

大飯原発基準地震動の見直しの必要性について

原告団長 竹本修三（京大名誉教授）

1. はじめに

関電は、2014年5月16日の新規制基準適合性に係る審査会合で高浜原発の基準地震動が700ガル、また、同年10月29日の審査会合で大飯原発の基準地震動が856ガルになることを計算結果に基づいて示し、それらが原子力規制委員会です承された。その後、東電は、柏崎刈羽原発の基準地震動で2300ガルという国内の原発で最大の値を原子力規制委員会に示し、2016年1月29日の審査会合でこれが了承された。

このような流れのなかで、われわれは京都地裁・大飯原発差止訴訟の口頭弁論において、関電がFO-B~FO-A~熊川断層を含む長さ63.4kmのM7.8に相当する想定地震を考え、これによる基準地震動（最大加速度）を856ガルと策定した過程の矛盾点を追及してきた（竹本、2016¹⁾）。その主張のなかには、(1)「既往最大」の地震加速度の観測値は、2008年6月14日の岩手・宮城内陸地震（M7.2）の際に防災科技研の岩手県一関市巖美町の「一関・西」観測点の強震計で観測された4022ガルである。(2)1984年9月14日の長野県西部地震（M6.8）の震源近くで埋まった石が飛び出す現象が見つかったが、このような飛び石現象が起きるには地球の重力加速度（980ガル）の15倍程度の地震加速度（約15000ガル）が働かなければならない。(3)任意性を有する様々な震源パラメータを組み合わせ求めてきた想定地震の基準地震動を3桁の有効数字で提示するのは欺瞞である、などが含まれていた。M7.2やM6.8の地震の震源近傍で、地球の重力加速度（980ガル）をはるかに超える地震加速度が観測されているのに、大飯原発から至近距離が3kmのところを通るM7.8の想定地震による最大加速度（基準地震動）が856ガルと設定されているのは、1995年の兵庫県南部地震（M7.3）の際に地震断層とはやや離れた地帯に震度7の被害が集中する震災の帯が走ったことから考えても納得できない。

最近、大阪地裁の「大飯原発3・4号運転停止行政訴訟」や福井地裁で原告側が勝利して現在は名古屋高裁金沢支部で争われている「大飯原発3・4号機差し止め請求裁判」などで、基準地震動を評価するのに使われる地震規模（地震モーメント）と断層面積・断層長・すべり量の関係を表すスケーリング則として、入倉-三宅の式（入倉・三宅、2001²⁾、入倉、2004³⁾）を使うと基準地震動が過小評価されることが指摘された。入倉-三宅の式のかわりに、基準津波の評価で用いられている武村の式（武村、1998⁴⁾）を使うと、地震モーメントが4.7倍にもなるという主張である。

前原子力規制委員会委員長代理の島崎邦彦東大名誉教授は、東大地震研究所を定年退職後も活発な学会活動を続けてきたが、2014年9月18日に規制委員会の委員長代理を任期満了で退任した後の学会発表や記者会見では、西日本の原発の基準地震動が過小評価されているほか、この地域の津波予測も小さすぎると述べている。その原因は震源の大きさを推定するスケーリング則に入倉-三宅の式を用いていることにあるとしている。そして、岩波科学の2016年7月号に「最大クラスではない日本海『最大クラス』の津波 - 過ちを糾さないままでは『想定外』の災害が再生産される」が掲載された（島崎(2016)⁵⁾）。次章では、島崎のこれらの主張を追いながら、わが国の原発の基準地震動の見直しの必要性について述べる。

2. 基準地震動の算定に用いられているスケーリング則

大飯原発、高浜原発などの基準地震動の算定に用いられている経験的スケーリング則は、

入倉－三宅の式である。この式は、Well and Coppersmith (1994) や Somerville *et al.* (1999) がまとめた米国を中心とする世界各地の断層パラメータのデータから地震規模（地震モーメント： M_0 ）と断層面積（ S ）・断層長（ L ）・断層幅（ W ）・すべり量（ D ）との関係を表すスケーリング則の検討結果から得られた。

地震調査推進本部・地震調査委員会が2009年12月21日に発表した震源断層を特定した地震の強震動予測手法「レシピ」（改訂版）には、 $M_0 \geq 7.5 \times 10^{18}$ (N・m) の地震（モーメントマグニチュード (M_w) が6.5以上の地震) については、入倉・三宅 (2001)²⁾ が提案した Well and Coppersmith (1994) などのデータを用いた次の(1)式を用いるようにと書かれている。

$$M_0 = (S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7} (\text{N} \cdot \text{m}) = 5.562 \times 10^{13} \times S^2 (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1)$$

これに対して、武村 (1998)⁴⁾ は、日本列島周辺の地殻内地震の M_0 と L の関係について、 $M_0 \geq 7.5 \times 10^{18}$ (N・m) の地震については $M_0 \propto L^2$ のスケーリング則が成り立つという島崎の論文 (Shimazaki (1986)⁶⁾) に準拠して、 M_0 と L の関係を求めている。これを上式と同様な形で表現すると下記ようになる。

$$M_0 = 4.365 \times 10^{16} \times L^2 (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (2)$$

島崎 (2016)⁶⁾ は、(1) と (2) 式の違いに着目し、(1) 式を用いた日本海津波の報告書⁷⁾ は、能登半島以西の日本海西部の最大クラスの津波が過小評価されていると述べている。地震モーメント (M_0) は、剛性率 (μ)、ずれの量 (D) と断層面積 ($S=L \times W$) の積であり、 $M_0 = \mu \times D \times S$ で表される。(1) 式は S と M_0 を結びつけた式であり、(2) 式は L と M_0 を結びつけた式であるから、一見 Dimension が合わないように思われる。

しかし、 $S=L \times W$ であり、断層幅 (W) は、 $M_0 \geq 7.5 \times 10^{18}$ (N・m) では頭打ちがあり、ほぼコンスタントと見做してもよい。そこで、この範囲では $M_0 \propto L^2$ というスケーリング則が成り立ち、(1) 式と (2) 式は矛盾しない。また、西日本の地殻内地震は、東西主圧力のもとで、断層傾斜角が垂直に近い水平横ずれ断層が多い。このような高角断層の M_0 を求める場合には、断層傾斜角の影響が少ない (2) 式を用いた方がよいという結論になる。長さが同じ断層で比べると、低角の断層に比べて高角の断層では、断層面積が小さく、地震モーメントや、ずれの量の平均値が小さくなる。島崎 (2016)⁵⁾ の見解は、原発からの脱却をめざす各地の運動に支持されている (例えば、美浜の会：小山 (2016)⁷⁾)。

ところで、武村 (1998)⁴⁾ は、 M_0 と S の経験的スケーリング則も求めているが、それは下記のような形で表現される。

$$M_0 = 2.630 \times 10^{14} \times S^2 (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (3)$$

$M_0 \propto S^2$ という同じスケーリング則に基づく (1) と (3) 式を比較して、同じ S から M_0 を求めてみると、その比は、 $5.562 / 26.30 = 1 / 4.73$ となり、入倉－三宅の式を用いた場合より、武村の式を用いたほうが、4.7 倍も大きくなる。この差は、主として入倉・三宅の式が米国を中心とする世界各地の断層パラメータのデータから求めた平均値であるのに対して、武村の式は日本の $M_0 \geq 7.5 \times 10^{18}$ (N・m) の地殻内地震の10個のデータから求めたものであることに由来すると考えられる。バラツキの幅は、入倉－三宅の式に比べて、武村の式の方が、当然小さくなるが、日本の原発近傍の活断層と関連する基準地震動を算定するには、日本の地殻内地震の10個のデータを用いた武村の式を採用した方がよいと考えるのが reasonable である。

2016年6月10日に推本・地震調査委員会が新「レシピ」⁸⁾ を発表した。この新「レシピ」の4ページの地震規模（地震モーメント M_0 ）の算出方法が書かれている。それによると、「 M_0 が 7.5×10^{18} (N・m)（モーメントマグニチュード $M_w 6.5$ 相当）以上で、 $M_0 = 1.8 \times 10^{20}$ (N・m) ($M_w 7.4$ 相当) 以下の地震については、従来通り入倉・三宅の式を

採用するが、 $M_o=1.8 \times 10^{20}$ (N・m)を上回る地震については、Murotani *et al.* (2015)⁹⁾ の提案による次式を用いる」となっている。

$$\text{Murotani 等の式 } M_o = S \times 10^{17} \quad (4)$$

そこで、次章で関電が大飯原発の基準地震動を 856 ガルと定めた想定地震 (M7.8) の震源パラメータを用いて、入倉・三宅の式、武村の式および Murotani 等の式を比較した。

3. 大飯原発の基準地震動について

関電は、最近まで FO-B~FO-A 断層と熊川断層は約 15 km の離隔を有しており、これらの断層が連動していることを示す地質構造も認められなかったことから、これらの断層は連動しないと考えていた。しかし、規制委員会の議論も踏まえて、関電側はより安全側に考えることにして、この 3 本の断層が連動して動くことを想定した。そして FO-B~FO-A~熊川断層を含む断層の長さ 63.4 km で、マグニチュード 7.8 に相当する地震を「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の最も深刻な「基本ケース」と考え、基準地震動 (最大加速度) S_s を求めた結果、856 ガルが得られたという。この想定地震について、関西電力株式会社 (2015)¹⁰⁾ が示した震源パラメータは以下のとおりである。

$$\text{断層長 : } L=63.4\text{km}, \quad L^2=4019.56\text{km}^2$$

$$\text{断層幅 : } W=15\text{km}$$

$$\text{断層面積 : } S=951 \text{ km}^2, \quad S^2=904401 \text{ km}^4$$

$$\text{断層傾斜角 : } \delta=90^\circ$$

これらの値を用いて、入倉・三宅の式、武村の式および Murotani 等の式から地震モーメントを求めた結果が以下の表 1 に示されている。

表 1 大飯原発の想定地震の地震モーメント (M_o)

使用した式	M_o (N・m)	M_o の比
入倉-三宅式(S^2 と M_o) (1式)	5.030×10^{19}	1
武村式 (L^2 と M_o) (2式)	1.755×10^{20}	3.5
武村式 (S^2 と M_o) (3式)	2.379×10^{20}	4.7
Murotani 等の式(S と M_o) (4式)	9.510×10^{19}	1.89

つまり、同じ震源パラメータを用いて経験的スケーリング則が異なる 4 つの方法で地震モーメントを比較してみると、入倉-三宅の式の S^2 を使って求めた M_o を 1 としたとき、武村式の L^2 を使って求めた M_o が 3.5 倍、武村式の S^2 を使って求めた M_o が 4.7 倍になる。また、新「レシピ」⁸⁾ の Murotani 等の式を使った場合でも 1.89 倍になる。

新「レシピ」⁸⁾ では、 $M_o=1.8 \times 10^{20}$ を上回る地震については、Murotani *et al.* (2015)⁹⁾ の提案式を使えとなっているが、FO-B~FO-A 断層と熊川断層が同時に動いた想定地震で、入倉-三宅の式を使うと、表 1 に示したように $M_o = 5.030 \times 10^{19}$ となり、 M_o が 1.8×10^{20} 以下であるから、原子力規制委員会がいま採用している基準で入倉-三宅の式を使って何ら問題ないということになる。仮に Murotani 等の式を使ったとしても $M_o = 9.510 \times 10^{19}$ にしかならない。ところが、武村式の S^2 を使った場合には、 $M_o = 2.379 \times 10^{20}$ となり、入倉-三宅の式は使えないことになる。

4. まとめ

最近各地の裁判所で行われている原発差止裁判で、司法判断が分かれている。一方では、従来の枠組みの範疇に留まり、自らの人格権を賭してこの問題に立ち向かうという姿勢を放棄して、専門的知識を有する原子力規制委員会によって策定された新規制基準は、その策定に至るまでの調査審議や判断過程に看過し難い過誤や欠落はないし、その内容に不合理な点は認められないとして、原発差止の原告側要求を否定している。他方では、裁判官自身が一步踏み込んで、原子力規制委員会の新規制基準が真に原発の安全性を確保するものかどうかを自分の頭で考え、原告側要求を承認する判決が増えてきている。

この小論では、主に地震モーメント (M_0) の求め方について述べたものであるが、地球科学における関係式の導入には、一つの簡単な数式があつて、それに当てはめれば、すべてが解決するという単純なものではない。断層パラメータから地震モーメント (M_0) を求める経験的スケールリング則は、国内外の研究者がそれぞれ独自に探した断層パラメータのデータに基づき、独自のスケールリング則を数多く提唱している。今後、大地震の観測データが増えれば、さらに新たなスケールリング則が提唱されることも考えられる。

現状で、地震調査推進本部・地震調査委員会の「レシピ」や原子力規制委員会の設置基準の強震動予測には、入倉-三宅の式が採用されている。それは、専門家を含む多数の識者の意見を聞いたうえで、実績があり、多くの国内外の研究者から支持されているこの式を使ってきたと考えられる。数ある地震規模 (地震モーメント) と断層パラメータの経験的スケールリング則のなかから、原子力規制委員会が入倉-三宅の式に固執してきたのは、もはや、学問的な議論の枠組みをはみ出しており、エネルギー政策全般を見渡した行政的判断に従ったものであろう。そこには、逼迫した電力需要を賄うためには、安全性を犠牲にしても原発稼働に頼らざるをえないという、原子力規制委員会の強固な意志が感じられる。安全性を重視して、入倉-三宅の式の代わりに武村式を採用すると、わが国の原発稼働が難しくなるからである。

表1から明らかのように、入倉・三宅の式の代わりに武村の式を採用したとすると、地震モーメント (M_0) の値は 3.4~4.7 倍にもなる。これに耐えうように原発施設を整備することは、極めて困難であろう。大飯原発の安全性の確保には最大限の努力をしていると主張する関電がこの問題にどのような対応をするかについて、今後も注意深く見守っていききたい。

ところで、20 年以上前の 1995 年兵庫県南部地震 ($M7.3$: 阪神・淡路大震災) のときに、神戸市及びその周辺地域で、気象庁震度階級に震度 7 が導入されて以来、初めて震度 7 が記録された。このときの被害の集中地域、いわゆる「震災の帯」は、地震断層の真上でなく、それよりやや海寄りや東寄りに、東西長さ約 20~40km、幅約 1km にわたって帯状に連なって現れたことに注目したい。大飯原発の近くで FO-B~FO-A~熊川断層が連動して動いた場合の想定地震は $M7.8$ であり、至近距離は発電所の敷地から 3km である。このような $M7.8$ の想定地震が現実起こった場合には、 $M7.3$ の兵庫県南部地震の際の「震災の帯」のような現象も大飯発電所として当然考えておかなければならない。そうすれば、大飯原発の基準地震動が 856 ガルでは到底済まないことになるであろう。

参考文献

- 1) 竹本修三 (2016): 日本の原発と地震・津波・火山、マニュアルハウス、全 210 頁。
- 2) 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、第 110 巻、849-875。

- 3) 入倉孝次郎 (2004) : 強震動予測レシピ—大地震による強震動の予測手法—、京大防災研究所年報、第 47 号 A、25-45。
- 4) 武村雅之 (1998) : 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—、地震、第 2 輯、第 51 卷、211-228。
- 5) 島崎邦彦 (2016) : 最大クラスではない日本海『最大クラス』の津波—過ちを糾さないままでは『想定外』の災害が再生産される、岩波科学 2016 年 7 月号、653-660。
- 6) 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. Monograph., 37, 209-216。
- 7) 小山英之(2016) : クリフエッジを超える大飯原発・美浜 3 号は廃炉に、再稼働はやめて、全ての原発の基準地震動を武村式で評価し直すこと。
<http://www.jca.apc.org/mihama/saikado/kenkai160724.pdf>
- 8) 地震調査推進本部・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」) (2016 年 6 月 10 日)。
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf
- 9) Murotani, S., S. Matsushima, T. Azuma, K. Irikura, S. Kitagawa (2015) : Scaling Relations of Source Parameters of Earthquakes Occurring on Inland Crustal Mega-Fault Systems, Pure and Applied Geophysics, Vol.172, 1371-1381。
- 10) 関西電力株式会社 (2015) : 大飯発電所の基準地震動について (2015 年 1 月)
京都地裁大飯発電所運転差止等請求事件 証拠 丙第 28 号
http://nonukes-kyoto.net/wp/wp-content/uploads/2016/07/kanden_hei28_01.pdf

西日本の日本海沿岸部の地震に伴う津波について

原告団長 竹本修三（京大名誉教授）

1. はじめに

2014年9月に「日本海における大規模地震に関する調査検討会」（国土交通省・内閣府・文部科学省）の報告書¹⁾が公表された。この「報告書」によれば、「日本海側で発生する地震は、太平洋側で発生する海溝型地震のように、同一場所で繰り返し発生が確認されるような地震ではないことから、発生メカニズムのモデル化が極めて難しく、また発生する地震の規模も太平洋側に比べると小さいことから、過去の地震に関する資料及び地震の発生メカニズム等に関する科学的知見等の蓄積は、太平洋側で発生する海溝型地震に比べて十分ではない」と書かれている。さらに「日本海東縁部では逆断層タイプの地震が発生し、南縁部では横ずれタイプの地震が発生している」との指摘もある。

そして、報告書では日本海側16府県の最大津波高の想定として、北海道では最大23.4mもの津波高が想定されているのに対して、西日本では福井県7.7m、京都府7.2m、兵庫県5.4mなどであり、若狭湾の原発立地点では、高浜原発3.3m、大飯原発2.8m、美浜原発1.4mと求められている。筆者（竹本(2016)²⁾）は、この見積もりが小さすぎるのではないかという印象を述べた。

その後、岩波科学2016年7月号に、前原子力規制委員会委員長代理の島崎邦彦東大名誉教授の「最大クラスではない日本海『最大クラス』の津波」という警告が掲載された（島崎(2016)³⁾）。ここでは、「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¹⁾で能登半島以西の日本海西部における津波予測が過小評価されており、その原因が震源の大きさを推定するのに入倉-三宅の式（入倉・三宅(2001)⁴⁾）を用いていることにあると述べられている。

小論では、「日本海における大規模地震に関する調査検討会」が、日本海西部の津波予測を出した手順を簡単に追った後、島崎邦彦東大名誉教授の指摘に基づいて、この報告書¹⁾の問題点に言及した。そして、日本海西部、とくに、若狭湾の大飯原発周辺の想定地震が動いたときの津波高の見積もりについて改めて検討した。

2. 検討会「報告書」による西日本の津波高を求める手順

断層パラメータのうち、津波への影響の大きいすべり量の設定のためには、地震規模と断層面積・断層長・すべり量の関係（スケーリング則）が必要となるが、この分野で国内外の研究者による多くの研究成果がある。報告書¹⁾では、そのなかから、断層面積と地震規模（地震モーメント）との経験的關係式を求めた入倉・三宅(2001)⁴⁾の論文を基本として、日本海「最大クラス」の津波予測を行っている。

入倉-三宅の式においては、活断層などの内陸地震の断層面積： S (km^2)と M_0 ($\text{N}\cdot\text{m}$)との関係が次のように表される（ M_w はモーメントマグニチュード）。

$$M_0 = (S / 2.23 \times 10^9)^{3/2} \times 10^{-7} \quad (M_w < 6.5) \quad (1-1)$$

$$M_0 = (S / 4.24 \times 10^5)^2 \times 10^{-7} \quad (M_w \geq 6.5) \quad (1-2)$$

このほか、報告書¹⁾では、地震規模の大きい内陸長大断層にも対応する経験的關係式として、Murotani *et al.* (2010)や田島・他(2013)の關係式も挙げられているが、現状ではとくに問題としなくてもよさそうである。なお、入倉-三宅の式の提唱者である入倉孝次郎京大名誉教授は、これらの2つの論文の共著者としても名を連ねている。

原発の基準津波の審査では、武村の式（武村(1998)⁵⁾）を用いて‘震源の大きさ’を推

定するのが普通であるが、報告書¹⁾では武村の式は無視されている。島崎 (2016)³⁾ の論文ではこのことも問題視されているが、それについては次章で述べる。

報告書¹⁾に戻り、断層の平均すべり量： D (m) と地震モーメント： M_0 (N・m) との関係は、断層面積： S (km²) と剛性率： μ (N/m²) (ここでは $\mu=3.44\times 10^{10}$ とする) を用いて、 $M_0 = \mu \times D \times S$ で表される。つまり、 M_0 と S が決まれば、 D は上式から決まるが、 $M_w=7.4$ 程度以上の地震では、平均すべり量が 3m 程度で飽和すると述べられている。しかし、既往研究による過去の地震の平均すべり量にはバラツキがみられる。そこで、防災上の観点からは、バラツキの標準偏差 ($\sigma=1.5$ m) を加えたものを日本海における「最大クラス」の津波としている。

すべり角の設定については、各断層面上の最大せん断応力方向から求めるとするが、計算の結果、西日本の横ずれとされる断層のすべり角は、5°~30°で、10°以下のものが多い。津波への影響の観点から見ると、横ずれ断層については、津波を起こしにくい低角なものが多いことから、今回の検討では、横ずれ断層に対して上下方向の断層変位を与える方法について検討した。このための参考となるデータはほとんどなく、今回の検討では、西日本の日本海側の横ずれ断層の地震である 1943 年鳥取地震での地表地震断層の露頭における垂直・水平変位量から求めたすべり角を参考にして、横ずれ断層において上下方向の変位を考慮する場合には、すべり角の値を 35°に設定することとした。

つまり、報告書¹⁾で西日本に多い水平横ずれ断層による津波高を見積もるのに用いられた手順は、下記のようなものである。

- (1) 断層パラメータから、地震モーメントを見積もる経験的關係式には入倉—三宅の式(2001)⁴⁾を採用した。
- (2) 防災上の観点から、各地で見積もられる津波高に 1.5m を加えたものを「最大クラス」の津波とした。
- (3) 西日本の高角横ずれ断層のすべり角を 35°に設定した。

3. 「報告書」への疑問

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震 ($M_w=9.0$) に伴い、東電の福島第一原発は壊滅的な被害を被った。それにより発生した原発の放射能漏れは、広範囲の住民の生活を脅かし、事故後 5 年を経過した今でも事態はまだ収束していない。福島第一原発の事故を大きくしたのは様々な要因があるが、なかでも福島第一原発の津波影響について、事故前に東電が想定した津波高は 6.1m であったのに対して、実際には 15.5m の津波が福島第一原発を襲った。これを東電は「想定外」として、予測を超えた自然災害による事故であったから、東電の責任はないと主張している。これについては、その後各方面からの検証で疑問視されているが、それについて、ここでは議論しない。

島崎 (2016)³⁾ は、このような「想定外」を繰り返さないために、前章で述べたような手順で求められた日本海西部 (能登半島以西) の「最大クラス」津波は、過小評価であり再検討が必要であると述べており、過小評価の原因は、入倉—三宅の式 (2001)⁴⁾ を採用していることにあるとしている。この式は、断層面積から地震モーメントを推定する際に用いられるが、西日本に多く分布する高角の断層では、地震モーメントが過小評価となる。長さが同じ断層で比べると、低角の断層に比べて高角の断層では断層面積が小さいから、地震モーメントやずれの量の平均値が小さく見積もられるからであるというのが、島崎 (2016)³⁾ の意見である。

前節の(1-2)式を書き直すと、入倉—三宅の式は、断層面積 (S) から震源の大きさ (地震モーメント (M_0)) を求める式として次のように書ける。

$$M_0 = 5.562 \times 10^{13} \times S^2 \quad (2)$$

これに対して、原発の基準津波の審査に一般に用いられている武村の式 (1998)⁵⁾ は、断層長 (L) から地震モーメント (Mo) を求める式で、次のようになる。

$$M_0 = 4.365 \times 10^{16} \times L^2 \quad (3)$$

これより先に、Yamanaka・Shimazaki (1990)⁶⁾ は断層長 (L) から地震モーメント (Mo) を求めるスケーリング則の経験的關係式として、次のようなものを提案しているが、これを山中-島崎の式と呼ぶことにする。

$$M_0 = 3.802 \times 10^{16} \times L^2 \quad (4)$$

つまり (2) 式は断層面積 (S)、(3、4) 式は断層長 (L) と地震モーメント (Mo) を結びつけた経験的關係式である。S=L×W であり、(2) 式と(3、4) 式は Dimension が合わないように思われる。しかし、地殻内地震は、地震発生層と呼ばれる厚さ 15km の範囲内で起こっており、断層幅 (W) は、 $M_0 \geq 7.5 \times 10^{18} \text{ (N}\cdot\text{m)}$ では頭打ちになるので、ほぼコンスタントと見做してもよい。そこで、 $M_0 \propto L^2$ というスケーリング則が成り立ち、(2) 式と (3、4) 式は矛盾しない。

島崎 (2016)³⁾ は、報告書¹⁾ に F54 と書かれている丹後半島沖の郷村断層を海域に延長した垂直断層を例として、(2) ~ (4) 式の比較を行っている。この断層は L=58km、W=14km、S=799km² と報告書¹⁾ には記載されているが、これから求めた Mo (N・m) の値は、次のようになる。

$$(2) \text{ 式 } M_0 = 3.55 \times 10^{18}$$

$$(3) \text{ 式 } M_0 = 14.08 \times 10^{18}$$

$$(4) \text{ 式 } M_0 = 13.00 \times 10^{18}$$

これから、西日本の断層面が垂直に近い高角の断層の地震規模 (地震モーメント : Mo) を推定するのに、断層面積 (S) から Mo を求める入倉-三宅の式を使った場合に比べて、断層長 (L) から Mo を求める武村の式か山中-島崎の式を用いた場合に、地震規模が 4 倍近くなることがわかる。入倉-三宅の式では世界の地震データが用いられており、武村の式や山中-島崎の式では、日本のデータのみが扱われている。この例から考えてみても、日本の原発への津波影響を見積もる際には、日本の地震データに準拠したスケーリング則の経験的關係式を採用した方がよいという島崎 (2016)³⁾ の主張には説得力がある。

4. 大飯原発周辺の想定地震による津波高について

関電は、大飯原発周辺で FO-B~FO-A~熊川断層を含む断層の長さ 63.4 km で、マグニチュード 7.8 に相当する地震を「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の最も深刻な「基本ケース」と考えて、856 ガルの基準地震動 (最大加速度) を決めている。この想定地震の断層モデルは、陸域の熊川断層まで含んでいるが、とりあえず、陸域まで含めた全体の断層パラメータ用いて、断層の平均すべり量を考えることにする。

関西電力株式会社 (2015)⁸⁾ の「大飯発電所の基準地震動について」に示されているこの想定地震の震源パラメータは、以下のとおりである。

$$\text{断層長 : } L=63.4\text{km}, \quad L^2=4019.56\text{km}^2$$

$$\text{断層幅 : } W=15\text{km}$$

$$\text{断層面積 : } S=951 \text{ km}^2, \quad S^2=904401 \text{ km}^4$$

$$\text{地震モーメント : } M_0=5.03 \times 10^{19} \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\text{断層傾斜角 : } \delta=90^\circ$$

$$\text{平均すべり量 : } D=1.51\text{m}$$

すべり角： $\lambda=0^\circ$

剛性率： $\mu=3.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

平均すべり量 (D) は、 $D = Mo / (\mu \times S)$ の関係から求めことができるが、上記の $D=1.51\text{m}$ という値は、(2) 式の入倉-三宅の式から求められた $Mo=5.03 \times 10^{19}(\text{N}\cdot\text{m})$ を使って決められる。ただし、ここでは剛性率 (μ) を $3.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ として計算しているが、これはもっと小さい可能性がある。 μ を $3.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ とすれば、D は 7/6 だけ増えることになり、 $D=1.76\text{m}$ となるが、いまは、 $\mu=3.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ として以下の議論をすすめることにする。

ここで、(3) 式に示されている武村(1998)⁵⁾ の断層長 (L) から地震モーメント (Mo) 求める式を用いると $D=5.28\text{m}$ となる。さらに、武村(1998)⁷⁾ に示される断層面積 (S) から地震モーメント (Mo) 求める式を用いると $D=7.15\text{m}$ になる。つまり、入倉-三宅の式に準拠して決められている現在の平均すべり量は、あまりに小さすぎると言える。

これまで述べた想定地震の断層モデルは、陸域の熊川断層まで含んだ FO-B~FO-A~熊川断層のものであった。想定地震の大飯原発への津波影響を考えるには、全てが海域にある FO-B~FO-A 断層だけの断層パラメータを用いて、平均すべり量を求めた方がよいという考えも成り立つ。しかし、関電(2015)⁸⁾ に示されている平均すべり量は、FO-B~FO-A~熊川断層が連動して動いた場合が $D=1.512\text{m}$ 、FO-B~FO-A 断層だけが動いた場合が $D=1.603\text{m}$ であり、その差は僅かなので、以下の大飯原発の津波影響の議論は、FO-B~FO-A~熊川断層の全体が動いた場合を想定して行う。

入倉-三宅の式でなく、武村の式を用いて得られた Mo から求めた想定地震の水平変位は $5.28\sim 7.15\text{m}$ となる。関電 (2015)⁸⁾ は、想定地震の断層傾斜角が 90° 、D のすべり角が 0° と純粋な水平横ずれ断層を仮定していて、断層面上のすべり量には津波を引き起こすような上下成分は基本的に含まれていない。すべり角が 0° の水平横ずれ断層でも断層終端部では、上下方向の変位を伴うが、その量は水平変位の高々 1 割程度なので、あまり影響はない。

しかし、「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¹⁾ によれば、西日本の高角横ずれ断層のすべり角を 35° に設定して津波高の計算をすることになっている。これに従えば、水平変位に $\sin 35^\circ (=0.5736)$ を乗じたものを断層面の平均的な上下変位として考えなければならず、想定地震の上下変位は $3.0\sim 4.1\text{m}$ となる。この地盤の上下変位は直接、震源域の津波高となるが、報告書¹⁾ には、「防災上の観点から、各地で見積られる津波高に 1.5m を加えたものを『最大クラス』の津波とする」と書かれている。そこで、FO-B~FO-A~熊川断層が連動して動いた場合の想定地震の「最大クラス」津波高は $4.5\sim 5.6\text{m}$ としなければならない。

5. まとめ

大飯原発の敷地から最短距離で 3km の想定地震の震源域で $4.5\sim 5.6\text{m}$ の津波を想定しなければならないとすると、少なくとも大飯原発の取水路奥まで津波が到達することは間違いない。主要な建屋の敷地高さは、東京湾平均海面 (T.P) より 9.3m 以上にあるというが、それでも安全とは言えない。2011 年東北地方太平洋沖地震の際に、震源域では最大 5.5m 強の海底隆起があったものが、福島第一原発から 1.5km 離れた沖合の波高計で観測された津波第 2 波が 7m 強であり、福島第一原発の敷地を襲った津波が 15.5m であったからである (竹本、2016²⁾)。大飯原発の至近距離の広範な海域で $4.5\sim 5.6\text{m}$ の津波が発生したとき、発電所の湾内ではどのくらいの遡上高になるか予測もつかないが、恐ろしい話である。

関電 (2015)⁸⁾ は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の最も深刻なケースとして FO-B~FO-A~熊川断層が連動して動く想定地震を考えているが、最近まで FO-B~FO-A 断層と熊川断層が連動して動くとは認めていなかった。その理由は、FO-A 断層と熊川断層の間には約 15km の隔離があり、その間に後期更新世以降の活動による地質構造は認められなかったことや、海上音波探査、柱状採泥、海上ボーリング等の詳細な調査の結果で断層運動を示唆する構造が認められなかったからである。しかし、原子力規制委員会の議論も踏まえて、この 3 つの断層が連動して動くと考えた長さ 63.4 km で、マグニチュード 7.8 に相当する想定地震をモデル化した。そのモデルでは、約 15km の空白域を含む 1 本の連続した断層線を考えている。既存の活断層をはみだして、空白域にも地震が延びていることは、最近の熊本地震でも立証されているので、この措置は納得できる。

そうすると新たな疑問が湧く。FO-B~FO-A~熊川断層は、この地域のほぼ東西方向を向いた主圧力に支配されていると考えることができる。そのような応力場を考え、付近の活断層図を見ると、FO-B~FO-A~熊川断層の西南に位置する上林川断層は、FO-B~FO-A~熊川断層とほぼ 90° ずれた、共役関係にある断層とみることができる。そうなると、現世の応力分布から考えて、上林川断層の東北延長上の空白域で、2005 年 3 月 20 日の福岡県西方沖地震 (M7.0) のような M7 クラスの地震が起こることも当然考えなければならないのではないか。既存の活断層は、将来動く可能性を考えなければならないが、その延長上の空白域は考慮に値しないという議論は通用しない。先に述べたように、関電 (2015)⁸⁾ は、FO-A 断層と熊川断層の間の空白域も想定地震の断層モデルに取り込んでいるからである。こうなると、上林川断層の東北延長上の空白域で M7 クラスの地殻内地震が起こることを想定した大飯原発への地震・津波影響も見積もっておくことが必要である。

参考文献

- 1) 日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書 (2014 年 9 月)。
http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/
- 2) 竹本修三：日本の原発と地震・津波・火山、マニュアルハウス (2016 年 4 月)、全 210 ページ。
- 3) 島崎邦彦：最大クラスではない日本海『最大クラス』の津波—過ちを糾さないままでは『想定外』の災害が再生産される、岩波科学 2016 年 7 月号、653-660。
- 4) 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、第 110 巻、849-875。
- 5) 武村雅之 (1998)：日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—、地震、第 2 輯、第 51 巻、211-228。
- 6) Yamanaka, Y. and K. Shimazaki (1980)：Scaling relationship between the number of aftershocks and the size of the main shock, J. Phys. Earth, Vol. 38, 305-324。
- 7) 地震調査推進本部・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」) (2016 年 6 月 10 日)。
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf
- 8) 関西電力株式会社 (2015)：大飯発電所の基準地震動について、京都地裁 大飯発電所運転差止等請求事件 証拠 丙第 28 号 (2015 年 1 月)。
http://nonukes-kyoto.net/wp/wp-content/uploads/2016/07/kanden_hei28_01.pdf

2016年熊本地震の教訓

原告団長 竹本修三（京大名誉教授）

1. はじめに

2016年4月14日21:26に熊本県熊本地方でM6.5の地震が発生した。そして、同地方では、15日00:03にはM6.4、16日01:25分にはM7.3の大地震が相次いで起った。なお、ここで使うMは、気象庁マグニチュードを表している。

海・陸のプレート境界で発生する海溝型の大地震・巨大地震を除き、わが国で起こった内陸部の地殻内断層地震の気象庁マグニチュード(M)が7を超える地震は、1995年兵庫県南部地震(M7.3)のあと、2016年熊本地震(M7.3)の直前までの約20年間に、2000年鳥取県西部地震(M7.3)、2005年福岡県西方沖地震(M7.0)、2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)、2011年福島県浜通り地震(M7.0)と、5~3年間隔で広範囲な地域でばらばらに起こっている。なお、このなかで2000年鳥取県西部地震と2005年福岡県西方沖地震は、事前に活断層が知られていなかったところで起ったことが注目される。このような地震予知研究の現状を考えると、次にM7を超える地震がわが国のどこで起きるかは、全く予想がつかない。

関電は、大飯原発の近くでM7.8の想定地震をモデル化して、この想定地震による大飯原発の基準地震動を856ガルと設定している。この基準地震動の決め方については、別のところで疑問を呈したが、さらに想定地震による大飯原発の地震被害を考える際に、最近起ったM7.3の熊本地震から学ぶことが多い。そこで、差し当たり、2016年熊本地震の教訓を以下のようにまとめてみた。

- (1) 熊本地震は予知できなかつた。
- (2) 地震断層が活断層をはみだした場所まで伸びている。
- (3) 余震は既存の活断層の位置よりかなり広い範囲に分布している。

2. 熊本地震の予知

地震調査推進本部・地震調査委員会(2016)¹⁾の見解によれば、4月14日の地震(M6.5)と4月15日の地震(M6.4)は、日奈久断層帯の高野-白旗区間の活動により起ったと考えられる。同委員会は、この地域の活断層の活動によりM6.8程度の地震が発生する可能性があり、30年以内の地震発生確率は不明と評価していた。また、4月16日の地震(M7.3)は、主に布田川断層帯の布田川区間の活動により起ったと考えている。布田川断層帯(布田川区間)については、活動時にM7.0程度の地震が発生する可能性があり、30年以内の地震発生確率はほぼ0%~0.9%(やや高い)と評価していた。なお、同委員会では、布田川断層帯を含む九州中部の区域でM6.8以上の地震の発生確率は18~27%と評価していた。いずれにせよ、熊本地域が、他の地域に比べて、大地震が近づいているという警告はなかつた。

筆者は、一連の熊本地震が起きる前に、この地域で前兆的ひずみ変化があつたかどうか、国土地理院電子基準点のGPS観測データに基づいて調べてみた。図1にGPS観測データから求められた今回の一連の熊本地震の直前までの熊本(左)と長陽(右)における10年間(2006年4月3日0時~2016年4月16日0時:UTC)の変動が示されている。図で上が東西成分、中が南北成分、下が上下(楕円体高)成分である。図の目盛は縦軸が5cm単位、横軸が1年間単位である。この10年間の変動で目につくのは、2011年3月11日に起った東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の際に、熊本と長陽の両観測点ともに、東西

成分が東方向に約 2cm の変動を示したことである。

2011 年東北地方太平洋沖地震の際には海域の震源近くでは東南東方向に最大で約 55m に達する大きな変動を示した。陸域では国土地理院の GPS 観測の結果によると、最大は牡鹿半島で東南東方向に 5.3m の変動を示した。また、この地震の際に、東京世田谷で東方向に 25cm、京都で東方向に 6cm 前後の変動があった。熊本地域でも、図 1 に示したように、過去 10 年間に於ける最大の地殻変動は 2011 年東北地方太平洋沖地震の影響であった。このことから考えてみると、地殻内断層地震を引き起こす地殻ひずみの蓄積状況を把握するには、全国規模で考えなければならない。

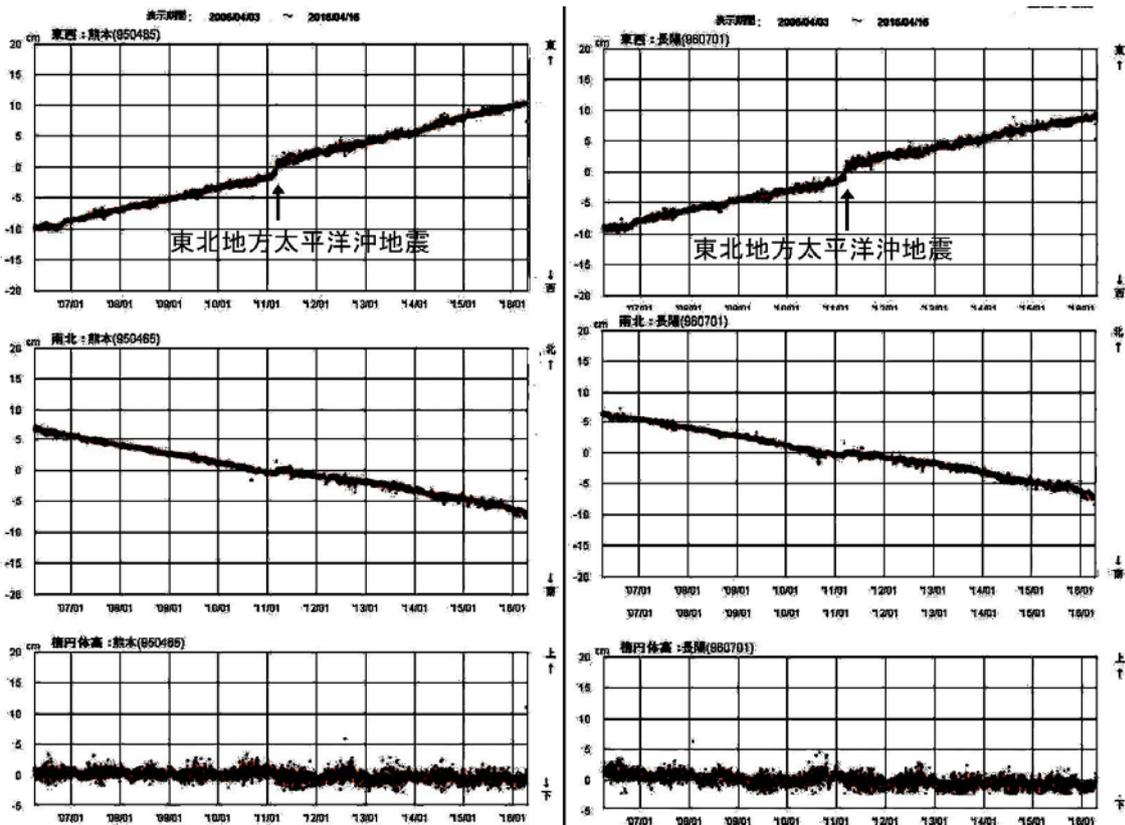


図 1 電子基準点；熊本と長陽の 10 年間の変動（国土地理院のデータによる）。

著者が調べた結果、熊本地震の前兆を示す異常地殻変動等は事前にまったく報告されなかった。この点は、専門家である島崎邦彦東大名誉教授、本蔵義守・東京工業大学名誉教授、瀧瀬一起東大地震研教授、平原和朗京大院理学研究科教授、島村英紀北大元教授の各氏にも確認済みである。これは、1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震（M7.3）の場合（竹本 2016²⁾）と同様であり、わが国で、M7 クラスの地殻内断層地震の予知は無理であることを示している。

さらに、震源域を取り囲む東－西及び南－北方向のひずみ変化を国土地理院電子基準点の GPS 観測データを用いて調べてみた。GPS 観測データの 2 点間の差である基線長変化（斜距離の差）は、2 点間のひずみ変化を表す。東として高森（960704）、西として島原（960694）を選び、ほぼ東西に並ぶ 2 つの電子基準点の熊本地震前の 10 年間の基線長変

化は、約 8mm/年の割合で縮んでいた。これに対して南に熊本相良 (950469)、北に熊本 (960700) を選び、ほぼ南北に並ぶ 2 つの電子基準点の熊本地震前の 10 年間の基線長変化は、約 4mm/年の割合の伸びを示していた。これで熊本地震の震源域は東西圧縮、南北伸長の応力場にあったことがわかった。東西圧縮は、西日本の応力場として共通のものであるが、南北伸長がこの辺りの応力場の特徴であると考えられる。しかし、高森-島原、熊本相良-熊本の 2 本の基線長変化ともに地震発生前の異常な地殻ひずみ変化は見いだされなかった。

3. 地震断層モデルと既存の活断層

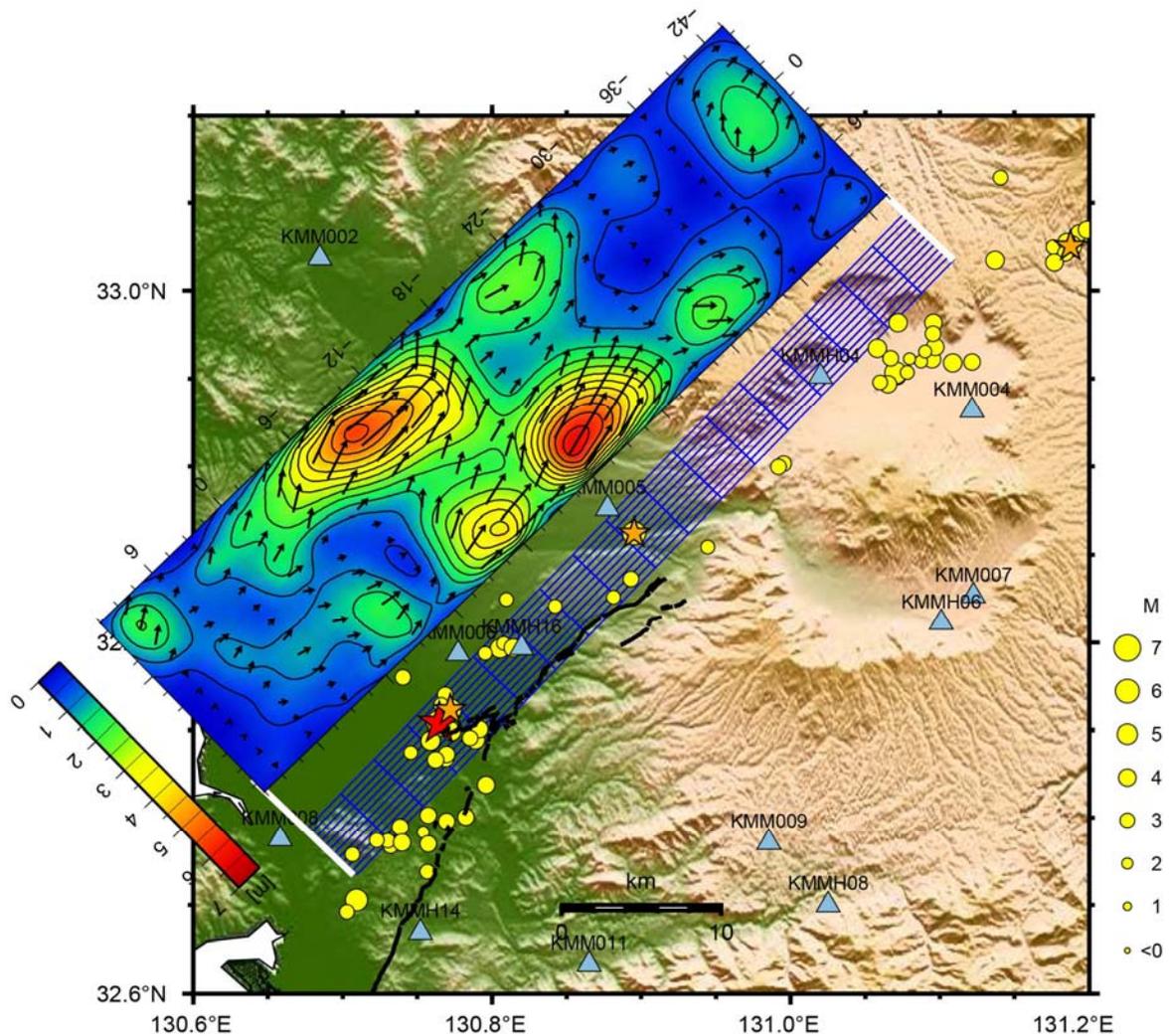


図2 強震・遠地・測地のジョイントインバージョンによる震源断層モデル (瀬瀬・他³⁾)

瀬瀬一起東大地震研教授らは、4月16日のM7.3の地震について、強震・遠地・測地のジョイントインバージョンによる震源断層モデルを求めた (瀬瀬・他³⁾)。まず、防災科学技術研究所の Hi-net の自動処理震源を基に破壊開始点を設定し、本震後 3 時間の余震分

布から考えて、 $3 \times 1.5 \text{ km}$ の小断層による $54 \times 16.5 \text{ km}$ の断層面を設定した。さらに、F-net（広帯域地震観測網）の解などを参考にして、走向・傾斜角・rake（すべり角）など断層パラメータを求めた。得られた計算結果は図2に示されている。この図で、走向は北から時計回りに測って 224° （つまり、西から南に 46° 向いた方向）、傾斜角は 75° （垂直断層から 25° 益城町の方を向いている）、rake（すべり角）は断層面の走向から約 180° ずれた2つのベクトルで表示されている。

図2では、4月16日の地震の破壊開始点（赤星印）、3時間後までの余震（橙星印・黄色丸）、及びそれらから推定された震源断層（メッシュ入りの青四角）が示されている。その震源断層で震源インバージョンを行い、得られたすべり分布を左上の枠内に示してある。すべり分布は、赤色が大きく、青色が最も小さい。この図で、震度7を記録した益城町や西原村の直下では、赤色で示されている大きなすべり分布が見られる。さらに防災科学技術研究所のK-net, KiK-net 観測網からから14点を選択し、得られた加速度記録を積分して速度にした後、バンドパスフィルタをかけ、リサンプリングしたものを観測波形として震源インバージョンを行った。その結果、最大すべり量は 6.1 m 、地震モーメントは、 $M_0 = 4.1 \times 10^{19} (\text{N} \cdot \text{m})$ と求められた。この地震のモーメントマグニチュード M_w は7.0に相当するとのことである。

図2の黒太線は活断層を表すが、これと強震・遠地・測地のジョイントインバージョンより求められた震源断層モデル（瀨瀨・他³⁾）とを比較すると、両者は一致しない。すなわち、震源断層モデルは、既存の活断層の延長上にも延びている。また、震度7を記録した地域は、地上に想定された活断層の線より数 km ずれている。さらに、余震分布は、活断層の幅より、かなり広い範囲に広がっている。これらを熊本地震の教訓として、大飯原発の想定地震について考えてみる。

4. まとめ

関電は、大飯原発の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の最も深刻なケースとして、FO-B~FO-A~熊川断層を含む断層の長さ 63.4 km で、マグニチュード7.8に相当する地震としているが、熊本地震の教訓として、既存の活断層をはみだした場所まで地震断層が伸びていることから、約 15 km の離隔を有しているFO-B~FO-A断層と熊川断層が連動して動くとしたのは、正しい措置であったと考えられる。それならばもう一步進めて、上林川断層の東北延長上の空白域でも地震が起きることも想定すべきである。また、FO-B~FO-A~熊川断層が連動して動くという想定地震を考えた場合、余震分布は大飯原発の敷地を含むことになるので、主要設備でない配管類などの余震による損傷も考慮しなければならない。

参考文献

- 1) 地震調査推進本部・地震調査委員会(2016):平成28年(2016年)熊本地震の評価(2016年5月13日)。
- 2) 竹本修三(2016):日本の原発と地震・津波・火山、マニュアルハウス、全210頁。
- 3) 瀨瀨一起・小林広明・三宅弘恵(2016):2016年4月14・16日熊本地震の震源過程、(2016年4月18日) <http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/2016kumamoto/index.html>