

2.3 比較結果

前項で述べた 4 社により寄贈された強震計を用いた同時観測によって得られた記録について、記録が整理されている 2003 年末までのものについて、その特徴を比較する。比較に用いた記録は、表 2.3.1 に示した 2003 年に共通に観測された地震によるものである。これらのうち、最大加速度が 10Gal を上回った、2003 年 9 月 20 日の地震と、2003 年 10 月 15 日の地震について比較を行った。

図 2.3.1~2.3.4 は擬似速度応答スペクトル比と、加速度フーリエスペクトル比による比較結果である。このうち 9 月 20 日の地震は、有効周期帯域の長周期限界が水平で 5 秒程度であり、上下がやや短くなっている。また、10 月 1 日の地震は、長周期限界が水平、上下共に 5 秒程度以上である。なお、短周期限界はどちらも 0.1 秒以下となっていることが確認されている。

2.3.1 周波数特性の比較

図 2.3.1 では、A 社と D 社を比較している。水平動に関しては、有効周期帯域である 5 秒程度まではよく一致しているが、上下動では、3 秒以上の領域で A 社の振幅が大きくなっている。これは、A 社の記録が 16bit の A/D 変換であるために、振幅の小さい長周期で十分な感度を得られていないためと考えられる。また、短周期側では多少のばらつきはあるものの、概ね 0.1 秒程度まではよく一致している。それよりも短周期側では、A 社が 30Hz、D 社が 40Hz のアンチエイリアスのためのハイカットフィルターを用いていることから、特にフーリエスペクトルでは 20Hz 前後の振幅比に若干の違いが見られる。ただし、ここでは図を記載していないが、A 社の地震計は、収録装置にノート型 PC を用いており、信号系統のシールド処理が、他の地震計と違って専用のものではない。そのため、特に地動入力が小さい場合に、50Hz の電氣的なノイズを除去しきれていないことに注意が必要である。

図 2.3.2 の B 社と D 社との比較では、有効周期帯域の 5 秒程度までは概ね一致するが、上下動の長周期側で、A 社と同様に B 社の振幅がやや見かけ上やや大きい。この原因は、A 社と D 社の違いが A/D 変換方式の違いの影響を受けていると推定されるのとは異なり、B 社の長周期に設定されている 10 秒の緩やかなローカットフィルターによって地動に対する感度が低下しているため、電氣的ノイズの影響による見かけ上の S/N 比が、特に振幅の小さい長周期帯域の上下動においてやや低下しているためと考えられる。

図 2.3.3 の 10 月 15 日の地震による比較では、A 社と D 社の関係は 9 月 15 日の地震と同様であり、長周期側の振幅比のばらつきは、A/D 変換の違いによるものが主であると思われる。A 社の長周期限界が概ね 5 秒であるのに対して、D 社は 10 秒程度となっているため、見かけ上振幅比がばらついているのはノイズとの比較になっているためと思われる。

図 2.3.4 の B 社と D 社の比較では、上下動の長周期において B 社の記録が明らかに小さい。これも 9 月 20 日の地震記録と同様、もともと地震動が小さい上に、B 社がローカットフィルターを用いているためであると考えられる。

表 2.3.1 観測記録一覧

No.	発震日時		震央地名	北緯 35° 38.6'	東経 139° 44.9'	深さ (km)	規模 (M)	震央距離 (km)	震源距離 (km)	震度階 (大手町)	計測震度 (建築会館)
33	2003年05月26日	18時24分	宮城県沖	38° 48.3'	140° 40.9'	71	7.0	361.4	366.3	3.0	2.5
35	2003年08月18日	18時59分	千葉県北西部	35° 48.0'	140° 06.7'	69	4.6	37.1	78.2	2.5	2.0
36	2003年09月20日	12時54分	千葉県南部	35° 12.9'	140° 18.2'	70	5.8	69.3	98.3	3.9	2.5
37	2003年10月15日	16時30分	千葉県北西部	35° 36.6'	140° 03.1'	74	5.1	27.6	78.9	3	2.9

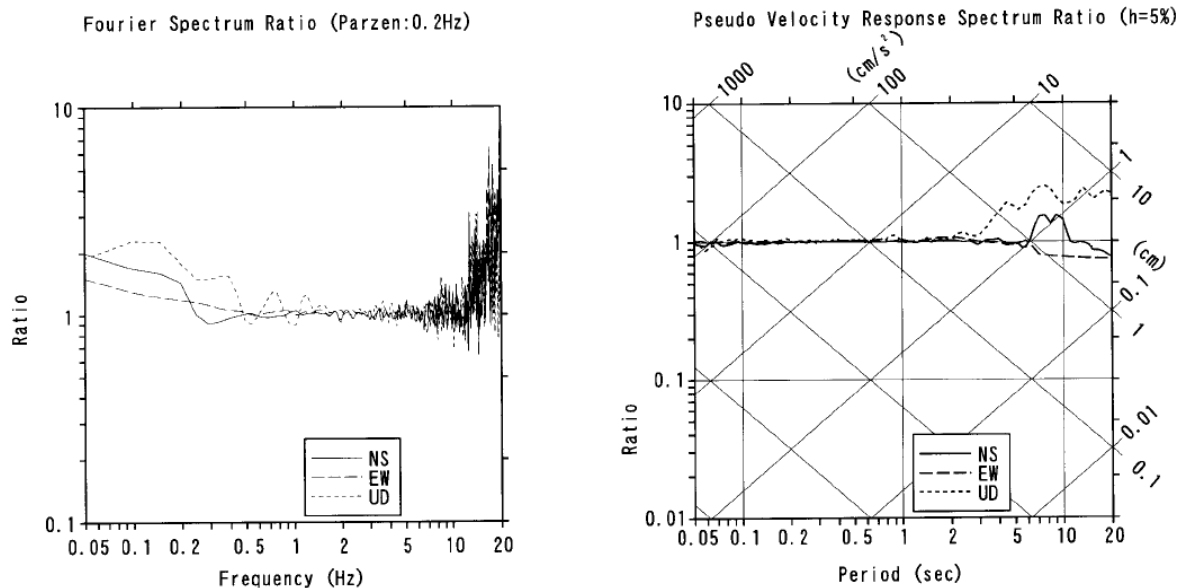


図 2.3.1 2003年9月20日の地震の比較：A社/D社

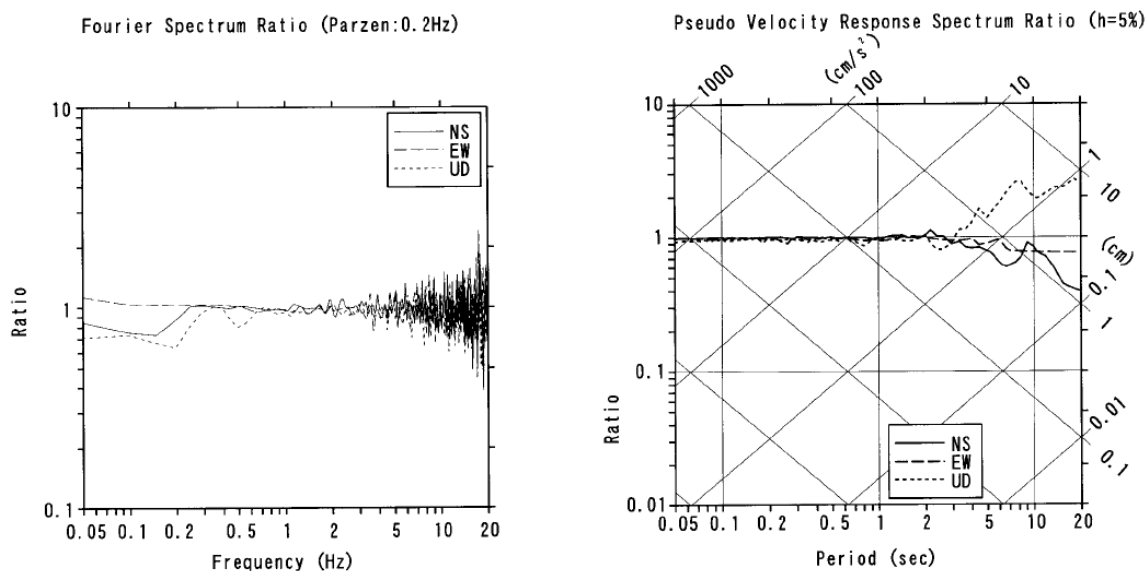


図 2.3.2 2003年9月20日の地震の比較：B社/D社

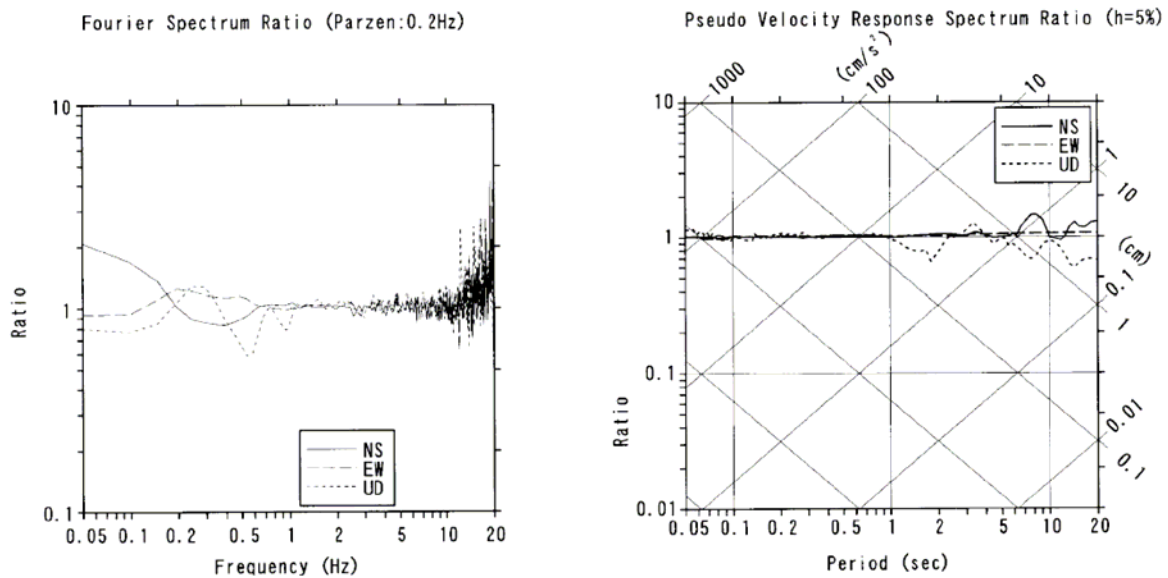


図 2.3.3 2003 年 10 月 15 日の地震の比較 : A 社 / D 社

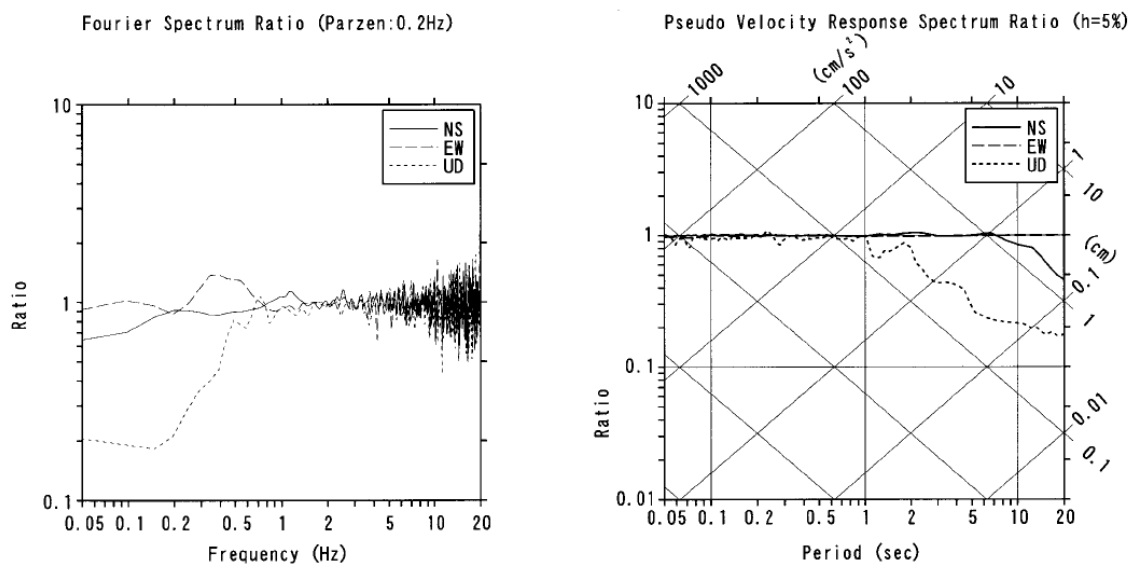


図 2.3.4 2003 年 10 月 15 日の地震の比較 : B 社 / D 社

2.3.2 分解能の比較

建築会館に提供いただいている各社の強震計は、それぞれ異なる A/D 変換装置を持っている。このうち A 社は 1980 年代に主流であった逐次比較型の A/D 変換装置を、他の 3 社は 1990 年代以降に主流となってきたデルタ Σ 方式による A/D 変換装置を採用している。

図 2.3.5 には、1980 年代の地震観測機器としてはもっとも標準的な A/D 変換装置である SAR (successive approximation register) 逐次比較型変換機の仕組みを示した。この SAR に信号電圧を貯めて、入力信号との比較を n 回行うことによって、 n bit のデジタル信号に変換するのがこの方式である。ちなみに、異なるスレッシュホールド電圧による比較信号を n 個保有し、SAR を用いずに同時に n bit 分のカウンタ出力を得る方式をフラッシュ型(並列型)と呼び、超高速サンプリングに用いられているが、地震観測で用いられることはまずない。

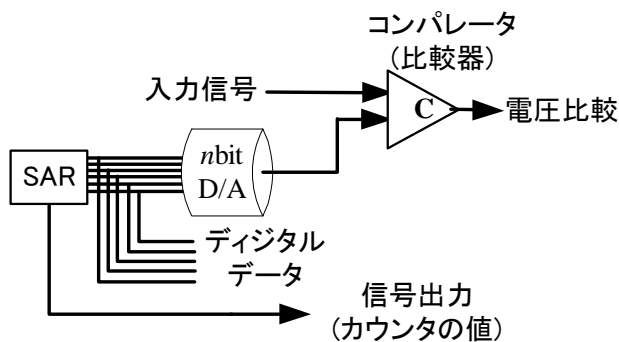


図 2.3.5 逐次比較型 A/D 変換装置の仕組み

図 2.3.6 は、1990 年代以降の $\Delta \Sigma$ 方式の基本的なシステム図である。この方式では、入力信号に近い 1 または 0 の信号を A/D から出力し、D/A でアナログ変換された 1 または 0 と、入力信号との比較を繰り返してその差(Δ)を積分(Σ)していくことによって、最終的に、multi-bit の A/D 変換結果と同等のデジタル出力を 1bit のシンプルな変換器によって得るものである。この方式では、最終的に得たいサンプリングレートに対して、より高倍率のサンプリング(オーバーサンプリング)を行うことによって、より真に近いデジタル出力を得ることが出来る。しかし、シンプルなオーバーサンプリングでは、図 2.3.7 に示すように、横軸方向に示すオーバーサンプリングの倍率に応じて、次第に信号入力との残差が収束していくものの、得たいサンプリング周波数よりも高周波の信号の揺らぎによって、収束の限界が生じる。また、入力信号のレベルや周波数の違いによって、この収束の仕方は違いが出てしまう。そこで、ハイカットフィルターや、サンプリングの間引きに相当する機能を持つデシメーシ

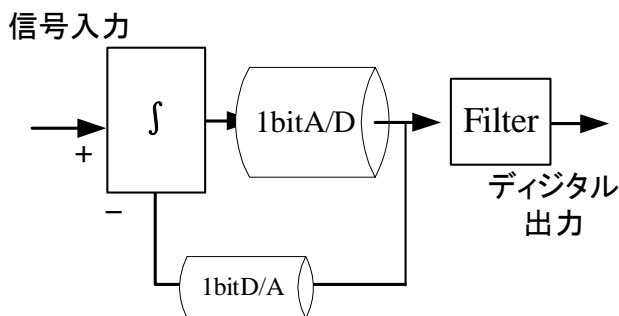


図 2.3.6 $\Delta \Sigma$ 型 A/D 変換装置の仕組み

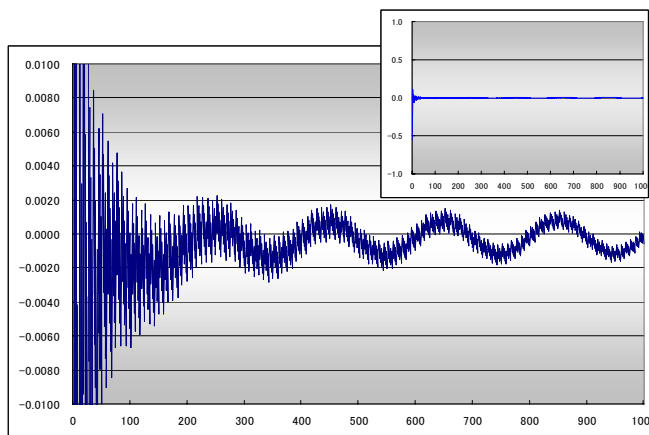


図 2.3.7 単純オーバーサンプリングによる収束

ョンフィルタによって、例えば図 2.3.8 に示すように収束性の向上が図られている。

今回、並列観測を行っている各社の強震計が設計・製造された 1990 年代前半は、計測器の A/D 変換方式が逐次比較型からデルタ Σ 型への移行時期にあたり、カンテラ社の収録装置のために開発された米アナログデバイス社 (Analog Devices, Inc.) の 24bit の $\Delta \Sigma$ A/D 変換器はまだ高価であったこともあり、20bit や 22bit の変換器を採用する地震計メーカーが多かった。また、デシメーションフィルタを含む変換器のチューニングが現在と比較すると十分ではなかったようで、実効分解能は 18bit 程度の場合が多く、安価な 16bit 逐次比較型の A/D 変換器に対する優位性はそれほど大きくはなかったとされる。

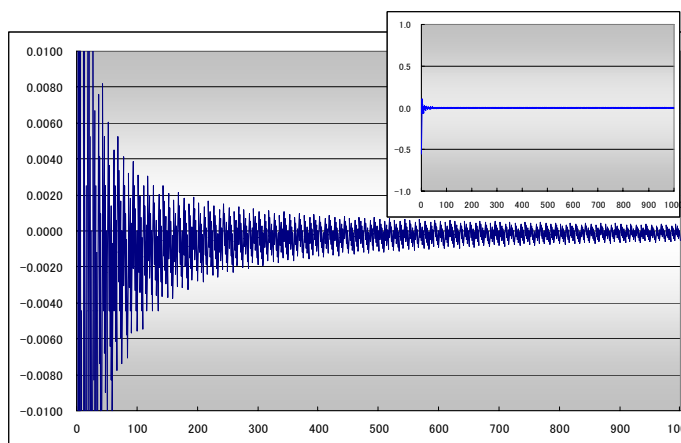


図 2.3.8 フィルター処理を付加した場合の収束

今回比較した計測器の観測記録では、例えば小さな地動入

力に対する出力は、図 2.3.9 に示すように、見かけの分解能の違いによって、B 社の方が高周波の波が含まれているように見える。しかし、前項において比較したように、B 社/D 社のスペクトル比は高周波において必ずしも B 社の記録に大きな高周波入力が含まれていることを示してはならず、また、ここでみえる波形は 50Hz 前後であることから、この振幅の小さな高周波成分は電気的なノイズである可能性が高い。

このことは、実効 18 あるいは 20bit の地震計と、16bit の地震計を、同じフルスケール 2000Gal で用いる場合、建築会館の建屋内のようなノイズレベルの高い場所で観測している限り、有意な差が生じる可能性が低いことを示している。

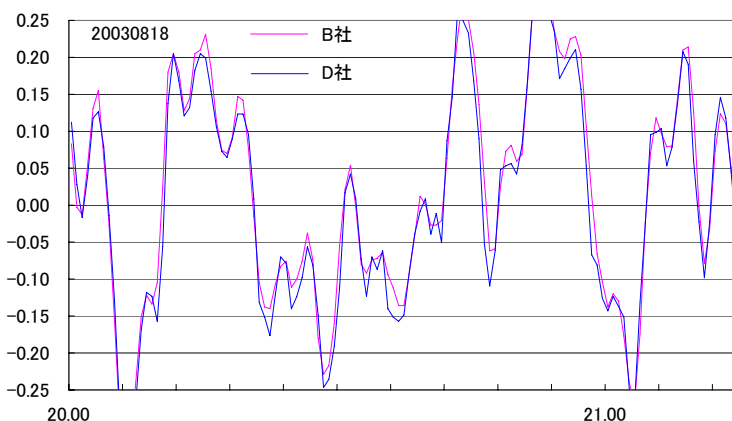


図 2.3.9 微小地動入力時の波形の比較

2.3.3 記録された時刻の違い

地震観測記録の時刻は、時刻較正の方式やアルゴリズムによって異なるため、その特徴を踏まえておくことは有用である。そこで、同時に起動したと思われる上記 2 地震の起動時刻について表 2.3.2 に整理する。

A 社の仕様では時刻較正を行わず、収録装置として用いている PC の時刻が記録される。他社と時刻を比較することは困難である。D 社と B 社の違いは微妙であるが、どちらも同じ P 波初動によって収録装置の起動がかかっている。にもかかわらず違いが生じているのは、D 社がトリガーレベルを超えた次の正 10 秒から 20 秒間遡って記録を開始するのに対して、B 社はレベルを超えた次の正秒から 10 秒間遡って記録するためである。つまり、遅延時間を 10 秒に設定した場合の D 社の記録は、起動時刻よりも前の記録が 10 秒以上 20 秒未満であるのに対して、B 社は 10 秒以上 11 秒未満となっている。これは、定常作動状態におけるメモリ上に書き込まれたテンポラリファイルの管理方法として、D 社が 10 秒単位のファイルを繰り返し作成して管理しているのに対して、B 社は設定されたサイズを上限としてメモリ上に常に記録をとり続け、起動した時点でファイル化するという違いを反映しているものである。そのため、比較的規模が小さく継続時間の短い地震に対しても、D 社の設定ではファイルサイズが大きくなる傾向があるため、テレメータ観測の通信環境や、収録装置のデバイスメモリのサイズなど、このような仕様の違いを理解したうえで、設定することが重要である。

表 2.3.2 地震記録の起動時刻

	A 社	D 社	B 社
2003/9/10	12 時 56 分 15 秒	12 時 55 分 08 秒	12 時 55 分 12 秒
2003/10/15	16 時 31 分 41 秒	16 時 30 分 47 秒	16 時 30 分 46 秒

2.3.4 まとめ

以上見てきたように、いずれの観測記録もおおむね各々の地震計の仕様をよく反映しているものといえる。また、A 社の電気ノイズの混入や D 社のプレトリガー時間の設定条件、A 社、D 社は振子加速度の正負、B 社は地動加速度の正負を出力の正負と一致させていることなどカタログや取扱説明書などに記載されていない、あるいは直接的な記載のない仕様にも、各機種の特徴を反映したものがある。データの活用や、新たな観測の導入に際しては、このような特徴についても十分理解しておくことが望ましい。