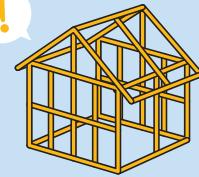




連続テーマ「地震と地震動」②

知っているようで知らない地震と地震動の話 —震度とは何か、どうやって決めるのか



■震度とは？

この「知っておきたい基礎シリーズ」では連続シリーズとして、地震と地震動にまつわるテーマをその都度とりとめもなく取りあげて、筆者の気の向くままに解説していきます。今回はその第二弾で前回の続きになります。

前回の話題は震度とマグニチュードの違いについてでしたが、マグニチュードの解説をただで紙面が尽きてしまいました。その際に、震度はある場所の「地震動（地面の揺れ）」の強さを表している、ということを申し上げました。そしてマグニチュードと同様に、震度も揺れの強さを表す便利な尺度として発案された値であって、物理量ではないという話をいたしました。震度もマグニチュードほどではないのですがいくつかの種類があります。

しかし現在我々が普段から目にしている気象庁が速報している震度、いわゆる気象庁震度は1996年に導入された「計測震度」¹⁾で、それ以前の本来の、というか普通の「震度」（英語ではSeismic Intensity）ではありません。普通の震度とは何かについては最後の章で解説しますが、1996年以前の我が国では、専ら訓練された気象庁（測候所）職員によって、感じた揺れおよびそれが引き起こした被害を含む様々な事象に基づいて震度が判断されており、これは別名「体感震度」と呼ばれています。

一方、現状の計測震度とは、地震の発生後より速やかに一般市民に知らせたいという目的から、その速報性を重視して「震度計」という震度観測専用の機器、すなわち加速度地動を観測してその値から震度を計算する機能が付加された強震計（強い揺れを観測できる地震計のこと）を用いて求められる値のことです。それはどのように求められ、それがどういう意味を持っているかを、本来の震度との対比をしつつ、これから解説していきます。

ちなみに、現在震度を速報している国は我が国以外には台湾が知られていますが、台湾の震度は実は超高層住宅等に多大な被害をもたらした1999年の集集地震までは、加速度を測る普通の強震計で得た観測波形の最大加

速度PGA (cm/s²) をそのまま以下の「河角式」²⁾に代入して求める「加速度換算震度」でした（ただしPGA \geq 400 cm/s² は震度VII^{2) 3)}）。

$$I_k = 2 \log (\text{PGA}) + 0.7 \quad (1)$$

なお集集地震以降は大震度域では最大速度PGV (cm/s) を用いた経験式による震度に変更されています³⁾。

このPGAを用いた河角式は現在の計測震度の計算¹⁾においても基本式として使われているのですが、実は河角のオリジナル論文²⁾においては、(1)式ではなく、体感震度 I_k からPGAを逆推定する次式が提案されていたのです。

$$\text{PGA} = 0.45 \times 10^{0.5 I_k} \quad (2)$$

この理由は、最大加速度が測られている地震計が置いてあったサイトに比して、体感震度 I_k が計測または推定されている地点の方が多かったので、経験式でPGAを推定するニーズの方が高かったからと考えられます。しかし、よく知られているように、ある変数（説明変数）から別の変数（従属変数）への写像として回帰（最小二乗法）で得られた線形関係は、同じデータを用いても逆の順序で回帰をすると必ずしも同じ線形関係とはなりません。両者が同じ関係になるのはデータの直線性が高く、回帰係数R²が1かそれに近い場合に限られます。当時の観測データの少なさと、そもそも体感震度は様々なパラメーターが影響する複雑な値であることを考えると、この(2)式から(1)式への変数の入れ替えは、今から見たらかなり乱暴なものだと言わざるを得ません。

なお河角の論文²⁾には各震度（正確には震度階級もしくは震度階）のPGAの上限と下限が示されており、次式

$$\text{PGA} = 0.800 \times 10^{0.5 I_k} \quad (3)$$

が I_k の上限、次式

$$\text{PGA} = 0.253 \times 10^{0.5 I_k} \quad (4)$$

がその下限とされていました。このことから例えば、旧震度の震度Vの下限（=震度IVの上限）はPGA換算では80 cm/s²、震度VIの下限（=震度Vの上限）は253 cm/s²、震度VIIの下限（=震度VIの上限）は800 cm/s²

になります(ただし、被害の様相に鑑みて震度VIIの下限だけは特例的に400 cm/s²にすることを河角²⁾は提案していました)。ちなみに同じ換算方法で現在の計測震度の震度階級であるVI弱とVI強の境目を推定すると450 cm/s²になります(V弱とV強の境目なら145 cm/s²)。

実はこの閾値は、2005年に姉歯問題が持ち上がった際に国土交通省がマスコミから「日本の耐震設計は震度いくつに耐えられるように計算しているのか?」と聞かれた際に「(旧耐震および一般構造物では)震度V弱程度の地震です」と答える羽目になった際の根拠でした。それは許容応力度設計の設計震度C₀=0.2を応答加速度200 cm/s²と見なし、それに建物の応答倍率(地動に対する建物応答の比)を2.5として地動の加速度PGAに換算した値80 cm/s²に相当します。この一次設計で80 cm/s²相当の地震動、C₀=1.0の二次設計では同じ換算で400 cm/s²相当(なので震度換算ではVI弱相当)の地動相当であるという設計荷重のPGA換算値は、実は新耐震設計法にC₀を導入した際に既に色々な文献に提示されてしまっていたので変えようがありませんでした。もちろん国交省は「実際にはその設計でできた建物は震度VIIにも耐えられる」と注釈をつけることは忘れませんでしたが。

■計測震度とは?

では現在気象庁が速報値として提供している震度情報である計測震度はどのように求められているのでしょうか? 計測震度は次の6つのステップを経て観測された加速度波形の最大値から求められています^{1) 4)}。

- ①観測加速度波形3成分にフーリエ変換を施してそのフーリエ・スペクトルを求める。
- ②得られたスペクトルに図-1のようなバンド・パスフィルター特性を持つ振幅フィルターを乗じる。ここでローカットフィルターのカットオフ周波数は0.5 Hz(周期2秒)、ハイカットフィルターのカットオフ周波数は10 Hz(周期0.1秒)である。その間の周波数帯では1/f^{0.5}の傾き(周期ではT^{0.5})を与える。
- ③得られたフィルター後スペクトル振幅と元の観測波の位相から逆フーリエ変換を施してフィルター加速度波形を求める。
- ④得られた3成分のフィルター加速度波形を時間軸上でベクトル合成する。
- ⑤合成した加速度波形で、その値を超える時間の合計が0.3秒になるような最大加速度値PGA_{0.3}を求める。
- ⑥得られたPGA_{0.3}を、係数を補正した河角式

$$I_{JMA} = 2 \log (PGA_{0.3}) + 0.94 \quad (5)$$

に代入して計測震度I_{JMA}を求める。

ここで図-1のフィルター特性の意味を説明します。まず高振動数(短周期)域の地震動は体感や被害に大きな寄与をもたらさないのでシャープにカットします。同様に低振動数(長周期)域の地震動も徐々に影響度が下がるのでこっちは緩やかにカットします。中央部分の重要な振動数帯域は加速度のままよりも加速度と速度の中間的な尺度が体感や被害によく対応すると考えられるので、その中間的尺度に直すために周波数fあるいは周期Tの平方根を取って補正します。なお図-1で旧計測震度とある赤線は、1988年の震度観測検討委員会が最初に提示した計器による震度の計算方法において提案されたフィルター特性です⁴⁾。最終版が青線になります⁵⁾。

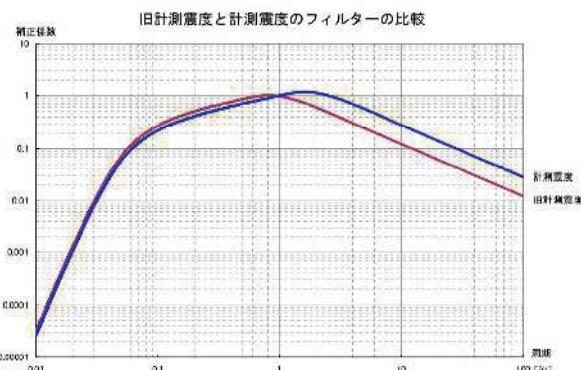


図-1 加速度波形から計測震度I_{JMA}を求めるためのフィルター波形を計算するのに用いるフィルター特性(周期軸)^{4) 5)}

さて、ここからは細かい話です。式(5)と式(1)を比較すると、補正係数が片や0.94、片や0.7と異なっています。数式の上ではこの補正係数の差は図-1によって加速度波形の振幅を補正し、しかも⑤で0.3秒の継続時間を必要としていることから、式(5)で用いられるPGA_{0.3}は観測波形の生のPGAに比して小さめになることを反映したものと解釈することができます。しかし、そもそも震度問題検討会の報告書⁴⁾に記載のオリジナルの計算式は

$$I_{JMA} = 2 \log (PGA_{0.3}) + 0.7 + \log (k) \quad (6)$$

となっており、このkは最終案では1.75とされています。もしもそれが計測震度の正確な定義なら補正係数は0.7 + log (1.75) = 0.94304でなければなりません。しかし気象庁監修の解説本¹⁾に添付されている震度計算プログラム例でも式(5)の0.94が用いられており、0.003の誤差が生じています。私はこの差が気になって仕方ありません。

■震度と震度階級とは？

以上のように、気象庁は1996年11月以降速報する震度を全面的に計測震度に変えました。計測震度は(5)式で得られた値を小数点2桁目で四捨五入して小数点1桁の数値に直したものとされています。

一方、計測震度導入以前の震度は1884年に最初に全国規模で微・弱・強・烈の4段階で揺れが観測され報告されるようになった時点から歴史的に、連続値ではなく飛び飛びの値として認識されてきました。これを震度階級あるいは震度階と呼びます。これまで申し上げてきた体感震度はですから震度階級のことを意味していました。この震度階級の運用においては、それぞれの震度階級に対応する各種の事象が記述されており、それが震度を決める際の基準とされていました。従って地震の揺れによって発生する事象と震度階級とは一対一に対応し、ある事象が生じた場合にはその事象の出現によって震度階級が決まっていたわけです。例えば1948年福井地震を受けて木造建物倒壊率30%以上という震度VIIが制定される以前の、1936年版の震度階級表では強震Vとは

「壁に割れ目が入り、墓石・石灯籠が倒れたり煙突や土蔵も破損する程度の地震」

で、最上位の烈震VIとは

「家屋が倒壊し山崩れが起り、地割れを生じる程度以上の地震」

とされています（ここで地震と記載されているのは揺れのことです）。ただし、定義の最後が「～程度（以上）の地震」となっているのは、その事象が起こったことを実際に見た場合のみそう判断するということではなく、そういう事象が起こりうるレベルの揺れであったと訓練された測候所所員が判断するという意味でした。そういつも近くに石灯籠があるわけはないですからね。

しかし計測震度によって従来の震度が置き換えられた段階で、気象庁震度階級は小数点1桁で定義されている計測震度を0.5（V～VIの弱と強）または1（0～IV）間隔で丸めた値であると定義されました。このことは、地震の揺れによって生じる事象と震度階級との直接的な対応関係が切れてしまったことを意味しており、その結果防災情報としての意味が不明確になってしまいました。

そこで気象庁は、入力値の指標である計測震度が、地面の揺れによって生じる出力値としての各種事象の発生を的確に予測できるとの前提のもとで、計測震度の震度階級に対応した「震度階級関連解説表」なるものを作成し公表しました。これは震度階級ごとに、その観測点周辺でどのような現象や被害が発生することが多いかを、

細かく記述したものです。例えば木造建物の被害に関しては震度VI強では

「耐震性の低い住宅では、倒壊するものが多い。耐震性の高い住宅でも、壁や柱がかなり破損するものがある」

とされています。またそのとき人間は

「立っていることができず、はわないと動くことができない」

とされています。かなり危険な状況です。ただしこれらの事象の発生が保証されているわけではありません。

実際①から⑥の複雑なステップを踏んでも地面の揺れによって生じる様々な事象を的確に予測できる1つの尺度を求めるることは決して容易なことではありません。当初計測震度が提案された段階では体感震度を再現するよう式(5)の補正係数が決められたのですが、その際に用いられたのは全部が震度V以下の観測値でした。その後比較に用いる観測値が増えて2009年の検討会の報告書では大きな震度においても妥当だとされていますが⁵⁾、震度VIの体感震度を記録した地震動観測地点は4か所だけで、その計測震度は5.6、5.6、6.3、6.4となっています。確かにその4つの平均値は5.98で体感震度と平均的にはよく合っていましたが、統計的に有意に対応していると確信が持てる情報量ではありません。しかし現在では体感震度が把握されていませんので、これ以上の計測震度の妥当性に関する統計的な検証は困難となっています。

■普通の震度とは？

以上、我が国では1996年までの被害等揺れが引き起こす現象に直に対応していた体感震度と、1996年以降速報されている機械で計測された揺れの強さそのものを表す計測震度があり、現在全国で気象庁だけでなく地方自治体が設置した震度計も含めて4,000点以上の地点で震度が観測され、地震後可能な限り速やかに発表されています。ちなみに速報する観点から、先に説明した式(5)の計算は速報時には記録開始から10秒ごとに区間を区切って計算し、計算し終わり次第次々に気象庁本庁に送信する仕組みになっています。

それでは、最初の話に戻って、普通の震度とは何かについて話しましょう。世界で最初に震度を定義したのはイタリアの物理学者Domenico Pignataroで1780年代のこととされています⁶⁾。彼はイタリアの1,181個の地震を slight, moderate, strong, very strong, violent の5つに分類しました。この時点では、体感震度の最初の

定義と同様に、地震と地震動（揺れ）は峻別されていませんね。

その後、10段階の近代的震度階級が提案されたのは1883年のことで、イタリアのDe RossiとスイスのForelによって提案された⁶⁾ので「ロッシ・フォレル震度階」と呼ばれています¹⁾。1902年Giuseppe Mercalliはこの震度階級の最上位がおおざっぱすぎるとして、それを3分割して12段階のメルカリ震度階を作ります。その後1931年にWood and Neumannが、1956年にマグニチュードの生みの親であるCharles Richterがこのメルカリ震度階を改良しました。これを修正メルカリ震度階（MM震度階）といい¹⁾、米国で広く利用されてきました。

一方、ヨーロッパでは同じくメルカリ震度階を1931年に改良したMercalli-Cancani-Seiberg (MCS) 震度階を使い、その後さらにそれを1964年に改良したMedvedev-Sponheuer-Kárník (MSK) 震度階を使ってきましたが、1988年ヨーロッパ地震学会 (ESC) がその改良が必要としてThe European Macroseismic Scale (EMS) を発表、さらに1998年にその改良版のEMS98を発表し、現在はそれが使われています。ちなみにロシアでは今でもMSK震度階を使っています。

このMM震度階やEMS98震度階の利用方法は、あくまで災害のインパクトを地震発生後に把握するための震度階なので、地震発生後の現地調査が前提となっています。例えば図-2にはTertullianiらが1976年イタリア・フリウリ地震の震度に関し2018年に発表した論文⁷⁾で引用されているKárníkらによる1978年の論文の等震度マップですが、Tertullianiらは同じ地震の被害情報を改めて収集しEMS98の基準で再評価して図-3のような等震度マップを作成しています。

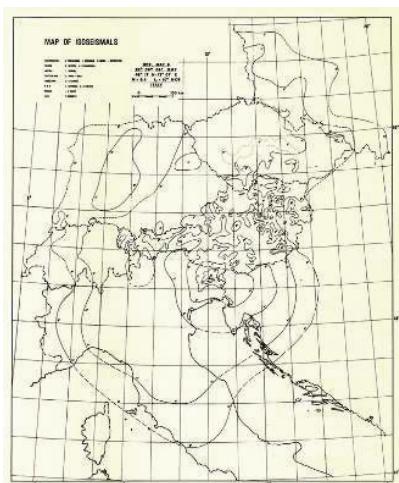


図-2 Kárníkらによる地震後のMSK震度階を用いた調査で作成された1976年フリウリ地震の震度マップ⁷⁾

以上、震度の話は色々学ぶことが多いのですが、PGAとの関係まで紙面が尽きてしまったので、次号ではPGVや他の尺度との関係について解説したいと思います。

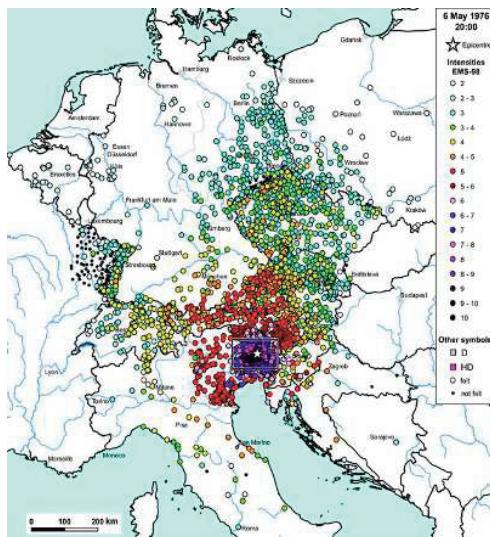


図-3 EMS98震度階により再評価された1976年フリウリ地震の震度マップ⁷⁾

【参考文献】

- 1) 山本孝二 (1996) : 震度を知る, 基礎知識とその活用, 株式会社ぎょうせい, p.238, ISBN-324-04992-0.
- 2) 河角広 (1943) : 震度と震度階, 地震, 15, pp.6-12, および震度と震度階(続), 地震, 15, pp.187-192.
- 3) Wu, Y.-M., Teng, T.-L., Shin, T.-Ch., and Hsiao, N.-Ch., (2003) : Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Intensity in Taiwan, B. Seismo Soc Am, 93 (1), pp.386-396, doi: 10.1785/0120020097.
- 4) 震度に関する検討会(気象庁) (2009) : 第二回検討会, 資料2「震度階級関連解説表」の見直し, 2-1参考資料 <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/jishin/shindokentokai/kentokai2/index.html>
- 5) 国土交通省気象庁・総務省消防庁 (2009) : 震度に関する検討会報告書(平成21年3月), 1. 計測震度と被害との関係について, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/study-panel/shindo-kentokai/kentokai-houkoku/chapter1.pdf>
- 6) Alexander, D. (1993) : Natural Disasters (1 ed.), Springer, p.652, ISBN 978-0-412-04741-1.
- 7) Tertulliani, A., I. CeciC', R. Meurers, I. SoviC', D. Kaiser, G. Grünthal, J. Pazdírková, C. Sira, B. Guterch, R. Kysel, T. Camelbeeck, T. Lecocq, and G. Szanyi (2018) : The 6 May 1976 Friuli earthquake: re-evaluating of macro-seismic data, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 59, pp.417-444, doi: 10.4430/bgta0234.

お問合せ先

試験研究センター 構造部 数値解析室
ペトゥヒン・アナトリ、川瀬 博
〒565-0873 吹田市藤白台5-8-1
Tel. 06-6872-0391 Fax. 06-6872-0784
E-mail : anatoly@gbrc.or.jp, h-kawase@gbrc.or.jp