長周期・大振幅地震動の測定を目指した小型絶対変位振動計の開発研究

岩崎 雄一^{*1}, 伊藤 彰彦^{*2}, 背戸 一登^{*3}, 宮崎 充^{*4}

Development of seismometer-type absolute displacement sensor aimed for detecting earthquake waves with large magnitude and long period

Yuichi IWASAKI^{*1}, Akihiko ITO^{*2}, Kazuto SETO^{*3} and Mitsuru MIYAZAKI^{*4}^{*1, *4} Oiles Corporation

1000 Hakari-cho, Ashikaga-shi, Tochigi 326-0327, Japan

^{*2} Oiles Corporation,

8 Kanagawa-cho, Fijisawa-shi, Kanagawa 252-0811, Japan

^{*3} Seto-Engineering Office

1727-3 Shimoyamaguchi, Hayama-machi, Miura-gun, Kanagawa 240-0116, Japan

Received 24 October 2014

Abstract

This paper proposes a novel seismometer-type absolute displacement sensor aimed at detecting earthquake waves with a large magnitude and long period. However, since the measuring range of the conventional displacement sensor is higher than the natural frequency of itself, it is difficult to detect a low frequency vibration below 1Hz using conventional seismic-type displacement sensors. In order to provide an absolute displacement detection which is capable of lowering the natural frequency and enlarging the detectable amplitude without causing a structural defect, the relative signals of displacement, velocity, and acceleration between a detected object and the auxiliary mass of the sensor are fed back into the sensor. In addition, a phase lag compensation is inserted to adjust phase angles, which are below a frequency lower than 1Hz. Theoretically, this sensor is able to detect a lower frequency range from 0.2Hz to 10Hz and large amplitude with 100 times to the movable range of the sensor. It has been demonstrated by experiments that the developed sensor with a small size and lightweight has a detecting range from 0.2 Hz to 10Hz for absolute displacement and velocity. As an additional advantage, the measurement displacement amplitude has been expanded to about 40dB (100 times) for detecting earthquake waves with large magnitude and long period. As the typical application example of the developed absolute displacement sensor, a seismic wave based on Hachinohe wave is used with well observation results.

Key words : Displacement sensor, Earthquake wave, Natural frequency, Large magnitude, Long period

1. 緒 言

2011年3月11日に発生した東日本大震災では岩手県、宮城県、福島県を中心に長周期大振幅の大地震が発生し、家屋の倒壊はもとより地震が誘発した大津波によって多くの人命が失われた。都内では200メートル級の超高層ビルで1メートルを超える長周期・大振幅の揺れが10分を超える長時間に及んで、(Kashima, et al., 2011) 住民に多大な不安と被害をもたらした。関西圏でも長周期ゆえにその地震波は伝搬され超高層ビルに被害があった(Sato, et al., 2011)。その様な巨大地震による建物の被害を防ぐには、建物に免・制振技術を組み込む方法が考え

No.14-00556 [DOI:10.1299/transjsme.14-00556], J-STAGE Advance Publication date : 30 March, 2015

^{*1} オイレス工業(株) (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000)

^{*2} オイレス工業(株) (〒252-0811 神奈川県藤沢市桐原町 8)

^{*3} 正員, 名誉員, 背戸技術士事務所 (〒240-0116 神奈川県三浦郡葉山町下山口 1727-3)

^{*4} 正員, オイレス工業(株)

E-mail of corresponding author: seto@seto-vcl.com

られるが、先ず建物の地震動を計測する手段が不可欠である。アクティブ形式の免・制振技術に不可欠なことは自明であるが、消費エネルギーの少ないセミアクティブ形式の制振には常時作動しておく不経済を避けるために、計測手段はトリガー機能として必要である。また、パッシブ形式の免・制振であっても、その効果を履歴として残すためには計測手段として必要である。

しかし、1Hz以下の低振動数の振動現象を変位信号として精度良く測定できる絶対変位センサは現在見当たらないので、その低振動数の測定を目指した研究が精力的に進められている。(Wakui, et al., 2007), (Wakui, et al., 2009), (甲斐他, 2010), (齊藤他, 1997), (Doi, et al., 1998), (Gatade, et al., 1999), (Ishihara, et al., 2006), (Seto, et al., 2010), (Seto, et al., 2012)。

一方、超高層ビルの風による揺れを制御する手段や一般住宅の路面振動による建物の揺れを制御する手段等にAMDが用いられているが(Spencer and Sain, 1997), (Seto, 2004), (Preumont and Seto, 2008), (Rodellar, et al., 1999), これらの制御には振動の速度、変位情報が必要なので、やむを得ず建物の揺れを加速度センサで検出し、二重積分して絶対変位信号を得ている。この方法の問題点は二重積分にある。積分には積分器が用いられるが、積分器には観測すべき加速度信号以外に内部で発生する微細な直流信号(これをドリフト信号と云う)などの望ましくない信号が入力されることになる。この信号も積分されることになるので、ある時点で積分器の信号があらぬ方向へ増加し飽和現象を起す。これを取り除く手段として、ある時間経過すると積分器の信号を零セットする方法が採られている。しかし、零セットする周期に伴う長周期の揺れが新たに発生することになる。これは長周期の地震波とは異なる人工的な振動である。現状では1Hz以下の低振動数が測定できる絶対変位センサが世の中に存在しないために、やむなく加速度信号の二重積分して絶対変位信号を得ている現状があるが、近時話題になっている長周期大振幅の地震対策には大きな問題を提供することが懸念される。また、大振幅の地震波の計測技術にも課題が残っている。

目下、開発中の絶対変位計はこの問題を一気に解決することを目指している(Seto, et al., 2012)。このセンサでは内部で検出された相対速度信号を一回積分することにより相対変位信号、一回微分することにより加速度信号を得て、これら三信号をフィードバック制御して所定の周波数応答特性を作っている。良く知られているように、フィードバック制御はドリフトを防止する機能を持っている。また、そのフィードバック制御と位相遅れ補償法の組み合わせによって所要の低振動数測定帯域を確保しようとしている。現時点ではフィードバック制御によって、センサの固有振動数が5.5Hzにあったものが0.53Hzまで低下されていることが実験と理論によって確認されており(Seto, et al., 2012) 位相遅れ補償によって測定帯域が0.2Hzから10Hzまで確保できている。課題とする大振幅の測定については、可動部が $\pm 1\text{mm}$ の小型振動計で $\pm 100\text{mm}$ の変位振動振幅が達成されていることを報告する。

2. 提案する絶対変位振動計

2・1 本振動計の構成

本振動計の基本構成は、図1に示されるように振動検出可動部(Sensor body)、制御回路部(Feedback control circuit)、位相補償部(Phase compensator)よりなっている。振動検出可動部は質量 m を有する可動体と、それが x 方向のみ運動できるようにばね定数 k を有する支持バネと、可動体の上下に取り付けられた2種類の磁気回路で構成される。磁気回路が磁場内を運動する時、減衰定数 c を有する磁気減衰力が発生する。また、上部の磁気回路は振動測定対象に取り付ける匡体の変位 u と可動体変位 x の相対速度($\dot{u}-\dot{x}$)を電気信号に変換する速度検出器であり、下部の磁気回路は制御回路部で作られた制御信号によって可動体を駆動するアクチュエータである。これで制御力 f_c を発生させる。

制御回路部は変換定数 K_a を有する信号変換部、積分時定数 $T_D = C_D R_D$ を有する積分回路、微分時定数 $T_A = C_A R_A$ を有する微分回路、およびそれらの回路で作られた相対速度信号 e_v 、相対変位信号 e_D 、相対加速度信号 e_A の三信号を加減算して制御信号 e_c を作るフィードバック回路から成っている。それら三信号には各々変位ゲイン定数 K_D 、速度ゲイン定数 K_V 、加速度ゲイン定数 K_A が重み係数として掛けられており、これらの値の選定によって大きく振動計の測定範囲に寄与がある。特に後述する加速度ゲイン定数 K_A の寄与は大である。得られた制御信号 e_c に力変換係数 K_f で定義するアンプを通してアクチュエータへの制御力 f_c が生まれる。このようなフィードバックループを有するので、ドリフト問題は抑制されるのである。

さらに、相対変位信号 e_D は位相遅れ補償器を通すことによって、極低振動数領域で位相が進む問題を解消することができる。本研究では2次位相遅れ補償器を適用する。

Fig.1 Signal detection principle of the proposed absolute displacement sensor. The sensor body, which belongs to a type of seismic sensor, is made up of an internal weight with mass m , a couple of spring units with a spring constant k , an actuator to generate control force f_c and a velocity detector to detect relative velocity $(\dot{u} - \dot{x})$. The spring unit supports the internal weight in order to move smoothly in x direction.

2・2 周波数伝達関数

図1を基に振動検出可動部の運動方程式と制御回路部の電気回路方程式を導き信号伝達線図(Kuo, 1962)で表すと図2のようになる。ここで s は微分演算子である。また、フィードバックループは全て負帰還で表している。

Fig.2 Signal flow diagram representation of sensor body and control circuit. On the base of Fig.1, the equations of motion and electrical circuit equations are introduced and the signal flow diagram is described as shown in this figure, where s is the differential operator.

図2において、測定対象の絶対変位 u と振動計の相対変位信号 e_D の間の伝達関数は信号伝達線図の直接解法により、(富成他, 1979), (背戸, 渡辺, 2013), 以下のように導出される。

$$\frac{e_D}{u} = \frac{mK_a(T_D s + 1)s^3}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (1)$$

また、測定対象の絶対変位 u と振動計の相対速度信号 e_V の間の伝達関数も以下のようになる。

$$\frac{e_V}{u} = \frac{mK_a\{T_D T_A s^2 + (T_D + T_A)s + 1\}s^3}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (2)$$

ここに、各式の分母の係数は以下のように定義されている.

$$\begin{aligned} a_0 &= T_D T_A m \\ a_1 &= (T_D + T_A) m + T_D T_{AC} + T_D T_A K_a K_f (K_A + K_V) \\ a_2 &= m + (T_D + T_A) c + T_D T_A k + T_A K_a K_f (K_V + K_D + K_A) + T_D K_a K_f K_V \\ a_3 &= (T_D + T_A) k + c + K_a K_f (K_D + K_V) \\ a_4 &= k \end{aligned}$$

図 1 に示された微分回路の伝達関数 $G_A(s)$ は次式で示される.

$$G_A(s) = \frac{T_A s}{T_A s + 1} \quad (3)$$

$T_A s \ll 1$ が成立すれば $T_A s + 1 \doteq 1$ と近似できるので、式 (3) は式 (4) で置換できる.

$$G_A(s) \doteq T_A s \quad (4)$$

やはり、図 1 に示した積分回路の伝達関数 $G_D(s)$ は次式で示されるので、

$$G_D(s) = \frac{1}{T_D s + 1} \quad (5)$$

$T_D s \gg 1$ が成立すれば $T_D s + 1 \doteq T_D s$ と近似できるので、式 (5) は式 (6) で置換される.

$$G_D(s) \doteq 1/T_D s \quad (6)$$

以上の近似を用いれば、式 (1) は式 (7) で近似できる.

$$\frac{e_D}{u} = \frac{m K_a s^2}{T_D (m + T_A K_a K_f K_A) s^2 + T_D (c + K_a K_f K_V) s + T_D k + K_a K_f K_D} \quad (7)$$

この式は 2 次系の伝達関数を表しており、これから 2 次系特有の固有振動数 ω_n と減衰比 ζ が以下のように導出される. 図中、赤線は変位振動計としての使用領域を示す.

Fig.3 Frequency response between an absolute displacement of the measured object and the relative displacement signal. In this figure the natural frequency is located at 1Hz. The measurement range of absolute displacement is above the natural frequency of the sensor. Where, the red line indicates the measuring range as a displacement sensor.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k + (K_a K_f K_D)/T_D}{m + T_A K_a K_f K_A}} \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{c + K_a K_f K_V}{2\sqrt{(m + T_A K_a K_f K_A)(k + K_a K_f K_D/T_D)}} \quad (9)$$

図3は固有振動数を1Hzに設定して表した2次系の周波数応答特性の一例である。絶対変位振動計の測定範囲は固有振動数以上の領域であるから、課題とする長周期振動の測定範囲は1Hz以下であるので、如何に固有振動数を低減させるかが課題となる。

2・3 各フィードバックゲインの効果

式(8)と(9)に基づいて各フィードバックゲインの効果を考察すれば、以下のことが分かる。

(1) 相対変位フィードバックゲイン定数 K_D

式(8)によれば、相対変位フィードバックゲイン定数 K_D は振動計可動部のばね定数 k と等価であることを示している。図2ではフィードバックループは全て負帰還で表しているの、負帰還では固有振動数は増加するが、このループだけ正帰還すれば、 K_D の極性が+から-に転じ、固有振動数を減ずることができる。しかし、正帰還では制御不安定の懸念があるので、ドリフト防止に留めることが肝心である。

(2) 相対速度フィードバックゲイン定数 K_V

式(9)によれば、相対速度フィードバックゲイン定数 K_V は振動計可動部のばね定数 c と等価であるので、これを負帰還すれば減衰比を大きくできて、正帰還すれば小さくできる。つまり、 K_V は共振ピーク値を調整できる。

(3) 相対加速度フィードバックゲイン定数 K_A

式(8)によれば、相対加速度フィードバックゲイン定数 K_A は振動計可動部の質量 m と等価であるので、これを負帰還すれば固有振動数を低減できる。またそれに伴い減衰比は減じるが、上記相対速度フィードバックゲイン定数の選定によって希望する周波数応答特性を確保できる。

2・4 相対加速度フィードバックの更なる効果

本振動計の最大の特長として、相対加速度フィードバックによって小型ながら大振幅の測定を可能にする所にある。図2に示した信号伝達線図によって、測定対象の絶対変位 u と振動計可動部の相対変位 $u-x$ の間の伝達関数を導出すると以下の式で表される。

$$\frac{u-x}{u} = \frac{mT_D s^2}{T_D(m+T_A K_a K_f K_A)s^2 + T_D(c+K_a K_f K_V)s + T_D k + K_a K_f K_D} \quad (10)$$

本振動計の測定領域は固有振動数よりも高い振動数領域であるから、測定領域では式(10)は以下のように近似できる。

$$\frac{u-x}{u} \doteq \frac{m}{m+T_A K_a K_f K_A} \quad (11)$$

可動部質量の相対変位振幅 h によって式(11)を式(12)のように書き換えれば、

$$\frac{u-x}{u} = h = \frac{1}{1+T_A K_a K_f K_A / m} \quad (12)$$

加速度フィードバックゲイン K_A の増大によって式(12)の値は小さくなる。つまり、相対変位 $(u-x)$ と本振動計に加わる変位入力 u の比 h が小さくなると大変位振幅の測定が可能になる。これが小型振動計で有りながら大振幅変位の測定が可能になる原理である。

3. シミュレーション

3・1 加速度フィードバックの効果

シミュレーションに用いた本振動計の主な諸元は以下の通りである。

$$m = 0.025 \text{ [Kg]}, \quad c = 5.23 \text{ [Ns/m]}, \quad k = 30.1 \text{ [N/m]}.$$

$$K_a = 18 \text{ [V/m/s]}, \quad K_f = 0.6 \text{ [N/V]}, \quad T_D = 3 \text{ [s]}, \quad T_a = 0.001 \text{ [s]}$$

式(1)に示した伝達関数とこれらの諸元を用いて、非フィードバック制御時 (Original) の周波数応答特性のシミュレーション結果を図4に黒い点線で示す。更に、加速度フィードバックゲイン $K_A = 220$ と速度フィードバックゲイン $K_V = 0.5$ を負帰還として、また変位フィードバックゲイン $K_D = 0.3$ を正帰還として与えた時の制御時 (Feedback control) の周波数応答特性を赤い実線で示す。図4では、非制御時の固有振動数が 5.5 Hz であったものが、制御時には固有振動数が 0.53 Hz 、減衰比が $\zeta = 0.4$ になっていることが分かる。

注目すべきは、主に加速度フィードバックを主体とするフィードバック制御によって、ゲインレベルが -40 dB に低下していることである。これは質量の可動範囲 $\pm 1 \text{ mm}$ の本振動計によって $\pm 100 \text{ mm}$ の大変位振幅が測定できることを意味する。

しかし、長周期振動を測定するには固有振動数が 0.53 Hz では不十分である。ここで注目すべきは、固有振動数の 0.53 Hz で位相が 90° 進んでおり、更に振動数が低下すると位相が 180° を超え 270° に向かって増加していることである。この位相の進みを減じ更に周波数応答特性を低振動数側に拡張するには位相遅れ補償法が考えられる。

Fig.4 One of the simulation results with or without feedback control gains. Dotted and red lines indicate the frequency responses of the original system and all feedback controlled system, respectively. This figure shows that the natural frequency located in 5.5 Hz of the original system is moved to 0.53 Hz with damping factor of $\zeta = 0.4$ by the all feedback.

3・2 2次位相遅れ補償器の導入

フィードバック制御によって更なる固有振動数の低減は理論的には可能であるが、使用する支持バネの高次振動等が原因となって、更にフィードバックゲインを増加させると発振問題を起すことが懸念される。そこで、固有振動数の低減化は 0.53Hz に留めて、位相遅れ補償によって更なる低減化を図ることとする。周期 5 秒の地震波の観測を目標にして、0.2Hz の振動数で位相の許容値を 45° に設定すれば、図 4 によれば 0.2Hz で 130° だけ位相を遅らせる必要がある。それは 2 次遅れ位相補償器によって実現が可能である。その 2 次遅れ補償器の伝達関数は以下のように表される。

$$G_c(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_n\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_d\omega_d s + \omega_d^2} \quad (13)$$

この伝達関数において、分子項はフィードバック制御によって得られた周波数特性を相殺する目的で設定され、分母の項は新たな振動計の測定帯域を設定するために定めれば良い。そこで、本研究では各値を以下のように定める。

$$\begin{aligned} \omega_n &= 0.53 \times (2\pi) \text{ [rad/s]}, & \zeta_n &= 0.4 \\ \omega_d &= 0.09 \times (2\pi) \text{ [rad/s]}, & \zeta_d &= 0.6 \end{aligned}$$

Fig.5 Frequency response of 2nd order phase lag compensator. In order to cancel out the natural frequency and damping factor of the all feedback controlled system, the frequency response of above-transfer function of the second order of the phase lag compensator is shown.

図 5 は式 (13) と上に記述したパラメータを用いて表した 2 次位相遅れ補償器の周波数応答特性である。目標とする 0.2Hz 付近で 130° 程度位相が遅れており、0.09Hz 付近でゲインが 30dB だけ持ち上げられているので、図 4 で見られるようにその付近で低下しているゲインを補えることが分かる。

図 4 に赤線で示したフィードバック補償系をこの 2 次位相遅れ補償器で補償後の周波数応答特性を図 6 に黒線で示す。参考までに非制御時の周波数応答特性を黒い点線で示し、各周波数応答特性と比較している。図 6 において固有振動数を 90° を横切る振動数と定義すれば、非制御時の固有振動数 5.5Hz からフィードバック制御で 0.53Hz に低減され、さらに補償後に 0.12Hz 低減されていることが分かる。

図 6 において注目すべきは、2 次の位相遅れ補償後もゲイン低下は -40dB に維持されていることである。これは非制御時のゲイン 0 dB から、補償後のゲインが -40dB=1/100 に圧縮されており、質量の可動範囲 ±1 mm の本振動計によって ±100 mm の大変位振幅が測定できることを意味しており、小型の絶対変位振動計で大変位が測定できることを示している。

Fig.6 Effectiveness of feedback control added with 2nd order phase lag compensator. Notable points in Fig. 6 are the drop in gain from 0 dB to -40 dB and shifting in the corresponded natural frequency from 5.5Hz to 0.12Hz. It means a possibility for realizing the absolute displacement sensor to measure seismic waves with long period and large amplitude, nevertheless a small size sensor.

3・3 本振動計の設計目標

Fig.7 Design target of developing the seismometer-type absolute displacement sensor. It will be able to measure 100 mm of the absolute displacement by the sensor with 1mm of moving distance and 5 second of the long period.

上記シミュレーションによって、可動範囲が 1mm の小型絶対変位振動計によって 100mm の振幅と周期 5 秒までの地震波を測定できることを確認した。また、理論的には可動範囲を更に大きくすることで、長周期・大振幅変位が測定可能なことが分かった。本研究においては図 7 の周波数応答特性を設計目標にして、振動計の構成を図ることとする。

4. 実 験

4・1 加振実験装置について

本振動計の性能試験には3種類の加振器を用いた。図8に示すのは本振動計の周波数応答測定のための小型加振装置であり、加振振幅は $\pm 5\text{mm}$ 程度しか出せないが広い加振帯域を持っている。図8はこの加振器によって加振台に取り付けられた本振動計を加振し、その出力信号とレーザー変位計で検出された加振変位信号を伝達関数解析装置に導き、周波数応答特性を得ている。図8に示すフィードバック制御部と2次位相遅れ補償器は、市販の演算増幅器を主体とする、アナログ機器を用いている。

用いた他の加振器としては、 $\pm 50\text{mm}$ 程度の加振振幅を有する中型加振器と、 $\pm 100\text{mm}$ を超える大型加振器である。中型加振器は模擬地震波の発生装置として用い、大型加振器は本振動計で測定できる最大振幅の確認に用いた。これらの実験結果については後述する。

Fig.8 Measurement system of frequency response for the sensor. The proposed sensor is attached to a compact shaker. A laser sensor is used to measure the input signal to the sensor. A transfer function (T.F.) analyzer obtains the frequency response between the laser sensor signal and the output signal of the proposed sensor.

4・2 構成した小型絶対変位振動計

Fig.9 Composed feedback control circuit and sensor body. The control circuit is constructed by analog devices to realize integration, differential circuits and 2nd order phase lag compensator shown in Fig 1

図9には本研究で構成した小型絶対振動計のフィードバック制御部と振動検出可動部の写真を示す。フィードバック制御部はアナログ機器を用いて図1の右部が忠実に実現されている。また振動検出可動部はA社製の速度センサにアクチュエータ機能を付加する改造を行っている。可動部の諸元は3・1に記述した通りである。

4・3 周波数応答の実験結果

図10は図4のシミュレーション結果に相当する実験結果である。非制御時の周波数応答は黒い点線で示されており、赤い線はシミュレーションで与えた各フィードバックゲインに相当するゲイン K_A , K_V , K_D が設定されていて、いずれもシミュレーション結果と類似の結果を得ている。実験結果では、非制御時に 5.5Hz にあった固有振動数がフィードバック制御によって 0.65Hz まで低下し、減衰比は適値の $\zeta = 0.4$ になっているが、フィードバック制御のみでは変位信号の測定範囲の下限は 0.8Hz となり、このままでは長周期振動の測定には不十分である。一方、ゲインレベルの低下はシミュレーション結果と同様に -40dB となっており、測定範囲は 100 倍に拡大できるので、可動範囲が $\pm 1\text{mm}$ の小型でも $\pm 100\text{mm}$ の大変位が測定できる絶対変位計が実現できることが分かった。

Fig.10 Measured frequency responses of developed absolute displacement sensor with and without feedback control. All feedback gains of K_A , K_V and K_D are determined to obtain the corresponded frequency response shown in Fig.4. The natural frequency was shifted from 5.5Hz to 0.65Hz with damping factor of $\zeta = 0.4$ by the all feedback.

Fig.11 Experimental results corresponded to the simulated results shown in Fig.6. Since the second order phase lag compensator was added, the frequency response of the feedback system is improved well at the low frequency range.

そこで、長周期・大振幅の測定を目指している本研究では、3章で示した設計目標に沿って、2次の位相遅れ補償器の導入によって、更に測定範囲の低減化を図る。図11に2次遅れ補償器が付加された周波数応答特性を黒い実線で示す。比較のためにフィードバック制御のみの周波数応答特性を赤線で示している。ここでも、 90° を通過する振動数をもって固有振動数と見れば、その値は 0.18Hz に低減化されており、周期 5 秒の極低振動数ま

で測定可能なことが分かる。また、ゲインについても非制御時に対して -40dB のレベルを維持しており、これらの実験結果から、長周期・大振幅変位振動を測定可能とする小型絶対変位振動計の第一歩が実現できたと考えられる。

4・4 模擬地震波による検証

今までの理論と実験によって、本振動計は 1Hz 以下の大振幅の振動変位が測定できることが分かった。また、超高層ビルの固有周期が $3\sim 5$ 秒程度で有れば、図 11 の振動数特性を有する本振動計で対応できるため、構造物の振動制御用振動計としての応用が可能なことが分かった。

Fig. 12 Comparison between the ground motion on simulated Hachinohe wave and its output signal of the sensor. Hachinohe wave is relatively coincident on the amplitude, although the phase is shifted forward. Since it is important to measure the amplitude of displacement exactly on the seismic observation system, it may applicable to this system.

そこで、観測波形としては比較的長周期波として知られる八戸波の振幅を小さくした模擬地震波を入力として、中型加振器によって、本振動計の観測性能を検証することにした。図 12 は、黒線で示されているのが入力信号としての八戸模擬地震波であり、赤線が振動計の出力信号を示す。八戸波の卓越振動数は約 0.3Hz である。本振動計の出力信号は入力信号より若干位相進みが見られるが、振幅は概ね一致しており、図 11 の周波数応答特性通りの観測波形を得ている。

4・5 大振幅による検証

最後に、本振動計は可動範囲が $\pm 1\text{mm}$ と小型ながら大振幅が測定できることを実証する。図 13 は、測定範囲が拡張されるように各フィードバックゲインを調整した制御回路ならびに 2 次位相遅れ補償器を用いた場合の、加振振幅 $\pm 100\text{mm}$ 、加振振動数 0.9Hz の場合の実測結果である。赤線で示した振動計の出力信号は黒線で示した加振信号に対して位相に 15° 程度の進みが見られるが、このような大振幅の変位振動に対して良く観測できることが分かる。図 13 の例ではセンサの校正値は $147.17[\text{mm/V}]$ である。これは $1\sim 10\text{Hz}$ のゲインの平均値を用い、基準センサ（レーザー変位計）と比較して得たデータである。このような方法で校正値を取得しておけば、本振動計の出力信号電圧の測定値に校正値を乗算することによって実際の変位を知ることができる。

今後は位相遅れ補償法の更なる改善によって、より精度の高い長周期・大振幅振動変位計が期待される。

Fig.13 Sinusoidal response under the shaking displacement amplitude of $\pm 100\text{mm}$ and exciting frequency of 0.9 Hz by the shaking table. It will be available to measure more large amplitude with a little phase shift by the use of the developed sensor controller.

5. 結 論

東日本大震災による長周期大振幅地震動で超高層ビルの長時間による大きな揺れが大問題になった今日、その観測と制御に必要な、長周期・大振幅の変位が測定できる絶対変位振動計の開発を目指して研究を行い、以下の知見と研究成果が得られた。

- (1) サイズモ型の振動検出可動部と相対加速度、相対速度、相対変位信号をフィードバック信号とする制御回路部を有する小型絶対変位振動計を構成し、解析によって制御系設計に必要な伝達関数を導き、各信号の本振動計の望ましい特性を得るための役割を明らかにした。
- (2) 相対加速度の負帰還は、長周期の振動測定に必要な固有振動数の低減化に最も寄与し、相対変位の正帰還も低減化にも寄与するが、発振問題の懸念があるのでドリフトを防止程度に留める。また、相対速度フィードバックは共振ピーク値を調整できる。
- (3) 相対加速度の負帰還は大振幅変位振動の測定に大きく寄与する。本研究では可動範囲 $\pm 1\text{mm}$ の小型振動計で $\pm 100\text{mm}$ の振動振幅が測定できることを理論解析と実測実験によって証明した。
- (4) 非制御時 5.5Hz であった固有振動数が、フィードバック制御によって 0.53Hz まで低下できることを理論解析と実測実験によって証明した。
- (5) しかし、長周期振動の測定にはフィードバック制御だけでは不十分なので、2 次位相遅れ補償器の導入によって更なる測定範囲の低振動数への拡張を図り、0.2Hz から 10Hz まで測定できる絶対変位振動計が構成できた。
- (6) 比較的長周期波として知られる八戸波を加工した模擬地震波を試験入力として、本振動計が長周期地震波の観測に利用できることを実証した。また、大振幅振動の観測については $\pm 100\text{mm}$ までの観測ができることを実証した。

以上の研究成果によって長周期・大振幅の振動変位測定のための絶対変位振動計構成の見通しが得られた。しかし、東日本大震災では超高層ビルが 1 メートルを超える揺れを観測した事例もあるので、本研究の成果を踏まえて、更なる長周期・大振幅の振動変位測定を目指した絶対変位振動計の開発を目指したい。

文 献

Doi, F., Gatade, Y. and Seto, K., Structural vibration control for bridge tower model using a new servo-type vibration sensor, proceedings of 2nd Second World Conference on Structural Control, Vol.2 (1998), pp.1339-1347.

- Gatade, Y., Doi, F. and Seto, K., Development of an absolute displacement sensor for active vibration control, Proceedings of Motion and Vibration Control in Mechatronics (1999), pp.244-249.
- Ishihara, T., Watanabe, T. and Seto, K., Development of seismic type sensor for vibration control, Proceedings of the 8th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC) (2006), Daejeon Korea, CD-ROM.
- Kashima, T., Koyama, I., Okawa, I. and Iiba, M., Strong Motion Records in Buildings from the Great East Japan Earthquake, 15 WCEE, LISBOA 2011 (2011).
- 甲斐孝志, 秋山昌也, 涌井伸二, 絶対変位センサのパラメータ感度解析とばらつきの一調整法, 日本機械学会論文集中編, Vol.76, No.771 (2010), pp.2923-2930.
- Kuo, B.C., Automatic control systems, Prentice-Hall, Inc. (1962), pp.48-52.
- Preumont, A. and Seto, K., Active control of structures, Wiley, Chapter 4 (2008), pp. 148–158.
- Rodellar, J., Barbat, A. H. and Casciati, F., Advances in structural control, CIMNE, Spain, Chap.8 (1999), pp.159-196.
- Sato, K., Asano, K. and Iwata, T., Long-period ground motion characteristics of the Osaka Sedimentary Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, 15 WCEE, LISBOA 2011 (2011).
- Spencer, B.F. and Sain, M.K., Controlling buildings: A new frontier of feedback, IEEE Control System, Vol.17, No.6 (1997), pp.19-35.
- 斉藤弘樹, 井田勝巳, 佐藤吉典, 土井文夫, 背戸一登, 振動制御のための速度・変位センサの開発, 日本機械学会論文集中編, Vol.63, No.615 (1997), pp.3722-3727.
- Seto, K., Control of vibration in civil structures, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Systems and Control Engineering, Vol.218, Part. 1 (2004), pp.515-529.
- 背戸一登, 渡辺亨, フィードバック制御の基礎と応用, コロナ社 (2013), pp.30-34.
- Seto, K., Iwasaki, Y., Ito, A. and Shimoda, I., Development of seismometer-type absolute displacement sensor aimed for detecting earthquake waves with large magnitude and long period, CD-ROM on Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (2010).
- Seto, K., Ito, A., Iwasaki, Y. and Miyazaki, M., Development of seismometer-type absolute displacement sensor for detecting earthquake waves with large magnitude and long period, DSCC2012-MOVIC2012-8821 (2012).
- 富成襄, 背戸一登, 岡田養二, サーボ設計論, コロナ社 (1979), pp.83-87.
- Wakui, S., Kojima, D. and Negishi, Y., Realization of displacement sensor using calibration coil, Journal of the Society of Precision Engineers, Vol.,73, No. 10 (2007), pp.393-397.
- Wakui, S., Kai, T. and Kojima, D., Wide bandwidth of absolute velocity/displacement sensors and its application to vibration isolated table, Journal of the Japan Society of Precision Engineers, Vol.75, No.4 (2009), pp.561-566.

References

- Doi, F., Gatade, Y. and Seto, K., Structural vibration control for bridge tower model using a new servo-type vibration sensor, Proceedings of 2nd Second World Conference on Structural Control, Vol.2 (1998), pp.1339-1347.
- Gatade, Y., Doi, F. and Seto, K., Development of an absolute displacement sensor for active vibration control, Proceedings of Motion and Vibration Control in Mechatronics (1999), pp.244-249.
- Ishihara, T., Watanabe, T. and Seto, K., Development of seismic type sensor for vibration control, Proceedings of the 8th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC) (2006), Daejeon Korea, CD-ROM.
- Kashima, T., Koyama, I., Okawa, I. and Iiba, M., Strong motion records in buildings from the great east Japan Earthquake, 15 WCEE, LISBOA 2011 (2011).
- Kai, T., Akiyama, M. and Wakui, S., Parameter sensitivity analysis of absolute displacement sensor and a tuning method of its dispersion, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 76, No. 771 (2010), pp.2923-2930 (in Japanese).
- Kuo, B.C., Automatic control systems, Prentice-Hall, Inc. (1962), pp.48-52.
- Preumont, A. and Seto, K., Active control of structures, Wiley, Chap. 4 (2008), pp. 148–158.
- Rodellar, J., Barbat, A. H. and Casciati, F., Advances in structural control, CIMNE, Spain, Chap.8 (1999), pp.159-196.
- Sato, K., Asano, K. and Iwata, T., Long-period ground motion characteristics of the Osaka Sedimentary Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, 15 WCEE, LISBOA 2011 (2011).

- Spencer, B.F. and Sain, M.K., Controlling buildings: A new frontier of feedback, IEEE Control System, Vol.17, No.6 (1997), pp.19-35.
- Saitoh, H., Ida, K., Satoh, Y., Doi, F. and Seto, K., Development of velocity and displacement sensor for vibration control, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 63, No. 615 (1997), pp.3722-3727 (in Japanese).
- Seto, K., Control of vibration in civil structures, Instn Mech. Engrs, Systems and Control Engineering, Vol.218, Part. 1 (2004), pp.515-525.
- Seto, K. and Watanabe, T., Fundamentals and applications of feedback control, Corona Publishing Co. (2013), pp.30-34 (in Japanese).
- Seto, K., Iwasaki, Y., Ito, A. and Shimoda, I., Development of seismometer-type absolute displacement sensor aimed for detecting earthquake waves with large magnitude and long period, CD-ROM on Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring (2010).
- Seto, K., Ito, A., Iwasaki, Y. and Miyazaki, M., Development of seismometer-type absolute displacement sensor for detecting earthquake waves with large magnitude and long period, DSCC2012-MOVIC2012-8821 (2012).
- Tominari, N., Seto, K. and Okada, Y., Analysis and design of servo control systems, Corona Publishing Co, Ltd. (1979), pp.83-87 (in Japanese).
- Wakui, S., Kojima, D. and Negishi, Y., Realization of displacement sensor using calibration coil, Journal of the Society of Precision Engineers, Vol.,73, No. 10 (2007), pp.393-397.
- Wakui, S., Kai, T. and Kojima, D., Wide bandwidth of absolute velocity/displacement sensors and its application to vibration isolated table, Journal of the Japan Society of Precision Engineers, Vol.75, No.4 (2009), pp.561-566.