水中音観測による海上監視技術の確立*

今 里 元 信** 桐 谷 伸 夫*** 麻 生 裕 司****
遠 山 修**** 松 下 邦 幸*****

Development of Marine Surveillance Technology by Sensing Underwater Sound

By Motonobu IMASATO, Nobuo KIRIYA, Hiroshi ASOU,
Osamu TOYAMA, Kuniyuki MATSUSHITA

An early warning system for sensing suspicious ships approaching nuclear power plants and other important facilities located at the coast is necessary. Thus, the authors developed a buoy equipped with a marine surveillance system.

In this paper, the results of actual sea trials of the prototype buoys for a two-month period from July to August in 2008 and 2009 are presented. The underwater sound recorded with hydrophones mounted on the buoy was analyzed, and the method used to detect underwater sound of ships approaching the buoys was evaluated. Next, the underwater sound from the experiment boat rotating around the buoys was observed and analyzed in order to build an algorithm for predicting the geometric direction and position of the boat's underwater sound source. Results show that this technique can be one of the methods for real-time underwater sound monitoring. The authors expect that this surveillance buoy system will be useful in predicting the presence of dubious ships or poaching boats by sensing underwater sound.

1. はじめに

沿岸部の発電所や石油貯蔵施設等の重要施設において、不審者の侵入対策として、陸上部分にフェンスやカメラ等の設置が進められている。しかし、陸上部分のみに設置されたこれらの監視システムでは、侵入者の早期発見能力は不十分であり、フェンス際で探知した段階では遅きに失し、侵入、破壊を許すこととなる。海側からの侵入者を早期探知するためには、重要施設の沖合海域に接近船舶・接近者を早期探知するために、海上や海中を監視するシステムの構築が有効であると考案する。これにより、不審船等の侵入を防ぎ、重要施設の安全を守ることができると考えられる。そこで、これまでも海上を航行する船舶を探知し、識別する技術の開発のためにセンシング技術に関する様々な研究が行われている¹⁾。例えば水中音を利用したセンシング技術もそのひとつである。水中音は、伝播距離が空中よりも長く、また伝播速度も大きいことから、接

近船舶の水中音をいち早く掴むことができるものと考えられる。

本研究では、沿岸重要施設等への不審船接近感知のための、海上や海中を監視するシステムを備えたブイの実現に向けて研究開発を行っている^{2,3)}。これまでに筆者らは、水中マイクロホンを用いて、接近する不審船等を早期に探知し、識別する装置の開発を試みている^{4,5)}。また航行船舶の方位推定技術の確立のために、複数の水中マイクロホンによって航行船舶の方位を検出する手法の開発も試みている^{6,7)}。そこで、2008年と2009年の毎夏約2ヶ月間にわたり、海上海中監視ブイの長期運用に向けて設置稼働試験を行う機会を得たので、監視ブイに設置した水中マイクロホンを利用した実海域における水中音観測実験を実施した。

本報告では、リアルタイム監視に向けて、接近船舶の水中音を検知するためのアルゴリズムに関する検討評価を行ったので、この結果について述べる。また海上海中監視ブイに搭載した水中マイクロホン2台を使用し、対象船の方位検出のための位相差観測実験を行い、観測データをもとに音響信号のフィルタ処理による方位検出アルゴリズムの妥当性についても検証評価したので、これらの結果についても述べる。

*原稿受付 平成 22 年 7 月 7 日
** 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)
*** 正会員 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)
**** ゼニライトブイ (倉敷市玉島乙島 8234-16)
***** 正会員 弓削船舶高等専門学校
(愛媛県越智郡上島町弓削下弓削 1000)

2. 水中音の観測

2.1 船舶の水中音 本研究開発において構築する海上海中監視ブイは、沿岸部の重要施設などの沖合に設置し、監視海域において水中音を観測することを想定している。水中音は、前述のとおり、空中音に比べて伝播速度が大きく、伝播距離が長い特徴を持つことから、遠くの音源も感知することが可能である。そのため、監視ブイで観測するパラメータのひとつとして水中音に着目した。

水中には、水中生物の鳴き声、波浪や降水による雑音など様々な音が存在する。ここでは動力船を音源として考えると、水中音としてパッシブに観測される対象は、以下のように考えられる⁸⁾。

- ① 機械雑音
- ② キャビテーション雑音
- ③ 水力雑音
- ④ その他の雑音

機械雑音として観測される水中音の音源は、主機や補機、推進器、プロペラなどに代表される。またこれらは様々な周波数を発生するが、その周波数は機械の回転速度に密接な関連がある。キャビテーション雑音は、回転するプロペラのブレードの低圧領域で発生する気泡が崩壊することによって発生する。3番目の水力雑音は、船殻などの表面からの発生、船体の航走によって発生する碎波音などに代表される流体力学的な水中音である。

2.2 水中音による方位観測 一般的に目標物の位置決定を行う方法として、LBL(Long Base Line), SBL(Short Base Line), SSBL(Super Short Base Line)方式がある⁸⁾。これらの名称は、測位に用いる送受波器の間隔であるベースラインの長さ由来する。

本研究では、2, 3個の受波器を同一の監視ブイに設置するため、マイクロホン間に長い距離を確保できないことから、SSBL方式の採用を考えている。SSBL方式は、非常に短い間隔で設置された複数の受波器を用いて、音波の入射角を受波器間の位相差として測定し、方位位置を計測する。

図1に受波器対による音波の入射角の計測原理を示す。近接した2つの受波器に到来する音波は平面波で近似してよく、同じ入射角で受波器に入射すると考えられる。図1に示すように、2つの受波器に角度 θ で入射する音波は、2つの受波器に時間差をもって到達する。信号の時間差はごく僅かであるから、信号の位相差 $\delta\phi$ で計測すれば、音波の入射角 θ は(1)式で求められる。

図1 位相差による方位の検出(SSBL法)

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\delta\phi \cdot c}{2\pi \cdot fd} \right) \quad (1)$$

ここで、 f はキャリア周波数、 c は受波位置の音速、 d は受波器間隔である。

3. 海上海中監視ブイシステム

3.1 海上海中監視ブイシステムの概要 本研究で構想している自律型海上海中監視ブイシステム^{2,3)}の概要を図2に示す。この係留ブイは、マイクロPCを搭載し、水中マイクロホンを用いて水中音の自動観測、解析を常時行う。そこで通常航行する船舶の水中音特性をデータベースに保持しておき、観測中の船舶の水中音特性が照合によりデータベースに存在せず、通常航行している船舶と異なると判定を出した場合には不審船と見なし、インターネットを介して管理者等のPCや携帯電話などの通信端末への情報送信を行う。このようにして、不審者の侵入や上陸を未然に防ぐことができる考えたものである。

本報告では、上述のような海上海中監視ブイの実現に向けて、実海域における長期の連続観測実証実験を行ったので、以下に実験の概要を述べる。

図2 海上海中監視ブイシステムの概要

3.2 海上海中監視ブイ設置場所 本研究で開発中の海上海中監視ブイは、瀬戸内海中西部の弓削島(愛媛県越智郡上島町)の東方沖合約3.5kmの海域に設置した。設置稼働期間は2008年および2009年の7月上旬から8月下旬までである。このとき設置したブイ

イの台数は、2008 年は1台（1号機ブイ）、2009 年は2台（1号機ブイと2号機ブイ、1号機ブイは前年と同機）である。写真1に1号機ブイ、2号機ブイの外観を示す。各ブイの大きさは表1のとおりであり、次に述べる送信局システムを搭載する。また各ブイの水深3mの位置に水中マイクロホン3台（各マイクロホン間距離は3m）を取り付けた。ここで各ブイに設置した水中マイクロホンの特性について、1号機ブイはOST2130型、2号機ブイはOST2310型（ともにオキシーテック社製）であり、どちらも無指向性で使用周波数が10Hz～100kHz（OST2130型）、100Hz～20kHz（OST2310型）の高受波感度タイプ（-176dB re. 1V/ μ Pa 以上 at 1kHz）のものである。なお2台のブイ設置間距離は東西方向に100m（1号機ブイが西側）である。これらの海上海中監視ブイを設置した地点および受信局の位置を図3に示す⁹⁾。

3.3 送信局システムと受信局システム 海上局である2台の監視ブイには、それぞれCPUモジュール

写真1 海上海中監視ブイの外観

表1 海上海中監視ブイの仕様

	1号機ブイ	2号機ブイ
全高	約6.8m	約8.9m
幅	約3.5m	約2.5m（径）
喫水	約3.0m	約3.6m
設置年	2008年、2009年	2009年

図3 海上海中監視ブイ設置地点⁹⁾

ルを搭載している。各CPUモジュールは、水中音のデータ取り込みと解析、広視野カメラによる画像のキャプチャ、GPSセンサおよびモーションセンサによるブイの動揺情報の取得などを行っている。これら取り込んだデータは、無線LANを介して約3.5km離れた受信局システムへ送信される。なお、データの送信は15秒間隔で繰り返し行い、その間に水中音の観測、解析や画像の取り込みなどを行う。ここでデータの送信時間間隔を15秒としたのは、これら1サイクルの所要時間とCPU負荷などに対する余裕を見込んだためである。また水中音のデータ取り込みにおいて、CPUモジュールおよびA/Dボードの性能上、サンプリング周波数は1チャンネルあたり最大36kHzであったため、余裕を見込んで32kHzとした。併せて記録時間は1チャンネルあたり65536個のデータを記録するため、2.048秒とした。

受信局システムは、基地局となる弓削商船高等専門学校校内に設置し、海上局からのデータ受信を行う。ここでは、受信データである水中音のパワースペクトルや広視野カメラでキャプチャした画像、ブイに搭載している各センサ情報などを表示する。こちらもデータの受信は15秒間隔で繰り返し行うため、表示の更新時間間隔もそれに合わせている。受信局システムの表示例を図4に示す。これにより、沖合に設置した2台の監視ブイ周辺の状況をリアルタイムに基地局にて把握可能となる。またこれらの受信データは、後日オフラインで検証するために保存できるようにしている。

図4 受信局システム表示例

4. 水中音変化の検出

4.1 水中音変化の検出手法 航行船舶が接近しているか否かは、水中音の変化を検出する方法が有用な手法のひとつであると考えられる。そこで筆者らは水中音の変化を評価するため、パワースペクトルの相関係数の時間変化から接近船舶の有無を判別する方法を取り入れている^{4,5)}。これはパワースペクトルを対象とし、1ステップ前（15秒前）と現在（0秒前）のパワースペクトルデータの相関係数を求める方法であ

る。相関係数が低くなれば音変化があったと推定できることから、水中音の変化が検出でき、接近船舶の有無を判別する一手法になり得ると考えており、今回の長期運用実験においても、本手法の導入を試みた。

4.2 水中音変化の検出結果 2008年8月上旬の貨物船が接近航行した時の広視野カメラでキャプチャした画像を写真2に、同時刻付近における相関係数の時間変化を図5に示す。ここで、対象データは1号機ブイの水中マイクロホン1台の水中音である。図5において、時間刻みは15秒であり、20分間の時間変化を表示している。現行アルゴリズムでは、パワースペクトルデータの対象周波数範囲を4k~8kHzとして相関係数を求め、その結果を図中の上段に示す。この図より、貨物船航行時に相関係数が最も小さくなっているが、それ以外でも全体的に相関係数が小さくなっている。これは航行船舶が無い時（環境音）のパワーが小さく、対象範囲内において僅かなパワーの変化が相関係数の変化に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、相関係数の対象範囲を拡げて2k~12kHzで算出したところ、図5中の下段の結果となった。この図より、航行船舶の出現が捉えやすくなっており、船舶が存在しない時は1に近い値を得ている。

また同時期の別の日において、漁船が接近航行したときの画像と相関係数の時間変化をそれぞれ写真3と図6に示す。こちらの結果についても前述同様、相関係数の対象周波数範囲を拡げたところ、航行船舶の出現が捉えやすくなっていることがわかる。但し、ここでは航行船舶の特徴が出たと考えているが、本実験において水流や波面状態など外乱の影響を考慮していないため、今後検討する必要があると考えられる。

これらの結果より、本手法は水中音の変化を検出する手法のひとつとして有用であると考えられる。なお、相関係数を求めるための対象周波数範囲の設定には検討を要する。

5. 音源方位観測

5.1 監視ブイ1台による方位観測 航行船舶の方位検出のアルゴリズム構築のために、筆者らは2台の水中マイクロホンによる位相差を利用した音源の方位推定を試みている^{6,7)}。本研究で構想している音源方位検出アルゴリズムの手順を以下に挙げる。

- ・音変化前後のパワースペクトル波形に着目し、変化した周波数帯域を検出する。この周波数は、船舶固有の特性周波数を表すと考えられる。
- ・検出した周波数帯域でバンドパスフィルタを設定

写真2 キャプチャ画像① (2008年8月8日)

図5 相関係数の時間変化① (2008年8月8日)

写真3 キャプチャ画像② (2008年8月11日)

図6 相関係数の時間変化② (2008年8月11日)

し、水中音をフィルタリングする。

- ・フィルタリングした波形を用いて位相差を求める。
- このような過程を自動的に実行できれば、水中音の位相差観測から航行船舶の音源の方位が推定できると考えている。

そこで、海上海中監視ブイの周囲を周回する実験支援船の水中音観測を別途行い、音源である実験支援船の方位変化を位相差計算から求めることとした。ここでは2号機ブイの上で水中音の観測実験を実施し、2号機ブイを中心に航行半径約100mで周回する実験支援船の水中音を記録した。このとき、水中音データの記録にはポータブルDATレコーダーを使用した。観測時の設定は、サンプリング周波数を48kHzとし、16bitリニアPCM形式でステレオ録音とした。これにより、監視ブイの上で水中マイクロホン2台による連続観測が可能となる。

本観測実験で得られた結果を図7に示す。図7(a)は実験支援船に搭載したGPSロガーによる相対方位をプロットしており、実験支援船1周回分を表している。プロット時間間隔は10秒であり、監視ブイを中心に時計回りで旋回している。図7(b)は観測データをもとに位相差算出から求めた方位推定結果をプロットしている。こちらも図7(a)同様、10秒間隔でプロットしており、同時刻における推定方位の位置変化を表している。ここで、フィルタ処理のための周波数帯域は3.5kHzから6.5kHzと設定した。これは実験支援船の水中音パワースペクトルが3.5kHzから6.5kHzにおいて他の周波数域よりも大きく現れたためである。この結果より、音源である実験支援船の旋回航行の状況が明らかとなっていることから、本アルゴリズムの有用性を確認できた。なお、位相差を求めるために用いる波形の対象時間範囲や濾過周波数範囲については、監視対象域や船舶によって異なるため、最適な設定については検討を要する。

5. 2 監視ブイ2台による方位観測 海上に離れて設置した2台の監視ブイに搭載した、それぞれ2台の水中マイクロホンを利用することにより、方位算出から交点が求められれば、音源の方位と距離が推定できると考えられる。すなわち、クロスベアリング(交叉方位法)による手法を採用することとした。そこで、1台の監視ブイからの音源の方位推定に関しては、前述のとおり有用性が確認できたことから、2台の監視ブイによる音源の推定位置算出を試みた。ここでは、実験支援船が1、2号機ブイ周辺を航行周回したときの観測データを用いた。GPSロガーによる実験支援船の相対位置(2秒おき)のプロットおよび概ね同時刻における各ブイより得られた音源の推定位置の算出結果例を図8に示す。

各ブイに搭載したCPUモジュールにより記録した水中音データのうち、解析に用いたデータは、実験支援船が2号機ブイを中心に半径約100mで時計回りに1周回したときである。ここで、実験支援船が1号機

図7 位相差観測実験結果

図8 クロスベアリングによる音源位置推定結果

ブイの左(西)側を通過する直前に記録した水中音データの時間を0秒とし、図8(b),(c)にそれぞれ約15秒、120秒後の結果を示している。これらの図より、推定結果の方が船舶位置よりも約10~15秒先行しているものの、これを考慮すれば概ね再現できることがわかった。このことから、本手法は有用であると考えられる。なお時間ずれについては、1、2号機ブイに搭載した各CPUモジュールの記録時刻が少しずれている等の要因が考えられる。この問題については、送信局のCPUモジュール、受信局PCの時刻およびデータ取り込みのタイミングの同期を取ることで解消できると期待する。さらにA/Dボードのサンプリング周波数を現行の32kHzからさらに高く設定できれば、音源の方位の精度を高められると推測する。また本実験では1、2号機ブイ間は100mであったが、監視ブイの最適な設置間距離については検討を要する。

6. まとめ

本報告において明らかとなった点を以下にまとめて列挙する。

- ①海上海中監視ブイの長期運用実験において、航行船舶の接近有無を判別する手法として、水中音のパワースペクトルの相関係数の時間変化を捉える方法を試みたところ、水中音の変化を検出する手法のひとつとして有用であることがわかった。
- ②それぞれの監視ブイにおいて音源の方位が算出できれば、2台の海上海中監視ブイからクロスベリングにより音源の位置を推定する方法は、一手法としてなり得ることがわかった。
- ③本研究開発の目標のひとつであるリアルタイム監視の実現のために、これらの手法は自動推定手法のひとつとして有用であることがわかった。

7. おわりに

本報告では、研究開発中の海上海中監視ブイの実海域における長期運用実験にあたり、監視ブイに搭載した水中マイクロホンによる水中音観測実験について述べた。そこで、リアルタイム監視において航行船舶の接近有無や音源位置を捉えるため、水中音の変化を検出する手法および位相差を利用した水中音源の方位推定手法について検討評価した。その結果、これらのアルゴリズムの有効性を確認できたことから、本研究開発において検討している技術の構築が可能であることがわかった。なお水中音の観測域、対象航行船舶の違

いによる対象周波数範囲の最適な設定など本手法の有用性については検討を要する。さらに複数の音源や背景雑音が存在する場合、目的音抽出のために雑音除去処理手法¹⁰⁾などの導入を検討している。

また本報告では、水中マイクロホン2台による位相差観測を述べたが、監視ブイ1台のみで観測する場合、この手法ではマイクロホンの配列に対して、音源が表裏のどちらに存在するのか判別できない。そこで筆者らは水中マイクロホン3台の三角形配置による音源推定手法を提案している。この配置によって、監視ブイ1台のみでも全方位での音源位置が推定できると考えられる。

本システムは不審船のみならず、密漁船やその他海上交通の監視など広範な他分野への展開が可能である。なお同一船舶における機関回転数や速力などの違いによる周波数特性の変化には未だ検討の余地があり、今後の課題である。

最後に本研究の一部は、海洋政策研究財団((財)シップ・アンド・オーシャン財団)が行う技術開発基金による補助金を受けて実施しており、関係者各位に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば日本航海学会 AIS 研究会, AIS の現状と展望, (平 16-1).
- 2) 海洋政策研究財団, 平成 19 年度技術開発基金による研究開発報告書, 27 (平 20-3), 11-25.
- 3) 海洋政策研究財団, 平成 20 年度技術開発基金による研究開発報告書, 28 (平 21-3), 48-62.
- 4) 今里ほか3名, 日本航海学会論文集, 117(平 19-9), 75-80.
- 5) 今里ほか3名, 日マリ学講, 77 回論集, (平 19-10), 117-118.
- 6) 今里ほか3名, 日本航海学会論文集, 119(平 20-9), 257-262.
- 7) 今里ほか4名, 日マリ学講, 79 回論集, (平 21-9), 105-106.
- 8) 海洋音響学会, 海洋音響の基礎と応用 (平 16), 成山堂書店.
- 9) 電子国土, URL <http://cyberjapan.jp/>.
- 10) 例えば中島ほか3名, 電子情報通信学会技術報告, 100-467,468 (平 12-11), 63-70.
- 11) K. Matsushita et al, ISME 2009, (2009-10).
- 12) Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound (3rd Edition), (1983), McGraw-Hill.