

**MT法による地下深部
比抵抗の長期観測
(平成14年度報告)**

報告書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年 3月

日鉄鉱コンサルタント株式会社

本資料の全部または一部を複写・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村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 Corporation 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)
2003

MT法による地下深部
比抵抗の長期観測
(平成14年度報告)

報告書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年3月

日鉄鉱コンサルタント株式会社

MT 法による地下深部比抵抗の長期観測（平成 14 年度報告）

岸本宗丸* 横井浩一* 高橋武春*

要 旨

本報告書は、核燃料サイクル開発機構が北海道天塩郡幌延町で実施している幌延深地層研究計画の一環として実施した MT(Magnetotelluric) 法による地下深部比抵抗の長期観測についてまとめたものである。

幌延町北部の HDB-1 孔近傍に MT 法による長期無人連続観測が可能なシステムを構築し、平成 14 年 11 月 24 日から平成 15 年 3 月 3 日までの 100 日間、地表から地下 10km 程度までを対象とした見掛け比抵抗の観測を実施した。観測点は 1 点である。

観測期間中システムは順調に稼働し、安定してデータが取得された。観測結果は概ね良好であるが、一部の周波数では人工ノイズの混入が見られた。また、自然信号が弱い観測期間については、やや測定品質が低下する傾向が見られた。

見掛け比抵抗の経時変化を検討した結果、観測期間中には地下水の流動に起因するような変化はなかったと推定されるが、今後核燃料サイクル開発機構が実施している地震観測データと併せて詳細な検討を実施する必要がある。更に、可能であれば年単位の長期観測を行いデータ量を増やすと共に、ノイズ除去のためのリモートリファレンス処理が実施できるよう、リモート点設置を検討する事も必要であろう。

本報告書は、日鉄鉱コンサルタント株式会社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成果に関するものである。

機構担当課室：幌延深地層研究センター深地層研究グループ

*日鉄鉱コンサルタント株式会社

March,2003

Resistivity Monitoring for the depth of underground Structure by using MT Method(2002)

Munemaru Kishimoto *, Takeharu Takahashi * and Koichi Yokoi *

Abstract

The present document is to report the results of resistivity monitoring by using MT(Magnetotelluric) method around the site proposed for the Horonobe Underground Research Program at Horonobe-cho, Hokkaido by the Japan Nuclear Cycle Development Institute.

One stationary MT observation system was installed near the HDB-1 drilling hole at the north of Horonobe-cho. This system can be carried out unmanned observation and data processing. The monitoring of apparent resistivity that contained the resistivity information from near surface to about 10km depth was carried out from November 24, 2002 to March 3, 2003, 100 days. In the period of this monitoring, MT observation system was operated normal.

The quality of the data was almost good. But the effects of culture noise were observed at some frequencies, and the data qualities were relatively low in the period that the amplitude of natural signal was weak.

The values of apparent resistivity were almost same during the period of monitoring. It seems that the flow of underground water near the site was stable during the period of this monitoring.

To estimate the resistivity monitoring data, it is necessary to compare with the earthquake monitoring data that was acquired by the Japan Nuclear Cycle Development Institute. In addition, it is necessary to observe over a few years for the purpose of the data accumulation and to consider the monitoring by adding remote site to remove the effect of culture noise by the remote reference data processing.

This work was performed by NITTETSU MINING CONSULTANTS CO.,LTD. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Horonobe Underground Research Center, Geotechnical Science and Engineering Group

* NITTETSU MINING CONSULTANTS CO.,LTD.

目 次

1 緒論	1
1. 1 業務名	1
1. 2 業務目的	1
1. 3 設置位置	1
1. 4 業務内容	1
1. 5 業務期間	1
1. 6 調査会社	1
 2 長期観測システム	3
2. 1 探査原理	3
2. 2 長期観測システムの構築	5
2. 2. 1 使用機器	5
2. 2. 2 機材設置作業	8
2. 2. 3 観測周波数及び測定時間	8
2. 2. 4 データ処理	10
 3 観測結果	13
3. 1 観測結果の概要	13
3. 2 試錐結果との比較	16
3. 3 見掛比抵抗の経時変化	19
3. 3. 1 データ編集処理方法の検討	19
3. 3. 2 見掛比抵抗経時変化	19
3. 4 観測結果のまとめ	27
3. 4. 1 観測結果のまとめ	27
3. 4. 2 今後への提言	27
 4 結論	30
 参考文献	31

付録目次

付録1 現地作業写真	(1) ~ (3)
付録2 見掛け比抵抗曲線図	(4) ~ (16)
付録3 見掛け比抵抗数値一覧	(17) ~ (23)

図 目次

図 1. 3-1	観測地域図	2
図 2. 2-1	観測概念図	5
図 2. 2-2	長期観測システム構成図	6
図 2. 2-3	機材設置位置図	9
図 2. 3-1	データ処理の流れ	11
図 2. 3-2	観測結果表示例	12
図 3. 1-1	観測結果例	15
図 3. 1-2	1次元解析結果例	15
図 3. 2-1	孔井試験結果と1次元解析結果の比較	17
図 3. 2-2	見掛け抵抗平面図(xy方向:周波数100Hz)	18
図 3. 3-1	データ編集処理方法の検討(見掛け抵抗曲線)	21
図 3. 3-2	データ編集処理方法の検討(xy方向)	22
図 3. 3-3	見掛け抵抗経時変化図(観測値)	23
図 3. 3-4	見掛け抵抗経時変化図(平均値)	24
図 3. 3-5	見掛け抵抗変動図(%:xy方向:平均値)	25
図 3. 3-6	見掛け抵抗変動図(%:yx方向:平均値)	26
図 3. 4-1	見掛け抵抗経時変化擬似断面図(観測値)	29

表 目次

表 2. 1-1	MT法長期観測実施例	4
表 2. 2-1	観測機器仕様	7
表 2. 2-2	MT法観測周波数	9
表 3. 1-1	観測点座標	13
表 3. 1-2	1次元解析結果数値一覧	14

添付CD-ROM

報告書デジタルファイル一式
データ処理結果一式(SEG-EDIファイルほか)

時系列データ

CD-ROM(11枚)

1 緒論

1. 1 業務名

MT法による地下深部比抵抗の長期観測（平成14年度報告）

1. 2 業務目的

MT (Magneto-Telluric) 法探査装置を設置し、微小地震の震源域と考えられる地下10km程度までを対象とした比抵抗変化の長期観測及び解析を行うことにより、幌延地域の地震発生域の比抵抗特性及び微小地震の発生に伴う比抵抗変化を捉えることを目的とする。

1. 3 設置位置

図1. 3-1に示す北海道天塩郡幌延町字北進435-4。

1. 4 業務内容

核燃料サイクル開発機構（以下サイクル機構とする）より支給されたカナダPhoenix社製のMT法探査装置（MTU-5）をベースに、地下深部（10km程度）までの比抵抗変化の長期無人連続観測が可能な探査システムを構築し、長期連続観測を実施した。また、観測期間中に測定パラメータの調整及び保守作業を実施し、観測データを用いて見掛け比抵抗の経時変化図を作成した。

1. 5 業務期間

業務期間：平成14年11月8日～平成15年3月10日

探査装置設置 平成14年11月18日～平成14年11月24日

データ取得 平成14年11月24日～平成15年3月3日

パラメータ調整 平成14年12月7日～12日、平成15年1月20日～21日

解析・報告書作成 平成14年12月1日～平成15年3月7日

1. 6 調査会社

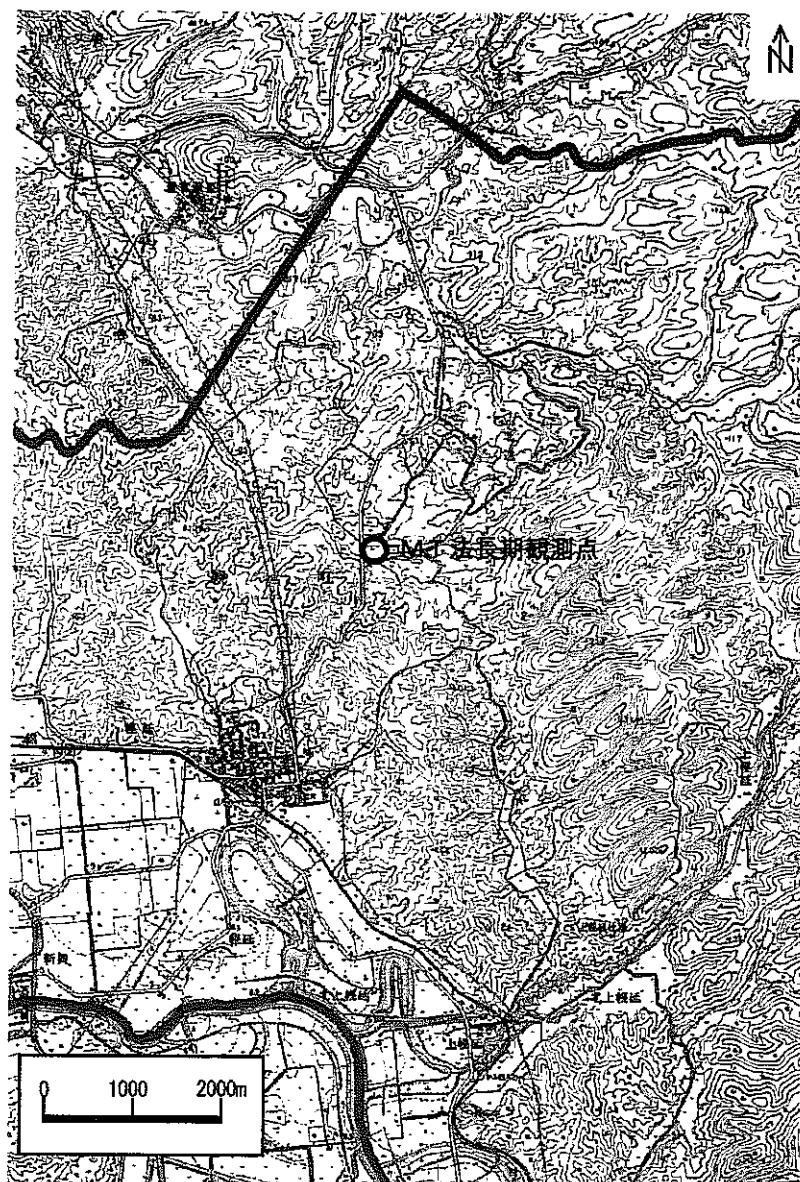
調査会社名：日鉄鉱コンサルタント株式会社

〒105-0021 東京都港区東新橋1丁目21-1

電話 03-3575-0508 (物理探査部)

FAX 03-3575-0292

技術責任者：横井浩一



国土地理院発行5万分の1地形図「幌延」より作成

図1. 3-1 観測地域図

2 長期観測システム

2. 1 探査原理

地球上の自然電磁場は、太陽の黒点活動に起因する地球電離層・磁気圏の擾乱により生じる一次電磁場と、それにより誘導された二次電磁場として形成されている。この電磁場は地下の比抵抗構造を反映しており、MT 法はこの自然電磁場を測定し地下の比抵抗構造を推定するものである。

MT 法は電場と磁場の比より大地の見掛け比抵抗（いわゆる電気抵抗）を算出し、地質構造を推定する手法である。この見掛け比抵抗は周波数の関数である。一般に電磁波は、その周波数が高い（周期が短い）と地表浅部の、周波数が低い（周期が長い）と地下深部の比抵抗情報を含んでいる。よって、幅広い周波数帯を測定することで、浅部から深部にわたる情報を取得することが可能となる。

MT 法は、直交する 2 方向の測定（テンソル）をするため、2 種類の見掛け比抵抗を得ることができる。大地が 1 次元の層状大地であればこの 2 種類の見掛け比抵抗は同じになるが、実際にはそのような地域は稀で、多くの地域が 2 次元・3 次元的に不均質であるため、この 2 つの見掛け比抵抗はそれぞれ異なった値を示し、地下構造解明の指標となる。

見掛け比抵抗 ρ_a ($\Omega \cdot m$) の算出式を以下に示す。

$$\rho_a = 0.2 / F | E / H |^2$$

F : 測定周波数 (Hz)

E : 地表面における電場 (mV/km)

H : 地表面における電場と直交方向の磁場 (γ)

また、テンソルの関係式を以下に示す。

$$Ex = Z_{xx} \cdot H_x + Z_{xy} \cdot H_y$$

$$Ey = Z_{yx} \cdot H_x + Z_{yy} \cdot H_y$$

Z : インピーダンス

x : 南北方向

y : 東西方向

実際の測定では、直行する 2 方向の電場と磁場を測定するため、上式より導かれる $Ex - Hy$ 及び $Ey - Hx$ から 2 つの見掛け比抵抗が算出される。

MT 法の特長は可探深度が大きい事である。この深度は大地の比抵抗に依存するが、一般的に探査深度は 10km 強に及ぶ。MT 法は、国内では主として地熱探査（探査深度 1 ~ 3 km）で用いられてきたが、近年は石油探査や地球物理・防災分野などの地下深部をターゲットにした調査で広く用いられるようになっている。欠点としては、測定日の自然信号強度や天候状況、更に測点周辺のノイズ状況（例えば高圧電線の有無など）によってデータ品質が大きく左右されるため、測定に日数がかかることが挙げられる。国内の一般的な調査では、1 点あたり 2 晩測定が多く、測定環境が悪い場合（例えば直流電車の影響が大きい地域）は 1 週間以上の測定が必要になる場合もある。

一方、MT 法の探査深度が大きい点、自然信号を用いるため保守管理が容易で、かつ高電圧を使用しないため安全である点を利用して、地下深部の比抵抗変化を長期観測する事が近年行われている。表 2. 1 - 1 に、国内で実施された MT 法長期観測実施例を示す。

一般に比抵抗は、流体の存在や温度変化に敏感であると言われている。そこで、比抵抗を長期間観測することで、地下における流体の挙動や温度変化を把握することを目的とし、これらの観測研究は実施されている。国土地理院で実施されている観測¹⁾は、地震活動に関連する変化の把握、新エネルギー・産業総合研究所で実施された観測³⁾は地熱貯留層の変化の把握を目的としており、いずれも長期間（年単位）の観測が実施されている。なお、国土地理院で実施している観測は現在も継続中である。

表2. 1-1 MT法長期観測実施例

年度	実施機関	場所	内容
平成7年度～（継続中）	国土地理院 水沢測地観測所	岩手県	電場2・磁場3成分連続観測＊2点
平成11年度～平成13年度	新エネルギー・産業 技術総合開発機構	鹿児島県	電場2・磁場3成分連続観測＊3点 電場2成分連続観測＊4点

2. 2 長期観測システムの構築

2. 2. 1 使用機器

長期観測システムは、表2. 1-1に示した長期観測において運用実績があるカナダ Phoenix Geophysics 社（以後 Phoenix 社とする）製の測定システムから構築される。システム構築に用いた機材・ソフト類について表2. 2-1に示す。なお、サイクル機構より支給された機材については表中に明記した。

MT 法探査装置 MTU-5 は、通常の MT 法調査で使用する測定器である。精密水晶時計を内蔵しており、GPS の時刻情報を用いた高精度の同期測定（リモートリファレンス測定）を行うことができる。A/D 変換能力は 24 ビットで、大容量のフラッシュメモリーの内蔵が可能なため、長時間のデータ取得及び保存が可能である。電源は直流 12V を使用する。

本観測では、測定点より 130m 程度離れた観測小屋内に 300V 直流電源を設置し、DC300V を電源ケーブルにより MTU-5 収納ケースまで伝送した。そして、収納ケース内に設置された DC/DC コンバーターで 12V に変換し、MTU-5 に供給した。MTU-5 のデータは収納ケース内に設置した光モデムによって、シリアルインターフェースから光信号に変換され、光ケーブルを用いて、観測小屋内に設置した制御用 PC に直接転送する。図2. 2-1 に観測概念図を、図2. 2-2 にシステム構成図を示す。

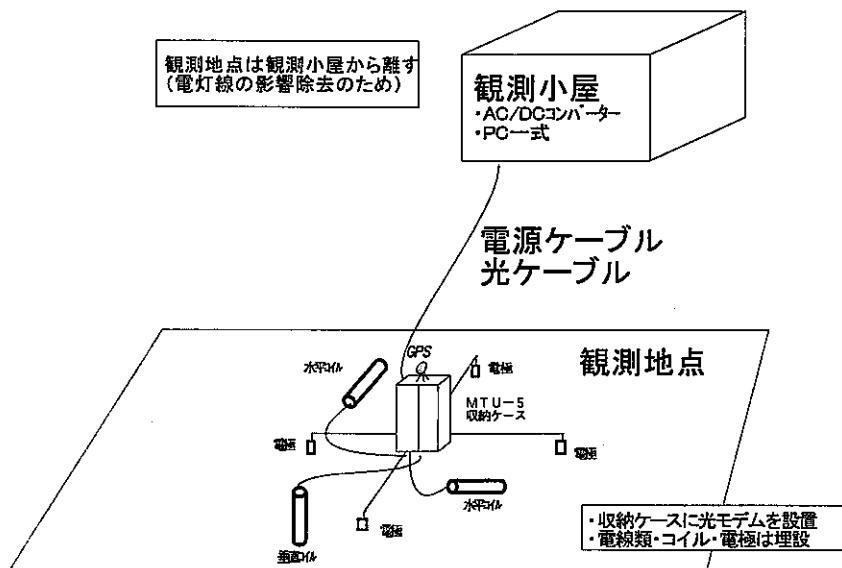
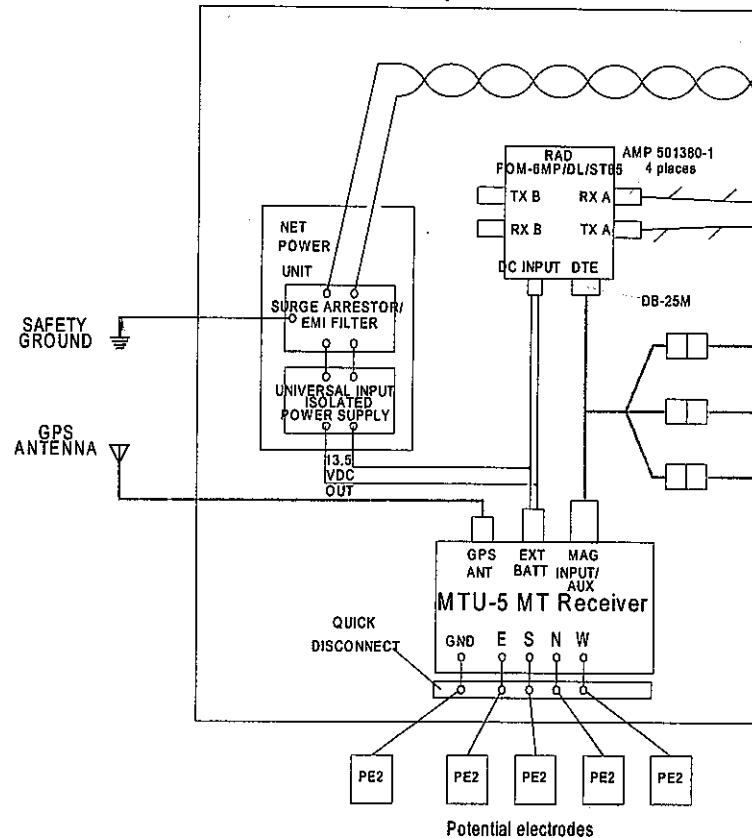


図2. 2-1 観測概念図

5 Component Unit



Central Station

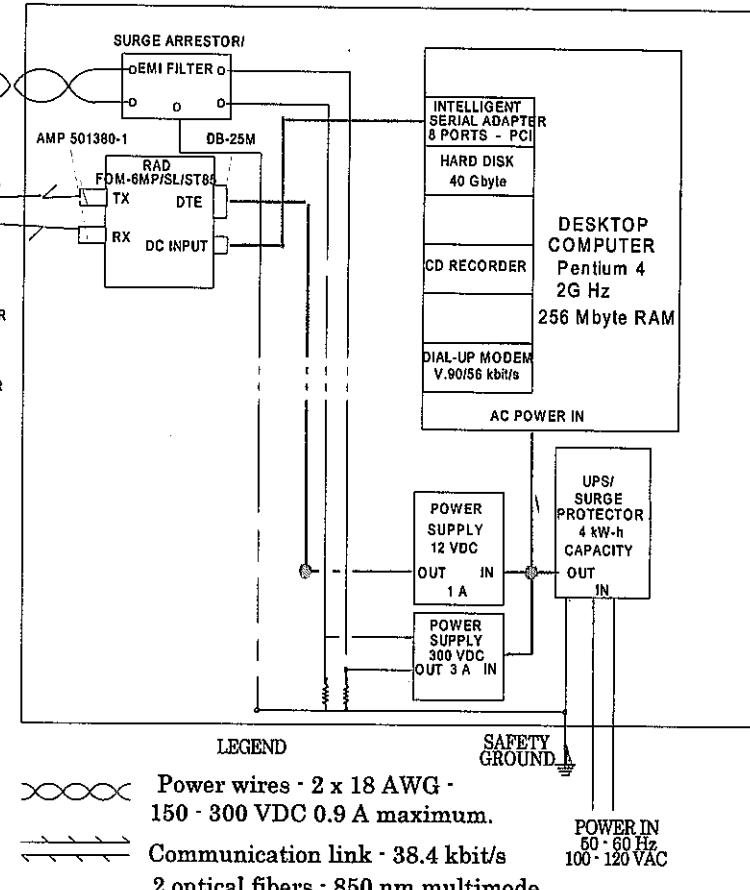


図2。2—2 長期観測システム構成図

表2. 2-1 観測機器仕様

観測部	
観測装置 (JNC支給)	Phoenix社製 MTU-5広帯域MT観測装置 5チャンネル（電場2成分+磁場3成分） 24bit A/D 4KHz GPS同期精度 1μsec データ採取，制御ソフトウェア内蔵（MTU-D3） GPSアンテナ，バッテリーケーブル付属 サイズ 23cmx22.5cmx11cm 重量 4kg
磁場センサー (JNC支給)	Phoenix社製 磁場インダクションコイルMTC-50 3本 プリアンプ，キャリブレーションワインディング内蔵 コイルケーブル20m付属 サイズ 140cm 重量 5.8kg
電場センサー (JNC支給)	Phoenix社製 鉛-塩化鉛非分極性電極 6個 高さ30cm 直径10cm
電源	Universal Isolated Power Supply 300V/13.5V DC/DC変換器 サージアレスター過電圧保護回路付き
光モデム	RAD FOM-6MP/DL/ST85 光モデム AMP501380-1コネクター (Type ST) 38.4kbits/s 電送
機器収納ボックス	Pedestal (TV2500) Marconi 製 高さ1.26m x 幅0.711m x 奥行き0.304m 金属製機器配線ボックス
データ転送部	
光ファイバー	Duplex 850nm Multimode 125μm 4芯光ファイバーケーブル，埋設用保護被服
電源ケーブル	AWG18 Twisted Pair Copper Wire 300VDC以上耐圧 0.9Amax
観測部制御及びデータ保存・処理部	
制御用PC	Pentium4 2.0GHz / 400MHz system bus 512k Cache Windows98/XP(英語Version) メモリー 256MB RDRAM HDD 40GB
増設インターフェース	Intelligent Serial Adaptor 8ポート PCI
光モデム	RAD FOM-6MP/DL/ST85 光モデム AMP501380-1コネクター (Type ST) 38.4kits/s 電送
無停電電源	APC Smart-UPS 420VA 120V Ethernet Protection, Modem Protection機能付き RS232C電源制御機能付き 出力 420W 420VA 電源 82-144V バッテリー Lead-Acid シールバッテリー サージプロテクション サイズ 17cm x 12cmx37cm 重量10kg
DC高電圧電源	ネットワークパワーユニット AC/DC電源 300V 最大3A 12V ACアダプター付属
通信ソフト	WinHost MTU-5 ネットワーク制御ソフト Phoenix社製 Windows MTU制御ソフト Setup, Record, Calibration制御機能 観測時刻，観測タイムテーブル設定機能
データ取得・表示ソフト	MTU-EDIT, MTU-DISP MTデータ編集・表示ソフト Phoenix社製 時系列データ収集機能 パワースペクトル計算機能 見掛比抵抗計算機能 見掛比抵抗・周波数曲線編集機能 見掛け比抵抗・周波数曲線表示機能 見掛け比抵抗経時変化表示機能

2. 2. 2 機材設置作業

観測機材は、HDB-1 孔より約 130m 南側の河川敷に設置した。図 2. 2-3 に設置位置を示す。なお、本地域の地質構造と平行な N20°W 方向を x 方向、直交する N70°E 方向を y 方向として、電場及び磁場の設置を実施した。

機材の設置は以下の点に留意して実施した。

- ・ 磁場センサーは 50cm 深に塩化ビニールパイプで保護し、水などが入らぬようにして埋設。
- ・ 電位電極は 1m 深の縦穴を掘り、塩化ビニールパイプで保護をして埋設。
- ・ 上記センサー類と測定器を結ぶケーブルは、必要に応じ部分的に埋設。
- ・ 光ケーブル及び電源ケーブルは、地表に敷設。傾斜地においては雪解け時の雪塊の移動による断線を避けるため固定。
- ・ 制御 PC 及び直流電源は観測小屋に設置。
- ・ MT 法探査装置 MTU-5 は、雨水や幌延地域の冬季の観測にも耐え得るよう、防水・防寒型の密閉式の専用ケースに収納。

以上の設置作業を実施した結果、観測期間中に機材故障あるいは断線などのトラブルは起きず、安定した観測を実施できた。なお、付録 1 に現場作業写真を掲載した。

2. 2. 3 観測周波数及び測定時間

観測周波数を表 2. 2-2 に示す。

MT 法は 320Hz から 0.00055Hz (周期約 1,800 秒) までの幅広い周波数帯域でデータ取得を行うため、実際の観測では 320~60Hz 間の観測は 2,560Hz、40~7.5Hz 間の観測は 320Hz、そして 6Hz 以下の観測は 24Hz のサンプリング周波数を用いる。このうち、6 Hz 以下の低周波数帯については測定時間中に連続してデータを取得するが、7.5Hz 以上の高周波数帯域については、連続して長時間の測定を実施するとデータ量が膨大になるため、5 分毎にデータを取得するようにした。なお、高周波数帯域は、2 つのサンプリング周波数を用いており、各々の帯域を交互に 10 分毎にデータを取得している。

また、観測データは、午前 9 時（グリニッジ標準時の 0 時に対応）から翌日の午前 9 時までの 24 時間を 1 データ（観測 1 日の結果）とし、保存及びデータ処理を実施した。なお、通常の MT 法測定では人工ノイズの少ない夜間に 10 時間以上の測定を実施することが多い。しかし、本観測は地震発生に関連する比抵抗変化を捉えることを目的としているため、夜間のみならず昼間も含む 24 時間のデータ取得を実施した。

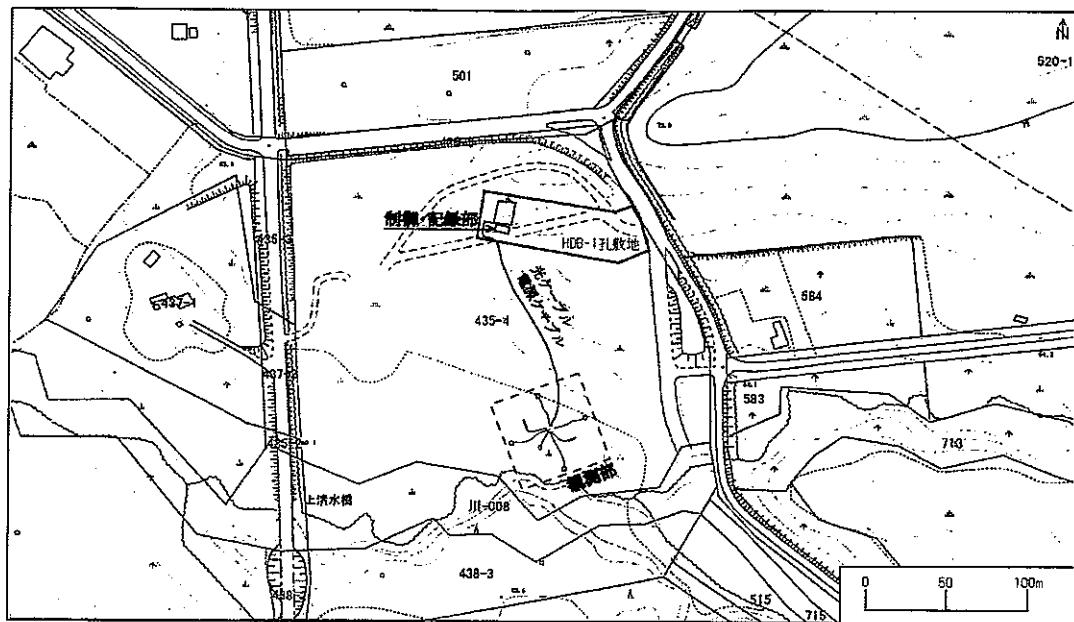


図 2. 2-3 機材設置位置図

表 2. 2-2 MT 法観測周波数

No.	Frequency (Hz)	Sample-rate (Hz)	測定スケジュール	No.	Frequency (Hz)	Sample-rate (Hz)	測定スケジュール
1	320.0	2,560	10分間隔	21	0.375	24	24時間連続観測
2	240.0	"	"	22	0.28125	"	"
3	160.0	"	"	23	0.1875	"	"
4	120.0	"	"	24	0.14063	"	"
5	80.0	"	交互に	25	0.09375	"	"
6	60.0	"	5分間隔	26	0.07031	"	"
7	40.0	320	10分間隔でデータ を取得	27	0.04688	"	"
8	30.0	"	"	28	0.03516	"	"
9	20.0	"	"	29	0.02344	"	"
10	15.0	"	"	30	0.01758	"	"
11	10.0	"	"	31	0.01172	"	"
12	7.5	"	"	32	0.00879	"	"
13	6.0	24	24時間連続観測	33	0.00586	"	"
14	4.5	"	"	34	0.00439	"	"
15	3.0	"	"	35	0.00293	"	"
16	2.25	"	"	36	0.0022	"	"
17	1.5	"	"	37	0.00146	"	"
18	1.12	"	"	38	0.0011	"	"
19	0.75	"	"	39	0.00073	"	"
20	0.5625	"	"	40	0.00055	"	"

2. 2. 4 データ処理

本システムのデータ処理の流れを図2. 3-1に示す。

各観測日のデータ処理は以下の内容に分けられる。

① 検定

表2. 2-2に示した3つのサンプリング周波数(2,560Hz、320Hz、24Hz)に基づき、時系列データの取得を行う。観測データは、1時間毎に7.5Hz以上の高周波数帯データ(1474mdd#.tsh:# a~x)、6Hz以下の低周波数帯データ(1474mdd#.tsl:# a~x)、及び測点情報や機器設定の情報を含んだ(1474mdd#.tbl:# a~x)のファイル名でMTU-5内のメモリーに保存される。

② データ伝送

毎時0分より1時間毎に作成される3個の観測データを、1時間毎(毎時10分)に光ケーブルを用いて観測小屋の制御用PCまで転送する。転送容量は2MB弱である。

③ データ保存

1日分のデータ伝送が終了すると、伝送した1時間毎のデータを日付毎にフォルダーを作成し、制御用PCのハードディスクに保存する。

④ 時系列処理

これらのファイルよりフーリエ係数を算出(1474mddA.FC#:# 3~6)し、時系列処理を行う。時系列処理は、観測された電場と磁場を用いて見掛け抵抗や位相などのMTパラメータを計算する処理で、1日1回実施し、ファイル(A01-mddA.mt)を作成する。

⑤ データ編集

MTパラメータファイルは、各周波数ごとに20個のパワースペクトルに分割されている。この各パワースペクトルより最適な見掛け抵抗・位相曲線となるように、極端に値が異なる異常データの除去を行うのがデータ編集である。また、本処理を実施する際に、元データの保存と表示用データセットの作成も併せて行う。なお、この処理は任意の時間にマニュアルで実行するようにした(“3. 3. 1 データ編集処理方法の検討”参照)。

⑥ 結果表示

測定結果の表示はマニュアルにより任意の時間に実行できる。測定結果の表示例を図2. 3-2に示す。上段の図は、1観測周波数についての見掛け抵抗及び位相を連続表示した結果である。横軸は日付を示す。表示周波数は適宜変更でき、測定した全周波数の結果を見ることが可能である。また、見掛け抵抗・位相以外の電場強度などのパラメータも表示可能である。下段はある観測日の見掛け抵抗測定結果を表示した例であり、2方向の観測データを “[” 及び “]” で表示している。図中の曲線は、観測開始直後の良好な測定結果より算出した標準見掛け抵抗曲線であり、曲線形状に極端な変化があれば判別が容易である。

以上の作業は、通常の調査では技術者がマニュアルで実施する作業である。本観測では、各種測定パラメータの入力作業などを自動化し、無人で処理が実施できるようにソフトの変更、あるいは開発を行っている。また、作業実施時間は“WINDOWS XP”に付属するスケジューラーで管理している。

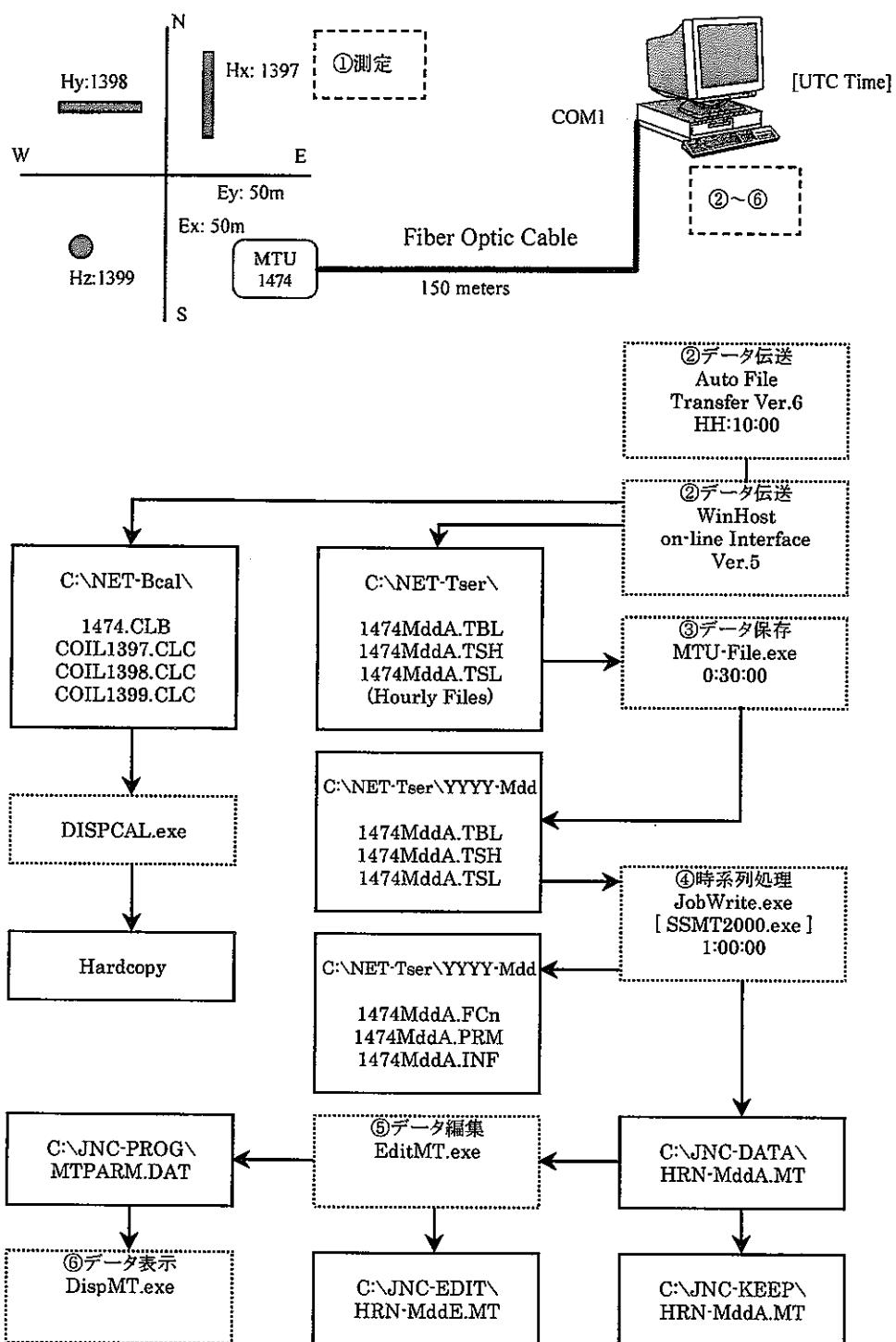
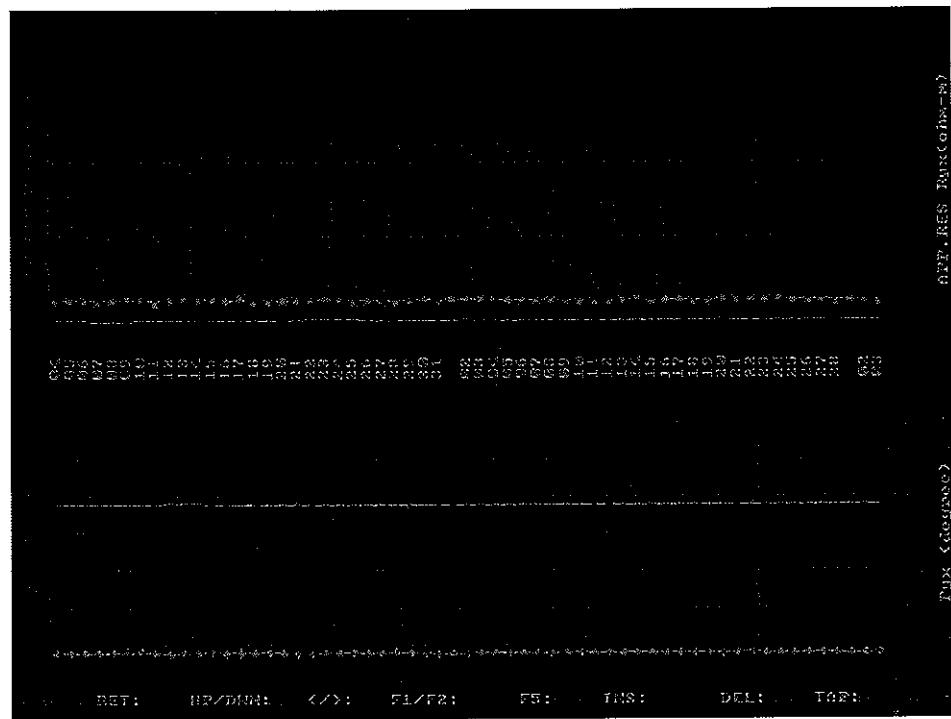
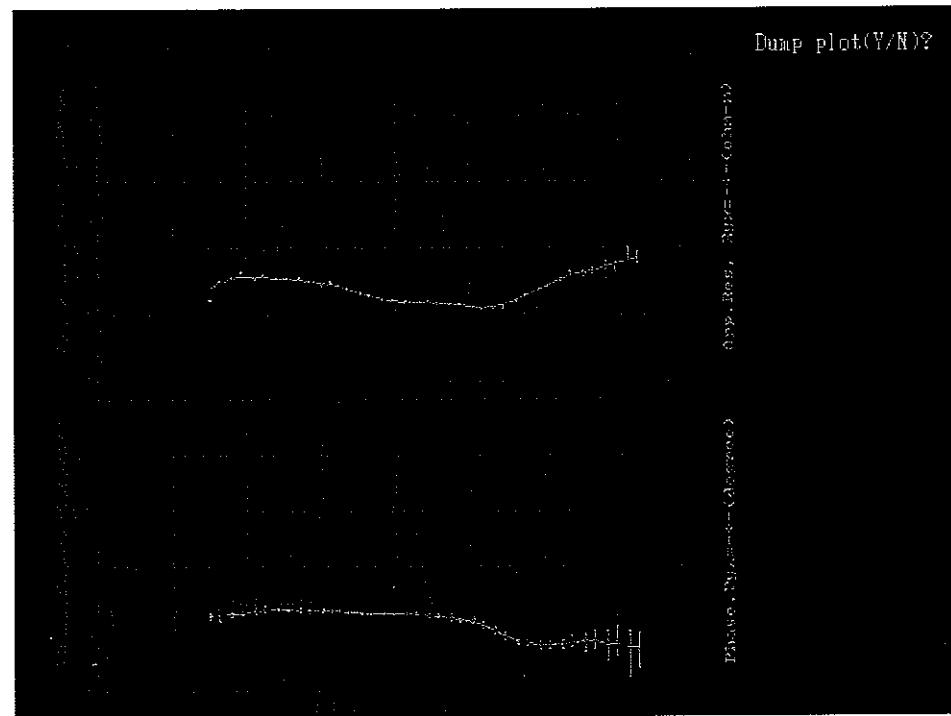


図2. 3-1 データ処理の流れ



見掛け比抵抗（上段）と位相（下段）の経時変化（赤：xy 方向 青：yx 方向）



見掛け比抵抗曲線（上段）と位相曲線（下段）の表示（赤：xy 方向 青：yx 方向）

図 2. 3-2 観測結果表示例

3 観測結果

MT 法測定結果には E_x (南北方向の電場) と H_y (東西方向の磁場) より算出される見掛け比抵抗・位相、及び E_y (東西方向の電場) と H_x (南北方向の磁場) より算出される見掛け比抵抗・位相の 2 方向がある。本報告書では前者の応答を xy 方向、後者を yx 方向とした。なお、観測における南北方向は N20° W 方向、東西方向は N70° E 方向である。

本章で用いる観測値はデータ編集後の結果で、巻末資料 2 及び巻末資料 3 に観測期間中の全ての見掛け比抵抗曲線及び数値を掲載した。また、見掛け比抵抗以外のパラメータについては、添付 CD-ROM に保存した。

3. 1 観測結果の概要

現地測定は平成 14 年 11 月 24 日から平成 15 年 3 月 3 日までの 100 日間実施した。観測期間中には機器トラブルもなく、システムは順調に稼働した。観測点の座標を表 3. 1-1 に示す。なお、この観測点座標は、MT 法観測装置に付属する GPS により求めた値である。

表 3. 1-1 観測点座標

緯度 度 分 秒	経度 度 分 秒	標高 m
45 2 20	141 51 54	58

(緯度及び経度は世界測地系に基づく)

①観測結果

観測地点は、道道や大型施設から数 100m、通常の電灯線から約 100m 離れている。図 3. 1-1 に観測結果例を示す。図の左側は見掛け比抵抗曲線で、縦軸は見掛け比抵抗 ($\Omega \cdot m$) 、横軸は周波数を示し、いずれも対数表示である。右側は位相曲線で、縦軸は位相 (deg) 、横軸は周波数を示し、横軸のみ対数表示である。本図より、概ね連続性の高い良好なデータが取得できた事が判る。

観測結果は $0.7 \sim 10 \Omega \cdot m$ 前後の値を示し、全体的に見掛け比抵抗値は低い。見掛け比抵抗曲線を見ると、両方向の曲線は重ならず、 xy 方向の曲線は yx 方向より低い値を示す傾向にある。このように高周波数部よりやや曲線が離れていることから、本観測データは地表浅部の局所的な比抵抗異常の影響 (スタティックシフト) を受けている可能性が考えられる。また、 yx 方向は見掛け比抵抗が単純に減少した後増加傾向にあるのに対し、 xy 方向は微妙な増減を繰り返していることより、観測点近傍の地下構造は単純な 1 次元構造ではないと考えられる。

本データは 40 周波数で解析しているが、 xy 方向の 40Hz 及び 60Hz 周辺で見掛け比抵抗曲線の連続性が劣っている。これは、何らかの人工ノイズの影響を受けているためと考えられ、 yx 方向に顕著な乱れが見られないことから、観測地点の北側あるいは南側にノイズ源があると想定され、1 月及び 3 月にノイズ源調査を行ったが原因を特定できなかった。また、0.1Hz 周辺は自然信号強度が弱く、天候状況 (風など) などに品質が左右されやすい帯域であるため、曲線の連続性が落ちる傾向が見られる。なお、本観測では、MT 法調査でノイズ除去のため実施されるリモートリファレンス処理を実施していないため、観測日によってはノイズの影響で品質が劣る結果も見られる。

②1次元解析

図3. 1-2に図3. 1-1の結果を用いた1次元解析結果例を示す。計算には、見掛け比抵抗と位相の値を比抵抗対深度に近似的に変換するBostick 1次元解析を実施した。本手法は各周波数について計算するため、概略の探査深度を把握するのが容易である長所がある。また、①で説明したように、観測した見掛け比抵抗曲線はxy方向とyx方向でやや離れ、かつ曲線形状がやや異なる傾向にあるので、ここでは両方向を平均化した見掛け比抵抗（インパリアントモード）を用いて計算を実施した。

図で縦軸は深度、横軸は比抵抗を示し、いずれも対数で表示している。なお、図に示した周波数は、後述する経時変化を検討する際に用いた周波数である。また、表3. 1-2に1次元解析数値一覧を示す。これらの図表より、観測結果は数10mから数10kmまでの比抵抗情報を含んでいることが判る。比抵抗は1~ $10\Omega\cdot m$ 前後の値を示し、深度1km程度まで比抵抗は徐々に低くなり、その後深度の増加と共に緩やかに増加していく傾向にある。

計算結果を見ると、MT法の最低測定周波数0.0005Hzにおける対応深度は約33kmとなる。しかし、測定周波数が低くなるほど、解析に使用できる測定データ数は減少（0.0029Hz以降は50%以下に減少）し解析結果の品質は安定せず精度が落ちるため、0.0029Hz以降の周波数については、深度方向の信頼性は低くなる。このような傾向を考慮すると、本観測の信頼できる探査深度は10km程度と考えられる。

表3. 1-2 1次元解析結果数値一覧

No.	周波数 (Hz)	1次元解析結果		No.	周波数 (Hz)	1次元解析結果	
		比抵抗(ohm·m)	深度(m)			比抵抗(ohm·m)	深度(m)
1	320	2.3	36	21	0.375	1.1	651
2	240	2.3	43	22	0.2813	1.1	738
3	160	2.4	54	23	0.1875	1.1	882
4	120	2.6	64	24	0.1406	1.1	995
5	80	2.8	81	25	0.0938	1.1	1178
6	60	2.9	94	26	0.0703	1.2	1343
7	40	2.3	104	27	0.0469	1.4	1659
8	30	1.9	112	28	0.0352	1.7	1976
9	20	1.6	127	29	0.0234	2.3	2602
10	15	1.4	138	30	0.0176	2.9	3197
11	10	1.3	162	31	0.0117	4.0	4372
12	7.5	1.3	179	32	0.0088	4.8	5460
13	6	1.3	196	33	0.0059	5.7	7450
14	4.5	1.3	220	34	0.0044	6.2	9215
15	3	1.3	262	35	0.0029	6.8	12344
16	2.25	1.3	297	36	0.0022	7.0	14907
17	1.5	1.3	353	37	0.0015	7.2	19285
18	1.125	1.3	400	38	0.0011	7.2	22825
19	0.75	1.2	478	39	0.0007	7.1	28563
20	0.5625	1.2	543	40	0.0005	7.0	33329

(斜体で示した周波数は経時変化の検討に使用した)

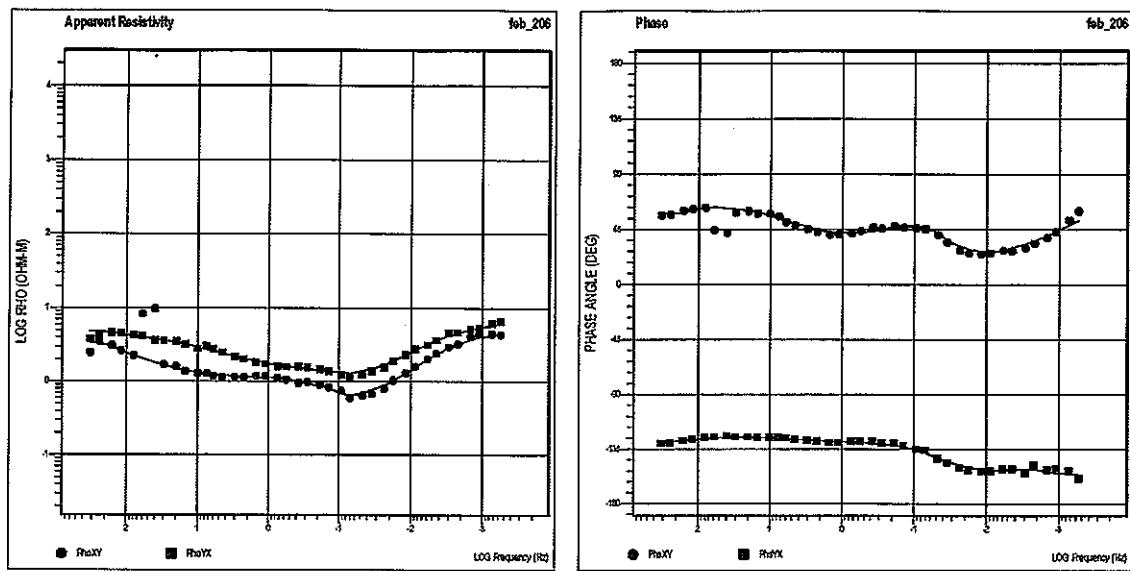


図3. 1-1 観測結果例

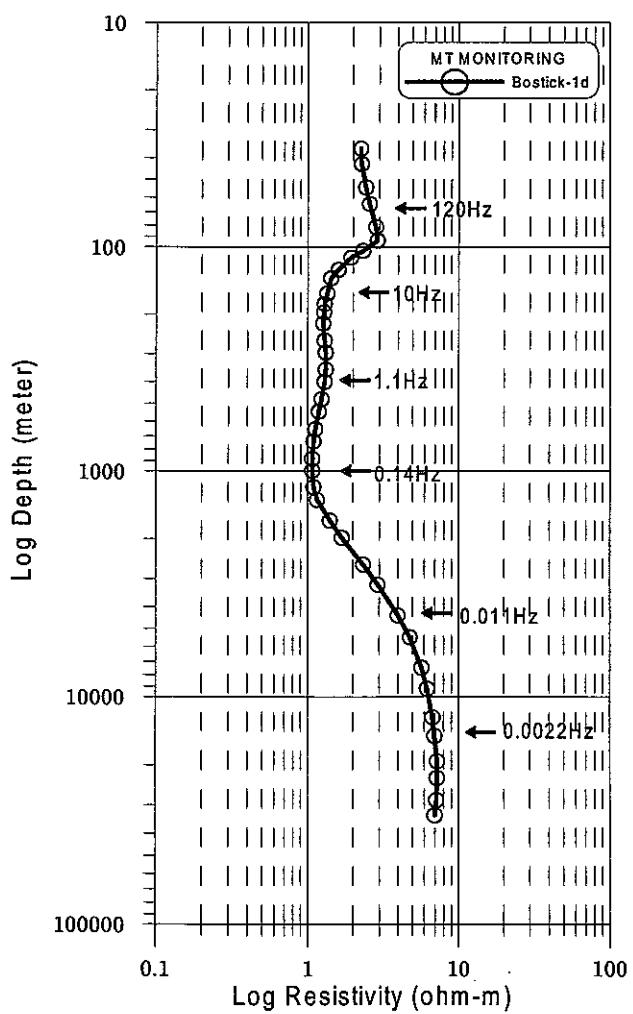


図3. 1-2 1次元解析結果例

3. 2 試録結果との比較

観測点は、HDB-1孔より約130m南側の河川敷に位置する。平成13年度成果報告(JNC T N1400 2002-004)⁴⁾によれば、HDB-1孔では各種孔内試験が実施されているので、孔内試験結果と1次元解析結果の比較を行った。

図3. 2-1は左より地質柱状図、比抵抗検層結果、1次元解析結果及びコアからの抽出水の元素濃度を示している。なお、1次元解析結果については、比較のため縦軸は実数にして表示した。

①比抵抗検層との比較

検層結果を見ると、比抵抗は深度50mでは $30\Omega\cdot m$ 前後となり、深度を増すにつれ、値は下がり、孔底付近では $2\sim 3\Omega\cdot m$ 前後の値となる。MT法長期観測結果による1次元解析結果は、深度50mでは $2\Omega\cdot m$ 強と検層結果より低い。孔底付近では約 $1\Omega\cdot m$ である。

図3. 2-2に平成13年度の電磁法調査結果²⁾を示す。本図はxy方向の見掛け比抵抗の分布を示したものである。MT法長期観測点は測点106及び107の南側に位置しており、図より100Hzにおける見掛け比抵抗は概ね $10\Omega\cdot m$ 前後の分布域に対応している事がわかる。観測周波数100Hzにおける探査深度は100m程度であることを考えると、既存調査結果は検層結果と整合的である。

長期観測点はHDB-1孔と離れている上、地表状況も異なっている。そのため、前述のように長期観測結果は浅部の局所的な低比抵抗異常の影響(スタティックシフト)を受け、xy・yx方向とも、検層結果及び既存調査結果と比較して低い値になった可能性が考えられる。

②元素濃度との比較

HDB-1におけるコアからの抽出水の塩分濃度を見ると、深度350m前後までは海水の1/4前後、それ以深は1/2前後を示す。塩分濃度が高いと比抵抗は低くなり、本観測結果や平成13年度の調査結果の比抵抗が全体的に低いことは、この結果と調和している。

1次元解析結果を見ると、比抵抗は深度100m前後までは $3\Omega\cdot m$ 前後の値を示し、その後、深度の増加と共に緩やかに比抵抗は下がる傾向にある。塩分濃度については深度150m以浅についてはデータがないが、この比抵抗低下の程度と塩分濃度の対応は明確ではない。

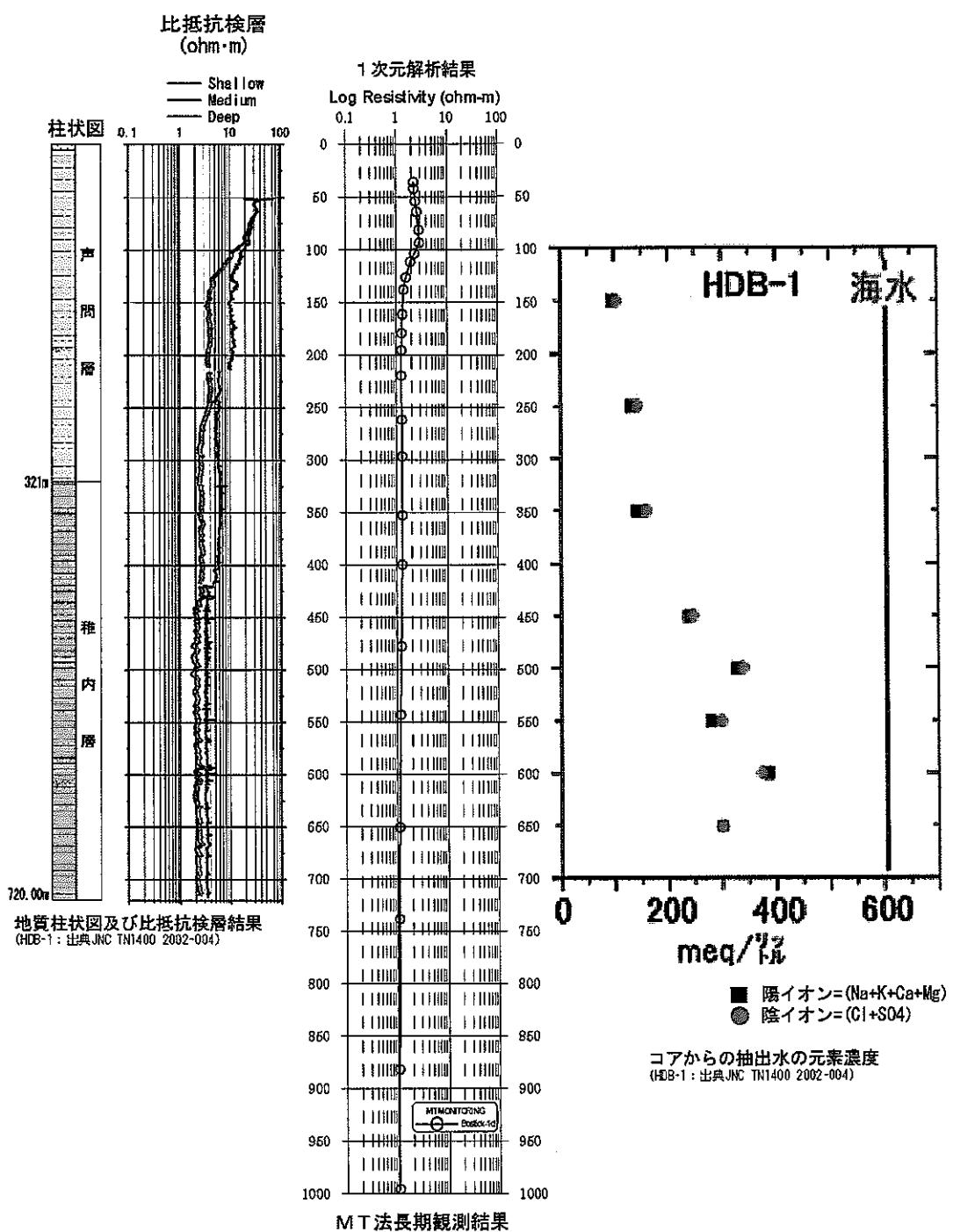


図 3. 2-1 孔井試験結果と1次元解析結果の比較

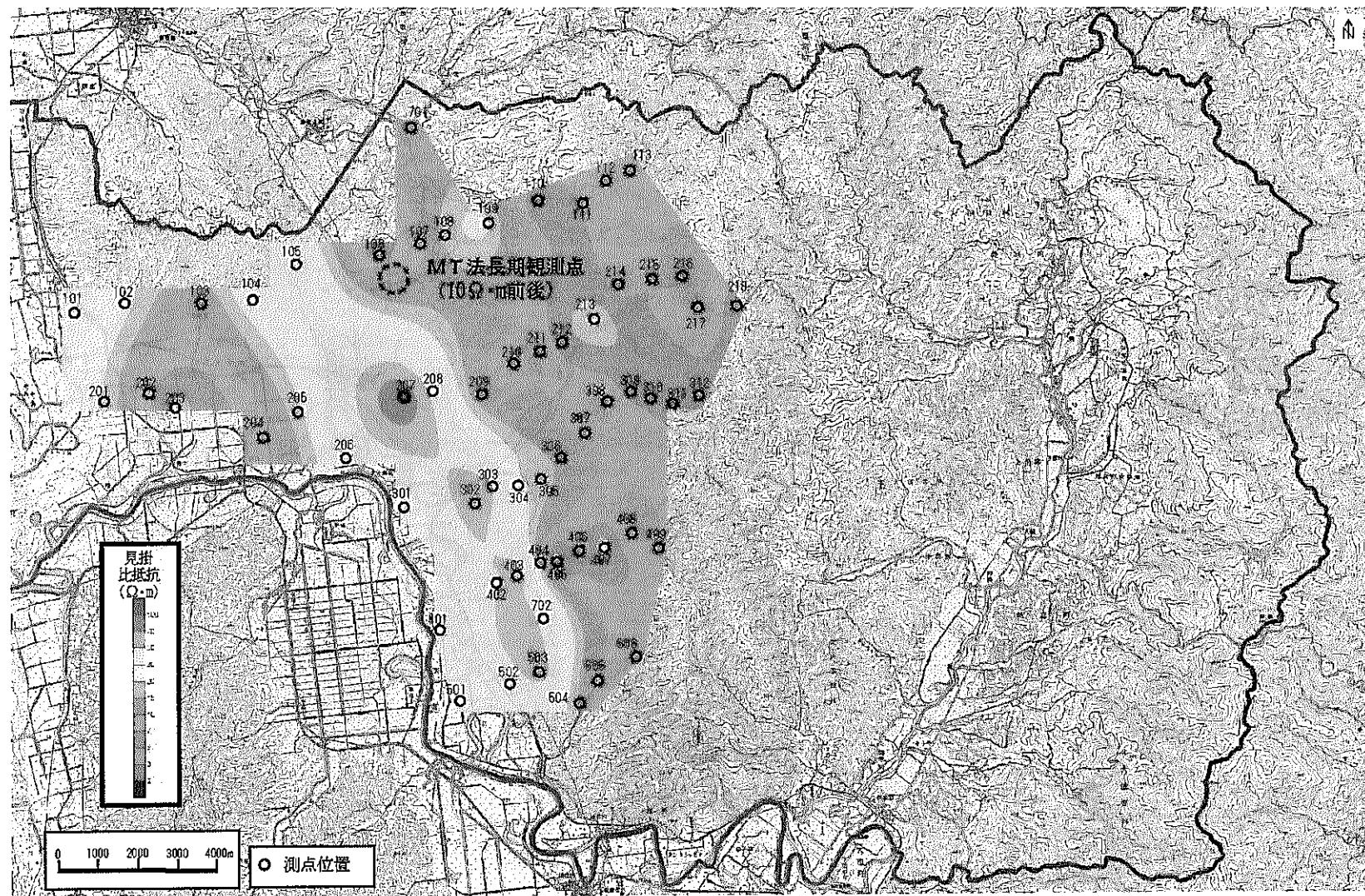


図3. 2-2 見掛け比抵抗平面図 (xy 方向: 周波数 100Hz)

3. 3 見掛け比抵抗の経時変化

3. 3. 1 データ編集処理方法の検討

MT 法は、自然電磁場を信号源として測定し、見掛け比抵抗などのパラメータを算出する手法である。しかし、実際の測定においては、高圧送電線や電灯線などに起因する電磁ノイズや、車両走行あるいは風雨の影響などに起因するノイズも信号として取り込むため、観測データよりそれらの影響を除去・軽減するデータ編集処理が必要となる。

データ編集処理では、12月初頭までの本観測結果より、自然信号が強くデータ品質の良好な観測結果を参考に見掛け比抵抗標準曲線を作成した。次に、毎日の観測結果は 20 個のセグメントに分割されているので、この中から標準曲線と極端に異なる見掛け比抵抗を排除した。更に、残ったセグメントより分散が最小になるような組み合わせを求め、最終的な見掛け比抵抗を算出した。そして、この作業を 40 測定周波数について行い、最終的な観測結果を求めた。図 3. 3-1 及び図 3. 3-2 に、データ編集の効果を確認するため、データ編集前とデータ編集後のデータを示した。

図 3. 3-1 は上段が平成 14 年 11 月 29 日の、下段は平成 15 年 2 月 6 日の測定結果（見掛け比抵抗曲線）であり、両方とも左側はデータ編集前の、右側はデータ編集後の結果を示した図である。いずれの結果も、データ編集前は 100Hz 以上の高周波数部及び 1~0.1Hz 間においてデータが乱れ、見掛け比抵抗曲線の連続性が著しく劣っているが、データ編集を実施した見掛け比抵抗曲線は連続性が改善されているのが良く判る。

図 3. 3-2 は見掛け比抵抗の経時変化図であり、上段はデータ編集前の、下段は観測値の経時変化を示し、いずれも xy 方向について示している。縦軸は見掛け比抵抗、横軸は日付を示し、各観測日の見掛け比抵抗値をプロットすることで、時間軸に対する見掛け比抵抗の変化を把握できる。なお、本図で用いたのは 120Hz・10Hz・1.1Hz・0.14Hz・0.011Hz 及び 0.0022Hz の 6 周波数である。MT 法測定では、前述のように 0.1Hz 前後の帯域においてデータが顕著に乱れる傾向が見られる。データ編集前の結果 (0.14Hz: ▲) を見ると、見掛け比抵抗の変化幅が非常に大きいが、このデータに対してデータ編集を実施すると、大幅に変化幅が小さくなるのが判る。また、12月初頭のデータを見ると、それ以外の周波数についても極端に異なるデータが除去され、変化幅が小さくなっている。

このように、データ編集処理は、測定結果よりノイズの影響を除去・軽減することが可能で、測定精度を向上させるのに有効な処理手法であることが判る。よって、本観測においては、全ての観測結果に対してデータ編集を行い、その結果（以後観測値とする）を用いてデータの表示及び検討を行った。

3. 3. 2 見掛け比抵抗経時変化

観測値より見掛け比抵抗について経時変化図を作成した。使用周波数は 120Hz・10Hz・1.1Hz・0.14Hz・0.011Hz 及び 0.0022Hz の 6 周波数である。なお、この周波数のおおよその対応深度は、表 3. 1-2 より 60m・160m・400m・1km・4.4km・15km である。

①観測値を用いた見掛け比抵抗経時変化

図 3. 3-3 は観測値を用いた見掛け比抵抗の経時変化図である。上段は xy 方向の、下段は yx 方向の結果であり、横軸は日付、縦軸は見掛け比抵抗を示している。

図より、両方向とも 0.14Hz (▲) は、他の 5 周波数に較べて変化幅が大きいことが判る。これは、この 1~0.1Hz 前後の帯域は比較的自然信号が弱く⁶⁾、ノイズに影響されやすい帯域であるためと考えられる。それ以外の周波数は比較的变化幅が小さく安定した傾向だが、120Hz (○) 及び 0.0022Hz (★) ではやや変化が見られる。120Hz は、人工ノイズの影響を受けやすい帯域であり、周辺に構造物が多いことを考慮すると何らかの人工ノイズが複合的に影響し、品質が安定しないと考えられる。0.0022Hz は約 500 秒の長周期でありデータ量が少ないため、やや変化幅が大きいと考えられる。

②移動平均値を用いた見掛け比抵抗経時変化

図 3. 3-4 は、1 日の観測値とその前後 4 日間の値を用いて移動平均した見掛け比抵抗値について①同様に表示した図である。上段は xy 方向の、下段は yx 方向の結果であり、横軸は日付、縦軸は見掛け比抵抗を示している。

この表示では、短期的で極端な変化が平滑化されるので変化が見易く、やや長期的な変化の把握に適しており、10Hz (●) · 1.1Hz (△) · 0.011Hz (◇) が安定している事が良く判る。ただし、1 日ごとの表示で乱れる傾向にある結果についても平滑化され、緩やかな変化をしている様に見える事もあり、観測値との比較・検討を十分に行う必要がある。

③移動平均値を用いた見掛け比抵抗経時変化率

移動平均の結果に対して、観測初日の測定結果を基準とした変化率を求め作図した。図 3. 3-5 は xy 方向、図 3. 3-6 は yx 方向の結果であり、横軸は日付、縦軸は % を示す。また、これらの図面には、独立行政法人通信総合研究所が公表している地磁気擾乱の程度を示す指標である K 指数⁶⁾を併せて表示している。

xy 方向の結果を見ると、120Hz (○) 及び 0.14Hz (▲) 以外の周波数は、変動幅が概ね ±5% 程度に収まっている事が判る。また、yx 方向では 120Hz · 0.14Hz に加え 1.1Hz (△) の変動が大きいが、それ以外の周波数は変動幅が概ね ±5% 程度に収まっている。この結果より、見掛け比抵抗は観測期間中に安定しており、顕著な変化をしていない事が判る。

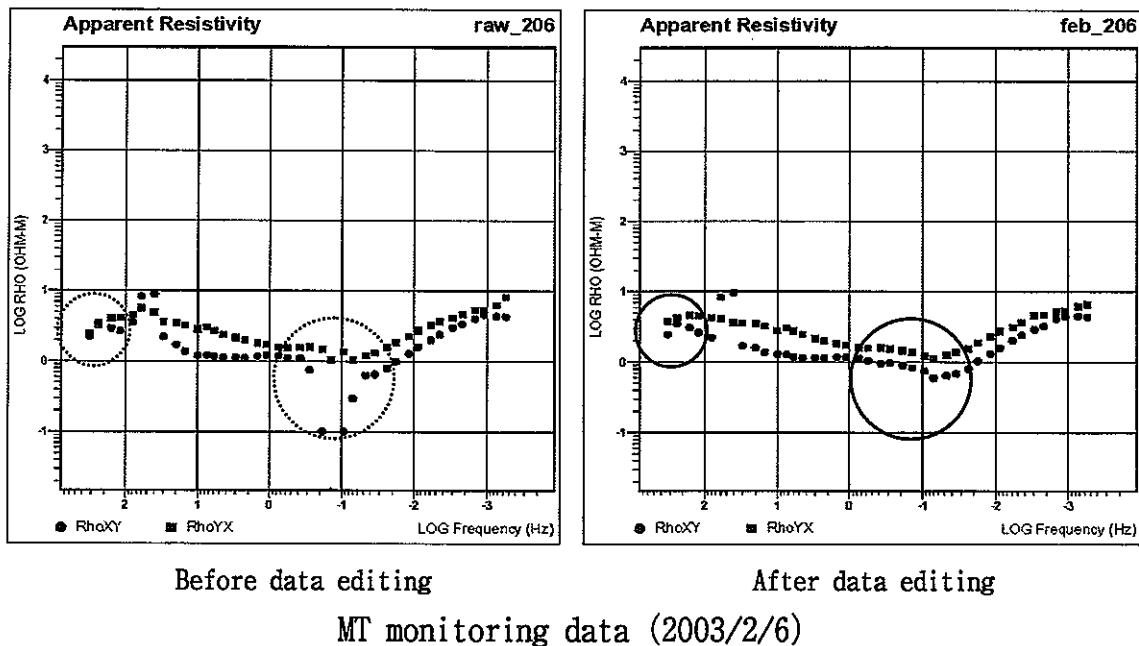
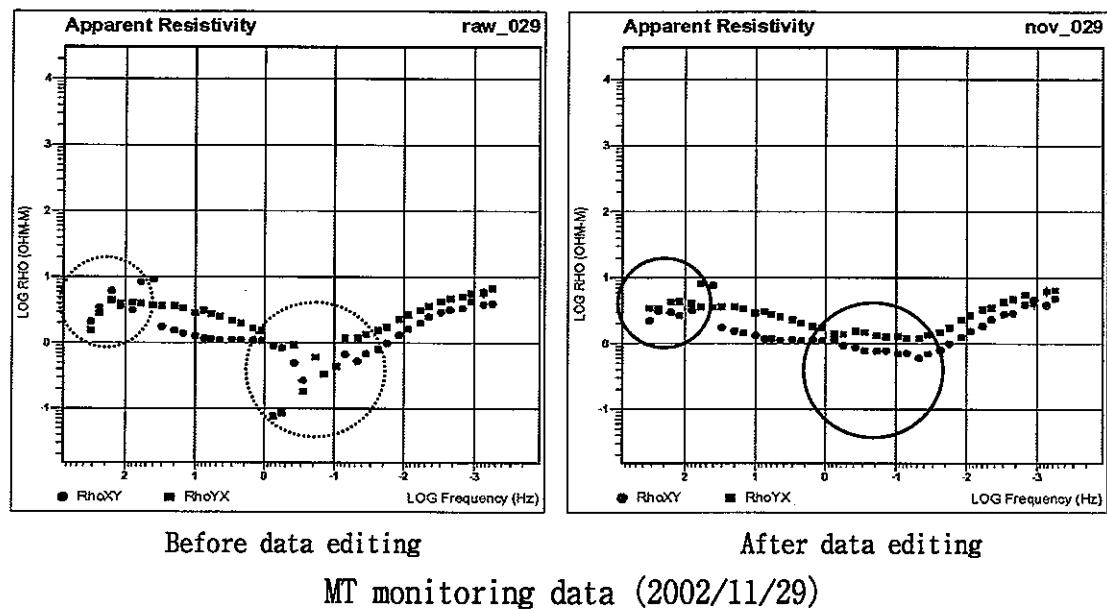
④K 指数

K 指数は地磁気擾乱の程度を示す指標であり、K 指数が大きいと大規模な電磁波が生じ、データ品質の向上が予想され、データ品質の評価に利用できる。K 指数はグリニッジ標準時 (UTC) に従い 3 時間毎に 10 段階で示され、午前 9 時から翌日の午前 9 時までをもって 1 日としており、観測スケジュールもこれと対応している。なお、図 3. 3-5、図 3. 3-6 ではある観測日における 10 個の K 指数の合計、及びその最大値の変化を表示した。

K 指数の変化について見ると、図中で点線で囲んだ 12 月初頭～12 月 18 日前後及び 1 月初頭～1 月 15 日前後の期間は K 指数の総和が 10 前後と低めであるが、それ以外の期間は概ね 20 前後の値を示している。この K 指数の小さい期間のうち、12 月月初頭～12 月 18 日前後について図 3. 3-5 を見ると、比較的安定している 0.011Hz についてもややばらつきが大きく、信号強度が弱いためノイズの影響を受けていると考えられる。

次に K 指数の最大値を見ると、2 以下を示す日は 100 日中 25 日間 (1/4) と少ない。通常の M T 法調査においては、K 指数を参考に測定品質を評価することが多く、K 指数の最大値が 2 以下

である場合は測定品質が劣る傾向にあることを考慮すると、本観測期間中は自然信号強度が強い傾向にあり、MT法の観測に適していたと考えられる。



データ品質が悪い部分（点線）がデータ編集後に改善（実線）

図3. 3-1 データ編集処理方法の検討（見掛け抵抗曲線）

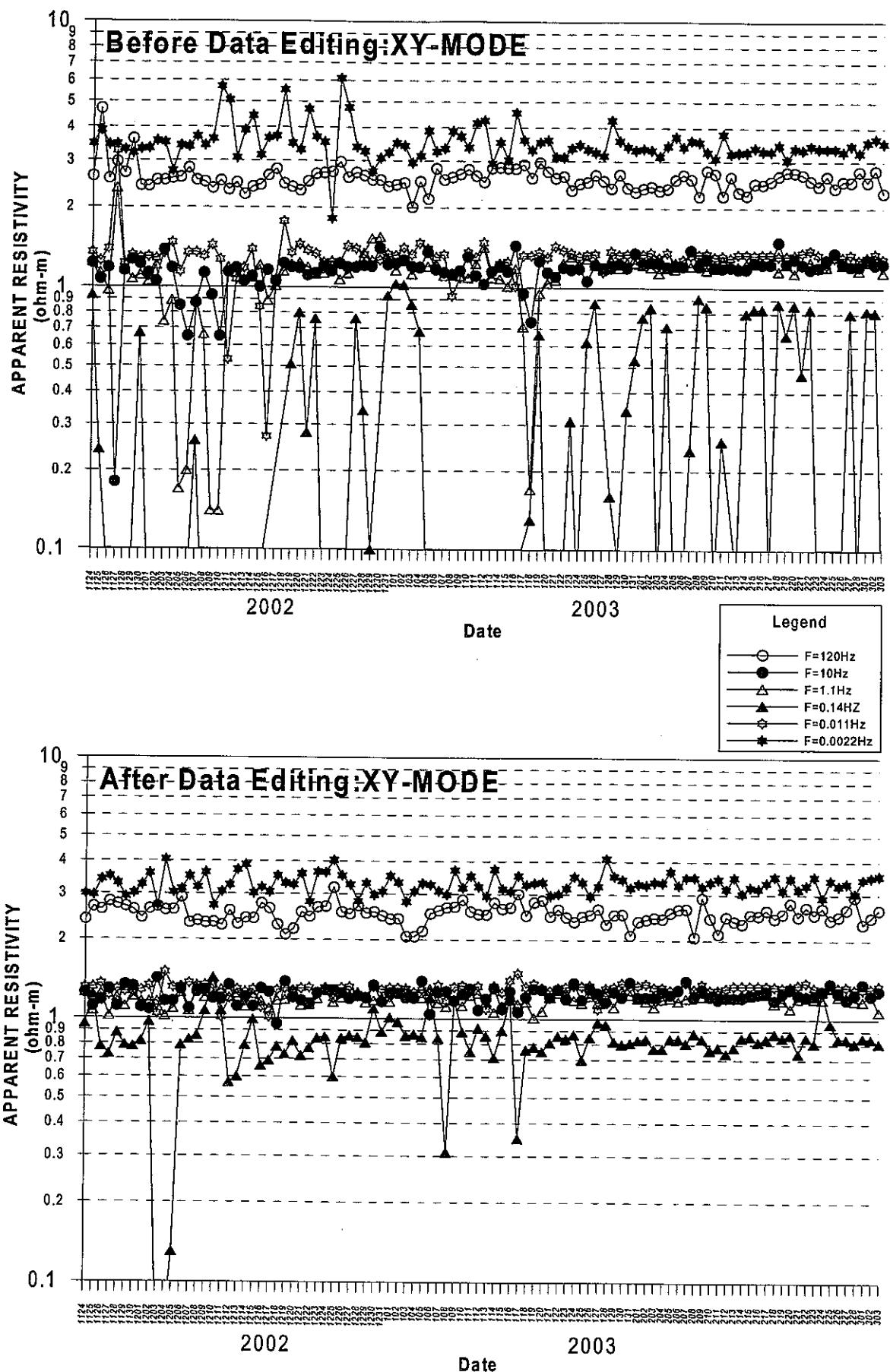


図3. 3-2 データ編集処理方法の検討 (xy 方向)
(上段: データ編集前 下段: データ編集後)

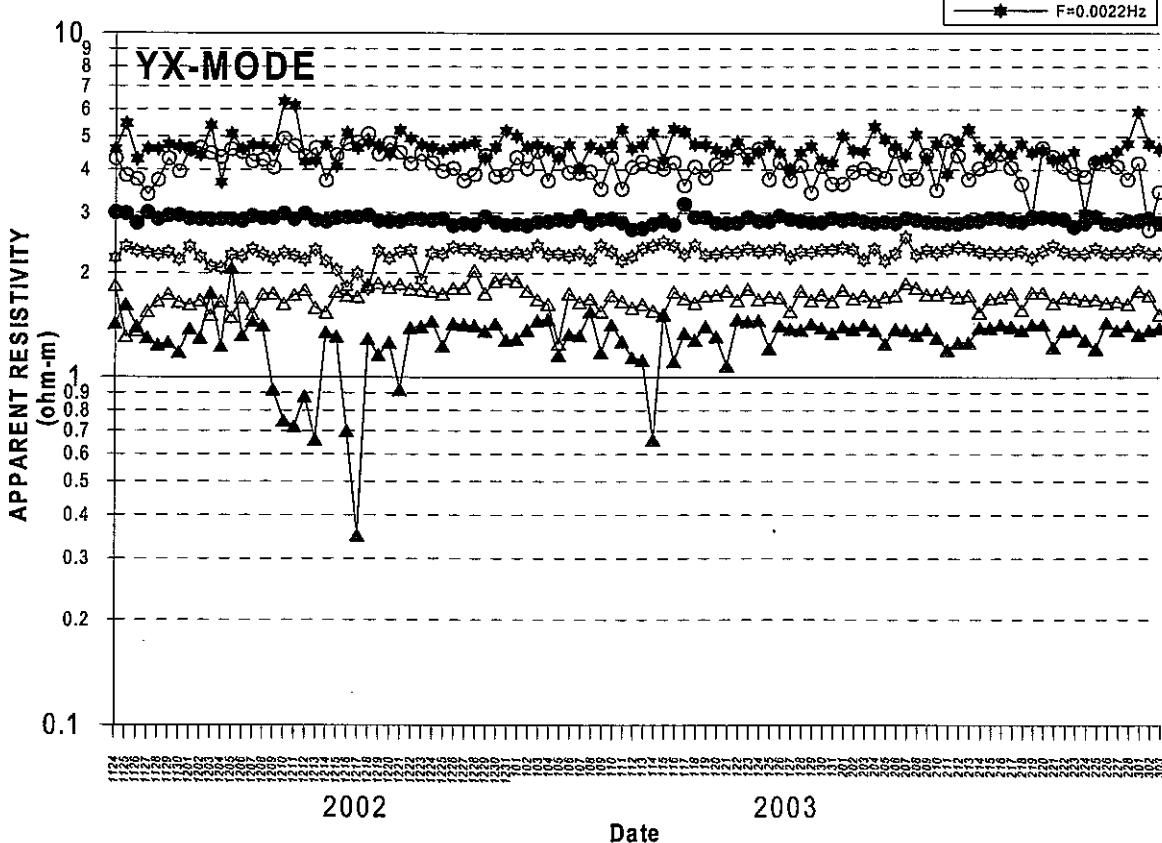
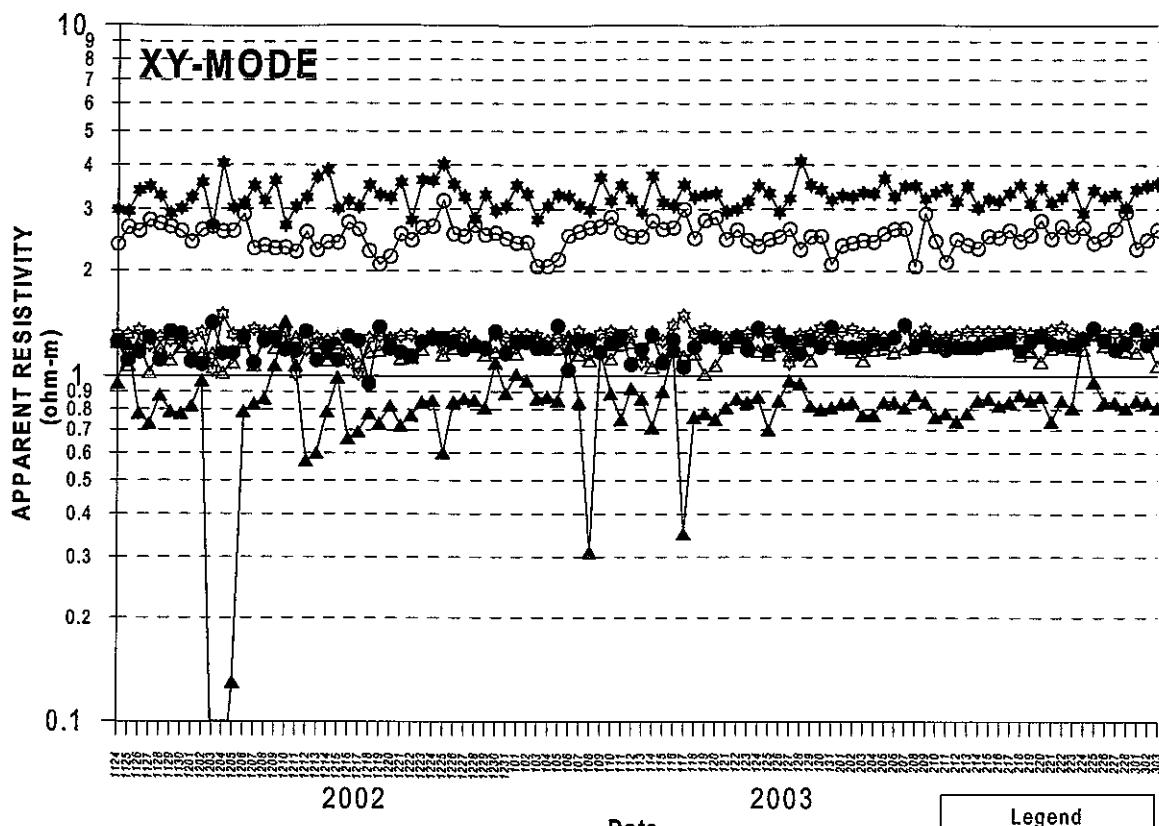


図3. 3-3 見掛け比抵抗経時変化図（観測値）
(上段：xy 方向 下段：yx 方向)

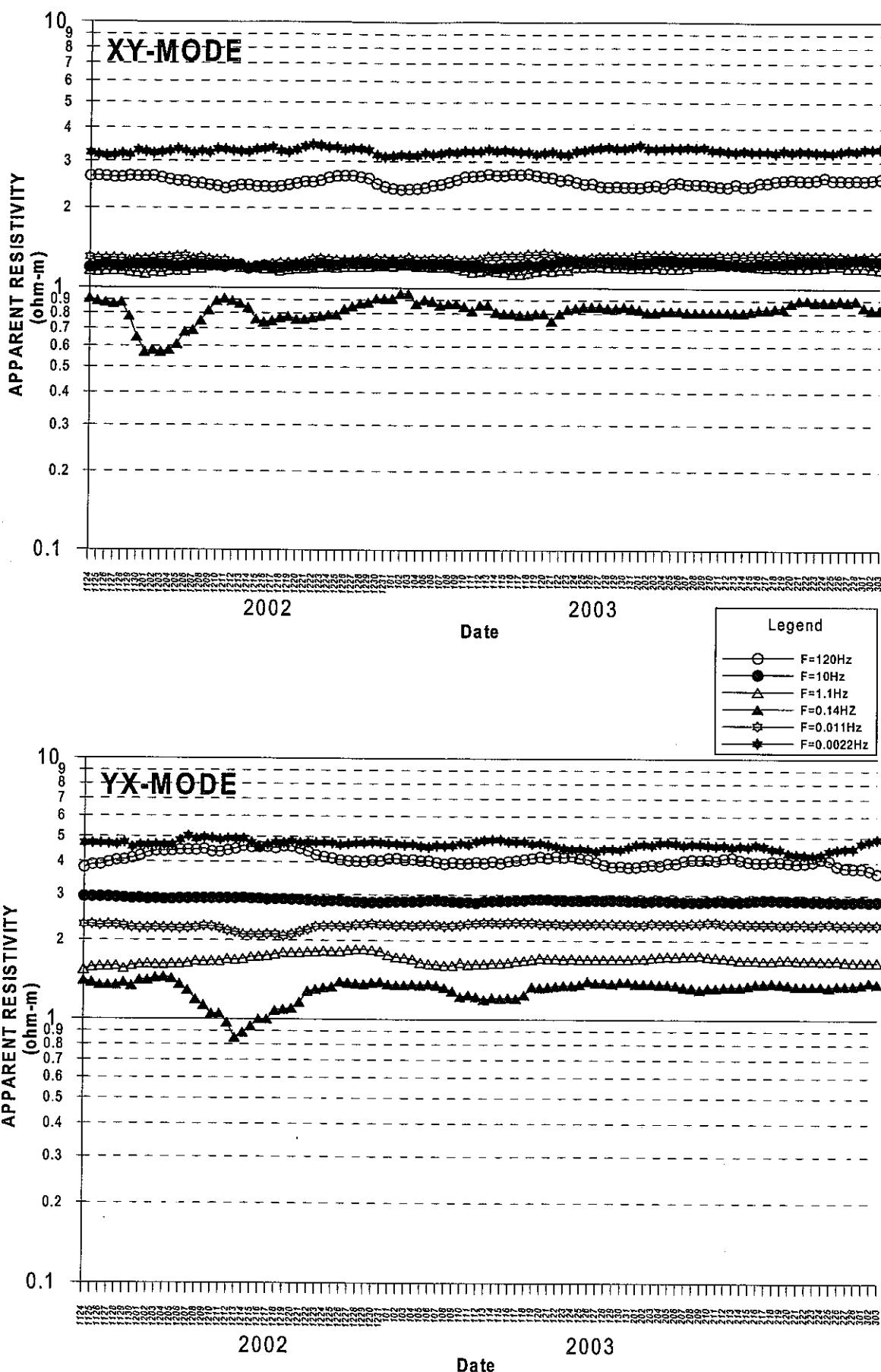


図3。3-4 見掛け比抵抗経時変化図（平均値）
(上段：xy 方向 下段：yx 方向)

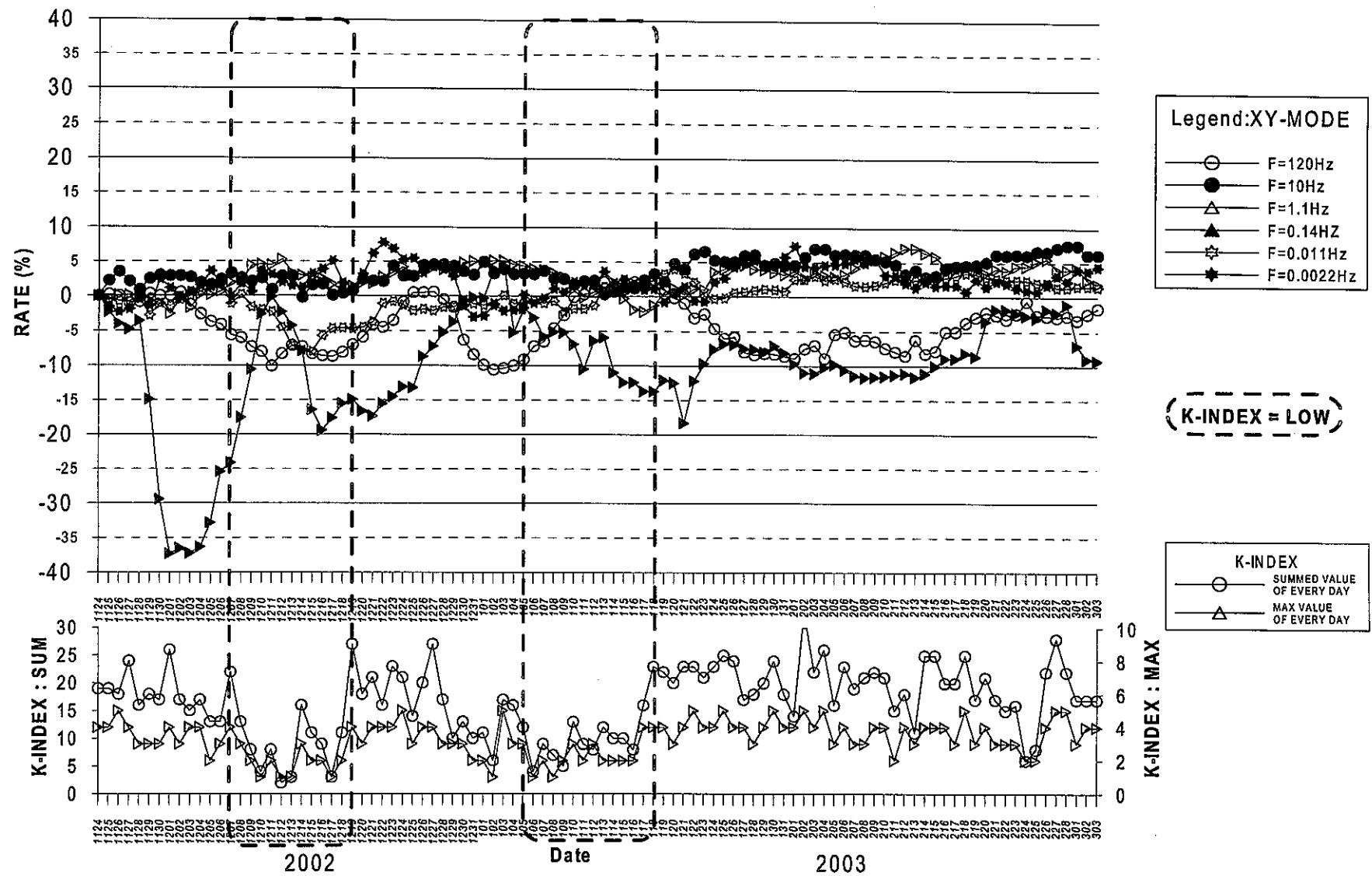


図3. 3-5 見掛け比抵抗変動図 (%: xy 方向: 平均値)

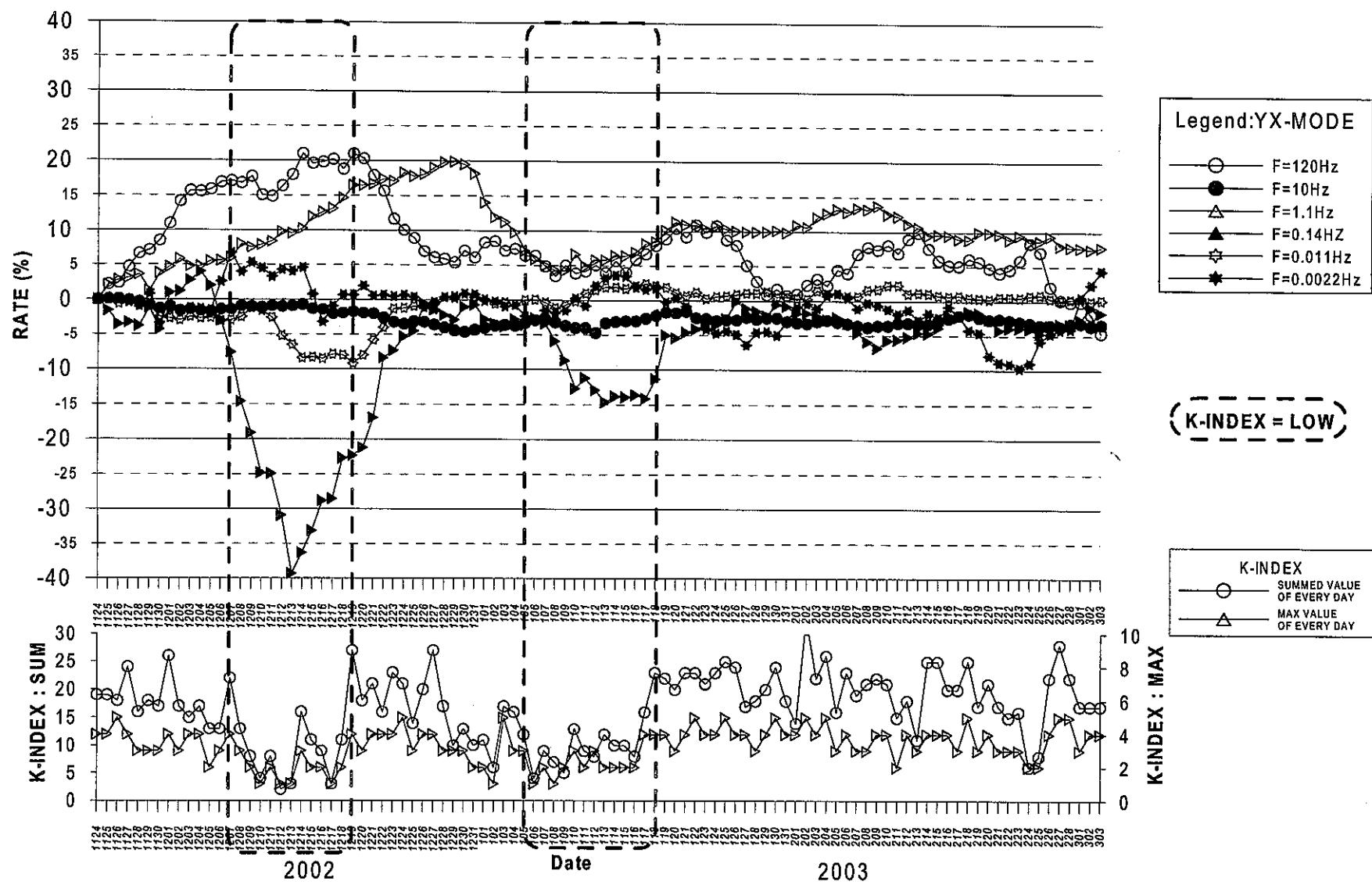


図 3. 3-6 見掛け比抵抗変動図 (%: yx 方向: 平均値)

3. 4 観測結果のまとめ

3. 4. 1 観測結果のまとめ

図3. 4-1に、本観測で得られた100日間の見掛け比抵抗観測データを用い、擬似断面として表示した。縦軸は周波数で、横軸は観測日を示す。上段はxy方向の、下段はyx方向の擬似断面であり、全観測周波数を用いて表示した。見掛け比抵抗は測定結果を基に11段階に分類・色分けをしており、同色の部分は同じ範囲内の値を示している。なお、黒点線で囲んだ部分はK指数が小さい（データ品質が悪い）期間である。

本図を見ると、両方向とも等見掛け比抵抗曲線（以下センターとする）がほぼ水平に延びており安定している事が判る。また、例えばyx方向の100Hz～数10Hzの周波数帯では、1月後半よりややセンターの連続性が劣る傾向があるが、それ以下の周波数帯のセンターの連続性を検討すると、高周波数部のセンターの変化と関連するような変化は見られず、本観測期間中には明瞭な見掛け比抵抗の変化はない事が確認できる。よって、本観測期間中には、見掛け比抵抗値に影響を及ぼすような顕著な地下水分布の変化は起きていないと考えられる。

今回実施したようなMT法長期観測はまだ事例が少なく、この手法の解析精度や限界を十分に把握しているとは言えない。また、地震観測データと対応させて検討しない限り、手法の有効性を評価するのは難しい。そのため、今後も観測を継続してデータの蓄積を図る必要があると考える。

3. 4. 2 今後への提言

今後長期観測を実施する場合の留意点として、以下の事が挙げられる。

①長期観測の必要性

岩盤の比抵抗は、構成物質、間隙水量、塩分濃度などに依存する。そのため、比抵抗を長期観測すれば、地質環境の変化や地下水の分布・流動の変化を、地表から把握できる可能性がある。ただし、他機関による長期観測調査結果³⁾を参照すると、観測された変動幅は10%前後と小さく、かつその変化は長期的に徐々に変化する傾向にあるとされている。

ここで、図3. 3-5及び図3. 3-6の10Hzの変動に着目すると、xy方向はやや増加傾向で、yx方向はやや減少傾向にあるのが判る。MT法観測データは、自然信号強度・測定日の天候状況及びノイズ発生状況に品質を左右されるため、少なくとも数%の誤差を常に含んでいることを考慮すると、この数%程度の見掛け比抵抗の変動は測定誤差と捉えるのが妥当であろう。しかし、何らかの微少な変化を抽出した可能性も完全に否定することはできない。このことを判断するには、100日間の観測では短く、より長期の観測（可能なら年単位）を行うことで、その傾向や再現性を詳細に検討することが必要である。

幌延地区は季節によって自然条件が全く異なる地域である。特に、冬季の積雪量は多く、春期以降には融雪による地下水流量の変動があると考えられる。そのため、長期間の観測を行えばこのような地下水の変動による変化を捉える可能性もある。

②観測点の増設：リモートリファレンス処理によるノイズ軽減

日本国内においてMT法観測を実施する場合、人工ノイズの影響がない地点を探すことは非常に難しく、多少はその影響を被ることやむを得ない。特に、連続観測の場合、電源などの施設が

必要となるため、道路などから極端に遠ざけることは難しい。本観測結果でも、例えば40Hz及び60Hzのxy方向の見掛け抵抗は、人工ノイズの影響で異常な値を示している。また、1点だけの観測のため、これらノイズの影響が目立つ傾向がある。

MT法調査では、調査地域から離れた地点にリモート点を設け、その磁場信号を参照して観測データより局所的なノイズの除去を図るリモートリファレンス処理が実施されている。幌延地域で平成13年度に実施されたMT法調査結果²⁾を見ても、本地域においてリモートリファレンス処理が有効であることが確認されている。以上のことより、仮にリモート点を設置して連続観測を実施し本処理を適用すれば、よりデータ品質の安定した連続観測が可能になると期待できる。

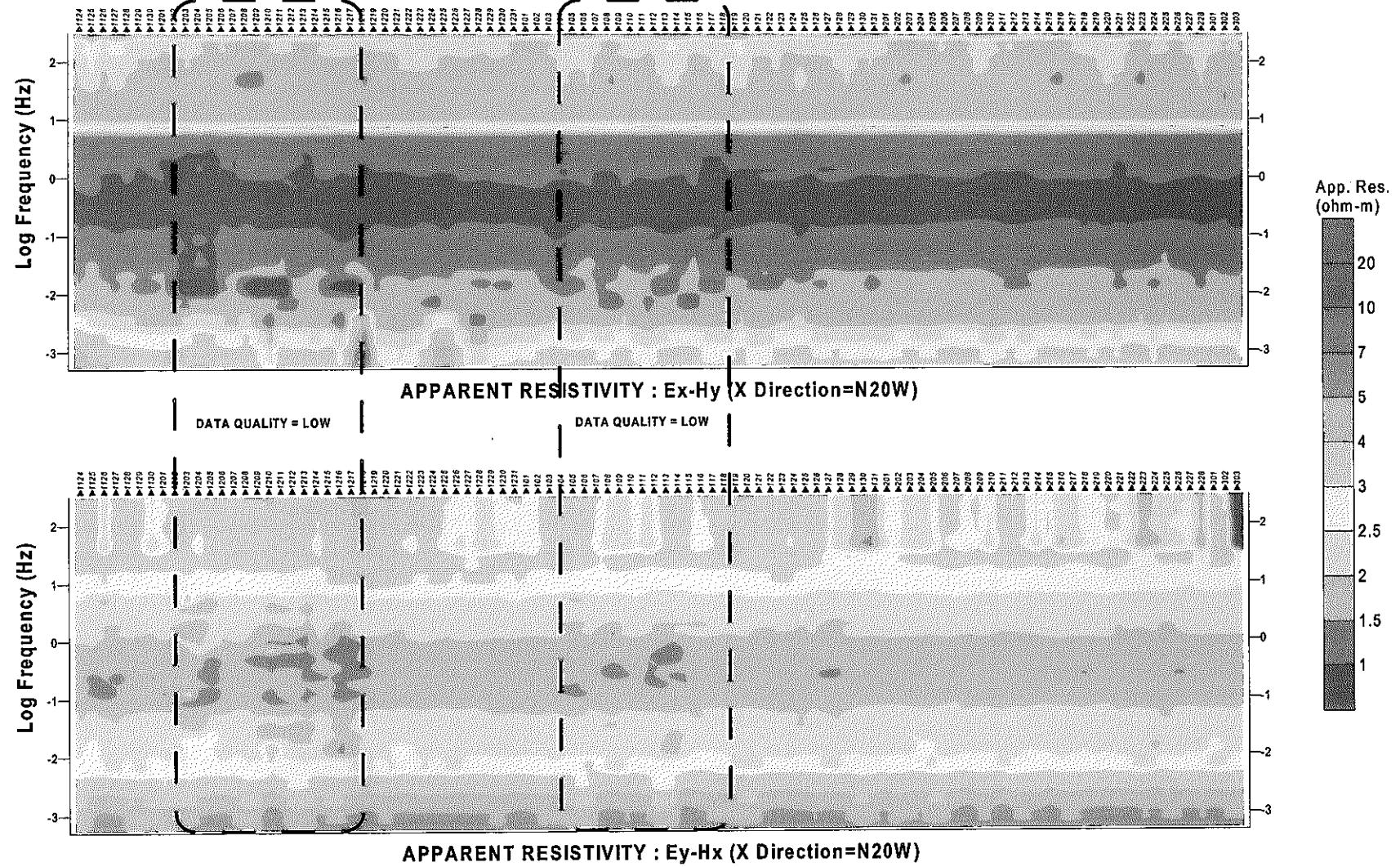


図3。4-1 見掛け比抵抗経時変化擬似断面図（観測値）

4 結論

地下深部の比抵抗変化の把握を目的として、MT法長期連続観測システムを幌延町北部に設置し、100日間の無人連続観測を実施した。その結果、以下の事が判った。

- (1) 無人長期観測が可能な観測システムを構築し、観測期間中安定したデータ取得を実施した。
- (2) 長期観測では概ね良好な結果が取得できた。ただし、周波数によっては人工ノイズの影響や自然条件の影響で、品質が劣る部分がある。
- (3) 見掛け比抵抗の経時変化を検討した結果、明瞭な見掛け比抵抗の変化は起きていないことを確認した。このことより、本観測期間中には、見掛け比抵抗値に影響を及ぼすような顕著な地下水分布の変化は起きていないと考えられる。

比抵抗の長期連続観測技術は、まだ運用実績が少なく、その観測日数や点数などについても明瞭な指針はない。今後は、より長期間の観測を行い、地震観測データと比較検討し、本手法の有効性を検証することが必要である。また、地域内にリモート点を設置して観測を行い、リモートリファレンス処理を実施すればデータ品質の向上が見込まれ、より観測精度は向上すると考える。

以上

参考文献

1. 藤原、他、：“水沢・江刺における広帯域 MT の固定連続観測（序報）”、
地球電磁気・地球惑星圈学会第 102 回講演会(1997)
2. “電磁法による物理探査”、核燃料サイクル開発機構、
JNC TJ1420 2001-036、(2001)
3. “平成 12 年度 地熱探査技術等検証調査 貯留層変動探査法開発 テーマ 3
電気・電磁気探査法開発”、新エネルギー・産業技術総合開発機構、(2001)
4. “幌延深地層研究計画 平成 13 年度調査研究成果報告”、核燃料サイクル開発
機構、JNC TN1400 2002-004、(2002)
5. “物理探査用語辞典”、物理探査学会、(1979)
6. “物理探査ハンドブック”、物理探査学会、p.312-p.316, (1999)

付 錄



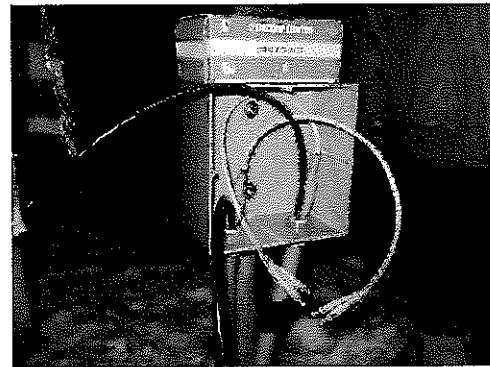
観測基地



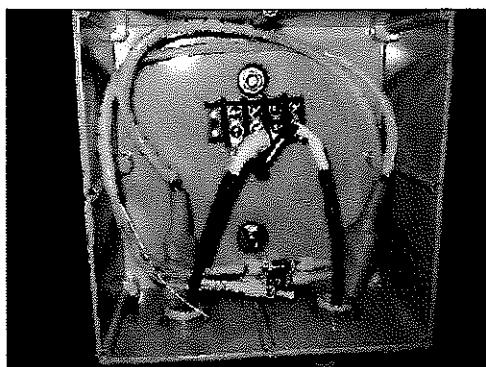
制御用PCとAC-DCコンバーター



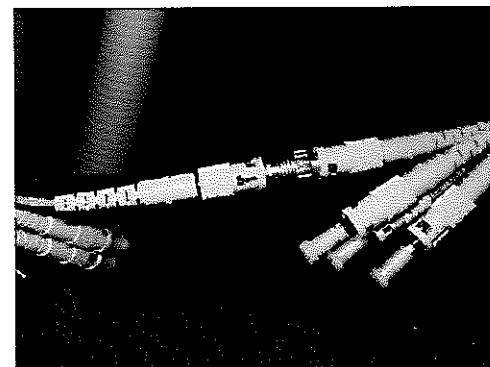
AC-DCコンバーター背面



光ケーブル用中継BOX

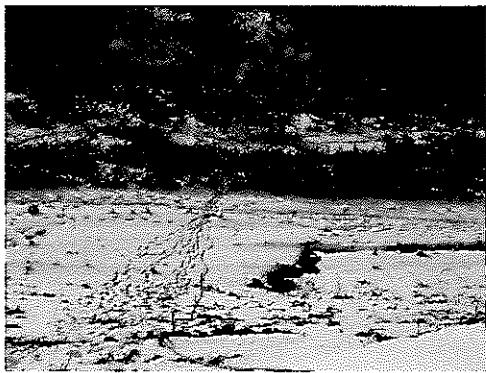


光ケーブル用中継BOX内部配線

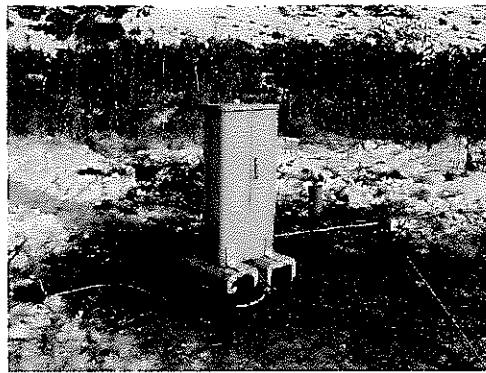


光ケーブル

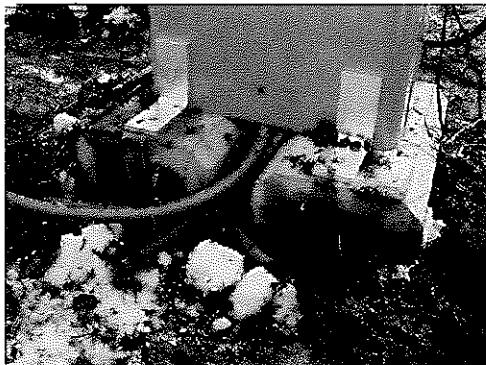
付録1 現地作業写真（観測基地及び光ケーブル）



観測点遠景



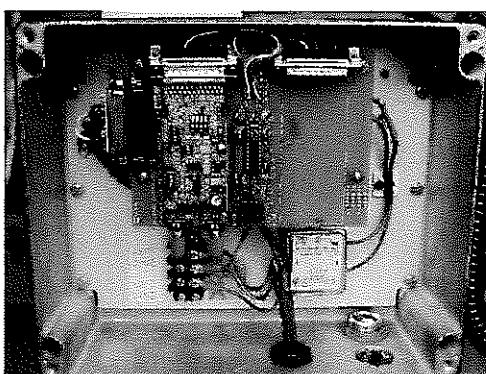
観測器収納ケース



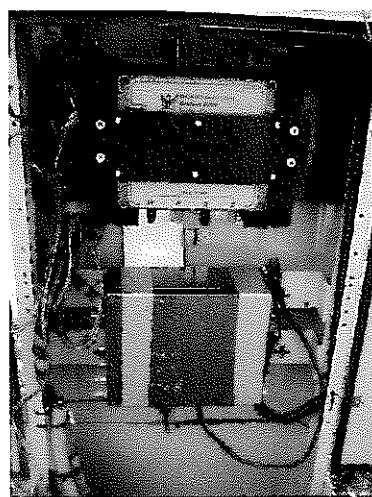
観測器収納ケース底面



観測器結線状況



電源及び光ケーブル用中継BOX内部配線



観測器収納ケース 内部

付録 1 現地作業写真（観測器及び収納ケース）



コイル埋設孔



コイルと収納パイプ



コイル埋設後（Hx）



コイル埋設後（Hz）

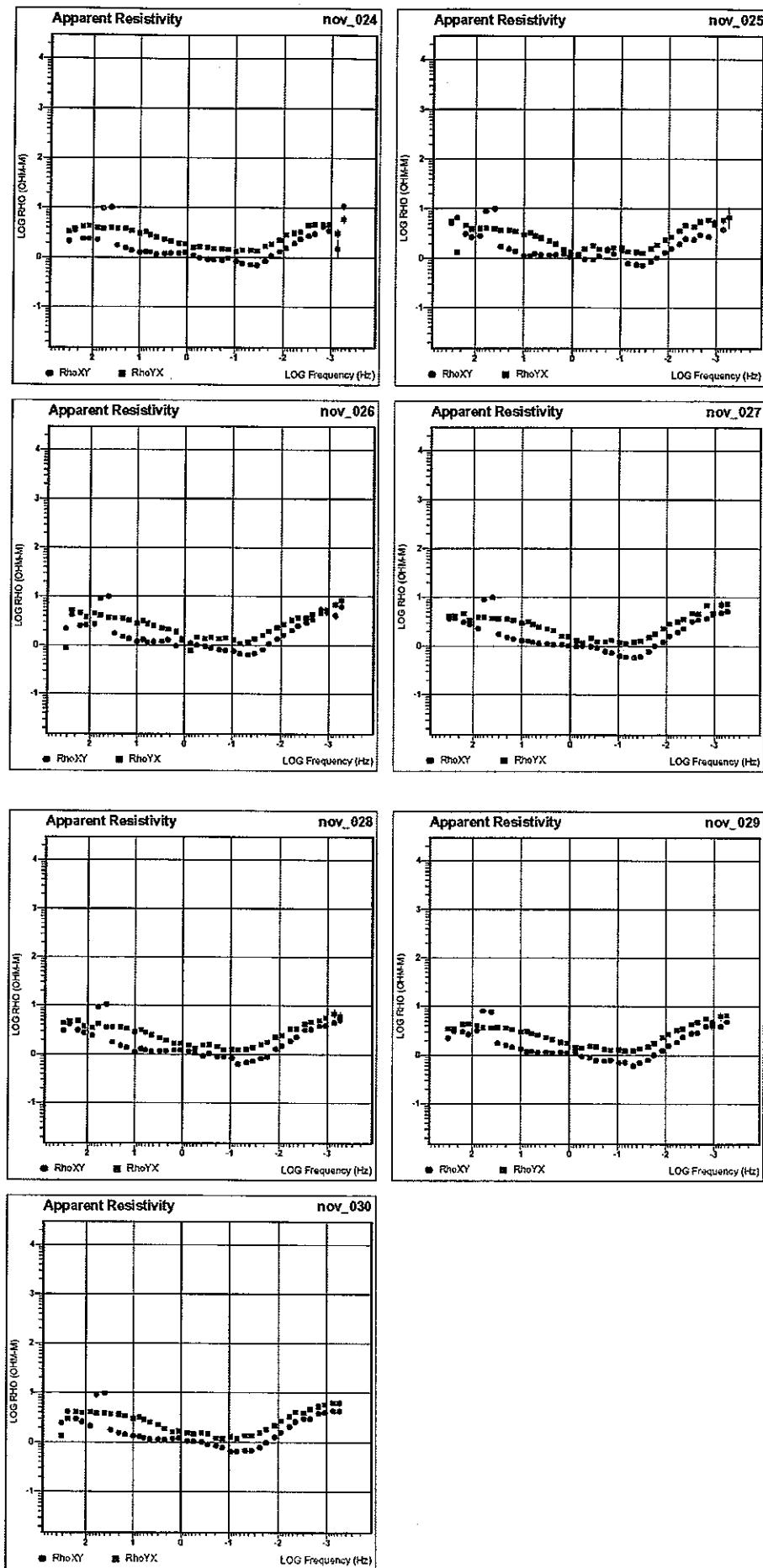


電極と収納パイプ

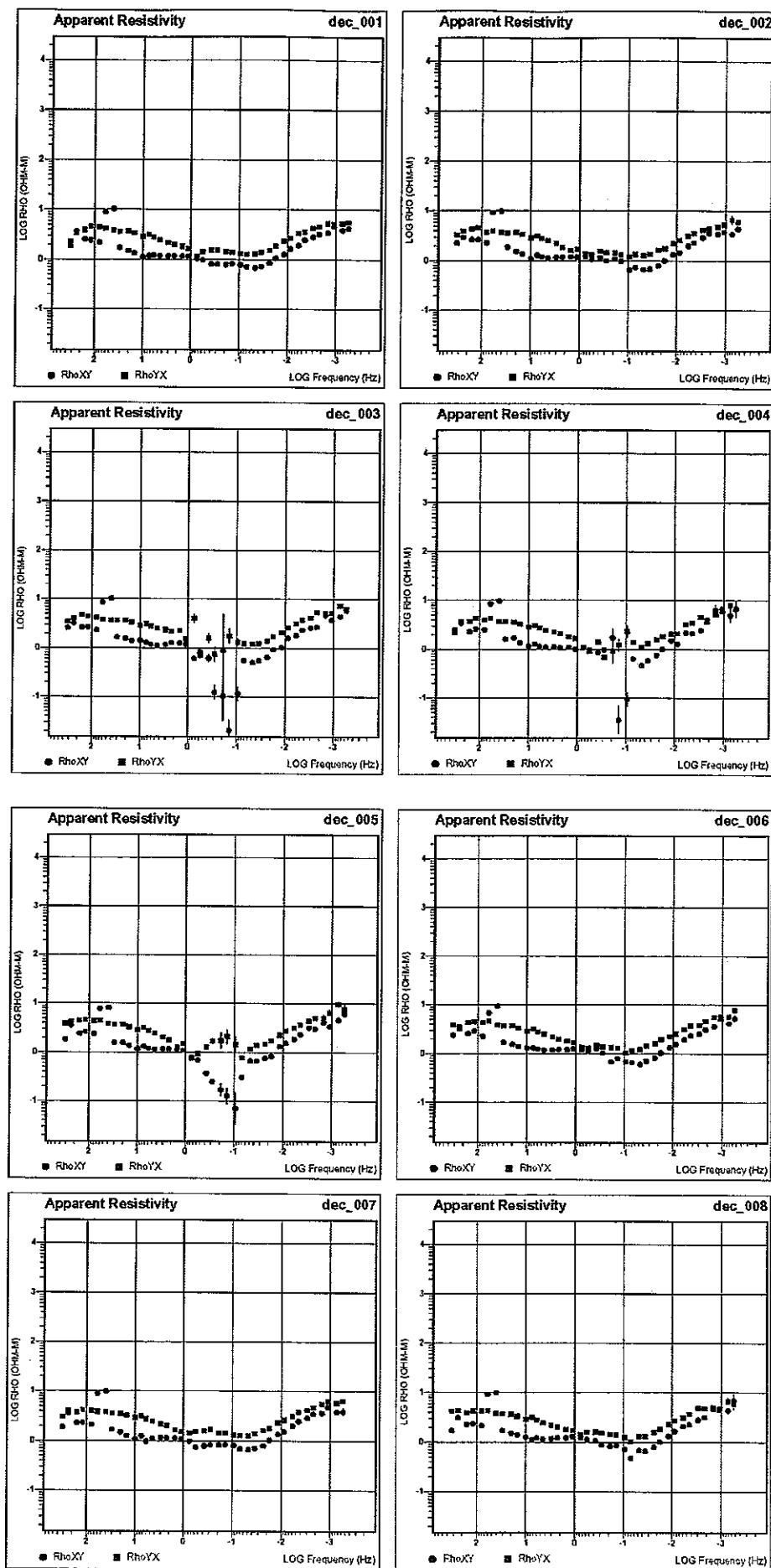


電極埋設後

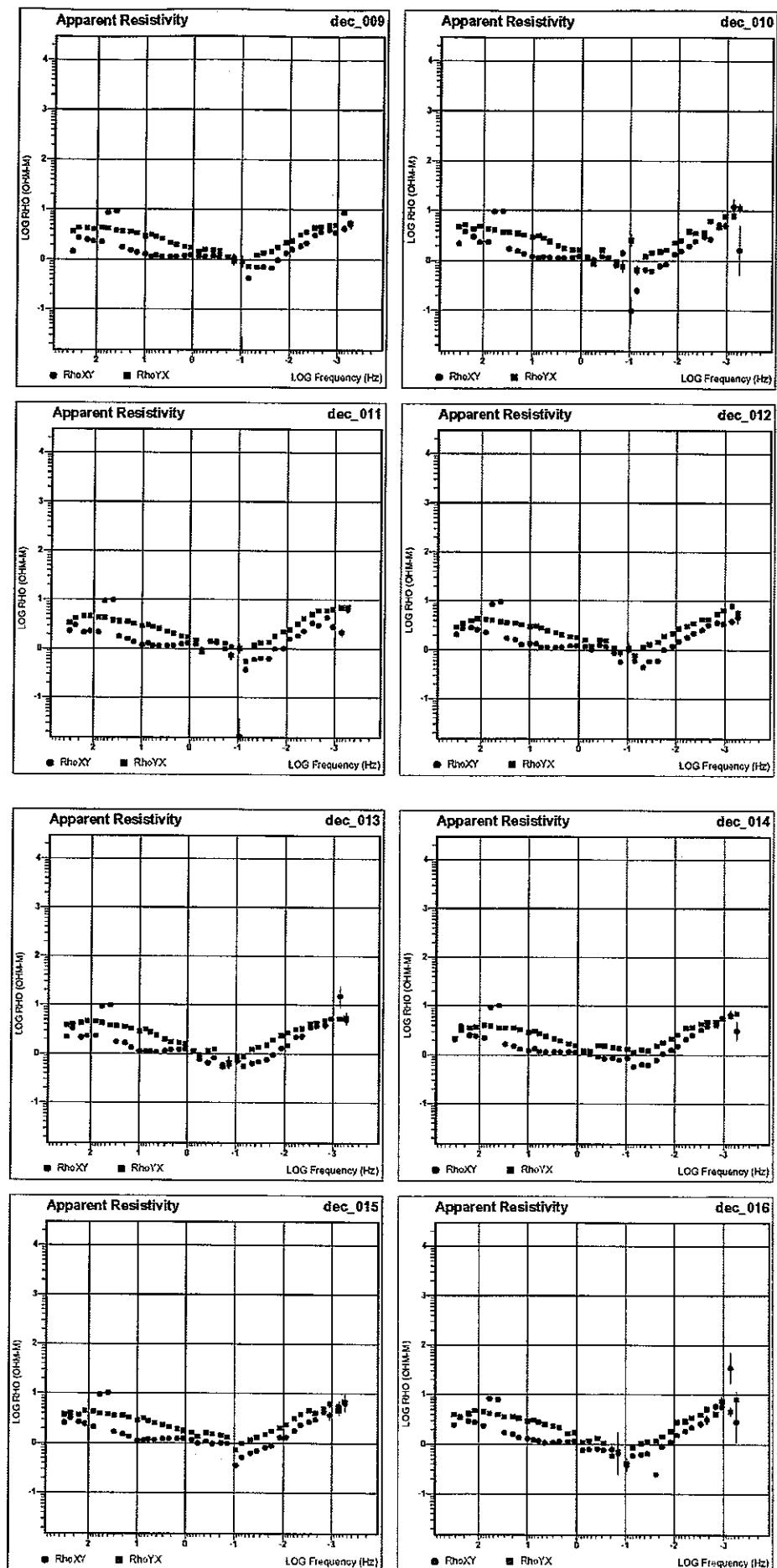
付録1 現地作業写真（コイル及び電極）



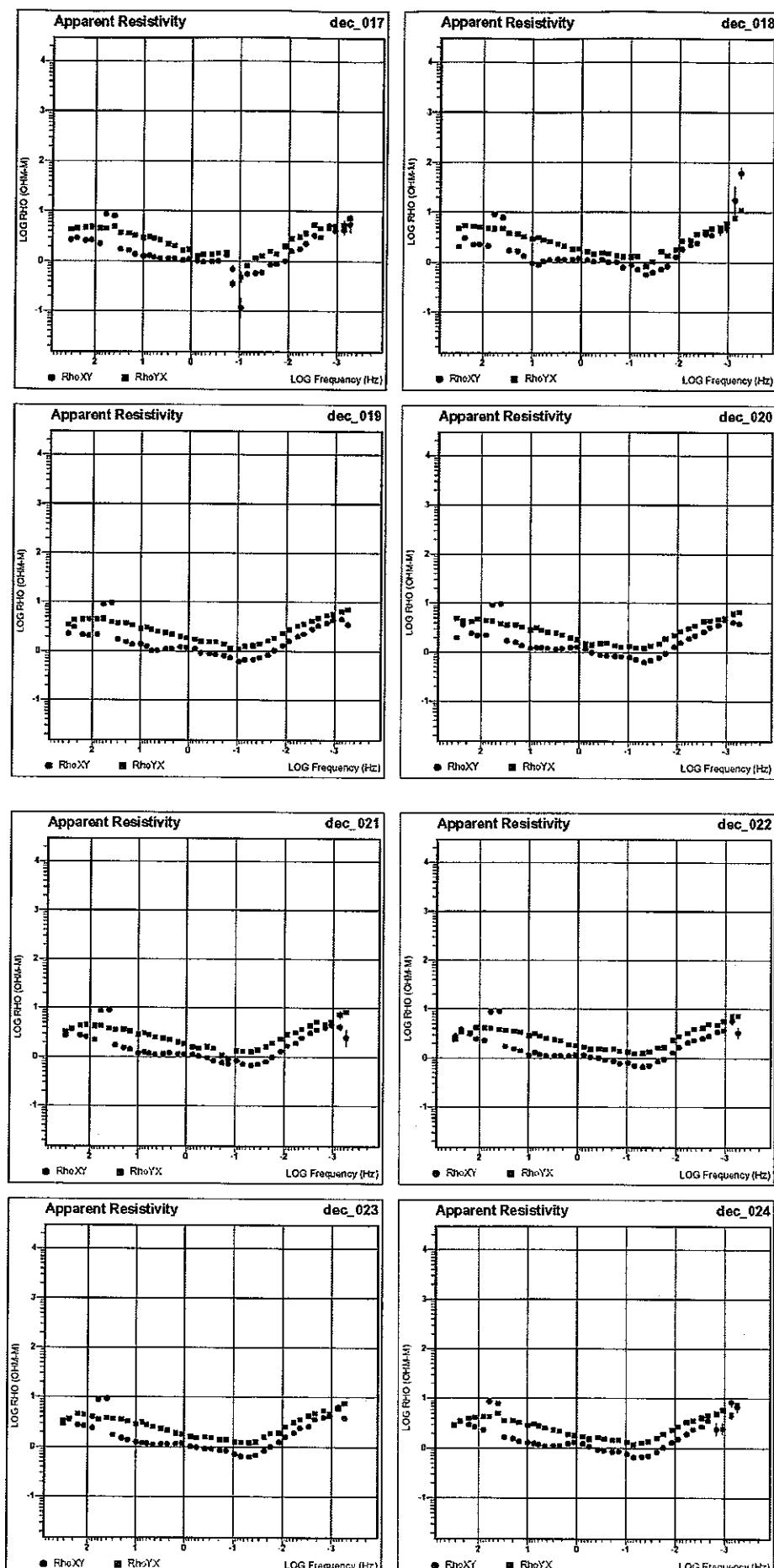
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2002/11/24～2002/11/30)



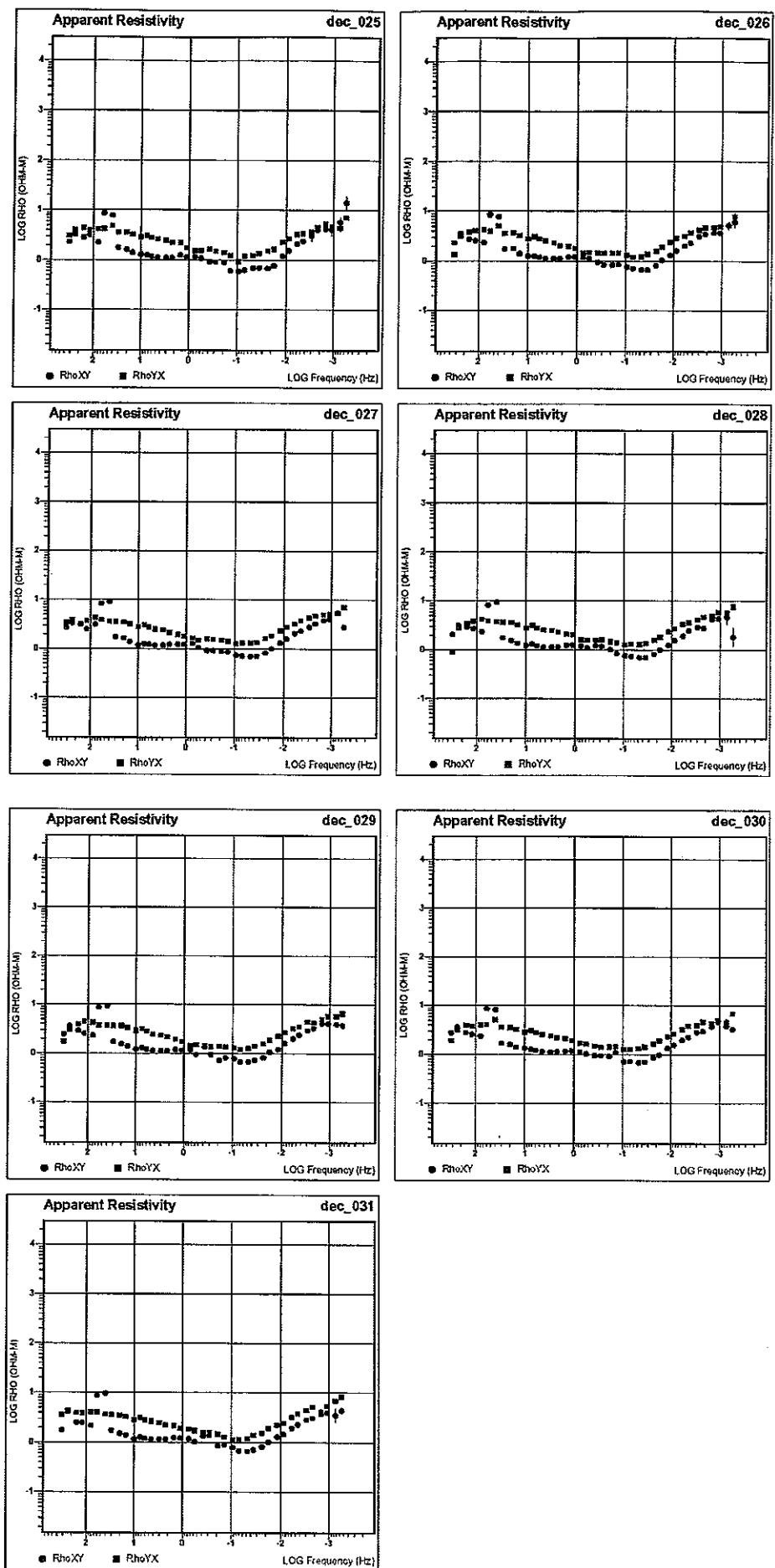
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2002/12/1~2002/12/8)



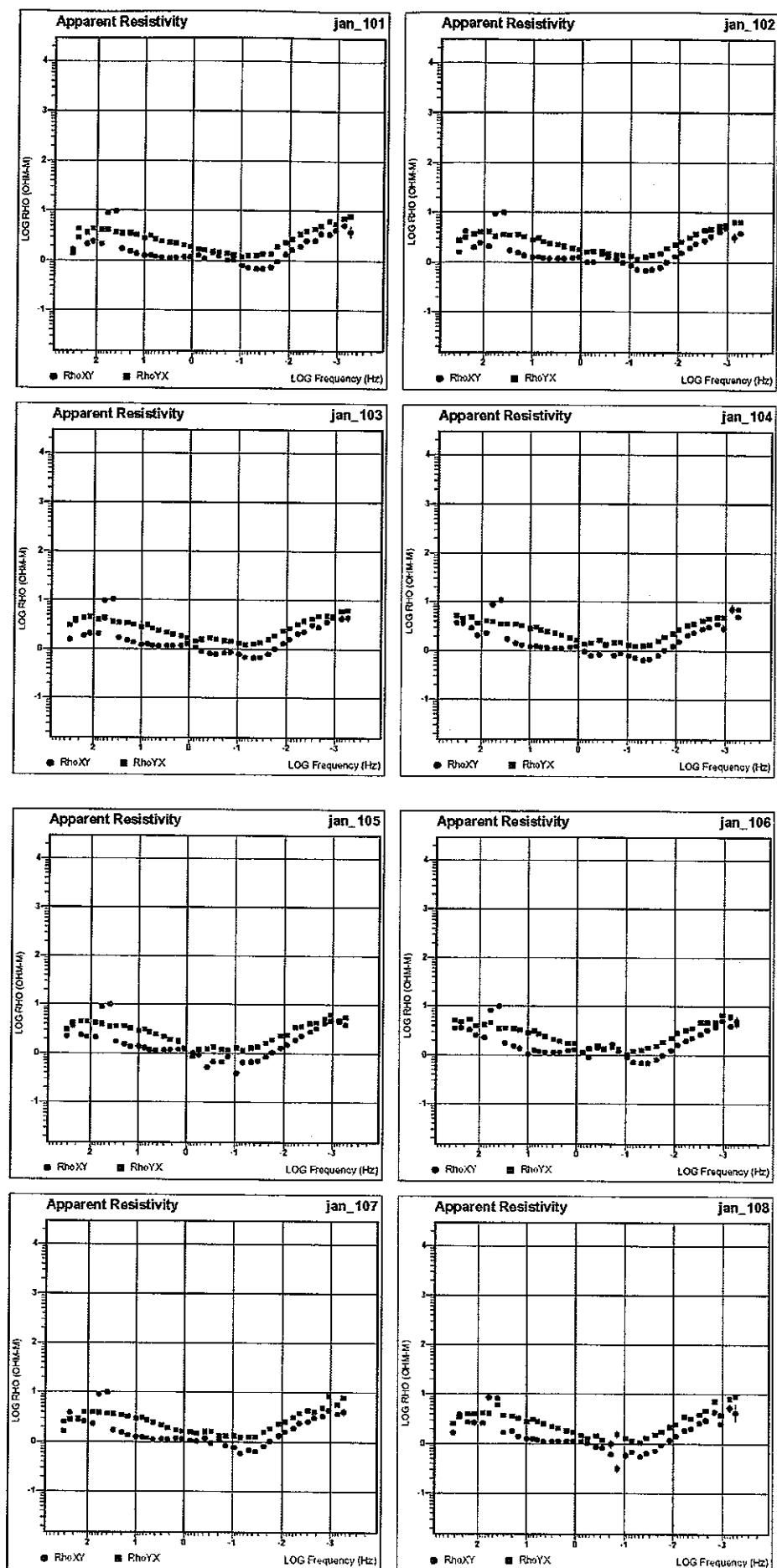
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2002/12/9~2002/12/16)



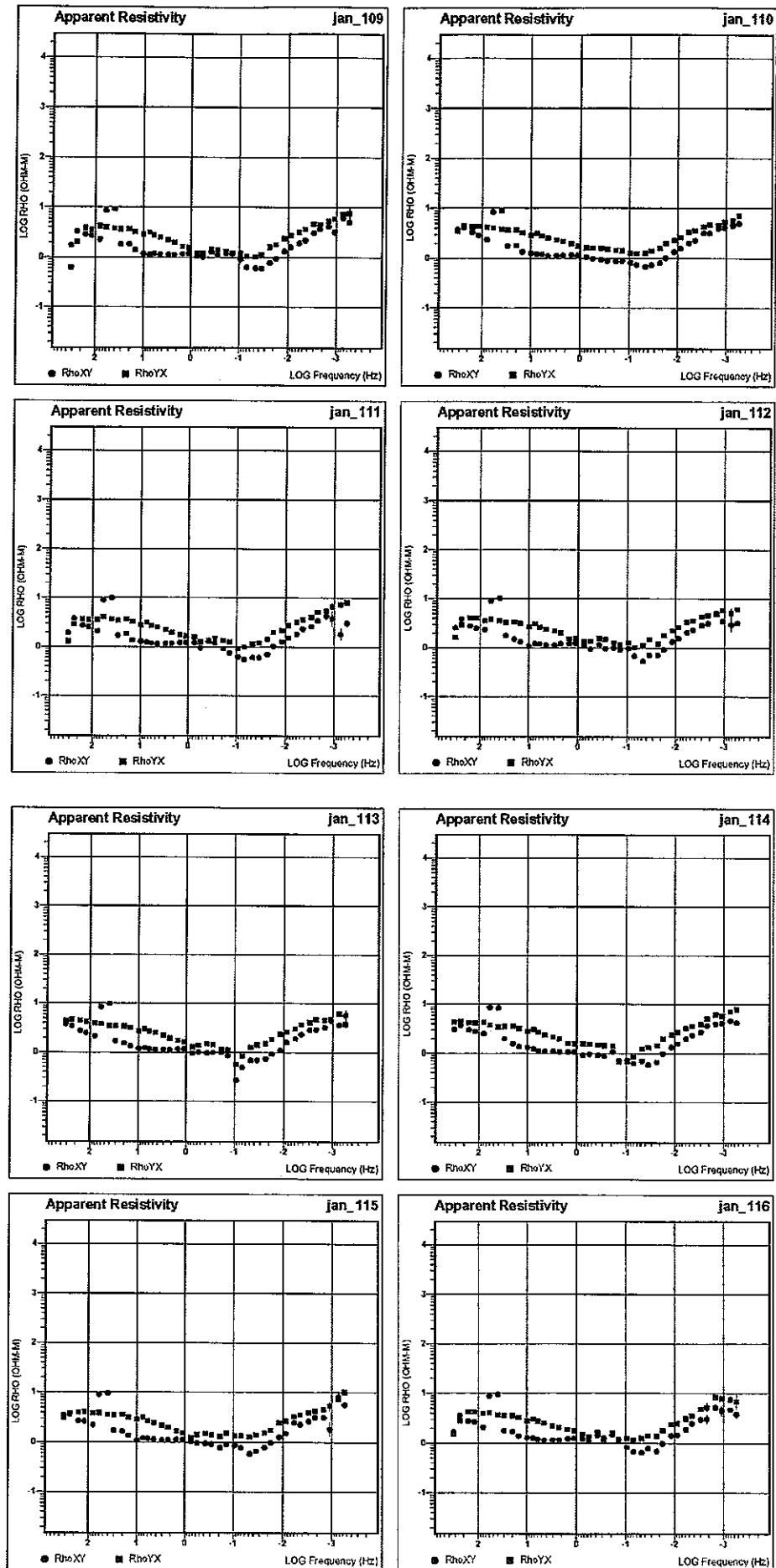
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2002/12/17～2002/12/24)



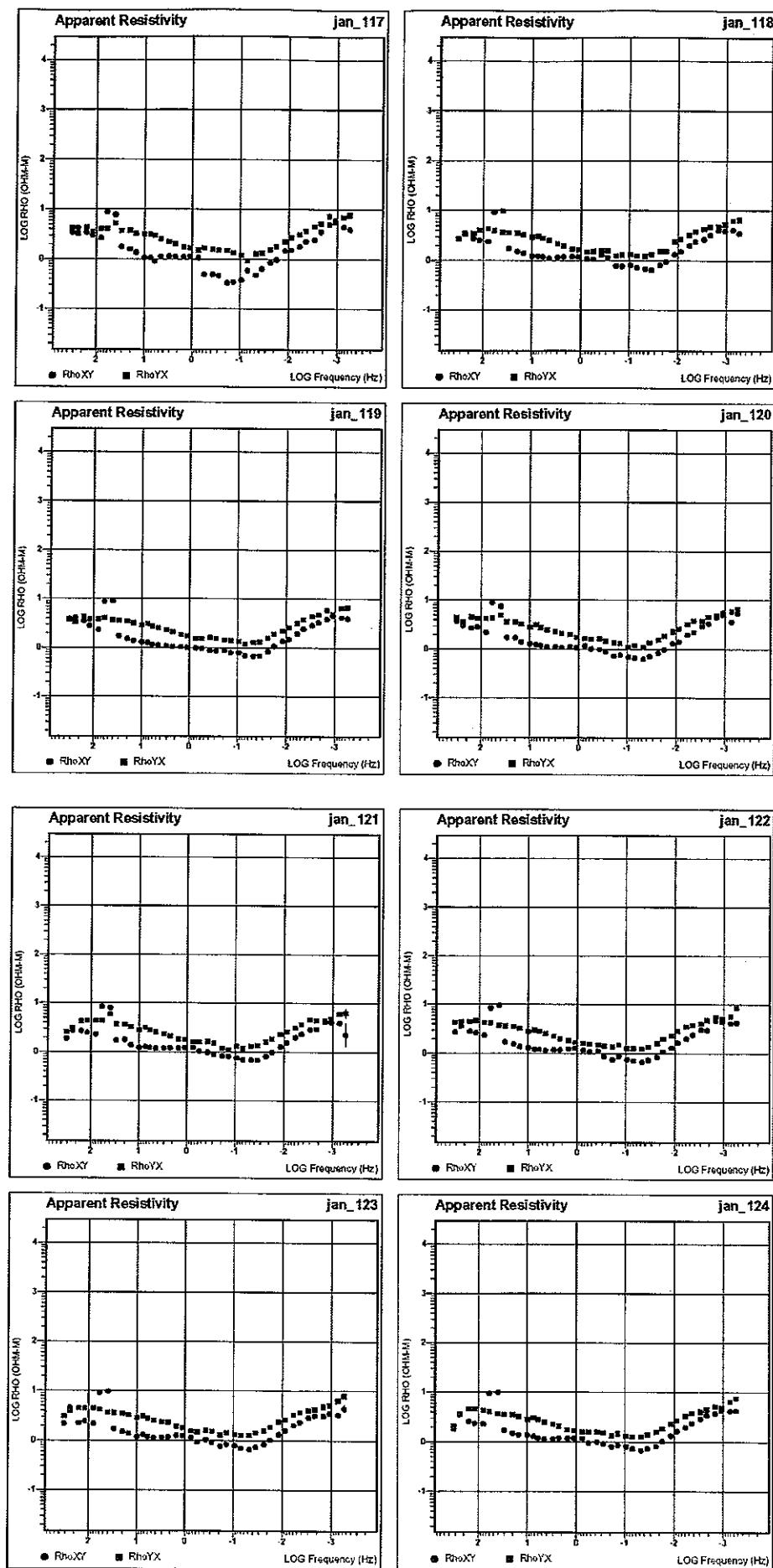
付録2 見掛け比抵抗曲線図（2002/12/25～2002/12/31）



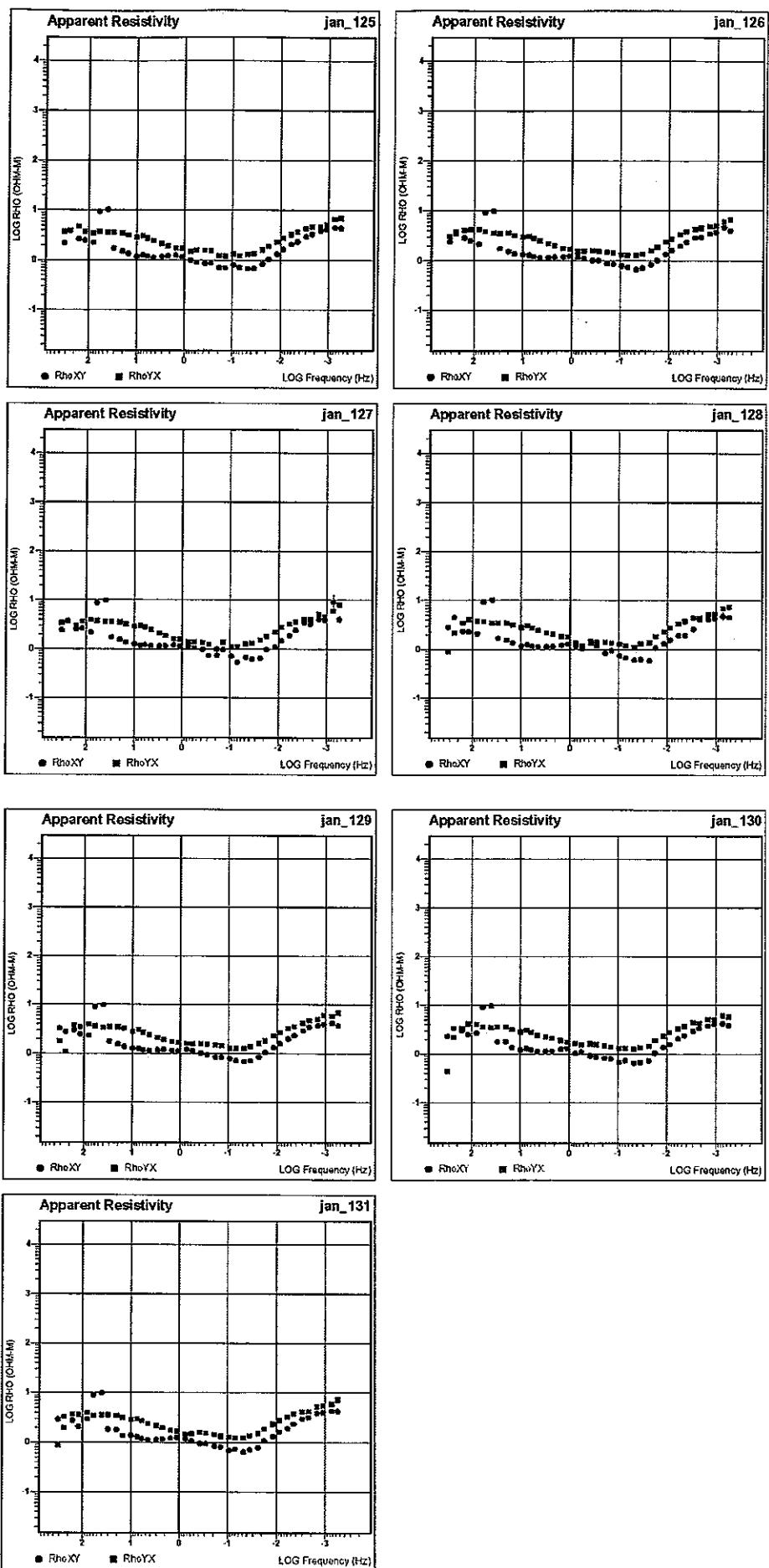
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2003/1/1~2003/1/8)



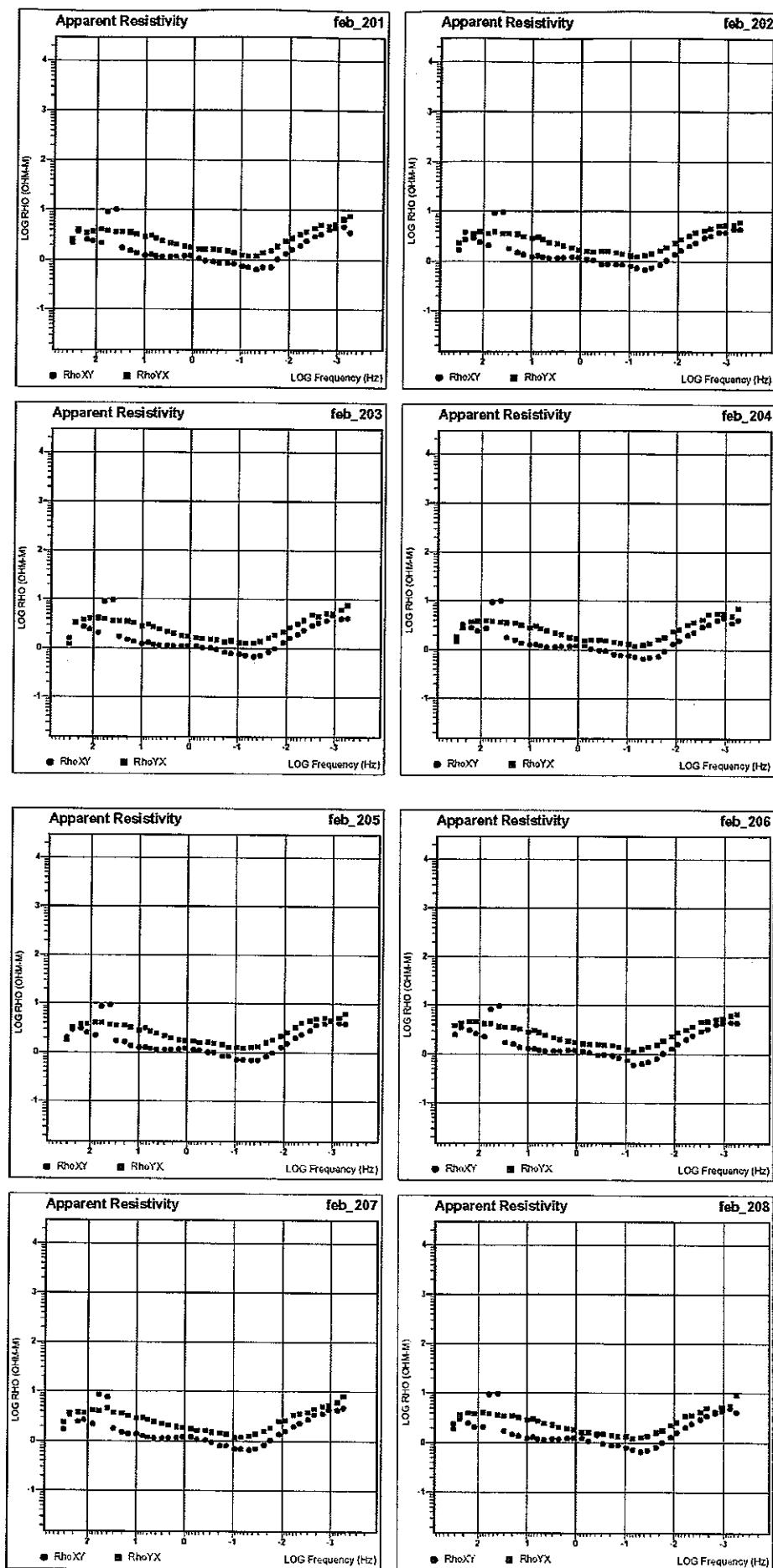
付録2 見掛け比抵抗曲線図（2003/1/9～2003/1/16）



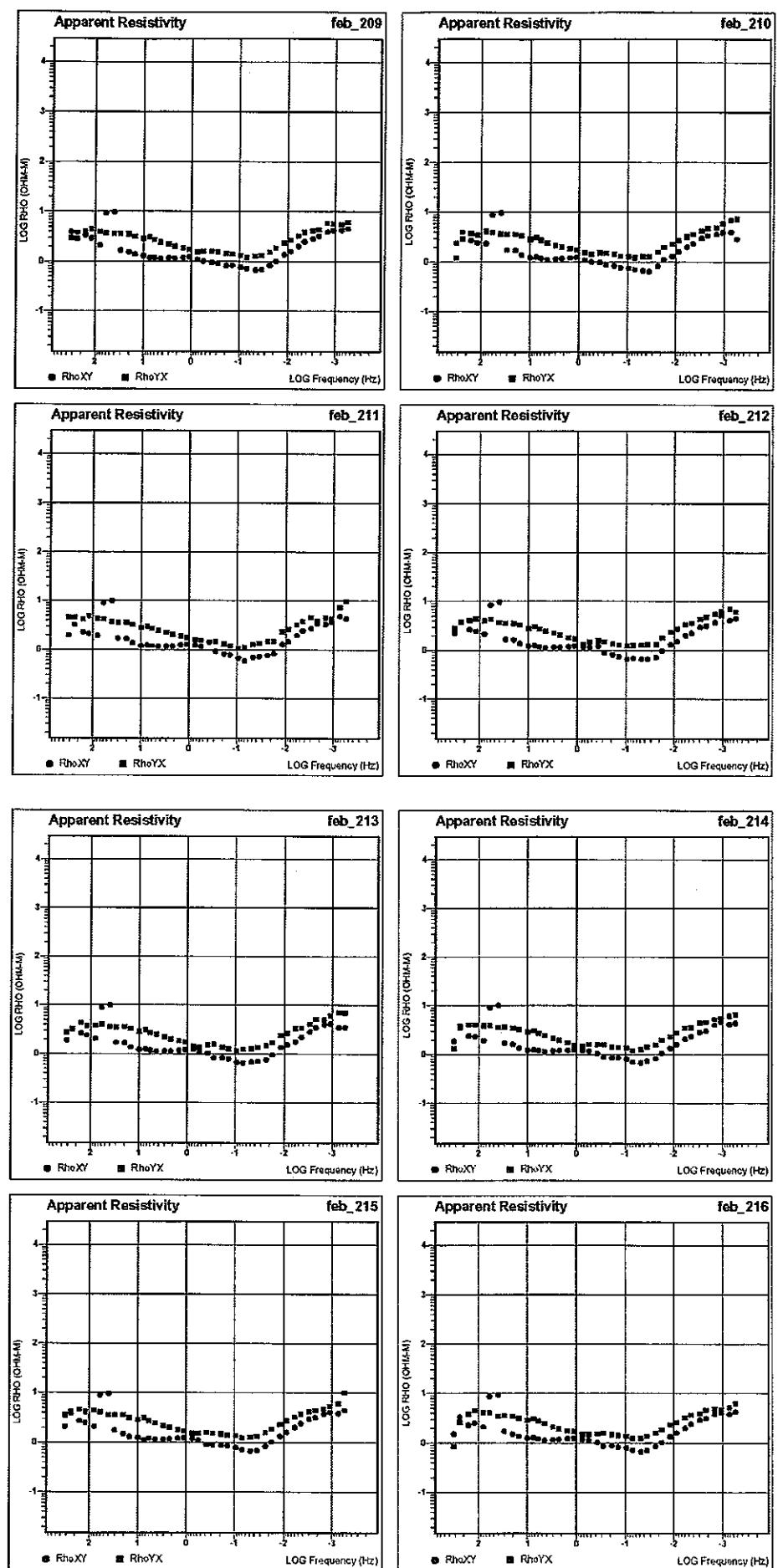
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2003/1/17～2003/1/24)



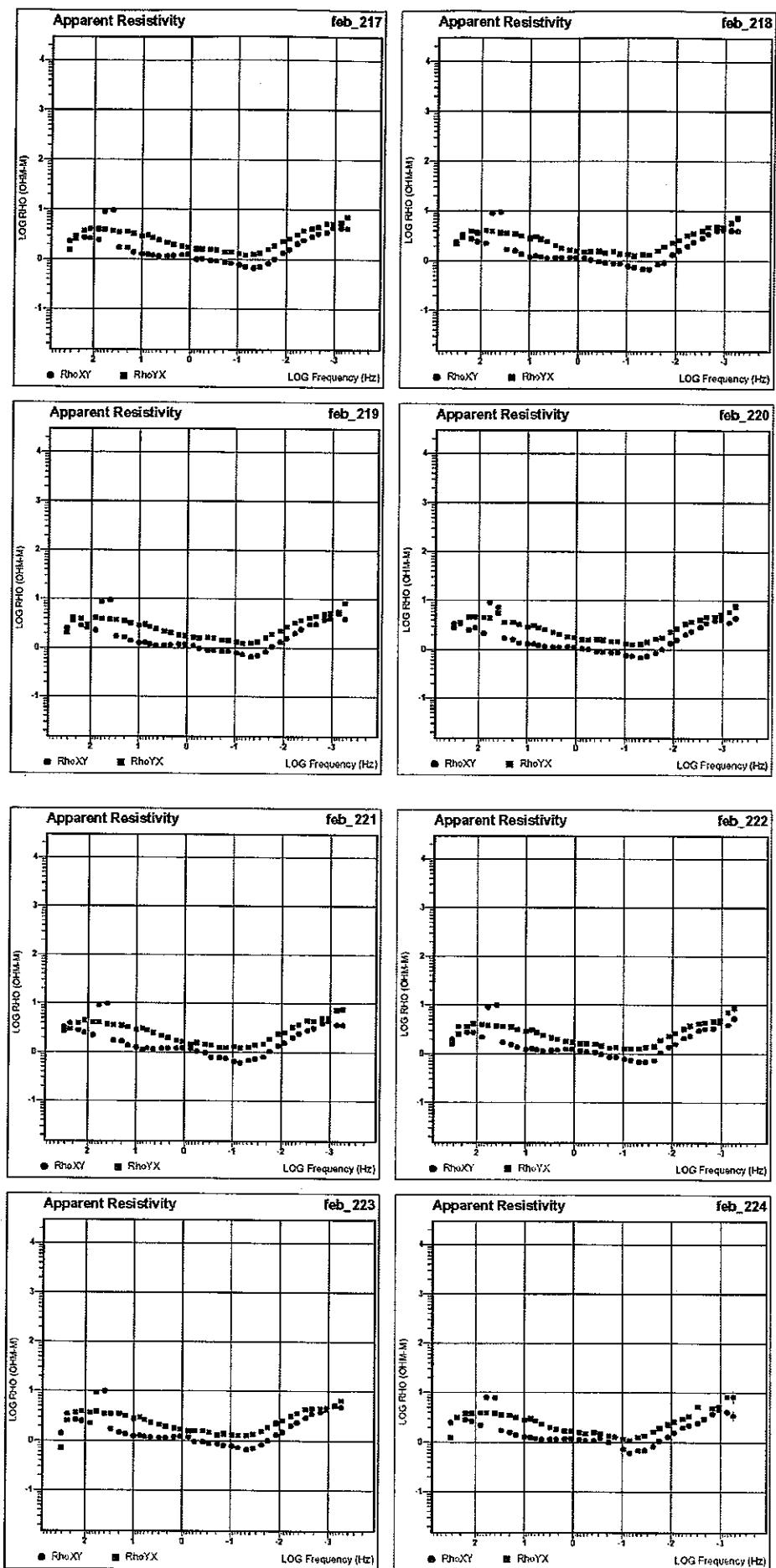
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2003/1/25~2003/1/31)



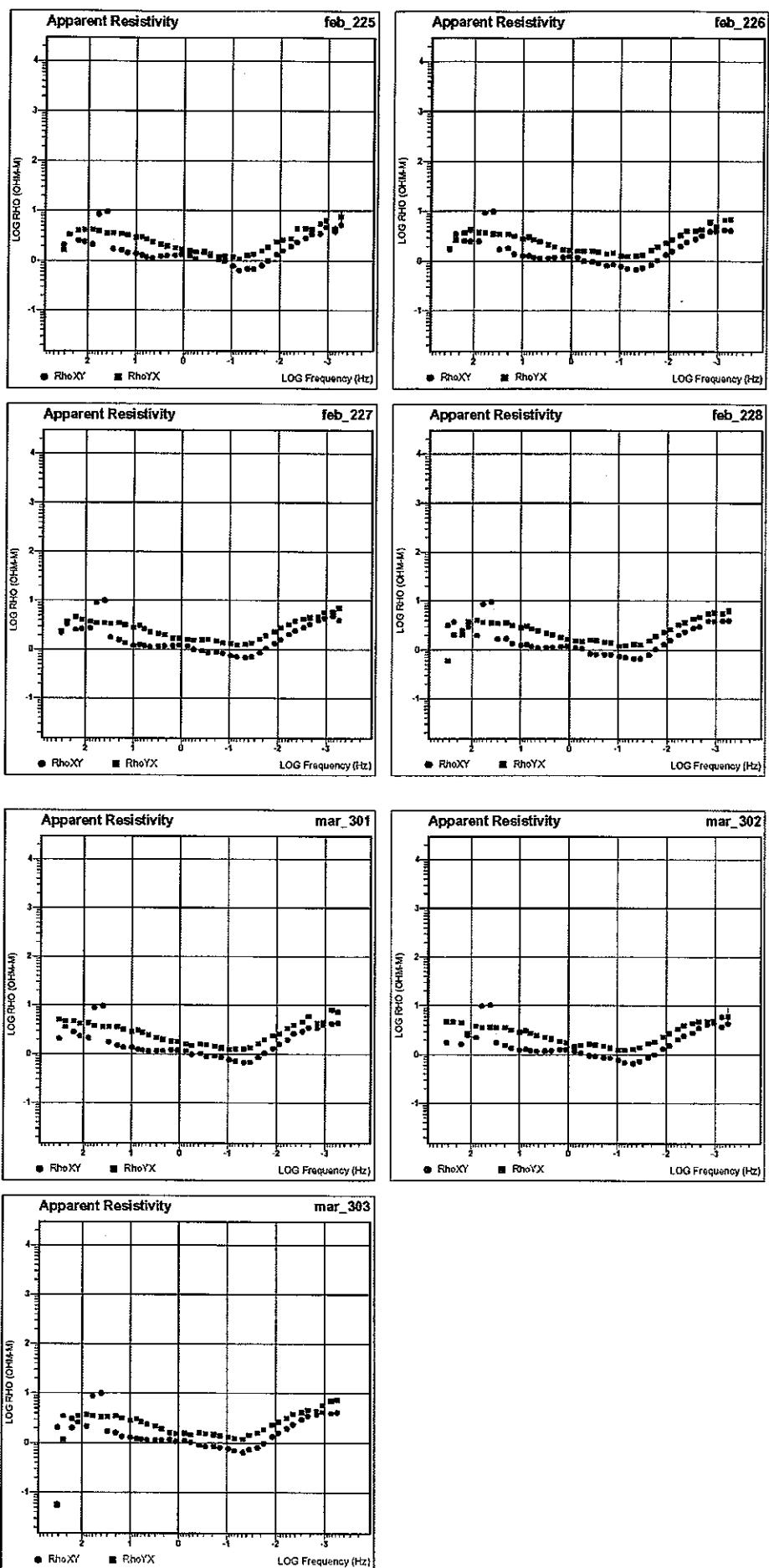
付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2003/2/1~2003/2/8)



付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2003/2/9~2003/2/16)



付録2 見掛比抵抗曲線図 (2003/2/17~2003/2/24)



付録2 見掛け比抵抗曲線図 (2003/2/28~2003/3)

付録3 見掛比抵抗数値一覧

	2003年2月25日	2003年2月26日	2003年2月27日	2003年2月28日				
周波数(Hz)	xy(Ω·m)	yx(Ω·m)	xy(Ω·m)	yx(Ω·m)	xy(Ω·m)	yx(Ω·m)	xy(Ω·m)	
320	2.07	1.62	1.70	1.79	2.21	2.38	3.18	0.60
240	3.34	3.37	3.50	2.66	3.30	3.66	3.75	2.05
160	2.52	4.01	2.53	3.72	2.53	4.60	2.54	2.05
120	2.40	4.20	2.47	4.25	2.63	4.09	2.94	3.75
80	2.11	4.18	2.48	3.73	2.74	3.73	1.98	4.05
60	8.53	3.90	9.23	3.71	8.94	3.44	8.66	3.72
40	9.50	3.52	9.84	3.52	9.90	3.48	9.54	3.52
30	1.73	3.58	1.69	3.46	1.76	3.38	1.68	3.49
20	1.61	3.45	1.80	3.44	1.58	3.47	1.71	3.56
15	1.43	3.22	1.37	3.13	1.35	3.17	1.34	3.14
10	1.37	2.92	1.26	2.79	1.19	2.78	1.24	2.84
7.5	1.29	2.93	1.27	3.00	1.26	3.05	1.29	3.03
6	1.18	2.72	1.18	2.70	1.18	2.63	1.17	2.72
4.5	1.11	2.38	1.13	2.46	1.13	2.28	1.10	2.46
3	1.22	2.07	1.15	2.13	1.16	2.10	1.12	2.20
2.25	1.23	1.93	1.17	1.91	1.18	1.96	1.13	2.03
1.5	1.26	1.80	1.18	1.66	1.18	1.71	1.16	1.80
1.125	1.32	1.68	1.22	1.64	1.22	1.66	1.18	1.63
0.75	1.23	1.56	1.17	1.56	1.16	1.59	1.10	1.53
0.5625	1.09	1.48	0.99	1.57	0.99	1.55	1.07	1.49
0.375	1.43	1.54	0.96	1.56	0.93	1.56	0.84	1.60
0.2813	1.26	1.36	0.89	1.50	0.87	1.57	0.81	1.56
0.1875	1.06	1.18	0.81	1.38	0.87	1.47	0.81	1.45
0.1406	0.96	1.21	0.84	1.44	0.84	1.37	0.81	1.41
0.0938	0.77	1.17	0.77	1.28	0.74	1.30	0.74	1.20
0.0703	0.63	1.08	0.70	1.24	0.71	1.24	0.71	1.23
0.0469	0.69	1.25	0.67	1.25	0.69	1.28	0.66	1.30
0.0352	0.68	1.35	0.71	1.30	0.71	1.37	0.66	1.27
0.0234	0.80	1.58	0.84	1.62	0.85	1.63	0.78	1.54
0.0176	0.99	1.88	1.02	1.91	1.05	1.92	1.03	1.93
0.0117	1.32	2.36	1.32	2.28	1.33	2.29	1.30	2.29
0.0088	1.58	2.58	1.55	2.69	1.58	2.76	1.57	2.63
0.0059	1.95	2.75	1.97	3.30	2.04	3.28	2.04	3.23
0.0044	2.37	4.45	2.38	4.07	2.43	3.85	2.34	3.65
0.0029	2.86	4.46	2.75	4.09	2.82	4.19	2.82	4.32
0.0022	3.40	4.24	3.24	4.33	3.31	4.53	3.02	4.77
0.0015	3.52	5.56	3.96	5.99	4.00	4.66	3.94	5.51
0.0011	4.72	6.37	3.97	4.84	4.43	5.76	3.90	5.81
0.0007	3.91	4.29	4.24	6.73	4.88	5.93	4.00	5.66
0.0005	5.23	7.63	4.14	6.96	3.96	7.01	4.04	6.40

	2003年3月1日	2003年3月2日	2003年3月3日				
周波数(Hz)	xy(Ω·m)	yx(Ω·m)	xy(Ω·m)	yx(Ω·m)	xy(Ω·m)	yx(Ω·m)	xy(Ω·m)
320	2.05	5.05	1.76	4.65	2.05	0.06	
240	3.56	4.68	4.68	4.63	3.48	1.15	
160	2.81	4.76	1.60	4.49	2.02	3.05	
120	2.31	4.18	2.45	2.67	2.62	3.45	
80	2.13	4.30	2.23	3.80	2.16	3.73	
60	8.75	3.81	9.82	3.55	8.86	3.45	
40	9.59	3.55	10.10	3.63	9.94	3.32	
30	1.74	3.58	1.74	3.55	1.73	3.40	
20	1.51	3.55	1.53	3.53	1.59	3.44	
15	1.36	3.20	1.33	3.18	1.34	3.17	
10	1.36	2.84	1.23	2.89	1.28	2.80	
7.5	1.24	3.06	1.28	3.04	1.21	3.07	
6	1.19	2.74	1.20	2.70	1.18	2.67	
4.5	1.14	2.43	1.15	2.44	1.14	2.40	
3	1.14	2.17	1.17	2.21	1.13	2.19	
2.25	1.15	1.99	1.18	2.05	1.13	1.93	
1.5	1.21	1.82	1.26	1.84	1.17	1.60	
1.125	1.17	1.78	1.25	1.73	1.07	1.52	
0.75	1.15	1.58	1.17	1.43	1.10	1.56	
0.5625	0.97	1.47	1.07	1.52	1.04	1.43	
0.375	1.02	1.58	0.95	1.61	0.90	1.60	
0.2813	0.88	1.52	0.91	1.55	0.85	1.54	
0.1875	0.90	1.45	0.86	1.47	0.85	1.47	
0.1406	0.85	1.33	0.84	1.37	0.81	1.39	
0.0938	0.75	1.24	0.76	1.23	0.77	1.31	
0.0703	0.71	1.27	0.68	1.23	0.70	1.22	
0.0469	0.67	1.25	0.65	1.26	0.65	1.20	
0.0352	0.68	1.35	0.71	1.38	0.73	1.46	
0.0234	0.84	1.63	0.86	1.67	0.80	1.60	
0.0176	1.04	1.95	0.98	1.80	0.98	1.84	
0.0117	1.30	2.35	1.31	2.28	1.34	2.28	
0.0088	1.59	2.62	1.50	2.66	1.58	2.66	
0.0059	1.94	3.33	2.03	3.34	1.96	3.20	
0.0044	2.62	3.96	2.39	3.94	2.36	3.86	
0.0029	2.94	4.59	2.78	4.35	2.98	4.13	
0.0022	3.42	5.90	3.49	4.76	3.54	4.60	
0.0015	3.41	4.29	4.14	4.70	3.78	4.34	
0.0011	4.42	3.98	4.55	4.86	4.18	5.72	
0.0007	4.24	8.15	3.73	5.91	3.95	7.05	
0.0005	4.34	7.35	4.31	6.14	4.15	7.29	