

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26282043

研究課題名（和文）実感をともなった動的な地震現象の理解のための実験・演習教材の開発および実践研究

研究課題名（英文）Development of Laboratory Seismic Exploration Experiment for Education and Demonstration

研究代表者

仲西 理子（NAKANISHI, Ayako）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・技術研究員

研究者番号：30371727

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,400,000 円

研究成果の概要（和文）：寒天を利用して地震波伝播を実際に見て触って実感できる室内地震探査実習装置を開発した。本装置では寒天ゲルを模擬地殻として利用する。寒天ゲルは透明なので、光弾性を利用して地震波を可視化できる。また、寒天ゲルの弾性波速度が岩石に比べ3桁遅く（毎秒数メートル）、波の伝播を肉眼で観察できる。高速カメラで撮影した実験動画から波形データも得ることができる。この波形を解析して寒天模擬地殻の構造を推定する屈折法地震探査実習が実施できる。本実験は、従来の屋外実習に比べ、机上で実施できる上、地震波が伝わる様子をその場で一目で容易に把握できるため、地殻を伝わる波と地殻構造の関係を理解し易くなると期待される。

研究成果の概要（英文）：We developed a laboratory experiment to simulate a seismic refraction survey for educational purposes. The experiment is tabletop scaled experiment using the soft hydrogel as an analogue material of a layered crust. So, we can conduct the seismic exploration experiment in a laboratory or a classroom. The softness and the transparency of the gel material enable us to observe the wave propagation with our naked eyes, using the photoelastic technique. By analyzing the waveforms obtained by the image analysis of the movie of the experiment, one can estimate the velocities and the structure of the gel specimen in the same way as an actual seismic survey. We report details of the practical course and the public outreach activities using the experiment.

研究分野：制御震源地震学

キーワード：科学教育 地学教育 寒天ゲル 屈折法地震探査

1. 研究開始当初の背景

日本では、国民の生活に対する地震災害の影響が大きく、地震研究への人々の関心や期待も高い。国民の「自然災害の予知や被害の軽減」という社会的な課題に対する問題意識は、2011年東北地方太平洋沖地震(以後、震災)後、特に高くなっており、この課題の解決・解明に科学技術が寄与することへの期待も大きく上昇している(科学技術政策研究所「科学技術に対する国民意識の変化に関する調査」平成24年8月1日付による)。一方で、震災前より、社会一般向けの地震に関する知識の普及、最新の地震研究の成果についての情報発信に関する活動の不足が学界でも問題とされてきたが、震災を受けて、科学者や技術者に対する信頼度が低下している現状では、そのような活動を工夫して展開する必要性がより高まっていると考えられる。学校教育においてさえ、地震を含む地球科学教育の占める割合が低い現状では、地震に関する知識を得る機会は限られている。地球科学現象の中でも、地球流体(海洋、気象)や火山に関するものについては、実際に目で見る事が可能であり、室内実験による教育方法が考案されている例はある。一方で、固体地球や地震現象は視認しにくいため、関連する教材例は稀で、動的な地震現象のイメージができるものはほとんどない(図1)。大学で専門分野に進んで初めて、実際の調査や観測と同様の演習が経験できる機会が得られるが、それも動的な地震像のイメージを持つためには平行して専門知識の習得を要する。より簡単に直感的な形で動的な地震現象のイメージを持つこと、つまり地震の揺れを感じたときに、何が起きているのか、この後何が起きそうか想像できるようになることは、防災的観点からも大変重要である。にもかかわらず、動的な地震現象がイメージできる助けとなるものが存在しないのが現状であり、最新の研究成果を社会に発信したところで、理解されにくい状況になっているのが現状である。



図1: 既存の断層実験の例。小麦粉とココアを使用した水平成層の側面から押し板で断層の発生を観察する。断層運動と地震の関係づけが困難。

2. 研究の目的

地震研究とその成果が広く一般に理解されるように伝えるためには、成果の情報発信をするだけでなく、動的な地震現象のイメージを可能となる実際に見て触って実感できる

教材や方法が必要である。そこで、本課題では、寒天ゲルを利用して、地震波伝播や破壊現象を実際に見て触って実感できる実験実習教材を開発し、その教育的効果を確認することを行う。具体的には以下の2種類のイメージを理解できる教材の開発を目指す。

(1) 地震波はどのように伝わるのか? 地震波からどうやって地球の内部構造を知るのか? : 寒天模擬地殻構造を用いた地震探査演習の教材

(2) 震源では何が起きているのか? : 寒天模擬地殻構造を用いた断層の動的破壊実験の教材

さらに、本課題では公開授業、一般公開等で研究者が教材を使用して実演するだけでなく、各学校などで教職員の方が簡単に実演できる教材の開発も検討する。実演者が限定されず、広く実験が行えることで、小学生から一般の方まで、幅広い対象に見て触って実感できる演習が体験可能となることを目指す。また、高校生や大学生向けには、教材を利用した演習や講義の実施とその効果をアンケート調査等によって確認し、教材と内容の改善を実施する。

以上より、これまでイメージしづらかった動的な現象としての地震像が実際の現象を目の前で確かめられることで、様々な年齢、対象者に対して理解しやすくなることが期待される。地震のイメージを持てることは、防災の観点からも必要な知識を身につけることに等しく、重要なことである。本課題での成果を足がかりとして、地震の知識普及、情報発信の将来展開につなげたい。

3. 研究の方法

本課題では以下の2種類の実験の開発を実施した。それぞれについて具体的に述べる。

(1) 寒天模擬地殻構造を用いた地震探査実験

地殻に見立てた層構造状の寒天の最上部表面に振動を与えることで、人工的な発振源から構造内部の弾性波の伝播を観察することができる。振動により寒天は変形するので光弾性で波の伝播を可視化できる。肉眼で数m/s(自転車程度の速度)の伝播速度の観察が可能であるが、実際には高速度カメラで撮影した動画のスロー再生によって波の伝播の様子を確認する。地震探査で使用する地震計の代わりに、画像データ処理によって地震計記録と類似のデータを作成することができる。ここでは教職員の方などが手軽に実行できるような教材としてのパッケージ作成を目指す。具体的には、以下の作業を実施した。

身近な材料(食用寒天、殺菌剤、家庭用デジタルカメラやスマートフォンなど)で実験が可能な道筋と方法を確立するための実験を実施した。

実験データの処理に必要なプログラムを整備するとともに、マニュアル等を作成した。

普及活動の手段や方法について情報収集し、検討しながら、普及活動及び教育的効果の定

量的評価を行った。実際には、受講前後のアンケート調査や受講後のレポート提出によって評価した。

効率良い可視化を実現するために、振動限（叩き方や振動発生装置）を工夫することによる改善を検討した。

構造の複雑化や反射法地震探査実験への適用について検討を進めた。

(2)寒天模擬地殻構造を用いた断層の動的破壊実験

寒天の動的破壊実験では、地殻に見立てた弱面（断層）入りの寒天板に荷重を加えることで、準静的な震源核の形成過程から、不安定で動的な破壊（すなわち地震）までを観察することができる。破壊先端は応力集中するので光弾性で可視化できる（図2）。肉眼で数m/sという破壊伝播速度の観察が可能である。荷重を手で加えているので荷重を加えて仕事をすることによるエネルギーの蓄積と破壊によるエネルギーの解放を実感することができる。本実験はかつて地震研究所の一般公開でも実演した実績がある。ここでは手軽に実行できる教材作成を目指す。

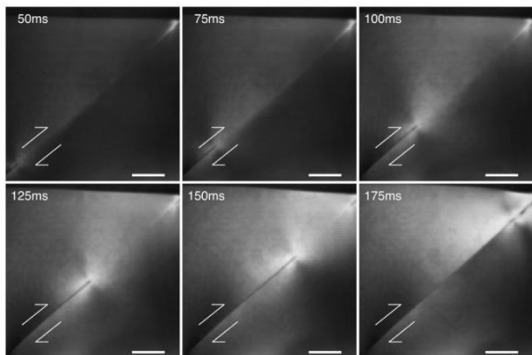


図2. 高速カメラ画像のスナップショット。水平方向に圧縮されたアガロースゲルの断層に沿って、破壊先端が左下から右上へ加速し、最終的にS波速度程度で伸展する。光弾性により応力集中域すなわち破壊の先端が明るく見えている。

具体的には以下の作業を実施した。

身近な材料（食用寒天、家庭用デジタルカメラなど）で実験が可能な道筋と方法を確立するための実験を実施した。特に実験試料作成用の型や実験時に使用するヘレシウセルの設計を工夫し、手軽な実験を可能とした。

実験マニュアル等を作成し、中高生向けおよび一般向けの実験、演習方法について検討し、予備実験を実施した。

破壊速度と破壊先端で消費されるエネルギーの関係を定量化し材料の動的破壊物性を評価することで、さらに発展的な実験が可能かを検討した。

4. 研究成果

通常、地震現象を目で見ることは、地震波の伝播速度が速いため実現が難しい。大学などで実施する地震学の演習では、実際に屋外で地震計によって観測したデータを研究室

に持ち帰り、処理、解析する方法が一般的である。実習中には現象を観察することができず、ハンマーで地面を叩く作業に没頭することになる。そのため、地震学や物理学の知識が不十分な対象者にとって、地震波が地下を伝播して地震計まで到達してきたことや、そのようなデータを使った探査手法で地下構造が明らかになることもその場で実感することが難しい

本課題で開発した実験教材では、誰でも直感的に波の伝播を実感できるように、地殻を模擬する媒質として、地震波（S波）伝播速度の比較的遅い寒天（もしくはアガロース）ゲルを用いることが特徴である。この実験は教室の机の上で実施が可能で、地震波が伝わる様子をその場で一目で容易に把握する事が可能であり、さらに解析に必要な波形データも得ることができる。つまり、寒天などのハイドロゲルには、透明なので光弾性による歪み（力）の可視化が可能（図3）、弾性波速度が小さく弾性波伝播や破壊現象の観察が容易、試料が安価で加工が容易、といった利点がある。寒天ゲルなどの透明な物質は、歪みに応じて複屈折した光を干渉させ、歪みを可視化することができる。また、寒天ゲルのS波速度は濃度約1%で約4~5m/sであり、地中を伝わる実際の地震波速度よりも3桁程度小さい。さらに、寒天ゲルの弾性波速度はゲルの濃度で調整することができ、試料の加工も容易なので任意の速度構造をデザインすることができる。

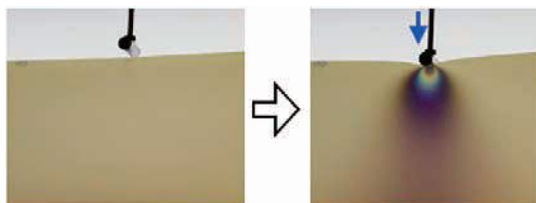


図3. 光弾性による歪みの可視化。ハンマーを寒天ゲルに押し付けることで生じた歪みが縞模様として見える。

本課題では、寒天模擬地殻を用いた地震探査演習教材として、屈折法地震探査の演習教材を開発したので、これについて述べる。

(1)寒天模擬地殻構造を用いた地震探査演習の教材

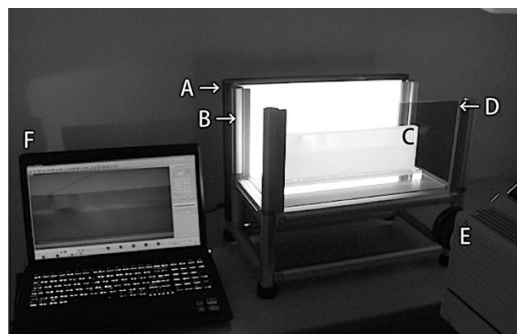


図4. 室内地震探査実験装置。A:光源、B: D: 偏光板、C:ゲル試料、E:カメラ、F:パソコンで構成されている。

製作方法

(i) 実験装置の構成

実験装置は地殻に見立てたゲル試料（寒天模擬地殻）、地震波を可視化するための光源および偏光板、カメラ、収録装置としてのパソコンから構成される（図4）。

実験フレームは、アルミフレームを用いて製作した。光源は、A3サイズのLEDトレーサーを使用した面光源である。偏光板は円偏光フィルムをアクリル板に接着して作製した。

(ii) 寒天模擬地殻の作製

寒天（もしくはアガロース）ゲルを用いて寒天模擬地殻を作製する。ゲルの濃度によって弾性波速度が変えられる。サイズ 350mm×100mm×20mm のゲル試料を作るためにアクリル製型枠を作製した（図5）。実習前の準備として寒天模擬地殻を作製しておく必要がある。1回の作業時間は30分程度である。2層構造（例えば濃度1%と3%）にする場合は、最初の層が固化してから、もう一方の濃度の層を作製するので、2回の作業が必要となる。は、最初の層が固化してから、もう一方の濃度の層を作製するので、2回の作業が必要となる。

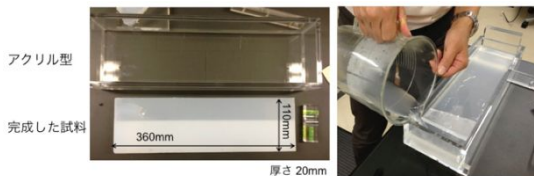


図5. (左) アクリル型と完成した寒天模擬地殻（2層）。(右) アクリル型にゲル溶液を注ぐ様子。

(a) 1回の作業

目的の濃度になるように寒天粉末と水を計量する。寒天粉末を耐熱ビーカーの水中に分散させ、電子レンジで加熱し、攪拌して十分に溶解させる。できたゲル溶液をアクリル型に注ぎ、放置して固化させる。

(b) 2層構造の作り方

最初に流し込んだゲル（例えば濃度1%）が固化してから、一部をカッターナイフで切り取り、そこへ違う濃度のゲル溶液（例えば濃度3%）を注ぐ。別の方法として、あらかじめダミーのアクリルブロックを入れた型に最初のゲル溶液を流し込み、固化してからダミーのブロックを抜きだして、そこへ違う濃度のゲル溶液を注いでも良い。

(iii) カメラ

弾性波の伝播を詳細に観察するために高速カメラで撮影する。毎秒240-1000コマ程度撮影可能な市販のコンパクトデジタルカメラやスマートフォンで十分に撮影できる。

(iv) 仮想地震計

画像から波形を取得するための仮想地震計プログラムを開発した。動画の任意の点の輝度（明暗）の時間変化を描き出せば波形が得られる（図6）。画像上の任意の点に仮想的な

地震計をピクセル単位で設置できる。実習では複数の波形を並べたものを印刷して解析に用いる。

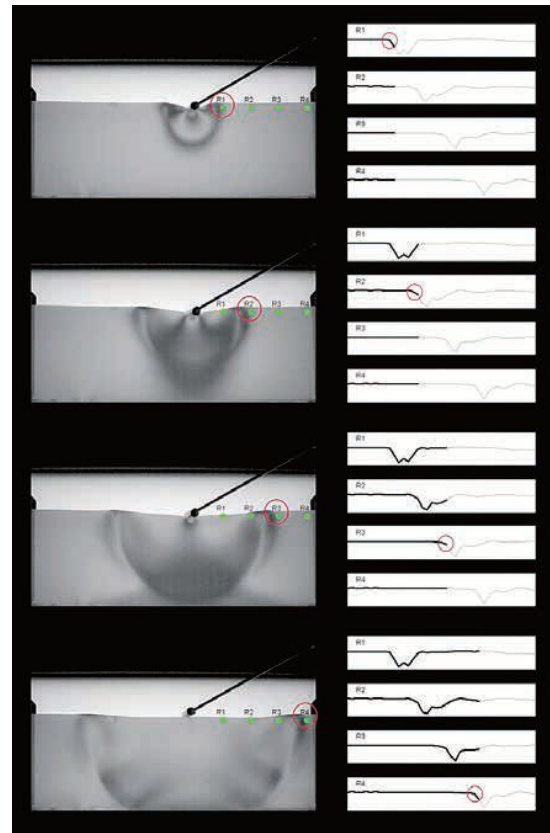


図6. 均質な寒天模擬地殻での実験のスナップショット（4時刻）と仮想地震計（4地点）での波形。

実習方法

地震波で地下構造を探る原理、手法を学ぶとともに、地震波が伝わる様子を実感することで屈折法地震探査の基礎について理解を深めることをねらいとする。また、地震波が寒天や地下をどのように時空間的に伝わるかをイメージするとともに理解することも重要なねらいである。

(i) 導入（約20分）

なぜ、地球内部を調べるのか、どうやって調べるのかを説明する。

(ii) 講義：屈折法地震探査の原理の説明と例題（約30分）

実習ではまず、均質な寒天模擬地殻（濃度1%）をハンマーで叩いて地震波の伝わる様子を実際に見せながら、地震探査の原理を解説した。寒天模擬地殻を実際に叩いてスロー再生した。均質な寒天模擬地殻の実験で得られた波形を例題として解析し波形の読み取り方などを確認する。

(iii) 実習：2層構造での実験、波形解析から構造の推定（約30分）

2層構造の寒天模擬地殻を用いてグループ毎にもしくは代表者が実験をして高速カメラで撮影してデータを取る。波の伝わる様子を、肉眼や撮影した動画で観察する。動画のスロー再生で直達波と屈折波がどのように

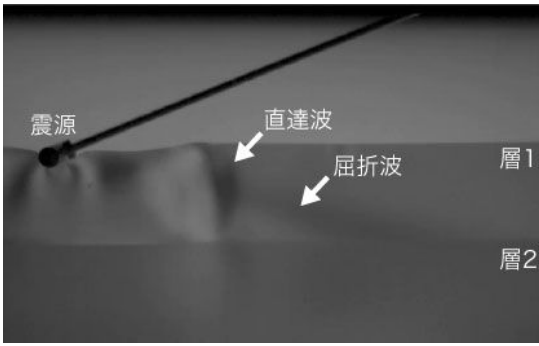


図 7. 水平 2 層構造での実験。直達波と屈折波の波面が観察できる。

伝播するかを観察しスケッチする。図 7 に示すように、直達波の波面とともに屈折波の直線的な波面が観察できる（層 1 は濃度 1%、層 2 は濃度 3% のゲル）。この屈折波は、層 2 から層 1 へ左下から右上へ進む様子が見え、観察できる。次に画像処理から得られた波形を印刷して、走時（波の到達時間）を読み取り、第 1 層と第 2 層の地震波速度と層境界の深さを推定する。図 8 は水平 2 層構造での実験で仮想地震計から得た波形を並べたものである。図 8 には直達波と屈折波の立ち上がりを結んだ直線が既に引いてあるが、実習では各自で波形の立ち上がりを読みとって直達波と屈折波の直線を引き、それぞれの走時曲線の式を求める（図 9）。求まった走時曲線から、図 8 の式を使って各層の弾性波速度と層境界の深さを求める。最後に実際に寒天模擬地殻に定規をじかにあて、層境界の深さを測り答え合わせをする。

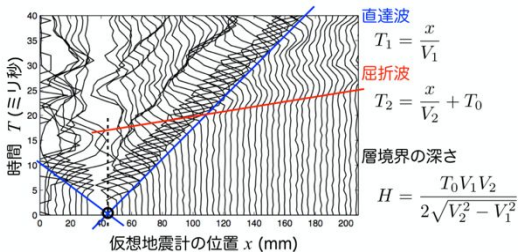


図 8. 水平 2 層構造での実験で仮想地震計から得た波形を並べたもの。直達波（青実線）とともに屈折波（赤破線）による走時の折れ曲がり確認できる。直達波と屈折波の走時を読みとり、各々の走時の式から弾性波速度（ V_1 、 V_2 ）と層境界の深さ（ H ）を求める。



図 9. 印刷した波形から定規とペンを使って走時を読み取り、解析した後（左）、層境界

の深さを確認して、答え合わせをする（右）。

(iv) まとめ

最後にまとめとして、実際の地震探査による最新の研究成果を紹介する。

実践効果

(i) アンケート結果

実習の前後で生徒にアンケート調査を行った結果をまとめたものを図 10 に示す。アンケートから、生徒は地震研究に対する興味は高いものの、実際の研究現場でどのように研究が行われているかをよく知らないことが分かった。実習後は地震探査と地震波伝播について実感を持って理解してもらえたようである。また最新の研究成果等も紹介し、実習の内容が調査や研究の現場でも活用されていることへの理解を深める構成として実習プログラムを組んだことで、実習前後で地震探査への認知度も増していると推測できる。

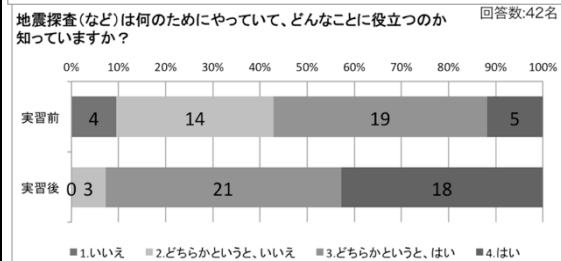
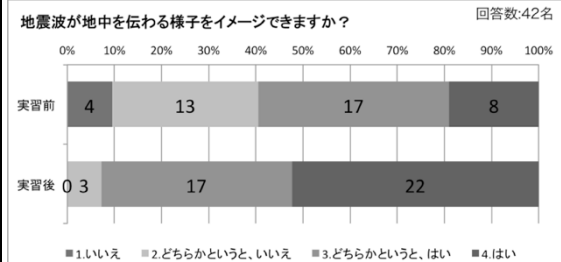
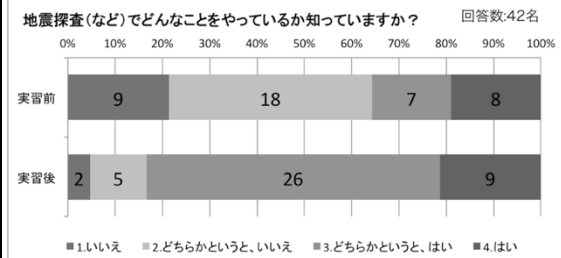
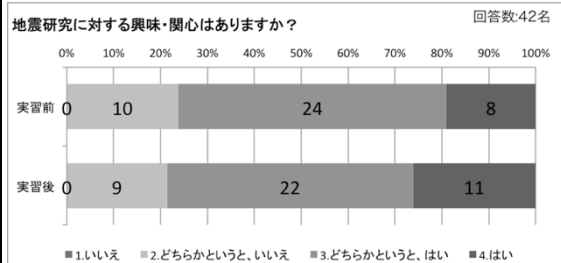


図 10. 実習前後のアンケート調査の結果。

講義では、実際に波の伝播を撮影し、動画再生で見たときの聴衆の反応が大きく、実習を体験した高校生の感想からも実際に自らが起こした現象を目で見ることの重要性を

感じられる内容が多く寄せられ、室内地震探査実験装置ならではの効果があつたと考えられる。実習では、解析に必要な屈折波の走時の式の導出はせず、結果の式だけ示した。屈折の臨界角と媒質の速度比の関係式を与えれば、高校生の数学の知識で導出可能である。授業では興味があれば宿題として後でやってみるように伝えたが、実際には多くの生徒が講義と実習の間の休憩時間を利用して熱心に導出に取り組んでいた。弾性波の伝わる様子を実際に生で見ると実感したことにより、生徒の現象へ興味を喚起し、自ら進んで学習する意欲を高めることができたのかも知れない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

桑野修、仲西理子、動的な地震現象の理解のための実験・演習教材の開発と実践、日本地震学会モノグラフ、査読無し、No.4、2015、p.110-112

<http://zisin.jah.jp/pdf/monograph4.pdf>

桑野修、寒天ゲルを用いた室内地震探査実験装置の開発と実践、平成26年東レ理科教育賞受賞作品集、査読無し、2015、p.34-38

http://www.toray-sf.or.jp/activity/science_edu/pdf/h26_08.pdf

桑野修、寒天を使って地震を見る、日本地震学会広報誌なみふる110号(総8p.)、査読無し、2017、p.4-5、日本地震学会、<http://www.zisin.jp/publications/pdf/nf-vol110.pdf>

〔学会発表〕(計4件)

桑野修、仲西理子、山下幹也、柳澤孝寿、実習・実演のための寒天ゲルを用いた室内地震探査実験、日本地球惑星科学連合-American Geophysical Union 2017年合同大会、2017年5月20日、「幕張メッセ(千葉県千葉市)」

桑野修、仲西理子、Development of Laboratory seismic exploration experiment for education and demonstration, American Geophysical Union 2016 Fall Meeting、2016年12月12日、San Francisco (U.S.A.)

仲西理子、桑野修、柳澤孝寿、山下幹也、小俣珠乃、今村仙子、諸橋葉子、首藤慶子、佐藤紀彦、屈折法地震探査のための実験・演習教材の開発と実践、物理探査学会第132回学術講演会、2015年5月11日、「早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都新宿区)」

桑野修、仲西理子、動的な地震現象の理解のための室内地震探査実験装置の開発と実践、日本地球惑星科学連合2014年大会、2014年4月29日、「パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)」

〔図書〕(計1件)

桑野修、寒天を使って地震を見る、なみふる110号、p.4-5、日本地震学会、

<http://www.zisin.jp/publications/pdf/nf-vol110.pdf>

(2017年7月発行)

〔その他〕

ホームページ等

海洋研究開発機構広報活動、地震学・地質学実習のホームページ

http://www.jamstec.go.jp/j/pr/gg_epo/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲西 理子 (NAKANISHI, Ayako)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・技術研究員

研究者番号：30371727

(2) 研究分担者

桑野 修 (KUWANO, Osamu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・研究員

研究者番号：30511969

(3) 連携研究者

伊東 明彦 (ITO, Akihiko)

宇都宮大学・教育学部・教授

研究者番号：70134252

山下 幹也 (YAMASHITA, Mikiya)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・研究員

研究者番号：00415978

柳澤 孝寿 (YANAGISAWA, Takatoshi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部ダイナミクス研究分野・主任研究員

研究者番号：20359186

山岸 保子 (YAMAGISHI, Yasuko)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・研究技術専任スタッフ

研究者番号：10359185

(4) 研究協力者

小俣 珠乃 (OMATA, Tamano)

今村 仙子 (IMAMURA, Hisako)

諸橋 葉子 (MOROHASHI, Yoko)

首藤 慶子 (SHUDO, Keiko)

佐藤 紀彦 (SATO, Norihiko)

加賀谷 一茶 (Kagaya, Issa)