

デジタルフィルタによる変位計算と精度の検証

Calculation method for transforming acceleration record to displacement using digital filter and its accuracy

鈴木崇伸*・堀宗朗**・古川洋之***

Takanobu SUZUKI, Muneo HORI and Hiroyuki FURUKAWA

*博士(工学) 東洋大学教授, 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

** Ph.D. 東京大学教授 地震研究所 (〒117-0031 東京都文京区弥生 1-1-1)

***(株)山武 アドバンスオートメーションカンパニー (〒251-8522 神奈川県藤沢市川名 1-12-2)

This paper presents calculation method for displacement from acceleration record in easy way. Using recursive digital filter is good for easy calculation, so simple formula is proposed, which is combined of integration and low-cut filter. Shaking table test is carried out in order to investigate accuracy of calculated displacement. The movement of the shaking table is measured by laser displacement meter, and two acceleration meters are installed on the table. Though data from laser meter include long period noise, calculated displacement is rather consistent with laser meter, after filtering noise. Proposed digital filter is useful for on-site health monitoring measurement.

Key Words: digital filter, calculation of displacement, health monitoring

キーワード: デジタルフィルタ, 変位計算法, 健全性評価

1. はじめに

地震動の計測は、構造物に加わる地震力を知るために始められ、稀に発生する強い揺れの計測に主眼が置かれていたといえる。こうした強い揺れの観測データは大きな地震に備える耐震設計の基礎データとして活用され、日本のインフラ設備の耐震性能の向上に寄与してきた。1995 年の兵庫県南部地震を契機に全国的に地盤における強震観測ネットワークが整備されたが、この観測は前述の目的に加えて、地震発生直後の被災状況の把握と初動体制の確立も目的とされ、これらのネットワークを活用して、最近では緊急地震速報として、揺れ始める前の地震情報が提供されるようになってきている。

公的機関の地震観測は観測点数が年々増加しているのに対し、個々の構造物の観測は不十分な状態といえ、日本建築学会強震観測小委員会では、「建物の強震観測に関する将来像(案)」¹⁾を提言し、現状の課題を分析している。全国的な建物の観測ネットワークの強化を提言する一方で、問題点として建物健全性の評価、いわゆるヘルスマニタリングに地震観測データが活用されていない点を上げている。その原因として、実観測データの不足と、多点観測システムの機能の不十分な点が指摘されている。最近では、耐震設計に不備がある構造物の存在が社会問題化しているが、これもまた性能検定する手法が不十分であることが影響していると考えられる。

筆者らはこれまで、地震計に演算機能を付与して加速度データ以外の出力を得られるよう工夫した新 SI センサーの開発²⁾を行ってきた。また建物の健全性に関しても、前述の新 SI センサーを建物の振動計測に活用する研究³⁾や、ジャイロを用いて角運動を計測することで、建物の剛体的な運動を少ない観測点数でより正確に捉える研究^{4) 5)}を行ってきた。一連の研究から筆者らは、構造物の健全性評価に必要となる計測項目を明確にして、健全性評価に特化した地震計の開発が重要であると認識するに至った。すなわち、加速度データを正確に記録する機能だけではなく、多様な出力が可能なハイブリッド地震計の開発に着手した。

今回の研究は、地震計から変位出力を可能にするためのデジタルフィルタの開発とその精度の検証を行った。漸化式の形としたデジタルフィルタは、畳み込み型のフィルタに比べて非常に効率が良いことが知られており、加速度を変位に変換する漸化式フィルタの有用性は高い。積分誤差を最小限に抑えた効率のよいフィルタは地震計に実装した CPU でも十分に計算が可能であり、変位出力がオンサイトで得られることになる。本論文では、積分計算とローカットフィルタを組み合わせた漸化式の提案をするとともに、振動台実験を行って、加速度から計算した変位とレーザ変位計の比較を行っている。積分計算にも、レーザ変位計のデータにも誤差が含まれるが、およそ 1 割の精度で両者が一致することを確認できた。簡易に精度よく加速度記録を変位に変換できる漸化式は、地震時の

揺れから構造物の健全性を評価する際に、有効な機能になると考える。

2. 変位計算と健全性評価

現在、地震を被災した構造物では、応急危険度判定あるいは被災度判定が行われる。現地で構造物の被災程度を観察して被害状況を把握するのが基本である。全体の被害状況を把握して技術者が本格的に対応を開始するのは、被害規模にもよるが、数日から1週間以降になる。しかし、防災拠点では継続使用の可否の判断は地震直後にも要求され、使用者他の臨機応変な判断に任されているのが現状である。一方、詳細な被災度や残余耐震性能の判定は、ひび割れや鉄筋の破断など観察可能な現象によってのみ判定されるため、専門家による判断でも経験にもとづいて極めて曖昧に推定されているのが現状である。

被災度や残余耐震性能を定量的に判定するためには、複数の地震計を構造物に展開し、加速度・速度・変位の応答の時刻暦を計測し、震動台実験と同様の計測ができることが望ましい。同時に、残余耐震性能の判定には、固有周期の変化の計測に留まらず、構造工学的により重要なモード変化等も計測できることも念頭に置くことも望ましい。しかしながら、震動台実験と同様の計測環境を実際の構造物の中で作することは決して容易な課題ではない。計測機は勿論、データの伝送・保存・分析に労力がかかるからである。構造物の健全性評価に必要な機能をシステム化できれば、経験的な判定を下さざるを得ない応急被災度判定を高度化することが可能となる。すなわち、計測可能な指標を使って被災度や残余耐震性能を客観的に判定するのである。

構造物の運動計測において加速度計測が重要であることはいままでもない。しかしながら前述のような健全性評価を行うためには、加速度データだけでは十分とはいえず、同期がとれた複数台の情報と、正確な変位データがそろえることが望ましい。構造物の変形の履歴として、理解しやすいのは変位記録である。破損の程度は相対変位によっておよそ推定が可能であることから、複数台の地震計から相対変位を精度よく計算できれば、構造物の健全性に関する有用な情報に加工することができる。地震計の同期方法と変位計算方法はキーとなる技術であり、本研究では健全性評価のための変位計算方法について検討した結果を報告する。

3. デジタルフィルターによる変位計算

加速度時刻歴の積分方法に関しては多くの研究があるが、大別すると時間軸での直接積分とFFTを用いた周波

数軸での積分方法に分けられる。地震計記録には、電気回路のノイズが含まれているのが一般的であり、基線ずれや定常ノイズをうまく除去する必要がある。直接積分では、大崎⁹⁾の提案した3次式を用いた基線補正法が有名であるが、変位波形を一度計算した後に、加速度の基線ずれを決めて、再計算を行う方法となっている。またFFT計算はパソコンレベルでは簡単に行えるようになったが、オンサイトの地震計に実装するには計算量が大きいという問題点がある。本章では、積分計算と誤差除去を行える回帰型のフィルターをつくり、実記録に適用してみる。なお本研究に関連して、高サンプリングレートの地震記録を周波数軸で積分する効果と建物の加速度記録の同期をとる方法の研究を別報⁷⁾で報告している。

(1) 積分フィルター

前述のように地震時の挙動を見るのに変位の大小が基本的な量となる。変位データを求めるためには積分計算を行うことになるが、ノイズの多い加速度記録を2回積分して変位に換算すると、不安定になることが多い。ここではオンサイトで簡単に処理できるデジタルフィルターを考える。

積分計算には、いろいろな方法が考えられるが、最も簡単な数値積分公式をデジタルフィルターとして用いる。ある程度、時間刻みが小さいデータを前提にすれば、単純な計算式でもよい精度が得られる。その精度の問題については後述する。時間変化する入力を x 、出力を y とすると両者の関連はデジタルフィルターを用いて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} y_0 &= y(t_n), & x_0 &= x(t_n) \\ y_j &= y(t_n - j\Delta t), & x_j &= x(t_n - j\Delta t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$y_0 = \sum_{j=0} a_j x_j - \sum_{j=1} b_j y_j \quad (2)$$

ある時間までさかのぼった既知の量の線形結合で、現在の出力が計算される。データ間隔が Δt [sec]である時系列データを積分する最も簡単な公式は、点列を直線で結んで、台形をつくり、その面積を計算する台形公式である。式で表せば、

$$y_0 = y_1 + \frac{\Delta t}{2} (x_0 + x_1) \quad (3)$$

となる。同様に点列の間を放物線で近似すると、

$$y_0 = y_1 + \frac{\Delta t}{12} (5x_0 + 8x_1 - x_2) \quad (4)$$

となる。ここで $z = e^{-i\omega\Delta t}$ とおくとフィルターのスペクト

ル特性は,

$$F(\omega) = \frac{\sum_{j=0}^n a_j z^j}{\sum_{j=0}^n b_j z^j} \quad (5)$$

で表される。フィルターの重ね合わせは、多項式計算によって求められる。重ね合わせた係数は、2つのスペクトルを分子と分母に分けて重ね合わせ、 z の係数を求めることで求められる。

計算公式からわかるように、足し算を繰り返すために、計算誤差が累積して、計算終了時に0にならない。多くの場合、計算途中からいずれかの符号に発散していく。こうした計算誤差は基線ずれの影響などにより、長周期成分に誤差分が多くなるのが原因である。そこで簡単なローカットフィルタを用いて、発散成分を取り除く。簡単なデジタルフィルタとして

$$y_0 = qy_1 + x_0 - x_1 \quad (6)$$

が知られている⁸⁾。係数 q は1よりも小さな数値で、ゲインが1/2 (-3[dB])となる周波数を f_0 (Hz)とすると

$$q = \frac{\cos(2\pi f_0 \Delta t)}{1 + \sin(2\pi f_0 \Delta t)} \quad (7)$$

で与えられる。積分フィルタとローカットフィルタを重ね合わせると、台形近似の場合は式(8)、放物線近似の場合には式(9)が簡単な積分フィルタとして求められる。2次あるいは3次のデジタルフィルタは、時間軸上の掛け算と足し算だけで出力が得られるきわめて簡単な演算ロジックとなり、オンサイトでの計算に向いているといえる。

$$y_0 = (q+1)y_1 - qy_2 + \frac{\Delta t}{2}(x_0 - x_2) \quad (8)$$

$$y_0 = (q+1)y_1 - qy_2 + \frac{\Delta t}{12}(5x_0 + 3x_1 - 9x_2 + x_3) \quad (9)$$

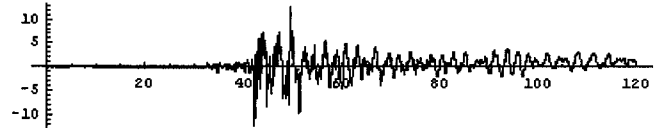
(2) 適用例

次に計算例を示す。筆者らは健全性評価のための地震計の要求仕様を検討するために、2kHz サンプリングの地震計を試作し、仙台市内のRCビルで地震観測を行っており、2005年8月16日の宮城県沖地震の記録を得ている⁹⁾。このデータを用いて変位を計算する。2kHz サンプリングのデータであるので $\Delta t = 1/2000$ [sec]である。

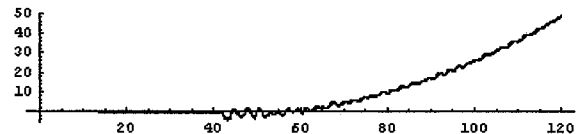
元の観測データは揺れ始める前の加速度が0になっていない。因果性に反するので、0になるように補正する。



(a) 加速度波形 (縦軸の単位: Gal)



(b) 台形積分による速度波形 (縦軸の単位: cm/s)



(c) 台形積分による変位波形 (縦軸の単位: cm)



(d) ローカットフィルタ処理をした変位波形 (縦軸の単位: cm)

図-1 積分計算の例

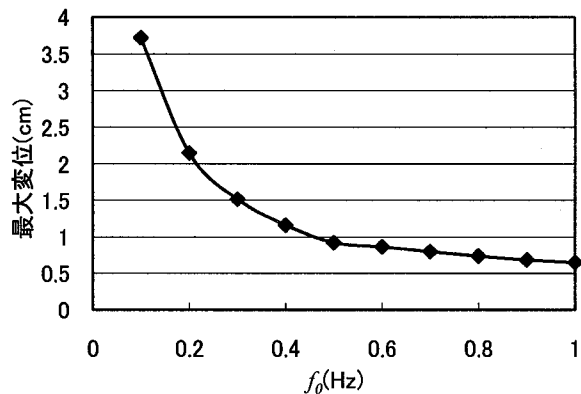


図-2 ローカットフィルタ処理による変位振幅の変化

補正は、記録開始から2秒間(4000個)のデータの平均値を求め、観測データからこの平均値を引いた値を加速度値として計算に用いる。この計算ではローカットフィルタは、-3[dB]となる周波数を $f_0 = 0.3$ [Hz]としている。図-1(a)はゼロ補正をした加速度波形であり、振動終了時も0となっている。同図(b)は式(3)の台形積分フィルタのみを作用させた速度波形である。振動の後半で計算誤差が累積しているのがわかる。その速度波形をもう一度積分したのが(c)である。誤差の累積がさらに大きくなって発散傾向となる。同図(d)は(c)の計算結果に式(6)のローカットフィルタを2回作用させた波形である。発散成分がとりのぞかれて、安定した波形が得られている。式(8)を2回作用させても計算結果は同じとなる。なお、加速度振幅が10[Gal]程度であっても、このデジタルフィルタによる計算は安定して

出力されることを確認している。

波形を安定させるために用いるローカットフィルタは、長周期成分を消すために減衰を作用させている。そのためにローカット処理を行うと振幅が小さくなる特性を持つ。図-2はローカット処理のパラメータである f_0 を変化させて、最大変位を求めた結果である。 f_0 が大きくなると変位振幅が徐々に小さくなっていくのがわかる。逆に f_0 を0.1[Hz]よりもさらに小さくしていくと波形が乱れるようになる。どの程度の値が真値に近い計算結果を与えるかは、振動台実験によって確認する必要がある。

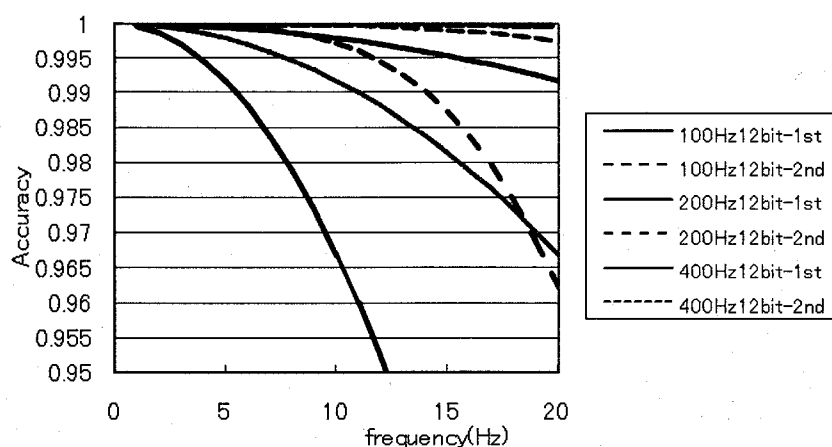
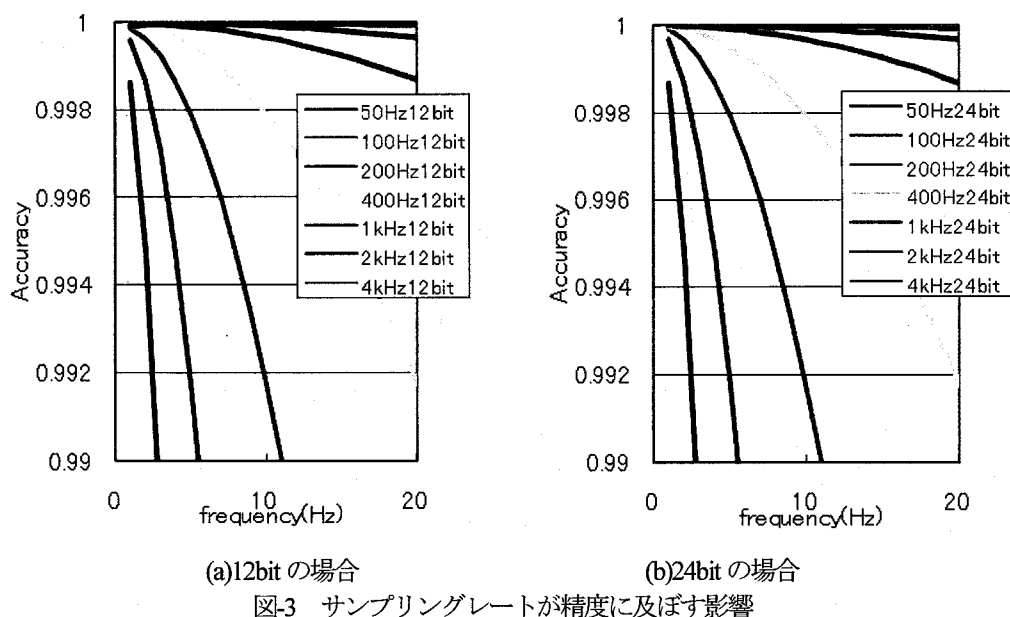
4. 変位計算精度の分析

積分による変位計算の場合、デジタル化の時間頻度を表すサンプリングレートと振幅レベルの分解能を表すサンプリングサイズの影響を考える。単純に考えれば、サンプリングレートとサンプリングレベルが高ければ、高品質の

デジタルデータが得られるが、コストがかさむのと記録メディアを多く必要とする問題が生じる。計測対象の特性に応じて必要最低限のサンプリングレートとサンプリングサイズを設定する必要がある。

地震計の場合には、対象が地震の揺れであり、これまでの観測データから、周波数ではおよそ20[Hz]以下の振動現象が対象になるといえる。また加速度振幅では1[Gal]から5000[Gal]ほどが計測対象と考えられる。中小地震の場合には最大加速度振幅は10[Gal]程度であることが多いが、まれに記録される非常に強い揺れの数百分の1以下の振幅となる。健全性評価のためには1000[Gal]をこす大振幅から1[Gal]程度の小さな揺れまでを精度よく記録することが期待される。

そこで簡単な数値実験により、AD変換のサンプリングレートとサンプリングサイズが数値積分にどのように影響するかを調べてみる。数値実験として、適当な周波数の正弦波を1秒間作成し、AD変換したデータに対し、数値積分を2回行い、デジタル化による誤差を計算する。式で表せば、



$$\begin{aligned} acc(t, \omega) &= \sin \omega t \\ disp(t, \omega) &= \frac{1}{\omega} \left(t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

となるが、加速度を条件に応じてAD変換して数値積分で速度と変位を計算する。この問題の場合には、数値計算誤差は、変位を小さく計算することになる。1秒間の計算を行って、 $t=1$ の変位値と数値積分結果の比率を積分精度とし、1から精度を引いたものを誤差とする。計算のパラメータとして、周波数は1[Hz]刻みで1[Hz]から20[Hz]とし、サンプリングレートは50[Hz], 100[Hz], 200[Hz], 400[Hz], 1[kHz], 2[kHz], 4[kHz]に設定した。サンプリングサイズはフルスケールを1として8bit(128レベル), 12bit(2048レベル), 16bit(32768レベル), 20bit(524288レベル), 24bit(8388608レベル)とした。

図-3に台形積分の場合の計算結果を示す。(a)は12bitの場合、(b)は24bitの場合である。正弦波の周波数が高くなると、右下がりになるグラフとなっており、周波数が高いほど積分精度が落ちる傾向となる。サンプリングレートは積分精度に影響が大きいといえ、サンプリングレートが低くなると積分精度は急速に悪くなる。100Hzサンプリングの場合、1%の誤差となるのは5[Hz]の周波数まで。200[Hz]サンプリングの場合は、1%の誤差となるのは10[Hz]までである。1[kHz]以上では20[Hz]の正弦波の積分で0.1%以下の誤差となる。また図3(b)はサンプリングサイズを変えた結果であるが、同じようなグラフとなっている。サンプリングレートをあわせて比較をした結果、グラフはほとんど重なり、ノイズのない正弦波を用いた今回のシミュレーションでは、サンプリングサイズはほとんど影響しないことが判明した。

3章で2種類の積分フィルターを述べたが、台形近似と放物線近似でどの程度違うかを比べてみる。図-4は100[Hz]から400[Hz]のサンプリングレートで、両方の計算をした結果を比較している。1次のフィルターが実線、2次のフィルターが破線である。グラフより、サンプリング周波数が低い場合には、2次の積分フィルターは誤差を低下させる効果が大いといえる。サンプリングレートが100[Hz]の場合、1%の誤差は1次のフィルターでは5[Hz]までであったが、2次のフィルターでは15[Hz]までとなる。200[Hz], 400[Hz]でも確実に精度が向上している。サンプリングレートが高い場合には、区別できないほど1に近いが、1[kHz]以上では2次のフィルターを用いると0.01%以下の誤差となる。単純な数学関数を積分する問題においてサンプリングレート、サンプリングサイズによらず2次のフィルターは誤差を小さくすることが確認された。

5. 振動台実験による検証

(1) 実験概要

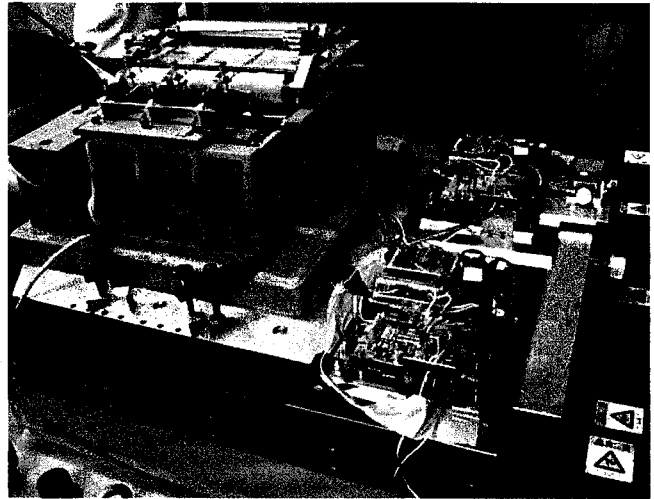


図-5 実験の様子

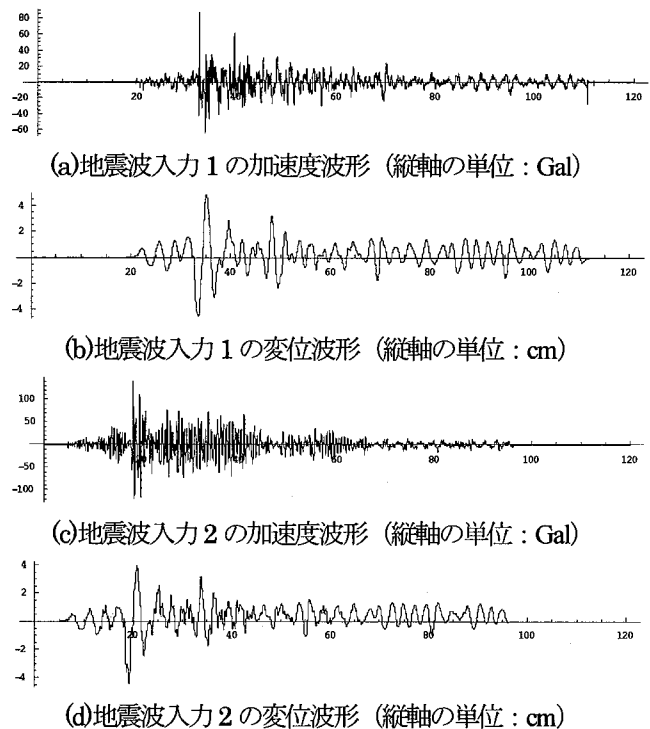


図-6 計測した波形の例

試作した加速度計の精度の検証を行うのと、変位計算方法を検討するため、東京大学地震研究所の1軸振動台に、新型地震計2台、基準加速度計、SMAC-B2加速度計、レーザ変位計をとりつけ、振動データを取得した。SMAC地震計は、最近のデジタル方式の地震計とどれほど差異があるかを確認するために設置した。実験は、正弦波加振(1[Hz], 2[Hz], 5[Hz], 10[Hz], 20[Hz], 50[Hz])と地震波加振(2波)のケースで実施した。実験写真を図-5に示す。左側の大型の地震計がSMAC-B、回路がむき出しになっているのが仙台に設置した新型地震計、右端の小さな円筒形のセンサーが基準サーボとなっている。レーザ変位計は基準サーボの近くにターゲットを置き、

振動台の脇に設置している。

地震波入力時の計測波形を図-6に示している。試作した加速度計による計測結果が(a)と(c)、レーザ変位計による変位が(b)と(d)である。加速度計は3章で述べた地震計と同じものであり、2kHzでサンプリングしている。レーザ変位計の記録を見ると、振動途中で基線ずれがあるのがわかる。しかし、振動終了時にはゼロにもどっており、長周期のノイズを含んだ計測結果であることがわかる。この長周期成分を加速度計で計測するのは難しいと考えられるが、レーザ変位計の記録を真値として変位計算方法の検証を行う。

今回、3種類の加速度計を用いて実験を行ったが、表-1に計測データの最大値を整理した結果を示している。基準サーボの計測データは試作地震計のフィルター特性にあわせて補正をしている。基準サーボと試作地震計の値を比べると、高周波になるとばらつきが大きくなるが、10[Hz]以下の帯域ではおよそ一致しており、地震波入力時にもよく一致している。また試作機どうしで比べると、個体差はほとんどなく安定して記録できている。

SMAC地震計は10[Hz]の振り子の臨界減衰応答を応用しており、高周波数で減衰が大きくなる特性を持つ。今回の実験でもおよそ理論的な特性曲線になることが確認された。地震波入力時には、逆にSMAC地震計の最大値のほうが大きくなる結果となった。1[Hz]の定常加振時にもSMAC地震計の振幅は小さくなっているが、地震波入力の最大振幅が大きくなった原因について分析してみる。

3種類の地震計による地震波入力1の記録のフーリエスペクトルを計算し比較したのが図-7である。凡例のservoは基準サーボ、prot1は試作地震計1、smacはSMAC地震計を示しており、基準サーボはハイカット補正をする前の生データを用いている。対数軸を用いてグラフを描いているが、SMAC地震計は0.2[Hz]以下の振幅が大きくなっており、長周期の計測誤差が、加速度の最大値に影響しているのがわかる。なお、基準サーボと試作地震計の差異は、フィルター処理の有無の違いであり、未補正時の基準サーボの最大値は93[Gal]であった。0.2[Hz]から5[Hz]の範囲でおよそ一致していても、それ以外の成分の影響で、最大加速度が変化することが確認された。

(2) 変位の計算

試作地震計は基準サーボと比べて、正確な計測データとなっていることが確認されたので、2[kHz]で取得した加速度データを用いて変位を計算し、レーザ変位計の記録と比べてみる。3章で述べたように、 f_0 を大きくすると、変位の計算結果が小さくなる。波形が安定する範囲でできるだけ小さく設定した結果、 $f_0=0.1$ [Hz]となった。

図-8(a)に試作地震計1の記録にデジタルフィルターを

表-1 実験ケースと最大振幅 (Gal)

実験ケース		基準サーボ	試作1	試作2	SMAC-B2
正弦波	1Hz	156.64	156.2	157.28	143.75
	2Hz	140.04	137.6	138.68	120
	5Hz	315.67	311.56	314.22	250
	10Hz	417.74	413.03	415.96	221.25
	20Hz	287.41	297.57	262.06	72.5
	50Hz	390.25	342.26	338.57	56.25
地震波	仙台1	75.73	76.18	76.38	86.6
	仙台2	131.46	132.55	133.6	145.5

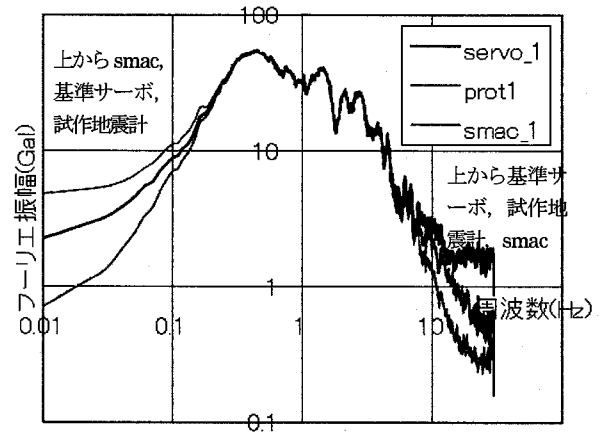


図-7 フーリエスペクトルの比較 (地震波入力1)

作用させた結果を示す。加振開始前から積分誤差がプラスの方向に累積し始め、加振終了後も永久変位が残る結果となっている。同じフィルターを試作地震計2の記録に作用させた結果を同図(b)に示している。この場合、加振開始前にはマイナスの方向に誤差が累積し始め、加振終了時に(a)とは逆の方向に永久変位が残る結果となっている。計算された変位波形を図-6(a)のレーザ変位計の計測波形と比べると、形状はよく一致するが、最大値が異なる結果となっている。

表-2中にレーザ変位計の最大値を示している。地震波入力1では4.63[cm]であり、図-8(a)に示した計算結果の最大値は4.80[cm]、同図(b)に示した波形では4.30[cm]である。積分誤差が最大値の方向に生じた場合には、レーザ変位計よりも大きく、最大値と逆の方向に生じた場合には、小さくなっている。

地震波入力2についても同様の分析を行っており、同様の結果を得ている。地震波入力2では、レーザ変位計の最大値が4.22[cm]、試作地震計1の積分結果が3.90[cm]、試作地震計2の積分結果が4.11[cm]となっている。デジタルフィルターを作用させて積分した変位波形の最大値について、表-3中にまとめて示している。

以上の検討により、およそ10%以内の精度で、レーザ変位計のデータを再現できることが確認された。しかしなが

ら、レーザ変位計のデータには長周期成分が入っており、またデジタルフィルターも波形が安定する範囲で、長周期ノイズを含んだ計算をした結果の比較をしている。加速度計はDC成分まで計測できるとはいえ、ゆっくりした運動を計測するには不向きであり、加速度記録の積分結果をレーザ変位計に一致させることはかなり難しいといえる。そこで、レーザ変位計から長周期成分を除いた振動を分析してみる。

まず、定常加振データを用いてレーザ変位計と試作地震計の基線ずれの特性を分析した。定常加振データのうち、振幅の安定した20秒間のデータを取りだして、振幅とゼロ線のずれを計算した。20秒間のデータの最大と最小を計算し、振幅は最大と最小の差の半分、平均ドリフト量は最大と最小の平均値として計算している。分析の結果、レーザ変位計、試作地震計ともにドリフトがあり、特に高周波数になるとレーザ変位計は大きくずれることが判明した。試作地震計は比較的安定しているが、数%は基線がずれることがあり、積分計算をしたときの誤差の原因となることが判明した。

次に、今回計測されたレーザ変位計のデータを0.3[Hz]、30[Hz]を通過させるバンドパスフィルターを適用して波形を整波した。バンドパスフィルターを作用させると、レーザ変位計のドリフト成分は除かれ、ゼロ線まわりで振動する波形に変換される。その結果、最大振幅は2割ほど小さくなるのが判明した。表-2にバンドパス処理をしたレーザ変位計の最大値を示している。

今回の実験からはレーザ変位計の長周期成分が誤差成分であるかどうかは判断できない。しかし、加速度計でゆるやかな変位を計測するのが困難なのは明らかであり、このような運動の変位まで再現するのは難しい問題となる。対処方法の一案として、速度検出型のセンサーを用いる案が考えられるが、加速度の精度が落ちるので、甲乙はつけがたい。適用周波数を限定した運動成分を検出するのであれば、フィルター処理したレーザ変位計のデータにあう変位計算方法を確立すればよいと考えられる。

図-8(a)、(b)に示した積分結果は、意図的に長周期の誤差を含ませ変位の計算結果が小さくならないようにしている。次に長周期の誤差を排除した結果が、バンドパスフィルター処理をしたレーザ変位計の記録とどれほど一致するか調べてみる。加振開始前の誤差の累積の影響が大きいことから、加速度の振幅に応じてローカットフィルターのパラメータ q を変化させる方法を試してみる。加振開始前までは、 $f_0=0.5\text{Hz}$ 、加振以降は $f_0=0.1\text{Hz}$ として計算した結果を図-8(c)、(d)に示す。(c)は試作地震計1による変位の計算結果であり、(d)は試作地震計2による結果である。(a)、(b)に示した変位波形は、加振開始前に誤差が累積し始めているが、フィルター特性を変化させることで、基線ずれのない波形になるのがわかる。表-3に、振幅に応じて q を変化させたときの最大振幅を示している。 q が一定の場合に比べて、最大振幅は1割から2割程度小さくなっている。加振開始時の基線をゼロに安定させることで、長周期の誤差が抑えられた結果である。この計算を行うと、2台の試

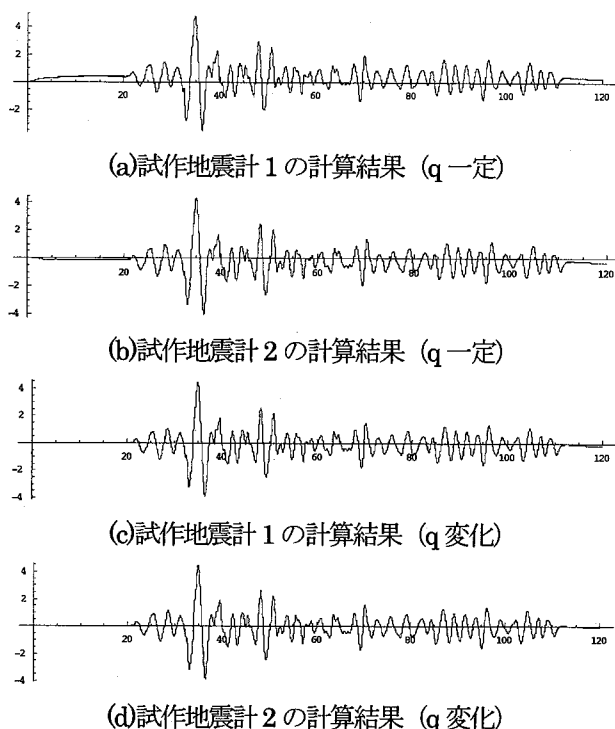


図-8 地震波入力1の変位計算結果(縦軸の単位: cm)

表-2 レーザ変位計の最大振幅(cm)

	レーザ計測	レーザ(BP処理)
地震波1	4.63	3.83
地震波2	4.22	3.50

表-3 変位計算結果の最大振幅(cm)

	qを一定		qを変化	
	試作1の積分	試作2の積分	試作1の積分	試作2の積分
地震波1	4.80	4.30	4.18	4.15
地震波2	3.90	4.11	3.47	3.47

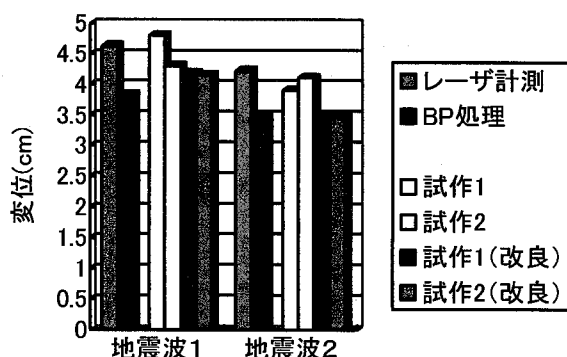


図-9 レーザ変位計と変位計算結果の比較

作地震計の最大変位がほぼ一致する点が注目される。バンドパスフィルター処理をしたレーザ変位計の値と比べると、地震波入力1では積分値が1.09倍とやや大きくなり、地震波入力2では積分値が0.99倍となり、ほとんど同じ値となっている。以上分析した内容を、グラフにまとめたのが、図9である。試作1, 2はを一定とした計算結果であり、改良は q を変化させた計算結果を示している。

加速度記録に簡単な積分フィルターを作用させることで、変位データに加工できるが、加速度データに含まれる基線ずれの影響を除く工夫が必要とされる。今回提案する q を変化させるデジタルフィルターによって、長周期成分を除いたレーザ変位計の記録を10%以内の精度で再現できることが確認できた。また長周期成分を含むレーザ変位計の元データを再現するのは難しいことも確認された。

6. おわりに

本研究は、加速度記録から一定の精度で変位波形を計算できるデジタルフィルターに関して検討を行っている。変位は変形計測の基本的な量であるが、実構造物では特殊な治具の取り付けも制約されるため、精密な計測が難しい状況にある。地震時の構造物の変形が加速度データから精度よく計算できるようになれば、健全性に関する有用な情報が得られることになる。大地震後に即座に被災判定を行わなくてはならない場合には、オンサイトの加速度センサーから変位に関する情報まで出力されることが望ましい。そのためには、計算負荷の軽いデジタルフィルターの開発が必要とされる。

加速度記録には基線ずれのノイズが含まれるため、長周期成分を適切に処理して積分計算を行う必要があるが、台形積分あるいは放物線積分の漸化式とローカット処理をする漸化式を組み合わせ、積分フィルターを作成した。高々3次のフィルターであり、演算効率は非常に高い。次にモデル計算により、サンプリングレートの検討を行い、サンプリング時間が短い場合には、台形積分でも十分な精度が得られることを確認した。

積分フィルターの精度を確認するために、振動台に加速度計をのせ、レーザ変位計をとりつけて加振実験を行った。レーザ変位計の値に近づくようにパラメータ解析を行った結果、1割程度の誤差で変位が計算できることを確認した。しかしながら、誤差を多く含む計算であり、地震計の個体差が大きくなることが判明した。誤差を減少させるために、ローカットフィルターのパラメータを変化させて、

加振開始時の変位をゼロ線に安定させることで、装置による誤差を取り除いた変位計算が行えることが判明した。レーザ変位計の長周期成分を除いた結果と比べると、1割以内の精度となることを確認した。

今後は、今回の研究を発展させて、加速度、速度、変位が出力可能なハイブリッド地震計の開発を目指したい。

謝辞

今回の振動台実験を行うにあたり、東大地震研究所の小国健二准教授と坂上実氏に協力いただきました。また今回の研究は(財)地震予知研究総合振興会に設立した研究会で進めた成果であり、池田潤一氏をはじめとするメンバー各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会強震観測小委員会, 建物の強震観測に関する将来像(案), 日本建築学会ホームページ.
- 2) T.Yanada et.al., Earthquake Sensor Sensors Update Volume 11 Sensors Technology- Applications-Markets, WILEY- VCH, 2002, pp.159-216.
- 3) 庄松涛, 他: 偏心ピロディ構造の震動実験その4 地震計による相対変位モニタリング, 平成14年日本建築学会全国大会, 2002.
- 4) 鈴木崇伸, 堀宗朗, 壁谷澤寿海, ジャイロセンサーによる構造物の耐震性能モニタリング, 応用力学論文集 Vol.6, pp.747-754, 2003.
- 5) 鈴木崇伸, 堀宗朗, 壁谷澤寿海, ジャイロセンサーを用いた地震観測の有効性に関する考察, 応用力学論文集 Vol.9, pp.701-708, 2006.
- 6) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 7) L. Huang, T. Peilius, M. Hori, H. Furukawa, T. Suzuki and A. Yamauchi, On Advantage of High frequency Sampling of Accelerometer for Time Integration and Time Synchronization, 土木学会地震工学論文集, 2007.
- 8) 力武常次, 佐藤良輔, 萩原幸男, 物理数学I, 学会出版センター, 1980.
- 9) 古川洋之, 大浦肇, 田久保光, 構造物の健全性評価のための多点同期地震加速度計測システムの研究, 自動制御学会(SICE)論文集, 2006.

(2007年4月12日 受付)