

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：55502

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560972

研究課題名(和文)音響トモグラフィーを用いた離岸流観測システムの開発研究

研究課題名(英文) Research on Development of the Rip Current Measuring System by using Acoustic Tomography

研究代表者

石田 廣史 (ISHIDA, Hiroshi)

大島商船高等専門学校・その他部局等・校長

研究者番号：60031473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：毎年夏季に300人以上の人が海水浴で命を落としている。その主原因は離岸流である。離岸流連続監視のため、音響トモグラフィーを用いた実海域用離岸流計測装置の開発を目的とする。2周波魚探探知機指示器に接続した1対の送受波器が、発信機能と受信機能を交互に機能交換できるように改造し、双方向音波伝搬による流速測定を可能とする計測システムを構築した。実海域実験を、平成24年度と25年度に鳥取県富浦海岸にて9月上～中旬に3回実施した。この観測データを基に、海水浴場での岸向きや沖向きの沿岸方向の分布が確認され、本離岸流計測システムの実用性が実証された。

研究成果の概要(英文)：Every year, more than 300 swimming people lose their lives in beaches. These casualties are mainly caused by the rip current flowing to offshore. For the continuous observation of the rip current, the aim of this research is to develop the real-time monitoring system of the rip current by using the acoustic tomography.

The system consists of one dual-frequency acoustic fish-finder, two broad-band acoustic transducers, a set of sound reflectors and a data acquisition network. The modified dual-frequency acoustic fish-finder alternately transmit and receive the sound signals of 50kHz at a few seconds interval. The observations were carried out in the Uradome Beach of Tottori Prefecture in September of 2012 and 2013. Based on these observational data, the current velocity fields were well reconstructed and weak offshore currents were detected. In conclusion, it was proved that the developed measurement system have a potential capability of monitoring the rip current.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：音響トモグラフィー 離岸流 計測装置 開発研究

1. 研究開始当初の背景

最近 10 ヶ年間、毎年夏季には日本沿岸の海水浴場では遊泳中の水難事故が 300 ~ 400 件が発生し、そしてこの内の約 3 分の 1 は死亡・行方不明となっている。この種の水難事故の大きな原因の一つに、海岸線から沖合いに向かう強い流れ、即ち、離岸流がある。この離岸流による水難事故防止ためには、離岸流の発生状況(場所や時間、強さなど)をリアルタイムで観測し、海水浴客に的確に情報を伝えることが水難事故防止上最も重要である。

これまで海洋学や海洋工学分野において、この離岸流の物理現象や観測研究は多くなされてきた。その多くは、離岸流を観測するには観測海域に大量の着色剤や浮遊物を撒き、その動きをヘリコプターや気球などによって上空からビデオや写真撮影などで直接観察する方法などが検討されたが、それらのほとんどは海水浴時期の海水浴場等で常時、そして長期間使用する事が不可能で、離岸流による水難事故防止のためには実用的ではなかった。また、海底に設置した超音波流速計による観測も、離岸流の観測がその装置の設置場所の上層でしか観測できないという制限があった。

2. 研究の目的

離岸流の発生場所や時間、強さは一定ではないが、海水浴場のように観測対象の海域を限定した場合、音波を利用したリモートセンシングが非常に有効であると考えられる。そのため、水中音響からのアプローチとして離岸流の性質に着目し、音波を用いた離岸流観測装置の開発に関連した開発研究とその実現化の可能性について研究することは非常に重要で、有益であると考えられる。本離岸流の観測システムは、本来は外洋で海洋構造の解明に観測威力を発揮してきた海洋音響トモグラフィ理論を浅海域の現象に新たに適用して理論展開し、観測と信号処理技術を改善して、海水浴場という比較的狭いそして浅い海域を観測監視対象とした「離岸流観測システム」を開発するものである。

3. 研究の方法

本離岸流観測システムは、一対の音響トランスミッターと複数個の音響レフレクタ(反射体)より構成されており、音響トランスポンダの欠点(トランスミッター間の遅延時間の不確定)を克服するものとして、音響レフレクタ(反射体)を用いた離岸流監視システムであり、また、音響レフレクタ(反射体)を用いたシステムは、音響トランスポンダに比べて装置がシンプルであり且つ安価でもある。このような離岸流観測システムの開発研究の試みは他にはあまり類がなく、海水浴場の水難事故防止という観点から、この種の監視システムの開発研究は強く望まれておりニーズは高いと考えられる。

4. 研究成果

(1) 海洋音響トモグラフィによる流速測定
の原理は、図 1 a に示されるように、3 個の音響トランスミッター間の双方向音波伝搬から得られる伝搬時間差が流速に比例することを利用して、この場合は、水平流速 2 成分を計測することが可能である。この方法の欠点は、音響トランスミッターが比較的高価であること、音響トランスミッターの時計同期を担保しなければならないことである。図 1 b に示す方法は、2 個の音響トランスジューサーから交互に送信し、音響反射体からの反射波を受信して、双方向音波伝搬を行うものである。音響トランスジューサーの送受信は、1 台のコントローラで行える。この方法の欠点は、音響トランスジューサーを結ぶ基線に平行な成分は測定できるが、垂直な成分は測定できないことである。この欠点は、離岸流を測定対象とするときには顕在化しない。この方法の利点は、安価な音響反射体を追加することにより観測領域を簡単に拡張できることである。さらに、基線間の音速・流速測定を可能とするように音響トランスジューサーの放射面を調整すれば、音響トランスジューサーと音響反射体の精密位置測定のみで、安価に閉じた測定系を実現できることになる。

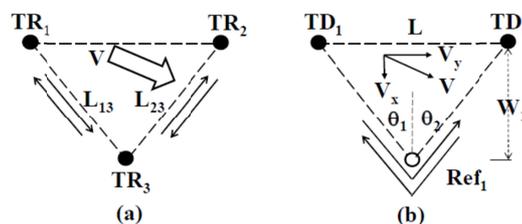


図 1 海洋音響トモグラフィーによる流速測定

(2) 図 1 b に示した流速測定の方法を数式で表すと式 1 となる。音響トランスジューサー TD₁ が発信し、音響反射体 Ref1 からの反射波を音響トランスジューサー TD₂ で受信した信号の伝搬時間が t₁¹² である。t₁²¹ は TD₂ が発信し、Ref1 からの反射波を TD₁ が受信した信号の伝搬時間を表す。この両方の伝搬時間の差をとると、式 2 に示されるように、基線に平行な流速成分しか測定できないことが明らかとなる。

$$t_1^{12} = \frac{W_1/\cos\theta_1}{C_0 + V_y \sin\theta_1 + V_x \cos\theta_1} + \frac{W_1/\cos\theta_2}{C_0 + V_y \sin\theta_2 - V_x \cos\theta_2} \quad (1)$$

$$t_1^{21} = \frac{W_1/\cos\theta_1}{C_0 - V_y \sin\theta_1 - V_x \cos\theta_1} + \frac{W_1/\cos\theta_2}{C_0 - V_y \sin\theta_2 + V_x \cos\theta_2}$$

$$d_1 = \frac{1}{2}(t_1^{21} - t_1^{12}) = \frac{V_y W_1 \tan\theta_1 + V_x W_1}{C_0^2 - (V_y \sin\theta_1 + V_x \cos\theta_1)^2} + \frac{V_y W_1 \tan\theta_2 - V_x W_1}{C_0^2 - (V_y \sin\theta_2 - V_x \cos\theta_2)^2} \quad (2)$$

$$\cong \frac{V_x}{C_0^2}(W_1 \tan\theta_1 + W_1 \tan\theta_2) + \frac{V_y}{C_0^2}(W_1 - W_1) = \frac{L}{C_0^2} V_x$$

(3) 実際の海水浴場では、図2に示すように音響トランスジューサ2個と音響反射体6本程度を汀線に沿って設置することになる。式2を音響反射体6個の場合に拡張すると、式3が得られる。

$$d_j = \frac{1}{2}(t_j^{21} - t_j^{12}) = \frac{L}{C_0^2} V_j^m, \quad V_j^m = \frac{\sum_1^j W_i V_i}{\sum_1^j W_i}. \quad (3)$$

($j=1, \dots, 6$).

式3から明らかなように、直接的に測定値として得られる流速は、各領域の流速成分の加重平均値である。これを、連立方程式として解けば、領域ごとの沖向き流速成分が式4によって、得られる。

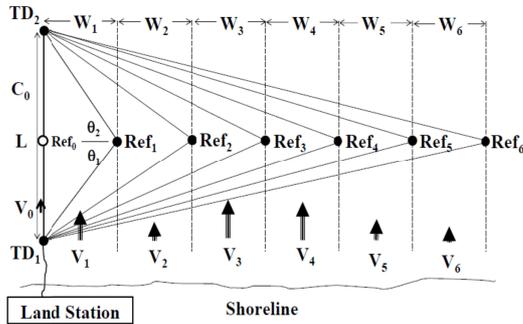


図2 離岸流観測システム展開図

$$\begin{aligned} V_1^m &= \frac{C_0^2}{L} d_1, & V_1 &= V_1^m, \\ V_2^m &= \frac{C_0^2}{L} d_2, & V_2 &= V_2^m + \frac{W_1}{W_2} (V_2^m - V_1^m), \\ V_3^m &= \frac{C_0^2}{L} d_3, & V_3 &= V_3^m + \frac{W_1 + W_2}{W_3} (V_3^m - V_2^m), \\ V_4^m &= \frac{C_0^2}{L} d_4, & V_4 &= V_4^m + \frac{\sum_1^3 W_i}{W_4} (V_4^m - V_3^m), \\ V_5^m &= \frac{C_0^2}{L} d_5, & V_5 &= V_5^m + \frac{\sum_1^4 W_i}{W_5} (V_5^m - V_4^m), \\ V_6^m &= \frac{C_0^2}{L} d_6, & V_6 &= V_6^m + \frac{\sum_1^5 W_i}{W_6} (V_6^m - V_5^m). \end{aligned} \quad (4)$$

更に、基線上の音速と流速は式5によって、基線上の信号の双方向伝搬時間の差と和から求められる。

$$\begin{aligned} d_0 &= \frac{1}{2}(t_0^{21} - t_0^{12}) = \frac{L V_0}{C_0^2 - V_0^2} \cong \frac{L}{C_0^2} V_0, \\ s_0 &= \frac{1}{2}(t_0^{21} + t_0^{12}) = \frac{L C_0}{C_0^2 - V_0^2} \cong \frac{L}{C_0}, \\ V_0 &= \frac{C_0^2}{L} d_0, \\ C_0 &= \frac{L}{s_0}. \end{aligned} \quad (5)$$

本シ

ステムを実現するための中核技術は、音響トランスジューサの送受信の切り替えである。本来、2周波魚群探知機では、高周波用と低周波用の2種類の音響トランスジューサを用い、低周波と高周波の独立した送受信系として機能させている。本システムでは、同じ周波数の音響トランスジューサ2個を接続し、一つのトランスジューサで発信し、もう一つのトランスジューサで受信できるように改造したものである。これにより、改造を必要最小限に抑えて、双方向音波伝搬の測定系を構成できるようになった。

コントローラとして、古野電気製の2周波魚群探知機FCV-295を使用した。音響トランスジューサはAirmar製のB265LH(50kHz, 200kHz、ケーブル長30mおよび60m)を使用した。精密ADコンバータにはNI PCI-6120(16bit, 800kHz)を使用した。音響反射体には50の鉄棒を使用した。固定用の支持金具は、単管パイプを活用した。

(5) 本システム展開上の留意点は、音響トランスジューサのビームパターンである。図3に示すように、-3dBビーム幅は50kHzで25°である。この範囲内に音響反射体を設置しなければならない。音響トランスジューサからの直達波は、音響反射体からの反射波に比べて20dB以上強いので、受信される可能性が高い。反射体設置前に、音響トランスジューサからの見込み角が-3dBビーム幅に入るように、調整した。

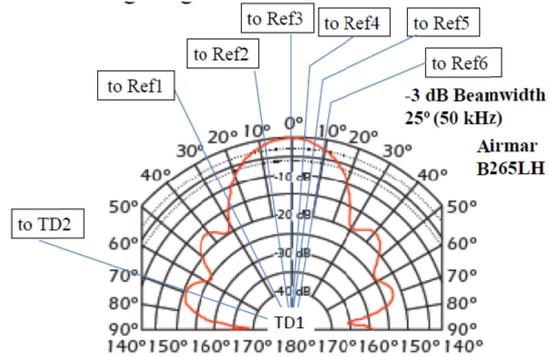


図3 音響トランスジューサのビームパターン (AirmarのHPより引用、加筆)

(6) 本システムの実証試験は、鳥取県岩美町浦富海岸で平成24年9月8日及び9日に実施した。この海岸では、毎年海水浴シーズンに水難事故が発生しており、離岸流観測も盛んに行われているところである。

海況の変動により、海底地形が大きく変化しているが、汀線から沖合30m~60mでは、海底の水深は1m~1.5mであった。

写真1aとbに音響トランスジューサと音響反射体の実際の設置状況を示す。写真1aでは、手前の赤丸が汀線に近い音響トランスポンダTD1であり、真中は、標識用の単管パイプであり、その沖合の赤丸は音響トランスジューサTD2を示す。汀線近くにある単管パイプを起点に25mおよび55m沖合に

TD₁とTD₂を設置した。音響反射体は写真1bに示すように、45m点、60m点および75m点の先端のみが見える。15m点および30m点の音響反射体は、水深が幾分深いため、頂部が海中に沈んだままであった。

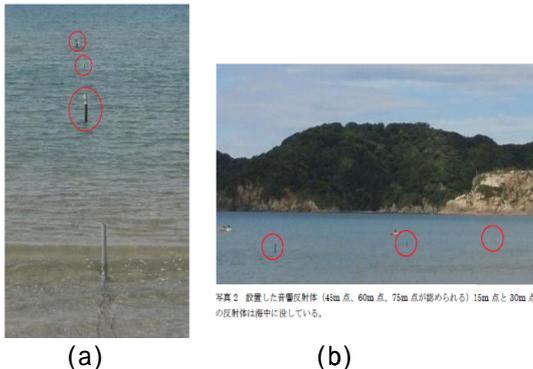


写真1 音響トランスジューサの設置状況

(7) 実証試験で取得した観測データの一例を図4に示す。上部パネルは、音響トランスジューサ用コントローラで得られたエコグラムである。最上部に示した数値は、音響反射体の基線からの概略の設置距離を表している。15m点の音響反射体からの信号は得られていない。下部パネルは、1ショットの受信記録である。横軸の単位は msec である。SN比は良好で、音響反射体からの反射波の信号には共通した特徴が表れている。

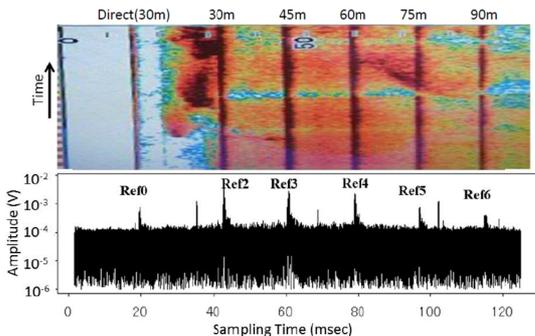


図4 受信記録の一例

(8) 実際に伝搬時間を求めるに当たって、それぞれの反射波及び直達波の受信信号の特徴を確認した。図5に代表的な4つの受信波形を示す。左上の直達波の受信波形は、単一パルスの典型的な波形であるが、いつも安定しているわけではない。左下の30m点の受信波形は、やや形が崩れてきているが直達波の波形に近い。右上の45m点の受信波形では、幾つかのピーク波形が重畳した波形となっている。右下の60m点では、メインピークがどれかを決定することは困難となっている。全体を見て共通することは、信号の到達前と到達後が明瞭な波形変化として認められることである。このため、ピーク波形では無く、50kHz音響信号の有無に着目して伝搬時間を決定した。

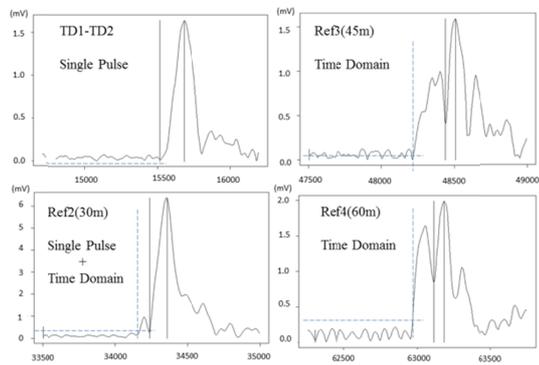


図5 直達波および反射波の受信波形

(9) 基線上の双方向音波伝搬データに基づいて、基線上の平均音速を求めた。結果は図6に示す。平均音速は、18時から20時にかけて1543m/secから1541m/sまで緩やかに低下している。減少幅はほぼ2m/secで、これは、SSTでは0.4の水温低下に相当する。

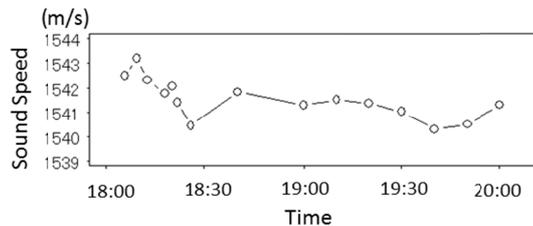


図6 基線上の平均音速の時系列変化

9月8日の受信データから得られた伝搬時間データの内、18:25:45~18:36:36間の148ショットのP1データおよび18:40:02~18:50:23間の141ショットのP2データを用いて、式5の妥当性を評価した。P1データとP2データから、まず、基線上の平均音速と平均流速を求めた。結果は図7に示す。基線上の平均音速は、1540.2m/sおよび1541.8m/sとなった。同時に求めた平均流速は-0.369m/sおよび-0.489m/sとなった。基線上では、岸向きの流れとなっていた。

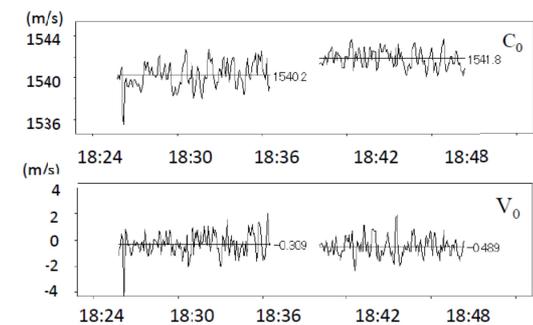


図7 基線上の平均音速と平均流速(P1およびP2データ、2012年9月8日)

同様に、30m点のRef2、45m点のRef3および60m点のRef4の音響反射体によるP1およびP2受信データについて、平均流速を求めた。結果は図8に示す。図8では、領域平均流速はすべて岸向きであった。図8から得られた平均流速データに誤差を

併せて結果を表示したのが図9の左パネルである。式4を用いて平均ゾーン流速を計算した結果は右パネルに示した。P2のゾーン4には、0.175m/sの沖向きの弱い流れが現れた。P1では、すべて岸向きの流れであった。

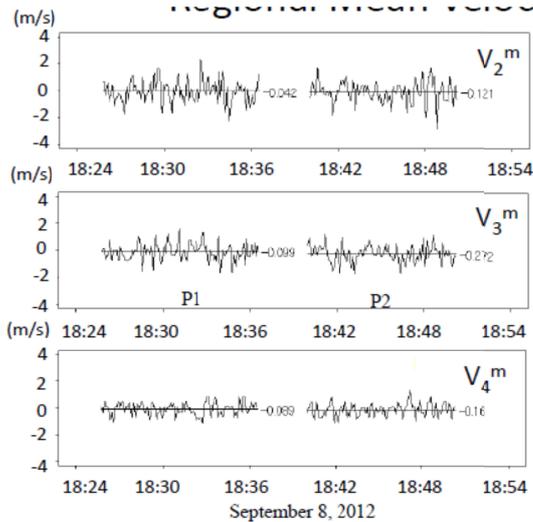


図8 実測した領域平均流速データ(2012年9月8日P1およびP2データ)

	(Regional)			(Zonal)	
	P1	P2		P1	P2
V_2^m	-0.042 ±0.066	-0.121 ±0.064	→	V_2	-0.042 ±0.066 -0.121 ±0.064
V_3^m	-0.099 ±0.051	-0.272 ±0.053		V_3	-0.215 ±0.202 -0.574 ±0.204
V_4^m	-0.089 ±0.036	-0.160 ±0.037		V_4	-0.058 ±0.210 +0.175 ±0.217

図9 実測した領域平均流速値と式4に基づいて求めたゾーン平均流速値

(10)2012年9月8日のゾーン2、ゾーン3およびゾーン4の平均流速データの推定結果を図10に示す。図中の赤枠は、10分平均の領域平均流速値を示し、誤差は0.06m/s以下である。その赤枠外の領域平均流速値では、誤差が0.1m/sより大きい。領域平均流速の測定値では、19:00付近に領域3および領域4に弱い沖向きの流れが現れている。その後は、沖向きの流れは測定されていない。式4により求めたゾーン平均流速では、岸向きの流れが優勢であるが、ゾーン3とゾーン4に沖向きの流れも有意に認められた。

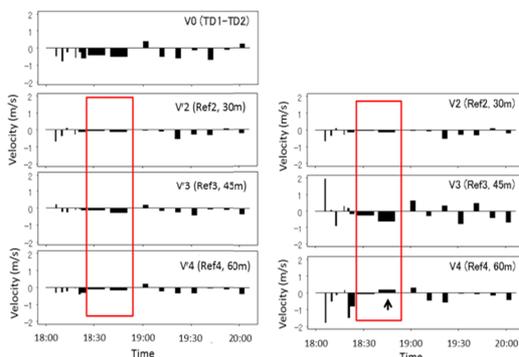


図10 領域平均流速実測値とゾーン平均流速変換値の時系列変化(2012年9月8日分)

赤枠内は10分間平均値、赤枠外は3分間平均値を示す。

(11)以上の結果から、実証試験では離岸流を観測するには至らなかったが、開発した音響トモグラフィーを用いた離岸流観測システムは、十分に音響観測の利点を発揮し、離岸流を観測する能力を有していることが実証されたと考えられる。今後、発信時間と発信間隔の最適化、連続観測と自動データ収録化を図ることにより、観測能力の強化が可能になると考えている。

更に、実証試験では、データの解析はオフラインで行うことを想定していたため、取得した受信データをリアルタイムで解析する段階に達していないが、今後の解析手法の再検討および高度化により、リアルタイム解析を可能にする解析手法が実現できると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

(1)有田守・出口一郎・入江祐介・松本卓郎・杉森貴之: 離岸流場周辺の波高と水位分布関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), (有審査), Vol.67-No.2, I_101-I_105, 2011.

(2)中埜岩男・石田廣史: 離岸流の音響計測システム, 2012年度春季海洋学会要旨集, (無審査), 159, 2011.

(3)中埜岩男・石田廣史: 離岸流計測システムにおける音波伝搬特性, 海洋音響学会 2012年度研究発表会講演要旨集, (無審査), 95-96, 2012.

(4)中埜岩男・石田廣史: 音響反射体を用いた双方向音波伝搬システムによる離岸流観測, 海洋調査技術学会第24回研究成果発表会講演要旨集, (無審査), 25, 2012.

(5)Iwao Nakano and Hiroshi Ishida: An acoustic monitoring system of the rip current based on passive reciprocal transmissions, Proceedings of the OCEANS 2012 IEEE YEOSU Conference & Exhibition, (有審査), pp.6(various pages), 2012.

(6)Iwao Nakano and Hiroshi Ishida: Realization of Acoustic Monitoring of Rip Current based on Passive Reciprocal Sound Transmissions, Proceedings of 2013 IEEE International Underwater Technology, (有審査), UT2013-1040, pp.4(various pages), 2013.

(7)Iwao Nakano, Hiroshi Ishida and Ichiro Deguchi: Measurement System for Acoustic Monitoring of Rip Current, Proceedings of the 8th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems, (有審査), pp.5(various pages), 2013.

(8)中埜岩男・石田廣史・出口一郎, 反射波を用いた受動的双方向音波伝搬による流速測定, 海洋音響学会 2014 年度研究発表会講演論文集, (無審査), 47-48, 2014.

〔学会発表〕(計7件)

(1)中埜岩男・石田廣史: 離岸流の音響計測システム, 2012 年度春季海洋学会, 2011 年 3 月 29 日, 茨城.

(2)中埜岩男・石田廣史: 離岸流計測システムにおける音波伝搬特性, 海洋音響学会, 2012 年 5 月 29 日, 東京.

(3)中埜岩男・石田廣史: 音響反射体を用いた双方向音波伝搬システムによる離岸流観測, 海洋調査技術学会第 24 回研究成果発表会, 2012 年 11 月 28 日, 東京.

(4)Iwao Nakano and Hiroshi Ishida: An acoustic monitoring system of the rip current based on passive reciprocal transmissions, OCEANS 2012 IEEE YEOSU Conference & Exhibition, May 22, 2012, Yeosu, Korea.

(5)Iwao Nakano and Hiroshi Ishida: Realization of Acoustic Monitoring of Rip Current based on Passive Reciprocal Sound Transmissions, 2013 IEEE International Underwater Technology, Mar. 8, 2013, Tokyo, Japan.

(6)Iwao Nakano, Hiroshi Ishida and Ichiro Deguchi: Measurement System for Acoustic Monitoring of Rip Current, the 8th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems, Nov. 11, 2013, Kaohsiung, Taiwan.

(7)中埜岩男・石田廣史・出口一郎, 反射波を用いた受動的双方向音波伝搬による流速測定, 海洋音響学会 2014 年度研究発表会, 2014 年 5 月 30 日, 東京.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

石田 廣史 (ISHIDA, Hiroshi)

大島商船高等専門学校・校長

(23, 24 年度 神戸大学・大学院海事科学研究科・教授)

研究者番号: 60031473

(2)研究分担者

出口 一郎 (DEGUCHI, Ichiro)

大阪大学・大学院工学研究科・名誉教授

(23 年度 大阪大学・大学院工学研究科・

教授)

研究者番号: 00029323

(3)連携研究者

()

(4)研究協力者

中埜 岩男 (NAKANO, Iwao)

海洋音響研究所・所長

(23 年度、24 年度 株式会社グローバルオーシャンディベロップメント 特任参事)

研究者番号: