

関東平野におけるラブ波の深さ方向振幅分布
—1990.2.20 伊豆大島近海地震の鉛直アレー記録を用いた検討—

The vertical distribution of amplitude of Love waves in Kanto-basin
— Study on using vertical-array data of 1990.2.20 Near Izu-Oshima island earthquake —

小林 孝至*
Takayuki KOBAYASHI

The main purpose of this study is using the data of vertical-array observation, not for amplitude of body waves but for the other aims. So I examine the vertical distribution of amplitude of Love waves in Kanto-basin, using the vertical-array data of 1990.2.20 Near Izu-Oshima island earthquake. The calculated value is ratio of surface's vibration to underground's in 7s band-pass-filtered time series.

The results confirmed that the surface and underground (about -100m) is vibrating in same amplitude by 7sec Love waves in Kanto-basin.

And the noteworthy fact is that underground's seismometers has orientation errors, more or less.

1. はじめに

関東平野、とくに東京においては震源深さや震央距離によらず周期8秒前後の長周期地震動が励起され、それが深い速度構造を反映したラブ波であるとの指摘がなされている^{1, 2)}。

1990年2月20日に発生した伊豆大島近海地震(マグニチュード 6.5, 深さ 17km)では多地点での観測により、周期8秒付近のラブ波が卓越し、その発生メカニズム(地点)や伝播経路などの説明がされている³⁻⁶⁾。それらの検討では主に地表面に設置した地震計(速度)記録を用いている。

また、鉛直アレー観測記録は、ESG研究に代表されるように、地表地震動への表層地質の影響を考慮するうえで貴重なデータを提供するが、実体波の増幅などの検討に利用される例が数多い⁷⁾。

本報では、鉛直アレー観測記録を実体波の増幅以外の利用に供するという観点から1990.2.20 伊豆大島近海地震(以降EQ2)で励起されたラブ波の深さ方向の振幅分布を関東平野内に数多く配置された鉛直アレー観測記録を

用いて検討する。深い地下構造を反映した「ラブ波の深さ方向振幅分布」を現在ある鉛直アレー観測記録から検討する場合、設置深度が問題となることも予想できるが、このように多数配置された記録を詳細に検討することにより、その面的な広がり の把握が可能と考えられる。

2. 観測記録

2.1 観測地点

この検討で使用したEQ2の鉛直アレー観測地点は、9機関で計15地点である。震央位置と観測点を図-1に示す。なお、図中の斜線部は第三紀層が露頭している地域⁸⁾を示している。

埋設点数は35点で、地表を含めて3点で鉛直アレーを構成している地点が多い。主に最深部の設置位置のせん断波速度はほぼ400m/s以上となっている。これは工学的な支持地盤に相当するものと考えられる。

観測地点は東京湾岸を中心に分布し、EQ2の震央からは75kmから175kmの間にほぼ直線的に分布している。15地点のうち12地点は加速度記録で、そのほかの3地点は速度記録である。

* 西松建設 技術研究所

Technical Research Institute, NISHIMATSU CONSTRUCTION

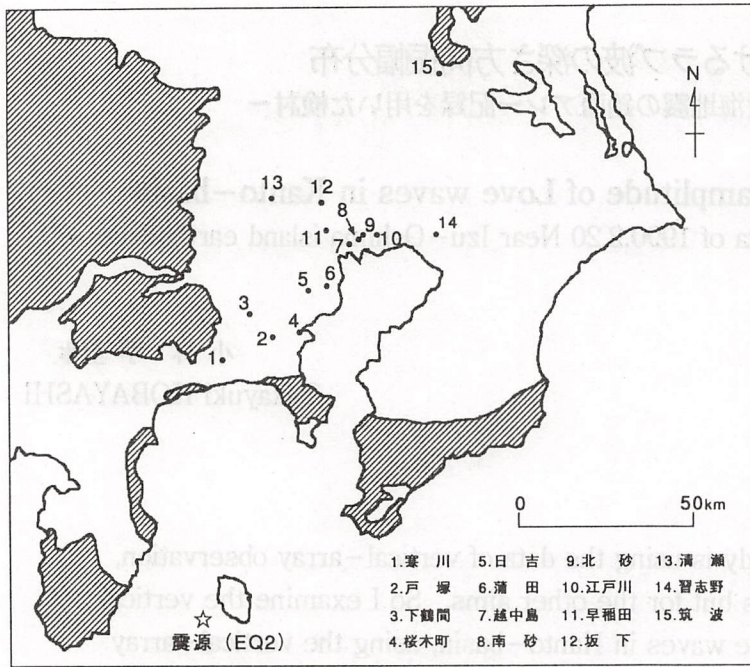


図-1 EQ2の鉛直アレー観測地点

2.2 記録の一次処理(計測器の設置誤差)

鉛直アレー記録の場合、しばしば埋設設置誤差が指摘され、その補正の必要性が論じられている⁹⁾。

対象とするEQ2の地震動は長周期成分が卓越しているため、その検討に適しているといえる。そこで記録の一次処理として各地点の埋設設置誤差を検討した。その方法は最浅部の地震計記録を基準とした最大コヒーレンス法^{10, 11)}を用い、検討周期は5~10秒とした。鉛直成分を計測していない点では水平2成分だけでの検討とした。その検討結果のうち鉛直軸まわり(水平成分に関する)誤差角度を図-2に示す。±20度程度の誤差結果が多く得られた。図には示さないが鉛直成分に関する誤差は数度程度のものが多く確認されたものの、10度を超えるものはなかった。以降の検討で用いた記録はこの結果を考慮した補正をおこなっている。

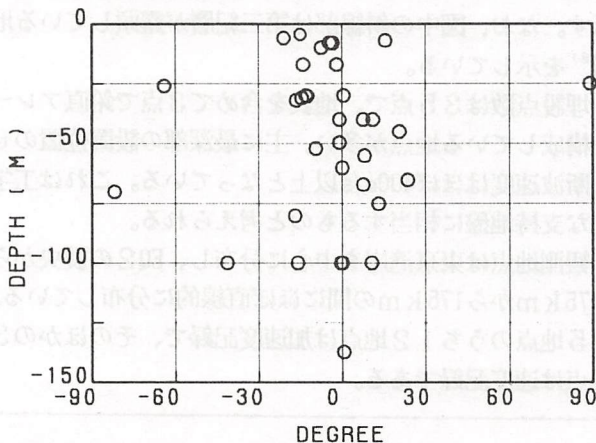


図-2 地中地震計の設置誤差
(鉛直軸回り、時計回りが正)

3. 観測記録中のラブ波の存在可能性

観測記録中には様々な波動成分が含まれているが、この波動を識別・分離することは非常に難しい問題である。「周波数特性や粒子軌道の特徴だけからは波の種類を特定することは避けるべきで、他の情報と併せて総合評価することが望ましい¹²⁾」と言われている。

ここでは、関東平野のやや長周期地震動の検討で周期8秒前後の波動の主成分はラブ波であるという結果をふまえ、ここであつかう記録中のラブ波の存在の可能性を検討した。検討項目は2次元速度応答スペクトル、分散性 および 粒子軌跡である。

なお、筑波の記録は第一データ時刻と継続時間から、表面波の伝播を考慮することができない。また、坂下については計器の特性から周期7秒付近の振幅には信頼性がないものの、検討はおこなった。

3.1 2次元速度応答スペクトル

各地点の記録中に8秒前後の成分がどの程度含まれているかをみるために、地表記録の水平成分で2次元速度応答スペクトルを計算した。減衰は5%とし、速度記録は数値微分して、加速度記録に変換して計算をおこなった。各地点の2次元速度応答スペクトルを図-3に示す。

寒川、下鶴間、坂下の3地点では1秒以下の周期に卓越したピークがある。これは各地点のボーリングデータの最深部の層を基盤としたときの伝達関数の卓越周期にほぼ対応している。清瀬については周期9秒付近にピークがあるもののレベルは小さい。筑波は震央距離が170 km以上の距離があり、微小ながら実体波がようやく到達したのであろう。以上の5地点を除く10地点では周期7~8秒付近に卓越したピークを見ることができ、その周期帯は関東平野での卓越ラブ波の周期と一致する。

3.2 バンドパスフィルター波形による分散性

表面波は実体波と異なる"分散性"を示す。記録中の分散性を確認するために地表面の記録をRT変換し、そのトランスバース成分のバンドパスフィルター(以降BPF)波形を図-4に示す。図には上からオリジナル波形、その下からは順番に1, 2, ..., 9秒のBPF波形を表示している。なお、バンドパスフィルターは秒で表現した数値に±10%の幅をもたせた。また、振幅値は各周期ごとに規準化して示している。

3.1で述べた5地点のうち、寒川、下鶴間、清瀬の3地点では周期5秒以上で分散性が見られるものの、その振幅は微小である。これは、3地点が第三紀層の露出境界の近傍での加速度計による計測のため、「盆地転換表

面波や盆地生成表面波¹⁸⁾」が十分に発達する前での観測であるためと考えられる。それ以外の10観測地点では5秒以上の波形に明瞭な分散性がみられ、とくに7秒のBPF波形の振幅は大きく、遅れて到達している。

以上の検討により寒川、下鶴間、坂下、清瀬および筑

波の5地点の観測記録にはラブ波の振動成分が少ないことが考えられるので、以降の検討からは除外した。また、分散性を示す波形のうち周期7秒BPF波形にはラブ波成分の存在が十分考えることができるので、以降では対象波形を周期7秒BPF波形とする。

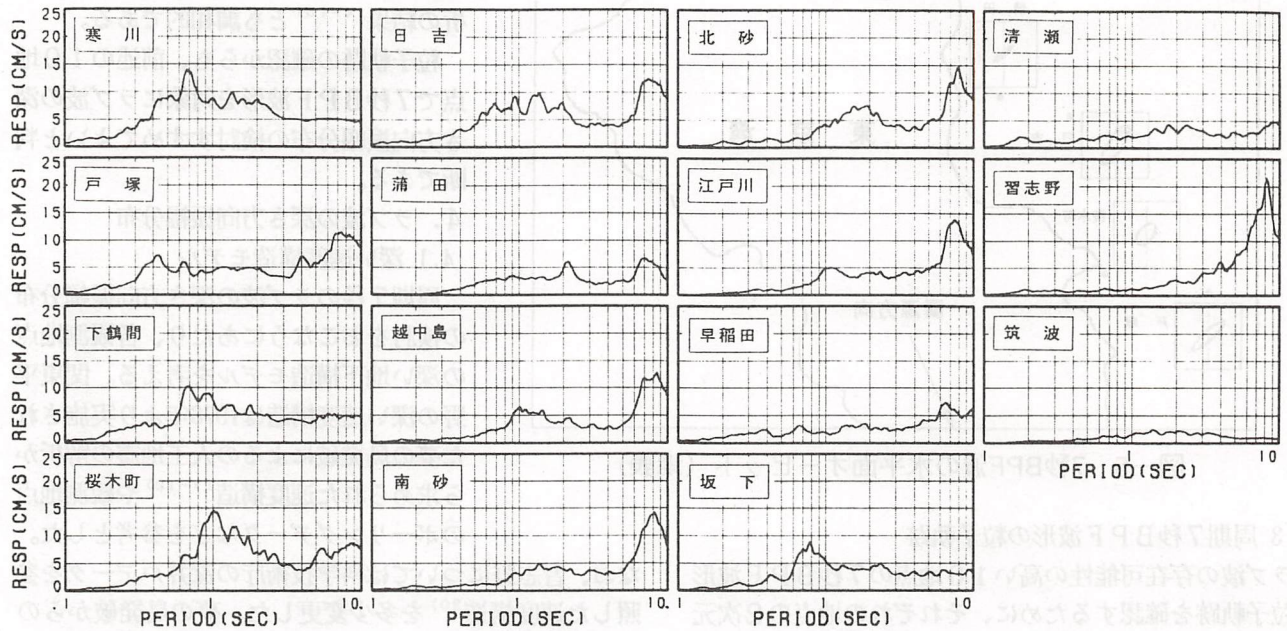


図-3 2次元速度応答スペクトル (h=0.05)

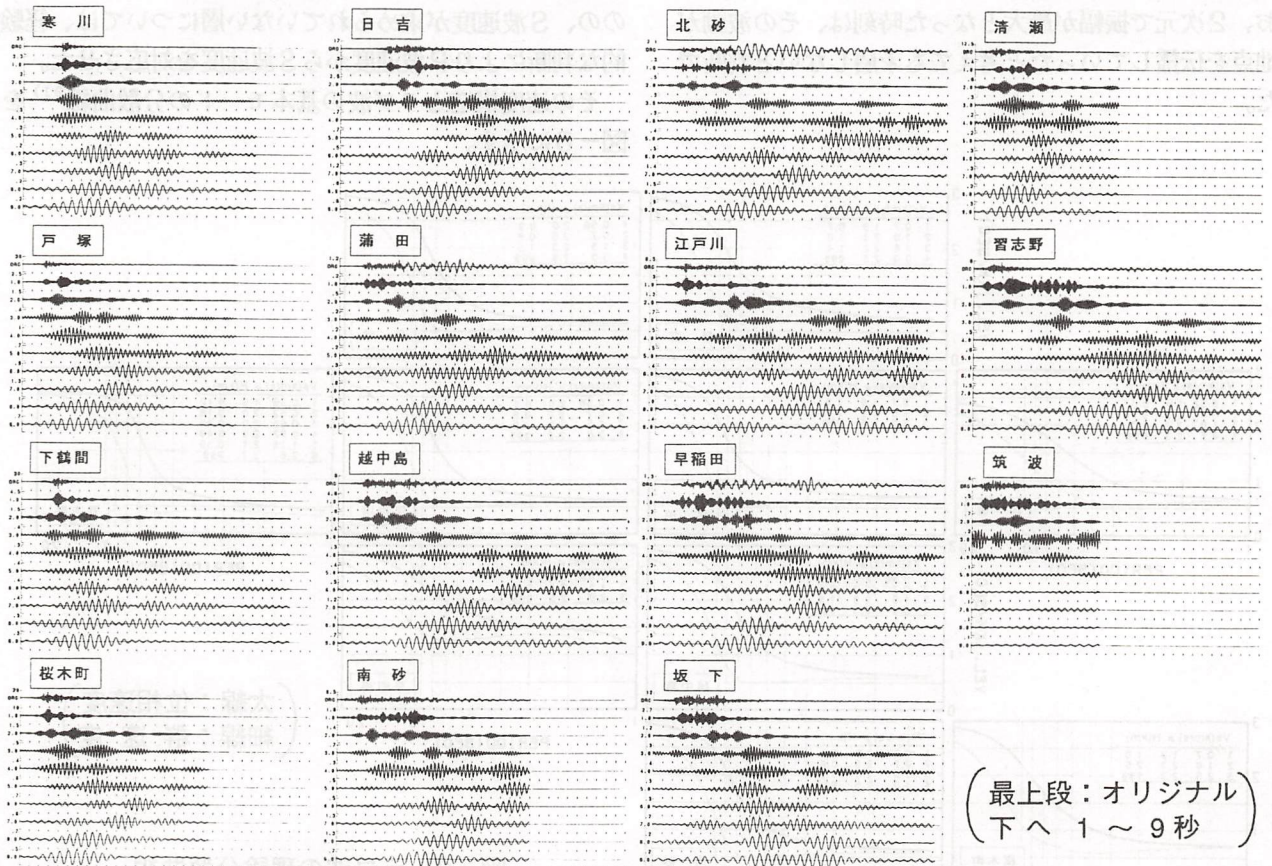


図-4 バンドパスフィルター波形

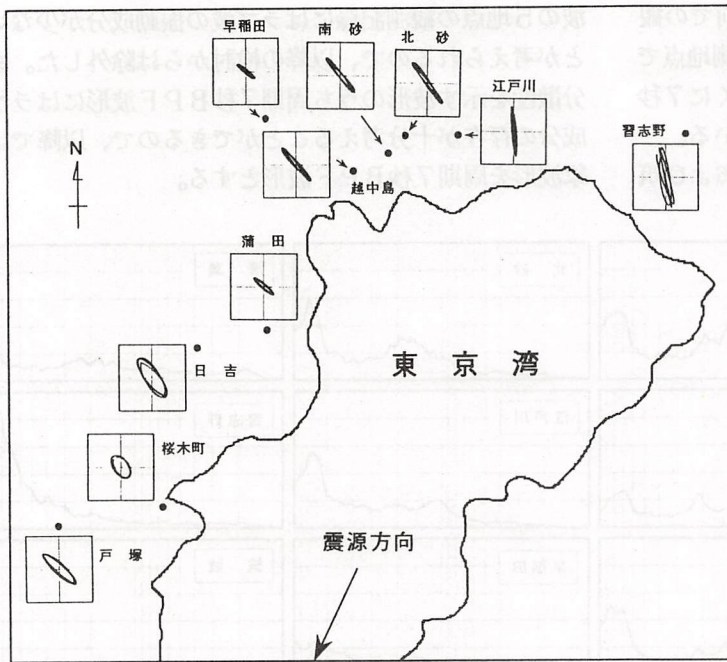


図-5 7秒BPF波の水平面オービット (地表)

3.3 周期7秒BPF波形の粒子軌跡

ラブ波の存在可能性の高い10地点の7秒BPF波形の粒子軌跡を確認するために、それぞれの地点の2次元での振幅が最大となった時刻の前後10秒間、計20秒間の地表の水平面の観測波形オービットを図-5に示す。なお、2次元で振幅が最大となった時刻は、その波動が各地点を伝播していったと考えても矛盾しないと判断できた。

長軸方向はおおむね震源方向と直交しているが、日吉、蒲田、越中島、南砂、北砂、江戸川から習志野にかけての、東京湾岸における長軸方向が時計廻りに回り込む現象を示している。これは観測記録を用いた検討^{2, 5)}や波動伝播モデル解析の結果¹⁴⁻¹⁶⁾とも調和的である。

粒子軌跡の確認からも、前述の10地点で7秒BPF波形を対象にラブ波の深さ方向振幅分布の検討すすめてよいと判断できる。

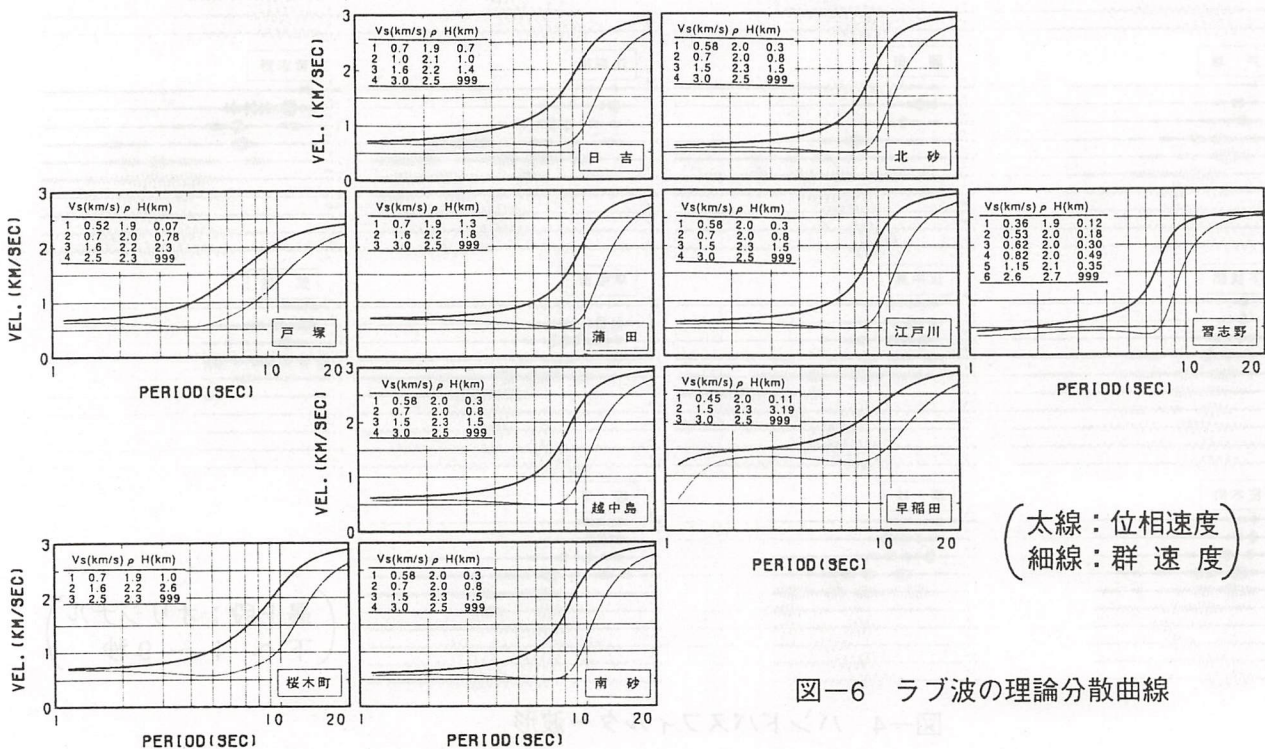
4. ラブ波の深さ方向振幅分布

4.1 深い速度構造モデル

周期7秒のラブ波の深さ方向振幅分布の検討をおこなうにあたり、各観測地点の深い地下構造モデルを考える。関東平野の深い速度構造は1976年より実施された夢の島発破によるの人工地震の解析から求められた速度構造¹⁷⁻¹⁹⁾や観測地点のボーリングデータなどを参考とした。

なお、習志野については科学技術庁の深井戸データを参照した速度構造²⁰⁾を多少変更した。夢の島発破からの速度構造の文献からは、観測地点にいちばん近い測線の速度構造を読みとった。P波速度は明記されてはいるものの、S波速度が求められていない層については、経験的な判断によりP波速度からS波速度を対応させた。

その速度構造とラブ波の基本モードの分散曲線²¹⁾を図-6に示す。



(太線: 位相速度)
(細線: 群速度)

図-6 ラブ波の理論分散曲線

戸塚、桜木町では群速度の極小となる周期が5秒付近にあり、図-5で示したBPF波形の分散性および振幅の相対的な大きさとも調和的と判断した。日吉、蒲田、早稲田、越中島、南砂、北砂、江戸川、習志野では、周期7秒のラブ波の振幅が卓越する様子が理論分散曲線からもうかがえ、この深い地下構造モデルは妥当であると判断した。

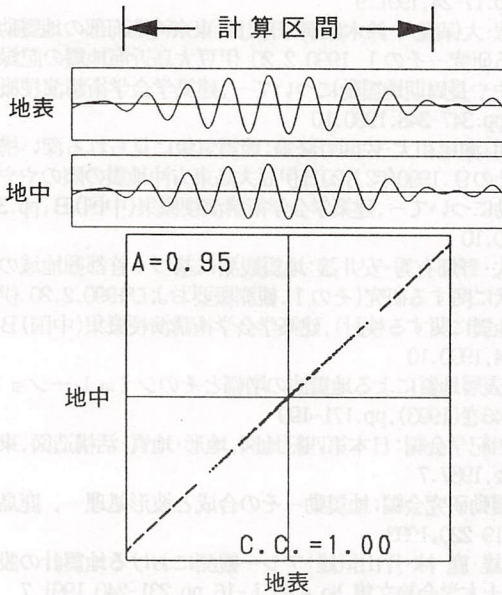


図-7 振幅分布計算の概念図

4.2 ラブ波の深さ方向振幅分布の理論値と観測値

ラブ波の深さ方向振幅分布の理論計算²⁰⁾は図-6に示した速度構造モデルを用いて計算した。観測値での振幅分布の評価はその振幅比でおこなった。その方法は、①7秒のBPF波形でベクトル値で最大を示す時刻を中心にウェーブパケットとみなせる区間を抽出する。②この波形の長軸方向の記録の散布の状況を通る直線で最小2乗近似する。③振幅比は直線の傾きであるとした。横軸項の係数がそれに相当する(図中のA)。④このときに求められる相関係数(図中のC.C.)は、地表と地中が同様に振動(横からの波動が卓越する)の尺度として考慮した。全地点とも周期7秒BPF波形では1とみなせる数値(0.999以上)を示した(図-7)。

周期7秒のラブ波の深さ方向振幅分布の理論値と観測値の周期7秒BPF波形の長軸方向の振幅比(ともに地表を基準(1)としている)を図-8に示す。

図中、理論計算値を太線で示しているが、深さ200mまでは周期7秒のラブ波の振幅分布は地表に対して約1、すなわち地表と同じように振動することを示している。また○印で示したものは各深度の上記の方法で算出した周期7秒BPF波形の観測値の最浅部に対する振幅比である。

多少のばらつきはあるものの、5%以内の振幅比におさまっており、相関係数も1であることから地表と同様の振動をしていることが確認できた。

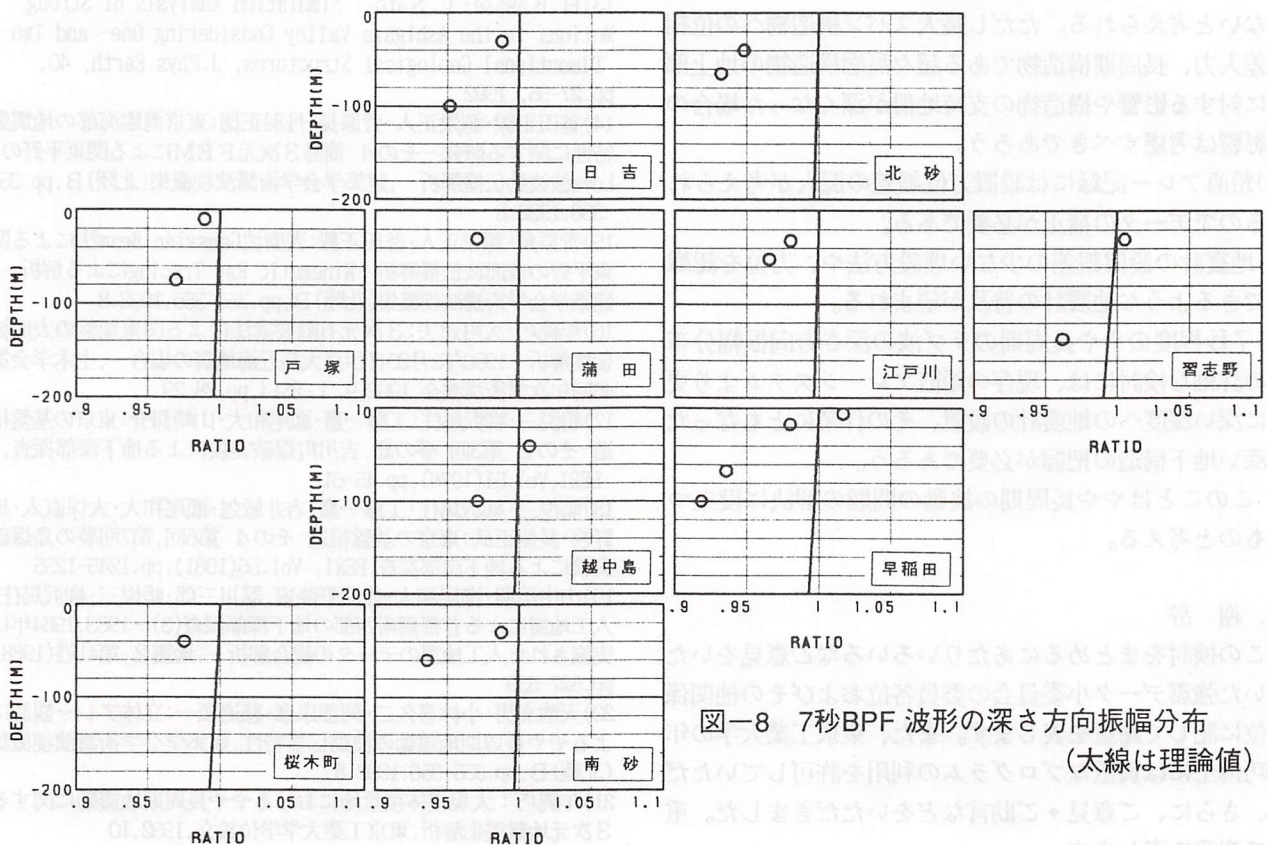


図-8 7秒BPF 波形の深さ方向振幅分布 (太線は理論値)

5%のばらつきについては、以下の解釈ができる。

- (1) 観測地点の速度構造が十分に反映されていない。
深い速度構造と観測(埋設)地点とをつなぐ速度構造がないため十分なモデル化ができていない。
- (2) 7秒BPF波にラブ波以外の波動の混入。
実体波は十分減衰していると考えられるが、それも絶対ではなく可能性として否定できない。またそのほかの観測地点近傍での特殊な波動の可能性も考えられる。
- (3) 計測機器にばらつきが存在する。
計器の検定許容誤差が、ひとつの観測システムにばらついて存在していることも考えることができる。
- (4) 計器の設置誤差評価が十分ではない。
設置誤差の評価は、ひとつの地震の限られた方法でしかおこなっていないため厳密評価がされていないことも考えられる。

5. まとめ

EQ2の関東平野における周期7秒ラブ波の深さ方向振幅分布の検討を鉛直アレー記録でおこなった。この検討を通じて、以下のことがわかった。

- (1) 関東平野で卓越する周期7秒のラブ波は鉛直アレー記録の最深部の深さ100m前後までは地表と同様の振動をしている。
したがって、構造物に対しての注意点としては、鉛直アレー観測地点の最深部を工学的な支持地盤と考え、杭のような地中構造物に対してはあまり問題ないと考えられる。ただし長大スパン構造物への位相差入力、長周期構造物である超々高層構造物の地上部に対する影響や構造物の支持地盤が深くなった場合の影響は考慮すべきであろう。
- (2) 鉛直アレー記録には設置方位誤差の混入が考えられるのでデータの補正が必要である。
地震計の設置誤差の少ない埋設方法や、方位を認識できるような地震計の普及が望まれる。
- (3) 7秒程度のやや長周期のラブ波の深さ方向振幅分布の詳細な検討には、現存の鉛直アレーシステムより更に深い深度への地震計の設置、その作業にともなった深い地下構造の把握が必要であろう。
このことはやや長周期の波動の問題の解決に役立つものと考えられる。

6. 謝辞

この検討をまとめるにあたりいろいろなお意見をいただいた強震データ小委員会の委員各位およびその他関係各位に記して謝意を表します。また、東京工業大学の年縄巧博士には貴重なプログラムの利用を許可していただき、さらに、ご意見・ご助言などをいただきました。重ねて謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 横田治彦・渡辺弘之・塩谷清人: 東京で観測された地震動のやや長周期成分とその特性, 第5回日本地震工学シンポジウム, pp.145-152, 1978
- 2) 田中貞二・吉沢静代・大沢絆: やや長周期帯域における地震動の特性—東京で観測されたM6以上の地震—, 第5回日本地震工学シンポジウム, pp.265-272, 1978
- 3) 座間信作・工藤一嘉: 東京湾岸におけるやや長周期地震動特性—1990年2月20日伊豆大島近海地震—, シンポジウム「ウォーターフロントにおける地震動特性と地盤に関わる諸問題」, 建築学会関東支部, pp.17-24, 1991.9
- 4) 丹羽正徳・大保直人・鈴木康嗣・野沢貴: 東京湾臨海部の地震動特性に関する研究—その1—1990.2.20伊豆大島近海地震の記録にみられるやや長周期地震動について—, 建築学会学術講演梗概集(中国)B, pp.347-348, 1990.10
- 5) 山中浩明・瀬尾和夫・佐間野隆憲: 地震気象に見られる深い構造の影響—その9—1990年2月20日伊豆大島東方沖地震の際のやや長周期地震動について—, 建築学会学術講演梗概集(中国)B, pp.351-352, 1990.10
- 6) 若松邦夫・野畑有秀・安井讓: 地震観測に基づく首都圏地域の地盤震動性状に関する研究(その1. 観測概要および1990.2.20伊豆大島近海地震に関する検討), 建築学会学術講演梗概集(中国)B, pp.373-374, 1990.10
- 7) 川瀬博: 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション, 地震2, 第46巻(1993), pp.171-190
- 8) 日本第四紀学会編: 日本第四紀地図, 地形・地質・活構造図, 東京大学出版会, 1987.7
- 9) 理論地震動研究会編: 地震動—その合成と波形処理—, 鹿島出版界, pp.219-220, 1993
- 10) 山崎文雄・鹿林・片山恒雄: アレー観測における地震計の設置誤差評価, 土木学会論文集, No.432/I-16, pp.231-240, 1991.7
- 11) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, pp.52-66, 1977
- 12) 座間信作: やや長周期地震動, 地震2, 第46巻(1993), pp.329-342
- 13) H. Kawase・T. Sato: Simulation Analysis of Strong Motions in the Ashigara Valley Considering One- and Two-Dimensional Geological Structures, J.Phys.Earth, 40, pp.27-56, 1992
- 14) 釜田正毅・源栄正人・菅原長・丹羽正徳: 東京湾臨海部の地震動特性に関する研究—その4—簡易3次元FEMによる関東平野のLove波波動伝播解析—, 建築学会学術講演梗概集(北陸)B, pp.355-356, 1992.8
- 15) 菅原長・源栄正人・釜田正毅: 表面波Gaussian Beam法による関東平野の表面波伝播解析—Kinematic Ray Tracingによる解析—, 建築学会学術講演梗概集(北陸)B, pp.355-356, 1992.8
- 16) 年縄巧・大町達夫: 3次元有限要素法による関東地盤の表面波伝播解析—1990年2月20日伊豆大島近海地震の場合—, 土木学会第46回年次学術講演会, 1992.9, I-PS14, pp.28-29
- 17) 嶋悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・瀬尾和夫・山崎謙介: 東京の基盤構造 その2 第3回 夢の島, 吉川町爆破実験による地下深部探査, BERI, Vol.51(1976), pp.45-61
- 18) 嶋悦三・柳沢馬住・工藤一嘉・吉井敏克・瀬尾和夫・大保直人・星野務・長能正武: 東京の基盤構造 その4 第6回, 第7回夢の島爆破実験による地下深部探査, BERI, Vol.56(1981), pp.1245-1255
- 19) 山中浩明・瀬尾和夫・佐間野隆憲・翠川三郎・嶋悦三・柳沢馬住: 人工地震による首都圏南西部の地下深部探査(3)—1983, 1984年に実施された人工地震のデータの総合解析—, 地震2, 第41巻(1988), pp.527-539
- 20) 天池文男・小林喜久二・阿部康彦・慈道順一: 立体アレー観測によるやや長周期地震動の波動伝播特性, 建築学会学術講演梗概集(北陸)B, pp.355-356, 1992.8
- 21) 年縄巧: 大規模体積盆地におけるやや長周期地震動に関する3次元地盤震動解析, 東京工業大学学位論文, 1992, 10