

輪読ゼミ資料

Design and operation of a 1500-m laser strainmeter installed at an underground site in Kamioka, Japan

EARTH PLANETS AND SPACE (2017. June)69:77

Akito Araya et.al

発表者 田中宏樹

2019 年 4 月 1 日

2016 年 8 月から、重力波検出器 KAGRA と並行して、長さ 1500m のレーザー歪計を用いた地面振動の観測が行われている。これと KAGRA の連携により、KAGRA の観測の長期安定性向上を目指している。観測された波形はほぼ理論値と一致した（ただし振幅は、地理的効果により、理論値よりも 13 %小さかった）。この歪計で観測した mHz 帯における地面の歪み (strain) の background ノイズは 10^{-12} 未満であった。地震の際、strain が 6×10^{-7} の振動を観測しても問題は生じなかった。

1 Introduction

地面振動測定の手段は複数存在する。中でもレーザー歪計は、低周波振動を高い精度で測定できることが知られている。ただ、基線長の短いレーザー歪計は、local な影響を受ける。例えば、神岡の基線長 100m の歪計は、local な水の影響を受けてしまう。基線長を長くすると local な影響を軽減できるので、1500m のレーザー歪計を作った。

2 1500m レーザー歪計

1500m レーザー歪計は Fig1 の場所にある。歪計で 1500m というのは史上最長である。各機器のパラメータは Table1,2 にまとめられている。

歪計のレイアウトが Fig2 に描かれている。2つの retroreflector がそれぞれ 1500m 離れた真空槽にあり、非対称干渉計を構成している。retroreflector は地面に固定される。光路の圧力が strain を生むので、それを十分小さくするため、光路は真空中に存在する。真空度の Requirement は 10^{-4} [Pa] であるが、現在の真空装置で維持できる圧力を考慮し、パイプ中の平均圧力は 0.01Pa 未満となっている。

ビームは 5m の input path で平行にして真空槽へ入れる。ビーム径が小さいと、往復 3km の間の干渉のずれによる影響が出るため、径は十分大きくなければならない。ビーム径は Front で 45mm、end で 32mm になる。2つの真空槽をつなぐ真空パイプは直径 400mm のものを使用する。

レーザーは Nd:YAG で波長 532nm である。周波数はヨウ素安定化により高い安定度となっており、それを光ファイバーで input path へ入れる。干渉計を通った干渉縞は 2つの Photo Detector で取得するが、Fig3

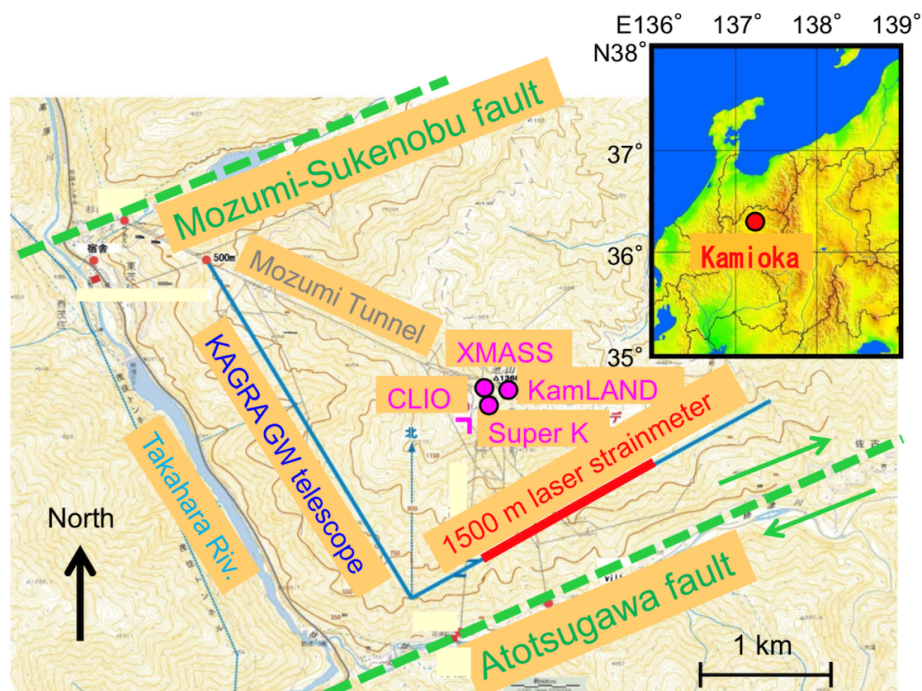


Fig. 1 Location of the 1500-m laser strainmeter and other facilities at the Kamioka underground site. The Atotsugawa fault is located approximately 0.5 km from the strainmeter and is almost parallel. This figure is modified from a map released by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI)

図 1 fig1.1500m レーザー歪計

の直交検出技術を用いる。直交検出技術とは、干渉計の2本の腕のうち、片方に1/4波長板（1/4波長の位相差を与えるレンズ）を入れることで、2本の腕のレーザーの位相（水平成分と鉛直成分）を $\pi/2$ ずらす。するとLissajous曲線ができ、これを歪に変換する。信号はSampling rate 50kHzで取得する。データは自動でstrainに変換される。50kHzで得たデータにはフィルタをかけてaverageをとって、5kHz、200Hz、20Hzデータを作る。これらを解析に用いる。

3 Result and discussion

Fig4の青が取得データ、緑が理論波形である。形は一致しているが、振幅は理論値より13%小さかった。13%の減少は神岡の100m歪み計で測定した地理的効果と一致した。

Fig5では、他の歪み計と比較した。実線が観測地で、点線がstrainのRMSから求めた理論値である。1500m歪計は、2-20mHzでは 10^{-12} より感度が高く、1mHz-10Hzでは 10^{-11} より感度が高い。また、1500m歪計は1-20mHzにおいて、100m歪計よりbackgroundノイズが小さい。どちらもほぼ同じレーザーシステムなので、ノイズが減ったのは基線長の長さによって空間平均化された効果と考えられる。それから、2mHz未満では1500m歪計のノイズが上がり、1.5mHz未満ではBFO（Black Forest Observatory、ドイツ）を超える。Zurnによると、この周波数域では気圧の影響が大きいようなので、1500m歪計の方がノイズが高いのは、気圧による影響と考えられる。

高周波では地面振動の干渉計への応答は減少する。1500mの干渉計の場合、例えば5km/sの振動のcutoff

Table 1 Configuration parameters of the 1500-m laser strainmeter

Item	Value
Coordinates	36°25'48"N, 137°18'36"E
Altitude above sea level	358 m
Depth below the surface	>200 m
Orientation	N60°E, horizontal
Baseline length	1500 m
Diameter of vacuum pipes	400 mm
Designed average pressure in vacuum pipes	<0.01 Pa

Table 2 Optical parameters for the 1500-m laser strainmeter

Item	Value
Laser (wavelength)	Frequency-doubled Nd:YAG (532 nm)
Estimated frequency stability	3×10^{-13} (Allan variance estimation)
Beam diameter	
Front	45 mm
End	32 mm
Retroreflector	
Aperture diameter	380 mm
Flatness	0.2 μm
Parallelism	2 μrad

図 2 Table1,2. 各機器のパラメータ

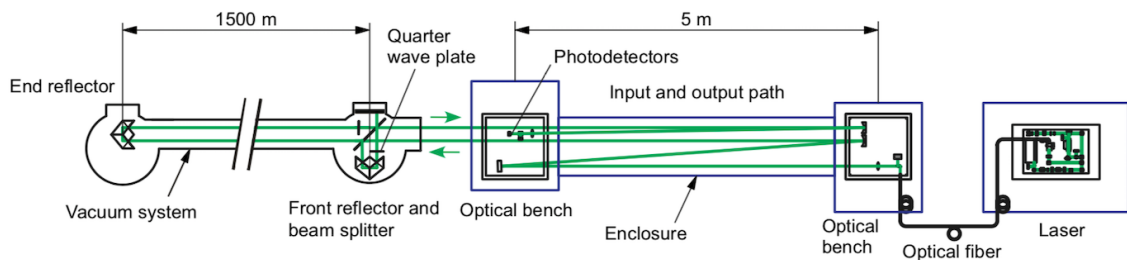


Fig. 2 Optical layout of the 1500-m laser strainmeter. Two retroreflectors, each housed in a chamber, and a beam splitter form a Michelson interferometer with a high-frequency-stabilized laser

図 3 fig2. 歪計のレイアウト

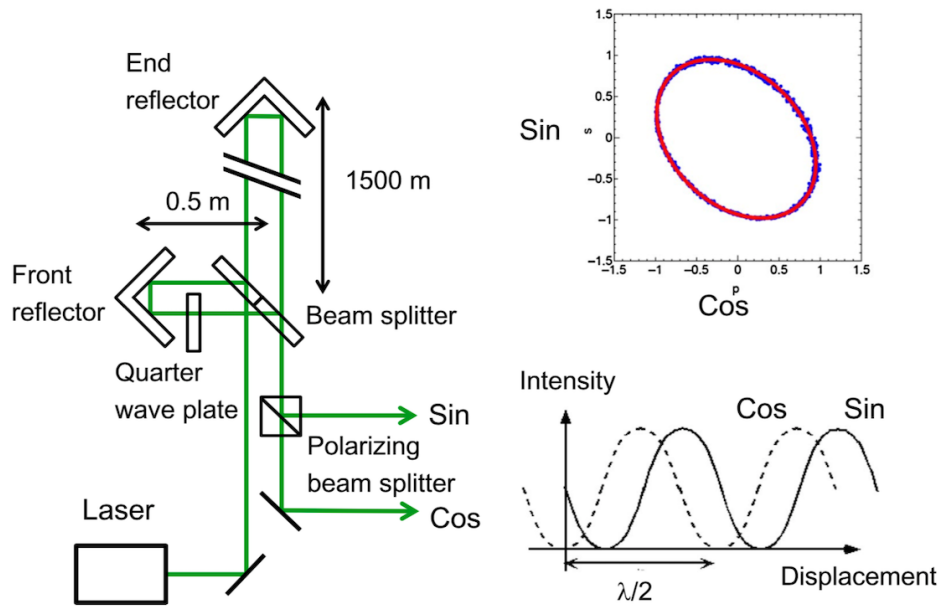


Fig. 3 Quadrature interferometer used in the 1500-m laser strainmeter (left). A quarter-wave plate inserted in the interferometer produces a 90° phase shift between the horizontal and vertical polarizations. As a result, the intensities of the interference beams for both polarizations separated by the polarizing beam splitter complementarily change as sine and cosine (bottom right). By normalizing the observed elliptic Lissajous curve (top right) into a circular one, mirror motion can be determined from the phase angle

図4 fig3. 直交検出技術

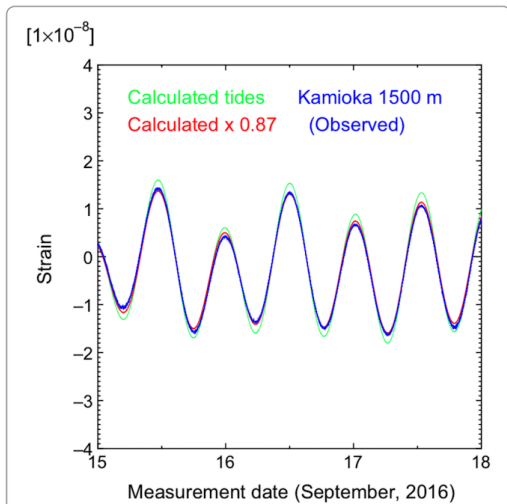


Fig. 4 Changes in the strain observed using the 1500-m laser strainmeter (blue). The waveform nearly agrees with the theoretical tides (green) but with a slightly smaller amplitude. The theoretical tides downscaled by a factor of 13% (red) are consistent with the topographic effects previously observed using the 100-m strainmeter located at the same Kamioka site

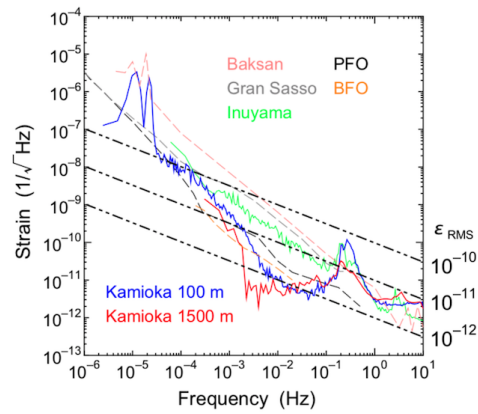


Fig. 5 Background strain spectrum for the 1500-m laser strainmeter (red) compared to those for other strainmeters: Piñon Flat Observatory (PFO, black, Berger and Lovberg 1970; Berger and Levine 1974), Baksan (pink, Buklerskii et al. 1995), Gran Sasso (gray, Crescentini and Renzella 1991), Inuyama (green, Araya et al. 2001), and Black Forest Observatory (BFO, orange, Zürn et al. 2015), including the 100-m laser strainmeter at Kamioka (blue, Araya et al. 2007). Detectable strain levels in amplitude are shown as dash-dotted lines. The detection limit for the 1500-m strainmeter is estimated as better than 10^{-12} in the 2–20 mHz range and 10^{-11} in the 1 mHz–10 Hz range

図5 fig4. 取得データと理論値、fig5. 他の歪計との比較

周波数は 1.8Hz なので、1Hz 以上のノイズは実際の strain を示していないと考えられる。

周波数ノイズは基線長によらないので、100m 歪計との比較により、1Hz 以上の background ノイズは周波数ノイズと考えられる。

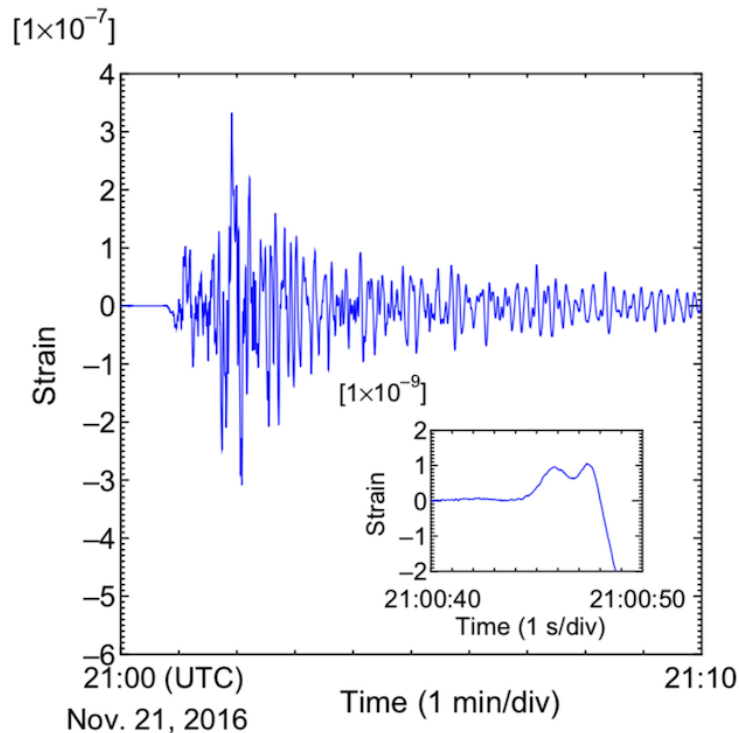


Fig. 6 Seismic waves associated with the Fukushima earthquake (Mw 6.9) that occurred at 20:59:49 (UTC) on November 21, 2016 (expansion positive); the *inset* is a magnified view around the initial motion. The peak-to-peak strain amplitude was 6.4×10^{-7} . The fringe signals were normally converted to strain without saturation or discontinuity due to cycle slip

図 6 fig6 福島地震の時の振動

1500m 歪計は 2016 年から地面振動を測定しているので、複数の地震を検出している。Fig6 は 2016 年 11 月の福島の地震の時の歪計の信号である。地震の時の Peak to Peak の振幅は、この地域の通常の地面の揺れの 20 倍の 6.4×10^{-7} である。ただ、地震でも misalignment は出なかった。地震による干渉縞の揺れは最大 2.7kHz となったが、sampling rate は 50kHz で 2.7kHz より十分大きいので、前述の直交検出技術と解析で、信号を strain に換算するときに問題は生じなかった。

4 Conclusion

1500m 基線長のレーザー歪計が神岡に作られ、2016 年 8 月から運用されている。ミラーは地面に固定され、光路の部分は真空にしている。レーザーは、ヨウ素安定化している。

観測波形は理論値と一致した。振幅の 13% のズレは 100m 歪計で観測した地理的効果と一致した。1500m

歪計で観測した strain は、2-20mHz で background ノイズが他の歪計より小さく、 10^{-12} 未満となった。この理由は、長い基線長によって local ノイズが空間平均化がされたからと考えられる。地震の時も観測に問題は生じなかった。

今回、active な alignment をせずに、km 基線長の歪計を安定して稼働し、微小な地面振動を観測することに成功した。