

サーボ型加速度計のノイズ評価

高橋正義*・坂上 実*

Evaluation of Noises for Force-Balance Accelerometers

Masayoshi TAKAHASHI* and Minoru SAKAUE*

はじめに

強震計のセンサーとしてサーボ型加速度計が広く国内外を通じて利用され、A/D 変換回路によるデジタル収録装置を含む一体化されたものが普及してきた。デジタル変換技術の進歩に伴い、センサーへの広ダイナミックレンジ化が強く求められている。

本実験では、機動用強震観測のための軽量・小型・低消費電力の観測システムを開発するための一過程として、製品化されているサーボ型加速度計（2機種）のノイズレベルを調べる実験を行った。既に、高橋（1981）や片尾ほか（1990）が日本航空電子製のサーボ型加速度計 JA-4 型、JA-5 V 型に関する検討を行っている。高橋（1981）は、可動コイル型の PELS（浅野ほか，1974）との比較観測から JA-4 型の分解能が±0.15 mgal（但し、0.025～15 Hz の周

波数帯域）であること、片尾ほか（1990）もほぼ同様な結論（周波数帯域 0.05～15 Hz の範囲で分解能は±0.1 mgal）を得ている。いずれもメーカー公称値の分解能（5 mgal）よりはるかに優れていることを指摘している。強震観測室では、新しく開発された安価・小型軽量のサーボ型加速度計 SSA-320 SLN 型（Terra Technology, 米国製）がスーパー・ロー・ノイズ（0.5 mgal）で高ダイナミックレンジ（144 dB 以上）の優れた特徴のサーボ型加速度計として製品化された高感度地震観測用であることから、機動用強震計としての使用が可能であるかないかを検討するため、センサーノイズに関する実験を行うこととした。あわせて、我々の駿河湾・伊豆半島観測網や足柄平野強震観測網に用いているサーボ型加速度計 V401-BT 型（アカシ製）、VSE-12AZ 型（東京測振製）を高倍率で観測すると同時に、速度計として利用している PELS 型、UP-251 型（振動技研

表 1. 比較に用いたセンサーの定数および倍率。

Ch.	センサー（略名）	成分	感度	倍率	1LSB	備考
1	V401-BT (AKS)	E-W	3 V/g	3200	$0.064 \times 10e-3 \text{cm/s/s}$	Max=2g
2	V401-BT (AKS)	U-D	3 V/g	3200	$0.064 \times 10e-3 \text{cm/s/s}$	Max=2g
3	SSA-320 (SSA)	N-S	1.25V/g	3200	$0.152 \times 10e-3 \text{cm/s/s}$	Max=4g
4	SSA-320 (SSA)	E-W	1.25V/g	3200	$0.152 \times 10e-3 \text{cm/s/s}$	Max=4g
5	PELS (PLS)	E-W	1V/Kine	3200	$0.191 \times 10e-6 \text{cm/s}$	fo=0.098, h=0.7
6	PELS (PLS)	U-D	2V/Kine	3200	$0.095 \times 10e-6 \text{cm/s}$	fo=0.110, h=0.7
7	VSE-12AZ (VSE)	U-D	10V/Kine	32	$1.910 \times 10e-6 \text{cm/s}$	Max=1Kine*
8	UP-251 (UP2)	E-W	10V/Kine	3200	$0.019 \times 10e-6 \text{cm/s}$	fo=1.0, h=0.7
9	UP-251 (UP2)	U-D	10V/Kine	3200	$0.019 \times 10e-6 \text{cm/s}$	fo=1.0, h=0.7

*Max=100Kineを切り替えて使用可

g:重力加速度,

Kine:cm/s

1996年5月15日受付, 1996年9月2日受理.

*地震地殻変動観測センター強震観測室, (東京大学地震研究所).

*Strong Motion Observation Laboratory, Earthquake Observation Center, (Earthquake Research Institute, University of Tokyo).

製；微動観測に用いている）などと比較観測を行った。

実験方法

地震計のノイズを正確に評価することは決して容易なことではないので、特性の分かっている地震計との相対的な比較観測による実験方法を採用した。特に、微小レベルの分解能を調べる手段として有効な観測は、碎石発破の比較観測である。また観測地点としては、地動ノイズレベル（微動）が低く、温度変化の少ない壕のような場所が最適である。筑波地震観測所の微小地震観測記録には定期的時間帯で碎石発破の記象が読み取れることから、同観測所地震計室でノイズ試験の観測を行った。実験の対象および比較のために用いた地震計とその定数を表1に示す。データ収録器としてSMAD-9型（アカシ製；9チャンネル用）を用いたが、各地震計の電圧感度が大きく異なる（加速度計と速度計の出力差にもよる）ため、SMAD-9型に内蔵されている増幅器のGain調整で総合倍率の統一を行った。その倍率と1LSB（Least Significant Bit）に相当するそれぞれの値を表1に示している。なお、サンプリングは100Hz、実質的A/D変換器の分解能は14Bitである。観測場所は筑波地震観測所の半壕の地震計室（同一地震計台を使用）で、測定は1996年1月22日と23日の2日にかけて実施した。実験1日目は、器材搬入・各種地震計のゼロ点調

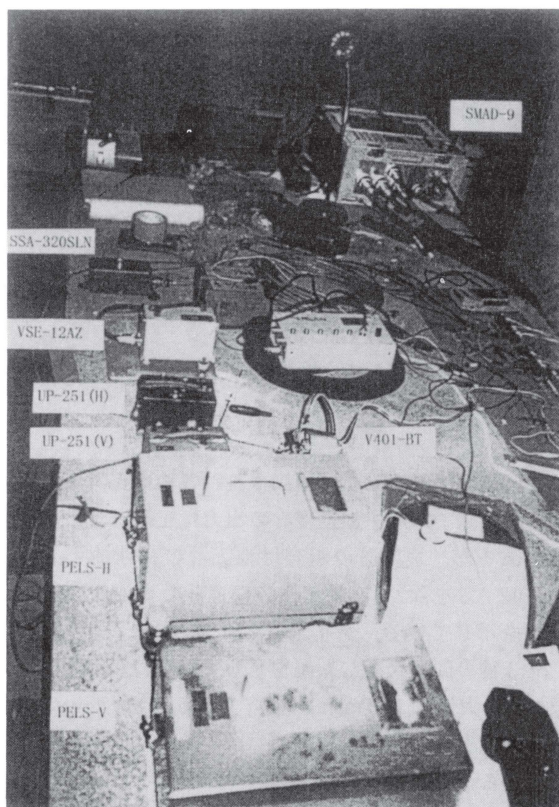


図1. 筑波地震観測所の地震計室（PELS-V, PELS-H, UP-251(V), UP-251(H), VSE-12AZ, V401-BT, SSA-320SLN, SMAD-9）。

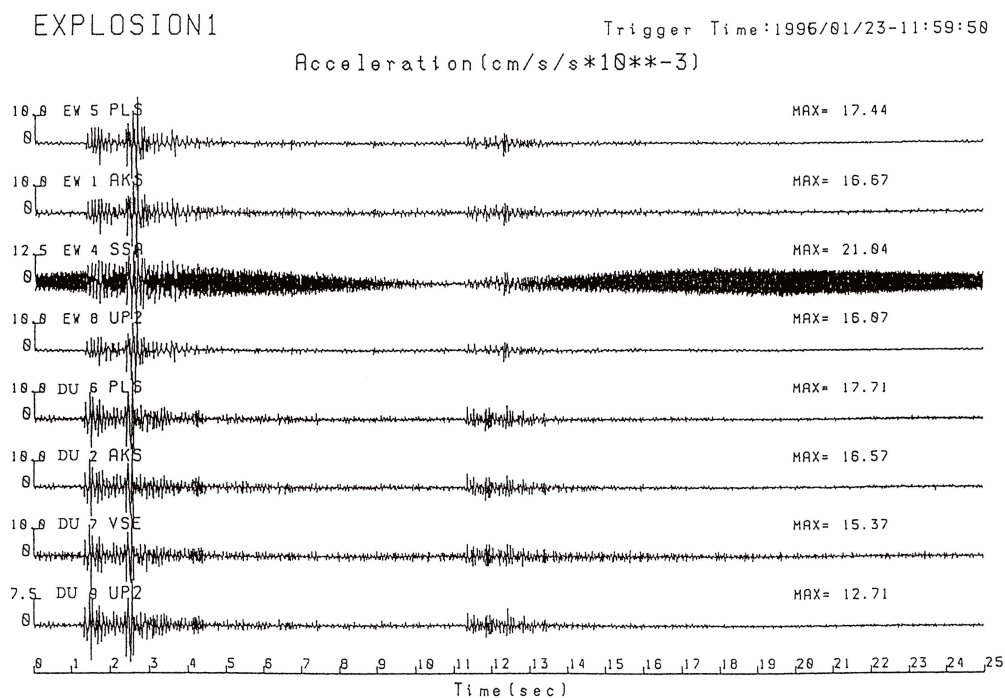


図2. 各種センサーによる加速度記象（碎石発破）の比較。上からEW5PLS；PELS（水平成分），EW1AKS；V401-BT（水平成分），EW4SSA；SSA-320SLN（水平成分），EW8UP2；UP-251（水平成分），UD6PLS；PELS（上下成分），UD2AKS；V401-BT（上下成分），UD7VSE；VSE-12AZ（上下成分），UD9UP2；UP-251（上下成分）。

整・倍率調整，および発破時刻などの調査を行った。図1は，地震計室内の地震計台に設置された5機種の地震計とデータ収録器を示している。前列と2列目にPELS型を2台（上下成分，水平成分），3，4列目はUP-251型微動計2台（上下成分，水平成分），3列目の右横にケースなしのV401-BT型加速度計（3成分）1台，5列目はVSE-12AZ型（上下成分）1台，6列目にSSA-320SLN型加速度計（3成分）1台，いちばん右奥にデータ収録器（SMAD-9）を配置した。SSA-320SLN型加速度計は小型・軽量のため，油粘土で軸足を固定した。

解析結果

図2は筑波地震観測所で観測された各種地震計による砕石発破の記録である。加速度計の出力は記録されたままの波形であるが，速度計の場合は地震計の特性補正を行い（VSE-12AZを除く），数値微分によって加速度に変換した結果を示している。タイムスケールの1~2秒の間に初動，2~3秒の間に大きな振幅を示しているのが砕石発破の記象で，最大値は16(mgal)程度である。センサーの正確な感度検定を各機種毎に行っていないので，相対的な差は無視することとする。3チャンネルSSA(SSA-320SLN)の記録にはハムノイズが重畳されており，ハム消去を試みたが改良できなかった。後にメーカー側よりケーブル（配線を含む）に問題ありとの連絡で，現時点では改良されている。図3(a)，(b)は，PLS(PELS)の記録を基準と考え，加速度計AKS(V401-BT；アカシ製)およびSSA(SSA-320SLN；Terra Technology，米国製)の時間軸上

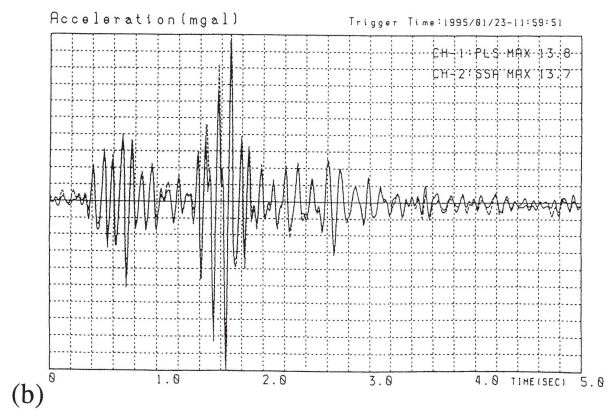
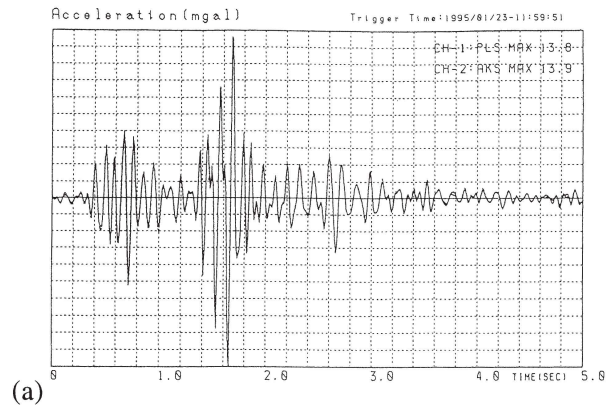


図3. (a) PLS (PELS) と AKS (V 401-BT) の比較 (水平動)，砕石発破による信号. (b) PLS (PELS) と SSA (SSA-320SLN) の比較 (水平動)，砕石発破による信号.

表 2. サーボ型加速度計の仕様.

形式	V401-BT	SSA-320SLN
測定範囲	± 2 g	± 4 g
感度	3.0 V/g	1.25 V/g
分解能	5 mgal	0.5 mgal
直線性	0.05 %	0.05 %
周波数範囲	DC ~ 400 Hz	DC ~ 50 Hz
減衰定数	0.6 ~ 0.7	0.6 ~ 0.7
横方向感度	0.001 g/g	0.0005 g/g
温度範囲	-40 ~ +80 °C	-25 ~ +85 °C
耐湿性	エポキシ密封	0~100% (非結露)
耐衝撃性	100 g (10msパルス)	500 G (5ミリ秒)
電源 (DC)	24V±10% 30mA	±12V 53mA
重量(パッケージ)	6.0 Kg	0.91 Kg
パッケージ寸法	150×192×192 mm	63×63×140 mm
ゲインクロック (dB)	114 dB	144 dB

V401-BT;アカシ製. SSA-320SLN;Terra Technology 米国製. g;重力加速度

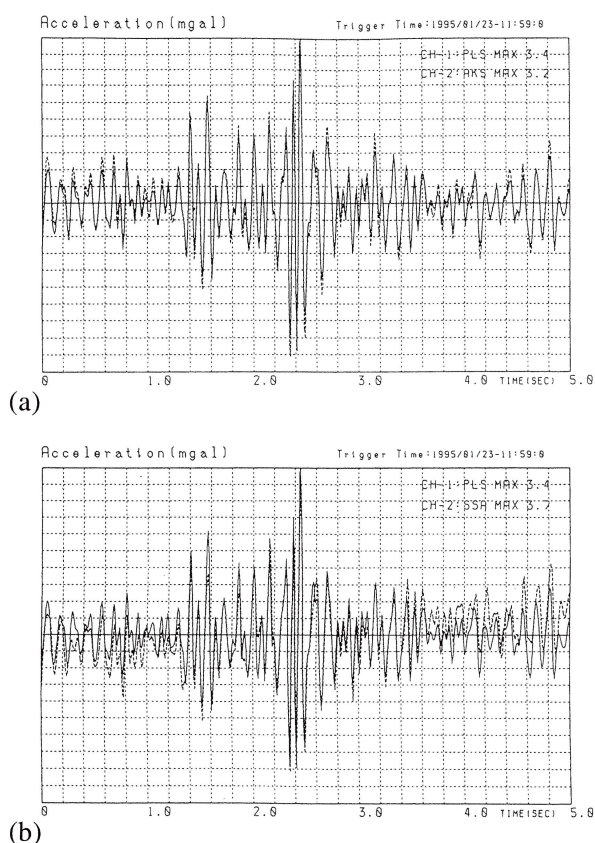


図 4. (a) PLS (PELS) と AKS (V401-BT) の小振幅時における比較 (水平動). (b) PLS (PELS) と SSA (SSA-3LSN) の小振幅時における比較 (水平動).

での各水平動成分 (E-W) の比較を行った。但し、SSA 型にハムノイズが含まれているので、比較する全機種波形に 20 Hz をカットオフ周波数とするローパスフィルターをかけている。いずれも実線が PLS (PELS) で、破線が AKS (V401-BT) および SSA (SSA-320 SLN) である。碎石発破の波形部分で最大値が 14 (mgal) であり、AKS (図 3 (a)) の場合は PLS との間で波形の相違がみられない。SSA (図 3 (b)) の場合は振幅の小さいところで差がみられる。表 2 は、サーボ型加速度計 V401-BT (アカシ製) と SSA-320 SLN (Terra Technology 米国製) の仕様表である。メーカー公称値の分解能が 5 (mgal) 以下であることから、碎石発破記録の最大値 (14 mgal) は 3 倍の加速度値で、解析データとしては V401-BT 型、SSA-320 SLN 型のどちらも全く問題にならないノイズレベルである。

図 4 (a), (b) は碎石発破記録の 50 秒前の地動ノイズ (微動) 記録である。図 3 と図 4 の最大加速度振幅の対比は、約 1/4 程度の振幅値を示す。図 4 の縦の罫線は、最大振幅記録部を 10 等分し 1 目盛り 0.3 (mgal) のスケールにしてある。AKS (図 4 (a)) の場合は PLS との波形差が最大 1 目盛りで約 0.3 (mgal) 程度である。SSA (図 4 (b))

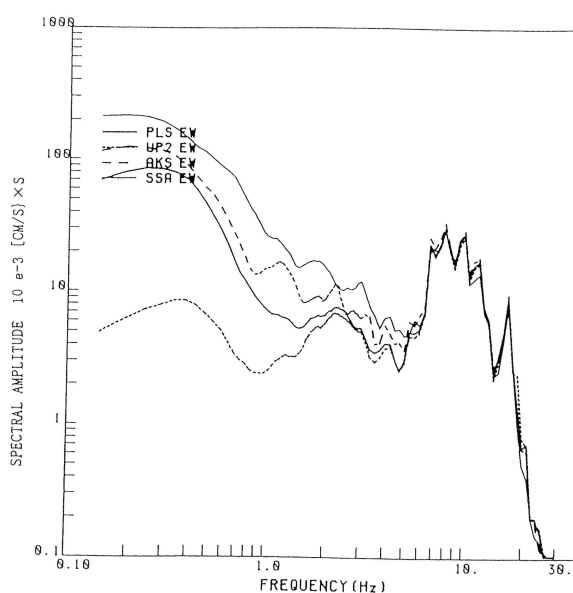


図 5. 各種地震計による速度フーリエスペクトルの比較。

の場合は 2.5 目盛りで約 0.7 (mgal) 程度の差が認められる。高橋 (1981), 片尾ほか (1990) の結果より若干ノイズレベルは高いが、表 1 に示すようにそれぞれの最少分解能 0.064 mgal (AKS), 0.152 mgal (SSA) であり、A/D 変換に伴うノイズも含まれていると考えられる。図 5 は 4 機種 (水平 E-W 成分) による速度フーリエ・スペクトルを示す。周波数 6~30 Hz の短周期での特性はよくあっているが、6 Hz より低い周波数については振幅の差があるものの形状は対応している。但し UP2 は固有周期 1 秒の地震計で特性補正をしていないため直接は比較できない。従って、短周期領域でのサーボ型加速度計 SSA-320 SLN (米国製) はメーカー公称値 0.7 (mgal) 程度であり、V401-BT (アカシ製) の場合は 0.3 (mgal) 以下の分解能であると言える。

ま と め

機動用強震計として使用するサーボ型加速度センサーの微小レベルでの性能調査を、地震研究所筑波地震観測所の地震計室で実施した。高倍率の比較観測として用いた地震計は 5 機種である。本稿では V401-BT 型 (アカシ製), SSA-320 SLN 型 (Terra Technology 米国製) 2 機種のサーボ型加速度計についてノイズ試験の検討を行ったが、高橋 (1981) や片尾ほか (1990) が調査した他機種 (JA-4 型, JA-5 V 型; 日本航空電子製) に対する結果と比べ、若干ノイズレベルが高い結果を得た。しかし、機動用強震計としては最大 2g から分解能 0.3 (mgal) 程度のセンサー性能でほぼ満足できるので、強震計としての使用には問題がなく、市街地での微動レベルでも観測範囲にあるといえ

る。機動観測を対象としたときの課題は電源およびセンサー（ドリフト等）の安定化であり、長時間の調整を要するセンサーは好ましいとは言えない。現在開発が進められている20ビット記録器の出現の際には、再度ノイズ試験を行うことが必要と考えている。

謝辞：本研究は平成7年度文部省科学研究費補助金の試験研究（B）代表者；工藤一嘉の研究援助を受けて行いました。なお、試験研究（B）の研究成果報告書（平成7年度）の資料を参考としたことを申し添えます。工藤一嘉氏には解析データをはじめ、有益な助言を頂き感謝申し上げます。

筑波地震観測所での実験にあたっては、渡邊唯夫氏の御協力を頂き厚く御礼申し上げます。

文 献

- 浅野周三・安藤誠一・太田 裕・大久原 保・堀 実・松本英照，1974，小型可搬長周期地震計の開発（その1），地震研究所速報，**13**，17-22。
- 片尾 浩・笠原順三・是沢定之，1990，航空機用加速度計による地震観測—加速度計を高感度長周期海底地震観測に用いる可能性の検討—，地震研究所彙報，**65**，633-648。
- 高橋道夫，1981，強震観測のための変換器，気象研究所報告，**32**，No. 3，173-181。