

表層地盤の不均質性が隣接地点間における地震動の空間変動特性に与える影響

徳光 亮一^{*1}・青木 雅嗣^{*2}・山本 優^{*2}・内山 泰生^{*3}・田子 彰大^{*4}・大野 晋^{*5}

Keywords : subsurface soil, heterogeneity, ground motion, spatial variation, acoustic tomography

表層地盤、不均質性、地震動、空間変動、音響トモグラフィ

1. はじめに

地震時に地表に伝播した地震動は、離間距離が数m～数十mとごく隣接した地点間でも振幅や位相に空間的な変動が見られる。こうした地震動の空間変動は建物の応答に影響を与え、特に大規模構造物においては、入力地震動の高周波成分を低減させる効果および上部建物における回転またはねじれ振動を励起させる可能性が指摘されている（例えば¹⁾）。

隣接地点間における地震動の空間変動の発生は、図-1に示すとおり、土の種類や局所的な空隙等に伴う表層地盤の空間的な不均質性に起因し、表層地盤の空間的な不均質性が地震動の空間変動特性に与える影響を分析した文献も存在する（例えば²⁾）。また地盤の速度構造の不均質性を把握することを目的に、ボーリング孔での速度検層データに基づき、地盤の速度構造の不均質性を統計的に評価した事例も見られる³⁾。ただし、速度検層データから得られる地盤の不均質性は、基本的に1次元的な情報に過ぎない。同一敷地内の複数のボーリング孔で速度検層を実施し、水平方向の不均質性を推定した事例も存在するが（例えば⁴⁾）、空間的な地盤の不均質性を把握するには限界がある。

本検討では実地盤を対象に音響トモグラフィ探査を実施し、表層地盤の2次元断面上における空間的な不均質性を調査する。また表層地盤の空間的な不均質性が隣接地点間における地震動の空間変動に与える影響について、地震観測記録および不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーションにより分析する。

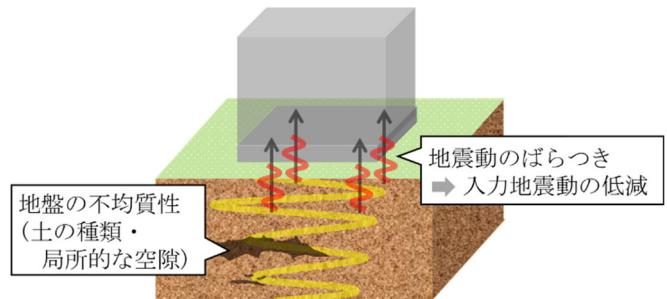


図-1 地盤の不均質性と地震動の空間変動
Fig.1 Heterogeneity of subsurface soil and spatial variation of ground motion

2. 実地盤の不均質性

2.1 解析対象地盤

本検討では、過去に千葉アレイ観測施設として稠密地震観測の実績がある東京大学生産技術研究所旧西千葉キャンパスの敷地を対象に、音響トモグラフィ探査を実施した。千葉アレイ観測施設の配置図および音響トモグラフィの探査測線を図-2に示す。本検討では探査測線の長さ、探査深さとともに約50mとした。

探査測線の両端においてボーリング調査を実施した。標準貫入試験の結果およびボーリング孔より採取した土質標本から推定した地層の層序を図-3に示す。地表～G.L.-10m付近までは標準貫入試験のN値は10以下であるが、G.L.-10m以深より徐々に大きくなり、G.L.-30m付近でN値は50に到達する。土質はG.L.-7m以浅が主にロームである。G.L.-7m以深の土質は主に細砂であるが、一部の層では貝殻も確認された。なお、両方のボーリング孔において、N値および地質の深さ方向

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 基礎構造研究室

*2 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

*3 技術センター 都市基盤技術研究部

*4 J F E シビル（株）

*5 東北大学

の分布に大きな差異は確認されなかった。このことから、現地の地層はほぼ平行成層であると考えられる。

図-2 に示す千葉アレイ観測施設の地震計のうち、過去に C0 観測点において PS 検層が実施されている。片山他(1990)⁵⁾は PS 検層結果に基づき地震波の P 波速度 (V_p) および S 波速度 (V_s) を推定し、表-1 に示すとおり地盤モデルを構築している。

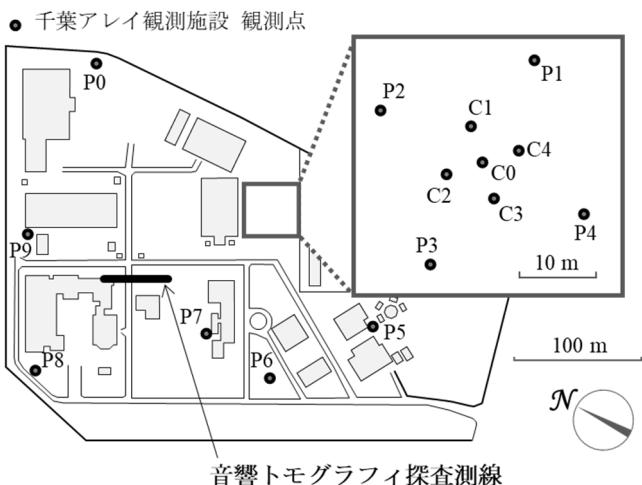


図-2 千葉アレイ観測施設⁵⁾と音響トモグラフィ探査測線
Fig.2 Chiba array site and acoustic tomography survey line

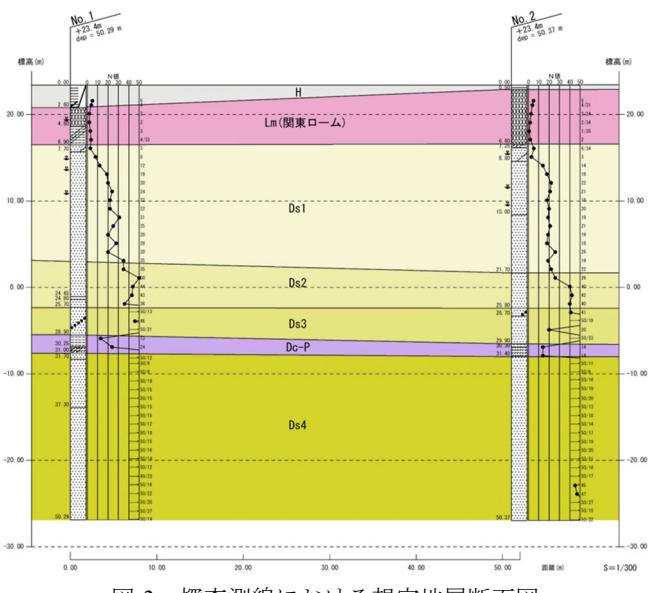


図-3 探査測線における想定地層断面図
Fig.3 Cross section of strata expectation along the survey line

表-1 千葉アレイ観測施設の表層地盤モデル⁵⁾

Table 1 Subsurface soil model of Chiba array site

層 No.	層厚(m)	S 波速度(m/s)	P 波速度(m/s)
1	5	140	320
2	10	320	550
3	9	320	1670
4	—	420	1670

2.2 音響トモグラフィ探査

音響トモグラフィ探査の計測概要を図-4 に示す。また探査に使用した主な計測機器の仕様を表-2 に示す。探査測線の両端にボーリング孔を掘削した。片方のボーリング孔には発振器を設置し、深さを 1m 単位で変化させながら音波を発振した。もう片方の端部のボーリング孔には地表から G.L.-50m まで 0.5m 間隔で受信器を設置し、発振器からの音波を受信した。各受信器で計測された音波を逆解析することにより、探査測線上の 2 次元断面における V_p および P 波の減衰 (Q_p) の不均質性を推定した。発振器からの音波の周波数は、精度の確保の観点から、できるだけ周波数が高く、かつノイズの影響を受けにくいことを考慮し、2kHz とした。

発振器の深さを変化させたときに各受信器で観測された受信波形の例を図-5 に示す。発振器の設置深さとほぼ同じ深さにおける受信器の波形に最初の振幅が見られ、周辺の深さでも順次音波が伝播するのが確認できる。一方、G.L.-15m 以浅では明瞭な音波の到達が認められず、深部から伝播した音波が G.L.-15m を境界として反射しているのが確認できる。これは現地の地下水位がおよそ G.L.-15m 付近であり、地下水位以浅には音波が伝播しなかったためと考えられる。本検討では地下水で満たされている G.L.-15m 以深を地盤の不均質性の評価対象とした。

2.3 V_p および Q_p の分布の評価

受信器で観測された音波の初動の到達時間および振幅をできるだけ再現するように、波線理論に基づき探査断面の V_p および Q_p の分布を推定した⁶⁾。本検討では探査断面の解析セルのサイズを約 1m 四方とした。

V_p 分布の推定結果を図-6 に示す。図中には探査測線

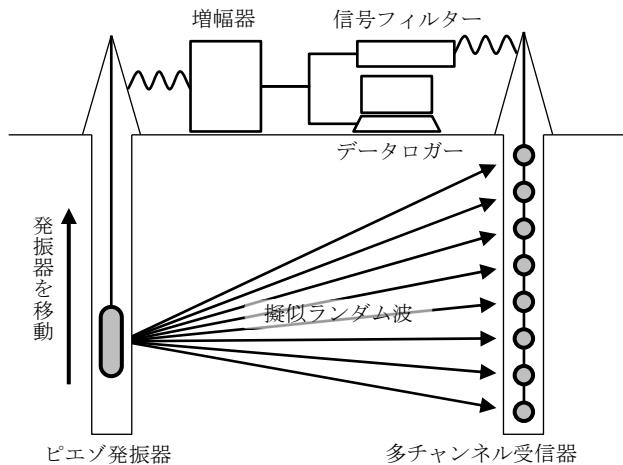


図-4 音響トモグラフィ探査の計測概念
Fig.4 Image for acoustic tomography exploration

の両端で計測した N 値の分布もあわせて示す。推定された V_p の値は、表 1 に示す第 3 層および第 4 層の V_p とほぼ対応する。また V_p は G.L.-30m 付近を境界として、深部の方がやや大きくなっている。これは N 値が 50 附近に到達する深さとおおむね一致する。また水平方向の方が鉛直方向に比べ、 V_p の値が類似する範囲が長くなっている。なお、ボーリング柱状図を比較した結果、細砂層で相対密度が大きい領域ほど V_p が大きくなる傾向が確認された。

Q_p の分布の推定結果を図-7 に示す。 V_p の分布と同様に、水平方向の方が鉛直方向に比べ、 Q_p の値が類似する範囲が長くなっている。ボーリング孔より採取した土質標本と比較した結果、 Q_p が低い領域は、貝殻片や木片等の影響により音波の伝播が阻害されたのではないかと推測される。また貝殻片や腐植土から発生したメタンガスの影響により地盤の飽和度が低下し、音波が伝播しにくくなつたことも考えられる。

表-2 音響トモグラフィ探査の主な計測機器

Table 2 Specifications of majoring instruments for acoustic tomography exploration

機器	仕様	備考
ピエゾ発振器	φ44mm×L250mm	NEC トーキン製
多チャンネル受信器	φ38mm×L150mm	
データロガー	24ch 同時計測	
発振器用増幅器	出力 100Vrms AC100V	Sound House 製
信号フィルター	24ch 同時計測 ゲイン 1~100 倍	JFE シビル社製

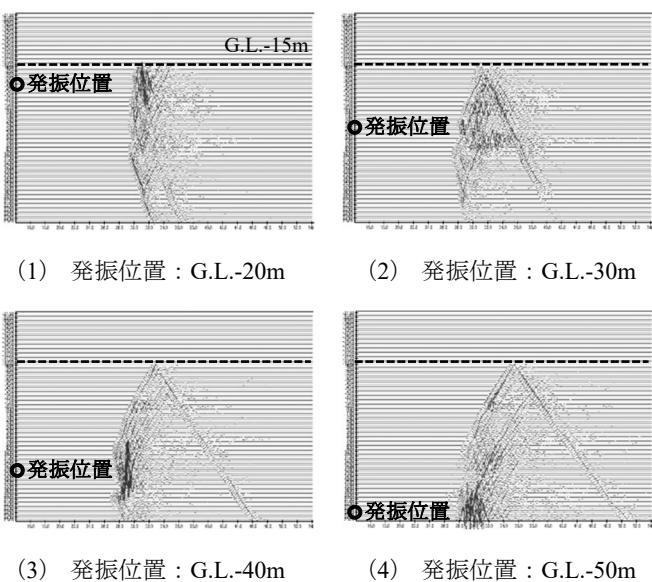


Fig.5 Received acoustic waveforms

2.4 地盤の不均質性の評価

音響トモグラフィ探査結果に基づき、千葉アレイ観測施設の表層地盤を模擬した不均質地盤モデルを作成する。

本検討では表-1 に示す地盤モデルにしたがい、表層地盤を 4 層でモデル化する。表-1 によると、第 1 層が地表～G.L.-5m、第 2 層が G.L.-5m～G.L.-15m であり、第 2 層の下端は音響トモグラフィ探査において伝播速度分布および減衰の分布の情報が得られなかつた深さとおおむね対応する。

また表-1 によると、第 3 層と第 4 層の境界は地表から 24m の深さに相当する。一方、図-6 によると、深さ 30m 付近を境界として V_p の値が変化している。敷地の地層構造はボーリング調査の結果からおおむね平行成層であると考えられることから、本検討では表-1 の第 3 層と第 4 層の地盤物性が図-6 の音響トモグラフィ探査結果における G.L.-30m 以浅および以深に相当すると仮定してモデル化する。

本検討では地盤の不均質パラメータとして、 V_s および S 波の減衰 (Q_s) を対象に、水平方向、鉛直方向の

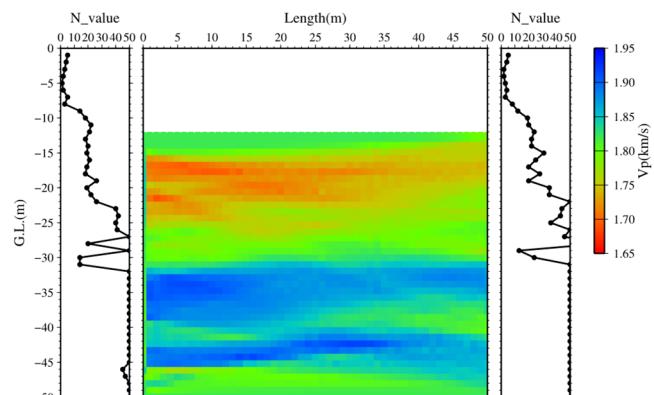


図-6 探査断面における V_p の分布
Fig.6 Distribution of V_p in the exploration section

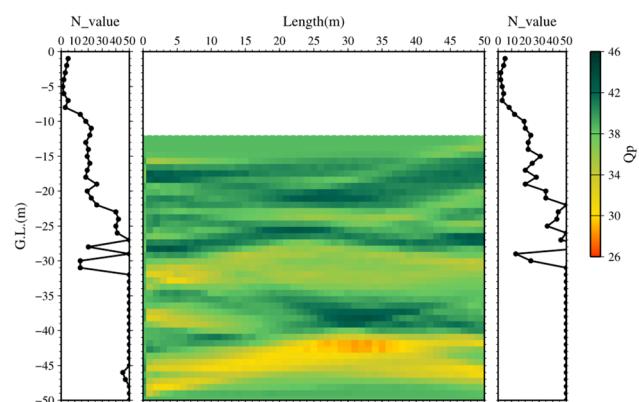


図-7 探査断面における Q_p の分布
Fig.7 Distribution of Q_p in the exploration section

相関距離 a_1 , a_3 および変動係数 μ を設定する。また第3層の不均質パラメータの推定には、G.L.-17～G.L.-31mの音響トモグラフィ探査結果を使用し、第4層の不均質パラメータの推定にはG.L.-35～G.L.-49mの音響トモグラフィ探査結果を使用する。なお、音響トモグラフィ探査で評価した伝播速度の分布は V_p であることから、本検討では(1)式より V_s に変換する⁷⁾。

$$V_s = \frac{1}{1.65} (V_p - 960) \quad (1)$$

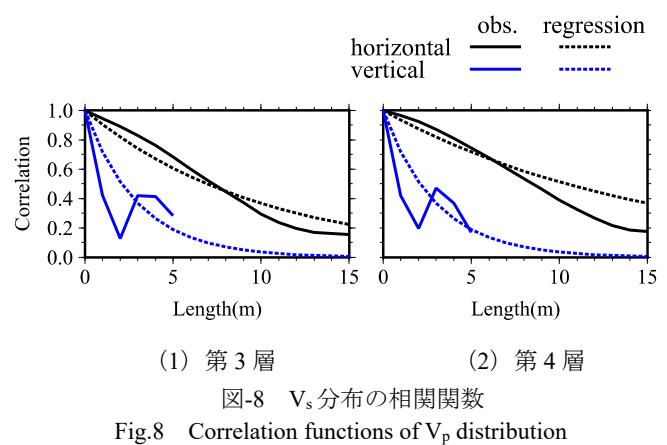
また、音響トモグラフィ探査で評価した減衰は Q_p を対象としているが、本検討では Q_s は Q_p の2倍($Q_s = 2Q_p$)であると仮定する。

第3層および第4層の V_s の自己相関の計算結果を水平方向および鉛直方向ごとに図-8に実線で示す。ここで自己相関とは、第3層についてはG.L.-17～G.L.-31m、第4層についてはG.L.-35～G.L.-49mを対象に、水平方向は音響トモグラフィ探査結果の同一深さにおける解析セル1行分の自己相関の平均値、鉛直方向は水平方向上の同一座標における解析セル1列分の自己相関の平均値より算出した。図-8には指数型の不均質パターンを想定し、第3層および第4層の自己相関関数と対応するように相関距離を設定した場合の自己相関関数を点線で示す。いずれの層においても、水平方向の方が鉛直方向よりも自己相関が高くなる傾向が見られる。また、第3層と第4層で自己相関関数の形状に大きな差異は見られない。各層における V_s の相関距離および変動係数を表-3に示す。第1層および第2層の相関距離については、第3層および第4層と比較し、表層になるほどやや小さくなるとの想定に基づき設定した。また変動係数については、標準貫入試験で得られたN値に基づき設定した。なお各層の V_s の平均は、表-1の値を適用する。

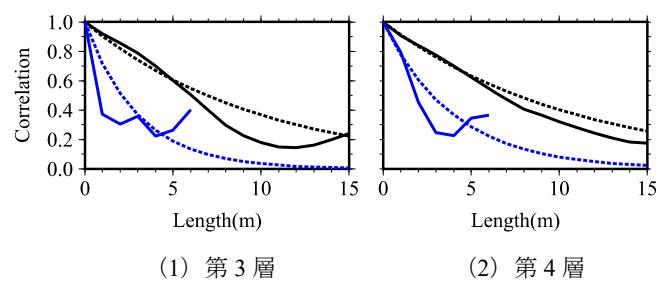
V_s の相関距離については、既往の検討⁸⁾において図-2に示す地震観測点で得られた観測記録から評価した隣接地点間の地震動の空間変動より、表層地盤における V_s の相関距離を逆解析している。表-3に示す相関距離の推定結果は、水平方向 a_1 、鉛直方向 a_3 とともに、既往の検討において探索範囲として設定した相関距離の下限付近または下限よりも小さい。

第3層および第4層の Q_s の自己相関の計算結果を水平方向および鉛直方向ごとに図-9に実線で示す。 Q_s の自己相関についても V_s と同様に、第3層については

G.L.-17～G.L.-31m、第4層についてはG.L.-35～G.L.-49mのデータを用いて算出した。図-9には指数型の不均質パターンを想定し、第3層および第4層の自己相関関数と対応するように相関距離を設定した自己相関関数を点線で示す。 V_s の自己相関と同様に、いずれの層においても、水平方向の方が鉛直方向よりも自己相関が高くなる傾向が見られる。また、第3層と第4層

Fig.8 Correlation functions of V_p distributionTable 3 Heterogeneity parameter of V_s

層 No.	相関距離 (m)		変動係数 μ	層厚 (m)
	水平方向 a_1	鉛直方向 a_3		
1	5	2	0.13	5
2	5	2	0.12	10
3	7	3	0.10	9
4	12	2	0.07	-

Table 4 Heterogeneity parameter of Q_s

層 No.	平均 Q_s	相関距離 (m)		変動係数 μ	層厚 (m)
		水平方向 a_1	鉛直方向 a_3		
1	40	5	2	0.10	5
2	60	5	2	0.10	10
3	80	10	2	0.04	9
4	74	11	4	0.09	-

で自己相関関数の形状に大きな差異は見られない。 Q_s の相関距離および変動係数を表-4 に示す。第 1 層および第 2 層の Q_s の平均および相関距離は、第 3 層および第 4 層と比較し、表層になるほどやや小さくなるとの想定に基づき設定した。また第 1 層および第 2 層の変動係数は、第 3 層および第 4 層の変動係数よりも大きくなるとの想定に基づき設定した。

3. 地震動の空間変動特性の評価

千葉アレイ観測施設の表層地盤を模擬した不均質地盤モデルにより地震動シミュレーションを実施し、隣接地点間の地震動の空間変動特性を評価する。

3.1 地震動の空間変動特性の評価方法

本検討では Ritter et al.(1998)⁹⁾を参考に、地震動シミュレーション結果から以下の方法で地震動の空間変動を評価する。

- ① 不均質地盤モデルの地表面より任意の 2 地点 i, j を選択し、両地点における応答波 $u(r_i, t), u(r_j, t)$ の平均 $u_{avg}(r_{i,j}, t) = \{u(r_i, t) + u(r_j, t)\}/2$ および残差 $u_{dif}(r_{i,j}, t) = u_{avg}(r_{i,j}, t) - u(r_i, t)$ を計算する。ここで、 $u_{avg}(r_{i,j}, t)$ には、2 地点間の波形のコヒーレント成分 $\langle u(r_{i,j}, t) \rangle$ とばらつき成分の半分に相当する振幅 $0.5 \times u_f(r_{i,j}, t)$ が含まれると考えられる。また $u_{dif}(r_{i,j}, t)$ には 2 点間の波形におけるばらつき成分の半分に相当する振幅 $0.5 \times u_f(r_{i,j}, t)$ が含まれると考えられる。
- ② $u_{avg}(r_{i,j}, t)$ および $u_{dif}(r_{i,j}, t)$ のパワースペクトル $I_{avg,i,j}, I_{dif,i,j}$ を計算する。
- ③ 上記①の考え方に基づき、2 点間の波形のコヒーレント成分のパワースペクトル $I_{c,i,j}$ およびばらつき成分のパワースペクトル $I_{f,i,j}$ を(2)式および(3)式で定義する。

$$I_{c,i,j} = I_{avg,i,j} - I_{dif,i,j} \quad (2)$$

$$I_{f,i,j} = 2 \times I_{dif,i,j} \quad (3)$$

- ④ ①～③をすべての観測点ペアに対して計算し、2 地点間の離間距離 $|\rho| = |r_j - r_i|$ ごとに $I_{c,i,j}$ および $I_{f,i,j}$ の平均を計算する。
- ⑤ 各離間距離 $|\rho|$ について、地震動のコヒーレント成分に対するばらつきの成分の平均 $\langle \varepsilon^2 \rangle$ を(4)式のとおり定義する。

$$\langle \varepsilon^2 \rangle = \sum_i \sum_j I_{f,i,j}(|r_j - r_i| = |\rho|) / \sum_i \sum_j I_{c,i,j}(|r_j - r_i| = |\rho|) \quad (4)$$

3.2 不均質地盤モデルを用いた地震動シミュレーションによる空間変動の評価

表-3 および表-4 に示す不均質パラメータに基づき、3 次元 FEM 不均質地盤モデルを作成した。モデルの形状および V_s の不均質パターンの例を図-10 に示す。ここで V_s の不均質性は表-3 の V_s の不均質性を適用し、水平 2 方向の不均質性は等方的と仮定した。同様に Q_s の不均質性は表-4 の Q_s の不均質性を適用し、水平 2 方向の不均質性は等方的と仮定した。また地盤モデルのメッシュサイズは 1m とした。本検討では初期乱数を変化させることにより、5 種類の不均質地盤モデルを作成した。またモデル底面より継続時間 0.02 秒の三角波を図-10 に示す y 方向に平面波入射し、図-10 の地盤モデル地表に示す田の字の線上より 1m 間隔で応答波を抽出した。

V_s に不均質性を与える、 Q_s を均質とした地盤モデルによる地震動シミュレーションの応答波から、離間距離 $|\rho|$ が 5m, 10m, 15m, 21m, 30m に対する $\log(\langle \varepsilon^2 \rangle + 1)$ の平均を計算した結果を図-11 に実線で示す。周波数が高く、 $|\rho|$ が大きくなるほど $\log(\langle \varepsilon^2 \rangle + 1)$ が大きくなっている。また、 Q_s にも不均質性を与えた場合の $\log(\langle \varepsilon^2 \rangle + 1)$ を図-11 に点線で示す。実線と殆ど重なつ

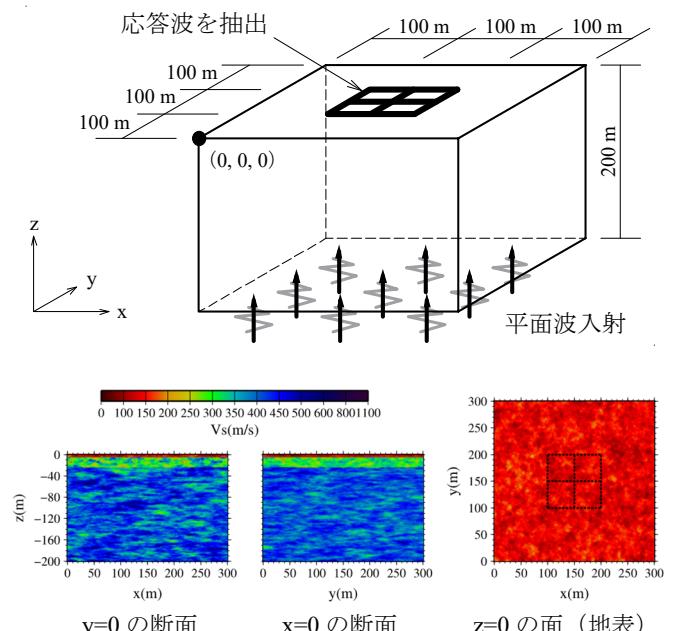


図-10 千葉アレイ観測施設を模擬した地盤モデルの形状と不均質パターンのイメージ

Fig.10 Images of the shape and heterogeneity pattern of the soil models of Chiba array

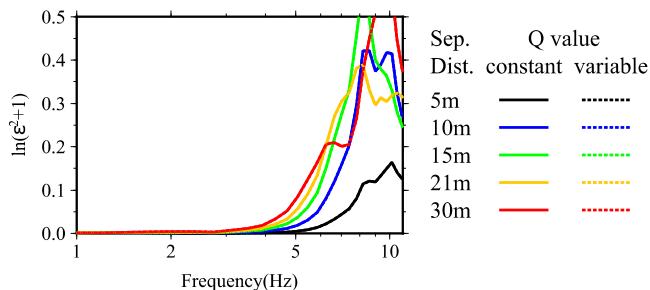


図-11 隣接地点間における地震動の空間変動
(Q_s の不均質性の影響評価)

Fig.11 Spatial variation of ground motion at adjacent sites
-Evaluation of the effects of heterogeneity of Q_s -

ていることから、 Q_s の変動が $\log(\langle \varepsilon^2 \rangle + 1)$ に与える影響は極めて小さいことが確認できる。

3.3 地震観測記録による空間変動の評価

図-2 に示す東京大学生産技術研究所旧西千葉キャンパスに整備されていた千葉アレイ観測施設のうち、C0～C4、P1～P4 観測点より $|\rho|$ が 5m, 10m, 15m, 21m, 30m となる観測点ペアの記録¹⁰⁾を観測記録の空間変動特性の評価に使用した。観測記録はノイズや非線形性の影響が無いこと、P 波による振幅が少なく S 波初動の波形を抽出できる等の観点から、①地震規模(M_I)5.0 以上、②震源深さ 80km 以上、③見かけの入射角 40° 以内、④最大加速度 100cm/s² 以内であることを条件とし、表-5 および図-12 に示す 5 つの地震の観測記録を使用した。また、解析には目視で S 波初動より約 1.3 秒間を抽出した水平方向の波形を使用した。

観測記録より各 $|\rho|$ に対する $\log(\langle \varepsilon^2 \rangle + 1)$ を評価した結果を図-13 に実線で示す。また V_s 、 Q_s の変動を考慮した不均質地盤モデルによる地震動シミュレーションで $\log(\langle \varepsilon^2 \rangle + 1)$ を評価した結果を点線で示す。両者はおおむね対応しているが、地震動シミュレーションによる $\log(\langle \varepsilon^2 \rangle + 1)$ の方がやや小さい。この原因として、地震計の設置地点直下における地盤の不均質性と音響トモグラフィ探査測線における地盤の不均質性が完全に

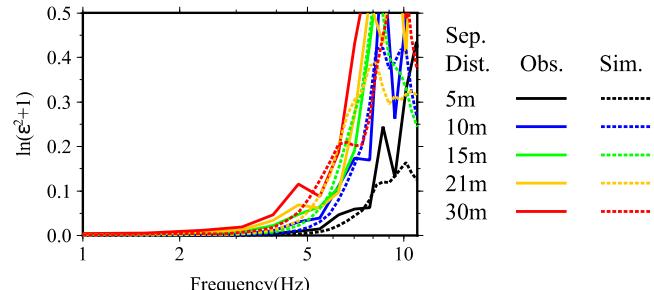


図-13 隣接地点間における地震動の空間変動
(地震観測記録との比較)

Fig.13 Spatial variation of ground motion at adjacent sites
-Comparison with ground motion records-

は一致していないこと等が考えられる。

4. まとめ

千葉アレイ観測施設の敷地を対象に音響トモグラフィ探査を実施し、表層地盤の 2 次元断面上の不均質性を推定した。速度構造および減衰の不均質性を推定した結果、水平方向の方が鉛直方向に比べ、物性が類似する範囲が長く続く傾向が確認された。

また音響トモグラフィ探査結果を反映し、 V_s および Q_s に不均質性を与えた地盤モデルにより隣接地点間の地震動の空間変動特性を評価した。 Q_s の不均質性が地震動の空間変動に与える影響は、 V_s に比べて極めて小さいことを確認した。また地震観測記録の空間変動特性と比較した結果、両者はおおむね同様の傾向を示したが、地震動シミュレーションによる地震動の空間変動の方がやや小さく評価された。

今後は音響トモグラフィ探査の結果および隣接地点間における地震観測記録に基づき、表層地盤の不均質性を推定する手法を確立するとともに、表層地盤の不均質性に伴う地震動の空間変動による建物の入力地震動の低減効果を定量的に評価するための手法の構築について検討する。

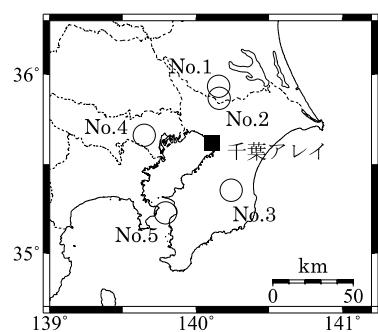


図-12 表-5 の地震の震央分布
Fig.12 Distribution of epicenters of Table 5

表-5 地震動の空間変動の評価に使用した観測記録の地震諸元

Table 5 Seismic events used for the evaluation of spatial variation of ground motions

No.	発生日	震央	M_I	震央距離(km)	深さ(km)
1	1983/02/27	SOUTHERN KANTO	6.0	35.1	72
2	1985/10/04	SOUTHERN IBARAKI PREF	6.1	27.8	78
3	1985/11/06	SOUTHERN BOSO PENINSULA	5.1	31.8	63
4	1988/03/18	TOKYO PREF	6.0	42.2	96
5	1992/02/02	TOKYO BAY REGION	5.9	52.4	92

謝辞

音響トモグラフィ探査の実施にあたり、千葉大学施設環境部殿のご協力をいただきました。震災予防協会（当時）より公開された千葉アレイ観測施設の観測記録を使用いたしました。一部の作図に GMT¹¹⁾を使用いたしました。本調査は資源エネルギー庁の令和6年度原子力産業基盤強化事業補助金にて実施したものです。

参考文献

- 1) Luco, J.E. and Wong, H.L. : Response of a Rigid Foundation to a Spatially Random Ground Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14, pp.891-908, 1986.
- 2) 神田克久, 源栄正人 : 不均質・不整形性および入力コヒーレンスが地震動特性に及ぼす影響評価 一釧路地方気象台の場合一, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp.85-94, 1995.
- 3) 堀家正則, 竹内吉弘, 桑田和宏 : 地盤のS波速度の揺らぎの統計的性質, 地震 第2輯, Vol.44, pp.267-269, 1991.
- 4) Dolan, S. S., Bean, C. J. and Riollet, B. : The broadband fractal nature of heterogeneity in the upper crust from petrophysical logs, Geophys. J. Int., Vol.132, pp.498-507, 1998.
- 5) 片山恒雄, 山崎文雄, 永田茂, 佐藤暢彦 : 高密度三次元アレーによる地震動観測と記録のデータベース化, 土木学会論文集, 第422号／I-14, pp.361-369, 1990.
- 6) Bregman, N. D., R. C. Bailey, C. H. Chapman. : Crosshole seismic tomography, Geophysics, vol.54, No.2, pp.200-215, 1989.
- 7) 東京電力 : 地盤の速度構造の推定および2次元不整形地盤モデルに関する補足説明, 新潟県第10回地震, 地質・地盤に関する小委員会資料, 2008.
- 8) 徳光亮一, 山本優, 内山泰生, 大野晋 : 散乱理論に基づく隣接地点間における地震動の空間変動特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第791号, pp.49-59, 2022.
- 9) Ritter, J.R.R., Shapiro, S.A. and Schechinger, B. : Scattering parameters of the lithosphere below the Massif Central, France, from teleseismic wavefield records, Geophys. J. Int., 134, pp.187-198, 1998.
- 10) 震災予防協会 : 強震動アレー観測記録データベース, Vol.A02, Vol.A03, Vol.A05 (CD-ROM) .
- 11) Wessel, P. and Smith, W. H. F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., vol.79 (47), pp.579, 1998.