



JAEA-Evaluation

2008-002

超深地層研究所計画の工学技術への ACROSS の応用に関する検討

-2007 年度年報-

Examination Concerning Application of ACROSS
to Engineering Technology of the MIU Project
-Annual Report, Fiscal Year 2007-

長谷川 健 國友 孝洋 中島 崇裕 熊澤 峰夫*
黒田 英高* 弥富 洋介 浅井 秀明 松井 裕哉

Ken HASEGAWA, Takahiro KUNITOMO, Takahiro NAKAJIMA, Mineo KUMAZAWA*
Hidetaka KURODA*, Yohsuke IYATOMI, Hideaki ASAI and Hiroya MATSUI

地層処分研究開発部門
結晶質岩工学技術開発グループ
Crystalline Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

JAEA-Evaluation

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

超深地層研究所計画の工学技術への ACROSS の応用に関する検討
－2007 年度年報－

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 東濃地科学的研究ユニット

長谷川 健⁺¹, 國友 孝洋^{※1}, 中島 崇裕^{※2}, 熊澤 峰夫^{*1},
黒田 英高^{*2}, 弥富 洋介, 浅井 秀明^{※3}, 松井 裕哉

(2008 年 12 月 18 日受理)

陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトの一環として研究開発されたアクロス (ACROSS, *Accurately Controlled Routinely Operated Signal System* の頭文字をとったもの) は地震研究をその目的としていたが、そこで培われた技術（信号の送受信技術ならびにデータの解析技術）は非常に汎用性に富むものであることから、坑道掘削による坑道周辺の地質環境の時間的变化や研究坑道の健全性の監視技術として利用可能かどうかについて 2007 年度から 3 年間を目途に検討を進めることとした。3 年間の内訳は 1 年目がアクロス観測網の整備、2 年目がデータの収集、3 年目がデータの解析および適用性の評価となっている。

本報告書では、1 年目の成果である ACROSS 観測網の整備ならびにアクロスの基盤的研究の成果について述べる。

東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

+1 地層処分研究開発部門

※1 客員研究員

※2 嘱託

※3 技術開発協力員

*1 静岡大学

*2 清水建設株式会社

Examination Concerning Application of ACROSS to Engineering Technology of the MIU Project
- Annual Report, Fiscal Year 2007-

Ken HASEGAWA⁺¹, Takahiro KUNITOMO^{※1}, Takahiro NAKAJIMA^{※2}, Mineo KUMAZAWA^{*1},
Hidetaka KURODA^{*2}, Yohsuke IYATOMI, Hideaki ASAII^{※3} and Hiroya MATSUI

Tono Geoscientific Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received December 18, 2008)

ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) has developed to acquire the detailed information on the tectonically active zone. The technology, for example the transmission and receiving technique, the data analysis and the interpretation technique of the ACROSS signal, is able to apply not only to seismology but also to other field.

We consider the ACROSS technology may apply to the engineering technology of the MIU project, for example monitoring of the change of the geological environment around shafts and also the physical condition of the shaft concrete itself.

It is planned that the examination for three years will be made from fiscal year 2007. The first year is expansion of the network of observation stations, the second year is data acquisition and last year is the analysis of data and evaluation of the ACROSS.

In this report, we describe the results of fundamental studies of the ACROSS and the preparation of the ACROSS observation stations, performed in fiscal year 2007.

Keywords: ACROSS, Engineering Technology, MIU Project

⁺¹ Geological Isolation Research and Development Directorate

^{※1} Invited Researcher

^{※2} Visiting Researcher

^{※3} Collaborating Engineer

^{*}1 Shizuoka University

^{*}2 Shimizu Corporation

目 次

1.はじめに	1
2.アクロス技術の基盤的研究	2
2.1 弹性波アクロス	2
2.1.1 弹性波アクロス送信装置と送信の概略	2
2.1.2 観測の現状	6
2.1.3 長期連続送信試験の結果について	10
2.2 電磁アクロス	16
2.2.1 電磁アクロスの土岐送信システムの概要	16
2.2.2 東濃鉱山での送信、およびモニタ結果の概要	18
2.2.3 正馬様用地での観測結果の概要	24
2.3 アクロスのための数値シミュレーション技術の基礎的検討	30
3.地質環境のモニタリング技術としてのアクロスの適用性評価	33
3.1 戸狩観測点（東濃地震科学研究所）のデータ解析	33
3.1.1 データ処理	33
3.1.2 伝達関数	34
3.1.3 伝達関数の時間変化	37
3.2 瑞浪超深地層研究所周辺のアクロス観測網の整備	46
3.2.1 弹性波アクロス	46
3.2.2 電磁アクロス	47
3.2.3 データロガー用観測ハウスの整備	49
4.地下構造物の健全性監視技術としてのアクロスの適用性評価	51
4.1 目標	51
4.2 MIU立坑内の既存地震計による弾性波アクロス信号の予備観測	51
4.2.1 観測の諸元	51
4.2.2 MIUのノイズレベル	52
4.2.3 アクロス信号の検出	56
4.2.4 考察	57
5.おわりに	59
謝辞	59
参考文献	60

Contents

1. Introduction.....	1
2. Basic research of the ACROSS.....	2
2.1 Seismic ACROSS.....	2
2.1.1 Apparatuses and instruments specially designed for the seismic ACROSS at the TOKI Station	2
2.1.2 Goal attainment level of the data acquisition.....	6
2.1.3 Results of the long term continuous transmitting test.....	10
2.2 Electromagnetic ACROSS.....	16
2.2.1 Apparatuses and instruments specially designed for the electromagnetic ACROSS at the TOKI Station	16
2.2.2 Goal attainment level of the data acquisition.....	18
2.2.3 Monitoring results at the Shobasama site.....	24
2.3 Basic study of the simulation method for the ACROSS.....	30
3. Applicability of ACROSS as monitoring technology of geological environment.....	33
3.1 Interpretation of the data at the Togari observation station.....	33
3.1.1 Data processing.....	33
3.1.2 Transfer function.....	34
3.1.3 Change with time of the transfer function.....	37
3.2 Preparation of the ACROSS observation stations.....	46
3.2.1 Seismic ACROSS.....	46
3.2.2 Electromagnetic ACROSS.....	47
3.2.3 Preparation of the hut for the recording devices.....	49
4. Applicability of ACROSS as monitoring technology of underground structure.....	51
4.1 Object.....	51
4.2 Preliminary test of the seismic ACROSS using of the seismographs set up at the Ventilation Shaft	51
4.2.1 Observation condition.....	51
4.2.2 Noise level.....	52
4.2.3 Detect of the ACROSS signal.....	56
4.2.4 Consideration.....	57
5. Summary	59
Acknowledgement.....	59
References	60

図 目 次

図 2-1-1 土岐送信所の写真および装置の概念図	2
図 2-1-2 2007 年度の連続送信の状況	3
図 2-1-3 第 7 回試験送信（2007 年 3 月 2 日～）の送信信号	5
図 2-1-4 第 5 回試験送信（2004 年 2 月 21 日～2007 年 2 月 12 日）の送信信号	5
図 2-1-5 土岐送信所の岩盤カプラと加速度計測位置	6
図 2-1-6 東濃鉱山敷地内のアクロス機器位置図	7
図 2-1-7 瑞浪超深地層研究所用地と正馬様地震計アレイの位置関係	8
図 2-1-8 中部地域の Hi-net 観測点	9
図 2-1-9 遠方での観測スペクトルと長期間スタッキングの効果	11
図 2-1-10 送信装置と 98SE-01 号孔底地震計	11
図 2-1-11 98SE-01 号孔底で得られたグリーン関数	13
図 2-1-12 3 年分のグリーン関数の重ね書き	13
図 2-1-13 98SE-01 号孔底で得られた時間変化。エンベロープの時間変化の濃淡図	14
図 2-1-14 Hi-net 八百津観測点（11.3km）で得られた時間変動	15
図 2-2-1 東濃鉱山における送信電極・モニタ電極、およびそれらを繋ぐケーブル	16
図 2-2-2 電磁アクロス送信システムの概略図	16
図 2-2-3 電磁アクロス送信システム：送信電極切替制御部の概略図	17
図 2-2-4 電磁アクロスの H20 中の送信信号	19
図 2-2-5 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の送信電流の振幅（左列）・ 位相（右列）の時間変動	20
図 2-2-6 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の送信電極間電圧（左列）・ 位相（右列）の時間変動	21
図 2-2-7 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の送信電流の振幅（左列）・ 位相（右列）の時間変動	22
図 2-2-8 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の送信電極間電圧（左列）・ 位相（右列）の時間変動	23
図 2-2-9 正馬様用地で行っている電磁場観測点の場所と接地機器の概略図	24
図 2-2-10 東濃鉱山での N=W 電極間送信時と S=W 電極間送信時に正馬様用地で 観測された電磁場スペクトル	25
図 2-2-11 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の正馬様で観測された磁場 N 成分の 振幅（左列）・位相（右列）の時間変動	26
図 2-2-12 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の正馬様で観測された電場 EW 成分の 振幅（左列）・位相（右列）の時間変動	27
図 2-2-13 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の正馬様で観測された磁場 N 成分の 振幅（左列）・位相（右列）の時間変動	28
図 2-2-14 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の正馬様で観測された電場 EW 成分の 振幅（左列）・位相（右列）の時間変動	29
図 2-3-1 周波数空間と波数空間の関係	30
図 3-1-1 戸狩観測点の位置	33
図 3-1-2 記号の説明	34

図 3-1-3	TGR165 のデータから得られた伝達関数	36
図 3-1-4	TGR350 の 24 時間スタッキング処理で得られた伝達関数	37
図 3-1-5	立坑の掘削工程	38
図 3-1-6	立坑の排水状況と地下水の水位	38
図 3-1-7	TGR165 の伝達関数の時間変化	39
図 3-1-8	TGR350 の伝達関数の時間変化	40
図 3-1-9	TGR165 の伝達関数の差表示	41
図 3-1-10	TGR350 の伝達関数の差表示	42
図 3-1-11	伝達関数の差表示 (a) 伝達関数 rR の差表示 (1 日毎)	44
図 3-1-11	伝達関数の差表示 (b) 伝達関数 tT の差表示 (1 日毎)	45
図 3-2-1	地震計および電極の位置図 ○地震計 +電極	48
図 3-2-2	設置したセンサ類と観測ハウスの位置関係	50
図 4-2-1	分毎の RMS ノイズの推移 (2007 年 12 月 14 日 18 時～12 月 19 日 14 時)	53
図 4-2-2	期間内に取得された地震波形の例	53
図 4-2-3	ノイズレベルが低い時間帯の観測スペクトル	54
図 4-2-4	ノイズレベルが高い時間帯の観測スペクトル	55
図 4-2-5	地表の観測スペクトル変化の一例 [UD]	55
図 4-2-6	GL-100m の観測スペクトル変化の一例 [(2)UD]	56
図 4-2-7	スタッキングによるノイズの低減とアロス信号の検出	58

表 目 次

表 2-1-1	土岐送信所における送信装置の諸元	3
表 2-1-2	各送信所への周波数系列の割り当て	4
表 3-2-1	地震計の位置座標	47
表 3-2-2	電極の接地抵抗と電極間隔	48

写 真 目 次

写真-1	地震計本体	46
写真-2	地震計を固定したケーシングパイプ	46
写真-3	ボーリング孔の掘削	46
写真-4	地震計の固定状況	46
写真-5	固定した磁力計	48
写真-6	銅棒電極	48
写真-7	新設した観測ハウス	49
写真-8	埋設した信号ケーブル 観測ハウス側	49
写真-9	埋設した信号ケーブル 地下壕通気口側	49

1. はじめに

アクロス (ACROSS, Accurately Controlled ROperated Signal Systemの頭文字をとったもの) は 1994 年に名古屋大学で産声をあげた。その直後 (1995 年 1 月 17 日) に発生した兵庫県南部地震を契機に翌 1996 年、日本原子力研究開発機構 (当時は動力炉・核燃料開発事業団) 東濃地科学センターにおいて陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトが立ち上がった。その一環として熊澤峰夫名古屋大学教授を中心とした研究チームが結成され、アクロスに関する様々な研究開発が行われた。このプロジェクトは 2 期 10 年にわたって実施され、所期の目的を達成し 2005 年度末をもって終了した。

陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトにおけるアクロスの研究開発は、地震の巣であるプレート境界の物性の空間的・時間的变化を捉えることを目標としていたが、そこで培われた計測技術は他に類を見ない精度での計測を可能にすることから、他分野においても活用可能な技術である。

そこで、結晶質岩工学技術開発グループでは、アクロスが工学技術のテーマの一つである「研究坑道の施工対策技術の開発（湧水対策・突発湧水）」における研究坑道周辺の地質環境の時間的变化の把握と、「安全性を確保する技術の開発」におけるコンクリートライニングの健全性の評価に利用可能かどうかについて検討することとした。具体的な検討項目は以下の 2 点である。

① 弹性波アクロス信号の受信による既存技術の適用性評価

現在、東濃鉱山の弾性波アクロス送信所から送信中の信号を瑞浪超深地層研究所の近傍に設置した地震計で受信することにより、研究坑道の掘削が坑道周辺の地質環境にどのような変化を及ぼしているのかをモニタリング可能かどうかについて、その適用性を検討する。

② モード解析の適用性評価

坑道覆工コンクリートの振動モードを常時モニタリングすることにより、坑道覆工コンクリート構造物ならびにその周辺岩盤の物性の時間的变化を非破壊的に常時検査可能とするシステムの開発について検討する。モード測定に必要な起振装置および受信装置にはアクロスの技術開発で培われてきた信号の送受信技術が現時点では最適である。

本研究は 2007 年度から 3 年間を目途に検討を進めることとする。3 年間の内訳は 1 年目がアクロス観測網の整備、地質環境および坑道覆工コンクリートのモニタリングの可能性の基礎的検討、2 年目がデータの収集、3 年目がデータの解析および適用性の評価である。

本報告書では、1 年目の成果であるアクロス観測網の整備、地質環境および坑道覆工コンクリートのモニタリングの可能性の基礎的検討結果ならびにアクロスの基盤的研究の成果について述べる。

2. アクロス技術の基盤的研究

2.1 弹性波アクロス

2.1.1 弹性波アクロス送信装置と送信の概略

弹性波アクロス (seismic ACROSS) は、地盤を加振する装置（以下、弹性波アクロス送信装置）により弹性波を連續的に送信し、地震計などを用いた振動の連続観測データを解析することにより、地下や建造物の構造や振動特性の推定、あるいは、その変化を遠隔でモニタリングすることを目的とした手法である。

弹性波アクロス送信装置は、偏心した錘をサーボモータにより精密に回転させて加振力を発生させる装置として名古屋大学で考案・設計された（例えば、熊澤・武井、1994）。1996年には、陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト（以下フロンティア研究）の一環として、東濃地科学センター（東濃鉱山：岐阜県土岐市、以下、土岐送信所）に 20tonf (2×10^5 N) 級の実用型送信装置が設置された（図 2-1-1、表 2-1-1）。その後、制御システムや制御方法・観測手法の工夫や改良などが行われ、2002年10月には連続送信試験が開始された。その信号は、100km 離れた地震観測点でも検出され、地震研究の新たな手法として研究開発が進められてきた。フロンティア研究が終了した現在は、超深地層研究所計画における工学技術開発の一環として、土岐送信所での連続送信を継続している。また、2005年度には、土岐送信所の3台の送信装置のうちの1台が幌延深地層研究センターに移設され、「遠隔監視システムの開発」として観測が行われている。

弹性波アクロス送信装置の概要および上述の経緯は、フロンティア研究の成果報告である Kumazawa et al.(2007)に詳しく議論されている。本報告では、主としてそれ以降の状況について概括する。なお、本報告で触れる基盤的研究の詳細は、別途報告する予定である。



図 2-1-1 土岐送信所の写真および装置の概念図

表 2-1-1 土岐送信所における送信装置の諸元

No	偏心モーメント	最大周波数	最大発生力
1	8.0kgm	25Hz	$2.0 \times 10^5 N$
2	1.3kgm	50Hz	$1.3 \times 10^5 N$
3	3.9kgm	35Hz	$1.9 \times 10^5 N$

(1) 連続送信試験の現状

連続送信試験を開始した 2002 年 10 月から 2008 年 3 月まで、約 5.5 年が経過した。この間、一貫して稼動している送信装置は、偏心モーメントが最も大きい No.1 (表 2-1-1) の装置であり、No.2 および No.3 は、補助的な稼動にとどまっている。遠方での観測により地殻深部の変化を捉えることを主眼としたため、低周波で最も発生力が大きい装置を優先的に使用してきたのである。幌延深地層研究センターは立坑の直ぐ傍に信号源を設置し、研究坑道の掘削影響を検出することを主目的とした研究を行うということから、発生力は小さいが広い周波数範囲をカバーすることができる No.2 が移設された。

No.1 の装置は、5.5 年間に及ぶ連続的な稼動にも関わらず、ベアリングの損傷などの重大な故障を発生することなく、送信を継続することができている。送信異常（異常停止や回転方向の自動反転が行われないなどの不良）の原因は、停電（雷による瞬間停電を含む）、ヒューマンエラー、作業による止むを得ない停止を除くと、PC やソフトウェアのトラブルがほとんどであり、それも 2005 年度に PC のリプレースおよびソフトウェアの改良を行うことで解決した。

2007 年度は、雷による瞬間停電での停止が 2 回、落雷による制御用電子機器の故障による送信異常が 1 回（サーボの侵入ルートを突き止めて改善済）、作業停電にともなう計画的な停止が 1 回、計測作業のために短時停止させたのが 2 回である（図 2-1-2）。365 日間のうち停止期間は 2 日程度、位相異常などを含めても、送信に問題のある期間は 4 日足らずに抑えることができた（正常稼働率 99% 以上）。



図 2-1-2 2007 年度の連続送信の状況

(2) 中部地域における送信規約と制御ソフトウェアの変更

土岐送信所では、2007 年 3 月から中部地域における送信規約（國友、2006）に従い、第 7 回試験送信を開始した。送信規約では、中部地域で常時稼動する弹性波アクロス送信装置に固有の離散的周波数系列が割り当てられており、各送信所が、割り当て以外の周波数系列を使用しないことで、観測される信号の混信を避けることになっている（表 2-1-2）。これは、アクロス送信装置の精密制御によって初めて実現できたことであり、複数のアクロス送信装置を同じ周波数帯域で稼動させたとしても、周波数系列が異なるため、全ての送受信間の伝達関数を独立に抽出することができる所以である。

送信規約が取り決められた背景として、森町送信所（気象庁気象研究所、2006 年 3 月、土岐か

表 2-1-2 各送信所への周波数系列の割り当て

	A	B	送信所（台数）
1	0.0000+0.02n	0.0100+0.02n	森町 1 台
2	0.0025+0.02n	0.0050+0.02n	土岐 2 台
3	0.0075+0.02n	0.0150+0.02n	豊橋 2 台
4	0.0125+0.02n	0.0175+0.02n	ノイズ評価、臨時

各送信所に 2 つずつの系列が割り当てられている。単位は Hz, n=0,1,2,……。

ら 90km), 豊橋送信所 (名古屋大学, 2007 年 4 月, 土岐から 73km) が建設され, 3 カ所からの同時送信が開始される段階に至ったことが挙げられる。第 7 回試験送信は, この取り決めに従つた送信スペックとなっており (図 2-1-3), 2004 年 2 月 21 日～2007 年 2 月 12 日までの約 3 年間継続してきた第 5 回試験送信 (図 2-1-4) とほぼ同様の周波数帯域, 変調周期での FM (周波数変調) 送信である。主な相違点は, 搬送波周波数を 13.01Hz から 13.005Hz としたこと, 反転周期を 1 時間から 2 時間に変更したことである。

第 7 回試験送信の開始に先立って, 制御および観測装置のソフトウェアをアップグレードした。この制御ソフトウェアは, 土岐送信所の他, 森町, 豊橋, 幌延の各送信所で共通に使用されている。主な変更点を下に示す。

<制御ソフトウェアの変更点>

- ①回転周波数の設定単位の変更 (0.001Hz→0.0001Hz)。
- ②反転時間, プレリュード (反転後の事前送信) 時間などの設定を送信規約に対応
- ③FM 周期毎の位相調整が可能 (基準位相の自動計算機能を付加)。
- ④制御プログラムの総合化 (送信装置の相違をパラメタファイルの選択で対応)。

(3) 今後の予定

第 7 回試験送信は, 10.245-19.445Hz の帯域を持つ 0.02Hz 間隔の離散的周波数系列信号の送信である。これよりも低い周波数への拡張は, 発生力が小さくなること, これよりも高い周波数への拡張は, 地下伝播経路での減衰が大きく, また, 構造物の振動モードが複雑になり解析が困難になると予想される。当面は, この送信周波数を継続する予定である。

加振方向に関しては, 縦置き (回転軸が鉛直) の No.1 を 2 時間毎に反転し, 後に観測データを線形結合することにより, 直交 2 方向の水平加振に対する応答を得ている。観測は 3 成分 (NS,EW,UD) 地震計で行っているため, 結果として得られるのは, 6 成分の伝達関数である。水平加振は, 主として S 波の発生を狙ったことによる。これに, P 波が効率的に発生する上下加振を加えると, 9 成分の観測データを得られるようになり, 地震波で調べることのできる全ての地下の情報を得ることができるようになる。そこで, 現在縦置きの No.3 を横置きに移設し, 上下加振での送信が同時にできるようにすることを計画している。

No.3 は, No.1 に比べて偏心モーメントが約半分で, 更に高周波 (35Hz) まで送信することができるが, No.1 と同じ周波数帯で送信を行い, P 波と S 波の伝播を同時に調べることを予定している。同じ周波数では, No.3 の発生力は No.1 の約半分となる。しかし, P 波は S 波に比べて波長が長く, 同じ周波数でも減衰が小さいので, 遠方で観測される信号レベルは, No.1 と遜色がないものと予想される。

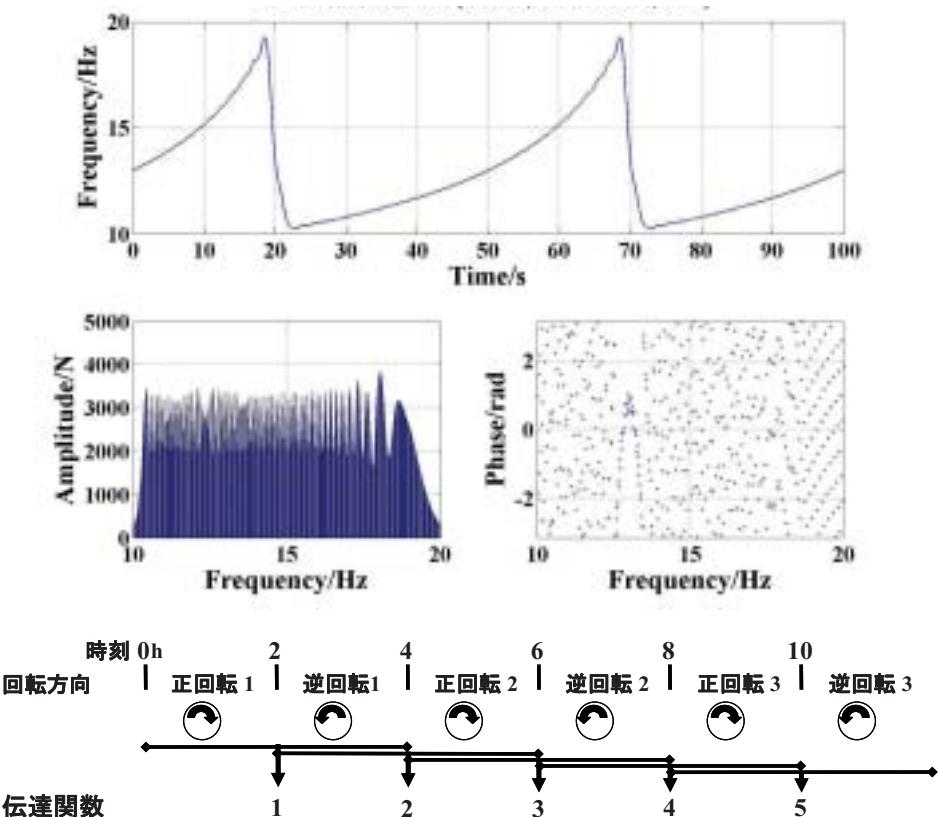


図 2-1-3 第 7 回試験送信（2007 年 3 月 2 日～）の送信信号

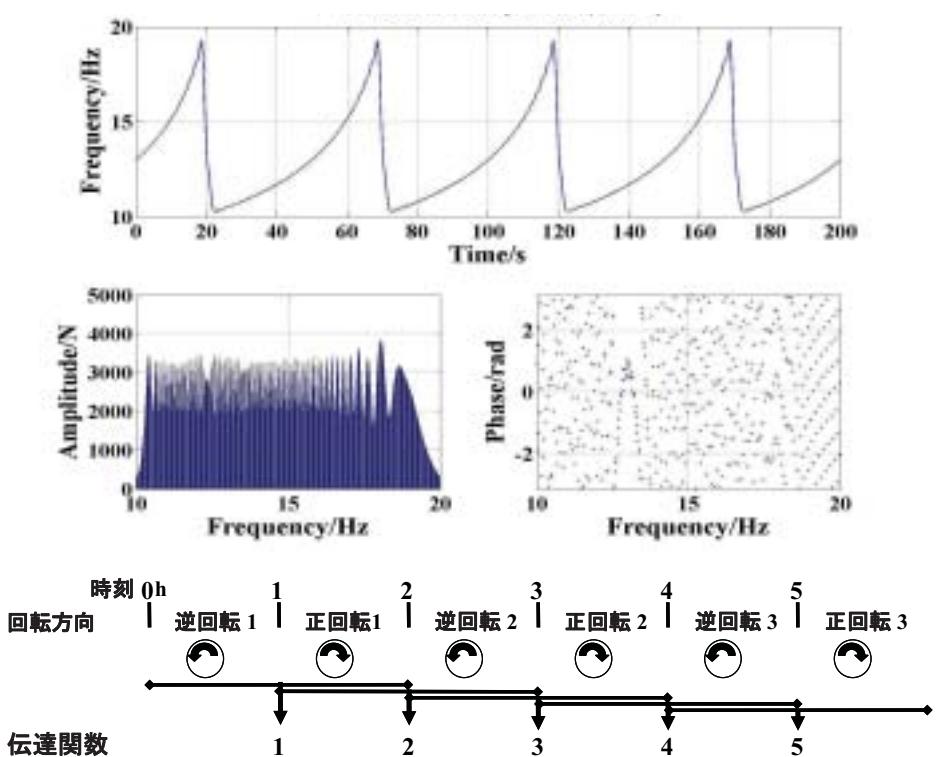


図 2-1-4 第 5 回試験送信（2004 年 2 月 21 日～2007 年 2 月 12 日）の送信信号

2.1.2 観測の現状

2007年度以降も継続されている観測点とデータ取得方法についてまとめる。送信規約では、搬送波周波数を0.0025Hz刻みで設定するため、1秒単位で測定した場合の錐の位相の繰り返し周期は最大400s (=1/0.0025)となる。これまで、100sないし200sの時間単位(時間区間)でスタッキングを行っていたが、規約制定以降は時間区間400sのスタッキングが必要である。そのため、観測用のソフトウェアの変更あるいはデータ取得方法の変更を行った。

(1) 土岐送信所内

土岐送信所内では、岩盤カプラ上に3点(3成分加速度計: Akashi JEP-4A3), 送信装置本体に1成分加速度計(V403)を1台に付き水平動2点の観測を行っている(図2-1-5)。これらは、岩盤カプラおよび送信装置本体の振動モニタ用である。観測は、PCベースの記録計であるKISS(Kunitomo Interface Stacking System)を用いている。観測の諸元を下記に示す。

センサ: JEP-4A3およびV403 単体(Akashi [現Mitsutoyo])

フォースバランス型3成分加速度計

測定範囲:(水平) $\pm 3000 \text{m/s}^2$ (鉛直) $\pm 2000 \text{m/s}^2$

周波数範囲: 0-450Hz

感度: 3V/G

分解能: $1 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$

設置方位: X(建物長軸) Y(建物短軸) Z(上下)

記録計: KISS

入力チャネル数: 16ch

サンプリングクロック: TrueTime(Symmetricom) XL-DC(精度100ns)

A/D分解能: 16bit

測定レンジ: (通常) $\pm 5\text{V}$ ($\pm 1\text{V}$, $\pm 2.5\text{V}$, $\pm 5\text{V}$, $\pm 10\text{V}$ も可能)

増幅器: 1x, 2x, 5x, 10x, 30x, 100x, 300x(岩盤カプラ上30x, 装置本体10x)

サンプリング周波数: 1000Hz

記録媒体: 60GB SCSI ハードディスク

2時間分(0-6800s)の単純スタッキングデータを保存(連続記録も可能)

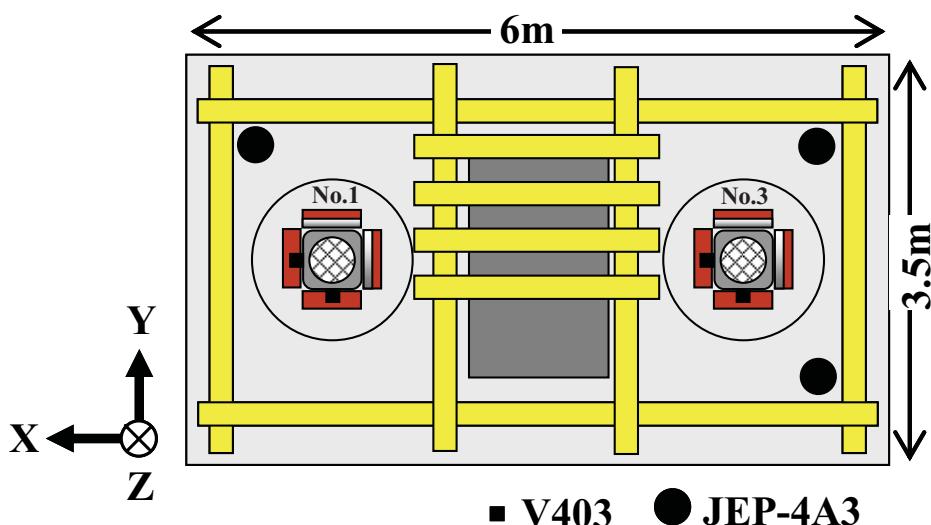


図2-1-5 土岐送信所の岩盤カプラと加速度計測位置

(V403: 1成分加速度計, JEP-4A3: 3成分加速度計)

(2) 東濃鉱山

送信所近傍（直下）での変動モニタを目的として、98SE-01号孔（GL-203m）および98FE-01号孔(GL-150m)での観測を行っている（図 2-1-6）。いる。観測の諸元は、両観測点ともに共通である。なお、98FE-01号孔の加速度計はEW成分が故障している。

センサ：JEP-7B3 [現 Mitsutoyo]

タイプ：フォースバランス型3成分加速度計（孔内設置用）

測定範囲：（水平） $\pm 3000 \text{m/s}^2$ （鉛直） $\pm 2000 \text{m/s}^2$

周波数範囲：0-450Hz

感度：3V/G

分解能： $1 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$

設置方位：真北基準、X：NS、Y：EW、Z：UD (N,E,D が+)

記録計：ECD-1200（近計システム）

入力チャネル数：最大 12ch

サンプリングクロック：GPS の 1s パルスに内部時計を同期

A/D 分解能：16bit

測定レンジ： $\pm 10\text{V}$

增幅器：100x (1x, 5x, 10x, 50x の選択も可)

サンプリング周波数：1000Hz (10kHz オーバーサンプリングを平均化)

記録媒体：60GB 外付けハードディスク

連続記録を取得。100s 単位でファイル化。

本記録計は、時間区間が 100s に固定された時間区間蓄積型記録計である。ただし、自然地震の観測なども行えるように、設定した閾値（トリガーレベル）を越えた時は、そのデータはスタッキングせずに別ファイルに保存する機能を有している。連続記録は、閾値を 0 とすることにより取得することができる。取得されたデータは、1000Hz から 100Hz にフーリエ変換を経由してリサンプリングして保存している。

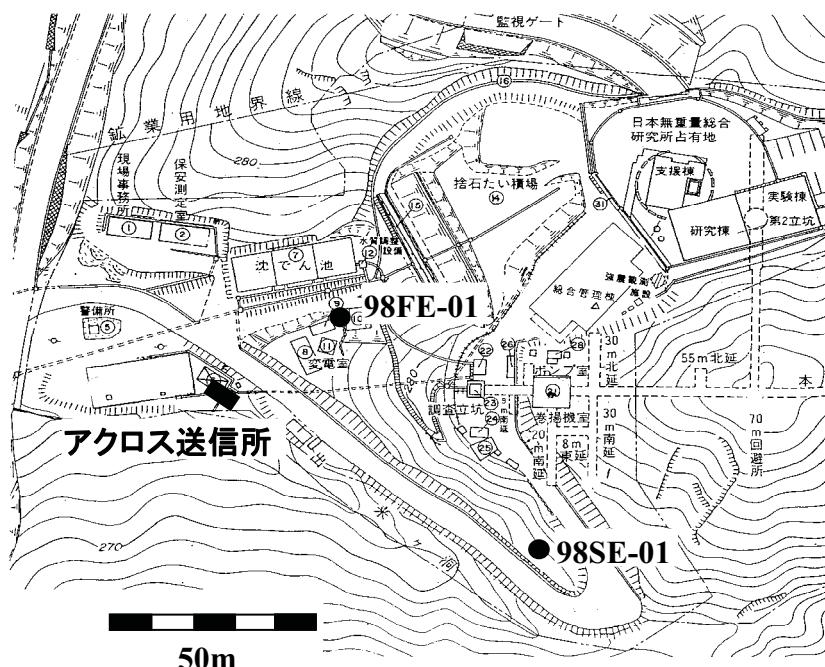


図 2-1-6 東濃鉱山敷地内のアクロス機器位置図

(3) 正馬様用地

アレイ観測およびその設置方法の基礎実験用に 13 点からなる L 型の地震計アレイ（第二アレイ）が設置されている（図 2-1-7）。後述する地下壕アレイと土岐送信所のちょうど中間的な位置に存在しているため、2008 年度以降、地下壕アレイで得られた時間変動などの結果の比較解釈に使用する予定である。

センサ：Seismic Nail/X-phone 内蔵（Geospace）13 台

タイプ：動コイル型 3 成分速度計（マーシュ設置用）

固有周波数：8Hz

感度：22.4V/m/s

設置方位：真北基準、(X) NS, (Y) EW (Z)UD (N,E,D が +)

記録計：MD8464（パベック電子開発）1 台

入力チャネル数：64ch

サンプリングクロック：TrueTime XL-DC の 10MPPS, 1PPS, 1PPM 出力を用いて内部時計を同期

A/D 分解能：24bit

測定レンジ：±2.56V

増幅器：100x（1x 10x の選択も可）

サンプリング周波数：100Hz

記録媒体：内蔵ハードディスク

連続記録を取得。100s 単位でファイル化。

本記録計も（2）と同様に、時間区間 100s 固定の時間区間蓄積型記録計である。閾値を 0 と設定することにより、連続記録を取得することができる。

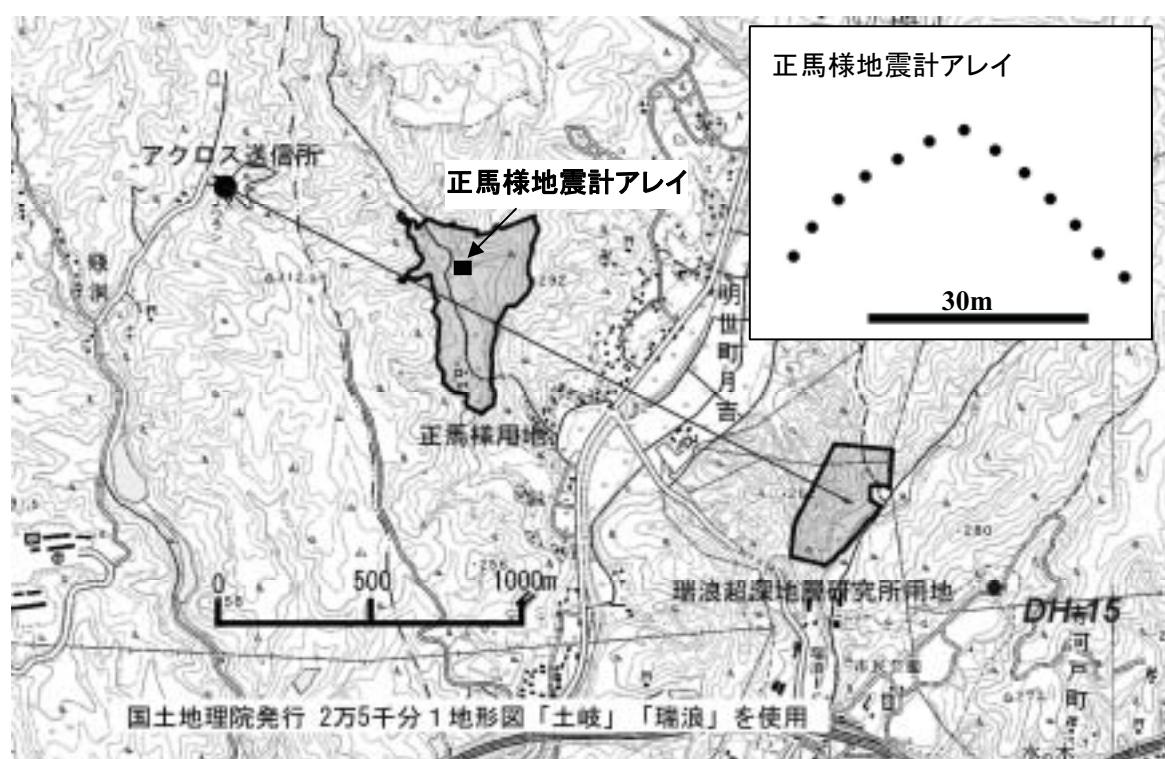


図 2-1-7 瑞浪超深地層研究所用地と正馬様地震計アレイの位置関係

(4) 瑞浪超深地層研究所 (MIU) 近傍の地下壕での観測

瑞浪超深地層研究所のそばには、戦時中に掘削された地下壕が存在しており、2007 年度に 32 点からなる地震計のアレイを設置した。センサおよび記録計の台数以外は、正馬様用地のシステムと同様である。設置の詳細は、3.2 を参照のこと。

センサ : Seismic Nail/X-phone 内蔵 (Geospace) 34 台

記録計 : MD8464 (パベック電子開発) 2 台

(5) Hi-net 観測点

防災科学技術研究所が日本全国に設置している高感度地震観測網である。土岐送信所から最も近い観測点は八百津 (11.3km) で、半径 100km 以内には 2007 年 12 月時点では 85 の観測点が存在する (図 2-1-8)。これらの観測点のうち比較的近いものは、アクロス信号の広域的変動を評価するのに活用できると考えられる。瑞浪超深地層研究所で観測されるアクロス信号には、広域的な変動の影響も含まれていると考えられ、立坑掘削影響などによる変化を議論する際には、バックグランドの変動として取り除く必要がある。

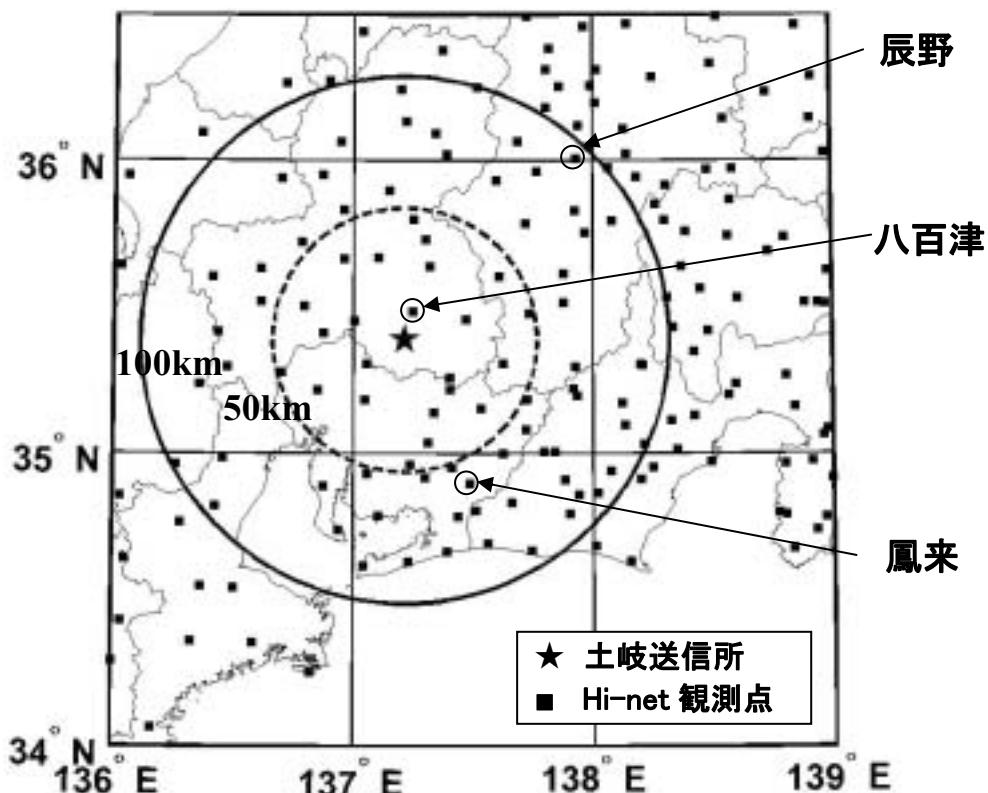


図 2-1-8 中部地域の Hi-net 観測点

2.1.3 長期連続送信試験の結果について

(1) 3年間のスタッキングによるアクロスの健全性評価

2004年2月21日～2007年2月12日までの約3年間継続された第5回試験送信のHi-net観測データを用いて、長期スタッキングによってどこまで微小な信号が検出できるかの評価を行った（國友他, 2007）。これは、送受信システムおよび解析手法が、理論通りに働いているかどうかの健全性の評価の一つになると考えられる。

<データ処理手順>

- 1) Hi-net観測データを1分毎のWIN32フォーマットから1時間毎のバイナリデータに変換する。
- 2) 自然地震などの振幅の大きいノイズを1秒単位で取り除いた後、時間区間200秒のスタッキングを1時間単位で行う。
- 3) 正回転および逆回転時の観測データを線形結合し、水平面内直交2成分(Radial:R, Transverse:T)の直線加振相当データとする。続いて、観測座標(NS,EW,UD)を回転し、それぞれの直線加振に対する3成分の応答radial(r), transverse(t), vertical(z)を計算する。結果として、1時間毎の6成分の観測スペクトル(rR, tR, zR, rT, tT, zT)が得られる。
- 4) この1時間単位の直線加振相当データに対して長期間最適重み付きスタッキング(長尾他, 2004)を行う。

以上の処理により得られた結果の例を図2-1-9に示す。図2-1-9の左列は、3年間に亘るスタッキングで、1時間単位データがスタッキングされる毎に信号レベルとノイズレベルが変化していく様子を示している。信号レベルは、10.25Hz～19.45Hzまでの0.02Hz間隔の送信信号の系列についてのRMS振幅値であり、ノイズレベルは、同じ帯域の信号系列以外の周波数のRMS振幅値である。スタッキング時間が小さい段階では、信号がノイズに隠れて見えていないが、スタッキング時間が増加するにつれ、ノイズレベルは低下していき、信号レベルは一定値に収束していくのが見て取れる。辰野では約4ヶ月で、鳳来では約7日でSN比(Signal to Noize Ratio)=2(P波とS波を明瞭に同定できるレベル)に到達する。ノイズレベルは、ほぼ理論通り、時間経過とともにスタッキング時間の平方根の逆数に比例して減少している。一方、信号レベルは、ある一定値に収束していき、結果としてSN比が時間の平方根に比例して増加することが示されている。これは、送受信の同期(GPS信号を基準とした時刻同期)が長期間に亘ってきちんと保たれていること、送信およびデータ取得が安定に行われていること、ノイズがほぼランダムと見なせること、また、それらを保証するデータ処理が行われていることを示している。

図2-1-9の右列は、3年間分のデータをスタッキングして得られた観測スペクトルである。○は信号系列を、+はノイズ系列を示している(×は400秒間のデータのノイズレベル)。右上がりの破線は、変位振幅の等値線であり、信号の振幅は10fm($fm=10^{-15}m$)程度である。これは、酸素の原子核程度のサイズであり、アクロスによる安定な送信とデータスタッキングにより極めて小さい振幅の地動の観測に成功していることが示された。

(2) 時間変動の観測例

一定時間毎のスタッキングにより得られた伝達関数を比較することで、地下の変化を議論することができる。ここでは、時間変動の一例として、東濃鉱山の98SE-01号孔およびHi-net八百津での観測結果を示す。

98SE-01号孔底の地震計は、送信装置から見て、水平距離約90m、深さ約190mの花崗岩内にあり、送信所のほぼ真下での観測となる(図2-1-10(a))。つまり、このデータは、遠方で観測される時間変化を評価する際に、送信点近傍での変化の影響を評価するための指標となる。加振方位一受信成分の関係を図2-1-10(b)に示す。受信成分のr:radial, t:transverse, v:verticalは互いに直交しており、それぞれ、主としてP波、SH波、SV波の観測に相当する。

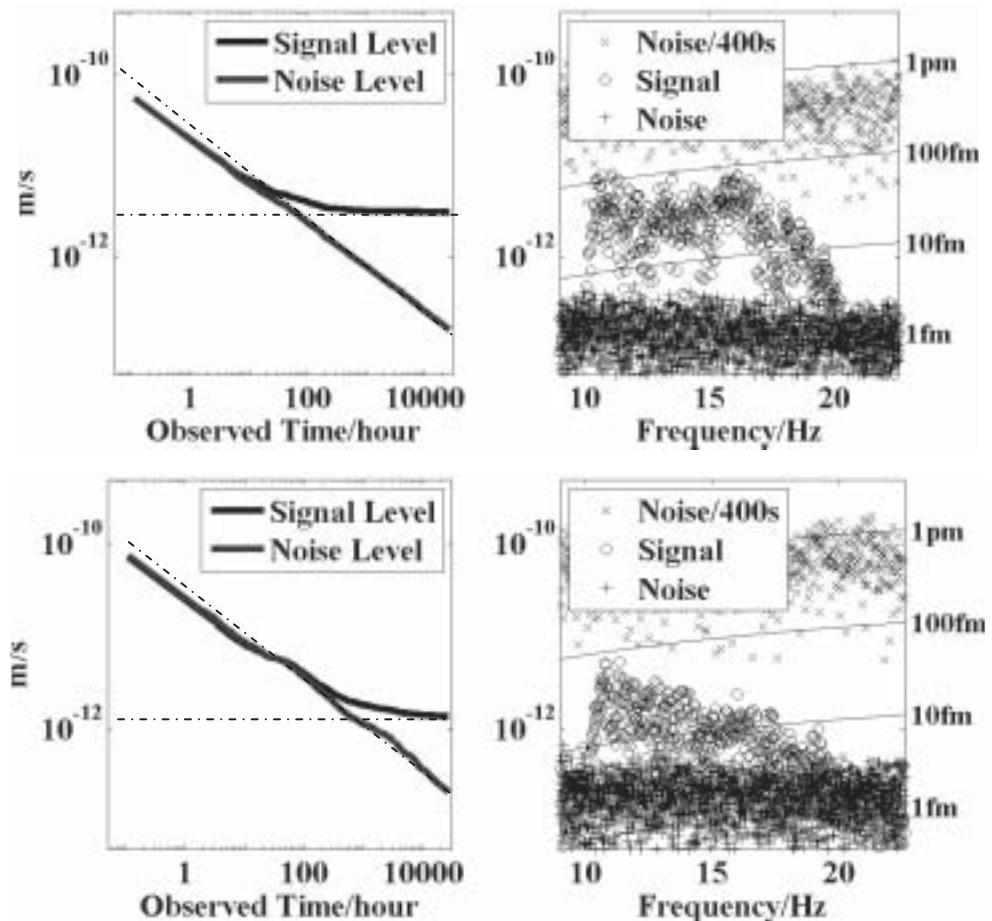


図 2-1-9 遠方での観測スペクトルと長期間スタッキングの効果

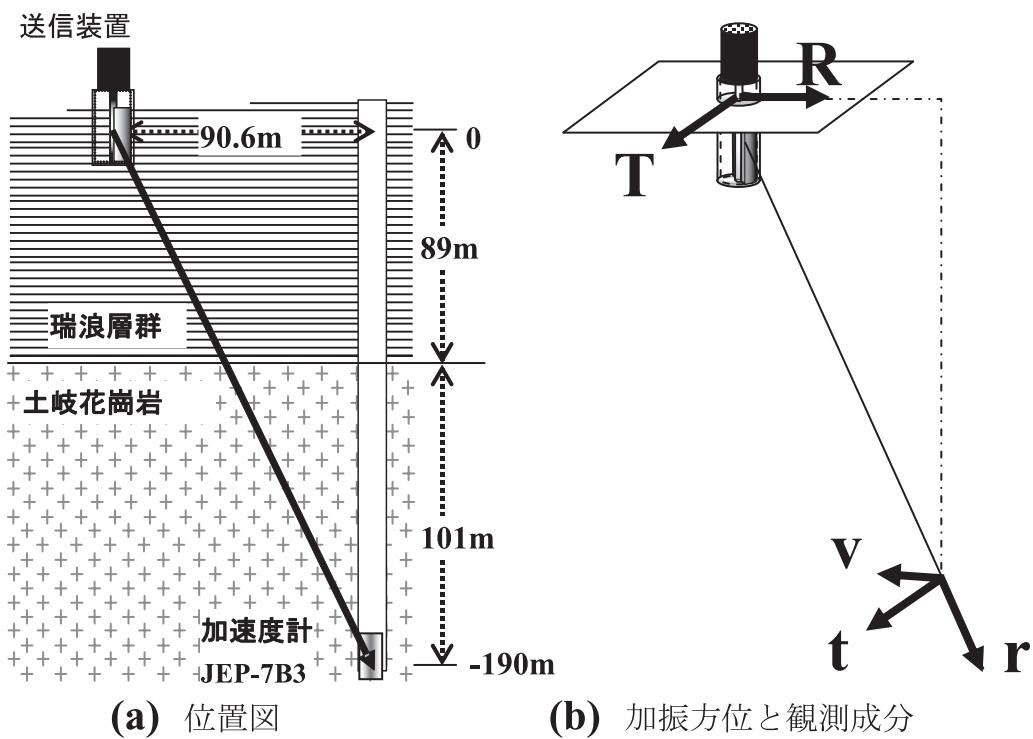


図 2-1-10 送信装置と 98SE-01 号孔底地震計

1日間のスタッキングにより得られた周波数領域の伝達関数を時間波形に変換したもの（グリーン関数）の一例を図2-1-11に示す。vR成分とtT成分に振幅の大きい顕著な波相が見られ、鉛直軸の周りの偏心錘の回転で発生する地震波の放射パターンと調和的である。それぞれの成分の大きな波相は、SV波およびSH波の直接波に対応していると考えられる。エンベロープのピークから求めた走時は両者とも約0.165sである。平均的なS波速度は1.28(=0.201/0.165)km/sとなる。

1日間スタッキングしたグリーン関数を、3年間分重ね書きしたものを図2-1-12に示す。0.2秒以降の線が太くなっている、坑道内の観測で得られた結果（國友・熊澤, 2004c）と同様に、直接波の変化に比べて後続波の変化が大きいことが分かる。

1日間スタッキングにより得られたグリーン関数のエンベロープを求め、3年間の変化を示したのが図2-1-13である。(a1)および(b1)は、vRおよびtTのエンベロープ振幅をグレイスケールによって示している。振幅の小さい後続波には濃淡の変化が見られるが、振幅の大きい直接波には目立った変化が認められない。そこで、直接波の到来を示すエンベロープの最大値の変化をプロットしたのが(a2)および(b2)である。また、(a3)および(b3)は、エンベロープ最大値の両側0.09秒間のウィンドウについて、2004年2月21日とのクロススペクトルの位相の傾きから遅延量を計算し、平均値との差をプロットしている。振幅は、夏場に大きくなり、冬場に小さくなる明瞭な年周変化が見られ、気温変化(d)と良く相關している。変化の程度はzRに比べてtTが大きく、振幅の絶対値に対して2~3%程度である。また、降雨(c)があると振幅が小さくなり、比較的直ぐに回復するというパターンも読み取ることができる。走時も振幅と同様の変化が認められ、夏場に走時が遅れ、冬場に進むという年周変動と、降雨によって走時が進むという傾向が認められる。走時変化は、最大で5ms程度である。

図2-1-14は、土岐送信所から最も近いHi-net観測点である八百津（距離11.3km）でのrRおよびtTの時間変化を示したものである。(a)の時間波形は、3年間スタッキングしたグリーン関数である。濃淡図は、3ヶ月間のスタッキングを1ヶ月毎に行い、そのグリーン関数のエンベロープを求めて、振幅の変化をグレイスケールで表現している。濃淡図では、年周的な振幅変動が見られ、その程度は走時が異なる波群毎に違っていることが読み取れる。濃淡図の右側に番号を振った波群について変化の様子をより見やすく表したのが(b)である。太い実線に見えるが、その波群の最大振幅値と誤差範囲が3本の実線でプロットされている。3ヶ月のスタッキングによって推定誤差が非常に小さくなっているため一本の実線に見えているのである。また、破線によって振幅変化のトレンドを示している。波群によって年周的な変化の程度や極性、位相が異なっていることが明瞭に認められる。最も大きく変化する波群では、20%もの変化がある。また、幾つかの波群は、振幅が大きくなる、あるいは小さくなるというトレンドが認められる。走時の大きい波群(rR-6,7, tT-6,7,8)では、概して変化が小さい。地殻深部（下部地殻）からの反射波であると考えれば、地表付近の影響を余り受けていないこともうなづける。送信点直下にある98SE-01号孔で得られた年周変動は2~3%であり、Hi-net八百津観測点の地震計が深度103mに設置されていること、走時（伝播経路）によって変化の仕方が非常に異なっていることを考慮すると、送信装置や地震計の問題ではなく、伝播経路上での変化を反映していると考えられる。

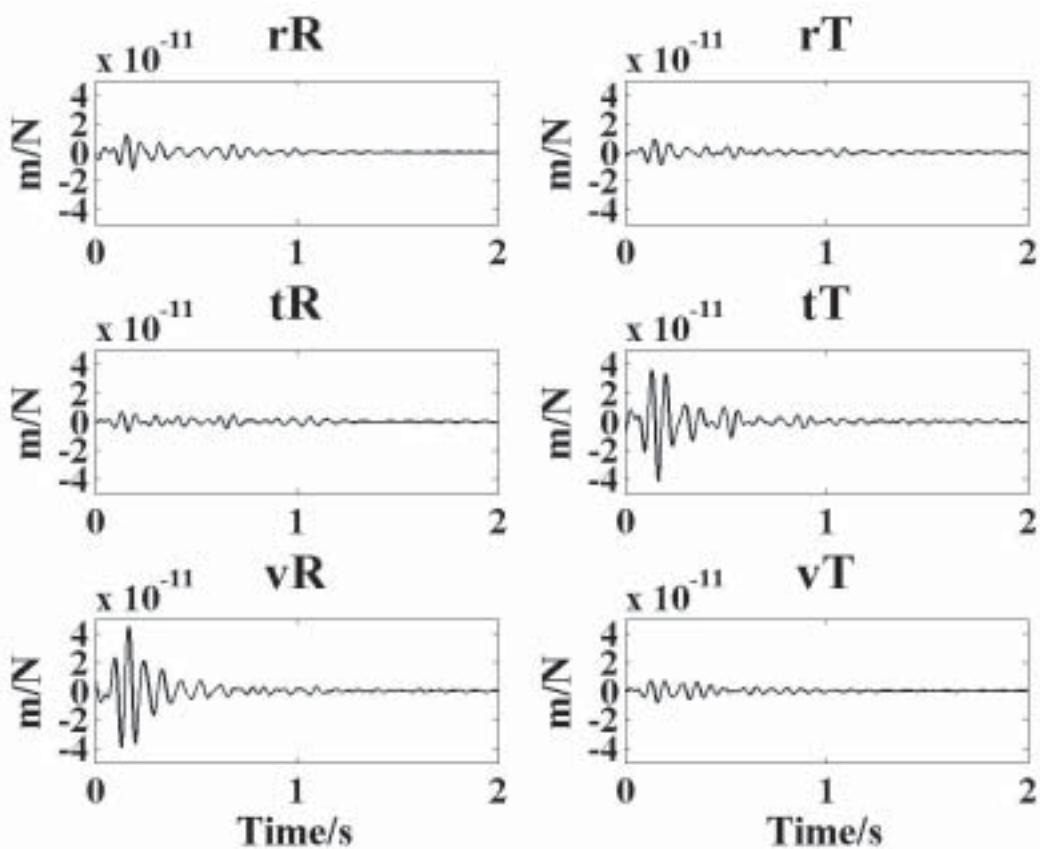


図 2-1-11 98SE-01 号孔底で得られたグリーン関数

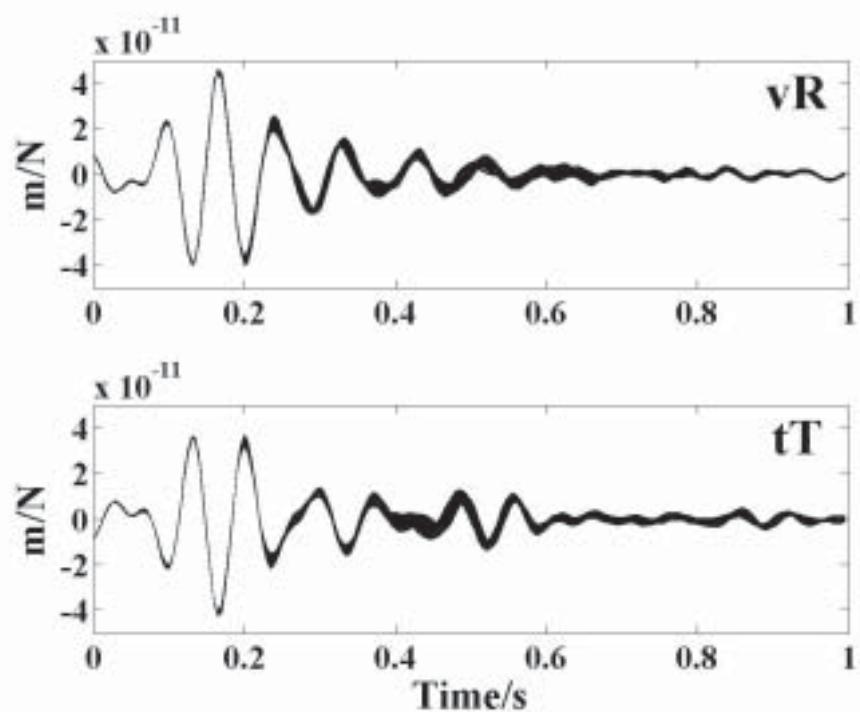


図 2-1-12 3 年分のグリーン関数の重ね書き

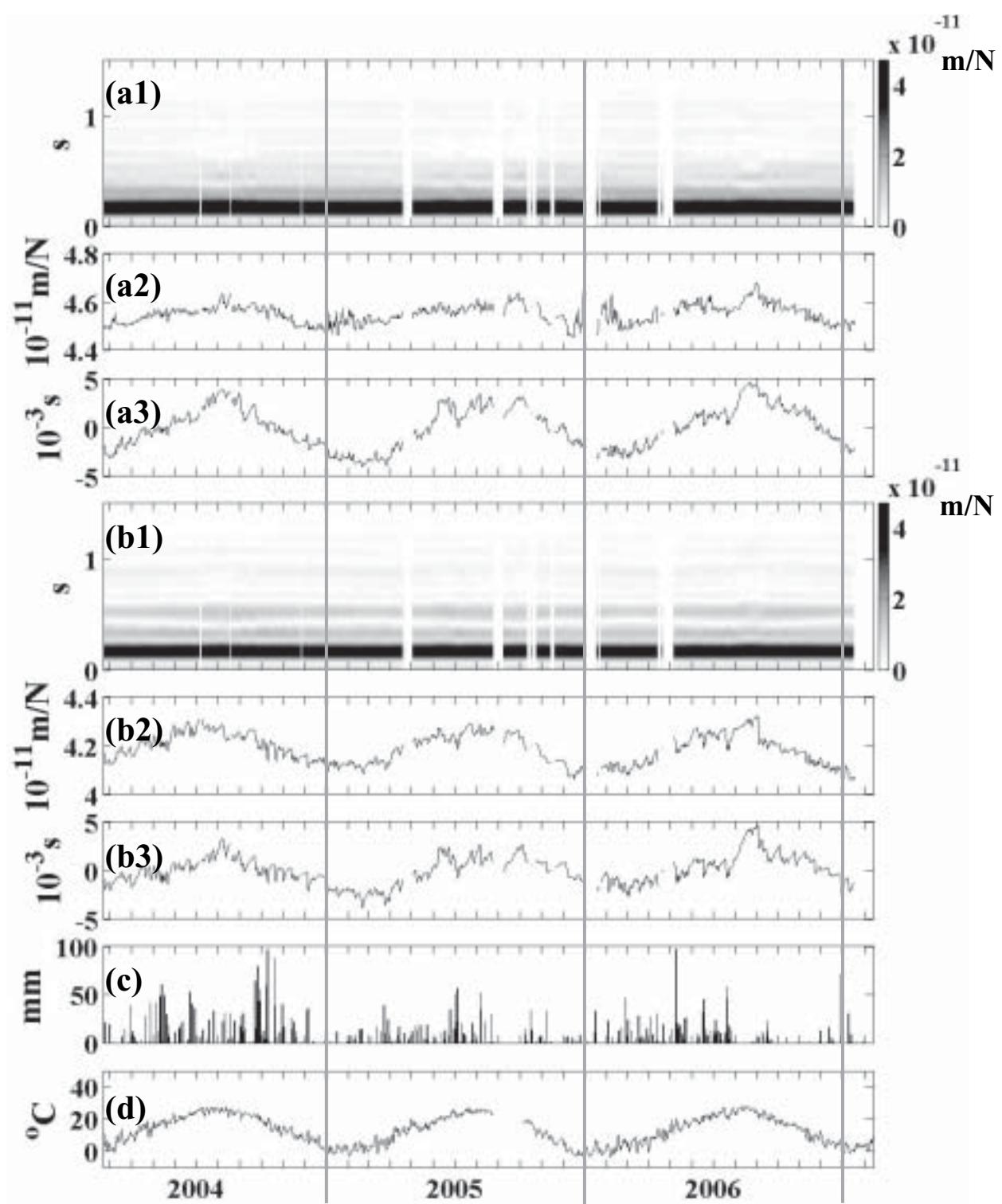


図 2-1-13 98SE-01 号孔底で得られた時間変化。エンベロープの時間変化の濃淡図

- (a1)vR (b1)tT エンベロープの最大振幅（走時 0.165 秒付近）の変化
- (a2)vR (b2)tT クロススペクトルから求めた走時の平均値からの遅延量
- (a3)vR (b3)tT 東濃鉱山で観測された(c)降雨量と(d)気温

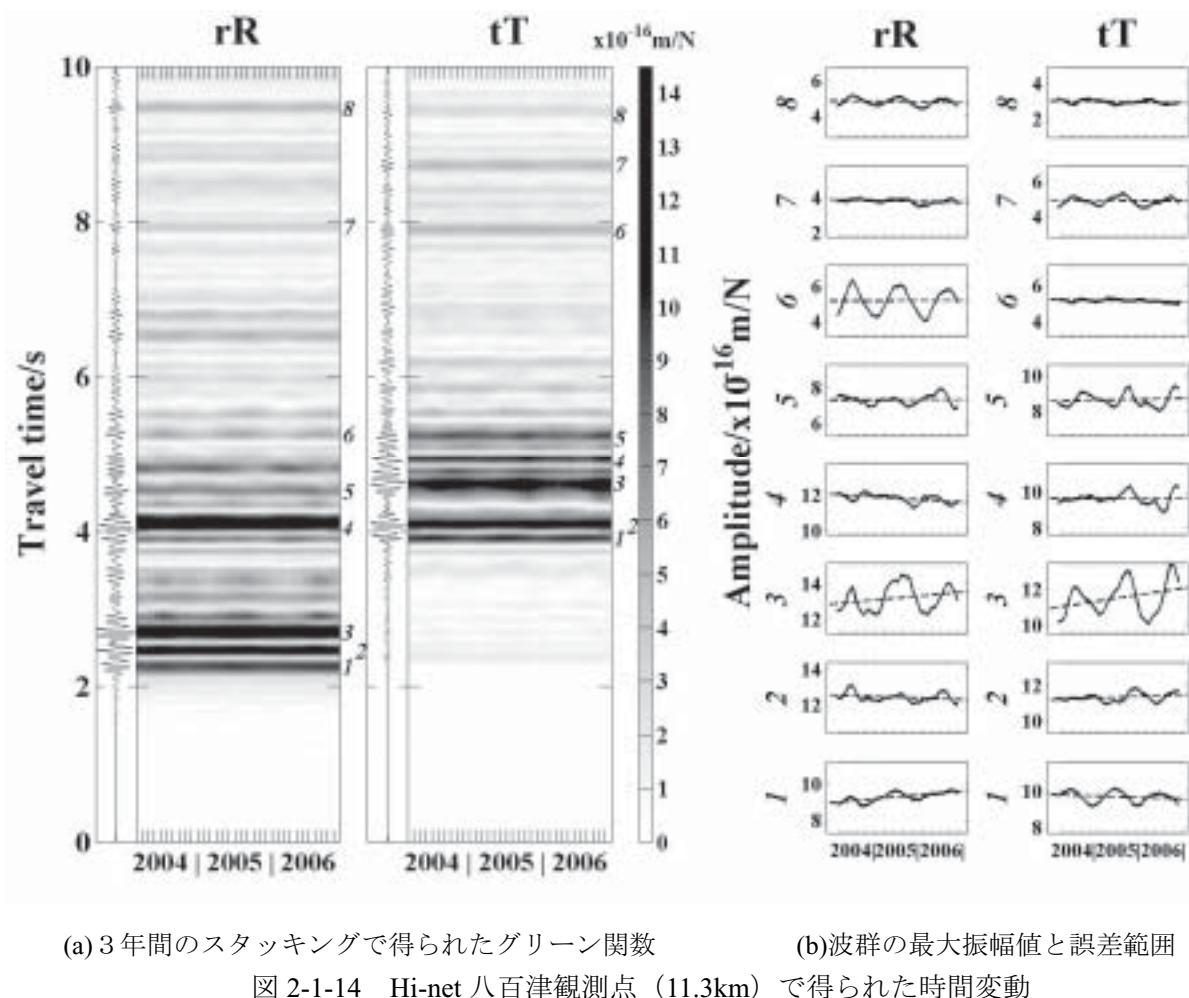


図 2-1-14 Hi-net 八百津観測点 (11.3km) で得られた時間変動

2.2 電磁アクロス

2.2.1 電磁アクロスの土岐送信システムの概要

東濃鉱山敷地内に、電磁アクロスの送信用接地電極、電極間に電流を流すためのケーブル、および送信をモニタするための接地電極を設置した。図 2-2-1 に東濃鉱山の電極およびケーブルの位置を示す。

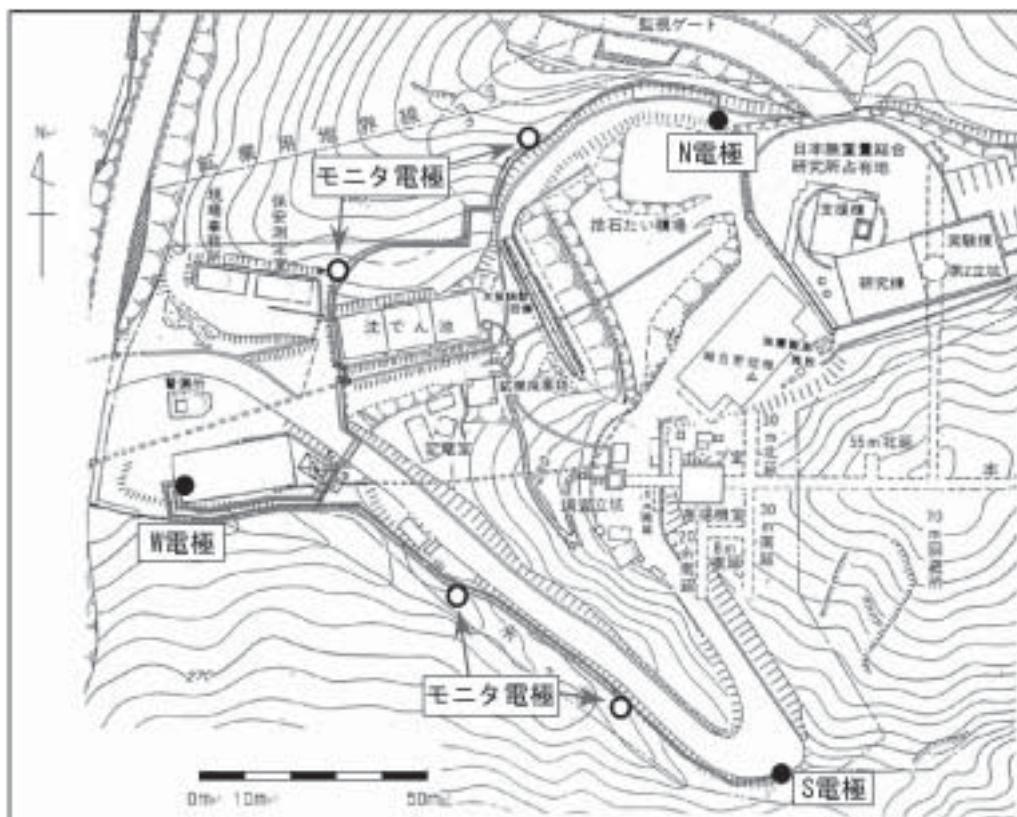


図 2-2-1 東濃鉱山における送信電極・モニタ電極、およびそれらを繋ぐケーブル

図 2-2-2 に送信システムの概略図を示す。

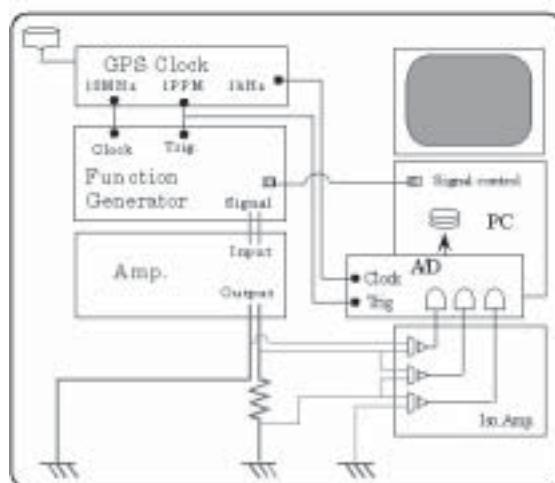


図 2-2-2 電磁アクロス送信システムの概略図（図には、送信モニタのための電流・電圧測定部分も含まれている）

信号送信のために使用している機器は、

- ・GPS 時計 (Symmetricom XL-AK)
- ・ファンクション・ジェネレータ (Agilent Technology HP33120A)
- ・パワーアンプ (千葉電子製 EAT01A および NF 回路ブロック社製 4025)

である。

GPS 時計は各受信点と同期した送信信号を発生させるために使われるだけでなく、送信点近傍でのモニタ記録のためのタイミング信号となる。ファンクション・ジェネレータでは、GPS 時計からのタイミング信号に同期して任意波形信号を出力する。パワーアンプでこの信号を増幅し地面上に電流を流す。以下に、用いたパワーアンプの仕様を示す。

・千葉電子製 EAT-01A

出力方式：定電流方式（入力電圧に比例した出力電流）：10A/2.5V

最大出力電圧：200V

最大出力電流：10A

定格周波数：DC～10kHz

入力電源：3相 200V 電源

出力電流・電圧モニタあり

・NF 回路ブロック社製 4025

出力方式：定電圧方式（入力電圧に比例した出力電圧）：x1, x20, x50, x100

最大出力電圧：±75 V

最大出力電流：±2A

定格周波数：DC～500kHz

入力電源：単相 100V 電源

出力電流：外付けシャント抵抗

送信は、一つのパワーアンプ出力を、一組の電極につなげることによって行うが、電極は3つ (N, S, W) があるので、パワーアンプの出力を1時間ごとに N=W および S=W の組み合わせを交互に切り替えて送信を行う。このことにより、ベクトル送信が可能になる。隣り合った1時間平均の送信信号のベクトル和をとることにより、その2時間の間の任意の方向の励起に対する応答が求められる。すなわち、送信電流(Input)から観測量：磁場・電場(Output)への伝達関数はテンソル量として取得可能となる。この電極の切り替えに関するシステムの概略を図 2-2-3 に示す。

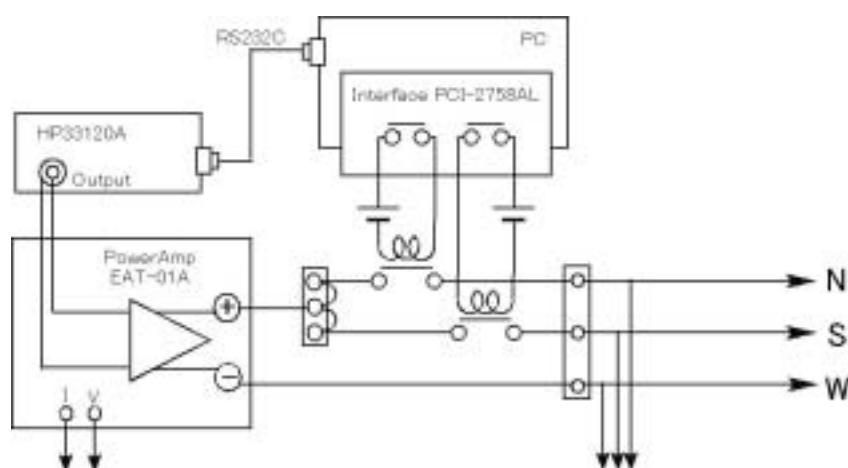


図 2-2-3 電磁アクロス送信システム：送信電極切替制御部の概略図

最後に送信波形設計の例を示す。送信信号としては、複数の離散周波数系列の信号を同時に送れるものとする。拡散電磁波の特徴は、周波数の平方根に比例して、伝播速度、波長等が変化する。そのため、伝播させる信号も、等間隔の周波数でなく、周波数の平方根に比例したものを用いる方が都合がよい。また、複数周波数の同時送信は、一番単純には、各周波数成分の信号を足し合わせた信号を用いることである。この足し合わせの際、各周波数成分の周期の最小公倍数を設計信号の周期とすれば、繰り返し信号となり、連続送信しても離散周波数で漏れのない常時送信が可能となる。

$$\begin{aligned}
 & \left[s_1 \mid a_1 \cos(\varpi_1 t 2 \lambda_1) \right. \\
 & \quad \vdots \\
 & \left. s_n \mid a_n \cos(\varpi_n t 2 \lambda_n) \right] \\
 S \mid & \xrightarrow[j=1]{n} s_j
 \end{aligned} \tag{2-2-1}$$

各周波数成分の振幅は、観測に応じて、ある周波数範囲の振幅を大きくすることが可能である。一般的には、高周波数成分ほど減衰が大きいので、振幅も大きくする。位相は、時間軸上で振幅が大きくならないように調整する。この決め方は、モンテカルロ法のように、ランダムに位相を変えて計算する方が最適値を見つけられると考えられるが、周波数範囲が広い場合には、高周波数成分の初期位相は低周波数成分の初期位相に対して影響は少なく、またランダムに位相を与える方法では計算時間もかかるので、ここでは $\phi/2$ ごとに変化させた場合の時間波形での最小値を求めることにした。

以下に、H19年度に継続して送信していた信号を示す。

基準周期（＝FG出力の繰り返し周期）：0.4秒

基準周波数（1/基準周期）：2.5 Hz

信号周波数：11周波数 [1 3 9 17 27 37 51 65 81 101 121] x 2.5 Hz

相対信号振幅：[1.0 1.73 3.0 4.12 5.20 5.20 5.20 6.24 6.24 6.24 6.24]

初期位相：[0 0 0 1 0 2 1 0 0 2 3] x $\phi/2$

図2-2-4に送信信号の時系列およびスペクトルを示す。

2.2.2 東濃鉱山での送信、およびモニタ結果の概要

H19年度中における東濃鉱山での電磁アクロスの連続送信、およびモニタ結果を示す。連続送受信試験は、2007年6月28日以降現在まで継続している（その前の期間は、機器の調整および、データ記録装置の不具合によるデータ欠損区間である）。送信電極の選択は、偶数時期間（0時台、2時台,,,）にはN=W電極からの送信を行い、奇数時期間（1時台、3時台,,,）にはS=W電極からの送信を行っている。電極切り替えは、毎時59分30～32秒に行っているが、この電極切り替え時のデータはスタッキングには用いない。

図2-2-5から図2-2-8に、送信周波数毎の送信電流および送信電極間の電位差を示す。黒点が1日ごと・送信電極別の平均値を示し、灰色線がデータ信頼区間を示している。データが切れている区間は、停電・PC停止等による送信中断期間である。

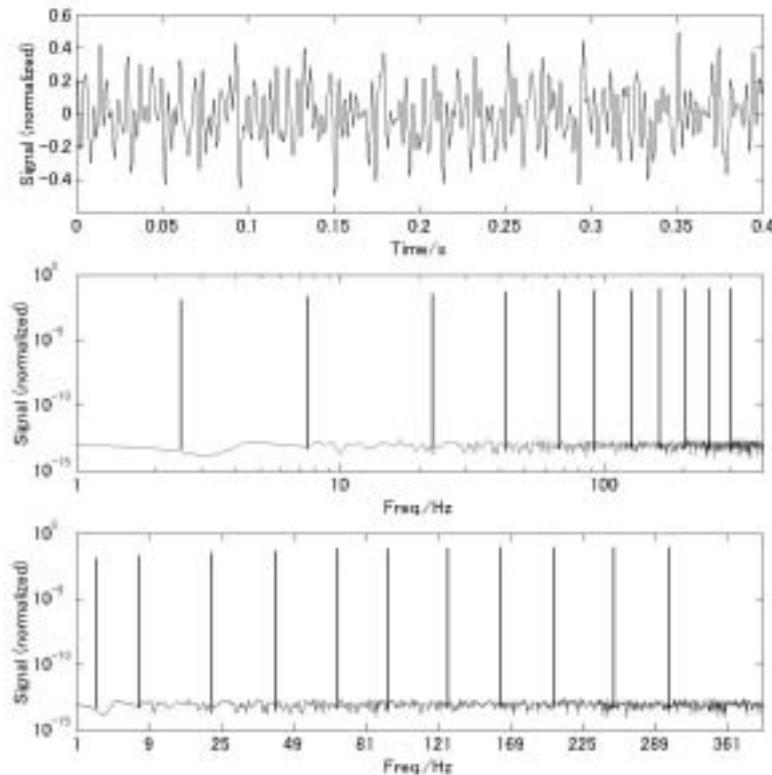


図 2-2-4 電磁アクロスの H20 中の送信信号。上から、時系列信号、スペクトル（周波数軸対数）、スペクトル（周波数の平方根で横軸をとった）

送信電流と電圧の比較をすると、電流の方が振幅・位相とも変動が大きい。これは送信に電圧制御アンプを用いているため、電圧の変化は基本的に送信信号を作成しているファンクション・ジェネレータと送信アンプの安定性を示しているのに対し、送信電流には送信電極の接地抵抗の変化が現れているためと考えられる。また、N=W 電極の場合と、S=W 電極の場合の比較では、ほぼ似た年変動を示しているので、電極の極近傍だけの変動というよりも、少なくとも東濃鉱山のスケール程度での比抵抗の変化が年変動として現れていると考えられる。

送信電流の振幅変化については、年変動と思われるゆっくりした変化と、9 月中の細かい段差が現れている振幅の変化は年で 1 割程度である。振幅の変動についての周波数別の違いはあまり大きくないことが分かる。一方位相については、変動は $10m\pi rad$ の範囲に収まっていて、位相変化の割合 ($10m\pi rad/2\pi rad$) は、振幅に比べ小さいが、周波数によってその変化の仕方が変わっていることが認められる。これは位相の方が細かい変動まで区別できるような精度で決まっているためであるが、このような現象となる原因はまだ不明である。アンテナとしての周波数による送信効率の違いなどを表していると考えられるが、今後より詳しく調べる必要がある。

今後、送信電極の接地抵抗の変化や、比抵抗法として測定される地表付近の比抵抗の変化と接地抵抗の変化の比較、および方向依存性があるかなどを調べ、コントロールソースとしての送信アンテナの安定性について調べる必要があると考えている。特に、どのような自然現象と今回観測された変動が対応しているかなどを詳しく比較する予定である。

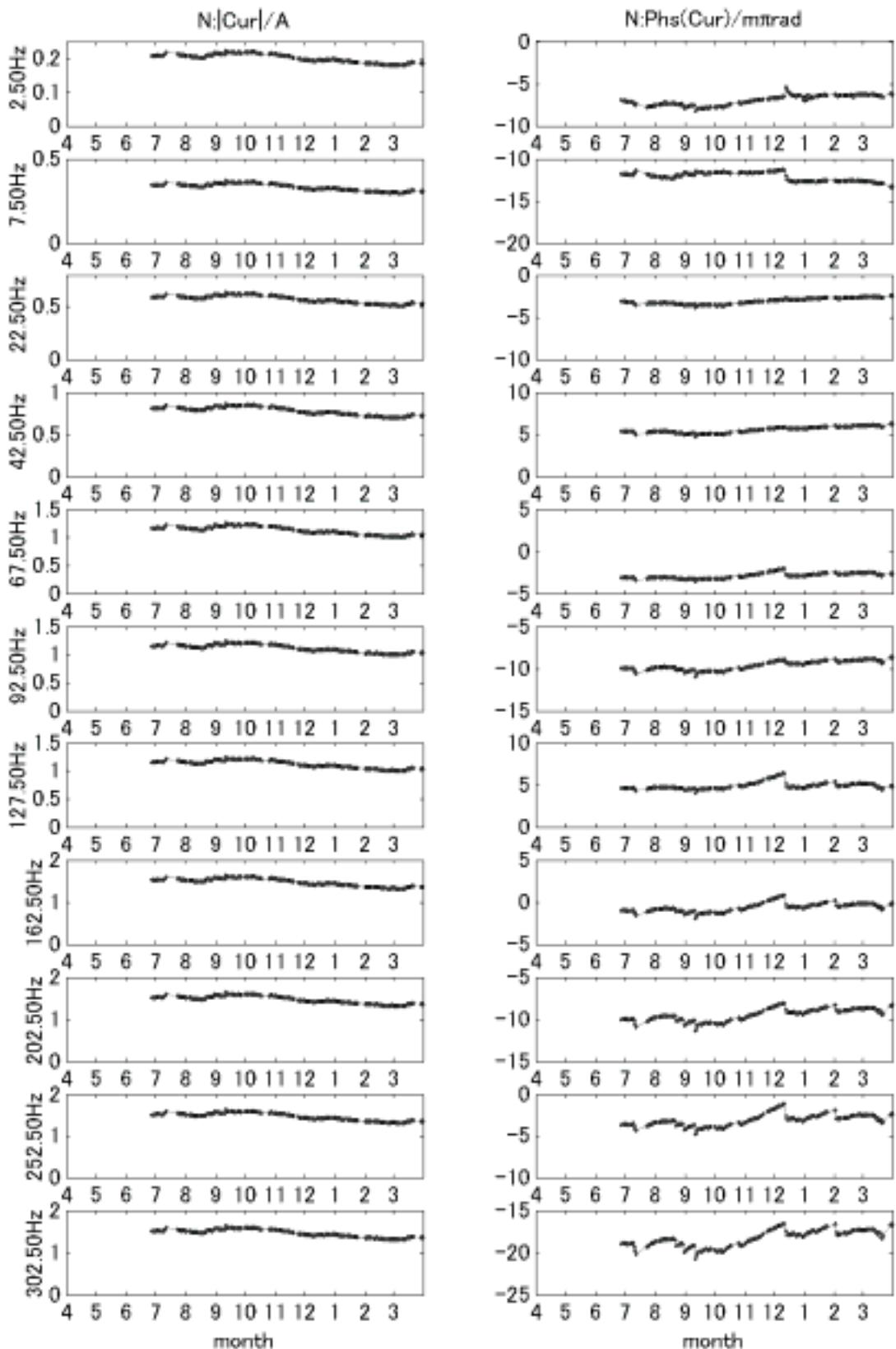


図 2-2-5 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の送信電流の振幅（左列）・位相（右列）の時間変動。信号の周波数は左側に示してある。横軸は H19 年度中の月の始まりを示す。位相はほぼ 0 になるようにずらして示している。

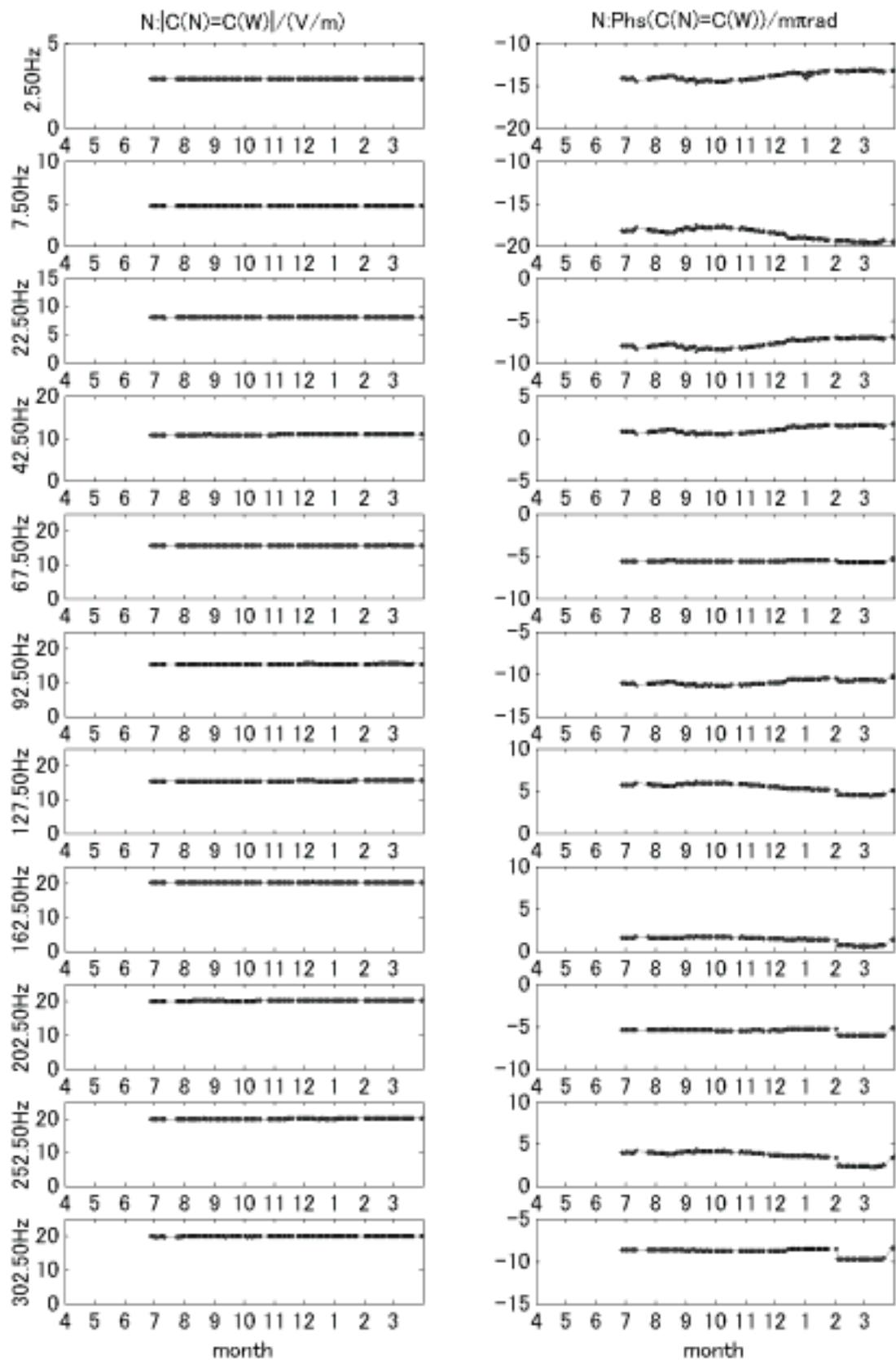


図 2-2-6 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の送信電極間電圧の振幅（左列）・位相（右列）の時間変動

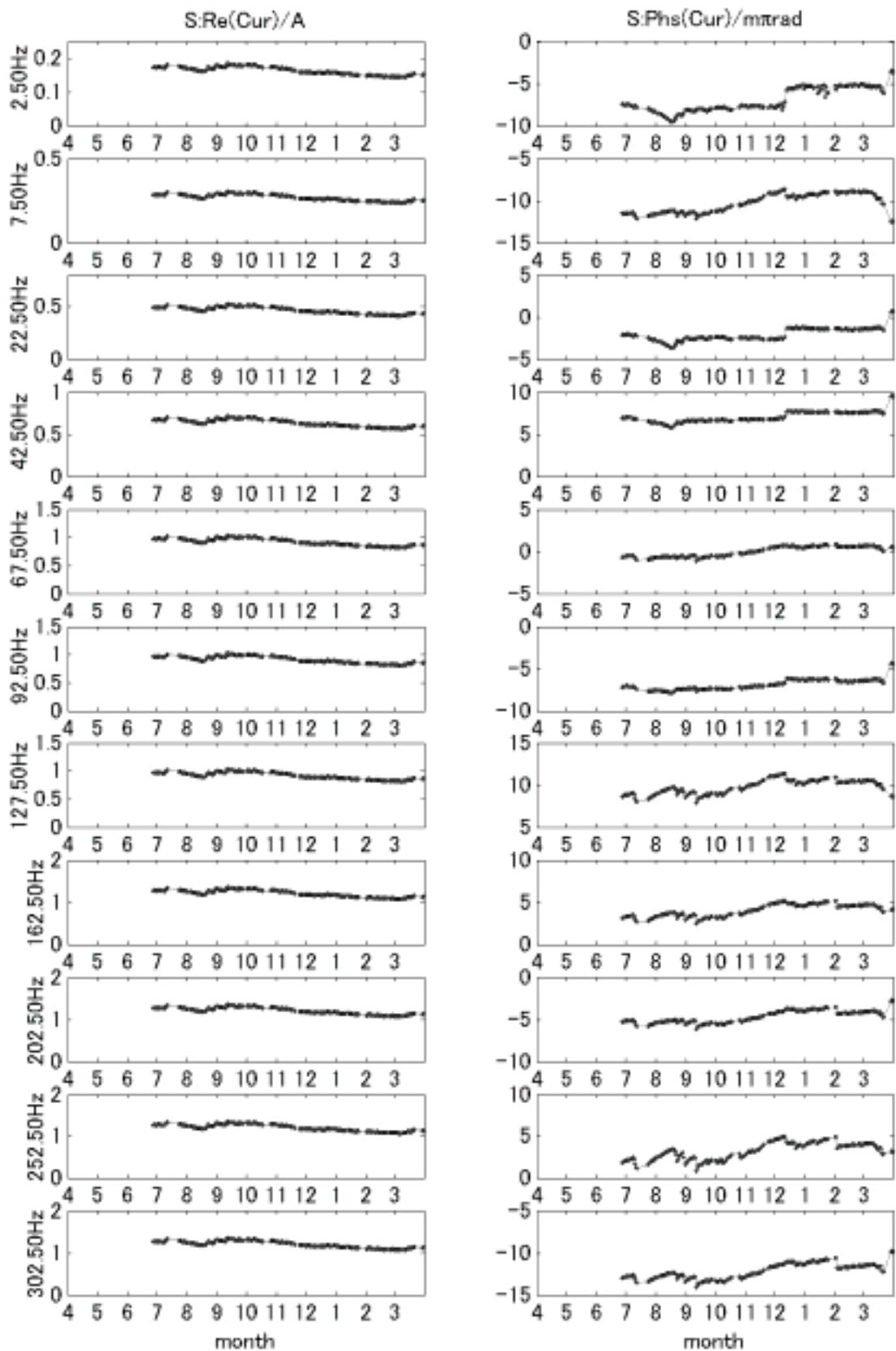


図 2-2-7 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の送信電流の振幅（左列）・位相（右列）の時間変動

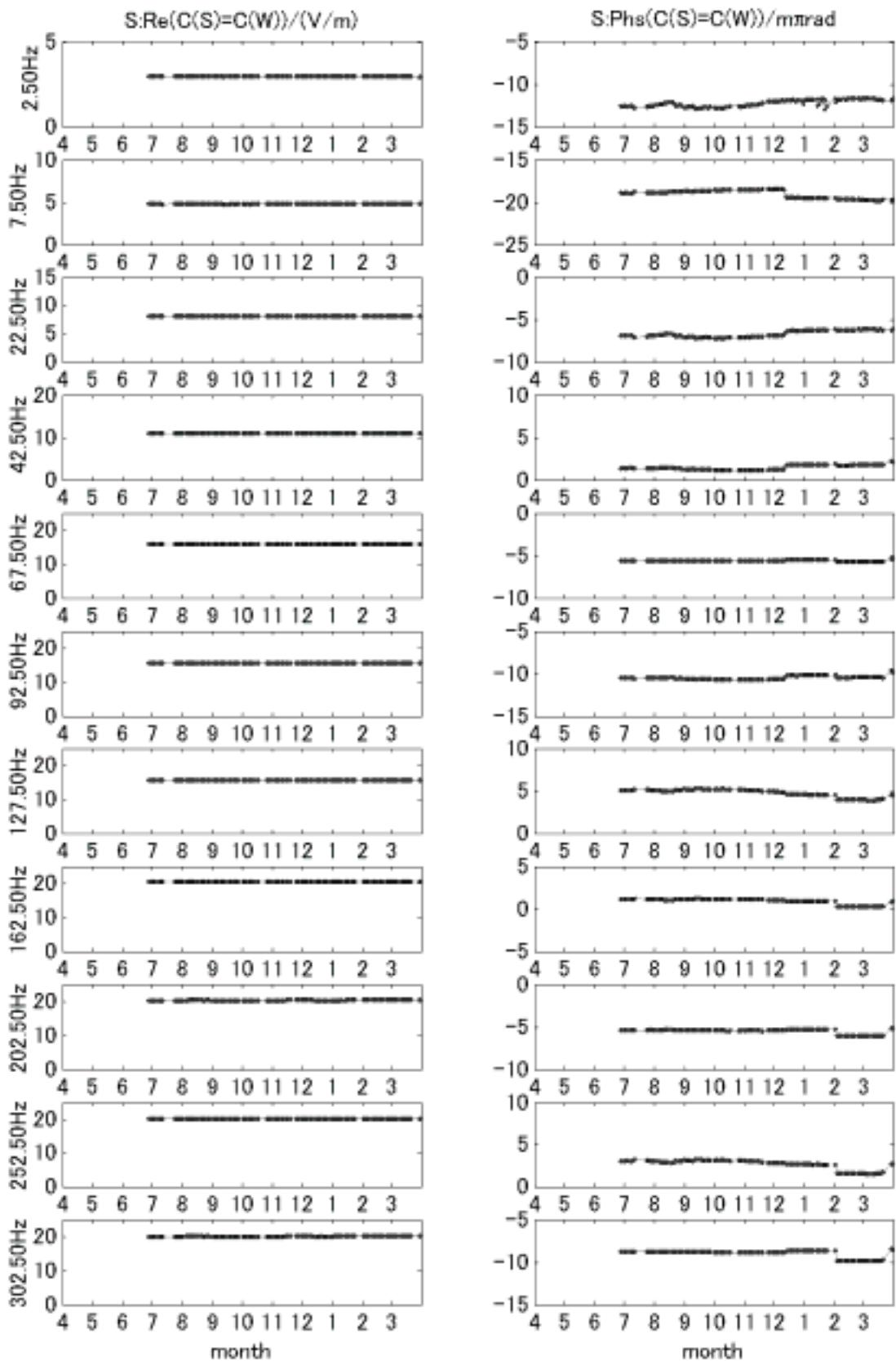


図 2-2-8 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の送信電極間電圧の振幅（左列）・位相（右列）の時間変動

2.2.3 正馬様用地での観測結果の概要

H19年度中における正馬様用地での電磁アクロス信号の観測結果を示す。図2-2-9に正馬様用地での受信点を示す。磁場観測は、磁力計としてBartington社製MAG03フラックスゲート磁力計を用いて3成分観測を行い、電場観測は、磁北および磁東成分を取るようにケーブルを這わして、33m間隔での電位差を測定している。結果を示す期間は2)と合わせて、2007年6月28日以降とする。また、送信電極を毎時変更しているので、送信電極別の結果を示す。

図2-2-10に、受信成分の一日分のデータのスタック結果を示す。この図で示すように、一日スタックでは十分な精度でアクロス信号が観測できていることが分かる。

図2-2-11から図2-2-14に受信した磁場N成分と電場EW成分の1日スタック結果の年変動を示す。電場の方が磁場に比べ変化が大きいことが分かる。これは、電磁アクロスの送信信号によって励起された電流の地下全体での総和として磁場が決まるのに対し、電場は電極近傍の比抵抗に直接比例するので、電場の方が変化に敏感であるためである。また、電場・磁場ともに送信点における変動よりも大きいので、観測された変動は、電磁波伝播の途中、および受信点近傍での変化を表していると考えられる。特に8月中旬に大きな変動があり、これは降雨などの影響を見ているものと考えられる。また、位相変化は、100Hz程度のところが一番大きく出ている。これは地下の比抵抗の変化について、深さ方向の情報を示していると考えられる。また送信方向によって、変動の大きさが異なっており、観測領域での異方性を表していると考えられる。

これらの観測によって得られた情報は、自然界のどの変動と対応するのかを確認する必要があるため、今後、降雨量、および地下水位などとの比較を行う予定である。

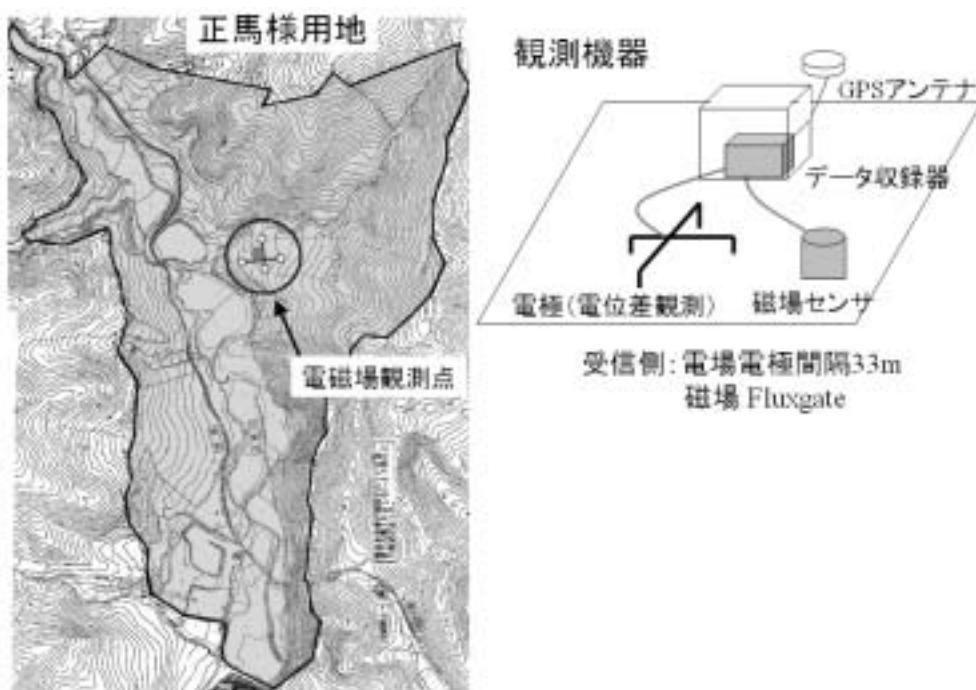


図2-2-9 正馬様用地で行っている電磁場観測点の場所と接地機器の概略図

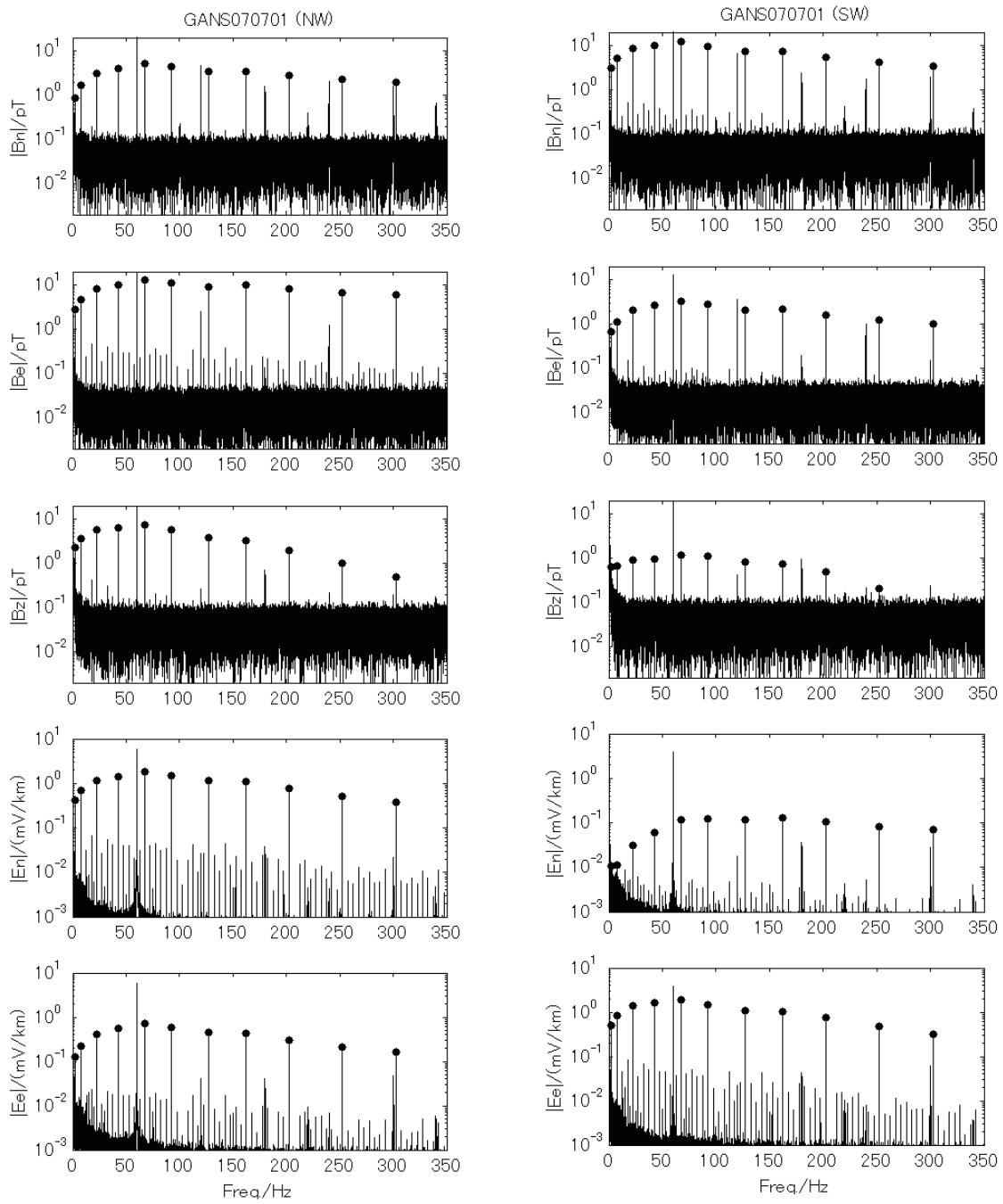


図 2-2-10 東濃鉱山での N=W 電極間送信時と S=W 電極間送信時に正馬様用地で観測された電磁場スペクトル。2007/7/1 の一日分のデータを 100 秒に等分し、等重みのスタッキングをした結果。

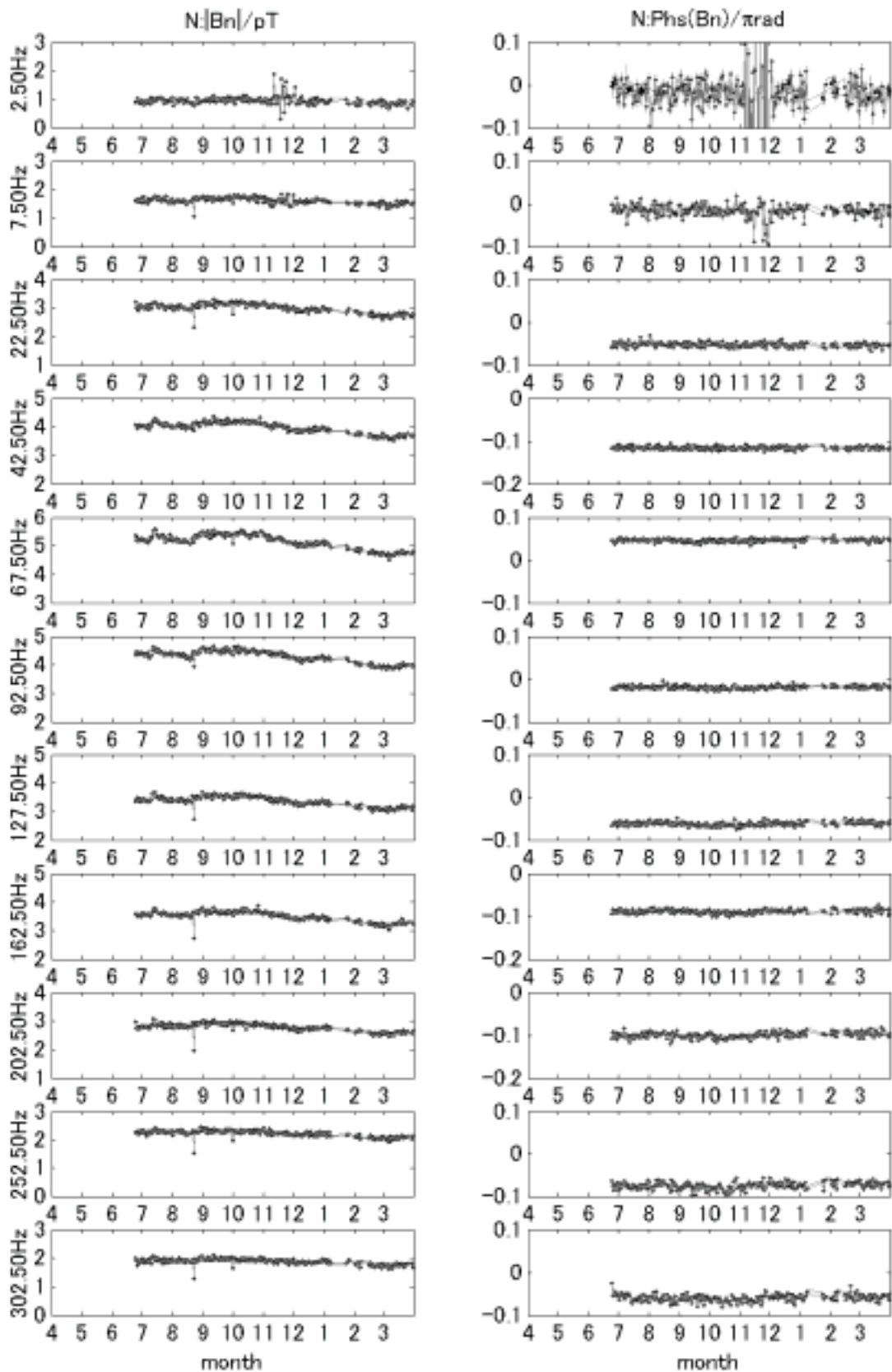


図 2-2-11 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の正馬様で観測された磁場 N 成分の振幅（左列）・位相（右列）の時間変動。信号の周波数は左側に示してある。横軸はH19年度中の月の始まりを示す。位相はほぼ 0 になるようにずらして示している。

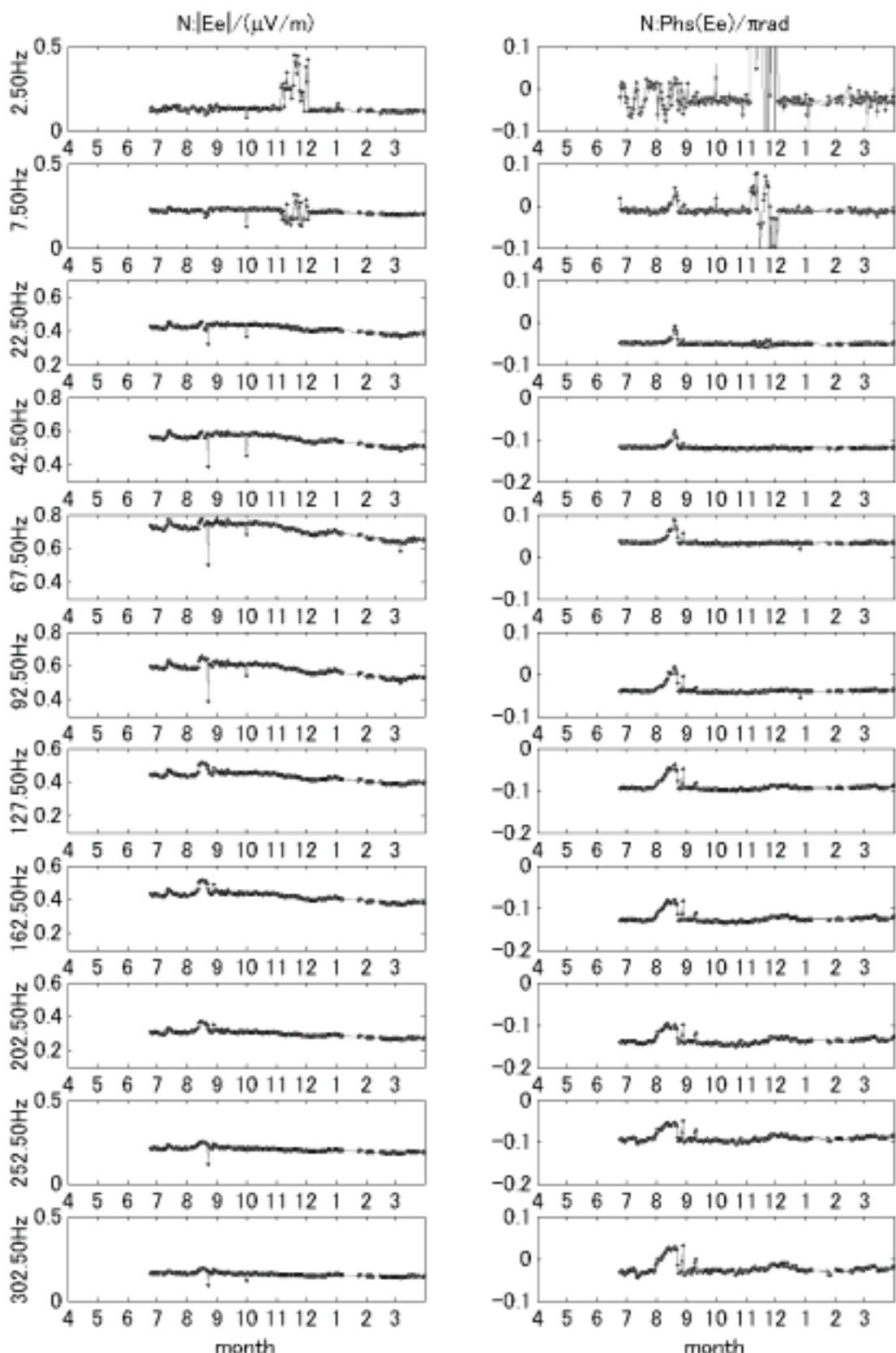


図 2-2-12 東濃鉱山での N=W 電極間送信時の正馬様で観測された電場 EW 成分の振幅
(左列)・位相 (右列) の時間変動

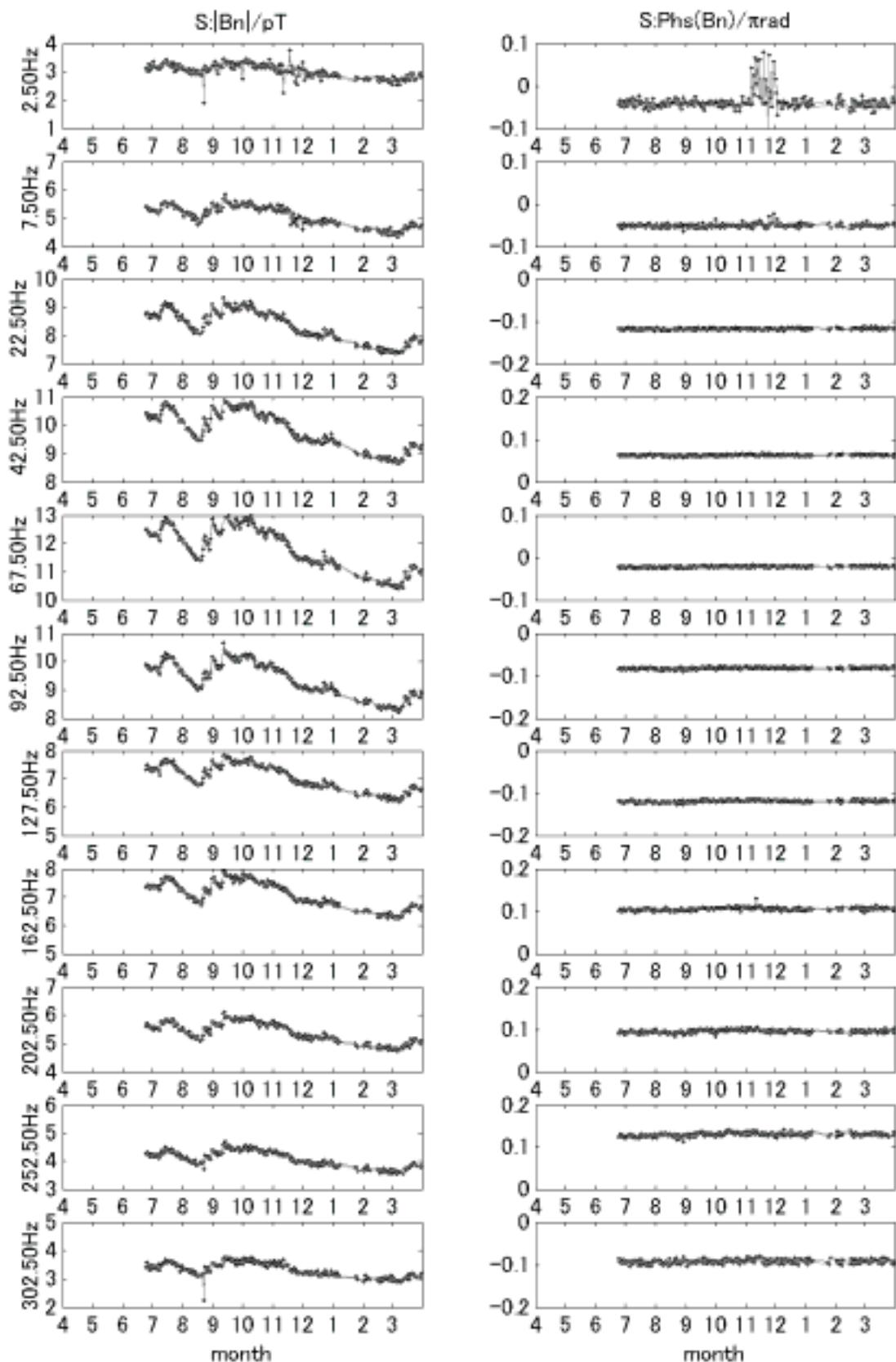


図 2-2-13 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の正馬様で観測された磁場 N 成分の振幅
(左列)・位相 (右列) の時間変動

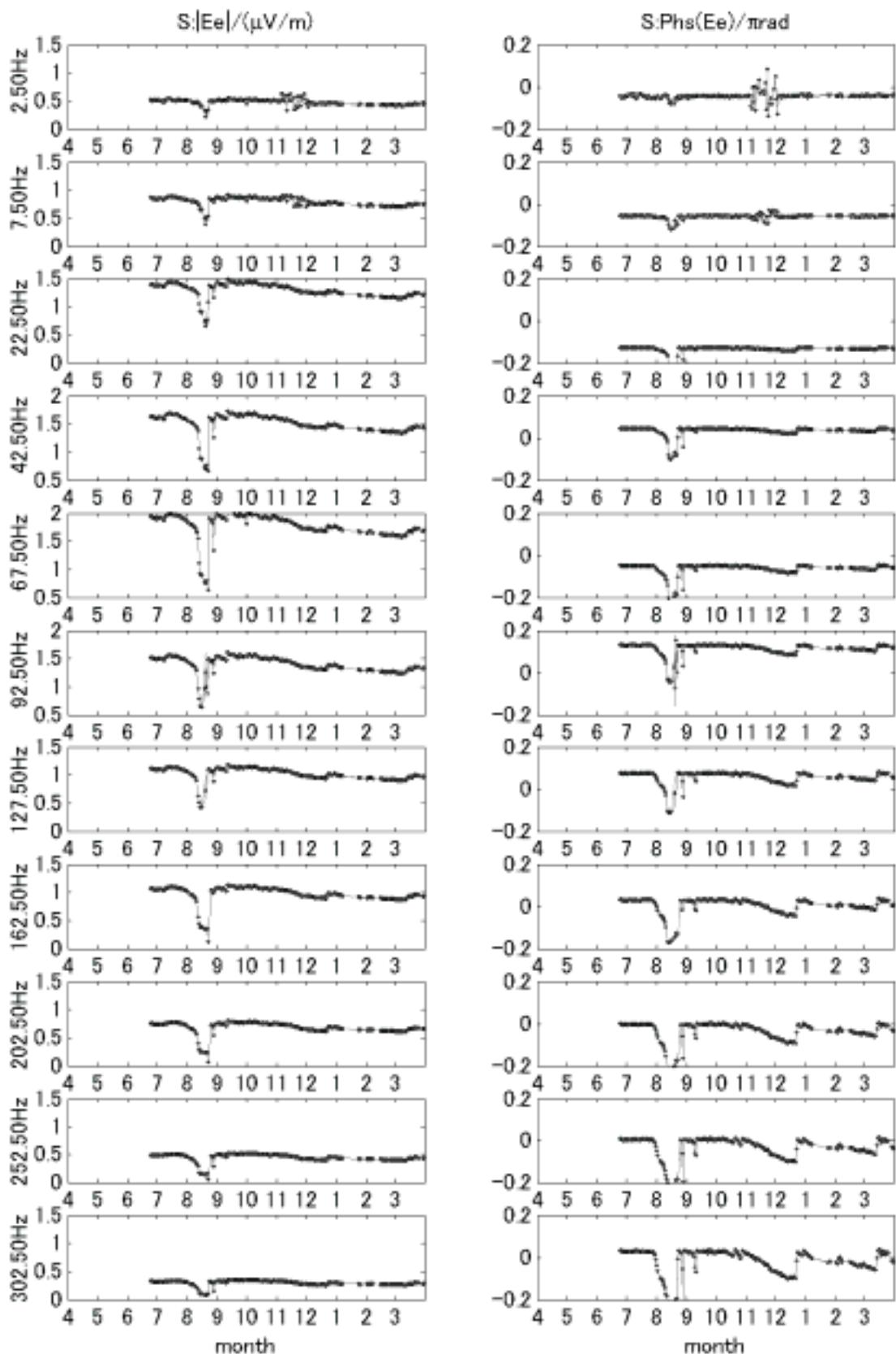


図 2-2-14 東濃鉱山での S=W 電極間送信時の正馬様で観測された電場 EW 成分の振幅
(左列)・位相 (右列) の時間変動

2.3 アクロスのための数値シミュレーション技術の基礎的検討

－境界条件の検討－

実空間における波動場 u は正の実数である ω と k に対し、4つの複素振幅で表現できる。ここで ω は周波数、 k は波数である。

$$u(t, x) = A(++) \exp(i\omega t - ikx) + A(+-) \exp(i\omega t + ikx) \\ + A(-+) \exp(-i\omega t - ikx) + A(--)\exp(-i\omega t + ikx) \quad (2-3-1)$$

ここで、波動が x の正の方向に伝播する場合は

$$A(--)=A(++)^* \quad \text{あるいは} \quad A(-\omega, k)=A(\omega, k)^* \quad (2-3-2)$$

波動が x の負の方向に伝播する場合は

$$A(-+)=A(+-)^* \quad \text{あるいは} \quad A(-\omega, k)=A(\omega, -k)^* \quad (2-3-3)$$

が成り立つ。

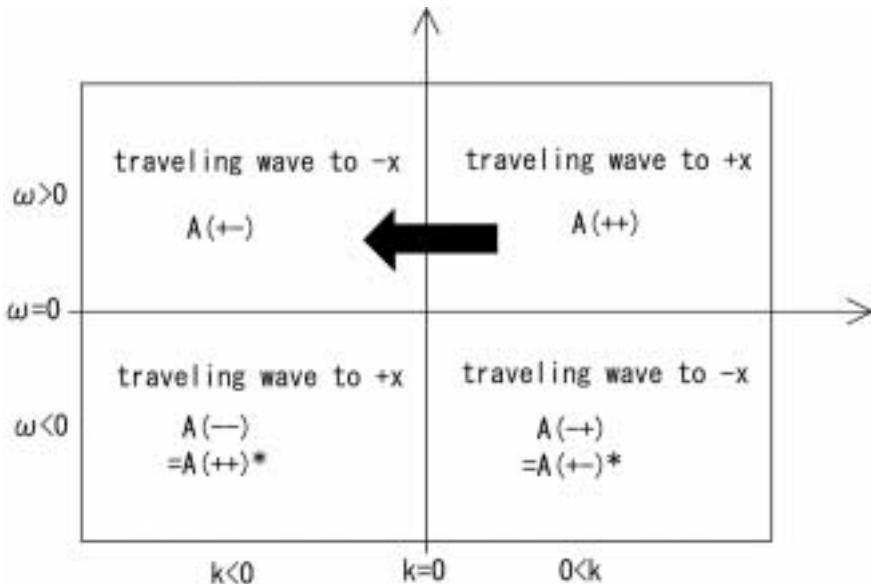


図 2-3-1 周波数空間と波数空間の関係

波動の伝播媒体に不連続が無い場合、 $A(+-)$ は $A(++)$ の k の符号を反転することによって得られるが、伝播媒体中に不連続がある場合はこの関係は成り立たない。今、左側の物理定数を $s_1, z_1, k_1 (= \omega s_1)$ 、右側の物理定数を $s_2, z_2, k_2 (= \omega s_2)$ と置く。ここで、 s はスローネス、 z はインピーダンスを表す。

不連続の影響を波動が $+x$ 側を伝播する場合と $-x$ 側を伝播する場合に分けて考察する。今、 $+x$ の方向に伝播する波が不連続境界 ($x = x_d$) に入射すると、透過波と反射波に分離される。

$$\mathbf{u}_{I1}(x - x_d) = \mathbf{u}_{10} \exp(-i k_1 \Delta x) \quad (\text{入射波}) \quad (2-3-4)$$

$$\mathbf{u}_{T1}(x - x_d) = \mathbf{u}_{12} \exp(-i k_2 \Delta x) \quad (\text{透過波}) \quad (2-3-5)$$

$$\mathbf{u}_{R1}(x - x_d) = \mathbf{u}_{11} \exp(+i k_1 \Delta x) \quad (\text{反射波}) \quad (2-3-6)$$

今、不連続境界において変位と応力の両方が連続であるという条件を与えると、

$$\mathbf{u}_{10} = ((\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2) / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{10} \quad (2-3-7)$$

$$\mathbf{u}_{12} = (2 \mathbf{z}_1 / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{10} \quad (2-3-8)$$

$$\mathbf{u}_{11} = ((\mathbf{z}_1 - \mathbf{z}_2) / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{10} \quad (2-3-9)$$

ただし、 $\mathbf{z} = (\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2) / 2$ である。以上より境界条件を満足するためには、

$$\mathbf{u}_{o1} = \mathbf{u}_{10} + \mathbf{u}_{11} = (2 \mathbf{z}_1 / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{10} = \mathbf{u}_{12} \quad (2-3-10)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{o1} = 0 \quad (2-3-11)$$

$$\text{または } \mathbf{u}_{10} = (\mathbf{z} / 2 \mathbf{z}_1) \mathbf{u}_{o1} \quad (2-3-12)$$

となる。

同様に、 $-x$ の方向に伝播する波が不連続境界 ($x = x_d$) に入射すると、透過波と反射波に分離され

$$\mathbf{u}_{I2}(x - x_d) = \mathbf{u}_{20} \exp(-i k_2 \Delta x) \quad (\text{入射波}) \quad (2-3-13)$$

$$\mathbf{u}_{T2}(x - x_d) = \mathbf{u}_{22} \exp(-i k_1 \Delta x) \quad (\text{透過波}) \quad (2-3-14)$$

$$\mathbf{u}_{R2}(x - x_d) = \mathbf{u}_{22} \exp(+i k_2 \Delta x) \quad (\text{反射波}) \quad (2-3-15)$$

$$\mathbf{u}_{20} = ((\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2) / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{10} \quad (2-3-16)$$

$$\mathbf{u}_{22} = (2 \mathbf{z}_2 / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{10} \quad (2-3-17)$$

$$\mathbf{u}_{21} = ((\mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_1) / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{10} \quad (2-3-18)$$

$$\mathbf{u}_{o2} = \mathbf{u}_{20} + \mathbf{u}_{21} = (2 \mathbf{z}_2 / \mathbf{z}) \mathbf{u}_{20} = \mathbf{u}_{22} \quad (2-3-19)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{o2} = 0 \quad (2-3-20)$$

$$\text{または } \mathbf{u}_{10} = (\mathbf{z} / 2 \mathbf{z}_2) \mathbf{u}_{o2} \quad (2-3-21)$$

以上より、不連続境界における連続および不連続パラメーターを得ることができる。

$$\mathbf{u}_{o1}' = -(\mathbf{i} \mathbf{u}_{o1} / 2 \mathbf{z}_1) (\mathbf{k}_1 \mathbf{Z}_2 + \mathbf{k}_2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-22)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{o1}' = (\mathbf{i} \mathbf{u}_{o1} / 2 \mathbf{z}_1) (\mathbf{k}_1 \mathbf{Z}_2 - \mathbf{k}_2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-23)$$

$$\mathbf{u}_{o1}'' = (\mathbf{u}_{o1} / 2 \mathbf{z}_1) (\mathbf{k}_1^2 \mathbf{Z}_2 + \mathbf{k}_2^2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-24)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{o1}'' = -(\mathbf{u}_{o1} / \mathbf{z}_1) (\mathbf{k}_1^2 \mathbf{Z}_2 - \mathbf{k}_2^2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-25)$$

$$\mathbf{u}_{o2}' = +(\mathbf{i} \mathbf{u}_{o2} / 2 \mathbf{z}_2) (\mathbf{k}_1 \mathbf{Z}_2 + \mathbf{k}_2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-26)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{o2}' = -(\mathbf{i} \mathbf{u}_{o1} / 2 \mathbf{z}_2) (\mathbf{k}_1 \mathbf{Z}_2 - \mathbf{k}_2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-27)$$

$$\mathbf{u}_{o2}'' = (\mathbf{u}_{o1} / 2 \mathbf{z}_2) (\mathbf{k}_1^2 \mathbf{Z}_2 + \mathbf{k}_2^2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-28)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{o2}'' = -(\mathbf{u}_{o1} / \mathbf{z}_2) (\mathbf{k}_1^2 \mathbf{Z}_2 - \mathbf{k}_2^2 \mathbf{z}_1) \quad (2-3-29)$$

以上より、媒質のインピーダンスの違いにより、右へ進む波動と左へ進む波動は異なることになる。ただし、媒質のインピーダンスに不連続が無い場合は、右へ進む波動と左へ進む波動は、媒質から同じ影響を受ける。

3. 地質環境のモニタリング技術としてのアクロスの適用性評価

3.1 戸狩観測点（東濃地震科学研究所）のデータ解析

東濃地震科学研究所は図 3-1-1 に TGR と示した位置にボーリング孔を掘削、3 成分地中埋設型速度計を深度 165m および 350m に設置し、2004 年 4 月より地震の連続観測を開始した。なお、戸狩観測点における瑞浪層群と土岐花崗岩の不整合深度は約 80m であり、両速度計は花崗岩中に設置されている。

核燃料サイクル開発機構（2003）によれば、アクロス送信所のある東濃鉱山から瑞浪超深地層研究所用地にかけて月吉チャンネルと呼ばれる花崗岩不整合面上の窪みが発達している。TGR の北約 250m に位置するボーリング孔 DH-2 号孔における不整合面深度は約 170m であり、DH-2 号孔が窪みの中央部に TGR は窪みの縁に掘削されていることが、両者の不整合面深度が大きく異なる理由である。

今回、戸狩観測点で取得されたデータを東濃地震科学研究所より譲り受け、東濃鉱山から発信された弾性波アクロス（國友・熊澤、2004a）のデータ解析を行ったので、その結果について報告する。なお、譲り受けたデータは 2004 年 4 月から 2006 年 3 月までの 2 年間のデータである。



図 3-1-1 戸狩観測点の位置

3.1.1 データ処理

データは1時間分のデータが1つのファイルに収められている。ファイル名はyyymmddhhである。ここで、yy は西暦年の下 2 桁、mm は月、dd は日、hh は時刻（00 時から 23 時）である。この1ファイルに深度 165m および深度 350m の速度計それぞれ 3 成分データが 0 から 5 チャンネルに対

応付けられて格納されている。ファイルの形式は東京大学地震研究所で開発された win フォーマットである。

まず最初に、このファイルから各チャンネルの 1 時間データを作成した。ファイル名は yyymmddhhc とし、c はチャンネル番号で 0 から 5 の値をとる。次に、各チャンネルの 1 時間データについて 200 秒毎に時間領域で単純スタッキングを行った。

スタッキングの開始日時と終了日時を決めた段階で、この 200 秒データを周波数領域に変換し、弾性波アクロス震源の正回転時刻のデータと逆回転時刻のデータ毎に最適重み付スタッキング法（長尾他, 2004）を用いてスタッキングし、最後に正回転データと逆回転データを足すことにより radial 方向の加震力、正回転データから逆回転データを引くことにより transverse 方向の加震力に相当する観測スペクトルを求め（國友・熊澤 2004 b），これを震源関数で割ることにより、6 成分の伝達関数を求めた（例えば、鶴我他, 2004）。記号の用い方については図 3-1-2 を参照されたい。



3.1.2 伝達関数

以下、深度 165m の速度計を TGR165、深度 350m の速度計を TGR350 と標記する。図 3-1-3 に TGR165 のデータを 24 時間および 240 時間スタッキングして結果得られた時間領域の伝達関数を示す。

スタッキング時間が 24 時間の場合、例えば rR 成分では推定されたノイズの標準偏差は 1.1×10^{-13} (m/s/N) であり、3 秒以降のイベントについては、それが意味のあるイベントなのかノイズなのかの区別がつかない。しかし、240 時間スタッキングした結果では、ノイズの標準偏差は 3.3×10^{-14} (m/s/N) と小さくなり 3 秒以降のイベントもノイズと区分できるようになる。

図 3-1-3(b) の radial 方向加震のデータからは 3 つの波群（図 3-1-3(b) 中の①から③）が識別でき、それぞれの走時はおおよそ 0.6 秒、0.9 秒、1.2 秒である。また③は最大振幅を示す。アクロス送信所と TGR の距離は約 2500m であるので、①から③の波群の見掛け速度は、おおよそ 4200 m/s, 2800m/s および 2100m/s となる。見掛け速度の値から考えて①は P 波の直達波であり、また、水平加震（回転軸が鉛直）により下方に S 波を放射していることや、実際にも 2.1.3 (2) で述べられているように、震源近傍では S 波が卓越して顕著に観測されていることから最大振幅を示す③は S 波の直達波であると考えられる。

これに対し、transverse 方向加震のデータはかなり複雑な波形をしている。tT の波形を例に取ると、0.6 秒付近に到達する波群①が識別できないのに対し、0.9 秒付近の波群②、1.2 秒付近

の波群③が明瞭に識別でき、さらに 1.4 秒付近（波群④）にも明瞭な波の到達が識別できる。この波群は最大振幅を示し、その見掛け速度はおおよそ 1800m/s となる。radial 方向加震のデータからは、S 波の直達波の走時は 1.2 秒と判断されたが、transverse 方向加震のデータで 1.2 付近に現れる波群は最大振幅を示さず、それよりもさらに遅く到達する波群④が最大振幅を示している。

図 3-1-4 は TGR350 のデータを 24 時間スタッキングして得られた伝達関数である。推定されたノイズの標準偏差は 4.3×10^{-13} (m/s/N) と TGR165 の場合より大きいが、振幅が TGR165 の 8 倍程度あるので、24 時間のスタッキングで、TGR165 の 240 時間スタッキングと同等の SN 比が得られている。

TGR165 と同様に radial 方向加震のデータからは 3 つの波群（図 3-1-4 中の⑪から⑬）が識別できた。それぞれの走時はおおよそ 0.6 秒、0.9 秒、1.2 秒であり、⑬は最大振幅を示すことなど、TGR165 とほぼ同様の結果が得られた。ただし、波群⑬は走時差がわずかに異なる二つの波群が重なっているように見える。一方、transverse 方向加震のデータは TRG165 とかなり様相が異なり、rT では波群⑪から波群⑬を分離して識別できない。さらに tT と zT では 0.6 秒付近および 0.8 秒付近の波群⑪および⑫を明瞭に識別できないのに対し、1.2 秒付近に波群⑬の到達が明瞭に識別でき、この波群は最大振幅を示す。以上より、⑪は直達 P 波、⑬は直達 S 波であると考えられる。

0.9 秒付近に到達する波群②および⑭については、その振幅が直達 P 波よりも大きいので、S 波を起源とする変換波の可能性が考えられた。早野ら（2004）によれば瑞浪層群中の P 波の平均速度は 2170m/s、S 波のそれは 1110m/s である。瑞浪層群中の S_v 波が不整合面で P 波に変換されて花崗岩中を伝わった考えると、アクロス送信所付近の瑞浪層群の層厚は約 150m であるので、直達 P 波との走時差は約 0.07 秒となり、このような単純なモデルでは 0.3 秒の走時差を説明することはできず、この波群の発生メカニズムの解明は今後の課題である。同じく、TGR350 の rT 成分で波群が識別できない理由の解明についても今後の課題である。さらに、TGR165 の tT 成分で直達 S 波と考えられる走時よりも遅い走時で最大振幅を示す波群が到達しているが、TGR350 には同じ現象が現れていない。このことから、その原因是 TGR165 近傍の速度構造に起因している可能性が高いと考えられる。冒頭で述べたように、TGR165 に到達する波動は月吉チャンネルの分布・形状等の影響を大きく受けていることは想像に難くない。

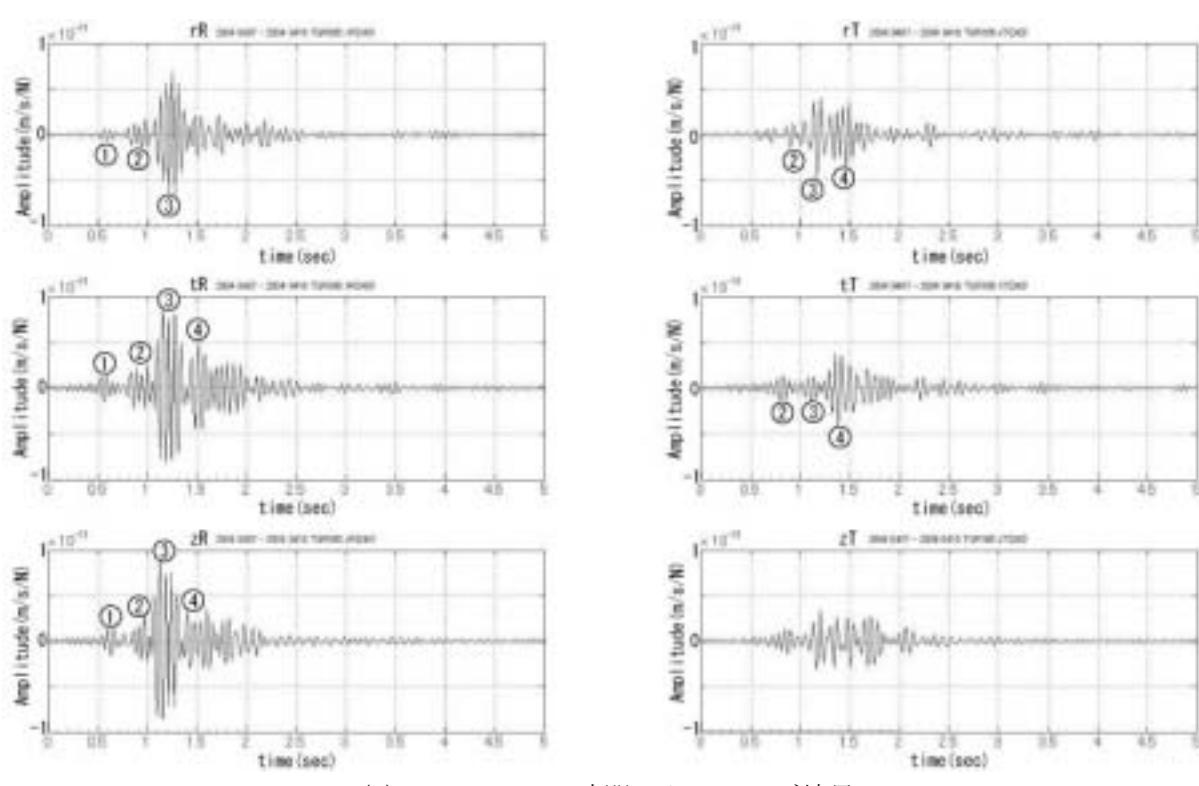
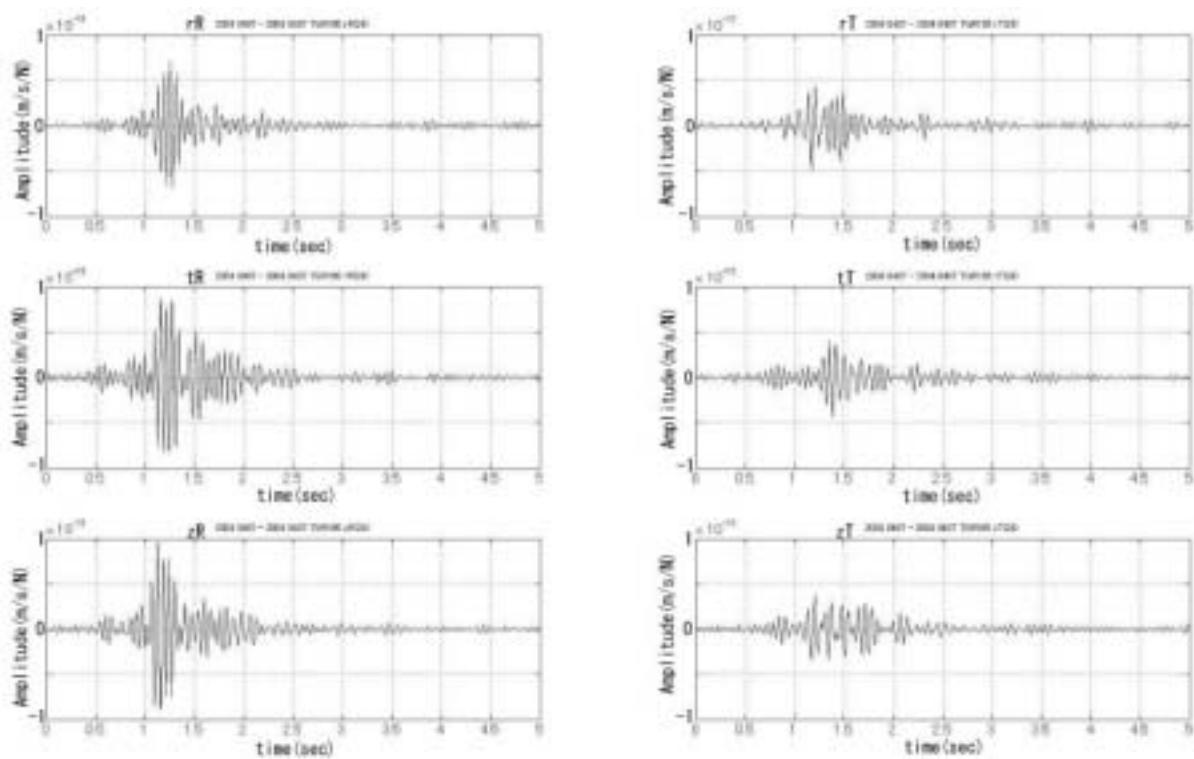


図 3-1-3 TGR165 のデータから得られた伝達関数

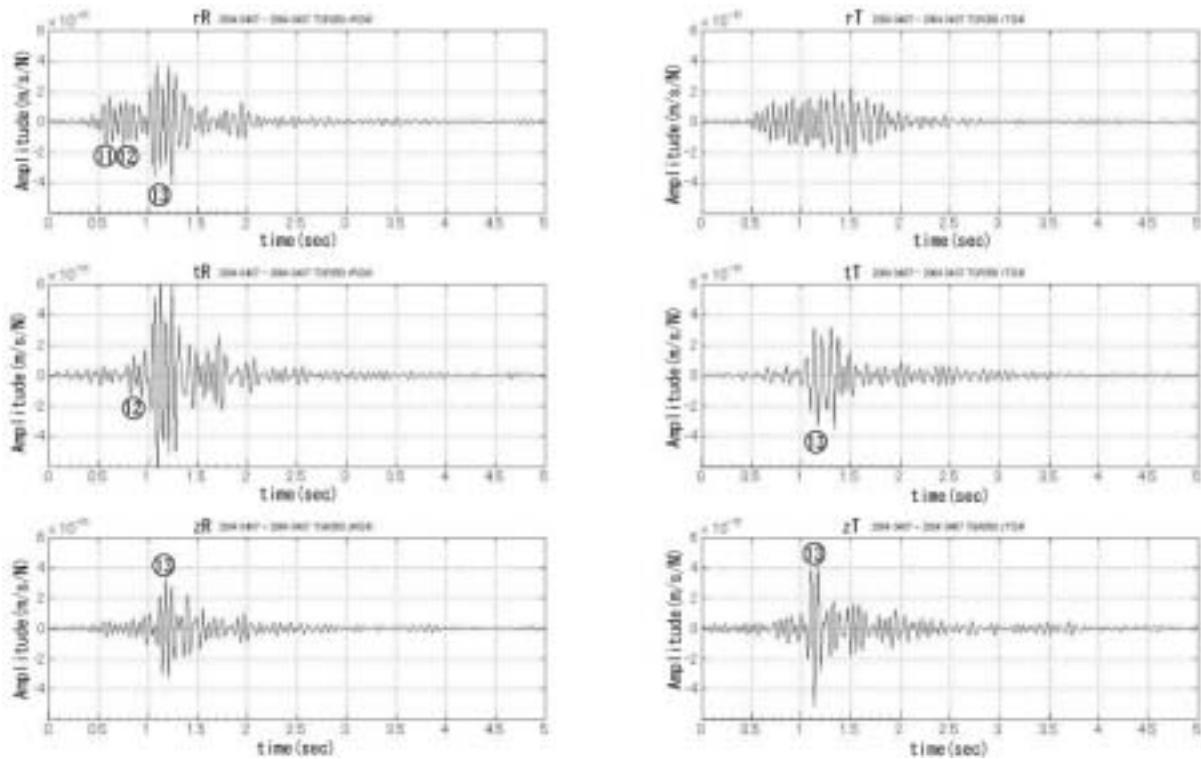


図 3-1-4 TGR350 の 24 時間スタッキング処理で得られた伝達関数

3.1.3 伝達関数の時間変化

今回処理を行ったデータは 2004 年 4 月から 2005 年 3 月までのデータであるが、この間、瑞浪超深地層研究所用地では 2005 年の 2 月初旬から主立坑および換気立坑の 50m 以深の掘削が始まり（図 3-1-5）、2005 年 10 月 27 日には排水ポンプの停止、2006 年 2 月 20 日に排水ポンプ再稼動（図 3-1-6）という大きなイベントがあった。

これらのイベントが伝達関数に現れているのかどうかを確認するために、伝達関数の時間変化を追ってみた。図 3-1-7 および図 3-1-8 は TGR165 および TGR350 のデータについて、それぞれ 240 時間スタッキングを行って得られた伝達関数を時間順に並べたものである。図 3-1-7 および図 3-1-8 から伝達関数には時間変化が見られるが、メジャーな波動の振幅に比べて変動が小さいため判読しにくい。そこで、4 月 7 日から 4 月 16 日までの 240 時間のスタッキングデータを基準とし、それとの差をプロットしてみた。TGR165 の結果を図 3-1-9 に TGR350 の結果を図 3-1-10 に示す。國友・熊澤（2004c）は弾性波アクロスの伝達関数の形状が降雨量に左右されること指摘しているので、東濃鉱山の降雨量をグラフ化したものを同じ図面上に表示した。

図 3-1-9 および図 3-1-10 によれば、TGR165 の rR, tT, TGR350 の rR, tT ともよく似た傾向が認められる。まず、P 波の初動走時である 0.5 秒付近にはイベントがまったく現れておらず、このことは P 波の初動には変化が無いことを示している。一方、S 波の初動については若干の変化が認められる。

次に、2004 年の 7 月の始めから 9 月中旬にかけて一つのまとまったイベントが認められる（図 3-1-9 および図 3-1-10 中の四角枠内）。このイベントの特徴は走時がほとんど変化せずに振幅だけが変化しているということである。このイベントは東濃鉱山周辺の降水量の多い季節の間に現

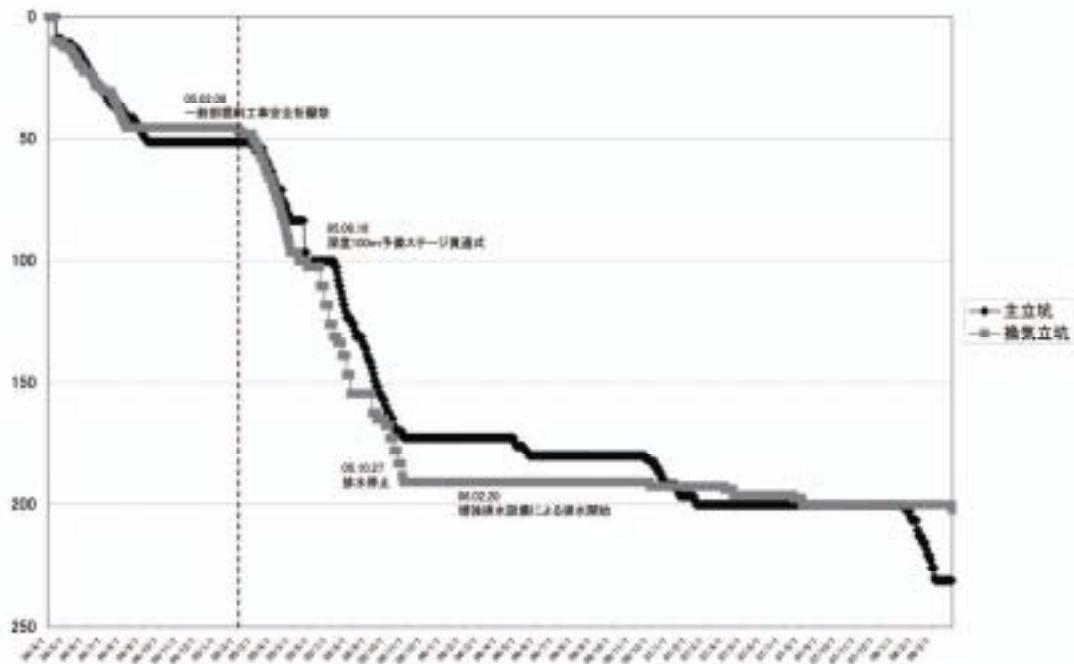


図 3-1-5 立坑の掘削工程

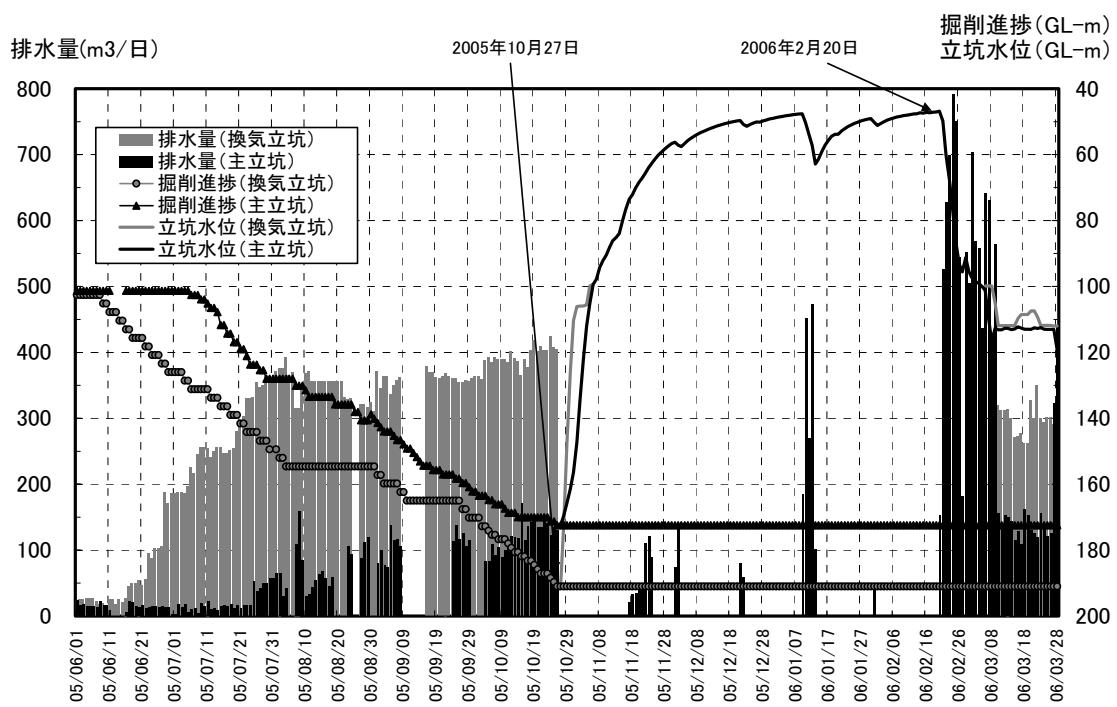
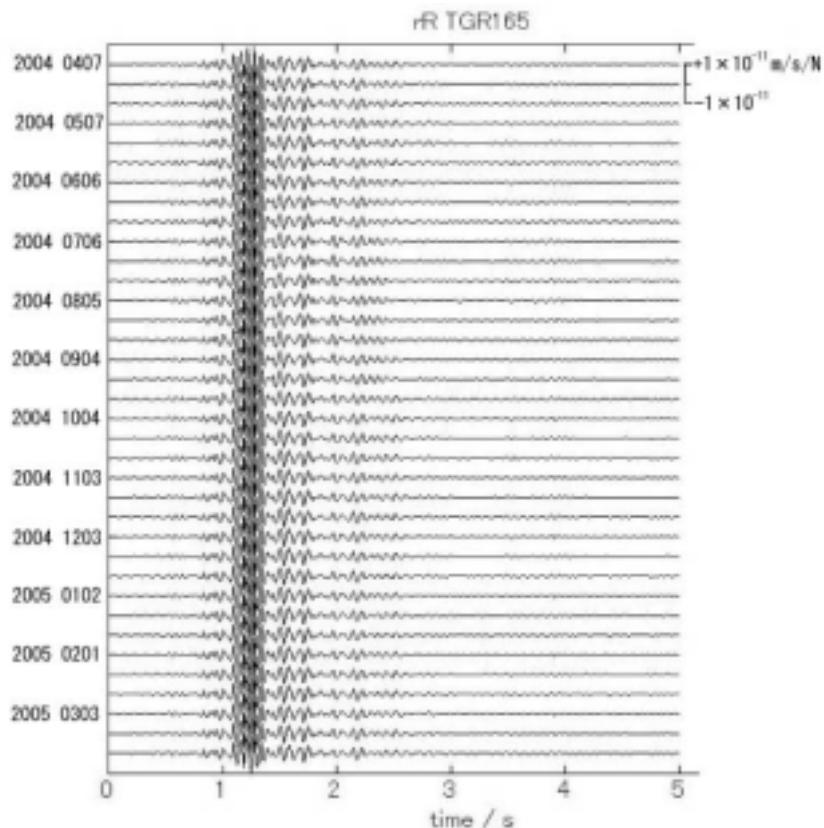
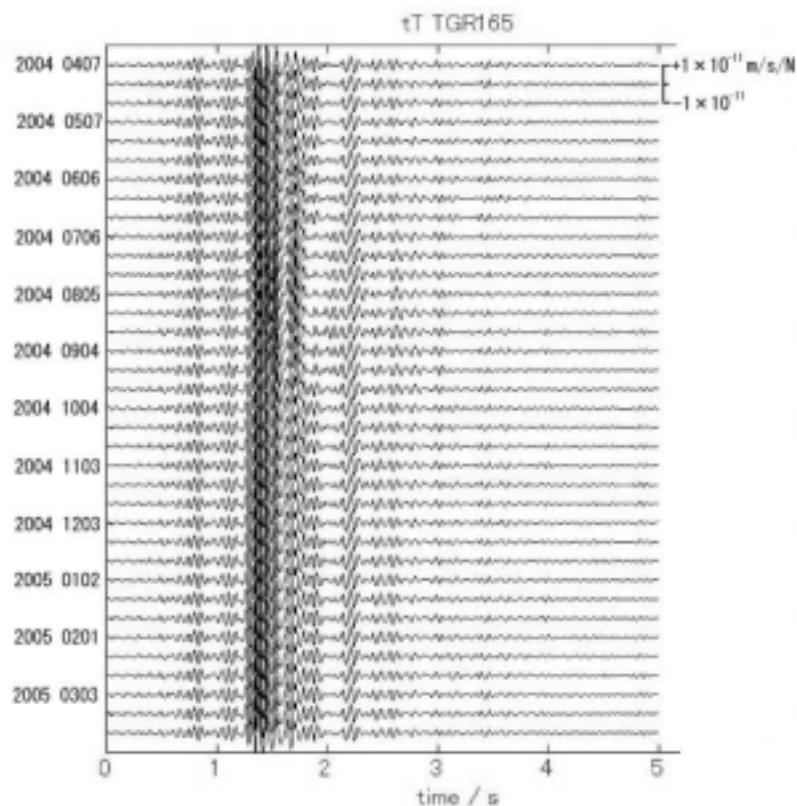


図 3-1-6 立坑の排水状況と地下水の水位

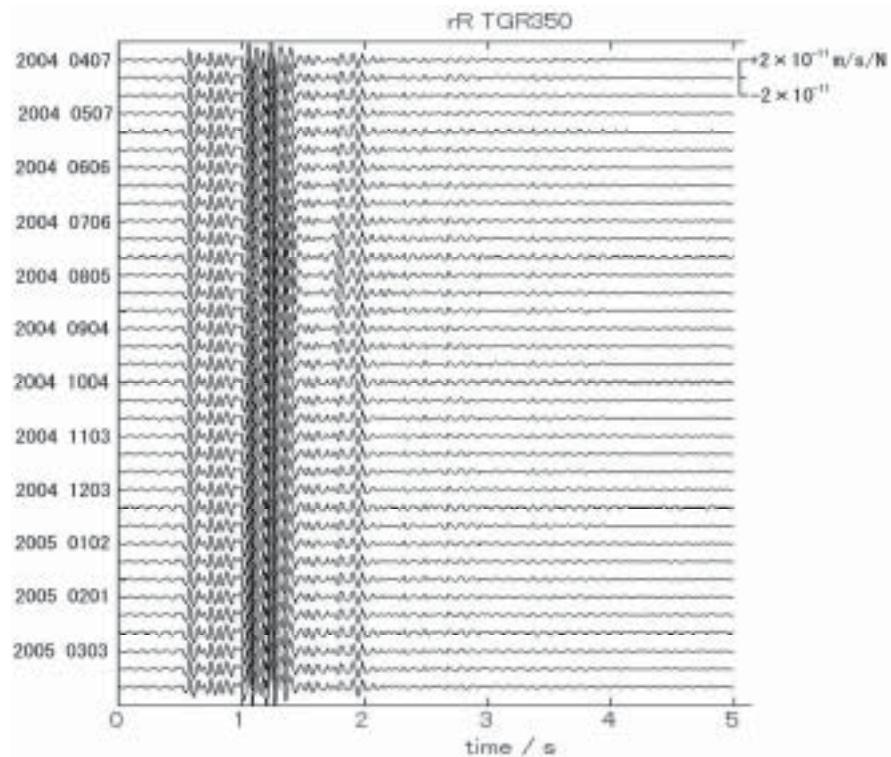


(a) 伝達関数 rR (TGR165)

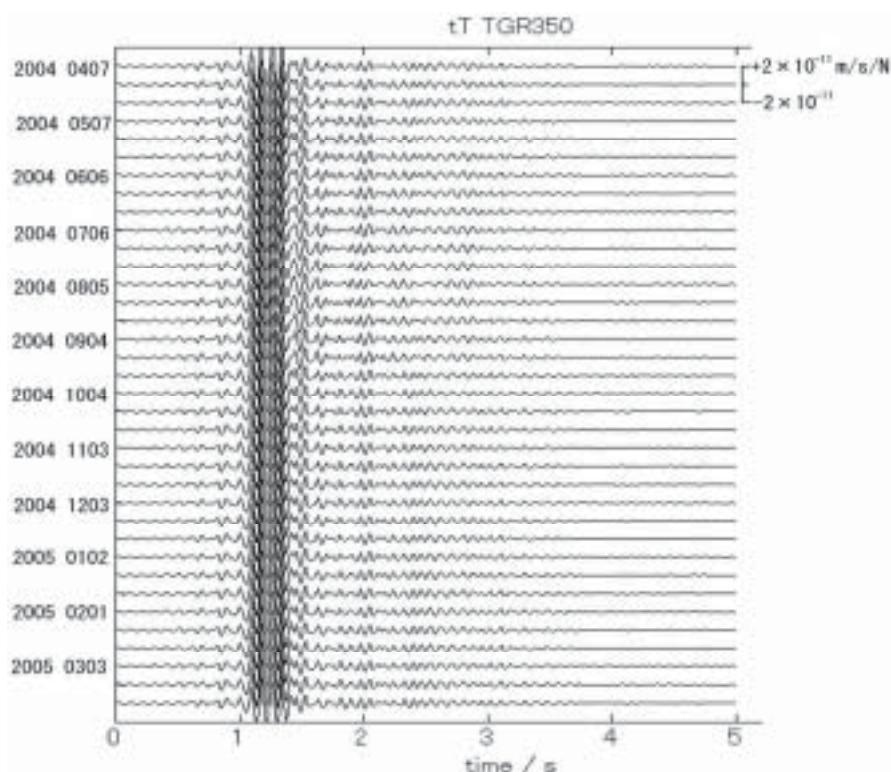


(b) 伝達関数 tT (TGR165)

図 3-1-7 TGR165 の伝達関数の時間変化



(a) 伝達関数 rR (TGR350)



(b) 伝達関数 tT (TGR350)

図 3-1-8 TGR350 の伝達関数の時間変化

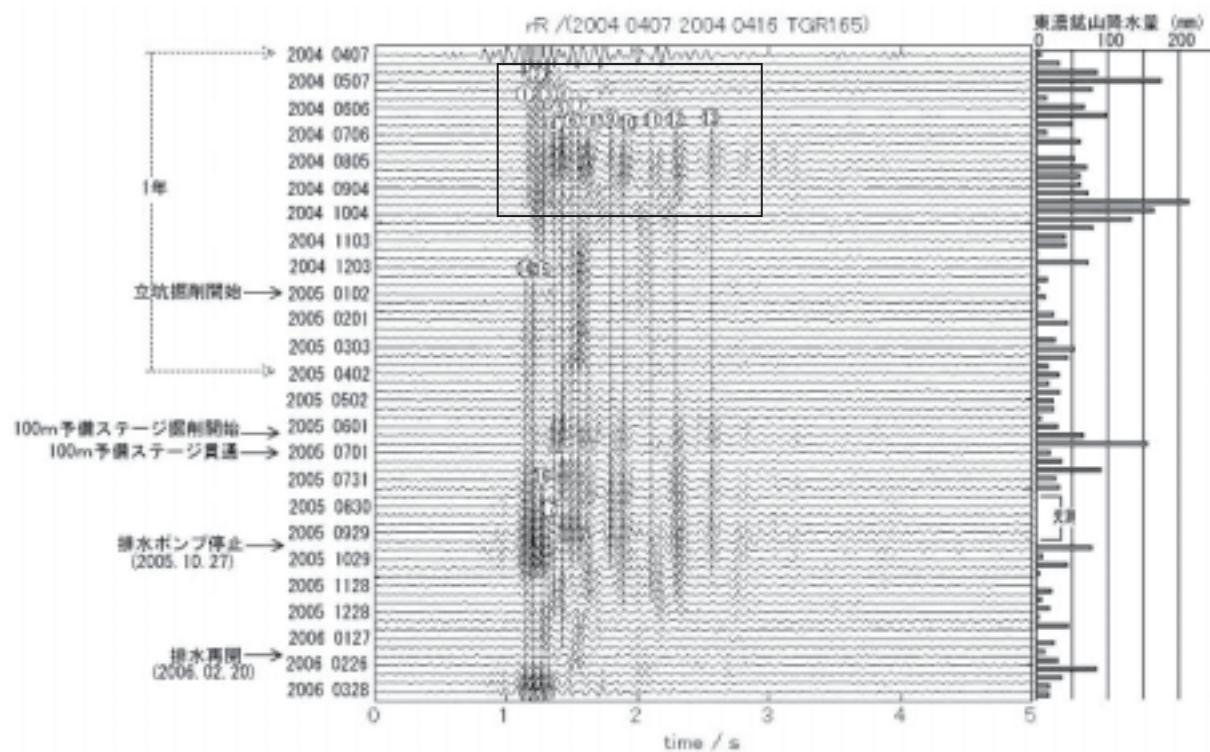
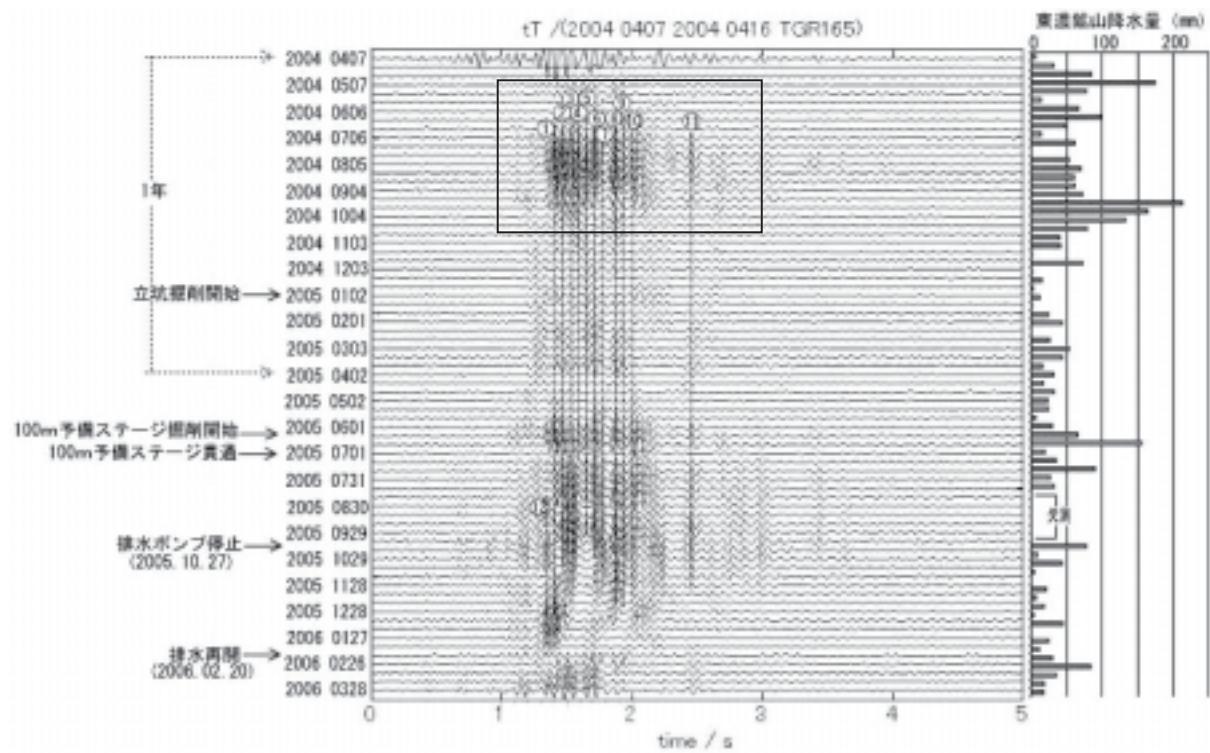
(a) 伝達関数 rR の差表示 (10 日毎)(b) 伝達関数 tT の差表示 (10 日毎)

図 3-1-9 TGR165 の伝達関数の差表示

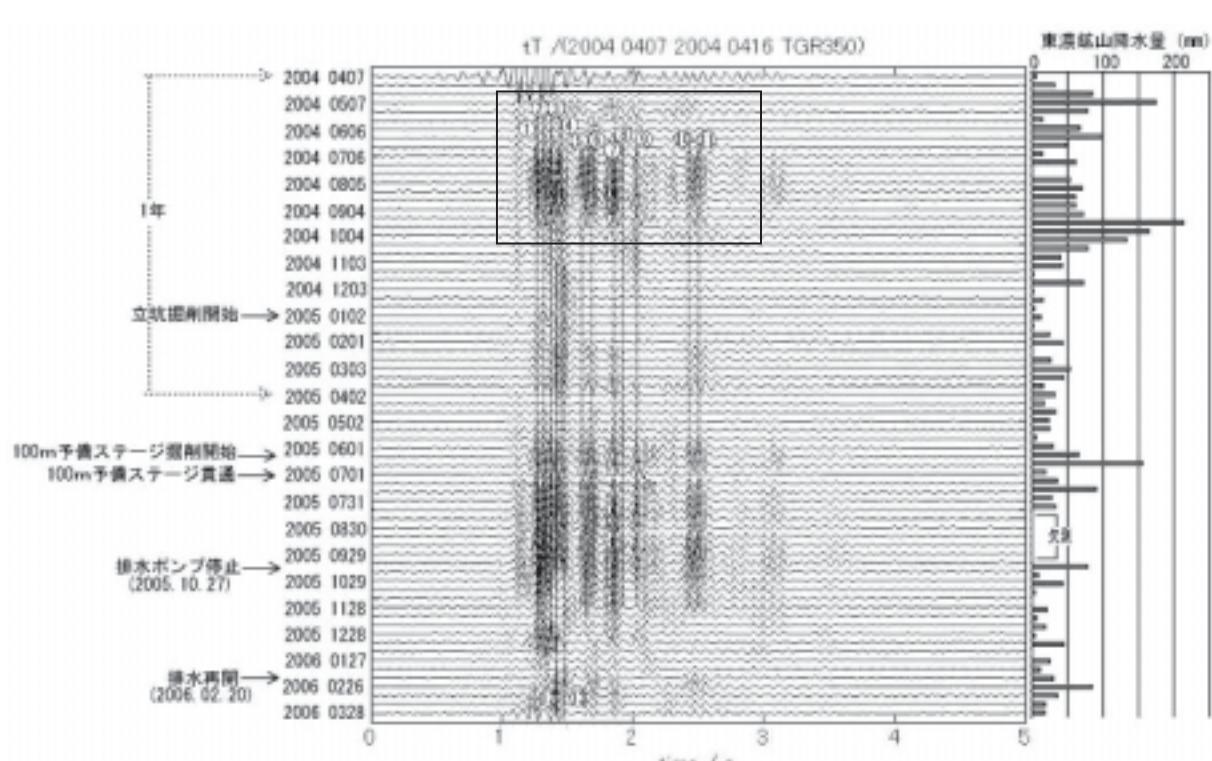
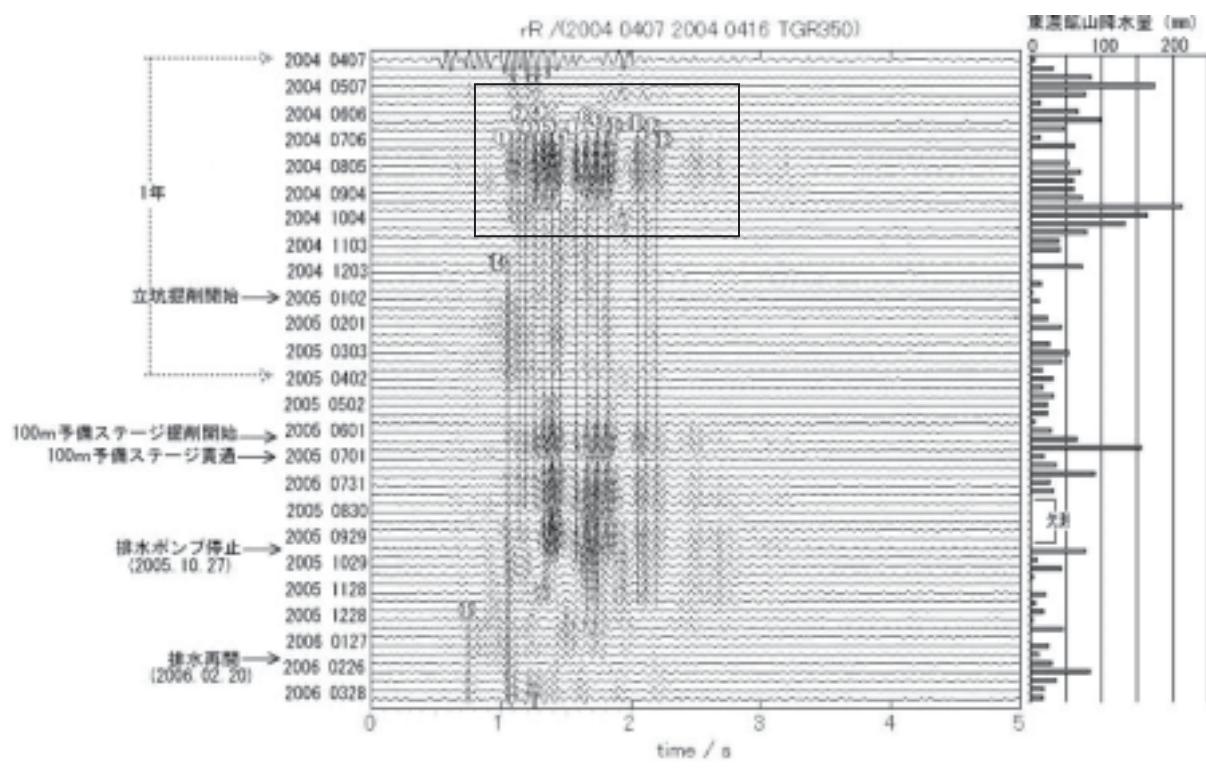


図 3-1-10 TGR350 の伝達関数の差表示

れるよう見える。

以下の議論をわかりやすくするために正のピークが大きなイベントに番号を付けてみた。1年に現れたイベントによく似たイベントは2年目にもほとんど同じ走時で出現するが、その出現は約1ヶ月早くなっている。TGR165のrRでは④から⑬のイベントは2年目にも同じ走時で出現するが、①から③のイベントは2年目には現れず、2005年1月頃から現れる⑭⑮および2005年7月頃から現れる⑯⑰のイベントに取って替わられる。そして、④から⑬のイベントおよび⑭から⑰のイベントは排水ポンプの停止とともに振幅が小さくなっていくように見える。排水再開とともに再びイベントが現れるが、それは⑭から⑰のイベントに限られている。これに対し、TGR165のtTでは、①から⑪のイベントはすべて2年目にも同じ走時で出現しており、①を除いて各イベントは排水ポンプの停止とともに振幅が小さくなっていくように見える。①のイベントは排水ポンプ停止のかなり前から振幅が小さくなっているのに、排水ポンプの停止後にふたたび振幅が大きくなり、①よりも速い走時を持つイベント⑫とともに排水再開の少し前に消えてしまう。排水再開後はrRと比べると振幅がかなり小さいイベントが現れるが、①から⑫のどのイベントとも走時が異なっている。

TGR350についてもTGR165とよく似た結果となっている。TGR350のrRでは①のイベントが2年目には現れない。2005年1月頃から現れるイベント⑭は2005年の5月頃に振幅が小さくなるが、排水ポンプ停止の少し前から振幅が大きくなりはじめ、排水ポンプ停止や排水再開とは無関係にイベントが続く。②から⑬のイベントは2年目にも現れるが、その出現は約1ヶ月早くなっている、排水ポンプ停止とともにその振幅が小さくなっていくように見える。TGR165と大きく異なるのは、排水ポンプ停止とともに1秒よりも小さな走時を持つイベントが現れ始めることである（例えば⑮）が、1秒よりも走時が大きな目立ったイベントは現れない。TGR350のtTについてもTGR165とよく似ており、①から⑪のイベントは2年目にも現れ、その出現は約1ヶ月早くなっている、④から⑪のイベントは排水ポンプ停止とともにその振幅が小さくなっていくように見える。①から③のイベントは排水ポンプ停止とともに、その振幅は少し小さくなるが、排水再開の直前でふたたび振幅が大きくなり、排水再開の直前で消えてしまう。排水再開後はrRと異なり、振幅の小さなイベント⑫⑬が現れるが、①から⑪のどのイベントとも走時が異なっている。

次に、TGR350では24時間のスタッキングで十分なSN比が得られることから、24時間毎の伝達関数の変化を追ってみることにした。差をとるための基準日は立坑の本格掘削が始まる直前の2005年2月1日とした。その結果を図3-1-11に示す。1日毎に比較した場合は、rRおよびtTとも排水ポンプ停止後、徐々にイベントが小さくなり、排水再開後にイベントがふたたび現れているように見える。ただし、tTでは排水再開の3日前から急にイベントが現れており（図3-1-10(b)中の⑫⑬に相当）、必ずしも対応はよくないが、このイベントが2005年2月中旬および3月下旬（立坑の本格掘削開始直後）に現れるイベントと同じ走時を持っていることは注目に値する。

これまで見てきたイベントは季節変化や年変化に立坑掘削の影響が重なり合って現れたものであり、どのイベントが立坑掘削の影響を表しているのか即断はできないが、少なくとも1年目とは異なる走時を持つイベントは立坑掘削の影響を表していると考えてもよいのではないだろうか。

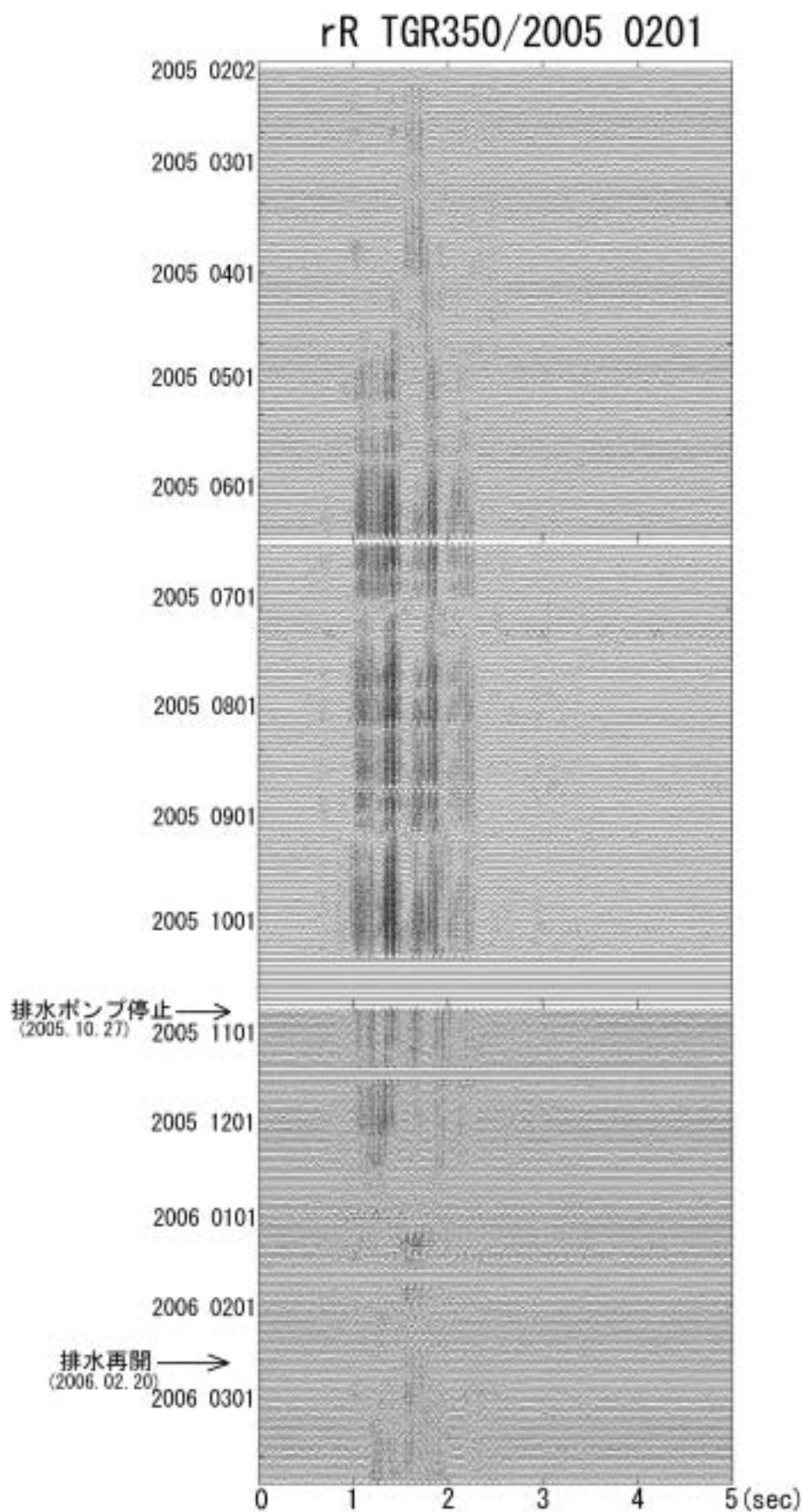
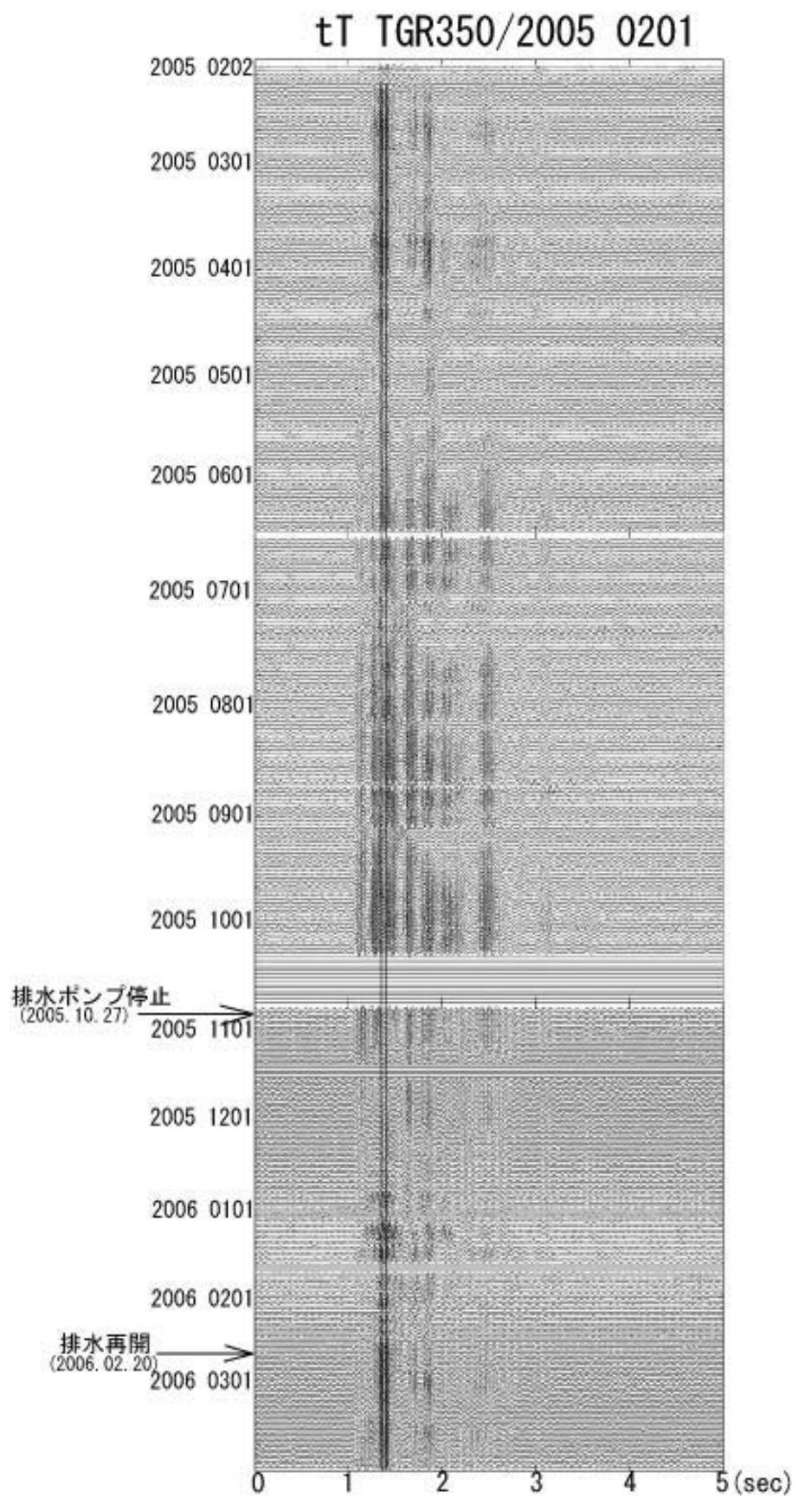


図 3-1-11 伝達関数の差表示 (a) 伝達関数 rR の差表示 (1 日毎)

図 3-1-11 伝達関数の差表示 (b) 伝達関数 tT の差表示 (1 日毎)

3.2 瑞浪超深地層研究所周辺のアクロス観測網の整備

坑道掘削がその周囲の地質環境に与える影響を現行のアクロスシステムでモニタリング可能かどうかを検討するためにアクロス用センサの設置を行った。

瑞浪超深地層研究所用地（以下、研究所用地）とアクロス送信所（東濃鉱山）は図3-1-1に示したような関係にあり、研究坑道の影響をモニタリングするには研究所用地の東側にセンサを展開する必要がある。研究所用地の東側は道路を挟んだ山中に地下壕が存在することから、センサは主に地下壕内に設置することにした。その理由は、地下壕内は年間を通じて気温がほぼ一定であり計器の温度ドリフトを抑えられること、地表面に比べて人工ノイズが小さいこと等の理由による。また、研究坑道近傍でのデータを取得する目的で研究所用地内にも地震計を設置することにした。

3.2.1 弾性波アクロス

正馬様に設置されていた第一アレイ地震計での観測が所期の目的を達成し終了していたので、ここで使われていた36台の地震計を再利用することにした。地震計は3成分地震計であるGeoSpace 製のSeismic Nail 3C（写真-1）である。36台の地震計の内1台はケーブルが破損して使用できない状態にあったので、35台の内32台を地下壕内に3台を研究所用地内に設置することにした。壕内においては、これを長さ800mm外径89.1mmのステンレスケーシングに格納し（写真-2）、深さ50cmの孔を底盤に掘削（写真-3）、孔壁とケーシングの間の空間に砂を充填しながら、治具を用いて鉛直と方位を正確に合わせ固定した（写真-4）。



写真-1 地震計本体



写真-2 地震計を固定したケーシングパイプ



写真-3 ポーリング孔の掘削



写真-4 地震計の固定状況

設置した地震計の位置座標を表 3-2-1 にそれを図示したものを図 3-2-1 に示す。

3.2.2 電磁アクロス

設置した磁力計は Bartington 製の Mag03 フラックスゲート磁力計である。磁力計の信号ケーブルが 50m と短く、壕内の奥へ設置することが無理であったため、通気口の入り口から約 10m 入った位置に鉛直に固定した（写真-5）。DH-15 号孔付近の車の通過の影響が磁場の観測にノイズとして多少現れることが予想される。電位計測用の電極は長さ 60cm の銅棒電極で（写真-6），坑道内の通路に沿ってほぼ 100m 間隔の水平 2 成分の電位差が測定できるように電極を設置した（図 3-2-1 参照）。

表 3-2-2 に設置時の接地抵抗、および電極間隔を示す。接地抵抗は低く、坑道内部地表付近の比抵抗は小さいと予想される。

図 3-2-1 には今回設置した電極（Pn, Pw, Ps）の配置をあわせて示してある。

表 3-2-1 地震計の位置座標

地震計 位置名称	旧日本測地系		管上端	管下端	標高	間隔	世界測地系(日本測地系2000)			
	X座標 m	X座標 m					緯度 ddmmss.ssssss	経度 ddmmss.ssssss	X座標 m	Y座標 m
1 N14	-69417.140	7040.223	199.108	198.308	9.97	352238.70566	1371428.19521	-69068.011	6768.796	
2 N13	-69422.493	7048.638	198.957	198.157	10.03	352238.53175	1371428.52847	-69073.364	6777.211	
3 N12	-69427.819	7057.137	199.003	198.203	10.01	352238.35871	1371428.86506	-69078.690	6785.710	
4 N11	-69433.151	7065.606	199.019	198.219	9.93	352238.18548	1371429.20046	-69084.021	6794.179	
5 N10	-69438.506	7073.973	199.035	198.235	10.06	352238.01144	1371429.53182	-69089.378	6802.546	
6 N9	-69443.879	7082.483	198.941	198.141	9.96	352237.83694	1371429.86884	-69094.749	6811.056	
7 N8	-69449.225	7090.891	198.865	198.065	9.99	352237.66325	1371430.20182	-69100.095	6819.464	
8 N7	-69454.591	7099.314	198.792	197.992		352237.48892	1371430.53539	-69105.461	6827.887	
9 N6	-69458.577	7102.918	198.755	197.955	8.00	352237.35948	1371430.67807	-69109.447	6831.491	
10 N5	-69465.341	7098.853	198.298	197.498	10.04	352237.14009	1371430.50888	-69116.211	6827.226	
11 N4	-69473.867	7093.358	197.925	197.125	9.89	352236.86354	1371430.29883	-69124.737	6821.931	
12 N3	-69482.227	7088.068	197.680	196.880	10.02	352236.59238	1371430.08899	-69133.097	6816.641	
13 N2	-69490.740	7082.778	197.380	196.580	10.48	352236.31625	1371429.87914	-69141.610	6811.352	
14 N1	-69499.642	7077.246	197.461	196.661	9.41	352236.02751	1371429.65969	-69150.512	6805.820	
15 S1	-69507.587	7072.209	197.072	196.272	10.04	352235.76981	1371429.45988	-69158.457	6800.783	
16 S2	-69516.100	7066.891	196.833	196.133	10.04	352235.49368	1371429.24892	-69166.970	6795.465	
17 S3	-69524.610	7061.557	196.603	195.803	9.97	352235.21766	1371429.03733	-69175.480	6790.131	
18 S4	-69533.064	7058.276	196.386	195.586	12.90	352234.94345	1371428.82784	-69183.934	6784.850	
19 S5	-69543.981	7049.413	196.293	195.493	7.10	352234.58935	1371428.55560	-69194.851	6777.987	
20 S6	-69549.978	7045.613	196.037	195.237	9.96	352234.39483	1371428.40486	-69200.848	6774.188	
21 S7	-69558.429	7040.347	195.595	194.795	9.97	352234.12071	1371428.19596	-69209.299	6768.922	
22 S8	-69566.860	7035.027	195.313	194.513	10.04	352233.84725	1371427.98493	-69217.730	6763.602	
23 S9	-69575.395	7029.748	195.125	194.325	6.91	352233.57041	1371427.77552	-69226.265	6758.323	
24 S10	-69581.251	7026.078	195.066	194.266		352233.38046	1371427.62994	-69232.121	6754.653	
25 S11	-69579.601	7018.333	194.962	194.162	9.94	352233.43419	1371427.32312	-69230.471	6746.908	
26 S12	-69574.346	7009.893	195.089	194.289	10.02	352233.60493	1371426.98887	-69225.216	6738.468	
27 S13	-69569.001	7001.414	195.148	194.348	10.04	352233.77858	1371426.65308	-69219.871	6729.989	
28 S14	-69563.712	6992.881	195.060	194.280	9.96	352233.95041	1371426.31515	-69214.582	6721.456	
29 S15	-69558.339	6984.495	195.127	194.327	20.06	352234.12497	1371425.98305	-69209.210	6713.070	
30 S17	-69547.869	6967.503	195.383	194.583	19.99	352234.47163	1371425.31011	-69198.540	6696.078	
31 S19	-69537.008	6950.588	195.403	194.603	9.89	352234.81799	1371424.64023	-69187.879	6679.164	
32 S20	-69531.675	6942.255	195.517	194.717		352234.99125	1371424.31022	-69182.546	6670.831	

注) XY、緯度経度は、管上端外周真北側。精度は10mm程度。



写真-5 固定した磁力計



写真-6 銅棒電極 (下)

表 3-2-2 電極の接地抵抗と電極間隔

電極番号	Pn	Ps	Pe	Pw
接地抵抗 [Ω]	23	22	43	42
電極間隔 [m]		115		89

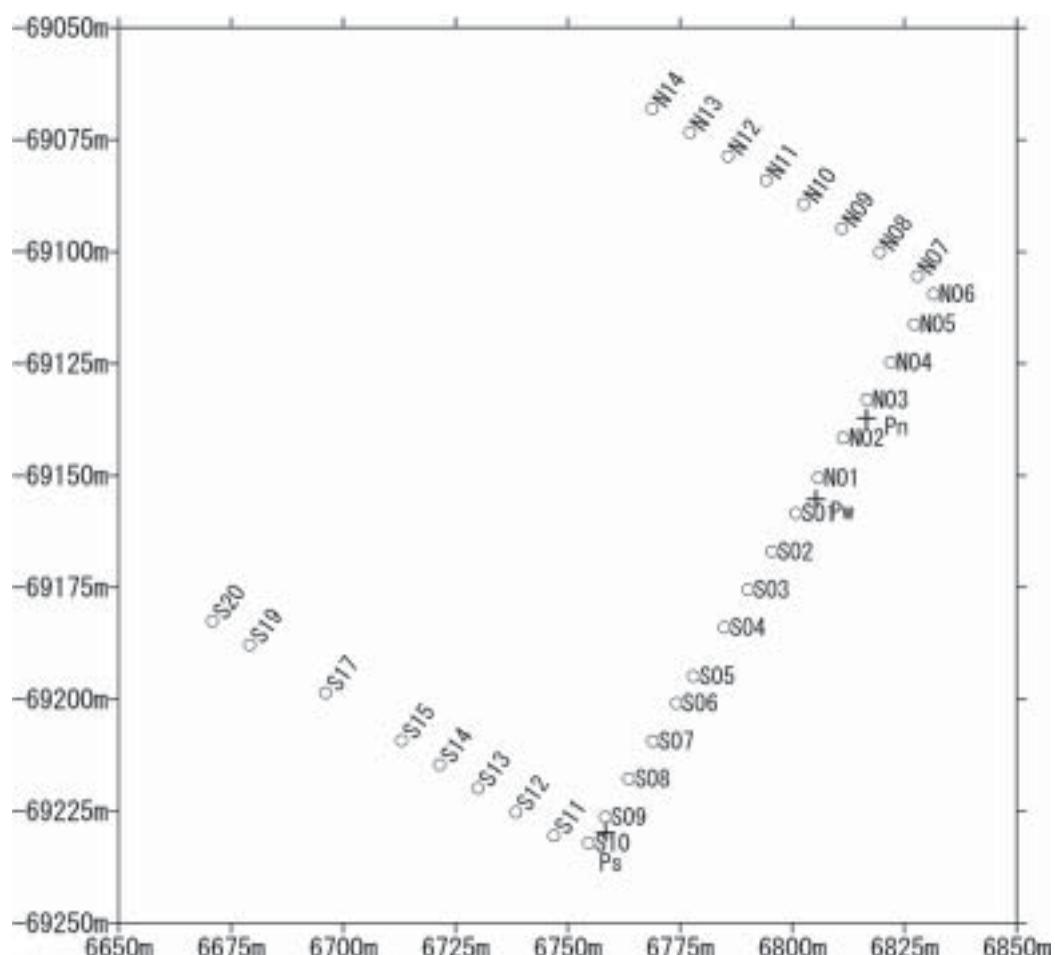


図 3-2-1 地震計および電極の位置図 ○地震計 +電極
(電極 Pe は磁力計のすぐ傍に設置したのでこの図面には記載されていない)

3.2.3 データロガー用観測ハウスの整備

地下壕の通気口が DH-15 号孔の敷地のすぐ傍にあることから、DH-15 号孔の敷地内に観測ハウスを新たに設置（写真-7）するとともに、AC100V の電源を確保するための工事を行った。さらに、地下壕の通気口から観測ハウスまで信号ケーブルを埋設した（写真-8、9）。



写真-7 新設した観測ハウス



写真-8 埋設した信号ケーブル
観測ハウス側



写真-9 埋設した信号ケーブル
地下壕通気口側

設置したセンサ類と観測ハウスの位置関係を図 3-2-2 に示す。なお、研究所用地内への地震計の設置は平成 20 年度に実施する予定である。

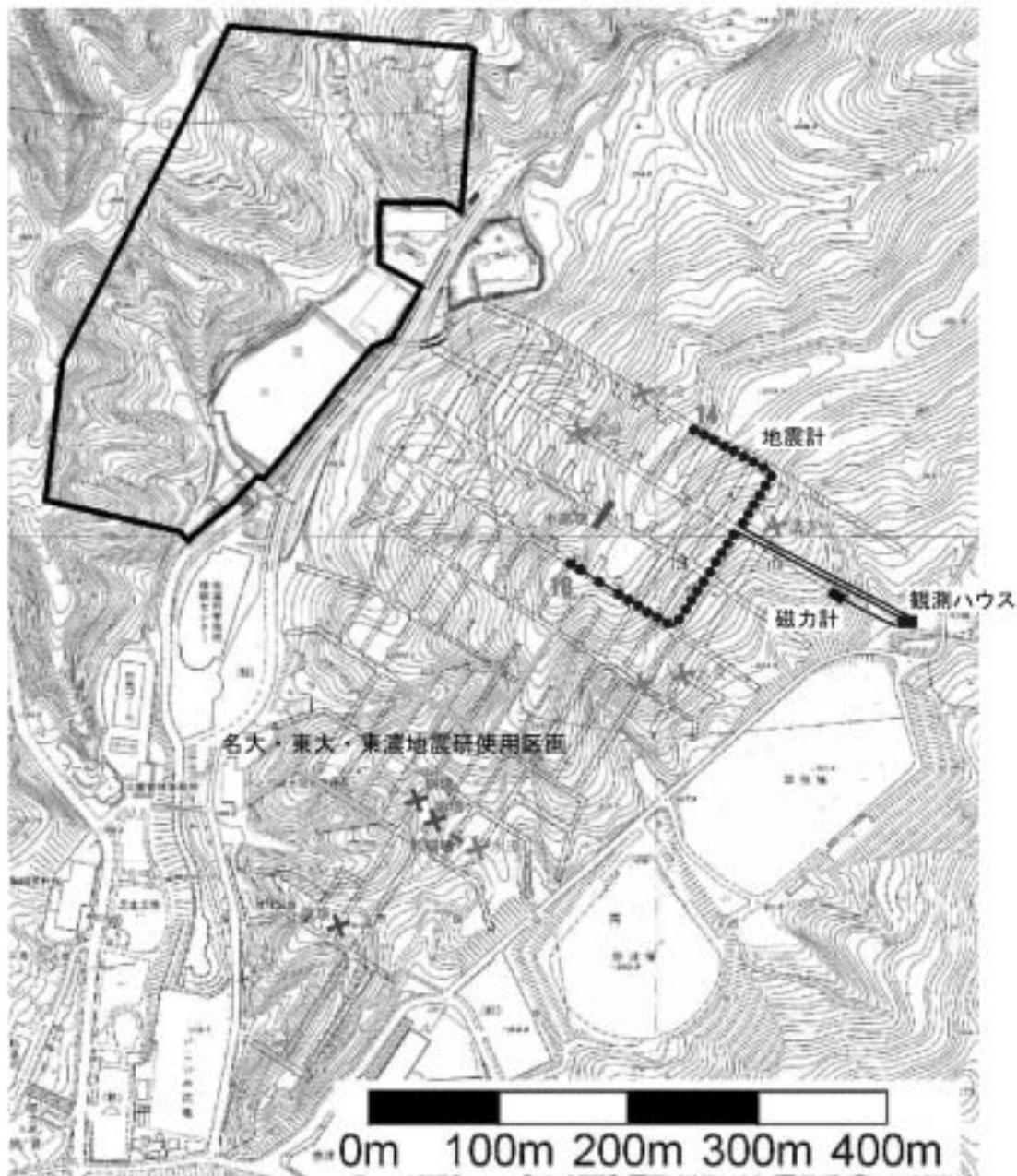


図 3-2-2 設置したセンサ類と観測ハウスの位置関係

4. 地下構造物の健全性監視技術としてのアクロスの適用性評価

4.1 目標

高レベル放射性廃棄物の地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構(2004)によれば、高レベル放射性廃棄物の最終処分場はその建設に10年程度、操業に50年程度さらに閉鎖作業に10年程度の年月が必要としている。この間、処分事業を安全に行うためには、処分場の建設・操業そして閉鎖に至るまで、地下構造物が健全に保たれることが必須の条件であり、そのためには数十年間にわたり常時、地下構造物の健全性をモニタリング可能な技術が必要不可欠であると考えられる。

弾性波アクロスの震源は、その近傍の岩盤にほとんど負荷を与えない非破壊震源であり、受信される信号はノイズに強く、さらに受信信号の誤差を評価可能なことから、受信信号が変化した場合、それが誤差の範囲であるのか有意な変化なのかを客観的に判断できるという優れた特性を持っている。従って、現時点での開発が進んでいる弾性波アクロスの技術を、地下構造物の健全性評価技術へと発展させることは非常に有意義な技術開発であると考えられる。

これを実現するためには、地下構造物の健全性評価に最適な信号源および受信器の開発が必要であり、さらに最も効率よくデータを取得するために、これら信号源と受信器を坑道内にどのように配置するのが最も適切か、といった問題を解決していく必要がある。

この第一歩として、平成19年度は、現時点での利用可能な東濃鉱山のアクロス送信所から発信されている信号を、瑞浪超深地層研究所(MIU)の立坑覆工コンクリートに設置されている地震計を用いて観測することにより、弾性波アクロスの地下構造物の健全性評価技術としての可能性を検討した。

4.2 MIU 立坑内の既存地震計による弾性波アクロス信号の予備観測

土岐送信所からの信号をMIU立坑内で観測して、構造物の健全性監視を行うことが可能かどうかを確認するために、予備観測を行った。土岐送信所からMIU立坑までの距離は約2.3kmと遠く信号レベルが小さいこと、種々のノイズ発生源(中央自動車道(約600m)や側近の道路の交通、掘削や水処理関係の機械の稼動など)が近くに存在しており、MIU立坑内外で地下構造物の健全性監視に十分なSN比の観測データを得るのは困難ではないかと予想されたためである。

4.2.1 観測の諸元

地震時の研究坑道の挙動を明らかにする目的でGL-100m予備ステージ(3台)および地表(1台)に設置されている地震計を活用した。GL-100m予備ステージでは、換気立坑の覆工コンクリートに120度間隔で3台の地震計が設置されている。地震計の種類は、地上、予備ステージいすれも、3成分のフォースバランスサーボ型加速度計(EpiSensor、キネメトリクス社製)で、記録計はALTUS-K2(キネメトリクス社)である。記録計は、GPS時計を用いた時刻校正が行われる。GPSアンテナの信号は、地上でALTUS-K2用の時計信号として変換され、ツイストペアケーブルにより伝送されている。そのため、この信号を他のGPS機器に使用することはできず、ALTUS-K2のデイジーチェーンのみが可能な閉じたシステムとなっている。データは、イベントトリガー方式で、光ケーブルによるLANで地上に回収される。今回は、連続記録を取得する方式としたため、LANによる回収はできず、1GBのコンパクトフラッシュに書き込む方式をとった。

連続記録の取得は、立坑での作業がある場合とない場合でのノイズの比較を考えて、土日を含む2007年12月14日18時～12月19日14時の約5日間行った。予備ステージでは地震計の数が

多いため、期間中一回コンパクトフラッシュの交換が必要であった。観測の諸元を下記にまとめます。

<共通仕様>

センサ : EpiSensor

測定範囲 : $\pm 2G$, ダイナミックレンジ 155dB 以上

分解能 : $35 \mu gal$ ($=3.5 \times 10^{-7} m/s^2$)

記録計 : ALTUS-K2

測定範囲 $\pm 2.5V (\pm 2G)$, ダイナミックレンジ 114dB(19ビット)以上

サンプリング周波数 : 100Hz (連続)

記録媒体 : 1GB コンパクトフラッシュ+PC カードアダプタ

<地表>

3 成分 : 1ch(X) : EW, 2ch(Y) : NS, 3ch(Z) : UD (ENU が +)

<GL-100m 予備ステージ>

9 成分 : 1ch(X) : EW, 2ch(Y) : NS, 3ch(Z) : UD, 4ch(X) : EW, 5ch(Y) : NS, 6ch(Z) : UD,
7ch(X) : EW, 8ch(Y) : NS, 9ch(Z) : UD (ENU が +)

観測の分解能（自己ノイズ）は、記録計のダイナミックレンジで制限されている。その目安は $\pm 3.7 \times 10^{-5} m/s^2$ [$\sim \pm 2(G) * 9.8(m/s^2/G) / 2^{19}$] 程度である。センサの自己ノイズはこれよりもずっと小さいので、アクロス信号観測のために 10 倍以上増幅して記録することが望ましいが、今回は、通常の地震観測の目的を妨げない（加速度の上限を下げない）ために、連続記録を取得する以外は通常の仕様での観測となった。

取得された連続記録波形データは、オリジナルフォーマットからテキストファイルに変換した。このテキストファイルは、チャネル毎に数日分が入っており、中途半端な時刻から始まっていたため、2 時間（弾性波アクロスの反転周期）毎のバイナリファイルに変換した後にデータ処理に供した。

4.2.2 MIU のノイズレベル

取得された時間波形記録から 1 分毎に RMS (Root Mean Square 直流成分除去後に計算) 値を計算した結果を図 4-2-1 に示す。地表でのノイズレベルは、 $3 \sim 5 \times 10^{-5} m/s^2$ を下限として、 $1 \times 10^{-3} m/s^2$ 程度までノイズレベルが大きく時間変化していることがわかる。16 日は日曜日であり、立坑の作業が休止していたため、作業が再開される 17 日の朝までは、ノイズレベルが小さく一定であった。つまり地表で観測されたノイズは高速道路や周囲交通の変化を反映していない。また、立坑作業が休止中のデータとの比較から、平日の大きなノイズが立坑の作業に伴うものであることが理解される。GL-100m 予備ステージでは、(1)の加速度計はノイズが大きいが、これを例外と考えると、 $2.5 \times 10^{-5} m/s^2$ を下限として、ほぼ $4 \times 10^{-5} m/s^2$ 以下に収まっている。15 日に $1 \times 10^{-4} m/s^2$ を越える RMS 加速度があるが、これは自然地震によるものである。図 4-2-2 から、大振幅の地動は全ての加速度計で記録されており、強震動を計測するという所期の目的は達成されていることが分かる。GL-100m 予備ステージの(2)および(3)の RMS ノイズレベルの下限 ($2.5 \times 10^{-5} m/s^2$) は、観測装置の自己ノイズを示していると考えられる。

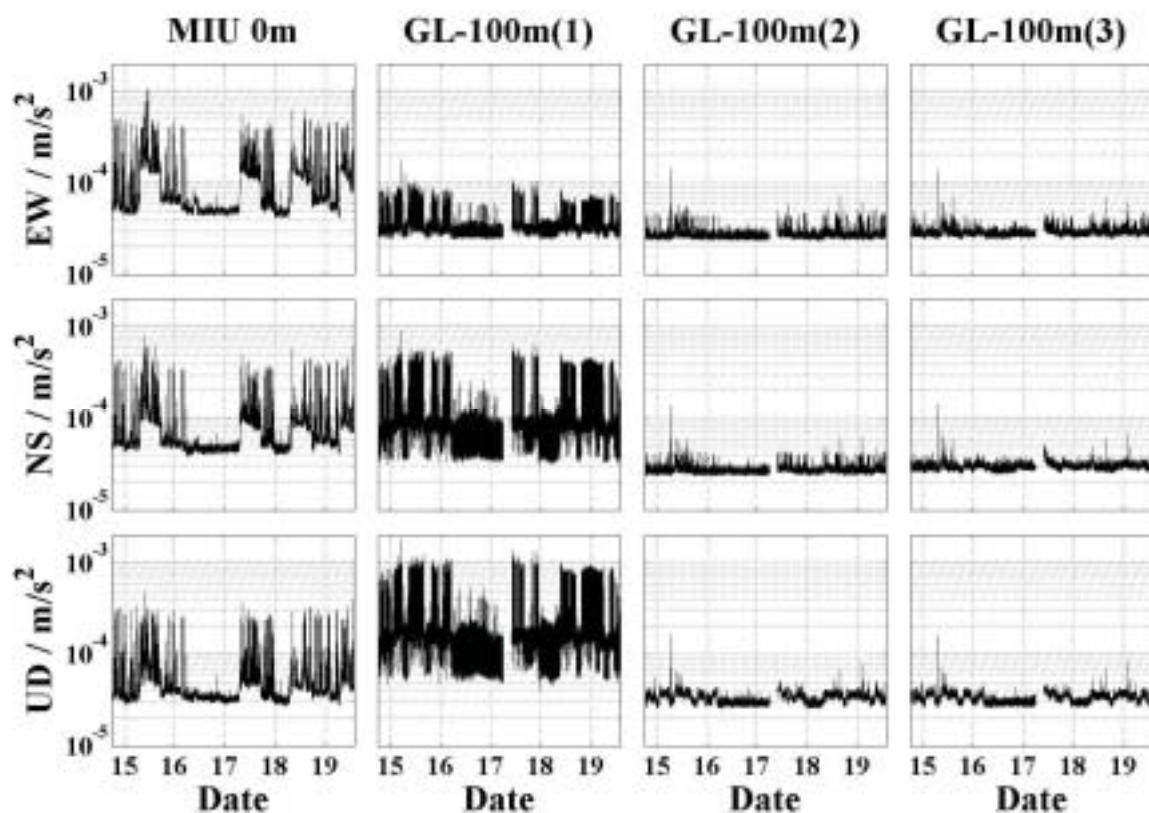


図 4-2-1 分毎の RMS ノイズの推移 (2007 年 12 月 14 日 18 時～12 月 19 日 14 時)

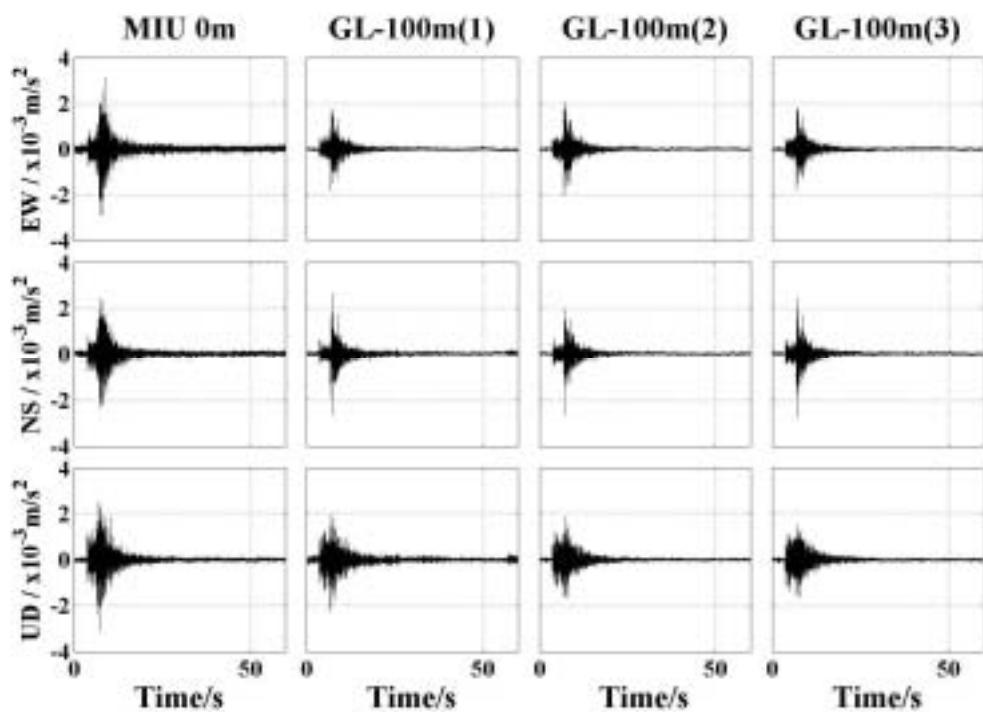


図 4-2-2 期間内に取得された地震波形の例 (2007 年 12 月 15 日 6 時 49 分 50 秒から 60 秒間を表示). 震源は不明 (震源距離は S-P 時間から 20km 程度と推定される).

ノイズレベルの低い期間（2007年12月17日午前0時）と高い期間（2007年12月15日午前10時）のそれぞれ100秒間の振幅スペクトル密度を図4-2-3および図4-2-4に示す。地表の加速度計のスペクトルは複雑なパターンを示し、ノイズレベルの高い時間帯は5Hz以上の周波数でノイズフロアが底上げされている。これは、種々の励起源により、立坑に付随する種々の構造物の様々なモードでの振動が重ね合わされた結果であると考えられる。鋭いピークは、電気的なノイズあるいは一定周波数の機械振動を加速度計および記録計が拾っている可能性が高い。GL-100m(1)では、30Hz以上に振幅スペクトルの高まりが常時存在し、RMS値が大きい原因となっている。このような現象は(2)(3)では見られないため、(1)の直ぐ近くにこのような周波数の振動源あるいは(1)の信号を伝送するケーブルへの電気的干渉があると考えられる。GL-100m(2)および(3)の振幅スペクトルは、低周波を除いて平坦である。17.2Hz付近に狭帯域のノイズが見られる。これは、地表およびGL-100mの全加速度計で認められる。ノイズレベルの高い期間には振幅スペクトルのパターンは変化せず、17.2Hz以外の周波数で狭帯域のノイズが出現するというパターンになっている。こうした特徴は振幅スペクトルのパターンが記録計の自己ノイズによるものであり、立坑作業中には自己ノイズを越える電気的（あるいは単一の周波数を持つ機械振動）なノイズが入ると考えると理解しやすい。

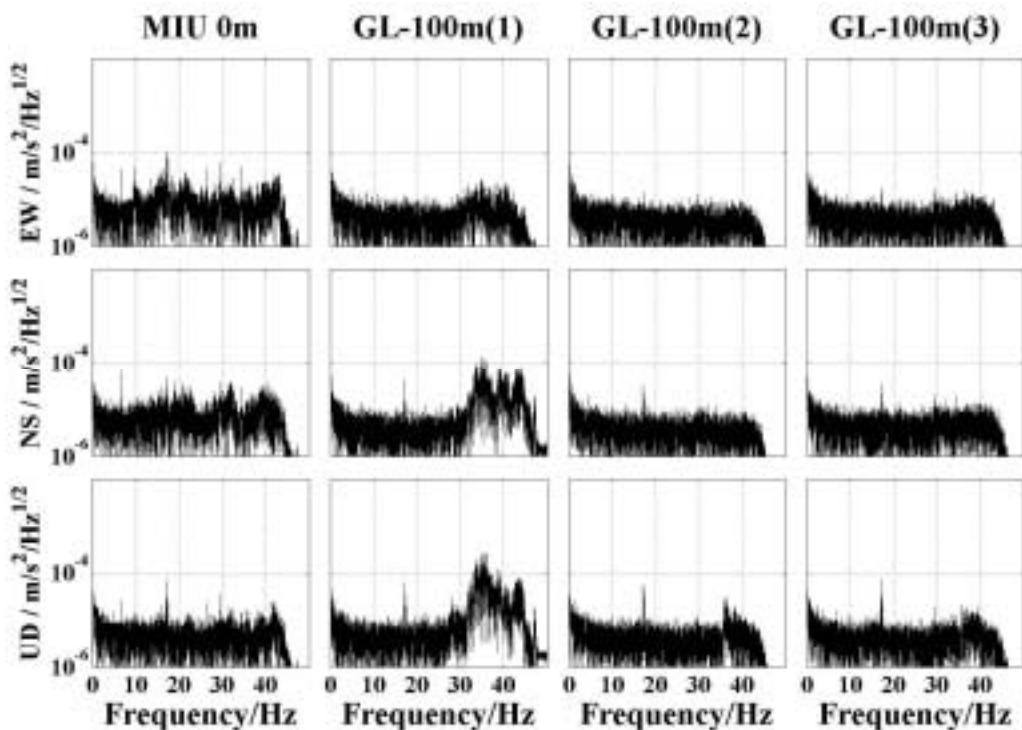


図4-2-3 ノイズレベルが低い時間帯の観測スペクトル（2007年12月17日午前0時から100秒間のデータをフーリエ変換）。ノイズ振幅密度表示。

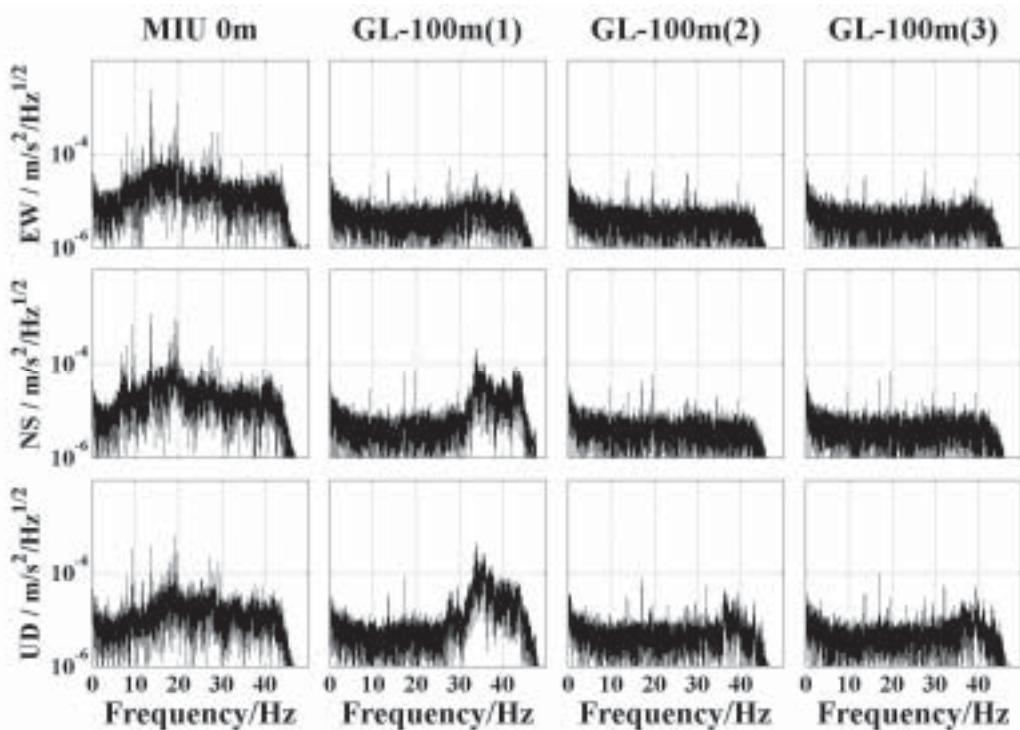


図 4-2-4 ノイズレベルが高い時間帯の観測スペクトル (2007 年 12 月 15 日午前 10 時から 100 秒間のデータをフーリエ変換). ノイズ振幅密度表示.

振幅スペクトルの変化 (5-25Hz) を地表 UD および GL-100m(2)UD について、全期間示したのが図 4-2-5 および図 4-2-6 である。

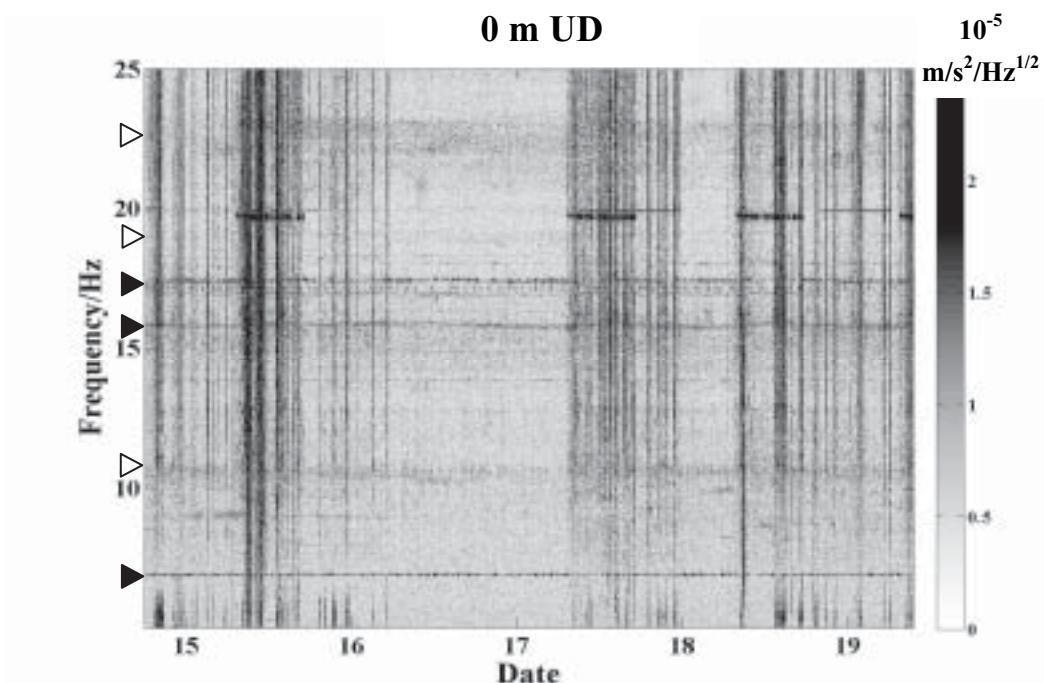


図 4-2-5 地表の観測スペクトル変化の一例 [UD]

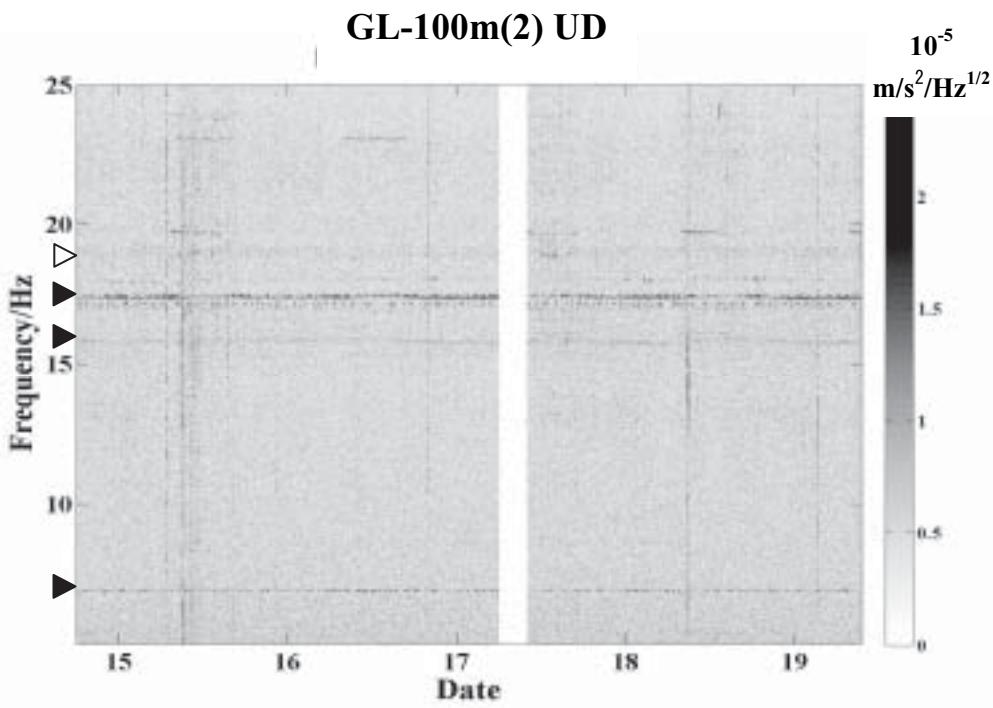


図 4-2-6 GL-100m の観測スペクトル変化の一例 [(2) UD]

黒い三角で示した周波数のノイズは、非常に狭帯域で、どの観測点でもずっとほぼ同じレベルで観測されており、電気的なノイズである可能性が高い。ノイズレベルが高くなる時期のみに出現する 20 あるいは 23Hz 付近のノイズも電気的あるいは单一の周波数の機械振動であろう。白い三角で示した周波数に見られる全期間に渡る薄い黒っぽい帯は、周波数帯域も比較的広く、構造物が常時振動しているモードを見ている可能性がある。全周波数にわたって縦の黒い筋として見えるのは、作業あるいは地震によって、実際に換気立坑の基礎およびコンクリート覆工が振動していることを表している。周波数方向に濃淡があるが、これは、構造物の振動モードあるいは発生源の周波数特性を表しているのであろう。GL-100m では、観測装置の自己ノイズレベルを超えるような振動はあまり存在しないことが分かる。

4.2.3 アクロス信号の検出

アクロス信号の検出のために、下記のデータ処理を行った。

- ①連続観測データを、正時から始まる 2 時間毎のファイルに分けた。
- ②それぞれの 2 時間データについて、大振幅のノイズを除去した後に、400 秒の時間区間でスタッキングを行った。
- ③隣り合う 2 時間毎のスタッキングデータをフーリエ変換した後に線形結合し、Radial(R)および Transverse(T)の直交 2 方向の加振に対する応答に変換した。その後、観測座標を回転し、NS, EW, UD 各成分を radial(r), transverse(t), vertical(z) 方向の成分に変換し、6 成分の観測スペクトルを取得した (rR, tT, zRrT, tT, zT, 國友・熊澤(2004b)など)。
- ④⑤で得られた全期間のデータに対し、周波数領域での最適重み付きスタッキング(長尾他, 2004)を適用した。

各加速度計で得られた結果のうち、rR, zR, tT の 3 成分について図 4-2-7 に示す。なお、通常

の地震観測と比較するために、加速度から速度に変換して表示してある。各図の左側は、スタッキング時間による信号（実線）およびノイズ（破線）の RMS 振幅の変化を示している。RMS 振幅は、10.245–19.445Hz の周波数帯域で、信号周波数系列およびノイズ周波数系列の振幅スペクトルから計算したものである。右側は、スタッキング後に得られた振幅スペクトルである。信号周波数系列を●で、ノイズ周波数系列を×で示している。

地表（0m）では、実線と破線がほぼ重なっており、スタッキングしても信号がノイズに埋もれていることを示している。振幅スペクトルの図でも、信号周波数系列（●）がノイズ周波数系列（×）に埋もれてしまっている。

GL-100m では、実線（信号）は一定値に収束し、破線（ノイズ）は、時間の平方根の逆数で減少を続け、最終的に SN 比が 3～4 のデータが得られている。振幅スペクトルでも信号周波数系列がノイズ周波数系列の上に分布するのが見られる。

4.2.4 考察

地表部では、5 日間のスタッキングでもアクロス信号を検出することは出来なかった。原因としてノイズレベルが大きいことが上げられる。しかし、5 日間のスタッキングにより、GL-100m の最も大きい振幅の信号よりもノイズレベルは低減しており、一部の信号は検出されても良さそうである。GL-100m から地表までの間に信号が減衰する構造があり、信号レベルそのものが低下しているか、記録計の不具合（GPS 時刻同期の問題）により信号のスタッキングが上手く行っていないことなどが考えられる。

GL-100m では、アクロス信号を検出することが出来たが、5 日間で平均的な SN 比が 3～4 というのは、地下構造物の健全性監視のための信号としては、いかにも心許ない。しかし、ノイズの主体が観測装置の自己ノイズであることを考えると、より高感度の観測をすることで、より短時間により高い SN 比での信号検出が可能と考えられる。この点については今後の観測に期待したい。立坑内での高感度の観測のためには、GPS 信号の立坑への導入などインフラの整備を進める必要があり、本研究が、超深地層研究所計画に組み込まれるか、他の研究との協同などを考えなければ実現は困難であろう。なお、検出された信号のスペクトルは、12Hz と 17Hz 付近にピークを持ち、14Hz 付近の振幅が小さいという構造をしている。これは、伝播経路の地下構造に由来すると考えられるが、地下構造物の周波数特性を評価する上で、このような信号が適当かどうかは、観測およびシミュレーションを通して検討していく必要がある。当面（平成 20 年度）は、東濃鉱山の立坑を活用するなど、信号レベルの高い場所での適用試験から実施するのが現実的であると考えられる。

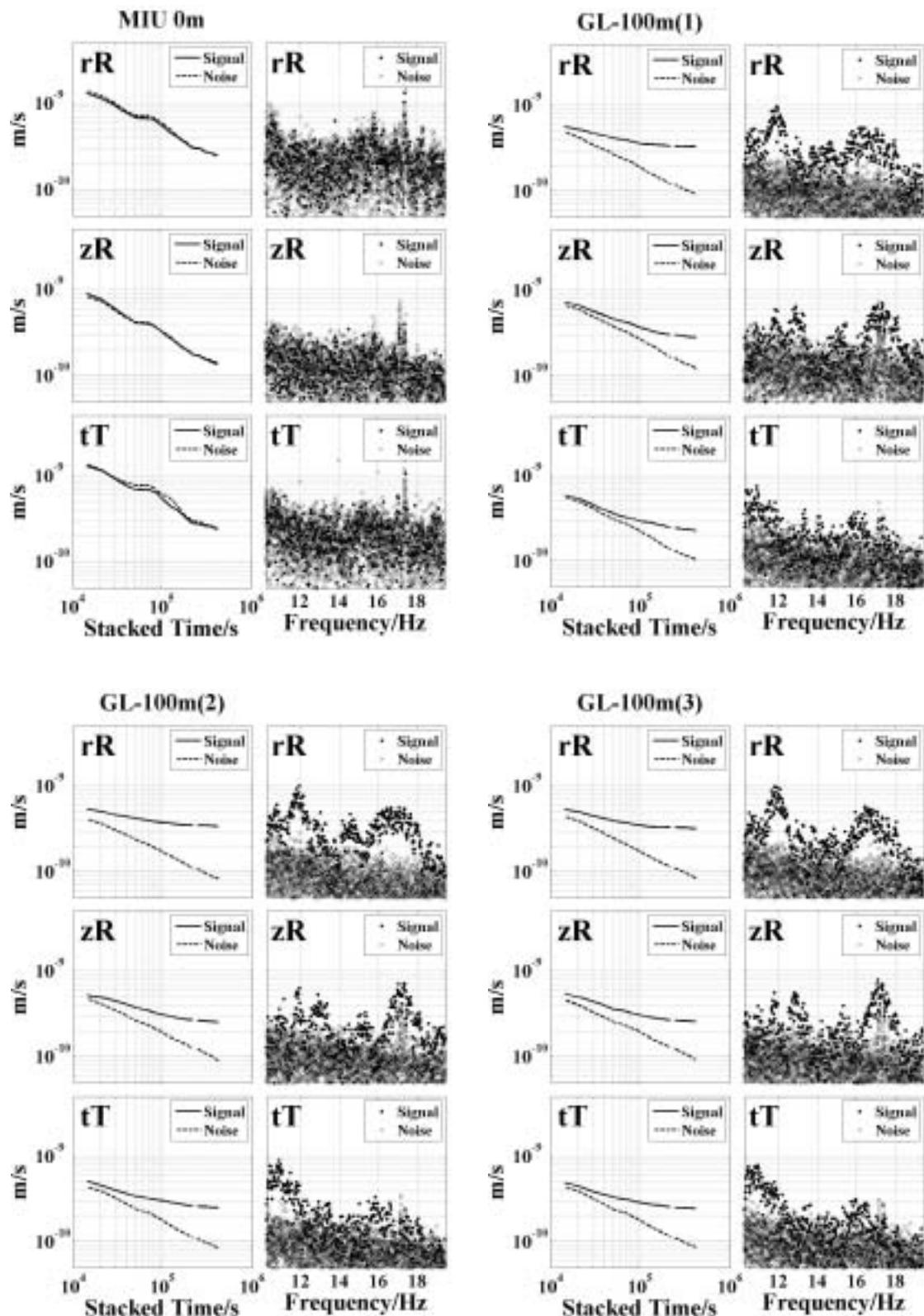


図 4-2-7 スタッキングによるノイズの低減とアクロス信号の検出
(約 5 日間のスタッキング結果)

5. おわりに

工学技術としてのアクロスの適用性について、平成19年度に行ったアクロス観測網の整備状況および研究成果について述べた。

地下構造物の健全性評価については、当初の予測に反し、現状（東濃鉱山のアクロス送信所と瑞浪超深地層研究所用地が約2.5km離れている）ではかなり困難なことが明らかになった。平成20年度は東濃鉱山第2立坑を瑞浪超深地層研究所の立坑と見立ててデータを取得する計画である。さらに、設置が完了したセンサについては、次年度早々にデータの取得を開始する予定である。

謝辞

「2.1 弾性波アクロスの研究」には、防災科学技術研究所のHi-netのデータを使用しました。ここに感謝の意を表します。

「3.1 戸狩観測点（東濃地震科学研究所）のデータ解析」において、戸狩観測点のデータを快く提供くださった東濃地震科学研究所の大久保慎人博士に感謝の意を表します。

「4.2 MIU立坑内の既存地震計による弾性波アクロス信号の予備観測」において、観測の実施およびデータ変換にご協力頂いた応用地質株式会社の下山昌宏氏に感謝の意を表します。

参考文献

原子力発電環境整備機構：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性 「処分場の概要」の説明資料, pp. 5-3 – 5-4, (2004)

早野明, 佐藤稔紀, 今津雅紀：超深地層研究所計画における施設設計・施工の現状, 瑞浪層群の地盤特性と解析用物性値の設定について, 土木学会第 59 回年次学術講演会, CS1-008, (2004)

核燃料サイクル開発機構: Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations, pp. 8-15 (2003)

熊澤峰夫, 武井康子 : 精密制御音波放射による能動的地下常時モニター手法の研究 その 1 目的と原理, 日本地震学会講演予稿集 1994 年度秋季大会, 2, 158, (1994)

Kumazawa, M., T. Kunitomo, T. Nakajima, K. Tsurga, Y. Hasada, H. Nagao, H. Matsumoto, J. Kasahara, N. Fujii, and N. Shigeta, Development of ACROSS (Accurately Controlled, Routinely Operated, Signal System) to realize constant monitoring the invisible Earth's interiors by means of stationary coherent elastic and electromagnetic waves, JAEA-Research 2006-033, pp.1-150, (2007)

國友孝洋, 熊澤峰夫 : 弹性波アクロスによる地殻構造のアクティブモニタリング 一弹性波アクロスの開発と東濃鉱山からの連続送信一, 月間地球, 号外 47, pp. 26-33, (2004a)

國友孝洋, 熊澤峰夫 : 弹性波アクロスによる地殻構造のアクティブモニタリング 一弹性波アクロスによる送受信技術一, 月間地球, 号外 47, pp. 44-52, (2004b)

國友孝洋, 熊澤峰夫 : 弹性波アクロスによる地殻構造のアクティブモニタリング 一東濃鉱山アクロステストサイトでの観測結果一, 月間地球, 号外 47, pp. 86-94, (2004c)

國友孝洋 : 弹性波アクロス送信規約試案ー中部地域における送信周波数の割り当てー, 日本地震学会講演予稿集 2006 年度秋季大会, C027, 92, (2006)

國友孝洋, 長谷川健, 熊澤峰夫 : 6 年目を迎える弾性波アクロス連続送信, 日本地震学会講演予稿集 2007 年度秋季大会, P1-012, 154, (2007)

長尾大道, 中島崇祐, 熊澤峰夫, 國友孝洋 : 最適重みつきスタッキングによる最大 SN 比を持つアクロス伝達関数の取得, 月間地球, 号外 47, pp. 53-60, (2004)

鶴我佳代子, 國友孝洋, 羽佐田葉子, 熊澤峰夫, 茂田直孝, 笠原順三 : 高品質信号取得のための ACROSS 稠密地震観測アレイ, 月間地球, 号外 47, pp. 95-104, (2004)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度、質量密度	キログラム每立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム每平方メートル	kg/m^2
比體積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア每平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア每メートル	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル每立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム每立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ每平方メートル	cd/m^2
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面上の角周波数	ラジアン ^(b) ステラジアン ^(b)	rad sr ^(c)	$1^{(b)}$ $1^{(b)}$	m/m m^2/m^2
力	ニュートン	N	N	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2	$\text{m}^1 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	J	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
仕事を、工率、放射束	ワット	W	W/s	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	C	$\text{s} \cdot \text{A}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	V	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \text{A}^{-1}$
静電容量	ファラード	F	F	$\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$
電気抵抗	オーム	Ω	Ω	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^3 \text{A}^2$
コンダクタンス	シーメンス	S	S	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$
磁束密度	テスラ	T	T	Wb/m^2
イントダクタンス	ヘンリー	H	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	$^\circ\text{C}$	K
光束	ルーメン	lm	$\text{cd sr}^{(c)}$	cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m^2	$\text{m}^{-2} \text{cd}$
吸収線量、比エネルギー一分子、カーマ	ベクレル ^(d)	Bq	Bq	s^{-1}
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	グレイ	Gy	Gy	J/kg
酸素活性	シーベルト ^(g)	Sv	Sv	J/kg
	カタール	kat	kat	$\text{s}^{-1} \text{mol}$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、慣習として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ハルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す數値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$\text{m}^{-1} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	$\text{m}^{-1} \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール每ケルビン	J/K	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
比熱容量、比エンタルピー	ジュール每キログラム每ケルビン	J/(kg K)	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$
比エネルギー	ジュール每キログラム	J/kg	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1} \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \text{A}^{-1}$
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	$\text{m}^{-3} \text{A}$
表面電荷密度	クーロン每平方メートル	C/m ²	$\text{m}^{-2} \text{A}$
電束密度、電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$\text{m}^{-2} \text{A}$
誘電率	フアラード每メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{A}^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1}$
モルエンタルピー、モル熱容量	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol K)	$\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \text{A}$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$\text{m}^{-2} \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² sr)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
酵素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	$\text{m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{mol}$

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^\circ=(n/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(n/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(n/648000) \text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
リットル	L	$1 \text{ L}=1 \text{ dm}^3=10^3 \text{ cm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1 \text{ t}=10^3 \text{ kg}$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1 \text{ eV}=1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
ダルトン	Da	$1 \text{ Da}=1.660 \cdot 538 \cdot 86(28) \times 10^{-27} \text{ kg}$
統一原子質量単位	u	$1 \text{ u}=1 \text{ Da}$
天文単位	ua	$1 \text{ ua}=1.495 \cdot 978 \cdot 706 \cdot 91(6) \times 10^{11} \text{ m}$

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バー	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ kPa}=10^5 \text{ Pa}$
水銀柱ミリメートル	mmHg	$1 \text{ mmHg}=133.322 \text{ Pa}$
オングストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=100 \text{ pm}=10^{-10} \text{ m}$
海里	M	$1 \text{ M}=1852 \text{ m}$
バイン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=2 \times 10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	$1 \text{ kn}=(1852/3600) \text{ m/s}$
ネーパー	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリ	Ci	$1 \text{ Ci}=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 \text{ R}=2.58 \times 10^4 \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 \text{ rad}=1 \text{ eGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 \text{ rem}=1 \text{ eSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
フェルミ	fm	$1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット	Torr	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
カリ	cal	$1 \text{ cal}=4.1858 \text{ J} \quad ([\text{15}^\circ \text{C}] \text{カロリー}), 4.1868 \text{ J} \quad ([\text{IT}] \text{カロリー})$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu\text{m}=10^{-6} \text{ m}$

