

地震動アレー観測記録に基づく表層地盤内の時空間変動スケール

Fluctuation Scale of Ground Motion in Surface Soil Layer
Based on Seismic Array Records

○中村博一 (東京大学大学院) 山崎文雄 (東京大学生産技術研究所)

Hirokazu NAKAMURA, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106

Fumio YAMAZAKI, ditto

連絡先 中村博一 FAX: 03-3408-2666 E-mail: nakamura@python.iis.u-tokyo.ac.jp

The spatially varying earthquake ground motion has a spatial variation that is frequently increased as a result of wave propagation in surface soil layers. The depth-dependence of the spatial variation is examined based on twelve earthquake events observed at ground level -1 m, -10 m, and -20 m in the Chiba array. After modeling the coherence function representing the spatial variation, some spatial variation parameters are analyzed at each depth to quantify the spatial variation, which can be utilized in the prediction of a design spectrum for spatially-extended underground structures. Then the spatial variation parameters, or the spatial correlation coefficient and normalized fluctuation scale, are modeled as a function of depth. It is shown as a result that the spatial correlation increases with the decrease of depth level beneath the surface, that the amount of the spatial variation at surface for horizontal and up-down components are estimated to be about 18% and 12% respectively, and that the amount of the spatial variation from the surface down to the -20 m level is small but comparable to that at the deeper soil layer.

Key Words: earthquake ground motion, Chiba array, spatial variation (correlation), underground motion, coherence function.

1. はじめに

地中構造物の地震時挙動をより現実的に予測するには、表層地盤内の地震動の空間変動を3次元的に考慮することが必要不可欠である。そのためにまず水平成層地盤の表面あるいは任意の深さにおける水平方向の地震動の空間変動に関してその深さ方向変化の様子を知る必要がある。

水平成層地盤を対象とした研究には、鉛直アレー観測記録に基づいて1次元波動伝播理論により地震時の地盤特性を推定した研究^{1,2)}、また平面アレー観測記録を用いて地表における地震動の空間変動特性を解析・モデル化した研究³⁾などがある。このように基盤上の土柱(1次元)あるいは地表面(2次元)の地震応答解析は数多く行われているが、利用できる3次元のアレー観測記録がほとんどないことも影響して、観測記録に基づいた表層地盤内における地震動の空間変動について検討している研究⁴⁾はあまりない。

一方、水平鉛直方向を考慮した地震動の空間変動の原因を解明することを目的として、表層地盤の速度構造に不均質性を割り付けた差分法や有限要素法を用いた数値解析が行われている。そこでは、仮定した不均質地盤に依存する地震動の空間変動を推定しているが⁵⁾、その結果は実証的というよりはまだ定性的であり、仮定した不均質性に対する妥当性は示されていない場合が多い。

表層地盤内における地震外力の性質を理解するために、本研究では特に地震動の空間変動に着目し、千葉アレー⁶⁾で観測された12の地震記録に基づいて地震動の空間変動を解析および検討する。解析には地下 -1 m, -10 m, および -20 mの各平面アレー加速度記録を用い、空間変動と等価な情報を持つコヒーレンス関数とこれを集約した空間変動パラメータ、つまり相関面積、空間相関係数、そして正規変動スケールを各深さにおいて定量化し、それらの値を用いて空間変動の深さ依存性を考察する。空間変動パラメータは深さ方向に変化する地震動の空間変動に対する理解を容易にするために必要なパラメータであり、不均質地盤の数値解析により得られる結果の検証にも利用可能である。

2. 確率波およびその2次の統計量

水平成層地盤の深さ z の層での震央方向($j=n$)、震央直交方向($j=r$)、および上下方向($j=u$)の加速度記録を定常均質確率波とすると、 (x_r, x_n) 地点と $(x_r + \xi_r, x_n + \xi_n)$ 地点での片側パワースペクトル G_{jj} を用いることによりコヒーレンス関数 γ_{jj} は(1)のように得られ、条件(2)を満たす⁷⁾。

$$\gamma_{jj}(\xi_r, \xi_n, z, f) = |G_{jj}(\xi_r, \xi_n, z, f)| / G_{jj}(0, 0, z, f) \quad (1)$$

$$\gamma_{jj}(0, 0, z, f) = 1.0 \quad (2)$$

Table 1 Location of Borehole Accelerometers (○: used, △: unused).

Depth (m)	Borehole														
	C0	C1	C2	C3	C4	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P0
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	△	△	△	△	△										
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
20	○					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
40	△									△					

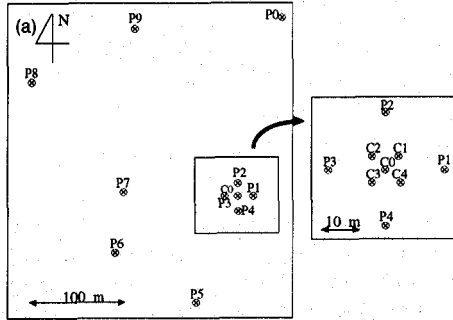
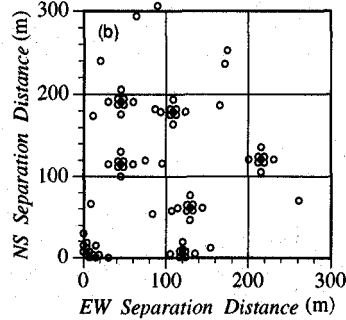


Fig. 1 (a) Layout of near surface (GL - 1 m) accelerometers, and (b) distribution of separation vectors resulting from those 15 combinations.

Table 2 P- and S-wave time window (in seconds) for each event used.

Event	P-window	S-window
8510	0.5~8.0	8.0~18.0
8519	2.0~9.5	11.0~21.0
8525	0.5~8.0	8.0~18.0
8601	0.5~8.0	9.0~19.0
8602	2.0~9.5	17.0~27.0
8722	0.5~8.0	8.0~18.0
8816	2.0~9.5	13.0~23.0
8823	2.0~9.5	11.0~21.0
9013	0.0~7.5	7.5~17.5
9014	0.0~7.5	7.5~17.5
9113	—	9.0~19.0
9202	0.5~8.0	12.0~22.0



確率波の空間相関構造が非等方の場合を考えると、まず空間変動パラメータの1つとして(3)で表される面積の次元を持つ相関スケール、つまり相関面積が得られる⁷⁾。

$$\theta_{ij}(z, f) = \iint_{\xi} \gamma_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) d\xi_r d\xi_t \quad (3)$$

ここで深さ z の層において相関面積は、確率波の各振動数成分波の相関が相対的に大きい範囲を表すスケールと考えることができ、相関面積の値が大きければ、考慮する空間領域において確率波の相関の度合いが高いことを示す。

また考慮する時間ウィンドーおよび振動数帯域における(4)により得られるその層を代表する分散 σ_{ij}^2 を用いて、(1)で定義されるコヒーレンス関数と(5)で定義される単位面積を持つパワースペクトル g_{ij} から、空間変動パラメータの1つとして(6)で表される空間相関係数 η_{ij} が得られる^{7),8)}。

$$\sigma_{ij}^2(z) = \int_f G_{ij}(0, 0, z, f) df \quad (4)$$

$$g_{ij}(0, 0, z, f) = G_{ij}(0, 0, z, f) / \sigma_{ij}^2(z) \quad (5)$$

$$\eta_{ij}(\xi_r, \xi_t, z) = \int_f g_{ij}(0, 0, z, f) \gamma_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) df \quad (6)$$

ここで深さ z におけるこの空間相関係数は、振動数領域において $g_{ij}(0, 0, z, f) df$ の重みを考慮したコヒーレンス関数の重み付き積分を表している。

(6)の空間相関係数からさらに空間変動パラメータの1つとして(7)で表される変動スケールが得られる⁷⁾。

$$\alpha_{ij}(z) = \iint_{\xi} \eta_{ij}(\xi_r, \xi_t, z) d\xi_r d\xi_t \quad (7)$$

ここで(6)で表される空間相関係数と確率波の2次の統計量

の関係を以下のように示すことができる。つまり、パワースペクトル G_{ij} と相関関数 R_{ij} の関係は、

$$R_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, \tau) = \int_f G_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) e^{2\pi i f \tau} df \quad (8)$$

$$G_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) = -2 \int_{\tau} R_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, \tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (9)$$

のように得られるので、考慮する確率波が実体波であり各地点の波形間の時間ラグ τ_{0ij} が振動数に依存しない場合には、パワースペクトルを(10)のように書き表すことができる。したがって相関関数、パワースペクトル、および空間相関係数の関係は(11)のように表される。

$$G_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) = G_{ij}(0, 0, z, f) \gamma_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) e^{-2\pi i f \tau_{0ij}(\xi_r)} \quad (10)$$

$$R_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, \tau_{0ij}(\xi_r)) = \int_f |G_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f)| df = \sigma_{ij}^2(z) \eta_{ij}(\xi_r, \xi_t, z) \quad (11)$$

本章ではコヒーレンス関数、相関面積、空間相関係数、および変動スケールの定義を示した。以下ではこれらの空間変動パラメータの深さ依存性について検討する。

3. コヒーレンス関数 γ_{ij} の深さ依存性

本研究では千葉アレー⁹⁾で観測された12の地震記録に基づいて以下の解析を行う。Fig. 1は、工学的にはほぼ水平成層地盤と考えられる千葉サイトにおいて、約300 m × 300 mの面積をカバーしている加速度計の平面配置およびその地点間距離の空間分布を示す。また平面アレーとして用いる地下-1 m, -10 m, および-20 mにおける加速度計の位置

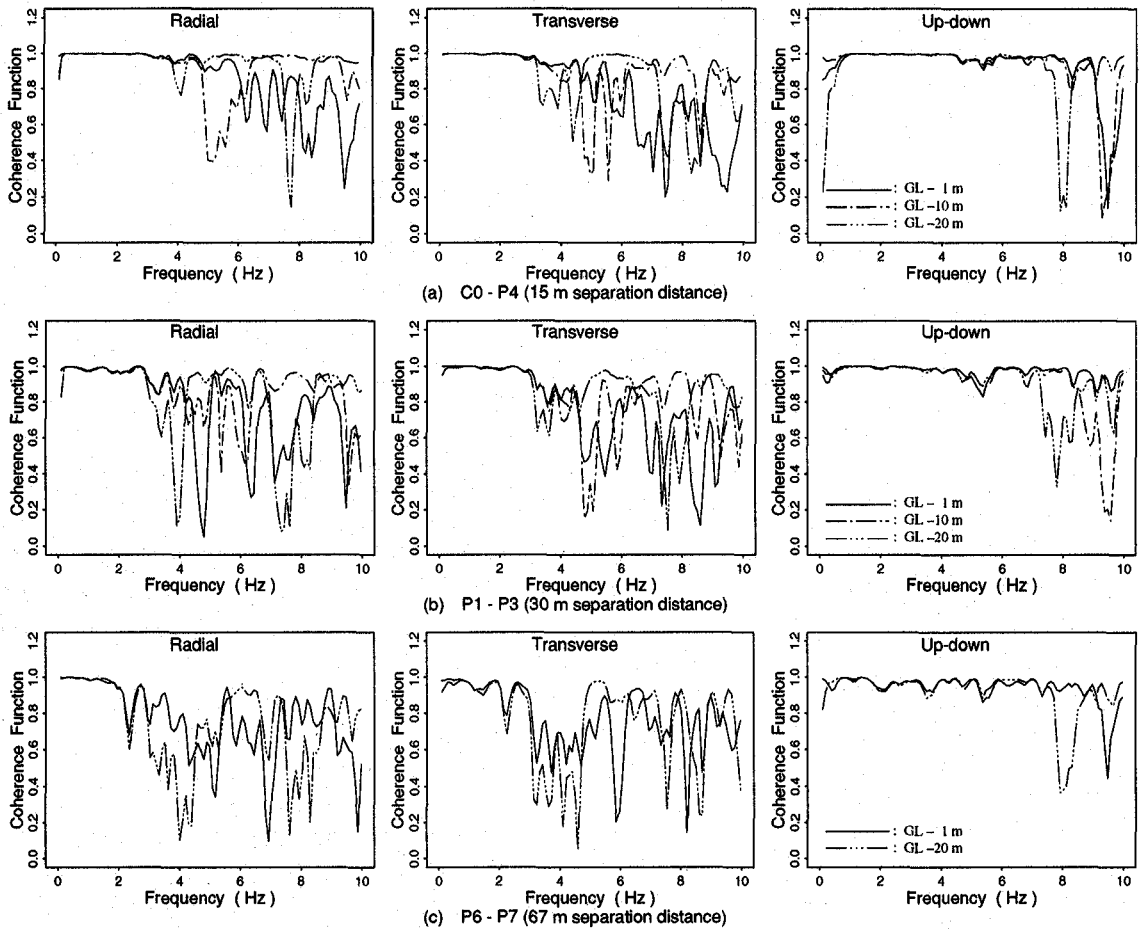


Fig. 2 Coherence functions for event 8519 at each depth (i.e., GL -1 m, GL -10 m, and GL -20 m); (a) C0 - P4, (b) P1 - P3, (c) P6 - P7.

を Table 1 に示しており、Table 2 に示すように上下動では P 波に対応する初動部分の 7.5 秒、水平動では S 波に対応する強振部分の 10 秒の時間ウィンドーを解析する。ただし加速度記録の水平成分は震央方向と震央直交方向のものに変換している。本解析では短い時間ウィンドーと狭い空間を考慮することによりアレー観測記録を定常均質確率波と仮定している。また、有限の加速度記録から 2 地点間のコヒーレンス関数を推定するためにバンド幅が 0.4 Hz の Parzen ウィンドーを用いてスペクトルを平滑化している。ここで加速度記録のサンプリング間隔は 0.005 秒である。ただし以上で示したコヒーレンス関数に関する解析手法の妥当性に関する説明³⁾はここでは省略する。

まず地下 -1 m, -10 m, および -20 m の平面アレー観測記録に対するコヒーレンス関数を解析しその深さ依存性について検討する。例として Fig. 2 に地震記録 8519 (Table 2 参照) から求めた各深さにおける 2 地点間 C0 - P4, P1 - P3, および P6 - P7 のコヒーレンス関数を示す。また特定の振動数での各 2 地点間に対するコヒーレンス関数の値を地点間

距離に関して Fig. 1 (b) のように並べ変えて線形補間すると振動数に関するものと同様地点間距離に関するコヒーレンス関数が得られる。そこで地震記録 8519 の震央直交方向成分に対して利用できる地点の観測記録からコヒーレンス関数を推定し、地点間距離に関して線形補間して得られたコヒーレンス関数を Fig. 3 に示す。ただし、地下 -10 m の平面アレー観測記録に関しては地点間距離が約 150 m までのものしかないため Fig. 3 (b) には 150 m 以上に対する結果は示されていない。ここで、コヒーレンス関数は振動数に関しては等間隔であるのに対し地点間距離に関しては等間隔ではないことと、Fig. 3 の下段には 1 Hz, 3 Hz, 6 Hz, そして 9 Hz の振動数に対してコヒーレンス関数を示しているが地点間距離に関するコヒーレンス関数は考慮する振動数によってかなり異なることに注意する必要がある。

Fig. 3 には震央直交方向成分に対しての解析結果を示しているが、Fig. 2 からわかるように震央方向成分および上下成分に対してもコヒーレンス関数の減少に関しては同様の傾向がある。これらの図から、3 成分ともにコヒーレンス

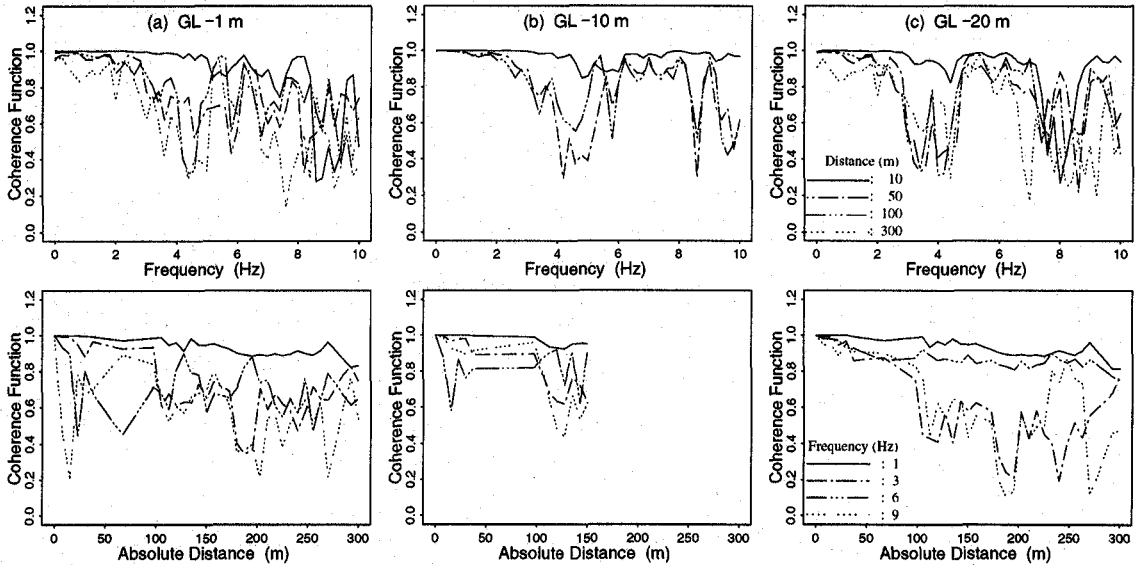


Fig. 3 Coherence function (transverse component of event 8519) interpolated with respect to absolute distance (top: frequency; bottom: distance).

関数は高振動数になるにつれて小刻みに変動しながら減少しているが、上下成分から得られるコヒーレンス関数は水平成分のものよりも全体的に大きく、上下成分に対応する地盤の卓越振動数は水平成分のものと比較して高振動数側にある。つまり水平成分は4~5 Hzおよび8 Hz付近、上下成分は8~10 Hz付近で特に大きく減少している。S波部分のスペクトル比を鉛直アレー記録から推定すると、地下-10 mと-1 mに対しては約5 Hz、地下-20 mと-1 mに対しては約4 Hzと8 Hzにピークが存在することから、前述の千葉サイトの表層地盤構造がほぼ水平成層であることを考慮すると、地震波が増幅される過程で特定の振動数およびその振動数付近の成分波が相互に干渉し合い、水平方向の空間変動が特に大きくなっている可能性がある。また、コヒーレンス関数の減少により地盤には相対変位³⁾が生じることが示されており、表層地盤内では特に卓越振動数付近の成分波による相対変位が考慮する2地点における全体の相対変位に大きく寄与することが予想される。したがって、地中構造物の地震応答解析などにコヒーレンス関数を利用する場合は、その単調な減少ばかりでなく表層地盤内の各深さでの卓越振動数付近の大きな減少に留意する必要がある。

しかしながら、ここでコヒーレンス関数の全体的な傾向を捕えるために、コヒーレンス関数の極大値³⁾から得られる包絡面を求めてみると、この包絡面は深くなるにつれて大きくなる。つまり、地震動は基盤(深部)においてほぼ空間的にコヒーレントであると考えられることから、地中におけるコヒーレンス関数はその深さが基盤から地表に近づくにつれて徐々に乱され減少しており、その減少は高振動数ほど大きいことがこの結果から推察できる。Fig. 2には地点間距離が67 mまでのコヒーレンス関数を示しているが、Fig.

2とFig. 3の結果から、このコヒーレンス関数の深さ依存性は近距離かつ高振動数のものほど顕著であることがわかる。この解析結果は工学的認識と調和的であり、この結果から地震時に見掛け上一塊となって動く地盤のサイズは深いところほど大きいであろうということが推測される。

4. コヒーレンス関数モデルおよびその相関面積³⁾

アレー観測記録に基づく多くのコヒーレンス関数モデルが提案されており、ここでは非等方の空間相関構造を持つ2つのガウス型指数関数の振動数依存の重み付き和として提案されている次式のコヒーレンス関数モデル³⁾を用いる。

$$\gamma_{ij}(\xi_r, \xi_l, z, f) = e^{-c_0 f} \exp\left(-\frac{f^2 + c_3^2}{c_1^2} \xi^2\right) + \left(1 - e^{-c_0 f}\right) \exp\left(-\frac{f^2}{c_2^2} \xi^2\right) \quad (12)$$

$$\xi^2 = c_4^2 \xi_r^2 + \xi_l^2$$

このモデルは深さzの関数である5つのパラメータ($c_0 \sim c_4$)を含み、条件(2)を満たしている。 $c_0 f$ はコヒーレンス関数の近距離での振動数による減少を表し c_0 はその係数である。また c_4 はコヒーレンス関数の空間的な異方性を表す。このモデルの各指数項は各々相関面積(3)を持ち、これらの相関面積は、地点間距離が約50 m以上で $c_1^2 / (f^2 + c_3^2)$ 、50 m以下で c_2^2 / f^2 を想定したものになっている。

千葉アレー観測記録に基づくため地点間距離に関しては300 mまで、振動数に関しては10 Hzまでを考慮し、Gauss-Newton法を用いた非線形回帰分析により、このモデルのパラメータを推定した。本研究ではコヒーレンス関数の極大値を用いてモデルパラメータを推定するので、推定された

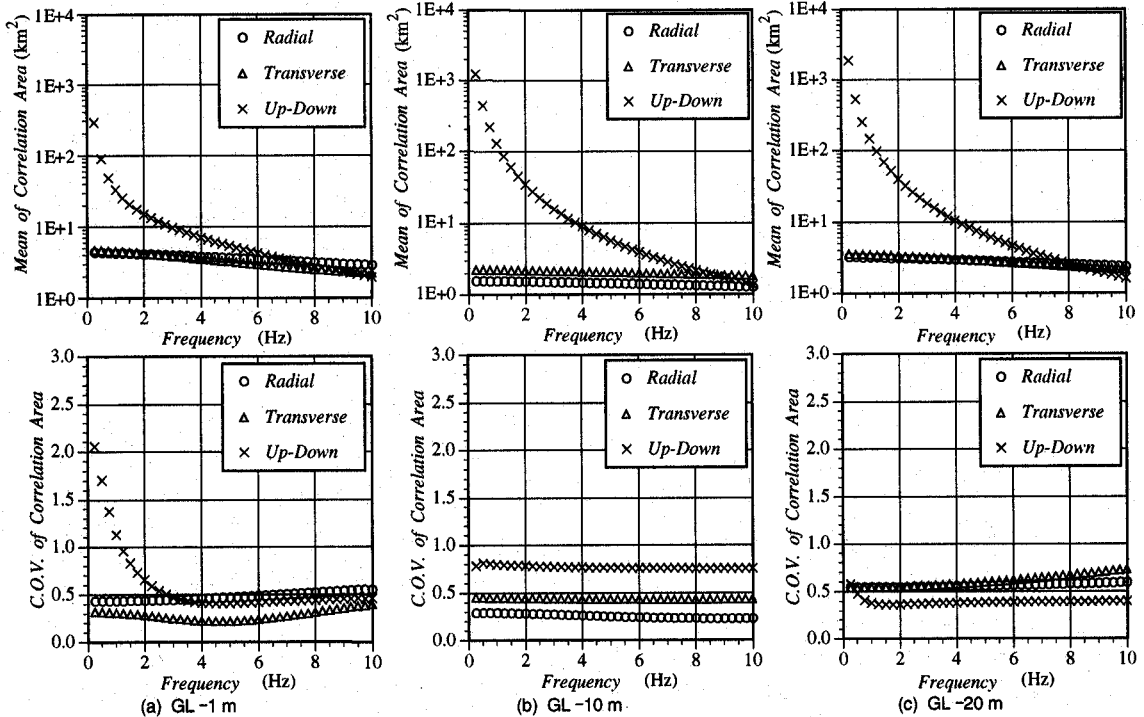


Fig. 4 Frequency-dependent correlation area (km²) for each depth; GL-1 m, GL-10 m, and GL-20 m (top: mean; bottom: C.O.V.).

モデルは、実際のコヒーレンス関数を包括するような曲面になる。ここでは示さないが、各地震記録に対して推定し平均したパラメータの値は振動方向成分や深さによっても異なり、例えばこのモデルの相関面積に関係する c_1 および c_2 は各々 7.0~74.5 および 0.08~0.20 の範囲にある。一方、空間的異方向性を表す c_4 はほぼ 1.0 に近い値となった。

(12) のモデルから空間変動パラメータの一つである相関面積を (13b) のように導くことができる。このモデルパラメータは地点間距離が約 300 m までの千葉アレー観測記録に基づいて推定されたものであるが、ここでは 300 m 以上でもこのモデルが成立すると仮定する。また c_1 に比べて c_2 の値が非常に小さいので (13b) の第 2 項は $f = 0$ Hz 付近以外で第 1 項と比べて非常に小さくなり近似式 (13c) を得る³⁾。

$$\theta_{ij}(z, f) = 4 \int_0^\infty \int_0^\infty \gamma_{ij}(\xi_r, \xi_t, z, f) d\xi_r d\xi_t \quad (13a)$$

$$= \frac{\pi}{c_4} \left\{ e^{-c_0 f} \frac{c_1^2}{f^2 + c_3^2} + \left(1 - e^{-c_0 f} \right) \frac{c_2^2}{f^2} \right\} \quad (13b)$$

$$\approx \frac{\pi}{c_4} \frac{(c_1/c_3)^2}{1 + (f/c_3)^2} e^{-c_0 f} \quad (13c)$$

Fig. 4 の上段には相関面積の平均値を示しており、一般に相関面積そのものに関しては低振動数域で地震波動の空間的な相関が高いことが、また水平成分よりも上下成分の方が空間的な相関が高いことがこの図からわかる。次に地下

-1 m, -10 m, および -20 m の相関面積を比較すると、水平成分に関しては深くなるにつれて大きくなるという傾向はみられないが、上下成分に関しては深いところほど大きくなり、それは低振動数のものほど顕著である。またこの図からコヒーレンス関数モデルが 300 m よりもかなり大きい地点間距離でゼロに漸近していることが推察される。一方、Fig. 4 の下段に示している相関面積の変動係数を示しており、この図から変動係数は 3 成分ともに、また各深さともに約 0.5 というほぼ同様の値を示していることがわかる。

第 3 章で示したコヒーレンス関数の解析では、空間相関は高振動数域ほど深さに依存するという結果が得られているが、(13c) による結果は期待した結果と隔たりを示しており、この相関面積の解析結果はコヒーレンス関数の解析結果と調和的でない。推定したコヒーレンス関数が考慮する空間領域でほぼゼロに漸近している場合にはこの相関面積を無限積分により精度よく推定することができるが、この場合にはコヒーレンス関数がゼロに漸近していないのに、地点間距離が約 300 m までの記録から推定されたコヒーレンス関数モデルのパラメータを用いて地点間距離に関する無限積分をしたためであるということと、当然のことながら推定したモデルパラメータが約 300 m 以上のコヒーレンス関数に対する外挿部分を期待どおりに表しておらず、推定された相関面積はこの外挿による影響を受けているためであると考えられる。

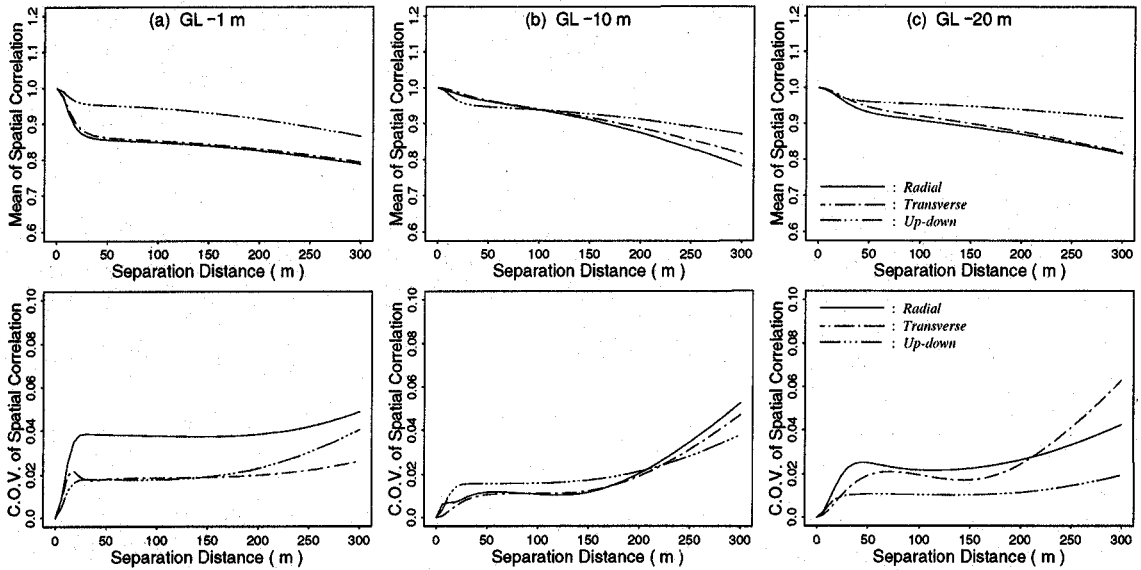


Fig. 5 Spatial correlation coefficient for each depth; GL-1 m, GL-10 m, and GL-20 m (top: mean; bottom: C.O.V.).

5. 空間相関係数 η_{ij} およびそのモデル化

空間相関係数を推定するためにコヒーレンス関数モデルの代りに地点間距離に関して適切に補間したコヒーレンス関数を用いることも考えられるが、ここでは第4章で示した既に推定されているコヒーレンス関数モデルを用いる。(6)により空間相関係数を計算でき、水平2成分および上下成分に対する地下-1 m, -10 m, および-20 mの各深さで推定した空間相関係数の平均値および変動係数を各々 Fig. 5 に示す。ただし、ここでは地点間距離を震央方向に対して 45° の方向にとっている。Fig. 5 の上段の図からは、一般に上下成分の空間相関係数は水平成分のものより大きいことがわかる。また各空間相関係数の値は50 m以下の近距離においてコヒーレンス関数の減少傾向をよく反映しており、地点間距離が離れるにつれて小さくなっている。一方、各地点間距離に関する空間相関係数は深いところほど1.0に近づいている。ただし地下-10 mの水平成分に関しては空間相関係数の近距離での減少がうまく表れていないことからコヒーレンス関数の近距離に関するモデルパラメータがあまりうまく推定されていないことがわかる。一方 Fig. 5 の下段の図からは、全ての空間相関係数の変動係数が地点間距離の増加につれて大きくなっていることがわかる。地下-10 mに関しては3成分ともほぼ同様の傾向を示しているが、地下-1 mでは震央方向成分の変動係数が他の2成分のもの比べて大きく、地下-20 mでは上下成分の変動係数が他の2成分のもの比べて小さい。これらの空間相関係数の解析結果は、千葉アレー観測記録を用いたコヒーレンス関数の解析結果から推定しているので、地下-1 mと-20 mに関しては地点間距離が約300 m以下を、地下-10 mに関しては約150 m以下をカバーするものである。そのため、

利用しているアレー観測記録がカバーする範囲内に関してはそれなりに適切な結果が推定されていると考えられる。

通常利用できるデータ数が少ない場合モデル化は難しいが、ここでは Fig. 2 と Fig. 3 に示したコヒーレンス関数の解析結果および Fig. 5 に示す空間相関係数の平均値から、空間相関係数が深くなるにつれて1.0に漸近することを仮定して、空間相関係数モデルを(14)のように提案する。

$$\eta_{ij}(z; \xi_r, \xi_t) = 1 - c_\eta(\xi_r, \xi_t) \exp\{-z/z_\eta(\xi_r, \xi_t)\} \quad (14)$$

ここで、 $1 - c_\eta$ は地表面での空間相関係数の値であり、 z_η はこのモデルの指数部に対する深さ方向の相関距離に対応する相関深さである。ここでは(14)のモデルパラメータの推定結果をわかりやすく表示するために Fig. 5 の (b) 地下-10 mを除く、(a) 地下-1 mと(c) 地下-20 mの空間相関係数の平均値を用いて(14)のモデルパラメータの値を計算した。その結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示している。

Fig. 6 は各地点間距離に対して地下-1 mと-20 mの空間相関係数の値および深さに関する空間相関係数のモデル曲線を併せて示しており、この図から近距離のものほど地下-1 mと-20 mの空間相関係数の差が大きいことがわかる。また、Fig. 7 (a) は地点間距離に関する地表面での空間相関係数の減少を表しており、この図よりモデルパラメータ c_η の値が近距離での急激な増加をとめない地点間距離の増加につれて大きくなっていること、水平成分に対する空間相関係数の値が上下成分のもの2~3倍であることがわかる。一方 Fig. 7 (b) は空間相関係数の相関深さ z_η の値を表しており、水平成分に対する z_η は地点間距離の増加につれて単調に大きくなっているのに対して、上下成分のものは70 m位でピークを示している。つまり、水平成分に対しては

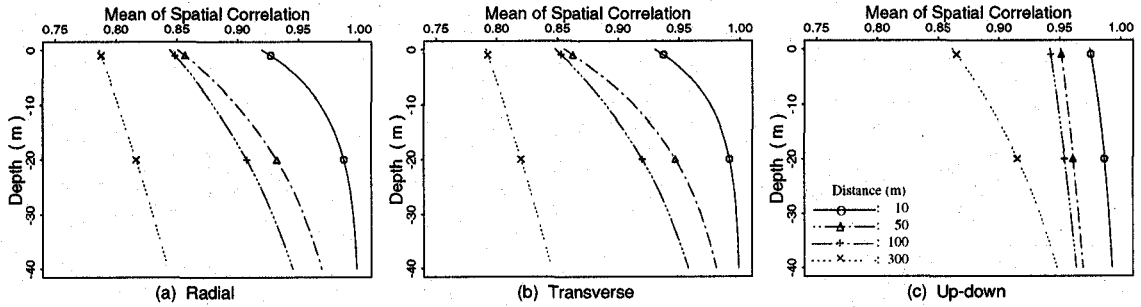


Fig. 6 Mean of spatial correlation coefficient (Hz) at depths of GL -1 m and GL -20 m and its depth-dependent model for each horizontal distance.

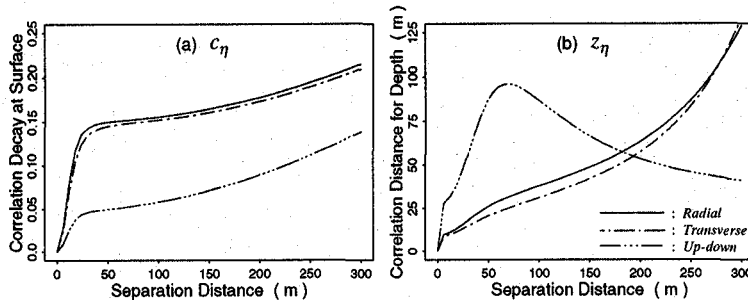


Fig. 7 The parameters estimated for depth-dependent model of spatial correlation coefficient (Hz) at depths of GL -1 m and GL -20 m.

地点間距離が離れるにつれて地下-1 m と -20 m の空間相関係数の差が小さくなっているが、上下成分に対しては地点間距離が約 70 m 以上になると逆に地点間距離が離れるにつれて地下-1 m と地下-20 m の空間相関係数の差が大きくなっている。

6. 変動スケール α_{ij} およびそのモデル化

地点間距離が約 300 m 以上に関しては、千葉アレー観測記録のカバーする範囲外ということから、地点間距離に関する無限積分の値を (η) に対して用いることは難しい。実際第 4 章で示したようにこの無限積分からは必ずしも適切な結果が推定されない。そこで変動スケール α_{ij} の深さ依存の傾向を調査するために、 α_{ij} として利用できる空間領域での積分値を考え、その空間領域で正規化したものを考慮する方が望ましい。以上から本研究では、考慮する千葉アレーの ξ が空間領域をカバーする 300 m \times 300 m の面積 A_0 までの積分値を α_{ij} とし、この α_{ij} をその面積 A_0 で正規化する。つまり (15) を正規変動スケールとして新たに定義する。

$$\alpha_{0ij}(z) = \alpha_{ij}(z)/A_0 \quad (15)$$

ただし一般に地点間距離の増加につれてコヒーレンス関数が小さくなるので、正規化された α_{ij} は考慮する空間領域を大きくとるほど小さくなる。ここでは空間相関係数の場合と同様に第 4 章で既に推定されているコヒーレンス関数モデルを用い、(15) の正規変動スケール α_{0ij} を数値的に推定する。(15) により各深さにおいて推定した水平成分と上下成分に対する正規変動スケールの平均値および変動係数

を、各々 Fig. 8 の (a) および (b) に示す。Fig. 8 (a) では各正規変動スケールの値は深くなるにつれて 1.0 に近づいている。また Fig. 8 (b) からこれらの変動係数は全体的に 0.25 付近であるが、震央方向成分の変動係数は地下-1 m のものが他と比べて大きく、震央直交方向成分の変動係数は深くなるにつれて大きく、そして上下成分の変動係数は深くなるにつれて小さくなっていることがわかる。

空間相関係数の場合と同様に、通常利用できるデータ数が少ない場合には意味のあるモデル化は非常に難しいが、漸近条件を持つ正規変動スケールに関してはそのモデル化が有効であると考えられる。そこで前章で示した空間変動パラメータおよび Fig. 8 (a) に示す正規変動スケールの解析結果に基づき、正規変動スケールが漸近条件を持つことを仮定して、そのモデルを (16) のように提案する。

$$\alpha_{0ij}(z) = 1 - c_\alpha \exp(-z/z_\alpha) \quad (16)$$

ここで $1 - c_\alpha$ は地表面での正規変動スケールの値であり、 z_α はこのモデルの指数部の相関距離に対応するパラメータである。Fig. 8 (b) の変動係数を用いた重み付き最小自乗法により Fig. 8 (a) に示している正規変動スケールのデータに対して (16) のモデルパラメータの値を推定した。

その結果を Table 3 に示しており、 c_α の値から地表面での水平成分に対する正規変動スケールの値が上下動のもの約 0.9 倍であること、 z_α の値から水平成分に対する相関距離が上下成分のもの約 1.8 倍であることがわかる。また地表面における地震動の空間変動量と比較して、地下-20 m までに既に生じている空間変動量は震央方向成分で約 78

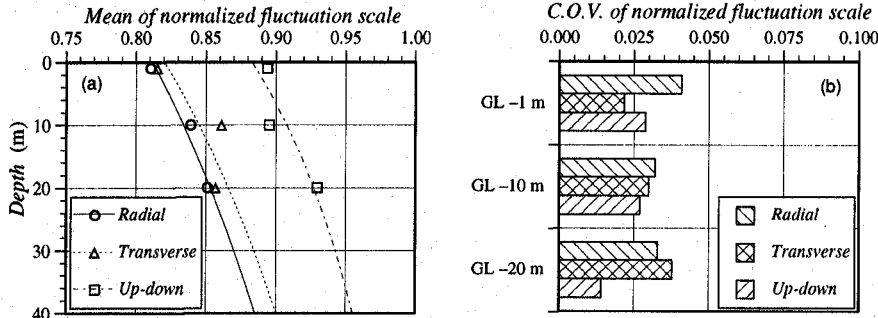


Fig. 8 Mean and C.O.V. of normalized fluctuation scale at depths of GL-1 m, GL-10 m, and GL-20 m, and its depth-dependent model.

Table 3 The parameters estimated for depth-dependent model of normalized fluctuation scale.

Vibration component	Parameters of the model $c_a(-)$	$z_a(m)$	Coefficient of determination
Radial	0.188	81.0	0.94
Transverse	0.180	67.9	0.69
Up-down	0.117	41.9	0.85

%, 震央直交方向成分で約 74%, 上下成分で約 62% に達していることがわかる。また Fig. 8 (a) には推定したモデルをデータと併せて示しており、前述の理由により地下-10m に対する値が他のものよりもモデル曲線から離れているが推定されたモデルパラメータは妥当な値を示している。

6. まとめ

本研究では 12 地震記録に基づいて工学的にはほぼ水平成層地盤と考えられる千葉サイトにおいて観測された地震動の空間変動パラメータの深さ依存性を検討した。解析には地下-1m, -10m, および-20m の各深さにおける平面アレー加速度記録の実体波部分を用いた。考慮した地震動の空間変動パラメータは、コヒーレンス関数とコヒーレンス関数から得られる相関面積、空間相関係数、および正規変動スケールであり、これらは表層地盤の不均質性の検証時に利用可能と考えられる。以下に得られた結果をまとめる。

1) コヒーレンス関数は深くなるにつれて大きくなる傾向を示し、特に近距離かつ高振動数域でその傾向が顕著であること、2) コヒーレンス関数は高振動数になるにつれて局所的に変動しながら減少していくが、コヒーレンス関数にはさらに地表面と表層地盤内との間で生ずる重複波の振動数付近での大きな減少が存在することがわかった。したがって 3) 地中構造物の地震応答解析にこの極大値を包括するように推定したコヒーレンス関数モデルを利用する場合は考慮する深さにおける地盤の卓越振動数付近のコヒーレンス関数の大きな減少を別途考慮する必要性を示した。また 4) コヒーレンス関数と同様に空間相関係数も深くなるにつれて大きくなり、ここで考慮した振動数域および空間領域に関しては、水平成分では近距離になるにつれて、

上下成分では地点間距離が約 70m を境にしてそこから離れるにつれてその増加傾向が顕著であること、また 5) 正規変動スケールも深くなるにつれて大きくなり、コヒーレントな地震動と比較した場合に 300m × 300m の面積における地表面での空間的な相関は、水平成分で約 18%, 上下成分で約 12% 減少 (Table 3) していること、および表層地盤内の不均質性により生じたと考えられる地下-20m 以浅の空間変動量は地下-20m 以深で既に生じているものよりも小さいながらもかなりの割合を占めることを示した。

参考文献

- 1) Elgamal, A. -W., M. Zeghal, H. T. Tang, and J. C. Stepp: Lotung Downhole Array. I: Evaluation of Site Dynamic Properties, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 4, pp. 350-362, 1995.
- 2) Zeghal, M., A. -W. Elgamal, H. T. Tang, and J. C. Stepp: Lotung Downhole Array. II: Evaluation of Soil Nonlinear Properties, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 4, pp. 363-378, 1995.
- 3) 中村博一, 山崎文雄: 高密度アレー観測記録に基づく地震動の空間相関モデル, 土木学会論文集, No. 519/I-32, pp. 185-197, 1995.
- 4) Katayama, T.: Use of Dense Array Data in the Determination of Engineering Properties of Strong Motions, *Struct. Safety*, Vol. 10, pp. 27-51, 1991.
- 5) Menke, William, Arthur L. Lerner-Lam, and Rakesh Mithal: Spatial Coherence of 5-25 Hz Seismic Wavefields at a Hard Rock Site, *Struct. Safety*, Vol. 10, pp. 163-179, 1991.
- 6) Katayama, T., F. Yamazaki, S. Nagata, L. Lu and T. Turker: A Strong Motion Database for the Chiba Seismometer Array and its Engineering Analysis, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 19, pp. 1089-1106, 1990.
- 7) Vanmarcke, E.: *Random Fields: Analysis and Synthesis*, MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- 8) Harada, T.: Probabilistic Modeling of Spatial Variation of Strong Earthquake Ground Displacements, *Proc. 8th World Conf. Earthquake Eng.*, Vol. II, pp. 605-612, 1984.
- 9) 川上英二, 佐藤靖彦: 地盤の相対変位・ひずみの推定結果に及ぼす地震波形の変形の影響, 土木学会論文報告集, No. 337, pp. 37-46, 1983.