み合わせた新たな地表断層抽出手法の研究"、日本リモートセンシング学会 第 61 回(平成 28 年度秋季)学術講演会論文集、pp. 147-148、2016.

- 66 小俣雅志、郡谷順英、三五大輔、"干渉 SAR を使用した新たな地表地震断層検出方法"、日本活断層学会 2016 年秋季学術大会講演予稿集、2016.
- Valentini. A., Y. Fukushima, P. Contri, M. Ono, T. Sakai, S. C. Thompson, E. Viallet, T. Annaka, R. Chen, R. E. S. Moss, M. D. Petersen, F. Visini, and R. R. Youngs, "Probabilistic Fault Displacement Hazard Assessment (PFDHA) for Nuclear Installations According to IAEA Safety Standards," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 111, pp. 2661-2672, 2021.
- 68 西坂直樹、大西耕造、石川慶彦、大野正登、宮腰淳一、池田倫治、辻健、隈元崇、 奥村晃史、"SSHAC レベル 3 ガイドラインに基づく伊方サイトでの震源特性モデ ルを活用した確率論的断層変位ハザード解析"、日本地震工学会論文集、第 23 巻、 第 4 号、pp. 70-88、2023.
- 69 株式会社構造計画研究所、"平成 30 年度原子力施設等防災対策等委託費(断層変 位評価に係る知見の整備)事業成果報告書"、2019.

#### 執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門

- 呉 長江 上席技術研究調査官((1)①)
- 儘田 豊 主任技術研究調查官((3) ②)
- 儘田 豊 王仕技術研究調査官((3) ②)

   田島 礼子 主任技術研究調査官((1) ②、(2) ①~③)
- 菅谷 勝則 副主任技術研究調査官((4))
- 藤田 雅俊 副主任技術研究調査官((3)①)
- 森木 ひかる 技術研究調査官

括弧内は、図 1.1 に示した研究課題のうち主に執筆した番号を示す。