

New Index for Earthquake Damage in Considering Response Spectra and Number of Cycle

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Kitaura, Masaru メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/47130

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



応答スペクトルと繰り返し回数を組み合わせた震害新指標の提案

New Index for Earthquake Damage
in Considering Response Spectra and Number of Cycle

課題番号：07650539

平成7年度～平成8年度科学研究費補助金（基盤研究（C））
研究成果報告書

Grant-in-Aid for Scientific Research (C)

平成9年3月
March 1997

研究代表者 北浦 勝
(金沢大学工学部)

Masaru KITAURA
(Kanazawa University)

文部省科学研究費補助金（基盤研究（C））研究成果報告書

Grant-in-Aid for Scientific Research (C)

研究課題：応答スペクトルと繰り返し回数を組み合わせた震害新指標の提案

課題番号：07650539

研究組織：研究代表者：北浦 勝（金沢大学工学部 教授）
研究分担者：太田秀樹（金沢大学工学部 教授）
研究分担者：宮島昌克（金沢大学大学院自然科学研究科 助教授）
研究分担者：飯塚 敦（金沢大学工学部 助教授）
研究分担者：吉田雅穂（福井工業高等専門学校 助手）
研究分担者：村田 晶（金沢大学工学部 助手）平成8年度
研究協力者：池本敏和（金沢大学工学部 技術官）

研究経費：平成7年度 1, 100千円
平成8年度 400千円

計 1, 500千円

研究発表：

（1）学会誌等

- 1) Miyajima, M. and Kitaura, M.: Earthquake Performance of Water Supply Pipelines During the Recent Earthquakes in Japan, Proc. of the Pacific Conference on Earthquake Engineering '95, Vol. 2, pp. 87-96, 1995.
- 2) 宮島昌克・ザイ恩地・北浦 勝：1995年兵庫県南部地震における上水道管路被害の定量的解析，土木学会阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 299-304, 1996.
- 3) Kitaura, M. and Miyajima, M.: Damage to Water Supply Pipelines, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, pp. 325-333, 1996.
- 4) Zhai, E., Miyajima, M. and Kitaura, M.: Study of Amplification of Vertical Ground Motion Using Inverse-Analysis to Determine Dynamic Soil Parameters, Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol.42A, pp.573-579, 1996.

- 5) Zhai, E., Miyajima, M. and Kitaura, M.: Experimental Study on Effects of Vertical Ground Motions upon Ground Amplification and Damage to Lifelines in Liquefied Area, Proc. of 11WCEE, 1996.
- 6) Miyajima, M. and Kitaura, M.: Performance on Water Supply Pipelines During The 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Proc. of the 5th Japan/US Workshop Urban Earthquake Hazard Reduction, 1997 (in press).
- 7) Kitaura, M., Ikemoto, T. and Miyajima, M.: Damage to Wooden Houses During the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Proc. of the 5th Japan/US Workshop Urban Earthquake Hazard Reduction, 1997 (in press).
- 8) 村田 晶・宮島昌克・北浦 勝：1995年兵庫県南部地震における地盤特性を考慮した上水道管路の被害要因分析，土木学会第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 157-162，1997.
- 9) 池本敏和・松川晃之・北浦 勝：1995年兵庫県南部地震における木造家屋被害の要因分析，土木学会第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 579-582，1997.

(2) 口頭発表

- 1) ザイ恩地・北浦 勝・宮島昌克：上下動を考慮した地盤の地震応答解析（神戸市ポートアイランドについて），土木学会第23回地震工学研究発表会，1995.
- 2) 松川晃之・池本敏和・北浦 勝・向川佳彦：1993年能登半島沖地震における道路被害の要因分析，土木学会第23回地震工学研究発表会，1995.
- 3) 村田 晶・宮島昌克・北浦 勝・吉田雅穂：1994年北海道東方沖地震による下水道被害に関する検討，土木学会第23回地震工学研究発表会，1995.
- 4) 福島聡一郎・宮島昌克・北浦 勝・吉田雅穂・藤野崇之：1994年三陸はるか沖地震による上水道被害の要因分析，土木学会第23回地震工学研究発表会，1995.
- 5) Zhai, E., Kitaura, M., Miyajima, M. and Yumura, T.: Characteristics of Vertical Ground Motions in Northridge Earthquake, 第50回土木学会年次学術講演会，1995.
- 6) 松川晃之・池本敏和・北浦 勝：兵庫県南部地震における木造家屋被害の要因分析，土木学会中部支部平成7年度研究発表会，1996.
- 7) 村田 晶・宮島昌克・北浦 勝：1994年北海道東方沖地震による上水道被害に関する定量的解析，土木学会中部支部平成7年度研究発表会，1996.
- 8) 田中良英・宮島昌克・北浦 勝：1995年兵庫県南部地震における上水道管路被害の要因分析，土木学会中部支部平成7年度研究発表会，1996.
- 9) 張 福道・北浦 勝・宮島昌克・ザイ恩地：1995年兵庫県南部地震におけ

- る地盤震動特性と構造物被害との関係，土木学会中部支部平成7年度研究発表会，1996.
- 10) 和佐田真吾・池本敏和・北浦 勝：兵庫県南部地震における道路被害と交通制御，土木学会中部支部平成7年度研究発表会，1996.
 - 11) 村田 晶・宮島昌克・北浦 勝：1994年三陸はるか沖地震による上水道被害に関する多変量解析，第51回土木学会年次学術講演会，1996.
 - 12) ザイ恩地・北浦 勝・宮島昌克：液状化地盤における水平動と上下動の波動特性，第51回土木学会年次学術講演会，1996.
 - 13) 北浦 勝・ザイ恩地・宮島昌克：直下型地震における実上下動と重複反射理論を用いて模擬した上下動との特徴比較，第1回都市直下型地震災害総合シンポジウム，1996.
 - 14) 張 福道・杉木啓伸・北浦 勝：繰り返し回数を考慮した応答スペクトルと木造建物の震害との関係，土木学会中部支部平成8年度研究発表会，1997.
 - 15) 宮島昌克・北浦 勝・片原道男・車古恵美里：上水道管路網の耐震診断法に関する検討，土木学会中部支部平成8年度研究発表会，1997.
 - 16) 村田 晶・宮島昌克・北浦 勝：数量化理論Ⅱ類を用いた上水道管路の被害要因分析，土木学会中部支部平成8年度研究発表会，1997.
 - 17) 片原道男・宮島昌克・北浦 勝：地震時の水道管属具施設被害に関する一考察，土木学会中部支部平成8年度研究発表会，1997.

応答スペクトルと繰り返し回数を組み合わせた震害新指標の提案

目 次

第1章 緒 論	1
1－1 研究の目的	1
1－2 研究の構成	1
第2章 繰り返し回数を考慮した応答スペクトル	3
2－1 概 説	3
2－2 応答スペクトルとスペクトル強度	3
2－3 疲労応答スペクトルの提案	3
2－4 結 語	5
第3章 近年の被害地震における構造物被害と震害指標	10
3－1 概 説	10
3－2 1993年釧路沖地震被害と震害指標	10
3－3 1993年能登半島沖地震被害と震害指標	11
3－4 1994年北海道東方沖地震被害と震害指標	12
3－5 1994年三陸はるか沖地震被害と震害指標	14
3－6 1995年兵庫県南部地震被害と震害指標	15
3－7 結 語	16
第4章 構造物被害と疲労応答スペクトルとの関係	82
4－1 概 説	82
4－2 木造家屋被害と疲労応答スペクトル強度との関係	82
4－3 水道管路被害と疲労応答スペクトル強度との関係	84
4－4 結 語	85
第5章 結 論	94

第1章 緒 論

1-1 研究の目的

1993年釧路沖地震や1994年ノースリッジ地震に見られるように、近年の被害地震においては最大加速度が1,000gal近くを記録するものもあるが、その割には壊滅的に構造物が壊れている例が比較的少なかった。しかし、1995年兵庫県南部地震では、最大加速度は1993年釧路沖地震や1994年ノースリッジ地震のそれと同程度であったが、壊滅的な被害が生じた。この理由には、被災地の構造物の耐震性が必ずしも等しくないことも考えられるが、最大加速度が構造物の被害を表すための良い指標ではないことも考えられる。

耐震設計における最も基本的にして重要な概念に応答スペクトルがある。構造物の減衰定数をパラメータにして、横軸に構造物の固有周期、縦軸に地震動に対する最大応答をプロットすることで、地震動に対する構造物の応答を総合的に把握することができるし、逆に地震動の特性を応答を介して明らかにすることもできる。しかし、基本的には応答の最大値に注目している指標であるので、応答の最大値とともに、最大値に近い振幅での繰り返しに基づいた考察もあってしかるべきであると考えられる。

そこで、応答スペクトルに疲労の影響を取り込むことで、構造物の破壊の機構に迫ることができると考えた。水平動を対象とした試算によると、衝撃的な単発の地震動に対する応答の最大値は、同じエネルギーを有する比較的だらだらと続く地震動に対するそれとほぼ同じ大きさであるが、最大振幅近くでの繰り返し回数は後者の方が大きい。この違いが、構造物の破壊と関わっていそうである。

このような観点から、地震動に対する構造物の応答振幅の最大値のみならず、各応答レベルでの繰り返し回数を同時に考慮する疲労応答スペクトルを提案し、衝撃型、継続型のみならず各種の地震動による構造物の疲労応答スペクトルを算出し、地震動の水平2方向と上下の3成分と、変位、速度、加速度の3応答の組み合わせを総合的に考察することにより、構造物の破壊を地震動との関係で明解に把握することが、本研究の目的である。

1-2 研究の構成

本研究報告書は、5章から構成されている。第1章は緒論である。

第2章では、繰り返し回数を考慮した応答スペクトルについて、具体的な計算方法を示しながら、提案している。

第3章では、近年わが国を襲った被害地震について、それぞれの地震および被害

の概要を述べるとともに、従来から用いられている震害指標と今回提案している震害指標である疲労応答スペクトルを、それぞれの地震について示した。本研究報告書では、1993年釧路沖地震、1993年能登半島沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震、1995年兵庫県南部地震の5つの地震を取り上げている。

第4章では、5つの被害地震における各種震害指標間の相関について検討するとともに、地上構造物である木造家屋の被害と地中構造物である上水道管路の被害を取り上げ、本研究で提案している疲労応答スペクトル強度をはじめ、従来からの震害指標との関係について考察した。

第5章は結論であり、本研究の成果と今後の課題を整理してまとめたものである。

第2章 繰り返し回数を考慮した応答スペクトル

2-1 概 説

一般に地震動の最大加速度が大きければ大きいほど、構造物の被害も大きくなると考えられてきた。そこで、最大加速度や、最大応答から導かれるスペクトル強度などが地震動の破壊力を示す指標として用いられてきた。しかし、これらの指標は最大値のみに着目しており、地震により構造物が何回揺らされ、どれくらい疲労が蓄積されたかという点を考慮していない。おそらく、そのためにこれらの指標は実際の地震による被害の程度と必ずしも一致しないのではないかと考えられる。そこで本章では、最大応答付近での繰り返し回数を考慮する疲労破壊の概念を導入した新しい震害指標を提案する。

2-2 応答スペクトルとスペクトル強度

応答スペクトルとは、地振動に対する1自由度系の最大応答を系の固有周期を横軸にとって図示したものである。図2-1は、地震応答スペクトルの模式的説明図である。ところで、構造物やその部材の周期にはいろいろなものがあり、また局所的な破壊が起ると、それらの固有周期は変化する。しかし、ある程度剛性の高い構造物では、主要な周期は大体0.1secから2.5secの間にあるものと考えられ、この間のエネルギーの総和を表わす積分値の平均をもって、地震の破壊力を表わす1つの指標とすることを、ハウスナー (G.W.Housner)は提案している。これをスペクトル強度 (Spectral Intensity, SI値)と呼び、図2-2に示す速度応答スペクトルにおいて、ハッチした部分の平均的な高さに相当するものである。

2-3 疲労応答スペクトルの提案

応答スペクトルにおいて、最大応答だけでなく疲労破壊の概念を導入し、最大応答付近での繰り返し回数を考慮した新しい指標を、疲労を考慮した応答スペクトル (Fatigue Response Spectral Intensity, FSI値)と呼ぶことにする。これには、加速度応答スペクトルに基づくFSI値(加速度)、速度応答スペクトルに基づくFSI値(速度)、変位応答スペクトルに基づくFSI値(変位)のそれぞれが考えられる。以下に、FSI値(加速度)について述べる。

まず、強震加速度記録に対する1質点系モデルの応答加速度を求める。図2-2のよ

うに、1質点系モデルの固有周期を $T=0.1\sim 2.5(s)$ 、減衰定数を $h=0.05$ とする。地震動における建物の疲労破壊を表すために、最大応答付近での繰り返し回数を数える方法を用いる。まず、図2-3のように応答の最大値を100%として、50%以上の応答レベルでの繰り返し回数をカウントする。基本的には、波形の各振幅が各パーセンテージのラインを越える回数を繰り返し回数とする。ある応答レベルでの繰り返し回数の算定に当って、図2-4のような場合には A_1 なる応答レベルで1回、 A_2 なる応答レベルで1回応答が繰り返されたとカウントする。また、図2-5のような場合には次のように考えた。まず、このうちの最大応答 A_3 で1回とカウントする。つぎに、 A_5 で1回とせずに $A_5 - \frac{A_4 + A_6}{2}$ で1回とカウントする。同様にして $A_7 - \frac{A_6 + 0}{2}$ で1回とカウントする。これは2、3番目のピークの麓が完全にゼロではないので、ピークと麓との差を応答の振幅とみなしたことに相当する。

実際の繰り返し回数のカウントの様子を次に示す。図2-6の上図は応答加速度波形の1例であり、これを下図のように変換してカウントする。表2-1は各応答レベルにおける繰り返し回数である。

構造物の固有周期を横軸 (x) に、加速度応答スペクトルを横軸 (y) に、各応答レベルでの繰り返し回数を縦軸 (z) にとったもの、すなわち従来の応答スペクトル (2次元) に繰り返し回数の軸を付け加えて3次元立体表示したものを「疲労を考慮した応答スペクトル」と呼ぶことにする。図2-7は、疲労を考慮した応答スペクトルを周期 T で切ったものである。例えば、固有周期 T で0.9倍した応答スペクトルの点における繰り返し回数は図2-6の応答波形の90%における繰り返し回数と対応しており、同じように0.8倍した応答スペクトルの繰り返し回数は応答波形の80%における繰り返し回数と対応している。

この際、応答レベルが大きいほど、繰り返し回数が多いほど破壊する可能性が高いと仮定する。実際の破壊のメカニズムについて別途詳しく調べなければならないが、ここでは簡単のために、例えば応答の最大値を800gal(100%)とすると、800gal (100%) で3回振動する場合の破壊の可能性は、480gal (60%) で5回振動する場合と等しいと仮定した。

繰り返し回数を応答スペクトルで積分した体積、すなわち疲労を考慮した応答スペクトルの積分値を求め、これを FSI 値 (Fatigue Response Spectral Intensity) と呼ぶことにする。実際の疲労を考慮した応答スペクトルを図2-8に示す。この3次元立体図の体積が FSI 値に相当する。 SI 値との関係で考えると、3次元立体図の体積を底面積で除した値が、この3次元立体図の平均的な高さとなり、 SI 値と対応する値となるのだが、本研究では、簡単のため底面積で割らずに体積のままで評価することにする。

同様に、 FSI 値 (速度)、 FSI 値 (変位) が、それぞれ速度応答スペクトル、変位応答スペクトルから求めることができる。このように、1つの強震加速度記録から FSI 値 (加速度)、 FSI 値 (速度)、 FSI 値 (変位) の3通りの FSI 値が得られる。

なお、前述したFSI値の算出方法では最大応答の50%以上のみを評価することにしていて、しかしこの方法では、例えば最大応答が300galの波形では150gal以上の範囲を評価するが、最大応答が1000galの波形では500gal以上の範囲しか評価しないというように、評価する範囲がばらついてくる。したがって、最大応答の50%以上という基準値を、ある加速度の絶対値以上としたFSI値についても同時に考えていくことにする。

2-4 結語

本章では、最大応答付近での繰り返し回数を考慮する疲労破壊の概念を導入した新しい震害指標である、疲労応答スペクトルを提案した。これは、地震の加速度、速度、変位の応答スペクトルと各振幅レベルでの繰り返し回数を、縦軸Z軸に応答レベル、横軸X軸に構造物の固有周期、横軸Y軸に応答レベルごとの繰り返し回数をとって、3次元立体図を作成し、これを疲労応答スペクトルと呼び、その体積をFSI値（Fatigue Response Spectral Intensity）と名付けた。

次章では、近年わが国で起こった被害地震における疲労応答スペクトルおよびFSI値を求めるとともに、各種震害指標と被害の概要を整理する。

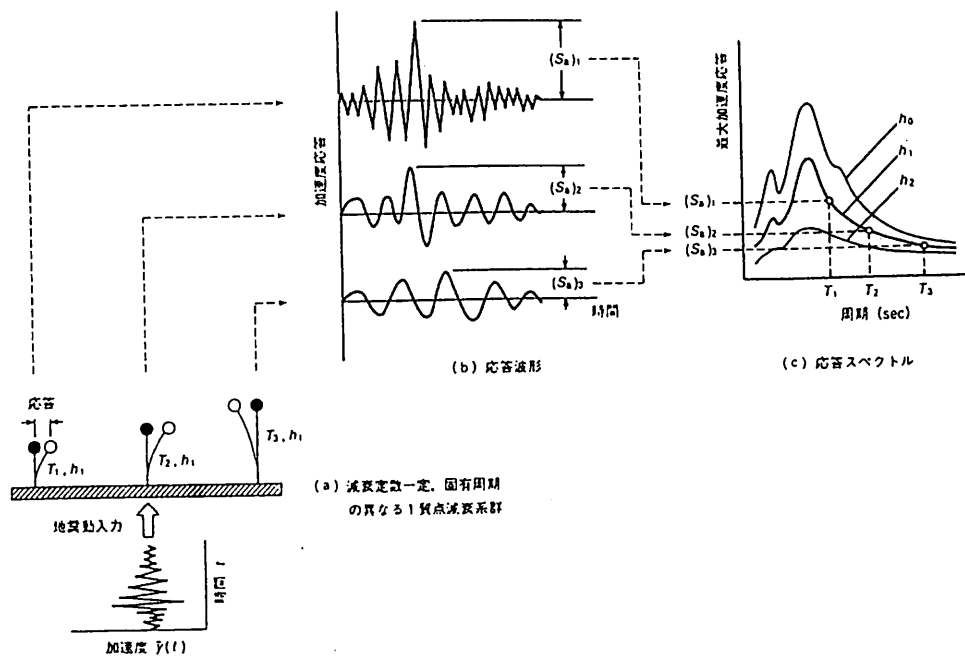


図2-1 地震応答スペクトルの説明図

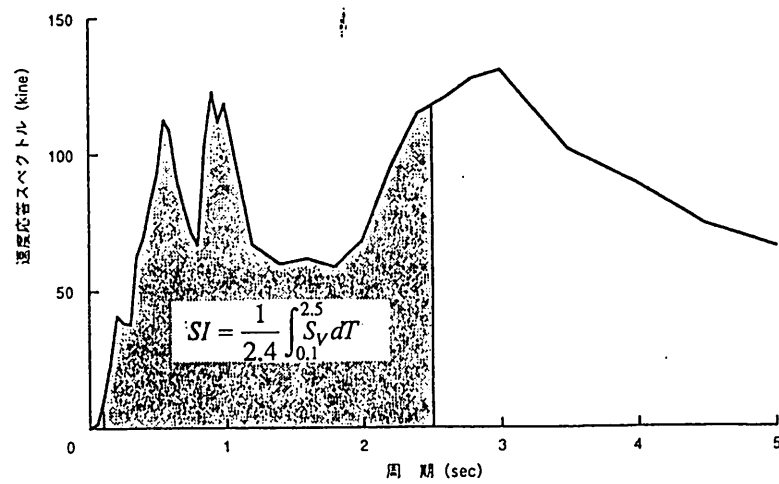


図2-2 スペクトル強度

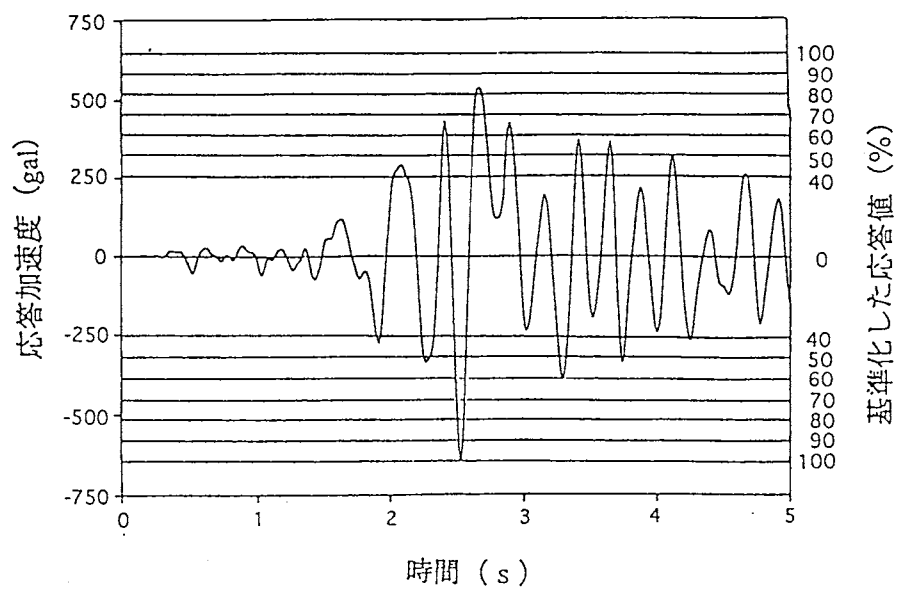


図2-3 応答加速度波形

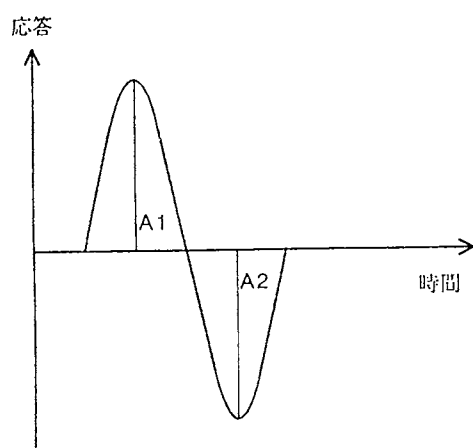


図2-4 繰り返し回数算定のための概念図（その1）

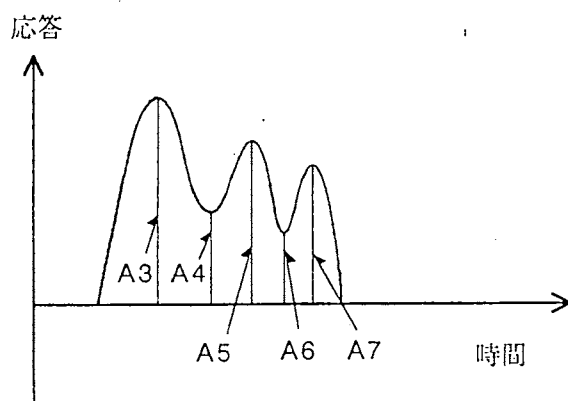


図2-5 繰り返し回数算定のための概念図（その2）

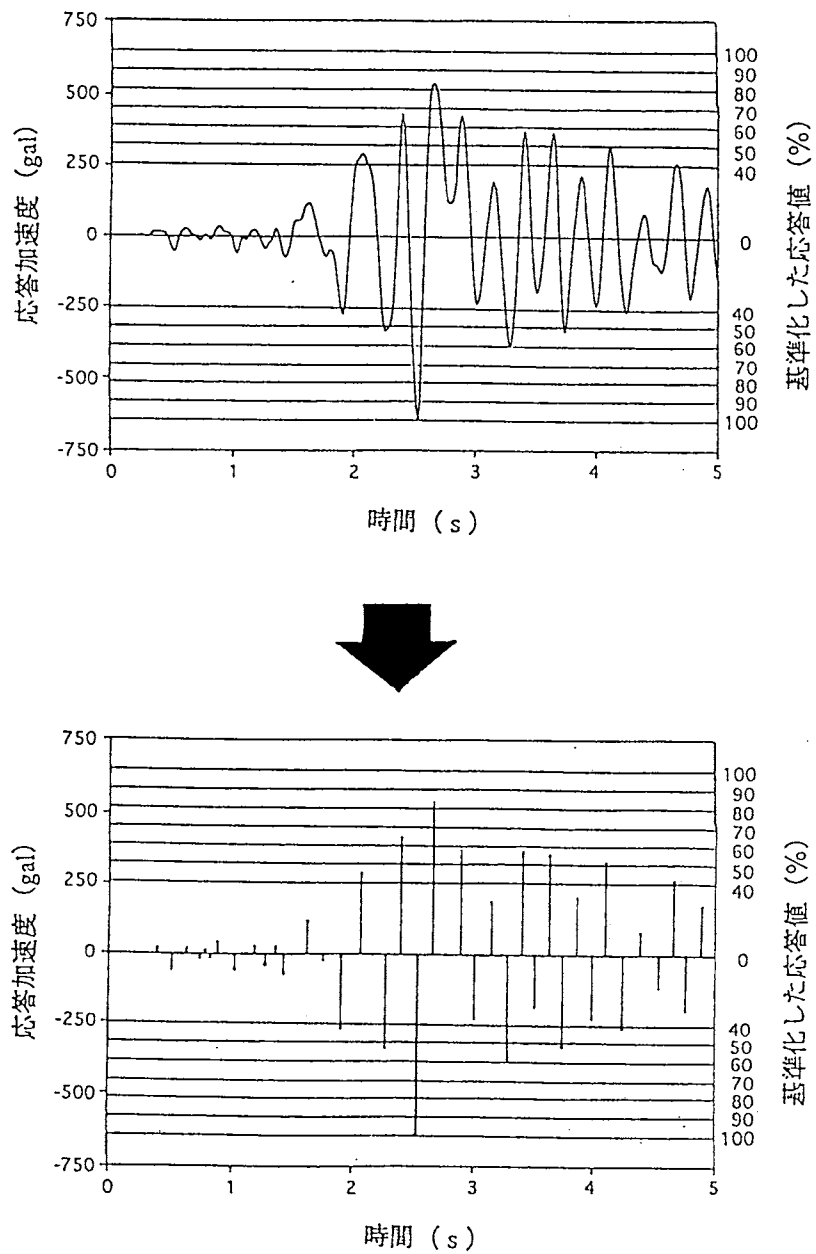


図2-6 変換した応答加速度波形

表2-1 各応答レベルにおける繰返し回数

応答レベル	繰返し回数 (回)
90%~100%	1
80%~90%	0
70%~80%	1
60%~70%	3
50%~60%	5
40%~50%	5

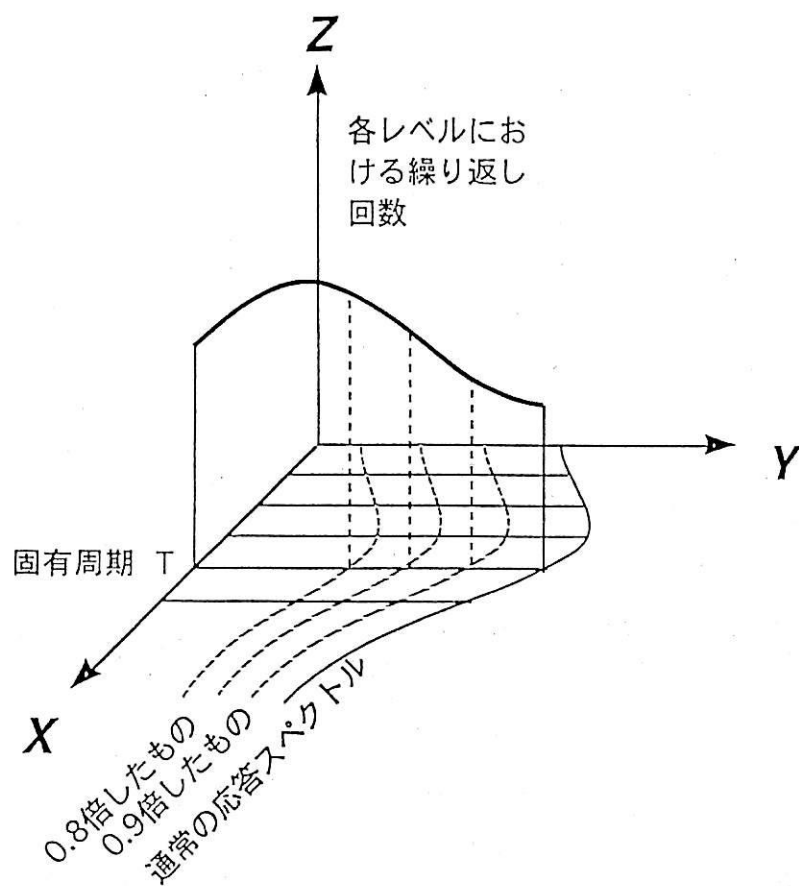


図2-7 周期 T で切った疲労応答スペクトル

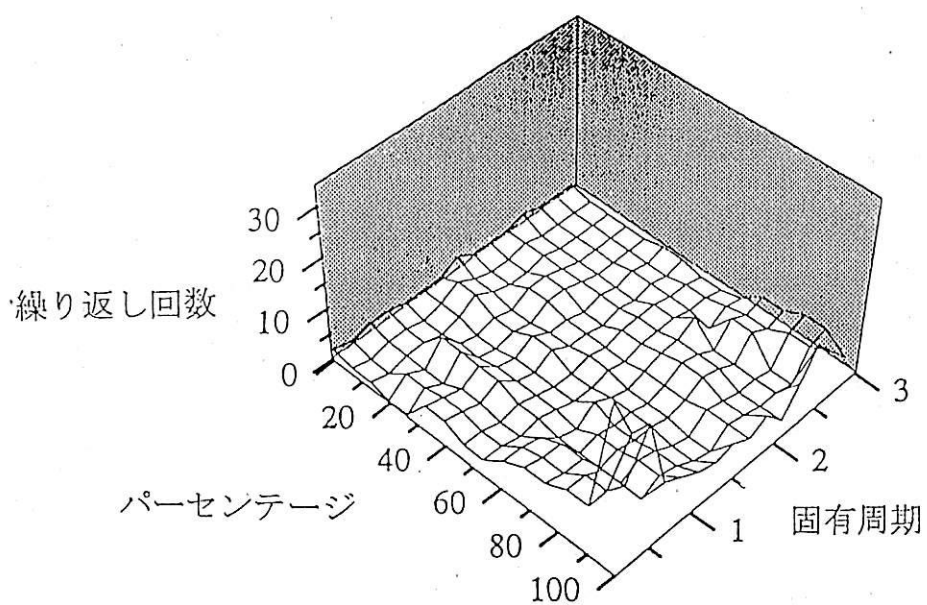


図2-8 疲労を考慮した応答スペクトル

第3章 近年の被害地震における構造物被害と震害指標

3-1 概説

1993年釧路沖地震が発生して以来，わが国においては被害地震が続発し，様々な被害が生じている．しかし，被害の発生形態は多種多様であり，これには被災地の地域性のみならず，地震動の動特性が深く関わっているものと考えられる．ここでは，1993年釧路沖地震，1993年能登半島沖地震，1994年北海道東方沖地震，1994年三陸はるか沖地震，1995年兵庫県南部地震を取り上げ，地震動の特徴と被害の概要を整理する．地震動の特徴として，フーリエスペクトルと応答スペクトルを示すとともに，最大応答加速度， SI 値や FSI 値などの各種震害指標についても算出する．また，被害の概要として，地上構造物である木造家屋の被害と地中構造物である上水道管路の被害のそれぞれに注目する．

3-2 1993年釧路沖地震被害と震害指標

3-2-1 地震の概要と震害指標

釧路沖地震の発震日時は1993年1月15日午後8時6分，マグニチュードは7.8，震源位置は釧路市の南約30kmの沖合いで，北緯42度5分，東経144度23分，深さ107kmであった．この付近は太平洋プレートがユーラシアプレートの下に潜り込む地震多発地帯の一つであり，これまでもマグニチュード7から8クラスの地震が多数発生しているが，この地震では震源が深かったため津波による被害は免れた．過去100年間に釧路市で震度4以上を記録した地震は計7回も発生している．

図3-1に釧路地方気象台で観測された加速度記録を示す．強震計はSMAC-MD型を使用している．最大値は水平成分で711galであり，数百galに及ぶ激しい短周期の揺れが20秒程度継続している．鉛直成分の最大値も363galと大きな値を示している．地震の規模としては1923年関東大地震（ $M=7.9$ ）に匹敵し，釧路沖地震の約6ヶ月後に発生した1993年北海道南西沖地震（ $M=7.8$ ）と同じであるが，振幅の大きな揺れが比較的短く短周期成分が卓越したため，両地震に比べて物的被害が少なかったものと思われる．図3-2には加速度フーリエスペクトルを，図3-3，3-4，3-5には加速度応答スペクトル，速度応答スペクトル，変位応答スペクトルをそれぞれ示す．また，図3-6，3-7，3-8に，それぞれの方向の疲労応答スペクトル（加速度，速度，変位）を示す．

3-2-2 地震被害の概要

釧路市の被害集計資料によると、この地震による住宅家屋の被害は、全壊6世帯、半壊39世帯、一部破損1,499世帯、半焼1世帯、部分焼6世帯、その他1世帯の計155世帯であり、また死傷者は死亡2人、重傷52人、軽傷426人の計480人となっている。地震による人的被害の発生要因は様々であるが、今回の地震は冬季の休日の夜（成人式の日）の午後8時頃ということもあり、死傷者の多くは住家内で被災した。

釧路市における木造家屋の全壊率は0.27%、被害率は4.82%であり、震度5を記録した地震被害としては過去の地震に比べて軽微であった。この原因としては、凍土対策で基礎が深い、開口部が比較的少ない、屋根が軽いなどの北海道という寒冷地特有の建築物の特徴が挙げられる。なお、全壊率とは全壊棟数に半壊棟数の1/2を加えた値を全棟数で除して算出したものであり、被害率とは被害棟数を全棟数で除して算出したものである。

つぎに、上水道管路の被害状況の概要を示す。配水管の被害状況を表3-1に示す。総数は弁類の被害を含めて32箇所である。管種別に被害箇所数の割合を見ると、ダクタイル鋳鉄管が12箇所、37.5%と最も多く、鋳鉄管、石綿セメント管がこれに次いでいる。ダクタイル鋳鉄管の12箇所はすべて接合部における離脱である。一方、鋳鉄管では8箇所が折損であり、亀裂1、離脱1となっている。石綿セメント管はすべて折損である。また、管径別に見ると、被害のほとんどは100mmと150mmの管路で生じており、中小口径の配水管に被害の多いことが分かる。なお、配水管全体の被害率は0.27箇所/kmであった。

給水管（道路内および敷地内）の被害総数は141箇所である。管種別にみると、鋼管が56箇所、39.7%で最も多く、次いでポリエチレン管が49箇所、34.8%となっている。管径別では、40mmが36箇所、25.5%と最も多く、13mmが27箇所、19.2%でこれに次いでいる。被害形態では、鋼管では折損、亀裂、離脱、継手の破損がほぼ同数となっており、ポリエチレン管が49箇所、離脱が最も多くなっている。

3-3 1993年能登半島沖地震被害と震害指標

3-3-1 地震の概要と震害指標

1993年2月7日の午後10時27分頃、能登半島沖を震源とするマグニチュード6.6の地震が発生した。震源に近い気象台、測候所の震度は輪島5、金沢4、伏木4、富山4であった。気象庁の発表によれば、震源は北緯37.7度、東経137.3度の能登半島沖約20km、深さ約30kmの海底である。

今回の地震で被害の集中した珠洲市街地には気象台、測候所はなく、地震記録は得られていない。珠洲市街地までの震央距離は約30kmであるので、水平成分最大地震

動の距離減衰式から最大加速度を推定すると、地盤種別にもよるが、155galから185galの値となる。また、柏原の小屋ダムには強震計が設置されており、これによればダムの天端で243galの最大加速度が得られているが、基礎の岩盤では100gal程度であった。珠洲市内の住民の話によれば、横揺れが2分程度続いたとのことであった。気象庁87型電磁式強震計で得られた各地の最大加速度値では輪島測候所が最も大きく、EW成分が130gal、NS成分が116gal、UD成分が38galとなっている。また、金沢地方気象台で61gal、富山地方気象台で34galであった。輪島測候所で得られた記録を図3-9に示す。図3-10には加速度フーリエスペクトルを、図3-11、3-12、3-13には加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルをそれぞれ示す。また、図3-14、3-15、3-16に、それぞれの方向の疲労応答スペクトル（加速度、速度、変位）を示す。

3-3-2 地震被害の概要

住家被害は全壊1棟、半壊1棟、一部破損19棟の合計21棟であり、非住家被害は11棟である。この他に、珠洲焼資料館、珠洲焼館における作品の破損、須受八幡宮における鳥居の崩壊、春日神社の鳥居の一部破損、体育施設の被害3件、などが報告されている。また、外壁の剥離や石積塀の転倒や鉄筋の入っていないブロック塀の破損が見られた。被害の集中した珠洲市における木造家屋の全壊率は0.05%と小さかったが、被害率は13%程度と大きい値を示した。これは、液状化や家屋の老朽化による比較的軽微な被害が多発したためと考えられる。

上水道管路に注目すると、配水管の被害箇所数は30箇所であり、 $\phi 250\text{mm}$ の铸铁管の送水管が1箇所破損している。被害地域は正院町正院地内、三崎町栗津地内、狼煙町に集中している。配水管の破損の半数は石綿セメント管で生じており、破損形態は管体部の折損であった。この中には、三崎地区の断水に大きな影響を与えた三崎第2配水池付近の $\phi 200\text{mm}$ の石綿セメント管4箇所の破損も含まれている。つぎに多かったのが硬質塩化ビニル管の13箇所であり、その全てが $\phi 40\sim 50\text{mm}$ の小口径管の継手の抜け出しであった。この他に $\phi 200\text{mm}$ の鋼管の継手部での破断が1箇所と $\phi 80\text{mm}$ 鋼管の破損が1箇所あった。なお、施設被害は発生しなかった。全体の被害率は0.14箇所/kmとなる。

3-4 1994年北海道東方沖地震被害と震害指標

3-4-1 地震の概要と震害指標

1994年10月4日午後10時23分頃、根室半島沖約150kmの海底を震源とするマグニチュード8.1の地震が発生した。気象庁の発表によれば、震源は北緯43度24分、東経147度54分で、震源深さは約30kmの海底である。地震発生直後の午後10時28分に北

海道東部、本州の太平洋岸の広い地域に津波警報と津波注意報が発令された。根室市花咲港で午後10時58分に173cmの津波の第1波が観測されたのを始め、北海道、東日本の太平洋岸で津波があった。釧路で震度6、根室、浦河、広尾で震度5、網走、帯広、苫小牧、青森などで震度4となっている。

釧路地方気象台で観測された最大加速度は、NS成分が455gal、EW成分が473gal、UD成分が193galとなっており、昨年の釧路沖地震の際に得られた最大加速度919galと比較すると約半分であるが、極めて強い地震動であったといえる。また、根室測候所においては、それぞれNS成分が369gal、EW成分が330gal、UD成分が181galとなっている。震央距離が釧路地方気象台よりも短いのに最大加速度が小さい値を示しているが、これは測定地の地形および地盤動特性の違いによるものと考えられる。図3-17に、根室測候所で得られた加速度記録を示す。

図3-18には加速度フーリエスペクトルを、図3-19、3-20、3-21には加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルをそれぞれ示す。また、図3-22、3-23、3-24に、それぞれの方向の疲労応答スペクトル（加速度、速度、変位）を示す。

3-4-2 地震被害の概要

この地震による被害は、北海道東部の根室、釧路、網走周辺に人的、構造的被害が集中した。死者の発生はないものの、435名もの住民が重軽傷を負った。また、地震動による被害だけでなく、津波による床下浸水等の被害も大きかった。

地震の規模からみると、建物などの被害は比較的小さかったが、住宅から公共施設等まで広範囲にわたって見られた。被害の特徴としては、地震動による斜面地崩壊や液状化による建物の不同沈下、地震動による建物の全半壊、建物の壁の剥離、損傷、天井の落下などの被害が見られた。一方、ライフラインの被害も大きく、継手の損傷、水道管の破裂などが見られた。

根室市においては地震による被災急患が50名あり、そのうち4名が入院したと報告されている。住家被害としては、全壊なし、半壊約30棟、一部破損が約1,100棟という数が報告されている。被害としては、外壁、内壁の剥離、集合煙突の破損、床、天井の損壊などが多く見られた。市内の飲食雑居ビルで火災が1件発生したが、ボヤで消し止められている。根室市の木造建物の被害率は22.39%、全壊率は1.35%であった。

上水道は市内で本管に34箇所、支管に34箇所の破損が生じ、地震発生直後13,000世帯中9,450世帯が断水し、釧路地区全域と農業用水全域も断水した。この間、周辺の自治体の応援を得て、給水車24台を出動し応急給水に当たった。水道管路の被害率は1.35箇所/kmである。

3-5 1994年三陸はるか沖地震被害と震害指標

3-5-1 地震の概要と震害指標

1994年12月28日（水）午後9時19分頃に発生した、三陸はるか沖地震のマグニチュードは7.5である。気象庁の発表によれば、震源は北緯40.4度、東経143.7度の八戸の東約200km沖合いのごく浅い海底である。この地震で、八戸で震度6、青森、盛岡、むつで震度5、函館、帯広、宮古、大船渡などで震度4の揺れを感じたのをはじめ、北海道、東北地方から関東、中部地方にかけての広い範囲でこの地震を感じた。地震発生4分後に気象庁から東北地方の太平洋沿岸に津波警報が、東北地方の日本海沿岸と北海道の太平洋沿岸、茨城県から静岡県にかけての太平洋沿岸に津波注意報が発令されたが、午後11時45分にすべて解除された。各地で同日夜に観測された津波の最高位は、宮古55cm、鮎川53cm、八戸44cm、大船渡27cm、釧路18cmなどとなっている。

八戸測候所の気象庁87型強震計で得られた記録を図3-25に示す。最大加速度は、NS成分が602gal、EW成分が488gal、UD成分が94.1galとなっている。図3-26には加速度フーリエスペクトルを、図3-27、3-28、3-29には加速度応答スペクトル、速度応答スペクトル、変位応答スペクトルをそれぞれ示す。また、図3-30、3-31、3-32に、それぞれの方向の疲労応答スペクトル（加速度、速度、変位）を示す。

1月7日に発生した、今回の地震の最大余震の八戸測候所の気象庁87型強震計で得られた最大加速度は、NS成分が363gal、EW成分が499gal、UD成分が95galであった。

3-5-2 地震被害の概要

人的被害としては、死者2名、負傷者689名の合計691名、住家被害としては、全壊38棟、半壊316棟、一部破損5331棟の合計5685棟である。市町村別では、八戸市の被害が甚大であるが、三沢市、十和田市、五戸町、六戸町、三戸町、百石町、名川町などでも比較的大きな被害が生じている。

観測史上初めて震度6を記録した八戸市域の被害は甚大で、ライフライン、土木施設、建築物などの被害はいずれも都市型震災の特徴を示している。被害の特徴としては、築20年以上経過した住宅の被害が多く、特に人口密度の高い八戸市と周辺地域の建築被害は顕著で、これにより建物崩壊による死者2名の他、住宅内での負傷事故が多発した。また、住宅地におけるブロック塀や窓ガラスの被害が多数見られた。これらの建物の被害の分布は、台地部及び台地辺縁に集中している。ライフラインにおいても被害が多く、上水道の管路においては継手の折損や離脱、分岐部付近の離脱が多発した。また、電力、通信、ガス施設の被害は比較的少なかった。八戸市の木造建物の全壊率は0.17%、被害率は8.29%であり、上水道管の被害率は0.17箇所/kmであった。

3-6 1995年兵庫県南部地震被害と震害指標

3-6-1 地震の概要と震害指標

1995年1月17日5時46分に兵庫県南部地震が発生した。震源位置は北緯34.6度，東経135.0度，震源深さは14.3kmであり，マグニチュードは7.2である。今回の地震では，1948年の福井地震を契機に定義された震度7（激震）が初めて適用された。激震域は，淡路島北部から神戸市を貫いて北東に向かう帯状の地域に広がっている。神戸周辺の激震域や，大きい震度（震度5）を示した京都や彦根は，神戸から東北に位置しているが，これは断層の伸びる方向に一致している。

神戸海洋気象台で得られた加速度記録である図3-33を見てわかるように，地震の主要動の継続時間は10秒程度と短く，最も強く揺れたのは最初の3秒ぐらいであった。しかし震源が都市部の直下で浅かったために，各地で大きな加速度が観測された。神戸海洋気象台では最大水平加速度（南北方向）818gal，最大鉛直加速度332galであった。神戸海洋気象台の強震記録を対象に，図3-34には加速度フーリエスペクトルを，図3-35，3-36，3-37には加速度応答スペクトル，速度応答スペクトル，変位応答スペクトルをそれぞれ示す。同図によれば，加速度応答スペクトルは固有周期が0.4～1秒の間では2G，速度応答スペクトルは固有周期0.6～1.5秒の間で200cm/secを超えていた。加速度応答値がいろいろな固有周期にわたってまんべんなく大きかったのが特徴である。また，図3-38，3-39，3-40に，それぞれの方向の疲労応答スペクトル（加速度，速度，変位）を示す。

3-6-2 地震被害の概要

この地震における被害は，兵庫県を中心として阪神地域一円に広がり，特に震源位置に近い淡路島北西部や，神戸市，芦屋市，西宮市などにおいて大きな被害をもたらした。死者，行方不明者は5,000人を上回り，被害総額も10兆円以上にも達すると推測されている。

被害の特徴としては，日本では初めてで，世界でもあまり類を見ない大都市での直下型地震であったために，住宅家屋及び中層建築物の倒・圧壊による人的被害をはじめとして，道路・鉄道などの交通網，並びにガス・水道・電気・電話などのライフライン施設がほぼ完全に寸断された。臨海部においては，護岸・港湾施設等の損傷，及び広範囲に及ぶ液状化現象が確認された。二次的な被害としては，1923年関東大地震や1993年北海道西南沖地震においても大きく取り上げられた火災が，地震と同時に広範囲の地域で多数発生し，被害をさらに大きくする要因となった。また，交通網の麻痺による輸送，救援活動の停滞も大きな問題となった。

木造建物の被害については，北部の山側では比較的少なく，南下するに従って多くなっている。その一つの理由は，北部の地盤地質の多くは，花崗岩，玉石等の硬い地盤であるのに対し，南部の地盤地質は，埋立地，砂，粘土層等の軟らかい地盤で

あるといった南北方向の地盤特性の違いによるものと考えられる。その他にも、南部の地盤振動の強さが北部よりも強かったことや、北部の建物の建築年代が南部より比較的新しくいったことなどが挙げられる。神戸市の木造建物の全壊率は13.7%、被害率は35.15%にも達した。

神戸市水道局では、被害形態を管体部の被害、継手部の被害、弁や消火栓、その他の属部の被害の3つに分類し整理している。それによると、神戸市全体の被害形態の割合は図3-41のようになる。すなわち、全体の約64%が継手部の被害で、約20%が管体部の被害となっており、継手部の被害が多いことが特徴的である。

図3-42は、これらの被害を管径別に被害率として示したものである。同図によれば、大口径管の属部の被害率が高くなっている。これは、大口径管の敷設延長が相対的に短いためであるが、空気弁などの属部の耐震性については、今後検討を要するものと考えられる。神戸市においては、敷設延長距離3,963kmに対して1,610箇所の被害が生じているので、被害率は0.41箇所/kmとなる。

なお、兵庫県南部地震においては、各地で強震記録が得られている。ここでは、強震記録とともに、被害データも比較的揃っている、尼崎市、明石市、宝塚市についても次章で考察するので、図3-43～3-50に尼崎市の、図3-51～3-58に明石市の、図3-59～3-66に宝塚市の加速度記録と応答スペクトル、疲労応答スペクトルをそれぞれ示しておく。

3-7 結語

本章では、1993年釧路沖地震、1993年能登半島沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震、1995年兵庫県南部地震を取り上げ、地震動の特徴と被害の概要を整理した。これらの地震は、プレート境界で生ずる海洋型地震から都市直下地震まで含んでおり、マグニチュード、震源深さ、震央距離も様々であり、地震動の特徴を表す指標も様々な値となった。この5つの地震における震害指標値を表3-2にまとめてこの章を閉じることとする。

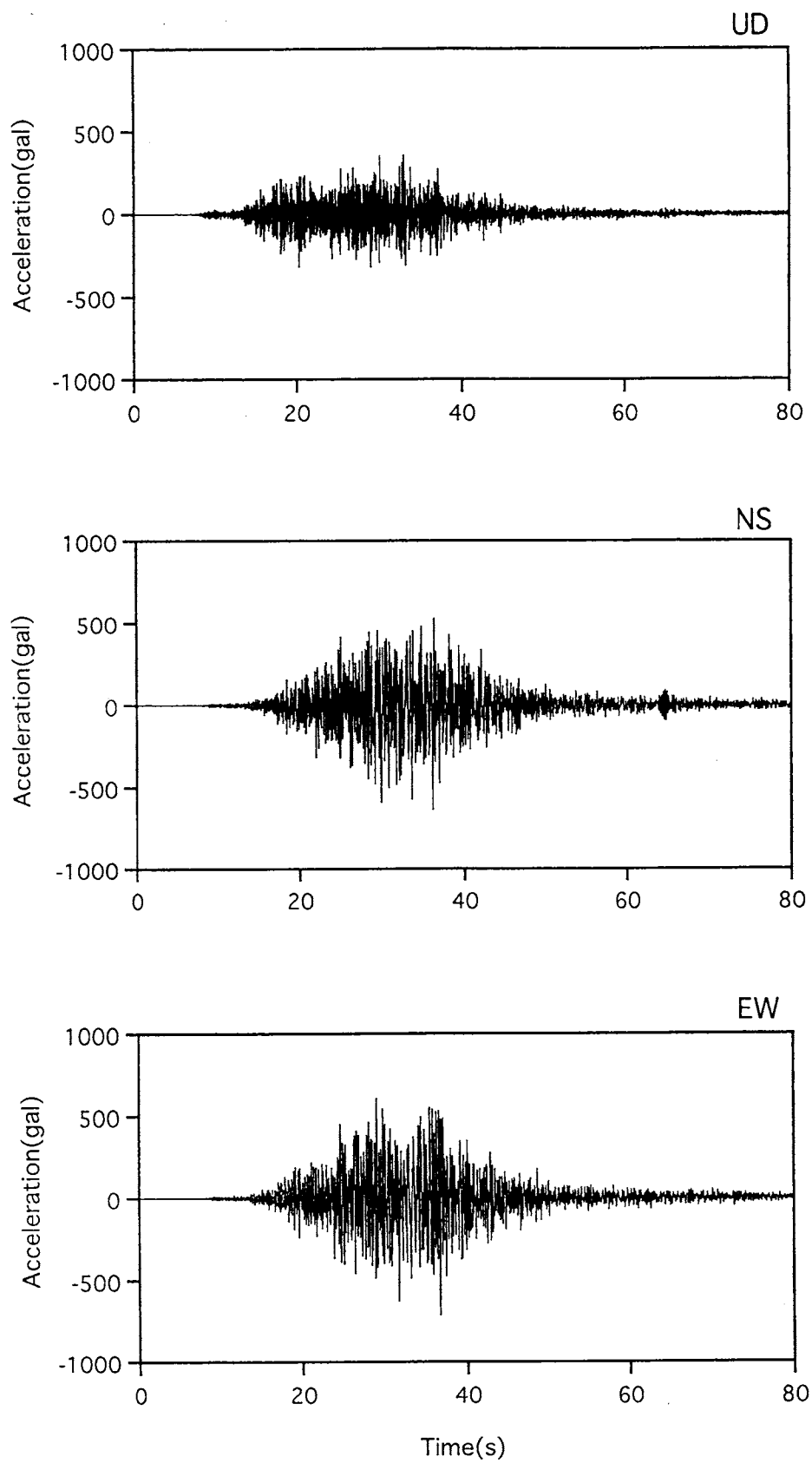


图3-1 加速度波形（釧路市）

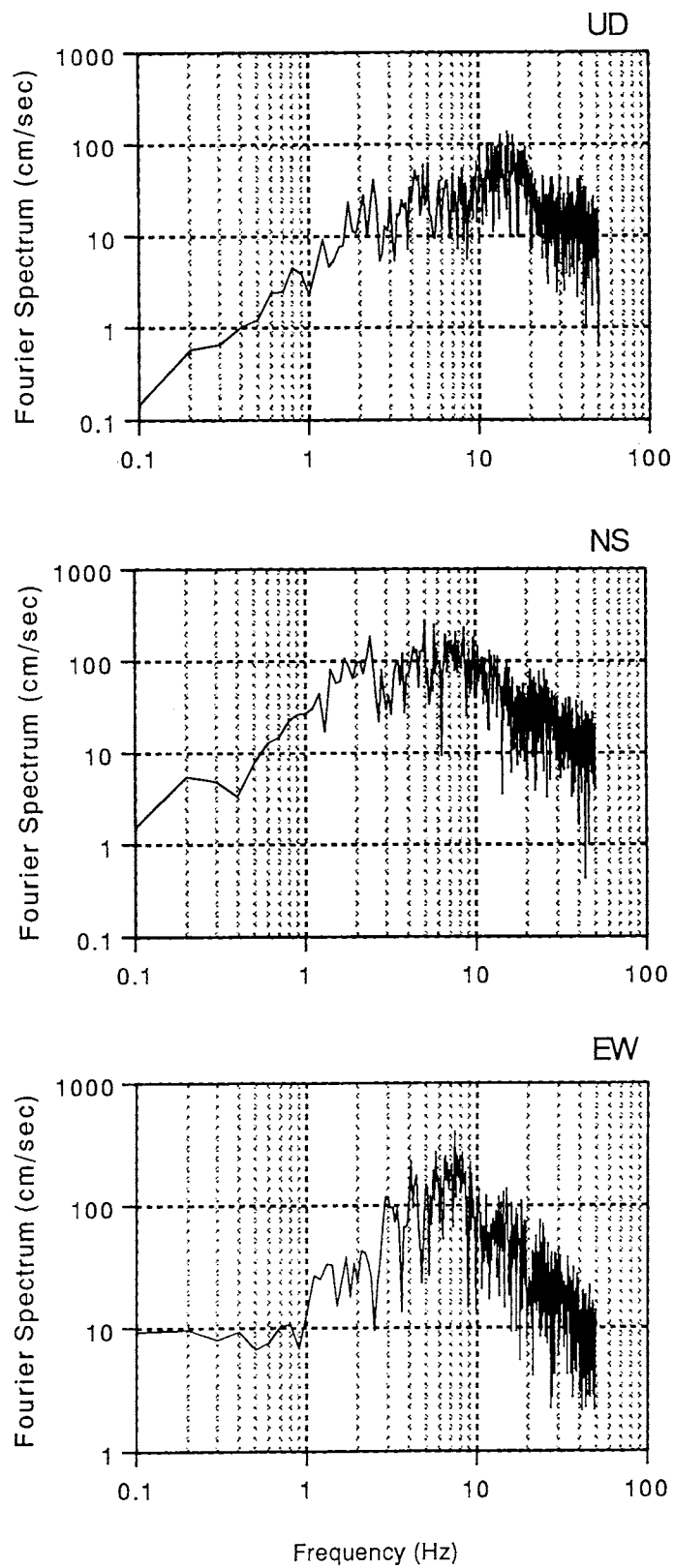


図3-2 加速度フーリエスペクトル（釧路市）

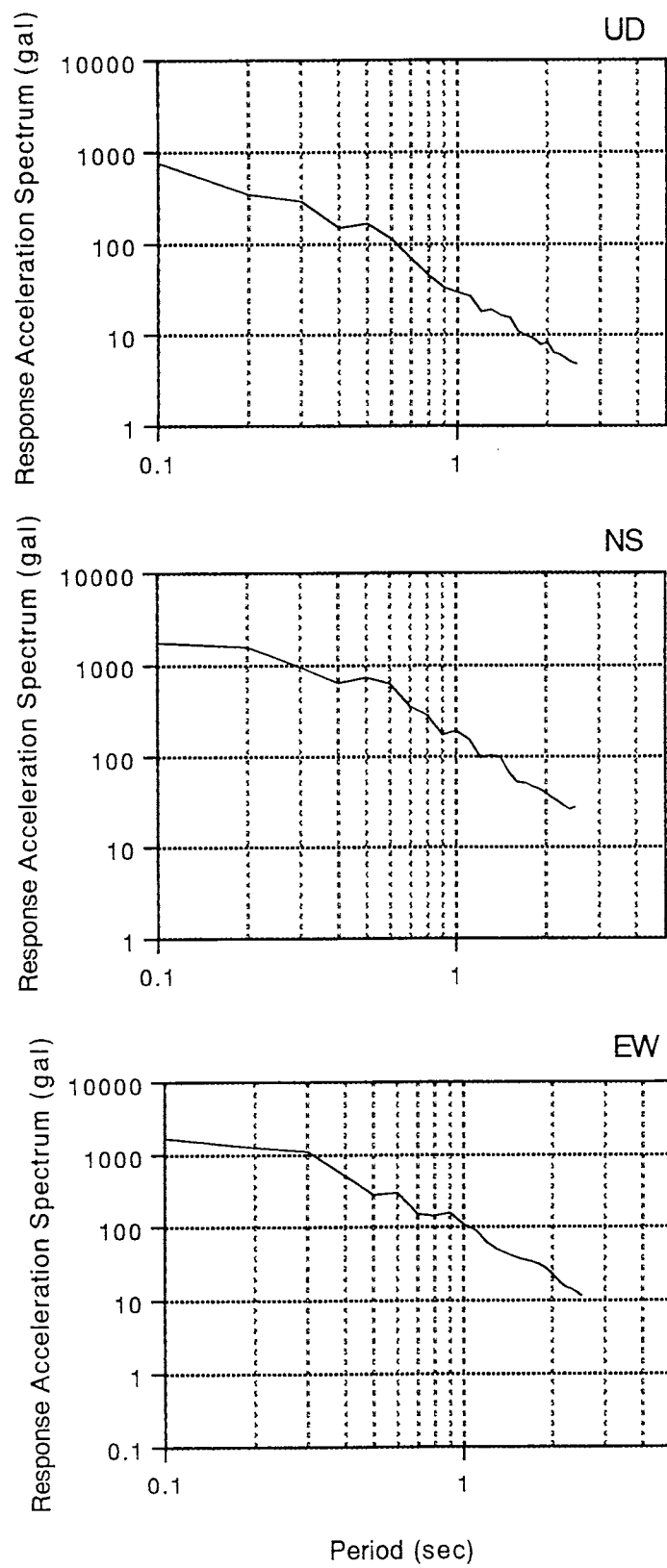


図3-3 加速度応答スペクトル（釧路市）

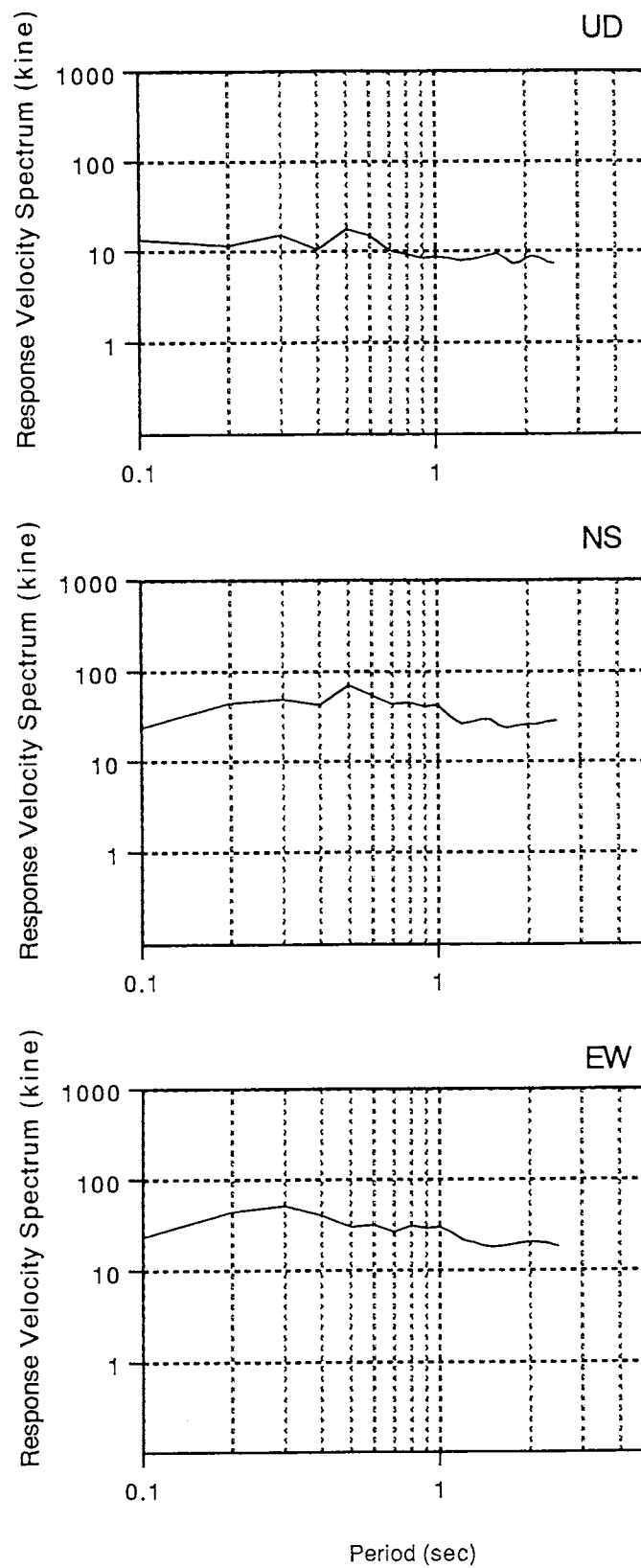


図3-4 速度応答スペクトル（釧路市）

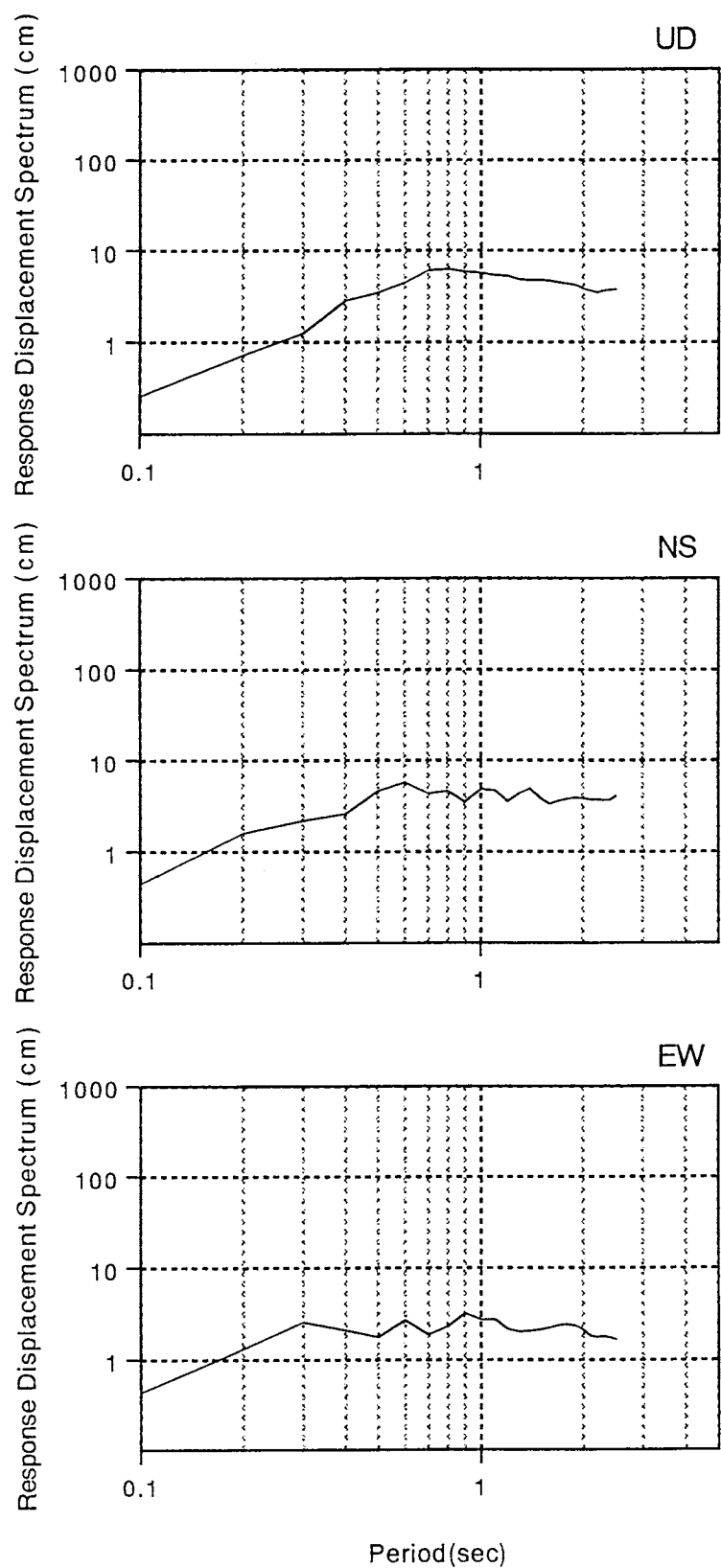


図3-5 変位応答スペクトル（釧路市）

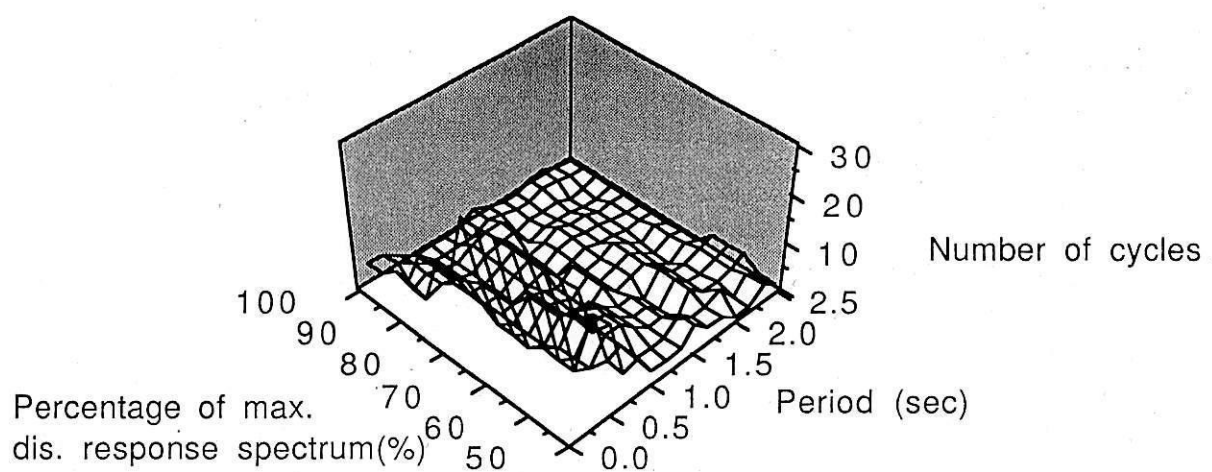
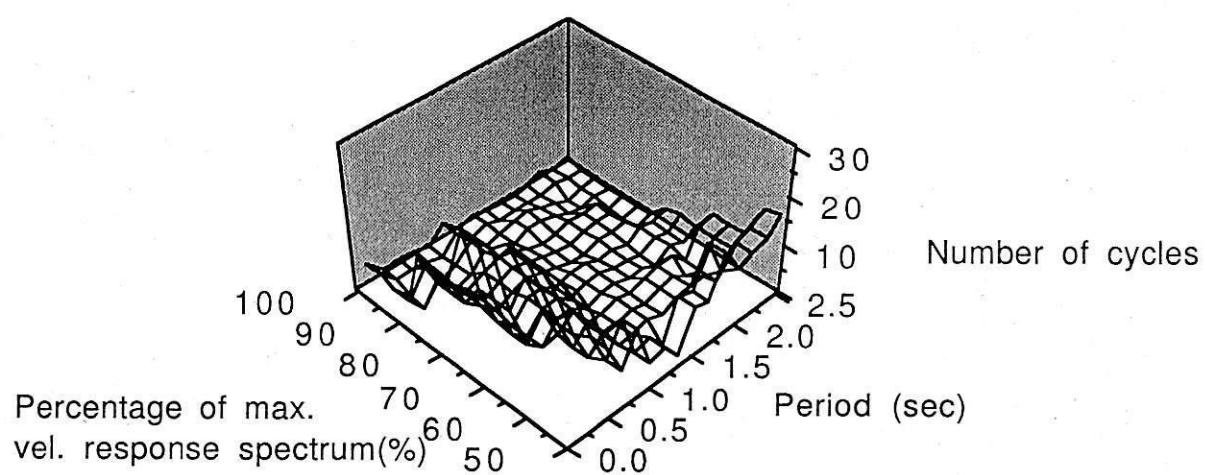
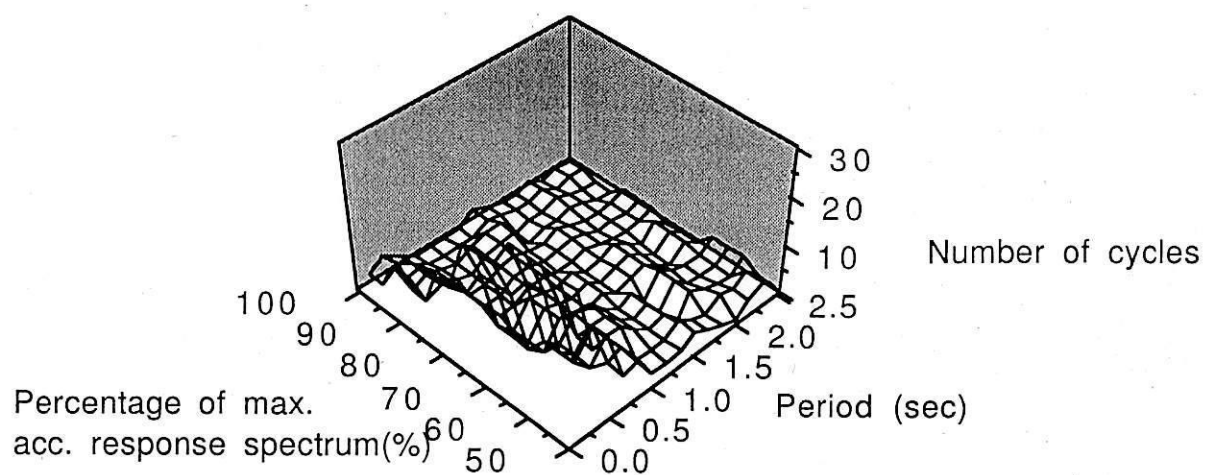


図3-6 疲労応答スペクトル（釧路市 上下方向）

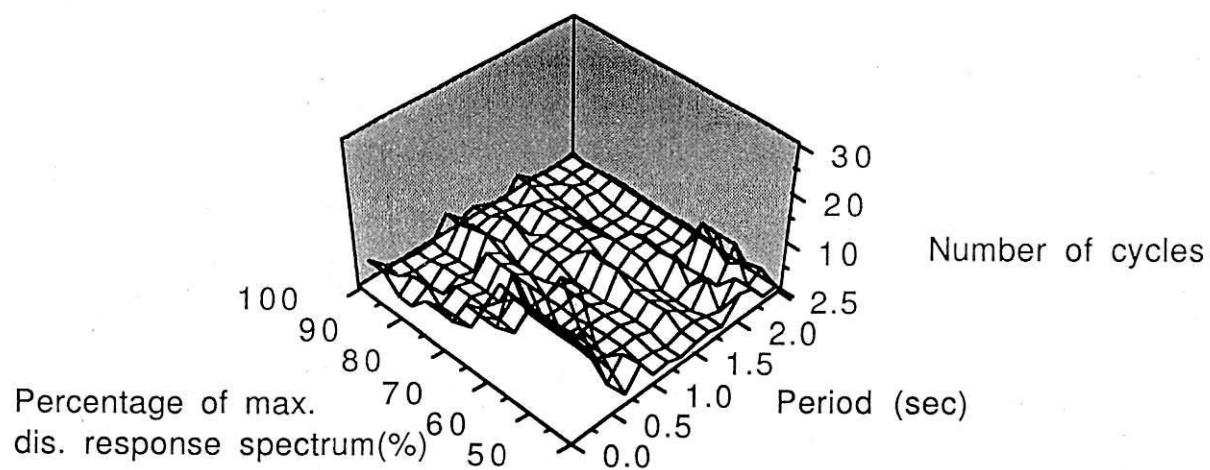
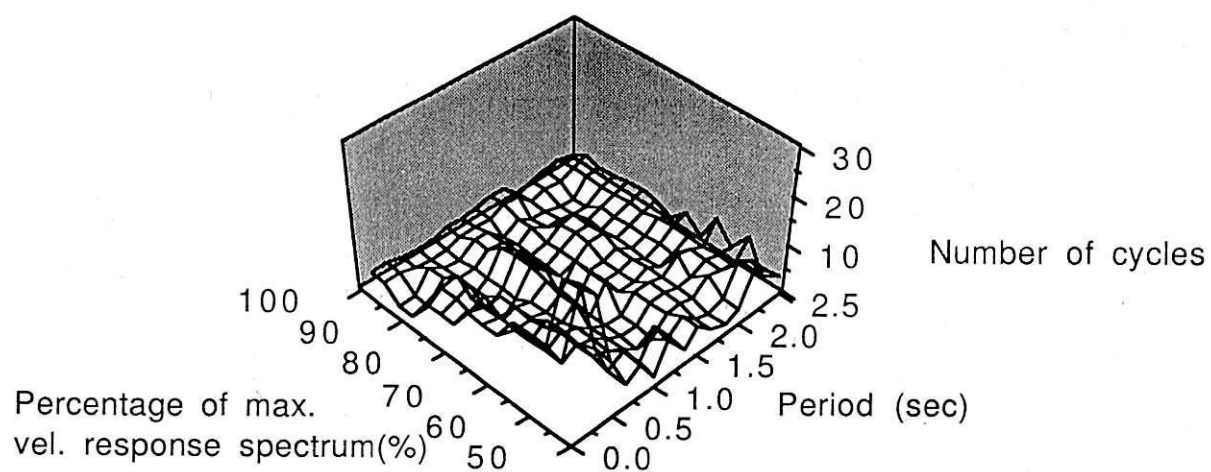
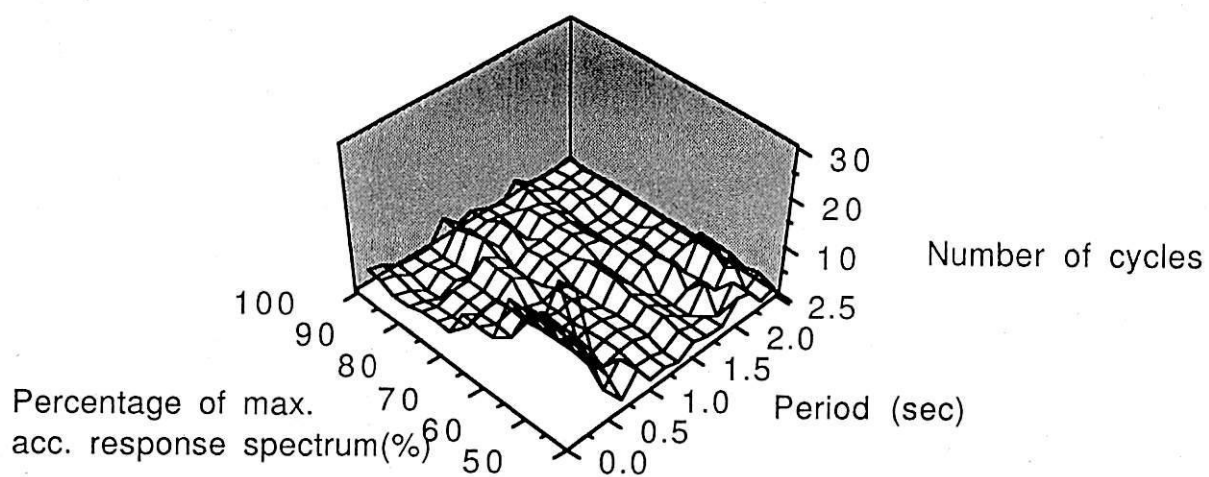


図3-7 疲労応答スペクトル（釧路市 南北方向）

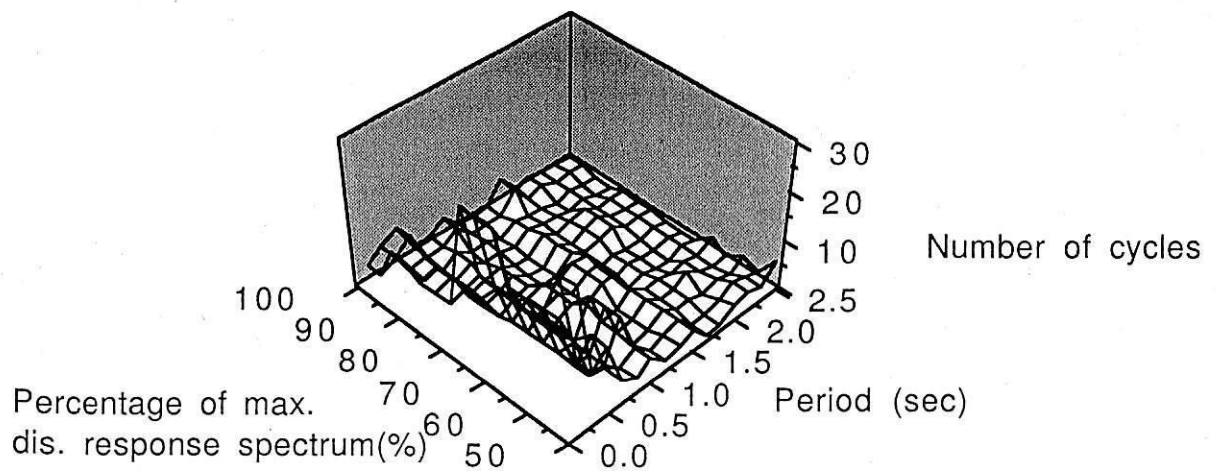
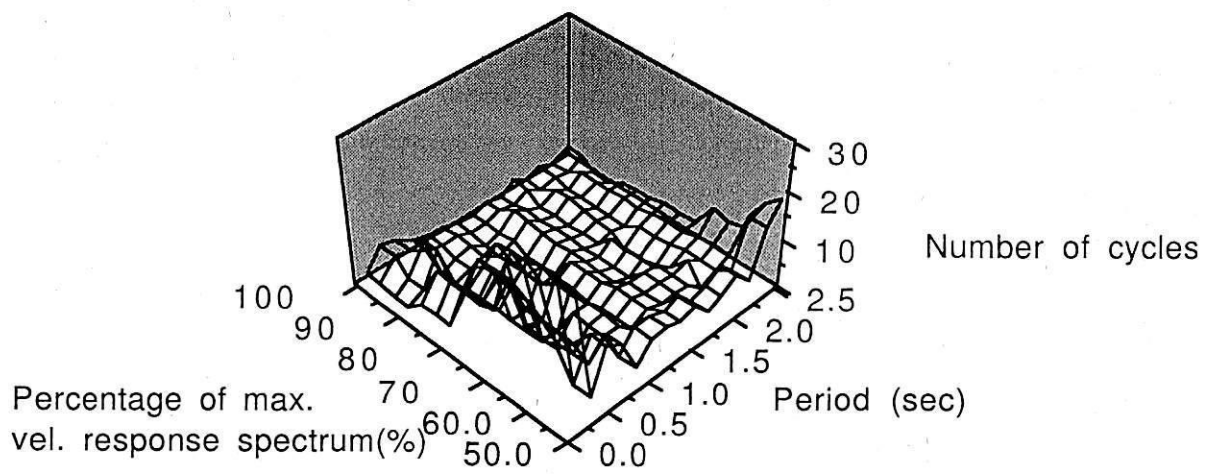
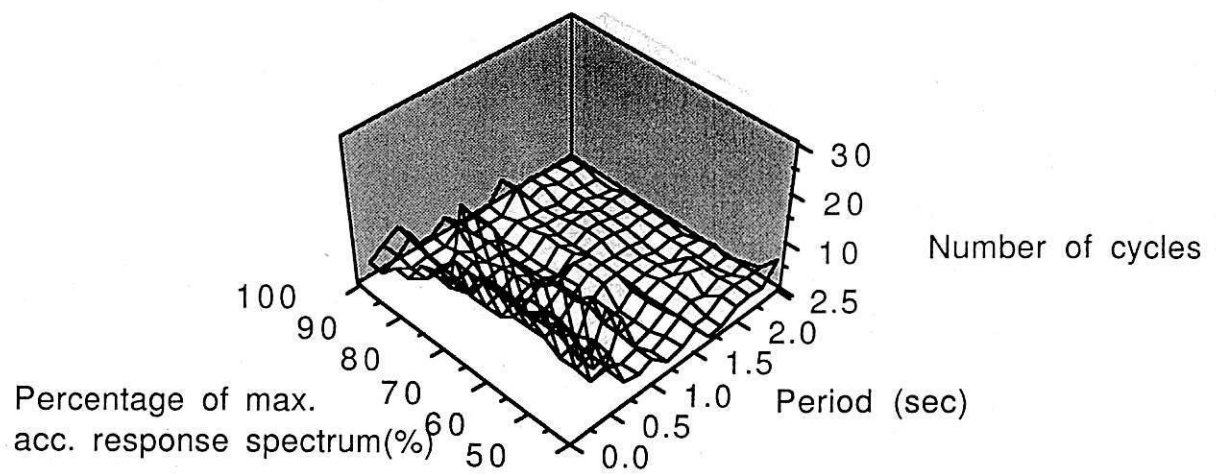


図3-8 疲労応答スペクトル（釧路市 東西方向）

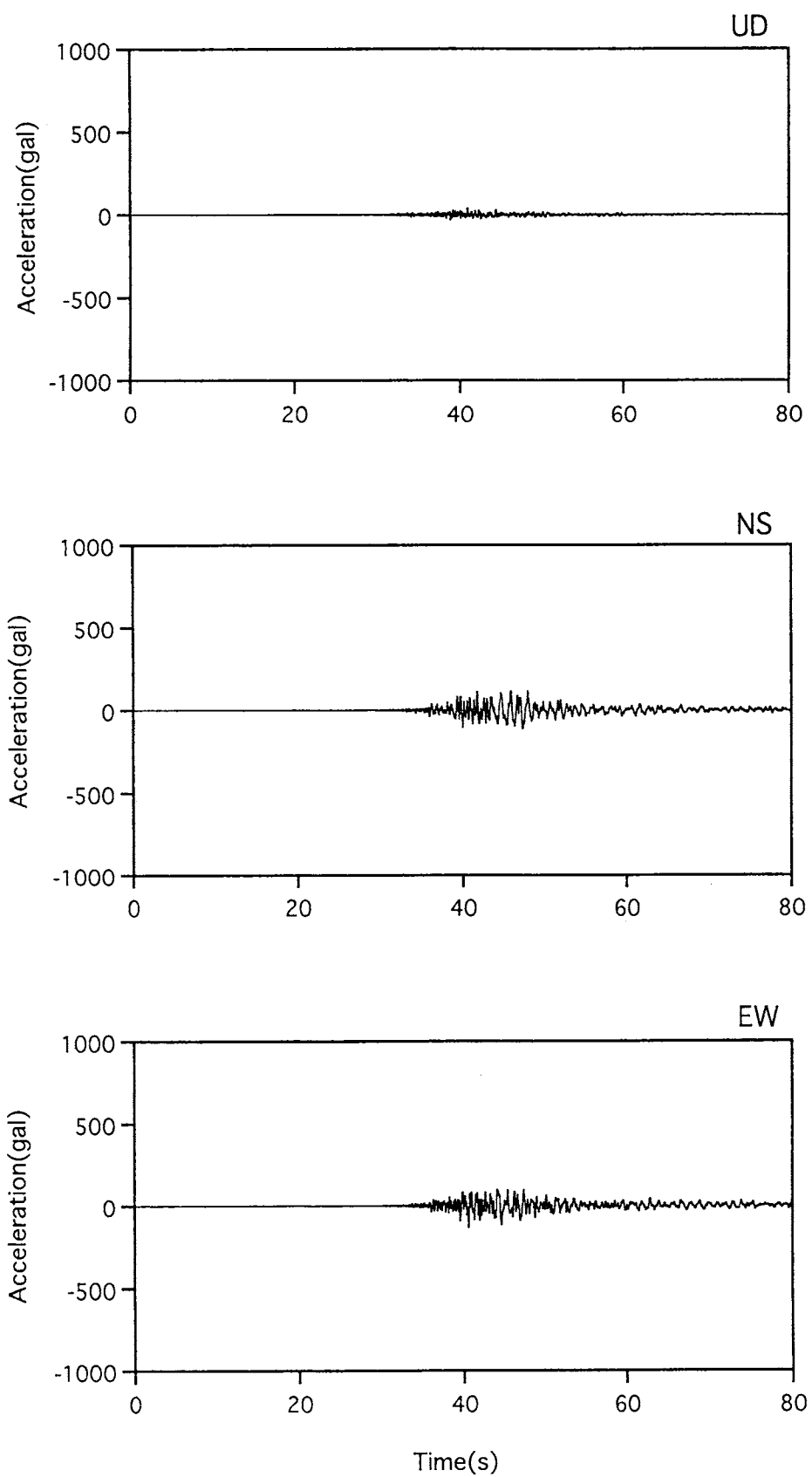


图3-9 加速度波形（輪島市）

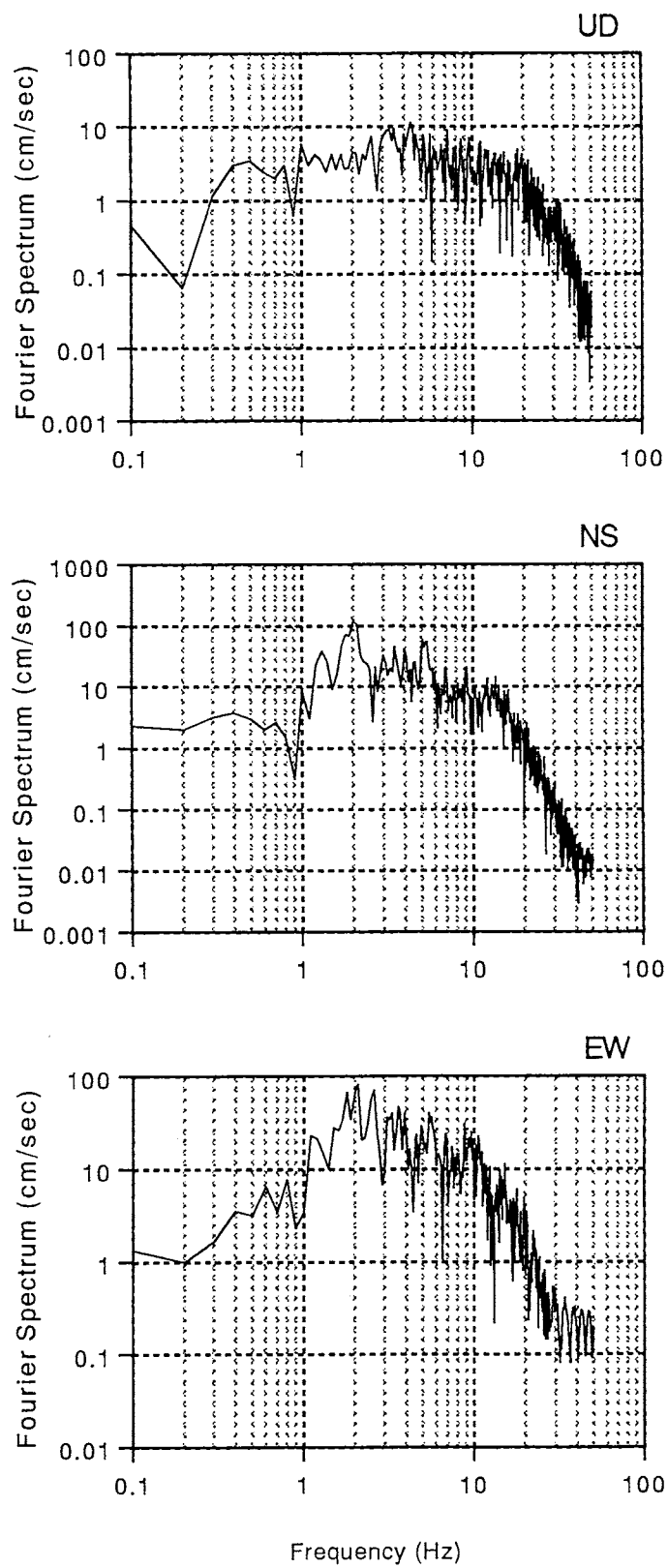


図3-10 加速度フーリエスペクトル (輪島市)

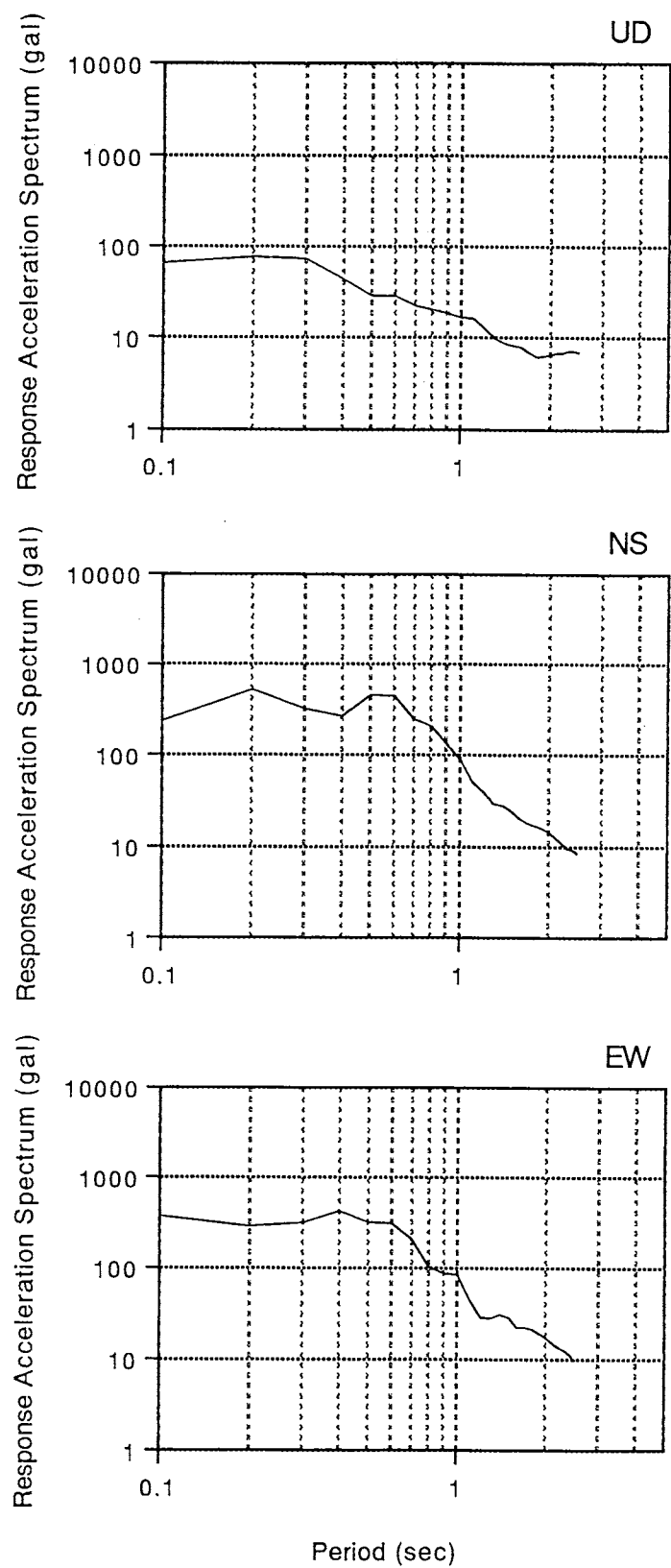


図3-11 加速度応答スペクトル（輪島市）

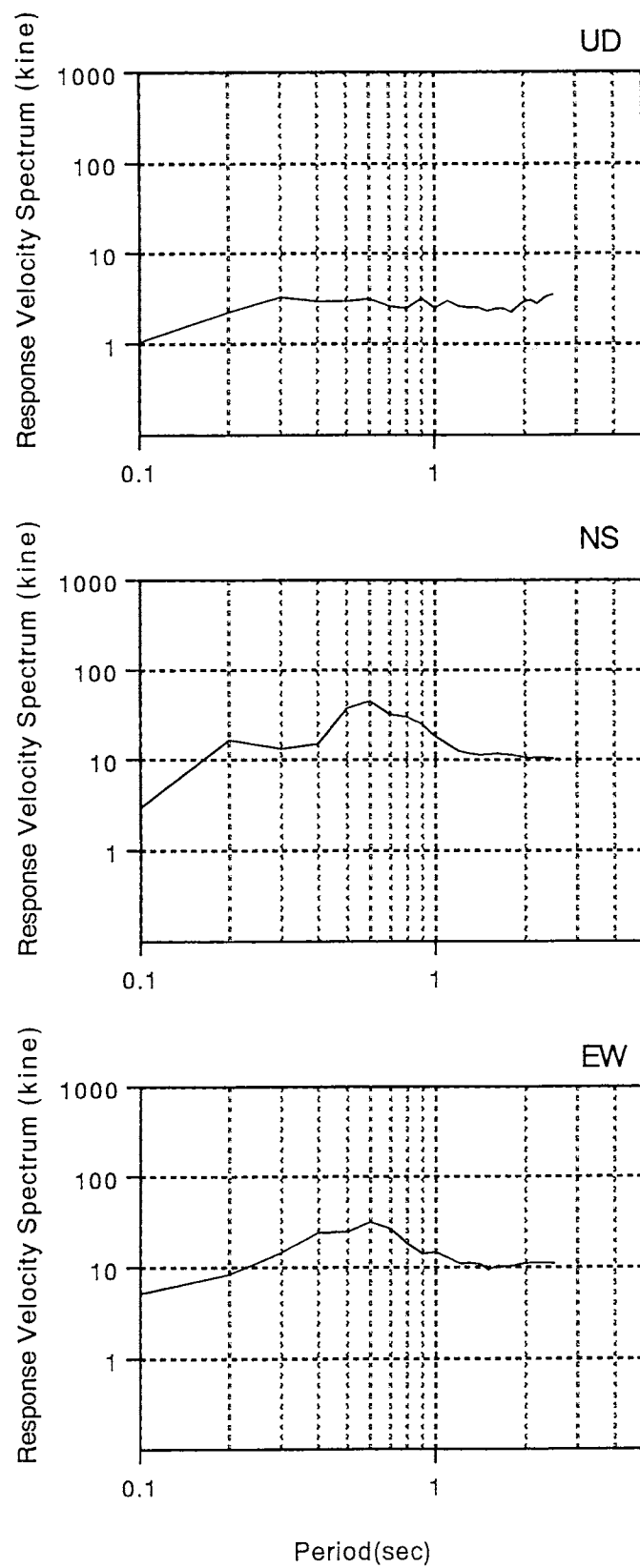


図3-12 速度応答スペクトル（輪島市）

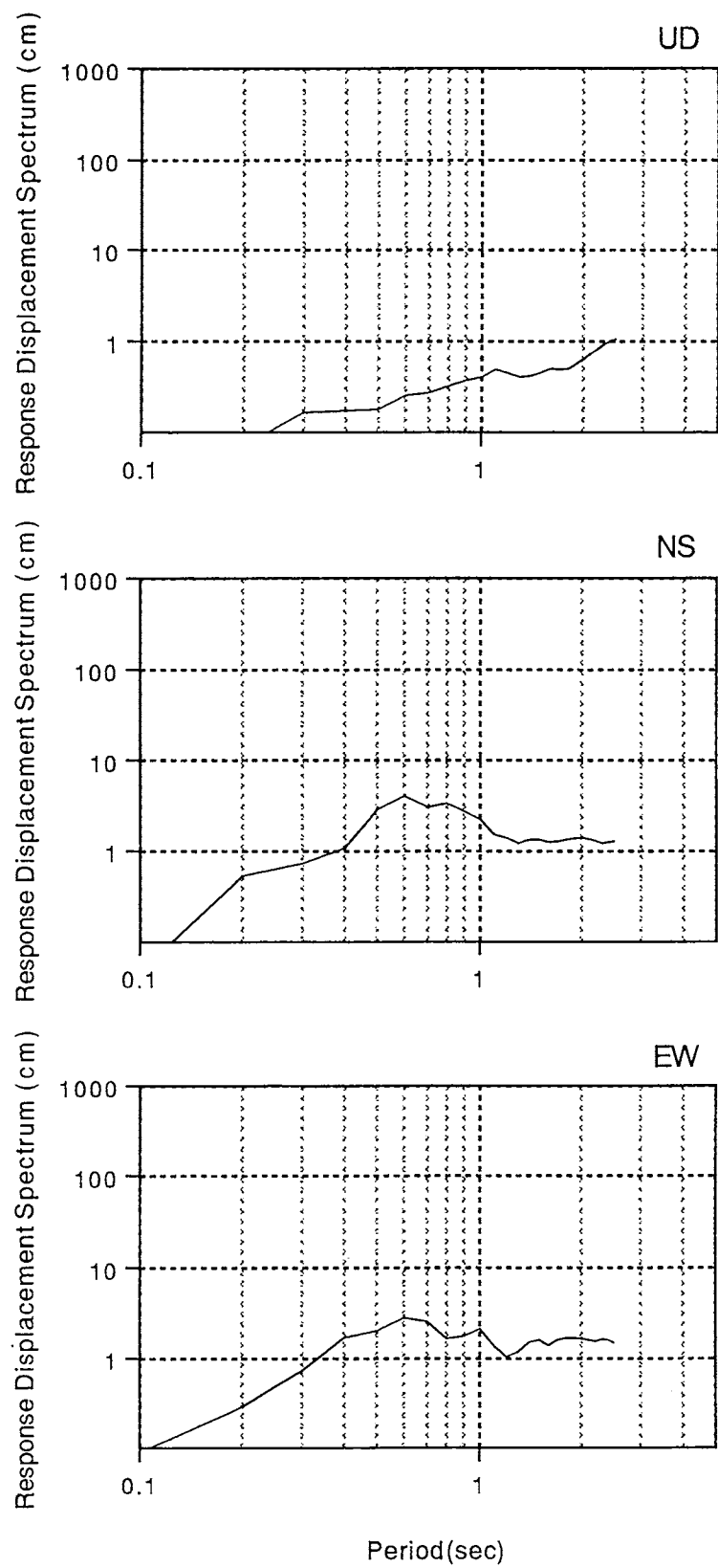


図3-13 変位応答スペクトル (輪島市)

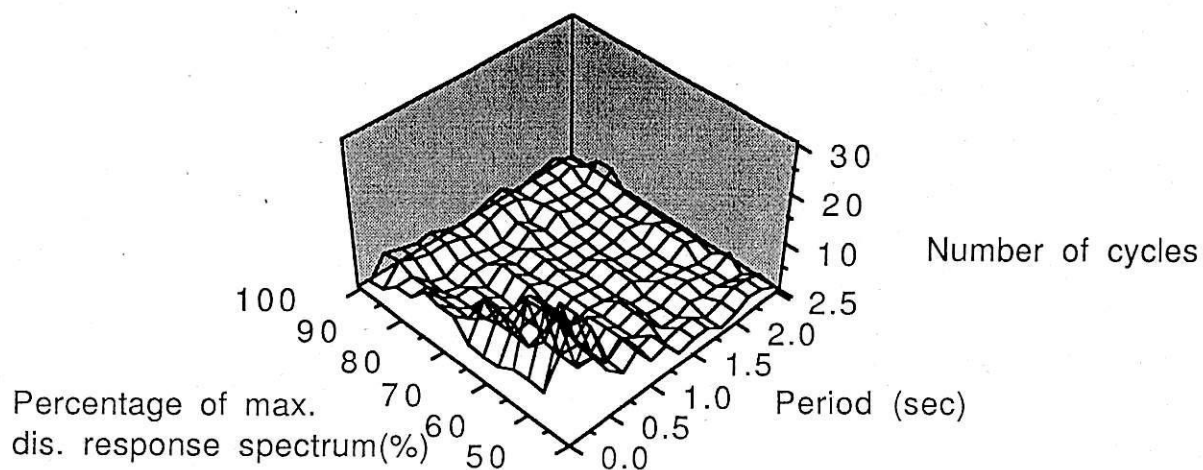
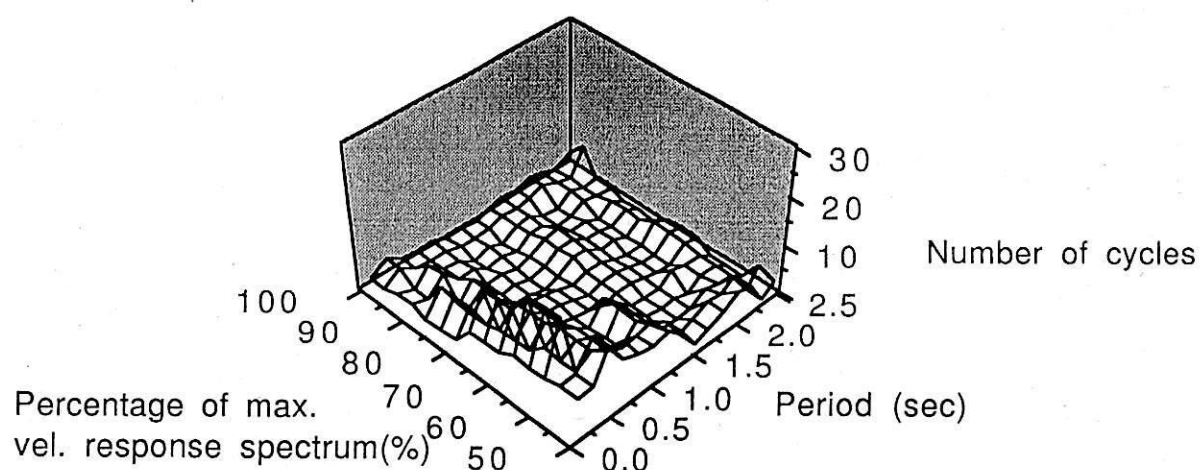
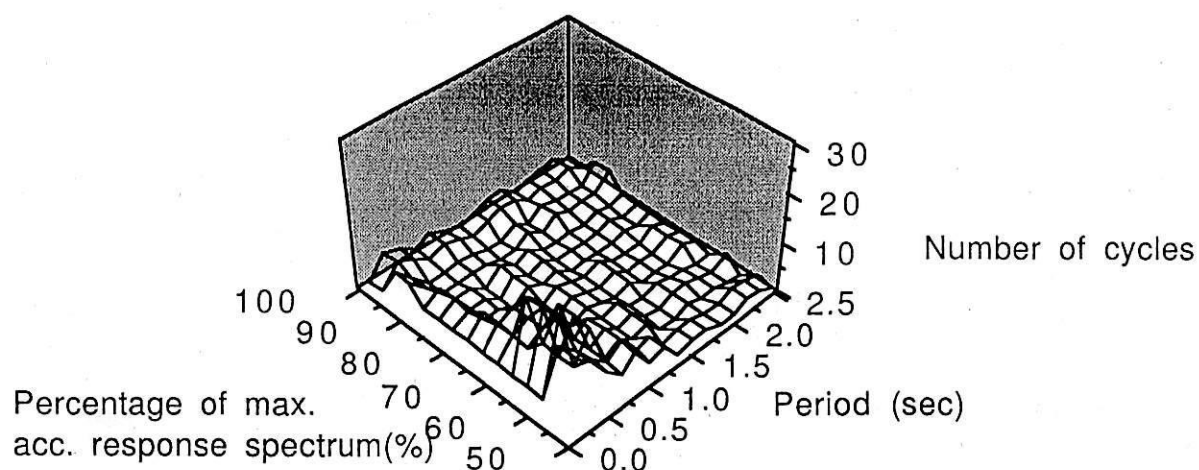


図3-14 疲労応答スペクトル（輪島市 上下方向）

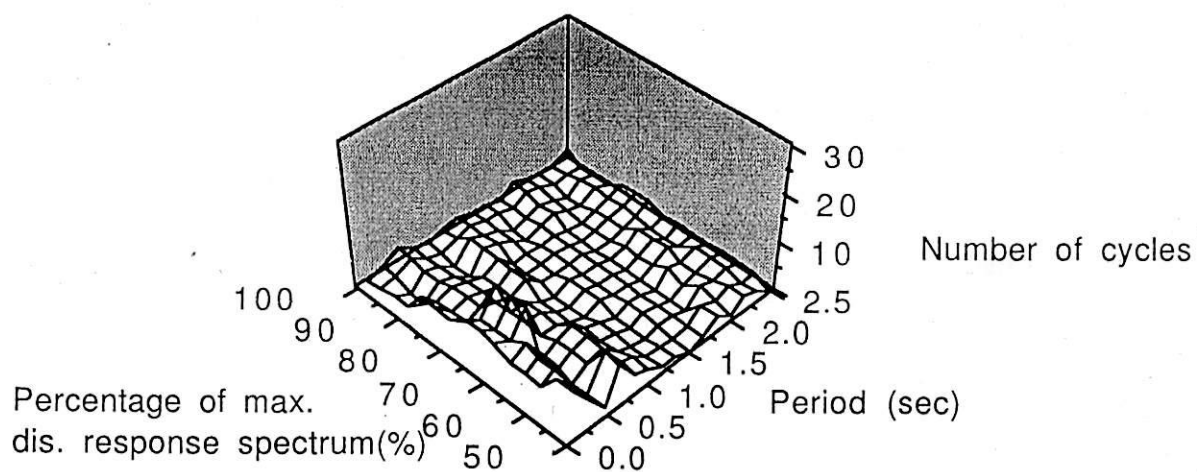
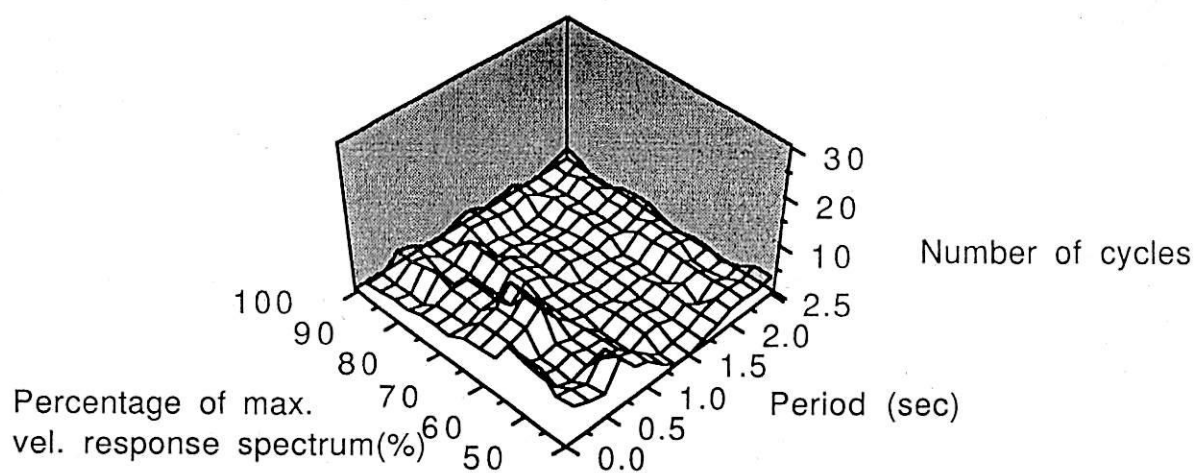
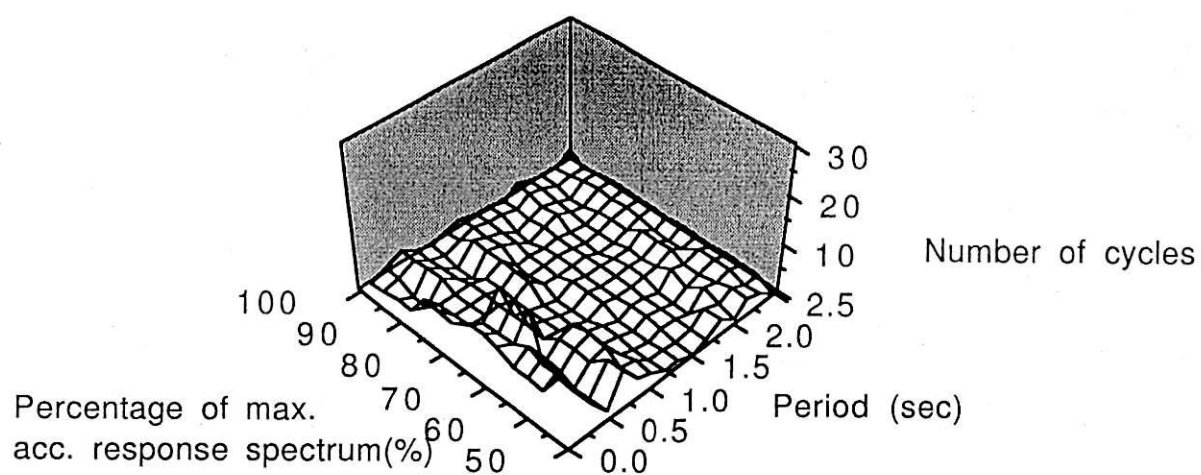


図3-15 疲労応答スペクトル（輪島市 南北方向）

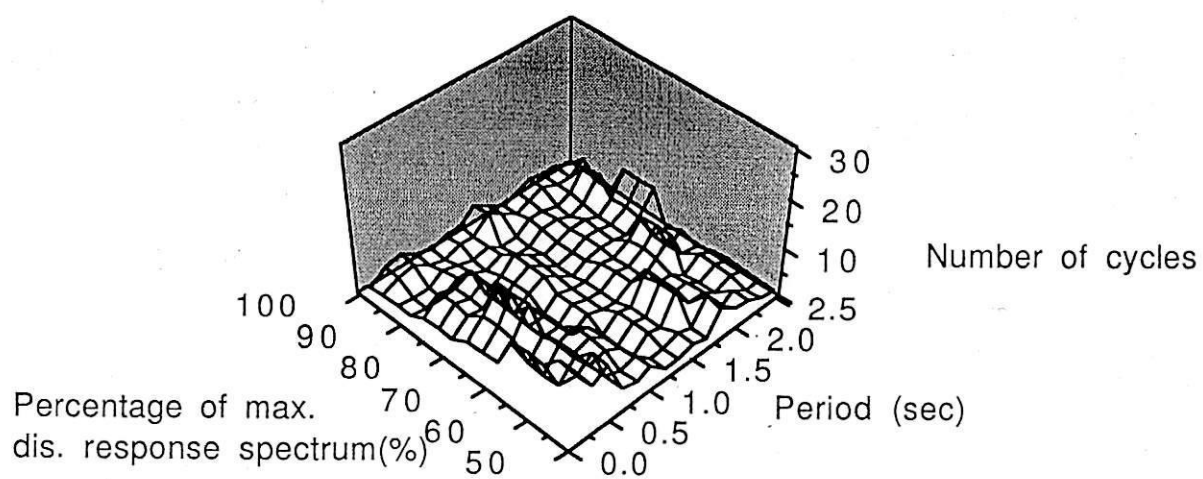
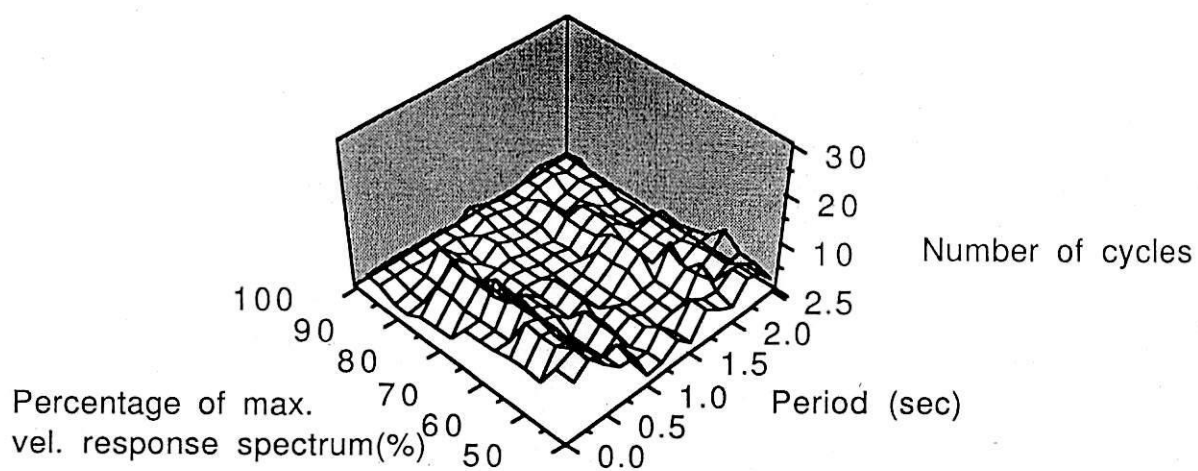
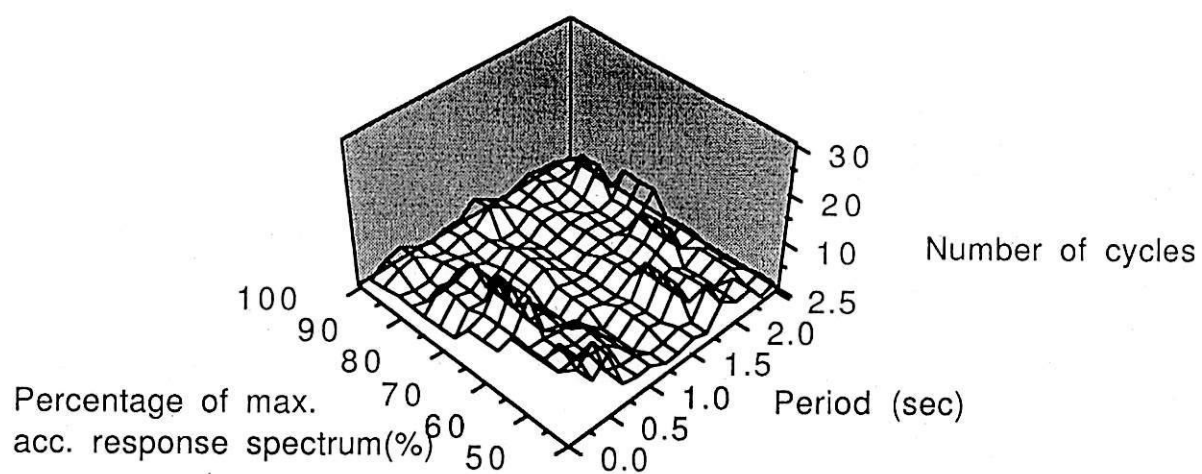


図3-16 疲労応答スペクトル（輪島市 東西方向）

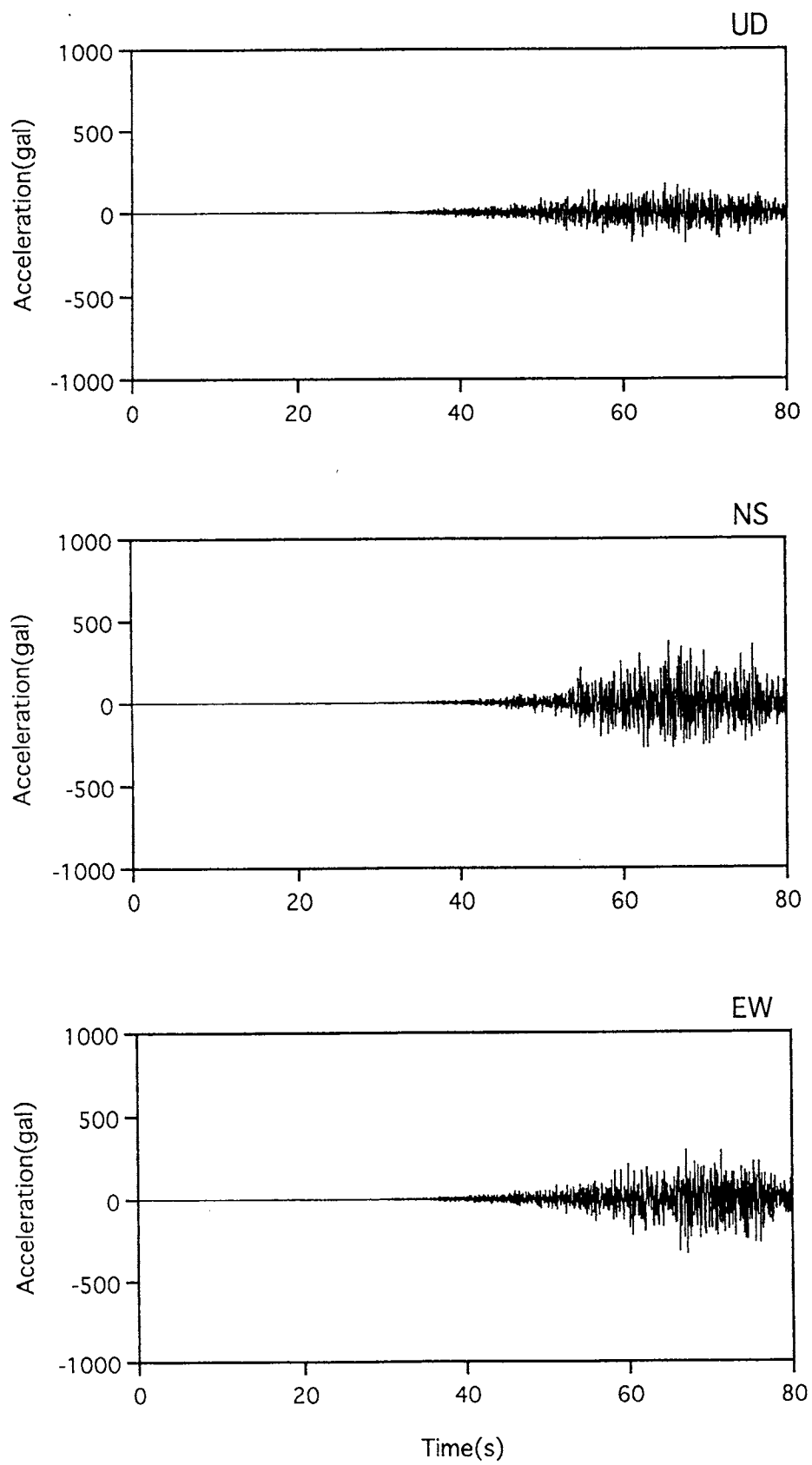


图3-17 加速度波形（根室市）

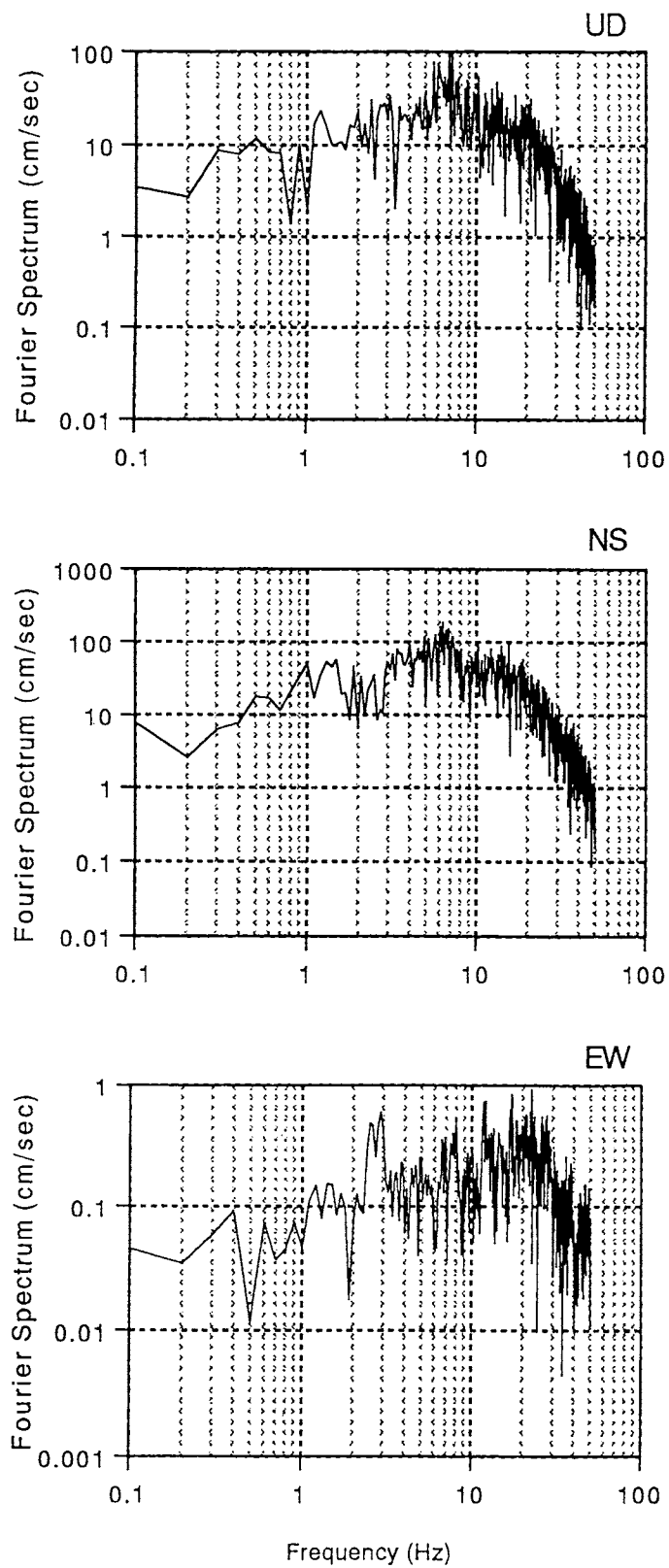


図3-18 加速度フーリエスペクトル (根室市)

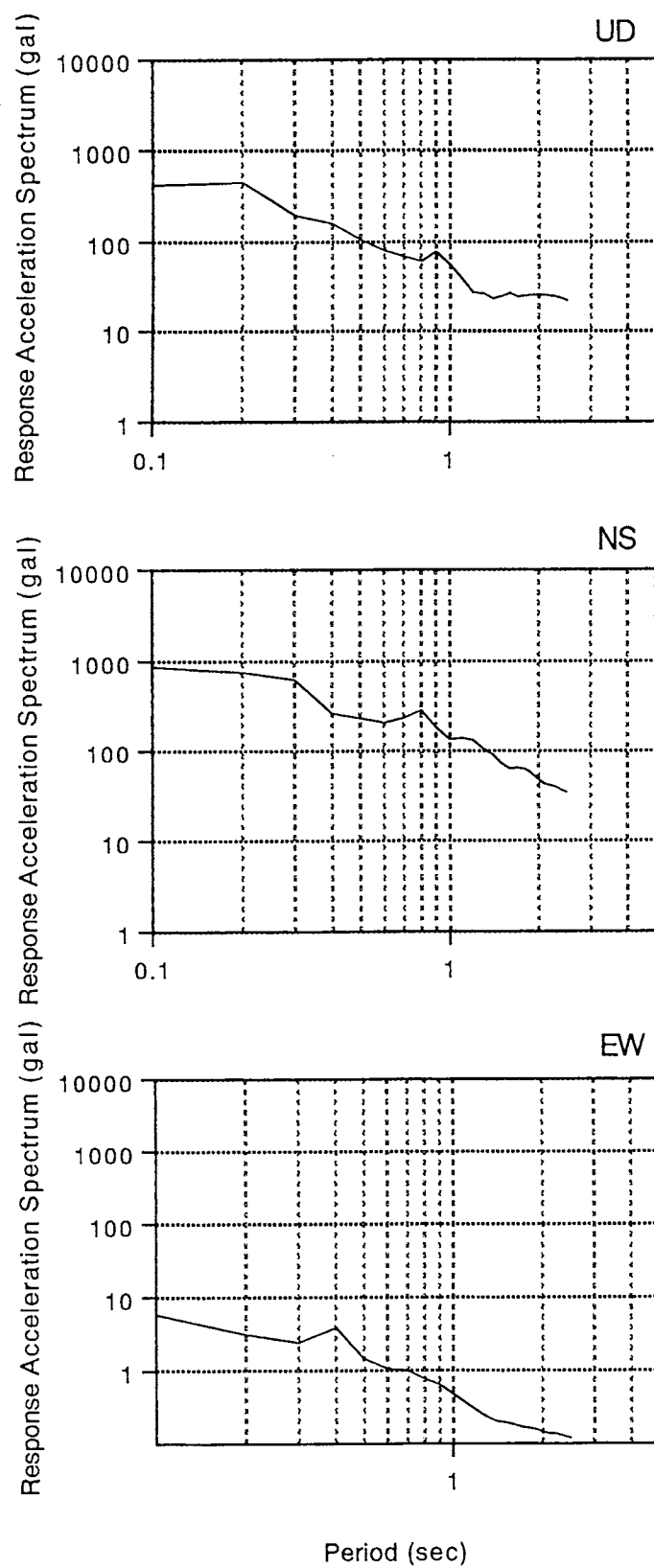


図3-19 加速度応答スペクトル（根室市）

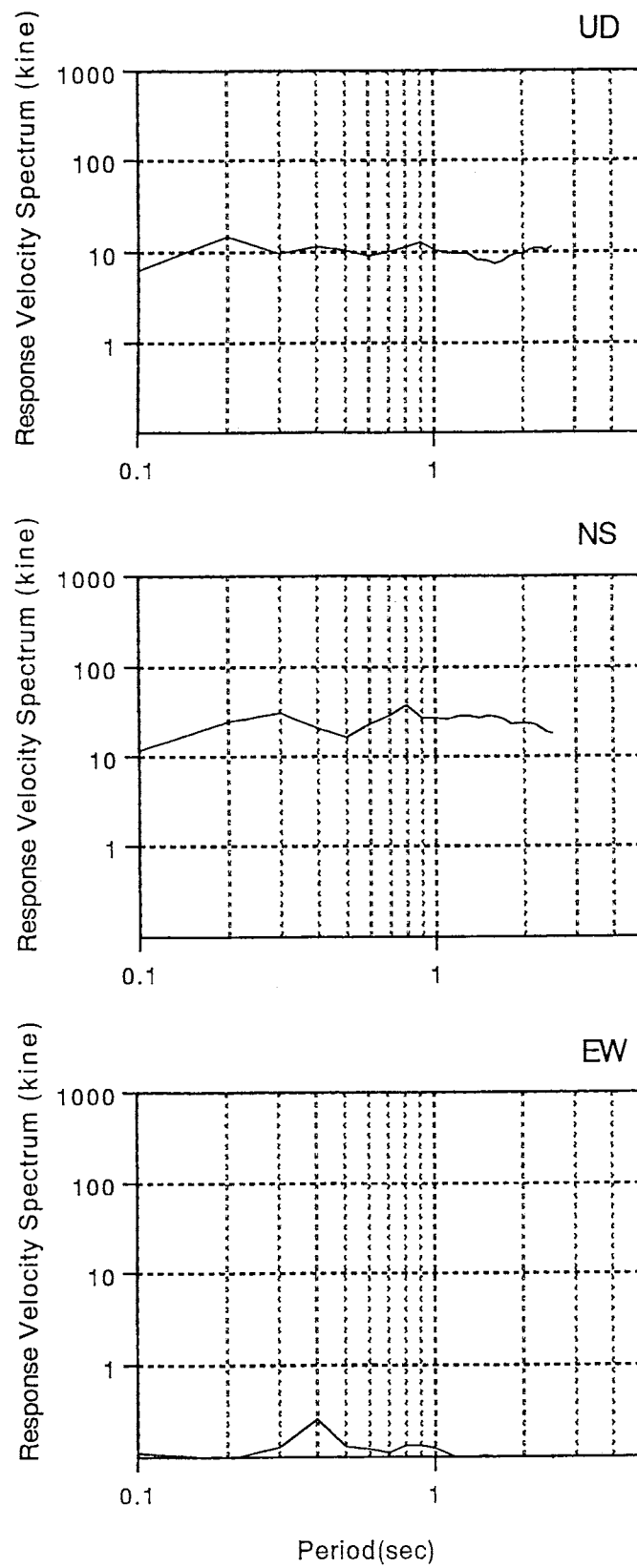


図3-20 速度応答スペクトル (根室市)

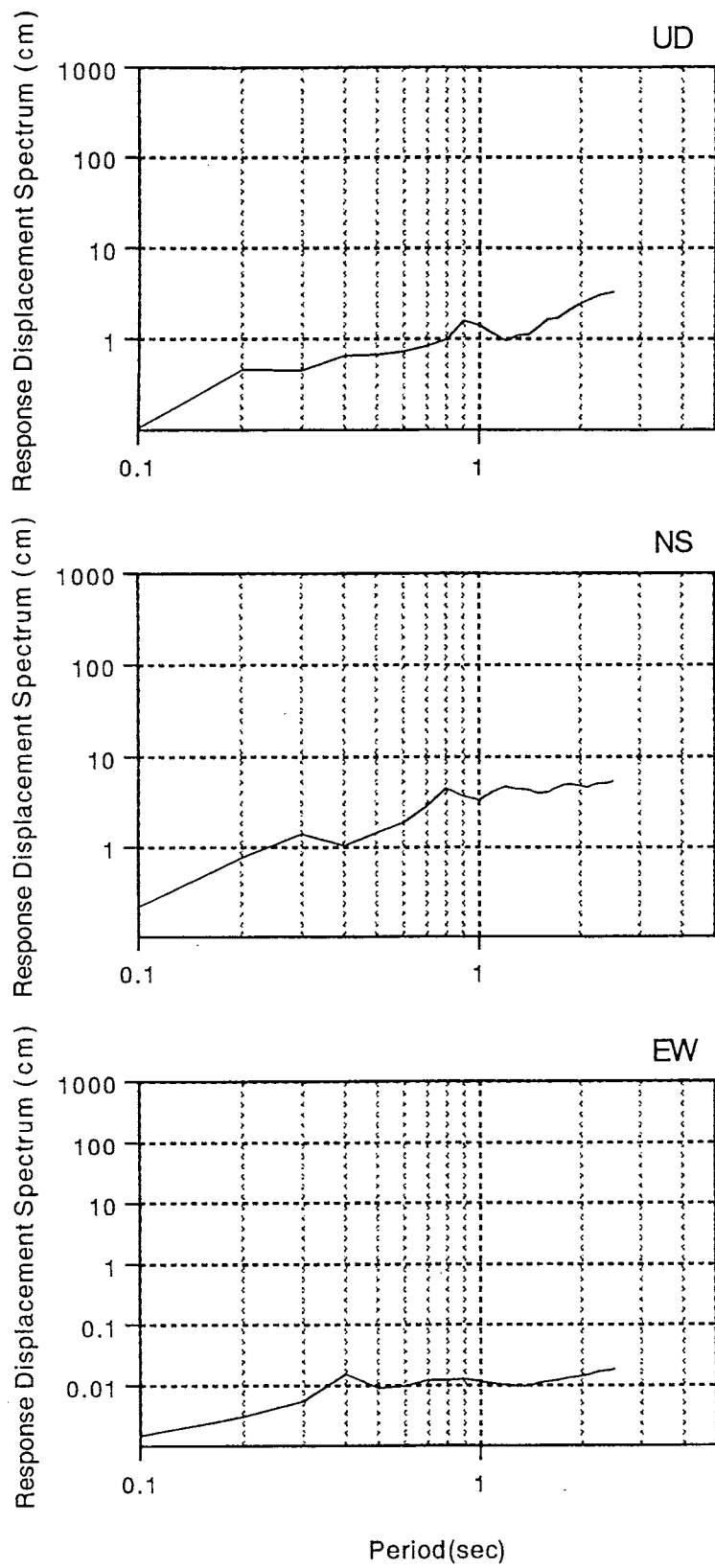


図3-21 変位応答スペクトル（根室市）

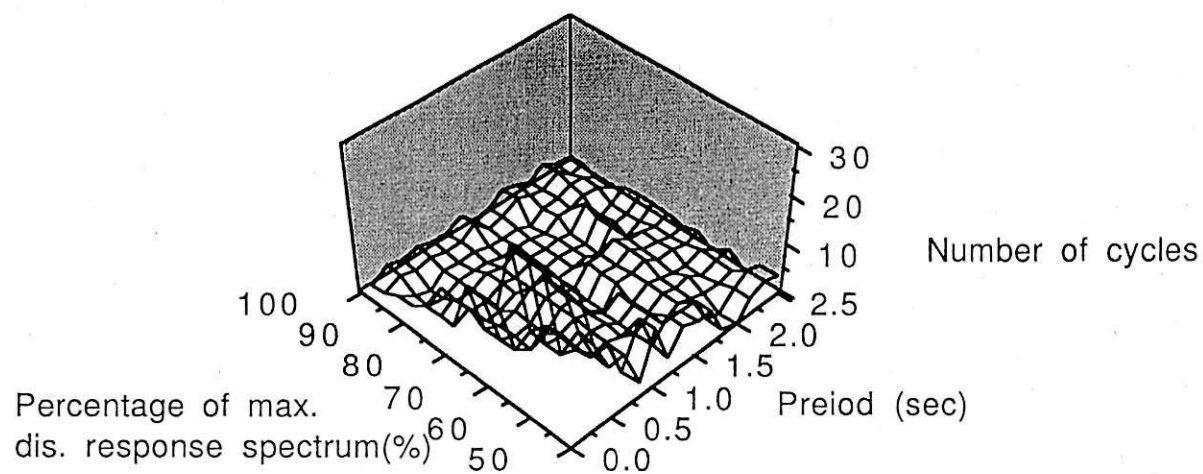
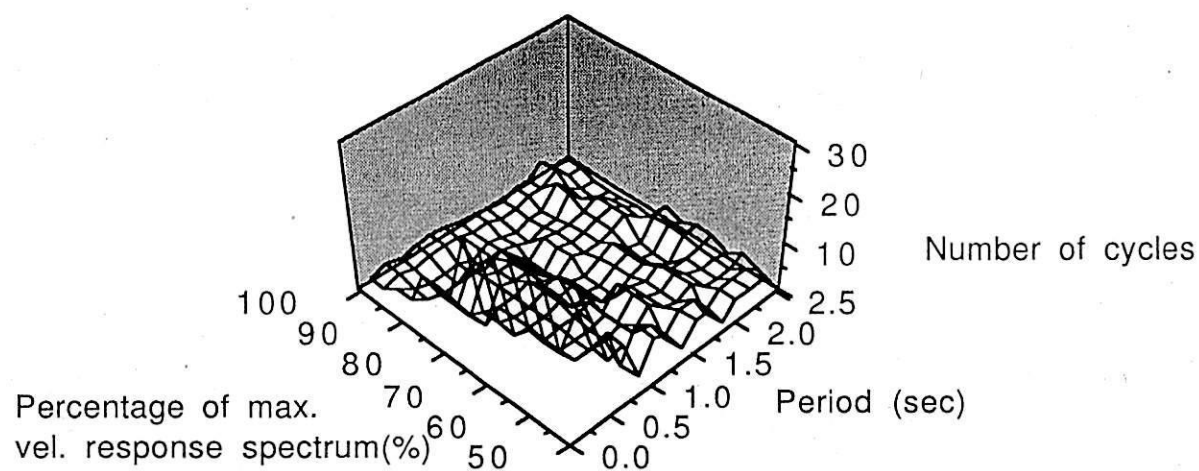
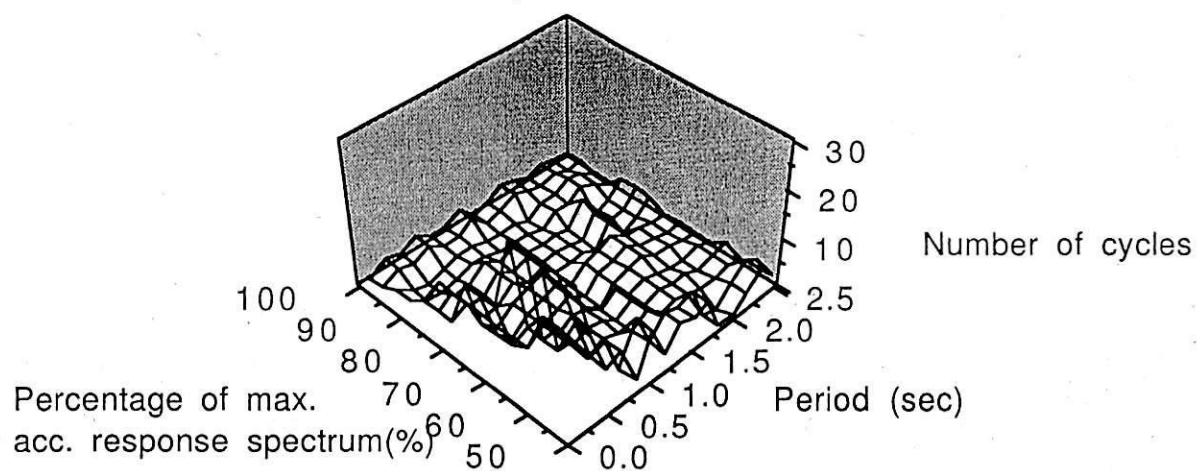


図3-22 疲労応答スペクトル (根室市 上下方向)

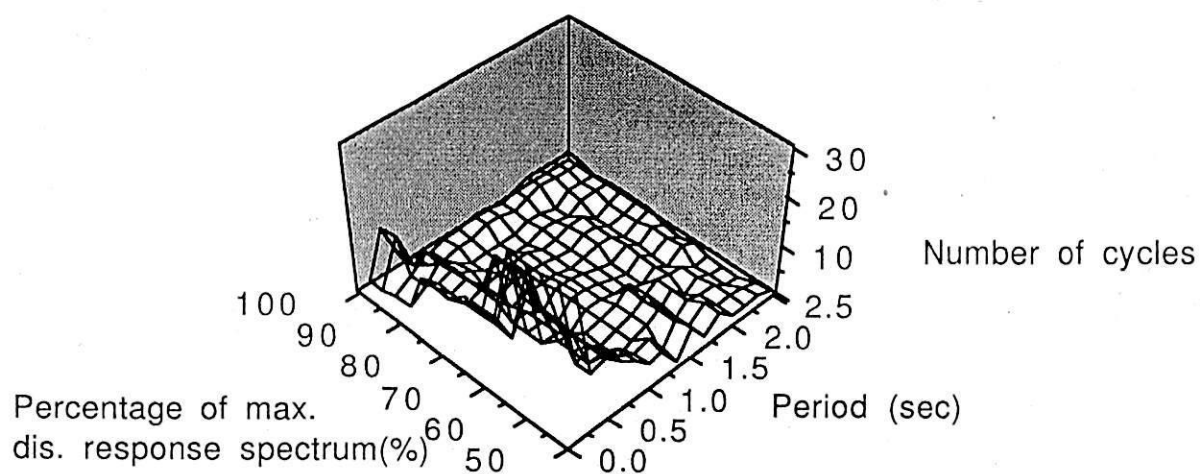
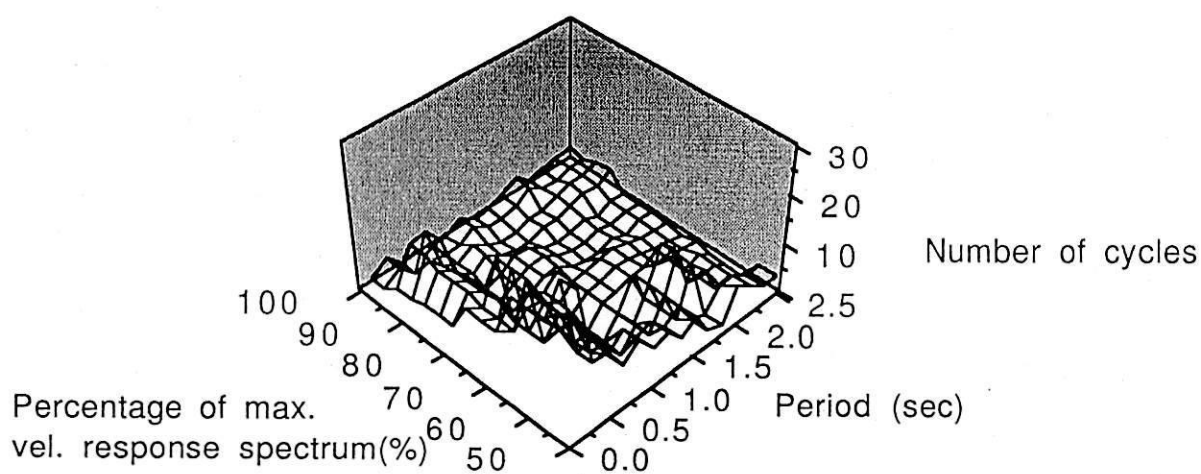
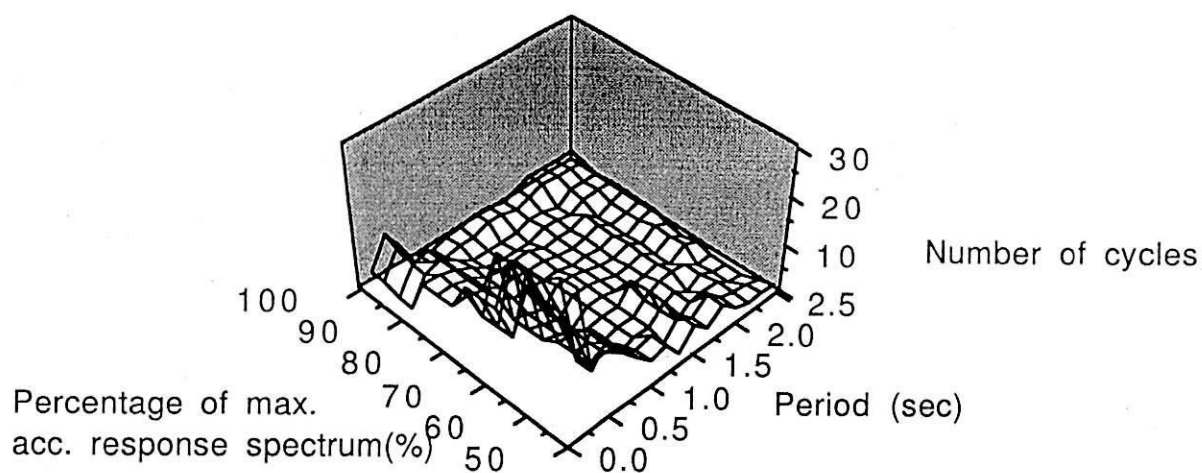


図3-23 疲労応答スペクトル（根室市 南北方向）

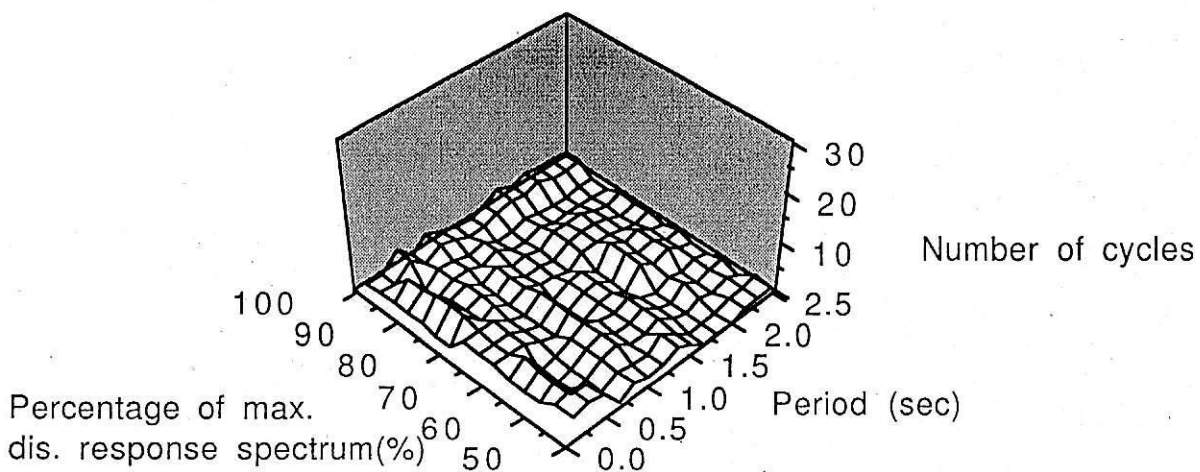
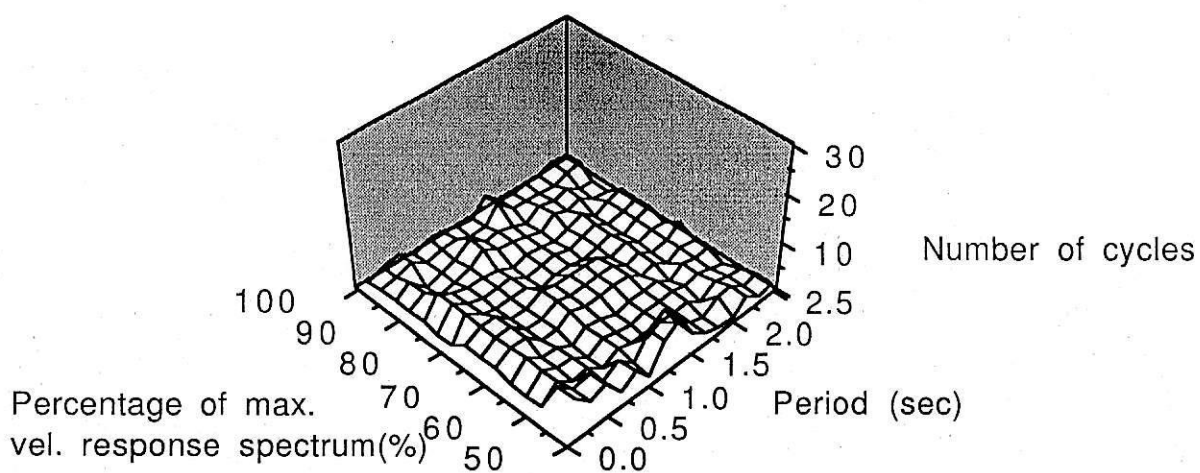
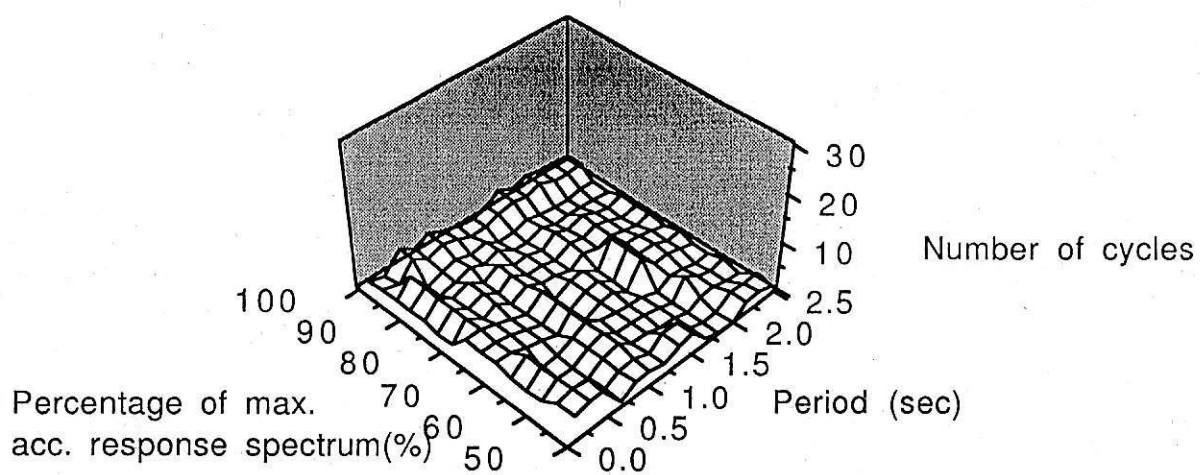


図3-24 疲労応答スペクトル (根室市 東西方向)

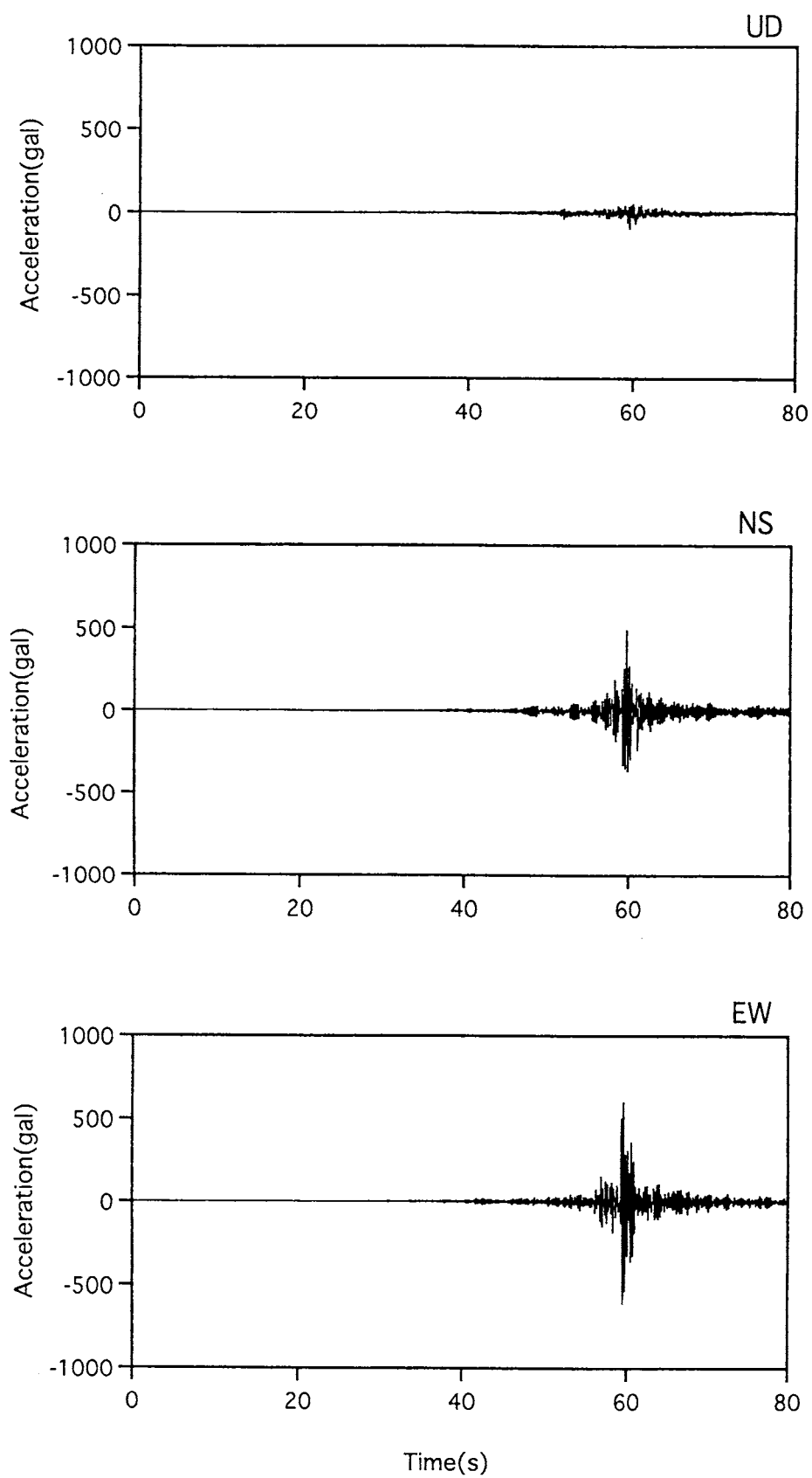


图3-25 加速度波形（八戸市）

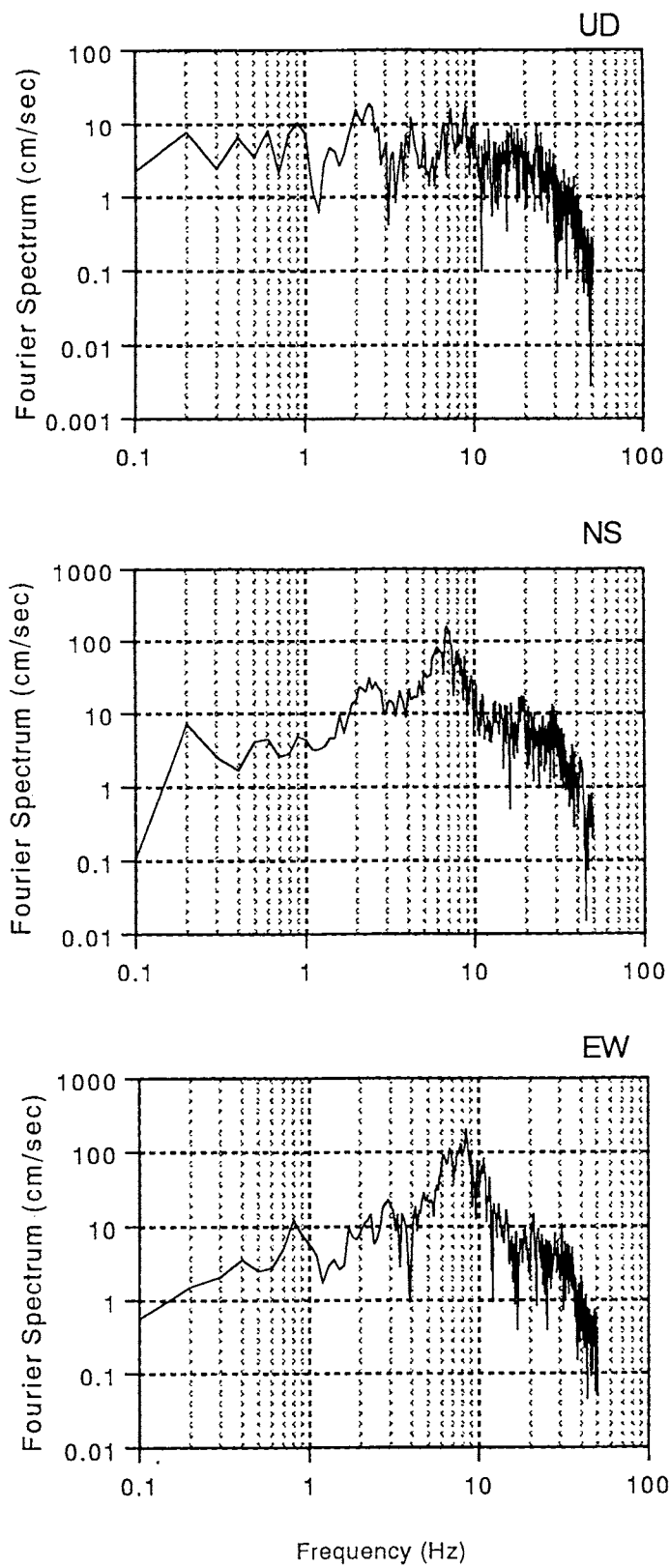


図3-26 加速度フーリエスペクトル (八戸市)

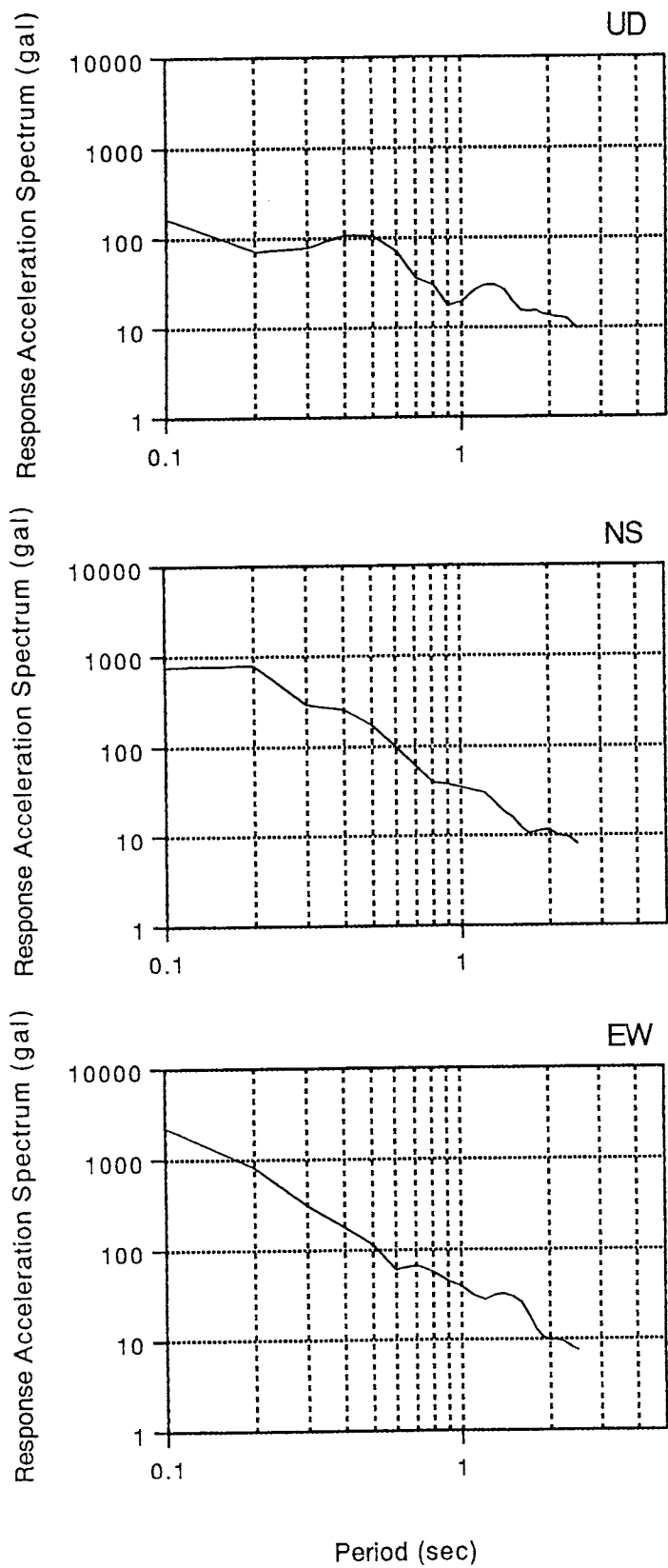


図3-27 加速度応答スペクトル (八戸市)

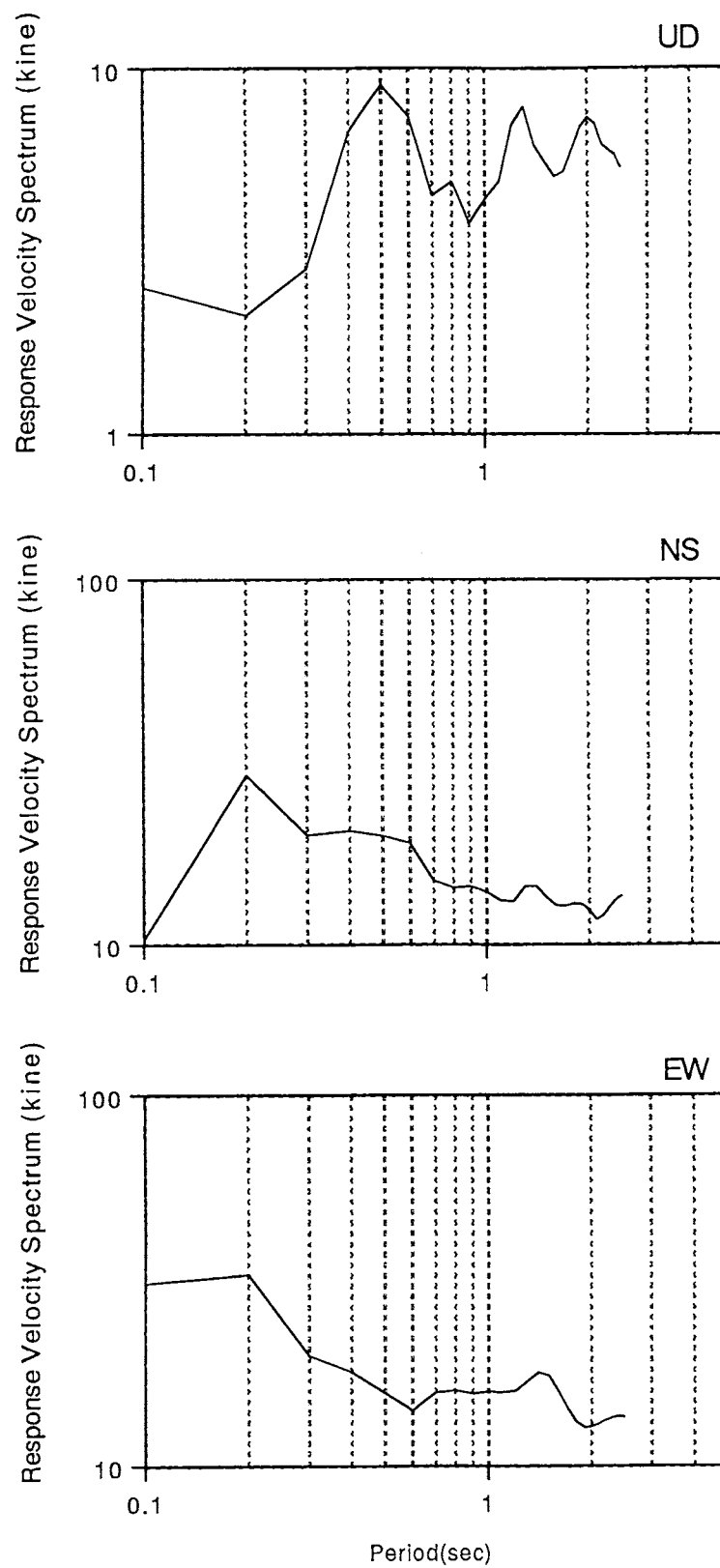


図3-28 速度応答スペクトル (八戸市)

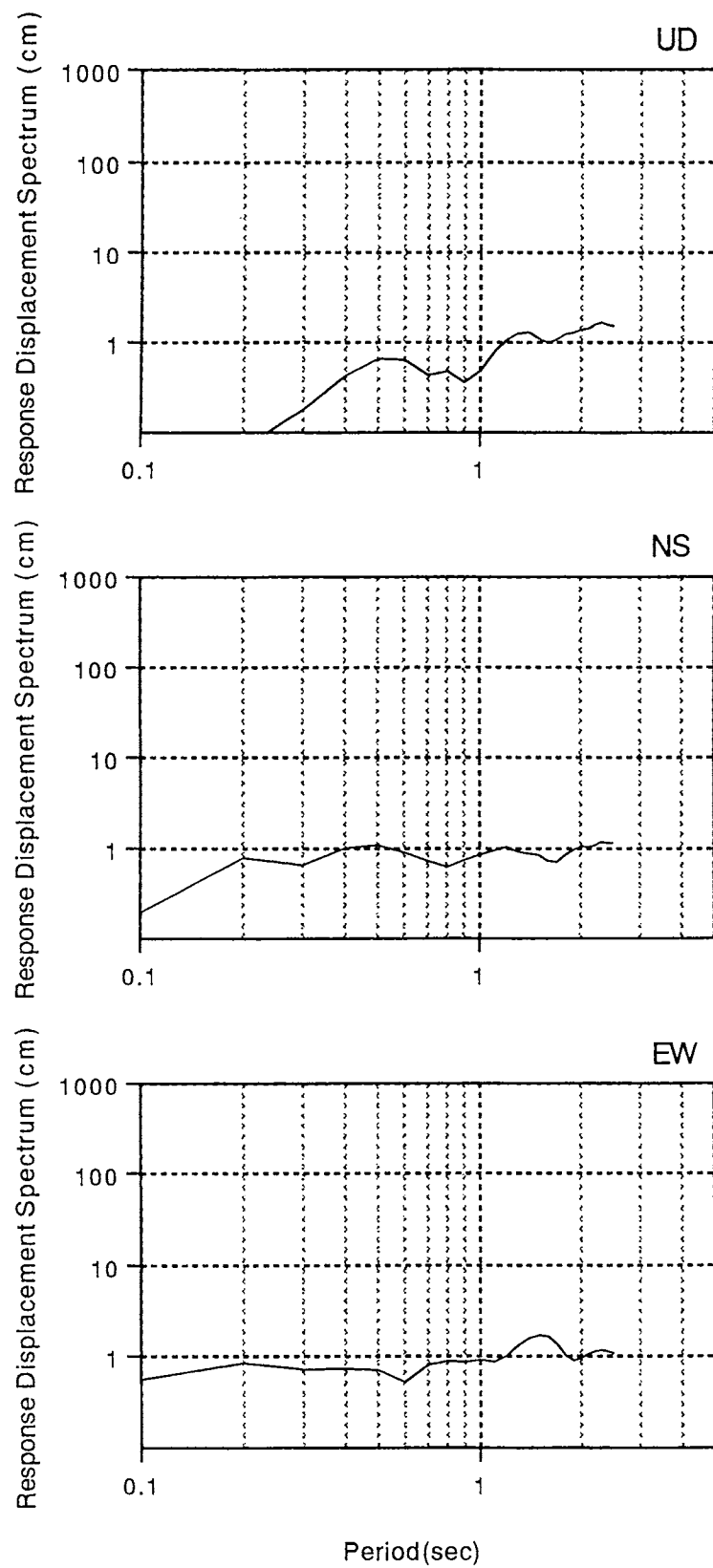


図3-29 変位応答スペクトル（八戸市）

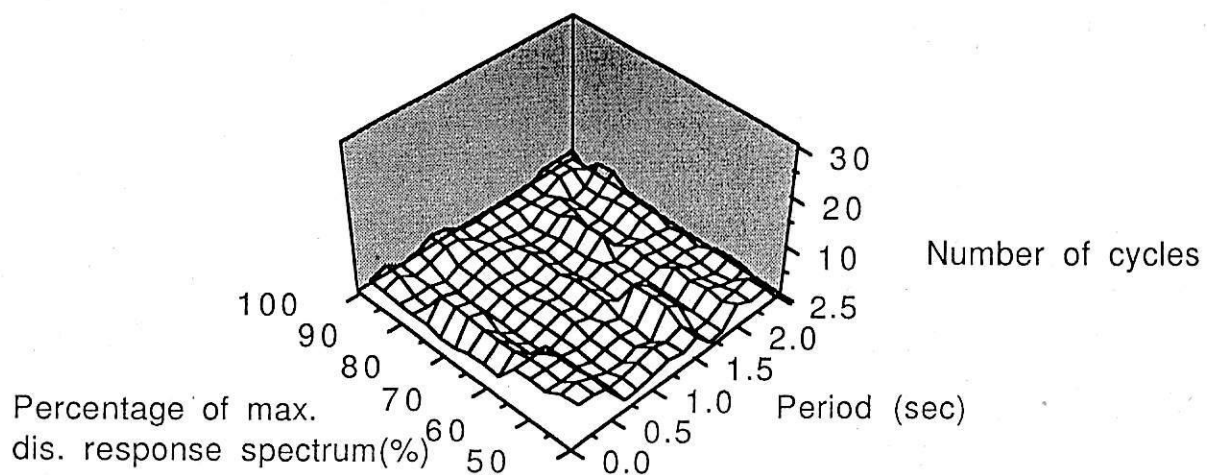
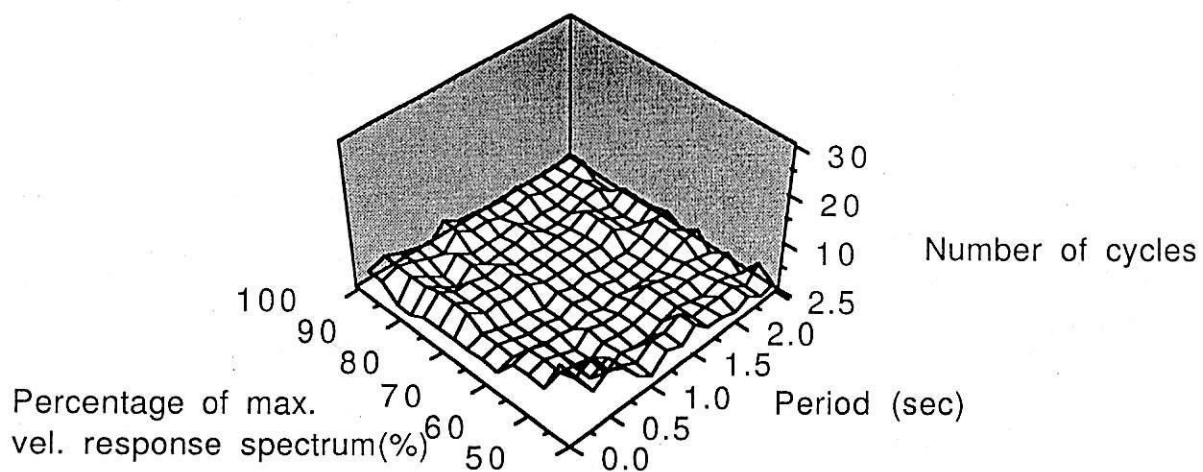
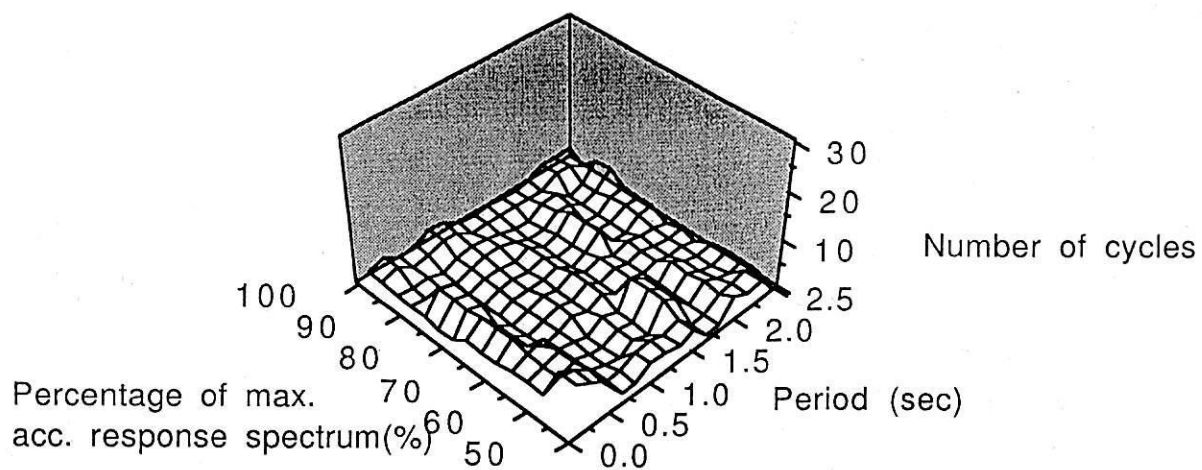


図3-30 疲労応答スペクトル (八戸市 上下方向)

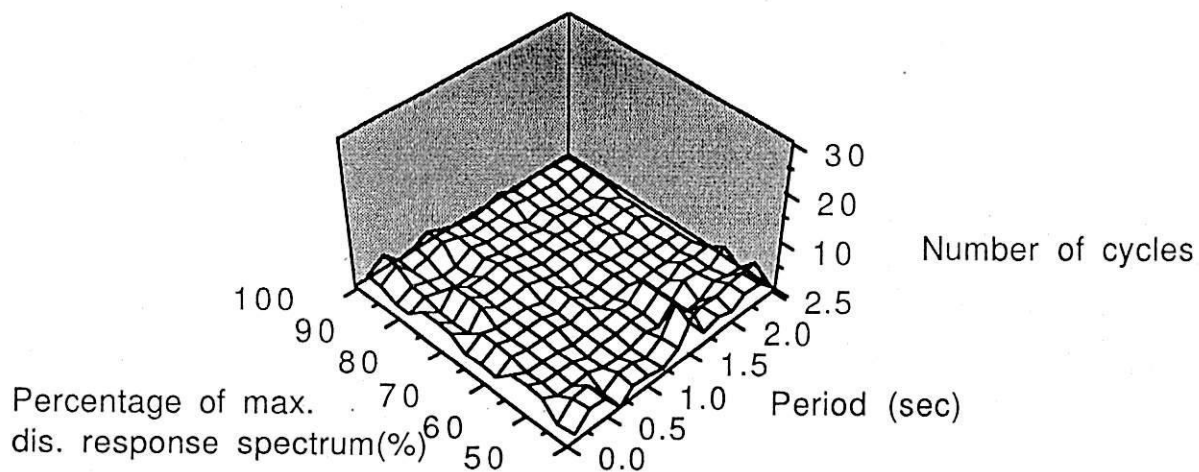
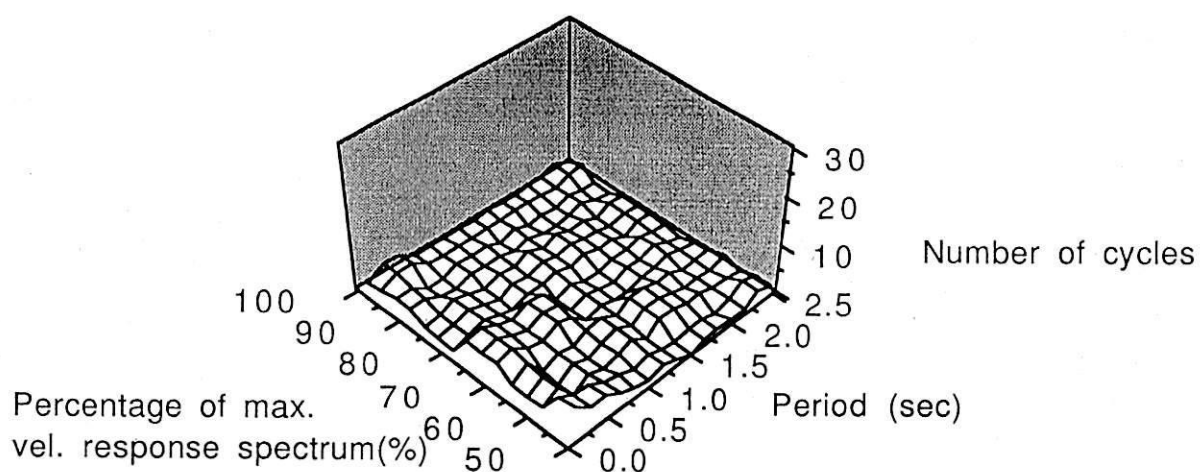
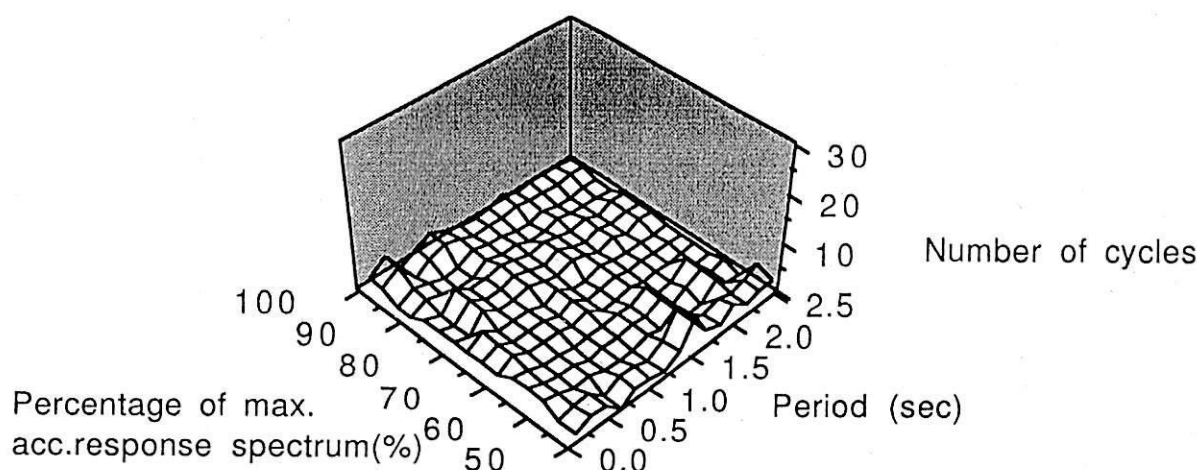


図3-31 疲労応答スペクトル (八戸市 南北方向)

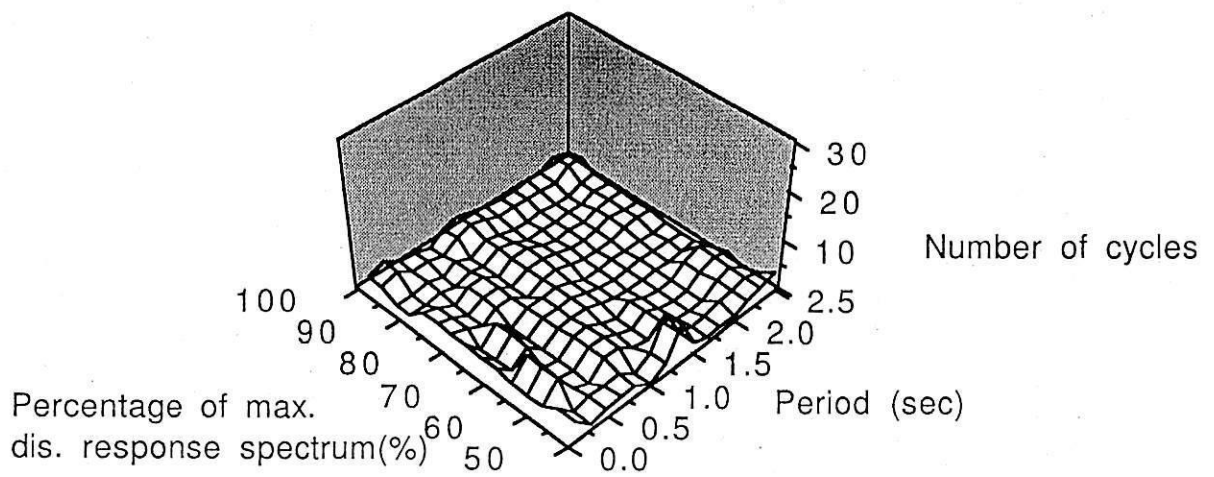
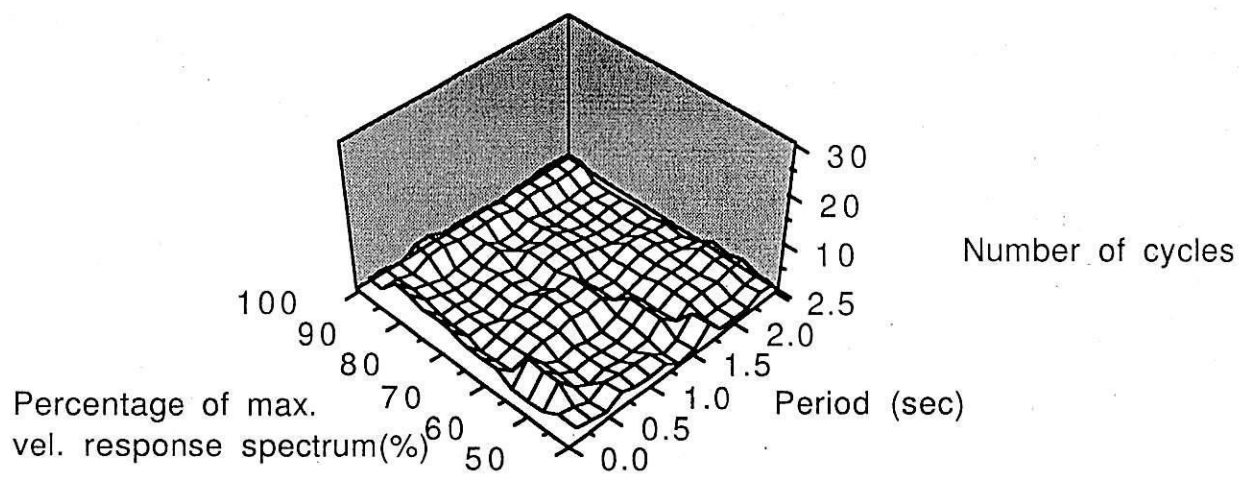
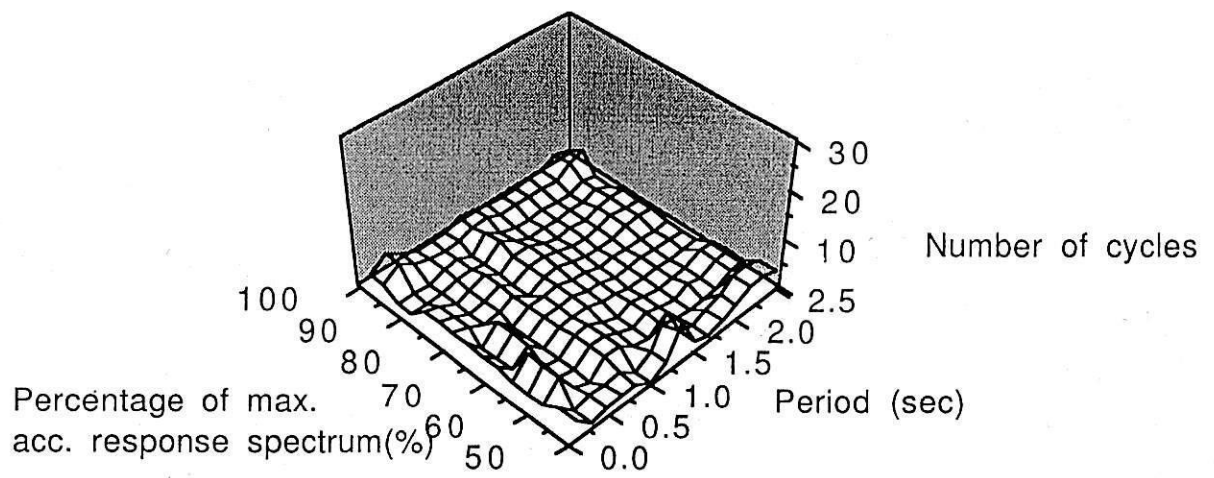


図3-32 疲労応答スペクトル (八戸市 東西方向)

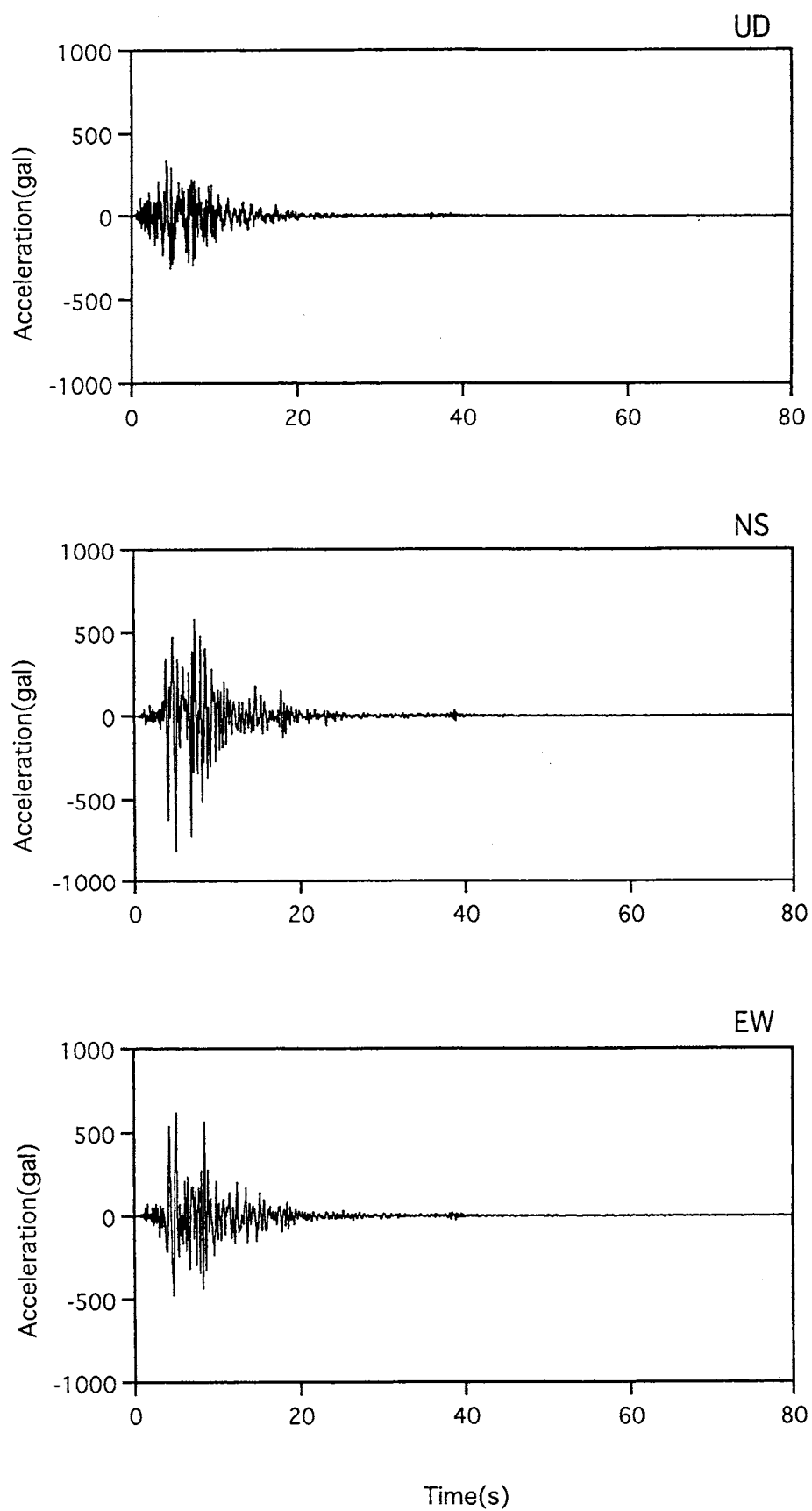


图3-33 加速度波形（神戸市）

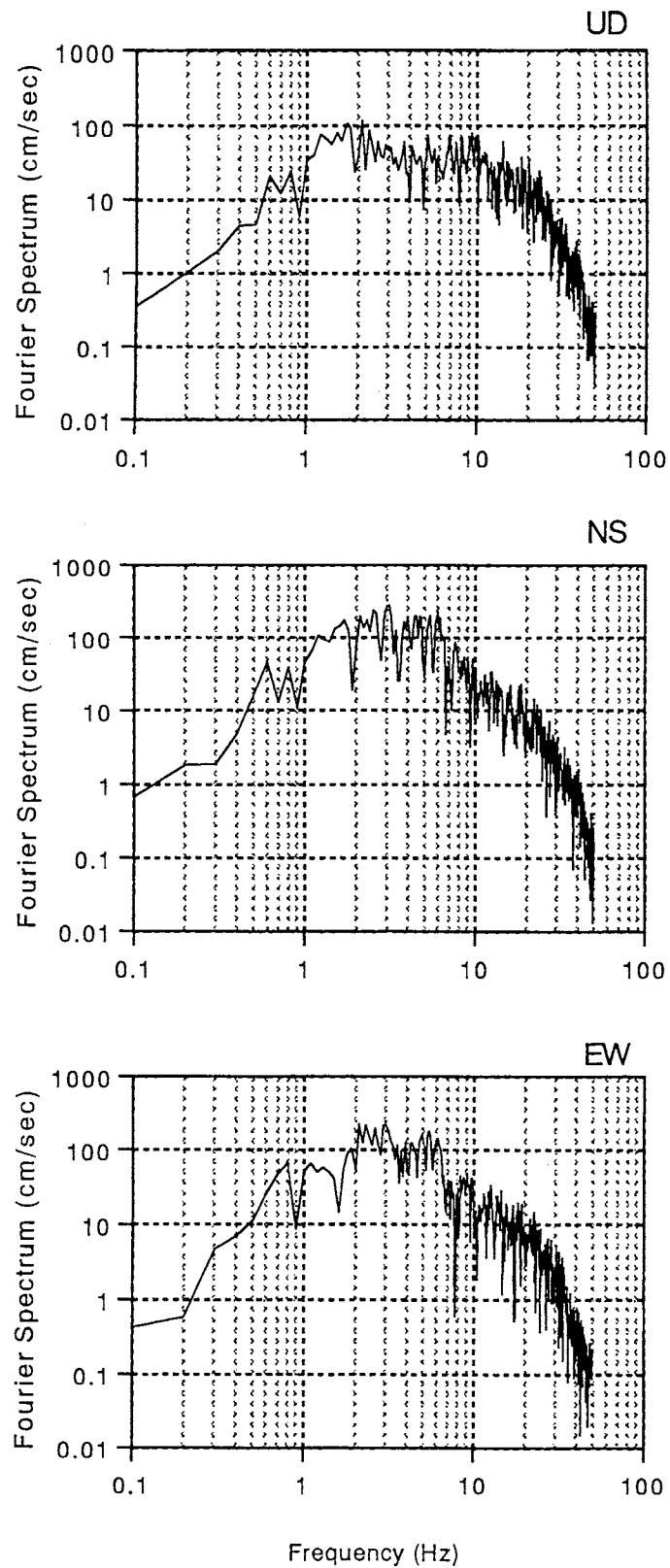


図3-34 加速度フーリエスペクトル（神戸市）

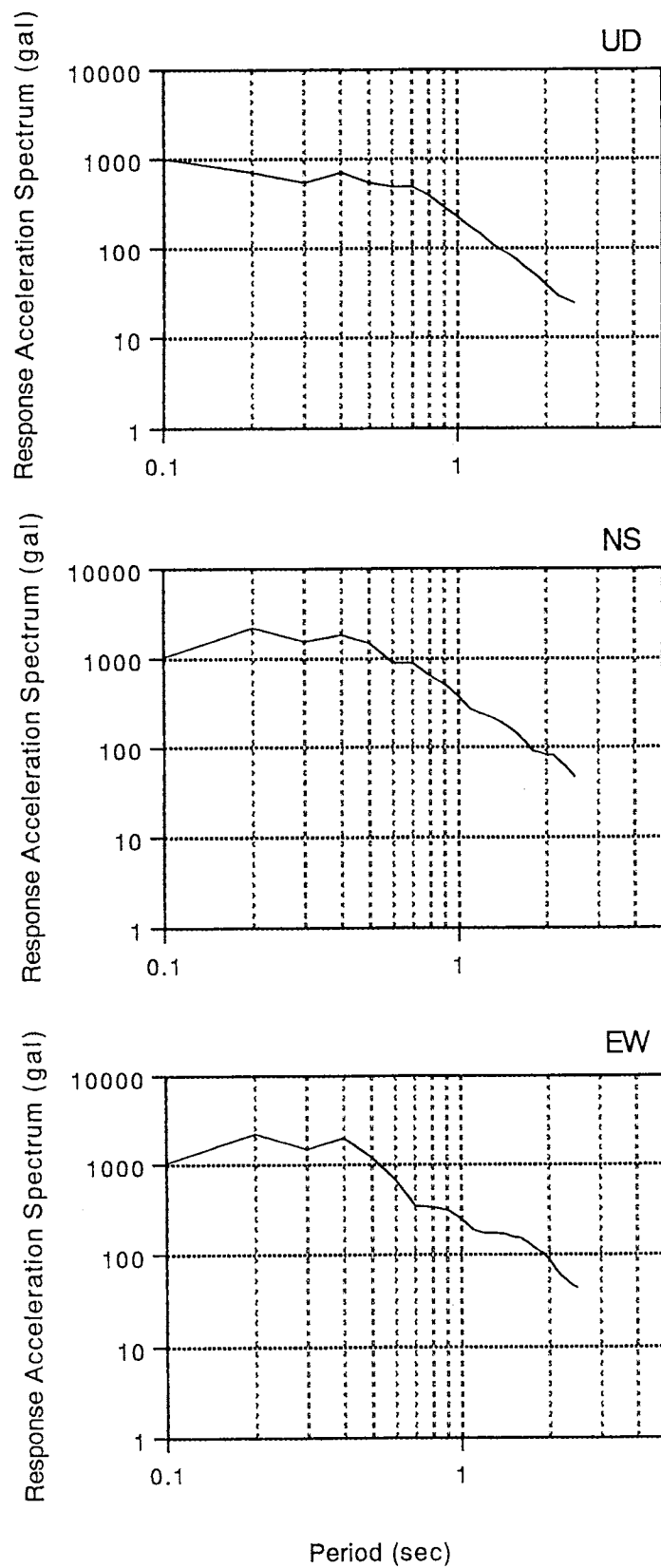


図3-35 加速度応答スペクトル（神戸市）

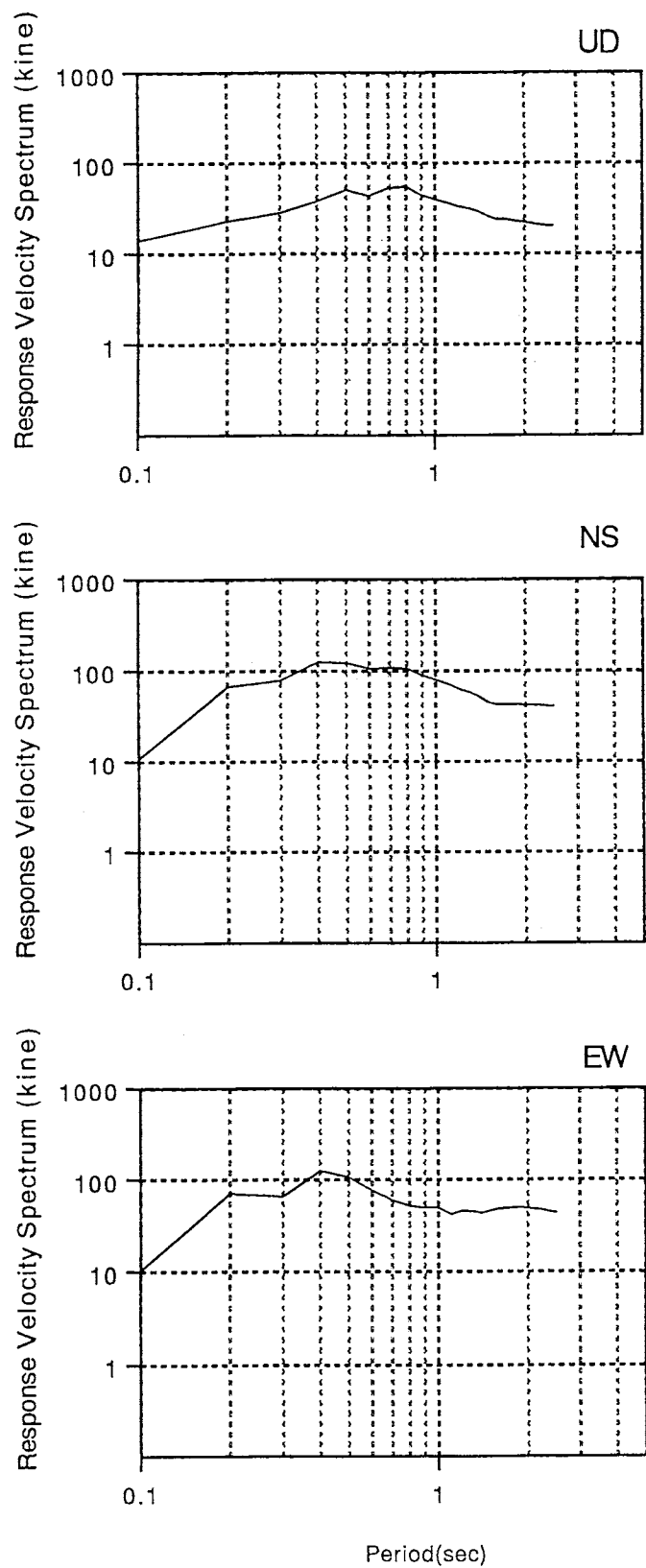


図3-36 速度応答スペクトル (神戸市)

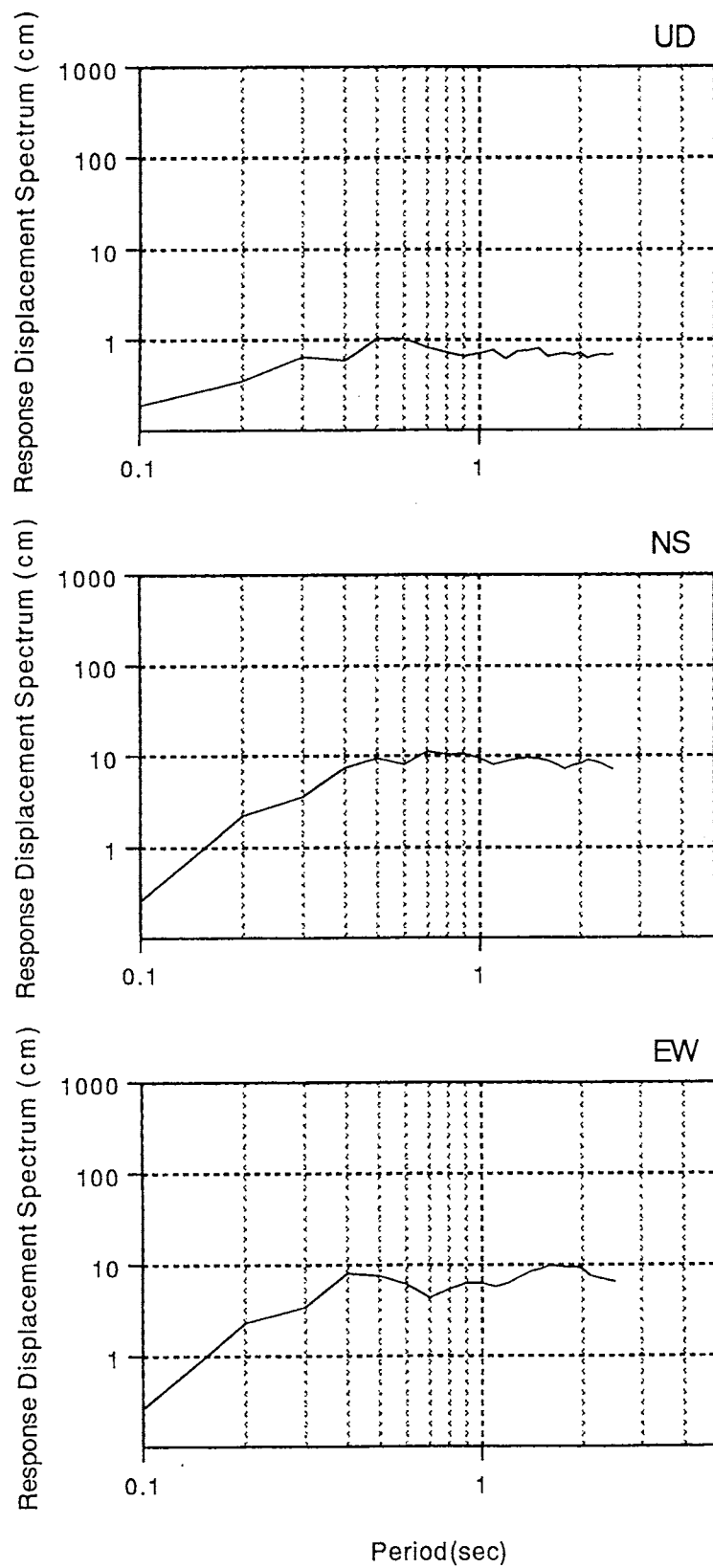


図3-37 変位応答スペクトル (神戸市)

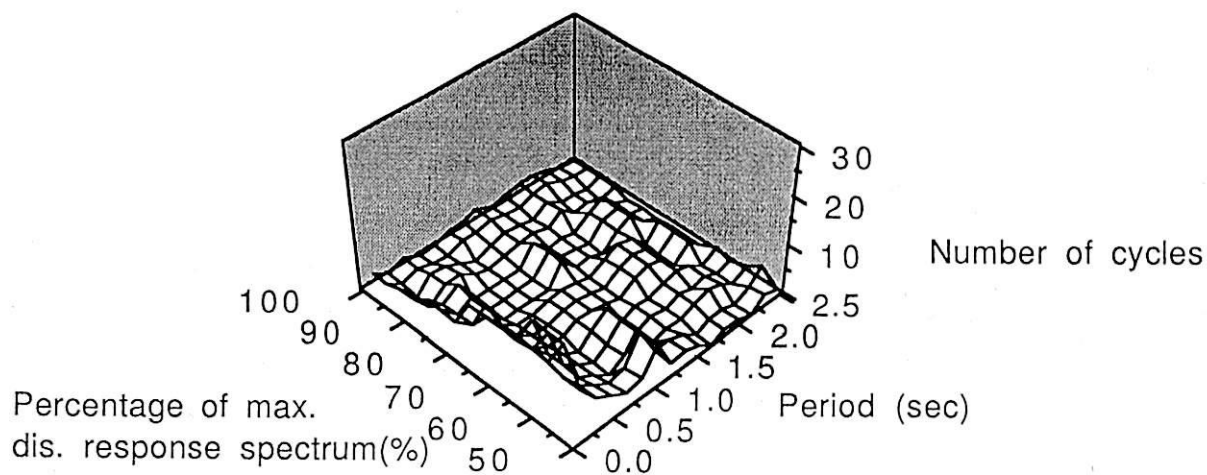
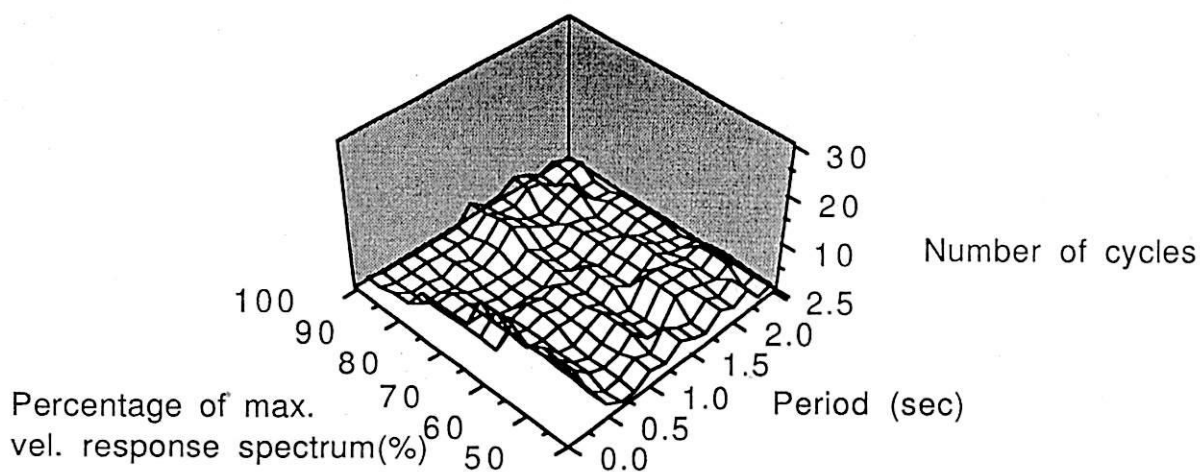
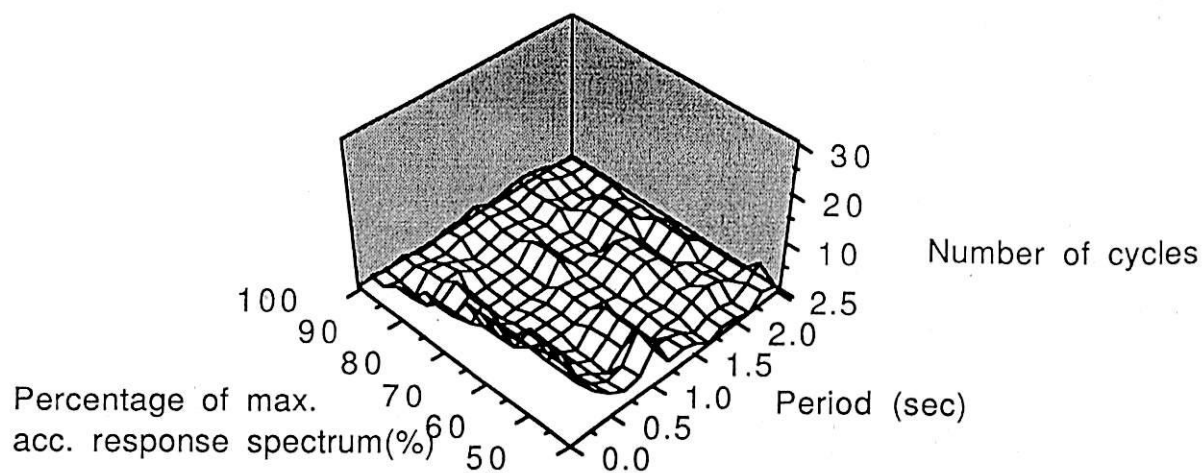


図3-38 疲労応答スペクトル（神戸市 上下方向）

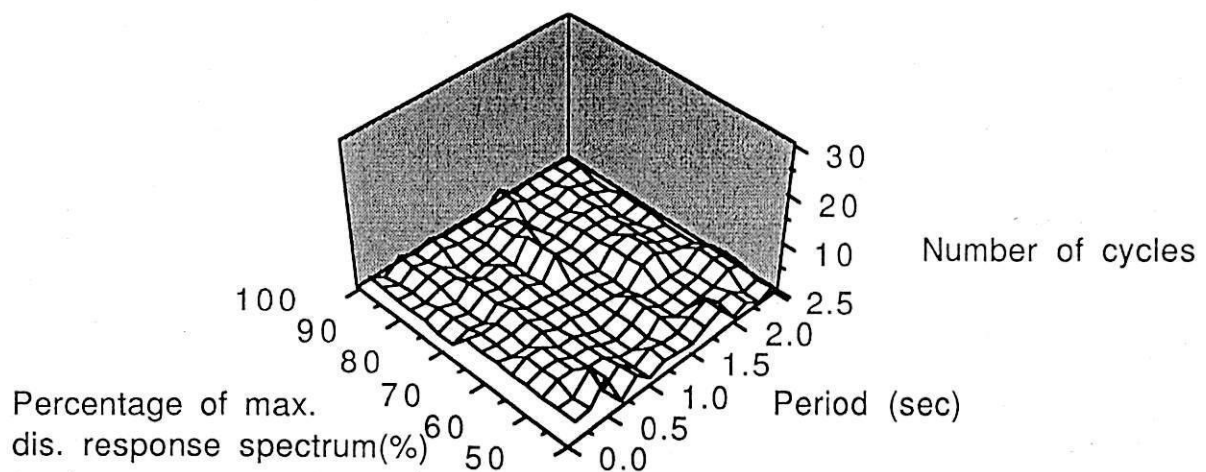
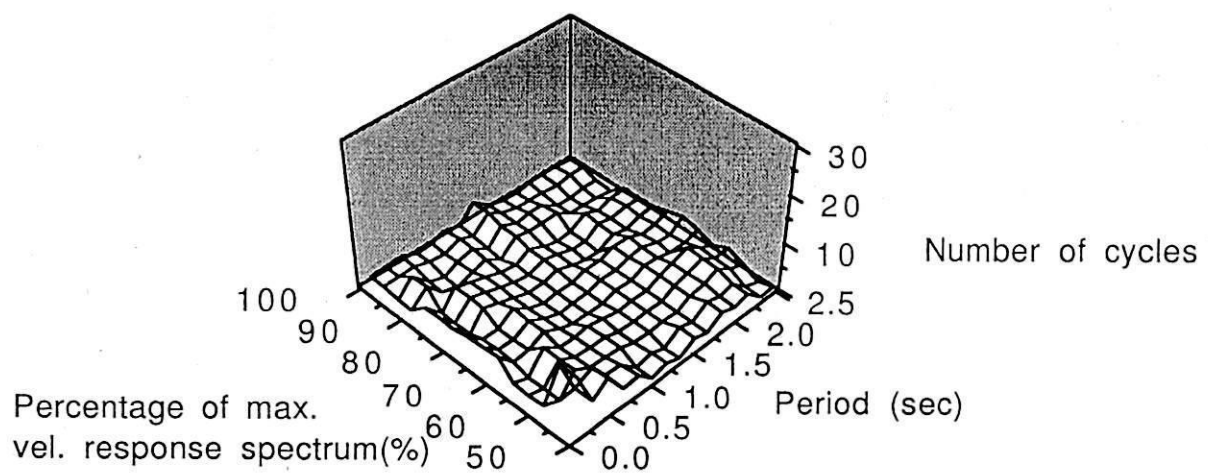
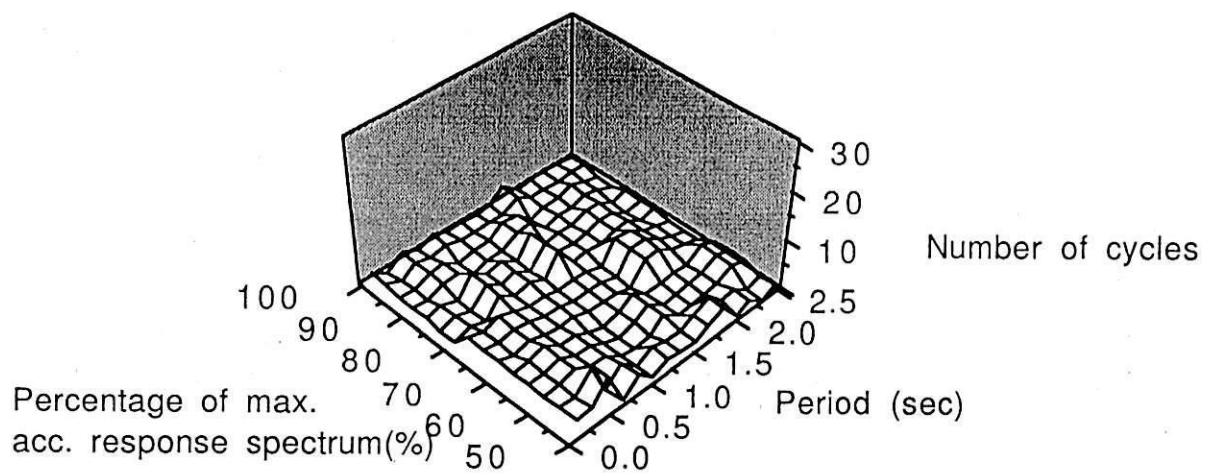


図3-39 疲労応答スペクトル (神戸市 南北方向)

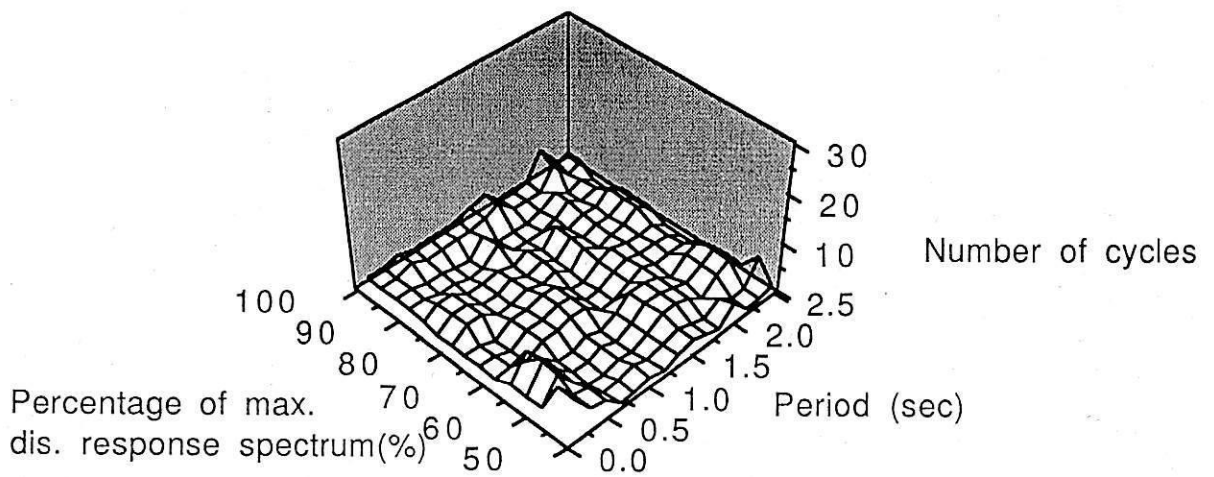
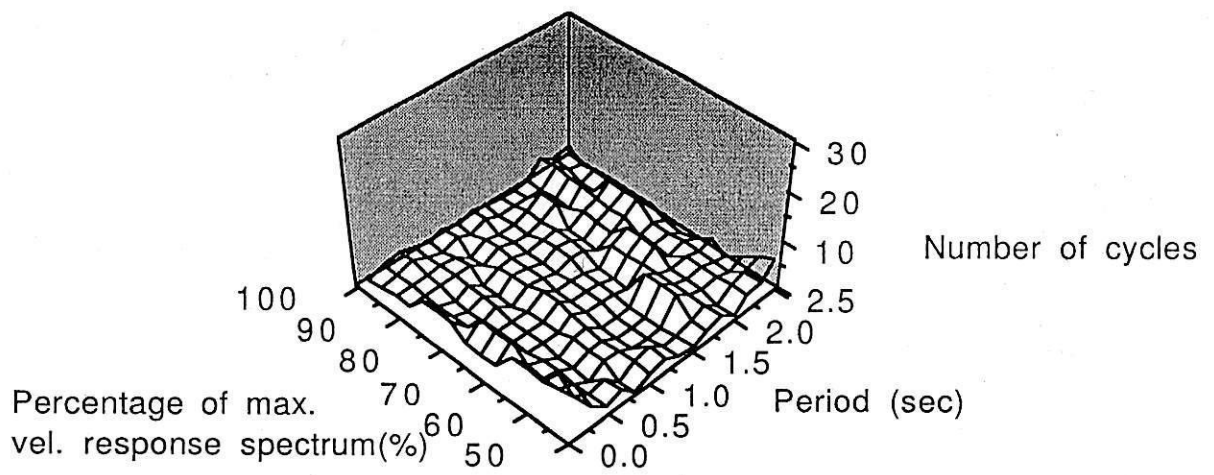
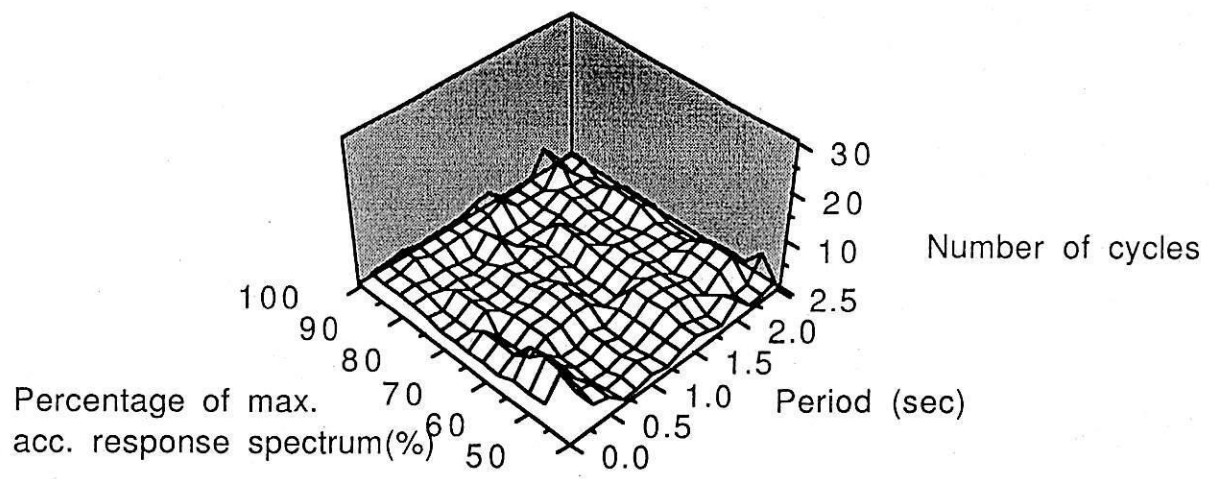


図3-40 疲労応答スペクトル（神戸市 東西方向）

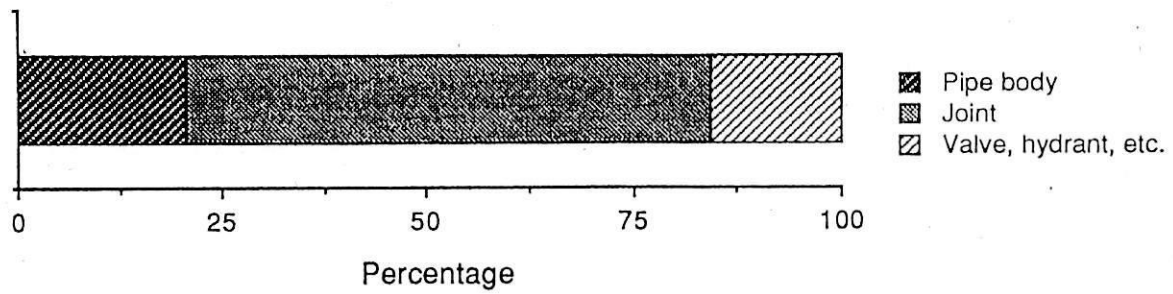


図3-41 神戸市全体の被害形態の割合

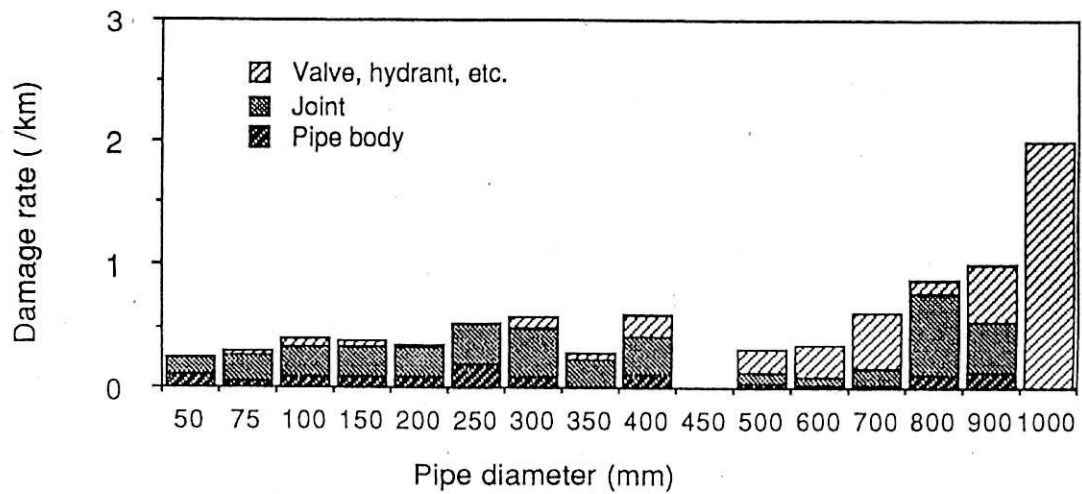


図3-42 神戸市における管種・管径別被害率

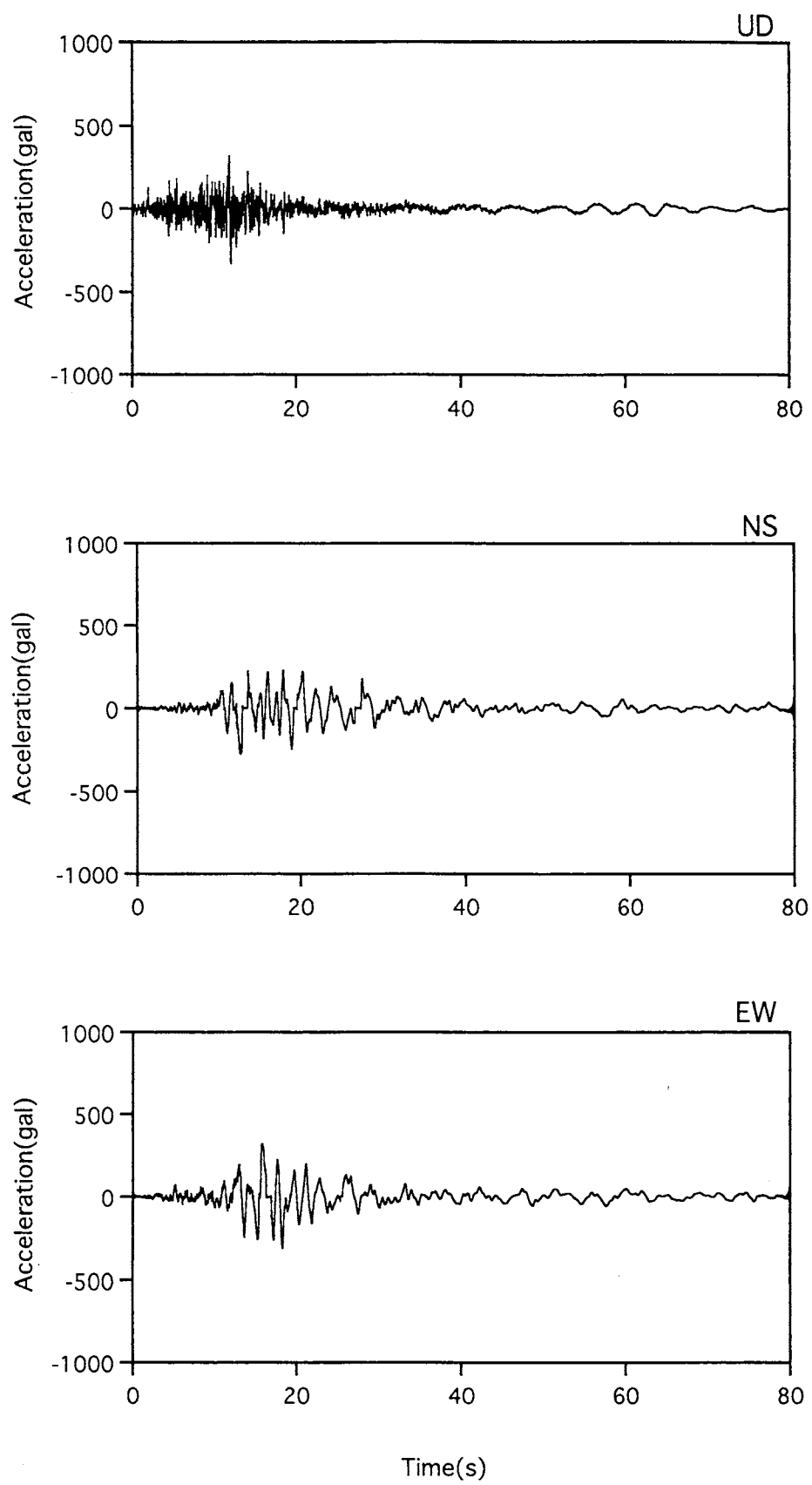


图3-43 加速度波形（尼崎市）

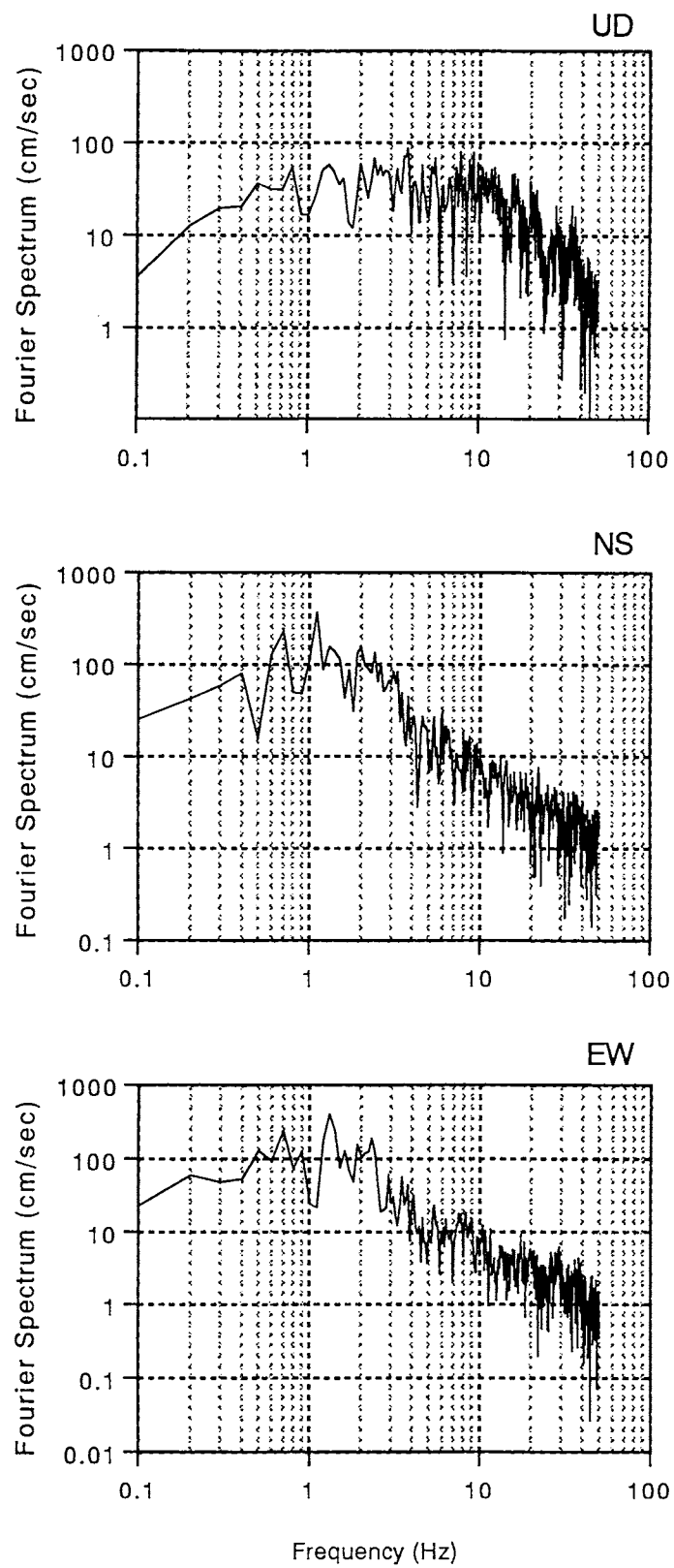


図3-44 加速度フーリエスペクトル (尼崎市)

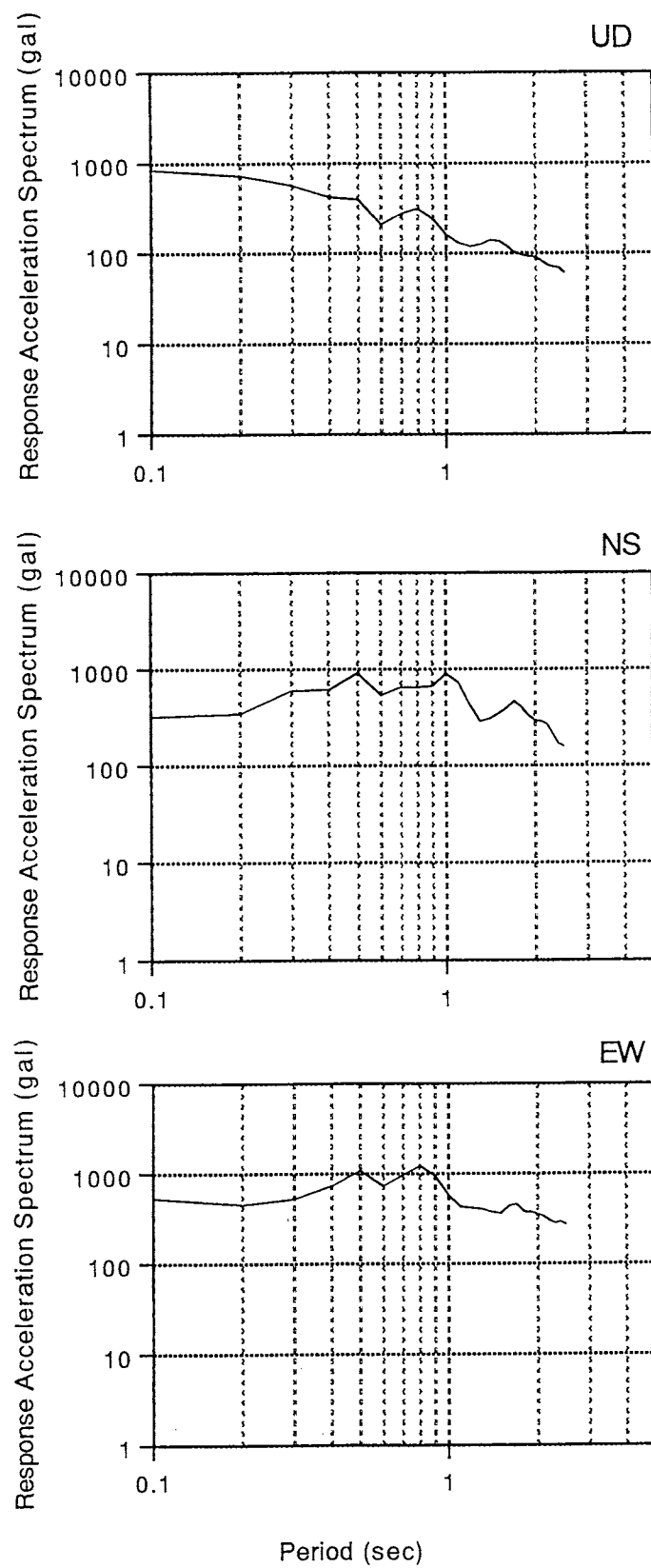


図3-45 加速度応答スペクトル（尼崎市）

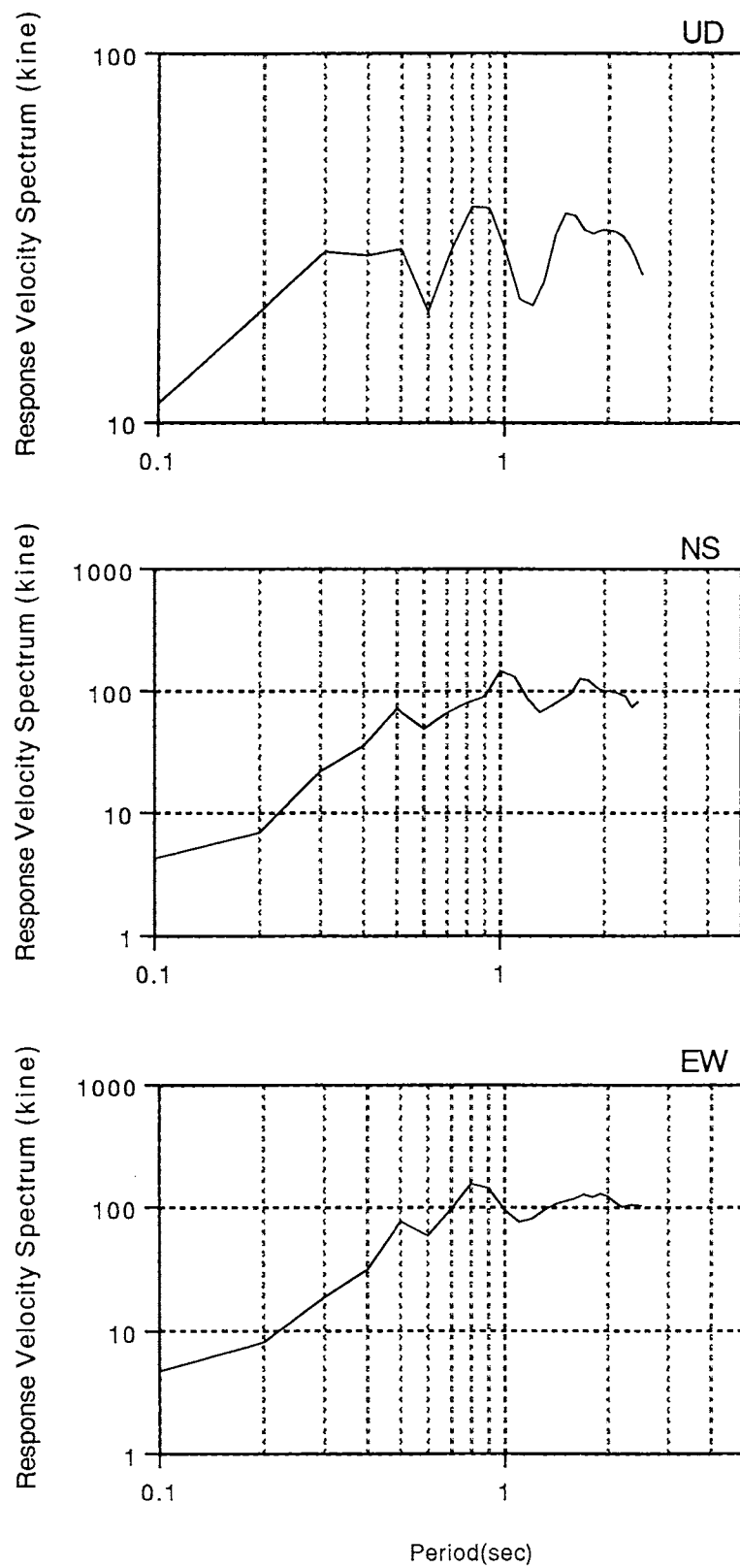


図3-46 速度応答スペクトル（尼崎市）

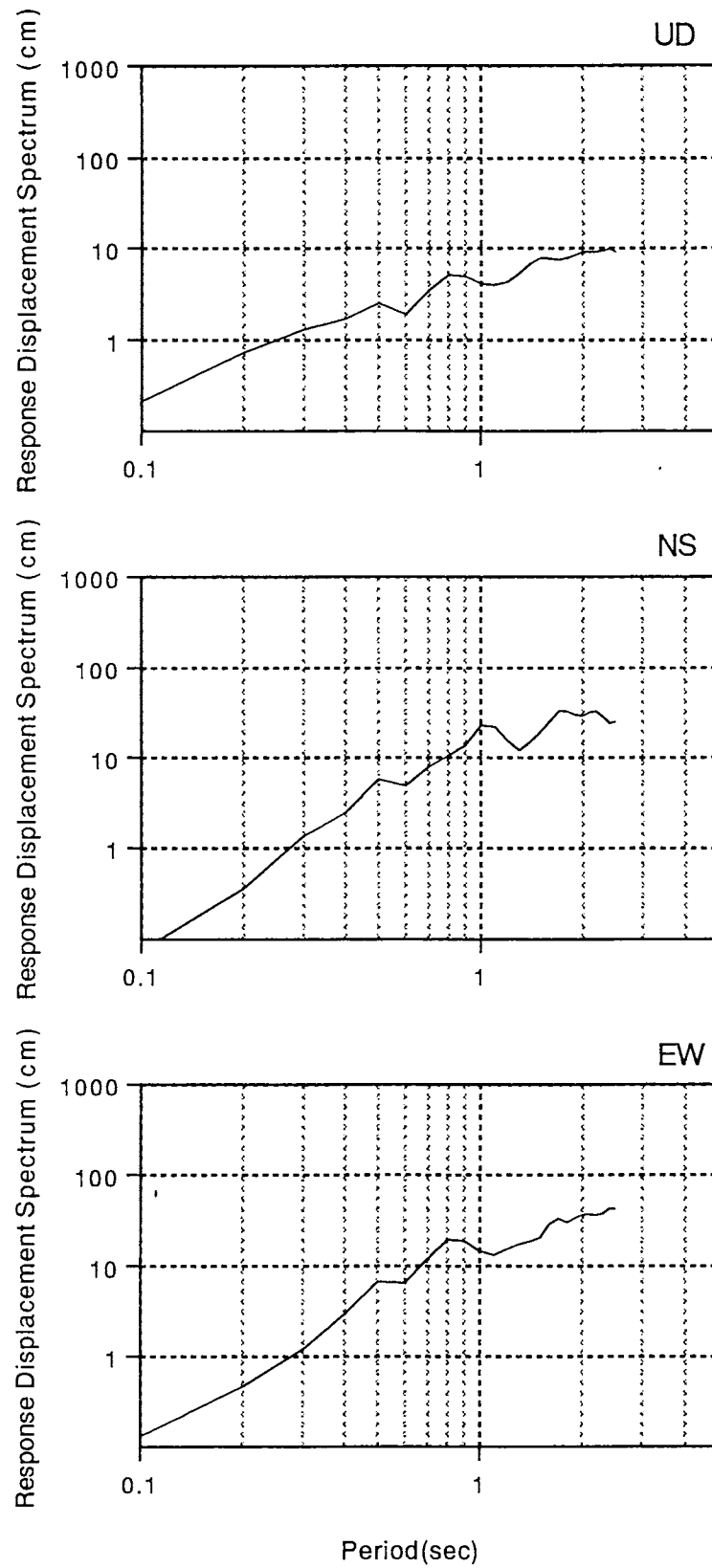


図3-47 変位応答スペクトル (尼崎市)

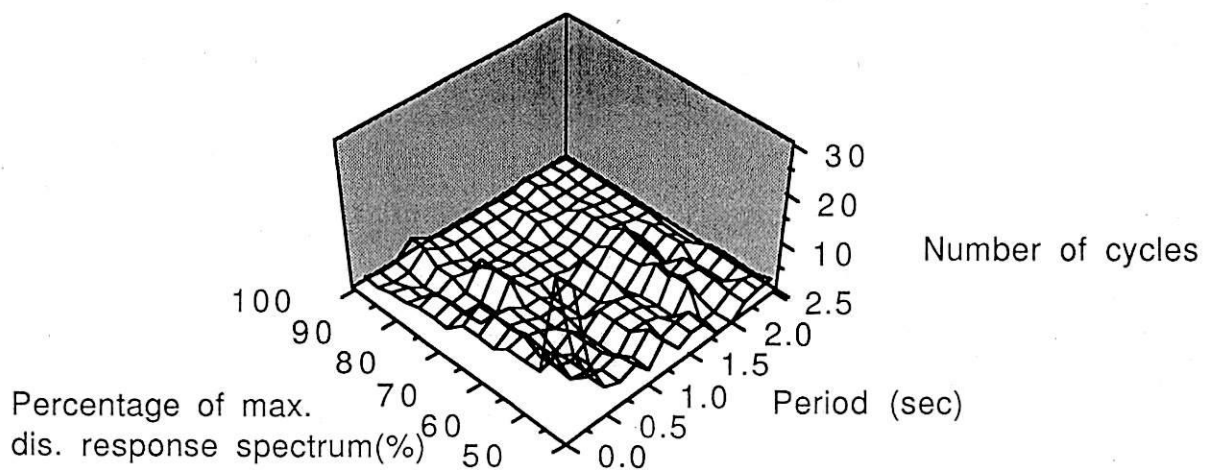
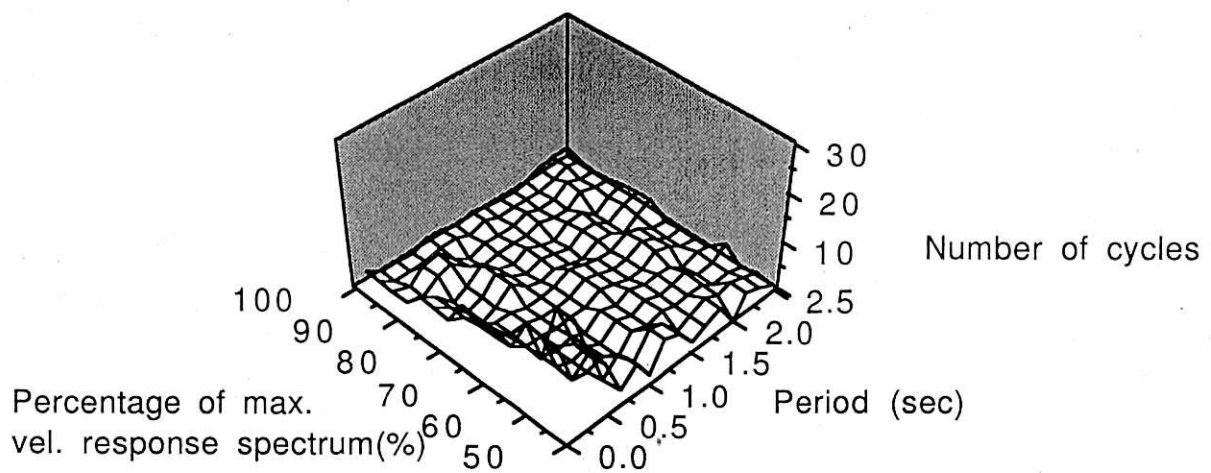
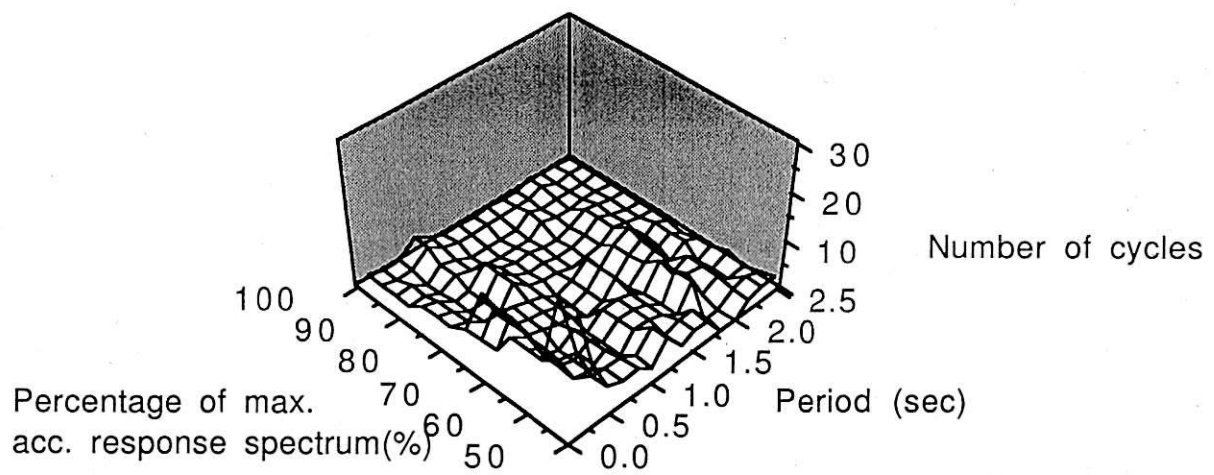


図3-48 疲労応答スペクトル（尼崎市 上下方向）

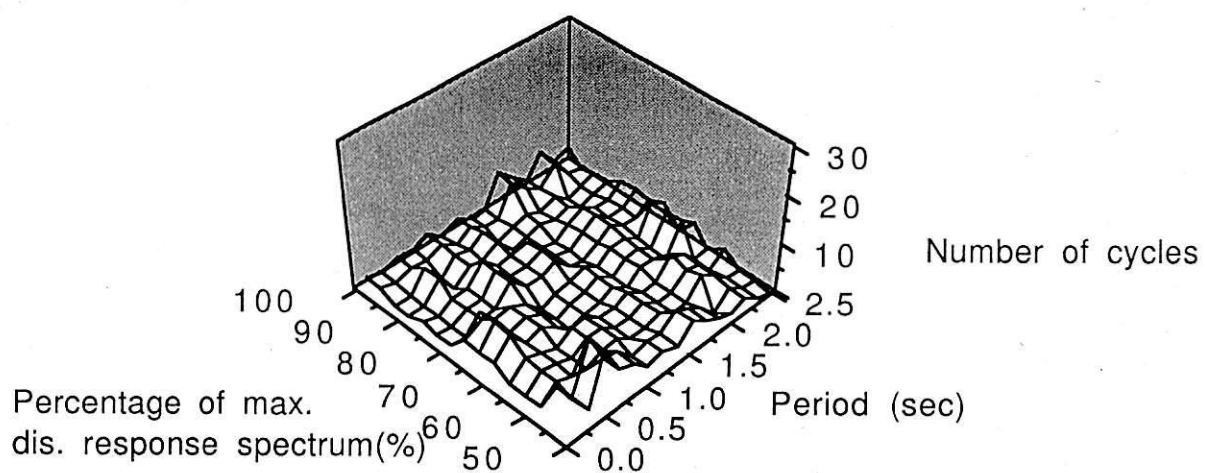
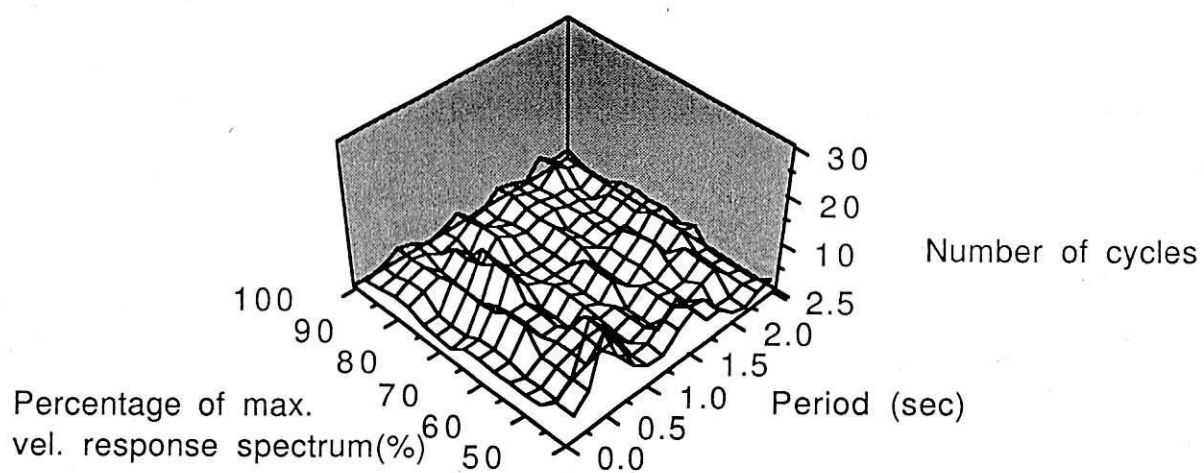
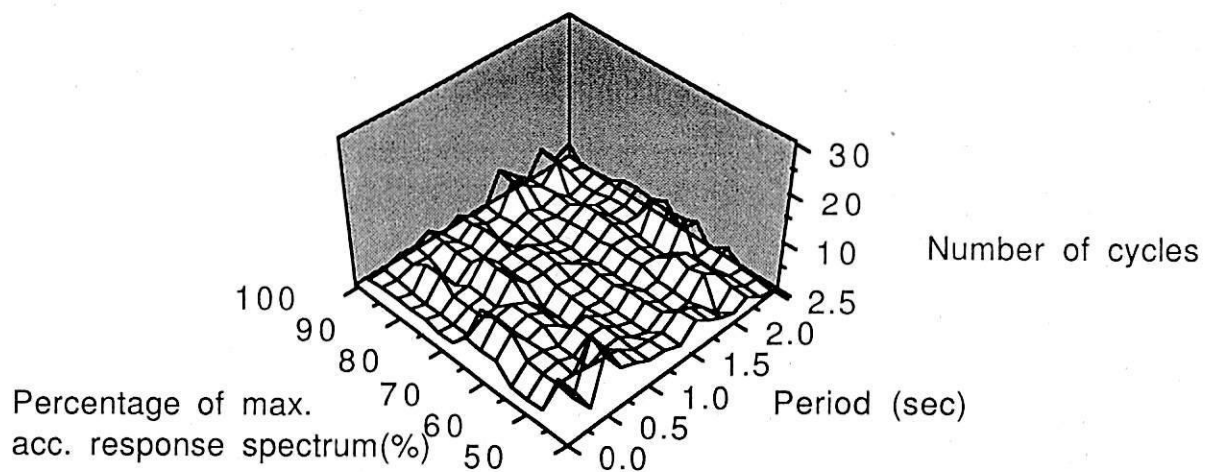


図3-49 疲労応答スペクトル（尼崎市 東西方向）

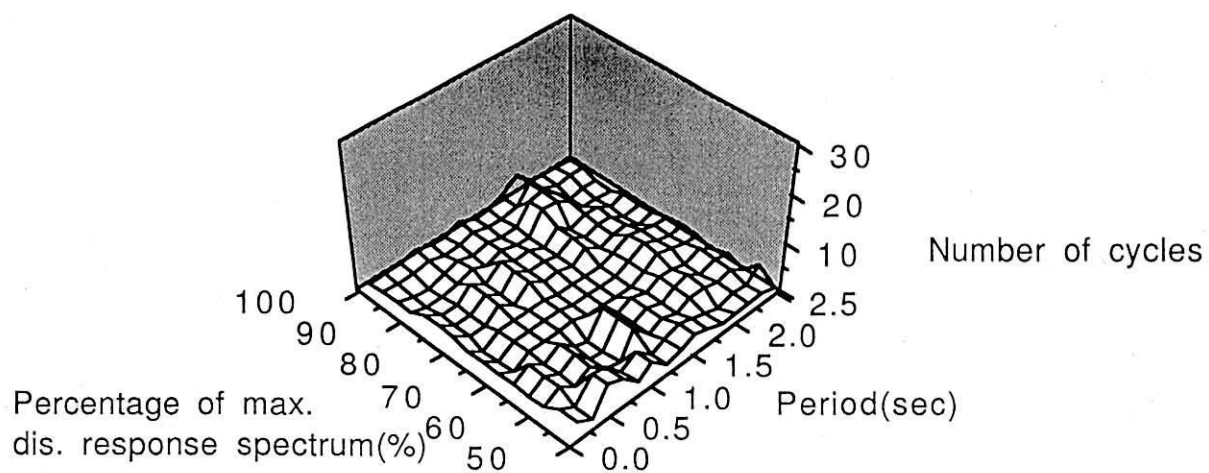
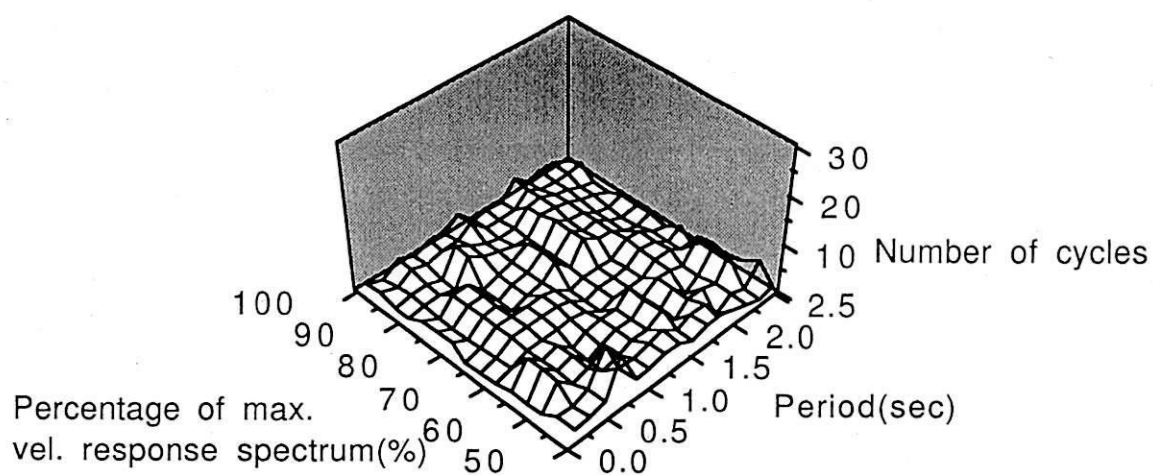
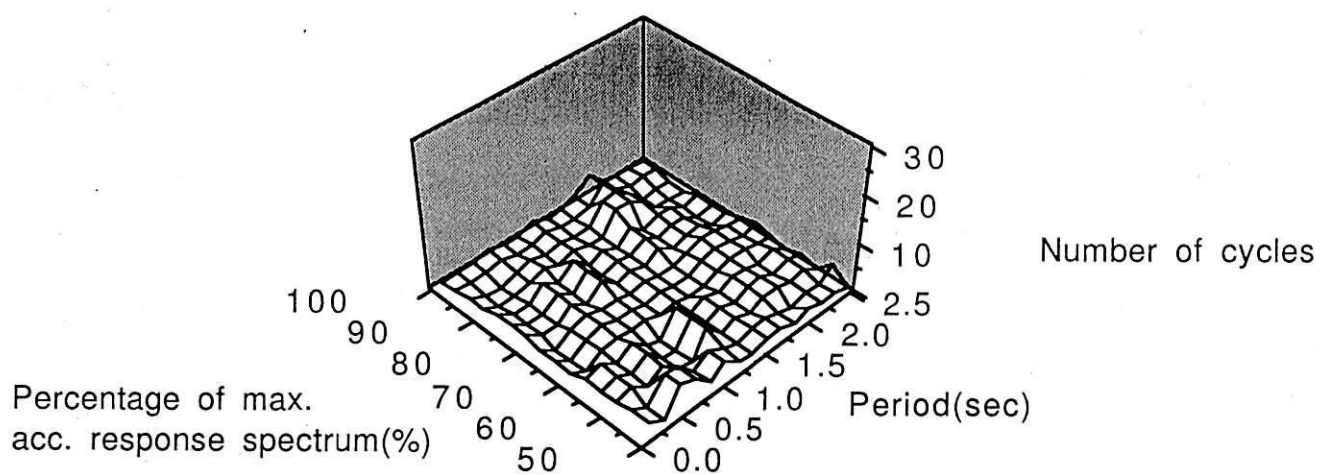


図3-50 疲労応答スペクトル（尼崎市 東西方向）

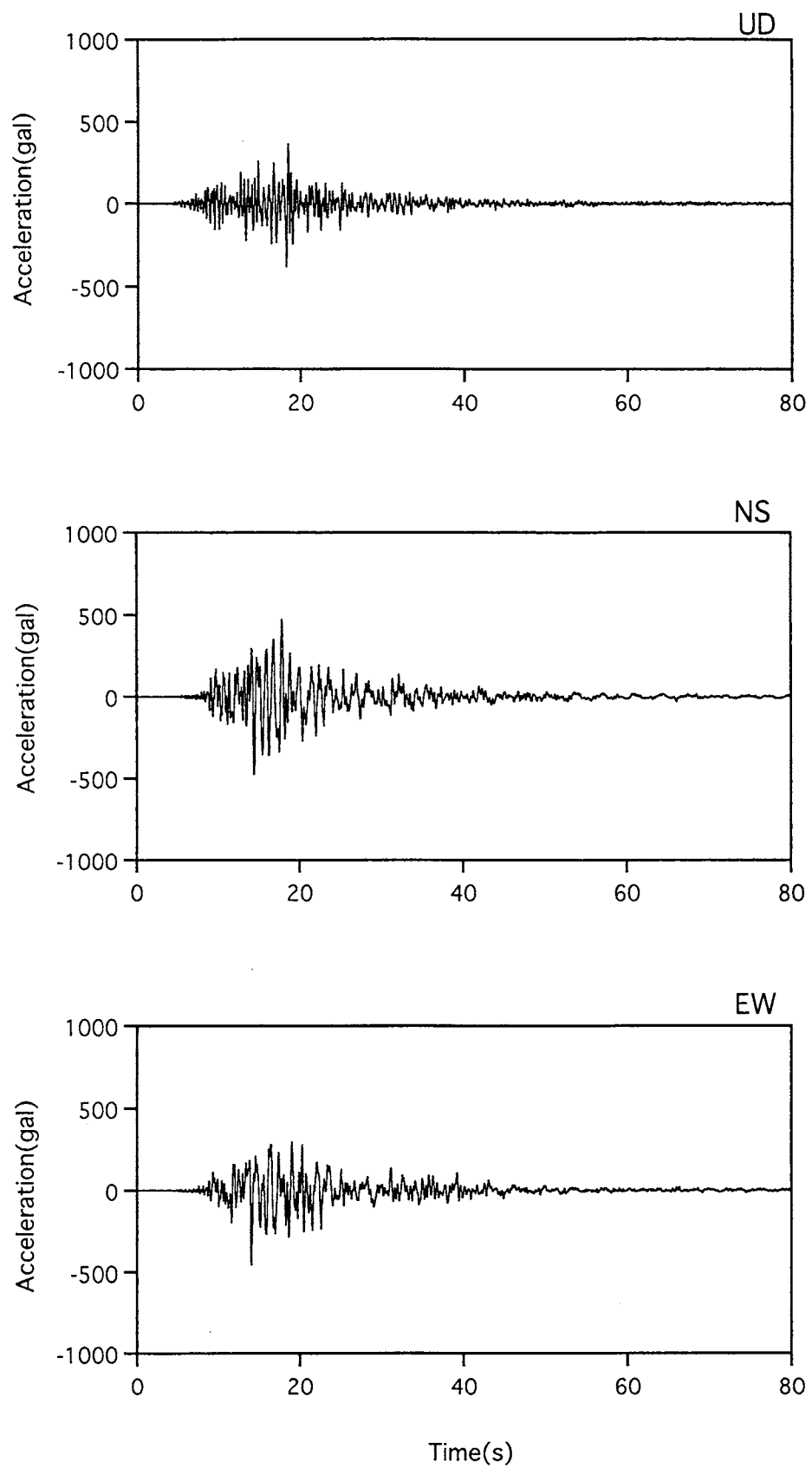


图3-51 加速度波形（明石市）

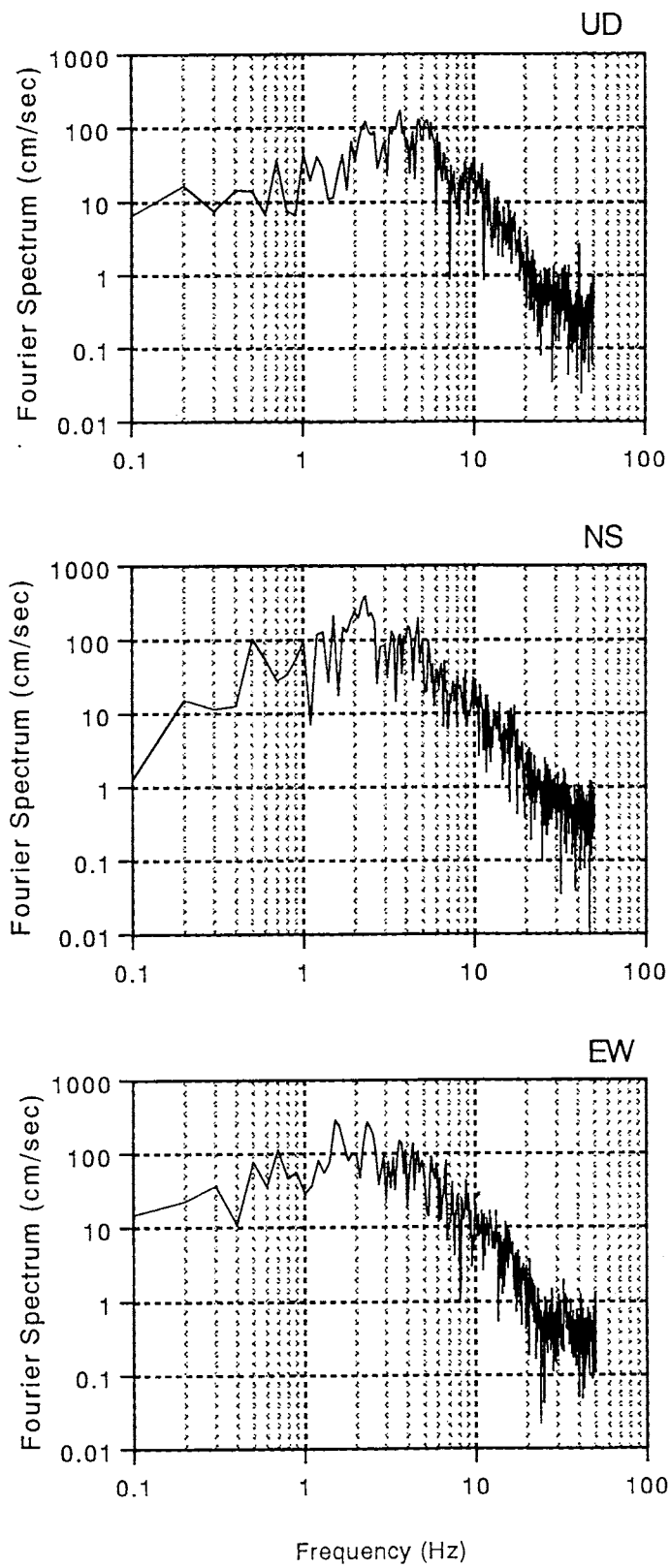


図3-52 加速度フーリエスペクトル（明石市）

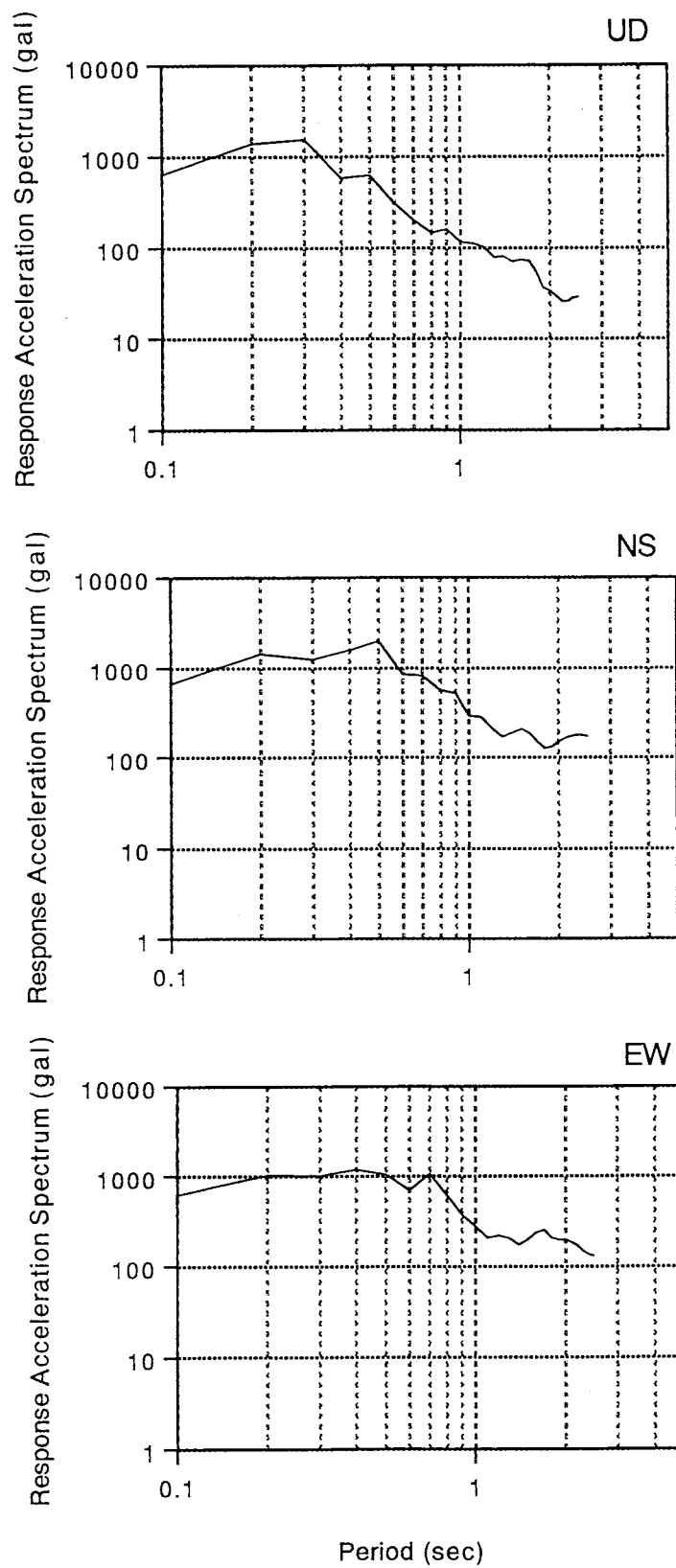


図3-53 加速度応答スペクトル (明石市)

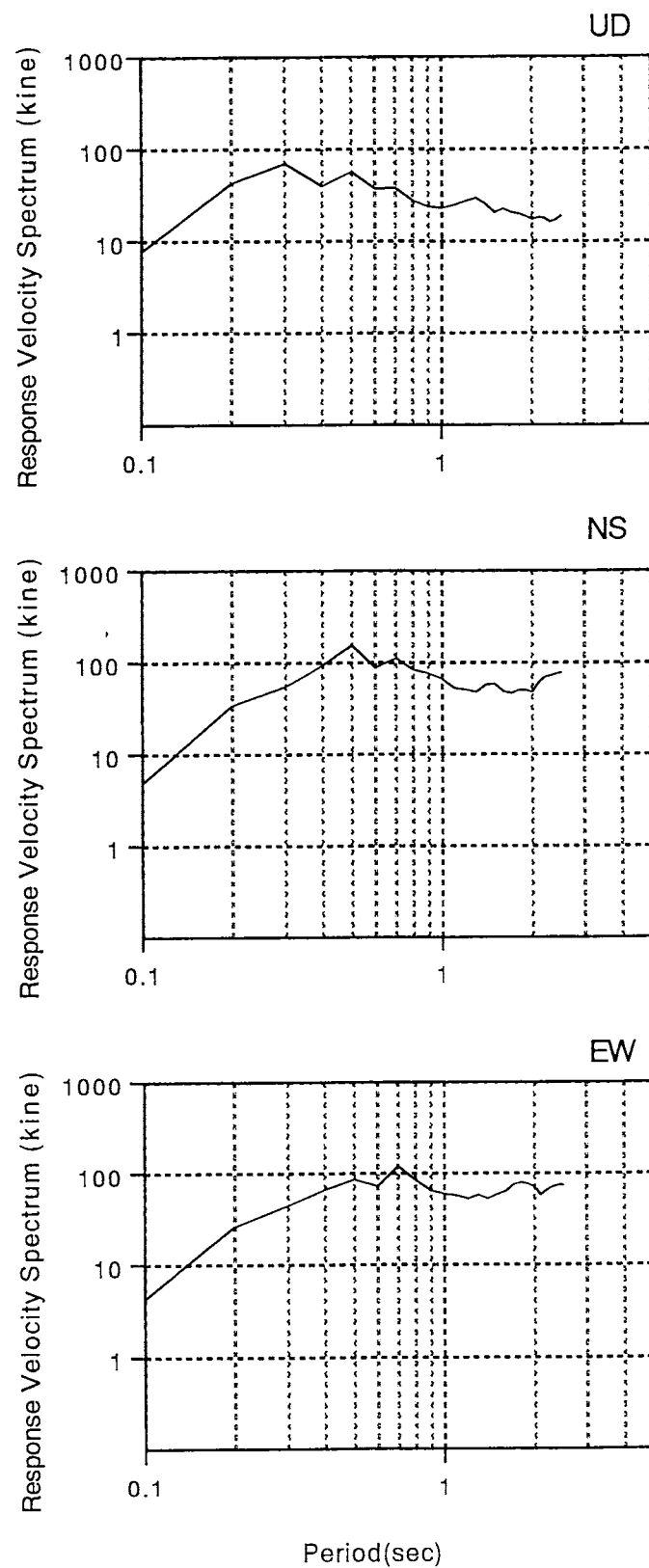


図3-54 速度応答スペクトル（明石市）

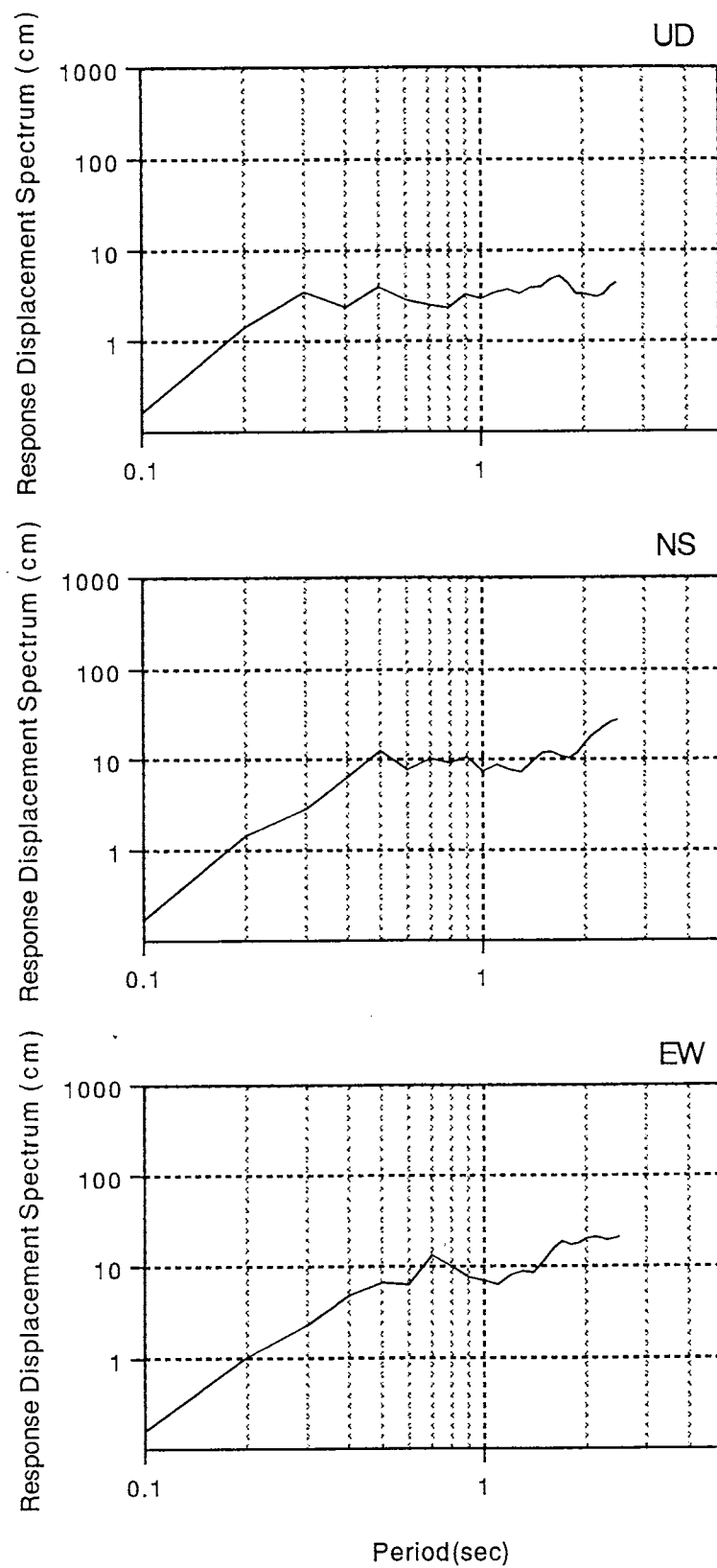


図3-55 変位応答スペクトル (明石市)

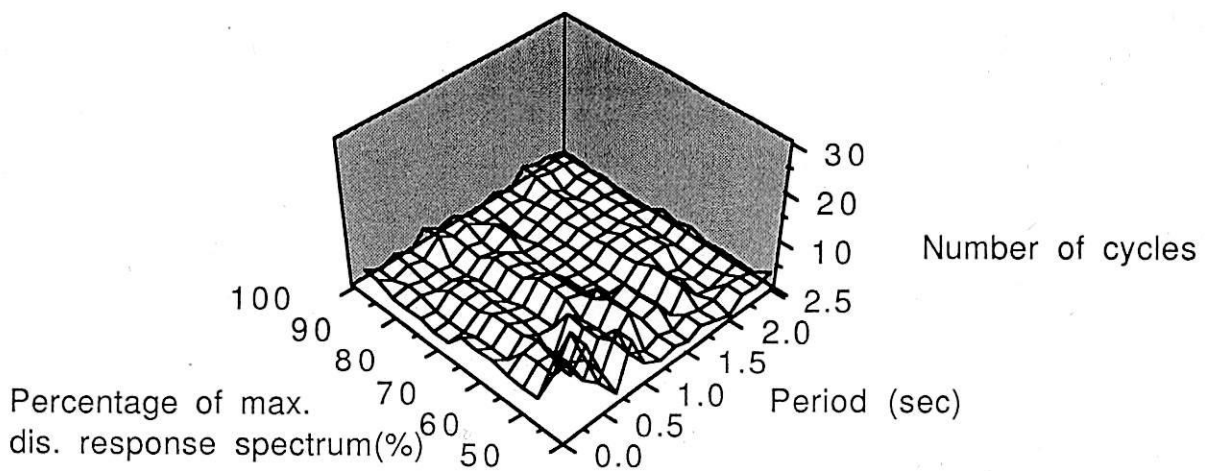
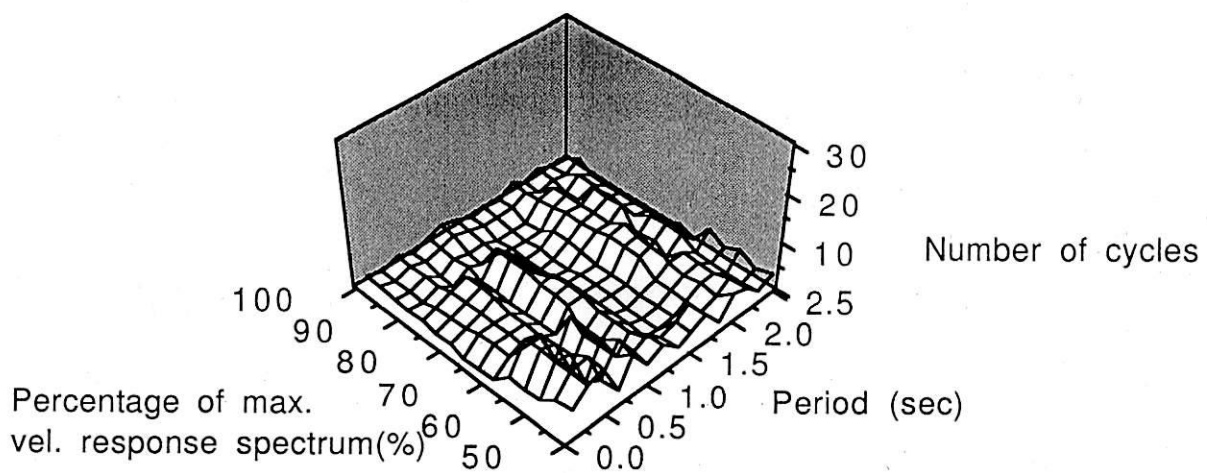
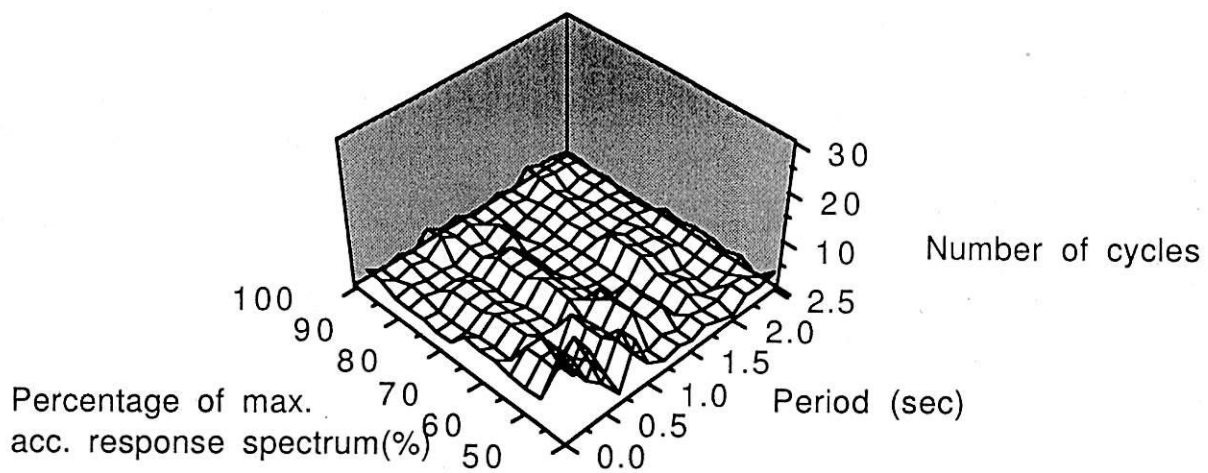


図3-56 疲労応答スペクトル（明石市 上下方向）

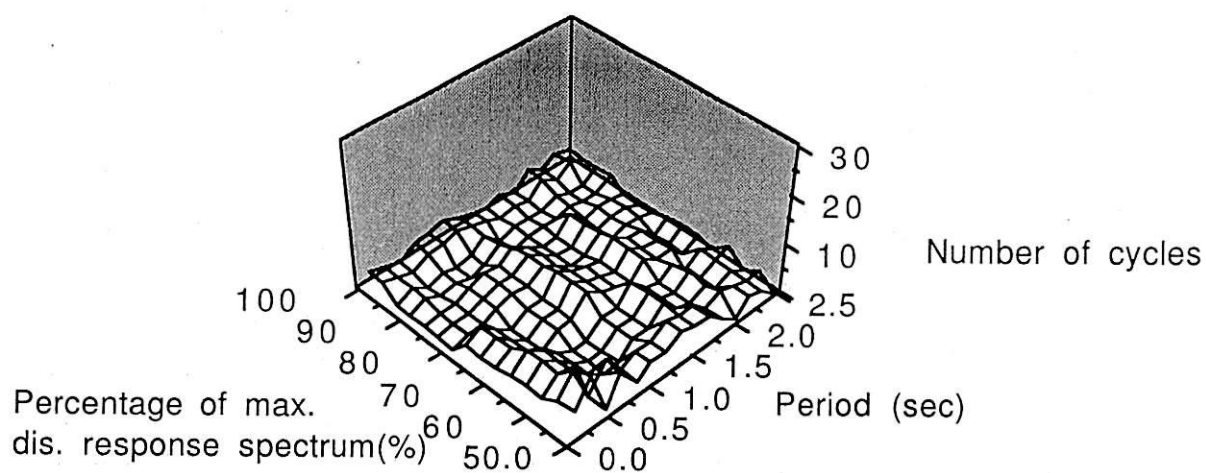
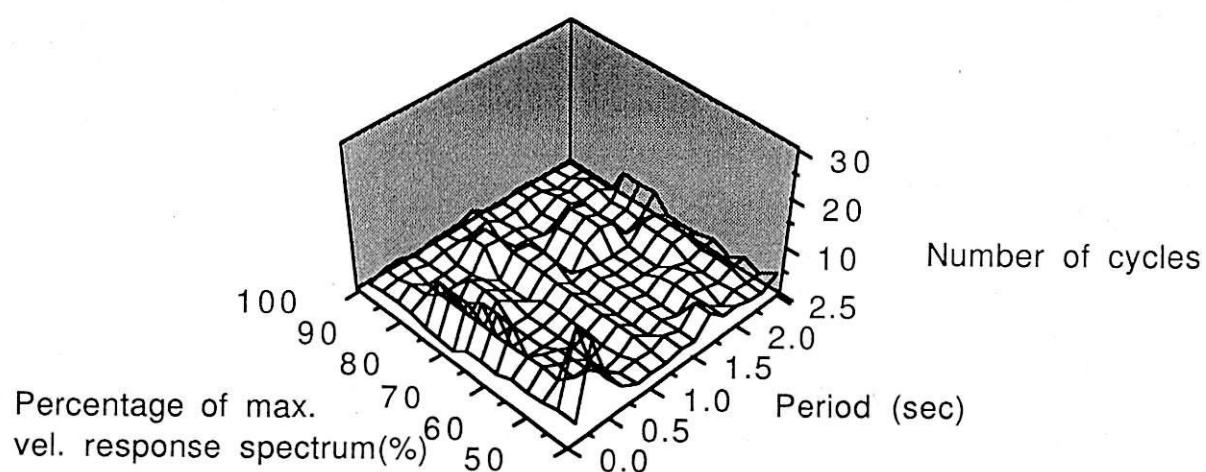
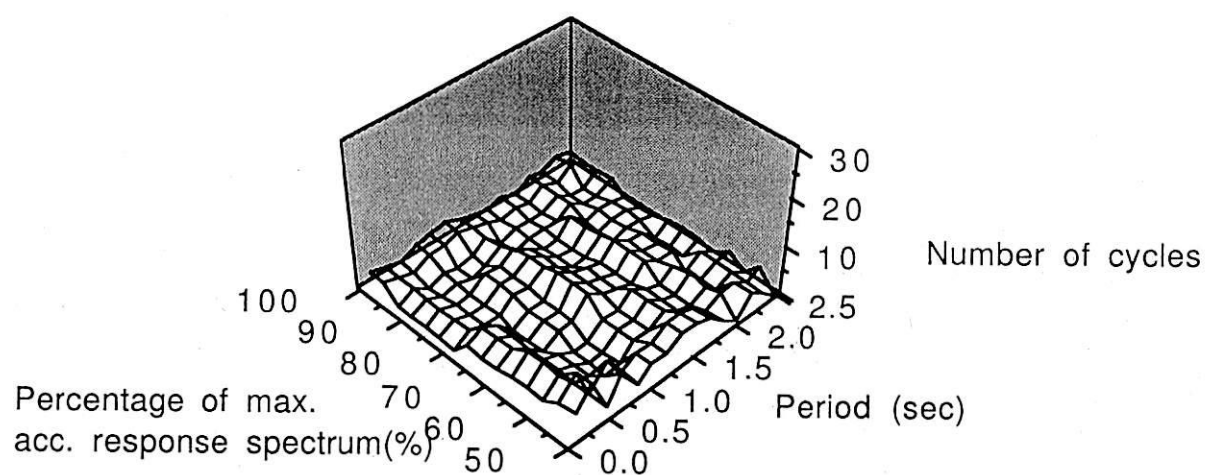


図3-57 疲労応答スペクトル (明石市 南北方向)

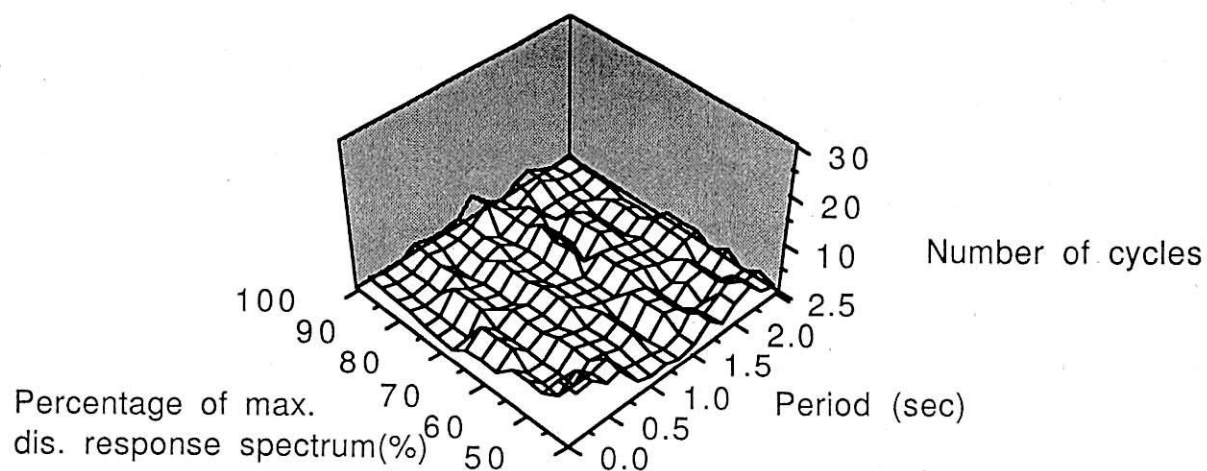
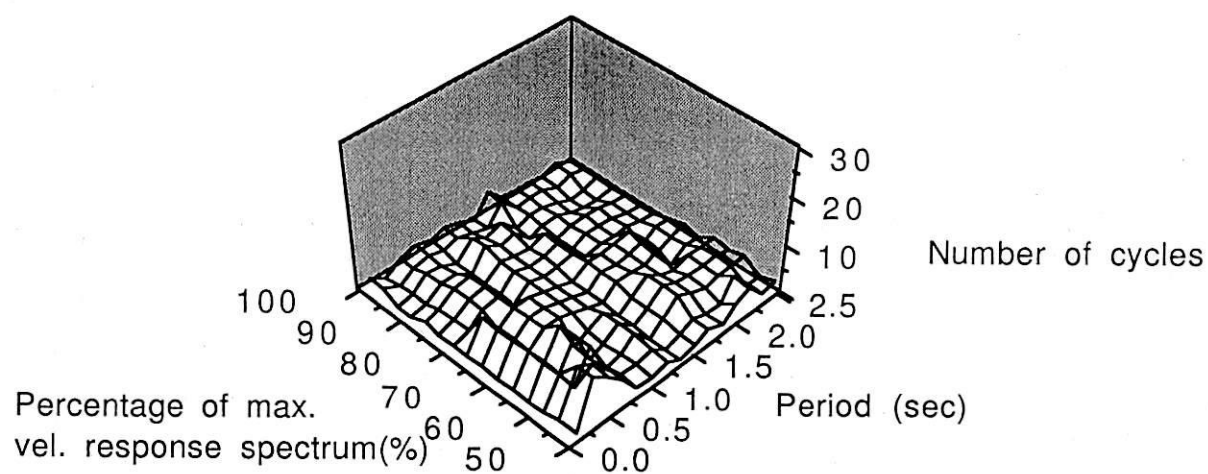
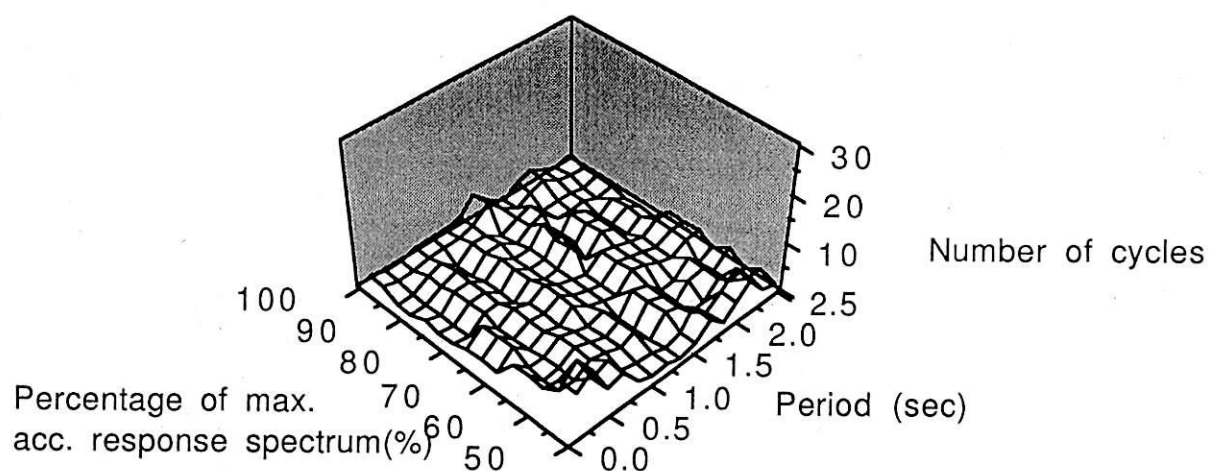


図3-58 疲労応答スペクトル（明石市 東西方向）

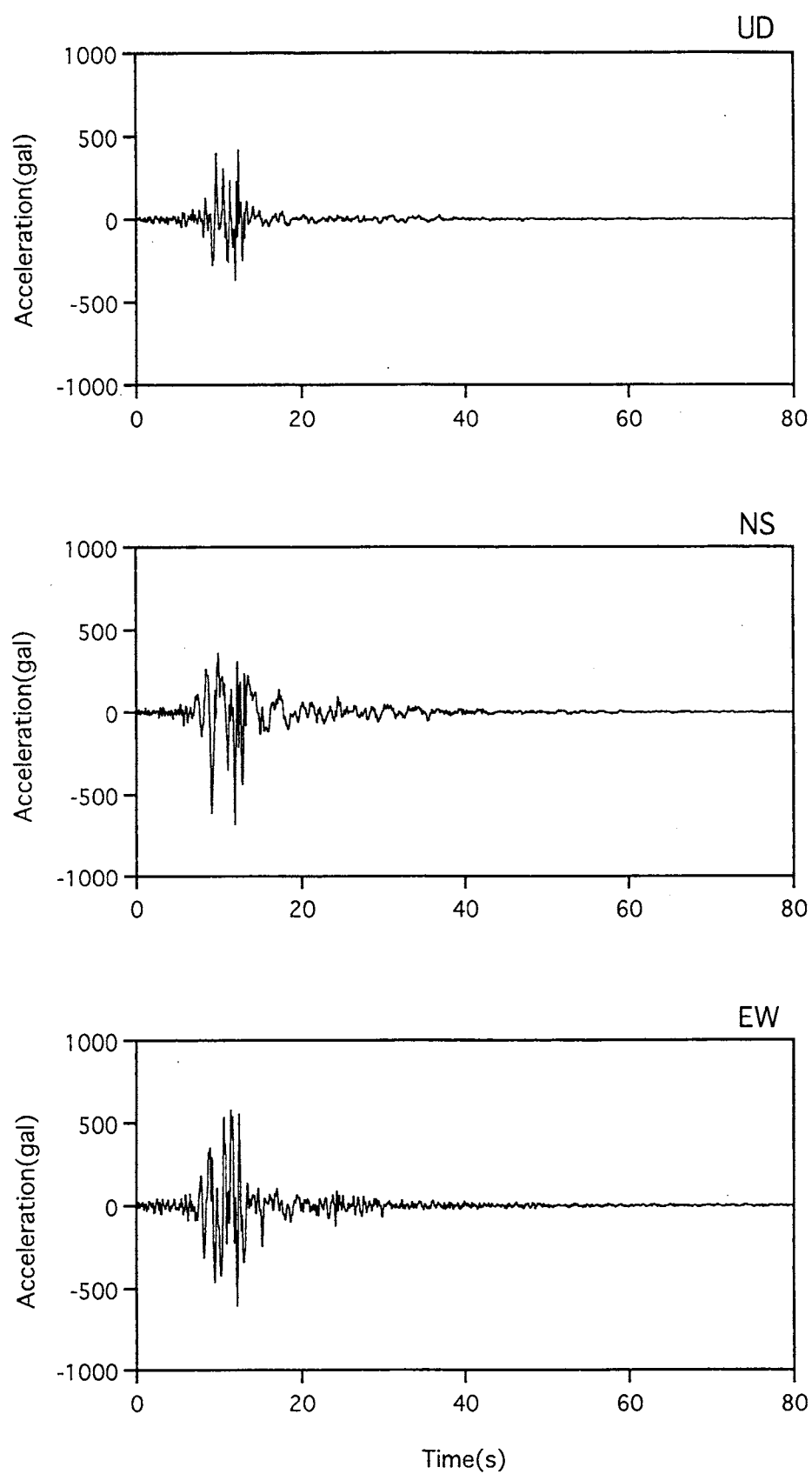


图3-59 加速度波形（宝塚市）

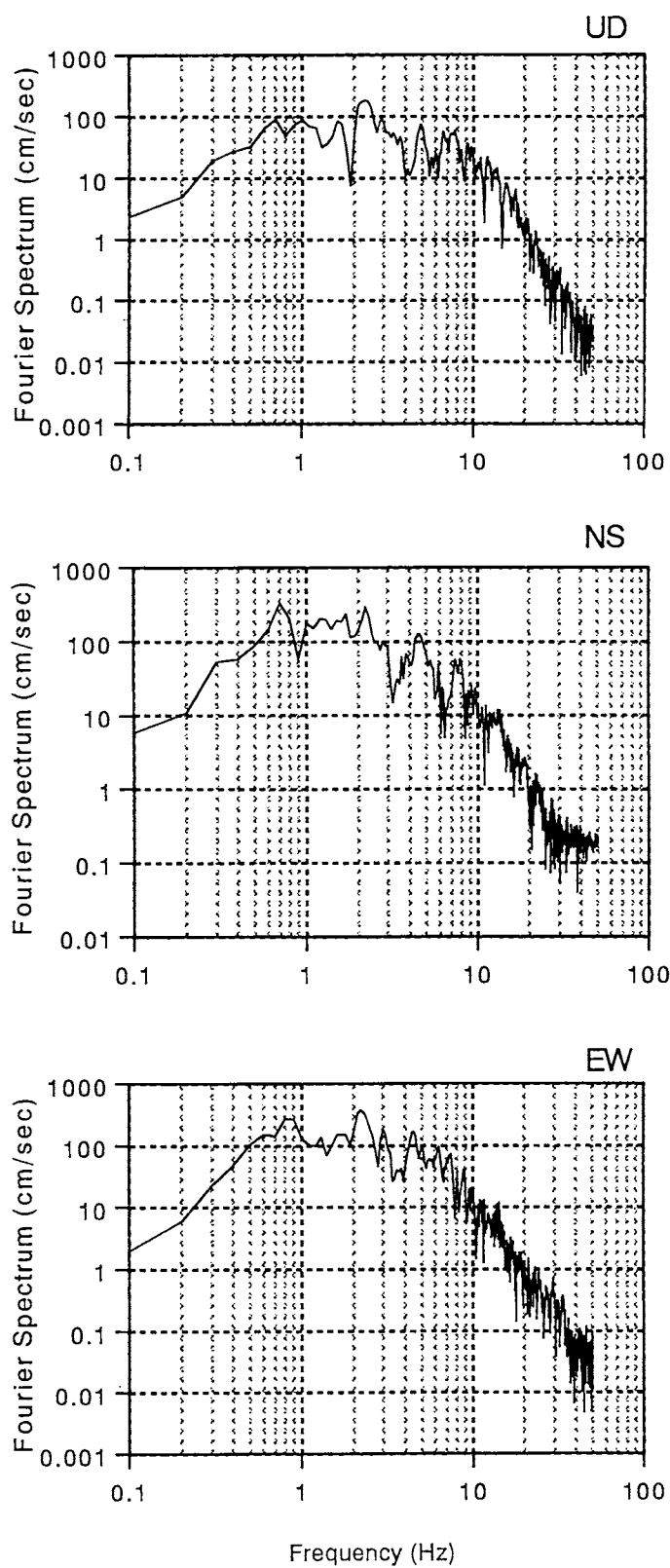


図3-60 加速度フーリエスペクトル（宝塚市）

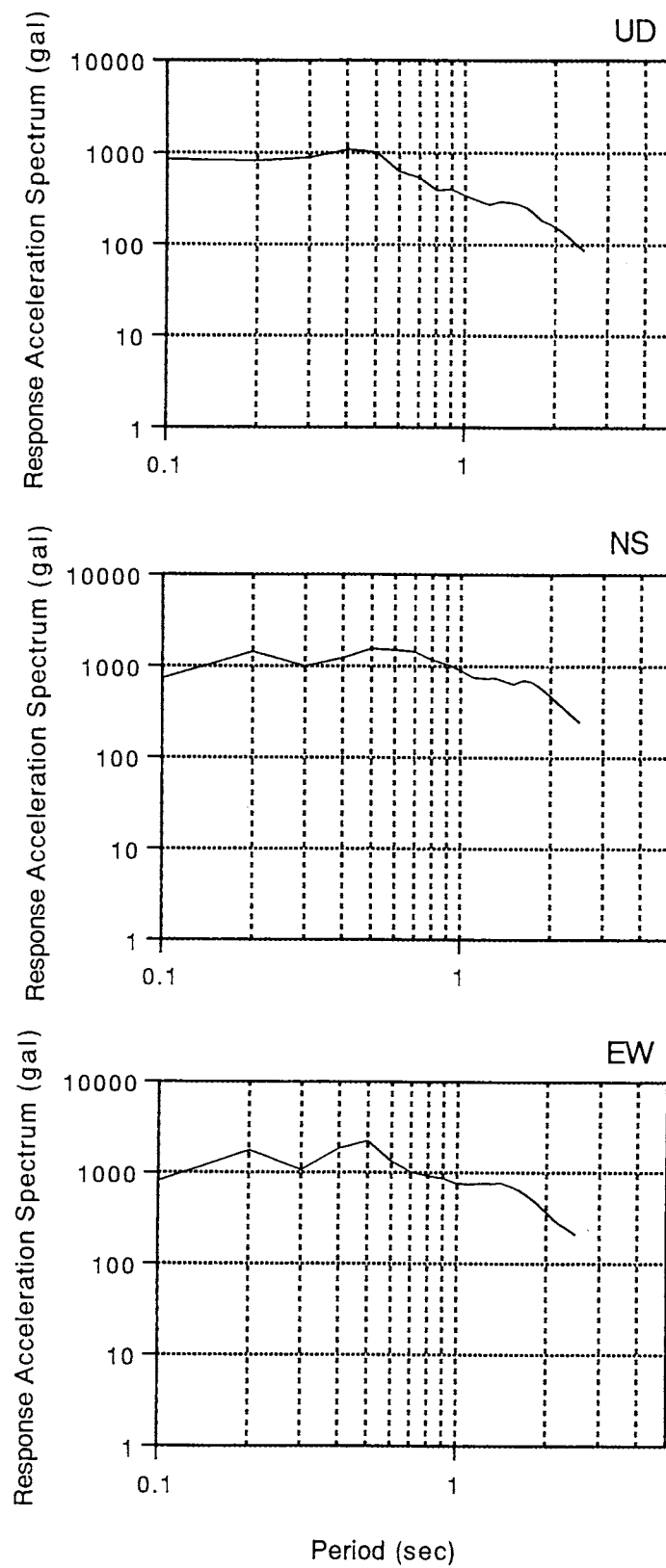


図3-61 加速度応答スペクトル（宝塚市）

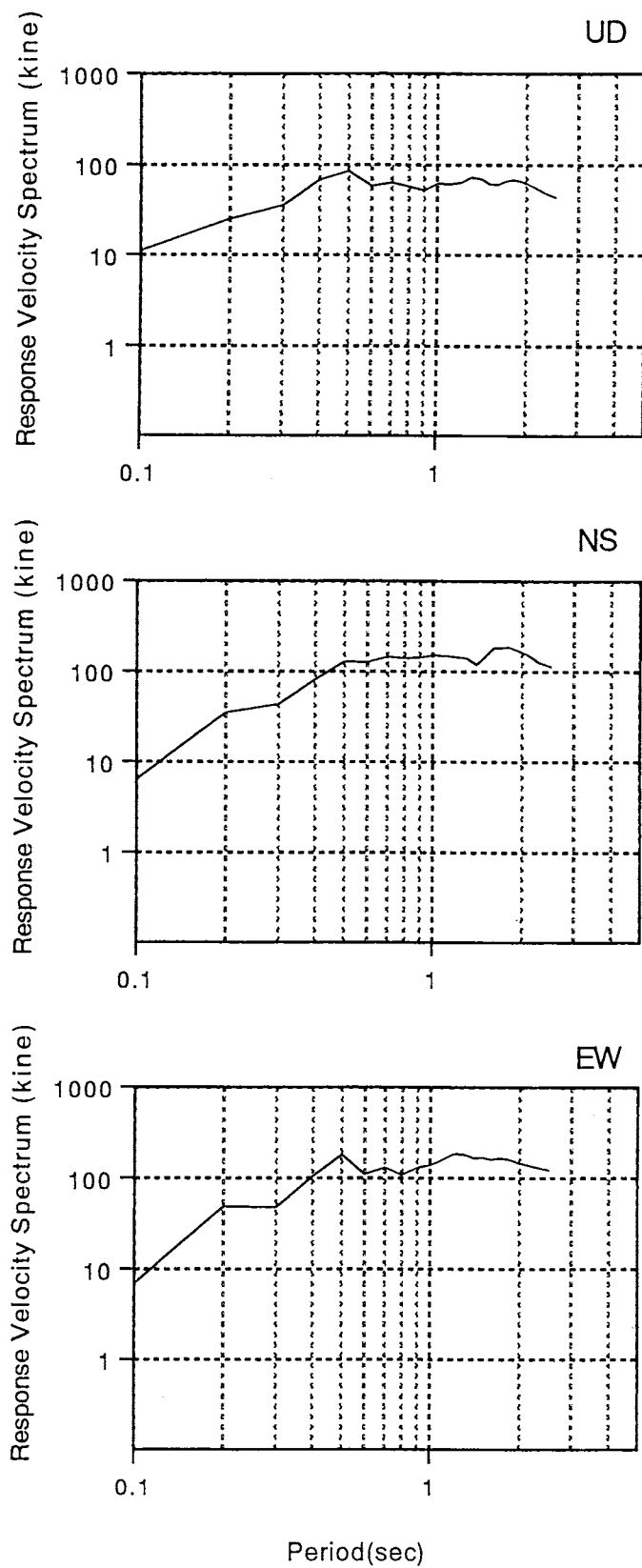


図3-62 速度応答スペクトル（宝塚市）

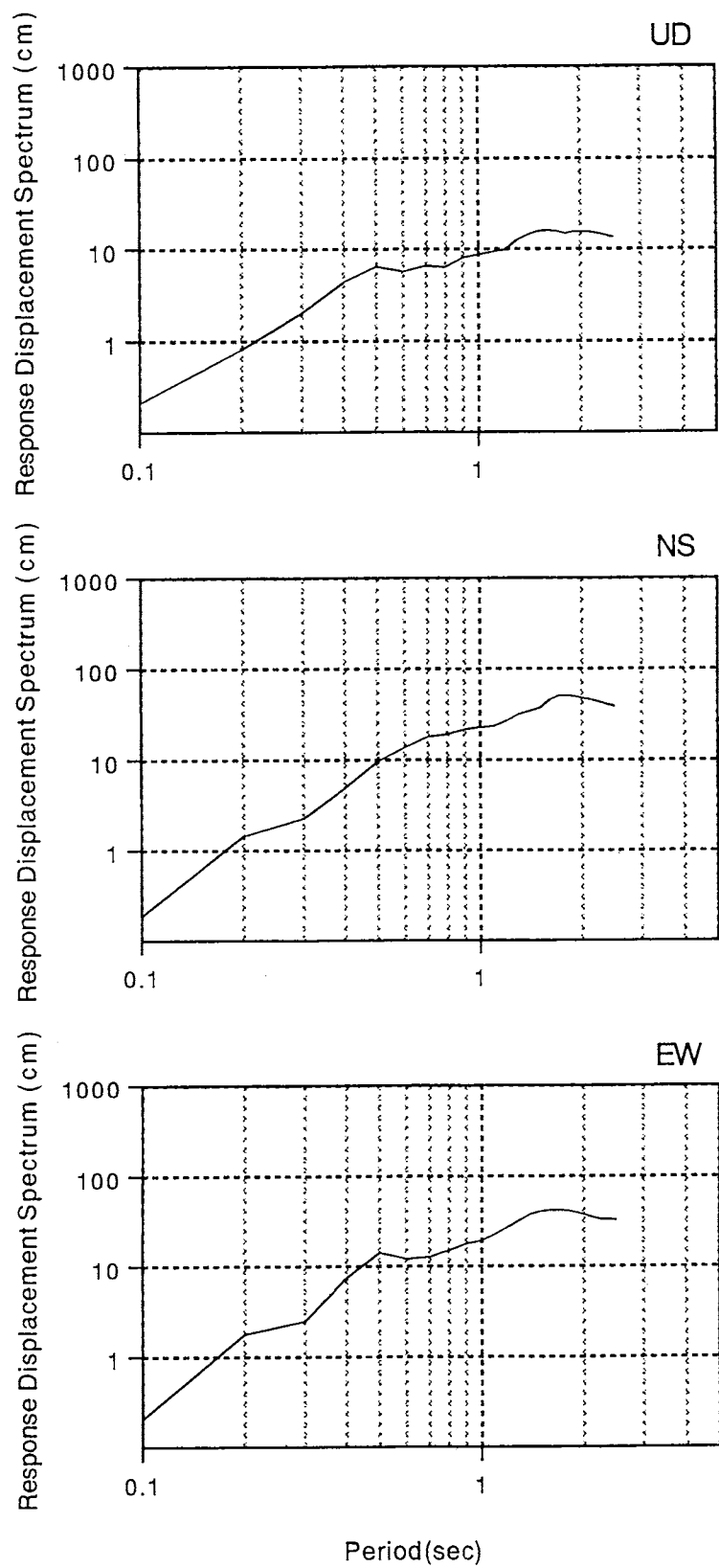


図3-63 変位応答スペクトル（宝塚市）

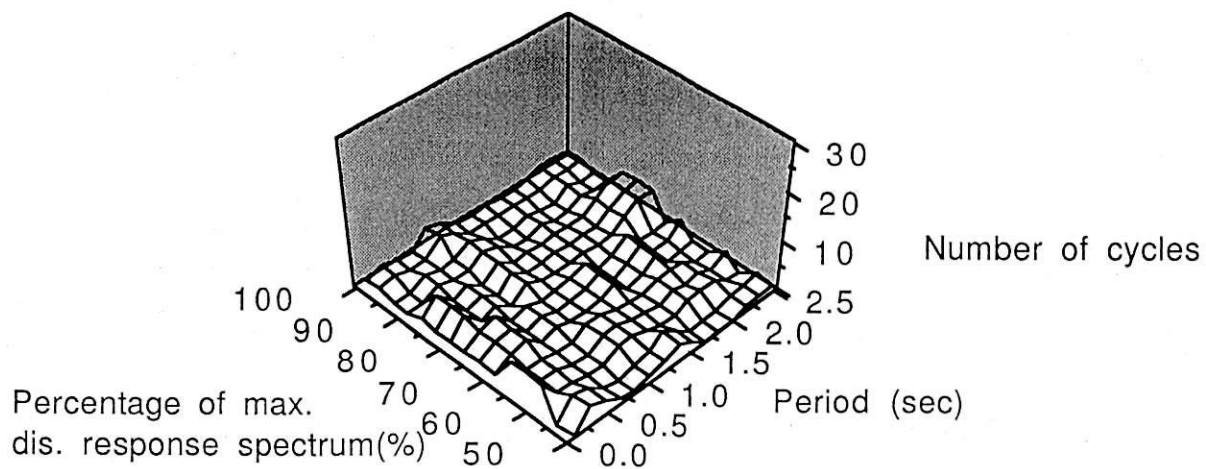
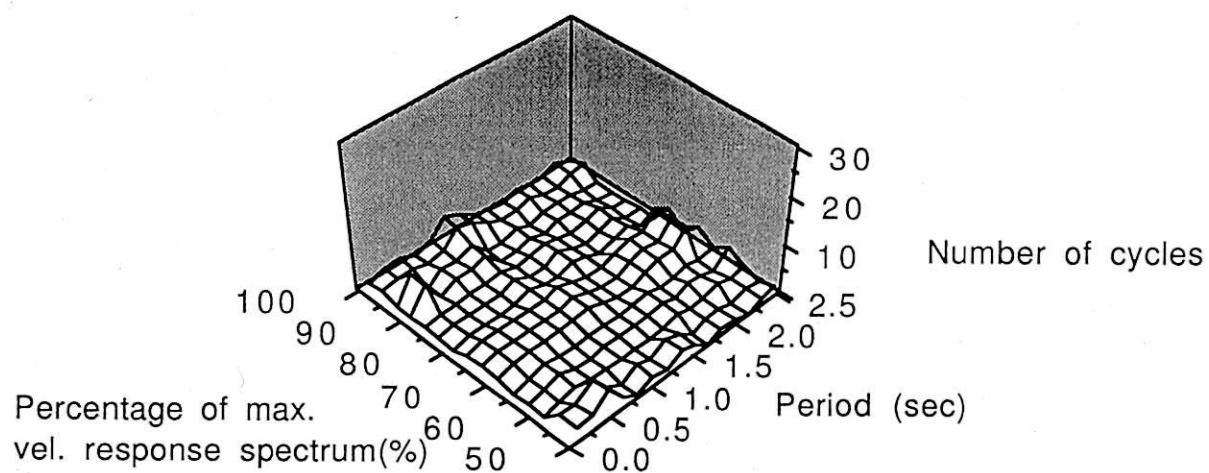
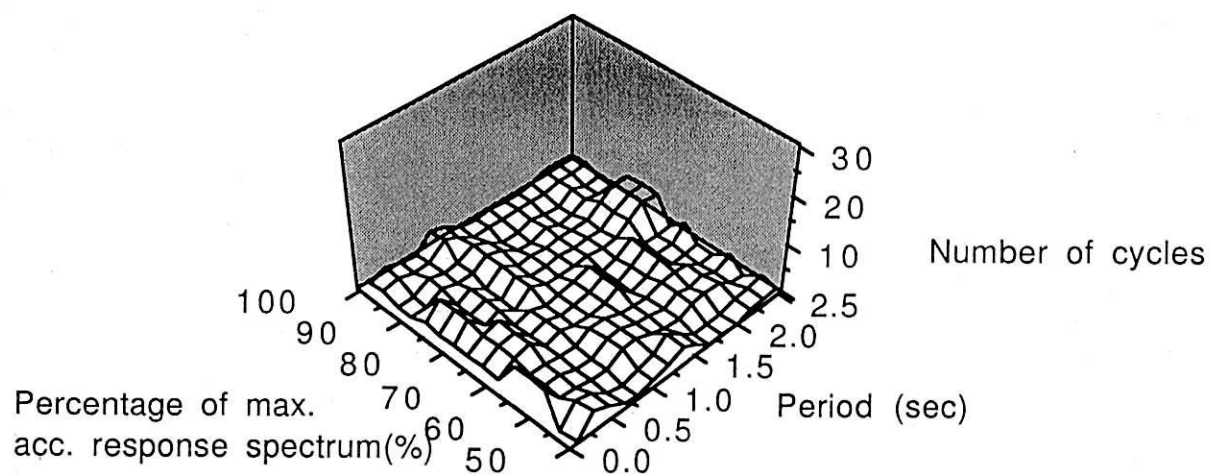


図3-64 疲労応答スペクトル (宝塚市 上下方向)

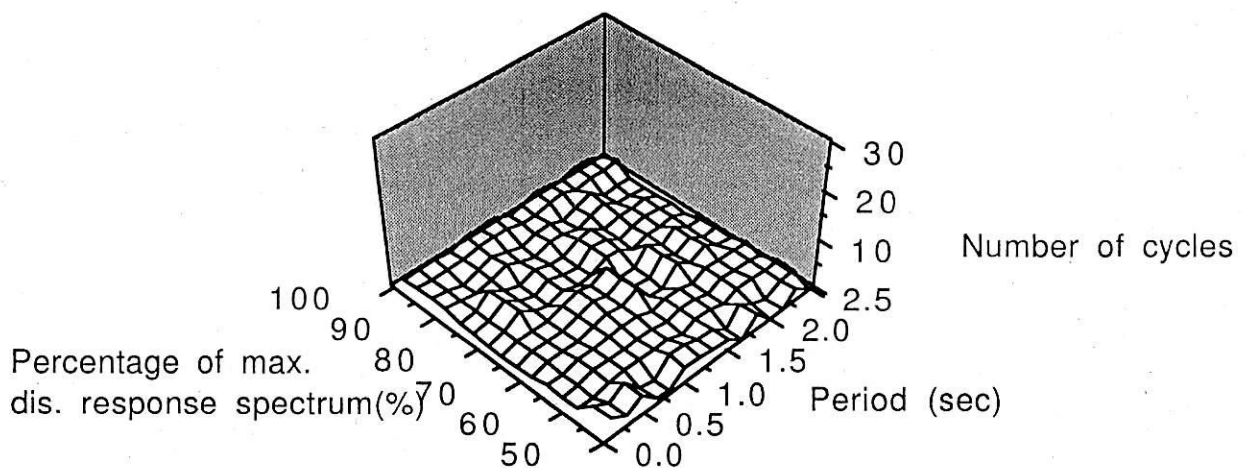
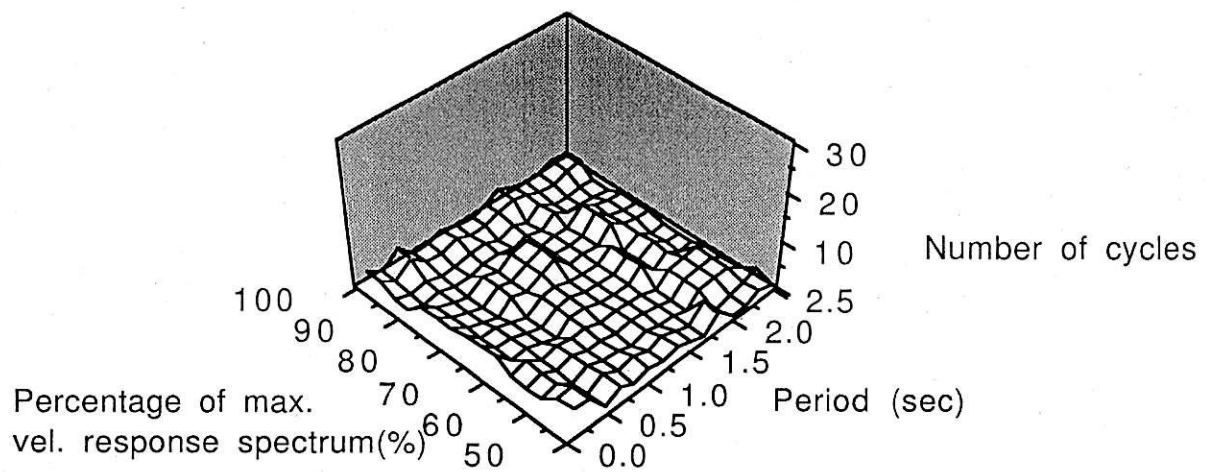
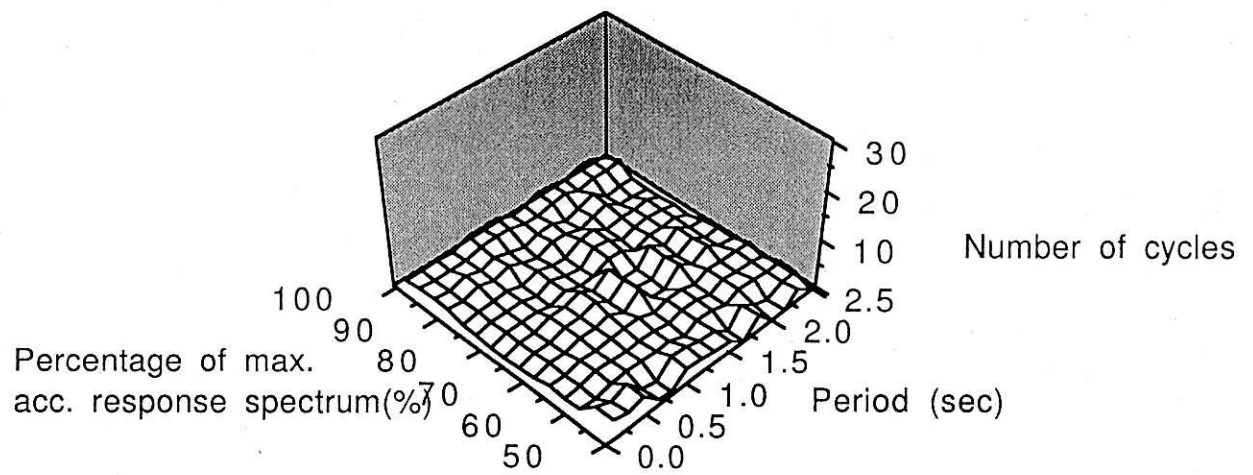


図3-65 疲労応答スペクトル (宝塚市 南北方向)

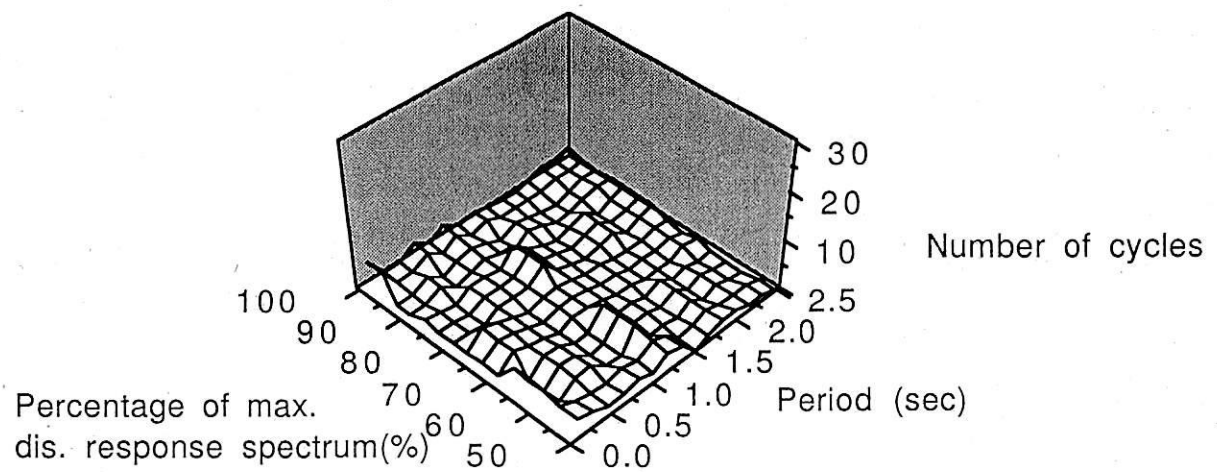
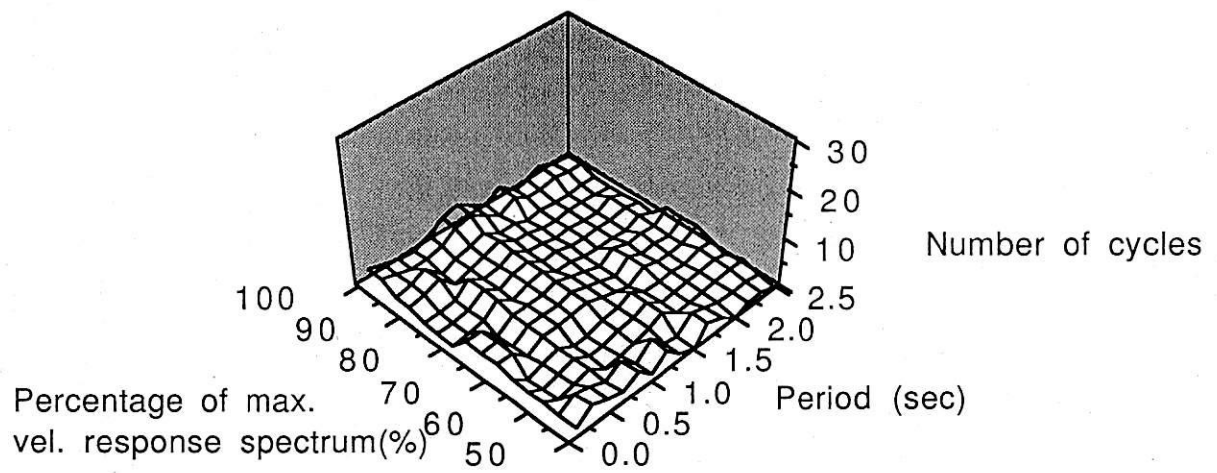
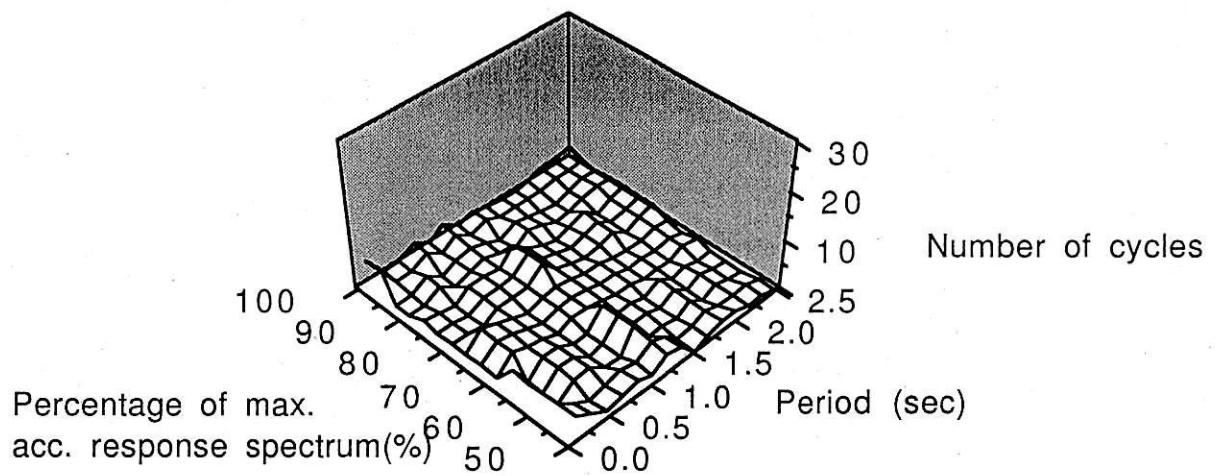


図3-66 疲労応答スペクトル（宝塚市 東西方向）

第4章 構造物被害と疲労応答スペクトルとの関係

4-1 概説

最大値付近での応答の繰り返しを考慮した、疲労応答スペクトルと構造物被害との関係を考察する。本研究では、前章で取り上げた1993年釧路沖地震、1993年能登半島沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震、1995年兵庫県南部地震の5つの被害地震における、それぞれ釧路市、珠洲市、根室市、八戸市、神戸市のFSI値と木造建物被害、水道管被害との相関について検討する。なお、1995年兵庫県南部地震においては神戸市だけではなく、尼崎市、宝塚市、明石市においても強震記録と各種の被害データが得られているので、それらについても検討することにする。

4-2 木造家屋被害と疲労応答スペクトルとの関係

図4-1に最大加速度と木造建物全壊率との関係を示す。各点はややばらついており、図中の直線との相関係数は0.56であった。八戸市と釧路市のデータが他の6点と離れており、この2点が相関係数を下げていると考えられる。この2点はいずれも木造建物全壊率が小さいデータである。八戸市のデータは1994年三陸はるか沖地震のものであるが、この地震では最大加速度は大きかったものの、主要動の継続時間が2～3秒と短かったため、このことが比較的被害の少なかった理由であると考えられる。すなわち、最大加速度だけでは、地震動の継続時間や、繰り返しによる疲労の概念を表わすことができず、そのため八戸市のデータが木造建物全壊率をうまく評価することができないのではないかと考えられる。このような点が、被害を表す指標として最大加速度を用いる場合、不十分な点であると考えられる。

また、1993年釧路沖地震における釧路市では地震動の継続時間が長く、大きな揺れが継続していたが、木造建物全壊率は小さかった。これは、冬場に起きた地震であったために地盤が凍結して固くなり、被害が比較的少なくなったことや、観測地点が台地の上にあったために地震動の増幅の度合いが他よりも大きく、観測地点の加速度が釧路市の平均的な値より大きく観測されたことなどが考えられる。

図4-2はSI値と木造建物全壊率との関係を示している。全体的にばらつきが少なく、図中の直線との相関係数は0.90と高い値となった。SI値は地震動の繰り返し回数を考慮せず、最大応答のみによって導かれているが、構造物の応答が考慮されているので、図4-1に示した最大加速度との関係よりも相関がよくなったものと考えられる。

つぎに、FSI値と木造建物被害との関係について調べた。図4-3はFSI値（加速度）と木造建物全壊率との関係を表したものである。上図は最大応答の50%以上という

基準値を用いて算出したFSI値を用いた結果であり、ばらつきは小さく、図中の直線との相関係数は0.84と高かった。同図において少し外れている点は、釧路市と兵庫県南部地震における宝塚市のデータである。下図は応答加速度が300galを越える値（基準値）を対象として求めたFSI値による結果である。大きく外れている点は釧路市のデータであり、このデータのために図中の直線との相関係数は0.45と低い値を示している。しかし、釧路市のデータを除外すると、上図の相関係数は0.88、下図の相関係数は0.97となり、それぞれ相関が高くなる。前述したように、釧路地方気象台がゆれやすい台地上に位置しており、釧路市における平均的な地震動よりもかなり大きな地震動が観測されたため、このようにFSI値との相関も悪いものと考えられる。

上図と下図を比べると、上図では他のデータの傾向から外れていた宝塚のデータが、下図では外れずに他のデータの傾向と調和的になっている。兵庫県南部地震のように大きな地震動では、最大応答の50%以下の応答加速度といっても1,000gal程度にもなる。上図を描くときに行っているように基準値を最大応答の50%にすると、これ以下のデータを基準値以下ということでFSI値の評価に考慮しないことになるので、このようにしてFSI値を求めると被害を小さく見積もってしまう可能性が高い。したがって、このような場合においては基準値を最大応答の50%にするのではなく、下図を描くときに行ったように基準値を300galとする方が良いと考えられる。このように考えると、上図においては宝塚市のデータが他のデータの傾向から外れているというよりは、宝塚市よりも木造家屋全壊率が大きい明石市と神戸市（いずれも兵庫県南部地震）のデータにおいて、基準値である最大応答の50%以下の大きな応答加速度が評価されていないため、FSI値が小さく評価されたものと考えられる。したがって、下図においては釧路市を除いて調和的な傾向を示している。

図4-4ではFSI値（速度）と木造建物全壊率との関係について調べた。上図の基準値を最大応答の50%としたFSI値の相関係数は0.67、下図の基準値を40cm/secとしたFSI値の相関係数は0.75となり、どちらもややばらついた結果となった。兵庫県南部地震の神戸市、宝塚市、明石市の3点以外のFSI値はほとんどゼロに近い値となっている。下図では、基準値を応答速度の40cm/secとしてFSI値を求めているが、この40cm/secという数値には理論的根拠が乏しいので、今後は木造建物の破壊と応答速度との関係についてさらに考察を加え、より適当な基準値を定める必要がある。

図4-5ではFSI値（変位）と木造建物全壊率との関係について調べた。上図の基準値を最大応答の50%以上としたFSI値の相関係数は0.39、下図の基準値を20cmとしたFSI値の相関係数は0.35となり、どちらもかなりばらついた結果となった。ここでも、基準値の設定については今後の課題である。FSI値（変位）と木造建物全壊率との相関はかなり低いと考えられる。

以上の結果をまとめると、以下のようなことがわかった。FSI値（変位）、FSI値（速度）、FSI値（加速度）の順で木造建物全壊率との相関が高くなっている。また、

基準値を最大応答の50%としたFSI値よりも、応答値のある絶対値を基準値に設定した方が、被害をよく説明できうるものと考えられる。さらに、FSI値（加速度）はSI値よりも木造建物全壊率とよい相関を示した。

4-3 水道管路被害と疲労応答スペクトルとの関係

まず、図4-6に最大加速度と水道管被害率との関係を示す。図中の直線との相関係数は0.1であり、かなり低い値であった。最大加速度が800gal前後であってもほとんど被害が見られないような点がいくつかあり、最大加速度と水道管被害率との相関はほとんどないと言える。地中埋設管の被害は地質や地盤振動などの様々な要因によって引き起こされるため、最大加速度で表わすのは困難であると言える。

図4-7はSI値と水道管被害率との関係を表わしたものである。図中の直線との相関係数は0.25と低い値を示した。SI値は最大応答が考慮されているので最大加速度よりは相関が高くなっているが、疲労破壊の概念が含まれていないので、相関が低くなったものと考えられる。

図4-8はFSI値（加速度）と水道管被害率との関係を表わしたものである。上図は基準値を最大応答の50%としたものであり、下図は基準値を設けずに応答値を全て用いてFSI値を求めたものである。すなわち、基準値を最大応答の0%としたものである。上水道管などの地中構造物については、地上構造物と異なり基準とする応答の絶対値を設定することが困難であったため、ここでは、基準値を応答値のある絶対値に取ることはせずに、全応答値による検討を行った。上図の相関係数は0.40、下図のそれは0.10となった。水道管被害率の小さい地点で、水道管被害率の大きな地点よりもかなり大きなFSI値を示しているケースが多く見られ、FSI値（加速度）と水道管被害率との相関はかなり低いことが見て取れる。

図4-9はFSI値（速度）と水道管被害率との関係を表わしたものである。相関係数は基準値を最大応答の50%とした上図で0.71、基準値を設けずに応答値を全て用いた下図で0.50となった。

図4-9はFSI値（変位）と水道管被害率との関係を表わしたものである。相関係数は基準値を最大応答の50%とした上図で0.89、基準値を設けずに応答値を全て用いた下図で0.82とそれぞれ高い値を示した。

以上の結果より以下のようなことが言える。FSI値（加速度）、FSI値（速度）、FSI値（変位）の順に水道管被害率との相関が高くなる。最大加速度、SI値と水道管被害率との相関はほとんど見られない。また、応答値を全て用いたFSI値は基準値を最大応答の50%としたFSI値よりも相関がかなり低くなっている。これは応答値を全て用いたFSI値では、構造物の破壊に直接寄与しない応答レベルもFSI値の評価に含まれてしまうためであると考えられる。FSI値よりもFSI値（変位）が水道管被害率と

の相関が高くなっており，興味深い．

4－4 結語

本章では，疲労応答スペクトルFSI値（加速度，速度，変位）と構造物（木造建物，水道管）の被害との関係について検討した．また，基準値の異なるFSI値を用いて構造物の被害との関係について調べた．以上の解析により以下のようなことが明らかとなった．

木造建物全壊率と各FSI値との関係は，FSI値（変位），FSI値（速度），FSI値（加速度）という順で相関が高くなった．逆に，水道管被害率と各FSI値との関係は，FSI値（加速度），FSI値（速度），FSI値（変位）の順に相関が高くなった．地上構造物の破壊が加速度の影響を，地中構造物の破壊が変位の影響を受けやすいことが推測できる．

木造建物被害との相関については，最大応答の50%以上という基準よりも，例えば300gal以上といった，応答値のある絶対値以上といった基準値の方が被害との対応が良いようである．最大応答の50%以上という基準では，最大応答が極めて大きい場合には，明らかに被害に影響を与えるような大きな応答であってもFSI値の算定に考慮されない場合があるからであると考えられる．

水道管被害との相関については，最大応答の50%以上という基準によるFSI値の方が，全応答を対象とするFSI値よりも被害との相関が良いようである．全応答を対象とするFSI値は，被害に直接関与しないものまでも評価に含まれることになるからであると考えられる．

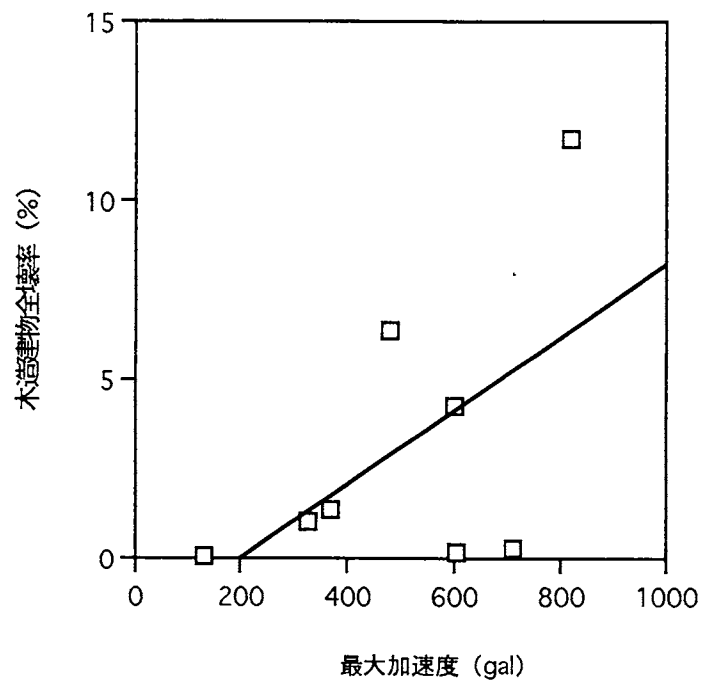


図4-1 最大加速度と木造建物全壊率との関係

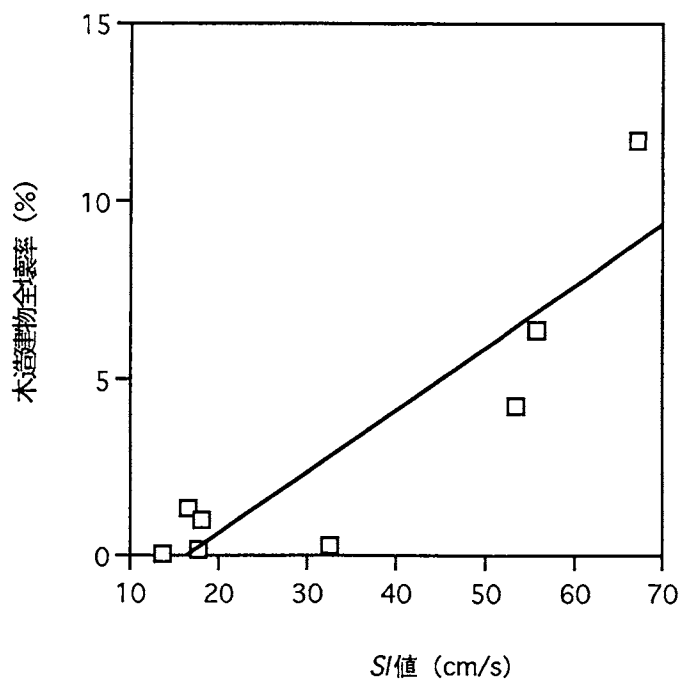


図4-2 SI値と木造建物全壊率との関係

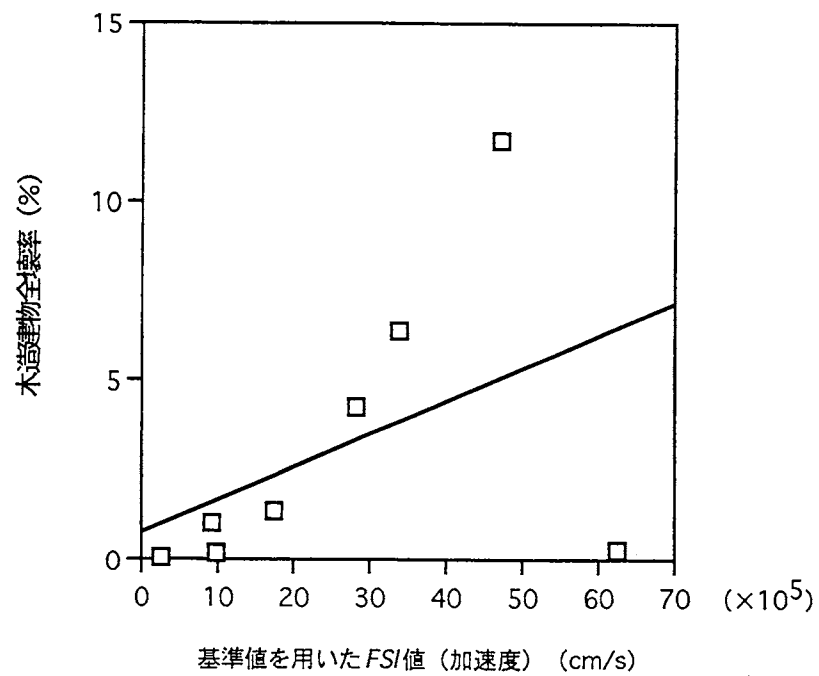
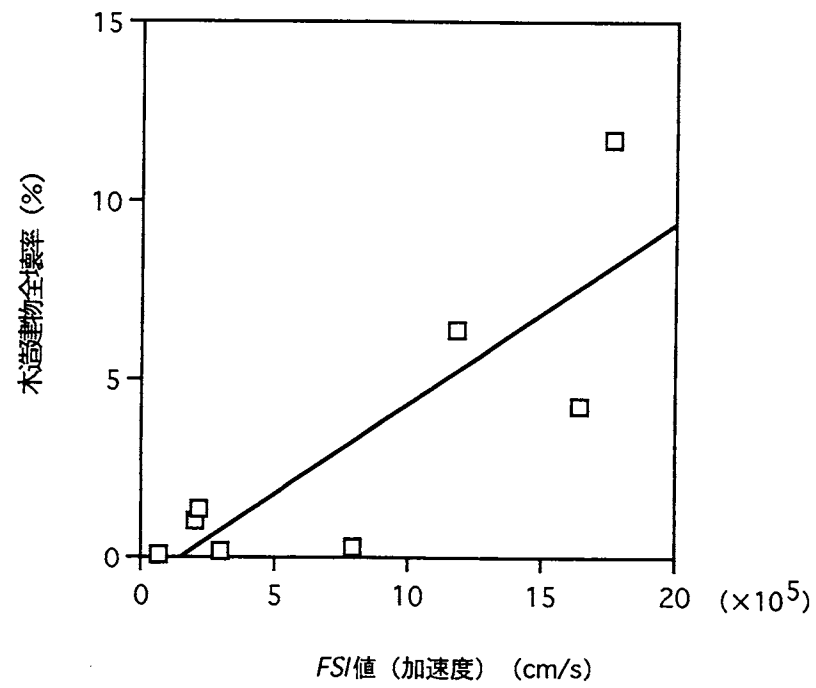


図4-3 FSI値(加速度)と木造建物全壊率との関係

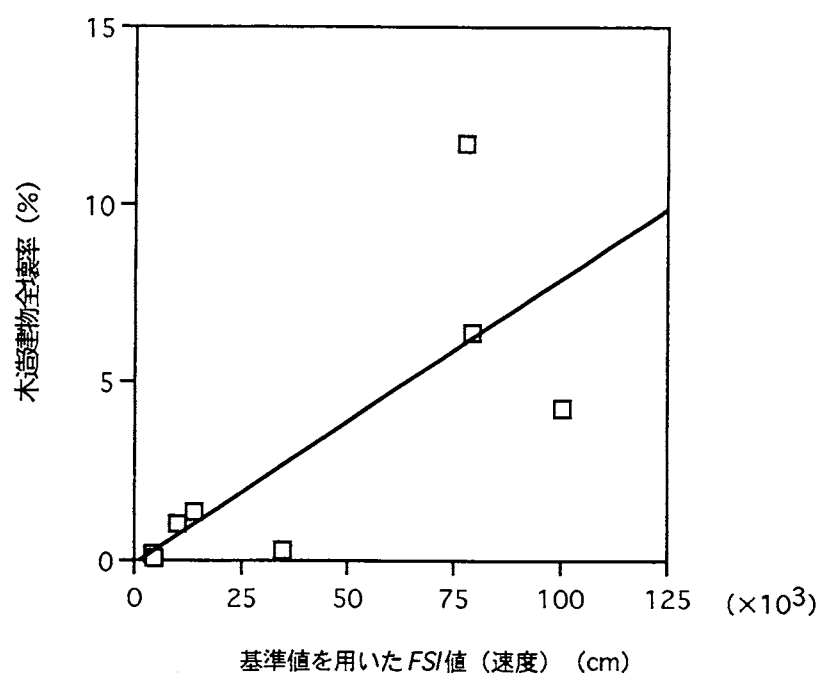
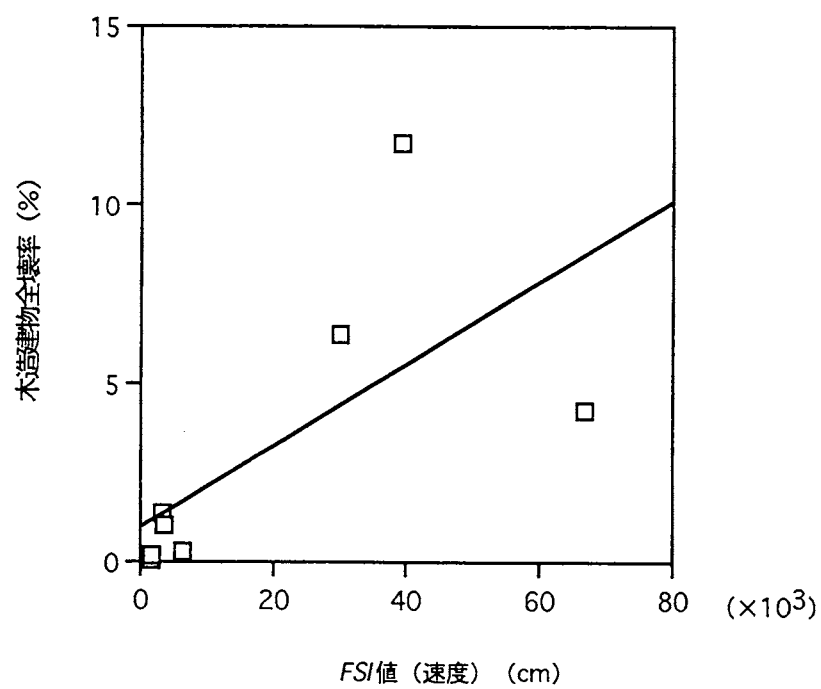


図4-4 FSI 値 (速度) と木造建物全壊率との関係

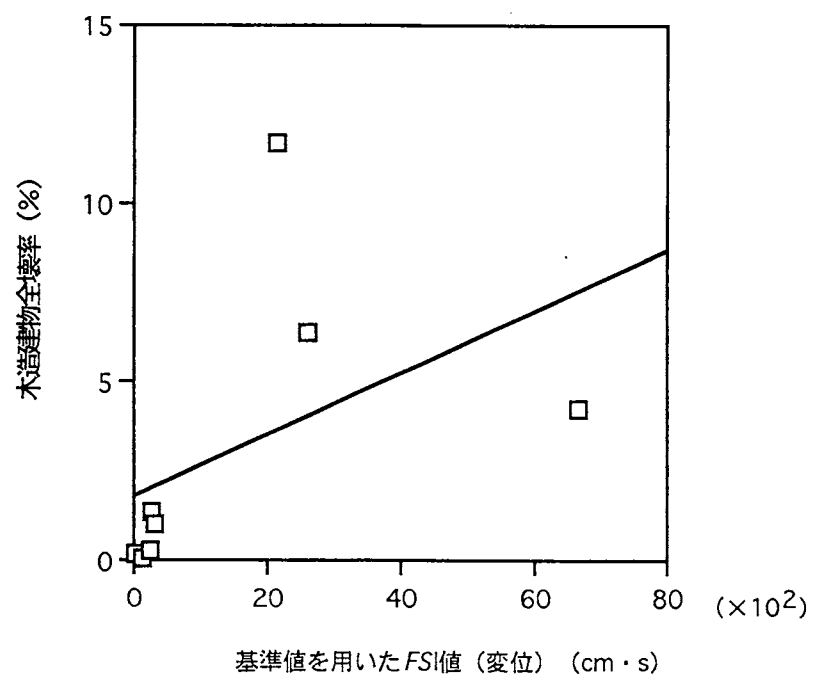
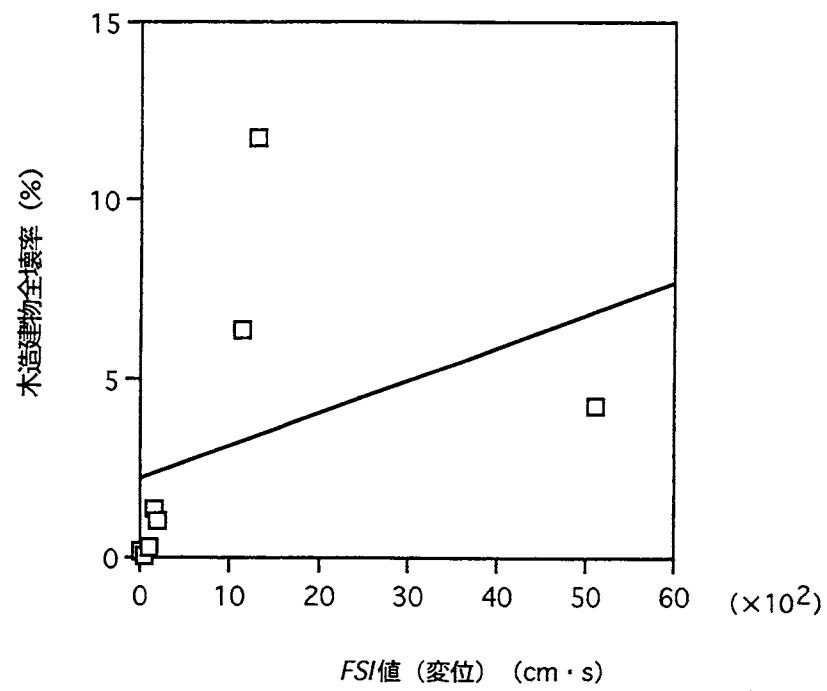


図4-5 FSI 値 (変位) と木造建物全壊率との関係

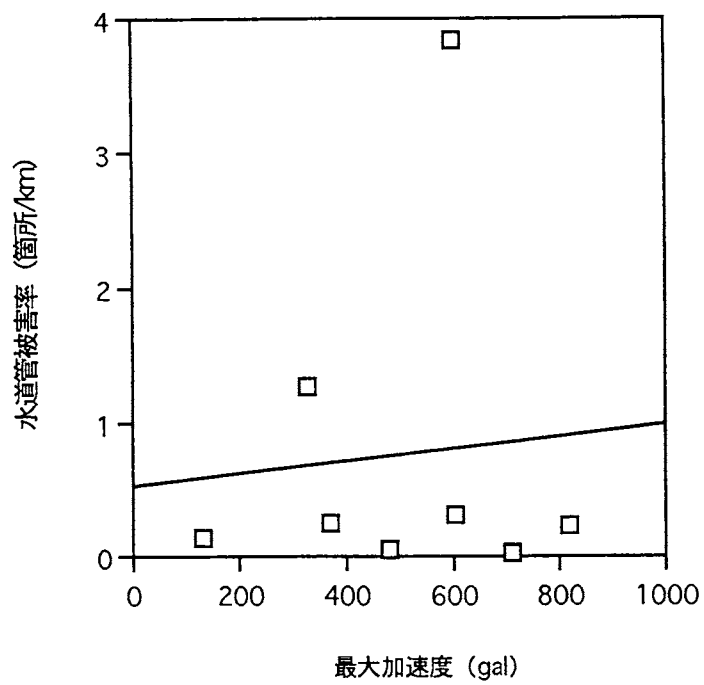


図4-6 最大加速度と水道管被害率との関係

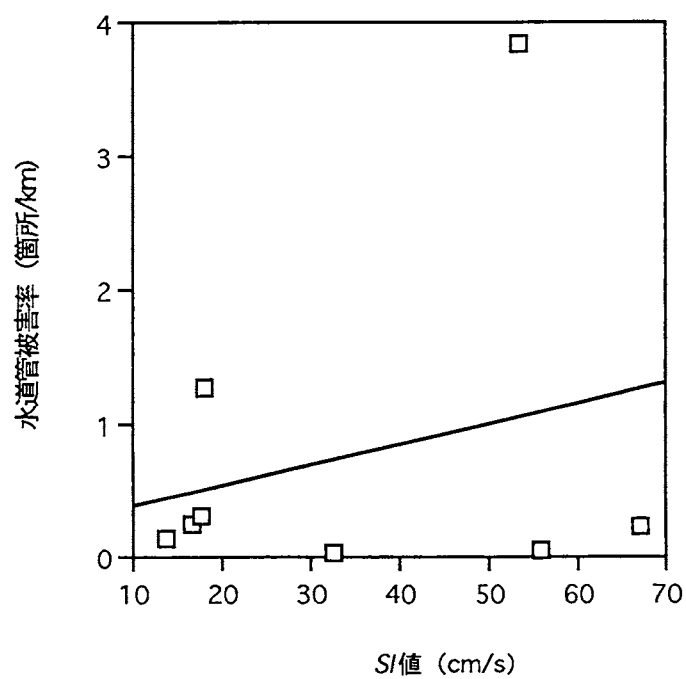


図4-7 SI値と水道管被害率との関係

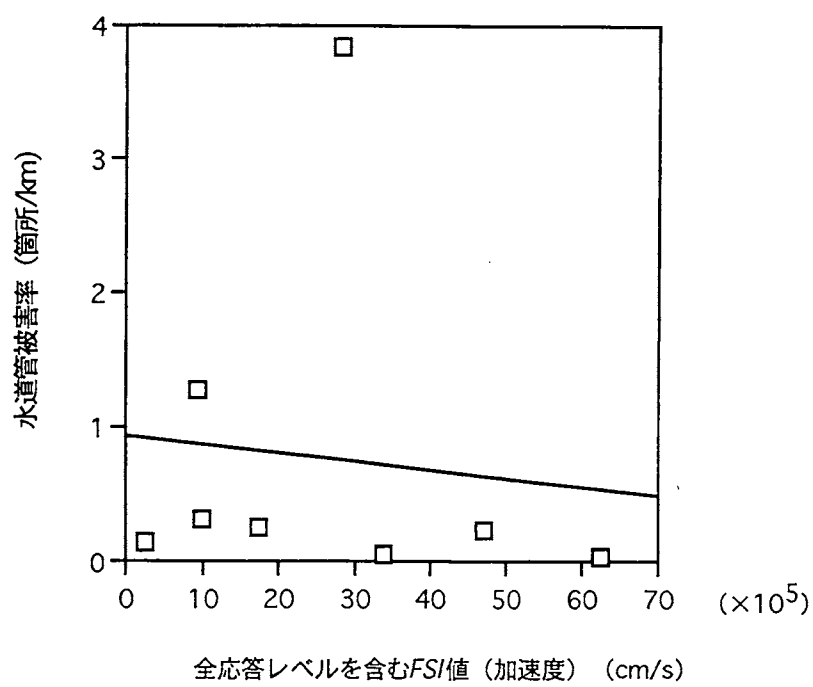
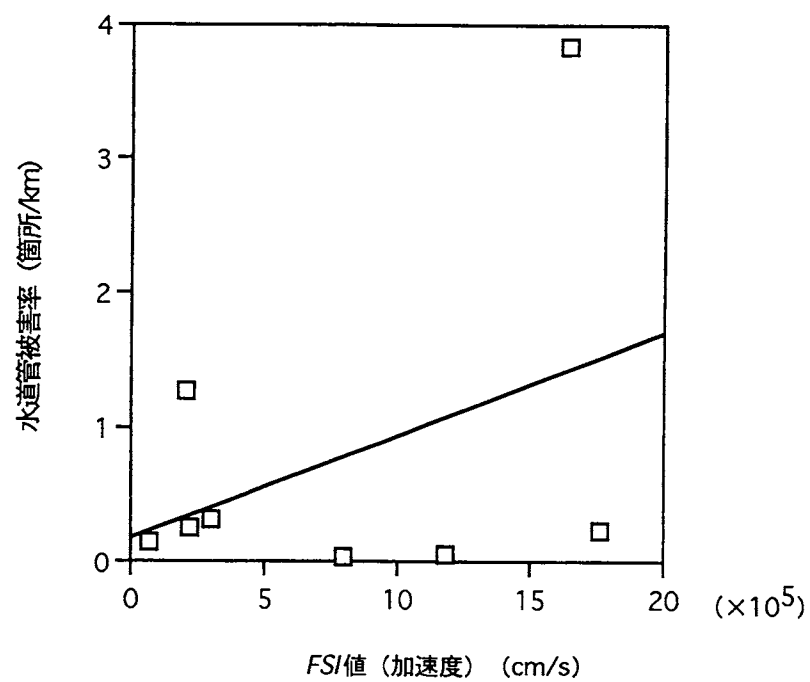


図4-8 FSI値 (加速度) と水道管被害率との関係

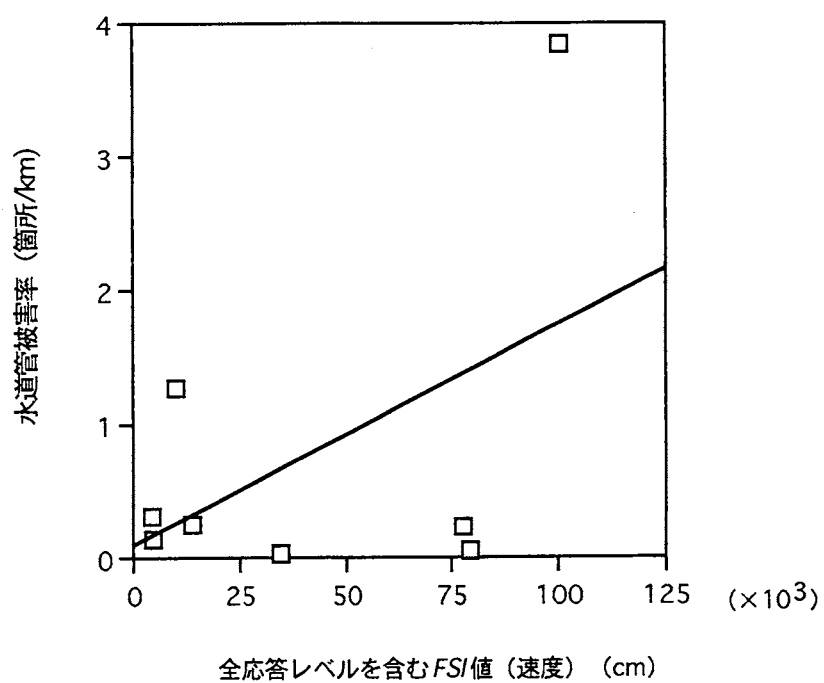
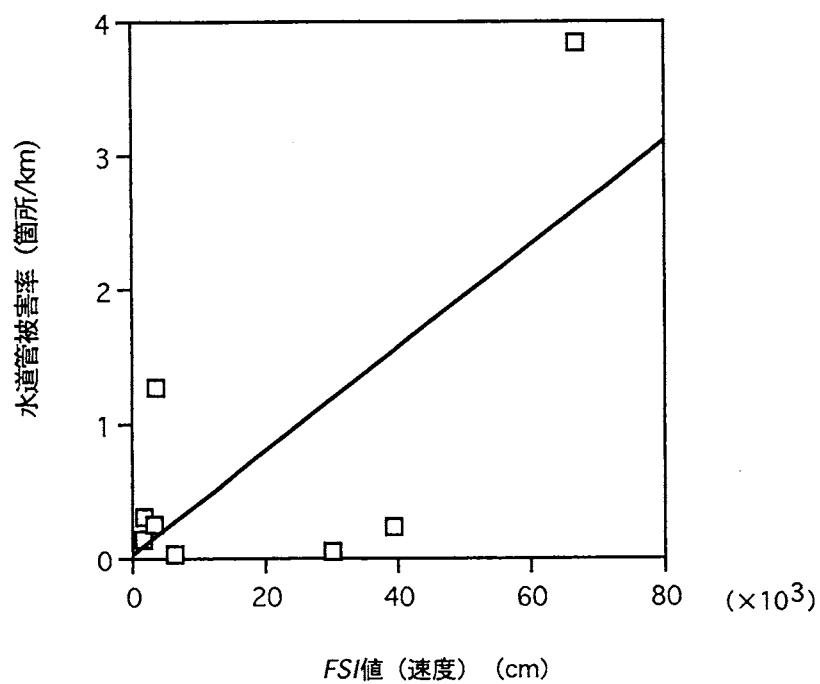


図4-9 FSI 値 (速度) と水道管被害率との関係

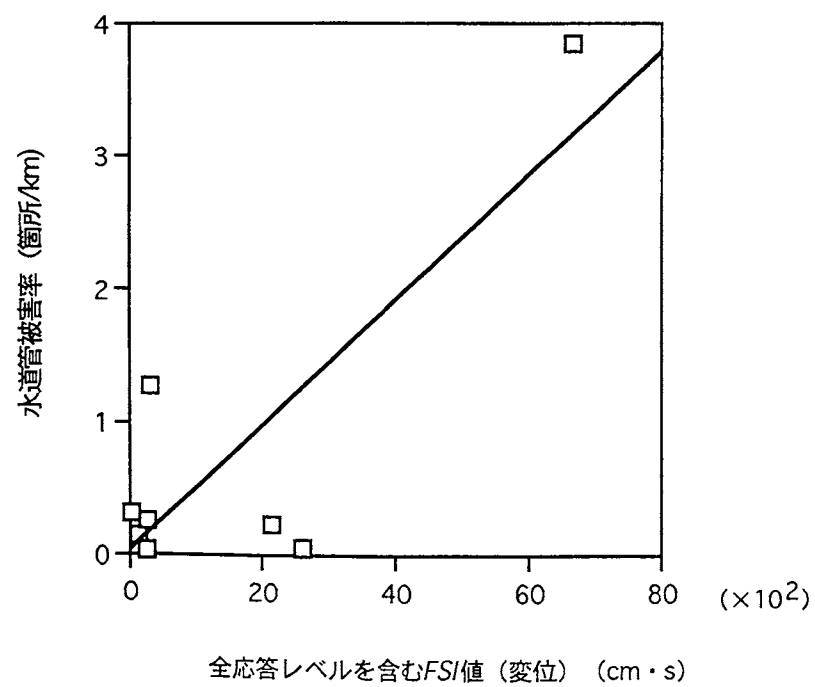
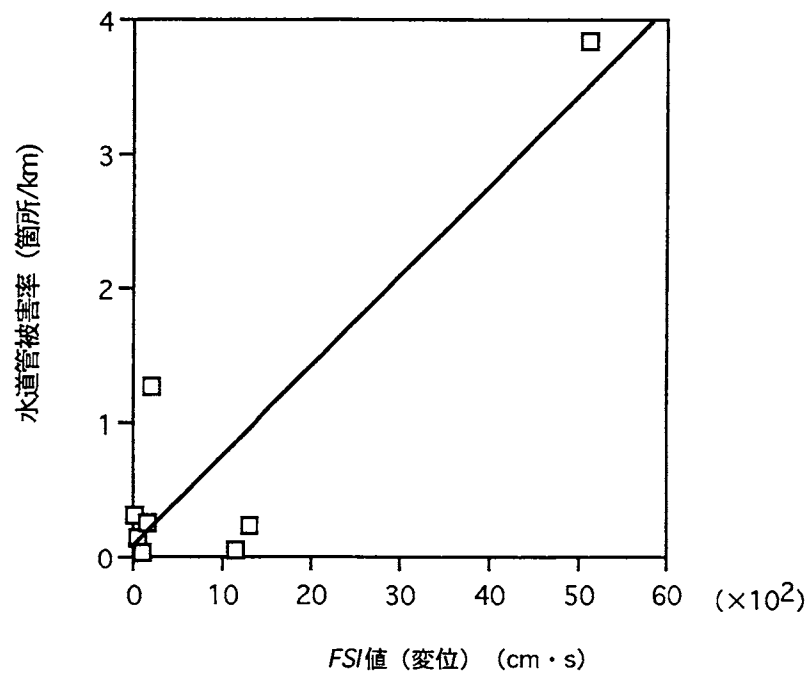


図4-10 FSI値 (変位) と水道管被害率との関係

第5章 結 論

本研究は、地震時の構造物被害と良い対応のある震害指標を、構造物の疲労破壊の観点から提案しようとしたものである。すなわち、従来の応答スペクトルに最大応答付近での繰り返し回数を考慮することによって、疲労を考慮した応答スペクトルを提案した。具体的には、構造物の固有周期を横軸（ x ）に、応答スペクトルを横軸（ y ）に、各応答レベルでの繰り返し回数を縦軸（ z ）にとったものであり、従来の応答スペクトル（2次元）に繰り返し回数の軸を付け加えて3次元立体表示したものである。さらに、繰り返し回数を応答スペクトルで積分した値、すなわち疲労を考慮した応答スペクトルの積分値を求め、これをFSI値(Fatigue Response Spectral Intensity)と定義した。上述した3次元立体図の体積がFSI値に相当するものである。

つぎに、FSI値と震害との対応を検討するために、まず、近年わが国を襲った被害地震について、それぞれの地震および被害の概要を述べるとともに、従来から用いられている震害指標と今回提案している震害指標である疲労応答スペクトルを、それぞれの地震について示した。本研究では、1993年釧路沖地震、1993年能登半島沖地震、1994年北海道東方沖地震、1994年三陸はるか沖地震、1995年兵庫県南部地震の5つの地震を取り上げた。5つの被害地震における各種震害指標間の相関について検討するとともに、地上構造物である木造家屋の被害と地中構造物である上水道管路の被害を取り上げ、本研究で提案している疲労応答スペクトル強度をはじめ、従来からの震害指標との関係について考察した。

以上の研究により得られた成果をまとめると以下のようである。

- (1) 木造建物全壊率と各FSI値との関係は、FSI値（変位）、FSI値（速度）、FSI値（加速度）という順で相関が高くなった。逆に、水道管被害率と各FSI値との関係は、FSI値（加速度）、FSI値（速度）、FSI値（変位）の順に相関が高くなった。地上構造物の破壊が加速度の影響を、地中構造物の破壊が変位の影響を受けやすいことが推測できる。
- (2) 木造建物被害との相関については、最大応答の50%以上という基準よりも、例えば300gal以上といった、応答値のある絶対値以上といった基準値の方が被害との対応が良いようである。最大応答の50%以上という基準では、最大応答が極めて大きい場合には、明らかに被害に影響を与えるような大きな応答であってもFSI値の算定に考慮されない場合があるからであると考えられる。
- (3) 水道管被害との相関については、最大応答の50%以上という基準によるFSI値の方が、全応答を対象とするFSI値よりも被害との相関が良いようである。全応答を対象とするFSI値は、被害に直接関与しないものまでも評価に含まれることになるからであると考えられる。

今後は、他の構造物の被害に関するデータも収集、整理し、FSI値との相関について検討していく予定である。

最後に、本研究課題を卒業研究として取り組み、本報告書の作成に全面的にご協力頂いた、金沢大学 4 年杉木啓伸氏をはじめ、本報告書の作成にご協力頂いた金沢大学工学部建設防災研究室の学生諸氏に感謝します。