

釧路・十勝沖海底地震総合観測システムの 広帯域海底地震計のセンサノイズ特性について - 気象庁精密地震観測室での比較観測 -

平田 賢治*¹ 杉岡 裕子*¹ 藤沢 格*¹
片山 武*² 海宝 由佳*¹
菱木 賢治*² 柏原 静雄*³

釧路・十勝沖海底地震総合観測システムの設置前に、長野市松代町の気象庁精密地震観測室において釧路システム海底地震計とSTS-1との比較観測を行った。釧路システム海底地震計データのパワースペクトル密度は3 Hz以上の高周波数側で 10^{-12} (m/s^2)/Hz程度とほぼ一定で、3 Hz以下で徐々に増大するスペクトル構造を示す。STS-1のパワースペクトル密度は、0.004 ~ 10Hzの帯域で地動背景ノイズを示し、かつ釧路システム海底地震計のそれよりもはるかに低い。これにより、松代で観測された釧路システム海底地震計の記録はシステムノイズであることがわかった。このシステムノイズは時間領域において $2 \sim 3 \times 10^{-5}$ m/s^2 p-p (2 ~ 3 mgal p-p)のランダムノイズとなって常時現れている。さらに、ノイズ評価試験を行った結果、このノイズがセンサ単体から発生していることが確かめられた。また、センサ固有ノイズを帯域通過フィルターを掛けた時間波形で見ると、0.05 ~ 0.25Hzのやや長周期帯域で $2 \sim 3 \times 10^{-6}$ m/s^2 p-p (0.2 ~ 0.3 mgal p-p)であるが、2 ~ 30Hzの短周期帯域では、 $8 \sim 10 \times 10^{-6}$ m/s^2 p-p (0.8 ~ 1.0 mgal p-p)程度の大きさである。このことから、釧路システム地震計の高・低感度両方を合わせた総合的なダイナミックレンジ(実効値)は、0.05 ~ 0.25Hzで147db、2 ~ 30Hzでは136dbあることが推測される。

キーワード：センサーノイズ, ダイナミックレンジ, 海底地震計, 釧路・十勝沖海底地震総合観測システム

On characteristics of inherent sensor noise of ocean bottom seismometers attached on the real-time seafloor geophysical observatory off Kushiro-Tokachi - A calibration test at the JMA matsushiro seismological observatory -

Kenji HIRATA*⁴ Hiroko SUGIOKA*⁴ Itaru FUJISAWA*⁴
Takeshi KATAYAMA*⁵ Yuka KAIHO*⁴
Kenji HISHIKI*⁵ Shizuo KASHIWABARA*⁶

Ocean bottom seismometers (OBSs) attached on the cable-connected geophysical observatory off Kushiro - Tokachi, Hokkaido, Japan were calibrated by comparing with IRIS STS-1 at JMA Matsushiro seismological observatory (MAT) before the geophysical observatory was deployed in July 1999. Power spectral density (PSD) from the OBSs showed a constant level of 10^{-12} (m/s^2)/Hz in a frequency range higher than 3 Hz and a gradual increasing in a frequency range lower than 3Hz. PSD from IRIS STS-1 at MAT showed a typical spectral structure of background seismic

* 1 海洋科学技術センター深海研究部
* 2 日本電気海洋エンジニアリング(株)
* 3 気象庁精密地震観測室
* 4 Japan Marine Science and Technology Center
* 5 NEC Ocean Engineering, Ltd.
* 6 JMA matsushiro seismological observatory

noise, and was lowered than that of the OBSs in a frequency range between 0.004 Hz and 10 Hz. By comparing PSD from the OBSs with that from STS-1, it was concluded that a total-system noise level of the OBSs is so higher than the background seismic noise level at MAT. The total-system noise appeared as random noise time series with an RMS amplitude of $2 \sim 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \text{ p-p}$. This was considered to be generated from a sensor pick based on a noise evaluation test. The RMS amplitude of the inherent sensor noise was $2 \sim 3 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \text{ p-p}$ between 0.05 and 0.25 Hz and $8 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \text{ p-p}$ between 2.0 and 30 Hz. Therefore, total dynamic range obtained from high- and low-gain channels of our OBSs is estimated to be 147 db for 0.05 to 0.25 Hz, and 136 db for 2 to 30 Hz.

Keywords : sensor noise, dynamic range, ocean bottom seismometer, cable-connected geophysical observatory off Kushiro

1. はじめに

あらゆる観測システムは固有のシステムノイズを持つ。地震観測システムも同様である。システム固有のノイズレベルと最大測定可能レベルによって観測のダイナミックレンジが決まる。一般には、システムのノイズレベルは観測センサが持つ固有のノイズレベルによって規定される。すなわちセンサ固有ノイズレベルが低いほど観測のダイナミックレンジが広がる。メーカーの製品カタログ等にもセンサノイズ情報が記載されていることがあるが、センサ間の個体差を考慮していない場合が多い。一方、観測計画/システムを設計する際に、観測目的に応じた観測センサを用いる必要があり、事前にセンサノイズを含むセンサ特性を把握しておくことが求められる。例えば、半永久的に海底に設置したままとなる海底地震計の場合、容易に回収・再設置することができないので、設置前にセンサ特性を測定しておかなければいけない。なお、本論文における「システムノイズ」及び「センサ固有ノイズ」の定義については後で触れる。

平成11年7月に設置された釧路・十勝沖海底地震総合観測システム(以下、釧路システムと略)には、3台の広帯域海底地震計(写真1)を装備することとし、最終的に図1のような海底地震計配置とした(Hirata *et al.*, 2000)。釧路システムの海底地震計(以下、釧路システム地震計と略)にはセンサとして、



写真1 釧路システム海底地震計の外觀。3本の矢印は海底地震計内部の3成分の向きを示す。

Photo 1 An ocean bottom seismometer attached on the geophysical observatory off Kushiro, Hokkaido, Japan. Three orthogonal axes indicate directions of +x-, +y-, and +z-components.

航空電子社製のサーボ型加速度センサJA-5III Aが採用されている。このサーボ型加速度センサ及び同型タイプのもは小型で耐衝撃性に優れているという特徴を持ち(片尾ほか, 1990),他のケーブル式海底地震計でも用いられている(例えば, 卜部・溝上, 1996, Kanazawa and Hasegawa, 1997)。

釧路システム海底地震計のシステムノイズを実測するため、平成11年4月末から5月初旬にかけ、長野市松代市町の気象庁精密地震観測室の観測用大坑道に、3台の広帯域海底地震計の実機を設置し、同大坑道で稼働しているIncorporated

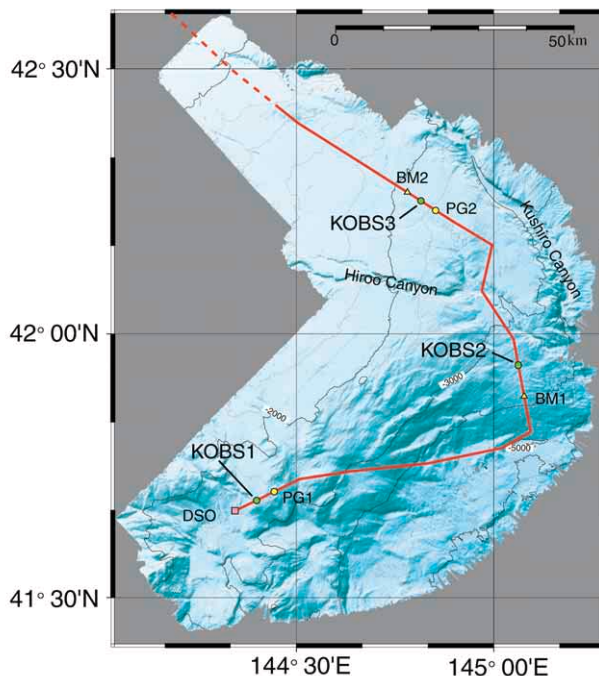


図1 釧路システムの海底地震計KOB S1, KOB S2, KOB S3の配置(緑色の円)。赤線はケーブルルート。

Fig. 1 Positions(green circles) of three ocean bottom seismometers, KOB S1, KOB S2, and KOB S3, attached on the geophysical observatory off Kushiro. Red line indicates a cable route.

Research Institutions for Seismology (IRIS)の広帯域地震計 STS-1(0.13 ~ 360sで速度にフラットな周波数特性)との比較観測及びセンサノイズ評価実験を行った。ここでは、その結果について報告する。

2. 観測概要

今回の観測では、釧路システムの3台の海底地震計 K OBS1, 2, 3をIRISのSTS-1から約30m離れた場所に設置した(図2)。K OBS1, 2, 3を専用器具の上に設置し、専用器具の脚部を石膏で大坑道床面に固定した(写真2)。K OBS1, 2, 3にはサーボ型加速度センサ3成分がそれぞれ直交するよう配置されており、ベリリウム銅合金製の圧力筐体の長軸方向に+X軸成分、これと直交するように+Y軸成分、+Z軸成分が取り付けられている(写真1)。設置に際しては、加速度出力のDC成分を見ながら、数度以内の精度で、+X軸方向、+Y軸方向及び、+Z軸報告をそれぞれ水平面内北向き、水平面内東向き及び、鉛直下向きに揃えた。また、K OBS1, K OBS2, K OBS3はそれぞれ1m離して並べた(写真2)。

図3に比較観測の際に用いられた測定系のブロックダイアグラムを示す。それぞれの成分について、低倍率と高倍率の2チャンネル分の記録を測定したが、ここでは簡単のため高倍率チャンネルのみを説明する。まず、加速度センサ JA-5III Aから地動加速度に比例した電流(電流感度 : 1.3 mA/G)が出力される。R_s = 2.3 k の出力抵抗によって電

圧出力(電圧感度 : 3 V/G)に変換され、遮断周波数200 Hzの2次のローパスフィルターに通される。遮断周波数0.05 Hzの1次のハイパスフィルターを通過後、プリアンプによって150 V/Gの電圧感度に増幅され、24bit Δ - Σ 型A/D変換器(米国Crystal Semi-conductor社製CS5321及びCS5322)により1 kHzでオーバーサンプリングされ、遮断周波数40Hzのローパス・デジタルフィルターで高周波数成分除去後、100 Hzサンプリングの波形データをワークステーションに収録するようにした。加速度センサからA/D変換器まではベリリウム銅合金製の海底地震計圧力筐体に封入された実機そのものである。ローパス・デジタルフィルターも実機と同じフィルターを使用した。低倍率チャンネルは、プリアンプ出力が1.5 V/G、1次のハイパスフィルターが無い他は高倍率チャンネルと同じである。なお、高倍率チャンネルでは、ローパス・デジタルフィルターの手前で24bit、1 kHzサンプル信号をFFTアナライザでモニターすることとした。

なお、本報告では、システムノイズ、センサ固有ノイズ、回路ノイズを、図3に基づき次のように定義する；システムノイズとは、図3に示される測定系全体を一つのシステムと考えた場合のシステムに固有のノイズとする。センサ(固有)ノイズとは、センサ(ここでは、図3中の「JA5」を指す)のみから発



写真2 比較観測のために気象庁精密地震観測室に設置された3台の釧路システム海底地震計。観測終了後の1999年7月、実際に3台とも釧路沖海底に設置された。

Photo 2 Three ocean bottom seismometers set on the JMA Matsushiro seismological observatory for a calibration test. The three were installed off Kushiro in July, 1999 after this test.

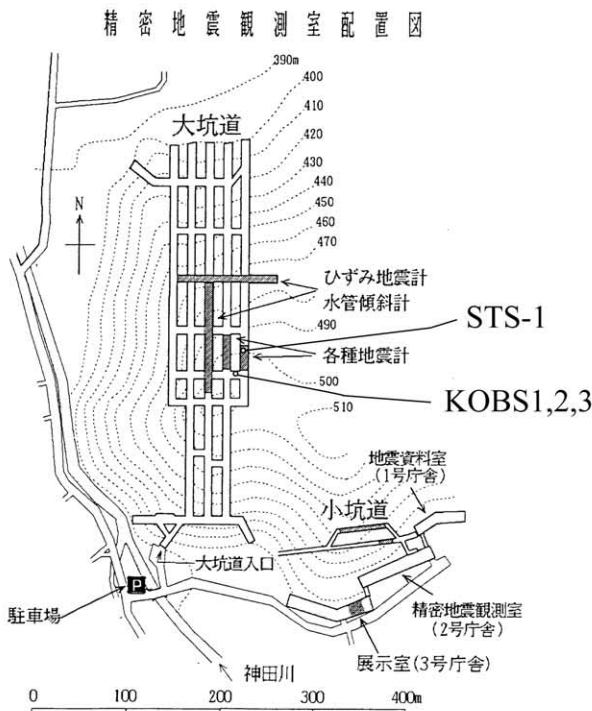


図2 気象庁精密地震観測室内の3台の釧路システム海底地震計とSTS-1の配置。

Fig. 2 Arrangement of the three OBSs and IRIS STS-1 in the JMA Matsushiro seismological observatory (MAT).

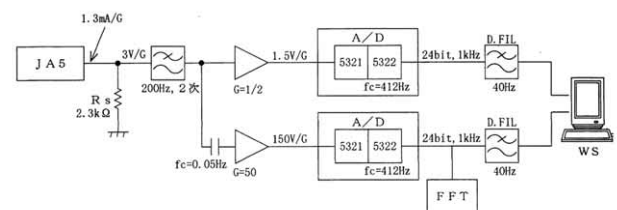


図3 比較観測の際に用いられた釧路システム海底地震計の測定系。
Fig. 3 A block diagram of the observation system of the K OBSs.

生ずるノイズとする。また、回路ノイズとは、図3の測定系全体からセンサを除いた残りの回路から発生するノイズとする。

3. システム広帯域海底地震計のセンサノイズ特性

3.1. STS-1との比較観測結果

図4に、KOBOS2とSTS-1の比較観測から得られた非地震時の地動加速度パワースペクトル密度(単位: $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$)を示す。KOBOS2とSTS-1のどちらも3成分のパワースペクトル密度が図示されている。スペクトル密度の計算には、日本時間1999年4月27日16時00分から16時54分までを用いた。foldは行っていないが、スペクトル領域で平滑化している。なお、STS-1の生データは地動速度であるので数値的に1回微分した。また、KOBOS2については、高倍率チャンネルデータのスペクトル密度のみを示している。

STS-1のパワースペクトル密度には、0.1~1 Hzの周波数範囲で脈動(microseism)が明瞭に現れている。脈動のピークは0.2 Hz付近にあり、そのピーク値は $4 \sim 6 \times 10^{-13} (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ 程度である。周波数2~4 Hzにも明瞭なピークが存在する。IRISのwebサイトで、1977年7月以降の、STS-1によって観測された気象庁精密地震観測室大坑道における平均的な地動背景ノイズ(ambient seismic noise または background seismic noise)を確認することができるが、いずれの期間においても、2~4 Hzの周波数帯でピークが見られる。この周波数帯に見られるノイズのピークは人間活動等に伴う人工的なノイズが原因であることがわかっている(楡皮, 1988)。なお、8 Hz付近のピークはSTS-1のアンチ・エイリアジングフィルターによる見かけ上のものである。

一方、KOBOS2のパワースペクトルにはSTS-1に見られたような脈動のピーク等は存在していない。3 Hz以上の高周波数側で $10^{-12} (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ 程度とほぼ一定で、3 Hz以下で

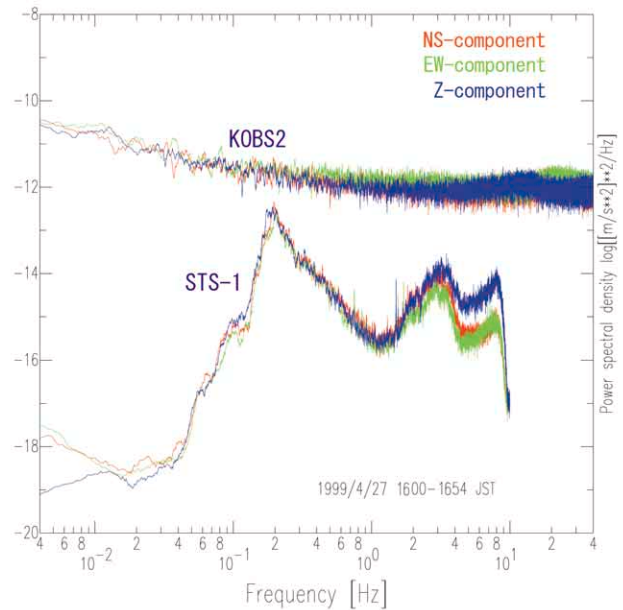


図4 気象庁精密地震観測室で観測されたKOBOS2高感度チャンネルとSTS-1のパワースペクトル密度。STS-1のパワースペクトル密度はで典型的な地動背景ノイズの構造が現れているが、KOBOS2のそれには見られない。また、KOBOS2のパワースペクトル密度の方が、全域にわたりパワーで10倍以上大きい。したがって、釧路システム海底地震計のシステムノイズは松代の地動背景ノイズより大きいと考えられる。

Fig. 4 Comparison power spectral density(PSD) from high-gain channel of KOBOS2 with that from IRIS STS-1 at MAT. While PSD from IRIS STS-1 shows a typical structure of background seismic noise at MAT, PSD from KOBOS2 does not show the similar structure. PSD from KOBOS2 is larger at least 10 times than PSD from IRIS STS-1 between 0.004 Hz and 10 Hz. A system noise of KOBOS2 is considered to be larger than the typical background noise at MAT.

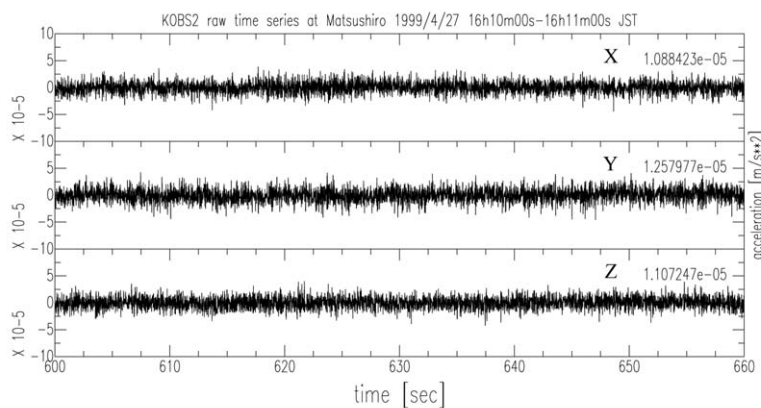


図5 松代観測所におけるKOBOS2高感度チャンネルの時間波形。上からX成分,Y成分,Z成分。各トレースの右上の数字はRMS片振幅(単位 m/s^2)を示す。システムノイズは時間領域においてRMS片振幅で $1 \sim 1.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ($1 \sim 1.3 \text{ mgal}$)のランダムノイズとなって常時現れている。

Fig. 5 A time series from KOBOS2 high-gain channel at MAT. A numeral attached at the upper-right corner of each trace indicates RMS half-amplitude in m/s^2 . A system noise appears as a random noise with an RMS half-amplitudes of $1 \sim 1.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ($1 \sim 1.3 \text{ mgal}$). top ; X-component, middle ; Y-component, bottom ; Z-component.

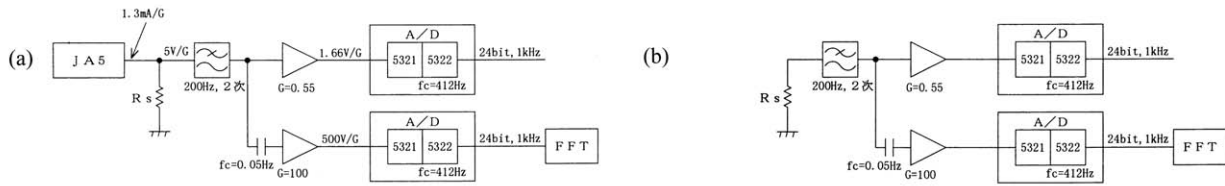


図6 (a) システムノイズの動的評価のための測定系。出力抵抗 R_s は可変。(b)回路ノイズ評価のための測定系。出力抵抗 R_s は可変。
 Fig. 6 (a) Block diagram of the observation system for evaluating the system noise in a case where sensor outputs exist. External resistivity R_s is allowed to change to an arbitrary value. (b) Block diagram of the observation system for evaluating a circuit noise. External resistivity R_s is allowed to change to an arbitrary value.

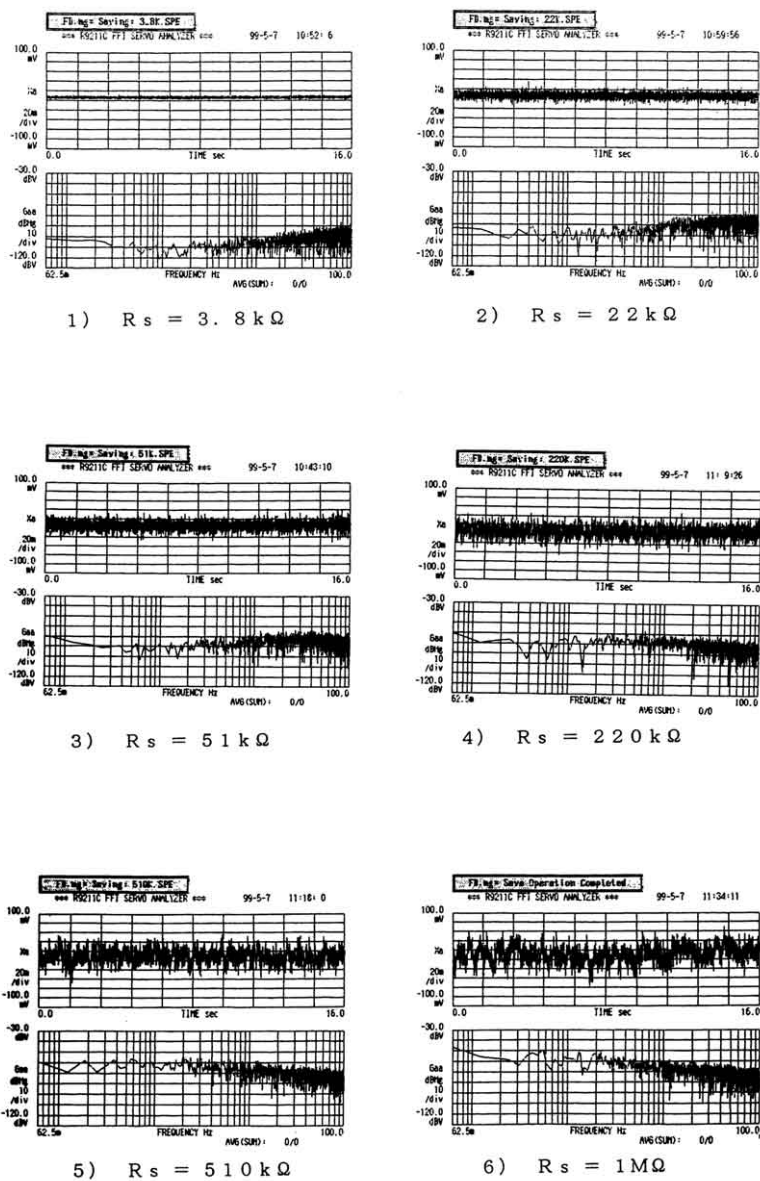


図7 図6(a)の測定系で出力抵抗 R_s を変化させた場合のシステムノイズ波形(上段)と振幅スペクトル(下段)。 R_s を大きくすると、システムノイズの振幅が増大していることがわかる。

Fig. 7 System noise time series (upper) and their amplitude spectra (lower) obtained by using the observation system in Fig. 6(a) when external resistivity R_s is changed. System noise level increases with R_s value.

徐々に左上がりになり,0.01 Hz付近で 10^{-11} (m/s^2)/Hz程度に増大する。STS-1のパワースペクトル密度と比較すれば, KOBS2のそれは全域においてSTS-1のそれを上回っている。明らかにこれが松代観測所における背景地動ノイズではなく, KOBS2のシステムノイズであることを示している。このシステムノイズは, 図5に示すように, 時間領域においてRMS片振幅で $1 \sim 1.3 \times 10^{-5}$ (m/s^2 ($1 \sim 1.3 \text{ mgal}$))のランダムノイズとなって常時現れている。KOBS1, KOBS3についても同様な結果が得られた。

3.2. システムノイズ発生要因の特定

3.1. で明らかになったシステムノイズが, サーボ型加速度センサのセンサ固有ノイズなのか, それとも回路ノイズであるのかの検討を行った。センサ出力を含めた動的な系としてシステムノイズを評価するため, 図6aのような出力抵抗 R_s が可変の測定系を用いて実験した。この実験は次のような簡単な考え方に基づいている;(1)もしも, このシステムノイズが加速度センサのセンサ固有ノイズであれば, R_s を増大させれば加速度センサからの電圧出力, すなわちシステムノイズの振幅が増大する。(2)逆に, このシステムノイズが回路ノイズであれば, R_s を変化させてもシステムノイズの振幅は変化しない。なお, 図6aの測定系では, 低倍率及び高倍率チャンネル用のプリアンプとして代用品を用いているがプリアンプ以外の回路は実機と同等である。図7に, 出力抵抗 R_s を変化させた時のFFTアナライザによるシステムノイズ波形とその振幅スペクトルを示す。 R_s を増大させるとシステムノイズの振幅が増大していることが確認できる。

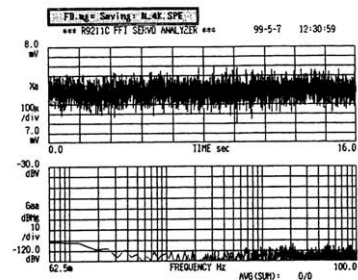
さらに, 図6bのようにセンサ部分を取り除いた測定系によって, 回路ノイズのみを測定した結果を図8に示す。図7の1と図8の1), 図7の2と図8の2), 図7の6と図8の3)がそれぞれ同じかほぼ同じ出力抵抗を付けた時に測定されたノイズであるが, 明らかに回路ノイズはセンサ固有ノイズよりも小さいことがわかる。振幅スペクトルの推定誤差が小さく安定していると思われる1Hz以上の周波数帯域では, 回路ノイズはセンサ固有ノイズより10dBVから40dBV ($1/10$ から $1/10,000$)小さいことが確認できる。

以上のことから, 3.1. で明らかになったシステムノイズはサーボ型加速度センサのセンサ固有ノイズであると推測される。

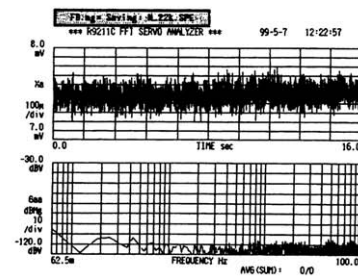
3.3. センサ固有ノイズレベルの変化

図9に, 実際の釧路海底におけるKOBS2高倍率チャンネルの非地震時(日本時間2000年1月10日6時00分から6時54分)のパワースペクトル密度を示す。比較のため, 図4と同じ, 気象庁精密地震観測所での比較観測時に得られたKOBS2の高倍率チャンネルのパワースペクトルも示している。周波数0.1~2Hzに見られるのは, 実際の釧路・十勝沖の海底の脈動である(Hirata *et al.*, 2000)。

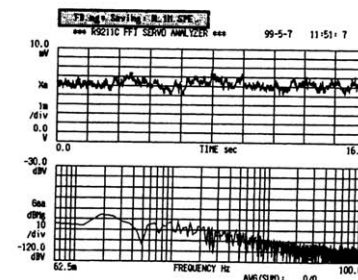
奇妙なことに, 周波数2Hz以上の高周波数帯域に注目すると, 全く同一の地震計であるにも関わらず, センサ固有ノイズレベルが異なっている。いずれの成分においても, 気



1) $R_s = 4 \text{ k}\Omega$



2) $R_s = 22 \text{ k}\Omega$



3) $R_s = 1 \text{ M}\Omega$

図8 図6(b)の測定系で測定した回路ノイズ波形(上段)と振幅スペクトル(下段)。図7の同じかほぼ同じ出力抵抗を付けた結果と比べると, システムノイズの方が回路ノイズより10倍から10万倍大きいことがわかる。

Fig. 8 Circuit noise time series (upper) and their amplitude spectra (lower) obtained by using the observation system in Fig. 6 (a). Comparing by the corresponding time series and amplitude spectra in Figs 7 and 8, the system noise level is 10 to 10,000 times as large as the circuit noise level.

象庁精密地震観測所で測定した際のセンサ固有ノイズレベルの方が実際の釧路沖海底でのそれを上回っている。

上下動(図9の青線)及び水平動(図9の赤線と緑線)ともに, パワーにして3Hz付近で約5倍, 8Hz付近で約4倍, 松代で測定されたセンサ固有ノイズの方が大きい。

筆者たちは, センサの振り子が定常的にある振れ幅で動いている時(釧路沖海底)と, ほとんど動いていない時(比較観測時)では, センサ固有ノイズに振り子振幅依存性がある

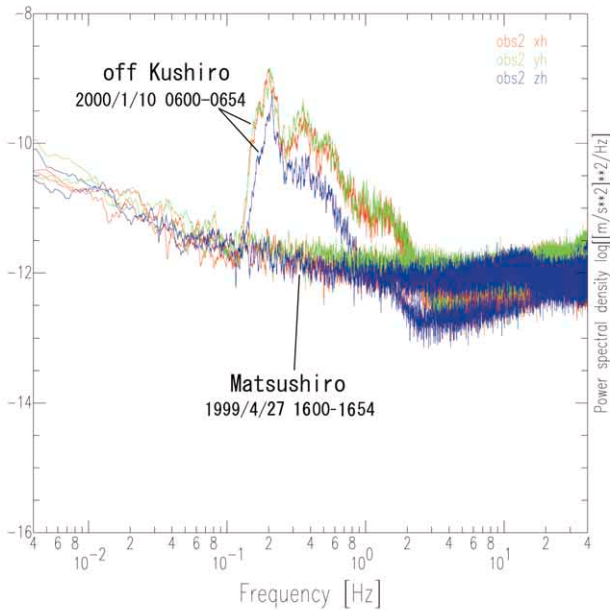


図9 実際の釧路沖海底におけるKOBOS2のパワースペクトル密度と気象庁精密地震観測室で測定されたKOBOS2のセンサ固有ノイズのパワースペクトル密度の比較。

Fig. 9 Comparison between PSD from high-gain channel of KOBOS2 actually installed off Kushiro, Hokkaido, Japan and that of the inherent sensor noise.

るためと推測しているが、その本当の原因については不明である。この現象を明らかにすることは本論の枠を越えている。

4. 議論

釧路システム地震計内に装備された加速度センサJA-5III Aと同型の加速度センサJA-5Aの分解能が片尾ほか(1990)によって調べられている。JA-5III AとJA-5Aはカタログ上は同じ 10^{-5} m/s^2 (1 mgal)以下の分解能を有している。片尾ほか(1990)によれば, JA-5Aは0.05 ~ 0.25Hzの周波数帯域で 10^{-6} m/s^2 (0.1 mgal)の最小分解能を有しており, JA-5Aのセンサ固有ノイズがこの帯域でそれ以下であることを示唆している。KOBOS2のセンサ固有ノイズ波形に0.05 ~ 0.25Hzを通過帯域とするバンドパス・フィルターをかけた波形を図10(a)に示す。この帯域では, センサ固有ノイズがRMS片振幅で, $1.2 \sim 1.4 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ (0.12 ~ 0.14 mgal)程度の揺れとなって現れていることがわかる。片尾ほか(1990)の結果にほぼ等しい。釧路システム地震計はやや長周期の高感度地震計として用いることができよう。

もっと高い周波数でのセンサ固有ノイズは時間領域でやや長周期帯域のそれより大きくなる傾向にある。図10(b)は, センサ固有ノイズ波形に2 ~ 30Hzを通過帯域とするバンド

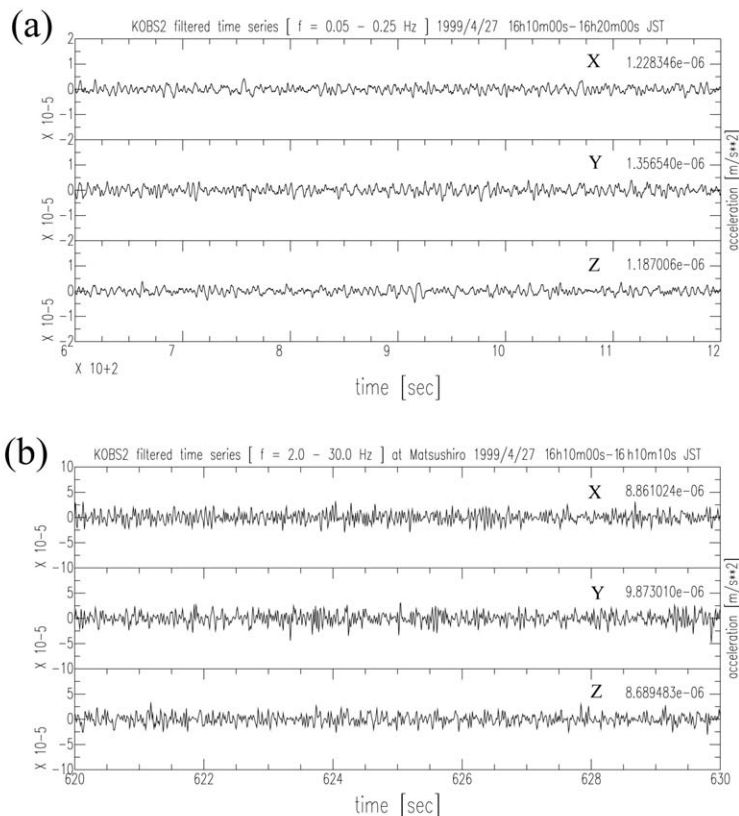


図10 KOBOS2高感度チャンネルのセンサ固有ノイズ波形。(a) 0.05 ~ 0.25Hzに含まれるセンサ固有ノイズ波形。(b) 2 ~ 30Hzに含まれるセンサ固有ノイズ波形。各トレースの右上の数字はRMS片振幅(単位m/s²)を示す。

Fig. 10 Filtered time series of the inherent sensor noise from KOBOS2 high-gain channels at MAT. (a) A band-pass filter with corner frequencies of 0.05 Hz and 0.25 Hz is applied. (b) A band-pass filter with corner frequencies of 2.0 Hz and 30 Hz is applied. A numeral attached at the upper-right corner of each trace indicates RMS half-amplitude in m/s².

パス・フィルターを掛けたものである。センサ固有ノイズはRMS片振幅で $8 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ (0.8 ~ 1.0 mgal)ある。M1 ~ 3の極微小地震を陸上で観測すると、最大振幅を持つ波の卓越周波数は概略2 ~ 30Hzの範囲に入る(渡辺, 1971)。海底地震観測でも同様であるとすれば、M1 ~ 3の極微小地震を観測する場合、 $8 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ (0.8 ~ 1.0 mgal)以上の加速度片振幅がなければ認識することは難しい。3.3.で述べたように、実際の釧路沖海底に置かれた海底地震計のセンサ固有ノイズは2 ~ 30Hzの帯域で振幅で半分程度に減少している。このことを考慮すれば、実際の釧路沖海底に置かれた海底地震計のセンサ固有ノイズは2 ~ 30Hzの帯域において $8 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ p-p (0.8 ~ 1.0 mgal p-p) となって寄与しているであろう。図11に、今回確認したJA-5III A及び実際に海底地震観測に用いられている地震センサのセンサ固有ノイズを比較した。他のセンサのセンサ固有ノイズレベルはカタログデータに基づいている。JA-5III Aのセンサ固有ノイズレベルは他のセンサに比べ大きい。筆者らは、次のケーブル式観測システム等で用いるべき地震センサのノイズ特性を実際に検証するため、今年度末から松代観測所において図11に示されたセンサを含む、複数の地震センサの比較観測を予定している。

実際の釧路システム地震計で測定可能な最大加速度は、高感度チャンネルで $\pm 0.3 \text{ m/s}^2$ ($\pm 30 \text{ gal}$)、低感度チャンネルで $\pm 30 \text{ m/s}^2$ ($\pm 3 \times 10^3 \text{ gal}$) (Hirata et al., 2000)である。また、両チャンネルの加速度測定範囲は十分オーバーラップしている。したがって、2 ~ 30Hzの周波数帯域において、高感度チャンネル単体の実効的なダイナミックレンジは96db、高・低感度の両チャンネルによる総合的な実効的なダイナミックレンジは136dbとなる。また、0.05 ~ 0.25Hzのやや低周波数帯域において、高感度チャンネル単体の実効的なダイナミックレンジは107db、高・低感度の両チャンネルによる総合的な実効的なダイナミックレンジは147dbとなる。

5. まとめ

釧路・十勝沖海底地震総合観測システムの実海域への設置前に、気象庁精密地震観測室において釧路システム海底地震計とSTS-1との比較観測を行った。STS-1のパワースペクトル密度は典型的な地動背景ノイズを示すにも関わらず、釧路システム海底地震計のそれは3Hz以上で周波数にかかわらずほぼ一定のレベルを示すこと等から、松代観測所において記録された釧路システム海底地震計の波形はシステムノイズであると考えられる。さらに、ノイズ評価

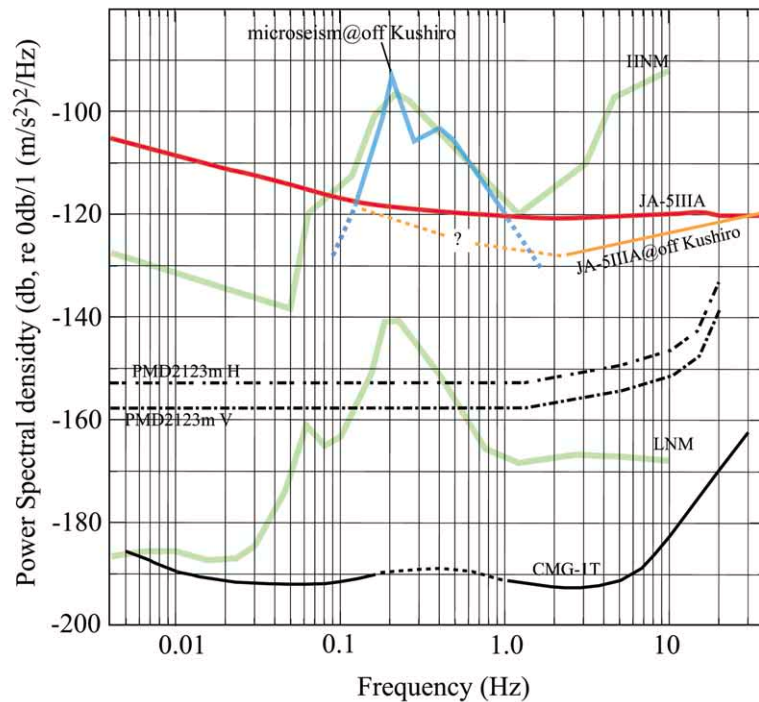


図11 釧路システム地震計に採用されている地震センサJA-5III Aと他の地震センサの固有ノイズのパワースペクトル密度の比較。他の地震センサのパワースペクトル密度はカタログデータに基づく。参考までに、実際の釧路沖海底での脈動及び、陸上での地動背景ノイズモデル、HNMとLNM (Paterson, 1993) も表示してある。

Fig. 11 Comparison between PSD of the inherent sensor noise of JA-5III A and those of other seismic sensors. PSDs of other seismic sensors are based on catalog data. Microseism actually obtained with JA-5III A off Kushiro and background seismic noise models, HNM and LNM (Paterson, 1993) are also plotted.

試験の結果、このシステムノイズはセンサ単体から発生していることがわかった。

0.05～0.25Hzのやや長周期帯域ではセンサ固有ノイズレベルは1桁下がり、 $2 \sim 3 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \text{ p-p}$ (0.2～0.3 mgal p-p) (図10)だが、微小地震の観測帯域である2～30Hzでは、 $8 \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \text{ p-p}$ (0.8～1.0 mgal p-p) 程度の大きさである。このことから、釧路システム地震計の高・低感度を合わせた総合的なダイナミックレンジ(実効値)は、0.05～0.25Hzで147db、2～30Hzでは136dbあることが推測される。

謝 辞

気象庁精密地震観測室における比較観測及びノイズ評価実験において、気象庁精密地震観測室の職員の方々、NEC海洋エンジニアリング(株)の鹿野勝彦氏、安楽兼太郎氏には多大なる協力をしていただいた。また、動的ノイズ評価実験の際には、深海研究部の青柳勝氏、森田重彦氏との議論がたいへん有益であった。ここに記して感謝いたします。

参考文献

Hirata K., M. Aoyagi, H. Mikada, K. Kawaguchi, Y. Kaiho, R. Iwase, S. Morita, I. Fujisawa, H. Sugioka, K. Mitsuzawa, K. Suyehiro, H. Kinoshita (2000): Real-time geophysical

measurements on the deep seafloor using submarine cable in the southern Kurile subduction zone, submitted to IEEE J. Ocea Engineering.

Kanazawa T. and A. Hasegawa (1997): Ocean-bottom observatory for earthquake and tsunami off Sanriku, North-eastern Japan using submarine cable, Proc. International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables, 208-209.

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ことの検討 -, 地震研究所彙報, 65, 633-648.

榆皮久義(1988): 地震観測所周辺のノイズレベル変化と地震観測環境, 気象庁地震観測所技術報告, 第9号, 47-60.

Paterson, J. (1993): Observations and Modeling of Seismic Background Noise, USGS Open File Report, 93-322.

ト部卓・溝上恵(1996): 伊東沖海底ケーブルシステム, 月刊海洋, 4, 219-224.

渡辺晃(1971): 近地地震のマグニチュード, 地震2, 24, 189-200.

(原稿受理: 2001年1月23日)