

7. 拡散波動場に基づく微動H/Vを用いた地盤構造の同定及び妥当性の検討

呉浩・入倉孝次郎・正木和明・倉橋奨

1. 序

微動水平成分（Horizontal）と上下成分（Vertical）スペクトル比（H/V）は実体波の伝達関数で昔から解釈されてきた¹⁾。微動シミュレーションによって、微動H/Vは主に表面波（SW: Surface Waves）のレーリー波基本モードのH/V（楕円率）で決まり、ピーク振幅や地盤のS波速度コントラストにより実体波の伝達関数のピークと合わないことがある²⁾。レーリー波基本モードのH/Vに対数平滑をかけて、ピーク振幅を地盤の増幅率と見なして、東京の小学校の揺れやすさを求めた応用例がある³⁾。また、微動H/Vはレーリー波基本モードだけでなく、高次モードやラブ波の寄与も考えなければならない⁴⁾。しかし、実際に微動は実体波のみでなく、表面波のみでもなく、実体波と表面波と両方（FW: Full Waves）を含んでいると考えられる。

微動場を拡散波動場（DFA: Diffuse Field Approximation）と見なす場合、自己相関関数は周波数領域においてグリーン関数の虚部に比例していることが明らかにされた⁵⁾。これにより、微動H/Vは水平動のグリーン関数の虚部と上下動のグリーン関数の虚部の比の平方根で表すことができる⁶⁾。グリーン関数は実体波と表面波と両方を含むため、微動H/Vは実体波と表面波との両方の寄与で解釈できるようになった。しかしながら、拡散波動場に基づく微動H/Vを用いて地盤構造を同定する研究は少ない。その原因は、離散波数法によりグリーン関数を求めるのは時間かかるからである。我々はLocked-mode近似法⁷⁾に基づき、グリーン関数の虚部が高速で計算され、拡散波動場に基づく微動H/Vを用いて地盤構造の同定を試みた⁸⁾。

この方法はどこでも適用できるが、本報告は2016年熊本地震における強震観測点の地盤構造の同定を記すことにする。また、同定した地盤構造の妥当性を検討するため、地震動記録から求めたものを説明できるかどうかを議論する。

2. 微動観測H/V

2016年熊本地震における本震の震度がそれぞれ6弱、6強、7と記録された3つの強震観測点、及び大きな被害が出た益城町市街地の30か所で微動観測を行った。表1に各地点の観測期間を示した。観測した微動記録に、タイムウインドウ（40.96秒）ごとに区切って、交通など近くの振動源により生じた大きなノイズと見られるタイムウインドウを取り除く。残りのタイムウインドウに、水平直交両方向（例えば南北と東西）と上下方向の平均パワースペクトルを求め、上下方向の平均パワースペクトルに対する水平方向（南北+東西）の平均パワースペクトルの比をとって、その平方根をH/Vとする。なお、H/Vに対して、対数平滑化を行う。

図1に微動観測記録から求めたH/Vを示した。観測H/Vは実線で、PS検層データを用いて式（1）より算出された拡散波動場に基づく全波動（FW）H/Vは点線で示した。観測H/Vと理論H/Vの差異はPS検層データを修正しなければならないことを示唆した。また、KMMH03とKMMH14での微動H/Vと違って、益城町KMMH16での微動H/Vは約2.5秒にピークがある。しかも、益城町市街地のほとんど観測点でも約2.5秒に同じピークが見られる。写真1に示したように、狭い市街地で観測点の間は離れていないことから、2.5秒のピークは共通となる深部構造の影響を反映したと考えられる。

$$\left(\frac{H}{V}\right)^{FW} = \sqrt{\frac{\text{Im} G_{11} + \text{Im} G_{22}}{\text{Im} G_{33}}} \quad (1)$$

ここでImGはグリーン関数の虚部で、下付き11, 22, 33は直交三成分である。

表1 微動観測場所及び期間

場 所	観測期間	本震震度
菊池市追間KMMH03	2016/4/23 16:45-17:15	6.1
宇城市豊野KMMH14	2016/4/25 12:20-13:20	5.8
益城町辻の城KMMH16	2016/4/24 10:03-16:00	6.5
益城町市街地30か所	2017/3/1~3/4 一か所30分	-

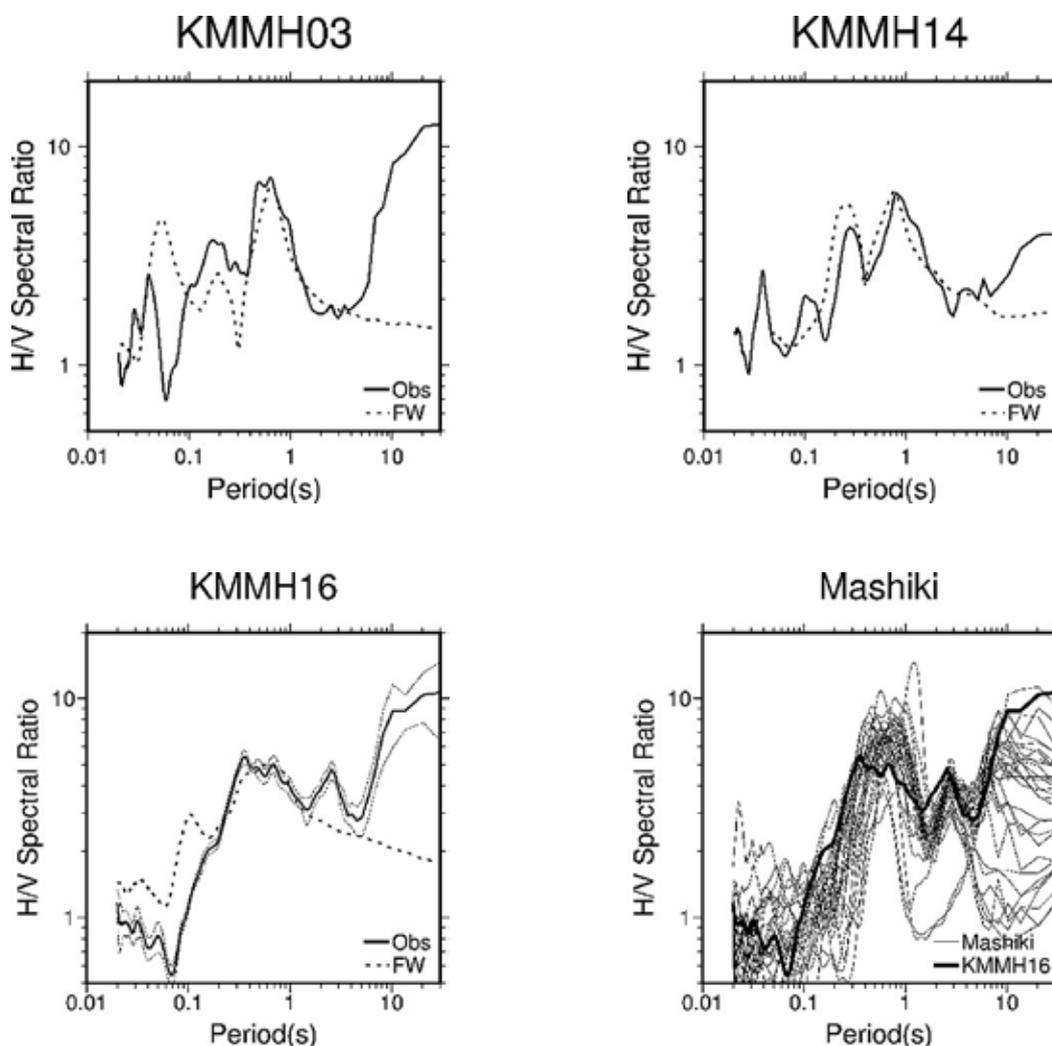


図1 微動観測点の水平/上下スペクトル比 (H/V)。実線は観測H/Vを、点線は初期地盤構造を用いて算出した理論H/Vを示した。KMMH03、KMMH14、KMMH16はそれぞれ菊池市、宇城市と益城町にある強震観測点である。KMMH16で長時間観測したため、灰色の実線は平均されたH/Vを中心に一倍の標準偏差を示した。右下の図は益城町で強震観測点KMMH16と県道28号より南にある微動観測点（写真1に示す）のH/Vをそれぞれ太い実線と細い実線で示した。

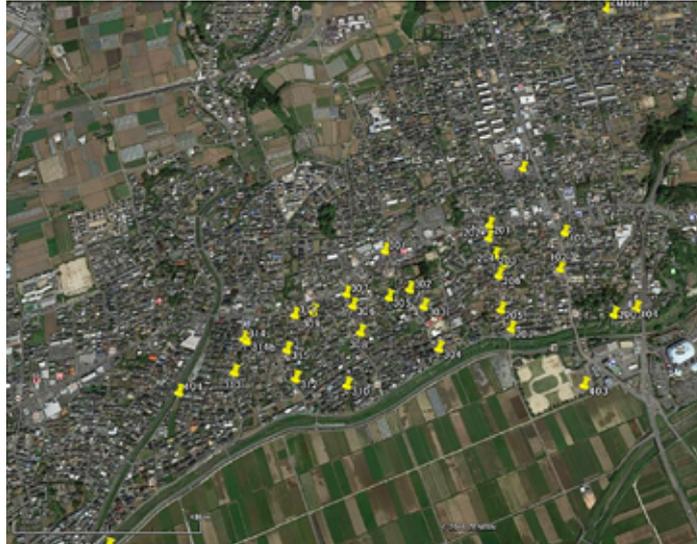


写真1 益城町の市街地で微動観測点の分布（Google Earthのスナップショット）。ピンで示した場所は実際に微動観測を実施した地点である。

3. 地盤構造の同定

地盤構造は深さ方向に沿って各地層のS波速度、P波速度、層厚、密度等を意味する。反射法、屈折法、PS検層法などの物理探査法により地盤構造を構築することができるが、必ずしも地震記録や微動記録を説明できるわけではない。観測記録を説明するための地盤構造を同定しなければならない。

我々はある地盤構造に対して、最下層（半無限空間）を設定した場合の基本モードの10倍波長に相当する深さにS波速度が最下層の半無限空間の2倍速い新たな半無限空間（キャップ層という）を追加した地盤構造を用い、拡散波動場に基づく表面波（SW: Surface Wave）H/Vはその地盤構造のFW H/Vとよく近似できることを証明した⁸⁾。本報告では、FW H/Vの代わりに、キャップ層付の地盤構造のSW H/VからKMMH03、KMMH14及びKMMH16での地盤構造を同定する。なお、SW H/Vは式（2）より算出される⁹⁾。

$$\left(\frac{H}{V}\right)^{SW} = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^M A_{Rm} (u/w)_m^2 + \sum_{n=0}^N A_{Ln}}{\sum_{m=0}^M A_{Rm}}} \quad (2)$$

ここでAR,ALはレーリー波とラブ波のミディアムレスポンスで、u/wはレーリー波の楕円率で、m,nはレーリー波とラブ波のモード、M,Nはレーリー波とラブ波の高次モード数である。

図1に示したように、KMMH03とKMMH14では、微動観測H/Vは1秒より短い周期帯でFW H/Vと合わないため、PS検層データの浅部構造のみ同定すればよい。一方、KMMH16では、微動観測H/Vは2.5秒でFW H/Vと合わないから、PS検層データより深部構造の同定が必要である。そこで、PS検層データの下にJ-SHIS深部構造を加えて、さらにキャップ層を追加する構造を初期地盤構造モデルとする。

密度とP波速度はH/Vに影響が少ないため、各地層の密度を固定した。P波速度は同定されたS波速度から経験式や固定したポアソン比より算出した。図2の下段に同定したS波速度構造を示した。初期地盤構造モデルを用いてSW H/Vを計算し、観測H/Vと合うようにS波速度（Vs）と層厚を調整し同定する。もっとも観測H/Vと合う地盤構造を該当地点の最適地盤構造とする。キャップ層を除いた地盤構造から求めたFW H/Vが観測H/Vとよく合うことも確認できる。

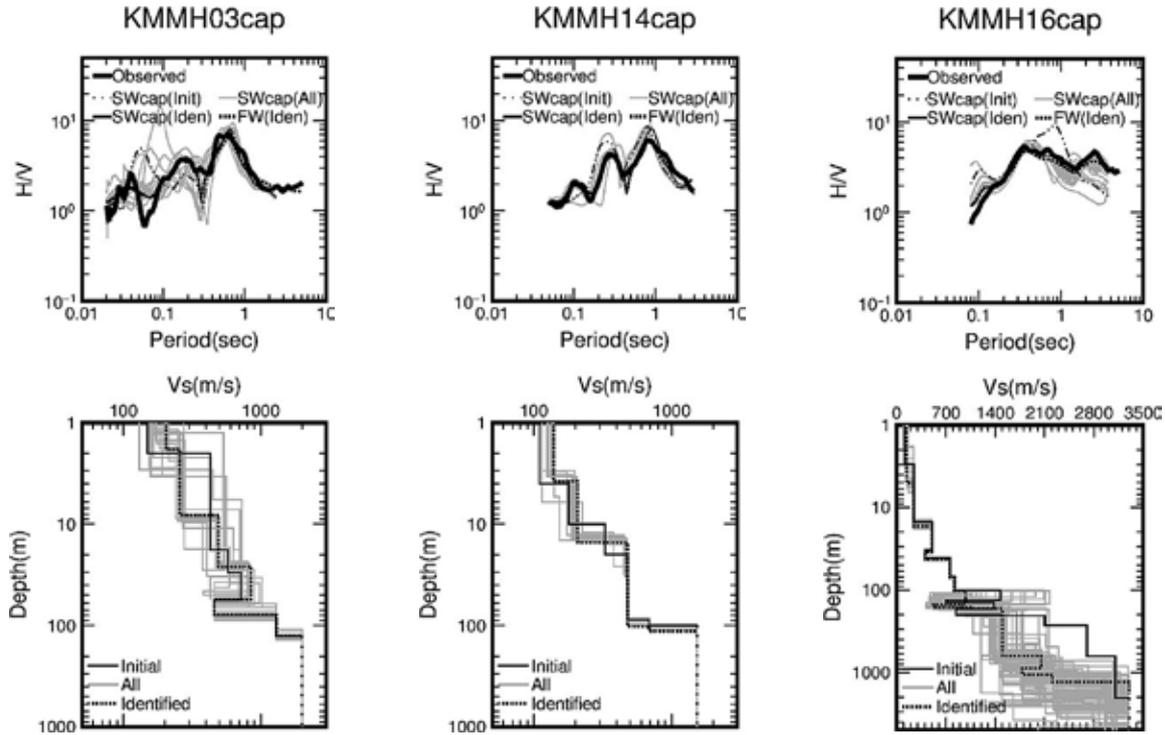


図2 菊池市 (KMMH03)、宇城市 (KMMH14)、益城町 (KMMH16) で強震観測点のH/V及び地盤構造の同定。上段で各種の水平/上下スペクトル比 (H/V) を、下段で地盤構造 (S波速度は深さに沿って変化する) を示した。黒く太い実線は観測 (obs) H/Vを、黒く細い点線は初期地盤構造 (下段で黒い実線で示すもの) を用いて算出した理論表面波 H/Vを、黒く細い実線は最適地盤モデル (下段で黒く太い点線で示すもの) を用いて算出した理論表面波 (SW) H/Vを、黒く太い点線は最適地盤モデル (キャップ層を除いて) を用いて算出した理論全波動 (FW) H/Vを、灰色実線は最適モデルを得られるまで生成した中間モデル (下段で灰色実線で示すもの) を用いて算出した理論表面波 (SW) H/Vを示した。なお、表面波H/Vを算出した際、もともとの地盤構造の下に、半無限空間の基本モードの10倍波長に相当する深さにS波速度が元の半無限空間の2倍速い地層 (キャップ層) が追加された。

4. 地盤構造妥当性の検討

KiK-net強震観測点で地表と地中の地震記録が得られるため、地震記録から地表の地震動H/Vと地表地中水平スペクトル比 (SRHSB: Spectral Ratio of Horizontal Surface motions to Bottom motions of borehole) が求められる。これらのスペクトル比を用いて地盤構造を同定することもできる。しかしながら、真の地盤構造が分からないため、同定された地盤構造同士を比較しても、どちらかが精度が高いのかは判らない。本報告で、微動H/Vから同定した地盤構造を用いて、理論の地震動H/VとSRHSBを算出し、それぞれ観測と合うなら、地盤構造は妥当性があると考えられる。

図3に、観測記録から求めた地震動H/VやSRHSBは黒色太い実線で、初期地盤構造モデルから算出した理論の地震動H/VやSRHSBは灰色実線で、最適地盤構造モデルから算出した理論の地震動H/VやSRHSBは黒色太い点線で示した。3つの観測点とも、初期地盤構造モデルから算出した理論の地震動H/VやSRHSBより、最適地盤構造モデルから算出した理論の地震動H/VやSRHSBのほうは観測と近いことが分かった。これは微動H/Vから同定した地盤構造の信頼性があると示唆し、妥当性があると考えられる。

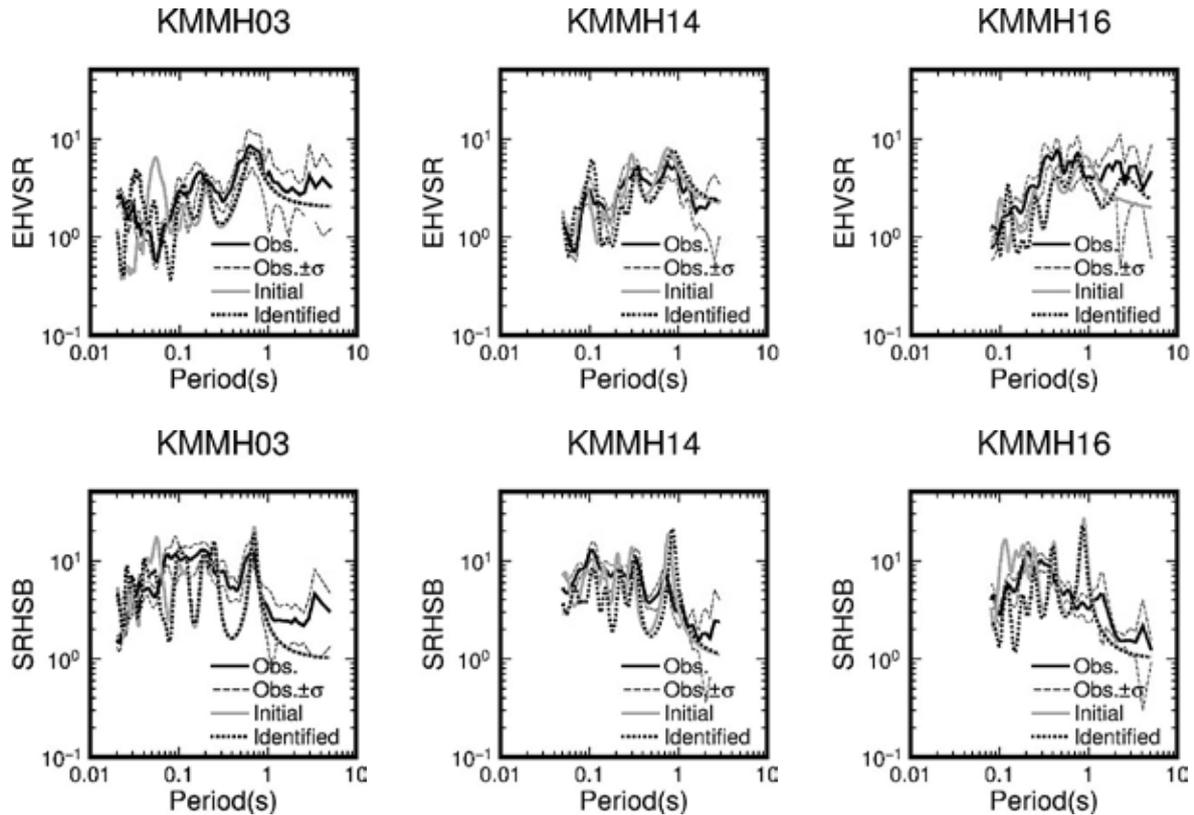


図3 菊池市 (KMMH03)、宇城市 (KMMH14)、益城町 (KMMH16) で地震動水平/上下スペクトル比H/V (上段) や地表地中スペクトル比SRHSB (下段)。黒色実線は観測したものを、黒色細い点線は観測値より一倍標準偏差が変わるものを、灰色線は初期地盤構造を用いて算出したものを、黒色太い点線は同定した最適地盤モデルを用いて算出したものを示した。

5. 結論

2016年熊本地震における本震の震度がそれぞれ6弱、6強、7と記録された3つの強震観測点で微動観測を実施した。拡散波動場に基づく微動H/VはLocked-mode近似法により高速で計算できるため、地盤構造の同定に応用した。同定した地盤構造を用いて算出した地震動H/Vや地表地中スペクトル比SRHSBは初期の地盤構造を用いて算出したものより、観測と良く説明できる。このことは地盤構造の妥当性があることを示しており、手法の有効性を示している。今後、益城町市街地にある微動観測点の地盤構造を同定する予定である。

謝辞

地震記録及びPS検層データは防災科学研究所より提供された。

参考文献

- 1) Nakamura Y (1989) . A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30 (1) : 25-33.
- 2) Lachet C, Bard PY (1994) . Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. Journal of Physics of the Earth, 42 (5) : 377-397.
- 3) Konno K, Ohmachi T (1998) . Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bulletin of the Seismological Society of America, 88: 228-241.

- 4) Arai H, and Tokimatsu K (2004) . S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. Bulletin of the Seismological Society of America, 94 (1) : 53-63.
- 5) Sánchez-Sesma FJ, Pérez-Ruiz JA, Luzón F, Campillo M, Rodríguez-Castellanos A (2008) . Diffuse fields in dynamic elasticity. Wave Motion 45: 641-654.
- 6) Sánchez-Sesma FJ, Rodríguez M, Iturrarán-Viveros U, Luzón F, Campillo M, Margerin L, García-Jerez A, Suárez M, Santoyo MA and Rodríguez-Castellanos A (2011) . A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. Geophysical Journal International, 186 (1) : 221-225.
- 7) Harvey DJ (1981) . Seismogram synthesis using normal mode superposition: the locked mode approximation. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 66: 37-69.
- 8) Wu, H., Masaki, K., Irikura, K. (2016) . An alternative method to identify underground velocity structures from microtremor H/V spectral ratio. Proceedings of 5 th IASPEI/IAEE International Symposium, Effects of Surface Geology on Seismic Motion, No. 30, Taipei.
- 9) García-Jerez A, Luzón F, Sánchez-Sesma FJ, Lunedei E, Albarello D, Santoyo MA and Almendros J (2013) . Diffuse elastic wavefield within a simple crustal model. Some consequences for low and high frequencies. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118 (10) : 5577-5595.