



山地形における地震動の増幅特性

栗田哲史¹⁾、安中正²⁾、高橋聡³⁾、嶋田昌義⁴⁾、末広俊夫⁵⁾

1) 正会員 アジア防災センター、主任研究員 博士(工学)

e-mail : kurita@adrc.or.jp

2) 正会員 東電設計株式会社、地震・地震動専門職 理修

e-mail : annaka@tepsco.co.jp

3) 正会員 東京電力株式会社

e-mail : takahasi.satoru@tepcoco.jp

4) 正会員 東電設計株式会社

e-mail : shimada.masayoshi@tepcoco.jp

5) 正会員 東京電力株式会社

e-mail : suehiro.toshio@tepcoco.jp

要 約

山地形のような不整形地盤では、地震動の増幅特性が地形の影響を受けることが知られている。不整形地盤に入射した波と内部で反射した波の干渉により、伝達する地震波は複雑な様相を示す。この様な山地形の地震動特性を明らかにするために、横須賀市内の山地において、アレー観測を行ってきている。観測記録はデータベース化され、増幅特性の分析に活用されている。本研究では、この山地形を対象として観測記録の分析及び3次元有限要素法による数値シミュレーションを実施した。観測記録を良く説明できる適切な解析モデルを作成し、山地形の増幅特性を評価することを目的としている。検討の結果、山地形を忠実にモデル化することによって観測記録を良く説明できるシミュレーションが可能となった。更に同モデルを用いて、山地形に地震波が入射した時に地震動がどのような特性を示すのかを解析的に評価した。

キーワード : 山地形、地震動、増幅特性、三次元FEM解析、アレー観測

1. はじめに

構造物の建設にあたって、その立地条件は非常に重要な選定の鍵となるが、一般的な土木構造物と異なり、電力施設は様々な制約から山地に構築されるものも少なくない。この様な施設の耐震性を考えるとき、その構造物が立地している地盤の震動特性が重要な要因となる。

山地形のような不整形地盤では、X,Y,Z成分間のカップリングが発生し、複雑な増幅特性となることが知られている¹⁾。しかし、山地形における地震動特性に関する観測・解析両面での研究は十分であるとは言えない。山地形の増幅特性に関する最近の研究としては、1993年1月15日の釧路沖地震($M_j=7.8$)

における、釧路気象台の観測記録に対する評価がある。気象台の 87 型地震計及び SMAC 強震計（建築研究所）の記録に関する分析では、水平成層モデルでは説明できない事を指摘し、不整形 FEM モデルを用いたシミュレーションで増幅特性が再現できることなどが示されている^{2)~5)}。

東京電力では横須賀市内の山地にアレー観測システムを構築し、1982 年から観測を行ってきている。本研究では比較的大きい加速度を選定して、強震動記録の分析を行うことにより、山地形における地震動の増幅特性を抽出した。更に、1987 年 12 月 17 日千葉県東方沖地震 ($M_j=6.7$) の記録を対象として、3 次元の有限要素法による数値シミュレーションを実施した。観測記録を良く説明できる適切な解析モデルを作成することによって、山地形の増幅特性を評価する事を目的としている。

2. アレー観測の概要

対象となる山地形の断面図およびアレー観測の地震計配置を図 1 に示す。山頂の標高は約 80m で、比較的低い小山である。地震計は山頂から 3 深度の鉛直アレーが生まれ、山腹および山麓に各 1 箇所設置されている。山麓の地震計 No.5 は山に近いが平坦部に位置し、岩盤上に地震計が設置されている。各地震計は水平 2 成分、鉛直 1 成分の計 3 成分のセンサーからなっている。アレー観測のトリガーは No.1 地震計である。5 つの地震計は平面図上で直線状に位置し、山地形の同一鉛直断面内に収まる配置となっている。

対象地点の地盤物性値は、地震計設置時に行った地質調査によって表 1 の様に得られている。対象山地は基本的に岩質の地形であるが、表層に極薄い風化層が存在する。

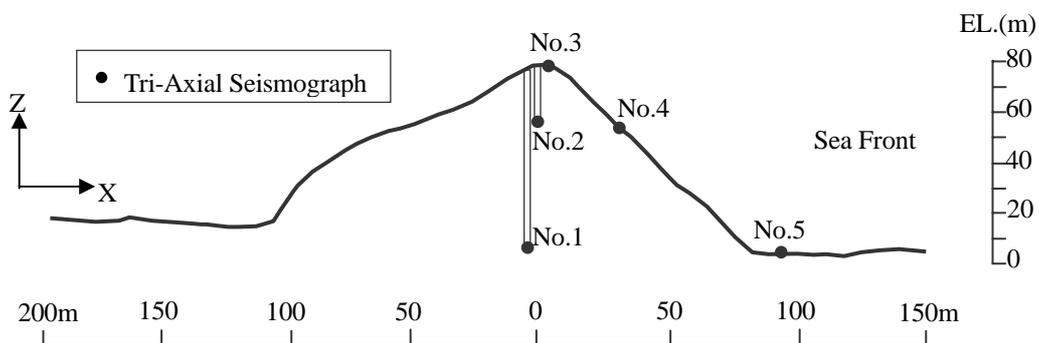


図 1 対象山地の断面と地震計の配置

表 1 地盤調査結果

Layer No.	Depth (m)	Thickness (m)	Geology	P-Wave Velocity (m/s)	S-Wave Velocity (m/s)	Density (g/cm^3)
1	-4	4	Silty Mudstone	1600	250	1.7
2	-8	4	Silty Mudstone	1600	400	1.8
3	-18	10	Mudstone	1900	600	1.9
4	-58	30	Sandstone	2000	700	1.9
5	-66	8	Sandy Tuff	2000	700	1.9
6	infinite	-	Tuff	2000	700	1.9

表2 対象とした地震の基礎情報と山頂の最大加速度

Event No.	Origin Time		Focal Depth (km)	M_j	Location of Epicenter	Max. Acc. at Hilltop (cm/s ²)		
						X	Y	Z
EQ.066	87/12/17	11:08:16.8	58	6.7	Offshore of Chiba Prefecture	132.4	122.4	53.9
EQ.070	88/08/12	14:14:53.9	69	5.3	Southern Boso Peninsula	85.7	65.1	33.0
EQ.083	89/10/14	06:19:58.6	21	5.7	Inshore of Izu-oshima Island	35.1	89.4	7.7
EQ.154	94/06/29	11:01:58.8	60	5.2	Southern Boso Peninsula	88.0	106.3	29.3
EQ.164	95/07/03	08:53:23.2	122	5.2	Sagami Bay	61.9	43.4	22.9

M_j : 気象庁マグニチュード

表2には、本研究で対象とした地震の基礎データと山頂における最大加速度の値を示している。これらの記録は、データベースの中で山頂における最大加速度の大きなものを選び出している。観測記録中で最大のものは、地震番号EQ.066の千葉県東方沖地震の記録である。

3. 観測記録の分析

各地震計における最大加速度の標高に対する分布を図2に示す。図より、水平成分に関しては、山頂で急激に振幅が大きくなっている。一方、鉛直成分では、その様な傾向は見られない。また、何れの記録でも地中と地表とで最大値に大きな差異が見られない。

自由地盤に近いNo.5地震計を規準として、No.1およびNo.3地震計の記録とのフーリエスペクトル比を計算した。図3に、観測記録の中で比較的加速度が大きい5地震を選択して計算した、フーリエスペクトル比の幾何平均を示す。尚、フーリエスペクトル比は、加速度フーリエスペクトルに0.2HzのParzen windowで平滑化処理を施した後に比を計算している。

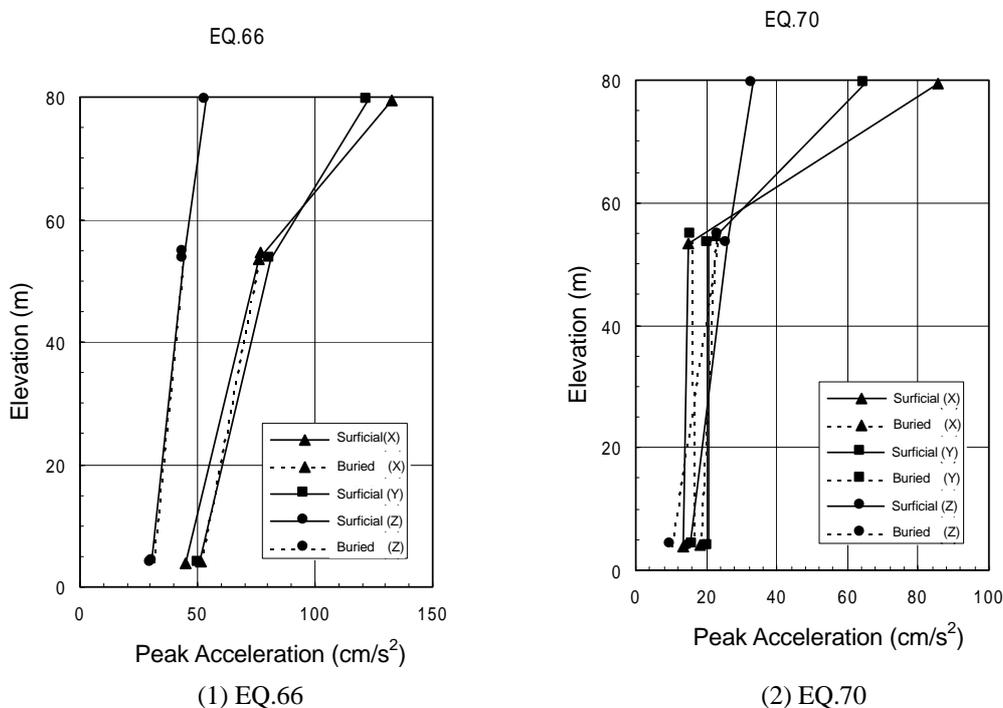
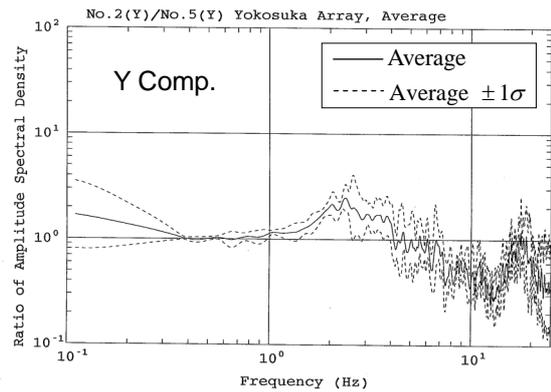
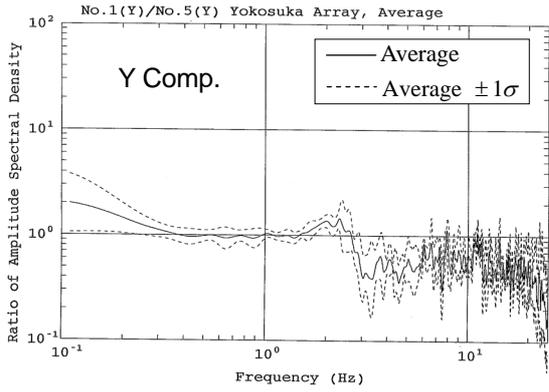
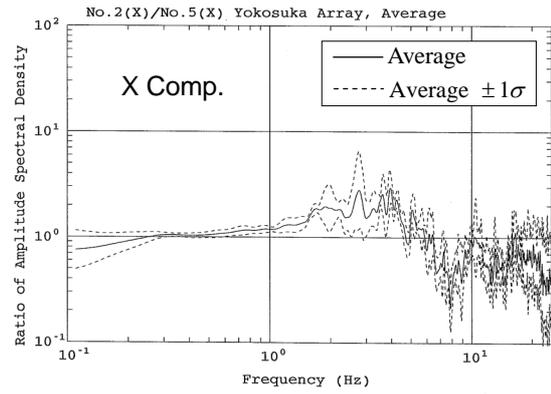
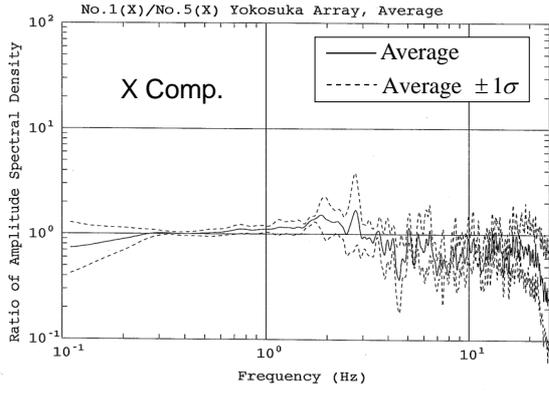
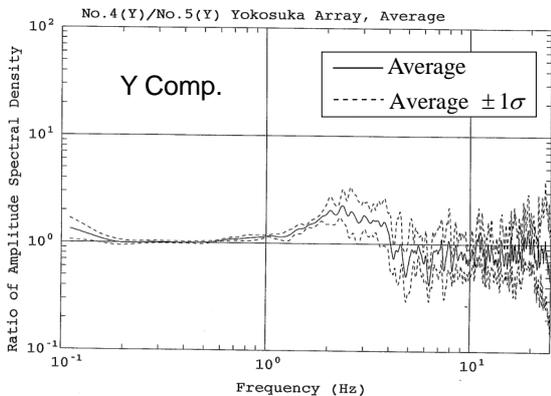
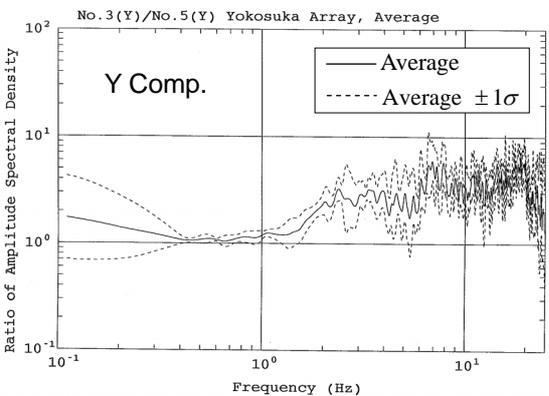
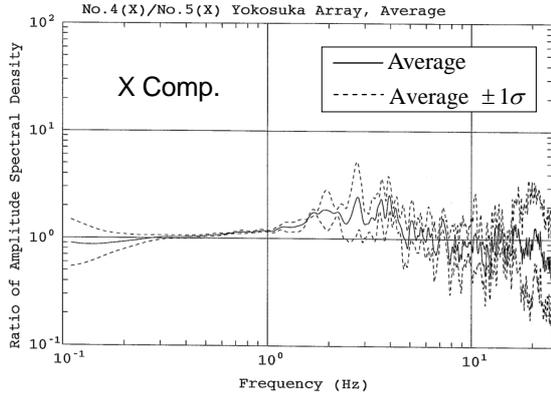
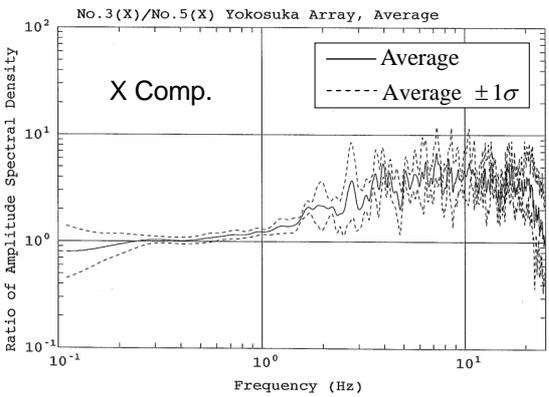


図2 観測された最大加速度の標高に対する分布



(1) No.1/No.5

(2) No.2/No.5



(3) No.3/No.5

(4) No.4/No.5

図3 観測記録のフーリエスペクトル比

図中の実線が平均値、破線が平均値 ± 標準偏差を表している。No.1 地震計に対する比では約 3Hz まで倍率 1.0 であるが、それ以上の周波数帯では 1 以下になっている。これは、No.1 地震計が山頂の真下に位置するため、山地形の中で発生した反射波によってこの周波数帯の成分がキャンセルされているものと思われる。No.3 地震計に対する比では、2Hz 以上の成分が増幅している。この状態は 20Hz 程度まで続いている。山頂は波が集中する事により、増幅率が大きくなるものと思われる。

4 . 数値シミュレーション

4.1 シミュレーション手法

数値シミュレーションは、図 4 に示す解析モデルを用いて 3 次元の有限要素法によって行った。解析モデルの全要素数は 6336、全節点数は 7500 である。解析は時間領域で行い、境界条件は底面・側面ともに粘性境界である。側方境界については、2 次元の地盤モデルとの間に 3 成分のダッシュポットを配置している。尚、要素には 8 節点要素を用い、入射波は水平 2 成分および鉛直 1 成分で与えた。

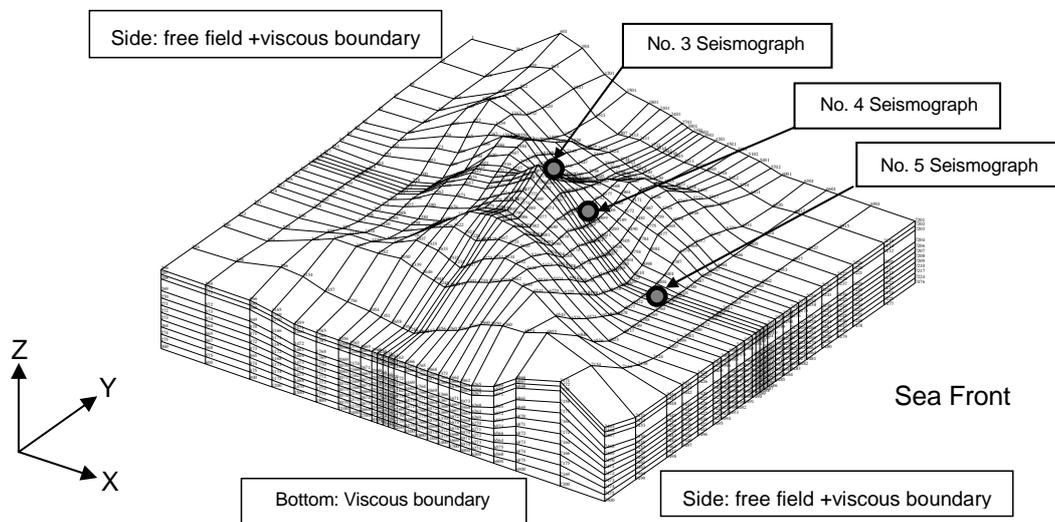


図 4 三次元解析モデル

入射波には、自由地盤に最も近い条件である No.5 地震計の記録 (3 成分) を、以下の式により周波数領域で入射面(EL.-50m)まで引き戻した波を用いた。

$$\mathbf{I}(\omega) = \mathbf{H}^{-1}(\omega) \cdot \mathbf{R}(\omega) \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(\omega) &= \{I_X, I_Y, I_Z\}^T && : \text{入射波、} \\ \mathbf{R}(\omega) &= \{R_{5X}, R_{5Y}, R_{5Z}\}^T && : \text{No.5 地震計の観測記録、} \\ \mathbf{H}(\omega) &= \begin{bmatrix} H_{5X/X} & H_{5X/Y} & H_{5X/Z} \\ H_{5Y/X} & H_{5Y/Y} & H_{5Y/Z} \\ H_{5Z/X} & H_{5Z/Y} & H_{5Z/Z} \end{bmatrix} && : \text{入射波に対する No.5 位置の応答の} \\ &&& \text{理論伝達関数 (先の解析モデル} \\ &&& \text{使用)} \end{aligned}$$

を表している。入射波が式(1)に示したものと一致するように、解析モデルに入力を与えている。

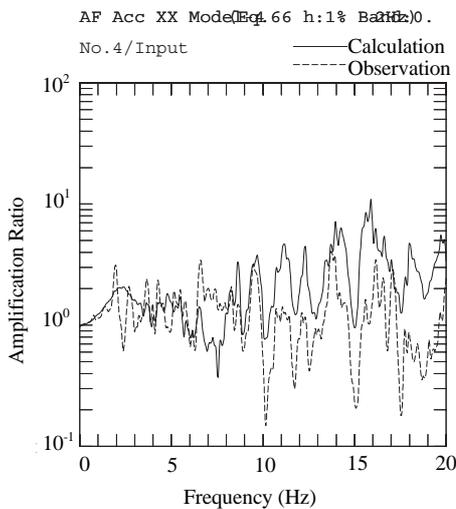
解析では、各要素に表 1 の物性値をそのまま与えた。また、減衰マトリックスは Rayleigh 減衰によっ

て与え、山地形における増幅特性の主要な周波数領域でほぼ一定とすることを旨し、 $f_0=2.24\text{Hz}$ と $f_1=13.0\text{Hz}$ において $h=1\%$ となるように設定した。

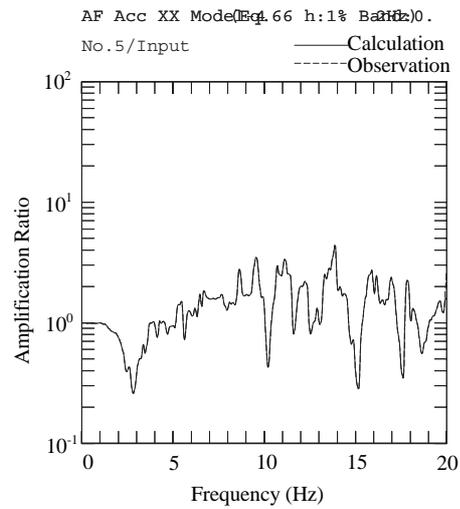
シミュレーションの対象は、対象地点で最大の加速度を観測している地震番号 EQ.066 の 1987 年 12 月 17 日千葉県東方沖地震 ($M_j=6.7$) の記録を用いることとした。

4.2 解析結果の検証

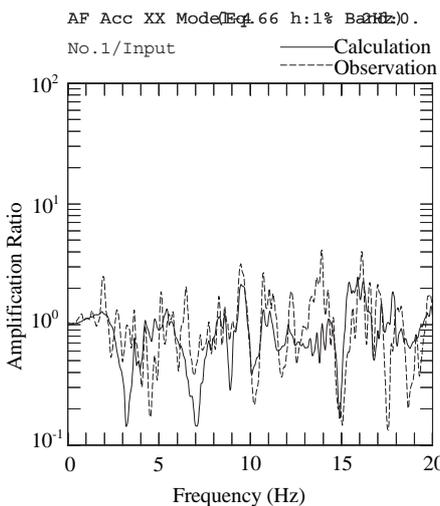
図5にシミュレーション結果および観測記録のフーリエスペクトル比の X 成分に関する比較を示す。ここで、解析値および観測値は、バンド幅 0.2Hz で平滑化処理している。両者は非常によく一致しており、ここで用いた解析モデルが実際の山地形を良く再現できていることを示している。特に、山頂において 5Hz 以上の増幅率が 10 倍程度で一定となる様子、山頂直下の地中で打ち消される周波数成分が有る事などが忠実に表現できている。



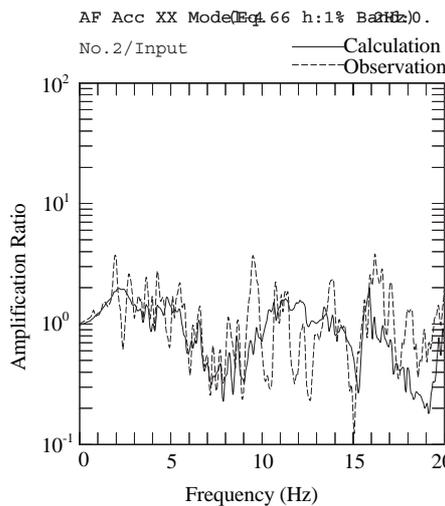
(4) Response at No.4 /Incident wave



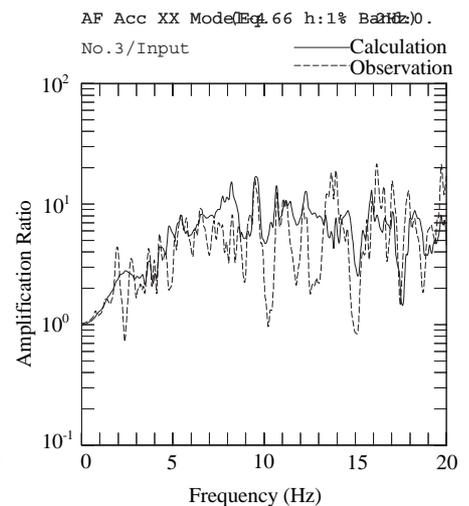
(5) Response at No.5 /Incident wave



(1) Response at No.1 /Incident wave

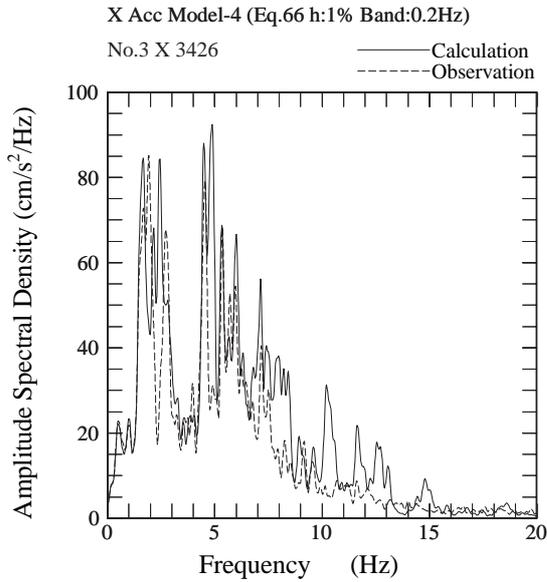


(2) Response at No.2 /Incident wave

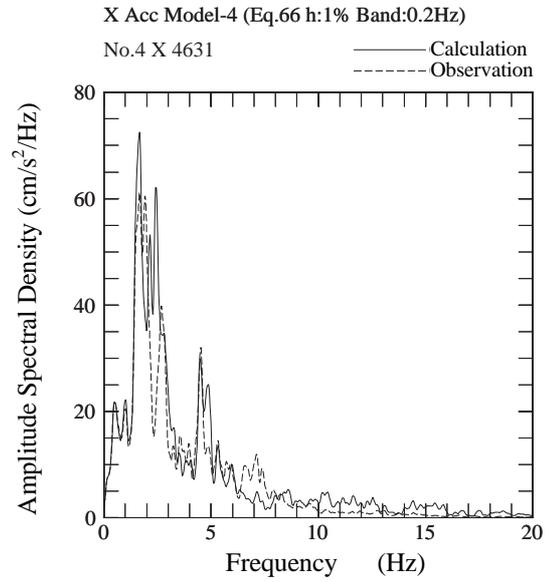


(3) Response at No.3 /Incident wave

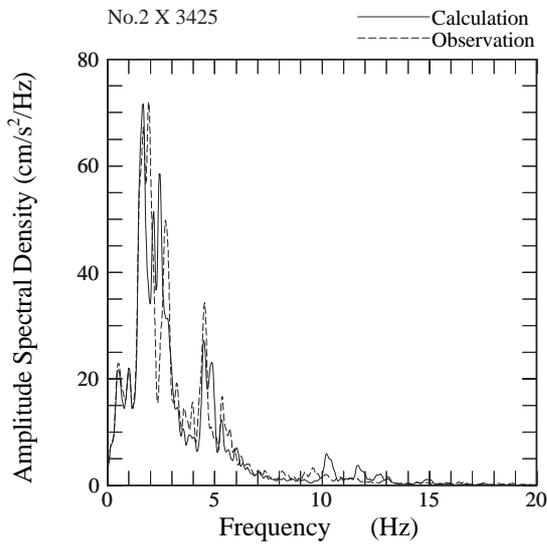
図5 観測記録とシミュレーションとのフーリエスペクトル比の比較



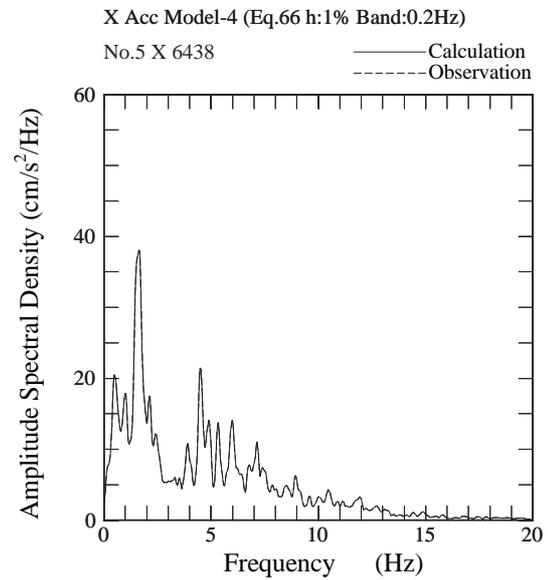
(3) No.3



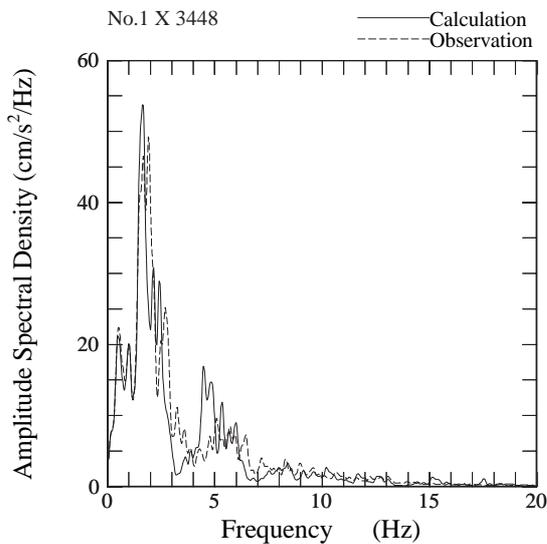
(4) No.4



(2) No.2



(5) No.5



(1) No.1

図6 観測記録とシミュレーション結果とのフーリエスペクトル(X成分)の比較。

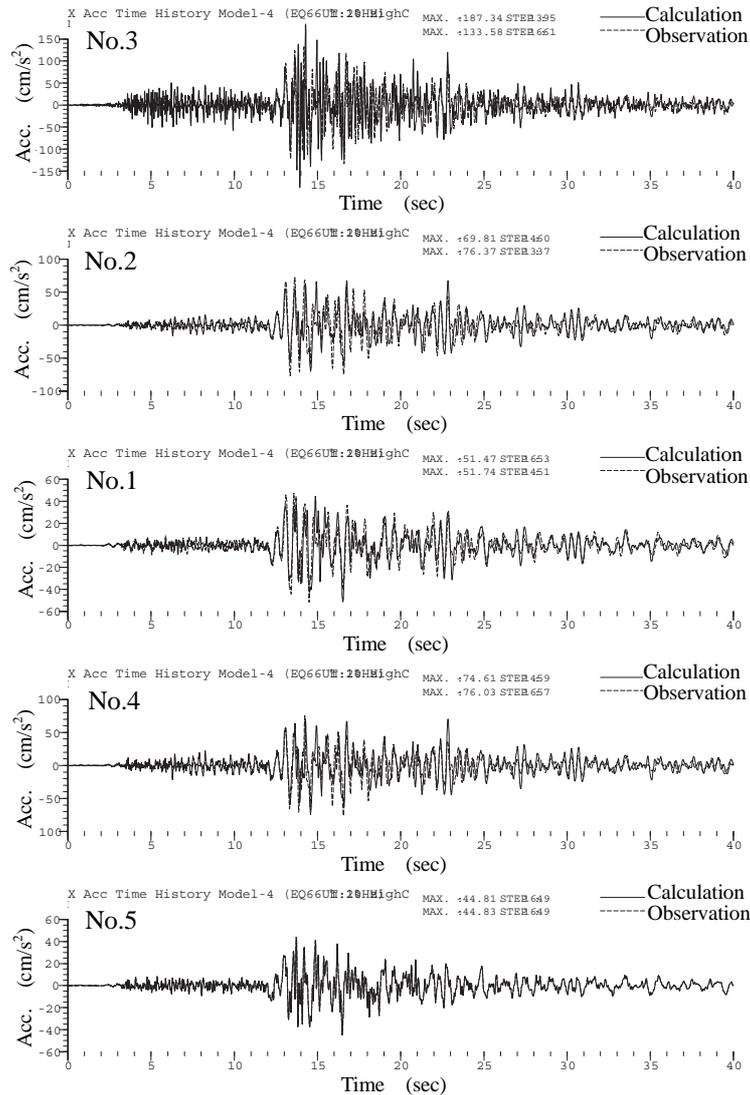


図7 観測記録とシミュレーションとの加速度時刻歴の比較

各地震計位置におけるシミュレーション結果と観測記録とのフーリエスペクトルの比較を図6に示す。ここで、各スペクトルはバンド幅 0.2Hz の Parzen window で平滑化している。同様に加速度時刻歴に関する比較を図7に示す。図中の、実線は解析値、破線は観測値を表している。両者は非常に良く一致しており、精度良くシミュレートできている事が分かる。ここでは、X成分のみに着目しているが、Y成分およびZ成分も同様に良く一致している。

尚、本論文では地震番号 EQ.066 のシミュレーション結果のみを掲載しているが、表2に示した他の記録でも同様のシミュレーションを行っている。特に、EQ.066 は継続時間 30 秒程度で、卓越振動数 1 ~ 2Hz の地震動であるのに対し、EQ.154 は継続時間 3 ~ 4 秒、卓越振動数 3 ~ 4Hz と、かなり異なる性質の記録であるが、両者共にシミュレーションでは観測記録を良く再現できることを確認している。

4.3 山地形の影響による地震動特性

次に、地中の地震波が反射波によって打ち消される現象に着目した。図 - 5 (1)のフーリエスペクトル比で振幅比が1以下の深い谷になっている周波数を選び、その周波数における加速度ベクトルの分布を図8の通り求めた。分布図より、No.1地震計の位置においてのみ振幅が小さくなっており、この点が振動の節となっている事が分かる。

更に、山地形の形状による増幅特性を調べた。入射波には、波動の伝播の様子が分かりやすいRicker waveletを用いた。図9に中心周波数が10Hzで最大振幅10cm/s²のRicker waveletをX方向にのみ入射した時の、XZ面内における最大加速度ベクトルの分布図を示す。XZ面は地震計の設置されている断面(図1参照)と一致する。図は各節点毎に得られたベクトルの最大値をプロットしたものである。図より、山頂付近において振幅が非常に大きくなる事が分かる。また、No.4地震計が有る海岸側の急峻な斜面は、増幅の度合いが小さい。一方、反対側のなだらかな斜面は、非常に大きい増幅率を示している。これらの結果より、斜面の形状に応じて、増幅の様子が異なる事が分かる。

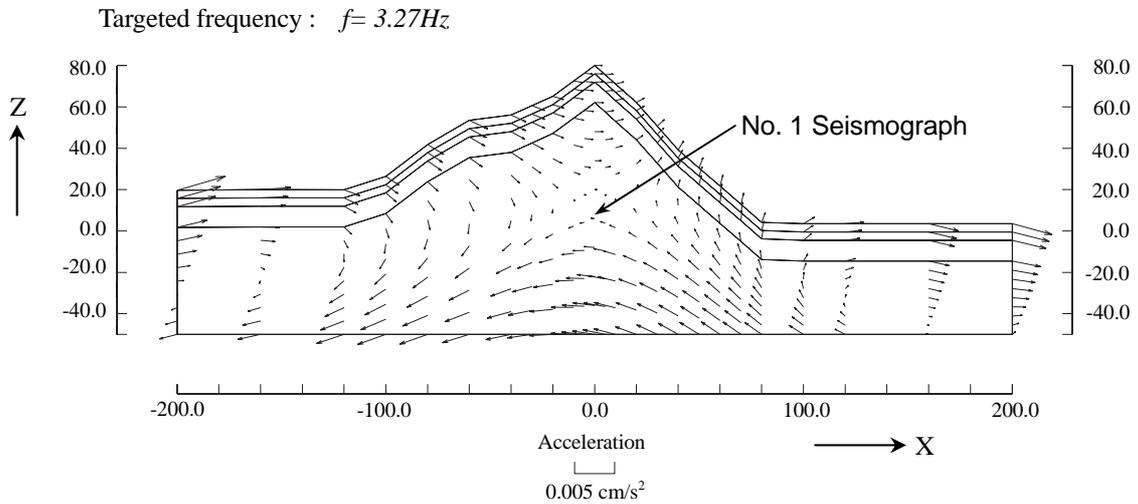


図8 着目周波数における加速度ベクトル (XZ断面, Y=0)

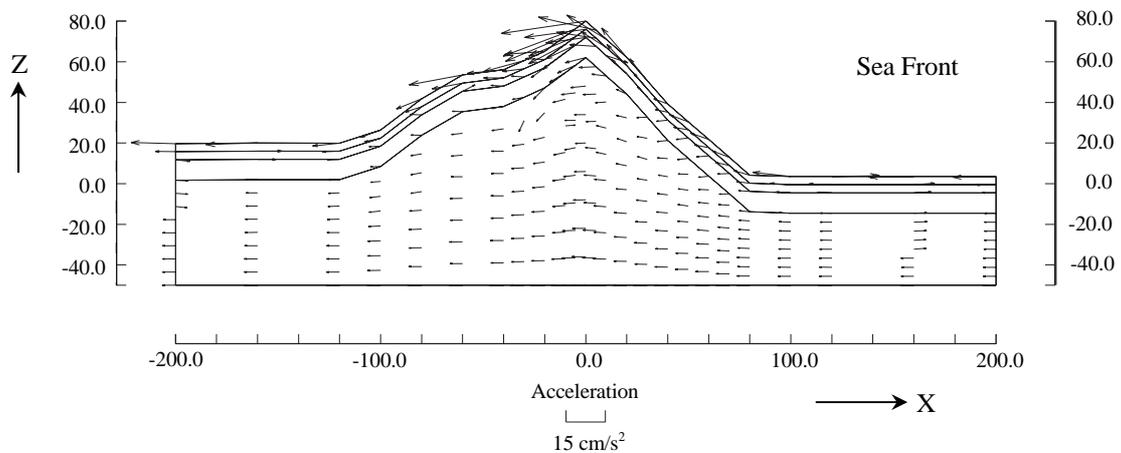


図9 最大加速度ベクトルの分布 (XZ断面, Y=0)

山頂において波が集中して増幅率が大きくなる様子や、地中に反射波によって打ち消される点が現れるという現象は、本研究の予備的検討で行った二次元解析でも確認できた。しかし、観測記録と比較した場合、二次元解析では表現できないピークや谷などの増幅特性があり、観測記録を良く説明するためには、三次元で忠実にモデル化する必要がある。

5 . 結論

山地形を増幅特性を把握する事を目的として、アレー観測記録の分析及び同記録に対する3次元有限要素法によるシミュレーションを実施した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・ 観測記録の分析から、山頂の増幅率が非常に大きくなり、特にある周波数以上では、常に増幅する様子が見られた。
- ・ 地中の観測記録には、山地形内の反射波によって打ち消されたと考えられる周波数成分が存在する。
- ・ 山地形を忠実にモデル化し、観測記録を良く説明できる数値シミュレーションが可能となった。
- ・ 数値シミュレーションでは、山頂付近に波が集中して増幅率が大きくなる特性が再現できた。
- ・ シミュレーションの分析より、伝達関数が谷となる周波数では、地中地震計の位置が節となる挙動をしていることが分かった。
- ・ 山地形における斜面の形状に応じて増幅の度合いが異なり、肩のような形状があると大きく増幅することが分かった。

謝 辞

本研究の数値解析を実施するにあたり、(株)ユニックの前原達也氏の協力を得た。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 編：動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法, 技報堂出版, 1989年7月.
- 2) 太田外氣晴：釧路気象台における強震動と地盤・構造物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.77~85, 1995年8月.
- 3) 神田克久・源栄正人：不均質・不整形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 釧路地方気象台敷地の場合, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp.85~94, 1995年10月.
- 4) 石田寛・佐々木透・丹羽正徳・北川良和・鹿嶋俊英：釧路地方気象台の鉛直アレー地震観測記録に見られる表層地盤の増幅特性, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.91~100, 1996年12月.
- 5) Paolucci, R., "Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, No. 31, 2002, pp.1831-1853.

(受理：2004年6月24日)

(掲載決定：2005年5月31日)

Effect of Irregular Topography on Strong Ground Motion Amplification

Tetsushi KURITA¹⁾, Tadashi ANNAKA²⁾, Satoru TAKAHASHI³⁾,
Masayoshi SHIMADA²⁾ and Toshio SUEHIRO³⁾

1) Member, Senior researcher, Asian Disaster Reduction Center, Dr. Eng.

2) Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

3) Member, Tokyo Electric Power Company

ABSTRACT

Topographic irregularities such as hills affect the amplification characteristics of strong ground motion. Due to the interference between direct waves and scattered waves, the behavior of seismic waves passing through irregular terrain is complex. In this study, records of seismic ground motion were compared to simulated seismic waves, calculated from 3-dimensional FEM. The study objectives were to build an analytical model capable of accurately reproducing the observed data and to evaluate the amplification characteristics of strong ground motion in areas characterized by irregular topography.

KEY WORDS: Irregular Topography, Strong Ground Motion, Amplification Characteristics, 3-dimensional FEM, Array Observation