

合理的な地震動強度指標値の検討

- DI値を中心にした地震動指標値間の関係 -

中村 豊¹

¹株式会社 システムアンドデータリサーチ
 (〒186-0003 東京都国立市富士見台3-25-3)
 E-mail: yutaka@sdr.co.jp

気象庁による計測震度は、便宜的な人工指標値であり、リアルタイムに算定できない。これに対して、DI (Nakamura, 1998) は地震動の仕事率に関係する物理量で、加速度ベクトルと速度ベクトルの内積の対数で定義されリアルタイムに算定できる。DIを基にリアルタイム震度RIを提案した ($RI = DI + 2.4$)。RIの最大値と計測震度の差は、M4～M8の震度1～震度7の地震動910データに対して、平均0.050、標準偏差0.134であった。なおDIの最大値は上下成分を算入しなくても、平均0.013 (標準偏差0.035, 314データ)の差しかなかった。さらにDIに基づいた改正メルカリ震度MMIの算定方法を提示してその妥当性を検証し、RIまたはMMIを加速度と交互にリアルタイム表示する手乗りサイズのデジタル警報地震計を開発した。

Key Words : Instrumental Seismic Intensity, Damage Index, Destructive Intensity, Realtime Intensity, Modified Mercalli Intensity, Peak Ground Acceleration, Quake Monitor, AcCo

1. はじめに

震度の標準化を考えた場合、日本では、好むと好まざるとに拘わらず、計測震度に言及せざるを得ない。しかし、物理的に意味のない人工的指標値である計測震度は、あくまでも便宜的なものに過ぎず、リアルタイムに算定することができないという欠点も持っている。筆者は、地盤の耐震性を評価するために提案した指標値Kg値 (中村ほか, 1990) が、液状化等の地盤被害と対応する以外に、地上の小規模建物の被害とよく対応することに着目して、あたらしい地震動指標DIを提案した (Nakamura, 1998)。DIは、単位時間当たりの地震動パワー、具体的には加速度ベクトルと速度ベクトルの内積の絶対値、の対数で定義される。DIは物理的に意味があり、その最大値DI値は被害とも関連が強いことが容易に推測できる。しかも、リアルタイムに算定することが可能である。DI値と計測震度は一定のずれがあるだけでほぼ同じ特性を示す。ここでは、DI値、最大加速度、計測震度、SI値などを相互に比較した上で、DI値を基にして、リアルタイムに算定・表示できるRI震度 (計測震度相当値) や改正メルカリ震度MMIの計器計測化を提案する。さらに、RI値や計測MMIを最大加速度と交互にリアルタイム表示する手乗りサイズのデジタル警報地震計を開発したので報告する。

2. DI値とその他の地震動指標値について

ここでは、DI値等の地震動指標について概説する。常時微動を用いた地盤の耐震性評価指標Kg値が当該地盤の液状化のみならず、周囲の被害状況とも関連している可能性が見出された (中村ほか, 1993)。DIは、これをきっかけに検討が始められ、1998年に提案されたものである。なお、P波部分のDIの値PI値でP波警報を出すシステム (コンパクトコレダス) が同年より東北新幹線などで稼働している。Kg値の定義式、 $Kg = A^2/F$ 、の形は次のように考えることができる。すなわち、応答加速度ベクトル a と応答速度ベクトル v の内積を、表層地盤の応答による増幅部分 (変化部分) と基盤加速度のパワー (不変部分) の積として捉えれば、Kg値は変化部分に相当する。したがって、Kg値が大きいところは地震動のパワーが大きく、地盤上の構造物に大きな被害をもたらすと考えられる。そこで、加速度記録を使って、直接的にパワーを算定することを考えた。その際、計算値は大きな値になると考えられたので、次式のようにパワーの対数をとって、DIと定義した。

$$DI = \log_{10} (| \mathbf{a} \cdot \mathbf{v} |) \quad (1)$$

DIの時間変動の様子や最大DI値について検討した結果、DIは地震波動が到来するとともに急速に増大し、その最大値であるDI値は計測震度 (Ijma) と良い相関を示して、0.6程度のずれしかないことがわかった。この時、DI値は、0.1Hz～5Hzの振動数域の

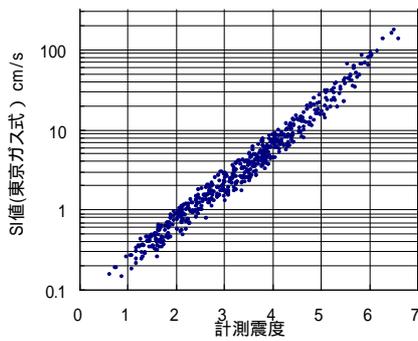


図1 SI値と計測震度の関係

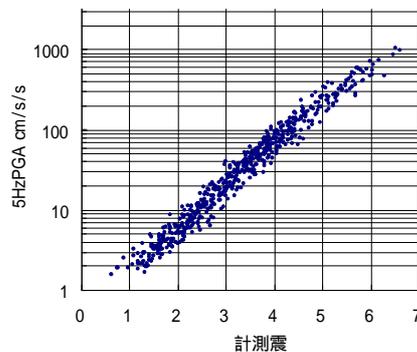


図2 5HzPGAと計測震度の関係

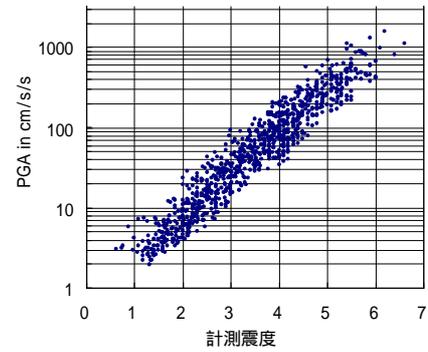


図3 PGAと計測震度の関係

地震動を対象に、加速度をGal (cm/s/s)、速度をmkine (cm/s/1000)として算定されている。

DI値の算定にあたって、上下動の影響について調べた。用いたデータは宮城県沖の地震、宮城県北部の地震群および十勝沖地震の314データである。3方向成分を用いて算定した定義どおりのDI値と上下動成分を省き水平2成分のみを用いて算定したDI値はほとんど一致し、両者の差の平均は0.013、標準偏差は0.035であった。そこで、以下の計算では水平2方向のみを用いてDI値を算定した。なお、今後、DI値の算定には、加速度をcm/s/s、速度をcm/sの単位系を用いることとし、DIの原意を当初のDamage IndexからDestructive Intensity (破壊強度)に改める。

地表面で観測される地震動の最大加速度は、最近では各機関から公表されるが、その対象周波数範囲は明確ではない。最大加速度は測定上限周波数が高ければ高いほど大きくなる傾向を示す。近年の観測技術の向上も相俟って測定周波数範囲は拡大している。このため、むやみに大きな最大加速度が記録されるようになってきているが、被害との関連を検討する際の誤差を大きくする結果ともなっている。JRでは既に国鉄時代に警報処理のための加速度の計測周波数範囲を0.1Hz～5Hzに制限している(中村, 1985)。

本論文の検討では、主としてK-net, KIK-NETの強震記録を用いたが、台湾気象庁の強震記録も使っている。データの地震規模はM3.8～M8.0、地震動の大きさは計測震度で0.6～6.6に分布する。主な地震は、1995年兵庫県南部地震(M7.2)、2000年鳥取地震(M7.3)、2001芸予地震(M6.7)、2003宮城県沖の地震(M7.0)2003年宮城県北部の地震群(M5.4, M6.2, 等)、2003年十勝沖地震(M8.0)および1999年台湾集集地震(M7.6)である。これらのデータを基に公表されている最大加速度(PGA)は、水平2成分ないし3成分波形を基にして特にフィルター処理せずに算定されており、概ね30Hzまで含まれているものと思われる。JRの警報特性に基づく最大加速度(水平2成分, 5Hzまで)をこれらのPGAと区別するため5HzPGAと表記する。

計測震度については種々の機関が気象庁の方法(平成8年気象庁告示第4号)で算定して公表した値を使用している。また、SI値は、その定義によっていくつか異なったものがあるが、ここではSIセンサーとして実績のある東京ガスの定義による値を採用

した。これは独立行政法人土木技術研究所による合理的なSI値(2方向の応答値のベクトル合成値)に比べると、常にわずかに小さな値となる。

3. 計測震度とSI値ならびに5HzPGAの関係

ここでは実用されている三種の代表的な地震動指標である計測震度(気象庁)、SI値(東京ガス)および5HzPGA(JR)を相互比較する。

図1および図2は、計測震度とSI値および5HzPGAの関係を、それぞれ示したものである。これらの図をみると、SI値や5HzPGAに対応する計測震度のばらつきの幅は、SI値の方が5HzPGAよりやや小さいものの、いずれも最大1弱程度で大きな相違はない。なお、計測震度とPGAの関係は図3のように大きくばらついており、被害とPGAの対応が良くないことを示唆している。このように加速度と被害の対応は通常良くないとされるが、高い振動数成分を除いた5HzPGAでは、被害との対応がいいとされているSI値と同程度になっていることは注目し値する。

なお、最大加速度は測定上限周波数により大きく異なるので、同じ規格で比較することを提案する。

4. RI値の提案と計測震度の関係

最大値が計測震度に対応する指標値RIを定義する。

$$RI = DI + 2.4 \quad (2)$$

なお、上記のDIは、加速度をcm/s/s単位、速度をcm/s単位で計算したものである。

図4にRIの最大値(RI値)と計測震度の関係を示す。使用したデータの地震規模はM3.8～M8.0、地震動の大きさは計測震度で0.6～6.6となっている。全体のデータ個数は910、計測震度とRI値の差の平均値は0.050、標準偏差は0.134であった。これから両者は実用上同じものと見なせる。

RI値と計測震度の差を、マグニチュード別に詳しく見たものが図5である。M<7ではRI値は計測震度よりやや小さく、M>7では逆にやや大きくなる傾向が伺える。Mが大きいほど卓越振動数は小さくなる

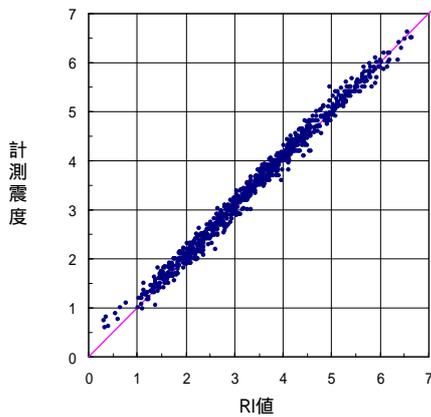


図4 RI値と計測親疎の関係

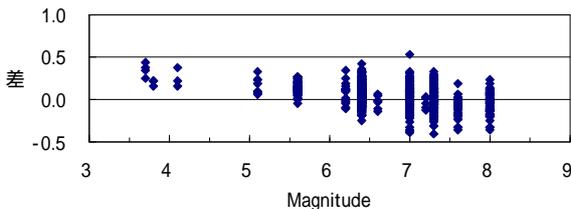


図5 計測震度とRI値の差とマグニチュードの関係

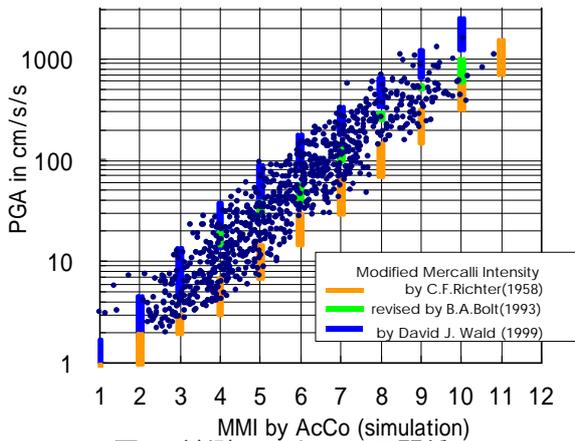


図6 計測MMIとPGAの関係

ので、RI値は、卓越振動数が高いほど計測震度より小さめになり、卓越振動数が低いと計測震度より大きめになるともいえる。最近の地震被害と地震動の傾向をみると、RI値のこの性質は地震動指標値としてより好ましいと考えられる。

5. 改正メルカリ震度の計器計測化提案

前節では、気象庁の計測震度に対応するリアルタイム震度 (RI) をDIを元にして定義した。ここでは、改正メルカリ震度 (MMI) の計器計測化を考える。

気象庁震度は0~7であり、MMIは1~12である。そこで、計測震度に対応するRI値のスケールを一様に引き延ばしてMMIに対応させ、その妥当性を最大加速度や最大速度との関係で検証する。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{MMI} &= (11/7) \cdot \text{RI} + 0.50 \\ &= (11/7) \cdot \text{DI} + 4.27 \end{aligned} \quad (3)$$

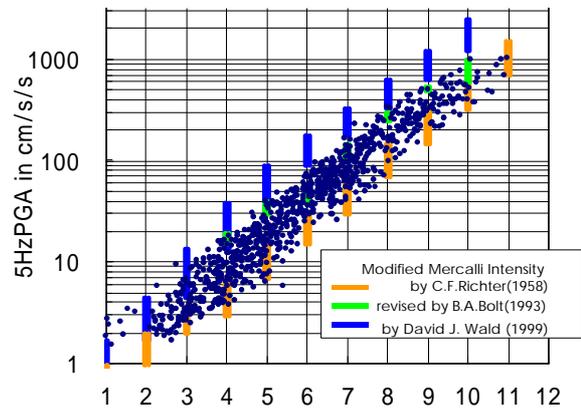


図7 計測MMIと5HzPGAの関係

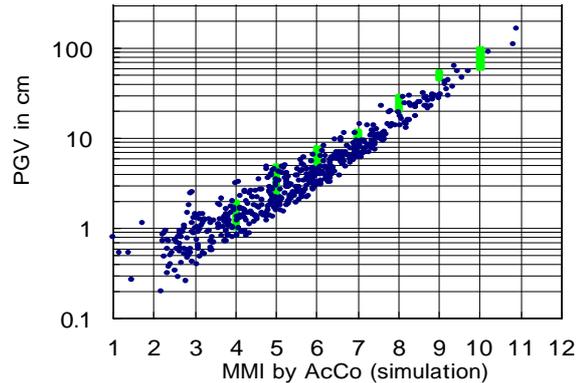


図8 計測MMIとPGVの関係

図6は、(3)式により計算されたMMI (計測MMI) とPGAを比較したものである。図中にはRichter (1958)、Bolt (1993)、およびWald (1999)によるMMIと最大加速度の関係をそれぞれ示した。これによると、Richter以後、MMIに対応するPGAは次第に大きくなっていることがわかる。そして、計測MMIとPGAの関係は、Richter、BoltおよびWaldの関係を包含したものとなっている。

図7は、計測MMIと5HzPGAとの関係を示したもので、これによると、両者の関係はRichterが示した最初の関係とよく整合している。これらの図から、最大加速度は時代とともに高い振動数まで計測できるようになって大きくなったが、高い振動数は破壊とあまり関係がないので、破壊との関連で定義された震度との関係はよりばらつきの大きなものになってしまった、と解釈される。一般に5Hz以上の振動は破壊に大きな影響はないと考えられるし、昔の加速度計による最大加速度もこの程度の振動数特性であったろう。ともあれ、計測MMIと5HzPGAの関係は当初のMMIと最大加速度の関係に類似している。

図8に計測MMIと最大速度PGVの関係を示したが、Bolt (1993)のMMI-PGV関係と概ね一致している。以上により、(3)式でMMIをリアルタイム計測することの妥当性が確認されたと考える。

6. 小型デジタル警報地震計の開発

最大加速度は地震力の大きさを見積もる上で重要

であり、RI値や計測MMIの基になっているDI値は地震動が単位時間にできる仕事を表わしている地震動のエネルギーを見積もるのに欠かせない。そこで、5HzPGAとRI値（または計測MMIなど）を同時にリアルタイム表示する小型デジタル表示警報地震計AcCo（Acceleration Collector，アッコ）を開発した。なお、上下動成分を用いなくても十分精度の高いDI値が算定できることなどを利用してコスト削減を図っている。重さ1kg以下の手乗りサイズで、RI値（または計測MMI）と5HzPGAを高さ27mmの4桁の赤色LEDを使って0.5秒毎に交互にリアルタイム表示する。RI値（または計測MMI）および5HzPGAのいずれでも警報可能（ブザー，ランプ，RS232C，リレー）であるとともに、1/6 Gal分解能，1Galrms精度で各方向約2gまでのデジタル波形をRS232C経由で常時デジタル出力することが可能である。さらに、遅延時間を含めて約100秒の記録を大きいものから2イベント分記録することもできる。詳細はHPを参照されたい（<http://www.sdr.co.jp/acco.html>）。

7. おわりに

ここでは、合理的な地震動指標値について検討を加え、計測震度の値とほぼ同じ値となる新しい指標値、リアルタイム震度（RI値）を提案した。また、世界の標準的な震度である改正メルカリ震度階MMIの具体的な計測化方法を提案し、その妥当性を検証した。さらに、震度と加速度を同時にリアルタイム表示することができる手乗りサイズのデジタル警報地震計を開発した。

この廉価なデジタル警報地震計が、地震動計測値を一般の方にもなじみのあるものにしたたり、木造住宅など各種構造物の強震動を記録するなどしてより合理的な耐震設計法の開発に資するとともに、地震防災のあり方を変えるきっかけになれば幸いである。

謝辞：本論文では、主として、K-net，KIK-NET（独立行

政法人 防災科学技術研究所）と台湾気象庁のデジタル地震動データを使わせていただきました。兵庫県南部地震・鳥取地震・芸予地震の計測震度やSI値などの計算結果については、前地震防災フロンティア研究センターのShabestari 博士らのもの（関連文献6）を、また、台湾集地震の計測震度については東京工大大学院翠川研究室（<http://www.enveng.titech.ac.jp/midorikawa/>）のものをそれぞれ使わせていただきました。その他の地震についてはCUE（地震情報利用研究協議会）による公開計測震度（<http://www.sdr.co.jp/cue/cuemainjn.html>）を使っています。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 豊・滝澤太朗：常時微動を用いた地盤の液状化予測，土木学会第45回年次学術講演会概要集，I-519，pp.1068-1069，1990.
- 2) Nakamura, Yutaka: A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System, Early Warning Conference '98, Potsdam, Germany, September 7-11, 1998.
- 3) 中村 豊・富田健二・渡邊保宣・西永雅行：1993年釧路沖地震の被害個所と常時微動の関係，第22回地震工学研究発表会講演概要集，pp.367-370，1993.
- 4) 中村 豊：国鉄における地震警報システム，鉄道技術 Vol.42，No.10，pp.371-376，1985年10月。
- 5) Shabestari, Khosrow T., Fumio Yamazaki, Jun Saita and Masashi Matsuoka: Estimation of Spatial Distribution for Ground Motion Parameters in Two Recent Earthquakes in Japan, Tectonophysics (submitted)
- 6) Richter, C. F.,: Elementary Seismology, W.H. Freeman and Co., pp136-140, 1958.
- 7) Bolt, Bruce A.: Abridged Modified Mercalli Intensity, Earthquakes -New Revised and Expanded, Appendix C, W.H. Freeman and Co.,p.331, 1993.
- 8) Wald, David J., Vincent Quitoriano, Thomas H. Heaton, Hiroo Kanamori: Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, Earthquake Spectra, Vol.15, No.3, pp.557-564, 1999

(2003.10.15. 受付)

EXAMINATION OF A RATIONAL STRONG MOTION INDEX - Relationship between the DI value and the other strong motion indices -

Yutaka NAKAMURA

Instrumental Seismic Intensity of Japan Meteorological Agency is just an artificial index without physical meaning and can not be calculated in real time. On the other hand, DI (Nakamura, 1998) is defined by the logarithm of the absolute value of the inner product of an acceleration vector and a velocity vector with regards to the power of an earthquake motion, and can be calculated in real-time. The real-time seismic intensity RI was proposed derived from the DI. The differences of the maximum RI value and Japan Meteorological Agency's Instrumental Seismic Intensity were an average of 0.05 and standard deviation 0.132 for strong motion records at totally 910 sites with the seismic intensity 1 to 7 of M4-M8 Earthquakes. Furthermore, a calculation method for the instrumental MMI, Modified Mercalli Intensity, based on DI value was also proposed and the validity was verified. Based on this technique, a new palm-top digital alarm seismometer AcCo (<http://www.sdr.co.jp/acco.html>) that gives a real-time display of the RI value or the instrumental MMI and the maximum acceleration by turns was developed.