

1. はじめに

世界の気候に大きな影響を与える「エルニーニョ」に代表されるように、海洋変動は私たちの生活にとって非常に重要である。1960年代に発見された海洋の中規模現象・中規模渦(空間スケール 数 100km) は海洋の運動エネルギーの多くを担っていることが知られているが、その全体像の把握は不十分であり、長期連続的に観測することが望まれている。

2. 海洋音響トモグラフィー

海洋内部の状況を連続的に計測する手法として、広い海域の周囲に多数の音波送受信器を配置し、その間を伝搬する音波の伝搬時間から海洋構造の空間時間変化を求める海洋音響トモグラフィー (OAT) が提案され、いくつかのシステムにより計測が進められている^{1,2)}。図1に海洋音響トモグラフィーの概念図を示す。

この図は海域を上から見たものである。海域周囲に音波の送受信システムを配置し、システム間に伝搬する音波を観測する。音波の伝搬時間は、海洋の音速と流れに依存する。さらに、海洋の音速は、水温、塩分、深度に依存する。塩分による効果は小さく、深度の効果は予測できるので、結果として音波の伝搬時間の測定は海中の温度と流速を測定することとなる。

海中の音速は、深度方向にも構造をもっている。圧力が一定であれば温度が高いほど音速は大きい。温度が一定であれば圧力が高いほど音速は大きい。海水の温度は表層から下層に向かって低下し、一方、圧力は増加する。これら二つの効果で、音速鉛直分布は深度方向に音速極小層を持つことになる。中緯度地方では、水深1000m付近で音速が最小となり、海底深度が数千mの海域では、この音速最小となる深度を中心として音波が屈折しながら遠距離まで安定に伝搬するため、海中の音波伝搬は広域観測に適した性質をもっている。図2に一組の送受信器間を伝搬する音波伝搬経路の一例を示す。

3. 広域海洋計測の現状

1980年代前半の米国を中心とする海洋音響トモグラフィー実証実験をきっかけに、日本でも本格的な研究が開始された。海洋音響学会では系統的な調査研究が行われ、1986年にトモグラフィー部会報告³⁾が、さらに、水路部、東工大奥島・蜂屋らの相模湾 5km・25km 音波伝搬

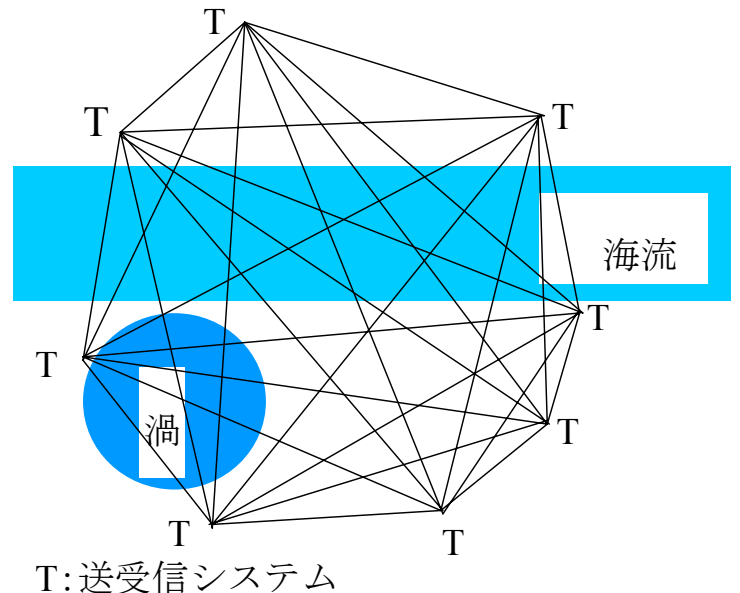


図1 海洋音響トモグラフィーの配置

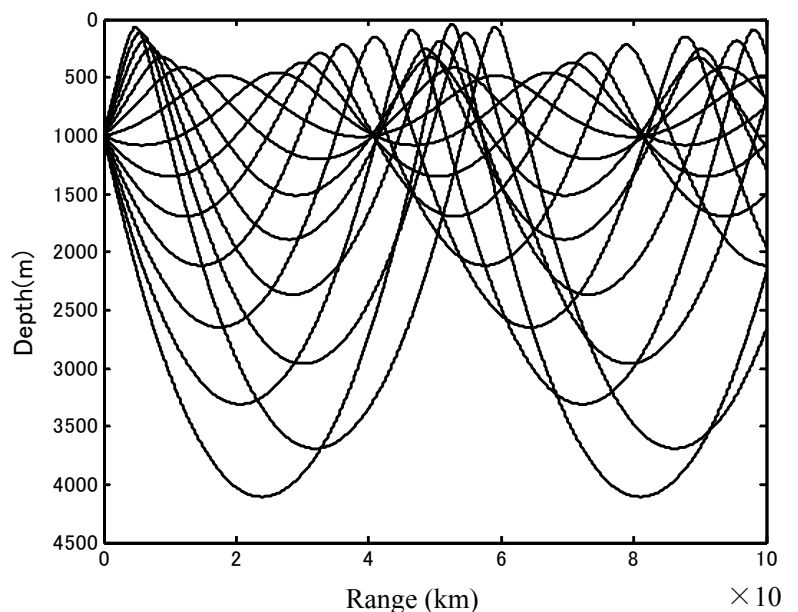


図2 海中の音波伝搬

実験⁴⁵⁾、気象庁佐伯らによる 108km 伊豆小笠原海域音波伝搬実験などが行われた。その後、海洋科学技術センター（現 独立行政法人海洋研究開発機構：JAMSTEC）中埜らにより赤道域、黒潮続流域、中部太平洋などで長期にわたる本格的な研究開発を行われ、大きな成果を上げた⁶⁻⁹⁾。また、広島大学の金子らのグループは、沿岸海洋の潮流場変動を計測するために、沿岸域において海底、海面で反射・散乱する海中音波を用いた沿岸音響トモグラフィ（CAT）の開発を 1993 年から始め、1999 年 3 月に瀬戸内海猫瀬戸で、短時間の内に発生・成長・消滅を繰り返す潮流渦の水平二次元分布計測に成功している¹⁰⁾。

4. 音波による広域海洋観測の特徴と海底ケーブル

一組の送受波器に音波の伝搬時間 T は、温度による音速 c と流れによる音速変化 v の二つの効果により決定する。流れによる双方向の経路変化がわずかだとし、鉛直方向の経路変化を無視して経路長を L と直線的に考えると、流れにそって伝搬する音波伝搬時間 T_1 は $T_1 = L/(c+v)$ 、流れに逆らって伝搬する音波伝搬時間 T_2 は $T_2 = L/(c-v)$ と表現できる。流速が音速にくらべ小さいとすれば、伝搬時間の和 $(T_1 + T_2)/2$ によって音速成分が、伝搬時間の差 $(T_1 - T_2)/2$ によって流速成分が求められる。実際には、測定データに加え、海洋モデルを組み合わせて逆問題を解く計算機パワーが必要であり、データをリアルタイムに伝送することが望まれる。

流速構造までを求めようとすれば、双方向に伝搬した音波の伝搬時間データが必要となる。現在の観測システムでは、海中に係留した測器を用いるため、リアルタイム計測のためには、データ転送が問題となる。現在のシステムは、送波されたコード化信号を受波した後、測器内で相関処理を行い、パルスを送波したのと同様の信号に変換した後、信号ピークから伝搬時間を決定し、やりとりするべきデータ量を削減している。しかし、図 3 に示すように、最近の我々の研究によれば、ほぼ同時に伝搬路の両側から送波された音波でも、数 100km の伝搬距離があると受波された波形は、類似の構造をもっているものの、大きく異なることがあり、精密な伝搬時間計測のためには、波形全体の情報を用いることが重要である。このように精密で確度の高いデータを得るためには、観測された大量のデータを有効に活用することが重要であり、現在のような独立した係留系システムでは、リアルタイム計測に大きな問題がある。海底ケーブル網の利用はこの問題を解決し、画期的な進展をもたらす可能性がある。

5. まとめ

海洋の広域観測において、高精度計測には波形情報すべてを用いた処理が必要である。流速分布測定には経路の両側のデータを同時に評価する必要があり、リアルタイム計測には高速で容量のある伝送路が必要不可欠である。

文献

- 1) W. H. Munk and C. Wunsch: Deep Sea Res. 26 (1979) 123.
- 2) B. Cornuelle, C. Wunsch, D. Behringer, T. Birdsall, M. Brown, R. Heinmiller, R. Knox, K. Metzger, W. Munk, J. Spiesberger, R. Spindel, D. Webb and P. Worcester: J. Phys. Oceanogr. 15 (1985) 133.
- 3) 海洋音響学会, "トモグラフィ部会報告書", (1986).
- 4) H. Hachiya, S. Ohtsuki and M. Okujima: Proc. 7th Symp. Ultrasonic Electronics, Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) Suppl. 26-1, p.73.
- 5) H. Hachiya, S. Ohtsuki and M. Okujima: J. Marine Acoust. Soc. Jpn. 17 (1990) 106 [in Japanese].
- 6) T. Nakamura, I. Nakano and I. Kaihou: Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) 3172.
- 7) T. Nakamura, T. Kanaizumi, H. Fujimori, I. Nakano and K. Metzger: Jpn. J. Appl. Phys. 39(2000) 3193.
- 8) H. Hachiya, T. Nakamura and I. Nakano: Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 3366.
- 9) Y. Wang, H. Hachiya, T. Nakamura and I. Nakano: Jpn. J. Appl. Phys. 41(2002) 3525
- 10) Yamaoka, H., A. Kaneko, et. al.: IEEE J. Oceanic Eng., 27(2), 283-295, 2002.

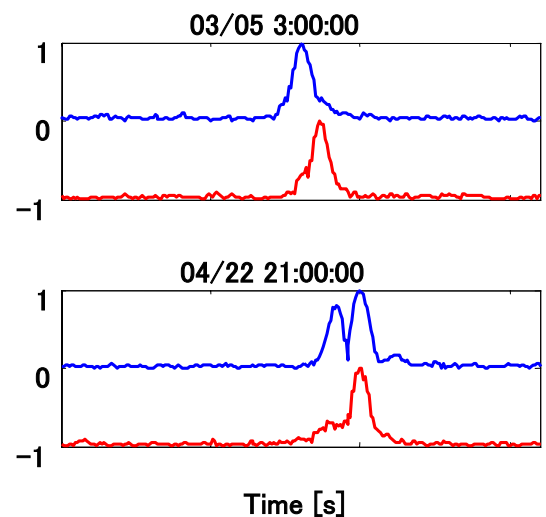


図 3 双方向音波伝搬波形の例
 上図：双方向の伝搬波形がよく一致している例
 下図：波形構造が双方向で異なる例