

音響ビデオカメラと実海域での水中監視映像

倉本和興*、倉重吉範*、田中隆博*、浅田昭**

Underwater Surveillance Images in an Actual Sea Area by Acoustic Video Camera

Kazuoki Kuramoto*, Yoshinori Kurashige*, Takahiro Tanaka* and Akira Asada**

Abstract

The optical camera/video has been generally used as a method for recognizing the object in water until now. However, there are many problems as below; the recognizing distance extremely shortens because the intensity of the optical wave is remarkably attenuated in the water, the field of view is obstructed because the irregular reflection is arisen by impurities and floating mud in the water and so on. On the other hand, it is noticed that acoustic sonar using sound wave is an effective imaging technology in the water, since it's attenuation is smaller than the optical wave and the field of view is hardly obstructed by haze in the water.

Development of the underwater security sonar system is in progress by the Special Coordination Funds for the promotion of Sci. and Tech. of Ministry of Education, Culture, Sports, Sci. and Tech.. Practical acoustic video camera using the acoustic lens is produced experimentally as one of the element research and the practicable study in sea area around the Japan Coast Guard Academy is carried out. In this paper, composition and imaging principle of the acoustic video camera which seems to be useful as an apparatus for monitoring or image pickup in the water are introduced, and moving images taken in the actual sea area around the JCGA are reported. And applications and possibilities of the acoustic video camera in JCG agency are also mentioned.

1. はじめに

水中の対象物を視認し、撮影する1つの技術としてこれまで光学カメラ・ビデオが使われてきたが、水中においては光の減衰が大きく視認距離が極端に短くなり、また水中の不純

原稿受付 2007年1月12日

* 海上保安大学校海事工学講座

** 東京大学生産技術研究所

物、浮泥等による濁りによって乱反射して視界が遮られなど多くの問題がある。これに対し、音波を利用した音響ソナーは光に比べて減衰が小さく、視界もほとんど遮られることもないため、水中での撮像技術として注目されている。このような背景の中、米国ワシントン大学、応用物理研究所のEdward Belcherらは音響レンズを使った画期的な水中ビデオカメラを開発した¹⁾。これは2周波の撮像ソナーでDIDSON(Dual-Frequency Identification Sonar)と呼ばれ、高分解能でしかもリアルタイムに簡便に撮影できる性能を備えている。

現在、文部科学省科学技術振興調整費による重要課題解決型研究（平成17年度から3カ年計画）として、東京大学生産技術研究所と共同で水中セキュリティソーナースステムの開発を行っている^{2,3,4)}。その要素研究の1つとして、米国Sound Metrics社と共同開発により2周波の音響ビデオカメラ（DIDSON）を改造試作し、水中監視のための音響ビデオシステムの開発を行っている。又、最適な水中監視手法を開発するため、小型艇に音響ビデオカメラを搭載し、海上保安大学校周辺海域での実用化試験を行っている⁵⁾。ここでは、水中での監視、撮像システムとして極めて有効と思われる音響ビデオカメラの構成および撮像原理を紹介し、実際に海中で撮影した映像（画像）結果を幾つか報告する。又、音響ビデオカメラの海上保安庁における業務への応用、発展性についても言及する。

2. 音響ビデオカメラの構成と撮像原理

音響ビデオカメラは、1MHz 前後の超音波を使用しており、送受波器から一定間隔で音響パルスを送信して、海中のターゲットからの反射・散乱波を受信し、受信信号の時間遅れに対応した距離に受信信号強度に応じた濃淡のある輝度として画像表示するものである。DIDSONの音響センサー部全体の写真をFig.1(a)に示す（以後「センサー部」という）。センサー部の形状は、長さ約30cm、高さ20cm、幅17cmと小型で、重量は約7kg（水中で

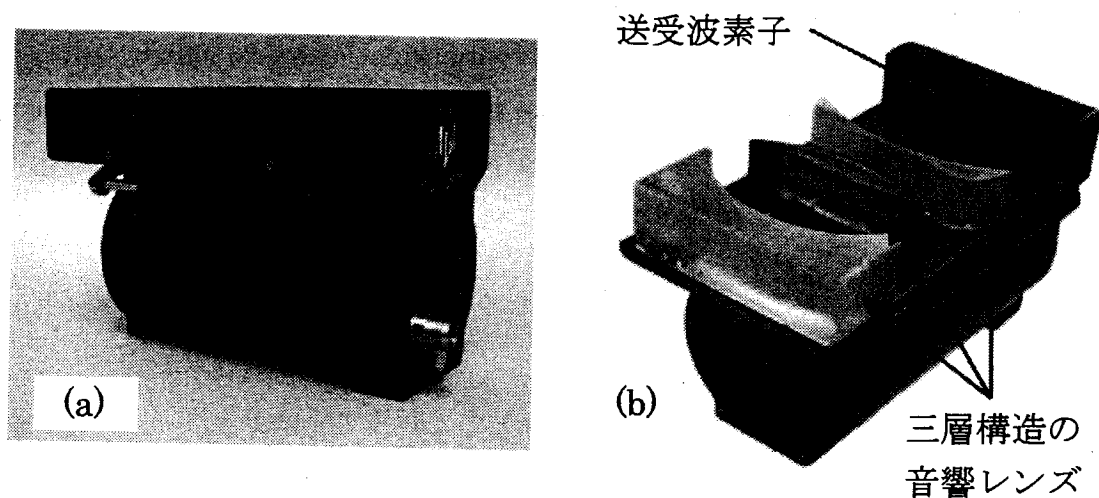


Fig.1 音響ビデオカメラ(DIDSON)の写真 (a)全体写真 (b)レンズハウジングを取り外した場合（水中では送受波素子および3枚の音響レンズの間は海水で満たされる）

は 0.6kg)、音響レンズ方式のためビームフォーミングに処理時間と電力は不要で、わずか 30W の電力で動作する。音響ビデオシステムとしては、このセンサー部にケーブルを介して接続されたインターフェースボックスとノートパソコンで構成され、Ethernet で制御される極めてコンパクトで汎用なものとなっている。音響レンズと送受波器アレイは、エレクトロニクス容器部の上に取り付けられており、レンズは 3 枚で構成される。レンズハウジングを取り外したものを Fig.1(b)に示す。送受波素子と 3 層の音響レンズが並んでおり、水中で使用する時には送受波素子および 3 枚の音響レンズの間は海水で満たされる。下部のエレクトロニクス容器部には中央のレンズを前後に移動させるモーター機構が組み込まれ、距離に対して焦点合わせをすることができる。送受波素子は横に細く高さ方向に長い円弧状のものが 96 個若しくは 48 個横一列に並び、各送受波素子は鉛直方向に 12° 、水平方向に 0.3° 若しくは 0.6° のビーム幅を持つ音響ビームを形成する。

今回試作した 2 種類の音響ビデオカメラの仕様を Table 1 に示す。DIDSON は、2 つの周波数 (Standard DIDSON (以下 St-DIDSON という)では 1.1MHz および 1.8MHz、Long Range DIDSON (以下 LR-DIDSON という)では 0.7MHz および 1.2MHz) のパルス音波を用い、左右 29° 幅の視野角で撮影できる。例えば、St-DIDSON の場合では、2 つの周波数 1.1MHz と 1.8MHz に対応して、それぞれ 0.6° 間隔で 48 本のビームと 0.3° 間隔で 96 本のビームを、左右 29° 幅で 4 回と 8 回の送受信サイクルに分割したビーム画像ラインを貼り合わせて 1 画像を形成し、毎秒 4~21 フレームの画像を生成する。撮像距離は使用周波数によって決まり、St-DIDSON で最大約 40m、LR-DIDSON で最大約 100m であり、低周波数になるほど最大撮像距離は長くなる。一方、距離分解能は、送信パルス幅によっ

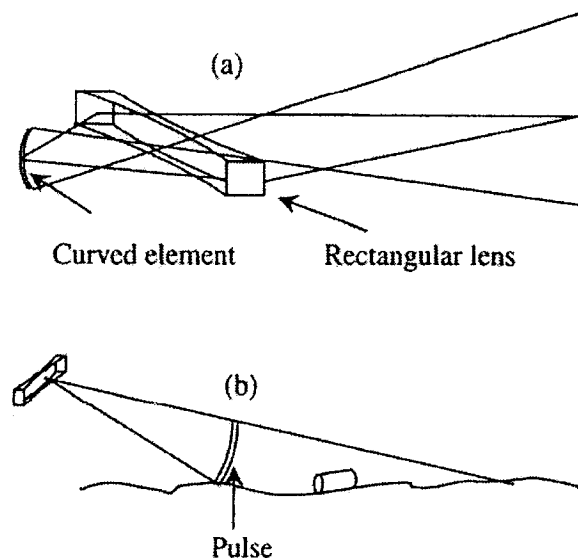


Fig.2 1つの送受波素子と音響レンズによってつくられるビームと走査線 (a) 鉛直方向には 12° の広がりを持つが、水平方向は音響レンズによってビームフォーミング (焦点合わせ) される (b) 1本のビームが海底に斜めに照射された様子

Table 1 2種類の音響ビデオカメラ (St & LR) の主な仕様

Standard DIDSON

Mode	Low	High
Operating Frequency	1.1MHz	1.8MHz
Beam width	0.6° H by 12° V	0.3° H by 12° V
Number of beams	48	96
Max Range	40m	12m
Frame Rate	4-21 frames/s	
Field of View	29°	
Power Consumption	30 Watts	
Weight in Air	7.0 kg	
Weight in Water	0.61 kg	
Dimension	30.7 cm by 20.6 cm by 17.1cm	
Control	Ethernet	

Long Range DIDSON

Mode	Low	High
Operating Frequency	0.7MHz	1.2MHz
Beam width	0.6° H by 12° V	0.6° H by 12° V
Number of beams	48	48
Max Range	100m	40m
Frame Rate	2-10 frames/s	
Field of View	29°	
Power Consumption	30 Watts	
Weight in Air	7.0 kg	
Weight in Water	0.61 kg	
Dimension	30.7 cm by 20.6 cm by 17.1cm	
Control	Ethernet	

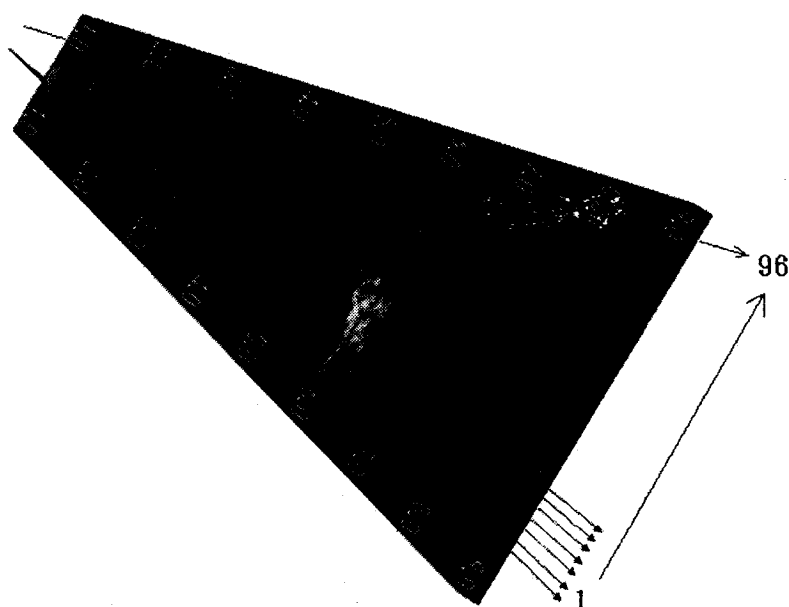


Fig.3 96本の走査線を貼り合わせて作成される1枚のDIDSON画像

ても異なるが、St-DIDSONで数cm、LR-DIDSONで十数cm程度であり、波長が長くなるほど画像分解能は低下する。1本のビームが形成される様子を模式的に示したのが**Fig.2(a)**である。鉛直方向は縦長円弧状の送受波素子によって 12° のビーム幅を持つが、音響レンズは縦方向には曲面を持っていないためレンズを透過しても放射される角度は入射前と同じである。一方、水平方向においては、送受波素子からレンズ全面に広がって放射された音波は、音響レンズによって焦点を結び目的の焦点距離の位置に収束する。**Fig.2(b)**は、鉛直方向に 12° のビーム幅を持つ1本のビームが水平な海底に斜めに照射された様子を示した図である。送受波素子から短い幅のパルスが送信され、海底からの反射パルスを受信する。手前から遠方へと到達時間に差が生じ、また、受信信号の強さは照射されたターゲットの表面の状況によって変化する。到達時間が距離に、受信信号強度が濃淡に変換されて、DIDSON画面で1本の放射状走査線となる。これが96本又は48本の近接した走査線として画面上に貼り合わされ、**Fig.3**に示すような左右 29° の視野角を持った扇形状のDIDSON画像を形成する。このように音響ビデオカメラは、往復伝搬時間を距離に換算して図化するサイドスキャンソーナーと同じ原理で画像を作成しているが、DIDSONでは、送受波器アレイを曳航する代わりに一度に96本若しくは48本のビームを送受波して画像の作成を行い、1秒間に4～21フレームの動画像を形成している。

3. 音響ビデオカメラの作る映像

光学ビデオカメラと音響ビデオカメラの違いは、単に光の代わりに音波を使用しているという点だけではなく、前節で述べたように映像化の仕方に大きな違いがある。光学ビデオカメラでは、光学レンズによりイメージセンサの感光面に結像させるが、音響ビデオカメラでは、音波が光の速度に比べて著しく遅いことを利用して、エコーパルスの往復伝搬

時間を奥行きに距離に換算して映像化する。このため実際に近い画像を得るためには、光学ビデオカメラとは異なった撮影上の工夫が必要である。例えば Fig.4 に示すように、オブジェクト①の平板に垂直に投射された場合、複数のビームによる画像はセンサー部から平板までの同距離の位置に一本の線のようになり、現実のイメージとは異なる縦方向に押しつぶされたものが得られる。又、オブジェクトの背面で音波が当たっていない影の部分（シャドウゾーン）が大きく現れてくる。複数のオブジェクトが同一ビーム内で等距離にあり異なった高さにある場合には、それらを識別することはできない。一方、オブジェクト②のようにビームが低角度で投射される場合には、実際に近い画像が得られ海底にあるオブジェクトの認識も容易となる。実際にはセンサーを船舶等に搭載して、海面から海中・海底の対象物を検索する場合が多い。撮影角度（音響ビーム照射角度）は Fig.4 にあるような低角度になるため、実際に近いイメージが得られる。又、音波が当たっていない影の部分（シャドウゾーン）の存在から、対象物の形状、高さ、奥行き等が経験的に推測される。

センサー部の揺れに対する画像のぶれに関しても、光学ビデオカメラと音響ビデオカメラで大きな差がある。光学カメラでは手ぶれ等によるセンサーの揺れは深刻な画像のぶれとして大きく影響する。これに対して、音響ビデオカメラはパルスの往復伝搬時間が距離に対応していることから、多少のセンサー部の揺れは深刻な画像のぶれには直結しない。DIDSON を船舶に搭載して撮影する場合、当然ながらセンサー部は波の動揺を受け上下に揺れる。しかし実際に得られる画像は上下に大きく動揺はせず、十分に判別できるものに

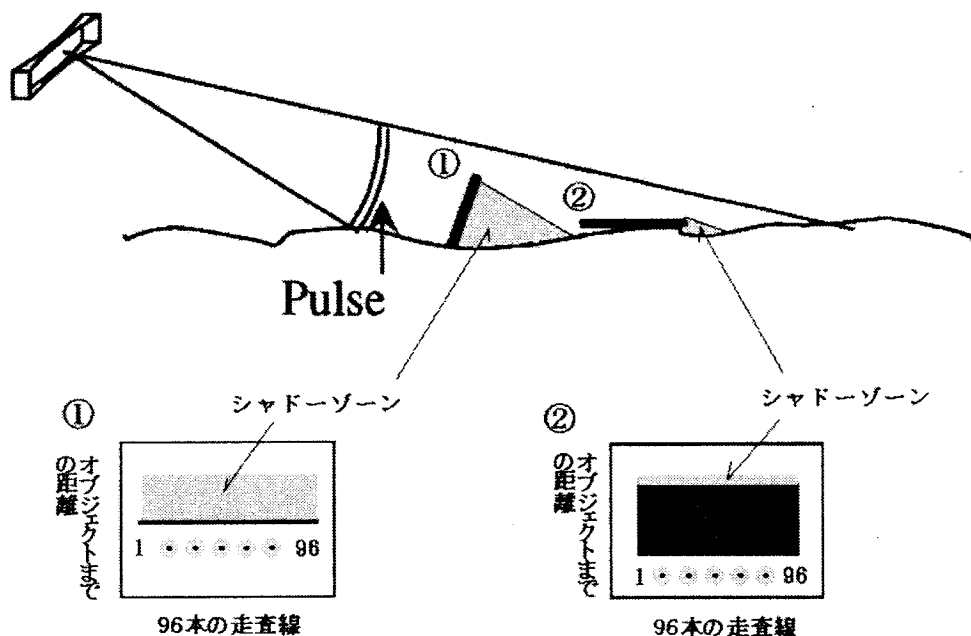


Fig.4 DIDSON の作る特徴的な画像（エコーパルスの伝搬時間が距離に対応するため、オブジェクトが同一ビーム内で等距離にあり異なった高さにある場合には識別しにくい）

なっている。多少の揺れに対しては、ソフトウェアによる FFT 相関処理を行うことで揺れを抑えた安定した映像を得ることも可能である。

4. 実海域での実用化試験

4.1 試験船への音響ビデオカメラの取り付け

音響ビデオカメラは音響レンズを使用するため、撮影視野角が約 29° と狭い。そのため、Fig.5 に示すように、試験船の舷にパン・チルト機構を持たせた取り付け治具を装着し、その先端にセンサー部を取り付けて、船上のモニター画面で映像を見ながら操作ハンドルを調整することで監視・撮影目標を捉えた。また、センサー部の向いている方位・傾斜角（パン・チルト角）を得るために、音響ビデオカメラの先に磁気方位・傾斜センサーを、また正確な位置情報を得るためにセンサー取り付け治具の横に GPS 精密測位装置 (RTK-GPS) を取り付け、水中監視映像データと同時にこれらのデータも取得した。これによってセンサーの正確な位置とカメラの向いている方向・角度が分かり、地図・海底地形データと組み合わせることによって、DIDSON 映像を地図上にマッピングすることが可能となり、水中捜索等において目標物の位置や姿勢の把握が容易になる。試験船には、海上保安大学校（以後「大学校」という）保有の長さ 8 m の船外機付実習艇 K2 を使用した。

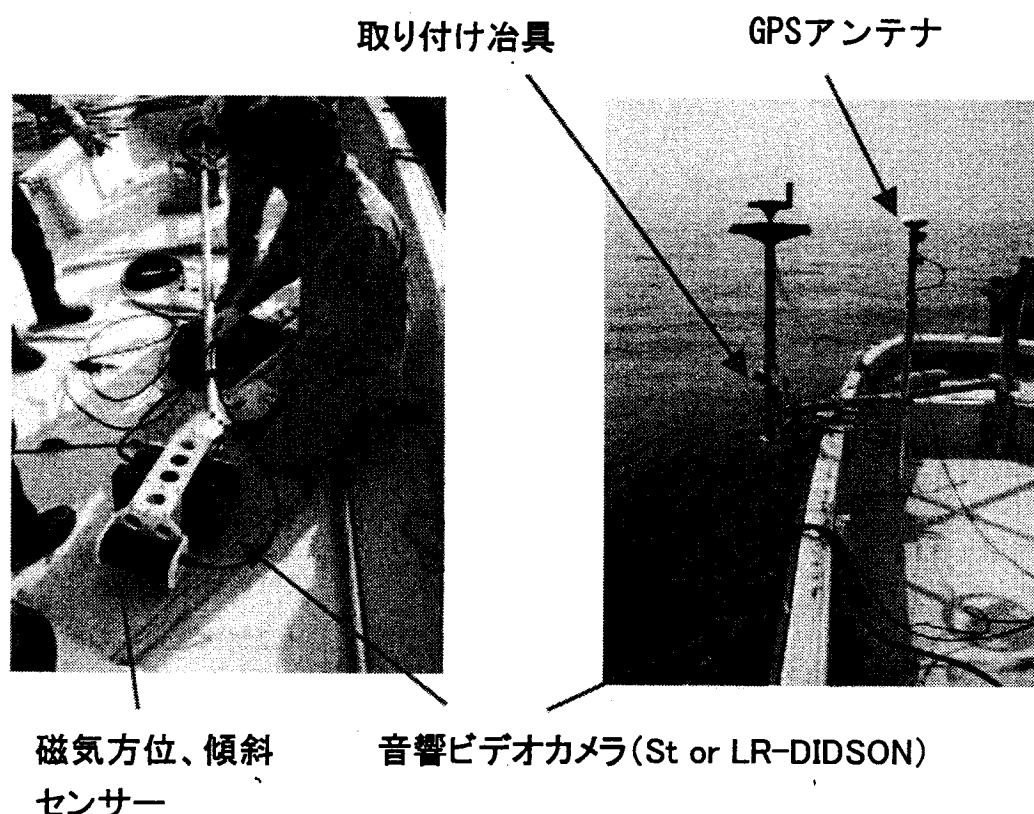


Fig.5 実習艇 K2 に取り付けした音響ビデオカメラ(DIDSON)と GPS 受信機および磁気方位・傾斜センサー（DIDSON と磁気方位・傾斜センサーはパンチルト機構を持つ制御ハンドル付きの治具で取り付けられている）

4.2 試験海域

今回、2種類の音響ビデオカメラ（St & LR-DIDSON）を使用し、実水中空間のデータの採取を行った海域を Fig.6 に示す。3つの試験海域のうち、まず大学校前面海域において予め既知の物標を海中に投入し St-DIDSON を用いてその映像を撮影した。又、大学校周辺海域において、魚礁、岩礁、こじま栈橋、蠣の養殖筏、岸壁周辺等の撮影を行った。次に、江田島市沖美ビーチ沖において大学校の潜水研修で行われる環状搜索訓練の様子を LR-DIDSON を用いて撮影した。更に、山口県岩国市柱島沖で水深 40m に沈没している戦艦「陸奥」の船体撮影を同じく LR-DIDSON によって試みた。

5. 撮影結果

5.1 St-DIDSON の撮影画像

音響ビデオカメラで水中の対象物がどの程度視認できるかを確かめるため、まず大学の前面海域において予め既知の物標を海中に投入し St-DIDSON を用いて撮影を行った。準

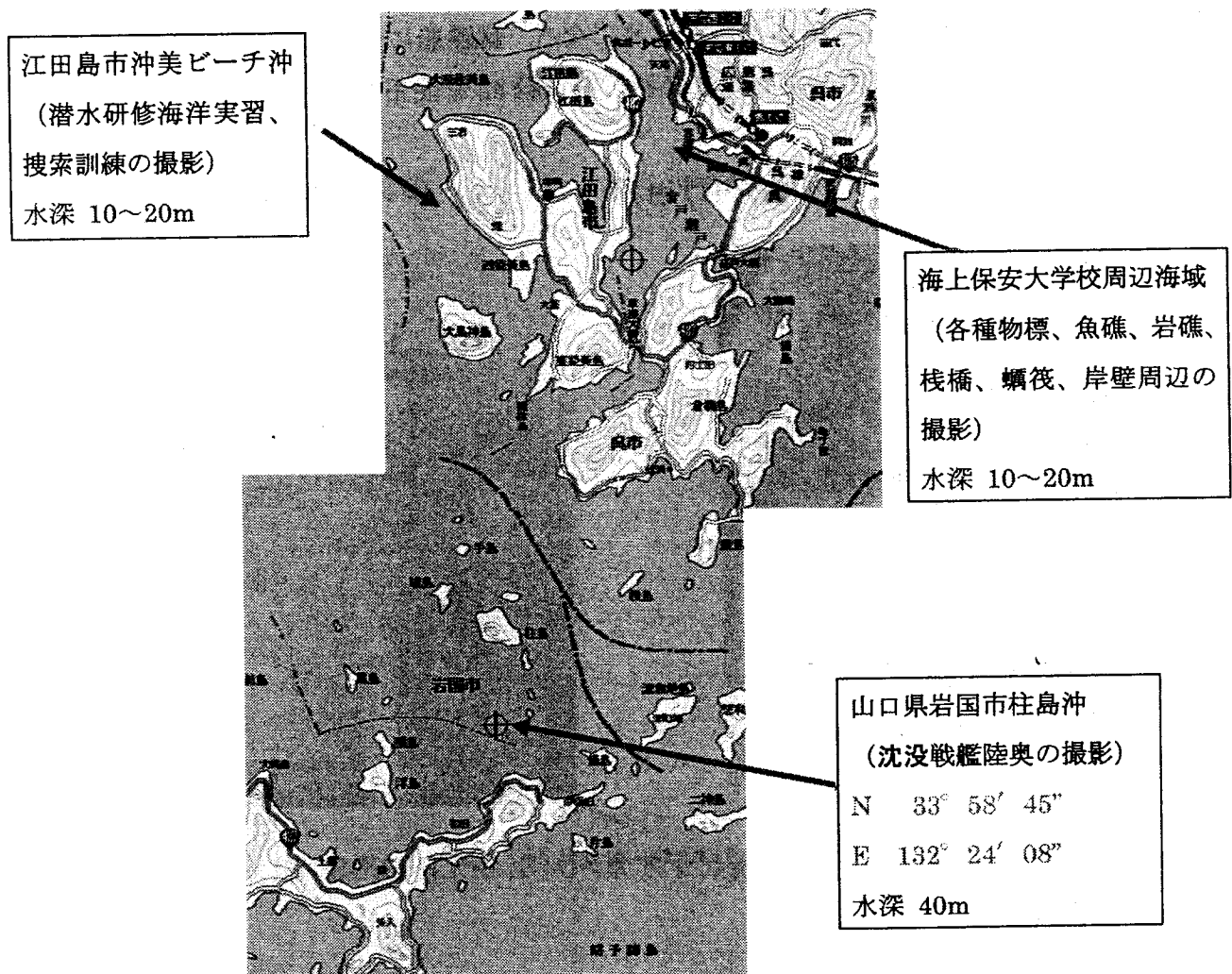


Fig.6 DIDSON の映像データの採取を行った3つの海域

備した物標は6種類（自転車、オイル缶、木箱、万力、ゴム製タイヤ、革製靴）で、それぞれにロープでブイを取り着け、浮力のあるものはブロックなどで錘をつけて水深約10mの海底に5m間隔で投下した。自転車とオイル缶を同時に撮影した DTDSON 画像を Fig.7

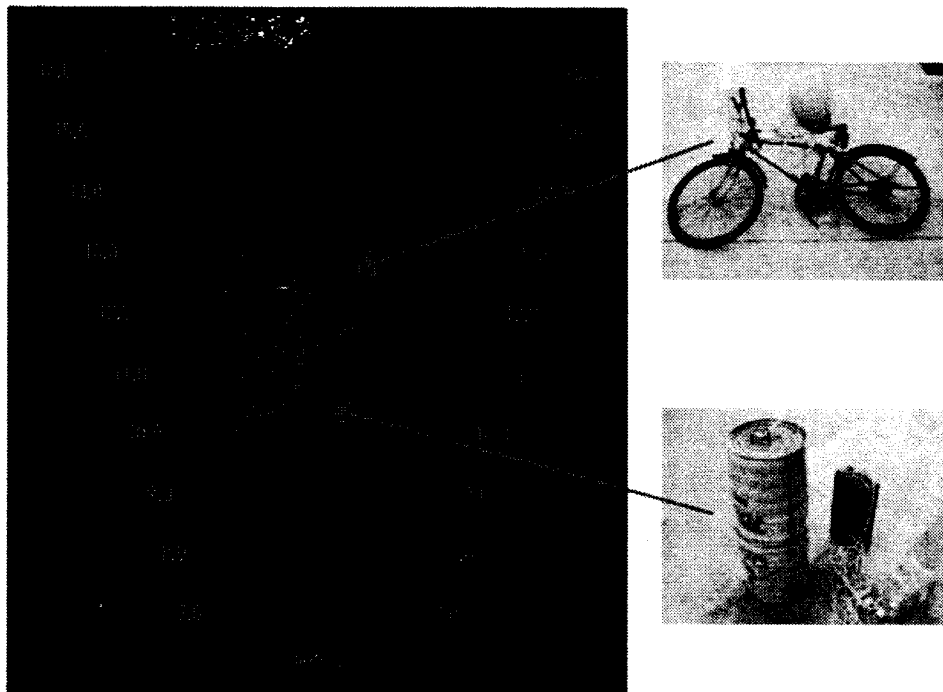


Fig.7 水深約 10m に投下された自転車及びオイル缶の撮影画像（横の数字はカメラからの距離 m を表す）

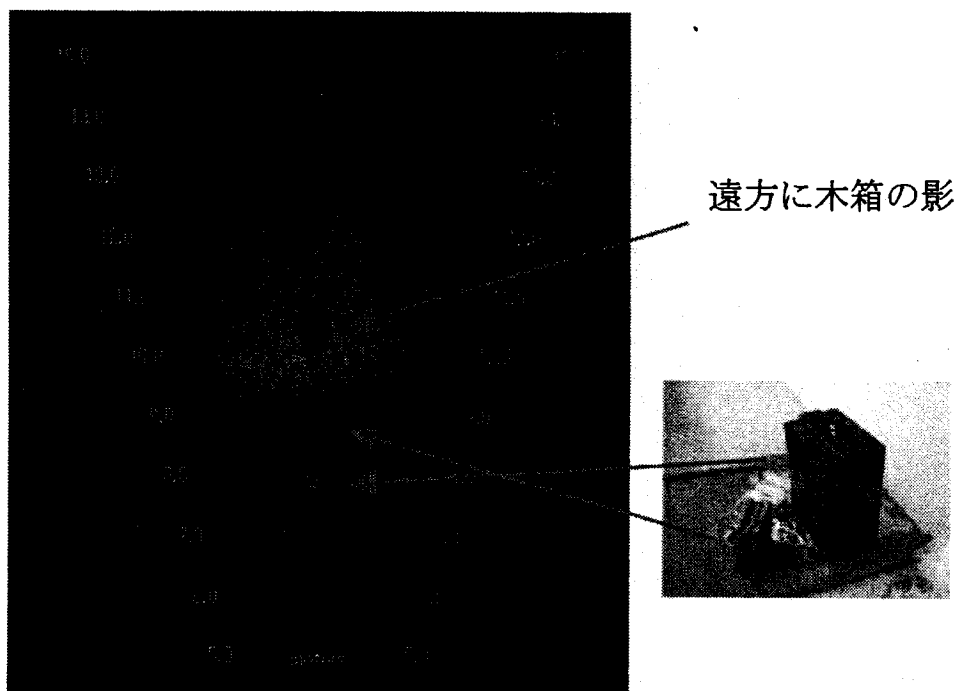


Fig.8 水深約 10m に投下されたブロックの錘をつけた木箱の撮影画像（木箱は海底から浮き、遠方にその影が写っている）

に示す。横の数字はセンサー部からの距離をメートル(m)で表示している。撮影画像をみると、金属など音波を強く反射する部分は白く、ゴムなど音波を吸収する部分は黒く写っているのが分かる。**Fig.8**は、ブロックの錘をつけ、海底から浮いている木箱を捉えた画像である。木箱は海底から浮いているため、DIDSON 画像では一番手前に木箱、少し遠い位置に錘のブロックが写り、上下が逆転している。更にその遠方に木箱の影（音波が木箱によって遮られ海底からの反射がないシャドウゾーンが黒くなっている部分）が写っているのが分かる。以上のように、その撮像原理からくる特殊性から DIDSON 撮影画像を理解する上で若干の注意が必要となってくるが、逆にその特殊性を良く理解することで対象物の形状、位置関係などを推測することができる。

大学校周辺海域での撮影結果の一例として、蠣の養殖筏と岸壁付近の海中投下物を撮影した画像を **Fig.9** および **Fig.10** に示す。音響ビデオカメラにより蠣筏の全容が映像として一度に捉えることができる。行方不明者が蠣筏に絡まっている場合があるが、音響ビデオカメラを用いれば、潜水を行わずに溺死者の有無を判断することも可能である。また岸壁周辺での不法投棄物なども容易に捉えることができ、事件、事故等における岸壁周辺の捜索など、海上保安庁（以下、当庁という）における海中捜査・捜索が効果的に行えると期待される。

5.2 LR-DIDSON の撮影画像

ある程度の水深をもつ海中・海底調査を行うためには、100m 程度の最大探知距離を持つ Long Range DIDSON を使用する必要がある。今回は、水中にいるダイバーを探知・監視する目的で、江田島市沖美ビーチ沖（水深 10m~20m）において行われた潜水研修海洋実習

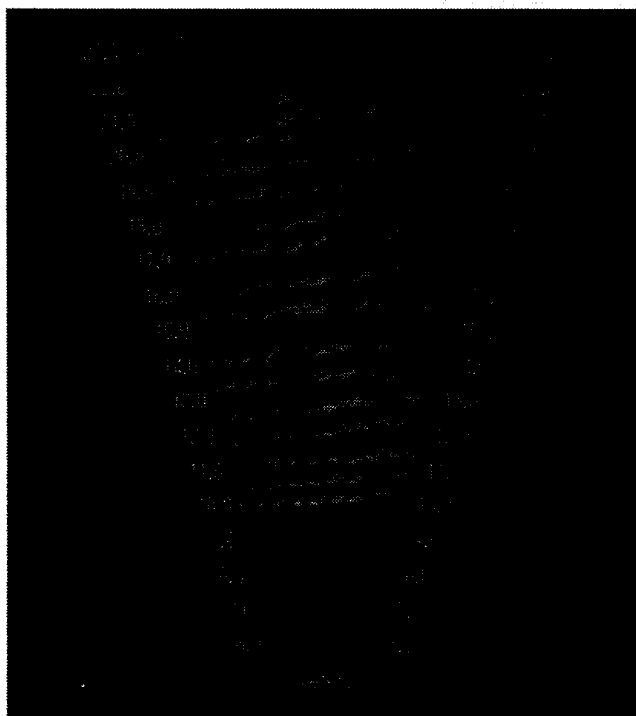


Fig.9 蠣の養殖筏（蠣が一行に並んで筏にぶら下がっている様子がわかる）

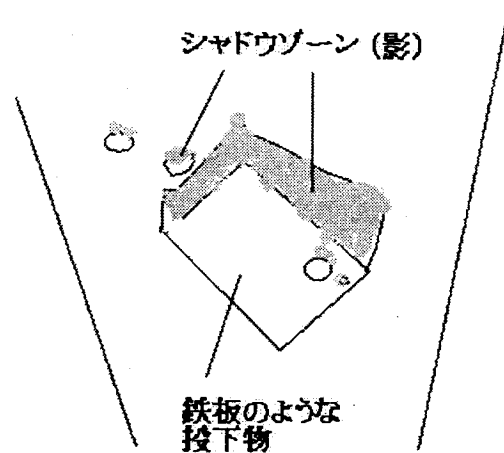
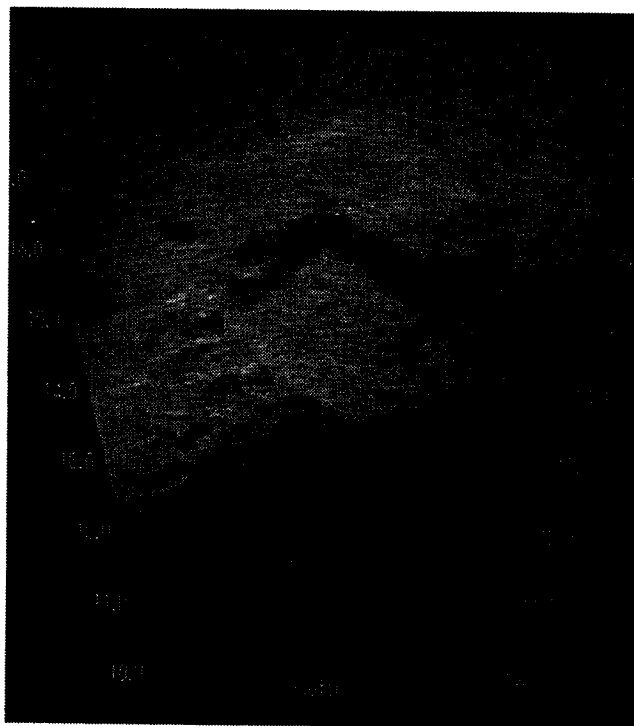


Fig.10 岸壁周辺で撮影された海中投下物（影などから物体の厚み、形状等が推測される）

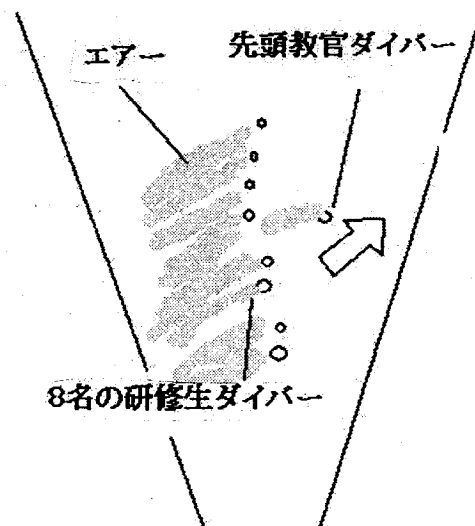


Fig.11 沖美ビーチでの潜水研修海洋実習の1シーン（実際の映像は動画で、8名の研修生ダイバーが1列に並んで環状搜索訓練を行っているのがわかる）

の模様を、沈船等の調査、捜索支援に資する目的で、山口県岩国市柱島沖の水深約 40m に沈没している戦艦「陸奥」の船体撮影を試みた。

海洋実習での環状捜索訓練の様子を捉えた画像を Fig.11 に示す。実際の映像は動画であるため、Fig.11 はその 1 画像を示している。映像では 8 名の研修生ダイバーが 1 列に並び、環状捜索を行っている様子が明確に識別される。なお環状捜索訓練とは、数名のダイバーでロープを持ち、一端を固定して円を描くように旋回しながら海底を捜索する訓練のことである。光学カメラで撮影すると、浮遊物などにより数m先までしか視界がないが、音響ビデオカメラでは数 10m 先までのダイバーの動きを捉えることができた。

柱島沖で戦艦「陸奥」を撮影した画像の一例を Fig.12 に示す。戦艦「陸奥」は、1943 年 6 月 8 日、3 番・4 番主砲塔の間の火薬庫から火災を起こし、爆破、転覆して 1121 人の乗組員と共に沈没した⁶⁾。1970 年から 8 年間の引き上げ作業により 3 番主砲塔他、多くの遺品が引き上げられたが、全体の 1/4 が未だに柱島沖の海底に眠っている。『陸奥』は当時世界最大級の大型戦艦であり、主要船体部分は、長さ約 110m、幅約 28m の大きさがあることから、Fig.12 に示すように視野角 29° の LR-DIDSON 画像では、船体の一部分しか写らず、全体像を撮影することはできなかった。しかしながら、試験船で沈没海域を何度か行き来して反復撮影することにより、水深 40m の海底の広範囲において爆破で飛び散った破片の幾つかを捉えることができた。今回の試験では GPS による正確な位置情報も同時に取り入れているため、それを基に画像を貼り合わせ全体像を作成することも可能であり、今後取り組むべき課題である。海難等で船舶が沈没した場合、最終的にはダイバーによる潜水作業とサルベージ作業が必要となるが、沈没船の姿勢等の概略が必要な初動捜索においては、巡視

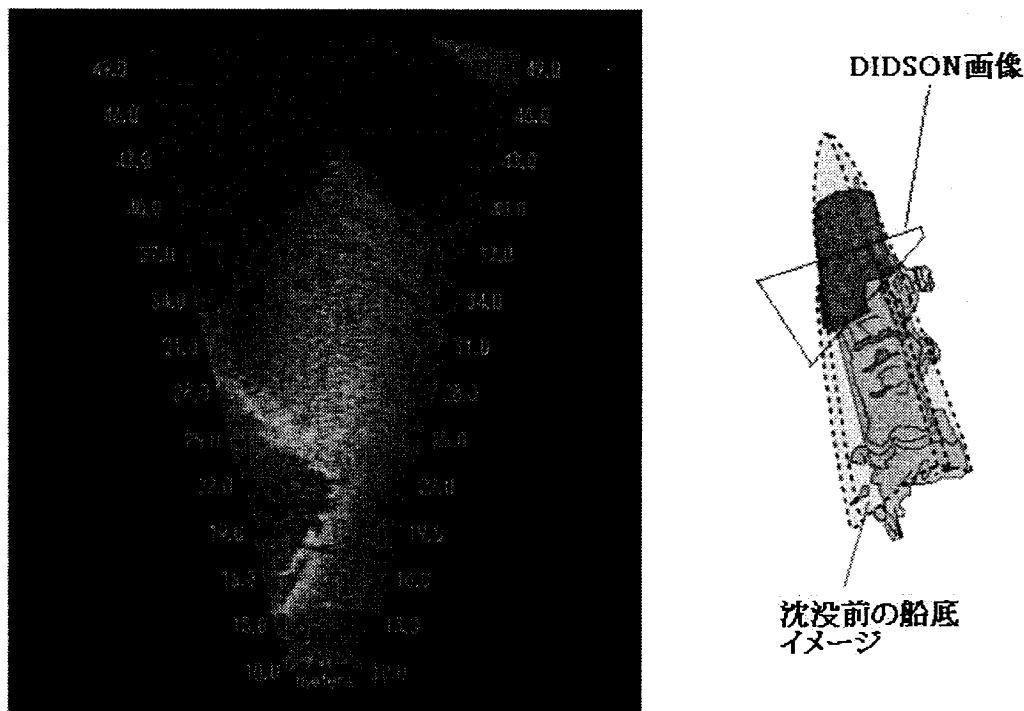


Fig.12 柱島沖で転覆、沈没した戦艦陸奥の船体（船底）の一部

艇等の船舶に比較的簡単に搭載でき、リアルタイムな映像が得られる音響ビデオカメラが有効であることは疑う余地のないところである。

6. おわりに

本研究は、文部科学省科学技術振興調整費による重要課題解決型研究「水中セキュリティソーナーシステムの開発」[研究代表者：浅田昭（東京大学生産技術研究所）]として行ったものの一部であるが、音響ビデオカメラに関しては、水中搜索・捜査、潜水支援等の警備救難業務に限らず、海底地形、浮標の海中部分調査など多方面の海上保安業務に役立つものであることがわかった。水中搜索、捜査においては潜水作業の占める割合が多く、特に港湾内での搜索においては、ヘドロ等の不純物により透明度が低く、水中で視認できる範囲は数m程度と限られてくる。その点、音響ビデオカメラは、昼夜を問わず監視距離が長く透明度の低い湾内では特に有効となる。潜ってみないと分からないといったこれまでの潜水作業の現状において、無駄な潜水を防ぎ、効率的な捜査、搜索を行う上でも音響ビデオカメラから得られる映像情報の果たす役割は大きいと思われる。又、投光器、電源などの装備も一切不要となり、夜間における捜査、搜索にも極めて有効と言える。

今後の課題としては、①音響ビデオカメラを巡視艇などの船舶に取り付けるため、汎用性のある船体固定治具の製作、②センサー部の動揺による DIDSON 画像のぶれの補正や位置情報に基づいた DIDSON 画像の貼り合わせ、地図上へのマッピングなどのソフトウェアの開発が重要であると考ええる。

謝辞 本研究の実海域での実用化試験において、試験船の準備、操船などにおいて多大なる援助を戴いた大学校訓練部に深く感謝致します。

参考文献

- 1) E. Belcher, W. Hanot and J. Brush: Dual-Frequency Identification Sonar (DIDSON), UT2002, pp.187-192, 2002.
- 2) 浅田昭, 倉本和興他, “水中セキュリティソーナーシステムの開発”, 海洋音響学会研究発表会講演論文集, pp. 59-60, May 2006.
- 3) 倉本和興, 浅田昭他, “水中セキュリティソーナーシステムの開発—岸壁固定型センサーの性能評価試験と実用化試験—”, 海洋音響学会研究発表会講演論文集, pp. 61-64, May 2006.
- 4) A. Asada, K. Kuramoto et al., Development of Underwater Security Sonar System, Proc. CD-ROM, Ocean' s 06 Singapore, 2006.
- 5) 浅田昭, 倉本和興, “音響ビデオカメラを使った水中監視技術”, 信学技報, Technical Report of IEICE, pp.27-30, 2006.
- 6) 吉村昭, 陸奥爆沈, 新潮社文庫