

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18204039

研究課題名（和文） 量子標準に基づいた次世代長期地殻変動観測手法の開発

研究課題名（英文） Development of new methods for monitoring crustal deformation based on quantum standard

研究代表者

新谷 昌人 (ARAYA AKITO)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：30272503

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、長期地殻変動観測の高精度化に必要と考えられる数百 m～数 km の空間スケールにおける観測手法を、普遍的な長さ基準である「量子標準」を用いた方法により実現することにある。神岡地下施設および犬山観測壕においてレーザー伸縮計による定常観測を実施し、神岡地下施設においては 2 光波干渉計、弾性波応力計、絶対長干渉計の複数の手法による同時観測を行った。その結果、長基線化が容易な 2 光波干渉計が有望な手法であることが示された。

研究成果の概要（英文）：The main purpose of this research is to develop a new method for the middle-scale (~100m to ~1000m) long-term strain observation using quantum standard as a measurement reference. We carried out continuous observations with laser strainmeters installed at Kamioka mine and Inuyama vault observatory, and performed parallel observations at Kamioka mine with a two-wavelength interferometer, an elastic-wave stressmeter, and an absolute distance meter. As a result, we have concluded that the two-wavelength interferometer would be a candidate for the middle-scale strain observation method if its baseline is scaled up.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2007 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2008 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
総計	29,400,000	8,820,000	38,220,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地殻変動、地震、測地、レーザ、計測工学

1. 研究開始当初の背景

従来の地殻変動観測手法は横坑に設置された 10m～100m の長さの伸縮計などによる観測および GPS による 10km～100km スケールの地表での観測に大別される。前者は石英管などを基準に地面の伸縮を測定するものであり、地球潮汐や地球自由振動などが観測可能なひずみ分解能、 10^{-9} ～ 10^{-11} を有している。しかし、数日以上長期変動に対して

は気圧・気温・降雨の影響が大きく、横坑の観測データからプレート運動に伴う長期的な地殻変動すなわちテクトニックなひずみの議論をすることは困難であるといわれる。

一方、GPS の場合は分解能は数 mm であるが、観測網として広域に展開できるため、地震にともなう地殻変動や長期観測によりテクトニックなひずみ変動が観測されている。GPS 観測の欠点は分解能の低さで、たと

例えば 10^{-7} /year の典型的なテクトニックひずみを観測するには 100km 基線でも 1 年以上要する。GPS で用いられているマイクロ波の波長(約 20cm)を考えると原理的に分解能の向上は難しい。地震の準備過程を含めた地殻変動を捉えるには、短期間で変動を検出する必要があり、GPS よりも精度の高い長期地殻変動観測手法の確立が急務であった。

2. 研究の目的

本研究では、従来の二つの主要な地殻変動観測のスケール、すなわち横坑に設置された伸縮計による 10m~100m のスケールの観測、および GPS による 10km~100km 基線での観測、の中間のスケール(数百 m~数 km)の地殻変動を観測する手法を開発する。具体的には、2 光波干渉計をベースに「量子標準」を測定基準としたシステムを開発する。その結果、高分解能と長期安定性をともに有する観測が可能となり、テクトニック変動をリアルタイム観測できる長期地殻変動観測手法の確立をめざす。

3. 研究の方法

本研究で開発する 2 光波干渉計は、量子標準としてヨウ素のガスの吸収を用いて波長安定化されたレーザー光および原子時計の 2 つを組み合わせ、レーザー干渉縞の周波数をカウントすることで実現される。数 km の距離で精度良く測定するために、異なった 2 波長の光の干渉を用いたヘテロダイク式の測距方式を用いる。従来の 2 光波測距よりも格段に高い精度で空気の屈折率が補正可能で、地球潮汐が観測可能な 10^{-8} のひずみ変動が測定できると期待される。既存の 100m レーザー伸縮計(神岡、全基線は真空中)や弾性波応力計、絶対長干渉計との比較測定による精度評価を行い、テクトニック変動がリアルタイム観測できる長期地殻変動観測の手法を確立する。

4. 研究成果

まず、本研究で開発する 2 光波干渉計を用いた地殻変動観測システムの性能評価基準となる神岡 100m レーザー伸縮計の連続観測を実施した。地震にともなうひずみステップを解析し、分解能や観測の信頼性などを評価した。2004 年から 2008 年に起こった M5.8-M7.4 の 10 の地震により、 10^{-8} ~ 10^{-10} 程度のひずみステップがレーザー伸縮計により検知された。地震波解析からもとめられた震源断層とこれら高精度な測地学的観測結果は整合することが定量的に確認され、逆に far-field での測地学的観測により震源断層パラメーターや地盤の剛性率について制限を与えることができることを示した。従来の GPS や SAR による近地での測地学的観

測に対して、それらの手法で検出できない海域地震や深発地震など遠地における信頼できる測地観測手法として位置づけられる。図 1 は 2007 年 7 月に日本海で起こった深発地震(震源深さ 374km、M6.9)の際に神岡で観測されたステップ(NS: -5×10^{-10} 、EW: -6×10^{-10})であり、これは GPS や SAR では検出できないレベルの地殻変動である。

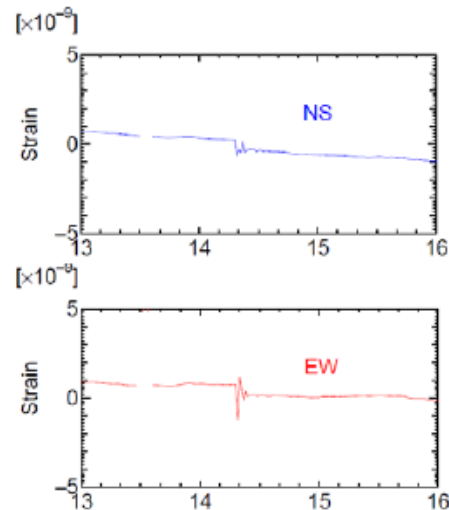


図 1 深発地震の際に観測された歪ステップ



図 2 神岡地下サイトの装置

2 光波干渉計の開発については、産業技術総合研究所(茨城県つくば市)の光学トンネル内に建設した基線長約 80m のプロトタイプを用いて試験観測を実施した。その結果、1 光波に気圧・気温補正を行った場合と 2 光波単独の場合はほぼ整合した結果が得られ、 10^{-9} 台の観測精度が得られた。地震波形については干渉縞の欠落なく記録できることを示した。この装置を神岡地下サイトに移設し、レーザー伸縮計・絶対長干渉計との同時観測

を実施した。その結果、光学トンネルで得られたものと同程度の 10^{-9} の観測精度が得られ、地球潮汐とともに 2010 年 2 月に起こったチリ地震などの遠地地震波形についても高い精度で観測された。深さ・地質等の異なる 2 箇所の観測サイトにおいて空気中の干渉計で同等の性能が得られ、基線のスケールアップも従来の真空ダクトを必要とするレーザー伸縮計に比べて格段に容易であることから、本研究で開発された 2 光波干渉計は数百 m～数 km の空間スケールでの地殻変動観測に有望な方法であると結論された。図 2 は神岡地下サイトにおける装置の配置を示す。一番右のダクトは 100m レーザー伸縮計が収納されている真空装置である。その左隣のは 2 光波干渉計の基線をガイドする塩化ビニル製のパイプであり、レーザー伸縮計と並行して南北方向に設置されている。レーザー伸縮計は高真空（数 Pa 以下）を維持する必要があるのに対し、2 光波干渉計は大気圧で動作させることができる。

神岡で実施した弾性波応力計は、25m 基線のパルス波の伝播時間を原子時計により正確に計測し岩盤の応力状態をモニターするものであり、期待通りの計測精度が得られた。長期変動に関しては、設置後の初期ドリフトが継続し、落ち着くのに時間を要している。ドリフトの小さい設置方法についてさらなる検討が必要と考えられる。

名古屋大学犬山観測所で実施した石英管伸縮計と 30m レーザー伸縮計の並行観測では、後者のノイズが有意に低いことが示された。量子標準であるレーザー波長を用いた計測手法の優位性が確認され、石英管基準尺の誤差要因を精査することにより過去の石英管伸縮計による観測データを補正できる可能性が認められた。

このように、量子標準をベースとした 4 つの手法（レーザー伸縮計、2 光波干渉計、弾性波応力計、絶対長干渉計）の同時観測を実現し、とくに 2 光波干渉計のシステムで設計以上の性能が得られ、安定した地殻変動観測ができることを実証した。中基線干渉計として有望であることが確認され、当初の研究計画をほぼ達成することができた。

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 9 件）

① A. Araya, A. Takamori, W. Morii, H. Hayakawa, T. Uchiyama, M. Ohashi, S. Telada and S. Takemoto, Analyses of far-field coseismic crustal deformation observed by a new laser distance measurement system, Geophysical Journal

International, 査読有, 181, 2010, 127-140

② Hori, T., A. Araya, S. Moriwaki and N. Mio, Formulation of frequency stability limited by laser intrinsic noise in feedback systems, Applied Optics, 査読有, 48, 2009, 429-435

③ Araya, A., W. Morii, H. Hayakawa, A. Takamori, et al., Broadband observation with laser strainmeters and a strategy for high resolution long-term strain observation based on quantum standard, J. Geod. Soc. Japan, 査読有, 53, 2007, 81-97

④ Hori, T., A. Araya, S. Moriwaki and N. Mio, Development of a wavelength-stabilized distributed Bragg reflector laser diode to the Cs-D2 line for field use in accurate geophysical measurements, Rev. Sci. Instrum., 査読有, 78, 2007, 026105

⑤ 佐野 修・中山芳樹・横山幸也・平田篤夫, 神岡鉦山跡津川坑内における地殻応力測定結果について, 東濃地震科学研究所報告, 査読無, 21, 2007, 143-149

〔学会発表〕（計 7 件）

① 新谷 昌人, レーザー伸縮計による far-field coseismic 地殻変動の観測, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 28 日, 千葉市（幕張）

② Akito Araya, Broadband observation with a laser strainmeter in Kamioka Mine and analyses of low-frequency background noise, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, 2008 年 11 月 26 日, 茨城県つくば市

③ 新谷 昌人, 超伝導重力計・広帯域地震計との比較観測によるレーザー地震計の絶対校正精度の評価, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007 年 5 月 21 日, 千葉市（幕張）

〔図書〕（計 1 件）

① 新谷 昌人, わが国におけるレーザー歪計観測の進展, 光科学研究の最前線 2, 強光子場科学研究懇談会, 2009, 72

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・准教授
研究者番号：30272503

(2) 研究分担者

佐野 修 (SANO OSAMU)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：20127765

高森 昭光 (TAKAMORI AKITERU)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号：00372425

堀 輝人 (HORI TERUHITO)
東京大学・地震研究所・研究員
研究者番号：40463898

寺田 聡一 (TERADA SOICHI)
産業技術総合研究所・計測標準研究部門・
研究員
研究者番号：30357545

(3)連携研究者

山田 功夫 (YAMADA ISAO)
中部大学・全学共通教育室・教授
研究者番号：60022670