

関東平野における長周期地震動の伝播特性と震源位置による変動

寺島芳洋¹⁾, 福和伸夫²⁾

1) 竹中工務店技術研究所, 研究員

e-mail : terashima.yoshihiro@takenaka.co.jp

2) 名古屋大学減災連携研究センター, 教授 工博

e-mail : fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

要約

関東平野などの不整形な基盤に囲まれた堆積平野では、観測される長周期地震動の振幅や継続時間、卓越周期が震源位置により変動することが知られている。この原因として、震源位置の違いに起因する地震波の伝播経路の差異が考えられるため、本研究では、関東平野およびその周辺で観測された長周期地震動の距離減衰性状を分析した。その結果、平野端部で励起された表面波の影響により、平野の内外で距離減衰性状が異なること、震源位置により表面波の励起や伝播特性が異なるため、距離減衰性状が変化することを確認した。

キーワード： 長周期地震動, 震源位置, 距離減衰, 関東平野

1. はじめに

近年、都市部に超高層建物や免震建物が多く建設され、長周期・長時間地震動（以降、長周期地震動と呼ぶ。）への安全性が懸念されている。実際に、2007年新潟県中越沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震などの地震では、都市部の超高層ビルが大きく長く揺れ、エレベータや内装材に被害が生じた^{1),2)}。

長周期地震動の予測手法としては、有限差分法³⁾を用いた理論的手法と地震記録から作成される距離減衰式⁴⁾⁻⁶⁾を用いた経験的手法などがあり、これらの手法を用いた各種の検討が実施されている。内閣府は理論的手法に基づき、南海トラフ・相模トラフ沿いの地震および首都直下の地震に関する予測を実施^{7),8)}、国土交通省は経験的手法に基づき、南海トラフ沿いの地震に対する都市部での設計用長周期地震動を検討し、技術的助言としてとりまとめている⁹⁾。

関東平野などの不整形な基盤構造を有する堆積平野では、発生する長周期地震動の振幅や継続時間、卓越周期が震源位置によって異なることが報告されている。地震動の卓越周期や振幅、継続時間を精度良く予測することは、耐震設計において重要であることから、上記の現象について研究が行われている。座間¹⁰⁾、植竹¹¹⁾、湯沢・南雲⁶⁾は東京における長周期地震動の振幅と卓越周期が震源位置に依存すること、Ishii¹²⁾は継続時間が震源位置に依存することを指摘した。これらの変動の一因として、平井¹³⁾、寺島¹⁴⁾は不整形な盆地構造における地震波の入射方位による伝播経路の違いを指摘した。また、山田¹⁵⁾は、中部地方に関する検討を実施し、盆地に至るまでの伝播経路に存在する付加体などの堆積物も長周期地震動の震源位置への依存性に影響すると指摘している。

以上のように、長周期地震動の性状と震源位置の関係について研究が進められているが、より定量的に距離減衰性状の違いを評価した研究はほとんど無い。しかし、既往研究から不整形な基盤を有する堆積平野では震源位置の違いに起因する地震波の伝播経路特性の差異によって、長周期地震動の振幅など

が変動することが推測される。距離減衰性状を把握することは長周期地震動を対象とする距離減衰式のモデル設定に重要であり、ひいては経験的手法の精度向上につながる。

本研究では、関東平野および周辺で観測された長周期地震動を対象に距離減衰性状を調べる。検討では、東京都心から見た震源方位が異なる複数の地震を対象に距離減衰性状を比較する。また、有限差分法による数値解析をあわせて実施し、観測と理論的手法の結果と比較することで、距離減衰性状に影響を与える要因を考察する。

2. データと方法

2.1 距離減衰性状の評価方法

複数地震に対する距離減衰性状を比較するためには、観測記録から震源特性を取り除く必要がある。スペクトルインバージョン¹⁶⁾では、多数の震源と多数の観測点の記録を対象に最小二乗法を用いて震源特性を推定することができるが、これらの手法は長周期地震動の方位依存性を考慮することができない。そこで本論では、S波とコーダ波を含む区間のフーリエ振幅スペクトルをS波のフーリエ振幅スペクトルで除すことで、震源特性をキャンセルすることにした。

S波初動は波形ペーストアップと走時に基づき決定し、初動後20秒間をS波部とした。この際、記録にS波部が見られない地震記録に関しては検討対象から除外した。S波初動以降コーダ波を含む区間はS波初動から163.84秒間とした。S波部やコーダ波部で163.84秒に満たない記録に関しては後続に0を加えて163.84秒としてフーリエ振幅スペクトルを計算した。波形の切出しに際して、波形の切出し区間のはじめと終わりに2秒のコサインテーパーを施した。すべての解析対象記録について、バンド幅0.05 HzのParzenウィンドウによる平滑化を施した後に、水平二成分の二乗和平方根を計算した。

2.2 対象とした地震観測記録

距離減衰性状の評価対象とした地震は、関東平野周辺で発生した地殻内地震から、記録に長周期成分が含まれる比較的規模の大きなM6.5程度の3地震を選定した。表1に地震諸元を、図1に各地震の震央と使用した観測点を示す。対象とする観測点としては震源から都心への伝播特性に着目するために、関東平野およびその周辺のK-NET・KiK-netの観測点のうち、震源からK-NET東雲(TKY016)を結んだ経路を中心に分布する観測点に限定した。

2.3 数値解析の方法とモデル

観測記録との比較に使用する数値解析の概要について示す。数値解析の手法としては、有限差分法³⁾を用いて、2次元地盤モデルと3次元地盤モデルを対象に数値解析を実施した。2次元解析と3次元解析の双方を実施した意図としては、震源位置による距離減衰性状の変動における盆地の断面形状の影響と3次元的な不整形による影響をそれぞれ把握するためである。なお、2次元解析では、SH波動場とP-SV波動場を計算した。3次元解析には、防災科学技術研究所のGMS¹⁷⁾を用いた。計算波形からフーリエ振幅を算出する手順は観測記録と同様の手順を踏んだ。

震源諸元は表1に示すものを使用し、複双力源の点震源を仮定した。震源時間関数は三角形型を仮定し、2秒のライズタイムの仮定を設定した。なお、本研究ではフーリエ振幅比を用いるので、地震モーメントや震源時間関数の形状およびライズタイムの仮定は結果に影響しない。図2に、3次元解析に使用した地震本部の全国1次地下構造モデル¹⁸⁾の地震基盤の分布と解析対象領域を示す。図3に2次元解析に使用した地盤モデルを示す。2次元地盤モデルは、全国1次地下構造モデルから震源とK-NET東雲(TKY016)を結ぶ直線に沿った断面とし、両側50 kmを加えた範囲(図3に破線で示す。)を抽出した。なお、全国1次地下構造モデルでは、海洋プレートまでモデル化されているが、ここでは盆地構造に着目した検討を行うため、地震基盤以浅の4層モデルを使用することにした。表2に各層の物性値を示す。また、表3に数値解析条件を示す。モデル端部は無反射境界¹⁹⁾と吸収境界²⁰⁾とし、非弾性減衰の与え方はGraves³⁾の手法に従っている。波形の計算地点は、震央からK-NET東雲(TKY016)を結ぶ直線(図2太線)上に1 km間隔に設定した。

表 1 検討対象とした地震一覧

No	Date	Time (JST)	Epicenter		JMA		F-net			Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
			Latitude	Longitude	M	Mw	M0 (Nm)						
EQ1	2004. 10. 23	18:34	37.306N	138.930E	6.5	6.3	2.93e+18	11	33	31	84		
EQ2	2011. 3. 15	22:31	35.310N	138.715E	6.4	5.9	8.38e+17	8	31	69	22		
EQ3	2011. 4. 12	14:07	37.053N	140.644E	6.4	5.9	7.05e+17	8	76	89	141		

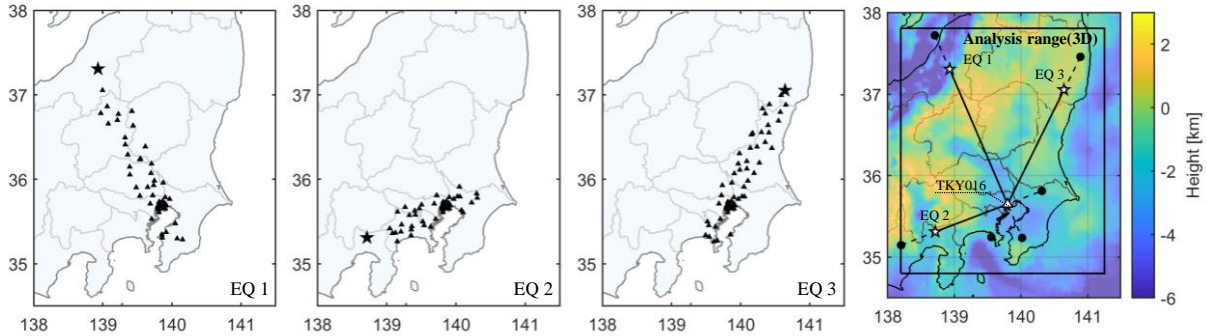


図 1 各地震の震央位置 (★) と対象とする観測点位置 (▲)

図 2 3次元解析範囲

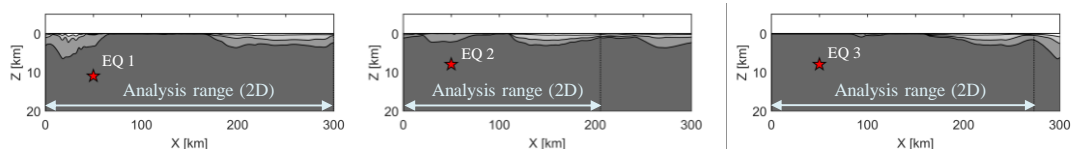


図 3 2次元解析地盤モデルと震源位置 (★). 解析範囲を両矢印で示す.

表 2 地盤モデルの物性値

Layer	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (g/cm ³)	Q_p	Q_s
1	1.8	0.5	1.95	170	100
2	2.3	0.9	2.10	306	180
3	3.0	1.5	2.25	510	300
4	5.5	3.2	2.65	680	400

表 3 数値解析条件

	3次元解析		2次元解析	
			SH	P-SV
空間刻み 水平 (m)	200	200	200	200
空間刻み 鉛直 (m)	100	100	100	100
時間刻み (s)	0.006	0.02	0.01	
最小周期 (s)	2.0	2.0	2.0	
モデル端部の境界条件	無反射境界+吸収境界(20 grid)			
非弾性減衰(Q値)	Gravesの手法			

3. 結果

3.1 振幅と震央距離の関係

関東平野およびその周辺で観測された長周期地震動の距離減衰性状を定性的に評価するために、フーリエ振幅と震央距離の関係について、平野の内外・周期間・地震間での比較を行う。図 4 に、観測記録の S 波部および S 波部+コーダ波部を用いたフーリエ振幅の周期 2~8 秒の距離減衰性状を示す。距離減衰の傾きを比較するため、基盤スペクトルの距離減衰曲線を示した。基盤スペクトルの算出には、Boore²¹⁾における震源項と幾何減衰項を抽出した式(1)を使用した。ただし、観測記録には堆積層による増幅効果が含まれるため、ここでは基盤スペクトルの 1 倍・2 倍・5 倍・10 倍の値を計算した。

$$A(f) = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot P_R}{4\pi\rho V_s} M_0 \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \frac{1}{R} \quad (1)$$

ここで、 A は基盤スペクトル (加速度)、 f は振動数である。 M_0 は地震モーメント、 ρ は密度、 V_s はせん断波速度であり、ここでは、表 1 に示した地震モーメントと、F-net の震源推定で使用する地下構造モデル Kubo et. al²²⁾から震源深さに対応する密度・せん断波速度を設定した。また、 $R_{\theta\phi}$ は震源放射特

性, FS は自由表面による増幅, P_R は水平 2 成分へのエネルギー分割係数, f_C はコーナー振動数, R は震源距離である. ここでは, $R_{\theta\varphi} = 0.63$, $FS = 2$, $P_R = 1$ を仮定した. f_C は川瀬・松尾²³⁾の内陸地殻地震に関する地震モーメントとコーナー振動数の関係式から計算した.

図 4 において平野内外の違いに注目すると, 平野外では, EQ2 の周期 2 秒以外では S 波部と S 波部+コーダ波部の振幅が類似し, それらの減衰の仕方は基盤スペクトルの減衰性状と概ね対応する. すなわち, 平野外では表面波の励起が小さく実体波が卓越する. 一方, 平野内では, すべての地震とすべての周期で S 波部+コーダ波部の振幅が S 波部を上回る. 加えて, 平野端部からの距離の増加に伴い S 波部+コーダ波部の振幅が増大する地震・周期が見られる. これは, 平野端部で表面波が励起され, その表面波が都心に向けて平野内を伝播したことによると推測される.

図 4 において, S 波部の振幅には地震間・周期間に明瞭な差は見られないが, 平野内における S 波部+コーダ波部の振幅には周期間に差が見られ, 周期 2s より周期 4~8s の振幅が大きい傾向がある. また, 同じ周期の S 波部+コーダ波部の振幅には, 地震間の違いが見られ, 大局的には EQ1 と EQ2 が大きく, EQ3 が相対的に小さい傾向がある. また, 細部を見ると, 振幅が増大する距離範囲は地震により異なる.

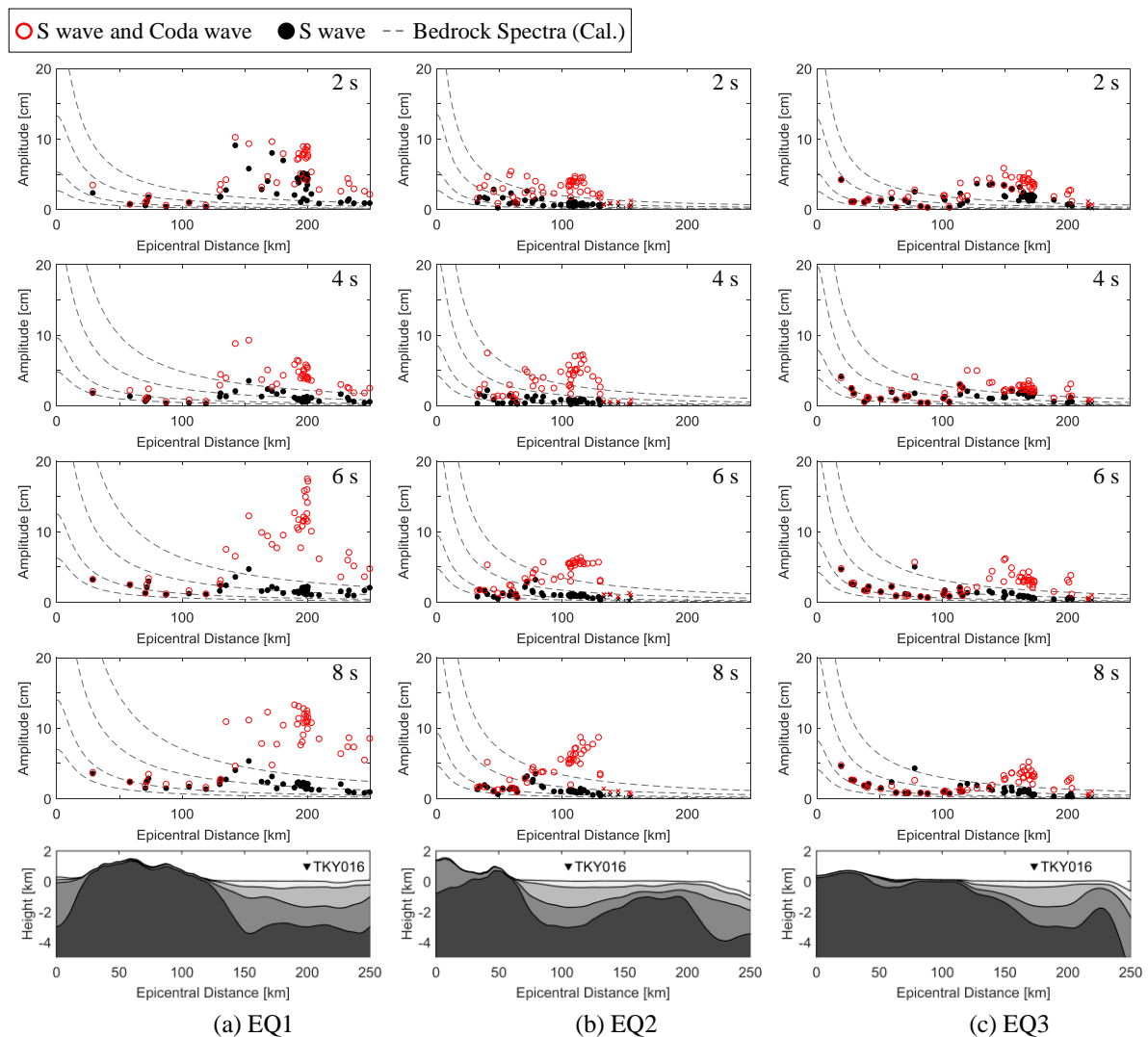


図 4 S 波+コーダ波の震央距離に応じたフーリエ振幅の変化. 速度フーリエ振幅の水平 2 成分の二乗和平方根を計算した. 赤色の丸は S 波+コーダ波, 黒色で塗りつぶした丸は S 波のフーリエ振幅を, 各色の×は表面波が十分に含まれておらず検討に不向きであると判断した記録を示す. 灰色の点線は式(1)から計算した基盤スペクトル (下から 1 倍・2 倍・5 倍・10 倍) を示す. 最下部の地下構造は, 震央-都心 (K-NET 東雲) を通る直線に沿った断面 (全国 1 次地下構造モデル).

3.2 振幅比と震央距離の関係

次に実体波に対する表面波の励起性状を比較するために、S波部のフーリエ振幅に対するS波部+コーダ波部の比を算出した。図5に、振幅比の周期2~8秒と震央距離の関係を示す。

観測記録の平野内外の違いに注目すると、長周期では平野外の振幅比が1に近いが、平野内では平野端部からの距離に応じて振幅比が増加している。これは、平野端部で励起された表面波が平野内を伝播するとともに増幅されること、もしくは表面波の幾何減衰が実体波より小さいことによると考えられる。EQ1の周期6~8秒、EQ2の周期4~8秒、EQ3の周期6~8秒において、上記の性状が顕著に見られる。

振幅比の増加の傾きは周期や地震により異なり、EQ1の周期6~8秒とEQ2の周期4~8秒では傾きが大きく、EQ3の周期6~8秒では傾きが小さい。津野²⁴⁾は、関東平野周辺で発生した地震について首都圏のサイト増幅特性を推定し、長野県北部の地震(2011/3/12 3:59, EQ1の震源方位と対応する。)や静岡県東部の地震(EQ2)では、福島県浜通りの地震(EQ3)を含む東北地方を震源とした地震に比べ、増幅率が大きくなることを示した。図5に見られるスペクトル比の傾向は、この結果と対応している。

図5に観測記録とシミュレーションの結果を比較して示す。3次元解析による結果でも、盆地外の振幅比が1に近く、平野端部からの距離に応じて振幅比が増大している。その増大の傾向は観測記録と対応

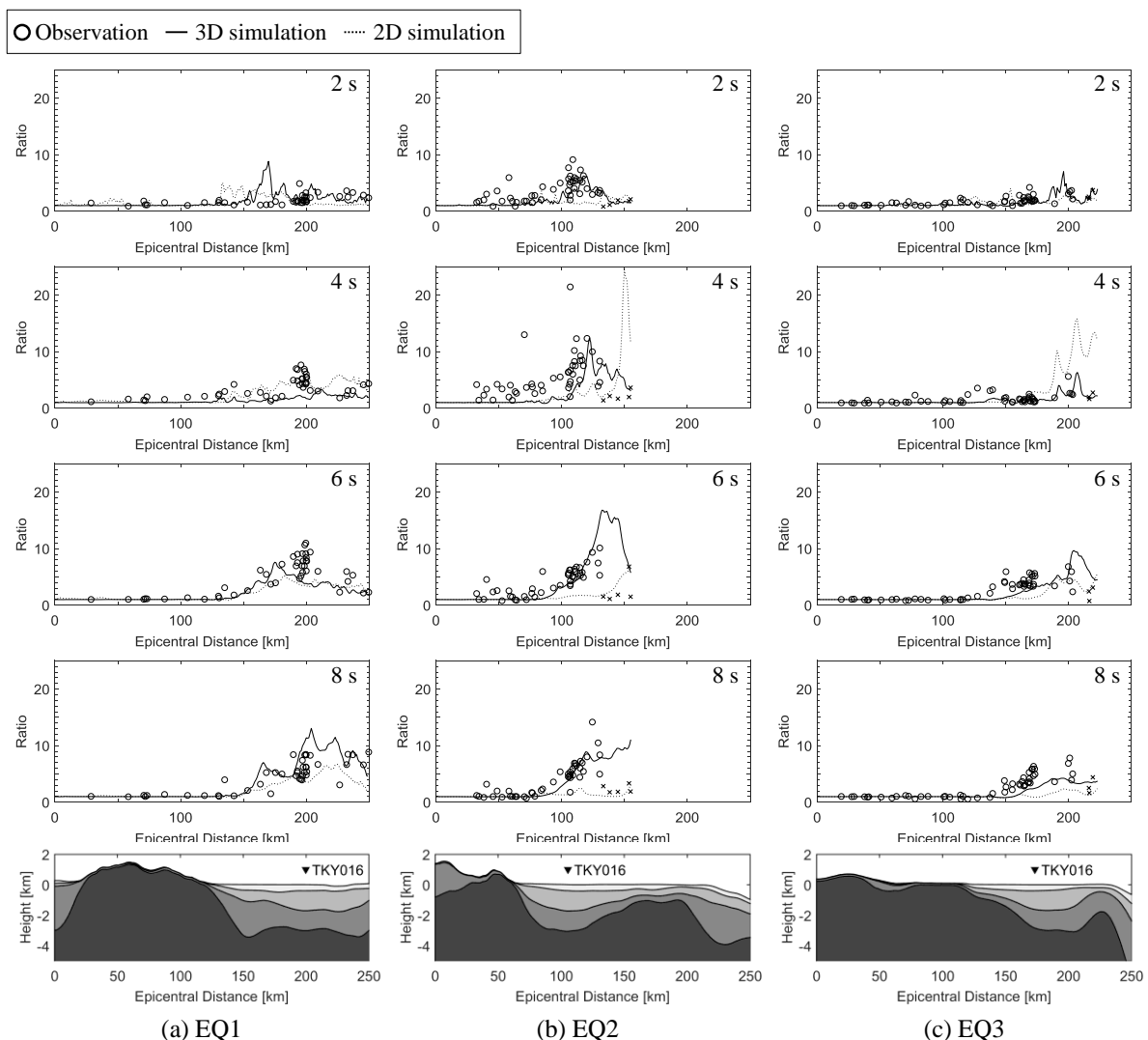


図5 S波に対するS波+コーダ波のフーリエ振幅比の震央距離に応じた変化。黒色の丸は観測記録、各色の×は表面波が十分に含まれておらず検討に不向きであると判断した記録を示す。実線は3次元解析結果、点線は2次元解析結果を示す。最下部の地下構造は、震央-都心(K-NET 東雲)を通る直線に沿った断面(全国1次地下構造モデル)。

しており、地震基盤までを仮定した数値解析によって平野端部で励起される表面波の震源方位に依存した性状を表現できることが示された。なお、2次元解析の結果も、観測記録と3次元解析の結果と概ね対応しており、2次元的不整形地盤によっても、各方向の伝播特性の差異が生じることを示している。しかし、2次元解析よりも3次元解析の方が観測記録に近く、2次元解析では表現が難しい地震もある。特にEQ2の周期6~8秒に関しては、2次元解析の結果は、観測記録や3次元解析の結果と大きく異なり、平野内でも小さな振幅比となっており、平野内の長周期地震動の伝播特性の評価には3次元地盤モデルによる評価が望ましいことを示している。

4. 議論

関東平野およびその周辺で観測される長周期地震動を対象に距離減衰性状を調べた結果、平野外では表面波の励起が小さく、実体波的な減衰性状であった。一方、平野の端部で励起される表面波の影響により、平野内では平野端部からの距離に応じてS波部+コーダ波部の振幅が増加し、周期や地震によって増加の傾向が異なることを確認した。このような距離減衰性状を示す地震記録を対象に距離減衰式を作成する場合は、例えば佐藤・巽²⁵⁾のように、距離に応じて減衰の傾きを変化させるモデルを仮定した上で、震源位置に応じて変化するパラメータを導入する必要があると考えられる。

また、地震基盤以浅を仮定した数値解析で上記の観測記録の性状を概ね表現できることを確認した。数値解析における地震間の差を生じ得る原因としては、地盤モデルの不整形性や震源の放射特性がある。平井・福和¹³⁾は、大阪平野を模した不整形盆地構造を対象に数値解析を実施し、震源方位や震源のモーメントテンソルの成分によって、地震動の卓越周期やグリーン関数が異なることを確かめている。本研究における観測記録の震源位置による変化も不整形地盤と震源の効果により生じていると推測される。

さらに、2次元地盤モデルと3次元地盤モデルを用いた数値シミュレーションを実施し、対象とする地震によってはその両者の結果に差が見られ、3次元解析の結果の方が、観測記録に近いことを確認した。この2次元解析の結果と3次元解析の結果の差が生じた原因について理解を深めることは、平野内における表面波の励起および伝播の特性を把握するために重要である。そこで、本節では、2次元解析と3次元解析で差が大きいEQ2の周期6秒成分を対象に、波動伝播の観点から考察を行う。

図6にEQ2の周期6秒のフーリエ振幅比を示す。図5に示した水平二乗和平方根の振幅比に加えて、Transverse成分およびRadial成分の振幅比を示した。3次元解析では、両成分とも観測記録に概ね対応する性状である。2次元解析ではTransverse成分が観測記録に近い傾向にあるが、100kmを超えたあたりから距離の増加に応じて振幅比が減衰しており、3次元解析や観測記録とは異なる性状である。

図7にEQ2の観測記録と差分法の数値解析の速度波形のペーストアップを比較する。波形には0.15~0.20 Hzのバンドパスフィルタを施した。各図には、P波S波の走時に加えて、数値解析における特徴的な波群の走時を矢印で示した。なお、伝播速度や粒子軌跡および振動方向からそれぞれの波群の種類を確認して

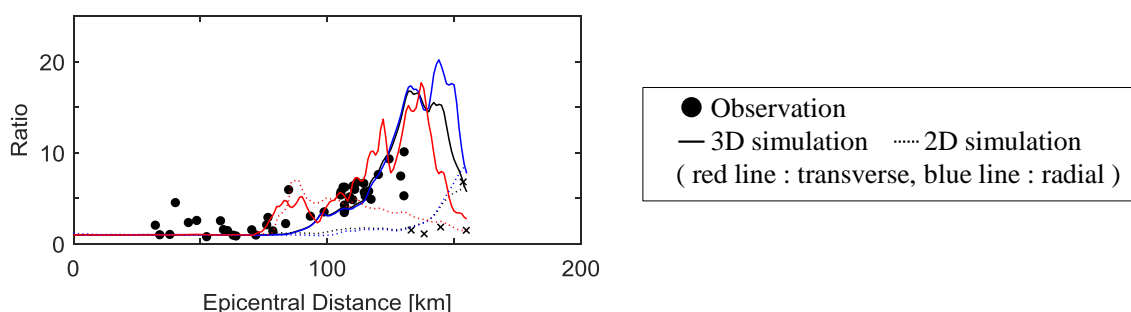


図6 EQ2周期6秒のフーリエ振幅比に関する数値解析結果の水平成分間の比較。黒色で塗りつぶした丸は観測記録、×は表面波が十分に含まれておらず検討に不向きであると判断した記録を示す。実線は3次元解析、点線は2次元解析の結果を示す。赤色はTransverse成分、青色はRadial成分を示す。黒色は水平2成分の二乗和平方根を示す。

おり、図中の青色の矢印はレイリー波の走時、赤色の矢印はラブ波の走時を示す。なお、図 7 の同色・同種の矢印は同じ走時である。Transverse 成分に注目すると、(a)と(b)の数値解析ではラブ波の走時が明瞭に確認でき、観測記録でも同じ時刻に波群が確認できる。しかし、その振幅は 2 次元解析で差が見られ、2 次元解析では震央距離 70 km 付近で励起されたラブ波は距離の増加に伴って減衰しているが、3 次元解析では約 100 km まで減衰し、100km を超えたあたりから再び振幅が大きくなっている。この再び振幅が大きくなる地点は東京湾岸に対応する。この要因として、三浦・翠川²⁶⁾や Koketsu²⁷⁾は、関東平野の南西で発生した伊豆半島沖の地震では震源から都心に向かう直線的な伝播経路に加え、関東平野西端部から都心に向かう迂回した伝播経路の存在を指摘しており、EQ2 でも複数の経路を通る表面波の干渉により、ラブ波の振幅が大きくなった可能性がある。

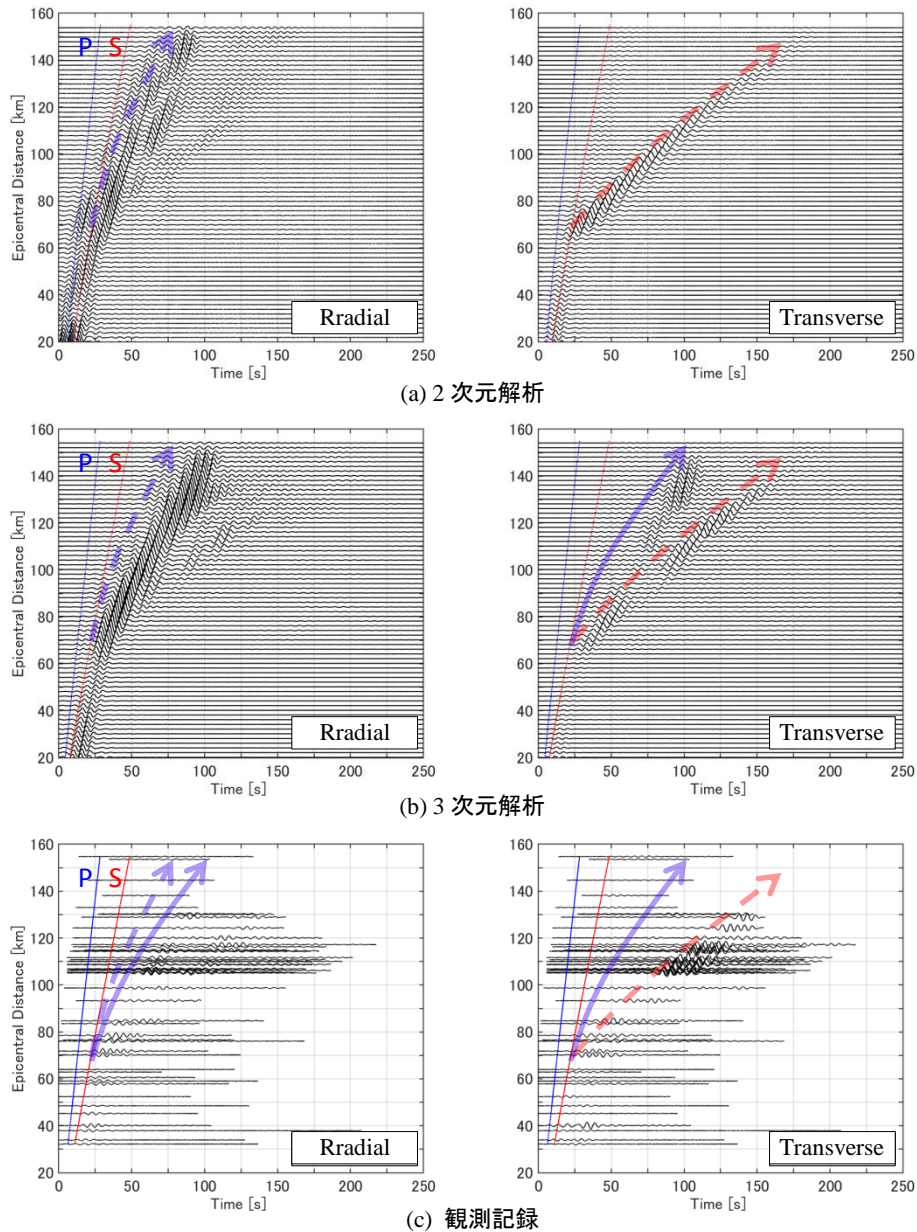


図 7 EQ2 のペーストアップ。周期 6 秒 (0.167 Hz) に注目するため、0.15-0.20 Hz のバンドパスフィルタを施した。振幅は TKY016 の Transverse 成分で基準化。実線と破線の矢印は、それぞれ 3 次元解析と 2 次元解析の結果から読み取った走時、青色と赤色の矢印は、それぞれレイリー波とラブ波を示す。

図 8 に、EQ2 の 3 次元解析結果のスナップショット (Transverse 成分) を示す。スナップショットの作成においては、波形に 0.15~0.20 Hz のバンドパスフィルタを施した上で、包絡形を計算した。図 8(b) に東京湾岸の代表地点として TKY016 の波形を示す。図中の点線は、スナップショットの時刻を示す。B から D の区間は、2 次元解析と 3 次元解析の Transverse 成分に違いが見られる区間に該当する。スナップショットを見ると、TKY016 に伝播する波群として、南西より伝播する波群 (紫色の範囲) と平野端の直交方向に伝播する波群 (水色の範囲) があり、これらの波群が都心に集中する様子が確認できる。これは、前述した三浦・翠川²⁶⁾や Koketsu²⁷⁾が指摘した伊豆半島沖の地震におけるラブ波の伝播性状と対応する結果である。以上から、3 次元地盤構造に起因する複雑な伝播経路を辿る複数の表面波の干渉が、関東平野で観測される表面波の振幅に影響を与えることが確認された。

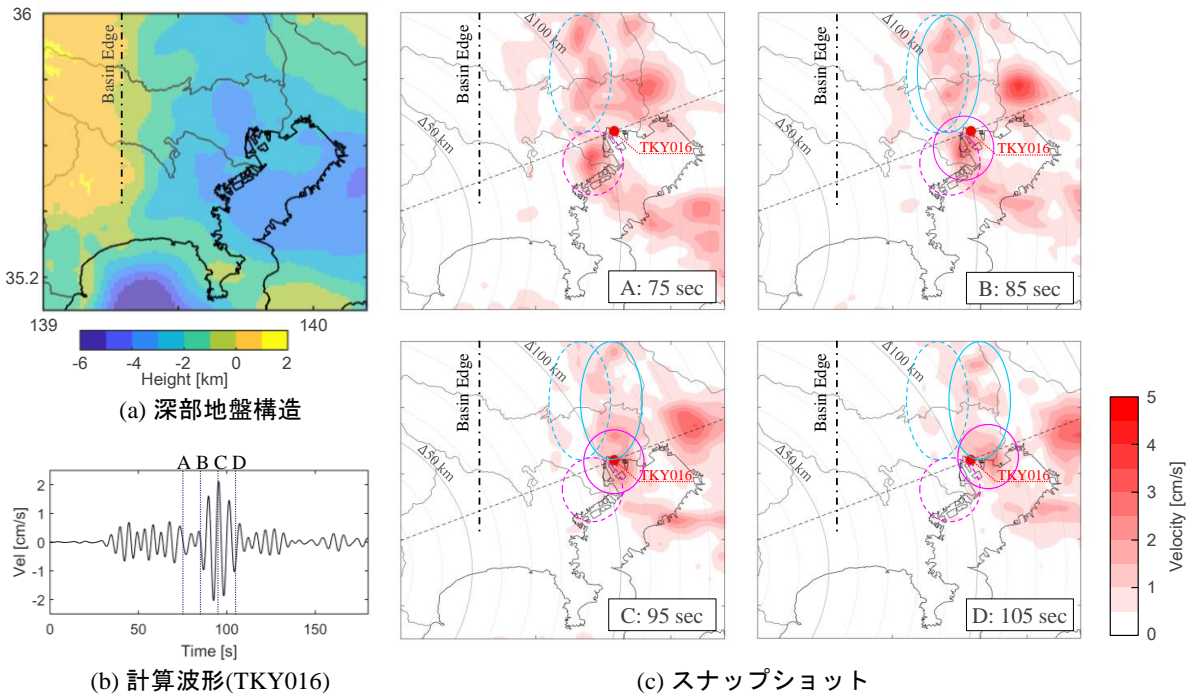


図 8 EQ2 のスナップショット (3 次元解析結果)。Transverse 成分の包絡形を示す。周期 6 秒に注目するため、0.15-0.20 Hz のバンドパスフィルタを施した。破線は、震央-TKY016 を結ぶ直線を示す。水色の丸は平野端と直交方向に伝播する波群を、紫色の丸は南西から都心に伝播する波群を示す。点線の丸は時刻 75 秒で確認された波群の位置を示す。

5. 結論

本論文では、関東平野およびその周辺で観測された長周期地震動を対象に距離減衰性状を調べた。その結果、平野の端部で励起される表面波の影響により、平野内では平野端部からの距離に応じてS波部+コーダ波部の振幅が増加すること、その増加の傾きが周期や地震によって増加の傾向が異なることがわかった。また、数値解析結果と観測記録の分析結果の比較を行い、両者の性状が類似することを確認した。数値解析の結果については、3次元解析による結果が2次元解析に比べて、より良く観測記録を説明することを確認した。この要因の一つとして、2次元解析では考慮できない複数の経路を通る表面波の干渉による増幅効果を確認した。

今後は、上記の性状を反映した回帰式を設定して、関東平野の長周期地震動の震源位置による変化の定量的な評価を行う。その際、観測記録が得られていない震源方位に関しては、数値解析に基づく評価を行う予定である。

謝 辞

防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 古村孝志,武村俊介,早川俊彦: 2007年新潟県中越沖地震 (M6.8) による首都圏の長周期地震動, 地学雑誌, Vol. 116, pp. 576–587, 2007年.
- 2) 東京消防庁: 長周期地震動等に対する高層階の室内安全対策専門委員会報告書, 2012年.
- 3) R. W. Graves: Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 86, No. 4, pp. 1091–1106, 1996年.
- 4) 野津厚,長尾毅,山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol. 7, No. 2, pp. 215–234, 2007
- 5) 佐藤智美,大川出,西川孝夫,佐藤俊明,関松太郎: 応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 649, pp. 521–530, 2010
- 6) 湯沢豊,南雲秀樹: 長周期地震動の揺れ易さ係数の変動要因とその低減対策 — 関東平野を例として —, 日本地震工学会論文集, Vol. 12, No. 2, pp. 41–59, 2012年.
- 7) 南海トラフの巨大地震モデル検討会,首都直下地震モデル検討会: 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告, 2015年.
- 8) 首都直下地震モデル検討会: 首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 2013年.
- 9) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について (技術的助言), 2016年.
- 10) 座間信作: 気象庁1倍強振計記録にみられるやや長周期地震動特性, 消防研究所報告, Vol. 76, pp. 1–11, 1993
- 11) 植竹富一: 広帯域地震観測に基づく東京湾岸のやや長周期地震動特性, 日本地震工学シンポジウム, pp. 4157–4164, 2010.
- 12) T. Ishii: A STUDY ON RESPONSE DURATION TIME SPECTRA OF EARTHQUAKE MOTIONS IN TOKYO, *14th World Conf. Earthq. Eng.*, 2008年.
- 13) 平井敬,福和伸夫: 3次元有限差分法と相反定理を用いた堆積盆地の地盤震動性状の評価手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 694, pp. 2083–2091, 2013年.
- 14) 寺島芳洋,平井敬,福和伸夫: 堆積盆地構造が地震動の周期特性に与える影響 3次元有限差分法を用いた検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 708, pp. 219–229, 2015年.
- 15) 山田沙代,平井敬,福和伸夫: 中京地域で発生する長周期地震動に対する堆積盆地及び付加体の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 738, pp. 1165–1175, 2017年.
- 16) 岩田知孝,入倉孝次郎: 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性および観測点近傍の地盤特性を分離する試み, *地震 第2輯*, Vol. 39, pp. 579–593, 1986年.
- 17) 青井真,早川俊彦,藤原広行: 地震動シミュレータ: GMS, 物理探査, Vol. 57, No. 6, pp. 651–666, 2004
- 18) 地震調査研究推進本部: 付録2. 全国1次地下構造モデル (暫定版), 2012年.
- 19) R. CLAYTON,B. ENGQUIST: ABSORBING BOUNDARY CONDITIONS FOR ACOUSTIC AND ELASTIC WAVE EQUATIONS, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 67, No. 6, pp. 1529–1540, 1977年.
- 20) C. Cerjan,D. Kosloff,R. Kosloff,M. Resheq: A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations, *GEOPHYSICS*, Vol. 50, No. 4, pp. 705–708, 1985年.
- 21) D. M. BOORE: STOCHASTIC SIMULATION OF HIGH-FREQUENCY GROUND MOTIONS BASED ON SEISMOLOGICAL MODELS OF THE RADIATED SPECTRA, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 73, No. 6, pp. 1865–1894, 1983年.
- 22) A. Kubo,E. Fukuyama,H. Kawai,K. Nonomura: NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: Quality test and application, *Tectonophysics*, Vol. 356, No. 1–3, pp. 23–48, 2002.
- 23) 川瀬博,松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サ

- イト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, Vol. 4, No. 1, pp. 33–52, 2004年.
- 24) 津野靖士他: 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) の本震記録と余震記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける長周期地震動の特性, 日本地震工学会論文集, Vol. 12, No. 5, pp. 102–116, 2012.
- 25) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No. 556, pp. 15–24, 2002年.
- 26) 三浦弘之, 翠川三郎: 3次元深部地下構造がやや長周期地震動の特性に及ぼす影響—横浜市とその周辺地域における検討—, *地震 第2輯*, No. 54, pp. 381–395, 2001年.
- 27) K. Koketsu, M. Kikuchi: Propagation of Seismic Ground Motion in the Kanto Basin, Japan, Vol. 288, pp. 1237–1239, 2000年.

Propagation effects of long-period ground motion in the Kanto Basin, Japan

TERASHIMA Yoshihiro ¹⁾, FUKUWA Nobuo ²⁾

1) Researcher, Takenaka Research&Development Institute

2) Professor, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, Dr. Eng.

ABSTRACT

According to previous studies, in the sedimentary plain on the irregular bedrock such as the Kanto basin, Japan, the characteristics of long-period ground motion vary with the hypocenter location due to the difference of the propagation path. In this paper, we evaluated the propagation path effects of long-period ground motion recorded in or around the Kanto Basin. Consequently, it was found that the different path effects were seen in the plain and outside the plain because of surface waves generated around the edge of the plain. Furthermore, the path effects varied depended on source location because of the different path and different characteristics of surface wave.

Keywords: Long-period ground motion, Source location, Attenuation, the Kanto Basin, Japan