

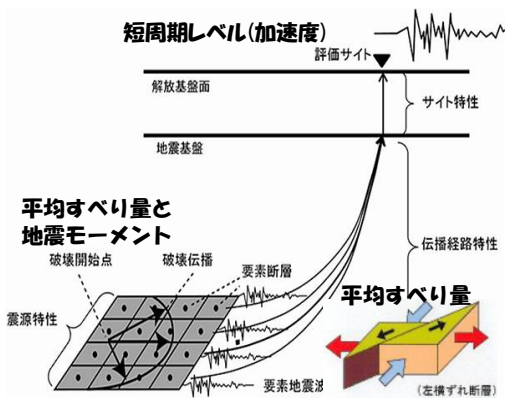
現行の基準地震動は二重の過小評価

— 入倉・三宅式による震源規模と壇他の式による地震動の算定 —

武村式と片岡他の式で基準地震動の再評価を行え

2016年10月18日 美浜の会

1. 主旨：断層面積、平均すべり量、短周期レベルと地震モーメントの諸関係及びそれらの相互関係から導かれる結論



地震は左図のように、地下にある震源・断層面のすべりによって起こり、その地震波が地表面に伝わって揺れ(加速度)を起こす。震源の規模を表す「地震モーメント」は「平均すべり量」に比例して決まり、地表面の揺れの程度を表す「短周期レベル」は最大加速度に比例する。

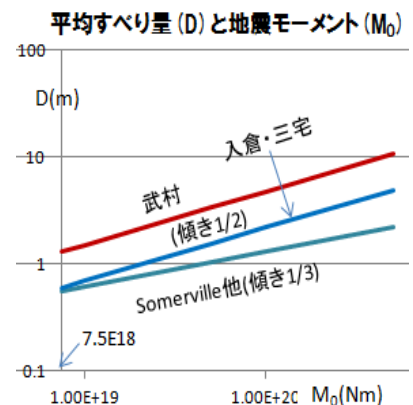
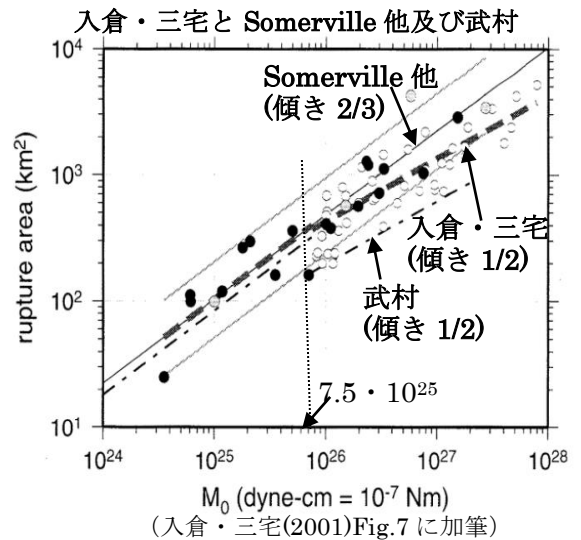
ここでは、断層面積 S と地震モーメント M_0 の諸関係、平均すべり量 D と M_0 の諸関係、短周期レベル A と M_0 の諸関係及びそれらの間の相互関係を示し、それから導かれる重要な結論について述べる(それら諸関係の詳細は、最後の「補

足説明」を参照されたい)。

日本地震学会の2016年秋季プログラムにおける入倉・宮腰・吉田・釜江予稿集の最後の部分に次の記述がある。「これまでの平均すべり量の経験式は $M_0^{1/3}$ に比例していたが、地震モーメントが $7.5E+18$ [Nm] ($M_w 6.5$) より大きい地震の平均すべり量は、入倉・三宅(2001)、宮腰他(2015)のデータおよび2016年熊本地震($M_j 7.3$)を含めて $M_0^{1/2}$ に比例して大きくなる傾向を示している」(注：E+18は 10^{18} を表す)。

この平均すべり量 D (km) と地震モーメント M_0 の比例関係が、 $M_0 = 7.5 \times 10^{18}$ Nm (7.5×10^{25} dyne · cm) を境にして、 $M_0^{1/3}$ から $M_0^{1/2}$ へと変わるという性質は、第1に断層面積 S (km^2) と地震モーメント M_0 の関係の変化に類似している。実際、入倉・三宅(2001) Fig7(右上図)が示すように、断層面積(破壊面積) S は、 $M_0 = 7.5 \times 10^{25}$ dyne · cm を境にして、Somerville 他 $M_0^{2/3}$ に比例する関係から、入倉・三宅(または武村)の $M_0^{1/2}$ に比例する関係へと変わっている。第2に、後述するように、短周期レベル(最大加速度に比例) A (Nm/s²) と地震モーメント M_0 との関係においても類似の性質の諸関係が存在する。

実際にこれら S - M_0 、 D - M_0 及び A - M_0 の諸関係は互いに相関していることを以下で明らかにする。その結果、次のような重要な結論が浮

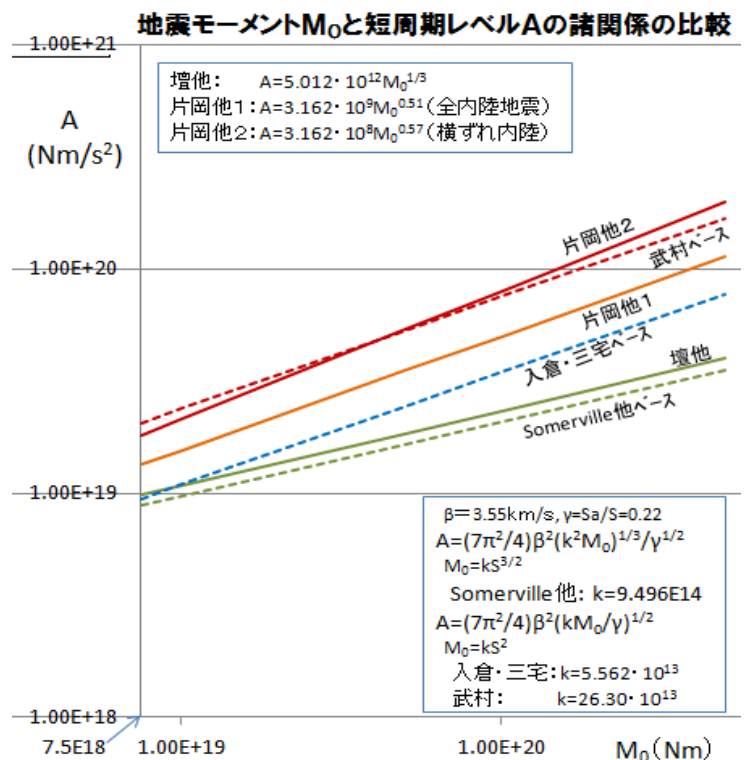


上してくる。

第1に、上記予稿集でいう、平均すべり量 D が大きい M_0 に対しては $M_0^{1/3}$ ではなく $M_0^{1/2}$ に比例するという関係(前頁右下図)は、前頁右上図の S - M_0 関係である Somerville 他及び入倉・三宅 (または武村) の関係式から導かれる。前頁右下のグラフでは、 $1/2$ や $1/3$ は直線の傾きを示しており、傾き $1/3$ の Somerville 他の式は M_0 が 7.5×10^{18} (Nm) を超えると、他の式より過小評価になることを示している。

第2に、それら D - M_0 の関係をベースにして短周期レベル A と M_0 の関係が導かれ、それらを元々そこに存在する壇他の式や片岡他の式と比較することによって次のような結論が導かれる (下図)。

- ① 短周期レベル A を地震モーメント M_0 から計算する式として、レシピや各原発の断層モデルで当然のように用いられている壇他の式は、実質的に Somerville 他の式に対応していて、 $M_0 \geq 7.5 \times 10^{18}$ (Nm) では著しい過小評価をもたらすので、使うべきではない。
- ② 短周期レベル A を地震モーメント M_0 から計算する式としては別に片岡他の式が存在するが、特に横ずれ断層の場合の片岡他2の式は武村式から導かれる関係式と整合している。片岡他の式は測定値から導かれているので、この事実によって逆に、大飯や玄海等の横ずれ断層の場合は武村式を用いるのが妥当であることが裏付けられる。
- ③ 入倉・三宅式から導かれる A - M_0 関係式は、片岡他の式と比較して相当な過小評価となる。逆をたどれば、入倉・三宅式は特に横ずれ断層に対して用いるべきではないということになる。



2. 壇他の式の代わりに片岡他の式を用いればレシピの矛盾は起こらない

島崎提言を受けて規制庁は、入倉・三宅式の代わりに武村式を用いる試算を大飯原発の FoA-FoB-熊川断層について行ったが、その結果、アスペリティ面積が断層面積より著しく大きくなるという矛盾が生じることを示した。すなわち、規制庁が武村式 (断層長 L (km) の式: $M_0 = 4.365 \times 10^{16} L^2$) を用いて地震モーメントを計算し、さらに壇他の式を用いて短周期レベルを計算した結果、部分であるはずのアスペリティの面積が $S_a = 1840 \text{ km}^2$ となり、全体である断層面積 $S = 951 \text{ km}^2$ の 1.93 倍にもなった (7月27日原子力規制庁資料1、8頁)。この結果、規制委員会は、武村式を用いるにはレシピは未熟であると結論し、規制庁が行った試算を破棄しただけで何も改善策をとらないという無責任を示した。

入倉・三宅式の代わりに武村式を用いると地震モーメントが大きくなり、それに応じて短周期レベルも大きくなるが、壇他の式では $A \propto M_0^{1/3}$ (\propto は比例関係を示す) となっているため、 A はそれほど大きくならない(上図)。アスペリティを円と見なしたときの半径 r ($S_a = \pi r^2$) はレシピ(13)式より次式で決まる。

$$r = (7\pi/4) \beta^2 (M_0/AR)$$

ただし、 β はS波速度、 R は断層を円と見なしたときの半径である ($S=\pi R^2$)。つまり、半径 r は M_0/A に比例しているの、大きくなった M_0 に比べて A がそれほど大きくならなければ r は比較的大きな値になる。こうして事実、上記のようにアスペリティ面積が断層面積を著しく上回った。

ところが、壇他の代わりに片岡他の式1または2を用いると、前記のグラフのように A がそれなりに大きくなるため、アスペリティ面積の半径 r が小さくなり、アスペリティ面積が断層面積より相当に小さくなる結果が得られて矛盾は生じない。

実際、大飯原発の場合 ($S=951\text{km}^2, \beta=3.6\text{km/s}$)、武村式 (L の式) と片岡他2を用いて計算すると、 $M_0=17.5 \times 10^{19}\text{Nm}$ 、 $A=10.9 \times 10^{19}\text{Nm/s}^2$ 。これらより、アスペリティ面積は $S_a=135.4\text{km}^2$ となり、断層面積 S の 14.2% となって矛盾は生じない。

3. 壇他の式では地震動は過小評価となるので片岡他の式で評価すべき

現在は、地震モーメントから短周期レベル(最大加速度に比例)を求めるのに壇他の式を用いている。これが過少評価のもう一つの(入倉・三宅式に加えて)根源となっている。壇他の式に代えて、片岡他の式を用いるべきだというのが上記の結論であり、その場合加速度は以下となる。

◆大飯原発の横ずれ断層 FoA-FoB-熊川断層：現行では、地震モーメント $M_0=5.03 \times 10^{19}$ 、短周期レベル $A=1.96 \times 10^{19}\text{Nm/s}^2$ 。武村式(L)と壇他を用いて再評価すると $M_0=17.5 \times 10^{19}\text{Nm}$ 、 $A=2.97 \times 10^{19}\text{Nm/s}^2$ となる(7月27日規制庁資料1、19頁)。壇他の代わりに片岡他2を用いれば、 $A=10.94 \times 10^{19}\text{Nm/s}^2$ となり現行の $10.93/1.96=5.58$ 倍になる。それゆえ、入倉・三宅式と壇他の式を用いて決めている現行最大加速度 (S_s-4) 856ガルは 5.58 倍の 4780ガルとなる。

◆高浜原発：震源については大飯原発と同じなので、武村・片岡他2を用いた場合の現行に対する倍率は同じ 5.58 倍になる。現行で入倉・三宅式を用いている断層モデルでの最大加速度は S_s-3 の 396ガルなので、その 5.58 倍で 2210ガルとなる。

◆美浜3号：現行ではC断層(逆断層)の S_s-3 の場合(基本ケースまたは短周期 1.5 倍ケース)が最大加速度 993ガルを与える。断層面積 $S=355.5$ で $M_0=0.70 \times 10^{19}$ 、壇他式による $A=1.0 \times 10^{19}$ となっている。これらを武村式(S)と片岡式2で再計算すると、それぞれ 3.32×10^{19} 、 4.24×10^{19} となる。それゆえ A は現行の $4.24/1.0=4.24$ 倍となるので、最大加速度は $993 \times 4.24=4210$ ガルとなる。ちなみに片岡他1で計算した場合、 $A=2.86 \times 10^{19}$ で最大加速度は $993 \times 2.86=2840$ ガルとなる。

◆玄海原発の竹木場断層(横ずれ断層)：断層面積が $S=299.29$ で、現行では $M_0=0.498 \times 10^{19}$ 、 $A=0.905 \times 10^{19}$ である。武村式(S)と片岡他2を用いた場合、 $M_0=2.36 \times 10^{19}$ 、 $A=3.48 \times 10^{19}$ となるので、短周期レベルは $3.48/0.905=3.85$ 倍になる。故に、入倉・三宅式と壇他の式を用いて計算した現行最大加速度(S_s-3)524ガルはその 3.85 倍の 2017ガルになるというのが結論である。

4. 結論—入倉・三宅式と壇他の式による過小評価を改めよ

規制庁は 2016 年 7 月 27 日付資料1で次のように述べている。「また、審査に当たっては、入倉・三宅式が他の関係式に比べて、同じ断層長さに対する地震モーメントを小さく算出する可能性を有していることにも留意して、断層の長さや幅等に係る保守性の考慮が適切になされているかという観点で確認してきている」。ここで入倉・三宅式が過小評価になるのを認めていることを確認しよう。ただし、それを断層長さなどの考慮でカバーしていると述べている。入倉・三宅式の過小評価は、本来別の経験式を適用する

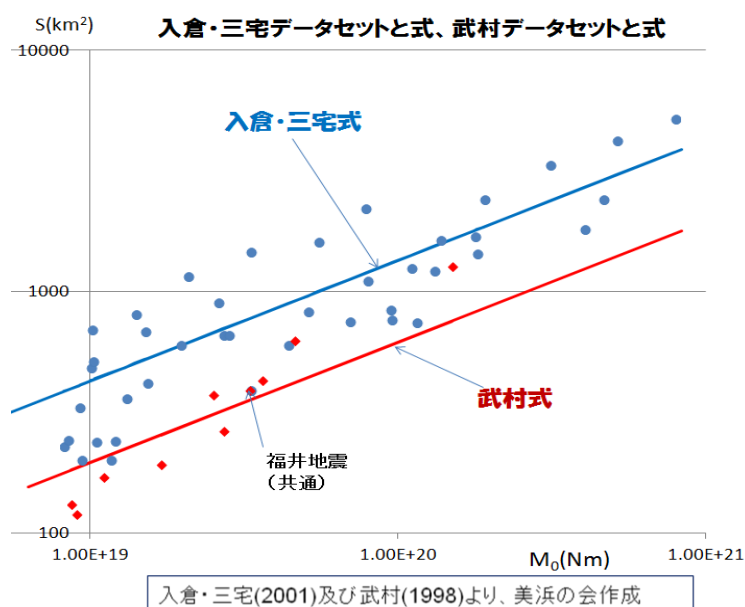
ことによってカバーすべきであるのに、断層長さの取り方にすり替えているのである。

なぜ武村式に置き換えることでカバーしないのかについては、規制庁は同じ資料1で次のように述べている。「震源断層の詳細な調査結果を用いて、レシピの(ア)の方法(引用者註:入倉・三宅式を用いる方法)以外の方法によって基準地震動を作成するというアプローチについては、どのように保守性を確保していくか(断層長さの設定(連動の考慮を含む)、各種の不確かさの取り方等)に関し、妥当な方法が現時点で明らかになっていないとは言えず、規制において要求または推奨すべきアプローチとして位置付けるまでの科学的・技術的な熟度には至っていないと考える」。この文面では、武村式を用いる方法を否定して、それを用いるだけの「科学的・技術的な熟度には至っていない」と判断し、後の手当を無責任にも放棄している。ところがここで示したように、壇他の式を用いるのを止めて片岡他の式に置き換えさえすれば、矛盾は簡単になるのである。

武村式を用いるだけの「熟度には至っていない」と判断するのであれば、まずは原発の運転を許可することをやめるべきではないだろうか。

武村式は架空の式ではなく、実際に起こった地震から導かれた式である。たとえば、現に起こった福井地震は、グラフ上でまさにほぼ武村式の上に乗っている。つまり、福井地震と同様の地震が起これば、武村式のような揺れ方が実際に起こるということである。それを扱う「熟度には至っていない」として、審査を放棄することが許されるのだろうか。

壇他の式を用いるのをやめて、片岡他の式を用いれば未熟問題は起こらない。武村式と片岡他の式を用いて基準地震動を評価し直すべきである。



(補足説明) 第1章の主旨に関する諸式を導く過程について

ここでは、第1章の主旨で述べた諸式とそれらの相互関係が導かれる過程について説明する。その中で、壇他と片岡他の式についても説明し、壇他の式が過小評価になる理由にも触れることにしたい。下記での単位は、 $S(\text{km}^2)$ 、 $M_0(\text{Nm})$ 、 $D(\text{m})$ 、 $A(\text{Nm}/\text{s}^2)$ であり、他はその都度示す。

(1) D- M_0 関係式の導出

平均すべり量 D と M_0 の関係はレシピ(10)式より次式で与えられる。

$$M_0 = \mu DS \quad (\text{剛性率} \times \text{平均すべり量} \times \text{断層面積}) \quad (1)$$

他方、Somerville 他¹⁾の式は次式である(入倉・三宅(2001))。

$$M_0 = k_S S^{3/2}; \quad k_S = 9.496 \times 10^{14} \quad (2)$$

入倉・三宅式や武村式(武村(1998))は、 $M_0 \geq 7.5 \times 10^{18}$ において次式で与えられる。

$$M_0 = k S^2 \quad (3)$$

$$k = k_M = 5.562 \times 10^{13} \quad (\text{入倉・三宅})$$

$$k = k_T = 26.30 \times 10^{13} \quad (\text{武村})$$

式(1)から求めた $S = M_0 / (\mu D)$ を式(2)及び(3)の S に代入して整理すると、それぞれ次の平均すべり量の式が得

られる。

$$D=(1/\mu)k_s^{2/3}M_0^{1/3} \quad (\text{Somerville 他より}) \quad (4)$$

$$D=(1/\mu)k^{1/2}M_0^{1/2} \quad (\text{入倉・三宅式または武村式より}) \quad (5)$$

こうして、入倉他の学会予稿集で示唆されたとおりの平均すべり量と M_0 の関係が得られた。

(2) A- M_0 関係を表す壇他の式と片岡他の式

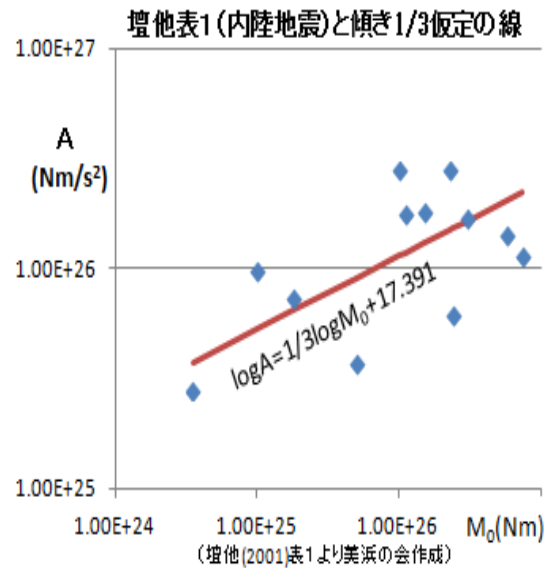
入倉・三宅式や武村式などの経験式を用いて断層面積 S から震源の規模を表す地震モーメント M_0 を算出した後、次に問題になるのは地表面（基盤）における地震動（最大加速度）を導く方式である。最大加速度は短周期レベル A に比例するが、その A を M_0 から導く式が壇他や片岡他によって求められている。

(a) 壇他の式（壇他（2001））

現在はレシピにおいても各原発の断層モデルにおいても、壇他の式が用いられている。その式は右図が示すように 12 個の内陸地震データから最小二乗法によって求められている。12 個中で日本の地震はただ一つ、兵庫県南部地震だけであり、他は 1 個のイラン地震を除けばすべて北米大陸北西部の地震である。式を求める際、直線の傾き（図中の式の $\log M_0$ の前の係数）は $1/3$ をとるものと頭から仮定されて、残りの切片だけが最小二乗法で求められている。その式は次式と同等である。

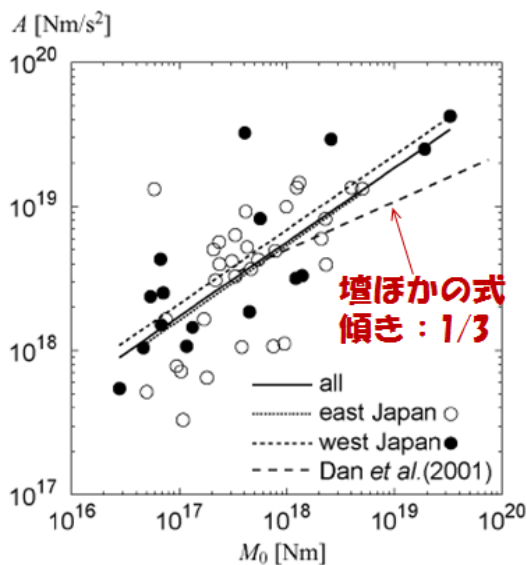
$$A=5.300 \times 10^{12} M_0^{1/3} \quad (6)$$

短周期レベル A が $M_0^{1/3}$ に比例していることに注目しよう。

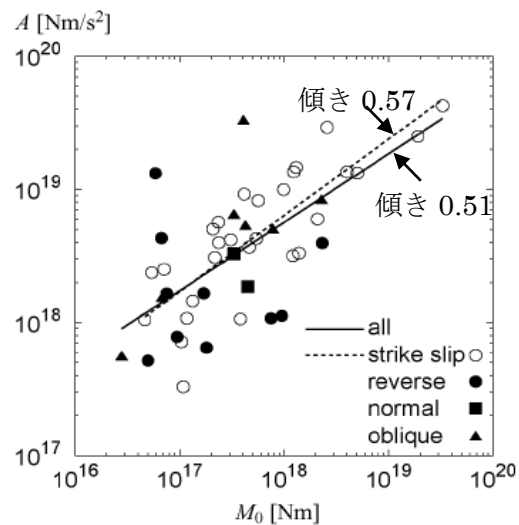


(b) 片岡他の式（片岡他(2006)）

片岡他の式は下図が示すように、やはり内陸地殻内地震から最小二乗法によって導かれているが、壇他との違いは第 1 に、すべて日本の地震だけを用いている。第 2 に、壇他のように傾きを $1/3$ に固定するのではなく、傾きも含めてデータから最小二乗法によって導びかれている。下図は片岡他の図-4 であるが、左図(a)は地域的な区別を、右図(b)は断層のタイプによる違いを表している。右図で横ずれ断層(strike slip)の場合は傾きが 0.57、それも含めた全内陸地震断層の場合は傾きが 0.51 で、いずれもほぼ $1/2$ に近い値をとっていることに注目しよう。



(a) 地域で分類



(b) タイプで分類

図-4 内陸地震の A と M_0 の関係

結局片岡他の式は上記2つの傾きの場合に応じて次式となる。

・片岡他1： $A=3.162 \times 10^9 M_0^{0.51}$ (全内陸地震) (7)

・片岡他2： $A=3.162 \times 10^8 M_0^{0.57}$ (横ずれ内陸地震) (8)

(c) 壇他の式が過小評価になる理由

片岡他と比べて壇他が過小評価になる理由は、第1に傾きを頭から1/3仮定したことにあるが、さらに第2の重要な理由は、ほとんどすべてのデータを北米大陸の北西部地震からもってきたことにある。それらの地震では日本の地震と比較して過小評価になることが、すでに Somerville や入倉他によって次のように指摘されている。「日本と北西アメリカの地殻内地震では、明らかな違いがあることがわかった。同じ地震モーメントの地震に対して、アスペリティで占められている面積はほぼ等しいか(マ、 「が」の誤記か?),日本の地震の破壊面積は小さく、平均すべり量は大きい」(1993年地震工学研究発表会)。

(3) 入倉・三宅式等から導かれる A-M₀ 関係の壇他式等との比較

これまで小節(1)において、入倉・三宅式等から D-M₀ 関係式(4),(5)を導いたが、次にそれらを A-M₀ 関係式に焼直し、上記小節(2)の壇他や片岡他の式と比較しよう。

まず、レシピ(13)式を変形すれば、次式が得られる。

$$A = (7\pi^2/4)\beta^2 \mu D / \gamma^{1/2} \tag{9}$$

(βはS波速度で大飯3.6km/s、玄海3.5km/s、 $\gamma = Sa/S$ [アスペリティ面積/断層面積])

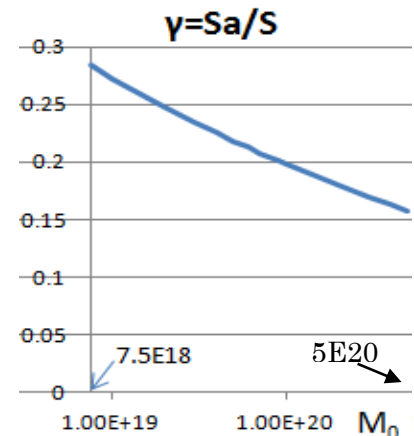
これに小節(1)におけるDの式((4)、(5)式)を代入すれば、次式が得られる。

$$A = (7\pi^2/4)\beta^2 (k^{2/3} / \gamma^{1/2}) M_0^{1/3} \text{ (Somerville 他}^\wedge\text{-式)} \tag{10}$$

$$A = (7\pi^2/4)\beta^2 (k/\gamma)^{1/2} M_0^{1/2} \text{ (入倉・三宅}^\wedge\text{-式 or 武村}^\wedge\text{-式)} \tag{11}$$

この(11)式は、(3)式のkの値に応じて「入倉・三宅ベース式」または「武村ベース式」と呼ぶことにする。

これらの結果を壇他の式及び片岡式1及び2と比較した結果は2頁の図で示したとおりであり、それから得られる結論もそこに示した。



(補足)

上記の諸式ではアスペリティ面積の断層面積に対する比 $\gamma = Sa/S$ は大飯原発などでとられている値 $\gamma = 0.22$ に固定したが、武村ベース式と片岡他2式が一致するように γ を決める方法も考えられる。その結果、

$$\gamma = 124.63 / M_0^{0.14} \tag{12}$$

となり、その挙動は右グラフのようになって、 $M_0 = 4.65 \times 10^{19}$ のとき $\gamma = 0.22$ となる。

◇主要な文献

- ・入倉・三宅(2001)：入倉・三宅、地学雑誌、Journal of Geography、110 (6) 849-875, 2001
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/110/6/110_6_849/_pdf
- ・武村(1998)：武村雅之、地震第2輯第51巻(1998)211-228頁
https://www.jstage.jst.go.jp/article/zisin1948/51/2/51_2_211/_pdf
- ・壇他(2001)：壇一男他、日本建築学会構造系論文集 第545号、51-62、2001年7月
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110004304876> (有料)
- ・片岡他(2006)：片岡正次郎他、土木学会論文集A、Vol.62,No.4,740-757,2006,10
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsceja/62/4/62_4_740/_pdf