

遠隔監視システムを構成する
受信システム機器の改良・製作

報 告 書

2000年5月

株式会社 サワ



サイエンス

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松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 319-1194

Japan

© 核燃料サイクル機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2000

遠隔監視システムを構成する受信システムの改良・製作

澤田臣啓* 吉田 孝*
凌 甦群* 石川 顕*

要 旨

北海道幌延町に計画されている深地層研究所(仮称)計画の一環として、岩盤や地下水の挙動を遠隔的に監視するシステムを開発することとしている。本業務は、弾性波を用いた遠隔監視システムの開発に関しての具体化に必要な準備・検討を行うものである。主として受信システムの改良等を行ない、具体的に下記項目を実施した。

- ?時間区間蓄積型記録計の改良 (1) データ収録システムのハードウェア・ソフトウェアの改良
(2) データ回収パソコンソフトウェアの改良

?周波数特性均一化回路の製作

?受信用地震計の検定

?基準加速度計および取付け3軸ブロックの購入

時間区間蓄積型記録計の改良については、データロガーのメーカーに委託し、データ収録システム、データ回収ソフトウェアとも目標とした仕様に改良・製作することができた。

周波数特性均一化回路については、「負抵抗シャントによる加制振・積分法」理論をもとに製作した。地震計に付加して検証した結果、振幅・位相特性の広帯域均一化を確認することができた。

キャリブレーションコイルによる地震計の検定では、周波数特性の安定性は回路を付けた状態のほうが、回路を付けない状態より明らかに改善した。さらに、微動およびアクロス発信信号による地震計の検定を行なった結果、振幅・位相特性については、均一化回路を付けない状態では長周期側と短周期側で不安定だったが、回路を付加することにより安定周波数範囲が広がった。

基準加速度計と取付け3軸ブロックの調達については、地震計メーカーから購入した。

本報告書は、株式会社サワソフトサイエンスが核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の成果に関するものである。

契約番号：112C1188

機構担当部課室：立地推進部 山崎真一

*：(株)サワソフトサイエンス

Improvement and manufacturing of receiver system device composing the Remote Monitoring System

Tomihiro Sawada*, Takashi Yoshida*,
Ling Suqun* and Ken Ishikawa*

Abstract

The Deep Layer Laboratory is projected in Horonobe, Hokkaido to develop the monitoring system for behavior of rocks and ground water. To give the shape to the project, we made preparations for development the monitoring system using elastic waves. The contents of this work is, mainly improvement of the receiver system, as follows.

·To improve the TS-stacker.

(1) Improvement of the software and hardware for data-recording system.

(2) Improvement of the software for data-retrieving system by personal computer.

·To product the circuits making equal the frequency characteristics .

·To calibrate of seismometers.

·To purchase a standard acceleration seismometer and 3-axis block.

We entrusted the manufacturer with improvement of the TS-stacker, and desired specifications of both the data-recording system and the data-retrieving system have been passed.

Over-damping and integration method by a negative shunt resistance was applied to the circuits for the purpose of equalization the frequency characteristics of seismometers. Seismometers with the circuits had the same amplitude and phase characteristics for wide frequency band, but seismometers with no circuit didn't.

The standard acceleration seismometer and 3-axis block was purchased from the seismometer manufacturer.

Work performed by Sawa Soft Science Inc. contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC liaison : Site Planning Division Shin'ichi Yamazaki

*: Sawa Soft Science Inc.

JNC TJ1400 2000-009

目 次

1	緒 論	1
2	バッテリー駆動式時間区間蓄積型記録計の改良	2
2.1	目 的	2
2.2	データ収録ソフトウェア	2
2.2.1	委託仕様	2
2.2.2	製作委託先・成果納品	3
2.3	データ回収ソフトウェア	3
2.3.1	委託仕様	3
2.3.2	製作委託先・成果納品	4
2.4	納品ソフトウェア仕様	4
3	周波数特性均一化回路の製作	12
3.1	目 的	12
3.2	設 計	13
3.3	製 作	14
3.3.1	部品リスト	14
3.3.2	製作回路	20
3.4	回路の検定	21
4	基準用加速度計の購入	28
4.1	注文仕様	28
4.2	購入先・納品	28
4.3	納品加速度計検査成績書	28
5	既存地震計の検定	39
5.1	地震計の仕様	39
5.2	検定方法	39
5.2.1	キャリブレーション・コイル	39
5.2.2	微動	39
5.2.3	アクロス	40
5.3	キャリブレーション・コイルによる地震計の検定	45
5.3.1	回路なし検定 (F.R.A.検定-I)	45
5.3.2	回路付き検定	45
	(A) $f_0=0.45\text{Hz}$ の場合 (F.R.A.検定-II)	45

(B) $f_0=4.5\text{Hz}$ の場合 (F.R.A.検定-Ⅲ)	46
5.3.3 回路を付けた場合、付けない場合の比較	47
5.4 微動による地震計の検定	47
5.4.1 回路なし検定 (微動検定-I)	47
5.4.2 回路付き検定	48
(A) $f_0=0.45\text{Hz}$ の場合 (微動検定-II)	48
(B) $f_0=4.5\text{Hz}$ の場合 (微動検定-Ⅲ)	48
5.4.3 回路を付けた場合、付けない場合の比較	49
5.5 アクロスによる地震計の検定	49
5.5.1 回路なし検定 (アクロス検定-I)	49
5.5.2 回路付き検定	50
(A) $f_0=0.45\text{Hz}$ の場合 (アクロス検定-II)	50
(B) $f_0=4.5\text{Hz}$ の場合 (アクロス検定-Ⅲ)	50
5.5.3 回路を付けた場合、付けない場合の比較	51
6. 結 論	95

写 真 ・ 図 表 目 次

写真1 均一化回路部品	15
写真2 周波数特性均一化回路	17
写真3 基準加速度計および取付け三軸ブロック	37
写真4 F.R.A.による地震計検定作業	41
写真5 微動、アクロスを用いた地震計検定作業	43
図3-1 回路図	23
図3-2 F.R.A.による均一化回路の周波数特性 ($f_0=0.45\text{Hz}$)	24
図3-3 F.R.A.による均一化回路の周波数特性・振幅比と位相差 ($f_0=0.45\text{Hz}$)	25
図3-4 F.R.A.による均一化回路の周波数特性 ($f_0=4.5\text{Hz}$)	26
図3-5 F.R.A.による均一化回路の周波数特性・振幅比と位相差 ($f_0=4.5\text{Hz}$)	27
図5-3 (1)~(3) F.R.A.検定-I : 地震計の周波数特性 (回路無し)	52~54
(4)~(6) F.R.A.検定-I : 地震計の特性比較 (回路無し)	55~57

- (7)~(9) F.R.A.検定-Ⅱ：地震計の周波数特性
(回路付き： $f_0=0.45\text{Hz}$) 58~60
- (10)~(12) F.R.A.検定-Ⅱ：地震計の特性比較
(回路付き： $f_0=0.45\text{Hz}$) 61~63
- (13)~(15) F.R.A.検定-Ⅲ：地震計の周波数特性
(回路付き： $f_0=4.5\text{Hz}$) 64~66
- (16)~(18) F.R.A.検定-Ⅲ：地震計の特性比較
(回路付き： $f_0=4.5\text{Hz}$) 67~69
- (19) 均一化回路を付けた場合／付けない場合の周波数特性比較 70

- 図 5-4 (1) 微動検定-I 微動による地震計の検定 波形データ
(回路無し) 71
- (2)~(4) 微動検定-I 微動による地震計の検定 振幅・位相特性の比較
(回路無し) 72~74
 - (5) 微動検定-II 微動による地震計の検定 波形データ
(回路 $f_0=0.45\text{Hz}$) 75
 - (6)~(8) 微動検定-II 微動による地震計の検定 振幅・位相特性の比較
(回路 $f_0=0.45\text{Hz}$) 76~78
 - (9) 微動検定-III 微動による地震計の検定 波形データ
(回路 $f_0=4.5\text{Hz}$) 79
 - (10)~(12) 微動検定-III 微動による地震計の検定 振幅・位相特性の比較
(回路 $f_0=4.5\text{Hz}$) 80~82

- 図 5-5 (1) アクロス検定-I アクロスによる地震計の検定 波形データ
(回路無しの場合) 83
- (2)~(4) アクロス検定-I アクロスによる地震計の検定 振幅・位相特性の比較
(回路無しの場合) 84~86
 - (5) アクロス検定-II アクロスによる地震計の検定 波形データ
(回路 $f_0=0.45\text{Hz}$) 87
 - (6)~(8) アクロス検定-II アクロスによる地震計の検定 振幅・位相特性の比較
(回路 $f_0=0.45\text{Hz}$) 88~90
 - (9) アクロス検定-III アクロスによる地震計の検定 波形データ
(回路 $f_0=4.5\text{Hz}$) 91
 - (10)~(12) アクロス検定-III アクロスによる地震計の検定 振幅・位相特性の比較
(回路 $f_0=4.5\text{Hz}$) 92~94

1. 緒 論

北海道幌延町に計画されている深地層研究所（仮称）の計画の一環として、地下施設建設や地殻変動によって岩盤や地下水の挙動を遠隔的にモニタリングするシステムを開発することとしている。このシステムを遠隔監視システムと呼んでいる。

遠隔監視システムは、その中核技術をアクロスシステムに置いているが、同システムは、いままで岐阜県土岐市の東濃地科学センターにおいて精力的に研究開発が進められてきている。その成果は、毎年合同学会、地震学会で講演やセッションの形で発表されている。またインターネットの専用ホームページでも公表されている。

現在のアクロスの到達段階は、ハードウェアでは 20tforce の偏心荷重回転体による弾性波周波数精密制御定常発信装置の開発、ソフトウェアでは時間区間蓄積型記録方式（TS スタッカー）および存否ケプstram解析法の開発まで進み、すでに実用化に至り、改良努力継続されている状況である。残された課題は、信号観測システムの構築と地下構造解析の汎用ソフトウェアの開発である。

本来、遠隔監視システムは、弾性波の他に電磁波をも用いて、地下の広範な領域の物性変化や岩盤挙動を非破壊的に把握することを目的にしている。本件は、このうち弾性波を用いた手法の開発に係る予備的検討を行うものであり、地元合意を得た後に行なう深地層研究所の実施計画具体化の予備的ステップとなるものである。

本件は、発想とデータ処理の手法がアクロスシステムのそれと共通性をもち、同時に実用化された構造解析のソフトウェアをもつ微動探査法について、遠隔監視システムへの応用性を検討し、アクロスシステムを補完する技術であるか否かを評価し、弾性波を用いたモニタリングシステムの開発に寄与することを目的にしている。

業務の内容は、微動探査法の原理と事例の紹介、遠隔監視システムへの応用性の検討、地下構造モデル設定による構造解析シミュレーション、および受信システムの基本設計である。

2. バッテリー駆動式時間区間蓄積型記録計の改良

2.1 目的

バッテリー駆動式時間区間蓄積型記録計 (TS スタッキング収録装置 LZ8090) を時間区間 100 秒で設定時、現行ファームウェアでは 98 秒しか取得できないが、これを 100 秒フルに取得できるようにし、完全に連続的なデータ取得が行えるようにすることを目的とする。

留意することは、①取り除けるノイズは極力排除することと、②長時間観測により S/N を向上させることの 2 点であるが、①は当然として、②については次のとおり。

取得データのフーリエ変換を考える理想的な正弦波の振幅はデータ長によらず一定であるが、ランダムノイズのスペクトル密度は時間が長いほど減少するので S/N が向上する。現実的には、やみくもに長いデータを取得することは、記録媒体や計算などの手間を増大させるだけである。

見たい信号の周波数が既知の場合は、その整数倍の時間区間で区切ってスタッキングを行うことで、S/N を向上できる (時間区間蓄積)。時間区間の整数分の 1 の周期をもつ正弦波信号は加算回数に比例してその振幅が増大するが、一方ランダムノイズは、加算回数の平方根でしか振幅が増えない。この理屈は、ロックインアンプなどでも同様である。結局ノイズを極力排除してダイナミックレンジを上げ、時定数を稼ぐことにより S/N の向上を図っている。

アクロス観測では、送信信号である FM 波の観測が行いやすい時系列取得方式を採用している。この場合の S/N 改善に必要な要件は、信号源が理想的な正弦波であるとして、つぎの 2 点である。

- ・ A/D 変換する際のクロック (サンプリングクロック) が正確であること。
- ・ センサー、アナログ回路、A/D 変換器が安定、低ノイズであること。

記録計の改良は、以上の認識に立っている。

2.2 データ収録ソフトウェア

2.2.1 委託仕様

バッテリー駆動式時間区間蓄積型記録計によるデータ収録機能の向上のため、下記内容においてハードウェア、ソフトウェアの改良を行った。

(1) 時間区間フルにデータ取得できるようにする。

現行：2 秒の欠測がある (時間区間を 100 秒で設定すると 98 秒)。

改良：欠測を 0 秒にする。

(2) 時間区間長のバリエーションを増やす

現行：100 秒、200 秒のみ

改良：10 秒、20 秒、50 秒、100 秒、200 秒に選択を広げる。

(3) データのサイズを縮小する。

現行：電圧データおよびスタック数が全て4バイト

改良：電圧データを3バイト、スタック数を1バイトにして、メモリの節約をはかり、スケジュール数の増大を考える。

(4) 4ch化

アレイ観測や地震3成分に加えて電磁データも1成分余計に取ることができる。

(5) 大振幅ノイズをスタックしない機能が正常に働くようにする

現行：キャンセル機能が上手く動作しない。

改良：正常にする。

(6) 測定完了情報をエリアパラメータに記録する。

(7) 測定スケジュールからロガーIDが変更できるようにする。

2.2.2 製作委託先・成果納品

ソフトウェア製作の委託先は、データ収録器の「LS8000SH」の製造メーカーとして関連ソフトに実績のある(株)白山工業とした。

株式会社白山工業 東京都府中市日綱町1-1 Tel:042-333-0080
データマーク事業部

2.3 データ回収ソフトウェア

2.3.1 委託仕様

バッテリー駆動式時間区間蓄積型記録計にパソコンからスケジュール管理等のコマンド入力の改良及び、パソコンに完全に連続的なデータ取得が行えるようにする等、下記を目標にパソコン搭載ソフトウェアの改良を行なった。

- (1) スケジュール新規作成時に、日時の設定内容をパソコンの日時を参照して開くようにする。スケジュールの設定の際、いつも年号を1980年から全て入れ直すとか、セーブしたスケジュールファイルを読み出して変更すると上手く行かないこともある。スケジュールを新規に設定する時はlatestの設定からスタート出来るようにすれば、間違いも少なく便利になる。
- (2) LS-8000SHのIDをWASSISTのスケジュールから可能とする。現行では本体のキー操作のみ。IDの部分をLocation名として使えば整理の手間がぐっと減る。
- (3) ファイル名の通し番号を変更可能にする。ファイルのスタートNoを設定できるようにする。同じディレクトリに上書きされることなく回収ができるよう改善する。
- (4) 回収時に未測定スケジュールを回収しないようにする。

2.3.2 製作委託先・成果納品

ソフトウェア製作の委託先は、データ収録ソフトウェアと同様、ファームウェア関連ソフトに実績のある(株)白山工業とした。

平成12年5月25日、(株)白山工業から、FDの媒体により、核燃料サイクル開発機構東濃地科学センターに納品がなされた。

2.4 納品ソフトウェア仕様

次ページ以下に示す。

TIMESTACKER SYSTEM

LS-8000SH+WASSIST

時間区間蓄積記録装置システム

A user manual

Mobile Time Segment Stacking Recorder

for accurate spectrometry by across

携帯式時間区間蓄積型記録装置

取扱説明書

(Ver 3. 0)

HAKUSAN CORPORATION

4.5. GPS

GPS は LS-8000SH の電源が投入された時点より動作した状態で使用されま
す。GPS を常時電源を投入していることで、測定時の時刻修正を短時間で行
うことができます。

4.6. 測位

設定によって、2種類の測位ができます。

1) オート測位

オート測位を選択すると、1エリア目(最初の測定)の5分前に測
位を開始します。この時は、GPSを位置推定モードにしますので、予
め緯度、経度を与える必要がありません。測位して得られた緯度、経
度は測定ヘッダに記録されます。

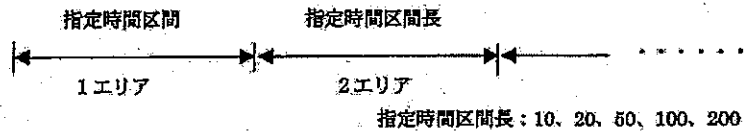
2) マニュアル測位

マニュアル測位は、測定中、測定待ちの状態では行うことができ
ません。

マニュアル測位は、オート測位の設定に関係なく実行でき、この時
の測位結果は測定ヘッダに記録されます。

4.7. 時刻修正

サンプリング用クロックの時刻修正は、時間区間の最初のサンプリング毎に行います。
この時刻修正は、サンプリングを中断することなく行われますので、指定時間区間長分の
データがフルに記録できます。例えば、サンプリングが100Hz、スタック長が100秒の場
合は、10000サンプルの測定が可能です。



4. 概要と特徴

4.8. 主な仕様

項目	仕様	
入力	入力チャンネル数：3ch 入力形式：平衡入力 入力インピーダンス：1M Ω	
ゲイン	2,10,30,100,300,900倍から選択	
地震計の制動抵抗	付属のシャント抵抗ボードより入力に並列に取り付けが可能 1M Ω (500K Ω ×2) 内蔵	
ローパスフィルタ	30,60,120,240Hz及びフィルタ未使用から選択可能	
分解能	16ビット	
サンプリング周期	100,200Hzから選択	
記録容量	20MByte	
時間区間	10,20,50,100,200secから選択可能	
データエリア	サンプリング 100Hz / 時間区間 10sec	999スケジュール
	サンプリング 100Hz / 時間区間 20sec	638スケジュール
	サンプリング 100Hz / 時間区間 50sec	255スケジュール
	サンプリング 100Hz / 時間区間 100sec	128スケジュール
	サンプリング 100Hz / 時間区間 200sec	64スケジュール
	サンプリング 200Hz / 時間区間 10sec	638スケジュール
	サンプリング 200Hz / 時間区間 20sec	255スケジュール
	サンプリング 200Hz / 時間区間 50sec	128スケジュール
	サンプリング 200Hz / 時間区間 100sec	64スケジュール
	サンプリング 200Hz / 時間区間 200sec	32スケジュール
GPS時刻校正	時刻精度：±5 μ sec	
時刻校正間隔	10,20,50,100,200sec間隔で時刻校正(時間区間に依存)	
基準時計部	時刻精度：±1ppm	
電源	乾電池内蔵(単2形4本)、外部電源端子付き(6~9V)	
消費電流	24.0mA	
パソコンとの通信	高速パラレル通信(最大500kbyte/sec)	
外形寸法	260×146×40mm	
重量	900g(乾電池含まず)	
動作温度湿度範囲	温度：-10 $^{\circ}$ C~+50 $^{\circ}$ C 湿度：30~90%、ただし結露なきこと	
バックアップ電池	出荷後約2年間	
その他機能	大振幅ノイズをスタックしない機能を有す 測定完了情報をエリアパラメータに記録するため、測定完了エリアのみの回収が可能	

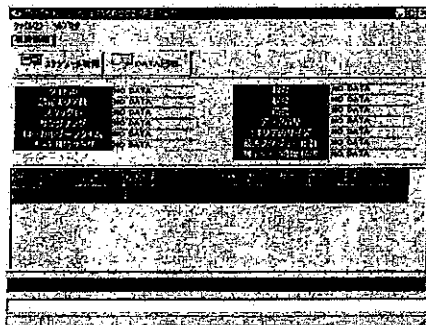
6.8. データの回収

データ回収の起動

プルダウンメニューの「回収」を選択すると次のような画面が表示されます。

“APP.EXE”を実行することで、回収ソフト単体で起動させることも可能です。

なお、データ回収を起動した状態で、LS-8000SH を接続すると、自動的にスケジュール取得を開始させることができます。



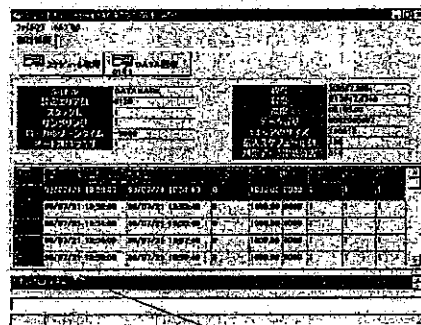
スケジュール取得

LS-8000SH をパソコンと接続し、「スケジュール取得」ボタンをクリックすると、次のような画面が表示され、LS-8000SH に設定してあるスケジュールを読み込みます。



スケジュールの読み込みが終了すると、読み込んだ内容が画面に表示されます。通信結果は画面下の所に表示されます。

ここで表示される内容は、LS-8000SH に書き込まれている状態をそのまま表示するため、スタック長等の表現が“1”や“2”といった表現になっています。この内容につきましては、「7. データ構造」を参照して下さい。

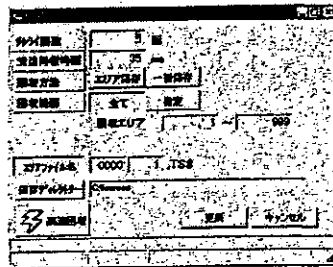


データ回収

通信結果

6. WASSIST

スケジュールが取得されます。「データ回収」ボタンがグレイ表示から通常表示に変わります。この状態の時に、「データ回収」ボタンをクリックすると次の画面が表示され、「高速回収」のボタンをクリックするとデータ回収が始まります。



この設定項目の内容は以下の通りです。個々の条件を設定し終えたら「高速回収」ボタンをクリックします。

データ回収の中断は「ESC」キーを押すと中止します。

- リトライ回数：通信が途中で失敗した場合のリトライ回数を変更できます。
- 受信待機時間：パソコンのパラレルポートの特性によって通信が不安定な状態の場合は、この時間を大きくして調整して下さい。
(但し、大きくすると通信時間が長くなります。)
- 回収方法：「エリア保存」とは1エリア回収する毎に保存を行います。
「一括回収」とは測定している全エリアを回収し、エリア毎に保存を行います。
(使用するパソコンのメモリ容量が 96Mbyte 以上の

みご使用下さい。メモリ容量が小さくパソコンで一括保存を行うとスワップが発生し、逆に回収時間を長くすることになります。)

- 回収方法：「エリア回収」とは測定終了しているエリア内で回収範囲を指定して回収することができます。
「一括回収」とは測定終了している全エリアを回収します。
- 保存ディレクトリ：回収データの保存先を変更することができます。
(ディレクトリは、極端にディレクトリ構造が深いものや、半角、全角が混在した構造の場合は、データ回収時に「不正なファイル名です」とエラーを表示して、回収できない場合があります。)
- 「更新」：更新ボタンを押すと、リトライ回数、受信待機時間を変更した内容が記録され、次に起動した時に変更した値で起動されます。

- ファイル名：エリアファイル名ボタンを押すと、設定用ウィンドウが開きます。
IDを変更する場合は、「0000」の箇所を変更します。
通し番号を変更する場合は、「1」の箇所を変更する。

7.2.6. エリアパラメータ

各エリアに設定される内容を示します。

0Byte	エリア番号 (4 byte)
4Byte	スタート時刻 (4 byte)
16Byte	ストップ時刻 (12 byte)
28Byte	フィルタ (1 byte)
29Byte	しきい値 (6 byte)
35Byte	デッドタイム (4 byte)
39Byte	1ch アンプゲイン (1 byte)
40Byte	2ch アンプゲイン (1 byte)
41Byte	3ch アンプゲイン (1 byte)
42Byte	4ch アンプゲイン (1 byte)
43Byte	測定終了ヘッダ (1 byte)
44Byte	予備 (20 byte)
64Byte	

1) エリア番号(4Byte)

エリア番号を4桁で表します。

2) スタート時間(12Byte)

測定を開始した時刻を年月日時分秒で表します。

"Y Y D D M M h h m m s s"
年 月 日 時 分 秒

3) ストップ時間(12Byte)

測定を終了した時刻を表します。

(測定中に、電源異常が発生した場合は、この時刻は適当ではなくなり
ます。)

"Y Y D D M M h h m m s s"
年 月 日 時 分 秒

4) フィルタ(1Byte)

フィルタの設定を表します。

0 : フィルターなし
1 : 30 Hz
2 : 60 Hz
3 : 120 Hz
4 : 240 Hz

7. データ構造

5) しきい値 (6Byte)

3ch の入力の内いずれかのチャンネルが、設定したレベル以上の入力の場合は、そのサンプリング時の全チャンネルのデータを加算しません。そのときのしきい値を3桁の整数と2桁の小数で表す。但し、単位は「mV」で表します。

000.00 mV

6) デッドタイム (4Byte)

しきい値よりオーバーした前後のデッドタイム分の時間をスタッキングバッファに加算しません。また、設定する時間はサンプリングに依存します。100Hzの時は10msecステップ、200Hzの時は5msecステップになります。

0000 msec

7) アンプゲイン (4Byte: 各チャンネル1 Byte)

各チャンネルのアンプゲインを表します。
(4chのみ0 (off) に固定)

- 1: 2倍
- 2: 10倍
- 3: 30倍
- 4: 100倍
- 5: 300倍
- 6: 900倍

3. 周波数特性均一化回路の製作

3.1 目的

遠隔監視システムに用いる地震計は、アクロスのターゲット周波数(数 Hz~100Hz)内で、平坦な振幅特性と直線的な位相特性を持つことが要求される。また、場所により異なるが、少なくとも現地の地動ノイズよりも自己ノイズが少ない地震計であることが必要である。その他に、遠隔監視システムに用いる地震計に特に要求される特性は、以下が考えられる。

(1)直線性

センサーをはじめとして観測装置に非線型性が存在すると、FM 信号のように複数の周波数を扱う場合には、周波数間でクロストークが発生し、振幅・位相データにバイアスを生じる。非線型性が無視できないような観測装置においては検定を十分に行い、出力の振幅値から入力振幅が正確に補正できるようにしておく必要がある。

(2)安定性

微妙な時間変動を捕らえようとする場合は、観測装置自体にそれ以上の変動があると何を見ているのか分からなくなる。観測装置自体を環境変動に強いものとするか、装置自体がある程度環境の影響を受けても、温度など設置環境を安定させたり、温度特性などをあらかじめ検定したり、また、常時キャリブレーションを行って補正できるようにするなどして、装置特性変動を取り除く必要がある。

(3)精度よく検定された周波数特性

地動(変位、速度、加速度)という物理量を紛れなく測るためには、装置自体の振幅や位相などの周波数特性が良く検定されてあらかじめ分かっている必要がある。これは、特に多数のセンサー・観測装置を使用する場合に大変重要となってくる。

サイクル機構が所有する5台の動コイル型地震計(マークランド製、5章に仕様を記述)は、同様の周波数特性を有しているものの、互いに多少の差異がある。遠隔監視システムにおいては、全ての地震計の周波数特性が厳密に整合するため、電氣的に周波数特性を均一化するための回路の製作をおこなった。これは、それぞれに固有の周波数特性を持つ地震計を広帯域化して位相特性などを安定化させると同時に、電気回路部分の特性を揃えることにより地震計の周波数特性の厳密な均一化を図るものである。

3.2 設計

上述の目的を実現するための地震計の周波数特性均一化の方法として、負抵抗シャントによる過制振・積分法（森谷他、1997）を用いた。

短周期地震計を用いてやや長周期地震計と同じ特性を得る方法として、過制振積分法がある。これは固有周波数 f_0 の地震計の振子に対する減衰定数 h を大きくして加速度計とし、それを積分することで、 $f_0/2h \sim f_0 \times 2h$ の広い範囲で速度計として使用するものである。この方法では、地震計の諸定数の影響が少なく、特性が安定しているという特徴がある。このとき、 h をどこまで大きく出来るかが周波数範囲を決定する。 h は外付けの抵抗で調整し、 h を大きくするためには抵抗値を小さくする必要があり、極限值は 0 オームである。しかしその場合でも、 h は 3～10 程度にしかならない。しかし電子回路により、見かけ上コイル抵抗より小さいシャント抵抗（つまり負抵抗）をつくることができる。これによって h を数 10 という大きい値に設定でき、二次的な共振回路を付加することにより長周期地震計と同じ特性を得ることが可能である。この方法は Erich Lippmann (The University of Munich) によって開発された。この方式は設置時に筐体のレベルを合わせるだけで本来の性能が発揮されるため、機動性が高い。

図 3-1 に回路図を示す。回路は主に、負抵抗シャントを用いた増幅回路（1 段目、出力 E_p ）、バンドパスフィルターの働きをする積分回路（2 段目）、ローパス・フィルター（3 段目）の 3 つの部分から成る。1 段目と 2 段目でデュアルタイプのオペアンプ（LT1124）を用いる。

1 段目では、負帰還を施した反転型オペアンプ増幅回路に、入力インピーダンスが 0 となる非反転入力端子に地震計のコイルを接続し、さらに全体に正帰還を施している。これにより入力端子にコイルに生じた電圧の逆方向の電圧が現れ、コイルには常に強い制振力が生ずるようになる。抵抗 R_f は、地震計のコイル抵抗 R_c から計算される。 R_c は地震計によって約 1.4k Ω から 1.7k Ω の範囲でばらつきがあり、 R_f は約 19k Ω から 21k Ω の間の値となる。

2 段目では、1 段目の出力を固有周波数 f_0 より低い共振周波数 f_b を持つバンドパスフィルターを介して速度計としている。バンドパスフィルターの中心周波数は地震計の 2 次的な固有周波数となる。バンドパスフィルターの中心周波数 f_b は

$$f_b = 1 / [2\pi \sqrt{(R_3 * R_4 * C_1 * C_2)}]$$

と表される。本回路では、スイッチの切り替えによって f_b を 2 通りに設定した。

図 3-1 よりチャンネル A（スイッチ I、スイッチ II、共に ON）のとき、

$$R_3 = 200k\Omega, R_4 = 1.00M\Omega$$

$$C1=C1'+C1''=0.22(\mu F)+2.0(\mu F)=2.22(\mu F)$$

$$C2=C2'+C2''=0.0284(\mu F)+0.26(\mu F)=0.284(\mu F)$$

よって、

$$f_b=1/(2\pi\sqrt{(200*10^3*1.00*10^6*2.22*10^{-6}*0.284*10^{-6})})$$
$$=0.45(\text{Hz})$$

また、チャンネルB（スイッチⅠ、スイッチⅡ、共にOFF）のとき、

$$R3=200k\Omega, R4=1.00M\Omega$$

$$C1=C1'=0.22(\mu F)$$

$$C2=C2'=0.0284(\mu F)$$

よって、

$$f_b=1/(2\pi\sqrt{(200*10^3*1.00*10^6*0.22*10^{-6}*0.0284*10^{-6})})$$
$$=4.5(\text{Hz})$$

となる。チャンネルAとBは、震動の測定時の目的や状況に応じて使い分ける。

3段目のローパスフィルターは、この地震計を用いて長周期の微動または地震観測を行う場合に、高周波のノイズを低減する目的で付け加えた。4チャンネルの切り替え方式とし、遮断周波数は

$$f_L=1/(2\pi(C_L*R_L))$$

で表され、それぞれ、ローパスフィルター無し（チャンネル①）、 $f_L=0.5\text{Hz}$ （チャンネル②）、 $f_L=1.5\text{Hz}$ （チャンネル③）、 $f_L=5.0\text{Hz}$ （チャンネル④）である。

3.3 製作

3.3.1 部品リスト

表3-1に回路の製作に用いた部品のリストを示す。また、写真1に製作前の各部品を示す。

回路は地震計毎に1セットずつで、各セットは上下及び水平2成分、計3成分について、成分毎に1個の周波数特性均一化回路で構成されている。ただし、オペアンプ駆動用の電源は、3成分で共通とした。

各地震計の特性を可能な限り均一にするため、森谷他（1997）にしたがって、使用する抵抗の値およびコンデンサーの容量値は3桁まで同一となるように選択、あるいは組み合わせて使用した。

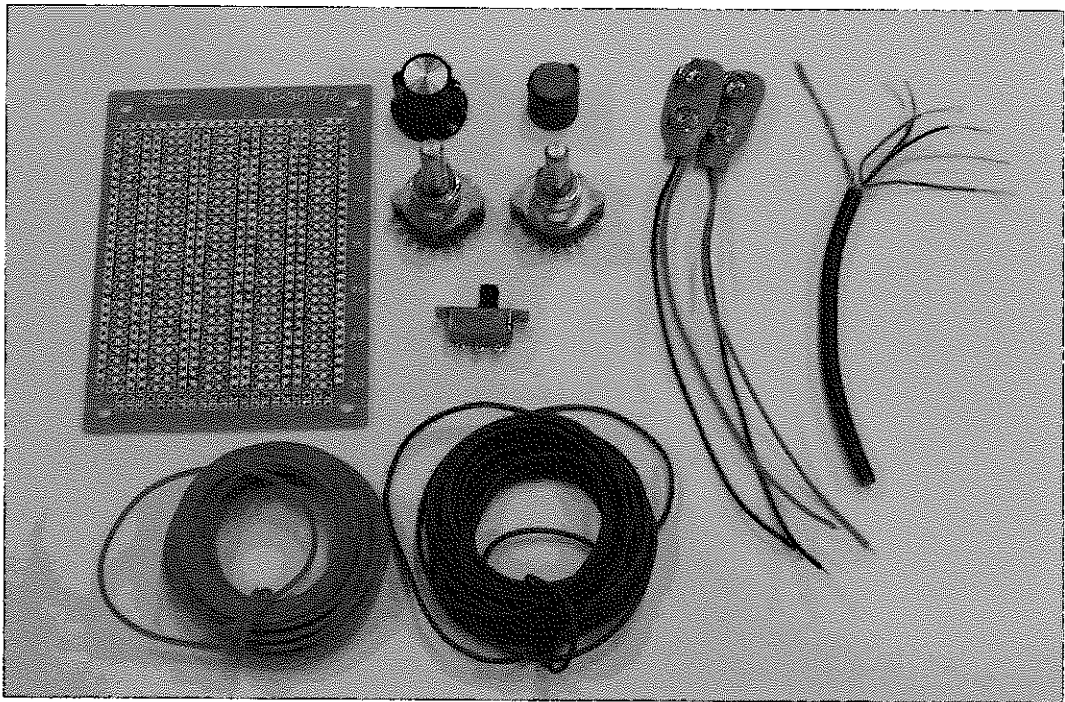
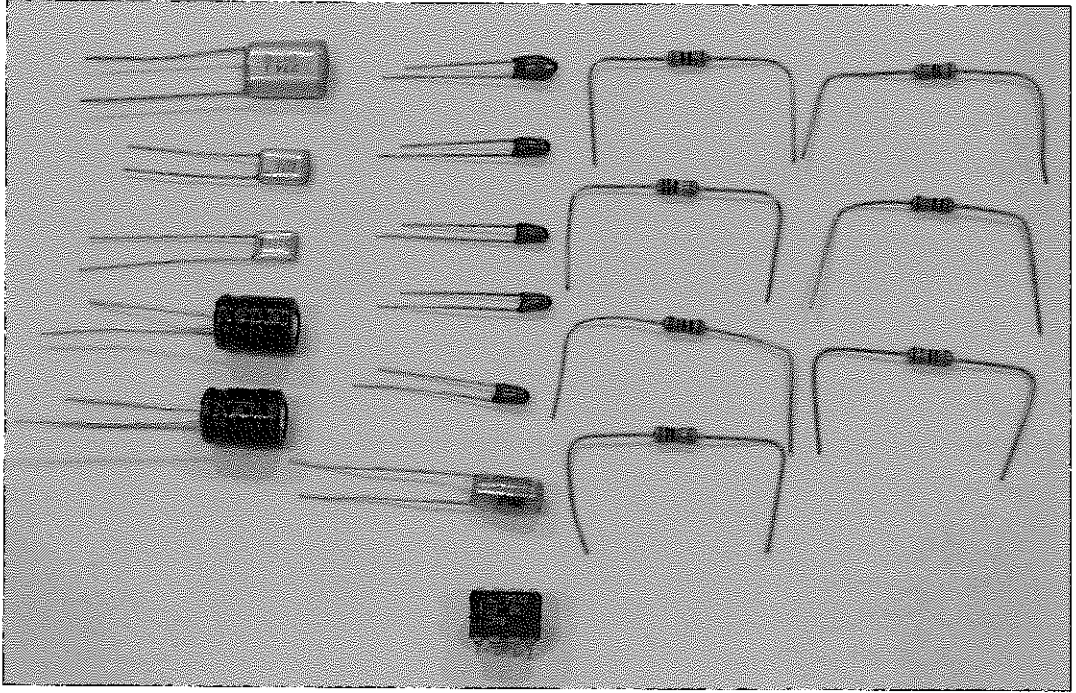


写真1 均一化回路部品

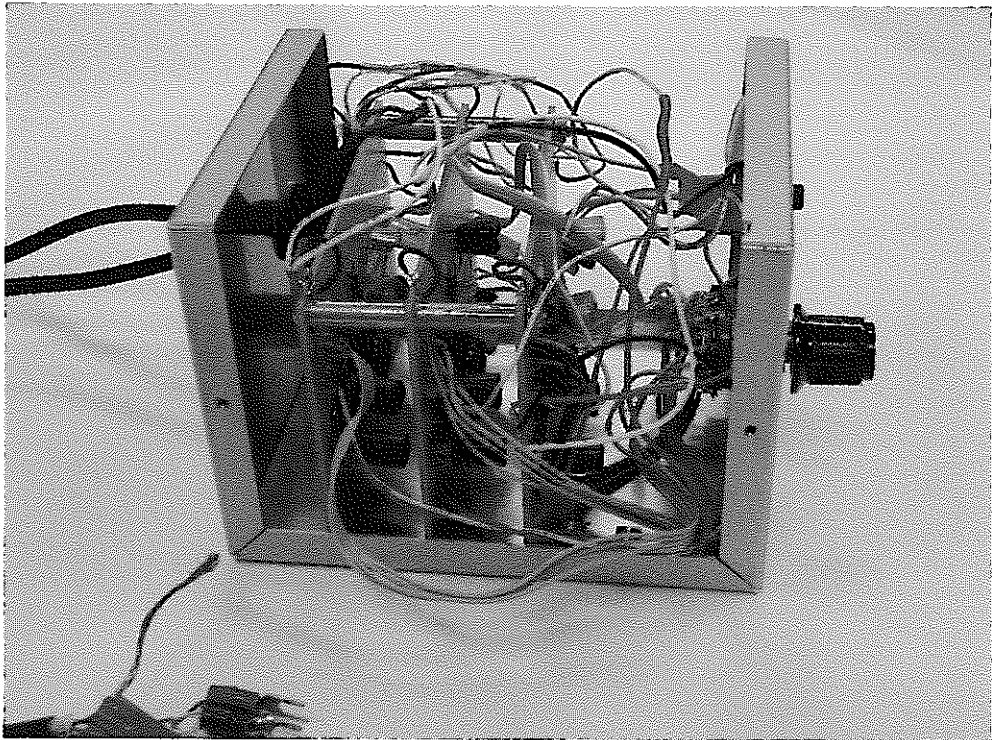
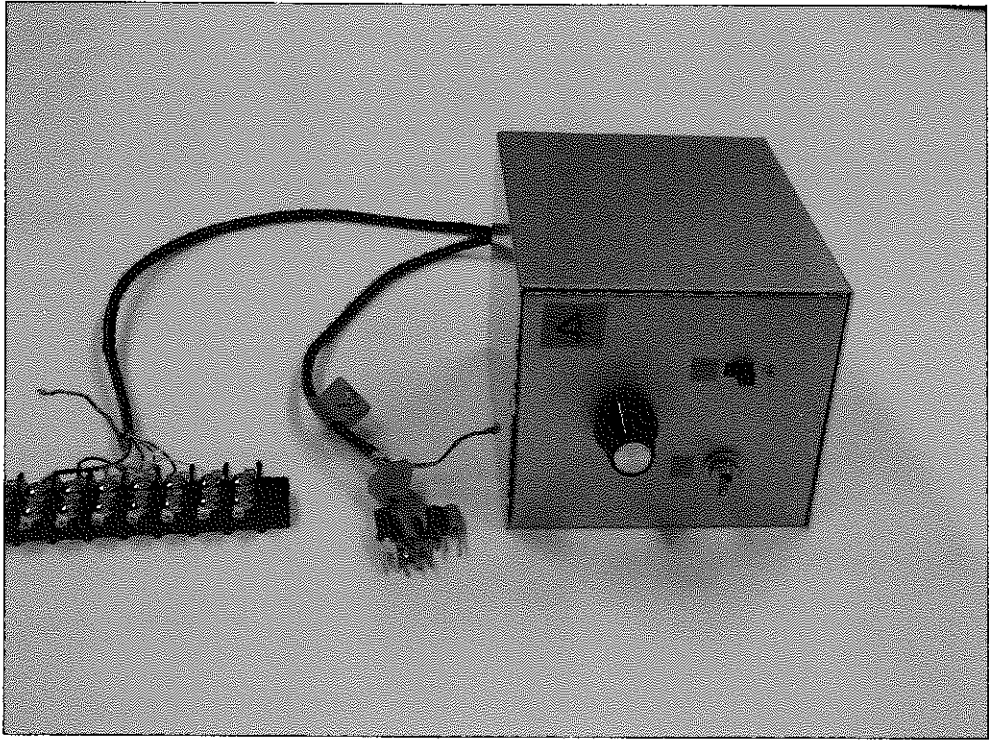


写真2 周波数特性均一化回路

表 3-1 均一化回路部品リスト

部品名	使用個数
【オペアンプ】 LT1124CN8	各成分 1 個
【コンデンサー】 タンタル電解コンデンサー 3.3 μ F 1.5 μ F 1.0 μ F 0.47 μ F 0.33 μ F マイラー・コンデンサー 0.22 μ F 0.27 μ F 0.15 μ F スチロール・コンデンサー 220pF アルミ電解コンデンサー 100 μ F	各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 2 個
【金属皮膜抵抗】 1.00 M Ω 200 K Ω 100 K Ω 56 K Ω 19.1 K Ω または 20.0 K Ω 3.6 K Ω 0.56K Ω 100~900 Ω	各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個 各成分 1 個
【スイッチ】 3回路4接点ロータリースイッチ 6回路2接点ロータリースイッチ 2接点切り替え電源スイッチ	各地震計 1 個 各地震計 1 個 各地震計 1 個
ユニバーサル基盤	各成分 1 枚
アルミ・ケース	各地震計 1 個
配電盤 (地震計接続用)	各地震計 1 個
データロガー接続用ピン	各成分 2 個
シールド線 (6芯)	各地震計 2.0m
8ピンICソケット	各成分 1 個
006P型乾電池用コネクタ	各地震計 1 個
その他 リード線 ネジ、ナット各種 スペーサー 各種	

3.3.2 製作回路

装置を取り付けたのは核燃料サイクル機構アクロス研究チームの所有する5台のマークランド3成分地震計である。これらの地震計はコイル抵抗が測定されている。表3-2に地震計の名称、コイル抵抗を示す。

表3-2 検定に使用した地震計

地震計	検定番号	UD	NS	EW
動燃 24932-007	M001	1472	1556	1453
動燃 24932-002	M002	1519	1549	1632
動燃 24932-003	M003	1539	1546	1639
動燃 24932-004	M004	1513	1547	1582
動燃 24932-005	M005	1525	1523	1525

(単位：Ω)

以下、地震計は検定番号 (M001~M005) で示す。

写真2に完成した装置の概観を示す。装置の内部構成は、上下および水平2成分、計3成分用の、3枚の基盤から構成される。各基盤は、各コイル抵抗の測定値に応じて計算した抵抗 R_f (図3-1参照) の値以外は全て同一である。

回路は各地震計について1台ずつ製作し、地震計M001に付属するものをC001、以下同様にM002-C002、M003-C003、M004-C004、M005-C005、と呼ぶ。C001~C005はそれぞれ上下(UD)、南北(NS)、東西(EW)の3成分の回路を含む。

3.4 回路の検定

周波数応答解析装置 (Frequency Response Analyzer、以下 F. R. A. と略す) を用いて、製作した回路の周波数特性を検査した。F. R. A. は、低周波数から数 kHz までの周波数範囲で、一定振幅の正弦波の電気信号を回路に入力し、その出力を再び F. R. A. に取り込んで①振幅および②位相 (入力信号との位相差) を周波数毎に測定するものである。写真 4 に F. R. A. 装置、及び検定作業風景を示す。同装置は 5 章において、キャリブレーション・コイルによる地震計の検定にも用いた。

この測定では回路のみ (地震計は用いない) の均一性を調べるため、回路の入力端子に F. R. A. からの正弦波信号を入力し、周波数 0.1~0.2Hz から 1000Hz の範囲で、約 40 個の周波数について回路からの出力をサンプリングした。測定値は各周波数で 4 周期のサンプル値の平均を取っている。F. R. A. から回路に入力する正弦波信号の振幅は 10mV とした。入力端子には、各地震計のコイル抵抗と同値の抵抗器を接続して測定を行った。

図 3.2 に、回路のバンドパスフィルターの固有周波数 f_0 を 0.45Hz とした場合 (チャンネル A) について、振幅特性 (上) と位相特性 (下) を 15 台の回路 (3 成分×5 台) について重ねて示した。縦軸は入力信号に対する振幅比である。振幅は固有周波数 0.45Hz のやや長周期地震計に相当する特性を示し、0.3Hz から 100Hz の範囲で振幅、位相特性は 15 台の回路でほぼ一致している。増幅値は 0.45Hz で最大の 300 倍程度になっている。固有周波数付近の最大振幅に対して、10Hz で約 1/10、100Hz では約 1/100 の振幅になる。位相は固有周波数付近でやや変化が大きく、-60 度~60 度の変化を示しているが、回路毎のばらつきは小さい。振幅が 1 台のみ (002NS に用いたもの) 他より小さい値を示しているが、5 章で回路を地震計に接続した場合の検定では、特に振幅は他と異なっていないため、電源電圧の違いなどの何らかの測定状況の違いがあったと思われる。図 3.3 に 15 台の中の 1 台を基準として計算した 14 台の振幅比 (上) と位相差 (下) を示す。振幅比は測定した 0.2Hz から 1000Hz の範囲で 10% 程度のばらつきを示した。位相は 0.3Hz~100Hz の範囲で 0.5 度~1.0 度のばらつきとなった。100Hz 以上ではややばらつきが大きくなる。

図 3.4 に、固有周波数 f_0 を 4.5Hz とした場合 (チャンネル B) について、振幅特性 (上) と位相特性 (下) を 15 台の回路について同様に示した。この場合は固有周波数の近傍 (1Hz から 10Hz) で -60 度~60 度と変化が大きいが、回路ごとのばらつきは小さい。図 3.5 に 15 台の中の 1 台を基準として計算した振幅比 (上) と位相

差（下）を示す。振幅比は 0.2Hz から 1000Hz の範囲で 5% 程度のばらつきとなっている。位相は 0.3Hz～100Hz の範囲で約 0.5 度のばらつきとなり、固有周波数付近でもばらつきは少ない。200Hz 以上では急激にばらつきは大きくなる。

マークランド地震計に均一化回路を取り付けた場合、地震計の特性はほぼ回路の特性と同等になる。回路の特性は概ね、やや長周期地震計に相当する特性を示し、回路の均一性についても一般的な長周期地震計よりも小さい。ただし、振幅特性のばらつきについては、若干の改良の余地がある。

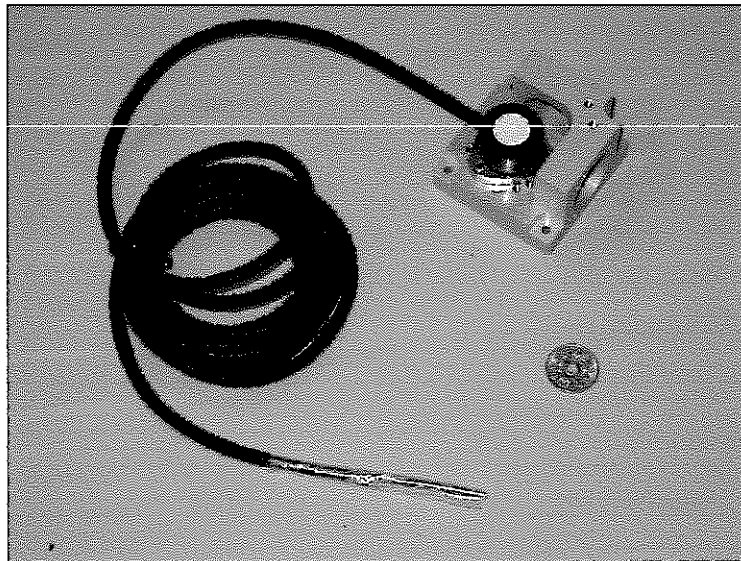
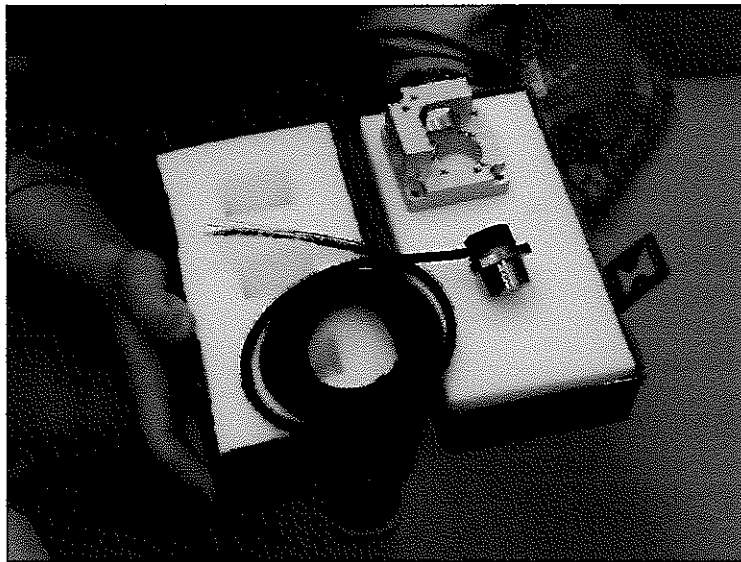
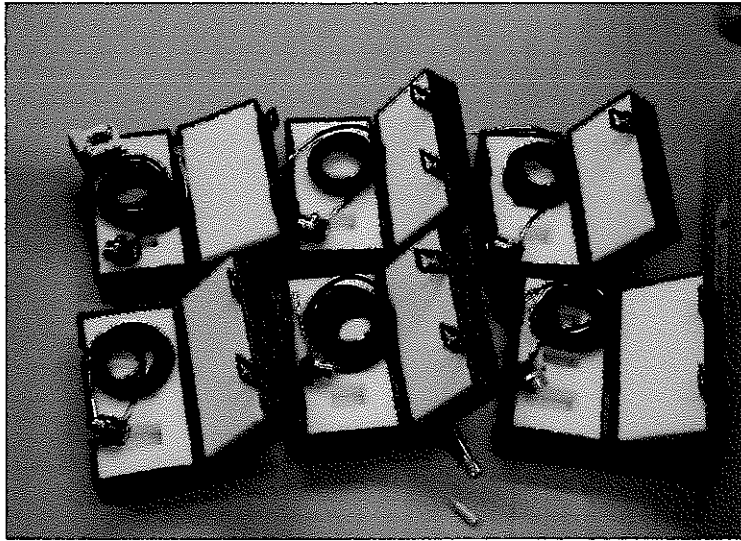


写真3 基準加速度計および取付け3軸ブロック

5. 地震計の検定

5.1 地震計の仕様

本検定では、マークランド (Markrand) 製動コイル型 3 成分地震計を用いた。これはアクロス信号測定用に作成された動コイル型の固有周波数 4.5Hz の 3 成分地震計で、キャリブレーション・コイルが付属している。

5.2 検定方法

5.2.1 キャリブレーション・コイル

地震計に付属するキャリブレーション・コイルと、周波数応答解析装置 (F.R.A.: Frequency Response Analyzer, 3 章「回路の検定」参照) を用いる。この検定では、地面の震動の代わりに F.R.A. から発信される電気信号によって、地震計の周波数特性を調べる。

この検定では、F.R.A. を 0.2Hz~1000Hz の周波数範囲から 80 個の周波数についての振幅と位相をサンプリングするように設定した。写真 4 に測定装置と検定作業の様子を示す。同じ設定で表 5-2-1 の示すように回路無し、回路を固有周期 0.45Hz にした場合、4.5Hz にした場合の 3 通りについて検定作業を行い、それぞれ F.R.A. 検定-I、II、III とした。

表 5-2-1 キャリブレーション・コイルを用いた検定 (FRA 検定 I~III)

	均一化回路の設定 (固有周波数)
FRA 検定-I	回路なし
FRA 検定-II	回路付(A: 0.45Hz)
FRA 検定-III	回路付(B: 4.5Hz)

5.2.2 微動

この検定では、5 台の地震計を 1 個所に集めて設置し、微動を同時に記録する。検定作業は東濃鉾山のアクロス震源室で行った。装置及び検定作業の様子を写真 5 に示す。

コンクリートの床の上に直径 50cm、重さ約 300Kg の金属製リングを置き、その上に 60cm×60cm、厚さ 2.5cm の金属板を載せ、その板上に地震計を固定した。地震計の 1 台 (「動燃 24932-002」、M002) を板の中心に置いて基準の地震計とし、四方に 25cm 離れた位置に 4 台の地震計を固定した。5 台の地震計は正確に東西南北に向きを揃え、金属板に粘着テープで固定した。この方法で、5 台の地震計

にはほぼ同じ震動が入力されていると考えることができる。

データロガーは白山工業のデータマーク LS-8000SH を用いた。記録は 3 成分同時に行い、記録時間は 1 回の測定について、それぞれ 5 分間～10 分間とした。サンプリング周波数は 1000Hz とした。この測定では 0.3～100Hz の震動データ取得を目的としているため、データマーク内臓の 120Hz のローパスフィルターをかけた。

同じ方法で回路無し、回路チャンネル A(0.45Hz)、回路チャンネル B(4.5Hz)について検定を行い、表 5-1 に示すようにそれぞれ微動検定-I、II、IIIとした。

表 5-2-2 微動を用いた検定 I～III

	均一化回路の設定 (固有周波数)
微動検定-I	回路なし
微動検定-II	回路付(A: 4.5Hz)
微動検定-III	回路付(B: 0.45Hz)

5.2.3 アクロス

この検定では微動による検定(2)と同じ装置、記録方法を用いて、アクロス発信信号を 5 台の地震計で同時に記録する。地震計を固定した場所は、アクロス震源装置と検定作業位置の間の距離は約 30m である。アクロスの発信周波数は約 5Hz～25Hz で、変調周期は 16.384 秒である。表 5.2.3 に示すように、回路無し、回路付きのそれぞれの場合について、アクロス検定 I～IIIを行った。

表 5-2-3 アクロスを用いた検定

	均一化回路の設定 (固有周波数)
アクロス検定-I	回路なし
アクロス検定-II	回路付き(A: 0.45Hz)
アクロス検定-III	回路付き(B: 4.5Hz)

なお、M003 に取り付けた均一化回路の EW 成分は、作業中に使用したオペ・アンプの故障が判明したため、今回の検定ではデータを取得していない。

データは 1000Hz から 200Hz にリサンプリングし、16384 ポイント (81.92 秒) の FFT によってスペクトルを求めた。

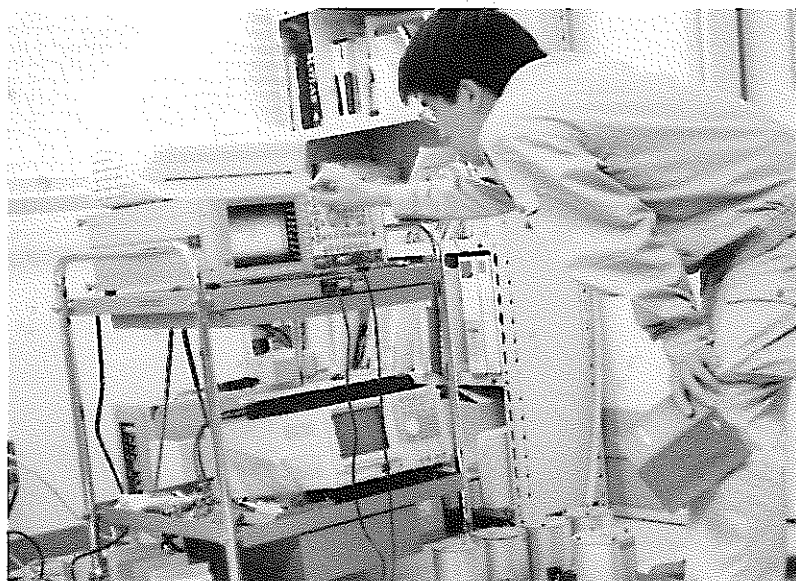
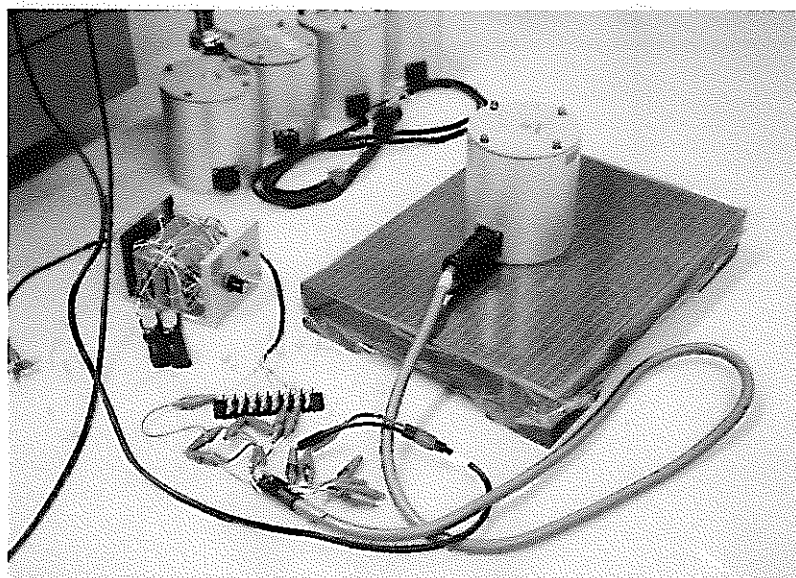
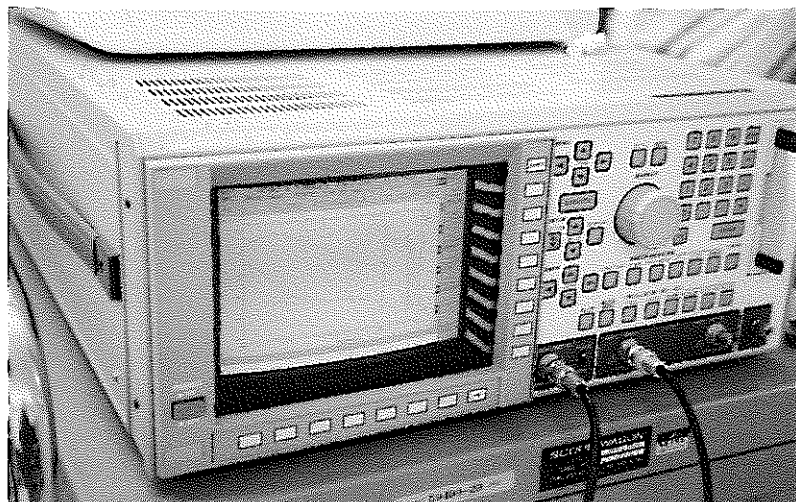


写真4 F.R.Aによる地震計検定作業

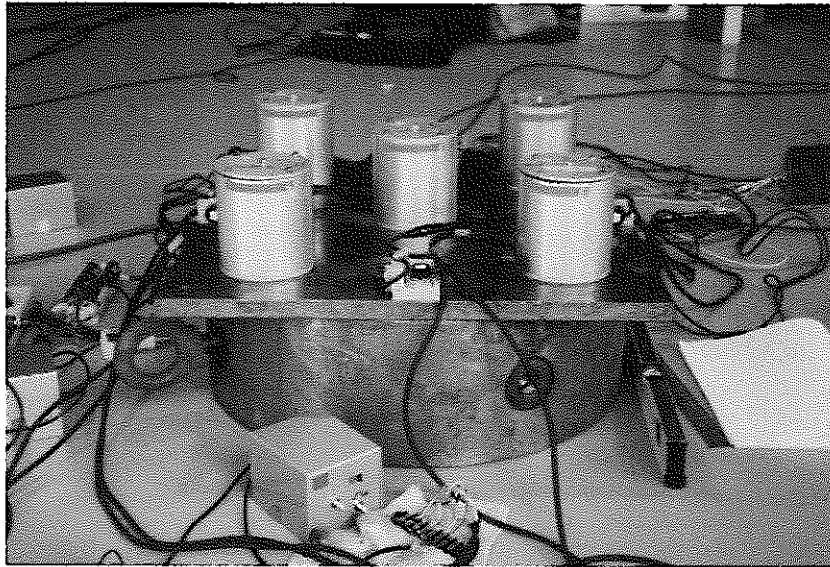
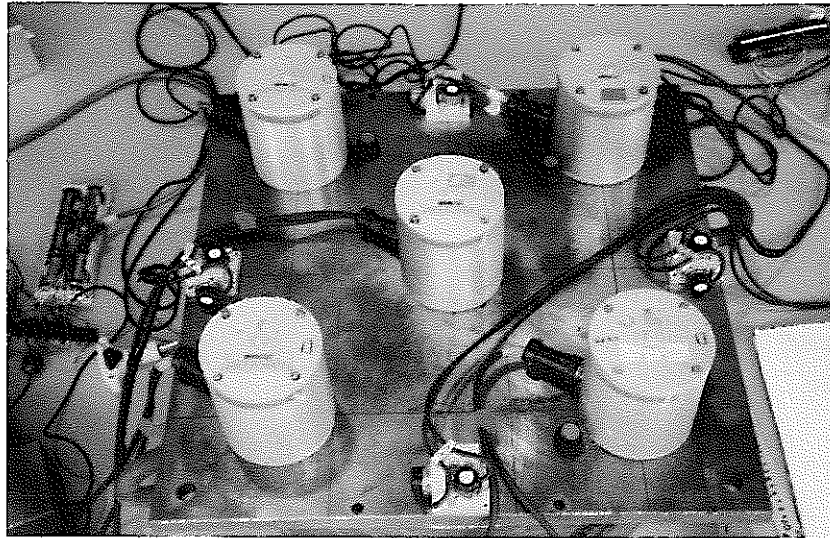


写真5 微動、アクロスを用いた地震計検定作業

5.3 キャリブレーション・コイルによる地震計の検定

5.3.1 回路なし検定 (F.R.A.検定 - I)

均一化回路を付けず、マークランド地震計のみの特性を調べた。キャリブレーション・コイルに入力した正弦波電気信号の振幅は全ての周波数で10mVである。

図5-3(1)~(3)に、(1)上下動(UD)成分、(2)南北動(NS)成分、(3)東西動(EW)成分について、5台の地震計の振幅(上段)、および位相(下段)特性を示す。マークランド地震計の固有周波数は4.5Hzで、この周波数付近で振幅は最大値を示し、位相特性は大きな周波数変化を示している。位相特性はこの4.5Hz近傍で、地震計によってばらつきあることがわかる。また振幅は、特に4.5Hz以下の低い周波数で地震計ごとのばらつきが大きい。

図5-3(4)~(6)に、中心に設置した地震計M002を基準にした場合の、4台の地震計の振幅比と位相差を(4)上下動(UD)成分、(5)南北動(NS)成分、(6)東西動(EW)成分に分けて示す。M002を基準としたのは5台の中で最も平均的な特性を示していた為である。振幅は、0.3Hzから100Hzの範囲で、UD成分では10~20%、NS成分では、5~10%、EW成分では10~20%の違いがある。固有周波数(4.5Hz)以下でばらつきは更に大きく、30%程度でなる。位相差は3成分のいずれも固有周波数付近で特に大きく、10度以上になり、10Hz~100Hzでは約3度~10度のばらつきになる。

5.3.2 回路付き検定

(A) $f_0=0.45\text{Hz}$ の場合 (F.R.A.検定 - II)

図5-3(7)~(9)に、5台の地震計の振幅、位相特性を、上下動(UD)成分、南北動(NS)成分、東西動(EW)成分に分けて示す。

周波数特性は3章で示した均一化回路のみの特性と振幅・振幅ともに概ね一致し、振幅は0.45Hzで最大値を示し、5Hzで1/10、50Hzで1/100になる。

0.3Hz~80Hzの間で特性は安定しており、地震計ごとのばらつきも少ない。特に位相は1Hz~50Hzでほぼ一定値を示した。周波数80Hz~120Hzで特性に乱れがあり、振幅が110Hz付近でピークを示し、位相も急激に変化している。この特性の乱れは地震計と回路を接続した場合のみに見られ、回路のみ(3章)、ま

た地震計のみ (5.3.1) のいずれの場合でも現れない。この乱れは回路の1段目(負抵抗を用いた過制振回路、図 3-1 参照) で発生していることを確認した。この特性の乱れによって振幅、位相特性ともに地震計ごとのばらつきがやや大きくなっている。現在、この影響を抑えるか、またこの特性の乱れの現れる周波数をもっと高周波数に移動させる、などの措置を考慮中である。

図 5-3(10)~(12)に、地震計 M002 を基準にした4台の地震計の振幅比と位相差を、(10)UD成分、(11)NS成分、(12)EW成分について示す。振幅は10%程度のばらつきがある。ただし周波数による変動は無く、全周波数が偏った状態になっている。これは、各回路に用いた抵抗値の違い、または接続抵抗が影響していると考えられる。

位相差は1Hz~10Hzの範囲で0.5度~1度以内に収まった。50Hz~100Hzではばらつきがやや大きく、約5度になる。この検定-II(チャンネルA、固有周波数0.45Hz)の場合、50Hz以上では振幅が極めて小さくなるため、誤差が増大するのはやむをえない。0.3Hz~1.0Hzではばらつきは2~3度となるが、これは位相特性が急変している部分(-60度~60度)に相当する。さらに低い周波数で位相差が更に増大する傾向があるが、これは均一化回路の出力に僅かな直流成分があり、この電圧が1台ずつ異なるためと考えられる。

(B) $f_0=4.5\text{Hz}$ の場合 (F.R.A.検定-III)

図 5-3(13)~(15)に、5台の地震計の振幅、位相特性を、UD成分、NS成分、EW成分に分けて示す。この(B) ($f_0=4.5\text{Hz}$) の場合、周波数特性は均一化回路のみの場合、また回路を付けない地震計だけの場合の特性とほぼ同じになる。振幅は4.5Hzで最大値を示し、0.5Hz、50Hzでおよそ1/10になる。A ($f_0=0.45\text{Hz}$) の場合と同様に、周波数80~120Hzで振幅と位相の急変が起こり、それ以上の周波数では地震計ごとのばらつきが大きい。1Hz~50Hzの範囲で特性は安定しており、ばらつきも少ない。

図 5-3(16)~(18)に、地震計 M002 を基準として4台の地震計の振幅比と位相差を各成分について示す。振幅は5~10%程度のばらつきがある。ただしA ($f_0=0.45\text{Hz}$) の場合同様に全周波数に均一に偏りがある傾向になっている。

位相差は1Hz~50Hzの範囲で0.5度~1度に収まった。(13)~(15)の図に示すように、1Hz~5Hzでは位相特性が-60度から60度まで大きく変化している。これは均一化回路を付けない地震計のみの位相特性とほぼ同じだが、回路を付け

ない場合と比較してばらつきははるかに少ない。0.3Hz から 0.5Hz で位相差は 2 度～4 度とやや大きくなるがこれは回路の直流電流成分の影響と考えられる。

5.3.3 回路を付けた場合・付けない場合の比較

図 5-3(19)に、均一化回路を付けない地震計の特性(実線)と、均一化回路のチャンネル A ($f_0=0.45\text{Hz}$) の場合 (破線)、チャンネル B ($f_0=4.5\text{Hz}$) の場合 (点線) について特性を示した。

A ($f_0=0.45\text{Hz}$) の場合、固有周期である 4.5Hz で、回路を付けない場合に対して約 100 倍の増幅率となり、4.5Hz 以上では回路を付けない場合とほぼ変わらない。位相特性は回路を付けない場合と比較して平坦な特性になる。

また B ($f_0=4.5\text{Hz}$) の場合は回路を付けない場合に対して全ての周波数範囲でほぼほぼ 10 倍の増幅率になり、位相特性もほぼ同じである。ただし、上記の F.R.A. 検定-Ⅲで示したとおり、地震計によるばらつきははるかに少なくなった。

以上より、マークランド地震計に試作した安定化回路を付けることによって、周波数特性が均一化および安定化することが示された。

5.4 微動による地震計の検定

5.4.1 回路なし検定 (微動検定-I)

5 台の地震計を金属板上に固定し、均一化回路を付けず、微動のデータを記録した。今回の検定では、約 10 分間のデータを取得した。図 5-4(1)に 100 秒～150 秒の波形を示す。検定を行った場所(東濃鉱山敷地内)の微動振幅は極めて小さく、地震計の出力振幅は 0.5mV～1.0mV 程度であった。

600 秒間のデータから、現場の作業、人の動きなどによる波形の乱れの少ない部分を選び、100.00～181.92 秒の部分について、パワースペクトル、パワー比、コヒーレンシー、位相差を計算した。図 5-4(2)～(4)に(2)UD、(3)NS、(4)EW の各成分について示す。パワー比、コヒーレンシー、位相差については、金属板の中心に据えた M002 の地震計を基準としている。パワースペクトルより、この地点の微動は 3Hz 以上の高周波数が卓越していることが解る。特に UD 成分では 20Hz 以上のパワーが大きい。コヒーレンシーは 4～50Hz の周波数範囲でほぼ 1 を示す。3Hz 以下の低周波数でパワーは小さく、コヒーレンスも低下している。

振幅比と位相差は、全ての周波数で地震計ごとのばらつきが大きい。特に位相差は地震計によって差が大きく、10Hz 以上でその差は顕著になる。

5.4.2 回路を付けた検定

(A) $f_0=0.45\text{Hz}$ の場合 (微動検定-Ⅱ)

地震計に均一化回路を付け、固有周波数 0.45Hz で 300 秒間の微動を記録した。図 5-5 (5) に 100 秒~150 秒の波形を示す (M003-EW はアンプ故障のため欠測)。

このチャンネル A は低周波数 (長周期) の微動測定を目的としているが、データロガーの増幅率を最大にしても、微動の低周波成分を検出することはできなかった。測定地点 (東濃鉱山) では 3Hz 以下の低周波数の微動振幅は非常に小さいと思われる。図 5-5(5) の波形記録には周期 3 秒~5 秒の長周期の波が見られるが、位相は地震計によって大きく異なっている。この見かけ上の長周期の波は、データロガーの倍率を最大にしたため、回路の電気ノイズ (わずかな直流電流による電圧の揺らぎ) が記録されたものと思われる。検定作業中にはこの長周期の波が微動ではなく電気ノイズであることには気がつかなかった。

この波形データから、100.00~181.92 秒の部分を取り出し、パワースペクトル、パワー比、コヒーレンシー、位相差を求めた。図 5-5(6)~(8) に (6)UD、(7)NS、(8)EW の各成分について示す。

3Hz 以上の高周波数ではパワー比は 1.0、位相差はほぼ 0 になっており、地震計の特性がほぼ均一になったことを示している。しかし、周波数ごとの細かい変動が大きくなっている。これは微動のデータ振幅が小さいため、計算誤差 (ビットエラー) が大きくなったと考えられる。コヒーレンシーが 3Hz ~ 10Hz でやや低下しているのも、計算誤差によるものと思われる。

1Hz 以下の低周波数のパワーは上述の電氣的ノイズで、コヒーレンシー、位相差ともに相関はほとんど見られない。

(B) $f_0=4.5\text{Hz}$ の場合 (微動検定-Ⅲ)

均一化回路を固有周波数 4.5Hz にして、微動データを 300 秒間取得した。図 5-5 (9) に 100 秒から 150 秒の波形を示す。このデータの中から、100.00~181.92 秒の部分について、パワースペクトル、パワー比、コヒーレンシー、位相差を求めた。図 5-5(10)~(12) に UD、NS、EW の各成分について示す。

3 ~ 50Hz の周波数域で、振幅比、位相差は、均一化回路を用いない場合、また回路をチャンネル A にした場合と比較しても、地震計ごとの大きな違いは無くなっている。 50Hz 以上の周波数で位相差が見られるのは、地震計を固定した金属板上で位置によって振動が異なるためと推定される。

パワースペクトルには 1Hz 以下の長周期のパワーが示されているが、これは (A) の場合同様に電気ノイズと思われ、地震計相互の相関はほとんど無い。

3Hz～50Hz の微動の振幅比、位相差、コヒーレンシーが周波数ごとの細かい変動が大きいのは、(A)の場合と同様に記録振幅が小さいための計算誤差と考えられる。

5.4.3 回路を付けた場合、付けない場合の比較

1) 3Hz 以上の高周波数では、回路無しの場合に見られる振幅、位相の系統的なずれが、回路を付けることによって揃っており、明らかに均一性は高くなった。

2) 検定を行った東濃鉾山地域の微動特性が、3Hz 以下の低周波数成分の振幅が極めて小さかったため、低周波数の微動データの回路による特性改善は確認できなかった。今後、通常の低周波数の微動振幅がある場所で、再度検定を行う必要がある。

3) 3Hz 以上の高周波数では、スペクトルの周波数ごとの細かい変動が大きい。これはデータ振幅が小さかったための計算誤差と思われる。また、1Hz 以下の低周波数で電気的なノイズが顕著に現れた。このノイズが今回の検定の条件下で特別に問題になったのか、または回路の改良が必要なのかは今後実験によって明白にする必要がある。

5.5 アクロスによる地震計の検定

5.5.1 回路なし検定（アクロス検定－Ⅰ）

地震計に回路を付けない状態でアクロス発信信号を記録した。震動の中心周波数は 14.06Hz、周波数範囲は±10Hz で、16.384 秒の周期で周波数変調を繰り返す。記録は 300 秒間取得した。図 5-5(1)に 100 秒から 150 秒の波形を示す。アクロス信号の記録振幅は、微動振幅と比較すると約 500～1000 倍になる。

このデータの中から、波形を見てノイズの少ない部分を選び、100.00～181.92 秒の部分について解析した。図 5-5(2)～(4)に(2)UD、(3)NS、(4)EW の各成分についてパワースペクトル、パワー比、コヒーレンシーを示す。

図 5-5(3)より、NS 成分はパワー、位相差ともに地震計ごとの違いが大きい。同様のばらつきは以下の回路を付けた検定（アクロス検定－Ⅱ、Ⅲ）の場合にも見られ、これは地震計の特性の違いでは無く、金属板、または台の特性によって地震計ごとの入力震動が異なっていたためと思われる。M005 の地震計が特に他の 4 台との差が大きい。これは地震計と金属板の固着が不十分だった可能性がある。

各地震計の相関は微動の場合よりもはるかに高く、アクロスの発信周波数域である 5Hz~25Hz では、コヒーレンシーは 0.98~1.00 になる。微動による回路無し検定 (図 5.4(2)~(4)) の場合と比較すると、5 台の地震計の特性は良く揃っている。したがって、マークランド地震計は微動のような微小振幅の振動に対しては均一性が低下すると考えられる。

5.5.2 回路を付けた検定

(A) $f_0=0.45\text{Hz}$ の場合 (アクロス検定-II)

チャンネル A の特性は 5Hz 以上の高周波数では振幅レベルが低下するため、高周波数のアクロス信号測定にはチャンネル B を用いるほうが有効であるが、より広帯域の特性の安定化を確認するために A でも測定を行った。

データは 300 秒間記録した。図 5-5 (5) に 100 秒から 150 秒の波形を示す。このデータの中から、100.00~181.92 秒の部分について、パワースペクトル、パワー比、コヒーレンシー、位相差を求めた。図 5-5(6)~(8)に、(6)UD、(7)NS、(8)EW の各成分について示す。EW 成分は特性が揃っていないが、回路なし (アクロス検定-I) で述べた様に、金属板または台座の特性と考えられる。

アクロス発信信号の周波数域 10Hz~30Hz でコヒーレンシーはほぼ 1.0 になった。また、微動よりデータ振幅が大きいため、微動による検定の場合 (図 5.4(6)~(8)) に見られたパワー比、位相差の周波数ごとの細かい変動も無くなっている。ただし、記録振幅が小さい (パワーが 10^{-3} 以下の) 30Hz 以上、及び 5Hz 以下の範囲では、ばらつきが大きくなる。

(B) $f_0=4.5\text{Hz}$ の場合 (アクロス検定-III)

均一化回路をチャンネル B ($f_0=4.5\text{Hz}$) にして、アクロスの震動を 300 秒間記録した。図 5-5 (9) に 100 秒から 150 秒の波形を示す。このデータの中から、100.00~181.92 秒の部分について、パワースペクトル、パワー比、コヒーレンシー、位相差を求めた。図 5-5 に(10)UD、(11)NS、(12)EW の各成分について示す。

アクロス発信周波数 (5Hz~25Hz) でコヒーレンシーはほぼ 1.0 を示し、パワー比、位相差のばらつきも小さい。25Hz 以上ではチャンネル A を用いた場合と比較するとばらつきは小さい。

EW 成分 (図 5-5(12)) ではアクロス信号の振幅が最大になる 30Hz 付近で位相、振幅がもっともずれているが、同様の傾向が回路を付けない場合にも見られた (図 5-5(4))。このずれは地震計の特性の違いでは無く金属板または台座の振動特性である可能性がある。

5.5.3 回路を付けた場合、付けない場合の比較

- 1) アクロス信号を用いた検定では、微動と比較してその振動が高周波数かつ振幅が大きいいため、検定台やその上に載せた金属板の固有振動の影響が大きかったと考えられる。したがって、図示した地震計相互の振幅、位相のずれが地震計の特性の違いのみに起因しておらず、地震計ごとの入力振動が異なっていた可能性がある。厳密に地震計の特性の違いだけを調べるためには、金属板の運動を考慮して補正する必要があるが、今回の解析ではそこまで至らなかった。
- 2) 上記の理由による検定精度の限界を踏まえた上で、回路無しの場合と、回路を付けてチャンネル B にした場合を比較すると、10Hz～30Hz の範囲では均一性はほぼ同程度、10Hz 以下では回路を付けた場合の均一性が高くなっている。ただし、微動を用いた検定の場合と比べて、回路を付けた場合の特性の安定化はそれほど顕著には現れない。

均一化回路は特に微動のような微小信号の場合に有効となる目的で製作された。今回のアクロス検定では、測定場所が震源に極めて近かったため、震動は体で感じられる程度に大きかった。この場合、回路を付けない状態でも地震計特性の均一性は高く、回路を付けることによる効果はそれほど明確には現れなかったと考えられる。震源からの距離が長く、アクロス信号の振幅が微動レベルと同じ程度に減衰した位置では回路が有効になると考えられ、震源との距離を変化させて測定する必要がある。

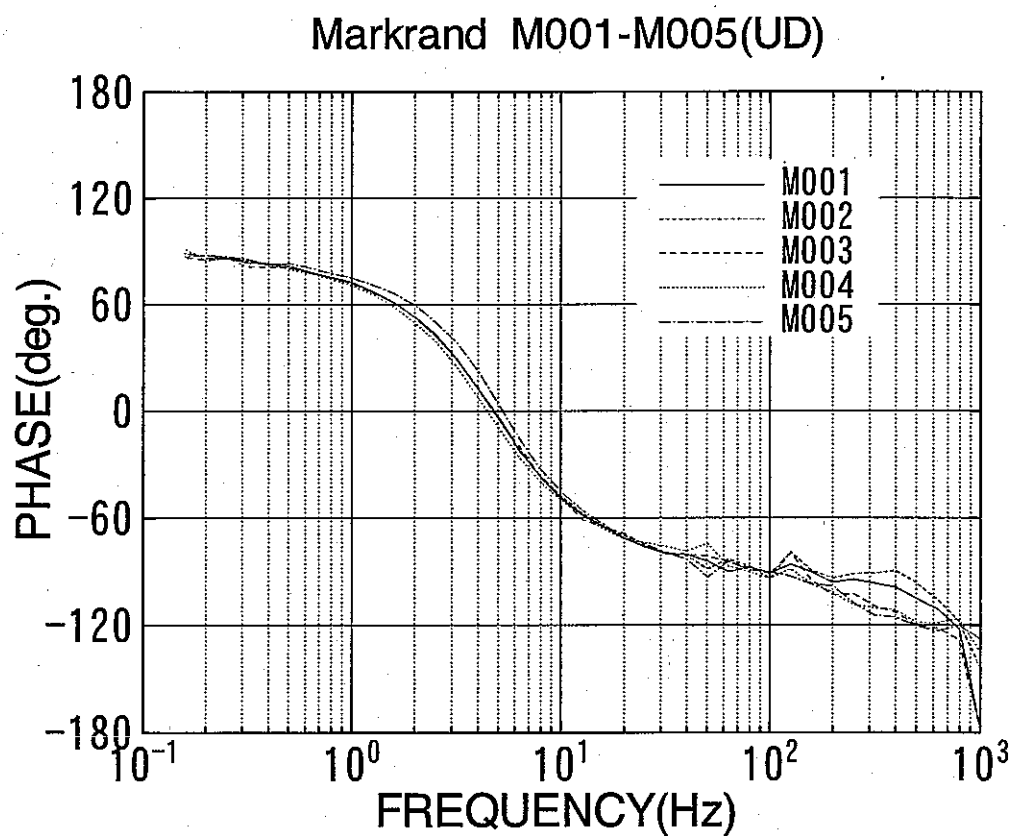
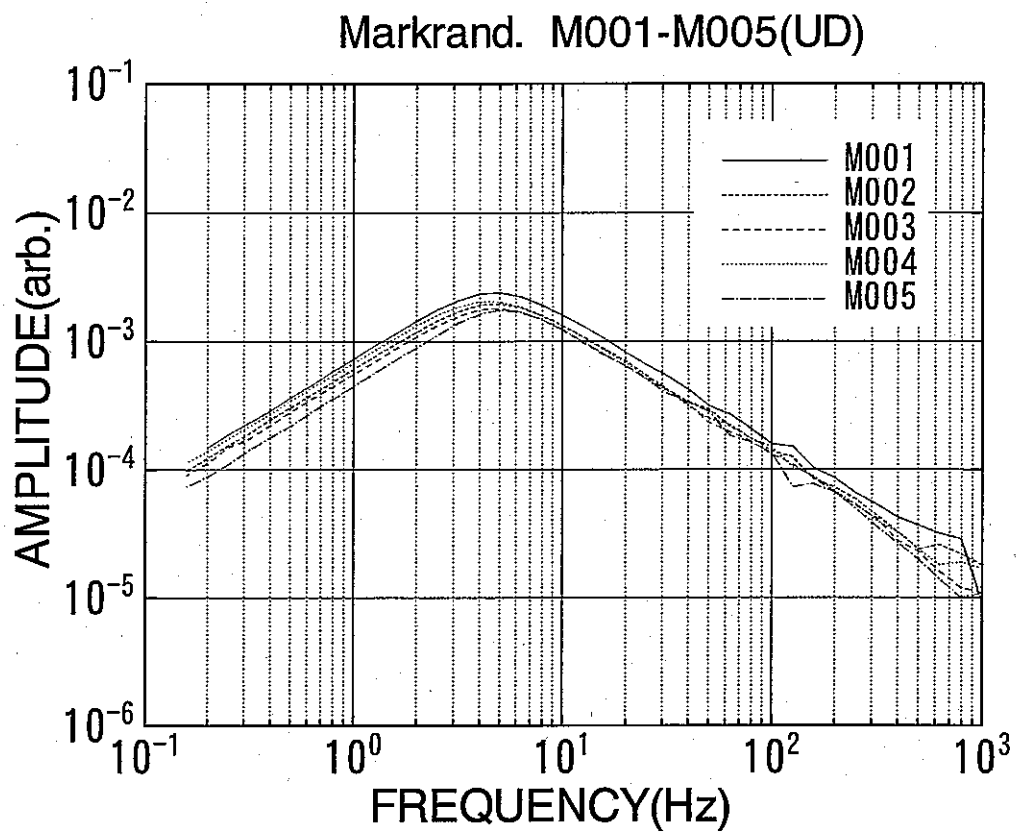
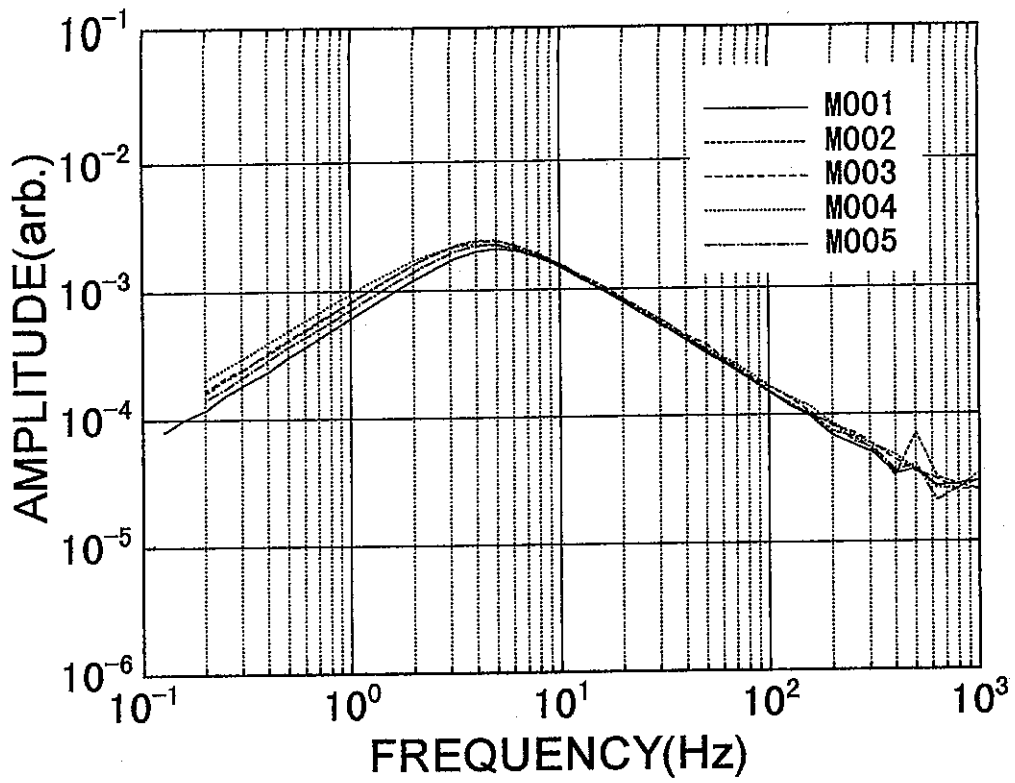


図 5-3 (1) Markrand地震計(均一化回路無し)の周波数特性(UD成分)

Markrand. M001-M005(NS)



Markrand M001-M005(NS)

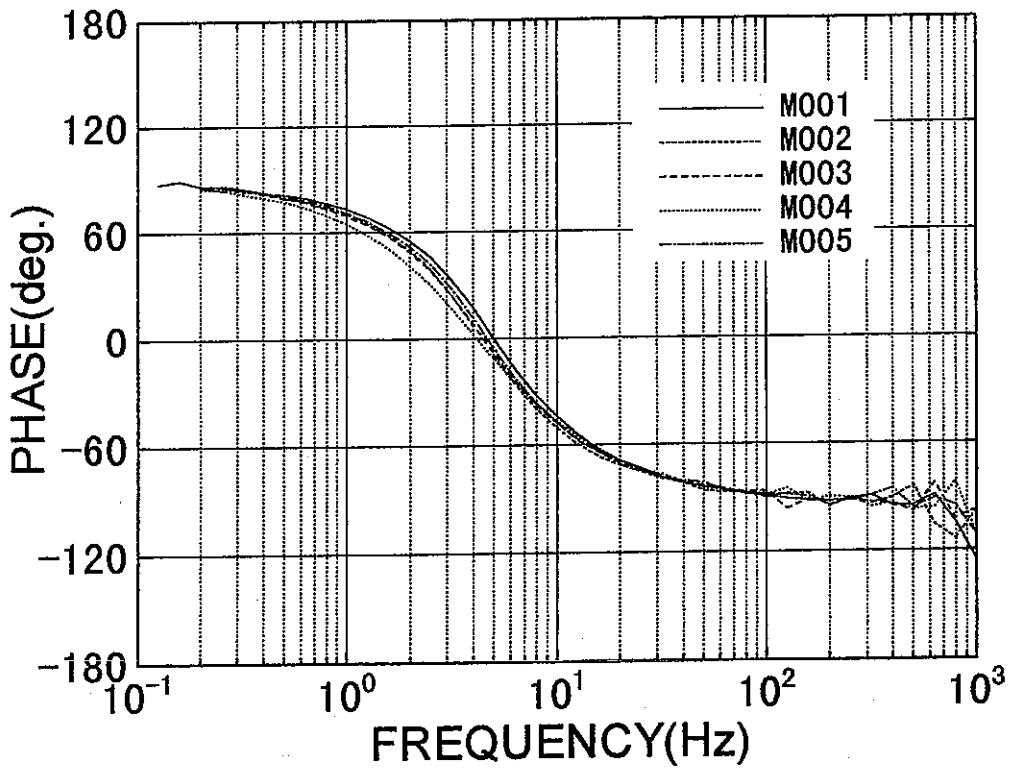
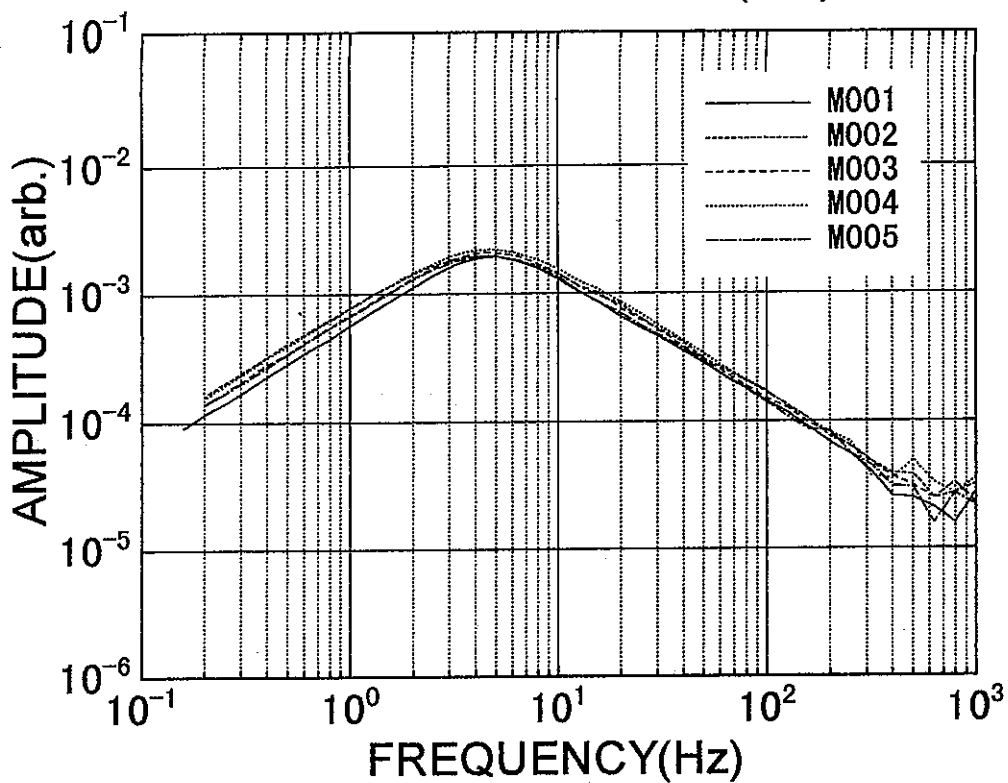


図 5-3 (2) F.R.A. 検定-I : 地震計の周波数特性 (回路無し) NS 成分

Markrand. M001-M005(EW)



Markrand M001-M005(EW)

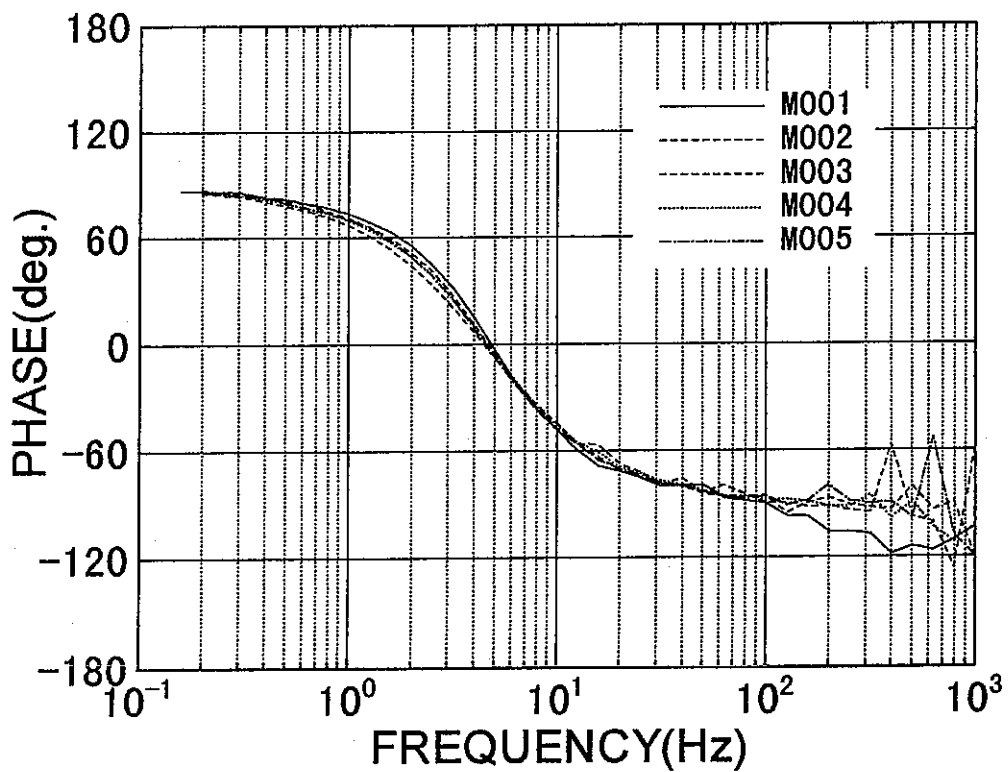


図5-3 (3) F.R.A. 検定-I : 地震計の周波数特性 (回路無し) EW 成分

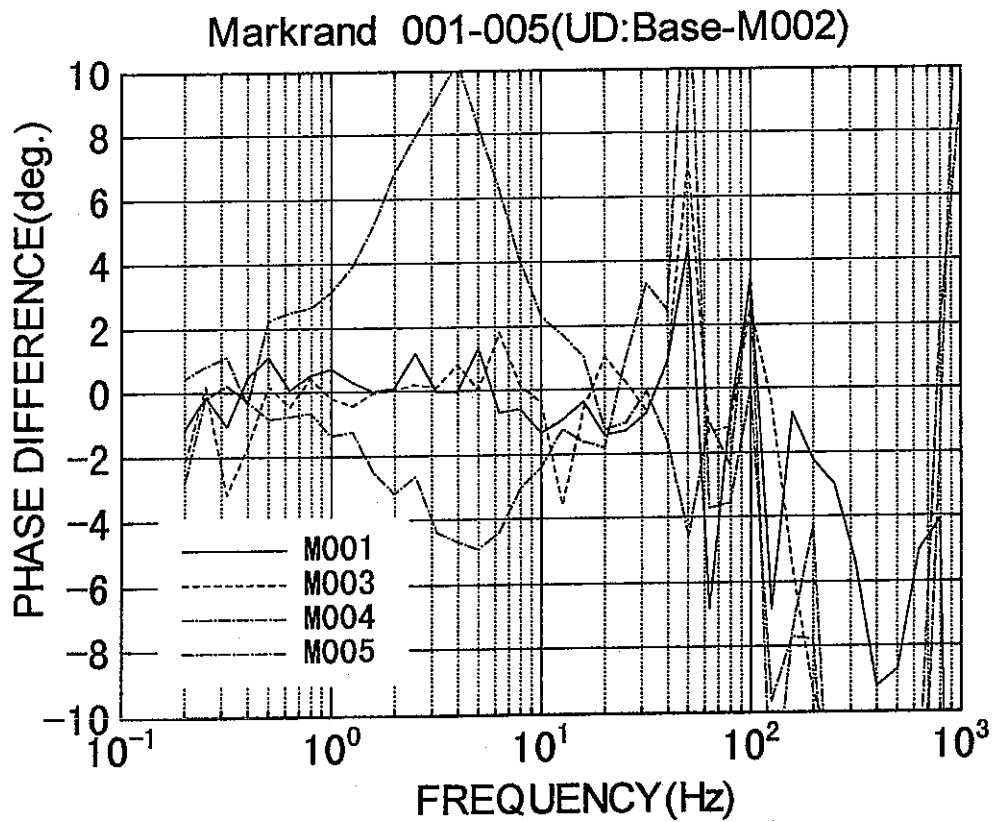
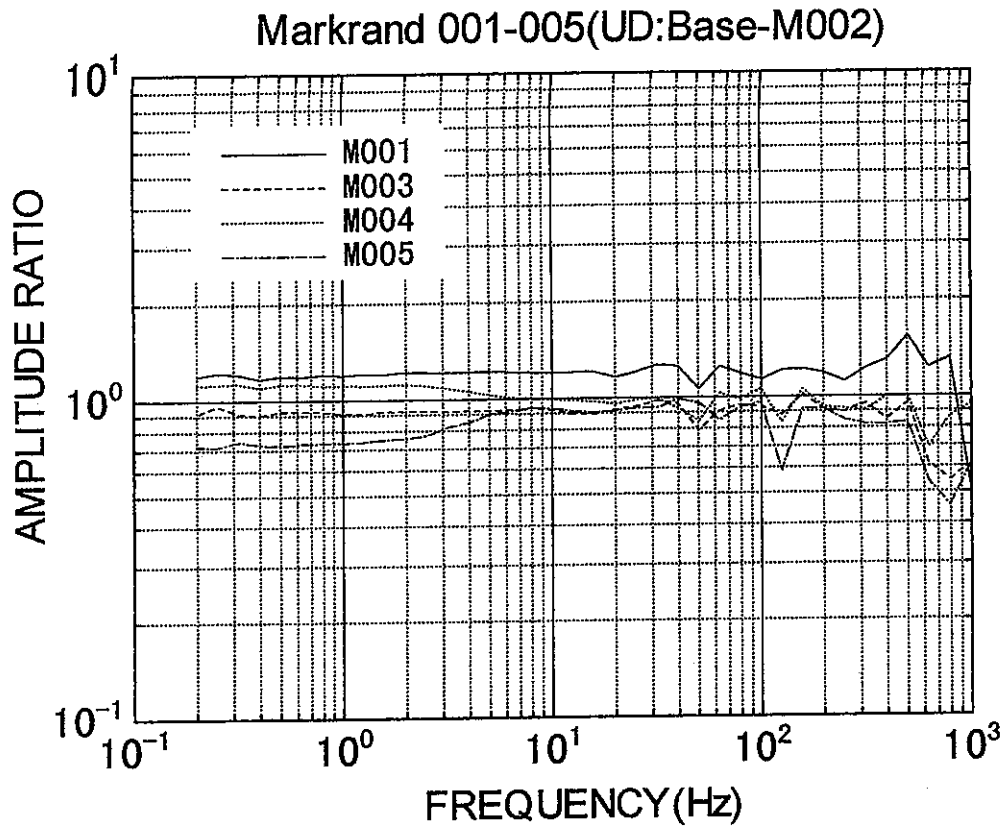


図 5-3 (4) F. R. A. 検定-I : 地震計の特性比較 (回路無し) UD 成分

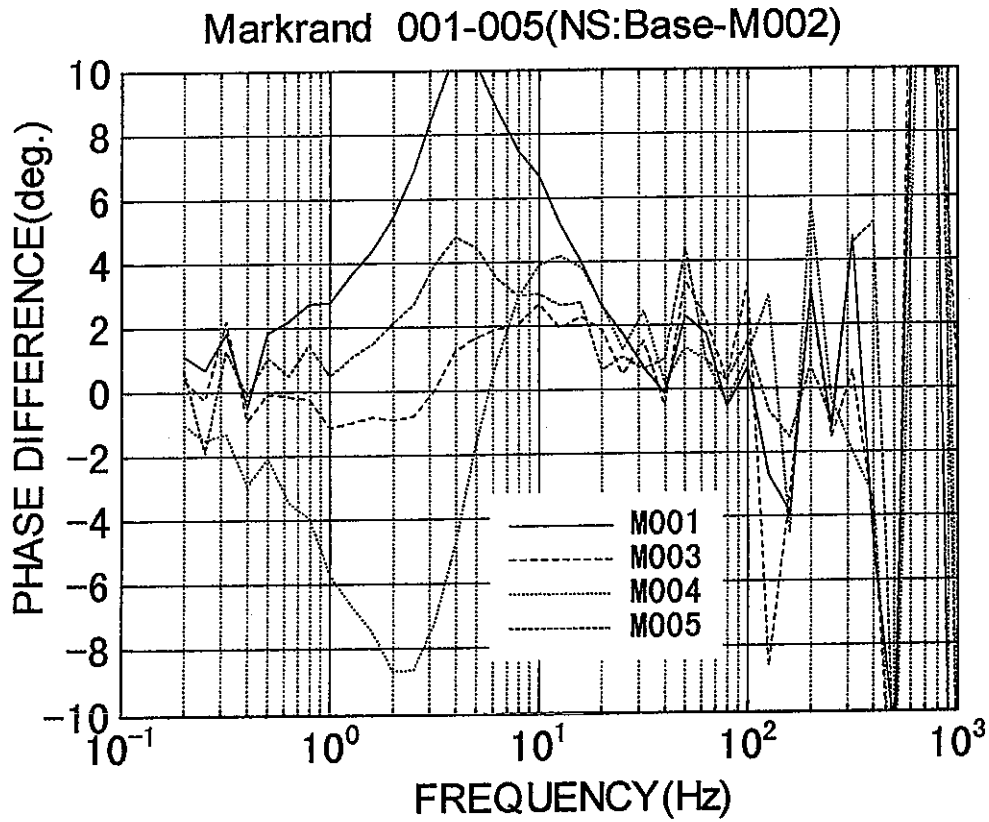
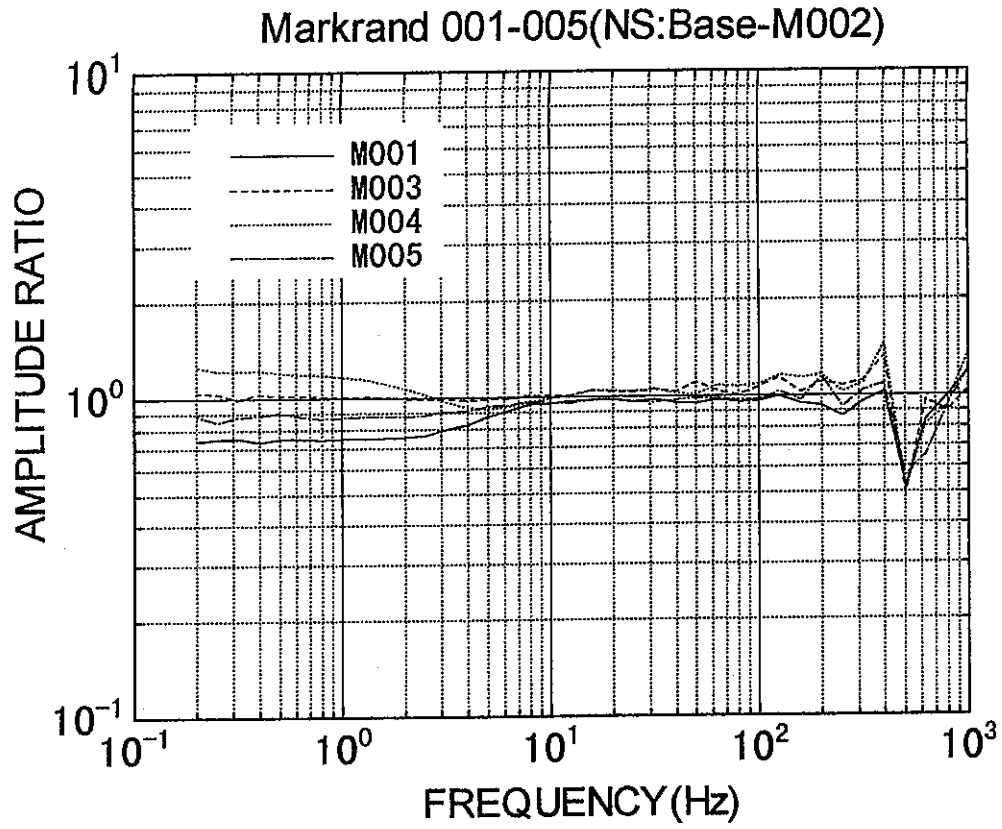


図5-3 (5) F. R. A. 検定-I : 地震計の特性比較 (回路無し) NS成分

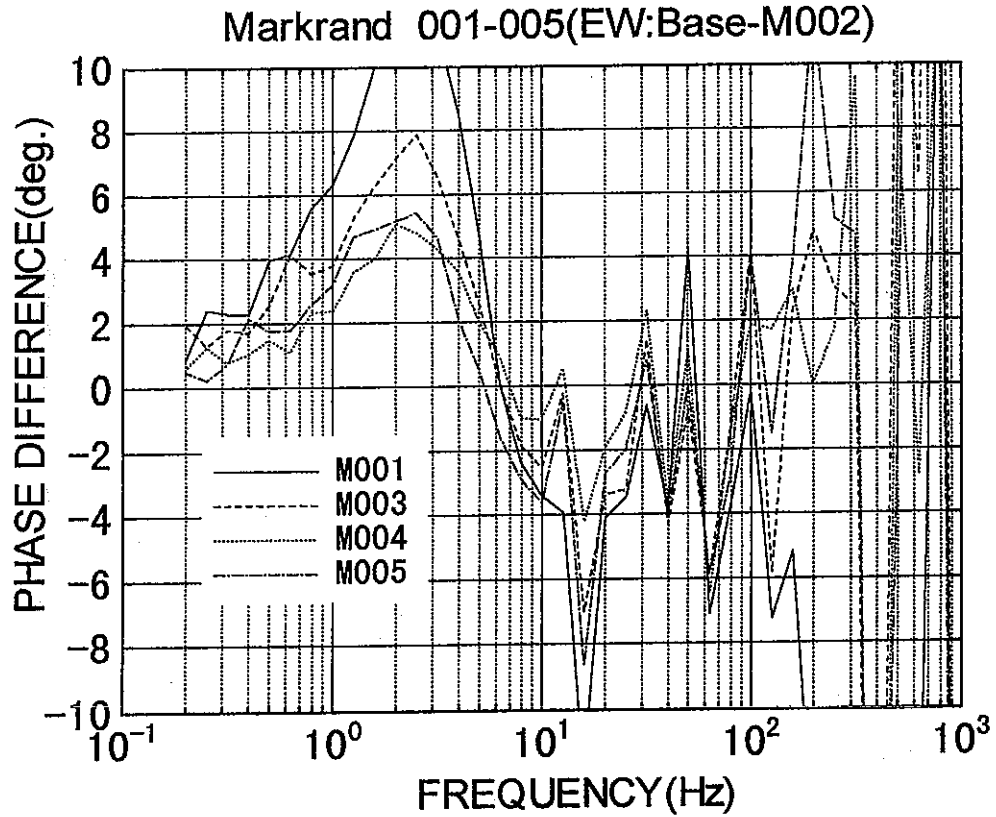
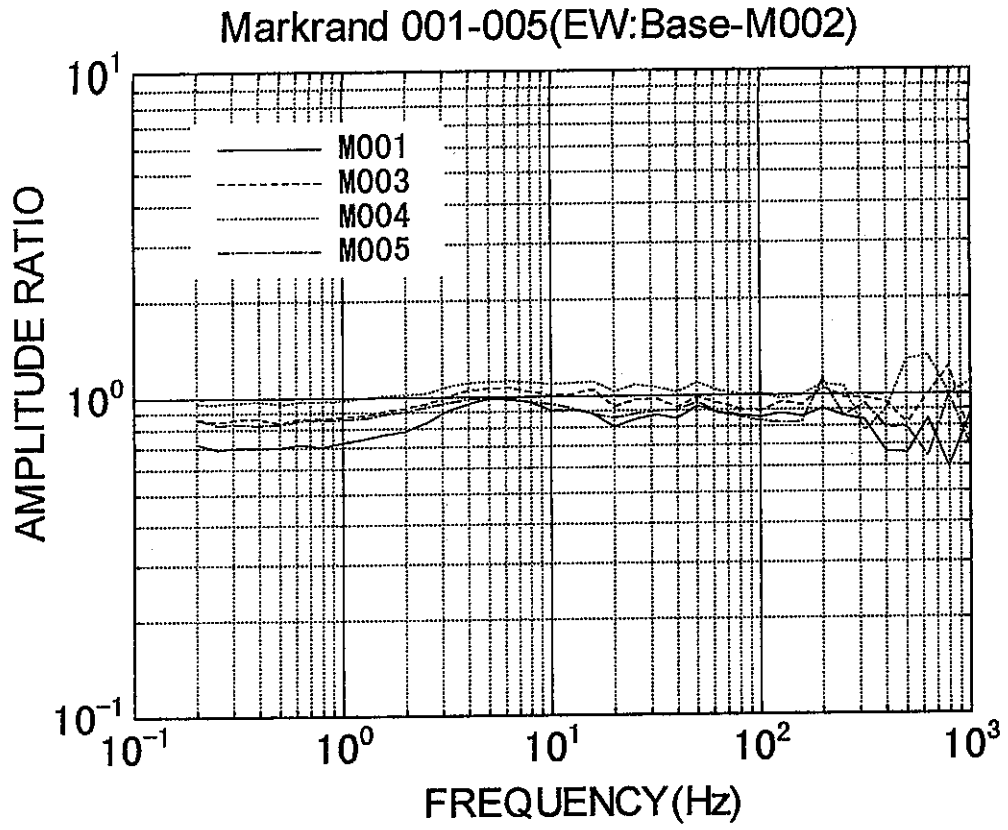
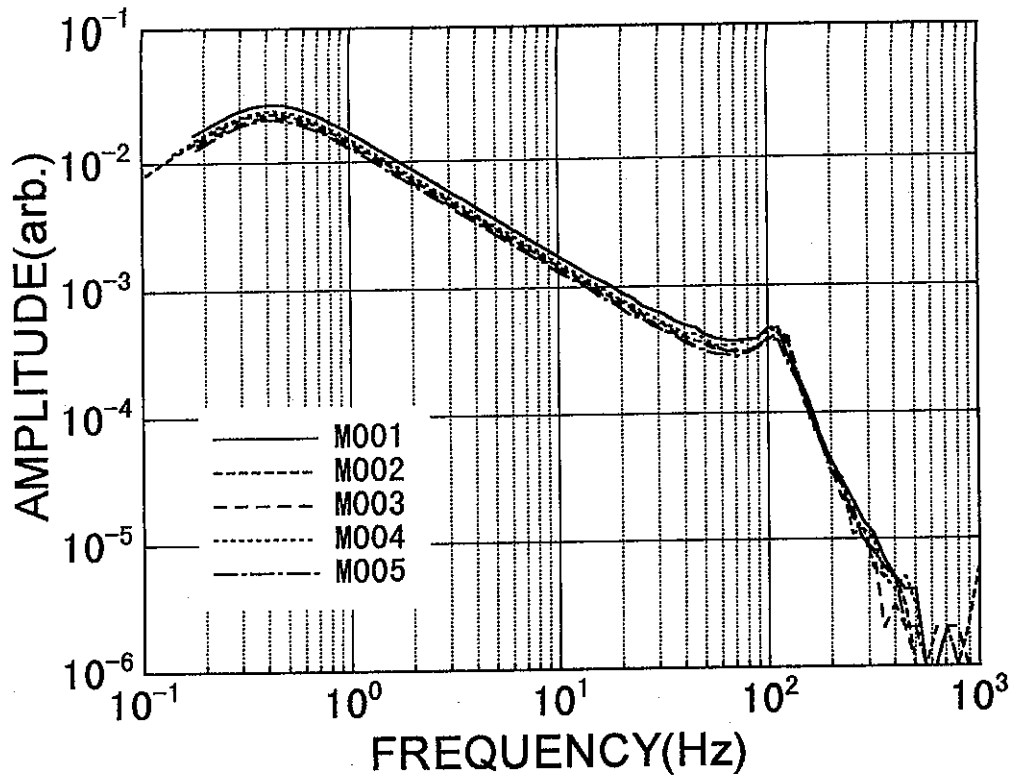


図5-3 (6) F. R. A. 検定-I : 地震計の特性比較 (回路無し) EW成分

Markrand-MoriyaC.(UD: fo=0.45Hz)



Markrand-MoriyaC.(UD: fo=0.45Hz)

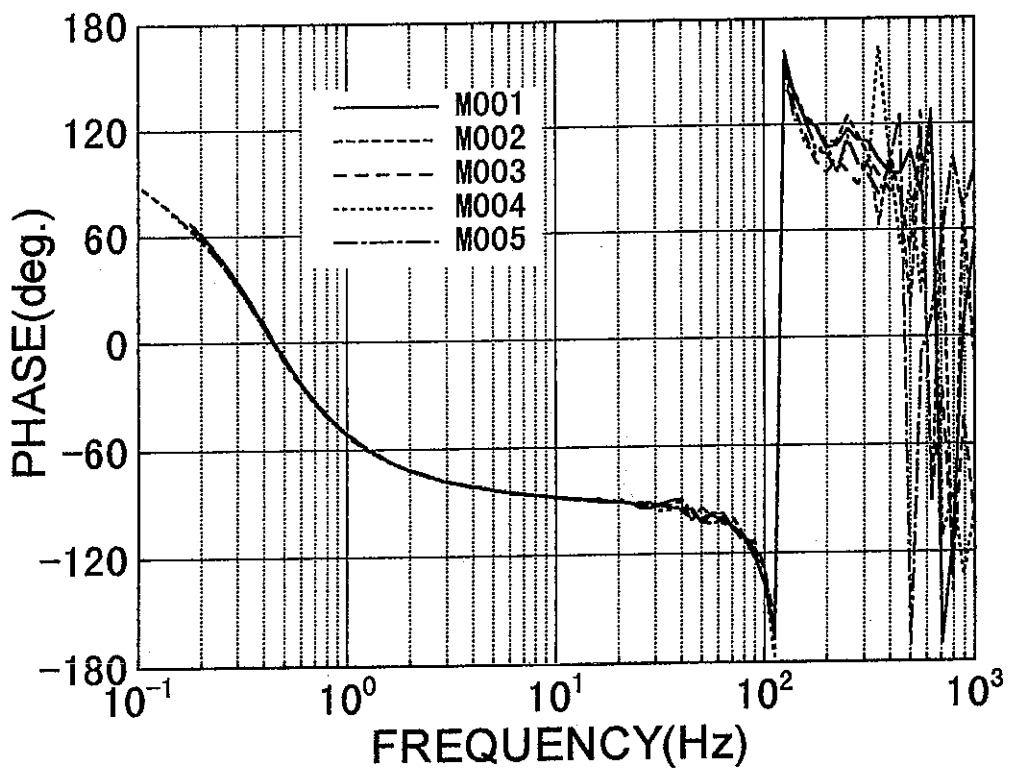


図5-3 (7) F.R.A. 検定-II : 地震計の周波数特性 (回路付き : fo=0.45Hz) UD 成分

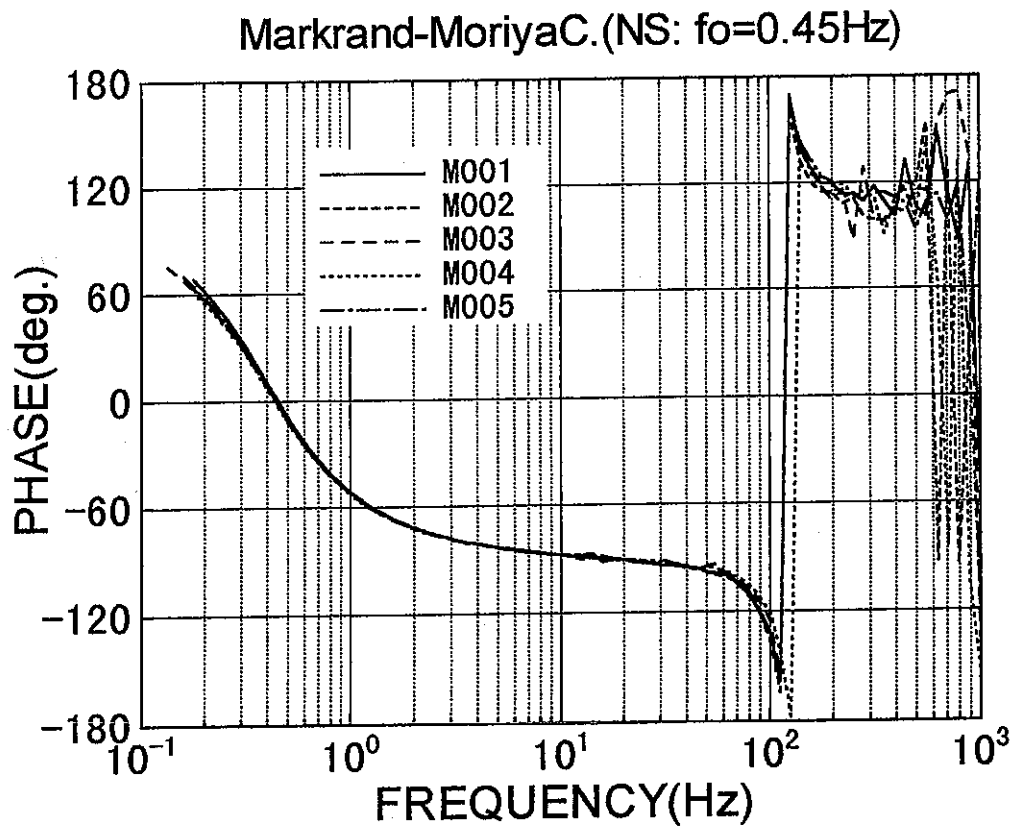
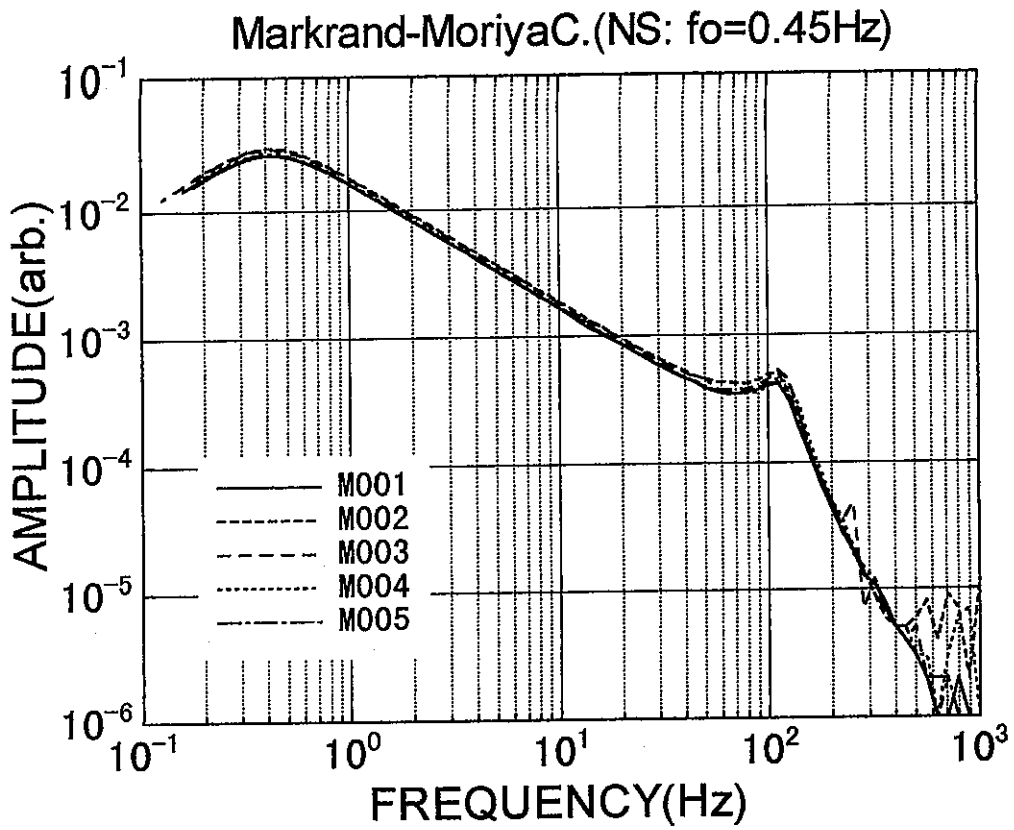


図5-3 (8) F.R.A. 検定-II : 地震計の周波数特性 (回路付き : fo=0.45Hz) NS成分

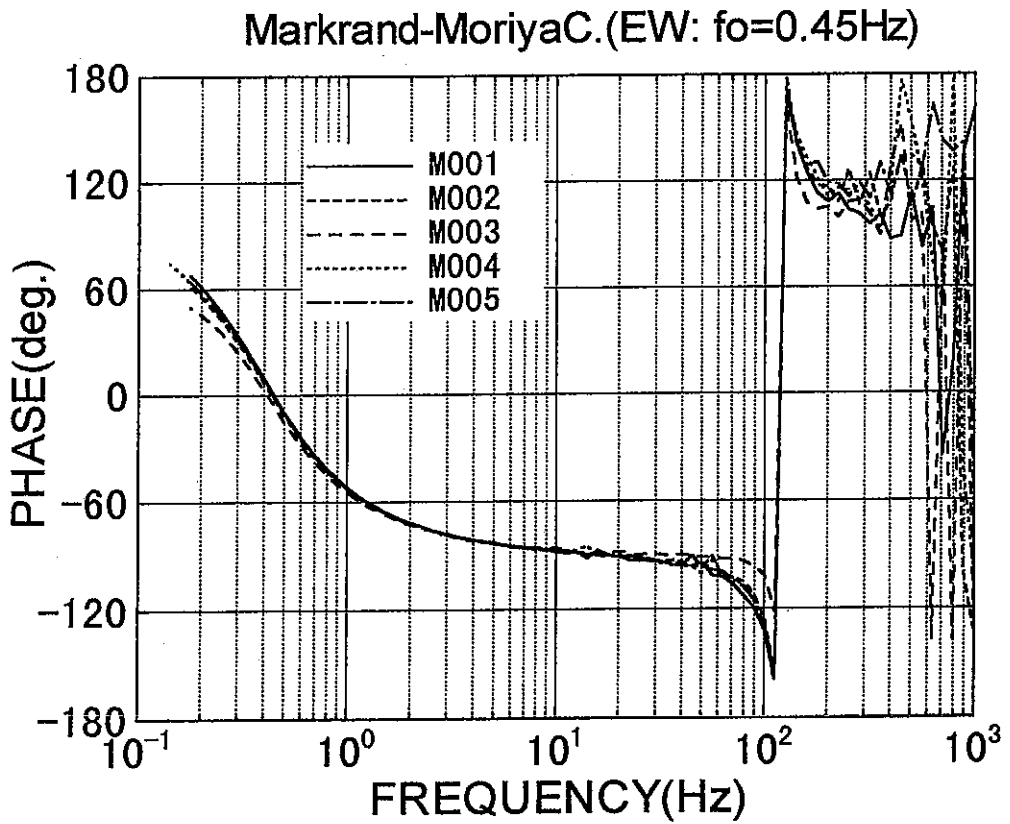
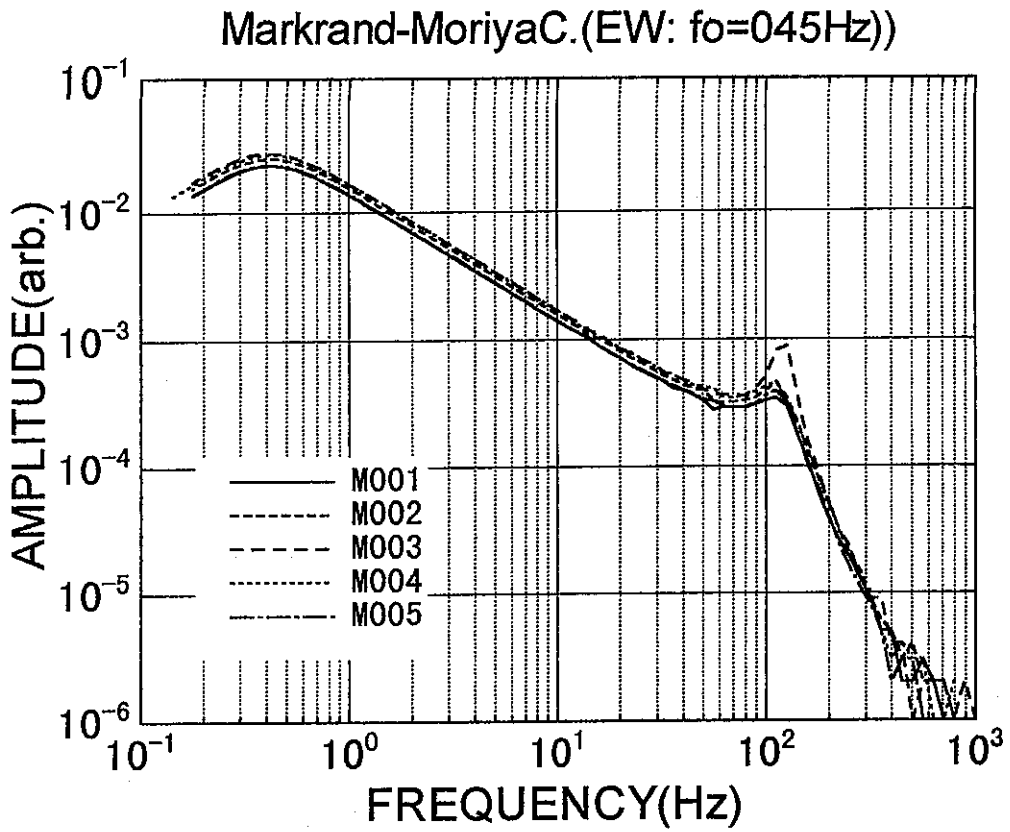
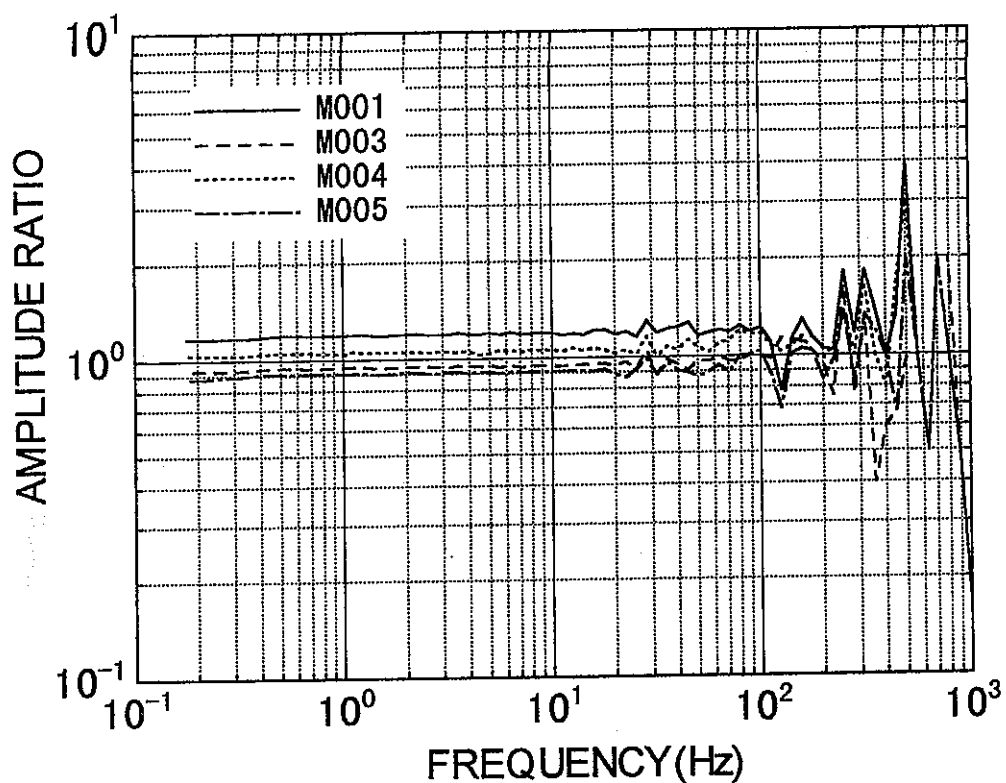


図5-3 (9) F. R. A. 検定一Ⅱ：地震計の周波数特性（回路付き：fo=0.45Hz）EW成分

Markrand-MoriyaC.(UD:fo=0.45Hz) Base:M002



Markrand-MoriyaC.(UD:fo=0.45Hz) Base:M002

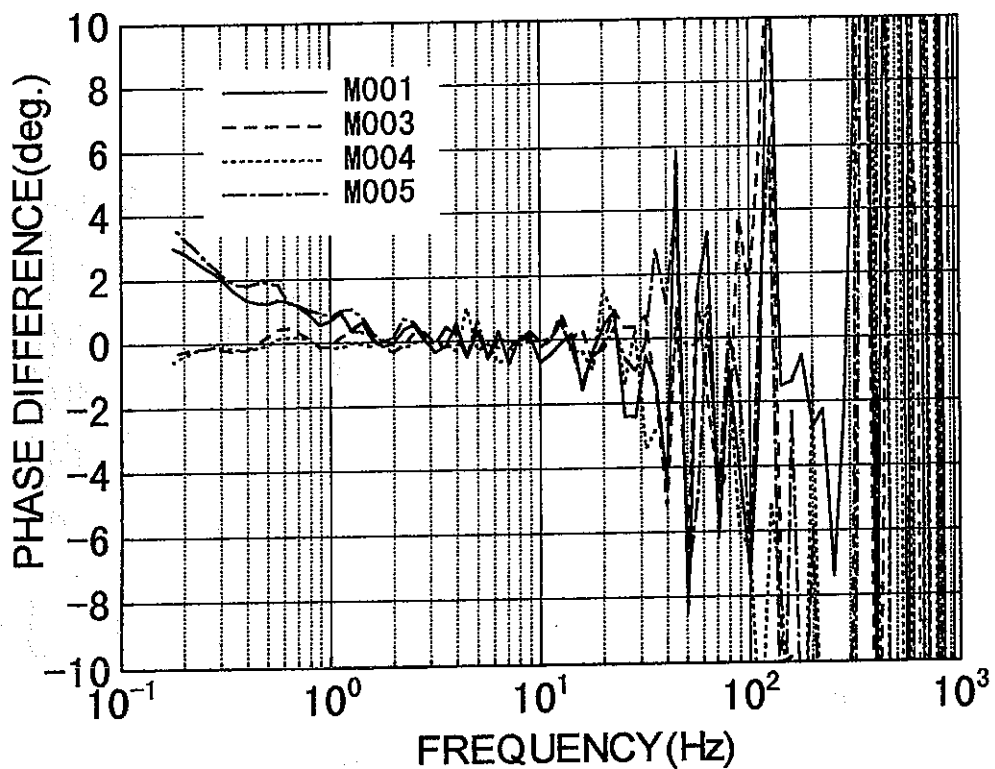
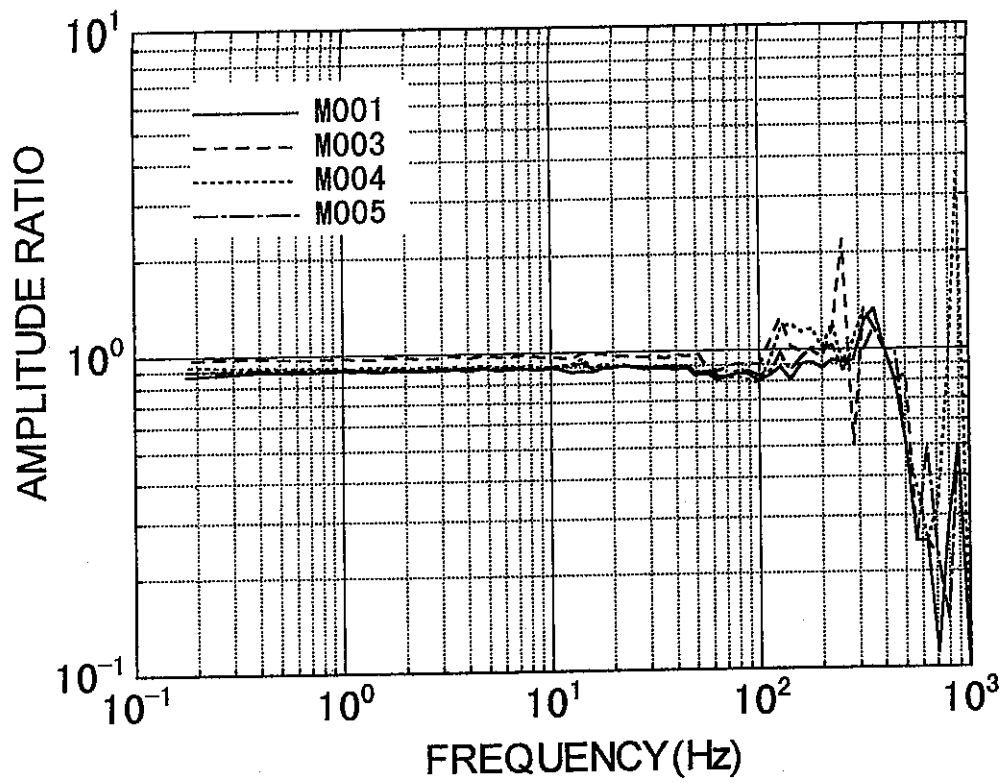


図5-3 (10) F.R.A. 検定-II : 地震計の特性比較 (回路付き : fo=0.45Hz) UD成分

Markrand-MoriyaC.(NS: fo=0.45Hz) Base:M002



Markrand-MoriyaC.(NS: fo=0.45Hz) Base:M002

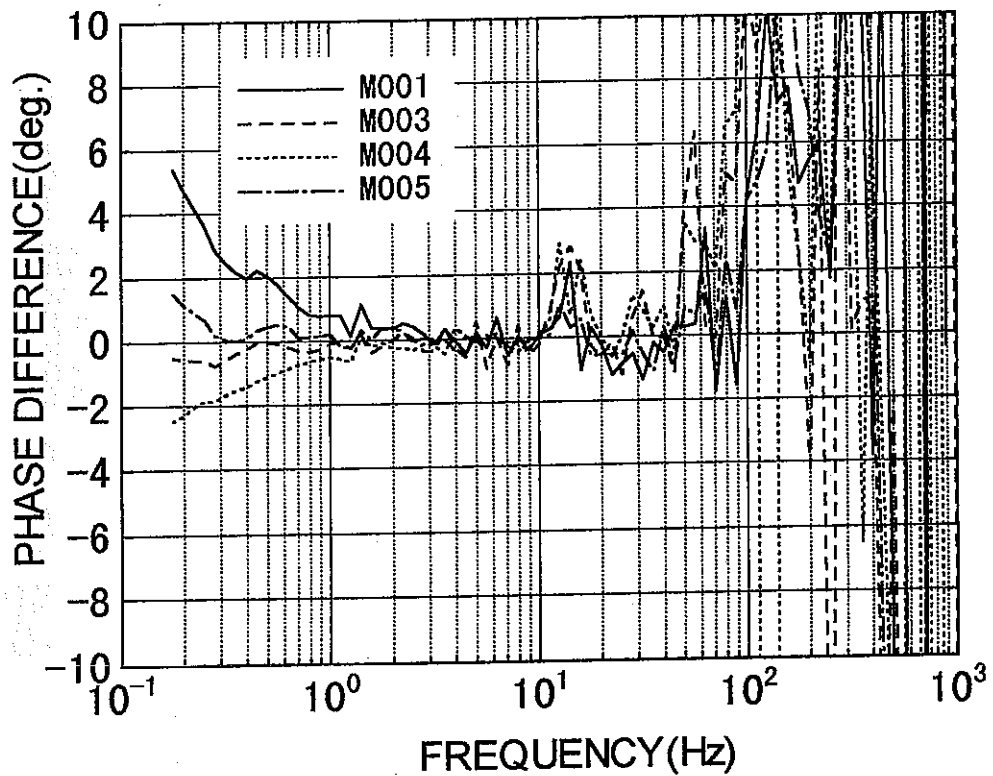
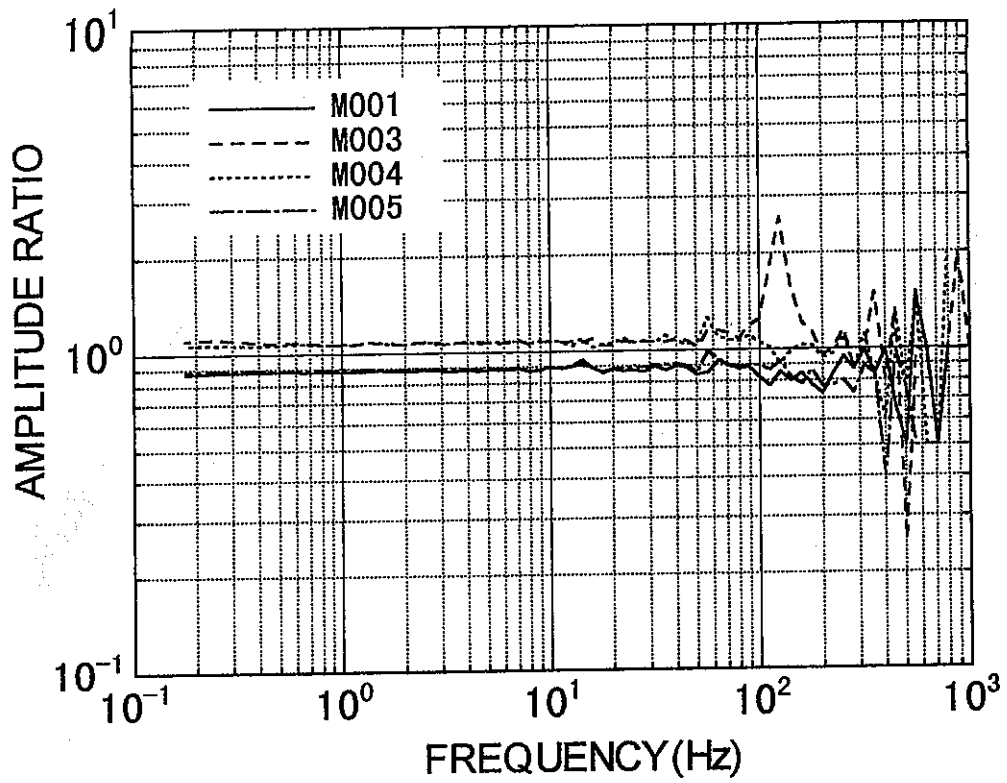


図 5-3 (11) F.R.A. 検定-II : 地震計の特性比較 (回路付き : fo=0.45Hz) NS 成分

Markrand-MoriyaC.(EW: fo=0.45Hz) Base:M002



Markrand-MoriyaC.(EW:fo=0.45Hz) Base:M002

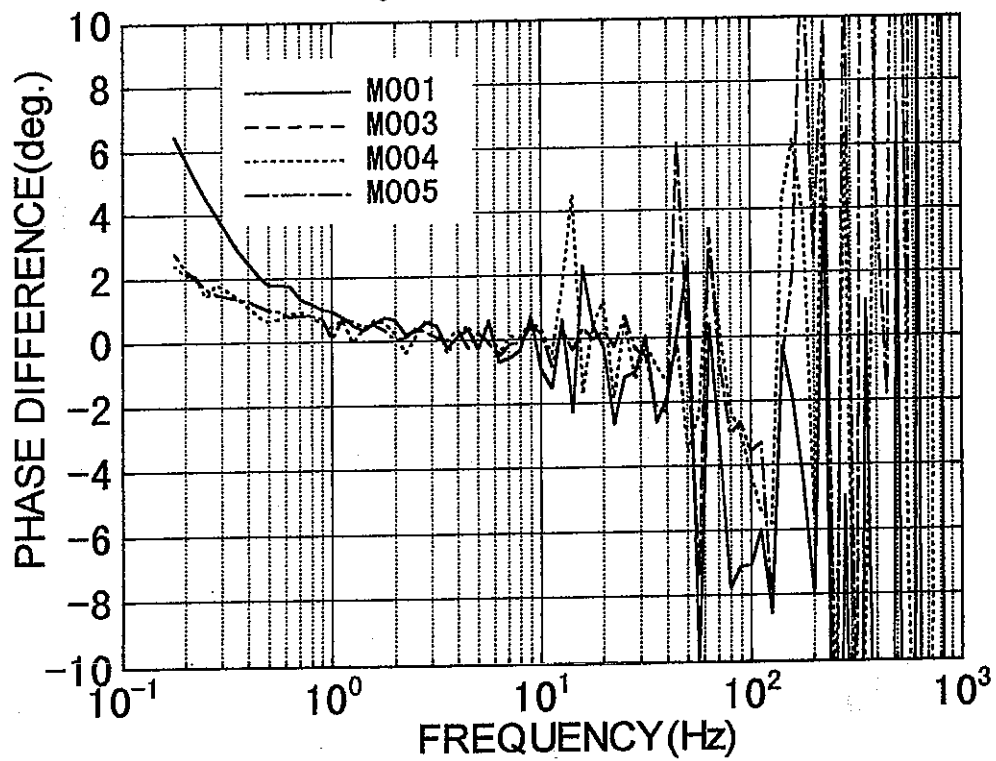


図5-3 (12) F.R.A. 検定-II:地震計の特性比較 (回路付き: fo=0.45Hz) EW成分

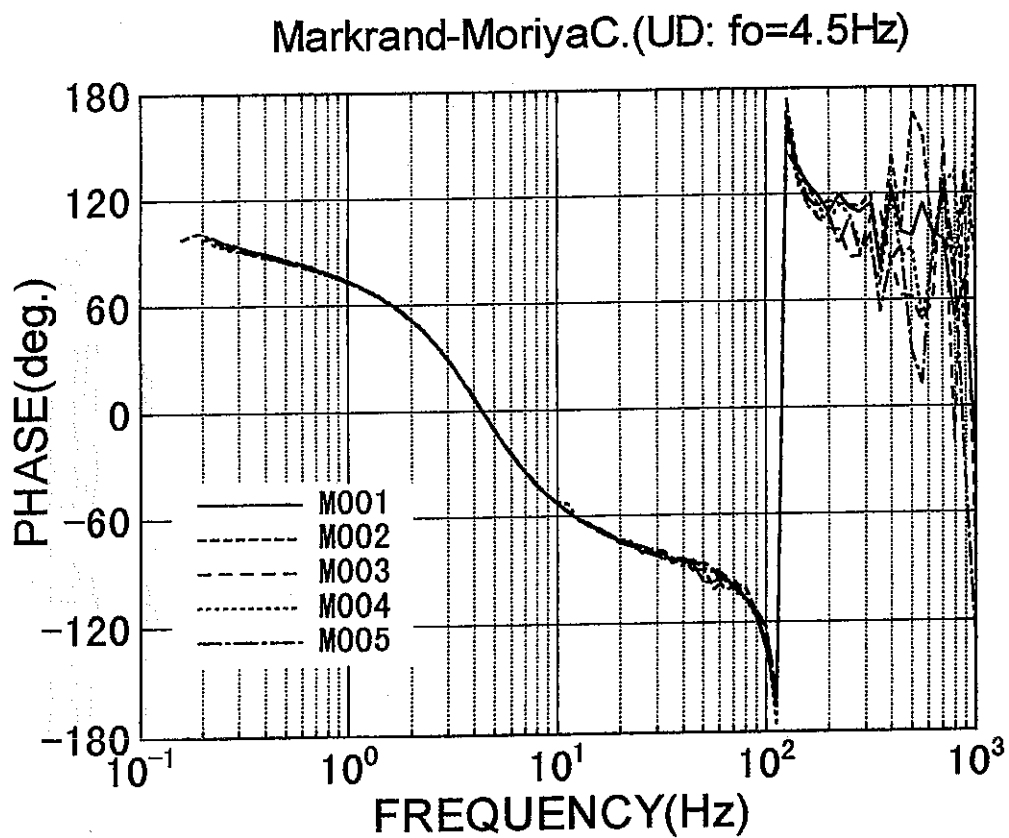
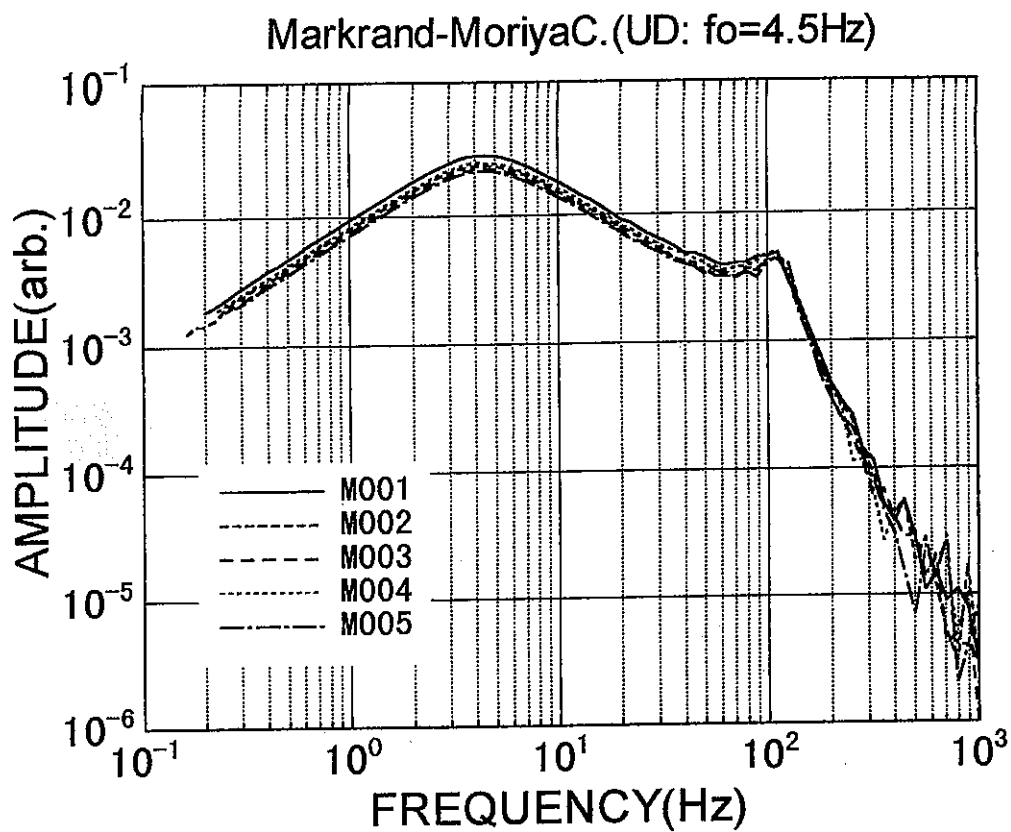


図5-3 (13) F.R.A. 検定-III : 地震計の周波数特性 (回路付き : fo=4.5Hz) UD 成分

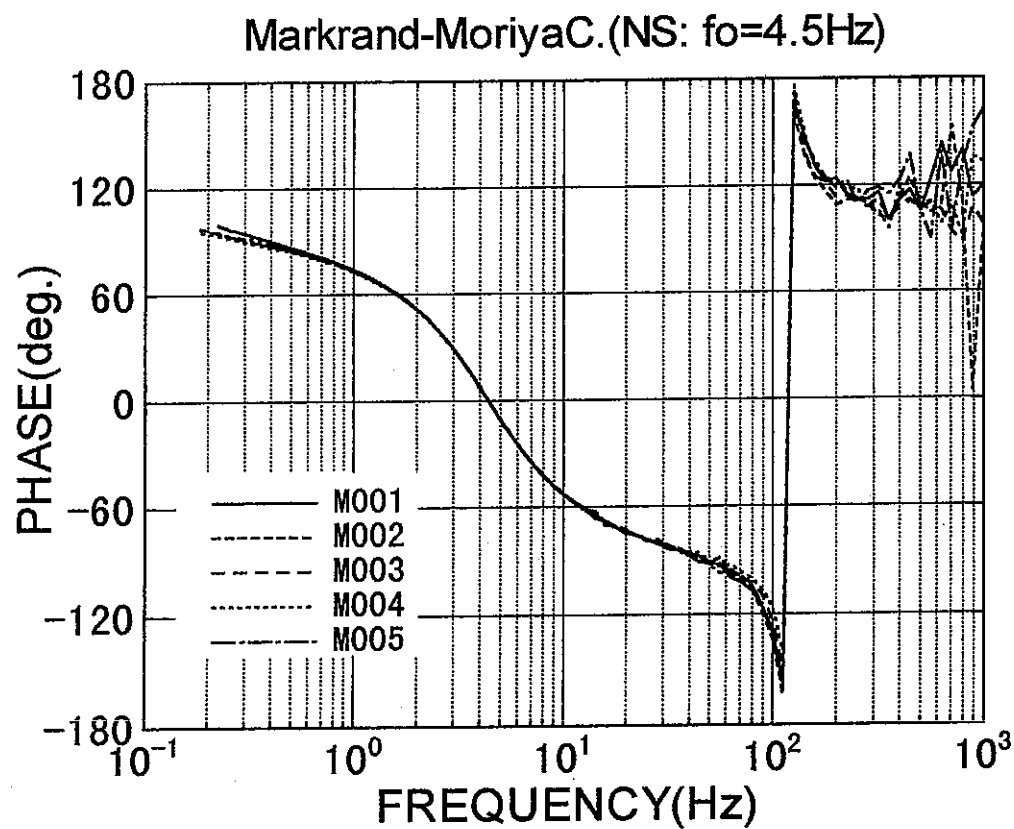
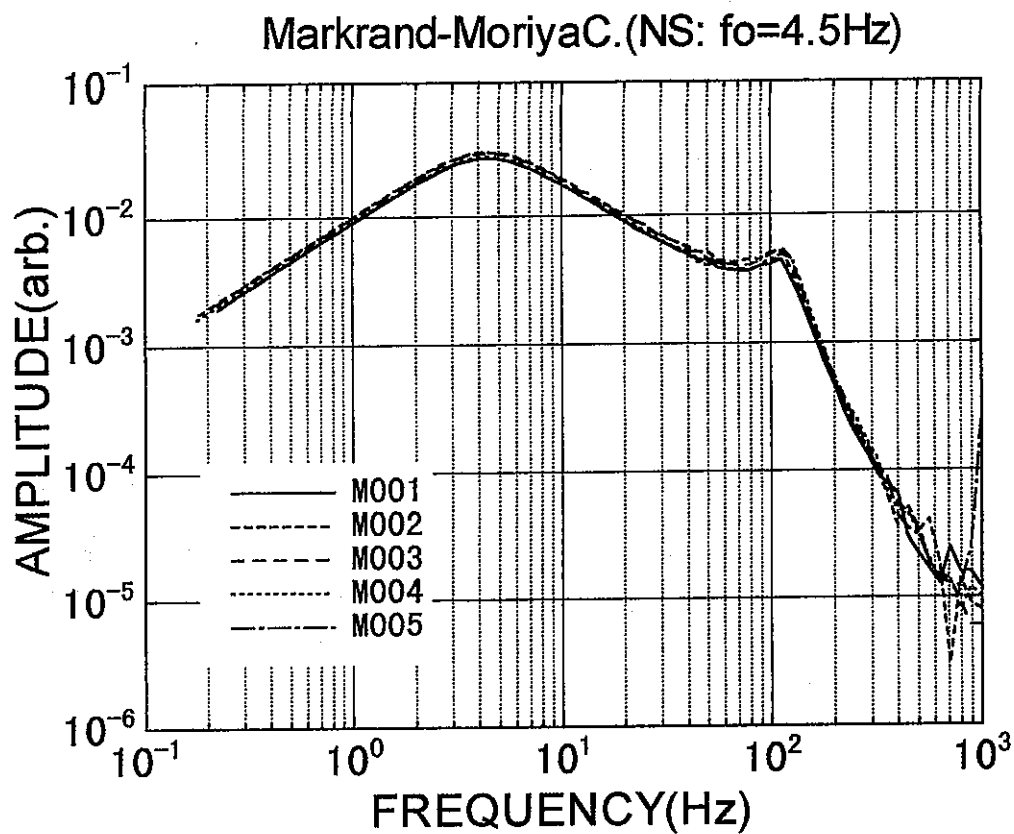


図5-3 (14) F.R.A. 検定-III : 地震計の周波数特性 (回路付き : $f_0=4.5\text{Hz}$) NSD 成分

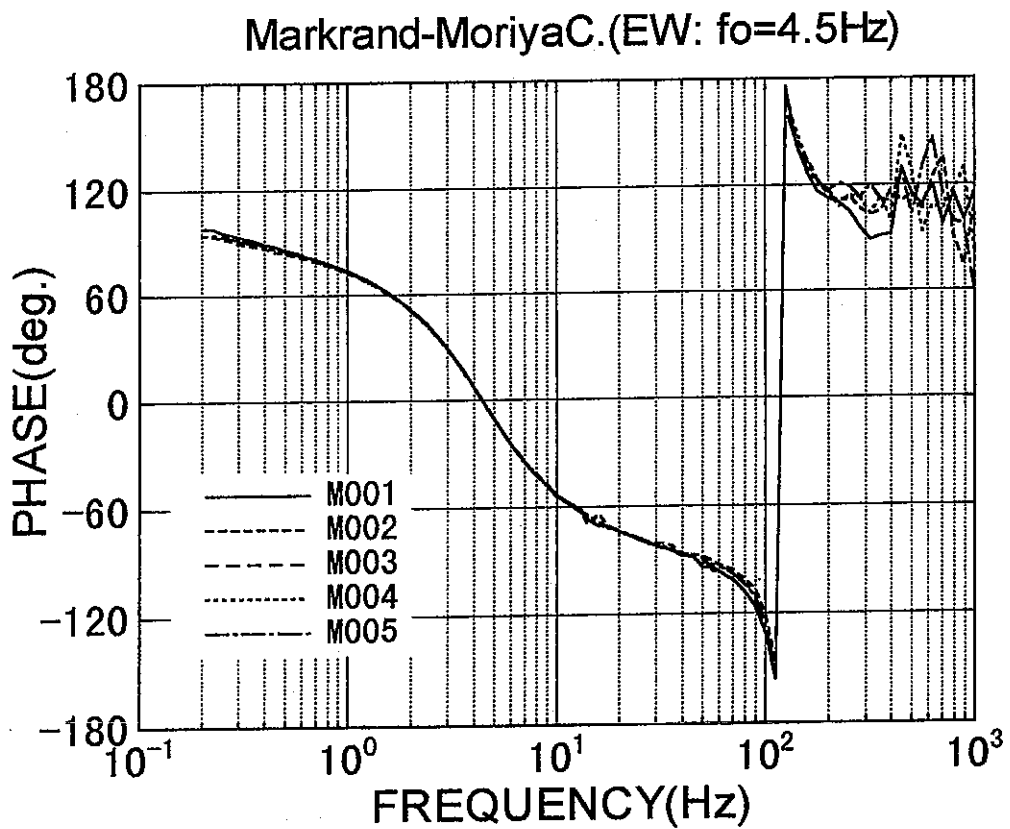
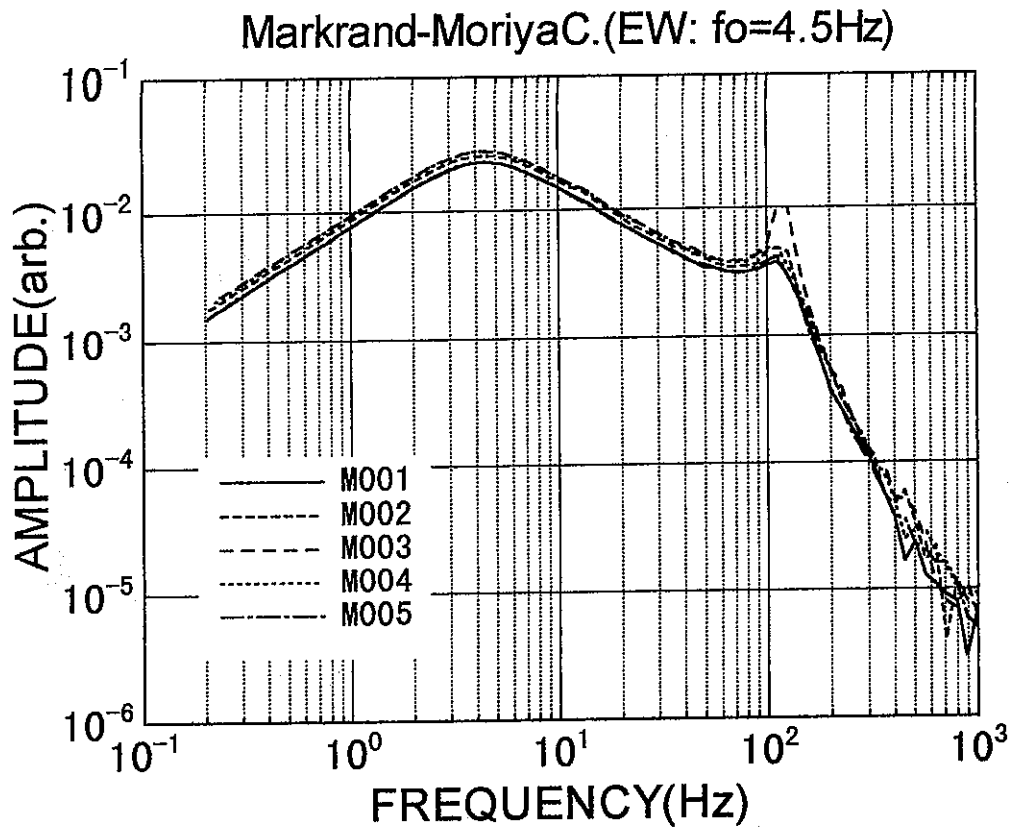


図 5-3 (15) F. R. A. 検定-III : 地震計の周波数特性 (回路付き : $f_0=4.5\text{Hz}$) EW 成分

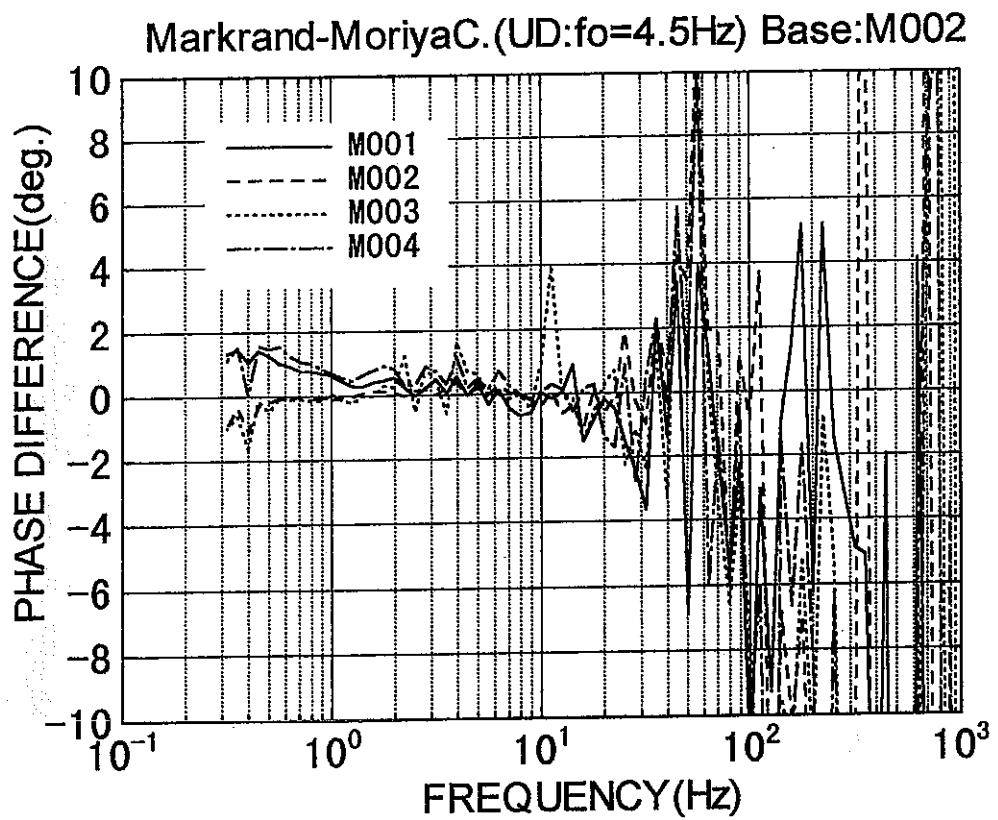
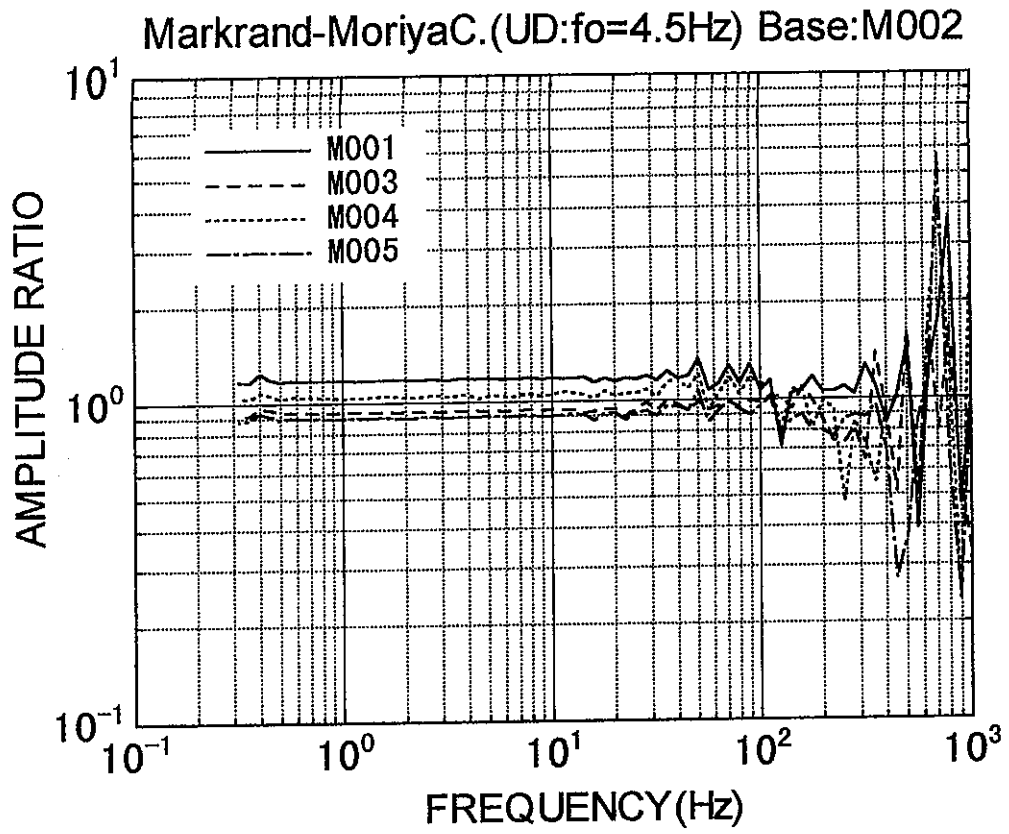


図5-3 (16) F.R.A. 検定-III:地震計の特性比較 (回路付き: fo=4.5Hz) UD成分

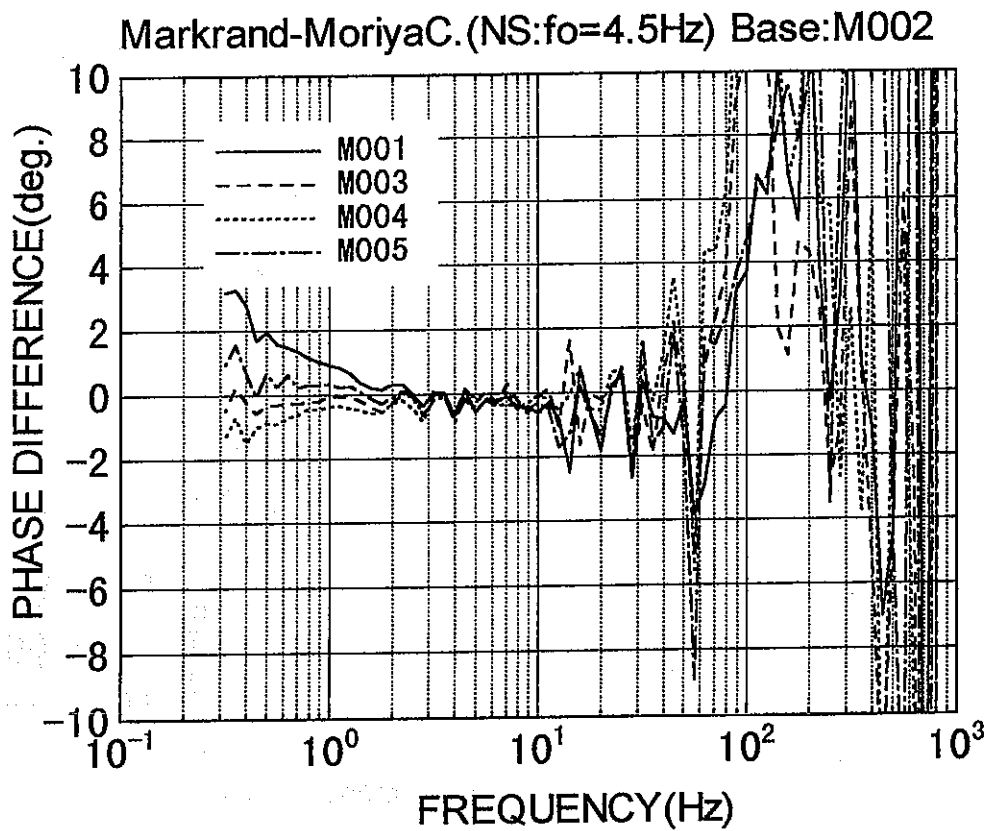
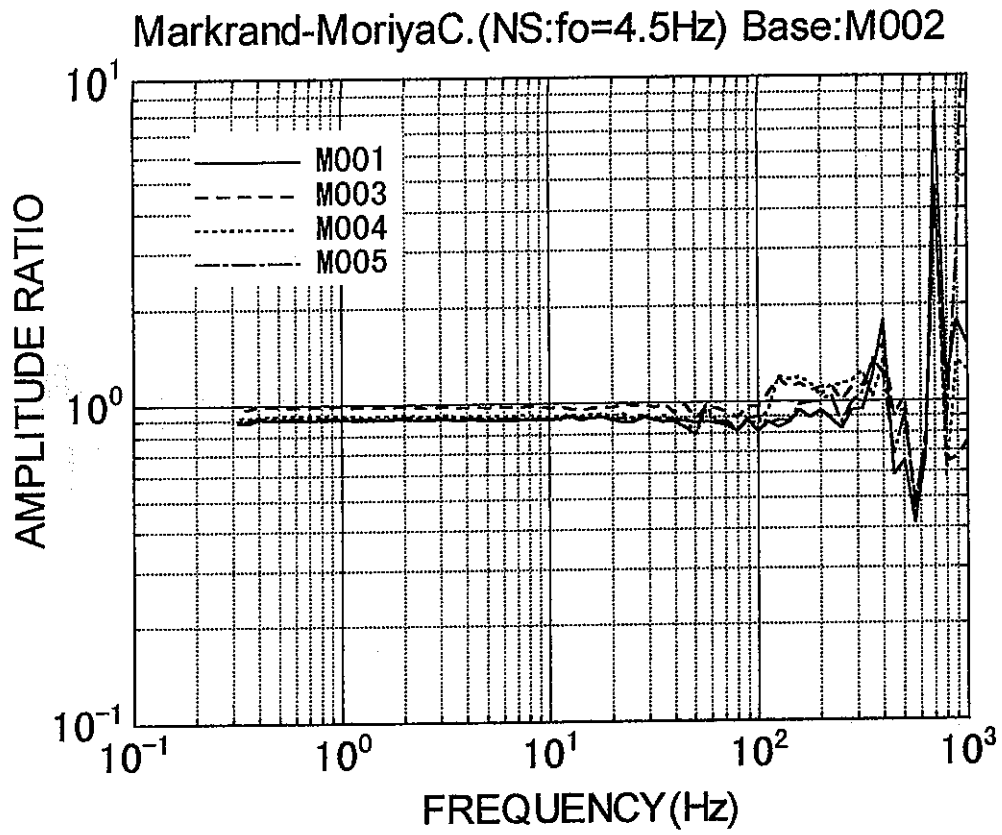
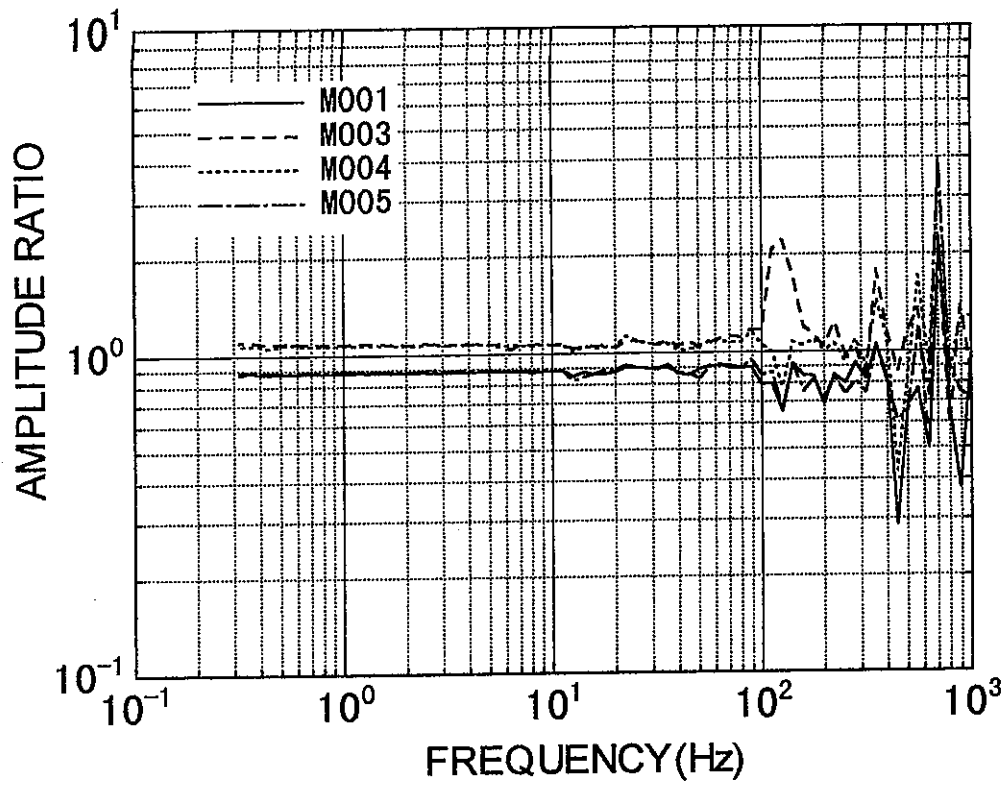


図5-3 (17) F.R.A. 検定-Ⅲ：地震計の特性比較 (回路付き：fo=4.5Hz) NS成分

Markrand-MoriyaC.(EW: fo=4.5Hz) Base:M002



Markrand-MoriyaC.(EW:fo=4.5Hz) Base:M002

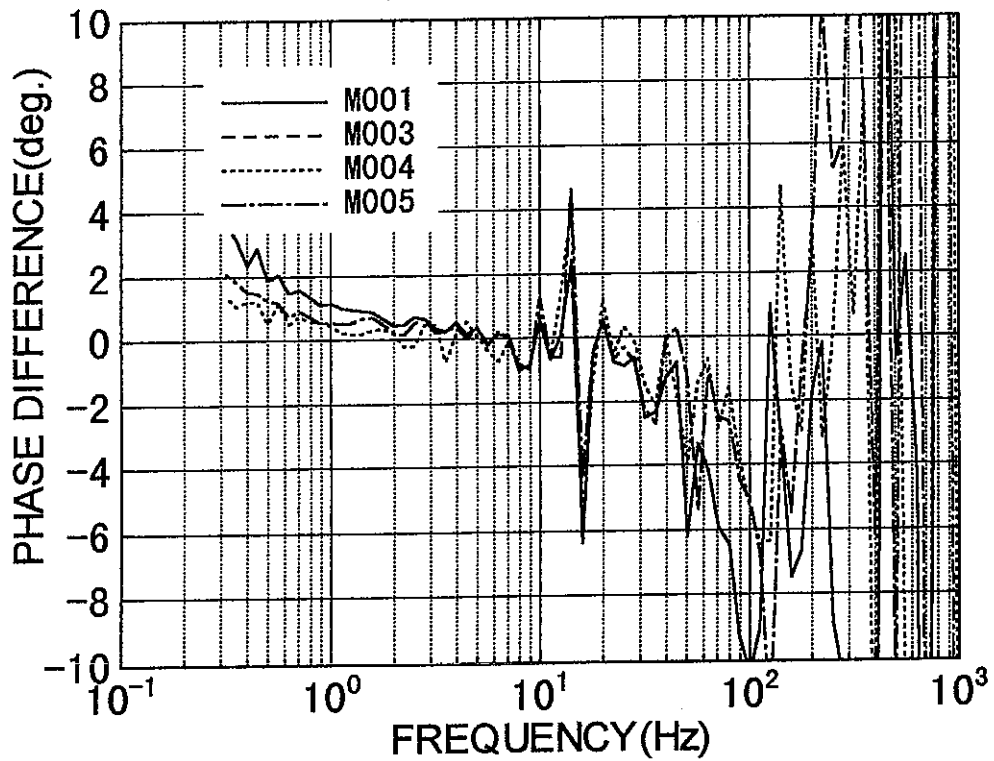
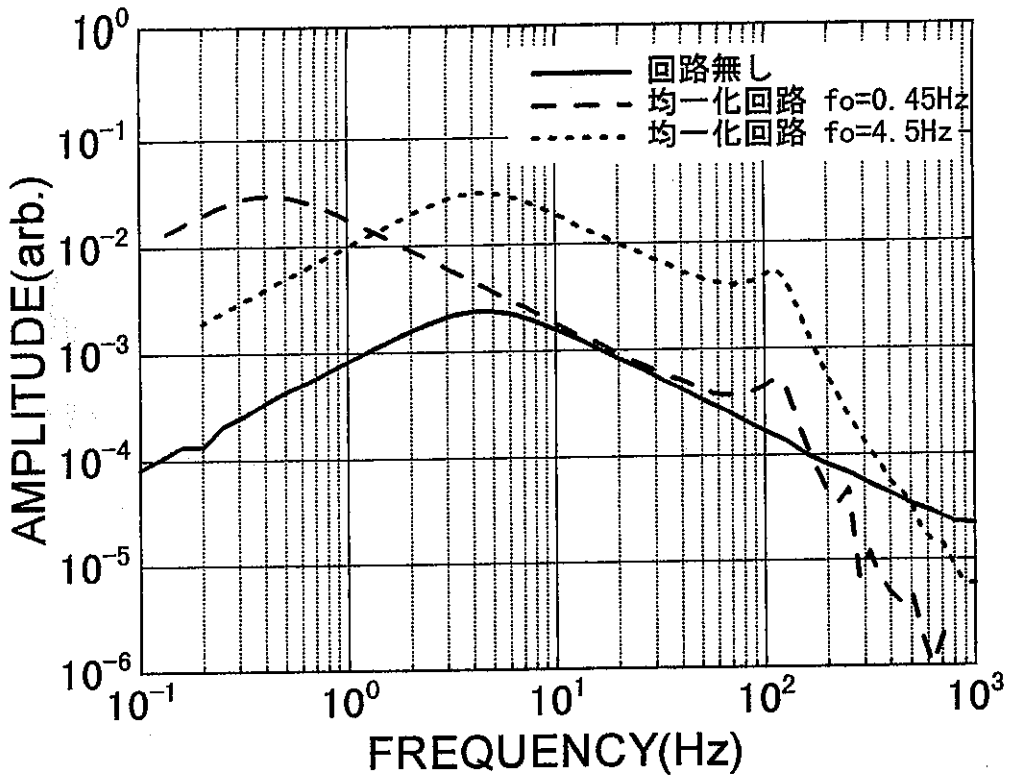


図5-3 (18) F.R.A. 検定-Ⅲ：地震計の特性比較 (回路付き：fo=4.5Hz) EW成分

振幅特性



位相特性

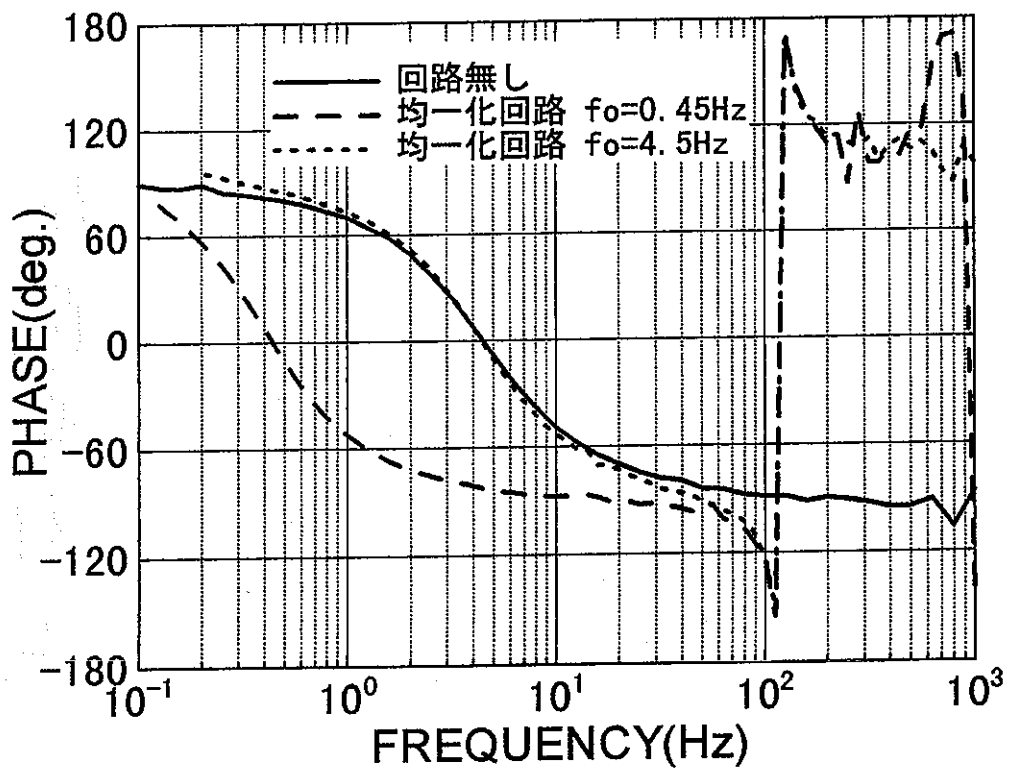


図 5-3 (19) 均一化回路を付けた場合 / 付けない場合の周波数特性比較

6. 結論

北海道幌延町に計画されている深地層研究所(仮称)計画の一環として、岩盤や地下水の挙動を遠隔的に監視するシステムを開発することとしている。本業務は、その具体化に必要な準備・検討を行なうことを目的に、弾性波を用いた遠隔監視システムの開発に関係して、受信システムの改良等を行なった。

下記の成果が得られた。

- a. 時間区間蓄積型記録計(TS スタッカー)の改良については、データロガーのメーカーに委託し、データ収録システム、データ回収ソフトウェアとも、目標とした仕様に改良・製作することができた。
- b. 「負抵抗シャントによる加制振・積分法」理論に基づいて製作した電子回路によって、地震計の周波数特性の均一化をはかった。これを地震計に付加し、周波数応答解析装置を用いて検定を行った結果、振幅・位相特性の広帯域の均一化を確認することができた。
- c. 基準加速度計と取付け 3 軸ブロックの調達については、地震計メーカーから購入した。
- d. 微動とアクロス発信信号を用いて地震計の検定を行なった。微動による検定の結果、振幅・位相特性は均一化回路を付けない状態では不安定だったが、回路を付けることにより均一性が向上した。但し、長周期側の周波数特性の均一化の向上を確認するためには、さらに他の場所で検定を行う必要がある。アクロス信号を用いた検定では、高周波数における周波数特性の均一化が確認された。

参考文献

森谷 武男 他(1998)：地震計の周期を長周期化するための負抵抗シャントによる過制振・積分法の評価：北海道大学地球物理学研究報告、No.61、pp107—113