

# 地震動の確率予測

## (J-SHIS 及びべき乗則によるハザードカーブの比較)

2018年11月20日

河村 廣

### まえがき

本サイトの小窓「耐震・防災・談話室」における前稿「活断層、一寸先は仄かな暗闇 ー大阪北部地震を体験してー」では、本年6月の大阪北部地震が現存の有馬高槻断層帯、上町断層帯、生駒断層帯の近傍で生じたのを機に、当時としてはホットな知見を集め、過去、現在、将来に向けての当該直下型地震のイメージ化を意図しました。

本稿ではさらに最新の地震動予測法とされている J-SHIS のハザードカーブと、筆者が本小窓の既往の「地震のマクロスケッチⅠ、Ⅲ」で提示したべき乗則によるハザードカーブとの定性的な比較を試みるものです。

### J-SHIS のハザードカーブ

この度改めて文献[1]の全国地震動予測地図や文献[2]の地震ハザードカルテを開き、さらに解説編[3]にも目を通してみました。

内容は、地震タイプのプレート内外および境界のカテゴリ分けと地域分け、震源断層モデルの設定、地震波伝播における距離減衰、

サイトの地下構造の設定、地震の発生確率、サイトにおける地震動の確率論的評価などなど地震学における最新の科学技術的知見の集積です。筆者を含めて基礎知識の不十分な門外漢がその全貌を理解することは一朝一夕にはできるものではありません。

一市民として最も身につまされる情報は地震ハザードカルテです。全国が 250m メッシュで区切られ、調べたい住所をインプットすると該当メッシュにおける地震動予測情報がカルテ形式で A4 判一面に表示される優れたものです。表 1 は一例として某所における地震ハザードカルテの一部ですが、ハザードカーブを主として切り取り表示したものです。

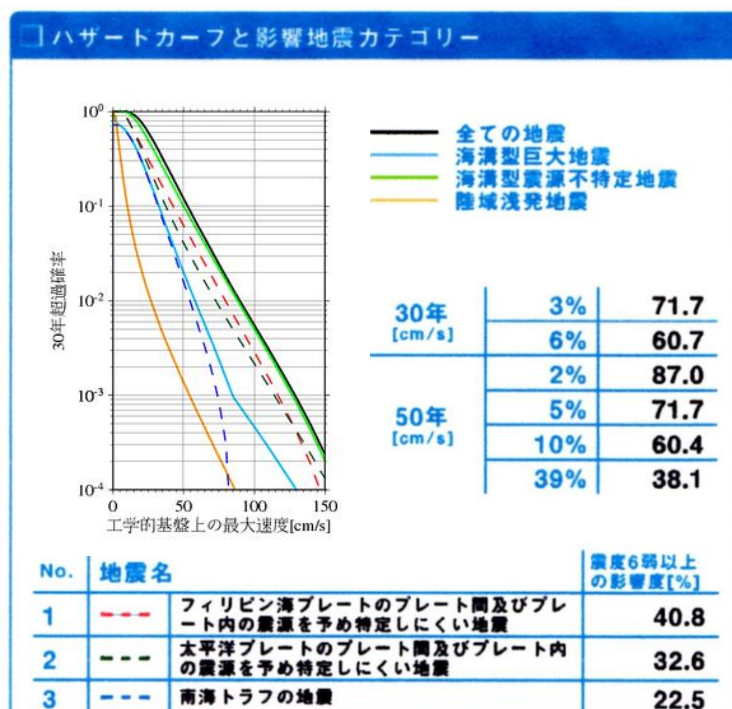


表 1 某所地震ハザードカルテ[2]の一部

### べき乗則によるハザードカーブ

本サイトの「地震マクロスケッチⅠ（確率と再来周期）」では被災地における震度  $I$  以上の累積度数分布  $N(I)$  を次式のように導きました。 $c', d$  は常数です。

$$\log N(I) = c' - d I \quad (1)$$

元式としては、ある地域、ある期間内における震度  $I$  ごとの地震の度数  $n(I)$  と震度  $I$  との関係が観測結果から次式のように求められています[4~7]。 $c, d$  は常数です。 $d$  は全国的にみて大よそ 0.5 とされています。

$$\log n(I) = c - d I \quad (2)$$

上式は離散的な震度  $I$  ごとに得られたものですが、平成 8 年から自動観測された計測震度が用いられ、震度も強、弱が付されるようになりましたので、連続量として記述する必要があり、(ある震度以上の) 累積度数分布  $N(I)$  に置き換えるため式 2 の  $n(I)$  を震度  $I$  で積分して式 1 を導きました。

一方、「地震マクロスケッチⅢ（べき乗則と震災過程）」では、建物の耐震設計に用いられる地盤振動の最大加速度を  $A$  とおけば、震度  $I$  により大よそ次式の関係で与えられることを示し[8.9]、 $g, h$  は常数ですが、 $I$  の係数  $h$  は 0.5 で与えられています。

$$\log A = -g + h I \quad (3)$$

以上より、式 1 と 3 から  $I$  を消去すれば、最大加速度の累積度数分布として次式を得ます。

$$\log N(A) = c' - \frac{gd}{h} - \frac{d}{h} \log A \quad (4)$$

$d, h$  は共に略 0.5 ですから、上式から  $N(A)$  は  $A$  に対して両対数軸座標で -1 の負勾配の直線となり、べき乗則に従っていることが分かります。

式 1、3、4 は 図 1、2、3 のように示されます。

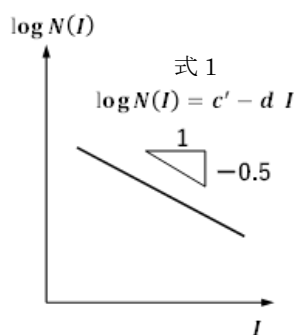


図 1  $\log N(I) - I$  関係

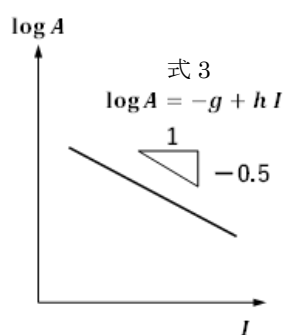


図 2  $\log A - I$  関係

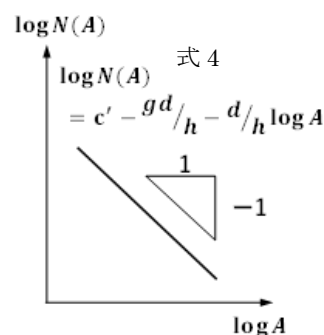


図 3  $\log N(A) - \log A$  関係

なお図 3 の負勾配 -1 はやはり古典に属する以下の経緯によっても導くことができます。

石本、飯田の式[10]として有名ですが、東大地震研において観測された地震について最大振幅（ここでは変位） $A$  と頻度（ここでは  $\Delta A$  間における度数） $n(A)$  に関する次式があります。 $m$  は 1.74 とされています。

$$\log n(A) = k - m \log A \quad (5)$$

上式 ( $A$ よりも大きい) 累積度数  $N(A)$  を積分で求めると下式を得ます。

$$\log N(A) = \log k/m - 1 - (m - 1) \log A \quad (6)$$

一方、浅田、鈴木、友田は上式の  $m$  が G-R 式 ( $\log n(M) = a - b \log M$ ) の  $b$  と次式の関係にあることを導きました[11]。

$$m = b + 1 \quad (7)$$

さらに、他地域の地震についても検討すると、 $m$  は 1.8, 1.9 になるとされていますから、式 6 の  $\log A$  の係数はおおよそ 0.8, 0.9 となり、他方 G-R 式の  $b$  はおおよそ 1 とされていることから、おおよそ負勾配 -1 とみることができます。補足すれば、石本、飯田は同文献[10]において  $A$  を最大加速度としても  $\log A$  の勾配は略 -1 となることを示しています。

参考文献[4]~[11]が地震学の先達によるものとはいえ、最早今日では顧みられることは殆どありません。

### J-SHIS とべき乗則のハザードカーブの比較

本稿で比較の対象とするのは表 1 の左上の図 (以下**最新**と略記) と図 3 (以下**古典**と略記) の両ハザードカーブです。**最新**は、1995 年阪神大震災以後、地震観測点数、計器の精度そしてコンピュータによる解析技術が飛躍的に増大し、政府主導で最新の知見を集約総合して導かれたものです。**古典**のほうは戦前戦後を通じて地震学の先達が手塩にかけて導いたもので、一般市民も誘導経緯をトレースできます。**最新**では地震のタイプから地域性まで詳細に考慮されていますが、**古典**では全国的な平均像を目指し、地盤も卓越周期 0.3 秒前後がイメージされています。**最新**では全ての地震の合成が**古典**に対応するものと思われます。座標軸のうち横軸は**最新**ではリニアスケールで工学的基盤上の最大速度ですが、**古典**では対数軸で地表の最大加速度になっています。縦軸は**最新**では超過確率 (当該最大速度以上の地震動の生じる確率) ですが、**古典**では累積度数 (当該最大加速度以上の地震動の生じる度数) ですから総地震発生度数で割れば超過確率になります。**古典**のほうは両対数軸ですから、**最新**の物理量に合わせる操作を行っても単に常数の乗除ならば、負勾配の大きさは変わりません。

表 2 は周知の JSCA の建物の性能評価概要図ですが [12]、左下の建築基準法による最低性能から右上に向か

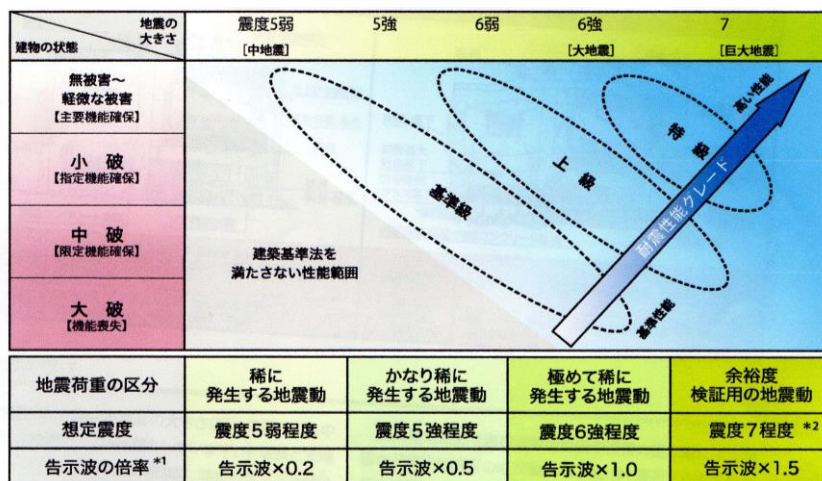


表 2 JSCA 建物性能評価の概念図[12]

って性能の増大する様子が描かれています。基準法で想定されている地震動も超過確率で評価されていますから、あくまでも最低値であってそれ以上の地震動が来ることも想定されています。従って、その対策として余力をみて性能を右上方向にアップすることに性能設計の意味があります。具体的には地震動の大きさを大きくすると発生(超過)確率は減少し、再来周期 (J-SHIS や JSCA では再現期間) は長くなります。

ここで性能アップの計算例を表 1 の**最新**のハザードカーブに戻って示します。

仮定ですが工学的盤基盤の最大速度が法的に 25cm/sec とされているとすれば、30 年超過確率は略 50%ですが、性能アップとして最大速度を 2 倍の 50cm/sec に増せば、略 10%に減少します。再来周期については、30 年超過確率が略 50%ですから、 $30 \text{ 年} \div 0.5 = 60 \text{ 年}$ としていたのが略 10%として  $30 \text{ 年} \div 0.1 = 300 \text{ 年}$ に伸びることになります。(厳密に言えば超過確率から求めていますから、再来周期はその値以上と解するべきでしょう。)

一方、図 3 の**古典**のハザードカーブで考えますと、両対数軸で-1 の勾配ですから、最大加速度を 2 倍にすれば超過確率は 1/2 になり、再来周期は超過確率の逆数ですから 2 倍になります。上の例に当てはめると、超過確率は 50%からの 1/2 の 25%に、再現周期は 60 年から 2 倍の 120 年になります。

上記の相違は耐震工学的には極めて大きいとみるべきでしょうが、経済性や建物の寿命なども関係しますので、詳しい議論は別稿に譲ります。ただし、J-SHIS でも実際の地震の起こり方に違和感を訴える人が多いため、地震および地震動は確率の大きさの順に起こるわけではないとか[13]、非常に小さな確率でも起こり易さの評価の程度を上げる方向に修正していますので (文献[1]の手引き編の p.5)、解釈にはいろいろと配慮しているようです。

本稿では話を簡単にするため相対比較にとどめています。定性的に言えば**最新**のように横軸がリニアスケールの片対数軸座標で負勾配の直線は、**古典**のように横軸も対数スケールの両対数軸座標では単調減少ながら右上方に凸状のカーブになり、地震動が大きくなると**最新**では**古典**よりも超過確率が早く減少することになります。しかし**古典**の場合は横軸の地震動の大きさがゼロの近づく観測の限度から直線の左端が切られ、横軸の値が大きくなると地域や観測期間の影響により観測地震動の最大値にも限界があり直線の右端が切られます。従って**古典**においても形状的には右上方に凸状とみることもできますが、自然界にこのような上下限界はなく、あるとすれば人工的な作為によるのかもしれませんが。

**古典**のハザードカーブを定量的に議論するには、度数分布を求める際の源データの地域、期間、データ中最大の地震の大きさ、総地震度数、サイトの地盤構造などが必要になりますので、今後の課題としてここでは詳細は省略させていただきます。

## まとめ

本稿では**最新**の知見と技術の集大成としての J-SHIS の地震ハザードカルテの中のハザードカーブと地震学の先達が導いたハザードカーブとの比較検討を試みました。技術的に見れば**最新**はデジタルの、**古典**はアナログの時代の申し子とも言えるでしょう。

併せて基準法よりもプラスアルファを考慮する JSCA の建物の性能評価法にも触れ、ハザードカーブはその考え方の根幹にも資することも示しました。

今や古典のハザードカーブにも、①表現が簡潔、②その拠って来る経緯が一般市民にも理解が容易、③応用法も簡明、などの利点があることを示すのが本稿の目的でした。

しかし最後に強調したいのは、森羅万象における創生と崩壊において普遍的にみられる「べき乗則」[14] に、この古典のハザードカーブが従っていることです。地震現象も地殻の崩壊過程であり、べき乗則もその本質に迫るものですので、安直に看過できないと思っています。

#### 参考文献：

- [1]政府地震調査研究推進本部：全国地震動予測地図 2018 年版  
[https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/shm\\_report/shm\\_report\\_2018/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2018/)
- [2]防災科学技術研究所 J-SHIS 地震ハザードカルテ  
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/karte/>
- [3]文献[1]中の解説編  
[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/18\\_yosokuchizu/yosokuchizu2018\\_tk\\_3.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/18_yosokuchizu/yosokuchizu2018_tk_3.pdf)
- [4]中村左衛門太郎：関東大震災調査報告、震災予防調査会、震災予防調査会報告、第百号（甲）、pp.67~140, (1925 年)大正 14 年 3 月。
- [5]池上良平：日本における有感地震回数と震度との関係、日本地震学会、地震、第 2 輯、14(2), 1961, pp.94~101.
- [6]宇佐美龍夫、勝又護：震度別有感地震回数、気象庁、験震時報、第 38 巻、1973,pp.15~21.
- [7]石垣祐三：明治・大正時代の震度観測について－震度データベースの遡及－、気象庁、験震時報、第 70 巻、2007, pp.29~49.
- [8]河角廣：震度と震度階、地震、第 1 輯、第 15 巻、pp. 6~12, 1943.
- [9]宇津徳治：地震学、共立全書、昭和 53 年（初版 3 刷）、pp. 111~114.
- [10]石本巳四雄、飯田汲事：微動計による地震観測（一）地震動の大きさ、空間分布、東大地震研究所、彙報、第 17 号、第 2 冊、1939、pp.443~478.
- [11]浅田敏、鈴木次郎、友田好文：地震の頻度とエネルギーについて、日本地震学会、地震、3 巻 1 号、1950、pp.11~15.
- [12]JSCA 技術委員会：安心できる建物をめざして JSCA 性能設計[耐震性能編]、2018. 3.  
<http://www.jsca.or.jp/vol5/p4/pamphlet2.php>
- [13] 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション、地震の発生確率と地震動の超過確率  
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/two-probabilities#more-888>
- [14]例えば：マーク・ブキャナン原著、水谷淳訳：歴史は「べき乗則」で動く、種の絶滅から戦争までを読み解く複雑系科学、早川書房、2009. 8.