

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。

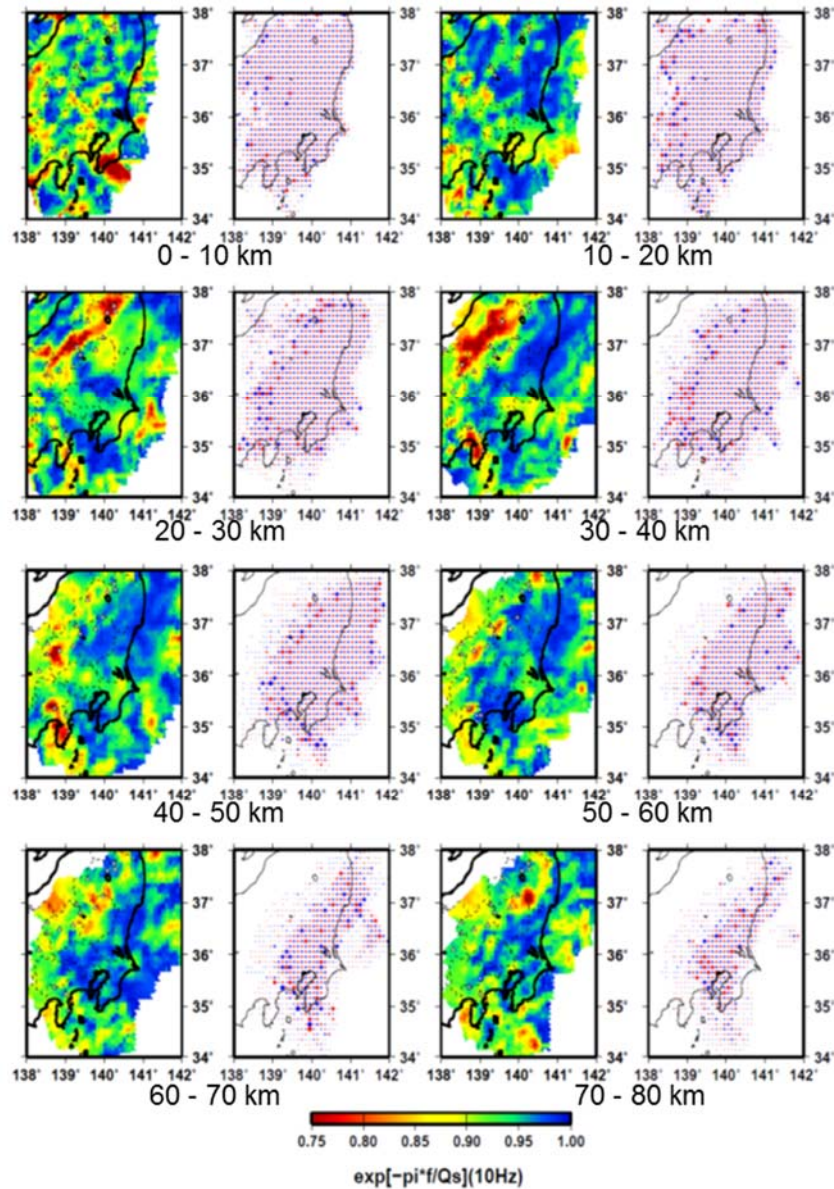


図1 得られた三次元減衰構造及びチェッカーボード解像テスト結果。
深さ 100 km まで 10 km 毎に示す。

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値を夫々の平面曲面上で示した。M5にすると全く違ったパターンになることもわかった。

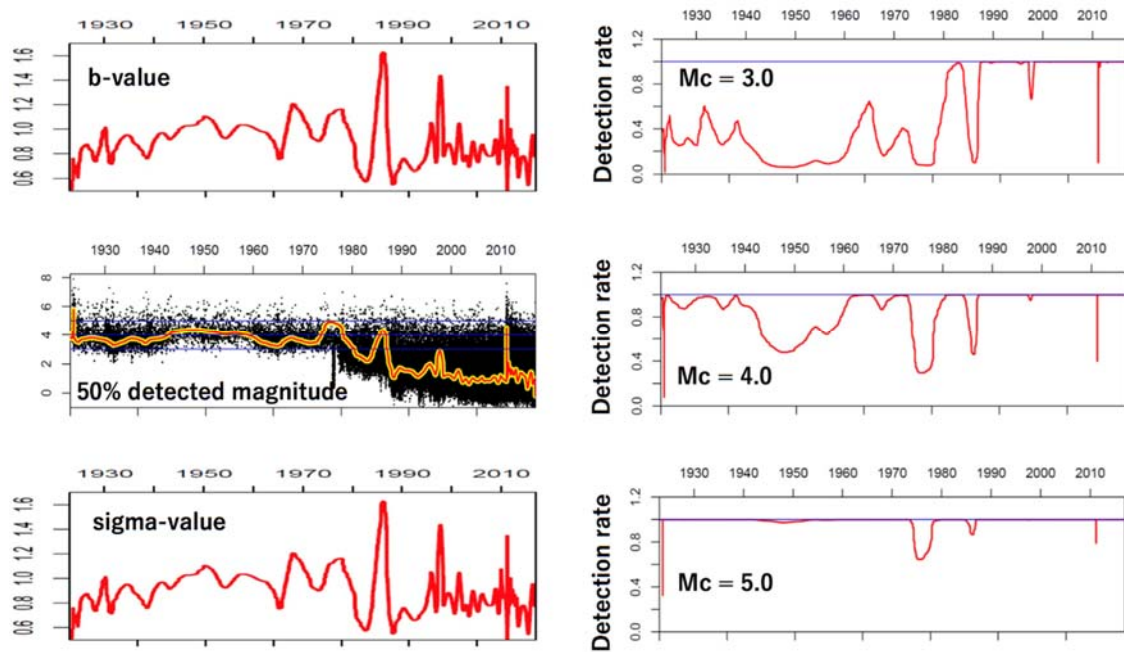


図 2. コンプリーtenessマグニチュードおよび b 値の時間変化。

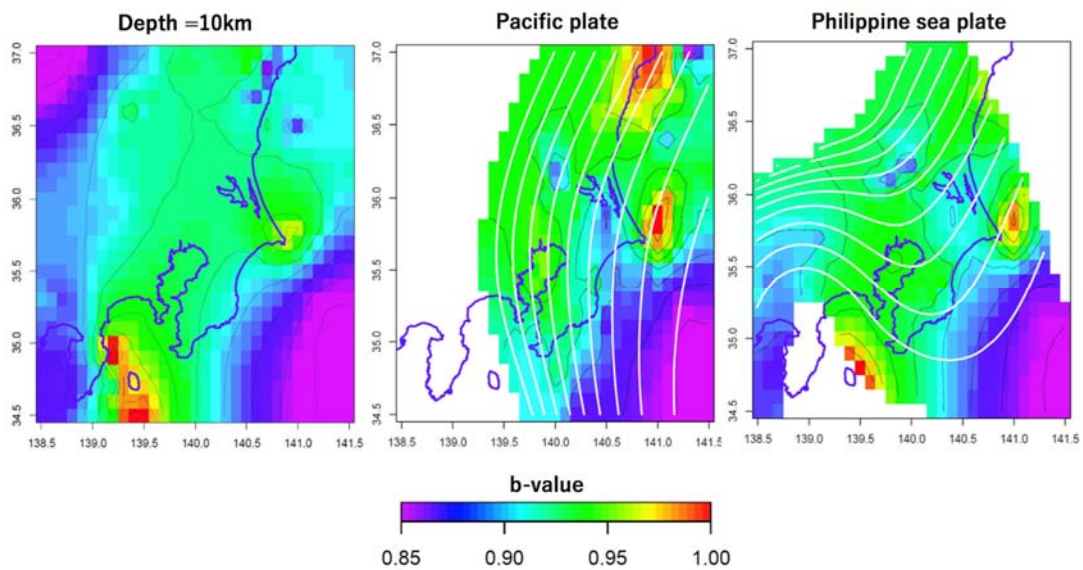


図 3. b 値の空間分布。

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)。

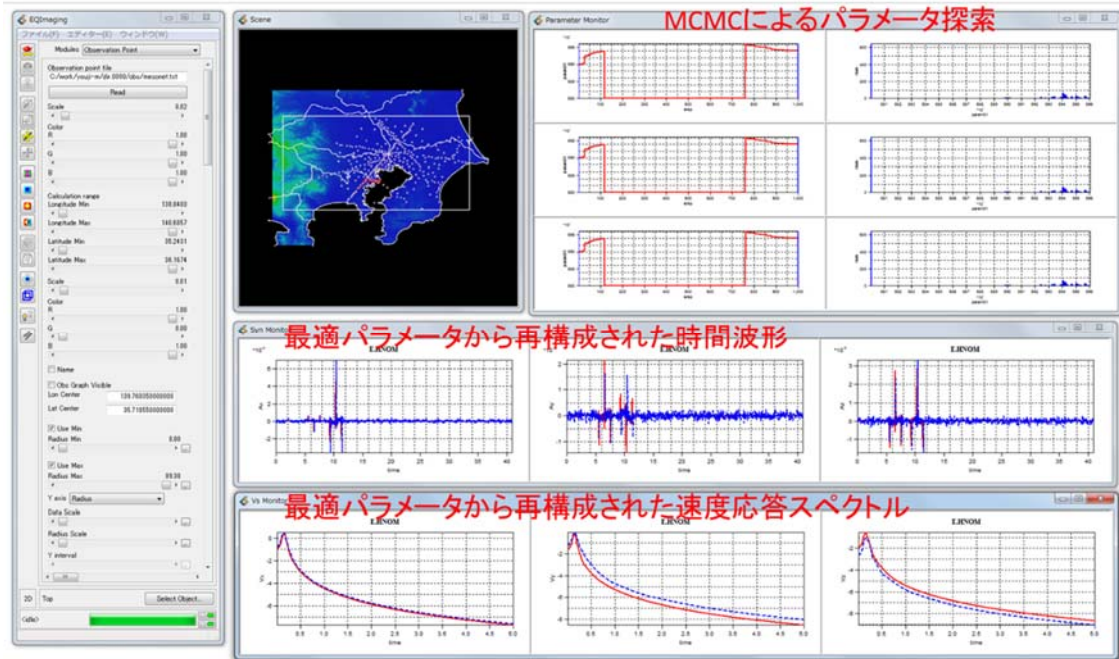


図 4：地震動イメージングモジュール画面

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。

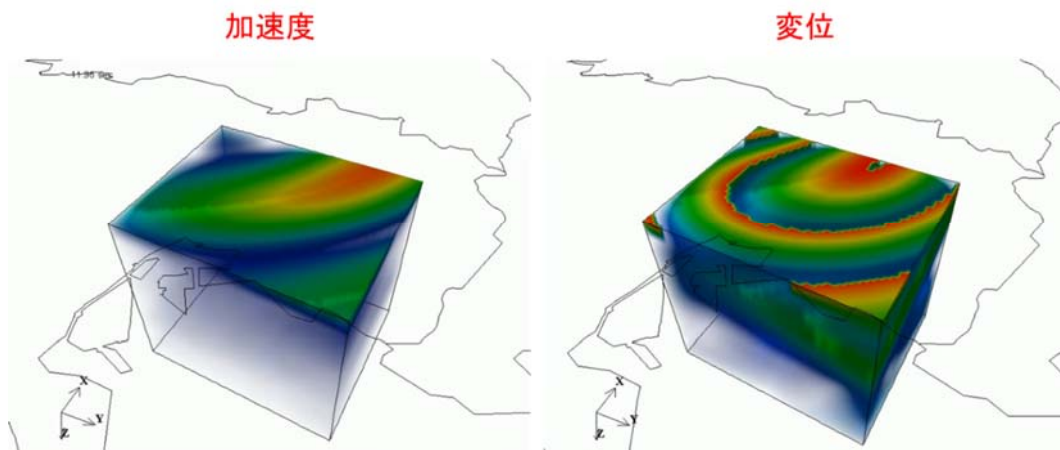


図 5：地震動イメージングによって再構成された地震波動場の可視化

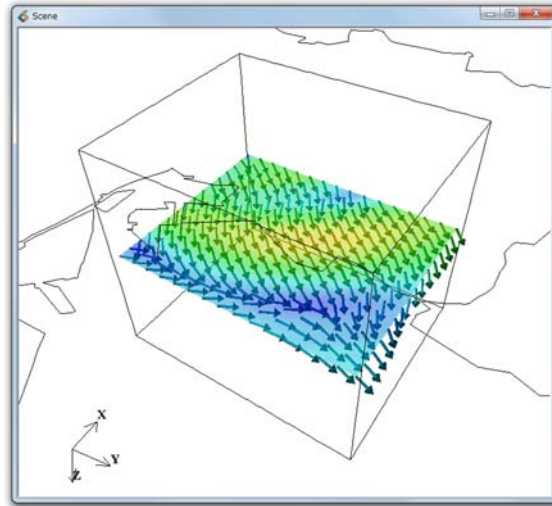


図 6： 任意の形状面における応力場の可視化

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。

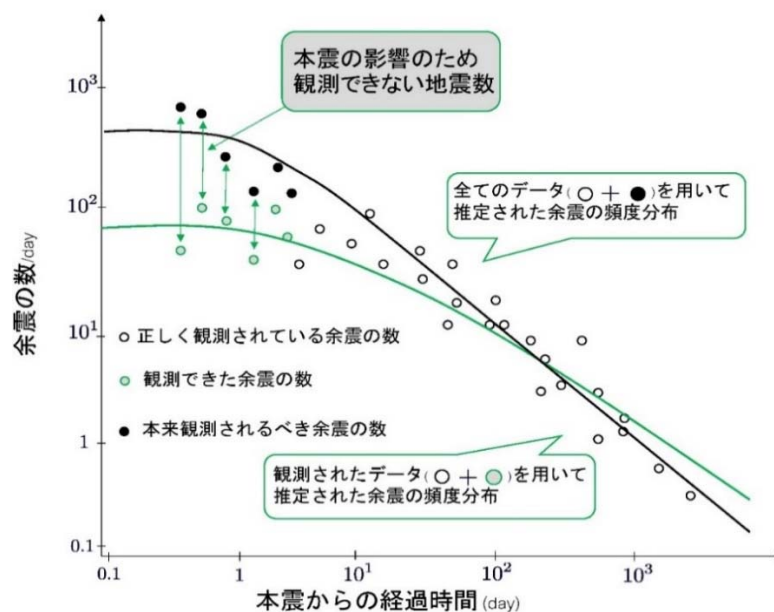


図 7： 検出不能な余震がその頻度分布に与える影響

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。

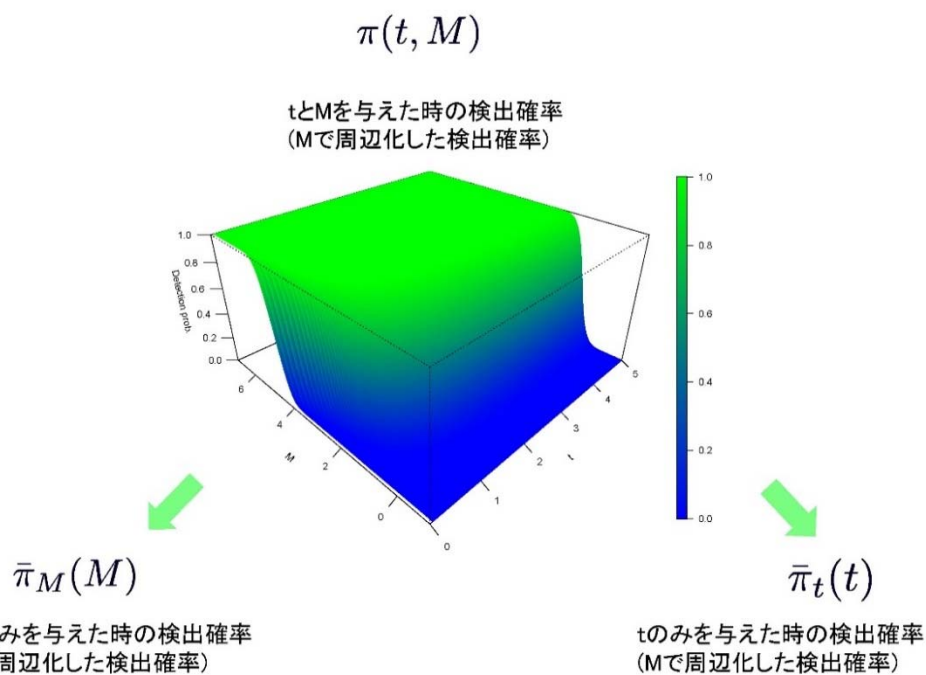


図8：余震の検出確率と本震からの経過時間およびマグニチュードとの関係

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。