

## 海洋の可視化における観測プラットフォームと音響センサーとの融合に係る提言

笹川平和財団 海洋政策研究所 特別研究員 吉武宣之

### (1) 音響センサーの特徴等

可視光や電波など周波数の高い波動が減衰により遠方まで到達しない海中においては、周波数が比較的低い音波や電磁波は遠方まで伝搬し有用である。特に、音波は海中を数百キロの単位で伝搬することから、長距離通信による海中の移動プラットフォームとの通信が可能であるとともに、広範囲かつ三次元的な海洋の水温や流速の構造計測に活用可能である。

一方、音波は海中において直進はせず、圧力、水温及び塩分の影響により屈曲して伝搬する。近距離伝搬においてはこの影響は少ないが、遠距離伝搬においては顕著に表れる。このため、計測においては音波が観測海域でどのように伝搬するのかを計算により把握することが必要である。さらに、高精度な計算にはパラメータとして海洋における伝搬経路での水温、圧力、塩分の鉛直及び水平方向での実時間計測値が必要であるが、これを把握することは現実的には非常に困難である。音響センサーによる観察は非接触の能動的な観測手法であり、観測対象を直接採取して計測できないことから精度推定が必要である。現在、海洋の可視化において音響センサーは、海底地形探査、地殻構造探査、魚群探査及び海洋音響トモグラフィによる水温及び流速の計測に使用されている。

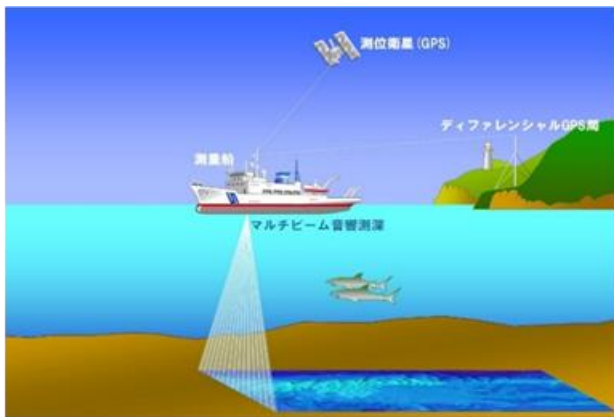


図1 海底地形探査（水路測量）の概念（出展 海上保安庁 HP）

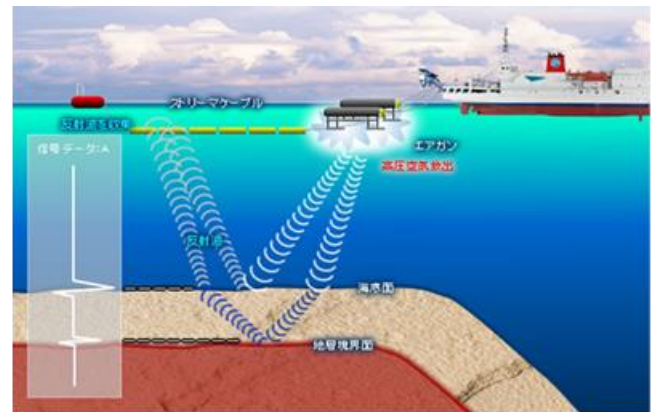


図2 地殻構造探査の概念（出展 日本海事産業株式会社 HP）

海底地形探査で代表的なものは水路測量であり、水路測量は水面下の深さとその位置を知る測量、海岸線の測量、港湾施設及び海上から確認できる目標物の測量などが該当する。近年では、マルチビーム音響測深が一般的であり、これは測量船から海底に向けて広角に鋭い指向性の音波ビームを多数出し、海底の反射エコーを角度ごとに捉えて、音波の往復時間と水中音速度から水深を計測するものである。一度に多数の水深が得ら

れるため、一般には船の航跡に沿って水深の3倍以上の幅で海底地形を明らかにすることができる。また、刻々変わる測量船の位置は測位衛星（GPS）とディファレンシャルGPS局からのデータで精密に決定する。図1に海底地形探査（水路測量）の概念図を示す<sup>1)</sup>。

音波による地殻構造探査は地質構造をイメージングする手法で、地質構造が連続的な断面上の記録として得られ、断層や地層の褶曲などを直観的に把握できる。ストリーマーケーブルとエアガンによる探査法による海底下の地殻構造探査は、海上の船舶から発振された音波の反射を利用して調査する。この方法は、音波が地層の境界で反射したり、音波の伝わる早さが地層の密度の違いで変化したりする事を利用したものであり、石油資源探査の分野で発達した。図2に地殻構造探査の概念図を示す<sup>2)</sup>。

魚群探知機は超音波を受発信する振動子とデータを画像処理する本体及びディスプレイで構成されている。魚群探査機は超音波の反射によって、水中の魚群の存在や量・種類などを分析することができる。超音波振動子から発信された超音波は、水中の魚群や海底で反射され、再び振動子で受信される。魚群探知機では超音波の発信から受信までの往復時間を距離に換算し、深度(深さ)として表示する。図3に魚群探知機の原理図を示す<sup>3)</sup>。

海洋音響トモグラフィは、海洋の中規模渦を面的あるいは3次元的に可視化するための新しい海洋計測法として、1970年代にスクリップス海洋研究所のMunkとMITのWunschにより提唱された。海洋音響トモグラフィは基本的には、海洋中に設置した送受信器間の音波伝搬時間あるいはその変動を測定することと、その測定値からインバーズ手法により送受信器間の海洋の音速構造や流速構造を推定するという二つの部分からなる。対象海域を多数の音波送受信機（音響局）で取り囲み、音響局間で音波を送受信し、音波の伝搬時間を精密計測することにより、対象海域の水温と流速の3次元空間構造を把握できる。図4に海洋音響トモグラフィの概念図を示す<sup>4)</sup>。

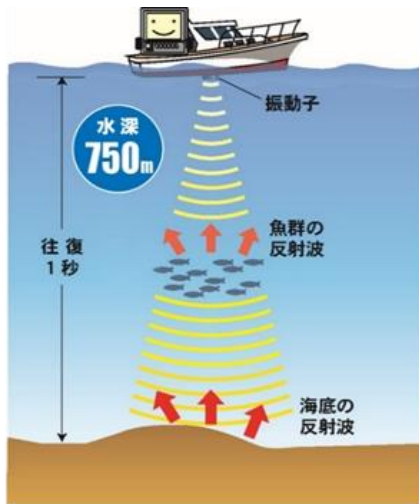


図3 魚群探知機の原理  
(出展 本多電子株式会社 HP)

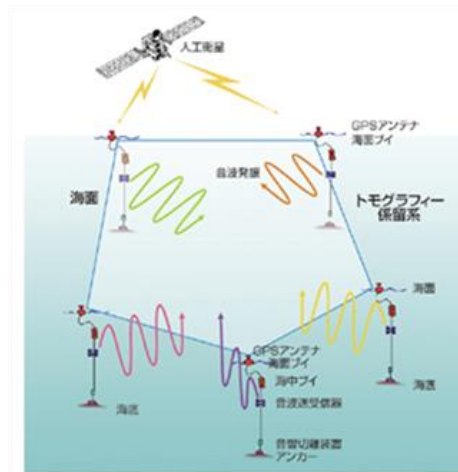


図4 海洋音響トモグラフィの概念  
(出展 Ocean Newsletter)

(2) 音響センサーと観測プラットフォームとの融合に係る提言

海洋観測においては、三次元、長期、連続及び精密な観測の実施が理想である。様々な観測機器を用いて海洋を三次元的に可視化するとき重要なのは、海中における観測機器の位置の特定である。特に、海中においてはGPS信号が使用できないことが大きな問題となっている。そのため、理想的な海洋観測システムを構築するための第一歩としては、定点観測できる海底固定ケーブル観測システム又は海上固定観測ブイなどの固定プラットフォームを観測のベースとした定常的な観測ができるように整備することが望ましい。

ここでは、海洋観測において代表的なセンサーである音響センサーと、①海底固定プラットフォーム、②海上固定プラットフォーム、③移動プラットフォームとしての水中無人機、④沿岸海洋構造物、それぞれとの融合の方法等について提言をする。

① 音響センサーと海底固定プラットフォームとの融合に係る提言

海洋観測において重要な、海中における観測機器の位置特定のために海底固定プラットフォームを活用することを提言する。具体的には、日本の太平洋側の海底に設置されている海底ケーブル式観測システムに音響送波機器を設置し、常時各音響送波機器から設置地点で特有の信号処理をされた音響信号を送信し、これを音響灯台とする。これにより、今後の海洋観測の有力なプラットフォームとなる水中無人機の位置特定精度向上を図ることが期待できる。現在、日本の太平洋側には海底の地殻活動をリアルタイムで観測するための海底ケーブル式観測システムが設置されている<sup>5)</sup>。これらは、国立研究開発法人防災科学技術研究所で実用稼働させている、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net ; Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan

Trench)、地震・津波観測監視システム(DONET ; Dense Ocean floor Network system for Earthquakes and Tsunamis)、相模湾地震観測施設であり、陸上局と海底ケーブルにより接続されている。また、太平洋側の海底地震・津波警報システムにおいて空白地域と言われている海域(高知県沖～日向灘)に、南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)の構築が進められている。これらのシステムには加速度計、地震計、水圧計、津波計、海底地震計などの地殻活動を観測するためのセンサーが備えられている。音響センサーが接続されているものもあるがセンサー数が少なく、現在稼働させている海底ケーブルに音響センサーを付加的に装備し、海中における音響灯台としての機能を付加させることを提言する。

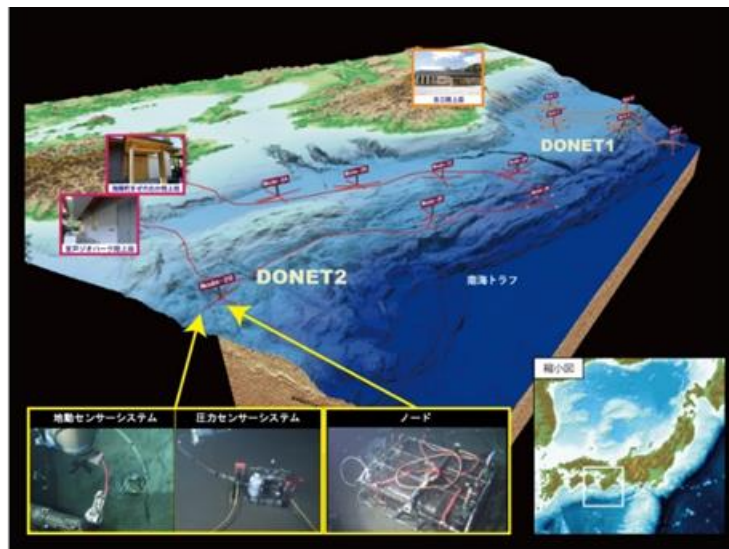


図5 海底ケーブル式観測システム DONET の概要  
(出展 参考文献5))

② 音響センサーと海上固定プラットフォームとの融合に係る提言

海上固定観測ブイは、国土交通省が港湾整備に必要な沖合の波浪を精度良く観測するGPS 波浪計を整備し、沖合波浪観測を実施している。地震発生時には津波の観測も可能であることから、気象庁等関係機関と連携することにより、港湾を含む沿岸域での津波への迅速な対応にも活用できるとしている。これは、ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網 : NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS )と呼ばれており、2019年4月現在、78観測地点に設置されている<sup>6)</sup>。

東京大学地震研究所らが「海洋 GNSS ブイを用いた津波観測の高機能化と海底地殻変動連続観測への挑戦」と題した研究プロジェクトを2016年から進めている<sup>7)</sup>。これは、国土地理院のGEONET(=全国約1,300カ所の電子基準点によるGNSS連続観測網)に匹敵する高精度・高密度・広域の観測ネットワークを、ゆくゆくは日本のEEZ(Exclusive Economic Zone、排他的経済水域)に展開しようという意欲的なチャレンジである。沿

岸に設置した GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム、GPS を含む各種衛星測位システムの総称) 受信機を基準局、観測ブイ上の受信機を移動局とし、両者間で RTK 法 (=測位衛星の信号を基地局と移動局で受信し、センチメートル単位の測位精度を実現する手法) による測位を行い、海面高度の変動を捉える技術を用いことにより、津波観測の高機能化と海底地殻変動の連続観測を行うものである。図 6 に海洋 GNSS ブイ観測システムの概要、図 7 に海洋 GNSS ブイ配置の将来構想を示す。この研究は、データを連続的に取得することにより、海底地殻の動きを連続的に計測することを目指したものであるが、このブイは位置情報が高精度で計測できるとともに、ブイからの情報を衛星を介して常時取得することができるため、音響センサーのみならず各種海洋観測センサーのプラットフォームとして活用させることを提言する。

また、海洋生物に影響を与えることが懸念されている海中騒音の状況については、固定プラットフォーム (海底ケーブル式観測システム及び海上固定観測ブイ) に音響受波機器を設置することにより、海中騒音の常時モニタリングが図れる。さらに、このような固定プラットフォームで魚鳴音のリアルタイム計測を行うことにより、魚群位置の推定や集団の大きさなど、漁業に直結した情報が取得できるものとする。特に、海上固定観測ブイについては、海上のブイから任意の深度に音響受波器機を吊下させる装置を装備することにより、より範囲の広い海中音計測が可能となる。

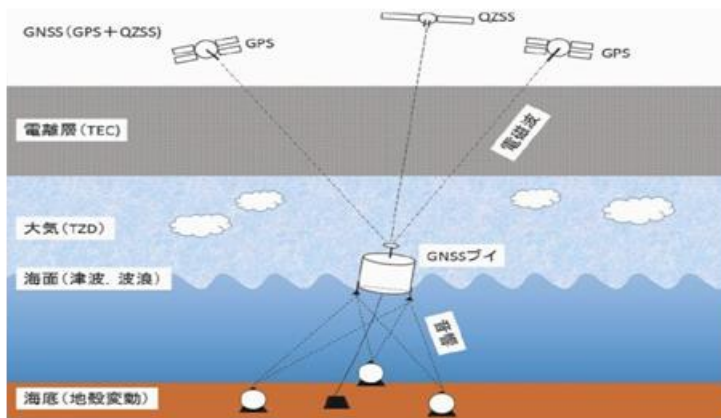


図 6 海洋 GNSS ブイ観測システムの概要  
(出展 気象庁気象研究所 HP)

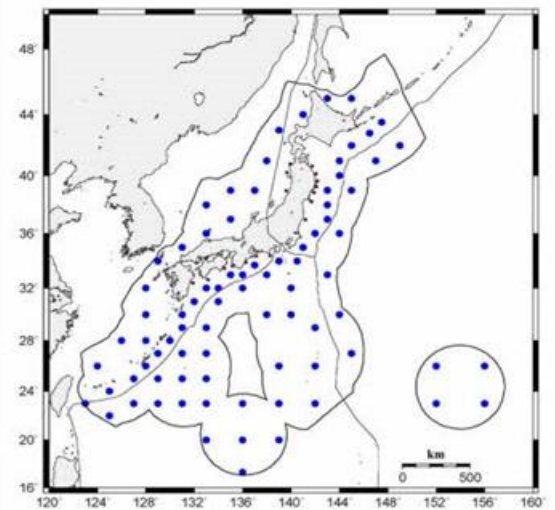


図 7 海洋 GNSS ブイ配置の将来構想  
(青○ : 構想 81 基)  
(出展 気象庁気象研究所 HP)

② 音響センサーと移動プラットフォームとしての水中無人機との融合に係る提言

音響センサーと移動プラットフォームとの融合に関して推進すべき事項としては、今後有効な移動プラットフォームとなり得る自律型の水中無人機の開発を促進させることであるとする。

広大な海洋を効果的かつ効率的に観測するために衛星を活用する方法は優れた手段ではあるが、衛星では海中の情報を直接観測することはできないとともに、衛星による海洋観測の精度維持のためには、併せて海洋観測船等による現場観測が不可欠である。また、海洋観測船、アルゴフロート、ブイ等を用いた海洋観測は、広範囲な観測とリアルタイム性を確保することが困難であることとともに、主として財政面から海洋観測船の更新、調査人員・機材の確保、調査日数の維持などに困難が生じていることもあり、これらの問題を内包しない新たな海洋観測アセットを取り入れる必要がある。

自律型的水中無人機はケーブルによる運動の制限もなく、人の搭乗に必要な設備やスペースが不要であることから、エネルギーの大部分を観測活動に使うことができるメリットがある。自律的に長時間の観測活動ができるため、広大な海洋の観測には適したセンサープラットフォームであるといえる。また、筐体に内蔵した各種センサーにより、海中の特定の水深における水温、塩分、溶存酸素量、二酸化炭素濃度などの観測が連続的に可能であるとともに、筐体内に海水サンプル摂取装置を装備することにより、任意の水深、任意の時間間隔で海水サンプルを摂取し母船に持ち帰ることができる。これらのサンプルを調査することにより海水中の重金属、油分などの汚染物質、その他の化学物質等の観測が可能となると考えられる。これまでは海洋観測船が各種のセンサーを船体から吊下して行っていた各種の観測が人の手を煩わさずにできることになる。これらのセンサーは汎用品を用いることでコストも抑えられる。

今後は、移動プラットフォームとしての水中無人機を、どのように海洋観測プラットフォームとするかの検討が必要である。そのため、始めに海洋の観測において固定観測プラットフォームにできること、できないことを明確に認識し、移動プラットフォームによってどの程度補完ができるのか検討する必要がある。水中無人機は海洋という三次元の現場で実際の物理量を計測でき、サンプルを採取できることから観測プラットフォームとして無限の可能性を秘めていると考える。これを活用するためには、今回実施する海洋観測プラットフォームのレビューを詳細に実施し、水中無人機に付加する観測機能について整理することが必要である。現時点においては、水中無人機と先に示した海底固定プラットフォームに付加した音響灯台を含んだ、海洋観測システムの全体設計の実施を提言する。

### ③ 音響センサーと沿岸海洋構造物との融合に係る提言

沿岸域は音波が海底や海面で反射するため、音波の伝搬損失が激しくなり、遠方へ音波を伝搬させることが困難である。沿岸域特有の問題として、どこでも漁業が盛んに行われていることがあり、接触型計測センサー（ローター型、超音波型、電磁型流速計など）や鉛直分布計測型センサー（ADCP）を海中に多数設置する従来型方式では、広域的計測は困難である。このため、海中を水平方向に比較的長距離伝搬する音波を利用するトモグラフィグラフィーが、漁場において海洋流動場を面的に計測できる唯一の計

測法になる。

これは、港湾施設などの既存の沿岸海洋構造物に音響送受波器を設置し、沿岸音響トモグラフィによる計測を定期的を実施することにより、沿岸域の水温及び流速の常時モニタリングを図るものである。この手法を用いれば、複雑なふるまいをする沿岸域の水温や流速を定期的に計測することが可能である。広島大学では1990年代から、沿岸音響トモグラフィシステムを開発し、瀬戸内海安芸灘猫瀬戸、東京湾、関門海峡、広島湾などの日本各地の沿岸で海洋流動場の可視化に成功している<sup>9)</sup>。

沿岸域の海洋状況を常時観測することは、特に、漁業産業にとって重要である。既存の海洋構造物に付加的に装置を設置し、簡易的な解析装置での実施ができる沿岸音響トモグラフィ計測実施ポイントを充実させることを提言する。

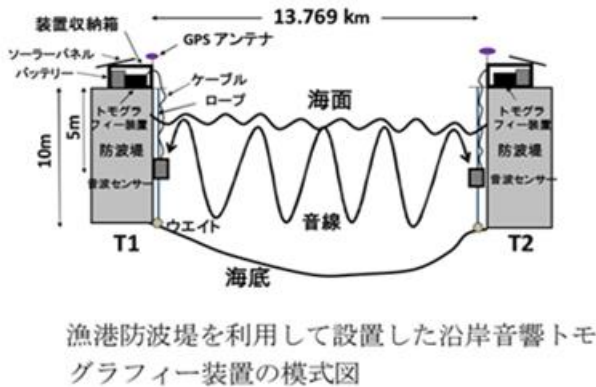


図8 沿岸音響トモグラフィの概要  
(出展 参考文献9))

参考文献

- 1) 海上保安庁 HP  
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/sokuryo/intro.html>
- 2) 日本海事産業株式会社 HP  
[https://www.nmeweb.jp/duties\\_marinesurveys.html](https://www.nmeweb.jp/duties_marinesurveys.html)
- 3) 本多電子株式会社 HP  
<https://www.honda-el.co.jp/marine/gyotankouza.html>
- 4) Ocean Newsletter バックナンバー 第148号 (2006.10.05 発行)
- 5) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所  
<https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>
- 6) 国土交通省 HP  
<https://www.mlit.go.jp/common/001069175.pdf>

7) 気象庁気象研究所 HP

[https://www.mri-jma.go.jp/Topics/H28/280824/Press\\_20160824ERI.html](https://www.mri-jma.go.jp/Topics/H28/280824/Press_20160824ERI.html)

8) 内閣府 HP

<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/juyoukadai/energy/2kai/siryu4-3.pdf>

9) 金子 新、朱 小火華、林 巨 「沿岸音響トモグラフィによる海洋流動場の可視化」 ながれ 33(2014)