

RREP-2018-4002

安全研究成果報告

地震動評価技術の整備

Development of Methods for Seismic Ground Motion Evaluation

呉 長江、小林 源裕、菅谷 勝則

Changjiang WU, Genyu KOBAYASHI, and Katsunori SUGAYA

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)

平成 30 年 11 月

November 2018

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、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本レポート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

地震動評価技術の整備

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 小林 源裕 菅谷 勝則

要 旨

原子力規制委員会は、平成 25 年 7 月に新規制基準及び「基準地震動及び耐震設計方針に係わる審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）を施行した。新規制基準及び審査ガイドでは、「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」に基づき基準地震動を策定することを求めている。また、新規制基準では、「耐震重要施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない」とされており、断層破壊や地震活動等に伴う地盤の永久変位の有無を適切に評価することが重要である。本プロジェクトでは、平成 24 年度から平成 28 年度にかけて、以下の研究課題（(1)～(4)）に取り組んだ。

(1) 地震動評価における不確かさの評価手法の整備（平成 24 年度～平成 28 年度）

平成 25 年度までに、2011 年東北地方太平洋沖地震による地震動解析等を行い、海溝型巨大地震の地震動評価手法の高度化を図った。平成 26 年度以降は、1995 年兵庫県南部地震以降の内陸地殻内地震を対象に、強震動記録に基づいた震源逆解析や地震動再現等を行い、特性化震源モデルにおける震源断層パラメータの不確かさ及びスケーリング則との整合性に関する知見を蓄積した。

(2) サイト特性の評価手法の整備（平成 24 年度～平成 28 年度）

平成 25 年度までに、大深度地震観測システムを開発し、地震動観測を行うとともに、三次元深部地下構造モデルを高精度化し、地下構造の調査手法及びモデル化手法を考案した。

平成 26 年度以降は、地震動記録を用いて軟岩サイトの三次元深部地下構造モデルの検証及び硬質岩盤における減衰特性の評価を行い、サイト特性評価に関する知見を蓄積した。

(3) 断層変位の評価手法の整備（平成 24 年度～平成 28 年度）

断層変位に関する決定論及び確率論的評価手法の現状と課題を整理した。決定論的手法の検討として表層地盤の断層変位評価における数値解析の適用性を確認するとともに、確率論的手法の検討として国内外の断層変位データを収集し、断層変位の大きさの評価方法について検討を行った。

(4) 震源を特定せず策定する地震動の評価手法の整備（平成 24 年度～平成 25 年度）

地盤非線形性を考慮した地盤同定解析及びはぎとり解析（解放基盤表面における地震動の推定）の手法を検討し、地表の観測地震動から解放基盤面上の地震動算定手法を提案するとともに、断層モデルの主要パラメータの不確かさが地震動評価に及ぼす影響を評価し、震源を特定しにくい地震を対象とした確率論的評価手法を提案した。

Development of Methods for Seismic Ground Motion Evaluation

Changjiang WU, Genyu KOBAYASHI, and Katsunori SUGAYA
Division of Research for Earthquake and Tsunami
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

In July 2013, the Nuclear Regulation Authority (NRA) enforced its new regulatory requirements as well as relevant review guides for commercial power reactors, including the guide for reviewing design basis ground motion and seismic design policies. The new regulatory requirements and the review guide both require that design basis ground motions (DBGM) be determined by considering the following two types of ground motions, “site-specific ground motions evaluated by specifying seismic sources” and “ground motions evaluated without specifying seismic sources”. Moreover, it is important to appropriately evaluate the possibility of the occurrence of displacement caused by near-site fault rupture or other earthquake activities, since according to the new requirements, facilities important to seismic safety shall be installed on the ground surface without a risk of occurrence of fault displacement. This project, which covered fiscal years 2012-2016, had dealt with four issues as follows.

(1) Development of uncertainty assessment method for ground motion evaluation

In fiscal years 2012 and 2013, this sub-project focused on improvement of methods for evaluating ground motions from great inter-plate earthquakes, and carried out a series of analyses for the 2011 Tohoku earthquake. For fiscal years 2014 to 2016, this sub-project analyzed the earthquakes occurring in continental crust after the 1995 Kobe earthquake, through determining the source rupture process from waveform inversion as well as strong motion simulation, and accumulated relevant knowledge on uncertainties of source parameters and the consistency of scaling laws of source parameters which are used for seismic source characterization.

(2) Development of methods for site effect evaluation

In fiscal years up to 2013, starting with the development and implementation of deep borehole seismic observation, this sub-project developed a high-resolution, large-depth underground structure model, and proposed a procedure for underground structure investigation and structure modeling. Since

fiscal year 2014, in order to develop methods for site effect evaluation, this sub-project carried out studies on validation of the developed 3-dimensional underground structure models for soft-rock sites as well as evaluation of wave attenuation for hard-rock sites by analyzing ground motion records.

(3) Development of methodology for fault displacement assessment

This sub-project reviewed the current status and issues of fault displacement assessment, tested the applicability of numerical simulation methods for simulating fault displacement as a deterministic approach, and investigated the probabilistic approach for fault displacement assessment by using displacement data observed from earthquakes occurring in and outside Japan.

(4) Development of methods for ground motion evaluation without specifying seismic sources

By applying the horizontal-to-vertical spectral ratio method to underground structure modeling with nonlinear soil effects taken into consideration, this sub-project proposed a deterministic approach to evaluate free-field ground motions on a hypothetical layer surface by using seismic motions observed on the ground surface, and investigated the probabilistic approach to evaluate ground motion without specifying seismic sources by using the rupture modeling method for ground motion simulation.

目次

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1. 序論 | 1 |
| 2. 研究期間を通じた主要成果 | 3 |
| 2.1 地震動評価における不確かさの評価手法の整備 | 3 |
| 2.1.1 地下構造情報に基づく震源断層パラメータの不確かさ評価手法の検討 | 3 |
| 2.1.2 地震動解析に基づく震源断層パラメータの不確かさ評価手法の検討 | 5 |
| 2.1.3 動力学知見に基づく震源断層パラメータの不確かさ評価手法の検討 | 12 |
| 2.2 サイト特性の評価手法の整備 | 16 |
| 2.2.1 地震動評価のための三次元深部地下構造モデル作成手法の高度化 | 16 |
| 2.2.2 硬岩サイト地震観測記録の整備及び地震動の評価 | 21 |
| 2.3 断層変位評価手法の整備 | 23 |
| 2.3.1 確率論的断層変位評価手法の整備 | 23 |
| 2.3.2 決定論的断層変位評価手法の整備 | 25 |
| 2.4 震源を特定せず策定する地震動の評価手法の整備 | 28 |
| 2.4.1 強震時の地表観測記録に基づく解放基盤における地震動の評価 | 28 |
| 2.4.2 確率論的評価手法の検討 | 29 |
| 3. 結論 | 30 |
| 参考文献 | 32 |

表 一 覧

| | | |
|-------|-----------------------|----|
| 表 2.1 | 検討地震及び断層長さ推定値一覧 | 4 |
| 表 2.2 | 地震動解析における検討地震一覧 | 6 |
| 表 2.3 | SMGA パラメーター一覧..... | 7 |
| 表 2.4 | 地盤物性値一覧..... | 26 |

図 一 覧

| | |
|--|----|
| 図 2.1 地表と地下構造情報による推定断層長さとの解析による地下の震源断層長さとの比較 | 4 |
| 図 2.2 微動アレイ観測による地下構造モデルの高度化 | 7 |
| 図 2.3 波形逆解析で得られた熊本地震の震源破壊過程 | 8 |
| 図 2.4 観測（黒線）と合成（赤線）速度波形の比較 | 9 |
| 図 2.5 計算（a）と観測（b）地殻変動の比較 | 9 |
| 図 2.6 観測（黒線）と SMGA モデルによる合成（赤線）速度波形の比較 | 10 |
| 図 2.7 震源断層パラメータのスケーリング則の比較 | 11 |
| 図 2.8 動力学的シミュレーションによる震源スケーリング則 | 12 |
| 図 2.9 臨界すべり距離 d_c の断層面上の分布 | 13 |
| 図 2.10 ケース 1 のアスペリティ（左側）及び計算された最大速度分布（右側）の比較 | 14 |
| 図 2.11 ケース 2 のアスペリティ（左側）及び計算された最大速度分布（右側）の比較 | 15 |
| 図 2.12 テストサイト及び観測点の分布 | 17 |
| 図 2.13 構築した三次元地下構造モデルの比較 | 18 |
| 図 2.14 地震の震央分布（コンターは基盤岩上面深度を描画） | 18 |
| 図 2.15 三次元地下構造モデルを用いた地震動シミュレーション結果の例 | 19 |
| 図 2.16 Anderson（2004）指標に基づく三次元地下構造モデルの精度評価 | 20 |
| 図 2.17 1000m 深部地震動観測井の地盤物性 | 21 |
| 図 2.18 硬質岩盤における地盤減衰特性 | 22 |
| 図 2.19 2016 年鳥取県中部の地震（Mj6.6）の地震動評価 | 22 |
| 図 2.20 断層変位の算出式の比較 | 24 |
| 図 2.21 数値解析に用いる計算モデル | 26 |
| 図 2.22 解析結果及び観測結果の比較 | 27 |
| 図 2.23 強震／弱震スペクトル比に基づく地盤同定解析の例 | 28 |
| 図 2.24 強震記録に基づく地震動評価 | 29 |

1. 序論

原子力規制委員会は、平成 25 年 7 月に新規制基準及び「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）を施行した。新規制基準及び審査ガイドでは、「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」に基づき基準地震動を策定することを求めている。

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」において、特に敷地付近の断層に対して、震源特性の各種の不確かさの分析・考慮を行い、断層モデルを用いた手法（以下「断層モデル法」という。）による地震動評価を求めている。断層モデル法における震源断層パラメータの設定に用いた震源スケーリング則は、主に平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震（以下「1995 年兵庫県南部地震」という。）の前に発生した内陸地殻内地震の震源インバージョン結果や強震動評価結果から提案された経験式である。一方、日本国内において、兵庫県南部地震を契機に地震観測網が整備されたことから、特に、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以下「2011 年東北地方太平洋沖地震」という。）の後、内陸地殻内地震の活発化により、大加速度の強震動記録が数多く得られている。このため、地震の規模等の不確かさを適切に評価するために、震源インバージョンや強震動記録の再現解析等を実施し、震源断層パラメータのスケーリング則との整合性の検証及びそれらの不確かさ評価手法の整備を行うことが重要である。

基準地震動の策定において、新規制基準では、三次元の地下構造を反映した地震動評価を要求している。三次元地下構造を反映した地震動評価手法の高度化に資するため、深部地震動観測システム等により得られた地下構造データ及び地震動データに関する総合解析を行い、深部地震動観測と物理探査による総合的な深部地下構造調査法及び三次元深部地下構造モデル作成法を整備することが重要である。

地震ハザード評価の観点からは、地震動に加え、地震による地盤の変位（ずれ）の評価も重要である。新規制基準では、「耐震重要施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない」とされている。また、当基準では、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、特に震源が敷地に近い場合に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ことが重要である。

また、「震源を特定せず策定する地震動」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収集し、これら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される必要がある。この場合、地震動評価において大加速度の観測記録が扱われることから、必要に応じて地盤非線形性を考慮した解析を要するなど、解放基盤での地震動評価に用いる手法を高度化することが重要である。

本プロジェクトでは、基準地震動策定の妥当性判断に資するため、「敷地ごとに震源を特

定して策定する地震動」について、断層モデル法による地震動評価における不確かさ及び三次元地下構造の影響等を考慮したサイト特性、並びに「震源を特定せず策定する地震動」における解放基盤面上の地震動、それぞれの評価手法を整備することを目的とする。さらに、断層変位に係る技術基盤を維持するために、断層変位の評価手法に関する知見の蓄積を目的とし、平成 24 年度から平成 28 年度に渡り、以下の研究課題（(1)～(4)）に取り組んだ。

(1) 地震動評価における不確かさの評価手法の整備（平成 24 年度～平成 28 年度）

特性化震源モデルにおける断層面積、アスペリティの位置や面積等の震源断層パラメータの設定手法に着目し、以下 3 つの手段に基づき、震源断層パラメータのスケーリング則との整合性及び不確かさに関する知見を蓄積した。

- ① 地下構造情報に基づき、震源断層長さや幅の巨視的パラメータを推定し、震源スケーリング則との整合性及びそれぞれの不確かさの評価手法を検討した。
- ② 地震動解析に基づき、アスペリティの面積や応力降下量等を含めた微視的パラメータのスケーリング則との整合性及びそれぞれの不確かさ評価手法を検討した。
- ③ 動力学知見に基づき、巨視及び微視的パラメータの不確かさ評価手法を検討した。

なお、本研究では、平成 25 年度までに、プレート間地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震、平成 26 年度以降は、1995 年兵庫県南部地震以降の内陸地殻内地震の 2 タイプの地震を対象に、震源逆解析や地震動再現等を行うことにより、地震動評価における不確かさの評価に関する知見を蓄積した。

(2) サイト特性の評価手法の整備（平成 24 年度～平成 28 年度）

平成 25 年度までは、大深度地震観測システムを開発し、地震動観測を行うとともに、三次元深部地下構造モデルを高精度化し、地下構造の調査手法及びモデル化手法を考案した。平成 26 年度以降は、地震動記録を用いて軟岩サイトの三次元深部地下構造モデルの検証及び硬質岩盤における減衰特性の評価を行い、サイト特性評価に関する知見を蓄積した。

(3) 断層変位の評価手法の整備（平成 24 年度～平成 28 年度）

断層変位に関する決定論及び確率論的評価手法の現状と課題を整理した。確率論的手法の検討として国内外の断層変位データを収集し、断層変位の大きさの評価方法について検討を行った。決定論的手法の検討として表層地盤の断層変位評価における数値解析の適用性を確認した。

(4) 震源を特定せず策定する地震動の評価手法の整備（平成 24 年度～平成 25 年度）

地盤非線形性を考慮した地盤同定解析及びはざとり解析の手法を検討し、地表の観測地震動から解放基盤面上の地震動算定手法を提案するとともに、断層モデルの主要パラメータの不確かさが地震動評価に及ぼす影響を評価し、震源を特定しにくい地震を対象とした確率論的評価手法を提案した。

2. 研究期間を通じた主要成果

2.1 地震動評価における不確かさの評価手法の整備

2.1.1 地下構造情報に基づく震源断層パラメータの不確かさ評価手法の検討

震源断層の巨視的パラメータとして重要である地下の断層長さは、通常は、地表・表層に現れた変動地形学・地質学的特徴から設定される。しかしながら、地震時の断層破壊（震源断層）は必ずしも地表まで伝播するとは限らず、仮に地表まで伝播しても、表層の地質・地盤条件、更には、表層の浸食条件等によっては、必ずしも過去の断層運動が全て地形に保存されているとは限らない。また、国内の内陸地殻内地震において、観測記録から解析的に求められた地震学的な断層長さ（以下「震源断層長さ」という。）が事前に評価された活断層長さと必ずしも一致していない。このため、地震調査研究推進本部（以下「地震本部」という。）が平成22年に発表した「活断層の長期評価手法（暫定版）」では、地表で確認される活断層長さを地下の断層長さとして評価していた従来の手法に対して、地形地質学的な調査結果に加えて、重力異常分布など面的に得られる地球物理学的な情報も検討し、地下の断層長さを検討するとしている。

本研究は、これを参考に、2016年熊本地震等、計12個の国内内陸地殻内地震(表2.1)を対象に、地表の活断層情報に加えて、各種地下構造情報から地下の断層長さを推定する手法を検討した。まず、各地震の本震位置を中心として、地表の変動地形学・地質学的情報をもとに活断層長さを評価した。そして、これらの情報に加えて、重力異常、磁気異常や微小地震分布等の地下構造情報を考慮することで、活断層構造と対応するような地下構造の特徴の抽出や分析により地下の断層長さ（以下「推定断層長さ」という。）の推定を行い、震源断層長さと比較した。図2.1は、各地震の推定断層長さ（色付き）及び地表の変動地形学・地質学的情報等に基づいた活断層長さ（白抜き）を示す。その結果、特に明瞭な活断層で発生した地震（図2.1丸印、特に震源断層長さが40km程度以上の地震）に関しては、推定断層長さと震源断層長さとの間に相関関係が認められた。これは、成熟した断層（累積変位量の大きい断層）に対しては、活断層情報、地球物理学的データに基づいた地下構造情報を適切に整理することで、より保守的な震源断層の評価が可能であることを示唆している。しかし、1978年伊豆大島近海地震のような未成熟な断層に対しては、活断層情報や地下構造情報から震源断層を評価することは困難であり、評価手法の確立が今後の課題である。

なお、本研究は、原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成27～28年度 地震動評価における不確かさ評価手法の高度化、受託先：一般財団法人 地域地盤環境研究所）事業により実施した。

表 2.1 検討地震及び断層長さ推定値一覧

Table 2.1 List of earthquakes and estimates of fault length

| 地震 | 発生年 | メカニズム | 推定断層長さ (km) | 地表地震断層長さ (km) | 活断層長さ (km) | 震源断層長さ (km) | 断層帯種別 |
|--------|------|-------|-------------|---------------|------------|-------------|-------|
| 熊本 | 2016 | 横ずれ | 45 | 31 | 35 | 42 | 成熟 |
| 長野県北部 | 2014 | 逆断層 | 70 | 9 | 58 | 20 | 成熟 |
| 福島県浜通 | 2011 | 正断層 | 42 | 30 | 16 | 40 | 未成熟 |
| 岩手宮城内陸 | 2008 | 逆断層 | 40 | 20 | 3 | 39 | 未成熟 |
| 能登半島 | 2007 | 逆断層 | 29 | 0 | 34 | 26 | 未成熟 |
| 中越 | 2004 | 逆断層 | 59 | 0 | 54 | 28 | 成熟 |
| 鳥取県西部 | 2000 | 横ずれ | 41 | 6 | 0 | 34 | 未成熟 |
| 岩手内陸 | 1998 | 逆断層 | 30 | 0 | 12 | 10 | 未成熟 |
| 兵庫県南部 | 1995 | 横ずれ | 67 | 10 | 60 | 64 | 成熟 |
| 伊豆大島近海 | 1978 | 横ずれ | 10 | 0 | 4 | 35 | 未成熟 |
| 三河 | 1945 | 逆断層 | 18 | 30 | 11 | 25 | 未成熟 |
| 濃尾 | 1891 | 横ずれ | 81 | 80 | 80 | 122 | 成熟 |

●成熟 ▲未成熟；
 色付き：地下構造情報による推定断層長さ
 白抜き：地表の情報による推定断層長さ

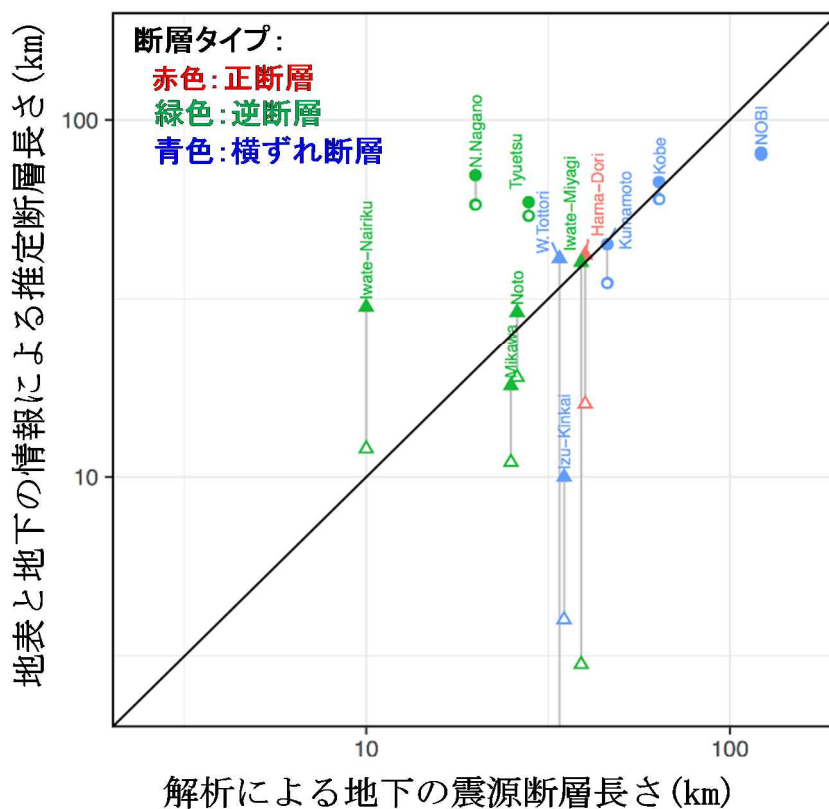


図 2.1 地表と地下構造情報による推定断層長さとの比較

Fig.2.1 Comparison between the estimates of active fault lengths and those of subsurface rupture length.

2.1.2 地震動解析に基づく震源断層パラメータの不確かさ評価手法の検討

地震本部が公表した内陸地殻内地震を対象とした強震動予測手法は、既往研究で提案された震源スケーリング則に基づき、震源断層パラメータを設定している。それらのスケーリング則は、主に1995年兵庫県南部地震の前に発生した内陸地殻内地震の震源逆解析結果や強震動評価結果から提案された経験式である。一方、1995年兵庫県南部地震以降、特に、2011年東北地方太平洋沖地震（以下「3.11地震」という。）の後、内陸地殻内地震の活発化により、大加速度の強震動記録が数多く得られている。本研究では、2016年熊本地震等計8個の国内内陸地殻内地震（表2.2）を対象とした震源逆解析や地震動再現解析等を実施し、震源断層パラメータを評価しスケーリング則との比較を行った^(参1)。

2016年熊本地震を例とした検討手順を以下に示す。まず、大加速度を記録した4つの強震動観測点について、微動アレイ観測を行い、求められた観測位相速度に対して、理論値との誤差が最小となるS波速度や層厚を推定し^(参2)、地盤構造モデルの高精度化を図った（図2.2）。そして、前震及び本震による強震動記録を用い、それぞれの震源破壊過程解析を実施した^(参3, 4)。特に、本震の場合は、破壊領域の推定精度を向上させるため、解析を2段階に分けて行った。第1段階では、0.05-0.5 Hzのバンドパスフィルター波形を用いてすべり分布を初期モデルとして推定し、得られた最終すべり分布にSomerville et al. (1999)^(参5)のトリミング手法を適用してすべり量の小さい領域を取除いて、破壊領域の推定を行った（図2.3(a)）。第2段階として、0.05-1.0 Hzのバンドパスフィルター強震波形を用いて、推定した破壊領域における、より高周波数までを説明する詳細な破壊過程を最終モデルとして解析した（図2.3(b)と(c)）。図2.3(b)は、最終すべり分布から、Somerville et al. (1999)^(参5)の抽出手法に基づいたアスペリティの位置を、図2.3(c)は、本研究で提案した最大モーメントレート（最大すべり速度と断層面積と剛性率を掛けたもの）の分布に基づいた抽出手法によるアスペリティの位置を、それぞれ、太い黒線の矩形で示している。観測波形と最終モデルの各要素断層の計算波形の合成（以下「合成波形」という。）を比較した結果、両者はよく一致していることを確認できた（図2.4）。また、図2.5から、最終モデルから計算した上下方向の地殻変動は、干渉合成開口レーダー（Interferometric Synthetic Aperture Radar; InSAR）で観測された地殻変動と全体的に整合していることが分かった。

次に、最終モデルを基に、特に、図2.3(c)に示したアスペリティの位置を参考に、日奈久断層及び布田川断層内に強震動生成域（SMGA）を3つ設置した震源モデル（以下「SMGAモデル」という。）を構築し、それを用いた強震動再現解析^(参6, 7)を実施した（図2.6）。その結果、従来の手法で観測地震動をほぼ再現でき、また、SMGAモデルの応力降下量は13.4MPa及び13.6MPa（表2.3）であり、平均的な値であることが確認できた。本震に対して、本研究に加え東京大学地震研究所や防災科学技術研究所等国内の四つの研究機関が実施した解析結果を基に、破壊面積及び地震モーメントの関係を分析した結果、既往経験式^(参5, 8, 9)と整合していることを確認した（図2.7(a)）。また、熊本地震を含め8個の国内内陸地殻内地震

震の SMGA モデルの面積及び応力降下量から計算した短周期レベルは、既往経験式^(参10)と整合しており^(参11, 12, 13, 14, 15, 16) (図 2.7(b))、各地震の短周期レベルの値 (図 2.7(b)の赤丸) は、経験式による予測値の 1.5 倍と三分の二の間に納まることを確認した。短周期レベル以外には、高周波数遮断特性の分析、震源破壊過程解析で得られた深さ方向のすべりの分布特性の分析及び短周期地震動の再現解析で得られた強震動生成域のパラメータの比較を行い、微視的パラメータの既存データとの整合性及び不確かさに関する知見を蓄積した^(参17, 18)。

本研究では、3.11 地震を対象とした検討も実施した。3.11 地震では、数十メートルを超える大きなすべり量が発生した海側の浅い震源域で長周期地震動が生成される一方、数メートル程度のすべり量が発生した陸側の深い震源域で短周期地震動が生成されており、従来の最終すべり分布に基づいた手法による強震動生成域の抽出が困難である。このため、本研究では、3.11 地震の強震動記録を用いた震源逆解析、特性化震源モデルの構築及び地震動再現解析等を行うことにより、新たに最大すべり速度、或いは最大モーメントレート分布に基づく強震動生成域の抽出手法を提案した^(参19)。

なお、本研究は、独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究 (平成 25 年度 新規制基準を踏まえた断層モデルによる地震動評価手法の高度化、受託先：一般財団法人 地域地盤環境研究所) 及び原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費 (平成 26~28 年度 地震動評価における不確かさ評価手法の高度化、受託先：一般財団法人 地域地盤環境研究所) 事業により実施した。

表 2.2 地震動解析における検討地震一覧

Table 2 List of earthquakes analyzed in this study

| 地震名 | 規模* | 断層タイプ |
|----------------------|-------|-------|
| 2016 年熊本地震 (4/16) | Mw7.1 | 横ずれ |
| 2008 年岩手・宮城内陸地震 | Mw6.9 | 逆断層 |
| 2011 年福島県浜通り地震 | Mw6.6 | 正断層 |
| 2011 年長野県北部地震 | Mw6.2 | 逆断層 |
| 2014 年長野県北部地震 | Mw6.2 | 逆断層 |
| 2016 年熊本地震 (前震 4/14) | Mw6.1 | 横ずれ |
| 2016 年熊本地震 (前震 4/15) | Mw6.0 | 横ずれ |
| 2013 年淡路島付近の地震 | Mw5.8 | 逆断層 |

* : M_w は防災科学技術研究所の F-net の CMT 解によるモーメントマグニチュードである。

表 2.3 SMGA パラメーター一覧

Table 2.3 Parameters estimated from SMGA modeling

| | SMGA1 | SMGA2 | SMGA3 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 面積 (km ²) | 51.8 | 51.8 | 100.0 |
| 地震モーメント(Nm) | 2.08×10^{18} | 2.08×10^{18} | 5.49×10^{18} |
| ライズタイム(s) | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 応力降下量(MPa) | 13.6 | 13.6 | 13.4 |
| 破壊伝播速(km/s) | 2.8 | 2.8 | 2.8 |
| 中心深さ(km) | 9.8 | 7.8 | 9.2 |
| 断層区間 | 日奈久断層 | 布田川断層 | 布田川断層 |

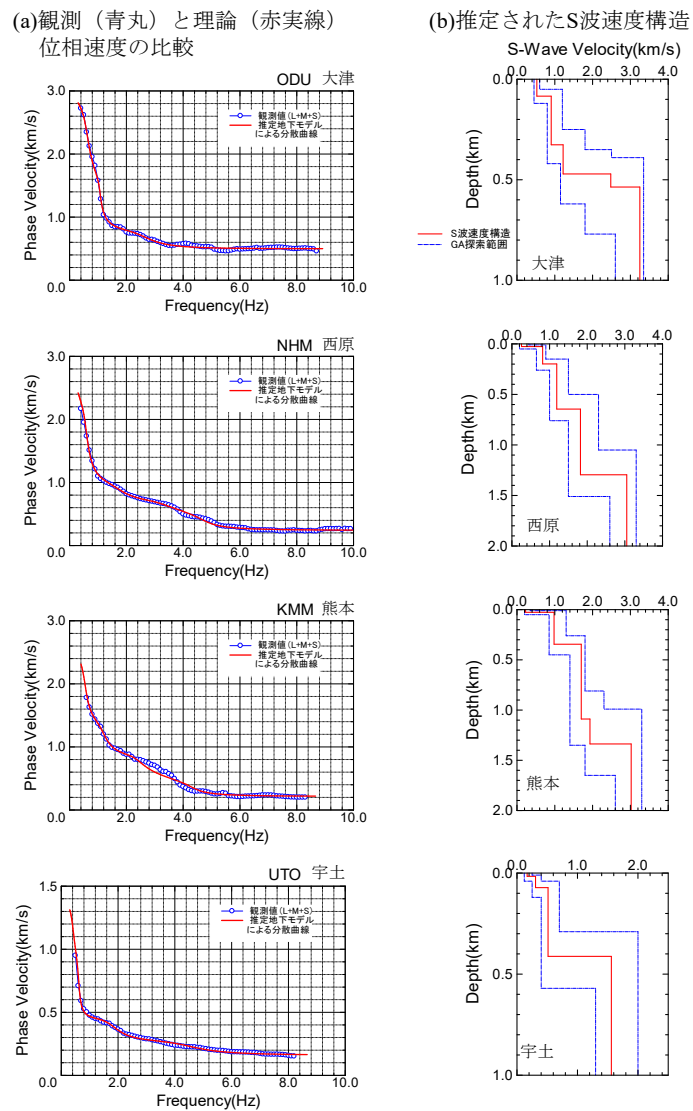


図 2.2 微動アレイ観測による地下構造モデルの高度化

Fig.2.2 S-wave velocity structure modeling. (a) Comparison between observation and theoretical phase velocity; (b) Estimation of S-wave velocity structure.

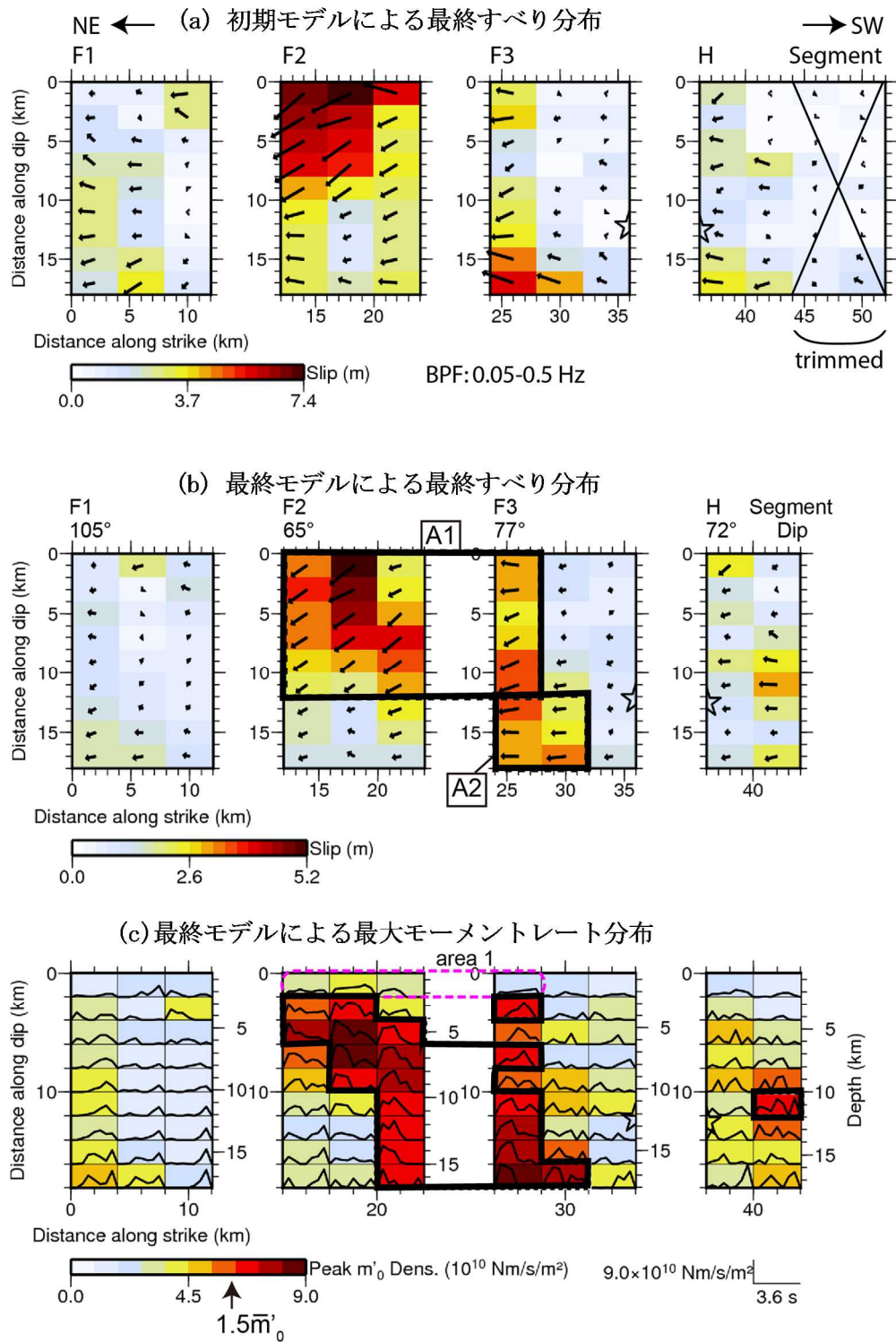


図 2.3 波形逆解析で得られた熊本地震の震源破壊過程

Fig.2.3 Source rupture process of the Kumamoto earthquake obtained from waveform inversion.

(a) Slip distribution and trimming result for the preliminary model; (b) Slip and (c) Peak moment rate distribution for the final model.

出典：Yoshida et al. (2017)^(参4)

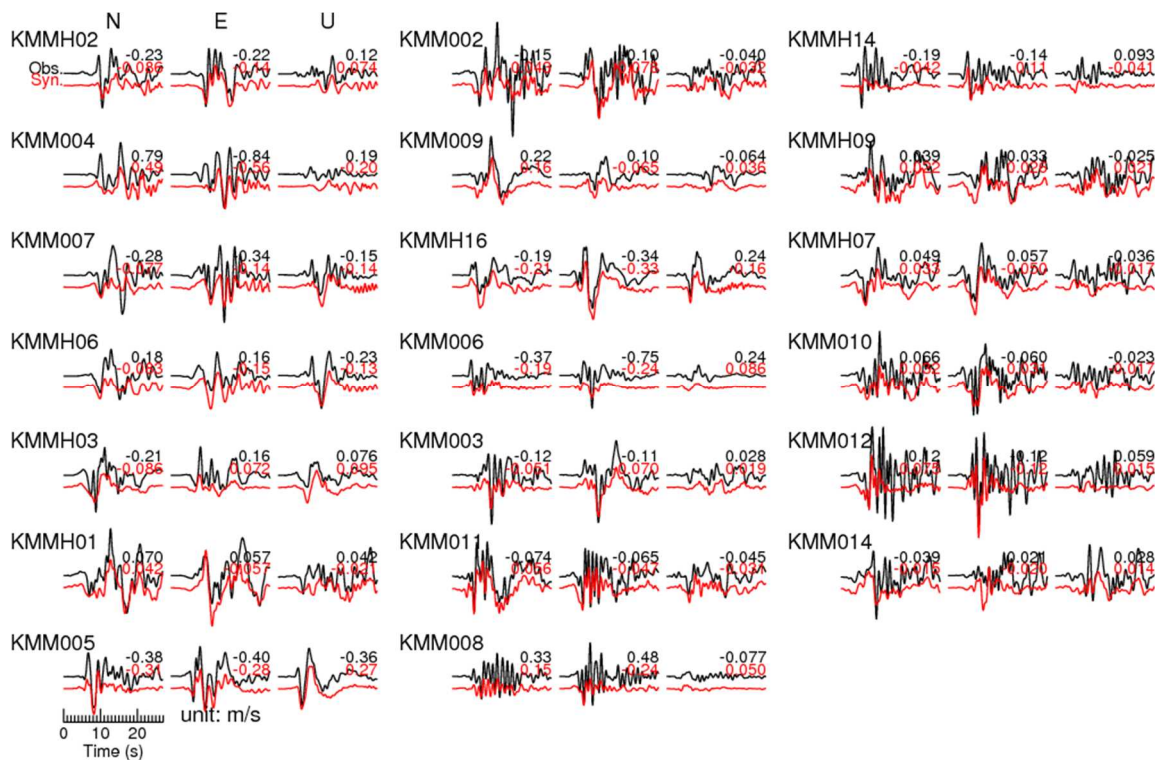


図 2.4 観測（黒線）と合成（赤線）速度波形の比較

Fig.2.4 Comparison between the observation (black) and synthetic (red) velocity waveforms

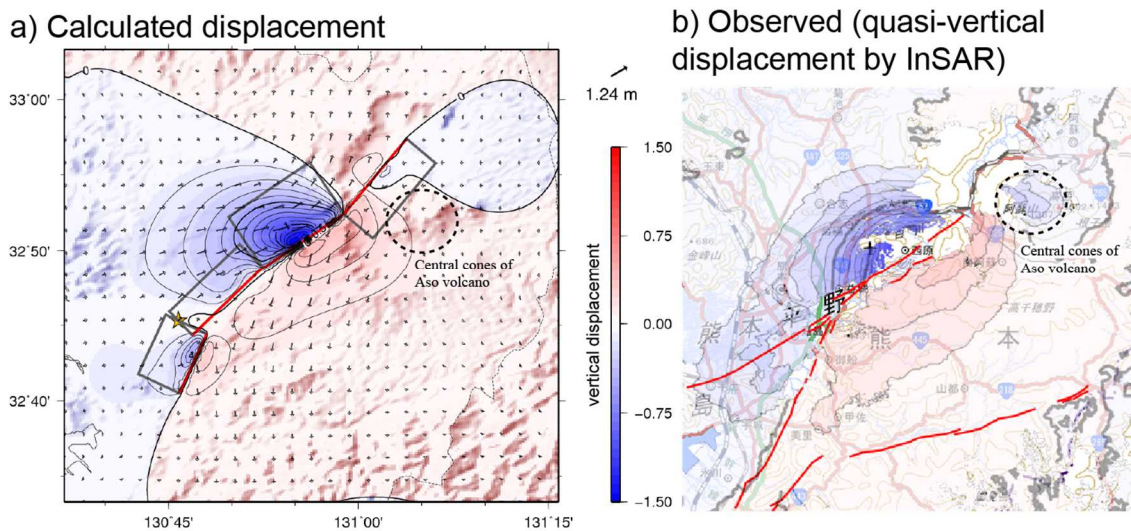


図 2.5 計算 (a) と観測 (b) 地殻変動の比較

Fig.2.5 Comparison between the calculated (a) and observed (b) ground displacements

出典：Yoshida et al. (2017) (参4)

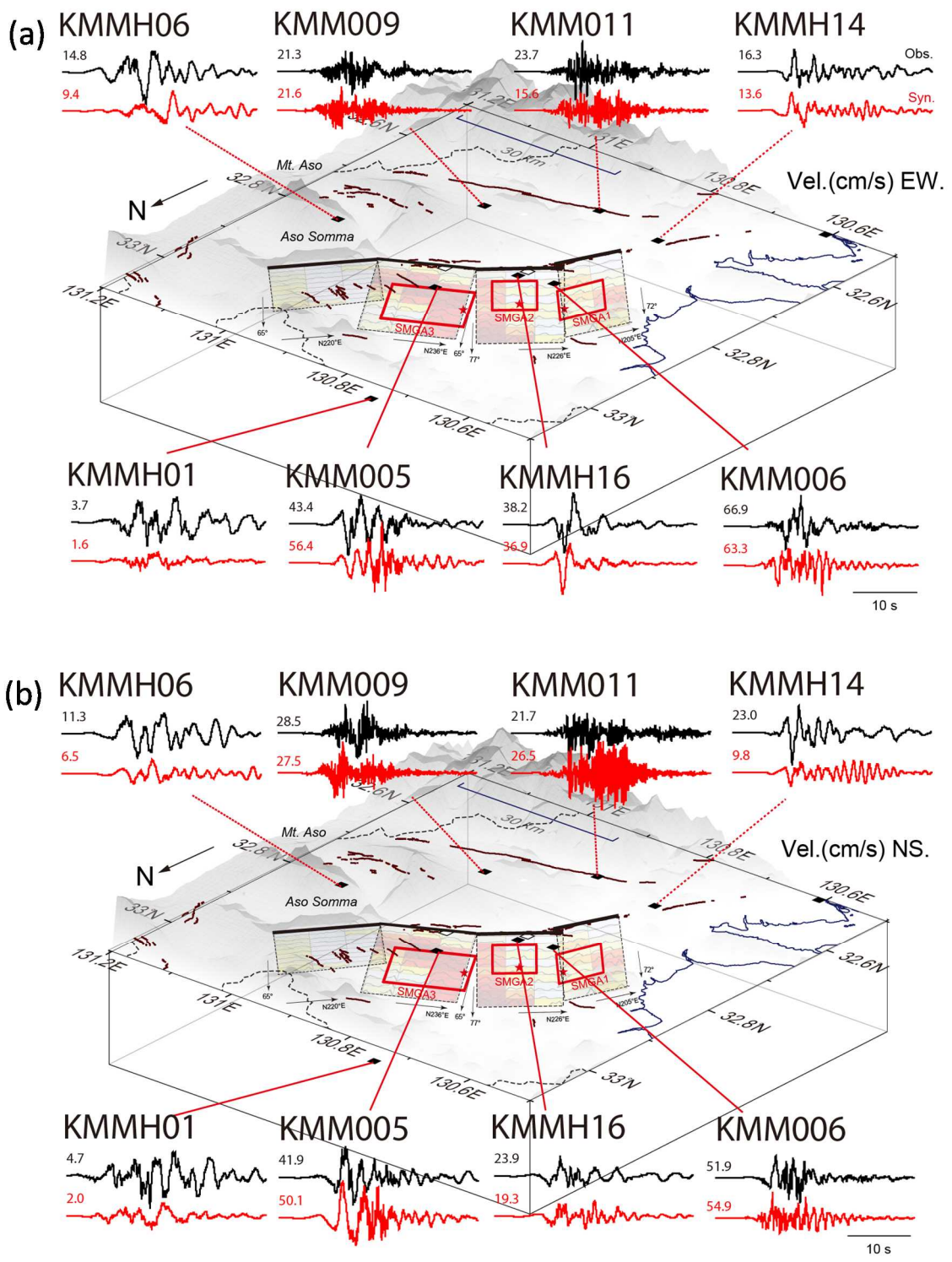
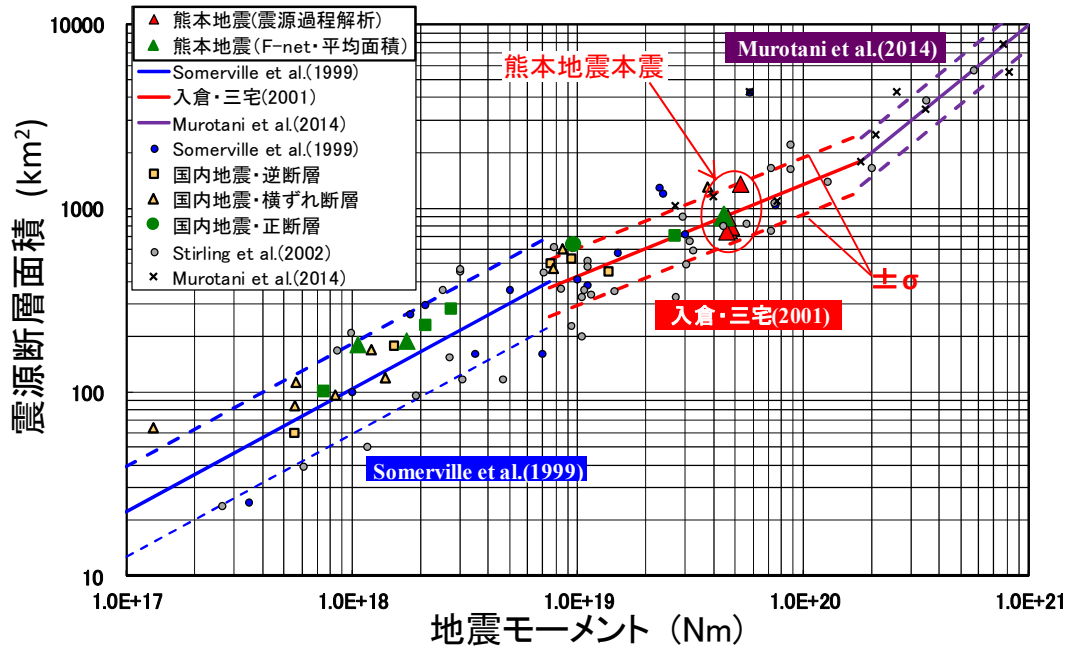


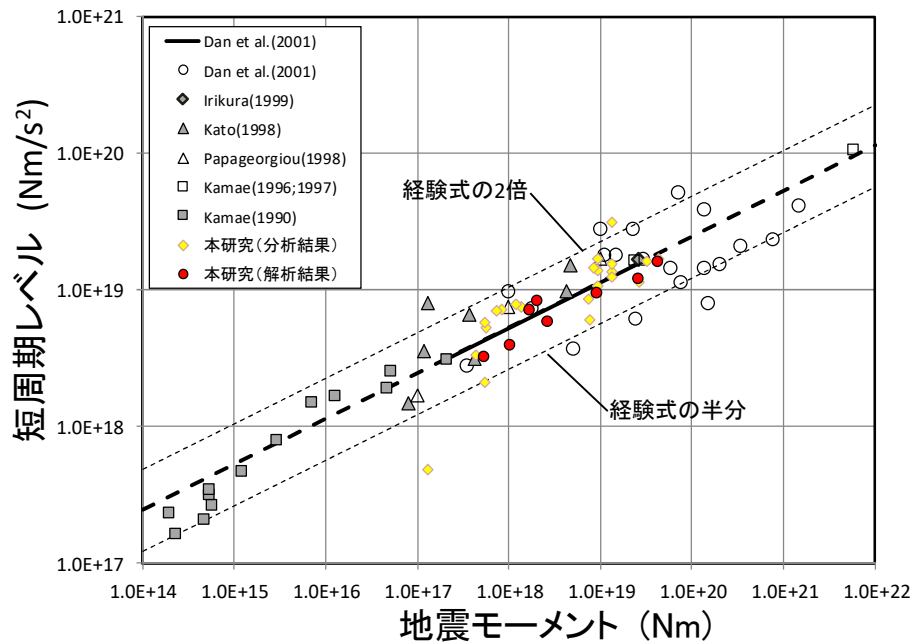
図 2.6 観測（黒線）と SMGA モデルによる合成（赤線）速度波形の比較

Fig.2.6 Comparison of observation waveforms with synthetic waveforms from the SMGA model.

(a) EW components; (b) NS components



(a)地震モーメント経験式との比較(緑:本研究解析結果)



(b)短周期レベル経験式との比較(赤丸:本研究解析結果)

図 2.7 震源断層パラメータのスケーリング則の比較

Fig.2.7 Comparisons of scaling laws with obtained fault parameters. (a) law of rupture area; (b) law of high-frequency source spectrum level, where the thick solid (or broken) line means the values predicted (or extrapolated) by the formula of Dan et al. (2001), and the thin dashed lines mean twice and half the prediction.

2.1.3 動力学知見に基づく震源断層パラメータの不確かさ評価手法の検討

地震本部での強震動予測手法は、内陸地殻内地震の震源サイズに応じた3ステージのスケーリング則 (図 2.7(a)参照; Somerville et al., 1999^(参5); 入倉・三宅, 2001^(参8); Murotani et al., 2014^(参9)) を採用している。しかし、地震規模が大きいほど、再来周期が長くなり、観測データによる検証が限られている。そのため、断層面上の応力の蓄積及び破壊過程を再現できる摩擦構成則に基づき、大地震の発生を含めた地震の繰り返し (以下「地震発生サイクル」という。) をシミュレーションし、地震モーメントのスケーリング則の検証を行った。本研究で用いた地震発生サイクルシミュレーションのコード (QDYN) は、式 (2.1) に示す断層面上の剪断応力 (τ) と法線応力 (σ) との比率が断層運動の速度 (V) 及び断層状態 (θ) に依存するとした摩擦構成則を採用している。

$$\frac{\tau}{\sigma} = \mu_0 + a \ln \frac{V}{V^*} + b \ln \frac{V^* \theta}{d_c} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 V^* はある基準の速度、 μ_0 は速度が V^* の時の定常状態の摩擦係数、そして係数 a 、 b 及び臨界すべり距離 d_c は摩擦パラメータであり、 a 及び b は深さに依存するとし、 d_c は断層の不均質特性を表すためにランダムに設定する。この地震発生サイクルシミュレーションを繰り返して得られた震源断層モデルを分析した結果、破壊面積と地震モーメントとの関係は、図 2.7(a)に示した観測データに基づいた3段階の震源スケーリング則を概ね再現でき、特に地震モーメント 10^{19} Nm 付近の特徴は、観測と整合していることを確認した (図 2.8)^(参20)。

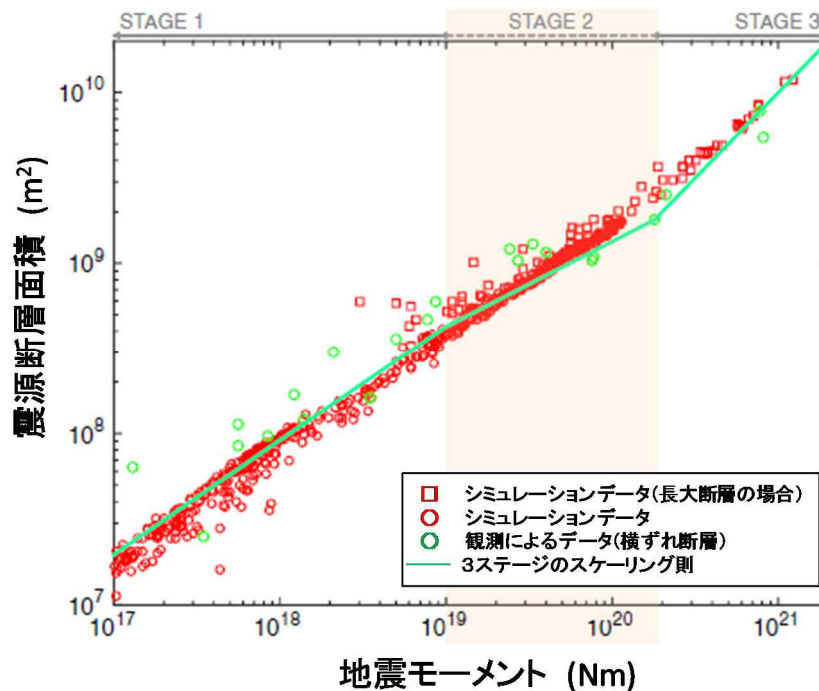


図 2.8 動力的シミュレーションによる震源スケーリング則

Fig.2.8 Simulation-based relationship between seismic moment and rupture area. Green curve: empirical 3-stage relation. Green circles: observational data from kinematic inversion of vertical strike-slip faults. Red circles and squares synthetic earthquake data from the simulation of “long fault” and “medium fault” models, respectively.

震源断層の微視的パラメータ設定の妥当性を動力的視点から検証するためには、震源断層の動的破壊過程を適切に評価することが重要である。QDYN は中小地震から巨大地震まで様々な大きさの地震発生を模擬する際に、運動方程式の慣性項を無視しており、動的破壊挙動に直接対応したものとなっていない。そこで、本研究は、QDYN による動的破壊直前の準静的すべり（震源核形成）段階の応力分布等を断層破壊の初期条件とし、動力的解析コード（SPECFEM）による数値計算に切り替え、運動方程式の慣性項を考慮した断層破壊シミュレーションを行い、その結果を QDYN に反映し、次の準静的な地震発生サイクルシミュレーションを実施した。さらに、断層の不均質性による影響を考慮するために、臨界すべり距離 d_c の断層面上の分布については、 d_c のばらつきが小さいケース（図 2.9(a)、成熟した断層に相当、以下「ケース 1」という。）と d_c のばらつきが大きいケース（図 2.9(b)、未成熟な断層に相当、以下「ケース 2」という。）の 2 ケースを設定し動力的断層破壊シミュレーションを行った。得られた動的震源モデルから、すべり量分布及び最大すべり速度分布に基づいた 2 つの手法を用いてアスペリティを抽出し、震源断層の分析を行った^(参 21)。その結果、ケース 1 の場合は、両抽出手法によるアスペリティがほぼ同じ場所に分布しており（図 2.10(a) と (b)）、また、それぞれのアスペリティを用いて計算した断層周辺の最大速度（PGV）の分布（図 2.10(d) と (e)）についても双方で類似したものとなった。ケース 2 の場合は、両抽出手法によるアスペリティ分布（図 2.11(a) と (b)）が顕著に異なったが、PGV の分布については、最大すべり速度分布に基づいた手法の方（図 2.11(e)）が動的断層破壊解析から得られた地震動（図 2.11(c)）により近い結果を得ることができ、強震動生成域の抽出手法としての有効性が明らかになった。なお、特に未成熟な断層の場合、最大すべり速度分布に基づくアスペリティ分布は図 2.11 左下図に示すように複雑なものとなると示唆され、地震動評価においてはアスペリティ分布の不確かさを考慮することが重要である。

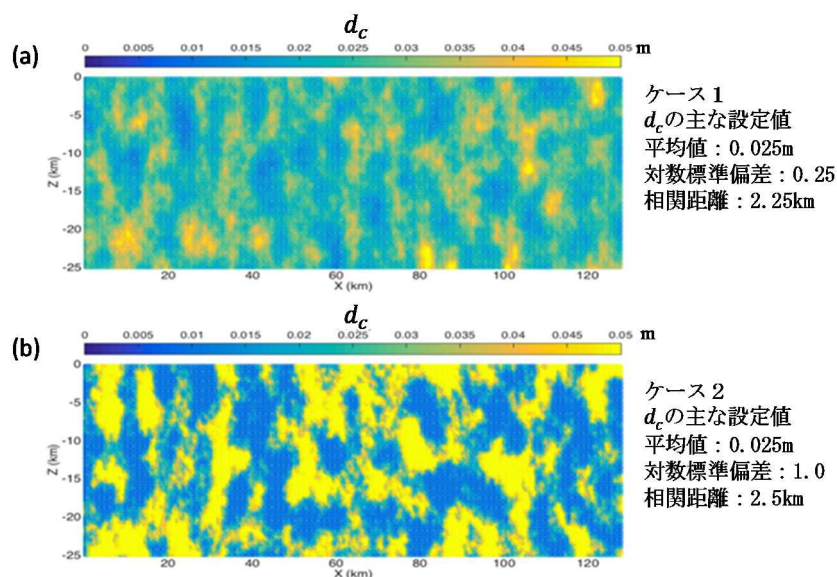


図 2.9 臨界すべり距離 d_c の断層面上の分布

Fig.2.9 Distributions of the critical slip-weakening distance d_c on the fault plane where two models with small (a) and large (b) variation of d_c are constructed, respectively.

なお、本研究は、原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成 26～28 年度 地震動評価における不確かさ評価手法の高度化、受託先：一般財団法人 地域地盤環境研究所）事業により実施した。

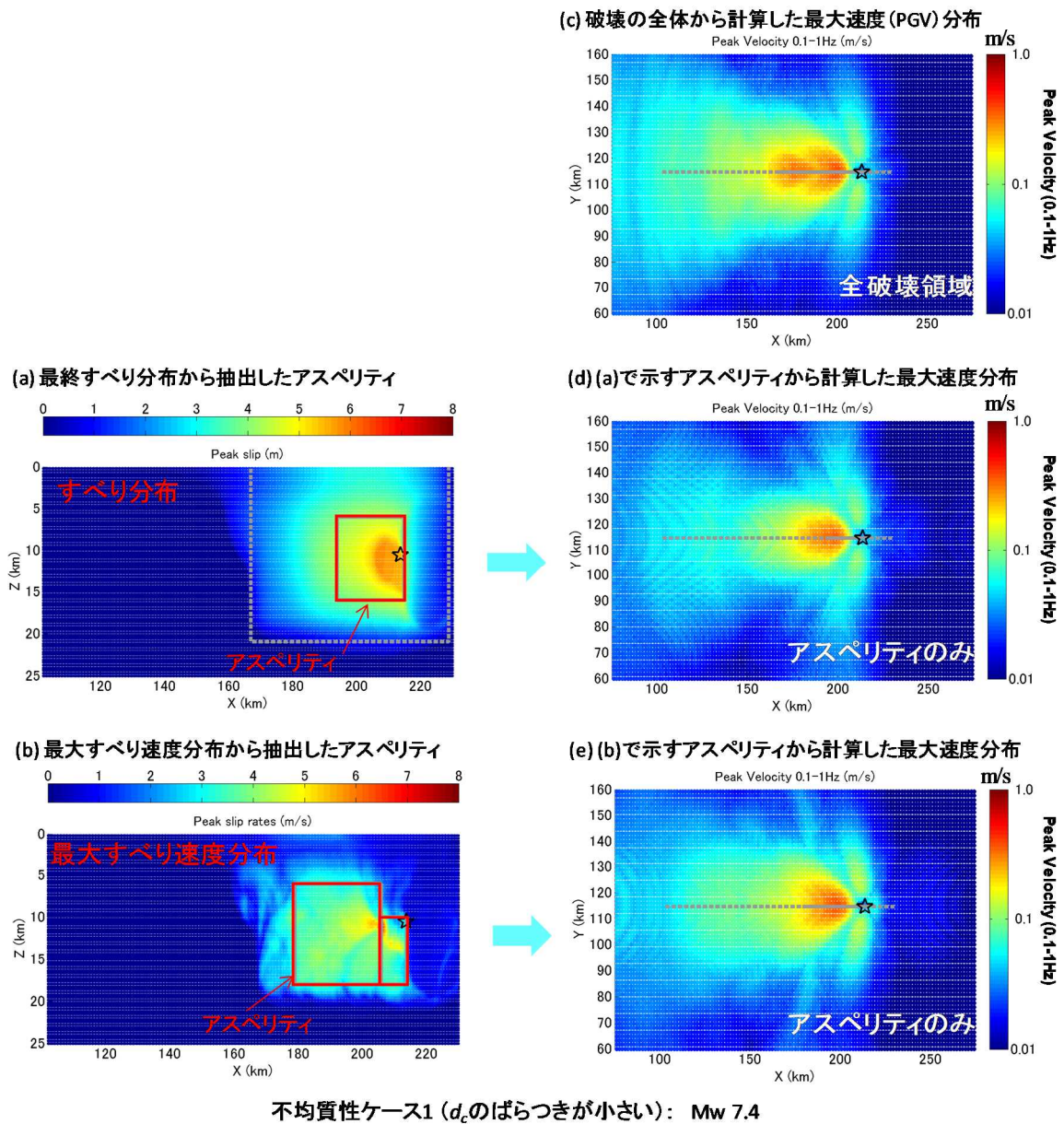


図 2.10 ケース 1 のアスペリティ（左側）及び計算された最大速度分布（右側）の比較
 Fig.2.10 Comparison of asperity models based on the slip and the peak slip rate distribution for Case 1 (a and b), as well as peak ground velocity distributions simulated from the full rupture model (c), from the asperity model based on slip distribution (d), and from the asperity model based on maximum slip rate distribution (e).

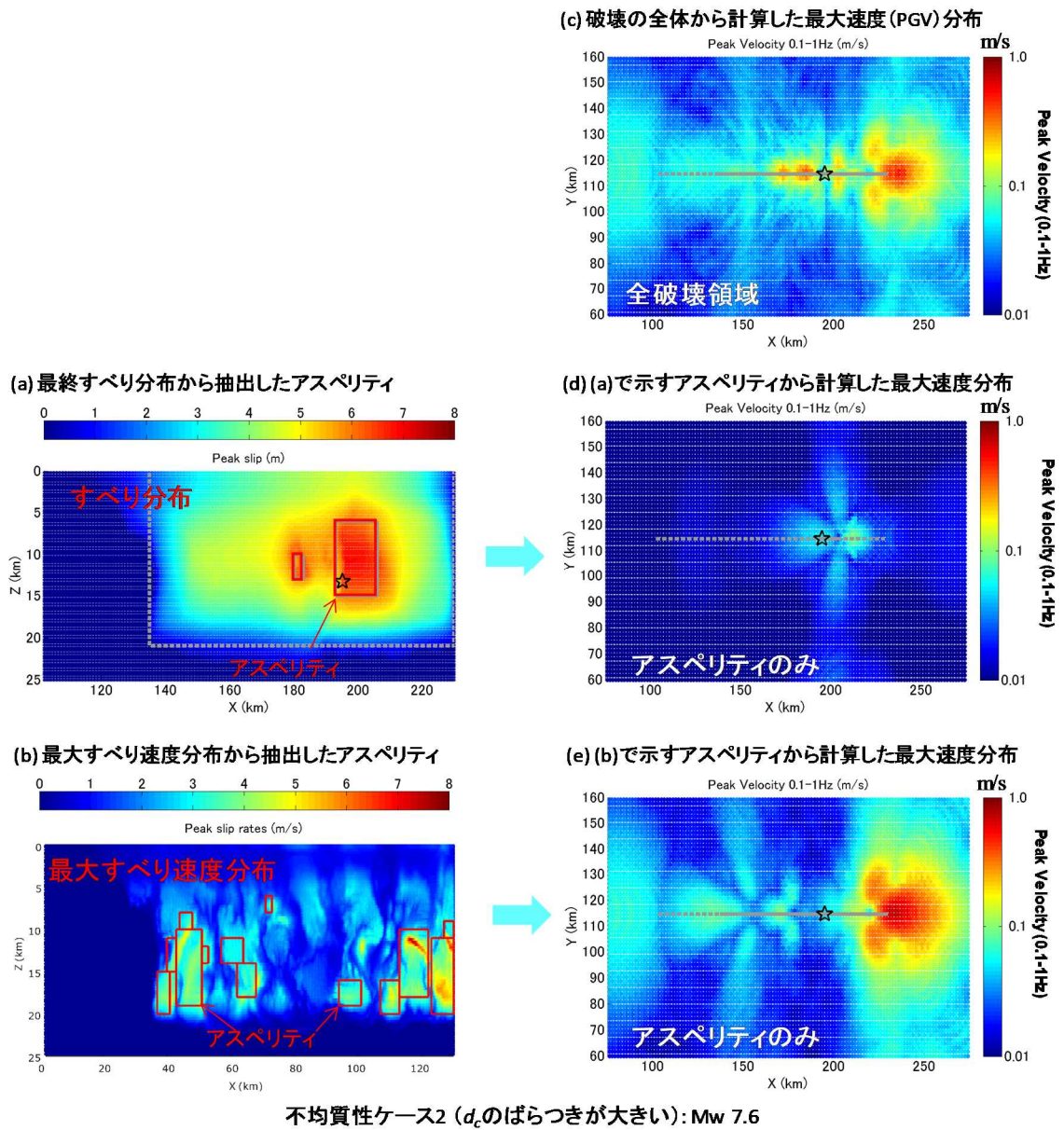


図 2.11 ケース 2 のアスペリティ (左側) 及び計算された最大速度分布 (右側) の比較
 Fig.2.11 Comparison of asperity models based on the slip and the peak slip rate distribution for Case 2 (a and b), as well as peak ground velocity distributions simulated from the full rupture model (c), from the asperity model based on slip distribution (d), and from the asperity model based on maximum slip rate distribution (e).

2.2 サイト特性の評価手法の整備

2.2.1 地震動評価のための三次元深部地下構造モデル作成手法の高度化

新規制基準には、基準地震動の策定に際し、三次元の地下構造を反映した地震動評価を要求している。地下構造モデルの設定においては、地層の傾斜、断層、褶曲構造等の地質構造を評価するとともに、地下の複雑な層構造に応じて地震波速度の分布が適切に評価されている必要がある。本研究では、三次元地下構造を反映した地震動評価手法の高度化に資するため、平成22年度から柏崎地域のテストサイト（図2.12）で実施した深部地震動観測システムプロジェクトにより得られた地下構造データ及び地震動データに関する総合解析を行い、深部地震動観測と物理探査による総合的な地下構造の調査手法及びモデル化手法を提案した^(参22)。

はじめに、柏崎サイト近傍及び周辺広域地域の地下深部の構造を詳細に把握するため、当該プロジェクトにより取得された水平アレー地震動観測、微動アレー探査、重力探査、反射法・屈折法地震探査ほかによる総合調査・探査データを使用し、複数のデータを同時に整合的に説明できるモデルを推定する逆解析法（ジョイントインバージョン法）により、地震基盤に至る高精度な三次元S波速度構造モデル「JNES2013Aモデル」及び「JNES2013Bモデル」を構築した（図2.13）。「JNES2013Aモデル」は各S波速度層内の水平方向に不均一な速度構造を有し、一方、「JNES2013Bモデル」は各S波速度層内で水平方向に一定（均質）な速度構造を有する。なお、テストサイトにおける既往モデルとして、2007年新潟県中越沖地震の地震動評価に資することを目的に、過年度の研究においてジョイントインバージョンを用いない従来法による三次元S波速度構造モデル「JNES2007モデル」を構築している（図2.13）。同モデルは、主にいくつかの既存のボーリングデータと反射法地震探査プロファイルに基づいており、各S波速度層内で水平方向に一定（均質）な速度構造を有する。本研究では、各種調査・探査データのフォワード解析により、先に構築したそれぞれの三次元地下構造モデルの妥当性を確認するとともに、深部地震動観測と物理探査による総合的な地下構造の調査手法及びモデル化手法の適用性を確認した。

次に、三次元地下構造モデルの不確かさが地震動評価に与える影響を評価するため、2012年6月28日福島県東方沖の地震（Mj5.2；Eq1（震央距離232.9km））、2012年10月18日新潟県中部の地震（Mj4.2；Eq2（震央距離36.5km））及び2012年7月26日新潟県中部の地震（Mj2.2；Eq3（震央距離1.9km））の3地震を対象に（図2.14）、先の三種類の地下構造モデルを用いて差分法による三次元地震動シミュレーションを実施した。本研究では、3地震の地震規模に相当する震源の大きさに対して震源距離が十分に大きいことから、各地震を点源として想定した。

三次元地震動シミュレーションの際、上記3種類の地下構造モデルと防災科学技術研究所による「全国一次地下構造モデル（暫定版）」をそれぞれ接合し、統合地下構造モデルを構築した。S波の減衰定数（ Q_s ）はS波速度（m/s）の1/10で設定し、基盤より浅い地下構

造物の場合において、 $Q_s > 200$ の場合は $Q_s = 200$ として一様な値を採用した。なお、P波の減衰定数 (Q_p) について、 $Q_p = 1.7Q_s$ とした。差分法において、S波速度構造モデルの最小格子間隔と最小S波速度は地震ごとに変更させた。本研究では、鉛直アレー記録5点(5深度)及び水平アレー地震観測点28点(地表)における地震動観測記録と、それぞれ3種類の地下構造モデルによる三次元地震動シミュレーション結果とを対比した(図2.15)。さらに、Anderson (2004) (参²³)の指標に準拠して周期10-8秒、8-6秒、6-4秒、4-2秒、2-1秒、1-0.5秒、0.5-0.2秒の7つの周期帯域ごとに指標値を計算し、各地下構造モデルの精度を定量的に評価した(図2.16)。

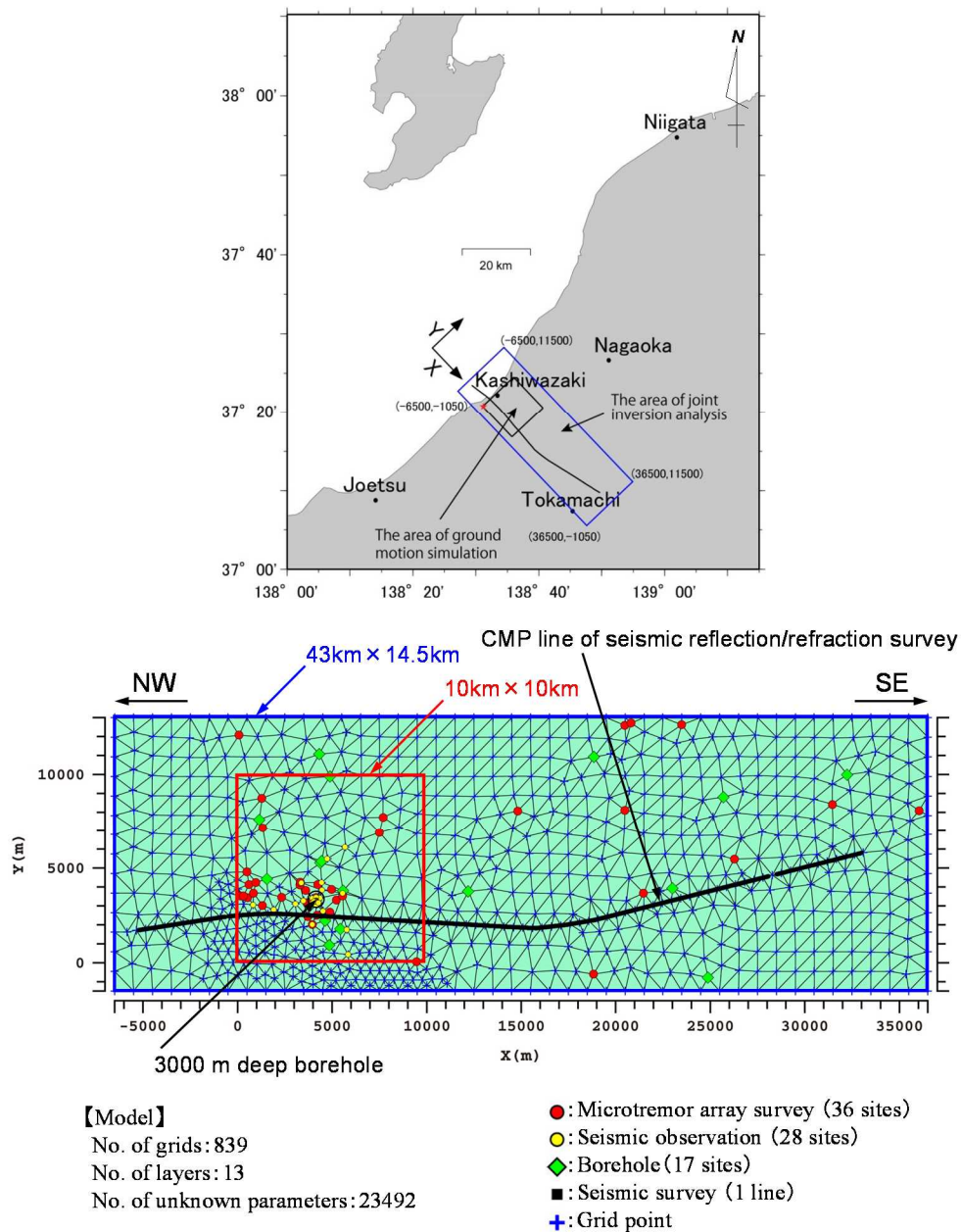
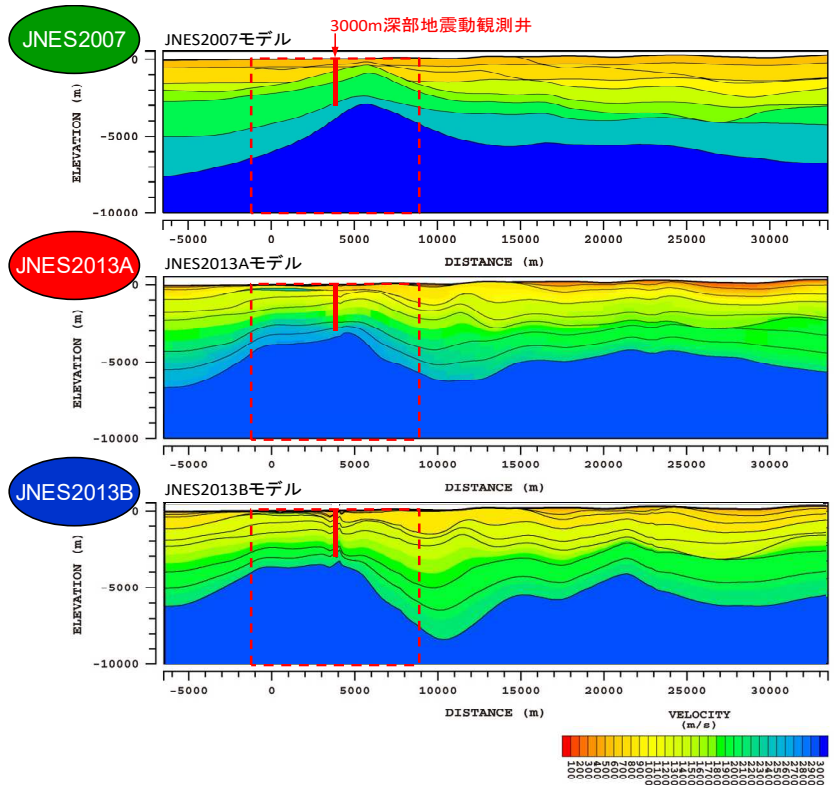


図 2.12 テストサイト及び観測点の分布

Fig.2.12 Location map of test site and distribution of grid points and observation stations.



| | |
|---------------------|---|
| 1) JNES2007 モデル | 2007年新潟県中越沖地震の柏崎刈羽原子力発電所における地震動増幅の原因究明のため、JNESが既往の地下構造データを基に作成したモデル。 |
| 2) JNES2013A モデル | 深部地震動観測システムプロジェクトにおいて得られた各種の地下構造データを用いて、JNES2007モデルの一部領域を改良したモデル。各S波速度層内で水平方向に速度が変化するものとしてジョイントインバージョン解析したモデル。 |
| 3) JNES2013B モデル | 深部地震動観測システムプロジェクトにおいて得られた各種の地下構造データを用いて、JNES2007モデルの一部領域を改良したモデル。各S波速度層内で水平方向に速度が変化しないものとしてジョイントインバージョン解析したモデル。 |

図 2.13 構築した三次元地下構造モデルの比較

Fig.2.13 Comparison of three-dimensional subsurface structure models constructed in this study.

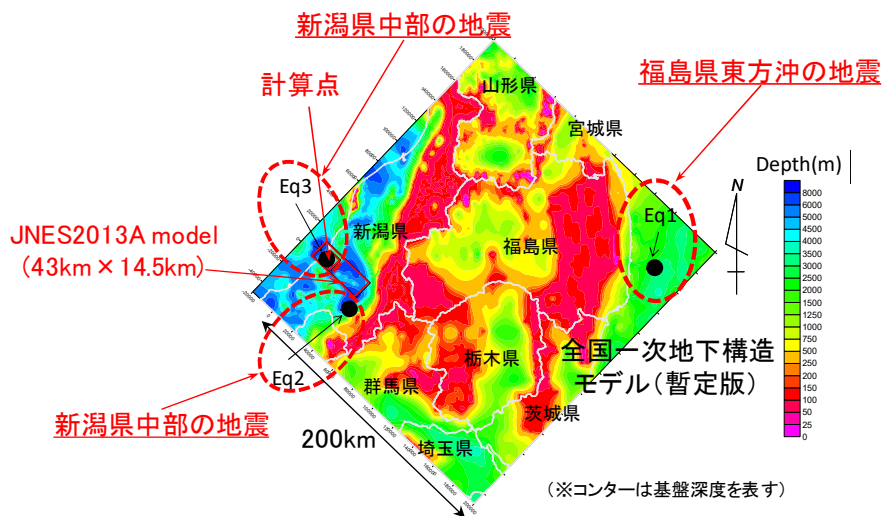


図 2.14 地震の震央分布 (コンターは基盤岩上面深度を描画)

Fig.2.14 Epicenter distribution of earthquakes (contour plots top surface depth of bedrock).

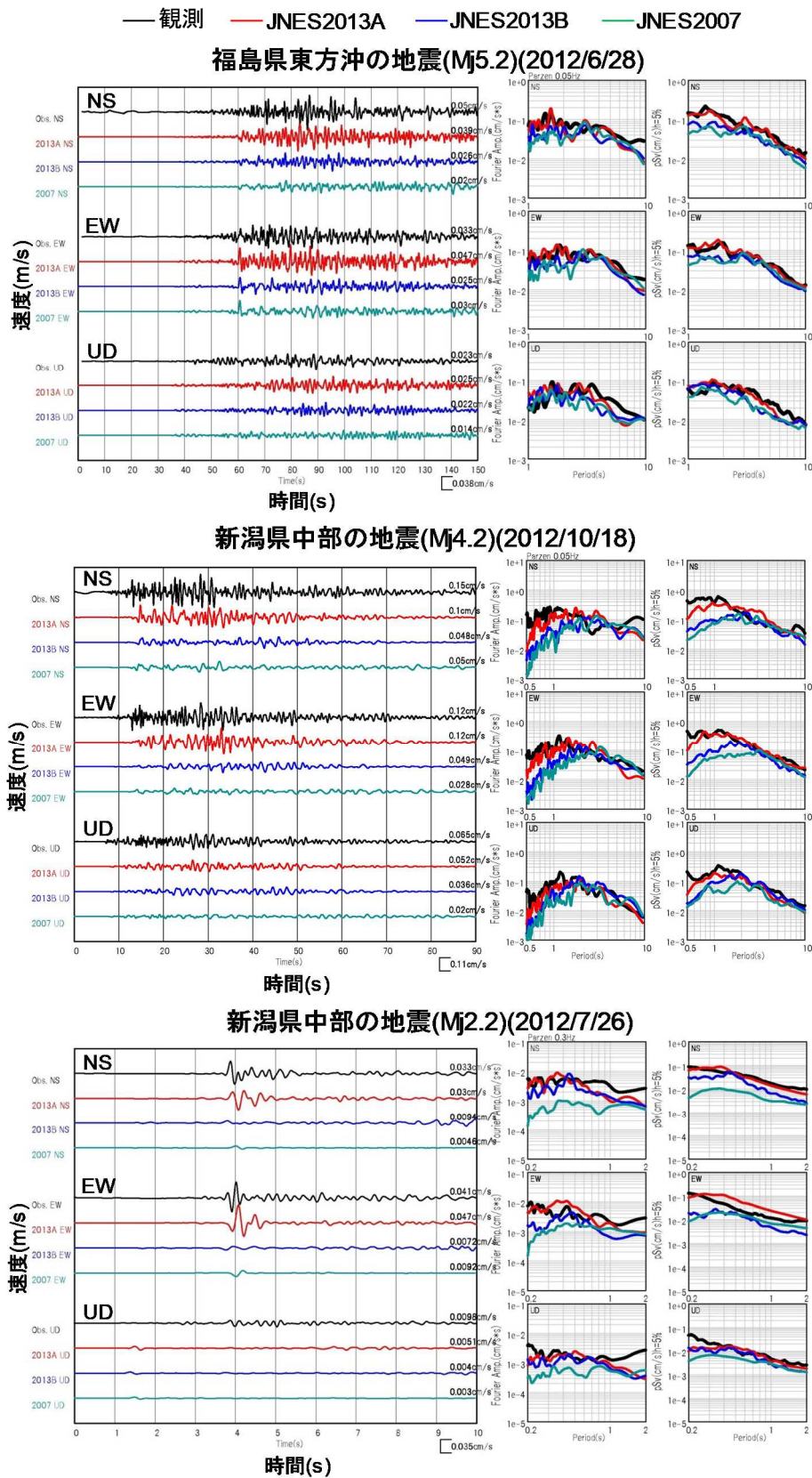


図 2.15 三次元地下構造モデルを用いた地震動シミュレーション結果の例

Fig.2.15 Example of ground motion simulation by using three-dimensional subsurface structure models.

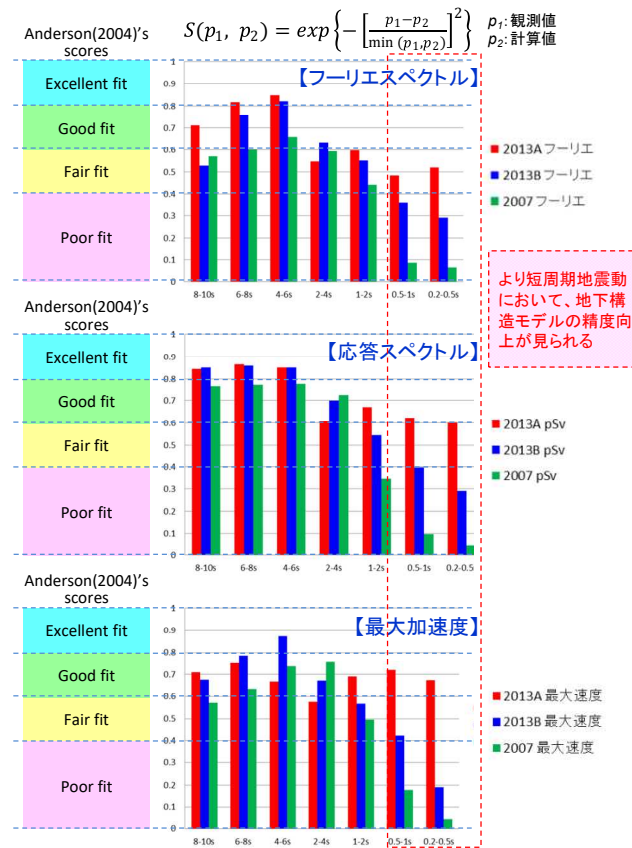


図 2.16 Anderson (2004) 指標に基づく三次元地下構造モデルの精度評価

Fig.2.16 Accuracy evaluation of three-dimensional subsurface structure model based on Anderson (2004)'s scores.

それらの結果、「JNES2013A モデル」及び「JNES2013B モデル」は、周期 2 秒以上で同等の良好なスコアを示すが、「JNES2013A モデル」は周期 1 秒以下でもスコアが高いことが分かった。このことは、短周期帯における地震動を説明するためには、「JNES2013A モデル」のように各 S 波速度層内の水平方向に不均一な速度構造を考慮する必要があることを示唆している。なお、「JNES2007 モデル」もほぼ周期 2 秒以上で約 0.6 以上のスコアを示しているが、周期 1 秒以下では非常に低いスコアとなっている。本研究では、地震動観測記録と三次元地震動シミュレーション結果との対比から、1~0.2 秒の短周期地震動を評価するには地下構造モデルにおいて水平方向の不均質性も考慮する必要があること、地震動評価においては観測点直下あるいは周辺の地下構造の精度の影響が強いことを示し、三次元地下構造モデルの不確かさが地震動評価に与える影響を定量的に把握した。

本研究では、地震動評価のための深部地下構造調査法及び三次元地下構造モデル作成法(手順)を考案するとともに、同手順に基づき「地震動評価のための三次元地下構造モデルの作成手引き」(JNES-RE-2013-2016) (参²²)としてまとめた。それらの成果の一部は、新規制基準の「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」及び「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」(参²⁴)へ反映されている。

2.2.2 硬岩サイト地震観測記録の整備及び地震動の評価

地下構造モデルの設定においては、地下構造の三次元不整形性、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性が適切に評価されている必要がある。本研究では、硬質岩盤における地盤減衰特性の評価手法を整備するため、鳥取県西伯郡（花崗岩地域）の1000m深部地震動観測井（図2.17）において取得された深度300m（S波速度2.8km/s）及び深度1000m（S波速度3.2km/s）の硬質岩盤における観測地震動を分析した。GL/GL-1000m及びGL-300m/GL-1300mにおける鉛直アレー観測記録の重複反射波及び直達波を用いて、PS検層による速度構造を基に地盤同定解析によりS波の減衰定数を同定し、PS検層による減衰定数とあわせて硬質岩盤における地盤減衰特性を詳細に分析した（図2.18）。

その結果、深度1000mにわたる平均の減衰特性は、PS検層でQ値24.5（減衰2.04%）、鉛直アレー観測記録の重複反射波でQ値25.5（減衰1.96%）及び直達波でQ値29.9（減衰1.67%）となり、硬岩サイトの深部地盤において高減衰特性が評価された。PS検層と鉛直アレー観測記録から評価されるS波の減衰特性は、PS検層が適用対象とするおよそ10Hzより高周波数側で互いにほぼ一致することが示され（図2.18）、両手法から評価される減衰特性において信頼性のある同一周波数帯のS波に着目した場合、評価手法の違いによる差はほとんどない。このことは、鉛直アレー観測記録がない場合でも、PS検層を実施していれば地震動評価に必要な地盤の微小ひずみ領域における減衰特性を把握できる可能性を示唆する。

ここで評価されたS波速度構造及び減衰特性を用いて、2016年鳥取県中部の地震(Mj6.6)の地震応答解析を実施し、高い精度で地震動を評価できること、硬岩サイトの深部地盤において高減衰特性となることを示した。本研究では、PS検層と鉛直アレー観測記録に基づく硬質岩盤における地盤減衰特性の評価手法の適用性を確認した（図2.18、図2.19）。

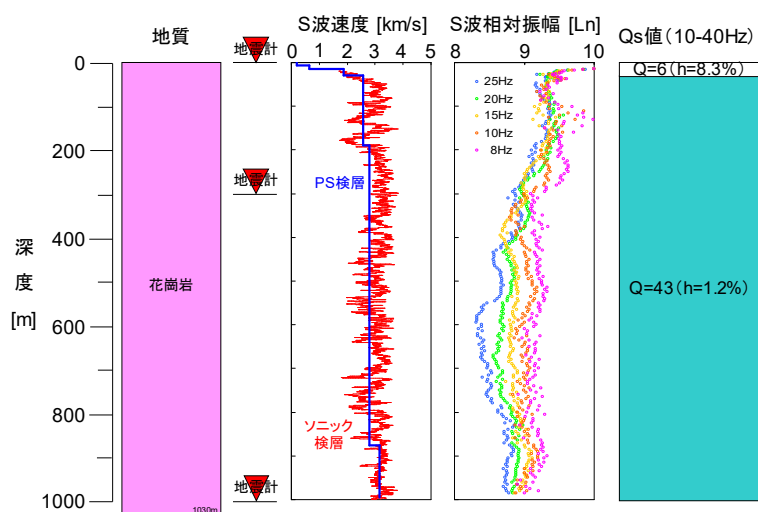


図 2.17 1000m 深部地震動観測井の地盤物性

Fig.2.17 Ground physical properties of 1000 m deep seismic observation well.

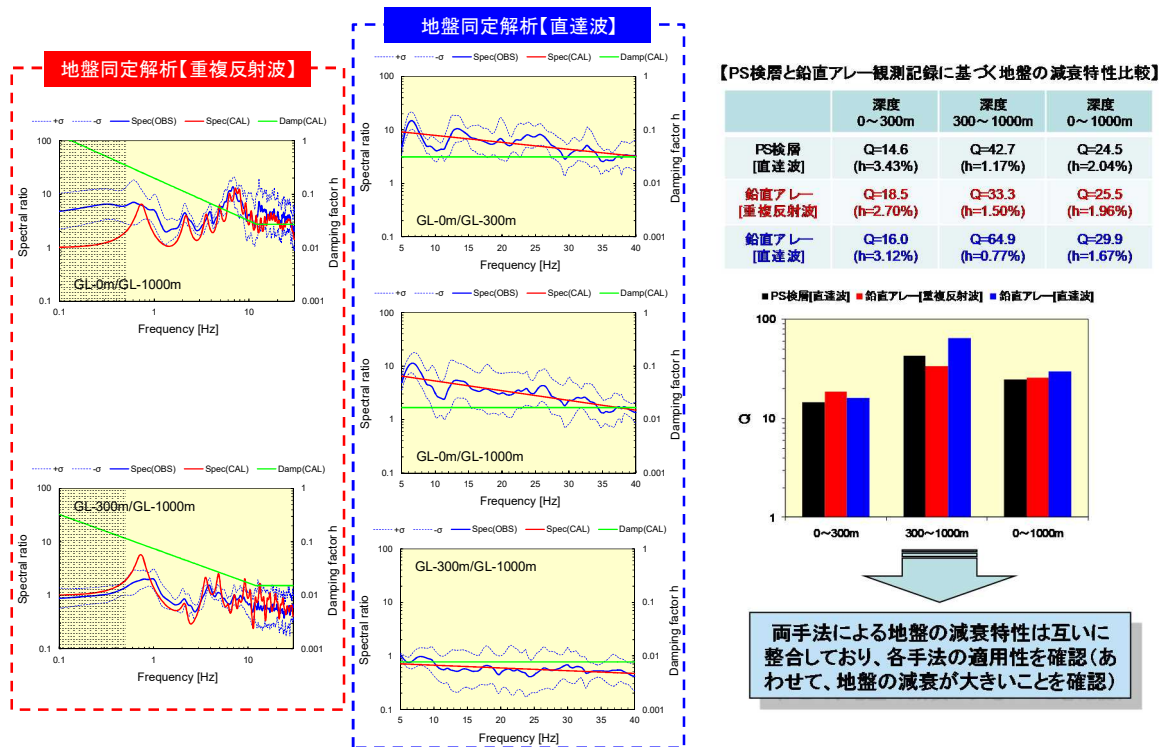


図 2.18 硬質岩盤における地盤減衰特性

Fig.2.18 Attenuation characteristics in the hard rock site.

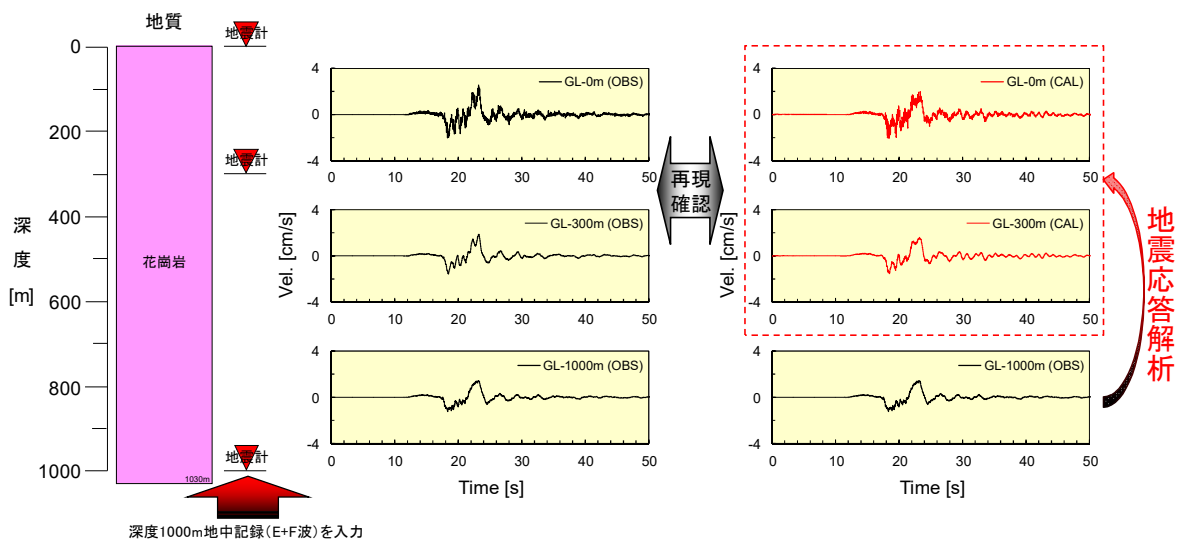


図 2.19 2016年鳥取県中部の地震(Mj6.6)の地震動評価

Fig.2.19 Evaluation of earthquake ground motion of the 2016 Tottori ken Chubu Earthquake (Mj6.6).

2.3 断層変位評価手法の整備

2.3.1 確率論的断層変位評価手法の整備

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（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）^(参25)では、「耐震重要施設は、変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。」とされており、断層破壊や地震活動等に伴う地盤の永久変位の有無を適切に評価することが重要である。ここで、変位とは、将来活動する可能性のある断層等が活動することにより、地盤に与えるずれをいう。また、国際的な動向として、地表における断層変位に対して確率論的手法を用いた評価が注目されている。本研究では、国内内陸地殻内地震による断層変位データに対して、地表に現れたずれを地中の震源断層と直接的な関連のある主断層及びそれらから離れた場所に生じた副断層に分類・認定を行った。その上で、観測データの統計的な処理を行い、断層変位の大きさを評価するための暫定的な算出式（以下、「算出式」という）を検討した^(参26, 27)。算出式は、横ずれ断層及び逆断層のタイプ別となっており、主断層については断層に沿った断層中央からの任意の位置、副断層については主断層に対し直交方向の任意の位置における断層変位の大きさを評価するものである。その結果、本研究の算出式（図 2.20(a)及び(b)の緑線）は、逆断層の場合、国内データの数が限られているが、海外の既往研究で提案された式（図 2.20(b)の茶線）と比べ、有意な差が見られない、横ずれ断層の場合、特に断層端部（図 2.20(a) $x/L = 0$ ）付近において、海外の式（図 2.20(a)の茶線）と異なる傾向が認められる。また、熊本地震（横ずれ断層）の地表地震断層の変位分布を本研究で検討した算出式（横ずれ断層）と比べた結果、過去のデータ（図 2.20 の+印）とほぼ同程度の相関関係となっていることを確認した（図 2.20(a)）。

さらに、本研究の算出式及び海外の既往研究で提案された算出式を基に、1995 年兵庫県南部地震（横ずれ断層タイプ）及び 2014 年長野県北部地震（逆断層タイプ）を対象に、確率論的断層変位ハザード解析を実施した。その結果、本研究の算出式による評価の方が断層変位の年超過確率が大きくなった。これは、確率論的断層変位ハザード評価を行うに当たり、異なるデータセットに基づいたそれぞれの算出式の適用性に留意する必要があることを示唆している。また、算出式の検討に当たっては断層変位データが非常に少ないことが課題である。今後、断層変位データの拡充を図っていく必要がある。

なお、本研究は、独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究（平成 24～25 年度 平成 24 年度断層変位ハザードの評価手法の検討、受託先：一般財団法人 地域地盤環境研究所）及び原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成 26 年度 断層変位及び断層極近傍地震動の評価手法の検討、及び平成 27～28 年度 断層変位評価手法の検討、受託先：株式会社構造計画研究所）事業により実施した。

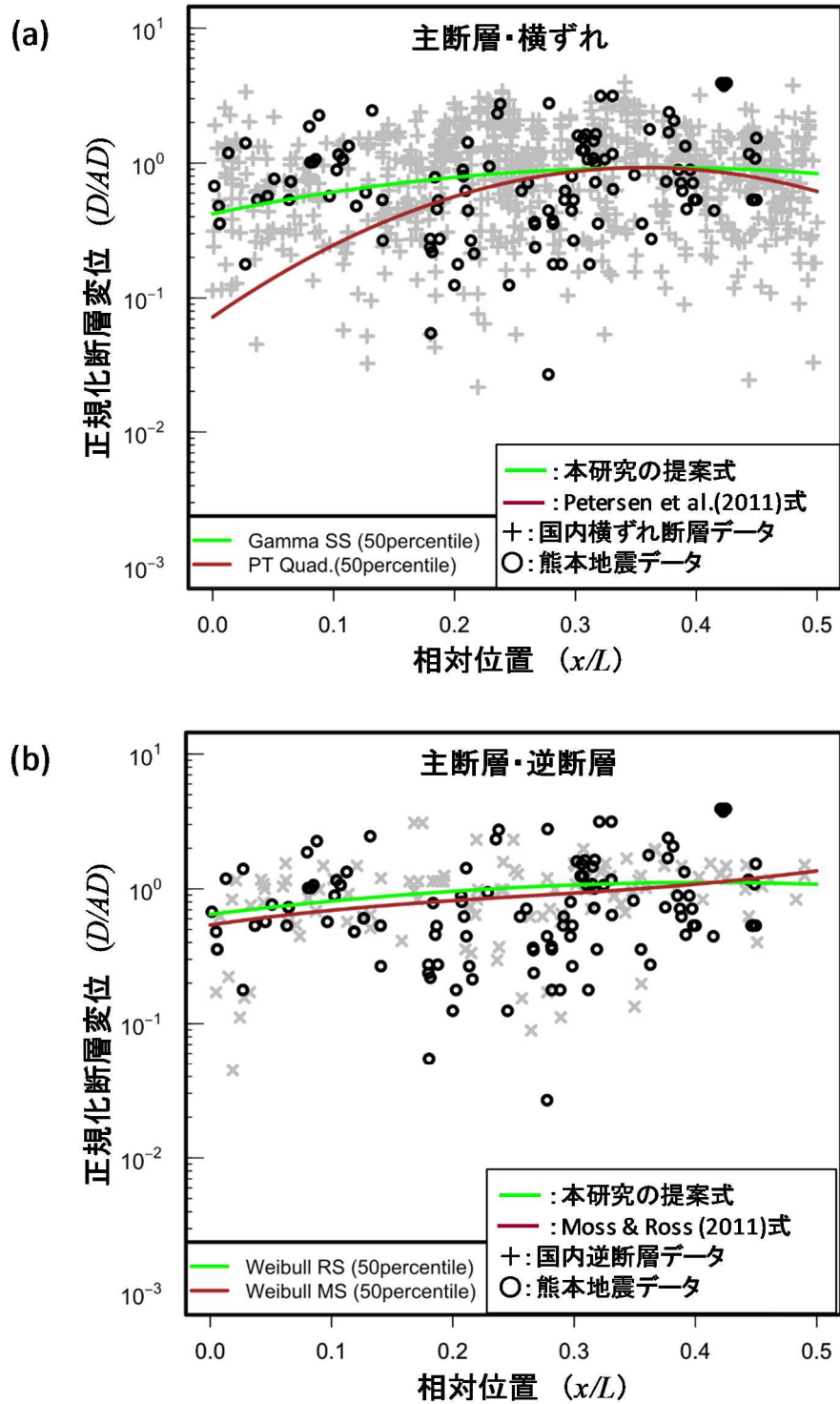


図 2.20 断層変位の算出式の比較

(D/AD : 変位量/平均変位量、 x/L : 地表地震断層上での距離/地表地震断層長)

Fig.2.20 Comparison of fault displacement prediction equations.

(D/AD : Displacement/Average Displacement, x/L : Distance on the coseismic surface rupture/Length of coseismic surface rupture.

2.3.2 決定論的断層変位評価手法の整備

断層変位の生成の有無及びその変位量は場所によって大きく異なるが、特に副断層の変位量は、主断層の特性（主断層の傾斜角や変位量等）や変位の出現地点における地盤物性が大きく影響していると考えられる。そこで、本研究では、断層変位生成メカニズムを分析するため、物理モデルを用いた地表までの断層破壊の数値解析手法に基づいた決定論的断層変位評価手法について検討した。はじめに従来の強震動予測手法における特性化震源モデルと整合した震源モデルを構築し、それに基づく差分法を用いた動力的破壊シミュレーションを実施した。次に、動力的破壊シミュレーション結果より得られる浅部領域の変位分布を入力として、浅部を詳細にモデル化した有限要素法及び粒子法を用いた数値解析を行うことにより地表における断層変位を評価する手法の枠組みを検討した^(参28, 29)。

具体的には、まず、逆断層タイプの1999年集集地震（台湾）を対象に、周期0.1秒から10秒程度の断層周辺の強震動を概ね再現できる特性化震源モデルを構築した。さらにこれを与条件とした動力的破壊シミュレーションを実施し、周期10秒以上の加速度波形及び変位波形を概ね再現できることを確認した。

さらに、断層変位数値解析を実施するため、同地震の既往研究結果^(参30)（図2.21(a)）を参考に、地表地震断層から東西方向に約35km、地表から深さ4kmの範囲にある上盤部分を解析領域とし、地形や地層構造、地盤の非線形等を考慮した計算モデルを設けた（図2.21(b)）。表2.4に図2.21(b)で表記した各層の地盤物性値を示す。また、前述の動力的破壊シミュレーションで得られた変位分布を境界条件とし、有限要素法及び粒子法を組み合わせた数値シミュレーションを実施した。その結果、主断層の東側に観測された断層崖（図2.22(c)の逆黒三角形▼）と近い位置で表層に破壊領域の発生（図2.22(b)の赤いメッシュ）が確認された。しかしながら、観測された断層変位量の再現性については、今後更なる検討を行うことが望ましい。

なお、本研究は、独立行政法人原子力安全基盤機構の委託研究（平成25年度 数値解析を用いた断層変位評価手法の検討、受託先：株式会社構造計画研究所）及び原子力規制庁の原子力施設等防災対策等委託費（平成26年度 断層変位及び断層極近傍地震動の評価手法の検討、及び平成27～28年度 断層変位評価手法の検討、受託先：株式会社構造計画研究所）事業により実施した。

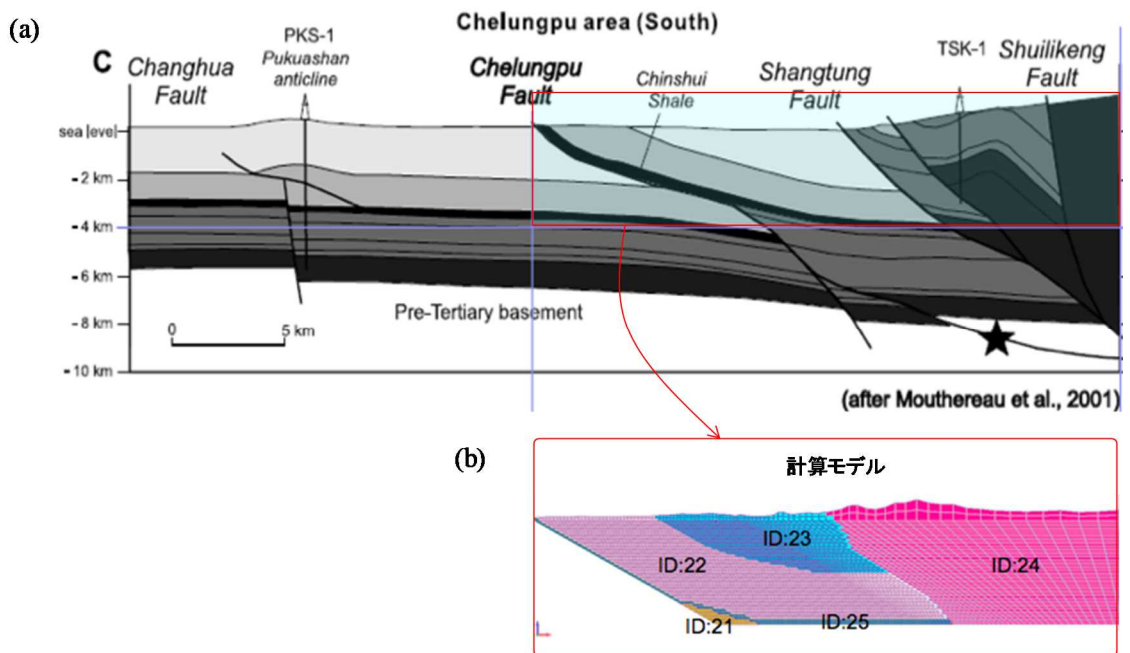


図 2.21 数値解析に用いる計算モデル
 Fig.2.21 Development of the numerical simulation model.

表 2.4 地盤物性値一覧

Table 2.4 List of physical properties of the ground structure

| 物性 ID | | S 波速度(m/s) | 密度(Kg/m ³) | ポアソン比 | せん断剛性(N/m ²) |
|-------|--|------------|------------------------|-------|--------------------------|
| 23 | | 1,550 | 2,000 | 0.3 | 4.81e+9 |
| 22 | | 1,700 | 2,050 | 0.3 | 5.92e+9 |
| 25 | | 1,550 | 2,000 | 0.3 | 4.81e+9 |
| 21 | | 2,500 | 2,300 | 0.3 | 1.44e+10 |
| 24 | | 2,500 | 2,300 | 0.3 | 1.44e+10 |

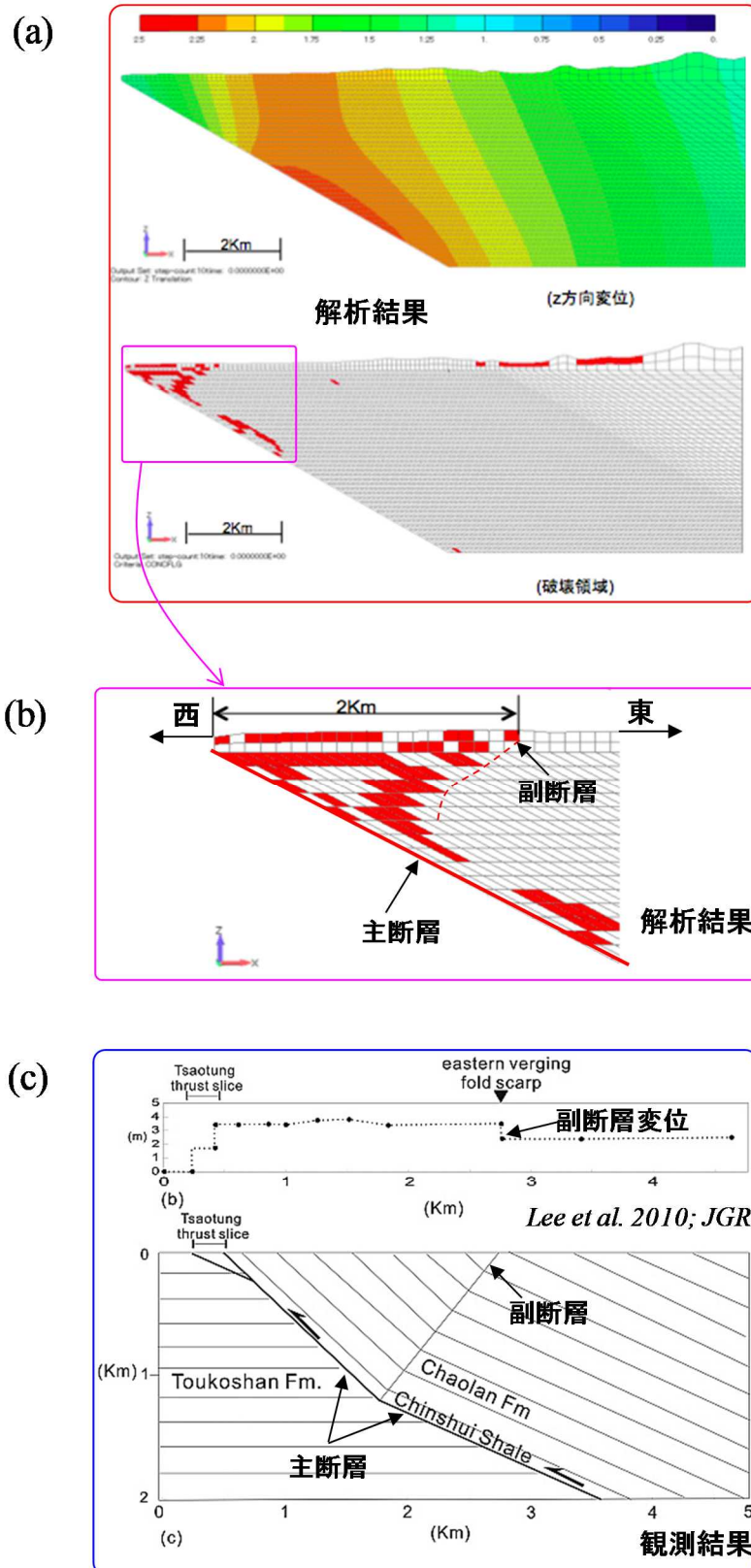


図 2.22 解析結果及び観測結果の比較

Fig.2.22 Comparison of simulation and observation results.

2.4 震源を特定せず策定する地震動の評価手法の整備

2.4.1 強震時の地表観測記録に基づく解放基盤における地震動の評価

新規制基準に基づく「震源を特定せず策定する地震動」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収集し、これら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される必要がある。この場合、地震動評価において大加速度の観測記録が扱われることから、必要に応じて地盤非線形性を考慮した解析を要するなど、解放基盤での地震動を評価するに当たっては幾つかの技術項目について高度化する必要がある。

本研究では、震源を特定せず策定する地震動の評価法の高度化に向けて、強震時の地表観測記録に基づく解放基盤における水平方向の地震動評価手法を検討した。評価手法は、地震動 H/V スペクトルを用いて、①弱震記録に基づく地盤同定解析、②強震記録に基づく地盤同定解析及び③強震記録に基づくはぎとり解析の三つのステップから、解放基盤における強震時の水平方向地震動を評価するものである。ここでは、拡散波動場理論に基づく地震動 H/V スペクトルを用い、同理論の応用から強震時と弱震時の水平動スペクトル比（強震／弱震スペクトル比）を定義して、両スペクトルの逆解析により線形地盤モデル及び非線形地盤モデルを推定した。強震記録を用いた地盤同定解析では、逆解析において対象層の地盤材料の動的変形特性、すなわちせん断ひずみに応じたせん断定数（S 波速度）と減衰定数を求めた。

評価手法の適用性を確認するため、地質・地盤情報及び地震動記録が豊富な第四紀地盤テストフィールドにおいて、強震時の地表観測記録から解放基盤相当（深度 300m、S 波速度 500m/s 相当の硬質地盤）における地震動を評価した（図 2.23、図 2.24）。その結果、十分な地質・地盤情報に基づき評価された地盤モデルを用いた場合、得られる解放基盤相当における地震動は観測地震動を良好に再現しており、新たな地震動評価手法として有効性が明らかになった。同成果に基づき「震源を特定せず策定する地震動に係る評価手引き（JNES-RE-2013-2045）」^(参31)を作成した。

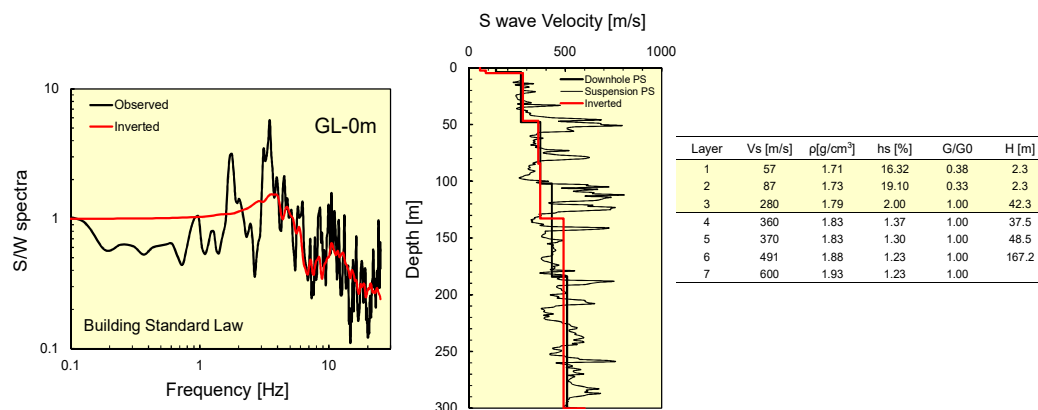


図 2.23 強震／弱震スペクトル比に基づく地盤同定解析の例

Fig.2.23 Example of ground identification analysis based on the strong-to-weak motion spectral ratio.

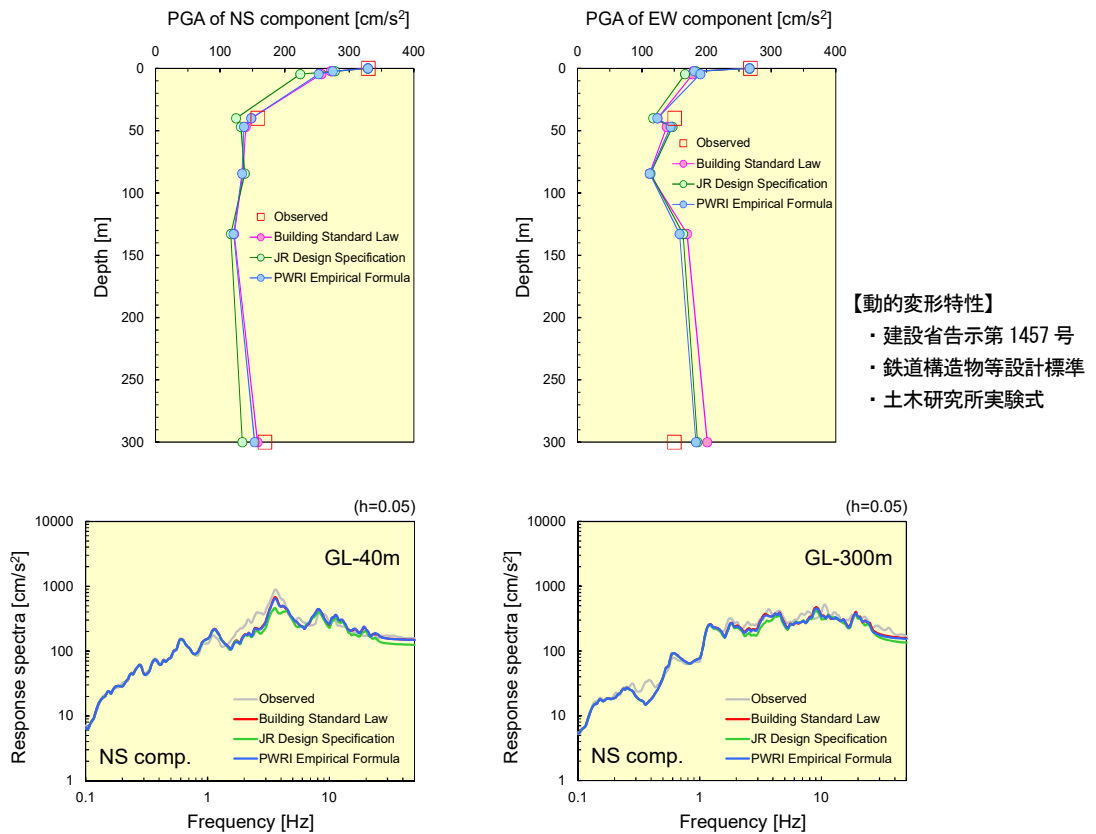


図 2.24 強震記録に基づく地震動評価

Fig.2.24 Evaluation of ground motion based on the strong motion records.

2.4.2 確率論的評価手法の検討

震源を特定せず策定する地震動に関して、既往研究において、地域性等を考慮し地表に地震断層が現れない地震の震源をモンテカルロ法により生成し、断層モデル法に基づく地震動評価を行い、超過確率別スペクトルを算定する確率論的評価手法を提案した^(参32)。本研究では、地表に地震断層が現れない可能性のある $M_{jma}6.8$ の地震を対象に、断層モデル法における特性化震源モデルの各パラメータを変化させ地震動評価を行い、パラメータの不確かさによる影響を定量的に分析した。さらに、これらのパラメータの内、影響度の大きい応力降下量及び高周波数遮断特性 (f_{max}) に対して、断層モデル法に基づいた地震動のばらつきを距離減衰式による地震動のばらつきと整合するパラメータの組み合わせを検討し、断層モデル法に基づく震源を特定せず策定する地震動の確率論的評価手法の高度化を図った。

3. 結論

(1) 成果の要点

本プロジェクトでは、原子力安全のための取組及び原子力安全規制の継続的改善に資するよう、平成 24 年度から平成 28 年度まで実施期間において地震動評価技術に関する安全研究を実施した。各研究実施項目において以下の成果を得た。

① 地震動評価における不確かさの評価手法の整備

国内内陸地殻内地震を対象に、重力異常等の地下構造情報を組み合わせた分析により地中の断層長さの推定を行い、震源逆解析から求められた震源断層長さとの比較を行い、両者の相関関係を確認した。さらに、2016 年熊本地震等の内陸地殻内地震を対象に、強震動記録を用いた震源破壊過程の解析並びに強震動生成域モデルの構築及びそれを用いた強震動再現解析を実施し、震源断層パラメータに関する既存データとの整合性及び不確かさに関する知見を蓄積した。

② サイト特性の評価手法の整備

三次元地下構造モデルを高精度化するとともに、およそ 0.2 秒までの短周期地震動の伝播特性に影響を及ぼす地震基盤を含む解放基盤から地表面までのサイト特性評価手法を高度化するための地下構造の調査手法及びモデル化手法を考案した。さらに、PS 検層と鉛直アレー観測記録に基づく硬質岩盤における地盤減衰特性の評価手法を検討し、鉛直アレー観測記録がない場合でも PS 検層により地震動評価に必要な地盤の微小ひずみ領域における減衰特性を把握できることを示した。

③ 断層変位の評価手法の整備

確率論的手法として、国内の観測データを収集・分析し、横ずれ断層及び逆断層の断層変位の大きさの算出式を検討し、断層タイプ別の断層変位評価に関する知見を蓄積した。また、決定論的手法として、動力学シミュレーション結果の活用及び FEM と粒子法による数値解析を用いることで、断層変位及び地震動を両方説明できる評価手法の枠組みを検討した。その上で、確率論的手法及び決定論的手法それぞれの課題を整理した。

④ 震源を特定せず策定する地震動の評価手法の整備

地盤非線形性を考慮した地盤同定解析及びはざとり解析の手法を検討し、地表の観測地震動から解放基盤面上の地震動算定手法を提案するとともに、断層モデルの主要パラメータの不確かさが地震動評価に及ぼす影響を評価し、震源を特定しにくい地震を対象とした確率論的評価手法を提案した。

(2) 目標の達成状況及び成果の活用等

上記のとおり、平成 24 年度から平成 28 年度までの実施期間の目的を全て達成した。本研究で得られた基準地震動の策定に係る地下構造の詳細調査に関する成果については、下記審査ガイドへ反映し、規制基準に基づく既設原子力発電所の適合性審査等において活用された。

- ・敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド、平成 25 年 6 月
- ・基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド、平成 25 年 6 月

なお、熊本地震に関する研究成果の一部をまとめ、下記原子力規制委員会へ報告した。

- ・第 6 回原子力規制委員会 熊本地震の分析について、資料 2、平成 29 年 4 月 26 日

参考文献

- (参 1) 宮腰研・入倉孝次郎・釜江克宏、強震動記録を用いた震源インバージョンに基づく国内の内陸地殻内地震の震源パラメータのスケーリング則の再検討、日本地震工学会論文集、第 15 巻、第 7 号、pp.141-156、平成 27 年 12 月
- (参 2) 吉田邦一・染井一寛・宮腰研・凌甦群、2016 年熊本地震の震源近傍強震観測点における微動探査、物理探査学会第 135 回（平成 28 年度秋季）、平成 28 年 10 月
- (参 3) 吉田邦一・染井一寛・宮腰研、近地強震記録の逆解析による 2016 年熊本地震の 3 地震の震源過程、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、平成 28 年 5 月
- (参 4) Yoshida, K., K. Miyakoshi, K. Somei, and K. Irikura, Source process of the 2016 Kumamoto earthquake (Mj7.3) inferred from kinematic inversion of strong-motion records, *Earth, Planets and Space*, 69:64 DOI 10.1186/s40623-017-0649-8, 平成 29 年 5 月
- (参 5) 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, No. 1, pp.59-80, 平成 11 年 1 月
- (参 6) 染井一寛・宮腰研・吉田邦一・西村利光、経験的グリーン関数法に基づく 2016 年熊本地震の震源モデルの推定 -4 月 14 日 Mjma6.5 の地震と 4 月 16 日 Mjma7.3 の地震-、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、平成 28 年 5 月
- (参 7) 染井一寛・宮腰研・吉田邦一、経験的グリーン関数法を用いた 2016 年熊本地震の地震動シミュレーション、日本地震学会 2016 年秋季大会、平成 28 年 10 月
- (参 8) 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、第 110 巻、pp.849-875、平成 13 年 7 月
- (参 9) Murotani, S., S. Matsushima, T. Azuma, K. Irikura, and S. Kitagawa, Scaling relations of source parameters of earthquakes occurring on inland crustal mega-fault systems, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, No. 5, pp. 1371-1381, 平成 27 年 5 月
- (参 10) 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手法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 545 号、pp. 51-62、平成 13 年 7 月
- (参 11) 入倉孝次郎・釜江克宏、1948 年福井地震の強震動、地震 2、第 52 巻、pp.129-150、平成 11 年 7 月
- (参 12) 加藤研一・武村雅之・八代和彦、強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性、地震 2、第 51 巻、pp.123-138、平成 10 年 5 月

- (参 13) Papageorgiou, A. S., On two characteristic frequencies of acceleration spectra: Patch corner frequency and f_{max} , Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 78, No. 2, pp. 509-529, 平成 10 年 4 月
- (参 14) 釜江克宏、1946 年南海地震のシミュレーション、日本建築学会、第 24 回地盤震動シンポジウム、pp. 81-90、平成 8 年 10 月
- (参 15) 釜江克宏・入倉孝次郎、1995 年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強振動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第 500 号、pp. 29-36、平成 9 年 10 月
- (参 16) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長、地域的な震源スケ-リング則を用いた大地震(M7 級)のための設計用地震動予測、日本建築学会構造系論文報告、第 416 号、pp.57-70、平成 2 年 10 月
- (参 17) 鶴来雅人・入倉孝次郎・釜江克宏、 κ を用いた高周波数領域におけるスペクトル低減特性に関する検討 ～地殻内地震～、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、平成 28 年 5 月
- (参 18) 宮腰研・釜江克宏・入倉孝次郎、強震動生成領域におけるストレス・パラメータの深さ依存性に関する検討、日本地震学会 2016 年秋季大会、平成 28 年 10 月
- (参 19) 吉田邦一・宮腰研、ピークモーメントレート分布を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震の特性化震源モデル、日本地球惑星科学連合大会、平成 25 年 5 月
- (参 20) Luo, Y., J.P. Ampuero, K. Miyakoshi, and K. Irikura, Surface rupture effects on earthquake moment-area scaling relations, Pure and Applied Geophysics, Vol. 174, No. 9, pp.3331-3342, 平成 29 年 9 月
- (参 21) Galvez, P., P. Somerville, J. P. Ampuero, A. Petukhin, and Y. Luo, Characteristics of strong ground motion generation areas by fully dynamic earthquake cycles, American Geophysical Union, San Francisco, 平成 28 年 12 月
- (参 22) 独立行政法人原子力安全基盤機構、地震動評価のための三次元地下構造モデルの作成手引き、JNES-RE-2013-2016、平成 25 年 11 月
- (参 23) Anderson, J., Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, paper 243. Vancouver, B.C., Canada, 1-6 August 2004, Earthquake Engineering Research, 平成 16 年 8 月
- (参 24) 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、平成 25 年 6 月
- (参 25) 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（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）、平成 25 年 6 月

- (参 26) Kitada, N., N. Inoue, and M. Tonagi, Study on the evaluation method for fault displacement: probabilistic approach based on Japanese earthquake rupture data -principal fault displacements, American Geophysical Union, San Francisco, 平成 28 年 12 月
- (参 27) Inoue, N., N. Kitada, and M. Tonagi, Study on the evaluation method for fault displacement: probabilistic approach based on Japanese earthquake rupture data -distributed fault displacements, American Geophysical Union, San Francisco, 平成 28 年 12 月
- (参 28) Dalguer, L., H. Miyake, K. Irikura, and H. Wu, Stress drop inferred from dynamic rupture simulations consistent with Moment-Rupture area empirical scaling models: Effects of weak shallow zone, American Geophysical Union, San Francisco, 平成 28 年 12 月
- (参 29) Tonagi, M., T. Takahama¹, Y. Matsumoto¹, N. Inoue, K. Irikura, and L. Dalguer, Study on the evaluation method for fault displacement based on characterized source model, American Geophysical Union, San Francisco, 平成 28 年 12 月
- (参 30) Lee, J. and Y. Chan, Structure of the 1999 Chi-Chi earthquake rupture and interaction of thrust faults in the active fold belt of western Taiwan, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 31, No. 3, pp.226–239, 平成 19 年 11 月
- (参 31) 小林源裕・杉野英治・堤英明・蛭澤勝三、震源を特定せず策定する地震動に係る評価手引き、JNES-RE-2013-2045、平成 26 年 2 月
- (参 32) 堤英明・呉長江・藤田雅俊・道口陽子、基準地震動の超過確率評価に係わる技術の整備、安全研究年報（平成 22 年度）、JNES-RE-2011-0001、pp.65-74、平成 23 年 9 月

「地震動評価技術の整備」の執筆者

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 主任技術研究調査官

小林 源裕 主任技術研究調査官

菅谷 勝則 技術研究調査官