

余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた 本震の応答スペクトルと計測震度の推定

ESTIMATION OF RESPONSE SPECTRUM AND JMA SEISMIC INTENSITY OF MAIN SHOCK USING FOURIER SPECTRUM RATIOS OF AFTERSHOCKS AND MICROTREMORS

村岡七重*, 丸山喜久**, 山崎文雄***

Nanae MURAOKA, Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

Various organizations have deployed seismometer networks to gather the earthquake information. However, some ground motion records are sometimes missed because of electric power failure etc. This study proposes the estimation method of JMA (Japan Meteorological Agency) instrumental seismic intensity using neighboring ground motion records. First, the response spectra with 5% damping were estimated using the Fourier spectrum ratios between two neighboring seismic observation stations. Then, the peak ground acceleration (PGA) and the peak ground velocity (PGV) were calculated through the spectrum intensity. Finally, using the estimated PGA and PGV, the JMA instrumental seismic intensity was obtained.

Keywords: *Ground motion record, Response spectrum, JMA instrumental seismic intensity, Fourier spectrum ratio, Peak ground acceleration, Peak ground velocity*

地震動記録, 応答スペクトル, 計測震度, フーリエスペクトル比, 最大加速度, 最大速度

1. はじめに

計測震度や最大速度といった地震動の強度指標¹⁾は, 災害対応時の基本情報として非常に重要なものである。そのため, 1995 年兵庫県南部地震以降, 各市町村に 1 台以上の計測震度計が整備されるようになり, 様々な研究機関や企業もまた全国に地震計ネットワークを整備してきた^{2,3)}。これにより, 地震発生後数分で高密度な震度情報がテレビやインターネットに配信されるようになり, 地震直後の初動体制の確立に役立っている⁴⁾。

ところが, 2004 年 10 月 23 日 17 時 56 分に発生した新潟県中越地震では, 川口町役場において震度 7 (計測震度 6.52) が観測されていたにも関わらず, 震度計の電源や回線などのトラブルによりそれが判明したのは約 1 週間後であった。この地震により多くの地区が一時孤立状態になったが, そのひとつが川口町である。気象庁は, 川口町の震度 7 が判明するまで, 小千谷市などで観測された震度 6 強を最大震度としていた。その後, 川口町の計測値が面的震度分布の推定結果に反映されて, 川口町と小千谷市の一部が震度 7 の揺れに見舞われたと修正された。1996 年以降, 震度は計測震度により決定されており,

気象庁観測点で震度 7 が記録されたのは新潟県中越地震が最初である。1995 年兵庫県南部地震では地震発生から 3 日後に建物の倒壊比率などをもとに震度 7 が判定された⁵⁾。新潟県中越地震では, このようにトラブルにより最大震度の確認が遅れたことになる。このような事態に対して, 地震計は非常用電源などに自動で切り替わり地震データを即時に提供できる状態になることが望ましいが, 各自治体や事業者の予算などの要因から整備されていないことがある。

機関別の地震計による記録のみに頼った場合, 度々上記のような問題が発生する可能性が考えられるが, 様々な地震計ネットワークで観測された近傍の地震記録を用いれば, このような不測の事態にも対応できるものと考えられる⁶⁾。丸山ら⁷⁾は, 常時微動と近傍の地震記録を用いて地震動を推定する方法を提案しているが, この検証には関東地方における中小地震の結果のみが用いられている。新潟県中越地震のような強震時にもこの手法の妥当性が示せれば, 地震計位置だけでなく任意の地点の地震動の推定が可能になるものと期待される。しかし一方で, 強震時には地点によっては地盤の非線形化が起こり, 常時微動と余震および本震の H/V スペクトル比のピーク値が異なることが

* 東京大学大学院生 修士(工学)

** 千葉大学工学部都市環境システム学科 助手・博士(工学)

*** 千葉大学工学部都市環境システム学科 教授・工博

Graduate Student, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo Research Assoc., Dept. of Urban Environment Systems, Faculty of Engineering, Chiba Univ., Dr.Eng.

Prof., Dept. of Urban Environment Systems, Faculty of Engineering, Chiba Univ., Dr.Eng.

指摘されている⁸⁾。そこで、本震のスペクトル比の特性に近い余震のフーリエ振幅比から推定することで精度が向上すると考えられる。

また、地震動の大きさが評価できれば、地震動強さの指標や建物に作用する外力を知ることができる。2000年6月の建築基準法改正で導入された限界耐力計算法では、建物を等価1質点モデルに置き換え、応答スペクトル法の考え方に基づいて、建物の周期から建物に生じる地震力を求めている。応答スペクトル法は、建物の周期がわかれば動的解析を行わなくても最大応答値が予測できる手法であり、 $h=0.05$ の加速度応答スペクトルを用いることになっている⁹⁾。 $h=0.05$ の加速度応答スペクトルを求めることができれば、各建物の周期からその建物に生じた地震力を知ることができ、構造物被害の程度との関係を見ることが出来る。

そこで、本研究では常時微動あるいは余震記録の2点間のフーリエスペクトル振幅比を用いて、 $h=0.05$ の応答スペクトルを推定するとともに、応答スペクトル強度を用いて災害対応時の指標としてよく使われる計測震度を推定する。

2. 常時微動と強震動のH/Vスペクトル比の比較

新潟県中越地震の震源近傍のK-NET, JMA, JH観測点において常時微動観測を実施した(図1)。観測には、周期約2秒程度まではほぼ平坦な振幅特性をもつ速度計を用い、100Hzサンプリングで30,000個のデータ(5分)を連続して取得した。3,000個ごとに分割したデータをフーリエ変換し、0.4HzのParzenウィンドウで平滑化して、水平動2成分、上下動1成分のスペクトルを求めた。ここでは、各成分の水平動スペクトルを上下動スペクトルで除して求めたH/V(水平動/上下動)スペクトル比10組について平均したものを各観測点でのH/Vスペクトル比とした。常時微動のH/Vスペクトル比は、中村¹¹⁾が提案した

地盤の1次固有周期を推定する方法として幅広く利用されているが、実体波(S波)の波動理論をもとにした考え方には議論の余地が残る。時松・宮寺¹²⁾や大町ら¹³⁾は、表面波(レイリー波)の基本モードに着目し常時微動のH/Vスペクトル比が地盤の1次固有周期を推定するのに有益であることを示している。Yamazaki and Ansary¹⁴⁾は、フー

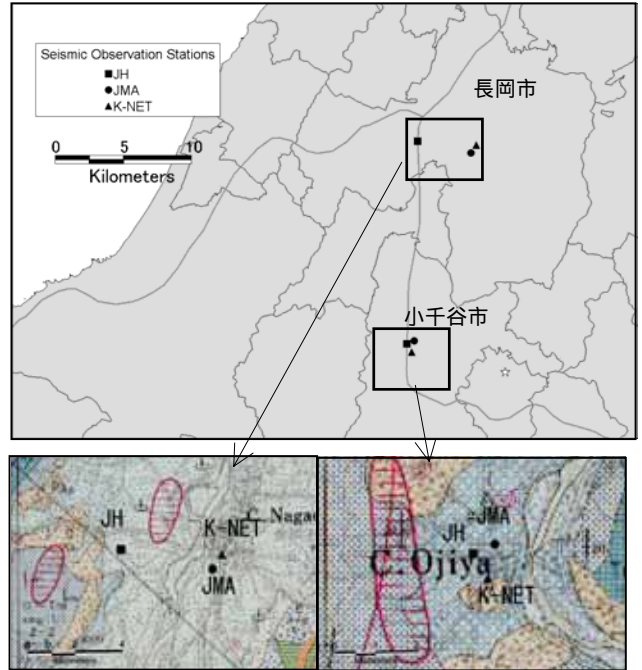


図1 新潟県長岡市および小千谷市の表層地質図¹⁰⁾とK-NET, JMA, JH地震観測点の位置

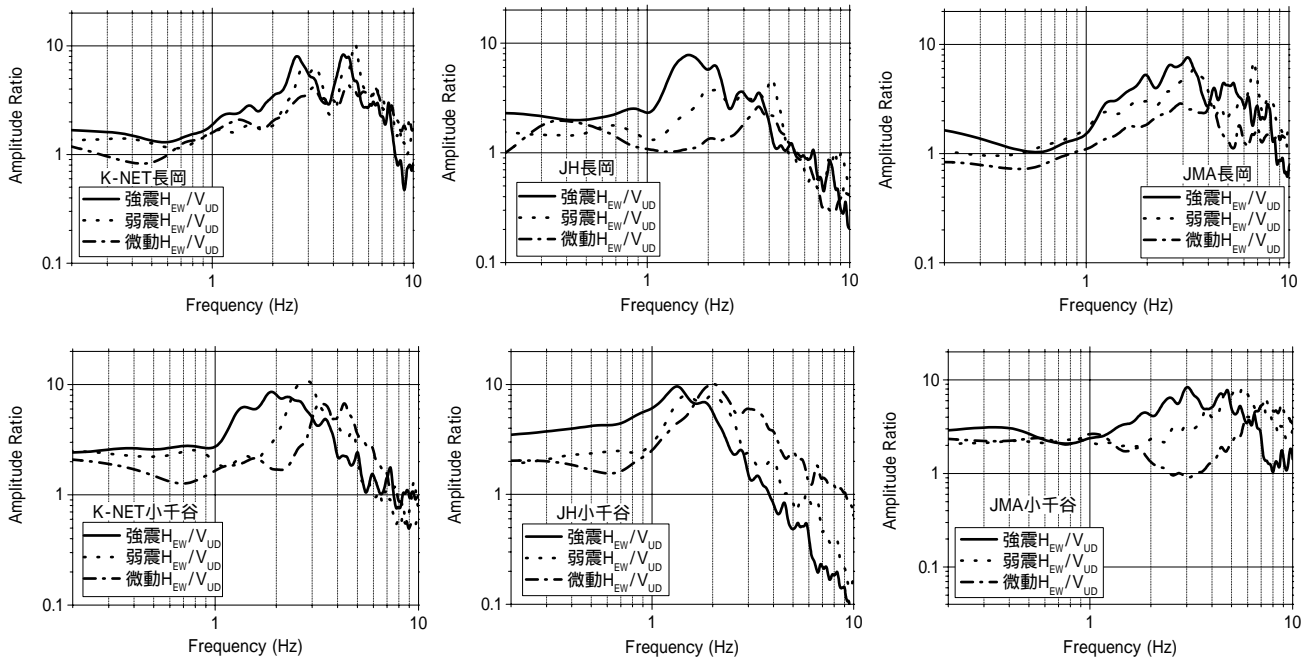


図2 K-NET 長岡, JH 長岡, JMA 長岡, K-NET 小千谷, JH 小千谷, JMA 小千谷で観測された常時微動と地震動(強震, 弱震)のH/Vスペクトル比の比較

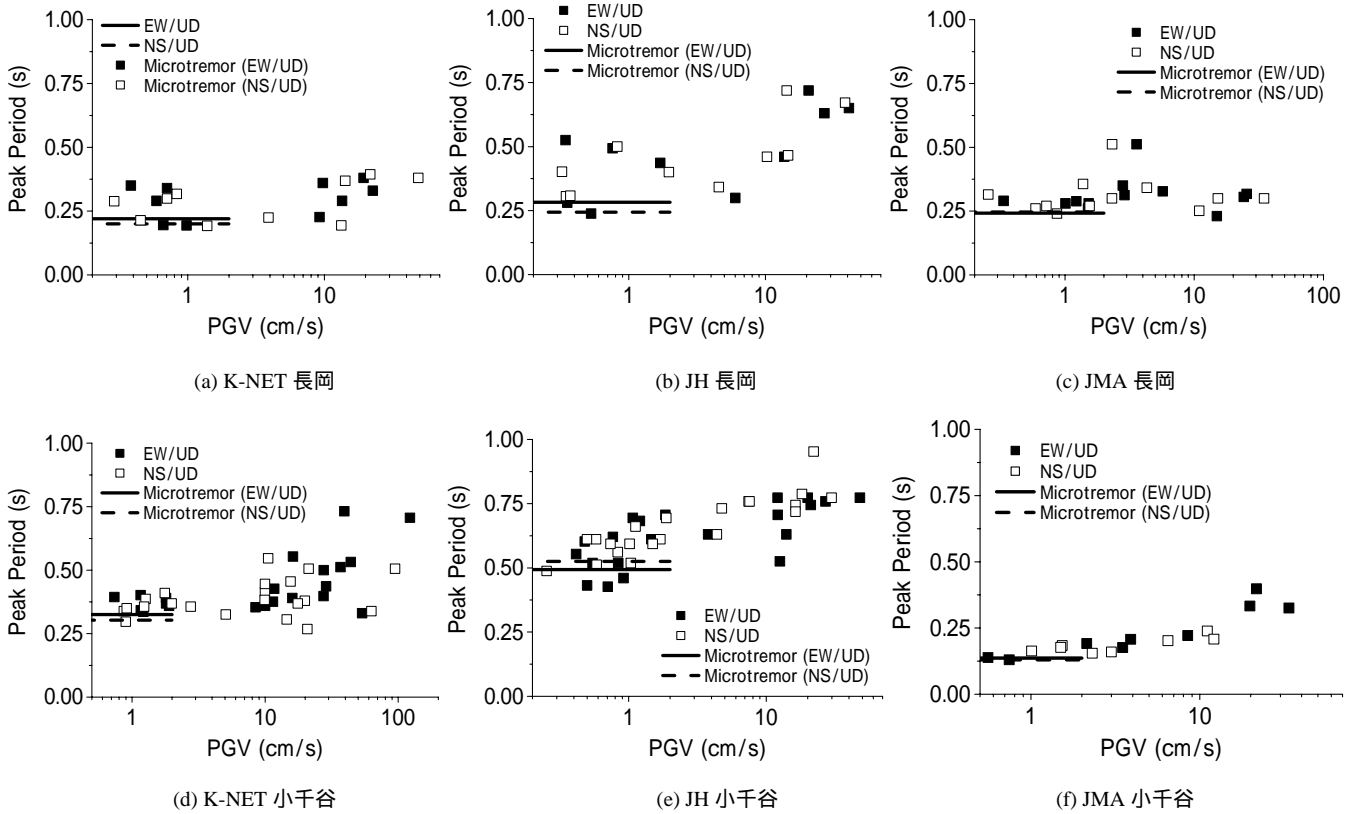


図3 各地震観測点における常時微動の卓越周期と地震動の最大速度ごとの卓越周期の変化

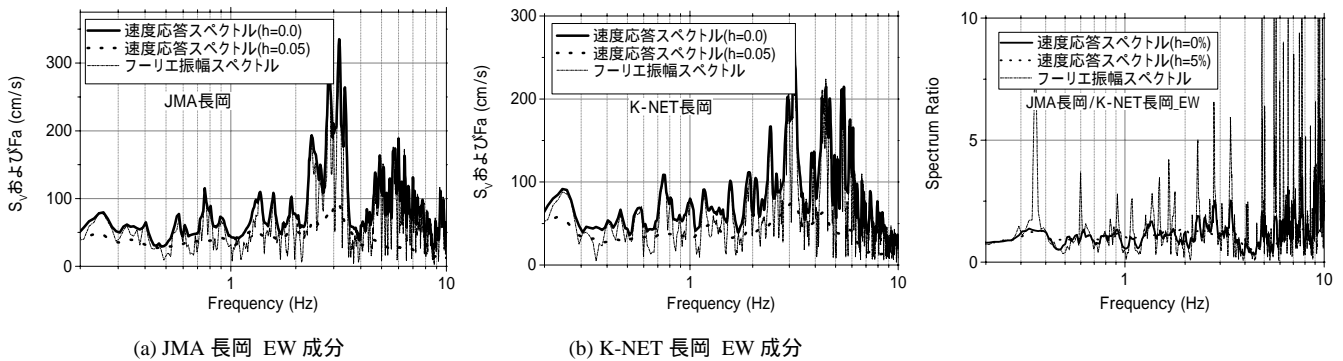


図4 JMA 長岡およびK-NET 長岡における新潟県中越地震本震の速度応答スペクトル ($h=0.0, 0.05$)とフーリエ振幅スペクトル

図5 K-NET 長岡を基準としたときの JMA 長岡の速度応答スペクトル比とフーリエ振幅スペクトル比

リエスペクトルと近似関係にある速度応答スペクトルの距離減衰式を利用し、地震動のH/Vスペクトル比が各地点固有の振幅形状を示すことを説明している。これらのことから、常時微動と地震動のH/Vスペクトル比は各地点の地盤情報を反映しているものと考えられる。

そこで、図2にK-NET 長岡, JH 長岡, JMA 長岡, K-NET 小千谷, JH 小千谷, JMA 小千谷観測点における常時微動と地震動のH/Vスペクトル比の振幅形状を比較する。地震動のH/Vスペクトル比は計算区間をS波立ち上がり以降の30秒間とし、0.4HzのParzenウィンドウで平滑化して水平動2成分, 上下動2成分のスペクトルを求めた。これらの地点ではNS, EW成分ともスペクトル特性がほぼ同じであるため、ここではEW成分について示す。新潟県中越地震では、本震(10月23日17時56分)発生後、本震と余り変わらない強さの余震や中小規模の余震が多発したので、地震動の強さごとのH/Vスペク

トル比の振幅形状の違いを確認することができる。図中の地震動は計測震度4.5を境界に強震と弱震に分けている。強震および弱震のH/Vスペクトル比は、それぞれ複数の地震から得られた記録のH/Vスペクトル比の平均とした。

各地震計は次のような地点に設置されている。K-NET長岡観測点は長岡市役所に隣接する駐車場の平坦地に設置されており、盛土の下に粘性土が堆積し約GL-3mから礫の堆積した地盤であり、微動観測による卓越周期は約0.30秒である。JH長岡観測点は埋土の下に粘土質シルトと粘土が約9m堆積し、GL-9.5mから礫混じり玉石の地盤で、約0.28秒を卓越周期にとる。JMA長岡観測点は長岡市役所に隣接する駐車場に設置されており、卓越周期は約0.25秒である。K-NET小千谷は表土の下にシルトと高有機土が約3m堆積しており、その後

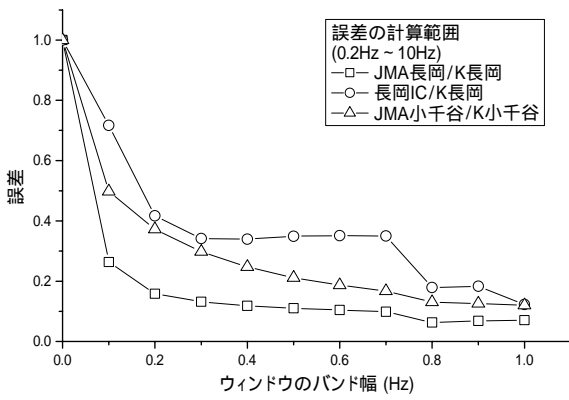
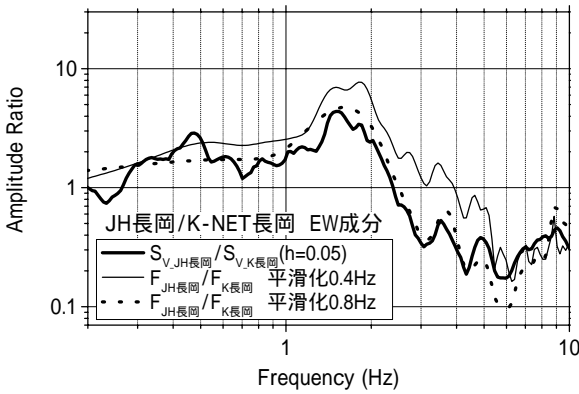
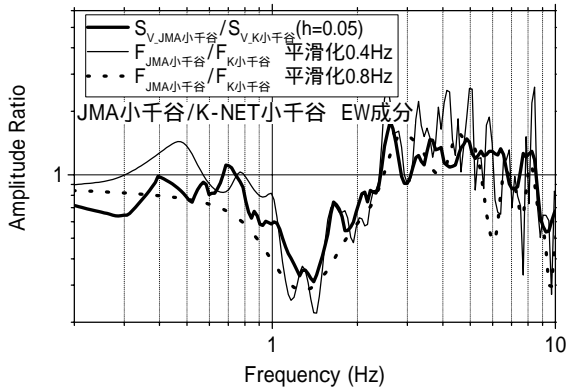


図6 ウィンドウのバンド幅と誤差の関係



(a) JH 長岡/K-NET 長岡



(b) JMA 小千谷/K-NET 小千谷

図7 2観測点の速度応答スペクトル比と異なるバンド幅で平滑化したフーリエ振幅比の比較

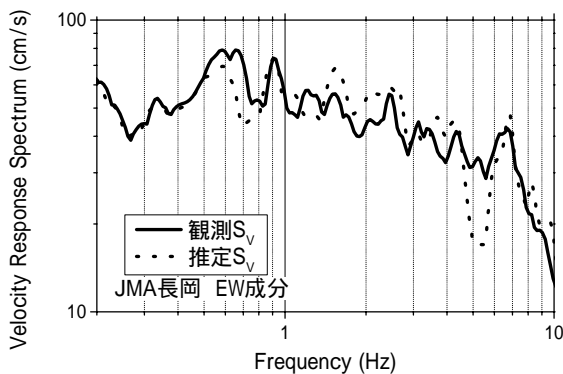


図8 K-NET長岡を基準点として推定したJMA長岡の速度応答スペクトルと観測された速度応答スペクトル

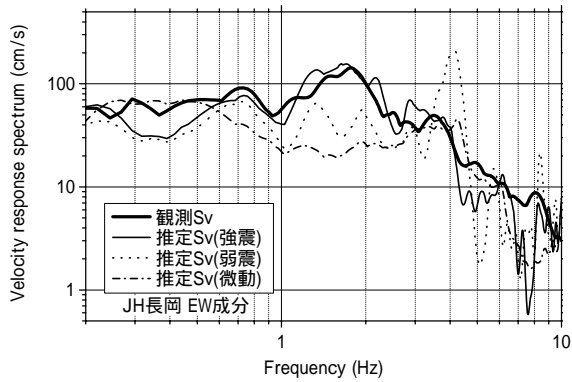
礫と岩盤が続く観測点であり、約0.30秒を卓越周期にとる。JH小千谷は表土の下に粘性土が約3m堆積し、その後砂礫が続く、約0.50秒を卓越周期にとる。JMA小千谷観測点は小千谷消防署敷地内に設置されており、微動観測による卓越周期は約0.13秒を卓越周期にとる。K-NET長岡やJMA長岡のように常時微動と余震(弱震、強震とも)のスペクトル特性が比較的似ている地点もあるが、概して常時微動のH/Vスペクトル比、弱震のH/Vスペクトル比、強震のH/Vスペクトル比の順にピーク周期の値が大きくなっている。このように常時微動と強震動のH/Vスペクトル比を比較すると、強震になるほど卓越周期が長周期化する傾向があることがわかる。この要因としては、地盤の非線形化が考えられる。藤本・翠川¹⁵⁾は地盤の非線形性が地盤増幅度に与える影響に注目し、2001年芸予地震の記録を用いて、強震動時には地盤の固有周期が長くなることおよび短周期成分が多く減衰されることを確認している。また、最大加速度の増幅度は一定の地震動を超えるると著しく低下するが、最大速度の増幅度はある程度までは地盤の非線形性の影響を受けないとしている。そこで、常時微動に対する地震動の卓越周期ずれと最大速度の関係を図3で検討した。JH小千谷を除くと最大速度が10cm/s以上になると地盤の卓越周期は長周期側に移行しており、40cm/s前後の地震動では1.5~2倍程度まで卓越周期が伸びている。これは地盤の剛性低下に伴うものと考えられる。ちなみに卓越周期からの推定を行ったところ、K-NET長岡では本震時にせん断剛性が2/3程度、K-NET小千谷では1/5程度に低下していた。これは、これらの地点で $10^{-3} \sim 10^{-2}$ オーダーのせん断ひずみが生じていたことを示すものである。

3. スペクトルの推定

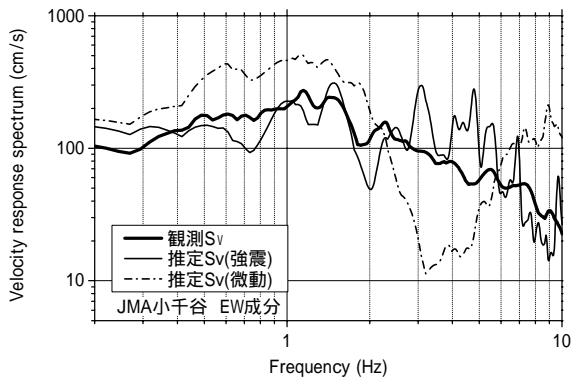
3.1 速度応答スペクトルと加速度応答スペクトル($h=0.05$)の推定

余震あるいは常時微動観測記録から、本震の速度応答スペクトルの推定を試みる。図2,3で示したように、本震のゆれが大きな場合、地震動と常時微動のスペクトル特性が異なることが多い。そのため、本震を精度よく推定するには、できるだけゆれの大きな余震記録を用いることが望ましいが、実際にはゆれの小さな余震しか観測されなかったり、余震記録自体がなかったりする場合もある。余震記録がある場合は、震源からの方向および距離がほぼ等しく、地震動が同じ伝搬経路をたどったと考えられる近傍2地点の地震動の水平動同士のフーリエスペクトルの比(H/H)からスペクトルを推定し、余震記録のない地点については、既往の研究^{7,16-19)}にあるように常時微動のH/Vスペクトル比をもとに2種類の方法から本震の速度応答スペクトルを推定する。余震記録をもとにした本震推定では、応答スペクトル比から直接推定する方法と、フーリエスペクトル比を介する2種類の方法について検討した。応答スペクトル比から直接推定する方法では、高振動数領域でとくに観測スペクトルとの間に差がでたが、フーリエスペクトル比を介することで、この点が改善されたため、地震動についても微動同様フーリエスペクトル比を介したものを本震推定に用いた。ここで、推定には、K-NET長岡、JMA長岡、JH長岡、K-NET小千谷、JMA小千谷、JH小千谷で観測された地震動と微動データを用いる。

$$F_a(f) \approx S_v^{h=0.00}(f) \quad (1)$$

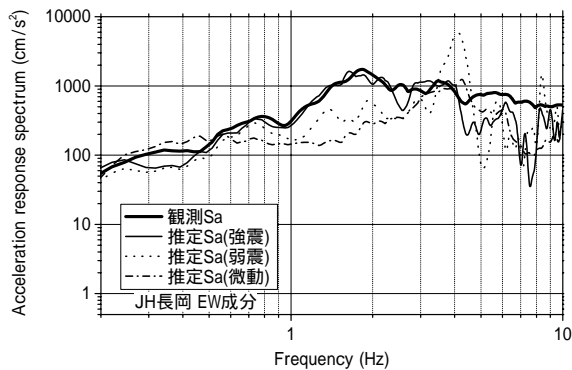


(a) K-NET 長岡を基準点として JH 長岡を推定

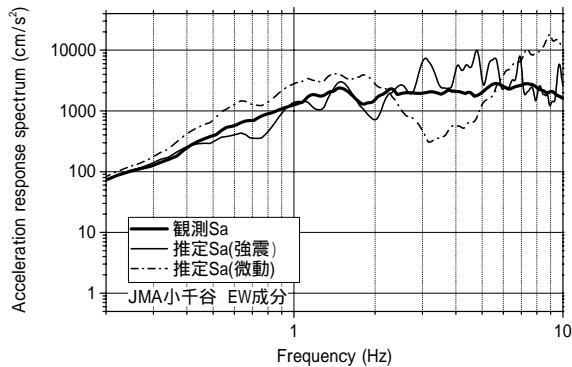


(b) K-NET 小千谷を基準点として JMA 小千谷を推定

図9 観測された速度応答スペクトルと推定された速度応答スペクトルの比較



(a) K-NET 長岡を基準点として JH 長岡を推定



(b) K-NET 小千谷を基準点として JMA 小千谷を推定

図10 観測された加速度応答スペクトルと推定される加速度応答スペクトルの比較

加速度フーリエスペクトルは、 $h=0.0$ の速度応答スペクトルに近似することが知られている²⁰⁾(1)式)。例えば、K-NET長岡とJMA長岡について、平滑化を行っていないフーリエ振幅スペクトルと $h=0.0$ および $h=0.05$ の速度応答スペクトルを比較すると、フーリエ振幅スペクトルは $h=0.0$ の速度応答スペクトルに近い値をとることが確認できるが、 $h=0.05$ の速度応答スペクトルでは、フーリエスペクトルと特性が大きく異なることがみてとれる(図4)。しかし、2地点間でこれらの同士の比をとると、減衰比の違いによる差は小さくなり、スペクトル比を各地点の増幅特性としてみた場合、減衰定数による影響は0%と5%とでは無視できるものとする(図5)。

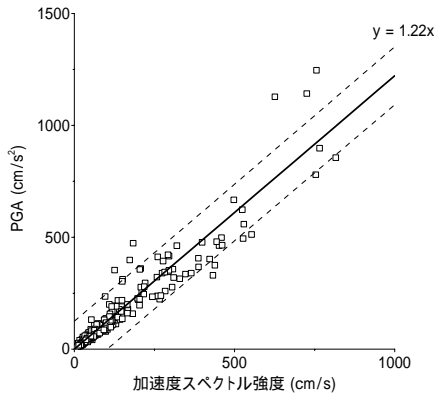
推定地点の $S_v(h=0.05)$ を算出するには、2地点間の速度応答スペクトル比とフーリエ振幅スペクトル比の差がより小さくなるのが望ましい。フーリエスペクトルを平滑化せずに比をとった場合、図5に示したように振動数によっては振幅が非常に大きくなる。そこで、フーリエスペクトルを異なるバンド幅の Parzen ウィンドウで平滑化を行い、フーリエ振幅比を速度応答スペクトル比に近似させることを考える。最適なバンド幅は、対象とする振動数領域の範囲や刻みのとり方により異なることが考えられるため、検討には0.2~10Hzまでの振動数の範囲を対象とし、その範囲を対数軸で等間隔に区切った。図6は速度応答スペクトル比と平滑化されたフーリエ振幅比の誤差を(2)式で計算し、平滑化していないフーリエ振幅比(バンド幅0.0Hz)を1.0として、これに対する誤差を求めたものである。図はそれぞれJMA長岡/K-NET長岡、長岡IC/K-NET長岡、JMA小千谷/K-NET小千谷の本震記録における誤差を示している。

$$Error = \sum_{i=1}^n \left(\log_{10} \left(\frac{S_v^B(f_i)}{S_v^A(f_i)} \right) - \log_{10} \left(\frac{\tilde{F}_a^B(f_i)}{\tilde{F}_a^A(f_i)} \right) \right)^2 \quad (2)$$

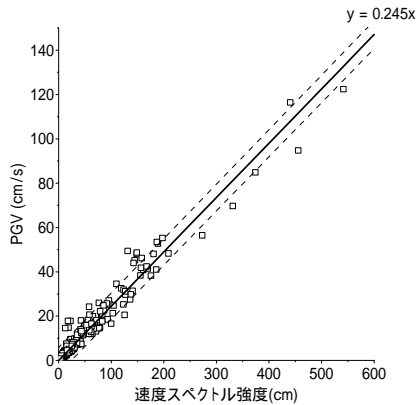
ここで、 \tilde{F}_a は、Parzen ウィンドウで平滑化された加速度フーリエスペクトルである。(2)式で計算される誤差は、振動数軸を対数で等間隔にとっているため、横軸を周期に置き換えても変わらない。また、スペクトル比の対数をとっているため対象地点と基準点を入れ替えても同じ値となる特徴を有する。

この結果、この例ではバンド幅0.2Hzあたりで誤差は小さくなり、わずかの差ではあるが、フーリエスペクトルにバンド幅0.8Hzの平滑化を行ったときが最も速度応答スペクトル比との誤差が小さく、よい近似を示すことが分かった。図7に平滑化を行ったフーリエ振幅比と $h=0.05$ の速度応答スペクトル比を比較する。バンド幅0.8Hzの平滑化を行ったフーリエ振幅比が、とくに2Hz以上の高振動数の領域において、 $h=0.05$ の速度応答スペクトル比に対する近似がよいことが分かる。最適バンド幅は、地点ごとの地震波形のスペクトル特性によっても変わることが推察されるが、ここでは、 $h=0.05$ 速度応答スペクトル比と、バンド幅0.8Hzの平滑化を行ったフーリエ振幅比を以下の検討に用いることにする。

速度応答スペクトルとフーリエ振幅スペクトル(バンド幅0.8Hzで平滑化)が等しいと仮定したとき、既知の地点Aの速度応答スペクトルと推定地点Bの地震動の水平動フーリエスペクトル比(H/H)から求められる(3)式に示す増幅特性 $R_{B/A}$ より、(4)式のように地点Bの速度応答スペクトルが推定できる。



(a) 加速度応答スペクトル強度と最大加速度



(b) 速度応答スペクトル強度と最大速度

図 11 応答スペクトル強度と最大加速度，最大速度の関係

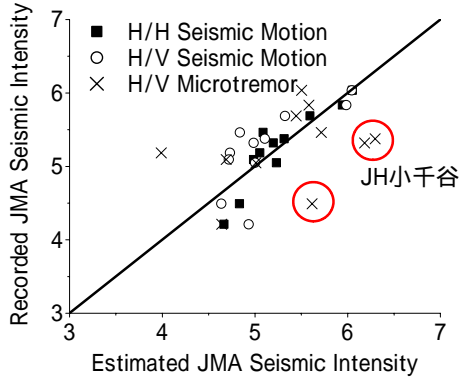


図 12 スペクトル比を用いて推定した計測震度と観測された計測震度の比較

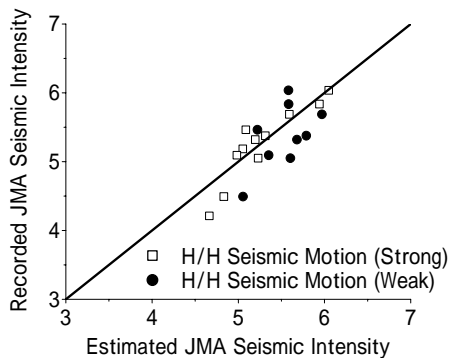


図 13 強震，強震の H/H スペクトル比から推定された計測震度と観測された計測震度の比較

$$R_{B/A}(f) = \frac{\tilde{F}_a^B(f)}{\tilde{F}_a^A(f)} \quad (3)$$

$$Sv^B(f) = Sv^A(f) \cdot R_{B/A}(f) \quad (4)$$

なお、この(4)式によるスペクトル推定においては、低振動数側および高振動数側のスペクトル比をとることによる数値的に不安定となる可能性を除くため、0.2~20Hzの範囲について計算を行う。

バンド幅 0.8Hzの平滑化を行った $R_{B/A}$ を用いて求められる推定地点の速度応答スペクトルが、観測された速度応答スペクトルに近似することを確認するため、本震の $R_{B/A}$ を用いて検証した。その結果、JMA 長岡の推定速度応答スペクトルは観測された $h=0.05$ の速度応答スペクトルをほぼ再現できた(図 8)。

次に、速度応答スペクトル Sv と加速度応答スペクトル Sa は ω を円振動数として、(5)式の近似関係が成り立つ¹⁹⁾。(4)式と(5)式を利用して、推定地点の加速度応答スペクトルを同様に推定する。

$$Sv \approx \frac{1}{\omega} Sa \quad (5)$$

3.2 推定精度の検証

上記の推定方法から推定されるスペクトルと観測地震動のスペクトルを比較する。図 9(a)は K-NET 長岡を基準点、JH 長岡を推定地点とし、図 9(b)は K-NET 小千谷を基準点、JMA 小千谷を推定地点として速度応答スペクトルを推定した。図 10 は図 9 と同じ地点について加速度応答スペクトルを推定した。これらの観測点では新潟県中越地震本震(2004/10/23 17:56)と複数の余震の記録が得られている。なお、JH 長岡のスペクトル推定には、K-NET 長岡の計測震度が 2.44、JH 長岡が 1.99 である弱震(2004/10/24 03:59)と、K-NET 長岡の計測震度が 4.91、JH 長岡が 5.09 である強震(2004/10/23 18:12)の記録を用いた。JMA 小千谷の推定には、K-NET 小千谷の計測震度が 5.47、JMA 小千谷が 5.11 である強震(2004/10/27 10:40)の記録を用いた。推定精度は速度および加速度応答スペクトルとも強震から推定したものが最も精度よく推定できている。また、余震から推定したスペクトルと微動から推定したスペクトルを比較すると、微動から推定されるもののほうが、各スペクトルとも再現精度がやや劣ることがわかる。これは、図 2 に示したように各々の地点において強震と弱震あるいは微動では、ピーク周期の値やスペクトル形状が異なることが要因として考えられる。本提案手法は、本震による地盤ひずみと推定に用いる余震・微動による地盤ひずみのレベルが大きく異なる場合に、推定精度が落ちる。したがって、余震が複数観測されている場合は、最大の余震を用いることが望ましい。

なお、基準点を K-NET から JMA に変えると増幅特性が異なるため、違う推定結果が得られる。たとえば、図 2 の小千谷の H/V スペクトルについては、K-NET 地点の方が JMA 地点より推定地点である JH に近い特性を持っていることがわかる。基準点は、このように推定地点に似た地盤特性やスペクトル特性を持つ方が精度上望ましいといえる。

4. 5%減衰の応答スペクトルを用いた計測震度の推定

本章では、前章で推定された5%減衰の応答スペクトルを用いて計測震度を推定する方法について述べる。

Midorikawa and Kobayashi²¹⁾は、次式に示す5%減衰の応答スペクトル強度を用いて最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)を推定する方法を提案している。

$$SI_a = \int_{0.1}^{0.5} S_a^{h=0.05}(T) dT \quad (6)$$

$$SI_v = \int_{0.1}^{2.5} S_v^{h=0.05}(T) dT \quad (7)$$

ここで、 SI_a 、 SI_v は、加速度応答スペクトル(S_a)、速度応答スペクトル(S_v)のスペクトル強度である。

本研究では、新潟県中越地震におけるJH観測点の本震と主な余震の132記録、K-NET観測点における本震63記録、JMA観測点の本震2記録(川口町、小千谷)を用いて、(6)、(7)で定義されるスペクトル強度とPGA、PGVの関係を検討した(図12)。その結果、以下のような回帰式が得られた。

$$PGA = 1.22SI_a \quad (8)$$

$$PGV = 0.245SI_v \quad (9)$$

上式の回帰係数は、Midorikawa and Kobayashi²¹⁾が用いている回帰係数(PGAは1.2、PGVは0.3)とはやや異なっており、回帰に用いるデータに依存すると考えられる。ここでは新潟県中越地震を対象としているので(8)、(9)式を用いることにする。式(8)、(9)からはEW成分、NS成分ごとにPGA、PGVが算出されるので、以下の関係式を用いて、2方向合成値に換算した²²⁾。

$$PGA_R = 1.076PGA_L \quad (10)$$

$$PGV_R = 1.085PGV_L \quad (11)$$

ここで、添字Rは2方向合成値を、Lは2方向最大値を意味する。

以上までで推定された PGA_R 、 PGV_R を用いて、Karim and Yamazaki²³⁾の次式から計測震度(I)を推定する。

$$I = 1.34 + 0.98 \log_{10}(PGA_R \cdot PGV_R) \quad (12)$$

図12に、新潟県中越地震における地震記録のスペクトル強度から推定された計測震度と地震記録から計算した計測震度を比較する。図中に、地震動のH/Hスペクトル比、地震動のH/Vスペクトル比、微動のH/Vスペクトル比をプロットしたが、地震動のH/Vスペクトル比は比較のために示したもので、本震の推定手法の一つとしての位置づけではない。2点間のスペクトル比として、地震動(強震)のH/Hスペクトル比を用いた場合がもっとも推定精度が高く、次いで地震動(強震)のH/Vスペクトル比の比、常時微動のH/Vスペクトル比の比を用いた場合の順で精度がやや低下するが、一部の結果をのぞいて概ね良好な推定結果が得られている。JH小千谷の常時微動のスペクトル比から推定される一部の記録で推定誤差が大きい、前述の通り強震のH/Vスペクトル比の振幅形状と常時微動のH/Vスペクトル比の卓越周期に違いが大きいためと推測される。

本震の地震動が欠落した場合などには、長周期化の影響の含まれない余震(弱震)のスペクトル比に基づく本震(強震)の応答スペクトルの推定も必要である。これは、臨時の地震計を配備した余震観測によって、簡易に本震の計測震度を推定するのに利用できる。図13に強震のH/Hスペクトル比から推定された計測震度と弱震のH/Hスペクトル比から推定された計測震度を比較する。弱震のH/Hスペクトル比から推定された計測震度は、強震のスペクトル比から推定されたものと比べると当然ながら推定精度がやや低下するが、本震の地震動強さの簡易な推定法としては充分利用できるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、地震計が何らかのトラブルで記録を残せなかった場合の対応策として、余震と常時微動のフーリエ振幅比に基づいた本震のスペクトル推定と計測震度の推定法を提案し、その精度を検討した。その結果を以下にまとめる。

常時微動のH/Vスペクトル比に周期の長い値をピークにもつ地盤では、概して常時微動、弱震、強震のH/Vスペクトル比の順にピーク周期の値が大きくなる。常時微動に対する地震動の卓越周期ずれと最大速度の関係は、最大速度が小さい場合は顕著でないが、地盤条件によっては40cm/s程度の地震動で1.5~2倍卓越周期がずれる。

新潟県中越地震において、バンド幅0.8HzのParzenウィンドウで平滑化したフーリエスペクトル比が $h=0.05$ の速度応答スペクトル比との近似がよい。とくに2Hz以上の高振動数領域ではそれが顕著に示された。その結果をもとに、余震のフーリエスペクトル比から本震の応答スペクトル($h=0.05$)を推定した。強震のH/Hスペクトル比を用いた場合、本震をほぼ再現することができる。弱震(計測震度2.0程度)のH/Hスペクトル比や余震記録が一切ない場合には微動のH/Vスペクトル比から推定することも可能であるが、再現精度が強震のH/Hスペクトル比を用いた場合と比較するとやや劣る。

次に、求めた応答スペクトルを用いて計測震度を推定した。本震の地震動が欠落した場合は、長周期化の影響の含まれない余震のスペクトル比に基づく本震の応答スペクトルの推定が必要となるが、本手法は本震の地震動強さの簡易な推定法としては活用できるものと考えられる。

謝辞

地震記録は、防災科学技術研究所 K-NET、気象庁、日本道路公団のデータを用いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, No.1, pp.51-56, 1999.11.
- 2) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, 577/I-41, 1-16, 1997.10.
- 3) 清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集, No. 738/I-64, pp.283-296, 2003.7
- 4) 川上則明, 藤縄幸雄: 緊急地震速報分野別活用システム開発, 土木学会 リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム論文集, pp121-124, 2004.6.
- 5) 気象庁: 震度を知る, ぎょうせい, 1996.10.

- 6) 飛田潤, 福和伸夫, 中野優, 山岡耕春: オンライン地震波形データ収集システムの構築と既存地震計・震度計のネットワーク化, 日本建築学会技術報告集第13号, pp49-52, 2001.7.
- 7) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No. 675/I-55, pp.261-272, 2001.4
- 8) 青井真, 森川信之, 本多亮, 関口春子, 巧刀卓, 藤原広行: なぜ新潟県中越地震の地震動は大きかったのか? 平成16年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集, pp19-26, 2004.12.
- 9) 国土交通省住宅局建築指導課, 基本建築基準法関係法令集(2005年度版), 建築資料研究社, 2005.2.
- 10) 経済企画庁総合開発局, 1/20,000 土地分類図(表層地質図 - 平面的分類図) 新潟県, 1973.
- 11) 中村豊: 常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol.2, pp.18-27, 1988.
- 12) 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, 第439号, pp447-448, 1992.9.
- 13) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧: 常時微動の水平動と上下動スペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489, pp.251-260, 1994.4.
- 14) Yamazaki, F. and Ansary, M.: Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.26, pp.671-689, 1997.7.
- 15) 藤本一雄, 翠川三郎: 2001年芸予地震の強震記録に基づく地盤増幅度に対する地盤の非線形性の影響, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 第1号, 2003.11
- 16) 大熊裕輝, 松岡昌志, 山崎文雄, 原田隆典: 宮崎県における常時微動H/Vスペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, No. 696/I-58, pp.261-272, 2002.1
- 17) 齋田淳, 松岡昌志, K. T. Shabestari, 山崎文雄, 原田隆典: 兵庫県内の強震観測点における地震記録と常時微動を用いた計測震度分布の推定, 土木学会論文集, No. 731/I-63, pp.159-168, 2003.4
- 18) 佐藤浩章, 東貞成, 芝良昭: 余震・微動観測に基づく境港市の地盤振動特性の検討, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp465-468, 2002.11.
- 19) Huang, H.: Characteristics of earthquake ground motions and the H/V of microtremors in the southwestern part of Taiwan, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, pp.1815-1829, 2002.11
- 20) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1996.5
- 21) Midorikawa, S. and Kobayashi, H.: On Estimation of Strong Earthquake Motions with Regard to Fault Rapture, Proceedings of the Second International Conference on Microzonation, Vol.2, pp.825-836, 1978.
- 22) Ansary, M. A., Yamazaki, F. and Katayama, T.: Statistical Analysis of Peaks and Directivity of Earthquake Ground Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, pp.1527-1539, 1995.11
- 23) Karim, K. R., Yamazaki, F.: Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol31, pp1191-1212, 2002.5

(2005年6月10日原稿受理, 2006年1月16日採用決定)