

機関番号：12601

研究種目：特別研究促進費

研究期間：2010年度

課題番号：22900002

研究課題名（和文） 2011年東北地方太平洋沖地震に関する総合調査

研究課題名（英文） Comprehensive studies for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

研究代表者

篠原 雅尚 (SHINOHARA MASANAO)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：90242172

研究成果の概要（和文）：2011年3月11日、東北地方太平洋沖でM9.0の巨大地震が発生し、地震動・津波被害をもたらした。この地震の詳細を明らかにするために、各種観測研究を行った。海底地震観測と陸域地震観測により、余震活動の時空間変化を明らかにした。海底地殻変動観測及び地震波反射法構造調査から、震源断層の位置・形状を求めた。さらに、各種データを用いて、断層面滑り分布を明らかにした。現地調査により、津波の実態を明らかにし、津波発生様式を解明した。構造物被害や地盤災害の状況を明らかにするとともに、防災対策に資するデータを収集した。

研究成果の概要（英文）：The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake occurred offshore of northeast Japan region on March 11, 2011, and large ground motion with long duration and huge tsunami damaged human society. To clarify the generation mechanism of this large earthquake, we carried out various observations. Seismic observations in marine and land areas revealed variation of seismic activities in time and space. Geometry of the source was estimated by seismic surveys and ocean bottom crustal movement measurements. In addition, the slip distribution during the mainshock was obtained using various geophysical datasets. Field surveys revealed tsunamis and the generation process of the tsunamis was estimated. Damage of constructions was also clarified and useful information for disaster mitigation in future was obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	48,900,000	0	48,900,000
総計	48,900,000	0	48,900,000

研究分野：理工系

科研費の分科・細目：数物系科学・地球惑星科学

キーワード：東北地方太平洋沖地震・海底地震観測・陸上臨時観測・海底地殻変動・マルチチャンネル反射法・強震動・津波・構造物等被害

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日午後2時46分頃、東北地方太平洋沖で日本国内観測史上最大のM9.0の巨大地震が発生し、宮城県では震度階最大である震度7を記録したのをはじめ、北海道から関東地方にかけての広範囲で強い揺れが観測された。この地震に伴い、太平洋沿岸で高さ15mを超える津波が観測され、大

きな地震動・津波被害をもたらした。この地震は陸側プレートとこれに沈み込む太平洋プレートとの間のプレート境界で発生した地震であり、余震域の広がりや南北約500kmにわたる極めて大規模なものである。遠地実体波や津波による予察的解析の結果では、海溝近くで特に大きな滑りがあったと推定されていた。このような巨大な地震が、沈み込む

海洋プレートの浅い部分の海溝近くで発生するメカニズムは、まだ良く解明されておらず、日本は観測網の充実した地域であることから、巨大地震の詳細な発生過程を明らかにできる可能性がある。大被害を引き起こす巨大地震は今後も日本国内外で発生すると考えられるが、その発生機構を明らかにし、地震防災に資することは、社会的にも重要である。さらに、この地震に伴い M7 クラスの余震が、内陸部を含めて多数発生したほか、M8 クラスの大きな余震の発生も懸念され、これらについて評価することも重要である。

## 2. 研究の目的

今回の巨大地震の震源域はほとんどが海底下であるため、陸上の観測網だけではその全貌を明らかにすることは困難であり、大規模な海底観測が必要である。海底地震観測によるデータと陸上観測網のデータとあわせて解析することにより余震分布を高精度で決定し、震源断層の位置、形状を明らかにする。さらに、これと反射法構造探査の結果をあわせることで、震源断層がどのような構造的特徴と関連しているかを明らかにする。さらに、海底地殻変動観測、地震波解析、津波解析により震源断層モデルを構築する。また、震源断層モデルと津波調査により、大被害をもたらした津波の発生過程を明らかにする。現地調査により構造物、地盤などの被害状況を調査することにより、地震動による被害の発生メカニズムを解明するとともに、地震災害軽減のための対策を検討する資料とする。

## 3. 研究の方法

平成 22 年度特別研究促進費「2011 年東北地方太平洋沖地震に関する総合調査」においては、4 つの調査課題が計画された。

### (1) 地震活動調査、海底地殻変動観測、震源域の地殻構造調査

海底地震観測、陸上臨時観測、GPS 音響結合方式を用いた海底地殻変動調査、マルチチャンネル反射法による構造調査の 4 つの調査観測を行った。

### (2) 巨大地震発生機構と強震動発生の解明

破壊過程の全貌を明らかにするために、全世界に設置された地震計で記録された地震波形データ、日本全土に設置された強震計データ及び地殻変動データ等についてインバージョン解析を行った。

### (3) 津波発生過程の解明と津波被害調査

津波の高さは海岸線の形状や地形によって大きくなることから、現地調査によって津波の高さの詳細な分布や被害を明らかにする。震災直後は、比較的被害の小さかった北海道・茨城・千葉県などから現地調査を開始した。また、海底水圧計、GPS 波浪計、沿岸の水位計などに記録された津波波形を収集

し、波形のインバージョン解析によって津波の発生過程を明らかにした。

### (4) 地震動による構造物等被害調査

地震動によって被害を受けた構造物、地盤等の被害状況を現地調査により、詳細に把握すると共に、地震発生に伴い発生した大規模火災等の被害調査を、都市防災の観点から調査する。

## 4. 研究成果

(1) 本震発生後 4 日目から、海底地震計の震源域への設置を行った。これにより、120 点を超える海底地震観測網が、4 月初めに完成し、観測を開始した(図 1)。設置した海底地震計は、約 1 ヶ月間の観測を行った後、順次回収し、ほぼ同一地点に新規の海底地震計を再設置し、観測を継続すると共に、観測網を広げた。この海底地震計も、約 1 ヶ月間の観測後、6 月に回収された。観測域は、ほぼ 500km x 200km の領域とし、海底地震計の設置間隔は約 25km である。この観測網により震源域ほぼ全域をカバーすることができた。

地震発生以前に設置されていた長期海底地震計の内、3 台を回収して、余震の震源決定、特に深さ分布の推定を行った。気象庁一元化リストをもとに、海底地震計観測網近傍で発生していると思われる 113 個の地震に対して、3 台の海底地震計と陸上観測点の P 波および S 波到着時刻を読み取り、一次元構造による震源決定を行った。その結果、余震の深さは 20km 付近に集中していることがわかった(図 2)。本震直後の余震発生域の南限が、茨城県沖の太平洋プレートとフィリピン海プレートが接触している領域に一致しており、本震の破壊がこの領域で停止したことが推定される (Shinohara *et al.*, 2011)。

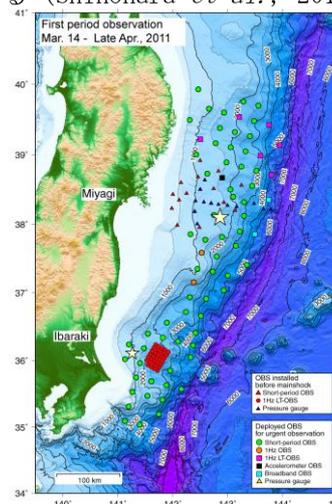


図 1 緊急余震観測の海底地震計分布。3 月 14 日以降、4 月下旬までの第 1 期の観測網

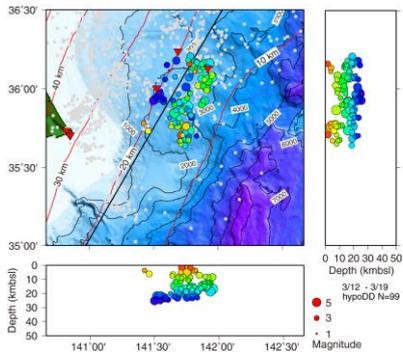


図2 海底地震計による震源決定結果。

2011年東北地方太平洋沖地震発生後、震源域近傍の定常観測点の多くは停電等の影響で欠測した。そのため、余震活動のモニタリング体制を維持強化することを目的として、早期に復旧した定常観測点と合わせて平均観測点間隔が20~30km程度となるように、6地点において3成分地震計による衛星テレメータ観測点を整備し、オンラインのデータ伝送を行った。これらのデータは気象庁にも常時転送され、地震活動監視に活用された。また、東北地方太平洋沖地震によって東日本の各地で誘発地震活動が発生したが、顕著な地震活動が発生した地域、及び今後の余震活動の拡大が懸念される地域を中心に、オフラインの機動的な地震観測網を展開した(図3)。特に活発な誘発地震活動が発生した茨城県北部から福島県東部の地域での地震活動は当初は主に3つの期間に分かれ、第1ステージは茨城県北部の活動、第2ステージは福島県南東部の活動、第3ステージは上記2つの活動領域の間の活動で、その後は3つの地域全域で活動が継続した。これらの地震活動は、いずれも正断層型の発震機構解で、震源の深さが非常に浅いという特徴を有する。機動的なオフライン地震観測データ等に基づいてダブルディファレンス法で精密震源決定を実施し、茨城県北部では比較的単純で主に傾斜角40~50度の南西傾斜の断層面が卓越するのに対し、福島県南東部では西傾斜あるいは東傾斜の断層面が東西に広がって分布し非常に複雑であることが明らかになった(図4)。茨城県北部に関する結果は、気象庁一元化震源情報に基づいて再決定された震源分布(Kato *et al.*, 2011)とほぼ調和的であり、これらの西傾斜の面を節面として正断層活動が生じたと考えられる。また、稠密観測データを用いて地震波トモグラフィー解析により地震波速度の3次元分布を調査したところ、この地域における最大規模の地震(4/11Mw6.7)の大すべり域は高速度域内に広がり、またその直下には低速度域が存在し、破壊開始点は低速度域と高速度域の境界に位置することが明らかになった。従って、震源域下部の地殻流体が既存弱面の再活動を促進したものと考えられる。

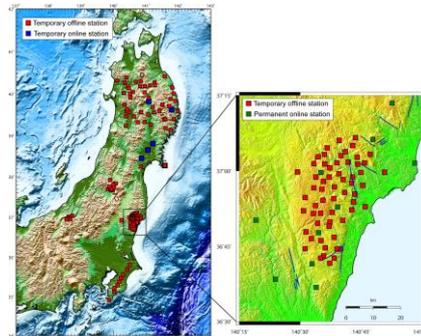


図3 陸域における機動的な地震観測点分布。

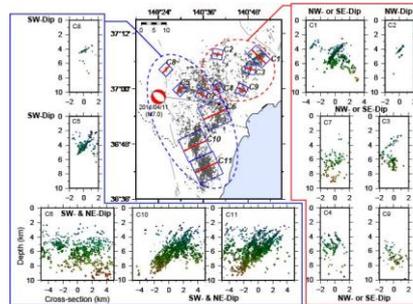


図4 茨城県北部の誘発地震活動。

本震付近では、海上保安庁海洋情報部と東北大学によるGPS音響結合方式による海底地殻変動観測、東北大学による海底圧力計を用いた上下方向の海底地殻変動観測が行われていた。今回の地震の発生を受け、GPS音響結合方式の観測、および海底圧力計の回収が行われ、地震時の海底変動が捉えられた。また、その後の観測を継続し、余効変動の観測も行われた。その結果、今回の地震により、震源のほぼ真上に位置する宮城県沖の海底基準点(宮城沖1)が地震前と比べて東南東に約24m移動、約3m隆起したことがわかった(Sato *et al.*, 2011)(図5)。また、周辺の観測点でも同様の変動が観測された。東北大学の観測点においても、海溝から50kmの点で31mの水平変動を観測した。また、海底圧力計でもメートルオーダーの大きな上下変動を観測した。これらの結果は、地震時の震源過程の研究に有用であるとともに、余効変動の精度のよい推定が可能となる。

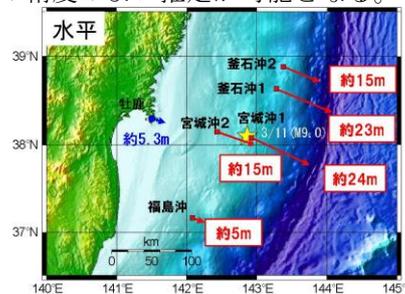


図5 海上保安庁海洋情報部により、観測された本震発生時における海底の水平変動量(Sato *et al.*, 2011)

海底地形調査の結果、震源近傍から海溝軸

に至る領域が南東～東南東方向に約 50 m 移動し、上方に約 7 m 移動した可能性があることが判明した (図 6)。宮城県沖においては、海底面の変動は、さらに日本海溝の海溝軸まで及んでいる。また、海溝軸付近の海底 (水深約 7600m) に幅約 1500m、高さ約 50m の地形変化 (高まり) が見られ、海溝軸底の直ぐ陸側部に地形が低く変位した斜面があることから、海底地すべりに伴う地形変動である可能性がある。

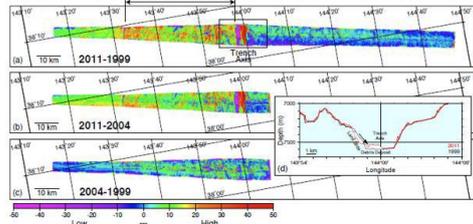


図 6 地震後と地震前の海底地形の差。

(2) 今回の地震の震源過程は、遠地地震波、地殻変動、強震動、津波などから求められているが、これらのデータセットを用いて、統一的な震源過程モデルが構築された (Koketsu *et al.*, 2011)。その結果、本震付近の大きな滑りにより、遠地地震波、地殻変動、強震動のそれぞれのデータは統一的に説明できるが、津波データは海溝付近に大きな滑りを必要とすることがわかった (図 7)。

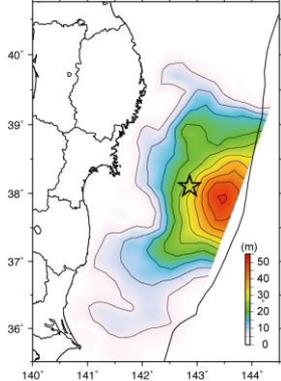


図 7 グリーン関数の不確定性を考慮した波形インバージョン法による遠地実体波による地震時の滑り分布 (八木, 2011)

(3) 釜石沖の海底水圧計、三陸沿岸の検潮所、北海道から四国までの沿岸の波浪計・海底水圧計、さらに太平洋西部の DART に記録された津波波形のインバージョンにより波源域内でのすべり量分布を求めた (図 8)。さらに、全国的に大規模な津波痕跡調査の結果、三陸沖では痕跡高が 20m を超える地域が南北に約 290km 以上に渡り、30m を超える地域も約 198km と非常に大きな痕跡高が広範囲に記録されていることがわかった。また、痕跡高が 10m を超える地域については約 425km と青森県から茨城県に渡る広域なエリアに広がっている (図 9)。

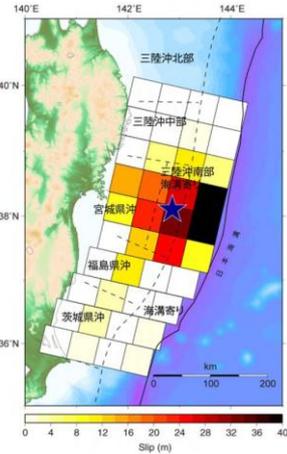


図 8 東北地方太平洋沖地震の断層面上のすべり量分布 (Fujii *et al.*, 2011)。

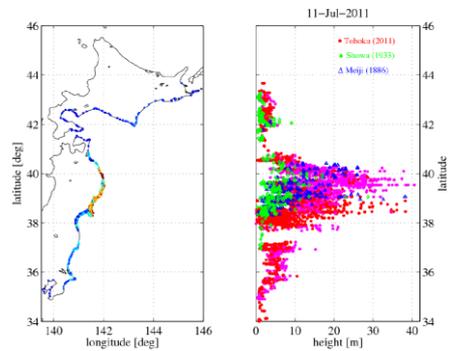


図 9 緯度方向に投影した津波高の分布 (東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ, 2011)。

(4) 大きな震度を記録した強震観測点周辺の被害調査 (全 35 観測点, 調査建物 4000 棟余り) を行った結果、建築構造物の大きな被害は非常に少なかった。建築構造物同様、土木構造物にも大きな被害は出てない。一方、局所的に非常に大きな被害を受けたものもある。第 1 中曽根高架橋においては、ラーメン構造端部柱の上部において、コアコンクリートが破碎し、軸力支持機能が喪失するほどの大きな被害が発生した (図 10)。継続時間が長い地震動を受けて地盤・地盤構造物は広域にわたり甚大な被害を受けていた。仙台市での造成宅地地盤の地震被害と、浦安市の液化化被害は、その代表である。



図 10 東北新幹線第 1 中曽根高架橋の損傷状況

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Shinohara, M., T. Yamada, K. Nakahigashi, S. Sakai, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Ito, R. Azuma, Y. Kaiho, T. No, H. Shiobara, R. Hino, Y. Murai, H. Yakiwara, T. Sato, Y. Machida, T. Shinbo, T. Isse, H. Miyamachi, K. Obana, N. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaneda, K. Hirata, S. Yoshikawa, K. Obara, T. Iwasaki, and N. Hirata, Aftershock observation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by using ocean bottom seismometer network, *Earth Planets Space*, **63**, 835-840, 2011.
- ② Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 815-820, 2011.
- ③ Kido, M., Y. Osada, H. Fujimoto, R. Hino, and Y. Ito, Trench-normal variation in observed seafloor displacements associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, doi:10.1029/2011GL050057, 2011.
- ④ Fujiwara, T., S. Kodaira, T. No, Y. Kaiho, N. Takahashi, and Y. Kaneda, The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis, *Science*, **334**, 1240-1240, 2011.
- ⑤ Kato, A., S. Sakai, and K. Obara, A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, *Earth Planets Space*, **63**, 745-748, 2011.
- ⑥ Koketsu, K., Y. Yokota, N. Nishimura, Y. Yagi, S. Miyazaki, K. Satake, Y. Fujii, H. Miyake, S. Sakai, Y. Yamanaka and T. Okada, A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **310**, 480-487, 2011.
- ⑦ 佐竹健治・酒井慎一・藤井雄士郎・篠原雅尚・金沢敏彦, 東北地方太平洋沖地震の津波波源, *科学*, **81**, 5, 407-410, 2011.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 篠原雅尚、海底地震計ネットワークによる 2011 年東北地方太平洋沖地震の緊急余震観測、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 27 日、千葉市 (幕張メ

ッセ)

- ② 野徹雄、深海調査研究船「かいれい」による東北地方太平洋沖地震の緊急調査航海 (速報)、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 26 日、千葉市 (幕張メッセ)
- ③ 日野亮太、宮城県沖における海底地震・測地観測網が捉えた 2011 年東北地方太平洋沖地震、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 22-27 日、千葉市 (幕張メッセ)
- ④ Satake, K., Tsunami Source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2011, 2011 年 8 月 8-12 日、台北市 (台北国際コンベンションセンター)・台湾
- ⑤ 大野晋、2011 年東北地方太平洋沖地震とその余震における仙台市内の強震動特性、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 22-27 日、千葉市 (幕張メッセ)
- ⑥ 源栄正人、2011 年東北地方太平洋沖地震における被災建物の地震前後の振動特性の変化、日本建築学会大会、2011 年 8 月 23-25 日、東京都新宿区 (早稲田大学)

[図書] (計 1 件)

- ① 平田直・他、朝倉書店、巨大地震・巨大津波 -東日本大震災の検証-、2011、200

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠原 雅尚 (SHINOHARA MASANAO)

東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：90242172  
(2)研究分担者  
村井 芳夫 (MURAI YOSHIO)  
北海道大学・大学院理学研究員・准教授  
研究者番号：40301931  
藤本 博己 (FUJIMOTO HIROMI)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：50107455  
日野 亮太 (HINO RYOTA)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：10740214  
佐藤 利典 (SATO TOSHINORI)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：70222015  
平田 直 (HIRATA NAOSHI)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：90156670  
小原 一成 (OBARA KAZUNARI)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：40462501  
塩原 肇 (SHIOBARA HAJIME)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号：60211950  
飯尾 能久 (IIO YOSHIHISA)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：50159547  
植平 賢司 (UEHIRA KENJI)  
九州大学・大学院理学研究院・助教  
研究者番号：80304723  
宮町 宏樹 (MIYAMACHI HIROKI)  
鹿児島大学・理学部・教授  
研究者番号：30182041  
金田 義行 (KANEDA YOSHIYUKI)  
海洋開発研究機構・地震津波・防災研究プロジェクト・プロジェクトリーダー  
研究者番号：50359171  
小平 秀一 (KODAIRA SYUICHI)  
海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・チームリーダー  
研究者番号：80250421  
松澤 暢 (MATSUZAWA TORU)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：20190449  
岡田 知己 (OKADA TOMOMI)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：30281968  
八木 勇治 (YAGI YUJI)  
筑波大学大学院生命環境科学研究科・准教授  
研究者番号：50370713  
瀧澤 一起 (KOKETSU KAZUKI)  
東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：90134634  
山中 佳子 (YAMANAKA YOSHIKO)  
名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授  
研究者番号：30262083  
平原 和朗 (HIRAHARA KAZURO)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：40165197  
谷岡 勇市郎 (TANIOKA YUICHIRO)  
北海道大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号：40354526  
今村 文彦 (IMAMURA FUMIHIKO)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40213243  
佐竹 健治 (SATAKE KENJI)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：20178685  
田中 淳 (TANAKA JUN)  
東京大学・大学院情報学環・教授  
研究者番号：70227122  
高橋 智幸 (TAKAHASHI TOMOYUKI)  
関西大学・社会安全学部・教授  
研究者番号：40261599  
岡村 眞 (OKAMURA MAKOTO)  
高知大学・教育研究部・教授  
研究者番号：10112385  
安田 進 (YASUDA SUSUMU)  
東京電機大学・理工学部・教授  
研究者番号：90192385  
壁谷澤 寿海 (KABEYASAWA TOSHIMI)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：00134479  
堀 宗朗 (HORI MUNEKO)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号：00219205  
(3)連携研究者  
平田 賢治 (HIRATA KENJI)  
気象庁・気象研究所・主任研究官  
研究者番号：20359128  
都司 嘉宣 (TSUJI YOSHINOBU)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号：30183479  
高橋 良和 (TAKAHASHI YOSHIKAZU)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号：10283623  
後藤 浩之 (GOTO HIROYUKI)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号：70452323  
盛川 仁 (MORIKAWA HITOSHI)  
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授  
研究者番号：60273463