

被告関西電力株式会社準備書面(25)の
『第 3 原告ら第 64 準備書面に対する反論』への
再反論

赤松 純平

関西電力株式会社は、準備書面(16)で 2016 年熊本地震が地殻内地震のスケーリング則（入倉・三宅(2001)）に従うとする Irikura et al.(2017)の論文（丙第 232 号証）、及び原子力規制庁技術基盤グループによる「熊本地震の分析について（丙第 206 号証）」を引用して、大飯発電所 3、4 号機の地震に対する安全性を主張した。これに対し、筆者は『基準地震動評価のための強震動予測について ー後追い予測における不確かさー（甲第 497 号証）』において、入倉・三宅のスケーリング則は、①大まかに断層面を仮定しても、トリミング操作によってすべり量の小さい領域は除外するという自己矛盾を回避する解析方法によるものであり、また②1 標準偏差は 0.72～1.38 倍もの大きな分散を許容しているため、これに依拠した断層モデルを用いて強震動予測を行う場合、2つの問題点、すなわち、③各観測点における強震動予測値のばらつき、および④強震動生成域の位置を確定できないという問題点のあることを指摘した。原告第 64 準備書面はこれを引用して、大飯発電所の基準地震動が過小評価であるとの主張を展開したものである。被告準備書面(25)には原告準備書面(58)及び(64)に対する反論が述べられている。本資料では、被告準備書面(25)の「第 3 原告ら第 64 準備書面に対する反論」のうち、特に筆者の論考（甲第 497 号証）に対する反論に的を絞って再反論する。なお、上記の①～④は関電が準備書面(25)で反論の項目として使っている番号である。

1. 震源インバージョン解析における問題

(1) スケーリング則の有効な周波数範囲について

震源インバージョンでは、多数の観測点での観測波形とモデル計算による合成波形との差（二乗誤差）の合計が最小になるようなモデルを選ぶ。震源インバージョンについて、関電は「そもそも、入倉他の論文で合成波形と観測波形の比較がなされた趣旨は、入倉・三宅式を含む経験式（スケーリング則）が 2016 年熊本地震に適用することができるのかを確認することにある（丙 232 の 2、9 頁）。そして、かかる比較において重要な点は、合成波形と観測波形の全体的な傾向が一致しているかどうかであり、最大値が一致しているかどうかは波形の全体的な傾向を見る際の一つの要素に過ぎない（15 頁、下から 8 行目）」と述べている。この文言自体は当然のことであるが、現実には広い周波数範囲にわたって波形の振幅と位相（波の山谷の位置）まで一致させることは不可能であるため、Irikura et al.(2017)が引用している先行論文では 0.05～0.5Hz または 0.05～1.0Hz の低周波数域に限って波形の合わせ込みを行っている。すなわち、2016 年熊本地震の断層破壊過程を 0.05～1.0Hz、周期では 20 秒～1 秒の長周期帯で議論して、

スケーリング則に合うことを確認したとしているのである。大飯原発の基準地震動を策定する周期帯は 0.02~10 秒、周波数では 0.1~50Hz であり、耐震工学上重要な 1.0~50Hz は看過されている。基準地震動策定に必要な周波数域（周期帯）でスケーリング則が確認されているのではない。

(2) トリミングについて

筆者の「2016 年熊本地震の震源インヴァージョン解析において、断層モデルのセグメントは 1~4 枚と枚数に自由度があり、面積は 756~1,344 km² と 1.78 倍も違っているにも拘らず、スケーリング則に合っている。これは、大まかに断層面を仮定しても、インヴァージョンによって求まるすべり量の小さい領域はトリミング基準によって除外するという自己矛盾のない (selfconsistent な) 解析方法に依っているからと考えられる (甲第 497 号証、6 頁)」と論考したことに対して、関電はトリミングの方法を「Somerville の規範」と称して「Somerville の規範が自己矛盾のないように断層面積を調整するための規範であるかの如く述べる原告らの主張には、全く理由がない (13 頁、下から 5 行目)」と述べている (①の反論)。

「規範」という、それが動かしがたい真理であるかのような印象を与える語を使っているが、観測・解析上の情報不足から生じる誤差を小さくするために導入された計算処理における単なる閾値の基準でしかない。Somerville(1999)は、15 の地震について「インヴァージョンにおいて、ほとんどの場合、矩形の断層モデルは破壊領域を充分カバーするように選択されているので、実際の破壊領域の大きさを過大評価する、それゆえ、モデルのエッジをトリミングする標準的な基準 (a standard criterion) を使って断層面を小さく (reduce) した (60 頁、右欄、下から 5 行目、#下記原文)」、すなわちトリミングによって断層面積を調整したのである。その後、観測データが蓄積されるに従い、Somerville(1999)が求めた一意的なスケーリング則から外れる地震が現れ、地震規模の大きさで区間を 3 分した 3 段階スケーリング則 (The three-stage scaling relationship) が提唱された。トリミングの方法は踏襲され、スケーリング則が手直しされたのである。このように、観測・解析上の矛盾を回避するようにトリミングの方法が導入され、スケーリング則が求められてきたのである。

In most slip model inversions, the rectangular dimensions of the fault are chosen to be at least large enough to accommodate the entire fault rupture, and so they generally overestimate the actual dimensions of the rupture area. Accordingly, we reduced the dimensions of the rectangular fault slip models using a standard criterion for trimming the edges of the slip models.

(3) スケーリング則の標準偏差について

関電は標準偏差の大きさについて「そもそも入倉・三宅式を含む各種の経験式は、最も確からしい値を導くものであり、過去の地震観測記録等の集積から経験的・帰納的に導かれたものであるという性質上、実際の観測記録と常に完全に一致するわけではなく、ある程度

のばらつきを有する。そのため、被告は、・・(略)・・地震動が大きくなる方向で安全側の条件設定を行ったりするなど、十分に保守的に設定したパラメータを経験式に入力し、かつ不確かさを適切に考慮した十分に保守的な基準地震動を策定している(14頁、8行目)」と述べて「原告らは、平均値の0.72倍~1.38倍という数値を単に示すことで、1標準偏差の大きさが問題であるかの如く主張するが、入倉他の論文は他の研究者3名による査読を経た信頼性が担保された論文であり(丙232の2, 11頁)、かかる査読によっても1標準偏差の大きさは何ら問題とされておらずこの点に関する原告らの指摘は、入倉・三宅式の経験式としての合理性はもとより、入倉他の論文の信頼性にも何ら影響を与えるものではない(14頁、下から6行目)」と主張している(②の反論)。

最も確からしい経験式に依拠しているにしても、標準偏差で0.72~1.38倍のばらつきがあり、そのばらつきを基準地震動の評価に組み入れず、平均値を使っていることが問題なのである。「十分に保守的に設定したパラメータを経験式に入力し、かつ不確かさを適切に考慮した十分に保守的な基準地震動」が、実際の観測記録のばらつきを考慮した地震動であることの保証はない。「不確かさ」と「ばらつき」は全く異なる概念であることは、2020年11月4日の大飯原発大阪地裁判決で言い渡されている。

2. 強震動生成域(SMGA)による強震動予測における問題

(1) 予測値と観測値の違いについて ③

Irikura et al.(2017)が提唱した強震動生成域モデル(SMGA model: Strong Motion Generation Area model)は、SMGAは震源インバージョンで求めたアスペリティに近似的に一致するとし、SMGAだけから強震動が生成されるというものである。震源断層モデルにおけるアスペリティ以外の背景領域は強震動の生成に関係しないとして、SMGA3枚モデルとSMGA1枚モデルが示されている。

SMGA3枚モデルでは、0.2~10Hzの周波数域で主要動を含む30秒間の波形合わせをしているが、モデルのパラメータが多すぎるので、計算機による客観的判定ではなく、SMGAの位置と大きさ、各SMGA内の破壊開始点、破壊伝播速度、すべりの継続時間などのパラメータの設定を試行錯誤で行い、波形の到達時刻、形、振幅の一致を目視で判定している。波形の一致について、Irikura et al.(2017)は「一致は、加速度、速度、変位についてほとんどの観測点で満足 of いくもの(The agreement is satisfactory at most of the stations for acceleration, velocity, and displacement at most of the stations.)(7頁、右欄、下から3行目)」と記している。

SMGA1枚モデルでは、0.3~10Hzの周波数域で、30秒間の変位波形と加速度波形の包絡線の残差平方和が最小になるように、最小二乗法でモデルパラメータを求めている。そして、「加速度、速度、変位について、合成動は観測動に一致している(The synthetic motions agree with the observed motions for acceleration, velocity, and displacement.)(8頁、右欄、11行目)」と記している。

波形の一致の程度を[合成波のピーク値/観測波のピーク値]で比較すると

SMGA 3 枚モデルでは、

加速度：平均 0.92、最大値 2.41、最小値 0.41、標準偏差 1.55 倍

速度：平均 0.69、最大値 1.30、最小値 0.25、標準偏差 1.44 倍

SMGA 1 枚モデルでは、

加速度：平均 1.33、最大値 5.43、最小値 0.47、標準偏差 1.67 倍

速度：平均 0.97、最大値 2.89、最小値 0.21、標準偏差 1.65 倍

であり、観測点によって一致度に大きな違いがある（甲第 497 号証、図 11、12）。

このような大きな不一致について、関電は「かかる比較において重要な点は、合成波形と観測波形の全体的な傾向が一致しているかどうかであり、最大値が一致しているかどうかは波形の全体的な傾向を見る際の一つの要素に過ぎない（準備書面 25、15 頁下から 6 行目）」と記していることから、波形の全体的な一致を議論していることを理解していると考えられる。波形の全体的な一致は、各観測点の波形の全体的な一致度の誤差が全観測点で合算して最小であるという意味である。SMGA3 モデルでは 30 秒間の波形の全体的な一致を目視により、SMGA1 枚モデルでは、同じく 30 秒間の変位波形と加速度波形包絡線の全体的な一致を最小二乗法により求めたのである。見かけ上個々の観測点での波形の全体的な傾向は似ている。しかしピーク値が違うのである。最小値でみると予測値は観測値の加速度で 0.4~0.5、速度で 0.2 倍程でしかない。波形の全体的な形が似ていても、振幅が 1/5~1/2 では強震動を予測したことにならない。構造物の耐震評価は応答スペクトルによって行われる。厳密な計算を必要とするが、波形が似ているから予測される応答スペクトルの形状は観測スペクトルの形状と似ていると推測され、そのレベルは大幅に低いことになる。これは基準地震動を過小評価することに繋がる。このことは、関電自ら、地盤の非線形性に関連して「なお、原告赤松氏も「Irikura et al. (2017)は明示していないが、表層地盤の非線形性の影響が疑われる。このような影響の少ない地中観測点では、合成波の振幅は観測値よりも小さい」（甲 497、8 頁）としている」と記して、予測値である合成波が観測値よりも小さく、過小評価であることを関電も認めているようである。

(2) 強震動生成域の大きさと位置がアスペリティとは違うことについて ④

SMGA は、強震動記録の波形インバージョンによって求めたアスペリティの位置と領域の情報から再定義されている。これは、強震動記録の波形インバージョンによって求めた震源モデルでは、強震動は主として大きいすべりを有するアスペリティで生成され、アスペリティ以外の背景領域は長周期の波や地震モーメントに関係するが、強震動には重要ではないからであると説明されている。背景領域は無視しアスペリティだけを取り出して SMGA を定義する。従って、SMGA の考え方は、「レシピ」の震源モデルの考え方、すなわち背景領域を規定する「巨視的震源特性」とアスペリティを規定する「微視的震源特性」とは同じではない。

レシピのアスペリティは、波形インバージョンによる震源破壊モデルに基づいて定義されている。再定義された SMGA がレシピのアスペリティとは同じでないにしても、微視的震源特性を有するアスペリティと同等あるいは類似の特性を持つはずである。甲第 497 号証の 8 頁で指摘したように、2016 年熊本地震の SMGA の大きさと位置は波形インバージョンで求めたアスペリティとは大きく違っている。レシピではアスペリティの面積は断層破壊領域全体の 22% とするとされている（註 1）が、再定義された SMGA は次表に示すように、3 枚モデルでは 26%、1 枚モデルでは 17% である。このように Irikura et al.(2017)が提唱する SMGA による強震動予測の方法は、基準地震動を策定したレシピとは考え方が違うことに注意すべきである。

表. 断層破壊領域の面積と SMGA の面積の比較

Model	断層総面積 (km ²)	SMGA (km ²)	SMGA / 総面積
SMGA 3	792 *a	203.8	25.7 %
SMGA 1	1,344 *b	224.9	16.7 %

*a : Yoshida et al.(2016)、*b : Kubo et al.(2016)

註 1 : レシピは「内陸地震によるアスペリティ総面積に占める割合は、断層総面積の平均 22% (Somerville et al., 1999)、15%~27% (宮腰・他, 2001)」を参照することとしている (レシピ、10 頁)。SMGA モデルは同一地震であるのに観測事例の極端なケースに相当する。

3. 入倉他の論文の信頼性について

ここに記す事項は、筆者の疑問に対して、関電から疑問を抱くこと自体が根拠のないものであり、事実誤認であるとされていることへの反論である。強震動予測の議論ではないが、学術論文は正確な記載のうえに成り立つものであるから、問題の所在を明らかにしておく。

Irikura et al. (2017)は、先行論文 3 編の断層モデルを引用して議論を展開している。引用された先行論文を参照すると、モデルとパラメータが原論文とは異なるケースがある。このことについて、甲第 497 号証において、「Irikura et al. (2017)は原論文の断層モデルをそのまま引用したのはいようである」、「原論文とは異なる情報に基づいているようである」と指摘した。これに対し関電は、入倉他の共著者に問い合わせた結果と称する事項を記載し「原告らの事実誤認である」と主張している (準備書面 (25)、第 3 (5) 17 頁)。この関電の記事から Irikura et al. (2017)の記述内容が原論文と違った原因が一部判明したので、以下に「原告らの事実誤認」ではなく、Irikura et al. (2017)の不完全で正確さを欠いた記載によるものであることを改めて指摘する。

(1) Yoshida et al. (2016) の引用について

Irikura et al. (2017) は、Yoshida et al. (2016) を引用したとしてセグメントが 4 枚の断層モデルを示している。ところが References (参考文献) 記載の Fall meeting of 2016 Seismological Society of Japan, S15-P02 (日本地震学会秋期講演会予稿集 S15-P02)にはセグメントが 3 枚の断層モデルが論じられている。この違いを筆者は指摘した。

このことについて関電は「入倉他の論文の著者に上記の点を確認したところ、原告赤松氏の意見書（甲 497）5 頁で指摘されている 3 枚の断層モデルは、2016 年 10 月 2 日に開催された公益社団法人日本地震学会秋季大会（以下、「2016 年地震学会」という。）の予稿集（丙 234）に投稿された時点での予備的解析結果であり、その後の 2016 年地震学会の当日においては、解析精度を上げて、それとは別の 4 枚の断層モデルがポスター掲載されており、入倉他の論文で引用しているのは当該ポスターの内容であるとのことであった（以下、他の文献等の表現を引用する場合を除き、当該ポスターの内容を「吉田他(2016)」という。）。吉田他(2016) は、2016 年地震学会以外の場では公にされていない」と記している。すなわち、ポスターセッションコアタイム（10 月 5 日 17:00～18:30）にパネルに掲示されたポスターの図を何らかの方法で入手して用いたようである。この資料は「地震学会（コアタイム）以外の場では公にされていない」という。Irikura et al. (2017) は 2016 年 8 月 11 日に投稿され、12 月 7 日に受理されて 2017 年 1 月 3 日にオンラインで公開されている（同論文、12 頁左欄末）。公開時点では、筆者に限らず、Irikura et al. (2017) の読者は References に記載された予稿集以外に情報はなく、予稿集記載の断層モデルが引用されていると考えるのが当然である。

さらに関電は「原子力規制庁による「熊本地震の分析について」（丙 206）の参考 1 の 8 頁の「吉田・他（地盤研/2016 地震学会）」や、東京電力ホールディングス株式会社引間和人氏他による「観測記録により推定された震源断層モデルに見られる特徴」（丙 233）の 29 頁の図 3 の No. 7 においても、入倉他の論文で引用されたものと同様の 4 枚の断層モデルが引用されている。」と記して、他の研究者も予稿集を引用して 4 枚モデルを使っていると主張しているようである。しかし、例示された引間和人氏他による「観測記録により推定された震源断層モデルに見られる特徴（日本建築学会・第 44 回地盤震動シンポジウムの梗概論文）」（丙 233）には、参考文献として Irikura et al. (2017) と同様「日本地震学会講演会予稿集 2016 年度秋季大会、S15-P02」を挙げたうえ「原稿の作成にあたり、電力中央研究所芝良昭氏、地域地盤環境研究所吉田邦一氏、染井一寛氏より、日本地震学会 2016 年度秋季大会でのポスター発表資料を提供頂きました」と明確に記載されている。これに比べても Irikura et al. (2017) の References の記載は不正確であり、原告らの事実誤認ではない。

(2) 断層面積等の数値の引用について

Irikura et al. (2017) が先行論文の震源パラメータとして引用している数値が、原論文とは違っていたり、原論文には記載されていないため、筆者は「原論文とは異なる情報に基づいているようである（甲第 497 号証、6 頁 2 行目）」と指摘した。

このことについて関電は「入倉他の論文の著者に数値が異なっている理由を確認したところ、久保他(2016)の著者の 1 人である久保氏から、「実際の数値は『4.55m』であったが、久保他(2016)においては四捨五入した数値『4.6m』を用いた」との情報を得たことから、入倉他の論文においては元の数値である「4.55m」を引用したとのことであった（関電準備書面(25)、21 頁 2 行目。）」、「原告らが原論文に記載されていないと主張する数値(久保他(2016)及び浅野・岩田(2016)の数値)についても、入倉他の論文の著者に確認したところ、同著者が原論文の著者から直接入手した数値を引用したものであるとのことであった（同 13 行目。）」と原論文にはないデータを原論文の著者から直接得たことを明かしている。そして「自らの論文の作成に必要となるデータを個別に当該先行論文の著者から取得した上で、自らの論文作成に引用することは一般的に行われていることであり、入倉他の論文において独自に設定した数値であるなどとする原告らの主張は、事実誤認に基づくものであり、明らかに失当である（同下から 9 行目。）」と主張している。

このことについては多言を要しない、このような場合「某私信」と明記して情報源の正確を期す。学術論文ではデータであれ論理であれ、著者のものか他者の引用かは厳然と区別する。他者の引用として明記されていなければ、著者の創意になる。Irikura et al. (2017) は引用が正確に記載されておらず、原告らの事実誤認ではない。

(3) SMGA 1 枚モデルおよび要素断層の大きさや個数について

筆者が「Irikura et al.(2017)は、強震動を予測するには、SMGA が 1 枚である方が簡単であるとして、Kubo et al.(2016)の 1 枚の断層モデルに基づいて SMGA 震源モデルを作成した。Mw4.4 の前震を用いた経験的グリーン関数法によっているが、要素断層の大きさや数などについての説明はない（甲第 497 号証、7 頁）」と記したことについて、関電は「入倉他の論文が、「簡単である」との理由で強震動生成域(SMGA)が 1 つのモデルを検証したという具体的な根拠は原告らから何ら示されていない（関電準備書面(25)、22 頁 2 行目。）」、「要素断層とは、経験的グリーン関数法による計算を行う際に、波形の重ね合わせの前提となる小地震の震源断層をいうところ、学術論文において、研究に用いた数値をどこまで記載するかは著者の裁量に委ねられており、必ずしも全ての数値を網羅的に記載しなければならないわけではない。そのため、要素断層の大きさや数などの細かい数値を論文中に記載していないことをもって当該論文の信頼性が乏しいなどとする原告らの上記主張は、明らかに論理の飛躍である（同 23 頁 1 行目）」と反論している。このことについて意見を述べる。

SMGA 3 枚モデルでは、経験的グリーン関数として前震と余震の 2 つの小地震を使い、それぞれの規模に対応して要素断層の大きさと個数を変えている。設定すべきパラメータは膨大な数であり、波形合わせは最小二乗法による計算機処理が出来ずに目視で感覚的に行われている。また、要素断層の大きさと数は、本文中や表には明示されていないが、図中の添え字で判読することが出来るので、表に示された SMGA の面積と照合することが出来る。

SMGA 1 枚モデルでは、験的グリーン関数として 1 つの前震を使っている。パラメータの数は 3 枚モデルに比べて大幅に少なく、波形合わせは最小二乗法によって計算機処理がなされている。データ解析上、SMGA 1 枚モデルの方が格段に「簡単」なのである。論文の目的として Irikura et al. (2017) の著者自身が「より簡単な断層面モデルが望ましい (It is preferable to use simpler fault geometry, 8 頁左欄 5 行目)」と言っているのである。「簡単である」との理由で云々」という関電の主張は理解し難い。

Irikura et al. (2017) の結論に述べられているように、この論文の主目的の一つは、経験的グリーン関数法により SMGA 1 枚モデルを用いて 2016 年熊本地震の強震動を 0.3~10Hz の周波数域で合成することとされている。強震動予測でこのような周波数域の議論は先駆的な研究と言ってよい。それだからこそ、小地震の大きさと SMGA 要素断層の大きさが注目されるのである。しかし、SMGA 1 枚モデルでは要素断層の情報はない。数は図から 12×9 個であることが判読できる。大きさは、前震の断層の長さは 1.44km と別表に記載されているので、これと同じとすると、SMGA の面積は 223.9km² (1.44×1.44×12×9) と計算される。表には SMGA Area 224.9km² と表示されている。計算過程での丸め誤差があるようであるが、概ねこのように判読しても良さそうである。「全ての数値を網羅的に記載」すべきなのではなく、読者に推察させるのではなく、最小限必要な数値は記載すべきである。

4. Irikura et al. (2017) 論文と原発基準地震動との関係性

Irikura et al. (2017) 論文の結論 (Conclusions) には、論文の主たる目的は、(1) 入倉・三宅の 3 段階のスケーリング則が 2016 年熊本地震に適用出来るか確認すること、解析の結果、(2) 第 2 段階のスケーリング則の破壊領域と地震モーメントの関係が、2016 年熊本地震に 1 標準偏差以内で適用できたこと、および第 2 段階スケーリング則で平均すべり量が地震モーメントの平方根に比例して増加することを見いだしたこと、そして (3) 経験的グリーン関数法により SMGA 1 枚モデルを用いて計算した合成波形が、加速度、速度、変位に関して観測波形と一致していることから、(4) 震源パラメータのスケーリング則は 2016 年熊本地震の強震動を再現するのに適切 (appropriate) であると結論づける (同論文結論、10 頁左欄 6 行目~) と書かれている。まさに「震源スケーリング則の 2016 年熊本地震の地震動推定への適用性」と

いう標題そのものであり、2016年熊本地震に限った議論である。従って、この内容が大飯原発の基準地震動評価に無条件で資するとは考えられず、どのような条件で引用可能か、あるいはその際の問題点の所在を明確にすることは不可欠の要件であろう。関電の準備書面(25)の内容を踏まえ、甲第497号証および本資料のまとめとして、以下のことを指摘する。

- (1) スケーリング則は震源断層モデルに関するものであり、0.05～1.0Hzの周波数域の地震波によって2016年熊本地震への適用性が議論された。
- (2) スケーリング則における断層モデルのパラメータのばらつきは大きく、標準偏差は1.38倍である。
- (3) SMGAモデルによって0.2～10Hzの周波数域で後追い予測された合成地震動は、最小値でみると予測値は観測値の加速度で0.4～0.5、速度で0.2倍程でしかない。標準偏差は1.4～1.7倍に及ぶ。波形の全体的な形が似ていても、振幅が1/5～1/2では強震動を予測したことにならない。
- (4) 経験的グリーン関数法によっているから、サイト特性はキャンセルされその影響は小さいと考えられるので、波形の不一致の大きな要因は震源特性（レシピにおける微視的震源特性）に着せられる。
- (5) 予測地震動のばらつきは、スケーリング則によるばらつき(2)と微視的震源特性によるばらつき(4)が重畳したものを考えなければならない。
- (6) 上記は0.2～10Hzの周波数域での議論である。基準地震動は0.1～50Hzで評価している。評価に必要な周波数範囲をカバーしていない。
- (7) SMGAモデルによる予測は、レシピによる予測とは考え方が異なる。
- (8) 上記は後追い予測での議論である。事前予測では特に(4)が問題である。
- (9) 以上のことから、Irikura et al. (2017)論文の内容は大飯原発の基準地震動評価に直に資するとは考えられない。

レシピ：震源断層を特定した地震の強震動予測手法、地震調査研究推進本部
地震調査委員会、2016年6月。

以 上