

地震動評価の精度向上に関する研究

事前評価 説明資料

令和5年11月

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

目次

1. 背景
2. 目的
3. 研究の概要
4. 研究計画(行程表)

1. 背景

- 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、超過確率を参照した上で、基準地震動を策定することを求めている。
- 原子力規制検査においてはリスク情報の活用が進みつつあるため、確率論的リスク評価の構成要素の1つである確率論的地震ハザード評価の精度向上が重要となる。

(1) 震源を特定せず策定する地震動の評価

- 規制基準では、内陸地殻内地震の震源近傍の観測記録を対象に、「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（Mw6.5程度未満の地震対象）**：
 - 原子力規制委員会が設置した検討チームにおいて「標準応答スペクトル」が策定され、中長期課題が整理された。標準応答スペクトルは令和3年に規制に取り入れられた。
 - これまでは、標準応答スペクトルに係る中長期課題を解決するために、新たな観測記録の収集・追加解析、はざとり解析手法・距離減衰式に係る調査・試検討等を実施し、残された課題を整理した。
 - 課題1-1：上記の中長期課題について引き続き最新知見の蓄積・反映を行うことが重要である。
- **地域性を考慮する地震動（Mw6.5程度以上の地震対象）**：
 - 審査ガイドでは「平成12年鳥取県西部地震」及び「平成20年岩手・宮城内陸地震」を検討対象地震として例示している。
 - 課題1-2：上記2つの地震の一部の観測記録には地形、地盤の非線形等による影響が含まれているため、原子力サイトのような硬質地盤の解放面における地震動の算定が困難である等の課題がある。

1. 背景(続き)

(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動の評価

- 地震動を評価する際に、支配的な震源断層パラメータを分析した上で、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が求められている。
- これまでは、地震動解析事例の蓄積により、震源断層パラメータの不確かさや既往の経験式との整合性等に関する知見を得た。
- 課題2-1：上記不確かさの取り扱いについて、主要パラメータの不確かさの考慮による手法の保守性の確認に留まっており、全体を俯瞰した上でのモデル設定の合理的な説明が不足している。
⇒ 確率論的な視点から、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。
- 課題2-2：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の中間報告では、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あげられている。
⇒ 断層極近傍の地震動評価に関して、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。

1. 背景(続き)

(3) 確率論的地震ハザード評価

- リスク情報を活用した原子力規制検査においては、事業者が安全性向上評価のために作成した確率論的リスク評価(PRA)モデルの適切性を確認するが、様々な内部事象及び外部事象(地震を含む)を考慮したPRAの実施手法は、必ずしも実用に資するレベルに到達していない。
- 上記を踏まえ、地震に対するPRA実施手法の構成要素である確率論的地震ハザード解析(PSHA)手法については、以下のような検討を行うことが重要となる。
 - 地震発生モデル、地震動特性等における不確かさを適切に評価し評価手法の信頼性向上を図る。
 - 将来的に確認ガイドの改正等を行い、原子力規制検査や安全性向上評価の高度化に資する。
- 課題3-1：これまでに、活断層による地震を対象に、従来の同じ規模の地震が繰り返し発生する固有地震モデルではなく、固有規模に不確かさを考慮した地震発生モデルについて調査・解析を実施した。
⇒ 以下について課題があることが分かった。
 - 活断層における固有の地震規模よりも一回り小さい地震のモデル化上の取り扱い。
 - 震源を予め特定しにくい地震等の領域震源として扱う地震のモデル化方法。
- 課題3-2：PSHAに影響を及ぼす各種不確かさの中では、地震動を推定する距離減衰式のばらつきの寄与が最も顕著であることが知られている。特に現行の距離減衰式は広域かつ複数観測点のデータから帰しており、単一サイトの地震動のばらつきが評価されていない。
⇒ 原子力サイトのような特定地点のPSHAへの適用性について課題がある。

2. 目的

本プロジェクトでは、震源を特定せず策定する地震動及び敷地ごとに震源を特定して策定する地震動の評価手法の調査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手法の改善を行い、地震動評価の精度向上を目的とする。

(1) 震源を特定せず策定する地震動評価の精度向上

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動（ $M_w6.5$ 程度未満）の標準応答スペクトルに関する新たな観測記録の追加解析、最新知見を反映した手法に係る分析等を行うとともに、地域性を考慮する地震動（ $M_w6.5$ 程度以上）の評価手法を調査・整備し、地震動評価の精度向上を図る。

(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価の精度向上

確率論的手法を用いた断層モデル法を調査し、震源パラメータの設定における不確かさの取り扱いに係る知見を蓄積するとともに、地表に地震断層が現れた内陸地殻内地震の地震動検証解析等を実施することにより、敷地ごとに震源を特定して策定する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の精度向上

活断層で発生する地震及び領域震源として扱うような地震の規模・発生頻度等のモデルの設定手法、及び地震動におけるサイト特性等の不確かさの適切な評価方法を調査・分析し、確率論的地震ハザード評価の精度向上を図る。

3. 研究の概要

- (1) 震源を特定せず策定する地震動評価の精度向上
- (2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価の精度向上
- (3) 確率論的地震ハザード評価の精度向上

【令和5年度までの主要成果】

- ・ 検討チームにて「全国共通に考慮すべき地震動」の標準応答スペクトルを令和元年度に策定した（図1）。
- ・ 新たに起きた地震の観測記録（5年間分）の追加解析を行い標準応答スペクトルへの影響を確認した。
- ・ はぎとり解析手法及び距離減衰式に係る調査、試検討等を実施し、その結果と残された課題を整理した。

【課題】

- ・ 【課題1-1】 標準応答スペクトルについて引き続き観測記録の蓄積及び検討手法の精度向上を行うことが重要である。
- ・ 【課題1-2】 「地域性を考慮する地震動」に該当する2つの地震の一部の観測点において、特に地表の観測記録に地形、地盤の非線形等による影響が含まれているため、硬質地盤の解放面における地震動の算定が困難である。

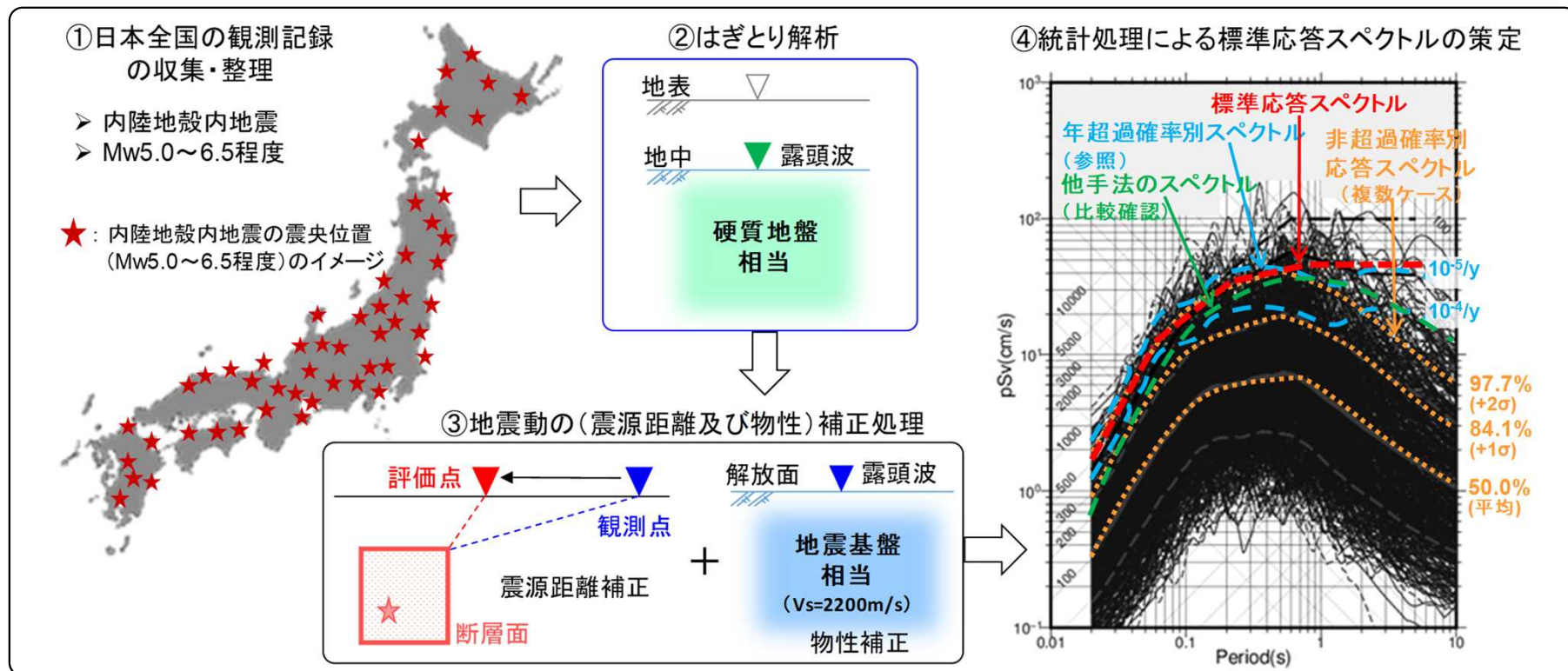


図1 震源を特定せず策定する地震動の標準応答スペクトルの検討

【令和6年度以降の研究内容】

- 【課題1-1】 これまでに対象とした平成12年から令和4年までの期間よりも後に起きた内陸地殻内地震の震源近傍の観測記録の収集・追加解析を継続的に実施して定期的に標準応答スペクトルへの影響確認を行うとともに、はぎとり解析手法及び距離減衰式（補正処理等を使用）に対して最新知見等を反映するための調査、分析、適用解析等を実施し、標準応答スペクトル評価の精度向上を図る（図2）。
- 【課題1-2】 「地域性を考慮する地震動」（Mw6.5程度以上）については、対象地震の地震動観測記録を精査・解析するとともに、適切な観測記録のない地域にも適用可能な確率論的手法等に基づいた地震動評価結果と比較検討を行うことにより、地域性を考慮する地震動の評価手法の適用性を確認する。【新規テーマ】

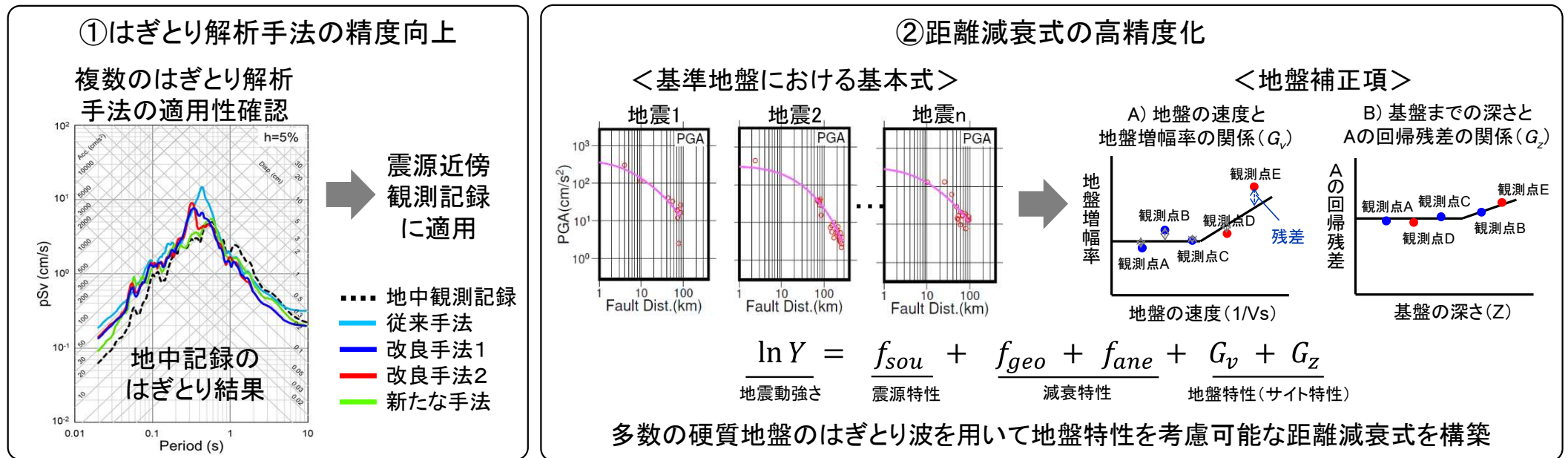


図2 震源を特定せず策定する地震動評価の精度向上

【令和5年度までの主要成果】

- 国内で起きた内陸地殻内地震並びに海外で起きたプレート間地震及び海洋プレート内地震に係る地震動解析を行い、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た。

【課題】

- 【課題2-1】震源モデルの不確かさの取り扱いについて、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うことにより手法の保守性の確認に留まっており、全体を俯瞰した上での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。

【令和6年度以降の研究内容】

- 【課題2-1】震源パラメータの設定における不確かさの評価について調査・分析し、相関性を考慮した複数パラメータの不確かさの確率分布に基づき、不確かさを考慮した断層モデル法による地震動評価を行い、その結果を観測地震動のばらつきと比較・分析することにより、断層モデル法の確率論的地震動ハザード評価への適用手法を整備する (図3)。

【新規テーマ】

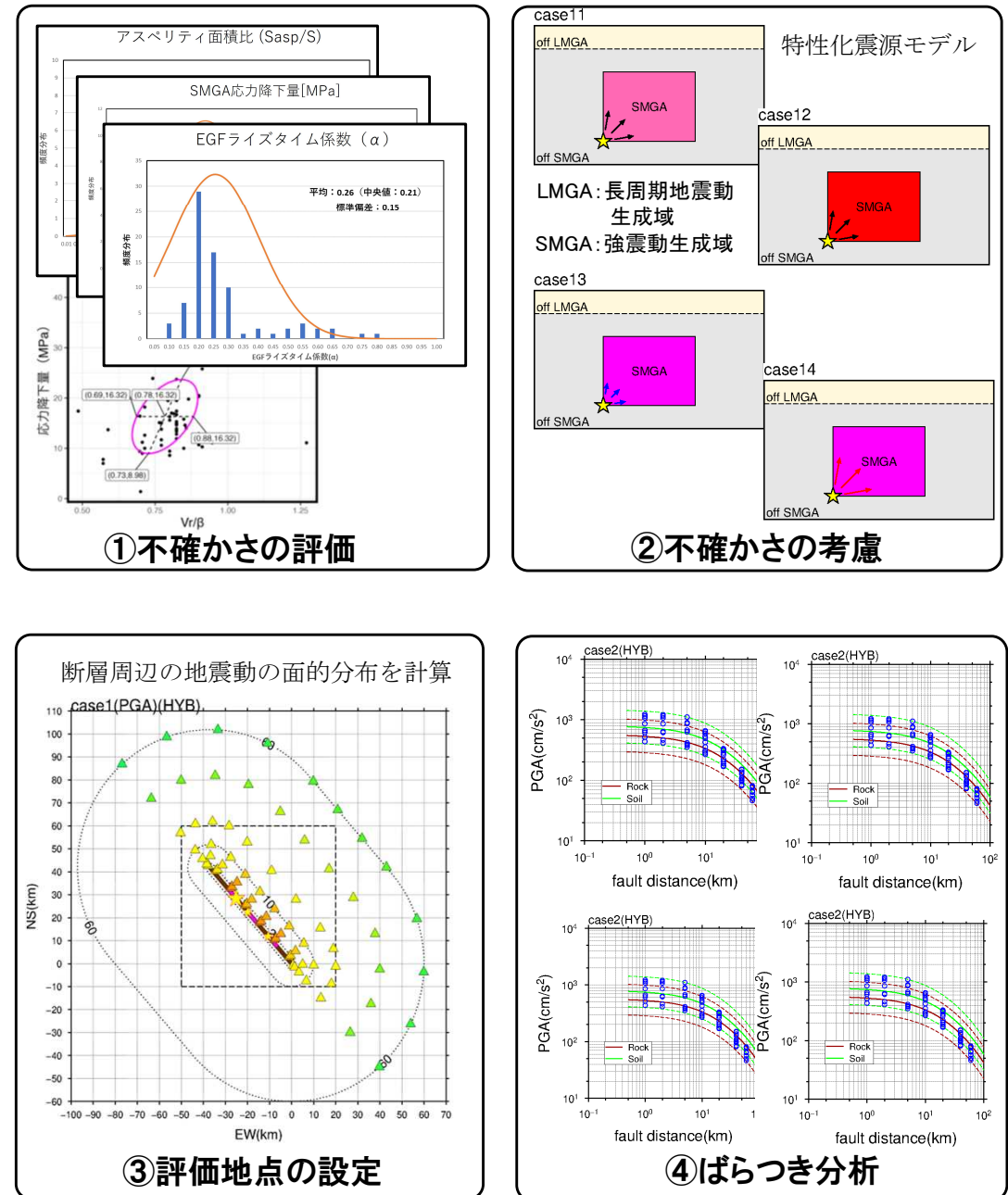


図3 震源パラメータの不確かさの取り扱いに係る調査の流れ

【令和6年度以降の研究内容】（続き）

- 【課題2-2】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が公表した2016年熊本地震の検証の中間報告では、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いる。本研究では、地震調査研究推進本部の動向等を踏まえつつ、地表に地震断層が現れた内陸地殻内地震の地震動検証解析等を実施する（図4）。

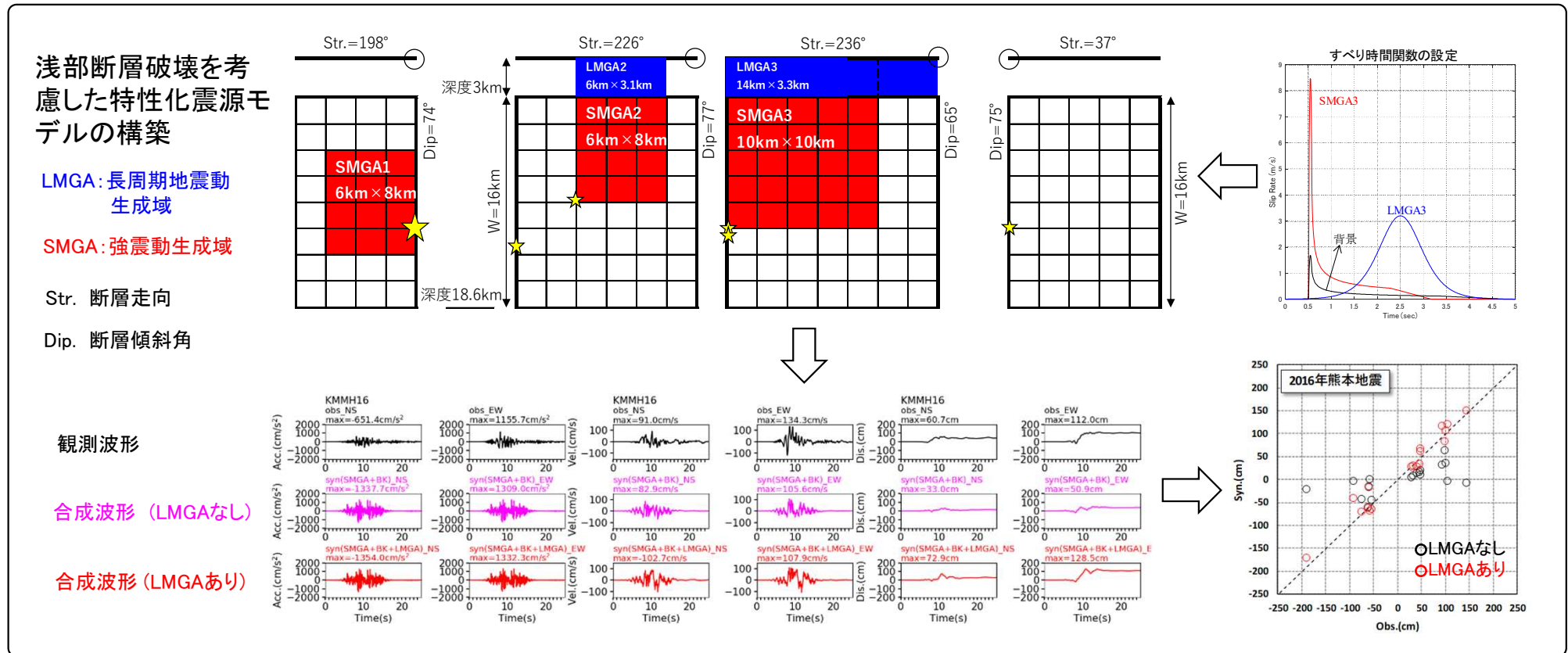


図4 震源極近傍の地震動評価のスキーム

【令和5年度までの主要成果】

- 活断層による地震を対象に、従来の同じ規模の地震が繰り返し発生する固有地震モデルではなく、固有規模に不確かさを考慮した地震発生モデルについて調査・解析し、PSHAへの影響を把握できた。
- 既存の距離減衰式を対象に単一サイトのばらつき評価について調査し、評価手法の知見を蓄積した。

【課題】

- 【課題3-1】活断層で発生する地震について、図5①に示すように固有地震よりも一回り小さい地震も発生しており、モデル化上の取り扱いに課題がある。また、震源を予め特定しにくい地震等の領域震源のモデル化方法についても対象地震や規模の設定等について課題がある。
- 【課題3-2】現行の距離減衰式は広域かつ複数観測点のデータから回帰しており、単一サイトの地震動のばらつきが評価されていないため、原子力サイトのような特定地点のPSHAへの適用性について課題がある。

【令和6年度以降の研究内容】

- 【課題3-1】活断層で発生する固有規模の地震及び一回り小さい地震並びに領域震源として扱うような地震を対象に、発生頻度等の地震発生モデルの設定方法並びに震源モデルを特定震源及び領域震源としてモデル化する際の設定方法について調査・分析を行い、課題抽出、モデルの改善、試解析等を実施する(図5①)。**【新規テーマ】**

【令和6年度以降の研究内容】（続き）

- 【課題3-2】原子力サイトの地盤に適用可能な距離減衰式におけるサイト特性等の不確かさの分析を行う（図5②）。また、本研究での分析結果を反映したPSHAを行い、その影響度合いを分析する（図5③）。

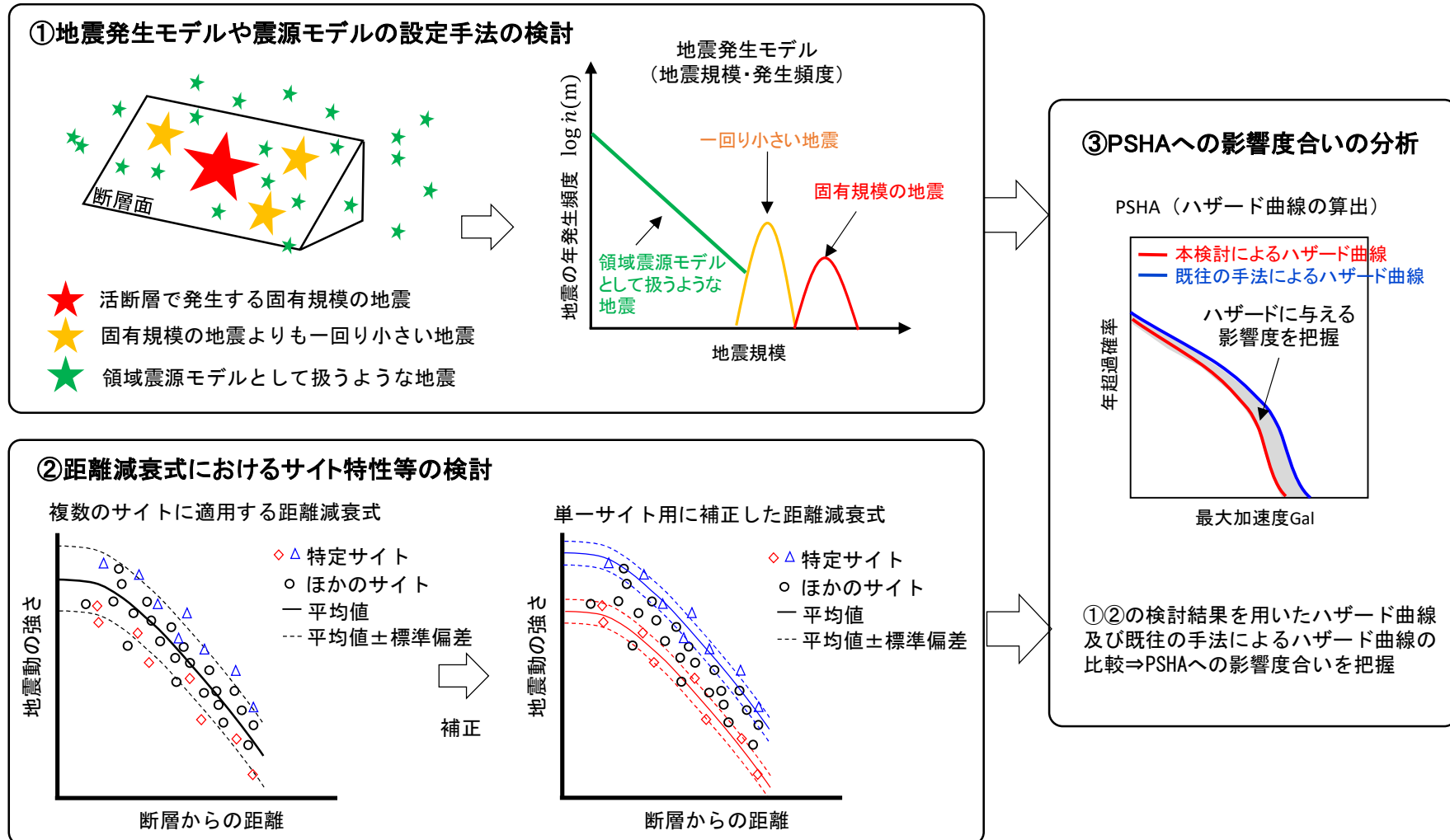


図5 確率論的地震ハザード評価の精度向上

4. 研究計画(行程表)

項目	R6 年度	R7 年度	R8 年度	R9 年度	R10 年度
(1) 震源を特定せず策定する地震動評価の精度向上	<p><全国共通に考慮すべき地震動 (Mw6.5 程度未満)></p> <p>新記録追加解析、適用課題の調査、データ追加整理</p>	<p>新記録追加解析、適用課題の分析、データ整備・分析</p>	<p>新記録追加解析、適用解析、式の高精度化検討</p>	<p>新記録追加解析、影響確認、比較分析</p>	<p>新記録追加解析、まとめ、課題整理 ▽論文投稿、NRA 技術ノート作成</p>
	<p><地域性を考慮する地震動 (Mw6.5 程度以上)></p> <p>記録精査・課題抽出</p>	<p>観測記録解析</p>	<p>地震動評価</p>	<p>比較検討</p>	<p>手法まとめ、課題整理、 ▽論文投稿</p>
(2) 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価の精度向上	<p><震源パラメータの不確かさ></p> <p>不確かさの分析</p>	<p>相関性の分析</p>	<p>地震動解析</p>	<p>ばらつき分析</p>	<p>手法まとめ、課題整理、 ▽論文投稿</p>
	<p><断層極近傍の地震動評価></p> <p>再現解析</p>	<p>再現解析</p>	<p>再現又は検証解析</p>	<p>検証解析</p>	
(3) 確率的地震ハザード評価の精度向上	<p><地震発生モデルや震源モデルの設定手法の検討></p> <p>地震規模と発生頻度の不確かさの調査</p>	<p>初期モデルの設定、分析・課題抽出</p>	<p>モデルの設定、PSHA の試解析</p>	<p>モデルの改善、PSHA の解析</p>	<p>影響度合い分析、まとめ、課題整理 ▽論文投稿</p>
		<p><距離減衰式のサイト特性等の不確かさ検討></p> <p>最新知見の調査</p>	<p>手法適用</p>	<p>精度検討、適用</p>	

文献

- (1) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム、「全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書」、令和元年
- (2) Tajima, R., Tanaka, H., Wu, C., “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, No. 5, pp.2408–2425, 2021.
- (3) 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」）」、令和2年
- (4) 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」、令和5年
- (5) 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」、令和5年
- (6) Galvez, P., Petukhin, A., Somerville, P., Ampuero J. P., Miyakoshi, K., Peter, D., Irikura, K., “Multicycle Simulation of Strike-Slip Earthquake Rupture for Use in Near-Source Ground-Motion Simulations”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 111, No. 5, pp.2463–2485, 2021.
- (7) 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発表論文、令和5年
- (8) Cotton, F., Archuleta, R., Causse, M., “What is Sigma of the Stress Drop?”, *Seismological Research Letters*, Vol. 84, No. 1, pp.42–48, 2013.
- (9) 引田智樹、瀨瀬一起、三宅弘恵、「震源特性の偶然的不確かさに起因する地震動シミュレーションのばらつきに関する検討」、日本地震工学会論文集、20巻、3号、pp.21–34、令和2年
- (10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会、「2016年熊本地震（Mj7.3）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）」、令和4年
- (11) 隈元崇、奥村晃史、佃栄吉、堤英明、堤浩之、遠田晋次、徳山英一、大西耕造、西坂直樹、大野裕記、酒井俊朗、亀田弘行、「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の構築」、日本地震工学会論文集、22巻、2号、pp.37–60、令和4年
- (12) Atkinson, G. M., “Single-station sigma”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 2, pp.446–455, 2006.
- (13) International Atomic Energy Agency, “Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations”, *Specific Safety Guide*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-9 (Rev. 1), 2022.