

原発基準地震動の「過小評価」指摘

関西電力大飯原発などの基準地震動(耐震設計の目安となる揺れ)が、計算式の不備が原因で過小評価されている可能性を原子力規制委員会の前委員長代理の島崎邦彦・東京大名誉教授(地震学)が指摘。慌てた規制委が島崎氏から説明を受け、検証を検討する異例の展開になった。

島崎氏の指摘が重要な新発見と確認されれば、規制委の審査基準改定や、一部原発の再審査も必要になる。だが、実は規制委は2年前にも同じ問題を指摘されていた。

▽二重基準

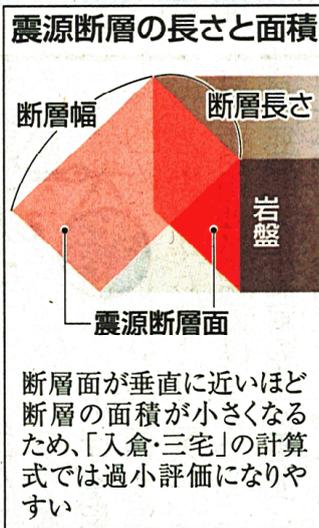
発端は2014年3月、国会内の会合で原子力規制庁のベテラン審査官を長沢啓行・大阪府立大名誉教授(工学)が追及したことだった。震源断層の面積から地震の規模(地震モーメント)

規制委、異例の検証へ

ト)を見積もる計算式は、北米の地震データに立脚し、日本の原発で適用すると過小評価につながる。

現在、基準地震動の計算では、断層面積を重視する入倉孝次郎・京都大名誉教授(強震動地震学)らによる「入倉・三宅」の計算式を、津波対策では断層長さを重視する武村雅之・名古屋大教授(地震学)による「武村」の計算式を使い、モーメントを求めている。

ところが、大飯原発直近の断層が起す地震を想定すると、



2年前に発端

同じ断層なのに「武村」よりも「入倉・三宅」で計算した方が、モーメントが小さくなる。このため基準地震動を小さく見せることを目的とした「二重基準」の批判が他にも出ていた。

答えに窮した審査官は、島崎委員長代理らに相談して検討すると約束。その場を切り抜けた。

▽検証

審査官から相談を受けた当時、島崎氏は多忙で時間的余裕はなかった。「実際のデータに合うのは武村と入倉・三宅の間あたりだろう」と思い、真面目に相手をしませんでした」と振り返る。規制庁に検討を指示したものの、報告はなかった。

島崎氏は14年9月の退任後、1人で本格的な検証作業を始めた。過去のデータを基に比較したところ、島崎氏自身が提唱した計算式や「武村」など、断層長さに注目した手法に比べ、「入倉・三宅」のモーメントが4分の1程度と小さいことに気付いた。

島崎氏は今月、大飯原発3、4号機の運転差し止め訴訟控訴審(名古屋高裁金沢支部)でも同趣旨の陳述書を提出。規制委が島崎氏の指摘を受け入れると、各地の訴訟にも影響が及ぶ。規制庁幹部は「中長期的課題だ」と、対応を先送りしたいとの本音をのぞかせる。

愛媛新聞社説 2016年07月28日(木)

原発の新たな知見 積極的な検証が規制委の責務だ

原発の耐震設計の目安となる基準地震動を巡り、過小評価の可能性が指摘されている。地震などの災害対策で新たな科学的知見が得られた場合には、原発の新規制基準に反映させるのが原子力規制委員会の責務であるはず。その知見がまだ定まったものではないとしても、慎重に検討するのが当然だろう。

指摘したのは、規制委の委員長代理を務めた島崎邦彦氏。想定する活断層の種類により、関西電力大飯原発(福井県)などでは一般的な計算式だと揺れが小さくなるとして、別の計算式が妥当と訴える。が、規制委の田中俊一委員長は大飯原発の基準地震動を見直さないと明言した。消極的な姿勢を危惧する。

規制委は、島崎氏の指摘を受け事務方に再計算を指示してはいた。結果は新基準適合審査で了承済みの数値を下回ったが、後に再計算の手法に問題があったことが判明し、田中委員長が「判断根拠にならない」と言及する事態に。ならばやり直すのが筋なのに、「知見が固まっておらず、現段階で(別手法に)乗り換える必要はない」と幕引きを図った。「黙殺」にも等しい対応に猛省を促したい。

大飯原発の基準地震動の審査は、島崎氏が在任中に指揮を執った。自ら誤りを認めて見直しを訴える意味は大きい。今回の指摘は、4月の熊本地震で観測した断層のずれが、一般的な計算式で説明できなかったのがきっかけだ。震度7の激しい揺れを2度観測するなど前例のない地震だけに、規制委はもちろん原発事業者も新たな知見の検証に後ろ向きではなすまい。

四国電力は伊方原発3号機を来月中旬以降に再稼働させる方針を示している。愛媛新聞が参院選期間中に実施した県民世論調査では、再稼働に否定的な回答が54%を占め、肯定的な37%を上回った。県民の不安を真摯しんしに受け止めるよう強く求める。

規制委の原点が、東京電力福島第1原発事故にあるのは言うまでもない。一つの行政組織が原発推進と規制の両方を担った反省に立ち、規制側の原子力安全・保安院を推進側の経済産業省から分離するなどして発足した。活動原則にある「何ものにもとられない独立した意思決定」こそが出発点なのだと、改めて肝に銘じるべきだ。

国民の信頼が揺らいでいる現状を憂慮する。島崎氏に代わって規制委に加わった田中知氏は原子力学会会長などを務め、電力団体から報酬を受けていた。さらに、老朽原発の運転延長に前向きな田中委員長発言も記憶に新しい。原発の運転期間を定めた「原則40年ルール」を形骸化させかねず、依存度の低減を掲げながら温存を進める安倍政権への迎合とさえ映る。

信頼を取り戻すには独立性と専門性を高めるしかない。基準地震動の評価だけでなく、あらゆる業務に通じよう。新たな知見に向き合い、「想定外」をなくすよう努めてもらいたい。福島事故の教訓でもある。

東京新聞社説 2016 年 8 月 2 日

大飯原発地震動 専門家の意見を聞け

福井県にある関西電力大飯原発の基準地震動が過小評価との指摘がある。原子力規制委員会の対応は迷走したあげく、見直す必要はないとなった。東日本大震災の教訓を生かした判断といえるのか。

基準地震動は、耐震設計の目安である。原発に影響を与える断層の面積から地震の規模を推定する。計算式は過去の地震データを使ってつくられる。いくつかの計算式が提案されている。

大飯原発 3、4 号機はすでに、適合性審査で最大加速度八五六ガル（震災前は七〇〇ガル）とすることで審査を通過している。このときに使われたのが、入倉・三宅式と呼ばれる計算式だった。

過小評価ではと疑問を投げかけたのは、地震学者で前規制委員長代理の島崎邦彦東大名誉教授だ。

四月に起きた熊本地震について、入倉・三宅式で計算すると実際よりも小さくなると指摘。その理由として、熊本地震は断層が垂直か垂直に近いことを挙げている。こうした断層は日本海西部に多く、大飯原発も含まれるという。

規制委はこれまで活断層や基準地震動について厳格に取り組んできたようにみえる。

活断層調査では、複数の専門家で構成する有識者会議をつくり、現地調査を行った。日本原子力発電の敦賀原発 2 号機（福井県）や北陸電力の志賀原発 1 号機（石川県）などは「活断層」との調査結果で廃炉の可能性が高くなっている。耐震設計の目安となる基準地震動も大幅に引き上げた。

今回の問題でも、規制委は指摘を受けて事務局に再計算を命じた。結果は「見直しは不要」だった。だが、島崎氏への説明の中で計算に不備があることが分かり、再計算結果は取り下げることを決めた。それなのに「八五六ガルは相当大きな設定」だから「見直しは不要」の結論は変えないという。

熊本地震は、政府の地震調査委員会が「確率がやや高い」とした断層で起きたが、断層は予想外の阿蘇山の外輪山の内側まで延びた。断層が地表で見えていて、調査をしても、予想通りにはいかない。

規制委には今、地震学の専門家はいない。活断層調査のように、この問題は地震学会に協力を求めるべきだ。計算式が複数あるのだから、合理的な式の中で最大値を選ぶのが安全サイドに立つ考え方である。地震の規模が大きくなったならば津波も再評価すべきだろう。拙速な結論が原発不信を招くようでは、規制委の存在意義が問われる。

NHK ニュース 2016年7月27日 17時47分

(NHK 科学文化部のブログにもニュースと同記事が掲載されている:以下引用)

大飯原発の従来の地震想定見直さず 改めて決定

福井県にある大飯原子力発電所で、想定される地震の揺れが過小評価のおそれがあると指摘された問題で、原子力規制委員会は、指摘を受けて行った再計算の結果は信頼できず、評価に使えないとするともに、これまでの審査で十分安全側に立った評価をしているとして、従来の想定を見直さないことを改めて決めました。

大飯原発で想定される地震の揺れを巡っては、原子力 規制委員会の元委員が審査で使われた計算式では過小評価になるおそれがあると指摘したことを受けて、別の計算式による再計算が行われ、その結果がそれまでの審査で了承された値を下回ったため、規制委員会は従来の想定を見直さないことをいったん決めました。

しかし、その後の議論で規制委員会は、再計算の結果は精度が高い数値とは言えず「判断は拙速だった」として、27日に再度検討しました。

検討の結果、今回の再計算は途中で矛盾が生じる信頼できないもので、従来の審査の結果との比較には使えないとするともに、審査では、断層の総延長を長めに見積もるなど、十分安全側に立った評価をしているとして、想定を見直さないことを改めて決めました。

今回の問題を巡っては、専門家からより詳しい検討や今の想定の手法が妥当かどうか規制委員会による検証の必要があるという指摘も出ていますが、田中俊一委員長は、学会など専門家の中で新たな知見が示されないかぎり、審査で使っている手法を見直さない考えを示しています。

原子力規制委「明確に判断した結論」

今回の判断について、原子力規制委員会の田中俊一委員長は会見で「きょうの委員会で明確にわれわれの判断をした。今後、学会などで、ほかのよりよい地震の想定の方法が示されれば、また検討する」と述べ、ひとまず議論を終わらせる考えを示しました。

一方、審査の際に「不確かさ」があることをどこまで見込んだ地震の想定をするか具体的に定められていないことについては、「熊本地震で観測された実際のデータがあるので、事前に予測した地震動とどういう関係になっているのか、原子力規制庁で調べて評価してもらおう。このように一つずつ積み重ねながら、不確かさを確認していく」と述べ、熊本地震で得られた新たな知見を審査にどう取り入れるかを含め、中長期的な課題だという考えを示しました。

強震動予測の専門家「今の審査方法の検証を」

原子力規制委員会が大飯原発の地震の想定を見直さないことを改めて決めたことについて、地震の強い揺れの予測、強震動予測の専門家で、防災科学技術研究所の藤原広行部門長は「安全規制の立場からは、地震の規模が過小評価になるおそれがあるというのは懸念事項で、よい計算手法がないので検討できないとして結論を出しているのは、元委員の指摘に正面から答えていないという印象だ」と述べ、十分な議論が尽くされていないという見方を示しました。

そのうえで「まだ検討中の部分もあるが、熊本地震で新たな知見が得られ、地震の揺れが計算以上になる『不確かさ』も含めて、今の審査のやり方が本当によいか検証し、審査の手法に反映させるべきだ。その意味で、今回の元委員の指摘は大切で、より時間をかけて検討するべきではないか」と指摘しています。

(※アンダーラインは当会事務局による)

大津地裁と福岡高裁宮崎支部の真逆の仮処分決定が意味するもの ～2016年熊本地震の地震観測記録を教訓に加えて～

大阪府立大学名誉教授 長沢 啓行

真逆の仮処分決定

またしても、真逆の仮処分決定が出た。

関西電力高浜原発3・4号の運転差止決定が今年3月9日に大津地裁から出され（以下「大津地裁決定」）[19]、その1ヶ月後の4月6日に福岡高裁宮崎支部が九州電力川内原発1・2号の即時抗告を棄却した（以下「福岡高裁決定」）[6]。これらの真逆の決定は、2015年4月14日の福井地裁による高浜3・4号運転差止仮処分決定（以下「福井地裁差止決定」）[4]および2015年4月22日の鹿児島地裁による川内1・2号運転差止仮処分申立却下決定（以下「鹿児島地裁決定」）[9]という真逆の仮処分決定に続くものである。川内原発については地裁と高裁の2度続けての棄却決定になるが、高浜原発については上記福井地裁決定が2015年12月24日に同地裁で別の裁判官によって覆されたものの（以下「福井地裁棄却決定」）[5]、その2ヶ月半後に、福井地裁とは別の大津地裁で、新たに運転差止が仮処分決定されたものである。

これらの結果、川内1・2号は稼働し続けているが、再稼働して間もない高浜3号は運転中止を余儀なくされ、再稼働中に事故で止まっていた高浜4号も一切の再稼働作業が中止された。

稼働中の原発の運転を差し止めた大津地裁決定は、国内史上初であり、福島第一原発重大事故から5年目の今なお国民の過半数が再稼働に反対し続けているという現実の世論を反映したものであり、さまざまな政治的圧力をはねのけ、司法が国民に寄り添って下した英断であったと言える。

では、なぜ真逆の決定になったのか。

大津地裁決定では関西電力が原発再稼働認可の合理性について「主張および疎明を尽くしていない」ことが運転差止の理由とされ、福岡高裁決定では九州電力が「主張、疎明を尽くした」ことが棄却の理由となっている。表面的にはこれが理由だが、どのような観点から、どのような内容の主張・疎明が求められているのかが全く違う。

ここでは、(1) 求められる安全性のレベルの違い、(2) 求められる審査基準と適合性判断に関する評価の違い、(3) 基準地震動における不確かさ考慮の違いの3点に絞って検討する。

くしくも、福岡高裁決定の8日後に2016年熊本地震が発生した。4月14日のM6.5の前震で、益城（ましき）地下地震計では「はざとり波」換算でNS方向470ガル、EW350ガル、UD250ガルの強震動を記録した。川内原発の基準地震動Ss-1を部分的に超えており、震源近傍では1,000ガルを超え、川内原発のクリフエッジを超えていた可能性すらある。熊本地震はまさに福岡高裁決定への自然界からの厳しい回答ではないか。熊本地震を踏まえれば、川内原発は直ちに運転中止すべきであり、地震動評価手法を根本的に改定し、基準地震動を作り変える必要がある。これを最後に述べる。

1 求められる安全性のレベル

2015年4月14日の福井地裁差止決定は、2014年5月21日の大飯3・4号運転差止判決（以下「福井地裁判決」）[3]を引き継ぎ、同じ樋口裁判長の下で出された決定であることから、これらの内容をまず整理し、それが大津地裁決定にどのように引き継がれているかを明らかにし、他の決定との関係にも触れる。

1.1 人格権侵害は万が一にも容認できない

福井地裁判決は、「人格権は憲法上の権利であり（13条、25条）、また人の生命を基礎とするものであるがゆえに、我が国の法制下においてはこれを超える価値を他に見出すことはできない。したがって、この人格権とりわけ生命を守り生活を維持するという人格権の根幹部分に対する具体的侵害のおそれがあるときは、その侵害の理由、根拠、侵害者の過失の有無や差止めによって受ける不利益の大きさを問うことなく、人格権そのものに基づいて侵害行為の差止めを請求できることになる。」

([3]p.38) と基本的立場を明確にし、「(1) 原子力発電所に求められるべき安全性」を次のように明記している。

万が一もない極めて高度な安全性、信頼性

「ひとたび深刻な事故が起これば多くの人の生命、身体やその生活基盤に重大な被害を及ぼす事業に関わる組織には、その被害の大きさ、程度に応じた安全性と高度の信頼性が求められて然るべきである。」([3]p.38) 「原子力発電所に求められるべき安全性、信頼性は極めて高度なものでなければならず、万一の場合にも放射性物質の危険から国民を守るべく万全の措置がとられなければならない。」「生命を守り生活を維持する利益は人格権の中でも根幹部分をなす根源的な権利 ということができる。本件ではこの根源的な権利と原子力発電所の運転の利益の調整が問題となっている。原子力発電所は、電気の生産という社会的には重要な機能を営むものではあるが、原子力の利用は平和目的に限られているから（原子力基本法 2 条）、原子力発電所の稼働は法的には電気を生み出すための一手段たる経済活動の自由（憲法 22 条 1 項）に属するものであって、憲法上は人格権の中核部分よりも劣位に置かれるべきものである。しかるところ、大きな自然災害や戦争以外で、この根源的な権利が極めて広汎に奪われるという事態を招く可能性があるのは原子力発電所の事故のほかは想定し難い。かような危険を抽象的にでもはらむ経済活動は、その存在自体が憲法上容認できないというのが極論にすぎるとしても、少なくともかような事態を招く具体的危険性が万が一でもあれば、その差止めが認められるのは当然である。」([3]pp.39-40)

福島第一原発事故は人格権の侵害

福島第一原発重大事故による放射能放出で避難生活を余儀なくされたこと自体が人格権の侵害である と次のように具体的に認定している。「福島原発事故においては、15 万人もの住民が避難生活を余儀なくされ、この避難の過程で少なくとも入院患者等 60 名がその命を失っている。家族の離散という状況や劣悪な避難生活の中でこの人数を遥か

に超える人が命を縮めたことは想像に難くない。さらに、原子力委員会委員長が福島第一原発から 250 キロメートル圏内に居住する住民に避難を勧告する可能性を検討したのであって、チェルノブイリ事故の場合の住民の避難区域も同様の規模に及んでいる。」([3]pp.38-39) 「原子力発電技術の危険性の本質及びそのもたらす被害の大きさは、福島原発事故を通じて十分に明らかになったといえる。本件訴訟においては、本件原発において、かような事態を招く具体的危険性が万が一でもあるのかが判断の対象とされるべきであり、福島原発事故の後において、この判断を避けることは裁判所に課された最も重要な責務を放棄するに等しいものと考えられる。」([3]pp.40-41)

このような認識の下、「(2) 原子炉規制法に基づく審査との関係」を次のように位置づけている。

改正原子炉等規制法ではなく憲法の観点から

「(1) の理は、人格権の我が国の法制における地位や条理等によって導かれるものであって、原子炉規制法をはじめとする行政法規の在り方、内容によって左右されるものではない。また、放射性物質の使用施設の安全性に関する判断については高度の専門性を要することから科学的、専門技術的見地からなされる審査は専門技術的な裁量を伴うものとしてその判断が尊重されるべきことを原子炉規制法が予定しているものであったとしても、この趣旨とは関係なく (1) の観点から司法審査がなされるべきである。したがって、改正原子炉規制法に基づく新規制基準が原子力発電所の安全性に関わる問題のうちいくつかを電力会社の自主的判断に委ねていたとしても、その事項についても裁判所の判断が及ぼされるべきであるし、新規制基準の対象となっている事項に関しても新規制基準への適合性や原子力規制委員会による新規制基準への適合性の審査の適否という観点からではなく、(1) の理に基づく裁判所の判断が及ぼされるべきこととなる。」([3]pp.41-42)

この観点から、「(3) 立証責任」を原告に負わせているが、次のように限定された立証に留まる。

原告による万が一の危険性の立証で足りる

「原子力発電所の差止訴訟において、事故等によって原告らが被ばくする又は被ばくを避けるた

めに避難を余儀なくされる具体的危険性があることの立証責任は原告らが負うのであって、この点では人格権に基づく差止訴訟一般と基本的な違いはなく、具体的危険がありさえすれば万が一の危険性の立証で足りるところに通常の差止訴訟との違いがある。」「規制基準への適合性の判断を厳密に行うためには高度の専門技術的な知識、知見を要することから、司法判断が規制基準への適合性の有無それ自体を対象とするのではなく、適合していると判断することに相当の根拠、資料があるか否かという判断にとどまることが多かったのには相応の理由があるというべきである。これに対し、(1)の理に基づく裁判所の判断は以下に認定説示するように必ずしも高度の専門技術的な知識、知見を要するものではない。」「被告に原子力発電所の設備が基準に適合していることないしは適合していると判断することに相当性があることの立証をさせこれが成功した後に原告らに具体的危険性の立証責任を負わせるという手法は原子炉の設置許可ないし設置変更許可の取消訴訟ではない本件訴訟においては迂遠な手法といわざるを得ず、当裁判所はこれを採用しない。(1)及び(2)に説示したところに照らしても、具体的な危険性の存否を直接審理の対象とするのが相当であり、かつこれをもって足りる。」([3]p.42)

こうして、福井地裁判決・差止決定では、クリフエッジを超える具体的危険性があることなど「原発の運転によって直接的にその人格権が侵害される具体的な危険があると認められる」([3]p.67)と認定し、大飯3・4号の運転差止判決および高浜3・4号の運転差止仮処分決定を出している。

1.2 人格権侵害が容認される安全性のレベル

福井地裁判決・差止決定が提起した問題のうち、(a)福島原発事故で避難生活を余儀なくされたこと自体が人格権の侵害であること、(b)原発の運転という経済活動の自由は人格権より劣位にあること、(c)人格権を侵害する具体的危険性があれば運転差止請求が認められることについては、その後の鹿児島地裁決定、福井地裁棄却決定、大津地裁決定、福岡高裁決定のいずれにおいても認定されており、ほぼ確定した司法判断と見なせる。

これを確認するため、川内原発の運転差止請求を棄却した福岡高裁決定を引用しておく。

(a)については、「生活の本拠等を離れて避難しなければその生命、身体に重大な被害を受けることを余儀なくされること自体、そもそも生命、身体に対する重大な侵害行為というべきである上、上記のとおり、いったん放射能によって汚染された環境を効果的かつ効率的に浄化することは現在の科学技術水準からはほとんど不可能であって、重大事故がもたらす災害によりその生命、身体に直接的かつ重大な被害を受けることが想定される地域に居住等する者は、事故後その居住等する地に戻る事が事実上不可能ないし著しく困難になると考えられることにも鑑みると、たとい適切かつ実効的な避難計画が策定されていたとしても、その居住等する地を離れて避難しない限り、当該発電用原子炉施設の運転等に起因する放射線被曝によりその者の生命、身体に直接的かつ重大な被害が生じる具体的な危険が存する場合には、差止請求の要件を満たすものというべきである。」([6]pp.57-58)

(b)については、「被侵害利益の内容、性質、侵害行為の態様、利益侵害(被害)の重大さ及び深刻さに鑑みると、本件原子炉施設の運転に起因して人の健康の維持に悪影響を及ぼす程度の量の放射線に被曝させる限りにおいて、当該侵害行為は受忍限度を超えるものとして違法というべきであり、本件 原子炉施設を稼働させることによる地域の電力需要に対する電力の安定供給の確保、産業経済活動に対する便益の供与、資源エネルギー問題や環境問題への寄与などといった公共性ないし公益上の必要性は、当該侵害行為の違法性を判断するに当たっての考慮要素となるものではない といふべきである。」([6]p.57)

(c)については、「抗告人らの差止請求に係る被侵害利益が生命、身体という各人の人格に本質的な価値に係るものであり、本件原子炉施設の安全性の欠如に起因する放射線被曝という侵害行為の態様、当該侵害行為によって受ける抗告人らの被害の重大さ及び深刻さに鑑みると、そのような侵害行為を排除するため、人格権に基づく妨害予防請求としての本件原子炉施設の運転の差止請求が認

められるためには、本件 原子炉施設が安全性に欠けるところがあり、その運転に起因する放射線被曝により、抗告人らの生命、身体に直接的かつ重大な被害が生じる具体的な危険が存在することをもって足りると解すべきである。」([6]pp.56-57)

違うのは、(c)の具体的な危険性がどの程度のレベルであれば人格権侵害の危険性があると認められるかである。

安全目標が達成されればよい!?

福井地裁差止決定の直後に出示された鹿児島地裁決定では、「絶対的安全性」の確保は不可能と断じ、原子力規制委員会が2013年4月に定めた安全目標は「相当程度厳格な目標であると評価することができ、この安全目標が達成される場合には、康被害につながる程度の放射性物質の放出を伴うような重大事故発生の危険性を社会通念上無視し得る程度に小さなものに保つことができると解するのが相当である。」([9]p.85)と踏み込んだ。しかし、安全目標やそのベースとなる確率論的安全評価手法については、原子力規制委員会ですら適合性審査で「参考」とするに留めており、規制基準にも組み込まれてはいない。その意味で、川内判決では、安全目標の内容について「国民的な議論を経て社会的な合意がされた結果とみることはできない」([9]p.85)と認めながら、原子力規制委員会を超える主張を展開し、司法の立場から国民に安全目標を受け入れるように迫っていると言える。これは許されることではない。

年超過確率で1~10万年に1回程度ならよい!?

福井地裁差止決定を取り消した福井地裁棄却決定では、「絶対的安全性を要求することは相当ではない。」「福島原発事故等に伴って現実に生じた被害の甚大さや深刻さを踏まえるならば、ここでいう安全とは、当該原子炉施設の有する危険性が社会通念上無視し得る程度にまで管理されていることをいうと解すべきである。」([5]pp.80-81)と曖昧な基準を示す一方、具体的には、「本件基準地震動については、年超過確率が 10^{-4} ~ 10^{-5} /年(1万ないし10万年に1回程度)という極めて低い数値となっており、本件基準地震動は不確かさが保守的に評価されているものと評価できることも併せ

考慮すると、本件原発の地震に対する危険性が社会通念上無視し得る程度にまで管理されているかという観点に照らしても、本件基準地震動は、本件原発の耐震安全性を確保するための基準として合理性があるというべき」([5]pp.110-111)としている。しかし、この年超過確率も安全目標と同様、規制審査では単なる参照扱いにすぎず、信頼性に乏しいと言わざるを得ない。

年超過確率や安全目標は社会的許容限度ではない

現に、福岡高裁決定は次のように指摘している。「新規基準及び地震ガイドの基準地震動の策定における 超過確率の参照は、発電用原子炉施設の耐震設計の基本となる基準地震動を決定論的な手法による評価により策定するものとしつつ、その妥当性を確率論的な手法による評価の面からも検証することにより、耐震設計における安全性の向上を図ろうとする趣旨によるものと認められるのであって、原子力規制委員会が確率論的安全評価の手法に基づき安全目標を設定したのとその趣旨を同じくするものということができる(なお、決定論的手法による安全(リスク)評価と確率論的手法による安全(リスク)評価は、安全確保のための評価手法として、その方法論のみならず評価の観点ないし基礎となる考え方ないし理念を異にするものであるから、原子力規制委員会が確率論的安全評価の手法による安全目標を設定したからといって、当該安全目標が直ちに新規基準ないし地震ガイドの解釈指針となるものでなく、また、安全目標が導入された趣旨及びその経緯からしても、安全目標が直ちに危険性(リスク)の社会的許容限度を画する基準となるものでもない。」([6]pp.139-140)

最新の科学技術的知見を踏まえた合理的予測

では、当の福岡高裁決定はどのような安全性を求めているのであろうか。

福岡高裁決定は、これまで「災害が万が一にも起こらないようにするため、原子炉施設の安全性につき、科学的、専門技術的見地から、多段階にわたり十分な審査を行わせ」([6]p.60)てきたが、福島第一原発事故が起きてしまったと率直に認めた上で、次のように「社会通念の基準」を持ち出す。

「地震、津波や火山の噴火といった自然現象の予測における科学的、技術的手法には必然的に限界

が存するものであって、少なくとも現時点においてその限界が克服されたとはいえない状況にあることは公知の事実であり、最新の科学的技術的知見を踏まえた予測を行ったとしても、当該予測を超える事象が発生する危険(リスク)は残る。また、一般に、自然現象については、地震や火山事象についても、規模と発生頻度との間に相関関係が認められており、その規模が大きくなればなるほど、発生頻度(発生確率)は低下する関係にあるが、その最大規模の自然現象の発生頻度(発生確率ないしリスク)が零になることはない。そして、そのようなリスクを許容するか否か、許容するとしてどの限度まで許容するかは、社会通念を基準として判断するほかにないというべきである。」([6]p.59)

福岡高裁決定は、肝心のこの許容限界を示さなければかりか、「発電用原子炉施設について最新の科学的、技術的知見を踏まえた合理的予測を超えた水準での絶対的な安全性に準じる安全性の確保を求めることが社会通念になっているということはできず¹、また、極めてまれではあるが発生すると発電用原子炉施設について想定される原子力災害をはるかに上回る規模及び態様の被害をもたらすような自然災害(引用者注:巨大な「カルデラ噴火」を指す)を含めて、およそあらゆる自然災害についてその発生可能性が零ないし限りなく零に近くなる限り安全確保の上でこれを想定すべきである²との社会通念が確立しているということもできない」([6]pp.64-65)と切り捨てる一方、現在の「原子炉等規制法の規制の在り方」にこの社会通念が反映していると決めつけている。すなわち、「本件改正後の原子炉等規制法は、福島第一原発事故の教訓等に鑑み、発電用原子炉施設等の安全規制に最新の知見を反映させ、発電用原子炉施設が常に最新の

¹ゼロリスクは追及できるし、実際に追及されてきた。例えば、新幹線では踏切を設置しなかったため踏切事故はゼロである。日本国内では現在、原発ゼロでも電力供給に余裕があり、再生可能エネルギーへの転換で地球温暖化対策もでき、原発重大事故ゼロのゼロリスク電力生産は十分達成できる。

²自然現象は人間の想定にかかわらず発生する。問題は、巨大カルデラ噴火を含めて将来起こりうる自然現象において、原発の安全性を確保できるかどうかであり、自然現象の発生確率の高低ではない。巨大噴火の予兆があったとき、人は農地等以外の財産をもって避難できるが、原発の使用済核燃料はピット内で5年以上冷却しなければ移動させられない。この特殊性こそが「原発についてのみ別異に考えるべき根拠」なのである。

科学的技術的知見を踏まえた基準に適合することを求めるとともに、科学的、技術的手法の限界を踏まえて、想定外の事象が発生して発電用原子炉施設の健全性が損なわれる事態が生じたとしても、放射性物質が周辺環境に放出されるような重大事故が生じないように、重大事故対策の強化を求めるものであると解される。このような本件 改正後の原子炉等規制法の規制の在り方には、我が国の自然災害に対する発電用原子炉施設等の安全性についての社会通念が反映しているといえることができる。」「発電用原子炉施設が現在の科学技術水準に照らし客観的にみて上記のような安全性に欠けるものである場合には、当該発電用原子炉施設の運転等によって放射性物質が周辺環境に放出され、放射線被曝により人の生命、身体に重大な被害を与える具体的危険が存在するものと解すべきである。」([6]pp.64-65)

結局のところ、「現在の科学技術水準に照らし客観的にみて安全性に欠けるか否か」が社会通念による基準だということになる。

1.3 十二分の余裕と見落としの可能性に配慮

福井地裁判決・差止決定は、原発の満たすべき安全レベルを具体的に定めているわけではないが、「技術の危険性の性質やそのもたらす被害の大きさが判明している場合には、技術の実施に当たっては危険の性質と被害の大きさに応じた安全性が求められることになるから、この安全性が保持されているかの判断をすればよい」([3]p.40)として、万が一の具体的危険性の存在を認定している。

大津地裁決定においては、「有史以来の人類の記憶や記録にある事項は、人類が生存し得る温暖で平穏なわずかな時間の限られた経験にすぎないことを考えるとき、災害が起こる度に『想定を超える』災害であったと繰り返されてきた過ちに真摯に向き合うならば、十二分の余裕をもった基準とすることを念頭に置き、常に、他に考慮しなければならない要素ないし危険性を見落とししている可能性があるととの立場に立ち、対策の見落としにより過酷事故が生じたとしても、致命的な状態に陥らないようにすることができるとの思想に立って、新規基準を策定すべきものとする。債務者の保全段階における主張及び疎明の程度では、新規

制基準及び本件各原発に係る設置変更許可が、直ちに公共の安寧の基礎となると考えることをためらわざるを得ない。」([19]p.45)と断じている。

いずれも、福島原発事故の深刻さと経緯に鑑み、「危険の性質と被害の大きさに応じた安全性」や「十二分の余裕と危険性見落としの可能性への配慮」を具体的に求めている。これらは、福島原発事故から5年後の今なお原子力規制行政への国民の不信感が強く、国民の過半数が原発再稼働に反対している現状を踏まえたものと言え、まさに社会通念を反映したものと言える。

福岡高裁決定においても、「発電用原子炉施設の敷地において発生することが合理的に予測される最大の地震動を策定」すること、および「最新の科学的技術的知見を踏まえて合理的に予測される規模の自然災害を想定」([6]p.84)することを求めていることから、基準地震動などを策定する際には、このような「危険の性質と被害の大きさに応じた安全性」を考慮し、「十二分の余裕と危険性見落としの可能性」に配慮するよう具体的に求めていく必要がある。

2 審査基準と適合性判断の評価

具体的な危険性の存否を直接審理

福井地裁判決では、万が一の「具体的な危険性の存否を直接審理の対象とするのが相当であり、かつこれをもって足りる。」([3]p.42)とし、規制基準や適合性審査の適否には言及していない。福井地裁差止決定では、高浜3-4号の再稼働認可(2015.2.12)が出ていたことから、「新規制基準に求められるべき合理性とは、原発の設備が基準に適合すれば深刻な災害を引き起こすおそれが万が一にもないといえるような厳格な内容を備えていることであると解すべきことになる。しかるに、新規制基準は緩やかにすぎ、これに適合しても本件原発の安全性は確保されていない。」([4]p.45)と踏み込んだ。そして、「具体的危険性の有無を直接審理の対象とする場合であっても、規制基準の合理性と適合性に係る判断を通じて間接的に具体的危険性の有無を審理する場合のいずれにおいても、具体的危険性即ち被保全債権の存在が肯定できるといえる。」(同上)と断じた。

伊方訴訟最高裁判決への回帰

他方、鹿児島地裁決定では、福井地裁判決・差止決定が行った「万が一の具体的な危険性の存否の直接審理」を全面的に拒否し、伊方訴訟最高裁判決に沿った判断に引き戻した。その上で、「新規制基準は、福島第一原発における事故の経験等をも考慮した最新の科学的知見及び安全目標に照らし、その内容に不合理な点はうかがわれない。」と踏み込み、「専門家の異論が残っているとしても、これらをもって新規制基準の内容に不合理な点があるということにはならない。」([9]pp.126-127)と擁護し、「新規制基準への適合性判断は原子力利用における安全性の確保に関する専門的知見等を有する委員長及び委員から成る原子力規制委員会により、債務者からの多数回にわたるヒアリングや、一般からの意見募集及びそこで提出された意見の検討を経て示されたものであり、その調査審議及び判断過程が適正を欠くものとうかがわれる事情はなく、むしろその調査審議は厳格かつ詳細に行われたものと評価でき、その判断過程にも看過し難い過誤、欠落があるとうかがわれないから、後記(エ)の債権者らの主張を踏まえ、あるいは福島第一原発における事故の経験等をも考慮した最新の科学的知見に照らしても、不合理な点は認められないというべきである。」([9]p.135)と、これ以上ありえないほどの手放しで原子力規制委員会による審査経過と結果を絶賛した。

福井地裁棄却決定は、ここまでひどくはないが、伊方訴訟最高裁判決に従い、「原子力規制委員会の判断に不合理な点があるか否かという観点から審理・判断」([5]p.81)し、「原子力規制委員会の判断に不合理な点はないものと認められ、債権者らの主張疎明を考慮しても、債務者による上記疎明を揺るがすには足りないというべきである」([5]p.224)るとして、福井地裁差止決定を取り消した。

伊方訴訟最高裁判決の枠内での運転差止決定

これに対し、天津地裁決定では、伊方訴訟最高裁判決の枠組みの中で異を唱え、「本件は、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、原子力規制行政に大幅な改変が加えられた後の事案であるから、債務者は、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、原子力規制行政がどのように変化し、その結果、本件

各原発の設計や運転のための規制が具体的にどのように強化され、債務者がこの要請にどのように応えたかについて、主張及び疎明を尽くすべきである。原子力規制委員会が債務者に対して設置変更許可を与えた事実のみによって、債務者が上記要請に応える十分な検討をしたことについて、債務者において一応の主張及び疎明があったとすることはできない。」([19]p.43)と警告し、「債務者の保全段階における主張及び疎明の程度では、新規制基準及び本件各原発に係る設置変更許可が、直ちに公共の安寧の基礎となると考えることをためらわざるを得ない。」([19]p.45)と批判し、「非常時の備えにおいてどこまでも完全であることを求めることは不可能であるとしても、また、原子力規制委員会の判断において意見公募手続が踏まれているとしても、このような備えで十分であるとの社会一般の合意が形成されたといつてよいか、躊躇せざるを得ない。したがって、新規制基準において、新たに義務化された原発施設内での補完的手段とアクシデントマネジメントとして不合理な点がないことが相当の根拠、資料に基づいて疎明されたとはいいい難い。」([19]pp.46-47)「基準地震動 Ss-1 の水平加速度 700 ガルをもって十分な基準地震動としてよいか、十分な主張及び疎明がされたということとはできない」([19]p.50)とし、高浜 3-4 号の運転差止決定を出している。

主張。疎明が尽くされなければ、不合理と判断

福岡高裁決定も伊方訴訟最高裁判決の枠組みの中で審理判断を行う方針をとったが、裁判所には「高度な科学的、専門技術的知見に基づく判断の当否を同程度の水準に立って行うことは本来予定されていない」という「裁判制度に内在する制約」を強調し、債務者事業者が相当の根拠、資料に基づき主張、疎明を尽くし、これに債権者が反証を行い、その結果として債務事業者の主張、疎明が尽くされない場合は審査基準や判断などに不合理があることが推認されることを強調している。これは、大津地裁決定を意識したものと思われるが、その詳細は下記の通りである。

「被告事業者は、当該具体的審査基準に不合理な点のないこと及び当該発電用原子炉施設が当該具体的審査基準に適合するとして原子力規制委員会

の判断に不合理な点がないことないしその調査審議及び判断の過程に看過し難い過誤、欠落がないことを相当の根拠、資料に基づき主張、立証(保全処分)の申立てにあっては債務者事業者において主張、疎明)すれば足りるというべきである。これに対し、原告(債権者)は、被告(債務者)事業者の上記の主張、立証(疎明)を妨げる主張、立証(疎明)(いわゆる反証)を行うことができ、被告(債務者)事業者が上記の点について自ら必要な主張、立証(疎明)を尽くさず、又は原告(債権者)の上記の主張、立証(疎明)(いわゆる反証)の結果として被告(債務者)の主張、立証(疎明)が尽くされない場合は、原子力規制委員会において用いられている具体的審査基準に不合理な点があり、又は当該発電用原子炉施設が当該具体的審査基準に適合するとして原子力規制委員会の判断に不合理な点があることないしその調査審議及び判断の過程に看過し難い過誤、欠落があることが事実上推定されるものというべきである。」([6]pp.68-69)

しかも、福岡高裁決定は、原子力規制委員会による審査基準適合判断が出ているかどうかにかかわらず、債務者事業者に求められる主張、疎明の程度は「いささかでも軽減されるものでないことはいうまでもな」と断言している([6]p.70)。これは、大津地裁決定が「原子力規制委員会が債務者に対して設置変更許可を与えた事実のみによって、…債務者において一応の主張及び疎明があったとすることはできない。」([19]p.43)と判示したのと同じである。

したがって、債務者事業者の主張、疎明が債権者によって徹底的に反証され、債務者事業者がそれに相当の資料に基づいて反論できなければ、設置変更許可(再稼働認可)は不合理だと司法は判断すべきだということになる。川内原発の基準地震動については、まさに債権者が債務者事業者の誤った主張を根底から暴露・批判し、債務者事業者は裁判長から何度も反論を促されながら、それに対する何らの反論もなしえなかったのであるから、再稼働認可は不合理と判断されるべきであったといえる。この点の詳細は後述することにして、火山については、福岡高裁決定自身が火山ガイド(審査基準)は不合理だと判断しておきながら、再稼

働認可は不合理ではないと判断しており、このことについて、まずは触れておこう。

火山ガイドは不合理だが、審査結果は合理的!?

福岡高裁決定は、「火山ガイドは不合理だ」と次のように判断している。「噴火可能性につながるモニタリング結果が観測された(火山活動の兆候を把握した)ときには、原子炉の停止、適切な核燃料の搬出等の実施を含む対処を行うものとしているところからすると、地球物理学的及び地球化学的調査等によって検討対象火山の噴火の時期及び規模が相当前の時点での確に予測できることを前提とするものであるということが出来る。」([6]p.217)他方、「現在の科学的技術的知見をもってしても、原子力発電所の適用期間中に検討対象火山が噴火する可能性やその時期及び規模を的確に予測することは困難であるといわざるを得ないから、立地評価に関する火山ガイドの定めは、少なくとも地球物理学的及び地球化学的調査等によって検討対象火山の噴火の時期及び規模が相当前の時点での確に予測できることを前提としている点において、その内容が不合理であるといわざるを得ない。」([6]p.218)

これは、噴火の予兆を把握してすぐに原発の運転を止めたとしても、原子炉内の使用済核燃料が高熱と高放射線を発し続けるからであり、少なくとも5年間はピット内で崩壊熱を冷やし、放射線を遮蔽し続ける必要がある、その間は外部へ搬出できないからである。ところが、福岡高裁決定は原発にのみ特殊なこの事情を別異に考慮することなく、無視したのである。

「少なくとも今日の我が国においては、このようにその影響が著しく重大かつ深刻なものではあるが極めて低頻度で少なくとも歴史時代において経験したことがないような規模及び態様の自然災害の危険性(リスク)については、その発生の可能性が相応の根拠をもって示されない限り、建築規制を始めとして安全性確保の上で考慮されていないのが実情であり、このことは、この種の危険性(リスク)については無視し得るものとして容認するという社会通念の反映とみる事が出来る。」「そうであるとすれば、発電用原子炉施設の安全性確保についてのみ別異に考える根拠はない」([6]p.222)と判断した。一方では、破局的なカルデラ噴火は

「将来必ず発生する」が「合理的な予測は困難」だと認定しておきながら、「その発生の可能性が相応の根拠をもって示されない限り」と条件付けるのは、不可能な立証を債権者に求めることに等しい。他方では、「相手方がした前記5つのカルデラ火山の噴火の活動可能性が十分に小さいとした評価には、その過程に不合理な点があるといわざるを得ない。」([6]p.228)と判断しているのである。債務者事業者は、福岡高裁決定で「問題点も指摘されている」(同 p.228)と認定された論文に基づいて「60年以上の余裕を持って予測できる」[16]と頑迷に主張しているのであるから、なぜ、債務者事業者に対して「それが発生しないことを相応の根拠をもって示す」ことを求めないのであろうか。

いずれにせよ、今の科学技術水準では、川内原発の運用期間中にカルデラ噴火が発生するか否かを相当の根拠をもって示すことができないのであるから、経済的活動の自由より憲法上上位にある人格権の侵害防止を優先させるのが、憲法の番人たる司法のあるべき判断ではなからうか。

3 基準地震動における不確かさ考慮

福岡高裁決定において最も重要な論点は、原発の安全性のレベルを社会通念ではかり、「最新の科学的技術的知見を踏まえて合理的に予測される規模の自然災害を想定した発電用原子炉施設の安全性の確保を求める」([6]p.64)ことが社会通念だということであった。ここには、福井地裁判決の示した論点、すなわち、「大きな自然災害や戦争以外で、この根源的な権利が極めて広汎に奪われるという事態を招く可能性があるのは原子力発電所の事故のほかは想定し難い」のであり「この被害の大きさに応じた安全性が求められる」([3]p.40)という最も重要な司法判断が全く顧みられていない。

「ゼロリスク」や「絶対的安全性」はあり得ないと言うが、それはリスクを押しつける側の論法であり、リスクを押しつけられる側や「リスクによる権利侵害」を阻止しようとする側の論法ではない。何より、「ゼロリスク」は工学的には十分可能であり、常に追及されてきた。新幹線では踏切がないから踏切事故は起きないし、高架にして踏

切をなくせば踏切事故はなくせる。電力供給は原発ゼロでも十二分に足りている。ゼロリスクを放棄するのではなく、ゼロリスクを追及するからゼロリスクが実現できるのであり、リスクを容認してしまえば、いつまでたってもリスクは減らない。ゼロリスクが可能なのに、それをあきらめて、たとえ「無視しうるほどの小さなリスク」であろうとも人格権の侵害を受け入れなければならない理由は全く存在しない。

リスクを押しつけようとする側にとって、「ゼロリスク」や「ゼロリスクに限りなく近い絶対的な安全性」は到底受け入れ難いものであろう。しかし、原発の安全性を論じる場合、最新の科学技術的知見による合理的な予想を超えるほど大きな地震動の想定が争点になっているわけではない。ここに大きな勘違いがある。

基準地震動に則して言えば、最新の科学的技術的知見を合理的に取り入れれば、少なくとも今の2倍に引上げる必要がある。最近20年間の地震観測記録を地震動評価手法に反映させ、最新の地震動評価手法で地震動評価をやり直せばさらに引上げる必要も出てこよう。原子力ムラの社会通念ではなく、地震学界や国民目線の社会通念に従って基準地震動を見直せば、それ以外にはあり得ない。

ここでは、福岡高裁決定において争点となった基準地震動における不確かさ考慮について、債権者の主張を補強する新たな知見を紹介するとともに、福岡高裁決定の誤った事実認定について指摘しておく。

3.1 偶然的な不確かさは低減できない

福岡高裁決定は、「経験式から導き出される平均像を用いることによって生じるばらつきを考慮するに当たっても、地域的特性を踏まえたものでなければならないというのが新規制基準の趣旨」([6]p.95)であり、「平均像とは、それらの関係式が構築される基となった観測記録が得られた各地点で発生する地震全体の平均像のことにほかならず、当該基となった地震に係る地震発生様式や震源特性、伝播経路特性、敷地地盤の特性(地域的特性)等が平均像からのばらつきを生じさせる主たる要因となっている」([6]p.95)と主張する。

この記述を見れば、福岡高裁決定では「認識論的不確かさ」と「偶然的な不確かさ」を区別できていないことがわかる。確かに、地震動のばらつきは地域性によるところが大きいですが、そのばらつきには、さまざまな知見と調査を尽くせば低減できる「認識論的不確かさ」と、いくら手を尽くしても低減できない「偶然的な不確かさ」の2種類がある。福岡高裁決定は前者については理解しているが、後者については全く理解できていない。データ解析の経験がなければ、それも無理はないが、最新の知見によれば、地震動に含まれるばらつきを2つの不確かさに分離し、偶然的な不確かさを定量的に明らかにする試みが始まっている。

内山・翠川(2013)[27]の試みがそれであり、次のように述べている。「地震動強さのばらつきは、認識論的不確かさ(epistemic uncertainty)と偶然的な不確かさ(aleatory uncertainty)に分離することができる。認識論的不確かさは、より正確なモデル化や新しい知見・データを追加することで低減可能なばらつき、偶然的な不確かさは新しい知見・データが追加されても低減可能なばらつきである。」「震源特性における震源メカニズムや破壊伝播方向、伝播経路における媒質(速度、減衰構造)の不均質性、サイト特性における地盤の不整形性や入射角などによる地震動強さの違いは予め想定することが困難であり、これらが地震間および地震内のばらつきにおける偶然的な不確かさの要因になっていると考えられる。」「地震間のばらつきは震源特性、地震内のばらつきは伝播経路・サイト特性がばらつきを与える主たる要因として指摘されている。」

このような位置づけの下、内山・翠川(2013)は、防災科学研究所のK-NETおよびKiK-netを対象に、K-NETの運用が開始された1996年から2010年12月までに発生した $4.5 \leq M_w \leq 6.0$ かつ震源深さ100km以浅の中小地震で得られた強震記録、756地震40,193データ(165内陸地殻内地震8,431データ、439プレート境界地震22,242データ、152スラブ内地震9,520データ)という膨大な量の国内地震データに基づいて、最大加速度または最大速度を求める距離減衰式を回帰させ、データのばらつきを分析している。その結果、最大加速度のば

らつきは「平均値+標準偏差」が平均値の2.34倍になる大きさであること、地震間のばらつきの43%が偶然的不確定性によるものであることを導出している。地震内のばらつきにおいても同様になるとすれば、たとえ、不確かさの考慮によって認識論的不確定性によるばらつきをゼロにできたとしても、低減不可能な偶然的不確定性によるばらつきは依然として存在するのであり、その大きさは「平均値+標準偏差」が平均値の1.75倍になる大きさだということになる。より詳細には、次の通りである。

内山・翠川(2013)[27]は、最大加速度の距離減衰式に関する回帰誤差を分析した結果、地震間のばらつきの自然対数標準偏差を0.522(「平均値+標準偏差」は平均値の $e^{0.522} = 1.69$ 倍になる)、地震内のばらつきの自然対数標準偏差を0.672($e^{0.672} = 1.96$ 倍)と導いている。これより、全体のばらつきの自然対数標準偏差は0.851(= $[0.522^2 + 0.672^2]^{0.5}$, $e^{0.851} = 2.34$ 倍)になる。内山・翠川(2013)はさらに、地震間のばらつきについて、認識論的不確定性によるばらつきと偶然的な不確定性によるばらつきに分離し、それぞれの自然対数標準偏差を0.361($e^{0.361} = 1.43$ 倍)と0.315($e^{0.315} = 1.37$ 倍)と求めている。したがって、地震間のばらつき全体の自然対数標準偏差は0.479(= $[0.361^2 + 0.315^2]^{0.5}$, $e^{0.479} = 1.61$ 倍)となり、元の0.522($e^{0.522} = 1.69$ 倍)より少し小さいが、これはばらつきを分離するための理論式に付随するやむを得ない誤差である。これより、地震間の自然対数分散の43%($0.315^2/[0.361^2 + 0.315^2] = 0.432$)が偶然的な不確定性によるものだという結果が得られる。内山・翠川(2013)[27]は今後、地震内のばらつきについても同様の分析を行う予定だが、地震内のばらつきについても自然対数分散の43%が偶然的な不確定性によるものだとすれば、地震間と地震内を合わせたばらつきのうち偶然的な不確定性によるばらつきは、自然対数分散で 0.559^2 (= $0.43 \times 0.522^2 + 0.43 \times 0.672^2$)、自然対数標準偏差で0.559($e^{0.559} = 1.75$ 倍)になる。

内山・翠川(2013)[27]の地震データにはMw6.0を超える大地震のデータが含まれていないが、その理由はばらつきの分析精度を高めるためである。

具体的には、次のように述べている。「大地震を対象にした場合には、中小地震に比べてその震源位置の空間分解能が疎になることにより、統計的に有意な解が得られない可能性が考えられる。また、規模の大きな地震を対象とした場合にはディレクティビティ効果など、ばらつきに影響を与える要因が中小地震よりも多くなると考えられることから、ばらつきに影響を与える要因を減らし、その解釈をより明確にするために中小地震($4.5 \leq Mw \leq 6.0$)を対象とした検討を行う。」したがって、大地震に対しては、ばらつきの要因が増えるため、一層複雑な検討が必要であり、認識論的不確定性についても、偶然的な不確定性についても、より大きなばらつきが伴うことは避けられない。

実際には、認識論的不確定性をゼロにするなどということは不可能に近く、認識論的不確定性の残りのばらつきと偶然的な不確定性によるばらつきを合わせて、「平均値+標準偏差」が平均値の約2倍になるという程度のばらつきを最低限考慮すべきだということになる。これこそが福岡高裁決定の取り入れるべき最新の知見であった。

ここで、参考になるのが、川内1.2号で基準地震動に取り入れられている2004年北海道留萌支庁南部地震(M6.1, Mw5.7)のHKD020観測点での地震観測記録である。図1は、同地震のK-NETおよびKiK-net観測点の最大加速度PGAの距離減衰

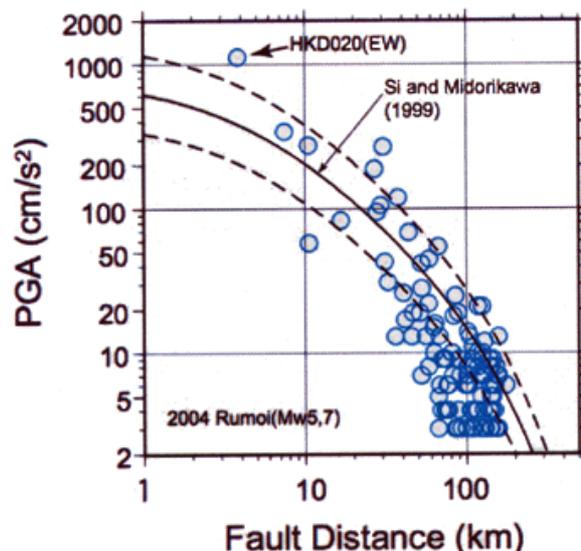


図1: 2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NETおよびKiK-net観測点の最大加速度の距離減衰と司・翠川(1999)による距離減衰式(実線が平均、破線が平均±標準偏差)との比較 [21]

衰と司・翠川(1999)による距離減衰式との比較だが、「HKD020(EW)」の最大加速度が「平均値+標準偏差」(平均値の約2倍)の破線をかなり越え、「平均値の約3倍」になっているのが分かる。この地震が起こる前には距離減衰式の平均値の実線で予測する以外に、たとえ認識論的不確定性によるばらつきを考慮して1.5倍に引上げていたとしても(耐専スペクトルで内陸補正をしない場合がこれに相当する)、さらに2倍の偶然的な不確定性等が存在していることになる。

福岡高裁決定は、「抗告人らの主張するとおり、本件原子炉施設敷地周辺は、内陸地殻内地震としては全国的な平均像よりも大きな地震動となる地域的な特性の存在がうかがわれるところである。しかしながら、上記のとおり、相手方は応答スペクトルに基づく地震動の評価においてNoda et al.(2002)の方法を適用するに当たり内陸補正係数を用いていないのであって、このことにより本件原子炉施設の存する地域の上記特性をも考慮したものである。」([6]p.98)としているが、これは2007年新潟県中越沖地震で明らかになった「震源特性が1.5倍に大きい」という認識論的不確定性を取り入れたにすぎず、偶然的な不確定性によるばらつきを考慮したものではない。

福岡高裁決定はこれに続けて、「本件原子炉施設において観測された地震の観測記録に基づく応答スペクトルのNoda et al.(2002)の方法を用いて導かれた応答スペクトルに対する比率は、おおむね全周期にわたり1.0を下回っていることからすれば、抗告人らの主張する偶然的な不確定性に伴うばらつきをしんしゃくしても、相手方がNoda et al.(2002)の方法を用いて行った応答スペクトルに基づく地震動の評価が直ちに過小なものとなっていることはできない」([6]pp.98-99)と判断しているが、これは偶然的な不確定性をゼロと認定するものにほかならず、「偶然的な不確定性に伴うばらつきをしんしゃく」したことはない。なんとすれば、図2からは、川内原発での地震観測記録はその平均が全国平均より大きいことが認められること(これは認識論的不確定性である)に加えて、偶然的な不確定性が平均の2倍程度存在することが認められるのであり、この偶然的な不確定性は、内

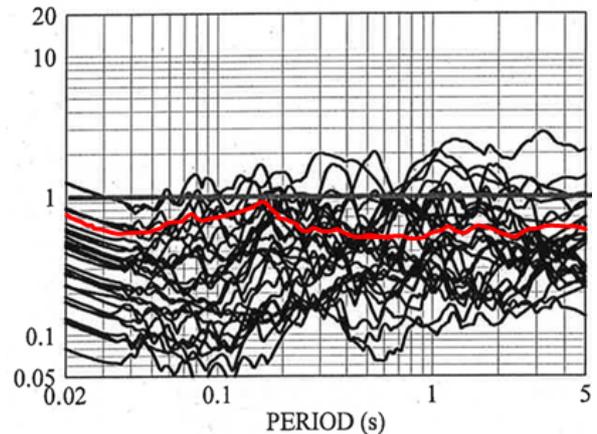


図2: 川内原発で観測されたM5.0以上の地震観測記録の応答スペクトルと耐専スペクトルとの比(水平方向) [13] (赤線は九州電力が再稼働申請時に示したM5.4以上の地震観測記録の平均 [12])

陸補正係数を用いないことで認識論的不確定性を考慮した上に、さらに考慮されるべきばらつきだからである。地震動のばらつきは「平均+標準偏差」が平均の約2倍になる程度に大きいというのが地震学界の常識であり、膨大な国内データに基づいて認識論的不確定性と偶然的な不確定性を分離した内山・翠川(2013)[27]の結果に基づけば、上述したとおり偶然的な不確定性は2倍近くになる。図2はそれを川内原発において数少ない地震観測記録で裏付けたものといえる。

福岡高裁決定は、「おおむね全周期にわたり1.0を下回っている」と認定しているが、図2が対数目盛であることを含めてよく見れば、1.5倍ないし2倍程度にまで「1.0」を超えており、そのような認定自身にかなり無理がある。また、このような視点の裏には、図2の最上部の曲線が最大値であるかのように見なしている可能性があるが、それは確率論的に間違っている。数少ない地震観測記録の中に最大値が含まれる確率は極めて小さく、図2に記されたデータは普通に起こりうる地震観測記録が収集されたものと見なすのが確率論的な常識である。確率論的にはさらに大きなデータが出て当然だと言えるのである。

さらに、福岡高裁決定は、「相手方は、応答スペクトルに基づく地震動評価において、地震規模を松田(1975)の関係式を用いて評価した上、距離減衰式としてNoda et al.(2002)の方法を用いており、経験式を重畳的に用いて評価しているが、各経験式が有する偶然的な不確定性に伴うばらつきは、経

験式を重畳する過程で相殺される部分も存する
と考えられる」([6]p.100)としているが、勘違い
も甚だしい。認識論的不確定性によるばらつきは小
さくできて、偶然的不確定性に伴うばらつきにつ
いてはその本来の性質から、経験式が重畳され
ることで「相殺」されるようなことは理論上絶対
にありえない。

基準地震動を策定する際には、全国的な平均像
から地域性を考慮して認識論的不確定性によるば
らつきをできる限りゼロに近づけることが必要だ
が、それだけでは偶然的不確定性によるばらつき
を考慮したことにはならない。この偶然的不確定
性が定量的に分析され始めたのはごく最近であり、
これまでは抽象的一般的な主張に留まらざるを得
なかったが、今後はより明確に位置づけられ、一
層定量的に議論されていくことになる。その意
味で、ここに紹介した内山・翠川(2013)[27]論文
は先駆的な意味を持つといえる。この最新の科学
的技術的知見を決して無視してはならない。

3.2 福岡高裁決定の誤った事実認定

福岡高裁決定は、基準地震動の策定に関する九
州電力による誤った説明を鵜呑みにし、完全に誤
った事実認定に基づいて運転差止請求を棄却して
いる。その最も致命的な誤りは、認識論的不確定
性を十分考慮すれば偶然的不確定性を無視でき
ると主張だが、これについてはすでに詳しく述べ
た。ここでは、これ以外の「致命的な誤り」につ
いてのみ指摘しておく。

鹿児島県北西部地震の余震による地震波形 の再現は、応力降下量の設定とは無関係

九州電力は、鹿児島県北西部地震の応力降下
量を 15.9MPa と算出し、これを市来断層帯市来区
間などの検討用地震の応力降下量として用いて
いる。この 15.9MPa は、三宅ら(1999)[17]が導
出した鹿児島県北西部地震の本震と余震の相
対的な関係を用いて、同本震の地震モーメント
 M_0 に比例して算出される仕組みになっている
が、この M_0 の値は、調査研究機関によって
導出法が異なるため、複数存在する。九州電力
は、そのうち最も小さな値(菊地・山中(1997)
[10]による値)を採用し、アスペリティ平均
応力降下量を 15.9MPa と小さく設定

した。これを正当化する根拠として挙げられた
のが、(ア) 15.9MPa を用いることによって本震
の地震波形が余震の地震波形で良く再現されて
いること、(イ) M_0 の導出法に不合理な点がない
ことこの 2 点であった。

しかし、(ア)については、余震から本震の地
震波形を合成する際に 15.9MPa や M_0 の値は全
く用いられておらず、無関係である。もともと、
三宅ら(1999)は、これら震源パラメータの値
とは無関係に、本震と余震の地震波形から得ら
れる相対的な関係だけを用いて、余震から本震
の地震波形を合成する新しい手法を提案してい
る。九州電力はこの手法を川内原発で観測され
た鹿児島県北西部地震の地震観測記録に適用し
ただけである。つまり、震源パラメータの値が
どのように設定されようが、結果には全く影響
してこないのである(注 1 参照)。このことを九
州電力は十分よく認識していたが、審査会合で
はそれには触れず、15.9MPa とすれば本震の
地震波形が良く再現できるかのように説明し
た。原子力規制委員会・規制庁は、このトリ
ックに気付かず、これに全く異を唱えること
はなかった。

また、ここでは、(イ)のように、用いられた
 M_0 導出法の合理性が問われているのではなく、
検討用地震と要素地震(1984年九州西側海域の
地震)の応力降下量の比=相対的な関係が重要
なのであり、 M_0 導出法が検討用地震と要素地
震とで異なると、両者の相対的な関係が崩れ
てしまい、応力降下量の比が正しく得られな
い。九州電力はこの要素地震の M_0 の値とし
て the Global CMT Project による値を用いて
いることから検討用地震のアスペリティ平均
応力降下量の元になった鹿児島県北西部地震
の M_0 の値としても the Global CMT Project
による値を採用すべきであり、アスペリティ
平均応力降下量を 25.1MPa に上げるべきで
ある(注 1 参照)。福岡高裁審尋の場で、私は
そのように主張した。この The Global CMT
Project による M_0 導出法はハーバード大学
で開発され、1982年から2006年まで「the
Harvard CMT Project」として運用され、ア
メリカ国立科学財団 NSF (National Science
Foundation) の財政的支援を受けて今日に
引き継がれている。その膨大なデータは「The
CMT

Catalog」と呼ばれ、国際的に活用されている。そのデータに不合理性は全くないと言って良い。

福岡高裁決定は、上述の（ア）と（イ）のような誤った事実認定で原子力規制委員会・規制庁の審査過程における過誤・欠落を見落としたりしたと言える。

以上の観点から福岡高裁決定を読み直すと、いかに奇妙な無理のある論理立てであるかがわかるので、少し長いですが以下に引用しておく。『菊地・山中(1997)』は、上記地震の観測記録に基づき、震源断面を詳細にモデル化するなどして上記地震の地震モーメント (M_0) 等の震源パラメータを評価したものであって、その過程に不合理な点は見いだせない上、… 相手方が基本震源モデルに基づいて設定した震源パラメータについて上記地震の余震を要素地震として経験的グリーン関数法による地震動評価を行ったところ上記地震で得られた本件原子炉施設敷地の観測記録をおおむね再現することができたというのであり、他方で、原告人らが援用する『the Global GMT Project』の解析の方がより合理的であることを裏付ける疎明資料はなく、… 相手方の設定した値が他の解析機関が示した数値を下回っていることの一事をもって、相手方の平均応力降下量及びアスペリティ実効応力の設定が不合理であるということはできない。また、相手方は、要素地震として昭和 59 年 8 月 15 日九州西側海域地震の観測記録を用いた上、その地震モーメント (M_0) として上記『the Global GMT Project』が解析した値を採用しているが、相手方が上記値を採用したのは、他に適切な知見が存在しなかったことによるものであるところ、上記機関の解析が不合理であることをうかがわせる疎明資料はなく、他方で、相手方が要素地震として適切な地震観測記録が得られている上記地震を採用したことが不合理であるということはできず、その結果、検討用地震の平均応力降下量及びアスペリティ実効応力の算定の基となった地震モーメント (M_0) と要素地震の地震モーメント (M_0) とが異なる解析機関等の評価によるものとなったとしても、そのことから直ちに相手方の平均応力降下量及びアスペリティ実効応力の設定が不合理であるということはできない。 ([6]pp.107-108)

「応力降下量を **25.1MPa** に引き上げても地震動は変わらない」との主張は大嘘

実は、the Global CMT Project による M_0 を用いてアスペリティ平均応力降下量を 15.9MPa から 25.1MPa へ 1.58 倍に引上げた地震動解析を行うよう、九州電力は原子力規制委員会・規制庁から指示されていた。ところが、九州電力は「the Global CMT Project の地震モーメントを採用した場合、検討用地震の短周期に影響を与えるパラメータが 1.58 倍になるが、要素地震のパラメータも 1.58 倍になるため両者の相対関係（合成倍率）は変わらないため、短周期側の検討用地震の波形合成結果は変わらない。」[15] と説明し、原子力規制庁は「納得」してしまった。その結果、アスペリティ平均応力降下量を 15.9MPa から 25.1MPa へ引上げた地震動解析は行われなかった。

しかし、この説明は根本的に間違っている。確かに、鹿児島県北西部地震の本震と余震の相対関係は地震波形から求められており、 M_0 や応力降下量など震源パラメータの値がどのように設定されようとも変わらない。これは先に述べたとおりである。しかし、検討用地震と要素地震（1984 年九州西側海域の地震）の間には「本震と余震の相対的な関係」はなく、検討用地震の M_0 が変わっても要素地震の M_0 は変わりようがない。これは九州電力による全くの誤認識であり、原子力規制委員会・規制庁もそれに気付かないという大失態を演じてしまったのである。この点についても、私は福岡高裁審尋の場で—「応力降下量を 25.1MPa に引き上げても短周期地震動は変わらない」と主張した九州電力とそれを了承した原子力規制庁の根本的誤り—と大書したスライドを示して裁判官に注意を喚起した。裁判官は九州電力に対し「これに反論するように」と促していたが、九州電力はこれに一切反論せず、弁明もしていない。にもかかわらず、福岡高裁決定はこれには全く触れず、無視したのである。原子力規制委員会・規制庁による重大な「過誤・欠落」を具体的に指摘されながら、福岡高裁決定は「審査過程に過誤・欠落はない」と判断し、「見て見ぬ振りをした」と言える。

表 1: 市来断層帯市来区間（五反田川断層）に関する断層パラメータ（鹿児島地裁決定 [9] 別表④および⑤）

	断層長さ km	断層幅 km	断層面積 km ²	地震モーメント N·m	短周期レベル N·m/s ² (b 基準の比)	応力降下量 ($\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$) MPa
(a) 再稼働申請時 *a	18.6	11	204.6	2.33×10^{18}	7.02×10^{18} (0.74)	(1.9, 16.5)
(b) 地震調査委考慮	24.9	13	323.7	5.83×10^{18}	9.54×10^{18} (1.0)	(2.4, 15.3)
(c) 九電モデル *b	24.9	13	323.7	1.39×10^{19}	1.53×10^{19} (1.6)	(5.8, 15.9)
(d) 九電モデル (1.25 倍)					1.92×10^{19} (2.0)	(5.8, 19.9)
(e) 修正モデル	24.9	13	323.7	1.39×10^{19}	1.28×10^{19} (1.3)	(5.8, 26.5)
(f) 修正モデル (1.5 倍)					1.92×10^{19} (2.0)	(8.7, 39.5)

*a: 断層面積 204.6km² からは未飽和断層の式で地震モーメント 2.78×10^{18} N·m, 短周期レベル 7.45×10^{18} N·m/s², 応力降下量 (2.3, 15.6)MPa とすべきところ, 九州電力は飽和断層の式を用いているため, (a) では九電評価値を記載した。
 *b: 九電モデルを (e) の修正モデルと比較すると, アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ が 3/5 と小さいのに, 短周期レベルが 6/5 と大きい。これはアスペリティ面積の断層面積に占める割合が修正モデルの 22.0%に対して 36.5%と異常に大きい（経験則から外れている）からである。地震動評価では, $\Delta\sigma_a$ が大きいほど評価結果が大きくなるため, 短周期レベルが少し大きくても地震動は過小評価になる。

入倉式で過小算定された震源パラメータと比べて余裕があるとの主張は成り立たない

福岡高裁決定は, 鹿児島県北西部地震の「地震モーメント (Mo) の値は, 強震動予測レシピの定める経験式 (入倉・三宅 (2001) の経験式) を用いた方法による場合と比べても, 約 1.9~2.4 倍大きくなっているというのであるから, 相手方の平均応力降下量の不確かさの考慮は, 地震ガイドの趣旨に照らしても, 不合理ということはできない。」([6]p.115) と判断しているが, 比較の対象を取り違えている。入倉・三宅 (2001) の経験式は北米中心の地震データに回帰させたものであり, これをそのまま国内の活断層に適用すると地震モーメントを大幅に過小評価してしまうので, これと比較しても, 入倉式による地震規模の過小評価を浮き出たせるにすぎず, 九州電力によるパラメータ設定を正当化することはできない。九州電力は応力降下量を先に決めてから地震モーメントを逆算しており, 見かけ上, 松田式から求めた地震規模に等しくなっているが, この地震規模から「強震動予測レシピの定める方法」で短周期レベル A やアスペリティ平均応力降下量を求めているわけではない。「強震動予測レシピの定める方法」とは全く異なる方法で先にアスペリティ平均応力降下量を設定し, 地震モーメントや短周期レベルを逆算しているだけなのである。

比較対象として選定すべきは, 前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏が「改正レシピ」と呼んだ強震動予測レシピの修正モデルである。

島崎氏は, 退職から 8 ヶ月後の日本地球惑星科学連合大会 (2015.5.28)[22] で, 入倉式によれば日本国内の活断層による地震の規模が著しく過小評価されると批判し, 日本地震学会 2015 年度秋季大会 (2015.10.28)[23] および日本活断層学会 2015 年度秋季学術大会 (2015.11.27-28)[24] でも同様の批判を行っている。そして, 島崎氏は「地震本部の強震動予測では, いわゆる改正レシピが使われており, (3) (引用者注: 松田式) によって地震モーメントが予測され, (4) のもととなる入倉・三宅 (2001) の式から断層面積が推定されている。」と指摘している。より正確に言うと, 「改正レシピ」では, 松田式による地震規模をそのまま適用するが, 震源断層の長さ L と幅 W については $L_{\text{model}} \leq L + 5\text{km}$, $W_{\text{model}} \leq W + 2\text{km}$ の範囲内でモデル ($L_{\text{model}}, W_{\text{model}}$) の断層面積を少し増やし, 通常の強震動予測レシピに従ってアスペリティ応力降下量や短周期レベルを算出するというものである。表 1 の (e) と (f) がその修正モデルだが, ここでは震源断層の長さや幅の増やし方が不明であるため増やしていない。福岡高裁決定はこの表の中で, (c) および (d) を (a) や (b) と比較しているが, 比較すべき対象は (e) および (f) なのである。この比較から一目瞭然なのは, 九州電力モデルと修正モデルの間で短周期レベル A の値に大差はなく, アスペリティ平均応力降下量に大差があるということである。これが地震動評価に決定的な影響を及ぼしている (注 1 参照) ということについては, 福岡高裁審尋の場で私は具体的に例を示して説明した。九州電力はそれに対して何も反論していない。福岡高裁決定は, 九州電力による震源パラメータ設

定のトリックを私が詳細に暴いたにもかかわらず、それを全く理解できなかったのか、鹿児島地裁決定と同じ過ちをくり返したのである³。

再現モデルを予測モデルと決めつけるのは 断層モデルによる地震動再現を否定するもの

福岡高裁決定は、財団法人地域地盤環境研究所が行った北海道留萌支庁南部地震の観測記録再現モデルによる地震動解析結果や原子力安全基盤機構が独自の断層モデルで行った地震動解析結果について、「いずれもモデルを用いた解析結果(地震動予測)にすぎない」([6]p.133)と決めつけた。しかし、いずれも国内で実際に観測された地震動を再現できるモデルによる解析であり、単なるモデルによる予測計算ではない。とくに、川内原発で基準地震動として採用されている北海道留萌支庁南部地震の観測記録は周辺により大きな最大加速度が得られる地点があり、そこに地震計があれば地震動がどの大きさになるのかを再現したものであり、単なる解析ではない。このような決めつけは最新の科学的・技術的知見を敢えて無視するものであり、極めて不当と言わざるを得ない。

地域地盤環境研究所の報告書は、本当に、実際の地震動とは無関係な仮想モデルによる仮想の計算にすぎず、全く使い物にならない代物なのであるか。当該報告書は原子力安全委員会が地域地盤環境研究所へ2009年度から3年間連続して委託した業務のうちの1つであり、「地震動評価に係る請負業務成果等の報告書について」と題して、今でも旧組織のホームページに掲載されており、原子力規制委員会の「発電用軽水型原子炉施設の地震・津波に関わる新安全設計基準に関する検討チーム第10回会合」でも「震源を特定せず策定する地震動について」(震基10-3)の中で原子力規制庁によって紹介され、新規基準策定の際の検討用資料として活用されている。当該報告書は2010年度の計算業務結果をまとめたものであり、翌年度にはその検討結果を用いて「東北地方太平洋沖地震の誘発地震と考えられる2011年3月15日に静岡

³九州電力は、鹿児島地裁での仮処分審理では、再稼働申請時の表1(a)が正しい断層評価であるとし、表1(b)(c)(d)はそれに余裕を持たせたものだと主張し、市来断層帯市来区間では2.7倍((d)/(a)=2.0/0.74)の余裕を確保していると豪語していた。鹿児島地裁決定では表1の(a)との比較については留保しているが、福岡高裁決定ではこの留保は付けていない。

県東部で発生したMj6.4の地震」との比較検討を継続して行うよう原子力安全委員会から業務委託されている。さらに、2012年9月に原子力規制委員会が発足した後も、地域地盤環境研究所は「平成24年度震源を特定せず策定する地震動レベルに関する既存資料の整理業務報告書」(2013年3月)をとりまとめ、原子力規制委員会へ提出している。もし、地域地盤環境研究所による2010年度報告書が、福岡高裁決定の指摘のように全く使い物にならない代物であるとすれば、それを業務委託した原子力安全委員会は地域地盤環境研究所の解析能力のなさを判断できないほど無能な組織であったことになる。また、当該報告書の成果を新規基準の策定のための検討用資料として無批判的に用いた原子力規制庁および原子力規制委員会もやはり無能だということになる。果たしてそうか。

さらに、原子力安全基盤機構JNESによる地震動解析は、年超過確率を求める目的のためではあれ、国内で発生した地震観測記録に合うように断層モデルが策定され、北海道留萌支庁南部地震の観測記録を比較的良く再現できているといえる。このことは原子力規制庁も認めており、「専門家を含めて再現性について改めて検討すべき」としていた。このことは、福岡高裁の審尋でも、私自身が原子力規制庁職員と対話した体験を通して詳しく説明してきたところである。原子力安全基盤機構はすでに原子力規制庁に統合され、今は原子力規制庁自身の報告書でもある。これが単なる予測モデルによる架空の計算にすぎないとすれば、全く無意味な報告書を積み上げてきたことになる。果たしそうか。2016年熊本地震の4月14日の前震はM6.5と小さかったが、震度7の激震をもたらした。その地下地震計による観測記録によれば、後述のとおり、JNESによるM6.5の横ずれ断層の地震動解析結果はやや小さいが比較的よくあっている。

福岡高裁決定は、最新の科学的技術的知見を取り入れることを重要視しているふりをしながら、その最も重要な地震動解析手法の発展を見ようとせず、その解析結果をドブに捨てるような対応に徹している。これでは、「最新の科学的技術的知見を踏まえて合理的に予測される」基準地震動の策定など鼻から問題にならないと言えよう。

4 2016年熊本地震の教訓

4月6日の福岡高裁決定から8日後の4月14日、2016年熊本地震が発生し、熊本県益城町(ましきまち)を震度7の激震が襲った。これを前震として、余震が続き、28時間後にM7.3の本震が襲った。意外なことに、震度7をもたらした前震のマグニチュードはM6.5(気象庁発表暫定値)と地震断層が現われない小さな地震であった。震源深さは11km、南北方向に張力軸を持つ右横ずれ断層だったが、表2のように非常に大きな地震動が発生した。その後も表3~5のように大きな地震動が続いた。

KiK-netの益城観測点KMMH16は地表地震計に加えて、地下252mの岩盤上にも地震計が設置しており、この設置場所はS波速度が2,700m/sの地震基盤であり、川内原発の解放基盤表面(1,500m/s)より硬い。この地下地震計により、表2および図6のように、M6.5の前震でNS方向237ガル、EW方向178ガル、鉛直方向127ガル、3成分合成で260ガル程度の地震動が観測された。これは解放基盤表面はざとりに波に換算するとほぼ2倍になり、NS方向470ガル、EW方向350ガル、鉛直方向250ガル、3成分合成で520ガル相当になる。

ここで興味深い事実を示そう。原子力安全基盤機構JNESが図5の震源断層モデルを使って、M6.5の左横ずれ断層による地震動解析を行い、図4のように、地震基盤表面($V_s = 2,600\text{m/s}$)での最大加速度の分布図を求めている。益城観測点とほぼ同じ地震基盤だと言え、この最大加速度はいわゆる「はざとりに波」の最大加速度に相当し、上記の益城観測点での地震観測記録を2倍した値に対応する。JNESの断層モデルは左横ずれなので、熊本地震の右横ずれ断層に対応させるには、図4の上下を反転させればよい。そこで、上下を反転させた図4をイメージしながら、図3の「14日21時26分M6.5、最大震度7(暫定)」の震央位置から**東南東約2.5kmに震源断層延長部**を想定し⁴、益城観測点との位置関係を測ると、図4では右斜め下

⁴気象庁による発震機構解(精査後)CMT解によれば、走向210度、傾斜角77度、すべり角177度である。益城観測点は、震央距離約6km(精査後)で、震源の深さ11kmと77度西側傾斜から震源断層地表延長部は震央から約2.5km東南東になり、この仮想地表断層部中央から約10km離れている。

の300~400ガルの位置(▲)に対応することが分かる。益城観測点での水平方向最大加速度(はざとりに波換算)は、NS方向470ガル、EW方向350ガルであった。つまり、JNESの解析結果と比べて同等以上であることがわかる。JNESの解析結果ではこの震源領域での最大値は1,340ガルであったことから、今回の熊本地震でも、地震計が震源領域に多数配置されていさえすれば、はざとりに波換算で1,000ガルを大きく超え、川内原発のクリフエッジ⁵をも超える地震動が観測されていた可能性が高い。2004年北海道留萌支庁南部地震で地域地盤環境研究所が行ったような再現モデルによる解析[2]を行えば、それが明らかになるであろうことは間違いないと言える。

今回の熊本地震の前震M6.5は日奈久(ひなぐ)断層帯の北部で発生したことから、これを含む震源断層の存在そのものは事前に分かっていたといえる。しかし、活断層の存在しないところでは、このようなM6.5の地震を引き起こす震源断層を事前に発見することは難しい。今日の科学技術水準では事実上不可能であり、川内原発の直下にこのような震源断層が眠っていてもわからない。川内原発の地域性を反映した熊本地震による地震観測記録を真摯に受け止め、まずは川内原発の運転を中止し、熊本地震の地震観測記録を精査し、基準地震動の作成に反映させることが不可欠である。

このことは、益城観測点での地震観測記録そのものが、川内原発の基準地震動が過小にすぎること、現在の耐専スペクトルや断層モデルによる地震動解析手法が過小評価になっていることを暴き出しているという点からだけでも言える。

たとえば、益城観測点での最大加速度(はざとりに波換算)は、NS方向470ガル、EW方向350ガル、鉛直方向250ガル、3成分合成で520ガル相当であったが、これは川内原発の540ガルの基準地震動Ss-1(水平方向)[14]より少し小さめだが、図7のように周期0.2秒付近で一部超えるなどほぼ同等と言ってよい。

このSs-1は市来断層帯市来区間(M7.2、等価震源距離 $X_{eq} = 14.29\text{km}$ (基本ケース))の内陸補正なしの耐専スペクトルによって規定されているが、

⁵炉心溶融事故に至るギリギリの地震動のことで、川内1号で1,004ガル、2号で1,020ガルとされている[7]。

表 2: 2016 年熊本地震の前震 M6.5(2016/4/14/21:26) で観測された地震動の最大加速度 [gal][1]

観測点名 コード	△	NS方向	EW方向	UD方向	合成	強震計種別	標高, 深度	S 波速度
益城 KMMH16 (地表)	6km	760	925	1399	1580	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s
矢部 KMM009 (地表)	18km	569	547	94	669	K-NET02	443m, -	-
熊本 KMM006 (地表)	6km	574	381	326	604	K-NET02	34m, -	-
砥用 KMM011 (地表)	15km	381	477	87	491	K-NET02	142m, -	-
豊能 KMMH14 (地表)	13km	328	219	228	357	KiK-net06	70m, 110m	1,540m/s
益城 KMMH16 (地下)	6km	237	178	127	-	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s
豊能 KMMH14 (地下)	13km	84	67	50	-	KiK-net06	70m, 110m	1,540m/s

表 3: 2016 年熊本地震の余震 M5.8(2016/4/14/22:07) で観測された地震動の最大加速度 [gal][1]

観測点名 コード	△	NS方向	EW方向	UD方向	合成	強震計種別	標高, 深度	S 波速度
益城 KMMH16 (地表)	4km	465	560	518	710	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s
熊本 KMM006 (地表)	7km	423	216	230	455	K-NET02	34m, -	-
矢部 KMM009 (地表)	16km	178	222	67	241	K-NET02	443m, -	-
豊能 KMMH14 (地表)	18km	176	88	102	181	KiK-net06	70m, 110m	1,540m/s
砥用 KMM011 (地表)	18km	146	111	51	149	K-NET02	142m, -	-
益城 KMMH16 (地下)	4km	168	98	84	-	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s
豊能 KMMH14 (地下)	18km	35	27	13	-	KiK-net06	70m, 110m	1,540m/s

表 4: 2016 年熊本地震の余震 M6.4(2016/4/15/00:03) で観測された地震動の最大加速度 [gal][1]

観測点名 コード	△	NS方向	EW方向	UD方向	合成	強震計種別	標高, 深度	S 波速度
益城 KMMH16 (地表)	11km	353	590	189	606	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s
豊能 KMMH14 (地表)	8km	353	324	557	560	KiK-net06	70m, 110m	1,540m/s
矢部 KMM009 (地表)	20km	208	342	70	381	K-NET02	443m, -	-
砥用 KMM011 (地表)	12km	211	265	106	286	K-NET02	142m, -	-
熊本 KMM006 (地表)	10km	152	147	181	183	K-NET02	34m, -	-
豊能 KMMH14 (地下)	8km	84	132	73	-	KiK-net06	70m, 110m	1,540m/s
益城 KMMH16 (地下)	11km	46	78	26	-	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s

表 5: 2016 年熊本地震の本震 M7.3(2016/4/16/01:25) で観測された地震動の最大加速度 [gal][1]

観測点名 コード	△	NS方向	EW方向	UD方向	合成	強震計種別	標高, 深度	S 波速度
益城 KMMH16 (地表)	7km	653	1157	873	1362	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s
熊本 KMM006 (地表)	2km	827	616	534	843	K-NET02	34m, -	-
矢部 KMM009 (地表)	22km	777	640	187	831	K-NET02	443m, -	-
菊池 KMMH03 (地表)	28km	787	228	403	800	KiK-net06	178m, 200m	2,000m/s
砥用 KMM011 (地表)	21km	598	602	255	778	K-NET02	142m, -	-
益城 KMMH16 (地下)	7km	159	242	196	-	KiK-net06	55m, 252m	2,700m/s
菊池 KMMH03 (地下)	28km	146	70	48	-	KiK-net06	178m, 200m	2,000m/s

注: 表中の「合成」はすべて「3成分合成」である。

この耐専スペクトルは約 460 ガルであり [14], 益城観測点での地下地震観測記録はざっと波はこれにはほぼ等しく, 図 7 のように周期 0.1 秒以上ではこれを上回ると言える。益城観測点は M6.5 の前震との震央距離が約 6km で, 等価震源距離では 13km 程度になり, 川内原発と市来断層帯市来区間の等

価震源距離にほぼ等しい。つまり, M6.5 の前震で, 地震規模が 1 桁大きい M7.2 の耐専スペクトルと同等以上の地震動が観測されたことになるのであり, M7.2 の耐専スペクトルが過小にすぎることとは明らかと言える。

断層モデルによる地震動解析結果は耐専スペク

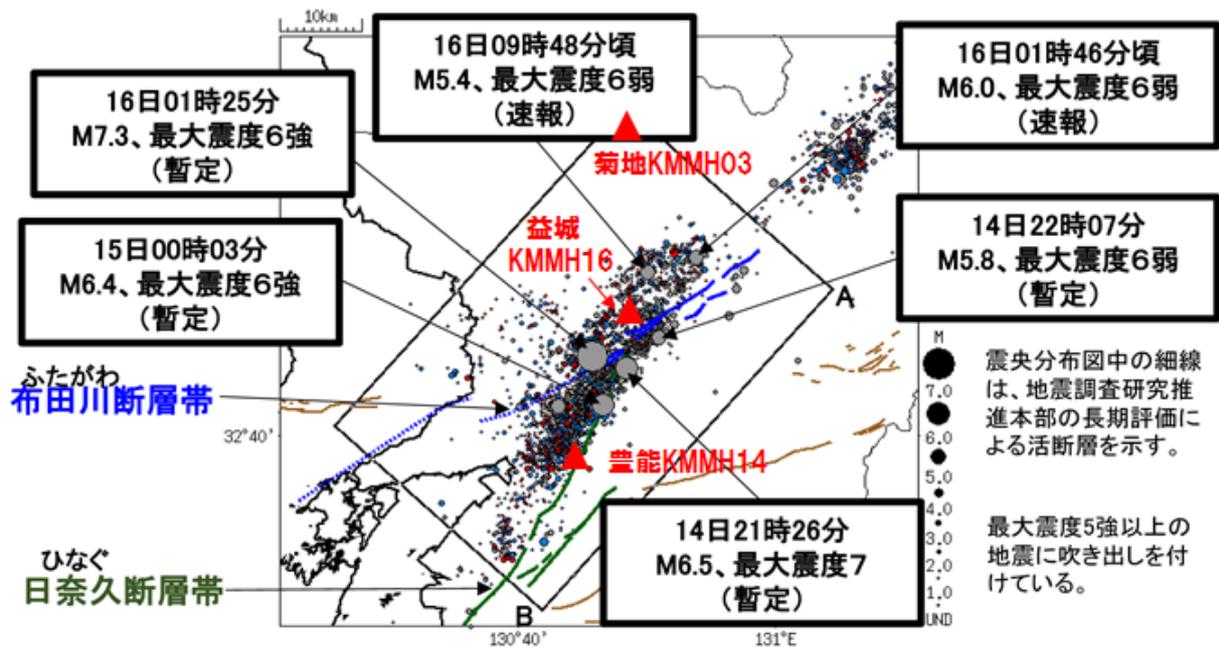


図 3: 2016 年熊本地震の前震 M6.5, 本震 7.3 と余震分布 (震央分布, KiK-net 観測点 ▲ を追記) [11]

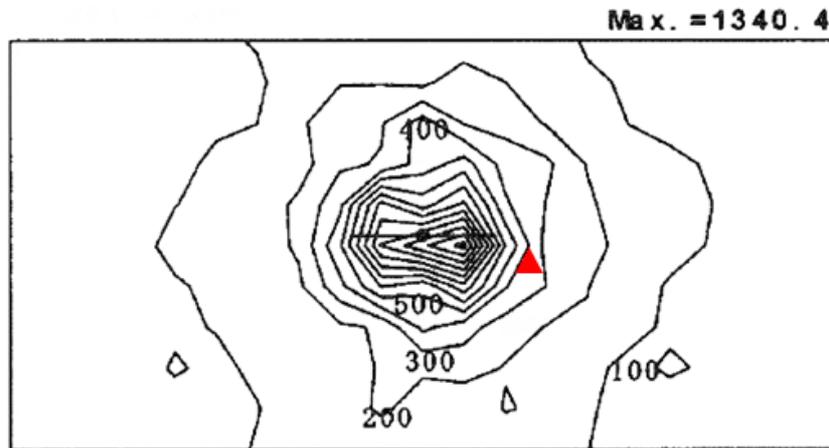


図 4: 原子力安全基盤機構 JNES による M6.5 の左横ずれ断層による地震基盤表面 ($V_s=2600\text{m/s}$) での加速度分布図 (水平方向, 最大値 1340.4cm/s^2) [8] (右横ずれの場合には上下を反転させた分布図になるため, 図 3 における震央距離約 6km の益城観測点 KMMH16 はこの図で震源断層の右斜め下 300~400 ガルの地点 ▲ に相当する)

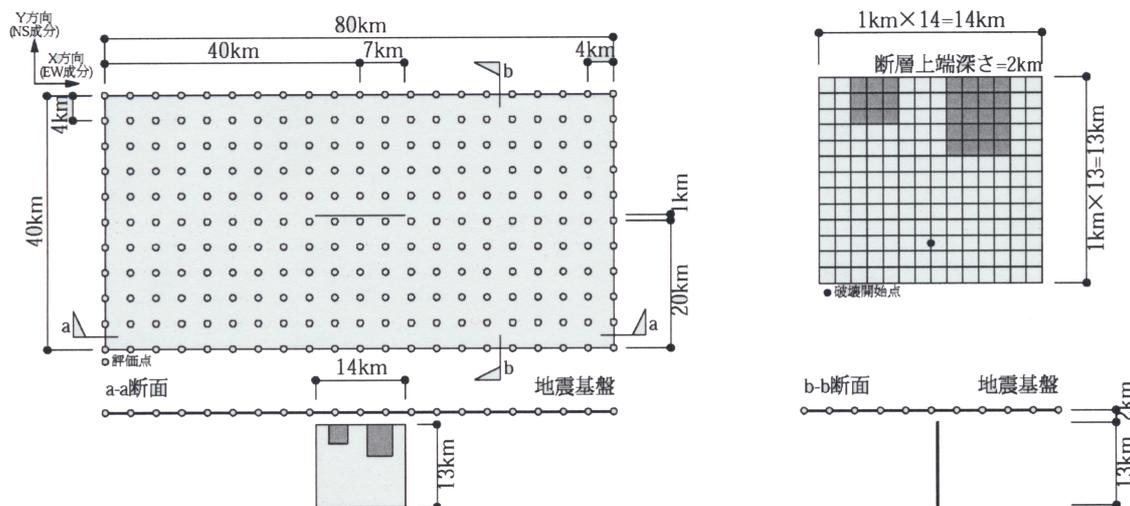


図 5: JNES が図 4 の解析結果を得るために用いた M6.5 の左横ずれ断層の震源断層モデル [8] (国内データに合わせた独自の経験式 $S = 1.85 \times 10^{-15} M_o^{2/3}$ で $M6.5 (M_o = 3.16 \times 10^{25} \text{dyn}\cdot\text{cm})$ に相当する断層面積 S を求め, 断層長さ 14km, 幅 13km, 断層上端深さ 2km, アスペリティ 2 個 (いずれも 19.1MPa), 破壊開始点を中央深さ 10.5km としている)

トルよりもっと小さく、最大加速度(水平方向)では300ガル弱にすぎない[14]。益城観測点での地震観測記録(はぎとり波換算でNS方向470ガル、EW方向350ガル)はこれをはるかに超えている。

結果として、川内原発の基準地震動は小さすぎることを、基準地震動を求めるための今の耐専スペクトルや断層モデルなどの地震動評価手法は過小

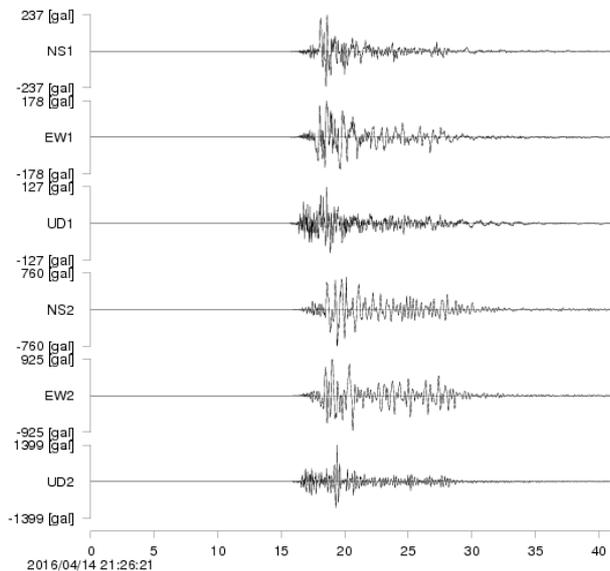


図 6: 2016 年熊本地震の前震 M6.5 の益城観測点 KMMH16 で観測された強震動波形(地下地震計が NS1, EW1, UD1, 地表地震計が NS2, EW2, UD2) [1]

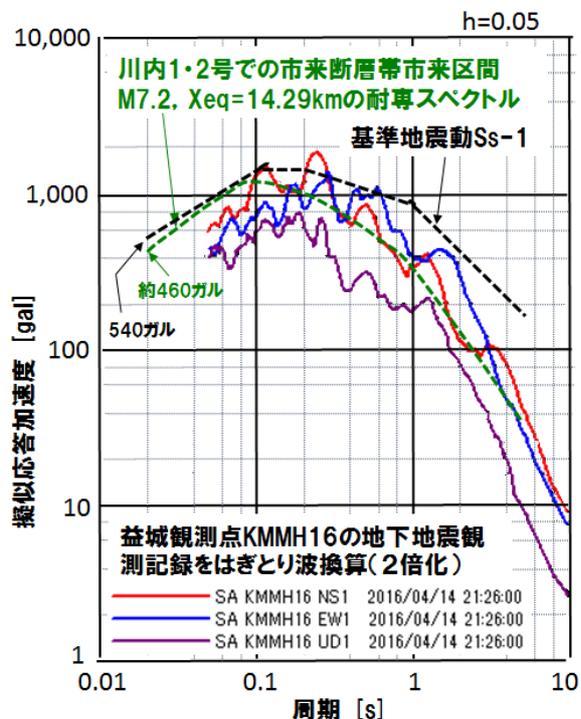


図 7: 益城観測点 KMMH16 の地下地震観測記録のはぎとり波(2倍化)の擬似加速度応答スペクトルと川内1・2号の基準地震動 Ss-1 および耐専スペクトル(水平方向)の比較(防災研データから長沢が作成)

評価にすぎるといえるのが実際のこの地震によって暴き出されたと言えるのである。

端的に言えば、2016年熊本地震は、福岡高裁決定が基準地震動の過小評価を追認したことを厳然たる事実で批判したと言える。司法はこのことを真摯に受け止め、福岡高裁決定を深く反省し、川内原発の運転中止を直ちに命じるべきである。原子力規制委員会・規制庁も自身の審査過程における重大な過誤・欠落から目を背けず、直視し、川内原発の運転を中止させ、再稼働認可を取り消し、基準地震動をもう一度策定し直すべきであろう。

(注1) 断層モデルによる地震波形合成法

断層モデルの経験的グリーン関数による要素地震から大地震の波形合成の計算式は下記の通りである。

$$U(t) = \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} \frac{X_e}{X_{ij}} C u_e(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'(1 - e^{-1})} \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} \sum_{k=1}^{(n_D-1)n'} \frac{X_e}{X_{ij}} C \times \exp\left\{-\frac{k-1}{(n_D-1)n'}\right\} \times u_e\left(t - t_{ij} - \frac{(k-1)\tau}{(n_D-1)n'}\right), \quad (1)$$

$$t_{ij} = \eta_{ij}/V_r + X_{ij}/\beta + \varepsilon_{ij}. \quad (2)$$

ただし、震源断層面を $n_L \times n_W$ の小断層(要素)に分割して大地震の地震動 $U(t)$ を要素地震の地震動 $u_e(t)$ で合成することとし、 X_e は要素地震の震源距離、 X_{ij} は小断層 (i, j) の震源距離、 $C = \Delta\sigma/\Delta\sigma_e$ は大地震と要素地震の応力降下量の比、 η_{ij} は破壊開始点から小断層 (i, j) までの距離、 V_r は破壊伝播速度、 β は媒質の S 波速度、 ε_{ij} は破壊時刻に対して与える乱数、 τ は立ち上がり時間、 n_D はすべり量 D の分割数、 n' はすべりの再分割数であり n_D 個に分割されたすべり量の要素をさらに n' 個に再分割する。

ここで、重ね合わせ数 n_L, n_W, n_D は

$$n_L \times n_W \times n_D = \frac{M_o/M_{oe}}{C} \quad (3)$$

となるように設定される。ただし、 M_o は大地震の地震モーメント、 M_{oe} は要素地震の地震モーメントである。式1で波形合成する場合、すべり量の分割数 n_D および再分割数 n' が小さいほどすべりの立ち上がりが急になる。

震源特性の不確かさを考慮して応力降下量を1.5倍にする場合には、応力降下量の比を $C' = 1.5C$ と大きくし、 n_L と n_W は変更せず、すべり量の分割数を $n'_D = n_D/1.5$ と小さくする。

三宅ら(2009)[17]は鹿児島県北西部地震の本震の地震波形 $U(t)$ と余震の地震波形 $u_e(t)$ から、変位振幅ス

ベクトルの平坦レベルの比 U_0/u_{e0} および加速度振幅スペクトルの平坦レベルの比 A_0/a_{e0} を求め、次式から重ね合わせ数 $N = n_L = n_W = n_D$ および応力降下量の比 C を導出した。

$$U_0/u_{e0} = M_o/M_{e0} = CN^3, \quad (4)$$

$$A_0/a_{e0} = CN. \quad (5)$$

具体的には、これらの式から次式が得られるので、これらを用いている。

$$N = (U_0/u_{e0})^{1/2}/(A_0/a_{e0})^{1/2}, \quad (6)$$

$$C = (A_0/a_{e0})^{3/2}/(U_0/u_{e0})^{1/2}. \quad (7)$$

ここには震源パラメータの地震モーメントや応力降下量の値そのものが出てこないことが分かる。つまり、鹿児島県北西部地震の本震の地震波形を余震の地震波形で合成する際には、震源パラメータの値そのものをどのように設定するかは無関係なのである。

市来断層帯市来区間など検討用地震の地震波形を要素地震（九州西側海域の地震）の地震波形から合成する際には、式(1)の応力降下量の比 C を求める必要があり、それぞれ独立した地震であるため、それぞれの応力降下量を求める必要がある。その際、地震モーメントから応力降下量を求めるため、地震モーメント導出法が両者で同じである方が相対的な関係が維持されて望ましいと言える。ところが、九州電力は両者で異なる算出法を用い、 $C = 15.9\text{MPa}/21.02\text{MPa} = 0.756$ と設定している。他方、両地震の地震モーメントを the Global CMT Project で導出すると、 $C = 25.1\text{MPa}/21.02\text{MPa} = 1.19$ になり、1.58 倍になる。また、式(3)から、 C の値が大きくなれば、 n_L と n_W を変えないとすれば n_D の値が小さくなり、震源断層のすべりがより急速に立ち上がることになる。このように、応力降下量の比 C の値で要素地震の地震波形が大きく設定され、 n_D の値にも影響するため、 C の値が 1.58 倍になれば、検討用地震の地震動評価結果は 1.58 倍以上に大きくなることは式(1)から自明であろう。

参考文献

- [1] 防災科学研究所 (2016) : 強震観測網 (K-NET, KiK-net) 地震選択 & ダウンロード
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>
- [2] (財) 地域地盤環境研究所 (2011) : 震源を特定せず策定する地震動に関する計算業務報告書 (2011.3)
http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/taishinkojo/pdf/ukeoi_1.pdf
- [3] 福井地方裁判所民事第 2 部 (樋口英明裁判長) 「平成 24 年 (ワ) 第 394 号, 平成 25 年 (ワ) 第 63 号大飯原発 3, 4 号機運転差止請求事件」判決 (2014.5.21)
- [4] 福井地方裁判所民事第 2 部 (樋口英明裁判長) 「平成 26 年 (ヨ) 第 31 号大飯原発 3, 4 号機及び高浜原発 3, 4 号機運転差止仮処分命令申立事件」決定 (2015.4.14)
- [5] 福井地方裁判所民事第 2 部 (林潤裁判長) 「平成 27 年 (モ) 第 38 号保全異議申立事件 (基本事件)・平成 26 年 (ヨ) 第 31 号大飯原発 3, 4 号機及び高浜原発 3, 4 号機運転差止仮処分命令申立事件」決定 (2015.12.24)
- [6] 福岡高等裁判所宮崎支部 (西川知一郎裁判長) 「平成 27 年 (ラ) 第 33 号川—内原発稼働等差止仮処分申立却下決定に対する即時抗告事件 (原審・鹿児島地方裁判所平成 26 年 (ヨ) 第 36 号)」決定 (2016.4.6)
- [7] 原子力安全・保安院 (2012) : 九州電力川内原子力発電所 1 号機及び 2 号機の安全性に関する総合的評価 (一次評価) に関する審査結果取りまとめ (2012.9.3)
- [8] 独立行政法人原子力安全基盤機構 (2005) : 震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書 (平成 16 年度), JNES/SAE05-00405 解部報-0004(2005.6)
<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/atom-library/seika/000005757.pdf>
- [9] 鹿児島地方裁判所民事第 3 部 (前田郁勝裁判長) 「平成 26 年 (ヨ) 第 36 号川内原発稼働等差止仮処分申立事件」決定 (2015.4.22)
- [10] 菊地正幸・山中佳子 (1997) : 97 年 3 月 26 日鹿児島県薩摩地方の地震の震源過程, 1997 年日本地震学会秋季大会講演予稿集 No.2, P81.
- [11] 気象庁 (2016) : 「平成 28 年 (2016 年) 熊本地震」について (第 14 報) (2016/4/18/15:30) <http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/18b/kaisetsu201604181530.pdf>
- [12] 九州電力 (2013) : 川内原子力発電所第 1・2 号機の設置変更許可申請書, 添付書類六 (2013.7.8)
- [13] 九州電力 (2013) : 川内原子力発電所・玄海原子力発電所震源を特定せず策定する地震動について (コメント回答), 第 59 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料 3 (2013.12.18)
- [14] 九州電力 (2014) : 川内原子力発電所 基準地震動の策定について (コメント回答), 第 92 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料 3-1(2014.3.12)
- [15] 九州電力 (2014) : 川内原子力発電所 基準地震動の策定について (補足提出データ・資料), 川内発電所 1, 2 号機の地震等に係る新基準適合性審査に関する事業者ヒアリング (35), 資料番号 TC-C-064(2014.6.4)
- [16] 九州電力 (2014) : 川内原子力発電所 カルデラを対象とした火山活動のモニタリングについて (コメント回答), 第 113 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料 1(2014.5.16)
- [17] 三宅弘恵・岩田知孝・入倉孝次郎 (1999) : 経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日 ($M_{JMA}6.5$) 及び 5 月 13 日 ($M_{JMA}6.3$) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル, 地震第 2 輯, 第 51 巻, 431-442.
- [18] Noda, S., Yashiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M., Watanabe, T.(2002): Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, OECD Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering, Istanbul, 399-408(October, 2002)
- [19] 大津地方裁判所民事部 (山本善彦裁判長) 「平成 27 年 (ヨ) 第 6 号原発再稼働禁止仮処分申立事件」決定 (2016.3.9)
- [20] 最高裁判所第一小法廷 (小野幹雄裁判長) 「昭和 60(行ツ)133 伊方発電所原子炉設置許可処分取消」判決, 民集 46 巻 7 号 1174 頁 (1992.10.29)
http://www.courts.go.jp/app/hanrei_jp/detail2?id=54276
http://www.courts.go.jp/app/files/hanrei_jp/276/054276_hanrei.pdf
- [21] 佐藤浩章・芝 昭和・東 貞成・功刀 卓・前田宜浩・藤原広行 (2013) : 物理探査・室内試験に基づく 2004 年留萌支庁南部の地震による K-NET 港町観測点 (HKD020) の基盤地震動とサイト特性評価, 電力中央研究所報告 N13007(2013.12)
- [22] 島崎邦彦 (2015) : 活断層の長さから推定する地震モーメント, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, SSS28-07(2015.5.28)
- [23] 島崎邦彦 (2015) : 活断層長に基づく地震モーメントの事前推定, 日本地震学会 2015 年度秋季大会, S17-10(2015.10.28)
- [24] 島崎邦彦 (2015) : 活断層の長さから推定される地震モーメント 日本海「最大」クラスの津波断層モデルについて, 日本活断層学会 2015 年度秋季学術大会, O-13(2015.11.27-28)
- [25] 東京電力 (2009) : 波形合成法の基礎的考え方, 原子力安全委員会 地震動解析技術等作業会合 2009.4.23(15)
- [26] 東京電力 (2009) : 耐専スペクトルの適用性検討 (内陸地殻内地震を対象とした追加検討内容), 原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 地震・地震動評価委員会 「応答スペクトルに基づく地震動評価」に関する専門家との意見交換会, 資料第 1-2 号 (2009.5.22)
- [27] 内山泰生・翠川三郎 (2013) : 距離減衰式における地震間のばらつきを偶然的・認識論的不確定性に分離する試み, 日本地震工学会論文集, 第 13 巻, 第 1 号, pp.37-51(2013)

島崎邦彦氏の問題提起と2016年6月改訂新レシピは 原発基準地震動の根本改定を求めている

大阪府立大学名誉教授 長沢啓行 (生産管理システム)

1 島崎邦彦氏の問題提起

前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏の問題提起は、大飯原発の地震動評価の見直しにつながった。これが意味のある見直しとなるためには、6月10日改訂の新レシピが取り入れられねばならない。両者が正当に考慮されれば、断層モデルによる地震動評価結果は、例外なく、大きく引き上げられることは必至であり、基準地震動の見直しは避けられない。ここでは次のことを明らかにする。

大飯原発では、断層モデルによる地震動評価結果が、修正レシピで1.5倍強へ引き上げられ、1,260ガルのクリフエッジをも超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

伊方原発では、54kmモデルの地震動評価結果が修正レシピで1.6倍強、69kmモデルでは2.0倍以上へ引き上げられ、855ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

高浜原発では、修正レシピで1.5倍強へ引き上げられ、基準地震動 Ss-1 を一部の周期帯で超えるため、基準地震動の見直しが避けられない。

島根原発では、修正レシピをそのまま適用すると断層面積が過大になるため、旧原子力安全委員会と同様に断層幅の拡大に限定して適用すれば、長さ25kmの宍道断層の地震動評価結果は1.5倍強になり、1,014ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

川内原発では、島根原発と同様に修正レシピを断層幅の拡大に限定して適用すれば、約25kmの市来断層帯市来区間の地震動評価結果は約1.6倍になり、基準地震動 Ss-1 を一部の周期帯で超えるため、基準地震動の見直しは避けられない。

どの原発においても、断層モデルによる地震動評価見直しで、耐専スペクトルとの大きな差が消え去る。これが今回の見直しの核心である。その結果、今後クローズアップされるべき残された課題についても明らかにする。

前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏は、入倉式による地震規模の過小評価を一連の学会 [40, 41, 42, 43] で次のように批判している。

垂直な横ずれ断層による M7 程度以上の地震を対象に、国内活断層に典型的な断層幅として $W = 14\text{km}$ と設定した上で、断層長さ $L[\text{m}]$ と地震モーメント $M_o[\text{Nm}]$ の関係式を次のように整理した¹。

$$(1) M_o = 4.37 \times 10^{10} \times L^2 \quad (\text{武村, 1998}) [46]$$

$$(2) M_o = 3.80 \times 10^{10} \times L^2$$

(Yamanaka & Shimazaki, 1990) [50]

$$(3) M_o = 3.35 \times 10^{10} \times L^{1.95} \quad (\text{地震調査委, 2006}) [28]$$

$$(4) M_o = 1.09 \times 10^{10} \times L^2 \quad (\text{入倉・三宅, 2001}) [13]$$

島崎氏はこれらの関係式の係数を比べて、「(4) と他との差異は顕著で、同じ断層長で比較すると、地震モーメントは4倍程度異なる。一方、同じ震源モーメントで比べれば、断層長が2倍程度異なる。」 [40, 41, 42] と批判している。

その具体例として、1891年濃尾地震、1930年北伊豆地震、2011年4月11日福島県浜通りの地震、1943年鳥取地震、1945年三河地震、1995年兵庫県南部地震を取り上げ、地震モーメントの観測値と(1)~(4)の関係式による計算値を表1のように比較し、「例は少ないが(4)を用いると地震モー

¹(1)は武村 [46] の式 $\log L = (1/2) \log M_o - 11.82$ から $M_o[\text{dyn cm}] = 10^{11.82 \times 2} L[\text{km}]^2 = 4.37 \times 10^{23} L^2$ を導き、 $1\text{Nm} = 10^7 \text{dyn cm}$ の関係を用いたもので、(2)は Yamanaka-Shimazaki [50] の式 $\log L = (1/2) \log M_o - 11.79$ を同様に变形して得た式である。(3)は松田式 $\log L[\text{km}] = 0.6M - 2.9$ (単位を変えると $\log L[\text{m}] = 0.6M + 0.1$ になる) に $M = (\log M_o[\text{dyncm}] - 17.72)/1.17$ の関係式を代入して $M_o[\text{dyn cm}] = 10^{17.72 - 0.1 \times (1.17/0.6)} L[\text{m}]^{1.17/0.6} = 10^{17.525} L^{1.95}$ を導き、 $1\text{Nm} = 10^7 \text{dyn cm}$ の関係を用いて $M_o[\text{Nm}] = 3.35 \times 10^{10} L[\text{m}]^{1.95}$ としたものであり、断層長さから松田式で求めた地震モーメントに相当する。

(4)は入倉ら (2001)[13] の式 $S = 4.24 \times 10^{-11} \times M_o^{1/2}$ で $S = LW$, $W = 14\text{km}$ と置いて变形したものである。

(1)~(3)は断層長さや地震モーメントの関係式であり、断層幅とは無関係だが、(4)は元の断層面積と地震モーメントの関係式において断層幅を14kmに固定して導かれた式であり、断層幅が変わると影響を受けるので注意が必要である。

表 1: 国内活断層による地震の地震モーメントの観測値と計算値 [$\times 10^{18}$ Nm][41, 42]

地震発生年	観測値	(1)	(2)	(3)	(4)
1891 年	180	210	180	130	52
1930 年	27	32	28	21	7.9
2011 年 ^(注)	11	17	14	11	5.5
1927 年	46	48	41	19	12
1943 年	36	39	34	18	9.8
1945 年 ^(注)	10	19	17	9	19
1995 年	24	45	39	20	11

注: 2011 年福島県浜通りの地震では傾斜角 60 度, 1945 年三河地震では傾斜角を 30 度とし, (4) 式の係数を傾斜角に応じて変えた。[41, 42]

メントが過小評価される傾向が明らかとなった」[40, 41, 42]と結論づけている。

その上で、「地震本部の強震動予測では、いわゆる改正レシピが使われており、(3)によって地震モーメントが予測され、(4)のもととなる入倉・三宅(2001)の式から断層面積が推定されている。昨年9月に発表された国土交通省の日本海における大規模地震に関する調査検討会の報告書では、日本海の『最大クラス』の地震による津波想定において、入倉・三宅(2001)の式により地震モーメントが推定されている。一方、原子力発電所の津波推定では(1)が使われている。」[40]と原子カムラでの地震動評価が地震調査研究推進本部等の評価と異なっていることを具体的に指摘し、批判している。

島崎氏による入倉式批判は、日本地球惑星科学連合2016年大会における5月25日の発表で4回になる。これらを契機として原子力規制委員会は6月16日、田中俊一委員長・石渡明委員らが島崎氏と面会し[47]、6月20日の定例会議で「とりあえず大飯原発について地震動評価を行う」ことを決定した²。

この動きに耐えかねた入倉氏は自身のホームページで6月22日、コメントを発表した(6月24日にこれを修正した最終版[17]を掲載している)。

²島崎氏が原子力規制委員会退職後に入倉式批判を行い始めたきっかけは、2014年3月の在職中に行われた私たち市民運動との話し合い[48]であったことが注1のように報道されている。その際、島崎氏は「原子力規制庁に検討を指示したものの、報告はなかった」という。原子力規制庁は今回、同様の検討を原子力規制委員会本会議で指示されたわけで、もはやサボタージュすることはできないが、後述するように応力降下量の設定で過小評価し続けることのないよう見守る必要がある。

その内容は、入倉式の妥当性を主張しながら、その限界を認めるものであった。すなわち、複数地点での地震観測波形から地下の震源断層面上の不均質なすべり量を逆算(震源インバージョン)して求めた震源断層の広がり断層長さは40~56km、断層幅16~20kmとなり、「一定のばらつき(例えば1 σ)の範囲で、スケーリング則(入倉式)に合致している」と主張する一方、国土院が地表での地殻変動量の分析から推定した均質な震源断層モデルは長さ約35km、幅約13km(一部6.6km)であり、産業技術総合研究所が地表調査で明らかにした地震断層(地震で現われた地表のずれ)の長さは約34kmであったことから、「測地データから求めた均質な震源断層は過小評価となってしま(つまり、入倉式に合わない)、という問題があります」と認めたのである。

入倉氏の主張が仮に正しいとしても³、問題は地震観測記録がなければ前者の不均質な震源断層の広がりわからないということであり、地震が起きる前には活断層や変動地形などの測地データによって震源断層を推定する以外にないということ、これを入倉式に適用すれば地震規模が過小算定されてしまうということである。入倉氏は「活断層の調査手法として、地表の変動地形だけでなく、反射法探査や重力探査など地球物理学的手法も取り入れるなど検討する必要がある」と主張するが、現在すでに原子力規制委員会の審査でこれらの手法が使われているにもかかわらず、M7.3の震源断層を「断層長さ40~56km、断層幅16~20km」と評価した例は全く存在しない。

この点について、島崎氏は6月16日の面会[47]で核心を突く発言をしている。「入倉・三宅式が正

³入倉式と松田式など他の式との違いは対象とした地震データにおける断層幅の違いにある。注2に詳述したとおり、断層長さ地震モーメントの関係式では入倉式の元になった北米中心の地震データは松田式にもほぼフィットするが、国内地震データより断層幅が大きい。そのため、断層面積と地震モーメントの関係では国内地震データとの間に違いが生じている。この事実は入倉ら[13]も論文中で認めていることだが、Somerville et al.(1993)[44]が指摘したように日本国内と北米等とで断層パラメータに大きな違いがあるのか、その原因は不明のままであった。今回、入倉は測地データによる地殻変動分布や地震断層分布と震源インバージョンによる滑り分布との違いで説明しようとしているが、それで説明し尽くせるのかどうかは疑問であり、これまでに蓄積された地震データについて、アスペリティ面積や応力降下量など震源パラメータ全体に関する今後一層の解明が必要である。

しいと、今言ったように幅が16kmにして断層の長さを逆に求めると57kmになる。実際の断層の長さは30km, 35kmという人もいるけれど、どう考えても57kmにはならない。とくに地震の前に57kmという人はいないはずです。活断層の長さもせいぜい30kmで、誰が好んで断層の長さを57kmと言うんでしょうか。とくに、事業者はどちらかという短い断層を好むわけで、地表の観測データから考えられるところを自ら進んで57kmという長い断層を提案する事業者は恐らくいない。ということはすなわち、今の入倉・三宅式を使っている限り、震源の大きさは過小評価される。」

このような過小評価を許さないためには、島崎氏の提案通り、入倉式以外の式を適用して地震モーメントを求める以外にないのである。これを長期的な課題だとして棚上げにすることは絶対に許されない。

2 2016年6月10日改訂の新レシピ

島崎氏の問題提起は、原子力規制委員会の重い腰を上げさせる一歩となった。しかし、これが大飯原発などで基準地震動の見直しにつながるかどうかは、もう一つの要因に依存している。

地震調査研究推進本部の地震調査委員会は2016年6月10日、「全国地震動予測地図2016年版」を公表したが、その際、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」を見直している[23]。これが地震動評価を左右するもう一つの要因であり、これを考慮しなければ、島崎氏の問題提起が基準地震動の見直しにつながることはないと言ってもよい。

このレシピ改訂は「断層長さが概ね80kmを超え断層幅と平均すべり量とが飽和する活断層」と「スラブ内地震（沈み込んだ海のプレート内で発生する海溝型地震）」に対応するためのものだが、ここでは前者に限ってその重大な意義を説明する。

断層モデルによる地震動評価結果を左右するのは、「応力降下量」と「短周期レベル」である。地震モーメントが大きくなっても、それが正当にこれらの値を引き上げることに繋がらなければ、地震動評価結果は変わらない。大飯原発の場合、基

準地震動を決定しているのは、断層長さ63.5kmの「FO-A～FO-B～熊川断層」であり、通常の断層モデルのレシピによれば「断層平均応力降下量 $\Delta\sigma = 4.2\text{MPa}$ 、アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a = 19.0\text{MPa}$ 」となるべきところ、関西電力は長大な断層に適用されるFujii-Matsu'uraの応力降下量「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ 」を採用していた。仮に、入倉式ではなく松田式（島崎氏の提示した(3)の式）を適用すると、地震モーメントは約1.4倍、短周期レベルは約1.1倍になり、応力降下量も「 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ 」（断層面積を変えない場合）または「 $\Delta\sigma = 4.5\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 20.6\text{MPa}$ 」（修正レシピで断層面積を変えた場合）と大きくなるが、これまで通りにFujii-Matsu'uraの応力降下量を採用すると応力降下量は変わらない。したがって、地震動評価結果はほとんど変わらないことになる。

ところが、6月10日改訂の新レシピでは、「長大な断層」の定義を明確にし、断層面積が $1,800\text{km}^2$ 以上の長大な断層でなければFujii-Matsu'uraの応力降下量を採用してはならないと明記した⁴のである。この基準によれば、「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層幅は15kmなので、120km以上でなければ「長大な断層」とは見なせず、Fujii-Matsu'uraの応力降下量をこの断層に採用してはならないことになる。つまり、結果として、「FO-A～FO-B～熊川断層」の場合、応力降下量を1.5倍ないし1.9倍に大きく引上げざるを得なくなった。断層モデルの地震動解析では、短周期レベル増大の効果も加

⁴6月10日改訂の新レシピでは、「1.1.1 巨視的震源特性」の項で、地震モーメント M_0 が $1.8 \times 10^{20}\text{N}\cdot\text{m}$ を上回る場合に、Murotani et al.(2015)の式 $M_0 = S \times 10^{17}$ を用いることとし、「1.1.2 微視的震源特性」の「(d) 震源断層全体及びアスペリティの静的応力降下量と実効応力及び背景領域の実効応力 $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\sigma_a$ 、 σ_a 、 σ_b 」の項で、Fujii and Matsu'ura(2000)による応力降下量「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 14.4\text{MPa}$ 」を暫定的に採用する「長大な断層」の条件をこれとの関係で明確にし、次のように注記した。

「*円形破壊面を仮定せずアスペリティ面積比を22%、静的応力降下量を3.1MPaとする取扱いは、暫定的に、断層幅と平均すべり量とが飽和する目安となる $M_0 = 1.8 \times 10^{20}(\text{N}\cdot\text{m})$ を上回る断層の地震を対象とする。断層幅のみが飽和するような規模の地震に対する設定方法に関しては、今後の研究成果に応じて改良される可能性がある。」

$M_0 = 1.8 \times 10^{20}(\text{N}\cdot\text{m})$ に対応する断層面積はMurotaniらの式から $1,800\text{km}^2$ となる（入倉・三宅(2001)の式でも同じ値になる）。入倉・三宅(2001)の対象とした地震データによれば、飽和断層の幅は16.6kmであり、 $1,800\text{km}^2$ は断層長さ108kmに相当する。

わる（修正レシピで断層面積を拡張した場合にはアスペリティ面積増大の効果がさらに加わる）が、応力降下量にほぼ比例して地震動が大きくなるため、地震動評価結果は1.5倍強ないし1.9倍になる。つまり、大飯原発では基準地震動の大幅な見直し避けられない。

原子力規制委員会・原子力規制庁は島崎氏と面会した際、この新レシピの重大さに全く気付いていなかったようだが、6月23日に提出された脱原発弁護団全国連絡会からの要請書[7]で具体的に指摘されたため、もはや無視できず、6月10日改訂の新レシピを適用せざるを得なくなったと言える。

その波紋は、大飯原発に限らない。以下では、まず、大飯原発について、「島崎氏の問題提起と新レシピの適用」が地震動評価に与える影響をより詳しく解明し、私が関係してきた高浜原発、伊方原発、島根原発、川内原発の地震動評価に即して、その波紋の大きさを解明する。

3 大飯3・4号の基準地震動への影響

2015年9月現在、原子力規制委員会の審査会合で了承された大飯3・4号の基準地震動Ss-1～19は表2の通りであり、断層モデルによる地震動評価結果とそれに基づく基準地震動Ss-2～Ss-17は図2の通りである⁵。

大飯3・4号では、「FO-A～FO-B～熊川断層」(M7.8, $X_{eq} = 11.0\text{km}$)の耐専スペクトルは1,200ガル以上になるが、等価震源距離が11.0kmと近いこと適用外とされており、700ガルの基準地震動Ss-1は再稼働申請時のままで、もっぱら断層モデルによる評価が行われている。その結果が、図2であり、基準地震動Ss-2～17と灰色の波線が不確かさを考慮した全ケースの重ね書きである。

図1の「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層パラメータは表4の通りであり、地震モーメントを入倉式ではなく松田式で求めると、断層モデル(入倉式)の「F-M不採用」の欄の $5.03 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ から「修正・新レシピ」の欄の $7.01 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ へ約1.4倍に

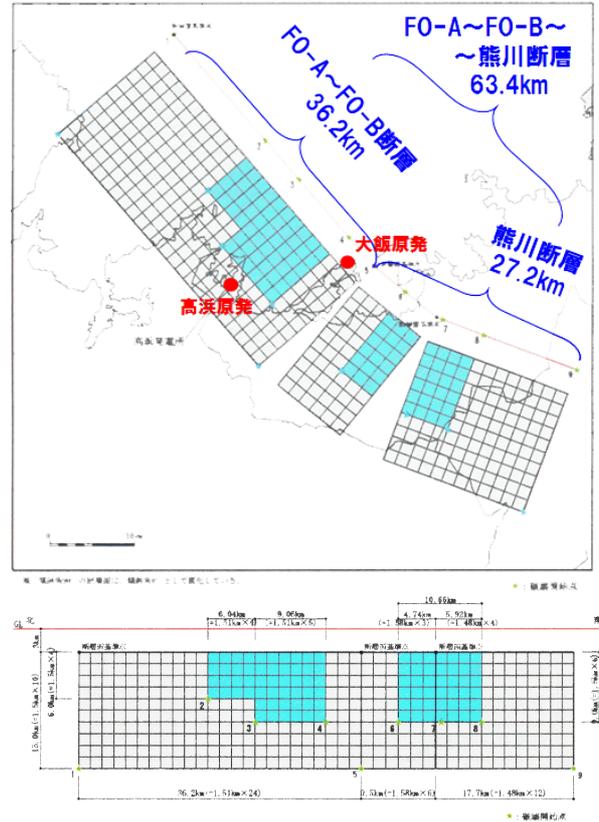
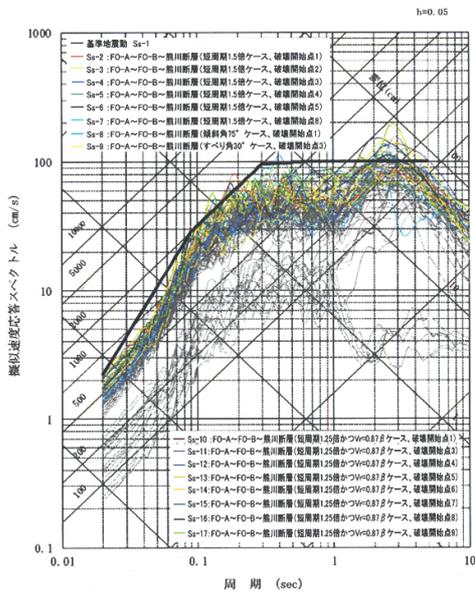


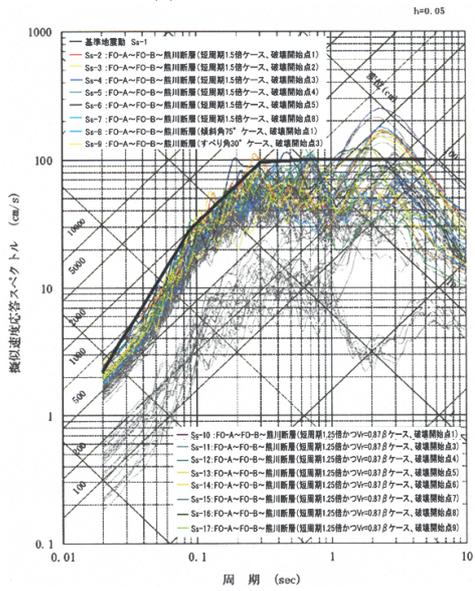
図1: 大飯3・4号と高浜3・4号における「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層モデル(上端深さ3kmの基本ケース) [25, 26]

なり、同様に、短周期レベルAは $1.96 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m/s}^2$ から $2.19 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m/s}^2$ へ約1.1倍になる。応力降下量もFujii-Matsu'uraの「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ 」から約1.9倍の「 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ 」(断層面積を変えない場合)または約1.5倍の「 $\Delta\sigma = 4.5\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 20.6\text{MPa}$ 」(修正レシピで断層面積を変えた場合)へ大きくなる。断層面積を変えた場合には、アスペリティ面積も 209.22km^2 から 247.05km^2 へ約1.2倍になる。これらの結果、断層モデルによる地震動評価結果は、松田式で地震規模を評価した場合に約1.9倍、修正レシピで断層面積を拡大した場合に約1.5倍強になると推定される⁶。仮に、図2の断層モデルによる地震動評価結果が1.5倍強になれば、表2の断層モデルに基づく基準地震動Ss-2～Ss-17も1.5倍強へ大幅に引き上げられることになり、大飯3・4

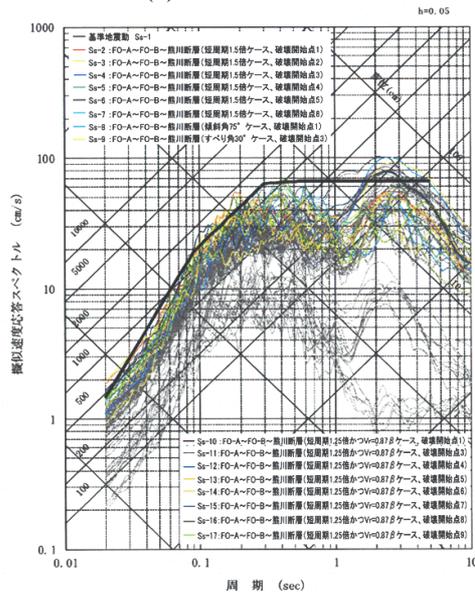
⁶大飯3・4号では、統計的グリーン関数法による断層モデルが使われており、その要素地震の応力降下量が約1.5倍、短周期レベルが約1.1倍に増やされるため、地震動評価結果も自動的に1.5倍以上になる。ただし、断層面積が拡大される修正レシピではアスペリティ面積も約1.2倍になるため、この分が地震動評価結果をさらに引き上げることになる。



(a) 水平 NS 方向

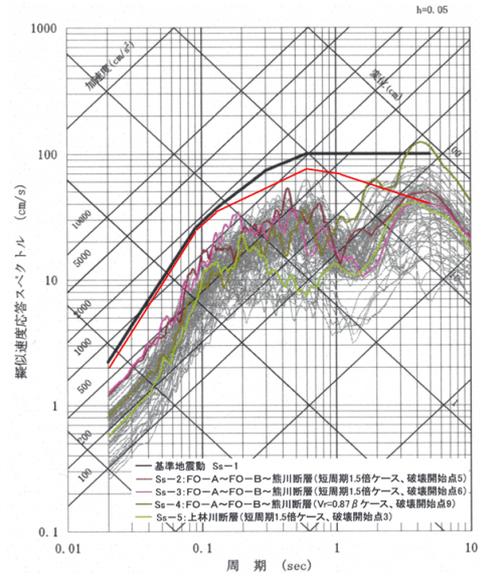


(b) 水平 EW 方向

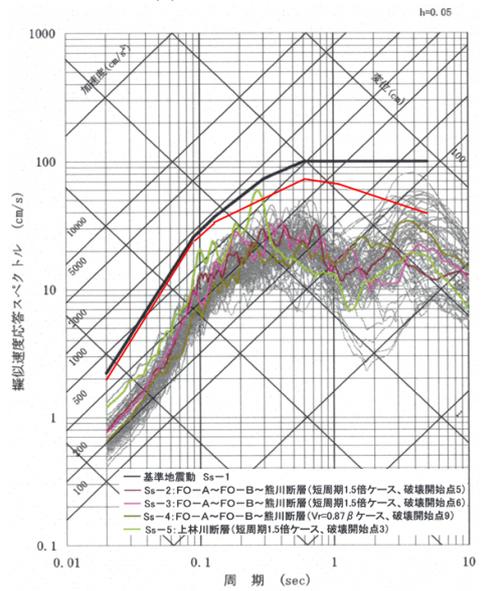


(c) 鉛直方向

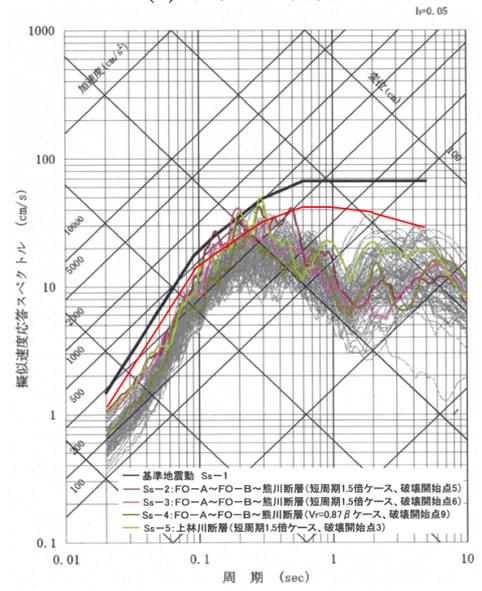
図 2: 大飯 3・4 号における「FO-A~FO-B~熊川断層」等の断層モデルによる評価結果 (灰色の全ケース重ね描き) と基準地震動 Ss-1~Ss-17 (2015 年 3 月)[26]



(a) 水平 NS 方向



(b) 水平 EW 方向



(c) 鉛直方向

図 3: 高浜 3・4 号における「FO-A~FO-B~熊川断層」等の断層モデルによる評価結果 (灰色の全ケース重ね描き) と FO-A~FO-B~熊川断層 (傾斜角 75 度) の耐専スペクトル (赤折れ線) および基準地震動 Ss-1~Ss-5 (2014 年 8 月)[25]

表 2: 大飯 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s² と同じ) [26]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動 (距離減衰式など「応答スペクトルによる方法」で作成)				
Ss-1	設計用模擬地震波 (FO-A~FO-B 断層~熊川断層の耐専スペクトルは適用外であり、距離減衰式による地震動評価に基づく)	700		468 ^{*1}
震源を特定して策定する地震動 (「断層モデルによる方法」で作成)				
Ss-2	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 1)	690	776	583
Ss-3	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 2)	496	826	383
Ss-4	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 3)	546	856	518
Ss-5	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 4)	511	653	451
Ss-6	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 5)	660	578	450
Ss-7	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 8)	442	745	373
Ss-8	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (傾斜角 75 度ケース, 破壊開始点 1)	434	555	349
Ss-9	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (すべり角 30 度ケース, 破壊開始点 3)	489	595	291
Ss-10	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 1)	511	762	361
Ss-11	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 3)	658	727	469
Ss-12	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 4)	495	546	334
Ss-13	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 5)	744	694	380
Ss-14	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 6)	723	630	613
Ss-15	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 7)	685	728	430
Ss-16	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 8)	677	753	391
Ss-17	同上 (短周期 1.25 倍かつ $V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 9)	594	607	436
震源を特定せず策定する地震動 (地震観測記録等に基づいて作成)				
Ss-18	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-19	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620		320

*1: 基準地震動の応答スペクトルでは 467gal (周期 0.02 秒の応答加速度) だが、これに適合するように作成した模擬地震波の最大加速度は 468gal になるため、関西電力は 468 gal を Ss-1 の模擬地震波の最大加速度として記載している。

表 2 と表 3 を比較して明らかのように、基準地震動 Ss-1 はいずれも同じだが、大飯 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2~17 は高浜 3・4 号の断層モデルによる基準地震動 Ss-2~4 の 2 倍以上である。同じ「FO-A~FO-B 断層~熊川断層」に対する評価でありながら、このように大きいのは、断層との等価震源距離が高浜 3・4 号の 18.6km に対し、大飯 3・4 号は 11.0km と非常に近いからである。だとすれば、応答スペクトルによる基準地震動 Ss-1 が大飯 3・4 号では 2 倍以上にも大きく設定されて当然である。しかし、そうっていないのは、断層との等価震源距離が「極近距離」より近すぎると耐専スペクトルの適用範囲外になるという理由からだが、震源近傍の地震観測記録はここ 20 年でかなり多く取れだしており、これらに基づいて耐専スペクトルを抜本的に作り替えて適用すべきである。ちなみに、原子力規制庁によれば、日本電気協会が耐専スペクトルを現在見直し作業中とのことである。そうであればなおさら、参考値としてでも耐専スペクトルを求め、大飯 3・4 号の基準地震動 Ss-1 を大幅に引上げるべきである。その上で、バラツキを考慮すべきである。

表 3: 高浜 3・4 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s² と同じ) [25]

基準地震動		NS 方向	EW 方向	UD 方向
震源を特定して策定する地震動 (耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成)				
Ss-1	設計用模擬地震波 (FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (傾斜角 75 度ケース) の耐専スペクトルによる)	700		467
震源を特定して策定する地震動 (「断層モデルによる方法」で作成)				
Ss-2	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 5)	376	248	334
Ss-3	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 6)	396	240	313
Ss-4	FO-A~FO-B 断層~熊川断層 ($V_r = 0.87\beta$ ケース, 破壊開始点 9)	255	205	218
Ss-5	上林川断層 (短周期 1.5 倍ケース, 破壊開始点 3)	180	374	320
震源を特定せず策定する地震動 (地震観測記録等に基づいて作成)				
Ss-6	2000 年鳥取県西部地震・賀祥ダムの記録	528	531	485
Ss-7	2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	620		320

表 4: 大飯・高浜原発における FO-A~FO-B~熊川断層の断層パラメータ (基本ケース) [25, 26]

断層パラメータ (すべて $S_a/S = 0.22$ 法による)	断層モデル (入倉式) *1		修正・新レシピ *2		
	F-M 採用 (関電)	F-M 不採用	断層面積変えず	断層面積拡大	
傾斜角 θ	90°				
ずれの種類	横ずれ断層				
断層長さ L	63.4 km		68.1 km		
断層幅 W	15.0 km		16.5 km		
断層面積 $S = LW$	951 km ²		1122.96 km ²		
断層上端深さ	3 km				
断層下端深さ	18 km				
破壊開始点	各アスペリティ下端 6 種類 + 断層下端 3 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	5.03 × 10 ¹⁹ N·m		7.01 × 10 ¹⁹ N·m		
マグニチュード	M7.7, M _W 7.1		M7.8, M _W 7.2		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	151.2 cm		210.8 cm	178.5 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.5 × 10 ¹⁰ N/m ²				
S 波速度 V_s (または β)	3.6 km/s				
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.59 km/s				
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$	3.1 MPa	4.2 MPa	5.8 MPa	4.5 MPa	
短周期レベル A	1.96 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		2.19 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		
ライズタイム $t_r = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$	1.61 sec		1.80 sec		
アスペリティ 全体	面積 S_a	209.22 km ²		247.05 km ²	
	地震モーメント M_{0a}	2.22 × 10 ¹⁹ N·m		3.10 × 10 ¹⁹ N·m	
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.1 MPa	19.0 MPa	26.5 MPa	20.6 MPa
	平均すべり量 D_a	303.9 cm		423.7 cm	358.8 cm
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	741.78 km ²		875.91 km ²	
	地震モーメント M_{0b} [N·m]	2.81 × 10 ¹⁹ N·m		3.91 × 10 ¹⁹ N·m	
	実効応力 $\sigma_b = 0.2\Delta\sigma_a$	2.8 MPa	3.8 MPa	5.3 MPa	4.1 MPa
	平均すべり量 D_b	108.1 cm		150.7 cm	127.7 cm
Q 値	50 $f^{1.1}$				
高周波限界遮断周波数 f_{\max}	8.3 Hz				

*1: 地震調査研究推進本部の強震動予測手法 (レシピ) では, 地震モーメント M_0 から短周期レベル A と断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ を求め, A の値からアスペリティ総面積 S_a を求め, S_a と断層面積 S の比 (アスペリティ面積比 S_a/S) からアスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を算出している (これを「A 法」とよぶ). この A 法では, S が大きくなるほど S_a/S が大きくなり, $\Delta\sigma_a$ が小さくなるとともに, 背景領域の地震モーメントがマイナスになるなど意味をなさなくなる. そこで, レシピでは, このような場合には S_a を S の 22% に固定する方法 (以下では, 「 $S_a/S = 0.22$ 法」とよぶ) を用いることとしている. さらに, レシピでは, 長大な断層の場合には, Fujii-Matsu'ura(2000) の $M_0 - (L, W)$ 関係式から導かれた $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ を使い, アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = \Delta\sigma/0.22 = 14.4\text{MPa}$ (上表では 14.1 となっているが, 原本での数値の丸め誤差による) と算出して用いることを推奨している. 関西電力は, 「FO-A~FO-B」の 35.3km モデルでは A 法 ($S_a/S = 0.248$) を使い, 熊川断層との連動 63.4km モデル (A 法では $S_a/S = 0.366 > 0.30$) では 「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用い, さらに Fujii-Matsu'ura(2000) で上表の「F-M 採用 (関電)」の欄のように応力降下量を小さく設定している. 問題はどの長さ以上を「長大な断層」とみなすかだが, 推本の「活断層の長期評価手法 (暫定版)」報告書 (2010.11.25) では「長さが 100km を超えるような長大な断層」(p.6) とし, 2014 年 12 月の「全国地震動予測地図 2014 年版」付録もスケリング則に沿った震源のモデル化との関連で「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層)」としていたが, レシピの中には明記されていなかった. 2016 年 6 月改訂の新レシピはこれを明記し, 地震モーメントが $M_0 > 1.8 \times 10^{20}\text{N}\cdot\text{m}$, すなわち, 断層面積 1,800km² 以上で適用することと明記し, 断層面積 951km² の「FO-A~FO-B~熊川断層」には到底適用できないことが明白になったのである. 入倉式で地震規模が過小設定されていても, Fujii-Matsu'ura(2000) の応力降下量を使わなければ, 「F-M 不採用」の欄のように, アスペリティ平均応力降下量は 19.0MPa になる.

*2: 修正レシピでは, 断層長さから松田式で地震規模を M7.8 と求め, 地震モーメント $M_0 = 7.01 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ を算出し, これに相当する断層面積 $S_{\text{model}} = 1122.96\text{km}^2$ を入倉式から求め, 断層長さと同断層幅を少し拡大して, この面積に近づけるが, 長さで 5km, 幅で 2km を上限としている. ここでは, 幅を 1.5km 拡張して $W_{\text{model}} = 16.5\text{km}$ とし, $L_{\text{model}} = S_{\text{model}}/W_{\text{model}}$ で長さを求めた. 参考のため, 断層面積を拡張しなかった場合を「断層面積変えず」の欄に記載した. 実際には断層モデルのメッシュの整数倍で断層の長さと同断層幅が決められるため, 応力降下量は両者の中間の値になる.

号の 1,260 ガルのクリフエッジを間違いなく超えるであろう。

それは別段、驚くべきことではない。大飯 3・4 号で適用外にされた「FO-A～FO-B～熊川断層」(M7.8, $X_{eq} = 11.0\text{km}$) の耐専スペクトルを採用しておれば、基準地震動が 1,200 ガル以上に設定されたはずだからである。元来、耐専スペクトルでも断層モデルでも、それらが正しく評価されていれば、同程度の結果になるはずであり、今回の検討はそれを裏付けたにすぎない。

原子力規制委員会は 6 月 20 日定例本会議の場で、島崎氏の問題提起に基づき、大飯原発について入倉式以外の松田式等で評価し直すよう原子力規制庁に指示したが、6 月 10 日改訂の新レシピを採用する限り、このような結果にならざるを得ない。

4 高浜 3・4 号の基準地震動への影響

島崎氏の問題提起と新レシピの適用がもたらす高浜 3・4 号の基準地震動への影響は、大飯 3・4 号の場合とは少し異なる。

高浜 3・4 号の基準地震動 Ss-1～7 は表 3 の通りであり、断層モデルによる地震動評価結果とそれに基づく基準地震動 Ss-2～Ss-5 は図 3 の通りである⁷。この図 3 には、「FO-A～FO-B～熊川断層（傾斜角 75 度）」の耐専スペクトル（内陸補正なし）が赤折れ線で描かれており、断層モデルによる水平 NS 方向と水平 EW 方向の地震動評価結果はこの耐専スペクトルの 1/3～1/2 にすぎないことがわかる。断層モデルによる地震動の過小評価がここに如実に現れており、その原因は、先に示したとおり、入倉式で地震規模を過小評価し、長大な断層に適用すべき Fujii-Matsu'ura の小さな応力降下量を無理矢理適用しているからにはほかならない。島崎氏の問題提起によって前者が是正され、新レシピの適用によって後者が是正される。その結果、「FO-A～FO-B～熊川断層」の断層パラメータは大飯 3・4 号と同様に表 4 の「修正・新レシピ」の欄のようになり、地震動評価結果は、大飯 3・4 号と同様に松田式で地震規模を評価した場合に約 1.9 倍、

⁷図 3 には上林川断層の断層モデルによる地震動評価結果も含まれる。なお、図 3 には「震源を特定せず策定する地震動」に関係した基準地震動 Ss-6 と Ss-7 は含まれていない。

修正レシピで断層面積を拡大した場合に約 1.5 倍強になると推定される⁸。

仮に、地震動評価結果が約 1.5 倍強になった場合には、表 3 の基準地震動 Ss-2～Ss-4 も約 1.5 倍強へ大幅に引き上げられるが、水平方向では 700 ガルの Ss-1 を一部の周期帯で超えることはあっても、大幅に超えることはない。しかし、鉛直方向では 467 ガルの Ss-1 をかなり超え、0.1～0.3 秒の周期帯で大きく超えることになる。つまり、高浜 3・4 号でも、基準地震動の見直しは避けられない。

高浜 3・4 号の基準地震動については、ここで検討した断層モデルによる地震動の過小評価だけでなく、次のような事柄も検討しなければならない。

(i) 耐専スペクトルには最近 20 年間の地震観測記録が反映されておらず、平均像そのものが過小評価に陥っていること、また、(ii) 「平均+標準偏差」が平均の 2 倍になるほどの偶然的不確かさが耐専スペクトルや断層モデルで考慮されておらず、実際の地震動を過小評価していること、さらに、(iii) 「震源を特定せず策定する地震動」では M6.5 の横ずれ断層で 1,340 ガルの地震動が起こることが原子力安全基盤機構 JNES によって解析されており、2016 年熊本地震の 4 月 14 日に起きた M6.5 前震の益城観測点での地下地震観測記録がそれを裏付けていること [49] である。これらについてはこれ以上は触れず、別稿に譲る [34]。

5 伊方 3 号の基準地震動への影響

四国電力による 2013 年 7 月の伊方 3 号再稼働申請時には、敷地前面海域の 54km モデルが基本震源モデルであり、不確かさの検討として 130km 連動モデルが採用され、モデルの妥当性確認のために 430km までのモデルが評価されていた。しかし、原子力規制委員会の審査会合で 480km モデル、130km モデル、54km モデルの 3 種類をすべて基本震源モデルとするよう迫られ、四国電力はそれに従わざるをえなかった。

結局、基本震源モデルは 2013 年 7 月申請時か

⁸高浜 3・4 号の場合も統計的グリーン関数法による断層モデルが用いられており、要素地震の応力降下量が約 1.5 倍に増やされるため、地震動評価結果も自動的に 1.5 倍になる。これにアスペリティ面積増大効果が付け加わり、約 1.5 倍強になる。

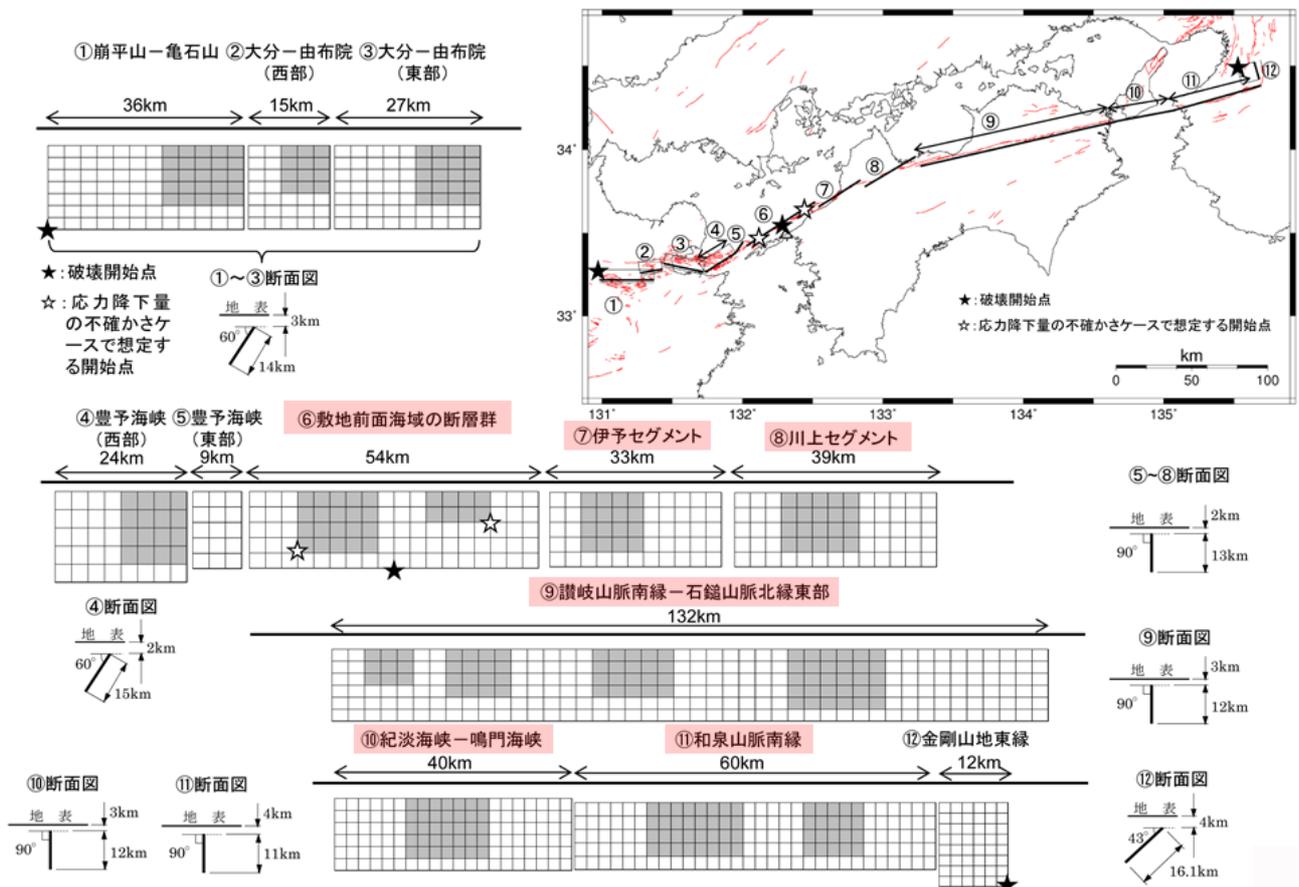


図 4: 伊方 3 号における敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 基本震源モデル [37]

表 5: 伊方 3 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s^2 と同じ) [37, 38]

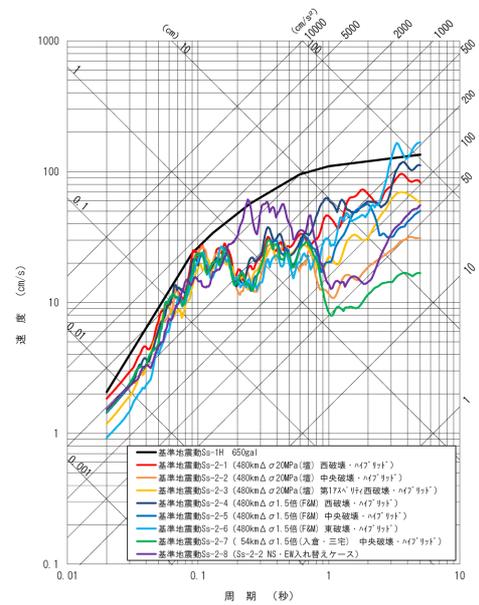
基準地震動		NS方向	EW方向	UD方向
震源を特定して策定する地震動（耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成）				
Ss-1	設計用模擬地震波（敷地前面海域の断層群 69km(傾斜角 30 度ケース)の耐専スペクトルによる）	650		377
震源を特定して策定する地震動（「断層モデルによる方法」で作成）				
Ss-2-1	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・壇の手法・ $\Delta\sigma 20\text{MPa}$ ・西破壊	579	390	210
Ss-2-2	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・壇の手法・ $\Delta\sigma 20\text{MPa}$ ・中央破壊	456	478	195
Ss-2-3	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・壇の手法・ $\Delta\sigma 20\text{MPa}$ ・第一アスペリティ西破壊	371	418	263
Ss-2-4	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・西破壊	452	494	280
Ss-2-5	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・中央破壊	452	388	199
Ss-2-6	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）480km 連動・Fujii-Matsu'ura の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・東破壊	291	360	201
Ss-2-7	敷地前面海域の断層群（中央構造線断層帯）54km・入倉・三宅の手法・ $\Delta\sigma 1.5$ 倍・中央破壊	458	371	178
Ss-2-8	Ss-2-2 の NS と EW の入れ替え	478	456	195
震源を特定せず策定する地震動（地震観測記録等に基づいて作成）				
Ss-3-1	2004 年北海道留萌支庁南部地震 M6.1 の解放基盤波	620		320
Ss-3-2	2000 年鳥取県西部地震 M7.3 の賀祥ダム（監査廊）の観測記録	528	531	485

ら大きく変わり、「図4の480km」,「図4⑥~⑧の130km」,「図4⑥の54km」という3種類の敷地前面海域断層群(中央構造線断層帯)が設定された。これに伴い、地震動評価手法も、壇ら(2011)の手法[9]が3種類の基本モデルに一貫して採用され、480kmと130kmにはFujii-Matsu'ura(2000)の手法[10], 54kmには入倉・三宅(2001)の手法[13]も併用された。こうして、表5および図5の基準地震動が策定された。

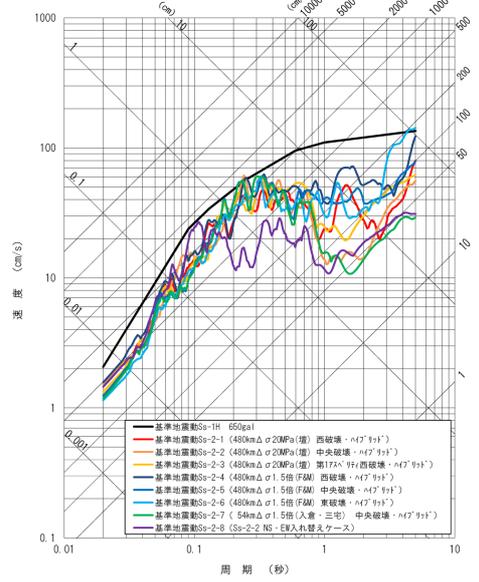
伊方3号の場合でも、54km, 69km, 130kmの鉛直ケースの耐専スペクトルは等価震源距離が小さすぎるため適用外とされ、断層モデルによる地震動評価結果が基準地震動Ss-2-1~Ss-2-8を占めており、入倉・三宅の手法による評価結果もSs-2-7として入っている。実は、Ss-2-7の破壊開始点を「西下端破壊ケース」とした場合も鉛直方向でSs-1を超えるが、Ss-2-4に包絡されるため基準地震動には含まれていない。

島崎氏の問題提起と新レシピの適用によって、断層モデルによる地震動評価結果がどのように変わるかは表6から推定できる。表6の「断層モデル(入倉式)」の「F-M採用(四電)」が四国電力による54km基本ケースの断層パラメータであり、「F-M不採用」の欄が新レシピを適用してFujii-Matsu'uraの応力降下量を使わない場合であり、「修正・新レシピ」の欄が松田式で地震規模を求め、断層面積を拡大する修正レシピを採用し、F-Mを採用しない新レシピを適用した場合である。これより、「修正・新レシピ」では、地震モーメントは約2.0倍、短周期レベルは約1.2倍になり、応力降下量もFujii-Matsu'uraの「 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 14.4\text{MPa}$ 」から約2.2倍の「 $\Delta\sigma = 7.0\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 31.9\text{MPa}$ 」(断層面積を変えない場合)または約1.6倍の「 $\Delta\sigma = 5.0\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 22.5\text{MPa}$ 」(修正レシピで断層面積を変えた場合)と大きくなる⁹。断層面積を変えた場合にはスペリティ面積も約1.3

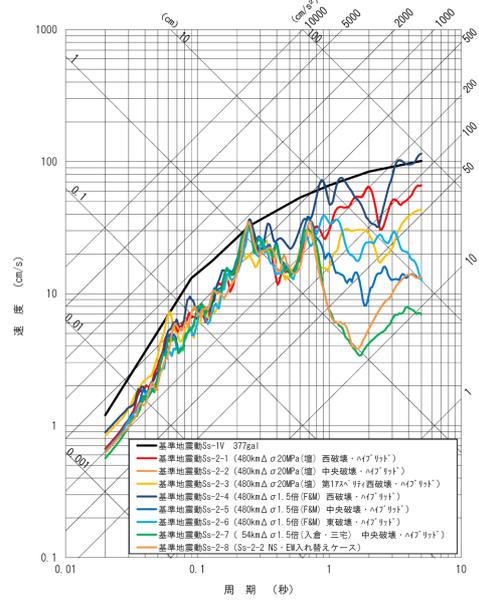
⁹Fujii-Matsu'uraのアスペリティ平均応力降下量が $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ ではなく、 14.4MPa になっているのは、アスペリティ面積比 S_a/S を大飯・高浜原発ではレシピ通りに0.22としているのに対し、伊方原発では原論文から0.215としているためである。断層面積を変えない場合には 31.9MPa と極めて大きいですが、国内で観測されているM7クラスの地震では注2(iv)に示したとおり、 $\Delta\sigma_a = 20 \sim 30\text{MPa}$ であり、異常とまでは言えない。ちなみに、海洋プレート間地震では $\Delta\sigma_a = 40 \sim 50\text{MPa}$ の応力降下量は通常レベルの大きさである。



(a) 水平 NS 方向



(b) 水平 EW 方向



(c) 鉛直方向

図5: 伊方3号における応答スペクトルによる基準地震動Ss-1と中央構造線断層帯の断層モデルによる基準地震動Ss-2-1~Ss-2-8[37]

表 6: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 54km 基本ケース (鉛直) の断層パラメータ [37]

断層パラメータ (すべて $S_a/S = 0.22$ 法による)		断層モデル (入倉式) *1		修正・新レシピ *2	
		F-M 採用 (四電)	F-M 不採用	断層面積変えず	断層面積拡大
傾斜角 θ		90 度 (右横ずれ断層)			
断層長さ L		54.0 km		59.0 km ²	
断層幅 W		13.0 km		15.0 km	
断層面積 $S = LW$		702.0 km ²		885.0 km ²	
断層上端深さ		2 km			
断層下端深さ		15 km		$W_{\text{model}}=17$ km	
地震モーメント M_0		2.74×10^{19} N·m		5.36×10^{19} N·m	
マグニチュード		M7.5 (M7.3 : 四電), M_W 6.9		M7.7, M_W 7.1	
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		118 cm		230.6 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.31×10^{10} N/m ²			
S 波速度 V_s (または β)		3.5 km/s			
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$		2.5 km/s			
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$		3.1 MPa	3.6 MPa	7.0 MPa	5.0 MPa
短周期レベル A [N·m/s ²]		1.65×10^{19}	1.60×10^{19}	2.00×10^{19}	
アスペリティ 全体	面積 S_a [km ²]	150.9 (0.215)	154.4 (0.22)	194.7 (0.22)	
	地震モーメント M_{0a} [N·m]	1.18×10^{19}	1.21×10^{19}	2.36×10^{19} N·m	
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.4 MPa	16.3 MPa	31.9 MPa	22.5 MPa
	短周期レベル A_a [N·m/s ²]	1.54×10^{19}	—	—	
	平均すべり量 D_a	236 cm		461.2 cm	365.8 cm
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	551.1 km ²	547.6 km ²	690.3 km ²	
	地震モーメント M_{0b} [N·m]	1.56×10^{19}	1.54×10^{19}	3.00×10^{19} N·m	
	実効応力 $\sigma_b = 0.2\Delta\sigma_a$	2.9 MPa	3.3 MPa	6.4 MPa	4.5 MPa
	短周期レベル A_b [N·m/s ²]	5.88×10^{18}	—	—	
	平均すべり量 D_b	86 cm	85 cm	165.5 cm	131.3 cm

*1: 四国電力は入倉・三宅の手法で敷地前面海域断層群 54km の断層パラメータを求める際 [37], A 法では $S_a/S = 0.267$ とやや大きくなるため, アスペリティ面積比を固定する方法を用いているが, 通常のレシピでは $S_a/S = 0.22$ とすべきところ, $S_a/S = 0.215$ としている。また, 長大な断層に対して推奨されている Fujii-Matsu'ura による応力降下量 ($\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 3.1/0.215 = 14.4\text{MPa}$) を採用している。通常であれば, 短周期レベル A を地震モーメント M_0 から算出するが, 応力降下量からアスペリティと背景領域の短周期レベルを $A_a = 4\beta^2\Delta\sigma_a\sqrt{\pi S_a}$, $A_b = 4\beta^2\Delta\sigma_b\sqrt{\pi S_b}$ から求め, 全体の短周期レベルを $A = \sqrt{A_a^2 + A_b^2}$ より求めている。通常のレシピによる $S_a/S = 0.22$ 法によるパラメータは「F-M 不採用」の欄に示した値になるが, 「F-M 採用 (四電)」の欄の値と比較すると, 短周期レベルはそれほど変わらないものの, 応力降下量が過小設定になっていることがわかる。「F-M 不採用」の欄でアスペリティ全体と背景領域の短周期レベルの値を「—」としているのは, 通常のレシピでは地震モーメントに対応する短周期レベルのすべてをアスペリティに割り当て, 背景領域の短周期レベルを無視しているからである。また, 四国電力の計算した気象庁マグニチュードが「(M7.3 : 四電)」と小さくなっているのは, 地震モーメント M_0 [N·m] を気象庁マグニチュード M へ換算する式として, 四国電力は通常の $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ ではなく, それを簡略化した式 $M = (1/1.2)(\log_{10} M_0 - 10.7)$ を用いているためである。以前は, このように気象庁マグニチュードを小さく計算し, これを耐専スペクトルなど距離減衰式に用いて地震動を過小評価していたが, さすがに今では, このような方法を用いてはならず, 過去の遺物を引きずっているといえる。

*2: 修正レシピでは, 断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M を求め, $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ より, 地震モーメント M_0 を求める。短周期レベルから応力降下量を求める A 法では, アスペリティの面積が大きくなりすぎて, 背景領域の地震モーメントがマイナスになり無意味になるため, アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a/\Delta\sigma = 0.22$ 法で求める。入倉式から断層面積を逆算すると 981.4km² となるが, 修正レシピでは断層長さや幅の拡張上限をそれぞれ 5km と 2km にしており, この上限値まで拡張しても 885.0km² にとどまるため, 上限まで拡張した。新レシピでは, 断層面積が 1800km² を超えない限り, Fujii-Matsu'ura の応力降下量が使えないため, 応力降下量は通常のレシピ通りに算出した。実際には断層モデルのメッシュの整数倍で断層の長さや幅が決められるため, 応力降下量は断層面積を拡張した場合としない場合の中間の値になる。

四国電力は, 2013 年 7 月申請時には 69km モデルを断層モデルで評価していたが, 基本震源モデル変更の際にして, 69 km モデルは 130km モデルに含まれると見なし断層モデルでは評価していない。参考のため, 69km モデルについて修正レシピ (上限まで拡大) で求めたパラメータは次の通りである (比較のため括弧内に申請時の 69km モデルのパラメータ値を示す): $L = 74\text{km}$ (69km), $W = 15\text{km}$ (13km), $S = 1110.0\text{km}^2$ (897.0km²), $M_0 = 9.18 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ ($4.48 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$), $A = 2.39 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m/s}^2$ ($1.83 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m/s}^2$), $D = 206.8\text{cm}$ (125cm), $\Delta\sigma = 6.0\text{MPa}$ (3.1MPa), $\Delta\sigma_a = 27.5\text{MPa}$ (14.0MPa : $S_a/S = 0.22$ なら 14.1MPa, $S_a/S = 0.215$ なら 14.4MPa とすべきところだが, 原典のまま引用), $S_a = 244.2\text{km}^2$ (0.22) (197.3km²(0.22)), $D_a = 413.7\text{cm}$ (250cm), $\sigma_b = 5.5\text{MPa}$ (2.8MPa), $D_b = 148.5\text{cm}$ (90cm)

表 7: 伊方 3 号における敷地前面海域断層群 54km 基本ケース (鉛直) の震源パラメータ *1[37]

	地震モーメント M_o [Nm] (比)	短周期レベル A [Nm/s ²]	応力降下量 ($\Delta\sigma, \Delta\sigma_a, 1.5\Delta\sigma_a$ or 20MPa)	S_a/S ($=\Delta\sigma/\Delta\sigma_a$)
壇ら (2011) の手法に基づく (四国電力) *2				
480km モデル	6.08×10^{19} (2.22)	1.56×10^{19}	(3.4MPa, 12.2MPa, 20MPa)	0.279
130km モデル	6.20×10^{19} (2.26)			
54km モデル	5.84×10^{19} (2.13)			
断層幅 12km で壇ら (2011) の回帰線にあわせたモデル (引用者が算出) *2				
480km モデル	7.69×10^{19} (2.81)	2.49×10^{19}	(4.3MPa, 19.5MPa, 29.3MPa)	0.22
130km モデル	7.85×10^{19} (2.86)			
54km モデル	7.38×10^{19} (2.69)			
Fujii-Matsu'ura(2000) の手法に基づく (四国電力: ただし, 54km モデルは引用者が算出) *3				
480km モデル	1.35×10^{20} (4.93)	1.65×10^{19}	(3.1MPa, 14.4MPa, 21.6MPa)	0.215
130km モデル	9.92×10^{19} (3.62)			
54km モデル	6.69×10^{19} (2.44)			
入倉・三宅 (2001)+Fujii-Matsu'ura の手法に基づく (四国電力) *4				
54km モデル	2.74×10^{19} (1.00)	1.65×10^{19}	(3.1MPa, 14.4MPa, 21.6MPa)	0.215
入倉・三宅 (2001)+断層モデルのレシピから引用者が算出 (上段: A 法, 下段: $S_a/S = 0.22$ 法) *5				
54km モデル	2.74×10^{19} (1.00)	1.60×10^{19}	(3.6MPa, 13.4MPa, 20.1MPa)	0.267
	2.74×10^{19} (1.00)	1.60×10^{19}	(3.6MPa, 16.3MPa, 24.5MPa)	0.22
松田式で地震規模を求め断層面積を広げる修正レシピから引用者が算出 ($S_a/S = 0.22$ 法) *6				
54km モデル	5.36×10^{19} (1.96)	2.00×10^{19}	(5.0MPa, 22.5MPa, 33.7MPa)	0.22

*1: 敷地前面海域断層群 54km 基本ケースの震源断層は, 傾斜角 90 度 (鉛直) の右横ずれ断層で, 上端深さ 2km, 断層長さ $L = 54.0$ km, 断層幅 $W = 13.0$ km, 断層面積 $S = 702.0$ km², 剛性率 $\mu = 3.31 \times 10^{10}$ N/m², S 波速度 $\beta = 3.5$ km/s, 密度 $\rho = 2.7$ g/cm³, 破壊伝播速度 $V_r = 2.5$ km/s である. 480km と 130km のモデルにおいては, カスケード方式 (断層面積に比例して地震モーメントを配分) で, 全体の一部をなすものとして 54km 断層群の震源パラメータが算出されている.

*2: 壇ら (2011)[9] は, Irie et al.(2010)[?] の動学的断層破壊シミュレーション結果から導かれた関係式 $\Delta\sigma = M_o(0.5 + 2 \exp(-L/W_{\max}))/(\Delta\sigma_{\max})$ を国内 9 地震, 海外 13 地震のデータに当てはめて平均動的応力降下量を求め, その幾何平均として $\Delta\sigma = 3.4$ MPa を導いている. その際, 断層面積 S と断層長さ L は各地震データの値を用いているが, 断層幅は $W = S/L$ ではなく, すべて $W_{\max} = 15$ km としている. つまり, $\Delta\sigma = 3.4$ MPa と $W_{\max} = 15$ km はベアになっている. 壇らの回帰式を用いて地震モーメント M_o の平均像を求めるのであれば, $W_{\max} = 15$ km とすべきところ, 四国電力は全体の断層帯の平均断層幅 (480km モデルで 12.7km, 130km モデルと 54km モデルで 13.0km) を用いている. その結果, 壇らの回帰線からずれる結果になっている. こうして得た全体の地震モーメントを断層面積に比例して配分している. たとえば, 480km モデルでは, 全体の断層面積が 6124.2km², 地震モーメントが 5.30×10^{20} Nm になるため, 54km モデルの地震モーメントは $M_o = 5.30 \times 10^{20} \times (702.0/6124.2) = 6.08 \times 10^{19}$ Nm となっている. 壇らの用いた国内 9 地震の平均断層幅は 12.0km なので, $W_{\max} = 12.0$ km として, 壇らの回帰線に合うように調整すると $\Delta\sigma = 4.3$ MPa になり, 「壇ら (2011) の回帰線にあわせたモデル」のように, 地震モーメントは壇らの回帰線上に載り, 短周期レベルや応力降下量も大きくなる (アスペリティ面積比は 0.279 では大きすぎるため, 断層モデルのレシピに従い $S_a/S = 0.22$ とした).

*3: Fujii-Matsu'ura(2000) は, 2次元のトランスフォーム・プレート境界での準静的なテクトニックローディングによる有限長断層運動シミュレーションから経験式 $M_o = WL^2\Delta\sigma/(aL + b)$ を導き, これを国内外の地震データに回帰させて, 断層平均応力降下量を $\Delta\sigma = 3.1$ MPa と求めている. ただし, リソスフェアの厚さ = 30km, 剛性率 $\mu = 4.0 \times 10^{10}$ N/m², $a = 1.4 \times 10^{-2}$, $b = 1.0$, $W = 15$ km としている. ここでも, 断層幅は 15km であり, 12~13km の震源断層に適用する際にはこの違いを考慮する必要がある. しかし, 四国電力にも原子力規制委員会にも, この違いを考慮した形跡は見られない. こうして得た全体の断層帯に対する地震モーメントを断層面積に応じて 54km モデルに比例配分している.

*4: 四国電力は入倉・三宅の手法を用いる際, 短周期レベルや応力降下量を通常のレシピに従って求めるのではなく, レシピでは 100km 以上の「長大な断層」に適用すべきとされている Fujii-Matsu'ura の手法を用いている.

*5: 通常の断層モデルのレシピに従い, 入倉・三宅の手法で地震規模を求め, 短周期レベルや応力降下量についても通常のレシピに従って求めた. 上段の「A 法」とは短周期レベルからアスペリティ総面積を求める方法で, 下段の「 $S_a/S = 0.22$ 法」とはアスペリティ総面積を断層面積の 22% に固定する方法である. A 法では, 断層面積が大きくなるほどアスペリティ面積の全断層面積との比 S_a/S が大きくなり, 応力降下量が小さくなる. そのため, 地震調査研究推進本部のレシピでは, 長大な断層に関しては $S_a/S = 0.22$ 法を用いるように推奨し, 「内陸地震によるアスペリティ総面積の占める割合は, 断層総面積の平均 22% (Somerville et al., 1999), 15%~27% (宮腰・他, 2001) であり, 拘束条件にはならないが, こうした値も参照しておく必要がある」としている. 壇らの $S_a/S = 0.279$ は平均像からかなり離れ, 27% の上限も超えている.

*6: 松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で断層長さ L [km] から気象庁マグニチュードを求め, 換算式 $\log_{10} M_o$ [Nm] = $1.17M + 10.72$ で地震モーメントを求め, 修正レシピに従い, 断層長さを $L = 54.0 + 5.0 = 59.0$ km, 断層幅を $W = 13.0 + 2.0 = 15.0$ km, したがって, 断層面積を $S = 885.0$ km² として通常の断層モデルのレシピを用いた. この場合, A 法では $S_a/S = 0.411$ と過大になるため, $S_a/S = 0.22$ 法の結果だけを示した. この場合の地震モーメントは壇らの 54km モデルや Fujii-Matsu'ura の 54km モデルにおける地震モーメントの値にほぼ等しい. こうなるのは, この規模の断層長さに対応する地震データには, 壇らも Fujii-Matsu'ura も国内地震データを用いて回帰式を導いているからであり, 入倉・三宅の手法による地震モーメントがこれらの半分程度に小さくなっているのは, 彼らの回帰式が北米中心の地震データに基づいているからである.

倍に増えるため、この効果も付け加わる。

仮に、54kmの断層モデルによる地震動評価が約1.6倍強となった場合には¹⁰、表5のSs-7は700ガル以上になり、水平方向・鉛直方向ともに、0.1秒付近や0.2~0.3秒付近の重要な周期帯でSs-1をかなり超えることになる。

四国電力は、2013年7月申請時には54kmの不確かさとして69kmを断層モデルで評価していたが、基本震源モデル変更之际、これは130kmに包含されると見なし評価していない。しかし、130kmは壇ら(2011)のモデルで解析されており、これに包含されるというのは当たらない。69kmモデルについて、54kmと同様に修正レシピ(上限まで拡大)で断層パラメータを求めると、表6の注釈に記したとおり、申請時のパラメータ値と比べて、地震モーメントで約2.0倍、断層面積で約1.2倍、短周期レベルで約1.3倍、応力降下量で約2.0倍、アスペリティ面積で約1.2倍になる。つまり、69kmモデルでは2倍以上の地震動評価結果になる。基準地震動Ss-1は69km北傾斜ケースの耐専スペクトルに規定されており、69km鉛直ケースの耐専スペクトルは適用外とされているが、69kmの修正レシピによる断層モデルで地震動評価をすれば、これと同等の地震動評価結果が得られると推定される。そうなれば、伊方3号の855ガルのクリフエッジを超え、再稼働できなくなるであろう。

伊方3号の場合には、これに加えて、表7に示すとおり、480km、130km、54kmモデルに適用されている壇ら(2011)の断層モデルのパラメータも過小設定されており、これらの地震動評価結果もアスペリティ応力降下量の比から約1.6倍(=19.5MPa/12.2MPa)に引上げられねばならない。そうなれば、69kmモデルの修正レシピによる断層モデルによる地震動評価見直しと同様に、伊方3号の855ガルのクリフエッジを超える可能性がある。その詳細は別項[33]に譲る。

¹⁰伊方3号では、統計的グリーン関数法と経験的グリーン関数法の両方で断層モデルによる地震動評価を行っている。前者では要素地震の応力降下量や短周期レベルを直接増減して要素地震波を作成するが、後者の経験的グリーン関数法では、要素地震と検討用地震の応力降下量の比の値を増減し、短周期レベルの増減もすべり速度関数の調整で考慮する。したがって、いずれにおいても応力降下量が1.6倍になれば、地震動評価結果を1.6倍に引上げる効果があり、これに短周期レベルの増減やアスペリティ面積増大の効果が加わることになる。

6 島根2号の基準地震動への影響

島根2号の基準地震動は2016年6月段階で表8のようになっているが、断層モデルによる地震動評価がまだ検討段階にある。800ガルの基準地震動Ss-DHを規定しているのは「F-III~F-IV~F-V断層(傾斜角60度)の耐専スペクトル(内陸補正なし)だが、「宍道断層」の全ケースおよび「F-III~F-IV~F-V断層」のアスペリティ横長・縦長両ケースについては耐専スペクトルを「適用外」としており、「700ガルを超える場合はすべて適用外」にしたと考えられる。このようにしても、断層モデルによる地震動評価結果は小さすぎて、どの周期帯においてもSs-Dを超えないため、断層モデルによって作成される基準地震動は全く存在しない。

「震源を特定して策定する地震動」の基本震源モデルは「宍道断層」と「F-III~F-IV~F-V断層」だが、「宍道断層」とは異なり、「F-III~F-IV~F-V断層」については、その基本ケースが3月の「80度傾斜ケース」[4]から6月には「鉛直ケース」[6]に変更された。この段階での断層モデルによる地震動評価結果を全ケース重ね描きしたのが図6である。断層モデルによる地震動評価結果は、水平方向、鉛直方向ともに基準地震動Ss-Dにかなり接近しているが、どの周期帯においてもそれを超えることはない。耐専スペクトルの多くのケースが適用外にされていることを考慮すれば、このこと自身が断層モデルによる地震動評価が過小評価であることを示している。

中国電力は「宍道断層」と「F-III~F-IV~F-V断層」のいずれの基本ケースでも、入倉式による断層モデルで短周期レベルAからアスペリティ面積と応力降下量を求める手法(A法)を用いており、Fujii-Matsu'uraの応力降下量は採用していない。ただし、「F-III~F-IV~F-V断層」(80度傾斜)には、Fujii-Matsu'uraの応力降下量を採用している。

では、島根2号では、島崎氏の問題提起と新レシピの適用で、地震動評価結果はどのようになるのであろうか。

宍道断層では、表9より、「修正・新レシピ」では、地震モーメントは約2.4倍、短周期レベルは約1.3倍になり、応力降下量も「 $\Delta\sigma = 2.44\text{MPa}$ 、 $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ 」から断層面積を変えない場合は

表 8: 島根 2 号の基準地震動とその最大加速度 [gal] (cm/s^2 と同じ) [4, 6]

基準地震動		NS方向	EW方向	UD方向
震源を特定して策定する地震動 (耐専スペクトルなど「応答スペクトルによる方法」で作成)				
Ss-D	設計用模擬地震波 (F-III~F-IV~F-V 断層による地震)	800		534
震源を特定せず策定する地震動 (地震観測記録等に基づいて作成)				
Ss-N1	2004 年北海道留萌支庁南部地震 M6.1 の解放基盤波	620		320
Ss-N2	2000 年鳥取県西部地震 M7.3 の賀祥ダム (監査廊) の観測記録	528	531	485

約 1.9 倍の「 $\Delta\sigma = 5.79\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 26.3\text{MPa}$ 」へとかなり大きくなるが、修正レシピで断層面積を変えた場合には約 1.15 倍の「 $\Delta\sigma = 3.56\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 16.2\text{MPa}$ 」への微増にとどまる。断層面積を変えない場合と比べて、応力降下量の増加度が余りに小さい。これは、断層長さが 25km、断層幅が 13km と小さい場合に、長さで 5km、幅で 2km も拡大すれば、断層面積が元の約 1.4 倍にもなり、応力降下量が過小に算定されてしまうためである。この点は、大飯・高浜原発の「FO-A~FO-B~熊川断層」の場合、修正・新レシピでは地震モーメントが約 1.4 倍になる一方、断層面積は約 1.2 倍にとどまったのと対照的である。したがって、断層幅が 13km と短く、断層長さが 20~35km の場合には、修正レシピによる震源断層拡大を単純に適用すると応力降下量を過小算定することになりかねない。

この点では、注 3 に示したとおり、宍道断層が断層長さ 22km (M7.1) と評価されていた 2010 年当時、旧原子力安全委員会で、断層幅だけを 2km 増やした解析を行っており、ここでも、断層幅だけを 2km 拡大したケースを評価した。その結果、表 9 の「修正・新レシピ」の「断層幅のみ拡大」の欄に記載の通り、応力降下量は「 $\Delta\sigma = 4.67\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 21.2\text{MPa}$ 」へ約 1.5 倍になる。この場合には、地震動評価結果は図 6 の 1.5 倍強になり¹¹, 0.02~0.3 秒の重要な周期帯で、宍道断層について適用外とされた 1,000 ガル以上の耐専スペクトルに相当する地震動になり、島根 2 号の 1,014 ガルのクリフエッジを超えるであろう。

断層長さ 48km の「F-III~F-IV~F-V 断層」(基本)では、地震モーメントは約 1.9 倍、短周期

¹¹ 島根 2 号では統計的グリーン関数法による断層モデルを用いており、要素地震波形に応力降下量や短周期レベルの増大が直接反映されるが、これにアスペリティ面積の増大効果が追加される。

レベルは約 1.2 倍になり、応力降下量も「 $\Delta\sigma = 3.39\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 12.7\text{MPa}$ 」から約 2.3 倍の「 $\Delta\sigma = 6.40\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 29.1\text{MPa}$ 」(断層面積を変えない場合)または約 1.6 倍の「 $\Delta\sigma = 4.45\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 20.2\text{MPa}$ 」(修正レシピで断層面積を変えた場合)と大きくなる。地震動評価結果が修正レシピで約 1.6 倍強になれば、図 6 の青線の「F-III~F-IV~F-V 断層」が約 1.6 倍強に引き上げられ、基準地震動 Ss-D にかなり近づく。この Ss-D は「F-III~F-IV~F-V 断層 (傾斜角 60 度)」の耐専スペクトルで規定されており、これとの整合性が出てくるということを意味する。このように、断層モデルによる地震動評価結果は、どの原発においても、耐専スペクトルの 1/3~1/2 程度にとどまっていたが、その主な原因は、島崎氏の問題提起にあった入倉式による地震規模の過小評価、および新レシピで採用できなくなった「概ね 80km を超える長大な断層」とは言えない断層への Fujii-Matsu'ura の応力降下量の採用であった。両者による過小評価が是正されれば、当然のごとく、両者の地震動評価結果にあった大きな食い違いは消えさる¹²。

大飯原発や伊方原発では、近距離の活断層による耐専スペクトルが適用外にされたため、断層モデルによる地震動評価結果が基準地震動を規定しているが、今回の断層モデルによる地震動評価の是正により、基準地震動が大きく引き上げられることは必至である。それは、適用外にされた耐専スペクトルと同程度の地震動が断層モデルで評価された結果に過ぎず、本来、耐専スペクトルが適用外にされていなければ、それが大きな基準地震

¹² 原発から遠くへ伸びる断層の場合には、耐専スペクトルは過小評価になる。たとえば、伊方 3 号では、54km より 69km のほうが大きい、130km、480km と伸びるほど小さくなる。また、耐専スペクトルでは極近距離内、特に震源域内の地震観測記録が反映されておらず、原子力安全基盤機構 JNES の解析結果では、耐専スペクトルは震源近傍で過小評価になっている。これら以外では両者で大差はないはずである。

表 9: 原子力規制庁による 2016 年 3 月ヒアリング段階の「宍道断層 (基本)」の断層パラメータ [5]

断層パラメータ		断層モデル (入倉)			
		修正レシピ ($S_a/S = 0.22$ 法) (注 1)			
		A 法 (中国電力)	断層面積変えず	断層幅のみ拡大	断層面積拡大
傾斜角 θ		90°			
ずれの種類		横ずれ断層			
断層長さ L		25.0 km			30.0 km
断層幅 W		13.0 km		15.0 km	
断層面積 $S = LW$		325.0 km ²		375.0 km ²	450.0 km ²
断層上・下端深さ		2 km · 15 km		2 km · $W_{\text{model}} = 17$ km	
破壊開始点		最大アスペリティ下端 2 種類 + 断層下端 3 種類			
破壊伝播方式		同心円状 (放射状)			
地震モーメント M_0		5.88 × 10 ¹⁸ N·m	1.39 × 10 ¹⁹ N·m		
マグニチュード		M6.9, M_w 6.4	M7.2, M_w 6.7		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$		52.1 cm	123.5 cm	107.1 cm	89.2 cm
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$		3.47 × 10 ¹⁰ N/m ²			
S 波速度 V_s (または β)		3.57 km/s			
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$		2.57 km/s			
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$		2.44 MPa	5.79 MPa	4.67 MPa	3.56 MPa
短周期レベル A		9.56 × 10 ¹⁸ N·m/s ²	1.28 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		
アスペリティ全体	等価半径 $r = \sqrt{S_a/\pi}$	4.23 km	4.77 km	5.12 km	5.61 km
	面積 $S_a = \pi r^2$	56.3 km ²	71.5 km ²	82.5 km ²	99.0 km ²
	地震モーメント $M_{0a} = \mu D_a S_a$	2.03 × 10 ¹⁸ N·m	6.13 × 10 ¹⁸ N·m		
	応力降下量 $\Delta\sigma_a = (S/S_a)\Delta\sigma$	14.1 MPa	26.3 MPa	21.2 MPa	16.2 MPa
	平均すべり量 $D_a = 2D$	104.3 cm	247.1 cm	214.1 cm	178.4 cm
第一アスペリティ	面積 $S_{a1} = (16/22)S_a$	40.9 km ²	52.0 km ²	60.0 km ²	72.0 km ²
	地震モーメント M_{0a1} (注 2)	1.65 × 10 ¹⁸ N·m	4.99 × 10 ¹⁸ N·m		
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a1} = \Delta\sigma_a$	14.1 MPa	26.3 MPa	21.2 MPa	16.2 MPa
	平均すべり量 $D_{a1} = M_{0a1}/(\mu S_{a1})$	116.6 cm	276.3 cm	239.4 cm	199.5 cm
第二アスペリティ	面積 $S_{a2} = (6/22)S_a$	15.3 km ²	19.5 km ²	22.5 km ²	27.0 km ²
	地震モーメント M_{0a2} (注 2)	3.80 × 10 ¹⁷ N·m	1.14 × 10 ¹⁸ N·m		
	応力降下量 $\Delta\sigma_{a2} = \Delta\sigma_a$	14.1 MPa	26.3 MPa	21.2 MPa	16.2 MPa
	平均すべり量 $D_{a2} = M_{0a2}/(\mu S_{a2})$	71.4 cm	169.2 cm	146.6 cm	122.2 cm
背景領域	面積 $S_b = S - S_a$	268.7 km ²	253.5 km ²	292.5 km ²	351.0 km ²
	地震モーメント $M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	3.84 × 10 ¹⁸ N·m	7.80 × 10 ¹⁸ N·m		
	実効応力 σ_b (注 3)	2.45 MPa	4.69 MPa	3.52 MPa	2.93 MPa
	平均すべり量 $D_b = M_{0b}/(\mu S_b)$	41.2 cm	88.7 cm	76.9 cm	64.1 cm

注 1: 断層モデルによるレシピには、入倉式で断層面積から地震モーメント M_0 を求める方法と松田式で断層長さから気象庁マグニチュードを求め、それを地震モーメントに換算して用い、断層面積を拡張する方法 (修正レシピ) の 2 種類がある。修正レシピでは、入倉式で逆算した断層面積を上限として、断層長さを最大 5km、断層幅を最大 2km まで拡張できるが、上表では最大まで拡張した「断層面積拡大」、全く拡張しない「断層面積変えず」、旧原子力安全委員会の 2010 年 WG の解析 [2] に従って「断層幅のみ拡大」したケースの 3 通りを示した。また、断層が未飽和の場合や飽和断層でも断層長さが比較的短い場合には短周期レベルからアスペリティ総面積を求める「A 法」を用い、「A 法」で求めたアスペリティ面積と断層面積の比 S_a/S が大きくなりすぎる場合には、アスペリティ総面積を断層面積の 22% に固定する「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用いる。「断層モデル (入倉式)」の「A 法」では $S_a/S = 0.173$ と小さいため、「 $S_a/S = 0.22$ 法」は参考として示したが、「修正レシピ」では、左から順に $S_a/S = 0.547, 0.411$ および 0.286 と過大になったため、「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用いている。

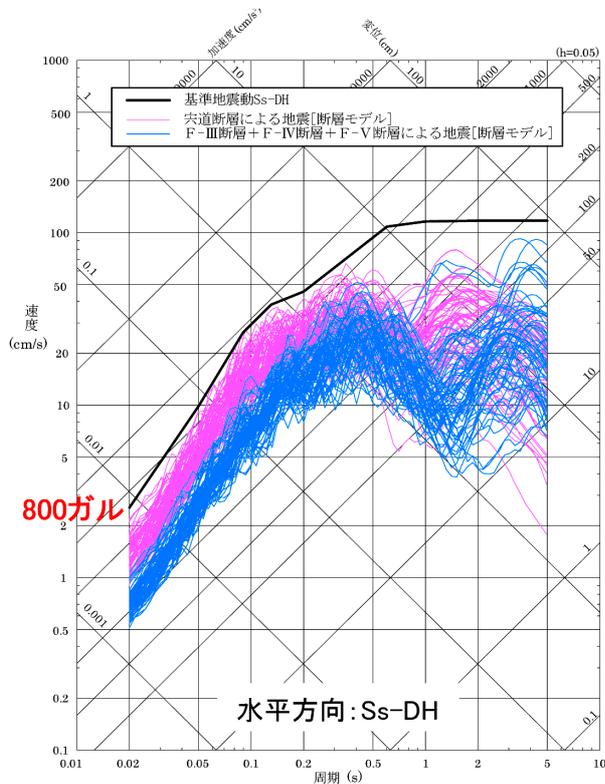
注 2: 中国電力は $M_{0ai} = M_{0a} S_{ai}^{3/2} / (S_{a1}^{3/2} + S_{a2}^{3/2})$ とし、アスペリティの地震モーメント M_{0a} をアスペリティ面積の 3/2 乗の値の比率で各アスペリティへ比例配分している。これは $D_{ai} = \gamma_i D_a / \sum_{i=1}^{N_a} \gamma_i^3$, $M_{0ai} = \mu D_{ai} S_{ai}$ としても同じである。

注 3: 中国電力は $\sigma_b = \frac{D_b \sqrt{\pi r} \sum_{i=1}^{N_a} \gamma_i^3}{D_a} \Delta\sigma_a$, $\gamma_i = r_i/r = \sqrt{S_{ai}/S_a}$ としている。

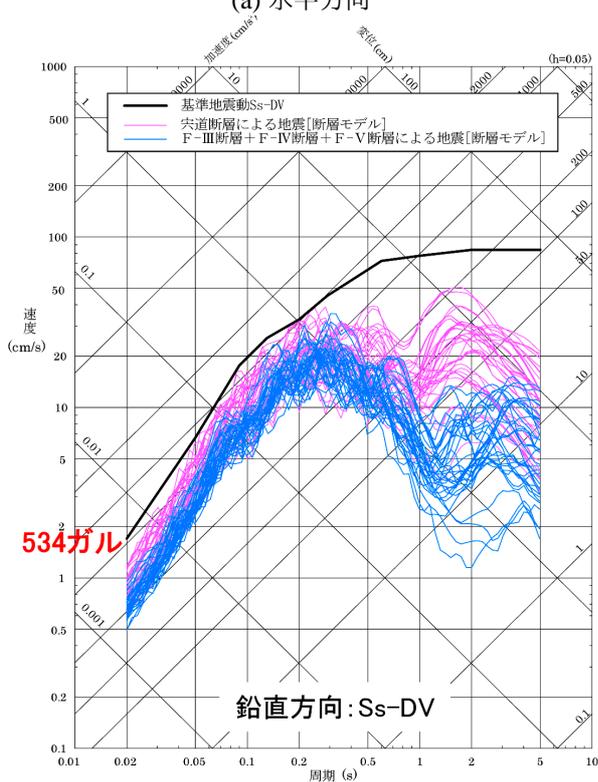
表 10: 原子力規制庁によるヒアリング段階の「F-III~F-IV~F-V 断層 (基本)」の断層パラメータ [6]

断層パラメータ	断層モデル (入倉式) (注)		修正・新レシピ		
	A 法 (中国電力)	$S_a/S = 0.22$ 法	断層面積変えず	断層面積拡大	
傾斜角 θ	90° (鉛直)				
断層長さ L	48.0 km		53.0 km		
断層幅 W	13.0 km		15.0 km		
断層面積 $S = LW$	624.0 km ²		795.0 km ²		
断層上・下端深さ	2 km · 15.0 km		2 km · 17.0 km		
地震モーメント M_0	2.17 × 10 ¹⁹ N·m		4.09 × 10 ¹⁹ N·m		
マグニチュード	M7.4, M _w 6.8		M7.6, M _w 7.0		
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	100.1 cm		186.0 cm	148.4 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.47 × 10 ¹⁰ N/m ²				
S 波速度 V_s (または β)	3.57 km/s				
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.57 km/s				
平均応力降下量 $\Delta\sigma = (7/16)M_0(\pi/S)^{2/3}$	3.39 MPa		6.40 MPa	4.45 MPa	
短周期レベル A	1.48 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		1.83 × 10 ¹⁹ N·m/s ²		
西側セグメント	断層長さ L_1	18.0 km		19.9 km	
	断層面積 S_1	234.0 km ²		298.1 km ²	
	地震モーメント M_{01}	6.87 × 10 ¹⁸ N·m		1.30 × 10 ¹⁹ N·m	
	平均すべり量 D_1	84.7 cm		159.9 cm	125.5 cm
	アスペリティ S_{1a}	62.6 km ²	51.5 km ²		65.6 km ²
	M_{01a}	3.68 × 10 ¹⁸ N·m	3.02 × 10 ¹⁸	5.71 × 10 ¹⁸ N·m	
	$\Delta\sigma_{1a}$	12.7 MPa	15.4 MPa	29.1 MPa	20.2 MPa
	D_{1a}	169.4 cm		319.8 cm	251.1 cm
	背景領域 S_{1b}	171.4 km ²	182.52 km ²		232.54 km ²
	M_{01b}	3.20 × 10 ¹⁸ N·m	3.85 × 10 ¹⁸	7.27 × 10 ¹⁸ N·m	
	σ_{1b}	2.47 MPa	3.02 MPa	5.70 MPa	3.44 MPa
	D_{1b}	53.8 cm	60.8 cm	114.8 cm	90.1 cm
	東側セグメント	断層長さ L_2	30.0 km		33.1 km
		断層面積 S_2	390.0 km ²		496.9 km ²
地震モーメント M_{02}		1.48 × 10 ¹⁹ N·m		2.79 × 10 ¹⁹ N·m	
平均すべり量 D_2		109.4 cm		206.5 cm	162.1 cm
アスペリティ S_{2a}		104.3 km ²	85.8 km ²		109.3 km ²
M_{02a}		7.91 × 10 ¹⁸ N·m	6.51 × 10 ¹⁸	1.23 × 10 ¹⁹ N·m	
$\Delta\sigma_{2a}$		12.7 MPa	15.4 MPa	29.1 MPa	20.2MPa
D_{2a}		218.7 cm		412.9 cm	324.1 cm
背景領域 S_{2b}		285.7 km ²	304.2 km ²		387.56 km ²
M_{02b}		6.88 × 10 ¹⁸ N·m	8.28 × 10 ¹⁸	1.56 × 10 ¹⁹ N·m	
σ_{2b}		2.41 MPa	3.00 MPa	5.67 MPa	3.86MPa
D_{2b}		69.4 cm	78.4 cm	148.2 cm	116.3 cm

注: 「F-III~F-IV~F-V 断層 (基本)」が 2016 年 6 月に 3 月の「80 度傾斜」から「90 度鉛直」に変わった。断層長さも断層面積もそれほど変わらないにもかかわらず、「80 度傾斜」ではアスペリティ総面積を断層面積の 22% に固定する「 $S_a/S = 0.22$ 法」を用い、「90 度鉛直」では短周期レベル A からアスペリティ総面積を求める A 法を用いているが、その理由は不明である。断層モデルのレシピでは、 A 法でアスペリティ面積比 S_a/S が 0.27 を超えて過大な値になると $S_a/S = 0.22$ 法を用いるが、「F-III~F-IV~F-V 断層」では、「90 度鉛直」では $S_a/S = 0.267$ 、「80 度傾斜」では $S_a/S = 0.270$ と、レシピでの参照範囲 0.15~0.27 の中にギリギリ収まっており、過大気味だが、手法を変えなければならないほどではない。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図6: 島根2号の2016年3月現在の応答スペクトルによる基準地震動 Ss-D と断層モデルによる地震動評価結果の前ケース重ね描き [6]

動につながっていたであろうことを示しているにすぎないのである。

高浜原発では、耐専スペクトルが適用され、基

準地震動がそれによって規定されているため、今回の断層モデルによる地震動評価の是正によって基準地震動が大きく影響されることはない。しかし、そのことによって残された課題が注目を浴びることにならざるを得ない。それは高浜原発の項で述べた3つの内容だが、(i)耐専スペクトルと断層モデルは地震動評価の平均像を表すにすぎないが、これには最近20年間の国内地震観測記録が反映されていないこと、(ii)平均像からの標準偏差ひとつ分のバラツキ=「平均+標準偏差」が平均の2倍になるほどの偶然的不確かさの考慮がなされていないこと、(iii)M6.5の原発直下の地震が1,340ガルの地震動をもたらすという原子力安全基盤機構の解析と熊本地震によるその裏付けが考慮されていないこと、の3つである。

島根原発では、「F-III~F-IV~F-V断層」の耐専スペクトルが適用され、基準地震動がそれによって規定されているため、「F-III~F-IV~F-V断層」に関しては今回の断層モデルによる地震動評価の是正によって基準地震動が大きく影響されることはない。しかし、「宍道断層」の耐専スペクトルはすべて適用外とされたため、この断層に関する地震動評価結果は基準地震動には全く現れないが、その断層モデルによる地震動評価結果は基準地震動に極めて近かった。そのため、今回の断層モデルによる地震動評価の是正によって基準地震動が大きく影響されることは避けられない。ただし、これは修正レシピの適用の仕方に依存するが、耐専スペクトルとの整合性を考慮すれば、宍道断層の耐専スペクトルと同程度の地震動評価結果になるのが妥当であり、ここで示したように「断層幅のみ拡大」する修正レシピを用いるべきであろう。

7 川内1・2号の基準地震動への影響

川内1・2号の基準地震動は島根2号のそれよりさらにシンプルであり、表11のように耐専スペクトルに基づく基準地震動 Ss-1 と2004年北海道留萌市庁南部地震 M6.1のK-NET港町における地震観測記録の解放基盤波(はぎとり波) Ss-2の2つだけである。断層モデルによる地震動評価結果は基準地震動に全く現れない。それどころか、Ss-1

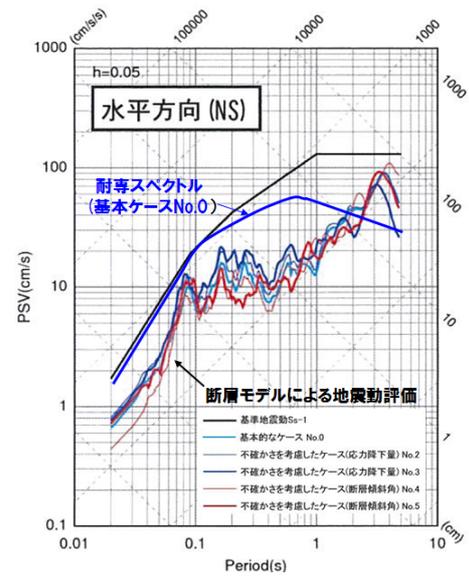
表 11: 川内 1・2 号の基準地震動 [gal][27]

基準地震動		水平成分	鉛直成分
震源を特定して策定する地震動			
Ss-1	設計用模擬地震波	540	324
震源を特定せず策定する地震動			
Ss-2	2004 年留萌支庁南部地震の解放基盤波	620	320

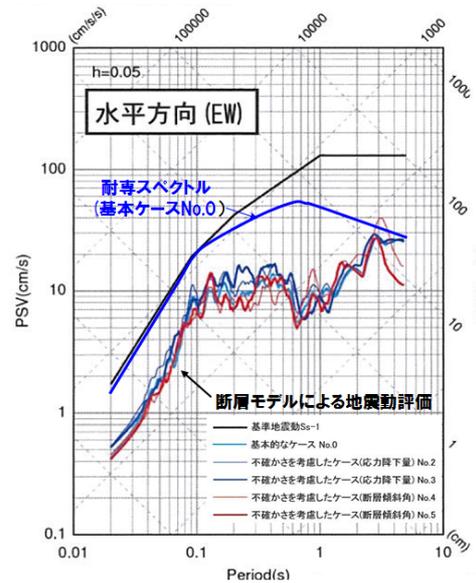
を規定しているのは図 7 に示される市来断層帯市来区間の耐専スペクトル（内陸補正なし）だが、この断層に対する断層モデルによる地震動評価結果は図 7 のとおり、耐専スペクトルの 1/2~1/3 にすぎない。あろうことか、九州電力は耐専スペクトルと断層モデルの間にあるこの大きな差を断層モデルによる地震動の過小評価とは捉えず、逆に、余裕を確保したものだと主張している。

九州電力は、表 12 の「九州電力」の欄に示すとおり、1997 年 5 月の鹿児島県北西部地震 M6.4 の応力降下量を「 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ 」と算出し、これらをそのまま M7.2 の市来断層帯市来区間の応力降下量としている。この問題点については別項 [31, 48, 49] に譲り、ここでは島崎氏の問題提起が川内 1・2 号の基準地震動に与える影響を検討する。

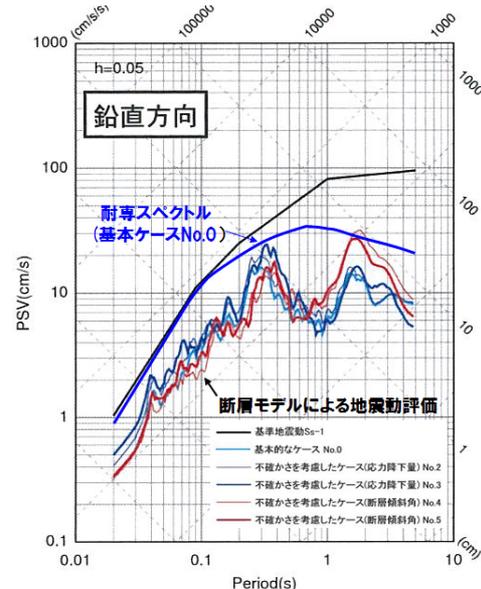
表 12 に示すとおり、市来断層帯市来区間の地震モーメントは「九州電力」と「修正・新レシピ」とで差はない。これは、九州電力が地震モーメントを断層面積から入倉式で求めるのではなく、応力降下量 $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$ と断層面積 S から逆算したためであり、結果として、「九州電力」の断層面積 S 、地震モーメント M_0 、平均すべり量 D 、応力降下量 $\Delta\sigma$ の各値は「修正・新レシピ」の「断層面積変えず」の欄の各値と丸め誤差の範囲内ではほぼ一致する。ところが、短周期レベル A およびアスペリティの面積 S_a と応力降下量 $\Delta\sigma_a$ については、両者で大きく異なる。これは、九州電力が、1997 年 5 月の鹿児島県北西部地震からアスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ と過小に算出し、アスペリティ面積比を $S_a/S = 0.365$ と異常に過大な値に算定し、ここから A を逆算しているからである [31]。断層モデルのレシピ通りにアスペリティ面積比を $S_a/S = 0.22$ とすれば、自動的に $\Delta\sigma_a = 26.5\text{MPa}$ が導かれる。この値は、1997 年



(a) 水平 NS 方向



(b) 水平 EW 方向



(c) 鉛直方向

図 7: 適合性審査における川内 1・2 号の基準地震動 Ss-1 と市来断層帯市来区間 (24.9km, M7.2) の地震動評価結果 (2014.3.12)[27]

表 12: 川内 1.2 号における市来断層帯市来区間の断層パラメータ

断層パラメータ	九州電力 *1		修正・新レシピ *3			
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定		断層面積変えず	断層幅のみ拡大	断層面積拡大	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)					
断層長さ L	24.9 km			29.9 km		
断層幅 W	13 km		15.0 km			
断層面積 $S = LW$	323.7 km ²		373.5 km ²	448.5 km ²		
断層上端深さ	2 km					
断層下端深さ	15 km			$W_{\text{model}}=17$ km		
破壊開始点	アスペリティ 東下端 1 種類 + 断層東下端 1 種類					
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)					
地震モーメント M_0	1.39 × 10 ¹⁹ N·m	1.39 × 10 ¹⁹ N·m				
マグニチュード	M7.2, M _W 6.7	M7.2, M _W 6.7				
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	129.5 cm	130.0 cm	112.7 cm	93.8 cm		
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31 × 10 ¹⁰ N/m ²					
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s					
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s					
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa	5.8 MPa	4.7 MPa	3.6 MPa		
短周期レベル A	1.53 × 10 ¹⁹ N·m/s ²	1.28 × 10 ¹⁹ N·m/s ²				
アスペリティ 全体	面積 S_a	118.08 km ² (0.365)	71.21 (0.22)	82.17 (0.22)	98.67 (0.22)	
	地震モーメント M_{0a}	1.02 × 10 ¹⁹ N·m	6.16 × 10 ¹⁸ N·m			
	平均すべり量 D_a	260.3 cm	261.4 cm	226.5 cm	188.6 cm	
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	15.9 MPa	26.5 MPa	21.4 MPa	16.2 MPa	
	短周期レベル A_a	1.50 × 10 ¹⁹ N·m/s ²	-			
背景領域	地震モーメント M_{0b}	3.70 × 10 ¹⁸ N·m	7.77 × 10 ¹⁸ N·m			
	面積 $S_b = S - S_a$	205.62 km ²	252.49 km ²	291.33 km ²	349.83 km ²	
	平均すべり量 D_b	54.4cm	93.0 cm	80.6 cm	67.1 cm	
	実効応力 σ_b	2.5 MPa	5.0 MPa	4.0 MPa	3.1 MPa	
	短周期レベル A_b	3.14 × 10 ¹⁸ N·m/s ²	-			

*1:九州電力は 1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震 (気象庁発表 M6.4) の特性化震源モデルのパラメータを根拠に $\Delta\sigma = 5.8\text{MPa}$, $\Delta\sigma_a = 15.9\text{MPa}$ と固定し, アスペリティ面積を $S_a = S(\Delta\sigma_a/\Delta\sigma)$ より求めている. そのため, アスペリティ面積は断層面積の 36.5% と異常に大きくなっている. これは鹿児島県北西部地震など M6 クラスの未飽和断層のデータを M7 クラスの飽和断層にそのまま適用した結果であり, 両者でスケール則が全く異なることを無視しており, 妥当とは言えない. 九州電力は, 通常の断層モデルのレシピが使えないため, 短周期レベルをアスペリティと背景領域に割り当て, それぞれ $A_a = 4\beta^2\Delta\sigma_a\sqrt{\pi S_a}$, $A_b = 4\beta^2\Delta\sigma_b\sqrt{\pi S_b}$ とし, 全体の短周期レベルを $A = \sqrt{A_a^2 + A_b^2}$ より算出している. 地震モーメントも $M_0 = (16/7)\Delta\sigma(S/\pi)^{3/2}$ より逆算しており, 入倉式による値より大きく, 偶然だが, 断層長さから松田式で求めた値 (上表の「修正・新レシピ」の欄の値) にほぼ一致する. このため, 松田式で求めたものではないかと錯覚させるが, 短周期レベルと応力降下量を比較すれば明らかのように, 中身は全く違う.

*2:修正レシピでは, 断層長さから松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ で気象庁マグニチュード M を求め, $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 - 10.72)$ より, 地震モーメント M_0 を求める. 短周期レベルから応力降下量を求める A 法では, アスペリティの面積が大きくなりすぎて, 背景領域の地震モーメントがマイナスになり無意味になるため, アスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a/\Delta\sigma = 0.22$ 法で求める. 入倉式から断層面積を逆算すると 500.5km² となるが, 修正レシピでは断層長さとの拡張上限をそれぞれ 5km と 2km にしており, この上限値まで拡張しても 448.5km² にとどまるため, 上表では最大まで拡張した「断層面積拡大」, 全く拡張しない「断層面積変えず」, 旧原子力安全委員会の 2010 年 WG での解析 [2] に従って「断層幅のみ拡大」したケースの 3 通りを示した.

表 13: 川内 1-2 号における市来断層帯市来区間の断層パラメータ (応力降下量の不確かさを考慮した場合)

断層パラメータ	九州電力 *1	修正・新レシピ *2			
	$\Delta\sigma, \Delta\sigma_a$ 指定	断層面積変えず	断層幅のみ拡大	断層面積拡大	
傾斜角 θ	90 度 (右横ずれ断層)				
断層長さ L	24.9 km			29.9 km	
断層幅 W	13 km	15.0 km			
断層面積 $S = LW$	323.7 km ²	373.5 km ²	448.5 km ²		
断層上端深さ	2 km				
断層下端深さ	15 km			$W_{\text{model}}=17$ km	
破壊開始点	アスペリティ東下端 1 種類 + 断層東下端 1 種類				
破壊伝播方式	同心円状 (放射状)				
地震モーメント M_0	1.39×10^{19} N·m	1.39×10^{19} N·m			
マグニチュード	M7.2, M_W 6.7	M7.2, M_W 6.7			
平均すべり量 $D = M_0/(\mu S)$	129.5 cm	130.0 cm	112.7 cm	93.8 cm	
剛性率 $\mu = \rho\beta^2$	3.31×10^{10} N/m ²				
S 波速度 V_s (または β)	3.5 km/s				
平均破壊伝播速度 $V_r = 0.72V_s$	2.52 km/s				
平均応力降下量 $\Delta\sigma$	5.8 MPa (8.7 MPa)	8.7 MPa	7.1 MPa	5.4 MPa	
短周期レベル A	1.92×10^{19} N·m/s ² (2.30×10^{19})	1.92×10^{19} N·m/s ²			
アスペリティ 全体	面積 S_a	118.08 km ² (0.365)	71.21 (0.22)	82.17 (0.22)	98.67 (0.22)
	地震モーメント M_{0a}	1.02×10^{19} N·m	6.16×10^{18} N·m		
	平均すべり量 D_a	260.3 cm	261.4 cm	226.5 cm	188.6 cm
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	19.875 MPa (23.85 MPa)	39.7 MPa	32.1 MPa	24.4 MPa
	短周期レベル A_a	1.88×10^{19} N·m/s ² (2.25×10^{19})	-		
背景領域	地震モーメント M_{0b}	3.70×10^{18} N·m	7.77×10^{18} N·m		
	面積 $S_b = S - S_a$	205.62 km ²	252.49 km ²	291.33 km ²	349.83 km ²
	平均すべり量 D_b	54.4cm	93.0 cm	80.6 cm	67.1 cm
	実効応力 σ_b	3.125 MPa (3.75 MPa)	7.5 MPa	6.1 MPa	4.6 MPa
	短周期レベル A_b	3.92×10^{18} N·m/s ² (4.70×10^{18})	-	-	

*1 : 「応力降下量の不確かさ」を考慮するため、通常は、断層モデルで求めた短周期レベルと応力降下量 (または実効応力) がすべて 1.5 倍になるよう波形合成の際に工夫する。たとえば、上表で「修正・新レシピ」では、断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ 、アスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ 、背景領域実効応力 σ_b および短周期レベル A, A_a, A_b の各値は表 12 の各値の 1.5 倍になっている。ところが、九州電力の欄では表 12 の各値の 1.25 倍にすぎない (1.5 倍の値を括弧内に示す)。その理由は、表 12 の九州電力の欄の短周期レベルを 1.5 倍すると 2.30×10^{19} N·m/s² になるが、表 12 の九州電力の欄の M_0 に対応する短周期レベルの値は断層モデルのレシピから 1.28×10^{19} N·m/s² (偶然だが、結果的に「修正・新レシピ」の欄の A の値にほぼ一致する) であり、それを 1.5 倍したものが 1.91×10^{19} N·m/s² なので、これと同程度であればよく、1.25 倍に留めるといふものである。これより、短周期レベルだけでなく応力降下量 (または実効応力) の値も 1.25 倍にすれば「1.5 倍」と同程度であるといふのである。ところが、表 12 の九州電力の M_0 と S から通常の断層モデルのレシピで応力降下量を求めると表 12 の「修正・新レシピ」の欄のようになり、これを 1.5 倍にした値は上表の「修正・新レシピ」の欄の値になる。九州電力の設定した応力降下量はこれらの値よりかなり小さく、20MPa にも達しない。

*2 : 表 12 の「修正・新レシピ」の $A, \Delta\sigma, \Delta\sigma_a, \sigma_b$ の各値を 1.5 倍している。

5月の鹿児島県北西部地震のアスペリティ平均応力降下量を $\Delta\sigma_a = 25.1\text{MPa}$ にすべきとした主張 [31] に合致する。さらに、九州電力は短周期レベルと応力降下量を 1.5 倍にする不確かさの考慮において、地震モーメントに対応する短周期レベル A の値、すなわち、「修正・新レシピ」の A の値を 1.5 倍にした表 13 の A の値まで増やせば十分だとして、1.25 倍に留め、応力降下量についても理由なく 1.25 倍に留めている。この結果、「応力降下量の 1.5 倍ケース」でも 1.25 倍の 19.875MPa にしかならず、 20MPa を超えない¹³。

島崎氏の問題提起に基づき、松田式で地震モーメントを求める「修正・新レシピ」を採用すると、 $1.5\Delta\sigma_a$ の値は、 39.7MPa （「断層面積変えず」の場合）、 32.1MPa （「断層幅のみ拡大」した場合）および 24.4MPa （「断層面積拡大」の場合）となり、それぞれ、九州電力による 19.875MPa の 2.0 倍、1.6 倍および 1.2 倍になる。ちなみに、 $\Delta\sigma = 25.1\text{MPa}$ とした場合は、 37.6MPa 、1.9 倍になる。

仮に、地震動評価結果が約 1.6 倍（「断層幅のみ拡大」した場合）ないし約 1.9 倍（ $\Delta\sigma = 25.1\text{MPa}$ とした場合）になれば、図 7 の断層モデルによる地震動評価結果は耐専スペクトルにかなり接近し、一部で基準地震動を超えるであろう。この場合も、耐専スペクトルと断層モデルで大差のあった地震動評価結果が整合性のある形に収まり、九州電力の主張していた「断層モデルを基準にした余裕」は完全に消え失せる。そして、川内原発においても、高浜原発の項で指摘した 3 つの残された課題が浮上してくるのである。

8 結言

前原子力規制委員長代理の島崎邦彦氏の問題提起は、原子力規制委員会を突き動かし、大飯原発の地震動評価の見直しにつながった。機を同じくして、地震調査研究推進本部は 6 月 10 日、断層モデルのレシピを改訂し、応力降下量の設定法を明確にした。両者が正当に考慮されれば、これまでに行われた断層モデルによる地震動評価結果は、例外なく、大きく引き上げられることは必至であ

り、基準地震動の見直しは避けられない。ここで明らかにした内容をまとめると、次のようになる。

大飯原発では、断層モデルによる地震動評価結果が、修正レシピで 1.5 倍強へ引き上げられ、1,260 ガルのクリフエッジをも超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

伊方原発では、54km モデルが修正レシピで 1.6 倍強、69km モデルでは 2.0 倍以上へ引き上げられ、855 ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

高浜原発では、修正レシピで 1.5 倍強へ引き上げられ、基準地震動 $Ss-1$ を一部の周期帯で超えるため、基準地震動の見直しが避けられない。

島根原発では、修正レシピをそのまま適用すると断層面積が過大になるため、旧原子力安全委員会と同様に断層幅の拡大に限定して適用すれば、25km の宍道断層の地震動評価結果は 1.5 倍強になり、1,014 ガルのクリフエッジを超える可能性が高く、再稼働できなくなるであろう。

川内原発では、島根原発と同様に修正レシピを断層幅の拡大に限定して適用すれば、約 25km の市来断層帯市来区間の地震動評価結果は約 1.6 倍になり、一部の周期帯で基準地震動 $Ss-1$ を超えるため、基準地震動の見直しは避けられない。

どの原発においても、断層モデルによる地震動評価結果が 1.5 倍程度に引き上げられることになり、耐専スペクトルとの大きな差が消え去り、ほぼ同一になる。これが今回の見直しの核心である。その結果、次の残された課題がクローズアップされることになろう。

第 1 に、耐専スペクトルと断層モデルは地震動評価の平均像を表すにすぎないが、これには最近 20 年間の国内地震観測記録が反映されていないこと、

第 2 に、平均像からの標準偏差一つ分のバラツキ = 「平均 + 標準偏差」が平均の 2 倍になるほどの偶然的不確かさの考慮がなされていないこと、

第 3 に、 $M6.5$ の原発直下の地震が 1,340 ガルの地震動をもたらすという原子力安全基盤機構の解析と熊本地震によるその裏付けが考慮されていないこと、の 3 つである。

いずれにせよ、島崎氏の問題提起が無に帰されないよう地震動評価見直し作業を見守りたいと思う。

¹³ 旧原子力安全・保安院のときに $1.5\Delta\sigma_a$ と 20MPa の大きい方を採用することになったが [11]、これに違反している。

(注1) 原発基準地震動の「過小評価」指摘
～規制委、異例の検証へ～2年前に発端

(2016年6月19日福井新聞と中国新聞から転載)

関西電力大飯原発などの基準地震動(耐震設計の目安となる揺れ)が、計算式の不備が原因で過小評価されている可能性を原子力規制委員会の前委員長代理の島崎邦彦・東京大名誉教授(地震学)が指摘。慌てた規制委が島崎氏から説明を受け、検証を検討する異例の展開になった。

島崎氏の指摘が重要な新知見と確認されれば、規制委の審査基準改定や、一部原発の再審査も必要になる。だが、実は規制委は2年前にも同じ問題を指摘されていた。

▽二重基準 発端は2014年3月、国会内の会合で原子力規制庁のベテラン審査官を長沢啓行・大阪府立大名誉教授(工学)が追及したことだった。震源断層の面積から地震の規模(地震モーメント)を見積もる計算式は、北米の地震データに立脚し、日本の原発で適用すると過小評価につながる。

現在、基準地震動の計算では、断層面積を重視する入倉孝次郎・京都大名誉教授(強震動地震学)らによる「入倉・三宅」の計算式を、津波対策では断層長さを重視する武村雅之・名古屋大教授(地震学)による「武村」の計算式を使い、モーメントを求めている。

ところが、大飯原発直近の断層が起こす地震を想定すると、同じ断層なのに「武村」よりも「入倉・三宅」で計算した方が、モーメントが小さくなる。このため基準地震動を小さく見せることを目的とした「二重基準」との批判が他からも出ていた。

答えに窮した審査官は、島崎委員長代理らに相談して検討すると約束。その場を切り抜けた。

▽検証 審査官から相談を受けた当時、島崎氏は多忙で時間的余裕はなかった。「実際のデータに合うのは武村と入倉・三宅の間あたりだろうと思い、真面目に相手をしませんでした」と振り返る。規制庁に検討を指示したものの、報告はなかった。

島崎氏は14年9月の退任後、一人で本格的な検証作業を始めた。過去のデータを基に比較したところ、島崎氏自身が提唱した計算式や「武村」など、断層長さに注目した手法に比べ、「入倉・三宅」のモーメントが4分の1程度と小さいことに気付いたという。

島崎氏は、長沢氏の指摘を「ポイントを突いた議論だった」と話す。

▽本音 震源断層の面積は、地表に現れる「断層長さ」と、割れて揺れを生じる硬い岩盤の厚さ「断層幅」を掛けて計算する。垂直に近い断層では幅が短くなるため、長さが同じでも面積が小さくなり、過小評価となる危険が高い。こうした断層は西日本に多く、島崎氏が担当した関電の大飯や高浜、九州電力の玄海(佐賀県)などの審査でも対象となった。

島崎氏は今月、大飯原発3、4号機の運転差し止め訴訟控訴審(名古屋高裁金沢支部)でも同趣旨の陳述書を提出。規制委が島崎氏の指摘を受け入れると、各地の訴訟にも影響が及ぶ。規制庁幹部は「中長期的課題だ」と、対応を先送りしたいとの本音をのぞかせる。

(注2) 断層モデルによる地震動過小評価について

(i) 断層モデルによる「地震規模」の過小評価

「断層モデルのレシピ」とは地震調査研究推進本部地震調査委員会(以下「推本」と略す)の作成した「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」[19, 23]のことをさす。断層モデルのレシピはいくつも提案されているが、「入倉レシピ」[13, 14]などと特に呼ばない場合には推本のレシピをいう。同地震調査委員会が、2002年に糸魚川-静岡構造線断層帯の断層モデル[18]を作成して以降、国内計14の活断層に対して種々の断層モデル設定法を検証し、2005年に最初の「全国を概観した地震動予測地図」報告書を作成し、その別冊に「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」[19]としてまとめたのが最初である。

この『「レシピ」』は、震源断層を特定した地震を想定した場合の強震動を高精度に予測するための、『誰がやっても同じ答えが得られる標準的な方法論』を確立することを目指しており、今後も強震動評価における検討により、修正を加え、改訂されていくことを前提としている。[19]この考え方にに基づき、推本は2005年以降、全国地震動予測地図・全国を概観した地震動予測地図をほぼ毎年作成し公表しているが、そのたびにレシピも改訂してきた。2016年6月10日改訂版[23]が2016年6月現在の最新のレシピである。

中でも、2008年4月11日の改訂[20]は断層モデルのパラメータ設定に本質的な修正を加え、2016年6月10日の改訂[23]は概ね80km以上の「長大な断層」に満たない断層に対する応力降下量の設定法に重大な制限を加えたものであり、極めて重要である。

推本による活断層長期評価では活断層の長さから松田式[28]を用いて将来起こりうる地震の規模を推定していたが、レシピの断層モデルでは断層面積から地震規模を推定しており、これが松田式による地震規模と比べて1/5~1/2に過小算定されるという問題点があった。しかし、松田式による地震規模をそのままレシピに適用すると、地震動評価結果が非常に大きくなるため、現実の震源断層とは別に仮想モデルとして断層幅や断層長さを長くし、断層面積を少し増やしてレシピを適用するという折衷的なモデル設定法を追加した。これが2008年4月11日に改訂されたレシピ[20]であり、以下ではこれを「修正レシピ」とよぶ。

また、2016年6月10日に改訂されたレシピ[23]では、「長大な断層」がスケーリング則によって明確に定義され、これまで推本の中では常識であった「長大な断層」の定義がレシピの中に明記されたことで、電力各社が長大な断層に至らない断層に対して採用してきたFujii-Matsu'uraの応力降下量は採用できなくなった。以下では、これを「新レシピ」とよび、「修正レシピ」と合わせて「新レシピ」を適用する場合を「修正・新レシピ」とよぶ。

これらに詳しく触れる前に、まず、断層モデルのレシピ[19]自身に含まれる問題点について述べる。

表9に「宍道断層(基本)」の震源断層に対する断層パラメータを示す。推本の活断層長期評価では、断層長

さ $L = 25.0\text{km}$ から松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ を使って地震規模が $M7.2$ (気象庁マグニチュード) と算定され、断層モデルのレシピからは、断層面積 $S = 325.0\text{km}^2$ から次式 (入倉式) の飽和断層に関する下段の式を使って地震モーメント $M_o = 5.88 \times 10^{18}\text{N}\cdot\text{m}$ ($M6.9$ 相当) が求められる。

$$S = \begin{cases} 2.23 \times 10^{-15} M_o^{2/3}, & M_o < M_{ot}; \\ 4.24 \times 10^{-11} M_o^{1/2}, & M_o \geq M_{ot}, \end{cases} \quad (1)$$

ただし、この式での M_o の単位は $\text{dyn}\cdot\text{cm}$, $1\text{N}\cdot\text{m} = 10^7 \text{dyn}\cdot\text{cm}$, である。 M_{ot} は、断層幅 W が断層長さ L に等しくなり、これ以上の地震規模では断層幅が変わらない飽和状態 $W = W_{\max}$ になる「飽和断層」に関する地震モーメントの値であり、レシピでは $M_{ot} \equiv 7.5 \times 10^{25} \text{dyn}\cdot\text{cm} = 7.5 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$ とされている。

表9の「修正レシピ」の欄に示すとおり、松田式による $M7.2$ は地震モーメントで $M_o = 1.39 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ に相当し、断層モデルによる地震規模は地震モーメントの値で42%にすぎない。これでは震源断層から42%のエネルギーしか放出されないことになり、地震動は大きく過小評価されてしまうのである。

なぜこうなるのかというと、Somerville et al.(1993) [44] が指摘したように日本国内の地震データと北西アメリカのデータでは断層パラメータに大きな差があるからである。レシピの元になったデータは入倉ら (2001) [13] の図8に示されるデータである。入倉らの地震データは、(a) Somerville et al.[45] による15地震 (米カリフォルニア10地震, 米アイダホ1地震, カナダ2地震, イラン1地震, 日本1地震で、ほとんどが北米大陸の地震), (b) Miyakoshi(2001 私信) のデータセット, (c) Wells and Coppersmith(1994) による244地震 (半数近くは米の地震, 1割程度が日本の地震) の3種類からなる。データ数は多いが、 $M_{ot} \leq M_o$ となるデータの大半は (c) のデータであり、武村 [46] は、Wells and Coppersmith(1994) が別のデータセットに対して求めた $L - M_o$ 回帰式を図11の黒点線で示し、これを2つの実線と比較した結果、「Wells and Coppersmith(1994) が求めた断層パラメータ間の関係は日本列島の地殻内地震には適用できないようである」 [46] と断じている。

$S - M_o$ 関係を示す図8の一点鎖線は

$$\log_{10} S = \begin{cases} \frac{2}{3} \log_{10} M_o - 14.74, & M_o < M_{ot}; \\ \frac{1}{2} \log_{10} M_o - 10.71, & M_{ot} \leq M_o, \end{cases} \quad (2)$$

または、

$$S = \begin{cases} 1.82 \times 10^{-15} M_o^{2/3}, & M_o < M_{ot}; \\ 1.95 \times 10^{-11} M_o^{1/2}, & M_{ot} \leq M_o. \end{cases} \quad (3)$$

と表される武村の式であり、図11に示される日本国内の地震データから導かれたものである。具体的には、佐藤編著による「日本の地震断層パラメータ・ハンドブック」 [35] で体系的に整理された地震データの33の内陸地殻内地震を使っている。図8の入倉式 (太い破

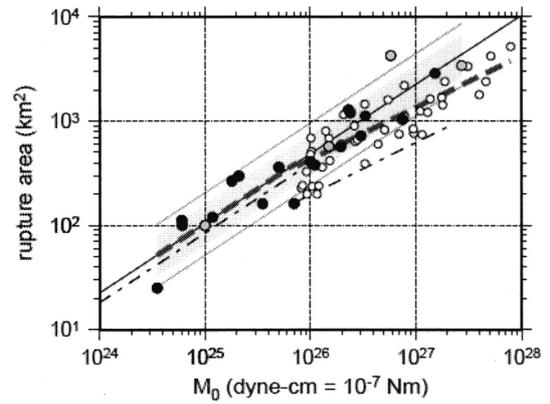


図8: 断層面積 S (rupture area) と地震モーメント M_o の関係 [13] (破線がレシピの式に相当, 入倉らは $L = 20\text{km}$ で $W_{\max} = 16.6\text{km}$ に達すると仮定し, 分岐点を $M_o = 7.5 \cdot 10^{25} \text{dyn}\cdot\text{cm}$ としている. 一点鎖線は武村 (1998) による $W_{\max} = 13\text{km}$ とした関係式で分岐点の M_o は同じ)

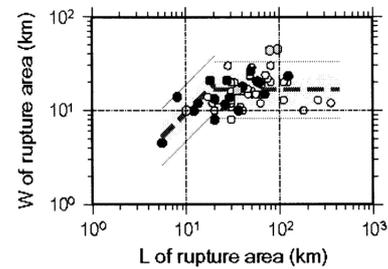


図9: 入倉ら [13] による $L - W$ の関係 (○は Well et al.(1994) ($M_{ot} < M_o$), ●は Somerville et al.(1999) および Miyakoshi(2001), 灰色の○は低角逆断層のデータ)

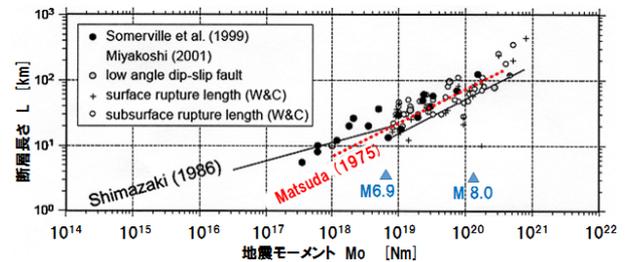


図10: 断層長さ L (rupture length) と地震モーメント M_o の関係 [13] (赤点線が松田式)

線) と武村式 (一点鎖線) を比べると武村式の方が下方にあり、同じ断層面積でも地震規模に大きな差があることが明らかである。

武村の $S - M_o$ 関係式は、最初に図11の国内地震データに対して $L - M_o$ 回帰式を

$$\log_{10} L = \begin{cases} \frac{1}{3} \log_{10} M_o - 7.28, & M_o < M_{ot}; \\ \frac{1}{2} \log_{10} M_o - 11.82, & M_{ot} \leq M_o, \end{cases} \quad (4)$$

と導き、国内データでは断層幅が

$$W = \begin{cases} \frac{2}{3} L, & M_o < M_{ot}; \\ 13, & M_{ot} \leq M_o, \end{cases} \quad (5)$$

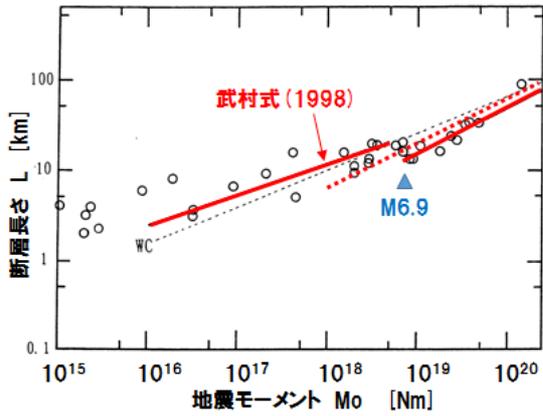


図 11: 武村 [46] による $L - M_0$ の関係 (赤点線で松田式を加筆)

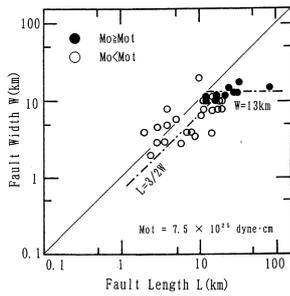


図 12: 武村 [46] による $L - W$ の関係

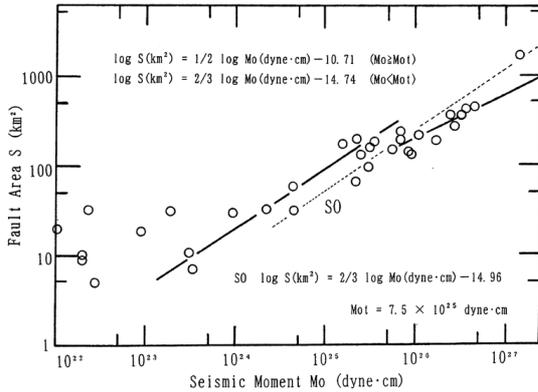


図 13: 武村 [46] による $S - M_0$ の関係

となることを利用している。つまり、断層長さが断層幅以上に長く、 $M_0 \geq M_{ot}$ (M6.8程度以上)の地震をもたらす飽和断層における断層幅の平均値は国内データで13kmであり、入倉ら(2001)の北米中心の地震データの16.6kmより小さいのである。

武村の $L - M_0$ 関係式(4)は、Shimazaki(1986)[39]が日本列島周辺の地殻内地震の断層長さ L と M_0 の関係を調べて

$$\log_{10} L = \begin{cases} 0.281 \log_{10} M_0 - 5.98, & M_0 < M_{ot}; \\ 0.524 \log_{10} M_0 - 12.44, & M_{ot} \leq M_0, \end{cases} \quad (6)$$

の関係式を導き、 $M_0 < M_{ot}$ では $M_0 \propto L^3$, $M_{ot} \leq M_0$ では $M_0 \propto L^2$ のスケーリング則が成り立つと結論づけたことによってしている。つまり、武村は、このスケー

リング則が図 11 の国内地震データに対しても成り立つと仮定して式(4)を導いているのであり、両式で大差はない。

他方、松田式 $\log_{10} L = 0.6M - 2.9$ に $M - M_0$ 換算式 $M = (1/1.17)(\log_{10} M_0 [\text{N}\cdot\text{m}] - 10.72)$ を適用すると、 $\log_{10} L = 0.513 \log_{10} M_0 - 11.99$ が得られる。この式は入倉ら [13] も導いており、図 10 に示される $L - M_0$ 図上で「Shimazaki(1986)の関係式とほぼ並行でかつ Wells and Coppersmith(1994)によってコンパイルされたデータをほぼ満足しているようにみえる」と指摘している。つまり、震源断層の長さや地震規模の関係を表す松田式は日本国内の地震データだけでなく、北米中心の地震データに対しても成り立つのである。ところが、国内と海外では断層の平均幅が大きく異なるため、断層面積と地震規模の関係を求めると大きく食い違ってくるのである。

この食い違いについて最初に問題提起したのは、Somerville et al.(1993)[44]であり、武村(1998)[46]が続いた。入倉ら(2001)も「断層長さや幅を求めるときの定義の違いかあるいは日本周辺の地域性によるものか、今後の検討が必要とされる。」[13]と提起している。

Somerville et al.(1993)[44] (入倉も共著者)は北西アメリカの12の地震データと日本国内の8の地震データからそれぞれに対して $S - M_0$ 関係式を導き、両者の違いを次のように記している。「日本の地殻内地震の断層面積は北西アメリカの地震の0.53倍であり、平均すべり量は1.86倍大きく、対応する日本の地殻内地震の静的応力降下量は平均で北西アメリカの地震の2.6倍大きい。日本の Slip Constant Ratio の平均は1.57であり、アスペリティの破壊面積の合計は断層全体の面積の42%を平均で示している。北西アメリカではそれぞれ1.875と26%である。このことは日本の地殻内地震はすべり量のコントラストが小さいアスペリティで、より広い領域が覆われていることを示す。アスペリティの絶対面積は日本の地震と北西アメリカの地震で大きな差はない。すなわち、日本の地殻内地震は北西アメリカの地震とほぼ同じ大きさのアスペリティを持っているが、すべり量の小さい領域は少ない。つまり、破壊領域全体の面積は小さい。すべり継続時間は平均して、3.6倍日本の地殻内地震のほうが北西アメリカの地震より大きい。しかし、すべりモデルを求めたインバージョン解析に固有周期6秒の気象庁1倍強震計の変位記録を用いていることに注意が必要である。」[44]

断層モデルのパラメータ設定法は経験式に基づいており、どの地震データに依拠するかで経験式が異なってくる。Somerville et al.(1993)は、日本国内の地震データと北西アメリカの地震データをつきあわせることで、その違いを明確に記述し、今後の検討が必要であることを示唆していたのである。断層モデルがもてはやされる現在だが、20年前にすでにその問題点が指摘されていたと言える。当時は国内地震観測記録も少なかったが、1995年の兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災を契機に強震観測計の全国ネットワークが構築され

るに伴い、M7クラスの地震観測記録が次々と収集され、震源近傍の観測記録さえ入手され始めた。ところが、国内地震データで断層モデルを再構築する動きは地震関連学界では見られない。「すでに構築」された断層モデルの「体系」を崩すことにつながるものが懸念されるからかもしれないが、重大事故につながる可能性の高い原発の耐震設計で矛盾を知りつつ地震動を過小評価し続けることは許されない。

推本ではこの問題に対して松田式で地震規模を求め、震源断層の断層モデルをそれに合わせて修正する「修正レシピ」[20]を用いることで対処しようとしている。しかし、中国電力をはじめどの電力会社も修正レシピを用いようとはせず、地震規模を過小評価する旧来の断層モデルをそのまま使って地震動を過小評価し続けている。原子力規制委員会・原子力規制庁もそれを容認してきた。今回の前原子力規制委員長代理・島崎邦彦の問題提起[40, 41, 42, 43, 47]は、客観的にはこれを断罪するものとなった。

批判の対象となった入倉孝次郎[17]は、測地データによる地殻変動量の分布と震源インバージョンによるすべり量の分布の違いに帰着させるコメントを自身のホームページで発表し、北米等と日本国内での地震データの質的な違いを否定したように見えるが、速断に過ぎる。この結論を正当化するには、国内地震観測記録に関するより詳細な検討が必要であろう。仮に、このコメントが正しいとしても、地震観測記録がない限り、すなわち、地震が起きた後でなければ入倉式を適用できないことになり、これまでの入倉式に基づく地震動解析は過小評価であることを認めたことにもなる。

推本の修正レシピも決して科学的とは言えないし、長さ20~35kmの断層では、断層面積を非現実的に拡大しすぎるにより、地震動を過小評価している可能性もある。最も科学的な方法は、これまでに得られた国内地震観測記録を集約して、日本国内に適用できる断層モデルの設定法を日本独自に開発することである。それができるまでは、入倉式の代わりに松田式等で地震規模を求めて地震動評価をやり直すか、少なくとも、推本の活断層長期評価で行っている修正レシピで地震動評価をやり直すことが不可欠である。

(ii) 断層モデルによる「応力降下量」の過小評価

断層モデルのパラメータは震源断層全体の特性を表すマクロなパラメータと、強い固着領域(アスペリティ)の特性を表すミクロなパラメータで構成される。マクロなパラメータのうち重要なものは、地震規模(地震モーメント M_0 、気象庁マグニチュード M またはモーメントマグニチュード M_W 等で表す)、断層面積 S 、短周期レベル A および断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ である。断層平均すべり量 D は地震規模と断層面積から $M_0 = \mu SD$ (μ は剛性率) で自動的に求められる。また、アスペリティに関するミクロなパラメータで重要なものは、アスペリティ面積 S_a とアスペリティ平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ である。これらのうち、短周期地震動を評価する際に決定的に重要なパラメータは短周期レベル

A と応力降下量 $\Delta\sigma$ および $\Delta\sigma_a$ である。これらが過小評価されれば、地震規模が大きく評価されたとしても、地震動は過小評価されてしまう。

断層モデルのレシピでは、円形破壊(円形クラック)面を仮定した次式で断層平均応力降下量 $\Delta\sigma$ を求めている。

$$M_0 = \frac{16}{7\pi^{3/2}} \Delta\sigma S^{3/2}. \quad (7)$$

この式に式(1)を適用すると、

$$\Delta\sigma = \begin{cases} 2.31, & M_0 < M_{ot}; \\ 2.31\sqrt{\frac{S}{291}}, & M_0 \geq M_{ot}, \end{cases} \quad (8)$$

が得られる。つまり、未飽和断層では、断層平均応力降下量は $\Delta\sigma = 2.31\text{MPa}$ と一定になり、断層が飽和した後では、断層面積の平方根に比例する形で大きくなっていく¹⁴。

アスペリティの平均応力降下量を求める計算式は複数あり、その主なものが短周期レベル A による方法(A 法)とアスペリティ総面積を総断層面積の22%とする方法(アスペリティ総面積固定法または $S_a/S = 0.22$ 法)である。

「短周期レベル $A[\text{dyn}\cdot\text{cm}/\text{s}^2]$ 」とは「強震動予測に直接影響を与える短周期領域における加速度震源スペクトルのレベル」のことであり、「 A 法」では、まず、この値を次の経験式から求める¹⁵。

$$A = 2.46 \cdot 10^{17} M_0^{1/3}. \quad (9)$$

続いて、 r をアスペリティ総面積 S_a の等価半径、 R を断層面積 S の等価半径、 β を震源域における岩盤の S 波速度として、アスペリティ総面積 S_a を次式から求める。

$$S_a = \pi r^2, \quad (10)$$

$$r = \frac{7\pi M_0}{4AR} \beta^2. \quad (11)$$

ここでは、便宜的に震源断層とアスペリティの形状を円形と仮定しており、式(11)はシングル・アスペリティモデルにおける M_0 と A に関する次の理論式から導出している。

$$M_0 = \frac{16}{7} r^2 R \Delta\sigma_a \text{(Boatwright1988)} [1], \quad (12)$$

$$A = 4\pi r \Delta\sigma_a \beta^2 \text{(壇ほか2001)} [8]. \quad (13)$$

¹⁴断層幅 W が地震発生層下端までの最大断層幅 W_{\max} より小さい断層を「未飽和断層」といい、断層幅が地震発生層下端に到達して $W = W_{\max}$ のまま水平に長く伸びた断層を「飽和断層」という。

¹⁵短周期レベル A は、加速度震源スペクトル $S(f)$ が振動数 f の関数として $S(f) = M_0/[1 + (f/f_c)^2]$ と表せることから、 $(2\pi f)^2 S(f) = (2\pi f_c)^2 M_0/[(f_c/f)^2 + 1]$ において $f \rightarrow \infty$ とした極限 $A = (2\pi f_c)^2 M_0$ として表される。ただし、 f_c はコーナー振動数である。ここで、 $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係が成立つことから、 $A \propto f_c^2 M_0 \propto M_0^{1/3}$ の関係が成立つ。

したがって、式(12)または式(13)からアスペリティの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を逆算できる。ここで、式(12)と式(7)を組み合わせると、

$$\Delta\sigma_a = \frac{S}{S_a} \Delta\sigma \quad (14)$$

という単純な式が得られる。

中国電力は、表9のように、「宍道断層（基本）」の断層パラメータをこのA法で求めている。その応力降下量は断層平均で $\Delta\sigma = 2.44\text{MPa}$ 、アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 14.1\text{MPa}$ （アスペリティ面積比 $S_a/S = 0.173$ ）である。

ところが、A法では、地震規模が大きくなるとアスペリティ総面積 S_a が大きくなりすぎてアスペリティの平均応力降下量 $\Delta\sigma_a$ が小さくなりすぎる。そこで、断層モデルのレシピでは、長い断層で地震規模が大きい場合にはこの短周期レベルによる方法（A法）は使わないよう警告している。それに代わる方法が「アスペリティ総面積固定法」であり、アスペリティ総面積 S_a を震源断層総面積 S の22%に固定する。この方法による断層パラメータの値が表9での「修正レシピ（ $S_a/S = 0.22$ 法）」の列のパラメータ値である。

しかし、中国電力によるパラメータ値は地震規模を断層面積からM6.9として求めたものであり、これを断層長さから松田式でM7.2とする修正レシピを用いた場合には、表9のように、「断層面積変えず」、「断層幅のみ拡大」、「断層面積拡大」のそれぞれで、応力降下量が $\Delta\sigma = 5.79\text{MPa}$ 、 4.67MPa 、 3.56MPa 、および $\Delta\sigma_a = 26.3\text{MPa}$ 、 21.2MPa 、 16.2MPa と大きくなる。

島根2号における地震動評価で、耐専スペクトルと断層モデルとの間に2倍の差が見られた原因の1つは、ここにある。地震規模が過小評価された結果、応力降下量が過小評価され、地震動が過小評価される結果となったのである。

この関係は、「F-III~F-IV~F-V断層（基本）」の場合にも現われる。表10の「断層モデル（入倉式）」の「A法（中国電力）」の列が中国電力によるパラメータ値であり、松田式でM7.6とする修正レシピを用いた場合が右端2列の値である。中国電力はA法で応力降下量を断層平均で $\Delta\sigma = 3.39\text{MPa}$ 、アスペリティ平均で $\Delta\sigma_a = 12.7\text{MPa}$ としているが、アスペリティ面積比は $S_a/S = 0.267$ とやや過大であり、 $S_a/S = 0.22$ 法を用いた場合の $\Delta\sigma_a = 15.4\text{MPa}$ より小さくなっている。修正レシピを用いた場合には、地震規模が大きくなるため $S_a/S = 0.22$ 法を用いているが、 $\Delta\sigma = 6.40\text{MPa}$ （断層面積変えず）または 4.45MPa （断層面積拡大）、および $\Delta\sigma_a = 29.1\text{MPa}$ または 20.2MPa とかなり大きくなる。このように、中国電力は地震規模だけでなく応力降下量も過小に設定したため、耐専スペクトルと断層モデルとで2倍の開きが出たのである。

さらに、中国電力は「F-III~F-IV~F-V断層（80度傾斜）」の応力降下量として、関西電力が「FO-A~FO-B~熊川断層」に用いたと同様に、長大な断層にのみ許容される Fujii-Matsu'ura(2000)[10]の応力降下量を用いている。2016年6月10日改訂の新レシピではこれを明確

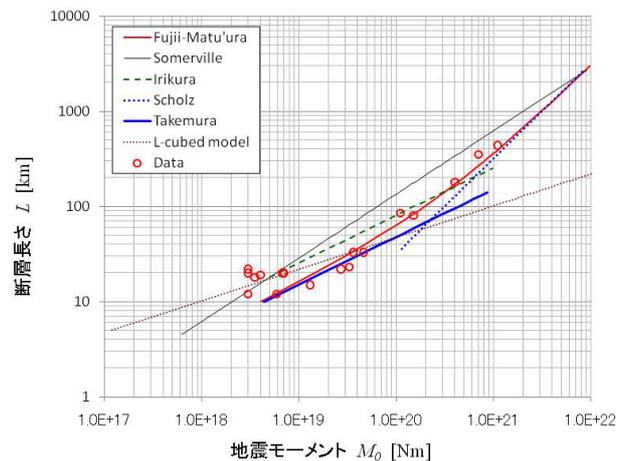


図14: Fujii-Matsu'ura[10]等によるスケーリング則の関係：Somerville(細線)、入倉(Irikura, 緑破線)、Scholz(青太点線)、武村 Takemura(青太直線)、L3乗モデル(茶細点線)、Fujii-Matsu'ura(赤太曲線)。Fujii-Matsu'uraはTakemuraとScholzに漸近し国内地震データ(赤丸)にフィットしている

に禁じており、通常の断層モデルのレシピに従うと、地震規模を入倉式で求めたとしても、 $\Delta\sigma = 3.41\text{MPa}$ と $\Delta\sigma_a = 15.5\text{MPa}$ になるが、これをそれぞれ 3.1MPa および 14.1MPa に小さく設定している。修正レシピを用いた場合には、鉛直基本の場合と同様に、 $\Delta\sigma = 6.25\text{MPa}$ （断層面積変えず）または 4.36MPa （断層面積拡大）、および $\Delta\sigma_a = 28.4\text{MPa}$ または 19.8MPa とかなり大きくなる。

(iii) 長大な断層における「応力降下量」の過小評価

地震調査研究推進本部（推本）による断層モデルのレシピでは、円形破壊面を仮定できない「内陸の長大な横ずれ断層」に対しては、データも少なく未解決の研究課題だと指摘したうえで、Fujii-Matsu'uraが横ずれ断層を対象として導出した次式を図14の地震データに回帰させて得た値 $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ を用いるよう推奨している。

$$M_0 = \frac{WL^2}{aL+b} \Delta\sigma. \quad (15)$$

ただし、 a と b は数値計算で得られる構造依存のパラメータであり、リソスフェアの厚さ $= 30\text{km}$ 、剛性率 $\mu = 4.0 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ として $a = 1.4 \cdot 10^{-2}$ 、 $b = 1.0$ を導いている。入倉(2004)[14]はこの関係式を次のように論評している。

「Matsu'ura and Sato (1997)による『2次元のトランスフォーム・プレート境界での準静的なテクトニック・ローディングによる有限長の断層運動のシミュレーション』を用いて導かれたものである。従って、この式自体は3次元の断層場での地震発生の理論モデルとしては不十分なものである。ただし、観測データとして得られている $M_0 - L$ 関係を説明するための経験的関係式として意味がある。式(15)の物理学的な意味での有効性については、3次元の動力学モデルに基づく理論的検証および観測データに基づく検証の両面の検討が必要とされる。」

つまり、 M_0-L 関係が経験的に式 (15) で表されるといことが重要であり、パラメータの値の妥当性については、動力学的シミュレーションや実際の地震データに基づいて検証すべきだといのである。Fujii-Matsu'ura は、上記のパラメータ値を用いて、 $W = 15\text{km}$ と設定し、地震データへの回帰計算で $\Delta\sigma = 3.1\text{MPa}$ を導出しているが、その適用に際しては具体的な検証が必要なのである。

さらに、推本は 2010 年 11 月に出した「活断層の長期評価手法 (暫定版)」報告書 [21] の中で「長さが 100 km を超えるような長大な断層」(p.6) とし、また、2014 年 12 月に出した「全国地震動予測地図 2014 年版」付録 [22] の中でもスケーリング則に沿った震源のモデル化との関連で「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層)」と明記しており、48.0km の「F-III~F-IV~F-V 断層 (基本)」は「長大な断層」とは言えない。参考のため、最新の同付録 [22] を以下に引用しておく。

「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層) の震源のモデル化に関する検討も必要である。長大断層については、一般的なパラメータ設定法を用いると背景領域のすべり量が負になってしまうため、強震動予測レシピ (地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2008c) では暫定的に平均応力降下量とアスペリティ面積比を固定している (引用者注: レシピでは $S_a/S = 0.22$ としている)。中央構造線や糸魚川-静岡構造線といった長大断層で発生する地震の強震動予測を行うためには、長大断層に対しても背景領域のすべり量が負にならないことも含め、震源モデル作成のための枠組みが必要であり、そのような枠組みを作るための検討が必要である。近年の観測データの蓄積により、長さの短い断層から長大断層に至るまでの断層面積と地震モーメントの間の関係が報告されており (例えば, Murotani et al., 2010), これによれば、断層面積と地震モーメントの関係式は、地震の規模に従って 3 段階で変化する。また、観測データから得られる、震源モデル作成に必要な物理量の間関係式として、短周期レベル (加速度震源スペクトルの短周期側におけるスペクトルの振幅) と地震モーメントの関係式 (例えば、壇・他, 2001) がある。長大断層の震源モデル作成については、このような観測データから得られた知見に基づき、応力降下量の適切な設定方法も含めた、新たな枠組みを示す必要がある。また、アスペリティの個数や大きさ、断層面上の分布等は、強震動に大きな影響を与える重要な要素であり、長周期帯域だけでなく広帯域にわたって強震動を予測可能な震源モデル設定の枠組みが求められる。」

つまり、「震源のモデル化」との関連で「長大断層 (おおむね長さが 80km を超える断層)」が定義されており、3 段階で変化するスケーリング則の 3 番目の段階と結びつけられているのである。ここにスケーリング則とは「断層面積と地震モーメントの関係」のことであり、未飽和断層に対応する $M_0 \leq 7.5 \times 10^{18}\text{Nm}$ では $M_0 \propto S^2$ (M_0 が断層面積の 2 乗に比例)、飽和断層で長大な断層になるまでの $7.5 \times 10^{18}\text{Nm} < M_0 \leq 1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ で $M_0 \propto S^{3/2}$ (M_0 が断層面積の 1.5 乗

に比例)、長大な断層に相当する $1.8 \times 10^{20}\text{Nm} \leq M_0$ で $M_0 \propto S$ (M_0 が断層面積に比例) となる関係のことを指す。ただし、長大断層の M_0 下限値 $1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ は Murotani et al.(2010) が示した値をここでは仮に引用しているが、Murotani らは 100km を超える断層では地表最大変位量が 10m で飽和することを示し、地震モーメントが $1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ 以上の断層に対して、スケーリング則が $S[\text{km}^2] = 1.0 \times 10^{-17} M_0[\text{Nm}]$ となることを示している。この式によれば、 $M_0 = 1.8 \times 10^{20}\text{Nm}$ では $S = 1800\text{km}^2$ になり、断層幅が 15km でも断層長さが 120km になる。

2016 年 6 月 10 日改訂の新レシピは、推本の中ではすでに常識となっていた「長大な断層」に関する断層モデルのパラメータ設定をレシピの中に明記したにすぎない。これは別に新しい知見でも何でもないのであり、私が意見書 [30] 等の中で常に主張してきた内容にすぎない。電力会社は新レシピに従い、応力降下量の過小設定を改め、地震動評価をやり直すべきである。

さらに、Fujii-Matsu'ura モデルに関わるより重大な問題点を指摘しておく。Fujii-Matsu'ura[10][29] は断層幅より断層長さが十分長い中規模断層から長大断層を広く包含する $L-M_0$ 関係式を「観測データに基づく回帰計算」から求めたものだが、彼らの用いた地震データは図 14 の赤丸で示されるように、入倉らの用いた地震データとはかなり異なる武村のデータである。結果として、Fujii-Matsu'ura は中規模断層に対しては武村式 (図 14 の青太実線)、長大断層に対しては Scholz の式 (図 14 の青点線) [36] に漸近するように $L-M_0$ 関係式 (図 14 の赤太曲線) を導出している。中規模断層に対して、武村式ではなく入倉式に漸近するように回帰するとすれば、応力降下量は全く異なる値になると推測されるし、そもそも Fujii-Matsu'ura の式 (15) に合うように回帰できるかどうかとも疑わしい。

同じことは、伊方原発の断層モデルに用いられた壇ら (2011)[9] のモデルでも言える。壇ら (2011) も中規模地震に対して、入倉らが用いた地震データを使わず、武村の用いたデータに回帰させている。Fujii-Matsu'ura[10][29] や壇ら (2011)[9] がなぜ入倉の用いたデータを使わず、武村のデータを用いたのか、その理由は不明だが、地震データが変われば、応力降下量の値も当然変わってくるであろう。

(iv) M7 クラスの国内地震では 20~30MPa

推本は、Fujii-Matsu'ura の断層平均応力降下量 3.1MPa およびアスペリティ平均応力降下量約 14.4MPa (推本のレシピ [20] では $S_a/S = 0.215$ で計算しており、14.1MPa ではない) について「既往の調査・研究成果とおおよそ対応する数値」[20] だとしているが、少なくとも M7 クラスの国内地震データと比べると小さすぎる。鳥取県西部地震 M7.3 (2000.10.6) では 2 アスペリティで平均応力降下量は 28.0MPa と 14.0MPa と評価され [12]、能登半島地震 M6.9(2007.3.25) では 3 アスペリティで 20MPa、20MPa および 10MPa [24]、新潟県越前地震 M6.8(2007.7.16) では 3 アスペリテ

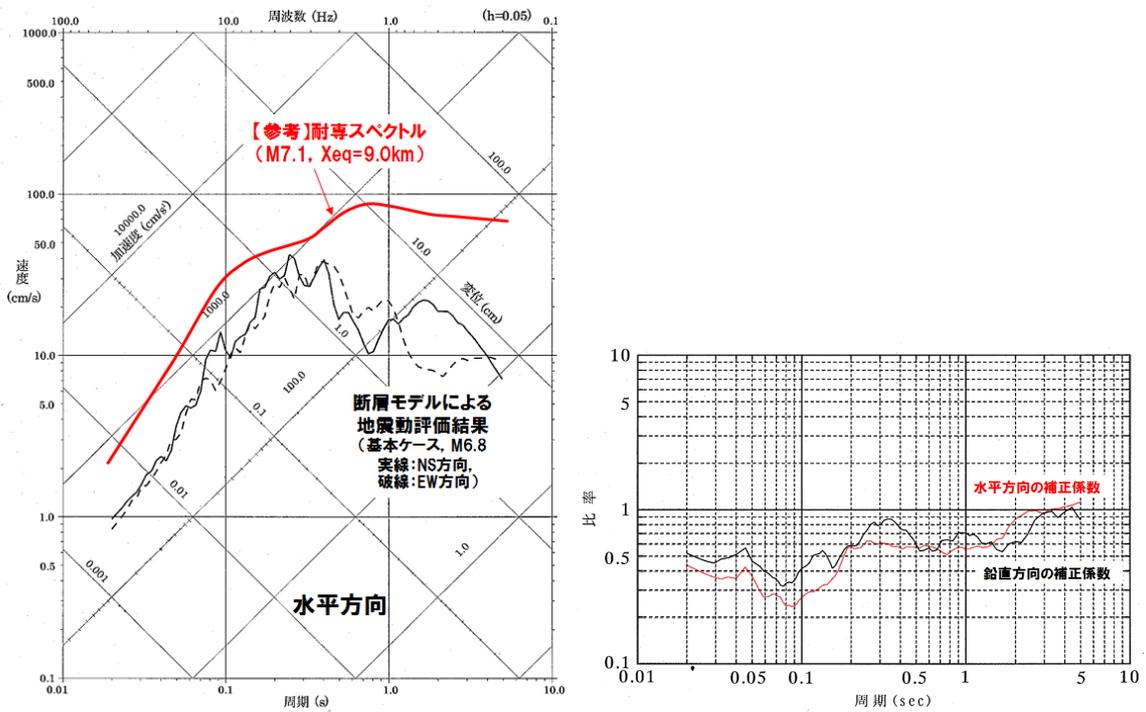


図 15: 2008 年耐震バックチェック時の宍道断層 (M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$) の耐専スペクトル (右図「島根原発敷地内地震観測記録による補正係数」で補正されたものだが、宍道断層が近すぎるため当時も適用範囲外とされ「参考」扱いにされている) と断層モデル (M6.8, 長さ 22km, 幅 13km) による地震動評価結果の比較 [3]

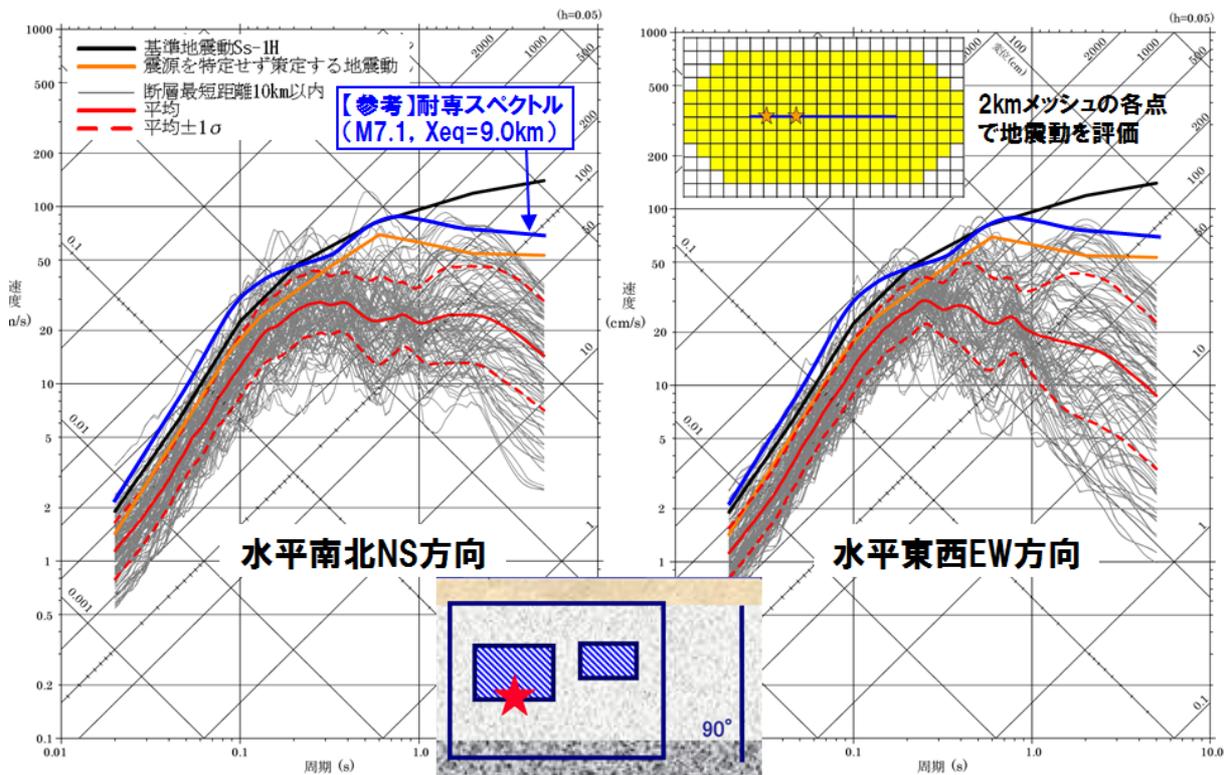


図 16: 2008 年耐震バックチェック時の宍道断層 (M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$) の耐専スペクトル (図 15 と同じ) と修正断層モデル (ケース 2: M7.1, 長さ 22km, 幅 15km, 破壊開始点第 1 アスぺリティ下端中央) による断層周辺極近傍観測点での評価結果の比較 [2] (いずれも、震源特性 1.5 倍化は考慮されていない。)

ィで 23.7MPa, 23.7MPa および 19.8MPa[15], 岩手・宮城内陸地震 M7.2(2009.6.14) では 2 アスぺリティで 17.0MPa と 18.5MPa[16] であった。これらを教訓として、アスぺリティの応力降下量を 20~30MPa またはそれ以上に設定すべきであろう。

(注 3) 修正レシピによる地震動評価について

断層モデルの修正レシピ [20] とは、断層面積から地震規模を算出する入倉・三宅 (2001) の手法では地震規模が過小に算定されるため、断層長さから松田式で地震規模を求め、それに合わせて断層面積を広げた上で、

応力降下量等を算出する手法である。

島根原発の2008年耐震バックチェック時には、宍道断層の断層長さは22kmと評価され、地震規模がM7.1(松田式による)ではなく入倉式でM6.8と小さく設定され、応力降下量も小さく、図15のように、当時の宍道断層(M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$)の耐専スペクトルの1/2程度にすぎなかった。この耐専スペクトルは、図15の右図の島根原発での地震観測記録で補正されたものであり、当時は断層モデルでも震源特性1.5倍化を考慮していないので、両者ともに条件は同じである。

そこで、2010年の第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3[2]では、地震規模をM7.1として震源断層の面積を少し拡張する修正レシピによって、地震動評価をやり直させた。これは推本が2008年に公表した修正レシピ[20]に基づくものであり、断層幅を13kmから15kmへ拡張し、地震モーメントをM7.1に相当する $1.06 \times 10^{19}\text{N}\cdot\text{m}$ とし、断層モデルのレシピに基づいて、応力降下量を断層平均で2.3MPaから4.32MPaへ、アスペリティ平均で15.1MPaから19.7MPaへ引上げ、解放基盤表面上観測点(2km間隔)での地震動を図16のように求めている。図16における最上部の地震波が極近傍の地震波であり、断層最短距離2kmに位置する島根原発の解放基盤表面での地震動評価に相当する。これと当時の宍道断層(M7.1, $X_{eq} = 9.0\text{km}$)の耐専スペクトル(内陸補正あり)はよく重なり合っている。つまり、断層モデルのレシピをそのまま適用するのではなく、松田式で求めた地震規模に合わせて断層モデルを少し修正すれば、断層モデルと耐専スペクトルによる地震動評価結果は互いによく合ってくるのである。

しかし、これを使うと通常のレシピと比べて応力降下量が大きくなるため、電力会社の中には修正レシピの適用には異論もあろうかと思われるので、参考のため、第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3(2010.3.3)速記録[2]から、徳山委員の「地震の物理からいって、あまりストレスドロップを今後バーンと上げて、そういうのがアンリアスティックだったらどうする」という質問に対する入倉孝次郎耐震安全性評価特別委員会委員長の発言を引用しておく。

○入倉耐特委委員長 私もそのとおり応力降下量を、レシピでいろいろ検討しているのですがその範囲を逸脱して計算しても、安全のためにいいと言ってもあまり説得性がない。それで先ほどの22kmに納めようとする問題があるということで、この背景の説明でよく分からなかった点があります。これは柏崎の時にもお願いしてやってもらったやつですが、地震調査委員会では長期評価と強震動評価。長期評価のいわゆる専門家というのは変動地形学であるとか、地質の専門家が評価しています。その変動地形や地質の専門家が地震規模を評価する時には、松田式しか今の点信頼出来るものがないということがあります。すると今回22kmですね。22kmを松田式を当てはめると、気象庁マグニチュードが7.1になる。それと22kmと地震発生層をモデル化

して断層面積等でやるとM_J7.1にならないということがあります。そうすると同じ国の機関がやるのに、長期評価でやっているモデルと強震動でやっているモデルがずれがあるのはおかしいのではないかとということで、それで長期評価の意見を活かして、気象庁マグニチュード7.1になるモデル化もしましょう。そうすると今、東原先生が言われた点ですね。地震発生層がある程度限られていると、地震発生層でないところがたくさん動くとするのは、やはり物理的におかしいのではないかとことがあります。しかしながら実際には長さであるとか、幅に関してある程度のばらつきがあるから、ある程度は許容して、要するに気象庁マグニチュードが7.1をモデル化するモデル化の方法を、地震調査委員会は提案しています。その場合は長さもある程度長くして、幅も長くする。これは別に物理的意味があるわけではないけれども、計算上のものですということで、気象庁マグニチュード7.1のモデル化として、LモデルというのとWモデルで計算して下さい。そうすれば一応気象庁マグニチュードを実現する地震動の計算が出来ます。これが3ページの左側のモデルだと思います。実際には22kmと。これは変動地形とかそういう観点で22kmと決まっているのに、なぜこんなことをするのかというご意見はあると思いますが、気象庁マグニチュードを実現するためにはどうしてもこれをしないといけない。そうしないと今、徳山先生が言われたように狭いところに地震のエネルギーを閉じ込めないといけないということで、応力降下は非常に大きくなるということで、そうするとこれまでのいろいろな経験的な、地震の震源モデルの解析結果と大きくずれてしまうということがあるので、こういうふうにモデル化した。ですから、22kmというふうに決まっているけれども、ここではそれを25.7kmにして、気象庁マグニチュード7.1を計算したらどうでしょうか。これは震源が特定出来る場合の計算です。震源を特定せずではないので先ほどの説明が震源を特定せずということを強調されたので、これは震源を特定して、かつ22kmなのに、なぜM6.8でいいんですかというご意見の方は当然おられると思います。そういう人たちに気象庁マグニチュードでやった場合にM7.1になるのなら、それで計算して比較してみましょう。これはやはり確認用の地震動として計算して、今徳山先生が言われるような考えで、応力降下量を無理やり上げるのではなくて、応力降下量は保存して、そのかわり長さ、幅は多少ばらつきの範囲内で動かすということで計算する。これは柏崎の時にも原子力安全委員会でお願ひして、確認用地震動として計算していただいたものをここでもやっていただくということでよろしいのではないのでしょうか。

参考文献

- [1] Boatwright, J. (1988): The seismic radiation from composite models of faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 78, 489-508
- [2] 中国電力(2010): 島根原子力発電所基準地震動S_sの策定について、第62回原子力安全委員会地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会WG3第62-7号および速記録(2010.3.3)

- [3] 中国電力(2010): 島根原子力発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書(2008年3月), IV 基準地震動の策定(2010.3.28)
- [4] 中国電力(2016): 島根原子力発電所基準地震動の策定について, 島根原子力発電所2号炉審査資料, 資料番号 EP(E)-040 改01(2016.3.2)
- [5] 中国電力(2016): 島根原子力発電所敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について, 島根原子力発電所2号炉審査資料, 資料番号 EP(E)-036 改02(2016.3.2)
- [6] 中国電力(2016): 島根原子力発電所基準地震動の策定について, 島根原子力発電所2号炉審査資料資料番号 EP(E)-040 改02(2016.6.15); 島根原子力発電所敷地ごとに震源を特定して策定する地震動について(コメント回答), 同 EP(E)-041(2016.6.15)
- [7] 脱原発推進全国連絡会(2016): 原子力規制委員会による入倉・三宅(2001)式適用の見直しに関する要請書(2016.6.23) <http://www.datsugenpatsu.org/bengodan/statement/16-06-23/>
- [8] 壇一男・渡辺基史・佐藤俊明・石井透(2001): 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, 545, 51-62
- [9] 壇一男・具典淑・入江紀嘉・アルズベイマサマン・石井やよい(2011): 長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第670号, 2041-2050.
- [10] Fujii Y. and Matsu'ura M. (2000): Regional Difference in Scaling Laws for Large Earthquakes and its Tectonic Implication, *Pure appl. Geophys.* 157, 2283-2302
- [11] 原子力安全・保安院耐震安全審査室(2012): 活断層による地震動評価の不確かさの考慮について(考え方の整理)(2012年8月17日)
- [12] 池田隆明・釜江克宏・三輪 滋・入倉孝次郎(2002): 経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集 第561号, 37-45
- [13] 入倉孝次郎・三宅弘恵(2001): シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110, 849-875
- [14] 入倉孝次郎(2004): 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報, 47A
- [15] 入倉孝次郎・香川敬生・宮腰研・倉橋奨(2007): 2007年新潟県中越沖地震の強震動—なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか?—(2007年12月24日修正版)
- [16] 入倉孝次郎・倉橋奨(2008): 「2008年岩手・宮城内陸地震の震源モデルと強震動—なぜ4000ガルの強震動が生成されたのか?—」, 日本活断層学会2008年度秋季学術大会
- [17] 入倉孝次郎(2016): 島崎邦彦氏の日本地球惑星科学連合2016年大会(2016/05/25)での発表「過小な日本海「最大クラス」津波断層モデルとその原因-入倉・三宅(2001)式について」へのコメント(2016.6.24) http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/comment_final-revision3.pdf
- [18] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2002): 糸魚川-静岡構造線断層帯(北部, 中部)の地震を想定した強震動評価
- [19] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2005): 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 分冊2「震源断層を特定した地震動予測地図の説明(平成17年3月23日, 平成18年9月25日改訂)」
- [20] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2008): 「全国を概観した地震動予測地図」2008年版, 付録3. 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピー」)(平成20年4月11日改訂), 46-74
- [21] 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会(2010): 「活断層の長期評価手法」報告書(暫定版)(2010.11.25)
- [22] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2014): 全国地震動予測地図2014年版~全国の地震動ハザードを概観して~, 付録-1「10. 今後の課題と展望」「10.1.2 活断層で発生する地震のモデル化」, p.385(2014.12)
- [23] 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016): 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピー」)(平成28年6月10日改訂) http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf
- [24] 釜江克宏・池田隆明・三輪滋(2003): 2007年3月25日能登半島地震(MJ6.9)の震源のモデル化
- [25] 関西電力株式会社(2014): 高浜発電所地震動評価について, 第131回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料1-3(2014.8.22)
- [26] 関西電力株式会社(2015): 大飯発電所地震動評価について, 第206回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料3-4(2015.3.13)
- [27] 九州電力(2014): 川内原子力発電所 基準地震動の策定について(コメント回答), 第92回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料3-1(2014.3.12)
- [28] 松田時彦(1975): 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, 269-283.
- [29] Matsu'ura M. and Sato T.: "Loading Mechanism and Scaling Relations of Large Interplate Earthquakes," *Tectonophysics*, 227, pp.189-198 (1997)
- [30] 長沢啓行(2014): 大飯3・4号と高浜3・4号の耐震安全性は保証されていない, 若狭ネット第147号, 6-27(2014/1/14) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/pre/news/147.pdf>
- [31] 長沢啓行(2015): 高浜3・4号と川内1・2号の真逆の仮処分決定が意味するもの, 鹿児島地裁への意見書(2015.9.21) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/senikensho.pdf>
- [32] 長沢啓行(2015): 高浜3・4号と大飯3・4号の基準地震動は過小評価されている, 福井地裁への意見書(2015.10.1) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/otikensho.pdf>
- [33] 長沢啓行(2015): 伊方3号の基準地震動は過小評価されている, 松山地裁への意見書(2015.12.20) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/ikata201512.pdf>
- [34] 長沢啓行(2016): 島根2号の基準地震動は過小評価されている, 広島高裁松江支部への意見書(2016.5.10) <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/Shimane20160510.pdf>
- [35] 佐藤良輔編著, 阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典(1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 105-381
- [36] Scholz, C. H.(2002): *The Mechanics of earthquakes and faulting*, second edition, Cambridge University Press
- [37] 四国電力株式会社(2014): 伊方発電所地震動評価 震源を特定して策定する地震動(中央構造線断層帯地震動評価)と基準地震動の策定(コメント回答), 第156回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料1-1(2014.11.7)
- [38] 四国電力株式会社(2014): 伊方発電所地震動評価 震源を特定せず策定する地震動と基準地震動の策定(コメント回答), 第173回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合, 資料2-1(2014.12.12)
- [39] Shimazaki, K(1986): Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, *Earthquake Source Mechanics*, *Am. Geophys. Union Geophys. Monogr.*, 37, 209-216.
- [40] 島崎邦彦(2015): 活断層の長さから推定する地震モーメント, 日本地球惑星科学連合2015年大会, SSS28-07(2015.5.28) <http://www2.jpgu.org/meeting/2015/session/PDF/S-SS28/SSS28-07.pdf>
- [41] 島崎邦彦(2015): 活断層長に基づく地震モーメントの事前推定, 日本地震学会2015年度秋季大会, S17-10(2015.10.28)
- [42] 島崎邦彦(2015): 活断層の長さから推定される地震モーメント 日本海「最大」クラスの津波断層モデルについて, 日本活断層学会2015年度秋季学術大会, O-13(2015.11.27-28)
- [43] 島崎邦彦(2016): 過小な日本海「最大クラス」津波断層モデルとその原因, 日本地球惑星科学連合2016年大会, HDS19-12(2016.5.25) <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2016/subject/HDS19-12/programpage>
- [44] Somerville, P. G., 入倉孝次郎, 澤田純男, 岩崎好規則, 田居優, 伏見実(1993): 地震断層のすべり変位量の空間分布の検討, 第22回地震工学研究発表会, 291-294.
- [45] Somerville, P.G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A. (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, 59-80
- [46] 武村雅之(1998): 日本列島における地殻内地震のスケールン規則—地震断層の影響および地震被害との関連—, 地震第2輯, 51, 211-228.
- [47] 田中俊一委員長・石波明委員と島崎邦彦前原子力規制委員会委員長代理との面会動画(2016.6.16) <http://www.nicovideo.jp/watch/1466146816> または <https://www.youtube.com/watch?v=zFxKpKICQ3o>
- [48] 若狭ネット編集局(2014): 「高浜3・4号と大飯3・4号に則した耐専スペクトルと断層モデルによる地震動評価に関する2014年3月18日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料 <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/appeal20140324.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140318r.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrc20140318m.pdf>
- [49] 若狭ネット編集局(2016): 「2016年熊本地震を踏まえた川内原発の基準地震動に関する2016年5月23日原子力規制委員会・原子力規制庁との交渉」関連資料 <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/pnrc20160531a.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/Appeal20160531.pdf> <http://wakasa-net.sakura.ne.jp/news/nrcrc20160523.pdf>
- [50] Yamanaka Y. and Shimazaki K.(1990): Scaling Relationship between the Number of Aftershocks and the Size of the Main Shock, *J. of Physics of the Earth*, Vol.38, No.4, pp.305-324(1990)