■ 研究

浅海域における双方向音波伝搬実験

蜂屋 弘之, 山口 匡 (千葉大・工) *¹

office@hachiya.net

2005年6月6日受付

Abstract :

Development of coastal acoustic tomography is carried out as a long term measurement technique to get shallow water information. Since sound is propagated with reflection at sea bed and sea surface, it is important to estimate characteristics of sound propagation in shallow water. In this paper, we investigated the characteristic of the propagating sound wave using data of a reciprocal acoustic transmission experiment in Uchiura Bay. Direct wave was used to estimate travel time and amplitude variation. We estimated water temperature with high accuracy and observed that an amplitude fluctuation happened with a rapid change of travel time. We got basic acoustic characteristics of reciprocal transmission signals that are useful for temperature and current measurements in shallow water.

分 類：海洋構造・トモグラフィ

キーワード：浅海域, 双方向伝搬, 海底・海面反射波, 海洋音響トモグラフィ

1. はじめに

海洋は地球の表面積の約7割を占め、その変動はさまざまな影響を与えることから海洋のセンシングを行うことが望まれている。特に沿岸域や湾のような浅海域の海洋情報は海洋物理学・漁業・環境保全などの面で需要が多く、浅海域を長期連続的に観測する浅海域海洋音響トモグラフィの開発が行われている。これは観測海域に送受波器を設置し、双方向に伝搬する音波の伝搬時間変動を観測することによって、海域の流速と温度の変動の空間分布を把握するものである。

これらの流速と温度の音波による計測については、1960年代後半¹⁾からの奥島、大槻らの一連の

研究がある。M系列を利用するドブラ流速計の開発²⁻³⁾、河川における音波伝搬特性の解明から双方向パルス伝搬音波の伝搬時間差を用いた河川用流速計の開発^{4, 10)}、さらにはM系列信号による海域の平均流速の測定法、計測例⁵⁻⁹⁾などがある。この計測例⁷⁻⁸⁾では、双方向伝搬音波全体のパターンの相互相関を基本としており、トモグラフィ的な経路ごとの空間情報の計測についての検討は不十分である。われわれは、深海域で提案された海洋音響トモグラフィ¹¹⁾を黒潮海域¹²⁾や浅海域¹³⁻¹⁶⁾に適用するための検討を進めてきた。浅海域における音響トモグラフィでは、深海域と異なり海底や海面の影響を受けながら音波が伝搬することが多く、海底や海面で

Reciprocal Acoustic Transmission Experiment in Shallow Water

* 1 Hiroyuki HACHIYA and Tadashi YAMAGUCHI (Chiba University)

の反射波の特徴や水面、海底などの境界が接近した直接波の特性を把握することが重要である。われわれは、相模湾での海底海面反射波の音波伝搬特性¹⁴⁾から、海底反射波が安定に計測できることを示し¹⁵⁾、海面反射波についても実験室内での観測結果¹⁶⁾からライス分布¹⁷⁾による解析などを進め、高精度な測定法¹⁸⁾などについても検討してきた。また、近年、金子らは、深度の浅い沿岸域で展開される沿岸域音響トモグラフィ (Coastal Acoustic Tomography : CAT) を提案し¹⁹⁾、開発したシステムを実海域に展開し、CATの実証実験に成功している²⁰⁾。

これらの計測において、求められた結果の評価や、精度の向上のためには、伝搬音波の特性を把握することが必要不可欠である。しかし、これまで、浅海域において双方向の音響データを長期連続的に観測し、検討した例は少ない²¹⁾。本論文では2004年11月11日～18日に三津湾沿岸で、音波伝搬特性の実海域での状況解明と、音速、流速を連続計測するために行われた双方向音波伝搬実験の概要について述べ、伝搬特性と計測結果の基礎検討結果について述べる。

2. 計測システム

浅海域において音響トモグラフィを高精度に行うためには、海底や海面の影響を受けやすい浅海域での伝搬音波の振幅・位相変動を把握することが重要である。伝搬音波の特徴を把握するために、2004年11月11日～18日に沼津市三津の内浦湾(駿河湾)で双方向音波伝搬実験を行った。実験海域は深度30 m程度の浅海域で、送受波器(沖ST-1002)を海岸と海上の計測バージ((株)オキシテック SEATEC II)直下の海底に設置して、10秒毎に送波と受波を交互に行った。送受波器はほぼ無指向性である。Fig. 1に計測海域の断面図を示す。海岸から海上のバージまでの距離は約350 m、送受波器の深度は、岸側(T_L)が約5 m、海(バージ)側(T_S)が約30 mである。送受波器は金属フレームを用いて固定し、海底に着底させて設置しているので、実験中の送受波器の位置変動はほとんどないと考えられる。

Fig. 2に実験で使用した計測システムの概要を示す。海側、岸側の時刻はGPSにより $\pm 0.67 \mu\text{s}$ (標準偏差:実測値)の精度で同期がとられている。両側のシステムでは10秒毎に送波と受波が交互に切り替えられる。この結果、両側での受波動作は20秒ごとに行われ、海側ではH時M分10秒、30秒、50秒(H, Mはそれぞれ任意の時と分)に、岸側ではH時M分0秒、20秒、40秒に受波データが記録される。記録は11/11午後から11/18午前まで連続的に行われた。

計測機器はGP-IBを介してPCで制御されている。送波側ではGPSからの時刻パルスにより、信号発生器からコード化された信号を発生させ、パワーアンプで増幅して送波を行う。利用した送波信号は、中心周波数31.25 kHz(周期32 μs)の7次のM系列信号である¹⁵⁾。M系列は、0または1の2値をとる周期的な擬似不規則系列の一つである。 n 段のシフト・レジスタと排他的論理和によって周期 $N = 2^n - 1$ の n 次M系列が容易に発生できる。系列中の0また

Fig. 1 Water depth between transducers.

Fig. 2 Measurement System.

は1の1 digitに周波数31.25 kHzの正弦波を2波($32\ \mu\text{s} \times 2$)含ませる。7次M系列の系列長は127で、これを4回繰り返し4周期のM系列信号とする。1周期の信号長は、 $8.128\ \text{ms}$ ($64\ \mu\text{s} \times 127$)、4周期全体の信号長は $32.512\ \text{ms}$ ($8.128\ \text{ms} \times 4$)である。受波側では、受波した音波をプリアンプ、フィルタを通過させた後、デジタルオシロスコープによって取り込み、PCに転送する。デジタルオシロスコープはサンプリング周波数250 kHz (サンプリング周期 $4\ \mu\text{s}$)でデータをサンプリングし記録する。記録長は10 kワードである。両側のデジタルオシロスコープのサンプリングクロックの同期はとられておらず、GPSの同期精度はこの周期よりも小さいので、両者の間の時刻同期精度はデジタルオシロスコープのサンプリング周期 $4\ \mu\text{s}$ に制限される。実験時における気象データとして、付近の観測施設による潮位、降水量、日照率、波高、風力のデータを収集した。潮位は内浦湾、降水量、風力、日照率は三島、波高は原で計測されたデータを利用した。また、実験と同時に海側のバージ上で気温、表面水温、深度15 mの水温を計測した。水温は深度方向への分布も考えられるので、複数の深度で温度を計測し比較することも興味深い。今回の実験では、観測点の深度の半分の位置での計測値を、深度方向の代表的な値と考え利用した。

3. 計測データの概要

Fig. 3は収集した実験時の気象情報のグラフである。上から順に (a) 気温、(b) 日照率、(c) 降水量、(d) 風速である。このグラフより11/12午前0時頃に降雨があり、11/14, 15は曇り、11/13は晴れだが風が強く、11/16, 17は晴れて最高気温と最低気温の差が大きいことがわかる。**Fig. 4**には (a) 波高、(b) 周辺海域の潮位、(c) 海上のバージ直下水深15 mの水温を示す。11/12は波高が高く、11/16午前0時頃やや波高が高い。他の日はおだやかな海面状況である。潮位は深夜0時付近を中心に大きな変動がある。夕刻から午前0時にかけて水温が低下することがあり、11/17は特に大きな温度低下(約 $3\ ^\circ\text{C}$)が

Fig. 3 Weather data in the measurement.

Fig. 4 Sea condition in the measurement.

ある。全体として11/12から11/18にかけて、徐々に平均的な水温は低下している。

Fig. 5 (a)に11/17 02:00:10に海側で受波された

データを示し、Fig. 5 (b)にこのデータをM系列送波パターンを用いて相関処理を行った結果を示す。x軸は音波の伝搬時間であり、振幅は最大値で規格化してある。相関処理を行うことでSN比が向上し、4周期のパルスを送波したのと同等の結果となっている。Fig. 5 (b)中で「1, 1'」と示した信号が1周期目の送波信号が伝搬した信号で、「1'」は海底海面に複数回反射した信号で、2周期目の直接波が含まれる「2」より遅れて到着している。「2, 2'」が2周期目、「3, 3'」が3周期目、「4」が4周期目の受波信号である。信号「4」はデジタルオシロスコープの記録長の関係から記録されていない。今後の解析には相関処理後のデータを利用する。4周期分の受波があるが、1周期目と4周期目にはM系列の打ち切りによる効果が含まれ、また、記録長の制限から、信号の最後が完全に記録されていないため、ここでは、240 ms付近から始まる2周期目のデータを解析に用いる。2周期目の信号を用いるが、今後の図の時間軸は、1周期の信号長である8.128 msを用い、送受波器間を伝搬する伝搬時間となるように補正し表示する。受波信号のピーク構造をみると、送受波器間を海底、海面に反射せずに直接伝搬する音波（直接波）が最

Fig. 5 Received and correlated signal at 2004/11/17 02:00:10.

初に到着している。その他に、海面反射波、海底海面反射波、さらに岸壁からの反射波などが観測されているが、本論文では直接波のみを扱う。

4. 海域の伝搬時間変動

2004年11月11日から18日までの間、10秒毎に交互に送波を行ったので、海側・岸側それぞれで20秒毎にデータが取得されている。計測期間に海側で取得したデータを相関処理した後に、復調処理し求めた振幅値を連続的に並べた結果を、Fig. 6に示す。横軸は伝搬時間、縦軸は計測日時で、振幅が大きいほど黒くなるように濃淡表示している。

矢印で示した最初に到着する音波は送受波器間を海底、海面に反射せずに直接伝搬する直接波である。この直接波の伝搬時間をみると、一日の中で定期的に伝搬時間が大きくなっている時間帯が見ら

Fig. 6 Correlated signal from 2004/11/12 to 11/18.

れる。最も大きな変化は15:00頃から深夜0:00頃にかけてであり、これは、測定海域の伝搬経路上で水温の低下があり、音波の伝搬速度が小さくなり、音波伝搬時間が大きくなったためと考えられる。

流速が音速に比べ十分に小さく、また、鉛直方向の音速分布変化も小さいとすれば、流速の影響を除いた送受波器間の平均音速 c は、陸側から海側への伝搬時間 t_1 と海側から陸側への伝搬時間 t_2 から

$$c = D / ((t_1 + t_2) / 2) \quad (1)$$

で求められる。ここで D は送受波器間距離で、経路が屈折する効果なども距離が短いので無視している。伝搬時間を直接波の振幅最大となる位置で求め、得られた伝搬時間 t_1 , t_2 から経路上の平均温度を求めた。海底の送受波器の位置は正確に測定していないので、求められた温度データと温度計による計測結果の平均的な傾向がもっとも合致するように距離 D を調整した。温度計、音響的計測とも絶対的な温度の値の精度検討はできないが、相対的な比較や相対的な変動の検討は可能である。式(1)で求められる音速 c から、温度への変換にはMackenzieの式(1981)²⁰⁾を用いた。塩分濃度は35‰、深度15 mとして、塩分、深度の変化による影響のない形で求めた。送受波器間距離 D は354.15 mとした。

Fig. 4で示した水深15 mの水温計測値と、音波伝搬時間から求めた平均温度の関係をFig. 7に示す。横軸は計測日時、縦軸は水温である。破線が海側の水深15 mの水温測定値、実線が音波による海域の平均水温評価値である。伝搬時間から求めた温度データをみると、平均水温は11/11から11/18にかけて1.5℃ほど低下している。また、1日の中での変動もあり、11/17には2.5℃ほどの温度低下がある。温度の大きな減少は、午後3時頃から始まっている。天候が悪く、風速、波高が高く、海水の混合が大きかったと思われる11/12は、水温の変化が小さいことから、昼間暖められた海表面が冷却されることで、夕刻から深夜にかけて伝搬経路上に温度の低い水塊が形成される可能性

Fig. 7 Temperature using a thermometer and the acoustical method.

が考えられるが、現時点で詳細は不明である。また、潮位変動の大きな午前0時頃にも温度の変化があり、この変化は潮汐の影響の可能性がある。

今回のデータ解析では、直接波ピーク位置の追跡は振幅値のみを用いて追跡したが、結果は安定であるので、評価時の誤差としては、ピーク位置評価が雑音などの影響で1サンプリングクロックずれる場合の4 μ s以下と考えられる。計測全体の伝搬時間評価精度 $|\delta t|$ として、考えられる要素の和を考えるとすれば、この4 μ sに加え、データ収集時の両側のデジタルオシロスコープのサンプリングクロックのずれによる誤差として4 μ s、両側のGPSクロックのずれ2 μ sとすると、 $|\delta t|$ は10 μ sとなる。音速の相対的变化の評価精度 $|\delta c|$ は、式(1)を利用し、温度22℃、深度15 mの音速、1527.1 m/sを基準音速 c_0 とすると、

$$|\delta c| = c_0^2 \times |\delta t| / D = 0.066 \text{ m/s} \quad (2)$$

であり、温度精度に換算すると0.025℃である。また、観測された温度の最大変動速度の絶対値は約0.025℃/分であった。われわれが、提案している信号位相も含めた復調信号の複素平面上での情報を用いれば、さらに精度を上げることが可能と考えられる。

矢印で示した、11/13, 14, 15, 16のようにバージ直

下15 mの水温計では捕えられない変化を、音波の伝搬時間変化による平均水温値は安定に計測しており、音波による広域観測が非常に有効であり、海洋変動の詳細な観測が可能であることがわかる。

5. 海洋変動と直接波の伝搬特性

Fig. 8に2004/11/17の2周期目の直接波の振幅値が最大となる時間位置を追跡し、その最大値位置か

Fig. 8 Travel time and amplitude of direct ray at 2004/11/17.

ら求めた音波伝搬時間とその時の直接波の最大振幅値の関係を示す。15:00から23:00頃の水温の低下による伝搬時間変化時に、直接波の振幅値も通常よりも大きく揺らいでいるように見える。これを定量的に評価するため、10分間(30データ)の振幅の平均値 A_{avr} と標準偏差 A_{std} から、10分間の変動の評価値 A_{std} / A_{avr} を求めた。**Fig. 9**に伝搬時間(**Fig. 9 (b)**)と振幅変動の評価値 A_{std} / A_{avr} (**Fig. 9 (a)**)を示す。両者の間には強い相関があり、伝搬時間が急速に変化している時間帯で、振幅変動も大きくなっていることがわかる。瞬間的なピーク値を除けば、変動の評価値 A_{std} / A_{avr} の最大は0.3程度である。

この状況を11/17の波形で示したのが**Fig. 10**である。2時間ごとに10分間の振幅データ(30データ)を重ねて表示している。波形の振幅ピークが各図の中央やや左に位置するように、伝搬時間を示す横軸の表示範囲を調整した。

図から、11/17 02:00のように振幅変動が小さいときは、波形形状も大きくは変化せず、ピーク位置も安定である。0:00, 16:00, 18:00, 20:00のように振幅変動が大きいときは、ピーク位置も前後に移動しており、波形形状も相似的な変化ではなく、複数の経路からの信号が干渉したように大きな変化が観測される。このように、海水構造が大きく変化するときには伝搬時間だけでなく、伝搬波面の揺らぎにより、

Fig. 9 Amplitude variation and travel time of direct ray from 11/11 to 11/18.

Fig. 10 Signal amplitude of direct ray at 2004/11/17.

音波の伝搬強度にも影響を与えるだけでなく、波形構造も変化するので、時間評価には注意が必要ながわかる。

Farmerらは流れの影響により流れに直交する方向に伝搬する音波到達位置がゆらぐことを指摘し、そこから流速を評価するAcoustic Scintillation法を開発している²³⁾。基本的な現象は類似しているが、浅海域トモグラフィにおいて、比較的短距離の直接波伝搬でもこのような変化を示すことはあまり議論されておらず、今後もデータの蓄積が必要である。

7. まとめ

2004年11月11日～18日に沼津市三津の内浦湾で行われた双方向音波伝搬実験の実験システムの概要と基礎検討結果について述べた。水温の点観測では捉えることができなかった広域での水温変化が0.025℃の精度で検出された。海底海面に反射せず比較的安定と考えられている直接波でも、

0.025℃/分程度の急速な海洋変動に伴い、振幅値に揺らぎが生じることが観測され、浅海域での音波による海洋構造計測のための貴重なデータが収集できたと思われる。今後、収集したデータについて、振幅情報のみでなく、振幅位相情報を総合した復調複素信号として詳細に検討する予定である。

謝辞

伝搬実験のデータを収集してくれた横山直広君(現東洋ビジネスエンジニアリング)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 奥島基良, 大槻茂雄, "超音波ドプラ流速計に関する研究," 超音波研究会資料, US69-38, 1-12 (1969).
- 2) 大槻茂雄, 奥島基良, "M系列変調超音波ドプラ速度計," 日本音響学会誌, **29**(6), 347-355 (1973).

- 3) 大槻茂雄, 奥島基良, "2重M系列法とM系列パルス法による超音波ドプラ速度計," 日本音響学会誌, **31**(11), 684-690 (1975).
- 4) 奥島基良, 寺本俊彦, 木下武雄, 宮沢久, "河川用超音波流速計," 信学技報, **76**(243), US76-63, 15-26 (1976).
- 5) 奥島基良, 大槻茂雄, "海中伝搬超音波のM系列離散相関法による計測 - 海流計測用超音波流速計の研究 -, " 信学技報, **79**(230), US79-51, 33-39 (1979).
- 6) 奥島基良, 大槻茂雄, 佐藤高根, "水中超音波M系列相関法による広域平均流速計測の試み," 信学技報, **81**(12), US81-4, 21-27 (1981).
- 7) M. Okujima and S. Ohtsuki, "Observation of underwater ultrasound propagation in the sea by two-period M-sequence signal method," Proc. 1st Symp. Ultrasonics Electronics, Tokyo, 1980, Jpn. J. Appl. Phys., 20 Suppl. 20-3, 237-239 (1981).
- 8) M. Okujima and S. Ohtsuki, "A Signal Processing for Realization of Ultrasonic Observation System of Sea Flow over a Long Distance," Proc. 2nd Symp. Ultrasonics Electronics, Tokyo, 1981, Jpn. J. Appl. Phys., 21 Suppl. 21-3, 161-163 (1982).
- 9) 大槻茂雄, 奥島基良, "海中における超音波伝搬状況観測のためのM系列2周期信号法," 日本音響学会誌, **38**(10), 619-623 (1982).
- 10) 奥島基良, "河川海洋における流速測定," 日本音響学会誌, **38**(8), 495-500 (1982).
- 11) W. H. Munk and C. Wunsch, "Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring," Deep Sea Res., **26A**, 123-161 (1979).
- 12) 蜂屋 弘之, 大槻 茂雄, 奥島 基良, "水平伝搬音波の伝搬時間計測による黒潮海域の音速鉛直分布の推定法," 日本音響学会誌, **44**(5), 377-381 (1988).
- 13) H. Hachiya, S. Ohtsuki and M. Okujima, "An Estimation Method of Vertical Sound Speed Profile in Mid-Deep Water Using Multipath Propagation," Proc. 7th Symp. Ultrasonics Electronics, Kyoto, 1986, Jpn. J. Appl. Phys., 26, Suppl. 26-1 73-75 (1987).
- 14) 蜂屋弘之, 大槻茂雄, 奥島基良, "相模湾における多経路伝搬音波の伝搬損失と変動の評価," 海洋音響学会誌, **17**(1), 29-36 (1990).
- 15) 蜂屋弘之, 大槻茂雄, 奥島基良, "M系列信号音波を用いた中浅海域の多経路伝搬音波の観測," 海洋音響学会誌, **17**(2), 106-113 (1990).
- 16) 蜂屋弘之, 奥島基良, "海面反射波の変動特性の実験的検討," 海洋音響学会誌, **26**(3), 48-53 (1999).
- 17) T. K. Stanton and C. S. Clay, "Sonar Echo Statistics as a Remote-Sensing Tool: Volume and seafloor," IEEE, OE-11(1), 79-96 (1986).
- 18) Y. Wang, H. Hachiya, T. Nakamura, and H. Fujimori, "Estimation of the Travel Time Using the New Measurement Technique for Long-range Transmission," Jpn. J. Appl. Phys., **43**(5B), 3169-3175 (2004).
- 19) 金子新, "浅海域海洋音響トモグラフィ," 海洋音響学会誌, **29**(3), 124-134 (2002).
- 20) H. Yamaoka, A. Kaneko, J-H. Park, H. Zheng, N. Gohda, T. Takano, X-H. Zhu and Y. Takasugi, "Coastal acoustic tomography system and its field application," IEEE J. Oceanic Eng., **27**(2), 283-295 (2002).
- 21) 谷本健一, 蜂屋弘之, "浅海域における海底・海面反射波の伝搬特性の検討," 信学技報, US2002-109, 77-82 (2003).
- 22) K. V. Mackenzie, "Nine term equation for sound speed in ocean," J. Acoust. Soc. Am., **70**, 807-812 (1981).
- 23) D. M. Farmer, S. F. Clifford and J. A. Verrall, "Scintillation structure of a turbulent tidal flow," J. Geophys. Res., **92**(C5), 5369-5382 (1987).