

意見書

全14ページ

令和3年5月28日

京都大学複合原子力科学研究所 特任教授

塩江克宏

第1 筆者の経歴等

筆者は、京都大学複合原子力科学研究所（旧原子炉実験所）を平成30(2018)年3月に退職し、京都大学から名誉教授の称号を付与され、同年4月から同研究所の特任教授として、研究用原子炉施設の安全管理（地震等の外部事象に対する安全性評価等）等に携わっている。同研究所在任中は原子力防災システムの体系化や防災教育を通じた社会的受容性の基盤となる原子力安全文化の構築等を目指して研究を行ってきた。具体的には、自然災害、特に、過去に起こった国内外における巨大地震や大地震時の地震動を分析し、地震動の生成、伝播（伝わり方）など、強震動予測に必要な基礎データの蓄積・解明を進めるとともに、得られた知見に基づき、強震動予測手法の開発とその高度化に関する研究などを行ってきた。特に、強震動予測手法の開発研究の専門家として、地震本部における「強震動予測手法検討分科会」において、全国を概観する地震動予測地図作成にかかり、退職後の現在も委員として活動している。

また、筆者は、旧原子力安全委員会の原子炉安全専門審査会及び核燃料安全専門審査会において、地震動の分野の審査委員として、原子力発電所を始めとする原子力関連施設の安全審査にかかりわってきた。平成23(2011)年3月の福島第一原子力発電所の事故後は、旧原子力安全委員会の「原子力安全基準・指針専門部会 地震・津波関連指針等検討小委員会」の委員として、耐震設計審査指針の改訂に向けた検討を行うとともに、原子力規制委員会発足後は、同委員会に設置された「発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関する規制基準に関する検討チーム」において、外部有識者として新規制基準の策定にかかりわってきた。

なお、筆者は大学院修士課程では建築構造を専攻し、一級建築士の免許も有している。そのため構造物の耐震設計の高度化への関心も強く、強震動予測がその高度化にとって重要な役割を果たし得るとの思いでこれまで予測手法の開発研究や審査などの活動を行ってきた。

## 第2 地震動評価における「不確かさ」と「ばらつき」の区別や関係性について

### 1 はじめに

一般には、「ばらつき」と「不確かさ」はその定義からして区別して扱われる場合が多いと思われます。

「ばらつき」とは、一般に統計の分野において、母集団の各メンバーの測定値の差異を意味し、これを定量化するときは分散や標準偏差などによって表現されます。

一方、「不確かさ」とは、真値（正しい値）を用いない測定値の評価手法を確立する必要性などから、測定の不確かさは「絶対的な真値は知ることができない」という測定値の知識についての不完全さを反映しています（例えば田中（2008）<sup>1)</sup>。この測定値の不完全さは、測定値に影響を与える要因についての知識の欠如に起因する場合、測定値が正確でない測定方法によって得られた場合を表し、リスク評価（確率論的評価）で導入される認識論的不確かさ（Epistemic uncertainty）や偶然的不確かさ（Aleatory variability）と同じだと理解しています。

ところで、我が国の地震動予測としては、文部科学省の地震調査研究推進本部（以下、「地震本部」という。）において、全国を概観する地震動予測地図として「確率論的地震動予測地図」を作成、公表するとともに、特定の地震に対して、ある想定されたシナリオに対する詳細な強震動評価に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」を作成、公表しています。前者は確率論的アプローチによる評価、後者は決定論的アプローチによる評価に基づいています。

原子力関係における基準地震動の策定における規則が求める手法は、後者の決定論的アプローチであり、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の内、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、同アプローチに基づき震源のモデル化から強震動評価までの一連の枠組みとして推奨されているのが、地震本部の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ）」（以下、「レシピ」という。）です。このレシピは、震源断層の巨視的震源特性や微視的震源特性を理論式や経験式を用いて評価し、また破壊開始点や破壊形態を設定した上で強震動を予測する標準的な手法を提示しています。こうした決定論的アプローチでは、強震動予測に必要な各種パラメータ（活断層情報や理論式、経験式から算出されたパラメータ）を真値（ばらつきのない正解値）として事前に推定可能として設定した上で強震動が予測されますが、活断層の評価や強震動評価においては必要に応じて現象のばらつきや不確定性に留意するなどの手続きが望ましいとされています。このようにレシピでは経験式から評価される値を真値と考えつつ、予測問題として現象のばらつきや不確定性（不確かさ）を必要に応じ考慮することとしており、経験式の元になった観測値に存在するばらつきに対しては、予測問題では不確かさとして考慮することができると整理できます。言い換えれば「不確かさ」と「ばらつき」はレシピの中でも区別されていないものと考えられます。前述した地震

<sup>1)</sup> 田中秀幸（2008）“はじめての不確かさ”，精密工学会誌，Vol.74, No.4 350-353.

本部によるレシピに基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」も、そうした観点から作成されています。レシピは策定後、何度か改訂されていますが、こうした考えは変更されていません。なお、このレシピについては種々の研究成果や観測記録の再現性などから、その妥当性や有効性が確認されています。

本来、「不確かさ」と「ばらつき」は意味が異なりますが、後述するとおり、原子力施設における基準地震動の策定の申請・審査実務においては「不確かさ」と「ばらつき」は区別されずに使われており、旧原子力安全委員会における耐震設計審査指針の改訂等に携わった、私を含む専門家の間でも、「ばらつき」は「不確かさ」によって生じ、両者は等価な関係（「不確かさ」の考慮によって解決）にあるとの理解が共通認識となっていました。

データの「ばらつき」という言葉がよく使われます。例えば地震観測記録の整理として、距離減衰式（地震動の最大振幅が距離とともに減衰する特性を示す式）がありますが、元になる観測記録のデータは結構ばらつきます（冒頭に述べた、母集団の各メンバーの測定値の差異が生ずるという意味です。）。同じ規模（マグニチュード）の地震でも、最大値に影響する特性の違いや最大値が観測された点と震源の距離だけでなく、観測点と震源との位置関係や地盤の硬軟等のより詳細な地盤の影響によっても観測値は変わり、これらに起因して、データの「ばらつき」が生じます。

このように、母集団の各メンバーの測定値（ここでは地震観測記録）の差異そのものを、データの「ばらつき」と言いますが、これをデータの「不確かさ」とは一般には言わないと思います。

このようなデータの「ばらつき」は、測定にかかる現象（ここでは自然現象である地震）特有の要因によるほか、単なる測定誤差（測定器の精度や測定方法）に起因することも考えられます。これら要因と考えられる事項は、広く「測定値の不完全さ」つまり「不確かさ」ということもできます。そのため、データの「ばらつき」は、「不確かさ」とは異なる概念ではありますが、様々な「不確かさ」が、データの「ばらつき」となって表れる（その意味で、「ばらつき」は「不確かさ」によって生じるということもできる）と考えられます。

強震動予測のためのレシピの中では、経験式によって算出される値は真値として扱われますが、これは構造物の設計ではばらつきのあるデータから作られた実験式が真値として取り扱われるのと同じで、設計と言う行為の中では別途外力の不確かさや地盤物性の不確かさ等、性能上の種々の不確かさが考慮されるのと同じように、基準地震動の策定を設計と考えれば、経験式は実験式にあたり、震源パラメータの設定の段階や基準地震動の策定の段階で種々の不確かさが考慮され、必要に応じてそれらが重畠されています。

例えば、地震規模を評価する震源断層面積  $S$  と地震モーメント  $M_0$  の関係（以下「 $S$ - $M_0$  関係」という。）の基となっているデータの「ばらつき」についてみると、 $S$  や  $M_0$  の

評価値には「不確かさ」が含まれており、言い換えれば、その「不確かさ」によって「ばらつき」が生じていることも考えられます。そのため、基準地震動の策定という一連の流れの中では、震源断層面の設定において考慮される「不確かさ」と、経験式の元になつたデータの「ばらつき」は同等に扱うことができ、例えば震源断層の長さの不確かさとして保守的に長く評価すること（震源断層面積  $S$  を大きく評価することと等価）と、経験式から外れて震源断層面積  $S$  に対する地震モーメント  $M_0$  を大きく評価することを同時に考えることは、震源断層長さに対する「不確かさ」と、その不確かさに起因して生じるデータの「ばらつき」の両方を考慮しているに等しく（ダブルカウント）、過剰で不必要的考慮になると考へています。そのため、「不確かさ」と「ばらつき」を区別して別々に考慮するのではなく、「不確かさ（ばらつき）」として適切に考慮すべきであるという考え方が、後述する耐震バックチェックでも暗黙的な共通認識となつていたと思ひます。

## 2 旧原子力安全委員会における耐震設計審査指針等の改訂や耐震バックチェックにおいて、「ばらつき」は「不確かさ」によって生じ得るとの考へが専門家間の共通認識であったこと

### (1) 耐震設計審査指針等の改訂において明記された、基準地震動の策定過程に伴う「不確かさ（ばらつき）」の考慮について

2006（平成 18）年 9 月 19 日に、旧原子力安全委員会は約 5 年間の審議を終え、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」を全面的に改訂しました（以下、改訂後の同指針を「新耐震審査指針」という。）。この新耐震審査指針は、現在の原子力規制委員会による規則やその解釈の原型となりました。

新耐震審査指針では、「残余のリスク」への言及とともに、新たな基準地震動の策定指針が定められました。具体的には、「5. 基準地震動の策定」「(2)敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」において、“検討用地震を複数選定し、それぞれに「応答スペクトルに基づく地震動評価」及び「断層モデルを用いた手法による地震動評価」の双方を実施し、それぞれによる基準地震動  $S_s$  を策定すること”などが定められました(5.(2)①ないし③)。また、④では“上記③の基準地震動  $S_s$  の策定過程に伴う不確かさ（ばらつき）については、適切な方法を用いて考慮することとする。”と明記されました。さらに、「5. 基準地震動の策定」の「解説」「II. 基準地震動  $S_s$  の策定について」「(4) 震源として想定する断層の評価について」の⑤において、“活断層調査によつても、震源として想定する断層の形状評価を含めた震源特性パラメータの設定に必要な情報が十分得られなかつた場合には、その震源特性の設定に当たつて不確かさの考慮を適切に行うこととする。”と明記されました。

この耐震設計審査指針の改訂を受け、「原子力発電所地質・地盤に関する安全審査の手引き」（1978（昭和 53）年 8 月 23 日原子炉安全専門審査会）も全面改訂することと

なり、2008（平成20）年6月13日には、敷地周辺の活断層など地質・地盤に関する事項についての改訂を先行した「活断層等に関する安全審査の手引き」が作成されました。そして、2010（平成22）年12月10日には「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き」（以下「手引き」という。）が作成されました。この手引きは、「活断層等に関する安全審査の手引き」で先行して改訂した事項を含め、基準地震動の策定に関する事項なども幅広くとりまとめられたものでした。この手引きでは、「IV. 基準地震動の策定」「1. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の中で、震源特性パラメータの設定方法、地震動評価手法などが記載されました。そして、「1. 2 地震動評価」の「解説」「(3)不確かさ（ばらつき）の考慮」には、『震源断層モデルの不確かさ（ばらつき）を考慮する場合には、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、その結果を地震動評価に反映させることが必要である。特に、断層モデルを用いた手法による地震動評価では、アスペリティの位置・応力降下量や破壊開始点の設定等が重要であることに留意すること。』と記載されました。なお、「1. 1 検討用地震の選定」「(2) 震源特性パラメータの設定」の②で、経験式を用いて地震規模を設定する場合には、経験式の適用範囲を十分に検討して行うことも記載されましたが、この時点では、経験式が有する「不確かさ（ばらつき）」には言及されていませんでした。

(2) 耐震バックチェックにおいて再評価された、既存の原子力施設の基準地震動策定における「不確かさ（ばらつき）」の考慮について

一方、2006（平成18）年の改訂で新耐震審査指針が定められたことを契機に、旧原子力安全委員会の耐震安全性評価特別委員会による「耐震バックチェック」が実施されました。この耐震バックチェックは、新耐震審査指針のほか、後に作成された「活断層等に関する安全審査の手引き」、さらには「新耐震審査指針に基づく既設原子力施設の耐震安全性の評価結果に対するワーキンググループとしての検討のポイント」<sup>2</sup>（以下「検討のポイント」という。）に従い、既設の原子力施設の耐震安全性を再評価するものでした。

この検討のポイントでは、「II. 基準地震動策定に関する検討のポイント」「1. WGにおけるバックチェック結果の検討において特に考慮すべき事項」「(3)基準地震動の策定」「(2) 不確かさ（ばらつき）」の項目には、『新耐震指針において、『基準地震動 Ss の策定過程に伴う不確かさ（ばらつき）』については、適切な手法を用いて考慮すること』とされている。基準地震動の策定においては、地震発生様式、地震波伝播経路等に応じた諸特性が観測記録の分析結果や活断層調査結果等を踏まえ、基本的な震源モデルが設定されていることが確認されている必要があり、その際には、設定された基本的な

<sup>2</sup> 平成20年9月5日耐震安全性評価特別委員会「新耐震指針に基づく既設原子力施設の耐震安全性の評価結果に対するワーキンググループとしての検討のポイントについて」の「別添1」がこれに当たる。

震源モデルのパラメータのうち、不確かさ（ばらつき）を考慮したパラメータと考慮しなかったパラメータについて、その根拠が確認されていること。”と記載されました。つまり、基準地震動の策定において、地震の種々の諸特性や活断層調査を踏まえて設定された基本的な震源モデルの各種パラメータにおける「不確かさ（ばらつき）」の考慮の有無やその根拠の確認が要求されました。なお、検討のポイントの「II. 基準地震動策定に関する検討のポイント」「2. 一般的確認事項」「(2) 震源断層のモデル化」の項目には、“2) 震源断層モデルの長さ又は面積、あるいは単位変位量から地震規模を関連づける経験式を用いて地震規模を設定する場合は、その経験式の適用範囲やばらつきが十分考慮されていること。”と記載されています。

こうして、2011（平成23）年3月11日の東北地方太平洋沖地震による東京電力福島第一原子力発電所の事故発生直前まで、耐震バックチェックによる厳格な審査が行われました。私は、耐震安全性評価特別委員会の下にできたワーキンググループ1（全体で4つのワーキンググループができサイトを分担して審査）の主査として、対象サイトの基準地震動の策定がレシピに従い、また「不確かさ（ばらつき）」の考慮などが適切に行われたかを確認しました。

その評価の過程でも、決定論的アプローチとしてレシピに示された経験式により算出する値は真値と捉え、例えは、地震規模の「不確かさ」を考慮する際には、「S-Mo関係」を表した（入倉一三宅式）に存在する「ばらつき」（母集団の各メンバーの測定値〔ここでは同式の基となっている個々の評価値〕の差異）も、震源断層面積の不確かさを十分考慮することに含まれると理解していました。この点に関しては、東北地方太平洋沖地震の後に旧原子力安全委員会によって検討された以下の3で言及する新耐震審査指針や手引きの改訂案において「不確かさ（ばらつき）」と表されたように、両者が基準地震動の保守性を確保する上で等価な関係にあるとの理解が旧原子力安全委員会による審査等を担った委員の共通認識であったと考えられます。

この間の基準地震動の審査での「不確かさ」や「ばらつき」への対応としてまとめると、新耐震審査指針や手引きによる耐震バックチェックにおいては、「不確かさ」と「ばらつき」は区別されず、震源断層面積などの不確かさの想定や他の不確かさとの重畳に主眼が置かれ、審査が行われたものと考えます。

### 3 東北地方太平洋沖地震後の新耐震審査指針及び手引き改訂の検討において新たに提案された、経験式の「不確かさ（ばらつき）」の考慮に関する自身の見解

2011年6月22日に旧原子力安全委員会の原子力安全基準・指針専門部会の下に、地震・津波関連指針等検討小委員会（以下「地震等検討小委員会」という。）が設置され、2006（平成18）年に作成された新耐震審査指針や2010（平成22）年に作成された手引きの改訂に向けた検討を行うことになりました。検討の方針としては、東北地方太平洋沖地震による津波の分析や知見、教訓の整理、耐震バックチェックで得られた経験、知

見の整理や残余のリスクに係る事項でした。

新耐震審査指針の改訂案には、プレート間地震や海洋プレート内地震の規模設定において震源領域などの「不確かさ（ばらつき）」を考慮することが明記されました（川瀬委員の発言を受けた結果）。当初案では規模を設定するための経験式の扱い（経験式の適用範囲への言及）や不確かさの考慮についての修正や追記事項は特になく、改訂事項のはほとんどが対津波事項でした。ただし、第10回地震等検討小委員会において、事務局から提案された同指針の改訂案の中には、地震規模を設定するための経験式に関して、「経験式を用いて断層長さ等から地震規模を想定する際には、その経験式の特徴等を踏まえ、地震規模を適切に評価することとする。その際、経験式は平均値としての地震規模を与えるものであることから、その不確かさ（ばらつき）を考慮する必要がある。」と、「その際」以降の一文が新たに追記されました。

この一文の表現ぶりについては、新耐震審査指針改訂案には基準地震動の策定方針という、いわば総論において“基準地震動 Ss の策定過程に伴う不確かさ（ばらつき）については適切な手法を用いて考慮する”との記載があったので、既に当時から行われていた運用を確認するために、「経験式を用いて断層長さ等から地震規模を想定する際」という、いわば各論にも同様に「不確かさ（ばらつき）」を「考慮する」との表現が使われたのではないかと推測します。

私は、この一文について、地震の規模を決める例えは S-M<sub>0</sub> 関係においてはデータ数が非常に少ないこともありますし、必ずしも「経験式は平均値としての地震規模を与える」との表現がこの経験式には適切ではないこと、追記した一文の内容すべてが、前の一文に記載されている「経験式の特徴等を踏まえ」という表現に含まれると解釈できることから、敢えて新耐震審査指針の改訂案に盛り込む必要はないのではないかと考えていました。そこで、私は、この一文が必要と判断されるのであれば、新耐震審査指針ではなく、手引きの改訂案に移してはどうかと提案しました。データの拡充が進み新知見が得られた場合など、審査への迅速な対応が可能だと考えたからです。

ただ、私としては、新耐震審査指針、手引きの改訂案に拘わらず、経験式に対しての「不確かさ（ばらつき）」に言及することについては積極的ではありませんでした。それは、先に述べたデータ数のほか、以下の理由によります。

前述したように、新耐震審査指針では「不確かさ」と「ばらつき」を区別せず、基準地震動の策定過程に伴う「不確かさ（ばらつき）」を適切に考慮するよう定めており、耐震バックチェックでも同様に、これらを区別することなく評価していたことから、「経験式を用いて断層長さ等から地震規模を想定する際」にも、暗黙的に、震源断層（震源断層長さ等）の設定において「不確かさ（ばらつき）」を考慮した保守的な設定が行われ、それが審査で確認されるべきと言うのが審査実務に対する私の認識でした。

にもかかわらず、追記された一文で「経験式は平均値としての地震規模を与えるものであることから、その不確かさ（ばらつき）を考慮する必要がある。」という表現が初

めて使われたことに対し、私としては、それまでの審査実務から考えると、この文章が具体的なデータのばらつきを考慮することを求めていたのであれば、その定量的な評価手法には課題があると考えていました。すなわち、上記のとおり、震源断層（震源断層長さ等）の設定の際にも、基準地震動の策定過程に伴う「不確かさ（ばらつき）」の考慮として、保守的な設定が行われていました。「経験式は平均値としての地震規模を与える」ことを踏まえた「不確かさ（ばらつき）」を定量的に評価するには、ばらつきの原因が認識論的な不確かさによるものなのか、自然現象としての偶然的な不確かさによるものなのか、具体的な原因を明らかにすべきだと考えていました。その上で決定論的アプローチで行われる基準地震動の策定において、こうしたばらつきがどのように定量的に考慮されるべきかの議論が重要だと考えていました。例えば「標準偏差で良いのか」などといった、地震等検討小委員会の専門家間のコンセンサスは何ら形成されませんでした。現状においても決定論的アプローチの枠組みでは確固たるコンセンサスはないと思います。

結局、上記の一文は、新耐震審査指針の改訂案には盛り込まれず、手引きの改訂案の中に盛り込まれることになりました。手引きの改訂内容としては、活断層の認定における「不確かさ（ばらつき）」の考慮、上記の一文を盛り込んだ基準地震動に関する震源パラメータの設定に係る経験式の「不確かさ（ばらつき）」の考慮、プレート間地震や海洋プレート内地震の震源域等の評価手法などが追記された程度で、ほとんどが指針の改訂と同様、津波に関する記載の追記でした。

新耐震審査指針や手引きの改訂作業の中での議論としては、前述したようにプレート間地震の地震規模評価に対し、必ずしも同じ震源域から同じ規模の地震が発生するとは限らず、不確かさを考えるべきとの川瀬委員の発言があり、新耐震審査指針や手引きの改訂案に上記の内容が盛り込まれましたが、川瀬委員の発言は、あくまでプレート間地震に関するもので、地震一般に関するものではありませんでした。ですから、この川瀬委員の発言自体が最終的に手引きに移された前述の経験式の不確かさ（ばらつき）を考慮する必要性に繋がったものではないと思います。また、地震等検討小委員会での議論を直接的な背景とした内容でもなかったと記憶しています。前述したように、基準地震動の策定方針に従った記述ではないかと推測します。

#### 4 原子力規制委員会の「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。）のいわゆるばらつき条項に関する自身の見解

以上の新耐震審査指針の改訂案と手引き改訂案が、原子力規制委員会に報告されたものと考えられます。その後原子力規制委員会では規則や審査ガイドを策定するための基準検討チームが構成され、審議が開始されました。ほとんどが規則（その解釈も含め）の審議に費やされ、審査ガイドについては一部の項目（震源を特定せず策定する地震動など）について重点的に審議されました。地震規模を決めるための経験式の扱い

については、旧原子力安全委員会による手引きの改訂案では経験式の「不確かさ（ばらつき）」を考慮するとの文言でしたが、審査ガイド案では不確かさのみが残され、括弧内の「ばらつき」は削除されていました。私は、基準検討チームの一員でしたが、手引き改訂案から括弧内のばらつきが削除されただけなので、私自身、レシピの枠組みや旧原子力安全委員会での審査の過程に照らしても問題ないと思い、当初案については了解していました。なお、その後、審査ガイド案が原子力規制委員会決定となった時点では「不確かさ」の文言が「ばらつき」の文言に変更されていますが、変更された経緯については知りません。

### 第3 震源特性パラメータの設定で重視されるのは短周期に関わるパラメータであり、基準地震動策定においては十分考慮されるようになっていること

ここからは、基準地震動の策定において、レシピを用いて設定することが推奨されている震源特性パラメータの中で、原子力施設の耐震安全性を考える上で特に重視されるべきものについて説明します。

前述の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」のうち「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において推奨されている強震動予測手法としてのレシピは、巨視的震源パラメータ、微視的震源パラメータ及びその他のパラメータの設定によって震源モデルが構築されます。

巨視的震源パラメータとしては、震源断層の位置や構造(形状)、震源断層面積(震源断層の長さと幅から計算されます)、地震モーメント(地震規模)があります。一方、微視的震源パラメータとしては、アスペリティ(最近では強震動生成域:SMGAともいう。)の位置、大きさ(面積)、数、応力降下量、短周期レベル、すべり量や背景領域(震源断層面積の内、アスペリティ以外の部分)に関するパラメータ(応力降下量など)、破壊伝播速度等があります。その他のパラメータとしては破壊開始点や破壊様式があります。

これまでのレシピの開発に係る研究として、実地震に対するフォワードモデリング<sup>3</sup>(周期0.1秒から10秒程度の広帯域の観測記録が再現できる震源モデルの構築が目的)があります。フォワードモデリングでは一般に、アスペリティのみをモデル化(その位置や大きさ、応力降下量)して、観測記録の再現性を確認します。現実にはアスペリティ以外の背景領域からも地震動は生成されますが、その大きさ(強さ)は小さく、特に短周期(数秒以下)の地震動のほとんどはアスペリティで生成されることがそうした解析によって示されています。解析は日本国内の地震のみでなく、海外での地震に対しても行われています。こうした結果も活用され、レシピで適用された特性化震源モデル(巨視的及び微視

<sup>3</sup> 一般には震源インバージョンで評価されたすべり分布を参考に、アスペリティのみを配したモデルに基づき、経験的グリーン関数法を用いた波形合成法によって観測記録との整合性を定量的に評価した上で、最適モデル(アスペリティの位置や大きさ、応力降下量)を決める方法を言います。

的震源パラメータに基づくアスペリティと背景領域からなるモデル）が提案されています。

建築構造物としても高層建築や超高層建築が建設されるようになり、長周期地震動（周期の長い地震波で周期は数秒以上）が注目され、免震構造物や長大橋など、周期の長い構造物の設計にも影響を与えています。構造物に作用する地震荷重は、地震動の周期と構造物の固有周期（構造物の揺れやすい周期で、構造物の大きさや構造、材料などによって異なる固有の値）に依存して決まります。基準地震動評価の中で得られる地震動の応答スペクトルは周期ごとの地震動強さを示したもので、構造物の固有周期がわかれれば、当該地震動に対してその構造物にどの程度の地震荷重が作用するかが評価できます。

以上のような地震動の周期特性と構造物との関係から、原子炉施設（建屋や機器・配管系）への地震による影響を考えた場合、原子炉建屋は機能（閉じ込め機能）上、剛強な設計となっており、その固有周期が短く、短周期地震動の影響を受けやすくなっています。機器・配管については、地震時に原子炉建屋との共振を避けるため、より固有周期が短く（より剛に）設計されています。

基準地震動そのものの評価の妥当性や保守性は重要で、基準地震動の短周期成分は原子炉施設の耐震安全性にとって特に重要です。レシピに基づく基準地震動の策定においては、各種の震源特性パラメータが設定されます。例えば、地震の規模を決める地震モーメント、短周期地震動の強さ（短周期レベル）を決めるアスペリティの位置、大きさや応力降下量、その強さをより大きくする破壊開始点の位置（破壊伝播による指向性効果と呼ばれる）などです。ここでは、施設・設備の耐震安全性の観点から、断層モデルを用いた手法による地震動評価のためのレシピにおける各種パラメータの設定と不確かさの考慮について述べます。

まず、敷地や敷地周辺の地質・地質構造（活断層の存在やプレート境界までの距離）に基づき、敷地への影響の大きい活断層の詳細な調査に加え、不確かさ（活断層の長さや形状、運動の可能性）を最大限考慮した上で検討用地震が選定されます。プレート間地震や海洋プレート内地震については、震源領域の不確かさなども考慮した上で保守的に検討用地震が選定されます。選定された検討用地震の震源モデルを設定する際、まず調査結果などに基づき科学的に妥当なモデルとして「基本ケース」を設定した上で、基本ケースの一部パラメータに不確かさを考慮した「不確かさケース」を設定することが一般的です。ただし、基準地震動の策定の場合、そもそも「基本ケース」において、既に上記の不確かさ（活断層の長さや形状、運動の可能性）が最大限考慮されていることに注意が必要です。

このように予め不確かさを最大限考慮した震源断層面の大きさから地震の規模である地震モーメントが想定されます。次にアスペリティについても、一般的にはレシピに従い震源断層の中央に配置することになりますが、本件発電所の基準地震動策定の場面においては、震源断層内で最も浅く、かつ敷地に近い位置に配置されています。最後に、レシピで定める計算過程に沿った震源特性パラメータの設定、敷地への影響を考えた破壊開

始点の設定が行われ（これが一般に「基本ケース」と呼ばれています。）、震源断層と敷地との関係の中では最も大きな地震動が評価されることになります。

また、「不確かさケース」として、さらなる不確かさの考慮として、短周期レベルを1.5倍するなど、一部のパラメータをより厳しくすることにより、原子炉施設への影響の大きい基準地震動の短周期成分をより大きくすることが要求されています。ちなみに、地震モーメントと短周期レベルとは観測データの分析結果や理論的な観点からそれらの関係が提案されており、レシピにおいて微視的震源パラメータの設定で用いられる壇ほか式（レシピの(12)式）に基づくと、短周期レベルを1.5倍することは地震モーメントが $1.5^3$ 倍（約3.4倍）の地震を想定することと等価になります<sup>4</sup>。

ただし、本件発電所の基準地震動の策定においては、まずレシピに従い壇ほか式を用いてモデル化を行った結果（モデル化1）、アスペリティ面積比（アスペリティの面積／震源断層面積）が過去の地震から得られた経験的な値より大きくなるため、レシピで推奨された別法である、アスペリティ面積比を22%、震源断層の平均応力降下量を3.1MPaと設定したモデル化を行っています（モデル化2）。モデル化1の場合では、上述したように壇ほか式により短周期レベルを1.5倍することは地震モーメントを約3.4倍上乗せした地震を想定することと等価ですが、モデル化2の場合にはその関係がどのようになるかを調べました。レシピの(2)式、(3)式、(4)式に示された地震モーメントと震源断層面積との関係（3段階スケーリング則）に従い、短周期レベルと地震モーメントとの関係を求めて図示したのが図1です。黒実線が壇ほか式、黄色及び赤実線が2段階目と3段階目のスケーリング則を適用したモデル化2による結果です。本件発電所の基準地震動策定の対象となった断層帶には2段階目のスケーリング則（入倉・三宅式）が適用され、図中の黄色実線に従うことになります。従って、短周期レベルを1.5倍することは地震モーメントが $1.5^4$ 倍（約5.1倍）の地震を想定することと等価になります。

モデル化2を使った短周期レベルと地震モーメントとの関係（図1中の黄色と赤の実線）の内、2段階目（黄色実線）では観測記録に基づく壇ほか式との差が地震の規模とともに若干大きくなっています、3段階目も含め、短周期レベルのスケーリング則として確立するためには今後観測記録による検証が必要です。

以上から、不確かさケースとして短周期レベルを1.5倍していることは、地震モーメントを上乗せ（ $1.5^3$ ～ $1.5^4$ 倍（約3.4～約5.1倍））した地震を想定していることと等価であると言えます。

こうした短周期レベルのかさ上げの要求は、前述したように原子炉施設が短周期地震動に対して応答（振動）しやすく、基準地震動の短周期レベルを大きくすることによって施設の耐震性を向上させるためです。一般的には基準地震動策定過程の計算で、短周

<sup>4</sup> 壇ほか式によると、短周期レベルの値は地震モーメントの値の $1/3$ 乗に比例するため、短周期レベルの値を1.5倍することは、地震モーメントの値を1.5の3乗倍（3.375倍）することと等価となります。

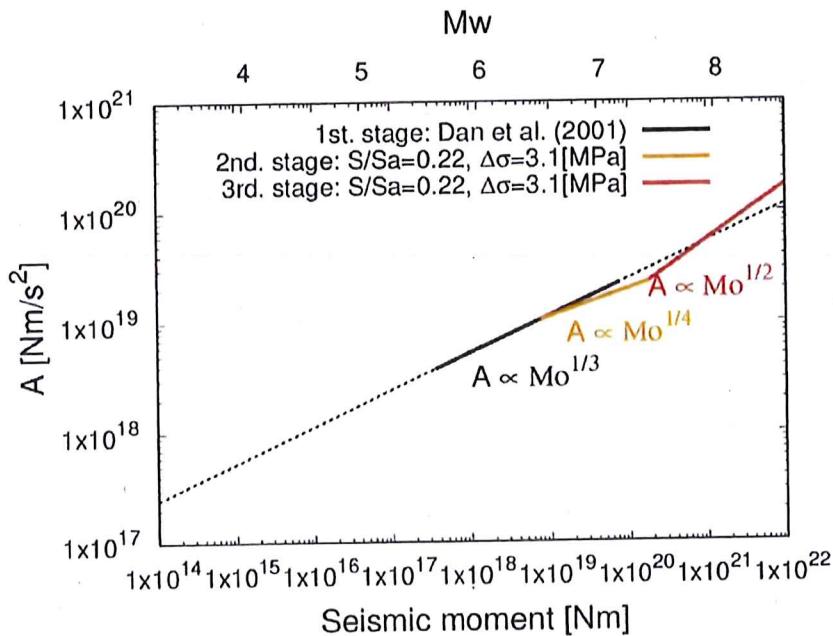


図1 短周期レベルAと地震モーメント $M_0$ の関係

期レベルのみを大きくすることは可能で、地震モーメントを上乗せした規模の地震を想定した震源のモデル化や地震動評価は要求されていません。

- 直接今回の裁判に対する意見ではないが、決定論的アプローチによって基準地震動を策定する枠組みと、審査についての自身の見解

旧原子力安全委員会の委員として新耐震設計審査指針に基づいた耐震バックチェックやその過程での手引きなどの改訂、耐震設計上重要な基準地震動の策定のためのレシピに関する研究やレシピの開発に携わった経験に基づき、このような意見書を執筆しました。最後に、これまでの審査の経験や種々の会議での議論などを踏まえ、基準地震動の策定に関する考え方や現在の原子力規制委員会による具体的な審査（基準地震動関係）について意見を述べます。新耐震審査指針に基づく原子力発電所等の原子力施設の耐震設計方法は、最新知見を反映した非常に独創的で高度化された方法と理解しています。旧原子力安全委員会での審査、2011年の東北地方太平洋沖地震による巨大津波による東京電力福島第一原子力発電所における原子力災害、それを契機とした原子力規制委員会や原子力規制庁の設置、耐震設計に係る規則やその解釈、審査のための審査ガイドなどの制定、具体的な審査、と言った流れの中で審査が大きく変遷してきたと感じています。原子力施

設と言う特殊な施設（万一の事故時の影響が大きい）に対する保守性は一貫した中でも、東京電力福島第一原子力発電所での事故以後は特に厳しい安全規制が行われており、耐震設計に係る規則類における要求事項は特に厳しくなっています。

基準地震動（活断層を起源とする内陸地殻内地震に焦点）の審査には活断層の認定（断層が活断層であるかどうかの判断）や、活動区間の設定（活断層が複数ある場合での運動の可能性など）、これらが最も重要な検討項目であり、一番のハードルで、耐震バックチェックの時にも審査する側の専門家によって意見が異なり、審査が停滞することがよくありました。旧原子力安全委員会ではそうした反省を踏まえ、手引きなどに詳細な判断基準を記載する方向での議論が多くの時間を割いて行われたことを記憶しています。原子力規制委員会の審査ガイドでは震源として考慮する活断層の認定について、より詳細にまた厳格に記載されています。耐震バックチェックの時にも現状のように基本ケースと不確かさケースを考え基準地震動が策定され、手引きに従ってその考え方や不確かさの考慮についての妥当性が審査されていました。地質・地質構造の観点から科学的に活動区間を確定することは困難な場合があることは否定できませんが、その中でも基本ケースの設定が最も重要だと私はいつも訴えていました。レシピに従った基準地震動の策定において、本来評価したいのは地下の震源断層の大きさ（震源断層面積）です。変動地形学や地質学的には地表面など浅い部分の知見しか得られません。そのために地球物理学的調査（反射法など）を行って、地下の情報を得ようと陸域や海域で精力的な取り組みが実施されていました。手引きや審査ガイドでは地下の震源断層の3次元的な情報を得るための調査などが要求されてきました。耐震バックチェックではそう言った調査で得られた情報に基づき基本ケースが作られてきたように思います。その評価に一貫性がないとその後の不確かさケースに統一した考え方でできない可能性があると思っていました。もちろん、地質構造からは、サイトによって統一できない（同じ考え方でできない）ケースも否定できませんでしたが。

原子力規制委員会になり、より保守的な基準地震動の評価が求められることになり、基本ケースや不確かさケースの考え方には少し変化がみられるようになったと理解しています。審査が進むにつれて新たな知見が出て、モデルの考え方も変わってくることは理解でき、その背景には基準地震動ができるだけ大きく評価するべきとの判断があったと思います。審査ガイドの内容（種々の判断基準）が厳しくなるほど調査などで得られた情報だけでは基本ケースにできない場合が増え、本来は不確かさケースとして分類できる可能性があったとしても、最終的には基本ケースとして位置づけられています。また基準地震動に影響するパラメータ（アスペリティの位置や深さなど）についても、レシピで推奨されるもの（例えばアスペリティを背景領域の中央に置く場合、本来は基本ケース）ではないモデル（アスペリティをサイトに近づける場合、本来は不確かさケース）が基本ケースとして位置づけられています。地震発生層の上端深さについて、大飯の例でもあるように、それまでの判断基準以外の新たな調査や分析からの情報を提示しても、結果的に

はその評価結果は認められず、より浅く設定されています(基本ケースとして)。その結果、このパラメータは基準地震動に直接影響する(距離が短くなる)パラメータであり、基準地震動としてはそれまでに考えた他の不確かさ以上の影響が出て、基準地震動そのものは大きくなり、保守性が強調される結果となっています。基準地震動の保守性は重要なので、こうした流れを否定するものではありませんが、この分野での決定論的アプローチの中では、科学的知見に基づき保守的に評価した基本ケースを全国同一の品質で想定したうえで、サイトごとの地域性に配慮した不確かさを別途考え、予測される最大地震動を基準地震動とすることが、審査の透明性と国民の理解に繋がるように感じています。基本モデルが曖昧になると、種々の不確かさを考慮して策定された基準地震動の保守性が見えにくくなり、原子力発電所の耐震安全性への理解が得られない原因ともなります。

前述したように、経験式( $S \cdot M_0$  関係)は分析した研究者や方法の違いによる認識論的な不確かさによるばらつきが大きく、自然現象としてのデータのばらつきがどの程度含まれるのか、定量的な分析が困難な中で、決定論的アプローチによって評価する基準地震動において、最大地震動を予測するためには、活断層評価から地震動評価に至る各段階で適切に不確かさを考慮することが重要だと思います。基本モデルと不確かさモデルとの認識の違いはありますが、原子力規制委員会における基準地震動の審査が適切に且つ厳格に行われていると考えます。

以上