レーザー干渉計を用いた短周期広帯域地震計の開発

新谷昌人*

Wideband Short-Period Seismometer using a Laser Interferometer

Akito ARAYA*

Abstract

A wideband short-period seismometer using a laser interferometer has been developed. A component of horizontal acceleration is sensed by a Michelson interferometer comprising a suspended mirror in combination with a fixed reference mirror. The minimum measurable displacement with this seismometer is $3 \times 10^{-11} \text{ m/}\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz and $2 \times 10^{-15} \text{ m/}\sqrt{\text{Hz}}$ above 2 kHz. Some observations of microtremor showed the sensitivity of the instrument was sufficient to detect signal even at the quiet site, Kamioka Mine (1,000 m underground), and their displacement spectral density had typical trends inversely proportional to square of vibration frequencies.

Key words : laser interferometer, seismometer, gravitational wave detector, high-frequency seismic noise

はじめに

レーザー干渉計を用いると非常に高感度の計測が可能と なるので、基準振り子の変位検出に利用することにより高 感度地震計をつくることができる.ここではマイケルソン 干渉計を用いた短周期広帯域地震計の製作例を紹介する. もともと、この地震計は重力波検出器の建設候補地の地面 振動を調査するために 1992 年頃に開発されたものである が(Araya et al., 1993)、高精度干渉計測や基準振り子の 非接触位置制御、同相雑音低減法など重力波検出器の技術 が多く含まれているので、地球観測機器の技術開発に参考 になれば幸いである.

地震計開発の経緯

重力波検出器(たとえば三尾・坪野,1993)は重力波に より励起された微小な鏡の振動をとらえるものであるので (Schutz,1985),その設置場所は地面振動が小さくなけれ ばならない. 観測する周波数帯域は100 Hz から1 kHz く らいの振動であるが,鏡をこの帯域で防振するための防振 装置の共振周波数は1 Hz 程度であるので,数 Hz 以下の低 周波地面振動も検出器に影響をおよぼす.このため,設置 場所を決定する際には低周波(数Hz)から高周波(数 kHz)までの地面振動(常時微動)を知る必要があるが,高 感度に数 kHz までの常時微動を測定できる地震計は入手 困難であった.そこで,重力波検出器のレーザー干渉計測 技術を応用して広帯域・高感度の地震計を開発することに なった.なお,重力波検出に影響のある振動は水平成分が 主であるので,水平の1次元の振動を検出するものを製作 した.

地震計の設計

数 Hz 以上の常時微動の変位スペクトル密度は以下の式 にほぼ従うことが知られている (Shoemaker *et al.*, 1988).

変位
$$x(v) \sim \frac{10^{-\gamma}}{v^2} \quad [m/\sqrt{Hz}]$$

ν: 地面振動の周波数 [Hz]

なお,ファクター10⁻⁷は地域・環境によりことなった値 をとる.

例えば1kHzの振動を検出するためには

$$\frac{10^{-7}}{(1\times10^3)^2} = 10^{-13} \text{ [m/\sqrt{Hz}]}$$

の感度が必要となり、検出帯域幅を100Hzと仮定すると、 10⁻¹²mの変位振幅となる.このような微小計測を実現す るためにはレーザー干渉計が有利である.地面振動によっ

¹⁹⁹⁶年1月23日受付, 1996年8月22日受理.

^{*}地球計測部門, (東京大学地震研究所).

^{*} Division of Monitoring and Computational Geoscience, (Earthquake Research Institute, University of Tokyo).

て生じる振り子のおもりの変位をレーザー干渉計で読みと ることにより、地面振動を高感度に検出することができ る.また、周波数特性としては低周波から高周波まで平坦 な特性が必要であるので、基準振り子の固有振動数の影響 がないサーボ型で構成した.

基本原理は次の通りである.図1のように地面(天井) から質点が吊るされているときに,地面振動による質点の 変位 x は次の運動方程式を満たす.

$$\ddot{x} + 2\gamma \left(\dot{x} - \dot{y} \right) + \frac{g}{l} \left(x - y \right) = \frac{f}{m} \tag{1}$$

ここで, *m* はおもりの質量であり, *g* は重力加速度とする. 地面に対する振り子の相対変位 *d*=*x*-*y* をレーザー干 渉計で読みとり, これが常に一定になるように質点に フィードバックをかけると(1)式は

$$\ddot{x} = \frac{f}{m} + \text{const.}$$

 $=\bar{y}$ \leftarrow $d=x-y\equiv \text{const.}$ (2) となり、フィードバック力fを検出することにより地面振 動の加速度変化がわかる. つまり、地面とおもりが完全に 同じ動きになっていればおもりに加えている力がおもりの 加速度をあらわすが、それは地面の加速度と同じものであ る. この場合は振り子の復元力の影響を全く受けないの で、振り子の固有振動数によらず平坦な特性で加速度が検 出できるわけである.

製作した地震計のブロックダイヤグラムは図2のような 構成になっている.

He-Ne レーザーの光はビームスプリッターで分けられ, 固定鏡(地面に固定された鏡)と振り子鏡(吊るされた鏡) の2つの鏡でマイケルソン干渉計が構成される. このよう な構成ではマイケルソン干渉計は「固定鏡からビームスプ リッターまでの距離」と「振り子鏡からビームスプリッ ターまでの距離|の差を検出することになるが、前者の距 離は一定とみなすことができるので、結局振り子と地面 (ビームスプリッター)との相対変位*d*が高感度に光検出 される. なお、レーザーの強度変動の影響を打ち消すため に2つの干渉光を検出し、それらの差をとることにより変 位信号を得ている. なぜなら、レーザーの強度変動に対し ては2つの干渉光は同じ符号(同相雑音)で変化するが, 鏡の変位に対しては逆符号に変化するからである. この信 号はサーボフィルター回路を介して振り子鏡にフィード バックされ、 $d \equiv \text{const}$ となるようにコントロールされる. このときフィードバックする力は、振り子鏡につけた磁石 およびコイルとの磁気相互作用によって生じさせるので、 コイルに流れる電流を図のように抵抗を用いて読みとれば そのときに加えられた力がわかる. つまり、コイルに流れ る電流が地面の加速度を表わすことになる.

しかし、実際にはフィードバック系のサーボループゲイ

ンが有限であるため *d* を完全に一定にすることはできな いので,コイルの電流をそのまま地面の加速度とするわけ にはいかない.そこで,ループゲインによりどのように出 力が依存するかを考えてみる.

この地震計の制御系は図3のようなサーボ系とみなすこ とができる.サーボ系が動作している状態では













$$(-m\omega^2 y - f) H(\omega) F(\omega) = f$$
(3)

が成り立つ.従って

$$\frac{|f|}{m} = \left| \frac{H(\omega)F(\omega)}{1 + H(\omega)F(\omega)} \right| \cdot |-\omega^2 \mathbf{y}|.$$
(4)

サーボループゲイン $|H(\omega)F(\omega)|$ が1より十分大きい ときはフィードバック力が地面の加速度をそのまま表わす が、そうでない場合は $|H(\omega)F(\omega)/(1+H(\omega)F(\omega)|$ と いう周波数応答の影響を考慮しなければならない. この応 答を計算するために、振り子とフィルターの伝達関数をも とにオープンループ伝達関数 $H(\omega)F(\omega)$ を計算した(図 4). 高周波までの信号を検出するためにはこのオープン ループゲインが高周波側まで1より大きい必要があるが、 この地震計では Unity Gain Frequency (ループゲインが 1になる周波数, UGF) が2kHz 程度を達成している. こ れは振り子など全体を小型化して、UGF を下げる要因と なる機械的共振周波数を高くした結果である. 位相余裕 (UGF での位相+180 度)も 30 度程度あるので時間応答特 性も良好となっている.

これより求めた周波数応答は図5のようになり、1kHz



図 4. サーボループ (open loop) 伝達関数. 細線は計算 値, 太線は実測値



図 5. 地面加速度に対する地震計の周波数応答特性(計算 値)

以下では 10% 程度の誤差を許せば平坦とみなしてよいこ とがわかる.

感 度

感度(検出できる最小の振動レベル)の評価は,原理的 には振動が全くない環境での地震計の出力を測定すれば得 られる.しかし,そのような環境を得るのは非常に困難で ある.

ところで、地震計の感度をきめる雑音要素としては次の ものが考えられる.

- ・レーザーのショットノイズ
- ・レーザーの強度雑音
- ・電気系(フィルター・アンプ)の雑音
- ・レーザーの周波数雑音

・機械的なもの(共振,温度ドリフト)

これらを大別するとレーザー干渉計部分から生じる雑音 と、それ以外の制御回路・出力回路の雑音のふたつに分け られる.後者の回路雑音の評価は容易であり、ほぼ無視し てよいことがわかった.前者の雑音はサーボとは無関係な ので、振り子鏡を土台に固定して純粋に干渉計から生じる 雑音を測定すればよい.

実際には振り子を固定しても若干の外来振動の影響があ るため、さらに防振台上で測定をおこなった.変位換算し た雑音レベルは観測結果に併せてしめした(図6参照).測 定でわかったことは、

- ・1.5 kHz 以上ではレーザーのショットノイズできまる感 度に一致する.
- 100 Hz~1.5 kHz では振り子を固定してもしなくても出力はほぼ変わらず,音によりレベルが上下する.つまり,固定鏡や振り子鏡が音で振動していると考えられる.
- ・10 Hz~100 Hz では外来振動のために十分に感度の評価 ができなかった.しかし,通常観測される信号レベルに 比べて 2 桁以上小さい値が得られたので,実際の観測に は感度は十分であると考えられる.
- ・数 Hz 以下では主に空気の揺らぎにより感度が制限されている。空気の温度揺らぎが屈折率を変動させて干渉計の光路長を変化させ雑音となる。干渉計部分を風よけでおおい、空気の流れを止めることによりこの影響は2桁程度減少する。

較 正

振り子の磁石とコイルの結合定数が変化するとフィード バック力が変わり、地震計の出力信号も変化する.そのた め何らかの較正法が必要となるが、固定鏡を一定の周波 数・振幅で振動させると地面が同じ周波数・振幅で振動し たことと等価であるのでこれを利用して較正をした.固定 鏡は鏡に貼り付けたピエゾ素子によって振動させる(図 2).

4

一方,固定鏡の振動振幅は干渉計のコントラストと干渉 計出力の関係から得られる.すなわち,サーボ機構を働か せない場合,干渉計出力は鏡の大きい変位に対して正弦的 に変化するがその干渉振幅は干渉計出力の最大・最小値か ら得られる.すると固定鏡を微小振動させた場合に,干渉 計出力と干渉振幅との比からレーザーの波長を基準に固定 鏡の振動が高精度に較正できる.

実 測

実際の地面振動(常時微動)の観測例として,東大理学 部地下室および岐阜県の神岡鉱山のものを紹介する.東大 の観測点は重力加速度定点の地下室内であり,地震計は地 面に埋め込まれた石の台にエポキシ接着剤で固定された. 比較的静かと思われる,日曜日の夕方に観測を行った.

一般に地下深い方が人工的振動や表面波による振動の影響が小さく,重力波観測には振動の点で有利である (Barstow *et al.*, 1990, Carter *et al.*, 1991). 神岡鉱山は ニュートリノ検出器で有名であるが(Hirata *et al.*, 1987), 検出器近くの地下 1,000 m の坑内で振動レベルを調べた. なお観測時には KAMIOKANDE は休止していたが,地震 計設置場所は鉱山事務所の付近で比較的活動度の高いところである.

両地点での地面振動スペクトル密度および前述の地震計 の感度を図6に示す.

100 Hz 以下では神岡は東大のレベルより1~2 桁小さい. 100 Hz 以上では東大のレベルとほぼ同じであるが,周囲の音が地面を振動させてそれを検出したためであるとわかった. つまり,この帯域の振動は周囲の環境に依存したものであるから観測の際には注意が必要である.いずれにしても2kHz 以下では感度限界以上で,神岡のような振動の少ない場所でも正しく地面振動を観測できることがわかった.

むすび

レーザー干渉計を利用した短周期広帯域地震計を開発し (図 7), ~1 kHz 以上ではショットノイズ限界の 2×10^{-15} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の感度が得られた. この地震計を用いて常時微動 を測定し,以下の変位換算スペクトル密度を得た.

東大構内:
$$\frac{10^{-7}}{\nu^2}$$
m/ $\sqrt{\text{Hz}}$
神岡鉱山: $\frac{10^{-8}}{\nu^2}$ m/ $\sqrt{\text{Hz}}$



図 6. 東大理学部地下 (Tokyo), 神岡鉱山 (Kamioka) および地震計の検出感度レベル (system noise) の変位換算スペクトル密度



図 7. 製作した地震計の外観

この地震計は、前にも述べたように重力波検出器の設置場 所調査のために開発されたものであるので、レーザーも比 較的大型で必ずしも使い勝手がよいものではない.また、 観測帯域もかなり短周期にわたっているために、地球科学 で関心のある帯域とは若干ずれているかもしれない.しか し、微小地震や地震の初期断層破壊過程など比較的スケー ルの小さい現象については、波長の短い短周期の観測も意 義をもつと考えられるし、地鳴りなど音波の周波数帯域の 現象もあるのでそのような観測に寄与できるのではないか と考えている.まだ完全に評価していないが、レーザーの 安定度から考えると10秒以上の長周期でも市販の広帯域 地震計程度の感度があると思われるので、今後もう少し使 いやすい形にして実際の観測にも応用できるように改良し ていきたい.

現在考えている改良点としては2点ある.まず,光源と して半導体レーザーを利用して小型化することである. 年々半導体レーザーの性能が上がっており,しかもかなり 低価格化している.半導体レーザーの性能としては,干渉 計の光源として機能し低雑音な干渉出力を得られるもので ある必要がある.ふつうの半導体レーザーは縦モードマル チ(いくつかの線スペクトルの光を出す)なので干渉計の 光源として問題があったが,最近 DFB や DBR タイプと いった安定した縦モードシングル発振するレーザーが市販 されるようになり,適当な温度安定化回路とともに用いれ ば He-Ne レーザーの代替光源も可能であると考えられ る.半導体レーザーの寿命(数万時間以上)という点から は He-Ne レーザーよりむしろ有利である.

もうひとつの改良点は、地震計全体を真空耐圧容器内に 封入することである。 地震計の感度の評価で空気の揺らぎ が数 Hz 以下で影響することがわかっている. この影響を 除去するためには干渉計部分を真空にすればよく、真空度 としては温度揺らぎの影響がない程度でよいので数 Torr 程度で十分であろう.実際,大気圧で封入するだけでも空 気の流れが止まり、揺らぎの効果はかなり減少する.また、 真空にすることにより鏡などの光学部品の長期間にわたる 劣化を防ぐことができ、観測機器としてこれは重要なこと である. さらにこれまでの観測では 100 Hz 以上になると 周囲の音による影響が顕著にみられたので、短周期まで意 味のある観測をするためにはボアホール内で観測をおこな う必要がある. そのために真空容器は耐圧性も備えたもの とする、地下深部でのボアホール内での観測は、地表の不 均質による短周期地震波の散乱の影響を避ける意味からも 望ましいと思われる.

今後,以上の2点を改良しつつ実際に試験観測を通じて 実用化への問題点を明らかにしていきたい.

献

文

- Araya, A., Kawabe, K., Sato, T., Mio, N. and Tsubono, K., 1993, Highly sensitive wide band seismometer using a laser interferometer, *Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 1337–1341.
- Barstow, N., Carter, J.A., Pomeroy, P.W. and Sutton, G.H., 1990, High frequency (1–100 Hz) noise and signal recorded at different depths in a mine, northwest Adirondacks, NY, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 681–684.
- Carter, J.A., Barstow, N., Pomeroy, P.W., Chael, E.P. and Leahy, P.J., 1991, High-frequency seismic noise as a func-

tion of depth, Bull. Seism. Soc. Am., 81, 1101-1114.

- Hirata, K., Kajita, T., Koshiba, M., Nakahata, M., Oyama, Y., Sato, N., Suzuki, A., Takita, M., Totsuka, Y., Kifune, T., Suda, T., Takahashi, K., Tanimori, T., Miyano, K., Yamada, M., Beier, E. W., Feldscher, L. R., Kim, S. B., Mann, A. K., Newcomer, F. M., Van Berg, R., Zhang, W. and Cortez, B. G., 1987, Observation of a neutrino burst from the supernova SN 1987 A, *Phys. Rev. Lett.*, 58, 1490–1493.
- 三尾典克・坪野公夫, 1993, 重力波検出器とそれを支える先端技術, 応用物理, 62, 216-226.
- Schutz, B.F., 1985, A first course in general relativity, Cambridge University Press.
- Shoemaker, D., Schilling, R., Schnupp, L., Winkler, W., Maischberger, K. and Rudiger, A., 1988, Noise behavior of the Garching 30-meter prototype gravitational-wave detector, *Phys. Rev.*, D 38, 423-432.