

令和 2 年 4 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H02122

研究課題名(和文)高性能海底地震計の革新的機能高度化へ向けた開発研究

研究課題名(英文) Development research of the high performance ocean bottom seismometer for breakthrough in scientific studies at the seafloor

研究代表者

塩原 肇 (Shiobara, Hajime)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：60211950

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,600,000円

研究成果の概要(和文)：海底地震観測研究分野でのブレイクスルーを目指し、自己浮上型広帯域海底地震計とセンサー埋設型広帯域海底地震計の利点を合わせた測器として、自律動作型センサー埋設方式の"NX-2G"の実現を本研究で進めた。

実海域試験の後、問題点を改修、長期試験観測を開始し、NX-2Gの音響通信による起動動作は正常に終了した。翌年に回収を実施、正常な動作を映像で確認した。しかし、雑音低減効果が期待値以下で、改修を行い、再試験に備えた。2019年8月に予定した長期試験観測は、台風で航海が取り消され、次回は2021年以降である。

研究成果は、国内外の関連学会で発表すると共に、関連レビュー論文を共著で執筆し受理された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ここ20年間の広帯域海底地震観測研究は、自己浮上型広帯域海底地震計(BBOBS)などを実用的に展開する機器開発を基に、世界最先端の水準で研究代表者らが推進してきた。小型なBBOBSは多様な船舶での運用実績があるが、観測データの質はセンサー埋設型の方が優れ、傾斜変動の計測も可能であるが、潜水艇での作業を要するため利用機会が限られる。後者を自律動作型として、BBOBSと同様な運用が可能となれば、陸上観測に遜色ない広帯域地震・傾斜変動観測が、海域で機動的に展開できる。未踏な海域での調査や海陸プレート境界直上で地震発生過程を詳細に観るなど、多様な地球科学の観測研究への応用が今後期待される。

研究成果の概要(英文)：For breakthrough of the broadband ocean bottom seismology, which has been established in these 20 years by us, we have performed to develop an autonomous type self-burial sensor ocean bottom broadband seismometer (BBOBS) named "NX-2G". It is a mixture of the self-popup type BBOBS and the self-burial sensor type, "BBOBS-NX", operated with a submersible. The BBOBS has been used in several observations with many kinds of vessels. But the data quality is better with the BBOBS-NX, which limits chance of observation due to use of a submersible.

The NX-2G has been almost realized during test observations in its autonomous functions planned. But the noise reduction was not as expected in results by BBOBS-NXs. We have modified the NX-2G for the next test, but the cruise in 2019 was canceled due to typhoons. The next chance will be in 2021. Results of this research have been presented in several meetings (IUGG, AGU, JpGU, and SSJ), and a review paper including this research has been accepted.

研究分野：海底地球物理観測研究

キーワード：固体地球物理学 広帯域地震学 海底地震計 底層流 自己浮上式

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ここ 15 年ほどの間に、研究代表者らは自己浮上型の BBOBS、それを高性能化した新型機器である BBOBS-NX を開発し、海底広帯域地震学と言える新たな研究分野を世界に先駆けて創出してきた[1][2]。最近では BBOBS-NX の応用版で、傾斜変動計測も可能な BBOBST-NX の開発と試験観測から、海底面での機動的傾斜観測という世界最先端の実証試験を進めている[3]。BBOBS は今でも国内外の機動的広帯域海底地震観測機器では最高レベルの観測データが得られるが、解析で主に用いる長周期帯での水平動雑音レベルが高く、これを解決すべく BBOBS-NX を開発、実用化した。観測期間が限られる機動的観測でも、高度な解析手法に対応できる良質な観測データの効率的蓄積が BBOBS-NX で可能となった。一方で、機動性という面では、自由落下設置・自己浮上回収方式の BBOBS が、小型船舶による運用実績(例えば[4])を持つのに対し、BBOBS-NX は潜水艇を利用して設置時の展開及び回収を行う必要があるため、観測機会と観測可能な海域は非常に限られてしまう。この制約を解消して、高い機動観測能力を有しつつ陸上地震観測と同等なデータが得られること、すなわち、BBOBS と同様な運用が可能な、開発開始当初(2003 年)からの目標であった最終形の BBOBS-NX(以下、NX-2G と略す)へと発展させる開発研究を行う必要と準備が整っていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は明確で、高い機動観測能力を有しつつ陸上地震観測と同等なデータが得られること、すなわち、BBOBS と同様な観測運用が可能な NX-2G を実現させることである。しかし、BBOBS-NX では海底での状況を観察しつつ潜水艇による作業で適宜対応することが出来たのに対して、NX-2G では全て自律動作させる必要がある点に、高いハードルがあった。更に、研究代表者らが進める開発研究は理学的立場にあり、単なる技術開発では無く、地球科学的な観測研究における実用性を重視する点でも、多様な視点から深く検討し、この目的を達成させる必要もあった。最終的には、大規模な海底地震(傾斜)アレイ観測にも適用可能な実用機を完成させるところまでを狙う。

本研究の大元である、理学的視点での目的は以下の通りである。海域での地震学的研究は、地球表面の 2/3 が海域であること、中央海嶺や海溝などのプレート境界での多様な現象が発生していることから、それらの現象の発生場直上で観測することが重要であることは広く認識されている。しかし、それを実行しうる観測機器は今も開発研究と切り離せない部分であるが、このような視点での研究は国際的にもごく限られた少数の研究者しか手がけていない。研究代表者らは BBOBS-NX などの開発研究で、海域地震学分野での最先端の観測研究を開拓してきており、本研究はその更なる観測能力の高度化を目指すものである。すでに実用化した BBOBS-NX についても、国際的ワークショップの招待講演[5]では多くの参加者が興味を示し、最新の観測手法への関心は高い。将来的には海外での彼ら独自の海底地震計に、本研究結果は応用されると思われる。国際的に、これらの高性能な観測機器による海底地震観測が広く行われることで、高品質な地震観測データが取得・蓄積できるようになる。広大で未踏部の多い海域での、地球科学研究分野における大きな発展へと、将来つながることは間違いない。

3. 研究の方法

(1)NX-2G の実現へ向けた準備として「その場」での計測と試験

2012/2014 年の BBOBS-NX 回収作業時に、センサー部を海底面から引き抜くのに必要な力の「その場」での計測を複数回実施した。センサー部は水中重量が約 39 kg であるが、引き抜くために最大で 80 kgf を要した事例があった。また、自律動作を容易・確実とするための基本的案として、センサー部の中央上方に記録部がある場合に、雑音レベルへの影響が無いことを試験観測(2013 年)で確認した。雑音源(記録部)とセンサー部が表層堆積物のみを介して「緩く」結合している場合には、雑音がセンサー

にはほぼ伝わらないと考えられる。

(2) NX-2G で必要な機能の開発

後述の動作概念図(図1)に示すように、NX-2Gでは着底・観測・回収の各状態となるための2段階の制御機構が必要となる。これは、10000 m水深へ設置可能な海底地震計[6]の開発時に、NX-2Gでの採用も考慮し、2段階の機械動作式音響トランスポンダを既に実用化していた。しかし、NX-2Gの動作機構、特に最初の状態遷移である着底状態で、錘・センサー部と記録部が一体となって投入・着底した後、それらが分離して観測状態となる機構は、全く新規に検討する必要があった。

(3) 自律動作のNX-2G実現に向けた既知の課題

2016年までのBBOBS(T)-NXでの着底時のセンサー部の傾斜が、約半数の事例で広帯域地震センサーの許容範囲(±8度以内)を越えた。これらは潜航作業による傾斜の補正が出来たが、NX-2Gは自律動作なので、着底時に傾斜する原因の特定と、機動性を確保した上での対策を考える必要があった。

(4) NX-2G 実現までの全体計画

最初に、BBOBS-NXの投入から着底までの機器の姿勢変化・挙動を理解するための試験、NX-2Gの機器構造の検討、を行うものとした。試作機の原案を2015年度内に完成させ、2016年度以降の実海域試験のため、海洋研究開発機構の研究船利用公募に応募し、試験観測の機会を獲得することも予定した。2017年度以降は、最初の実海域試験の結果を基に問題点を解決した上で、実用検証機を作り長期試験観測を実施、目標とした機能と観測性能の確認を順次進めるものとした。

4. 研究成果

(1) BBOBST-NXでの着底までの状況把握とNX-2Gの機構設計

2015年に宮城沖でBBOBST-NXを設置する際、水中降下中から着底するまでを、独自開発した深海用ビデオカメラおよび3軸加速度ロガーを用いて、初めてその状況を捉えた。海面で投入されてから着底するまで、傾き±10数度・約3秒周期で継続的に揺れていた。一方で、NX-2G全体の機構設計を進め、センサー部を引き抜き自己浮上するために追加する浮力体と記録部との接続方法を考慮すれば、降下中の揺れを抑制させられることが予想された。その基本的構造・動作概念を図1にしめす。追加した浮力体(図1左の最上部)と記録部をロープで繋ぐが、頂部ではなく赤道部の3点で均等に結合する方法を採った。降下中はロープに張力がかかり、記録部が傾斜し始める直ちに抑制するように働き、それは赤道部での方が効果的である。

機構設計では、着底状態で、錘と記録部の間にレバーを3方向に配置し、その先端でセンサー部を引き上げることで、錘・記録部・センサー部が一体化されるようにした。観測状態(図1右の中央)への移行時には、そのレバーが下方に回転しセンサー部から外れると共に、記録部は浮力で錘から数10 cm離れた上方で細いロープにより繋留される。錘はセンサー部の三角枠中央に配置され、センサー部は水中ケーブルで記録部とのみ繋がる。回収状態では錘と記録部を繋ぐロー

機構設計では、着底状態で、錘と記録部の間にレバーを3方向に配置し、その先端でセンサー部を引き上げることで、錘・記録部・センサー部が一体化されるようにした。観測状態(図1右の中央)への移行時には、そのレバーが下方に回転しセンサー部から外れると共に、記録部は浮力で錘から数10 cm離れた上方で細いロープにより繋留される。錘はセンサー部の三角枠中央に配置され、センサー部は水中ケーブルで記録部とのみ繋がる。回収状態では錘と記録部を繋ぐロー

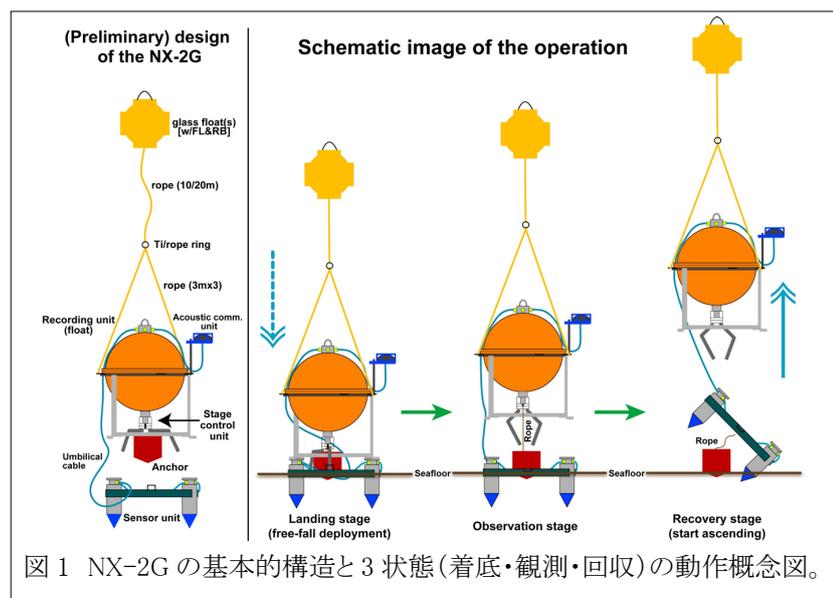


図1 NX-2Gの基本的構造と3状態(着底・観測・回収)の動作概念図。

し、その先端でセンサー部を引き上げることで、錘・記録部・センサー部が一体化されるようにした。観測状態(図1右の中央)への移行時には、そのレバーが下方に回転しセンサー部から外れると共に、記録部は浮力で錘から数10 cm離れた上方で細いロープにより繋留される。錘はセンサー部の三角枠中央に配置され、センサー部は水中ケーブルで記録部とのみ繋がる。回収状態では錘と記録部を繋ぐロー

ブが外れ、十分な浮力によってセンサー部の一端を引き上げる。これは堆積物中のセンサー部の円筒型耐圧容器を斜めにこじり力となり、まっすぐ上方へ引くのに較べて引き抜きやすい状態を作る。

(2) 試作機による降下姿勢安定化の確認

上記の機構設計に基づき、2016 年に実施した実海域試験に向けて試験機を製作した。この試験は 2015 年に敷設された地震研究所の釜石沖海底ケーブル観測システム最沖部にある観測点の状態を確認するために民間備船の ROV を利用するのと併せて実施した。そのため、水深は 1570 m 程度と浅い。試験機には深海用ビデオカメラ及び記録部内に加速度ロガーを取り付け、海面から追加の浮力体、続けて試験機を投入した。海底での着底状態を ROV から見ると、試験機の着底時の傾斜は小さく、加速度ロガーの記録からも、水中降下時の周期的揺れが効果的に抑制されたことが確認された。

水中降下から着底の状況を複数回確認したく ROV で試験機を吊り上げようとした際に、前述のレバー先端がセンサー部から外れてしまうという問題が発生した。そのため、センサー部のすぐ脇に錘が付いたままの記録部を配置し、回収状態への遷移状況を ROV から観察した。但し、ROV では海底の上方にケーブルなどがあること、ROV が水中にある間は作業船が自由に動けないため浮上したものを回収できないことから、錘と記録部が完全に浮上できないように長めのロープで繋いであった。この試験時には余剰浮力は約 75 kgf であり、回収状態への遷移開始から約 2 分半経過したところで、センサー部が海底堆積物から完全に引き抜かれた。その後、試験機は無事に ROV により船上まで回収された。

この実海域試験から、試験機は基本的な機器構造としては良いが、設置時の着底状態での記録部とセンサー部の連結をより確実にする必要があることが分かった。水中降下中の周期的な揺れを抑制する手法が容易かつ効果的に実現できたのは、初期の課題を解決した重要な成果であった。

(3) 実用検証機での長期試験観測、

翌 2017 年 4 月の研究船航海では、福島県沖の日本海溝近くで、BBOBST-NX と NX-2G を同地点に設置する長期試験観測が計画され、実用検証機を製作した。同地点では既に BBOBS での観測データもあり、各観測システム間での性能比較に適していた。航海中に悪天候の予報が出たため、本来の運用方法を取り、NX-2G を海面から自由落下させて設置し、船上からの音響通信で観測開始させた。小さい傾斜で着底し、観測状態への移行が正常であったことを確認した。なお、それらを映像でも視るため、深海用ビデオカメラを記録部へ固定していた。2018 年 10 月の研究船航海で、ROV を用いて回収状態への移行を観察し、NX-2G を回収した。観測状態を観察(図 2 左)すると、水中ケーブルの引き回し方が不相当で、センサー部のすぐ脇からケーブルが立ち上がり、記録部へと繋がっている状態だった。高圧の深海底では水中ケーブルは柔軟性がなくなり、記録部で発生する振動を伝えてしまう可能性があった。また、これまで見たことが無いほど、センサー部と錘が堆積物中に埋まっており、設置地点の海底堆積物が非常に柔らかいことも分かった。

ROV から、回収状態への遷移のための音響信号を送ると、今回は記録部が浮上開始した直後にセンサー部が堆積物中

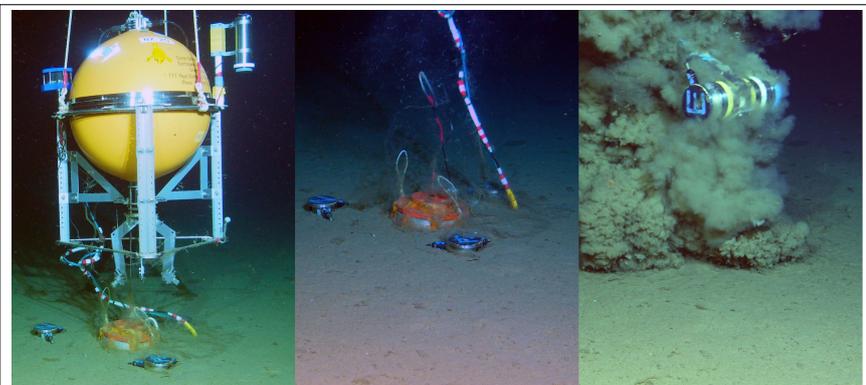


図 2 NX-2G の観測状態(左)、回収状態への遷移開始時(中央)、センサー部を引き抜いた状態(右)である。オレンジ色の球体が記録部のチタン製耐圧容器で、その直下にある赤茶色のものが錘、その周囲にセンサー部の 3 成分それぞれの耐圧容器頂部(黒地に青い英文字”E”等)が見えている。

から引き抜かれた(図 2 中央・右)。その後、NX-2G 全体は研究船上へ無事に回収された。深海用ビデオカメラも設置時の映像を正常に記録しており、着底状態から観測状態への遷移の様子、およびその後数時間の設置状況が分かった。同地点は水深約 5400 m と深いが、定常的に一方方向での秒速 10 cm を超える底層流があり、記録部は大きく揺れていた。

得られた観測データから NX-2G と BBOBS での水平動成分での雑音レベルの差を比較すると-6dB 程度で、埋設型センサーで期待される-20dB 程の雑音レベル低下の効果が得られなかった。雑音レベルが高かった理由は、水中ケーブルの配置と強い底層流、加えて柔らかい堆積物が関連しているものと推測された。NX-2G の機構改良で対処できることを検討し、再度の比較試験観測へ備えた。

(4) 改修した実用検証機での再試験観測への準備、開発研究の取り纏め

本研究期間の最終年度である 2019 年度に、長期比較試験観測を実施できる機会を確保し、前年度に判明した問題点への対策、水中ケーブルの配置変更、を実施した。2019 年 8 月に実施予定の研究船航海であったが、作業海域の小笠原諸島周辺に台風が 3 連続で通過したため、出航も出来ずに航海は取止めとなった。再度の試験観測は 2021 年度以降に実施することになる。

2019 年 7 月の IUGG 国際学会で NX-2G の開発研究成果に関する口頭発表[7]を行い、海外の関連研究者との質疑応答を行った。同年 9 月には日本地震学会でも同様な口頭発表[8]を行った。更に、本研究を最新成果として記載した、日本における広帯域海底地震学についてのレビュー論文[9]を日本地震学会誌に共著で執筆し、本年度末に受理された。

<引用文献>

1. D. Suetsugu, and H. Shiobara, Broadband Ocean Bottom Seismology, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 42, 27-43, 2014.
2. H. Shiobara, T. Kanazawa, and T. Isse, New Step for Broadband Seismic Observation on the Sea Floor: BBOBS-NX, IEEE-JOE, doi: 10.1109/JOE.2012.2222792, 2012.
3. H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, and M. Shinohara, Possibility of tilt observation at the seafloor by a mobile ocean bottom seismometer, IAG-IASPEI, J07-P-10, Kobe International Conference Center, Kobe, 3 Aug. 2017.
4. D. Suetsugu, H. Shiobara, H. Sugioka, G. Barruol, E. Schindele, D. Reymond, A. Bonneville, E. Debayle, T. Isse, T. Kanazawa, and Y. Fukao, Probing South Pacific Mantle Plumes with Ocean Bottom Seismographs, Eos, Transactions AGU, 86(44), 429,435, 2005.
5. H. Shiobara, H. Sugioka, T. Isse, A. Ito, M. Shinohara, and T. Kanazawa, OBSs with the self burying broadband sensor in the NOMan project and a new style OBS for the ultra-deep sea, IRIS OBSIP, OBS Workshop, Redondo Beach, CA, USA, 21-22 Oct. 2013. (invited)
6. 塩原肇・篠原雅尚・伊藤亜妃・杉岡裕子, 超深海域での海底地震観測への新たなる挑戦, 日本地震学会 2013 年度秋季大会, D11-13, 横浜市中区産業貿易センター, 2013 年 10 月 7 日.
7. H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, and M. Shinohara, New Era of Ocean Bottom Broadband Seismology with Penetrator System of the Autonomous BBOBS-NX (NX-2G), 27th IUGG General Assembly, S05a, IUGG19-0453, Montreal, Quebec, Canada, 16 July 2019.
8. 塩原肇・伊藤亜妃・杉岡裕子・篠原雅尚, 次世代観測へ向けた自律動作方式の高性能広帯域海底地震計: NX-2G, 日本地震学会 2019 年度秋季大会, S02-02, 京都大学吉田キャンパス, 2019 年 9 月 16 日.
9. 末次大輔・塩原肇, 日本の広帯域海底地震学, 地震 2, 73, 2020. (受理日 2020 年 3 月 29 日)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 末次大輔・塩原肇	4. 巻 73
2. 論文標題 日本の広帯域海底地震学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地震2	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 塩原肇・伊藤亜妃・杉岡裕子・篠原雅尚
2. 発表標題 次世代観測へ向けた自律動作方式の高性能広帯域海底地震計：NX-2G
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, and M. Shinohara
2. 発表標題 New Era of Ocean Bottom Broadband Seismology with Penetrator System of the Autonomous BBOBS-NX (NX-2G)
3. 学会等名 27th IUGG General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara
2. 発表標題 The First Data of the Autonomous BBOBS-NX (NX-2G) for New Era of Ocean Bottom Broadband Seismology
3. 学会等名 2018 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara
2. 発表標題 Development of the autonomous BBOBS-NX (NX-2G) : preliminary test report
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, M. Shinohara
2. 発表標題 NX-2G : autonomous BBOBS-NX for a highly mobile broadband seismic observation at the seafloor
3. 学会等名 EGU General Assembly 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 塩原肇・杉岡裕子・太田豊宣・大西信人
2. 発表標題 次期高機能海底地震計開発試験に向けた深海用ビデオカメラの開発
3. 学会等名 ブルーアースシンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 塩原肇・篠原雅尚・杉岡裕子・伊藤亜妃
2. 発表標題 自律動作の高性能広帯域海底地震計開発計画: NX2G
3. 学会等名 日本地震学会 2015年度秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 H. Shiobara, M. Shinohara, H. Sugioka and A. Ito
2. 発表標題 NX-2G : autonomous BBOBS-NX for a highly mobile broad-band seismic and tilt observation at the seafloor
3. 学会等名 MTS/IEEE OCEANS ' 15 (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	杉岡 裕子 (Sugioka Hiroko) (00359184)	神戸大学・海洋底探査センター・教授 (14501)	
連携研究者	伊藤 亜妃 (Ito Aki) (90371723)	独立行政法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門・技術研究員 (82706)	
連携研究者	篠原 雅尚 (Shinohara Masanao) (90242172)	国立大学法人東京大学・地震研究所・教授 (12601)	