

地震波形収録装置のデジタルフィルタ による信号遅延の計測

田中伸一^{*†}・蔵下英司^{**}

Measurement of the signal delay of the seismic recorders

Shinichi S. TANAKA^{*†} and Eiji KURASHIMO^{**}

はじめに

アナログ量をデジタル値に変換する A-D コンバータの発展に伴い、地震波形データはデジタル値で収録されるようになった。デジタルデータはパーソナルコンピュータなどで拡大縮小が容易で、積分や周波数フィルタリング等の数値的な処理が簡便である。さらに、伝送による情報の劣化もないことから、紙に地震波形を記録していた時代に比べると、飛躍的な進化といえる。

A-D 変換の方式は多種あるが、地震波形データのデジタル化には、その多くがデルタ・シグマ型を採用している。デルタ (Δ) は差分検出動作を、シグマ (Σ) は積分 (ローパスフィルタ) 動作を意味する。デルタ・シグマ型の利点は、後述の通り、分解能 (ビット数) を高くできる点にある。自然地震観測には、この A-D コンバータを搭載した地震波形収録装置が多種使用されている。はじめに、デルタ・シグマ型の A-D コンバータについて河合 (2010) に沿って簡単に紹介する。

デルタ・シグマ型の量子化器は 1 ビット A-D コンバータであり、High/Low の 2 値のみを表現する。それらの値は、1 ビットデジタルアナログコンバータ (DAC) で High/Low の 2 値いずれかで入力にフィードバックされる。

この 1 サイクルの動作はサンプリング周波数 (f_s (Hz)) 毎に実行され、 $n \cdot f_s$ (n は任意の整数) はオーバーサンプリング周波数と定義される。

一般に、A-D コンバータによる量子化雑音のスペクトラム分布は、低周波数から $f_s / 2$ までに分布するが、分解能が高い場合は、それに比例して量子化雑音も下がる。

ところが、デルタ・シグマ型では、量子化が 1 ビットしかなく、その量子化雑音は実用レベルにない。それをダイナミックレンジで表現すれば、7.8 dB 程度しかない。そこで、第一に f_s を 10 倍、100 倍、1000 倍とオーバーサンプリングさせることで、より高い周波数帯を収録することができる。このとき、量子化雑音の総量はオーバーサンプリング前と同じであるが、高周波数帯域の雑音が増えることになり、相対的に実用帯域である低周波側の雑音が小さくなる。第二に、実用帯域の量子化雑音レベルをさらに下げ、不必要な高周波数帯へ雑音を追いやる処理 ($\Delta \cdot \Sigma$ 変調) を行って、量子化雑音を実用レベルにまで下げる。

次に、高サンプリングレート 1 ビットから低サンプリングレート複数ビットへ変換するために、デジタルフィルタを用いる。このとき、オーバーサンプリング周波数を高くすることで、24 ビットを超える高分解能を得ることも可能である。

このデジタルフィルタの最小構成単位は、デシメータ ($n \cdot f_s$ を f_s にする処理) とローパスフィルタである。ローパスフィルタは、サンプリングレートをデシメートした際に発生するエイリアシング (折り返し雑音) を取り除く役割をもつ。このローパスフィルタ処理の際に、実用周波数帯域の高周波数側の減衰を極力抑えるためには、急峻なフィルタ特性が必要であるが、それはフィルタの次数 N を高くすることと同義である。ところが、次数 N が高くなるほどに、フィルタに用いるデータ数が増えるため、希望するサンプリングレートまでデシメートした際に、サンプルのタイムスタンプが後ろにずれてしまう。これがデジタルフィルタに起因する信号遅延の原因である。この遅延は、信号のタイムスタンプをソフトウェア的に変更するこ

2016 年 11 月 22 日受付, 2017 年 1 月 20 日受理.

[†] sst@eri.u-tokyo.ac.jp

^{*} 東京大学地震研究所技術部総合観測室

^{**} 東京大学地震研究所地震予知研究センター

^{*} Technical Supporting Section for Observational Research, Technical Division, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

^{**} Earthquake Prediction Research Center, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo.

とで補正することが可能である。

デジタルフィルタ処理の一例として、白山工業製 LS-7000 XT の A-D 変換の構成概要を図 1 に示す。デルタ・シグマ型モジュレータは、アナログ信号を 409.6 kHz の 1 ビットデジタル信号に変換し、ハードウェア・デシメーションフィルタへ出力する。そして、Sinc フィルタ、FIR フィルタを通して、100 Hz や 200 Hz のサンプリングレートのデジタルデータを作り出す。100 Hz サンプリング時のダイナミックレンジは 135 dB であり、低ノイズな波形収録を実現している。最後に、出力されたサンプルのタイムスタンプをソフトウェア的に変更して、信号遅延を補正する。

ところが、現在、地震研究所で使用している多種の地震波形収録装置では、デジタルフィルタ処理の方法や信号遅延の補正などは統一されていない。したがって、各地震波形収録装置のデジタル信号に付与されるタイムスタンプにはばらつきが生じるが、それを定量的に示した例はない。そこで、本稿では、自然地震観測に用いられている地震波形収録装置（テレメータ式およびオフライン式）7 機種に、一定の矩形波を入力して、波形の立上りのタイミングを計

測し、それぞれの信号遅延量を比較した。

方 法

本実験では、GPS 受信機の 1 pps 信号をトリガーにして、マルチファンクションダックから矩形波を電圧出力させた。これにより、矩形波を出力する時刻が正秒を基準として常に一定となる。

GPS 受信機には Symmetricom 社製 Xli Time & Frequency system を用い、任意の時刻で 1 pps の信号をマルチファンクションダックのトリガーへ入力する。マルチファンクションダックは、各機種の入力電圧範囲を超えないように +0.2 V ~ +5 V を 100 msec 間出力（矩形波）し、それを計測精度 $\pm 1 \mu\text{sec}$ のタイムロガーおよび地震波形収録装置に入力させる。タイムロガーは、マルチファンクションダックの出力タイミングの正確さを確かめるために用いた。実験の様子を図 2 に示す。実験は、2015 年 2 月 24 日から 25 日の 2 日間にかけて、ジオシス社嵐山分室で実施した。屋外に GPS アンテナを設置し、レピータを用いて室内に GPS 信号を発信させている。GPS 受信機およ

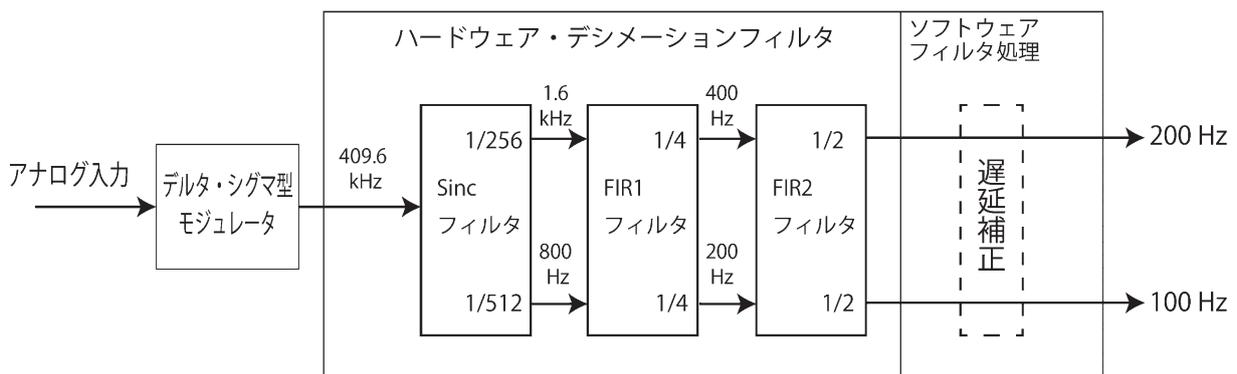


図 1. 白山工業製 LS-7000 XT の A-D 変換の構成概要.

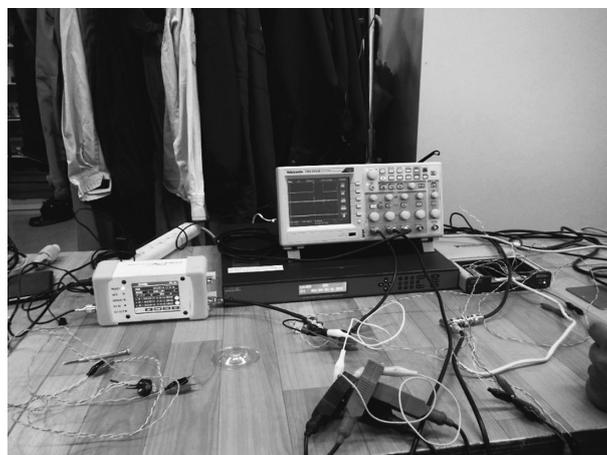


図 2. 実験の様子。左からタイムロガー、GPS 受信機、オシロスコープ、マルチファンクションダック。

びタイムロガーの内部時計は GPS 信号に同期させている。また、各地震波形収録装置の内部時計も GPS 信号に同期させている。

GPS の 1pps 信号をトリガーにしてマルチファンクションダックから出力された矩形波を 20 回出力させたとき、タイムロガーの矩形波検知時間は、正秒から $100 \pm 1 \mu\text{sec}$ 後であった。今回実験に用いる地震収録装置のサンプリングレートは最大で 1000 Hz であり、サンプリング間隔は 1 msec であるため、 $1 \mu\text{sec}$ の誤差は十分小さい。従って、矩形波の出力タイミングは、正秒 (GPS の時刻) を基準にして常に一定であるとし、1 回の実験に地震波形収録装置 1 つを繋ぎ、それぞれ矩形波を入力させることとした。実験はそれぞれの装置のサンプリングレート毎に 10 回以上行った。

信号遅延を計測した地震波形収録装置とその収録条件、内部時計の較正間隔を表 1 に示す。本稿では、自然地震観測に焦点を当てているため、その観測に多く使われる最小位相フィルタ設定時の計測結果のみを示す。計測技研製の HKS-9700 は、信号遅延の補正を任意に設定できるが、今回は初期設定であるゼロ (補正なし) とした。

各装置の波形を win ファイル形式に変換し、白山工業製波形表示ソフト「winchk」を使って表示させて、矩形波の立上りを読み取り、正秒との差を信号の遅延とした。今回は室内実験であるため、地震波形収録装置の自己ノイズに加えて、周囲からの電磁波ノイズ (交流電源のハムなど) が収録波形に反映され、それらのノイズが読み取りに影響を及ぼす可能性がある。そこで、矩形波入力直前の 300 msec 間における電圧の最大値と最小値の差をバックグラウンドノイズと定義し、バックグラウンドノイズの 3 倍の電圧値を最初に超えたサンプリングポイントの時刻を

矩形波の立上りと定義した。

結果と議論

各地震観測装置の矩形波の立上り時刻と正秒との差 (msec) およびサンプル数を表 2 に示す。それぞれの条件で矩形波の立上りを 10 回読み取ったが、読み取り時間の誤差はいずれもゼロであった。ハムなどのノイズが十分小さく安定した環境で計測ができたため、読み取り時間のばらつきが無かったと考えられる。

一例として、矩形波 (振幅 5 V, 幅 100 msec) を LS-8800 (サンプリングレート 200 Hz) で収録した際の波形を図 3 (a) に示す。最小位相フィルタにより、波形の立上りは若干緩やかになって波形全体が時間的後方にずれる。波形の立上り部分を拡大すると (図 3 (b)), 矩形波の立上りは正秒からのずれがゼロであった。

一般に、矩形波に同じ係数のデジタルフィルタをかけると、そのサンプリングレートにかかわらず、信号遅延のサンプル数は同じになる。しかし、LS-7000 XT, LS-8800, LF-1100 R/2100 R のサンプリングレート 100 Hz では、より高いサンプリングレートに比べて矩形波の立上りが 1 サンプル早かった (表 2)。これらの機体では、矩形波の立上りのサンプリングポイントの電圧が、他の機種に比べて低かった。言い換えると、矩形波の立上りが比較的緩やかなデジタルフィルタ特性を持っていることになる。従って、本実験の立上りの定義 (シグナルノイズ比が 3 倍以上) に当てはめるときに、特に時間分解能の低いサンプリングレート 100 Hz において信号遅延が微妙にずれたものと考えられる。

DAT-5 A は、他機種と同じくデルタ・シグマ型の A-D コンバータ (LINEAR TECHNOLOGY 社製 LTC2440)

表 1. 実験で使用した地震波形収録装置の機種名とサンプリングレート、フィルタの種類、GPS 時刻較正間隔。

機種名	メーカー	サンプリングレート (Hz)	フィルタ	GPS 時刻 較正間隔
LS-8200SD	白山工業	125/250/500/1000	最小位相	1 時間
LS-7000XT	白山工業	100/200	最小位相	常時
LS-8800	白山工業	100/200	最小位相	常時
LF-1100R/2100R	白山工業	100/200/1000	最小位相	常時
DAT-5A	クローバテック	100/200/250	※	1 時間
HKS-9700***	計測技研	100/200/1000	最小位相	常時
GSX	Geospace Technologies	250/500/1000	最小位相	6 分間

※ DAT-5A は A-D コンバータに LINEAR TECHNOLOGY 社製 LTC2440 を採用しており、LTC2440 に内蔵されているデシメーションフィルタのみを使っている。

*** HKS-9700 では、最小位相フィルタ選択時にデータのタイムスタンプを補正する機能 (Filter Delay M) があり、今回はその値をゼロとした。

を採用しているが、そのコンバータに内蔵されているデシメーションフィルタのみを使っている。得られた矩形波の立上りは、他機種に比べて急峻で、シグナルノイズ比の3倍を示すポイントの電圧値が矩形波のピーク電圧とほぼ同じであった。言い換えると、他機種では矩形波の立上り時の電圧が0V付近（例えば図3）と小さいのに対し、DAT-5Aの立上りは与えた電圧の最大値付近になる。表2の計測結果は、矩形波の立上りの定義通りに読み取りを行い信号遅延のサンプル数は1であったが、実質的には、信号遅延はゼロである。信号遅延の補正に関してはこの点を十分に注意されたい。

LS-7000XTの矩形波の立上りは、正秒より前であることが明らかになった。これは、同機体を開発した当時、地

震波形の読み取りの際に時間のズレを最小にするようメーカーと研究者が協議して調整したとのことであった。

一方で、GSXの信号遅延量は3サンプルと最も大きい。メーカーに確認すると、タイムスタンプの補正を行わず、GSXに内蔵されているA-Dボードの出力値をそのまま収録しているとのことであった。

矩形波の立上り時刻のうち、最も早いLS-7000XT（100Hz）と最も遅いHKS-9700（100Hz）の差は50msecである（図4）。これは10Hzの波が半波長分ずれることと同じであり、計測誤差としてはかなり大きい。例えば、地震波干渉法は、異なる受信点で観測された地震記録の相互相関をとることにより、一方を仮想的な震源として他方を受信点とする擬似ショット記録を合成するデータ処理法

表 2. 信号遅延量の計測結果

機種名	サンプリングレート	立上り	
		時刻 (msec)	サンプル数
LS-8200SD	125Hz	16	2
	250Hz	8	2
	500Hz	4	2
	1000Hz	2	2
LS-7000XT	100Hz	-30	-3
	200Hz	-10	-2
LS-8800	100Hz	-10	-1
	200Hz	0	0
LF-1100R/2100R	100Hz	0	0
	200Hz	5	1
	500Hz	2	1
	1000Hz	1	1
DAT-5A※	100Hz	10	1
	200Hz	5	1
	250Hz	4	1
HKS-9700	100Hz	20	2
	200Hz	10	2
	1000Hz	2	2
GSX	250Hz	12	3
	500Hz	6	3
	1000Hz	3	3

※ DAT-5A は他の収録装置と異なり、矩形波の立上りが鋭い。矩形波を入力した際に、シグナルノイズ比の3倍を示すポイントの電圧値が矩形波のピーク電圧とほぼ同じであったため、実質の立上り時刻は0msec およびサンプル数0である。DAT-5Aの信号遅延の補正を行う際は、十分に注意する必要がある。

である（例えば、白石ほか、2008）が、もし、受信点間にシステムティックに 50msec のズレがあった場合、ショット波形の重合時に、信号が打ち消されてイメージが悪くなる可能性がある。従って、多種の地震波形記録装置の記録を用いて地震波形干渉法のような解析を行う際は、本実験結果（表 2）に基づいて、それぞれの信号遅延量を統一するよう補正する（WIN 形式であれば wtime コマンドを使用するなど）ことで、解析の誤差を小さくできるだろう。

ま と め

現在、自然地震観測にて使用されている地震波形収録装置 7 機種 21 パターンの信号遅延量を計測した。その結果、それらの信号遅延の差は最大で 50 msec になることがわかり、収録装置間の信号遅延量のバラつきはかなり大きいことが判明した。地震波形の解析手法によっては、この誤差が解析の精度を下げることがあるので、必要に応じて本実験結果を用いて信号遅延量の補正を行うことが望ましい。

謝 辞：本実験で使用した計測装置の一部は、株式会社

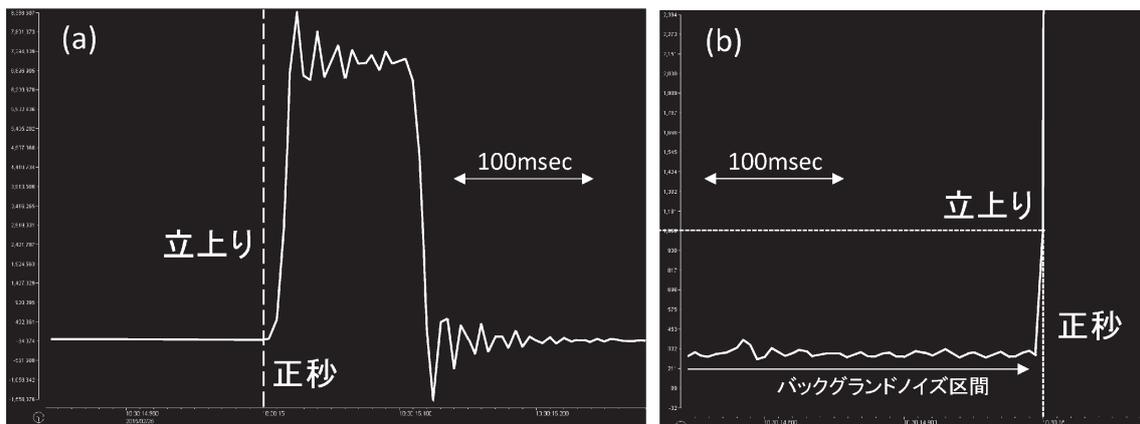


図 3. (a) LS-8800 (200Hz) で記録された矩形波（振幅 5V、100msec）、(b) 立上り部分の拡大。バックグラウンドノイズの 3 倍のサンプリングポイントを矩形波の立上りと定義し、その時刻は正秒であった。

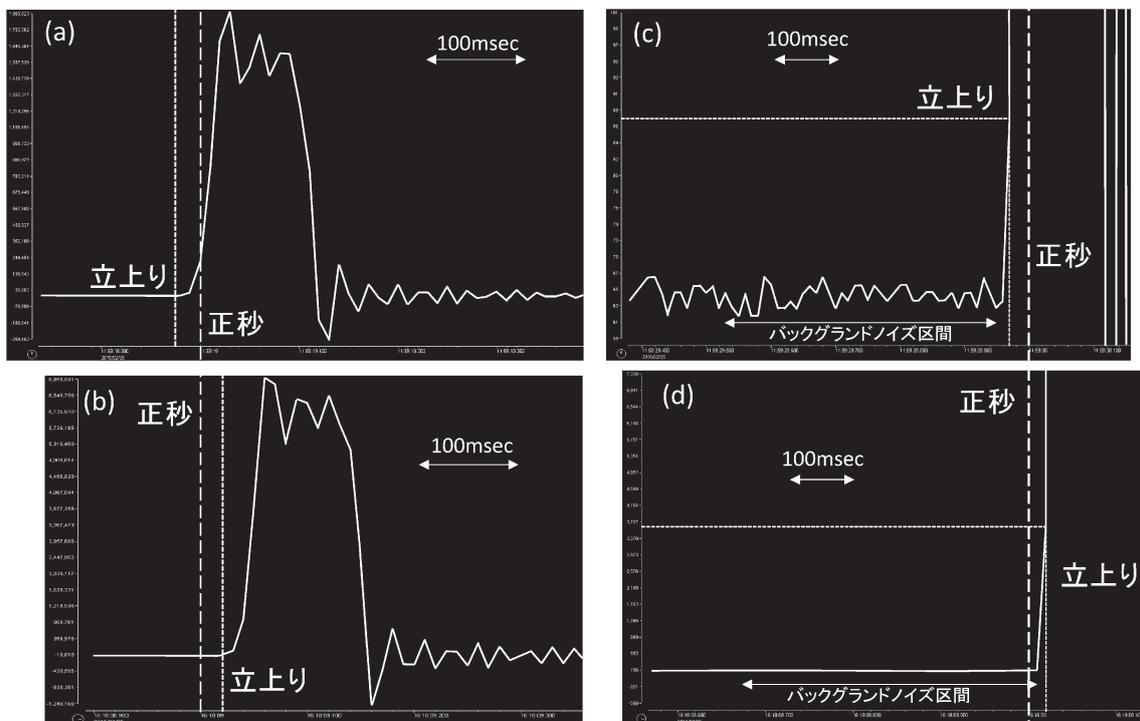


図 4. 地震観測装置で記録された矩形波（振幅 5V、100msec）。(a) LS-7000 XT (100 Hz)、(b) HKS-9700 (100 Hz)、(c) a の矩形波立上り部分の拡大、(d) b の矩形波立上り部分の拡大。

ジオシスよりお借りしました。また、同社の澤田壮一郎氏には、実験に際して多大なご助力を頂きました。実験方法の内容や結果の議論に関して、東京大学地震研究所技術部総合観測室の皆様にご助言、ご助力を頂きました。また、東京大学地震研究所観測開発基盤センターの岩崎貴哉教授、新谷昌人教授、酒井慎一准教授には、有益なご助言を頂きました。記して深く感謝いたします。

文 献

- 河合一, 2010, 「A-D コンバータ活用ノート」, CQ 出版社, 143 頁.
白石和也, 松岡俊文, 松岡稔幸, 田上正義, 山口伸治, 2008, 逆 VSP データに対する地震波干渉法の適用, 物理探査, **61**, 111-120.