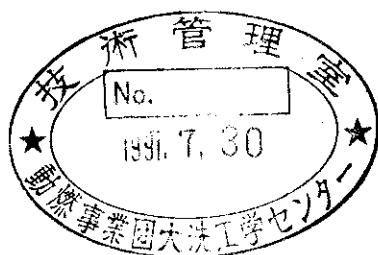


| 区 分 変 更 | |
|---------|--------------|
| 変更後資料番号 | PNC |
| 決裁年月日 | 平成 14年 2月28日 |

地震に関する調査研究(Ⅶ)

| 技術資料コード | |
|-------------------------------------|--------------|
| 開示区分 | レポートNo. |
| P | J1552 91-001 |
| この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です | |
| 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室 | |

1991年4月



社団法人 資源・素材学会

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。
したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払って
ください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、
特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



社 内 資 料
PNC ~~2~~J1552 91-001
平成 3 年 4 月

地 震 に 関 す る 調 査 研 究 (VII)

社団法人 資源・素材学会

要 旨

平成 2 年度の委員会活動としては、結晶質岩盤である岩手県釜石鉱山の大峯地区坑内に昨年度設置した 4 ケ所の地震計と、3 ケ所の水圧計および 1 ケ所の水量計について、観測と解析作業から開始すると共に、地震計 2 ケ所の増設工事を実施した。研究活動としては、地下水理と数値解析の各ワーキンググループを編成して、夫々の分野での調査研究を進めた。

本報告書の第 1 章では、第 7 年目に入った本委員会の研究方針とそれに伴う研究活動の内容について記述した。

第 2 章では、本年度増設した独立型地震計 S M A C - M D 型 2 台について、その特性と設置工事について記述した。

第 3 章では、平成 2 年 2 月より平成 3 年 2 月までの一年間に観測された地震と地下水理についての集積データとその解析内容について記述した。

深部地下構造物の耐震性評価手法についての検討結果は第 4 章と第 5 章に記述した。即ち第 4 章では、耐震設計法の実例調査や地震による地下水流変化に関する文献調査等を実施した結果について報告した。

第 5 章では釜石鉱山の地質・地形を対象として地下深部における地震動特性と構造物の挙動について数値解析を行った結果について記述した。

第 6 章のあとがきでは、本年度に得られた研究成果についてのまとめを行うとともに、次年度以降に実施すべき研究内容についての提言を述べた。

本報告書は、社団法人資源・素材学会が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。



OFFICIAL USE ONLY

Z
PNC J1552 91-001

April 1991

Survey and Research of Earthquake(VII)

The Mining and Materials Processing
Institute of Japan

Synopsis

Fiscal year of 1990, the committee's activity was commenced from accumulation and Analysis of the observation data on ground motion and underground water behavior for earthquake in the Omine area of the Kamaishi mine.

As the expansion work of the earthquake observation system, two independent type seismic meters were installed at the levels of SL 725 and SL250.

To carry out the committee's activity, two working groups for observation of underground water behavior and for numerical analysis were organized. They have studied each of their objects.

In the report, chapter One explains the guideline of current year research activities of the committee which have continued for 7 years.

Chapter Two explains installation works of the independent type seismic meters SMAC-MD, and the specification of the seismic meter are also described.

Chapter Three shows the observation data of the ground motion and underground water behavior caused by earthquake which were accumulated for one year, from February of 1990 to February of 1991.

In this chapter, the results of analysis of the obtained data were also explained.

The results of research and study on the evaluation of aseismatic characteristics of structures in deep underground are described in Chapter Four and Chapter Five.

Chapter Six explains the summary of the results which were obtained by the committee's research and study activities. As the recommendation, the items of the future study are also explained finally.

* Work performed by the Mining and Metallurgical Institute of Japan under contract, with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

目 次

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 1. まえがき | 1 |
| 2. 釜石鉱山における地震計の増設工事 | 3 |
| 2.1 設置工事の工程 | 3 |
| 2.2 デジタル地震計の仕様 | 3 |
| 2.3 デジタル地震計の収録条件および観測開始日 | 5 |
| 3. 釜石鉱山における地震・地下水理観測データの収集と解析 | 19 |
| 3.1 まえがき | 19 |
| 3.2 観測の概要 | 20 |
| 3.2.1 地震観測の概要 | 20 |
| 3.2.2 地下水観測の概要 | 23 |
| 3.3 地震観測 | 27 |
| 3.3.1 観測方法 | 27 |
| 3.3.2 観測結果 | 27 |
| 3.3.3 今後の課題 | 96 |
| 3.4 地下水観測 | 103 |
| 3.4.1 観測方法 | 103 |
| 3.4.2 観測結果 | 114 |
| 3.4.3 今後の課題 | 171 |
| 4. 地層処分施設の耐震性評価手法の検討 | 172 |
| 4.1 まえがき | 172 |
| 4.2 地層処分施設の耐震性評価に特有な事象の抽出 | 173 |
| 4.2.1 地層処分施設の概念 | 173 |
| 4.2.2 耐震性評価の概念 | 175 |
| 4.2.3 耐震性評価に特有な事象の抽出 | 176 |
| 4.2.4 特有な事象に対する検討方針 | 178 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 4.3 地下構造物の耐震設計法の実例調査 | 179 |
| 4.3.1 調査目的 | 179 |
| 4.3.2 調査対象 | 179 |
| 4.3.3 調査結果 | 181 |
| 4.3.4 地層処分施設への適用性 | 182 |
| 4.4 地下深部での地震特性 | 190 |
| 4.4.1 地下深部の地震動特性評価のための基本的考え方 | 190 |
| 4.4.2 原子力発電所の模擬地震動の作成 | 192 |
| 4.4.3 既往の地下地震観測例 | 200 |
| 4.4.4 地上と地下の地震動特性比較 | 213 |
| 4.5 地震による地下水水流変化に関する文献調査 | 215 |
| 4.5.1 調査目的 | 215 |
| 4.5.2 調査範囲 | 215 |
| 4.5.3 調査文献の抄録 | 216 |
| 4.5.4 まとめ | 229 |
| 4.6 まとめと今後の課題 | 230 |
| 5. 地下深部での地震動特性と構造物の挙動 | 232 |
| 5.1 はじめに | 232 |
| 5.2 弹性波動解析 | 232 |
| 5.3 地下深部での地震動特性のシミュレーション | 239 |
| 5.4 地下構造物の応答解析例 | 240 |
| 5.5 地下構造物の耐震特性 | 241 |
| 5.6 おわりに | 242 |
| 6. あとがき | 287 |
| ○文献抄録（地中地震観測の成果および考察） | 291 |

1. まえがき

平成2年度は、地震に関する調査研究委員会が発足してから7年目に当たる。昨年度は、結晶質岩盤の観測対象地区として選定した岩手県釜石鉱山の大峯地区坑内に、地震計と水圧計および水量計を設置して平成2年2月より観測作業を開始した。本年度はこの時から集積を始めた地震と地下水理の観測データについての解析作業を開始すると共に、EL 725とEL 250レベルに独立型のデジタル強震計を増設する工事を行った。この工事により、地震計はEL 865, EL 725, EL 550, EL 250の4レベル6カ所に設置され、上下の高低差615mを有する地域において、地表と地下深部での地震動の比較測定が可能な体制が確立した。

地下水理の観測業務では、昨年度設置した水圧計3台と水量計1台のデータは地震発生時のみ地震記録と同一のテープに収録されるが、これとは別個に電力中央研究所が主体となり、EL 550およびEL 250に水質測定用サンプリングケ所を設けて水質変動を観測する作業も開始した。これらの観測データとその解析結果は、地下水理ワーキング・グループ会を適宜開催して検討を行い、研究の円滑な推進を計った。

深部地下構造物の耐震性評価手法の検討については、電力中央研究所を主体とする研究と、数値解析ワーキング・グループによる研究とで分担して実施した。即ち前者は地下構造物の耐震設計法の実例調査や地震に伴う地下水流変動に関する文献調査などを主な内容とするのに対し、後者は釜石鉱山の地形や岩盤特性を用いて、地下深部における地震動特性や地下構造物の挙動などについて、シミュレーションを行い理論的な考察を加えたものである。

地下水理に関しては、現地における実測データの採取と解析は本年度になり初めて実行できたが、地下深部における水量、水質の変化が地球潮汐と密接な関係のあることが判明し、今後の測定計画の立案に有益な指針が得られたものと考えられる。

最後にあとがきとして、今後必要な研究活動の項目を列記して提言とした。

平成2年度の本委員会のメンバーは下記のとおりである。

| | | |
|-----|-------|----------------|
| 委員長 | ◎佐々宏一 | 京都大学工学部資源工学教室 |
| 委員 | 山口梅太郎 | 東京大学工学部資源開発工学科 |
| " | 川本眺万 | 名古屋大学工学部土木工学科 |
| " | 高木章雄 | 鹿児島大学理学部地学教室 |

| | | |
|----|--------|---------------------|
| 委員 | 小林 昭一 | 京都大学工学部土木工学教室 |
| " | 石島 洋二 | 北海道大学工学部資源開発工学科 |
| " | 小林 芳正 | 京都大学理学部地球物理学教室 |
| " | 松木 浩二 | 東北大学工学部資源工学科 |
| " | 渡辺 邦夫 | 埼玉大学工学部地盤水理実験施設 |
| " | 小出 仁 | 地質調査所環境地質部 |
| " | 楠瀬 勲一郎 | 地質調査所環境地質部地震物性課 |
| " | 駒田 広也 | (株)電力中央研究所処分研究室 |
| " | 佐々木 俊二 | (株)電力中央研究所耐震研究室 |
| " | 浜辺 修二 | 日鉄鉱業株式会社資源開発部 |
| " | 武内 俊昭 | 応用地質株式会社 |
| " | 佐藤 孝雄 | (株)明豊エンジニアリング |
| " | 堀田 光 | 建設企画コンサルタント(株)土質技術部 |

最後に、今年度の釜石鉱山における地震と地下水理の観測および計器の点検保守、ならびに地震計の増設工事に多大の御尽力を戴いた釜石鉱山株式会社と(株)明豊エンジニアリングに対し、又地震と地下水理の観測データの解析と、新たな地下水理観測作業を担当して戴いた電力中央研究所に対し、深く感謝する次第である。

2. 釜石鉱山における地震計の増設工事

2. 1 設置工事の工程

平成2年9月30日から10月3日にかけて釜石鉱山においてEL725m坑およびEL250m坑にデジタル地震計の増設工事を行った。増設地震計の設置点を図-2.1(平面図)および図-2.2(断面図)に示す。今回の増設工事により、平成2年1月下旬に設置した地震計と合わせて計6台の地震計が地表点から深度615mまでの4レベル間に設置されたことになる。

2. 2 デジタル地震計の仕様

デジタル地震計は内蔵されている3成分のいずれかの成分が予め設定したレベル(0.5~32 Gal)を越えるとICメモリカードへの収録を開始する。収録停止は起動レベルを下回ってから設定時間(15~99秒)に至って停止する。以下にデジタル地震計の総合性能を示す。

2. 2. 1 総合性能

| | |
|------------|---------------------------------|
| 1) 記録範囲 | ±1000Gal (オプションで±2000Gal迄可能) |
| 2) 周波数特性 | 0.02~30Hz(図-2.4, 図-2.5参照) |
| 3) 信号遅延時間 | 10秒(100Hzサンプリング時) |
| 4) 起動周波数特性 | 0.1Hz~5Hz(図-2.6参照) |
| 5) 使用電源 | AC 90~260V 50/60Hz, DC 24V |
| 6) 使用温度 | -10~+40度 |
| 7) 使用湿度 | 90%以下 |

2. 2. 2 各部仕様

| | |
|----------|----------------------|
| 1) 検出器 | |
| a) 形式 | サーボ型加速度計(V401-BT) |
| b) 測定範囲 | ±2000Gal |
| c) 分解能 | 5×10 ⁻⁶ G |
| d) 周波数特性 | DC~400Hz |
| e) 出力感度 | 3V/G |

| | |
|-----------|---|
| 2) 増幅制御部 | |
| a) 測定成分 | 3成分(オプションにて9CH迄実装可能) |
| b) 測定範囲 | ±1000Gal |
| c) 周波数特性 | 0.02~30Hz |
| d) A/D変換器 | 16Bit |
| e) サンプリング | 100Hz/50Hz |
| 3) 制御部 | |
| a) 信号遅延時間 | 10秒 |
| b) 起動 | 3成分のOR論理 |
| c) 起動レベル | 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32Gal設定可能 |
| d) 停止 | 3成分の全てが設定レベルを下回ってから一定時間 (15~99秒設定可能) 経過後自動停止 |
| e) 起動周波数 | 0.1~5Hz |
| f) 校正信号 | 1Hz三角波 手動操作(正弦波の記録も可能) |
| g) 時刻情報 | □□年□□月□□日□□時□□分□□秒 (万年カレンダー付き、年は西暦下二桁) |
| h) 時刻精度 | 2×10 ⁻⁶ 以上 |
| i) 時刻自動修正 | NHK時報を外部入力 |
| j) 故障検出 | 各ユニットの故障を検出し、表示ランプを点灯させる。 |
| 4) 表示部 | |
| a) 表示方法 | バックライト型LCD(15×8文字) |
| b) 表示起動 | 手動スイッチによる。 |
| c) 表示内容 | <ul style="list-style-type: none"> ・過去5回地震の起動時刻、各成分の最大加速度値 ・動作回数表示(0~99回) ・時計表示 □□年□□月□□日□□時□□分□□秒 ・ICカード残量 |
| 5) 記録部 | |
| a) 記録媒体 | ICカード |
| b) 記録密度 | 1Mbyte/1枚(オプションにて4枚迄実装可能) |
| c) データ保持 | 1.5年間(リチウム電池による。) |

| | |
|------------|--|
| d) 記録時間 | 1 Mbyte で約 20 分収録可能 (3成分 100Hz で収録時) |
| 6) 電 源 部 | |
| a) 使用電源 | A C 90 ~ 260 V 50 / 60 Hz 又は D C 24 V (オプションにて太陽電池可能) |
| b) 消費電力 | 20 W 以下 |
| c) 内蔵電池 | トリクル充電式アルカリ電池 (Ni-Cd) |
| d) 停電補償時間 | 約 3 時間 (3成分実装時) |
| 7) 収納ケース | |
| a) 構 成 | アルミ製 ("0" リングによる密閉構造) |
| b) 外形, 重量 | 約 398 (W) × 418 (D) × 210 (H) 約 20 kg |
| c) 固定方法 | アンカーボルト 3 本により固定 |
| d) 塗 装 色 | マンセル 10 YR7.5 / 1.5 |
| 8) 信 号 系 統 | |

図-2, 3 にデジタル地震計の信号系統を示す。

9) 地震計の設置

図-2, 7 に外形寸法を示す。地震計は坑道床の基盤上に打設したコンクリート基礎台に固定されている。

2. 3 デジタル地震計の収録条件および観測開始日

デジタル地震計の収録条件は下記のように設定した。

1) 起動設定条件

3成分の or, トリガーレベルは 0.5 Gal

2) サンプリング周波数

200 Hz

3) 遅延, 起動停止時間, キャリブレーション

a) 遅延時間 : 5 秒

b) 起動停止時間 : 起動レベル 0.5Gal を下回ってから 4.5 秒間

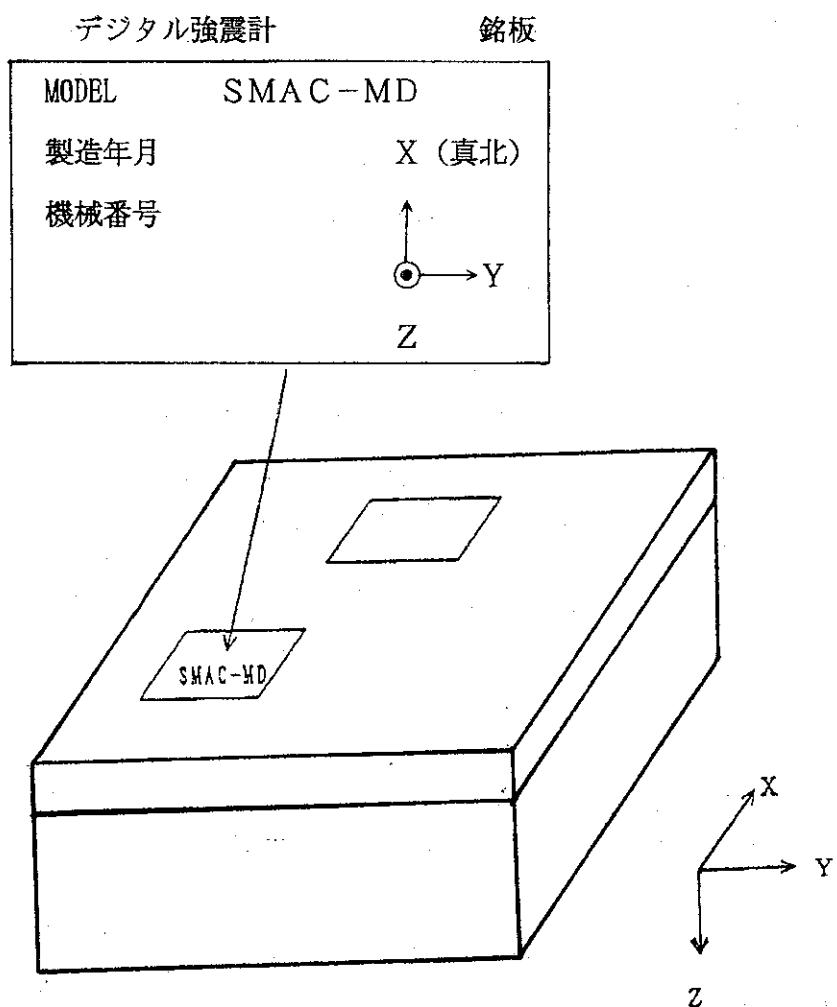
c) キャリブレーション : 地震波収録後 1.5 秒間

4) 観測開始日

a) K-5 観測点 (EL 725 m) : 平成 3 年 10 月 1 日午前 10 時 16 分

b) K-6観測点(EL 250m)：平成3年10月2日午前10時16分

5) 極性について



矢印方向に加速度が加わった時に一出力となる

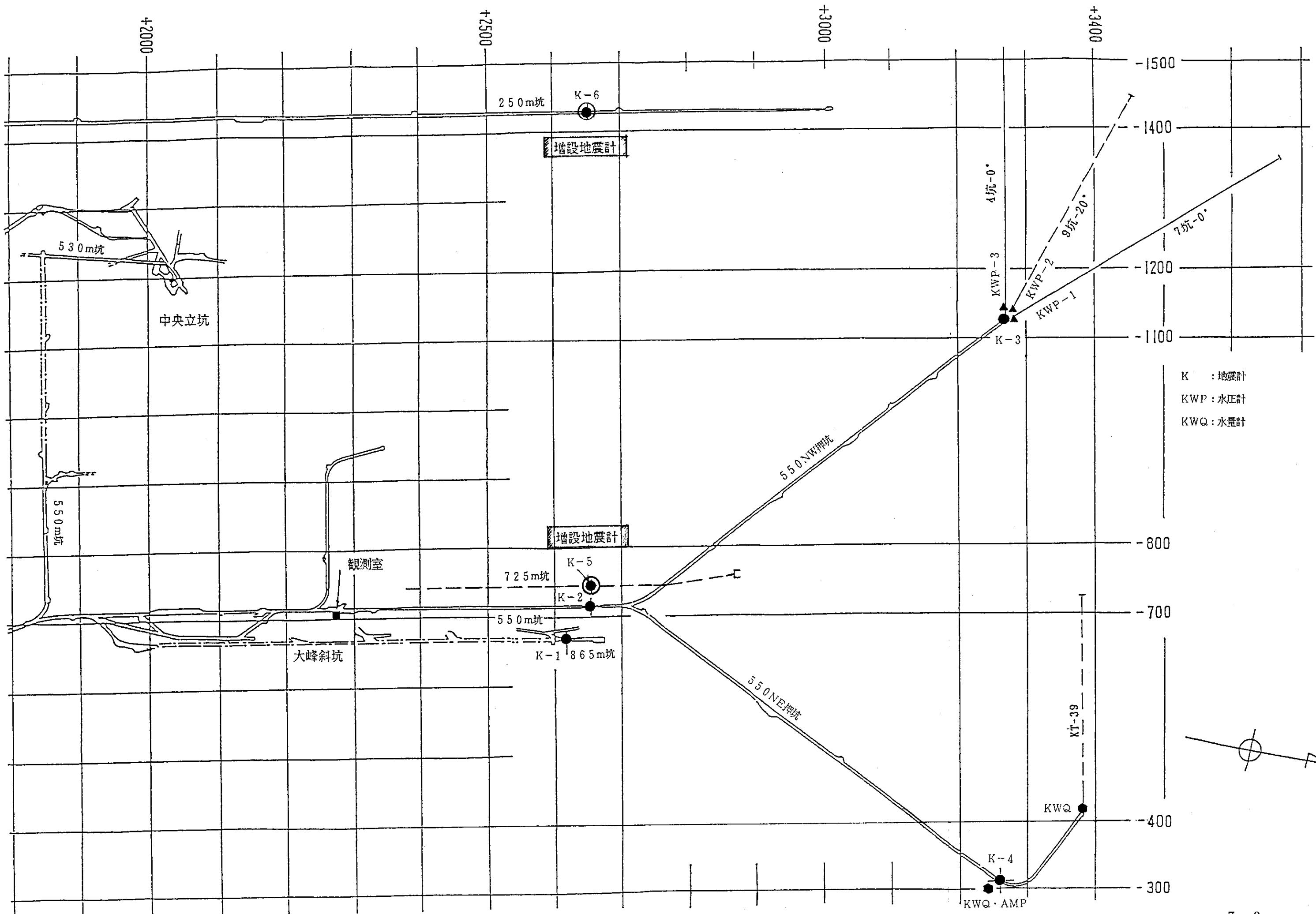


図-2.1 地震観測点および地下水圧観測点位置図（平面）

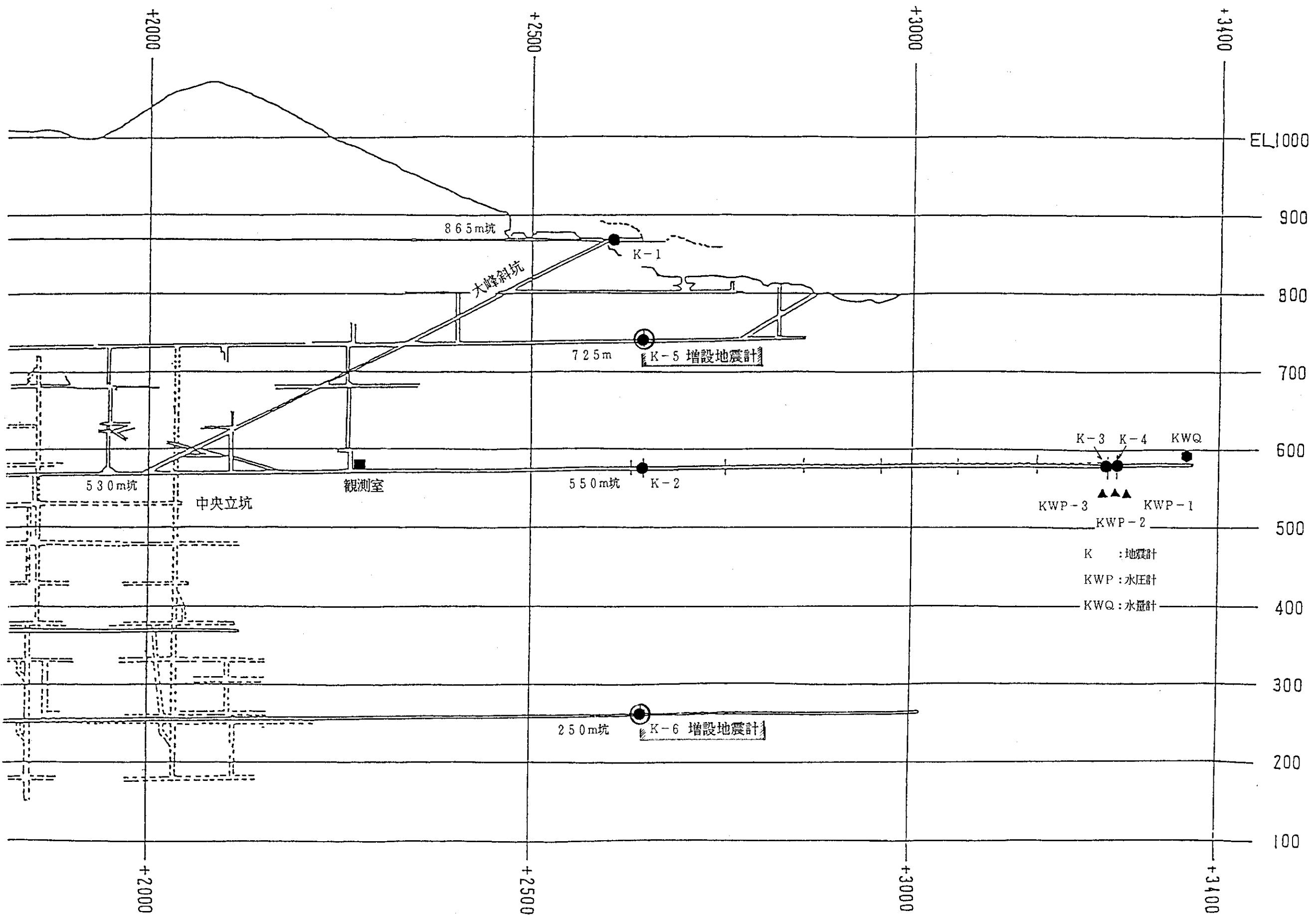


図-2.2 地震観測点および地下水圧観測点位置図（断面）

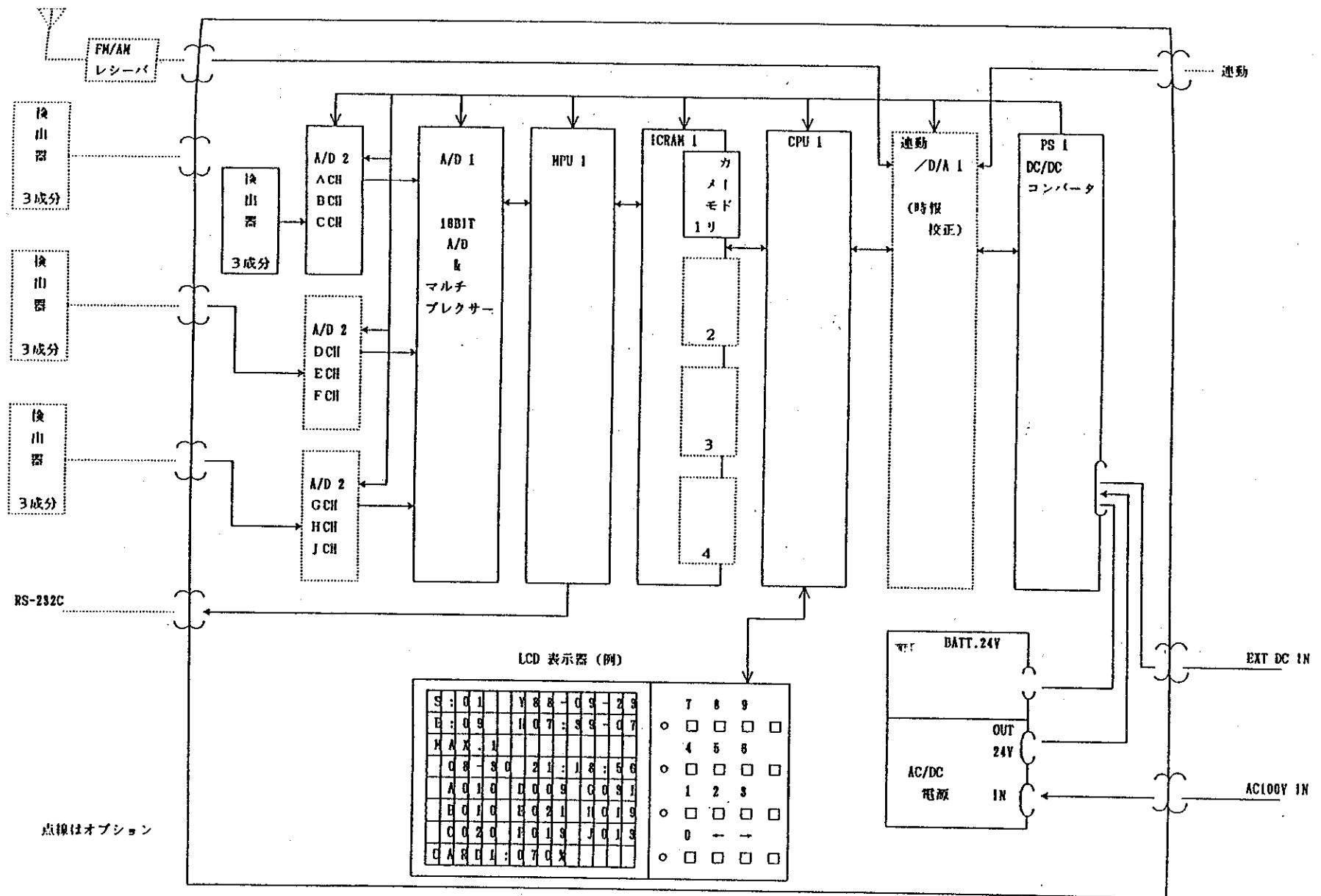


図-2.3 信号系統図

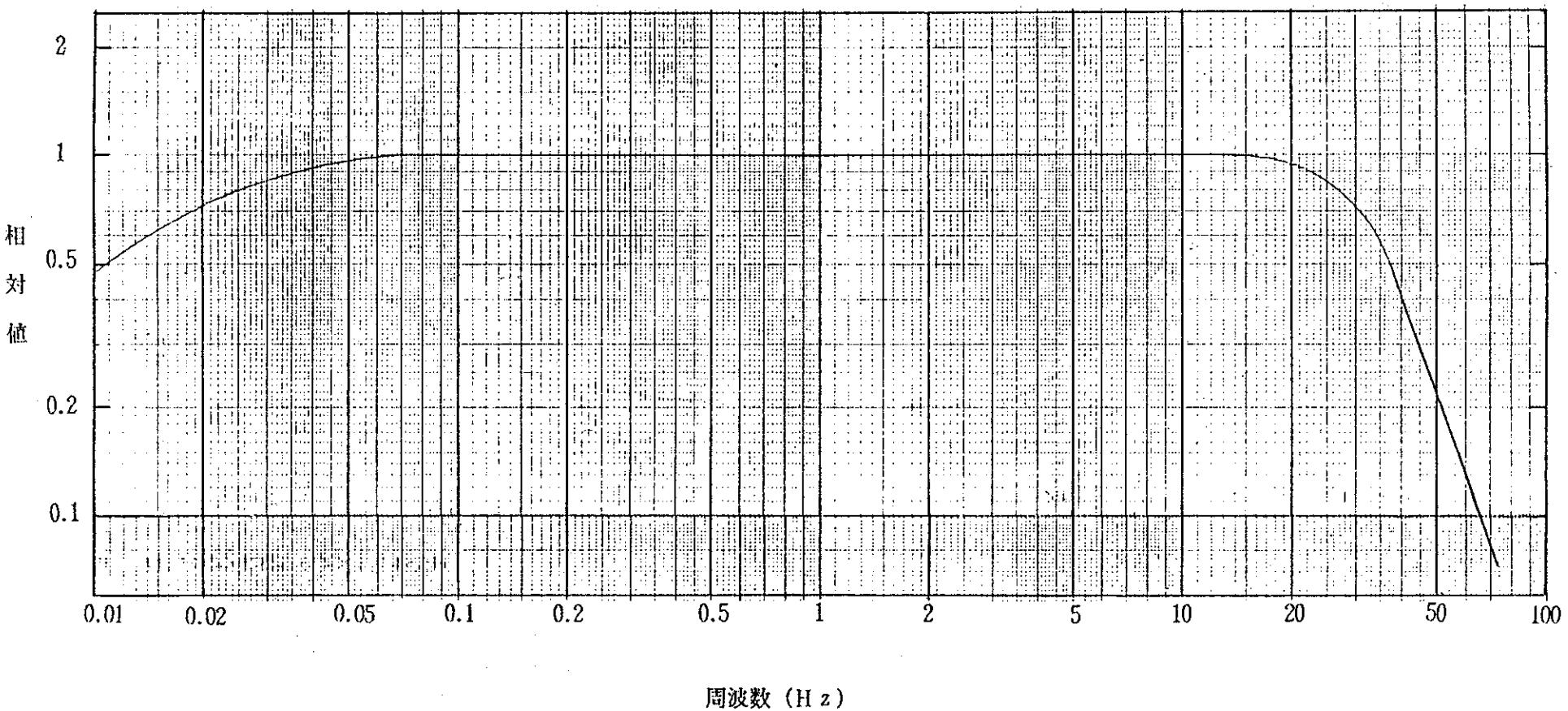


図-2.4 代表周波数特性

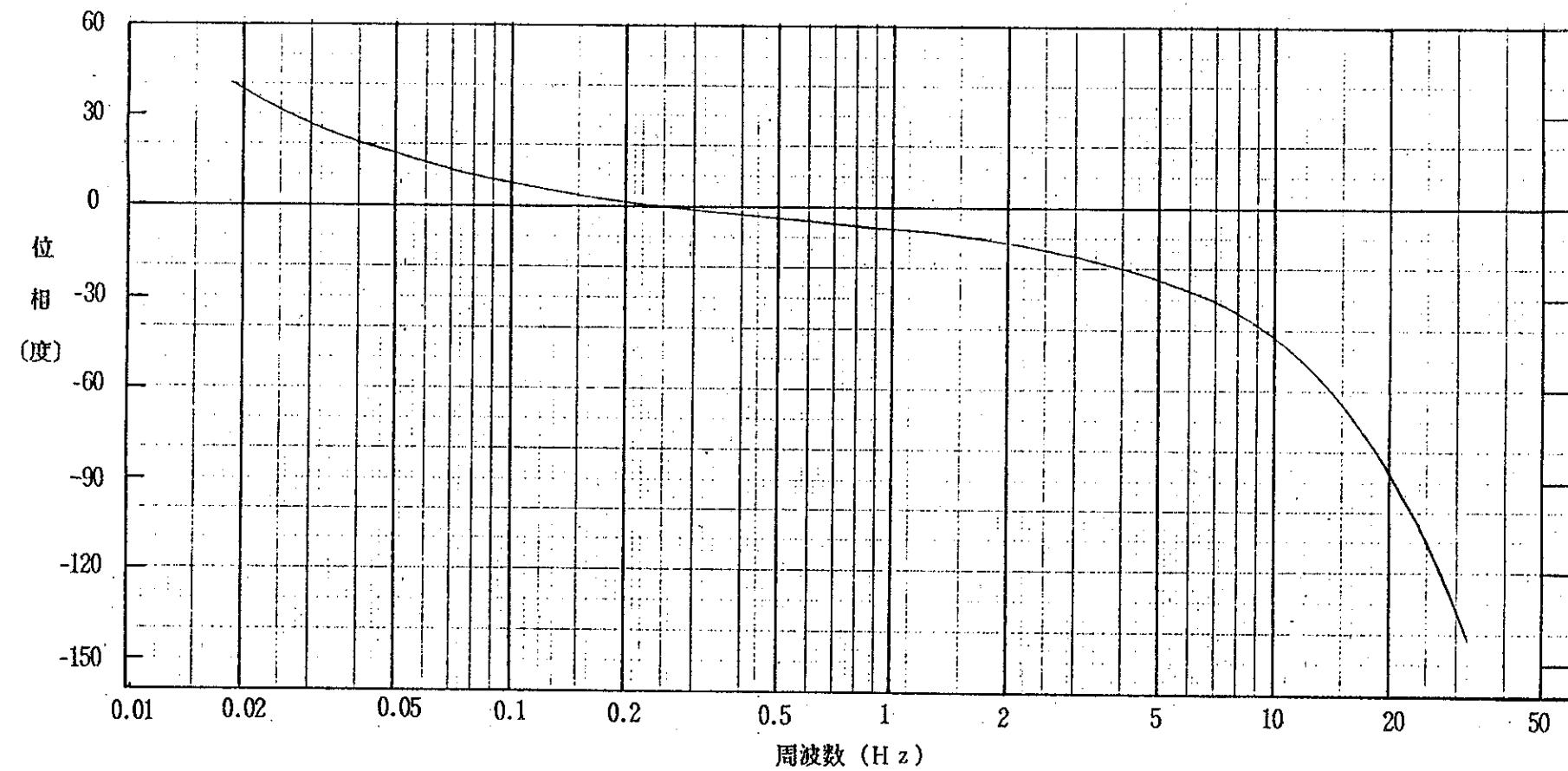


図-2.5 代表位相特性

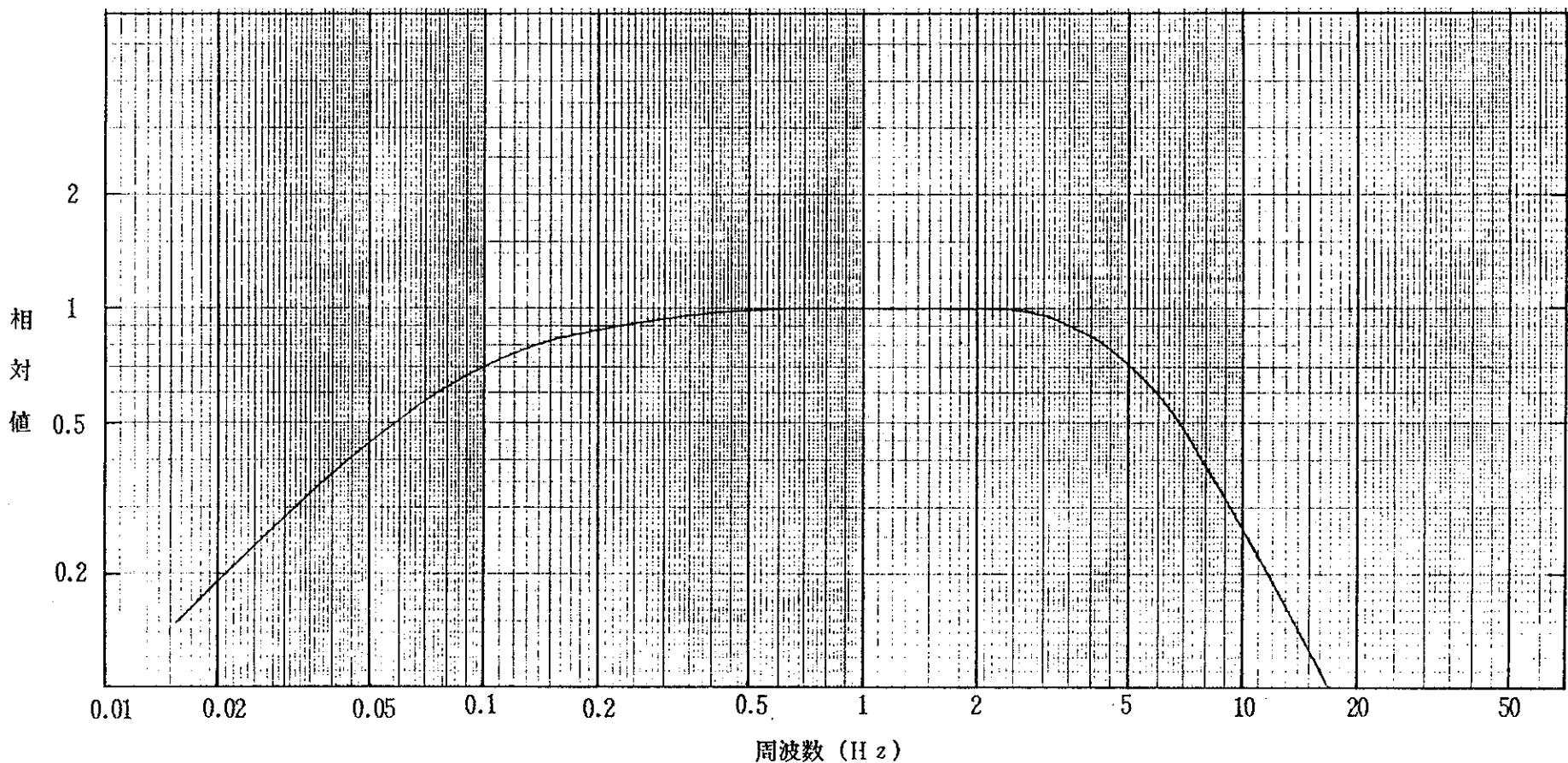


図-2.6 代表起動周波数特性

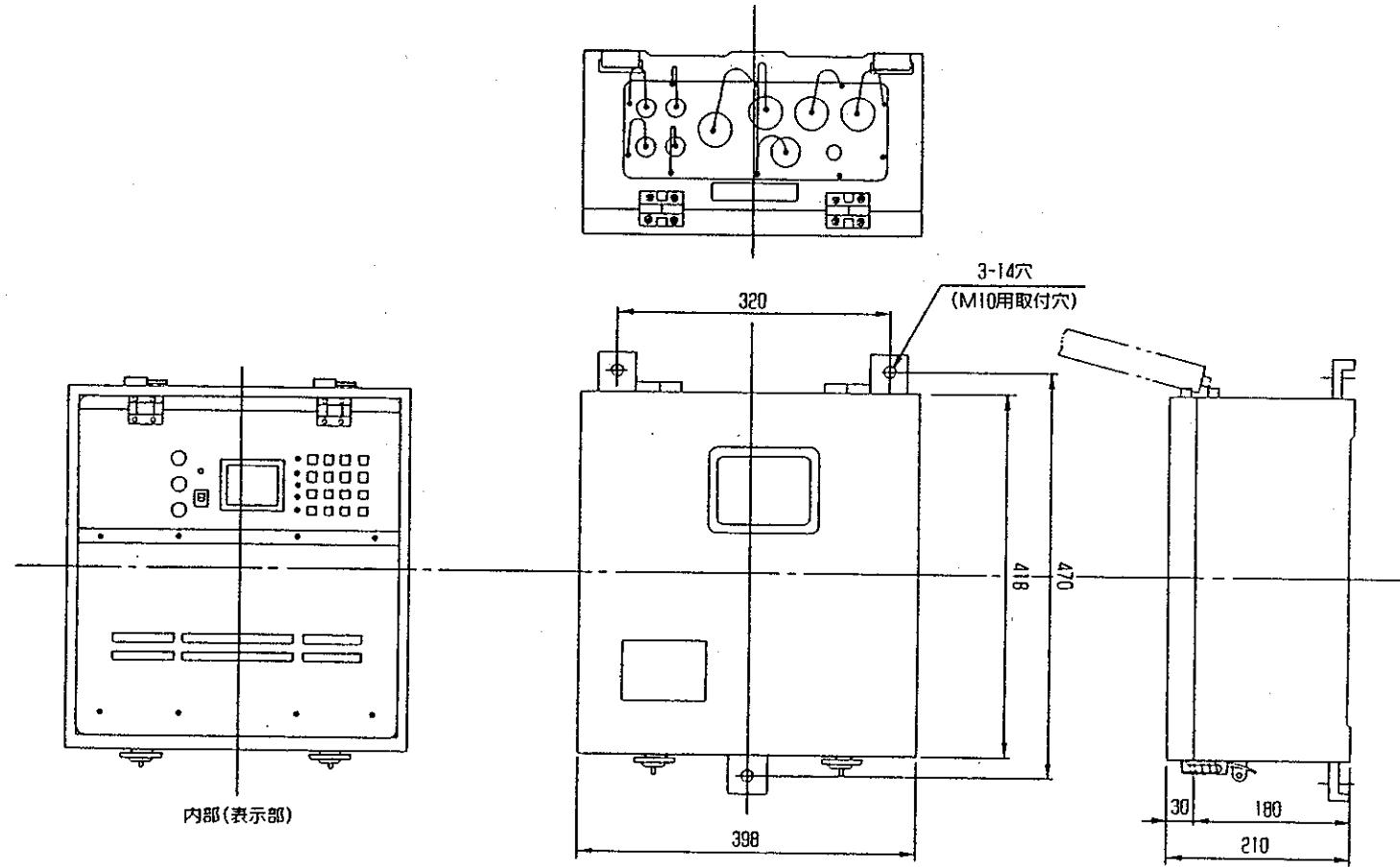
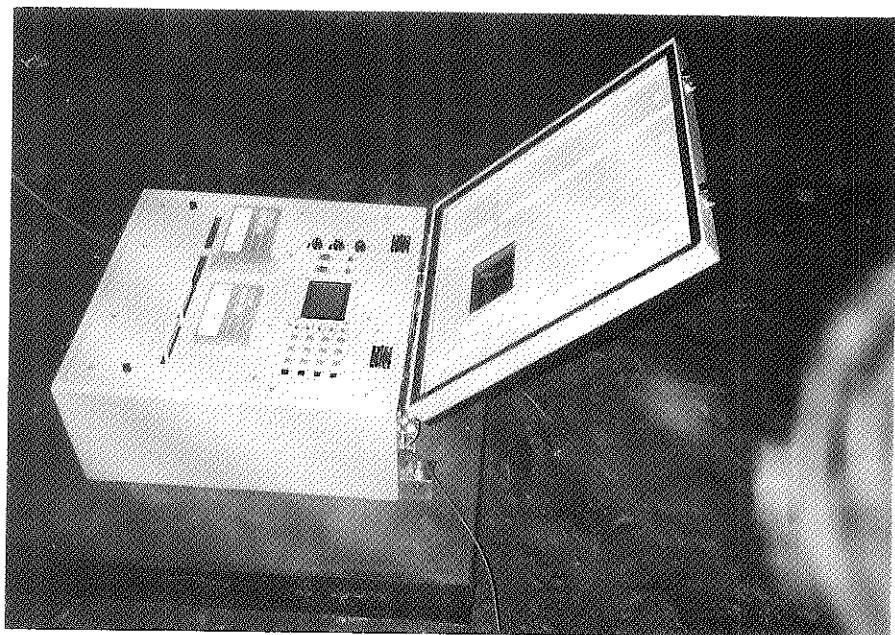


図-2.7 地震計寸法図

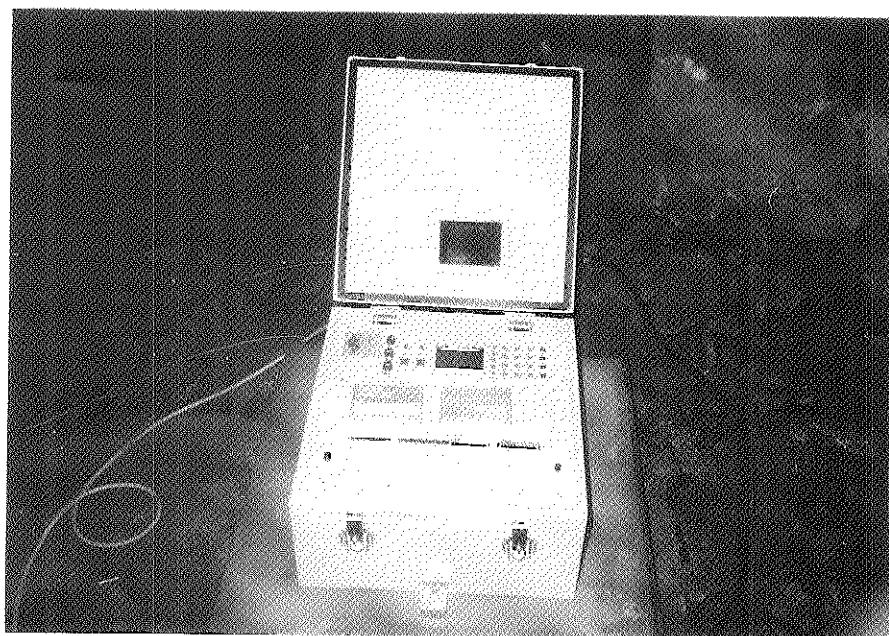
S M A C - M D
725m坑設置



保安器および
電圧調整器設置
725m坑



S M A C - M D
250m坑設置



3. 釜石鉱山における地震・地下水理観測データの収集と解析

3.1 まえがき

ここでは、釜石鉱山の坑道を利用した地下深部における地震データを解析し、地下深部での地震動特性を取りまとめた。同時に、地震による地下水流动変化を検討するために基礎データを釜石鉱山で収集し、解析を行った結果を取りまとめた。

まず 3.2節では、釜石鉱山における地震・地下水理観測の概要を記述した。特に、今年度新規に観測したのは、地震観測ではEL. 250m（地表より深さ約615m）とBL. 725m（地表より深さ約140m）に加速度計を増設し、地下水理観測では、EL. 550m（地表より深さ約315m）、EL. 250m（地表より深さ約615m）で水質調査を行った。

3.3節では、地震観測データを解析した結果をまとめた。観測開始の平成2年2月から平成3年2月までに40個の地震が観測され、地上と地下の地震動特性の比較、地震動の周波数特性、アレー観測による地震入射方向等について考察した。

3.4節では、地下水理観測データを解析し、取りまとめた。特に、坑内湧水量ならびに水質（電気伝導度）の経時変化について考察し、今後の課題を記述した。

3.2 観測の概要

3.2.1 地震観測の概要

世界有数の地震国である我が国では、高レベル放射性廃棄物地層処分施設に対する地震動の影響評価や耐震性評価が必要であるため、基礎資料を蓄積する目的で結晶岩質のモデル地区として岩手県の釜石鉱山を選定して、地下深部における地震観測を平成2年2月13日より実施している。

釜石鉱山における地震観測は図3.2-1に示すように大峰地区坑道のEL.550m坑を中心にK-1～K-6の観測点で行っている。すなわち、K-1としてEL.865m坑の地表面付近に、K-2としてEL.550m坑でK-1の真下にあたる地点、K-3としてEL.550m坑でK-2よりNE方向に約790mの地点、K-4としてEL.550m坑でK-2よりNW方向に約760mの地点である。このようにK-2、K-3、K-4で一辺760～790mのほぼ正三角形とし、これにK-1を加え三角錐とする立体アレー配置となっている。その後、平成2年11月より同地点のEL.250mおよび725mのレベルにそれぞれK-5、K-6の2観測点を増設し、観測体制の充実をはかっている。

釜石鉱山に設置した地震観測装置のシステムは細倉鉱山において昭和61年3月に設置し、同年4月から昭和63年3月まで観測を行った装置である。本観測システムの構成および仕様は細倉鉱山における観測で用いたものと基本的には同一であり、システムの仕様および機器の性能等については「地震に関する調査研究報告書(V)、社団法人資源・素材学会、1989年4月」に詳述している。

この様な地震観測体制により、これまで釜石鉱山で観測された地震データを用いて、主に以下の項目を明らかにすることを目的としてデータ解析を実施した。

- ① 地上と地下の地震動特性比較
- ② 地下深部での地震伝播特性

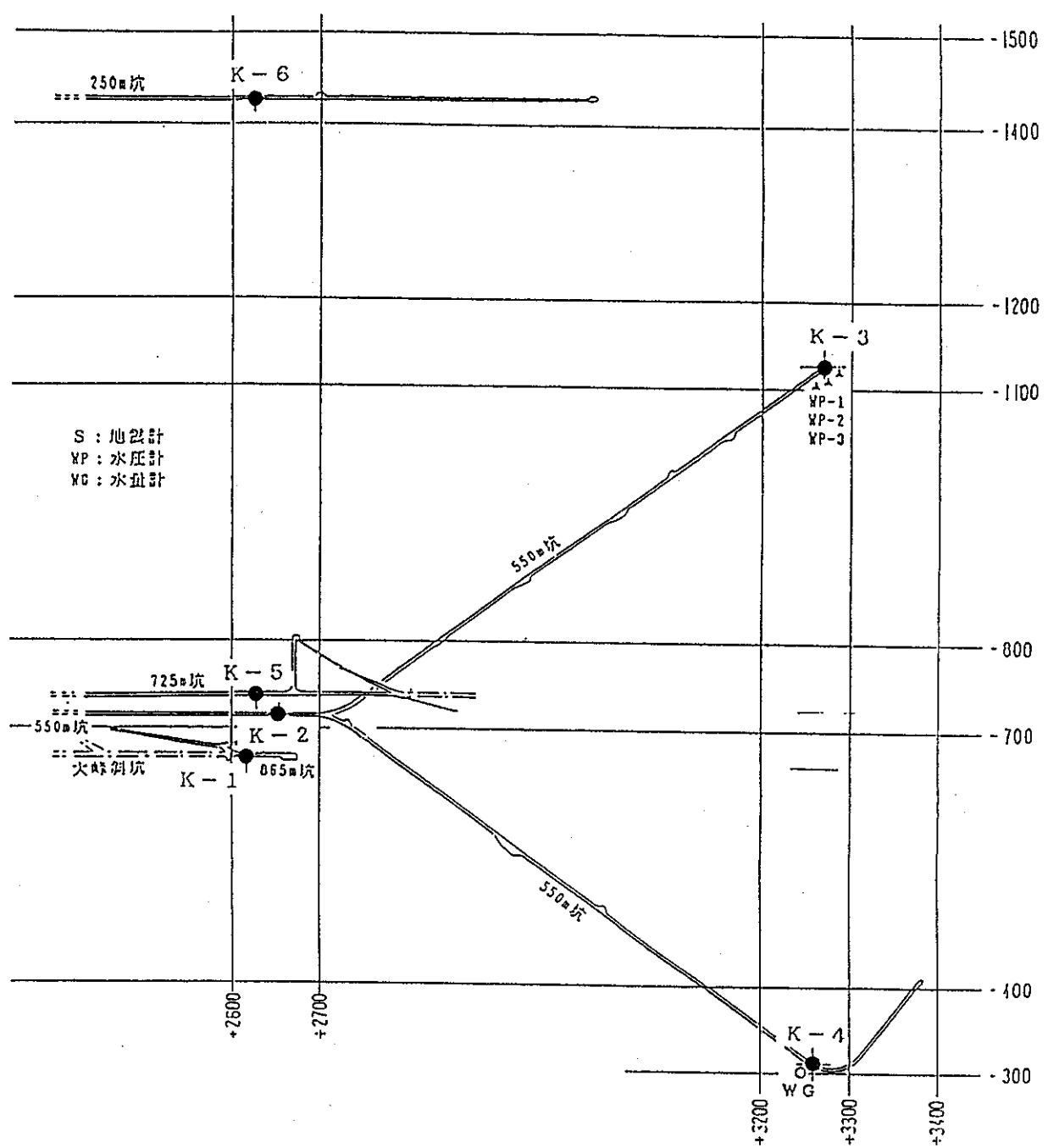


図 3.2-1(1) 地震計設置箇所平面図 (釜石鉱山鉱内)

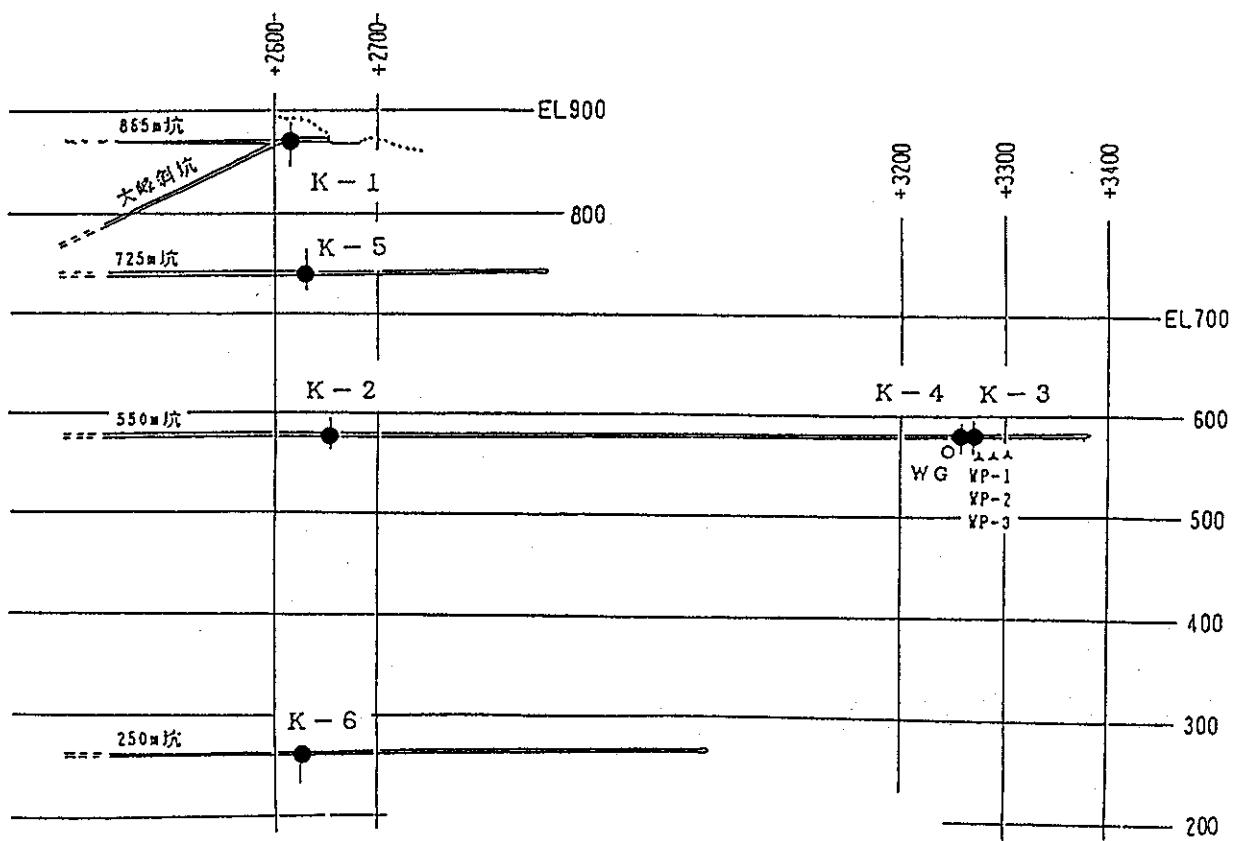


図 3.2-1(2) 地震計設置箇所断面図 (釜石鉱山鉱内)

3.2.2 地下水観測の概要

平成2年度より地震に起因すると考えられる地下水理特性の変化による天然バリア特性への影響を明らかにするために地震時の地下水流动に着目した調査・を開始した。ただし、地震活動に伴う地殻変動が原因で広域の地下水流动場が変化し、天然バリア特性に対して及ぼされる影響については扱わない。具体的には、地震による地下水流动変化を検討するための基礎データを収集する目的で、釜石鉱山において以下の項目のデータを収集し、若干の解析を実施した。

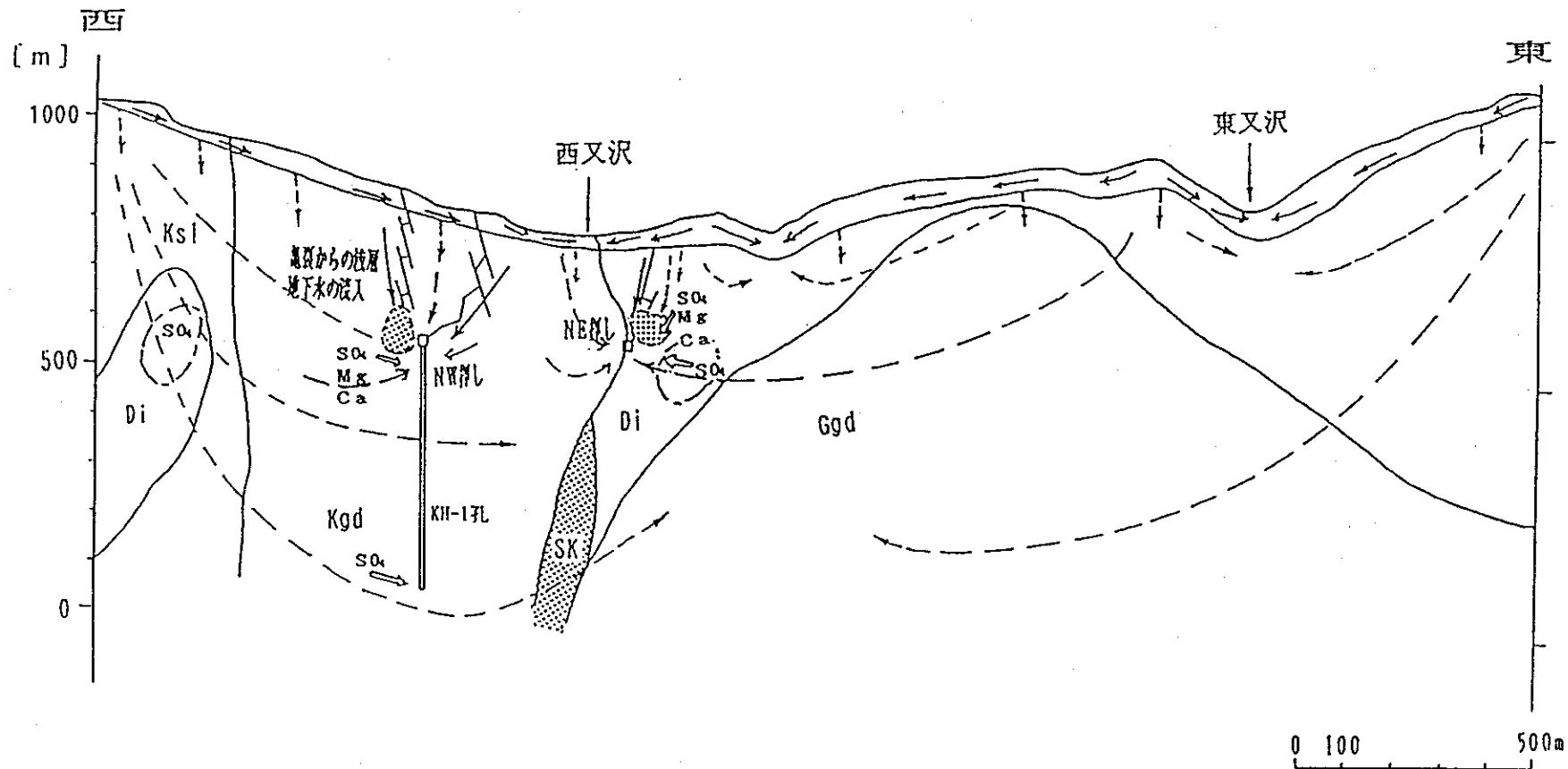
- ① 地震による水圧・湧水量の変化
- ② 地震による水質変化

これらのデータは、別に報告する地震による地下水流动変化の実例の文献調査により補完され、今後の解析に供するものである。

以下、地震による地下水理への影響検討の基本的な考え方を示し、平成3年度以降を含めた研究全体を展望する。

釜石鉱山では、すでに地震観測・地下水理観測を平成2年2月より開始している。地下水理観測項目は水圧および湧水量であり、それぞれ連続記録が得られている。平成2年度からは、さらに水質について月別定期観測、地震時の特別観測を実施する。本年度はこれら「水圧」「湧水量」「水質」の変化を地震時と非地震時に検出できるかどうかを中心に検討を加える。観測の対象とする釜石鉱山大峰鉱床付近の結晶質岩地域においては、すでに動力炉・核燃料開発事業団の委託によって、日鉄鉱業株が実施したいいくつかの調査・試験によって地下水流动の推定がなされている。そこでは、水質・安定同位体等の分析結果から浅層系地下水、深層地下水等起源の異なる水の区分、浸透経路によって異なる水質区分等が明らかにされている（図3.2-2）。このような既往の調査結果を踏まえて、「水質」変化のメカニズムについて以下の作業仮説を設定する。すなわち「これら起源ないし経路を異にする水の混合割合が変化することを通じて水質変動がもたらされる」というものである。このような仮説の妥当性は、湧水量ないし水圧の変動と水質変動との関係に着目することによって検証されるものと考える。

平成2年度は、予備的な文献調査から地震動以外に「湧水量・水圧・水質の変動」をもたらす要因として地球潮汐と季節的な地下水涵養量の変化をとりあげ、これらの要因に対応するような変動の検出に重点をおいて観測計画を立案する。すなわち、水



KsI : 甲子層（粘板岩）

Ggd : 栗橋岩体

Kgd : 蟹岳岩体（花崗閃綠岩）

Di : 蟹岳岩体（閃綠岩）

SK : スカルン

→ 浅層地下水の流れ

→ 深層地下水の流れ

(○) 蟹岳岩体の鉱化作用

によるSO₄の富化

(●) スカルン, スカルン化岩体

によるSO₄, Mg, Caの富化

元素の移動

図 3.2-2 釜石鉱山における地下水流動の模式図

質調査のための採水点、採水頻度、分析項目および水圧・流量の観測については表3.2-1の示すように計画した。これらの結果次第では、さらに図3.2-3に示すような研究の展開を予定している。

表3.2-1 平成2年度釜石鉱山における地下水理観測概要

| | |
|--|----------------|
| 1. 水 圧 (平成元年度からの継続) | 3ヶ所 |
| 2. 湧水量 (平成元年度からの継続) (新規; 湧水量変動の精密観測) | 1ヶ所 1ヶ所 |
| 3. 水 質 (新規; 採水による調査) | |
| (1) 試料採取箇所 | |
| 1) 大峰 550m level | |
| ① 水圧・湧水量観測付近 | 2ヶ所 |
| ② 坑内湧水箇所 | 9ヶ所 |
| ③ KH-1孔 | 5区間 |
| 2) 日峰 250m level | |
| ① 坑内湧水箇所 | 5ヶ所 |
| (2) 採水頻度 (それぞれ変動要因に対応して) | |
| 1) 季節変化 | 2回／月 |
| 2) 潮汐変化 | 1回／2時間×24時間×2回 |
| 3) 地震時 | 1回／時間×5時間 |
| (3) 分析項目 | |
| 1) 全採水試料について電気伝導度 | (釜石鉱山で実施) |
| 2) 一部試料について安定同位体 (δD ; $\delta^{18}O$) | (電力中央研究所で実施) |

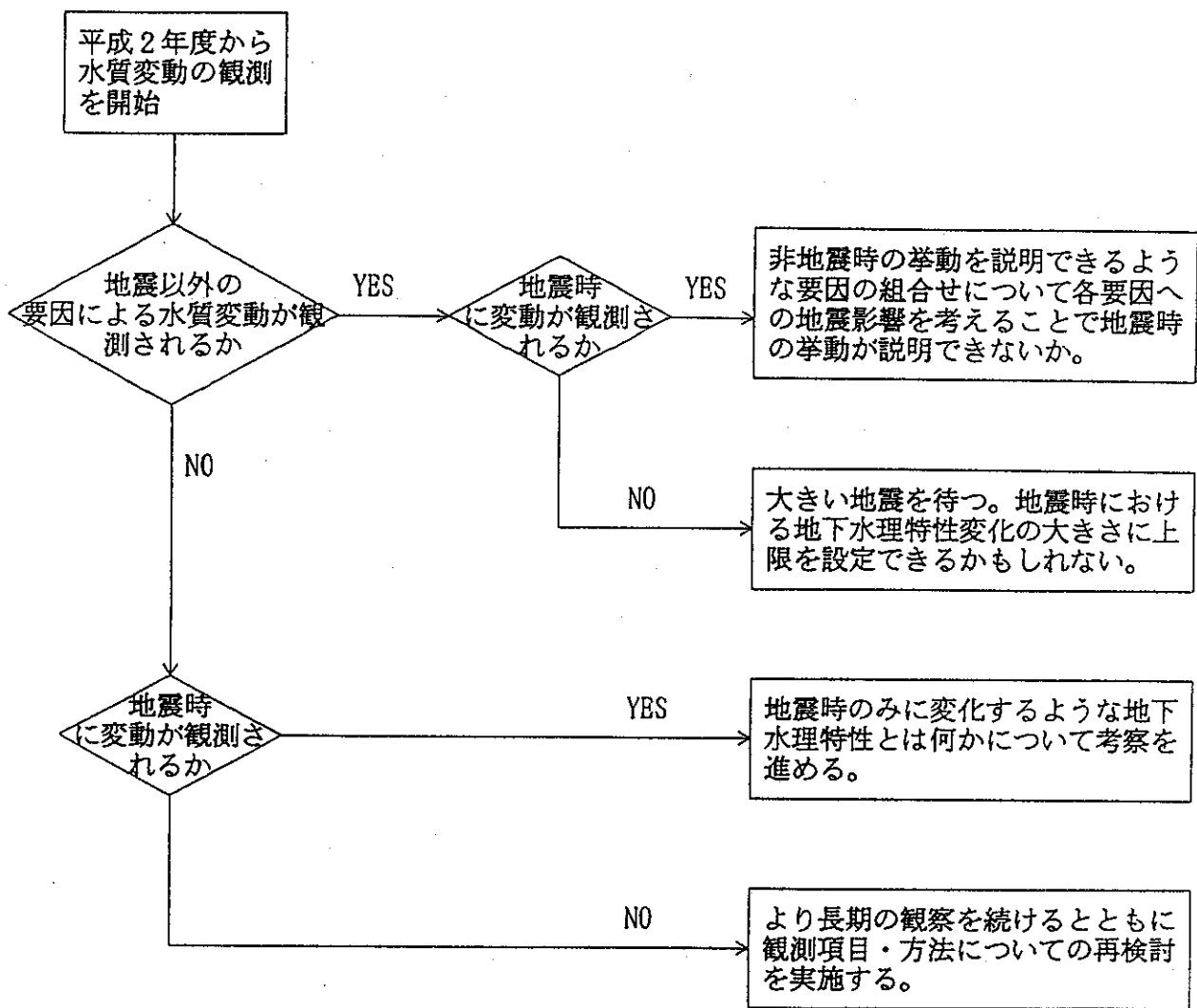


図 3.2-3 観測による地下水理の変動の検出に重点をおく本研究の進め方

3.3 地震観測

3.3.1 観測方法

釜石鉱山の大峰地区坑道に設置した地震計の位置は図 3.2-1 に示す通りで、測点 K-1 から測点 K-6 まで合計 6 箇所に設置してある。

その範囲は平面的には東西800m、南北800m、鉛直方向には地表 (EL. 865m) から EL. 725 m、EL. 550m、EL. 250m の各坑の 3 坑道、深度615m間にわたっている。

地震波の平面アレイ観測網として、EL. 550m 坑にそれぞれ760m、790m、860m の各辺をもつ三角形を形成するよう測点を配置し、さらにこの平面上の 3 点と地表部の測点によって三角錐状の観測網を形成している。なお全観測点を平面的にみると測点 K-1、K-2 および K-5 はほぼ同位置に設置されている。

各観測点とも表 3.3-1 に示すように NS 方向 (x) 、EW 方向 (y) および鉛直方向 (z) の 3 成分観測で、地震計は速度帰還型加速度計を使用している。地震データは分解能が良く微小地震動から強地震動まで観測できるデジタル方式で収録している。このシステムの A/D 変換器は 16 ビットで、最大振幅を 500gal とすると 0.015gal が最小分解能である。サンプリングタイムは 0.005sec である。トリガー方式は K-1 と K-2 の 2 測点の z 成分の AND 回路でトリガーレベルは 0.3 gal 、遅延は 5 秒である。なお、既設の K-1 ~ K-4 各測点の信号は EL. 550m に設けた観測室に信号ケーブルで送り集中記録しているが、K-5、K-6 の各測点の信号を観測室まで信号ケーブルで送ることは困難なため、この 2 点ではサーボ型加速度計を用いたデジタル強震計 (SMAC-MD) を設置し観測を実施している。このサーボ型加速度計は DC から 400Hz までの広い周波数範囲にわたりデータを記録することができ、既設の地震計の周波数範囲 (0.05~30Hz) をカバーしている。

K-5、K-6 測点の記録との時間的な対応を明らかにするための水晶時計は毎日 1 回定時に NHK の時報で自動的に較正される。

これらの地震観測装置のブロックダイヤグラムを図 3.3-1 に示す。

3.3.2 観測結果

観測を開始した平成 2 年 2 月から平成 3 年 2 月までの 1 カ年間に観測された 40 個の地震の諸元と震央を表 3.3-2 と 図 3.3-2 にそれぞれ示す。なお、各地震の諸元は、気象庁資料 (平成 3 年 3 月 11 日現在) によった。これらの地震の震央は岩手県沖、宮城

表 3.3-1 地震観測装置設置場所一覧表

| | 地点番号 | EL. (m) | 設置場所 | 測定機器 | 加速度計No. |
|------------------------|------|---------|--------|--|---------|
| 地震 加速度 計設置地 点 | K-1 | 865 | 地表面 | 水平成分 (NS) | K-1 X |
| | | | | 水平成分 (EW) | K-1 Y |
| | | | | 上下成分 (UD) | K-1 Z |
| | K-2 | 550 | 大峰地区坑道 | 水平成分 (NS) | K-2 X |
| | | | | 水平成分 (EW) | K-2 Y |
| | | | | 上下成分 (UD) | K-2 Z |
| | K-3 | 550 | " | 水平成分 (NS) | K-3 X |
| | | | | 水平成分 (EW) | K-3 Y |
| | | | | 上下成分 (UD) | K-3 Z |
| | K-4 | 550 | " | 水平成分 (NS) | K-4 X |
| | | | | 水平成分 (EW) | K-4 Y |
| | | | | 上下成分 (UD) | K-4 Z |
| | K-5 | 250 | " | 水平成分 (NS) | K-5 X |
| | | | | 水平成分 (EW) | K-5 Y |
| | | | | 上下成分 (UD) | K-5 Z |
| | K-6 | 725 | " | 水平成分 (NS) | K-6 X |
| | | | | 水平成分 (EW) | K-6 Y |
| | | | | 上下成分 (UD) | K-6 Z |
| 計測器設置地點 | 測定部 | 550 | " | 1. サーボ増幅器 2. 直流電源装置 3. 地震波収録装置 4. 収録・処理・遅延装置 5. 時刻信号発生器 6. テレルテレコーグ 7. アンシェーター 8. 起動・停止・校正装置 9. 最大値判別・表示器 10. 可視記録計 | _____ |

加速度地震計

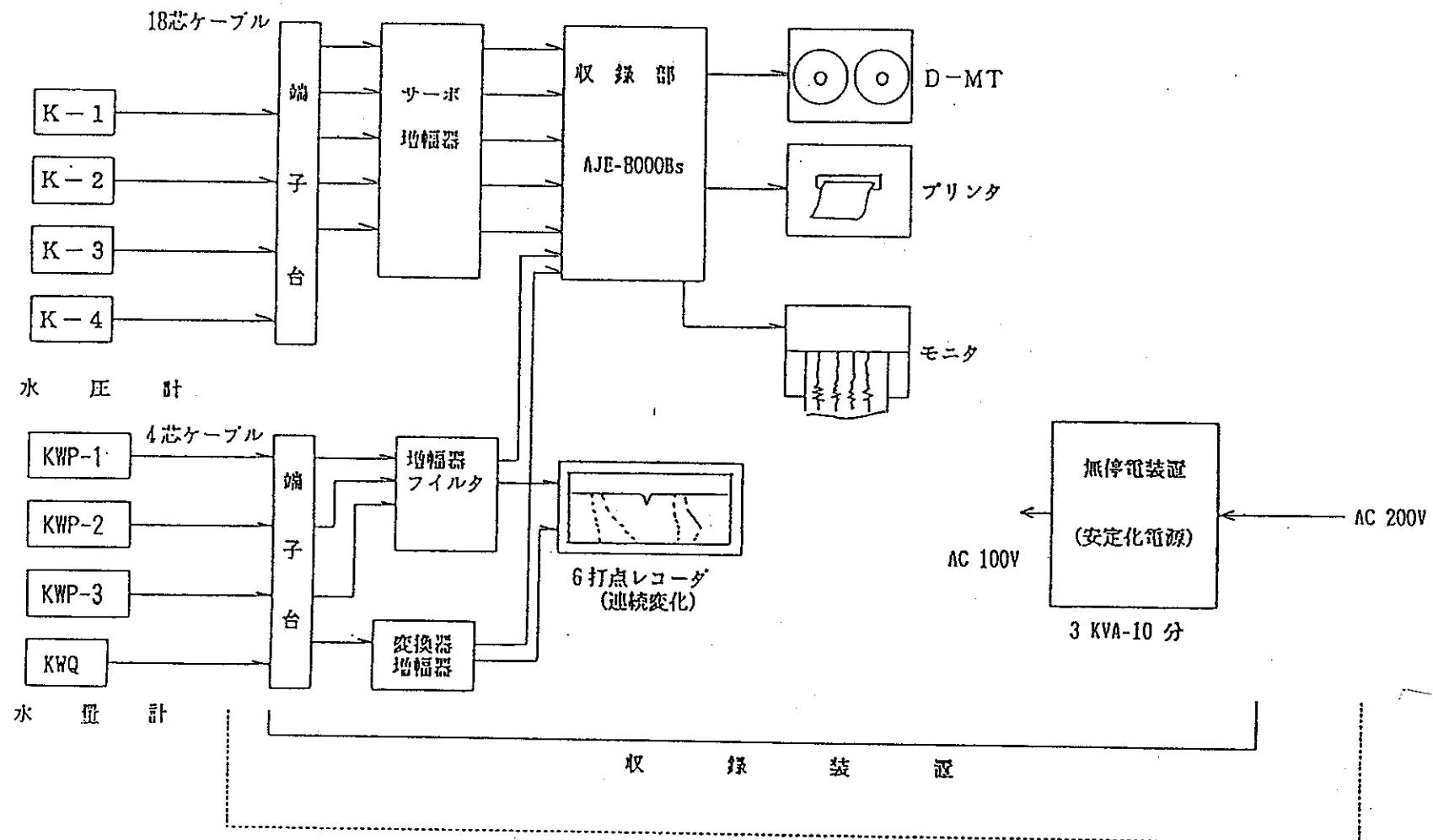


図 3.3-1 地震観測装置ブロック図

表 3.3-2(1) List of Max. Acceleration (1990.2~1991.2)

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | |
|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|-------|------|
| Earthquake | 岩手県中部 | 宮城県沖 | | 宮城県沖 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | | | 岩手県沖 | 石川県沖 | 岩手県南東部 | 岩手県中部 | 岩手県南部 | 岩手県中部 | 宮城県北部 | | | | |
| Origin time | 1990.2.21 05:48 | 1990.3.4 13:48 | 1990.3.20 07:02 | 1990.3.24 06:57 | 1990.4.7 06:27 | 1990.4.27 20:58 | 1990.4.30 11:31 | 1990.5.8 15:32 | 1990.5.12 13:52 | 1990.5.12 13:54 | 1990.5.13 15:39 | 1990.5.17 10:06 | 1990.6.2 18:39 | 1990.6.8 11:12 | 1990.6.14 07:42 | 1990.6.25 04:08 | 1990.6.29 08:25 | 1990.6.29 16:15 | | | |
| Latitude | 39.8° | 38.5° | | 38.2° | 39° 19' | 39° 29' | 40° 06' | 39° 05' | | | 39° 42' | 37° 03' | 39° 08' | 39° 43' | 38° 53' | 39° 45' | 38° 56' | | | | |
| Longitude | 141.8° | 141.6° | | 142.0° | 142° 04' | 142° 08' | 142° 58' | 142° 08' | | | 142° 22' | 137° 06' | 141° 39' | 141° 59' | 141° 16' | 141° 48' | 141° 36' | | | | |
| Depth (km) | 70 | 50 | | 50 | 51 | 55 | 21 | 47 | | | 35 | 272 | 20 | 65 | 117 | 57 | 69 | | | | |
| Magnitude | 3.8 | 3.4 | | 3.5 | 3.3 | 3.7 | 5.0 | 3.9 | | | 3.9 | - | 2.1 | 3.2 | - | 3.2 | 3.9 | | | | |
| Epicentral Distance (km) | 56.7 | 89.0 | | 125.5 | 34.5 | 45.0 | 142.6 | 46.9 | | | 74.9 | 471.7 | 18.6 | 53.7 | 57.8 | 51.2 | 41.1 | | | | |
| Hypocentral Distance (km) | 90.1 | 102.1 | | 135.1 | 61.6 | 71.1 | 144.1 | 66.4 | | | 82.6 | 544.5 | 27.3 | 84.3 | 130.5 | 76.6 | 80.3 | | | | |
| Obs. pt | Location | EL. (m) | ※ | Max. Acceleration (gal) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-1 | On the ground | 865 | X | 2.57 | 0.49 | 0.76 | 1.74 | 2.24 | 2.49 | 0.91 | 2.70 | 2.70 | 1.35 | 2.17 | 0.95 | 0.85 | 0.73 | 0.79 | 0.95 | 11.85 | 0.50 |
| | | | Y | 3.34 | 1.06 | 1.33 | 2.52 | 3.01 | 4.75 | 1.10 | 4.94 | 1.77 | 1.22 | 2.75 | 1.10 | 1.46 | 0.76 | 1.40 | 1.12 | 13.83 | 0.76 |
| | | | Z | 2.06 | 0.66 | 0.86 | 1.56 | 1.72 | 3.40 | 0.71 | 1.92 | 2.55 | 1.74 | 1.57 | 0.72 | 0.85 | 0.63 | 0.90 | 0.68 | 6.47 | 0.61 |
| K-2 | Under ground | 550 | X | 1.43 | 0.22 | 0.42 | 0.68 | 1.74 | 2.08 | 0.41 | 1.36 | 0.91 | 0.73 | 0.98 | 0.39 | 0.58 | 0.35 | 0.38 | 0.58 | 5.98 | 0.41 |
| | | | Y | 1.32 | 0.39 | 0.52 | 0.88 | 1.81 | 2.00 | 0.44 | 1.38 | 0.83 | 0.78 | 0.68 | 0.48 | 0.61 | 0.47 | 0.66 | 0.56 | 6.23 | 0.22 |
| | | | Z | 0.94 | 0.24 | 0.31 | 0.68 | 0.83 | 1.13 | 0.39 | 1.02 | 1.65 | 1.37 | 0.63 | 0.29 | 0.65 | 0.30 | 0.23 | 0.41 | 2.79 | 0.24 |
| K-3 | Under ground | 550 | X | 1.57 | 0.26 | 0.40 | 1.43 | 1.35 | 0.80 | 0.54 | 1.34 | 1.21 | 1.10 | 1.04 | 0.41 | 0.51 | 0.33 | 0.52 | 0.59 | 5.59 | 0.24 |
| | | | Y | 1.98 | 0.24 | 0.40 | 1.06 | 1.83 | 0.81 | 0.38 | 1.88 | 0.77 | 0.96 | 0.59 | 0.44 | 0.46 | 0.35 | 0.52 | 1.07 | 4.20 | 0.17 |
| | | | Z | 1.11 | 0.27 | 0.48 | 0.85 | 1.04 | 0.56 | 0.55 | 0.99 | 1.68 | 1.22 | 0.48 | 0.40 | 0.40 | 0.31 | 0.27 | 0.48 | 2.71 | 0.34 |
| K-4 | Under ground | 550 | X | 1.00 | 0.21 | 0.33 | 1.28 | 1.23 | 0.63 | 0.36 | 0.95 | 1.00 | 0.95 | 0.65 | 0.30 | 0.61 | 0.31 | 0.37 | 0.44 | 4.88 | 0.35 |
| | | | Y | 0.85 | 0.27 | 0.30 | 0.81 | 0.98 | 0.60 | 0.30 | 1.18 | 0.81 | 0.72 | 0.43 | 0.34 | 0.26 | 0.31 | 0.34 | 0.37 | 3.36 | 0.21 |
| | | | Z | 0.81 | 0.21 | 0.24 | 0.71 | 0.56 | 0.55 | 0.37 | 1.03 | 1.46 | 1.19 | 0.34 | 0.19 | 0.39 | 0.15 | 0.16 | 0.34 | 2.67 | 0.22 |

※ X: NS (horizontal), Y: EW (horizontal), Z: UD (vertical)

各地震の諸元については、気象庁地震課資料（1991.3.11 現在）によった

表 3.3-2(2) : List of Max. Acceleration (1990.2~1991.2)

| No. | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------|------|------|
| Earthquake | 岩手県沖 | 岩手県中部 | 岩手県南東部 | 宮城県沖 | 岩手県沖 | 宮城県沖 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | | 岩手県沖 | 茨城県中部 | 岩手県沖 | 青森県東方沖 | 岩手県南部 | | | | |
| Origin time | 1990.7.16 21:35 | 1990.7.18 21:11 | 1990.7.22 09:10 | 1990.8.9 02:58 | 1990.8.27 18:44 | 1990.9.5 14:45 | 1990.9.15 01:47 | 1990.9.19 11:36 | 1990.9.19 17:29 | 1990.9.23 13:05 | 1990.9.23 19:06 | 1990.10.2 08:48 | 1990.10.5 19:14 | 1990.10.12 11:14 | 1990.10.24 20:28 | 1990.12.11 10:09 | 1990.12.28 12:28 | 1991.1.13 22:13 | | | |
| Latitude | 39° 17' | 39° 42' | 39° 12' | 38° 53' | 39° 58' | 38° 44' | 38° 44' | 39° 38' | 39° 15' | 39° 39' | 39° 35' | 38° 46' | | 39° 45' | 36° 21' | 40° 07' | 41° 29' | 38° 59' | | | |
| Longitude | 142° 08' | 141° 50' | 141° 42' | 141° 39' | 141° 57' | 142° 04' | 142° 03' | 142° 05' | 142° 22' | 142° 06' | 143° 07' | 142° 06' | | 142° 21' | 140° 34' | 142° 31' | 142° 01' | 141° 27' | | | |
| Depth (km) | 54 | 67 | 11 | 110 | 50 | 60 | 60 | 50 | 45 | 50 | 0 | 60 | | 45 | 100 | 28 | 64 | 85 | | | |
| Magnitude | 4.8 | 3.8 | 2.0 | - | 3.9 | 4.3 | 4.1 | 3.9 | 3.8 | 3.6 | 4.9 | 3.8 | | 3.0 | 4.6 | 4.1 | 4.9 | - | | | |
| Epicentral Distance (km) | 40.3 | 46.6 | 11.2 | 46.3 | 77.9 | 71.8 | 71.2 | 51.5 | 60.7 | 53.9 | 128.8 | 70.1 | | 77.1 | 341.5 | 116.4 | 244.3 | 39.8 | | | |
| Hypocentral Distance (km) | 67.4 | 81.6 | 15.7 | 119.3 | 92.6 | 93.6 | 93.1 | 71.8 | 75.5 | 73.5 | 128.8 | 92.3 | | 89.3 | 355.9 | 119.7 | 252.6 | 93.9 | | | |
| Obs. pt | Location | EL. (m) | ※ | Max. Acceleration (gal) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-1 | On the ground | 865 | X | 15.68 | 1.18 | 0.42 | 0.85 | 2.05 | 3.62 | 2.27 | 4.16 | 0.87 | 1.06 | 0.74 | 1.24 | 1.03 | 1.76 | 2.34 | 0.88 | 0.82 | 1.40 |
| | | | Y | 16.81 | 1.25 | 1.13 | 1.05 | 2.66 | 7.46 | 2.37 | 7.74 | 1.15 | 1.81 | 0.89 | 2.19 | 1.53 | 1.83 | 2.68 | 0.87 | 0.83 | 2.72 |
| | | | Z | 13.41 | 0.89 | 0.48 | 0.54 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.20 | 0.49 | 0.70 | 1.50 | |
| K-2 | Under ground | 550 | X | 9.99 | 0.92 | 0.33 | 0.32 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.49 | 0.74 | 0.75 | 0.27 | 0.44 | 0.70 |
| | | | Y | 9.00 | 0.69 | 0.52 | 0.52 | 1.28 | 2.56 | 1.31 | 2.93 | 0.48 | 0.40 | 0.31 | 1.29 | 0.47 | 0.71 | 0.98 | 0.41 | 0.37 | 0.87 |
| | | | Z | 5.41 | 0.69 | 0.21 | 0.25 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.94 | - | 0.37 | 0.63 | |
| K-3 | Under ground | 550 | X | 7.32 | 1.11 | 0.20 | 0.69 | 1.68 | 2.47 | 1.08 | 1.37 | 0.42 | 0.32 | 0.40 | 0.63 | 0.53 | 0.96 | 1.06 | 0.32 | 0.51 | 0.84 |
| | | | Y | 5.05 | 0.20 | 0.38 | 0.46 | 1.48 | 2.39 | 1.35 | 1.25 | 0.34 | 0.30 | 0.29 | 1.07 | 0.31 | 0.61 | 1.14 | 0.35 | 0.50 | 0.90 |
| | | | Z | 3.31 | 0.79 | 0.21 | 0.20 | 1.03 | 1.90 | 0.83 | 1.28 | 0.27 | 0.27 | 0.29 | 0.74 | - | 1.12 | - | 0.68 | 0.69 | |
| K-4 | Under ground | 550 | X | 8.94 | 0.57 | 0.24 | 0.32 | 0.87 | 1.80 | 0.98 | 2.03 | 0.38 | 0.53 | 0.37 | 0.93 | 0.63 | 0.78 | 0.77 | 0.29 | 0.36 | 0.62 |
| | | | Y | 8.21 | 0.46 | 0.23 | 0.21 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.84 | 0.26 | 0.41 | 0.56 | |
| | | | Z | 3.46 | 0.43 | 0.14 | 0.19 | 0.70 | 1.70 | 0.61 | 1.01 | 0.26 | 0.22 | 0.22 | 0.79 | 0.40 | 0.46 | 1.08 | - | 0.40 | 0.36 |

※ X: NS (horizontal), Y: EW (horizontal), Z: UD (vertical)

各地震の諸元については、気象庁地震課資料（1991.3.11 現在）によった

表 3.3-2(3) List of Max. Acceleration (1990.2~1991.2)

| No. | | 37 | 38 | 39 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Earthquake | | 宮城県沖 | 岩手県中部 | 岩手県沖 | 岩手県沖 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Origin time | | 1991.1.16 23:49 | 1991.1.27 18:56 | 1991.2.3 00:00 | 1991.2.3 06:17 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Latitude | | 38° 15' | 39° 46' | 39° 40' | 39° 31' | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Longitude | | 141° 55' | 141° 59' | 142° 11' | 142° 23' | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Depth (km) | | 48 | 68 | 50 | 53 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Magnitude | | 4.7 | 4.6 | 4.3 | 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Epicentral Distance (km) | | 118.6 | 58.1 | 60.3 | 66.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hypocentral Distance (km) | | 127.9 | 89.7 | 78.3 | 84.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Obs. pt | Location | EL. (m) | ※ | Max. Acceleration (gal) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-1 | On the ground | 865 | X | 3.09 | 6.71 | 2.45 | 3.58 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Y | 4.11 | 13.04 | 5.16 | 3.77 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Z | 3.20 | 4.21 | 2.45 | 3.08 | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-2 | Under ground | 550 | X | 1.48 | 3.67 | 1.95 | 1.06 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Y | 1.77 | 3.51 | 1.95 | 1.31 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Z | 1.65 | 2.91 | 1.17 | 0.90 | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-3 | Under ground | 550 | X | 1.65 | 3.71 | 1.74 | 1.20 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Y | 2.06 | 4.93 | 1.20 | 0.81 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Z | 1.58 | 2.81 | 1.11 | 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-4 | Under ground | 550 | X | 1.31 | 3.58 | 1.94 | 0.80 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Y | 1.55 | 2.80 | 1.50 | 0.85 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Z | 1.24 | 2.10 | 0.91 | 0.69 | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-5 | Under ground | 725 | X | 1.80 | 3.60 | ※1 - | 0.80 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Y | 2.00 | 3.85 | ※1 - | 0.90 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Z | 1.50 | 3.17 | ※1 - | 0.70 | | | | | | | | | | | | | | | |
| K-6 | Under ground | 250 | X | 1.60 | 4.07 | ※1 - | ※1 - | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Y | 1.80 | 3.47 | ※1 - | ※1 - | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Z | 2.10 | 3.14 | ※1 - | ※1 - | | | | | | | | | | | | | | | |

※1 当地点で、トリガーレベル以下の地震

※ X: NS (horizontal), Y: EW (horizontal), Z: UD (vertical)
各地震の諸元については、気象庁地震課資料（1991.3.11 現在）によった

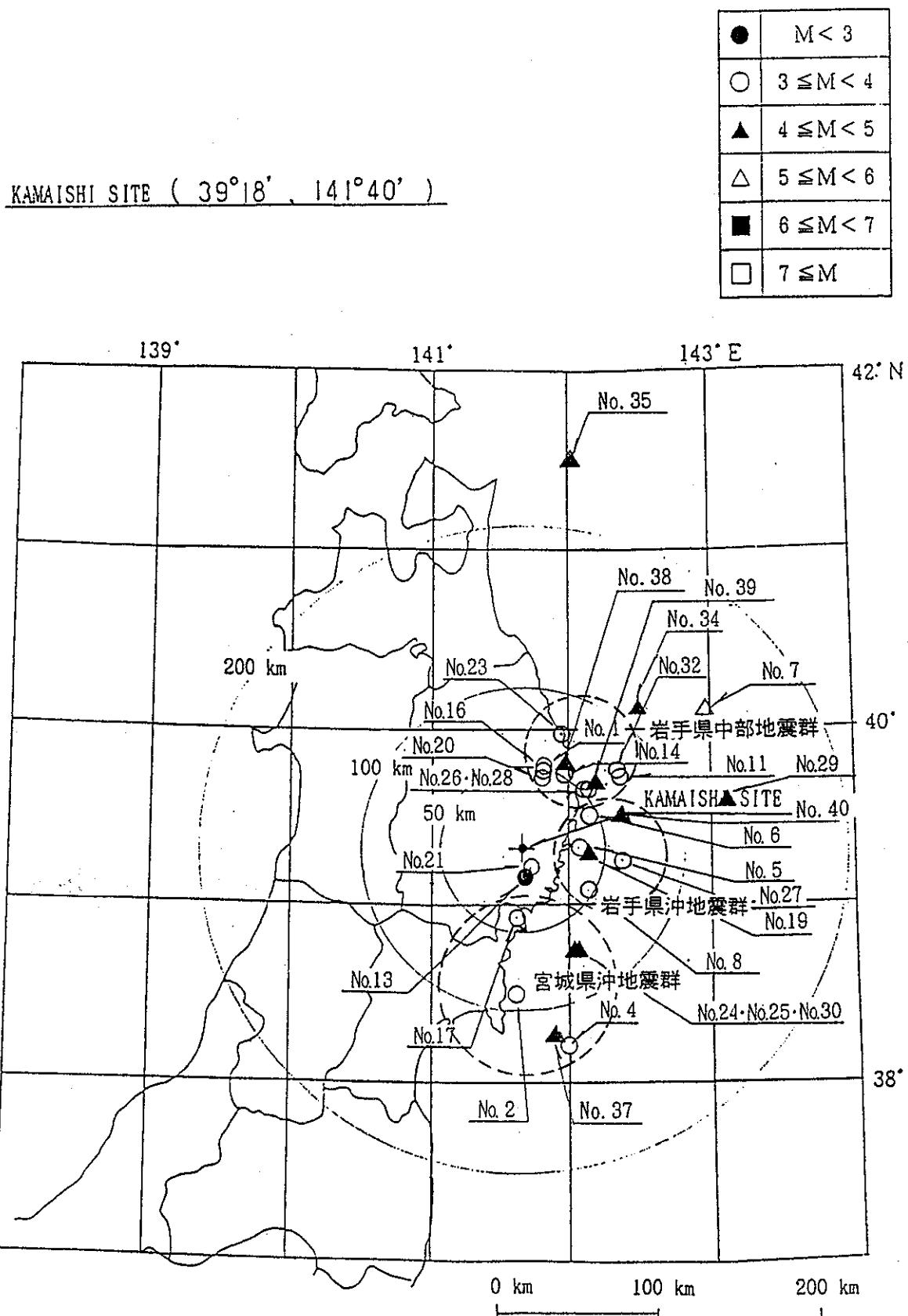


図 3.3-2 観測地震の震央位置 (1990年 2月～1991年 2月)

Location of epicenters at observed earthquake
(from Feb. 1990 to Feb. 1991)

県沖に集中しており、マグニチュードが4未満のものが19個、4～5のものが11個、5以上が1個である。震央距離は岩手県沖の地震で30～120km、宮城県沖のもので70～120kmである。この内、加速度が最大の地震は岩手県沖の地震（地震番号19, M=4.8, 震央距離40km）で地中のK-2 (GL-315.0m)においてx成分 10.0gal, y成分 9.0gal, z成分5.4gal、地上の K-1 (GL-0.0m)において、x, y, z成分はそれぞれ 15.7gal, 16.8gal, 13.4gal である。

(1) 地上と地下の地震動特性の比較

① マグニチュードと震源距離の関係

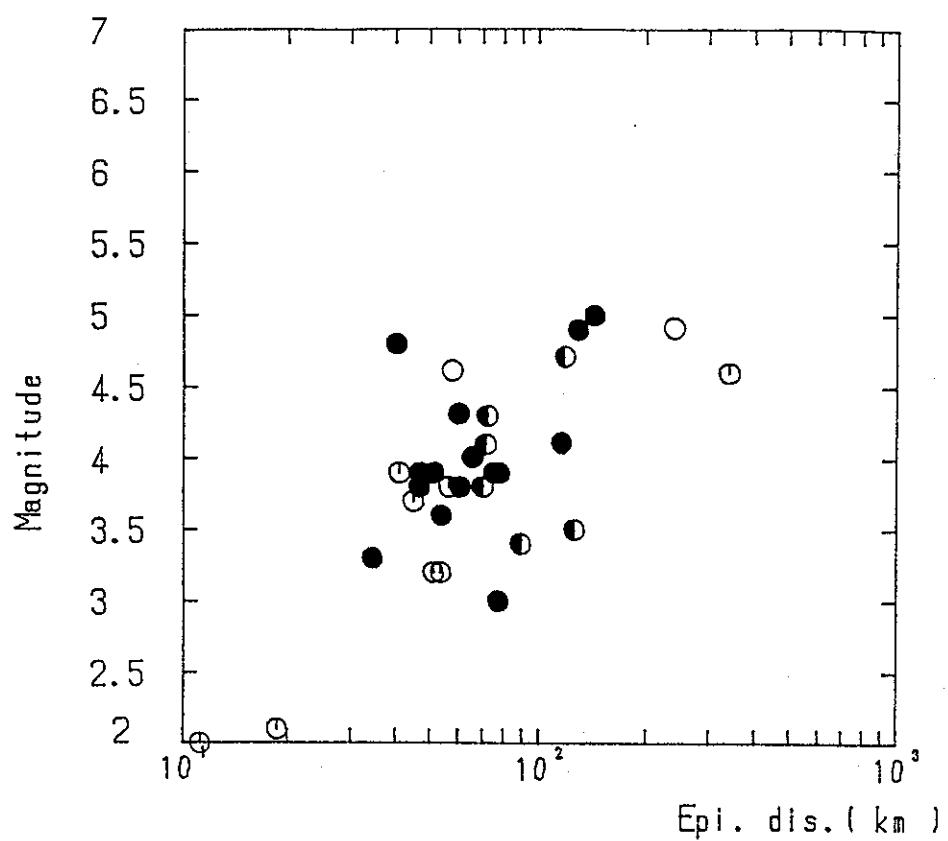
観測された40個の地震のうち、地震諸元が判明している31個の地震のマグニチュードと震央距離および震源距離の関係を図3.3-3に示す。同図では岩手県沖、宮城県沖および他の地震にわけてそれぞれ別の記号で示してある。図に示すように、岩手県沖の地震はマグニチュードが3.0～5.0、震源距離が60～140km程度であるのに対し、宮城県沖の地震はマグニチュードが3.4～4.7、震源距離90～130kmである。また、地震観測地点からみた岩手県沖と宮城県沖の地震の震央は、それぞれほぼ北東と南東方向である。

② 最大加速度

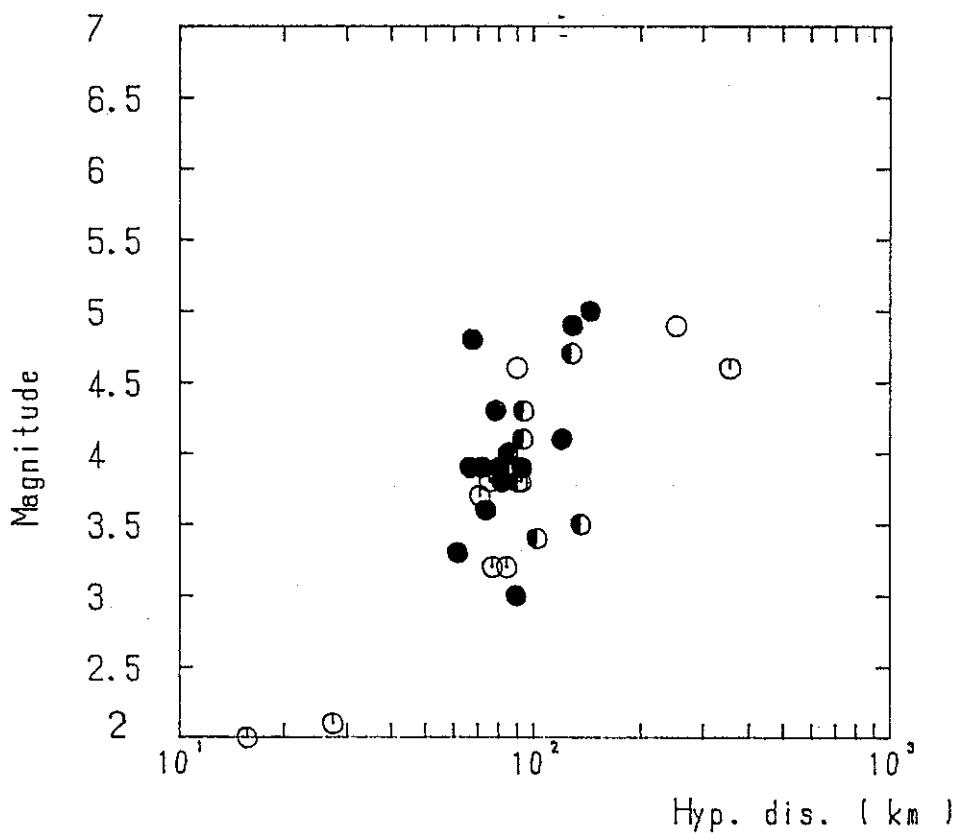
観測された40個の地震の最大加速度および加速度振幅比をまとめると以下のようである。

地下部測点K-2と地上部測点K-1の最大加速度の関係を図3.3-4に示す。図から明らかなように、K-1とK-2の2点間の振幅比は、多くの場合K-1の最大加速度がK-2の1～4倍の範囲に入っている。x, yおよびzの3成分を比較すると、振幅比で3倍を超えているものの多くはy成分である。

次に、K-1点を基準とした場合のK-5、K-2およびK-6の鉛直アレー点での加速度振幅比を図3.3-5に示す。先に述べたように、EL. 250mと725mレベルのK-5、K-6測点は平成2年11月から観測を開始したため、これまでに観測された地震は3個である。このようにデータが少ないため断定はできないが、同図よりEL. 725mレベルのK-6点からEL. 250mレベルのK-5点までは加速度振幅はほとんど変らず、地表近傍に位置するK-1点でおよそ2倍に増幅されるようである。



(1) マグニチュードと震央距離の関係



(2) マグニチュードと震源距離の関係

図 3.3-3 観測地震のマグニチュードと距離の関係

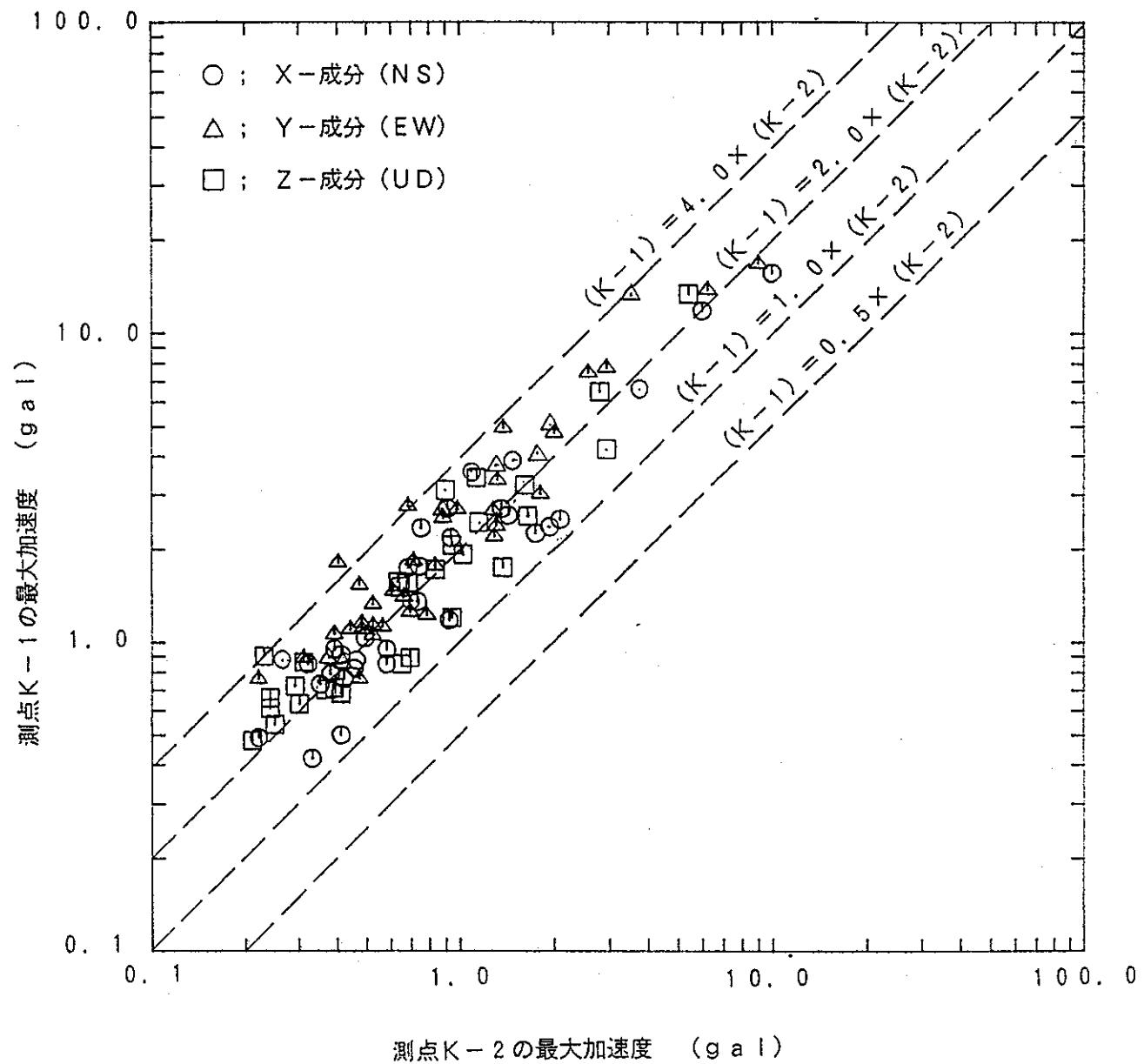


図 3.3-4 地下部測点K-2と地上部測点K-1の最大加速度の関係

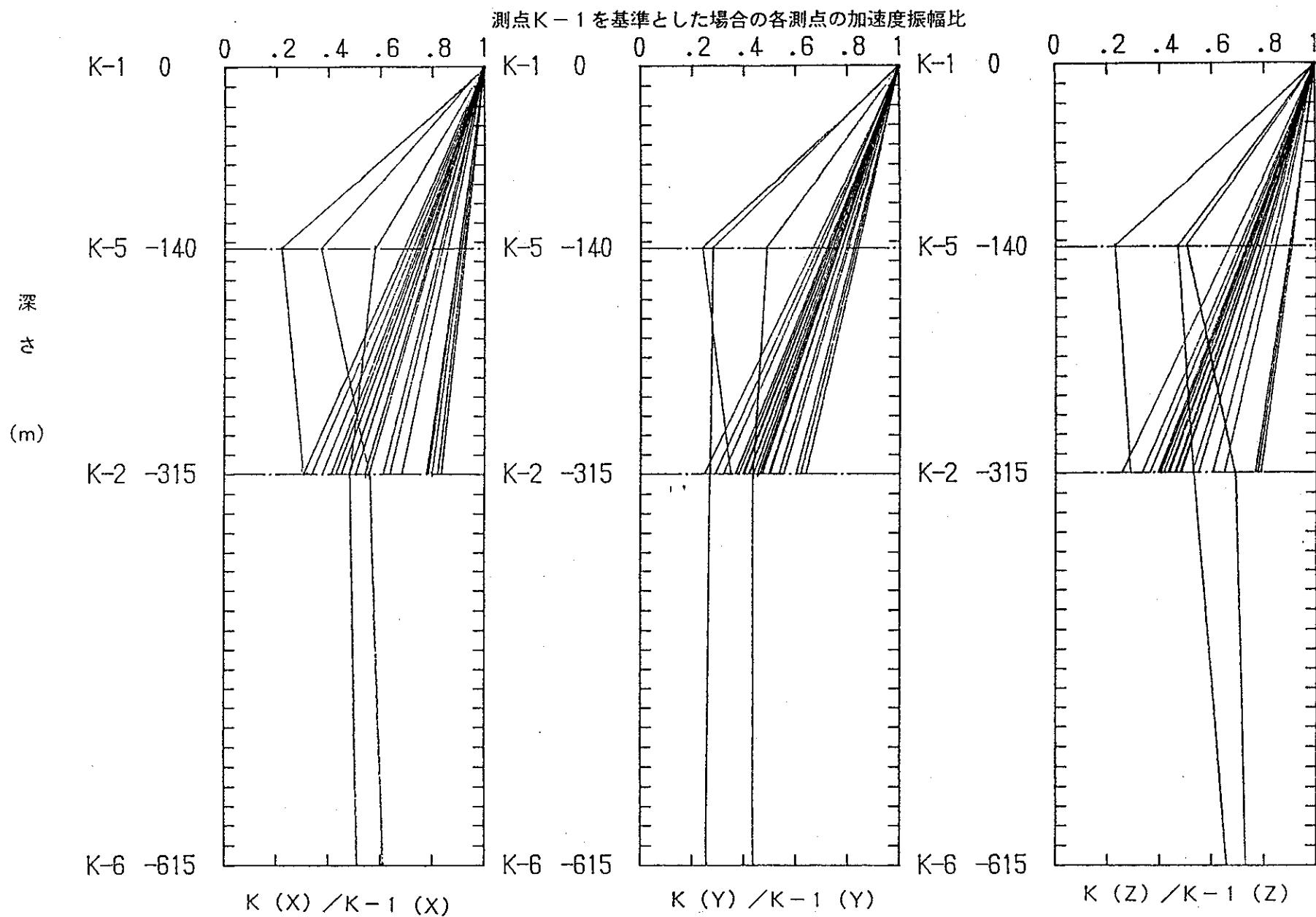


図 3.3-5 全データを対象とした場合の加速度振幅比の比較 (全周波数域)

図3.3-5においてK-1とK-2の2点間のx、yおよびzの3成分の加速度振幅比を比較すると、測点K-1を基準とした場合の加速度振幅比が最も小さい成分はy成分で、測点K-2での加速度振幅比の平均値は0.46(標準偏差±0.105)である。次いでz成分0.50(標準偏差±0.157)、x成分0.58(標準偏差±0.151)の順となっている。

ところで、振幅特性は対象とする周波数帯域に依存することから、個々の地震動の周波数特性が異なれば最大加速度の振幅特性も異なると考えられる。

そこで、K-1～K-4点でのデータについて2Hz毎に区分した各周波数域における加速度振幅比をプロットしたものが図3.3-6である。同図によればこれら各成分毎の加速度振幅比が最も小さくなる周波数域は以下の通りである。

- 1)測点K-1を基準とした場合の加速度振幅比は、x成分では4～8Hz前後の周波数域で最も小さくなっている。また14Hz以下の周波数域では各地震共に同じ傾向を示している。
- 2)同様にy成分では6～8Hzの周波数域で加速度振幅比が最も小さい。
- 3)これに対しz成分では、10～14Hz前後の周波数域で加速度振幅比が最も小さくなっている。

以上のことより、各地震ともに振幅特性は地点特有の固有周波数に依存し、各成分毎に顕著な傾向があることが確認された。電力中央研究所では、成層構造を示す硬質岩盤での地震観測記録に基づき、数値解析によって地中地震動の深さ方向の低減特性を次式のように提案している。*1

1

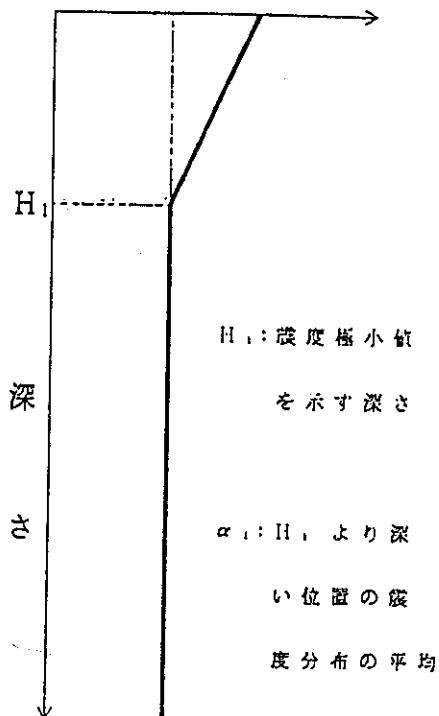
加速度（正規化震度）

$$H_1 = \frac{1}{4} V_s \cdot T$$

4

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \sqrt{1 + (V_s/V_B)^2}$$

$$0 \quad \alpha_1 \quad 1.0$$



ここに V_s : 基盤より表層の S 波速度

V_B : 基盤の S 波速度

T : 入射波の加速度応答スペクトル
の卓越周期

* 1 佐藤ほか 「地中地震動の深さ方向の低減特性とその定式化」

(財)電力中央研究所 研究報告 U385043 昭和61年6月

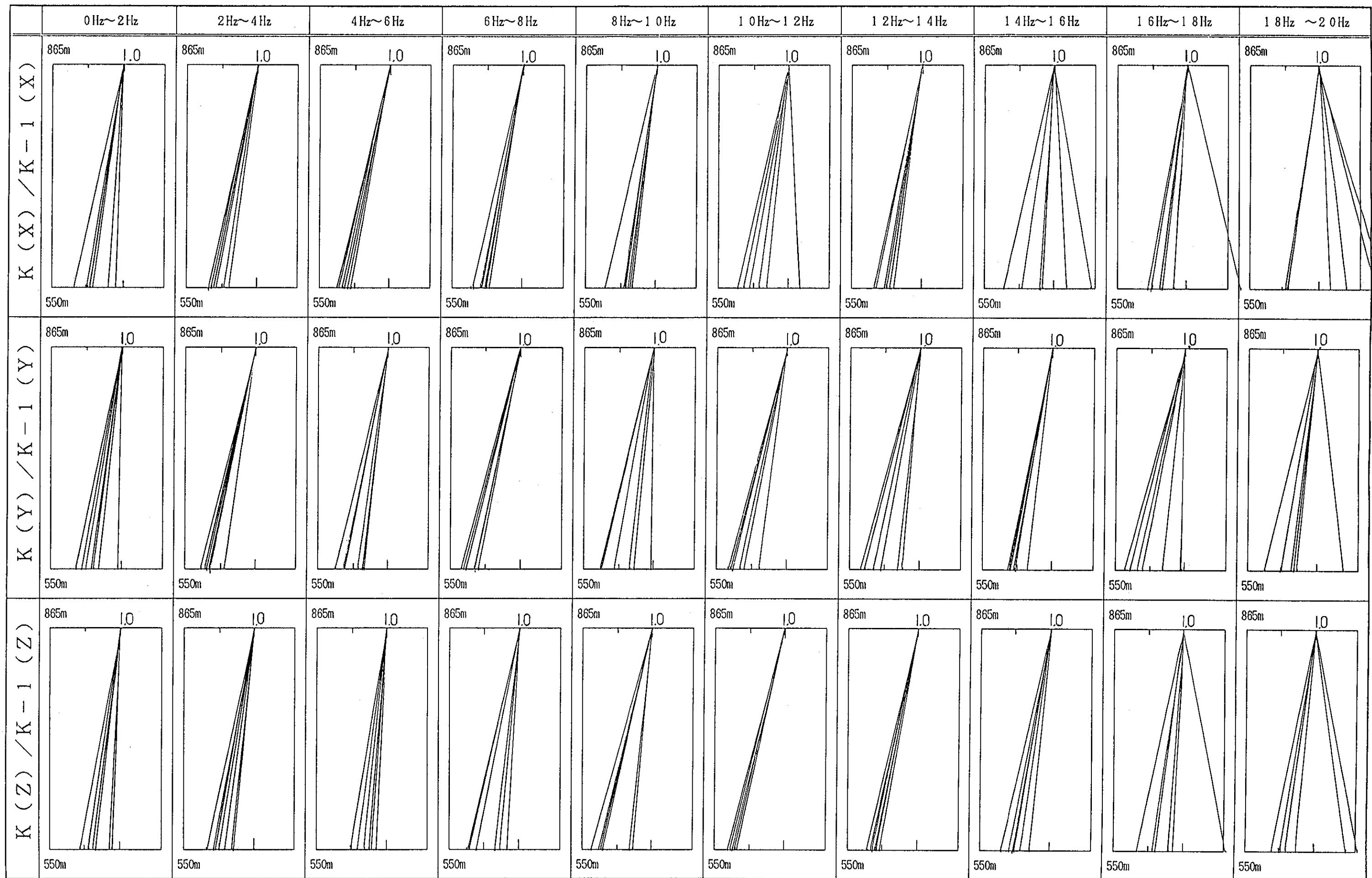


図 3.3-6 各周波数域毎での加速度振幅比の上乗数 (測点 K-1 を基準とした場合)

上述の提案式に対し釜石鉱山での地盤特性を考慮して $V_s = 1000 \text{m/s}$ 、 $V_B = 2000 \text{m/s}$ 、 $T = 0.4 \text{sec}$ とすると、 $H_1 = 100 \text{m}$ 、 $\alpha_1 = 0.56$ を得る。これらの値は図3.3-5に示す観測値と概ね一致している。したがって、地層処分施設の対象となる地下数百mの深部における地震力の推定に、この提案式を用いることが可能であると判断される。

(2) 地震動の周波数特性

① 周波数特性

観測期間中に観測された40個の地震のうち、地表に近いK-1点で最大加速度が10galを越えた宮城県北部の地震（地震番号17）、岩手県沖の地震（地震番号19）および岩手県中部の地震（地震番号38）に着目して以下に示す周波数解析を実施した。解析に用いた地震番号17、19、38の各地震の観測波形を図3.3-7～3.3-9にそれぞれ示す。なお、岩手県中部の地震（地震番号38）においては、新たに増設したK-5、K-6地点の観測波形をも示しているが、同波形は他地点と同期をとっていないため各々記録開始時刻が異なっている。また、これらの波形から求めたフーリエスペクトル、パワースペクトルおよび減衰定数を5%とした時の応答スペクトルをそれぞれ順に図3.3-10、図3.3-11および図3.3-12に示す。

図3.3-10よりフーリエスペクトルの特徴をまとめると次のようになる。1Hz～10Hzの周波数範囲のスペクトルに着目すると、3つの地震のx、yおよびz成分はともに地下深部のK-2～K-4点で顕著な凹凸があり、地上部のK-1になるとほぼフラットなスペクトル形状を示す傾向にある。また、地下深部より地上付近に伝播するにつれx成分で4～6Hz、y成分で3Hz, 7Hz前後、z成分にて4Hz, 10Hz前後の周波数が増幅する傾向にある。

次に、パワースペクトルの形状はx、yおよびz成分ともに似通った形状を示す。

宮城県北部や岩手県沖の地震の加速度応答スペクトルは、x、yおよびzのすべての成分が地下深部に対して地表付近で増幅している。岩手県中部の地震の加速度応答スペクトルのx方向およびy方向も同様に、地下深部に対して地表付近で増幅するが、z成分では地表付近と地下深部とではほぼ同様の値を示している。

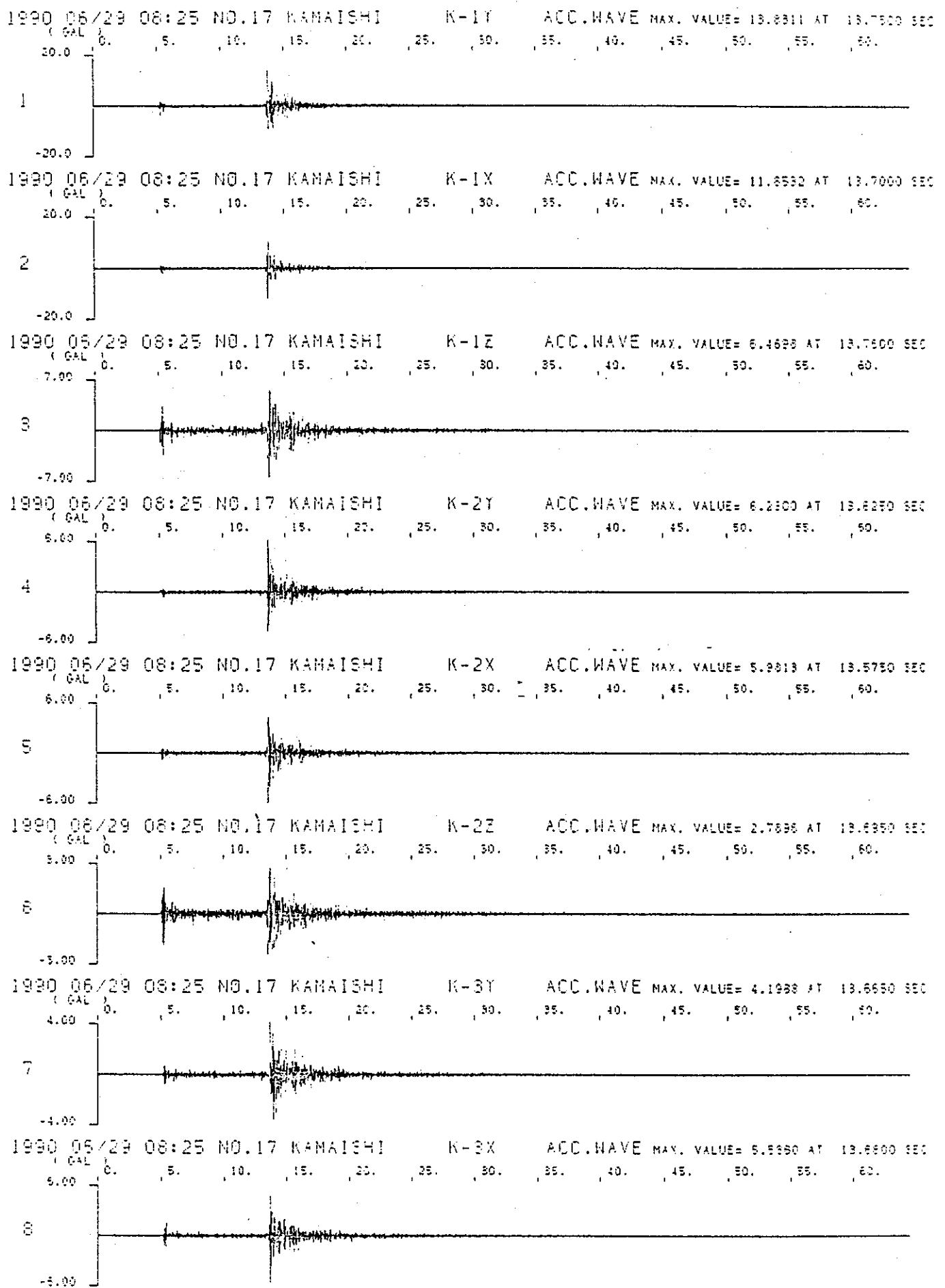


図 3.3-7(1) 観測地震加速度波形 (EQ. No.17 1990. 6/29 08:25)

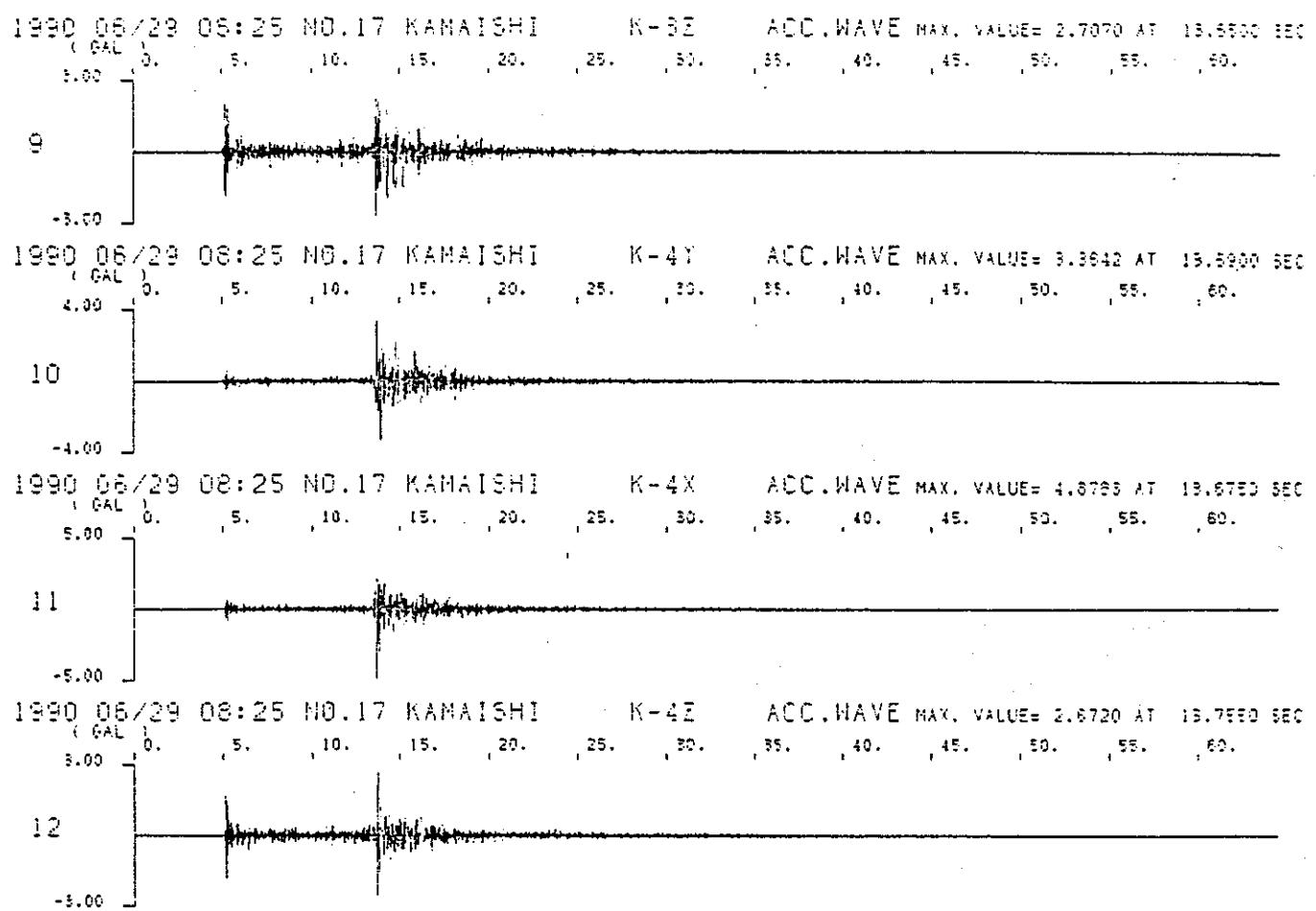


図 3.3-7(2) 観測地震加速度波形 (EQ. No.17 1990. 6/29 08:25)

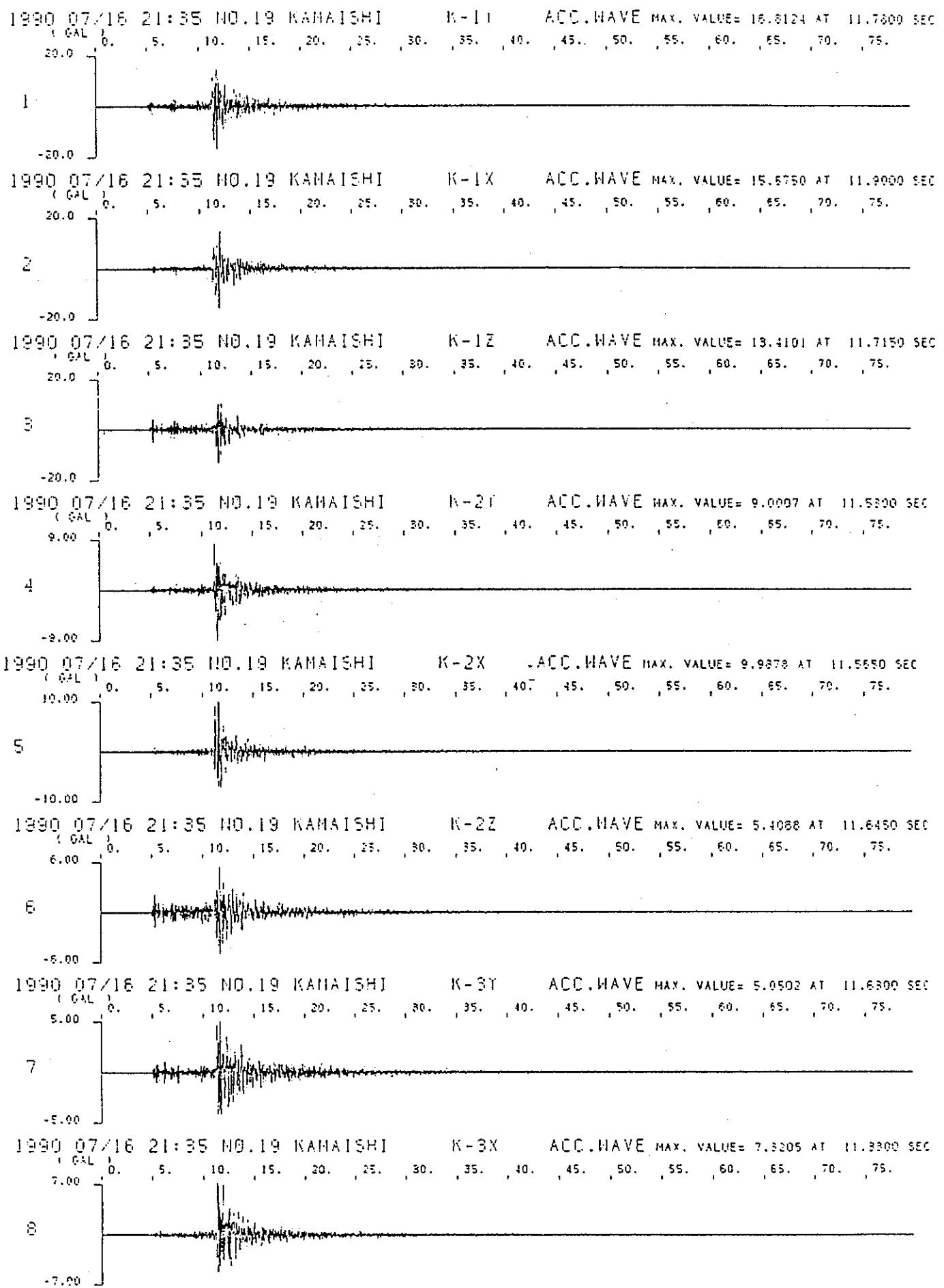


図 3.3-8(1) 観測地震加速度波形 (E0. No.19 1990. 7/16 21:35)

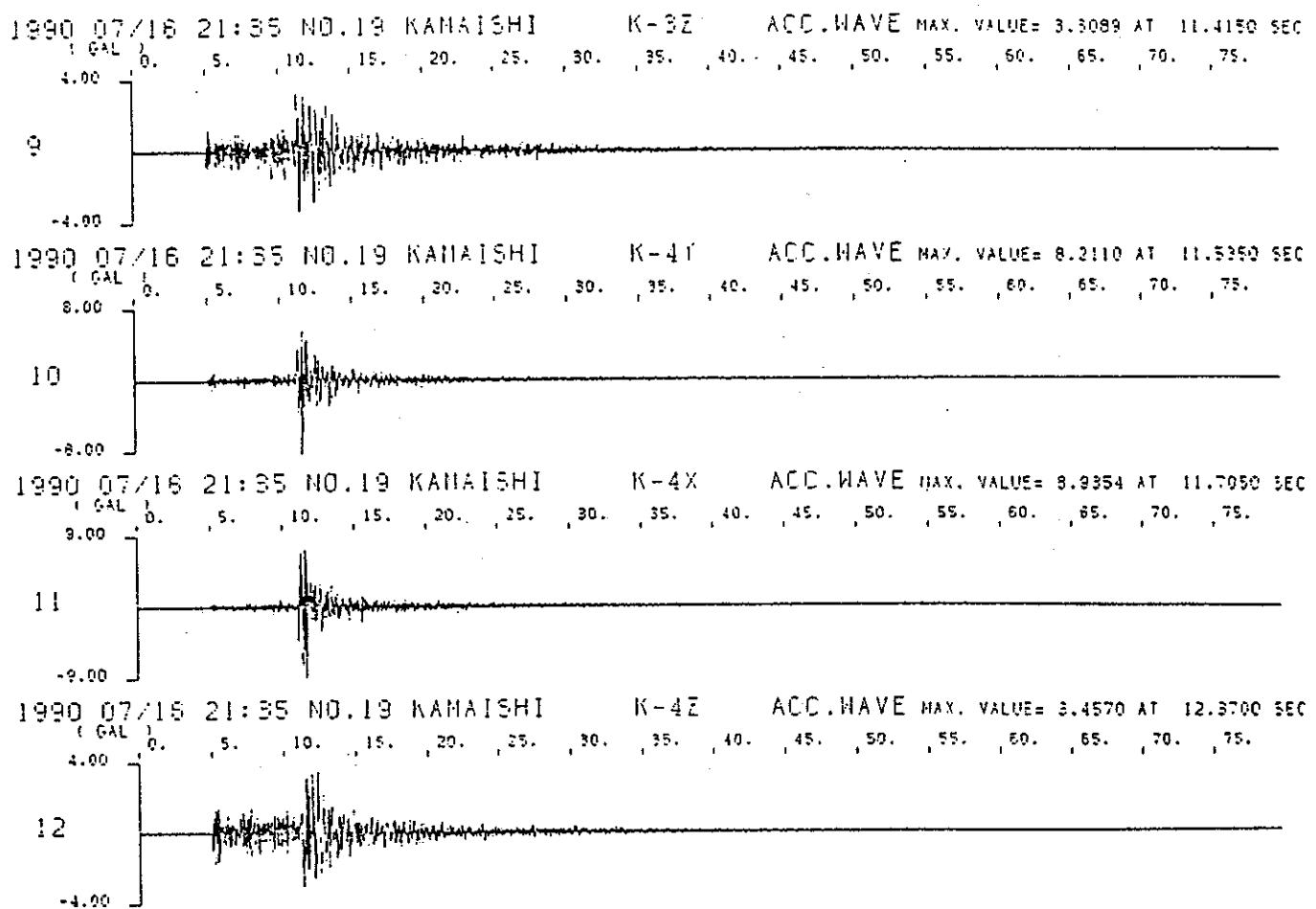


図 3.3-8(2) 観測地震加速度波形 (EQ. No.19 1990. 7/16 21:35)

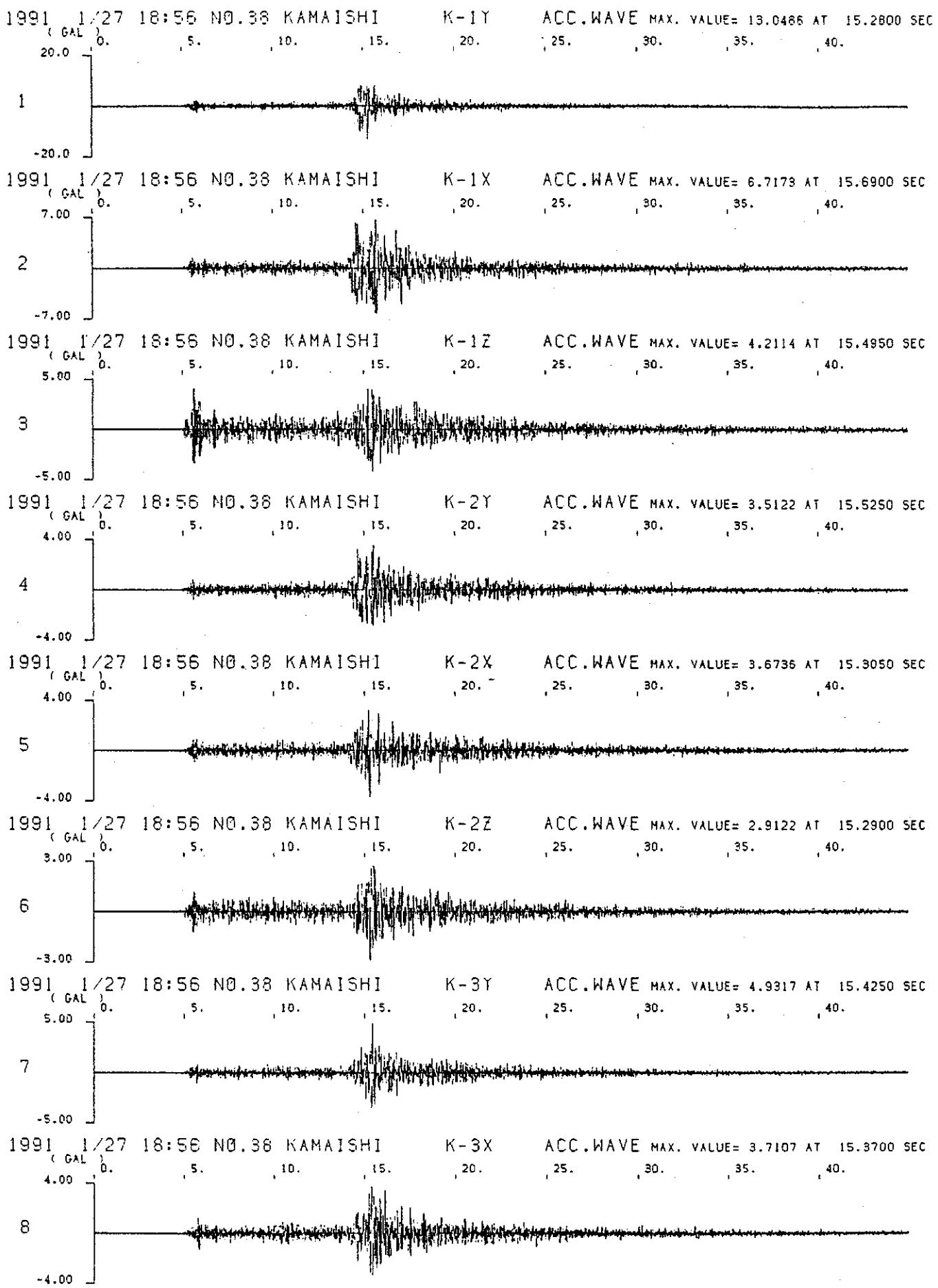


図 3.3-9(1) 観測地震加速度波形 (EQ.No.38 1991. 1/27 18:56)

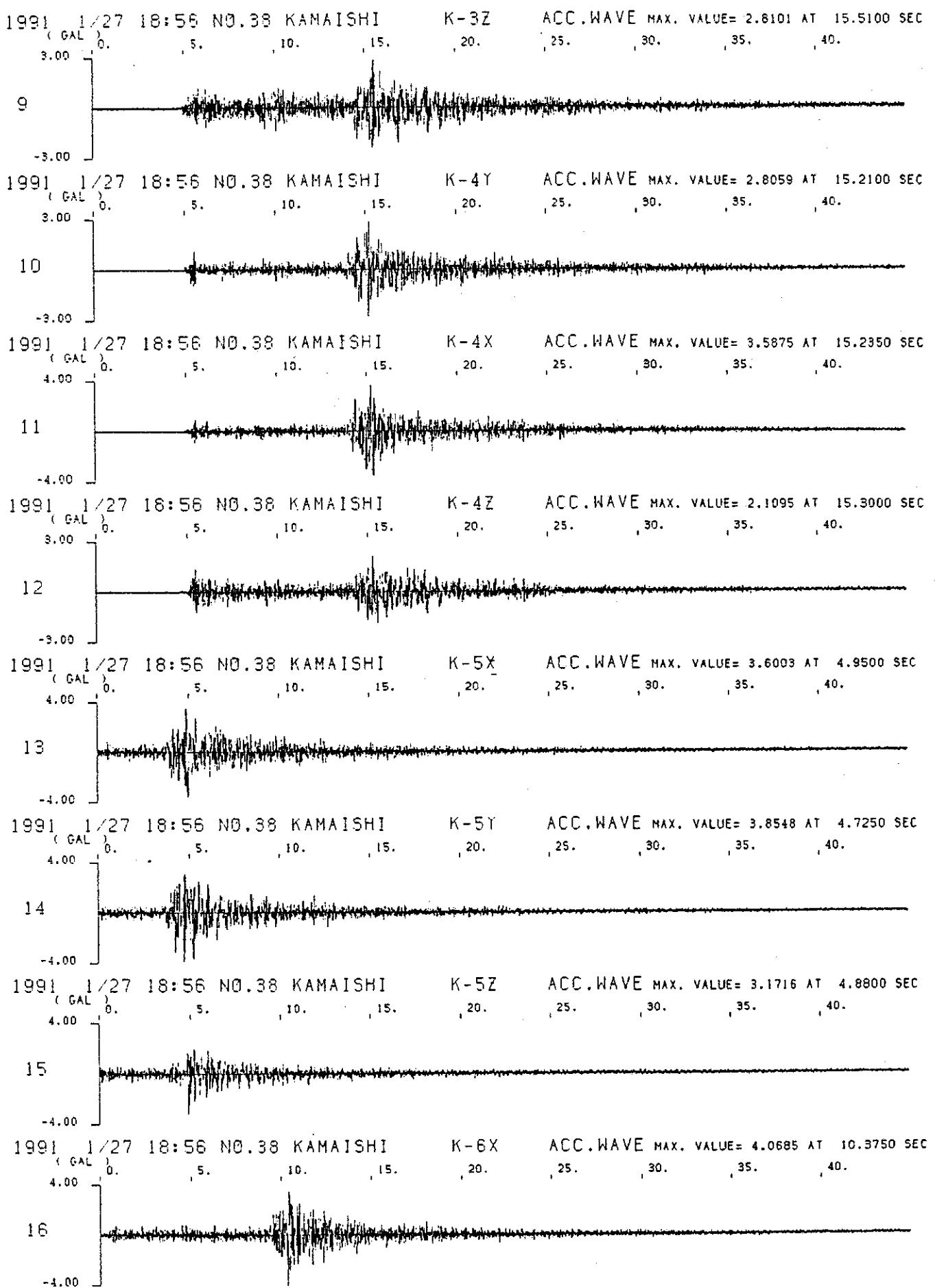


図 3.3-9(2) 観測地震加速度波形 (EQ. No.38 1991. 1/27 18:56)

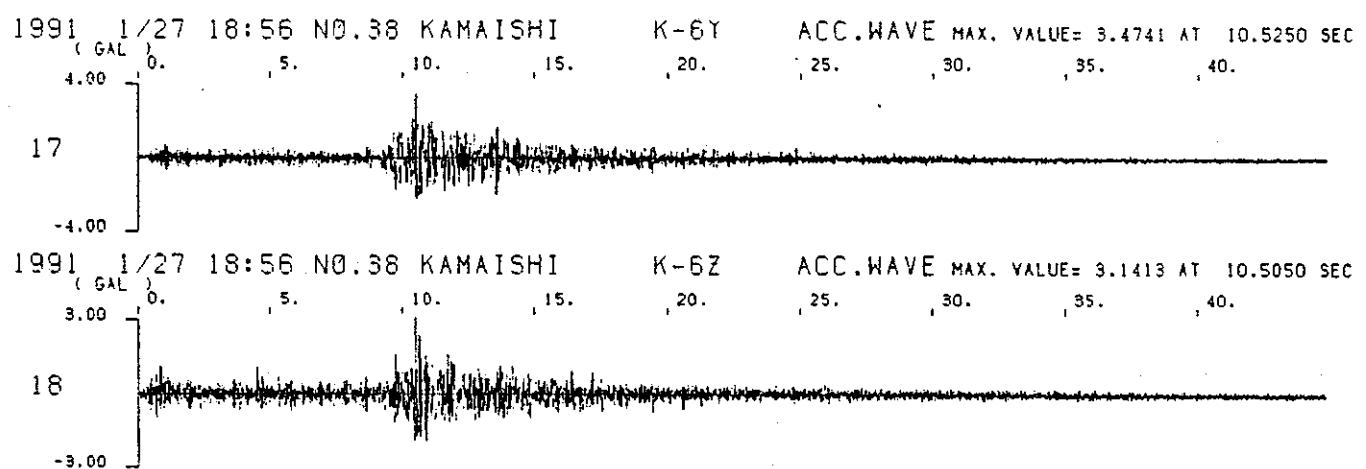


図 3.3-9(3) 観測地震加速度波形 (E0. No.38 1991. 1/27 18:56)

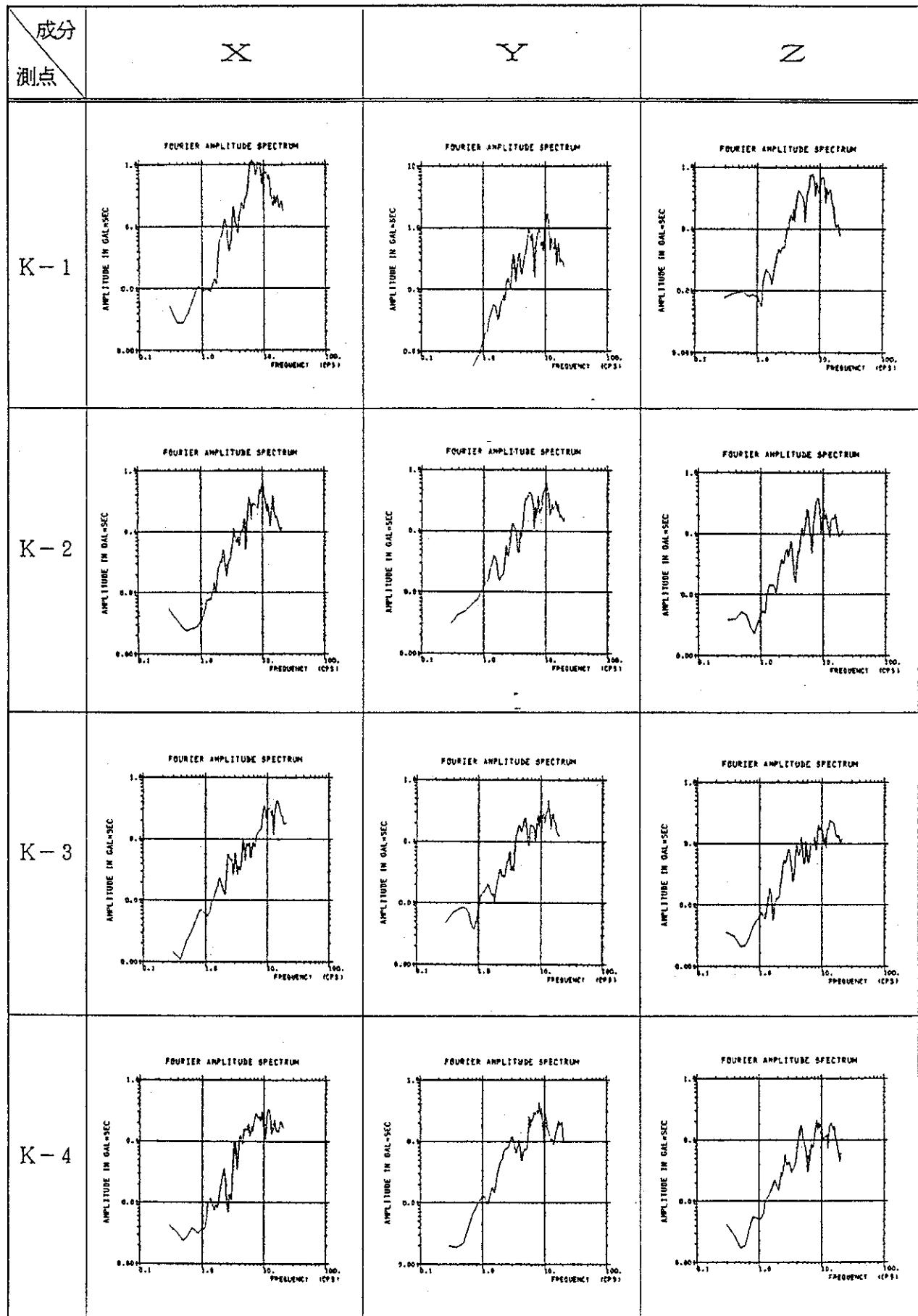


図 3.3-10(1) フーリエスペクトル (EQ. No.17 宮城県北部 1990. 6/29 08:25)

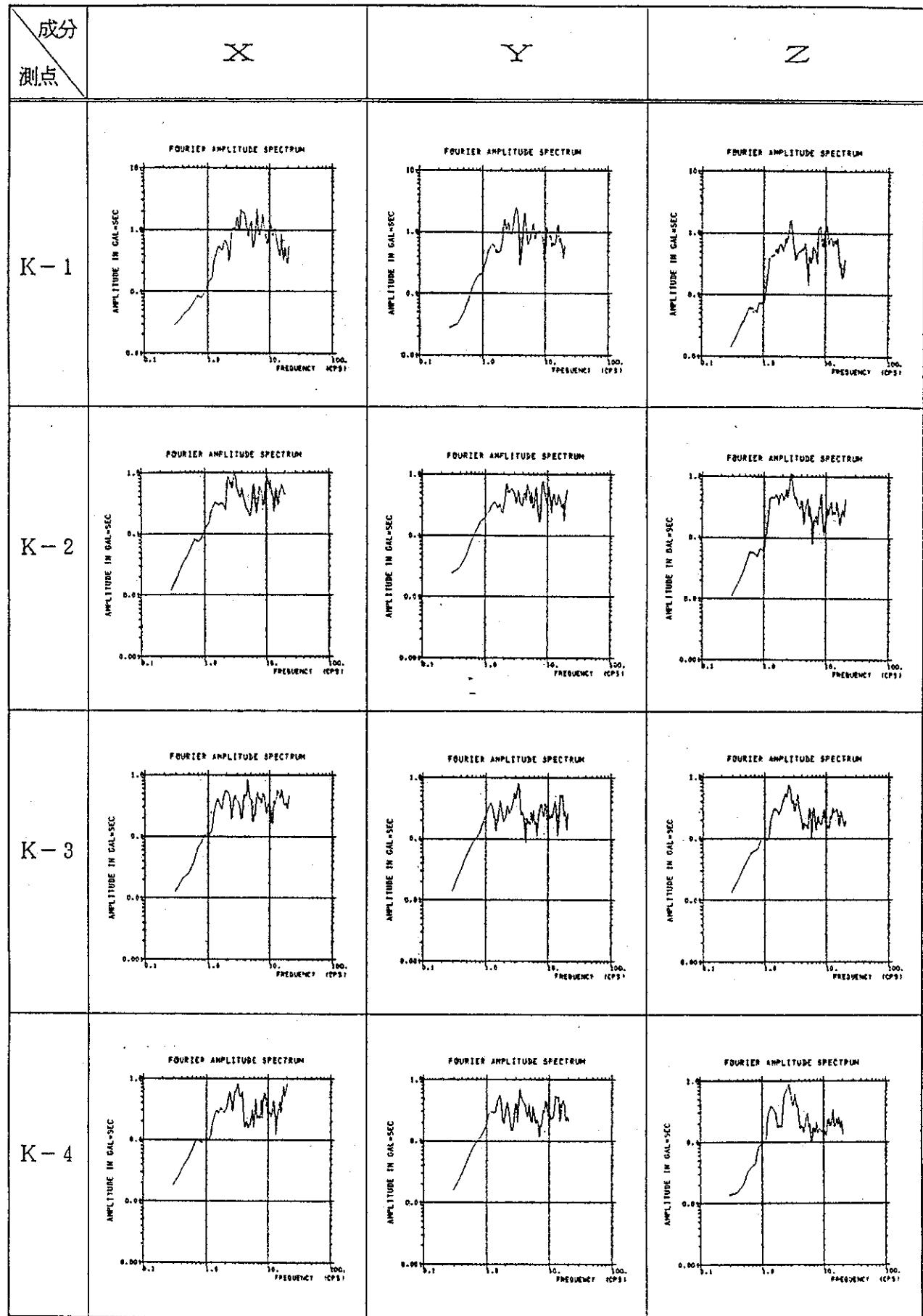


図 3.3-10(2) フーリエスペクトル (EQ. No.19 岩手県沖 1990. 7/16 21:35)

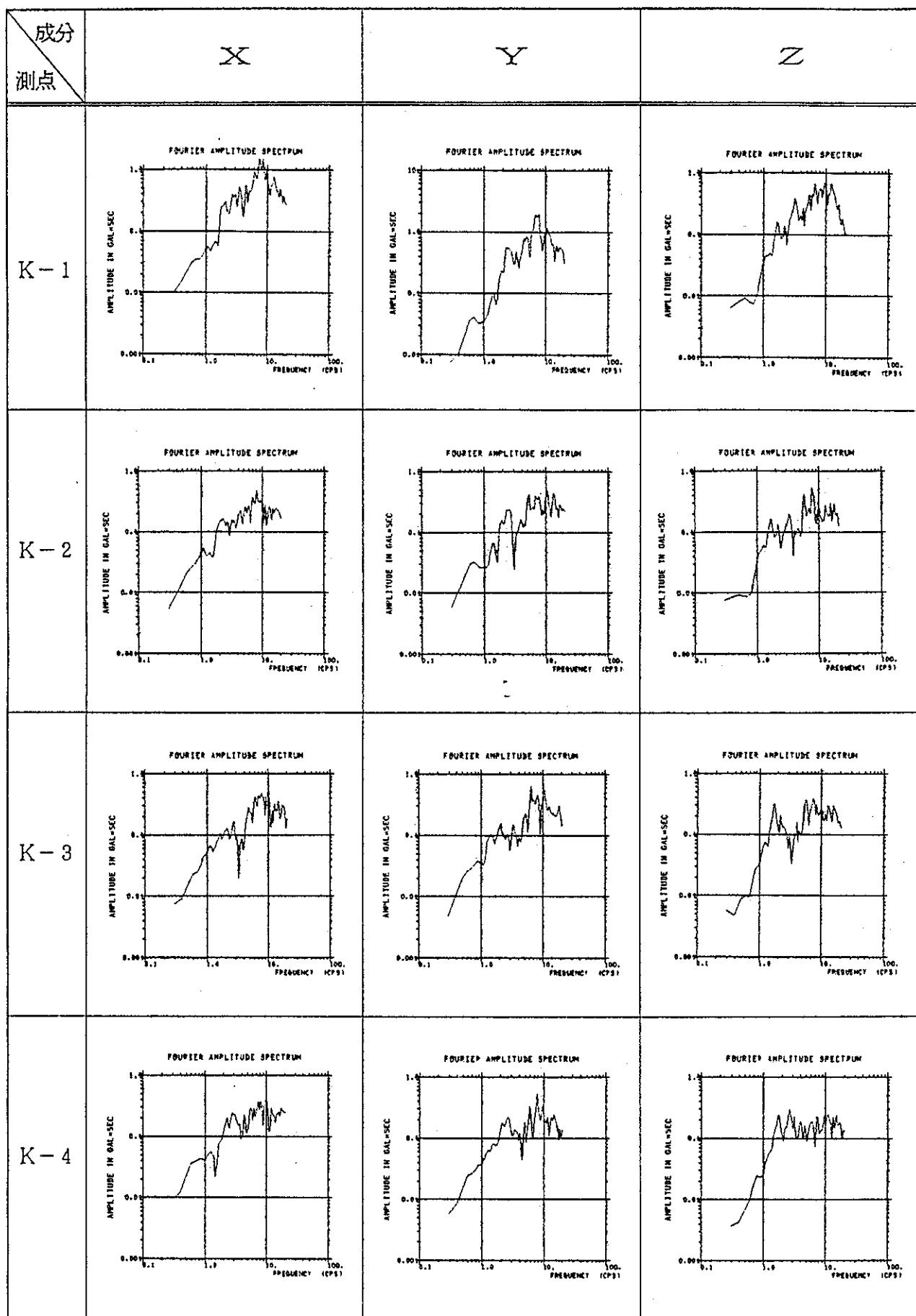


図 3.3-10(3) フーリエスペクトル (EQ. No.38 岩手県中部

1991. 1/27 18:56)

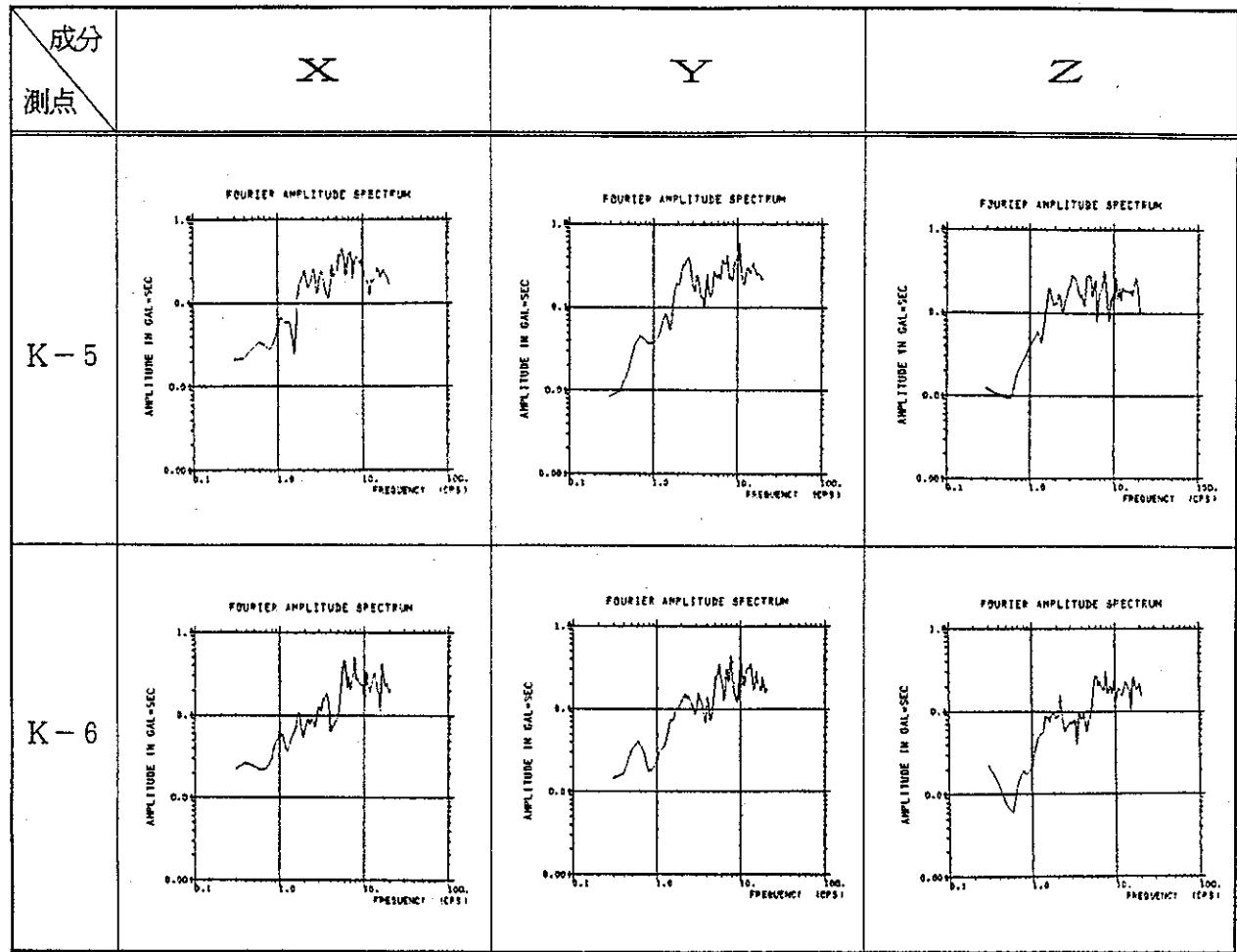


図 3.3-10 (4) フーリエスペクトル (EQ. No.38 岩手県中部 1991. 1/27 18:56)

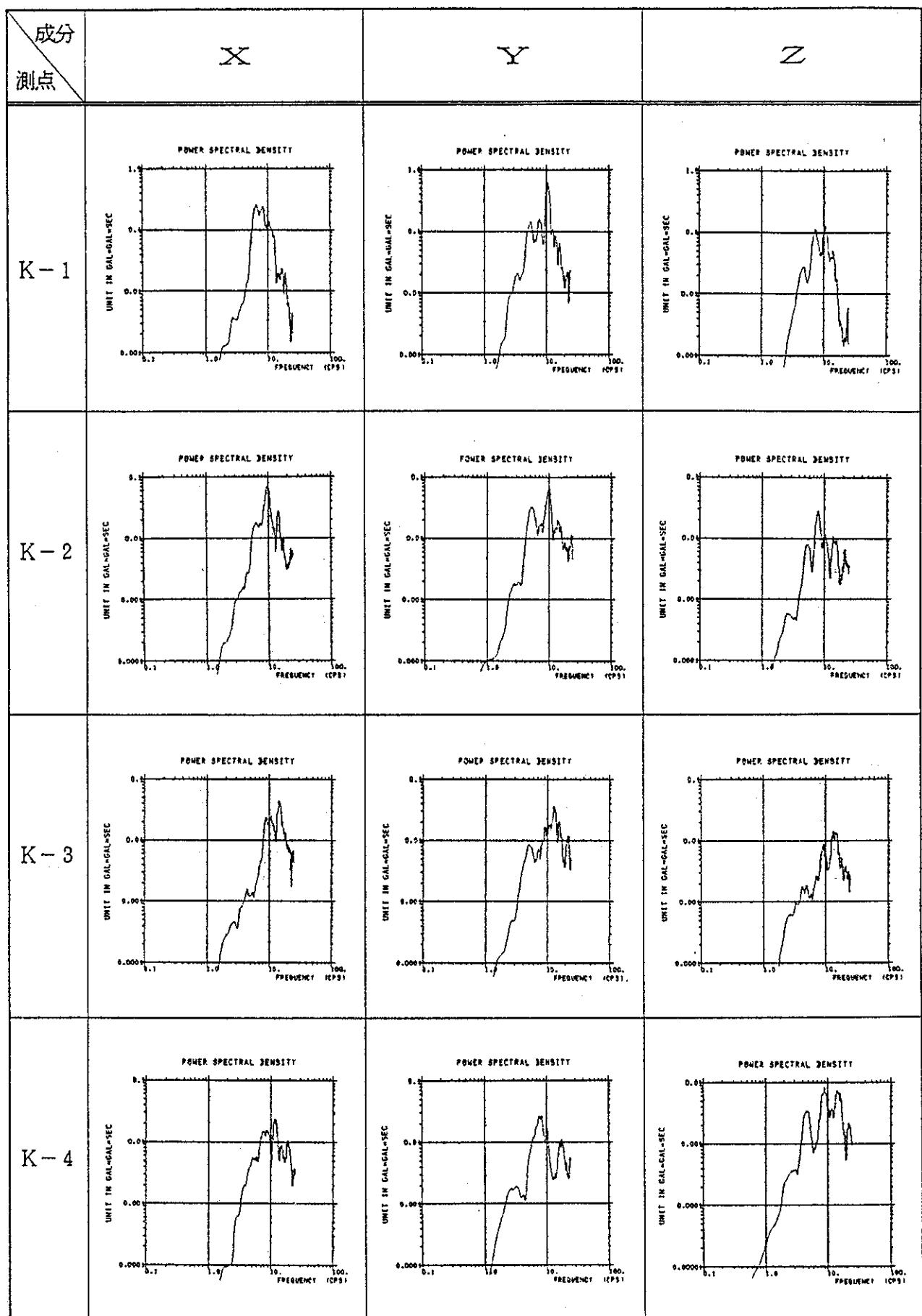


図 3.3-11(1) パワースペクトル (EQ. No.17 宮城県北部 1990. 6/29 08:25)

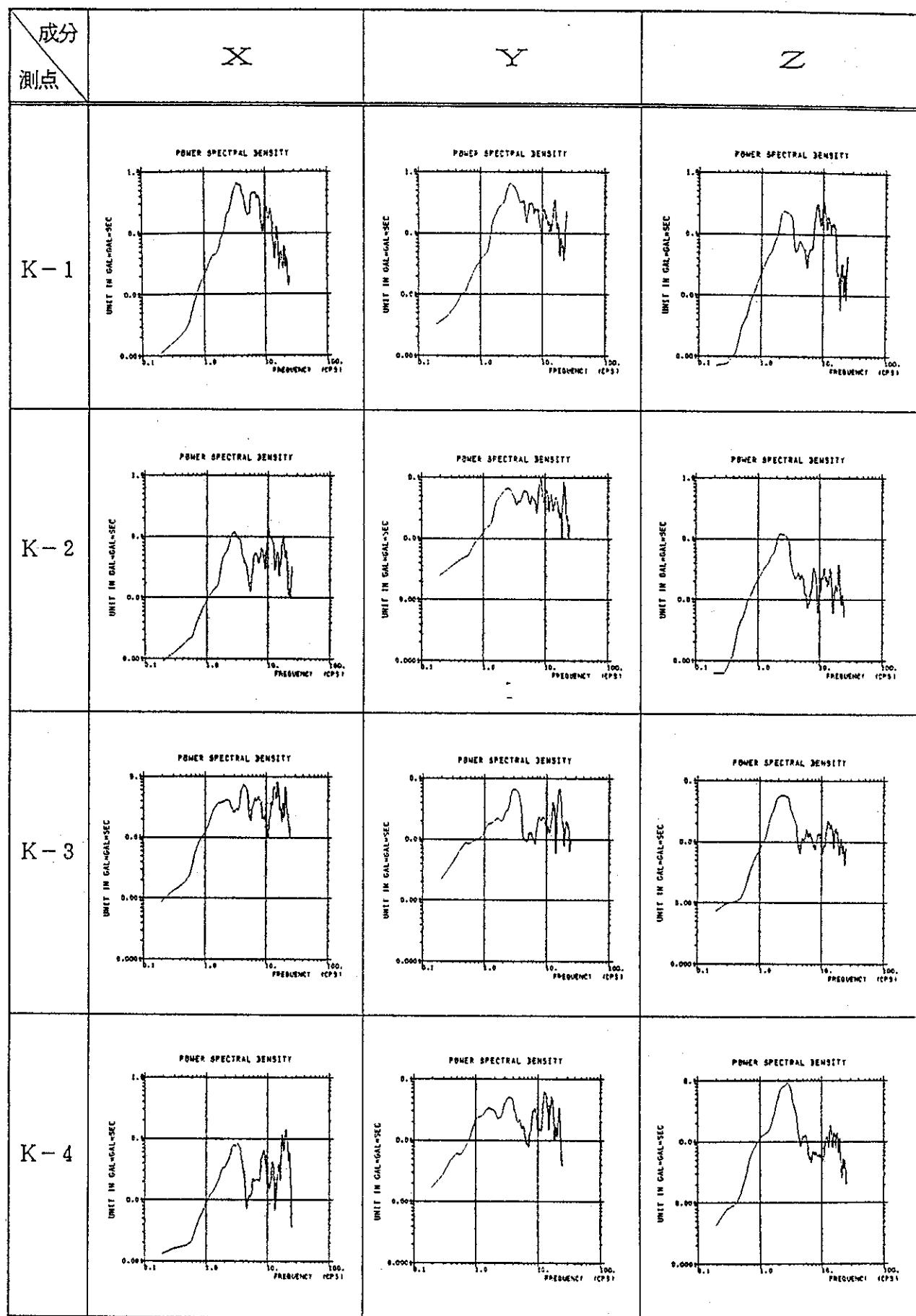


図 3.3-11(2) パワースペクトル (EQ. No.19 岩手県沖 1990. 7/16 21:35)

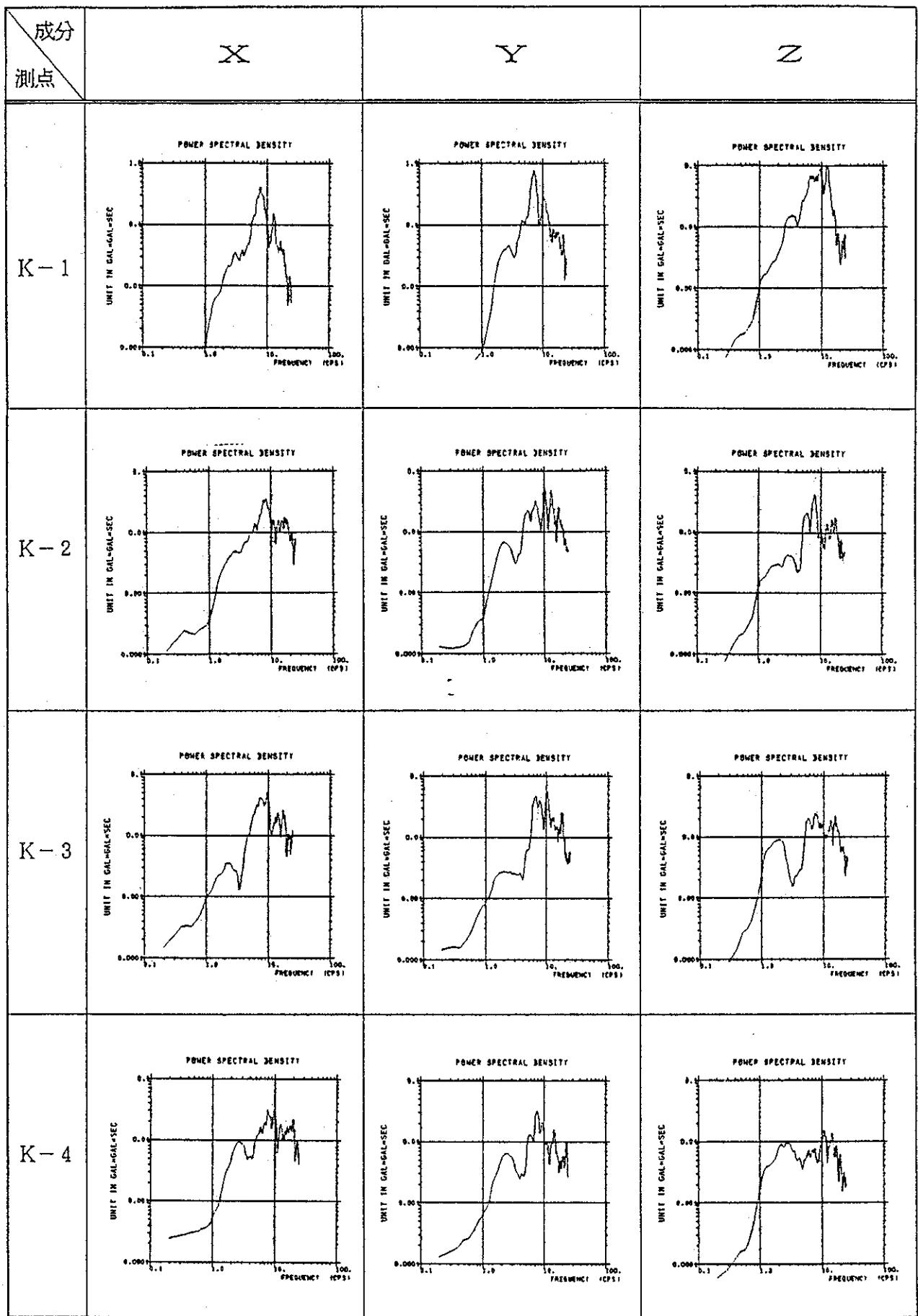


図 3.3-11(3) パワースペクトル (EQ. No.38 岩手県中部 1991. 1/27 18:56)

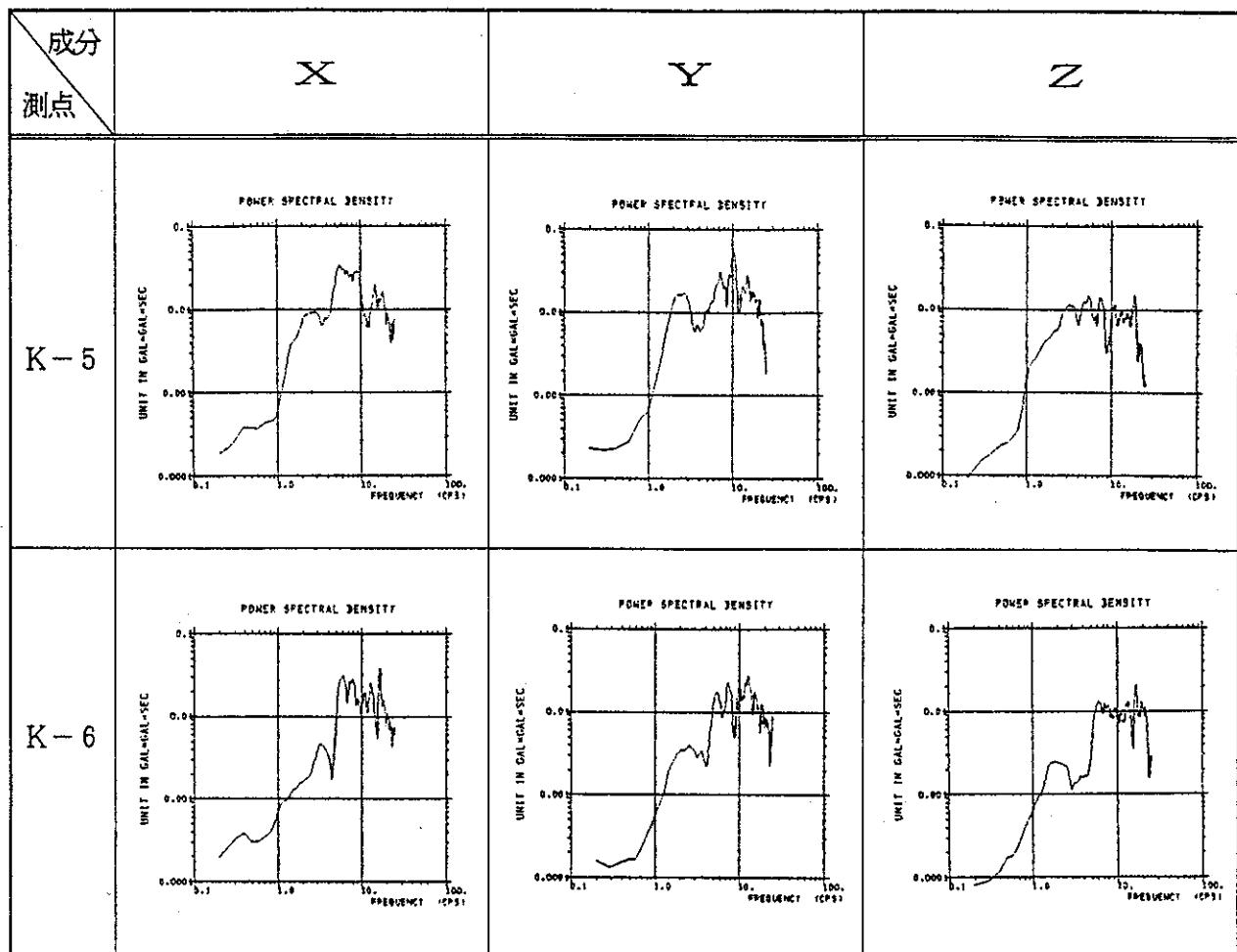


図 3.3-11 (4) パワースペクトル (EQ No.38 岩手県中部 1991. 1/27 18:56)

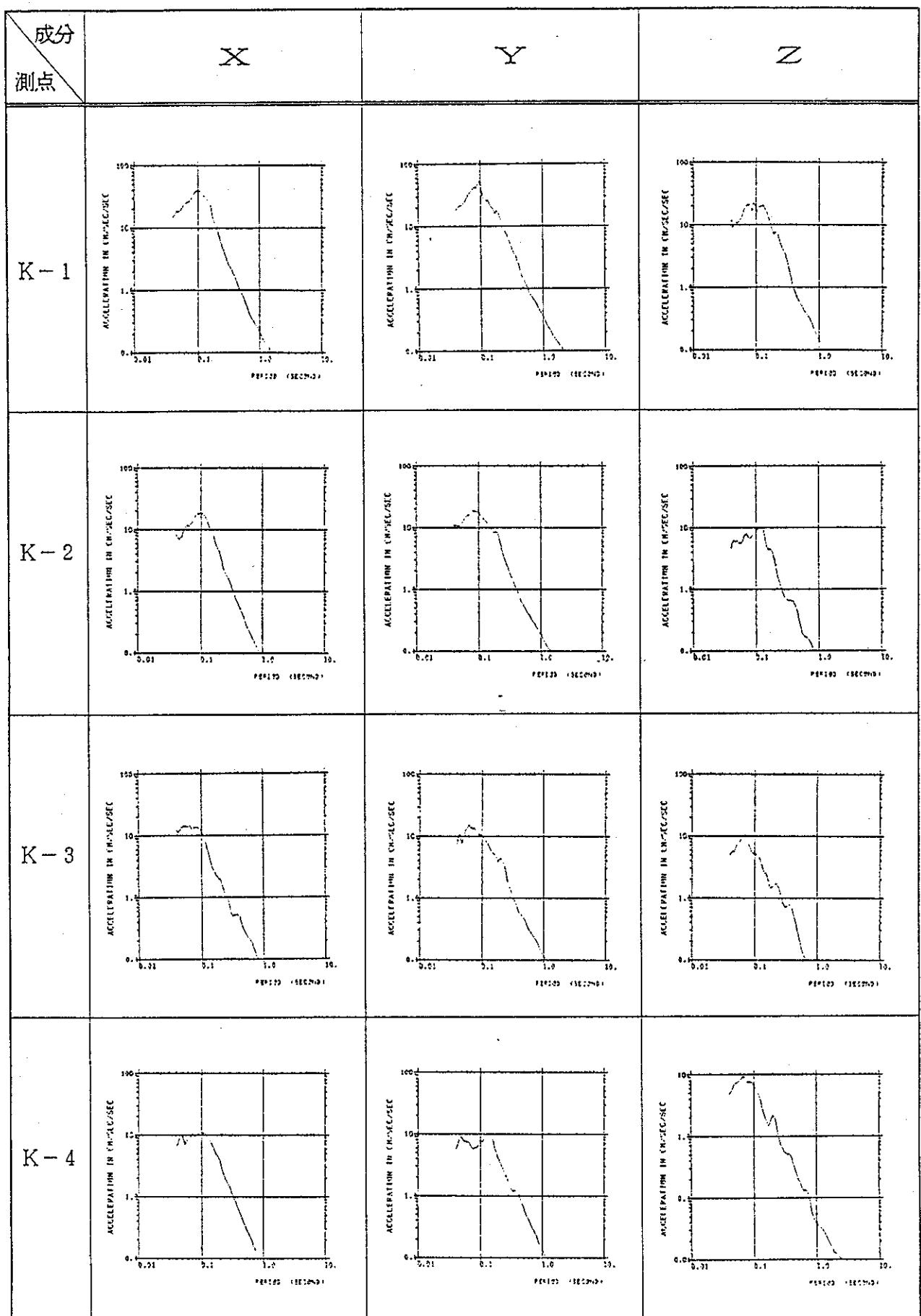


図 3.3-12(1) 応答スペクトル $h=0.05$ (E0. No.17 宮城県北部 1990. 6/29 08:25)

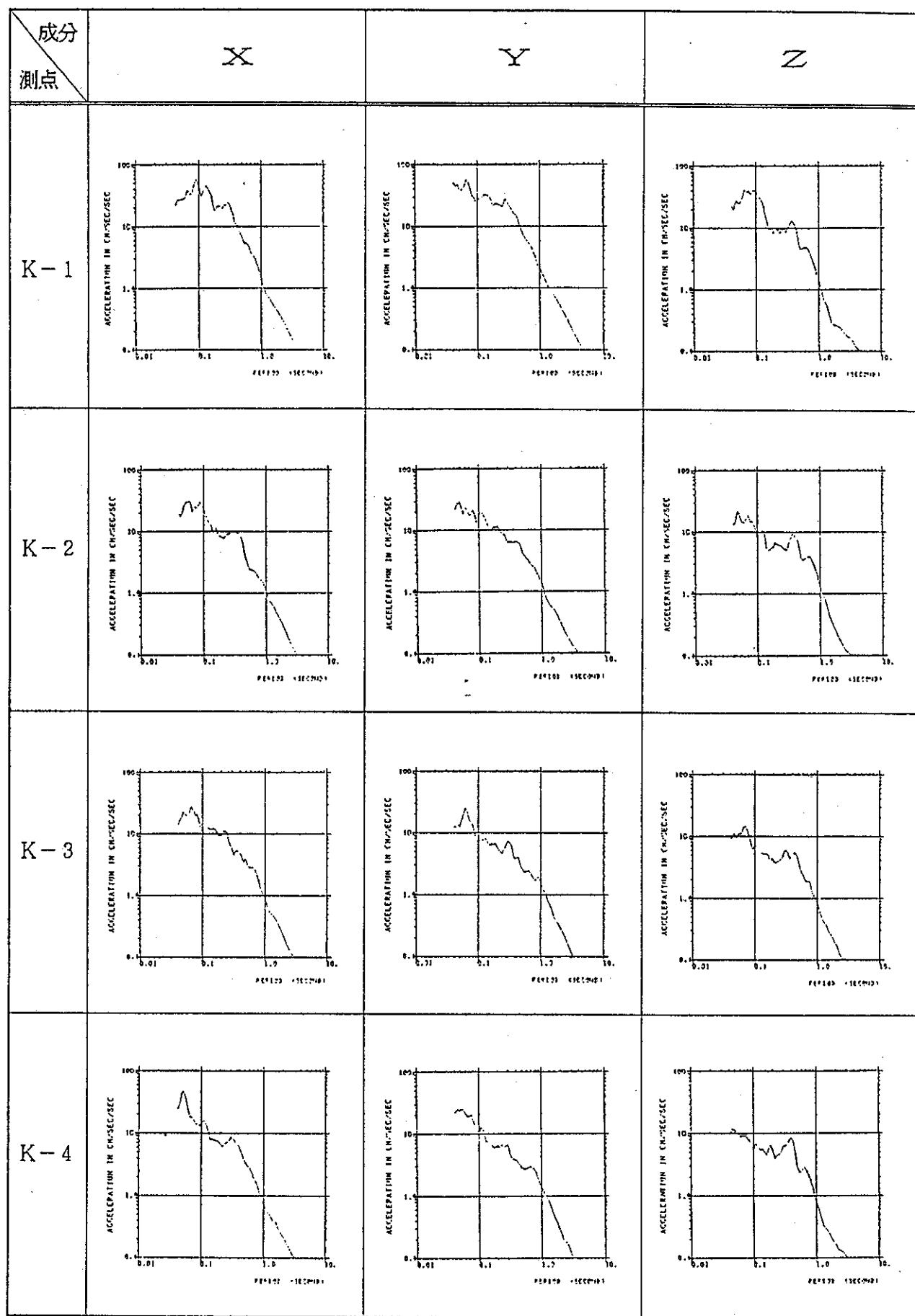


図 3.3-12(2) 応答スペクトル $h=0.05$ (EQ. No.19 岩手県沖 1990. 7/16 21:35)

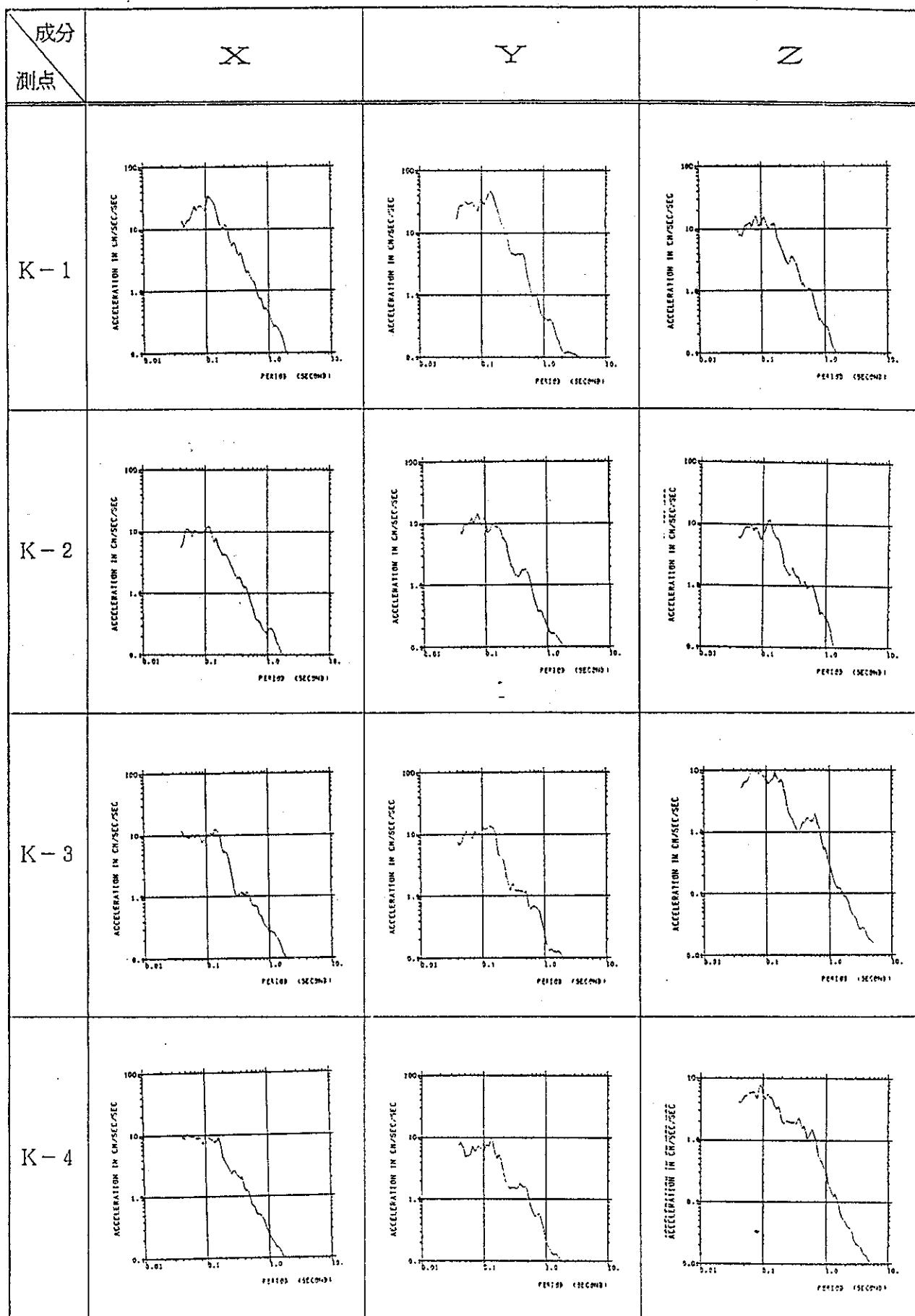


図 3.3-12(3) 応答スペクトル $h=0.05$ (E0. No.38 岩手県中部 1991. 1/27 18:56)

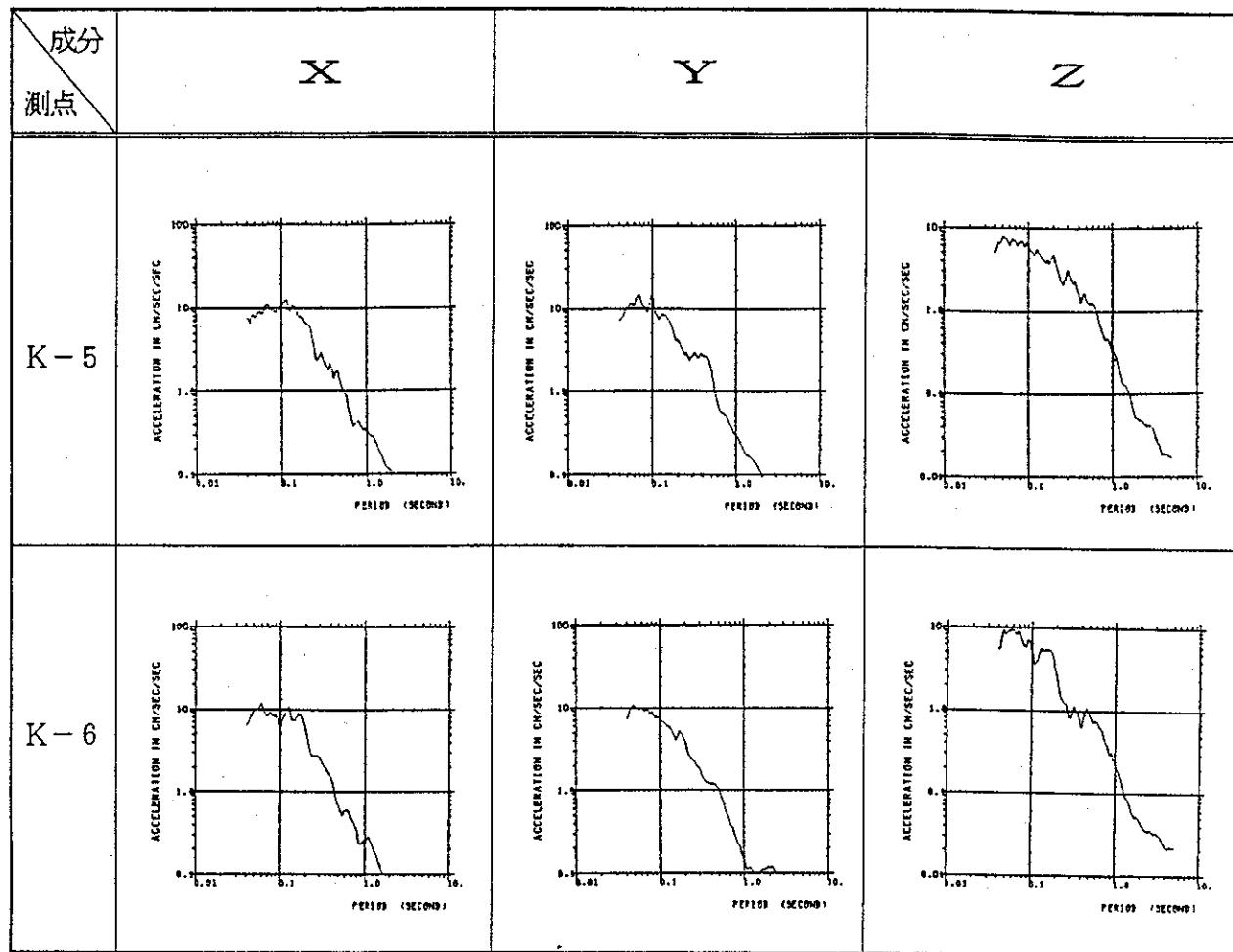


図 3.3-12 (4) 応答スペクトル $h=0.05$ (EQ No.38 岩手県中部 1991. 1/27 18:56)

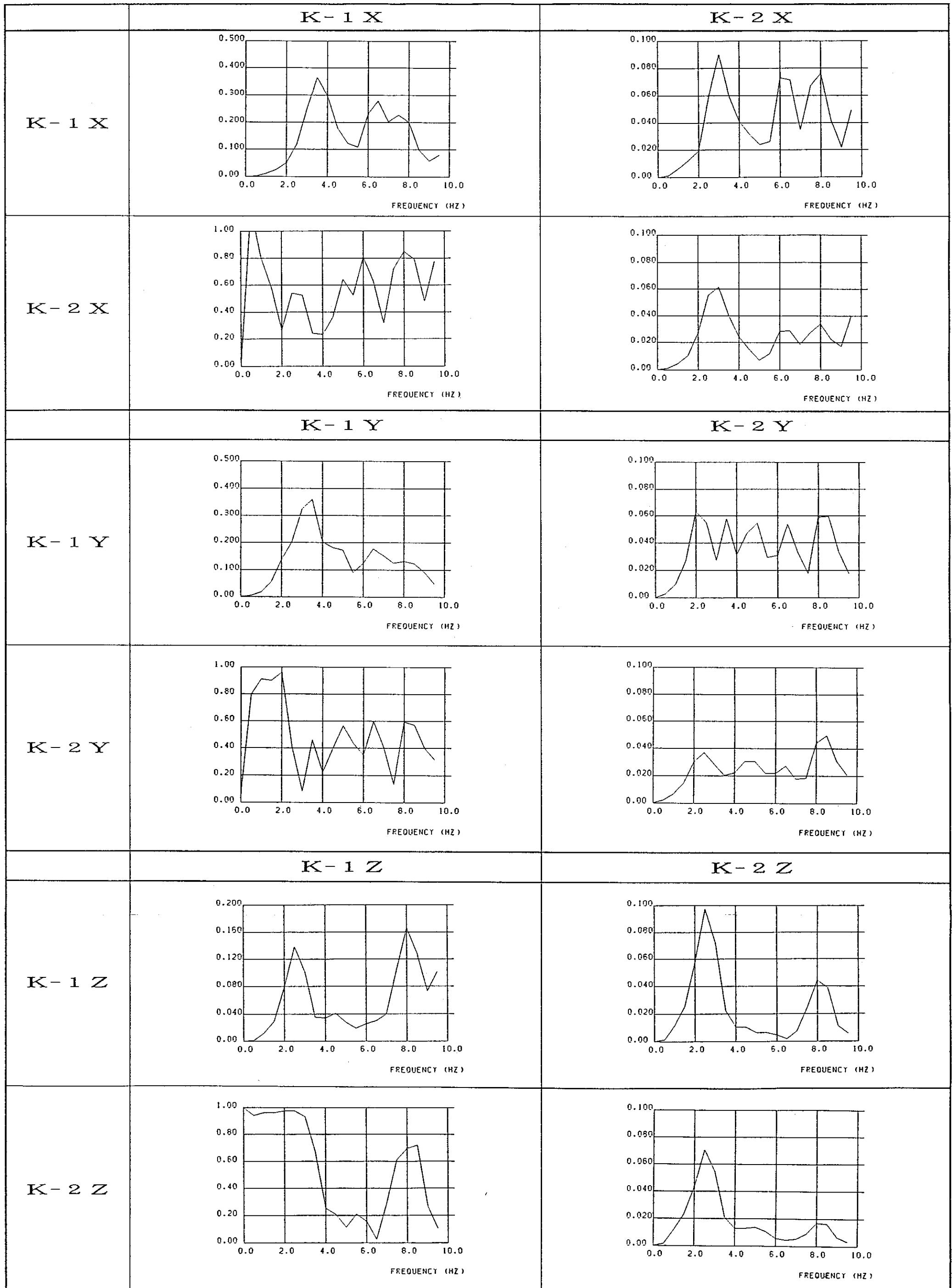


図 3.3-13 パワースペクトル・クロススペクトル・コヒーレンス (EQ. No.19 岩手県沖 1990.7/16 21:35)
 (各成分ともに右上段はクロススペクトル、左下段はコヒーレンスを各々示す。)

さらに、図3.3-13に測点K-1とK-2におけるクロススペクトルならびにコヒーレンスを各成分毎に各々示している。同図よりコヒーレンスは低周波数領域では値が高くなり、非常に相関性が良く、特にz成分で顕著であるのが確認できる。また、4Hz前後に谷が存在しており、これは、フーリエスペクトルにて確認されたように地下深部の固有振動特性によるものと思われる。

② 伝達関数

次に、図3.3-2に示す震源分布において、①岩手県中部、②岩手県沖および③宮城県沖の3つの地震群に分類し、各地震群毎に伝達関数を求めた。各地震群に属する地震はいずれも4個で、岩手県中部の地震群では地震番号1, 11, 38および39、岩手県沖の地震群では地震番号5, 6, 8および19、また、宮城県沖の地震群では地震番号4, 17, 36, 37である。3地震群について求めた伝達関数を図3.3-14に示す。K-1とK-2の2点間の伝達関数は図3.3-14(1)に示すように、x成分で3～5Hz前後、y成分で3Hz, 7Hz前後、またz成分で4Hz, 10Hz前後と各成分毎によるピークは異なるが、各地震群とも似かよったスペクトル比を示す。

K-1とK-3の2点間の伝達関数は図3.3-14(2)に示すように、岩手県中部と岩手県沖の地震群に関しては、x成分にて3Hz、y成分にて6～7Hz、z成分にて3～4Hz、12Hz前後に顕著なピークがある。一方、宮城県沖では、x成分で8Hz前後、y成分で3Hz、8Hz前後、z成分で5Hz前後にピークが存在しており、この傾向は、前述の岩手県中部と岩手県沖の地震群と比較すると、相反する伝達関数を示している。

K-1とK-4の2点間の伝達特性は図3.3-14(3)に示すように、全体として水平成分において、岩手県中部、岩手県沖の地震群と宮城県沖の地震群とで特性が異なるが、Z成分はいずれの伝達関数も地震によらずほぼ一定であり、伝達特性がそれぞれの地震が有する周波数特性には左右されないことが確認された。

③ 地下での表面波の影響

表面波は実体波と比べて次のような特徴をもっている。

- 1) 地表面に沿って伝播するので、地下深部に行くに従って振幅が減少する。
- 2) 分散性を示す。
- 3) 実体波成分よりやや遅れて到着する。
- 4) 実体波と比べ長周期成分が卓越し、継続時間が長い。

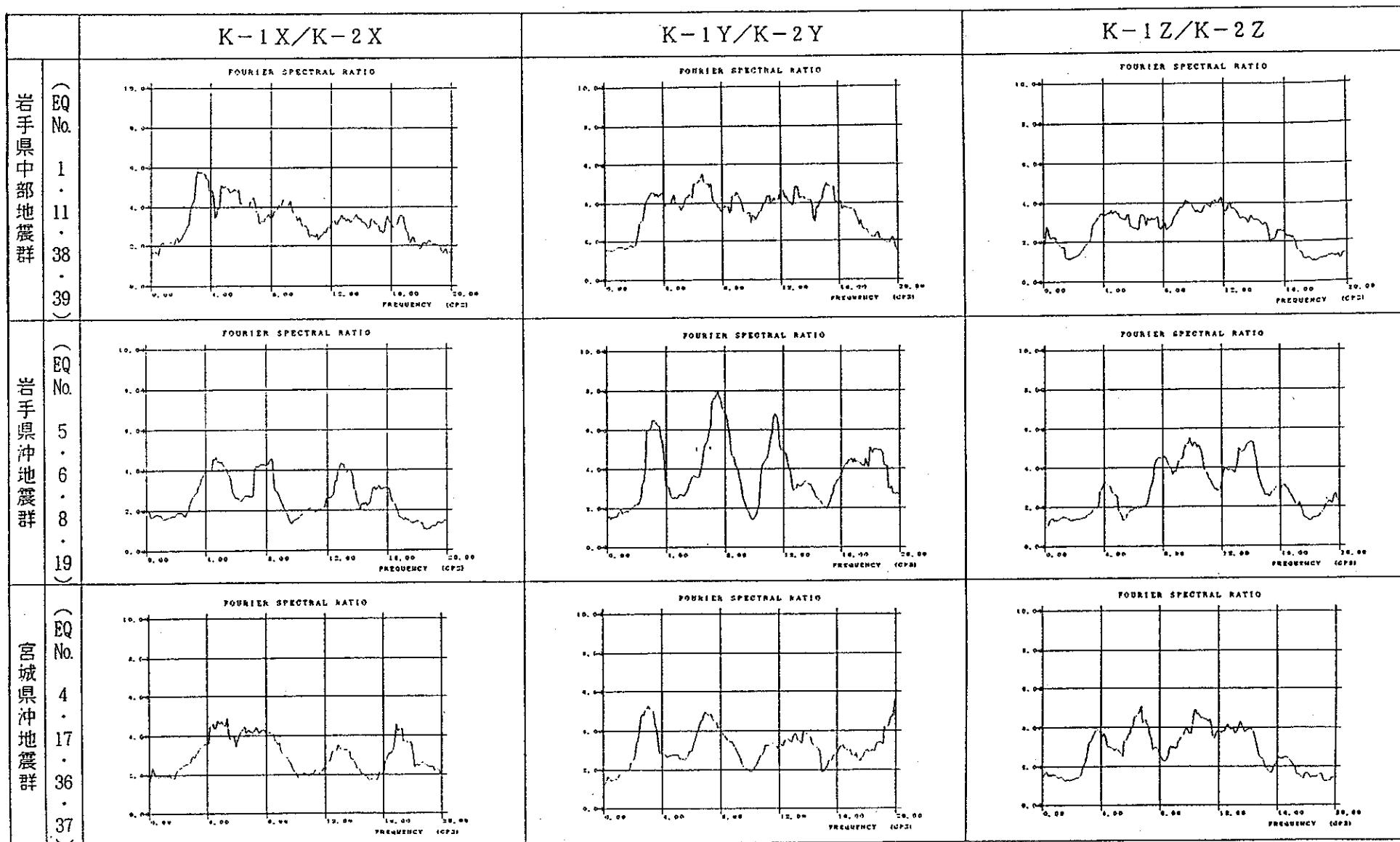


図 3.3-14 (1) 各地震群の伝達関数の比較 (K-1/K-2)

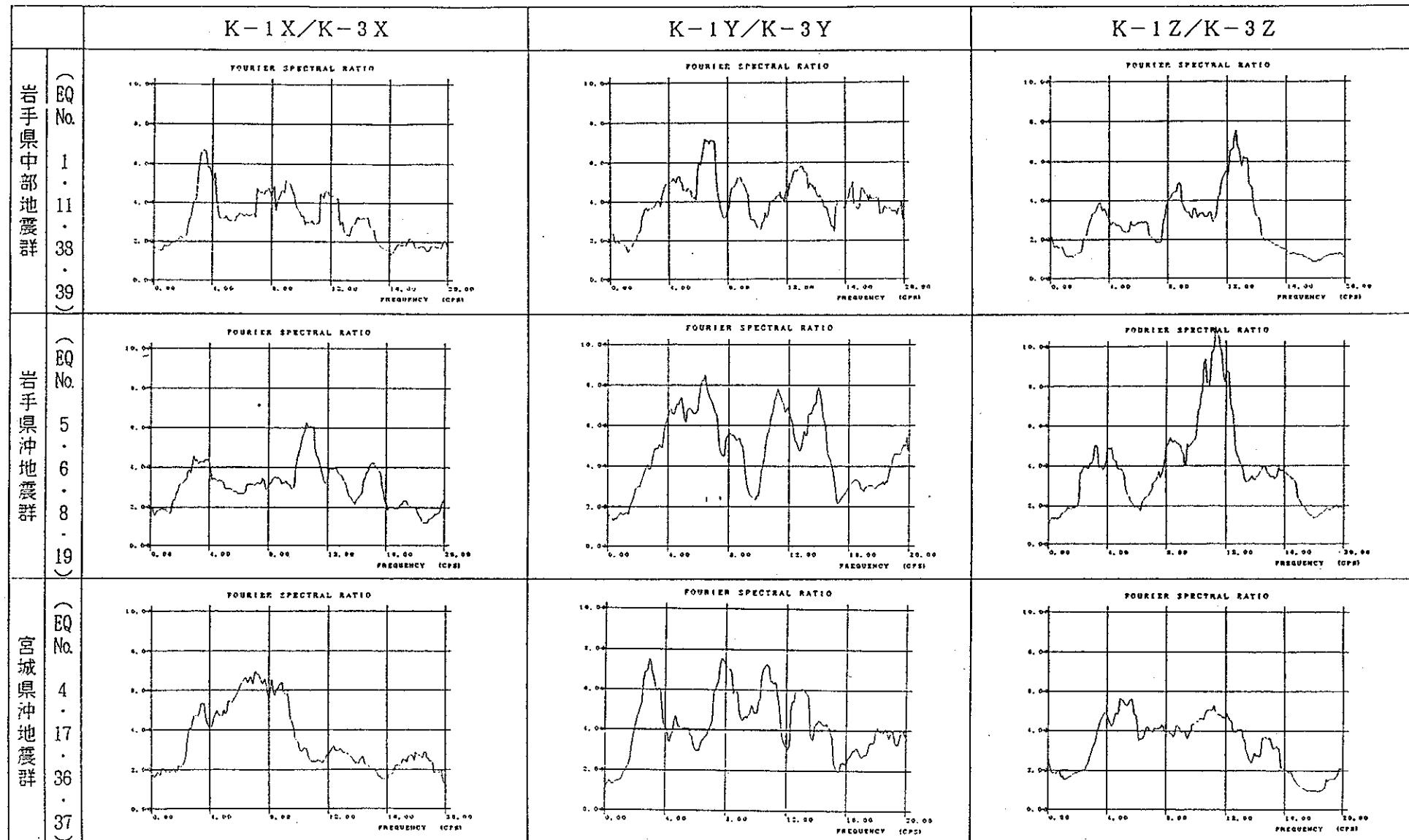


図 3.3-14 (2) 各地震群の伝達関数の比較 (K-1 / K-3)

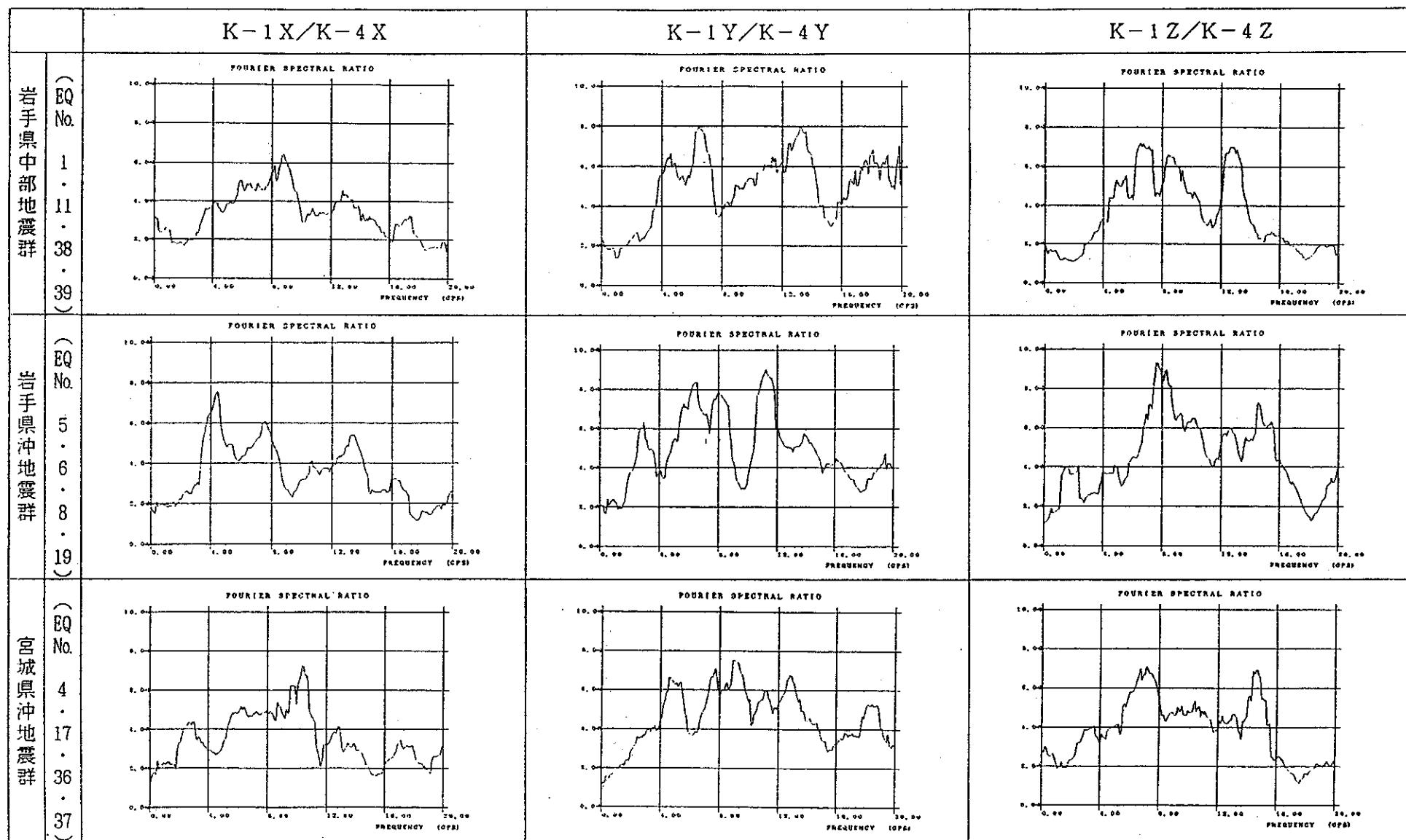


図 3.3-14 (3) 各地震群の伝達関数の比較 (K-1/K-4)

表3.3-3 3地震群に属する地震の諸言

| 地震群 | EQ. No. | マグニチード M | 震央距離 Δ (km) | 震源距離 x (km) | 震源深さ D (km) |
|-------|------------|-------------|-----------------------|----------------|----------------|
| 岩手県中部 | 1 | 3. 8 | 57 | 90 | 70 |
| | 11 | 3. 9 | 75 | 83 | 35 |
| | 38 | 4. 6 | 58 | 90 | 68 |
| | 39 | 4. 3 | 60 | 78 | 50 |
| 岩手県沖 | 5 | 3. 3 | 35 | 62 | 51 |
| | 6 | 3. 7 | 45 | 71 | 55 |
| | 8 | 3. 9 | 47 | 66 | 47 |
| | 19 | 4. 8 | 40 | 67 | 54 |
| 宮城県沖 | 4 | 3. 5 | 126 | 135 | 50 |
| | 17 | 3. 9 | 41 | 80 | 69 |
| | 36 | - | 40 | 94 | 85 |
| | 37 | 4. 7 | 119 | 128 | 48 |

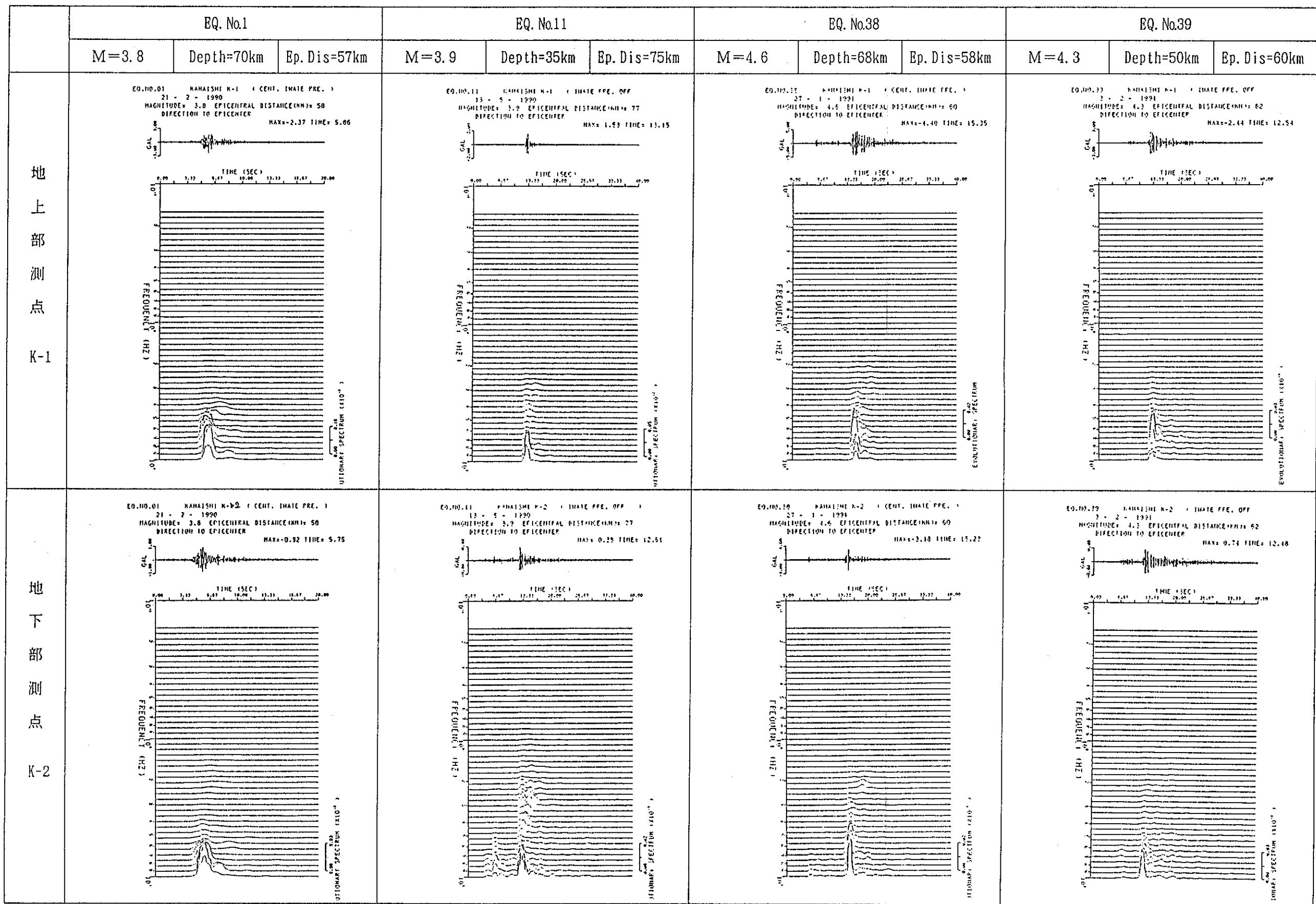


図 3.3-15 (1) 岩手県中部地震群における各観測地震での震央方向成分の非定常スペクトル

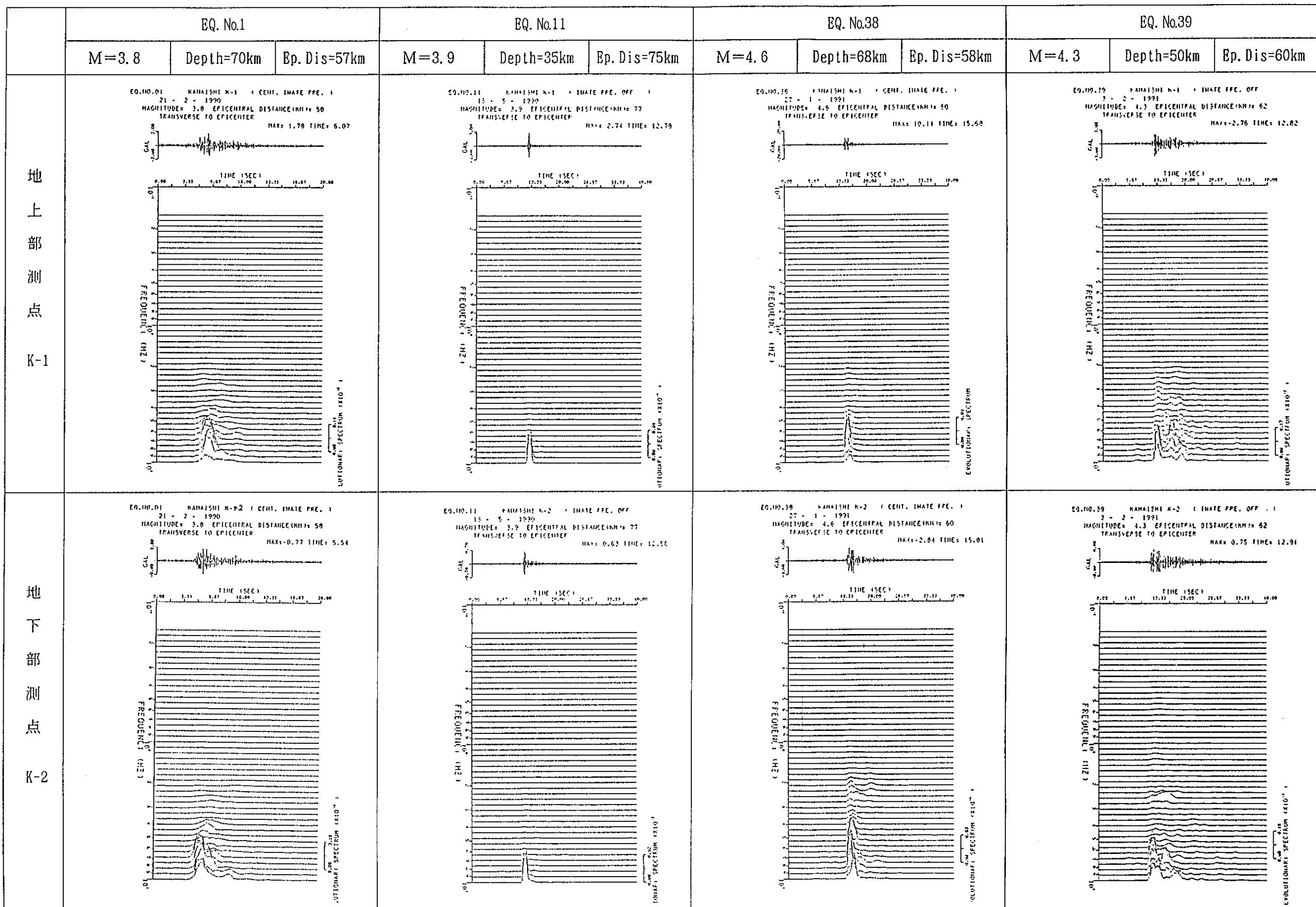


図 3.3-15 (2) 岩手県中部地震群における各観測地震での震央直角方向成分の非定常スペクトル

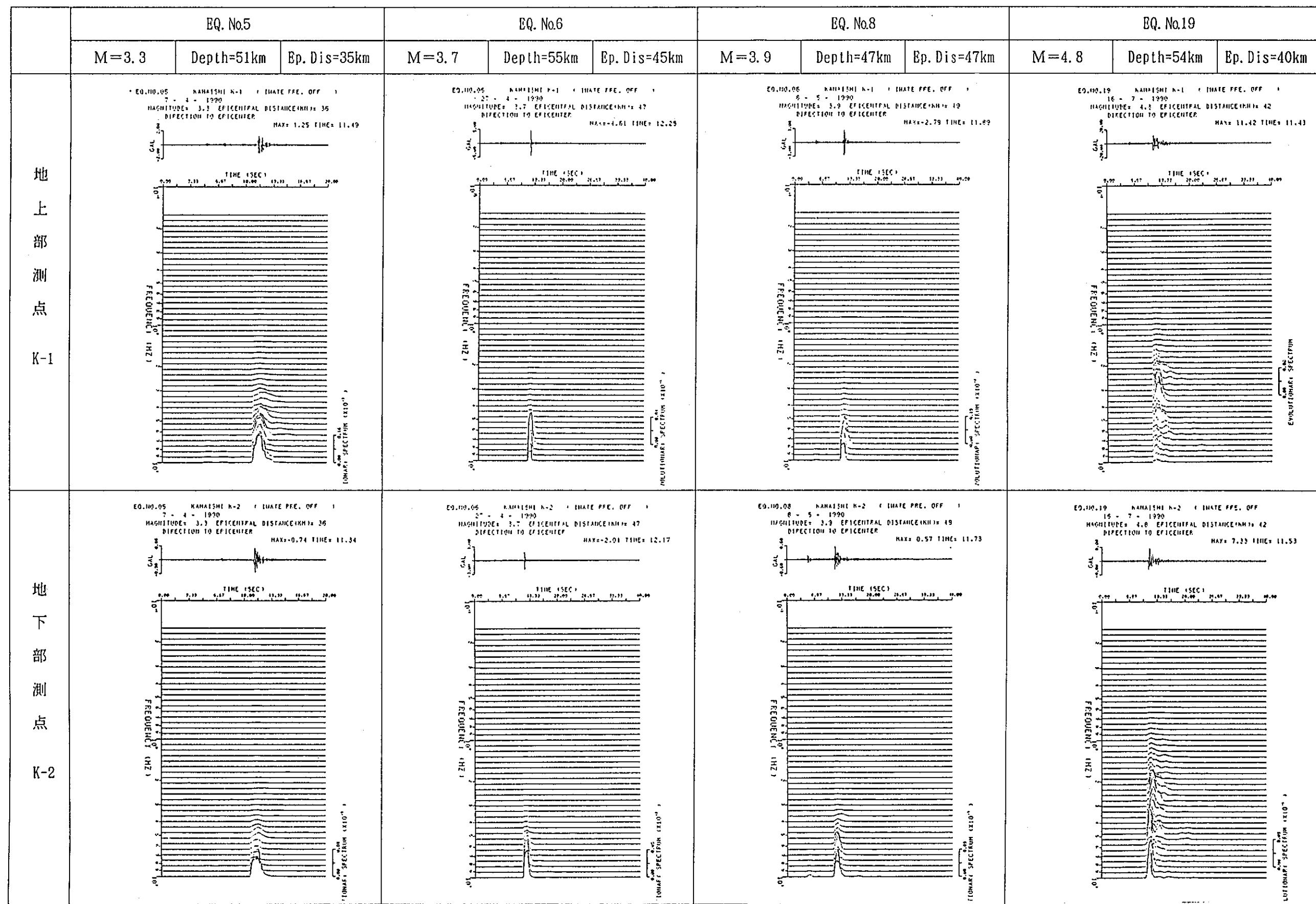


図 3.3-16 (1) 岩手県沖地震群における各観測地震での震央方向成分の非定常スペクトル

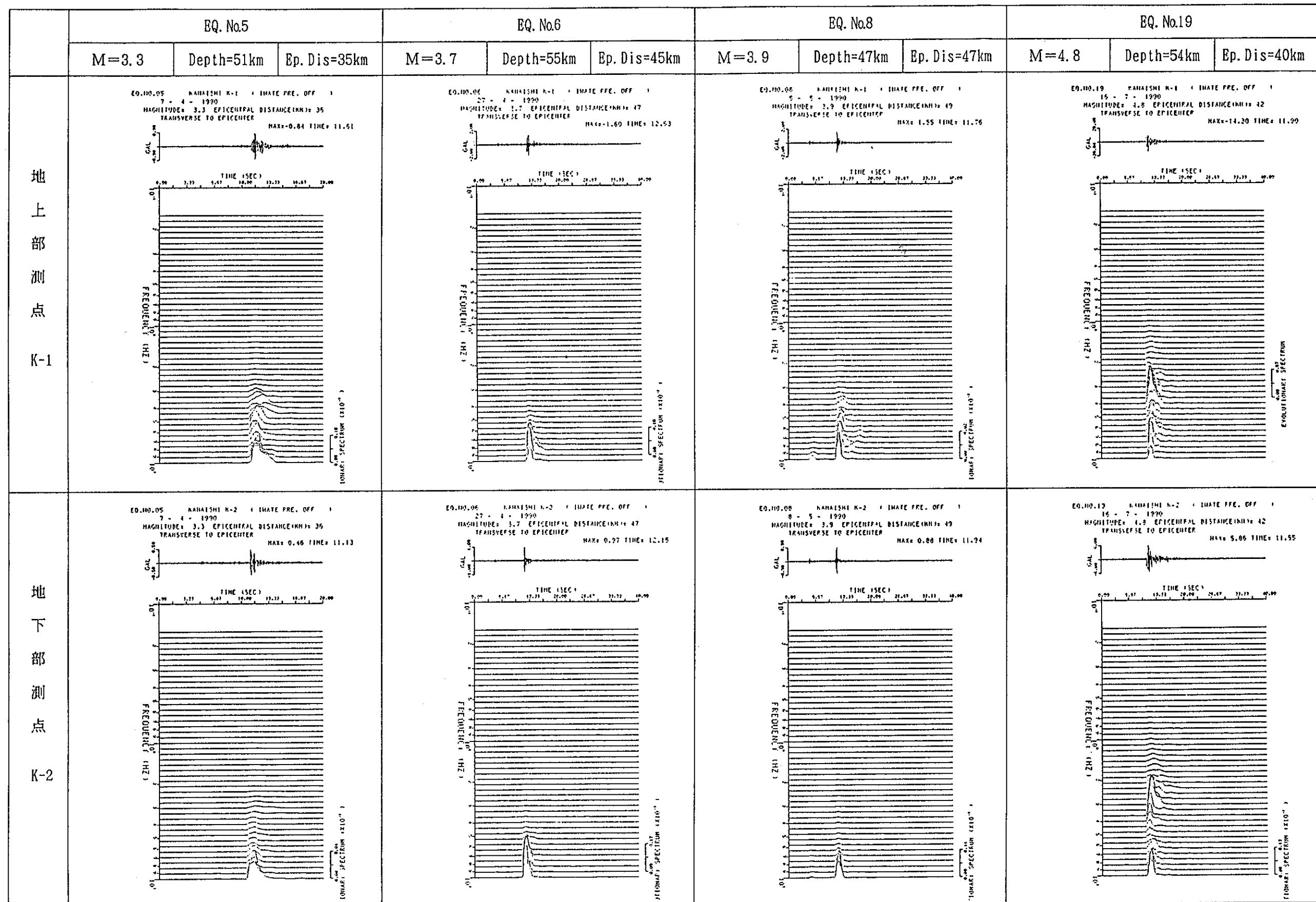


図 3.3-16 (2) 岩手県沖地震群における各観測地震での震央直角方向成分の非定常スペクトル

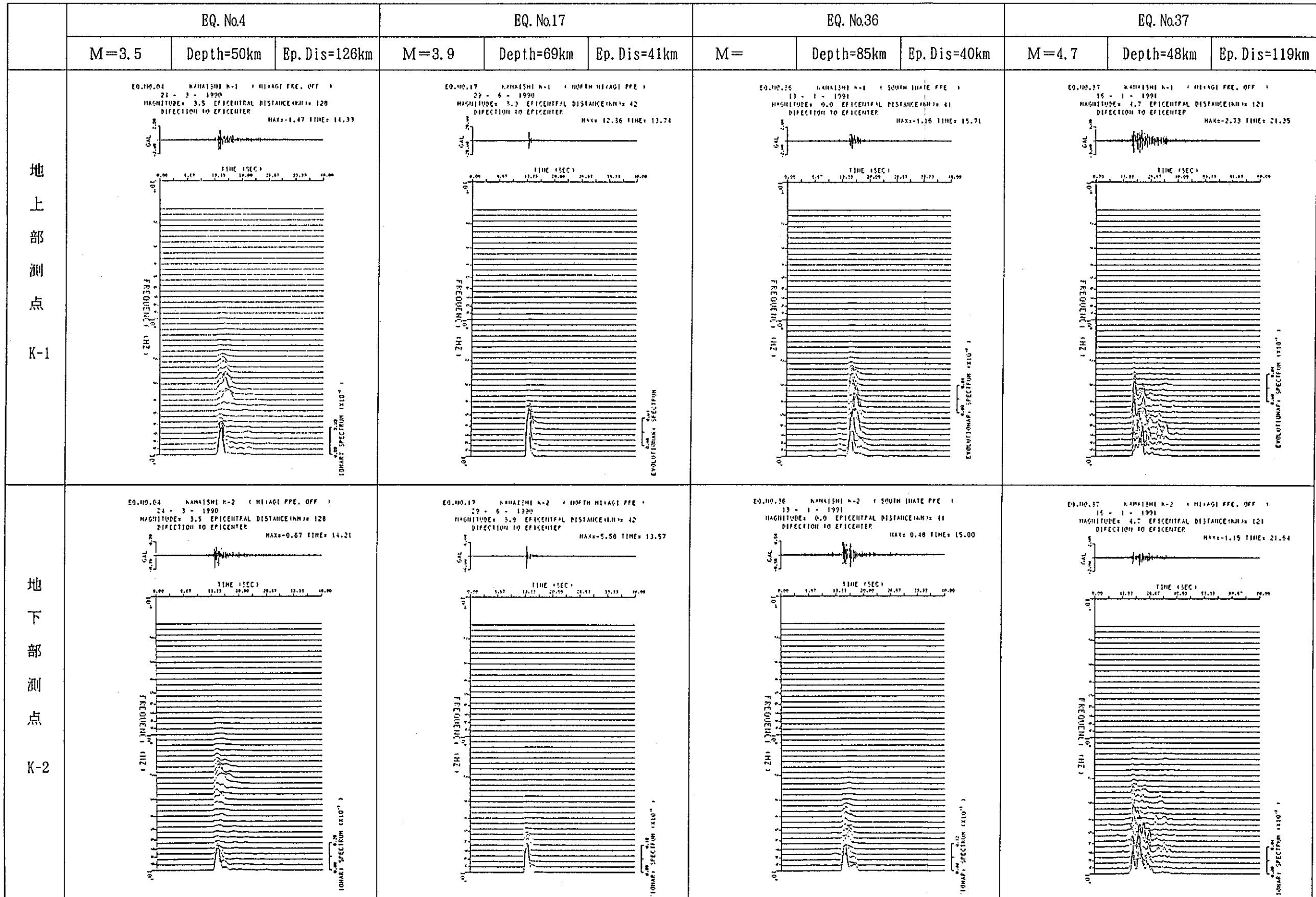


図 3.3-17 (1) 宮城県沖地震群における各観測地震での震央方向成分の非定常スペクトル

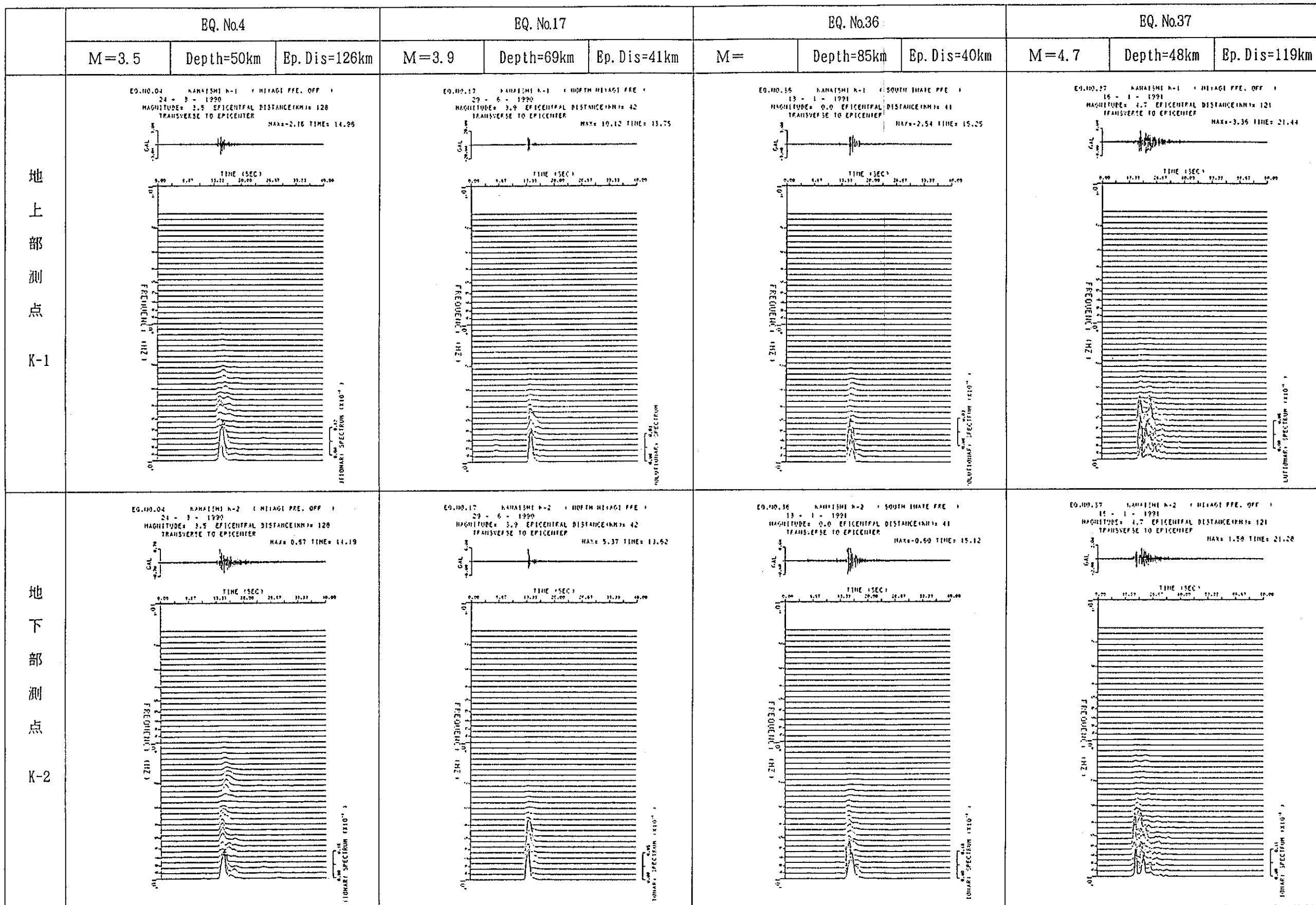


図 3.3-17 (2) 宮城県沖地震群における各観測地震での震央直角方向成分の非定常スペクトル

5) 粒子が梢円運動する。

ここで、観測された地震のうち、マグニチュードや震央がほぼ等しく震源の深さが異なる場合の長周期成分の有無を検討するため、前述した各地震群毎の観測波形に着目して非定常スペクトル解析を実施した。検討に際し、震央と観測点とを結ぶ方向を地震波の進行方向と見なし、水平成分を震央方向（R D）とその直交方向（T R）とに分解した。

3 地震群は表3.3-3に示すように震源の深さが35km～85kmの範囲の地震で、マグニチュードは3.3～4.8、震央距離 35～126 kmのものである。

各地震群におけるK-1とK-2の2点での震央方向成分および震央直角方向成分毎の非定常スペクトルを図 3.3-15～3.3-17に示す。

ここで、細倉鉱山における地震観測において福島県沖（マグニチュード6前後、震央距離200km前後）の地震について求めた非定常スペクトルの卓越周波数と震源の深さの関係についての知見を列記すると以下のようである。

- 1) 震源の深さが40km以上の中では、地上、地下の各測点ともに長周期成分が卓越することはない。
- 2) 震源の深さが40km以浅の場合、震央方向成分では1.0Hz以下の周波数成分が卓越し、特に地上部測点では震源深さが浅くなるにつれ低周波数化する傾向にある。これに対し、地下部各測点では震源深さに関係なくほぼ一定の 0.7Hz前後の値を示す。
- 3) 非定常スペクトルの卓越周波数を見るかぎり、観測点の震動特性は地震の震源の深さに強く依存し、この傾向は特に震央方向成分で顕著である。

しかし、今回3つの地震群の地震について求めた非定常スペクトルでは、図3.3-15～図3.3-17から明らかなように、地上、地下のいずれにおいても長周期成分が卓越したものはみられなかった。これは、観測された地震はいずれもマグニチュードが5以下で長周期成分が少ないうえ、震源の深さが40km以深と深く表面波が励起しにくいことによると思われる。

(3) 地震時挙動

前節で示した伝達関数においてピークあるいは谷の現れた周波数帯域に着目し、宮城県沖の地震群に属する地震番号17、岩手県沖の地震群に属する地震番号19およ

び岩手県中部の地震群の地震番号 3 8 の各地震での地震時の挙動を検討した。

図 3.3-18 は 1 Hz 間隔で求めた各周波数域での加速度波形の履歴（リサージュ）を各地震毎に示したものである。同図において前節で示した伝達関数でのピークや谷の現れた周波数帯域でのモードは、他の周波数域に比してリサージュの相関性が良い。

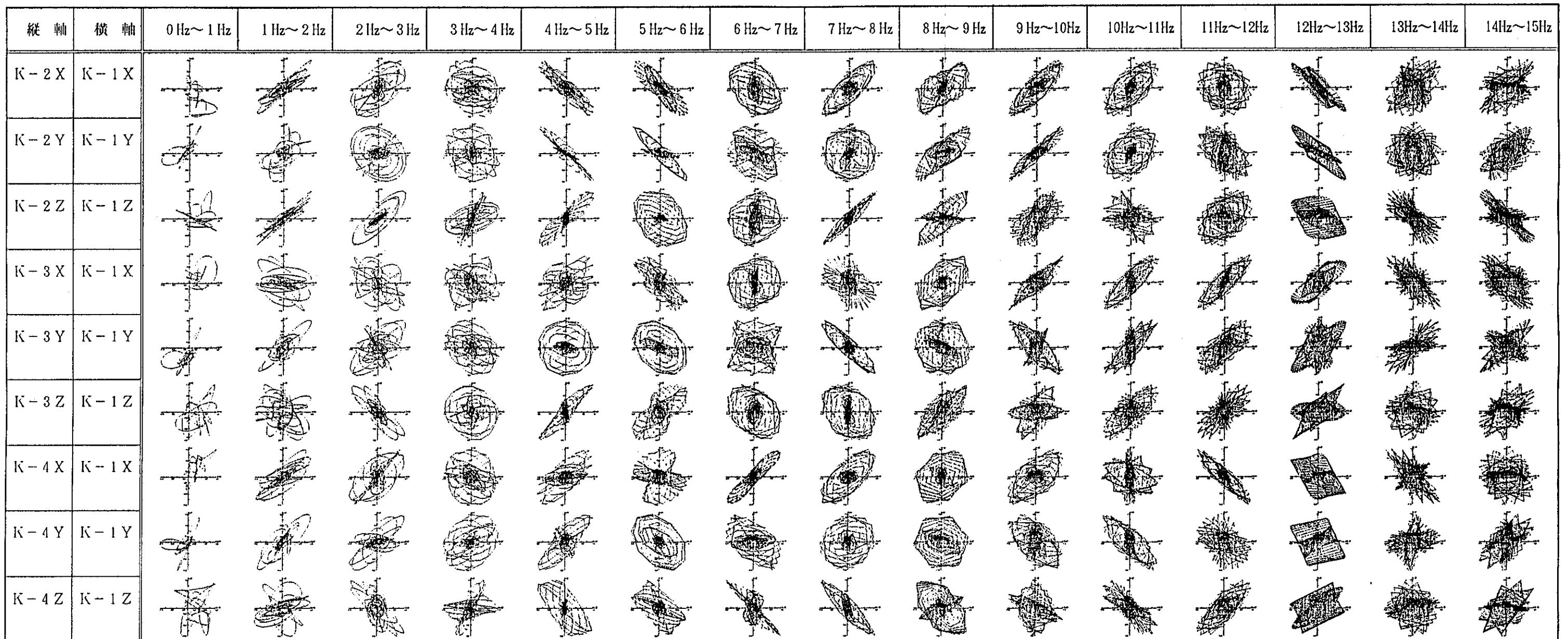


図 3.3-18 (1) 各周波数域毎での加速度履歴 (EQ. No. 17 震央距離 41.1 km)

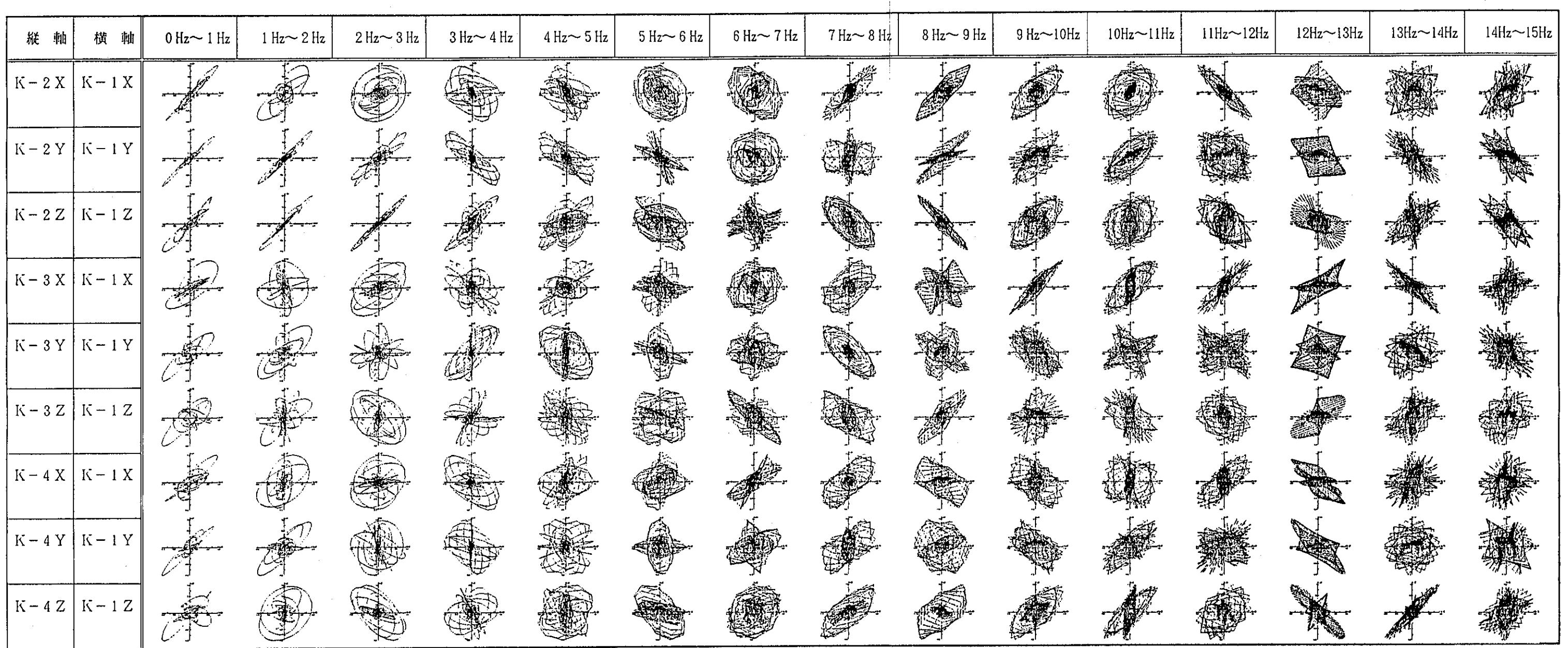


図 3.3-18 (2) 各周波数域毎での加速度履歴 (EQ. No. 19 震央距離 40.3 km)

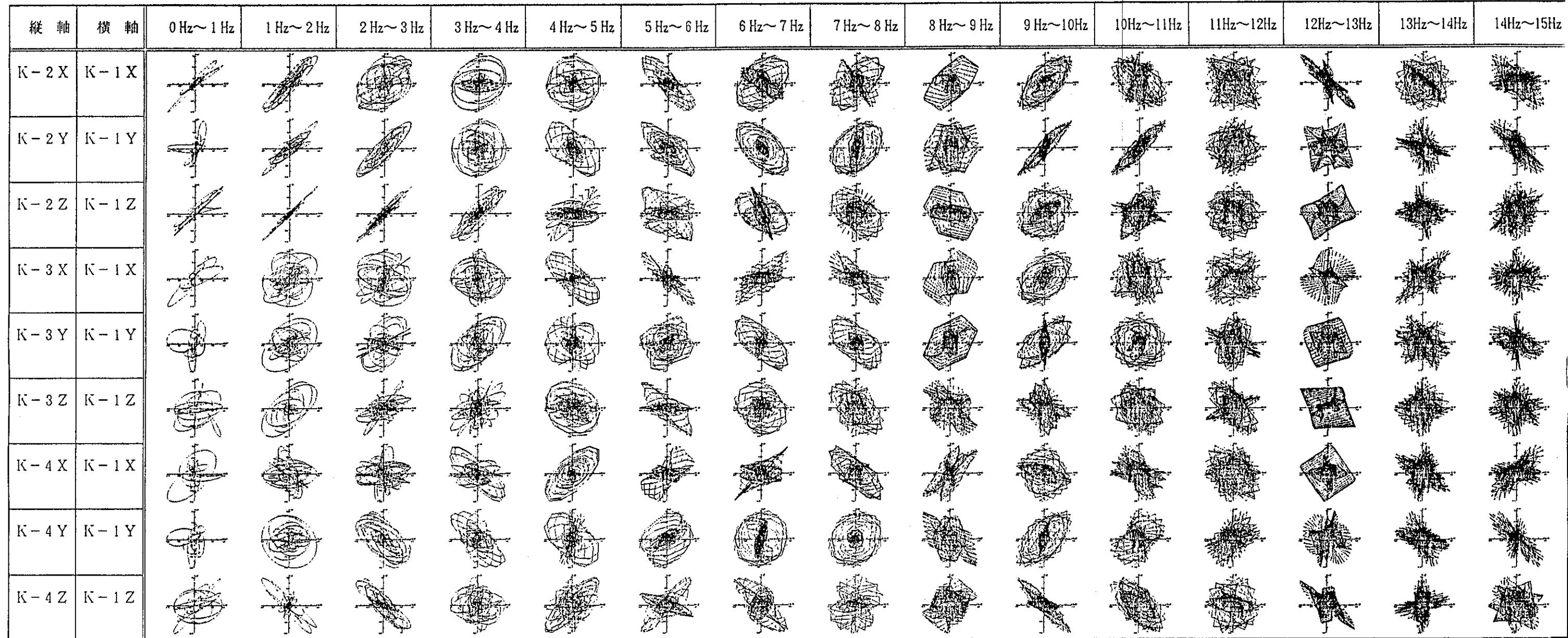


図 3.3-18 (3) 各周波数域毎での加速度履歴 (EQ. No. 38 震央距離 58.1 km)

(4) 三次元アレイ観測による入射方向の算出

宮城県沖の地震群の地震番号17、岩手県沖の地震群の地震番号19および岩手県中部の地震群の地震番号38の3地震について、アレイ観測から地震波の入射角や到来方向を求めた。K-1～K-4の4点で構成する立体アレーの各点でのz成分の初動部の自己相関・相互相関関数を図3.3-19に示す。同図より得られた位相遅れ時間を作各地震・各測点間毎に一覧にしたもののが表3.3-4である。また、地震動が鉛直下方から伝播してきたと仮定して求めたK-1とK-2の2点間の見かけの伝播速度を表3.3-5に示す。同表より見かけ速度は4.5～5.7km/secとなり、この値は原位置で実施された室内岩石試験結果と調和的である。次に立体アレーから求めた地震波の到来方向と震央の関係を図3.3-20に示す。入射角と到来方向は図3.3-19より読み取った位相遅れ時間より算出した。図から明らかのように、地震波の到来方向は観測点から震央方向と概ね一致している。次に、鉛直アレー観測から求めた入射角と気象庁が震源決定に用いている走時曲線より算定した理論値入射角とを対比して表3.3-6に示す。理論から求まる入射角が20～25°であるのに対し、地震番号17と19の地震の観測値は12～16°とやや小さな値を示し、また、地震番号38の地震では79°と大きな値を示す。

(5) 釜石鉱山における観測データのまとめ

- ① 平成2年2月から平成3年2月までの約1年間に観測された地震の数は40個である。これらの地震の震央位置は、概ね岩手県中部（震央距離約60km）、岩手県沖（震央距離約50km）および宮城県沖（震央距離50～120km）の3地域に区分することができる。
- ② 観測された地震のうち加速度が最も大きい地震は岩手県沖地震（地震番号19）で地表で約17gal、地下315mで約10galの加速度波形が得られた。
- ③ EL. 550m坑の地中K-2点とEL. 865m坑の地表付近のK-1点間の加速度振幅比は、概ね2～3倍の範囲にある。また、x, yおよびzの各成分を比較すると、水平成分のy方向の振幅比が若干大きくなる傾向にある。
- ④ スペクトル解析によれば地震動の周波数特性は地震ごとにかなり異なるが、增幅特性は地震によらずほぼ一定で、K-1とK-2測点の間では水平成分で3～4, 8Hz、鉛直成分で10Hz前後が増幅される。また、新たに設置したEL. 250mレベル

のK-5とEL. 725mレベルのK-6の2測点のデータも加えた結果によれば、EL 250 m レベルからEL. 725m レベルまで加速度振幅はほとんど見られないが、この EL. 725m レベルから地表(EL. 865m)にかけて、およそ2倍に増幅されるようである。

- ⑤ 宮城県北部の地震番号19や岩手県沖の地震番号17の地震の加速度応答スペクトルは、x、yおよびzのすべての成分が地下深部に対して地表付近で増幅している。岩手県中部の地震の加速度応答スペクトルのxとy方向も同様に、地下深部に対して地表付近で増幅するが、z成分では地表付近と地下深部とでほぼ類似している。
- ⑥ 伝達関数に関する解析結果によれば、地下深部から地表付近までの地震動の増幅特性は、震央が似かよった地震群ごとに共通の特性が認められる。これは震源過程ならびに伝播経路の類似性によるものと考えられる。
- ⑦ 主な地震について非定常パワースペクトルを求めた結果、いずれの場合も長周期成分が卓越するような地震はみられず、対象とした地震では表面波の成分が少ないことが確認された。これは解析した地震のマグニチュードが5以下と小さく長周期成分が少ないうえ、震源が40kmより深く表面波が励起されにくいことによると思われる。

3.3.3 今後の課題

平成2年11月にEL. 250mおよび725mのレベルにK-5, K-6の2測点を増設し観測体制の充実をはかった。今後増設した2測点も含めて地震観測を継続実施し地震データの蓄積をはかるとともに、地層処分施設に対する地震動の影響評価を行ううえで不可欠な地下深部における地震動の低減特性、各地震群による地下深部での地震動特性および硬質岩盤と軟質岩盤での地震動特性などの検討を行う必要がある。

また、地層処分施設に対する地震動の影響を観測と数値解析により評価するためには、地震観測点周辺の岩盤の弾性波速度をできるだけ詳細に把握する必要がある。

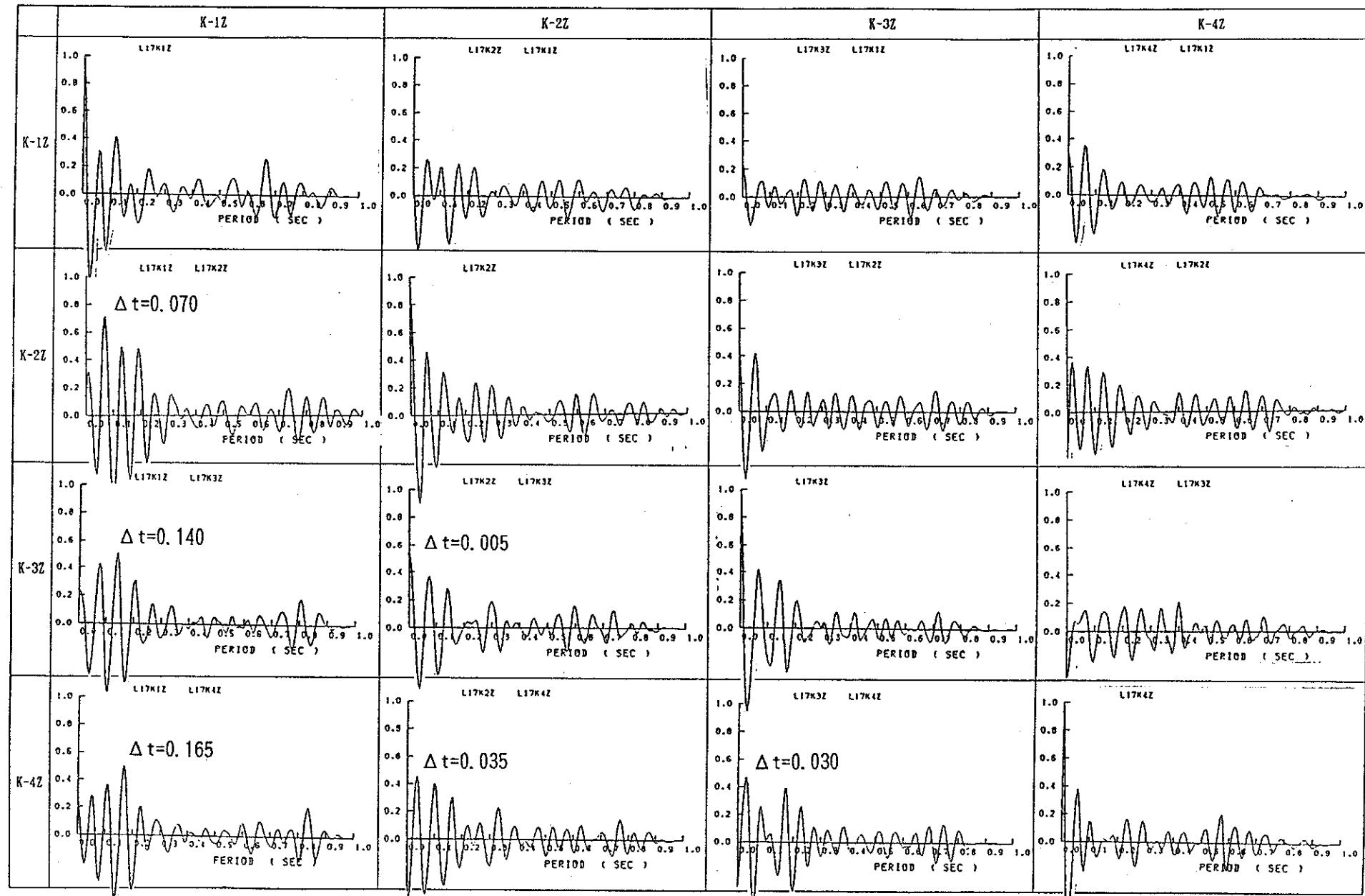


図 3.3-19 (1) 自己相関・相互相関関数 (EQ. No. 17 宮城県北部 1990.6.29 08:25, Z 成分, 初動部) Δt (sec)

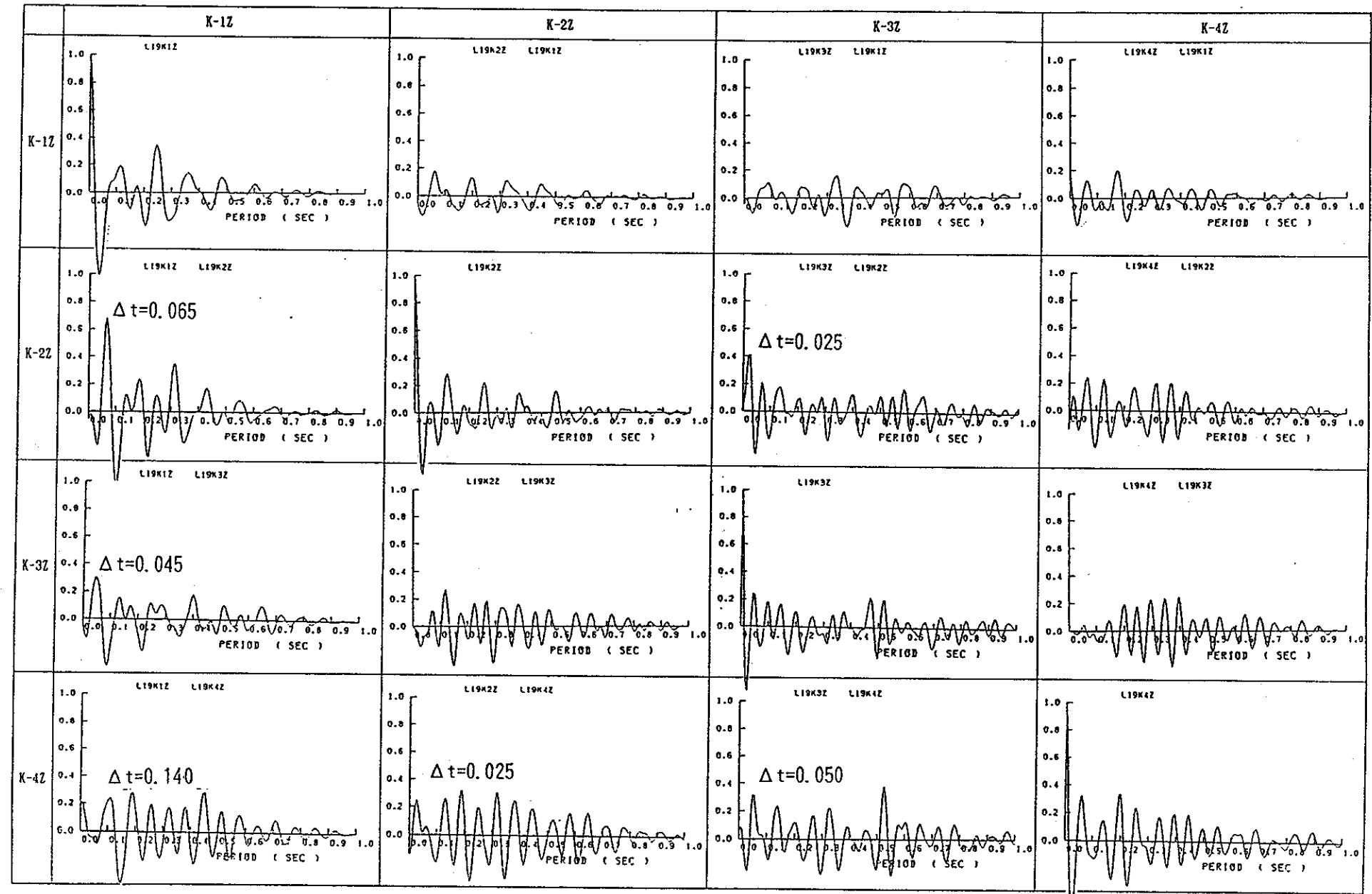


図 3.3-19 (2) 自己相関・相互相関関数 (EQ. No. 19 岩手県沖 1990.7.16 21:35, Z 成分, 初動部) Δt (sec)

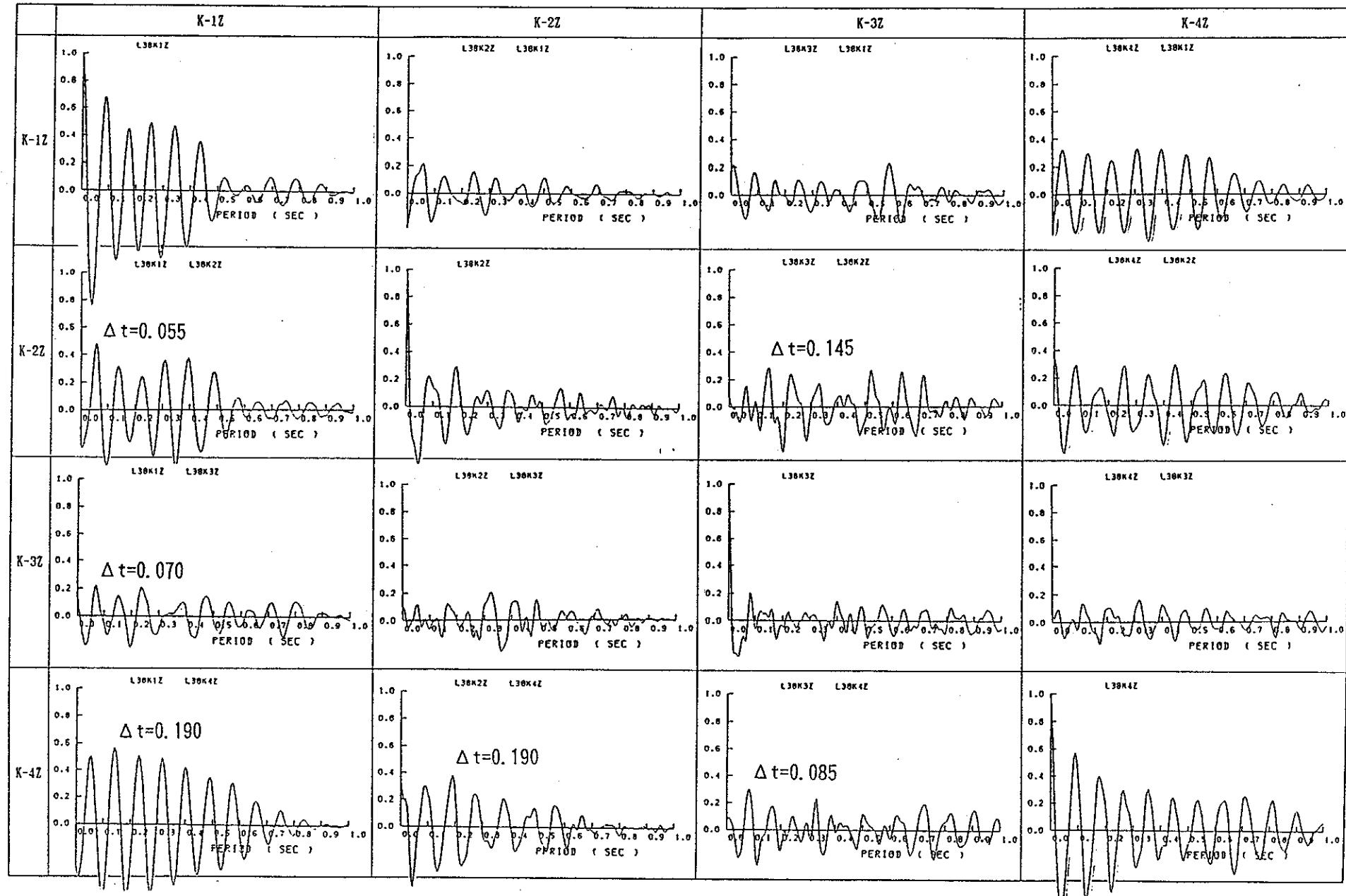


図 3.3-19 (3) 自己相関・相互相関関数 (E0. No. 38 岩手県中部 1991.1.27 18:56, Z 成分, 初動部) Δt (sec)

表 3.3-4 地震波の遅れ時間 (Z成分、初動部、 Δt (sec))

| 地震番号 | k-2～K-1 | k-3～K-1 | k-4～K-1 | 備考 |
|------|---------|---------|---------|----|
| 17 | 0.070 | 0.140 | 0.165 | |
| 19 | 0.065 | 0.045 | 0.140 | |
| 38 | 0.055 | 0.070 | 0.190 | |

表 3.3-5 地震波動の解析より得られた伝播速度 (V_a)

| 区間 | 区間距離 (m) | * 鉛直成分、 V_{av} (km/sec) |
|---------|------------|-----------------------------|
| k-2～K-1 | 315.0 | 4.5 ~ 5.73 |

* 地震波が鉛直下方から入射してきたと仮定した時の値

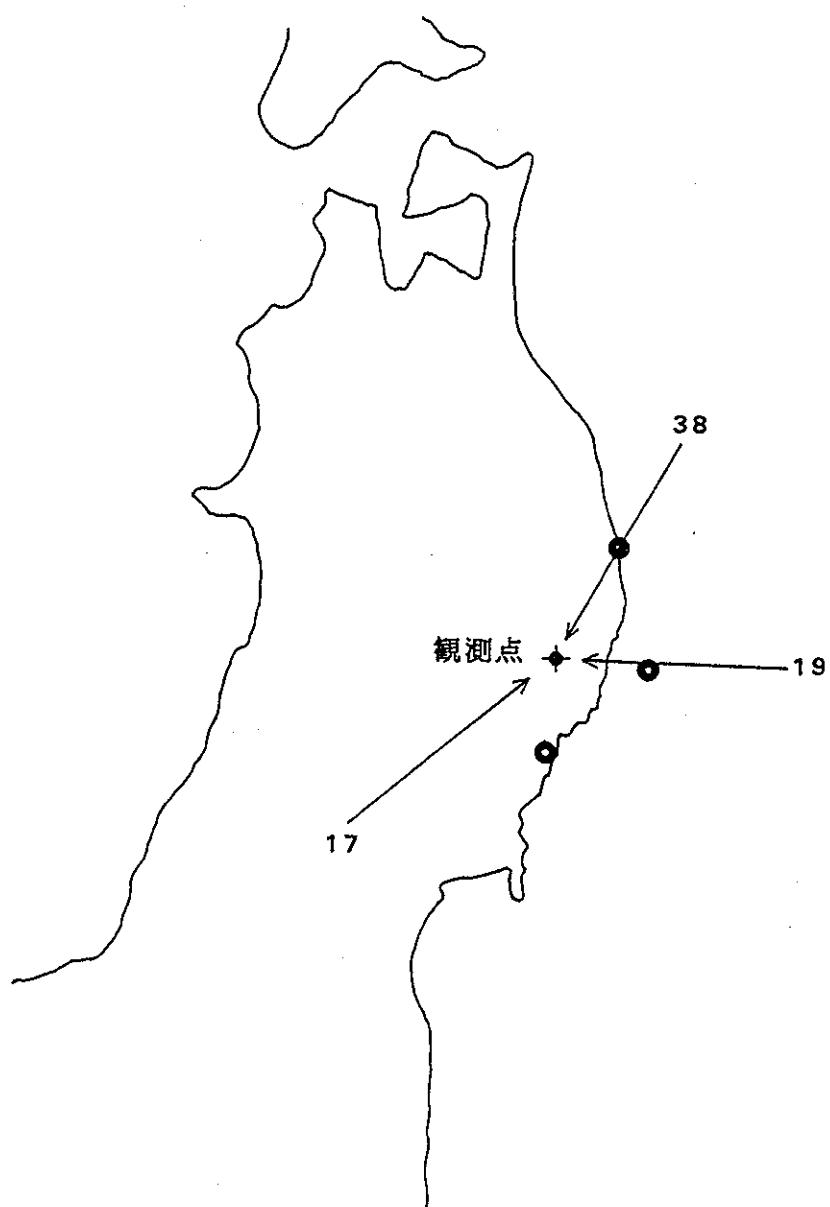


図 3.3-20 立体アレー観測による地震波の到来方向

表3.3-6 地震波の鉛直入射角の観測値と理論値の比較

| 地震番号 | 観測記録 から算定 | 地殻構造理論 から算定 |
|------|--------------|----------------|
| 17 | 12.4° | 20.0° |
| 19 | 15.5° | 23.8° |
| 38 | 79.0° | 25.0° |

3.4 地下水理観測

3.4.1 観測方法

(1) 水圧・湧水量

水圧計ならびに水量計が設置されている大峰地区坑道付近の平面図並びに断面図を図3.4-1、図3.4-2に示す。なお観測装置の仕様等については、前年度の報告書「地震に関する調査研究（VI）、1990年4月」に記載されている。

また、本年度は岩盤の亀裂からの湧水量の地震あるいは地球潮汐に伴う微細な変動を測定するための観測システムを予備的に設置した。設置場所は大峰550mレベル坑道のK0-10地点である。K0-10地点天盤における広さ約2m²の範囲の数カ所から滴下する湧水をビニールシートで水槽に集水し、電子天秤を用いてその秤量値を得た。

測定装置はサイホンの付随した受水槽、この受水槽を秤量台に載せている電子天秤、秤量値を経時的に記録するパソコン用コンピュータとからなる（図3.4-3）。

測定に使用した機器は

- ・電子天秤：ザルトリウス社製IB1600S型（最大秤量16.1kg、読取精度0.1g）
- ・パソコン用コンピュータ：NEC社製PC-9801NV

である。

本システムでは、湧水量を0.01%を超える精度で計測することが可能である。電子天秤はRS-232C規格の外部入出力機能を有しており、コンピュータ側の印字指令を受け、その時点の秤量値をコンピュータに出力することができる。受水槽では水位がある一定のレベルに達するとサイホン管によって自動的に排水が行われる。この排水時間中は湧水量の記録は得られない。

本調査では平成3年2月1日から3月1日までの湧水量変化を対象として、データ取込み間隔を1分に設定し、測定を実施した。

(2) 水質

① 採水方法

地下水採水箇所を図3.4-4に示す。大峰550mレベル坑道への湧水については、図3.4-5に示すように6つの水質型がすでに識別されている。これらを含むように、採水箇所を配置した。湧水している亀裂には穴を開けて、プラスチック製チューブの一端をこれに差し込み、他端から常に滴下させておくようにした。採

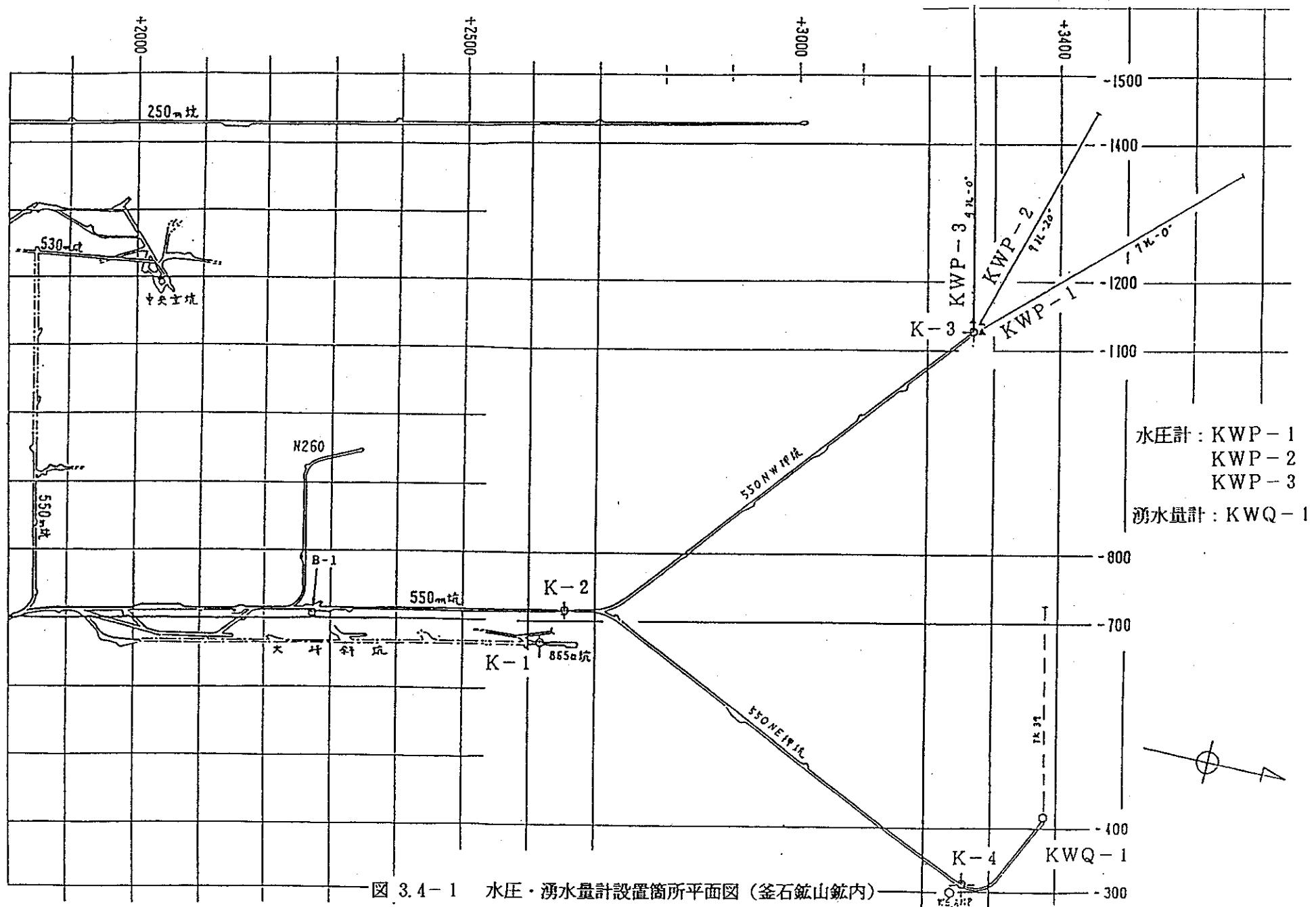


図 3.4-1 水圧・湧水量計設置箇所平面図 (釜石鉱山鉱内)

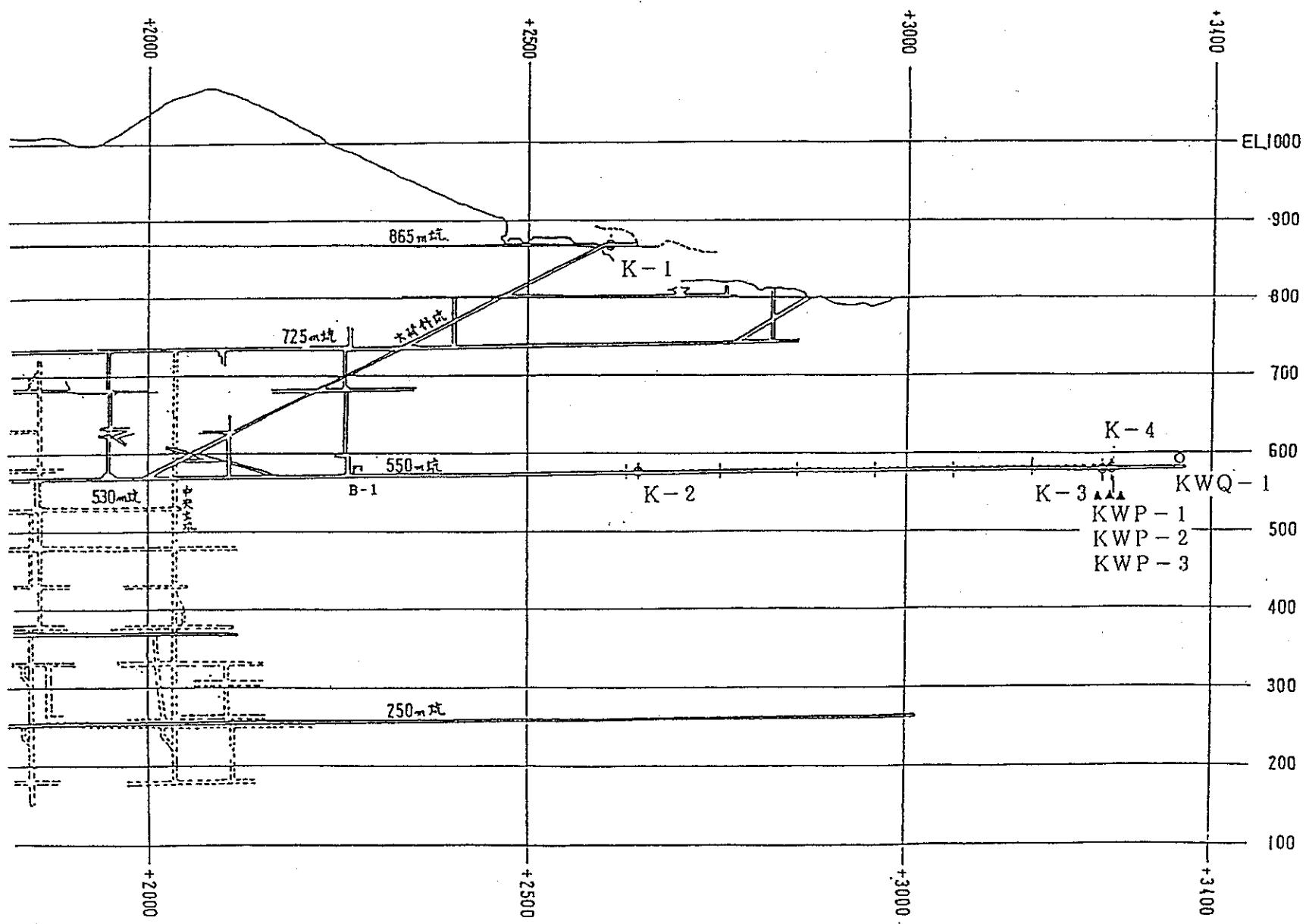


図 3.4-2 水圧・湧水量計設置箇所断面図（釜石鉱山鉱内）

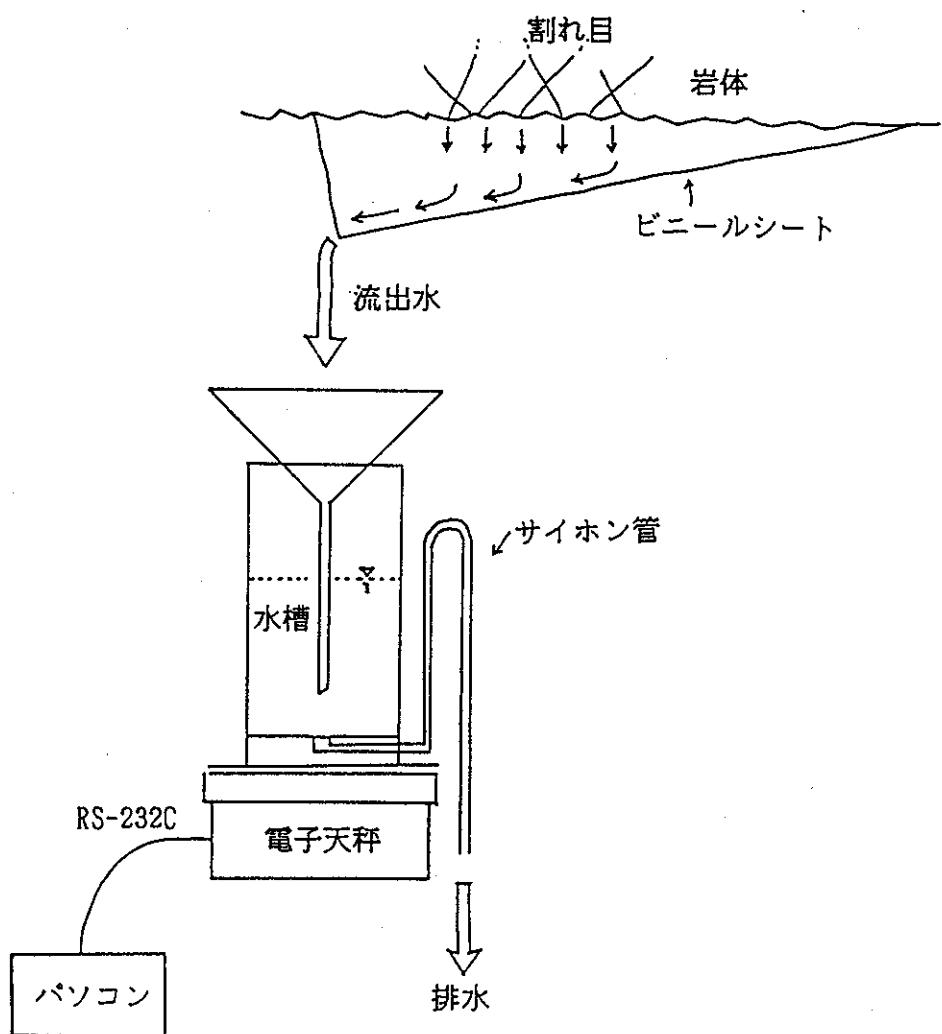
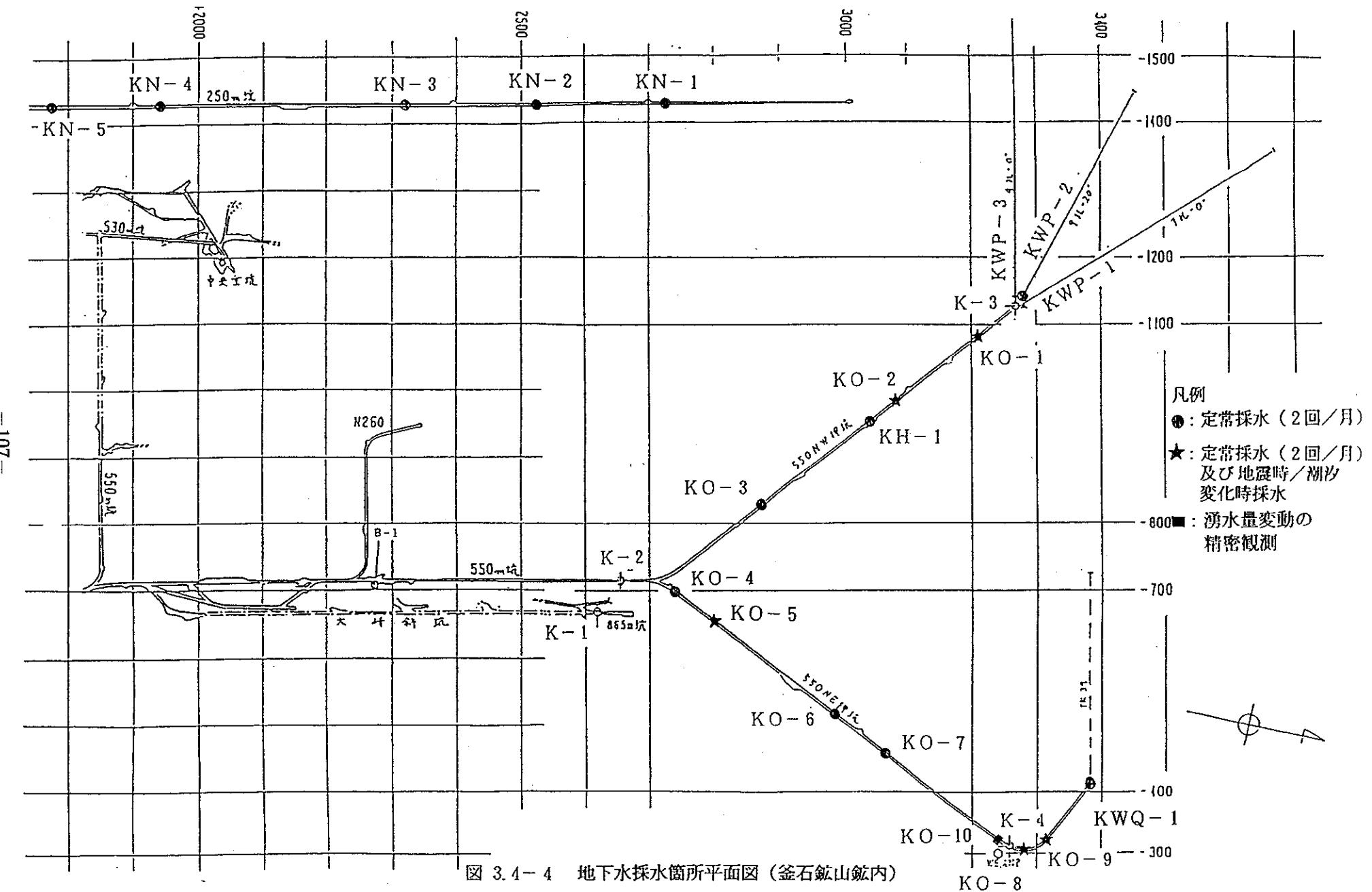


図 3.4-3 水量観測装置の概要



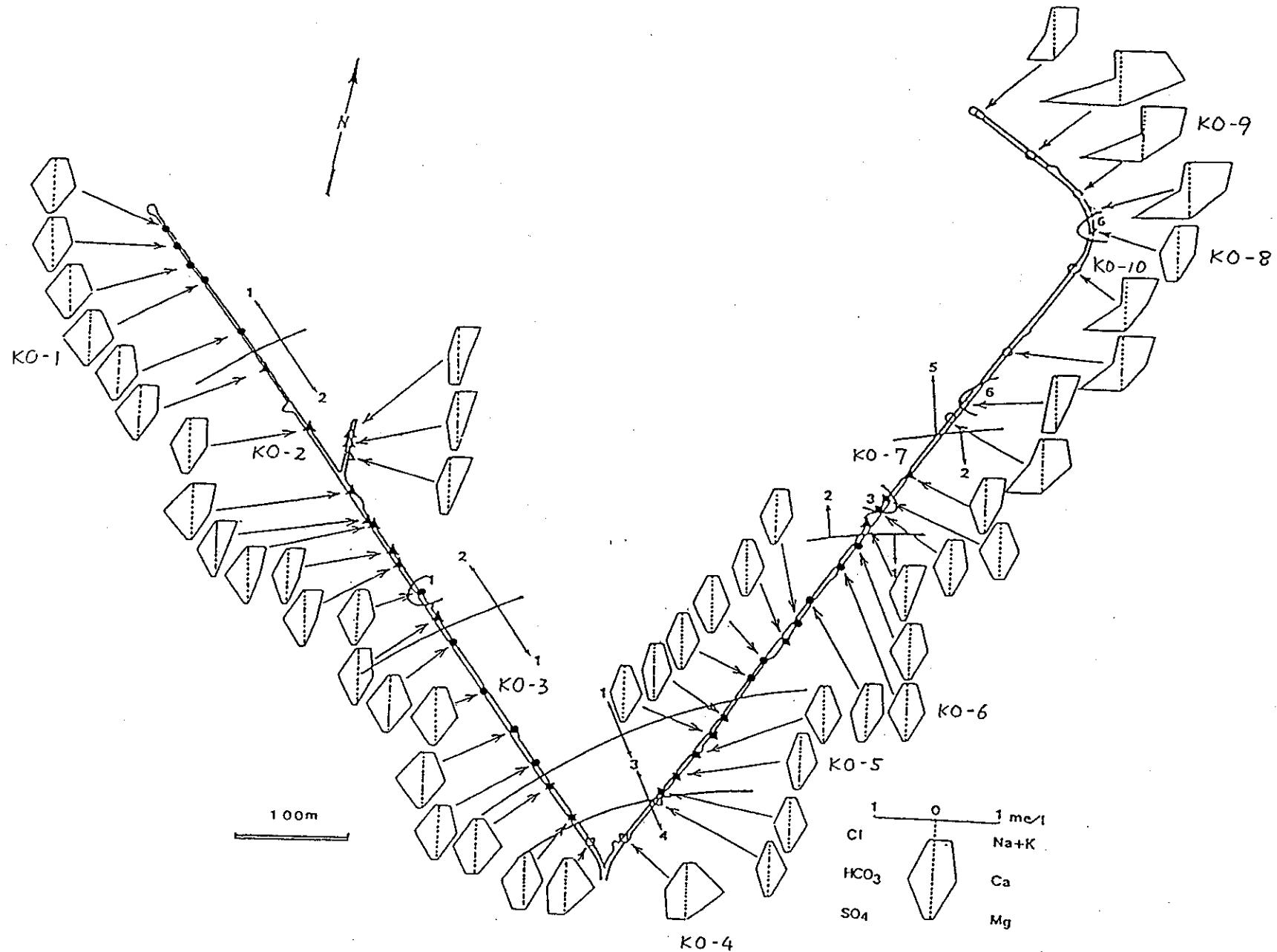


図 3.4-5 大峰550mレベル坑道における湧水の採水箇所の配置 (KO-1~10)

水時には、これを直接試水容器に受けた（K0-1～9）。なお、K0-10の湧水については、前述のようにビニールシートに受けているのでシート下端より採水した。

日峰250mレベル坑道への湧水については、それぞれ天盤中央部の湧水ポイントに目印を設置し、これから滴下する水を、試水容器に受けた（KN-1～5）。

大峰550mレベル坑道から垂直下方に76mm径で掘削されたボーリング孔（KH-1孔）内への湧水については、表3.4-1に示す深度からの湧水が平成2年度4月25日以来常に孔口へと流出するよう多段式のパッカーが設置されているので、これについて、各採水チューブからの採水を実施した（KH-1～5）。

また本調査における水圧測定孔であるKWP-2については、ボーリング孔の孔口は、バルブにより止水してあるものの亀裂を伝って孔口の脇へ孔内水が湧出しているものと認められるので、この水を採水対象とした（KWP-2）。

同様に本調査での湧水量測定孔であるKWQ-1については、電磁センサーの流出端からの水を採水対象とした（KWQ-1）。

以上試水容器には、内容積100mlのポリエチレン製広口びん（中蓋付）を用い、容器内に空気が残らないように口元までいっぱいに採水後直ちに密栓をし、坑外の分析室へと搬出、電気伝導度の測定時まで静置、保管した。

表 3.4-1 ポーリング孔での採水深度

| 試料名 | 採水区間 * |
|--------|-----------------|
| KH-1-1 | 2.01 ~101.17m |
| KH-1-2 | 102.25 ~236.41m |
| KH-1-3 | 237.49 ~337.14m |
| KH-1-4 | 338.22 ~410.94m |
| KH-1-5 | 412.02 ~500.00m |

* : KH-1孔の孔口からの深度で示す。ただし、孔口の海抜レベルは575.55m。

② 採水実施時期

表 3.4-2 に示す日時に月 2 回の採水を実施した。

また、潮汐に対応した水質変動を検出するための経時採水については、平成 2 年 11 月 4 日午前 2 時から 2 時間おきに同日午後 12 時までの 12 回にわたり、K0-1～9 ならびに KH-1-1, KWP-2, KWG-1 の 12 試料について、平成 3 年 2 月 15 午後 7 時から 2 時間おきに翌日午後 9 時までの 14 回にわたり K0-1～10 ならびに KH-1-1, KWP-2, KWQ-1 の 13 試料についてそれぞれ実施した。

地震時の採水については、実施の態勢をとったものの試料を得るにはいたらなかった。

③ 電気伝導度測定

水質を表すそれぞれの化学成分濃度値を 2～3 % 以下の相対精度で分析するには、コントロールされた条件での注意深い測定を必要とする。ある水質を 2 つのエンドメンバーの混合で説明することは、水質水文学ではしばしば試みられる手法であるが時系列の変動を検出しようとすれば、試水の化学分析をまとめて実施することや分析操作における各種の条件の厳密なコントロールなど、手数のかかる作業となる。例えば時系列試料については、保存に注意をはらって、一度に測定し、さらに標準添加法のような相対精度を高める分析法を採用するなどの配慮が必要である。

これに比較すると電気伝導度の測定は、測定機器の精度を充分に発揮するためにコントロールすべき測定条件は、温度、pCO₂ など管理しやすい項目といえる。

また、天然水のような希薄な水溶液については、陽イオン・陰イオンの各化学成分の当量電気伝導度の加成性が成立し、水質変動が存在すれば、電気伝導度に反映されることの確かな保証もある。そこで本調査では、必要な精度を得るために測定が容易である点に着目し水質代表項目として電気伝導度をとりあげることとした。

天然水に通常含まれるイオンについての当量電気伝導度の温度変化の傾向から考えると、天然水の電気伝導度は、1 °C の温度上昇について 2～2.5 % 増大する。このことは 0.5 % をきる測定精度を得るには、0.2 °C 以内に測定試水の温度を一定に保つ必要があることを意味している。一方、本調査の対象試水については採水時の pH が 8～9 であり、R pH が 7.5 前後であるところから試水を清浄な大気に

表 3.4-2 採水日時・時刻一覧

| | 1990年 8月10日 | 1990年 8月12日 | 1990年 8月15日 | 1990年 9月8日 | 1990年 9月22日 | 1990年 10月6日 | 1990年 10月20日 | 1990年 11月2日 | 1990年 11月17日 | 1990年 12月1日 | 1990年 12月15日 | 1991年 1月4日 | 1991年 1月19日 | 1991年 2月2日 | 1991年 2月15日 |
|--------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| KN-1 | 採水時刻 不明 | — | 9~10h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KN-2 | 同上 | — | 9~10h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KN-3 | 同上 | — | 9~10h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KN-4 | 同上 | — | 9~10h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KN-5 | 同上 | — | 9~10h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-1 | — | 採水時刻 不明 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-2 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-3 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-4 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-5 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-6 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-7 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-8 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KO-9 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KWP-2 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KWQ-1 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KH-1-1 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KH-1-2 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KH-1-3 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KH-1-4 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |
| KH-1-5 | — | 同上 | 13~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 12~14h | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 | 同左 |

触れさせておくと $\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^-$ の反応がおこって試水の陰イオン組成が変化をうけることが推定される。 CO_3^{2-} の寄与する電気伝導度と 2HCO_3^- が寄与する電気伝導度とは前者より、後者の方が小さいのでこの変化がおこると電気伝導度は低下する。本調査では、8月10日～9月22日に採水した試料について9月26日に電気伝導度を測定しているが保存期間が長いほど電気伝導度が低いという傾向は示されていない。2カ月程度の保存期間であれば(1)採水方法の項で述べた試料採取・保存が適切であると判断される。

上述の考察にもとづき下記の条件で電気伝導度を測定した。

測定に使用した機器は、

- ・電気伝導度計：ハンディ導電率計
電気化学計器株製 H P K - 22型
- ・恒温水槽 : トーマススタッット（噴流攪拌式）
トーマス科学機器株製 T - 22型（精度は±0.1 °C）

である。

なお、恒温水槽は20°Cに設定し、試水容器を密栓をしたまま、多数水槽に並べ、恒温に達した後順次、栓をあけて電気伝導度計のセンサー部を浸す手順で測定を実施した。

④ 安定同位体比測定

いくつかの電気伝導度測定後の試料について、重水素および酸素-18含量 (δD および $\delta^{18}\text{O}$ で示す) の測定を実施した。

使用した質量分析計は、フィニガン・マット社製delta E型であり、同社製の水・二酸化炭素自動平衡化装置を用い、電力中央研究所における常法（「ハイドロロジー」1991年4月号）に従って分析した。

分析精度 (1σ) は、 δD 値で±1‰、 $\delta^{18}\text{O}$ 値で±0.05‰である。

3.4.2 観測結果

(1) 水圧・湧水量

① 間隙水圧

地震時の岩盤内における間隙水圧の挙動を見るため、EL550m坑に位置するボーリング孔孔口に間隙水圧計を設置し、平成2年2月13日より観測を開始した。

その後、表3.3-2に示す地震によって岩盤内の地震時間隙水圧が観測されたが、ここではそのうち地震No1, No17, No19, No24, No33, No38の6波による間隙水圧について報告するものである。

これらの地震によって観測されたEL550m坑のボーリング孔における観測地震波形、岩盤内の地震時間隙水圧波形及びフーリエ・スペクトルを図3.4-6に示す。なお、同図には、各地震計で捉えた地震動の加速度波形、速度波形、変位波形及び速度のフーリエ・スペクトルも記載している。また、図3.4-7(1)に観測地震時間隙水圧と加速度との関係を、図3.4-7(2)に観測地震時間隙水圧と速度との関係を示す。

以上の観測結果より次の2点が明らかになった。

1. 地震動の加速度波形を積分して求めた速度波形のフーリエ・スペクトルと地震時間隙水圧波形のフーリエ・スペクトルの形状は、非常に似ている。
2. 速度の最大値と地震時間隙水圧の最大値とは、よい相関関係が見られる。

次に観測された地震時間隙水圧の概略の特性を調べる目的で入射波の地動とそれによって発生するボーリング孔内の水圧の理論値と観測地震時間隙水圧とを比較してみた。

・平面波の入射によるボーリング孔内の水圧の算定式

任意の弾性波が均質媒質中を伝播し、その中に存在する液体の充満した円孔を、任意の角度で横切るものとする。円孔が通過する弾性波によって円孔の中心軸上の各点には孔横断面で変形が生じる。この変形によって、孔内水が膨張、圧縮されその結果として孔内水に水圧が発生する。この関係は、whiteによって式(1)、(2)の様に与えられている。なお、地震波の入射角 θ は間隙水圧設置位置と地震の震央方向の関係より算定するものとする。算定結果を図3.4-8に示す。

$$\frac{p}{u_p} = \kappa^2 \cdot \rho_w \cdot V_s \cdot \gamma \cdot \frac{1 - 2\gamma^{-2}\cos^2\theta}{1 - \kappa^2\gamma^{-2}\cos^2\theta} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{p}{u_{sv}} = \kappa^2 \cdot \rho_w \cdot V_s \cdot \frac{\sin 2\theta}{1 - \kappa^2 \cos^2\theta} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

p : 孔内の水圧 (kg f/cm^2)

u_p : 観測された地震波の初動部における加速度波形積分による最大速度
(cm/s) (図 3.4-9 参照)

u_{sv} : 観測された地震波の主動部における加速度波形積分による最大速度
(cm/s) (図 3.4-9 参照)

θ : 地震波の入射角

ρ_w : 孔内水の密度 (t/m^3)

V_b : 孔内水に伝わる音波の速度 (=1350m/s : 図 3.4-10より算定)

κ : V_b/V_s

γ : V_p/V_s

V_p : P波の速度 (=4500m/s)

V_s : S波の速度 (=2600m/s)

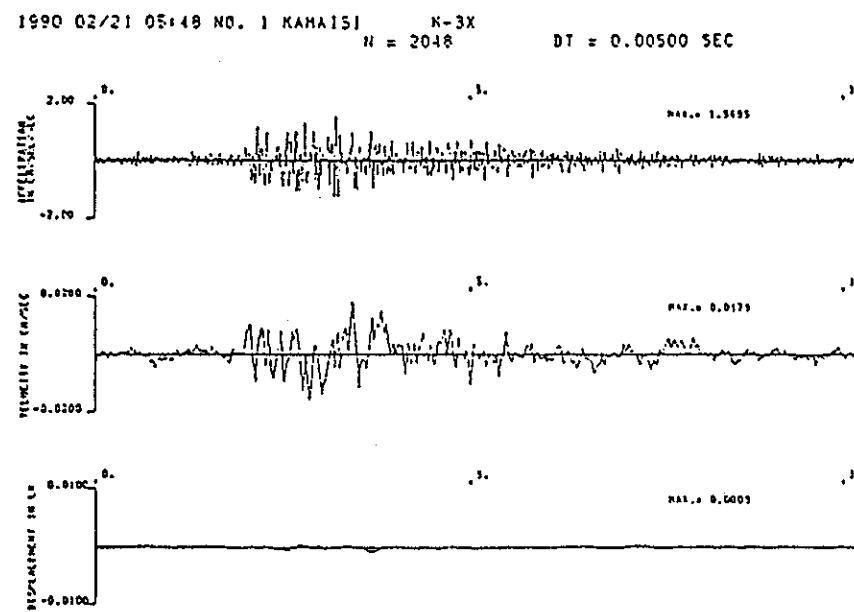
・算定値と観測値の比較

上記式(1)、(2)を用いてP波、S波による各々の孔内水の圧力を算定する。

算定結果と観測地震時間隙水圧との比較を表 3.4-3 に示す。

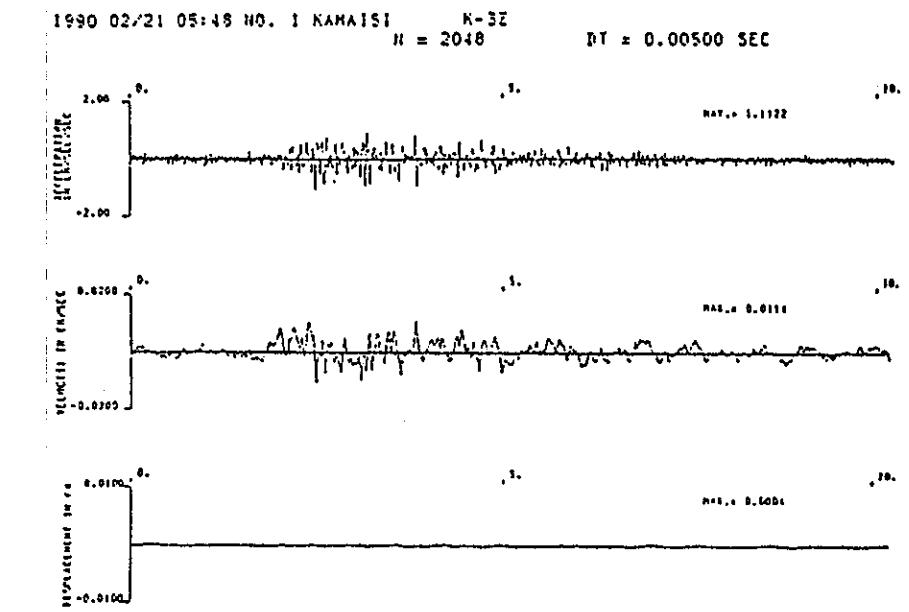
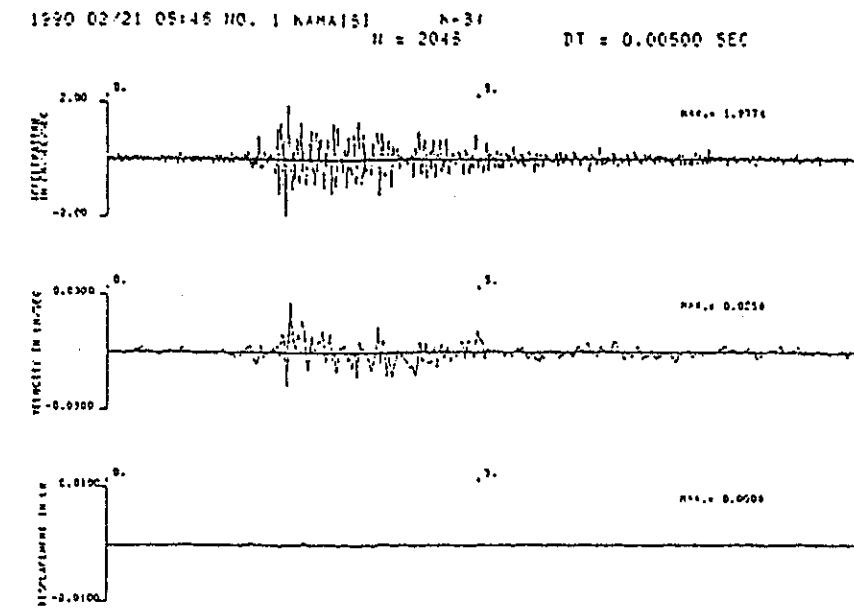
計算結果と観測地震時間隙水圧とを比較すると両者はよく対応する。このことから観測された地震時間隙水圧は、地震動によってボーリング孔の孔内水に発生した水圧を測定している可能性が高いと考えられる。

EQ.NO.1

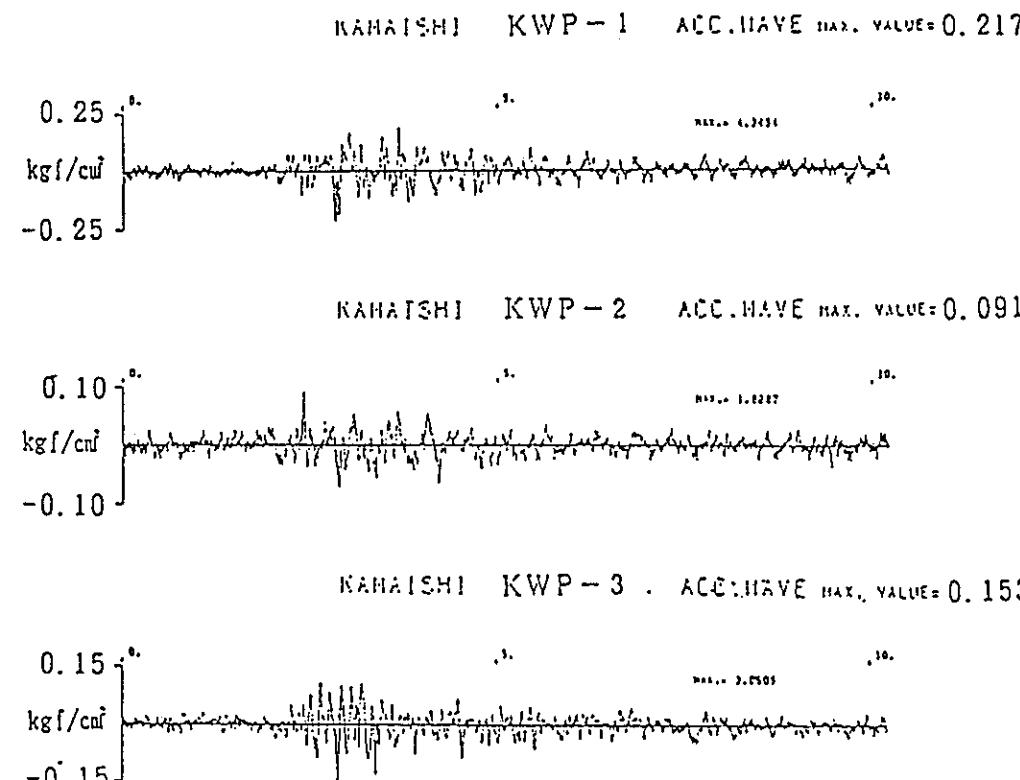


観測地震波形

- 上段：地震加速度波形
- 中段：地震速度波形
- 下段：地震変位波形



地震時間隙水圧波形



フーリエスペクトル

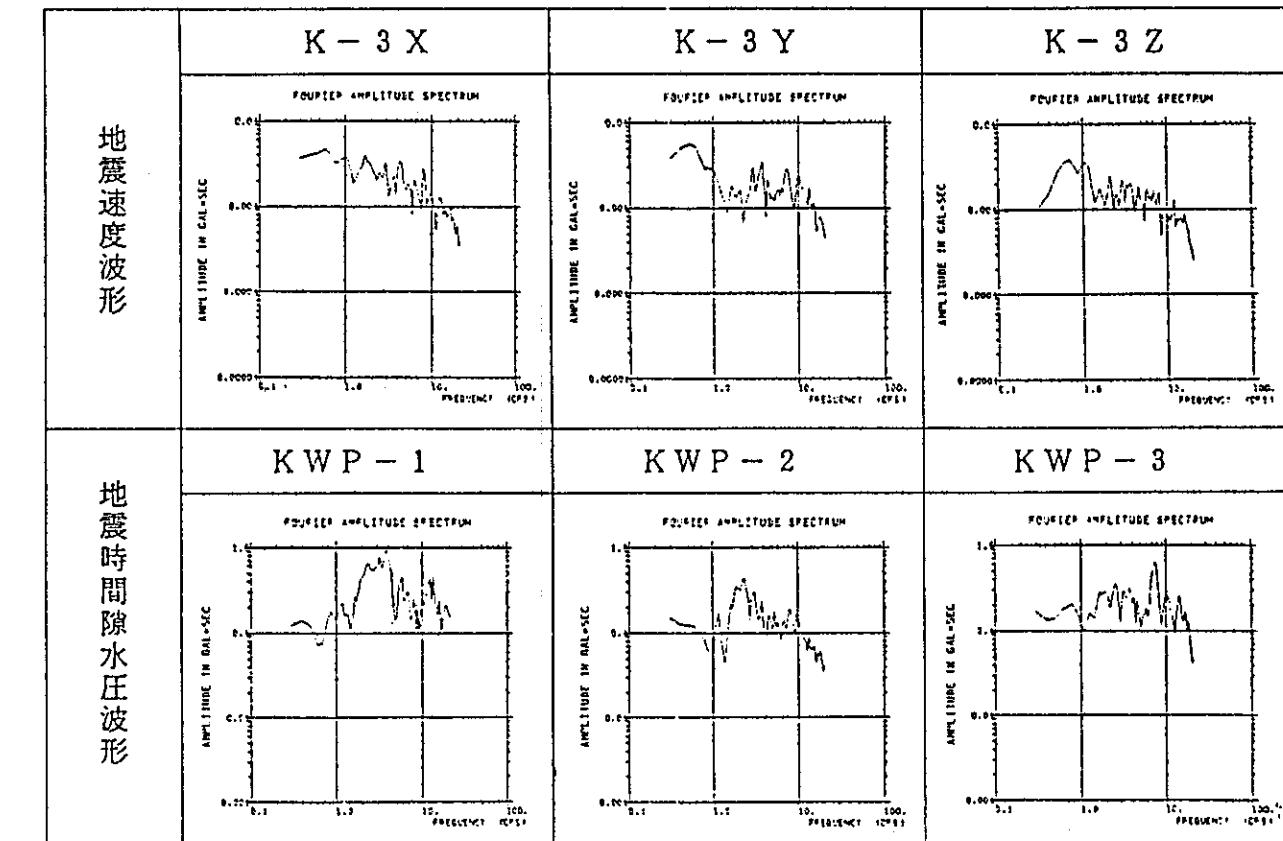
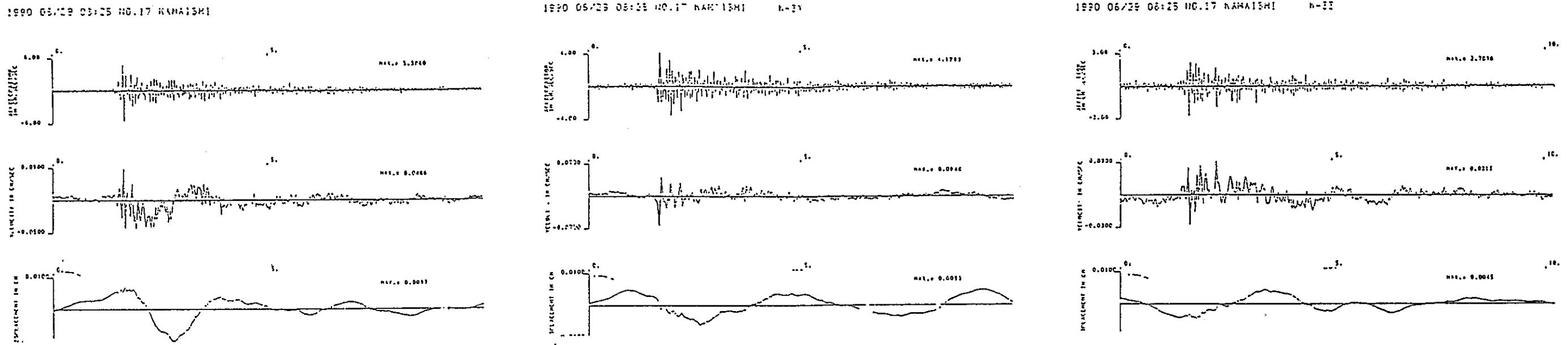


図 3.4-6(1) 録測地震波形、地震時間隙水圧波形及びフーリエスペクトル図

EQ. NO. 17

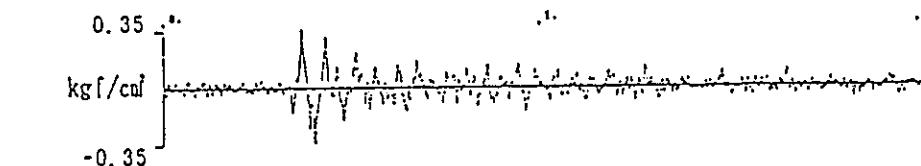
観測地震波形

上段：地震加速度波形
中段：地震速度波形
下段：地震変位波形

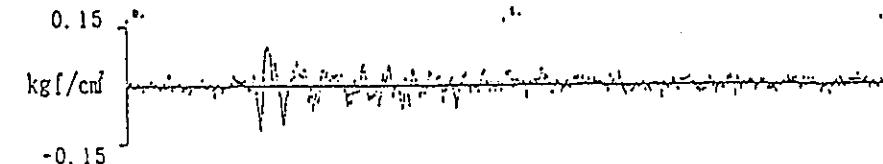


地震時間隙水圧波形

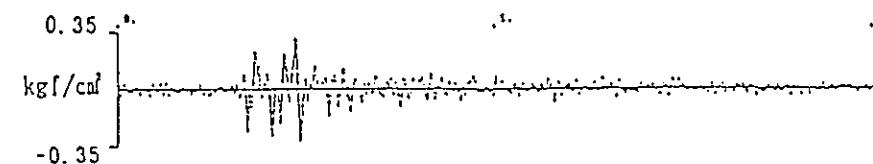
1990 06/29 08:25 NO.17 KAMAISHI KWP-1 ACC.WAVE MAX. VALUE= 0.364



1990 06/29 08:25 NO.17 KAMAISHI KWP-2 ACC.WAVE MAX. VALUE= 0.118



1990 06/29 08:25 NO.17 KAMAISHI KWP-3 ACC.WAVE MAX. VALUE= 0.324



フーリエスペクトル

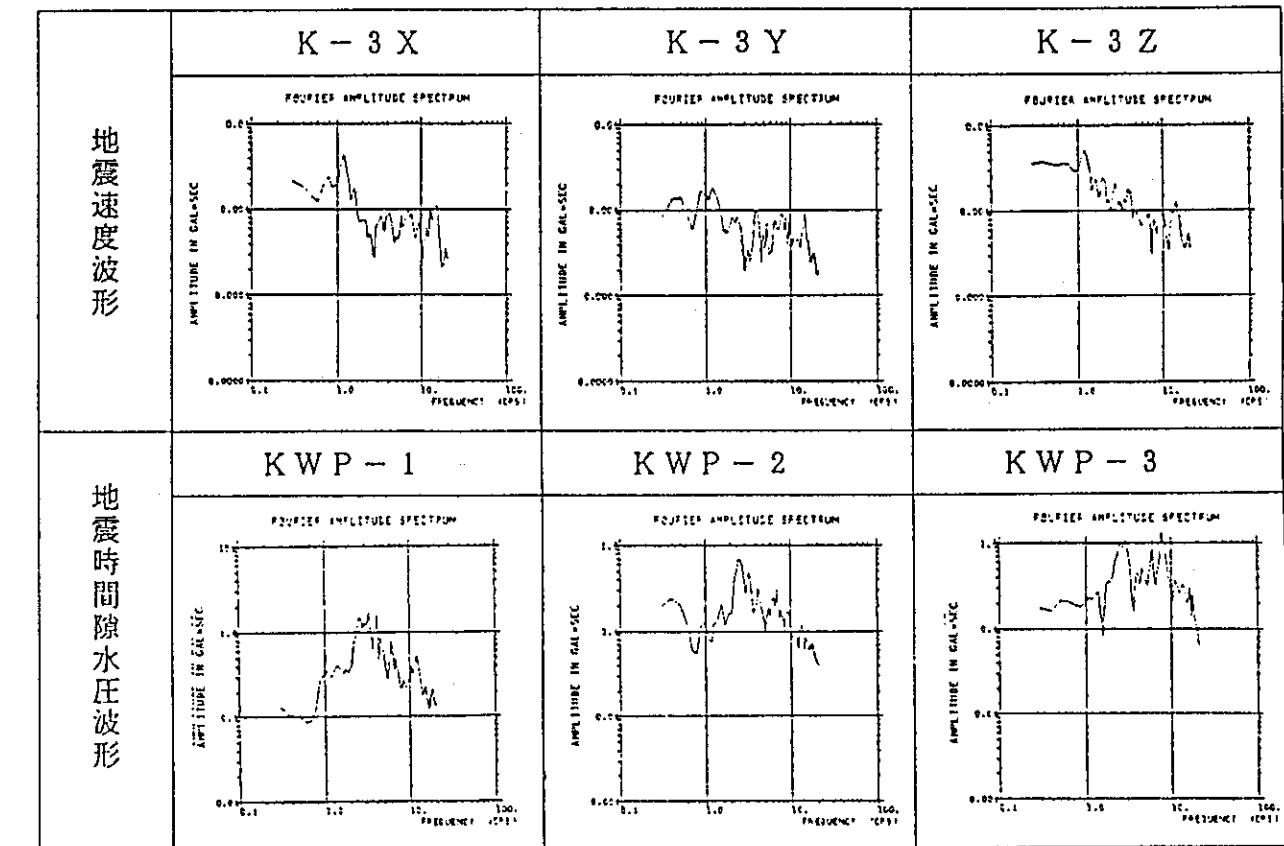
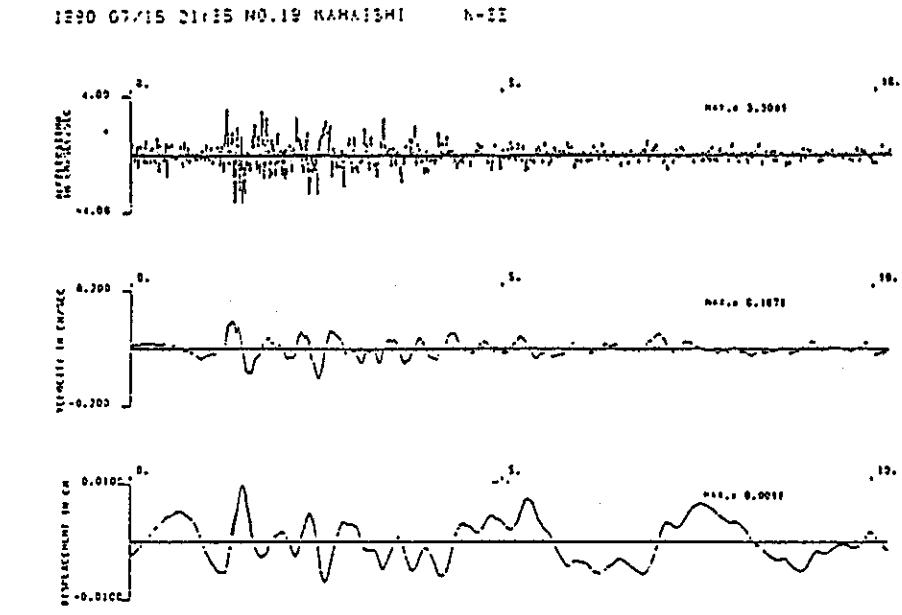
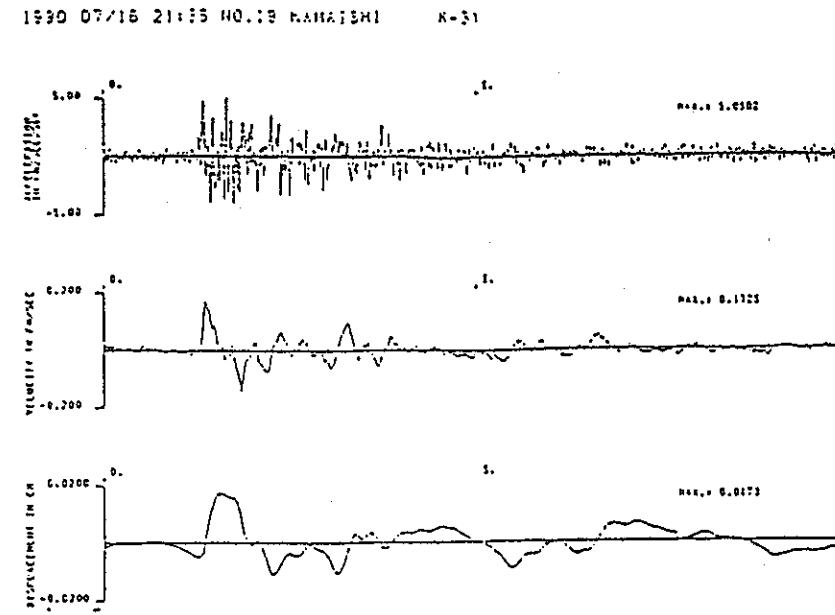
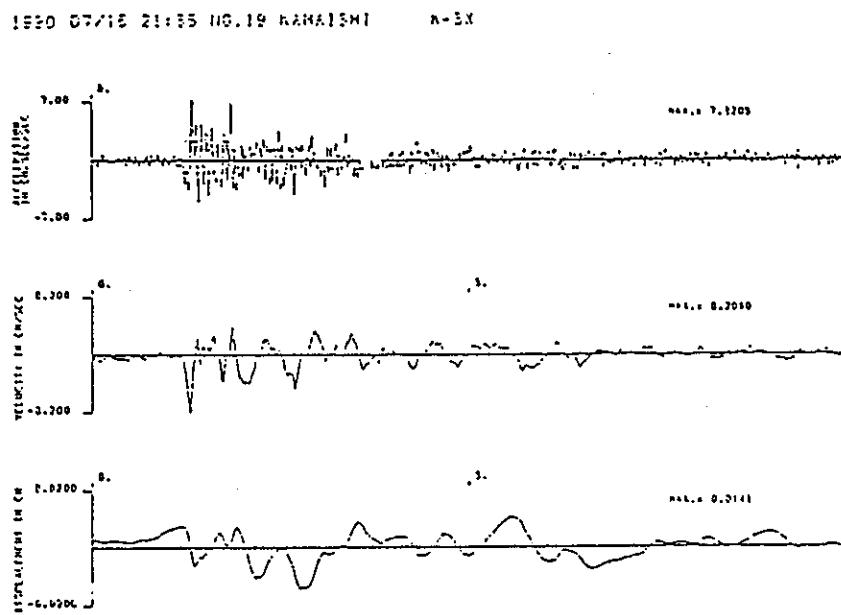


図 3.4-6(2) 観測地震波形、地震時間隙水圧波形及びフーリエスペクトル図

EQ.NO.19

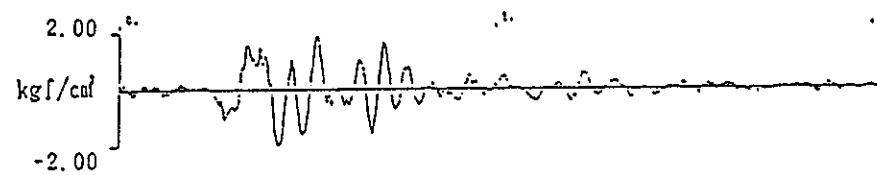
観測地震波形

- 上段：地震加速度波形
- 中段：地震速度波形
- 下段：地震変位波形

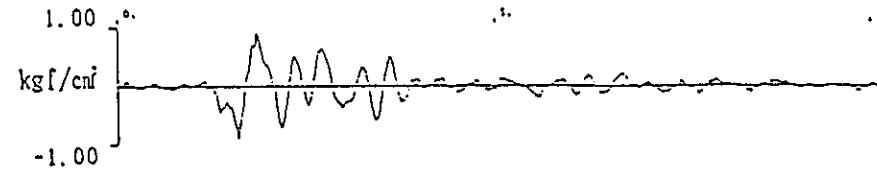


地震時間隙水圧波形

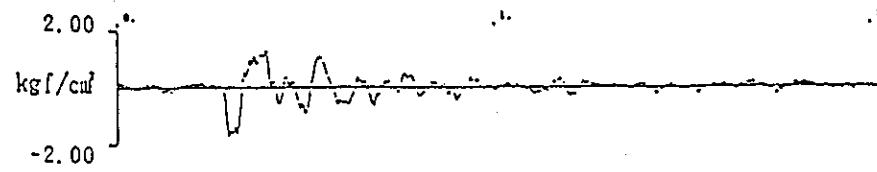
1990 07/16 21:35 NO.19 KAHASHI KWP-1 ACC.WAVE MAX. VALUE 1.996



1990 07/16 21:35 NO.19 KAHASHI KWP-2 ACC.WAVE MAX. VALUE 0.908



1990 07/16 21:35 NO.19 KAHASHI KWP-3 ACC.WAVE MAX. VALUE 1.703



フーリエスペクトル

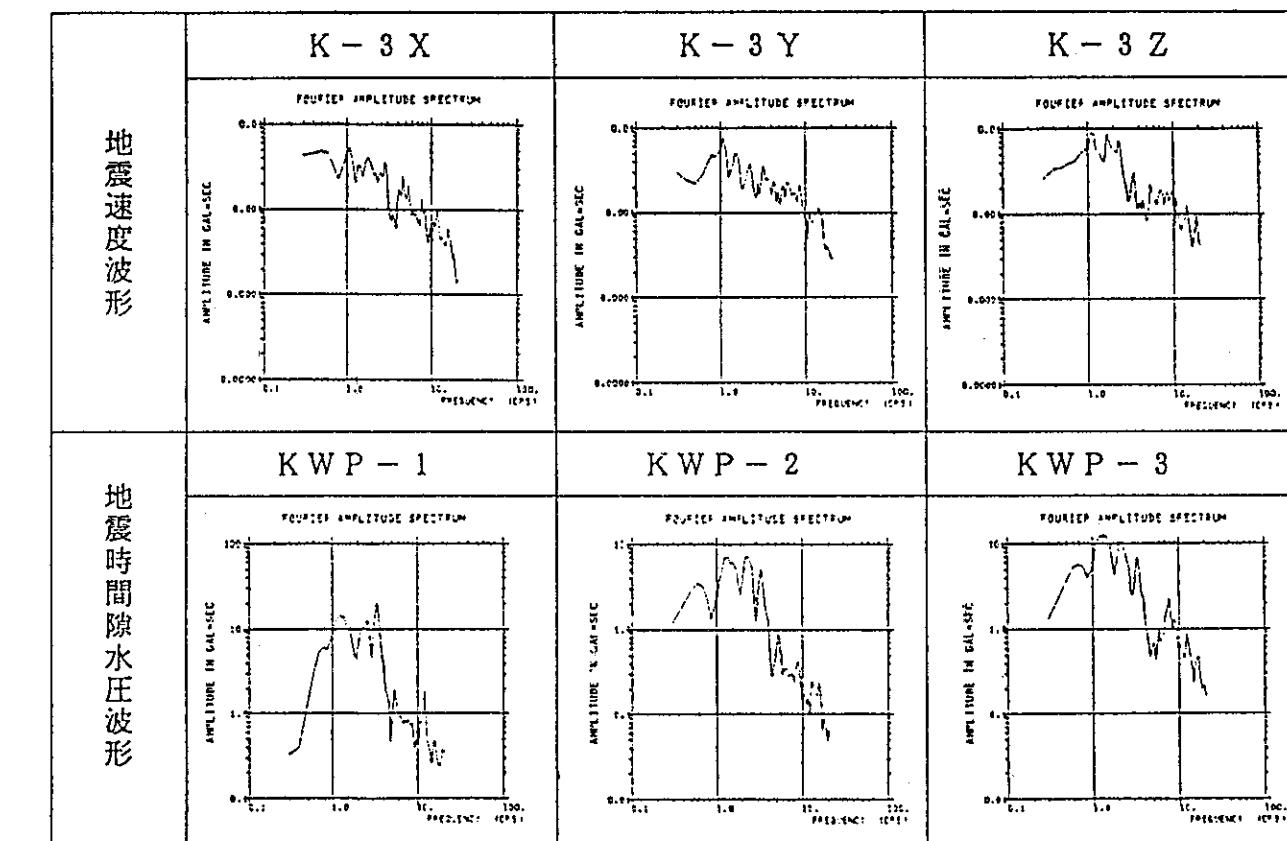
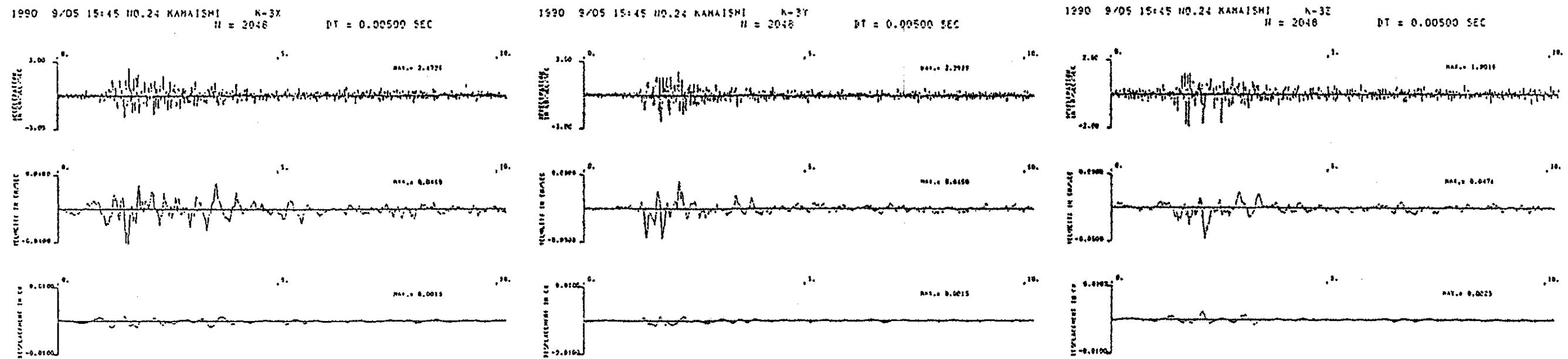


図 3.4-6(3) 観測地震波形、地震時間隙水圧波形及びフーリエスペクトル図

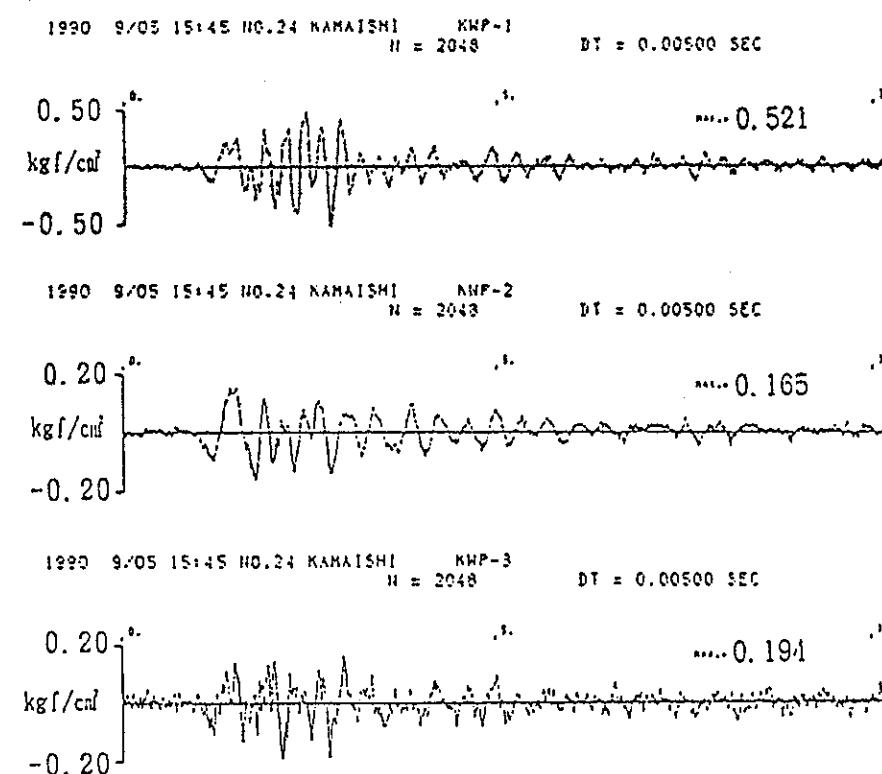
EQ. NO. 24

観測地震波形

上段：地震加速度波形
中段：地震速度波形
下段：地震変位波形



地震時間隙水圧波形



フーリエスペクトル

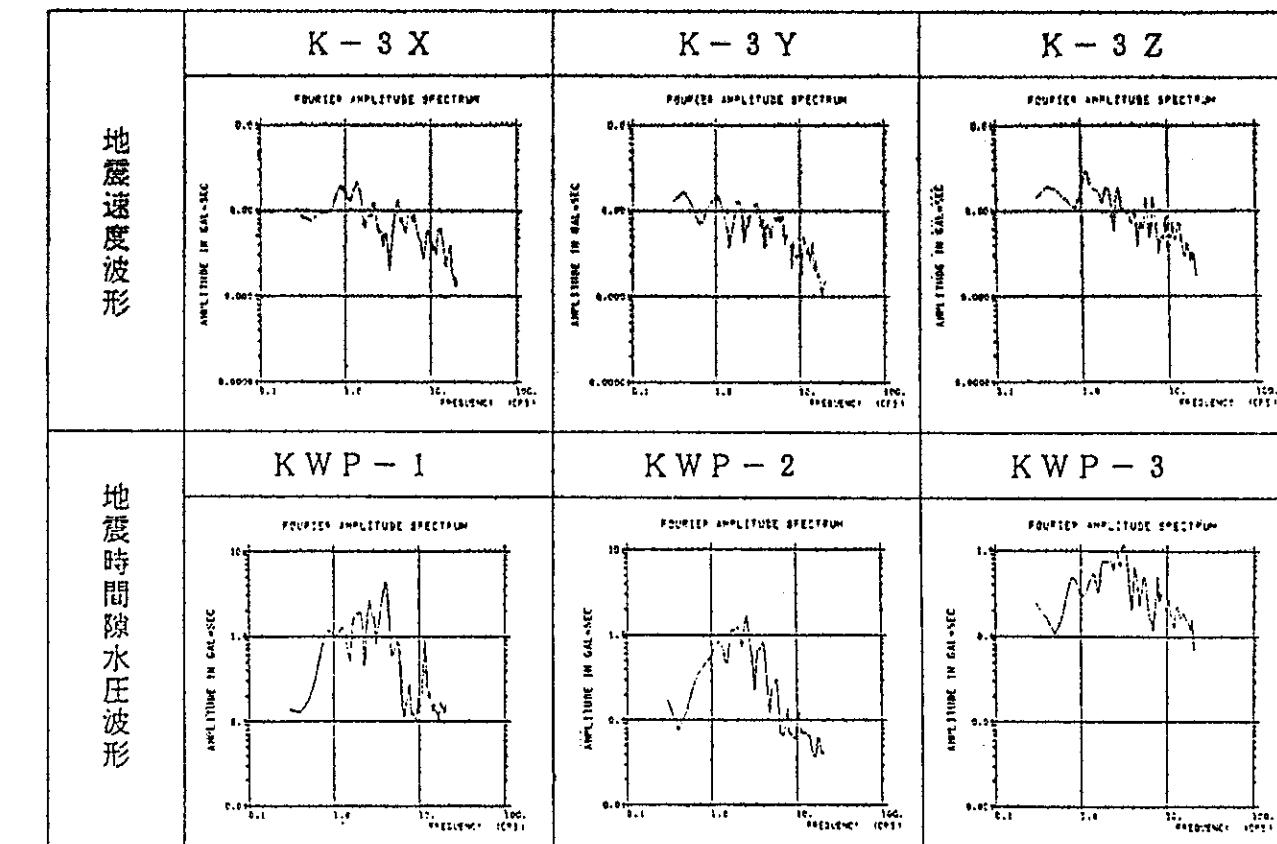
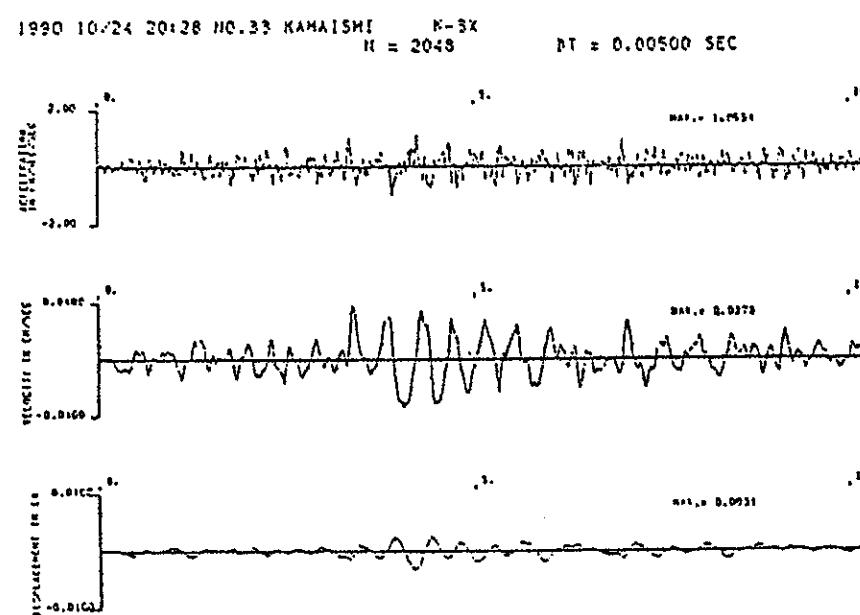


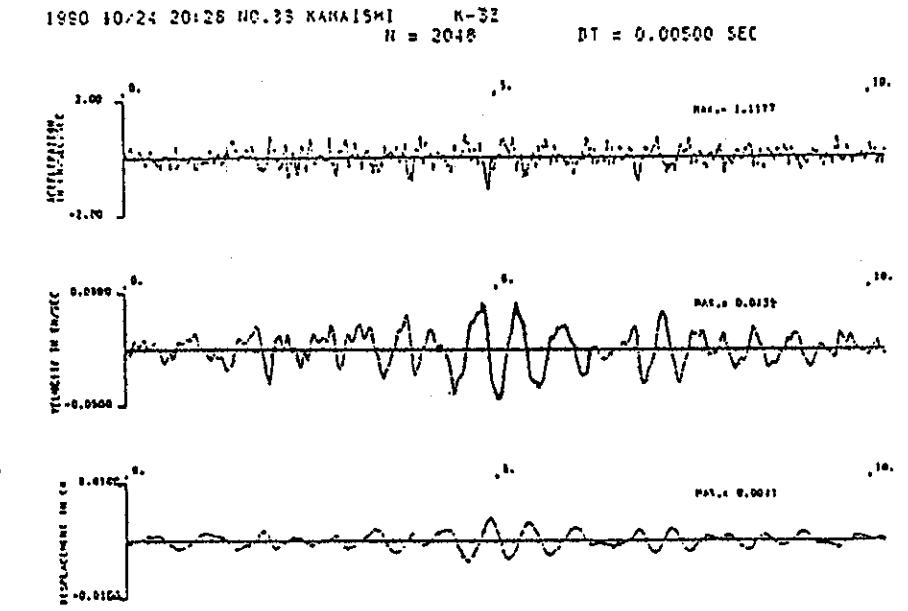
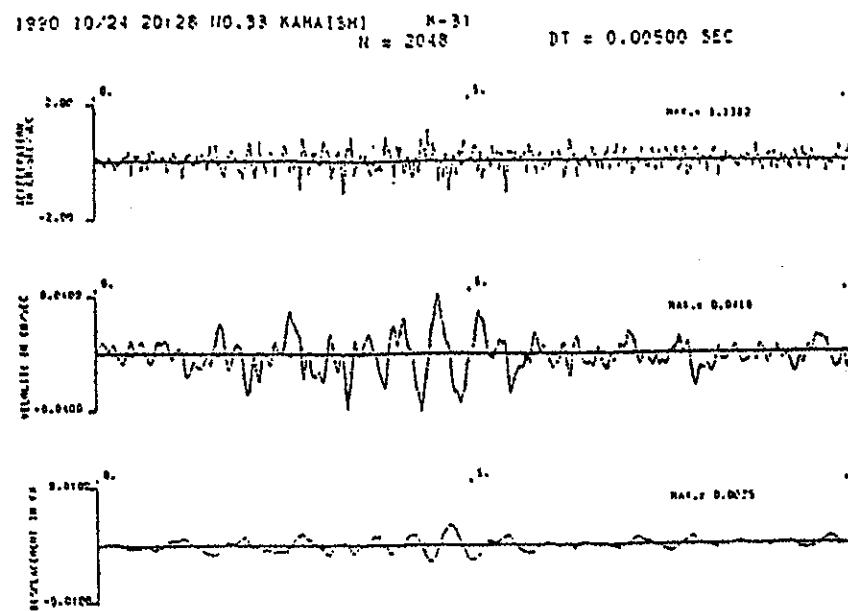
図 3.4-6(4) 観測地震波形、地震時間隙水圧波形及びフーリエスペクトル図

EQ. NO. 33

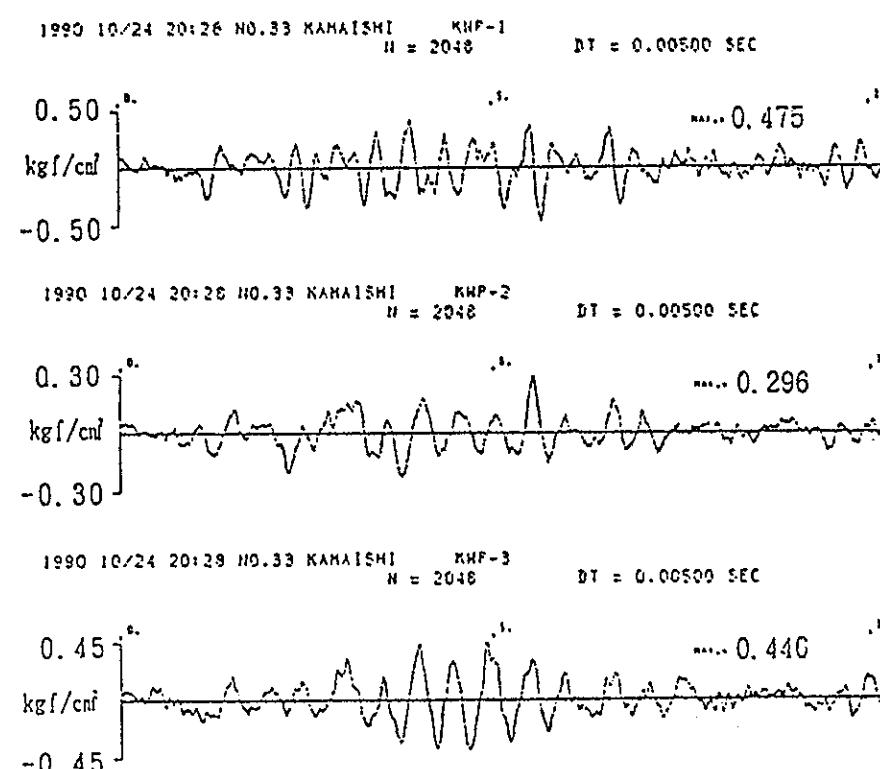


観測地震波形

- 上段：地震加速度波形
- 中段：地震速度波形
- 下段：地震変位波形



地震時間隙水圧波形



フーリエスペクトル

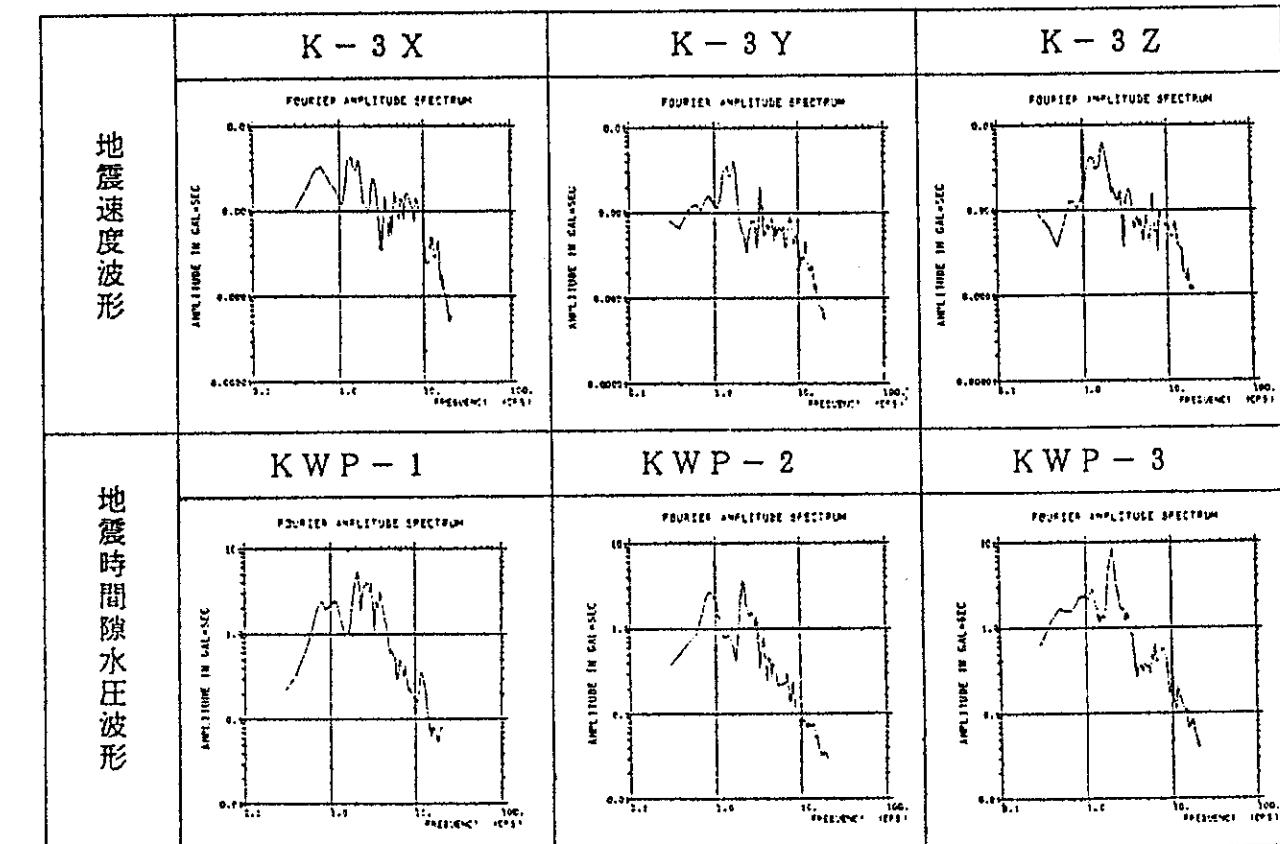
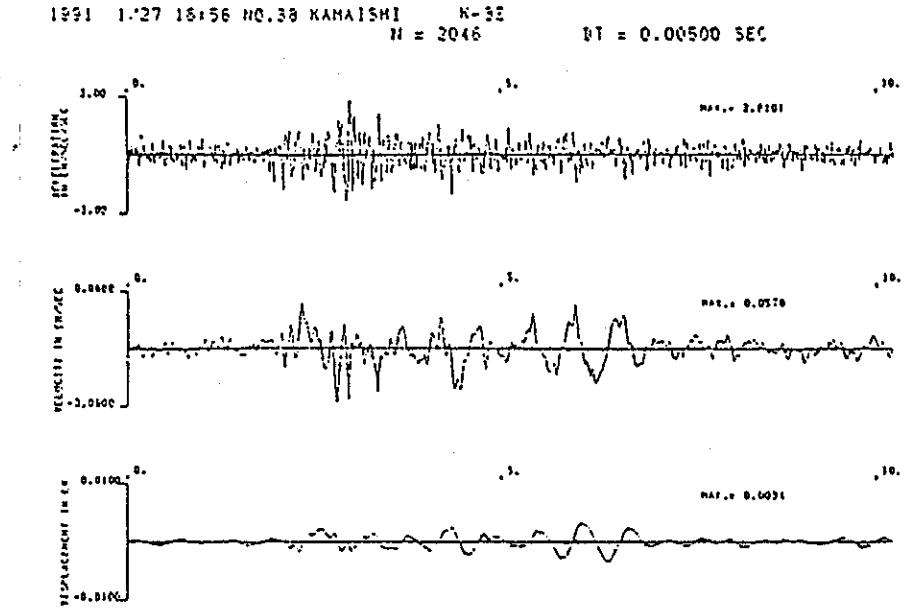
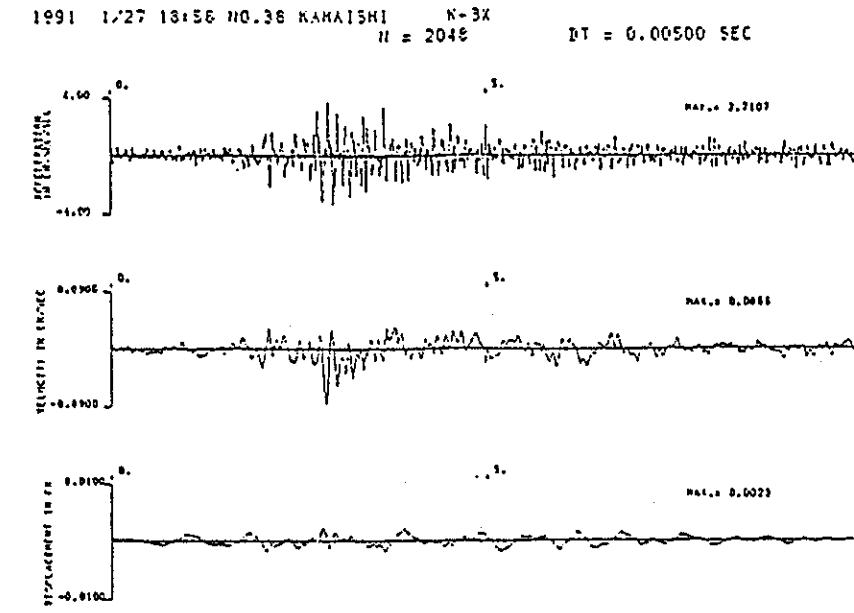
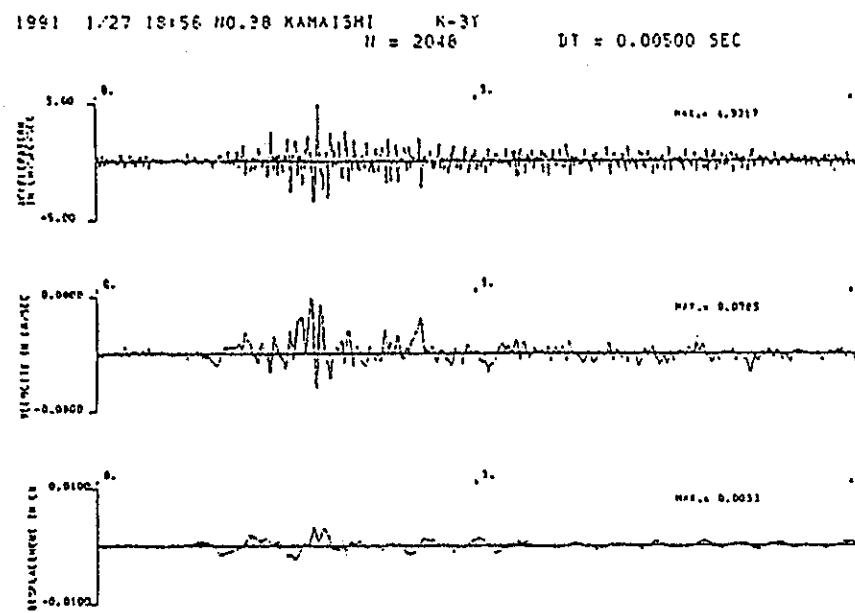


図 3.4-6(5) 観測地震波形、地震時間隙水圧波形及びフーリエスペクトル図

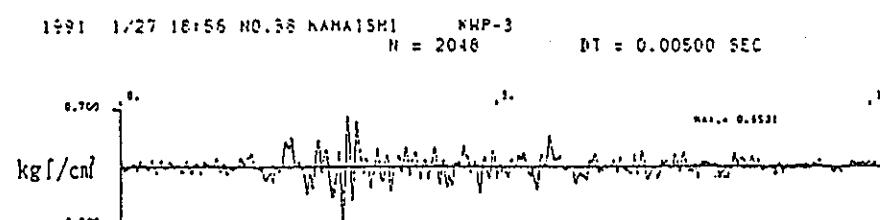
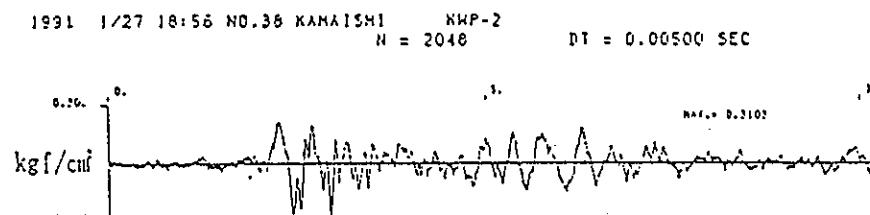
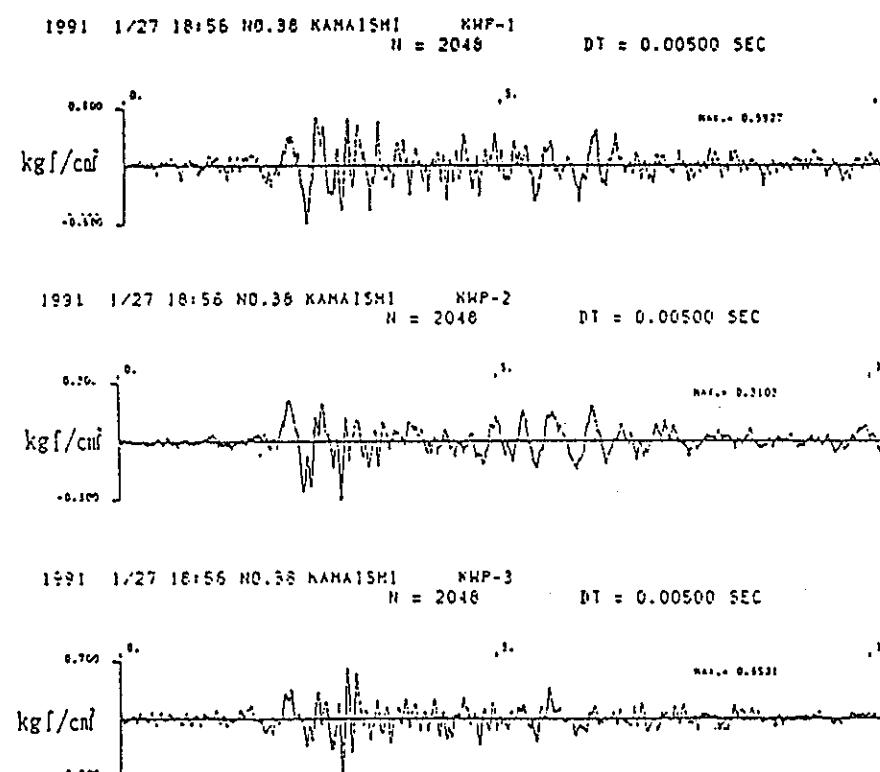
EQ.NO. 38

観測地震波形

上段：地震加速度波形
中段：地震速度波形
下段：地震変位波形



地震時間隙水圧波形



フーリエスペクトル

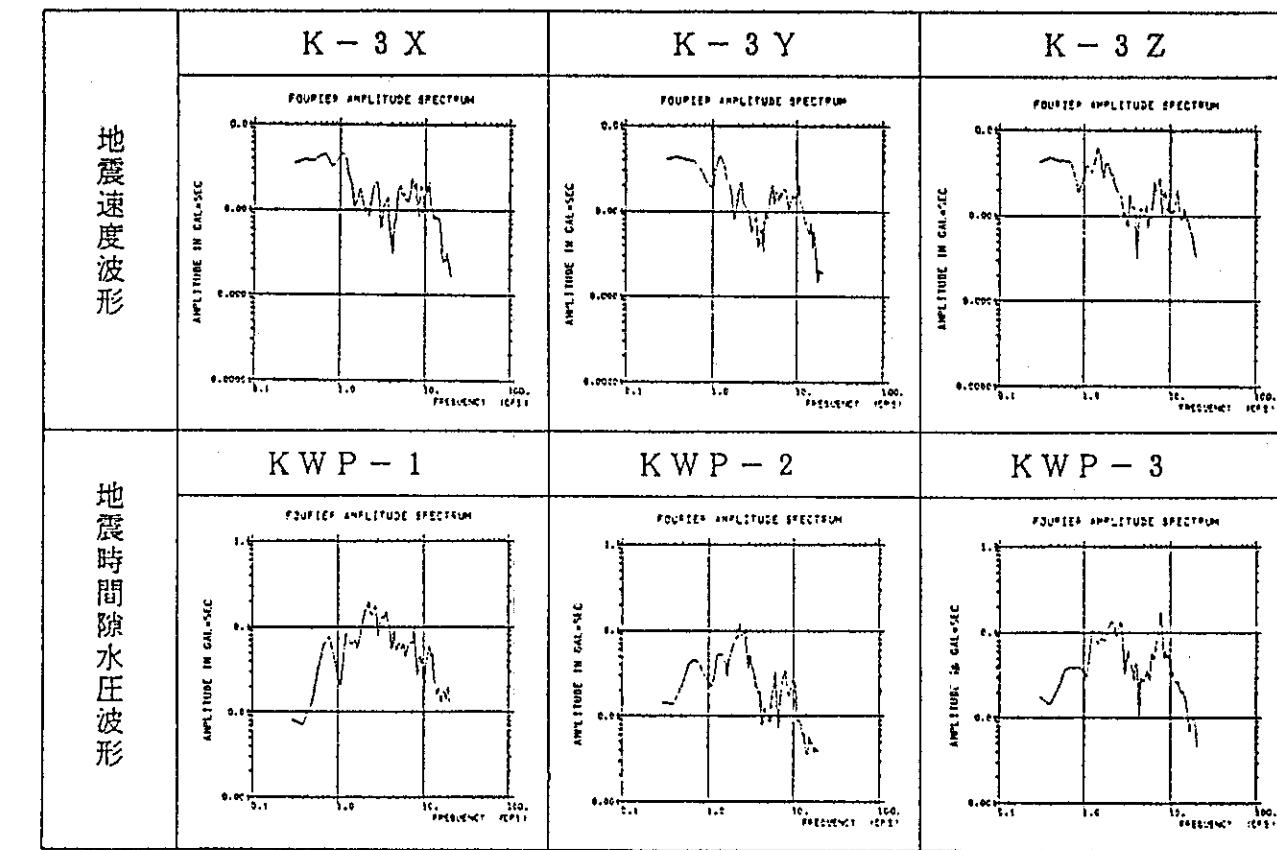
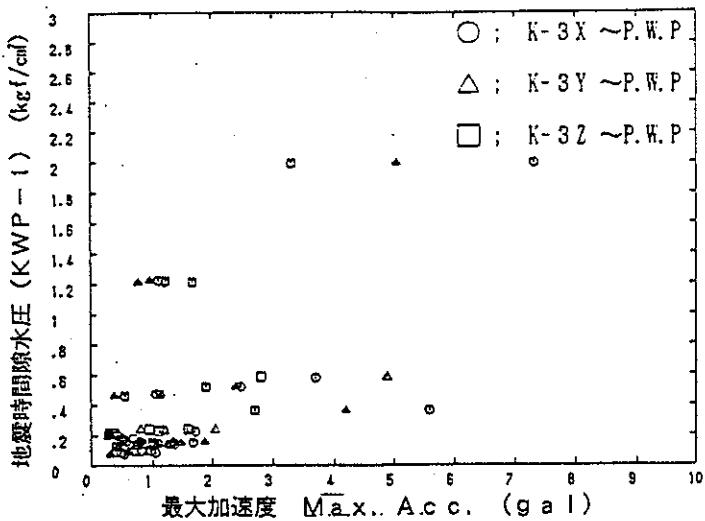
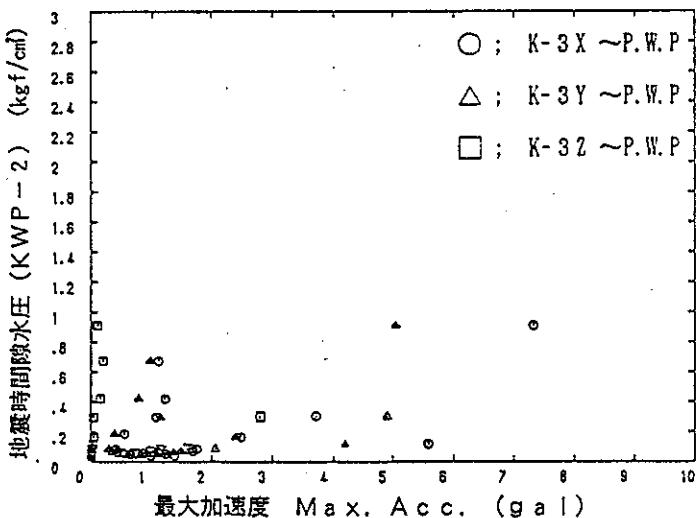


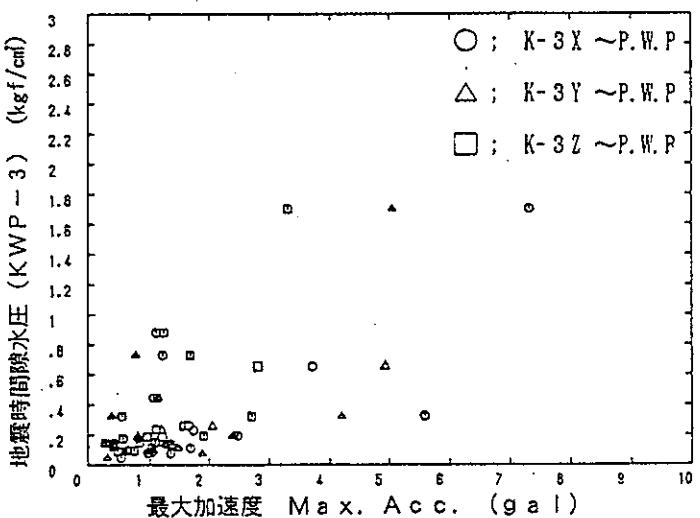
図 3.4-6(6) 観測地震波形、地震時間隙水圧波形及びフーリエスペクトル図



(1) 観測地震時間隙水圧と加速度との関係 (KWP-1 ~K-3)

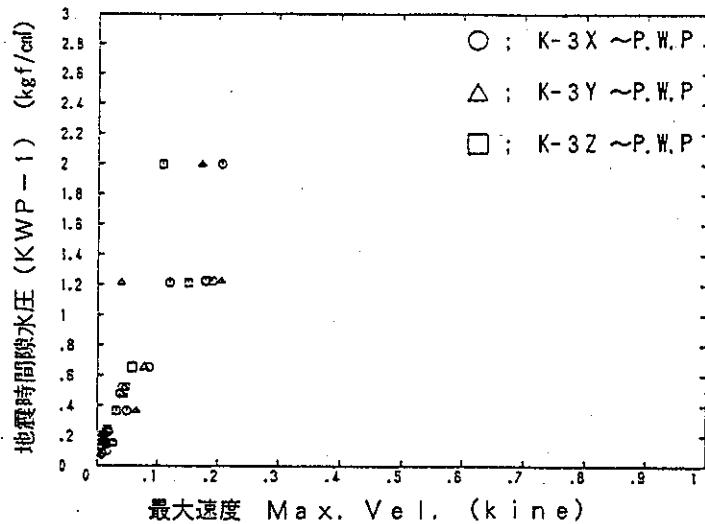


(2) 観測地震時間隙水圧と加速度との関係 (KWP-2 ~K-3)

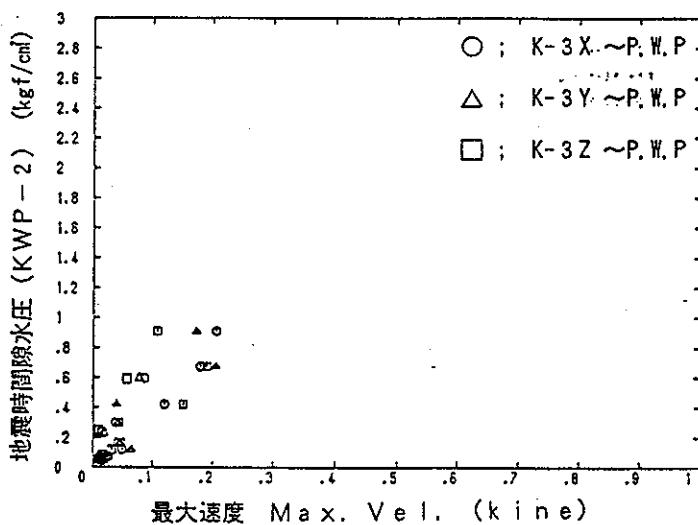


(3) 観測地震時間隙水圧と加速度との関係 (KWP-3 ~K-3)

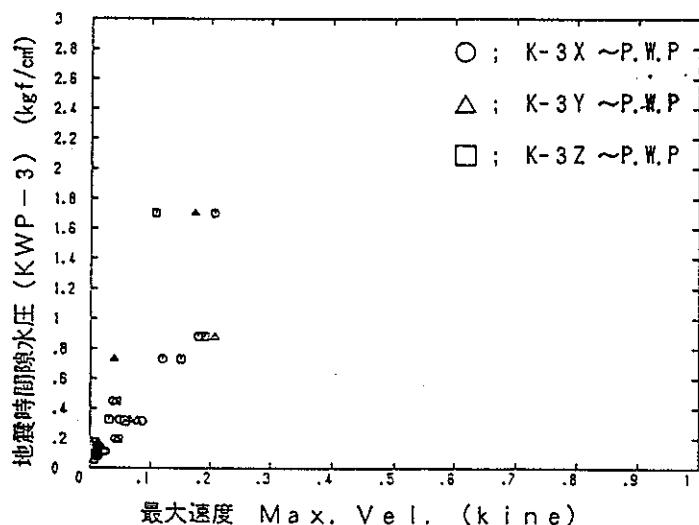
図 3.4-7(1) 観測地震時間隙水圧と加速度との関係 (KWP ~K-3)



(1) 観測地震時間隙水圧と速度との関係 (KWP-1 ~K-3)



(2) 観測地震時間隙水圧と速度との関係 (KWP-2 ~K-3)



(3) 観測地震時間隙水圧と速度との関係 (KWP-3 ~K-3)

図 3.4-7(2) 観測地震時間隙水圧と速度との関係 (KWP ~K-3)

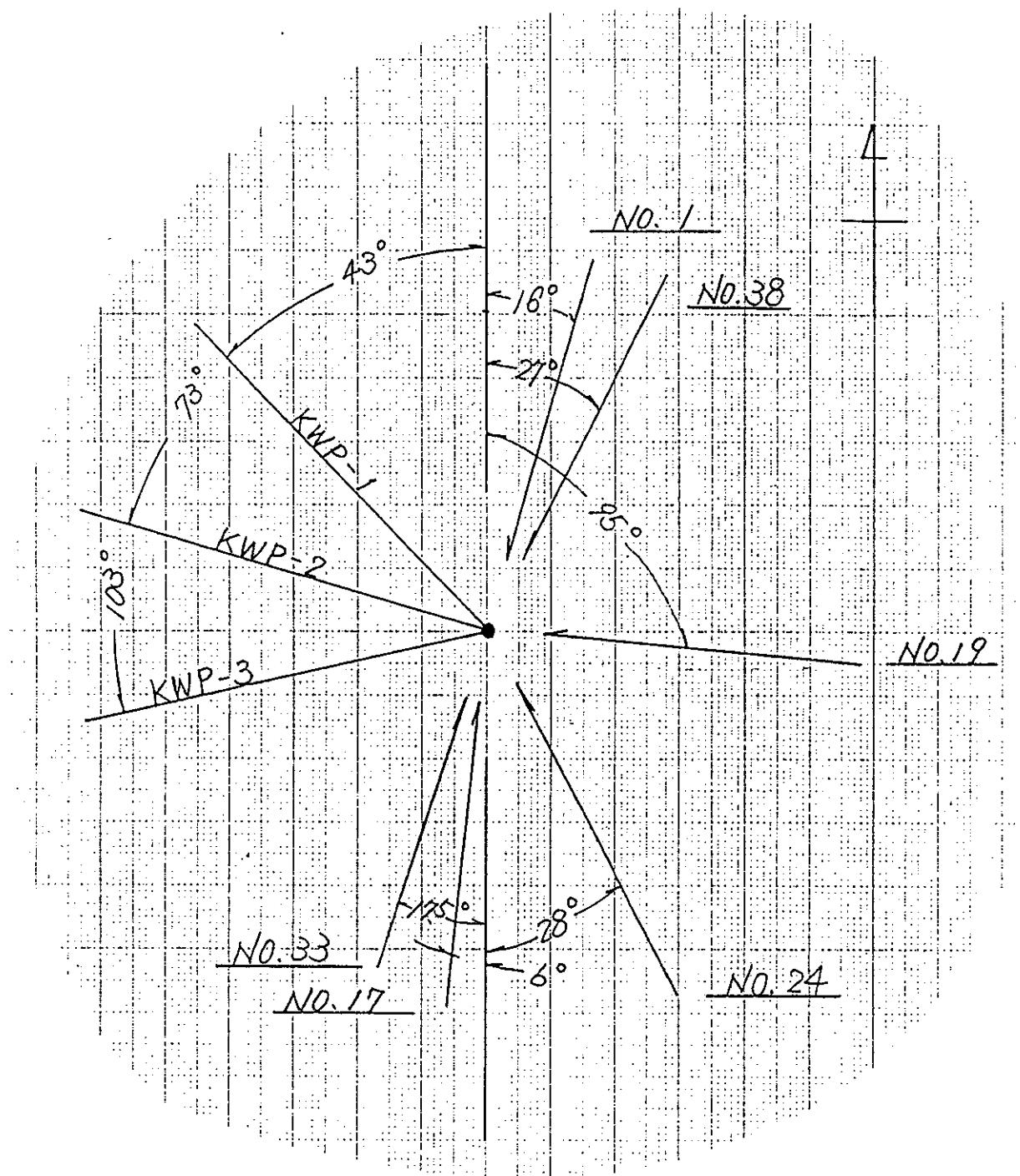


図 3.4-8 釜石鉱山サイトにおける計測平面と地震の震央方向の関係

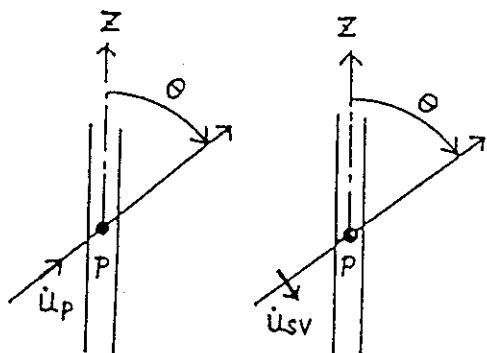
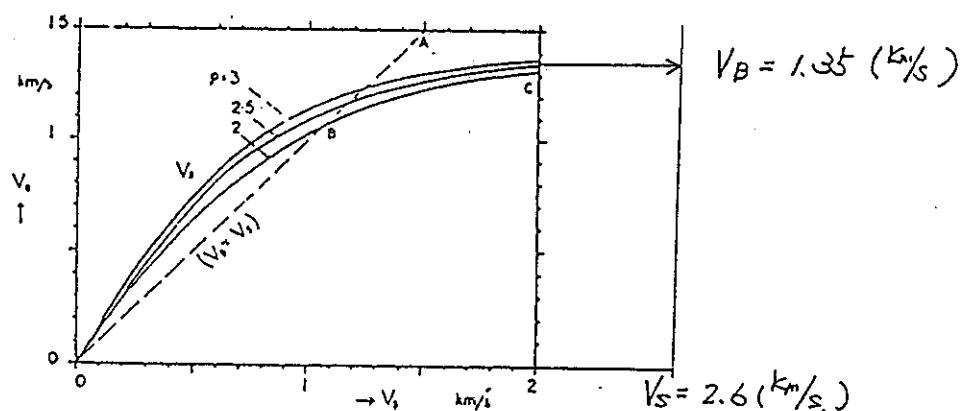


Illustration showing the waves incident to borehole.
 \dot{u}_p and \dot{u}_{sv} : particle velocity, p : pressure signal

図 3.4-9 θ について



Relation between V_B and V_s , under assumption of $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$

図 3.4-10 V_B について

表 3.4-3 ポーリング孔内水圧式より算定した水圧と観測値の比較

| EQ. No | 測定地點 | u_p (cm/s) | u_{vs} (cm/s) | θ (°) | P_p (算定値) (kgf/cm²) | 初動部(P波) 観測値 (kgf/cm²) | P_{sv} (算定値) (kgf/cm²) | 主動部(SV) 観測値 (kgf/cm²) |
|--------|---|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | KWP-1 | — | 0.018 | 59° | — | — | 0.120 | 0.217 |
| | KWP-2 | — | 0.018 | 89° | — | — | 0.004 | 0.091 |
| | KWP-3 | — | 0.018 | 119° | — | — | 0.115 | 0.153 |
| 17 | KWP-1 | 0.021 | 0.060 | 229° | 0.189 | 0.214 | 0.473 | 0.364 |
| | KWP-2 | 0.021 | 0.060 | 259° | 0.250 | 0.086 | 0.160 | 0.118 |
| | KWP-3 | 0.021 | 0.060 | 289° | 0.240 | 0.165 | 0.267 | 0.324 |
| 19 | KWP-1 | 0.016 | 0.220 | 138° | 0.129 | 0.216 | 1.808 | 1.996 |
| | KWP-2 | 0.016 | 0.220 | 168° | 0.077 | 0.081 | 0.849 | 0.908 |
| | KWP-3 | 0.016 | 0.220 | 198° | 0.084 | 0.192 | 1.203 | 1.703 |
| 24 | KWP-1 | — | 0.059 | 195° | — | — | 0.277 | 0.521 |
| | KWP-2 | — | 0.059 | 225° | — | — | 0.480 | 0.165 |
| | KWP-3 | — | 0.059 | 255° | — | — | 0.211 | 0.194 |
| 33 | KWP-1 | — | 0.051 | 241° | — | — | 0.329 | 0.475 |
| | KWP-2 | — | 0.051 | 271° | — | — | 0.006 | 0.296 |
| | KWP-3 | — | 0.051 | 301° | — | — | 0.337 | 0.446 |
| 38 | KWP-1 | — | 0.113 | 70° | — | — | 0.527 | 0.593 |
| | KWP-2 | — | 0.113 | 100° | — | — | 0.274 | 0.310 |
| | KWP-3 | — | 0.113 | 130° | — | — | 0.881 | 0.653 |
| 備考 | $\rho_w = 1.00 \text{ t/m}^3$ 、 $V_s = 2600 \text{ m/s}$ 、 $V_p = 4500 \text{ m/s}$ 、 $V_b = 1350 \text{ m/s}$ $\kappa = V_b / V_s = 0.52$ 、 $\gamma = V_p / V_s = 1.73$ | | | | | | | |

② 地震時の孔内湧水量変化

図 3.4-11に平成元年度より継続しているKWQ-1点における孔内湧水量の地震時における変化を示す。同図に示した波形は、前述した地震加速度波形ならびに地震時間隙水圧の挙動に比べて長周期成分が卓越していることが確認される。また、水量は、地震前後における変化が見られずほぼ一定量で推移しており、この規模の地震では孔内水の水量変化は認められないものと想定される。次年度以降、次節に述べるようなより測定精度の高い観測システムとの比較により、さらに検討を進めるべきであると考える。

③ 坑内湧水量の微細変動

KO-10における湧水量の変動を図 3.4-12に示す。同図には月の南中時（時角 0° ）および月の時角 180° の時刻を十字で表す。湧水量変動のパターンは地球潮汐の主太陰半日の周期に良く対応している。川辺ら（1987年、日本地球化学会での講演）の愛媛県奥道後での観測と同様に地球潮汐による岩盤内歪みの増大に伴って湧水量が増大していることが想定される。

また湧水量と気圧変動とは密接な関係があり、気圧が低くなると水量が増加する。湧水量について(1)式のような補正を施し、残差の2乗和が最小となるようにシンプレックス法を用いて各パラメータを求める。

ここで

Y : 補正後の値 (cc/min.)

q : 觀測湧水量 (cc/min.)

t : 時間 (min) (年の初めを 0 とした)

p : 气压 (mb)

であり、各パラメータの値は

$$a = -1.56 \times 10^{-4} \text{ cc/min}^2$$

b = 298 cc/min

$$c = -5.82 \times 10^{-2} cc/min/mB$$

である。なお、気圧のデータは、調査地点の北北東約45kmに位置する宮古測候所のものを用いた。

この式による残差（Y：湧水量偏差）を時系列にプロットしたものが図 3-4-

13である。

湧水量の長期変動成分（観測期間内では単調に減少する）と気圧による変動成分とを差し引いた残差（Y）についてフーリエ解析により、スペクトルを求めたところ図 3.4-14のようになった。スペクトル分布には、地球潮汐の周期に対応する場所に明瞭なピークが認められる。得られたスペクトル分布から地球潮汐に対応する周期で逆フーリエ解析を行った結果を図 3.4-15に示す。この図から、地球潮汐による湧水量変動の大きさは最大 $0.6 \text{cc}/\text{min}$ 程度であると判断される。

以上のような結果から、湧水量は気圧の変動に関しては 1 mbあたり 0.025% の水量変動があり、また地球潮汐力の日変動の影響は最大で水量の 0.26% の変動を引き起こすことが明らかになった。さらに、この結果について以下のような考察を行った。坑内への湧水についての岩盤内亀裂中の流れが、仮にダルシー則で表されるものと考えれば湧水量は以下の式に従う。

$$q = K \cdot (P_1 - P_2 + Z) / L$$

ここに、

q ; 水量のフラックス

K ; 透水係数

L ; 通過する亀裂内の距離

P_1 ; 岩体内の水圧

P_2 ; 坑内の気圧

Z ; 亀裂両端の高度差に相当するポテンシャル

である。

ここで K 、 L 、 Z を一定と考えよう。気圧変動は上式において P_2 の変動に相当し、 q は 1 mbあたり $-0.058 \text{cc}/\text{min}$ の変動をする。この事実から K/L は $9.5 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{s}$ という値になる。

また地球潮汐によって引き起こされる変動は、 P_1 を変動させる。その大きさは日変化で最大 $0.6 (\text{cc}/\text{min})$ 程度である。この水量の増加は先の K/L の値から $10 \text{cmH}_2\text{O}$ 程度の圧力変化に相当する。この値は、これまで地球潮汐に由来するとされてきた孔内水位変動の大きさや岩盤内間隙水圧の地球潮汐に対する応答の値として、ほぼ妥当な値である。

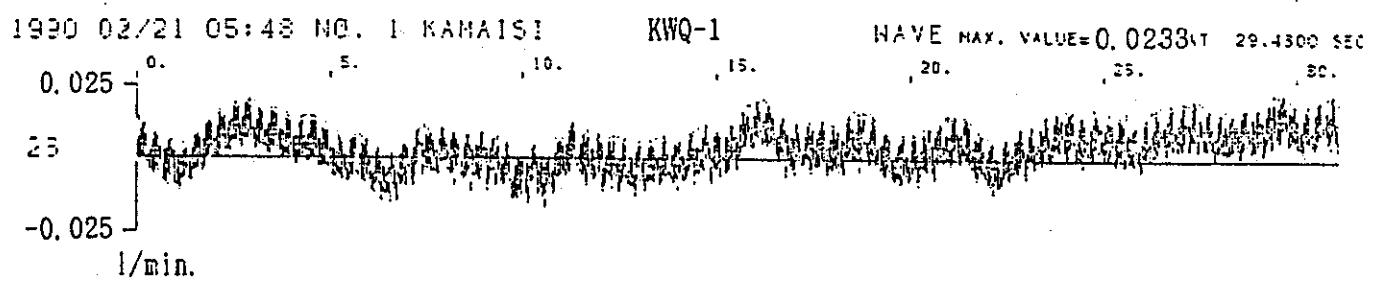


図 3.4-11 地震時の水量変化 (EQ. No1 岩手県中部 1990, 2/21, 05:48)

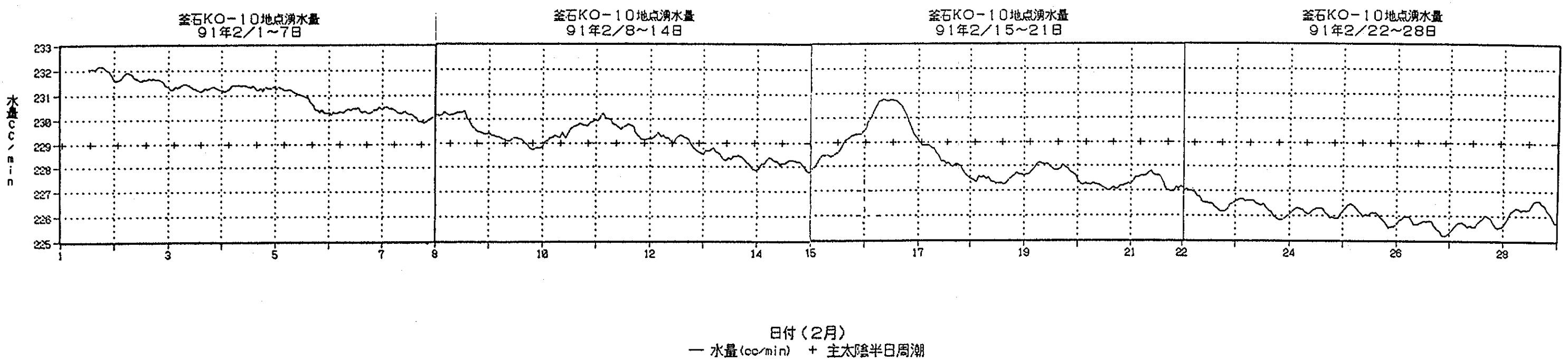


図 3.4-12 KO-10 地点湧水量変化

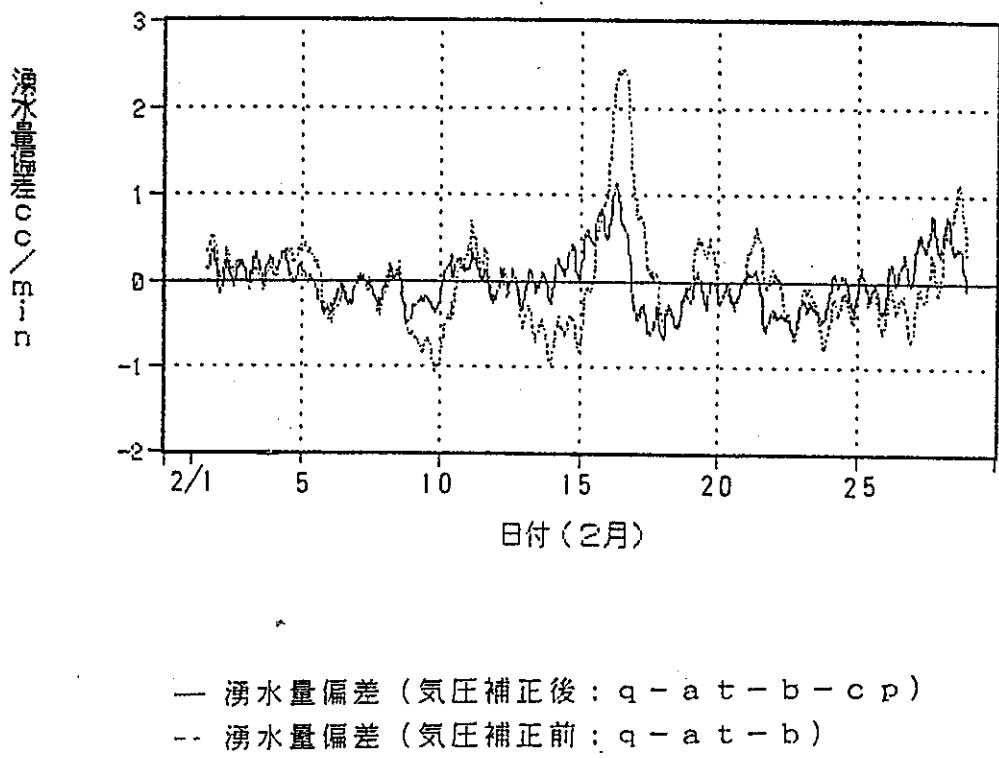
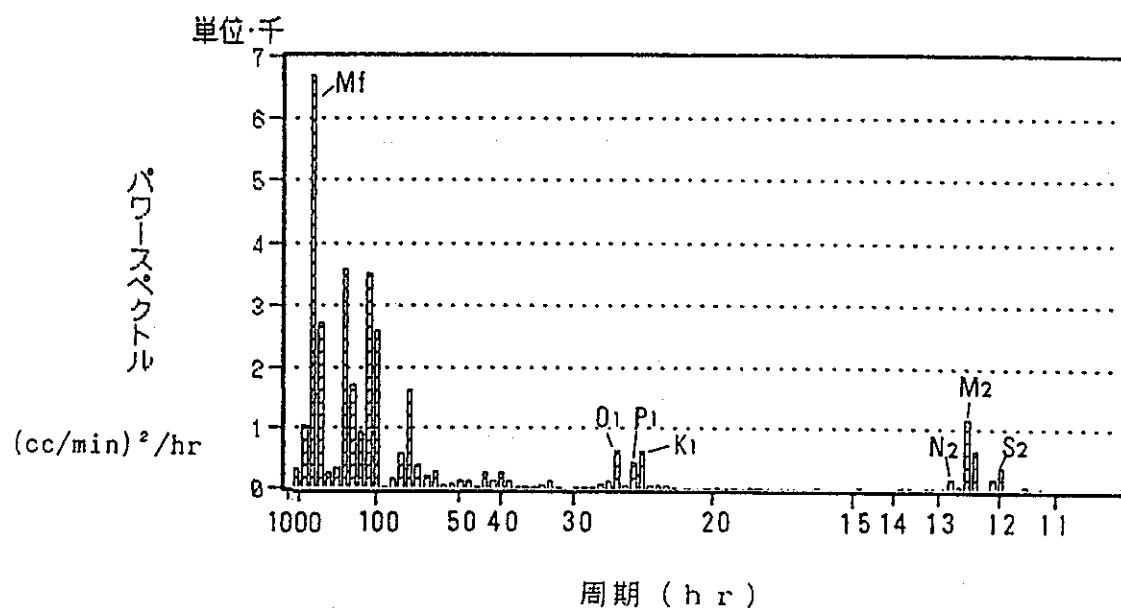


図 3.4-13 湧水量の変動



| 記号 | 分潮の名称 | 周期 (hr. min) |
|----------------|---------|--------------|
| M _f | 太陰半月周潮 | 13日 15.52 |
| O ₁ | 主太陰日周潮 | 25.49 |
| P ₁ | 主太陽日周潮 | 24.04 |
| K ₁ | 日月合成日周潮 | 23.56 |
| N ₂ | 主太陰長円潮 | 12.39 |
| M ₂ | 主太陰半日周潮 | 12.25 |
| S ₂ | 主太陽半日周潮 | 12.00 |

図 3.4-14 漢水量変動のフーリエスペクトル図

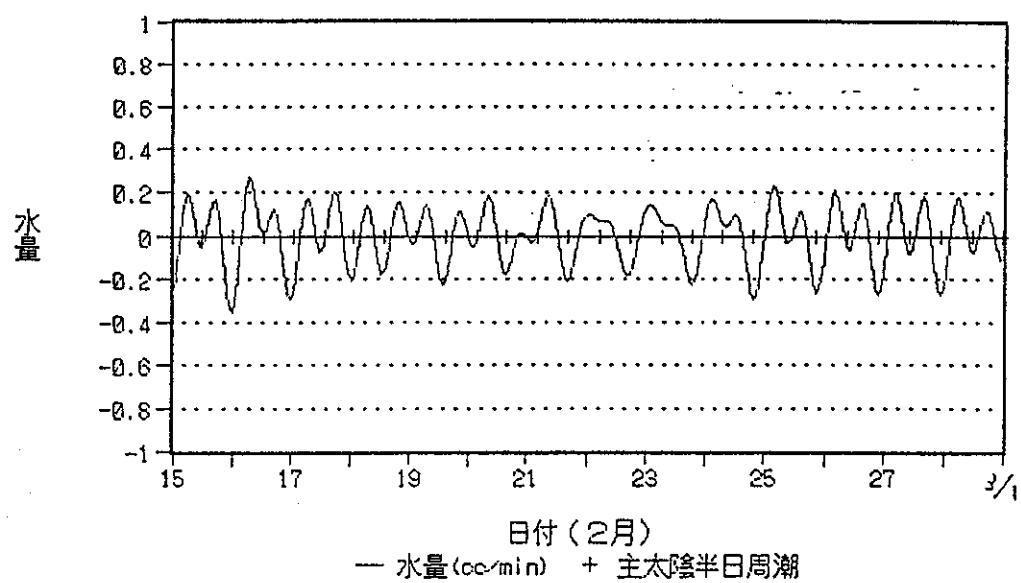
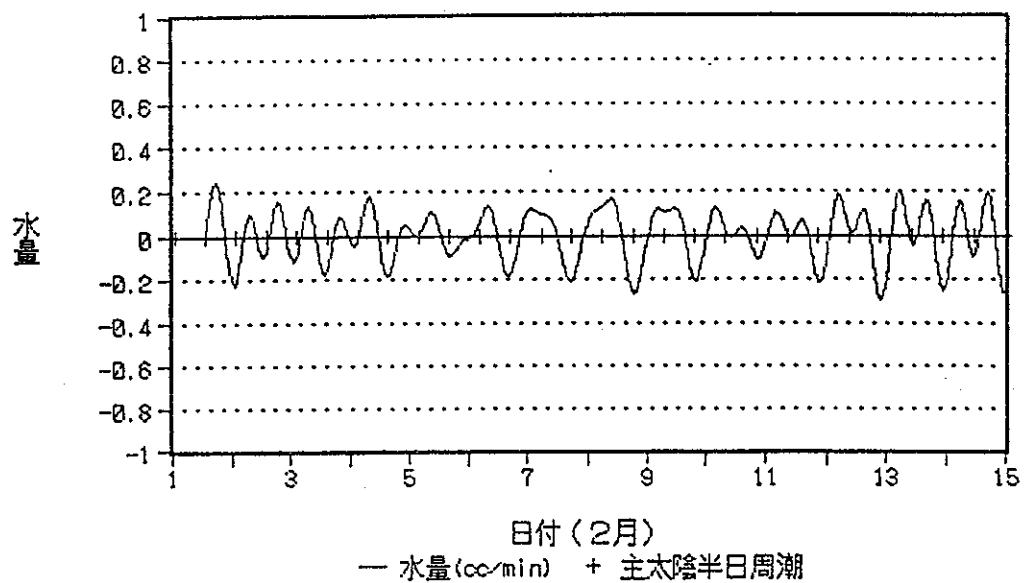


図 3.4-15 波数31から89の範囲のスペクトルの逆フーリエ変換結果

(2) 水質

① 湧水状況

表 3.4-4 に採水点での湧水状況を示した。

② 電気伝導度の変動と地震との関係

表 3.4-5 に月 2 回の採水試料についての電気伝導度の測定結果の一覧を示した。同表に既往の調査で対応すると思われる湧水のデータをあわせて示した。日峰 250 m レベル坑道湧水については、前回調査データは 20°C の測定値であり、今回とのよい一致を示している。大峰 550m レベル坑道で採水した試料は、前回調査時には、採水時に電気伝導度を測定しており、測定データ自体を比較することはできない。

図 3.4-16 に月 2 回採水した試料についての電気伝導度の経時変化と観測期間に観測された地震を示した。採水頻度が少ないと、測定されている電気伝導度の地震以外の要因による変動が存在するため、この観測結果からは、水質（電気伝導度）と地震との関係を見出すことはできなかった。

③ 電気伝導度の変動と地球潮汐の関係

図 3.4-17 及び表 3.4-6 に 22 時間（平成 2 年 11 月 4 日）および 26 時間（平成 3 年 2 月 15~16 日）にわたる 2 時間おきの採水試料についての電気伝導度の経時変化を示す。この図から、水質についても湧水量と同様に地球潮汐との対応関係が推定される。すなわち、岩盤内体積歪が増大（月の時角が 90° ないし 270° の時）するとき電気伝導度が低下している傾向がある。

以下、平成 3 年 2 月 15 日～16 日の湧水量と水質との対応を検討する。図 3.4-17 にも明らかなように KO-10 の試水については、他の試水の電気伝導度変動に比較してその値のバラツキが大きい。この理由としては、この地点は他の地点と異なり、ビニールシートで集水しているため、流出水は空気の接触の機会が大きくなり、坑内空気中の CO₂ のビニールシート上の水滴への溶け込みによって電気伝導度に影響を与えている可能性がある。

そこで、観測点が KO-10 地点と位置的に接近している KO-8 と KO-9 地点の電気伝導度を対象に KO-10 地点での湧水量変動との対応を検討することとした。

図 3.4-18 から、水質変動は、湧水量そのものに対応しているというよりも、

むしろ地球潮汐に対応した湧水量変動成分に大きく支配されているかのようである。より詳細な検討は今後の観測の充実にまたねばならないが、もしこれが事実であるとすれば、水質変動をもたらすメカニズムのモデルに対して、大きな制約条件を課すことができる。以下に仮説的に試論を展開する。

前節で坑内湧出水の岩盤内亀裂中のダルシー流を仮定した。すなわち

$$q = K \cdot (P_1 - P_2 + Z) / L$$

の式において地球潮汐による湧水量変動は P_1 の変動に起因するものとしてモデルを提示した。一般に短時間の地下水水質変動を説明するには、水質の異なるいくつかの地下水の混合割合が変化すると考えるのが通例である。地下水水質それ自身が短い時間で変動するような特殊なメカニズムを想定することが難しいからである。本研究での水質は、溶存電解質の総濃度に相当する電気伝導度の観測をしているので、電気伝導度の高いものと低いもの2つの端成分を550mレベル坑道湧水の起源として想定することとなる。一般に地下水は涵養されてからの期間が長いものほどより多くの化学成分を含有していると考えられるので、図3.2-2に照らしても、深層地下水の性格をより多く有する電気伝導度の高い端成分Aと浅層地下水の性格をより多く有する電気伝導度の低い端成分Bとを推定することには妥当性があると認められよう。A、Bが混合し、水質が決定される場を地球潮汐に敏感な場である岩体内に想定し、ダルシー流の上式における P_1 の変動に応じてA、B混合比が変化するものと考えれば、気圧変動を除去したのちの地球潮汐による水量変動パターンに水質変動のパターンが合致することは理解しやすい。

ところで、3.4.2節に述べたようにKO-10地点での地球潮汐に起因する湧水量変動は日最大0.26%である。KO-1～KO-9およびKH-1-1地点での日水質変動の最大幅0.4%～3%から推測して、KO-10で仮に1つの割れ目に着目した場合でも地球潮汐に起因する水質変動率が地球潮汐に起因する湧水量変動率を上回る可能性は高い。

このことは、次のようなことを意味している。いま、図3.4-19に示すモデルのようにA成分の流量 Q_A を一定と考えれば、 $\Delta Q = \Delta Q_B$ であり、仮に $C_B = 0$ としても（極端に蒸留水に近い端成分Bを仮定することに相当する）、水量の変動による希釈効果だけでは水質変動が定量的には説明できることになる。す

なわち、図 3.4-20に示すモデルのように、水質を決める流量Q ($= Q_A + Q_B$) が増大する場合には、地球潮汐の影響により流量 Q_A は低下し、流量 Q_B が Q_A の低下分を補って増加することを考える必要があることを示している。このことは、地球潮汐に対する岩盤内の亀裂の挙動と地下水の流れの様式との関連について大きな示唆を与えるものである。本研究の目的に照らしても今後、より詳細な観測と検討を要する課題であると考える。

④ 安定同位体測定結果

表 3.4-7 に今回測定した試料についての同位体測定値の一覧を示す。

大峰坑道試料のうちKO-2, 3, 4, 5, 6, 8については。1988年12月の調査との比較が可能である。概ね分析精度内で一致しているとみなせる。ただ、水質区分① (HCO_3^- 型、湧水量が多く透水性の高いゾーンに分布している) に属するKO-3、KO-6について δD 値が増大していると判断されるので今後の検討が必要である。前節の湧水量の項で述べたように平成3年2月の1ヵ月で、KO-10地点の湧水量は 7 cc/min (3 %程度) 低下しているので、これが季節変動を意味しているのであれば、安定同位体比についてもその影響が及んでいる可能性もあるからである。

KH-1孔試料については、KH-1-4試水の δD 値、KH-1-5試水の $\delta^{18}\text{O}$ 値に1988年3月の値との差が認められる。これが何らかの変動を確かに示しているのかどうかは、今後の検討課題である。

日峰坑道試料のうち、KN-3, 4がそれぞれ1986年当時の試水KM-14, 15と一致するものと考えてよい。同位体比、電気伝導度ともほとんど一致しており、この4年間の間水質変化が無かったものと想定される。

表 3.4-4 試料採水状況一覧

| 試料名 | 採水部位 | 岩相 | 湧水状況 | 水量 |
|--------|------|------|-----------------------------------|-----------|
| KN - 1 | 天盤中央 | 栗橋GD | 石英、カルサイト、粘土鉱物を含む脈より滴水。 | 20~30cc/分 |
| 2 | 天盤中央 | 栗橋GD | クロライトを含む脈より滴水。白色のつらら状の垂下物あり。 | 20~30cc/分 |
| 3 | 天盤中央 | 栗橋GD | カルサイトを含む脈状開口から滴水 | 20~30cc/分 |
| 4 | 天盤中央 | 栗橋GD | ローモンタイト脈の亀裂から滴水。 | 20~30cc/分 |
| 5 | 天盤中央 | 栗橋GD | ローモンタイト脈のはいった破碎帯より湧水。 | 20~30cc/分 |
| KO - 1 | 天盤西端 | 栗橋GD | 破碎部より湧水。湧出部は褐色に変色。 | 500 cc/分 |
| 2 | 東側側壁 | 栗橋GD | N60E方向の脈に平行した開口亀裂より湧水。湧出部は微褐色に変色。 | 630 cc/分 |
| 3 | 天盤西部 | 栗橋GD | 破碎部から湧水。湧出部は薄く褐色に変色。 | 200 cc/分 |
| 4 | 西側側壁 | 蟹岳Di | 方解石脈より湧水。流出部には暗褐色の付着物が存在。 | 100 cc/分 |
| 5 | 天盤東部 | 栗橋GD | 脈より滴水。 | 200 cc/分 |
| 6 | 天盤東端 | 蟹岳Di | 不規則な方解石脈と母岩との境界部より湧水。 | 1500cc/分 |
| 7 | 東側側壁 | 蟹岳Di | 脈の開口部より湧水。 | 300 cc/分 |
| 8 | 天盤西部 | 蟹岳Di | N45E方向の方解石脈より滴水。 | 100 cc/分 |
| 9 | 東側側壁 | 蟹岳Di | 亀裂より湧水。 | 80 cc/分 |
| KH-1-1 | — | 栗橋GD | — | — |
| 2 | — | 栗橋GD | — | — |
| 3 | — | 栗橋GD | — | — |
| 4 | — | 栗橋GD | — | — |
| 5 | — | 栗橋GD | — | — |
| KWP-2 | — | 栗橋GD | — | — |
| KWQ-1 | — | 栗橋GD | — | — |

注) GD:花崗閃綠岩、Di:閃綠岩

表 3.4-5 電気伝導度一覧

単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$

| 試料名 採水日* | 8月10日 ↓ 8月12日 | 8月25日 | 9月8日 | 9月22日 | 10月6日 | 10月20日 | 11月2日 | 11月17日 | 12月1日 | 12月15日 | 1月4日 | 1月19日 | 2月2日 | 2月18日 | 平均 値 | 標準偏差 | 前回試験 結果 |
|-------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------------|
| KN-1 | 72.7 | 73.4 | 74.8 | 75.8 | 71.5 | 73.1 | 73.4 | 77.0 | 73.0 | 73.5 | 72.6 | 74.4 | 74.4 | 75.5 | 74.1 | 1.45 | — |
| 2 | 70.8 | 70.0 | 70.7 | 70.9 | 69.1 | 70.0 | 69.4 | 69.7 | 68.2 | 68.8 | 69.0 | 69.1 | 69.7 | 70.2 | 69.7 | 0.78 | — |
| 3 | 95.7 | 96.3 | 98.3 | 98.5 | 96.5 | 96.0 | 96.9 | 97.6 | 95.2 | 94.6 | 94.8 | 95.1 | 96.4 | 96.7 | 96.3 | 1.17 | 95.0 |
| 4 | 65.2 | 63.7 | 64.2 | 64.2 | 63.5 | 63.1 | 62.8 | 62.7 | 62.4 | 63.5 | 63.1 | 61.5 | 61.4 | 62.4 | 63.1 | 1.01 | 66.0 |
| 5 | 62.2 | 61.1 | 60.2 | 60.7 | 59.5 | 59.0 | 59.2 | 59.7 | 59.1 | 59.4 | 59.0 | 58.5 | 58.7 | 59.1 | 59.7 | 1.00 | — |
| KO-1 | 83.9 | 84.0 | 84.2 | 84.1 | 83.5 | 82.7 | 82.9 | 82.6 | 83.5 | 83.2 | 82.3 | 82.6 | 82.0 | 83.2 | 83.2 | 0.68 | 60.2 |
| 2 | 75.4 | 75.1 | 75.6 | 76.4 | 74.2 | 74.1 | 74.8 | 75.1 | 75.1 | 75.7 | 75.9 | 75.7 | 75.4 | 76.1 | 75.3 | 0.64 | 61.0 |
| 3 | 78.4 | 77.9 | 78.2 | 78.3 | 77.2 | 76.4 | 76.9 | 76.5 | 77.8 | 78.0 | 77.5 | 77.8 | 77.8 | 78.1 | 77.6 | 0.62 | 60.5 |
| 4 | 110.9 | 110.5 | 110.1 | 110.2 | 110.3 | 108.7 | 109.8 | 109.5 | 112.1 | 111.9 | 112.2 | 112.5 | 112.1 | 112.4 | 110.9 | 1.20 | 86.4 |
| 5 | 61.3 | 61.1 | 61.0 | 61.7 | 60.2 | 59.7 | 59.7 | 59.9 | 61.2 | 61.4 | 61.8 | 62.2 | 62.2 | 62.9 | 61.2 | 0.96 | 46.0 |
| 6 | 64.4 | 64.9 | 64.8 | 65.0 | 63.7 | 63.1 | 63.0 | 63.3 | 64.4 | 64.8 | 63.6 | 64.0 | 64.1 | 64.9 | 64.1 | 0.68 | 49.8 |
| 7 | 69.8 | 69.7 | 69.8 | 70.4 | 68.6 | 68.3 | 68.4 | 68.8 | 69.7 | 69.7 | 70.1 | 69.8 | 70.2 | 70.8 | 69.6 | 0.74 | 53.5 |
| 8 | 90.5 | 90.0 | 90.4 | 91.0 | 89.8 | 89.0 | 89.3 | 89.2 | 92.1 | 92.3 | 92.4 | 92.7 | 92.9 | 93.9 | 91.1 | 1.53 | 69.3 |
| 9 | 196.7 | 194.9 | 194.2 | 195.9 | 196.3 | 194.2 | 195.4 | 195.0 | 194.7 | 194.3 | 194.6 | 195.7 | 194.3 | 195.9 | 195.1 | 0.80 | 159.6 |
| 10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 141.5 | 141.5 | 0.00 | — |
| KH-1-1 | 68.9 | 69.3 | 70.3 | 72.0 | 68.4 | 68.4 | 69.5 | 70.2 | 69.5 | 69.7 | 70.0 | 68.8 | 70.2 | 70.1 | 69.7 | 0.90 | 55.5 |
| 2 | 93.7 | 92.1 | 93.9 | 95.1 | 92.6 | 92.9 | 94.0 | 94.1 | 92.7 | 93.4 | 93.1 | 92.8 | 92.9 | 92.9 | 93.3 | 0.75 | 73.8 |
| 3 | 94.3 | 92.8 | 95.1 | 97.4 | 94.2 | 92.8 | 94.6 | 94.5 | 93.4 | 94.5 | 94.8 | 92.9 | 93.0 | 93.9 | 94.2 | 1.18 | 73.5 |
| 4 | 104.3 | 104.3 | 106.0 | 107.8 | 105.6 | 104.3 | 106.0 | 106.5 | 102.2 | 105.0 | 105.3 | 103.3 | 104.3 | 105.6 | 105.0 | 1.35 | 84.0 |
| 5 | 135.6 | 134.6 | 135.3 | 137.5 | 135.8 | 133.9 | 135.0 | 135.4 | 132.3 | 133.1 | 134.0 | 130.3 | 132.2 | 133.3 | 134.1 | 1.77 | 104.4 |
| KWP-2 | 75.2 | 74.1 | 73.6 | 74.7 | 73.0 | 71.9 | 72.2 | 72.3 | 73.1 | 72.9 | 73.0 | 72.3 | 72.4 | 73.6 | 73.2 | 0.94 | — |
| KWQ-1 | 91.8 | 92.5 | 93.4 | 95.0 | 93.6 | 92.4 | 93.1 | 94.6 | 92.6 | 93.8 | 93.8 | 93.6 | 95.0 | 96.8 | 93.7 | 1.26 | — |

*) 8/10、9/22には、大峰NW坑道真中付近で発破をかけている。

前回試験結果: KN→1986年調査での値、KO→1988年12月調査での値、KH→1989年3月調査での値

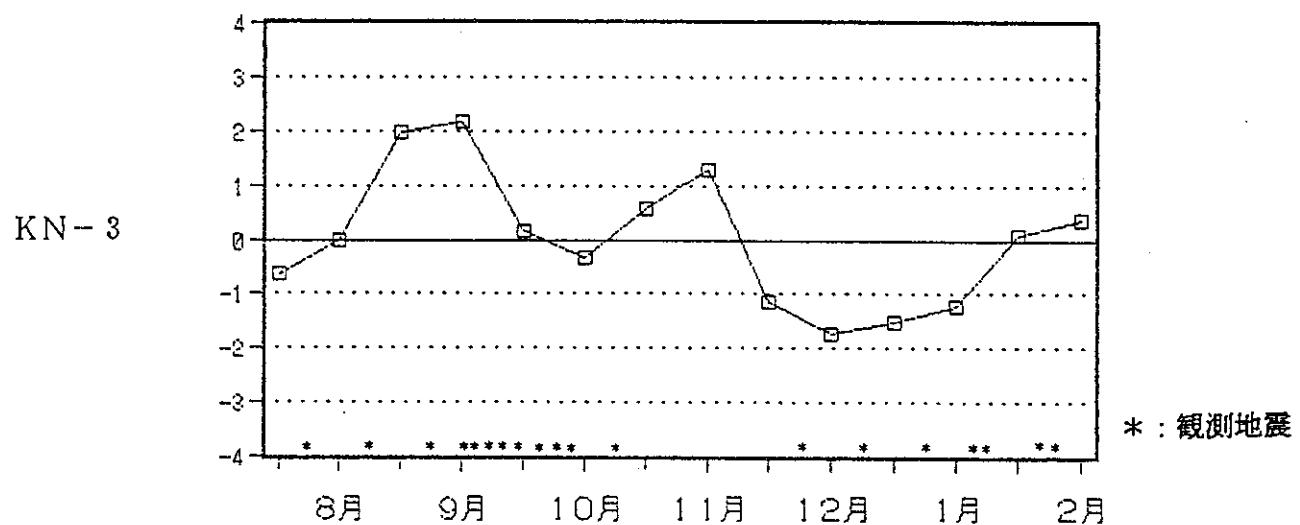
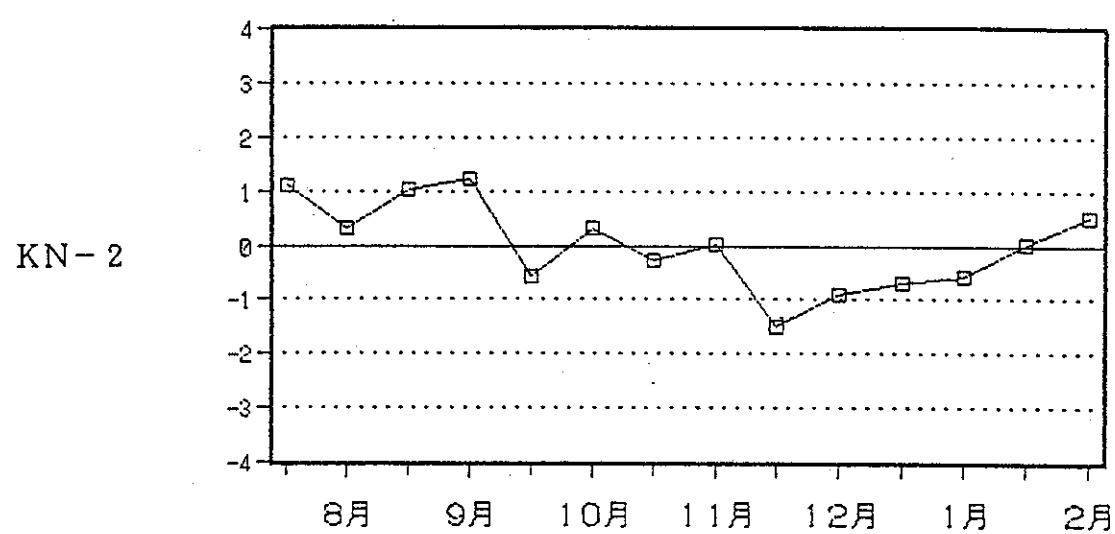
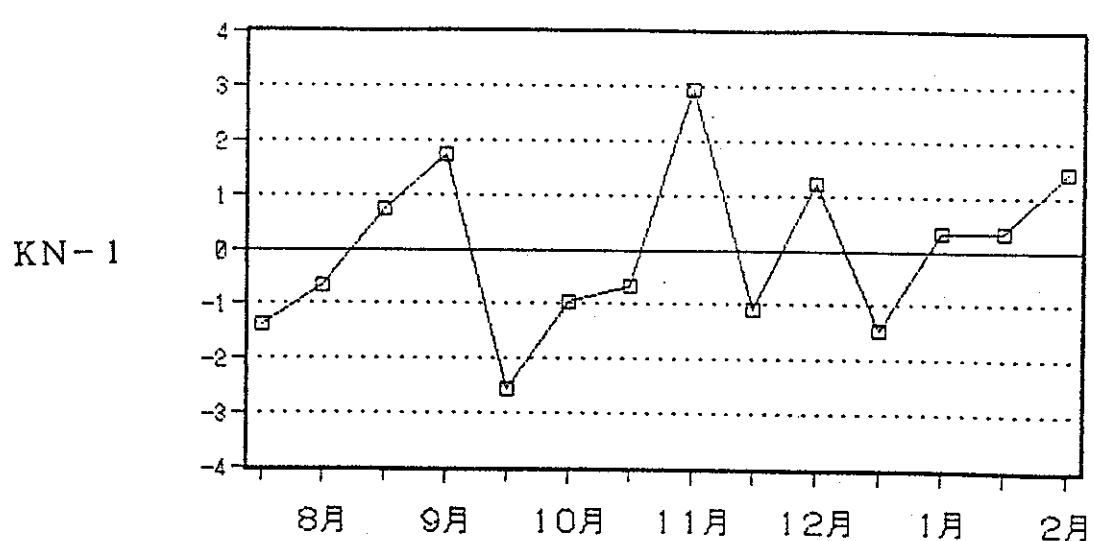


図 3.4-16(1) 電気伝導度の経時変化と観測期間中の地震

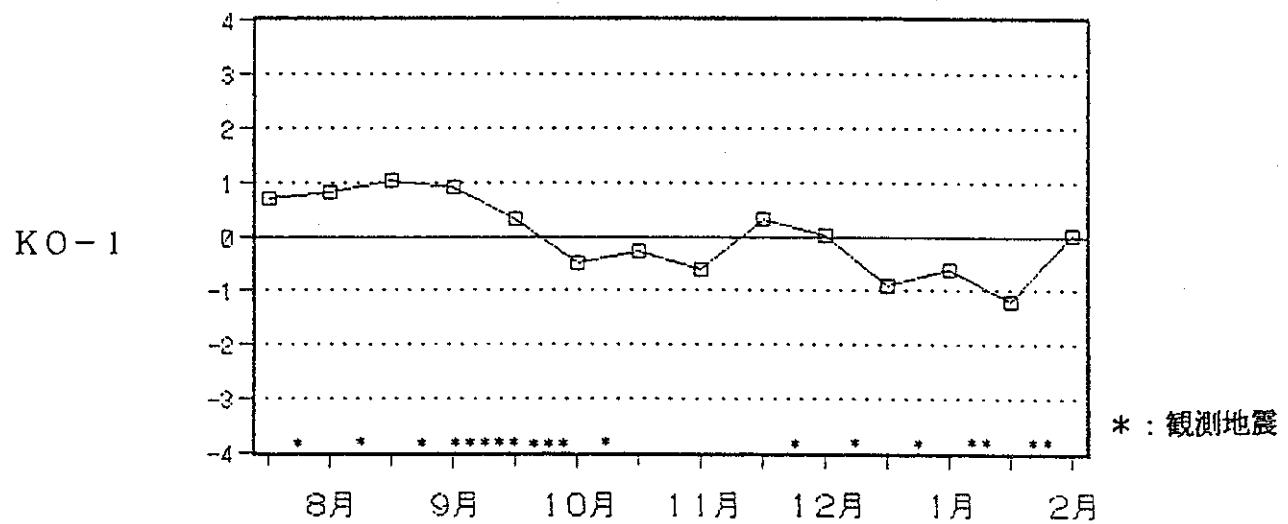
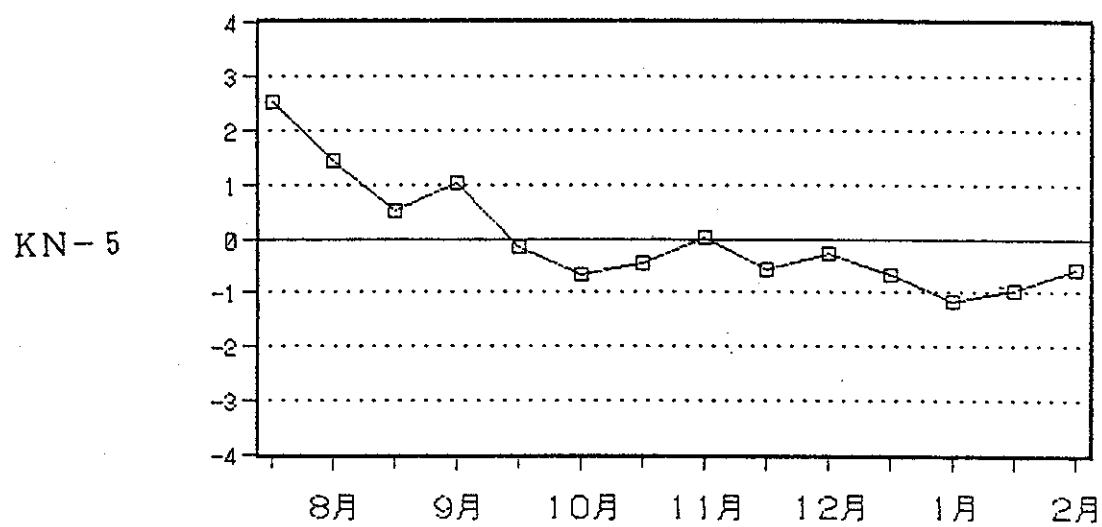
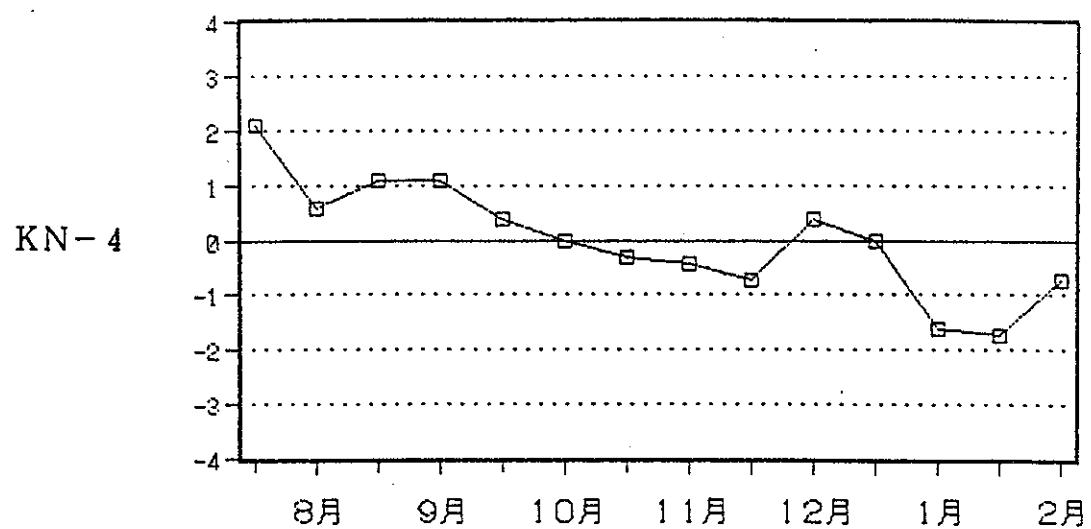


図 3.4-16(2) 電気伝導度の経時変化と観測期間中の地震

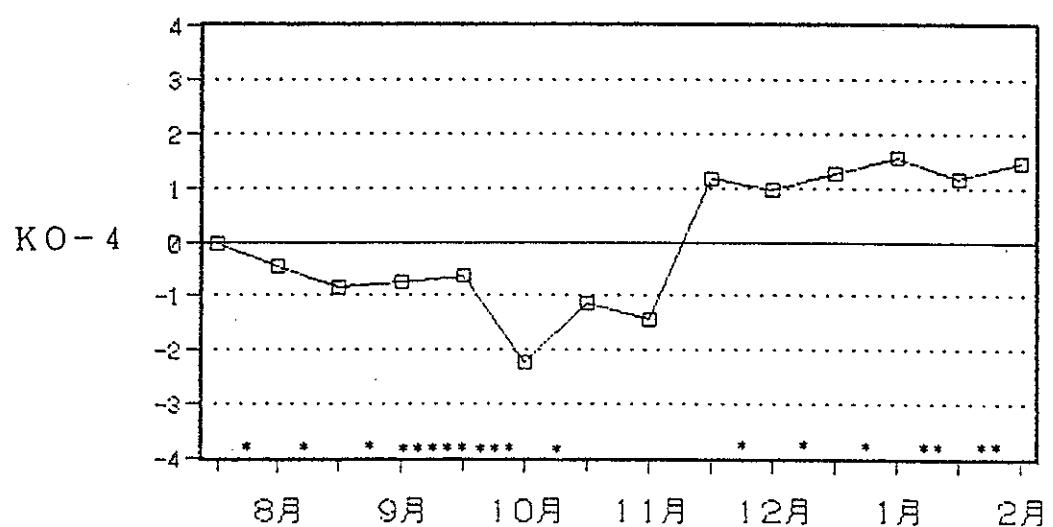
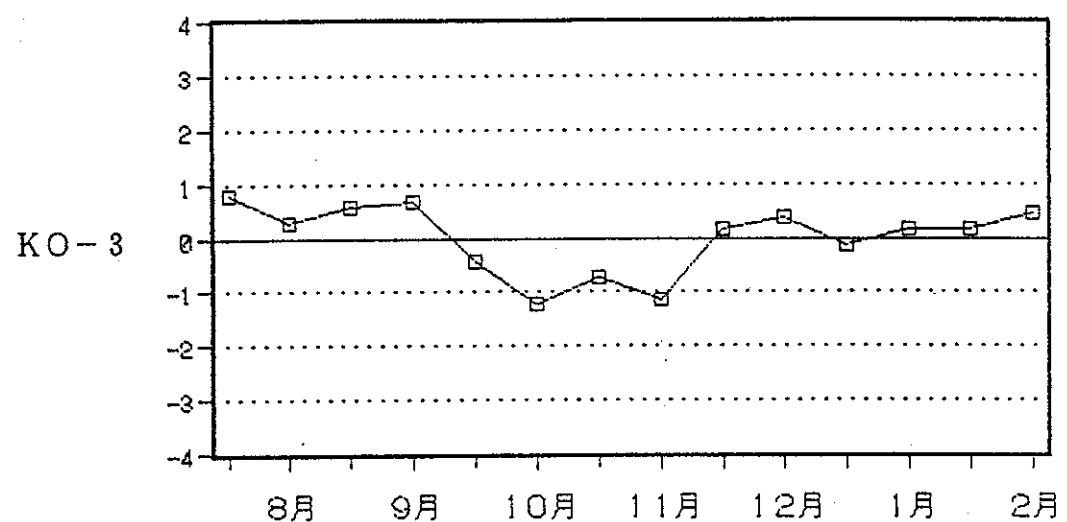
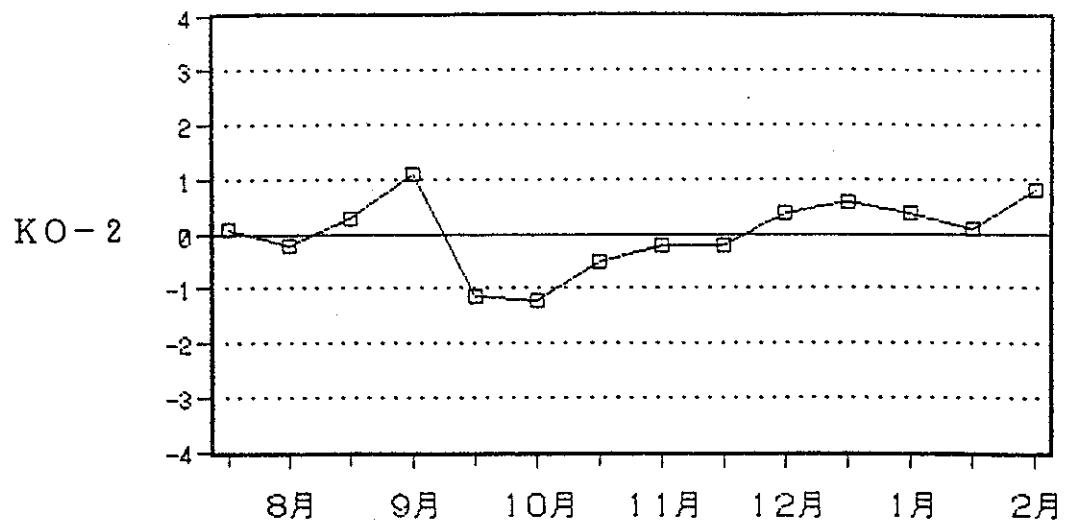


図 3.4-16(3) 電気伝導度の経時変化と観測期間中の地震

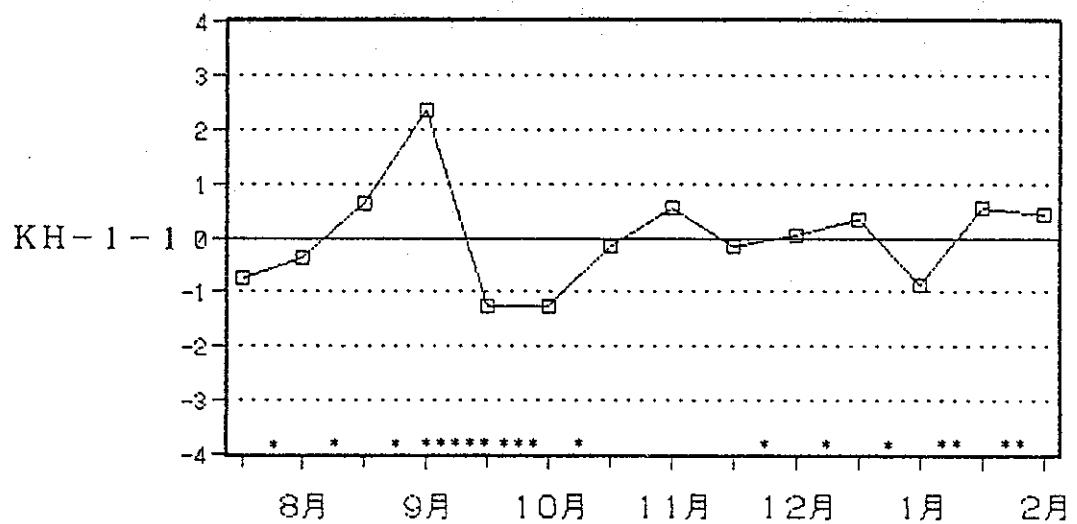
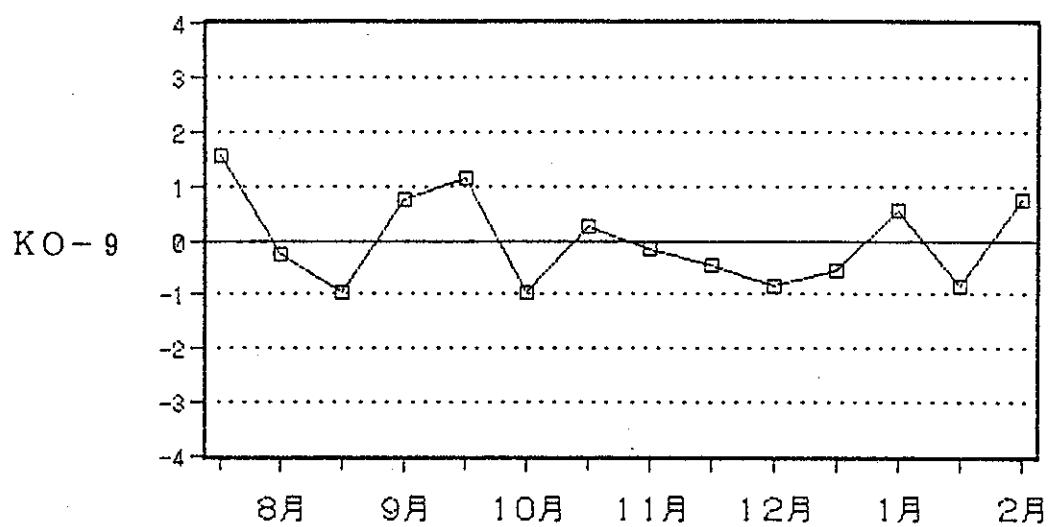
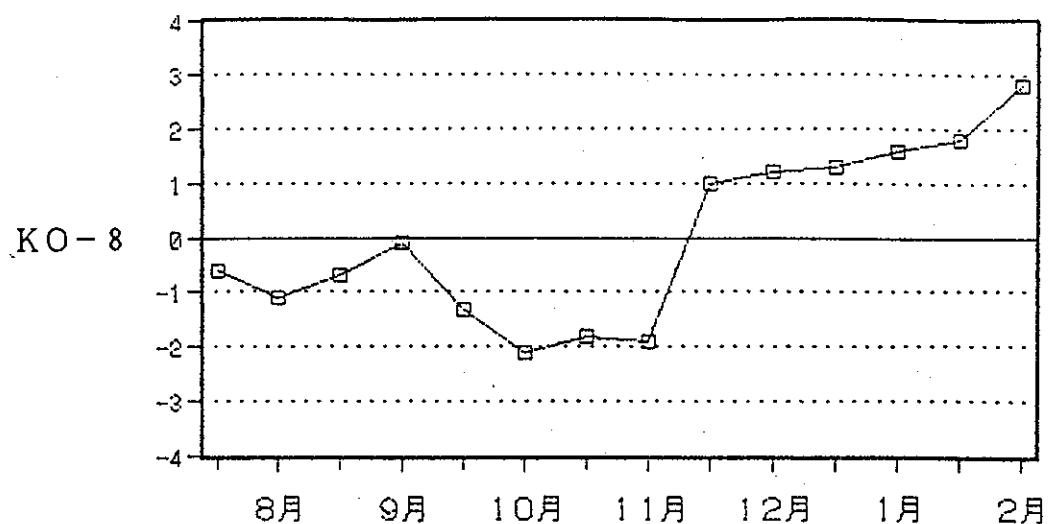


図 3.4-16(5) 電気伝導度の経時変化と観測期間中の地震

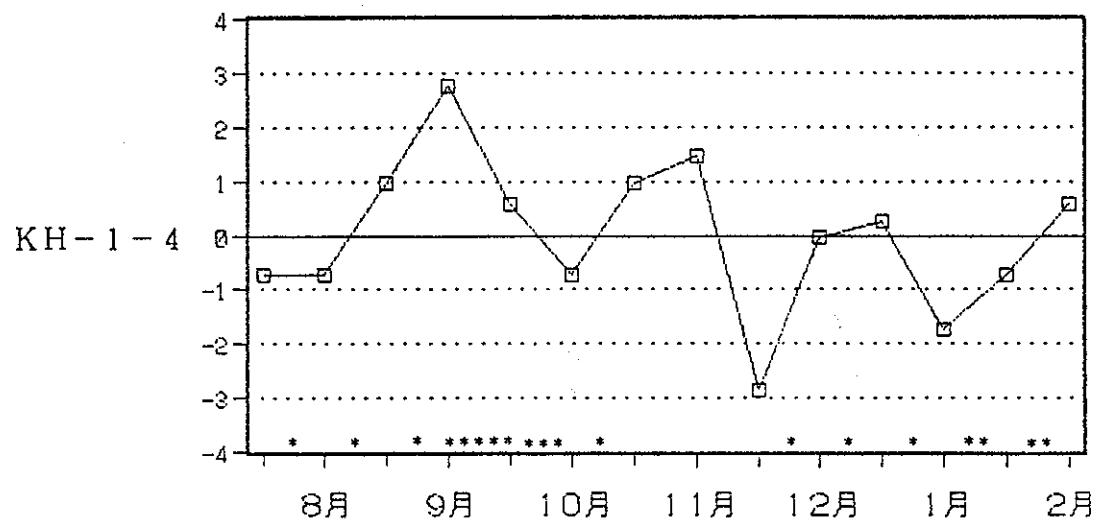
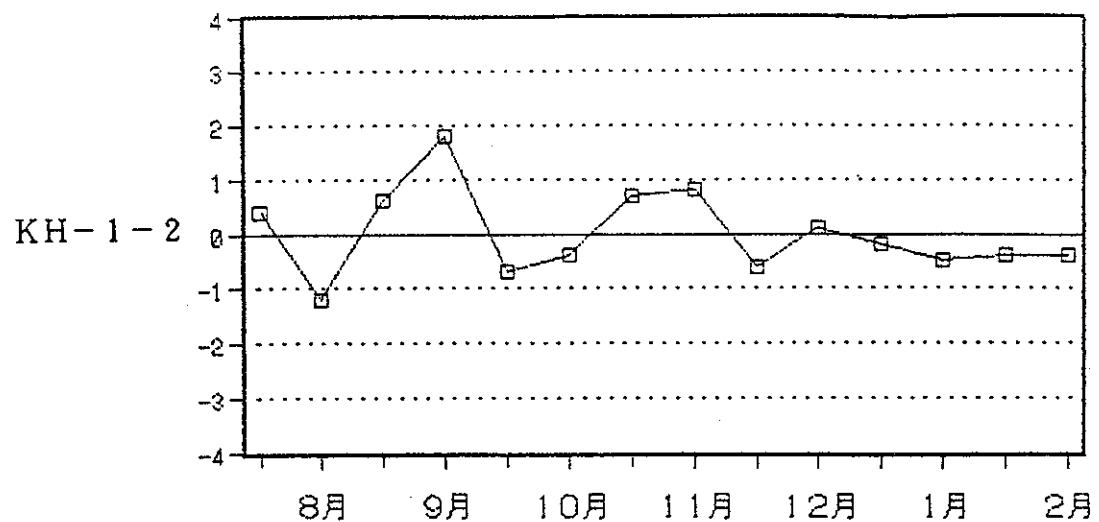


図 3.4-16(6) 電気伝導度の経時変化と観測期間中の地震

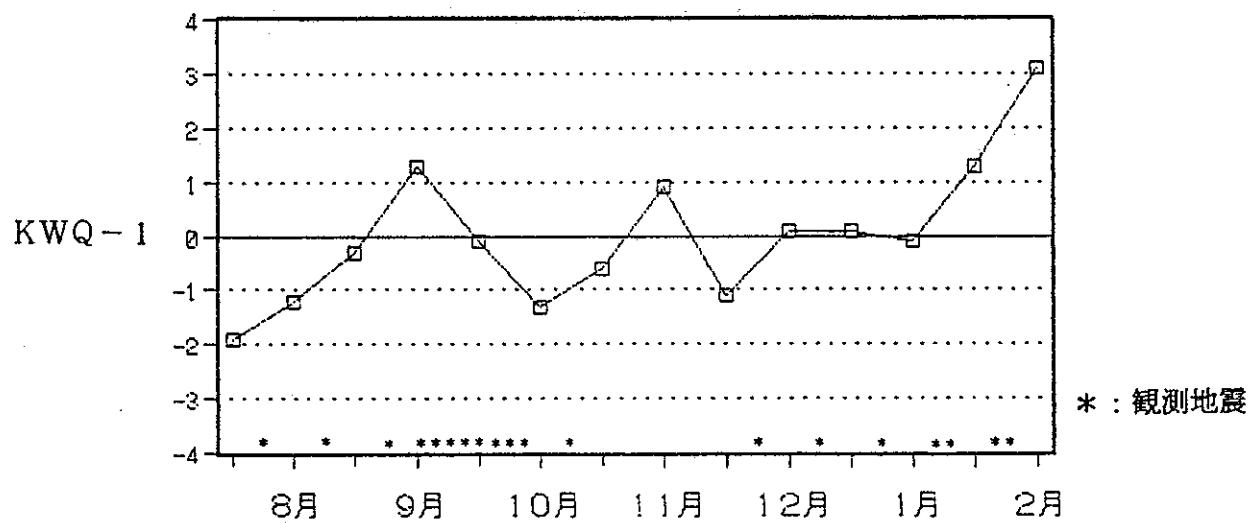
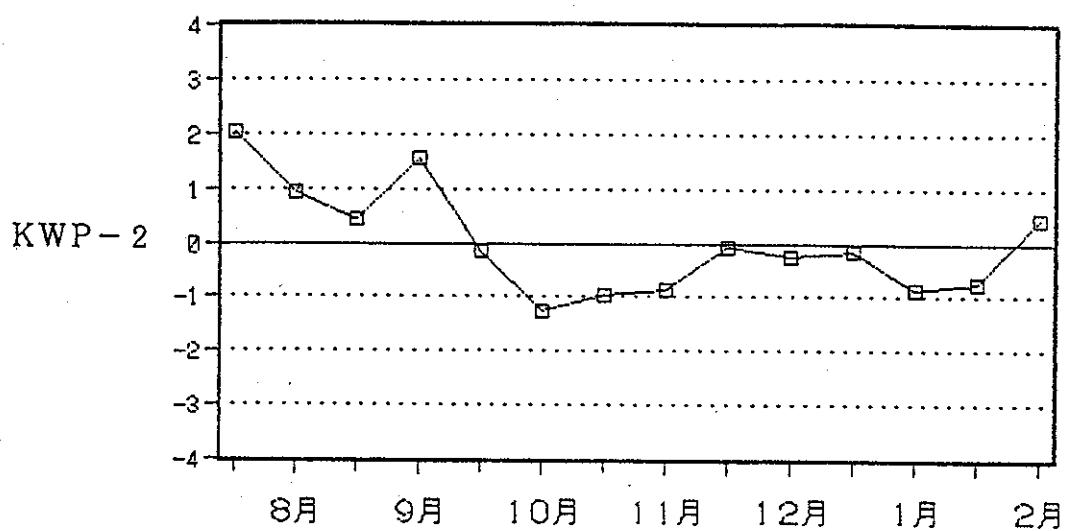
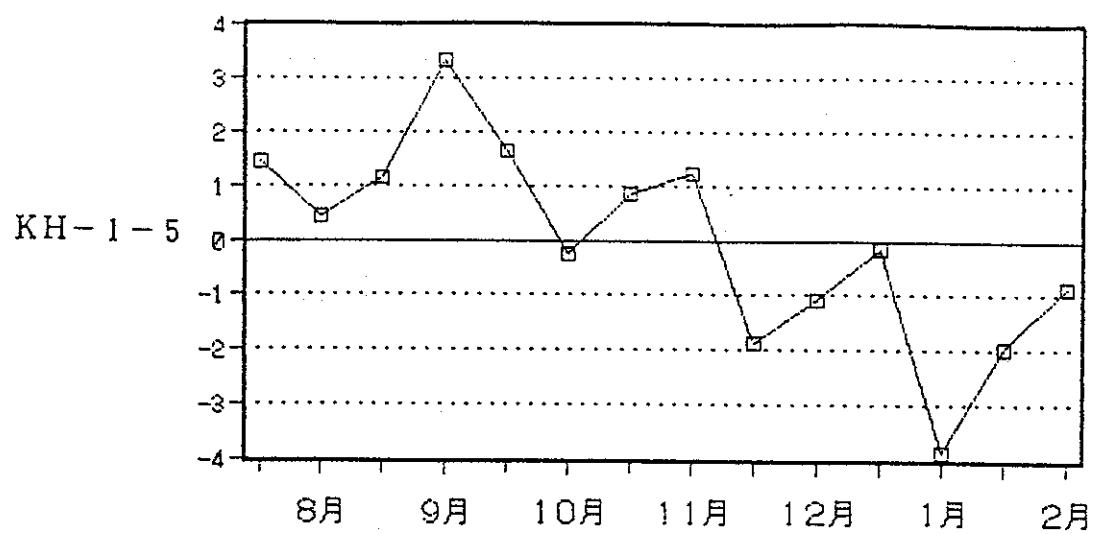


図 3.4-16(7) 電気伝導度の経時変化と観測期間中の地震

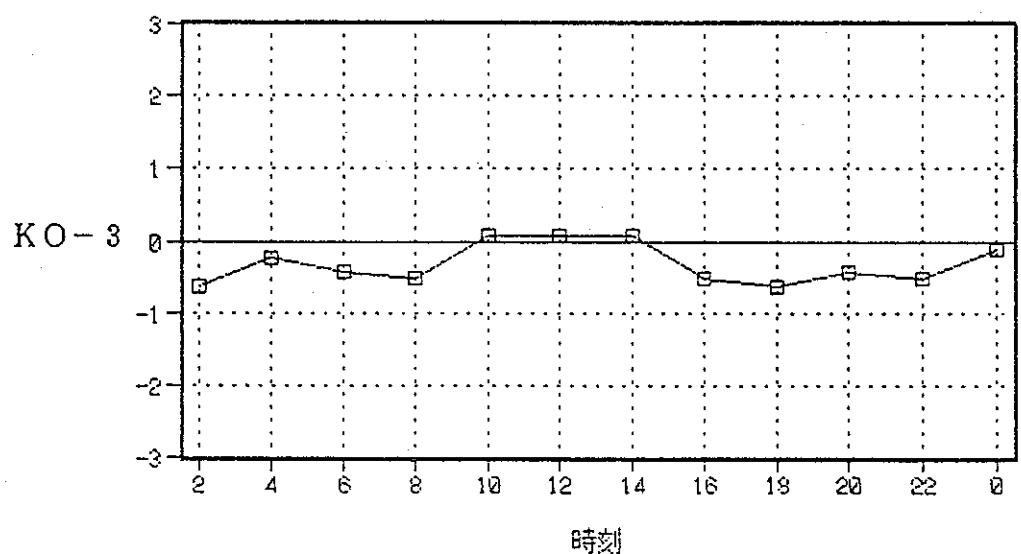
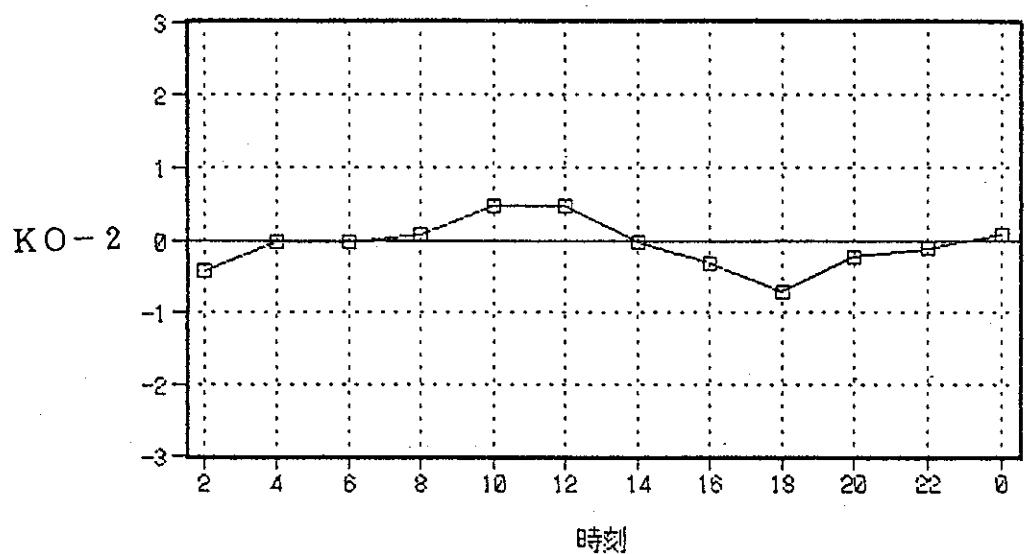
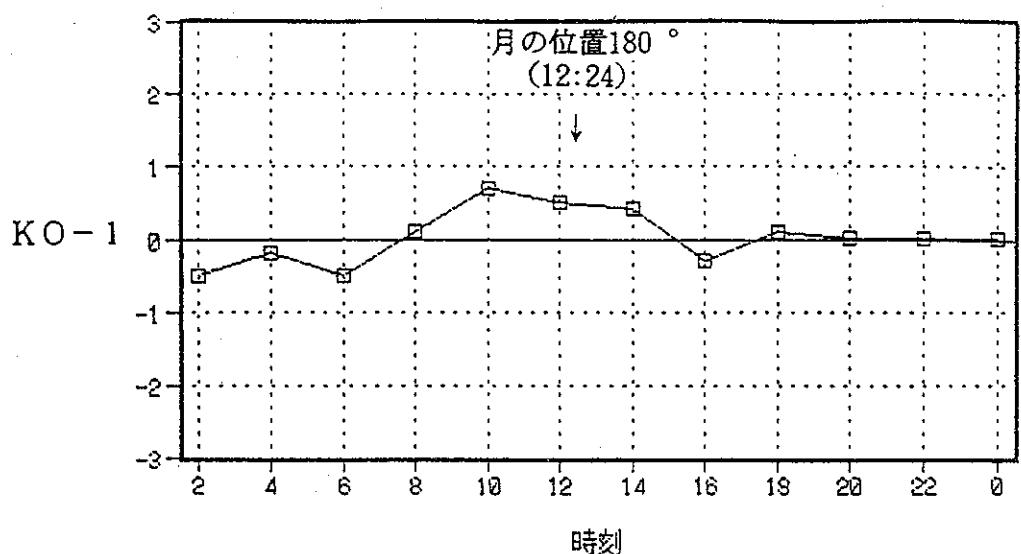


図 3.4-17(1) 地下水電気伝導度の経時変化 (平成 2 年 11 月 4 日)

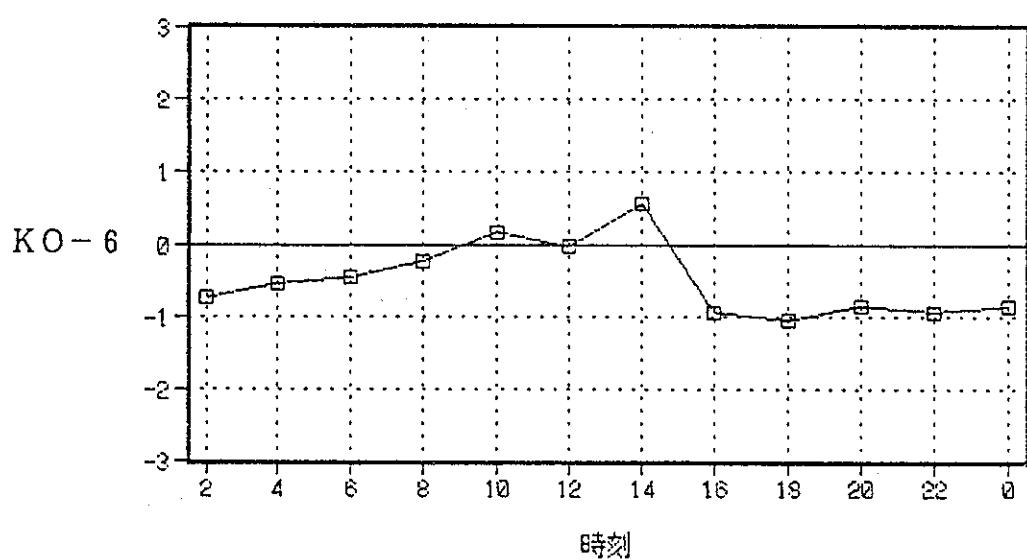
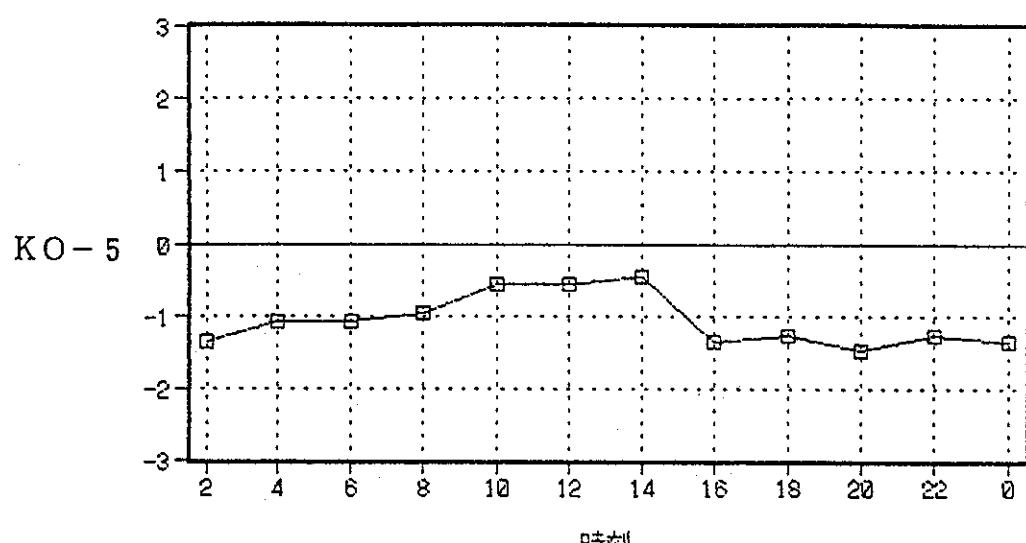
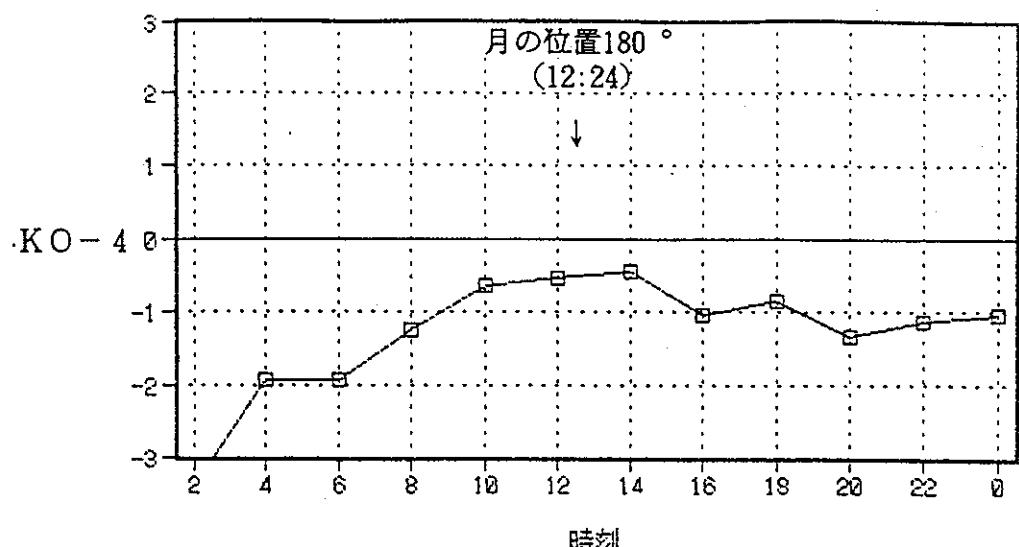


図 3.4-17(2) 地下水電気伝導度の経時変化（平成2年11月4日）

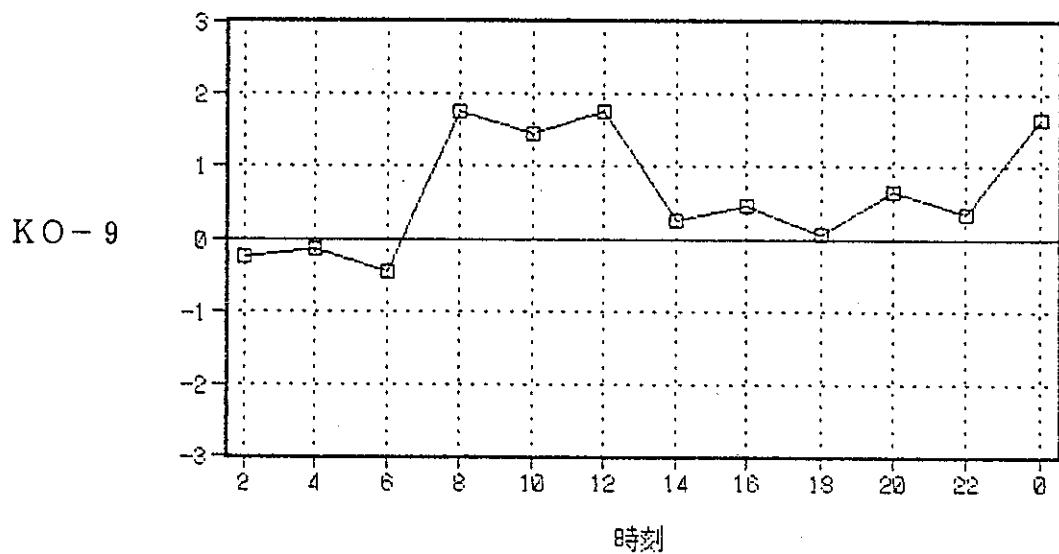
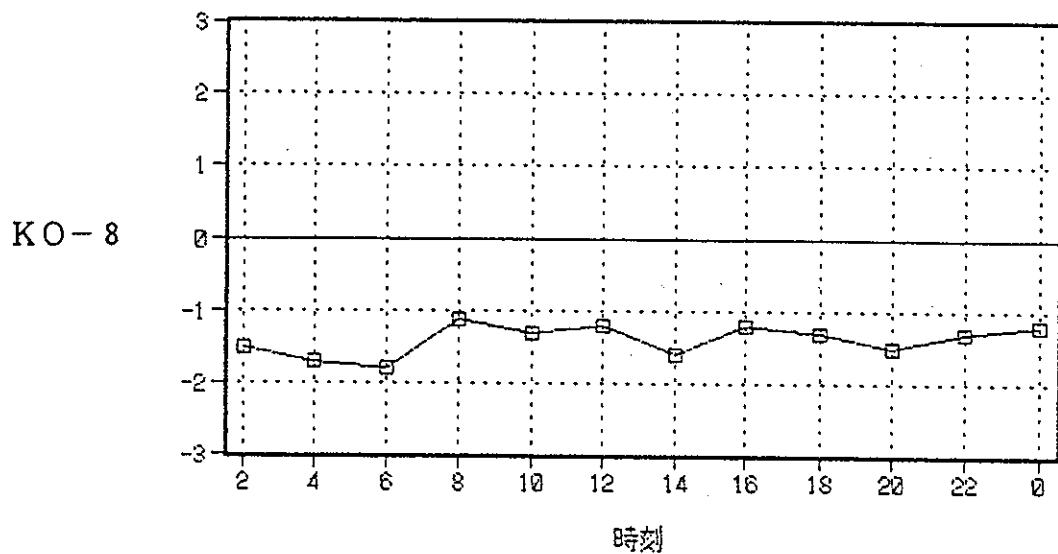
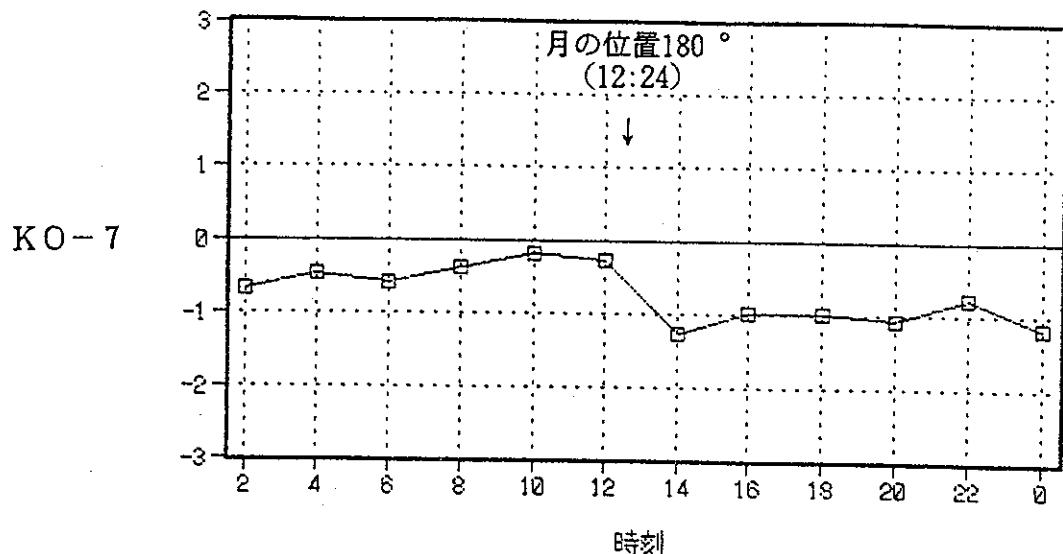


図 3.4-17(3) 地下水電気伝導度の経時変化 (平成2年11月4日)

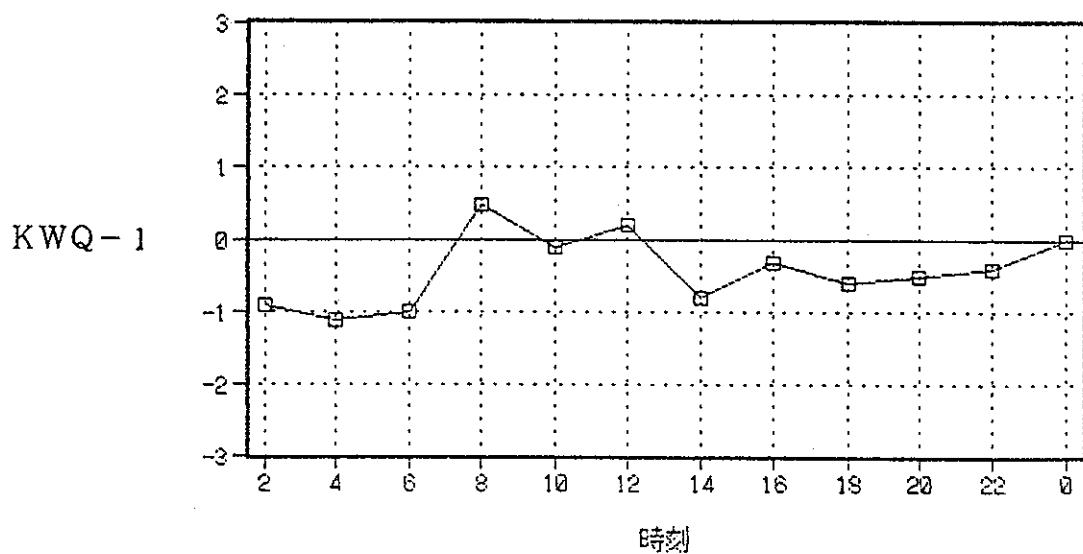
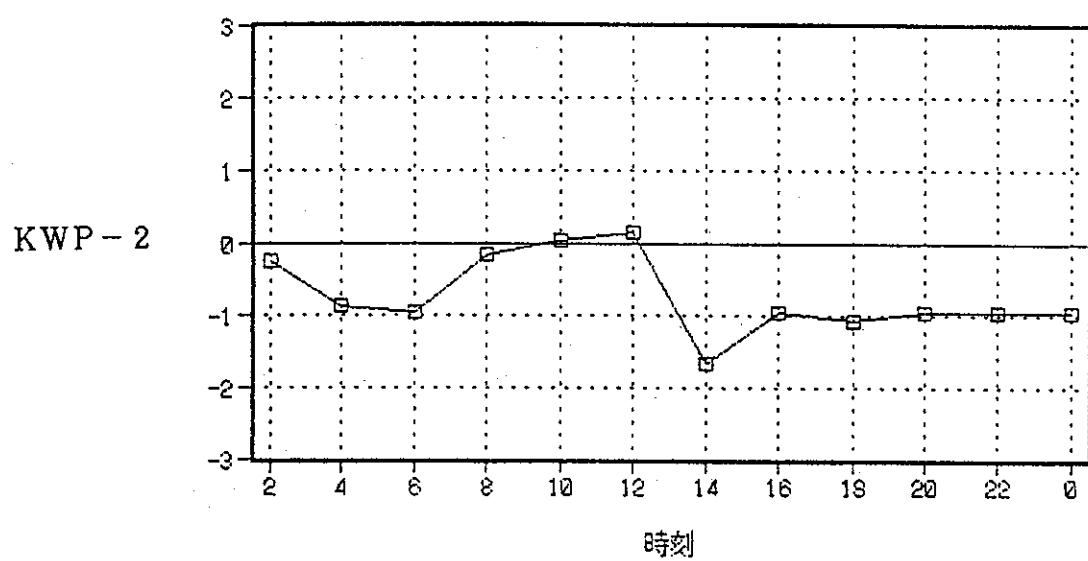
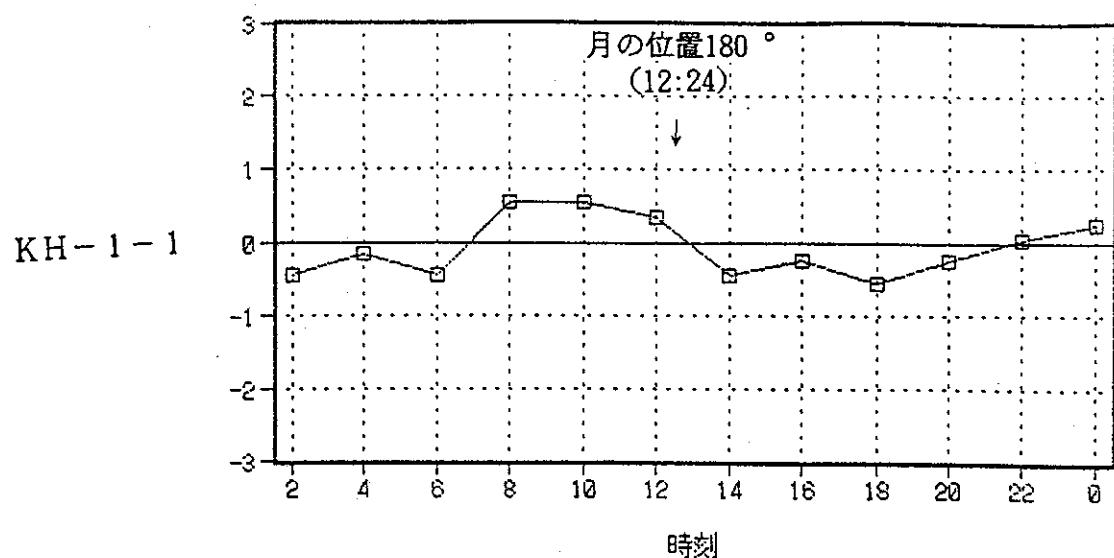


図 3.4-17(4) 地下水電気伝導度の経時変化（平成2年11月4日）

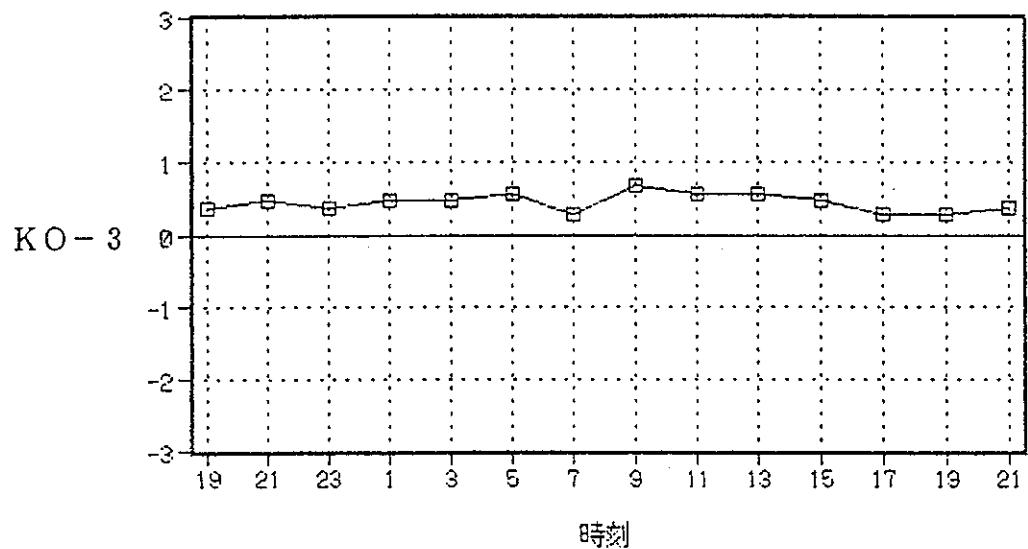
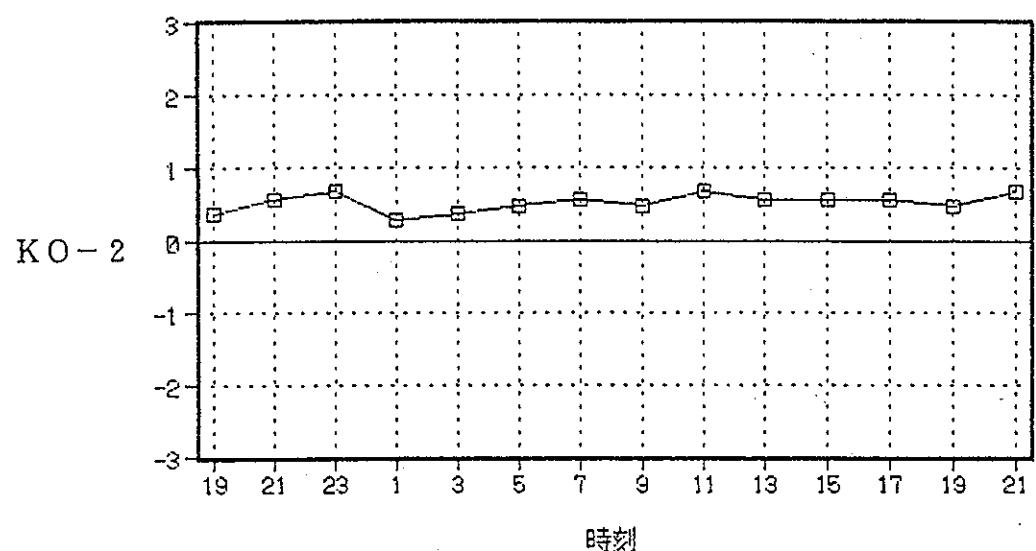
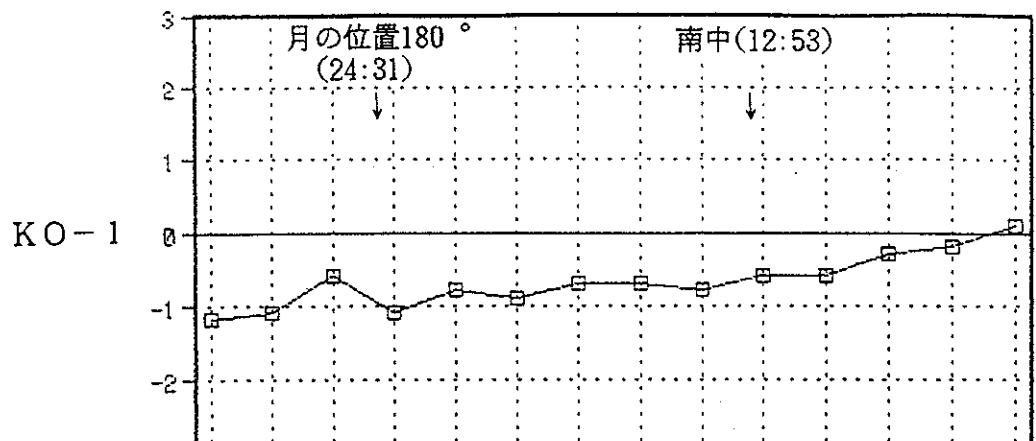


図 3.4-17(5) 地下水電気伝導度の経時変化 (平成3年2月15~16日)

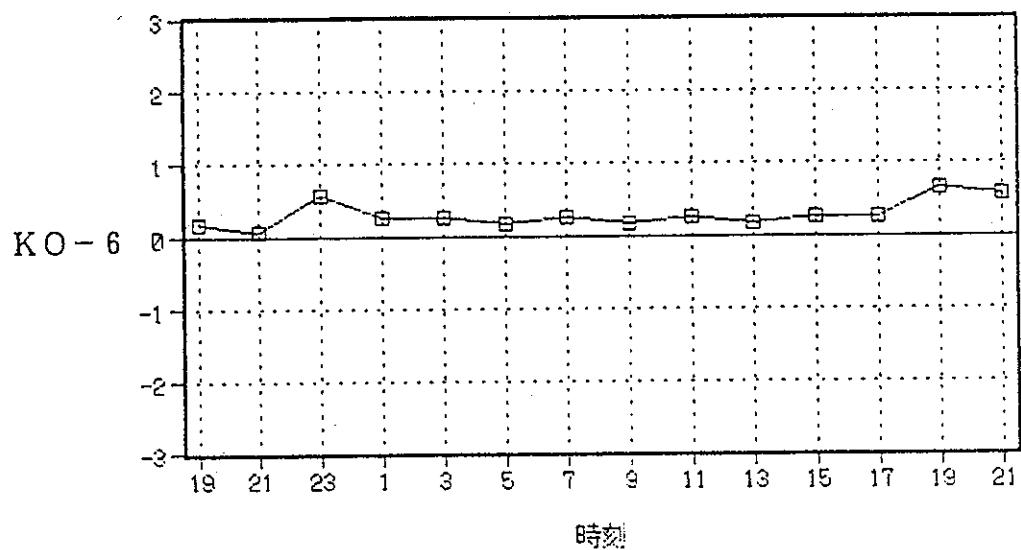
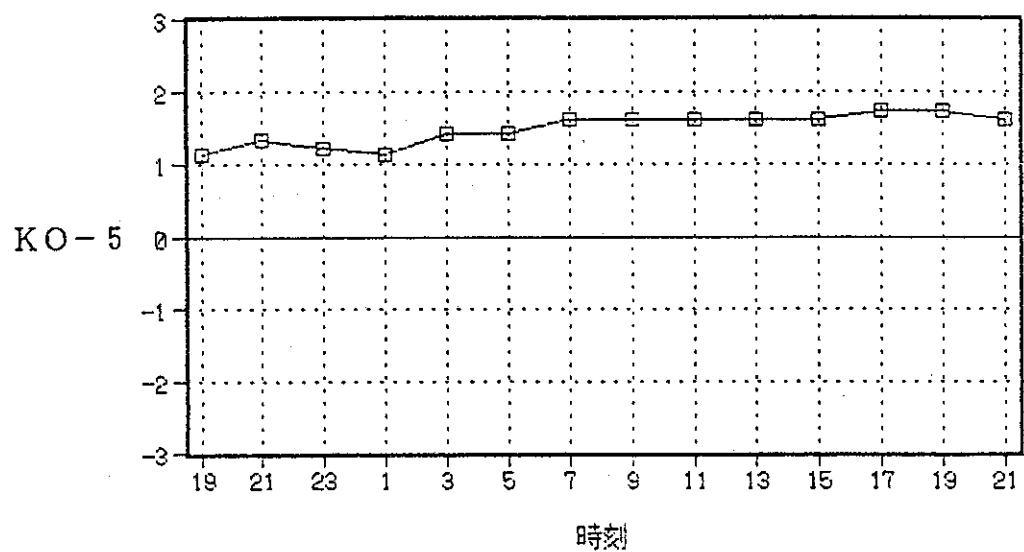
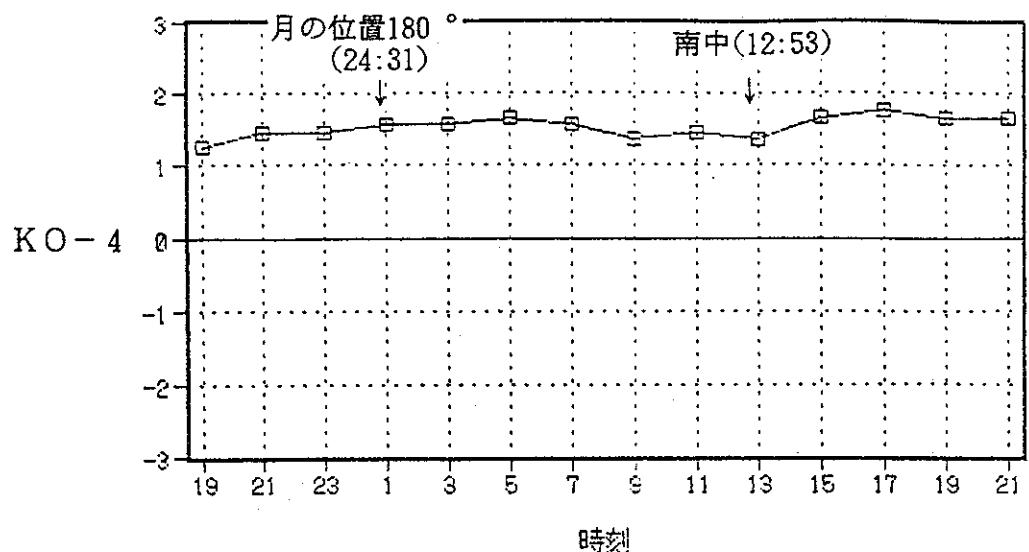


図 3.4-17(6) 地下水電気伝導度の経時変化（平成3年2月15～16日）

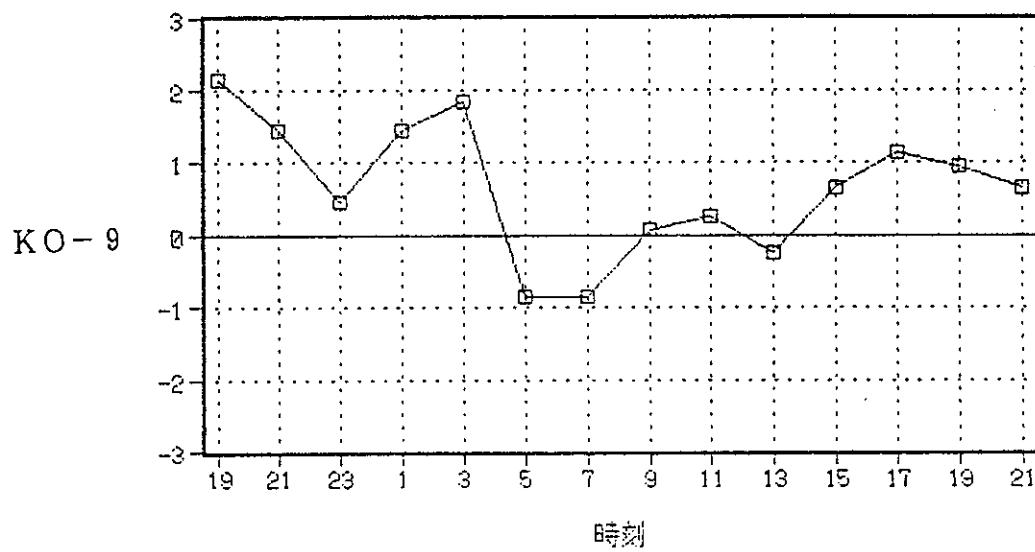
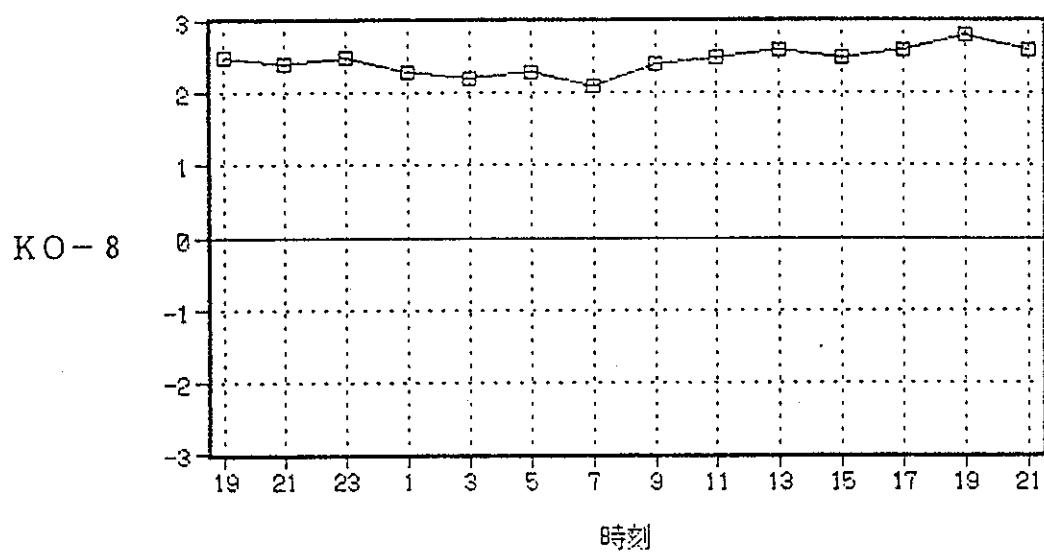
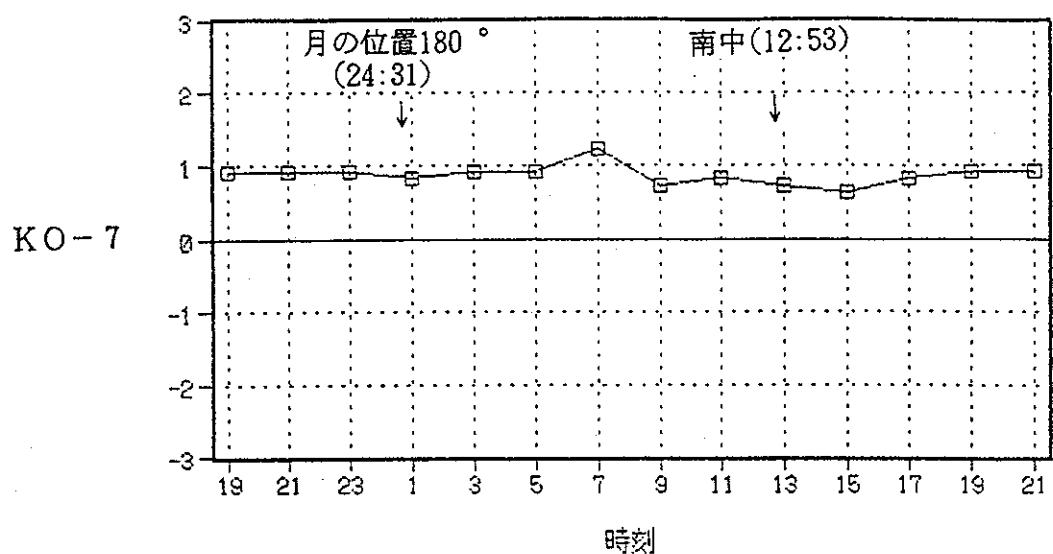


図 3.4-17(7) 地下水電気伝導度の経時変化 (平成3年2月15~16日)

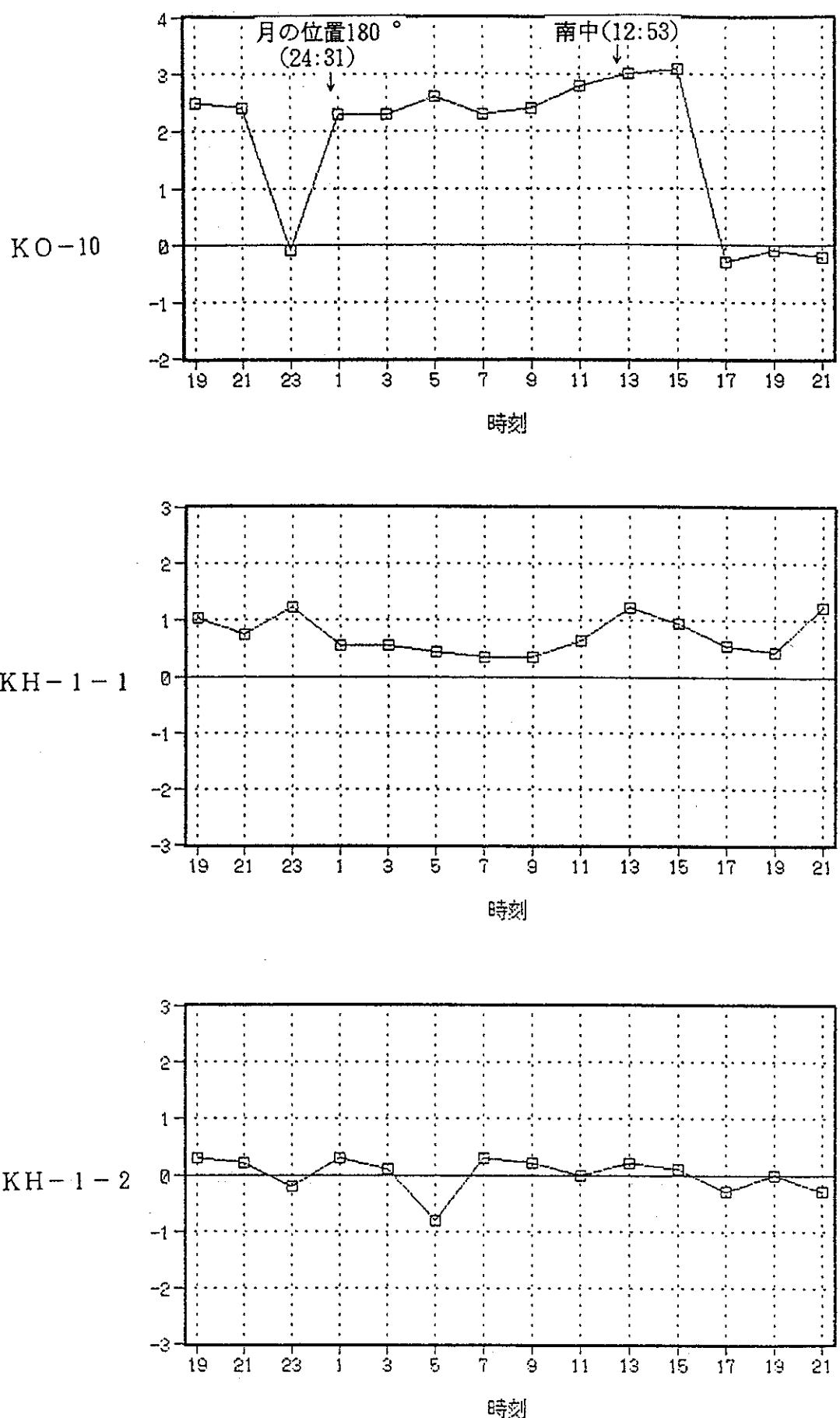


図 3.4-17(8) 地下水電気伝導度の経時変化（平成3年2月15～16日）

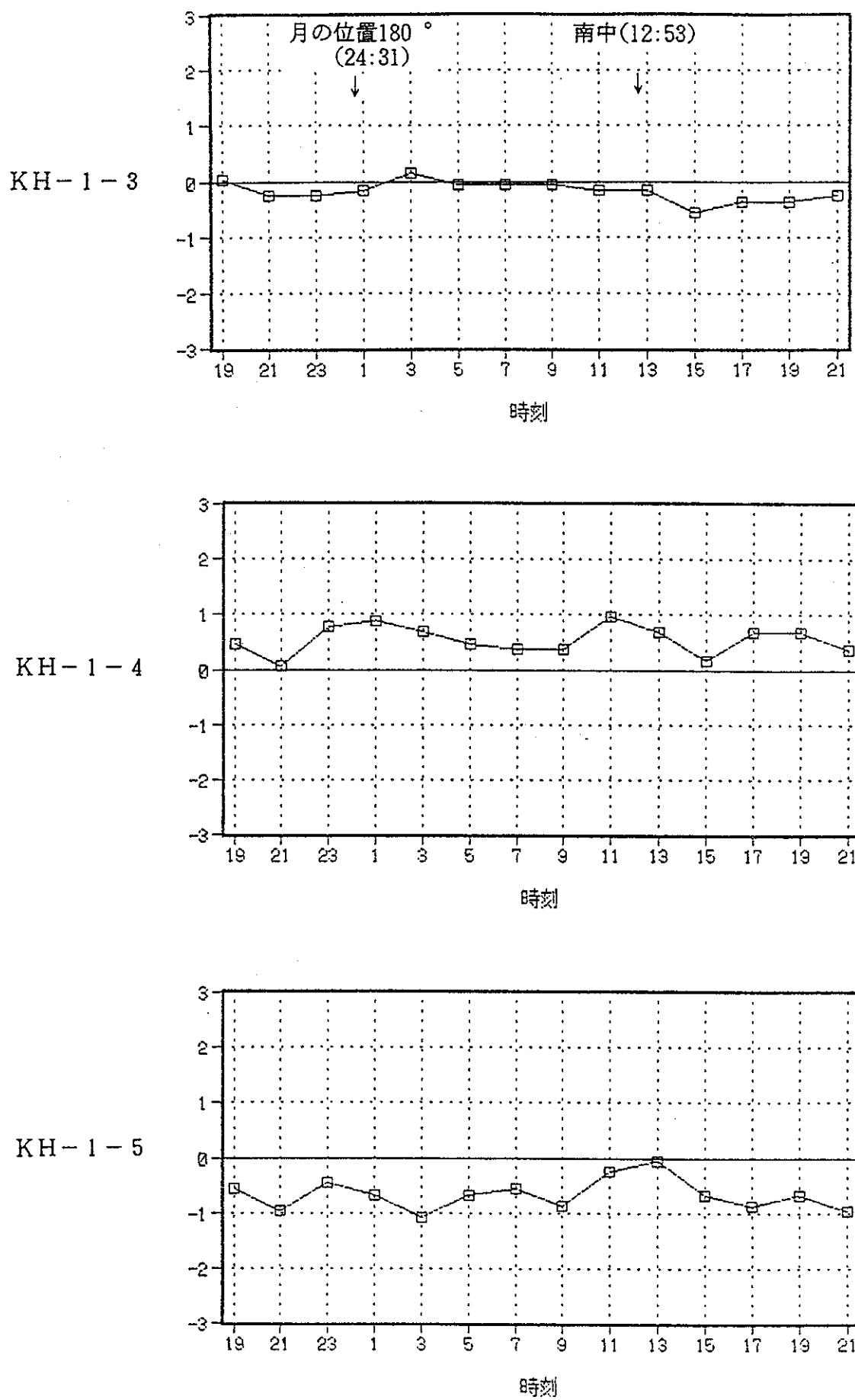


図 3.4-17(9) 地下水電気伝導度の経時変化 (平成3年2月15~16日)

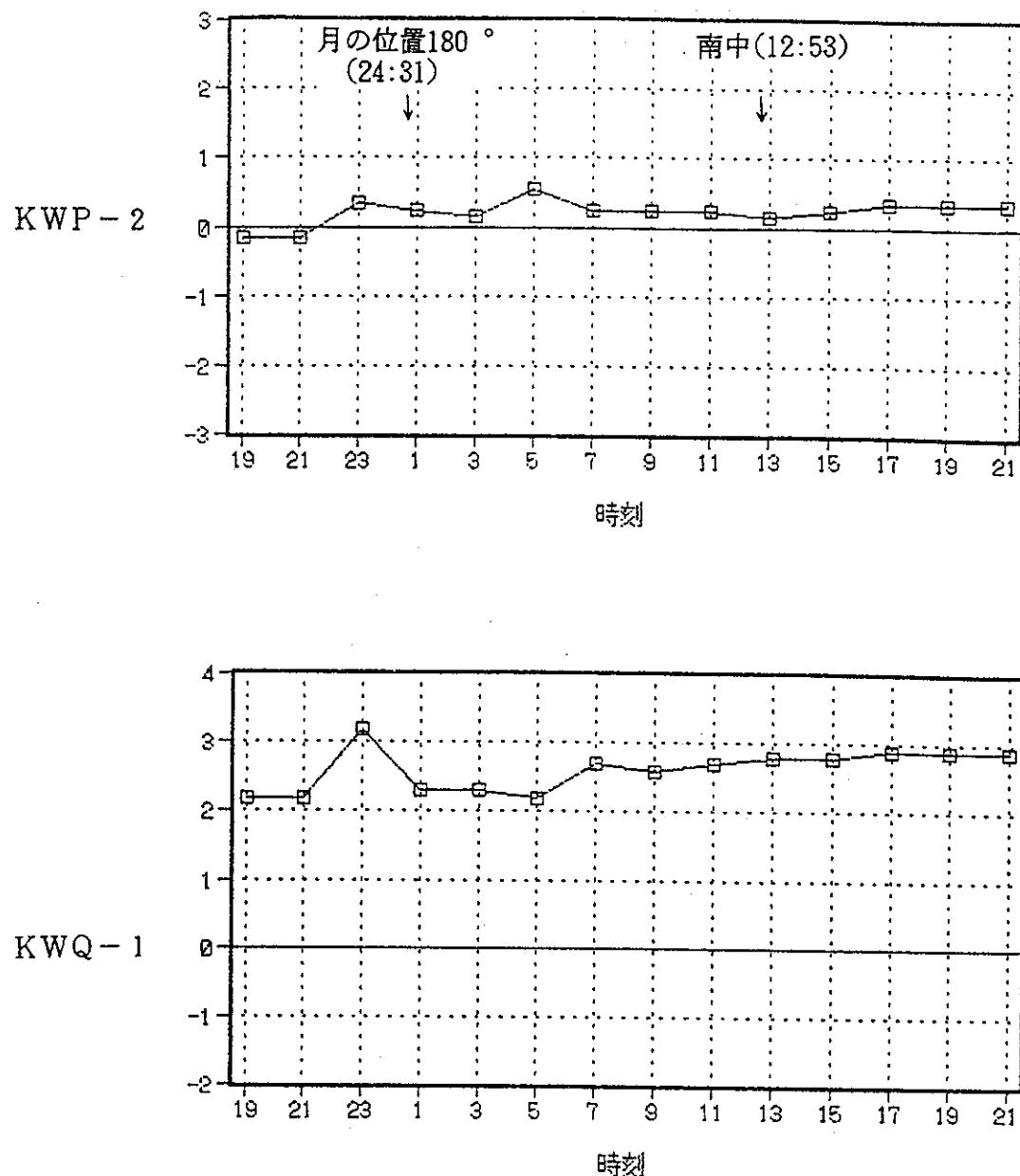


図 3.4-17(10) 地下水電気伝導度の経時変化 (平成3年2月15~16日)

表 3.4-6(1) 電気伝導度の経時変化一覧

単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$

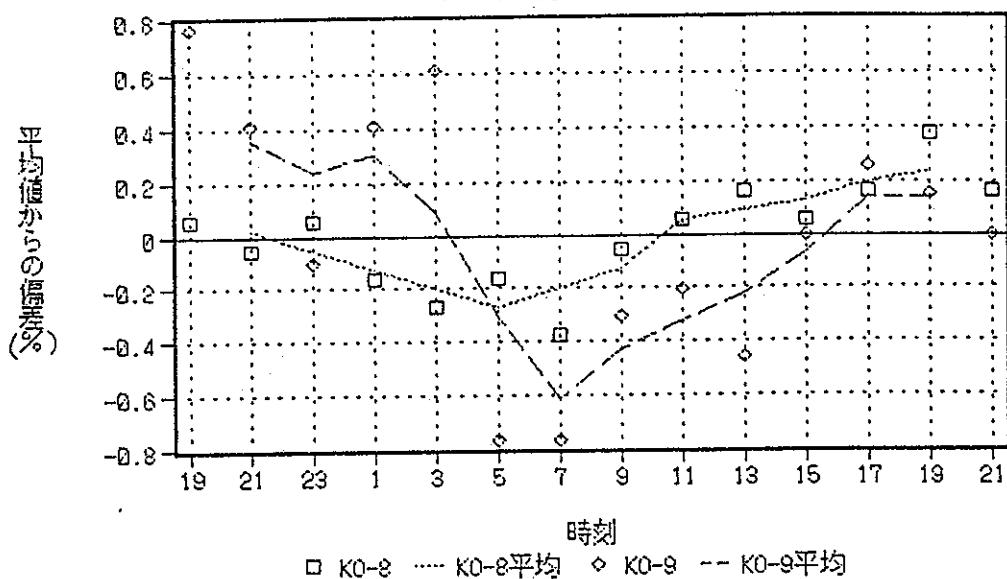
| 採水月日 | 11月4日 | | | | | | | | | | | 11月5日 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2:00 | 4:00 | 6:00 | 8:00 | 10:00 | 12:00 | 14:00 | 16:00 | 18:00 | 20:00 | 22:00 | |
| KO-1 | 82.7 | 83.0 | 82.7 | 83.3 | 83.9 | 83.7 | 83.6 | 82.9 | 83.3 | 83.2 | 83.2 | 83.2 |
| 2 | 74.9 | 75.3 | 75.3 | 75.4 | 75.8 | 75.8 | 75.3 | 75.0 | 74.6 | 75.1 | 75.2 | 75.4 |
| 3 | 77.0 | 77.4 | 77.2 | 77.1 | 77.7 | 77.7 | 77.7 | 77.1 | 77.0 | 77.2 | 77.1 | 77.5 |
| 4 | 107.5 | 109.0 | 109.0 | 109.7 | 110.3 | 110.4 | 110.5 | 109.9 | 110.1 | 109.6 | 109.8 | 109.9 |
| 5 | 59.8 | 60.1 | 60.1 | 60.2 | 60.6 | 60.6 | 60.7 | 59.8 | 59.9 | 59.7 | 59.9 | 59.8 |
| 6 | 63.4 | 63.6 | 63.7 | 63.9 | 64.3 | 64.1 | 64.7 | 63.2 | 63.1 | 63.3 | 63.2 | 63.3 |
| 7 | 68.9 | 69.1 | 69.0 | 69.2 | 69.4 | 69.3 | 68.3 | 68.6 | 68.6 | 68.5 | 68.8 | 68.4 |
| 8 | 89.6 | 89.4 | 89.3 | 90.0 | 89.8 | 89.9 | 89.5 | 89.9 | 89.8 | 89.6 | 89.8 | 89.9 |
| 9 | 194.9 | 195.0 | 194.7 | 196.9 | 196.6 | 196.9 | 195.4 | 195.6 | 195.2 | 195.8 | 195.5 | 196.8 |
| KH-1-1 | 69.2 | 69.5 | 69.2 | 70.2 | 70.2 | 70.0 | 69.2 | 69.4 | 69.1 | 69.4 | 69.7 | 69.9 |
| KWP-2 | 72.9 | 72.3 | 72.2 | 73.0 | 73.2 | 73.3 | 71.5 | 72.2 | 72.1 | 72.2 | 72.2 | 72.2 |
| KWQ-1 | 92.8 | 92.6 | 92.7 | 94.2 | 93.6 | 93.9 | 92.9 | 93.4 | 93.1 | 93.2 | 93.3 | 93.7 |

表 3.4-6(2) 電気伝導度の経時変化一覧

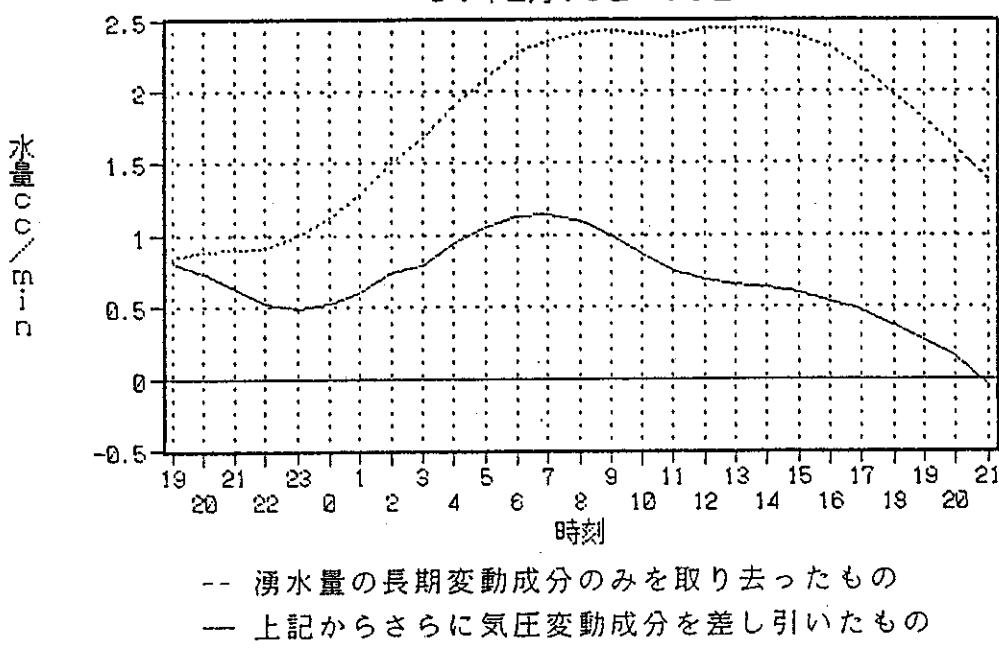
単位: $\mu\text{S}/\text{cm}$

| 採水月日 | 2月15日 | | | | 2月16日 | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| | 19:00 | 21:00 | 23:00 | 1:00 | 3:00 | 5:00 | 7:00 | 9:00 | 11:00 | 13:00 | 15:00 | 17:00 | 19:00 | 21:00 | | |
| KO-1 | 82.0 | 82.1 | 82.6 | 82.1 | 82.4 | 82.3 | 82.5 | 82.5 | 82.4 | 82.6 | 82.6 | 82.9 | 83.0 | 83.3 | | |
| 2 | 75.7 | 75.9 | 76.0 | 75.6 | 75.7 | 75.8 | 75.9 | 75.8 | 76.0 | 75.9 | 75.9 | 75.9 | 75.8 | 76.0 | | |
| 3 | 78.0 | 78.1 | 78.0 | 78.1 | 78.1 | 78.2 | 77.9 | 78.3 | 78.2 | 78.2 | 78.1 | 77.9 | 77.9 | 78.0 | | |
| 4 | 112.2 | 112.4 | 112.4 | 112.5 | 112.5 | 112.6 | 112.5 | 112.3 | 112.4 | 112.3 | 112.6 | 112.7 | 112.6 | 112.6 | | |
| 5 | 62.3 | 62.5 | 62.4 | 62.3 | 62.6 | 62.6 | 62.8 | 62.8 | 62.8 | 62.8 | 62.8 | 62.9 | 62.9 | 62.8 | | |
| 6 | 64.3 | 64.2 | 64.7 | 64.4 | 64.4 | 64.3 | 64.4 | 64.3 | 64.4 | 64.3 | 64.4 | 64.4 | 64.8 | 64.7 | | |
| 7 | 70.5 | 70.5 | 70.5 | 70.4 | 70.5 | 70.5 | 70.8 | 70.3 | 70.4 | 70.3 | 70.2 | 70.4 | 70.5 | 70.5 | | |
| 8 | 93.6 | 93.5 | 93.6 | 93.4 | 93.3 | 93.4 | 93.2 | 93.5 | 93.6 | 93.7 | 93.6 | 93.7 | 93.9 | 93.7 | | |
| 9 | 197.3 | 196.6 | 195.6 | 196.6 | 197.0 | 194.3 | 194.3 | 195.2 | 195.4 | 194.9 | 195.8 | 196.3 | 196.1 | 195.8 | | |
| 10 | 144.0 | 143.9 | 141.4 | 143.8 | 143.8 | 144.1 | 143.8 | 143.9 | 144.3 | 144.5 | 144.6 | 141.2 | 141.4 | 141.3 | | |
| KH-1-1 | 70.7 | 70.4 | 70.9 | 70.2 | 70.2 | 70.1 | 70.0 | 70.0 | 70.3 | 70.9 | 70.6 | 70.2 | 70.1 | 70.9 | | |
| KH-1-2 | 93.6 | 93.5 | 93.1 | 93.6 | 93.4 | 92.5 | 93.6 | 93.5 | 93.3 | 93.5 | 93.4 | 93.0 | 93.3 | 93.0 | | |
| KH-1-3 | 94.2 | 93.9 | 93.9 | 94.0 | 94.3 | 94.1 | 94.1 | 94.1 | 94.0 | 94.0 | 93.6 | 93.8 | 93.8 | 93.9 | | |
| KH-1-4 | 105.5 | 105.1 | 105.8 | 105.9 | 105.7 | 105.5 | 105.4 | 105.4 | 106.0 | 105.7 | 105.2 | 105.7 | 105.7 | 105.4 | | |
| KH-1-5 | 133.6 | 133.2 | 133.7 | 133.5 | 133.1 | 133.5 | 133.6 | 133.3 | 133.9 | 134.1 | 133.5 | 133.3 | 133.5 | 133.2 | | |
| KWP-2 | 73.0 | 73.0 | 73.5 | 73.4 | 73.3 | 73.7 | 73.4 | 73.4 | 73.4 | 73.3 | 73.4 | 73.5 | 73.5 | 73.5 | | |
| KWQ-1 | 95.9 | 95.9 | 96.9 | 96.0 | 96.0 | 95.9 | 96.4 | 96.3 | 96.4 | 96.5 | 96.5 | 96.6 | 96.6 | 96.6 | | |

(I)

KO-8、KO-9地点伝導度変化
91年2月15日～16日

(II)

湧水量変動
91年2月15日～16日図 3.4-18 電気伝導度変化と湧水量変動の対応
(I 図の線は 4 時間移動平均値)

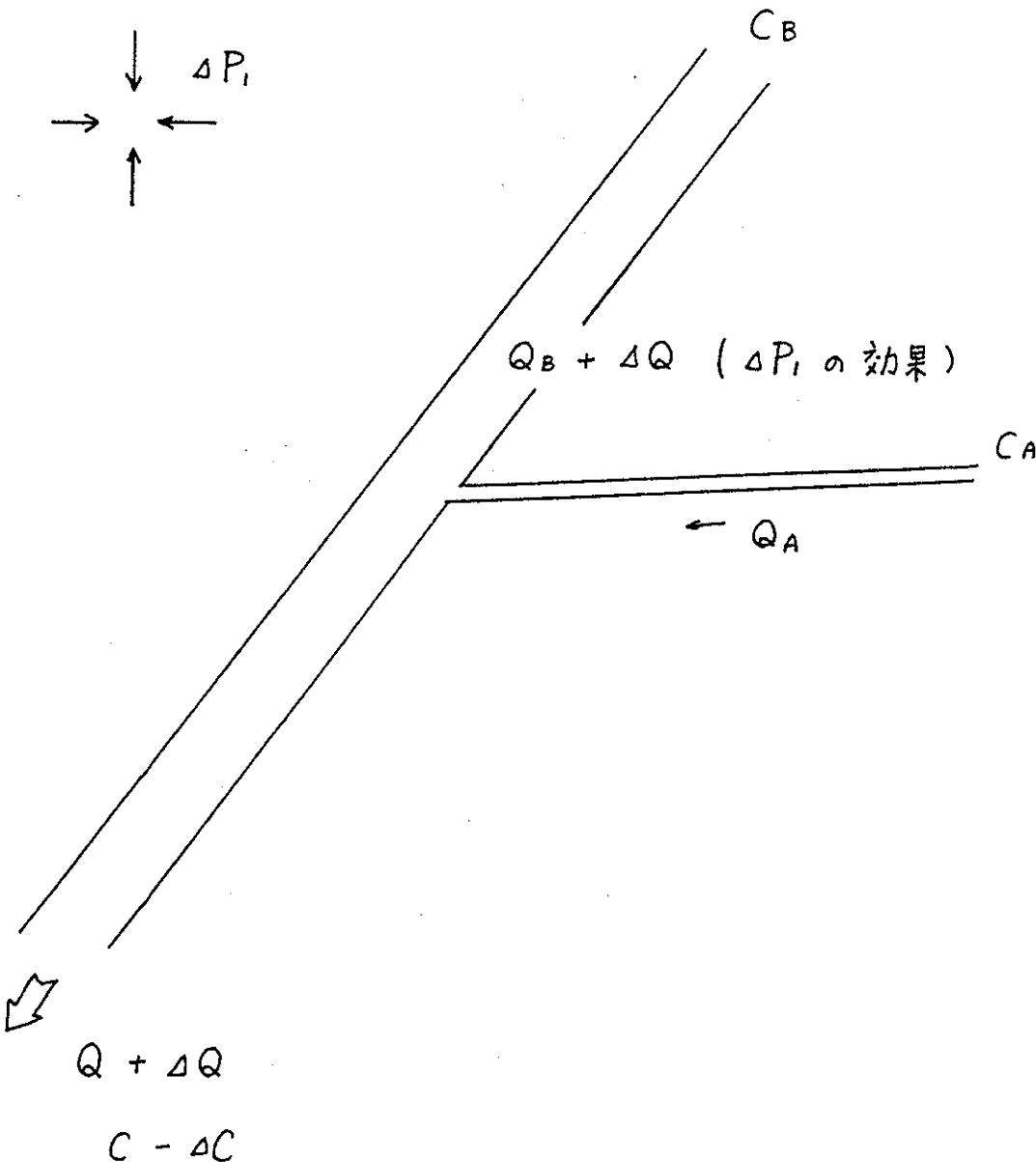


図 3.4-19 濃厚端成分 A の流量 Q_A が地球潮汐の影響を受けない場合の 2 成分混合モデル

流量 Q のとき $C = \frac{Q_A C_A + Q_B C_B}{Q}$

流量が $Q + \Delta Q$ に増加したとき

$$C - \Delta C = \frac{Q_A C_A + (Q_B + \Delta Q) C_B}{Q + \Delta Q}$$

$$\therefore \Delta C = \frac{Q_A \cdot \Delta Q}{Q(Q + \Delta Q)} (C_A - C_B)$$

$$\text{よって } \frac{\Delta C}{C} \leq \frac{\Delta C}{C_A - C_B} = \frac{Q_A}{Q} \cdot \frac{\Delta Q}{Q + \Delta Q} < \frac{\Delta Q}{Q}$$

であり、観測事実を説明できない。

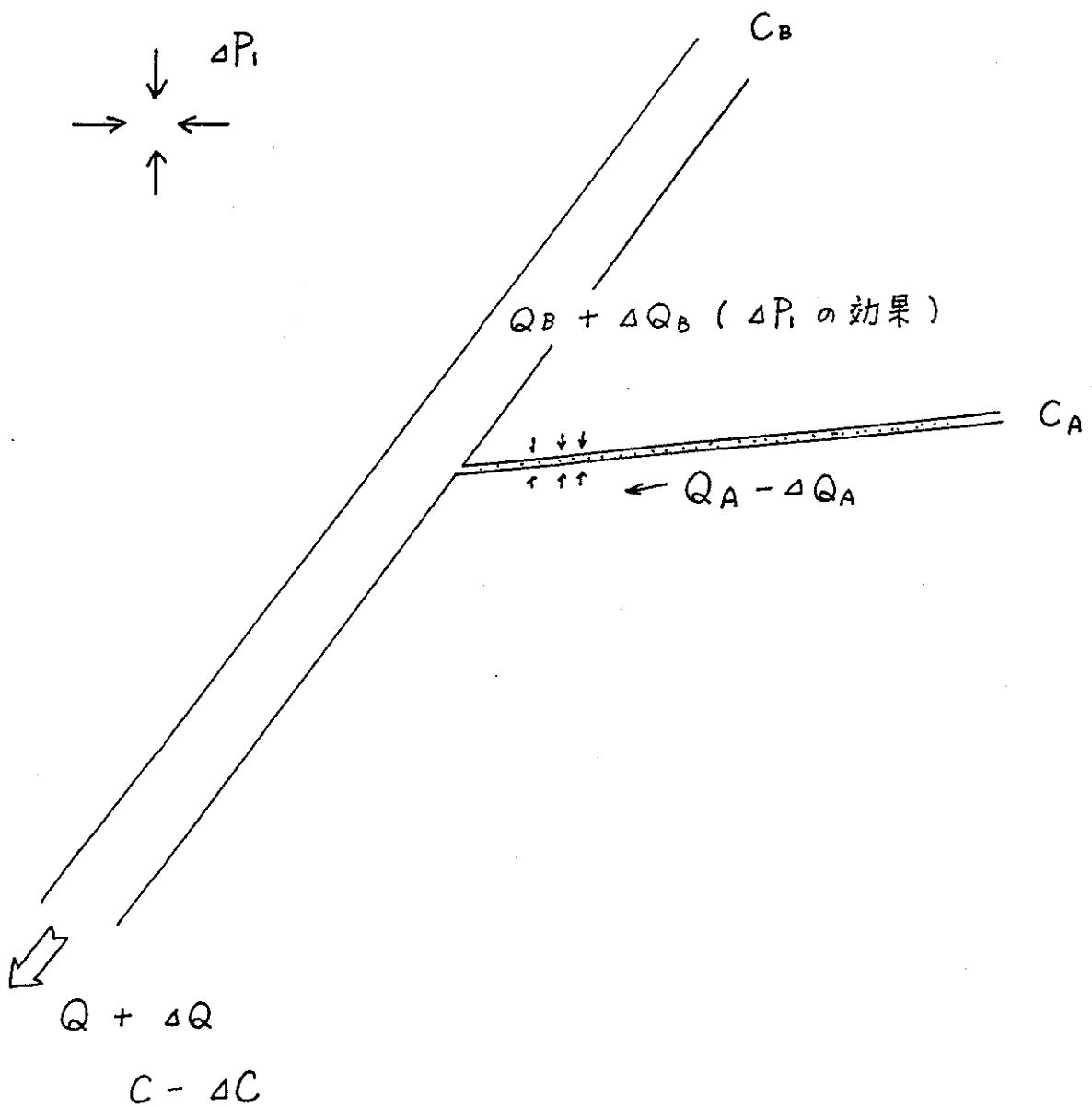


図 3.4-20 各端成分流量が地球潮汐に対して逆の影響を受ける 2 成分混合モデル

表 3.4-7 安定同位体分析 (δD 、 $\delta^{18}O$) 結果一覧

分析機関：電力中央研究所

分析精度： $\delta D \pm 1.0\% (1\sigma)$
 $\delta^{18}O \pm 0.05\% (1\sigma)$

| 採水日* | 8月10日、12日 | | 前回試験結果 | | 水質区分 |
|---------------------|------------|----------------|------------|----------------|------|
| | δD | $\delta^{18}O$ | δD | $\delta^{18}O$ | |
| KN - 1 ↓ 8/10 | -65.4 | -10.4 | - | - | - |
| 2 | -64.7 | -10.5 | - | - | - |
| 3 | -69.3 | -10.8 | -69.0 | -10.9 | - |
| 4 | -67.1 | -10.3 | -64.0 | -10.2 | - |
| 5 | -66.0 | -10.5 | - | - | - |
| KO - 1 ↓ 8/12 | -63.6 | -10.6 | - | - | ① |
| 2 | -69.5 | -10.8 | -66.2 | -10.5 | ② |
| 3 | -63.7 | -10.5 | -66.2 | -10.2 | ① |
| 4 | -65.2 | -10.3 | -63.9 | -10.5 | ④ |
| 5 | -64.3 | -10.2 | -66.5 | -10.4 | ③ |
| 6 | -64.2 | -10.2 | -70.4 | -10.3 | ① |
| 7 | -65.7 | -10.2 | - | - | ② |
| 8 | -67.1 | -10.3 | -62.6 | -10.2 | ⑥ |
| 9 | -69.4 | -10.8 | - | - | ⑤ |
| KH - 1 - 1 | -66.9 | -10.5 | -66.7 | -10.4 | - |
| 2 | -75.4 | -11.2 | -76.2 | -11.3 | - |
| 3 | -73.9 | -11.2 | -73.9 | -11.4 | - |
| 4 | -77.7 | -11.4 | -71.6 | -11.5 | - |
| 5 | -78.9 | -11.6 | -78.2 | -12.1 | - |
| KWP - 2 | - | -10.4 | - | - | - |
| KWQ - 1 | -69.3 | -10.5 | - | - | - |

*) 8/10には、大峰NW坑道真中付近で発破をかけている。

前回試験結果：KN→1986年調査での値、KO→1988年12月調査での値

KH→1989年3月調査での値

3.4.3 今後の課題

地下水理観測として、主に地震観測地点付近における湧水量ならびに水質（電気伝導度、安定同位体比）の経時変化を測定した結果、湧水量および電気伝導度の経時変化に地球潮汐、気圧等の影響が少なからず存在することが明らかになった。本研究の目的である地震による地下水流动への影響を調べる場合には、湧水量および電気伝導度の実測値から、地球潮汐、気圧の影響を分離させる必要がある。そのためには、今後以下の観測を実施する必要がある。

- (1) 今年度試験的に実施した坑内湧水量の経時変化の高精度測定の拡大
 - 1) 長期的な観測を継続できるような測定装置の改良
 - 2) 測定データの一般化を図るための多地点での測定
 - 3) 水質と関連付けて湧水量変動を解析できるように、より低流量の湧水を対象にできるための測定精度の向上
 - 4) 坑内湧水量に影響すると思われる坑内気圧および降雨の観測
 - (2) 電気伝導度の現場における連続自動測定
 - 1) 測定電極の長期安定性を確保した測定システムの導入
 - 2) 電気伝導度に影響を与える水温との組合せ測定による精度の確保
 - 3) 地震動観測、流量観測システムとの連係
- 以上の湧水量、電気伝導度の連続測定に加えて、地震による地下水流动への影響調査をさらに充実させるために、以下の測定を実施することが望まれる。
- 1) 平成元年度より実施しているボーリング孔内水圧KWP-1、KWP-2、KWP-3を地震前後および平常時において高精度に測定可能にする記録システムの改良
 - 2) 地震前後における湧水の化学成分分析を可能にするために、現場連続自動採水装置の開発
 - 3) 岩盤内に掘削されたボーリング孔を利用した亀裂水の挙動観測（間隙水圧、湧水量、水質）

4. 地層処分施設の耐震性評価手法の検討

4.1 まえがき

ここでは、釜石鉱山における地震観測データ等を基礎資料として地層処分施設の耐震性評価手法について検討した。今年度は3ヵ年の1年目にあたり、平成2年度の研究成果を取りまとめた。

まず4.2節では、地層処分施設の概念を整理するとともに耐震設計上問題となる特有な事象を抽出し、その特有事象に対する検討方針を考察した。

つきの4.3節では、処分施設に類似の地下構造物の耐震設計法の現状を指針・基準により調査した。これは現行の指針・基準がどのような耐震設計手法を採用しているかを把握すると同時に、設計地震力の大きさや分布などを調べたものである。

さらに4.4節においては、既往の地下地震観測に関する文献を整理して文献抄録を作成するとともに、增幅特性などを地上と地下の観測記録で比較した。さらに、地下深部での地震動特性を推定する際の参考とするため、原子力発電所の耐震設計に用いられる模擬地震波の作成方法もまとめておいた。

最後の4.5節では、地震による地下水水流変化の実例を文献により調査すると同時に、変化の理論的あるいは実験的検討例も調査した。

なお、4.3節～4.5節の研究は次年度も引き続き行う予定である。

4.2 地層処分施設の耐震性評価に特有な事象の抽出

4.2.1 地層処分施設の概念

高レベル放射性廃棄物地層処分は、数百メートルから千メートルの地下深部に廃棄物固化体（廃棄体）を埋設処分することが一般的な概念となっている。地層処分施設の耐震性を考える場合、この地下深部という特徴をまず念頭に置く必要がある。また、処分施設の建設が開始されると予想される西暦2030年頃までに発生する廃棄体は4万本程度が見込まれており、仮に深部坑道内における廃棄体の設置間隔を5mとして考えると、坑道の総延長は200kmにも及ぶことになる。さらに、坑道の離間距離を8m（坑道径を4mとして、2×坑道径を離間距離とした）として単純に矩形配置した場合、その平面的拡がりは約 $1.6\text{km} \times 1.6\text{km}$ にも達する。つまり、大規模な坑道群が地下深部に建設されることになり、例を示すと図4.2-1のようになる。

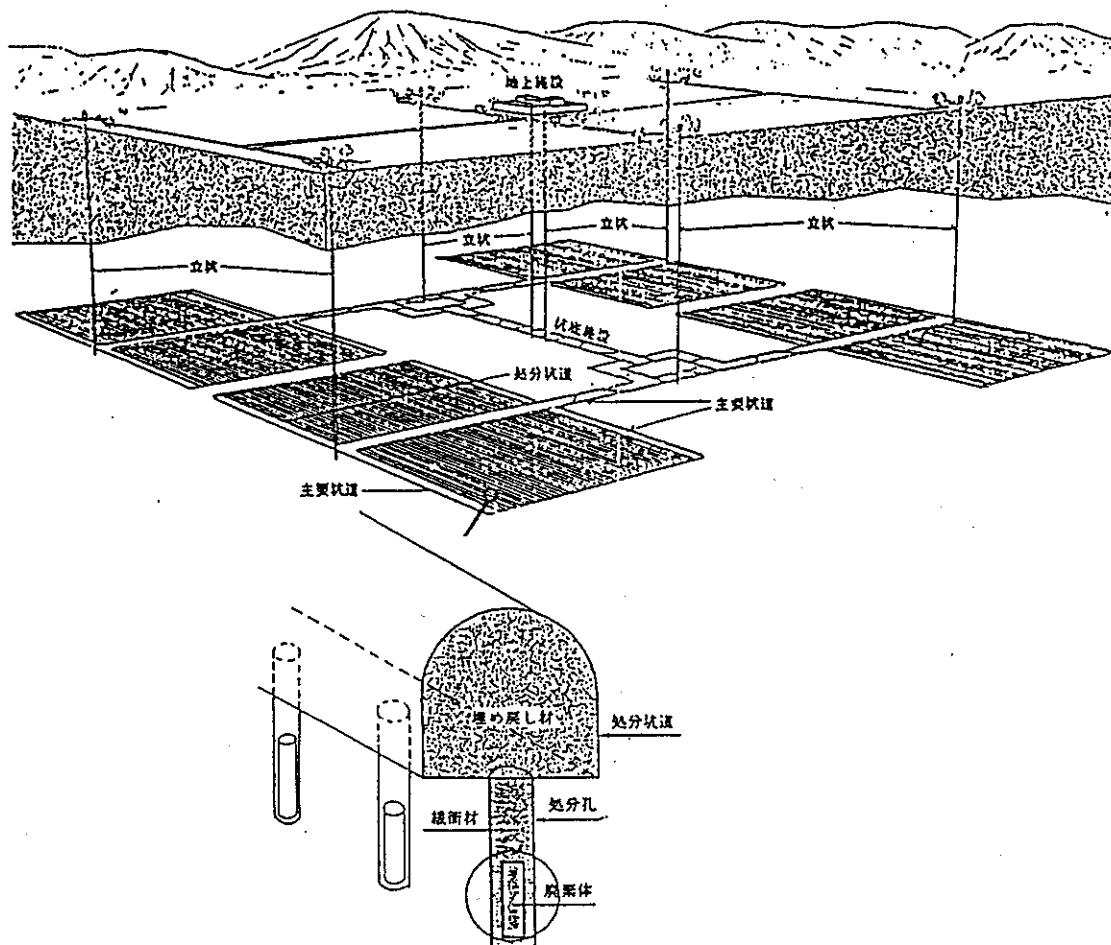


図4.2-1 高レベル放射性廃棄物地層処分施設の例

この地層処分施設をさらに各構成要素に分けると、図 4.2-2 のようなツリー図にまとめられる。また、各施設の概要を表 4.2-1 に示す。

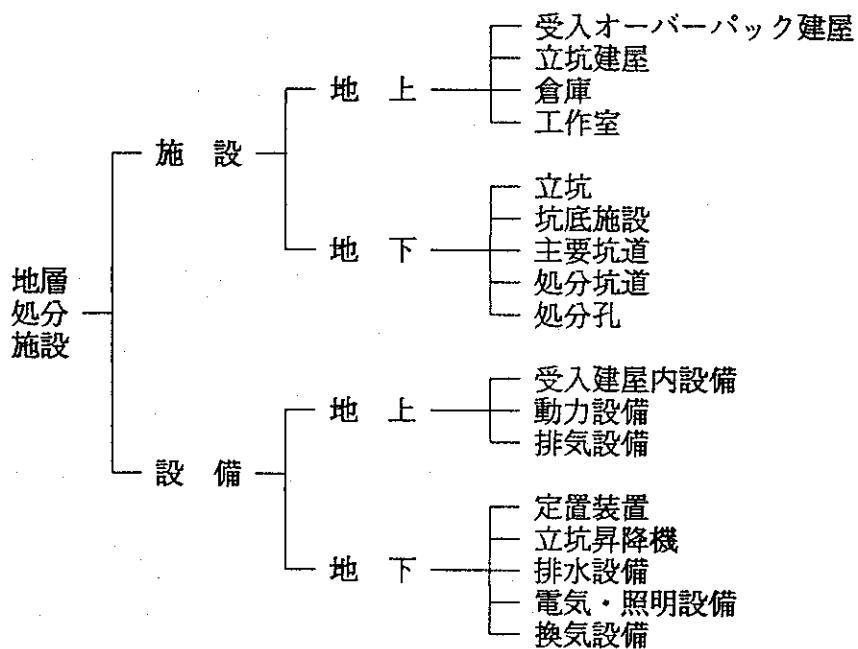


図 4.2-2 地層処分施設の構成要素

表 4.2-1 処分施設の概要

| 施設名 | | 概要 |
|------|-------------|--|
| 地上施設 | 受入オーバーパック建屋 | 中間貯蔵施設から搬送されてきた廃棄体を受け入れ、オーバーパック等を行うための施設 |
| | 立坑建屋 | 1)廃棄体搬送用、2)運転員の昇降及び各種機器の搬送用、3)排気用、4)建設時人荷搬送及びズリ搬送用、5)閉鎖資材搬送用の計5種類の立坑に付随する建屋 |
| | 倉庫 | 各種資材の保管庫 |
| | 工作室 | 電気・機械等補修作業を行う施設 |
| 地下施設 | 立坑 | 1)廃棄体搬送用、2)運転員の昇降及び各種機器の搬送用、3)排気用、4)建設時人荷搬送及びズリ搬送用、5)閉鎖資材搬送用の計5種類の目的の異なる地上と地下をつなぐ垂直坑 |
| | 坑底施設 | 地下施設の機能を維持するための各種設備を設置した坑道および空洞 |
| | 主要坑道 | 地表から立坑を経由して坑底施設へ運搬した廃棄体を処分坑道へ円滑に搬送するための坑道 |
| | 処分坑道 | 処分孔が設置された坑道 |
| | 処分孔 | 廃棄体を最終的に格納する場所 |

4.2.2 耐震性評価の概念

前節で述べた地層処分施設のうち、ここで取り扱う耐震性評価の対象とする施設は立坑、坑道等の地下施設に限定する。地層処分施設のうち地下施設の耐震性評価を検討するにあたって、以下に示す評価概念に着目する必要がある。

(1) 閉鎖前と閉鎖後

地層処分施設を構成する各坑道は、廃棄物の搬入後埋戻されるため、埋戻しの前後で施設の形態が異なる。そのため、耐震検討の目的および対象が変わる。特に、閉鎖後処分場の安全性に関する担保期間が数万年に及ぶ超長期間であるため、数回にわたって地震力を受けることが考えられ、地震耐力の劣化といった面も考慮の対象となる。

(2) 立坑と地下深部坑道（処分坑道、主要坑道および坑底施設）

立坑は地上と地下を連絡する坑道であり、耐震性を考える場合地上から地下深部に至る縦方向の地震動の変化を考慮する必要があり、一方、地下深部坑道は 2 km 四方程度の面的な拡がりを持つため、水平方向の地震動の変化を考慮する必要がある。

(3) 空洞の安定性と地下水挙動（水質）

地層処分を考える場合、通常の地下構造物で対象となる空洞の力学的な安定性と、放射性核種の漏洩に重要な役割を果たす地下水挙動の 2 面性が挙げられる。また、地震による地下水の化学的な変化についても着眼点の一つと考えられる。

4.2.3 耐震性評価に特有な事象の抽出

前節の耐震性評価の概念に基づき、地層処分施設の耐震性評価に特有な事象を以下に抽出する。なお、ここでは空洞掘削時ならびに常時の空洞安定性については検討外とした。

(1) 閉鎖前と閉鎖後

閉鎖前では、立坑、坑道の地震時安定性評価が必要であり、評価対象期間は約百年と考えられる。

閉鎖後は、人工バリアと天然バリアの安全性能に影響を及ぼす事象を挙げる必要がある。まず処分ピットに着目すると、廃棄体周囲の緩衝材に対する影響として地震時の慣性力や間隙水圧の変化に伴って変形が生じ、性能上必要な緩衝材の厚みが失われるという懸念が考えられる。次に処分坑道をはじめとする各坑道に対しては、埋戻し材への繰り返し発生する地震の影響として、埋戻し材が塑性変形し、やがて水みちとなる空隙が生じるという懸念が考えられる。一方、天然バリアである岩盤に対しては、地下坑道群が建設されることによる岩盤応力の変化が引き金となって新たな亀裂が地震時に発生する事象が考えられる。この時、数千年から一万年の間に起こる最大規模の地震力の設定が従来にはない問題となる。

(2) 立坑と地下深部坑道

数百メートルから千メートルの長さを持つ立坑への地震の影響としては、地層が変わることで動的物性が変化し、この場合通常の動的解析を実施すると、動的物性に比例した形で地盤の応答が得られる。この結果、層理面を境にしてギャップが生じ、垂直搬入装置や配管等の設備に支障をもたらすことが懸念される。但し、実際の深部の地震動特性が地層の変化で顕著に変わるか否かは定かではない。

一方、2 km四方程度の面的な拡がりを持つ地下深部坑道に関しては、地震波入力による単一の空洞の安定性のほかに、空洞間の干渉の問題がある。特に、斜め入射による影響は検討すべき事項である。たとえば、一定距離間隔で続く坑道が、特定の周期の地震波に対して横方向に干渉し合い、坑道周辺の岩盤に大きなせん断変形を生じさせる懸念がある。

(3) 空洞の安定性と地下水挙動

空洞の安定性に関しては、(1)および(2)で示した事象が全てと考えられるので、ここでは地下水挙動（水質）について事象の抽出を行う。

地震現象に伴う地下水の変化は、これまでの地表付近の記録においては見られるが、どの程度の深さまで影響を及ぼしているかは定かでない。仮に、影響があるとすると天然バリアである岩盤中の地下水流动場が変化したことを意味するので重要な事象と考えられる。

この他、水質については地震による微小亀裂の発生に伴って、岩石中の流体包有物の流出が生じ、塩素濃度が変化する等の現象が予想され、化学的な環境の変化に伴う事象が考えられる。

以上に抽出した事象を表 4.2-2 にまとめる。

表 4.2-2 耐震性評価に特有な事象のまとめ

| No | 耐震設計に特有な事象 | 対象物 | 考慮すべき期間 | 備 考 |
|----|--|-------------|---------|---|
| 1 | 立坑を対象とした層理面位置のギャップの発生による被害 | 立 坑 | 約百年 | 解析では指摘される事象であるが、実際に起これうる事象であるか否かはわからない |
| 2 | 地下深部坑道部の単独あるいは複数の干渉による周辺岩盤のせん断変形破壊 | 地下深部坑道周辺の岩盤 | 約百年 | 広大な平面的拡がりを持つ地層処分施設の固有の問題として懸念される事象である |
| 3 | 掘削応力に加えた地震時応力による坑道周囲での新たな亀裂（緩み域）の発生 | 坑道周囲の岩盤 | 数万年 | 考慮すべき期間が非常に長く地震力の設定や水みちとしても評価法の確立が必要 |
| 4 | 繰り返し発生する地震による緩衝材の塑性変形に伴う厚みの減少 | 緩衝材 | 数万年 | 考慮すべき期間が長いことによる地震力の設定や従来にない事象のため検討が必要 |
| 5 | 埋戻し材の塑性変形に伴う空隙の発生 | 埋戻し材 | 数万年 | |
| 6 | 地震時の地下水位変化データから推測される岩盤中の地下水流动場の変化 | 岩盤中の地下水流动場 | 数万年 | 考慮すべき期間が非常に長く地震力の設定や地震との因果関係等困難な問題が多くある |
| 7 | 地震時の微小亀裂の発生に伴う、流体包有物の流出によって予想される塩素濃度等の変化 | 地下水の水質 | 数万年 | |

4.2.4 特有な事象に対する検討方針

ここでは、表 4.2-2 に示された 7 項目の特有な事象について、その検討方針を示す。検討の方法としては以下の方法が考えられる。

(1) 解析的検討

数値解析手法等を用いて検討する。事象の発生メカニズムが比較的明確なものに適する。

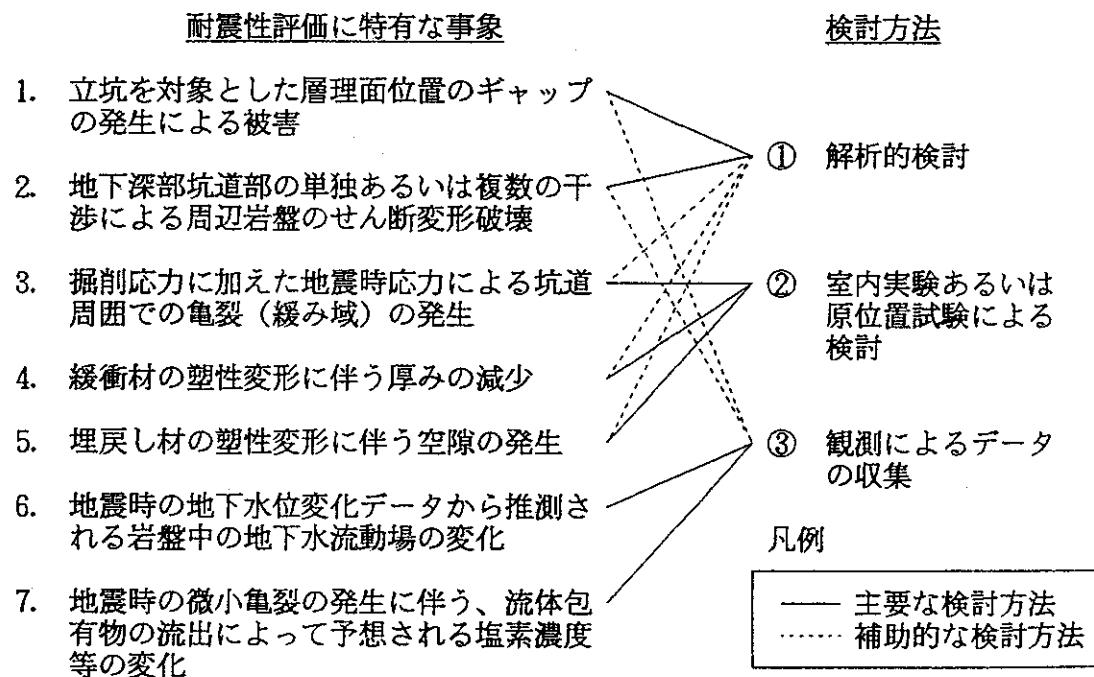
(2) 室内実験あるいは原位置試験による検討

現象の因果関係が比較的明らかとなっているが、発生メカニズムについては研究すべき課題がある事象に適する。

(3) 観測によるデータの収集

現象の因果関係がハッキリしないため、試行錯誤の研究が不可欠な事象に必要。

以上 3 つの検討方法を 7 項目の特有な事象にあてはめると以下のようになる。



4.3 地下構造物の耐震設計法の実例調査

4.3.1 調査目的

本章では、地下構造物を含む土木関連・原子力関連の耐震設計指針・基準について調査する。本調査において地下構造物以外の指針・基準をも対象とするのは、現状の耐震設計法や設計震度を明確にし、その中で地下構造物の基準の位置付けを明らかにすることを目的の1つとしていることによる。さらに、本調査においては、地層処分施設に関連あると判断される記述についてまとめ、今後の検討の一資料とすることを目的とする。

4.3.2 調査対象

調査対象とする指針・基準は、つきの項目に沿って選抜する。

- (1) 地下構造物を対象とするもの
- (2) 現在、広く使用されているもの
- (3) その指針・基準の考え方が後のものに影響を与えたと判断されるもの

以上より、対象とするものは、表 4.3-1 に示す15指針・基準とした。表には発行年月の順に並べてあり、地下構造物を対象としている指針はつきの2編である。

8. 水封式燃料地下貯蔵施設技術指針

9. 地下貯油施設技術指針（案）

表 4.3-1 調査した指針・基準一覧

| | 名 称 | 発行機関 | 発行年月 |
|----|--|---------|----------|
| 1 | 本州四国連絡橋耐震設計指針 | 土木学会 | 1967年 |
| 2 | 石油パイプライン技術基準（案） | 日本道路協会 | 1974年 6月 |
| 3 | 沈埋トンネル耐震設計指針（案） | 土木学会 | 1975年 3月 |
| 4 | 新耐震設計法（案） | 建設省 | 1977年 3月 |
| 5 | 本州四国連絡橋技術関係基準集 耐震設計基準・同解説 | 海洋架橋調査会 | 1978年 4月 |
| 6 | LNG地下式貯槽（土木設備）設計指針 | 電気事業連合会 | 1978年10月 |
| 7 | 水道施設耐震工法指針・解説 | 日本水道協会 | 1979年 |
| 8 | 水封式燃料地下貯蔵施設技術指針 | 電気事業連合会 | 1980年 3月 |
| 9 | 地下貯油施設技術指針（案） | 土木学会 | 1980年 5月 |
| 10 | LNG地下式貯槽指針 | 日本瓦斯協会 | 1981年12月 |
| 11 | ガス導管耐震設計指針 | 日本瓦斯協会 | 1982年 3月 |
| 12 | 原子力発電所地質・地盤の調査・試験法 および地盤の耐震安定性の評価手法 | 土木学会 | 1985年 8月 |
| 13 | 共同溝設計指針 | 日本水道協会 | 1986年 3月 |
| 14 | 原子力発電所耐震設計技術指針 | 日本電気協会 | 1987年 |
| 15 | 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 | 日本水道協会 | 1990年 2月 |

4.3.3 調査結果

調査結果の一覧表を表 4.3-2 に示す。調査項目として、つぎの 4 項目を取り上げてまとめた。

- ・対象構造物
- ・耐震設計法
- ・設計震度
- ・動的解析

調査結果より、つぎのことが言える。

一般的な規定

- (1) 耐震設計手法の基本としては、いずれの指針・基準も震度法（修正震度法を含む）を取り上げており、基準震度は 0.15～0.2 を設定している。鉛直震度は水平震度の 1/2 としている。
- (2) 比較的軟質な地盤中の構造物には応答変位法の規定が見られる。この手法は地盤ばねを介して地盤の水平変位を入力する手法であり、地盤変位は実測によるもの、応答計算によるもの、平均応答スペクトルを用いるものがある。
- (3) 動的解析を規定しているものは、1. と 5. の本州四国連絡橋に関連する指針・基準と 3. の沈埋トンネル耐震設計指針（案）であるが、その他のものも必要に応じて行うとしている。また、動的解析が必要な場合としては
 - ① 静的解析で不十分と考えられる場合
 - ② 地層の変化が著しい場合
 - ③ 構造物のディメンジョンが従来のものと大きく異なる場合
 - ④ 全体系の地震応答の概略を調べる場合
 - ⑤ 隣接構造物の影響を調べる場合
 - ⑥ 構造物が大規模で地震時の挙動が複雑な場合などとしている。
- (4) 動的解析に用いる入力地震動については、基盤入力で最大値 100～150gal 程度を規定している。また、地震波は 3 種類程度の波形を用いるものとしている。

地下構造物について

(5) 比較的深い岩盤内に設置される地下貯蔵施設を対象とした指針として

8. 「水封式燃料地下貯蔵施設技術指針」

9. 「地下貯油施設技術指針（案）」

が挙げられる。

両指針とも耐震設計の考え方は共通しており、耐震性の検討は震度法を基本とし、必要に応じて動的解析を実施するとしている。これらは、他の指針と同様な考え方である。しかし一方では、「掘削および地山自重について岩盤の安定性に十分余裕があれば、耐震設計計算は省略してよい」との記述がみられる。この記述は他の指針・基準で見られないものであり、堅固な岩盤での耐震性の優位性を認めているものと考えられる。

4.3.4 地層処分施設への適用性

既往の指針・基準の調査から、地層処分施設への適用性を考える場合、つきの項目がポイントになると判断される。

(1) 基本設計法としては震度法によることになると判断されるが、設計震度の設定について

地下タンクを対象構造物とする指針8.と9.では0.105～0.15の範囲の設定となっている。これらよりさらに深い部分にある処分場の震度として、さらに小さくできるかどうか検討する必要がある。一方、地層処分施設はこれらの構造物に比較して、①地下深い、②重要度が高い、③評価すべき期間が長い（空洞閉鎖まで約100年）等の特徴があり、今後設計震度を検討する必要がある。

(2) 岩盤が健全であれば、耐震優位性は認められていると判断されるが、岩盤の健全性の定量的評価について

指針8.と9.で堅固な岩盤の耐震優位性を認めているが、(1)の震度との関係で岩盤健全性の定量的評価ができれば合理的な設計法になると考えられる。

表 4.3-2(1) 耐震設計指針・基準(その1)

| 基準・指針 | 対象構造物 | 耐震設計法 | 設計震度 | 動的解析 | 特徴 |
|---|---------------------------|--|--|---|------------------------------------|
| 1) 本州四国連絡橋 耐震設計指針 土木学会 1967年 | 本州四国連絡橋 | 静的解析 震度法 修正震度法 動的解析 基本的検討は動的解析 | 震度法における設計震度 ・震度法における設計 ・基準震度は0.2とし、地盤の種別により補正する。 ・修正震度法における設計 ・設計震度 K_D は、応答が最も卓越する周期に相当する基本応答震度につきの補正を行って定める。 $K_D = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \mu_4 \cdot \mu_5 \cdot K_R$ ここに、 K_R : 基本応答震度 μ_1 : 地震の最大加速度の補正係数 μ_2 : 高次モードの影響による補正係数 μ_3 : 等分布震度に換算するための補正係数 μ_4 : 構造部材の運動の方向に関する補正係数 μ_5 : 経験的事実に基づく補正係数 鉛直震度は水平震度の1/2 | 動的解析法における入力地震動 ・速度応答スペクトルをもとにして、応答の最大値を計算する。 ・地震動は基礎地盤上において次の2種類の地震記録を最大加速度200galに縮小または拡大したものを用いる。 1) 架橋記録付近で記録された地震記録のうち代表的なもの。 2) 1940年El Centroにおける強震記録。 | 動的解析を基本とし、その最大加速度は基礎地盤上で200galとする。 |
| 2) 石油パイプライン技術基準(案) 日本道路協会 1974年6月 | 道路法による道路 に設置する石油パイプライン | 静的解析 震度法 応答変位法 | 震度法における設計震度 $k_{0h} = 0.15 \cdot v_1 \cdot v_2$ k_{0h} : 設計基盤面における水平震度 v_1 : 地域別補正係数 v_2 : 土地利用区分別補正係数 鉛直震度は水平震度の1/2 応答変位法における地盤変位 $U_h = 0.203 \cdot T \cdot S_v \cdot k_{0h}$ U_h : 表層地盤面の水平変位振幅 T : 表層地盤の固有周期 S_v : 応答速度の基準値 | 規定なし | 震度法・応答変位法による静的解析を基本とする。 |

表 4.3-2(2) 耐震設計指針・基準(その2)

| | | | | | |
|--|-----------|---|--|--|-----------------------------------|
| 3) 沈埋トンネル耐震設計指針(案) 土木学会 1975年3月 | 沈埋トンネル | 静的解析 震度法 応答変位法 動的解析 建設地点の地形・地質などの影響を含む全体系に対する動的解析に基づく設計を行い、地震時の安全性を確認しなければならない。 | 震度法における設計震度 設計水平震度は次式による。 $K_h = v_z \cdot v_l \cdot v_s \cdot k_{0h}$ <p>ここに、</p> $K_h : \text{設計水平震度}$ $v_z : \text{地域別補正係数}$ $v_l : \text{重要度補正係数}$ $v_s : \text{地盤別補正係数}$ $k_{0h} : \text{設計震度の基準値}$ <p>鉛直震度は水平震度の1/2</p> <p>応答変位法における地盤変位</p> $U_h = (2/\pi^2) \cdot S_v \cdot T \cdot A_{0h} \cdot v_l$ $U_h : \text{地表面の水平変位振幅}$ $S_v : \text{基盤での応答速度値}$ $T : \text{表層地盤の固有周期}$ $A_{0h} : \text{基盤面での水平加速度}$ | 動的解析法における入力地震動 $A_{0h} = v_z \cdot A_0$ $A_{0h} : \text{最大水平加速度}$ $v_z : \text{地域別補正係数}$ $A_0 : \text{標準水平加速度}$ <p>(100~150gal程度)</p> <p>建設地点の地震の強さ、沈埋トンネルの重要度などを考慮して定める。</p> | 静的解析の設計震度に重要度補正係数を導入している。 |
| 4) 新耐震設計法(案) 建設省 1977年3月 | 土木構造物と建築物 | 静的解析 震度法 応答変位法 動的解析 必要に応じて行う。 | 震度法における設計震度 $K_h = \Delta_1 \cdot \Delta_3 \cdot K_0 / B_G$ $K_h : \text{基盤面における設計水平震度}$ $\Delta_1 : \text{地域係数}(1.0, 0.85, 0.70)$ $\Delta_3 : \text{その他の補正係数}(1.0, 0.5)$ $K_0 : \text{標準設計水平震度}0.2$ $B_G : \text{表層地盤の增幅係数(一般に}4/3\sim 2\text{の範囲)}$ <p>応答変位法における地盤変位</p> $U_h = (2/\pi^2) \cdot S_v \cdot T \cdot K_H$ $U_h : \text{地表面の水平変位振幅}$ $S_v : \text{単位震度あたりの応答速度}$ $T : \text{表層地盤の基本固有周期}$ $K_H : \text{表層地盤に作用させる設計震度}$ | 動的解析法における入力地震動 地震動の工学的特性は、強震記録等を勘案して設定する。 少なくとも3種類の波形を用いる。 | 静的解析を基本とし、必要に応じて動的解析を行う。 |
| 5) 本州四国連絡橋技術関係基準表耐震設計基準・同解説 海洋架橋調査会 1978年4月 | 本州四国連絡橋 | 静的解析 修正震度法 動的解析 基本的検討は動的解析とする。 | 修正震度法における設計震度 震度の設定は、1)と同様であるが、最大加速度を200galから180galに低減している。 | 動的解析法における入力地震動 設計に考慮すべき地震はつぎのものとする。 100年当たり1~2回の発生を予想されるマグニチュード8程度の地震。 設計加速度は架設地点の下部構造支持地盤において、180galとする。 | 動的解析を基本とし、下部構造支持地盤において、180galとする。 |

表 4.3-2(3) 耐震設計指針・基準(その3)

| | | | | | |
|--|--|---|---|---|---------------------------------------|
| 6) LNG地下式貯槽 (土木設備)設計 指針 電気事業連合会 1978年10月 | 軟質地盤でのコン クリート構造の円 筒形堅形LNG地下 式貯槽 | 静的解析 震度法 応答変位法 動的解析 必要に応じて行 う。 | 震度法における設計震度 次のA,Bにより総合的に判断して決定する。 A. 地震動強度期待値の地域区分図より定める。 $k_{0h} = v k_0$ k_{0h} : 基盤における水平震度 v : 地域別補正係数 k_0 : 基準設計震度0.15 B. 地震活動度に関して詳細な調査を行い、建設地点の周辺に発生する地震を高い信頼度で推定できる場合は、想定した地震をもとに当該地点の震度を推定する。なお、推定にあたって貯槽の耐用年数も考慮する。 鉛直震度は水平震度の1/2 応答変位法における地盤変位 $U_h = (2/\pi^2) \cdot S_v \cdot T \cdot k_{0h}$ U_h : 地表面の水平変位振幅 S_v : 設計基盤面で単位震度あたりの応答速度値 T : 表層地盤の基本固有周期 k_{0h} : 設計基盤面において定めた水平震度 | 動的解析法における入力地震動 建設地点の地震活動度の地域的特性、 表層地盤の振動特性ならびに、地震波動の特性を考慮して決定するものとする。 地震波動として、鉛直下方より伝播する実体波と、表層部を水平方向に伝播する表面波の2種類を考慮する。 波形特性の異なる地震波を適宜選定する。 | 動的解析では鉛直下方からの実体波、水平方向からの表面波の2種類を考慮する。 |
| 7) 水道施設耐震工 法指針・解説 日本水道協会 1979年 | 水道施設 | 静的解析 震度法 応答変位法 動的解析 必要に応じて行 う。 | 震度法における設計震度 $k_h = 0.75 \Delta_1 \cdot k_0$ k_h : 基盤面における設計水平震度 Δ_1 : 地域係数(1.0, 0.85, 0.70) k_0 : 標準設計水平震度(0.2を下回らない値) 鉛直震度は水平震度の1/2 応答変位法における地盤変位 $U_h = (2/\pi^2) \cdot S_u \cdot T \cdot K_H$ U_h : 地表面の水平変位振幅 S_u : 単位震度あたりの応答速度 T : 表層地盤の基本固有周期 K_H : 表層地盤に作用させる設計震度 | 規定なし | 石油パイプライン 技術基準(案)に類似する。 |

表 4.3-2(4) 耐震設計指針・基準(その4)

| | | | | | |
|--|-------------------------------|--|---|---|----------------------------------|
| 8) 水封式燃料地下貯蔵施設技術指針 電気事業連合会 1980年3月 | 水封式燃料地下貯蔵施設の設計・施工および維持管理 | 静的解析 震度法 掘削および地山自重について岩盤の安全性に十分な余裕がある場合、耐震設計計算は原則として省略してよい。 動的解析 必要に応じて行う。 | 震度法における設計震度 $K_h = 0.75K_0 \cdot \beta_1$ K_h : 基盤面における設計水平震度 K_0 : 標準設計水平震度0.2 β_1 : 地域係数(1.0, 0.85, 0.70) 鉛直震度は水平震度の1/2 | 動的解析法における入力地震動 サイトに着目し、歴史年代における過去の被害地震を考慮して定める。 入力波の選定にあたっては、その地点の地震観測値のほか、地盤、地震条件などが類似の地点の地震記録および有名地震波等を参考にする。 | 空洞掘削後に十分な安全余裕があれば耐震設計計算は省略してもよい。 |
| 9) 地下貯油施設技術指針(案) 土木学会 1980年5月 | 地下貯油施設を新たに建設し、また、これを維持管理する場合。 | 静的解析 震度法 堅固な岩盤中に建設する貯油槽については、掘削による岩盤の安定性に問題なければ耐震設計計算は省略してよい。 動的解析 必要に応じて行う。 | 震度法における設計震度 $K_{hb} = 0.75K_0 \cdot \beta_1$ K_{hb} : 設計基盤面における設計水平震度 K_0 : 標準設計水平震度0.2 β_1 : 地域係数(1.0, 0.85, 0.70) 鉛直震度は水平震度の1/2 | 動的解析法における入力地震動 $a_{hb} = a_0 \cdot \beta_1$ a_{hb} : 最大水平加速度 a_0 : 標準水平加速度150gal β_1 : 地域係数(1.0, 0.85, 0.70) 建設予定地点付近の強震記録、想定する地震の規模および地震条件を考慮して、その地点に適した周期特性の異なる波形を少なくとも3種類用いるのが望ましい。 卓越周期が比較的長い波形を入力する場合は a_0 を100galまで減じてよい。 | 堅固な岩盤中の貯油槽では、耐震設計計算は省略してよい。 |
| 10)LNG地下式貯槽指針 日本瓦斯協会 1981年12月 | LNG地下式貯槽の計画、設計、建設及び保守 | 静的解析 震度法 動的解析 必要に応じて行う。 | 震度法における設計震度 $K_H = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot K_0$ K_H : 地盤の水平震度 K_0 : 基準水平震度0.15 a_1 : 地域別補正係数(1.0, 0.85, 0.70) a_2 : 地盤種別による補正係数(1.4, 1.6, 1.8, 2.0) a_3 : 地中部分の補正係数 $a_3 = 1.0(Z/H)(1.0 - 1/a_2)$ 鉛直震度は水平震度の1/2 | 動的解析法における入力地震動 $A_H = a_1 \cdot A_0$ A_H : 最大水平加速度 a_1 : 地域別補正係数(1.0, 0.85, 0.70) A_0 : 基準水平加速度(150gal) 建設する地域の過去の地震記録、地盤調査および想定する地震規模等を考慮して、その地域に適した周期特性の異なる波形を3種以上用いる。卓越周期が比較的長い波(卓越周期が2秒を越えるもの)を入力する場合には基準水平加速度 A_0 を最低100galまで減じてよい。 | 震度法による静的解析を基本とする。 |

表 4.3-2(5) 耐震設計指針・基準（その5）

| | | | | | |
|---|-------------------------------------|--|--|--|---|
| 11) ガス導管耐震設計法 日本瓦斯協会 1982年3月 | ガス事業法に規定されるガス導管のうち、埋設管路を新設する場合の耐震設計 | 静的解析 応答変位法 | 応答変位法における設計震度 $k_{0h} = 0.15 \cdot v_1 \cdot v_2$ k_{0h} : 地盤基盤面の設計水平震度 v_1 : 重要度係数(1.0, 0.8) v_2 : 地域別補正係数(1.0, 0.8, 0.6) 応答変位法における地盤変位 $U_h = (2/n^2) \cdot T \cdot S_v \cdot k_{0h}$ U_h : 表層地盤変位 T : 表層地盤の固有周期 S_v : 単位震度当たりの応答速度 k_{0h} : 地盤基盤面における設計水平震度 | 規定なし | 石油パイプライン技術基準(案)に類似する。 |
| 12) 原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法 土木学会 1985年8月 | 原子力施設の立地 地盤および屋外重要構造物 | 静的解析 震度法 (屋外重要構造物には応答変位法について述べている。) 動的解析 静的解析によらない場合および必要とする場合 | 震度法における設計震度 ・原子力建屋基礎地盤 $K_H = n_1 \cdot K_0$ n_1 : 地域係数(1.0に固定) K_0 : 標準設計水平震度0.2 鉛直震度は水平震度の1/2 ・周辺斜面 $K_H = n_1 \cdot n_2 \cdot K_0$ n_1 : 地域係数(1.0に固定) n_2 : 増巾係数(1.5に固定) K_0 : 標準設計水平震度0.2 鉛直震度は水平震度の1/2 ・屋外重要土木構造物(応答変位法による評価) $K_H = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot K_0$ n_1 : 地域係数(1.0に固定) n_2 : 地盤条件による係数 n_3 : 上記以外の補正係数 K_0 : 標準設計震度0.2 | ・原子力建屋基礎地盤 ・周辺斜面 動的解析法における入力地震動 基準地震動 S_2 S_2 : 設計用限界地震 設計用限界地震: 地震について、活断層による地震、地震地体構造に基づく地震および直下地震のうち最も敷地に影響を与えるおそれのある地震を想定する。 ・屋外重要土木構造物 基準地震動 $S_1 \cdot S_2$ S_1 : 設計用最強地震 設計用最強地震: 過去の地震および活動度の高い活断層による地震のうち最も敷地に影響を与えるおそれのある地震を想定する。 | 原子力施設の立地 地盤について ・調査から ・試験法 ・設計用地震動 ・解析法 ・評価法 が総合的に述べられている。 |

表 4.3-2(6) 耐震設計指針・基準（その6）

| | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------|--|---|---|--|
| 13) 共同溝設計指針 日本道路協会 1986年3月 | 地下に鉄筋コンクリートの共同溝を構築する場合 | 静的解析 応答変位法 動的解析 必要に応じて行う。 | 応答変位法における地盤変位 $U_h = (2/n^2) \cdot S_v \cdot T_s$ U _h : 地表面の水平方向の変位振幅 T _s : 表層地盤の固有周期 S _v : 設計応答速度 | 規定なし | 応答変位法による静的解析を基本とする。 |
| 14) 原子力発電所耐震設計技術指針 日本電気協会 1987年 | 原子力発電所の耐震設計 | 静的解析 震度法 動的解析 必要に応じて行う。 | 震度法における設計震度 地表面において次式によるものとし、地中震度については、深度に係わりなく地表面で定義された値を用いてよい。 $K_H = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot K_0$ K _H : 設計水平震度 n ₁ : 地域による補正係数(1.0) n ₂ : 地盤条件による補正係数(1.0, 1.5) n ₃ : 上記以外の要因による係数(一般的に1.0) K ₀ : 基準水平震度0.2 鉛直震度は水平震度の1/2 | 動的解析法における入力地震動 基準地盤動 S ₁ 及び S ₂ (基準地盤動 S ₁ , S ₂ をそれぞれ設計用最強地震、設計用限界地震と呼んでいる) ・ 設計用最強地震：過去の地震及び活動度の高い活断層による地震のうち最も敷地に影響を与えるおそれのある地震を想定する。 ・ 設計用限界地震：上記設計用最強地震を上回る地震について、活断層による地震、地震地体構造に基づく地震及び直下地震のうち最も敷地に影響を与えるおそれのある地震を想定する。 鉛直震度は水平震度の1/2 | 震度法の静的解析を基本とするが、動的解析の基準地盤動として S ₁ , S ₂ を考慮する。 |

表 4.3-2(7) 耐震設計指針・基準（その7）

| | | | | | |
|--|-----------------|--|--|--|-----------------------|
| 15)道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 日本道路協会 1990年2月 | 支間200m以下の橋の耐震設計 | 静的解析 震度法 動的解析 地震時の挙動が複雑な橋は、動的解析により安全性を照査するのが望ましい。 | 震度法における設計震度 $k_h = c_Z \cdot c_G \cdot c_I \cdot c_T \cdot k_{h0}$ ここに、 k_h : 設計水平震度(小数点以下2けたに丸める) k_{h0} : 標準設計水平震度(0.2とする) c_Z : 地域別補正係数 c_G : 地盤別補正係数 c_I : 重要度別補正係数 ただし、値が0.1を下回る場合には0.1とする。 | 動的解析法における入力地震動 ・応答スペクトル法に用いる加速度応答スペクトル ・応答スペクトル法に用いる加速度応答スペクトルは、原則として耐震設計上の地盤面において与え、次式により算出するものとする。 $S = c_Z \cdot c_I \cdot c_D \cdot S_0$ ここに、 S : 応答スペクトル法に用いる加速度応答スペクトル(1gal単位に丸める) c_Z : 地域別補正係数 c_I : 重要度別補正係数 c_D : 減衰定数別補正係数であり、モード減衰定数 h_i に応じて次式により算出するものとする $c_D = 1.5/(40h_i + 1) + 0.5$ S_0 : 標準加速度応答スペクトル(gal) ・時刻歴応答解析法に用いる地震入力 ・時刻歴応答解析法に用いる地震入力としては、地盤条件や橋の動的特性等を考慮して、既往の強震記録の中から規定する応答スペクトル法に用いる加速度応答スペクトルSに近い特性を有する強震記録を選定するものとする。 | 動的解析法では、応答スペクトル法を用いる。 |
|--|-----------------|--|--|--|-----------------------|

4.4 地下深部での地震動特性

4.4.1 地下深部の地震動特性評価のための基本的考え方

第2章で述べたように、高レベル放射性廃棄物地層処分は地下数百メートルから千メートルの深部に大規模な坑道群を掘削して、そこに廃棄物固化体を埋設処分するという概念が一般的になっている。したがって、地下千メートル付近での地震動特性の把握は、処分施設の耐震設計においては重要なポイントである。

地震動特性を耐震設計の観点から評価するときは、設計手法との関連で考える必要がある。すなわち、耐震設計を静的手法で行う場合は地震の影響を震度（震度法）あるいは変位（応答変位法）で評価するので、それらの大きさや空間的な分布を求めることがある。一方、動的手法による場合は時刻歴応答解析法が用いられると思われる。耐震設計用基盤面での入射波の特性が評価対象となる。ここに、震度法とは構造物に作用する地震力を構造物の自重に設計震度をかけた静的な慣性力に置換して、断面力など安定性の評価に必要な諸量は静力学的手法で求める方法である。また、応答変位法は地下タンクのような地下構造物の耐震設計によく用いられ、構造物の影響のない遠方地盤での地震時変位を地盤バネを介して構造物に作用させる方法であり、断面力の算定などは震度法の場合と同じである。さらに、時刻歴応答解析法は構造物を動力学的モデルに置換してその地震時挙動を時々刻々追跡する手法である。

第3章の地下構造物の耐震設計法の実例調査から明らかなように、既存構造物の耐震設計では、構造物の重要度により設計手法は異なるけれども静的手法としては震度法と応答変位法が、動的手法としては時刻歴応答解析法が用いられている。処分施設の場合、おもな検討対象は処分坑道および立坑であることを考えると（第2章参照）、耐震設計法としては震度法と時刻歴応答解析法が有力である。したがって、地震動特性としての評価項目は、震度法で必要な設計震度の大きさとその空間的な分布および時刻歴応答解析法で用いる入射波の最大振幅、周波数特性、継続時間などである。

地震動の特性評価においては実地震の観測記録が重要である。しかし、地表付近では沖積地盤のみならず岩盤上においても多くの地震観測が行われており、それらの解析から得られた知見に基づき模擬地震動（人工地震波）の作成も可能となっているが、深部地下（地下千メートル付近）での記録はほとんどない。したがって、現状では、地表付近での地震動特性から解析あるいは観測記録を手掛かりに深部地下での地震動

特性を推定することになる。このように考えると評価プロセスは、①地上での地震動特性の評価、②地上と地下の地震動の比較、③地下深部での地震動特性の推定、の順となる。この過程で、①においては原子力発電所耐震設計技術指針（1987年）に述べられている模擬地震波が、②において細倉鉱山や釜石鉱山などのような地上と地下での同時観測記録が参考になる。そこで以下の 4.2.2 では原子力発電所の耐震設計用に用いられている模擬地震動の作成方法をまとめ、4.4.3 と 4.4.4 では既往のいくつかの地下地震観測を紹介すると同時に、観測記録を地上と地下の比較の観点から検討する。

なお、本章の研究は 3 年間の予定であるので、最終の目標である‘地下深部での地震動特性’の評価は次年度以降に行う。

4.4.2 原子力発電所の模擬地震動の作成

(1) 基準地震動

原子力発電所の施設は、その重要度に応じて設計用地震力を決め、耐震設計を行っている。各施設の重要度は、表 4.4-1 の定義により決められる。それぞれの重要度に対しては、表 4.4-2 の設計用地震力を与えて設計される。特に、重要度分類Aクラス以上の施設では、耐震設計は静的設計の他に基準地震動を与えて動的設計を行うことになっている。基準地震動とは、敷地サイトに影響を与える基準の地震により、敷地での第三紀層かそれ以前の硬質地盤 ($V_s = 0.7 \text{ km/s}$ 以上) の著しい風化を受けていない水平で平坦な表面(解放基盤表面)で予測される地震動である。

図 4.4-1 に基準地震動の策定フローを示す。

表 4.4-1 耐震重要度分類の定義

| | |
|-------|---|
| Asクラス | その破損により冷却材喪失を引き起こすおそれもあるもの、原子炉を緊急停止させ、かつ、安全停止状態に維持するために必要なもの、使用済燃料を貯蔵するための施設及び原子炉格納容器 |
| Aクラス | 原子炉建屋事故の際に放射線障害から公衆を守るために必要なもの及びその機能喪失が公衆に放射線障害を及ぼすおそれのあるものでAsクラスに属する以外のもの |
| Bクラス | 高放射能性物質に関連するものであって、As及びAクラスに属する以外のもの |
| Cクラス | 放射性物質にかかる施設で、上記耐震クラスに属さないもの、及び放射線安全に關係しない施設 |

表 4.4-2 建物・構築物系の耐震重要度ごとの設計用地震力

| 耐震重要度 | 設計用地震力 | 水 平 | 鉛 直 |
|-------|-------------|-----------|--------------|
| As | 基準地震動 S_2 | A_{s2} | $1/2 A_{s2}$ |
| | 基準地震動 S_1 | A_{s1} | $1/2 A_{s1}$ |
| | 静 的 震 度 | $3.0 C_1$ | C_v |
| A | 基準地震動 S_1 | A_{s1} | $1/2 A_{s1}$ |
| | 静 的 震 度 | $3.0 C_1$ | C_v |
| B | 静 的 震 度 | $1.5 C_1$ | - |
| C | 静 的 震 度 | C_1 | - |

C_1 : 層せん断力係数 C_v : 鉛直震度

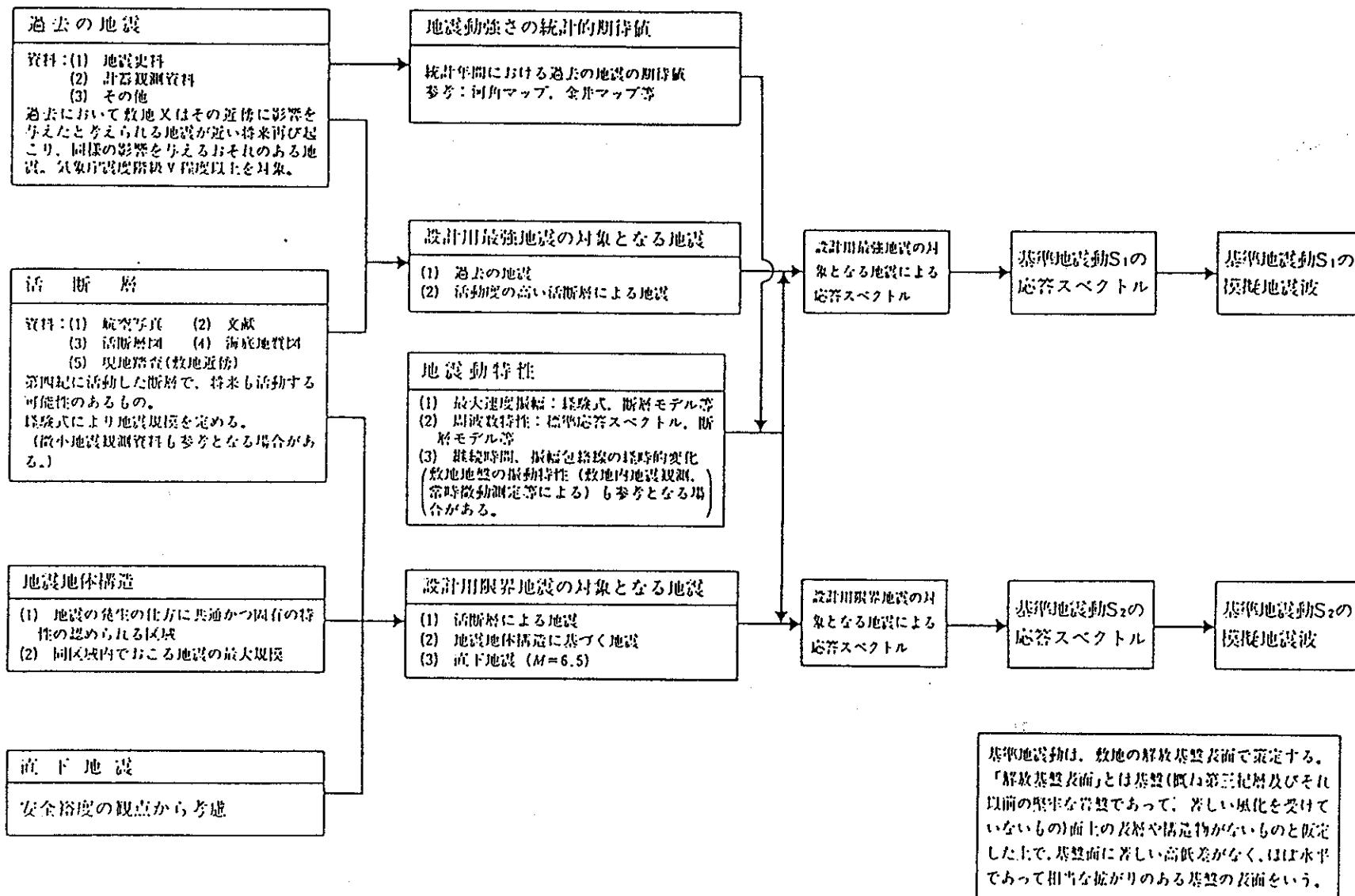


図 4.4-1 基準地盤動の策定フロー

本節以降の部分では、基準地震動として用いられることが多い模擬地震動の作成方法についてまとめる。

(2) 考慮すべき地震

基準地震動 S_1, S_2 を励起する地震を、それぞれ設計用最強地震および設計用限界地震と呼ぶ。

設計用最強地震は、歴史的資料から過去において敷地またはその近傍に気象庁震度階で震度V程度以上の影響を与えたと考えられる地震が再び起こり、同様の影響を与える恐れのある地震、または近い将来敷地に影響を与える恐れのある活動度の高い活断層による地震のうちから最も影響の大きい地震と定義されている。

設計用限界地震は、地震学的見地に立脚し、設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質および地震地体構造に基づき工学的見地から検討を加え、最も影響の大きい地震と定義されている。さらに、設計用限界地震の1つとしてマグニチュード6.5、震源距離10kmの直下地震も考慮する。日本周辺の地震地体構造から推定される最大規模の地震を図4.4-2に示す。

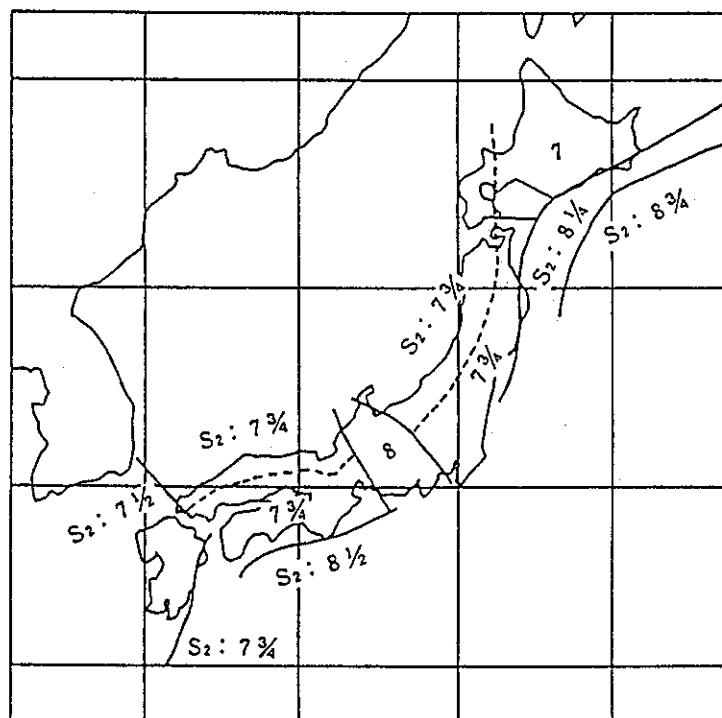


図 4.4-2 日本周辺で推定される地震の最大規模

(3) 地震動の最大振幅

地震動の最大振幅（最大加速度、最大速度、最大変位）については、震源特性と波動伝播経路の特性とが地震動に影響する主たる要素であると考えて、マグニチュードと震央距離の関係で表した実験式が各種提案されている。これらの内、代表的な金井式について述べる。

金井は、日立鉱山の地下 300m の地震動観測および松代群発地震の記録をもとにして基盤での加速度 a_0 (gal)、速度 v_0 (kine)、変位 d_0 (cm) について以下のを提案した。

$$a_0 = \frac{1}{T} \times 10^{0.61M - (1.66 + \frac{3.60}{X}) \log X + (0.167 - \frac{1.83}{X})}$$

$$v_0 = 10^{0.61M - (1.66 + \frac{3.60}{X}) \log X - (0.631 + \frac{1.83}{X})}$$

$$d_0 = T \times 10^{0.61M - (1.66 + \frac{3.60}{X}) \log X - (1.430 + \frac{1.83}{X})}$$

(4) 地震動の周波数特性

地震動の周波数特性は、震源特性、地震波の伝播経路の特性、観測点近傍の局地的な地盤構造の特性、地震計の特性等の相乗効果によって決定される。ここで、局地的な地盤構造の特性を除いた岩盤での地震動の周波数特性の評価法の一つである大崎の手法について述べる。

大崎スペクトルは、M 6, 7, 8 の 3 つの地震の、近地、中間、遠地の 3 地点における合計 9 個の地震動の安全裕度を含んだ応答スペクトル形状を、5 つのコントロールポイントで定めている。ただし、地震動は最大ピーク速度を 10kine に規準化している。大崎スペクトルは減衰 5 % の加速度応答スペクトル S_A を円振動数 ω で除した擬似速度応答スペクトル S_V であり、周期 0.02 秒から 2 秒までで規定している。表 4.4-3 に大崎スペクトルのコントロール・ポイントを、図 4.4-3 にスペクトル形状を示す。

表 4.4-3 大崎スペクトルのコントロール・ポイント

| Field | Magnitude, <i>M</i> | Epicentral Distance <i>d</i> (km) | Control Points | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | A | | B | | C | | D | | E | |
| | | | <i>T_A</i> | <i>S_V</i> | <i>T_B</i> | <i>S_V</i> | <i>T_C</i> | <i>S_V</i> | <i>T_D</i> | <i>S_V</i> | <i>T_E</i> | <i>S_V</i> |
| Near | 8 | 25 | 0.02 | 0.6 | 0.10 | 10 | 0.30 | 30 | 0.50 | 30 | 2.0 | 12 |
| | 7 | 10 | | 0.7 | 0.10 | 11 | 0.23 | 24 | 0.45 | 24 | | 7 |
| | 6 | 5 | | 1.2 | 0.10 | 17 | 0.13 | 21 | 0.35 | 21 | | 3 |
| Intermediate | 8 | 120 | 0.02 | 0.5 | 0.20 | 18 | 0.35 | 32 | 1.00 | 32 | 2.0 | 26 |
| | 7 | 45 | | 0.5 | 0.13 | 11 | 0.33 | 28 | 0.80 | 28 | | 19 |
| | 6 | 15 | | 0.6 | 0.10 | 10 | 0.25 | 24 | 0.60 | 24 | | 12 |
| Far | 8 | 350 | | 0.5 | 0.22 | 26 | 0.37 | 44 | 1.20 | 44 | | 42 |
| | 7 | 150 | | 0.5 | 0.14 | 15 | 0.35 | 38 | 0.90 | 38 | | 32 |
| | 6 | 60 | | 0.5 | 0.10 | 10 | 0.33 | 33 | 0.70 | 33 | | 20 |

T : 周期 (s)

S_V : 速度応答スペクトル値 (kine)

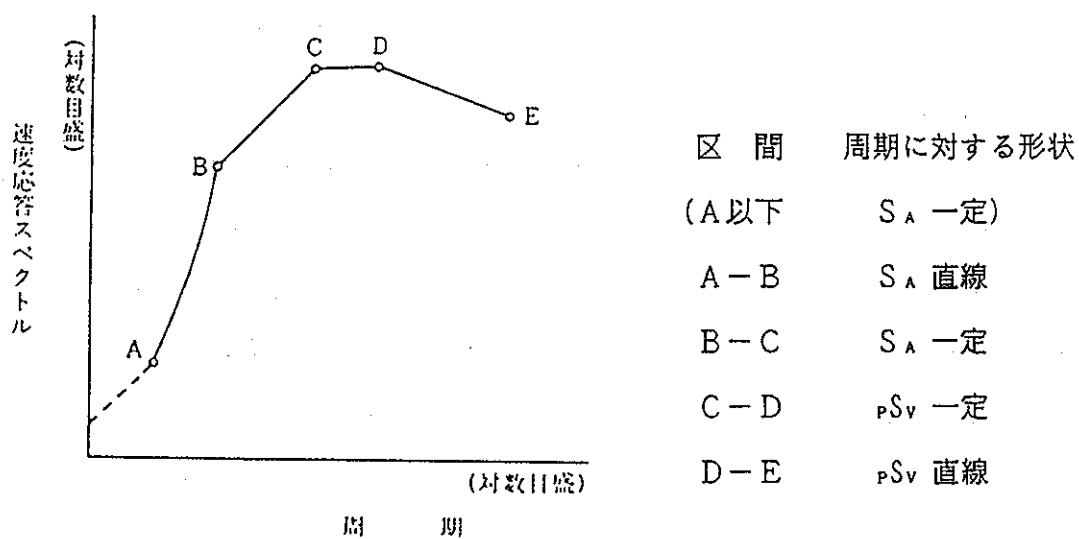


図 4.4-3 大崎スペクトルの形状

(5) 地震動の経時変化

地震動の継続時間は、断層の破壊に要する時間、地震波の観測点までの伝達に要する時間、地震波の伝播経路、特に観測点近傍の局所的な軟弱地盤での地震波の重複反射による地震動継続時間の伸びなど、種々の要因によって影響されるため、これらの要因を考慮して地震動の継続時間を求めることは難しい。そこで、マグニチュードMのみを変数として、観測記録に基づいた実験式がいくつか提案されているが、よく使われる関係式は次式 (Hisada & Ando) である。

$$\log T_d = 0.31M - 0.774$$

ただし、この式で継続時間 T_d は加速度波形の立ち上がり時刻からピーク値の10%の振幅になるまでの時刻である。

振幅包絡線の経時変化については、大崎により図 4.4-4 のモデルが提案されている。このモデルは Jennings 型のモデルを修正したものであり、包絡線の変化点時刻 T_b , T_c は、 T_d との比で与えられている。

| マグニチュード | T_b/T_d | T_c/T_d |
|---------|-----------|-----------|
| 8 | 0.08 | 0.46 |
| 7 | 0.12 | 0.50 |
| 6 | 0.16 | 0.54 |

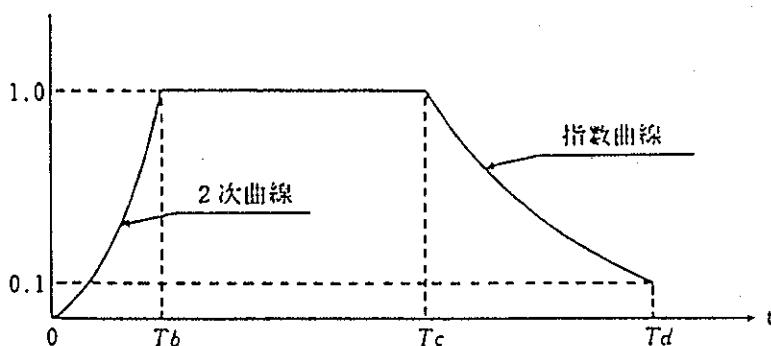


図 4.4-4 加速度波形の振幅包絡線の例

(6) 模擬地震波の作成

基準地震動 S_1 , S_2 の模擬地震波は、前項の地震動特性において述べた継続時間と振幅包絡線の経時的变化に基づいて、それぞれの応答スペクトルに適合するように作成される。模擬地震波の作成法は、さまざまな手法があるが、現在多く用いられているのは、正弦波の重ね合せによって目標とする応答スペクトルに適合するよ

うに作成する方法である。重ね合せられた時刻歴加速度波形 $X(t)$ は、下式のように表される。

$$X(t) = E(T) \sum_1^N A_i \cdot \sin(\omega_i t + \phi_i)$$

$X(t)$: 加速度波形

ω_i : 角振動数

$E(T)$: 振幅包絡線

A_i : 各振動数成分の振幅

N : A_i の重ね合せ個数

ϕ_i : 位相角

さらに上記手法も、用いる位相や振幅包絡線により、以下のように分けられる。

- ① 実地震動の位相特性を用いて作成する方法
- ② 一様乱数とした位相と図 4.4-4 のような振幅包絡線を使用する方法
- ③ 一様乱数とした位相と、対象周期範囲別に形状を変えた振幅包絡線を使用する方法
- ④ 位相特性をパルス位相、指数関数位相及び乱数位相の混合とする方法

作成された模擬地震波の目標とする応答スペクトルへの適合度 $R(T)$ は、下記により判定する。ただし、応答スペクトルの減衰は 5 % とする。

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T \leq 2.0)$$

T : 周期 (s)

$S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

この判定条件を満足しない場合は、適切な補正を行って満足するまで繰り返す。

以上の作成例を図 4.4-5 に示す。

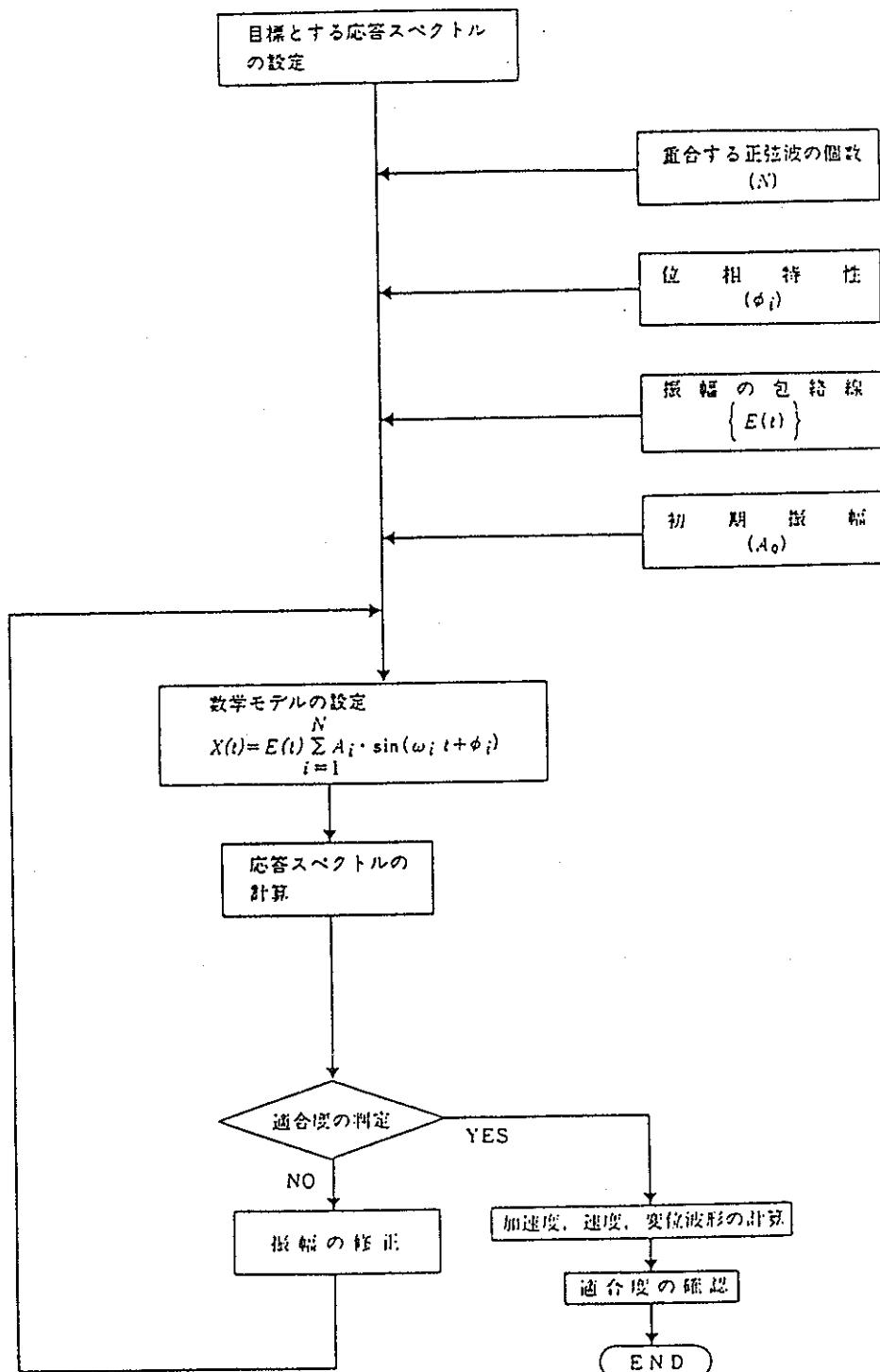


図 4.4-5 模擬地震波作成のフロー

4.4.3 既往の地震観測例

地中地震観測の目的は、地震動特性の解明と地盤・構造物の相互作用解明の2つに大別される。

ここでは、主に岩盤内での地震動特性の知見を得るために、図4.4-6¹⁾に示す地下発電所、鉱山、トンネルなどの岩盤内構造物を対象とした地震観測結果を調査する。

図中の城山水力発電所、細倉鉱山、釜石鉱山の3地点については、以下に地震計設置位置を示し、得られた知見について述べることとし、図中の他の観測点については文献抄録の形で本編の最後に添付するものとする。

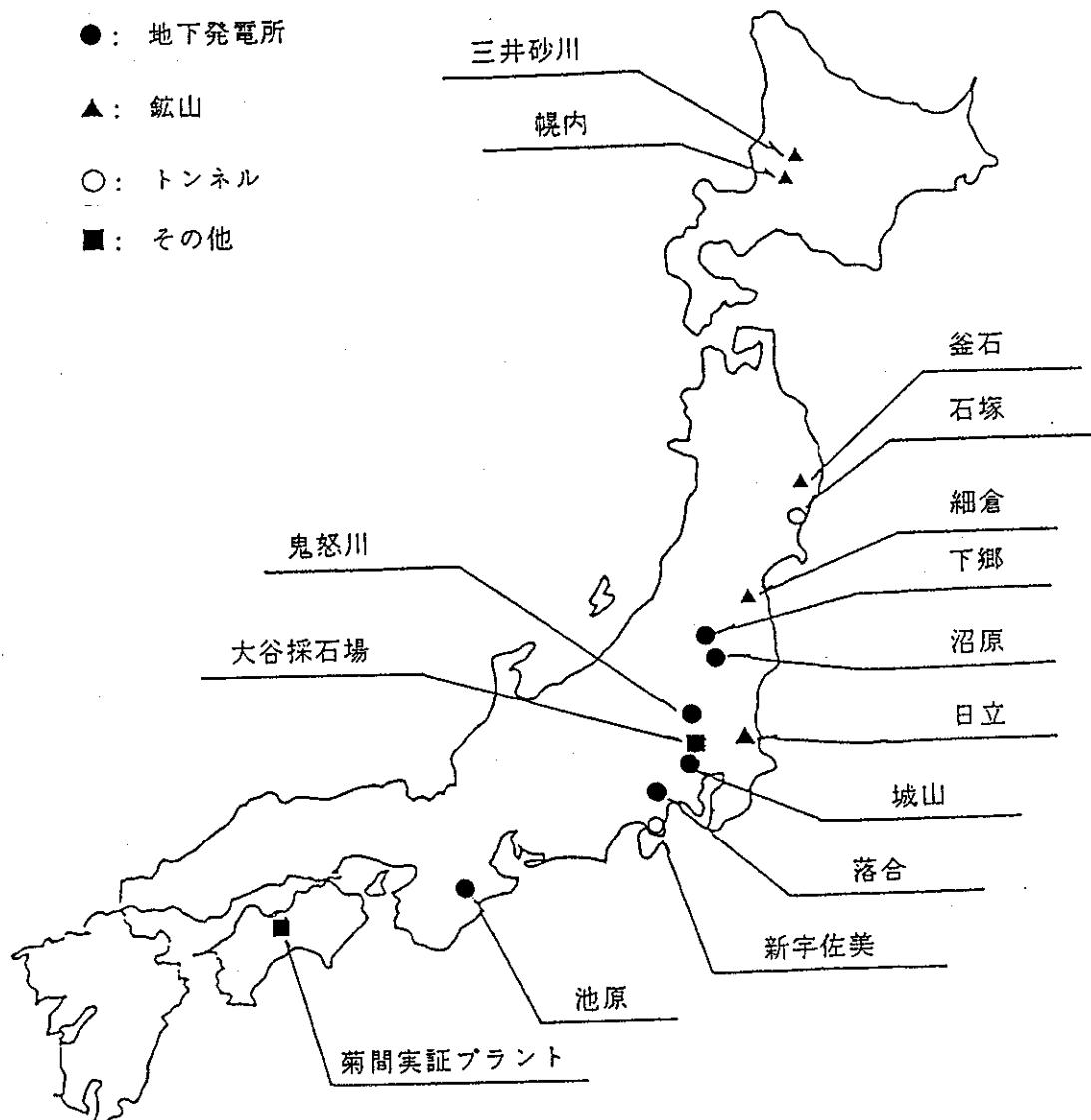


図 4.4-6 地震観測サイト位置図

(1) 城山水力発電所での観測および結果²⁾

① 観測概要

城山水力発電所は神奈川県北部（北緯35度36分、東経 139度17分）に位置し、発電所周辺は中世層の小仏層群に属する千枚岩状粘板岩、砂岩、およびそれらの互層から成っている。地表部の風化層を除いて、縦波速度は3.4～4.3 km/sである（横波速度は不明）。

観測は加速度計とひずみ計を用いて発電所空洞を中心に行なわれている。加速度計の配置を図 4.4-7 に示す。A-1～A-4 は発電所空洞内部に、B-1 は調圧水槽への連絡空洞内に、C-1～C-3 は地上部（C-3 は事務所の屋上）に設置されている。

観測開始以来 164個の地震が観測されたが、比較的振幅が大きく、原波形の再現度が良好な19個の記録を解析して以下のような知見が得られている。解析された観測記録はマグニチュードが3以上で、C-1 での最大加速度がほとんど 1 gal 以上のものである。

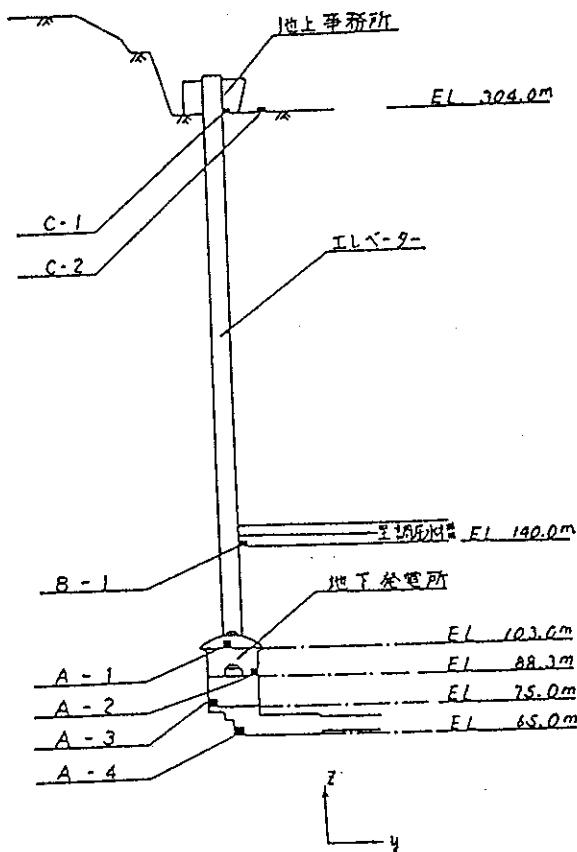


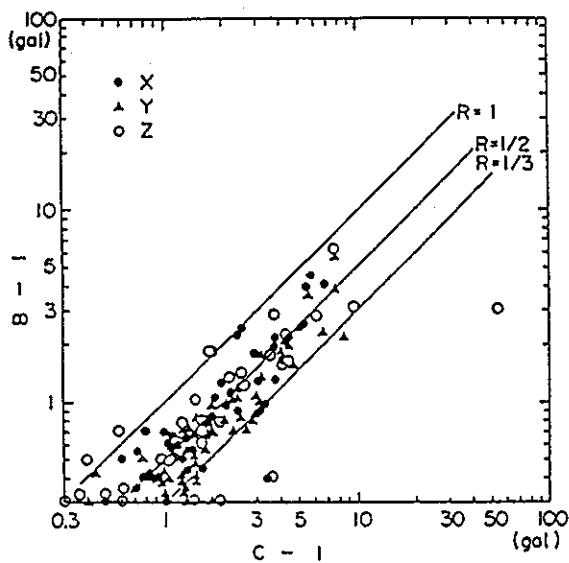
図 4.4-7 地震計設置位置（全体、断面図）

② 最大加速度に関する知見

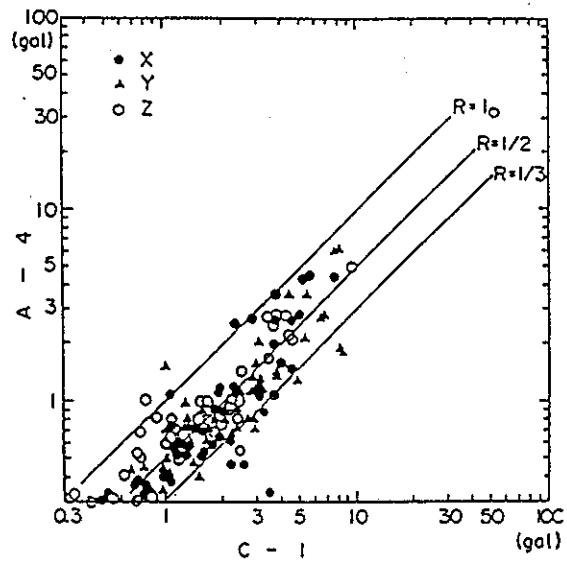
(a) 地下と地上の最大加速度比

図 4.4-8 および図 4.4-9 はおのおの C-1 と B-1 および C-1 と A-4 との比較であるが、C-1 にくらべて B-1 および A-4 での最大加速度は $1/3 \sim 1$ であり、とくに $1/2$ 前後に集中している。すなわち、地下部の最大加速度は地上部の約 $1/2$ に減少している。

なお、C-1 と C-2 の比較から C-1 には建物の影響はほとんど含まれていないこと、A-4 と B-1 の比較から A-4 は空洞掘削の影響をあまり受けていることが分かっているので¹⁾、この知見は空洞の存在しない岩盤にも適用できる。



Relation of C-1 and B-1



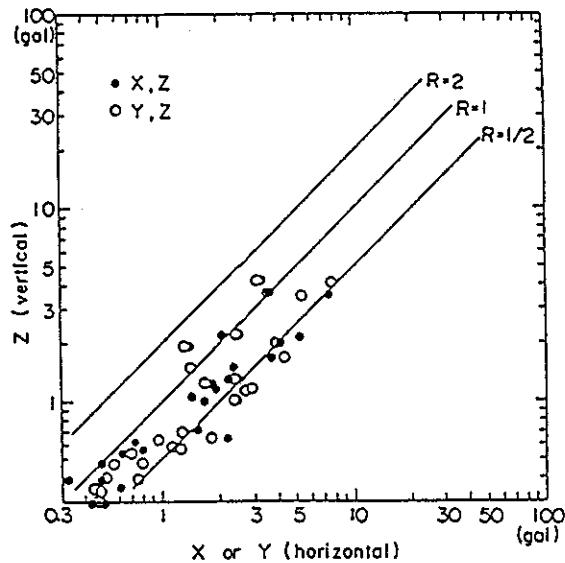
Relation of C-1 and A-4

図 4.4-8 地上 (C-1) と地下 (B-1)
との最大加速度比

図 4.4-9 地上 (C-1) と地下空洞底部
(A-4) との最大加速度比

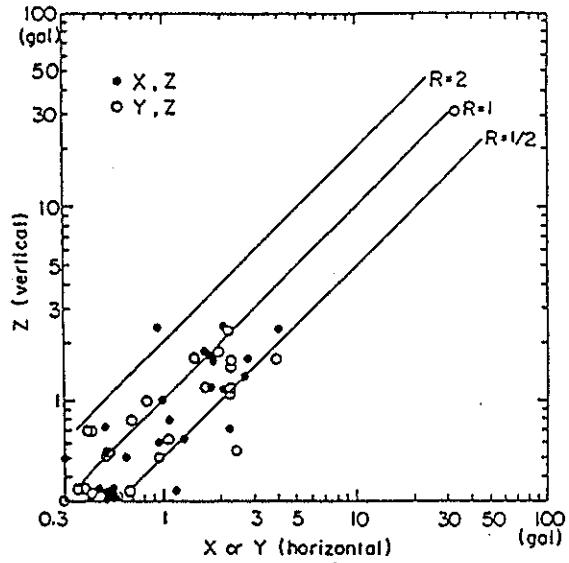
(b) 上下動と水平動の最大加速度比

図 4.4-10 と 図 4.4-11 は C-1 と B-1 における最大加速度の水平成分と上下成分の相関を示したものであるが、水平成分に対する上下成分の比は、地上においては $1/2 \sim 1$ の範囲に集中しているのに対して、地下におけるこの比は地上に比較して大きい。すなわち、地下に行くに従って、水平成分に対する上下成分の比は大きくなる傾向にある。



Relation of horizontal acc. and vertical acc. at C-1

図 4.4-10 地上部(C-1)における上下動と水平動との最大加速度比



Relation of horizontal acc. and vertical one at B-1

図 4.4-11 地下部(B-1)における上下動と水平動との最大加速度比

(c) 最大加速度の推定式

水平方向の最大加速度 (\bar{A}_{\max})、震源距離 (X)、マグニチュード (M) の関係を

$$\bar{A}_{\max} = 10^{aM - b \log_{10} X + c}$$

と仮定して、重回帰分析より係数 a、b、cを決めて以下の式を得ている。

$$\text{地上部 (C-1)} \quad \bar{A}_{\max} = 10^{0.41M - 1.34 \log_{10} X + 0.92}$$

$$\text{地下部 (B-1)} \quad \bar{A}_{\max} = 10^{0.45M - 1.44 \log_{10} X + 0.60}$$

ちなみに、C-1 での X 成分に関する実測値との対応は図 4.4-12 のようである。

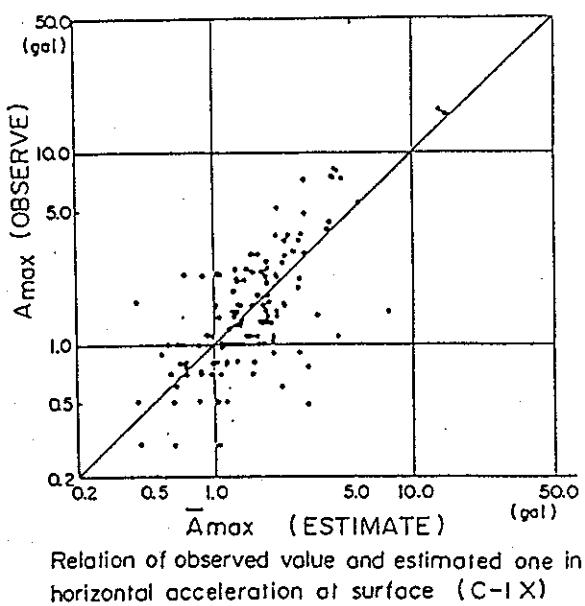


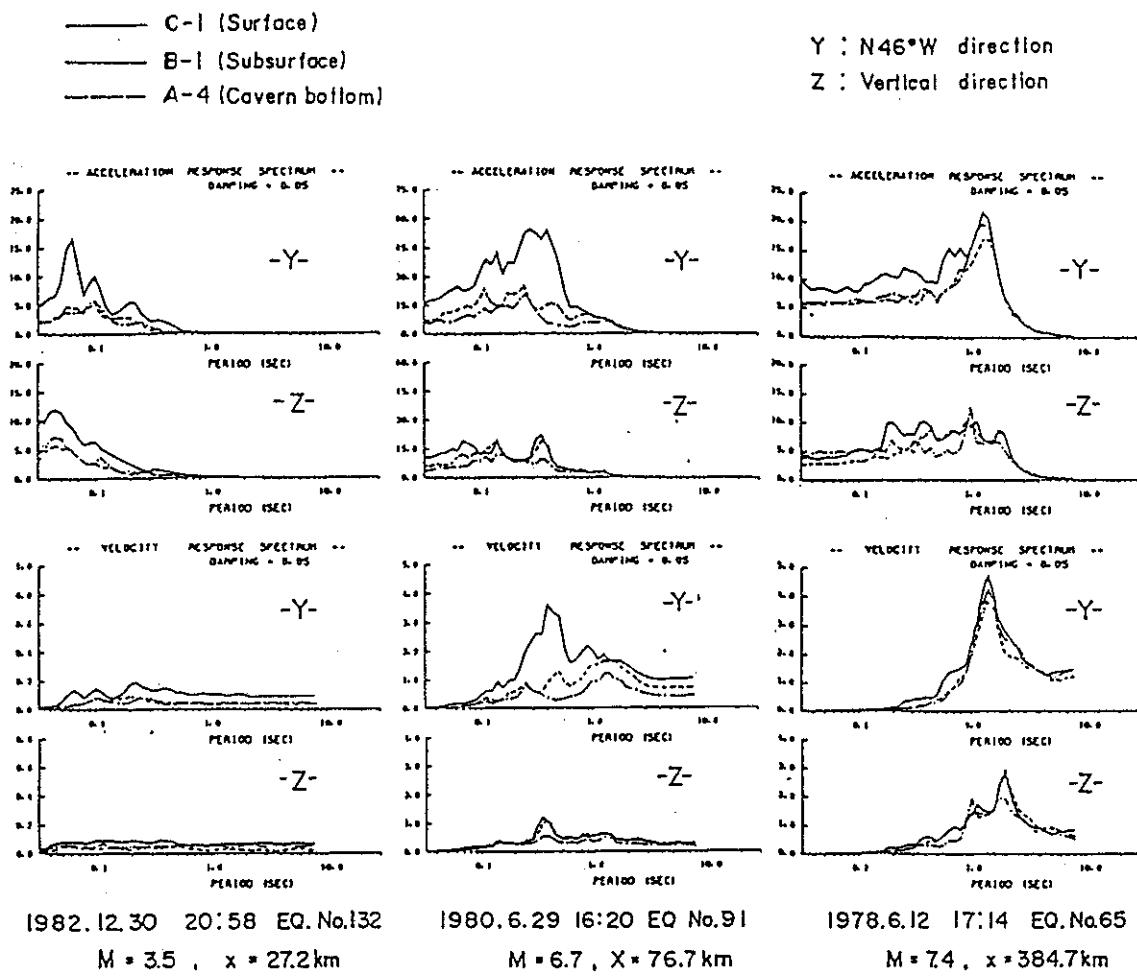
図 4.4-12 予測値 \bar{A}_{\max} と実測値 A_{\max} との相関図

③ 周波数特性に関する知見

(a) 応答スペクトル

図 4.4-13は近距離、中距離および遠距離の3種類の地震について、C-1、B-1およびA-4での記録から水平および上下成分の絶対加速度応答スペクトルと相対速度応答スペクトルを求めたものである。この図からつきのような考察を行っている。

- ・ 近距離地震は短周期成分が卓越するが、震源距離が長くなるにつれて卓越周期は長周期成分へ移行する傾向がある。
- ・ 地上部では明瞭な卓越周期が存在するが地下部でのスペクトル形状はほぼフラットである。
- ・ 地上部と地下部の応答スペクトルの差は震源距離が短い地震ほど顕著である。
- ・ 上下動に関する地上部と地下部の差は水平動より少なく、とくに遠距離地震ではほとんど認められない。



Acc. response spectrum and vel. response spectrum.

図 4.4-13 絶対加速度応答スペクトル・相対速度応答スペクトル

(b) スペクトル強度

スペクトル強度(S. I.)および修正スペクトル強度(M. S. I.)とも、地上(C-1)に対する地下(A-4)の比は水平動で $1/3 \sim 1$ 、上下動で $1/2 \sim 1$ の範囲にあり、最大加速度と同様に地下部では地上部に比較してS. I.およびM. S. I.とも軽減される。

ちなみに、スペクトル強度(S. I.)は地震動が構造物に及ぼす影響を表わす一つの指標と考えられており、次式で定義されるものである。

$$S. I. = \int_{\alpha}^{\beta} S_v(T, h) dT$$

S_v ; 相対速度応答スペクトル

T ; 1質点系の非減衰固有周期 (sec)

h ; 減衰定数 ($h=0.05$)

α, β ; 積分区分 ($\alpha=0.04\text{sec}, \beta=5.0\text{sec}$)

そして、修正スペクトル強度(M. S. I.)は相対速度応答スペクトルの代わりに絶対加速度応答スペクトルを用いて算出したものである。

(c) 伝達関数

図 4.4-14に示すように、A-4 でのパワースペクトルに対する C-1でのパワースペクトルの比を取ると、これはA-4 に対する C-1の伝達関数である。この伝達関数は水平動、上下動ともに、周波数が高い領域でいくぶん大きな値になる傾向をもっている。これは地上から地下へ行っても、高周波成分が少なくとも増大する傾向にはないことを意味している。

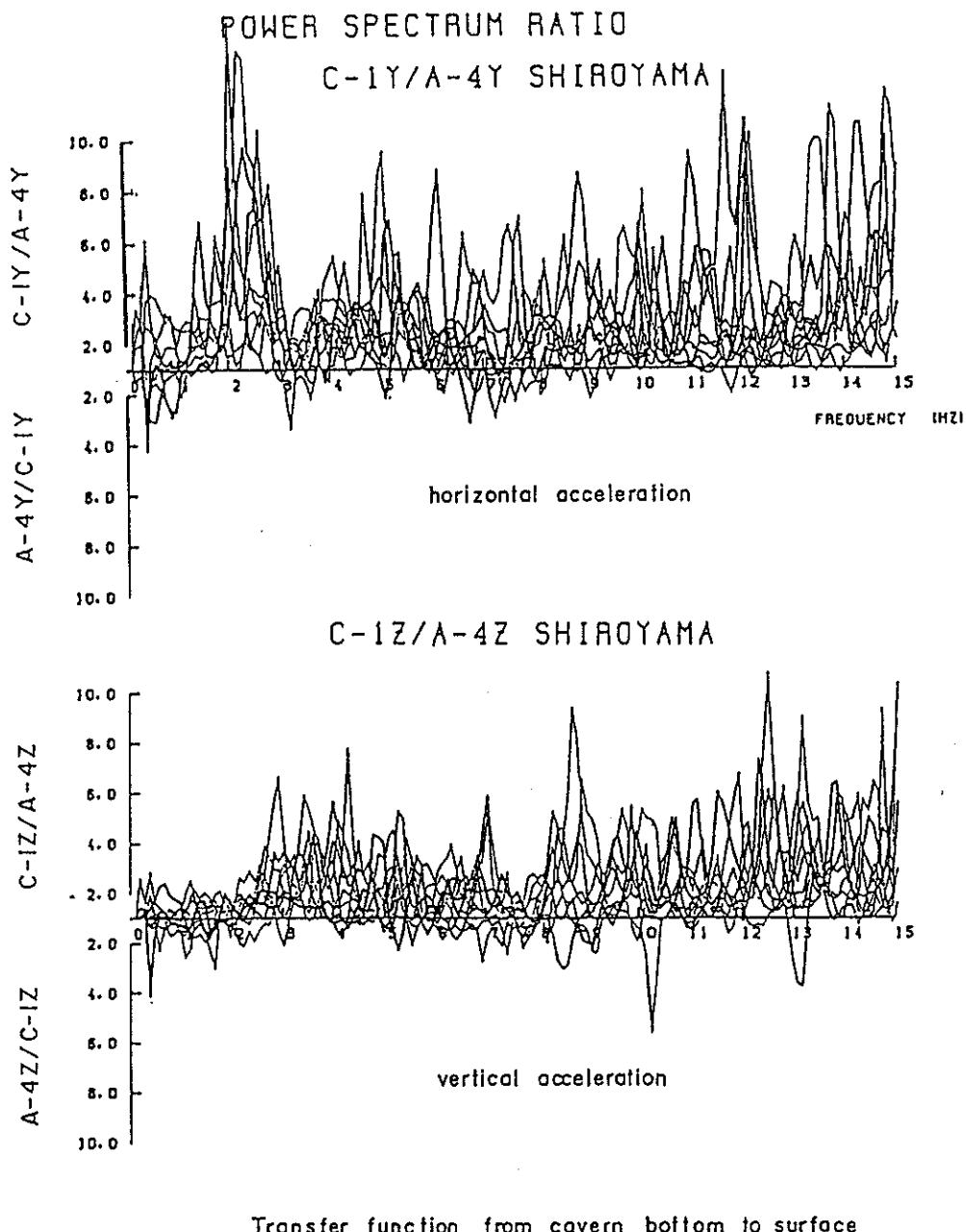


図 4.4-14 地下空洞底部 (A-4) から地上 (C-1) への伝達関数

(2) 細倉鉱山での観測および結果³⁾

① 観測概要

細倉鉱山での地震観測の目的は、高レベル放射性廃棄物地層処分研究の一環として地下深部に想定される処分施設の耐震評価のための基礎資料を蓄積することにある。よって現在まで数多く実施された地下 250m程度の水力地下発電所空洞などの地震観測より、さらに深部（地下 400m）において、観測網を設置している。

図 4.4-15に地震計設置位置を示す。

地震計は測点H-1から測点H-8まで合計8箇所に設置し、その範囲は平面的には東西 800m、南北 500m、鉛直方向には地表から上1番坑、下3番坑、下7番坑、下10番坑の4坑道、深度 350m間にわたっている。

地震波の平面アレイ観測網として、下10番坑にそれぞれ 420m、600m、720mの各辺をもつ三角形を形成するよう測点を配置し、さらにこの平面上の3点と上位の坑道の測点によって三角錐状の観測網を形成している。また、地下空洞周辺での地震波挙動を観測する目的で下3番坑に採掘跡空洞を挟んでそれぞれ測点H-3、測点H-4を配置している。

なお、地震計設置位置（図 4.4-15）より、全観測点を平面的にみると測点H-1、H-4、H-5およびH-6はほぼ同位置に設置されている。

観測地点のP波速度は、地表付近から深度 400mにかけて $V_p = 3.5 \sim 4.7 \text{ km/sec}$ に分布している。

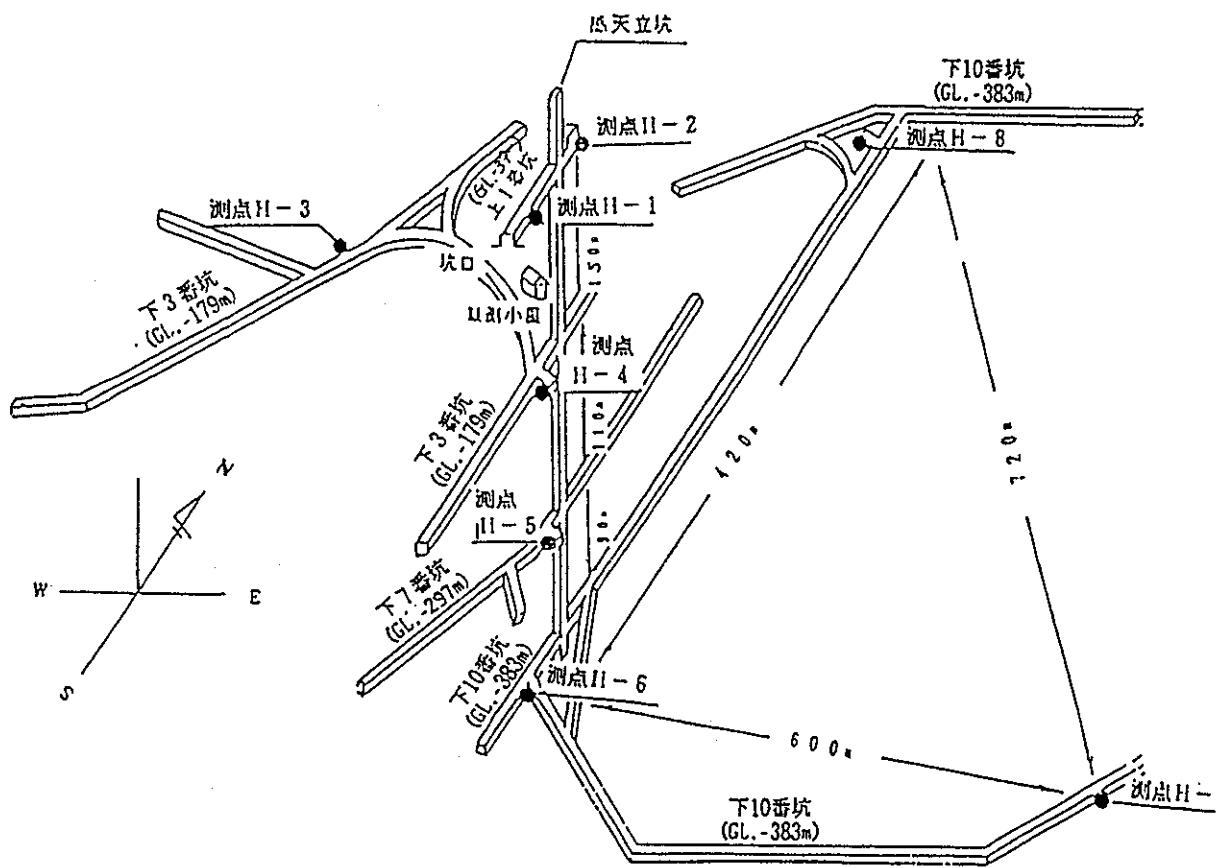


図 4.4-15 地震計設置位置

観測は昭和61年6月から昭和63年3月までの2年間実施され、44個の地震が観測された。観測地震の震央位置を図4.4-16に示す。同図より震央分布は岩手県中部、宮城県沖、福島県沖の3地域に集中していることがわかる。

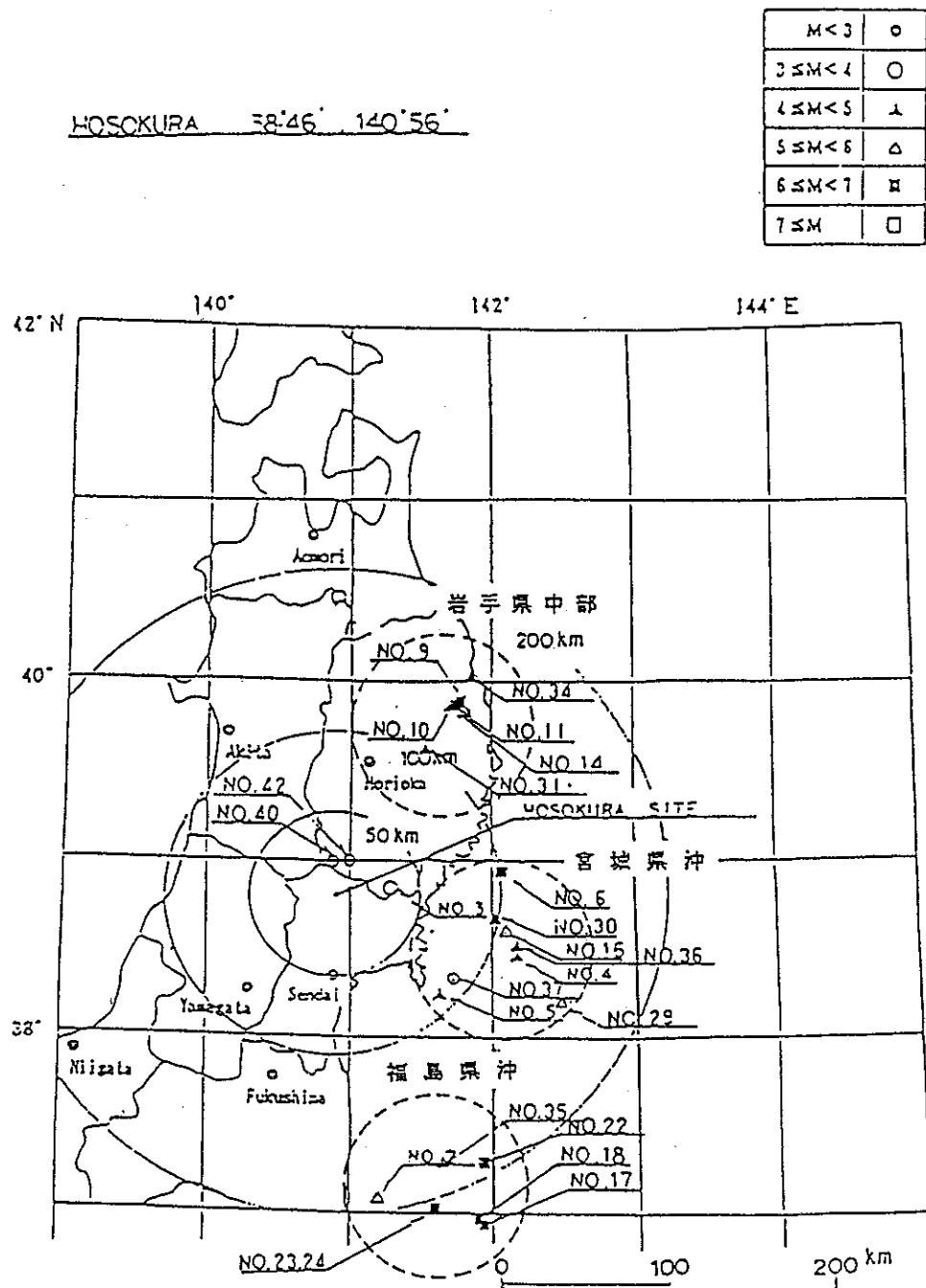


図4.4-16 観測地震の震央位置

観測された44個の地震の内、地震諸元の判明している26個の地震について、地上と地下の地震動特性の比較を行い、つきの検討結果を得ている。

② 最大加速度に関する知見

- (a) 地表付近岩盤に対する地下の最大加速度は地下約150mにおいて、水平方向で約6割、鉛直方向で約7割に減少するが、それ以深でさらに減少する傾向はほとんど認められない。
- (b) 電力中央研究所では、成層構造を示す硬質岩盤での地震観測記録に基づき数値解析により地中地震動の深さ方向の低減特性を次式のように提案している。この提案式と観測結果は概ね一致している。

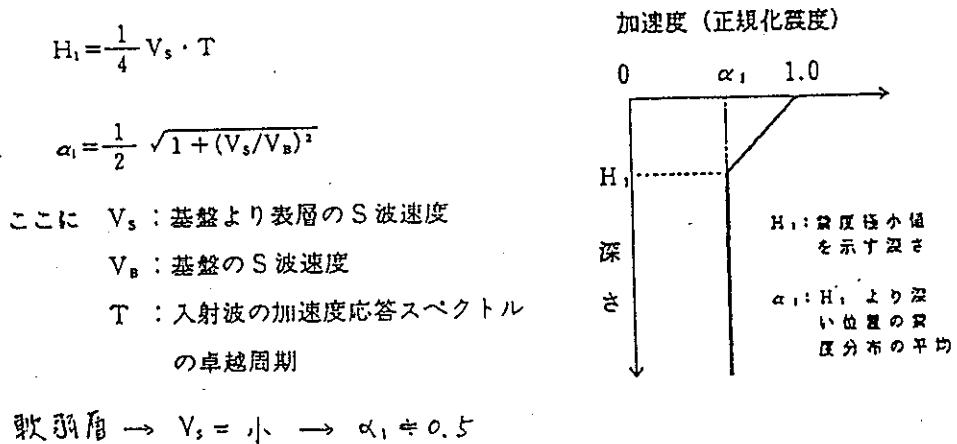


図 4.4-17 地中地震動の深さ方向の低減

③ 周波数特性に関する知見

- (a) 観測地震波の周波数特性は地震ごとにかなり異なるが、地下深部から地表部への地震波伝達特性は地震によらずほぼ同じ特性となることが得られた。したがって、地盤特性に応じて設定した伝達特性を用いて、地表付近で観測された地震波より地下深部施設の耐震設計入力波を推定できることが確認された。
- (b) 非定常スペクトル分析により、地震波の周波数特性時間変化を調べた。地下深部においても、地表部と同様に時間の経過とともに低周波数(0.5 Hz以下)成分が卓越するが、地表面反射によると考えられる地表部での高周波(1 Hz

以上) 成分が地下深部では減衰している。この現象より地下深部における地震波スペクトルは地表部より単純化されることがわかる。

④ 地震波の入射方向に関する知見

立体アレー観測記録から地下深部における地震波の入射方向を解析した。地震波の平面入射方向は観測点からの震央方向とほぼ一致している。一方、地震波の鉛直入射角は鉛直に対して約 $3\sim35^\circ$ の範囲となり、これらの値は震源と観測点間の構造から求まった理論値約 $26\sim33^\circ$ に比較してバラツキが大きいが、概ね対応している。したがって、地下深部構造物に対する耐震設計入力には、地震波の入射方向をパラメーターとする検討の必要性が示唆された。

(3) 釜石鉱山における観測

岩手県の釜石鉱山では、廃坑跡を利用して1990年2月より地震観測がされている。観測点付近の地質は、おもに花崗閃緑岩から成っている。6点の観測網で最深観測点は地表より約600mの地点にあり、細倉鉱山の場合と同様に立体アレー観測を行っている。1991年2月までに40個の地震が観測されているが、詳細な解析と検討は今後行われる予定である。

4.4.4 地上と地下の地震動特性の比較¹⁾

これまでに得られた釜石鉱山での地震観測データ並びに地下発電所、鉱山、トンネル等の他地点における地震観測結果から、おおむね以下のような知見が得られている。

- (1) 城山および沼原の地下発電所での観測結果から200m以深の地下における最大加速度は、水平動の場合地上の1/2～1/3程度となり、上下動の場合1/1～1/2程度になることが得られている。一方、落合および池原の地下発電所での観測結果から100m以浅の地下における最大加速度は、深い場合に比較して、地下での地震の遅減が小さいことが得られている。
- (2) 変位振幅も地下において小さくなる傾向にあるが、加速度の場合ほどには遅減しない。
- (3) 地下深部の硬い地盤から表層100m付近の軟かい地盤になるまでは、地震動の加速度振幅の増幅はほとんど見られないが、表層の軟かい地盤では地震動の増幅が大きくなる。
- (4) 地下での地震動の遅減は地震波の周波数が高くなる程大きくなる傾向にある。
- (5) 地下地震動のスペクトル形状は地上に比較して平坦になる。
- (6) 地下発電所等の地下空洞では、空洞側壁の加速度には、空洞の影響による増幅がほとんど見られない。

参考文献

- 1) 「地震に関する調査研究」 日本鉱業会, 1985年 4月
- 2) 「地下空洞における地震観測－横型地下空洞の地震時挙動－」
電力中央研究所報告, 昭和61年 6月
- 3) 「立体アレー観測による地下深部の地震挙動－細倉鉱山における地震観測－」
電力中央研究所報告, 平成元年 8月

4.5 地震による地下水水流変化に関する文献調査

4.5.1 調査目的

処分施設の長期にわたる隔離性能に関わる要因の一つとして、地下深部での地下水流动があげられる。地下水流动は地質・地層構造に依存しているが、断層のすべりを伴う地震現象は地下深部での地質・地層構造に変化を与える可能性のある事象であり、地下深部での地下水流动に変化をもたらす可能性がある。よって処分施設の長期安定性評価のために地下水流动と地震事象の関係を把握することは、重要なことであると判断される。

そこで、ここでは文献調査に基づいて、地震事象と地下水位の変動の関係について検討するものとする。

4.5.2 調査範囲

(1) 文献調査のデータベース

文献調査は、日本科学技術情報センター（Jicst）により提供されているJOIS（Jicst On-line Information System）により行う。

JOISの文献データベースは、主要50余か国の逐次刊行物（9000種）技術レポート、会議資料などに掲載された科学的技術的文献、年間55万件について収録されたものである。対象分野として次のものが挙げられており、今回の調査に充分なデータベースと考えられる。

| | | |
|-----------|-----------|--------|
| 科学技術一般 | システム・制御工学 | 建設工学 |
| 物理学 | 情報工学 | 環境工学 |
| 基礎科学 | 経営工学 | 運輸交通工学 |
| 宇宙・地球の科学 | エネルギー工学 | 鉱山工学 |
| 生物科学 | 原子力工学 | 金属工学 |
| 農林水産 | 電気工学 | 医学 |
| 熱工学、応用熱力学 | 化学鉱業 | 工学一般 |
| 機械工学 | その他の工業 | |

また、調査期間は、1980-1990年の10年間とした。

(2) 調査手順

JOISにより、キーワードを「地下水」と「地震」として検索した。その結果 265 の文献名があると出力された。つぎに各文献の抄録より「地震現象に伴う地下水位の変動」に関連あると判断される19文献を取り出すこととした。

4.5.3 調査文献の抄録

文献数は、全部で19編である。この中に東京都が昭和53年より実施している「地震予知に関する報告書」が7件あり、これらはまとめて抄録を示すこととし、一般文献12と区別することとする。

(1) 一般文献の抄録

- ① 1988年10月20日ギリシャにおけるマグニチュード 4.8の地震に関する地下水の水位と温度の地震前の挙動

Asteriadis G, Livieratos E (Thessaloniki Univ., Greece),

Tectonophysics, Vol. 170, PP. 165-169, 1989

ギリシャの地震帯において1988年10月20日に発生したマグニチュード 4.8の地震で、地下水の水位と温度の探知ネットワークにより、その変化が図 4.5-1 に示すように記録された。地震の前兆として、水位が約10cm上昇、水温が約1°C上昇していることがわかる。このことは地下水の水位と温度の異常な変化は、地震の発生機構に密接に関連する反応であることを示している。

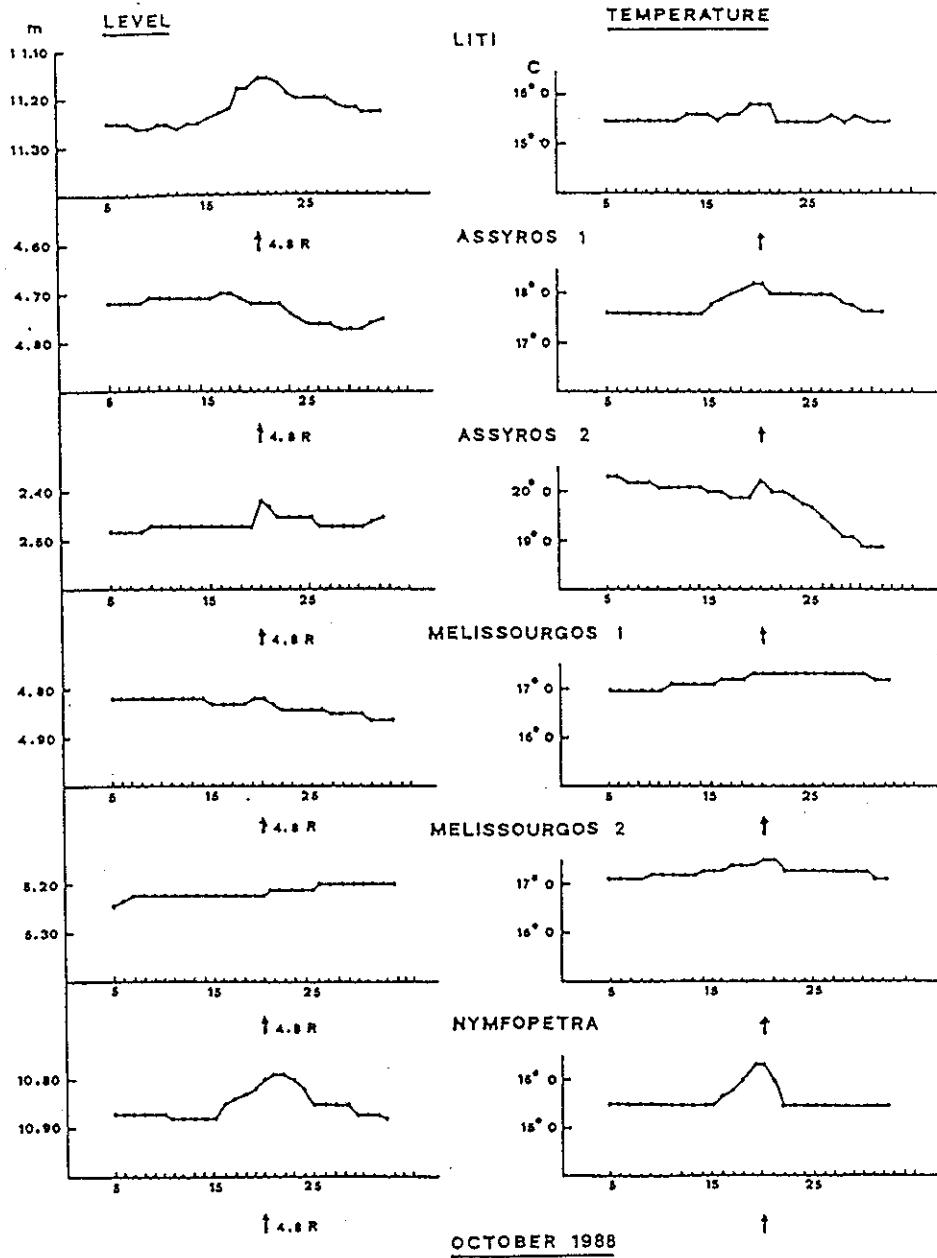


図 4.5-1 1988年10月5日から30日における地下水の水位と温度変化

② 地震の発生と誘発された地球自由振動を示す地下水の流れの記録

Kawabe I, Ohno I, Nadano S (Ehime Univ., Japan), Geophysical Research Letters, Vol. 15, No. 11, PP. 1235-1238, 1988

1987年西南日本でおきた地震 (M6.6)の直前直後に地下水の有意な変化を観測した。観測井戸は震源の北東 226kmのもので、図 4.5-2 に示すように、地震の15分前から地下水が増加しはじめた。地震の直後から井戸からの浸水は急に増加しある一定値に近づいたが、5時間後も周期的に変動していた。地震前の流れの

増加は地震に先行する局部的な応力場の変化を示している。今回の観測は、地下水が地震の直前直後の地殻変動に系統的に反応するということを示唆している。

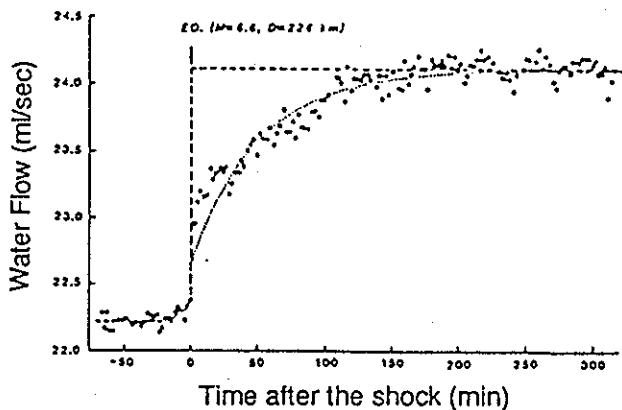


図 4.5-2 観測井の変化状況

③ 日本におけるアマチュア観測網による地震予知のための地下水の観測

Oki Y, Hiraga S (Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, Japan), Pure Appl Geophys, Vol. 126, No. 2/4, PP. 211-241, 1988

1976年以来、地震を予知するために南関東及び東海地区を主体に、100個の井戸を使って、地下水位と水温の観測が行われている。地下水に表れた異常は次の強地震の前兆として観測された。すなわち1978年伊豆大島西方沖地震 (M7.0), 1978年宮城沖地震 (M7.4), 1980年伊豆半島東方沖地震 (M6.7)である。1978年伊豆大島西方沖地震では伊豆半島に設置されている気象庁の体積歪計と地下水位の変化が、ほぼ地震と同時に記録された。しかし、他の地震の場合では水位と温度変化のみ前駆現象が観測されている。なお、地震マグニチュードと震央距離の間で成立する経験式を導いている。

④ 1984年山崎地震直後の生野における変形について

Tabei T (Kyoto Univ., Japan), J. Physics of Earth, Vol. 35, No. 3, PP. 225-239, 1987

図 4.5-3 に示すように、1984年山崎断層地震M5.6 の発生直後、指數関数的

に表される顕著な地震後変形が近畿地方北西部の生野で観測された。この観測は現在深さ約 1,000mまで地下水に満たされた廃鉱で実施された特別な条件下の結果であり、地震発生後の地下水移動が変形に重要な影響を与えると考えている。

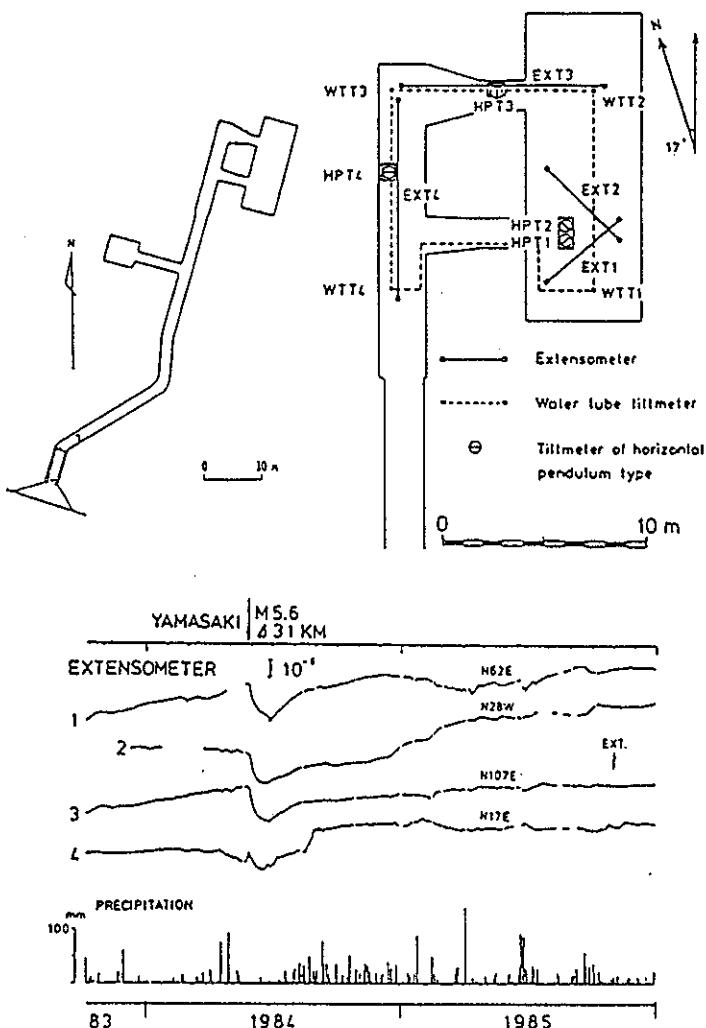


図 4.5-3 計器配置とひずみ変化

⑤ 地下水中のラドンの連続観測（その 2）

栗屋徹（神奈川県温泉地学研）、神奈川県温泉地学研究所報告,
Vol. 17, No. 5, PP. 273-288, 1986

神奈川県西部に分布する湧水または自噴井戸 8 カ所を選び、週 1 回ラドン濃度、

温度、湧出量を測定し、地震の前兆との関係を調べた。図 4.5-4 に示すように、ラドン変化に前兆異常が期待される地震として 7 個を選んだが、そのうち 4 個に水位の前兆的変化を認めた。しかし全般にラドンとの対応は明確でなかった。今後、自動連続観測装置によりテレメータ化する必要がある。

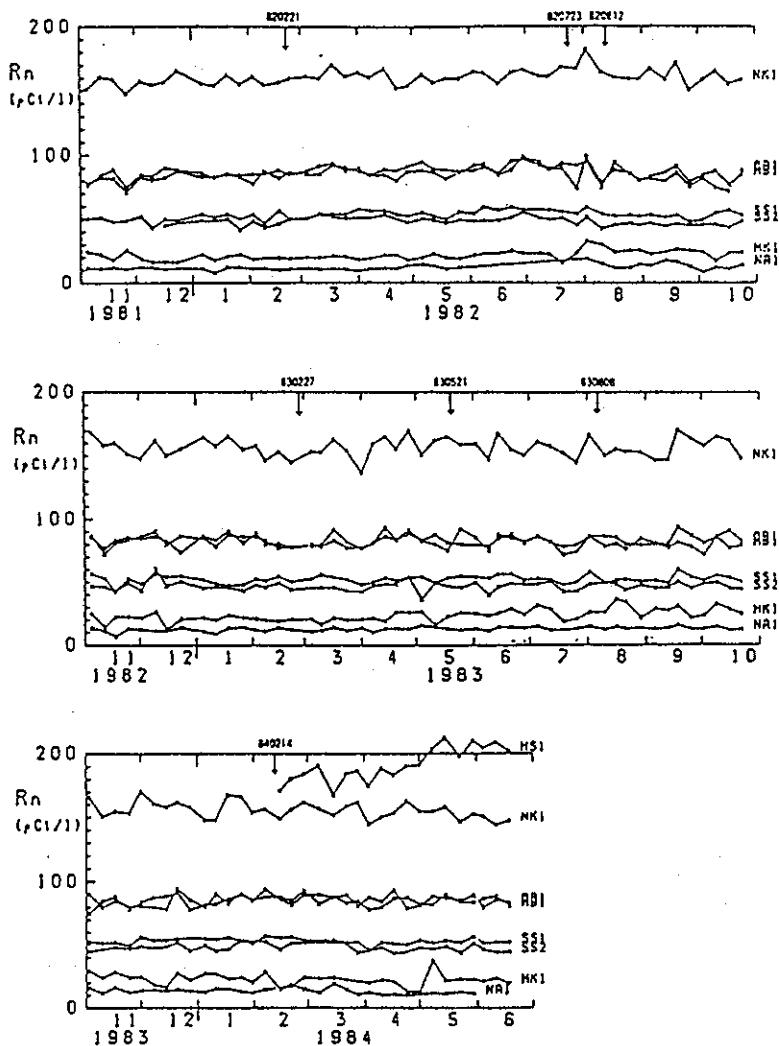


図 4.5-4 8 地点のラドン濃度の変化

矢印は前兆異常が期待された地震を示す。

⑥ 中国における地震予知のための地下水の研究

Wang C (State Seismological Bureau, Beijing, China), Pure Appl Geophys, Vol. 122, No. 2/4, PP. 215-217, 1984-1985

中国の地下水観測の現状を述べその予知への有効性を強調した。観測網はアマチュア用浅井戸、専門家用深井戸等併せて 4000 場所に達し、過去 15 年間に 60 以上

の地震に先行した地下水異常を認めた。そのうちM6.0以上のもの28個、震央距離50km以下のもの36個であった。これら異常の特徴として、水位が地震前に一様に低下するなど4点を指摘した。

⑦ 日本および中国における地震の前兆地下水異常について

平賀士郎、大木靖衛（神奈川県温泉地学研）、Feng X（国家地震局
中国）、神奈川県温泉地学研究所報告、Vol. 16, No. 4, PP. 129-140, 1985

日本と中国の歴史地震について、前兆現象の1つである地下水異常を選び出して調査した。収集した93の異常例は表にしてまとめた。図4.5-5に示すように、前兆地下水異常出現地点の震央距離との関係、同異常の出現時刻及びその地震規模Mとの関係、などを調査した結果、日本と中国ともに、1) $\log d=0.3M+0.2$ (d:震央距離)、2) $\log t=0.33M-0.65$ (T:日数)なる結果を得た。

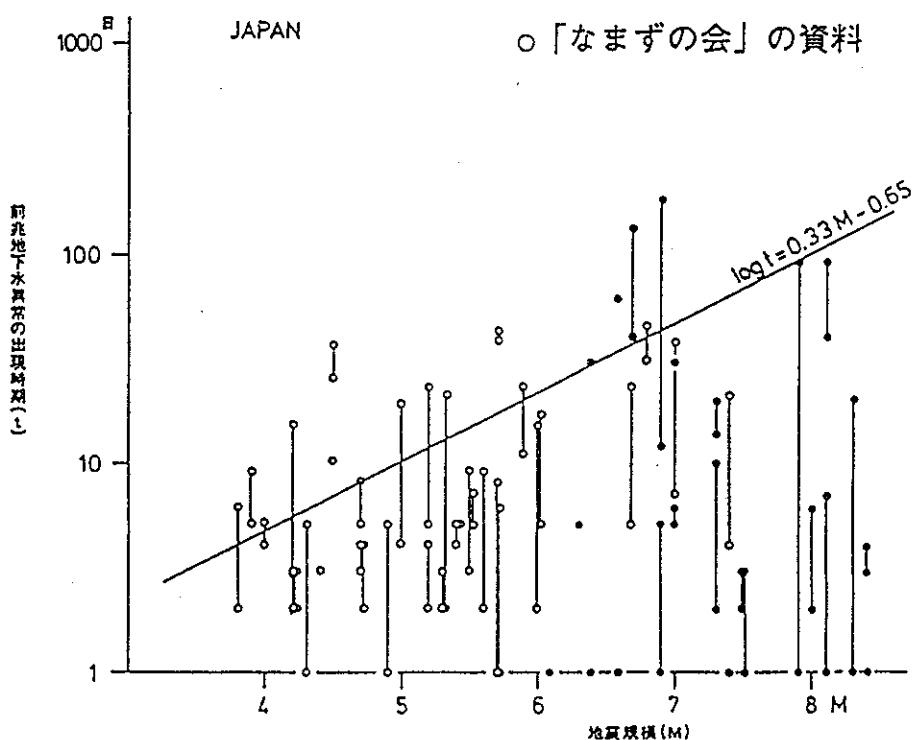


図 4.5-5 日本における地震規模と前兆出現時期の関係

⑧ (1983・10・31) 鳥取県中部地震前後の地下水位変動

宮腰潤一郎(鳥取大), 自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集,
Vol. 21st, PP. 177-178, 1984

標記地震は、三朝温泉付近を震央とするM6.1の地震である。震央から約25km離れた鳥取市の深井戸の水位変動と、県内各地の温泉の湧出量と湯温の変化について報告している。図4.5-6に示すように、震央の周辺域では水位の上昇があり震央域ではむしろ低下した。東西圧縮力による地震であることを考慮すると、地下においてクラックの縮小、成長が生じていることを示すものかも知れない。

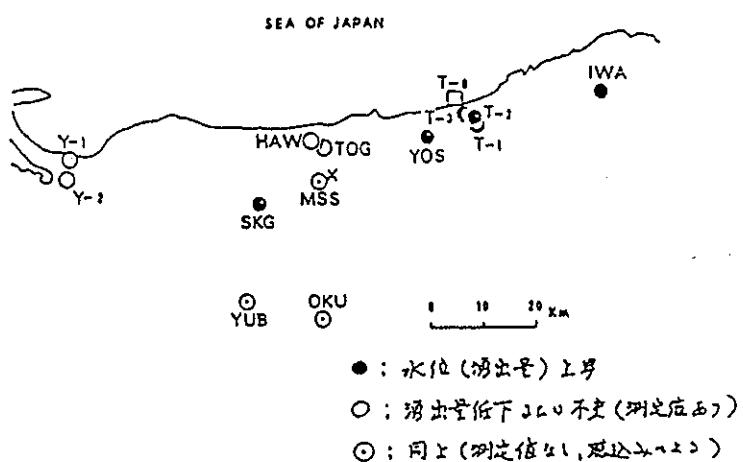


図4.5-6 Co-seismicまたはPost-seismicに生じた水位変化

⑨ 輪島の地下水観測 — 汀線移動と水位変化 —

米田昭二郎(金沢市此花町小学校), 日本海域研究所報告, No. 16,
PP. 15-27, 1984

輪島市の掘抜井戸の水位を1947年9月から1959年8月まで毎朝測定した。その間、1948年6月28日福井地震では、震度4度であったが、図4.5-7に示すように、地震前後で約20cmの水位上昇があり、その状態が続いた。

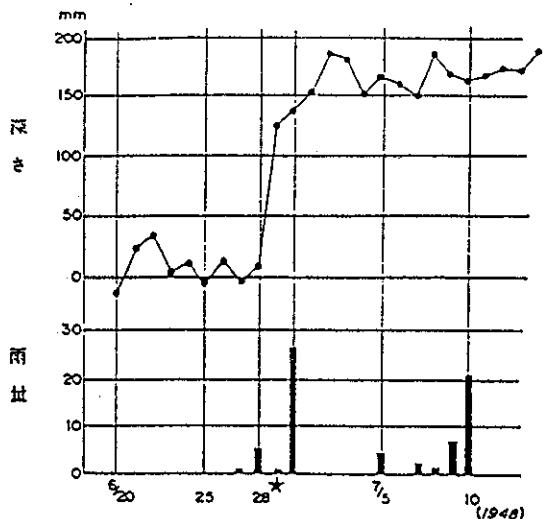


図 4.5-7 地震前後の水位変動

⑩ 防災センター構内深井戸の地下水位連続観測

池田隆司（防災科技セ），地震予知連絡会会報，Vol. 32, PP. 157-162,

1984

観測井の構造は同一地点で異なる深度の地下水を同時に観測できる二重管式で、上層は 340～346 m間の水位、下層は 430～603 m付近までの水位を測定することができる。1983年4月測定開始してから1984年1月までの結果を報告している。注目すべき観測事実として、図 4.5-8 に示すように地震に伴う比較的長周期の水位変動があり、その変動量は地層によって異なり、向きが逆の場合もあることなどを明らかにした。

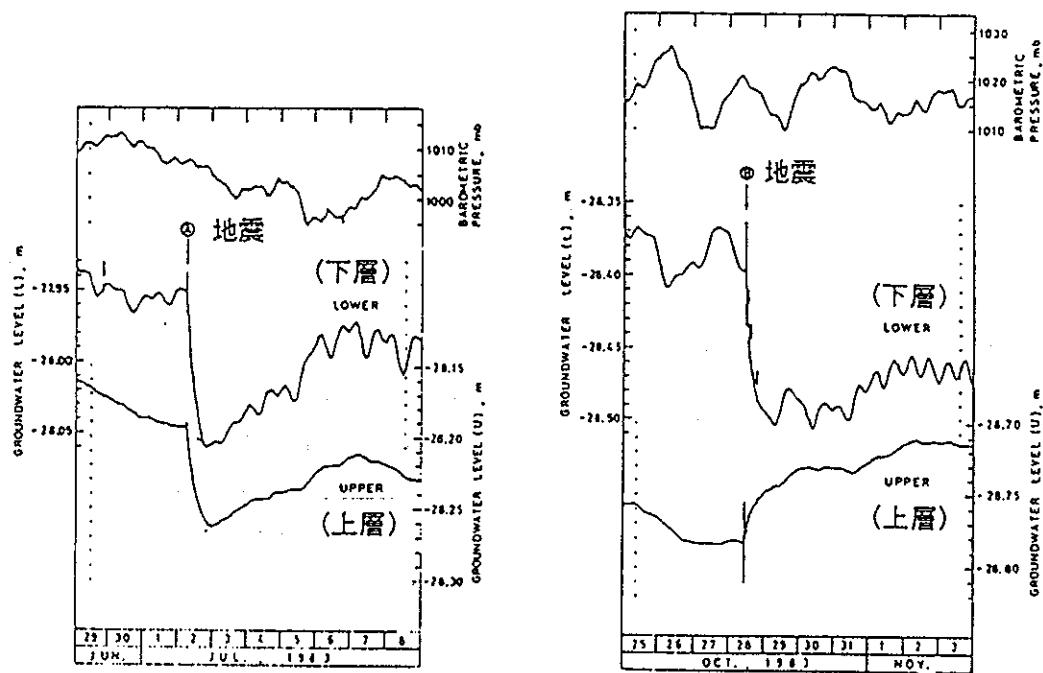


図 4.5-8 地震に伴う地下水位変動

⑪ 地震にともなう地下水の水位変化について

嵯峨山積（北海道地下資源調査所），北海道立地下資源調査所報告，

No. 52, PP. 107-111, 1981

地震により生ずる地下水位変化が、滯水層や地層の性質を反映しているのか、もし反映しているのなら滯水層・地層区分の手段になるかどうかを調べるために、札幌周辺の1975-78年の水位記録を検討。その結果、地震に伴う水位変化の最大振幅分布範囲のちがいが、地層区分に対する1手段としてある程度有効で、特に最大振幅が大きい時ほど有効なことが分かった。

⑫ 1980年伊豆半島東方沖地震と伊豆船原、柿木における水位変化の異常

山口林造（東大地震研），地震予知連絡会会報，Vol. 25, PP. 179-182,

1981

この研究では、地盤沈下調査を目的にした地下水位観測井の記録を用いて、被圧地下水位変動中に地震の前兆と認められる特異な変動が見出されたかどうかについて、昭和53年度から進められているものである。

今までの調査結果の概要は次の通りである。

- ① 每時の地下水位記録から、自然要因である潮位と気圧の影響を除去した補正地下水位を求める計算システム・プログラムを作成し、この補正地下水位を用いて地震前の地下水位の変動を検討することとした。
- ② 潮位の補正については水門操作などによる河川水位の変動が地下水位に現れることがあるので、東京湾内の潮位よりも観測井近傍の河川水位を用いた方がより正確に補正できる。しかし、大部分の観測井では東京湾内の潮位を用いても実用上十分であることが判明した。
- ③ 昭和48～53年、55年の7年分について、都内10ヶ所18井の地下水位記録の補正地下水位および補正地下水位の1週間(168時間)移動階差を求め、人為的な揚水の影響を考慮して、地震前後の水位変動を検討した。その結果、この期間中に発生した伊豆半島沖地震(昭和49年5月9日、M=6.9)、伊豆大島近海地震(昭和53年1月14日、M=7.0)、宮城県沖地震(昭和53年6月12日、M=7.4)、千葉県中部地震(昭和55年9月25日、M=6.1)等、いづれの地震時にも、前兆と見られる特異な変動は認められなかった。しかし、いくつかの観測井で地震後急激な地下水位の変動が見られた。
- ④ 新潟県、新潟大学、農林水産省の協力を得て、新潟の地盤沈下観測井7井を対象に新潟地震(昭和39年6月16日、M=7.5)前3ヶ月の期間について、水位変動の解析をおこなった。しかし、前兆と認められる水位変動は見られなかった。
- ⑤ 昭和56年度の報告では、この研究で開発した補正地下水位を求める基本計算プログラムを公表した。
- ⑥ 昭和57年度からは、それまでの調査井10ヶ所18井が下町地域に偏在していたため、この地域の5井を解析の対象から除外し、新たに多摩地域を中心に7ヶ所8井を加え、15ヶ所21井とした。なお、追加した観測井の中には活断層といわれる立川断層の直上付近に設置してある武蔵村山観測井(武蔵村山市三ツ木)を含めた。

1980年6月29日の伊豆半島東方沖地震 ($M=6.7$)により、伊豆船原（修善寺の南約6km）において、図4.5-9に示すような明瞭な地下水位の変動が記録された。地震の前兆とみられる5月25日から6月5日頃にかけての約30cmの水位上昇、地震直後の約40cmの水位低下がみられる。

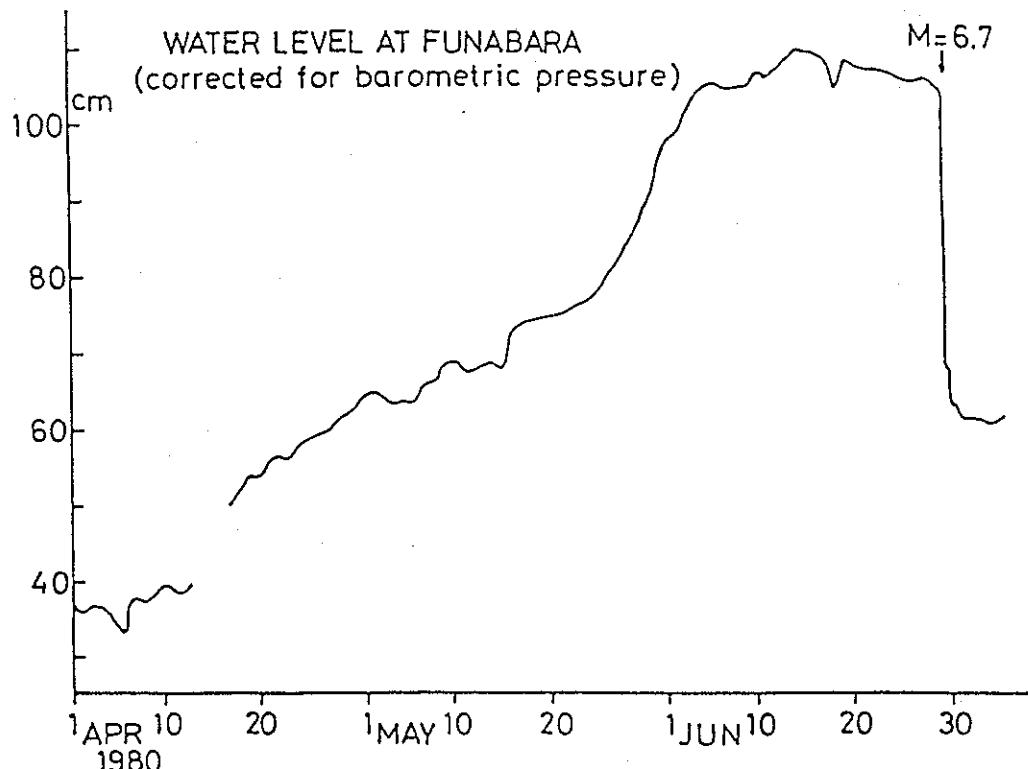


図4.5-9 伊豆船原に於ける地下水位の変動

(2) 東京都「地震予知に関する調査報告書」

東京都防災会議地震部会が標記研究の基礎資料を得る為に実施しており、以下の4項目からなる。 1) ラドン濃度測定に関する調査（定期採水による地下水中ラドン濃度の観測、自動連続測定装置による地下水中ラドン濃度の連続観測、伊豆大島における地下水に関する情報収集・試料採取及び分析、ラドン等による地球化学的地震予知に関する情報）、2) 魚類の異常生態に関する調査、3) 地震時における地下水の水質変化に関する調査、4) 地震時の地下水位変動に関する調査
この中から、4) の地震時の地下水位変動に関する調査結果のみを抜粋する。

- ⑦ 昭和61年度には武蔵村山観測井と同様に立川断層付近に設置した瑞穂観測井等を追加し、水位解析の対象井を16ヶ所24井とした。観測井の位置および地質柱状図を図4.5-10、図4.5-11に示す。
- ⑧ これまでに地震の前兆と判断された地下水位の変動は昭和58年2月27日、茨城県南部を震源とする地震（M=6.4、震度4）時に小岩観測井の地下水位が地震直前の約10分前に急激な水位低下が認められただけである。しかし、この水位低下は記録紙上で読み取られたもので、1時間ごとの補正地下水位では変動を読み取ることはできなかった。
- ⑨ 立川断層付近の観測井である武蔵村山、瑞穂の地下水位については、観測期間が短いが、他の観測井と比べて特異な地下水位変動を示したことはない。
- ⑩ 地震直後に生じるコサイスミックな地下水位変動は、より近くで生じ、また、より大きい地震の方が変動が現れ易いといえる。
- ⑪ 地震直後のコサイスミックな地下水位変動は荒川断層（推定）の延長上や立川断層付近にある観測井の水位に大きく現れる傾向がある。

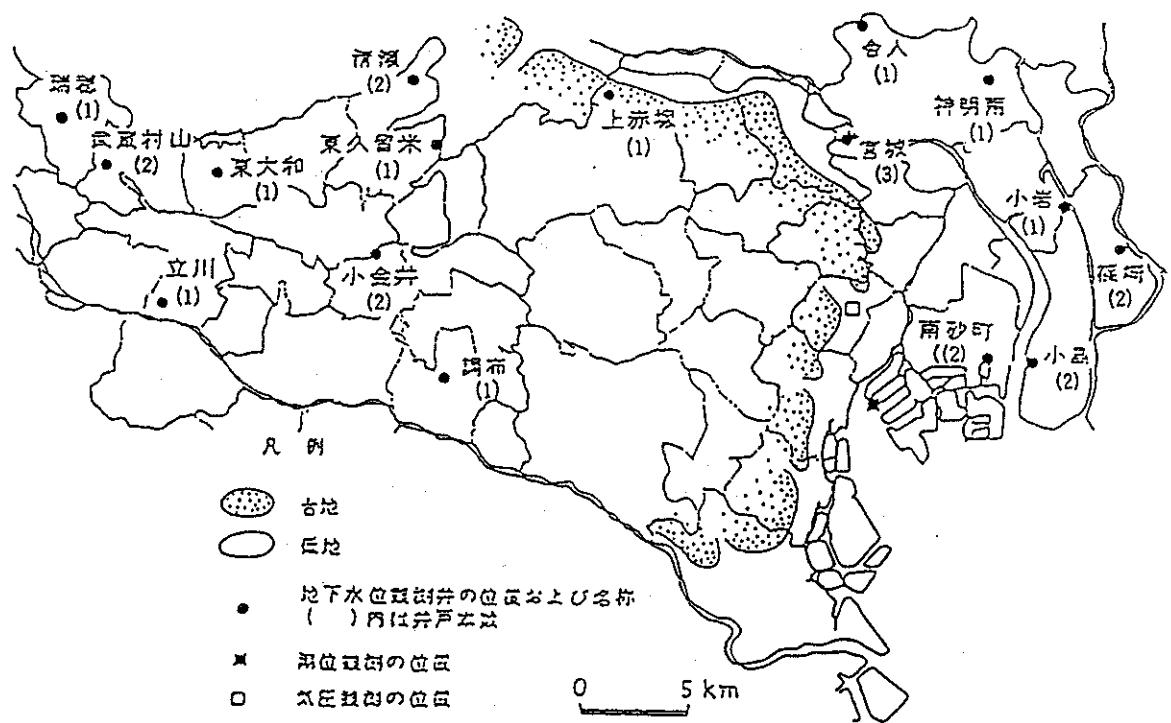


図 4.5-10 観測井の位置

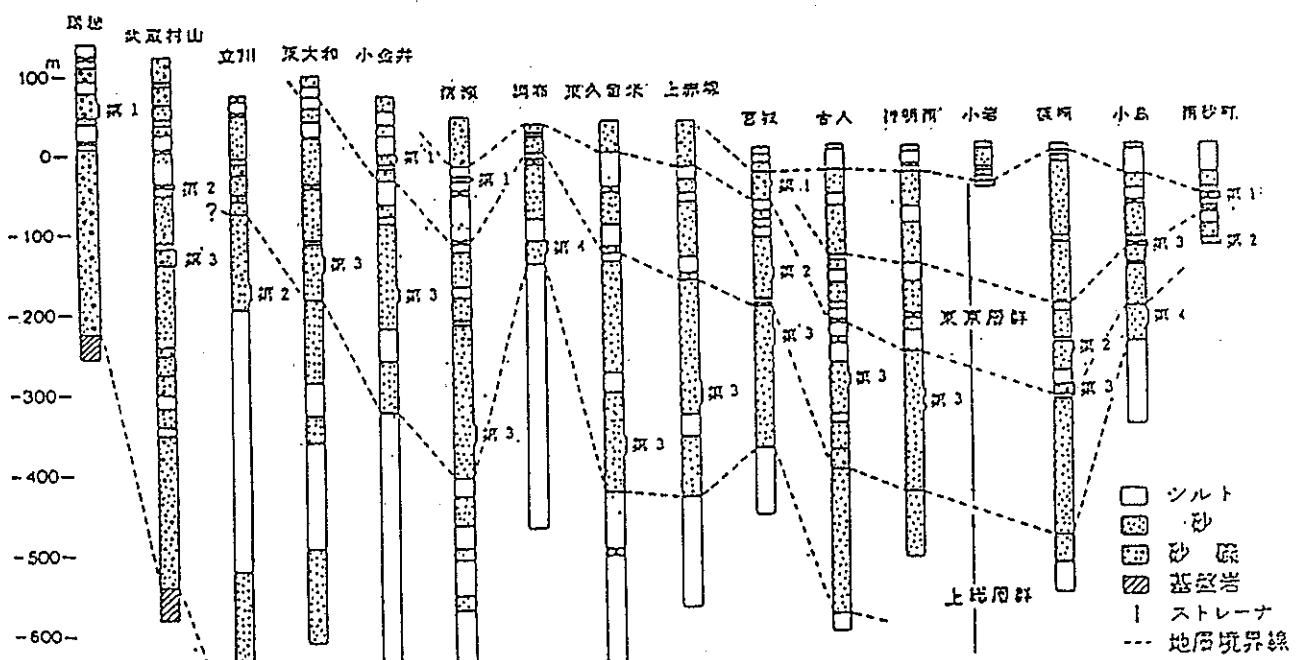


図 4.5-11 地質柱状図

4.5.4 まとめ

文献に述べられている地下水位変動の記録は、観測井の水位観測を基にしたもののがほとんどであり、その多くは地震予知の観点から地震発生前の変化に重点を置いている。また、理論的・解析的検討を行っているものは、一般文献の抄録②)で示した「地震の発生と誘発された地球自由振動を示す地下水の流れの記録」の一編である。

調査結果より、つきの知見が得られた。

- (1) あるサイトで記録される全ての地震に対して、地震前後に地下水位の変動があるとは言えないが、その中からいくつかの地震に対しては、水位変動が確認されており、地震に伴う水位変動はあると判断してよいと思われる。
- (2) 地震のマグニチュードが大きくなるほど地下水変動域は大きくなる傾向にある。しかし、変動域全体として水位がどのように分布しているかについての議論は見られない。
- (3) 地震発生前後の地下水の変動が、地質・地層構造のどのような変化により発生するかについては、明確な説は見られない。よって地下水の変動が不可逆的なものであるかの判断についても議論されていない。
- (4) 一般文献②)の「地震の発生と誘発された地球自由振動を示す地下水の流れの記録」では、断層モデルにより地震と地下水変化について議論しているが、現時点では1地震を対象としており、「地下水が地震の直前直後の地殻変動に系統的に反応することを示唆している」との判断レベルにある。

4.6 まとめと今後の課題

「地層処分施設の耐震性評価手法の検討」の3カ年計画のうち初年度の項目の検討を行った。初年度は現状の調査を中心として、つぎの4項目を実施した。得られた主な研究成果は以下の通りである。

(1) 地層処分施設の耐震性評価に特有な事象の抽出

7項目の特有な事象を抽出している。主なものはつぎのものである。

- ① 立坑を対象とした層理面位置のギャップの発生による被害。
- ② 地下深部坑道部の単独あるいは複数の干渉による周辺岩盤のせん断変形破壊。

(2) 地下構造物の耐震設計法の実例調査

耐震設計法に関し14編の指針・基準の調査を行った。

- ① 耐震設計手法の基本として、いずれの指針・基準も震度法を取り上げており、基準震度は0.15～0.20を設定している。また、比較的軟質な地盤中の構造物には応答変位法の規定がみられる。
- ② 動的解析を規定しているものは、本州四国連絡橋に関する指針と沈理トンネル耐震設計指針（案）であるが、その他のものも必要に応じて行うとしている。
- ③ 比較的深い岩盤内に設置される地下貯蔵施設を対象とした指針として水封式燃料地下貯蔵施設技術指針と地下貯油施設技術指針（案）がある。両指針とともに耐震性の検討は震度法を基本とし、必要に応じて動的解析を実施するとしている。
- ④ 上記の2指針では、さらに「掘削および地山自重について岩盤の安定性に十分余裕があれば、耐震設計計算を省略してもよい」との記述がみられる。この記述は他の指針・基準ではみられないものであり、堅固な岩盤での耐震性の優位性を認めているものと考えられる。

(3) 地下深部での地震動特性

地下発電所、鉱山、トンネル等での地下地震観測結果を調査し、地下での地震動について以下の知見が得られた。

- ① 城山および沼原の地下発電所での観測結果から200m以深の地下における最大加速度は、水平動の場合地上の1/2～1/3程度となり、上下動の場合1/1～1/2程度になることが得られている。一方、落合および池原の地下発電所での観測結果から100m以浅の地下における最大加速度は、深い場合に比較して、地下での地震の遮減が小さいことが得られている。

- ② 変位振幅も地下において小さくなる傾向にあるが、加速度の場合ほどには遅減しない。
- ③ 地下深部の硬い地盤から表層 100m付近の軟かい地盤になるまでは、地震動の加速度振幅の増幅はほとんど見られないが、表層の軟かい地盤では地震動の増幅が大きくなる。
- ④ 地下での地震動の遅減は震源距離が短くなる程大きくなる傾向にある。
- ⑤ 地下地震動のスペクトル形状は地上に比較して平坦になる。
- ⑥ 地下発電所等の地下空洞では、空洞側壁の加速度には、空洞の影響による増幅がほとんど見られない。

(4) 地震による地下水水流変化に関する文献調査

19編の文献を調査した。得られた主な知見はつぎのものである。

- ① あるサイトで記録される「全ての地震」に対して地震前後に地下水位の変化があるとは言えないが、その中から「いくつかの地震」に対しては水位変動が確認されており、地震による水位変動はあると判断してよい。
- ② 地震発生前後の地下水の変動が地質・地層のどのような変化により発生するかについては明確な説はみられない。また、地下水の変動が不可逆的なものであるかの判断についても議論されていない。

次年度の実施項目に合わせて、本年度の検討結果から今後検討すべき課題を整理するつぎのようになる。

| 来年度実施項目 | 本年度の検討結果からの課題 | 来年度の実施内容 |
|----------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 地下深部での地震特性の評価 | 地下深部での地震波の再現手法の検討 | ・手法の調査 (釜石の記録のシミュレーションを平成4年度に行う) |
| 地震による地下水水流変化に関する文献調査 | 地下水水流変化に伴う影響 | ・文献調査 |
| 地下構造物の耐震設計法の実例調査 | 岩盤健全性の評価 | ・既往設計例の調査 ↓ ・評価項目の絞り込み |
| 地震時の応力・変形解析手法の調査・検討 | 耐震設計に用いる解析モデルの検討 | ・既往設計例の調査 ↓ ・既往解析例の調査 |

5. 地下深部での地震動特性と構造物の挙動

5.1 はじめに

廃棄物の地下処分に関連して地下深部の地震動特性を把握することは重要である。また、同時に処分施設構造物の地震時の挙動を解析し、その知識を蓄積することは処分施設構造物を設計する上で不可欠である。この章では、その重要性に鑑みて、特に数値解析的なアプローチによって、地下深部での地震動特性と地下構造物の挙動を解明することを意図した。

地震動は、震源から発する弾性波動を観測地点で観測したものであるので、観測地震動は、震源の波動特性のみならず、観測地域の地質特性や構造特性などの諸特性の影響を大きく受けている。更に一般的に言えば、観測した地震動は、震源から発する地震波動が観測地点まで伝播する間に経た全ての現象が情報として含んでいる。一方、シミュレーション解析では、地形、地質特性が正しく評価されておれば、解析的に求められる地震波動も観測地震動と全く同じものを生じる筈である。その際、地形、地質データが正しく与えられておれば、解析結果の良否を左右するのは解析技術だけである。解析技術は最近急速に進歩し、大型計算機の活用とあいまって、地形、地質特性を考慮した、より現実に近いモデルを用いたシミュレーション解析も可能となっている。

このような解析法及びいくつかの解析結果については、”地震に関する調査報告(IV)”(1988)——”同(VI)”(1990)¹⁾⁻³⁾で報告した。特に、解析法に関してつぎのことが言える。均質に近い地質特性の無限ないし半無限領域に対しては境界要素法が、また複雑な地質特性を有する領域に対しては、有限要素法が有利である。また、局所的な非均質領域を含む無限ないし半無限領域の問題には、その非均質領域には有限要素法を、その外部には境界要素法を用いる解法も考えられる。一般的に言えば、この境界要素-有限要素結合法が最も有効である。上記の報告書ではこれらの解法の定式化と数値解析法の概要も述べられている。

この報告書では、まず境界要素法の要点を述べ、計算上の高速化アルゴリズムを補足する。ついで地形の影響をも考慮にいれた地下深部での地震動の特性と地下深部でのモデル構造物の地震動に対する応答特性の解析例について述べる。これらをもとに、最後に地下構造物の耐震特性を検討する。

5.2 弾性波動解析

5.2.1 弾性波動問題⁴⁾⁻⁶⁾

弾性波動問題は、ナビエ-コーシー(Navier-Cauchy)の運動方程式を、与えられた境界条件及び初期条件のもとで解くことに帰着される。すなわち、空間 $D \subset \mathbb{R}^N$ ($N=2, 3$) 及び時

間 $T (= [0, \infty))$ で定義された

$$\nabla \cdot (E: \nabla u(x, t)) + \rho b(x, t) = \rho \ddot{u}(x, t) \quad (1)$$

を

$$\text{初期条件: } u(x, 0) = u_0(x), \dot{u}(x, 0) = \dot{u}_0(x)$$

$$\begin{aligned} \text{境界条件: } u(x, t) &= \bar{u}(x, t), \quad (x, t) \in S_1 \times T, \\ t(x, t) &= n, \sigma = n, E: u = T(x, n(x)) u(x, t) \\ &= \bar{t}(x, t), \quad (x, t) \in S_2 \times T \end{aligned} \quad (2)$$

のもとで解くことである。ここに、 $S = S_1 \cup S_2$ 、 S は D の境界、

x : 位置ベクトル, t : 時間, ∇ : 勾配演算子, u : 変位ベクトル, ρ : 密度、

b : 物体力ベクトル, E : 弹性テンソル, t : 表面力ベクトル, σ : 応力テンソル、

n : ∂D 上の単位法線ベクトル, $T(\partial x, n(x))$: 点 x での $n(x)$ 方向への表面力演算子、

$(\)_0$: 初期値, $(\bar{\ })$: 境界値, $(\dot{\ }) = \partial (\) / \partial t$

である。

なお、無限領域に対しては、この他に、散乱波は外向きの波からなり、無限遠では有界であるという、いわゆる放射条件を満足しなければならない。

5.2.2 粘弾性波動問題^{3), 6)}

線形粘弾性波動の問題は、線形弾性の構成式 $\sigma_{ij} = E_{ijk1} \varepsilon_{k1}$, $\varepsilon_{k1} = (\partial_k u_l + \partial_l u_k) / 2$ (ひずみを表す) の代わりに、粘弾性構成式

$$\sigma_{ij}(x, t) = \int_0^t G_{ijk1}(x, t-s) \frac{\partial \varepsilon_{k1}}{\partial s}(x, s) ds \quad (3)$$

を用いればよい。ここに、 G_{ijk1} は応力緩和関数である。なお、繰り返される添字に関しては、総和規約を適用している。以下でも同様である。

初期及び境界条件、並びに放射条件などは、弾性波動の場合と同様である。

なお、粘弾性構成式に於て、応力緩和関数を時間に依存しない定数とすると、線形弾性の構成式が得られる。従って、弾性波動は、粘弾性波動の特別な場合と考えてよい。その場合には、上の時間に関する合成積分を、単に時間に無関係な積を表すものと解釈すれば良い。

5.2.3 弾性波動解析法⁴⁾⁻⁶⁾

上に述べた弾性波動の初期値境界値問題は、空間時間領域で、或は時間に関して積分変換した像空間で、積分方程式に定式化して解くことができる。

例えば、Fourier 変換された動弾性の問題は、時間 t に関する Fourier 変換

$$f(x; \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) \exp(i\omega t) dt \quad (4)$$

を用いると、式(1)及び(2)を変換した次の境界値問題を解くことに帰着される。

$$L_u(x; \omega) + \rho \omega^2 u(x; \omega) + \rho b(x; \omega) = 0, \quad L(\cdot) = \nabla(E: \nabla(\cdot)) + \rho \omega^2 (\cdot) \quad (5)$$

$$u(x; \omega) = \bar{u}(x; \omega), \quad x \in S_1 \quad (6)$$

$$t(x; \omega) = T_u(x; \omega) = \bar{t}(x; \omega), \quad x \in S_2$$

なお、無限領域を含む問題では、当然散乱波の場は放射条件をFourier変換したもの満足しなければならない。

変換された境界値問題の解が求まると、元の問題の解は、Fourier逆変換

$$f(x; t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (7)$$

を施すことによって容易に求められる。

ここで、式(5)に次式で定義された基本解 U

$$L^* U(x, y; \omega) = -1. \delta(x-y) \quad (8)$$

(L^* は L の随伴作用素である) を掛けて積分すると、次の積分表現式式を得る。

$$\begin{aligned} \varepsilon(x) u_k(x; \omega) &= \int_S \{ U_{ki}(x, y; \omega) t_i(y; \omega) - W_{ki}(x, y; \omega) u_i(y; \omega) \} dS(y) \\ &\quad + \int_D \rho U_{ki}(x, y; \omega) b_i(y; \omega) dV(y) \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、

$$\begin{aligned} t_i(y; \omega) &= T_{ii} u_i(y; \omega), \\ W_{ki}(x, y; \omega) &= T_{ii} (\partial_y n(y) U_{ki}(x, y; \omega)) \\ \varepsilon(x) &= \begin{cases} 1, & x \in D \\ 0, & x \in D_c \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

であり、 D_c は D の補領域である。また、 T_{ii} は境界上の点 y での表面力作用素である。

ひずみは、上式より求まる変位勾配の対称部分として求められ、応力は、それより容易に求められる。

式(10)に於て、補領域から境界上への極限移行操作を施すと、例えば、外部問題に対して、次の積分方程式を得る。

$$\begin{aligned} -C(x_0) \cdot u(x_0; \omega) &= \int_S W(x, y; \omega) \cdot u(y; \omega) dS(y) - \int_S U(x, y; \omega) \cdot t(y; \omega) dS(y) \\ &\quad + \int_D \rho U(x, y; \omega) \cdot b(y; \omega) dV(y) \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 $C(x_0) u(x_0; \omega)$ は、境界上の点 x_0 を中心とする微小球面が D を切り取る部分

$s(x_0; \varepsilon)$ 上の積分の極限値

$$C(x_0) \cdot u(x_0; \omega) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_S s(x_0; \varepsilon) W(x_0, y; \omega) \cdot u(y; \omega) dS(y) \quad (12)$$

で与えられる。なお、境界が点 x_0 近傍でなめらかであれば、 $-C(x_0) \cdot u(x_0; \omega) = 1 \cdot u(x_0; \omega) / 2$ (1 は単位テンソル) となる。また、 $U(x, y; \omega)$, $W(x, y; \omega)$ は放射条件を満足する第1および第2基本解（式(8)および(10)₂で定義されたもの）であり、 $\oint (\cdot) dS$ は Cauchy の主値積分を表す。なお、基本解については、報告書(IV)を参照されたい。

積分方程式(11)は、放射条件を満足する散乱波の変位場 $u^s = u - u^i$ (u :全変位場, u^i :入射波の場) に対して適用することになる。即ち、式(11)の u を u^s で置き換えて適用されることになる。

なお、外部領域を対象とする場合には、以下のように変形したものを用いると便利である。ここでは、簡単のために物体力を省略した。

$$\begin{aligned} -C(x_0) \cdot u(x_0; \omega) &= \int_S s W(x, y; \omega) \cdot u(y; \omega) dS(y) \\ &\quad - \int_S U(x, y; \omega) \cdot t(y; \omega) dS(y) + u^i(x_0; \omega) \end{aligned} \quad (13)$$

なお、Fourier 変換の代わりに Laplace 変換を用いても、同様に積分方程式を定式化できることは言うまでもない。その際には、Fourier 変換のパラメーター ω を単に is (s は Laplace 変換のパラメター) で置き換えるべき。

線形動粘弹性体の構成式(3)を Fourier 変換したものを

$$\sigma_{ij}(x; \omega) = G^{*}_{ijkl}(\omega) \varepsilon_{kl}(x; \omega) \quad (14)$$

と書くと、動粘弹性体の運動方程式は次のようになる。

$$\nabla \cdot (G^* \nabla u) + \rho \omega^2 u + \rho b = 0 \quad (15)$$

ここに G^* は複素緩和テンソルである。等方均質体に関しては

$$G^*_{ijkl}(\omega) = \lambda^*(\omega) \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu^*(\omega) (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{jk} \delta_{il}) \quad (16)$$

である。ここに $\lambda^*(\omega)$, $\mu^*(\omega)$ は複素 Lame 定数である。

従って、Fourier 変換した像空間での、等方均質な動粘弹性体の運動方程式は次のように与えられる。なお、物体力を省略した。

$$\mu^*(\omega) \nabla^2 u(x; \omega) + \{\lambda^*(\omega) + \mu^*(\omega)\} \nabla \nabla \cdot u(x; \omega) + \rho \omega^2 u(x; \omega) = 0 \quad (17)$$

粘弹性体では、縦波の波数は、 ω を実数とすると、

$$k_L^* = k_L^0 + ik_L^1, \quad k_L^0 = \omega \cos \alpha / c_L, \quad k_L^1 = \omega \sin \alpha / c_L \quad (18)$$

で与えられる。ここに、

$$\frac{\rho}{\lambda^* + 2\mu} = \frac{1}{c_L^2} \exp(2i\alpha), \quad c_L, \alpha : \text{実数}$$

である。また、横波に関しては、

$$k'^T = k_T^0 + ik_T^1, \quad k_T^0 = \omega \cos \beta / c_T, \quad k_T^1 = \omega \sin \beta / c_T \quad (19)$$

$$\frac{\rho}{\mu^*} = \frac{1}{c_T^2} \exp(2i\beta), \quad c_T, \beta : \text{実数}$$

である。

以上のことから、動粘弾性問題では、動弾性問題における波数を単に複素波数に置き換えるだけでよいことが分かる。従って、動粘弾性問題に対する積分方程式への定式化は言うまでもないであろう。

5.2.4 積分方程式の数値解法⁴⁾⁻⁶⁾

上述のようにして求められた積分方程式は、一般には離散化されて数値的に解かれる。積分方程式では積分の評価が解の精度を左右する。通常は、積分は有限要素法の技法を用いて評価される。即ち、積分は、境界を有限個の要素に分割し、境界の形状及び境界上の関数をアイソパラメトリック要素などで近似した上で、Gauss積分などの数値積分により評価される。なお、解析的に評価することができれば、それに越したことはない。

ここでは、例として、アイソパラメトリック要素を用いて離散化する道筋を示しておく。

いま、関数 $f(x, t)$ を局所座標 ξ に関して、補間関数 N^α を用いて

$$f_i(\xi) = \sum_{\alpha} N^\alpha(\xi) f_i(x^\alpha) \quad (20)$$

と表そう。ここに、 x^α は節点座標を表す。

ここで、境界を8節点を有するN個の要素に分割し、式(20)を式(13)（簡単のために、物体力を無視し、また静止過去を仮定した）に代入すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^3 C_{ik}(x) u_i(x, \omega) \\ & + \sum_{i=1}^3 \sum_{\beta=1}^N \sum_{\alpha=1}^8 u_i(x^{k(\beta+\alpha)}; \omega) \int_{S_B} W_{ki}^\beta(x, y(\xi); \omega) N^\alpha(\xi) J(\xi) dS(\xi) \\ & = \sum_{i=1}^3 \sum_{\beta=1}^N \sum_{\alpha=1}^8 t_i(x^{k(\beta+\alpha)}; \omega) \int_{S_B} U_{ki}^\beta(x, y(\xi); \omega) N^\alpha(\xi) J(\xi) dS(\xi) \\ & + u_k^{-1}(x; \omega) \end{aligned} \quad (21)$$

こでは、上式の $x^{k(\beta, \alpha)}$ は、それぞれ要素 β の節点 α の全体座標系での番号であり、 $J(\xi)$ はヤコビアンを意味している。

ここで、式(21)を、簡単に次のように書くことにする。

$$Wu - Ut = -u^1 + F \quad (22)$$

この右辺第2項は与えられた境界条件を式(22)に代入して得られる項である。従って、入射波が分かっておれば既知の量である。

式(22)を解けば、境界上の変位と表面力が求められる。それらを用いて、領域内部の変位及び応力が定められる。

なお、Laplace変換を用いても同様にして解くこともできる。

5.2.5 境界要素法の高速計算アルゴリズム⁷⁾

式(21)により離散化された連立代数方程式を具体的に求めるには、通常は次のようなアルゴリズムによっている。即ち、境界積分を、例えば、8節点アイソパラメトリック要素を用いて4x4点のGauss積分で評価すると、要素数N、節点の総数Mの場合には、通常のアルゴリズムは、記号的に書けば次のように表わされる。

$$\begin{array}{cccccccc} M & N & 3 & 3 & 8 & 4 & 4 \\ DO & DO & DO & DO & DO & DO & DO \\ n(x)=1 & e=1 & i=1 & k=1 & \alpha=1 & l=1 & m=1 \end{array} W_{ik}(x, y_e(\xi_1^l, \xi_2^m)) N^\alpha(\xi_1^l, \xi_2^m) w^l w^m J_e(\xi) \quad (23)$$

ここに、 $n(x)$ は観測点の節点番号を意味し、 $\begin{array}{cccc} M & 3 \\ DO & DO \\ n(x)=1 & i=1 \end{array}$ 及び $\begin{array}{cccc} N & 3 & 8 \\ DO & DO & DO \\ e=1 & k=1 & \alpha=1 \end{array}$ は、それぞ

れ係数行列の中の適当な行成分及び列成分に値を代入して行く操作を表している。また、最後の2つのDOはGauss積分を意味している。なお、観測点と源点が一致する場合、即ち $\alpha=n(x)$ の場合には、積分は特異となるので上の演算を用いることはできない。しかし、その場合には実際には積分計算をせずに、動弾性の基本解と静弾性の基本解とのオーダーが同じであること及び静弾性内部問題では剛体変形が解であることを考慮すれば、その係数（対角項成分）を求めることができる。この通常のアルゴリズムを”要素型アルゴリズム(Element-wise Algorithm, EWA)と呼ぶことにする。

上のアルゴリズムでは、節点数が多くなると係数計算に相当な時間を必要とするので、何らかの方法で計算の高速化を図ることが望まれる。一般に計算の高速化を行う要点は、プログラムの最も内側のDOループのループ長をできるだけ長く取ることである。そのためには、上のアルゴリズムの積和の順序を変更して、

$$\begin{array}{cccccccc} 4 & 4 & N & M & 3 & 3 & 8 \\ DO & DO & DO & DO & DO & DO & DO \\ l=1 & m=1 & e=1 & n(x)=1 & i=1 & k=1 & \alpha=1 \end{array} W_{ik}(x, y_e(\xi_1^l, \xi_2^m)) N^\alpha(\xi_1^l, \xi_2^m) w^l w^m J_e(\xi) \quad (24)$$

とし、更に内側の3個のD0ループを展開して72個の計算を（並列で或は単独で）計算すればよい。このようにすれば、最も内側のD0ループ長は節点の総数Mとなり、節点数が多くなるほど有利となる。このアルゴリズムを”ガウス点固定型アルゴリズム(Gauss-Pointwise Algorithm, GPWA)と呼ぶことにする。

GPWAは、ベクトルプロセッサーに用いると最も効率的である。なお、それをスカラープロセッサーに用いても、通常のアルゴリズムをベクトルプロセッサーに用いた程度の効率は十分得られるようである。

5.2.6 数値逆変換^{4), 6)}

時間に関して積分変換し、その像空間で積分方程式に定式化して数値的に解いた場合には、元の問題の解を得るために、像空間での数値解を逆変換しなければならない。数値逆変換には、FFT(高速 Fourier 変換)が用いられる。また、逆Laplace変換には、Durbin の方法が便利に用いられる。

5.2.7 その他の留意事項

1) 離散データからの補間

積分方程式を簡単に解くには、一定要素で近似して、選点法を用いることである。代表点が一要素に一点だけであり、未知量が少なくなるので、全体としての要素分割を細かくすることができる利点がある。また、積分は解析的に行うことができるので、そうすれば計算時間は大幅に短縮できることになる。結果的には、解の精度を上げることもできる。しかし、反面、境界に沿う接線微分を求めることができないという欠点がある。この欠点は、境界上で離散的に得られたデータをもとに、補間関数を作れば、容易に解決することができる。例えば、アイソパラメトリック要素を用いて補間すればよい。

なお、一次要素を用いる場合でも、境界に沿う微分の精度はよくない。この場合にも、適切に補間することを考えればよいであろう。

2) 境界近傍内点の値の評価

領域内点の解は、得られた境界上の解を積分表現式に代入して求められる。この場合に、離散化した境界に接近した領域内点では解の精度が著しく低下する。これは、領域内点が境界に接近すると特異積分に近い積分が現れることに原因がある。これを準特異積分(quasi-singular integral)という。この評価には、特異積分と同様な技法を用いると良い精度が期待できる。

サブエレメント法では、領域内点から境界に垂線を下ろし、境界との交点を中心とした三

角形要素に再分割した上で、極座標あるいは正方形正規座標に変換して積分を評価すればよい。

或は上のようにして定めた境界上の垂線の足の点Pでの値(P)（この値は境界要素法を解いて、或は更に補間して求められる）を差し引いたもの-u(P)に対する積分表現式（式(9)において、uの代わりにこれを用いたもの）を適用すればよい。但し、この場合には基本解の体積積分の評価が必要となる。更にその体積積分は境界上の積分に変換することもできる。

なお、応力などの計算には、更に性質の悪い準積分が現れるが、それらについては、やはり特異点除去法を適用することができる。

5.3 地下深部での地震のシミュレーション

5.3.1 シミュレーション解析モデル

地下深部での地震動の特性を知る目的でシミュレーションの解析を行った。解析は、2次元（平面ひずみ）とし、境界要素法により、次式で表される時間調和なSV入射波（鉛直面内のせん断波）による変位応答を求めた。

$$u = u_0 n \exp(i(k_T x_p - \omega t))$$

ここに、 u_0 は入射波の振幅を表し、 n は波の振動方向、 p は波の進行方向を表す単位ベクトルである。また、 $k_T = \omega / c_T = 2\pi / L_T$ 、（ L_T は横波の波長）である。

解析モデルは、図-5.1に示す釜石鉱山の豊坑を含むほぼ南北の鉛直断面1-1'、及びほぼ東西の鉛直断面2-2'をモデル化したものであり、図-5.2に示すものである。この方向は、それぞれ比較的大きい地震の震央方向、即ちほぼ東及び南方向を念頭に入れたものである。モデルの解析範囲は、豊坑の左右にはほぼ2,000m、また豊坑の坑口から地下800mまでの範囲とした。なお、図-5.2にはその中央部分のみを示した。なお、境界要素の分割には節点間距離が25mの2次のアイソパラメトリック要素を用いた。

5.3.2 解析結果

図-5.2(a)に示したモデルの入射調和SV波による表面及び豊坑の変位の応答解析結果を図-5.3に示す。図示の変位は入射変位振幅u_0で正規化したもの(u/u_0)である。

REAL PART及びIMAGINARY PARTは、それぞれ波の山(ピーク)及び腹(ノード)が座標原点に位置する場合を意味し、また、THETAは入射波の入射角を鉛直から左向き(南方からの入射)に測ったものであり、Fは周波数を意味している。なお、周波数F、円振動数 ω 、SV弹性波の伝播速度 c_T 、波数 k_T 、波長 L_T の間には、次の関係がある。

$$F = \omega / 2\pi = c_T / L_T = k_T c_T / 2\pi$$

このモデルとした鉱山はほぼ均一な花崗岩体からなり、その物性は次のようにある。

密度 $\rho = 2.7 \text{ t/m}^3$, 弾性係数 $E = 6.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, ポアソン比 = 0.24

従って、その S V 波の伝播速度 c_T は次のようにある、

$$c_T = \sqrt{[E/2(1+\nu)]/\rho} = \sqrt{6.5 \times 9.8 \times 10^{10} / 2.7 \times 2 \times (1.0 + 0.24)} = 3,084 \text{ m/sec}$$

念のために、波長を求めるところのようである。

| F (Hz) | 1.0 | 3.0 | 5.0 | 7.0 | 9.0 | 11.0 | 13.0 | 15.0 |
|--------------------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|
| L _T (m) | 3084 | 1028 | 617 | 440 | 343 | 280 | 237 | 206 |

なお、F=15.0 Hzで波長は206mとなり、その1波長の間には節点が約8個含まれることになる。

ここで用いた解析モデルでは、この周波数が信頼できる最大限であろう。

また、図-5.2(b)に対応した解析結果を図-5.4に示した。解析条件などは、上述の場合と同様である。なお、この場合のTHETAは入射波の入射角を鉛直から右向き（東方からの入射）に測ったものであることに注意されたい。

5.3.3 結果の考察

解析結果から次のことが言えよう。

- 1) 地表での変位応答は複雑であるが、周波数が小さい範囲ではその応答倍率はほぼ2倍である。
- 2) しかし、周波数が高くなると位相のずれも生じているので、図からその応答倍率は見ることは困難である。但し、振幅の絶対値（実部と虚部の2乗和の平方根）を取れば、最大応答の応答倍率を求めることができる。
- 3) 地中への振幅遞減は、明確には言うことができない。観測データからは位相を無視して、振幅の最大値で比較し遞減としているが、弾性体であれば、地形の影響が2次的には現れるであろうが、それ程の递減は期待できない。或周波数では逆に増幅することも有り得る。

5.4 地下構造物の応答解析例

5.4.1 解析モデル

解析モデルは2次元（平面ひずみ）とし、図-5.5に示すような3連の空洞ないし空洞を異質物で充填した構造物を考えた。なお、解析には2次のアイソバラメトリックを用い、一つの空洞境界を42節点で表現した。従って、合計では、126節点のモデルである。

このモデルでは、その物性は次のようにある。

周辺岩盤：密度 $\rho = 2.7 \text{ t/m}^3$, 弾性係数 $E = 6.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$, ポアソン比 = 0.24

充填物： 密度 $\rho = 2.2 \text{ t/m}^3$ 、 弹性係数 $E = 1.3 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 ポアソン比 = 0.30

また、入射波としては5.3に用いたのと同じS V変位波を考えた。なお、入射波の入射角度 θ は鉛直から時計廻り方向に測った角度とした。

5.4.2 解析結果

空洞壁面の変位応答倍率の解析結果を図-5.6に示す。 θ は入射波の入射角、 F は周波数である。この場合の周波数 $F = 10\text{Hz}$ 及び 50Hz は、波長ではそれぞれ 308m 及び 62m に対応している。また、REAL PART 及び IMAGINARY PART はそれぞれ、波の山及び腹が座標原点に位置した場合を意味している。

また、空洞を充填物で満たした場合について同様の結果を示せば図-5.7のようである。この図は、図-5.6の場合と比較するために同様な表現にしておいた。

次に、空洞壁面上の応力の応答倍率を図-5.8に示す。この図は、横軸は壁面上の節点番号を左から右へ展開して並べ、縦軸にはその点の無次元化した壁面応力を描いたものである。 θ は入射波の入射角、 F は周波数である。また、REAL PART 及び IMAGINARY PART はそれぞれ、波の山及び腹が座標原点に位置した場合を意味している。

また、空洞を充填物で満たした場合について同様の結果を示せば図-5.9のようである。この図は、図-5.8の場合と比較するために同様な表現にしておいた。

5.4.3 解析結果の考察

変位応答倍率の図を見れば明らかのように、周波数が 10Hz 程度では空洞の変形はほぼ剛体的である。言い替えれば、空洞は静的な状態となんら差異がないと言える。周波数が 50Hz では、動的な効果が若干現れている。この場合でも波長が 62m もあるので、空洞の径に対して約15倍であり、顕著な動的な効果は現れない。このことは斜め入射の波に対しても言えることである。

また、空洞を周辺岩盤の $1/50$ の弾性率の材料で充填した場合についても、ほぼ同様のことが言える。この程度の充填材料では空洞と同様と見なしてもよいことが分かる。

上述のことは、応力についても同様である。即ち、空洞壁面の応力倍率は波長が空洞の約15倍以上もあれば、静的な場合とほぼ同様であり、また周辺岩盤の $1/50$ 程度の弾性率の材料で空洞を充填しても応力を一様化する様な（応力集中を和らげるような）効果はないと言える。

5.5 地下構造物の耐震特性

一般的に、地下構造物は地上構造物に比して耐震的には優れていると言われている。その根拠は、しばしば地震動の地下遮減に求められている。しかし、地下遮減率は余り明確ではなく、通常言われていることとは異なるようである。それは、周波数、換言すれば地震波の波長に依存し、また局所的な地形に影響される。或る周波数でかえって地中で増幅されることも有り得ることに注意しなければならない。しかし、地上の構造物のように共振を起こすことはなく、またロッキング的な振動を生じることはない。地上構造物の破壊とか破損が主として個のような現象に起因していることを考えると、地下構造物にはこのような現象が起らないので、それは耐震的には優れていると言うことはできよう。なお、地下構造物の中に設置された構造体では地上構造物と同様な現象が起こることに注意しなければならない。

5.6 おわりに

ここでは弾性波動解析の手法として最も有力である境界要素法について述べ、効率的な数值解法にも触れた。次いで、具体的な解析例として、釜石鉱山をモデル化して2次元解析を試みた。これらの例から、境界要素法の有効性が示された。

モデル解析の結果を基に地下遮減の解釈を試みた。しかし、通常言われているようなことを明確に説明付けることはできないようである。

また、地下空洞の動的な挙動を解析したが、ここで考えた程度の寸法の空洞（径が4m程度）では、地震動に伴う動的な効果は殆ど現れないことが分かった。

なお、ここでは2次元解析だけしか試みなかった。しかし、2次元解析では波動のエネルギー伝播が平面内に閉じ込められているので、現実の3次元の波動に比して特に散乱波の幾何減衰（dispersion）効果を小さく見積過ぎており、おそらく解析結果にもその影響が出ているであろう。できれば簡単化したモデルを用いてでも、3次元解析で検証することが望ましい。

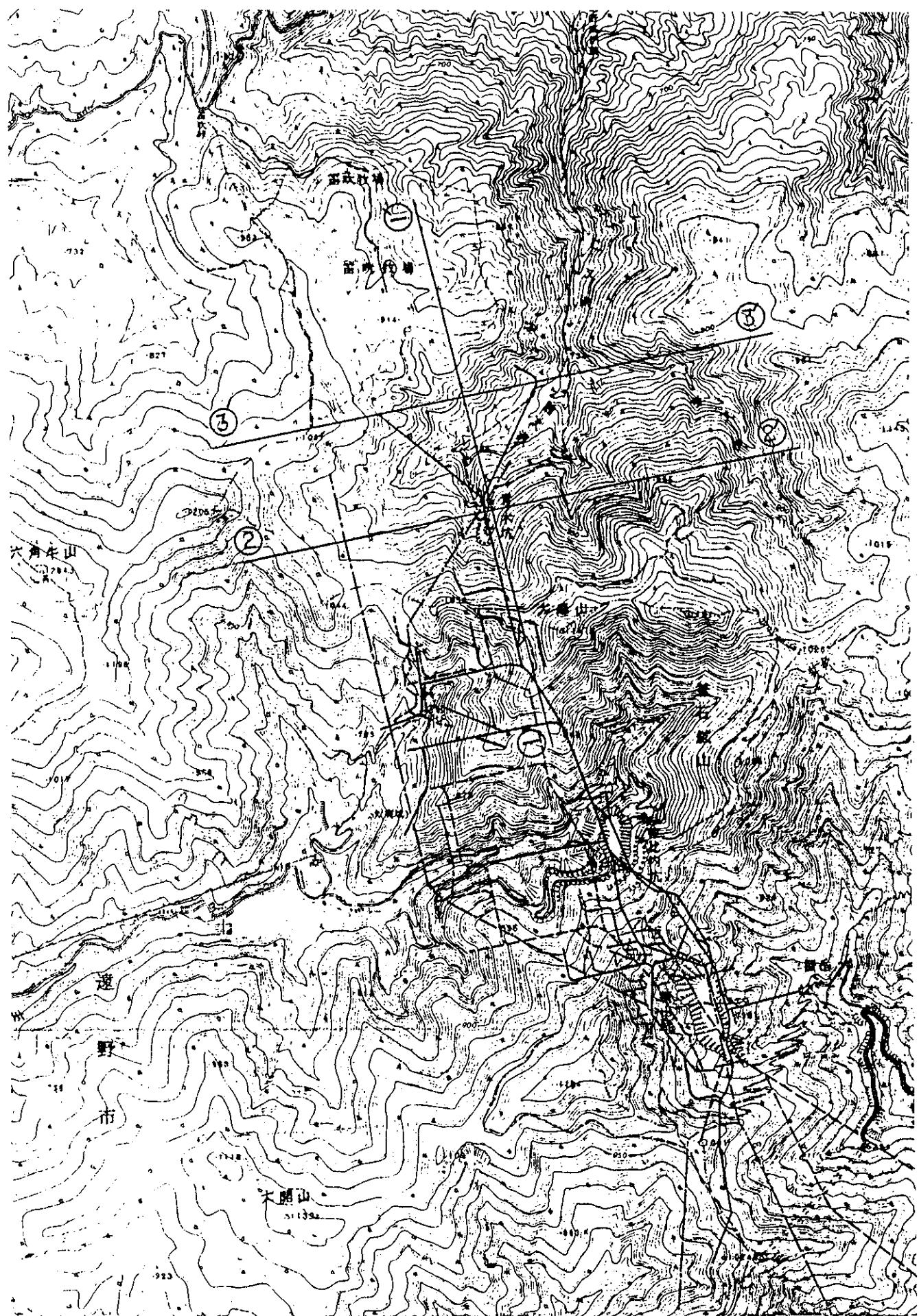
参考文献

- 1) 地震に関する調査報告(IV), 資源・素材学会, 1988.
- 2) 地震に関する調査報告(V), 資源・素材学会, 1989.
- 3) 地震に関する調査報告(VI), 資源・素材学会, 1990.
- 4) Kobayashi, S.: Elastodynamics, Chapt. 4, in Boundary Element Methods, in Mechanics, (ed.) D. E. Beskos, North-Holland, 1987.
- 5) Kobayashi, S & N. Nishimura: Transient Stress Analysis of Tunnels and Caverns

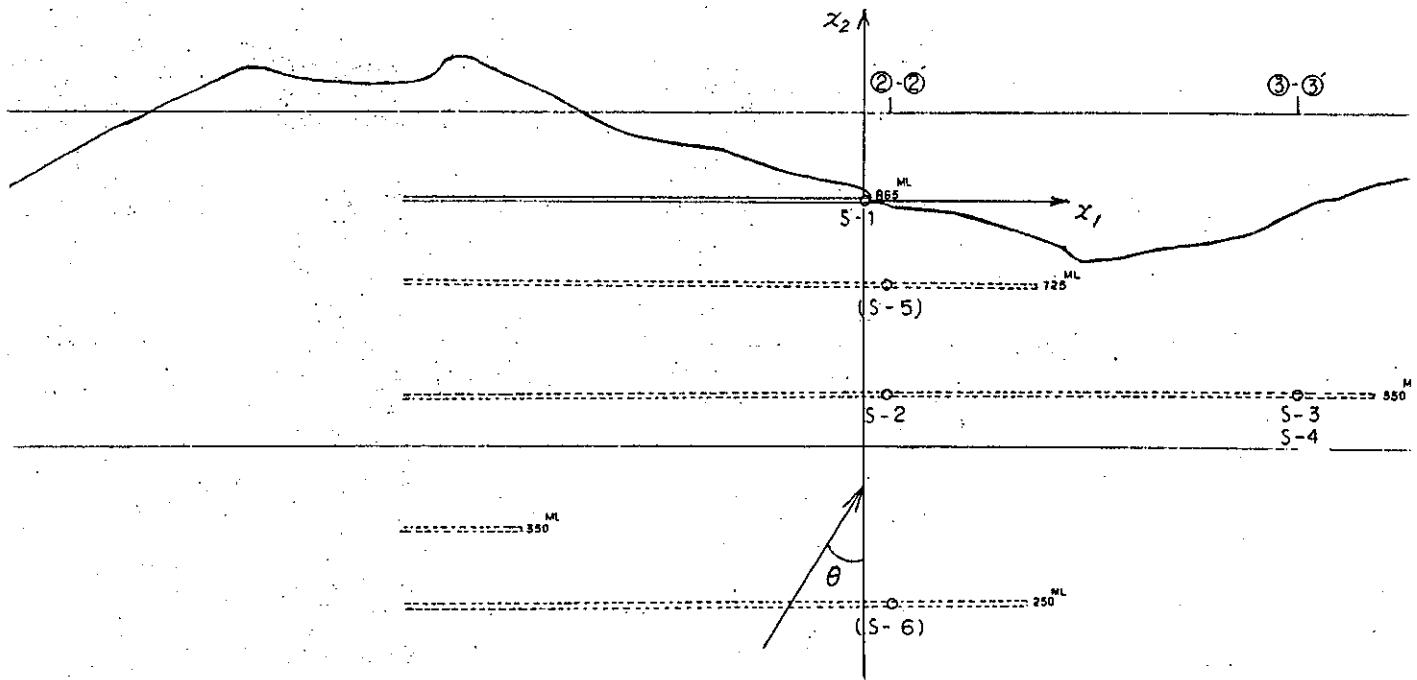
of Arbitrary Shape due to Travelling Waves, Developments of Boundary Element Methods-2, (eds.) P. K. Banerjee & R. P. Shaw, Chapt. 7, Applied Science Publishers, 1982.

6) 境界要素法研究会(編) : 境界要素法の理論と応用, コロナ社, 昭和61年.

7) 神谷泰範, 西村直志, 小林昭一: ベクトルプロセッサーによる境界要素法の高速化とその動弾性問題への適用, 境界要素法論文集, 第6巻, p. 31-36, 境界要素法研究会, 1989.

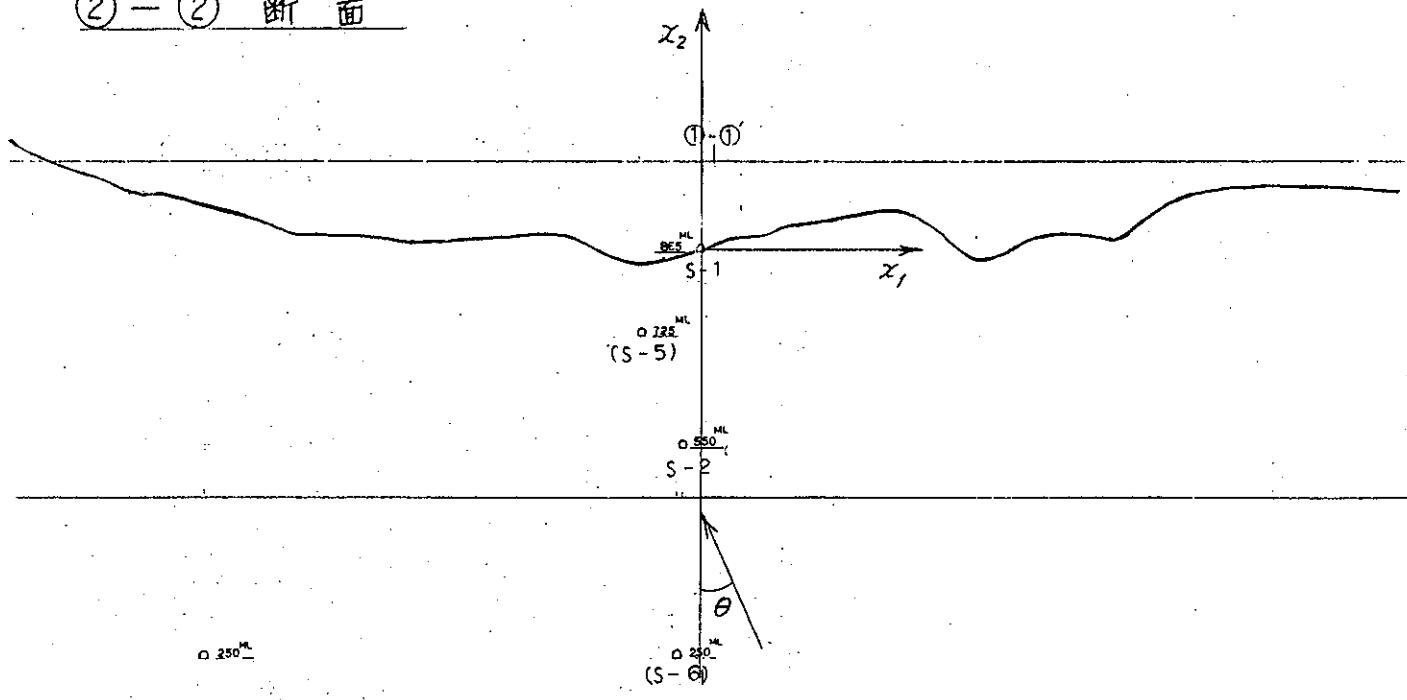


① - ① 断面



(a)

② - ② 断面



(b)

図-5.2 地震波動解析モデル断面

REAL PART



IMAGINARY PART



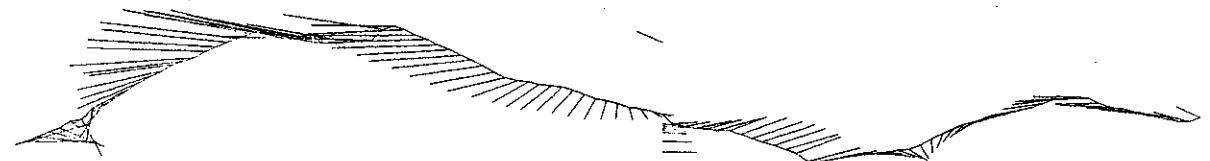
THETA=0
F = 1.0 (HZ)

図-5.3-1(a) 変位SV入射波による変位応答図。断面1-1. 入射角=0°

REAL PART



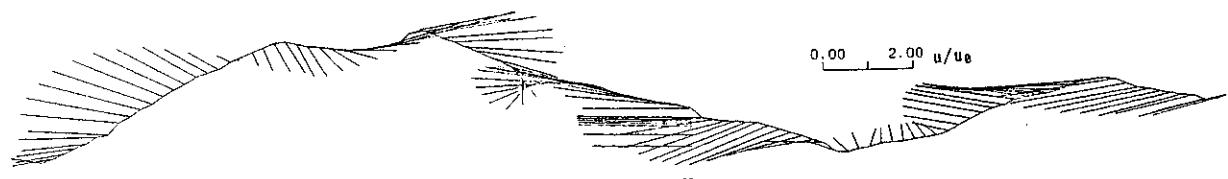
IMAGINARY PART



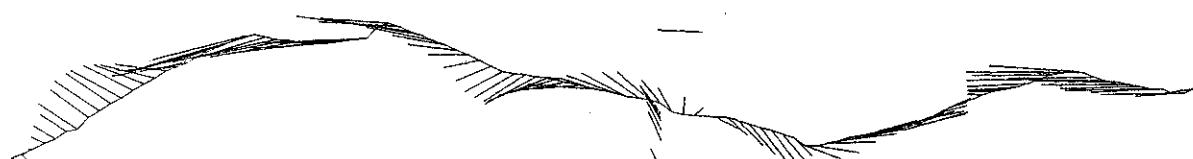
THETA=0
F = 3.0 (HZ)

図-5.3-1(b) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART



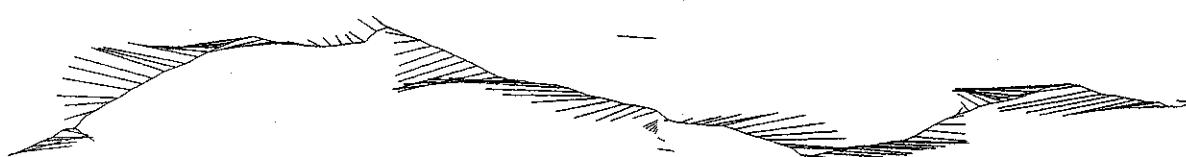
THETA=0
F = 5.0 (HZ)

図-5.3-1(c) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART



THETA=0
F = 7.0 (HZ)

図-5.3-1(d) 続き

REAL PART

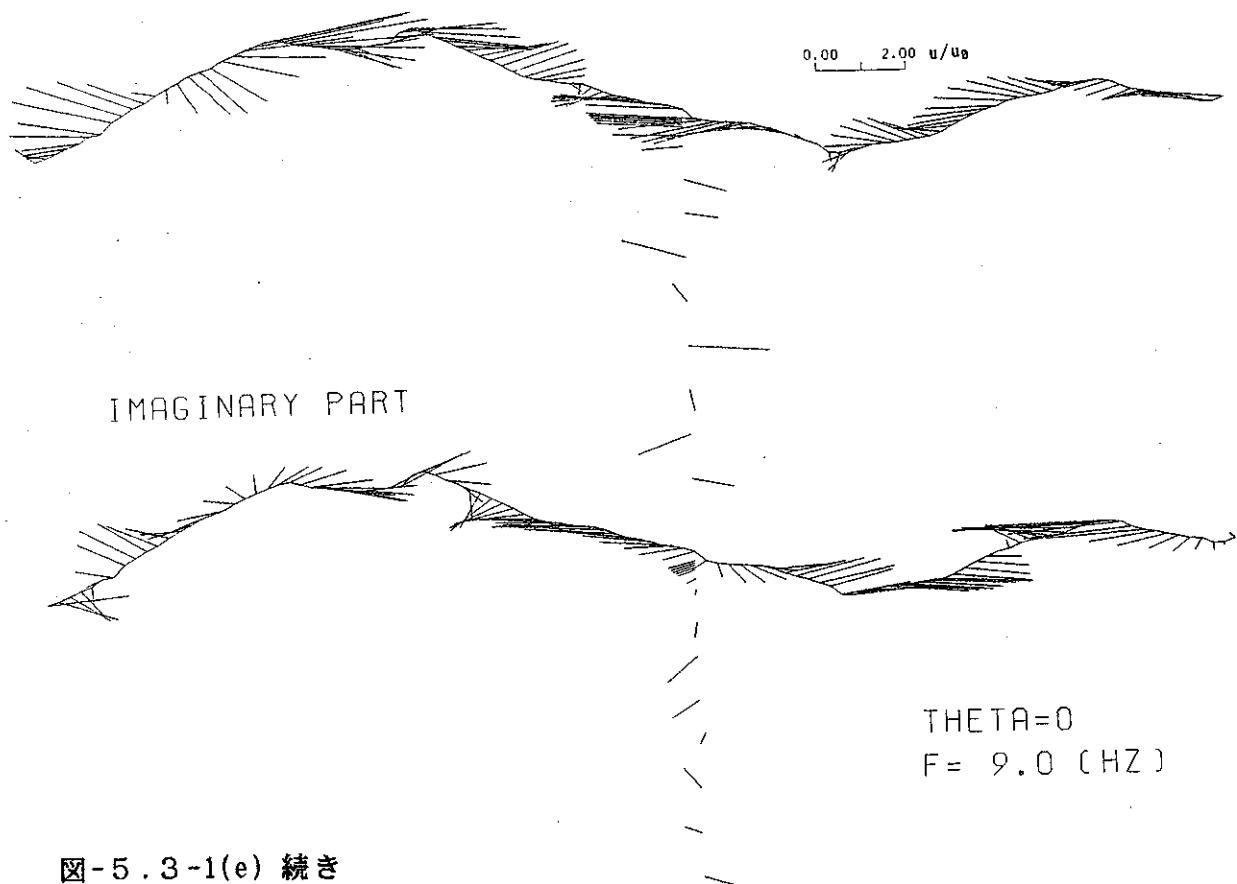


図-5.3-1(e) 続き

REAL PART

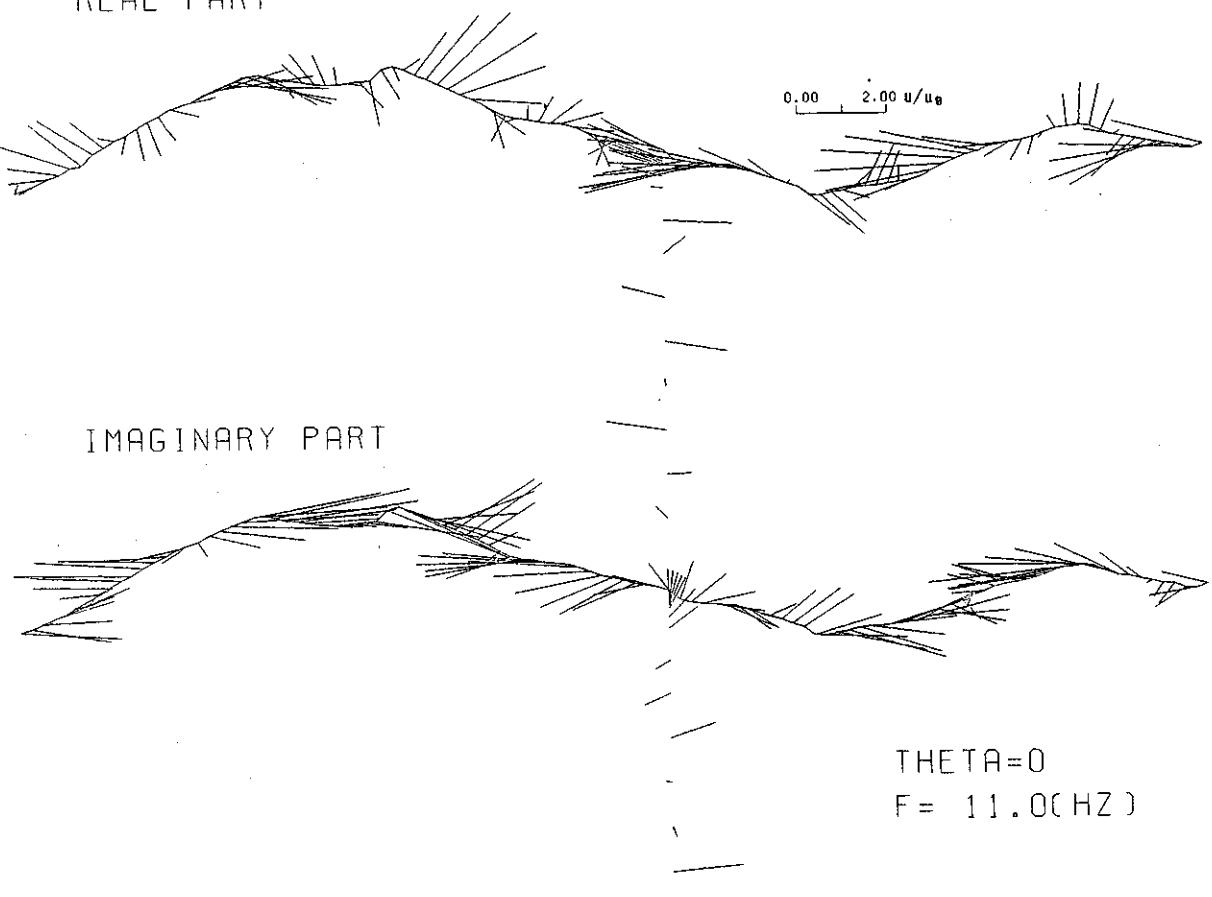
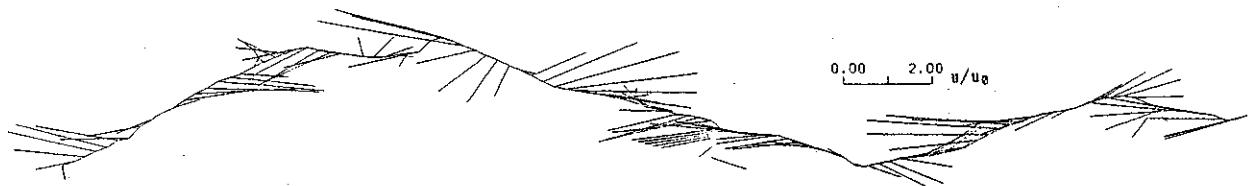


図-5.3-1(f) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART

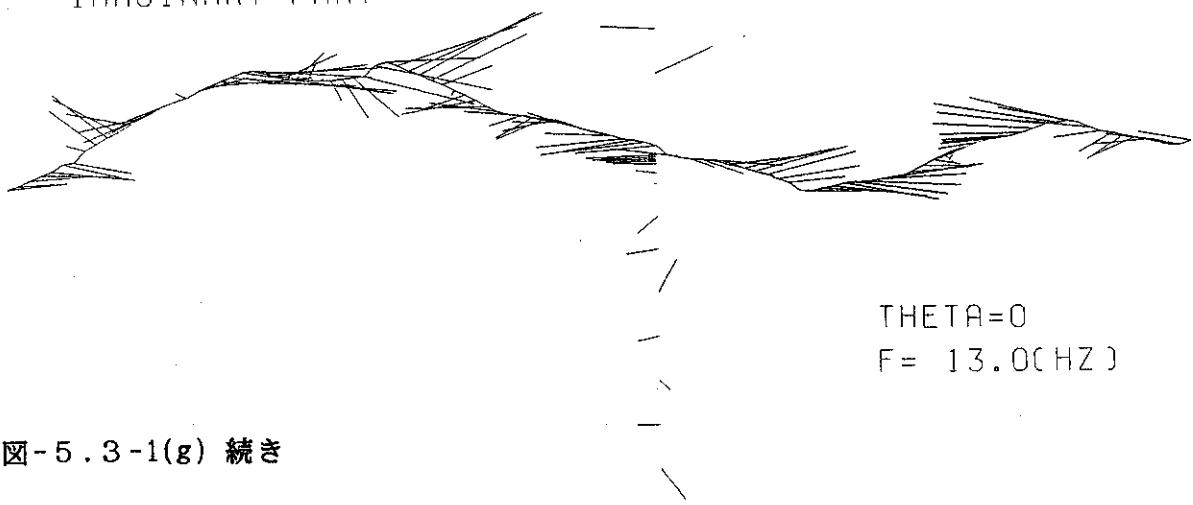
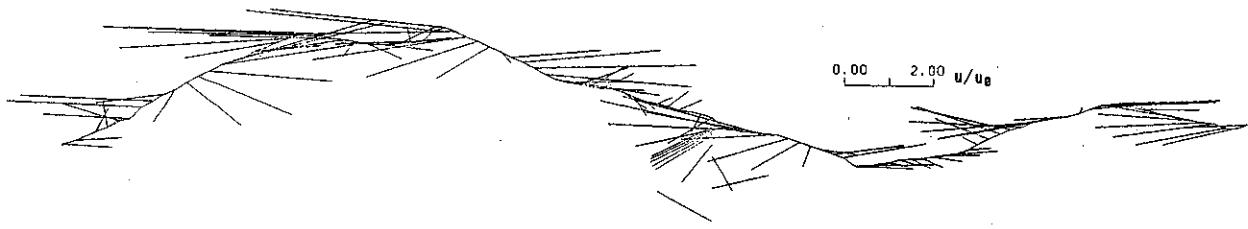


図-5.3-1(g) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART

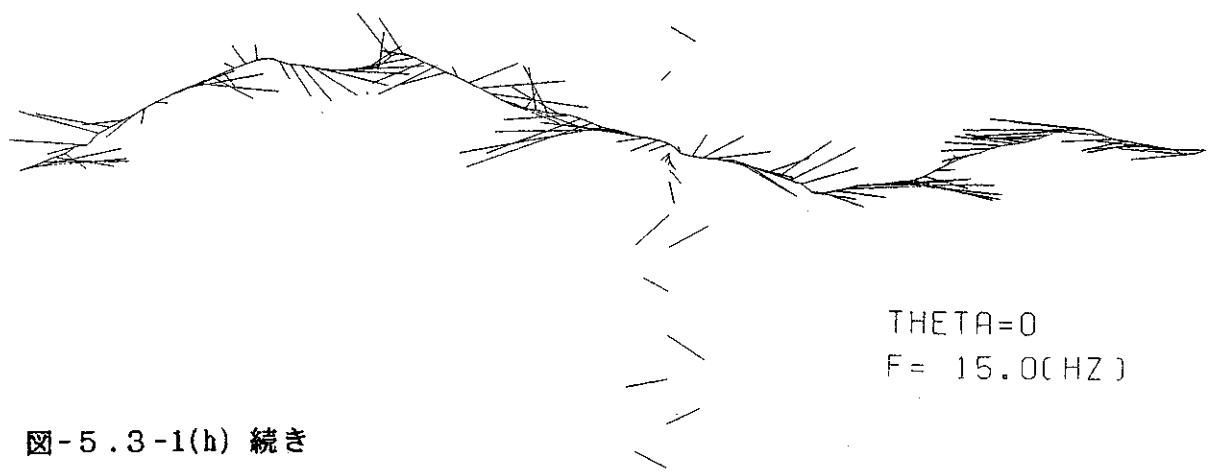
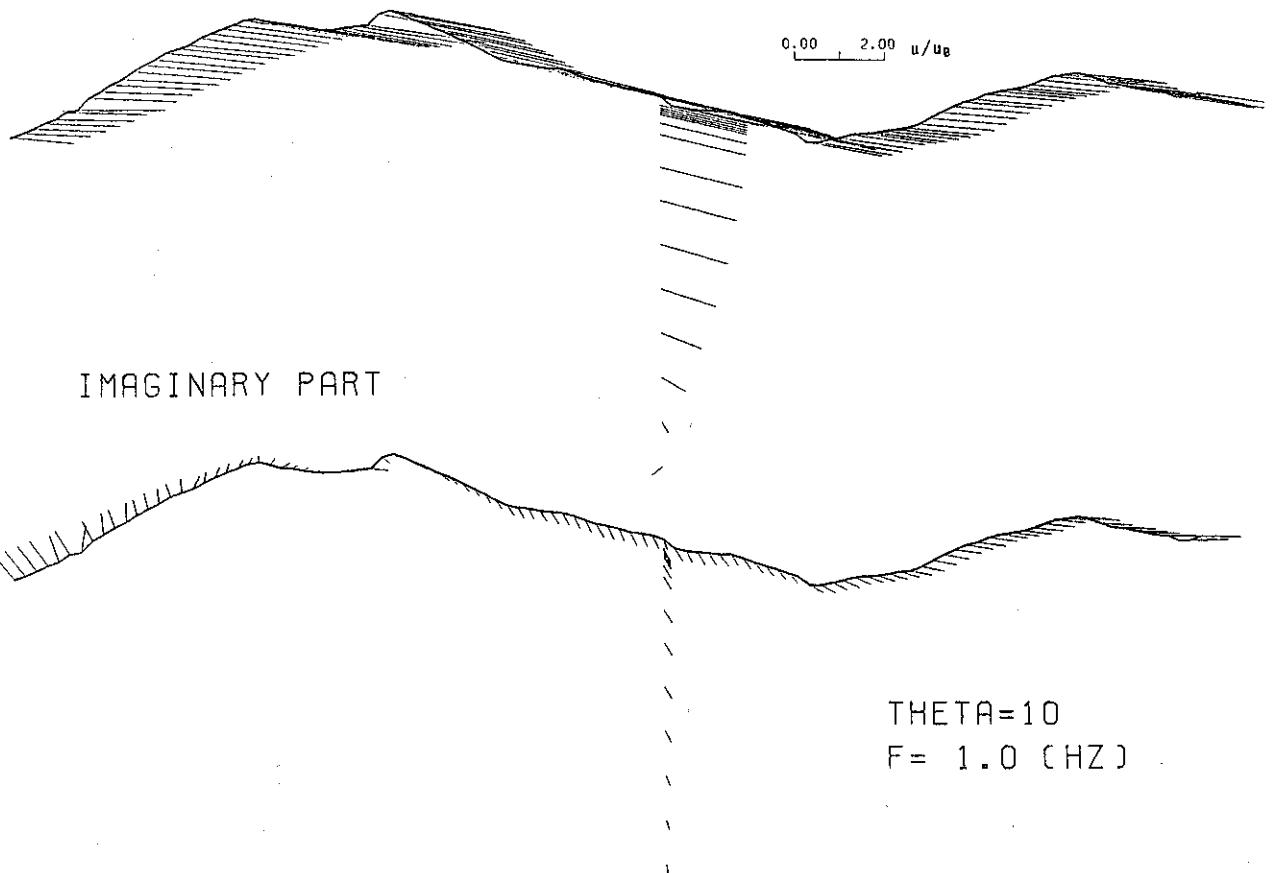


図-5.3-1(h) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART

THETA=10
F = 1.0 [HZ]

図-5.3-2(a) 変位 SV 入射波による変位応答図. 断面1-1. 入射角=10°

REAL PART

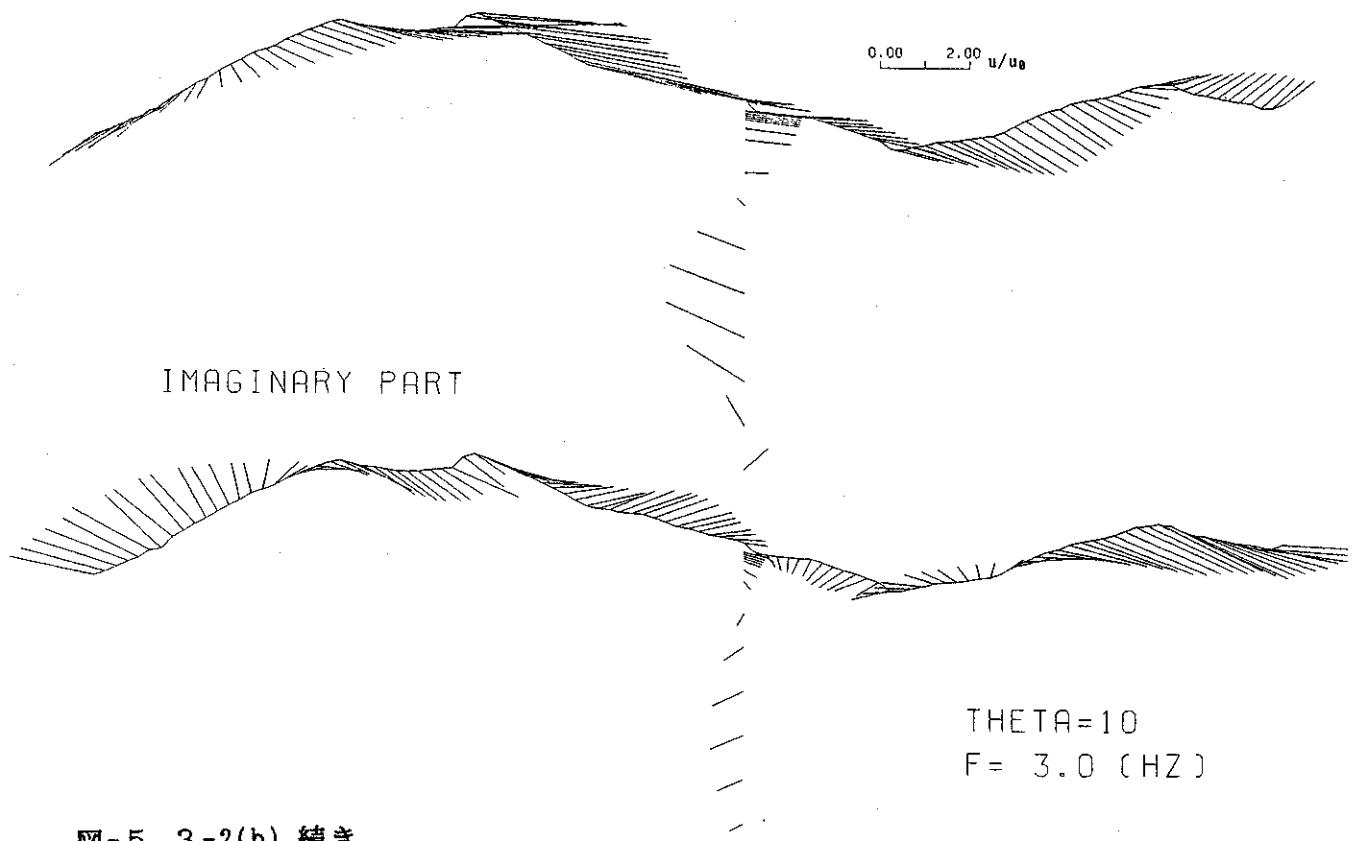


図-5.3-2(b) 続き

REAL PART

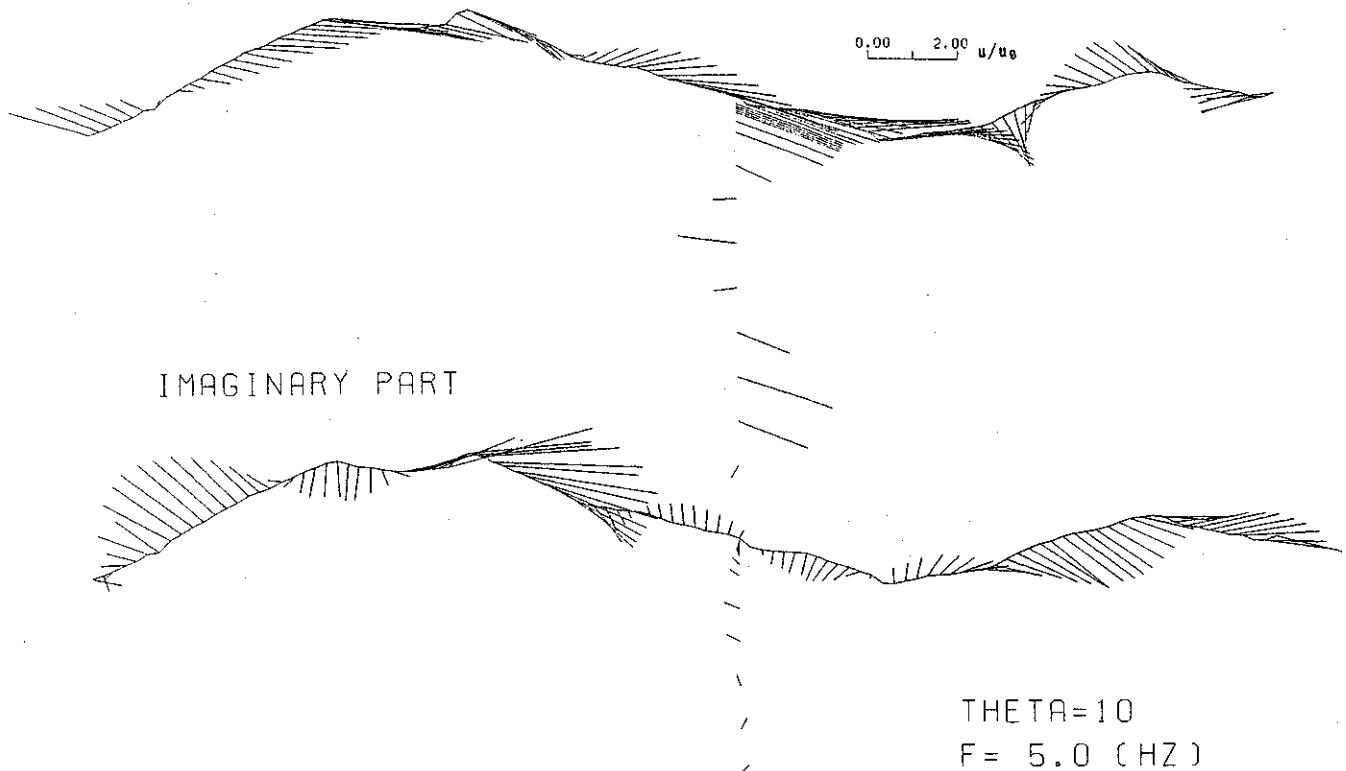


図-5.3-2(c) 続き

REAL PART

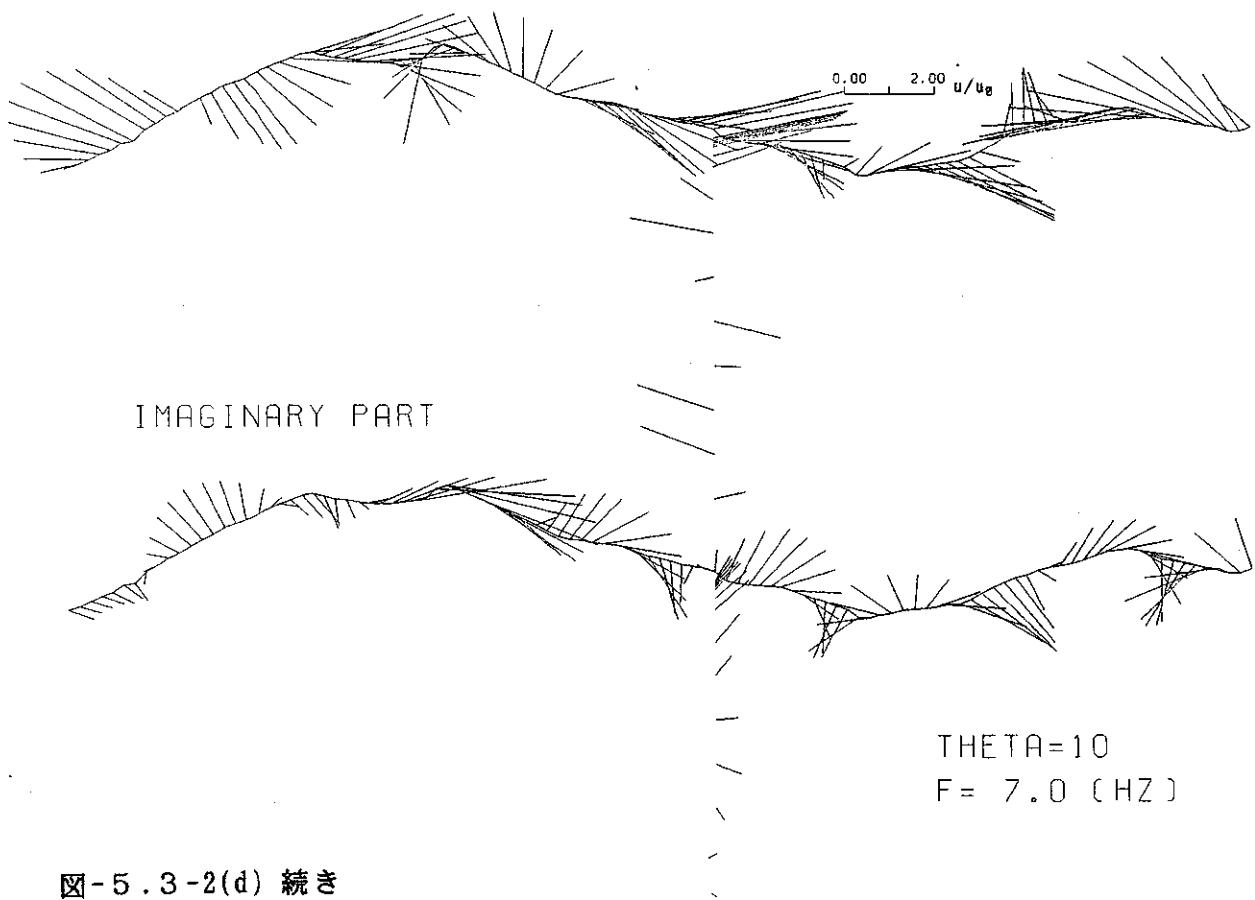
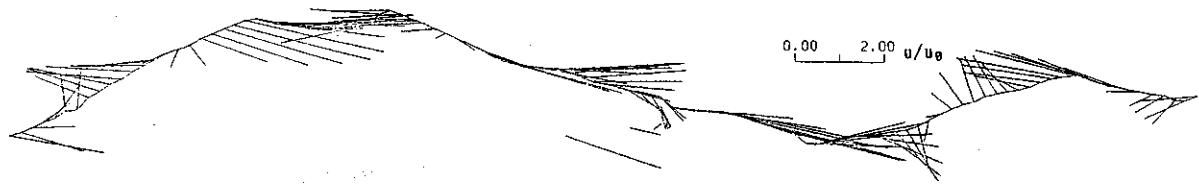
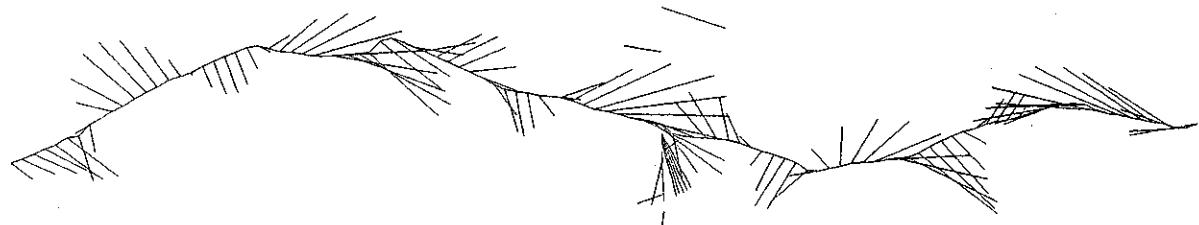


図-5.3-2(d) 続き

REAL PART



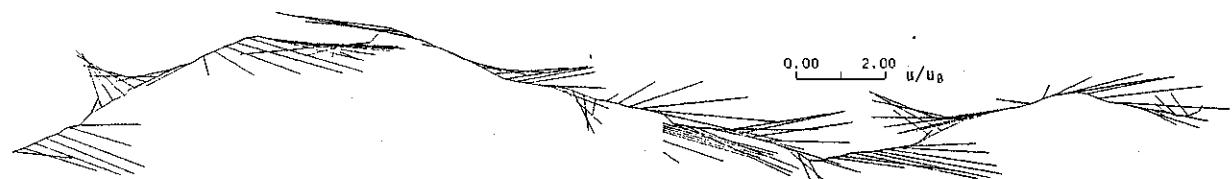
IMAGINARY PART



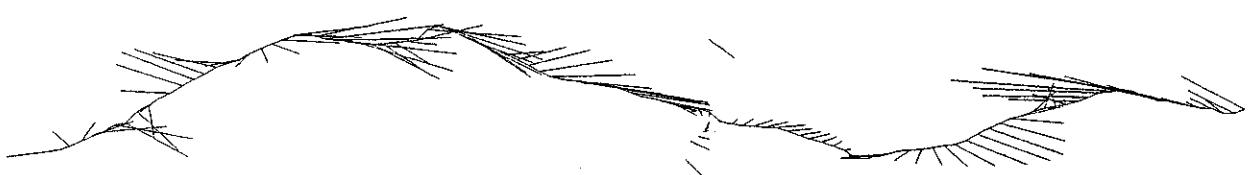
THETA=10
F = 9.0 (HZ)

図-5.3-2(e) 続き

REAL PART



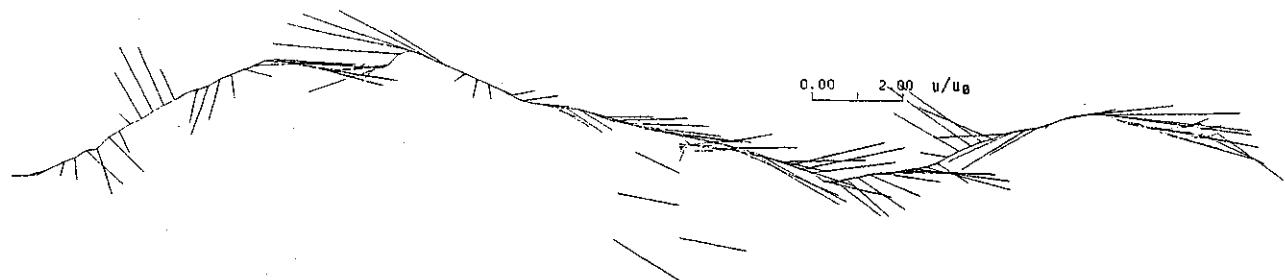
IMAGINARY PART



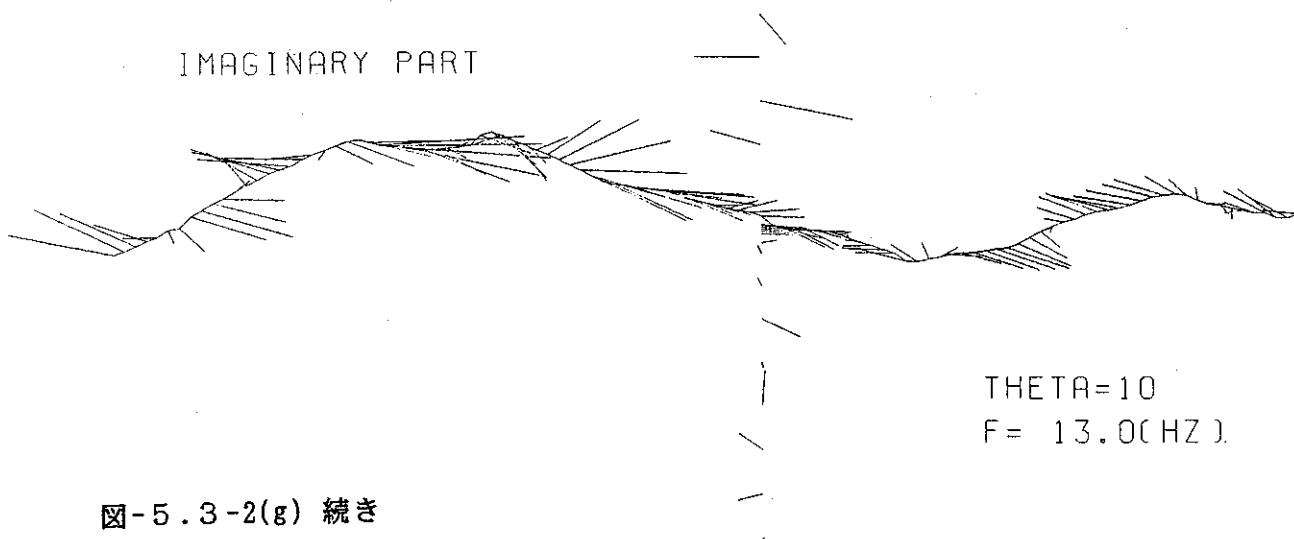
THETA=10
F = 11.0 (HZ)

図-5.3-2(f) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART



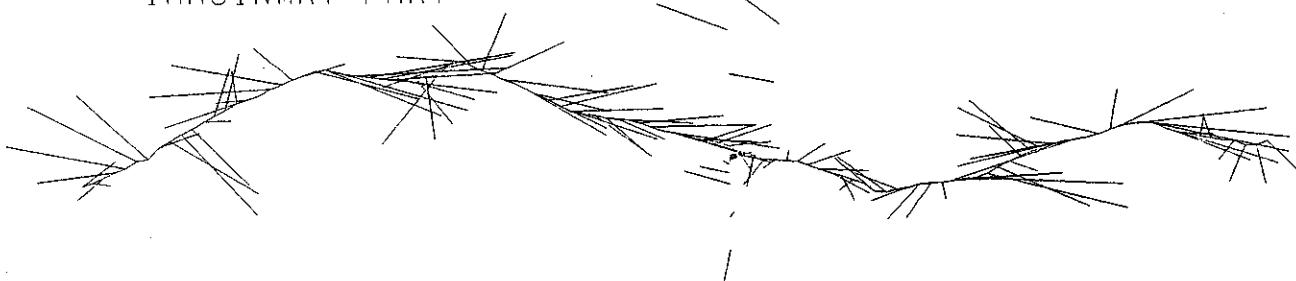
THETA=10
F = 13.00(HZ)

図-5.3-2(g) 続き

REAL PART



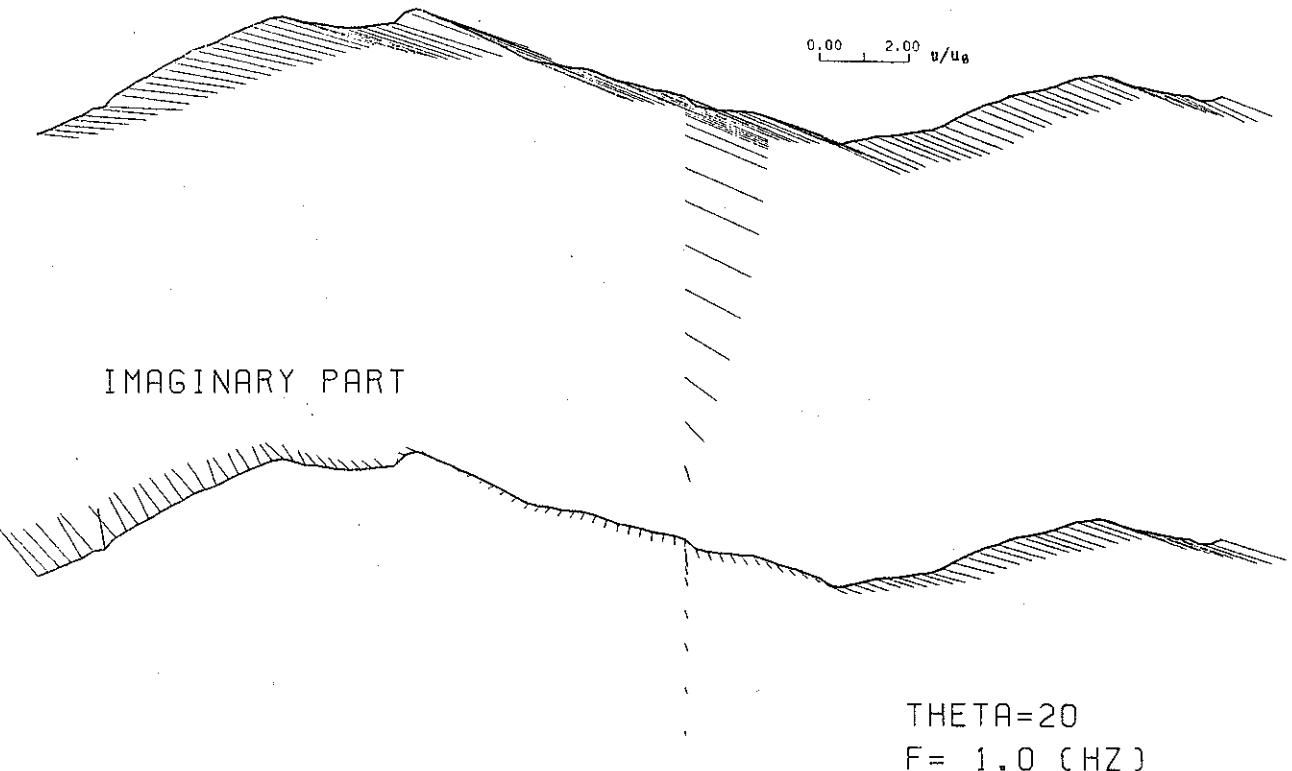
IMAGINARY PART



THETA=10
F = 15.00(HZ)

図-5.3-2(h) 続き

REAL PART

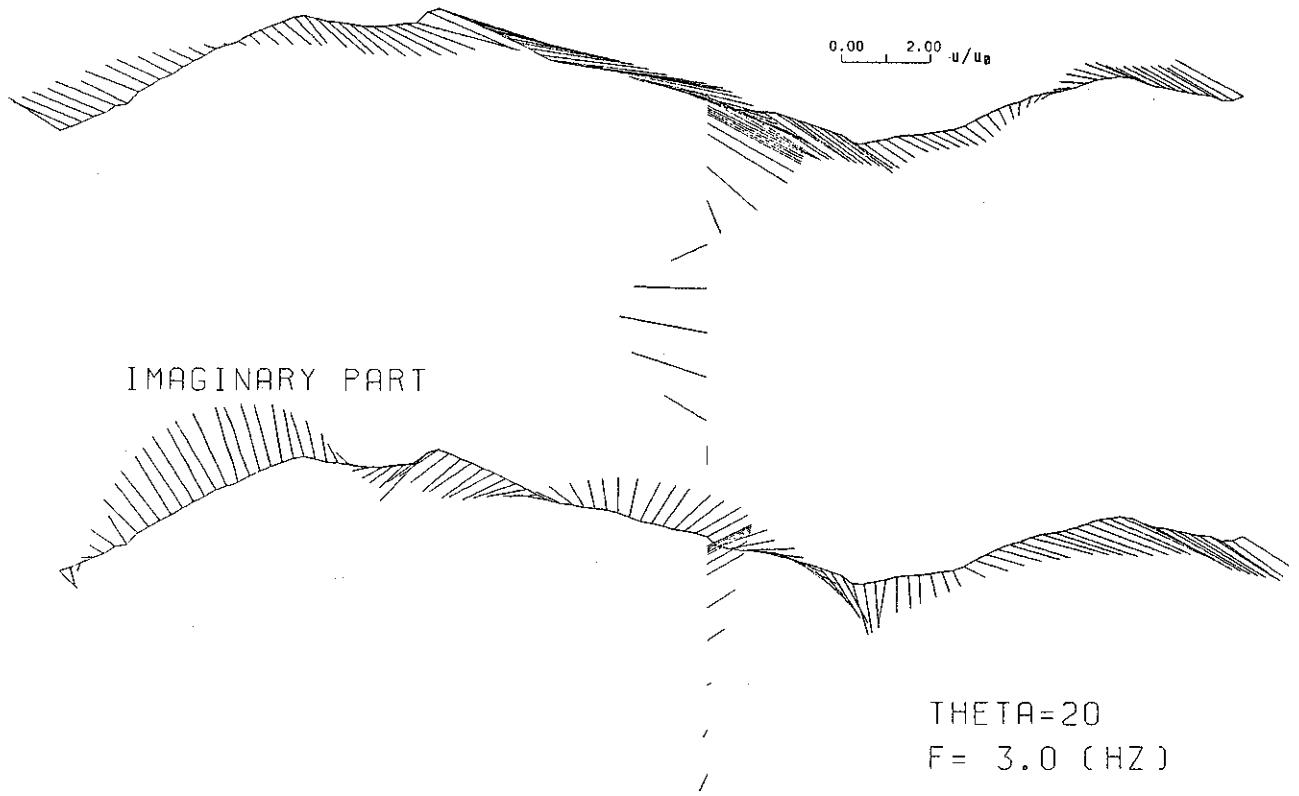


IMAGINARY PART

$\Theta = 20$
 $F = 1.0 \text{ (Hz)}$

図-5.3-3(a) 変位 SV 入射波による変位応答図. 断面1-1. 入射角=20°

REAL PART

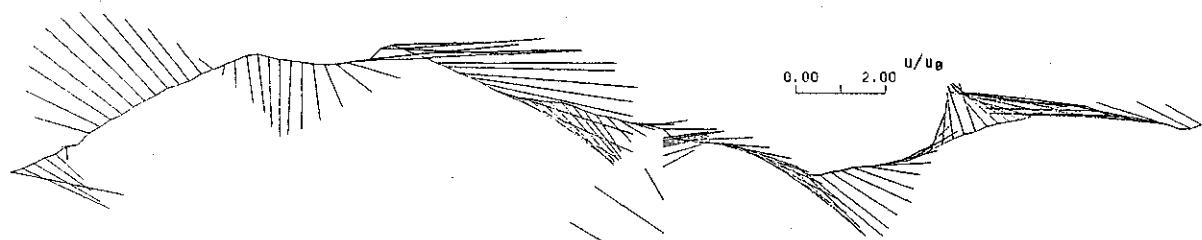


IMAGINARY PART

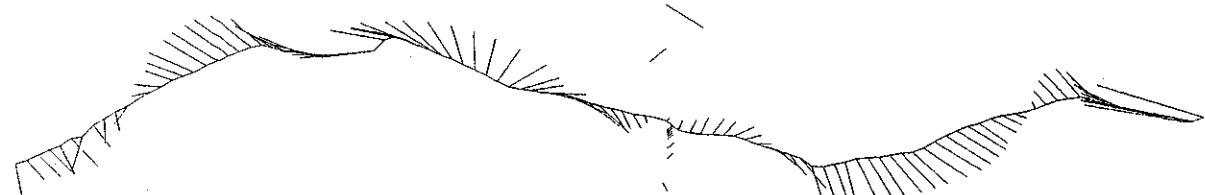
$\Theta = 20$
 $F = 3.0 \text{ (Hz)}$

図-5.3-3(b) 続き

REAL PART



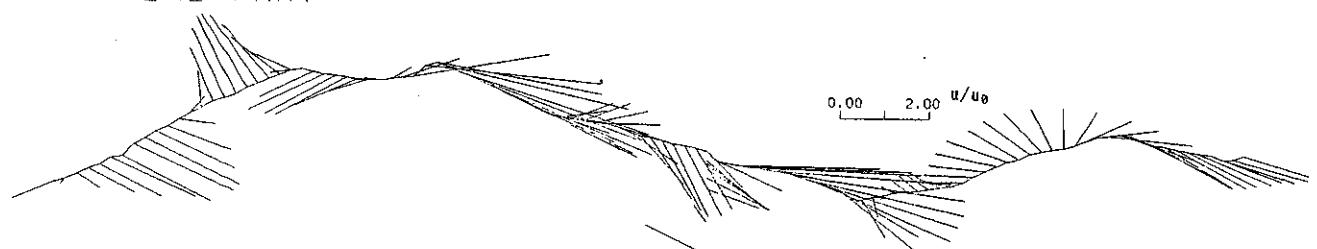
IMAGINARY PART



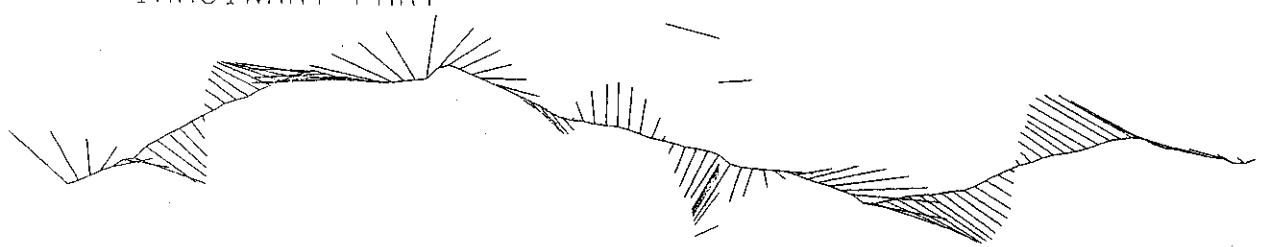
THETA=20
F = 5.0 (HZ)

図-5.3-3(c) 続き

REAL PART



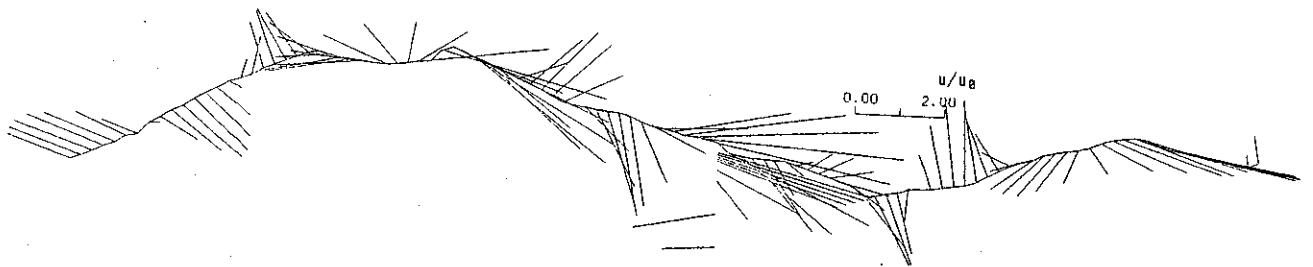
IMAGINARY PART



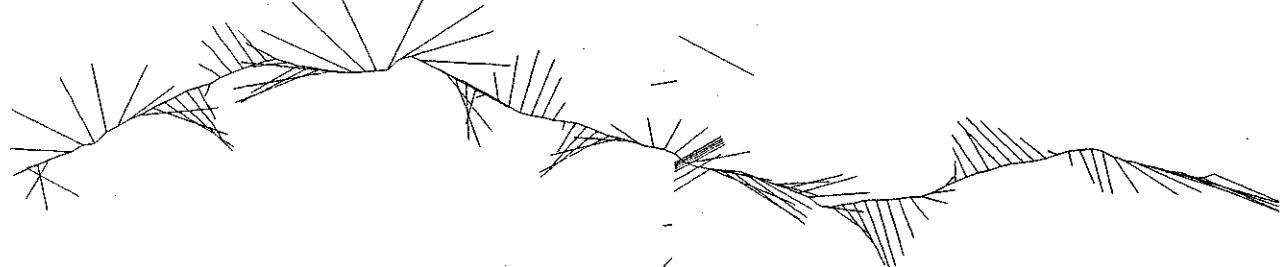
THETA=20
F = 7.0 (HZ)

図-5.3-3(d) 続き

REAL PART



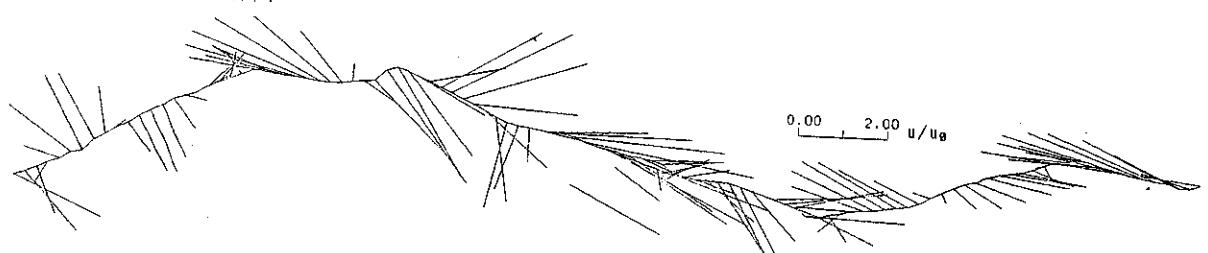
IMAGINARY PART



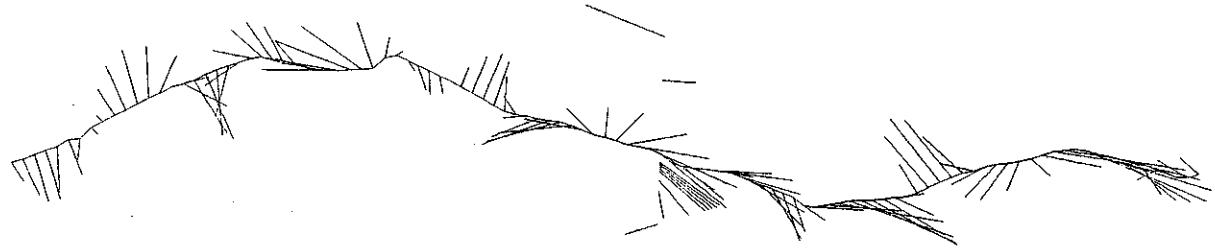
THETA=20
F = 9.0 (HZ)

図-5.3-3(e) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART



THETA=20
F = 11.0 (HZ)

図-5.3-3(f) 続き

REAL PART

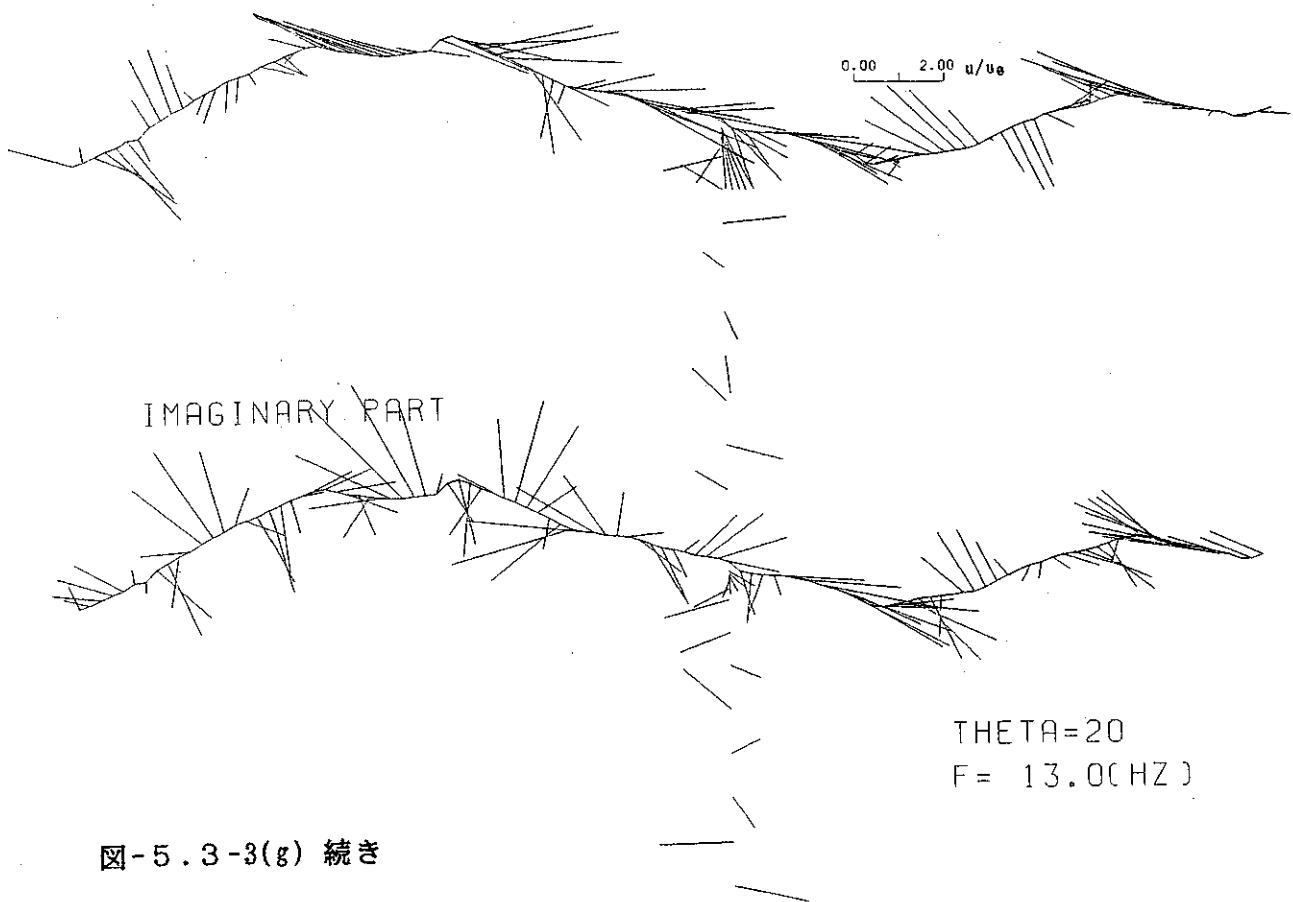


図-5.3-3(g) 続き

REAL PART

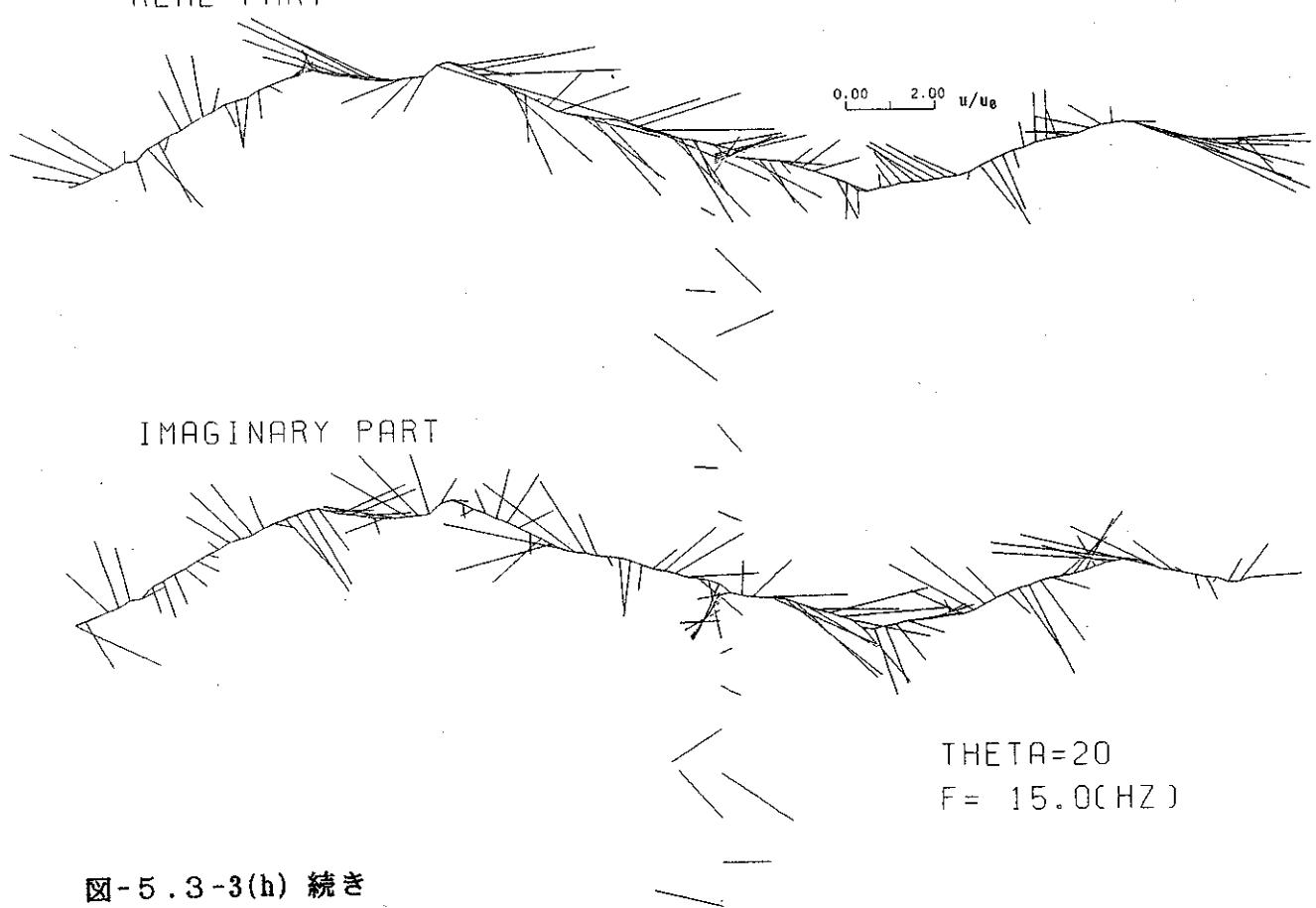


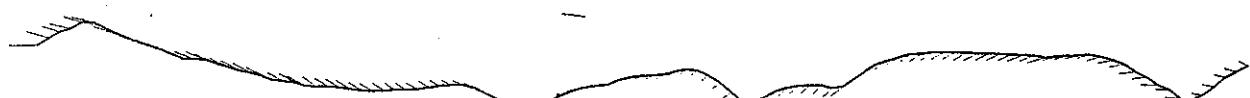
図-5.3-3(h) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART

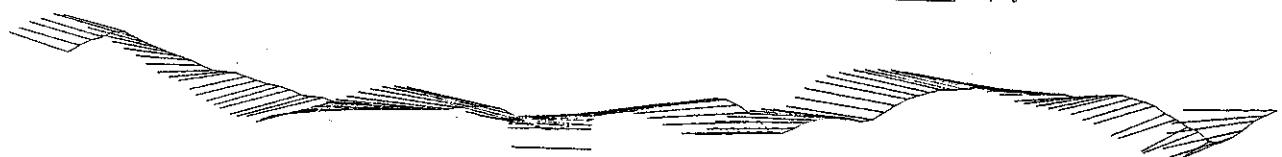


THETA = 0
F = 1.0 (HZ)

図-5.4-1(a) 変位 SV 入射波による変位応答図。断面 2-2. 入射角=0°

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART



THETA = 0
F = 3.0 (HZ)

図-5.4-1(b) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART



THETA = 0
F = 5.0 (HZ)

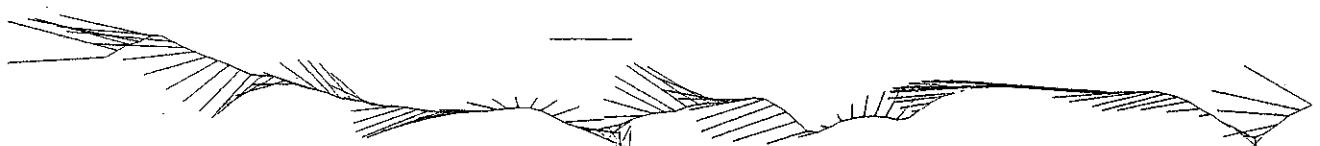
図-5.4-1(c) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART

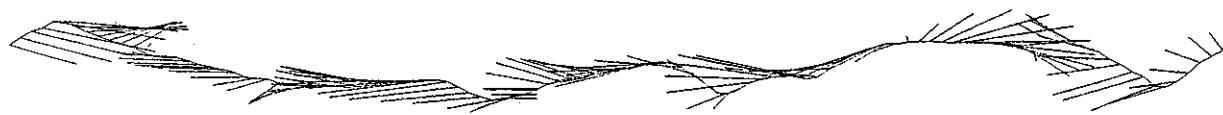


THETA = 0
F = 7.0 (HZ)

図-5.4-1(d) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



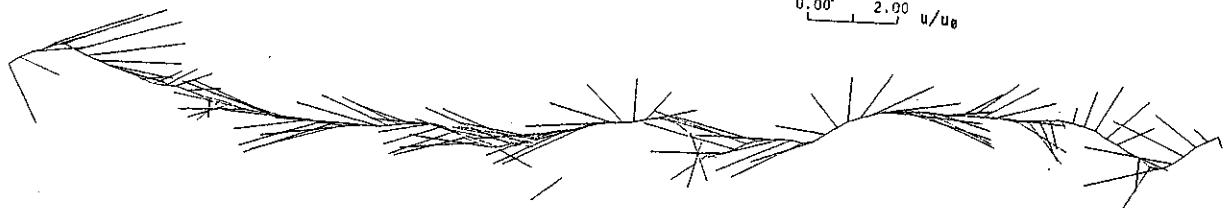
IMAGINARY PART

THETA = 0
 $F = 9.0 \text{ (Hz)}$

図-5.4-1(e) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



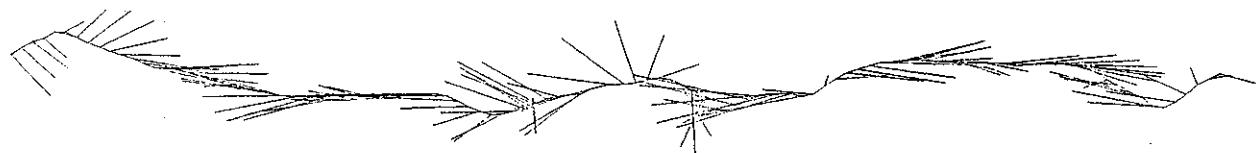
IMAGINARY PART

THETA = 0
 $F = 11.0 \text{ (Hz)}$

図-5.4-1(f) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



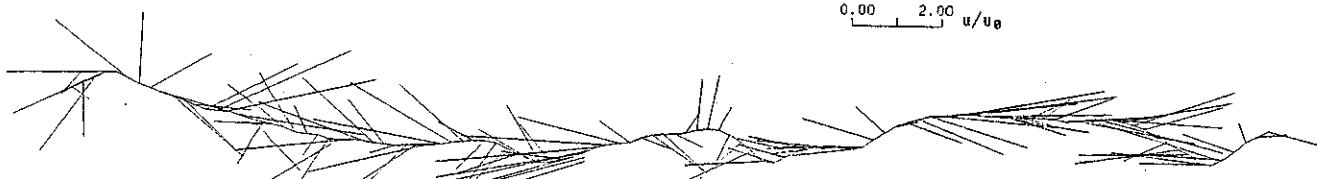
IMAGINARY PART

THETA = 0
F = 13.0(HZ)

図-5.4-1(g) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART

THETA = 0
F = 15.0(HZ)

図-5.4-1(h) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART

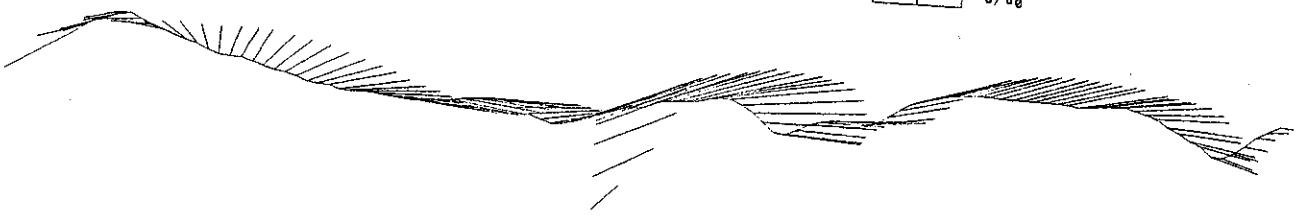


THETA=10
F = 1.0 (HZ)

図-5.4-2(a) 変位SV入射波による変位応答図. 断面2-2. 入射角=10°。

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART



THETA=10
F = 3.0 (HZ)

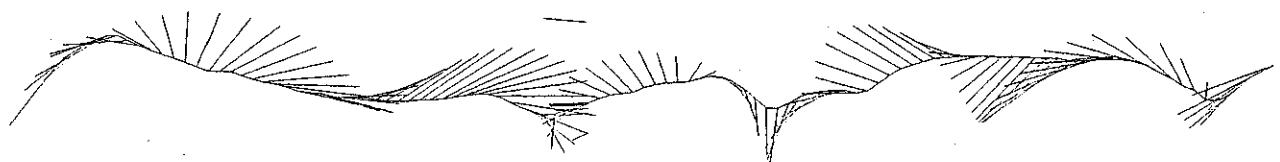
図-5.4-2(b) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART

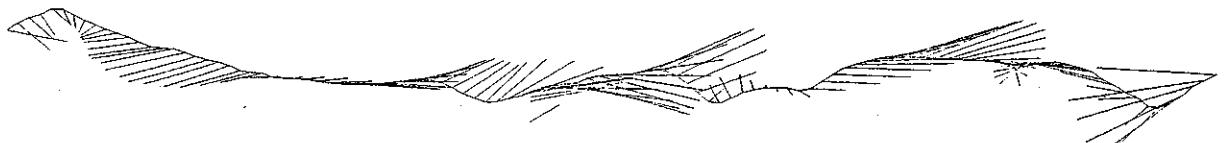


THETA=10
F = 5.0 (HZ)

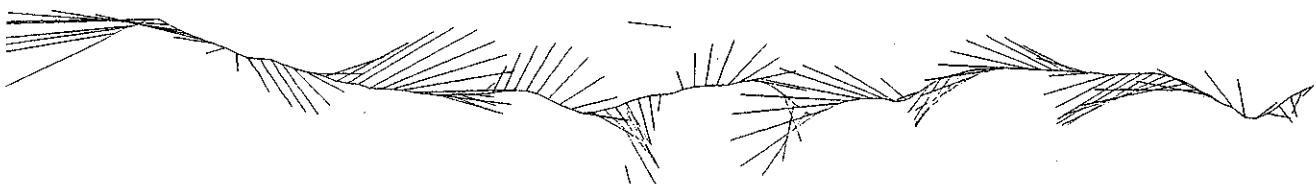
図-5.4-2(c) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



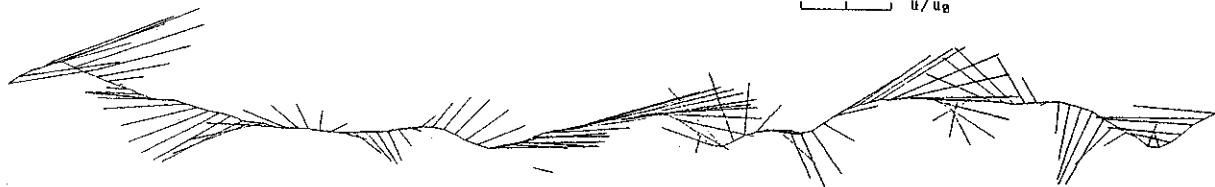
IMAGINARY PART



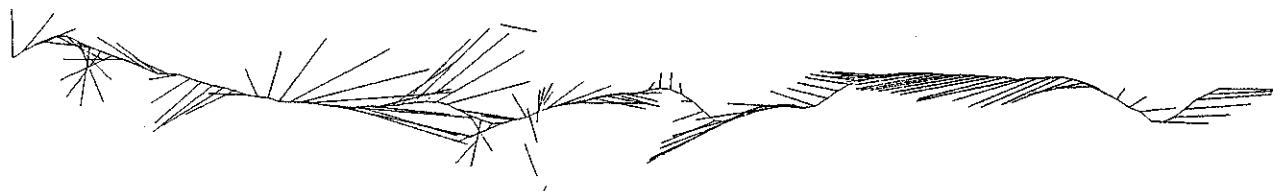
THETA=10
F = 7.0 (HZ)

図-5.4-2(d) 続き

REAL PART



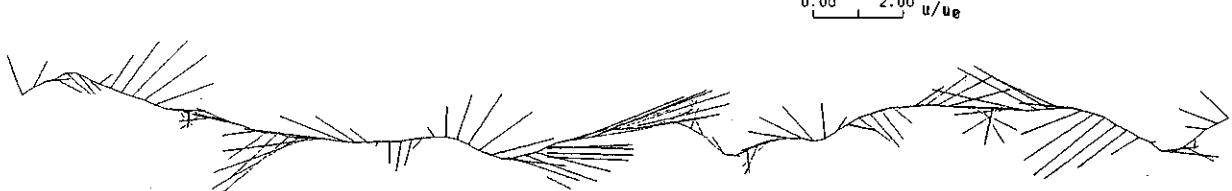
IMAGINARY PART



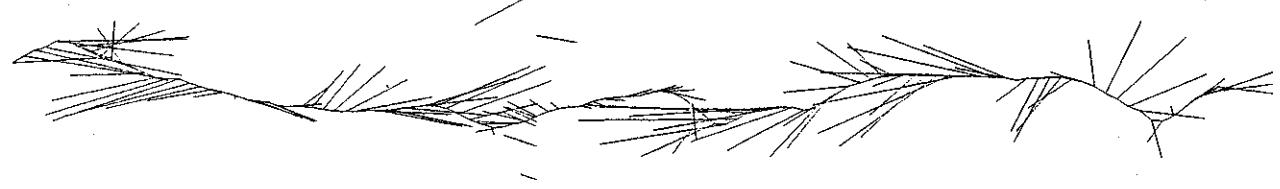
THETA=10
F = 9.0 (HZ)

図-5.4-2(e) 続き

REAL PART



IMAGINARY PART

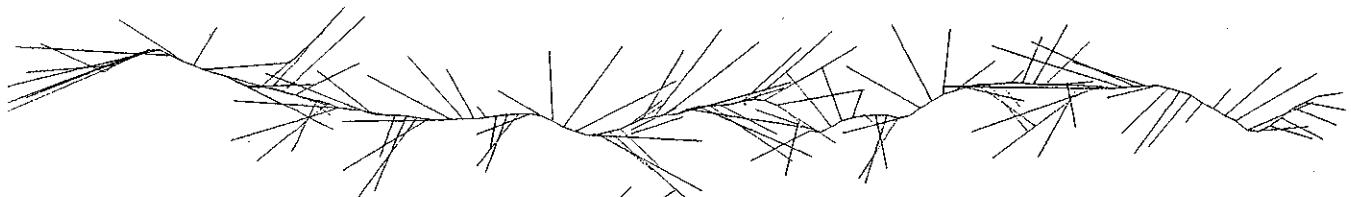


THETA=10
F = 11.0 (HZ)

図-5.4-2(f) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART

THETA=10
F= 13.00(HZ)

図-5.4-2(g) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



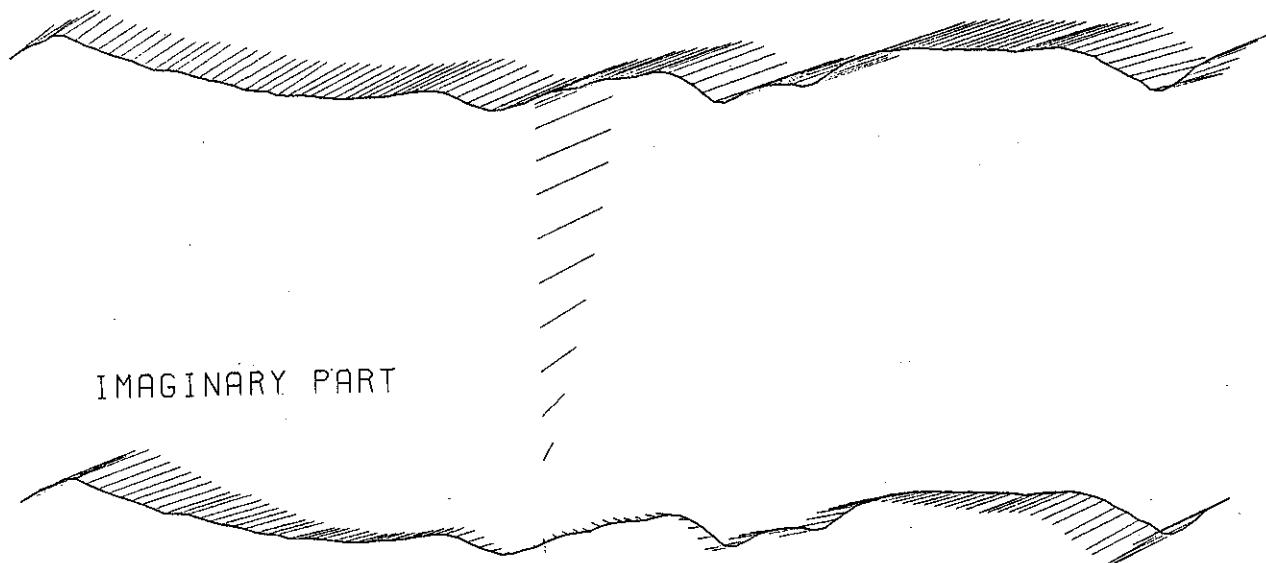
IMAGINARY PART

THETA=10
F= 15.00(HZ)

図-5.4-2(h) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0

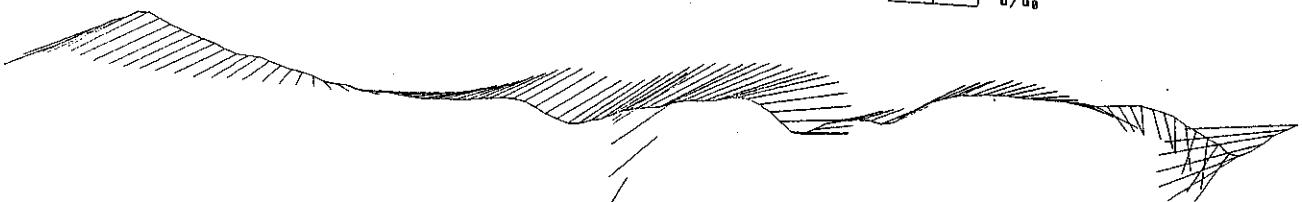


THETA=20
F = 1.0 (HZ)

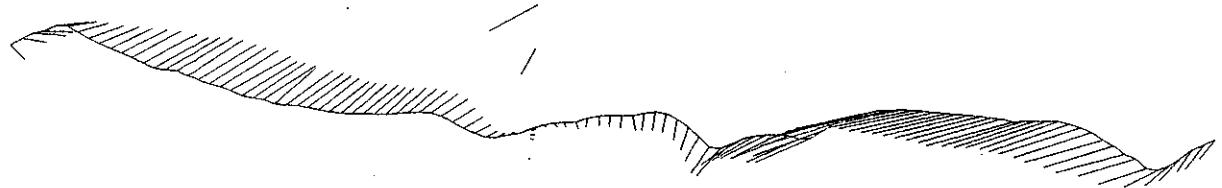
図-5.4-3(a) 変位SV入射波による変位応答図. 断面2-2. 入射角=20°

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART



THETA=20
F = 3.0 (HZ)

図-5.4-3(b) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



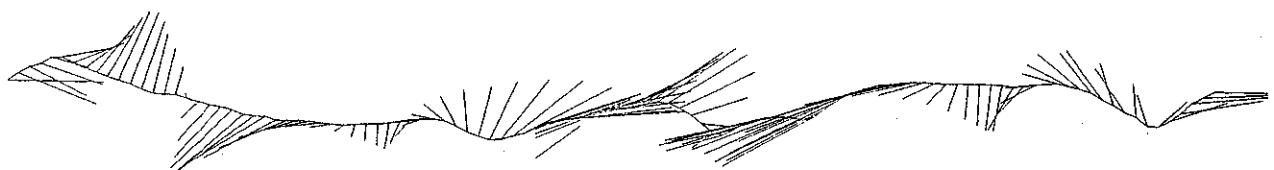
IMAGINARY PART

THETA=20
F= 5.0 (HZ)

図-5.4-3(c) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



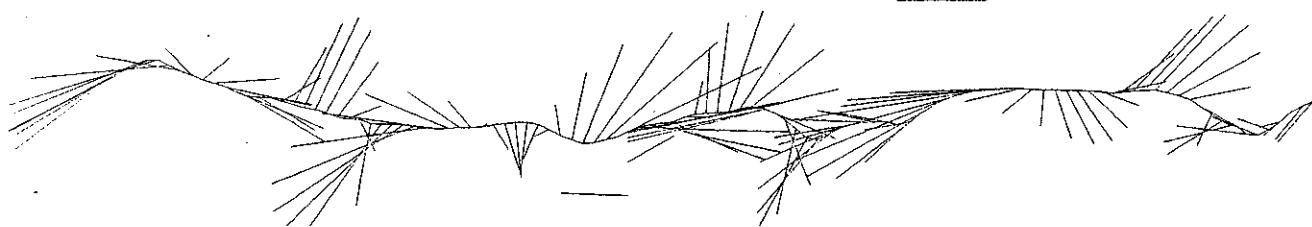
IMAGINARY PART

THETA=20
F= 7.0 (HZ)

図-5.4-3(d) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



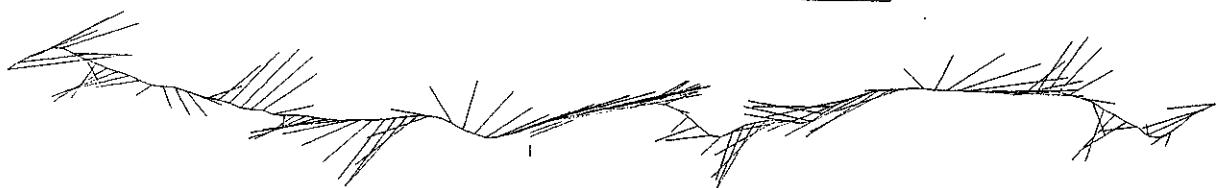
IMAGINARY PART

THETA=20
F = 9.0 (HZ)

図-5.4-3(e) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



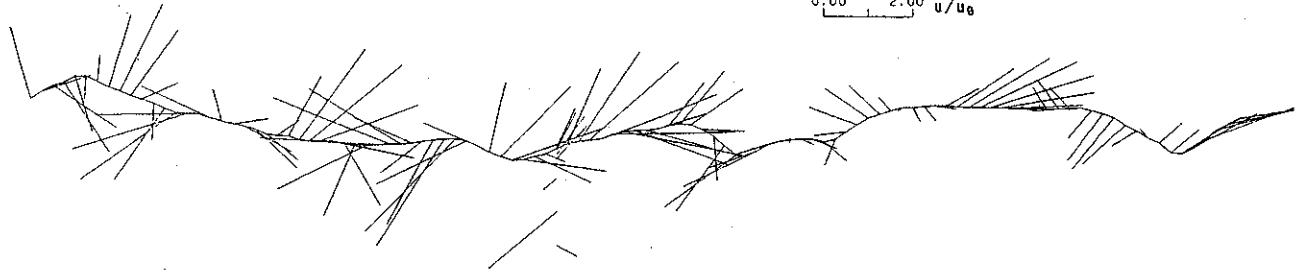
IMAGINARY PART

THETA=20
F = 11.0 (HZ)

図-5.4-3(f) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



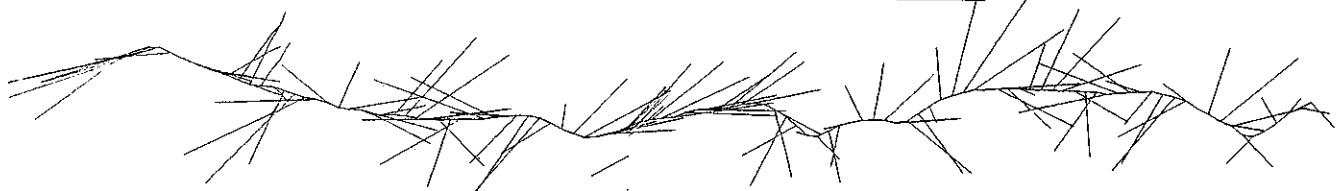
IMAGINARY PART

THETA=20
F = 13.0(HZ)

図-5.4-3(g) 続き

REAL PART

0.00 2.00 u/u_0



IMAGINARY PART

THETA=20
F = 15.0(HZ)

図-5.4-3(h) 続き

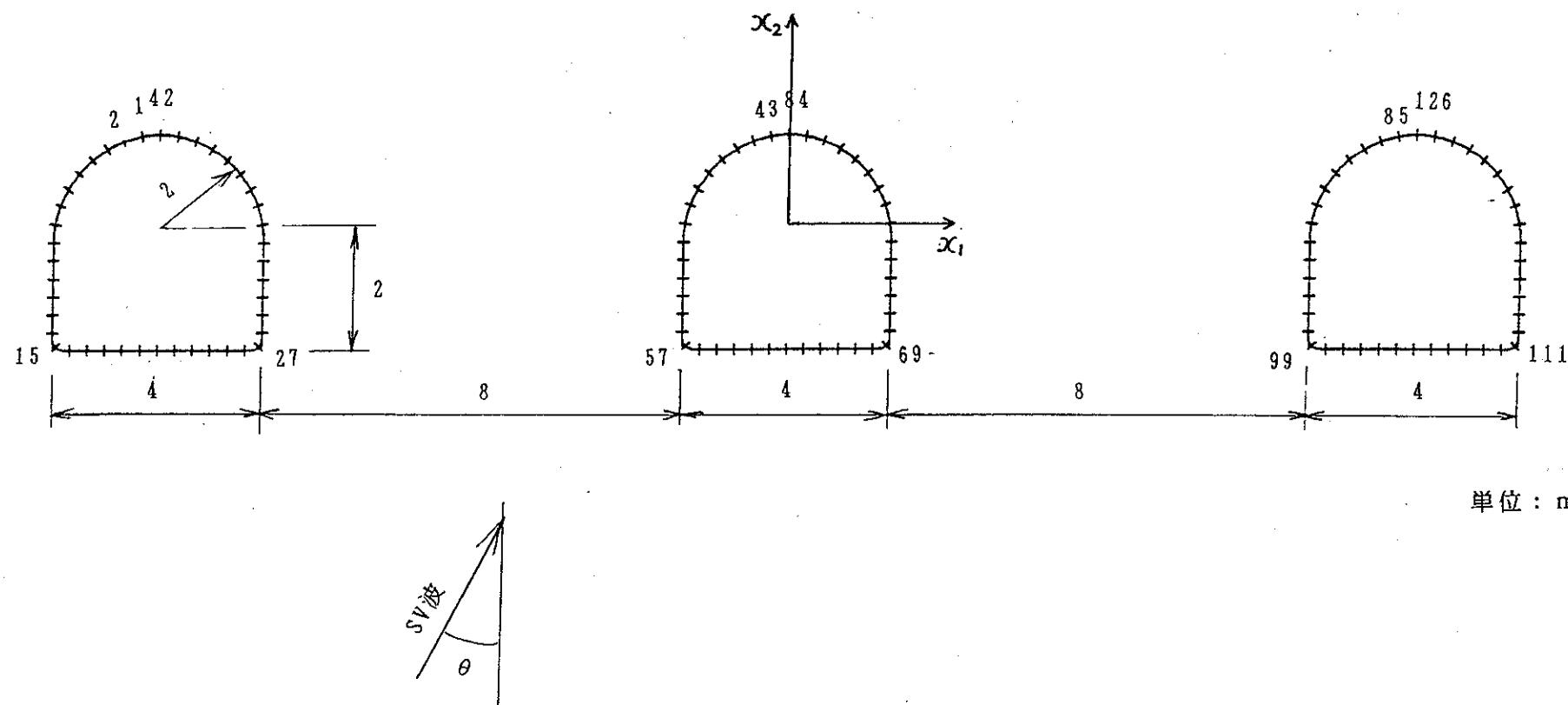
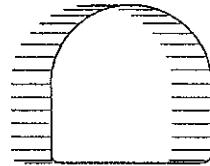
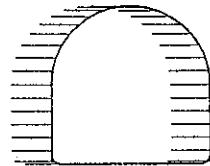
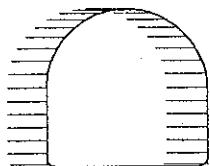


図-5.5 空洞モデルとその要素分割

$\theta = 0^\circ$ $f = 1.08\text{Hz}$

REAL PART

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

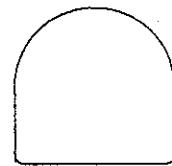
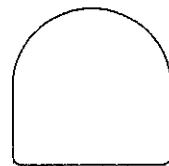
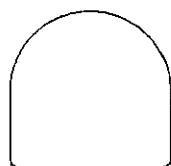
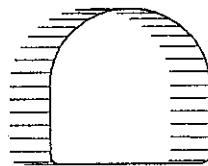
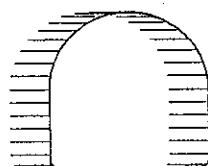
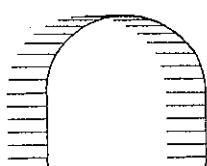


図-5.6-1(a) 変位 SV 入射波による空洞の変位応答図

$\theta = 0^\circ$ $f = 10\text{Hz}$

REAL PART

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

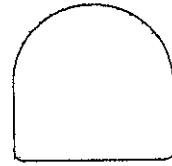
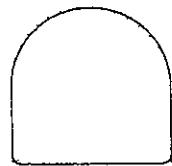
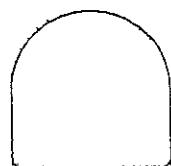
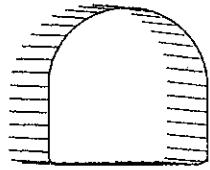
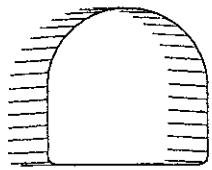
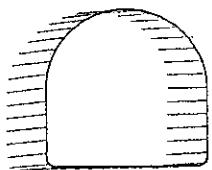


図-5.6-1(b) 続き

$\theta = 0^\circ$ F=50Hz

REAL PART

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

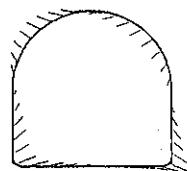
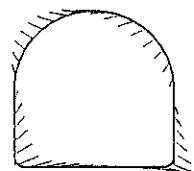
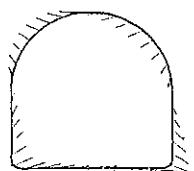
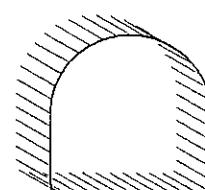
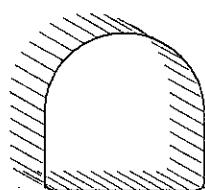
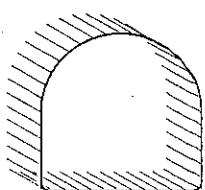


図-5.6-1(c) 続き

REAL PART

$\theta = 30^\circ \quad F = 1.0 \text{ Hz}$

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

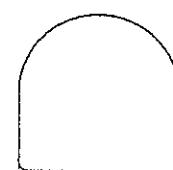
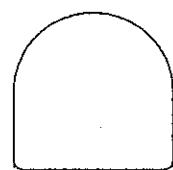
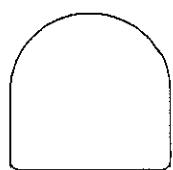
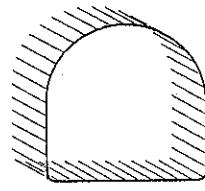
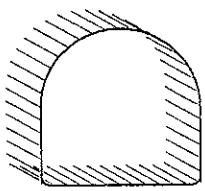
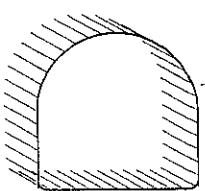


図-5.6-2(a) 変位SV入射波による空洞の変位応答図

REAL PART

$\theta = 30^\circ \quad F = 10 \text{ Hz}$

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

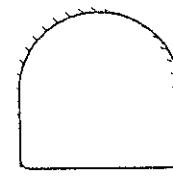
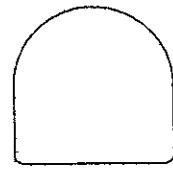
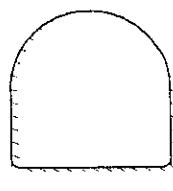
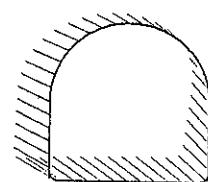
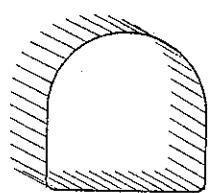
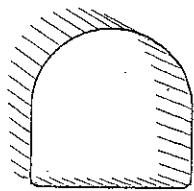


図-5.6-2(b) 続き

REAL PART

$\theta = 30^\circ$ $f = 50\text{Hz}$

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

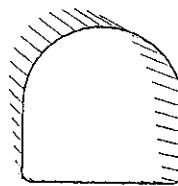
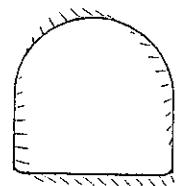
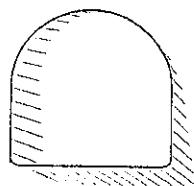


図-5.6-2(c) 続き

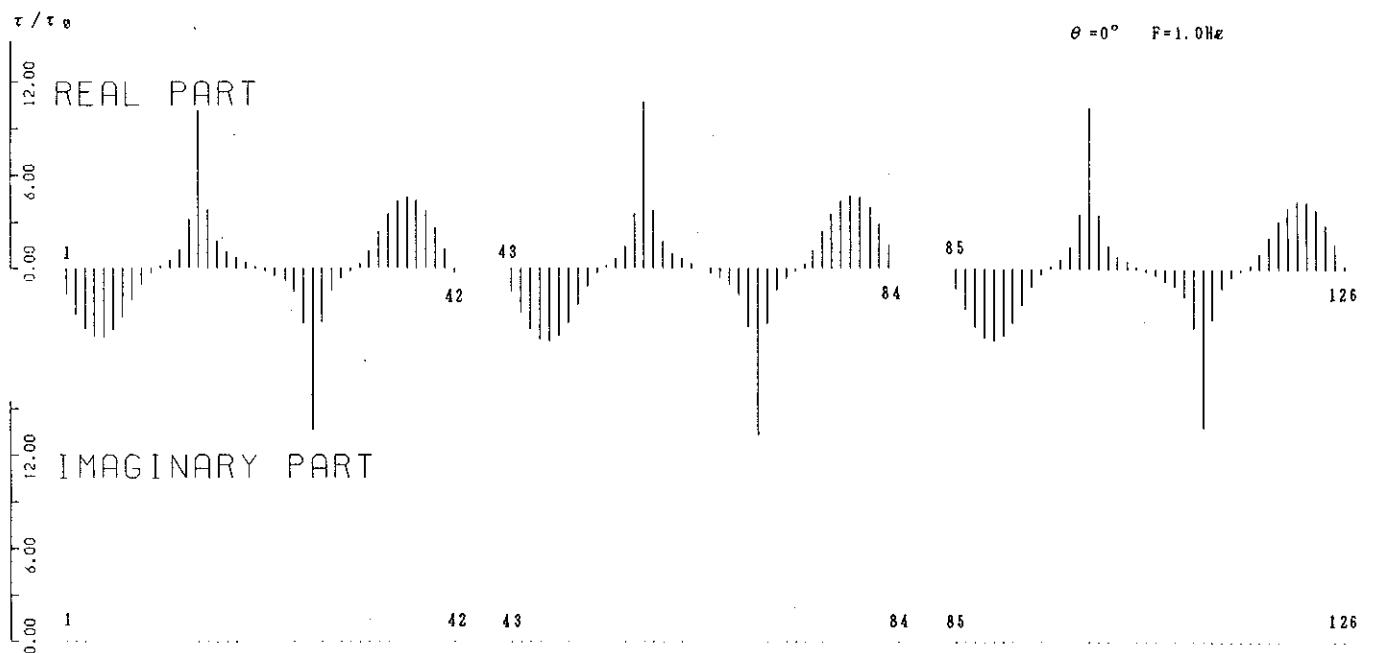


図-5.7-1(a) 変位 SV 入射波による空洞の壁面応力応答図

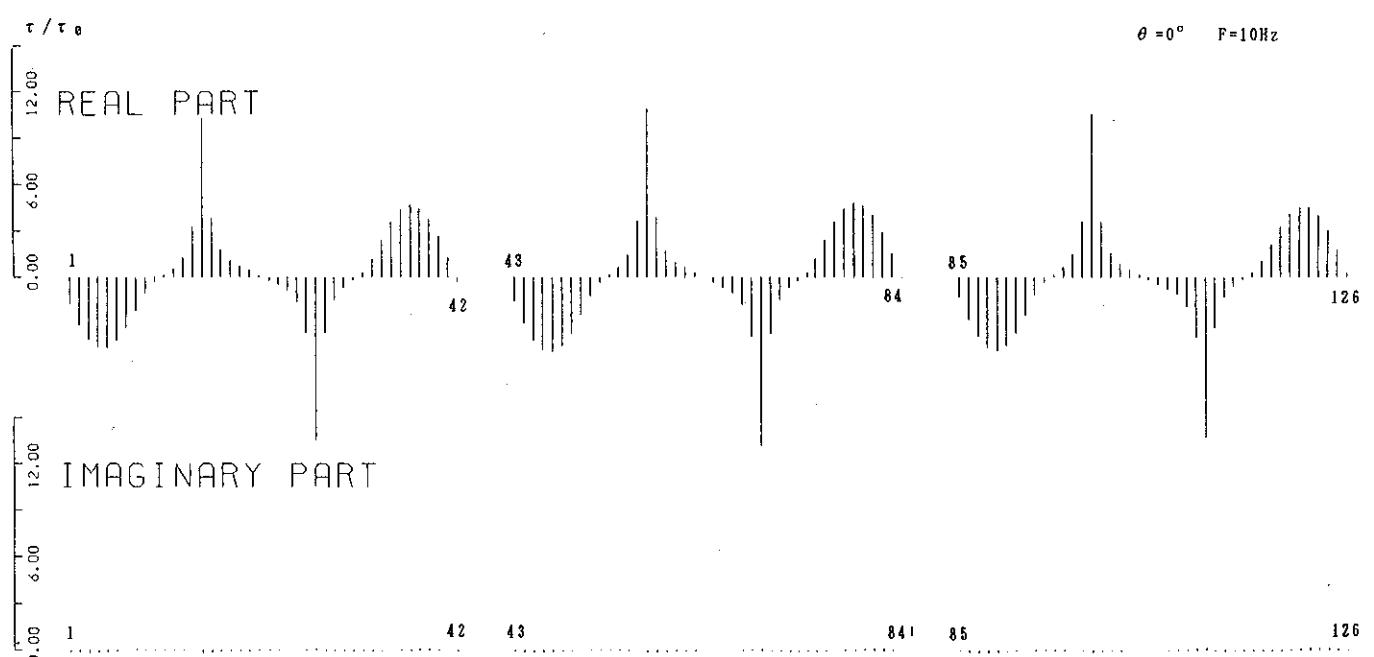


図-5.7-1(b) 続き

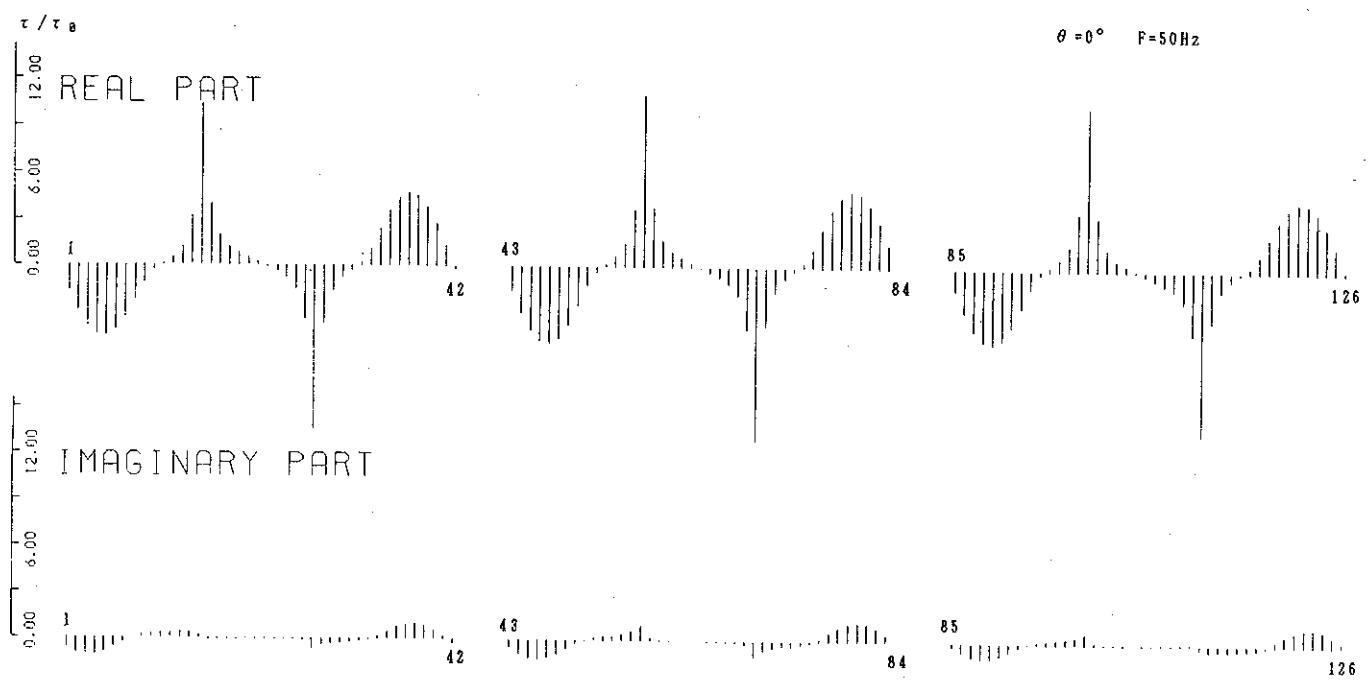


図-5.7-1(c) 続き

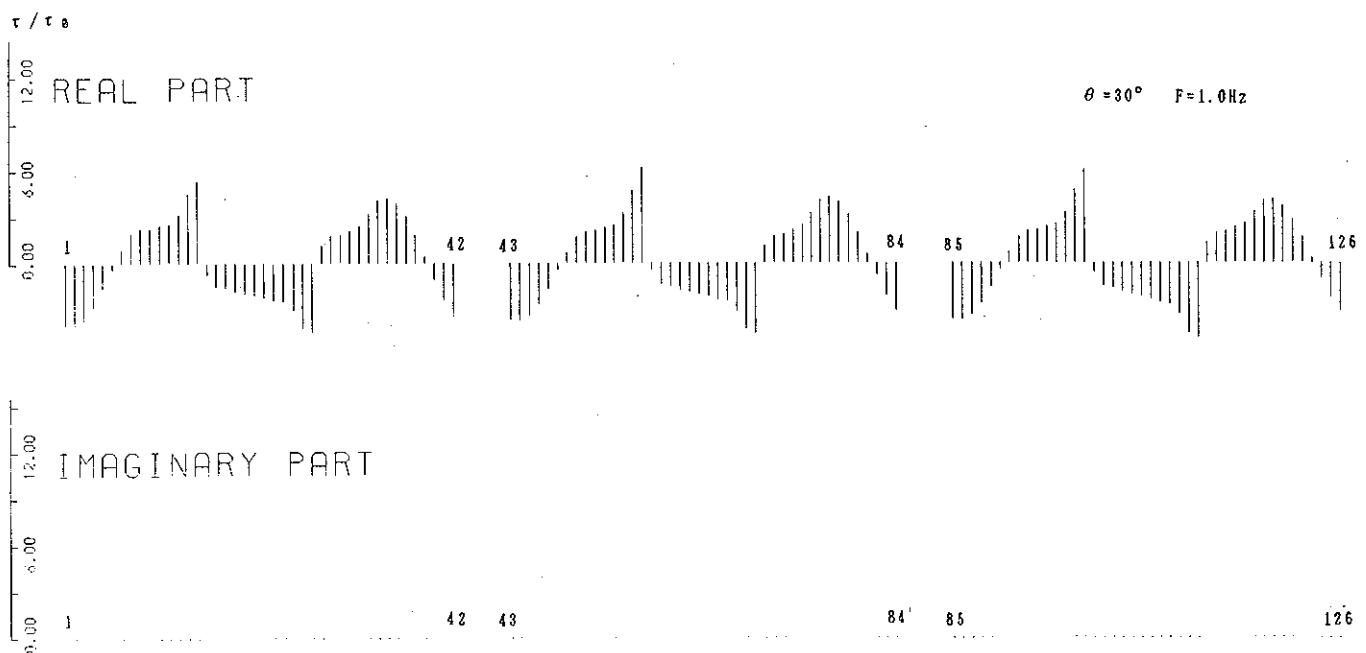


図-5.7-2(a) 変位SV入射波による空洞の壁面応力応答図

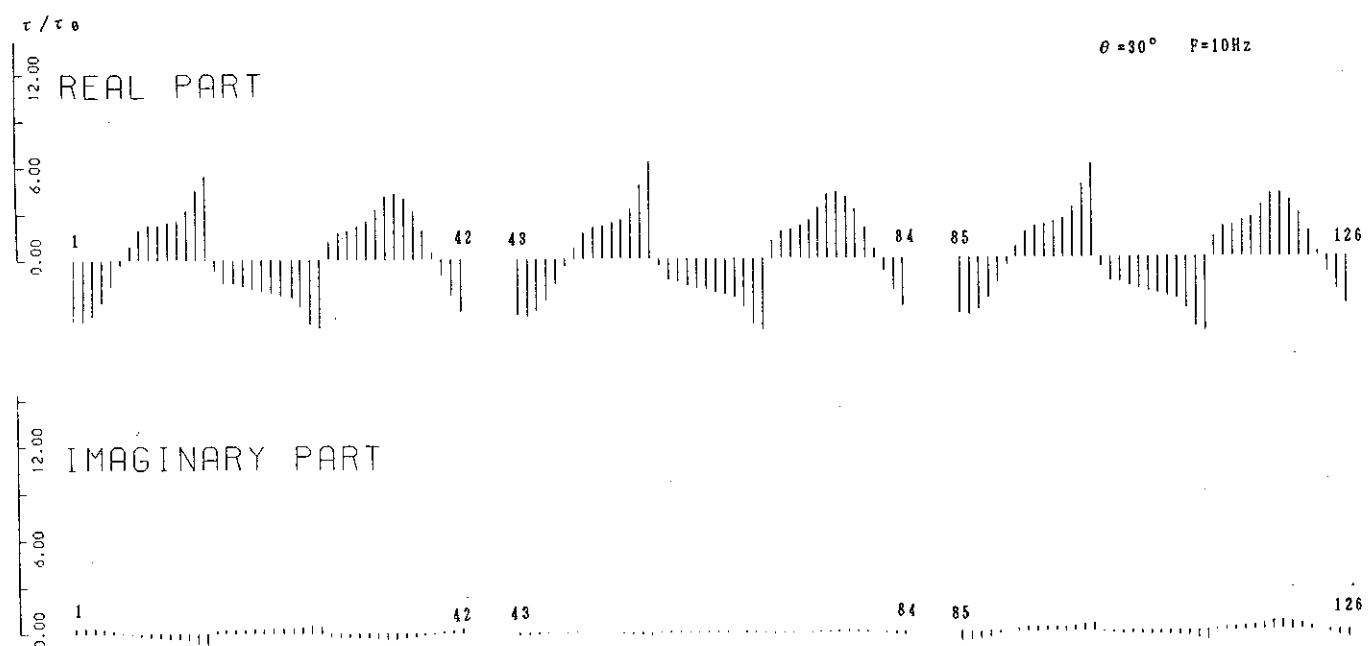


図-5.7-2(b) 続き

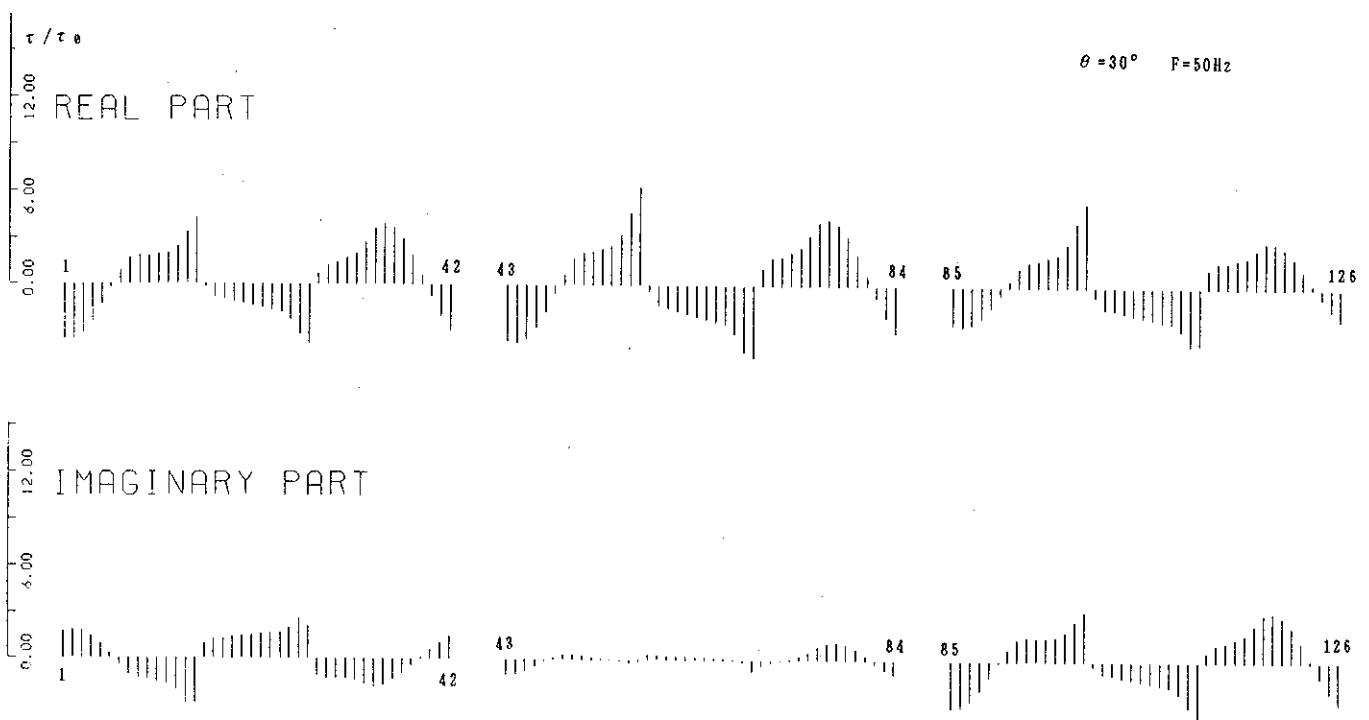
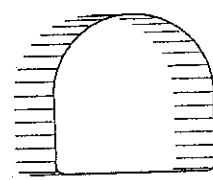
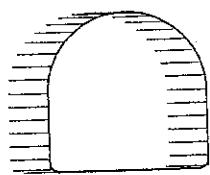
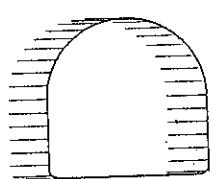


図-5.7-2(c) 続き

$\theta = 0^\circ$ $F = 1.0 \text{ Hz}$

REAL PART



IMAGINARY PART

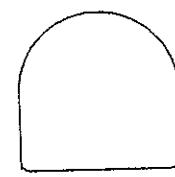
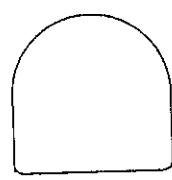
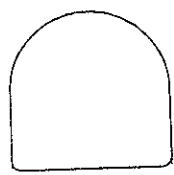
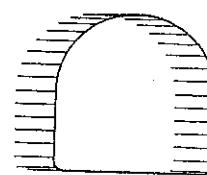
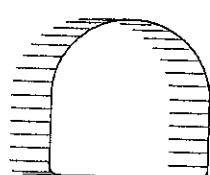
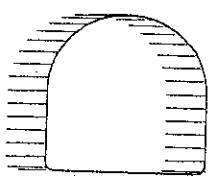


図-5.8-1(a) 変位 SV 入射波による充填した空洞の変位応答図

REAL PART

$\theta = 0^\circ$ $F = 10 \text{ Hz}$



IMAGINARY PART

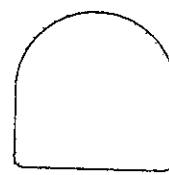
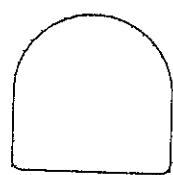
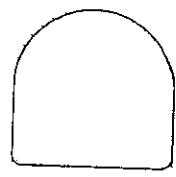
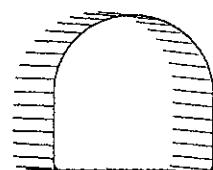
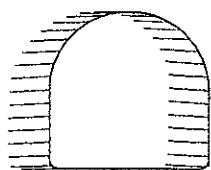
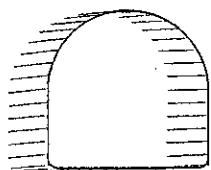


図-5.8-1(b) 続き

REAL PART

$\theta = 0^\circ \quad f = 50 \text{ Hz}$

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

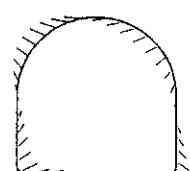
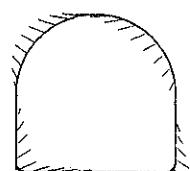
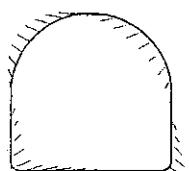
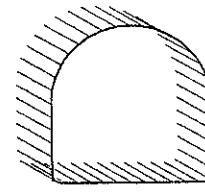
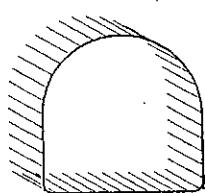


図-5.8-1(c) 続き

REAL PART

$\theta = 30^\circ \quad F = 1.0 \text{ Hz}$

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

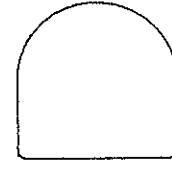
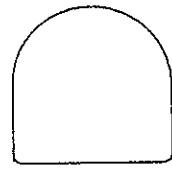
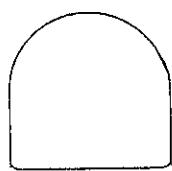
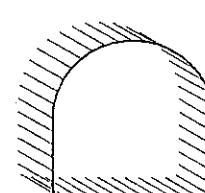
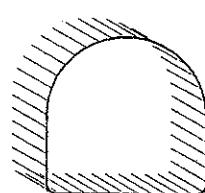
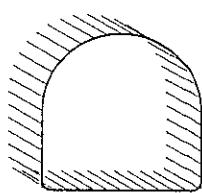


図-5.8-2(a) 変位SV入射波による充填した空洞の変位応答図

REAL PART

$\theta = 30^\circ \quad F = 10 \text{ Hz}$

0.00 2.00 4.00 u/u_0



IMAGINARY PART

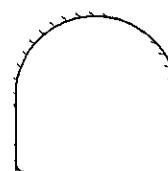
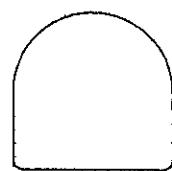
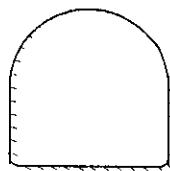
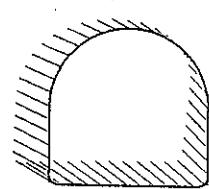
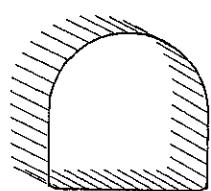
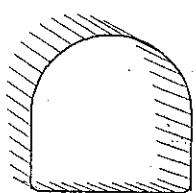


図-5.8-2(b) 続き

$\theta = 30^\circ$ $f = 50\text{Hz}$

REAL PART



IMAGINARY PART

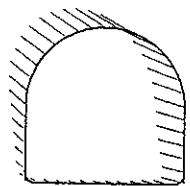
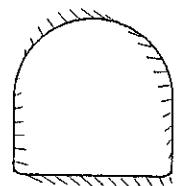
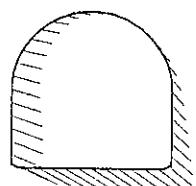


図-5.8-2(c) 続き

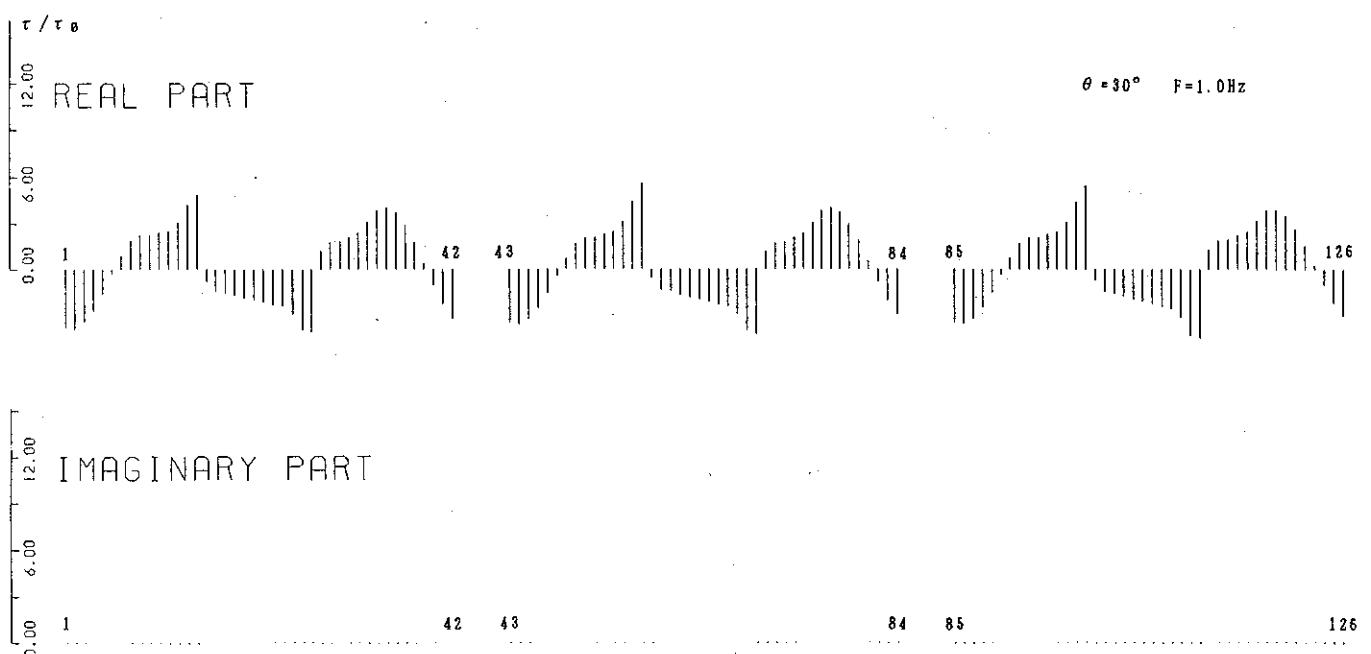


図-5.9-2(a) 変位SV入射波による充填した空洞の壁面応力応答図

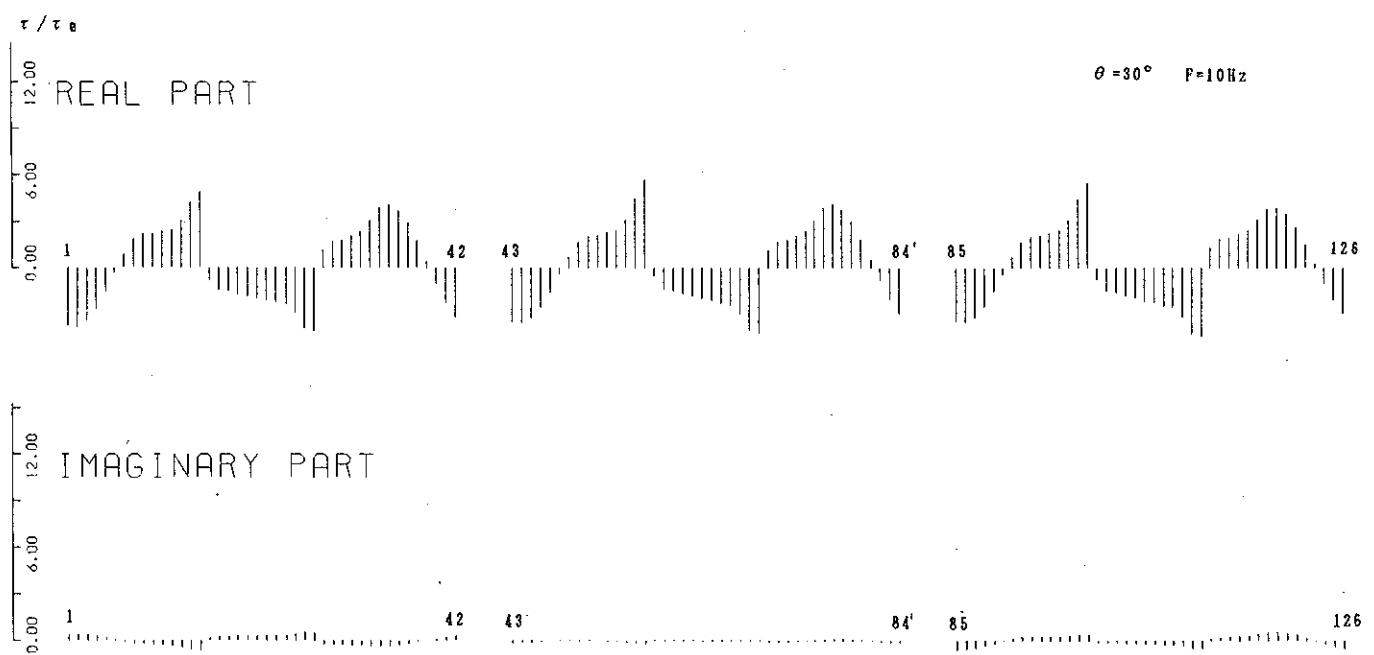


図-5.9-2(b) 続き

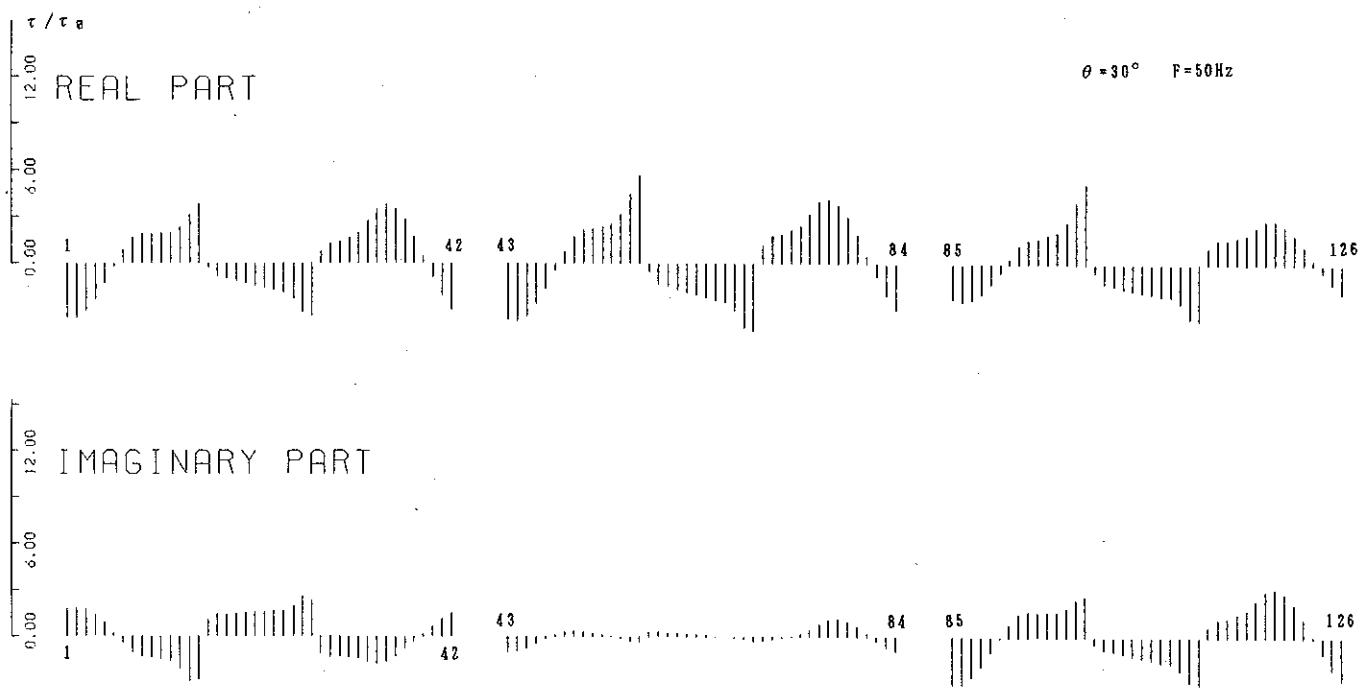


図-5.9-2(c) 続き

6. あとがき

1984年度から開始され、本年度で7年目となった本委員会の活動は、(1)釜石鉱山における地震計の増設、(2)観測データの収集とその解析、(3)地下水の水質分析、(4)地層処分施設の耐震性評価手法の検討、(5)地下深部での地震動特性と構造物の挙動の各項目について調査研究を行った。得られた成果は以下のとおりである。

1) 釜石鉱山における地震計の増設

釜石鉱山の坑内は数kmに亘る広大な区域に展開されているため、当初設計した地震計の配置では、信号線の配線が長大となった。そこで昨年度は上下4レベル6ヶ所の設計地点から信号線が比較的短くて済むEL550（3地点）を中心に、地表点（EL865）との2レベル4地点のみに地震計を設置した。本年度は残された2レベル2地点に、信号線の不要な独立型デジタル強震計を夫々1台ずつ設置した。即ちEL725と最下底のEL250にSMAC-MD型強震計を設置した。この工事により、地震計は地表点から最下底点間615mの間に、4レベル、6地点に設置されこれによって立体アレー観測網が完成したことになる。

増設工事は平成2年10月3日に完成し、地震観測が開始されたが、同年9月と12月の2回に亘り、落雷による観測システムの故障が発生した。坑外で発生した落雷の誘導電流は電力ケーブルを伝って観測システムに流入し、增幅器入力ICの焼損や地震計センサーの断線を発生させた。これらの事故は部品交換等の応急処置で修理を完了しているが、次年度には、本格的な雷対策工事を追加する必要がある。

2) 釜石鉱山における地震観測

- (1) 今年度新規にEL725mとEL250mの各1地点に加速度計を設置し、昨年度設置4地点とあわせ、立体アレーで地震観測を実施した。
- (2) 平成3年2月までに40個の地震が観測された。観測された地震の震央位置は、概ね、岩手県中部（震央距離約60km）、岩手県沖（震央距離約50km）、宮城県沖（震央距離約50～120km）の3地域に区分することができる。
- (3) 深さ約315mの地下部（EL550m）に対する地表部（EL865m）の最大加速度比は概ね2～3倍の範囲にあり、各成分を比較すると水平成分の振幅比が若干大きくなる傾向にある。
- (4) スペクトル解析によれば地震動の周波数特性は地震ごとにかなり異なるが、增幅

特性は地震によらずほぼ一定で、K-1とK-2測点の間では水平成分で3~4, 8Hz, 鉛直成分で10Hz前後が増幅される。また、新たに設置したEL250mレベルのK-5とEL725mレベルのK-6の2測点のデータも加えた結果によれば、EL250mレベルからEL725mレベルまで加速度振幅はほとんど見られないが、このEL725mレベルから地表（EL865m）にかけて、およそ2倍に増幅されるようである。

- (5) 非定常パワースペクトルによる表面波の存在を検討したが、実体波が到達した後、長周期成分が卓越するような地震はみられず、これまでの観測地震では表面波の存在が少ないことがわかった。
- (6) 立体アレーから地震波の到来方向と震央の関係を算出した。その結果地震波の到来方向は観測点から震央方向と概ね一致しているが、入射角については理論値に比べバラツキが大きい。

3) 釜石鉱山における地下水理観測

- (1) 平成元年度から継続で、間隙水圧3ヶ所、湧水量1カ所に加えて今年度新規に、採水21ヶ所による水質（主に電気伝導度、安定同位体比）調査、1カ所の湧水量変動精密観測を実施した。
- (2) ボーリング孔孔口に設置した間隙水圧計で地震時間隙水圧の波形が観測された。その観測結果より、
 - i) 加速度波形を積分して求めた速度波形のフーリエ・スペクトルと地震時間隙水圧波形のフーリエ・スペクトルの形状は非常に似ている。
 - ii) 速度の最大値と地震時間隙水圧の最大値とはよい相関関係が見られる。
 - iii) 観測された地震時間隙水圧は、平面波の入射によるボーリング孔内の水圧の理論式による値とよく対応することから、地震動によってボーリング孔の孔内水に発生した水圧を測定している可能性が高いと考えられる。
- (3) 坑内の1ヶ所で湧水量の微量変動を測定した。その結果、湧水量は地球潮汐と気圧の影響を受けていることがわかった。今後、湧水量と地震との関係を調べるには、この地球潮汐と気圧の影響を定量化する必要がある。
- (4) 月2回の電気伝導度の測定では、地震との関係を見出すことができなかった。しかし、2時間おきの電気伝導度の経時変化を調査したところ、湧水量と同様に地球

潮汐との対応関係が推定された。

- (5) 平成2年8月に水質の安定同位体分析を実施した。昭和63年12月の分析結果と比較し、一部の地点を除き、概ね分析精度内で一致している。従って、この4年間の間で水質変化がほとんど無かったものと想定される。

4) 地層処分施設の耐震性評価手法の検討

- (1) 地層処分施設の耐震性評価に特有な事象を7項目抽出し、その検討方法を示した。
- (2) 地層処分施設に類似の地下構造物の耐震設計法の実例調査を行った。耐震設計手法の基本として、いずれの指針・基準も震度法を取り上げている。動的解析法は必要に応じて実施している場合が多い。
- (3) 地下発電所、鉱山、トンネル等での既往の地下地震観測結果を調査し、地下での地震動についてこれまでに得られている知見を整理した。
- (4) 地震による地下水流动変化に関する文献を19編調査した。いくつかの地震に対して水位変動が確認されているが、地震発生前後の地下水の変動が地質・地層のどのような変化により発生するかについては明確な説はみられない。

5) 地下深部での地震動特性と構造物の挙動

ここでは数値解析的なアプローチにより、地下深部での地震動特性と地下構造物の挙動を解明するためのシミュレーション解析を行った。解析手法としては、弾性波動解析に対し、最も有力である境界要素法を用い、釜石鉱山をモデル化して2次元解析を試みた。その結果以下のようないくつかの結論が得られた。

- (1) 地表での変位応答倍率は、周波数が小さい範囲では、応答倍率はほぼ2倍である。
- (2) 周波数が高くなると、位相のずれも生じるので、図からその応答倍率をみるのが困難となる。

地下構造物の応答解析も、モデルとしては3連の空洞を2次元で考えた。その結果以下のようないくつかの結論が得られた。

- (1) 周波数が10Hz程度では、空洞の変形はほぼ静的状態と同様と言える。
- (2) 50Hzになると動的効果が若干現れてくる。

このことから、径が4m程度の寸法では、地震動に伴う動的効果は殆ど現れないことが分かった。また空洞内を周辺岩盤の1/50の弾性率をもつ充填物で充填した場合も、

空洞と同様と見なして良いことが分かった。以上のこととは、空洞壁面の変位応答倍率のみでなく、空洞壁面の応力倍率についても言えることである。

以上本年度に得られた成果の概要について述べたが、以下に、次年度以降に逐次実施していく調査研究項目について提案する。

- ① 地震観測システムへの雷対策工事
- ② 細倉鉱山と釜石鉱山に於ける地震動特性を比較することによる地下震動特性の一般化
- ③ 釜石鉱山坑内における弾性波速度調査
- ④ 数値解析による地震動ならびに地下空洞特性に関する研究
- ⑤ 坑内湧水量および坑内水質の経時変化に影響する地球潮汐、気圧の定量化の為の観測機器の高精度化と多点設置
- ⑥ 岩盤内に掘削されたボーリング孔を利用した亀裂水の挙動観測（間隙水圧、湧水量、水質）

これらの提案項目は、本文中の各章節で詳述されているので、具体的な内容は以下の章節を参照されたい。

第②、③項：3.3.3(P96)、4.6(P230)

第⑤、⑥項：3.4.3(P171)

文 献 抄 錄

地中地震観測の成果および考察

1. 落合水力発電所 (神奈川県)
2. 沼原水力発電所 (栃木県)
3. 下郷水力発電所 (福島県)
4. 池原水力発電所 (奈良県)
5. 鬼怒川水力発電所 (栃木県)
6. 日立鉱山 (茨城県)
7. 三井砂川 (北海道空知)
8. 北炭幌内 (北海道石狩)
9. 石塚トンネル (岩手県釜石市)
10. 新宇佐美トンネル (静岡県伊豆市)

| | | |
|------|---------------------------------------|--------------------|
| 観測地点 | 落合水力発電所（神奈川県） | |
| 参考文献 | 1. 電力中央研修所報告 2. 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 | 1987年3月 1985年4月 |

地震計設置状況

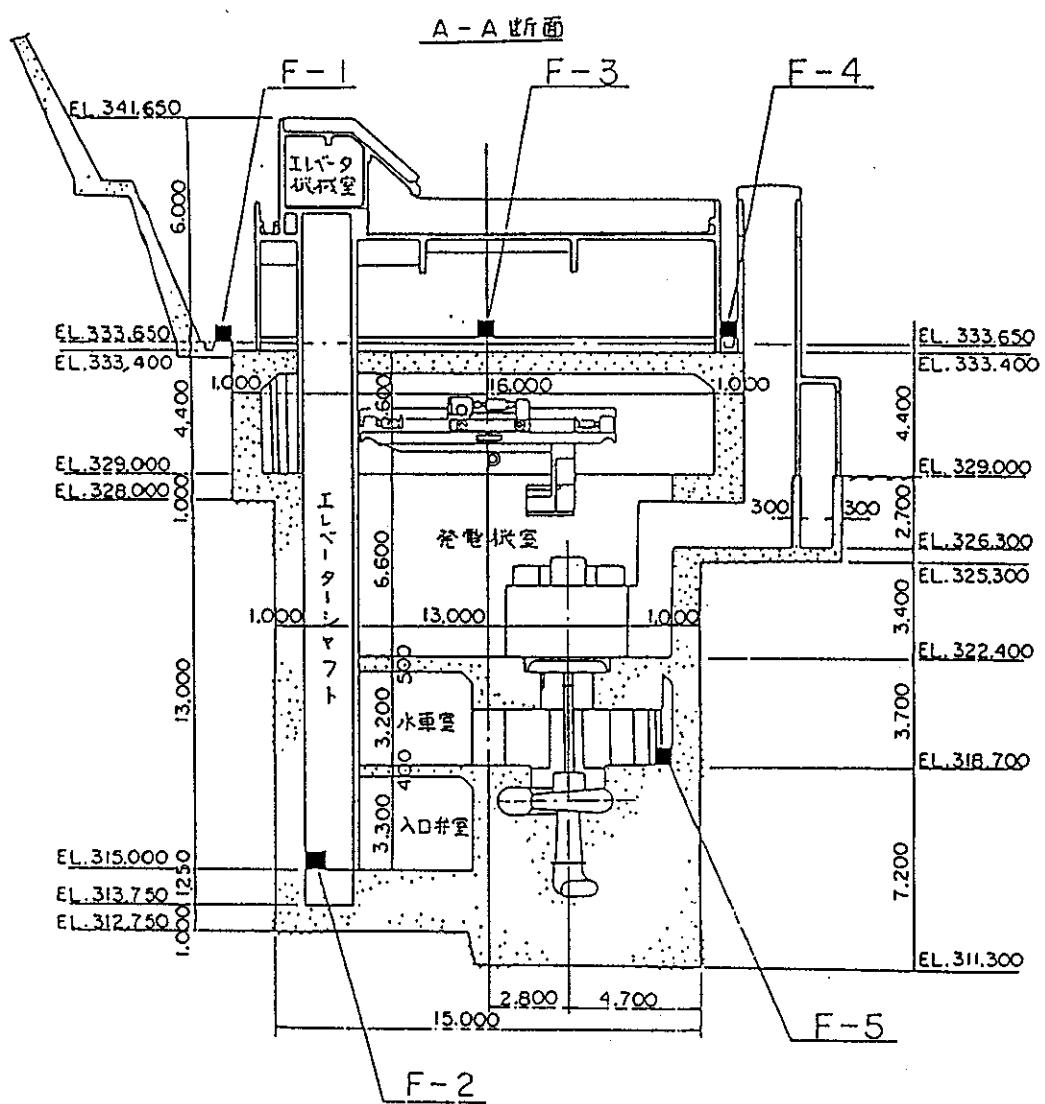


図-5 地震計設置位置図(断面図)
Location of seismograph (section)

落合水力発電

直径 1.5 m, 深さ 2.2 m の円筒ビット

| | |
|--------------------------------|--|
| 地質および 速度構造 | |
| 観測期間 | 1984.5.30~1985.12.14 43地震 |
| 成 果 お よ び 考 察 | |
| 最大加速度比 (GL-19m/地表) F2 F1 | 水平動 = $1/2 \sim 1$ 上下動 ≈ 1 |
| 增幅率 (上下F1/地下2) | 近・小地震 = 短周期 \Rightarrow 大 遠・大地震 = 長周期 \Rightarrow 小 |
| 卓 越 周 期 | マグニチュードが大きくなるほど長周期になる |
| | |

| | | |
|-----------|--|--|
| 観測地点 | 沼原地下発（栃木県） | |
| 参考文献 | 1. 地震工学発表会 2. 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 | 1983年7月 1985年4月 |
| 設置 | 空洞内（巾22m、高45m、長130m） | |
| 地質および速度構造 | ・基礎—花崗閃緑岩 ・表層—凝灰岩（中新世） 火山噴火堆積（第四紀） | $V_p = 4.0 \text{ km/s}$ $V_p = 0.5 \text{ km/s}$ |
| 観測期間 | | |

成 果 お よ び 考 察

| | |
|------------|--|
| 応答性状 | 地下空洞のスパンが伸び縮み振動をした。（両側壁） |
| 観測結果の周期特性 | 直下型地震（近・小）— 短周期 遠距離地震（遠・大）— 長周期 |
| 加速度（地下／地上） | 水平動 = $1/2, 1/3$ 上下動 = $1 \sim 1/2$ 近地地震 \Rightarrow 比が小 (短周期=増幅大) |
| 空洞の伸縮率 | 最大 $400 \mu\text{m}$ ($\varepsilon = 2 \times 10^{-5}$) |

| | | |
|-----------|----------------------------------|---------|
| 観測地點 | 下郷発電（福島県） | |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 | 1985年4月 |
| 設置 | 空洞内（土被り100m、長さ171m、巾22m、高さ45.5m） | |
| 地質および速度構造 | 地盤—閃緑岩 表層—砂岩 | |
| 観測期間 | | |

成 果 お よ び 考 察

| | |
|----------------------------------|----------------------|
| 空洞の応答 | 最大速度が周辺岩盤内の1.15倍 |
| 地表／地下の比 (最大速度) (S11/S10か?) | 水平動 1.55 上下動 1.14 |
| | |

| | | |
|-----------|--|---------|
| 観測地点 | 池原発電所（奈良県） | |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 | 1985年4月 |
| 設置 | 空洞の両側壁はほぼ同じ変位位相 | |
| 地質および速度構造 | ・地山 = 砂岩、粘板岩（中生代） ・堆積層 ≈ 20m（地山被り？） | |
| 観測期間 | 1977.4.13～ | 5.9地震 |

成 果 お よ び 考 察

| | |
|--------------|---|
| 地上／地下のスペクトル比 | 短周期成分ほど増幅大 |
| 空洞変位 | <p>空洞の両側壁はほぼ同じ変位位相</p> <p>図2-51 池原における地震計設置位置</p> |

| | |
|---------------|---|
| 観測地點 | 鬼怒川発電所（栃木県） |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 1985年4月 |
| 地質および速度構造 | ・表土（河床堆積物＝沖積） 孔—8m 坑—0.5m 第三紀（粗粒凝灰岩） |
| 観測 | 立孔、ボーリング孔、共に地表からGL-67.2mまでに1成分（東西） 加速度計 (立坑—GL 0m、GL-17m、GL-34m、GL-51m、GL-67m) |
| 観測期間 | |
| 成 果 お よ び 考 察 | |
| 加速度分布 | <ul style="list-style-type: none"> ・長周期地震 — ほぼ一様（增幅なし） ただし、同じ周期でも增幅特性は著しく異なる (どの地震が異なるか不明) ・短周期成分は増幅あり <p>○ 变位計 丘曳き? • 加速度計 (ひずみ計型) ● 加速度計 (動線輸型) Moving Coil式</p> <p>図2-60 地震計設置位置図(鬼怒川)</p> |

| | |
|---------------|---|
| 観測地點 | 日立鉱山(茨城県) |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究(I) 日本鉱業会 1985年4月 |
| 地質および速度構造 | 古生層と貫入火成岩 試料の $V_p = 5 \sim 7 \text{ km/s}$, $V_s = 1.5 \sim 3 \text{ km/s}$ (現位置の速度はこれ以下のはず) |
| | <p>CL-0M CL-150M CL-350M CL-550M</p> <p>地質岩相 無色岩 褐色岩 白色岩 灰色岩</p> <p>図 2-64 模式地質断面図 (日立)</p> |
| | <p>CL-0 CL-150 CL-350 CL-550</p> <p>RATIO EW NS UD</p> <p>図 2-70 最大加速度の振幅比</p> |
| 観測期間 | |
| 成 果 お よ び 考 察 | |
| 最大加速度分布 | GL-550mからGL-150mまで1~2倍に増幅 " GL-0mまで3~6倍 " |
| マグニチュードと卓越周期 | 大地震 \Rightarrow 長周期 小地震 \Rightarrow 短周期 |

| | |
|-----------|--|
| 観測地点 | 三井砂川（北海道空知） |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 1985年4月 |
| 地質および速度構造 | 古第三紀石狩層群 $V_p = 3.1 \sim 3.9$ |
| 観測点 | 地表に6点（EL + 268m～EL + 178m） 地下に2点（EL - 757m～EL - 859m） (標高約220mでGL - 980～GL - 1080mに相当) サンプリング周波数500Hz、分解能12bits/sample AE含め652地震 |
| 観測期間 | |

成 果 お よ び 考 察

観測成果

特に重要なものなし

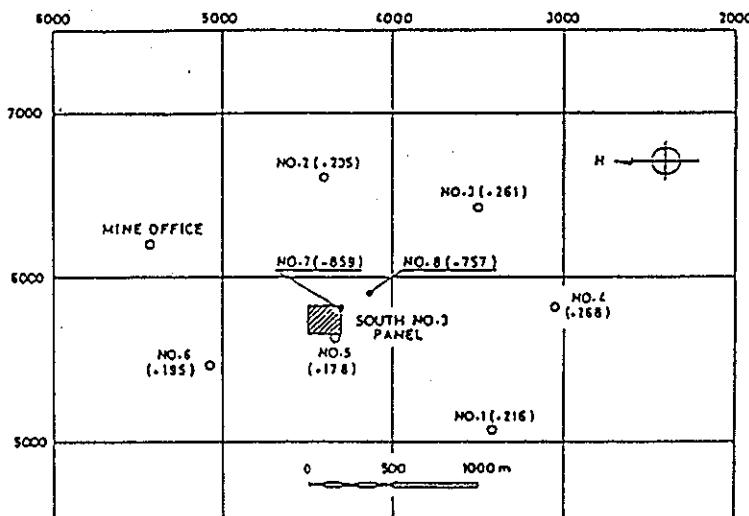


図2-79 地震計の配置図（平面）（砂川）

○印は地表測点、○印は坑内測点で、()内の数字は海水準を基準とした測点の標高(+)または深度(-)を表わす。

| | | |
|-----------|---|----------------------|
| 観測地点 | 北炭幌内（北海道石狩） | |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 | 1985年4月 |
| 地質および速度構造 | 石狩層（古第三紀） | $V_p = 2.8 \sim 3.3$ |
| 観測システム | 観測点 地上8点、地下2点（GL-1100まで）、上下1成分速度計 サンプリング400Hz、分解能12bits/sample | |
| 観測期間 | | |

成 果 お よ び 考 察

| | |
|------|---|
| 観測成果 | 地震動に関しては特になし 注) 切羽付近のAEを観測するのが目的 |
|------|---|

| | |
|-----------|--|
| 観測地点 | 石塚トンネル(岩手県釜石市) |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究(I) 日本鉱業会 1985年4月 |
| 地質および速度構造 | 粘板岩 $V_s = 2.7 \sim 3.6$ 覆工厚(ランニング) 30cm(地震計は岩盤内) |
| 観測点 | 土被り110m~135mのトンネル内4台、坑口1台、ひずみ計14台 |
| 観測期間 | |

成 果 お よ び 考 察

観測結果 坑口の加速度は2倍以上に増幅(周期0.2秒以下)
増幅なし(周期0.3秒以上)

注) 坑口は地表と同じと考えられる。

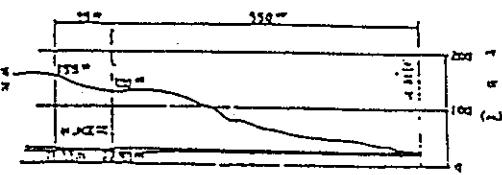


図2-93 トンネル横断面

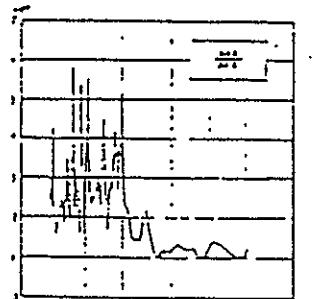


図2-96 A4X/A1Xスペクトル比

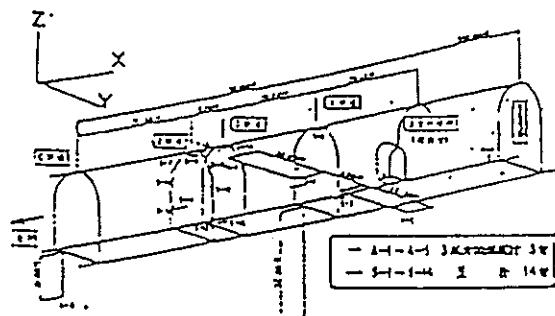


図2-92 測点配置図

| | |
|-----------|---|
| 観測地点 | 新宇佐美トンネル（静岡県伊豆市） |
| 参考文献 | 地震に関する調査研究（I）日本鉱業会 1985年4月 |
| 地質および速度構造 | 玄武岩 $V_p = 2.3 \sim 3.2$ $V_s = 1.1 \sim 1.6$ 覆工厚40cm、直径6m |
| 観測点 | 土被り220m～260m サーボ型加速度計8台（坑口1台、岩盤内7台） トンネル底下40mから天井40mまで |
| 観測期間 | |

成 果 お よ び 考 察

観測結果

トンネル周辺岩盤ではほぼ同位相で変位

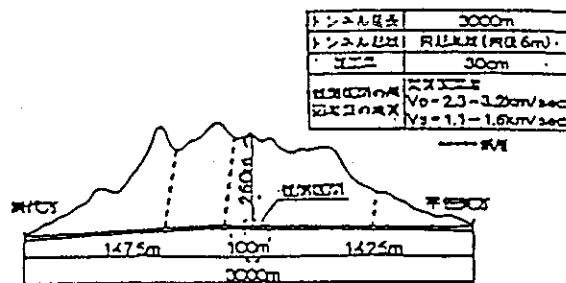


図2-99 トンネルの概要と観測区間
(新宇佐美)

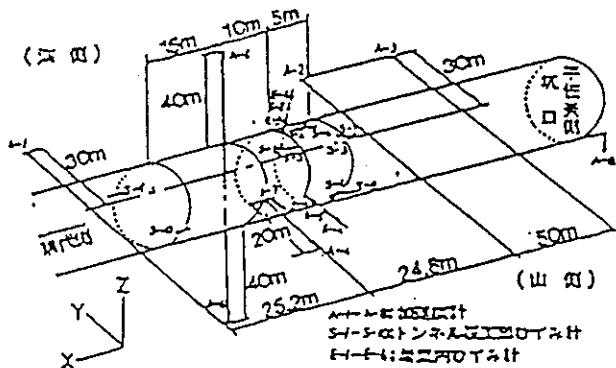


図2-100 地震観測計器配置図