

— 論文 —

2007年7月18, 19日, 及び2010年1月29, 30日の  
三陸沖海洋上層構造からみた海中音波伝搬\*

鈴木美幸†・遠峰菊郎†\*\*・小笠原英子†

要旨

三陸沖海洋上層構造と海中音波伝搬の関係を調べるため、2007年7月18, 19日と2010年1月29, 30日の海洋上層構造と海中の音波伝搬の様子を解析した。2007年7月の場合、沿岸域には津軽暖流水が幅広く分布することに加え、沖側にも暖水が存在し、さらに海面付近では高温となったうえ、親潮水がこれらの暖水塊の下層に分布する構造となっている。そのため、音源が親潮水の深度付近にある場合は、サウンドチャンネルに音波がトラップされ暖水が分布する層や海面付近でシャドーゾーンが形成された。また、津軽暖流水でも沿岸30m深の海水温は比較的低温で、ここに音源を設置すると周囲のより高水温の津軽暖流水や海面付近ではシャドーゾーンとなる。2010年1月の場合、親潮水が広く分布し、表層の一部では沿岸親潮水が分布しており、海面付近で表層ダクトが形成されていた。

キーワード：三陸沖、海水温分布、音波伝搬

1. はじめに

海中で物体を探索する際に用いられる音波は、温度、塩分、圧力に依存する音速分布によってその伝搬経路が決定されるため、海水の性質に大きく影響される。そのため、ソーナーなどで物体探索を行う際は、海洋構造の情報が必要である。日本の三陸沖海域の上層では、津軽暖流、黒潮、親潮、沿岸親潮を起源とする海水が季節・経年変動をとめないながら、互いに混合しつつ、複雑に

分布しているため、音波伝搬環境も複雑になっていると考えられる。

津軽海峡から流出する津軽暖流は春季に最小、秋季に最大となる流量の季節変化を示す。これにともなって夏季および秋季（以下暖候期とよぶ）には海峡の東または南東沖に暖水渦を形成し、冬季および春季（以下寒候期とよぶ）には本州沿岸に沿って流れる傾向にある（Conlon, 1982；杉本・川崎, 1984）。沿岸親潮はオホーツク海の海水を起源とする低塩分低密度水で、晩冬から初夏にかけて道東沿岸から津軽海峡東沖に流入する（Kono *et al.*, 2004）。津軽暖流の流域にあたる三陸沖では、沿岸定線観測データを用いてT-S図上のモードで海水を分類し、400m以浅において分類された海水の分布が解析されている（Hanawa and Mitsudera, 1987）。彼らによれば、この海域では、沿岸親潮水は春季においてごく表層を覆うのみで、津軽暖流水をはじめ、親潮水、

\* 2011年3月29日受理；2011年12月26日受理  
著作権：日本海洋学会，2012

† 防衛大学校地球海洋学科  
〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20

\*\* 連絡著者：遠峰 菊郎  
TEL: 046-841-3810 ext.2241 FAX 046-844-5902  
e-mail: tomine@nda.ac.jp

黒潮水が頻度高く分布している。とりわけ津軽暖流水は 300 m 以浅に限られるものの、春～秋季において最も広く断面を占める。一方、津軽暖流域とその周辺の観測結果から、暖候期に津軽暖流水の下層では 1,000 m まで達する下に凸の形状をもつ渦の構造が、寒候期には津軽暖流水が沿岸域に限られるとともに低密度表層水に覆われる構造が、それぞれ示されている (島ら, 2001)。さらに、水塊分布だけでなく、津軽暖流水の冷却や黒潮や暖水塊の北上にともなう黒潮水と親潮水の混合による水塊の変質なども示唆されている (永田ら, 2001)。

現在、水塊分布と音波伝搬に関しては、3-D 音波伝搬解析の有用性についての研究などがある (Tsuchiya *et al.*, 1999; Okuyama *et al.*, 2000)。彼らによれば、直径数十 km 以上の大きさを有している暖水塊では、中心での音速変化が暖水塊の周りと比べて  $10 \text{ ms}^{-1}$  程度以内なら水平面内における音波の屈折に対する影響は少ない。ここで津軽暖流水の水平スケールは、渦を形成する場合と岸沿いを南下する場合ではそれぞれ 100 km 及び、数 10 km であるが、水平方向の音速差は  $30 \text{ ms}^{-1}$  程度あり、この水平スケールが音波の伝搬する方向に直交する長さで見做せる場合は音波伝搬に影響を与える可能性がある。したがって、海洋構造が複雑で季節変化をする津軽暖流水の分布する三陸沖では、パッシブソーナーによる物体探査にあたって、水塊構造とその季節変化を考慮することが必要となる。

そこで本研究では三陸沖海域において、パッシブソーナーによる物体探査のターゲットの探査可能範囲の同定を目指し、海上自衛隊対潜資料隊の保有する比較的密な海洋観測データを用いて、より小さなスケールの海洋上層構造とその季節変化が音波伝搬に与える影響について解析した。対象海域での音波伝搬特性を調べるために、解析にあたっては夏季と冬季の海洋観測データを数値モデルに適用した。その際、音速は Mackenzie (1981) の式を用いて求め、海洋における音速プロファイルをもとに音波伝搬経路と伝搬損失を求めた (Jensen *et al.*, 1994)。

## 2. 使用データと解析方法

### 2.1 使用データ

海上自衛隊対潜資料隊による観測結果のうち、青森県尻屋崎付近の  $141^{\circ}40'E$  から  $146^{\circ}00'E$  まで、 $41^{\circ}25'N$  の東西に延びた観測線 (Fig. 1) 上で、2007 年 7 月 18, 19 日、及び 2010 年 1 月 29, 30 日に収集した水温塩分データを用いた。観測には XCTD (鶴見精機製、XCTD-1) が用いられ、その温度精度は  $\pm 0.02^{\circ}C$  であり、電気伝導度精度は  $\pm 0.03 \text{ mS/cm}$  である。これは、塩分測定精度にしておよそ  $\pm 0.05$  に相当する。観測地点の間隔は、鉛直方向に 1 m 毎、東西方向に約  $16'$  ( $\approx 22.5 \text{ km}$ ) 毎であった。

### 2.2 解析方法

2007 年 7 月、及び 2010 年 1 月の三陸沖の海洋上層構造を把握するため、気象庁 100 m 海水温平面図を用いて、解析期間の暖水塊の水平分布を調べるとともに、水

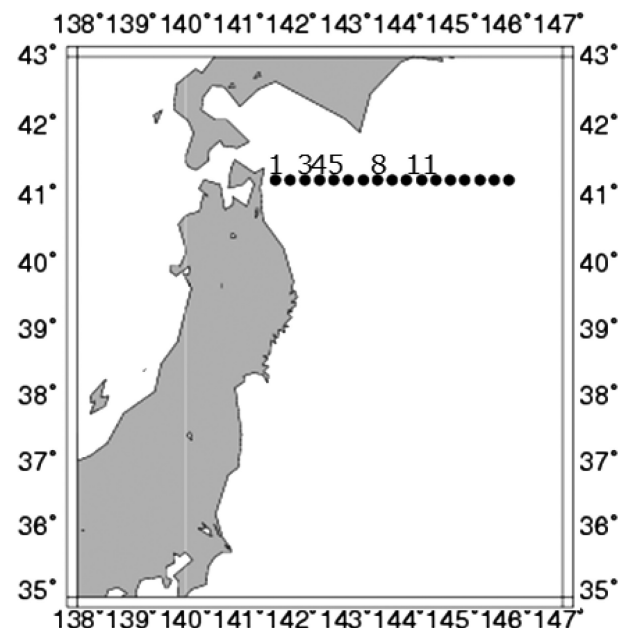


Fig. 1. Locations of XCTD stations. Numerals denote the station numbers.

**Table 1.** Parameters for the model to analyze the sound propagation and the transmission loss.

	Sound ray diagram	Transmission loss
Beam number	20	100
Elevation angle	$-25^{\circ} \sim 25^{\circ}$	$-89^{\circ} \sim 89^{\circ}$
Sound speed profile	A 20'th order polynomial approximation is used to require the sound speed profile. Plot intervals for the approximation are 10 m and 100 m over and below 500 m depth, respectively.	
Boundary conditions	No substance is assumed over the sea surface. At 0 m depth, longitudinal sound speed depends on the sound speed profile, speed of transverse sound wave is $0.0 \text{ ms}^{-1}$ , water density is $1.0 \text{ g cm}^{-3}$ , dissipation rate of the longitudinal sound wave is $0.0 \text{ dB/wavelength}$ , and dissipation rate of transverse sound wave is neglected. At the bottom of the sea, longitudinal sound speed is $1550 \text{ ms}^{-1}$ , speed of transverse sound wave is $0.0 \text{ ms}^{-1}$ , water density is $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ , dissipation rate of the longitudinal sound wave is $0.5 \text{ dB/wavelength}$ , and dissipation rate of transverse sound wave is neglected.	

温塩分の鉛直断面図を用いて水塊構造を明らかにした。さらに観測結果による T-S 関係から、Hanawa and Mitsudera (1987) にしたがって、水塊分類も行った。また、各測点の水温塩分データから断面上の音速分布を見積もった後、Bellhop プログラム (Jensen *et al.*, 1994) を適用して、特定の音源から発射された音波の伝搬経路を解析し、伝搬損失を計算した。音速分布の見積もり際には、Mackenzie (1981) の式を用いて各測点ごとに水温、塩分、水深から音速を計算した。計算された音速の鉛直分布に対し、多項式近似を用いて平滑化し最大観測水深から海底までを外挿した後、水平方向に内挿した。Bellhop プログラムとは、音線理論に基づいて距離依存 (Range-dependent) 海域中で音波伝搬を解析するためのソフトウェアであり、Ocean Acoustics Library の Acoustic Toolbox (<http://oalib.hlsresearch.com/>) の中に収録されている。

このプログラムを実行する際に音線計算においては、結果を分かりやすく表示するために、伝搬損失より音線を少なくし、仰角範囲を小さくした (Table 1)。海面における境界条件としては、海面上は真空とし、縦波音速は音速分布に従い、流体中の音波は縦波なので横波音速は  $0 \text{ ms}^{-1}$  を設定した。海底面における境界条件としては、縦波音速は  $1550 \text{ ms}^{-1}$ 、横波音速は  $0 \text{ ms}^{-1}$  を設定した。音源位置は鉛直断面上の津軽暖水が分布する  $141^{\circ} 40' \text{ E}$  (St. 1) の沿岸域のほか、7 月には  $143^{\circ} 30' \text{ E}$  (St. 8) の暖水塊の分布域、1 月には  $142^{\circ} 29' \text{ E}$  (St. 4) の沿岸親潮水の分布域とした。音源深度は津軽暖水塊や沿岸親潮

が分布する 30 m と津軽暖水塊直下の 400 m に設定し、異なる音源深度、位置を設定することにより海洋上層の水塊構造が音波の伝搬経路および損失に与える影響を調べた。

このプログラムによる音波伝搬の解析結果は、対象とする音波の周波数に依存する。また、このプログラムの計算スキームの基本原則となる音線理論はサウンドチャンネル内における回折現象を表現することが不可能であるが、海洋のように一般的に音速の水平傾度が小さい場合は、回折現象は問題とならない。船舶航行雑音の周波数範囲は 50~500 Hz であり、本研究では回折現象の効果が小さく音線理論を適用可能な 500 Hz の音波を対象としてその伝搬特性を調べた。 $-120 \text{ dB}$  以上の損失は検知範囲外として除外し、このような伝搬損失を伴う音線は表記しないものとした。なお、海洋音響トモグラフィへの応用を考えた場合は、複数経路を通る音波の時間差を利用して媒質の音速分布を測定する目的で伝搬時間の解析を用いるが、本研究の将来の目的は、ソナーによる物体探査のターゲットの探査可能範囲の同定を目指しているため、伝搬時間の解析は特に必要としなかった。

### 3. 結果

#### 3.1 2007 年 7 月中旬の水塊構造と音響特性

2007 年 7 月中旬の暖水塊の水平分布を調べるため、気象庁ホームページの『海洋の健康診断表 海洋のデー

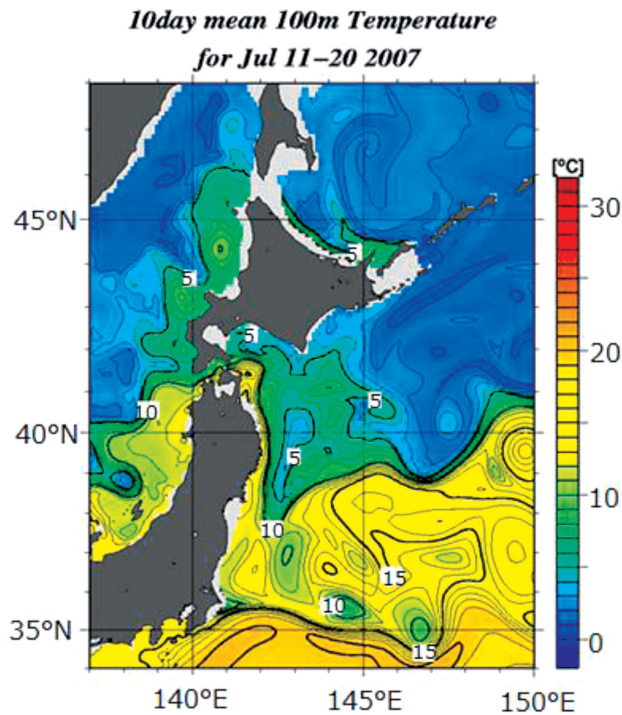


Fig. 2. 10 day mean 100 m temperature map in Mid-July, 2007 after Japan Meteorological Agency.

タバンク』に公開されている北海道周辺・日本東方海域旬平均表層水温図，水深 100 m 水温図を引用した。Fig. 2 は，2007 年 7 月中旬の水深 100 m における海水温分布図である。津軽海峡東部の 41°N から 42°N をみれば，水温 5°C を示す等値線は 143°E から 144°30'E の間を北向きに拡がり，水温 10°C を示す等値線は海峡東側出口で東向きに円弧状に拡がっており，それぞれ南からの暖水および津軽暖流水の影響が示唆された。

2007 年 7 月 17, 18 日に 41°25'N に沿った観測点 (Fig. 1) で観測された，水深 1,000 m までの水温と塩分の鉛直断面図を Fig. 3 a, b に示す。これらの断面図から，二か所で高温高塩分の暖水塊を示唆する下に凸の構造がみられる。西側の暖水塊は，141°40'E から 142°30'E まで，海面から水深約 220 m までの範囲にあり，142°15'E 付近に水温 15°C 以上のコアがあった。また，東側は 143°E から 145°E まで，海面から水深 200 m 付近までを占めており，その幅は約 200 km に及んでいた。これらの暖水塊の位置は，前述のように Fig. 2 において津軽海峡東側の水温 5°C と水温 10°C の等値線によって

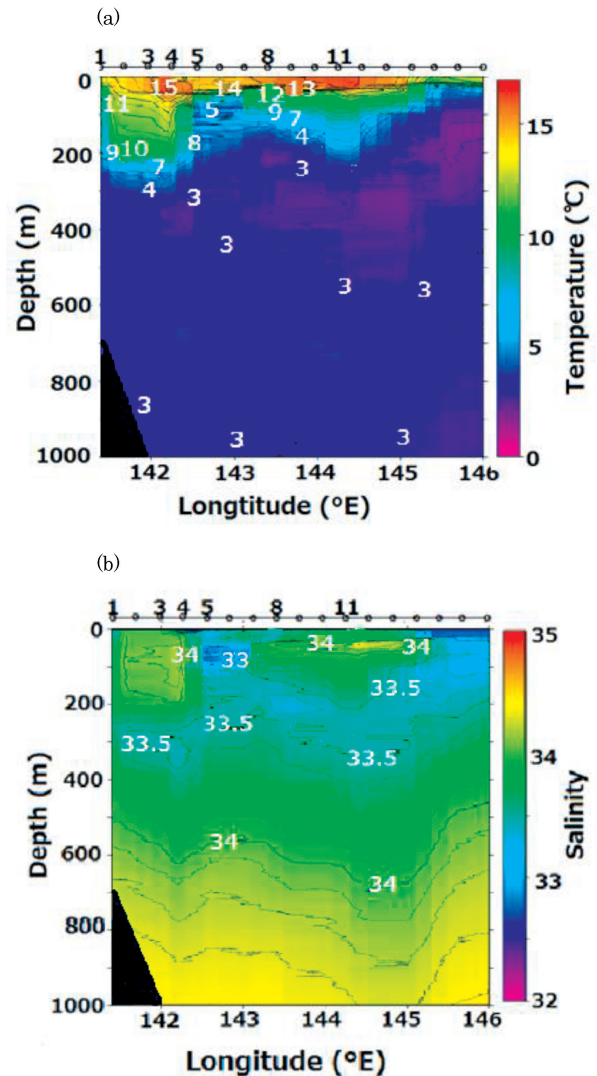


Fig. 3. Cross sections of (a) water temperature (°C), and, (b) salinity on 18 and 19 in July, 2007. Numerals over the figures are observational station numbers. The shaded triangle area on the lower left side of the figure represents bottom of the sea.

示された津軽暖流水および北上暖水とほぼ一致する。

最も沿岸にある St. 1 とその東側で暖水コアが分布する St. 11 における T-S 関係をそれぞれ示し (Figs. 4 a, b), Hanawa and Mitsudera (1987) に基づいて水塊を分類した。津軽暖流水が分布すると考えられる St. 1 の T-S 関係をみると，200 m 深の下層にプロットの不連続があり，躍層の存在がうかがえる。水塊分類によれば，この躍層から上の層は津軽暖流水と分類でき，

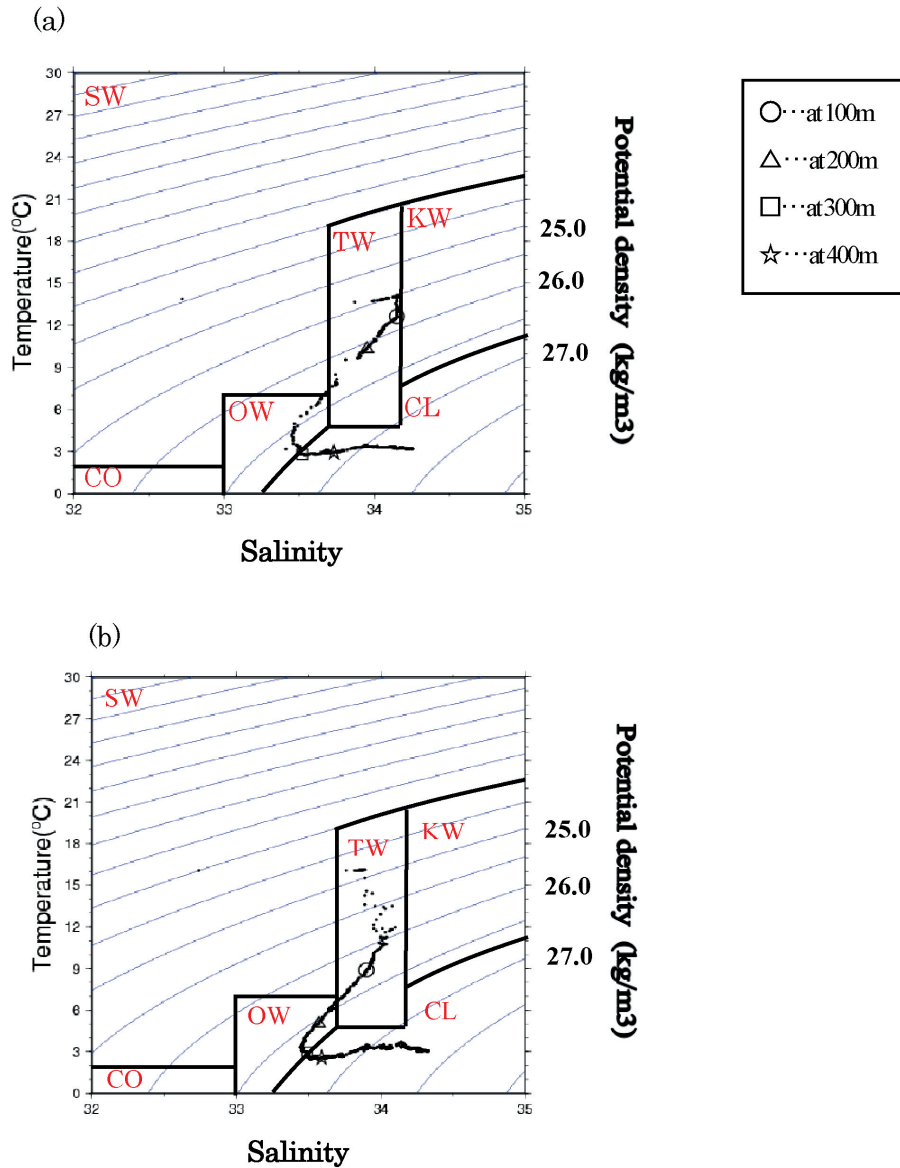


Fig. 4. T-S scatter diagrams at  $141^{\circ}40'E$  (St. 1) (a) and  $144^{\circ}23'E$  (St. 11) (b) on 18 and 19 July, 2007 with the water system classification based on Hanawa and Mitsudera (1987). The symbols of circle, triangle, square, and star show the observed depths of 100 m, 200 m, 300 m, and 400 m, respectively. The water systems classified are the warm current water system (TW), the Oyashio water system (OW), the Kuroshio water system (KW), the cold lower-water system (CL), the surface-layer water system (SW), and the Coastal Oyashio water system (CO).

前述の 100 m 深水温分布および断面分布の解析結果と一致する。しかし、St. 11 の T-S 関係を見ると、100 m 深を中心とした表層は津軽暖流水と分類できるものの、100 m 深水温図 (Fig. 2) をみればこの暖水は津軽海峡から連続しておらず、黒潮を起源としている北上暖水で

ある可能性が高い。これは、Hanawa and Mitsudera も指摘していたように、水温塩分だけでは起源の特定は困難であることを示す例といえる。これら暖水の表層に注目すれば、St. 1 では水温が一樣で塩分が海面に向けて減少し密度の変化は大きくないのに対し、St. 11 では

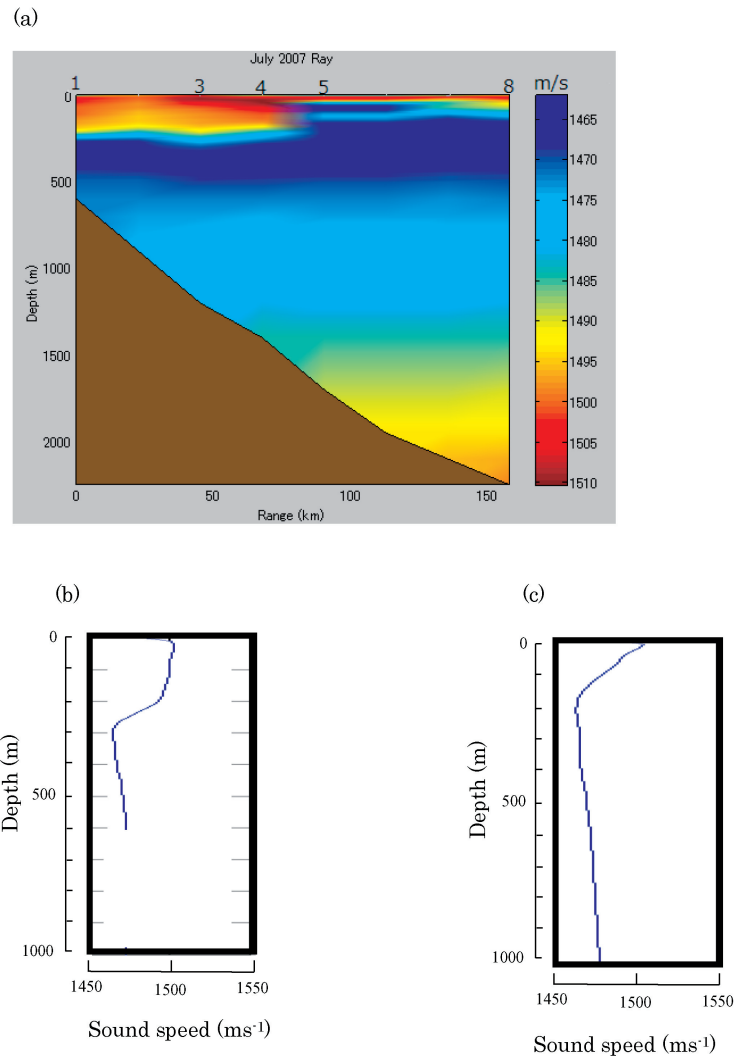
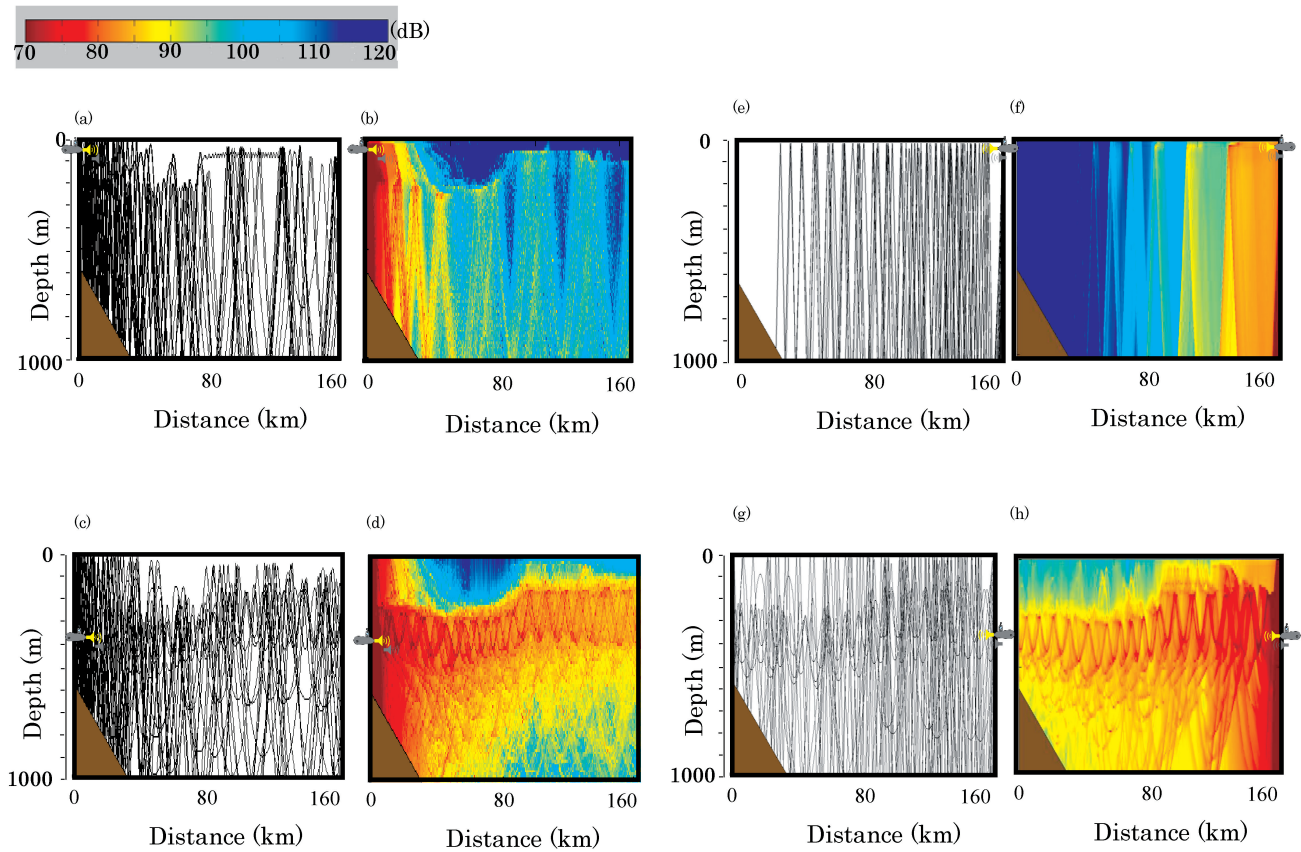


Fig. 5. (a) A cross section of sound speed on July 18 and 19, 2007 and sound profiles at (b) St. 1 ( $141^{\circ}40'E$ ) and (c) St. 8 ( $143^{\circ}30'E$ ). Numerals on the top of the cross section denote the observation station number.

水温が海面に向けて大きく増加し密度の減少も顕著であった。また、両暖水の下層にはいずれも親潮水と下層冷水が層重していることが示唆された。

同海域における音波伝搬の状況を調べるため、 $41^{\circ}25'N$ に沿った観測結果のうち、 $141^{\circ}40'E$  (St. 1) から  $143^{\circ}34'E$  (St. 8 近傍) までの 160 km にわたる水温、塩分、および深度を Mackenzie (1981) の式に適用して音速分布の鉛直断面図を作成した (Fig. 5)。海面付近の音速は  $1,510 \text{ ms}^{-1}$  ほどで最も大きく、津軽暖流水の分布する付近も比較的音速が大きい。一方で、St. 1 において水深 250~300 m で分布している親潮水 (Fig. 4 a) は

沖に広がっているが、そこでは音速は  $1,465 \text{ ms}^{-1}$  未満で最も小さい。200 m 深まで津軽暖流水が観測されている  $141^{\circ}40'E$  の St. 1 と  $143^{\circ}30'E$  の St. 8 における音速の鉛直分布を示し水塊構造との対応を調べた。St. 1 の鉛直分布をみれば、音速は水深 50 m 付近までの混合層で最大を示し、混合層直下から津軽暖流水の分布下限である水深 200 m 付近まで緩やかに減少している (Fig. 5 b)。さらに、親潮水を示す塩分極小の存在する 300 m 深まで急激に減少し、この層で音速極小を示した。St. 8 では、海面で音速最大となり親潮水の分布する 200 m 深で極小を示す (Fig. 5 c)。



**Fig. 6.** Ray diagrams (Figs. a, c, e and g) and Transmission loss (Figs. b, d, f and h) from the range dependent model with a sound source on the coast at 30 m depth (Figs. a and b), at 400 m depth (Figs. c and d), and at a distance of 160 km from the coast, at 30 m depth (Figs. e and f), 400 m depth (Figs. g and h) on July 18 and 19, 2007. The scale bar represents the transmission loss in dB. Symbols of submarine in the panels represent the sound sources.

この音速分布に基づき、音線ダイヤグラムと伝搬損失を計算した結果を Fig. 6 に示す。音源深度は津軽暖水塊や沿岸親潮が分布する 30 m と津軽暖水塊直下の 400 m に設定し、音源位置は津軽暖流水が分布する沿岸域の St. 1 と St. 8 (160 km) 付近の暖水塊の中とし、海洋上層構造が音波伝搬に与える影響を調べた。沿岸域の  $141^{\circ}40'E$  (St. 1) で音源深度 30 m から発せられた音線は、音源から距離 35 km 付近までは、海底が浅く音源位置の音速が大きいため海面から海底まで音波が届くが、暖水が覆う表層では音速が大きいため、St. 1 からの距離が 40 km (以下、距離と呼ぶ) より遠い地点では音波は暖水塊を避けるように転回し、海面付近には音波が届き難い (Fig. 6 a)。また、距離 71~119 km につ

て深度 100 m 付近を伝搬している音線が形成されているのは、上述したように、ここに音速極小域が存在しているためである。伝搬損失を見ると、音源から距離 20 km 付近までは 70~80 dB 程で伝搬損失は小さいが、距離 20 km 以遠では次第に伝搬損失が大きくなり、暖水の覆う海面付近では、伝搬損失が 120 dB 以上とさらに大きく、音波が届き難いシャドーズーンを形成する (Fig. 6 b)。

$141^{\circ}40'E$  (St. 1) の水深 400 m に音源を置いた場合 (Figs. 6 c, d), 海底は浅くても音源位置の音速が比較的小さいため音源近傍の距離 15 km 付近までしか海面から海底まで音波が届かない。距離 40 km 以遠の海面付近は津軽暖水塊や大気により海面が暖められる影響

で音速が大きく、海面までは音波が届き難くシャドーゾーンを形成する。また、音速が最小となる深さを軸としたサウンドチャンネルに一部音波がトラップされ、水深400 m付近では上下へ転回しながら距離160 km先まで達している (Fig. 6 c)。この点が音源深度30 mの時の相違点である。伝搬損失を見ると、音源から距離15 km付近までの海面から海底までは70~80 dB程と小さく、また水深400 m付近を中心とするサウンドチャンネル内は距離160 km先でも約80 dBと小さく、音波が届いている。しかし、津軽暖水塊や大気により暖められている海面付近では、100 dB以上と大きくなり、ソナーで探知し難い (Fig. 6 d)。

Figs. 6 e と 6 f は、それぞれ、音源を距離160 km (St. 8) 地点の水深30 mに設置したときの音線ダイアグラムと伝搬損失を示した図である。音源深度30 mから発せられた音線は、海面から海底へ曲げられ音波が届くが音波は幅広く広がり、距離とともに減衰が大きく、顕著なシャドーゾーンは形成されていない (Fig. 6 e)。伝搬損失を見ると、海洋深部より海面に音波が戻ってくる毎に伝搬損失が大きくなり、距離50 km付近は、伝搬損失が120 dB以上と大きい (Fig. 6 f)。沿岸側に音源がある場合と比較すると、沿岸側に音源がある場合は、津軽暖水塊や大気による海面の暖化のため海表面にシャドーゾーンが形成されている。しかし、距離160 km地点の水深30 mに音源がある場合、ここは音速最大の領域の一つであるため (Fig. 5 c) シャドーゾーンは形成されない。

Figs. 6 g, h は、それぞれ音源を距離160 km地点の水深400 mに設置したときの音線ダイアグラムと伝搬損失を示した図である。音源深度400 mから発せられた音線は、音源から沿岸方向へ4 km程度離れた地点までは海面から海底まで音波が届くが、それ以上岸に近づくと下向きの音波は海底に到達する前に転回する。また、サウンドチャンネルに一部音波がトラップされ、水深300~400 m付近では上下へ転回しながら距離160 km先まで達している (Fig. 6 g)。伝搬損失を見ると、音源から沿岸方向へ4 km程度離れた地点までの海面から海底までは70 dB程と小さく、また水深300~400 m付近を中心とするサウンドチャンネル内は距離160 km先でも80 dB程と小さく、音波が届いている。しかし、

距離70 km以遠では、津軽暖流水の影響で、海面から水深250 m付近までは、伝搬損失が95 dB程で、ソナーで探知し難いシャドーゾーンとなる (Fig. 6 h)。音源が沿岸側にある場合と比較すると、沖側に音源がある場合の方がシャドーゾーンにおける伝搬損失の値が小さい。

### 3.2 2010年1月下旬の水塊構造と音響特性

2010年1月下旬における水塊の水平分布を調べるため、100 m 深水温図を Fig. 7 に示した。5°C以下の水域をみれば、北海道の南東岸に沿って低水温の親潮が南下し三陸沿岸に至り、沖合でも40°N付近では146°Eを中心として冷水が南下していた。5°C以上の暖水はこれら冷水に挟まれた144°30'Eを中心として北上がみられたが、その先端は41°Nに限られていた。一方、津軽暖流水を示す10°C以上の海水は北半島から三陸沿岸にかけて、北海道南東岸から連続する低温な親潮水と岸に挟まれた、岸から10~40 kmの範囲に分布していた。

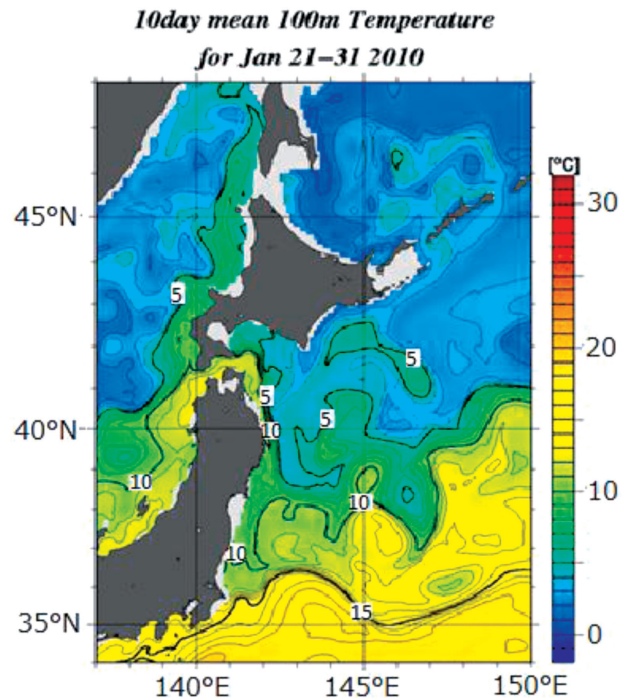


Fig. 7. 10 day mean 100 m temperature in the last ten days of January, 2010 after Japan Meteorological Agency.



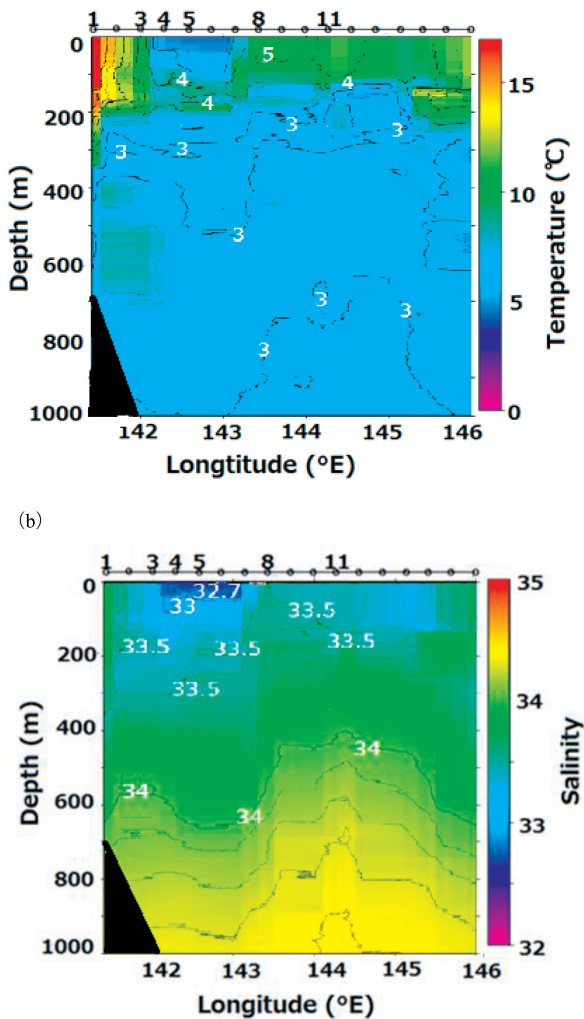


Fig. 8. Same as Fig. 3, but for on January 29 and 30, 2010.

2010年1月29, 30日に $41^{\circ}25'N$ に沿った観測点 (Fig. 1) で観測された水深1,000 mまでの水温と塩分の断面図を示す (Figs. 8 a, b)。この図を見ると、最も岸よりの St. 1 から St. 3 までの300 m以浅では $5^{\circ}C$ 以上、塩分33.3以上の水塊に覆われ、その幅は約40 kmである。また、 $142^{\circ}00'E$ から $143^{\circ}00'E$ までの100 m以浅では $3^{\circ}C$ 以下、塩分33.0以下の低温低塩分水塊が分布している。図は示さないが、この水塊は低塩分であるため低密度であり、下に凸の密度構造を示していた。これら暖水および冷水の水平位置は、前述のとおり、下北半島に沿って分布していた津軽暖流水および親潮水とほぼ一致する。最も岸よりの St. 1 の T-S 関係 (Fig. 9 a)

を Hanawa and Mitsudera (1987) に適用して水塊分類すれば、海面から50 m付近まで $9.5^{\circ}C$ 、塩分32.9の表層混合層があり、その直下から水深300 m付近まで津軽暖流水として分類された。この津軽暖流水の下層では、2007年7月と同様に、親潮水と下層冷水が分布していた。一方、低温低塩分の海水が分布していた、 $142^{\circ}45'E$ における St. 5 の T-S 関係 (Fig. 9 b) から、表層から下層に向かって沿岸親潮水、親潮水、および下層冷水が分類された。表層の沿岸親潮水から親潮水までは密度は塩分依存となっており、表層は低温ではあるが低密度である。

同海域の音速分布を Fig. 10 に示してあるが、沿岸の津軽暖流水域を除き、海面付近が最も音速が小さくなっていることが分かる (Fig. 10 a)。St. 1 の音速プロファイル (Fig. 10 b) をみれば、海面から水深200 m付近までの表層水と津軽暖流水の層ではほぼ等音速である。その下層の親潮水が分布する水深300 mから400 m付近にかけて徐々に音速が小さくなっている。岸から90 km離れた $142^{\circ}29'E$  (St. 4) の地点では、沿岸親潮水が覆っている海面付近が最も音速が小さく、表層から親潮水の分布する水深100 m付近まで徐々に音速が大きくなったのち150 mまで減少し、わずかに極大を示している (Fig. 10 c)。150 mの下層をみれば、音速は1,000 m深まで増加する傾向にあり、下層冷水が占める350~400 mでは増加の傾向が大きくなっている。

Figs. 11 a, b は、音源を $141^{\circ}40'E$  (St. 1) の水深30 m地点に設置したときの音線ダイアグラムと伝播損失を示した図である。音源深度30 mから発せられた音線は、津軽暖流水の分布する沿岸域では、海面から海底の間で反射を繰り返すもの他に、50 m深までの表層水と津軽暖水塊間で弱い表層ダクトを形成し、音線は表層ダクトにトラップされるものと、海底に向かって緩やかに曲げられるものがある (Fig. 11 a)。また、St. 1からの距離 (以下、距離と呼ぶ) が40 kmの $141^{\circ}48'E$ 付近では海面を覆っている水塊が津軽暖水から沿岸親潮水に変化するが、それより沖側では海面が冷たいために音波は海面方向に屈折し表層ダクトを形成しており、音線は表層ダクトにトラップされて海面付近を160 km先まで伝搬しており、一部の音線は、海面と300 m以深の下層冷水塊との間でトラップされている。伝播損失状況を見る

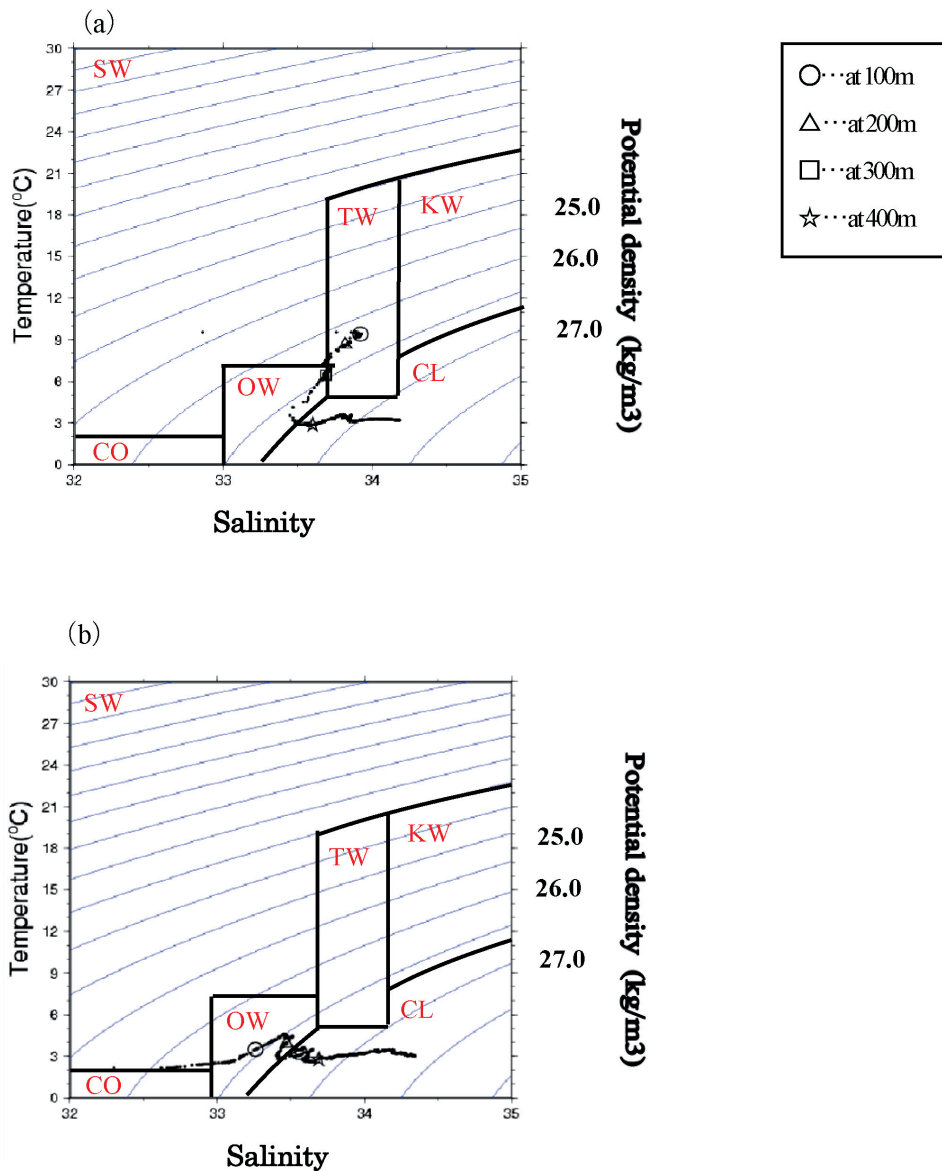


Fig. 9. Same as Fig. 4 except for on January 29 and 30, 2010 and at (a) 141°40'E (St. 1) and, (b) 142°45'E (St. 5).

と、表層をみれば津軽暖水塊の分布する距離 40 km 付近までは、海面から水深 200 m まで 70~80 dB と損失が小さく、音源から遠くなるにつれて、損失が 80~90 dB とやや大きくなっている (Fig. 11 b)。

音源を St. 1 の水深 400 m に設置したときについてみれば、発せられた音線は、沿岸付近において一部は海面や海底に達し、距離とともに減衰している (Fig. 11 c)。また、津軽暖流水の下 200~400 m 深では明瞭なサウ

ンドチャンネルを形成しているが、距離 37 km の 142°E で津軽暖流水から沿岸親潮水域に達すると、サウンドチャンネルは弱くなり海面にもダクトが形成され、チャンネルから一部の音線が抜けて海面ダクト中を伝搬する (Fig. 11 c)。伝播損失状況を見ると、音源付近では伝搬損失が小さく、遠方では 300 m 付近を中心とするサウンドチャンネル付近の伝搬損失は小さく、遠くまで音が届いている。また、沿岸親潮水域では、表層部分

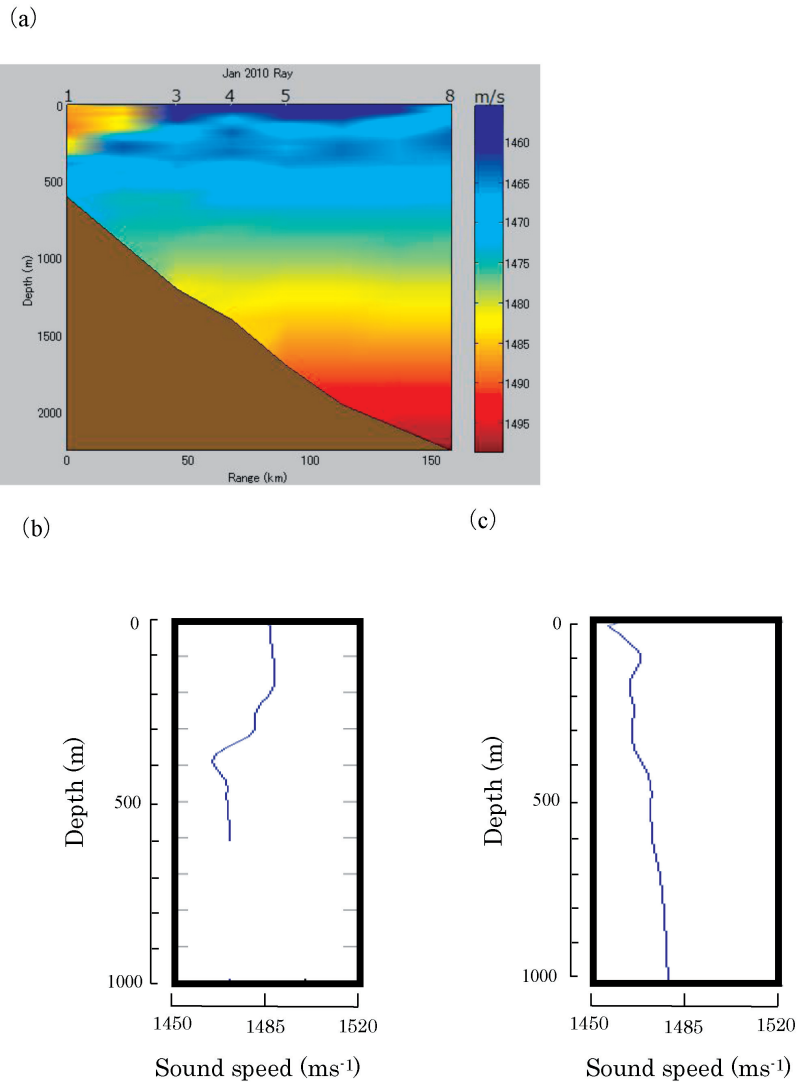


Fig. 10. Same as Fig. 5 except for on 29 and 30 in January, 2010, and sound speed profiles at (b) 141°40'E (St. 1) and (c) 142°29'E (St. 4).

の伝搬損失も小さい (Fig. 11 d)。

Figs. 11 e, f は、音源を距離 90 km 地点 (142°29'E, St. 4) の水深 30 m (沿岸親潮水内) に設置したときの音線ダイヤグラムと伝搬損失を示した図である。音線は音源近傍 4 km 付近までは海面と海底の間で反射を繰り返す、それ以遠では音線は転回により海洋深部より海面に戻ってくる。沿岸親潮や表層水塊の海域では海面が冷たいために音速が小さく、音波は冷水側に屈折するため表層ダクトを形成し、一部音波がトラップされている (Fig. 11 e)。伝搬損失状況を見ると (Fig. 11 f)、沿岸

親潮水や低温表層水の広がる距離 90~160 km 付近の表層付近では、水深 150 m まで 70~80 dB と損失が小さく、津軽暖水塊の分布する沿岸部の表層付近で、80~90 dB と損失がやや大きくなっている。

Fig. 11 g と Fig. 11 h は、音源を距離 90 km 地点 (St. 4) の水深 400 m に設置したときの音線ダイヤグラムと伝搬損失を示した図である。音源深度 400 m から発せられた音線は、音源近傍 4 km 付近までは海面と海底の間で反射を繰り返す、それ以遠では音線は転回により海洋深部より海面に戻ってくる。大部分の音波はトラッ

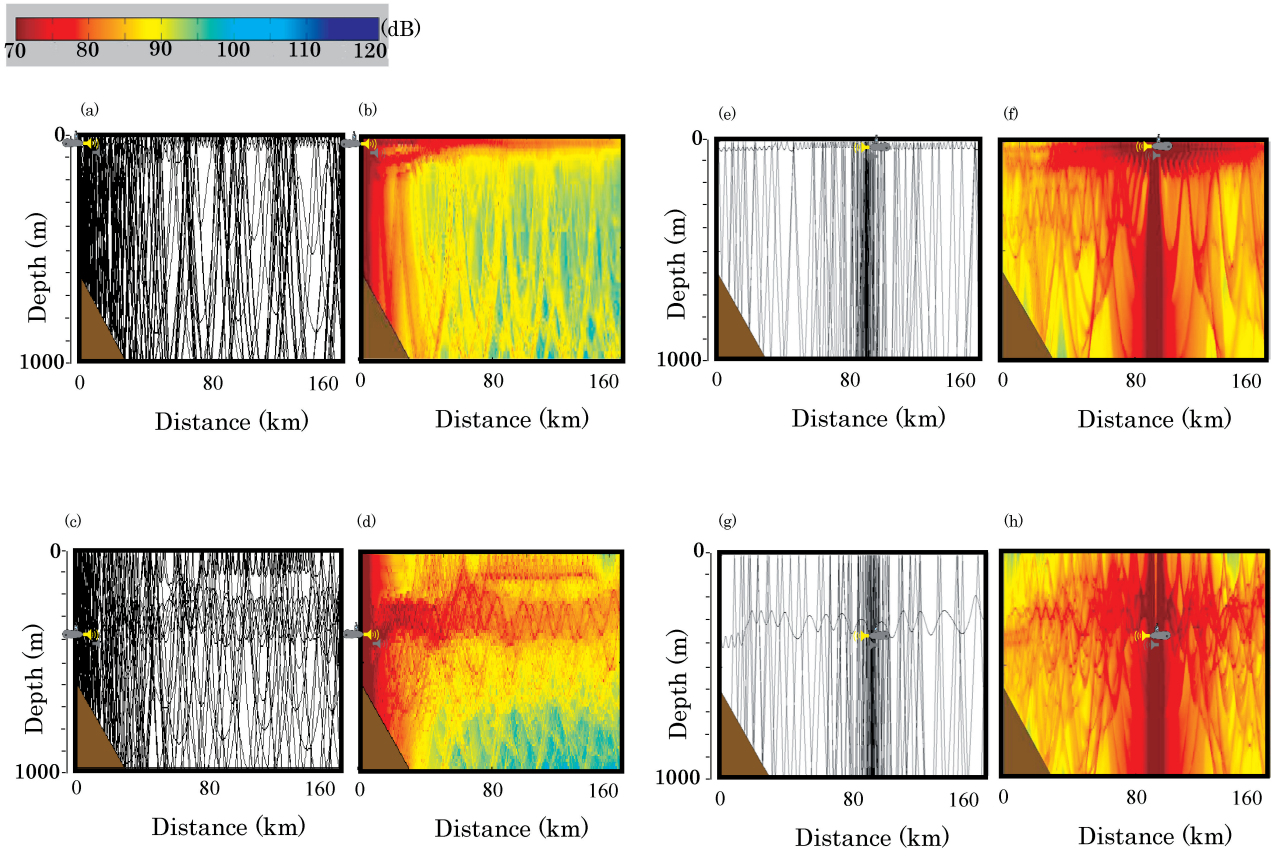


Fig. 11. Same as Fig. 6, except for on 29 and 30 in January, 2010.

プされていないが、一部音波が水深 400 m 付近のサウンドチャンネルにトラップされている (Fig. 11 g)。伝搬損失状況を見ると、サウンドチャンネル内では、伝搬損失が 70~80 dB と小さく、津軽暖流水の分布する沿岸部から距離 50 km 付近の表層で、90 dB 程と損失がやや大きくなっている (Fig. 11 h)。

#### 4. 考察

三陸沖海洋上層における水温塩分構造を明らかにしたうえで、音速分布を見積もり、数値モデルを用いて音波の伝搬経路と伝搬損失について調べるとともに、水塊構造との対応を明らかにした。この節ではこの海域における水温塩分と音速の関係を明らかにしたうえで、音波の伝搬と水塊構造との対応について考察する。

音速  $c$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) は、水深  $d$  (m)、水温  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )、塩分  $s$

(‰) の関数であり、次の式で表わされる (Mackenzie, 1981)。

$$\begin{aligned}
 c(t, s, d) = & 1448.96 + 4.591t - 5.304 \times 10^{-2} t^2 + 2.374 \\
 & \times 10^{-4} t^3 + 1.340(s-35) + 1.630 \times 10^{-2} d \\
 & + 1.675 \times 10^{-7} d^2 - 1.025 \times 10^{-2} t(s-35) \\
 & - 7.139 \times 10^{-13} td^3 \quad (1)
 \end{aligned}$$

なお、この式では塩分は千分率 (‰) で表現されているが、以下 XCTD の測定値である実用塩分を塩分濃度とみなして計算に用いた。本研究の水温塩分範囲において塩分濃度と実用塩分の差は 0.01‰ 以下である (Lewis and Perkin, 1981), XCTD の塩分精度より小さい。水深 0 m における音速を (1) 式を用いて全 XCTD データのプロットとともに T-S ダイアグラム上に示すと (Figs. 12, 13), 等音速線は塩分軸にほぼ平行で音速は主に水温に依存している。一方、 $\partial c / \partial d$  は 0~500 m の範囲で  $d, t, s$  に強く依存せず、ほぼ一定値 0.0163~

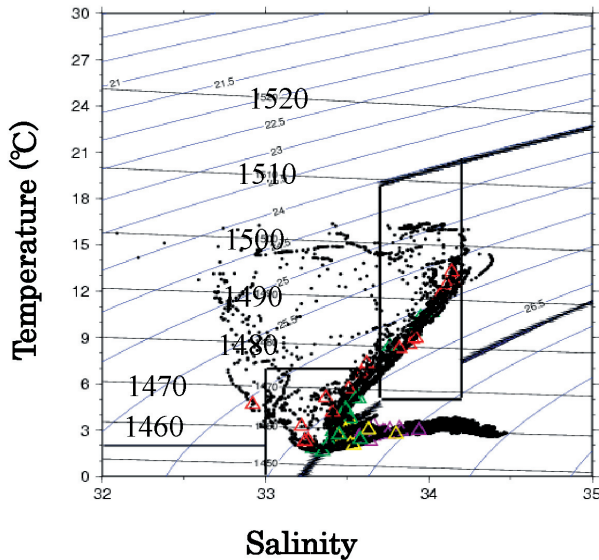


Fig. 12. Same as Fig. 4, except for 8 T-S scatter diagrams between 141°40'E and 146°00'E. Isoleths of sound speed at the 0 m depth are plotted as black lines. Red, green, yellow, and purple triangles in the panel denote the depths of 100 m, 200 m, 300 m, and 400 m.

$0.0164 \text{ s}^{-1}$ を示した。すなわち 100 m 程度の水深差なら音速の変化幅は  $1.64 \text{ ms}^{-1}$  であり、たかだか水温差  $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  程度の音速差に対応する。このことを考慮しながら水塊構造と音速の関係の季節による違いについて考察する。

2007年7月18, 19日の全観測データを用いたT-Sダイアグラム (Fig. 12) をみれば、観測海域における水塊の鉛直構造には二つのパターンがみられる。すなわち、33.2,  $2^\circ\text{C}$  で水温と塩分の極小, 34.2,  $14^\circ\text{C}$  で塩分の極大を示す構造と、33.2,  $2^\circ\text{C}$  で水温の極小を示し、それより上層では水温は高いが塩分は比較的に少ない水塊に覆われている構造である。前者は上層から順に表層水、津軽暖流水、親潮水、下層冷水が層重しており、後者は表層水、親潮水、下層冷水が分布している。いずれの表層水も海面付近では 33.0,  $15^\circ\text{C}$  であるが、その下層で津軽暖流水が分布する海域では水温の鉛直変化はほとんどないのに対し、下層に親潮が分布する海域では海面に向かって温度が上昇する。一方、2010年1月29, 30日のT-Sダイアグラム (Fig. 13) においても、不明瞭ではあるが、33.2,  $3^\circ\text{C}$  を中心とした親潮水の上層に津軽暖流水が分布する海域と親潮水の上層にはさらに低塩分でやや

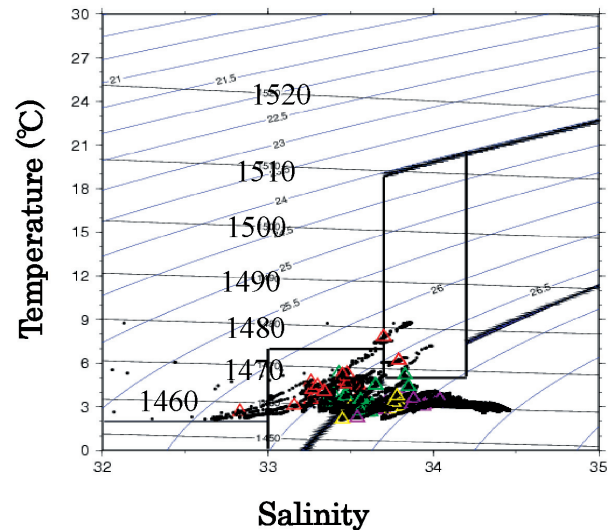


Fig. 13. Same as Fig. 12 except for on 29, 30 in January, 2010.

低温の沿岸親潮水が分布する海域がみられる。いずれのパターンも親潮水の下層に水温の一樣な下層冷水が分布している。7月ほど顕著ではないが、津軽暖流水の海域では下層の親潮水との間に水温差がみられる。しかし、全体的に大きな水温の鉛直変化はみられず、沿岸親潮水の海域では海面に向かって水温の低下がみられる。こういった水塊構造の違いは1回ごとの観測ではあるものの、この海域の季節変化をとらえていると考えられる (Hanawa and Mitsudera, 1987)。

以上の水塊構造と音速が主に水温に依存していることをふまえながら、水塊構造と音波伝搬について考察する。まず表層に着目すると、7月では、暖水が広がる海面付近では海面に向けて音速が増加するため表層ダクトは形成されないのに対し、1月には沿岸の津軽暖流水では、海面から 50 m 深まではほぼ等音速であり、その下の津軽暖水塊との間で弱い表層ダクトしか形成していないのに対し、沖合では低温な沿岸親潮水が海面に拡がるため、水深とともに音速が増大し、表層ダクトが形成される (Figs. 9,10)。100 m 以深をみれば、7月には津軽暖流水および北上暖水と親潮水との間の深度 200~500 m にサウンドチャンネルを形成していた (Figs. 5 b, 5 c)。これに対し1月では、サウンドチャンネルも津軽暖水塊の直下 300~400 m 深でのみ明瞭であるが、それ以外の

領域では水温差が小さいため、音線の分布および伝搬損失においてその特徴は7月ほど顕著ではない。

水塊の水平分布の音波伝搬への影響を考えると、7月で30 m深を音源とした計算結果をみれば、沿岸に設置した場合、距離30 kmから沖側の表層にシャドゾーンが現れるが、沖側160 kmに設置した場合は現れない (Fig. 6)。ここで、海中で音速度場が鉛直方向にのみ成層している場合、スネルの法則により、音速が等しければ音波の入射角も等しくなる。音波が下方に屈折するような音速場中では、音源からほぼ水平に射出された音波は下方に屈折し、射出地点と同等の音速を持つ深海でほぼ水平となり、転回・上昇し、再び射出地点と同等の音速となる水塊が存在する地点で下方に転回する。上述されているような表層のシャドゾーンは、上昇してきた音波が下方に転回するために必要な射出地点の音速と同程度の音速を持つ水塊が海中に存在し、その水塊よりも上層は音波が届きにくい場合に形成される。このため、音源付近の水塊よりも高温の水塊はシャドゾーンを形成しやすい。この場合は、距離60 km付近には津軽暖流水のコアがあって、沿岸部音源の30 m深よりも高温であるため、このコアを中心にシャドゾーンが形成されたのに対し、距離160 km、30 m深の音源位置は北上暖水のコアにあたり、水平的に水温極大を示したため (Fig. 3 a)、シャドゾーンは形成されなかった。また、400 m深に設置した場合、設置場所が沿岸、沖側の両者とも200~500 m深のサウンドチャンネル内を音波が伝搬していた。しかし、音源が沿岸の場合、距離30~80 kmのシャドゾーン内における伝搬損失が顕著であったのに対し、沖側の音源からの音波は表層で比較的減衰が小さかった (Fig. 6 d, h)。これは沿岸の400 m深は音速の鉛直傾度が大きい領域が200~300 m深度に迫っているが、沖側160 kmの400 m深度付近では、音速の鉛直傾度が比較的緩やかであり、音線の角度が広く散らばることが可能であり、このため80 kmよりも沿岸側のシャドゾーンにも、小さい入射角の音波が入るからである。

1月に音源を30 m深度に設置する場合を考える。音源を沖側90 kmに置いた場合は、沿岸側に置いた場合に比べて、音源を中心とした距離30~140 kmの表層ダクト内における伝搬損失が小さく、距離30 kmから沿

岸側の津軽暖流水中で伝搬損失が増加している (Fig. 11 b, f)。これは、津軽暖流水の分布する沿岸側では、表層50 mまでの混合層と津軽暖流水域で弱い表層ダクトしか形成していないのに対し (Fig. 10 b)、沖側90 km地点は沿岸親潮や表層水塊の海域であり、海面が冷たいために表層ダクトを形成しているためである (Fig. 10 c)。さらに1月には7月の場合と異なり、沿岸30 m深に音源を設置しても、沖側の表層にシャドゾーンは現れない。これは1月には、沿岸30 m付近で音速が最も大きくなるからである。また音源を400 m深度に設置した場合、沿岸に設置すると深度300~400 mにおけるサウンドチャンネルを音波が伝搬している様子が良く分かるが、沖側90 km地点に設置すると音源から4 km以内では音波は海面と海底の間で反射するものが顕著であり、それ以遠では音波は転回により海洋深部より海面に戻ってきている。このため音波は幅広く広がり、サウンドチャンネル内を伝搬する音波は少ない (Fig. 11 d, h)。これは、沿岸では津軽暖流水の直下から350 m深付近にかけて徐々に音速が小さくなり、親潮水が存在している水深350 m付近で急に音速が小さくなっており (Fig. 10 b)、サウンドチャンネルを形成しているが、沖側90 km地点では、水深400 m付近に音速の極小は見られるものの顕著ではなく (Fig. 10 c)、ほとんどの音波がトラップされないためである。

最後に、局地的な水温構造にともなう音波の伝搬特性について考察する。7月において表層ダクトは形成されないが、詳細に見れば30 mを音源としたとき、距離74~124 kmの深度100 m付近で水深100 mに沿った音波伝搬を示す音線がみられた (Fig. 6 a)。これは、顕著ではないものの、100 m深の親潮水が水温極小層 (中冷水) を形成し (Fig. 3 a)、音速極小層と対応していたためである (Fig. 5 a)。

## 5. まとめ

本研究の目的は、三陸沖海洋上層における複雑な水塊分布が海中音波伝搬に与える影響を調べることである。考察で示したように音速および音速傾度は主に水温および水温傾度にそれぞれ依存し、比較的寒冷な海水中より射出された音波はより暖かい海水中では伝搬損失が大

きく、シャドーゾーンを形成し易く、これとは逆に比較的暖かい海水中より射出された音波はシャドーゾーンを形成し難い。

暖候期にあたる2007年7月18, 19日の場合、表層ダクトは形成されず、暖水域や海面付近でシャドーゾーンが形成され易い。また、音源深度が400 mの場合には、海中のサウンドチャンネルに音波がトラップされ易くなる。さらに、海面における暖水の厚さ及び水温は海域により大きく異なり、津軽暖流水中でも沿岸における30 m水深の海水温は比較的低温で、ここに音源を設置すると周囲のより高水温の津軽暖流水や海面付近ではシャドーゾーンとなる。しかし、海水温が最大値を示す沖側160 km, 30 m深度に音源を設置するとシャドーゾーンは現れない。

寒候期にあたる2010年1月29, 30日の場合、海面付近で表層ダクト、海中にはサウンドチャンネル、津軽暖流水でシャドーゾーンがそれぞれ形成されていた。しかし2007年7月の場合に比べると全体的に水温差が小さいため、音速差も小さく、津軽暖流水域以外にはシャドーゾーンは形成されず、サウンドチャンネルは不明瞭であった。

これまで述べてきた水塊の分布域や分布層は短期的・経年的に変化するものの、季節ごとの卓越水塊と100 km程度および100 m程度の水平および鉛直スケールで、それらの層重構造は特徴的である。したがって、2回のみ観測結果であるものの、これらの水塊分布により形成される音速分布に依存する音波伝搬の特徴にも上述の季節変化が存在することが期待される。

また、パッシブソーナー等で物体探知を試みる際には、シャドーゾーンとなる暖水塊域や暖候期の海面付近、サウンドチャンネルの位置、表層ダクトの位置等をよく把握することが重要である。特に海水温差が大きく、シャドーゾーンやダクトが明瞭になる暖候期にはより注意する必要がある。

本研究では回折現象の効果が小さく音線理論を適用可能な500 Hzの音波を対象としてその伝搬特性を調べたが、回折の効果が大きい低周波の音波も扱う必要がある。その場合、音線理論ではなくPE法(Parabolic Equation Method)を用いる方が適切であり、今後の課題である。

## 謝 辞

本研究に用いたデータは、海上自衛隊対潜資料隊の保有するものであり、学術目的の使用に快く応じてデータを提供して頂きました。感謝いたします。

## References

- Conlon, D. M. (1982): On the outflow modes of the Tsugaru Warm Current. *La mer*, **20**, 60–64.
- Tsuchiya, T., T. Okuyama, N. Endoh and T. Anada (1999): Numerical analysis of acoustical propagation in ocean with warm and cold water mass used by the three-dimensional wide-angle parabolic equation method. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 3351–3355.
- Hanawa, K., and H. Mitsudera (1987): Variation of Water System Distribution in the Sanriku Coastal Area. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **42**, 435–446.
- Jensen, F. B., William, A. K., Michael B. P., and Henrik, S. (1994): COMPUTATIONAL OCEAN ACOUSTICS. *American Institute of Physics*, 3–5, 13–15, 149–202.
- Kono, T., M. Foreman, P. Chandler, and M. Kashiwai. (2004) Coastal Oyashio south of Hokkaido Japan. *J. Physical Oceanogr.* **34**, 1477–1494.
- Lewis E. L., and R. G. Perkin (1981): The practical salinity scale 1978: conversion of existing data. *Deep-Sea Res.*, **28** A, 307–328.
- Mackenzie, K. V. (1981): Nine-term equation for sound speed in the oceans. *JASA*, **70** (3), 807–812.
- 永田豊, 小熊幸子, 鈴木亨, 渡辺秀俊, 山口初代, 高杉知 (2001): 三陸沿岸海域への黒潮系水の侵入について. *月刊海洋*, **32**, 800–807.
- 小熊幸子, 鈴木亨, 永田豊, 渡辺秀俊, 山口初代, 高杉知 (2001): 三陸沿岸海峡の季節変化について. *月刊海洋*, **32**, 815–823.
- Okuyama, T., T. Tsuchiya, N. Endoh (2000): Three dimensional sound propagation analysis in ocean have water mass by the parabolic equation method. *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, 7–13.
- 島茂樹, 中山智治, 伊勢田賢一, 西澤慶介, 賀佐信一, 小栗一将, 蓮沼啓一 (2001): 六ヶ所村沖合における津軽暖水の分布について. *月刊海洋*, **32**, 843–849.
- 杉本隆成, 川崎康寛 (1984): 津軽暖流の季節・経年変動とその力学的解釈. *沿岸海洋研究ノート*, **22**, 1–11.

# Sound propagation in the sea near the Sanriku coast on 18 and 19 in July, 2007, and on 29 and 30 in January, 2010

Miyuki Suzuki<sup>†</sup>, Kikuro Tomine<sup>†</sup>, and Hanako Ogasawara<sup>†</sup>

## Abstract

Structure of the sea and sound propagation in the sea near the Sanriku coast are analyzed on 18, 19 in July, 2007 (warm season), and on 29, 30 in January, 2010 (cold season).

The Tsugaru warm current widely spreads near the Sanriku coast, other warm water masses are over the offshore sea of the coast, and the sea surface is warmed by the warm atmosphere on 18, 19 in July, 2007. The cold Oyashio water system lies under these warm water masses. The large water temperature difference makes it easy to form shadow zones in the warm water masses near the sea surface. If a sound source is settled in the cold Oyashio water system under the warm water masses, the sound is trapped in the sound channel formed near the Oyashio water system. Moreover, water temperature of 30 m depth near the coast, though it is in the Tsugaru warm current domain, is relatively cold to make shadow zone in surrounding warmer domain of the Tsugaru warm current and in the other warmer water masses near the sea surface if a sound source is settled near the coast.

The Tsugaru warm current was only 40 km wide near the Sanriku coast on 29, 30 in January, 2010. The Oyashio water system widely spread over the sea surface and the Coastal Oyashio water system occupied a part of the sea surface to form a surface duct.

**Key words:** the Sanriku coast, water temperature distribution, sound propagation

(Corresponding author's e-mail address: tomine@nda.ac.jp)

(Received 29 March 2011; accepted 26 December 2011)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2012)

---

<sup>†</sup> Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa, Japan, 239-8686.