

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25610129

研究課題名（和文）中周期帯スロー地震観測のためのレーザー歪偏差計の開発

研究課題名（英文）Development of a laser strain gradiometer for observation of slow earthquakes in the intermediate frequency band

研究代表者

新谷 昌人（ARAYA, Akito）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：30272503

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は現在明確には観測されていない中周期帯、すなわち継続時間が1000秒から10万秒程度のスロー地震を観測する手法として、新規にレーザー歪偏差計を開発し、プレート境界などで起こると予想される当該イベントの初検出を目指すものである。レーザー歪偏差計は同一直線上の2本の基線の間の歪の差、すなわち歪偏差をレーザー干渉計で直接計測する。機器の主要なノイズは温度変化による構成部品の熱膨張であると考えられ、温度環境の実測および有限要素法による熱伝導シミュレーションを行い、温度変動の影響を受けにくい装置の基本構成や設置方法に関する結論が得られた。それらに基づいた歪偏差計を設計・製作した。

研究成果の概要（英文）：This research aims for developing a laser strain gradiometer and observing slow earthquakes in the intermediate frequency band, with duration time from one thousand to one hundred thousand seconds, which likely occur at plate boundaries. The laser strain gradiometer measures difference in two neighboring baselines aligned in line using a laser interferometer. Its dominant noise source is thermal expansion of components. An optimized setup and an installation method could be obtained based on the temperature measurement and the heat transfer simulation using the finite element method. As a result, a laser strain gradiometer was designed and fabricated.

研究分野：固体地球計測

キーワード：スロー地震 レーザー 歪計 干渉計 歪偏差

1. 研究開始当初の背景

スロー地震はプレート境界や断層で起こる、通常の地震と比べてゆっくりとしたせん断すべりの現象であり、その発生場所が大地震の震源と隣接する分布であることから、両者の関連が指摘されている。しかし、スロー地震の物理過程は明らかにされておらず、長い時間スケールのすべりから、地震計でとらえられるような短期的な断層すべりまで様々な時間スケールの事象が観測されている。

これら断層運動の時間スケールと規模の間にスケーリング則があることが指摘され、統一的に現象を記述するための仮説が提案されている。地震モーメントを M_0 、地震の継続時間を T とすると、通常の地震は $M_0 T^3$ の傾向を示すのに対してスロー地震は M_0

T の関係になっている。継続時間の長いスローリップやサイレント地震はGPSや伸縮計など測地的な方法で観測されている。短周期側の低周波微動は地震観測網で観測されている。これらの中間の時間スケールのスロー地震に相当するイベントは見つからない。この帯域では、現象自体が存在しない可能性もあるが、測地観測と地震観測の間であるため、現象が存在しても精度の高い観測がされていないと考えることもできる。そこで、本研究ではこの中間帯域のスロー地震をねらった観測装置の開発を行う。歪の差分である歪偏差を代表者らが考案したレーザー干渉計を用いて高精度に測定する。

2. 研究の目的

本研究では現在明確には観測されていない中周期帯(継続時間 $10^3 \sim 10^5$ 秒)のスロー地震を観測する手法として、新規にレーザー歪偏差計を開発し、プレート境界の当該イベントの初検出を目指すものである。検出できれば、さまざまな時間スケールで観測されているスロー地震が同一の物理過程であるか否かを観測的に決着できるのみならず、物理モデルの

構築に必要な基礎データを提供する。

3. 研究の方法

レーザー歪偏差計は同一直線上の2本の基線間の歪の差、すなわち歪偏差をレーザー干渉計で直接計測する原理であり、脈動など空間波長の長い地動ノイズは空間微分である偏差を計測することにより低減される。一方スロー地震などの空間スケールの小さい震源からの地動は偏差を計測することにより強調され、従来歪や変位の計測では検知が難しかった中周期帯のスロー地震が、歪偏差を計測することにより検知可能になることがモデル計算により示されている。実際の装置では、2本の基線から得られる歪について、どのくらいの精度で差が取れるかが歪偏差の検出性能を決める。

4. 研究成果

まず、典型的なスロー地震から生じる歪偏差の予想振幅を計算した。地下40kmにスロー地震の点震源を想定し、その断層運動が作る地表における歪偏差の振幅および空間分布を計算した。本研究開始時の見積りとほぼ一致する結果が得られた。ただし、空間分布があるため場所によって若干振幅が異なることがわかった。この結果を踏まえ、観測に適した場所を検討した。また、愛知県の犬山観測点と岐阜県の神岡観測点に設置された各レーザー歪計のデータについて、背景ノイズにフィルタをかけて相関を計算した結果、レーザー歪偏差計を用いて背景ノイズが効果的に低減できることが計算で確かめられた。

レーザー歪偏差計に関しては、最初の実験室において検出精度の評価を行った。小型の真空容器内の同一光学台上にビームスプリッターを中心に左右対称な各基線の差の信号を干渉光として得られる光学系を構成し、歪偏差のノイズレベルを計測した。その結果、対称型レーザー干渉計のノイズは、周期10秒から

20000秒の帯域では、光路のわずかな非対称性とレーザー波長の不安定性に起因し、それより長周期側では温度変化による光学定盤や光学素子の熱膨張に起因すると分かった。また、温度変化は当初光学台の支柱の熱伝導によるものが大半と予想していたが、計測部をモデル化し大まかな伝熱量を見積もったところ、支柱の熱伝導の寄与が半分程度、残留空気の熱伝導と輻射による伝熱がそれぞれ1/4程度だと計算された。この結果と同程度のノイズが残留すると仮定すると、継続時間1万秒のスロー地震を観測できるまでノイズを落とすには500m以上の基線長が必要であり、伝熱を低減すべきであることが分かった。

そこで、目標とする検出精度を現実的な基線長で実現するために、レーザー歪偏差計の計測部の検出性能を向上させる方法を検討した。長周期側の温度変化によるノイズの影響を低減させるために、外部からの伝熱を減らし断熱する方法および一定温度の岩盤に熱結合して温度変化を低減させる方法の2つを検討した。その結果、後者がより現実的に構成できることがわかった。また、干渉計のノイズの短周期側を調べたところ、レーザー光強度の揺らぎ、素子の雑音、光軸ずれに伴うノイズ、ADC収録装置のノイズからなっていることがわかり低減策を講じた。

また、現実的な装置の構成で定量的なノイズの評価を実施した。有限要素法解析ソフトウェアを用いて、真空容器の熱伝導のシミュレーションを行った。真空容器の底板を模したステンレス塊を断熱材で覆い地面と熱結合するというモデル化を行い、断熱材および床面の表面にステップ状の温度変化を入力してステンレス塊の温度変化を計算した。その結果、熱結合した場合は 10^5 秒の時間スケールで 4.5×10^{-2} Kの温度変化、熱結合しなかった場合は 2.4×10^{-1} Kの温度変化になると計算された。観測坑の床面を断熱材で覆うことができる場合は、真空容器を地面に熱結合したほうが温

度変化が小さく、そうでない場合は熱結合しないほうが良いことが分かり、レーザー歪偏差計の装置形状や設置方法に関する指針が得られた。

さらに、観測所坑内での温度環境の実測および実際の装置構成に近いモデルを用いた有限要素法による熱伝導シミュレーションを行い、温度変動の影響を受けにくくなる条件を検討した。その結果、空気による温度擾乱を抑えるための装置全体の断熱、真空容器の岩盤への熱的な結合、熱容量の大きい光学定盤と真空容器との熱的分離、などが有効であることがわかり、基本構成や設置方法に関する結論が得られた。それらに基づいた歪偏差計を設計・製作した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

Araya, A., A. Takamori, W. Morii, K. Miyo, M. Ohashi, K. Hayama, T. Uchiyama, S. Miyoki, and Y. Saito, Design and operation of a 1500-m laser strainmeter installed at an underground site in Kamioka, Japan, Earth, Planets and Space, 査読有, in press.

Nagorny, V. D., S. Svitlov, and A. Araya, Improving absolute gravity estimates by the Lp-norm approximation of the ballistic trajectory, Metrologia, 査読有, 53, 2016, pp. 754-761.

Araya, A., M. Shinohara, T. Kanazawa, H. Fujimoto, T. Yamada, T. Ishihara, K. Iizasa, and S. Tsukioka, Development and demonstration of a gravity gradiometer onboard an autonomous underwater vehicle for detecting massive seafloor deposits, Ocean Engineering, 査読有, 105, 2015, pp.

64-71.

Takamori, A., A. Araya, W. Morii, S. Telada, T. Uchiyama, and M. Ohashi, A 100-m Fabry-Perot Cavity with Automatic Alignment Controls for Long-Term Observations of Earth's Strain, *Technologies*, 査読有、2、2014、pp. 129-142.

Telada, S., A. Araya, and A. Takamori, Crustal strain observation using a two-color interferometer with accurate correction of refractive index of air, *Technologies*, 査読有、2、2014、pp. 115-128.

新谷昌人、寺田聡一、長基線レーザー干渉計による地殻ひずみの高精度観測、*光学*、査読無、43、2014、pp. 73-79.

〔学会発表〕(計5件)

新谷昌人、高森昭光、森井互、三代浩世希、大橋正健、KAGRA 地下サイトに建設された 1.5km レーザー歪計の設計と運用、日本地球惑星科学連合大会、2016年5月23日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)。

出口雄大、新谷昌人、レーザ歪偏差計の開発と温度変化ノイズの測定、日本地震学会秋季大会、2014年11月26日、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県・新潟市)。

出口雄大、新谷昌人、レーザーひずみ偏差計の開発～温度依存ノイズの低減、地球惑星科学連合大会、2014年4月30日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)。

出口雄大、新谷昌人、レーザーひずみ偏差計の開発～真空中の性能評価～、日本地震学会秋季大会、2013年10月7日、産業貿易センター(神奈川県・横浜市)。

出口雄大、新谷昌人、スロー地震の観測を目指したレーザー干渉型ひずみ偏差計の開発とその状況、日本地球惑星科学連

合大会、2013年5月19日、幕張メッセ(千葉県・千葉市)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新谷 昌人 (ARAYA, Akito)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：30272503

(4) 研究協力者

出口 雄大 (DEGUCHI, Takehiro)
東京大学・理学系研究科・大学院生