

海洋音響トモグラフィを用いた沿岸域での流速計測

埜口英昭* ・伊藤集通** ・田邑 忠***
江田憲彰**** ・金子 新*****

1. はじめに

海洋音響トモグラフィ (Ocean Acoustic Tomography; OAT) は、医療分野で普及している CT Scanner の手法を海洋観測に応用したもので、1970 年代の終わりに Munk と Wunsch によって提唱された。1981 年には米国の OAT グループが大西洋のパーミューダ海域で中規模渦の検出に成功したのをはじめ、1991~92 年には日本の海洋科学技術センターのグループがミンダナオ島東方の北赤道海流域での音響伝播実験に成功し、エル・ニーニョ現象に関連した実験海域の水温上昇を検出する (Yuan, 1995) など、外洋では着々とその成果が得られつつある。ところで、この OAT を沿岸海域での観測手法として実用化できれば、船舶の航行や漁船の操業などに妨げられずに流速や水温の 3 次元分布を長期間連続的にモニタリングできる、沿岸域に最適な計測技術となる。そのために著者らは、沿岸域特有の技術課題を解決するとともに、コンパクトで安価な水中音響送受信システムを試作することを目的とした研究を実施しており、本報告では、試作したシステムによる実海域での双方向音響伝播実験によって得られた流速測定結果について報告する。

2. 流速と水温の推定法

一般に OAT では、複数の音響送受信器を計測対象海域の海中に最適配置し、これらの送受信器相互間で信号の発信・受信を繰り返すことによって、送受信器に囲まれた領域内の流速や水温のマッピングを行う。ここでは、OAT を行うための最小単位である、一対の送受信器による音響伝播実験で得られるデータから音波の伝播経路に沿って平均された流速と水温の推定方法について述べる。今後簡単のために、音波の伝播経路に沿った平均操作を、単に平均と呼ぶ。このような 2 点間の音波の伝播

時間差から流速測定を行う方法は、時間差法と呼ばれよく知られた方法である。今、送受信器が海中設置されている点をそれぞれ A, B と呼ぶことにする。A から B への信号の伝播時間と B から A への信号の伝播時間をそれぞれ $t_{AB}(s)$, $t_{BA}(s)$ とし、信号の伝播距離を $L(m)$ とする時、測点間の平均音速 $c(m/s)$ および平均流速 $u(m/s)$ は次式によってそれぞれ計算することができる。

$$c = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_{AB}} + \frac{1}{t_{BA}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$u = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

平均音速は次のような経験式 (Clay and Medwin, 1977) から算定することができる。

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.005T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016z \dots\dots (3)$$

ここで、式中の S は塩分 (psu), z は深度 (m) である。また、測点間の平均水温 $T(^{\circ}C)$ は、式 (1) を式 (3) の簡略式 $c = 1449.2 + 4.6T$ に代入することによって得られる。

3. 音響伝播実験

3.1 実海域実験

実海域での双方向音響伝播実験は、1994 年 9 月 6 日に広島県の南部に位置する呉市近くの仁方と下蒲刈島に挟まれた猫瀬戸と仁方湾にまたがる海域 (図-1) で行った。この海域の一般的な海況は、半日周潮が卓越している。高杉 (1993) によれば、猫瀬戸の潮流は上げ時に東向き、下げ時に西向きの強いジェット (潮流ジェット) となり、この潮流ジェットによる地形性の循環流が仁方湾内や下蒲刈島の北岸で発生する。そして実験当日は大潮に近く、猫瀬戸の潮流の流速は最大時に 2 ms^{-1} を越えた。このような海況下で、実験は、下げ潮が最大となる時刻から憩流となる時刻の間をねらって約 1 時間おきに合計 3 回実施された。送受信器を設置した測点 A と B は仁方湾の奥と下蒲刈島北岸の入り江に設定され、その水平距離は約 2.3 km であった。1 回の実験では、測点 A から約 0.5 秒間連続した信号を発信し、対岸の測点 B で受信した。そして、10 秒後に測点 B で発信し測点 A で受信した。この

* 正会員 工博 中国工業技術研究所 海洋環境制御部
** 学博 中国工業技術研究所 海洋環境制御部 (科学技術特別研究員)
*** 工修 三洋テクノマリン(株) 研究開発センター
**** 理博 広島大学助教授 工学部共通講座
***** 正会員 工博 広島大学教授 工学部共通講座

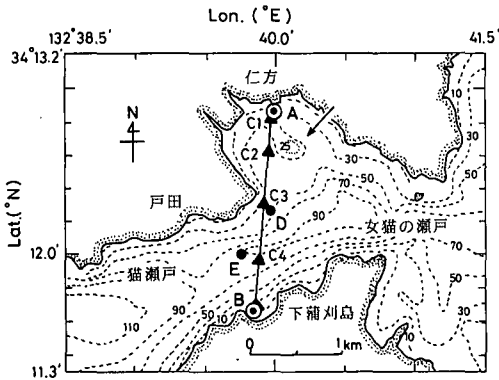


図-1 観測海域と測点

ような送受信プロセスを測点 A, B の各々について 20 秒間隔で約 5 分間行った。

実験用に試作した音響送受信システムの構成図を図-2 に示す。実験システムの制御はノートパソコンで行い、音響信号の送受信器となるトランスミッターとハイドロフォンは、測点 A, B ともに 2 m 深度に船から吊り下げて設置した。本実験では、流速の測定精度として 1 cm/s を選択した。これを達成するためには、測点間の距離が 2.3 km であるならば、約 20 μ s の精度で信号の伝播時間を計測することが必要となる。そこで、本システムでは各々の測点の時計に GPS 衛星から送信されている時刻情報を利用し、両測点のシステムの作動タイミングを 0.1 μ s の精度で同期させた。音響信号としては、搬送波を M 系列と呼ばれる疑似ランダム信号で位相変調した、7 次 M 系列位相変調信号を用いた。その理由は、海中を伝播する信号が周囲雑音に埋没して受信データ上で確認できない場合でも、送信に用いた M 系列位相変調信号との相関をとり S/N 比を飛躍的に改善することで到達時刻を正確に知ることができるからである(大槻ら, 1982)。使用した搬送波の周波数は、測点 A で 7.14 kHz, 測点 B

で 4.54 kHz, 出力音圧は、それぞれ 194 dB, 200 dB (1 m re 1 μ Pa) であった。受信側では、伝播距離を考慮して、対岸の測点で信号を送信した 1450 ms 後から受信動作を開始した。受信波は、1~10 kHz のバンドパスフィルターで処理された後に 10 μ s 間隔でサンプリングされた。

また、この実験と並行し、測点 A, B, C, D の 4 点で海中の周囲雑音強度の測定を、測点 C1~C2 の 5 点で CTD による水温・塩分観測を実施した。さらに、測線 A-B に沿って音響ドップラー流速分布計 (ADCP) による流れ場の観測も行った。

3.2 数値実験

海洋で音響伝播を行う場合、一点の音源から放射された指向性の良くない音波が一点の受信器に到達する経路(音線)は両測点を含む鉛直断面内に多数存在する(多重経路)。個々の音線は、その長さや平均音速が異なり、1 回に送信された同じ信号が数回にわたって受信されることになる。そして 1 つ 1 つの伝播時間データが個々の音線の通ってきた経路の流速や水温情報を含んでいる。これらの情報をもとに流速や水温のマッピングを行うためには、海域実験で得られた伝播時間データと海中の音線を同定する事が必要となる。ところが実際の海中において、音線自身を目視確認あるいは可視化することは不可能である。そこで、幾何光学の手法を適用して音線を描く音線追跡法(Pierce, 1981)を利用した数値実験を行い海中の平均音速プロファイルに対する音線を求めた。計算には、計算条件として実験海域で得られた音速分布、海図から読み取った海底地形を与え、金子(1991)の方法を用いて 10 μ s の時間メッシュで計算した。

4. 実験結果と考察

4.1 周囲雑音

図-3 は、Wenz (1962) によって与えられた外洋域における周囲雑音のスペクトル図上に、本海域実験で得られた周囲雑音の絶対音圧値(図中に矢印で示した)を重ねたものである。この図より、本実験海域では周囲雑音が測定周波数の全域で外洋にくらべ 10~30 dB 高いことがわかる。また、周波数が高くなるほど周囲雑音の音圧レベルが低くなっている。この結果から、今後沿岸域で使用する音響伝播システムを設計する際には、10~100 kHz 程度のできるだけ高い周波数の音波を使用することが有効であることがわかる。さらに、受信装置には送信波の周波数に合わせた狭帯域のバンドパスフィルターを用意することで効率的に S/N 比を向上できるものと考えられる。

4.2 数値実験

数値実験で得られた音線を図-4 に示す。信号の到達

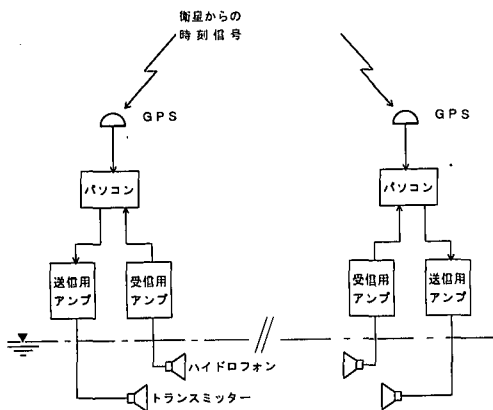


図-2 実験システムの構成図

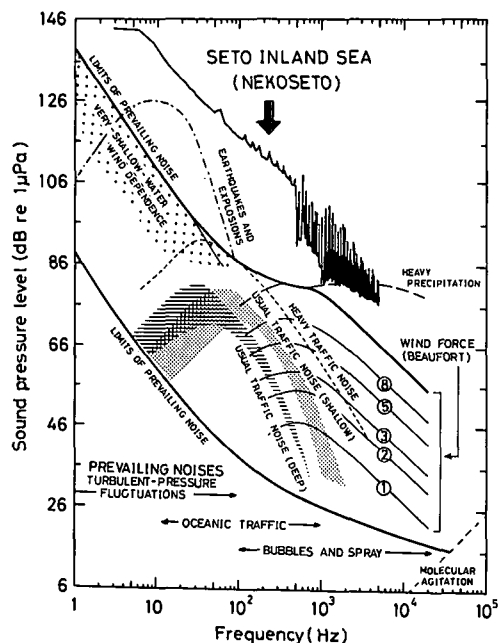


図-3 沿岸と外洋の海中周囲雑音強度の比較

条件として、海面か海底のどちらか、あるいはその両方に1回のみの反射を許した結果、本実験で測点 A-B 間を伝播した信号は、図のような6本の音線を経由していたことがわかった。各音線には到達の早い順に①～⑥の番号を付した。CTD データからみると、実験時には約5 mの深度に音速の極小となる音響チャンネルが形成されていた。これに対して、実際に送受波器を設置した深度が2 mであったため、これらの到達音線の中には、海面にも海底にも反射しない直達波は存在しなかった。最も早く到達する音線①と最も遅く到達する音線⑥の間の伝播時間、音線長の差はそれぞれ $320 \mu\text{s}$ と 0.54 m であった。

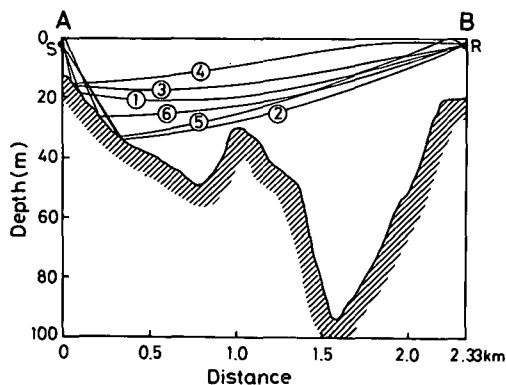


図-4 数値実験で得られた到達音線

4.3 音響伝播実験

本実験で得られた受信データの一例を図-5に示す。上段に示した(a)が測点Aで受信されたものであり(b)が測点Bで受信されたものである。これらの図では横軸が受信動作開始後からの経過時間、縦軸が信号強度である。また、矢印がついている時間位置が、信号の到達時刻である。測点Aでは信号到達時刻から信号強度が大きく変動しはじめ、信号の到達を目視確認することができた。これに対して測点Bでは、周囲雑音による信号強度の変化が全般的に顕著で、信号到達を目視確認することはできなかった。この図では信号到達時刻後に信号強度の変動幅が大きくなっているが、このような変動は、信号到達以前から頻繁にみられていて、また波形も前後に非対称であるため雑音と考えている。これらのデータから信号の到達時刻をより正確に検出するために、受信信号と対岸の測点から送信したM系列位相変調信号との相互相関を施したものを図-6に示す。(a)が測点A、(b)が測点Bに対する結果である。各々の図で横軸は対岸の測点から信号が送信されて1500 msから計ったタイムラグ、縦軸が相関値である。両図ともタイムラグ約20 msあたりからビート状に相関値が大きく変動している。矢印をつけたピーク位置を信号の到達時刻と判定した。このような相関処理によって、S/N比を約340～370倍向上させることができた。図-7(a)～(c)は、4番音線までの信号伝播時間を各実験毎にプロットしたものである。図中の黒い四角が測点Bから測点Aへの伝播時間 t_{BA} 、白抜きの四角が測点Aから測点Bへの伝播時間 t_{AB} である。これら3回の実験で、信号が双方向で伝播できたのは、1番目の到達音線のみであり、それらの伝播時間も数値実験の結果とよく対応していた。2番目以降の到達音線については、これらの到達時刻が1番音線のそれに比べて1 ms以上遅れているため、2番目以降の到達信号は、数値実験で得られたような鉛直断面内の多重音線に対するものではなく、湾内の水平方向境界で反射された音線が到達したものと思われる。このため本報告では、双方向で伝播時間データの存在する1番目の到達音線のみについて扱うこととする。図-8は、1番目の到達時間の平均値をもとに式(2)で計算した平均流速をADCP観測で得た平均流速に対してプロットしたものである。第1回、第2回実験では $\pm 20 \text{ cm/s}$ 程度の差を生じたものの、第3回実験では両者は非常によく一致した。この第1回、第2回実験で両者の測定値に差が生じた原因は、強い潮流のためにADCPを搭載した調査船が猫瀬戸を測線に沿ってまっすぐに横断できなかったためであると考えられる。また、このように猫瀬戸では強い潮流が存在していたにも拘らず、3回の実験を通してOAT、ADCP観測ともに最大で 20 cm/s 程度の流速しか観測

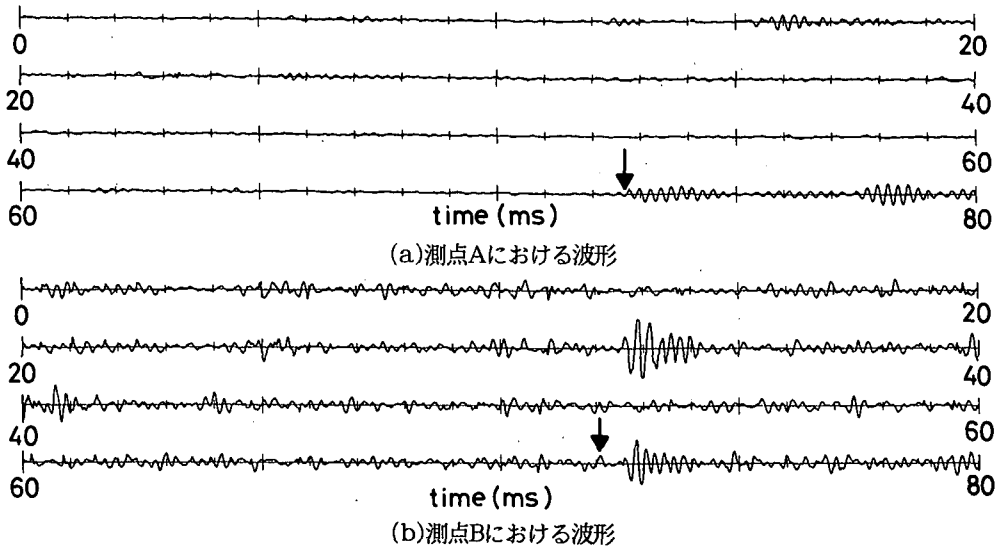


図-5 受信データの一例

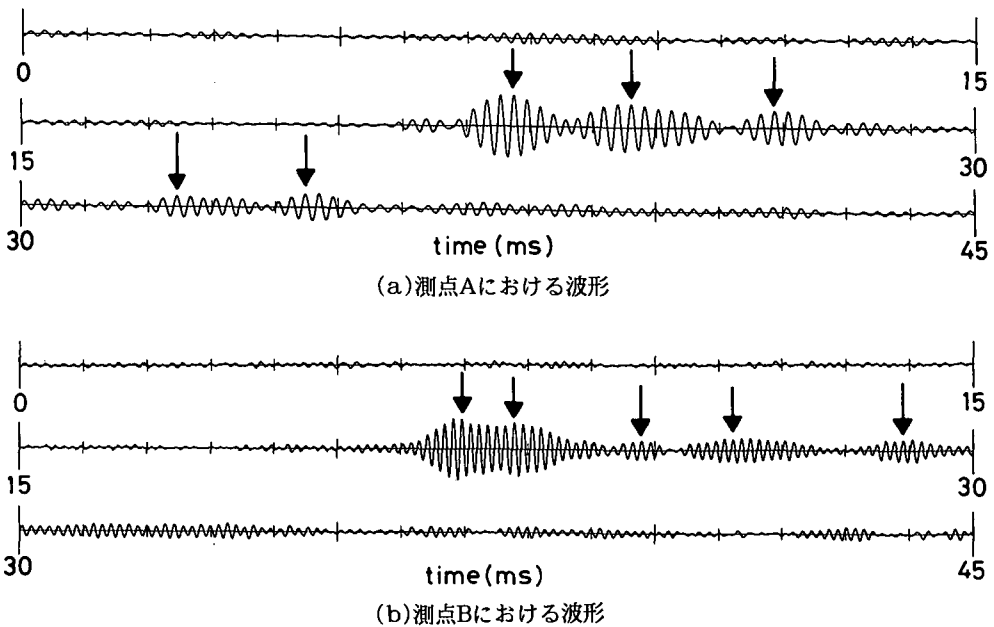


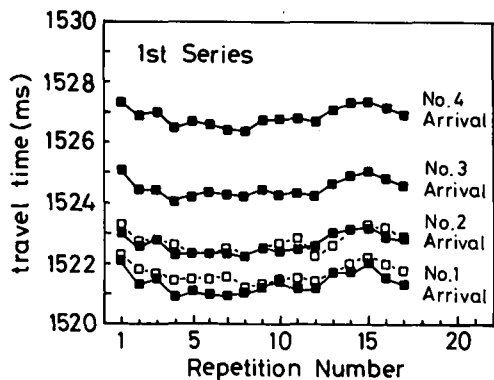
図-6 受信信号と送信したM系列位相変調信号との相関処理後データの一例

しなかったのは、本実験が、Takasugi ら (1994) が報告したような仁方湾内や下蒲刈島の北岸に形成される循環流までを含んだ形で平均流速を測定したことに原因する。

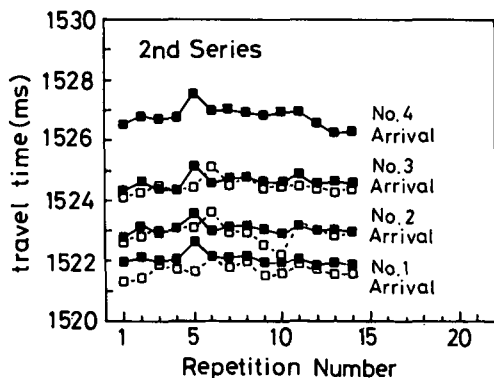
5. おわりに

周囲雑音レベルが外洋に比べて 10~30 dB 程度高い沿岸域において、距離約 2.3 km の双方向音響伝播実験に

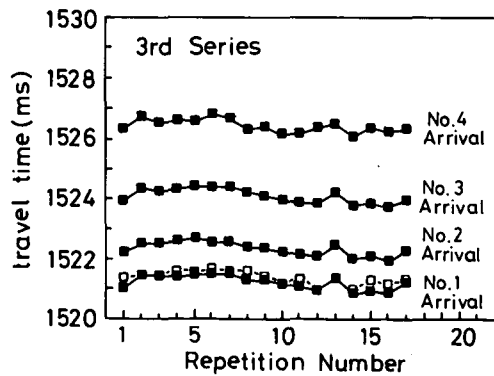
成功した。この実験では、海峡部の兩岸近くに設置した音響送受信システムを GPS からの時刻信号を利用して同期させ、さらに M 系列相関法を用いた信号処理法で S/N 比を飛躍的に向上させることで、信号の伝播時間を $10 \mu s$ の精度で計測できた。このときの到達音線は、音線追跡法を用いた数値実験結果を考慮して同定した。双方向伝播時間データを用いて求めた平均流速値は ADCP 観測で得られたそれとよく一致した。現在、より高度な



(a) 第1回観測



(b) 第2回観測



(c) 第3回観測

図-7 3回の海域実験で得た各音線の伝播時間

クロック・コントロールと信号処理法を用いたシステムにより長距離の双方向音響伝播実験を計画している。最終的には、音響送受信器を対象海域に空間的に配置した

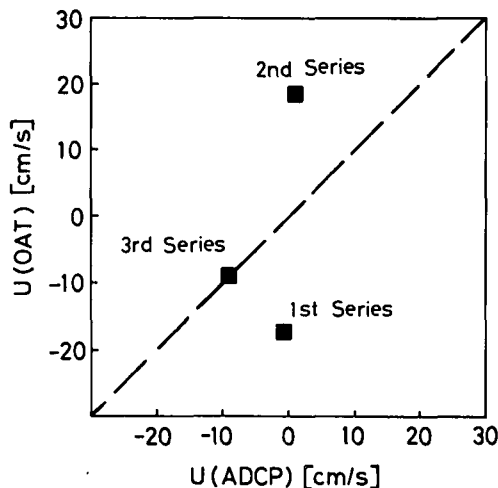


図-8 双方向音響伝播実験で得られた平均流速と ADCP 観測で得られた平均流速の比較

3次元トモグラフィシステムの完成をめざしている。

本研究を行うに当たり、ADCPを用いた海域実験に多大なるご協力を頂きました中国工業技術研究所の高杉由夫博士に深く感謝致します。

参考文献

- 大槻茂雄, 奥島基良 (1982): 海中における超音波伝播状況観測のための M 系列 2 周期信号法, 日本音響学会誌, 50 巻, pp. 619-623.
- 金子 新 (1991): 東シナ海陸棚縁部における黒潮の音響トモグラフィシステムの数値シミュレーション, 昭和 64, 平成 2 年度文部省科学研究費研究成果報告書, 69 p.
- 高杉由夫 (1993): 海峡およびその周辺域における潮流の微細流動構造と懸濁物質輸送機能, 中国工業技術試験所研究報告, 127 p.
- Pierce, A. D. (1981): Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, McGraw-Hill, 642 p.
- Takasugi, Y., A. Hoshika, H. Noguchi and T. Tanimoto (1994): The role of tidal vortices in material transport around straits, J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 65-80.
- Yuan, G., I. Nakano, H. Fujimori and A. Kaneko (1995): Long-term measurement of temperature variabilities off Mindanao Island by the ocean acoustic tomography, J. Oceanogr., Vol. 51, pp. 327-339.
- Wenz, G. M. (1962): Acoustic ambient noise in the ocean, spectra and source, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 34, pp. 1936-1956.