研究

相模湾における低周波雑音計測

岩瀬 良一, 直井 純 (海洋研究開発機構) *¹菊池 年晃 (海洋研究開発機構, 現所属: 防衛大学校) *²水谷 孝一 (筑波大学大学院) *³

iwaser@jamstec.go.jp

(2006年1月6日原稿受付)

Abstract :

For the purpose of monitoring deep seafloor environmental changes associated with a submarine earthquake swarm, a cabled observatory consisting of multidisciplinary sensors including a hydrophone was deployed by JAMSTEC at a depth of 1200 m off Hatsushima Island in Sagami Bay. By using the data obtained by the observatory, the relationship between surface weather changes and underwater ambient noise, especially the origin of low frequency noise lower than 100 Hz, was examined. As a result, the site effects on the noise characteristics obtained by the hydrophone, consisting of the surrounding topography and the water depth, became clear. It also became clear that the low frequency noise caused by an earthquake and a typhoon can be discriminately observed by the observatory. These results can be utilized for detecting fluctuation phenomena or precursors on the seafloor that are associated with earthquakes.

分類: 海中雑音

キーワード: 低周波雑音, 深海底, 長期観測ステーション, 台風, 地震

1. はじめに

海中においてソーナーを運用する際に, その性能に影響を及ぼす要因の一つに海中の雑音問題がある. この雑音には観測船等が放射する自己雑音と自然界に存在する海中雑音とがある. いずれもソーナーの運用に当たっては重要な要因であるが, ここでは海中雑音について考える. 海中雑音は多くの研究者によって古くから研究されており, それらの研

究の成果は Wenz¹⁾によってまとめられている. その雑音分布は成因である風力(数百 Hz から数十 kHz)や船舶航走(数十 Hz から数百 Hz)等との関係も明らかにされている. 一方, これらの周波数より低い, 数十 Hz 以下の雑音の成因として, 文献1)では海洋表面波のほか, 地震や火山噴火などもあげられているが, これらの過渡現象と, より長い時間継続する雑音分布との間に, 明確な関連づけが十分になされ

Low Frequency Ambient Noise Measurement in Sagami Bay

*¹ Ryoichi IWASE, Jun NAOI (JAMSTEC)*² Toshiaki KIKUCHI (JAMSTEC, present affiliation : National Defense Academy of Japan)*³ Koichi MIZUTANI (Graduate School, University of Tsukuba)

ているとはいえない。また、雑音分布は海域や計測深度にも依存すると考えられる。最近、陸上の地震観測で検出される雑音である極低周波の脈動の起源として、地震ではなく大気-海洋-海底地形の相互作用の寄与が議論されている²⁾。その中で、近年まで海域に関する情報を得る手段が、ブイや海底圧力計などによる一時的な観測に限られていたが、人工衛星の高度計と陸上の地震観測網との組み合わせなどにより新たな知見が得られつつあることが指摘されている。しかしながら、海洋と海底の相互作用を議論するうえで、海域、特に深海域における長期観測は現在でもまれである。一方、海洋研究開発機構では相模湾初島南東沖の深海底に長期観測ステーションを設置し、地震動及び水中音響をはじめ、海底の生物や深海環境を長期にわたって連続観測を行っている。長期観測の主な目的は地震に伴って発生する変動現象や前兆現象を把握することである。しかしながら、地震動や水中音響の記録には、原因が明らかでない多くの信号や雑音が混入し、地震に起因する現象を検出することは容易ではない。地震起源の現象を明確に補足するためには、原因が明らかでない信号や雑音の成因を明確にしておくことが重要である。今回は、主に地震観測に用いられる帯域である 100 Hz 以下の低周波雑音の成因について、ハイドロフォンの設置場所による影響を

含めて調べる。その結果、静穏時雑音と伝搬環境の関係、地震と海中雑音の関係、および台風等による巨大波浪と海中雑音との関係を明らかにする。

2. 観測ステーションと観測項目

伊豆半島東岸の伊東市沖は 1979 年以降しばしば群発地震が発生し、また 1989 年には手石海丘で海底噴火があるなど、地殻変動が比較的活発な場所であり、陸上での稠密な地震観測網のみならず、3 台の地震計を海底ケーブルで接続した海底地震観測システムも設置されている³⁾。また、この群発地震域の 8 km ほど北東に位置する水深約 1200 m の相模湾初島沖深海底は、地殻熱流量が高く、海底からの湧水に含まれるメタンや硫化水素などで生息するシロウリガイなどの化学合成生物群集が存在する冷湧水域と呼ばれる特異な場所であり⁴⁾、海洋研究開発機構(旧海洋科学技術センター)が設置したケーブル型海底観測システム(深海底総合観測ステーション)による深海環境の長期観測が 1993 年より実施されている⁵⁾。観測ステーションの設置場所を **Fig. 1** に示す。設置水深は 1175 m である。観測項目は、地震動、海中雑音、海底画像、底層流、水温、塩分濃度などである。本論文では主として海中雑音について述べる。本ステーションで使用しているハイドロフォンは米国 International Transducer Corporation (ITC) 社製の ITC-

Fig. 1 Location of "Off Hatsushima Island Observatory" and cable route.

1010Aであり、海底に設置されている。なお、ステーションに搭載されているその他の装置と性能に関しては、文献6)及び文献7)に記述されている。

3. 海中雑音の観測結果

3.1 静穏時の海中雑音

ハイドロフォンで受波した信号は、200 Hzでサンプリングした、周波数帯域が100 Hz以下の連続データとして収録されている。これに加えて、ビデオカメラの映像録画時にはDVCAMデッキの音声トラックに音声帯域の信号としても同時に収録されている⁷⁾。

雑音の計測で重要なのはその海域の最低雑音レベルである。ハイドロフォンによる長期にわたる観測データから最もレベルが低かったデータをFig. 2(a)に示す。これは2004年6月6日午後23時50分から10分間に受波した雑音の振幅スペクトルであり、文献7)に静穏時の例として示された時刻(2004年1月

1日午前0時)のデータよりも更に低いレベルとなっている。この時刻にステーションで観測された流速値(ADCP最下層、設置水深1175 mの海底からの高度12 m)は2.5 cm/sである。また、ステーションに近い気象庁網代測候所の毎時気象データによれば、風速0.4 m/s、降水は13.5 mm/hであり、降水量が大きいものの風速は小さい。使用しているハイドロフォンITC-1010Aの検査成績書上の周波数特性は2 kHz以上しか保証されていないものの、Fig. 2(a)から100 Hzにおける振幅レベルは50 dB re:1 μ Pa弱であり、おおよそWenz曲線⁸⁾における静穏時のレベルと同程度である。ほぼこの時刻(2004年6月7日午前0時)に、ビデオの音声トラックに収録された雑音の振幅スペクトル(相対レベル)をFig. 2(b)に示す。海中の雑音は、全体的な傾向として、周波数が下がるにつれ増大することが知られている⁹⁾。

Fig. 2(b)では5 kHz以下では周波数が下がるにつれ雑音レベルが増大している。しかしながら、更に低い周波数領域を示すFig. 2(a)では単調な増大は見られず、約9 Hz付近で雑音レベルが低下していることが分かる。この原因はハイドロフォンが設置された海域の伝搬特性によるものと考えられる。その検討は次節で行う。

3.2 強風時の海中雑音

低周波数帯域における海中雑音として、文献1)では風や降水により海面で発生する波浪雑音や降雨雑音、遠方を航行する船舶の航走雑音および地殻変動や地震による地殻変動雑音が挙げられている。

そこで、網代測候所の気象データからいくつか特徴的な気象条件を取り出して、対応する時刻に受波した雑音のレベルを調べ、Wenz曲線¹⁾⁸⁾と比較する。前述のビデオ録画は、通常0時と12時のみに収録しているので、この時刻を計測時刻とした。また、船舶航行雑音の影響をできる限り避けるため、音声再生時に船舶航行音が聞こえないことを確認した。

Fig. 3は、2004年1月22日午前0時におけるハイドロフォンの受波信号とビデオ記録からの振幅スペクトルを、Fig. 2, すなわち静穏時(2004年6月7日

Fig. 2 Ambient noise spectrum observed by the hydrophone. (a) 2004/06/06 23:50 - 2004/06/07 00:00, frequency lower than 100Hz, (b) 2004/06/07 00:00, frequency lower than 10 kHz.

午前0時)におけるデータとあわせて示したものである。この時刻における網代測候所の気象データは、風速13.8 m/s、降水量はゼロであった。一方、ステーションの流速値は3.2 cm/sで、Fig. 2のとくと同程度であり、周囲環境としての流速の条件はほぼ同じである。

Fig. 3(a)のほぼ全ての帯域、及びFig. 3(b)の5 kHz以下の周波数帯域では、いずれも10 dB程度のレベル増加が見られる。これらのレベルの増加幅は、Wenz曲線⁸⁾の同程度の風速条件と比較するとやや小さい。この相違の要因としては、ハイドロフォンの周波数特性によるもののほか、観測場所が外洋ではなく相模湾内という地形的影響により波浪が発生しにくいことが考えられる。一方、Fig. 3(b)の5 kHz以上ではあまり差は見られない。但し、この5 kHz以上のデータについては、ビデオデッキの入出力特性に依存している可能性がある。

3.3 台風時の海中雑音

Fig. 4は、関東地方を直撃した台風22号が接近中の2004年10月9日午前0時におけるハイドロフォンの受波信号とビデオ記録からの振幅スペクトルである。Fig. 3と同様、静穏時(2004年6月7日午前0時)におけるデータとあわせて示す。

この時刻には、台風は四国沖に位置しており、網代測候所の気象データでは、風速は、2時間前までは9 m/sあったが、この時刻には風速1.1 m/sとなり、降水量は17 mm/hと比較的大きなものであった。ステーションで観測された流速は5.5 cm/sで、前2例より若干大きい、ほぼ同じレベルである。

前例(Fig. 3)と同様、Fig. 4(a)及びFig. 4(b)の5 kHz以下の周波数帯域では10 dB程度のレベル増加が見られるが、特に0.4 Hz以下では0.3 Hzのピークを中心に、20 dB程度のレベル増加となっている。このレベル増加については、5.2節で検討する。高周波側の振幅増加は、気象データから判断すると降水による影響の可能性もあるが、静穏時の降水も13.5 mm/hと比較的大きいことを考慮すれば、台風に伴う波浪雑音の影響が大きいと思われる。

3.4 地震時の海中雑音

以上では、気象要因に起因する海中雑音についてのデータを見てきたが、ここでは海中雑音と地震データの周波数帯域について述べる。

Fig. 5(a)およびFig. 5(b)に、2004年12月13日10時18分に観測ステーションの南西約8 kmに位置する伊東沖の群発地震域で発生したマグニチュード1.7の地震をハイドロフォンで観測した際の波形、およびその地震波形を含む1分間の時間窓に対して得られたスペクトルをそれぞれ示す。Fig. 5(a)では地震計で得られた地震波形を、Fig. 5(b)ではFig. 4などと同様、静穏時のスペクトルをあわせて示した。

群発地震域で発生する地震の卓越周波数は数Hzの帯域であり、ちょうど海中雑音のスペクトルが極小となる付近である。この帯域に着目すれば、Fig. 4に示した台風の際に発生した程度の周囲雑音下でも、群発地震域で発生した微小地震が識別可能となる。実際、2005年3月12日22時15分に同群発地震域で発生したマグニチュード1.0の地震では、10 Hz付近のレベルが約 $2 \text{ mPa}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、同程度のマグニチュードの地震までは識別可能であると考えられる。

4. 設置環境の音響特性

海中雑音の計測は、船舶や港湾およびソーナーなど人為的な要因による雑音の影響が及ばない環境で計測することが望ましい。そして、それは長期的に安定に継続して行われることが望ましい。しかしながら、これらの条件を満たす場所はほとんど存在しない。前述のように、海洋研究開発機構では、地震に伴う変動現象を把握する観点から、観測ステーション設置海域として相模湾初島南東沖を選んだ。このステーションは音響学的に海中雑音を計測する環境としては満足できるものではない。海中雑音を成因から大別すると、遠方を航走する船舶の雑音と海面の波浪によって生じる雑音とがある。前者はほぼ水平方向に伝搬し、後者は鉛直方向に伝搬する。それらに与える影響が最も大きいと考えられるのは海底の存在である。そこで海底が存在する場合の音波伝搬をシミュレーションによって明らかにする。

Fig. 3 Ambient noise spectrum observed by the hydrophone. (a) 2004/01/22 00:00–00:10, frequency lower than 100 Hz (black line), compared with the spectrum in Fig. 2(a) (red line). (b) 2004/01/22 00:00, frequency lower than 10 kHz (black line), compared with the spectrum in Fig. 2(b) (red line).

4.1 水平方向伝搬雑音

Fig. 1から明らかなように、外洋から到来する雑音は湾口にあたるほぼ南方から到来すると考えられる。ハイドロフォン設置場所の海底地形は、東西には傾斜しているが、南方の深度変化はあまり大きくない。そこで、まずFig. 6に示すようなモデルを考える。ハイドロフォンは深度1200 mの海底面上に設置されている。CTDの実測値をもとに、Chen and Milleroの式¹⁰⁾で音速に変換した音速プロファイルをFig. 7に示す。音速最小の深度は900 mであるが、海底の深度が1200 mであるため十分なダクトは形成されていない。ハイドロフォンから100 km離れた位置に雑音源を仮定する。深度500 mから1100 mまで100 m間隔に7個の音源を配置する。それらの振幅はダク

Fig. 4 Ambient noise spectrum observed by the hydrophone. (a) 2004/10/09 00:00–00:10, frequency lower than 100 Hz (black line), compared with the spectrum in Fig. 2(a) (red line). (b) 2004/10/09 00:00, frequency lower than 10 kHz (black line), compared with the spectrum in Fig. 2(b) (red line).

トの軸に近い1000 mの音源にのみ4倍の重みを付けた。音波伝搬の計算モデルには結合モード法¹¹⁾を用いた。各音源からハイドロフォンに至る音圧を求め、それらの二乗加算、すなわちインテンシティを求めた結果をFig. 8に示す。この場合、海面の波浪による影響を含めていないので静穏時の特性に相当する。この結果を、静穏時の計測結果、Fig. 2(a)と比較すると、10 Hz付近のレベルの低下が一致することが分かる。このレベルの低下は海底で制限された狭いダクトを伝搬する音波の影響と考えられる。

ここでさらに遠方の地形を考慮する。水深1200 mの観測ステーションのハイドロフォンに外洋から伝搬してくる音波は、相模トラフに沿って、大島と房総半島に挟まれた狭い部分を通過する。観測ステー

Fig. 5 (a) Waveforms of hydrophone and Ocean Bottom Seismometer data observed at the occurrence of an earthquake at 10:18 on Dec. 13th 2004. (b) Ambient noise spectrum observed by the hydrophone at the occurrence of an earthquake at 10:18 on Dec. 13th 2004 (frequency lower than 100Hz, black line), compared with the spectrum in Fig. 2 (red line).

Fig. 6 Propagation model.

ションから約 100 km 沖合いにあたる房総半島の先まではほぼ平坦で、そこからはトラフ軸が房総半島寄り、すなわち東向きとなり、これに沿って緩やかに深度が増大し、ステーションから約 200 km の地点

Fig. 7 Sound speed profile.

で深度約3500 mに達する。一方、トラフ軸に沿わずにまっすぐ延長した大島寄りの経路はほぼ平坦で、ステーションから約200 kmの地点で深度は約1500 mである。そこで、これら二つの場合を想定し、ステーションから距離200 kmの地点のSOFAR軸上に音源をおき、そこからステーションに至るまでの伝搬損失を求めFig. 9に示す。Fig. 9の上図は深度変化の小さい大島寄りの経路を伝搬した場合で、下図は深度変化の大きいトラフ軸沿いの経路を伝搬した場合である。ここでは外洋からの伝搬を考えているので拡散はないものとしている。また音源は純音で連続波としているので変動の激しい曲線になっているが、雑音の場合は干渉が起きにくいので、これらの曲線の平均に近いものと考えられる。したがって、これら二つの経路には深度の差があるが、周波数が低い雑音に対しては大きな差異は生じないものと考えられる。両図に共通な特徴として、Fig. 8と同様な10 Hz付近のレベル低下があげられる。そこで、音波の周波数を10 Hzとして、伝搬モードの深度分布をノーマルモード法¹²⁾で求めた結果をFig. 10に示す。音圧はこれらのモードの加算に比例する。したがって、第1モードの寄与が大きいことが分かる。しかしながら、ハイドロフォンが設置されている海底面上では、第1モードの振幅は第2モードの振幅の約1.4倍に過ぎない。さらに、それらの位相

Fig. 8 Spectral intensity of the low-frequency sound wave propagation, when the water depth is constant and is 1200 m.

は逆相であり、互いに打ち消し合う。その結果、Fig. 9のディップが生じると考えられる。また、Fig. 8およびFig. 9に見られる変動は、第1、第2モード間の打ち消し合いにより振幅が小さくなった上に、振幅がより小さい第3、4、5、6モード等との干渉が生じたことによると考えられる。

次に、周波数が2 Hz以下の低周波になると、波長が長いので二層モデルで近似することができる。その場合遮断周波数は次式で表される¹³⁾。

$$f_{cm} = \frac{(2m-1)c_1}{4H\sqrt{1-(c_1^2/c_2^2)}}$$

ここで c_1 と c_2 は水中と海底の音速で、 H は深度である。 m はモード番号である。ここで c_1 、 c_2 、 H をそ

Fig. 9 Spectral intensity of the low-frequency sound wave propagation, when the water depth at 200 km far is 1500 m (top) and is 3500 m (bottom).

Fig. 10 Vertical distribution of propagation modes.

れぞれ 1500 m/s, 1600 m/s, 1200 m としたとき, 第 1 モードと第 2 モードの遮断周波数は, それぞれ 0.9 Hz と 2.7 Hz になる. この結果と照らし合わせると, Fig. 9 の上図で 1 Hz から 3 Hz 付近までの単調な変化は, 第 1 モードのみの減衰が寄与しているためと解釈される. また, 3 Hz 以上の変動は, 第 1 モードと第 2 モードの干渉によるものと考えられる.

以上のことから 水平方向から伝搬してくる音波で, 10 Hz 付近の成分はハイドロフォンが海底に設置されているためほとんど検出されず また約 1 Hz 以下の成分は遮断されて到達できないと考えられる. 従って, Fig. 2(a) で計測されている 1 Hz 以下の成分は, 次節の鉛直方向伝搬雑音か, もしくはレイリー波などの地動として海底を伝搬してきた脈動¹⁴⁾を, 海底に設置されたハイドロフォンが水圧変動として検出した雑音と考えられる.

4.2 鉛直方向伝搬雑音

Fig. 6 のモデルを用いて, 海面の波浪によって起る雑音のシミュレーションを行う. 海面下 10 m に音源を仮定し, ハイドロフォンの直上から音源を離れた場合の音圧を, 海底が存在する場合と十分深い場合とで比較した. 海底が十分深い場合の音速プロファイルは, 計測によって求めた音速プロファイルに Munk の式¹⁵⁾を適用し, それを深度 5000 m まで延長した. 海面から海底のハイドロフォンに至る伝搬損失の特性は, 周波数が約 20 Hz 以下 (Fig. 11(a)) と 20 Hz から 100 Hz の範囲 (Fig. 11(b)) で異なった特性を示す. これらの図で, 青線は海底が浅い場合の伝搬曲線を, 赤線は海底が十分深い場合の伝搬曲線を示す. 海底が十分深い場合は近距離と低周波を除くとほぼ単調な分布である. 近距離では海底の反射の影響による変動が見られる. また, 低周波では距離と共に増大する傾向も見られる. 一方, 海底が浅い場合は, 低周波域を除くと全般的に雑音レベルが 20 dB ほど高い.

5. 超低周波域の海中雑音

海中雑音に関しては多くの研究者によって研究さ

Fig. 11 Sound pressure level of the hydrophone at a depth of 1170 m caused by sea surface noise. Blue line and red line show shallow water case and deep water case respectively. (a) frequency lower than 20 Hz, (b) frequency range 20-100 Hz.

れているが, 数 10 Hz 以下の超低周波域の雑音に関してはまだ十分解明されているとは言えない. ここでは地震による雑音と波浪の非線形干渉による雑音について検討する.

5.1 地震による海底雑音

Fig. 5(b) は 2004 年 12 月 13 日 10 時 18 分に伊豆半島東方沖で発生した地震の振動をハイドロフォンで受波した雑音スペクトルである. 静穏時の雑音スペクトルと比較すると 1 Hz から 40 Hz までの周波数範囲で大きなレベルの差が見られる. 一方, 1 Hz 以下の周波数範囲では静穏時の雑音レベルとの差は小さい. Fig. 2(a) と Fig. 8 との比較から, この範囲

の雑音は海底を伝搬してきたものと考えられる。他方、1 Hzから40 Hzまでの周波数範囲の雑音は、Fig. 8の結果から、海底を伝搬してきた実体波を水压変化として検出したものに加え、海水中を伝搬したのも含まれていると考えられる。

5.2 波浪の非線形干渉による雑音

Fig. 4に示した台風通過時の雑音スペクトルは、Fig. 2(a), (b)と比較すると、1 kHz以上では波浪による雑音レベルの増加が明らかである。この波浪と海中雑音との関係は既に良く知られている。しかしながら、100 Hz以下の雑音に関してはまだ十分に知られているとは言えない。

Fig. 4において、1 Hzから100 Hzの範囲の雑音レベルは、1 kHz以上の周波数範囲における増大と比較するとやや小さい。一方、1 Hz以下では、かなりのレベルの増大がみられる。そしてそのレベルは0.3 Hz付近にピークを持っていることが分かる。台風は広範囲に影響を及ぼすので遠方で何らかの振動が発生して伝搬してきたことも考えられる。しかしながら、既に論じたように、このステーションでは海中を伝搬して来た波を考えることは困難である。また、台風接近中とはいえ、風速は1.1 m/sでかなり小さく、Wenz曲線で表されるような従来の風力と海中雑音との関係からは議論できない。Kibblewhiteらは、海面ブイにより得られた波浪データと海岸に設置された地震計の地動記録から推定された海中の水压変動により、海面の波浪の非線形干渉によって水中に発生する雑音の解析を行っている¹⁶⁾¹⁷⁾。その結果によれば、波浪の状態によって発生する雑音は変化するが、0.1 Hzから数Hzの雑音が発生し、その中間にレベルのピークが生じ、風速の増加に応じてそのピークレベルの増大とピーク周波数の減少が見られることが示されている。Kibblewhiteらの結果は陸上の地震計データから推定されたものであるのに対し、本研究ではハイドロフォンにより水压変化を直接計測しており、実際の深海での現象を捉えていると言えるが、Fig. 4(a)に示された0.1 Hzから2 Hz付近までの雑音レベル変化は、

Kibblewhiteらの結果と特徴がよく一致している。したがって、この雑音の発生機構は海面の波浪の非線形干渉によるものと考えることができ、その後の他の研究結果もこの発生機構が基本的には支持されている¹⁸⁾。しかしながら、前述のように今回のケースは風速が小さい点が相違している。これまでの検討から、この周波数帯域の雑音は海中を伝搬したのではなく、海面付近で発生したものが鉛直方向に伝搬したものか、遠方で発生したものが地動に変換された脈動として伝搬したと考えられる。脈動については、防災科学技術研究所が公開している広帯域地震観測網F-net¹⁹⁾の館山観測点のスペクトル図を参照すると、Fig. 4に対応する時刻は欠測しているものの、その前後の記録からは、より低い周波数、すなわち0.1 Hzから0.2 Hzの間にピークがあることがわかる。このことから、Fig. 4に見られる雑音レベルのピークは脈動よりもむしろ鉛直方向の伝搬によるものと考えるのが妥当である。台風接近時にその要因として考えられるのはうねりである。すなわち相模湾内において生じたうねりの非線形干渉による雑音と考えられる。Kibblewhiteらのフィールドであるニュージーランドの場合と違い、湾内では海岸からの反射による波浪の非線形干渉が発生しやすい環境にあると考えられる。

6. まとめ

海洋研究開発機構は、相模湾の初島沖海底に地震に伴って発生する変動現象や前兆を把握することを目的として、海底地震や海底環境および海中雑音を長期観測する観測ステーションを設置している。今回は、このステーションの観測データを用いて、海洋環境の変化と海中雑音との関係、特に100 Hz以下の低周波雑音の成因との関係を検討した。その結果、ハイドロフォンの設置場所による雑音特性への影響が明らかにされた。そしてこの観測ステーションにより観測されるデータから地震や台風によって起きる低周波の雑音を識別できることが明らかになった。これらの結果は、地震に起因する変動現象や前兆現象を検出するために十分有用に活用

することができる。

また海岸や港湾に大きな被害を起こしかねない低周波の巨大な波浪を水中音響を通してリアルタイムで観測できることは大変有意義なことと考えられる。

謝辞

本研究で使用した気象データは、財団法人気象業務支援センターのメテオ i-NET サービスによるものである。また防災科学技術研究所が公開している広帯域地震観測網 F-net のデータを参照した。

参考文献

- 1) G. M. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources," *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**, 1936-1956 (1962).
- 2) S. Kedar and F. H. Webb, "The ocean's seismic hum," *Science*, **307**, 682-683 (2005).
- 3) ト部卓, 溝上恵, "伊豆東方沖海底ケーブルシステム," 月刊海洋, **28**, 219-224 (1996).
- 4) 岩瀬良一, 町山栄章, "電気伝導度変化を伴う冷水湧水変動の検出 - 相模湾初島南東沖潜航調査 (「ドルフィン 3K」第 546 潜航, 「しんかい 2000」第 1320, 1323 潜航) 序報 -, " *JAMSTEC 深海研究*, **20**, 115-125 (2002).
- 5) H. Momma, R. Iwase, K. Mitsuzawa, Y. Kaiho and Y. Fujiwara, "Preliminary results of a three-year continuous observation by a deep seafloor observatory in Sagami Bay, central Japan," *Phys. Earth Planet. Inter.*, **108**, 263-274 (1998).
- 6) 岩瀬良一, 満澤巨彦, 平田賢治, 海宝由佳, 川口勝義, 藤江剛, 三ヶ田均, "相模湾初島沖深海底総合観測ステーションの更新 - 次世代リアルタイム観測の確立に向けて -, " *JAMSTEC 深海研究*, **18**, 185-192 (2001).
- 7) 岩瀬良一, 菊池年晃, 土屋利雄, 水谷孝一, "相模湾初島沖深海底におけるハイドロフォン長期連続観測," 信学技報, US2005-34, 13-18 (2005).
- 8) <http://www.npmoc.navy.mil/KBay/background-noise.htm>.
- 9) G. M. Wenz, "Review of underwater acoustics research: Noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, **51**, 1010-1024 (1972).
- 10) C. T. Chen and F. J. Millero, "Speed of sound in seawater at high pressure," *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**, 1129-1135 (1977).
- 11) R. B. Evans, "A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with step-wise depth variations of a penetrable bottom," *J. Acoust. Soc. Am.*, **74**, 188-195 (1986).
- 12) D. C. Stickler, "Normal-mode program with both the discrete and branch line contributions," *J. Acoust. Soc. Am.*, **57**, 856-861 (1975).
- 13) F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational ocean acoustics* (Springer-Verlag New York, Inc., New York, 2000), p.118.
- 14) 友田好文, 鈴木弘道, 土屋淳編, 地球観測ハンドブック (東京大学出版会, 東京, 1985), p. 728-729.
- 15) W. H. Munk, "Sound channel in an exponentially stratified ocean with applications to SOFAR," *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**, 220-226 (1974).
- 16) A. C. Kibblewhite and C. Y. Wu, "A reexamination of the role of wave-wave interactions in ocean noise generation," *J. Acoust. Soc. Am.*, **85**, 1946-1957 (1989).
- 17) A. C. Kibblewhite and C. Y. Wu, "The theoretical description of wave-wave interactions as a noise source in the ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**, 2241-2252 (1991).
- 18) S. C. Webb, "Broadband seismology and noise under the ocean," *Rev. Geophys.*, **36**, 105-142 (1998).
- 19) <http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/wave-form/prev.html>