

地殻変動監視システム (CMS) の構築

– Crustal-movement Monitoring System –

神田正一・鎌滝孝信・内田淳一

Establishment of Crustal-movement Monitoring System (CMS)

Shoichi KANDA, Takanobu KAMATAKI and Jun-ichi UCHIDA

Abstract

Recently, official seismic monitoring networks such as KiK-net and Hi-net are well consolidated, and also universities and research institutes are doing their unique monitoring. However, it would say these are mostly used only by researchers. By developing a new monitoring system with high quality seismographs and GPS, we think those observation data can not be easily used only by researchers but also can be delivered to wide range of municipalities and private companies. We contracted to review the applicability of seismic fault survey methodologies, in which we had a chance to conduct seismic monitoring with high sensitivity seismographs and crustal movement monitoring with GPS. To conduct this project, we established a system for monitoring and analyzing micro earthquakes and surface movements. This project was targeted to reduce human costs in data processing and monitoring operations by automation, to reduce instrument costs by using lower computer system, and to reduce network costs by lower and safe network. In this paper, we described the objectives and performances of the developed Crustal-movement Monitoring System (CMS).

Keywords : crustal movement, monitoring system, micro earthquake monitoring, GPS, telemeter, internet VPN

(要 旨)

近年、基盤強震観測網 (KiK-net)、基盤高感度地震観測網 (Hi-net)、GPS連続観測システム (GEONET) などの公的な地震観測網、GPS観測網が整備され、大学を始めとする研究機関においても独自の観測が行われている。しかしながら、これらはほとんど研究者のみの利用にとどまっていると考えられる。高精度地震計及びGPSを用いた観測システムを開発することにより、これらの観測データを研究者以外でも利用しやすくし、自治体や民間へのサービスを展開できるものとする。今回、震源断層調査手法の適用性を検討する業務を受注し、高感度地震観測、及びGPSによる地殻変動観測を実施する機会を得た。業務の実施に当たり、断層深部で発生する微小地震及び地表変動を監視・解析するシステム (地殻変動監視システム) を構築した。本システムは、データ処理・動作状況監視の自動化による人的コスト、低価格なコンピュータシステムによる機器コスト及び低価格で安全性の高い通信網による通信コストの低減を図ったものである。本論文では地殻変動監視システムについて、開発の意図及び機能について述べる。

キーワード: 地殻変動, 監視システム, 微小地震観測, GPS, テレメータ, インターネット VPN

1. まえがき

筆者らは震源断層に係る研究の一環として震源断層調査手法の適用性を検討する業務を受注し、震源断層パラメータを評価するための調査及び解析を実施した。震源断層の調査項目は、地震調査研究推進本部「今後の重点的調査観測について」(平成17年8月30日)に示されている。地震発生規模の予測手法として、変動地形調査、断層を対象とした地殻構造探査、重力探査、高感度・広帯域地震観測、GPS等による地殻変動観測、電磁探査などが挙げられている(図-1参照)。

これらのうち、断層に沿った地中及び地表の変動を地殻変動と捉え、断層深部で発生する微小地震及び地表変動を監視・解析するシステムを構築した。微小地震観測は高感度の地震計を7~10km間隔で配置し、地表変動を監視するGPS観測は、断層に直交する測線を配置し、稠密観測を行うものである。本システムでは、データ収録、測定状況の監視、データを用いた解析を行い、蓄積したデータとHi-net、GEONETの観測データも利用して、震源断層評価の検討に資することを目的とした。

本システムは業務で調査及び解析対象とする北上低地西縁断層帯(縦ずれ断層)、山崎断層帯主部(横ずれ断層)に設置した。北上低地西縁断層帯では2008年6月14日に岩手・宮城内陸地震(Mj7.2)が地震観測網中央部で発生した。本システムで得た微小地震とGPSの観測結果を用いて、すべり面の分布と余震分布域が報告されている。²⁾

本論文では地殻変動監視システムについて、開発の意図及び機能について紹介する。

2. システムの概要

地震及び地殻変動に関する観測システムは、常にその時代の先端技術によって進化してきた。今回、地殻変動監視システムを構築するにあたり、観測網の机上検討、現地調査・確認、事前ノイズ調査、機器設置作業、観測・メンテナンス及びデータ解析の順で検討を進め

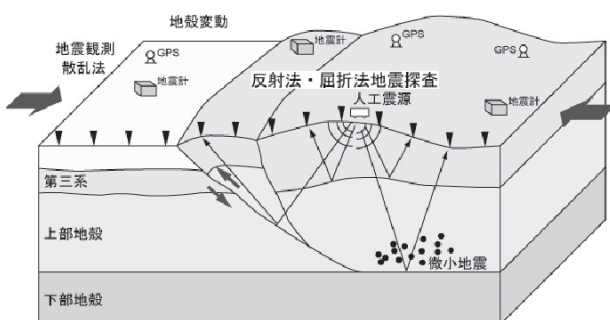


図-1 震源断層調査の概念図¹⁾

Fig. 1 Scheme of seismogenic fault survey

た。

観測・メンテナンスについては、テレメータの検討(主にデータ通信網の設計)とデータ収録・解析システムを設計し、収録した生データの管理、地震波形を読み取ったデータの管理方法を検討した。

データ解析については、気象庁一元化震源データから地震情報(時刻、位置等)を入手し、イベント波形データから地震波読み取りを行った。また、稠密観測の連続波形データから観測領域の微小地震情報を抽出した。これらのデータからイベント波形データを切り出して読み取りを行い、微小地震の震源位置とメカニズム解の高精度化を図った。地殻変動観測・解析の流れを図-2に示す。

今回構築した地殻変動監視システムは、最新の機器と通信サービスを独自に開発したソフトウェアで制御し、安価で信頼性の高い連続観測システムを実現できた。地殻変動監視システムの構成図を図-3に示す。

以下に、本システムの主な特徴を示す。

1) 観測の自動化と管理要員の削減

24時間連続的に観測し、その観測データを遠隔地にリアルタイムで送信する。連続観測に際して、いろいろな障害が起きても無人で自動復旧し、また必要に応じて観測本部から各機器の設定値をリモートで変更し、再スタートできる。何らかの理由で通信が途絶えた場合でも、1ヶ月以上観測点でデータの保存を行い、通信が復旧してから自動で観測本部にデータを送ることができる。

2) 低価格で操作性の良いコンピュータシステムの構築

ハードウェアは低価格で一般的なコンピュータ機器を採用し、ソフトウェアは開発が簡便で、ソフトウェア資源の流用性、開発したアプリケーションの操作性とビジュアル性を優先し、Windowsで短期間にシステムの構築を可能とした。モニター画面は一般テレビ用の大型液晶ディスプレイ(52インチ)を用い、観測結果と機器状態のモニタリング結果をリアルタイムで表示した。さらに誰でも操作できるように、ほとんどの操作を同じ画面上のメニュー選択で行えるようにした。

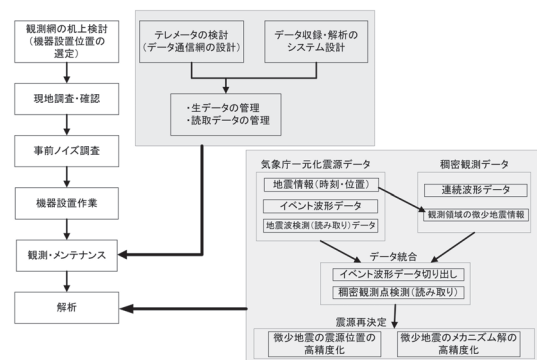


図-2 地殻変動観測・解析の流れ

Fig. 2 Crustal movement monitoring and analysis flow

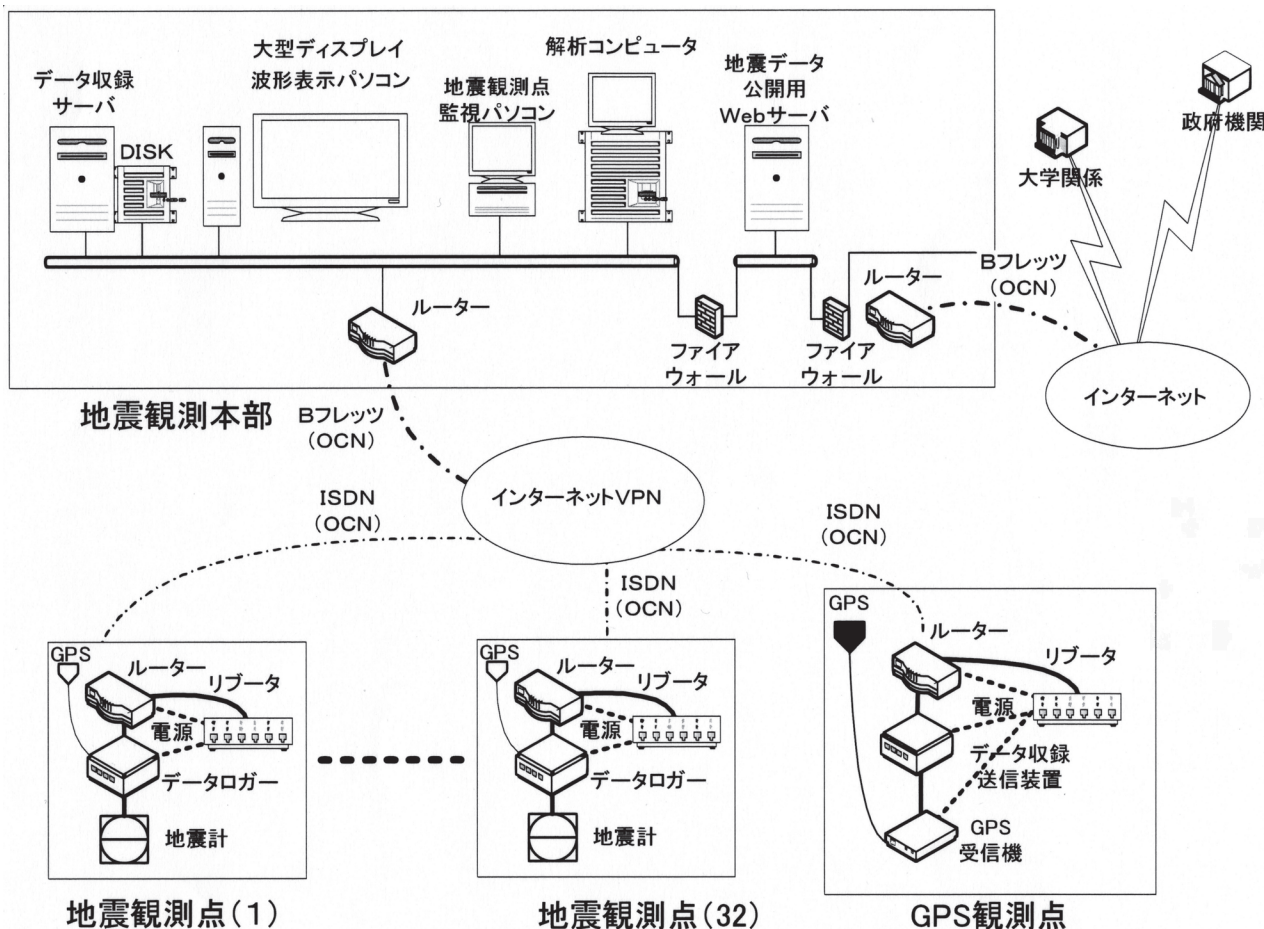


図-3 地殻変動監視システムの構成図

Fig. 3 Structure of crustal movement monitoring system

3) 安価でリアルタイム性と確実性を確保したデータ通信

ネットワーク回線は、価格の安いIPアドレス方式のインターネット回線網を用い、データ通信回線網のセキュリティが保たれるインターネットVPN方式を採用した。またリアルタイムモニタリングを可能とするためにUDPプロトコルを採用し、かつデータロガーに保存されているデータをFTPで再度取り込み、UDP方式によるデータの漏れを補うこととした。

4) 標準形式のデータフォーマットによる独自の解析処理

大学、気象庁、防災科学技術研究所などで収録されているデータと併せて評価、解析することを目的に、データフォーマットを標準形式のWINフォーマットとした。収録したデータを元に、独自に開発したソフトウェアで地震カタログを作成し、イベント波形の切り出しを行う。さらに、気象庁から正式なカタログを入手した後で再度イベント波形の切り出し及び読み取りを行う。その他、イベントを指定することで簡単に収録波形の再表示ができ、さらに自動震源決定、メカニズム解の3D表示も実現した。これらの収録したデータ及び解析結果を、大学研究機関等へWeb

で配信可能とした。

3. 観測システム

3.1 観測機器

3.1.1 地震観測

観測地点における観測システムの基本的な構成を図-4に示す。システムを構成する主な機器は、地震計、データロガー、時刻校正用のGPSアンテナ及び電源である。テレメータ観測を行う場合は、このほかにルーター及び遠隔電源制御装置(リポータ)を使用する。地震計及びGPSアンテナとも、雷からデータロガーの損傷を防ぐため、避雷器をデータロガー側終端部に接続している。電源については、現場の状況に応じ、DC12V(バッテリー)もしくはAC100Vを選定する。

地震計は応用地震計測(株)製HS-1、データロガーは白山工業(株)製LS-7000を使用する。地震計の仕様を図-5及び表-1に、データロガーの仕様を図-6及び表-2に示す。

3.1.2 GPS観測

観測地点における観測システムの基本的な構成を図

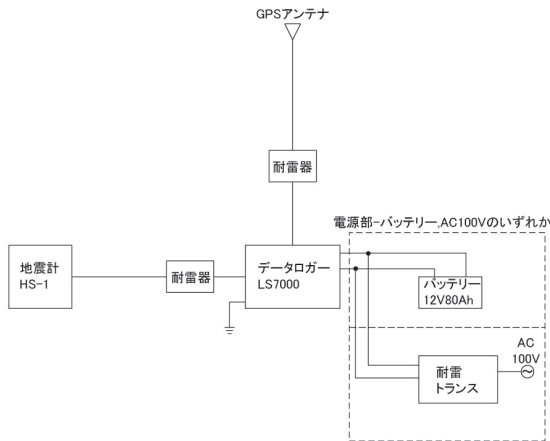


図-4 地震計観測システムの基本構成
Fig. 4 Structure of seismograph monitoring system

表-1 地震計機器仕様
Table 1 Seismograph specification

項目	仕様
品名	HS-1
固有周波数(Hz)	2Hz
成分	3成分 水平2成分、上下1成分
センサ出力	460~1580mV/in/sec
動作温度範囲	-45~100°C
製造元	応用地震計測株式会社

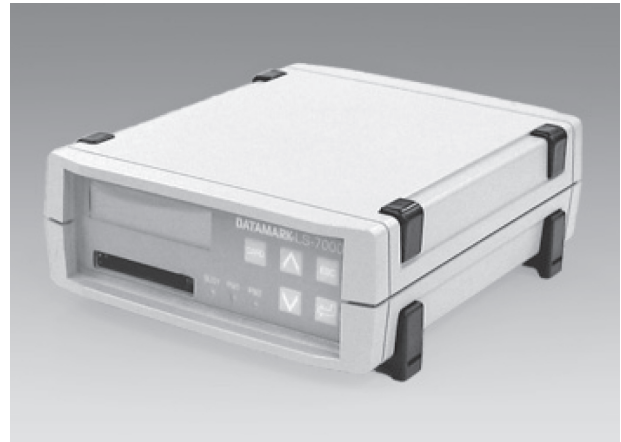
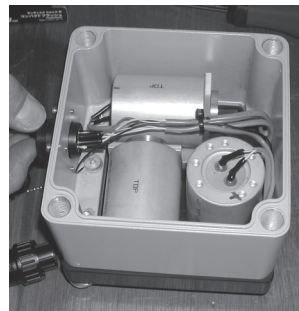
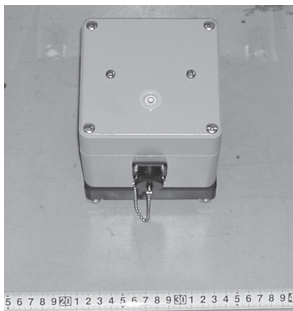


図-5 地震計 (応用地震計測(株)製 HS-1)
Fig. 5 Seismograph (OYO Seismic Instrumentation Corp. HS-1)

図-6 データロガー (白山工業(株)製 LS-7000)
Fig. 6 Data Logger (Hakusan Corporation. LS-7000)

表-2 データロガー仕様
Table 2 Data Logger specification

項目	仕様
品名	LS-7000
チャンネル数	6チャンネル差動入力
入力レンジ	±10V、±1V チャンネル毎に切り替え可能
サンプリング	200Hz、100Hz、80Hz、20Hz、2Hz 3チャンネル毎に設定可能
分解能	24bit(ΔΣ型AD)
AD精度	200Hz、100Hz、80Hzサンプリングで17bit保障 20Hz、10Hz、2Hzサンプリングで18bit保障
時刻校正	内蔵GPS受信モジュールによる時刻校正 1衛星だけの捕捉でUTCに同期
時刻校正方法	指定時刻あるいは指定温度変化毎にGPS捕捉
記録メディア	コンパクトフラッシュ(48MB~2GB) フォーマット:FAT16、FAT32
ロガー機能	連続記録、トリガ記録(レベルトリガあるいはSTA/LTトリガ)
テレメータ機能	UDP/IPパケットによるリアルタイムテレメータ機能
データフォーマット	WINフォーマット(テレメータ動作時は、拡張WINフォーマット)
保守機能	設定状態、動作状態の通知機能 センサ入力モニタ、電源電圧モニタ、トリガモニタ
通信プロトコル	TCP/UDP、telnet、FTP、ppp
通信インターフェース	10BASE-T、RS232-C(通信速度:4800、9600、19200、38400bps)
消費電力	65mA~120mA、GPS起動時は+50mA パワーマネジメント機能により設定、動作状態に応じて最適化
センサ電源出力	DB12V出力(500mA max)
電源	DB12V 2系統同時入力可能
動作湿度	-20~+50°C
保存温度	-30~+60°C
寸法・重量	155x187x56mm(突起部除く)、約960g(コンパクトフラッシュ含まず)
製造元	白山工業株式会社

-7に示す。システムを構成する主な機器は、GPS受信器、GPSアンテナ、データ収録送信装置及び電源である。電源はAC100Vとする。降雪地域に設置する場合にはGPSアンテナにレドームを装着し、着雪による精度低下を防止する。GPS受信機の仕様を図-8及び表-3に、GPSアンテナの仕様を図-9及び表-4に示す。また、アンテナレドームを図-10に示す。



図-9 GPSアンテナ (Trimble社製 Zephyr ジオデティックアンテナ)

Fig. 9 GPS antenna (Trimble Navigation Ltd. Zephyr Geodetic Antenna)

表-4 GPSアンテナの仕様

Table 4 GPS antenna specification

項目	仕様
品名	Trimble Zephyr Geodetic基準局アンテナ
寸法	直径34.3cm x 高さ7.6cm
重量	1.0kg
動作温度範囲	-40~70°C
耐湿度	100パーセント、完全密封
衝撃試験	2m上空よりコンクリート面への落下試験
振動試験	MIL-STD-810
アンテナ利得	50dB 4点のアンテナ供給によるサブメートル位相中心再現性
製造元	Trimble社

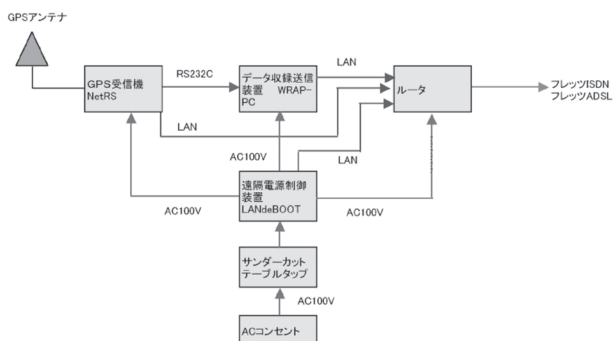


図-7 GPS観測システム機器構成図

Fig. 7 GPS monitoring system configuration

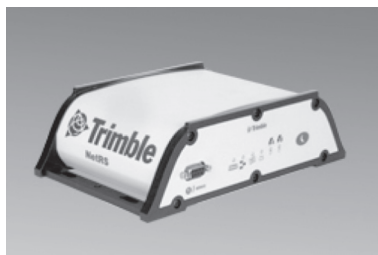


図-8 GPS受信機 (Trimble社製 NetRS)

Fig. 8 GPS receiver (Trimble Navigation Ltd. NetRS)



図-10 アンテナレドーム

Fig. 10 Antenna radome

表-3 GPS受信機仕様

Table 3 GPS receiver specification

項目	仕様
品名	TRIMBLE NetRS
性能仕様	高精度複合コリレータによるL1及びL2 擬似距離測定 L1/L2搬送波測定ノイズ: 精度<1mm (1Hz帯域幅) L1/L2信号ノイズ比をdB-Hzでレポート 24チャンネルL1 C/Aコード、L2C1、L1/L2全波長位相、WAAS/EGNOS対応
データ格納	内部メモリ 150MB(3,400時間) または950MB(21,533時間) *衛星からのデータを15秒エポックで記録した場合の生データ観測
精度	静止5mm+1ppm 水平RMS 及び10mm+1ppm 垂直RMS S
電気仕様	11-28V DC外部電源入力、過電圧保護
消費電力	NetRS本体: 3W以下 Zephyr Geodetic™アンテナとセット時: 3.5W
寸法・重量	22.8cm x 6.5cm x 14cm、1.6kg
動作温度	-40~+65°C
保存温度	-40~+75°C
防水、防塵	IPX5、砂、埃、湿気に対して完全密封
湿度	100%、結露なし
衝撃及び振動	MIL-810-F Figure 514 5c-17振動レベル(各軸) MIL-810-F Table 516.6-1 衝撃試験、2mの落下に耐える
通信	LANポートx1、RS232ポートx4 セキュリティ機能
測位および出力	1Hz、2Hz、5Hz、10Hz測位、内部路銀愚及びデータストリーミング出力
RT-17出力	CMR、CMR+、BINEX 及び RTCM2.1、2.3出力
製造元	Trimble社

3.2 観測地点の選定

観測地点の選定は次の手順で行う。

①机上検討

次の諸条件を考慮して、1/20万地勢図～1/2.5万地形図上に観測点を配置する。

- ・既存観測点の位置（大学、Hi-net、GEONET 観測点等）
- ・地震計については観測点の間隔（今回業務では弾性波トモグラフィの精度を考慮し、観測点間隔は7～10kmとした）
- ・地形
- ・地質
- ・活断層の地表トレース
- ・活断層の性状・活動履歴
- ・地震活動の状況

今回の業務のGPS観測では、上記のほか既存の弾性波探査の測線位置、GEONET観測網の成果等を参考にして観測地点を設定した。

②現地踏査

現地で次の条件を確認し、設置・観測が可能であるかどうかを判断する。その後、地形図上で観測点配置が適切であるか確認する。

- ・地形
- ・地質
- ・上方空間の状況

測地用にGPSを設置する場合は天頂が150°以上開けていることが望ましく、特に南側が開けている必要がある。条件が厳しい場合には予備測定を行い、データの品質を確認する。

- ・AC電源、電話線等の整備状況

③地権者、規制区域等の確認

公図、土地登記事項要約書を取得し、地権者を確認するとともに、設置位置が国有林、保安林、砂防指定地などの規制区域に設定されているか否かについて確認する。設置が困難であると判断した場合には再度現地踏査を行い、設置箇所を選定し直す。

3.3 ノイズ測定

地震計設置に先立ち、観測箇所のノイズレベルを測定する。測定は上下成分について行い、測定期間は1週間程度とする。測定期間中の地震波形を抽出し、ノイズレベル及び観測波形が目的に耐えるか否かを判定する。

表-5 ノイズ測定に使用する上下動地震計の例

Table 5 Sample of vertical seismometer for noise measurement

品目	メーカー・型式	主要な性能	数量
上下動地震計	サーセル社 L-22D	標準周波数:2.0Hz 標準コイル抵抗:210,325,510Ω 周波数変化:0.2～2.0Hz コイルインダクタンス:2.5×10 ⁴ Rc 寸法:φ60x50(H)mm	1

測定は上下動地震計、データロガー、12Vバッテリーを使用して行い、サンプリングは実際の観測と同一とする。ノイズ測定に使用する上下動地震計の例を表-5に示す。

3.4 観測機器の設置

3.4.1 地震計

観測機器の設置手順は、次のとおりである。

(1)基礎の設置

a. 地震計

・露岩部に設置する場合は、設置面の風化部を取り除き、モルタルを打設する。モルタルの厚さは7～10cm程度とする。土砂部に設置する場合は、基礎設置面とする比較的硬質な部分まで掘削し、モルタルを打設する。必要に応じて保護カバー固定用のボルトを埋め込む。地震計の基礎設置状況を図-11に示す。

b. データロガー他収納部

表土を深さ10～20cm程度掘削し、敷砂利を敷き均す。型枠、ケーブル保護管を設置したのち、場所打ちコンクリートを打設する。必要に応じて保護カバー用のボルトを埋め込む。データロガー他収納部の基礎設置状況を図-12に示す。

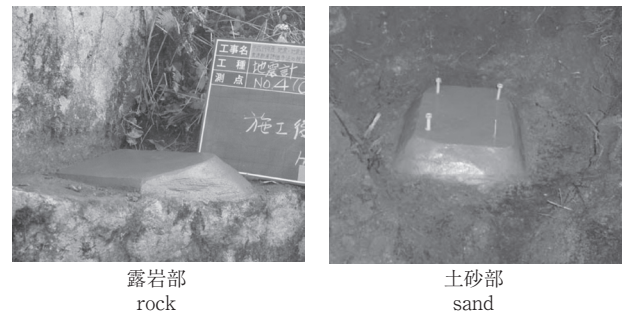


図-11 地震計基礎設置状況

Fig. 11 Seismograph base setting



図-12 データロガー他収納部基礎設置状況

Fig. 12 Data logger etc. base setting



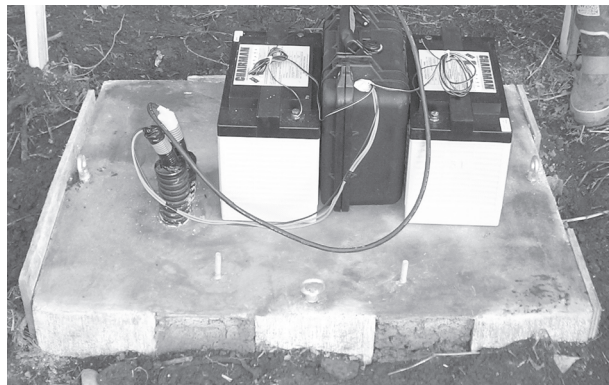
地震計設置状況
Seismograph setting



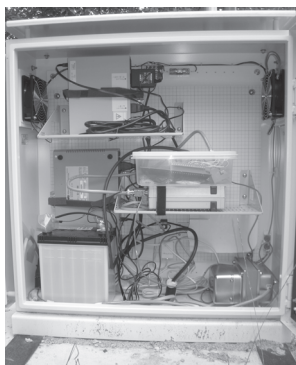
地震計保護箱設置状況
Seismograph cover box setting

図-13 地震計及び地震計保護箱設置状況

Fig. 13 Seismograph and cover box setting



データロガーケース(中央)及びバッテリー
Data logger case (middle) and batteries



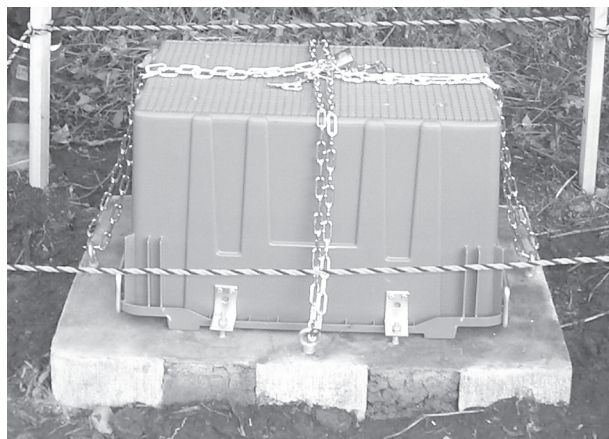
収納箱内部
Interior



収納箱外観
Outlook

図-14 収納箱設置状況(テレメータ観測)

Fig. 14 Cover box setting (Telemeter monitoring)



カバーを設置した状態
Covered version

図-15 収納箱設置状況(オフライン観測)

Fig. 15 Cover box setting (off-line monitoring)

(2)地震計設置

- ①地震計設置面に方位をマーキングする。
- ②地震計位置を決め、地震計固定用ビスの位置をマーキングする。
- ③ドリルでガイド穴を開け、コンクリートビスをねじ込む。
- ④コンクリートビスに地震計を引っ掛けて方位を合わせ、水準器で確認しながら地震計を水平に固定する。
- ⑤地震計保護箱を設置する。保護箱は周囲の状況に合わせて選択する。地震計及び地震計保護箱設置状況を図-13に示す。

(3)データロガー他収納箱設置、観測機器設置・接続

収納箱は、観測機器の多少により適宜選択する。テレメータ観測の場合は通信機器他が加わるため、収納箱にはある程度の容積が必要となる。テレメータ観測及びオフライン観測の収納箱設置状況を図-14及び図-15に示す。

データロガー時刻校正用のGPSは、収納箱付近に支柱を立て込み先端に設置する、あるいはAC電源の引き込み電柱に固定するなどの方法で設置する。GPSの設置状況を図-16に示す。

なお、地震計、GPSなどの信号線、電灯線、電話



図-16 GPS設置状況

Fig. 16 GPS setting

線等が露出する部分は保護管に収納し、動物による食害に対処する。

3.4.2 GPS

GPS の設置は、アンテナを既設構造物に取り付ける場合と基礎及び支柱を新設して取り付ける場合に分けられる

(1) アンテナを既設構造物に取り付ける場合

既設構造物の屋上付近にボルト及び取付金具を固定し、GPS アンテナを設置する。屋上の平面部分には防水シート、断熱材等が設置してある場合が多いため、躯体の立ち上げ部分にボルトを埋め込む、あるいは側壁にアンカーボルトを打設し、取付金具を固定する方法を用いた。

注意点は次のとおりである。

- ・ ボルト、取付金具の鉛直性を確保する。
- ・ ボルトの場合は埋込み長を確保し、充填剤の強度・硬化時間を十分とる。
- ・ 躯体の鉄筋に損傷を与えない。施工時に鉄筋が現れた場合は削孔部を修復し、設置位置を変更する。ボルト、取付金具及びGPS アンテナの設置状況を図-17に示す。

(2) 基礎及び支柱を新設する場合

基礎の形状は設置する地盤の状況に応じて設定する。今回の業務ではPHC 杭を立て込み、場所打ちコンクリートを打設して一辺1.5mの基礎を施工した。PHC 杭の高さは約G.L.+4mである。基礎形状と



ボルト (保護キャップ付) Bolt (with protect cap) 取付金具 /GPS アンテナ Bracket/GPS antenna

図-17 ボルト、取付金具及びGPS アンテナの設置状況

Fig. 17 Bolt, bracket and GPS antenna setting



図-18 基礎形状とGPS 設置状況

Fig. 18 Foundation geometry and GPS setting

GPS 設置状況を図-18に示す。

GPS 受信器 (観測機器収納箱) は、電気・電話の引き込み易さ、定期点検・メンテナンスの作業性等を考慮して設置場所を決定する。

4. テレメータシステム

テレメータシステムは、観測本部・各観測点の信頼性の高いデータ通信網によるネットワーク化、データの自動収録及びその状態のモニタリングからなる。

4.1 データ通信ネットワーク

データ通信ネットワークを構築する時のポイントは、観測点の通信状況、信頼性と価格 (初期費用、維持費用) である。観測点の通信状況が良く、無線、有線 (光回線、ADSL、ISDN) が使用可能な場合、比較的安価に構築可能である。それが難しい場合は、衛星回線、その他の特殊なデータ通信回線が必要になる。信頼性については、ネットワークの切断を極力避けるために、インターネット回線網が効果的である。また、インターネット回線の弱点であるセキュリティについては、インターネットVPNの発展により、十分なセキュリティの確保が可能である。価格については、通信事業者側のサービスメニューにより大きく変わるが、競争により徐々に低下傾向が見られる。

今回の観測点は山間部であるため、携帯電話網は難しく、安定してデータ通信が可能なISDN回線を用いた。観測点で収録されたデータは、ルーターからISDN回線を介してインターネットVPN網へ入り、光回線を介して観測本部へ送った。

今回、採用したネットワーク回線の概略図を図-19に示す。

地震観測本部は、インターネット網より基地局ルーターを介してコンピュータシステムへ接続される。地震観測点は、インターネット網に接続するためのルーター、地震計からのデータを取得するデータロガー及び電源制御装置 (リポータ) で構成される。

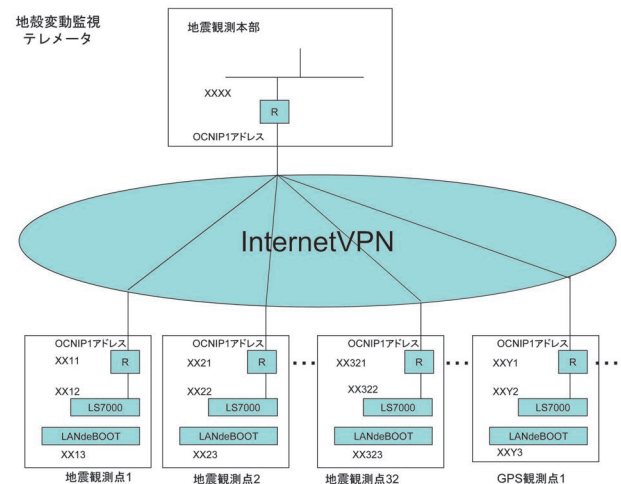


図-19 ネットワーク回線の概略

Fig. 19 Network bandwidth layout

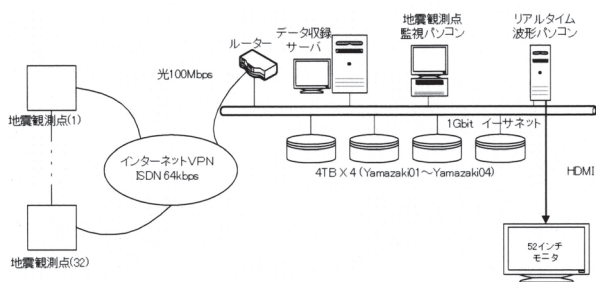


図-20 システム構成
Fig. 20 System layout

4.2 コンピュータシステム

コンピュータシステムは、開発期間の短縮と誰でも操作可能なシステム構築を目指して、OSにWindowsを採用した。ハードウェアは、低価格で一般的なコンピュータ機器を採用し、データ収録サーバ、リアルタイム波形表示コンピュータと大型ディスプレイ、地震観測点監視コンピュータ及びデータ管理用DISKで構成される。システム構成を図-20に、システム構成機器の仕様を表-6に示す。

各コンピュータの機能を以下に示す。

- ①データ収録サーバの機能
 - ・データ収録管理（プログラムの動作やデータ欠損等の管理）
 - ・FTP処理（観測地点の定期FTPデータ取り込み）
- ②リアルタイム波形表示コンピュータの機能
 - ・リアルタイムデータ受信管理
 - ・UDP受信・表示処理
 - ・保存WINデータの表示（日付・時刻指定）
 - ・各観測地点の情報等の表示
- ③地震観測点監視コンピュータの機能
 - ・観測地点の各機器（ルーター、データロガー、リブータ）との通信状況監視
 - ・電源制御装置からの監視状態受信及び表示（電源ON/OFF状態）
 - ・異常及び異常回復時メール送信

各コンピュータの機能と収録されたデータファイルの関係を図-21に示す。各コンピュータはそれぞれの目的のみの処理を行う、分散型コンピュータシステム

を採用した。これにより、データ収録、波形表示及び機能監視を別々のコンピュータで行い、連続運転における障害のリスクを低下させることができた。収録されたデータファイルは、LANで接続された外部のデータ管理用DISKに収録され、各コンピュータから参照される構成（NAS）とした。

地震観測システム全体の運用面からの機能構成を図-22に示す。操作的には、3つの機能に分かれる。

- ①全国震源表示システム、②山崎断層帯地震観測システム及び③北上低地西縁断層帯観測システムである。
- ① 全国震源表示システムでは、気象庁のホームページから震源リストをダウンロードし、震源決定システムで用いる地震カタログを自動的に作成する。地震の発生状況を、リアルタイムで大型ディスプレイ（52インチ）に表示する。
- ② 山崎断層帯地震観測システムでは、観測点のデータロガーによりリアルタイムでデータを収集（UDP）し、リアルタイム波形表示を行う。さらに、リアルタイム収録でのデータの漏れを補完するために、データロガーに保存されているデータをFTPにより収録する。収録データから、1ヶ月間の観測状況を確認できる。さらに収録データから、地震カタログをもとに震源決定を行う。WINシステムによる読み取りも行うが、P波・S波の読み取りシステムも独自に開発した。
- ③ 北上低地西縁断層帯観測システムでは、テレメータ機能がないため、データ収集を行っている。現場事務所と観測本部をネットワークで連携し、リアルタイム性は無いがテレメータと同様のデータ収集を可能とした。気象庁の地震カタログから、3Dの震源表示を可能とした。

4.3 データ収録

山崎断層帯地震観測システムにおけるデータ収録は、2段階で行う。データロガーに収録した波形データをリアルタイムで観測本部の大型ディスプレイに表示するために、UDPでデータ通信を行う。さらにデータロガーに収録されているデータをFTPでデータ通信し、

表-6 システム構成機器の仕様
Table 6 System devices specifications

機器	OS	CPU	メモリー容量	DISK容量	ディスプレイ
データ収録コンピュータ	Windows Server 2003	Intel® Xeon® プロセッサ 2基	4GByte	300GByte (RAID)	17インチ
リアルタイム波形表示コンピュータ	Windows XP	Intel® Core™ 2 Duo	4GByte	500GByte × 4 (RAID5)	52インチ
地震観測点監視コンピュータ	Windows XP	Intel® Core™ 2 Duo	2GByte	250GByte	17インチ
データ管理用DISK				4TByte	

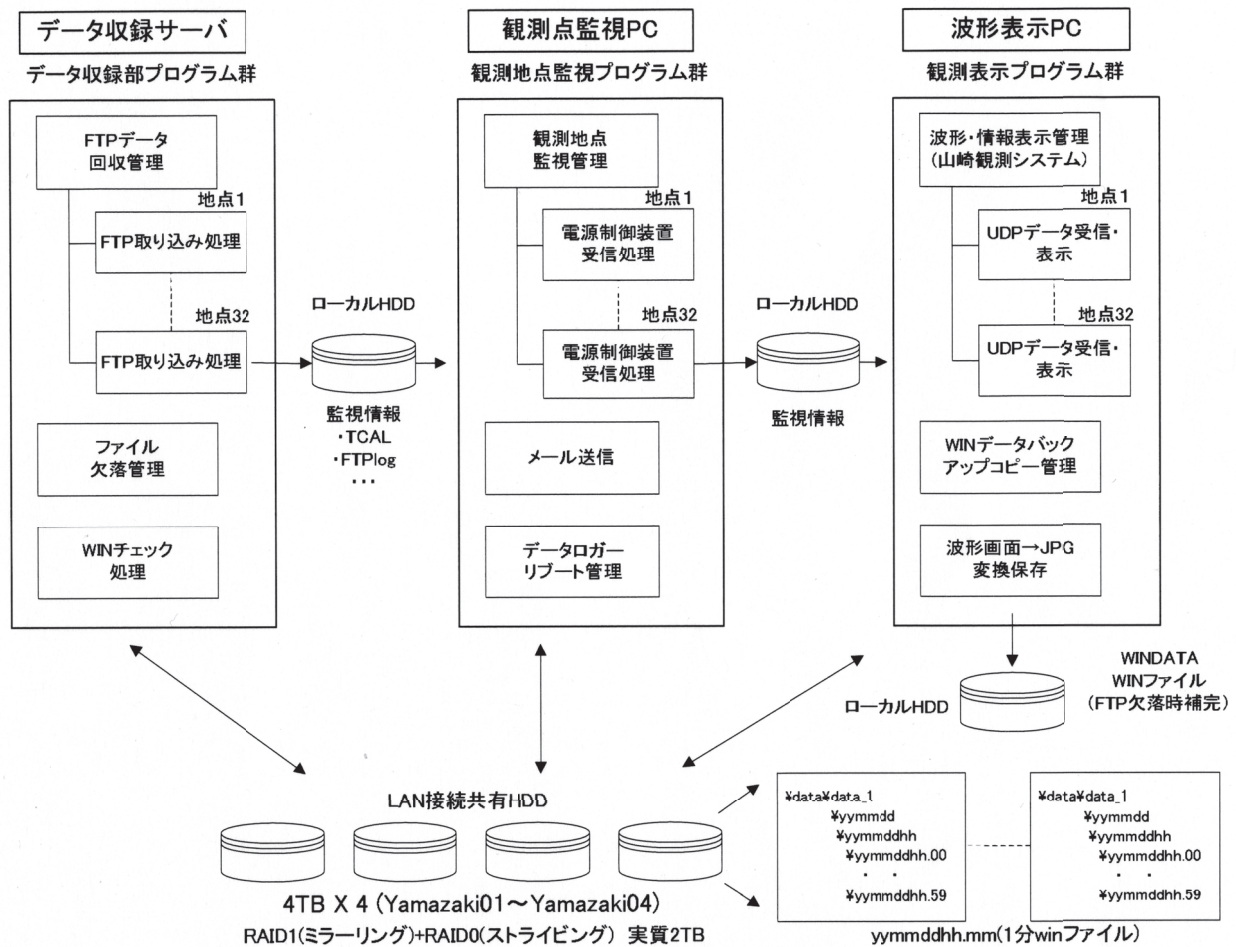


図- 21 各機能とファイルの関係
Fig. 21 Function-file relations

UDPによる収録漏れを補完する。FTPによるデータ収集は、データ収録コンピュータで行い、3分間で全てのデータロガーに対してFTPを実施する。通信環境、回収データ量などにより、3分以内にデータ収録が完了しなかった場合は、次の3分間で未回収データの回収を行う方法を採用している。これにより、観測データのリアルタイム表示とデータ収録の確実性を実現している。データ収録の構造を図-23に示す。FTPデータ回収の操作画面を図-24に示す。FTPデータ回収管理画面上に各観測地点からのデータ回収状況を表示する。その際、回収に失敗した場合の欠落管理を行い、回収に成功したファイルはFTP回収ファイル一覧に示す。また回収に失敗したファイルは、欠落WINファイル表示画面に示される。FTPの動作状況はFTP動作履歴画面に表示する。UDP方式によるリアルタイムデータ受信/波形表示の方法を図-25に、その処理の流れを表-7に示す。観測データのリアルタイム表示には、UDPによるデータ受信を行う。観測地点毎に受信ポートを介して受信し、大型ディスプレイにリアル

タイムに地震波形を表示する。

FTP方式によるデータ収録の方法を図-26に、その処理の流れを表-8に示す。

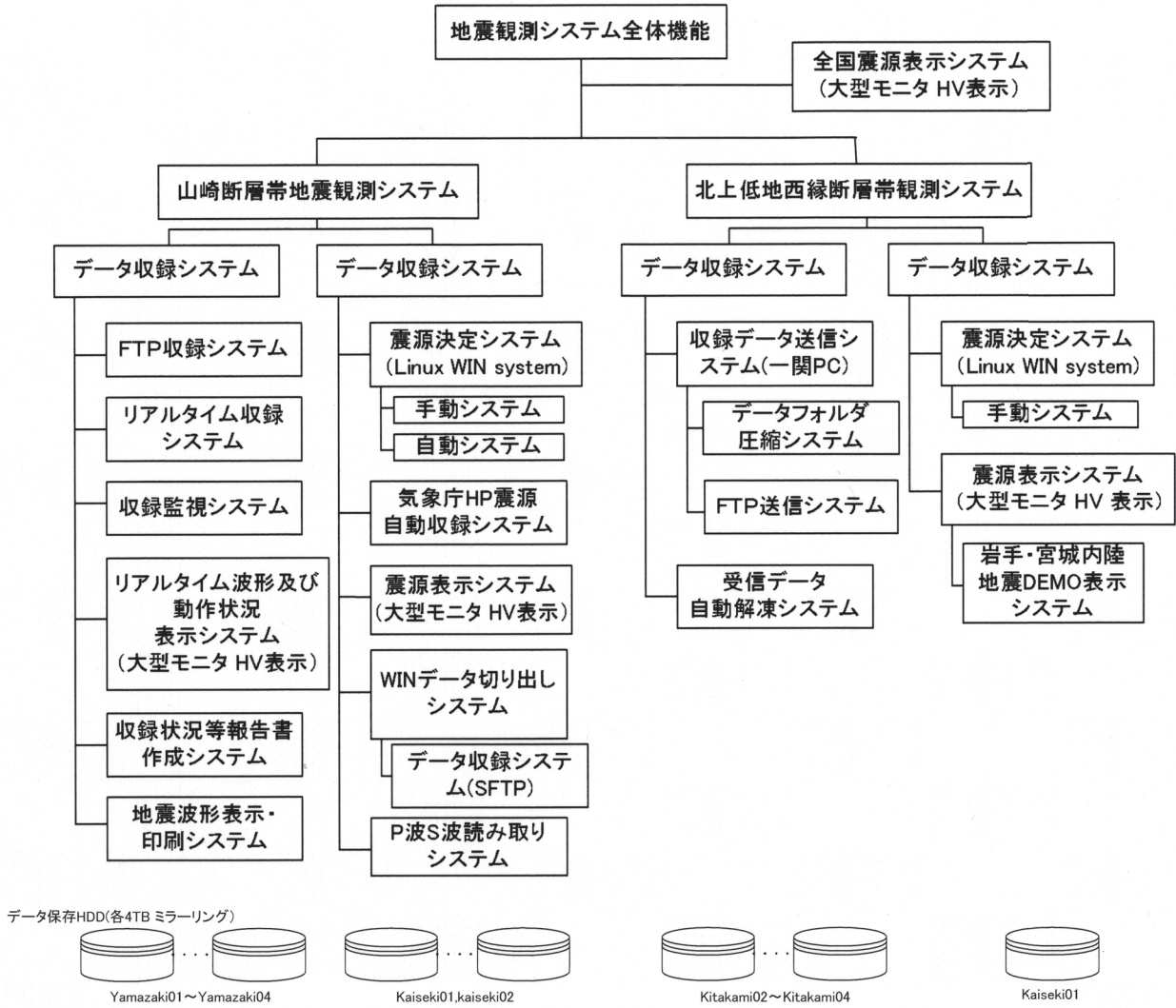


図- 22 システム全体機能構成

Fig. 22 Functional framework

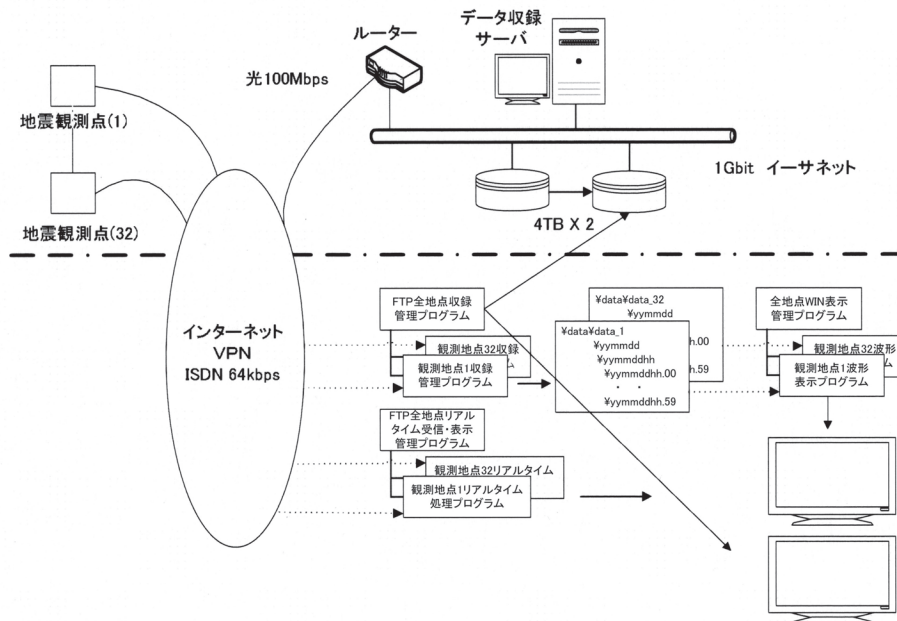


図- 23 UDP と FTP によるデータ収録の構造

Fig. 23 UDP and FTP data recording/correcting structure

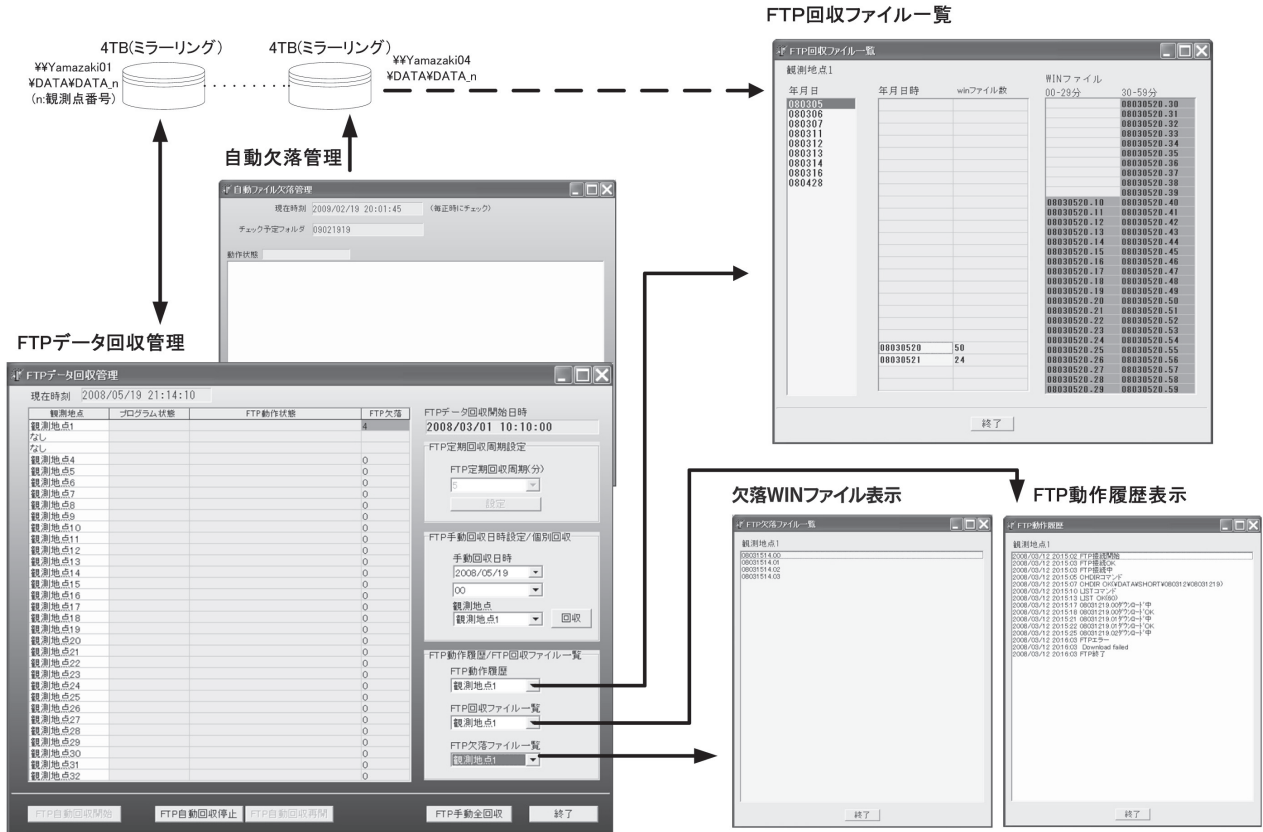


図-24 FTPデータ回収操作画面

Fig. 24 FTP data correcting operation screen shots

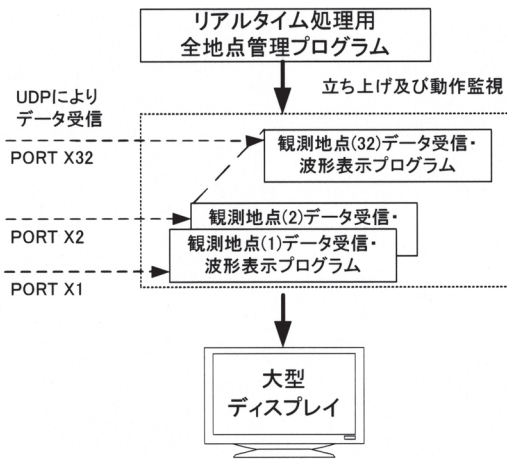


図-25 UDP方式によるリアルタイムデータ受信/波形表示
Fig. 25 Real-time data receiving and wave display with UDP

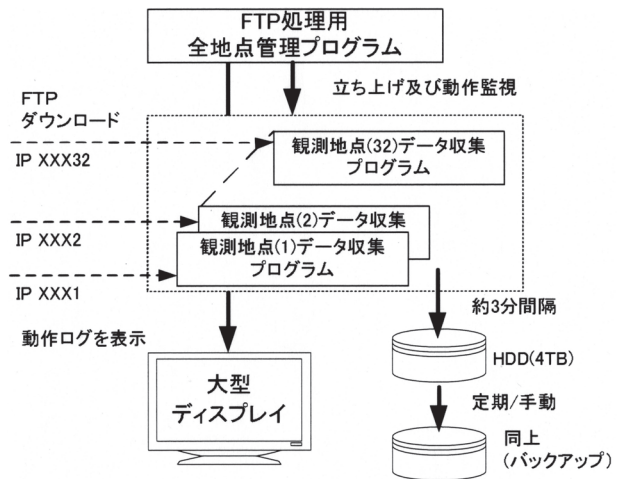


図-26 FTPによるデータ収録
Fig. 26 Data receiving with FTP

表-7 UDP方式によるリアルタイムデータ受信/波形処理方法表

Table 7 Flow of real-time data receiving and wave display with UDP

① センサー ~ データロガー	3CH、200Hzサンプリングにて収集
② データロガー ~ ルーター	10BASE-T LAN経由のUDPプロトコルにて、1秒ごとにWINフォーマットデータ転送
③ ルーター ~ ISDN(インターネット/VPN)	max 64kbps(max 6kByte/s)で同様にWINフォーマットデータ転送
④ ルーター ~ サーバPC(PowerEdge 2900)	1000BASE-T LAN経由のUDPプロトコルにて、1秒ごとにWINフォーマットデータ転送

表-8 FTP方式のデータ収録の流れ
Table 8 Flow of FTP data recording

① センサー ~ データロガー	・各データロガー(1ロガー/地点)に3CH、200Hzサンプリングにて収録 ・1時間ごとのフォルダに各60個の1分WINフォーマットデータを保存
② サーバPC ~ ISDN(VPN) ~ データロガー	・FTPコマンドによりデータディレクトリの変更
③ データロガー ~ ISDN(VPN) ~ PC	・FTPによりダウンロード(約60KB/WINファイル) ・データロガー ~ ルーター 10BASE-T ・ルーター ~ ISDN(VPN) max 64kbps(max 6kByte/s) ・ルーター ~ サーバPC 1000BASE-T

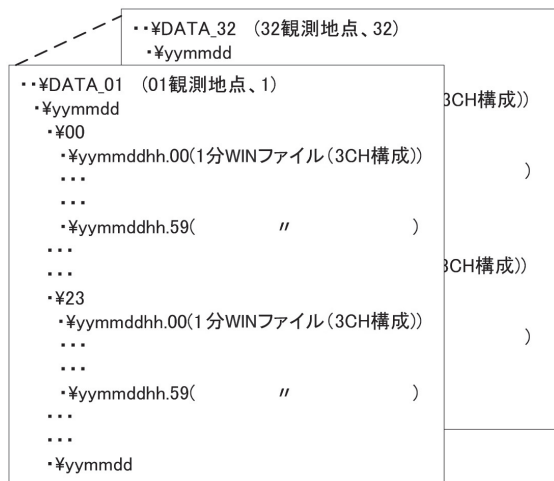


図-27 FTPで取得した観測地点1-32のデータ
Fig. 27 Data of 1-32 monitoring points by FTP

4.4 ファイル構成

収録した観測データのファイル構成を図-27に示す。ファイルの内容は、3CHのデータを観測地点(1~32地点)ごとに、年、月、日及び時のフォルダ階層構造をもち、1分毎にファイルを作成する。ファイルのデータサイズは、WIN型式を採用し、約60kbyteである。したがって、作成されるデータ容量は下記の通りである。

- ・1分:約60kB/地点×32地点=約2MB
- ・1日:約2MB×60分×24時間=約3GB
- ・1月:約3GB×30日=約90GB
- ・1年:約90GB×12ヶ月=約1TB

4.5 モニタリング

4.5.1 リアルタイム波形表示画面

各観測地点からの地震観測・波形をリアルタイムで監視することができる。

リアルタイム波形表示の画面を図-28、システムの概要を図-29に示す。全観測点(32地点)のデータを表示させるため、52インチの大型液晶ディスプレイを採用しハイビジョンで表示する。画面上に位置図を表示し、上部に操作メニューを配置、右側に観測地点からの波形情報をリアルタイムで表示、観測点上には監視状況を色分けして表示させる。各観測点には、観測点の諸情報を登録し、内容を確認することができる。

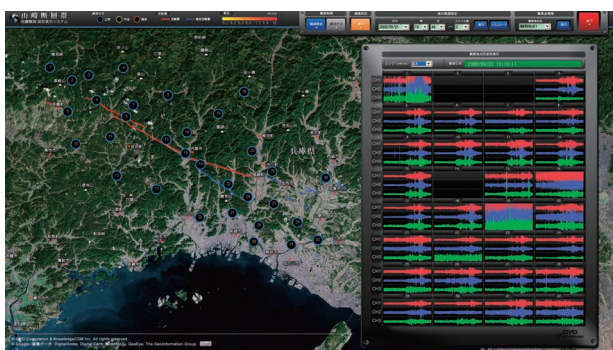


図-28 リアルタイム波形表示
Fig. 28 Real-time wave display

リアルタイム観測表示メイン

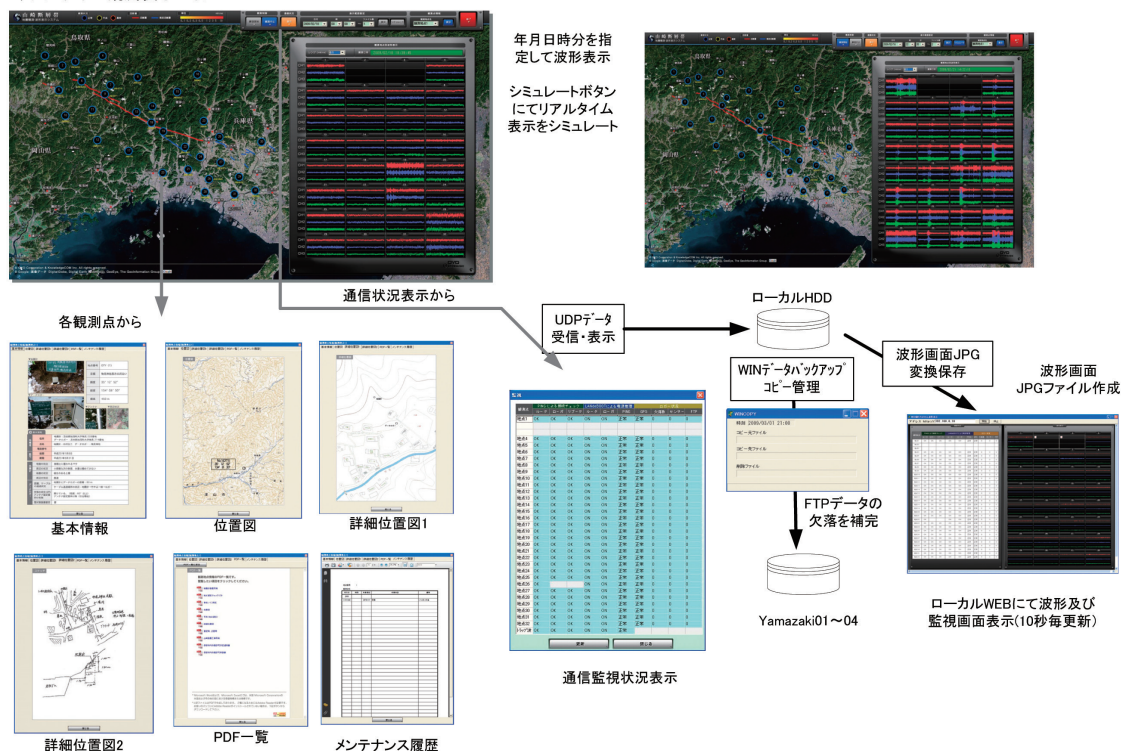


図-29 リアルタイム波形表示システムの概要
Fig. 29 Real-time wave display system outline instructions

4.5.2 テレメータ監視機能

テレメータ監視機能は、ネットワークを介して各機器に定期的に診断信号を発信し、その応答内容で各機器の動作状況を監視する。さらに、データの収録状況なども監視し、ルーター、データロガー、電源制御機器

(リポータ)、GPS、データ収録欠落数及びネットワークの状況などに異常が発生した場合に、関係者のパソコン及び携帯電話へ異常内容をメールする。監視機能の構成を図-30に、操作方法を図-31に示す。

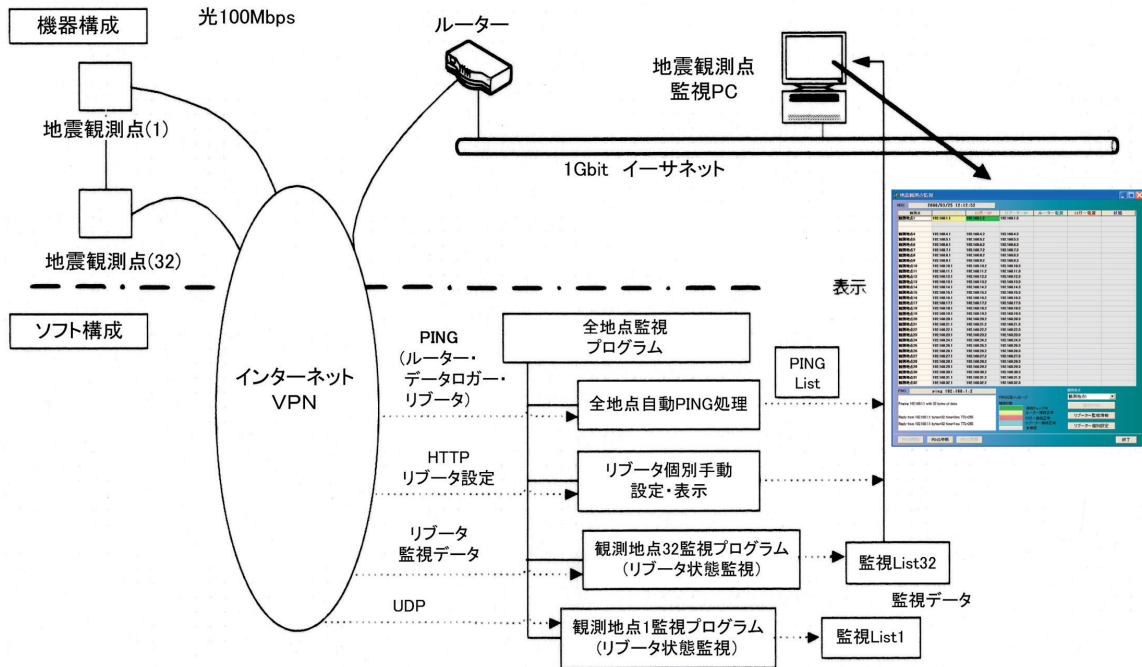


図-30 監視機能の構成

Fig. 30 Structure of monitoring system

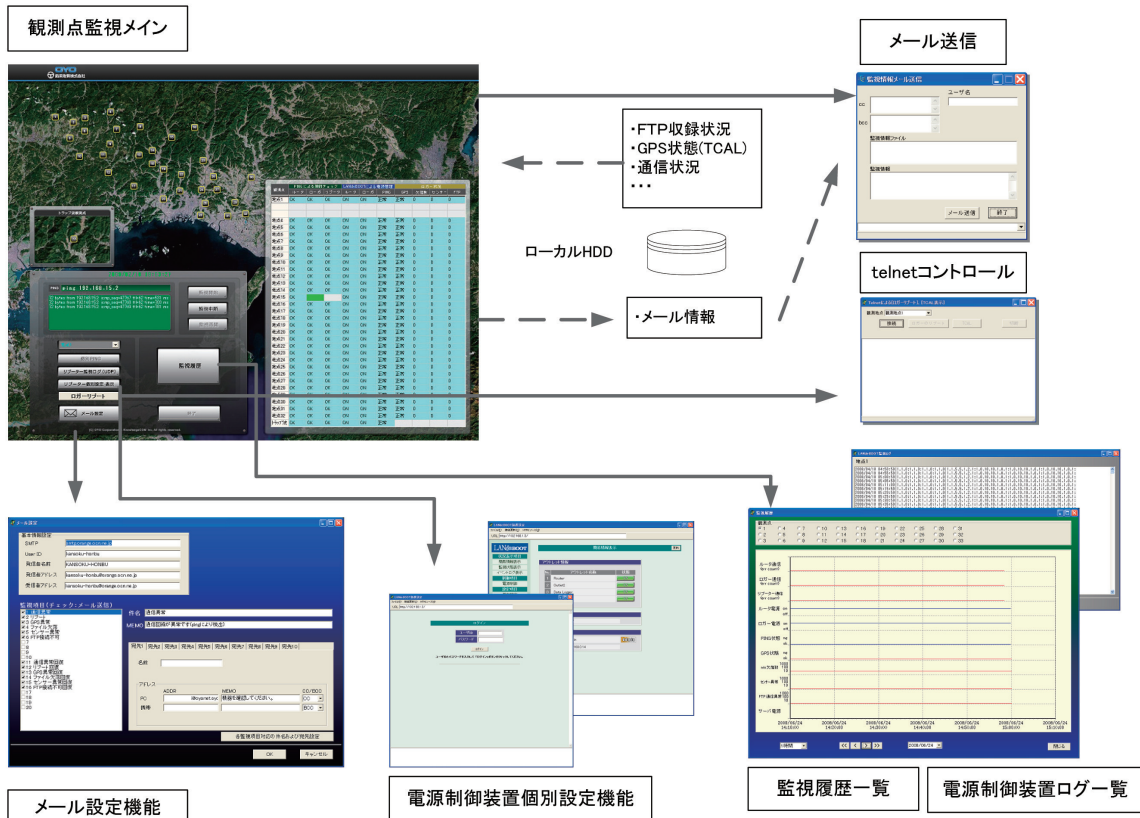


図-31 操作方法

Fig. 31 Operating instructions

4.5.3 データ収録確認

観測データについて、データ欠損状況の確認をファイル単位で行うことができる。欠損状況は観測データのファイル数で表示される。データ欠損状況の出力例

を図-32に示す。

観測データの内容については、チャンネル毎に1ヶ月間の波形データを印刷することで確認出来る。印刷した波形データ例を図-33に示す。

[2008年04月 データ収録・欠損報告書]

観測地点	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日	18日	19日	20日	21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日	28日	29日	30日	31日	合計	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	648	1440	1089	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3178
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4052
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3947
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4000
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4000
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	940	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4880
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3941
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	3946
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	281	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3943
28	0	363	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	1440	941	1	3	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18208	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	280	1440	1440	780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3940

図-32 データ欠損状況出力例

Fig. 32 Sample display of data missing status

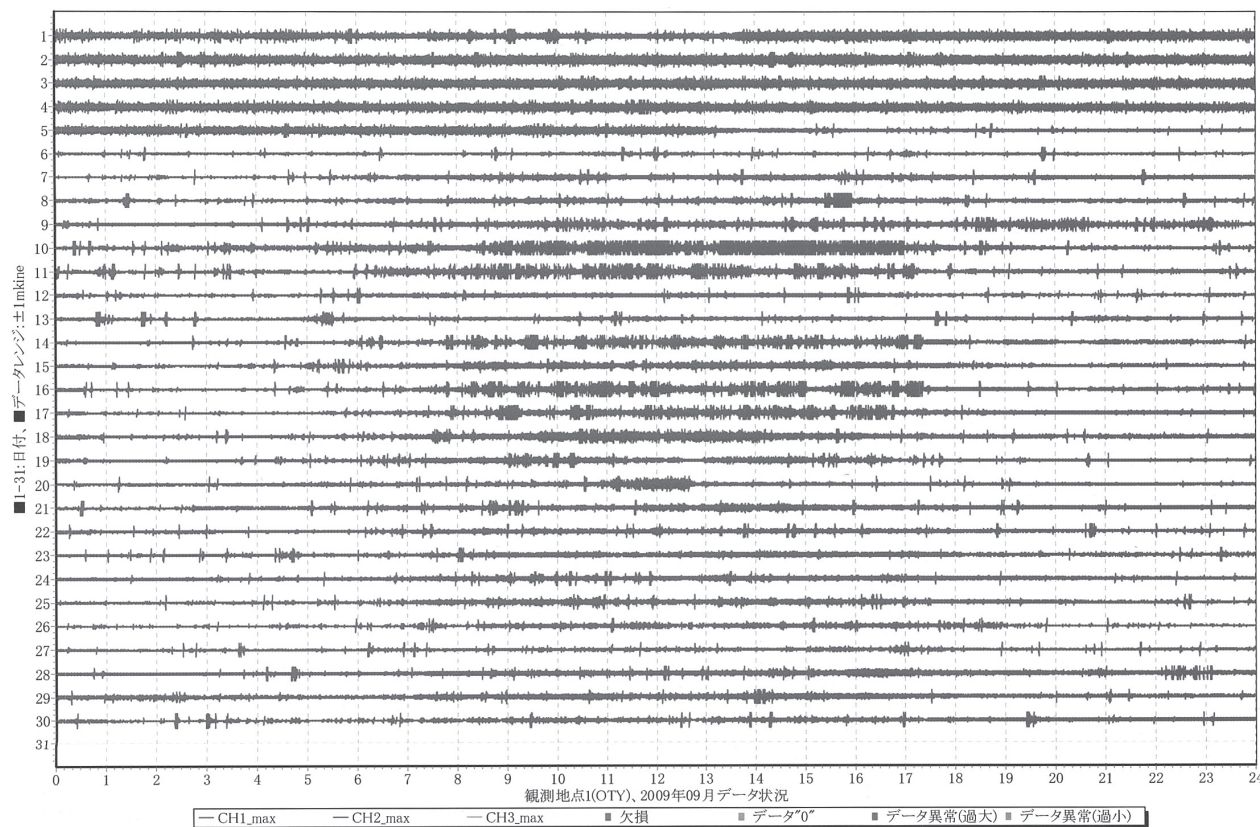


図-33 1ヶ月観測波形データ例

Fig. 33 Sample display of 1 month monitored wave data

5. 震源決定システム

地震の解析に用いるデータを供するため、地震波形のP波・S波の初動、最大振幅などを読み取る。震源決定は地震波形の読み取り作業の過程で、読み取り精度を確認し、内容を修正するために行う。

震源決定システムは読み取り作業を支援するもので、地震カタログ作成、地震波形自動切り出し及び読み取り支援システムからなる。

5.1 地震カタログ作成

地震カタログ作成は、気象庁のホームページから任意の地域の震源リストをダウンロードし、自動的に地震カタログを作成するものである。

作成した地震カタログから震源の平面的な分布及び3次元分布を表示する。気象庁ホームページを図-34、震源の平面分布の表示例を図-35、震源の3次元分布の表示例を図-36に示す。



図-34 気象庁ホームページの震源リストの例²⁾
Fig. 34 Sample of hypocenter focus list on JMA website²⁾

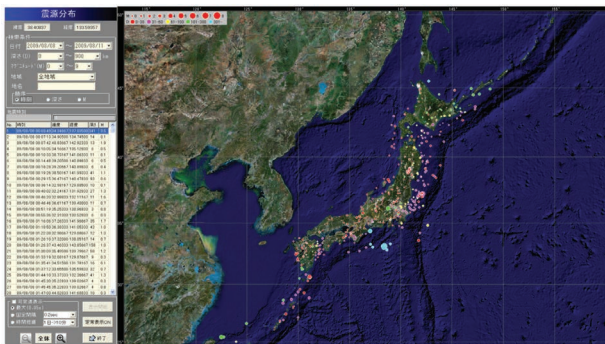


図-35 気象庁震源の平面分布の表示例
Fig. 35 Sample display of JMA hypocenter focus planardistribution

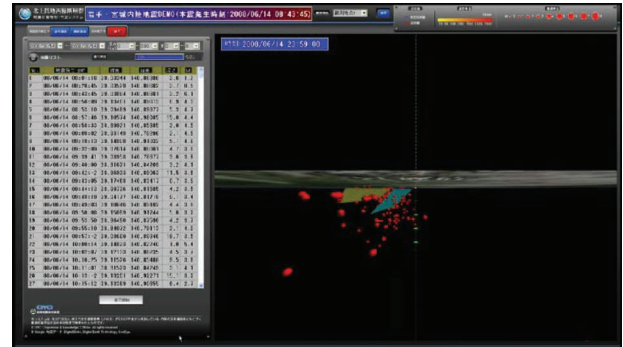


図-36 震源の3次元分布の表示例
Fig. 36 Sample display of hypocenter focus three dimension distribution

5.2 地震波形自動切り出し

震源カタログを基に、1分ごとの観測データから読み取り用の波形データを作成する。波形データの大きさは任意に設定でき、今回の業務では地震イベントの20秒前からイベントの120秒後までの140秒のデータとしている。

5.3 読み取り支援システム

読み取り支援システムは、地震波形の諸特性の読み取り、震源決定及び精度の表示を行うものである。読み取りと震源決定を適宜繰り返すことにより、読み取り精度を向上させることができる。読み取りできる項目は、P波・S波の初動(P-time, S-time)・最大振幅・誤差及びP波の極性である。

読み取り支援システムの表示例を図-37に示す。全般的に感覚的になじみやすい画面表示にするとともに、マウスのドラッグで操作でき、扱いやすいように配慮した。画面左側には地震観測点の配置図、地震リスト、選択した地震波形の諸元(緯度、経度、深さ、マグニチュード)、読み取り結果等を表示する。画面右側には各観測点・測定チャンネルの観測波形、選択した観測点3チャンネルの拡大図が表示される。

地震イベントを選択すると、それに対応する波形が表示される。ここで、震源からの距離を計算し、波形は距離により並べられ、あらかじめ与えた地盤の速度構成によりP波・S波の初動位置・最大振幅の目安が表示される。これらを参考にして読み取りを行うことができる。

読み取りは画面右下の拡大図上で行う。ここでは、波形の縦・横方向の拡大・縮小を簡単な操作で行え、読み取り能率の向上を図っている。

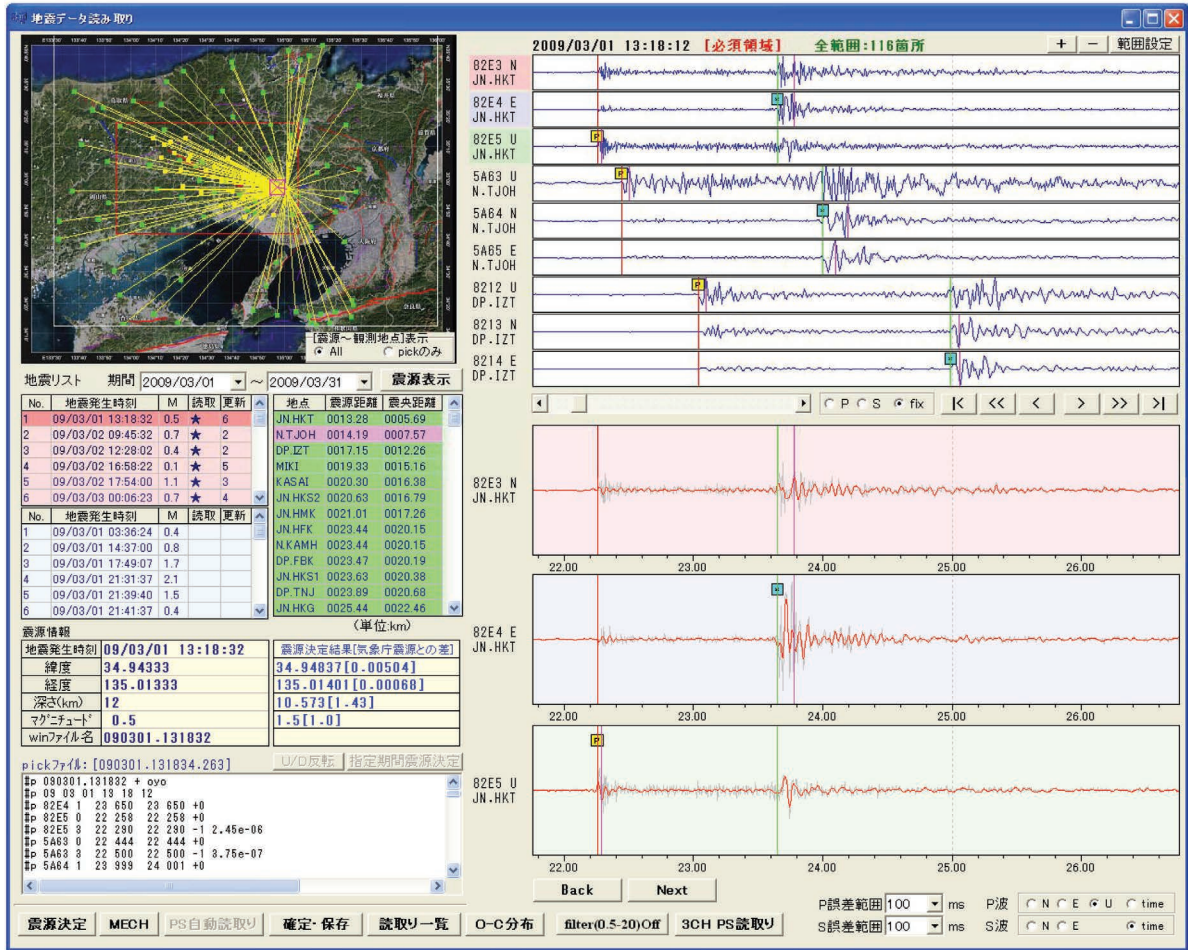


図-37 読み取り支援システムの表示例
Fig. 37 Sample display of readout support system

6. 波形データベースシステム

6.1 利用方法

波形データベースシステムは、インターネットを介して利用者へデータを提供する。利用者は、Webの会員専用ページよりログインしてアクセスする。利用にあたっては、事前に利用者登録が必要である。Web画面を図-38に示す。

利用者登録し、会員ページよりログイン画面からE-mailアドレスとパスワードを入力してデータベースへアクセスする。

6.2 システム構成と機能

提供するデータは、観測システムからNATルーター（ファイアウォールの一種）を経て、Webサーバの公開用データ DISKへ自動的に登録される。システム構成を図-39に示す。

波形データベースシステムの機能概要を次に示す。

- データの提供先
 - 政府機関, 大学関係等, 事前に利用登録を必要とする。
- データの提供方法
 - 集中的な大量のダウンロードを避けるため, 利用



図-38 波形データベースシステムのWeb画面
Fig. 38 Web screen of wave database system

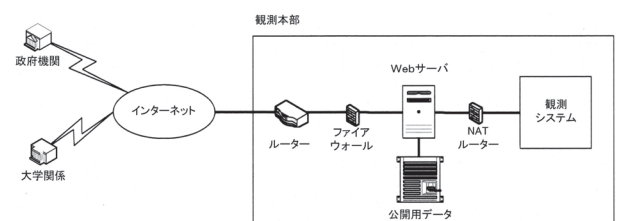


図-39 波形データベースシステム
Fig. 39 Wave database system

登録者への送信とする。

- ・ データ検索及び確認機能を持つ。

3) セキュリティ

- ・ ルーターと Web サーバの間にファイアウォールを導入する。
- ・ 観測システムとの間には、NAT ルーターを導入する。

4) Web サーバ

- ・ 公開用データの量が大きいので、Web サーバを独自に構築する。

5) 公開用データ

- ・ 運用期間、サービスメニュー（公開データの内容）を表示する。
- ・ 地震データ（生データ、編集結果データ）、GPS データ他とする。

セキュリティは、2つのファイアウォールで Web サーバと公開用データ DISK を挟み込む形となる。インターネット側からは、ファイアウォールにより利用者の要望するデータメニューのみが Web サーバへ要求され、それ以外のアクセスは全て拒否される。観測システム側からは、決められたコンピュータからのみ、Web サーバへのデータ登録、操作を可能とした。

7. おわりに

地殻変動観測システムを構築し、平成20年4月以降観測を行っている。北上低地西縁断層帯、山崎断層帯の2地域で地震計72箇所、GPS14箇所の観測・データ処理を限られた人員で行うには、本システムは必要不可欠であったと考えている。また、この間には北上低地西縁断層帯の地震観測網中央部で発生した2008年岩手・宮城内陸地震への対応を始めとし、様々な知見を得ることが出来た。¹¹⁾

今後はインターフェイスの改良による操作性の改善など、より使いやすいシステムに改良していきたいと考えている。地殻変動に係るデータを広く活用し、ローカルなユーザへの情報提供をしていきたいと考えている。

なお、システムの開発に当たっては、独立行政法人原子力安全基盤機構、東北大学大学院理学研究科地震・火山噴火予知研究観測センター、京都大学防災研究所地震予知研究センター、株式会社ナレッジコミュニケーション、M@TSU NET の関係各位に多大なご協力とご助言をいただいた。ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 平田 直(1996), 活断層の深部構造の研究が指すもの, 活断層研究, **15**, 121-122. (一部改編)
- 2) 三浦 哲ほか(2008), 2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)に伴った地震時・地震後地殻変動(A11-06)(演旨), アジア国際地震学連合総会(第7回)・日本地震学会秋季大会合同大会講演予稿集, 2008, 5-5, 日本地震学会 など
- 3) 気象庁, 気象統計情報, 8月10日の震源リスト <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/daily_map/tokyo/20090810_list.shtml> [accessed August 20, 2009].
- 4) 東京大学WINシステム <http://eoc.eri.u-tokyo.ac.jp/WIN/>
- 5) 応用地震計測(株)HS-1 <http://www.oyosi.co.jp/khsl.pdf>
- 6) 白山工業(株), LS-7000 <<http://www.hakusan.co.jp/bosai/products/ls7000.shtml>> [accessed August 1, 2009].
- 7) GPS受信機, (株)ニコン・トリンブル, <<http://www.nikon-trimble.co.jp/products/pdf/gps/netrs.pdf>> [accessed August 1, 2009].
- 8) GPSアンテナ, (株)ニコン・トリンブル, <<http://www.nikon-trimble.co.jp/products/gps/zephyr.html>> [accessed August 1, 2009].
- 9) アンテナレドーム, Trimble Navigation Limited, <<http://www.trimble.com/infrastructure/zephyr-geodetic-antennas.aspx?dtID=overview>> [accessed August 1, 2009].
- 10) FTP/UDP, (株)日経BP, <<http://itpro.nikkeibp.co.jp/members/NNW/NETPOINT/20040217/1/>> [accessed August 1, 2009].
- 11) 岡田知己(2008), 2008年岩手・宮城内陸地震緊急余震観測による震源分布・地震波速度構造・メカニズム解分布(A11-05)(演旨), アジア国際地震学連合総会(第7回)・日本地震学会秋季大会合同大会講演予稿集, 2008, 5-5, 日本地震学会 など