

データプラットフォーム拠点形成事業（防災分野）

首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト

サブプロジェクト（b）

「官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備」

（平成 29 年度）

成果報告書

平成 30 年 5 月

国立研究開発法人防災科学技術研究所

はじめに

わが国は世界でも有数の地震大国であり、これまでに幾度となく甚大な物理的・人的・経済的被害をうけてきました。特に、過去に甚大な被害をもたらしてきた首都直下地震や南海トラフ地震については、地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価によれば、今後30年以内の地震発生確率はどちらも70%程度であり、その切迫性が高まっています。

3,800万人を擁する世界最大の都市圏における首都直下地震については、内閣府より、首都機能の喪失をはじめその経済被害想定額が95兆円と試算されており、社会的懸案事項として捉えられています。こういった自然災害に対応するため、最先端の防災科学技術を一層推進すべく、「経済財政運営と改革の基本方針2016(平成28年6月2日閣議決定)」、「日本再興戦略2016－第4次産業革命に向けて－(平成28年6月2日閣議決定)」、「科学技術イノベーション総合戦略2016(平成28年5月24日閣議決定)」といった政府の基本方針が定められています。

わが国の現在の防災力ではこうした大規模地震災害の被害を完全に予防することはできず、残された時間の中で少しでも被害を減らすこと、高い事業継続能力を持つこと、速やかな復旧・復興を実現することで災害に対するレジリエンスを向上させることが課題です。

一方で、2015年5月に発生した小笠原諸島西方沖地震では、大きな被害こそ発生しなかったものの、首都圏における約2万機のエレベータの停止、交通機関の乱れ、ライフラインの一時停止等が生じ、事業の中断や経済機会損失にもつながっており、このように比較的頻度の高い中規模地震への備えの充実も決して看過することができません。

また、政府では、急速に成長するアジアをはじめとする世界の観光需要を取り込み『観光先進国』への新たな国づくりに向けて邁進していることから、災害発生時の訪日外国人旅行者向けの対策も重要な課題です。

特に、都市機能、人口が集中し、社会経済活動の中核でありわが国の頭脳となっている首都圏においては、災害に対する脆弱性を内在していることから、首都機能の維持を図るため、詳細に災害リスクを評価するとともに発災に備えた対策を施しておくことは、これまでも増して重要かつ喫緊の課題となっています。

そこで、本プロジェクトにおいては、以下に掲げる3つのサブプロジェクトの推進、有機的連携を通じて、官民一体の総合的な事業継続や災害対応、個人の防災行動等に資するデータの収集・整備を目指します。

- (a) 首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上に資するデータ利活用に向けた連携体制の構築
- (b) 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備
- (c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

本プロジェクトの推進に当たっては、防災科研が有する、又は管理・利用する研究開発基盤（施設・設備・リソース等）を活用した大学等との連携方策等について提案を募り、オールジャパンによる研究推進体制を構築し、本プロジェクト終了時における研究開発成果の最大化を図ります。

本報告書は「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト」のうち、「(b) 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備」に関する、平成 29 年度の実施内容とその成果を取りまとめたものです。

「官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備」（以下、本サブプロジェクト）の目的は、政府関係機関が保有する首都圏に整備された稠密かつ高精度な首都圏地震観測網（MeS0-net）と全国規模の地震観測網（K-NET・KiK-net、Hi-net 等）により得られるリアルタイムの観測データ、民間が保有する地震観測データを統合した超高密度地震動観測データを収集・整備することです。これらのデータにより、これまでに解明を進めてきた地震像の精緻化や都市の詳細な地震被害評価に資することを目指しています。

本サブプロジェクトは、「(1)官民連携超高密度観測データ収集・整備」と「(2)マルチデータインテグレーションシステムの検討」の二つの研究課題から構成されています。前者の課題では、首都圏の地震像や地盤特性を明らかにするために、より稠密かつ確実に地表・地中の観測データ等の収集・整備を行います。後者の課題では、首都圏の揺れの様子を超高解像度で把握するため、大量かつ多様な地震データを統合するシステムについて検討します。さらに、様々なデータを取り入れることにより、地震発生直後の揺れの迅速な把握に加えて、過去の大地震の揺れの推定や将来の大地震による揺れの予測等に資するデータ解析手法を検討します。また、マルチデータインテグレーションシステムの入力の一部として想定している民間企業が保有する地震データは、サブプロジェクト「(a) 首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上に資するデータ利活用に向けた連携体制の構築」が運用するデータ利活用協議会を通じて取得・利用するとともに、マルチデータインテグレーションシステムの出力となる地震動データや揺れの指標データについては、サブプロジェクト(a)および「(c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」からの要望も加味しながらシステム開発の検討を進めます。

平成 29 年度は、5 か年計画で進める本プロジェクト開始の初年度にあたります。東京大学地震研究所から防災科研に移管された首都圏地震観測網（MeS0-net）について新たにセンター機能を防災科研に構築するとともに、安定運用を継続し稠密かつ良質な首都圏の地震動データの収集を実施しました。また、マルチデータインテグレーションシステムの開発やそれに必要な地盤特性の検討や新たな観測技術の開発に着手し、大量のデータを利用して首都圏周辺の地下構造や地震像の解明に向けた手法開発も開始しました。これらの成果を着実に積み重ねて、首都圏を中心としたレジリエンス総合力の向上に貢献していきたいと考えています。

目次

はじめに	i
目次	iii
1. プロジェクトの概要	1
1.1 目的	1
1.2 各課題の概要	1
2. 研究機関および研究者リスト(サブプロ b)	3
3. 研究報告	4
3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備	4
3.2.1 官民連携超高密度データ収集	4
3.2.2 マルチデータインテグレーションシステム開発の検討	9
3.2.2.1 マルチデータインテグレーションシステムに関する技術開発	9
3.2.2.2 MeSO-net 観測点における地表地震記録の推定	14
3.2.2.3 スマートフォンによる揺れ観測技術の開発	21
3.2.2.4 MeSO-net 観測点～サテライト観測点群間の揺れデータ伝送技術の開発	26
3.2.2.5 首都圏における過去/未来の地震像の解明（東京大学地震研究所）	33
3.2.2.6 首都圏における過去/未来の地震像の解明（神奈川県温泉地学研究所）	44
4. 活動報告	49
4.1 会議録	49
4.2 対外発表	52
5. むすび	55

1. プロジェクトの概要

1.1 目的

本プロジェクト（サブプロジェクト(b)：官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備）では、政府関係機関が保有する首都圏に整備された稠密かつ高精度な首都圏地震観測網（MeS0-net）と全国規模の地震観測網（K-NET・KiK-net、Hi-net 等）により得られるリアルタイムの観測データ、民間が保有する地震観測データを統合した超高密度地震動観測データを収集・整備することを目的としている。また、これらのデータによりこれまでに解明を進めてきた地震像の精緻化や都市の詳細な地震被害評価に資することを目指している。そのために(1)官民連携超高密度観測データ収集・整備と(2)マルチデータインテグレーションシステムの検討の2つの項目で研究開発を進めた。

1.2 各課題の概要

平成 29 年度は、5 か年計画の初年度で、以下に、今年度の研究の概要を示す。

(1) 官民連携超高密度データ収集（防災科研が実施）

首都圏における稠密な地震観測データを確実に収集するために、約 3-5km 間隔という高密度に展開されている MeS0-net（約 300 観測点）の運用を行った。

(2) マルチデータインテグレーションシステム開発の検討

(a) マルチデータインテグレーションシステムに関する技術開発（防災科研が実施）

首都圏における多種多様な地震観測データを、有機的に統合し利用可能とするマルチデータインテグレーションシステムの開発に向け、MeS0-net による高密度地震観測データとこれまで防災科研が運用してきた基盤的地震観測網による強震観測データを受信し統合管理するシステムの開発に着手した。

(b) MeS0-net 観測点における地表地震記録の推定（防災科研が実施）

MeS0-net 地震計と同じセンサ特性を持つ 3 成分地震計兼微動観測機器を購入し、各 MeS0-net 観測点において微動アレイ観測および解析を実施した。また地表地震計として一定期間臨時観測を行うための設置位置・手法の検討および資材調達を行った。

(c) スマートフォンによる揺れ観測技術の開発（防災科研が実施）

首都圏の住宅・企業等を対象にモニター募集を行い、スマートフォン地震計インストール済み端末を設置した。モニターと連携しながら観測技術を高度化していくための運用体制を構築するとともに、API 等によるデータ配信技術の開発に着手した。

**(d) MeSO-net 観測点～衛星観測点群間の揺れデータ伝送技術の開発
(株式会社東芝が実施)**

衛星観測点における揺れデータの伝送に必要な地震時のトリガ機能やデータの無線伝送機能・省電力機能等について検討し、揺れデータ伝送無線機を試作した。

(e) 首都圏における過去/未来の地震像の解明（東京大学、温泉地学研究所が実施）

MeSO-net 等から得られたデータを元にして、首都圏および伊豆地方のプレート構造および3次元減衰構造を求めている。長期間の地震カタログからコンプリートネスマグニチュードおよびb値の3次元分布を求めている。従来の震源決定アルゴリズムを整理し、統計学的手法としての特徴を分析し、空間相関を採り入れた多変量版の震源決定アルゴリズムを開発している。

(3) サブプロジェクト(b)の管理・運営

本プロジェクトの総括的・効率的な運営を図るため、代表機関である国立大学法人東京大学、共同実施機関である株式会社東芝・神奈川県温泉地学研究所、協力機関である東京理科大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所の研究者が参加する運営委員会を2回開催した。

2. 研究機関および研究者リスト(サブプロ b)

所属機関	役職	氏名	担当課題
東京大学地震研究所	准教授	酒井慎一	研究統括 3.2.2.5
防災科学技術研究所首都圏レジリエンス研究センター 防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	研究統括 センター長	青井 真	研究統括 3.2.1
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	上野 友岳	3.2.1
防災科学技術研究所首都圏レジリエンス研究センター	契約専門員	川北 優子	3.2.1
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	木村 武志	3.2.2.1
防災科学技術研究所地震津波防災研究部門	主任研究員	木村 尚紀	3.2.2.1
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	功刀 卓	3.2.2.1
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	汐見 勝彦	3.2.2.1
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	鈴木 亘	3.2.2.1
防災科学技術研究所社会防災システム研究部門	主任研究員	中村 洋光	3.2.2.1
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	松澤 孝紀	3.2.2.1
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	松原 誠	3.2.2.1
防災科学技術研究所社会防災システム研究部門	主幹研究員	先名 重樹	3.2.2.2
防災科学技術研究所社会防災システム研究部門	研究員	東 宏樹	3.2.2.3
株式会社東芝 研究開発センターネットワークシステムラボラトリー	主任研究員	佐方 連	3.2.2.4
東京大学地震研究所	准教授	加藤愛太郎	3.2.2.5
東京大学地震研究所	准教授	鶴岡 弘	3.2.2.5
東京大学地震研究所	准教授	長尾大道	3.2.2.5
東京大学地震研究所	特任研究員	尾形良彦	3.2.2.5
東京大学地震研究所	特任研究員	中村亮一	3.2.2.5
東京大学地震研究所	特任研究員	森川耕輔	3.2.2.5
神奈川県温泉地学研究所	所長	里村幹夫	3.2.2.6
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮	3.2.2.6
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	原田昌武	3.2.2.6
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	行竹洋平	3.2.2.6
神奈川県温泉地学研究所	技師	道家涼介	3.2.2.6
神奈川県温泉地学研究所	技師	安部祐希	3.2.2.6
神奈川県温泉地学研究所	非常勤職員	大石真由美	3.2.2.6

3. 研究報告

3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備

3.2.1 官民連携超高密度データ収集

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏における地震像の精緻化や都市の詳細な地震被害評価に貢献するため、政府関係機関が保有する、首都圏に整備された稠密かつ高精度な地震観測網（MeSO-net）と全国規模の地震観測網（K-NET・KiK-net、Hi-net 等）により得られるリアルタイムの観測データ、民間が保有する地震データを統合した超高密度地震観測データを収集・整備する。このうち本業務は、MeSO-net の安定的な運用を目的としている。

(b) 平成 29 年度業務目的

- ・ MeSO-net 観測点から伝送されるデータの受信システムを防災科学技術研究所に新しく構築し、観測データの管理システムを整備する。
- ・ MeSO-net 各観測点で発生する障害に対応することで、首都圏における稠密な地震データを安定的に収集する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	上野 友岳
防災科学技術研究所首都圏レジリエンス研究センター	研究統括	青井 真
防災科学技術研究所首都圏レジリエンス研究センター	契約専門員	川北 優子

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

約 300 観測点からなる首都圏地震観測網（MeSO-net）の観測データの受信システムを構築し既存システムから切り替えを実施した。また、各観測点の障害対応等を実施し、特に 3 観測点について観測施設の移設および一時撤去を実施した。

(b) 業務の成果

1) MeSO-net データ受信システムの構築

2007 年度より観測を開始している MeSO-net はこれまで東京大学地震研究所（以下、東大地震研）が主体となって構築・運用を実施しており、観測データの受信システムは東大地震研が運用していた。2017 年度より MeSo-net が東大地震研から防災科研に移管されたため、各観測点からのデータ受信システムを防災科研内に新たに構築した。

各観測点の通信回線についてはこれまでと同様に原則 ISDN を利用し、新たに構築

した IP-VPN 網により防災科研のデータ受信システムに接続している。データ受信システム側の回線はこれまで 10Mbps の帯域を確保するギャランティ型 2 回線であったが、100Mbps のベストエフォート型 1 回線とした。また、モバイル回線によってデータを収集している一部の観測点についても、防災科研の受信システムによるデータ収集に移行した。2017 年 12 月から各観測点の観測機器の設定変更作業を開始し 2018 年 3 月 19 日には、全ての観測点の切替が完了した（図 1）。

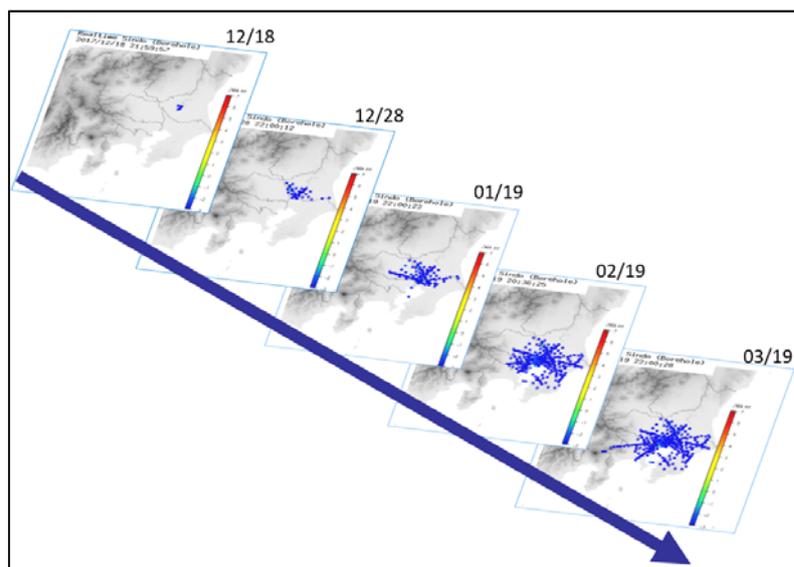


図 1 データ送信先を切り替えた MeSO-net 観測点の推移

2) MeSO-net データ管理システムの構築

MeSO-net には、観測装置の動作や死活をリモートで監視できるように自動的に機器情報を受信システムへ送信する仕組みが存在する。これらは観測装置から通信装置にいたるまで管理情報（Management Information Base : MIB）を持たせて、Simple Network Management Protocol (SNMP) を用いて実現している¹⁾。この機器情報を各観測点の位置情報等と合わせて統合監視ソフトウェア（Zabbix）により可視化するシステムを構築した（図 2）。これにより、複数の運用者により従来よりも直感的な障害監視を容易に実施することが可能となった。

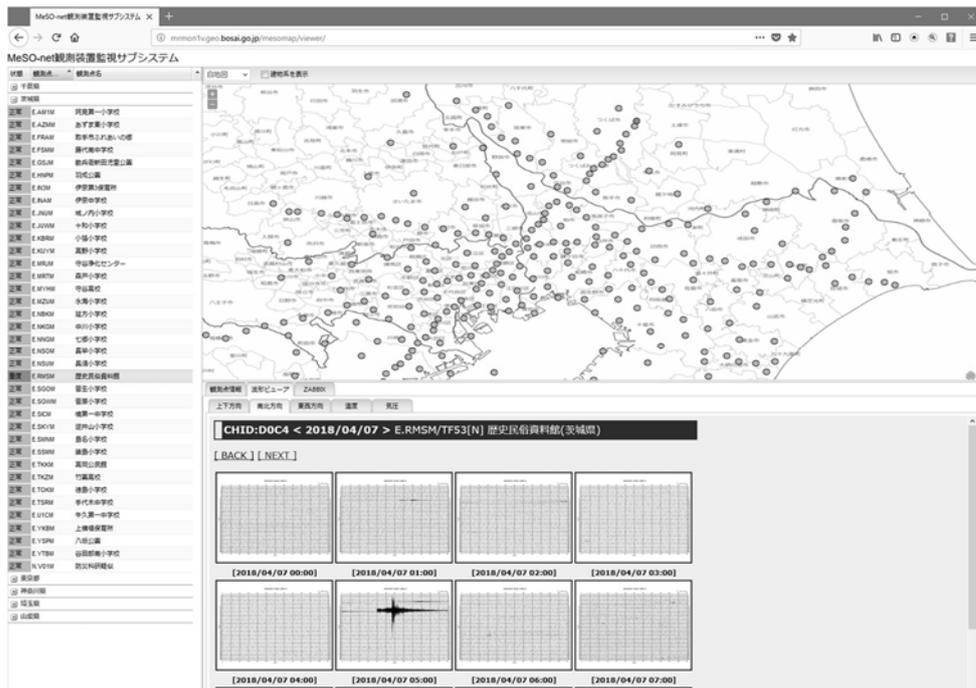


図2 MeSO-net 観測管理システム (RMSM 観測点) の例

3) MeSO-net データの蓄積

MeSO-net データの受信システムは、データを受信し一時的に蓄積する短期集約システムと、その後確実にデータを蓄積する長期集約システムから構成される。短期集約システムでは、受信した地震データパケットを WIN フォーマットで保存するとともに、(2)a「マルチデータインテグレーションシステムに関する技術開発」で開発を進めているデータ前処理システムや東大地震研へリアルタイムで転送する。また、通信回線事情等により遅延して受信するデータパケットの補完も行う。記憶容量の大きな長期集約システムでは、その後の他観測網データとの統合解析等を効率よく実施できるよう、WIN32 フォーマットで蓄積している。

4) 疑似観測点の構築と試験機観測

観測機器の状態をリモートで監視することは非常に有用であるが、より正確に把握するためにはオンサイトでの確認が必要である。そのため、防災科研内に MeSO-net の疑似観測点を構築し、機器の状態を簡便に把握できる環境を整備した。特に、今年度は観測点側の送信装置の送信先を変更する受信部変更作業があり、切り替え手法の検討に活用した。

5) MeSO-net 観測点の維持管理

2017年度に実施した維持管理作業は、通信回線対応が19件、観測点における地上機器の保守作業が29件、地中機器の故障修理作業が1件であった。特筆することとしては、KH2M観測点における無線LAN機器の交換作業が挙げられる(図3)。KH2M観測点はISDN回線を引き込むことは出来ず、無線LANによって隣接のFTP観測



点へデータが伝送されそこから受信システムへと転送されている。この無線LAN機器の障害によりデータ収集が出来なくなったため交換を実施した。2017年度末現在、保守作業が必要な観測点は複数存在し、2018年度以降に対応を検討する。

図3 特殊観測点の維持管理作業風景

6) MeSO-net 観測点の移設および一時撤去

2017年度の観測点移設および一時撤去は以下の通りである。

・KKSM 観測点

駒木青年館観測点では道路拡幅工事等に伴い、東大地震研が2017年3月に観測機器を一時撤去した。2017年10月に工事が終了したため、同じ場所へ再設置し観測を再開した。

・SKMM 観測点

阪本小学校観測点は地上筐体が小学校の校舎脇に、地中機器が運動場脇の道路に設置されている。校舎の改築工事に伴い2017年6月に観測機器を撤去した。移設先を検討中である。

・SKPM 観測点

潮風公園観測点は公園内の管理事務所脇に設置されている。管理事務所およびその周辺の整備工事のため、地上筐体は1m程度の移設を実施した。

(c) 結論ならびに今後の課題

首都圏地震観測網(MeSO-net)の運用引継ぎに伴い、データ受信システムの切り替え、通信回線およびデータ管理システムの構築、疑似観測点の整備、観測点設置機器の保守、および移設作業等を実施した。これにより、防災科研がMeSO-netを引き続き安定的に運用することが可能となった。一方で、MeSO-netは運用開始から10年以上が

経過しており、老朽化による故障率の上昇が見込まれ、故障状況を早期に把握し、事後の対策を検討する必要がある。また、ISDN回線の新規申し込み受付終了等も懸念され、別サービスの利用を検討する必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 文部科学省研究開発局 東京大学地震研究所：首都圏でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等，首都直下地震防災・減災特別プロジェクト H21 年成果報告書，pp.10-34，2008.

(e) 学会等発表実績

1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30年度業務計画案

平成29年度に引き続き MeSO-net データの安定収集を目的とした運用を実施する。

3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備

3.2.2 マルチデータインテグレーションシステム開発の検討

3.2.2.1 マルチデータインテグレーションシステムに関する技術開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏地震観測網（MeSO-net）から収集する高密度な地震観測データに加えて、基盤的地震観測網および民間企業等により設置された計測機器から得られる大量かつ様々な品質の地震データを有機的に統合するマルチデータインテグレーションシステムを開発する。さらに、このシステムにより、大地震発生直後の首都圏における揺れの様子を超高解像度で把握可能にするとともに、その情報を配信するための技術開発を行う。

(b) 平成29年度業務目的

首都圏における多種多様な地震観測データを、有機的に統合し利用可能とするマルチデータインテグレーションシステムの開発に向け、MeSO-net による高密度地震観測データとこれまで防災科研が運用してきた基盤的地震観測網による強震観測データを受信し統合管理するシステムの開発に着手する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	木村 武志
防災科学技術研究所地震津波防災研究部門	主任研究員	木村 尚紀
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	功刀 卓
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	汐見 勝彦
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	鈴木 亘
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	中村 洋光
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	松澤 孝紀
防災科学技術研究所地震津波火山ネットワークセンター	主任研究員	松原 誠

(2) 平成29年度の成果

(a) 業務の要約

平成29年度は、5年間で開発を進めていくマルチデータインテグレーションシステムのうち、特にMeSO-netデータの受信・前処理・統合管理サブシステムの構築に着手した。また、K-NET/KiK-netデータにMeSO-netデータを加えた首都圏版強震モニタを試作し、東京ガス株式会社によるSUPREMEの地震波形データの解析に着手した。

(b) 業務の成果

1) MeSO-net データに対するデータ前処理サブシステムの構築

大地震発生直後に首都圏における地震動の様子を高解像度で把握するためには、これまで防災科研が運用してきた K-NET・KiK-net のデータと MeSO-net のデータを合わせて活用することが効果的である。これまで防災科研が K-NET・KiK-net のデータを対象に開発してきたリアルタイム震度（功刀・他，2013）や最大加速度、速度応答スペクトル等の各種リアルタイム演算技術を、1)「MeSO-net データ受信システム構築と移行」で新たに構築した受信システムで収集される MeSO-net データに対して適用するプロトタイプシステムを構築した。図 1 に各種指標の分布例を示す。

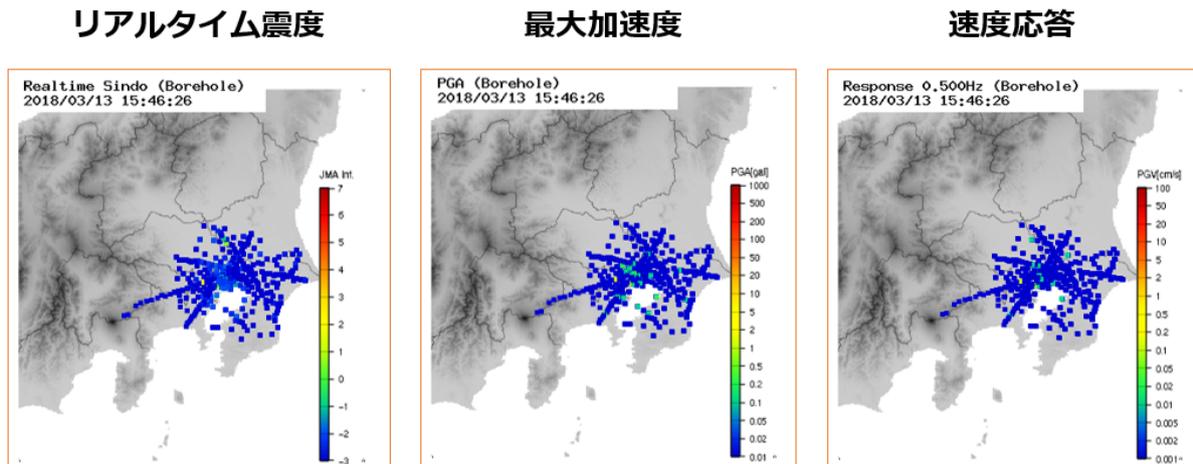


図 1 MeSO-net データを用いた各種指標の分布例

2) MeSO-net データに対する統合データ管理サブシステムの構築

首都圏における揺れの様子を高解像度で把握する上で、MeSO-net は最も重要な観測網の 1 つである。約 300 点からなる MeSO-net の各観測点の観測機器の異常や観測データの異常を的確に検知し、各種データ解析に反映させる必要がある。(1)「官民連携超高密度データ収集」と連携して異常を効果的に監視するためのプロトタイプシステムを構築した。

3) MeSO-net データを用いた配信サブシステムの構築

首都圏における揺れの様子を高解像度で把握するために、K-NET・KiK-net データを用いた従来の強震モニタ（全国版・九州版）に、MeSO-net データを加えて首都圏にフォーカスした首都圏版強震モニタを試作した。K-NET・KiK-net データに MeSO-net データを加えたことで、首都圏における揺れの伝播の様子が従来よりも詳細に可視化できるようになった（図 2）。

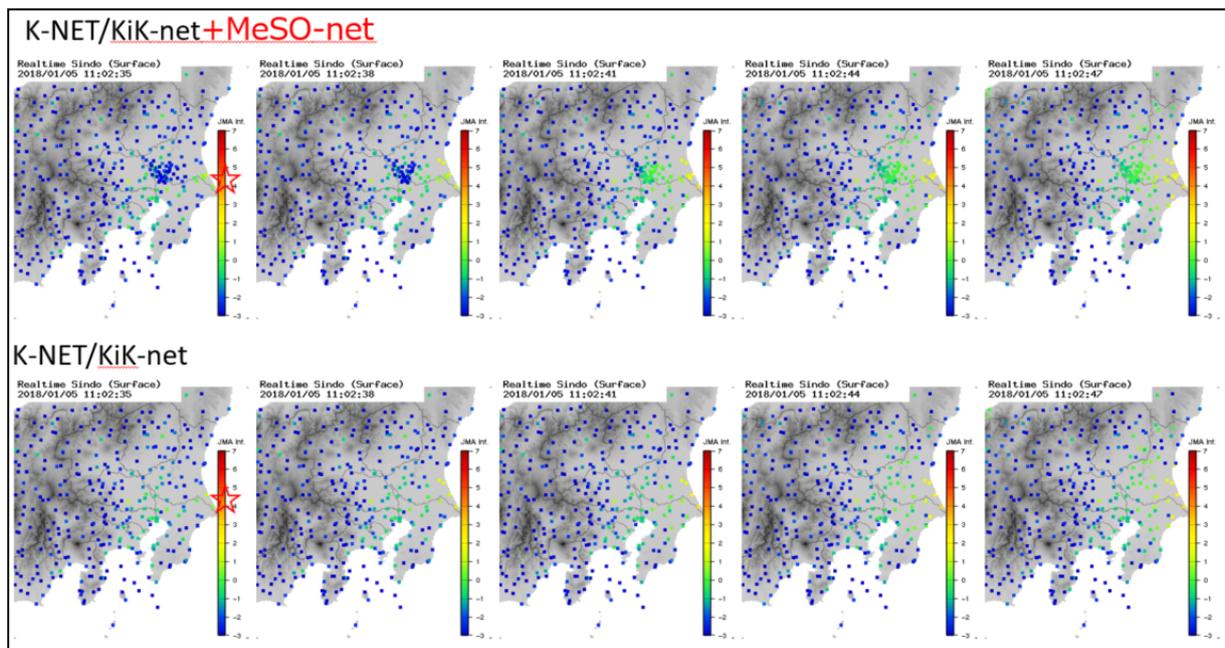


図2 首都圏版強震モニタの試作例。2018年1月5日11時02分茨城県沖の地震（Mj4.4）によるリアルタイム震度のスナップショット。上段はK-NET・KiK-netにMeSO-netのデータを加えたもの。下段はK-NET・KiK-netのみのデータによるもの。

4) 東京ガス株式会社 SUPREME による地震波形データの予備解析

東京ガス株式会社より提供いただいた超高密度リアルタイム地震防災システム（SUPREME）（清水・他，2001）による地震波形データのうち、2011年東北地方太平洋沖地震時の記録（3161観測点）から計測震度を算出し、K-NET・KiK-net・MeSO-netの値と比較した（図3）。両者の傾向はおおよそ一致しており、今後マルチデータインテグレーションシステムの開発に活用していく予定である。

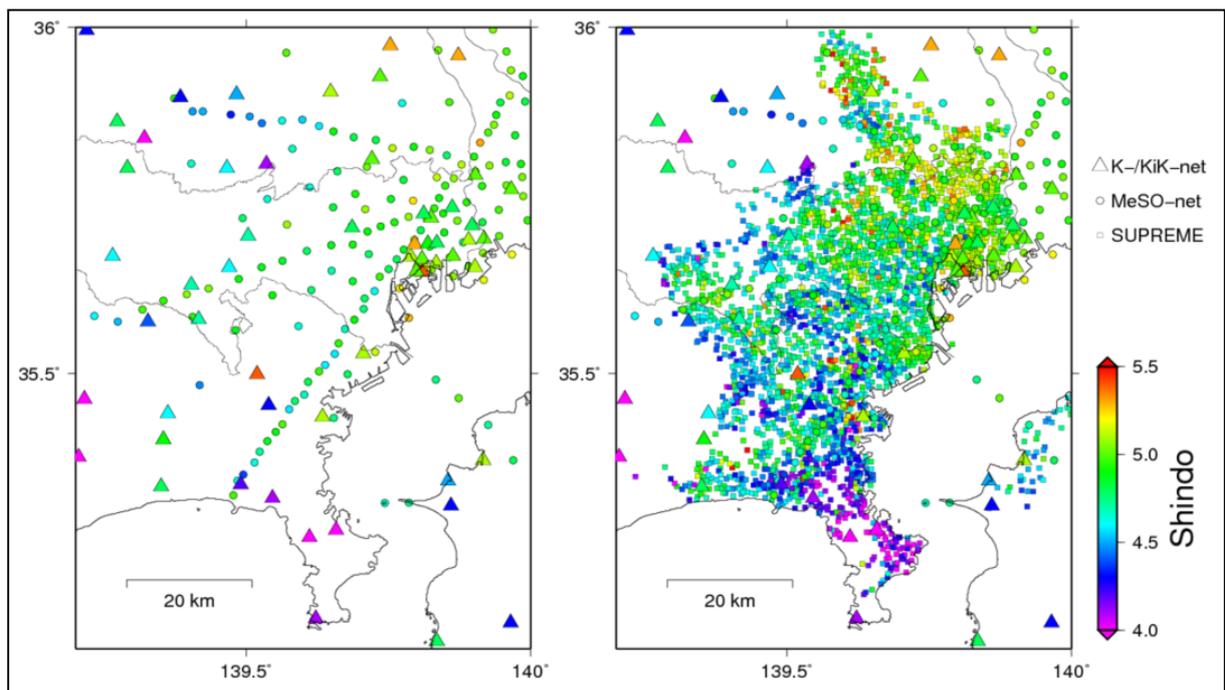


図3 2011年東北地方地平用沖地震時の計測震度分布。左図はK-NET・KiK-netとMeSO-netによるもの、右図はそれにSUPREMEによる値を加えたもの。

(c) 結論ならびに今後の課題

新たに防災科研で収集を開始した MeSO-net データに対するデータ前処理・統合管理サブシステムの構築に着手し、リアルタイム震度等の地震動指標演算アルゴリズムを MeSO-net データに適用し、MeSO-net の観測機器やデータの状態を監視するためのシステムを構築した。得られた MeSO-net の地震動指標と K-NET・KiK-net の指標を合わせて首都圏版の強震モニタを試験的に作成した。また、東京ガス株式会社による SUPREME の地震波形データを用いて 2011 年東北地方太平洋沖地震時の計測震度を計算し、MeSO-net や K-NET・KiK-net とおおよそ同様の傾向があることを確認した。

今後、首都圏における地震動を高解像度かつ高精度で捉えるために、地下 20m に地震計が設置されている MeSO-net データから地表の揺れを高精度で予測する必要がある。また、東京ガス株式会社の SUPREME のデータのように、各民間企業がそれぞれの目的のために保有しているデータは、K-NET・KiK-net や MeSO-net に比べて汎用性は高くなく、今後両者を合わせて利用していくためには、データの時刻や地震計の設置方位の補正等を検討する必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 功刀卓・青井真・中村洋光・鈴木亘・森川信之・藤原広之：震度のリアルタイム演算に用いられる近似フィルタの改良，地震 2，65，223-230，2013.
- 2) 清水義久・小金丸健一・中山渉・山崎文雄：超高密度地震防災システム (SUPREME) の開発．第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，1285-1288，2001.

(e) 学会等発表実績

1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30年度業務計画案

MeSO-net による高密度地震観測データと基盤的地震観測網による強震観測データを受信し統合管理するシステムを開発する。サブプロ(b)の(2) b「MeSO-net 観測点における地表地震記録の推定」と連携し、MeSO-net による地中観測データから地表の揺れを予測するアルゴリズムの実装に着手する。また、東京ガスの SUPREME 等のデータを効果的に活用するために、時刻や方位等の補正手法の開発に着手する。

3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備

3.2.2 マルチデータインテグレーションシステム開発の検討

3.2.2.2 MeSO-net 観測点における地表地震記録の推定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

MeSO-net の地中設置型地震計のデータから地表の揺れの様子を高精度に予測するために、各観測点での微動観測や地表における臨時観測を行うことにより、地盤増幅特性の評価や地盤の S 波速度構造の推定を行う。

(b) 平成 29 年度業務目的

MeSO-net 地震計と同じセンサー特性を持つ 3 成分地震計兼微動観測機器を購入し、MeSO-net 観測点において微動アレイ観測および解析を実施する。また地表地震計として一定期間臨時観測を行うための設置位置・手法の検討、資材調達および地震観測を MeSO-net 観測点で実施する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
防災科学技術研究所社会防災システム研究部門	主幹研究員	先名 重樹

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・MeSO-net 地震計と同じセンサー特性を持つ 3 成分地震計兼微動観測機器を購入し、各 MeSO-net 観測点において微動アレイ観測および解析を実施した。
- ・MeSO-net 観測点において、地表地震計として一定期間臨時観測を実施するための設置位置・手法の検討および資材調達を行い、一定期間臨時観測を実施することで地震記録を取得し、地中・地表の増幅特性を検討した。

(b) 業務の成果

1) MeSO-net 観測点における微動アレイ観測および解析

a) 微動アレイ観測

MeSO-net 地震計と同じセンサー特性を持つ 3 成分地震計兼微動観測機器 (JU410) を購入した。それらを用いて、対象となる MeSO-net 観測点 293 地点のうち茨城県内 36 地点および千葉県内 70 地点の計 106 地点について微動アレイ観測を実施した (図 1)。図 2 に示すように、アレイ半径 60cm の 4 点極小アレイと 1 辺 5~10m 程度の 3 点不規則アレイを展開し、同時に 15 分間程度の観測を行った。データ収録時のサンプリング周波数は 200Hz、レンジは±0.1G とした。



図 1 H.29 年度の地表地震観測地点（桃色△）および微動観測地点（桃色△と桃色○）

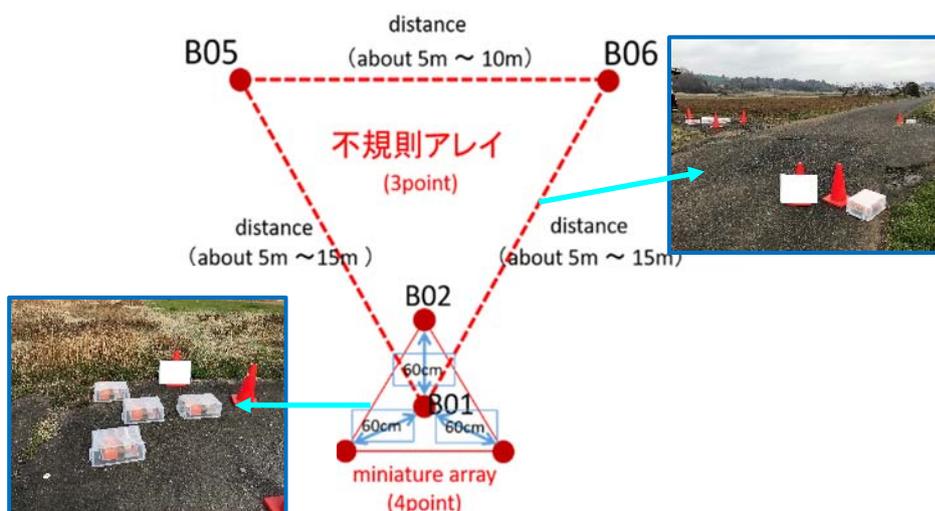


図 2 微動アレイ観測（極小・不規則アレイ）における微動計設置方法

b) 観測結果の解析

微動アレイ観測結果に対し、SPAC 法 1)および CCA 法 2)を用いて位相速度解析を実施した。その上で、AVS30 等の増幅特性の抽出(C40)3)、分散曲線の直接深度変換法 (SPM)4)、簡易逆解析(SIM)等の逆解析手法 5),6)を用いて S 波速度構造等の地盤物性値を推定した。図 3 に解析結果例を示す。比較的固いローム台地と軟弱な後背湿地の特徴の違いが明確になっている。

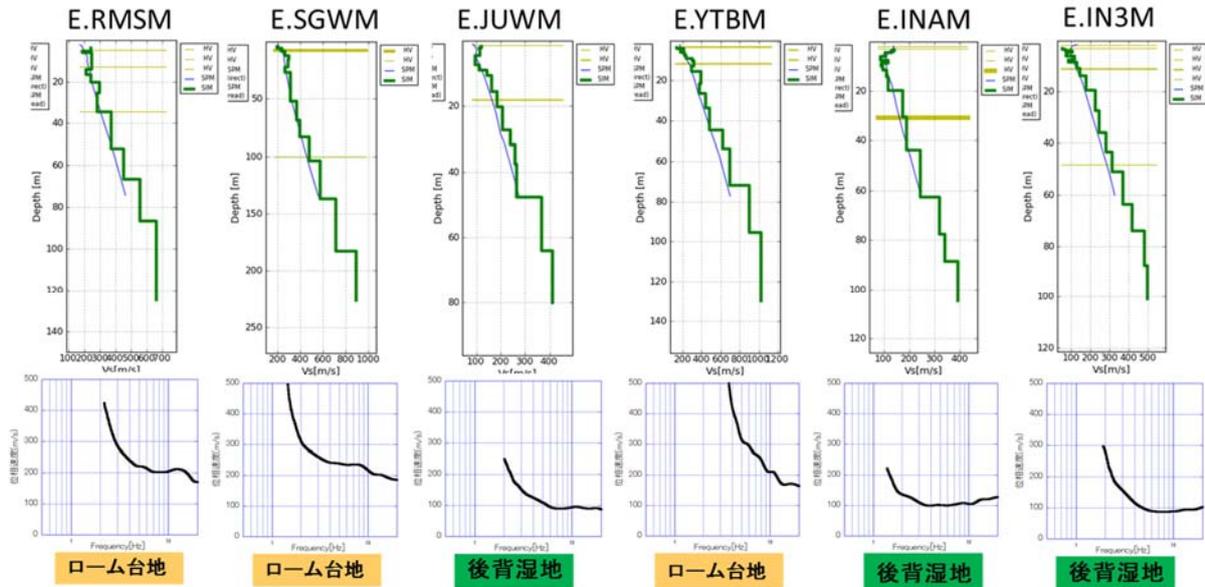


図3 微動観測記録の解析結果例（H.29年度第1期地表地震観測地点）
（上：S波速度構造，下：分散曲線）

2) MeSO-net 観測点における地表地震観測および増幅特性の推定

a) 地表地震観測

地表地震観測は、対象となる MeSO-net 観測点 293 地点のうち茨城県内の 18 地点について実施した（図 1）。観測期間は 1 地点あたり 2～3 ヶ月とし、1 期で 6 地点ずつ観測し、計 3 期実施した（表 1 および表 2）。図 4 に地震観測装置設置例を示す。対象観測点ごとに地震計(JU310)1 台およびバッテリー 4 台を使用した。地震計は固定板および防水容器に、バッテリーは 2 台ずつ防水容器に格納し、防水処理された電源ケーブルで接続した。それら全体をブルーシートで養生しロープで固定した。これを観測井近傍に設置してポールとチェーンで囲った。また、データ収録時のサンプリング周波数を 200Hz、レンジを±1.0G とした。

b) 地表地震記録の取得および地中～地表における増幅特性の推定

第 1 期の各地震観測地点（表 2）において地表および地中で記録が得られた地震の諸元を表 3 に、地震波形の一例を図 5 に示す。また、第 1 期の各地震観測地点における地中～地表の増幅特性を図 6 に示す。増幅特性は各観測地点における地中および地表で得られた地震波形からフーリエスペクトルを成分ごとに計算し、0.1～10Hz のバンドパスフィルターをかけ、対数ウィンドウ（バンド幅 0.05Hz）で平滑化した上で、地中に対する地表の比をとった。図 6 では比較的固いローム台地と軟弱な後背湿地の増幅特性の特徴の違いが明瞭となっている。

表 1 H.29 年度地表地震観測実施時期

第1期	2017/07/27～2017/10/16
第2期	2017/10/17～2018/01/10
第3期	2018/01/15～2018/03/26

表 2 H.29 年度地表地震観測地点一覧（18 地点）

観測点番号	観測点コード	観測点名称	微地形区分	都道府県	自治体	観測時期
TF53	E. RMSM	つくば市桜歴史民俗資料館	ローム台地	茨城県	つくば市	第1期
W157	E. SGWM	菅原小学校	ローム台地	茨城県	常総市	第1期
W183	E. JUWM	十和小学校	後背湿地	茨城県	つくばみらい市	第1期
TF48	E. YTBM	谷田部南小学校	ローム台地	茨城県	つくば市	第1期
TF44	E. INAM	伊奈中学校	自然堤防/後背湿地	茨城県	つくばみらい市	第1期
TF43	E. IN3M	ふれあい第1保育園	自然堤防	茨城県	つくばみらい市	第1期
FK05	E. MZUM	水海小学校	ローム台地	茨城県	古河市	第2期
FK08	E. MRTM	森戸小学校	ローム台地	茨城県	猿島郡境町	第2期
FK11	E. NKG M	中川小学校	ローム台地	茨城県	坂東市	第2期
W221	E. SKYM	逆井山小学校	ローム台地	茨城県	坂東市	第2期
W182	E. FSMM	藤代南中学校	後背湿地/自然堤防	茨城県	取手市	第2期
FK15	E. MRJM	守谷浄化センター	後背湿地/自然堤防	茨城県	守谷市	第2期
DD44	E. TOKM	徳島小学校	河岸低地/干拓地	茨城県	潮来市	第3期
W215	E. JNUM	城ノ内小学校	谷底低地	茨城県	龍ヶ崎市	第3期
W217	E. AM1M	阿見第一小学校	谷底低地	茨城県	稲敷郡阿見町	第3期
W245	E. NSOM	長竿小学校	河岸低地/自然堤防	茨城県	稲敷郡河内町	第3期
YN20	E. AZMM	あずま東小学校	河岸低地	茨城県	稲敷市	第3期
YN22	E. NBKM	延方小学校	砂州	茨城県	潮来市	第3期

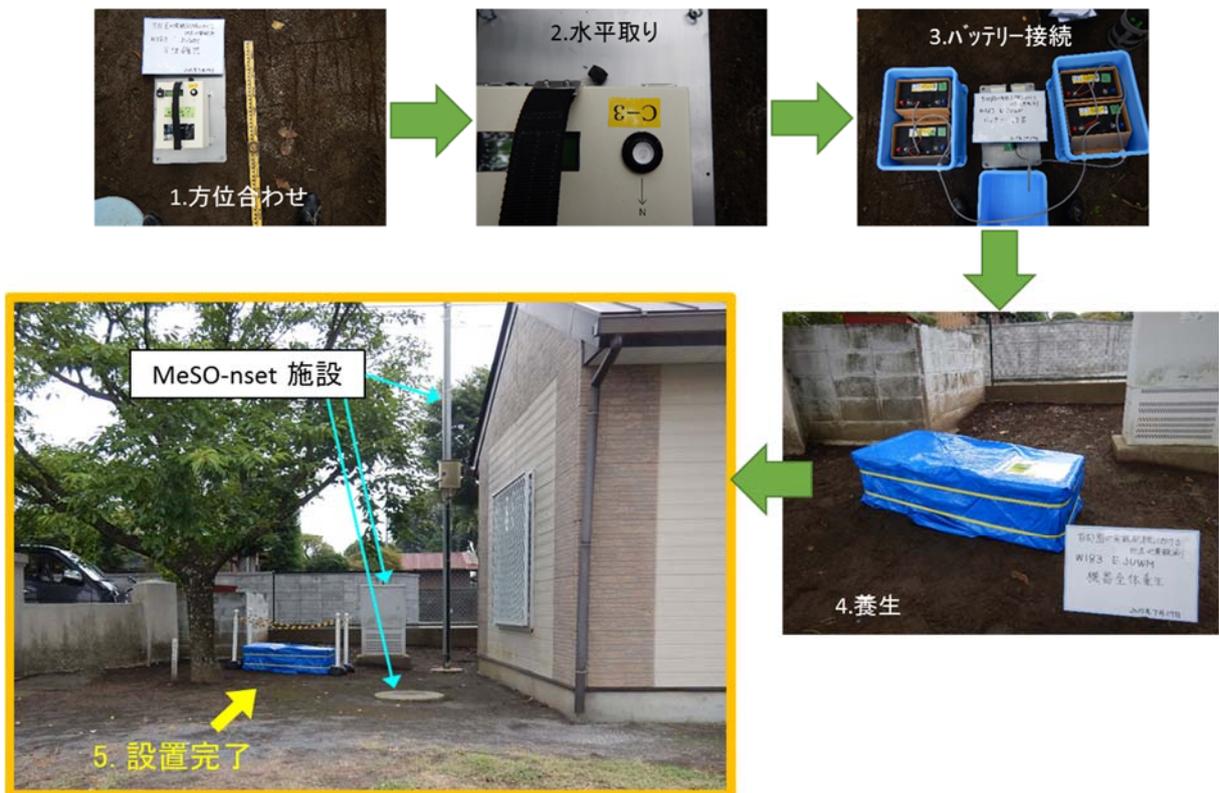


図 4 地表地震観測装置設置状況例（E.YTBM；十和小学校）

表 3 H.29 年度第 1 期地震観測地点の地表および地中地震計で記録された地震の諸元

origin time	Lat. (deg.)	Lon. (deg.)	depth(km)	Mj	epicenter name
20170802 02:02:07.5	36.803	140.535	9	5.5	north of Ibaraki
20170802 07:15:56.8	36.12	140.022	48	4.6	south of Ibaraki
20170803 13:45:04.4	36.078	139.885	46	4.6	south of Ibaraki
20170810 09:36:31.1	35.797	140.09	64	5	northeast of Chiba
20170827 11:26:04.5	36.747	140.575	11	4.8	north of Ibaraki
20171003 04:01:10.9	36.808	140.537	8	4.2	north of Ibaraki
20171006 23:56:40.7	37.087	141.155	53	5.9	off Fukushima

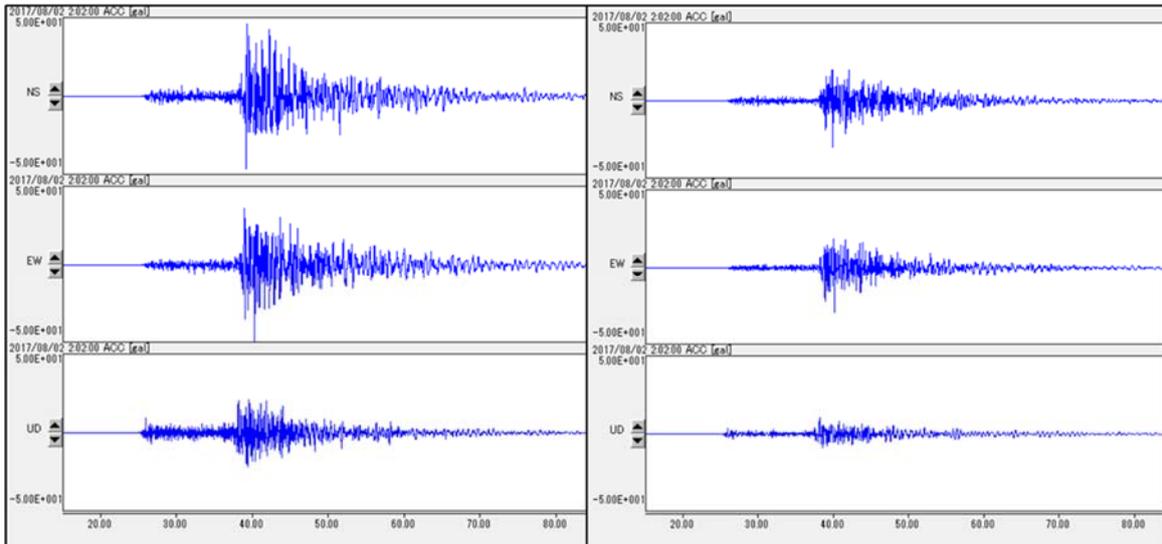


図 5 取得された地震波形例 (E.INAM; 伊奈中学校, 左; 地表, 右; 地中, 上段; NS 成分, 中段; EW 成分, 下段; UD 成分)

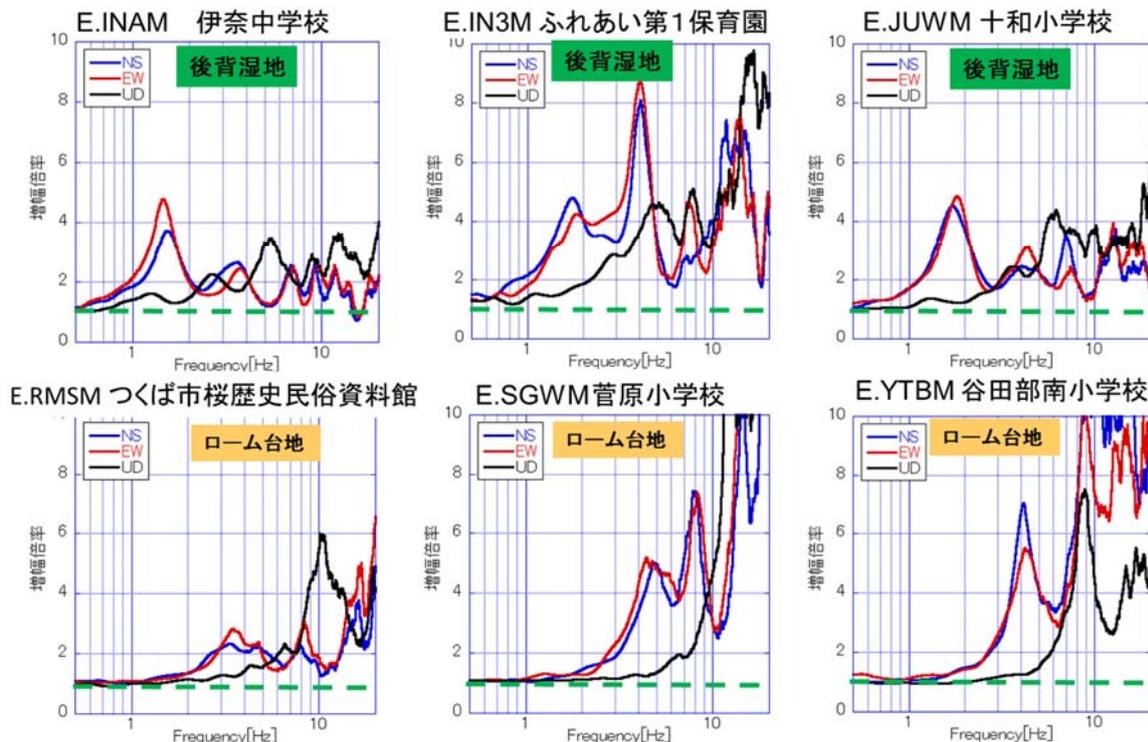


図 6 H.29 年度第 1 期地震観測地点における地中～地表の増幅特性 (青実線; NS 成分, 赤実線; EW 成分, 黒実線; UD 成分, 緑破線; 増幅倍率 1 倍)

(c) 結論ならびに今後の課題

MeSO-net 地震計と同じセンサ特性を持つ 3 成分地震計兼微動観測機器を購入し、各 MeSO-net 観測点において微動アレイ観測および解析を実施した。また、地表地震計として一定期間臨時観測を実施するための設置位置・手法の検討および資材調達を行い、一定期間臨時観測を実施することで地震記録を取得し、地中～地表の増幅特性を推定した。

地表地震観測については、来年度以降、年間の観測地点数を増やすために準備・設置・撤去に要するコストを減らす必要がある。解決策の一つとして、電源供給元としてバッテリーではなく MeSO-net 引込柱の分電盤を利用することが想定される。

(d) 引用文献

- 1) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earth. Res. Inst. Univ. Tokyo, **35**, 415-457, 1957.
- 2) Cho, I., S. Senna, and H. Fujiwara: Miniature array analysis of microtremors, Geophysics, **78**, KS13-KS23, doi:10.1190/geo2012-0248.1, 2013.
- 3) 紺野克昭・片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案，土木学会論文集，**647/I-51**, 415-423, 2000.
- 4) Satoh, T., C. J. Poran, K. Yamagata, and J. A. Rodriguez: Soil profiling by spectral analysis of surface waves, in Proc. 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, vol. 2, pp.1429-1434, 1991.
- 5) Pelekis, P. C., and G. A. Athanasopoulos: An overview of surface wave methods and a reliability study of a simplified inversion technique, Soil Dyn. Earthquake Eng., **31**, 1654-1668, 2011.
- 6) Arai, H., and K. Tokimatsu: S-Wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V Spectrum, Bull. Seismol. Soc. Am., **94**, 53-63, 2004.

(e) 学会等発表実績

- 1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

- 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

- 3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30年度業務計画案

平成29年度に続き、MeSO-net地震計と同じセンサ特性を持つ3成分地震計兼微動観測機器を購入し、MeSO-net観測点において微動アレイ観測および解析を実施する。また、地表地震計として一定期間臨時観測を行うための資材調達および地震観測をMeSO-net観測点で実施する。なお、サブプロ(b)の(2)a「マルチデータインテグレーションシステムに関する技術開発」と連携し、MeSO-netによる地中観測データから地表の揺れを予測するアルゴリズムを開発する。

3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備

3.2.2 マルチデータインテグレーションシステム開発の検討

3.2.2.3 スマートフォンによる揺れ観測技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

「官民連携による超高密度地震観測データの収集・整備」において首都圏におけるより稠密な地震観測データの収集を可能にするために、スマートフォンを用いた揺れの観測技術の開発を行う。

(b) 平成29年度業務目的

首都圏の住宅・企業等を対象にモニター募集を行い、スマートフォン地震計インストール済み端末を設置する。モニターと連携しながら観測技術を高度化していくための運用体制を構築するとともに、API 等によるデータ配信技術の開発に着手する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
防災科学技術研究所社会防災システム研究部門	研究員	東 宏樹

(2) 平成29年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 首都圏の住宅・企業等を対象に一般モニター募集を開始し、スマートフォン地震計端末を設置した。
- 2) モニターからの問い合わせ対応を行った。
- 3) API 等によるデータ配信技術の開発の検討を行った。
- 4) 市販治具を用いた加振実験を実施した。

(b) 業務の成果

1) 首都圏の住宅・企業等を対象とした一般モニター募集ならびに設置

モニター募集ウェブサイト（図1）を作成して首都圏の住宅・企業等を対象にモニター募集を行い、スマートフォン地震計アプリインストール済み端末を設置した。

a) モニター募集ウェブサイトの開発

観測協力者が本プロジェクトの目的等を理解して、手軽に応募できるようにエントランス・ウェブサイトを開発した。ウェブの URL は次のとおりである。

<https://www.jishincheck.com>

b) 観測参加者の募集・端末配布・設置

上記サイトより応募があった観測参加者に対して準備済みの端末を送付した。ユーザはスマートフォン地震計を受け取った後、設置マニュアルにしたがってスマートフォンを壁または床に固定した。固定には同梱されている両面テープを利用した。



図1 モニター募集ウェブサイト

2) モニターからの問い合わせ対応

モニターと連携しながら観測技術を高度化していくための運用体制構築の一環として、モニターからの問い合わせ対応を行った（3件）。

a) 2階のみでの観測から被害推定を行うことについて、技術的質問を受けた。これについ

て、メールで回答した。

- b) 登録メールの送付について質問を受けた。これについて、メールで回答した。
- c) バッテリーの心配等について質問を受けた。これについて、メールで回答した。

3) API 等によるデータ配信技術の開発の検討

地震計測アプリの建物設置に関する現状と課題を踏まえ、サブプロ(b)内におけるデータ統合に向けた API 連携の方法について検討を行った。

4) 市販治具を用いた加振実験

市販治具の利用した加振実験（図 2）を行った。

a) 市販治具および設置面の違いによる加振実験

スマートフォン設置治具として「充電ホルダー」として市販されている製品から 3 種類（いわゆるクレードル型を含む）と壁に据え付けられるホルダー 1 種類、そして接着ゴム（繰り返し利用可能）の合計 5 種類の設置治具を選んで、振動実験を実施した（図 2）。また、普通の住環境で使用されると思われる床材と壁紙の上からスマートフォンを設置し、将来の解析のために接地面の違いによる計測への影響データを収集した。



図 2 市販治具（試作版）加振実験の様子

b) 加振実験の結果

実地震の水平方向の 50%以上の振動においては、市販のホルダーにスマートフォンを置くだけでは、スマートフォンのズレやホルダーからの落下、あるいはホルダー自身の転倒などのため、計測に適さない結果となった。特定の形状のホルダーでは他のホルダーより若干良い結果となったが、実地震では不相当であった。

そこで、今後はスマートフォン地震計で計測しやすい、すなわちスマホをセットしやすく、また取り出しやすい、なおかつ地震の際不要な振動（設置治具による地震動以外の振動）の無いような治具で固定することが望まれる。

(c) 結論ならびに今後の課題

1) スマホ地震計の展開に関する結論と課題

観測は 2018 年 2 月 24 日より本格的に実施し、2018 年 3 月 28 日現在、ユーザ登録数は 43 人で、地震観測点数は 22 である。配布数に対して少なくとも 50%以上の稼働率を目標とした。初年度末の稼働率はこれをクリアしてはいるが、150 端末にはほど遠く、次年度以降何らかの方策が必要である。ただし、1 ヶ月半程度の極短い期間しかなかったことを考えると、今後毎月 20~25 台程度のユーザ獲得目標は達成できると考える。その上で稼働率を上げる工夫が必要である。

表 1 稼働数の推移

日付	稼働台数 (率%)
2018/2/23	0
2018/2/24	2 (11)
2018/3/26	8 (44)
2018/3/27	10 (56)
2018/3/13	10 (48)
2018/3/19	11 (52)
2018/3/20	11 (46)
2018/3/23	18 (50)
2018/3/26	21 (58)
2018/3/28	22 (51)

2) 治具加振実験に関する結論と課題

現在行われている両面テープによるスマートフォンの壁や床への直付けは、取り外し時に壁表面を損傷する可能性（および実例も）があるため、設置方法としては誰にでも推奨できるものではなく、あくまで妥協案である。今年度行った加振実験の結果も踏まえると、今後治具の開発は必須と考えられる。

(d) 引用文献

- 1) 藤原広行・東宏樹・内藤昌平・先名重樹・中村洋光・はお憲生・吉田稔・結城昇・平山

義治：センサークラウド技術を用いた建物の地震応答情報共有システム，日本地震工学会論文集，第13巻，第5号，44-61，2013.

(e) 学会等発表実績

1) 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
地震計測アプリの建物設置に関する現状と課題（口頭）	東 宏樹	第36回 日本自然災害学会学術講演会（アオーレ長岡、新潟県長岡市）	2017年9月	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30年度業務計画案

前年度に引き続きモニターを募集し、スマートフォン地震計を設置する。サーバの安定化対応を行うとともに、API 等による配信システムのプロトタイプ開発を行う。具体的には、応募者を増加させつつ稼働率を現在の 50%程度から 60%程度に向上する。応募者の飛躍的増加にはメディアへの露出を上げることが一番効果的であると考え。初年度は、システムや対応体制の立ち上げ直後であるため、緩やかな増加が望まれたが、今年度以降は、応募者の増加を図るため、各方面に宣伝、周知を図られるべきである。治具に関しては、H29 年度では市販治具を用いた加振実験を行ったが、H30 年度では実際に独自のプロトタイプ治具を開発する。

3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備

3.2.2 マルチデータインテグレーションシステム開発の検討

3.2.2.4 MeSO-net 観測点～サテライト観測点群間の揺れデータ伝送技術の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

株式会社東芝が実施する本委託業務では、国立研究開発法人防災科学技術研究所（以下「防災科研」という。）が維持し、運用の安定化・高度化を目指す MeSO-net から収集する高密度な地震観測データに加えて、基盤的地震観測網（K-NET、Hi-net 等）および民間企業等により設置された計測機器から得られる大量かつ様々な品質の地震データを有機的に統合するマルチデータインテグレーションシステムを、防災科研と連携して開発する。具体的には、「MeSO-net 観測点～サテライト観測点群間の揺れデータ伝送技術の開発」として、東京理科大学の技術助言を受けつつ、MeSO-net の各観測点をハブとするサテライト観測を実施するためのデータ伝送技術を開発し、その有効性を検証する。

(b) 平成 29 年度業務目的

サテライト観測点における揺れデータの伝送に必要な地震時のトリガ機能やデータの無線伝送機能・省電力機能等について検討し、揺れデータ伝送無線機を試作する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
株式会社東芝 研究開発センターネットワークシステムラボラトリー	主任研究員	佐方 連

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・サテライト観測点における揺れデータの伝送に必要な地震時のトリガ機能について検討した。
- ・サテライト観測点における揺れデータの無線伝送機能について検討した。
- ・サテライト観測点における省電力機能等について検討した。
- ・揺れデータ伝送無線機を試作した。

(b) 業務の成果

1) サテライト観測点における揺れデータの伝送に必要な地震時のトリガ機能

a) センサ候補の選定

これまで、加速度の測定と無線収集のために、MEMS センサを搭載した無線加速度センサ装置を試作してきた。この装置には、TDK 社製センサである MPU-9250¹⁾（以下、センサ A と呼ぶ）を搭載してきた。このセンサ A は直交する 3 軸の加速度に加え、3 軸の角速度及び 3 軸の磁気を測定可能な 9 軸のセンサである。全センサ動作時の電流の典

型値が $9.3\mu\text{A}$ と小さく、サイズが $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ と小さいことも特徴である。

また、2017年8月に、東京理科大学理工学部土木工学科の佐伯昌之教授を訪問し、防災や減災のためのセンシングシステムに用いられている試作装置について伺った。佐伯教授の試作装置でも加速度を測定できる MEMS センサを採用していることを伺った。

以上より、小型、安価で消費電力が低く、簡便に取り扱える MEMS センサの中から、サテライト観測点における揺れデータの測定のためのセンサの候補を選定し、地震の測定において有効にトリガ機能が働くかどうかを机上検討することとした。

まず、MEMS センサの候補を選定した。今回は入手性や省電力性などの観点から、上記のセンサ A と、STMicroelectronics 社製の LIS3DSH²⁾ (以下、センサ B と呼ぶ) を候補として挙げた。双方の主な仕様を表 1 に示す。

表 1 2 種類の MEMS センサの比較

	センサ A ¹⁾	センサ B ²⁾
測定可能項目	加速度、角速度、磁気	加速度
加速度の測定軸数	3	3
加速度測定時のダイナミックレンジ	$\pm 2\text{g}/\pm 4\text{g}/\pm 8\text{g}/\pm 16\text{g}$ (可変)	$\pm 2\text{g}/\pm 4\text{g}/\pm 6\text{g}/\pm 8\text{g}/\pm 16\text{g}$ (可変)
加速度測定時のビット幅	16 ビット	16 ビット
加速度測定時の雑音スペクトル密度	$300\ \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	$150\ \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
加速度測定時のサンプリングレート	4 Hz ~ 4 kHz	3.125 Hz ~ 1.6 kHz
加速度測定時の電流値の例	$450\ \mu\text{A}$ (4kHz サンプリング時)	$225\ \mu\text{A}$ (1.6kHz サンプリング時)
待機状態の電流値	$8\ \mu\text{A}$	$2\ \mu\text{A}$
待機状態において、一定の加速度を検知した場合に外部へトリガをかける機能	あり (wake-on-motion) 機能	あり (motion-detection) 機能

b) センサ候補の吟味

表 1 より、センサ A は加速度に加え角速度や磁気も測定できる分だけセンサ B よりも高機能であることが分かる。

一方で加速度測定時の雑音量はセンサ A の方が大きい。この雑音量の影響は、次年度以降の研究において検討する。

測定及び待機時の電流値もセンサ A の方が大きい。しかし、無線機の動作の際に約 40mA 程度の電流が流れることと比較すると、センサの消費電流は無視できるほどに小さい。従って実際は、無線機の低消費電力化の方が重要である。ただし、センサ A や B の動作時の電流である $450\ \mu\text{A}$ や $225\ \mu\text{A}$ が常に流れ続けたとすると、単三電池 2 本程度であれば 1 年もたたずに電池が切れる恐れがある。従って、地震による揺れが無いと

みなせる時間帯には、センサを待機状態へと遷移させることも必要である。

加速度の測定はいずれも $\pm 2g \sim \pm 16g$ の間で可変であり、測定値のビット幅は16ビットにつき、解像度も同一である。東北地方太平洋沖地震では最大で1軸あたり960mg以上の加速度が観測されている⁴⁾。センサのダイナミックレンジは $\pm 2g$ 以上あるため、不足は無いと考える。また、例えば震度2のときの加速度は、均一な周期の振動が数秒間継続した場合には、最小でも1mg以上である³⁾。 $\pm 2g$ を16ビットで観測した場合の解像度は $61 \mu g$ 以上であるため、こちらも現段階では不足は無いと考える。より詳細な是非は、来年度以降に試作機などを用いながら確認する。

センサA及びBの双方とも、待機状態において一定以上の加速度を検出した場合に、外部にそれを通知する機能を有している。例えば通常は待機状態として消費電力を下げおきつつ、1mg以上、すなわち震度2以上と思われる揺れを検知した場合には外部の装置にその旨を通知して、詳細な測定を行うことができる。

以上より、サテライト観測点における揺れデータの伝送に必要な地震時のトリガ機能を実現するためには、いずれのMEMSセンサも、電流、ダイナミックレンジ、解像度、そして揺れの検出機能の観点から、大きな問題は無いと考える。従って、これら2センサを今後の検討にて用いることとする。

2) サテライト観測点における揺れデータの無線伝送機能

前述の佐伯教授の訪問において、防災や減災のためのセンシングシステムに920MHz帯の特定省電力無線を用いている旨を伺った。この無線方式は、伝送できるデータ量が少ないものの、見通し環境であれば1km以上の無線通信が可能である。従って街中で地震に関する情報を伝送する今回の検討にもふさわしいと考える。他によく知られている2.4GHz帯を用いた無線LAN通信は、通信距離が100m以下となることが多く、大容量のデータが伝送できる点では優れているが、本用途には適さない。

ただし920MHz帯特定省電力無線であっても、街中では数100mの通信距離にとどまってしまう。従って、街中の広い範囲から情報を収集するためには、遠方の無線センサが測定した情報も、隣接する周囲の他のセンサが中継して伝送し、数少ないMeSO-net観測点までデータを届ける必要がある。このような中継を用いた無線通信技術として、本プロジェクトとは別にこれまで、電池駆動できる無線センサ装置について研究開発を進めてきた。この技術を、省電力無線マルチホップネットワーク(LPMN: Low Power Multihop Network)と呼んでいる。LPMNは図1のように、複数のノードと呼ばれる無線センサ装置と、1台のコンセントレータと呼ばれるノードの管理装置から構成される。そしてバケツリレー方式で遠方からデータを収集する無線マルチホップネットワークを形成する。無線方式には920MHz帯特定省電力無線を採用している。

以上より、サテライト観測点における揺れデータの無線伝送機能として、920MHz帯特定省電力無線を用い、さらにマルチホップ機能を備えたLPMNを選定する。今後の検討ではLPMNの活用を前提とする。

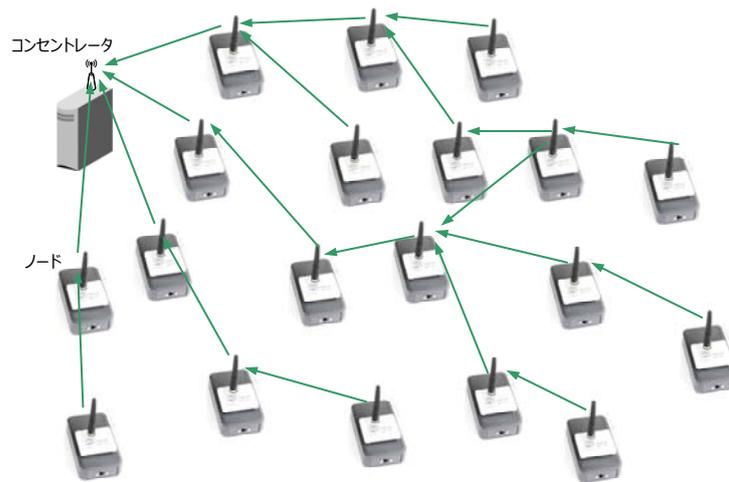


図1 LPMN システム構成

3) サテライト観測点における省電力機能等

前述の通り、センサ A やセンサ B が常時動作し続けると、それだけでも 1 年を超える電池駆動が難しい可能性がある。また LPMN が用いる無線センサ装置も、無線信号の送受信時には 30mA 以上の電流が流れる。従って、地震の揺れが無いと見なせる時にはセンサ及び無線機は待機状態に入ってスリープすることで消費電力を下げ、地震を検出した場合には揺れの測定及び通信を開始する機能が望まれる。

この観点において、センサ A 及びセンサ B の双方とも、待機状態において予め設定した一定の加速度を超える揺れを観測したら、外部に対してトリガをかける機能を有している。このトリガをきっかけに無線機を通信状態とし、さらにセンサも測定状態へと遷移させれば、上記の機能が実現される。

LPMN は、10 分に 1 度程度の通信であれば、電池で 10 年以上駆動できることが確認されている⁵⁾。図 2 に示すように、LPMN では各無線ノードが重ならないように自律的に時刻を分けて無線通信する時分割通信方式を採用している。各ノードは、通信していない時間帯はスリープして消費電力を落とす。例えば、上述の揺れの測定結果を最大加速度のような特徴量に変換し、10 分に 1 回の通信で伝送すれば、長時間の電池駆動が可能となる。

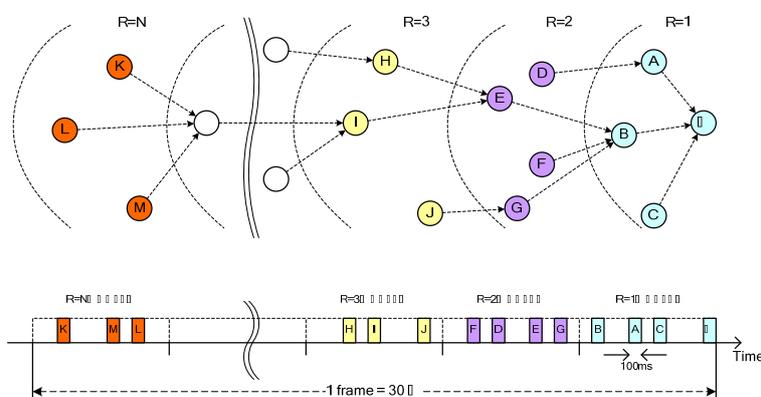


図2 LPMN の通信タイミング (通信周期が 30 分の場合)

4) 揺れデータ伝送無線機の試作

LPMNの無線センサノードの設計を改造し、揺れデータ伝送無線機を試作した。試作した装置の外観を図3に示す。具体的には、センサAを搭載した既存のLPMN用無線センサノードの回路を流用し、センサの交換ができるよう、センサAの回路部分を搭載した加速度センサA基板と、それ以外の無線通信と制御部分を搭載した通信基板の2つの基板に分けた。そして双方をケーブル及びコネクタで接続するようにした。またセンサBを搭載した加速度センサB基板も作成し、こちらも通信基板と接続できるようにした。

上記の揺れデータ伝送無線機を動作させるためのソフトウェアとしては、今期はセンサAを搭載した既存のLPMN用無線センサノードのソフトウェアをそのまま流用した。このソフトウェアは、センサAからの揺れを検出した信号をトリガに通信する機能などを備えている。

本年度は、ソフトウェアを搭載した本試作機の電源を投入し、上記ソフトウェアが持つ基本機能である、コンセントレータからの指示に従って一定時間の揺れ波形を収集する機能を試験した。そして揺れデータを収集できることを確認した。来年度以降に、揺れをトリガに通信する機能を今回試作した基板上で動作させるなど、サテライト観測点として必要な機能を確認したり、追加で作成したりする予定である。

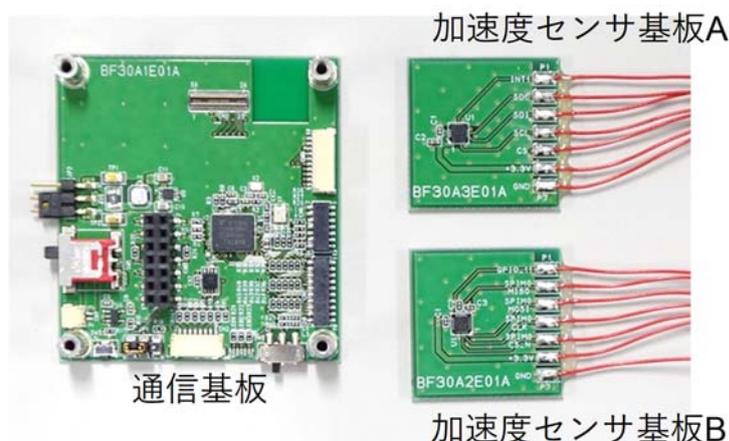


図3 試作した基板

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度はまず、サテライト観測点を実現するためのMEMSセンサの候補を2種類選定し、揺れデータの伝送に必要な地震時のトリガ機能を実現できる見込みがあることを確認した。続いて、通信部分に省電力無線マルチホップネットワークLPMNの技術を用いることで、データの無線伝送機能や省電力機能を実現できる見込みがあることを確認した。最後に、LPMNの無線センサノードの設計を元に揺れデータ伝送無線機を試作した。

今後はまず、試作した揺れデータ伝送無線機について、揺れを検出して動作する機能を

試験する。続いて省電力動作するよう設定をする。そして屋外に試作機を設置し、実際に地震を検出してそのデータを無線伝送できるかを試験する予定である。

(d) 引用文献

- 1) “MPU-9250 | TDK” , <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/> , 2018年4月17日アクセス.
- 2) “LIS3DSH - 3-axis accelerometer, $\pm 2g/\pm 4g/\pm 6g/\pm 8g/\pm 16g$ user selectable full-scale, SPI/I2C digital output, ultra low-power, high performance” , <http://www.st.com/ja/mems-and-sensors/lis3dsh.html> , 2018年4月17日アクセス.
- 3) “気象庁 | 震度と加速度” , <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/comp.htm> , 2018年4月17日アクセス.
- 4) “気象庁 | 強震波形（平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震）” , http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index.html , 2018年4月17日アクセス.
- 5) 長久保, 金, 工藤, 佐方: 省電力高信頼無線マルチホップネットワークにおける大容量データ伝送方式, 2018年電子情報通信学会総合大会, B-5-104, 2018.

(e) 学会等発表実績

1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

- ・ MEMS センサを交換可能な無線加速度センサ基板の試作仕様を策定

(3) 平成30年度業務計画案

サテライト観測技術を検証するために、揺れデータ伝送無線機の試作機を複数製作

し MeSO-net 観測点の周辺での試験観測に着手する。

3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備

3.2.2 マルチデータインテグレーションシステム開発の検討

3.2.2.5 首都圏における過去/未来の地震像の解明（東京大学地震研究所）

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

首都圏における過去/未来の地震像の解明」として、首都圏の地震ハザード評価に資するため、首都圏中心部における詳細な地下構造を提案し、首都圏における過去から現在の地震像を解明し、将来の大地震による揺れの予測手法を開発する。統合された地震観測データを用いてノイズレベルの高い首都圏でも適用可能な自動震源決定手法を高度化する。さらに、歴史地震による揺れの分布を再現するとともに、3次元階層化地震活動予測モデルを開発する。

(b) 平成29年度業務目的

東京大学地震研究所では、(2)マルチデータインテグレーションシステム開発の検討「e. 首都圏における過去/未来の地震像の解明」の業務を行う。

神奈川県温泉地学研究所と連携して、MeSO-net 等から得られたデータを元にして、首都圏および伊豆地方のプレート構造および3次元減衰構造を求める。長期間の地震カタログからコンプリートネスマグニチュードおよびb値の3次元分布を求める。従来の震源決定アルゴリズムを整理し、統計学的手法としての特徴を分析し、空間相関を採り入れた多変量版の震源決定アルゴリズムを開発する。特に、伊豆地方のプレート構造や3次元速度構造の推定を担当し、MeSO-net 等のデータを用いた地震波形解析を実施する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
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	鶴岡 弘
東京大学地震研究所	特任研究員	尾形良彦
東京大学地震研究所	特任研究員	中村亮一
東京大学地震研究所	准教授	長尾大道
東京大学地震研究所	特任研究員	森川耕輔
東京大学地震研究所	准教授	加藤愛太郎

(2) 平成29年度の成果

(a) 業務の要約

MeSO-net 等から得られたデータを元にして、首都圏および伊豆地方のプレート構造および3次元減衰構造を求めている。長期間の地震カタログからコンプリートネスマグニチュードおよびb値の3次元分布を求めている。従来の震源決定アルゴリズムを整理

し、統計学的手法としての特徴を分析し、空間相関を採り入れた多変量版の震源決定アルゴリズムを開発している。

(b) 業務の成果

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所に移管された首都圏地震観測網 (MeSO-net) を利用して自然地震観測を行った。収集・処理されたデータをこれまでに国内で設置された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ー法等の手法を用いて、震源分布や地震波速度と非弾性常数の三次元的分布等の解析を進め、関東地方のプレート構造の精緻化を進めた。
- 2) 関東地方には MeSO-net による加速度計が約 300 観測点という高密度の地震計が展開され、2008 年からの記録が蓄積されている。この記録と K-NET 及び KiK-net を統合して解析することにより、より詳細な減衰構造を求めることができることが期待される。しかし、MeSO-net は地中約 20m に設置されているため、扱いに注意が必要と考えられた。そこで、今年度、MeSO-net と K-NET 及び KiK-net 記録を用い、関東地方の三次元減衰構造とサイト増幅特性の同時スペクトルインバージョンを行った。得られた三次元減衰構造を図 1 に示す。火山に沿って高減衰域が求まったほか、深さ 20 km から 50km 程度で首都圏を東西に横切る高減衰域が得られ、フィリピン海プレートでは低減衰域が得られた。また、同時インバージョンにより MeSO-net 記録の増幅率は地表岩盤サイトに近く、地表地盤の差異による影響に比べて小さいことがわかった。これらの結果は、歴史地震による揺れの分布を再現する際に重要なものと考えられる。その他、首都直下の地震の一つである 1921 年龍ヶ崎付近の地震による上水道被害と復旧について調べた。

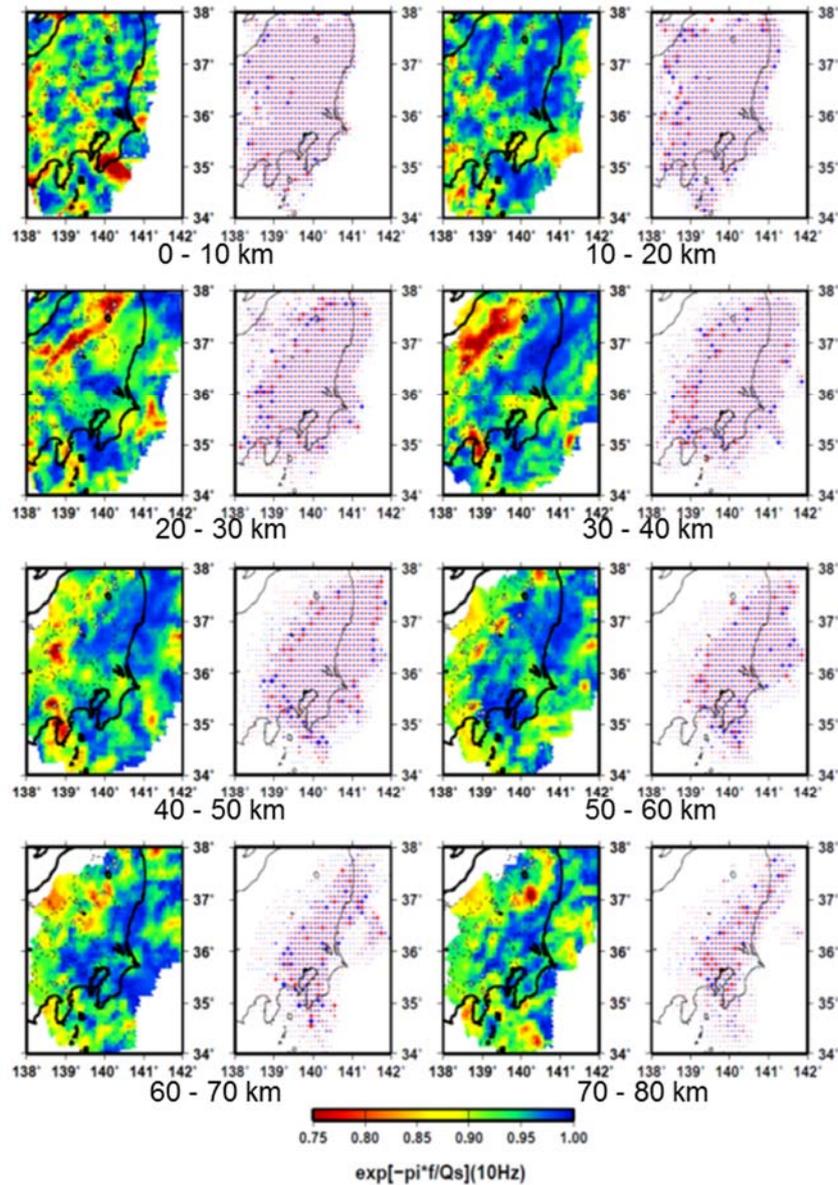


図1 得られた三次元減衰構造及びチェッカーボード解像テスト結果。
深さ 100 km まで 10 km 毎に示す。

気象庁一元化震源カタログを用いて、関東直下のコンプリートネスマグニチュードとb値の3次元分布の調査を実施した。コンプリートネスマグニチュードについては、M3以上は1980年以後、M4以上は1944—1960年を除いて、M5以上は全時代を通じて、検出できていることがわかった。また関東M7.9地震と東北沖M9地震直後の検出率が急激に低下していることもわかった。なお、1975-80年は伊豆地域の群発地震を他地域より精度良く決めたためモデルに合わず見掛けの低下である。図2のb値の時間変化はb値そのものが時間変化しているというよりは、地震活動の活発地域が違う為と考えている。図3に全期間を通しての関東直下のM4以上の3次元b値を夫々の平面上で示した。M5にすると全く違ったパターンになることもわかった。

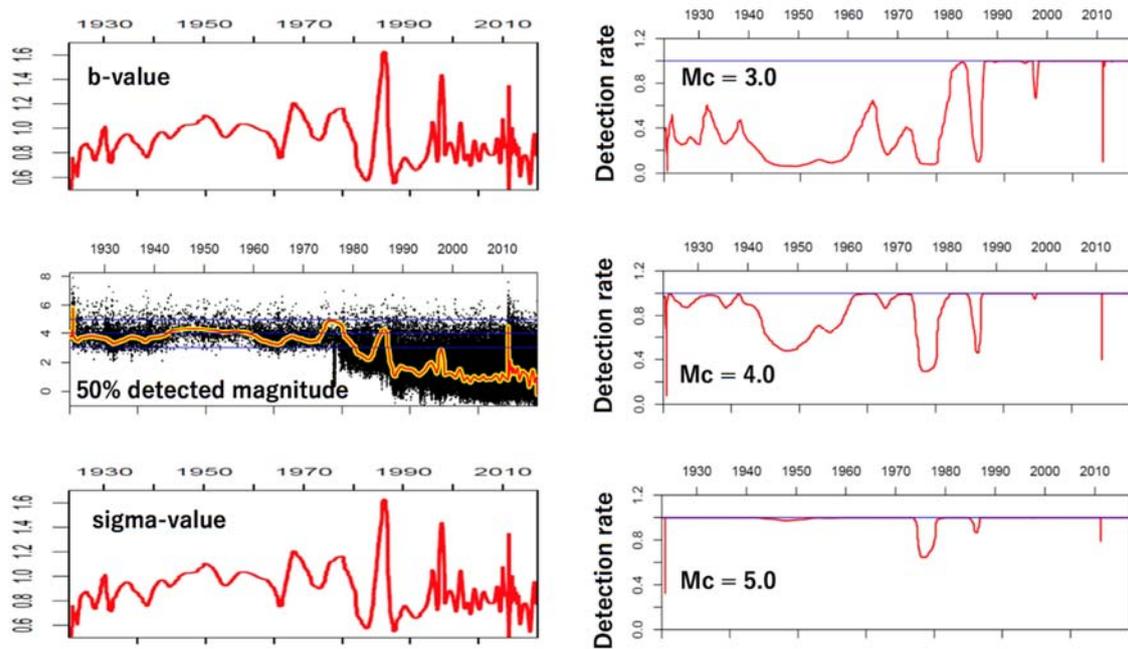


図 2. コンプリーtenessマグニチュードおよび b 値の時間変化。

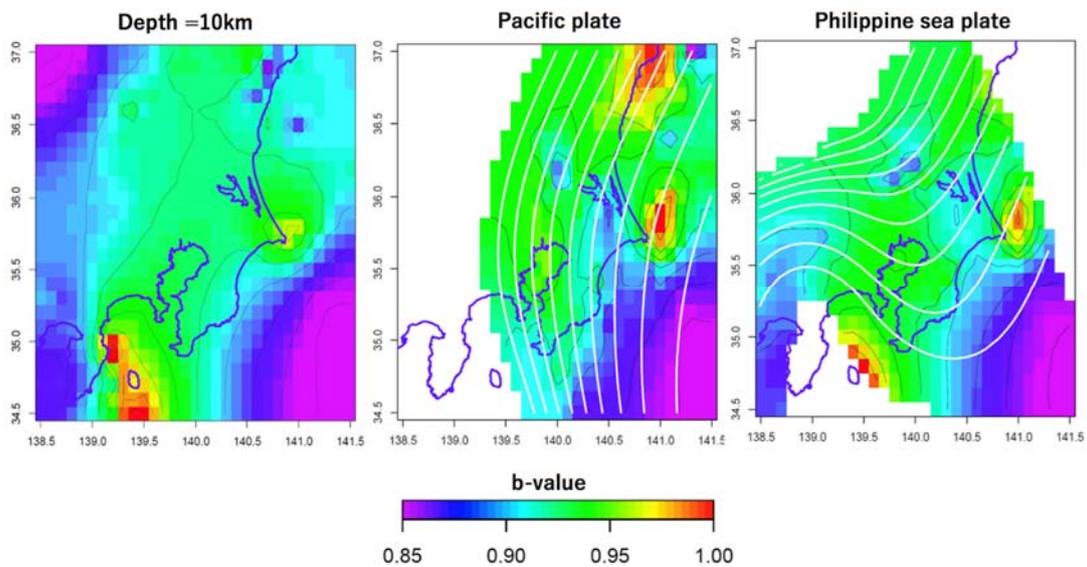


図 3. b 値の空間分布。

3) a) 地震動イメージングモジュールの開発

巨大地震発生時の都市の構造物即時被害予測の精度向上を目的に、マルコフ連鎖モンテカルロ法的一种であるレプリカ交換モンテカルロ法に基づき、空間的にスパースな地震観測網データから地震波動場を面的に再構成する「地震動イメージング法」を開発した¹⁾。本年度は、ユーザが任意に選択した地震観測網の波形データに対し、地震動イメージングを実施するための「地震動イメージングモジュール」の開発を行った(図4)。

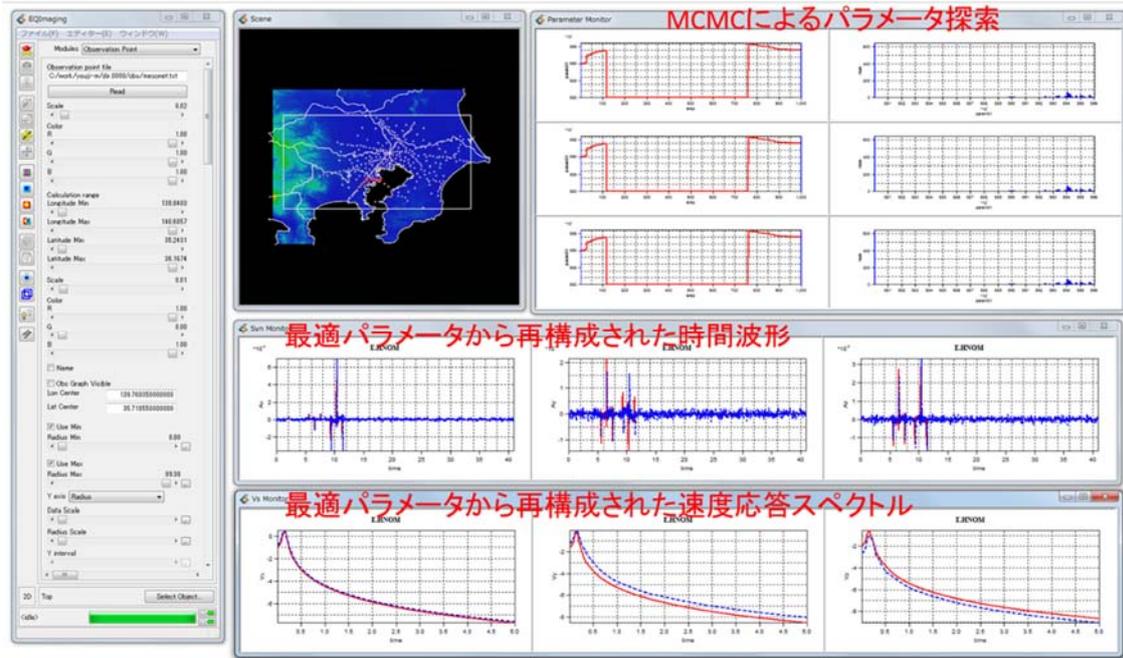


図4：地震動イメージングモジュール画面

本モジュールでは、地下構造モデルとして任意の層数と半無限層からなる水平成層構造を設定することができ、地上における地震波動場と同時に、各層における地震波速度と層厚、さらには震源の位置、発震時刻、およびマグニチュードを未知パラメータとして推定することが可能となっている。このような水平成層構造の場合、与えられた震源および地下構造に関するパラメータ群に対する地上での応答波動場を解析的に計算することが可能であり、それと観測データが最も良く適合するようなパラメータ群を探索する一種のデータ同化の問題となる。そしてレプリカ交換モンテカルロ法に基づき、事後分布をモンテカルロ近似するパラメータ群の集合を得る。事後分布は複雑な多峰性を持っており、一般的によく用いられるマルコフ連鎖モンテカルロ法のメトロポリス法では大域的なパラメータ探索が非常に難しいため、本モジュールではメトロポリス法の並列版とも言えるレプリカ交換モンテカルロ法の採用し、多峰性をもつ事後分布からでも効率的にサンプルが得られるようにしている。

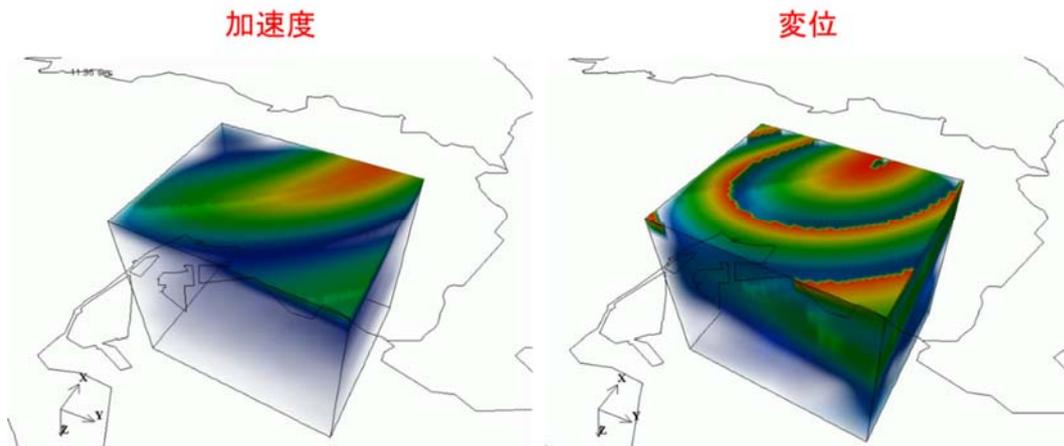


図5：地震動イメージングによって再構成された地震波動場の可視化

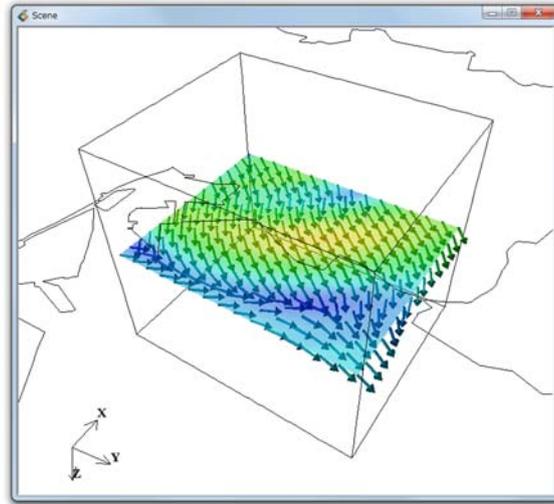


図 6：任意の形状面における応力場の可視化

本モジュールでは、事後分布を最大にするパラメータ群から地震波動場を再構成し、可視化する機能を有している（図 5）。さらには、ユーザが与えた任意の形状面における応力場やひずみ場等の物理量を可視化する機能も有している（図 6）。

b) 余震検出率の誤特定にロバストな推定量の構成

余震の時空間分布等の特徴を把握することは、本震の理解や防災上の観点からも極めて重要である。例えば、2016年に発生した熊本地震は、本震の28時間後に非常に大きな余震が発生し、甚大な被害を及ぼした。余震の頻度とマグニチュードの時空間分布を知ることができれば、本震が発生した後、どれくらいのマグニチュードの地震がどのくらいの確率で起こるかを見積もることができる。

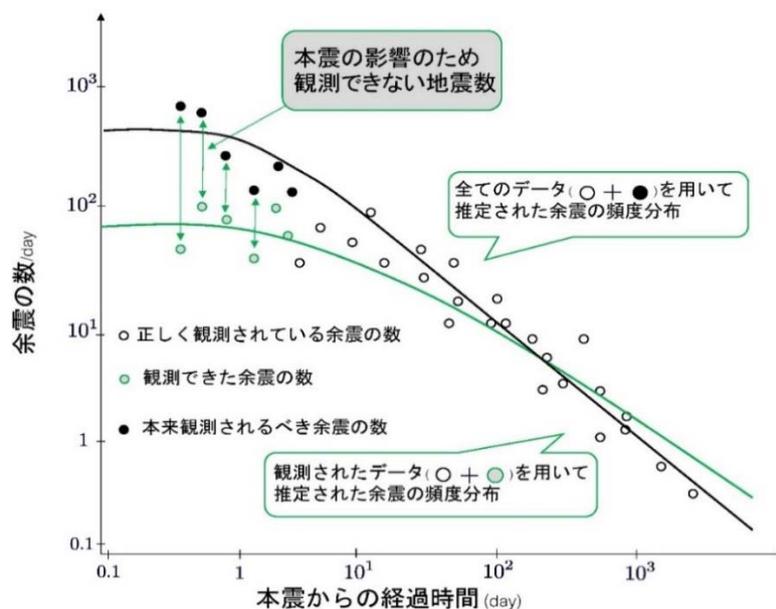


図 7：検出不能な余震がその頻度分布に与える影響

余震の頻度は、経験的に大森-宇津則に従うことが知られている（図7の黒線）。また、余震のマグニチュードは、経験的に Gutenberg-Richter 則に従うことが知られている。大森-宇津則では、3つのパラメータ、Gutenberg-Richter 則では1つのパラメータ、計4つの未知パラメータがあり、これらのパラメータを推定することにより、余震の予測に生かすことができる。

しかし、大地震が発生した直後は、重合する複数の地震イベントの分離が難しいため小さな余震が観測されにくくなる。その結果、図7の緑線のように、余震の頻度分布過少推定されてしまい、予測に大きなバイアスが生じてしまう。余震のマグニチュードの時間分布も同様である。そこで、余震のデータが完全には得られないことを前提に、観測されるデータのみから正しい余震の頻度分布、マグニチュードの分布を推定できる手法が必要となる。

先行研究²⁾³⁾では、余震の本震からの経過時間 t とマグニチュード M の両方が与えられた場合のその余震が検出される確率（図8）を導入することにより、観測されない余震の補正を行った。しかし、このような3次元曲面のモデリングは難しく、誤特定してしまうとバイアスが生じる。またバイアスを防ぐために複雑なモデルを考えると、多くのデータが必要となり、できるだけ早く、少ないデータで推定したいという本研究の前提には適さない。

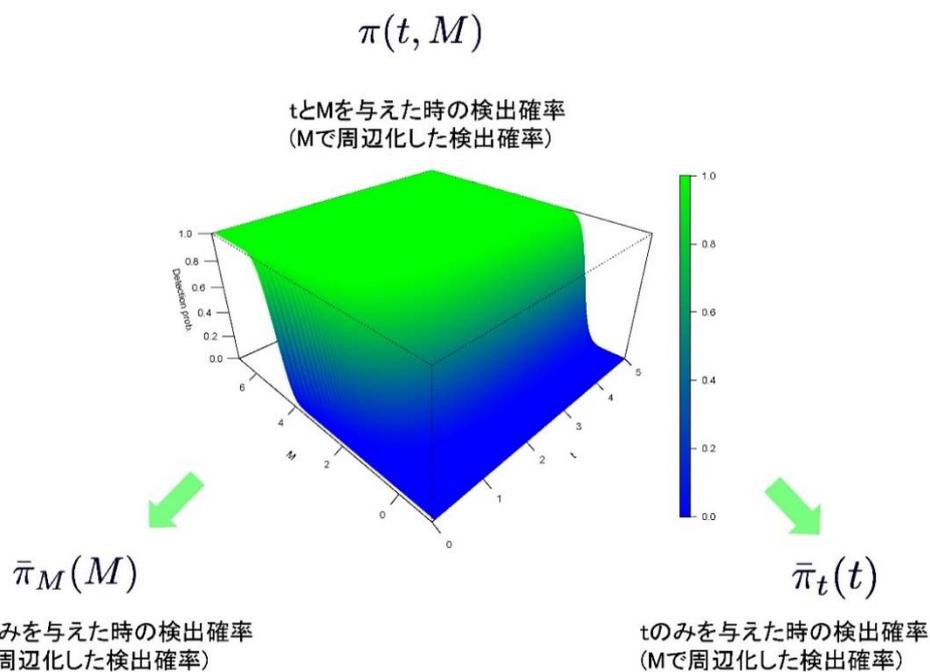


図8：余震の検出確率と本震からの経過時間およびマグニチュードとの関係

そこで、本研究では統計学の標本調査の分野で知られている、欠測値データ解析手法を応用し、より緩い仮定の下で本震直後の余震分布の補正が可能な手法を開発した。本手法では、余震の(i)本震からの経過時間 t を与えたときの検出確率と(ii)マグニチュード M を与えたときの検出確率のそれぞれを独立にモデリングする（図8）ことにより、観測が困難な本震直後の余震分布の補正を行った。ここで必要な2つのモデルは、

それぞれ 2 次元曲線であり、より柔軟なモデリングが可能となる。

しかし、提案手法は頻度論ベースで作られた方法であり、事前情報を生かすことができない。例えば、それぞれの地震発生域における地震の特徴等の事前情報は、大いに推定に役立つはずである。特に、地震イベント数があまり期待できない本研究の前提のもとでは、そのような情報は極めて貴重である。そのため、頻度論ベースで開発した本手法を、ベイズ論ベースの手法に拡張する必要がある。これを今後の課題とし、最終的に実データへ適応して、本震からまもない時間帯においても、サンプリング期間を長く取ったときの結果と同等な推定が可能かどうかを検討する。

(c) 結論ならびに今後の課題

MeSO-net 等から得られたデータを元にして、首都圏および伊豆地方のプレート構造および 3 次元減衰構造を求めている。長期間の地震カタログからコンプリートネスマグニチュードおよび b 値の 3 次元分布を求めている。従来の震源決定アルゴリズムを整理し、統計学的手法としての特徴を分析し、空間相関を採り入れた多変量版の震源決定アルゴリズムを開発している。

今後も、観測データを取得し、首都圏および伊豆地方のプレート構造および 3 次元減衰構造の精緻化をすすめる。2 次元階層化 ETAS モデルを高度化し、3 次元階層化 ETAS モデルのプロトタイプの開発を行うとともに、平成 29 年に得られた 3 次元 Q 構造を用いて、震度分布推定アルゴリズムのプロトタイプを開発する。地震動イメージングモジュールについては、ユーザが任意に選択した地震観測網の波形データに対して地震動波動場の再構成を行い、得られた地震波動場を可視化する。

(d) 引用文献

- 1) Kano, M., H. Nagao, D. Ishikawa, S. Ito, S. Sakai, S. Nakagawa, M. Hori, and N. Hirata: Seismic wavefield imaging based on the replica exchange Monte Carlo method, *Geophys. J. Int.*, **208**, 529-545, doi:10.1093/gji/ggw410, 2017.
- 2) Ogata, Y. and K. Katsura: Immediate and updated forecasting of aftershock hazard, *J. Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL025888, 2006.
- 3) Omi, T., Y. Ogata, Y. Hirata, and K. Aihara,: Forecasting large aftershocks within one day after the main shock, *Sci. Rep.*, **3**, doi:10.1038/srep02218, 2013.

(e) 学会等発表実績

1) 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
シミュレーション及び震度分布の特徴の検討による安政江戸地震の震源像について(口頭)	中村亮一 佐竹健治 石辺岳男 村岸純 西山昭仁	日本地球惑星科学連合2017年大会(幕張メッセ国際会議場,千葉県千葉市)	2017年5月	国内
Can felt reports of historical documents be used to estimate the source of large earthquakes?- Evaluation of applicability to historical large earthquakes (口頭)	石辺岳男 松浦律子 岩佐幸治 中村亮一 佐竹健治	日本地球惑星科学連合2017年大会(幕張メッセ国際会議場,千葉県千葉市)	2017年5月	国内
1921年龍ヶ崎付近の地震と1923年関東地震による玉川上水被害と給水への対応について(口頭)	中村亮一	第10回中部『歴史地震』研究懇談会(名古屋大学減災ホール,愛知県名古屋市)	2017年6月	国内
1921年龍ヶ崎付近の地震及び1923年関東地震による玉川上水の被害について(ポスター),	中村亮一	第34回歴史地震研究会大会,(つくばイノベーションプラザ,茨城県つくば市)	2017年9月	国内
関東地域の震度分布の特徴からみた安政江戸地震の震源像について(口頭)	中村亮一 佐竹健治 石辺岳男 村岸純 西山昭仁	第34回歴史地震研究会大会,(つくばイノベーションプラザ,茨城県つくば市)	2017年9月	国内
1921年龍ヶ崎付近の地震と1923年関東地震による玉川上水被害と給水への対応について-淀橋浄水場予備ポンプを中心に(口頭)	中村亮一	第143回地震工学・工学地震学談話会,(東京工業大学すずかけ台キャンパス,神奈川県横浜市)	2017年9月	国内
1855年安政江戸地震による関西での揺れの長さ-経験的グリーン関数に基づく検討(口頭)	中村亮一 佐竹健治 西山昭仁 鶴岡弘 鷹野澄 三宅弘恵 平田直	日本地震学会2017年度秋季大会,(かごしま県民交流センター,鹿児島県鹿児島市)	2017年10月	国内
関東地域の震度分布の特徴からみた安政江戸地震の震源像について(口頭)	中村亮一 佐竹健治 西山昭仁 石辺岳男 村岸純	第967回地震研究所談話会(東京大学地震研究所,東京都)	2018年1月	国内

Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo metropolitan area, Japan	H.Nagao, M.Kano, K.Nagata, S. Ito, S.Sakai, S.Nakagawa M.Hori, N. Hirata,	American Geophysical Union Fall Meeting 2017 (New Orleans, USA)	2017年12月	国際
Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo metropolitan area, Japan (同上)	H.Nagao, M.Kano, K.Nagata, S. Ito, S.Sakai, S.NakagawaM.Hori, N. Hirata,	International Meeting on "High-Dimensional Data-Driven Science" (HD3-2017), Kyoto, Japan	2017年9月	国際
Seismic wavefield imaging in the Tokyo Metropolitan area based on the replica exchange Monte Carlo method	M.Kano, H. Nagao, K.Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.NakagawaM. Hori, N. Hirata	2017年度統計関連学会連合大会, (南山大学名古屋キャンパス)(名古屋市昭和区)	2017年9月	国内
Seismic wavefield imaging in the Tokyo Metropolitan area, Japan, based on the replica exchange Monte Carlo	M.Kano, H. Nagao, K.Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.Nakagawa, M. Hori, N. Hirata	Japan Geoscience Union - American Geophysical Union Joint Meeting 2017, Chiba, Japan	2017年5月	国際
Seismic wavefield imaging in the Tokyo Metropolitan area, Japan, based on the replica exchange Monte Carlo method	M.Kano, H. Nagao, K.Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.Nakagawa, M. Hori, N.Hirata	European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria	2017年4月	国際

2) 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
Simulation of Strong Ground Motion by Stochastic Green's Function Method Considering 3-D Attenuation Structure (査読付き論文)	R.Nakamura, T. Uetake and K. Hikima	The JAEE Journal(日本地震工学論文集), Vol.17, No. 3, The English Issue p. 3_13-3_25	2017年	国内
1921年龍ヶ崎地震と1923年関東地震による玉川上水の被害とその対	中村亮一	歴史地震	印刷中	国内

応, (査読付き論文)				
Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo Metropolitan area, Japan	M.Kano, H. Nagao, K. Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.Nakagawa, M.Hori, and N. Hirata,	J. Geophys. Res. Solid Earth,122, doi:10.1002/2017JB014276	2017 年	国際

3) 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)	発表者氏名	発表場所 (新聞名・TV 名)	発表時期	国際・ 国内の 別
稠密観測から見た地盤の揺れやすさの違い	酒井慎一	NHK	2018.3.12	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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30年度業務計画案

神奈川県温泉地学研究所と連携して、MeSO-net 等から得られたデータを元にして、首都圏および伊豆地方のプレート構造および 3 次元減衰構造を求める。2 次元階層化 ETAS モデルを高度化し、3 次元階層化 ETAS モデルのプロトタイプの開発を行うとともに、平成 29 年に得られた 3 次元 Q 構造を用いて、震度分布推定アルゴリズムのプロトタイプを開発する。地震動イメージングモジュール、ユーザが任意に選択した地震観測網の波形データに対して地震動波動場の再構成を行い、得られた地震波動場を可視化する。

3.2 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備

3.2.2 マルチデータインテグレーションシステム開発の検討

3.2.2.6 首都圏における過去/未来の地震像の解明（神奈川県温泉地学研究所）

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

国立大学法人東京大学と連携して、首都圏の地震ハザード評価に資するため、伊豆地域における詳細な地下構造を提案し、首都圏における過去～現在の地震像を解明し、将来の大地震による揺れの予測手法を開発する。統合された地震観測データを用いてノイズレベルの高い首都圏でも適用可能な自動震源決定手法を高度化する。さらに、歴史地震による揺れの分布を再現するとともに、3次元階層化地震活動予測モデルを開発する。

(b) 平成29年度業務目的

神奈川県温泉地学研究所では、(2)マルチデータインテグレーションシステム開発の検討「e. 首都圏における過去/未来の地震像の解明」の業務を行う。

国立大学法人東京大学と連携して、MeSO-net等から得られたデータを元にして、首都圏および伊豆地方のプレート構造および3次元減衰構造を求める。長期間の地震カタログからコンプリートネスマグニチュードおよびb値の3次元分布を求める。従来の震源決定アルゴリズムを整理し、統計学的手法としての特徴を分析し、空間相関を採り入れた多変量版の震源決定アルゴリズムを開発する。特に、伊豆地方のプレート構造や3次元速度構造の推定を担当し、MeSO-net等のデータを用いた地震波形解析を実施する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
神奈川県温泉地学研究所	所長	里村幹夫
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	本多 亮
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	原田昌武
神奈川県温泉地学研究所	主任研究員	行竹洋平
神奈川県温泉地学研究所	技師	道家涼介
神奈川県温泉地学研究所	技師	安部祐希
神奈川県温泉地学研究所	非常勤職員	大石真由美

(2) 平成29年度の成果

(a) 業務の要約

伊豆衝突帯（伊豆地方）のプレート構造や3次元速度構造の推定を目的として、温泉地学研究所がリアルタイムに受信している観測点のデータを用いて波形解析を実施した。

(b) 業務の成果

温泉地学研究所の主たる研究課題は、「伊豆島弧衝突帯 3 次元プレート形状および地震波速度構造の推定」である。地震波速度の不連続面を推定する手法として、本業務ではレシーバ関数を用いる。レシーバ関数は、地震波形の水平動を上下動でデコンボリューションして得られる関数で、速度不連続面で P 波から変換された S 波を検知することで、速度不連続面の位置を推定する。速度不連続面があるとレシーバ関数にピークとして現れる。地震一つに対して一本のレシーバ関数が得られ、多くの観測点と地震のペアを使うことで、速度不連続面の空間的な広がりやを推定する。

平成 29 年度は、温泉地学研究所でリアルタイムに波形を収集している観測点のデータを用いて予備解析を行った。この観測点には、MeSO-net の観測点 10 点も含まれる。レシーバ関数の深さ断面への変換には、ローカルな 3 次元速度構造モデル (Matsubara and Obara, 2011) を使用した。手始めに、各観測点でレシーバ関数を計算し、その後の解析に用いることが可能かを検討した。解析には 2007 年～2013 年のアメリカ地質調査所のカタログから、 35.5° N, 139.1° E を中心として 29° から 91° の距離にあるマグニチュード 6 以上の地震を使用した。その結果、図 1 に示した 12 点は使用不可と判断した。

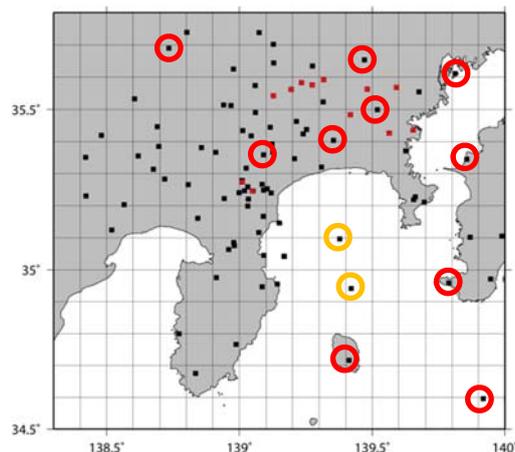


図 1 観測点配置

温泉地学研究所で波形を収集している観測点の位置を四角形で示す。レシーバ関数の作成には、黒の四角で示した観測点の速度波形と赤の四角で示した観測点の加速度波形を用いた。丸で囲んだ観測点は断面の作成に使用しなかった。

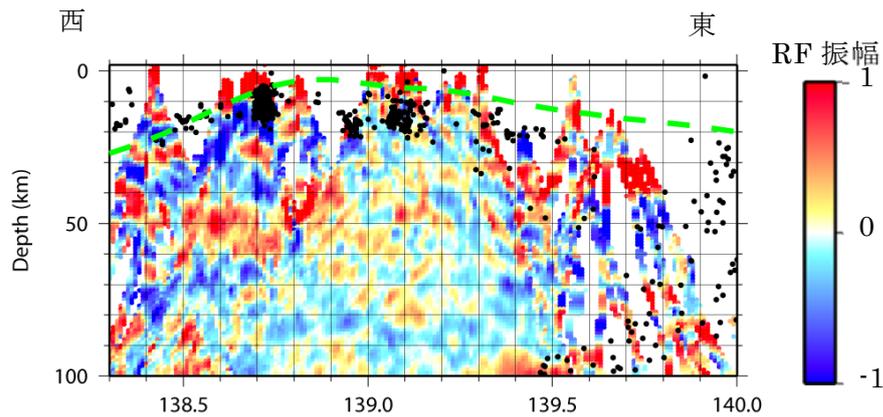


図2 レシーバ関数の東西断面（北緯 35.35 度）

黒の丸印で 2007-2013 年に北緯 35.3-35.4 度で気象庁により検出されたマグニチュード 1 以上の地震の震源を示す。緑の点線で気象研究所弘瀬冬樹氏が集約したフィリピン海スラブ上面の深度を示す。

次に、解析に不適と判断された観測点を除いたレシーバ関数をスタックし、不連続面を推定した。その一例として、図 2 に北緯 35.35 度での東西断面を示す。図 2 では、東経 139 度より西側では深さ 50 km 程度のところにレシーバ関数の正の振幅に対応する赤い帯が明瞭にみられ、遅い地震波速度が上にある不連続面が検出されていると考えられる。一方、東経 139 度から 139.5 度付近では、明瞭な不連続面は検出できていないが、この領域を通過する波線は十分にあり、データの不足による解像度不足とは考えにくい。この領域では明瞭な不連続面が存在しないか、何らかの原因で不連続面の検出が妨げられていると考えられる。さらに東側の東経 139.5 度より東では、速度不連続面を面的に追跡するためには、データが不足している。

東経 138.85 度の南北断面図を図 3 に示す。この南北断面図では、北緯 34.6 度付近から 35.7° 付近まで明瞭な不連続面が検出されている。不連続面の深さは南の方が浅く、北緯 35° 付近までは深さ 30km 付近、そこから北に向かってやや深くなり、北緯 35.5° 付近ではおよそ深さ 50 km である。反射法による地震波速度構造の解析結果（Kodaira et al, 2007）では、伊豆島弧地殻底面（モホ面）の深さが 26~32km とされており、図 3 のレシーバ関数解析で検出された不連続面は、このモホ面を見ていると考えられる。

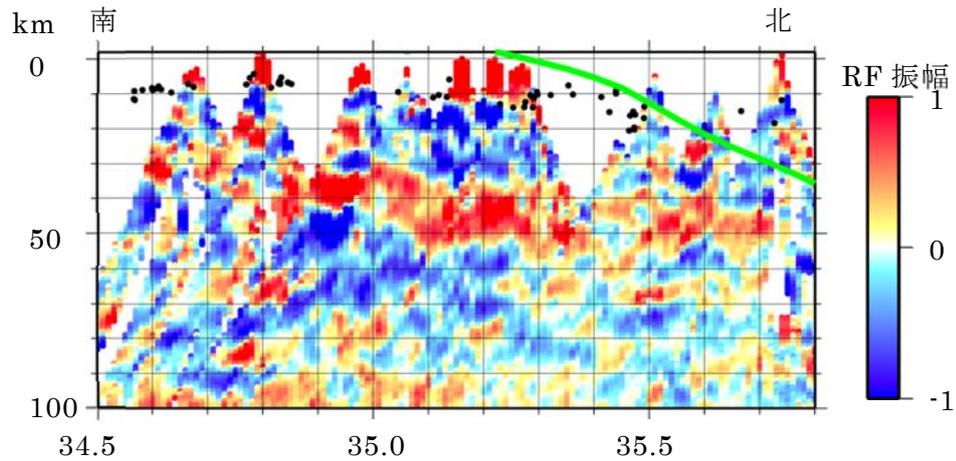


図3 レシーバ関数の南北断面（東経 138.85 度）

黒の丸印で 2007-2013 年に東経 138.8-138.9 度で気象庁により検出されたマグニチュード 1 以上の地震の震源を示す。緑の線で気象研究所弘瀬冬樹氏が集約したフィリピン海スラブ上面の深度を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度は温泉地学研究所がリアルタイムでデータを受信している観測点のデータを用いてレシーバ関数解析を実施した。データを検討した結果、12 点の観測点は解析に使用できないことがわかった。レシーバ関数を深さ断面に投影し、スタックして地震波速度の不連続面の位置を推定したところ、東経 139 度より西側では明瞭な不連続面が検出され、東経 139~139.5 度では明瞭な不連続面は検出されず、さらに東側はデータが不足していることがわかった。面的に不連続面を追うことができた東経 138.85 度で南北断面図を作成すると、伊豆半島付近で深さ 30km 付近に明瞭な不連続面が検出され、反射法探査の結果と比較すると、伊豆島弧地殻底面（モホ面）であると推定された。

来年度は、解像度や検出能力の向上のため手法の改善とデータのマージを実施する。それによって速度不連続面を空間的に連続的に追うことができるようになることを期待される。

(d) 引用文献

- 1) Matsubara, M., and K. Obara: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets Space*, **63**, 663-667, 2011.
- 2) Kodaira, S., T. Sato, N. Takahashi, A. Ito, Y. Tamura, Y. Tatsumi, and Y. Kaneda : Seismological evidence for variable growth of crust along the Izu intraoceanic arc, *Journal of Geophysical Research*, **112**, B05104, 2007.

(e) 学会等発表実績

1) 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
レシーバ関数を用いた伊豆島弧衝突帯の地殻構造解析（ポスター）	安部祐希 本多亮 行竹洋平	日本地震学会 2017 年秋季大会 （かごしま県民交流センター、鹿児島県鹿児島市）	2017 年 10 月	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(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

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

温泉地学研究所は伊豆地方のプレート構造や 3 次元速度構造の推定を担当し、プレート等の面的形状を理解するために、レシーバ関数解析のためのデータの補完や解析手法の改良等を行う。

データ補完の実施のため、防災科学技術研究所に集積される MeSO-net のデータのうち、新たに解析に使用する観測点について自動的に温泉地学研究所に転送するための仕組みを構築する。また、東京大学地震研究所に保管されている、過去に MeSO-net で観測された地震のデータについては、職員が直接出向いてデータの収集を行う。

平成 29 年度の解析において速度不連続面が明瞭に見られなかった領域の検出力の向上のため、解析手法の改善を行う。具体的には使用する周波数帯の変更や浅部の構造の導入、傾斜不連続面の導入などを検討する。

データ補完と解析手法の改善により、不連続面の検出能力や解像度を向上させ、伊豆半島付近で明瞭に見られたような不連続面の 3 次元的な分布の把握を目指す。

4. 活動報告

4.1 会議録

本プロジェクトの総括的・効率的な運営を図るため、代表機関である国立大学法人東京大学、共同実施機関である株式会社東芝・神奈川県温泉地学研究所、協力機関である東京理科大学、国立研究開発法人防災科学技術研究所の研究者が参加する運営委員会を2回開催した。

【第1回】

- ・日時：2017年8月18日（金）13：00～16：00
- ・場所：地震研究所会議室
- ・出席者：

東京大学地震研究所	平田 直
東京大学地震研究所	酒井 慎一
東京大学地震研究所	鶴岡 弘
東京大学地震研究所	郭 一村
東京大学地震研究所	長尾 大道
東京大学地震研究所	中村 亮一
株式会社 東芝	佐方 連
温泉地学研究所	本多 亮
防災科学技術研究所	青井 真
防災科学技術研究所	東 宏樹
防災科学技術研究所	木村 武志
防災科学技術研究所	上野 友岳
防災科学技術研究所	木村 尚紀
防災科学技術研究所	汐見 勝彦
防災科学技術研究所	鈴木 亘
防災科学技術研究所	先名 重樹
防災科学技術研究所	松原 誠
東京理科大学	佐伯 昌之

・議事次第

13：00	開会
13：00-13：30	首都圏レジリエンス全体の動向について デ活の状況・8月25日統括委員会に向けた確認・依頼事項 今後のスケジュール

プロジェクト総括 平田 直

	プロジェクト統括	酒井 慎一
	プロジェクト統括	青井 真
13:30-13:40	【話題提供】「関東の3次元地震活動モデル」	鶴岡 弘
13:40-14:50	【各サブテーマのH29年度計画と進捗状況】(各10分程度)	
	「官民連携超高密度データ収集」	上野 友岳
	「マルチデータインテグレーションシステムに関する技術開発」	木村 武志
	「MeSO-net観測点における地表地震記録の推定」	先名 重樹
	「スマートフォンによる揺れ観測技術の開発」	東 宏樹
	「MeSO-net観測点～サテライト観測点群間の揺れデータ 伝送技術の開発」	佐方 連
	「首都圏における過去/未来像の解明」	酒井 慎一/ 本多 亮
15:00-15:20	【話題提供】(各10分)	
	「超高密度地震動観測データ解析に向けた数理アルゴリズム開発 ～観測点自動選択アルゴリズム～」	長尾 大道
	「MeSO-net記録の分析 ―観測点ごとのスペクトルの特徴―」	中村 亮一
15:20-16:00	議 論	
16:00	閉 会	

【第2回】

- ・日時：2018年2月20日(水) 13:00～17:00
- ・場所：防災科学技術研究所 交流棟3F 特別会議室
- ・出席者：

東京大学地震研究所	平田 直
東京大学地震研究所	酒井 慎一
東京大学地震研究所	鶴岡 弘
東京大学地震研究所	長尾 大道
東京大学地震研究所	中村 亮一
東京大学地震研究所	森川 耕輔
株式会社 東芝	佐方 連
温泉地学研究所	本多 亮
防災科学技術研究所	青井 真
防災科学技術研究所	東 宏樹
防災科学技術研究所	木村 武志
防災科学技術研究所	上野 友岳
防災科学技術研究所	木村 尚紀
防災科学技術研究所	先名 重樹
防災科学技術研究所	松原 誠

・議事次第

13:00 開 会

13:00-13:30 プロジェクト全体概要・デ活の状況など

プロジェクト総括 平田 直

プロジェクト統括 酒井 慎一

プロジェクト統括 青井 真

13:30-14:40 【サブテーマ進捗状況】 (各10分程度)

「官民連携超高密度データ収集」 上野 友岳

「マルチデータインテグレーションシステムに関する技術開発」

木村 武志

「MeSO-net 観測点における地表地震記録の推定」 先名 重樹

「スマホ地震計の設置に関する開発」 東 宏樹

「MeSO-net 観測点～サテライト観測点群間の揺れデータ

伝送技術の開発」 佐方 連

「首都圏や伊豆地域における過去/未来の地震像の解明」

酒井 慎一/ 本多 亮

14:55-15:55 【話題提供】 (各10分)

「余震検出率の特定が不要な推定量の構成に関する検討」 森川 耕輔

「首都圏地震動イメージングモジュール開発の現況報告」 長尾 大道

「首都圏地震観測網 (MeSO-net) でとらえた変換波より推定される

首都圏南東部および北東部下のプレート構造」 木村 尚紀

「防災科研 Hi-net・MeSO-net で推定された関東地域の減衰構造」

松原 誠

「三次元減衰構造スペクトルインバージョン」

中村 亮一

15:55-16:10 事務連絡

16:20-17:00 NIED 見学

4.2 対外発表

1) 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
地震計測アプリの建物設置に関する現状と課題(口頭)	東 宏樹	第 36 回 日本自然災害学会学術講演会(アオーレ長岡、新潟県長岡市)	2017年9月	国内
シミュレーション及び震度分布の特徴の検討による安政江戸地震の震源像について(口頭)	中村亮一 佐竹健治 石辺岳男 村岸純 西山昭仁	日本地球惑星科学連合 2017 年大会(幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市)	2017年5月	国内
Can felt reports of historical documents be used to estimate the source of large earthquakes?- Evaluation of applicability to historical large earthquakes (口頭)	石辺岳男 松浦律子 岩佐幸治 中村亮一 佐竹健治	日本地球惑星科学連合 2017 年大会(幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市)	2017年5月	国内
1921 年龍ヶ崎付近の地震と 1923 年関東地震による玉川上水被害と給水への対応について(口頭)	中村亮一	第 10 回中部『歴史地震』研究懇談会(名古屋大学減災ホール, 愛知県名古屋市)	2017年6月	国内
1921 年龍ヶ崎付近の地震及び 1923 年関東地震による玉川上水の被害について(ポスター),	中村亮一	第 34 回歴史地震研究会大会,(つくばイノベーションプラザ, 茨城県つくば市)	2017年9月	国内
関東地域の震度分布の特徴からみた安政江戸地震の震源像について(口頭)	中村亮一 佐竹健治 石辺岳男 村岸 純 西山昭仁	第 34 回歴史地震研究会大会,(つくばイノベーションプラザ, 茨城県つくば市)	2017年9月	国内
1921 年龍ヶ崎付近の地震と 1923 年関東地震による玉川上水被害と給水への対応について-淀橋浄水場予備ポンプを中心に(口頭)	中村亮一	第 143 回地震工学・工学地震学談話会,(東京工業大学すずかけ台キャンパス, 神奈川県横浜市)	2017年9月	国内
1855 年安政江戸地震による関西での揺れの長さ-経験的グリーン関数に基づく検討(口頭)	中村亮一 佐竹健治 西山昭仁 鶴岡弘 鷹野澄 三宅弘恵 平田直	日本地震学会 2017 年度秋季大会,(かごしま県民交流センター, 鹿児島県鹿児島市)	2017年10月	国内
関東地域の震度分布の特徴からみた安政江戸地震の震源像について(口頭)	中村亮一 佐竹健治 西山昭仁 石辺岳男 村岸 純	第 967 回地震研究所談話会(東京大学地震研究所, 東京都)	2018年1月	国内

Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo metropolitan area, Japan	H.Nagao, M.Kano, K.Nagata, S. Ito, S.Sakai, S.Nakagawa M.Hori, N. Hirata,	American Geophysical Union Fall Meeting 2017 (New Orleans, USA)	2017年12月	国際
Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo metropolitan area, Japan (同上)	H.Nagao, M.Kano, K.Nagata, S. Ito, S.Sakai, S.Nakagawa M.Hori, N. Hirata,	International Meeting on "High-Dimensional Data-Driven Science" (HD3-2017), Kyoto, Japan	2017年9月	国際
Seismic wavefield imaging in the Tokyo Metropolitan area based on the replica exchange Monte Carlo method	M.Kano, H. Nagao, K.Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.Nakagawa M. Hori, N. Hirata	2017年度統計関連学会連合大会, (南山大学 名古屋キャンパス) (名古屋市昭和区)	2017年9月	国内
Seismic wavefield imaging in the Tokyo Metropolitan area, Japan, based on the replica exchange Monte Carlo	M.Kano, H. Nagao, K.Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.Nakagawa, M. Hori, N. Hirata	Japan Geoscience Union - American Geophysical Union Joint Meeting 2017, Chiba, Japan	2017年5月	国際
Seismic wavefield imaging in the Tokyo Metropolitan area, Japan, based on the replica exchange Monte Carlo method	M.Kano, H. Nagao, K.Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.Nakagawa, M. Hori, N.Hirata	European Geosciences Union General Assembly 2017, Vienna, Austria	2017年4月	国際
レシーバ関数を用いた伊豆島弧衝突帯の地殻構造解析 (ポスター)	安部祐希 本多亮 行竹洋平	日本地震学会 2017年秋季大会 (かごしま県民交流センター、鹿児島県鹿児島市)	2017年10月	国内

2) 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
Simulation of Strong Ground Motion by Stochastic Green's Function Method Considering 3-D Attenuation Structure (査読付き論文)	R.Nakamura T.Uetake K. Hikima	The JAEE Journal(日本地震工学論文集), Vol.17, No. 3, The English Issue p. 3_13-3_25	2017年	国内
1921年龍ヶ崎地震と1923年関東地震による玉川上水の被害とその対応, (査読付き論文)	中村亮一	歴史地震	印刷中	国内
Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo Metropolitan area, Japan	M.Kano, H. Nagao, K. Nagata, S.Ito, S.Sakai, S.Nakagawa, M.Hori, N. Hirata,	J. Geophys. Res. Solid Earth,122, doi:10.1002/2017JB014276	2017年	国際

3) 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）	発表者氏名	発表場所 （新聞名・TV名）	発表時期	国際・ 国内の 別
稠密観測から見た地盤の揺れやすさの違い	酒井慎一	N H K	2018.3.12	国内

5. むすび

首都圏を中心にレジリエンス総合力を向上させるための新しいプロジェクト（首都圏レジリエンスプロジェクト）が始まった。このプロジェクトの目的達成のためには、従来の社会科学・理学・工学の各学問分野の協力に加えて、民間企業をはじめとした様々な機関との連携により、オールジャパンの体制で研究開発を進めていく必要がある。首都圏レジリエンスプロジェクトでは、防災分野における企業・組織の課題解決、事業継続能力の向上に資することを目的にデータ利活用協議会が立ち上がり、計4回のシンポジウムが開催される等の活動が始められた。

理学分野を担うサブプロジェクト b「官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備」では、①「官民連携超高密度観測データの収集・整備」と②「マルチデータインテグレーションシステムの検討」の二つの大きな課題があり、②はさらに5つの個別研究課題から構成されている。①「官民連携超高密度観測データの収集・整備」では、東京大学地震研究所から防災科研に移管された首都圏地震観測網（MeSO-net）を安定的に運用することで、首都圏における稠密な地震動データの確実な収集を継続している。特に平成29年度は、観測網のデータ収集や監視機能等を担うデータ受信システムを防災科研に新たに構築した。②「マルチデータインテグレーションシステムの検討」では、これまで防災科研が運用していた K-NET・KiK-net の強震観測網と、新たに受信を開始した MeSO-net データの統合処理に着手した。また MeSO-net 観測点での地盤特性を評価するための微動アレイ観測や臨時の地表地震観測を開始し、モニターと協力したスマートフォン地震計端末での観測や揺れデータを伝送する無線機の開発にも着手した。さらに、MeSO-net 等から得られるデータを活用し、首都圏や伊豆地方の詳細な地下構造の推定、長期間の地震カタログを用いた3次元での地震活動解析、多変量版の震源決定アルゴリズムの開発等にも着手した。

引き続き平成30年度も、データ利活用協議会との連携等により首都圏における大量の地震データを収集し、地震直後の首都圏の揺れの様子を超高解像度で把握可能にするとともに、過去の大地震の揺れの推定や将来の大地震による揺れの予測等に資するデータ解析手法を検討することで、官民一体の総合的な事業継続や災害対応、個人の防災行動等に貢献するデータの収集・整備を進めていく。

サブプロジェクト (b) 研究統括 酒井慎一、青井真