

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20年度業務目的

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。前年度試験された90式と、本年度整備する約40式とを合わせて、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。前年度設置した45箇所と、前年度整備・性能試験を行って本年度設置する90箇所、さらに本年度整備・試験を行って設置する約40箇所の合計約175箇所において自然地震観測を行う。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。また、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、解析をすすめる。

(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	教授	岩崎 貴哉	
東京大学地震研究所	教授	鷹野 澄	
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	飯高 隆	
東京大学地震研究所	准教授	卜部 卓	
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	蔵下 英司	
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	大木 聖子	
東京大学地震研究所	助教	中川 茂樹	
東京大学地震研究所	特任研究員	佐々木 俊二	
東京大学地震研究所	特任研究員	楠城 一嘉	

東京大学地震研究所	技術専門員	坂上 実	
東京大学地震研究所	技術職員	宮川 幸治	
東京大学地震研究所	学術支援職員	川北 優子	

(2) 平成20年度の成果

(a) 業務の要約

首都圏に設置する中感度地震観測装置 37 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した。前年度試験された 90 式と、本年度整備する 37 式とを合わせて、首都圏の 127 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した。前年度設置した 45 箇所と、前年度整備・性能試験を行って本年度設置する 90 箇所、さらに本年度整備・試験を行って設置する 37 箇所の合計 172 箇所において自然地震観測を行っている。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、データの収集・処理を行っている。また、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、解析を進めた。

(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

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マグニチュード (M) 8 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 86 年経った現在、次の M8 級地震の発生までには、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。

具体的には、首都直下の地殻・マンツ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。本サブプロジェクト①の分担課題 3 (歴史地震の研究) と分担課題 4 (震源断層モデル等の構築) では、明らかになった詳細なプレート構造を用いることにより、仮定した震源断層モデルにおける強震動分布を予測する。そして、観察された被害分布と推定された強震動分布の比較から、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、ここで構築する首都圏地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network: MeSO-net) はこれら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が可能な観測データを提供する必要がある。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網でもある。

b) 首都圏中感度地震観測網の配置

MeSO-net は、沈み込む 2 つの海洋プレートが両方とも存在する範囲全体を覆うことができるような地域に構築することにした。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に含める。その結果、首都圏の約 150 km x 150 km の地域の地表から深さ 40km 程度までの領域が対象領域となる。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、観測網内及びその周辺で発生した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ような観測網とする。

本観測網は、M7 級地震（断層サイズ約 30km）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が生じることを許せば、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、中心に近いほど密）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 1）。

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。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。一方で既存の観測網をすべて利用できるように、東京大学地震研究所（地震研）、神奈川県温泉地学研究所（温地研）、気象庁、防災科学技術研究所（防災科研）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、例えば中央防災会議で首都直下地震の被害想定に用いられた東京湾北部地震の震源断層上では、これまでの約 20 倍の観測点数になる配置になった（図 2）。

一般に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、首都圏地域に設置する場合、そのような環境を満たす場所は少ない。そのため、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場所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・生徒や教師など地震観測に興味を持つ可能性の高い方々が多くいる。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て、防災教育や理科教育に役立てられることも期待している。

c) 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観測網の目的を整理して、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、防災科研が運営する高感度地震観測網 (Hi-net) ¹⁾ 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 ²⁾。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さとした。

d) 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）、防災科研に設置された「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 3）。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、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 4）とデジタル振動計であるセンサ部装置（図 5）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³⁾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、回線復旧後、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地上部装置が生成する。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 の容量を持つ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、測定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。

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て、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 もしくは 200Hz が可能であり、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・蓄積する機能及び取得した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 6)。また、防災科研に設置されたサブセンターと JDXnet⁴⁾ 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 チャンネル 1 時間長のデータを 1 ファイルとして記録する。200Hz サンプリング、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。今年度は、観測点数が半数以下の 178 観測点（温地研設置分を含む）であるため、蓄積期間を 4 週間として運用している。

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 7 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。さらに、取得したデータをバックアップ保存するために約 12TB 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も設置した。これにより、長期間の連続波形データを常時アクセス可能な状態で保持することが可能となった。

データ処理装置での処理プロセスは平成 19 年度に採用した手順の一部を変更した。集約短期蓄積装置で受信したデータは、そのままリアルタイムデータ処理装置に直ちに転送すると同時に、1 チャンネル 1 時間長の波形ファイルとして記録される。リアルタイムデータ処理装置では、房総アレイ（「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」で設置された観測点）で取得された波形データ及び気象庁・防災科研・大学等によって維持されている微小地震観測網の波形データと混合し、多チャンネルの波形データを生成する。生成されたデータは、IP 形式の WIN フォーマットデータとしてデータ交換用の装置を通じてリアルタイムに防災科研に設置されたサブセンターと温地研に送信される。また、波形データは 1 分間の WIN フォーマットとして RAID 装置に保存される。

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、WIN システム⁵⁾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した。

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)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、本年度までに設置された 172 観測点及び温地研が設置した 6 観測点の計 178 観測点のうち本 IP

—VPN 網を経由してデータ収集する 175 観測点からの測定データの受信には十分である。

多くの地震観測点は ISDN 回線を利用しデータの送信を行っているが、一部の観測点ではそれとは異なる形態でデータの送信を行っている（図 8）。まず、弥生観測点は、地震研究所敷地内に設けた観測点であり、地震研の所内ネットワークに直接接続しデータの送信を行っている。次に、風の塔観測点及び潮風公園観測点であるが、両拠点とも ISDN 回線を引き込むことが困難であったため、携帯電話を利用する IP-VPN 網を採用しデータの送信を行っている。最後に、第二海堡観測点は東京湾内に位置する無人島であり、ISDN 回線はもとより携帯電話の受信感度も大変低く常時通信を行える環境ではない。また、観測に必要な電力は太陽電池を用いて自家発電する必要がある、使用可能な電力量の観点から通信衛星を用いたデータ転送は困難である。そこで、対岸の富津公園観測点との間で無線 LAN によるデータ転送を行い、富津公園観測点から ISDN 回線を使用してデータ送信を行うこととした。

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。SNMP プロトコルを用いた監視システムの詳細については、3)d)節で述べる。

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 37 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広いダイナミック・レンジを有する装置であることが要求される。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）を計測した。更に、地震計センサ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、装置の妥当性を検証した。

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、自動的にデータ送出率を最適化し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が高く、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、MeSO-net 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・レンジの測定と試験観測の結果

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ため、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・レンジに大きく依存する。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）の要素に分けられる。実効分解能と歪率は短周期成分の自己ノイズの要因であり、オフセット・ドリフトは長周期成分の自己ノイズの要因である。ここでは、観測装置の i) 実効分解能、ii) 歪率、iii) 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、iv) 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 $\Delta \Sigma$ 型であるため、後段のデシメーション・フィルタの特性も、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。記録されたデータを 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ノイズとし、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ノイズとダイナミック・レンジを表 3 に示す。

この表 3 から明らかのように、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9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10に示す。

上記の図10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%である。図10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温度依存性やプリアンプなどの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11(a)、図11(b)、図11(c)は、恒温槽内の温度をそれぞれ0°C、25°C、50°C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時間の変化は最大20 μ Vである。一方、温度変化によるオフセット電圧の変化は大きい。入力チャンネルにより若干のばらつきがあるが、0°Cの時には入力換算電

圧が約 $-100\mu\text{V}$ 、 25°C では約 $0\mu\text{V}$ 、 50°C では $150\mu\text{V}$ と電圧のドリフトが見られる。温度換算すると $3\sim 4\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 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°C 以下であるので、年間を通して、オフセット・ドリフトは $5\mu\text{V}$ 以下であると見積もれる。この値は①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。以上のように、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、観測データのダイナミック・レンジが低下し、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見積もるためには、地動ノイズの小さな場所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。このため、関東地方で比較的地動ノイズの小さい、防災科研の筑波観測点で約 3 週間の連続観測を行い、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 12 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、観測システムのうちの電子回路部起源のものは少なく、地震計センサ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) の典型的な特徴であり、ここで得られた信号のうち $0.2\sim 0.8\text{Hz}$ 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) 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ている。以上より、本装置は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、多くの観測点 (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・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、中断前と切れ目なく連続した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、データセンターとの間の通信が想定外に増加した場合には、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、データ送出率を観測点側で自律的に制御する機能を導入し、通信装置の故障やソフトウェアの不具合があった場合でも、他の観測点に影響を与えることなく、ネットワーク全体が安定して動作するような仕組みを創り出した。

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以下のように検証した。

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秒分1成分の地震波形データを1つの単位（パケット）として取り扱われる。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・キューの中で古いデータから順にデータセンターに送信する。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新しいデータから順に送信することもできる。

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 13 で示すように観測点側装置は、観測波形データに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%と言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を検証できた。

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 サンプルデータ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 14 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。傾きが 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。通信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、通信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ようになった。

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大な労力と時間を必要とする。しかも、ネットワーク全体に悪影響が及んだ後では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なので、ネットワークが機能しているうちに異常のある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してネットワーク全体が安定して動作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 15(a)-(c)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 15(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ったことを意味する。

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、多数の観測点を保守、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、防災科研の岩槻観測井（深さ 3000m）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、深さ 3m、深さ 5m のそれぞれに設置して試験観測を行い、SN 比の違いを検討した。

設置深度による波形の SN 比の違いを、実際の観測例を用いて示す。図 16 は地震研究所 1 号館脇に試験観測のために設置した地表、深さ 3m、深さ 5m の地震計とそのすぐそばに設置した MeSO-net 弥生観測点（深さ 20m）、及び 気象庁の東京観測点（皇居北の丸、深さ 285m 固有周期 1 秒の速度型地震計）の波形を示した。図 16(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。地表や深さ 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、初動を読み取るのに容易ではない。しかし、深さ 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の立ち上がりは読みやすい。

図 16(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では P 波初動付近の SN 比は小さく初動は読みにくい、深さ 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 17 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さ 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、設置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。またどの深さにおいても、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、数 Hz 以上の周波数帯域ではそれが顕著である。MeSO-net 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。

MeSO-net 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

これ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、MeSO-net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18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。地震計センターの直近で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19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の円筒形の防水型ステンレスアルミ容器に入れられ、ロッドを用いて地下に設置される。

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。更に、ここでその性能を評価し、本研究に最適なシステムを構築できた。

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、埼玉県、山梨県に127観測点を設置した(表7)。この分布は、埼玉県日高市から千葉県銚子市に至るもの、茨城県古河市から千葉県長生郡白子町に至るもの、東京都文京区から山梨県南都留郡山中湖村へ至るものの3本の直線状の観測点配置と、東京都中心部の観測点群からなる(図20)。直線状の観測点は約3km間隔で配置され、昨年までに設置された2本の直線状の配置と併せて、5本の直線状観測網で関東平野を広く覆うものになっている。

今年度は、東京湾内および東京湾に面した地点にも観測点を設置した(第二海堡、海ほたる、風の塔、葛西臨海水族園、潮風公園、富津公園)。これらの地点は、主に人工的に埋め立てられた地域であり、電力線や電話線の確保が困難な場所である。しかし、首都直下のプレート構造を理解するためには、観測点配置上必要不可欠な地域である。そこで様々な技術を用いて、データの取得を可能にした。たとえば東京湾内に位置する第二海堡観測点は、江戸時代末期に作られた人工島であり、現在は立ち入りが禁じられている場所である。そのため、太陽電池パネルを用いて電力を生成し、無線LANを利用して近傍の富津

公園観測点へ送り、そこから電話線を使ってセンターまで伝送した。大容量の蓄電池を併設したため、陽が射さない日が4日間続いても欠測しない。風の塔観測点（東京湾内の人工島）や潮風公園観測点（お台場）では、電話線を引くことが困難なため、代わりに携帯電話を利用して、24時間の連続データ伝送を行った。携帯電話は、ある一定時間間隔で接続が遮断されるが、今回のシステムでは測定は続けられ、回線が復旧した後に再送されるため、データに欠けが無く収録されている。

f) 川崎市浮島観測点におけるノイズ調査

MeSO-net を構築するにあたり、東京湾沿岸地域にも観測点を選定した。その中で川崎市川崎区浮島には、地震研究所がすでに強震動観測を行っている浮島公園観測点が存在する（図 21）。ここでは、約 128m の観測井の孔底に加速度計が設置されていて、強震動を観測するとトリガが働き、約 3 分間のデータを保存する。それを、電話線によるダイヤルアップで取得し、様々な研究に利用している。すでに観測井があり、電源や電話線が利用できるため、この観測点のデータが MeSO-net の観測点として利用可能かどうかのノイズ調査を行った（図 22）。地震計は深さ 128m の観測井の孔底に設置されているが、すぐ脇に国道 409 号線や首都高速川崎線があるためノイズレベルが高く、MeSO-net 観測点として今回は不適とした。

g) 地震計設置方位解析

MeSO-net では、深さ約 20m のボーリングの孔底に設置した加速度型地震計を用いて地震観測を行っている。ボアホール地震計による地震観測は、地表に設置した地震計による観測に比べてノイズレベルが低く、S/N 比の高いデータを得ることが出来るという利点がある。しかし、ボアホール地震計を設置する際、地震計の方位の調整が困難なため、必ずしも設計通りの方向を向いていない可能性がある。このため、地震波の P 波初動の振動方向と方位角（震央と観測点のなす角度）とを比較することにより、ボアホール地震計の設置方位を調べた。一般に、地震計の水平 2 成分のうち NS 成分は真北の方向に設置される。しかし、MeSO-net の場合、作業の効率化及び統一化を図るため、地震計の NS 成分は磁北の方向に設置している。

解析に用いた地震は、2008 年 7 月 24 日に岩手県北部で発生した地震（ $M_{jma}6.8$ 、震源の深さ 110km）である。42 観測点で良好な波形を得た。

解析の手順は以下の通りである。はじめに、WIN データファイルを ASCII データに変換して得たデジタルデータを物理値（加速度）に変換するとともに、DC 成分の除去などの基本処理を行う。次いで、5 秒のローパス・フィルター処理を施した加速度波形の水平 2 成分の P 波初動部分の軌跡を表示し、この軌跡の固有値解析から P 波初動の到来方向を求める。ボアホール地震計の設置方位は、a（軌跡から求めた P 波初動の到来方向）と b（方位角、すなわち、震央と観測点の角度）との差（a-b）から推定する。P 波初動の到来方向と震央の方向が一致していると仮定したとき、ボアホール地震計の NS 成分が真北の方位に設置されていればこの差はゼロになる。

今回採用した解析手法に関する検討を以下に述べる。YYIM（東京大学地震研究所弥生）観測点の場合、 $a=208.5^\circ$ 、 $b=200.9^\circ$ 、その差は 7.6° であった。この結果は、YYIM のボア

ホール地震計の NS 成分は、真北に対し西方向に 7.6° (N352.4°E) 回転していることを意味する。先に述べたように、MeSO-net の場合、ボアホール地震計の NS 成分は、真北の方向ではなく、磁北の方向 (偏角はおよそ -7° 、N353°E) にあわせて設置されている。今回得られた結果は、ボアホール地震計が設定した方向に 0.6° の差で設置されていることを示し、十分に解析に耐えうる記録であると言える。

次に、この解析で得られた結果の精度について検討する。汐見・他⁷⁾は、2008 年 5 月 12 日中国四川省で発生した地震 (Mw7.8) の観測記録を用いて、YYIM のボアホール地震計の方位を推定した。解析の概要は次の通りである。はじめに、加速度波形を積分して求めた速度波形に 100~200 秒のバンドパス・フィルター処理を施し変位波形を求める。ついで、求めた変位波形に、汐見・他⁸⁾の解析方法を適用しボアホール地震計の設置方位を求める。この方法で求めた YYIM におけるボアホール地震計の NS 成分の方位は N357°E である。汐見・他⁷⁾が 100~200 秒の長周期の変位記録を用いて求めた結果は 357°E である。一方、5 秒のローパス・フィルター処理を施した P 波初動部分の軌跡から求めた結果は 352.4°E である。このように、解析に用いた地震、データの周期帯域、解析方法などが異なる二つの方法がほぼ同じ値を示すことから、今回採用した P 波初動の軌跡に基づく解析方法は妥当であると判断される。

その他の観測点での解析結果は次の通りである。ボアホール地震計の NS 成分の方位と真北との差の頻度分布を図 23 に示す。真北との差が $\pm 5^\circ$ 以下の観測点は 8 点、 $5\sim 10^\circ$ の観測点が 10 点、 $10\sim 15^\circ$ が 9 点で、半分以上の観測点でボアホール地震計の NS 成分の方位は磁北を中心に分布している。しかし、真北との差が 20° を超える観測点が 9 点、なかには約 180° 近くも差のある観測点が 2 点あった。これらは、地震計設置時に NS の方向は意識していたものの、逆に取り違えて設置したものと推測される。これらの結果は、採用した設置手順が必ずしも完全でないことを示している。今後は、今回得られた結果を踏まえ、ボアホール地震計の設置方法について慎重に検討し、より精確に設置する予定である。

今回用いた P 波初動の軌跡に基づく解析方法を他の方法と比較すると、両者はほぼ同じ値を示すことから、今回採用した解析方法は妥当であると判断される。しかし、解析事例が一例に限定されるため、今後、データの蓄積をはかり、解析手法のばらつき具合を調べる予定である。また、今年度設置した温地研設置の 5 観測点を含めた 132 観測点のボアホール地震計の方位についても検討する予定である。

h) 観測点におけるノイズ調査

本プロジェクトで設置した観測点には、様々なノイズが含まれている。実際に観測されたデータにどの程度のノイズが含まれているかを評価し、ノイズに対する理解を深めると共にその軽減に資することを目的として、簡易的な時間周波数解析ツールを開発した⁹⁾。このツールは観測データから、予め設定された軸スケールなどのパラメータに基づいて、時系列波形・パワースペクトル密度 (Power Spectrum Density ; PSD) ・スペクトログラムなどのグラフを簡単に出力するものである。日々蓄積されていくデータに対して同じ処理を施してグラフ化することでその時間変化を調べたり、同時間帯の複数観測点のデータのノイズレベルを比較したりすることが可能になった。またノイズの中から観測システムに起因するものを見つけ出すことによって、観測機器の不具合の解決にも寄与することが

できた。その他にも、観測点構築前のノイズ調査に適用することによって、地点選定の判断材料の一つとして利用することができた。またノイズ調査目的だけでなく、地震イベントなどの信号の周波数解析にも適用し、時間波形だけでは困難な周波数変化なども見出すことができた。

この解析ツールは WIN フォーマットの地震波形ファイルを入力として、数値解析ソフトウェア Matlab で解析するプログラムである。Matlab は数値計算を簡潔に記述・実行できるプログラミング言語であり、グラフ表示機能に優れている。またコマンドインタプリタ形式であるためにデバッグが容易という特徴を持っている。動作環境においてはマルチプラットフォーム (Windows、Linux、Solaris、Mac) に対応しており、同じプログラムファイル (M ファイル) をそのまま利用することができる。

例えば、この解析ツールを弥生観測点 (YYIM) で観測されたデータに対して適用し、その振動の特徴について述べてみた。図 24 は、2008 年 3 月 9 日 (日) に YYIM で記録された上下動成分の 24 時間データを示しており、以下の現象が確かめられた。

- 1) 2008 年 3 月 9 日 6 時 13 分に発生した地震 ($M_{jma}4.4$) が時系列波形で確認でき、スペクトログラムにもピークが認められた。
- 2) 時系列波形では、日中の振幅が全体的に増大すると共にスパイク状のものが多く見られ、スペクトログラムでもこの時間帯は暖色になっていてパワーが高まっている。この時間帯の強まりは、深夜のパワーと比較して約 10~数 10 倍である。
- 3) スペクトログラムのア) 2~5Hz、イ) 10~15Hz、ウ) 48~50Hz には、ある程度の周波数幅を持った振動が常時存在していることが分かる。
- 4) 多くの線スペクトルの存在が確認できた。これらの振動をスペクトログラムで見ると、必ずしも常時発生していないことが分かる。例えば、1 時間周期で間欠的に ON-OFF を繰り返しているものや、ある時間以降消えてしまうものがある。これらのピークの発生は、平日に顕著に見られるため、人工的な設備の稼働が原因だと考えられる。
- 5) 80Hz より高周波の帯域においてパワーが大きく落ちるのは、データ収録装置のアンチエイリアスフィルター (カットオフ周波数 80Hz) の作用によるものである。
- 6) 図 25 では 30Hz 辺りから 90Hz を越える高周波にまで伸びるピークが不規則な間隔で確認できる。これらのピークの継続時間は 30 秒~1 分程度で、深夜 0 時半頃~早朝 5 時頃以外の時間帯には数分間隔で存在する。これらのピークの存在しない時間帯が電車の終電時間から始発時間までの間とほぼ重なることから、電車起源の振動であると考えられた。

次に YYIM と他の地点とのノイズレベルの違いについて示す (図 26)。ほぼ同じ地点であるがセンサの設置深度が異なる YYIM (深さ約 20m) と YYI0 (地表) を比較すると、周期数秒の脈動帯域と 2~5Hz 周辺ではほぼ同じ振幅であるが、それより高い周波数帯では YYIM の方が 10~100 倍静かであることが分かる。YYIM では日中と夜間のノイズレベルの差が 10~数 10 倍であることから、YYIM (深さ約 20m) でも日中はノイズレベルが高くなるが、それでも YYI0 (地表) の夜間の静かな時間帯のノイズレベルよりも低いと言える。

次に、YYIM (東京都文京区) を地震研が栃木県足尾町に設置した定常観測点 ASO と比較する。ASO は、関東平野の中で最も静かな観測点の 1 つである。比較に使用した 10 分

間は、これらの観測点において1日の中で最も静かな時間帯に該当し、また地震や大きな人工ノイズなどが含まれていない。20Hz以下では100倍以上、2~4Hzにおいては10,000倍もノイズレベルが高いことが分かる。YYIM周辺には人工ノイズ源が多いことが、ノイズレベルの違いに影響していると考えられる。

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27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28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29)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30)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。

また、収集したデータを学校教育に活かすために情報交換を目的とした連絡組織を関係の教育者たちと構築する準備を行った。

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31)。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。

c) 防災科研・温地研へのデータ送信

MeSO-netの地震観測点で観測されたデータは、地震研に設置した「データ収集・処理・公開センター」に収集される。収集したデータは、データの転送効率を向上するために多チャンネル化し、リアルタイムで防災科研および温地研に送信される(図8)。防災科研に

設置されたサブセンターには JDXnet⁴⁾を利用して MeSO-net の全チャンネルのデータを送信している。JDXnet は、超高速広域ネットワークである JGN2plus や SINET3 を利用した地震波形データ流通専用のネットワークで、全国の大学や研究機関が接続し、地震波形データの交換・流通を行っている。

また、温地研が設置した 6 観測点のデータは、観測ネットワークを介して地震研のデータセンターに直接送信されている。一方、従前より地震研と温地研の間では公衆のインターネット回線を利用したデータ交換を行っている。MeSO-net において温地研が設置した 6 観測点のデータも前述したデータ交換と混合してリアルタイムに送信している。なお、リアルタイムに送信しているデータは 6 観測点分であるが、これは利用している通信回線の容量に制限があるためである。従って、温地研での解析に必要なデータは、可搬型の固定ディスク装置に記録して宅配便等で送付している。

d) SNMP を利用した観測点情報の収集

約 400 か所の観測装置を少人数で監視・保守するためには、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ようなシステムが必要である。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な仕組みを構築した。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。

現在は、地下地震計内の温度と湿度、観測筐体内の温度と湿度、SD カードの異常、バッテリーの電圧と抵抗値、消費電力、ACT プロトコルの ACK 受信率 (ISDN 回線品質の推定)、GPS 衛星捕捉数、GPS 時計とデジタイザ内部時刻との差等の情報が自動的に送られ、異常値が検出された場合は画面上のアイコンの色が変わって、異常個所が特定できるように設定した (図 32)。緑色が正常で、異常の度合いによって黄色、桃色、赤色の表示に変わり、そこをクリックしていくだけで画面が変わり、異常値を示す観測点の機器の表示画面にまで辿り着くことができる。故障の原因特定や機器・電気・電話等に関係した業者への連絡に有用な情報を簡単に得ることができ、リアルタイムの MIB 情報を表示することもできる (図 33)。通常は、ほとんど変化が無い情報であるが、回線状態が悪いときは ACK 受信率が大きく変化することもあり、リアルタイム表示で状況監視をすることが可能である。

このようなリアルタイム表示での監視は、地震研究所の所内ネットワークに繋がっていれば複数の箇所から同時に行うことが可能で、現在、地震研究所内の 3 箇所に設置されたパソコン上で監視作業を行っている。さらに、通信が途絶した等の理由でデータの取得ができない状態になった場合は、即座に関係する研究者の所持する携帯電話等にメールによる通知が行われている。

4) 既存観測網と房総半島稠密アレイ観測データの解析

a) 観測データの高精度処理

MeSO-net で収録したデータは、周辺のテレメータ観測点のデータと統合して、高精度処理に用いた（図 34）。切り出す地震は、気象庁一元化処理震源カタログに基づき、以下の 4 つの基準で選んだ。

- ①北緯 34.8 度～36.5 度、東経 139.0 度～141.0 度、マグニチュード 2.5 以上
- ②北緯 34.5 度～37.0 度、東経 138.5 度～141.5 度、マグニチュード 3.0 以上
- ③北緯 20.0 度～50.0 度、東経 120.0 度～160.0 度、マグニチュード 6.0 以上
- ④北緯 34.8 度～36.5 度、東経 139.0 度～141.0 度、マグニチュード 1.8 以上

2008 年 4 月 1 日から 12 月 31 日の期間に関東地方で発生した地震および日本列島周辺で発生した M6.0 以上の地震、あわせて 601 個を切り出し、読み取りを行った（図 35）。読み取り数は P 相が 77,542 個、S 相が 70,617 個、最大振幅が 85,432 個、初動振動方向が 29,893 個である。

これらの地震に対し、各観測点の P 波到着時刻、S 波到着時刻、最大振幅、P 波初動振動方向を読み取り、震源決定を行った。読み取りは、以下の手順に従って行った。

- ① 地震波形ファイル一つにつき一つの地震が含まれている。一つのファイルに複数の地震が含まれている場合は、気象庁一元化処理震源に対応した地震のみを読み取り作業の対象とする。
- ② 地震波形ファイルを開き、観測点ごとの三成分波形を並べて拡大表示し、P 波および S 波の到着時刻を読み取る。
- ③ P 波到達時刻は上下動成分で、S 波到達時刻は水平動成分のうち到達が明らかな方の成分で読み取る。その際の読み取り幅は、読み取り精度に応じて加減する。
- ④ P 波初動の振動方向が明確な場合は、その極性を読み取る。ノイズレベルが高い場合など振動方向が不確かな場合は、無理に読み取らない。
- ⑤ 最大振幅は、上下動成分の P 波初動周辺または S 波初動周辺で読み取る。
- ⑥ P 波到達時刻、S 波到達時刻、P 波初動振動方向および最大振幅を読み取る場合は、フィルターを通さない原波形で読み取る。加速度計による波形の最大振幅は、積分して速度波形に直してから読み取る。
- ⑦ 読み取り作業を行った後で、hypomh¹⁰を用いて震源計算を行う。その結果の震源位置を地図上で確認し、震源計算に用いた観測点の配置との関係を見て不十分な場合や観測点配置に偏りがある場合などは、もう一度、観測点の波形を確認して読み取り直す。さらに、震源精度、観測点ごとの走時残差、観測点ごとのマグニチュード等も確認し（図 36）、基準値を超えている場合や近隣の観測点と大きく異なる場合は、もう一度波形を確認し読み取り直す。
- ⑧ 震源決定時の解が収束し、震源精度や走時残差等が規定値内に収まるよう努力した後で、最終的に一つの地震に対して読み取り値ファイルの一つだけ保存する。

震源決定には以下の一次元 P 波速度構造を使用した（図 37）。その際にポアソン比を 1.73 と仮定した S 波速度を用いた。最初の震源決定後、観測走時と計算走時の差の平均値を基に観測点補正値を決定した。観測点補正値を算出するために使用した地震は、東経 138 度から 141 度、北緯 34 度から 38 度、深さ 150km 以浅で発生した地震のうち、P 相、S 相ともに 50 個以上の読み取りのある 383 イベントである（図 38）。その結果、得られた観測点補正値を以下に示す（図 39、図 40）。

この観測点補正値を用いて再び震源決定を行った（図 41）。震源決定の誤差は、図の範囲内の地震に限ると、平均約 0.85km（水平）、約 0.86km（深さ）であった（図 42）。範囲外の地震は深さの精度が悪くなり、深い地震は水平方向の精度が悪くなる。気象庁一元化処理震源と比較すると、水平方向の差は約 4.7km、深さ方向の差は約 6.9km であった（図 43）。

b) 地震波速度構造解析

MeSO-net で取得したデータ及び既存のデータを用いて、二重走時差トモグラフィ法（Double-difference tomography）¹¹⁾による走時データ・インバージョン解析を行い、関東下の地震波速度構造の推定を試みた。群列配置された観測網に本手法を適用して地震波速度構造を推定することは、Kato et al. (2009¹²⁾、2008a¹³⁾、2008b¹⁴⁾などの研究により、震源の相対走時の精度を向上させ結果として分解能の向上に寄与することが示されている。さらに、列状配置された観測網間も、地下深部であれば精度良く推定されることが示されている。

本解析は、基本的には Hagiwara et al.(2006)¹⁵⁾が房総半島を中心とした関東地方を対象領域として行ったトモグラフィ解析を参考にした。解析に用いたデータは、Hagiwara et al.(2006)¹⁵⁾が解析に用いたデータに、前項 a)観測データの高精度処理で検出した MeSO-net のデータを加えたものを利用した。解析グリッドは、Hagiwara et al.(2006)¹⁵⁾と同じとした。即ち、水平方向は、房総半島稠密アレイに直交する方向 (X) を 20km 間隔、平行する方向 (Y) を 10km 間隔とした。また、深さ方向 (Z) は、深さ 50km までは 5km 間隔に、それ以深は 60、70、80、100、150km にグリッドを配置した。解析に用いた観測点の分布・震源分布とともに図 44 に示す。インバージョン解析用の初期速度構造として、Hagiwara et al.(2006)¹⁵⁾が用いた初期速度構造を採用し、Vp/Vs は全領域で 1.73 を仮定した（図 45）。インバージョン解析に使用した地震数は 280 個で、気象庁一元化処理震源のうちマグニチュード 1.2 以上の地震に相当する。使用した走時データの内訳は、絶対走時データは P 波が 27,710 個、S 波が 23,402 個であり、二重走時差データは P 波が 63,979 個、S 波が 47,102 個である。

解析にあたってチェッカーボード・レゾリューションテストを行った。このテストでは、初期速度構造モデルに±5%の速度パーターベーションを仮定したモデルを基に走時データを作成し、インバージョンを行うことにより再現性を評価した。図 46 にその結果を房総アレイ測線（図 44 の A-B）及びつくばー藤沢測線（図 44 の C-D）における断面図で示す。両測線とも概ね測線中央部において深さ 10km から 50km 程度まで、速度パーターベーションが良く再現されていた。ただし、測線端の深部では、測線と地震との幾何学的な相対関係に起因して再現性が悪くなる。

図 47 に房総アレイ測線及びつくばー藤沢測線の P 波速度構造の断面図を示す。いずれの断面図においても高速度層の上に載っている薄い低速度層が北東方向へ向かって沈み込む様子が鮮明に捉えられた。この低速度層は、沈み込むフィリピン海プレート上部の海洋性地殻に対応していると考えられる。また、海洋性地殻内やその上面付近でも地震が発生していることがわかる。

本解析結果は、現在までに取得した MeSO-net データの一部を使ったものであるが、

MeSO-net のデータを用いた解析で高精度な地震波速度構造の推定が可能であることを示唆している。今年度までに設置した観測点を含めると、5本のアレイ状測線が MeSO-net 内に完成し、データの蓄積が進行している。データの充実に伴い、関東広域・深部におけるより高精度な速度構造の推定が行われることが期待される。

c) 地震活動の統計的解析

地震発生予測の高度化を目指し、首都直下の地震活動の統計的性質、特に関東の小地震の発生域と中・大規模地震との関係を明らかにする。そのための準備として、気象庁の既存観測網で得られた地震カタログを用いた研究、及びその枠組み作りを開始した。

まず、地震発生予測を評価することを目的とした国際研究プロジェクト“Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability (CSEP)”¹⁶⁾ で使用しているデータ処理計算機システムと同等の評価システムを地震研究所に設置した^{17)、18)、19)、20)、21)}。このシステムは、南カルフォルニア地震センターとスイス連邦工科大学の協力により開発されたものである。今年度は、そのシステムの稼動試験のために、異なる仮説に基づく3つの統計モデル (Triple-S、JALM、RI) を使用して、日本全土を対象とした予察実験を遂行し (図 48)、本検証実験の関連ウェブサイト (<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/ZISINyosoku/>) を作成した。

次に、上記の実験で使用する気象庁地震カタログに収められたデータの評価研究を行った²²⁾。この評価結果は、評価システムの事前情報として利用される。検知可能な最小規模 (コンプリートネスマグニチュード (M_c)) を見積もれば、それより小規模な地震を含んだデータを使用した研究は不確実な研究であると言えることができる。使用した PMC 法²³⁾ は地震観測網の分布に基づき M_c を推定する方法で、CSEP で標準的に使われている。これまでの M_c の研究と違って、地震の規模別頻度分布が Gutenberg-Richter (GR) 則から逸脱することが地震検知能力と関連するという仮定を必要としない。既存の地震観測網に PMC 法を適用した (図 49)。 M_c 値は地域差があり、陸域の M_c は 0 から 2 である一方、陸域から離れた海域では M_c が 3 から 4 またはそれ以上の値を取る。沿岸地域は陸域と海域の中間的な値を取る。この結果は、地震観測網が密な地域では M_c 値が小さいという従来から考えられている傾向を定量的に示している。これまでにカルフォルニアやスイスにおいて PMC 法を適用した結果と比較すると、この M_c の最小値は 0 に近く、 $M_c=0\sim 2$ の地域が広範囲に及ぶことから、日本の観測網が最も検知能力の高い観測網であると言える。

さらに従来の GR 則に基づく手法²⁴⁾も利用して M_c を見積もり、複数の手法による比較研究を行い、震源データの品質評価を行った²⁵⁾。図 50 は 2007 年に起きた地震を基に作成された M_c の空間分布図である。上記の M_c 分布と矛盾しない結果を得ているため、本研究では信頼ある M_c 値を推定していることと同時に仕様した地震カタログも高品質であることが示された。 M_c の空間分布の関東地域周辺を拡大してみると、地震検知能力の空間的ばらつきが分かる (図 51)。たとえば、日本列島陸域では全体的に M_c が 1 より小さいが、房総半島周辺の M_c は約 1.5 と比較的高い。首都圏直下の地震活動度を議論するときには、このような検知能力の違いを理解した上で様々な考察をする必要があることが示された。

今後は、これらの成果を活用して首都直下の地震活動に焦点を当てた研究を行う。特に

今年度構築した評価システムを首都圏地域に適用し、その地震予測検証実験を始める¹⁷⁾。この場合、沈み込み帯で起きる深部の地震も考慮に入れた予測実験を行うため、三次元的な領域での予測実験が可能なようにデータ処理システムを拡張し、 M_c のデータベースを作成する。

(c) 結論ならびに今後の課題

観測網は、所期の計画通りに整備が進み、平成20年度は127箇所の観測装置を設置した。昨年度に設置された45箇所および神奈川県温泉地学研究所が設置した6箇所とあわせて178箇所からのデータを収集し、処理し、解析を始めた。平成19年度までは2本の線状配置であったが、今年度の設置により5本の線状配列が作られ、首都圏を面的に観測できるようになった。その結果、さまざまな方位から伝播してくる地震波を観測することができ、首都圏下の構造を理解する上で有効な情報が得られている。データ収集・処理・公開センターの整備を進め、学校などの関係者にも見ていただけるようなウェブを立ち上げた。

今後は、これらのデータから地震波の到着時刻の差、地震波の振幅の違い、地震波の卓越周期のゆらぎ等を測定し、首都圏直下の構造を求める解析を始める。その結果を元に、観測データが不足していると思われる地域を見出だし、そこに新たな観測点を設置する計画を立てる。

(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) 汐見勝彦, 佐々木俊二, 酒井慎一, 笠原敬司, 関根秀太郎, 中川茂樹, 小原一成, 平田直, 棚田俊收: 地震動の長周期成分を用いた首都圏地震観測網(MeSO-net)の設置方位推定, 地球惑星科学連合大会予稿集, 2009.
- 8) 汐見勝彦, 小原一成, 青井 真, 笠原敬司: Hi-net/KiK-net 観測点における地中地震計

- 設置方位の推定, 地震 2, 56, 99-110, 2003.
- 9) 宮川幸治、酒井慎一: 地震波形の時間周波数解析ツールの開発ー首都圏地震観測網 (MeSO-net) 構築におけるノイズ調査への摘要ー, 東京大学地震研究所技術研究報告, 14, 13-22, 2008.
 - 10) Hirata, N. and M. Matsu'ura: Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using non-linear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 40, 50-61, 1987.
 - 11) Zhang, H. and C. Thurber: Double-difference tomography: The method and its application to the Heyward fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 93, pp/1875-1889, 2003.
 - 12) Kato, A., E. Kurashimo, T. Igarashi, S. Sakai, T. Iidaka, M. Shinohara, T. Kanazawa, T. Yamada, N. Hirata, and T. Iwasaki: Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05301, doi:10.1029/2008GL036450, 2009.
 - 13) Kato, A., S. Sakai, E. Kurashimo, T. Igarashi, T. Iidaka, N. Hirata, T. Iwasaki, T. Kanazawa, and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake: Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, 60, 1111-1116, 2008a.
 - 14) Kato, A., S. Sakai, T. Iidaka, T. Iwasaki, E. Kurashimo, T. Igarashi, N. Hirata, T. Kanazawa, and Group for the aftershock observations of the 2007 Noto Hanto Earthquake: Three-dimensional velocity structure in the source region of the Noto Hanto Earthquake in 2007 imaged by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, 60, 105-110, 2008b.
 - 15) Hagiwara, H., T. Igarashi, N. Hirata, and S. Sakai, Velocity structure in the Kanto Region from dense array observation: A new configuration of the Philippine Sea plate, AGU 2006 Fall Meeting, 2006.
 - 16) Jordan, T. H.: Earthquake Predictability, Brick by Brick, *Seismol. Res. Lett.*, Vol. 77, pp. 3-6, 2006.
 - 17) 地震活動評価に基づく地震発生予測研究グループ (文責: 楠城一嘉, 鶴岡弘, 平田直): 地震発生予測検証実験に関する公募, 日本地震学会ニュースレター, Vol. 20, No. 6, pp. 7-10, 2009.
 - 18) 楠城一嘉, 鶴岡弘, 遠田晋次, 平田直: 地震活動評価に基づく地震予測研究: 世界と日本の動向, 日本地震学会ニュースレター, Vol. 20, No. 4, pp. 16-20, 2008.
 - 19) Tsuruoka, H., Hirata, N., Schorlemmer, D., Euchner, F. and Jordan, T. H: CSEP Earthquake Forecast Testing Center for Japan, *Eos Trans. AGU*, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S33A-1935, 2008.
 - 20) Tsuruoka, H., Hirata, N., Schorlemmer, D., Euchner, F. and Jordan, T. H.: The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability: Establishing a Testing

Center in Japan, In The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall Meeting, Program and abstract, p. C41-09, 2008.

- 21) Tsuruoka, H., Hirata, N., Schorlemmer, D., Euchner, F., Nanjo, K. Z. and Jordan T. CSEP Earthquake Forecast Testing Center for Japan: Primary Scope and Recent Progress, Japan Geoscience Union Meeting 2009, 2009 submitted.
- 22) Schorlemmer, D., Hirata, N., Euchner, F., Ishigaki, Y., Tsuruoka, H.: A Probabilistic Completeness Study in Japan, In The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall, Program and abstract, p. Y3-214, 2008.
- 23) Schorlemmer, D. and Woessner, J., Probability of Detecting an Earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 98, No. 5, pp. 2103–2117, 2008.
- 24) Woessner, J. and Wiemer, S.: Assessing the Quality of Earthquake Catalogs: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainties, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 95, pp. 684-698, 2005.
- 25) Nanjo, K. Z., Tsuruoka, H., Hirata, N. and Ishigaki, Y.: Initial Report on the Magnitude of Complete Reporting for Japan, Using the Gutenberg-Richter Frequency-Magnitude Law, In JPGU Meeting 2009, 2009 submitted.

(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（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
A PLAN FOR THE NEW JAPANESE NATIONAL RESEARCH PROGRAM FOR PREDICTION OF EARTHQUAKE AND VOLCANIC ERUPTION (2009-2013)（口頭）	Hirata, N.	米国地震学会 2008年大会 (Santa Fe, NM, USA)	2008年4月	国際
首都圏地震観測網 (MeSO-net:Metropolitan Seismic Observation network)の構築（口頭）	笠原敬司・平田直・酒井慎一・佐々木俊二・中川茂樹, 鶴岡弘・森田裕一・小原一成・棚田俊收	日本地球惑星科学連合2008年大会（千葉市）	2008年5月26日	国内
首都圏地震観測網	酒井慎一・笠	日本地球惑星科	2008年5月26	国内

(MeSO-net) から見たスロースリップとプレート構造 (ポスター)	原敬司・中川茂樹・鶴岡弘・佐々木俊二・平田直・木村尚紀	学連合2008年大会 (千葉市)	日	
首都直下の不均質構造のイメージング (1) (ポスター)	中川茂樹・酒井慎一・萩原弘子・笠原敬司・佐々木俊二・平田直	日本地球惑星科学連合2008年大会 (千葉市)	2008年5月26日	国内
IMAGING CRUSTAL FAULTS IN KANTO, JAPAN, WITH MeSO-net AND ADTIVE SOURCE DATA (ポスター)	Hirata, N.	2008 IRIS Workshop (Skamania Lodge, Stevenson, WA, USA)	June 4-6, 2008	国際
Present magma accumulation process at Izu-Oshima volcano in Japan (ポスター)	Y. Morita and H. Watanabe	IAVCEI 2008 General Assembly, (Raykjavik, Iceland)	Aug.18-22. 2008	国際
The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability: Establishing a Testing Center in Japan (ポスター)	H. Tsuruoka, N. Hirata, D. Schorlemmer, F. Euchner, and T.H. Jordan	2008 SCEC Annual Meeting, (Palm Springs, CA, USA)	2009/09/07-11	国際
Plate boundary under the Metropolitan observed by a dense seismic network (MeSo-net) (ポスター)	S. Sakai, K. Kasahara, S. Sasaki, S. Shigeki, H. Tsuruoka, E. Kurashimo, A. Kato, T. Igarashi, T. Iidaka, Y. Morita, and	The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall Meeting (Tsukuba, Japan)	24-27 Nov. 2008	国際

	N. Hirata			
Azimuth estimation of the MeSO-net borehole seismometers based on the orbit of P wave first motion (ポスター)	Sasaki, S., K. Kasahara, S. Sakai, S. Nakagawa, Y. Morita, H. Tsuruoka, N. Hirata, K. Shiomi, S. Sekine, K. Obara, T. Tanada	The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall Meeting (Tsukuba, Japan)	24-27 Nov. 2008	国際
The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability: Establishing a testing center in Japan (口頭)	H. Tsuruoka, N. Hirata, D. Schorlemmer, F. Euchner, T. H. Jordan	The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall Meeting (Tsukuba, Japan)	24-27 Nov. 2008	国際
Imaging of Heterogeneous Structure beneath the Metropolitan Tokyo Area (2) (ポスター)	S. Nakagawa, S. Sakai, H. Hagiwara, A. Kato, K. Kasahara, S. Sasaki, N. Hirata	The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008 Fall Meeting (Tsukuba, Japan)	24-27 Nov. 2008	国際
Relationship between active seismicity and seismogenic structure associated with an ancient rift	Kato, A., E. Kurashimo, T. Igarashi, S. Sakai, T. Iidaka, M.	American Geophysical Union, Fall Meeting 2008 (San Francisco,	Dec. 2008	国際

system along the eastern-margin of the Japan Sea (ポスター)	Shinohara, T. Kanazawa, T. Yamada, N. Hirata, and T.Iwasaki and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake	CA, USA)		
CSEP earthquake forecast testing center for Japan (ポスター)	H. Tsuruoka, N. Hirata, D. Schorlemmer, F. Euchner, T. H. Jordan	American Geophysical Union, Fall Meeting 2008 (San Francisco, CA, USA)	Dec. 2008	国際

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文 (論文題目)	発表者氏名	発表場所 (雑誌等名)	発表時期	国際・国内の別
Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation	Kato, A., S. Sakai, E. Kurashimo, T. Igarashi, T. Iidaka, N. Hirata, T. Iwasaki, T. Kanazawa, and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake	Earth Planets Space	2008年	国際

Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes	Kato, A., E. Kurashimo, T. Igarashi, S. Sakai, T. Iidaka, M. Shinohara, T. Kanazawa, T. Yamada, N. Hirata, and T. Iwasaki	Geophys. Res. Lett.	2008年	国際
首都直下地震防災・減災特別プロジェクトー首都圏における超高密度地震観測網ー	平田直	なみふる, No.67	May, 2008	国内
首都直下地震防災・減災特別プロジェクトーその2「サブプロジェクト①首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」世界でも例を見ない首都圏での高密度地震観測網を構築	平田直	地震本部ニュース, 平成20年8月号	2008年8月	国内
地震活動評価に基づく地震予測研究：世界と日本の動向	楠城一嘉・鶴岡弘・遠田晋次・平田直	日本地震学会ニュースレター, Vol. 20, No. 4, pp. 16-20	2008年11月	国内
地震波形の時間周波数解析ツールの開発ー首都圏地震観測網(MeSO-net)構築におけるノイズ調査への摘要ー	宮川幸治・酒井慎一	東京大学地震研究所技術研究報告	2008年	国内
観測点選定支源地図システムの開発	中川茂樹・鶴岡弘・蔵下英司・酒井慎一	東京大学地震研究所技術研究報告	2008年	国内
地震発生予測検証実験	地震活動評	日本地震学会ニュ	2009年3月	国内

に関する公募	価に基づく地震発生予測研究グループ（文責：楠城一嘉・鶴岡弘・平田直）	ースレター， Vol. 20, No. 6, pp. 7-10		
--------	------------------------------------	---------------------------------	--	--

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果 (記事タイトル)	対応者氏名	報道・掲載機関 (新聞名・TV名)	発表時期	国際・国内の別
首都圏400カ所 観測	酒井慎一	日本経済新聞	2009年1月11日	国内
地震観測網で気温監視	酒井慎一	日本経済新聞	2009年1月28日	国内
首都圏の地下探る 400 台の地震計網 小中学校 校に設置	笠原敬司	中日新聞	2008年4月8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	機能
AJAXを用いたリアルタイム波形表示ソフトウェア	Webブラウザ上で MeSO-net により収集される地震波形をリアルタイムに波形を表示するソフトウェア
ジャンプランキング用 Web アプリケーション	MeSO-net により収集される地震波形(加速度)から、10秒毎の時間窓の最大最小値を計算し、その加速度値のランキングを計算するソフトウェア。出力用の PDF ファイル作成機能もある。
地震波形時間周波数解析ツール	地震波形データのパワースペクトル密度やスペクトログラムを計算しグラフ化する MATLAB を用いたツール。
観測点選定支援地図システム	Web 上の無料地図サービスを利用して地震観測点の選定作業を支援するソフトウェア

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成21年度業務計画案

首都圏に設置する中感度地震観測装置 44 式を整備する。前年度までに首都圏および東京湾に設置された 172 台の中感度地震観測装置によるデータを用いた解析結果を参照し、新たな観測地点 44 箇所を選定する。それらの地点で環境調査等を実施して地震観測装置を設置し、合計 216 箇所において自然地震観測を行う。

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、引き続きデータを収集・処理する。あわせて、房総半島の観測点で得られる房総半島沖の地震データも収集する。収集したデータを既存観測点のデータと併せ、震源決定法・地震波トモグラフィ法・地震波干渉解析法等の手法を用いて、首都圏下の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を明らかにするための解析を進める。

また、これまでに得られたデータを統合し、関東の地震カタログを整理する。

さらに、収集したデータを学校教育に活かすための連絡組織を関係の教育者たちと構築し、その組織運営を行う。