

### 3. 研究報告

#### 3. 1 地震計を用いた自然地震観測によるプレート構造調査

##### 3. 1. 1 中感度地震観測によるプレート構造調査

#### (1) 業務の内容

##### (a) 業務の目的

首都圏に新たな中感度地震観測点を機動的に設置し、自然地震の稠密観測を行う。これにより、精度の高い震源分布や強震動予測に必要な地震波速度と非弾性常数の三次元的な分布を明らかにするとともに、プレート境界面の形状やプレート内における弱面の存在等を把握する。特に、フィリピン海プレート内部（スラブ内）の構造を解明する。

##### (b) 平成 19 年度業務目的

首都圏の約 400 箇所の中感度地震計を設置してデータを連続観測するシステムを設計し、約 130 式の観測装置を整備して、室内で性能試験を行い、所期の性能が得られることを確認する。首都圏の 45 箇所で環境調査等を実施して、開発した地震観測装置を設置する。地震研究所に「データ収集・処理・公開センター」を設置してデータを収集・処理を開始する。房総半島に設置されている観測点からのデータを収集して、予備的な解析を始める。

##### (c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学地震研究所	教授	平田 直	
東京大学地震研究所	特任教授	笠原 敬司	
東京大学地震研究所	准教授	酒井 慎一	
東京大学地震研究所	准教授	森田 裕一	
東京大学地震研究所	准教授	卜部 卓	
東京大学地震研究所	准教授	鷹野 澄	
東京大学地震研究所	准教授	飯高 隆	
東京大学地震研究所	助教	鶴岡 弘	
東京大学地震研究所	助教	五十嵐俊博	
東京大学地震研究所	助教	加藤愛太郎	
東京大学地震研究所	助教	中川 茂樹	
東京大学地震研究所	産学官連携研究員	佐々木俊二	
東京大学地震研究所	学術研究支援員(技術者)	川北 優子	

## (2) 平成 19 年度の成果

### (a) 業務の要約

首都圏の約 400 箇所に中感度地震計を設置してデータを連続観測するシステムを設計した。135 式の観測装置を整備して、室内で性能試験を行い、所期の性能が得られることを確認した。首都圏で環境調査等を実施して、45 箇所に設置場所を選定して、開発した地震観測装置を設置した。地震研究所に「データ収集・処理・公開センター」を設置してデータを収集・処理を開始した。房総半島に設置されている観測点からのデータを収集して、予備的な解析を始めた。

### (b) 業務の成果

#### 1) 首都圏中感度地震観測網 (MeSO-net) の設計

##### a) 首都圏中感度地震観測網の目的

首都圏下の地殻・マントルの構造と地震活動との関係を明らかにすることにより、本州弧中央部を形作る陸側のプレート（ユーラシアプレートあるいは、北アメリカプレート、アムールプレートなど諸説があるがここでは、陸側のプレートと呼ぶ）、フィリピン海プレート、太平洋プレートの 3 つのプレートの位置関係とプレート内部の構造など（プレート構造）を解明する。本サブプログラム①の分担課題 3 と 4（歴史地震の研究、震源断層モデル等の構築）では、プレート構造を用いて震源を仮定したときの強震動の分布を予測し、観察された被害分布と推定された強震動分布を比較することによって、震源の深さや地震規模を推定することを目指す。このため、本観測網はこの目的に資する空間分解能の高いプレート構造を求めることのできる観測データを提供できる必要がある。さらに、2 つの海洋プレートの相互作用をプレート内部の変形に注目して理解するために、プレート内の弱面の検出を目指した観測を行う。

これらの科学的目的のために、首都圏の約 150 km x 150 km の地域の地表から深さ 40km 程度までの領域で、空間分解能 5km 程度の速度分布を推定するためのデータを得ることを目指す。地震波形解析に基づいてプレート構造を推定することを目指すために、観測網内とその周辺の地震の観測とあわせて遠地地震や常時微動のデータも収集する必要がある。速度構造と微小地震の震源分布との関係を明らかにするとともに、有感地震を含む大・中地震の震源過程を解明して、プレートの相互作用による起震応力（発震機構）、震源過程を解析するのに資するデータを収集する。このために、常時微動から有感地震までの地震波を連続して収集する観測網とする。

##### b) 観測システム設計の基本的な考え方

本プロジェクトで設置する中感度の稠密地震網の基本的な目的を整理して、首都圏中感度地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network: MeSo-net) の基本設計を行った。この観測網の特徴は、(1) 都市部のやや広域 (100–150km) の地域に、(2) 稠密 (3–5km 間隔) な地震観測網を構築して、(3) 多観測点 (400 点) からの高品位の連続

地震データを維持管理にコストをかけずに収集・蓄積し、(4) 広範な研究者がデータを活用するシステムとすることである。我が国でもっとも規模の大きい定常的な地震観測網は、防災科学技術研究所が運営する高感度地震観測網 (Hi-net) <sup>1)</sup> である。Hi-net は全国の約 700 点から高品質の連続データが収集され、広く研究者に公開される世界で最も優れた地震観測システムであり、我が国の基盤的な調査観測として位置付けられている <sup>2)</sup>。本プロジェクトで構築する観測網も、多点の観測点からデータを収集して、データを公開するという点では、Hi-net 構築の考えかたを取り入れることができる。さらに、都市部で稠密な観測点を建設するという点では、これまでに例を見ない観測網であり、さらに、本プロジェクトで観測網を設置する地域は、大地震の発生確率が高いとされ、中規模の有感地震が頻発する地域でもある。これらの、観測の目的と観測環境の特徴に最適な観測網を設計する必要がある。

大地震発生前後の観測記録には、前震、本震、余震が含まれているので、それらを漏れなく記録することは、本プロジェクトのように、大地震の地震像を解明する研究では特に重要である。このためには、小地震から、大地震の地震動を記録できる広いダイナミック・レンジの観測システムが必要である。同時に、大地震時に電力・通信のインフラ設備に破損が生じても取得されたデータが保全され、電力の許す範囲でデータを取り続けることのできる堅牢 (robust) な観測網であることが必要である。これまでの地震観測システムでは大地震発生時の停電や回線不通の際に観測データに欠落が生じることがあり、貴重なデータが失われることがあった。本プロジェクトで開発する装置ではこの欠落をなくすために、一つのセンターが観測網全体を集中制御するのではなく、約 400 観測点に設置された装置が必要に応じて観測点にデータを一時保存するなどの手順を取りながら、それぞれ自律的に回線状態やセンター側の状況を判断して、データを確実にセンターに送信し蓄積する方式 (自律協調型地震観測方式) を採用した。そのために新しいデータ転送システムを開発した。停電時には可能な限り蓄電池で観測を継続するとともに、その間の観測データ蓄積が可能な低消費電力型の地震観測装置が必要である。MeSO-net の多くは、人口稠密地域であるため、一般には電力・通信回線の環境は良いが、大地震発生時以外にも、人工的な理由による停電や回線の切断も発生する。回線の品質は、回線契約のコストに直接関係するので、必ずしも、完全に回線品質が確保されていない回線を使うことができれば、経費の削減に結びつく。例えば、無線 LAN 等で、回線品質の確保しづらい環境でも最終的なデータの品質が確保されることは重要である。

さらに、約 400 か所の観測装置を少人数で監視・保守するため、観測点それぞれにおいて観測装置の動作監視・死活監視を自動的に行い、その情報が自動的かつ確実にセンターに伝えられることが必要である。そのために Simple Network Management Protocol (SNMP) を用いたシステムの自動監視を行い、その実現のために制御の対象となる機器に管理情報 (Management Information Base: MIB) を持たせて、定期的あるいは呼び出しによって、システムを自動的に監視できるようにした。大地震発生時以外にも、人工的な原因による停電や回線の切断に迅速に対応して、観測網全体の機能を維持することは、観測網全体のデータの品質を確保するために重要である。

また、首都圏は経済活動や交通などによる雑振動が多く、高感度地震観測には不向きな

地域である。この問題を完全に解決するには数千メートルの深井戸による観測しかないが、本プロジェクトのように多点の観測では、経費の面でも、用地を確保する点でも困難である。そこで、MeSO-net では、地震計を地下 20m の孔底に設置し、孔底でデジタル化して伝送することによってノイズ軽減を図ることとした。完全な高感度観測は実現できなくとも、地表よりは遥かに信号対雑音比のよいデータが得られることが分かった。掘削深度は、設置に掛かる経費（作業日程）とデータの品質の兼ね合いで決まるが、本プロジェクトの科学的な目的に必要なデータが得られる深度とした。

### c) 観測システム設計の基本的仕様

以上の考えに基づいて、首都圏に約 400 箇所展開された「中感度地震観測装置」、地震研究所に設置された「データ収集・処理・公開センター」（以下、データセンター）、防災科学技術研究所に設置された「データ統合・保管センター」（以下、サブセンター）から構成される観測網を設計した（図 1）。中感度地震観測装置で取得されたデータは、地域 IP 網等を経由してデータセンターに集約される。データセンターでは、各観測点からの地震波形データを結合し、震源決定等の処理を行うとともに、データの公開を行う。また、各観測点に設置された観測機器の動作状態を監視し、必要に応じて観測機器の設定変更を行う。サブセンターでは、データセンターから送信した MeSO-net の地震波形データを受信し、高感度地震観測網（Hi-net）や気象庁等の地震波形データと統合・保管を行う。

以下、中感度地震観測点、データセンター及び観測ネットワークシステムについて詳述する。

#### i) 中感度地震観測装置

中感度地震観測装置は、観測制御装置である地上部装置（図 2）とデジタル振動計であるセンサ部装置（図 3）から構成される。地上部装置とセンサ部装置とは、ISO11898 に準拠したシリアルバス（CAN バス）を用いて接続され、測定データはデジタル通信により送信される。

地上部装置は、測定データのデータセンターへの送信、GPS による時刻校正、電源の供給・制御、センサ部装置及び通信の動作監視、環境測定を行う機能を有している。地上部装置の主要諸元を表 1 に示した。

センサ部装置からの測定データは、地上部装置で WIN フォーマット<sup>3)</sup>に変換され、データセンターへ UDP/IP 手順により送信される。地上部装置とデータセンター間のデータ転送は、自律協調型通信方式によって行われる。この通信方式では、回線状態やデータセンター側の処理状況に応じて適切な伝送レートを自律的に選択するが、この選択動作実現のために、伝送処理はデータセンターから送られるデータ受信通知（ACK 信号）を地上部装置が受け取った時点で完了することとした。ACK 信号を一定時間経過後も受信できなかった場合は、地上部装置からデータセンターへ測定データが自動的に再送される。また、回線不通時には測定データを記憶装置上に蓄積し、回線復旧と同時に未送信データのデータ送信を自動的に再開する。

基準時刻情報は、GPS を利用して常時時刻校正を行うことにより生成する。この基準時

刻情報は CAN バスを通じてセンサ部装置に伝達される。GPS を利用した協定世界時の取得は、観測点座標の設定で 1 衛星のみの捕捉でも可能であり、都心部等で顕著にみられる視界の開けていない場所でも時刻校正を行うことができる。GPS から時刻情報を得られない状況では、協定世界時に対する誤差が 1 時間あたり  $\pm 3.6\text{ms}$  以下となっている。

地上部装置には、70 Ah の蓄電池を搭載している。地上部装置は商用電源により動作するが、停電時には自動的に蓄電池による動作に切り替わり、地震観測を中断することなく約 50 時間にわたって継続する。蓄電池による動作では、通信機器への電源供給は停止され、測定データは地上部装置内の記憶装置上に蓄積される。復電後通信回線に異常がなければ、停電時に取得した測定データは自動的にデータセンターへ送信されることとなる。

地上部装置は中感度地震観測装置の制御部として重要な機能を有しているが、データセンターにおける各装置の動作状況の監視を円滑かつ自動的に行うため、SNMP を利用した監視システムを導入した。これにより、少人数での観測網の運用が可能となった。また、データセンターから遠隔操作で観測装置のファームウェアの更新や各機能の制御パラメータの変更を行うことができ、保守に係る人的・時間的コストの軽減を実現した。

また、地上部装置には、環境測定装置として温度・圧力センサが設置され、各観測点における気温・気圧相当値を取得することができる。この温度・圧力センサも CAN バスにより地上部装置と接続されている。中感度地震観測装置の CAN バス上には、センサ部装置、温度・圧力センサ以外の他の測定装置を接続することも可能であり、多項目観測装置としての十分な拡張性をも有している。

一方、センサ部装置は、負帰還型加速度センサ部と測定部から構成され、1 つの筐体に収められている。センサ部装置の主要諸元を表 2 に示した。センサ部装置は深さ 20m のボアホール内への設置に十分な IP67 相当以上の防水性能を有している。センサ部は、鉛直・南北・東西の 3 成分を測定し、フルスケールは水平成分で  $\pm 1,500\text{ gal}$ 、鉛直成分で  $\pm 500\text{ gal}$  である。測定部は、センサ部で得られた信号を AD 変換し、デジタル信号として CAN バスを用いて地上部装置に電送する。AD 変換方式は  $\Delta - \Sigma$  方式である。サンプリングレートは 100Hz、200Hz であり、サンプリング周波数の 40% または 20% の周波数をカットオフ周波数とする最小位相及び直線位相のデシメーションフィルタを有している。実効ダイナミックレンジは、サンプリング周波数 100Hz でカットオフ周波数 40Hz の最小位相フィルタ使用時に 135dB である。地動加速度のサンプリングは、地上部装置から送信される基準時刻情報に対して  $\pm 50\mu\text{s}$  以内で同期し、地理的に分散配置された複数の観測点間で同一タイミングでの測定を可能とした。

## ii) データセンター

データセンターは、各観測点から伝送されたデータを収集・集約し、波形データを加工して処理を行い、研究者や観測点を設置した学校向けにデータを公開する機能を有する(図 4)。また、防災科学技術研究所に設置されたサブセンターと JDXnet<sup>4)</sup>を利用して地震波形データの交換も行う。これらの機能を実現するために、データセンターには、地震観測データ集約短期蓄積装置、データ処理装置、データ公開装置が設置されている。データセンターは地震研究所に設けられ、停電時においても滞りなく動作させるために CVCF 電源に

接続されている。

地震観測データ集約短期蓄積装置は、観測点に設置された中感度地震観測装置から送信される測定データを受信・集約し、蓄積する装置である。データの受信は自律協調型通信方式によって行われ、データ受信時にはデータ受信通知（ACK 信号）を地震観測装置に送信する。蓄積されるデータは、非圧縮の WIN 形式であり、1 チャネル 1 時間長のデータを 1 ファイルとして記録する。200Hz サンプルング、3 成分、400 観測点の測定データを 2 週間蓄積することが可能である。冗長化のため主・副の 2 台により運用している。

集約されたデータは、データ処理装置へと送られ、加工され様々なデータ処理が行われる。データ処理のプロセスを図 5 に示す。データ処理装置は、約 20TB の実効容量からなるディスク装置を有するファイルサーバ装置と 4 台のデータ処理装置からなる。これらの装置は単一のネットワークスイッチにファイルサーバは 10Gbps、データ処理装置は 2Gbps で接続され、高速なデータ転送を可能としている。

データ処理装置での処理プロセスの概要は以下ようになる。集約短期蓄積装置で 1 チャネル 1 時間長として記録された波形データファイルを読み込み、多チャンネル 1 分間の WIN 形式ファイルを生成する。同時に房総アレイで取得されたデータを結合する。このデータは、データ交換用の装置を通じてサブセンターにも送信される。その後、気象庁一元化処理震源に基づいて波形データを編集する。また、これとは別に、集約短期蓄積装置に届いたリアルタイムデータを WIN システム<sup>5)</sup>で処理することにより準リアルタイムで震源データや波形データを生成する。最終的にはこれらの波形データを統合し、震源決定やトモグラフィ計算など研究を行う基礎データとする。

データ公開装置は、緊急地震速報の受信装置と 3 台のデータ公開用サーバ装置から構成される。研究者や地震観測点を設置した各学校向けのコンテンツを配信する。詳細については、3.1.1 (2) (b) 3 節で述べる。

### iii) 観測ネットワークシステム

観測ネットワークシステムは、各観測点の回線とデータセンターの回線、それらを接続する IP-VPN 網、及び監視システムから構成される。各観測点の回線は、地震観測データのデータ量から 1 観測点あたり 42kbps 以上の常時接続型の形態で原則として ISDN を利用するものとした。MeSO-net で用いる ISDN ルータは、回線切断時などの復旧の際にデータセンターから観測点のルータを電話で呼び出すことによりリセット動作を行うことが可能であり、保守性能が高い。データセンターの回線は 10Mbps の帯域を持ち、本年度設置された 45 観測点からの測定データの受信には十分である。

各観測点の回線や観測機器の状態を監視するため、監視サーバを観測ネットワークシステムの一部として設置した。監視情報は SNMP プロトコルにより取得され、監視端末に GUI により表示される。データセンターでは、監視端末を運用することにより、観測点の異常を早期に検知することが可能となった。

### d) 首都圏中感度地震観測網観測点配置のねらい

これまで首都圏では、大正関東地震や元禄関東地震のような M8 級のプレート境界型巨

大地震が発生してきた。このような M8 級の巨大地震の発生間隔は 200～300 年と長く、大正関東地震から 85 年経った現在、次の M8 級地震の発生までは、まだ若干の時間がある。しかし過去の事例では、M8 級地震が発生する間の期間に M7 級地震が何度も発生し、江戸・東京（首都圏）に大きな被害をもたらしている。当時は近代的な地震観測網がなかったため、それら M7 級地震の震源の位置・深さ・規模などの震源要素の詳細はわからず、首都直下地震の地震像が把握できていない。そこで、本プロジェクトでは首都直下で発生する大地震の詳細を明らかにするために、首都直下のプレート境界の形状およびプレート内の不均質構造を解明する。そのために、首都圏中感度地震観測網（MeSO-net）の構築を開始した。

観測点分布の範囲、密度、配置、形状について考えた。本プロジェクトは、首都直下のプレート構造の解明が主たる目的であるため、首都圏の中心部を覆う観測点分布でなくてはならない。首都直下には、南方からフィリピン海プレートが沈み込み、さらにその下へ太平洋プレートが東方から沈み込んでいる。この沈み込むフィリピン海プレートが存在する範囲全体を覆うことができるような地域に観測網があればよいと考えた。一方で、フィリピン海プレートが沈み込む前後での地下構造や地震活動の対比のために、プレートが沈み込む前の関東山地周辺も観測範囲とすることにした。全体として、東京東部を中心とした半径約 80km の範囲を研究対象領域とした。

MeSO-net は、M7 級地震（断層サイズ約 20km）の解明が目的の一つであるため、この地震断層のサイズより小さな分解能の観測が不可欠である。そこで、平均 5km 間隔での観測点配置を検討した。首都圏（半径約 80km の円内）をその間隔（約 5km）で均一に覆うと、約 850 点の観測点が必要になる。しかし、重要な地域に観測点を集中させるなどして観測点分布に粗密を許せば、もう少し観測点数を減らしても十分な研究成果を上げることが可能な配置になると考えられる。そこで、4 本の直線状の観測点分布（2～3km 間隔）と半径約 80km の面状分布（4～10km 間隔、中心で密）の組み合わせによる配置を考え、最終的に 400 か所の観測点を選んだ（図 6）。

この 4 本の直線状アレイ観測点は、過去に発生した大地震の直上と現在発生している微小地震活動域の直上を通るように選んだ（図 7）。さらに、これまでに得られた研究成果で指摘されている不均質構造（低速度層）が存在する地域、繰り返し相似地震およびスロースリップ発生域などの直上を通ることも考慮に入れた（図 8）。

一方で既存の観測網をすべて利用できるように、地震研究所、気象庁、防災科学技術研究所の観測網も取り込み、統合して処理することにした。その結果、例えば東京駅を中心とした半径 40km の範囲では、これまでの約 20 倍の観測点数になる配置になった（図 9）。

地震の観測を行う際には、できるだけノイズレベルが低い静かな場所を選んで設置してきたが、首都圏に設置する場合、そのような環境を満たす場所は少ない。そのため、具体的な観測点候補地として、道路や鉄道路線から比較的離れることが可能で、地震計を設置する 20m の深さまで掘削することが可能な広いグラウンドを持つ学校や公園を選ぶことにした。特に、学校には多くの児童・生徒や先生など地震観測に興味をもってもらえる方々が多くいる。そのような方々に対しては、専用のウェブサイトで各地点での地震波形や環境測定データ（気温・気圧）を簡便に閲覧できるようにした。

## 2) 性能試験と観測データの評価

### a) 性能試験と観測データの評価の方法

上述の首都圏中感度観測網の設計思想に基づき仕様を策定し、今年度 135 式の観測装置を整備した。ここで整備した装置が仕様に合致し、所期の研究目的を達成するために十分な性能を有する装置であるかについて、室内試験、試験観測などにより検証した。

本プロジェクトでは大地震の他に、その前震及び余震も十分な品質で記録できることが要求される広いダイナミック・レンジを有する装置であることが求められる。観測システムの装置のダイナミック・レンジを規定する AD 変換器や周辺のアナログ回路の自己雑音のレベル、周囲温度変化等によるゼロ点のシフト（オフセット・ドリフト）を定量的に見積もった。更に、地震計センサーを含めた観測装置を、地動ノイズの小さな観測点で試験観測し、その時のノイズレベルから、装置の妥当性を検討した。

また、本プロジェクトでは、多数の観測点（最終的には 400 点）からの高品位の連続地震データを維持管理にコストをかけずに収集することが求められる。そのため、それほど品質が高くない回線を利用しても、管理に手間をかけずに安定的にデータ収集できる通信の手順（通信プロトコル）を用いることが求められる。つまり、それぞれの観測点に設置した装置が自律的に回線状態やデータセンターの状況を判断して、必要に応じて観測点装置にデータを一時保存するなどの手順を取りながら、地震波形データを確実にセンターに送信し蓄積すること（自律協調型地震観測）を目指している。この観測装置で用いる通信プロトコルが自律協調型地震観測を実現できているかについて試験した。

更に、経済活動が活発で人間の社会活動の高く、人口の密集する首都圏で、多数の観測点を設置するには、観測点の選定、多様な環境下で行う設置工事の複雑さなど多くの困難を伴う。そのため、観測点設置方法もできるだけ標準化し、首都圏中感度観測網に要求される観測点設置方法を検討した。

以下に、上記の項目について試験結果等を詳細に記述する。

### b) 観測システムのダイナミック・レンジと試験観測

観測システムのダイナミック・レンジは、計測できる最大の信号と計測ノイズの振幅比と定義できる。本研究で導入した観測システムで採用した地震計センサーダイナミックレンジは全ての周波数帯域において 135dB 以上有している。この値はこの観測装置で要求されるダイナミック・レンジを満足しているので、観測システム全体のダイナミック・レンジは、地震計センサーの出力以降のアナログ回路、AD 変換器等の電子回路のダイナミック・レンジに規定される。電子回路部分の最大信号は、AD 変換器の最大入力電圧で決まる。従って、電子回路部分のダイナミック・レンジを大きくするには、電子回路部分の自己ノイズをできる限り小さくする必要がある。電子回路部分の自己ノイズは①AD 変換器で電圧をデジタル化（量子化）する際の誤差に起因する実効分解能、②AD 変換器及び周辺の電子回路の非線形性に起因する波形の歪み、③温度等の計測環境変化によるゼロ点のシフト（オフセット・ドリフト）などに起因する。実効分解能と歪率は短周期成分の自己ノイズに影響を与え、オフセット・ドリフトは長周期成分の自己ノイズに影響を与える。ここでは、観測装置の①実効分解能、②歪率、③温度変化によるオフセット・ドリフト試



験の結果に加えて、④地動ノイズの小さな場所で行った総合試験観測の結果について記す。

### i) 実効分解能

電子回路部の自己雑音は、プリアンプの自己ノイズ、AD 変換器の変換誤差、AD 変換器の基準電圧の安定性、AD 変換器に与える制御時刻信号の正確さなど色々な要素が絡み合っていて生じる。複数の機能を持つ電子素子が1つの部品として供給される現在では、それぞれの要素に切り分けて、そのノイズの大きさを比較することは不可能である。そこで、電子回路全体の自己ノイズの大きさを計測した。

電子回路全体の入力を短絡(ショート)し、AD 変換装置をサンプリングレート 100Hz、で動作させてその記録からノイズを算出した。AD 変換器は $\Delta \Sigma$ 型であるので、後段のデシメーション・フィルターの特性も、自己ノイズの大きさに影響を与える。そこで、実験では、実用時と同等な、カットオフ周波数 40Hz、最小位相フィルタで動作させた。記録されたデータから1分毎に平均値を差し引き、そのRMS 振幅の電圧換算値を自己雑音とし、最大入力電圧値( $\pm 20V$ )との比から算出した。このようにして算出した自己雑音とダイナミック・レンジを表3に示す。

この表3から明らかなように、電子回路部の実効ダイナミック・レンジは135dB以上あり、地震計センサーのダイナミック・レンジと同じ値を持ち、本研究に利用する機器として十分な性能を有することが示された。

### ii) 歪率

理想的なAD 変換器では入力電圧に正確に比例したデジタル値が得られ、入力電圧を横軸に取り、出力デジタル値を縦軸にとると、その関係は直線になるはずである。しかし、現実には電子素子の性能のばらつきなどの原因で、直線の一部が歪み、正確な比例関係からはずれることが知られている。つまり、正確な正弦波を入力しても、取得できるデジタル値のフーリエ・スペクトルは理想的な線スペクトルとはならず、入力周波数の2倍、3倍などの整数倍の周波数を持つ高調波が付随する。入力信号に対する高調波信号の割合を歪率と定義し、電子回路部の非線形性の度合いを示す。非線形性の増大は、AD 変換器の変換誤差を示すので、観測システムのダイナミック・レンジに影響を及ぼす。

歪率を計測するために、以下の図10で示す装置を用いて実験した。精度の高い基準信号発生装置から周波数20Hzの理想的な正弦波を入力し、サンプリングレート200Hz、デシメーション・フィルタをカットオフ周波数80Hzの最小位相フィルタとしてAD 変換し、そのデータを2秒のタイムウインドー毎にフーリエ・スペクトルを計算した。入力正弦波の高調波(40Hz、60Hz、80Hz)成分のフーリエ振幅の二乗和を、入力波のフーリエ振幅の二乗で除したものの平方根をパーセント表示したものを歪率として、その値を表4および図11に示す。

上記の図11及び表4より、この観測システムにも自己ノイズの原因となる非線形性があり、わずかながらも歪率を持つことが明らかになった。観測システムの歪率は時間変化するものの最大0.0006%以下である。図11で見られる歪率の時間変化は、基準信号発生装置の時計と、AD 変換器の時計とが同期しておらず、しかも基準信号発生装置の出力周

波数が設定値である 20Hz からわずかにずれているために起こる現象であり、この実験が正しく行われていることを示すものである。ここで求められた歪率は、基準信号発生装置と観測装置を合わせた歪率である。基準信号発生装置から出力される正弦波にも極めて小さな量の歪率があるが、これと観測装置の歪率を区別することはできない。従って、ここで得られた歪率は、観測装置の歪率の最大値であると考えることができる。このようにして得られた歪率が 0.0006%以下であることから、観測システムの歪率もそれを上回ることはない。従って、本研究で利用する機器として十分な性能を有することが確認できた。

### iii) 温度変化によるオフセット・ドリフト

どのような観測システムでも、入力電圧を一定値に固定していても、AD 変換器の出力値は時間変化する。この現象をオフセット・ドリフトと呼び、観測システムの自己ノイズの長周期成分の主たる原因となる。最も影響を与えるのが装置周辺の温度変化で、AD 変換器の基準電圧発生器の周囲温度の依存性やプリアンプなど様々な電子素子の温度ドリフトが原因である。

本研究課題で利用する観測システムのオフセット・ドリフトを定量的に計測するため、電子回路部を恒温槽に入れて試験観測を行った。電子回路部の入力を短絡させ、サンプリングレート 200Hz で、デシメーション・フィルタをカットオフ周波数 80Hz の最小位相フィルタとして記録した。恒温槽の温度は白金測温抵抗体で測定した。図 12(a)、図 12 (b)、図 12 (c) は、恒温槽内の温度をそれぞれ 0℃、25℃、50℃として各々約 1 時間連続に記録を取得したときの入力換算電圧値の時間変化を示したものである。

これらの図から、どの温度においても温度が一定の時には、オフセット・ドリフトが小さく、1 時間の間の変化は最大  $20 \mu\text{V}$  である。一方、温度によるオフセット・ドリフトは大きい。入力のチャンネルにより、若干のばらつきがあるが、0℃の時には入力換算電圧が約  $-100 \mu\text{V}$ 、25℃では約  $0 \mu\text{V}$ 、50℃では  $150 \mu\text{V}$  とドリフトが見られる。温度換算すると  $5 \mu\text{V}/\text{℃}$  程度であると見積もれる。

この観測装置は、後述するように AD 変換器を含む電子回路を地下 20m に埋設する。このような設置環境での温度変化は年間を通して  $1 \text{℃}$  以下であるので、年間を通して、オフセット・ドリフトは  $5 \mu\text{V}$  程度である。この値は i) で示した自己雑音電圧と同程度であり、観測システム全体のダイナミック・レンジに大きく左右するものではない。つまり、本研究で利用する観測機器として十分な性能を有することが検証できた。

### iv) 地動ノイズの小さな場所で行った総合試験観測

本研究で使用する観測装置は首都圏の都市部で観測することから、地動ノイズの大きな場所を使用することを念頭において中感度の地震計として設計されている。しかし、観測システムの持つ自己ノイズによって地動ノイズが正確に記録できない場合には、ダイナミック・レンジの低下につながり、研究に利用できる地震の数が減り、研究成果に影響を及ぼす。従って、都市部の観測点の地動ノイズを正確に記録できる程度に観測システム全体の自己ノイズが小さくしなければならない。観測システムの総合的な自己ノイズを評価するためには、地動ノイズの小さな場所で地震計を動作させ、そこで地動ノイズが正確に記録

できるか否かを調べるのが有効である。そのため、関東地方で比較的地動ノイズの小さい、防災科学技術研究所筑波観測点で約3週間の連続動作試験を行い、観測システム全体の自己ノイズと筑波観測点での地動ノイズを比較した。

図13の灰色の線は筑波観測点で得られた信号の典型的なパワースペクトル密度である。これには、地動ノイズ、地震計センサーの自己ノイズ、及びAD変換器等の電子回路部の自己ノイズの全てが含まれる。一方、緑色の線はAD変換器の入力をショートした時のパワースペクトル密度で、これは電子回路部起源の自己ノイズであると考えられる。どの周波数帯域においても、緑色のレベルは灰色のレベルを下回っているため、筑波観測点で記録された信号には、観測システムの中の電子回路部起源のものは少なく、地震計センサーの自己ノイズ及び地動ノイズの成分が多く含まれることが判る。

更に、筑波観測点で記録された信号のパワースペクトル密度は、およそ0.2Hz（周期約5秒）付近でピークを持つ。これは、波浪による励起される地面の振動（脈動）を記録していると推定でき、ここで得られた信号のうち、0.2~0.8Hzの周波数帯域では筑波観測点の地動ノイズを記録していると思われる。また、記録された信号の大きさと、都市部での典型的な地動ノイズ（NHNL:new high noise level）<sup>6)</sup>を比較すると、約0.05Hz（周期20秒）より高周波数側で、記録された信号（灰色）が低いことが判る。これは、本研究で使用する観測システムの総合的な自己ノイズが、都市部の地動ノイズよりも小さいことを示し、首都圏に設置する中感度地震計として十分な性能を有することが検証できた。

### c) データ伝送プロトコルの性能試験

本研究では、多観測点（400点）からの高品位の連続地震データを、維持管理にコストをかけずに収集・蓄積することが要求されている。そのため、品質のそれほど良くない安価な通信回線を利用しても、観測点からデータを欠損なく安定的に伝送できる通信手順（プロトコル）を採用した。このプロトコルの採用により、現在、大学の地震観測で通常利用されているシステムに比べ、データセンター側での役務の負担を格段に軽減できると期待される。また、観測点における一時的な停電や回線障害が発生した場合でも、回線や停電の復旧後に自動的にデータ伝送を再開し、中断前のデータと切れ目なくデータを記録することが可能になった。これはこの通信プロトコルの自動再送機能に負うところが大きい。

更に、このような多観測点のネットワークでは、1つの観測点で異常が発生してその観測点とデータセンターとの間の通信が想定外に増加して、全体のネットワーク通信を停止させるほど大きな障害が発生することがある。ここで採用した通信プロトコルには、伝送可能な通信容量を観測点側で判断し、それによってネットワーク全体が安定して運用できるデータ伝送量を観測点側で自律的に制御できる機能を導入した。

ここで採用した通信プロトコルの最大の特長は上記の2つの機能に集約される。ここでは、これらの機能が設計どおり動作するかを検証した。

#### i) 自動再送機能

この通信プロトコルでは、観測点側装置は地震波形データを一旦メモリに蓄積し、1秒間1成分の地震波形データを1つの単位（パケット）として取り扱う。新たに生成された

パケットは未送信データ・キューに蓄えられ、決められたデータ送信タイミングで一定の伝送率で未送信データ・キューの中で最も古いデータから順にデータセンターに送信される。パラメータの設定の変更により、未送信データ・キューから伝送するデータを最新のものから新しいものの順にすることもできる。

観測点側装置はデータを伝送した後、データセンターからデータ受領の信号(ACK 信号)を受信すると、当該データは未送信データ・キューから削除される。一方、データを伝送した後、一定時間経過してもデータセンターから ACK 信号が返信されない場合には、当該データは未送信データ・キューの中に残され、次回以降のデータ送信タイミングで、再度データセンターに向けて伝送される。

このような自動再送機能を持つ堅固(robust)な通信プロトコルを採用することにより、通信事情の悪い場合においても、確実に地震波形データをデータセンターに伝送することができる。この機能が設計どおり動作するかを検証するために以下のような試験を行った。

図 14 で示すように観測点側装置は、観測波形データとして代替の擬似データを多数発生させ、それを未送信データ・キューに蓄積する。それと同時に通信プロトコルに従って伝送路シミュレータにデータを伝送する。伝送路シミュレータはランダムにデータの欠損を作り、データセンター側装置に送る。データセンター側装置は、データを受領した際にはデータ受領の ACK 信号を伝送路シミュレータを介して観測点側装置に返信する。その際、伝送路シミュレータでは、データ送信時と同様に ACK 信号もランダムに欠落させて観測点側装置に送る。このような実験により、伝送路シミュレータで擬似的に品質の悪い回線を作り、データ欠損の大きな場合でも確実にデータが伝送できるかについて試験した。

無作為にデータパケットを欠落させる条件下において、観測点側装置からデータセンター側装置に 108 万個のデータを伝送した。これは地震動 3 成分観測とした場合、約 1 ヶ月分のデータに相当する。試験ではより条件を厳しくするために、データ伝送量を通常の 100 倍にした負荷試験を行った。データの欠落率は時々刻々変化させ、最大で 100% (全てのデータを欠落させる)、平均で 10% 程度に設定した。データセンター側装置で受領した送信データ数、欠落データ数、データ欠落率を表 5 に示す。この表から判るように、伝送路シミュレータを用いて、現実にはありえないような平均 10% という高い欠落率をもつデータで伝送を行っても、ここで採用する通信プロトコルによって最終的には全てのデータをデータセンターに送れることが検証できた。

実際の観測網の運営の際には、通信回線の一時的な不通や、ネットワーク機器の故障、停電などの理由で、長期間ネットワークが不通になることが度々発生することが予想される。そこで、伝送路シミュレータを一定時間停止させ、故意に長期間の回線不通を引き起こし、データの欠損率を上記と同様に調べた。その結果を表 6 に示す。ここで採用する通信プロトコルを用いることによって、このような場合においても、最終的には全てのデータをデータセンターに送れることを検証できた。

上記のように、通信路の品質の悪さに起因するランダムなデータの欠落、及び通信路の一時的な故障に相当する一定時間の通信の停止においても、ここで採用する通信プロトコルによって、実データでは 1 ヶ月分の地震波形データに相当する量のデータを、1 つの欠落もなくデータセンターに伝送できることが検証できた。

図 15 では伝送路シミュレータによって一定時間通信が遮断された場合を故意に作り、観測点側装置からデータを伝送し、伝送データを故意に欠落させる実験を実施した時の、実経過時間（横軸）とデータセンター側装置に正常に収録された最新のデータの時刻の関係を示したものである。斜め 45 度の直線は、受信データがほぼ実時間データで伝送されていることを示し、その直線からのずれがデータセンターで取得されるデータの遅れを意味する。伝送路の欠落率が多くなり、伝送効率が悪くなると（図中、横軸の上にオレンジ色で示した時間帯）伝送されてくるデータが実時間から遅れてくる。回線が正常に戻るとデータの回復を始め（図中、横軸の上に青色で示した時間帯）、実時間で送れなかったデータを送出し始めて、実時間に回復する。データ伝送が完全に停止した場合（図中、横軸の上に赤色で示した時間帯）も同様で、受信されるデータは実時間から大きく遅れるが、回線の回復と共に実時間に追いつく。

このようにここで採用した通信プロトコルはデータ伝送路に異常が起こったとしても自動的に復旧するので、地震波形データの伝送を効率的な維持管理の下で行うことができるものである。

## ii) 自動伝送速度制御機構

多数の観測点をインターネット技術でデータ伝送を行う本研究の装置の場合、一部の観測点でデータ伝送に異常が生じた場合、それがネットワーク全体の波及し、最悪の場合には観測網全体のデータが取得できなくなる可能性がある。これは、混雑時と閑散時のデータ伝送量が極端に異なる鉄道や航空機の発券システムなどで時々発生し、大混乱に陥ることが報道されていることでも判る。このようなシステム全体を混乱に陥れる通信異常の原因は様々であり、解決する手段はすぐには見つけることは容易ではない。これまでの地震観測網を運用した経験から、このようなシステム全体を混乱に陥れるものの中で最も多く発生した障害は、以下のようなものである。

一部の観測点の装置が故障し、そこから伝送されるデータに異常が発生した場合、データセンター側の収録装置はデータの異常を検知し、データの再送を要求する。しかし、装置が故障しているために再送されたデータも異常であり、データセンター側装置は再度再送を要求する。このように、異常データを再送要求のデータ通信量（トラフィック）が急激に増加し、最後には伝送路の容量を越えて、全ての観測点のデータが受信不可能になる。つまり、一部の観測点の異常がネットワーク全体を機能不全に陥れる。

上記のような、負の連鎖を引き起こさないためには、異常なデータを送信する観測点装置をネットワークから切り離すことが最終的な解決になるが、異常データを送出する観測点を多数の観測点の中から見つけ出し、その装置を停止するという作業を行うとなると多数の労力と時間を必要とする。しかも、それがネットワーク全体に悪影響を及ぼすとデータセンター側から観測点側装置を制御することは困難になるので、ネットワークが機能している短い時間で異常観測点をネットワークから切り離すことは、極めて困難な作業となる。

このような問題を解決するために、本研究で導入した通信プロトコルでは、観測点側でデータセンターから伝送したデータが正常に受領されたことを示す ACK 信号が受け取れ

ない状況が続いた場合には、伝送するデータレート（単位時間に観測点からデータセンターに伝送するデータの量）を自動的に低下させ、自律的にネットワーク全体の負荷を少なくし、システム全体が協調する仕組みを導入した。この伝送プロトコルの採用により、先に述べたトラフィックの急増と伝送路の容量超過によるネットワーク全体の障害を回避できる。

ここで採用したデータ伝送プロトコルが設計どおりに動作するかを試験した。その結果を図 16 に示す。伝送データがデータセンターに正常に送信されたことを示す ACK 信号の受信率により、観測点側装置は伝送するデータレートを自動的に制御する。図 16 (a) のオレンジ色が観測点側で受信した ACK 信号の割合の時間変化で、(b) の赤色は観測点側から送信されるデータレートの時間変化、(c) はデータ伝送されずに観測点側装置に一時的に蓄積されたデータ量である。観測点側装置で ACK 信号の受信率が低下すると、データ伝送率の上限を低下させ、それに従って実効データ伝送率は低下する。そのため、観測点側装置に未送信のデータが増加する。これは回線の異常によりデータ伝送エラーが多発した場合に対応し、回線異常時には観測点側装置からのデータ送信が抑制されるという動作が自動的に行われたことを意味する。

一方、回線異常が回復するとデータ伝送は正常に行われるようになる。これは結果として観測点側装置において ACK 信号の受信率の増加となる。観測点側装置は、ACK 受信率の増加を検知すると、データ伝送率の上限を上げ、その結果実効データ伝送率も上昇し、一時的に観測点側装置に蓄積されていたデータもデータセンターに伝送され、伝送データが実時間に徐々に近づいてくる。

このように、ここで採用した通信プロトコルは回線の状態を検知し、回線が混雑している場合には観測点側装置がデータ伝送率を自動的に抑制し、ネットワーク全体の状況を改善するように自律的に制御する。また、回線の混雑が緩和され、正常なデータ伝送が行われると、観測点側装置はデータ伝送率を自動的に上昇させ、伝送するデータを実時間に近づける。このような通信プロトコルを採用することにより、多数の観測点の観測データをより少ない保守、維持、管理にコストをかけずに構築することができる。

#### d) 観測点設置

地震計を設置する際に最初に考慮しなければならないのは地震計の設置方法である。沖積層の厚い関東平野で真に SN 比の良い観測データを取得しようとする、防災科学技術研究所の岩槻観測井のような大深度観測井を掘削し、その孔底に地震計を設置することが理想である。しかしながら、工期、設置経費を考えると、本研究においては、このような大深度掘削井への設置方法は断念せざるを得ないことは容易に判断できる。そこで、地震計設置の際に、簡易な工事のできる浅い観測孔を掘削し、その孔底に地震計を設置することを計画した。どの程度の深度の観測孔を掘削するとデータの質が改善されるかについて、東京大学地震研究所 1 号館脇に実際に観測孔を掘削し、この観測網で利用する地震計を、地表、深度 3 m、深度 5 m のそれぞれに設置して試験観測を行い、どの程度まで掘削すれば SN 比の良い記録が得られるかを検討した。

設置深度の深くするとどの程度波形の SN 比が良くなるかを、実際の観測例を用いて示

す。図 17 は東京大学地震研究所 1 号館脇に試験観測のために設置した地表、深度 3m、深度 5m の地震計とそのすぐそばに設置した首都直下中感度地震観測網弥生観測点（深度 20m）、及び 気象庁の東京観測点（皇居北の丸、深度 285m の孔底に固有周期 1 秒の速度型地震計を設置）の波形を示した。図 17 (a) は 2008 年 3 月 24 日 11 時 02 分に茨城県南西部（震央距離約 50km）で発生した M3.5 の地震の P 波初動前後の 8 秒間の上下動成分の波形を表示したものである。発生時刻が平日の昼間で全体として地動ノイズ振幅が大きい。地表や深度 3m に設置した地震計では、初動前に地動ノイズの短周期成分が大きく、初動を読み取るのは容易でない。しかし、深度 20m の弥生観測点では P 波初動付近で十分な SN 比で記録され、気象庁の東京観測点よりも初動は読みやすい。

図 17 (b) は 2008 年 3 月 23 日 03 時 58 分に発生した茨城県南西部（震央距離約 70km）を震源とする M3.3 の地震の波形記録である。地震発生時刻が夜間であるので、地表付近でも昼間ほどノイズは大きくない。しかし、地表や設置深度の浅いセンサーでは P 波初動付近の SN 比は小さく初動は読みにくい、震度 20m の弥生観測点の波形は SN 比が大きく精度良く初動を読み取ることができる。

昼間と夜間の地動ノイズの大きさを地震計の設置深度で比較した。図 18 は地動ノイズのパワースペクトル密度を、地震計の設置深度で色を変えて示したものである。昼間も夜間も地震計の設置深度が大きくなるにつれて地動ノイズは小さくなる。数 Hz より低周波成分では地表設置の地震計で記録される地動ノイズのパワーは深度 20m の地震計の 10 倍程度（振幅で 3 倍程度）であるが、10Hz 以上の高周波成分では約 1000 倍（振幅で 30 倍）も異なる。これから明らかなように、埋設深度を大きくすると、高周波成分の地動ノイズの減衰が著しく、初動読み取りが容易になる。またどの深度においても、数 Hz より低周波成分では昼間のノイズと夜間のノイズに差はないが、それより高周波成分では、昼間のノイズのパワーは夜間のノイズに比べ 10 倍以上大きい。

上記のように、地震計の埋設深度は取得できる記録の質に大きく寄与する。設置深度が大きいほど良質の地震波形データが得られる。特に、周波数数 Hz 以上の周波数帯域ではそれが顕著である。首都直下中感度地震観測網では、このような点を考慮し、地震計の設置深度を 20m に決めた。

首都圏中感度地震観測網は、多くの人たちが暮らし、道路、鉄道が網の目のように張り巡らされ、そこを多数の自動車や電車が高頻度で走行し、事務所、商業ビルや工場などが密集して立ち並ぶ過密な地域に、稠密な観測点を多数設置することを計画している。このような条件で地震観測網を設置する際に、最も困難と予測されるのは観測点の用地の確保である。色々な条件を考慮し、首都圏中感度地震観測網の観測点は、原則として小中学校、高等学校のグラウンドの一部を借用して設置することを当初から計画した。観測点の設置に協力頂いた学校向けに教材となるコンテンツを提供することで、用地確保の困難さを軽減することを考えた。学校向け教材コンテンツに関しては 3) に記す。

学校のグラウンドの一部を利用することを想定した観測点の模式図を図 19 に示す。地震計は深さ 20m 程度の縦孔を掘削し、5 インチのケーシングパイプを埋設する。ケーシングパイプの先端には地震計の方向を北に合わせるキーを取り付け、ケーシングパイプをセメンチングにより固定する際にキーの方向を北に向けて設置する。このような方法で、水平

動センサーを正確な方向に設置した。

この観測装置の特徴のひとつは、観測孔の孔底に設置する地下部ユニットに、地震計センサーだけでなく AD 変換器とその周辺の回路を収納したことである。首都圏では、高圧送電線が多数走り、電力線からの 50Hz のノイズ（いわゆるハムノイズ）による悪影響が懸念された。地震計センサーの直近で AD 変換することにより、ハムノイズの低減をはかることと、センサーや電子回路部周辺温度の変化によるオフセット・ドリフトの影響の低減を狙い、地震計センサーだけでなく、AD 変換器等の電子回路部を地下ユニットに収納した。地下部ユニットの外観を図 21 に示す。地震計及び AD 変換器等の電子回路は直径約 12cm、長さ約 60cm の円筒形の防水型アルミ容器に入れられ、ロットを用いて地下に設置される。

地下部ユニットでデジタル化された地震計データは、標準化されたシリアル通信方式（ISO11898 規格）で地上部ユニットに送られる。この標準仕様のシリアル通信方式を採用することで、環境センサー等の他種のセンサーを容易に接続（増設）できる。地上部筐体（図 20）には、データ収録と伝送を行う Linux を OS に持つボードコンピューター、観測点の気温及び気圧相当値を計測する環境センサー、データ伝送のための ISDN ルータ、及び無停電装置（電源監視装置＋密閉型蓄電池）が収納されている。観測システムの時刻同期は GPS 受信機から出力される高精度の時刻信号により行われる。電力線、電話線を引き込む電柱に GPS アンテナが取り付けられている。

このうち無停電装置は、一定時間以上の継続した商用電源の停止（停電）を感知すると、電力消費の大きい ISDN ルータの電源を切り通信を停止させる。一方、地震波形データを蓄積するボードコンピューターは、蓄電池から電源の供給を受けて停電時にも動作し、地震波形データはボードコンピューター上のメモリや不揮発メモリ（コンパクト・フラッシュ・メモリ）に蓄積される。停電が普及した時には、無停電装置が ISDN ルータの電源を投入し、前項に書いた伝送プロトコルの自動再送機能を利用して、未送信のデータを順次データセンターに送信し始める。また、消費された蓄電池の充電も自動的に開始する。このような仕組みで、大地震発生時に停電が発生しても、本震や余震を確実に記録し、回線や停電の復旧後に自動的に地震波形データをデータセンターに伝送する。現在の蓄電池の容量で、停電後 1 週間程度の地震波形が不揮発メモリに保存できる。

上記のように、首都圏という地震観測網の構築に極めて困難な環境においても、稠密な地震観測網を構築し、研究に有用なデータを取得できるように、観測装置、データ伝送プロトコル、観測点設置方法について新たなアイデアを取り入れたシステムを完成させた。

### e) 今年度の観測網の設置状況

今年度は、東京都、神奈川県、千葉県、茨城県に 45 観測点を設置した（表 7）。この分布は、茨城県つくば市から神奈川県藤沢市に至る直線状で、約 2km 間隔で観測点を配置した。

### 3) データ収集・処理・公開センターの整備

地震研究所に「データ収集・処理・公開センター」を設置して、データの収集・処理を開始した。収集・処理については前述したので、本項ではデータ公開について詳述する。



データ公開の対象は、①地震観測点を設置した学校向けと②研究者向けに大別できる。①では理科教育・防災教育に直結するコンテンツを配信し、先生や児童・生徒に地震観測に興味を持っていただくことが重要であるのに対し、②では研究者が真に必要なデータを簡便に取得できることが重要である。従って、対象者に合わせたシステムをそれぞれ構築した。なお、これらのコンテンツは、地震研究所に設置された公開用サーバからインターネットを介して提供されている。

#### a) 学校向けコンテンツ

日頃から地震活動に関心を持ち防災意識を高める防災教育に役立つコンテンツを用意した。図 22 は学校向けコンテンツの例で、学校に設置した地震計の連続波形画像や環境測定の結果を表示している。図 23 は緊急地震速報を元にした地震の一覧表で、任意の地震を選択することにより MeSO-net の計測震度相当値の分布 (図 24) などを表示させることができる。また、緊急地震速報の翻訳/活用ソフトを使用することで、各学校における予測震度や S 波到達までの猶予時間を表示する (図 25) ことが可能であり、日常的な防災教育に貢献する。この翻訳/活用ソフトは、気象庁 (気象業務支援センター) から配信される緊急地震速報を地震研究所で受信し、その情報を各学校に再配信するもので、WEB ブラウザが予測震度や S 波到達までの猶予時間を計算し表示している。

#### b) 研究者向けコンテンツ

地震研究所では、全国地震データ等利用系システムとして全国 9 大学の地震波形データをデータベース化し、WWW を用いて研究者に広くデータを提供するシステム (HARVEST システム) を構築し運用している。MeSO-net の研究者向け地震波形データ公開システムも、このシステムの一部を改良して構築した (図 26)。研究者は利用者登録することにより、指定した時間範囲における任意の観測点の連続波形データを WWW を用いて取得することが可能である。

### 4) 既存観測網と房総半島稠密アレイ観測データの解析

首都直下で発生する地震活動と 3 次元速度構造との関係を理解するための準備として、既存観測点で得られたデータの解析を進めた。本年度は、トモグラフィ解析によって得られた速度構造<sup>7)</sup>と、房総半島に設置されている観測点からのデータを収集して、2007 年 8 月に房総半島東部で発生した群発地震活動を解析した。この房総半島稠密アレイ観測網は、平成 14 年度から 5 カ年計画で行われた文部科学省からの受託研究「大都市大災害軽減化特別プロジェクト」の一環として設置されたもので、30 観測点を約 3km 間隔で直線状に配置したものである。このように稠密に線状に配置することで、2 次元平面状に平均的に配置させるよりも、部分的には地下構造をより詳しく調べることができた。この直線状稠密アレイ観測の考え方を拡張して今回のプロジェクトでも注目する地域に 4 本の直線状アレイを計画している。

房総半島東部周辺域では、これまで繰り返し大地震が発生し、フィリピン海プレート上面では 5~6 年ごとに小繰り返し地震が発生してきた<sup>8)</sup>。2007 年 8 月に発生した群発地震

のときも、房総半島で傾斜変動が観測され<sup>9)</sup>、GPS 解析からはプレートのスロースリップ運動とそれらの現象が連動していることがわかっている<sup>10)</sup>。この群発地震活動を房総アレイで観測し、トモグラフィ解析で求めた 3 次元速度構造を用いて震源再決定を行った (図 27)。速度構造の南北断面図 (図 28) や東西断面図 (図 29) に震源をプロットするとフィリピン海プレート上面付近に水平に位置する。図中の白破線は、速度構造の不連続な場所や普段の震源分布から求めたプレート境界の形状を表している。地震研究所で定常的な処理に使われている速度構造で求めた震源の深さは 20km~30km の深さに広がるが、三次元速度構造による震源分布は深さ 20km 付近の狭い範囲に限られる。今回の群発地震活動は、スロースリップ運動に伴う活動であるから、フィリピン海プレート上面と下部地殻との境界部分で発生したと考えられるため、この震源分布がプレート境界の位置そのものを表しているといえる。この深さは、速度構造解析から得られているものより高精度なプレート境界の位置であり、今後の波形解析を行う上で重要な情報を提示することができた。

この群発地震活動の分布は、九十九里浜沖といすみ市周辺域の範囲に広がっており、それぞれの地域で M5 級の地震を最大地震とする群発地震活動が発生した。房総アレイで観測された地震波形の例を図 30 と図 31 に示す (北から順に上下動成分を並べた)。どちらの地震でも、P 相と S 相の間に顕著な X 相がみられ、この X 相は震源から出た S 波がプレート境界で P 波に変換した SP 変換波と考えられる。そのため、この SP 変換波と S 波との時間差 (S-X 時間) の分布からプレート境界の形状が推定できる。今後のデータ蓄積と速度構造解析より高精度なプレート境界の 2 次元分布を得ることができる。

気象庁一元化データ (P 波と S 波の到達時刻) を用いたトモグラフィ解析によって、フィリピン海スラブと太平洋スラブの衝突の概要が明らかにされ、「スラブ内変形仮説」<sup>11)</sup> が提唱された (図 32)。フィリピン海スラブの北東端が太平洋スラブと接している部分で、フィリピン海スラブ内部に変形が生じている。この変形は、スラブ内に発生する地震によって賄われているというものである。本プロジェクトによるデータによって、この仮説が検討される。

### (c) 結論ならびに今後の課題

観測網全体の基本設計が済み、所期の計画通りの観測装置を整備することができた。45 箇所の観測装置を設置した。この結果、それぞれの観測点固有のノイズが検出された。この原因の突き止めるためのデータを蓄積し始めた。ノイズ源には、人工的な経済・社会活動による地盤の振動と電磁気的なノイズの両方が考えられるため、それぞれについてのノイズの特徴を理解して解析時の対策を検討する必要がある。本年度設置した観測点数は 45 箇所であったが、20 年度は約 130 か所であることから、効率的な設置作業が必要である。

### (d) 引用文献

- 1) Obara, K., S. Hori, K. Kasahara, Y. Okada and S. Aoi: Hi-net: High sensitivity seismograph network in Japan, Eos Trans. AGU, 81 (48), Fall Meet. Suppl., Abstract

S71A-04. 2002.

- 2) 地震調査研究推進本部: 「地震に関する基盤的調査観測計画」平成9年8月  
<http://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku97/s8kei.htm>  
<http://www.jishin.go.jp/main/houkokukaigi/chousakansoku.pdf>
- 3) ト部卓: 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, 地震学会講演予稿集, No. 2, P24, 1994.
- 4) 鷹野澄, ト部卓, 鶴岡弘, 中川茂樹, 三浦哲, 松澤暢, 岡田知己, 中島淳一, 中山貴史, 平原聡, 伊藤武男, 大見士朗, 植平賢司, 松島健: 超高速ネットワークJGNIIによるリアルタイム地震波形データ交換システムの構築実験, 日本地震学会講演予稿集, 北海道, C098, 2005.
- 5) ト部卓, 東田進也: win-微小地震観測網波形観測支援のためのワークステーション・プログラム(強化版), 地震学会講演予稿集, No. 2, P41, 1992.
- 6) Peterson, J.: Observations and modeling of seismic back-ground noise. USGS Open File Report 93-322, 1993.
- 7) 萩原弘子, 五十嵐俊博, 平田直, 酒井慎一: 大都市圏地殻構造調査: 房総アレイ・構造探査データを用いた地震波トモグラフィによる関東地方の速度構造, 日本地震学会2006年秋季大会予稿集, 2006.
- 8) Kimura, H., K. Kasahara, T. Igarashi, N. Hirata: Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips, Tectonophysics 417, 101-118, 2006.
- 9) 防災科学技術研究所: 2007年8月に発生した房総沖スロースリップと群発地震活動, 地震予知連会報, 第79巻, 2008.
- 10) 国土地理院, 関東甲信地方の地殻変動, 地震予知連会報, 第79巻, 2008.
- 11) Wu, F., D. Okaya, H. Sato, and N. Hirata: Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards, GRL, 34, L18301, doi:10.1029/2007GL030763, 2007.

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・外の別
「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」の首都圏地震観測網(口頭)	平田直	東京大学地震研究所第35回地震火山防災関係者との懇談の場(東京大学地震研究所)	平成19年6月29日	国内
Mega-thrust and Intra-slab	Hirata, N., H. Sato,	ペルー・イタリア(IUGG)	平成19年7月10日	国外

Earthquakes Beneath Tokyo Metropolitan Area, JAPAN (口頭)	K. Koketsu, K.Kasahara, H.Hagiwara			
地震のメカニズムと地震予知に関わる人々の想い(口頭)	平田直	東京都港区、公文教育研究会2007年9月度「I リーグセミナー」	平成19年9月8日	国内
首都圏地震観測網(MeSO-net)の構築(口頭)	笠原敬司, 酒井慎一, 森田裕一, 平田直, 卜部卓, 鷹野澄, 鶴岡弘, 中川茂樹, 小原一成, 棚田俊收	日本地震学会秋季大会(仙台市)	平成19年10月24日	国内
首都圏地震観測網(MeSO-net)における学校向けコンテンツ(ポスター)	鶴岡弘, 鷹野澄, 酒井慎一, 笠原敬司, 平田直	日本地震学会秋季大会(仙台市)	平成19年10月24日	国内
首都圏地震観測網(MeSO-net)観測点情報総合管理システムの開発(ポスター)	中川茂樹, 酒井慎一, 鶴岡弘, 森田裕一, 笠原敬司, 平田直	日本地震学会秋季大会(仙台市)	平成19年10月24日	国内
Mega-thrust and Intra-slab Earthquakes beneath Tokyo Metropolitan Area around subduction and collision zones in JAPAN (口頭)	Hirata, N., K. asahara, H.Hagiwara, H. Sato, K.Shimazaki, K. Koketsu, F. Wu, D.,Okaya	サンフランシスコ、米国(AGU)	平成19年12月13日	国外
The Metropolitan Seismic network (MeSO-net) for Detection of Mega-thrust and Intra-slab	Kasahara,K., N. Hirata, S. Sakai, Y. Morita, S.Nakagawa, S. Sasaki,	サンフランシスコ、米国(AGU)	平成19年12月12日	国外

Earthquakes beneath Tokyo Metropolitan Area, JAPAN (ポスター)	K. Obara, T. Tanada			
Metropolitan Seismic Observation Network (MeSO-net) in Japan (ポスター)	Nakagawa,S., K. Kasahara, S. Sakai, H. Tsuruoka, T. Urabe, K. Takano, S. Sasaki, A. Kato, S. Sekine, K. Obara	サンフランシスコ、 米国 (AGU)	平成19年12 月12日	国外
Complex Fault System of Recent Earthquakes in Central Japan by Dense Seismic Observations (ポスター)	S. Sakai, A. Kato, E. Kurashimo, T. Igarashi, T. Iidaka, N. Hirata, T.Iwasaki, T. Kanazawa, Group for aftershock observations of 2007 Noto Hanto Earthquake, and Group for aftershock observations of 2007 Chuetsu-oki Earthquake	サンフランシスコ、 米国 (AGU)	平成19年12 月12日	国外
Shear-wave splitting analysis at the	T Iidaka, Y Hiramatsu, K	サンフランシスコ、 米国 (AGU)	平成19年12 月12日	国外

Niigata-Kobe Tectonic Zone using the seismic network of the Joint Seismic Observations at NKTZ (口頭)	Iwatsuki, S Ueyama, J the Joint Seismic Observations at NKTZ			
Effects of heterogeneous structures of the seismic velocity and the stress field on earthquake generations elucidated by dense temporary seismic networks (口頭)	A Kato, S Sakai, E Kurashimo, T Igarashi, T Iidaka, N Hirata, T Iwasaki, T Kanazawa, G observation of 2007 Noto Earthquake, G observation of 2007 Niigata Earthquake	サンフランシスコ、米国 (AGU)	平成19年12月12日	国外
首都直下地震防災減災特別プロジェクトについて (口頭)	中川茂樹	IT強震計研究会第6回定例会(東京大学地震研究所)	平成20年1月29日	国内
緊急地震速報の Ajax による利用システムについて (口頭)	鶴岡弘	IT強震計研究会第6回定例会(東京大学地震研究所)	平成20年1月29日	国内
首都直下地震防災・減災特別プロジェクトの紹介 (口頭)	平田直, 笠原敬司, 瀧澤一介	SK-net 研究集会と担当者の会(東京大学地震研究所)	平成20年1月30日	国内
首都直下地震防災・減災特別プロジェクト (口頭)	平田直	第12回「震災対策技術展/自然災害対策技術展」横浜シンポジウム・セミナー 横浜国際平和会議場 (パシフィコ横浜) 展示ホール	平成20年1月31日	国内

「首都直下地震の可能性とその地震像の解明に向けた新しいプロジェクト」首都直下地震防災・減災特別プロジェクト：首都圏周辺でのプレート構造調査・震源断層モデルの構築（口頭）	平田直	東京都千代田区 セキュリティ・フォーラム（CR&S 総合研究所）	平成20年2 月19日	国内
地震研究の現状と将来展望ー学界から産業界への要望（口頭）	平田直	埼玉県児玉郡 キ ャノン・コンポーネ ンツ（株）会議室	平成20年2月 8日	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文	発表者氏名	発表場所	発表時期	国内・ 外の別
Interaction between two subducting plates under Tokyo and its possible effects on seismic hazards	Wu, F., D. Okaya, H. Sato, and N. Hirata	Geophys. Res. Lett., 34, L18301, doi:10.1029/ 2007GL030763.	平成19年	国外

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果	対応者氏名	報道・掲載機関	発表時期	国内・ 外の別
直下型に備え 学校に地震計（NHKニュース）	平田直	NHK	平成19年 1月6日	国内
首都圏400か所、新たに地震計設置	平田直	TBS	平成19年 1月17日	国内
大地震に備える 学校にも地震計（首都圏ネットワーク）	平田直, 笠原敬司	NHK	平成19年 1月17日	国内
関東地下プレート本格調査	平田直	読売新聞	平成19年 5月20日	国内
一石二鳥 首都圏400校に地震計	平田直	毎日新聞	平成19年 6月3日	国内
首都圏400校に地震計	平田直	日本経済新聞	平成19年 6月30日	国内

地震防災：首都圏の小中学校に地震計設置 東大地震研など	平田直・笠原敬司	毎日新聞	平成20年 1月17日	国内
首都圏の学校へ地震計設置開始＝予測精度向上に期待－東大研究所	平田直	時事ドットコム (時事通信社)	平成20年 1月17日	国内
首都直下地震を解明へ、学校地下に地震計400個埋設計画	平田直	読売オンライン (読売新聞社)	平成20年 1月17日	国内
学校地下に地震計、400個設置計画	平田直	読売オンライン (読売新聞社)	平成20年 1月17日	国内
千代田区が直下地震想定し訓練、学校に地震計	平田直	日経ネット	平成20年 1月17日	国内
小中校など400カ所地震計の網 首都直下型地震に備え	平田直	アサヒ・コム (朝日新聞社)	平成20年 1月18日	国内
首都圏の学校へ地震計設置－東大地震研	平田直	時事通信社	平成20年 1月19日	国内
防災と教育 一石二鳥 学校中心、首都圏400カ所に地震計	笠原敬司	MSN産経ニュー ス	平成20年 2月5日	国内

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称（作成者）	機能
緊急地震速報翻訳・活用ソフトウェア（鶴岡弘）	個別地点での予想震度および主要動到達までの猶予時間を計算する Ajax による Web ブラウザ用緊急地震速報受信ソフトウェア
WIN データ用リアルタイム波形表示ソフトウェア（鶴岡弘）	WIN データを受信して，リアルタイムに波形を表示するソフトウェア
地震カタログの3次元可視化ソフトウェア（鶴岡弘）	VRML 言語を用いて，関東直下の震源カタログを3次元的に可視化するソフトウェア
震度データ2次元マップ表示ソフトウェア（鶴岡弘）	首都圏観測点における予想震度および観測計測震度相当値を地図表示するソフトウェア
Web 用地震波形表示ソフトウェア（鶴岡弘）	蓄積された地震波形データを画像および PDF ファイルとして出力するソフトウェア



### 3) 仕様・標準等の策定

なし

#### (3) 平成 20 年度業務計画案

首都圏に設置する中感度地震観測装置約 40 式を整備して、室内で性能試験を行い、所期の性能が得られることを確認する。19 年度試験された 90 式と、本年度整備する約 40 式を合わせて、首都圏の約 130 箇所環境調査等を実施して、開発した地震観測装置を設置する。19 年度に設置された 45 箇所と合わせて、約 175 か所からデータを収集する。地震研究所の「データ収集・処理・公開センター」の整備を進めて、データを収集・処理する。房総半島に設置されている観測点からのデータを収集して、解析をすすめる。