

原子炉安全専門審査会・核燃料安全専門審査会

第3回地震・津波部会の審議結果報告

令和5年9月6日
原子力規制庁

1. 趣旨

本議題は、令和5年6月19日に開催された第3回地震・津波部会の結果概要について、別紙1のとおり、報告するものである。

[附属資料一覧]

別紙1	第3回地震・津波部会の審議結果報告
別紙1-1	第3回地震・津波部会 資料2-3抜粋
別紙1-2	第3回地震・津波部会 資料2-6抜粋
参考	原子炉安全専門審査会及び核燃料安全専門審査会の調査審議事項

第3回地震・津波部会の審議結果報告

1. 開催日:令和5年6月19日(月)10:00~12:00

2. 出席者:

原子炉安全専門審査会・核燃料安全専門審査会 地震・津波部会

山岡 耕春 部会長、久田 嘉章 部会長代理

審査委員

三宅 弘恵

臨時委員

谷岡 勇市郎、遠田 晋次

専門委員

吾妻 崇

(敬称略)

原子力規制庁

佐藤核物質・放射線総括審議官、大島原子力規制部長、

杉野安全技術管理官(地震・津波担当)、内藤安全規制管理官(地震・津波審査担当) 等

3. 議題

(1)原子力規制庁が収集した地震・津波等の事象に関する知見の分析結果について

(2)その他

4. 主な審議内容

審議の冒頭に、原子炉安全専門審査会・核燃料安全専門審査会の審査委員2名(山岡審査委員、久田審査委員)が、令和4年12月に再任されたことに伴い、改めて部会長の互選及び部会長代理の指名が行われ、部会長に山岡審査委員が選任され、部会長代理に久田審査委員が指名された。

(1)原子力規制庁が収集した地震・津波等の事象に関する知見の分析結果について

第2回地震・津波部会(令和4年6月23日)以後の技術情報検討会で報告した自然ハザードに関する情報のうち、地震・津波等に関する技術情報(9件)について、これらの概要及び原子力規制庁の対応の方向性を説明した。本会合では、これらの情報に対する原子力規制庁の対応の方向性について委員から異論はなかった。主なコメントと回答は以下のとおり。

(審査委員等からの主なコメントと原子力規制庁の回答)

① 確率論的津波ハザード解析における津波発生・伝播モデルの不確かさの影響について

- 図3(別紙1-1)ではマグニチュード12まであり、理学的見地からは想像しがたく、考え方を確認したい。また、Taper付きのGR則を用いているが、マグニチュード9.5ぐらいからTaperがかかっている。引用されているKaganの論文では、もう少し手前でTaperしていたと思う。大きいマグニチュードにおけるGR則の考え方を確認したい。【遠田臨時委員】
 - ➔ 本モデル利用の際は、まず津波波源モデルの面積を設定し、スケーリング則を用いてマグニチュードを決めている。Taper付きのGR則については、既往の文献に基づいてモデルを設定した。【杉野安全技術管理官】
 - 相似則のような考えを用いて、ある程度適用できる範囲を超えて推測するという点が、受け入れにくい。通常の相似則をそのまま延長して良いのかという問題があると考えるので、引き続き検討するのが良いと思う。【山岡部会長】
 - 東日本大震災では浅部で50m程すべったと言われている。結局、マグニチュードよりも、そのすべりの分布の不確かさ、ばらつきが大きい印象を受ける。本解析だと、不均一すべりの配置パターンの影響はあまりないが、東日本大震災の知見は入っているのか確認したい。また、対策としては想定を超えた場合に、クライシスマネジメントが必要。ハードというよりもソフト的な対応になる。そういう結論なのか確認したい。【久田部会長代理】
 - ➔ 東日本大震災の波源の知見は、表1に示した不均一すべりの配置パターンの中で取り入れている。プレート境界の比較的浅部に大きなすべりを配置するモデルを取り入れており、波源の中で超大すべり域を移動させて、不均一なすべりのパターンを幾つか用意している。また、設計では、確率論的評価とは違って、いろいろ現実的な保守性を捉えて、基準津波というものをまず設定し、これを超えてくるものに対しては、シビアアクシデント対応を行うことになっている。【杉野安全技術管理官】
 - Taper付きのGR則では、大きいマグニチュードのほうがばらついて、元のGR則よりもマグニチュードが小さいほうにずれる。そのため、原子力規制庁としては、Taper付きのGR則よりも、元のGR則を使えばいいことになる。それよりも、固有地震的に、GR則より大きいほうにずれるモデルを考えるようなことはないか。【谷岡臨時委員】
 - ➔ 色々な考え方で提案されているモデルを確率論的手法の中に取り入れることはあり得る。色々な考え方を認識論的不確かさという方法を使って、ロジックツリーの形で取り入れることになる。【杉野安全技術管理官】
 - マグニチュードの大きいほうの問題は多々あると思う。単純に低頻度なのか、もうあり得ないのか。多分、上のほうに限界があると思う。その辺りを頭の中に置きながら議論を進めると良い。【山岡部会長】
 - 審査には当該論文を直接取り入れないと聞いているので、今後の検討の中でさらに議論を進めるといふことと理解した。【山岡部会長】
 - ➔ 今後、検討していく。【杉野安全技術管理官】
- ② 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について
- 短周期レベルが断層面積の平方根に比例するようなスケーリング則を取り入れると、示された図(別紙1-2 各スケーリング則(経験式)の比較)のような形になるということと理解して良いか。【山岡部会長】

- 御指摘のとおりである。当該論文では、面積の平方根に比例するような式を、前提条件として仮定して係数を回帰することになっている。【呉総括技術研究調査官】
- ①の論文で、断層面積とモーメントに関するグラフが示されていたが、巨大地震に対応する右辺の折れ曲がりがこの内陸地震の3ステージモデルと逆ではないのか。【遠田臨時委員】
 - 内陸地震の場合は、断層幅が約20キロで飽和したら、第2ステージになる。断層がさらに長くなると、すべり量が飽和し、第3ステージに入る。図1(別紙1-1)は海溝型だけに絞ったもので、田島ほかに示されるように海溝型では断層幅が約200キロ程度で飽和するため第1ステージと第2ステージのみが議論されていることになる。【三宅審査委員】
- ③ 三陸沿岸における1611年慶長津波の短周期波の遡上について
 - 「短周期」と表現されている周期はどの程度か、また、「ゆっくりすべり」はどの程度のすべり速度かを確認したい。【久田部会長代理】
 - 周期に関しては、この論文で8分程度と特定している。【山下副主任技術研究調査官】
 - すべり速度は仮定していない。瞬間的に破壊が生じるという仮定で設定している。【谷岡臨時委員】
 - 一つの地震の中に大すべり域が二つあるようなイメージで良いか。【山岡部会長】
 - そのとおりである。【谷岡臨時委員】
 - そもそもすべりそのものがゆっくり生じると、地殻変動の現れ方、海底変化も一度に変形させてよいのかどうかということも変わってくるのではないか。【吾妻専門委員】
 - 動的破壊についても、いろいろシミュレーションしており、水位には効いても、10~20%程度であると思う。【谷岡臨時委員】
- ④ 宮城県の津波浸水想定の設定について
 - 自分は、宮城県第五次地震被害想定調査の委員になっている。目視で確認ということだが、実際にある程度、定量的なデータが公開されている。【遠田臨時委員】
- ⑤ 決定論的津波ハザード評価における断層パラメータの不確かさの効果に関する知見について
 - 長周期地震動ではSMGAと呼ばれている幾つかの大きな地震動を放出するところがあり、その壊し方、破壊の間隔の設定により、長周期の波が、あるところでプラスとプラスで大きくなる場合やプラスとマイナスで小さくなる場合がある。その辺のばらつきが考えられているのか確認したい。【久田部会長代理】
 - そういう考慮はされていない。【道口主任技術研究調査官】
- ⑥ 統計的手法を用いた津波模擬波形の提案について
 - 一つの断層の中に波源が幾つかあって、それを重ねるようなことができるのか確認したい。また、それを使うとばらつきが大きくなると考えられるが、そういった考慮はされているのか。【久田部会長代理】
 - 本論文は、波源から生起される複数の波の組み合わせを論じたものではない。【杉野安全技術管理官】

- ⑦ 津波堆積物中の礫の円磨度から推定される古津波の浸水距離に関する知見について
- コメントなし。
- ⑧ 化学的風化指標を用いた断層の活動性評価に関する最新知見について
- 風化度について、化学的風化指標を用いたとのことだが、本論文中で引用した文献の対象試料及び年代を確認したい。【吾妻専門委員】
 - ➔ 引用文献である2007年の太田・新井の論文は基本的には堆積岩の風化が対象であり、断層とは特に関係のないものとなっている。対象は、世界中の、例えばラテライト等の風化土壌を母岩と一緒に採取し、その化学組成から統計的な計算で風化度を算出するといった研究となっているのではないかと¹。年代という観点では、強いて言うなら現在ということになる。【林副主任技術研究調査官】
- ⑨ 下北半島北部における津波堆積物について
- コメントなし。
- ⑩ 北海道山越郡長万部町で確認された水柱について
- (時間の都合上、事務局からの説明を省略した上で、質問を受け付けたところ)コメントなし。
- ⑪ 2021年12月に米国で発生した竜巻の調査結果
- (時間の都合上、事務局からの説明を省略した上で、質問を受け付けたところ)コメントなし。

(2)その他

山岡部会長から、本年2月に発生したトルコ・シリア地震について、非常に長大な断層で発生した地震であると同時に強震動波形が多く得られたこと、また、実際に得られる強震動波形は原子力分野にとって特に重要であるとの観点から、今後の国内外の論文を注視し、この場で報告してほしいとの要望が規制庁に対してあった。

¹ 部会後に当該論文を確認した結果、Ohta and Arai (2007)は火成岩の風化を対象とした研究であり、断層に関係した研究ではないこと、文献データから世界中の風化土壌(ラテライト等)及び母岩の化学組成を統計的に比較したものであることを確認した。

資料 5 5 - 1 - 2 - 2

「確率論的津波ハザード解析における津波発生・伝播モデルの不確かさの影響」について（案）

令和 4 年 9 月 2 9 日
地震・津波研究部門

1. 背景

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（以下「設置許可基準規則」という。）第 5 条では、設計基準対象施設は、基準津波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ぬと規定されている。また、設置許可基準規則解釈別記 3 において、策定された基準津波については、その水位の超過確率を把握することを求めている。さらに、「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」では、確率論的津波ハザード評価（以下「PTHA」という。）により当該超過確率を求め、その値が参照されていることを確認する、としている。

PTHA 手法では、津波発生・伝播モデルには不確かさが伴うため、偶然的な不確かさと認識論的不確かさに分類して考慮することが一般に行われる。しかし、従来の PTHA 手法（例えば、土木学会¹⁾、杉野ら²⁾、地震調査研究推進本部³⁾）では、津波発生・伝播モデルには不確かさが存在するが、その影響が考慮されていないモデルもある。

そこで、原子力規制庁では、従来の PTHA 手法に見られる上記の課題を解決するために、安全研究プロジェクト「津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究（実施期間：平成 29 年度～令和 2 年度）」のうち、「(1) 地震起因の津波の確率論的ハザード評価手法の信頼性向上」の「a. 津波発生モデルの不確かさ評価手法の整備」を研究テーマとして実施した。そして、その研究成果の一部が日本地震工学会論文集に公表¹⁾された。本論文の内容は、現行規制基準の超過確率に関連する情報であることから、その内容と今後の対応について報告する。

2. 本論文の内容と得られた新知見

本論文の概要は、以下のとおりである。

- 著者らは、プレート間地震による津波を対象に、従来の PTHA 手法¹⁾⁻³⁾における課題を提示し、その解決策を提案するとともに、提案手法をモデルサイトに適用して、不確かさ項目が PTHA の結果に及ぼす影響を比較分析した。

¹⁾ 杉野英治、阿部雄太：確率論的津波ハザード解析における津波発生・伝播モデルの不確かさの影響、日本地震工学会論文集、第 22 巻、第 4 号、pp. 1-22、2022.

- 1つ目の課題として、従来手法では地震規模に係るスケーリング則²、地震発生頻度に係るグーテンベルグ・リヒター則³の各モデルの不確かさを考慮していない（平均値のみを考慮し、確率分布を考慮していない）ことを挙げた。著者らは、これらの既往研究を基に不確かさを定量的に評価し、確率モデルを設定した。そして、これらのモデルを導入した PTHA 手法を提案した。新たに導入したモデルを図 1、図 2 及び図 3 に示す。

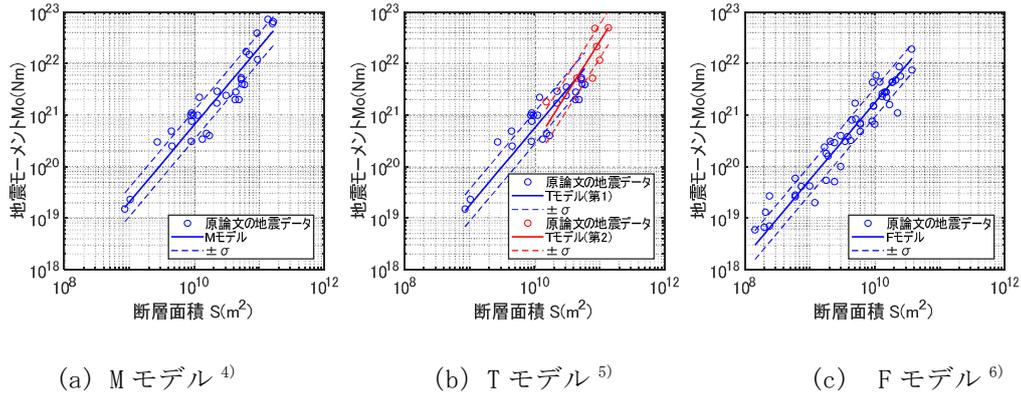


図 1 地震規模に係るスケーリング則の各モデル

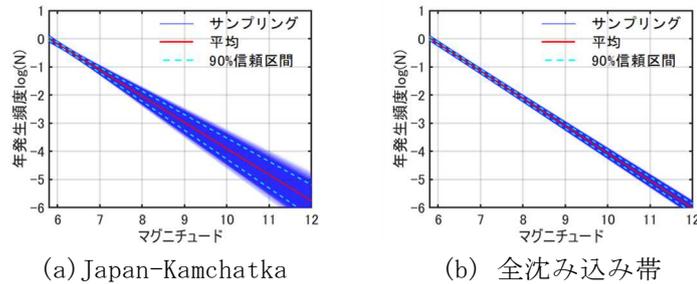


図 2 地震発生頻度に関する GR モデル⁷⁾

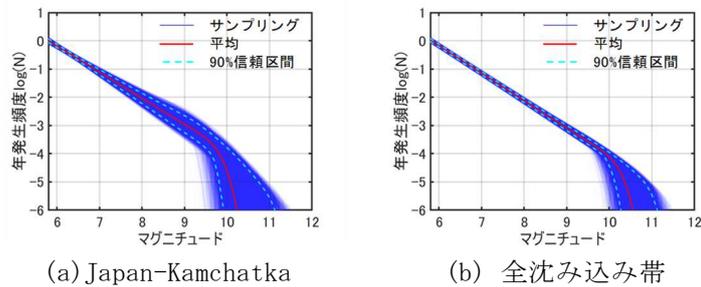


図 3 地震発生頻度に関する Tapered GR モデル⁸⁾

² 地震規模に係るスケーリング則とは、過去の地震のデータ（例えば、断層面積と地震モーメント）を近似した平均的傾向を表す経験式（回帰モデル）のこと。

³ 地震発生頻度に係るグーテンベルグ・リヒター則とは、地震の発生頻度と規模の関係を表す法則であり、縦軸を発生頻度の対数とした片対数グラフ上で直線関係を表す回帰式がよく知られている。また、これを改良した方法も提案されている。

- 2つ目の課題として、従来の PTHA 手法では、偶然的不確かさは1本の津波ハザード曲線で、認識論的不確かさは複数の津波ハザード曲線で表現するとされ、ハザード曲線の本数として現れるのは認識論的不確かさの影響のみとなり、偶然的不確かさと認識論的不確かさの両者の不確かさの影響を比較することができないことを挙げた。著者らは、両者の不確かさを同じように扱えるよう、層別サンプリング法⁴及びラテン超方格法⁵を組み合わせた方法を提案した。そして、両者が共にハザード曲線の本数やその拡がりとして明示的に表し、両者の不確かさの影響を比較できるようにした。
- さらに、著者らは、地震規模に係るスケーリング則及び地震発生頻度に係るグーテンベルク・リヒター則の各モデルの不確かさのほかに、津波波源の不均一すべり分布の配置パターン及び津波伝播モデルの不確かさを考慮して、福島県沖を例として PTHA を実施した。
- そして、上記の四つの不確かさ項目について、不確かさを考慮した確率モデルと不確かさを考慮しない平均モデルとしたときの違いやロジックツリー分岐が PTHA 解析結果に及ぼす影響を定量的に評価し、その結果、福島県沖での適用事例では、今回検討した中では図1の(a)～(c)に示す地震規模に係るスケーリング則の不確かさの影響が最も大きいことを示した。解析条件を表1に、解析結果を図4にそれぞれ示す。
- なお、著者らは、本提案手法において、水深が比較的深い沖合の地点を対象とすることにより、地震モーメントと津波高に比例関係が成り立つことを仮定したため、非常に大きい地震モーメント（確率は低い）に対応する極めて高い津波高が推定された。著者らは今後の課題として、津波高の成長限界やプレート間地震の地震モーメントの上限に関するモデルの検討の必要性を示している。

表1 不確かさ項目と取扱い方法一覧

ケース No.	地震規模に係るスケーリング則	地震発生頻度に係る GR 則	不均一すべりの配置パターン	津波伝播モデル
1	確率モデル	確率モデル	確率モデル	確率モデル
2	平均モデル	平均モデル	平均モデル	確率モデル
3	平均モデル	確率モデル	確率モデル	確率モデル
4	確率モデル	平均モデル	確率モデル	確率モデル
5	確率モデル	確率モデル	平均モデル	確率モデル

⁴ 層別サンプリング法とは、母集団を適当な数の層に分割し、各層でランダムサンプリングを行う方法をいう。ランダムサンプリングの質や効率の向上が見込まれる。

⁵ ラテン超方格法とは、実験計画法の一つであり、2次元のラテン方格をn次元に拡張したものをいう。n個の因子をそれぞれm層の層別サンプリングを行い、ランダムなm組の組合せを設定することにより、試行回数を減らすことができる。

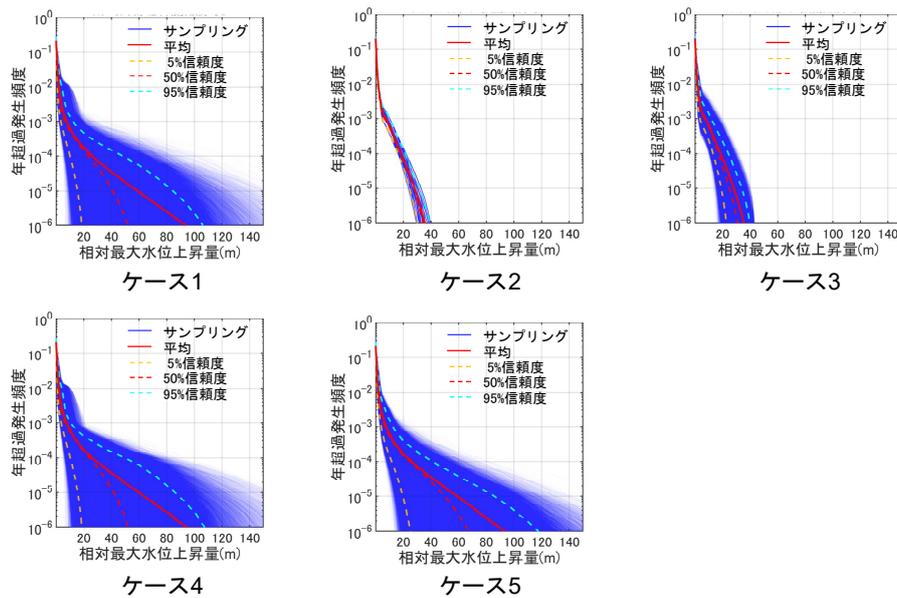


図 4 PTHA 解析結果

3. 今後の対応

本論文では、プレート間地震による津波を対象に、PTHA 手法においてこれまで考慮されていなかった地震規模に係るスケーリング則及び地震発生頻度に係るグーテンベルク・リヒター則の各モデルの不確かさを定量的に評価し、確率モデルを設定した。また、不確かさを考慮する方法とその適用事例を示した上で、地震規模に係るスケーリング則の不確かさが評価結果に大きく影響することを示した。

「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」の「4. 超過確率の参照」は、「津波発生モデル及び津波発生・伝播の数値モデルの不確かさ⁶を考慮して、（中略）津波水位とその超過確率との関係を表す津波ハザード曲線が算定されていることを確認する。」としている。本論文の知見は、「津波発生モデルの不確かさ」の具体的な項目とその導入方法を提案したものであり、この審査ガイドに反映すべき事項はない。

PTHA は、安全性向上評価においても実施する項目⁷である。本知見では、地震規模に係るスケーリング則の不確かさの考慮の仕方により、事業者の PTHA の評価結果に大きな影響を与える可能性が見出された。そのため、ATENA 定例面談等で事業者に対して周知することとしたい。

⁶ 「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」及び「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」の中では「不確かさ」と表現されており、そのまま引用した。一方、論文の中では「不確かさ」と表現した。両者は、同義である。

⁷ 「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では、「参考資料 1 確率論的リスク評価 (PRA) 実施手法の例」の PTHA に際し、「波源モデル及び津波伝播モデルの不確かさ要因の分析に関連する情報も併せて収集する。」としている。

参考文献

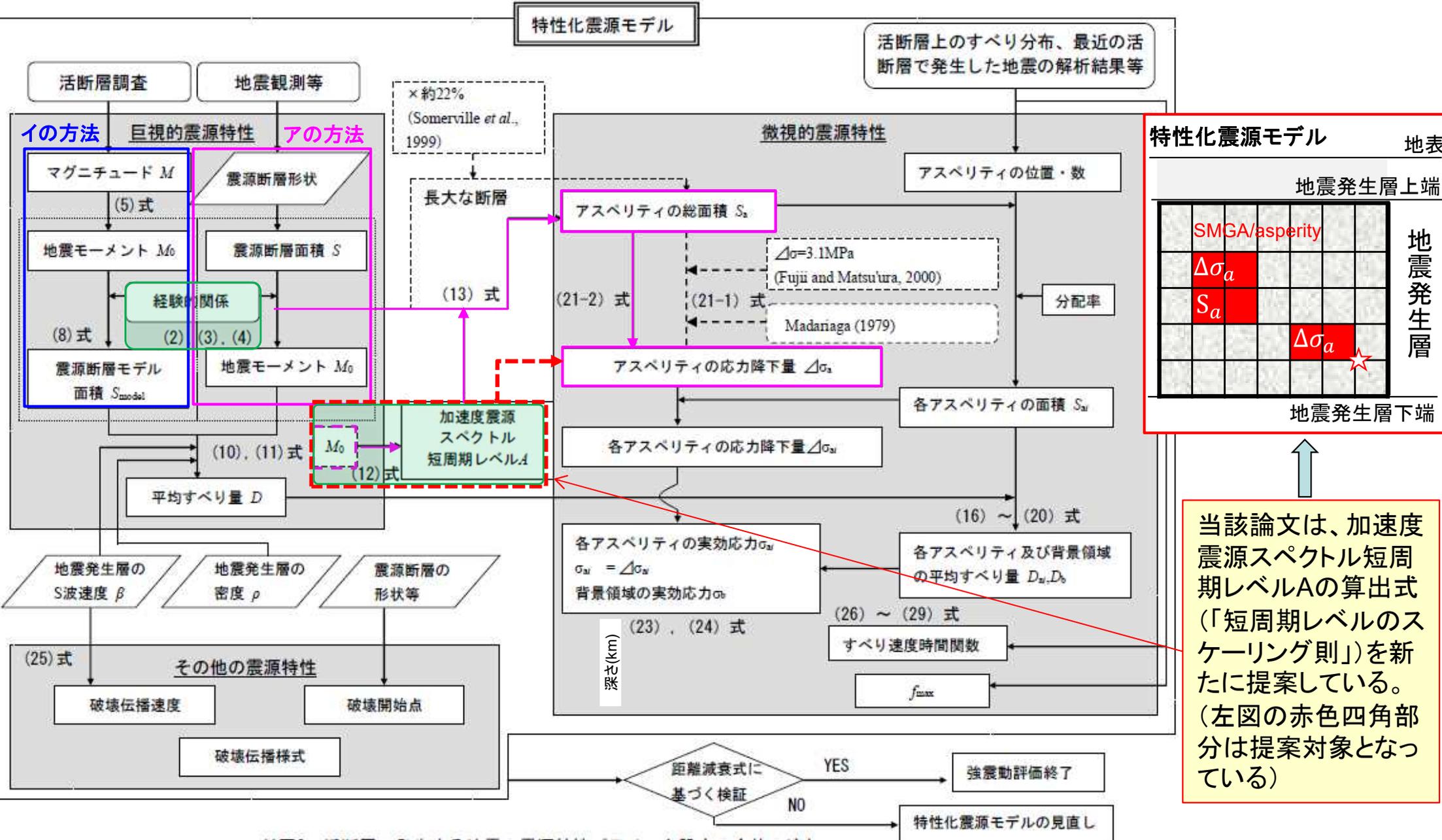
- 1) 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会：原子力発電所の津波評価技術 2016, 2016.
- 2) 杉野英治ほか：確率論的津波ハザード評価における津波想定の影響，日本地震工学会論文集，2015.
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価，2020.
- 4) Murotani, S., Satake, K. and Fujii, Y.: Scaling Relations of Seismic Moment, Rupture Area, Average Slip, and Asperity Size for M~9 Subduction Zone Earthquakes, *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, pp. 5070–5074, 2013.
- 5) 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，Vol. 66, pp. 31-45, 2013.
- 6) 藤原広行，平田賢治，中村洋光，長田正樹，森川信之，河合伸一，大角恒雄，青井 真，松山尚典，遠山信彦，鬼頭 直，村嶋陽一，村田泰洋，井上拓也，斎藤 龍，秋山伸一，是永真理子，阿部雄太，橋本紀彦：日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，Vol. 400, pp. 49-52, 2015.
- 7) Gutenberg, R. and Richter, C. F.: Frequency of Earthquakes in California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 34, pp. 185–188, 1944.
- 8) Kagan, Y. Y.: Seismic Moment Distribution Revisited: I. Statistical Results, *Geophysical Journal International*, Vol. 148, No. 3, pp. 520–541, 2002.

1. 強震動予測手法(「レシピ」)

別紙 1 - 2

資料 58-1-1
(参考)

地震調査研究推進本部: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)



付図2 活断層で発生する地震の震源特性パラメータ設定の全体の流れ

「短周期レベルA」: 短周期領域における加速度震源スペクトルのレベルを意味しており、設計上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。

2. 特性化震源モデル設定の課題

主要パラメータの設定

活断層調査結果等により、断層長さ L 、幅 W を推定
 \Rightarrow 断層面積 $S=LW=\pi R^2$

スケールリング則の経験式

(1)断層面積と地震モーメントとのスケールリング則 M_0 レシピ(2~4)式

Irikura & Miyake, 2001; Murotani et al., 2015

(2)短周期レベルと地震モーメントとのスケールリング則 A レシピ(12)式

Dan et al., 2001

三つの関係式により、 $\Delta\sigma, S_a, \Delta\sigma_a$ が決まる

レシピ(22-2)式

$$M_0 = \frac{16}{7} \Delta\sigma R^3 \Rightarrow \text{平均応力降下量 } \Delta\sigma$$

$$\Delta\sigma_a = (S/S_a) \cdot \Delta\sigma \quad \text{レシピ(21-1)式}$$

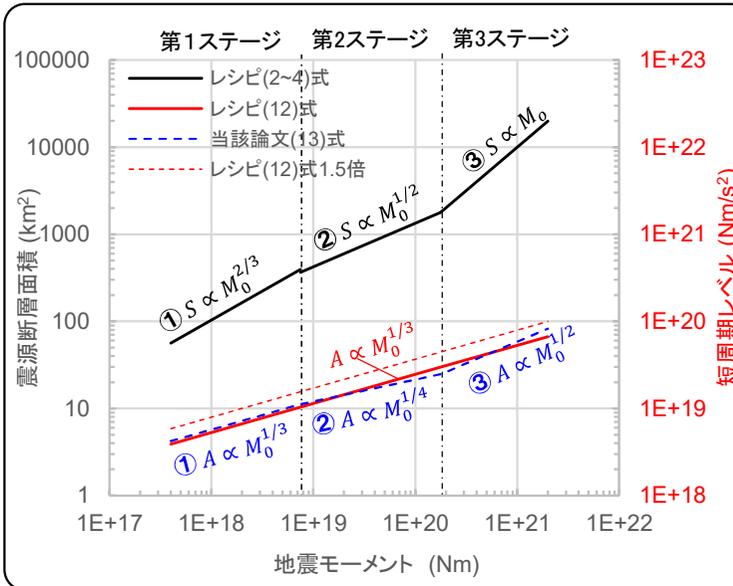
$$A = 4\pi \cdot r \cdot \Delta\sigma_a \cdot \beta^2 \quad \text{レシピ(15)式}$$

\Rightarrow アスペリティの面積 $S_a = \pi r^2$

\Rightarrow アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$

「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意味しており、設計上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。

各スケールリング則(経験式)の比較



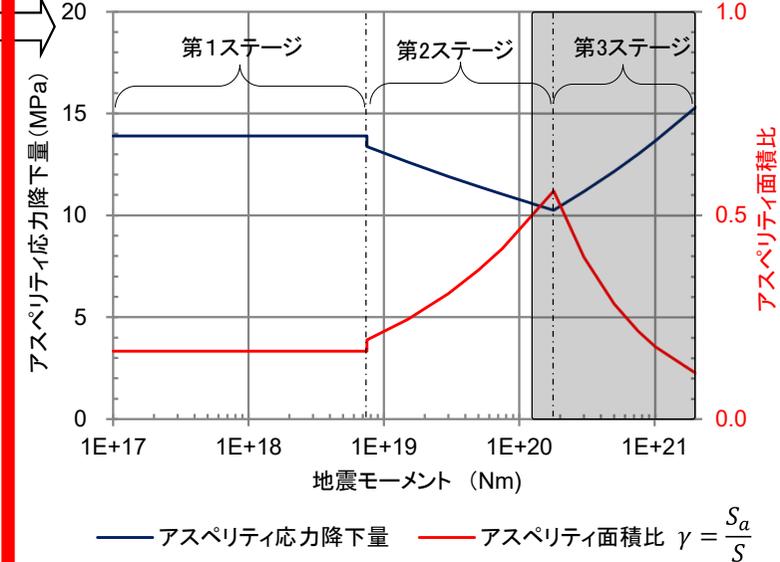
本資料の記号一覧

S 震源断層面積	R 震源断層の等価半径
M_0 地震モーメント	$\Delta\sigma$ 平均応力降下量
A 短周期レベル	r アスペリティの等価半径
β S波速度	$\Delta\sigma_a$ アスペリティの応力降下量
S_a アスペリティの面積	
γ アスペリティと断層との面積比	

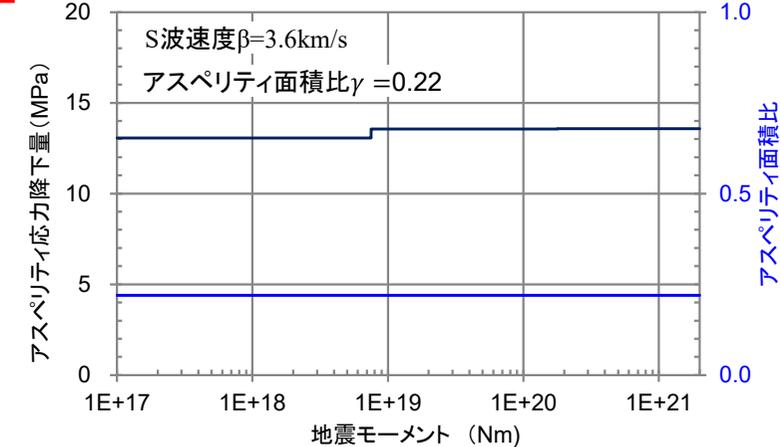
- レシピの3ステージモデルの M_0-S 経験式及び M_0-A の経験式をそのままに適用すると、第2ステージでは、地震モーメントが大きくなるほど、アスペリティの応力降下量が小さく、面積比が大きくなる。
- レシピでは、第3ステージ又は第2ステージの一部では、暫定的な取り扱いとして、アスペリティ面積比を22%、平均応力降下量を3.1MPaとする。
- 当該論文は、アスペリティの面積比と応力降下量が M_0-S 関係式の3ステージモデルの各ステージで M_0 に関わらず一定となるように、短周期レベル A を各ステージに応じて $M_0^{1/3}$ 、 $M_0^{1/4}$ 、 $M_0^{1/2}$ と比例する新たな M_0-A 関係式を提案している。

レシピの経験式を適用した場合

(S波速度 $\beta=3.6\text{km/s}$ の場合)



当該論文の(13)式を適用した場合



原子炉安全専門審査会及び核燃料安全専門審査会の
調査審議事項

- ① 国内外で発生した事故・トラブル及び海外における規制の動向に係る情報の収集・分析を踏まえた対応の要否について調査審議を行い、助言を行うこと。
- ② 令和2(2020)年1月に実施されたIRRS(IAEAの総合規制評価サービス)のフォローアップミッションの結論(輸送に係る結論を含む)を受けた、原子力規制委員会の対応状況について評価や助言を行うこと。
- ③ 令和2(2020)年4月に施行された新たな原子力規制検査制度に係る規制機関及び事業者における実施状況について調査審議を行い、助言を行うこと。
- ④ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第43条の3の29の規定に基づく発電用原子炉設置者が行う発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価について事業者から聴取し、その活用方法に関し、助言を行うこと。
- ⑤ 発電用原子炉設置者の火山モニタリング結果に対する原子力規制委員会の評価について調査審議を行い、助言を行うこと。
(原子炉安全専門審査会への指示)
- ⑥ 核燃料施設事業者の火山モニタリング結果に対する原子力規制委員会の評価について調査審議を行い、助言を行うこと。
(核燃料安全専門審査会への指示)
- ⑦ 地震・津波等の事象に関し、国内外で発生した災害、行政機関等が発表した知見等に係る情報の収集・分析結果をもとに、規制上の対応の要否について調査審議を行い、助言を行うこと。
- ⑧ 火山事象に関し、国内外で発生した災害、行政機関等が発表した知見等に係る情報の収集・分析結果をもとに、規制上の対応の要否について調査審議を行い、助言を行うこと。