

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.48 No.4 December 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 4 号 (Vol. 48, No. 4), 2009年12月 (December 2009)

目 次 (CONTENTS)

杭の軸直角方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案 菊池喜昭.....	3
(Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile Yoshiaki KIKUCHI)	
断面修復を施したコンクリート床版の鉄筋腐食性状に関する検討 加藤絵万・審良善和・岩波光保・横田弘.....	23
(Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA)	
水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発 松本さゆり・片倉景義・吉住夏輝.....	53
(Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI)	
空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案 前川亮太・蘇凱・水上純一・坪川将丈.....	71
(Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA)	
水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発 吉住夏輝・松本さゆり・片倉景義.....	89
(Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA)	
流出油回収装置への蒸気エゼクタの応用 藤田勇・吉江宗生・竹崎健二.....	109
(Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI)	

水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発

松本さゆり*・片倉景義**・吉住夏輝***

要 旨

水中施工状況の確認は、潜水士によるレベル測量と目視による出来栄確認により実施される。通常の施工は水中の透明度には関わりなく実施され、また作業中においては底泥のまき上げにより透明度がさらに低くなる場合も有りうる。このような悪条件下において、潜水士による水中の視程距離は短い場合が多い。また、水中施工時の安全管理、被災直後の現況調査等においては即時的な水中視認と測量が必要とされた。このような背景から、潜水士に頼らない、すなわち濁度に依存しない、安全、確実、効率的なリアルタイム水中視認技術と測量技術を可能とする機器開発が望まれている。

そこで、水中映像化のために著者の一人が取り組んできた水中音響レンズの基礎研究成果を踏まえ、超音波式水中映像取得装置を開発した。そして、水槽及び海上試験において、観察距離 5~25m、視程距離 10m の場合、分解能 縦 5cm×横 10cm×奥行き 13cm、観察範囲 縦横共に 33 度 (6m×6m) を実現した。また、フレームレート 1 秒当たり 1 画面の三次元・リアルタイム映像取得に成功した。さらに、本機の測量精度は±5%以内であることにより、実用上必要なレベルに達した。

キーワード：水中視認，超音波，三次元イメージ，リアルタイム，水中音響レンズ

* 施工・制御技術部計測・制御研究チーム研究官

** 客員研究官

*** 施工・制御技術部計測・制御研究チーム特別研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail:matsumoto-s@pari.go.jp

Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens

Sayuri MATSUMOTO*
Kageyoshi KATAKURA **
Natsuki YOSHIZUMI ***

Synopsis

In the present situation, the slope of landfill after underwater construction is checked by divers by using level survey and visual confirmation. Usually, underwater constructions are executed even in case of in murky waters. The water turbidity might increase by raising bottom mud under construction. Because of such the bad condition, visibility distance of divers tends to be shortened. Moreover, real-time underwater monitoring and surveying system is needed in case of the safety management for underwater construction, the investigation of post-disaster situation and so on. From such back grounds, a new technique, which is independent on the water turbidity, is needed to replace the direct diver works.

Then authors have developed an underwater three-dimensional imaging SONAR system with acoustic lens based on fundamental research by one of the authors. The developed system performances are as follows; 1) the observation distance is from 5 to 25 m, 2) the field of view is 33 degrees, 3) the recording movie is at a 1 fps, 4) the surveying precision within 5%. Such performance ability satisfies the demand in the practical usage in airport site.

Key Words: Underwater Imaging, Ultrasonics, Three-Dimensional Imaging, Real Time, Acoustic Lens

* Researcher, Construction and Control Systems Department
** Visiting Researcher
*** Fellowship Researcher, Construction and Control Systems Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:matsumoto-s@pari.go.jp

目 次

要 旨	53
1. まえがき	57
2. 超音波式三次元水中映像取得装置	57
2.1 装置概要	57
2.2 主要センサ部と三次元映像の取得原理	60
3. 水槽試験	63
3.1 試験概要	63
3.2 映像取得試験	63
3.3 測量試験	64
3.4 水槽試験の考察	65
4. 海上試験	67
4.1 試験概要	67
4.2 映像取得試験	68
4.3 測量試験	68
4.4 海上試験の考察	68
5. 結論	68
6. あとがき	70
謝辞	70
参考文献	70

1. まえがき

港湾や空港島などにある埋立マウンドは、捨石材を盛土した後、潜水士による均し施工を行い、捨石マウンド築造後、被覆石の施工を行う。捨石マウンド法面高さの測量は音響測深機法が用いられ、また、出来高の確認は潜水士の目視により実施される。しかしながら、港湾土木施工においては、作業そのものによる底泥の巻き上げや海域によっては富栄養化に起因する‘濁り’も加わり、透明度が十分でないため、通常的水中光学カメラやダイバー目視による水中測量作業は実施が困難なことが多い。このような背景から、水中の施工状況の管理や安全のための監視をするために音響的手法を用いた水中視認や撮影への関心は従来から高く、実用には至っていないものの研究例はいくつか存在する¹⁾。また、水中の測量では、従来から音響による深淺測量も行われているが、港湾土木施工では、特に、海上プラットフォームの動揺による影響を避けるため、計測の高速化が必要となる。さらに、津波や地震等の後の構造物被災調査においては、高速実時間の即時水中視認を可能とすることも望まれている。これらのことから、港湾土木施工においては、音響的手法によりリアルタイムに三次元計測を行い、三次元構造の測量と水中視認とを同時に、かつ即時に実施する機器が強く望まれることとなった。

ここで、港湾土木用途に限らなければ、国内外を含めて音響的手法を用いた水中視認に関わる基礎研究例は多数存在する²⁻⁵⁾。確立された既存技術としてはナローマルチビームソナー⁶⁾、米国SOUND METRICS社製の音響ビデオカメラ⁷⁾が有名である。ナローマルチビームソナーは、船舶の直下を方位方向に広く、進行方向に極めて狭い範囲で対象物までの距離を取得する(図-1)。さらに、航行しながらデータを取得し、さらにGPSによる位置データとモーションセンサによる船体動揺も同期して取得し、市販される専用ソフトウェアで後処理をすることで、水中の三次元映像と測量データ(XYZデータ)を取得することが可能となる。しかし、このシステムではリアルタイムに正確な映像は取得できず、船上での逐次判断には向かない。

一方、音響ビデオカメラは、方位方向に狭いビームを複数送受信することによって視野内の方位分解能をもち、高さ方向の分解能は持たない上面図のリアルタイム表示を可能とするものである(図-2)。画像のフレームレートが20fpsと高く、即時性の面では優れているため、高速に移動する魚を対象とした水産資源調査の分野においては、既に実用や応用研究の域に達しているものの、視野

範囲が狭いことと高さを分解する性能を持たない、いわゆる二次元画像(Bモード、上面図)であり、土木分野の用途においては実用のための研究を要する。これらの機器比較は文献8に詳しいので参照されたい。これより、既存の装置においては、港湾土木分野で使い勝手の良い、つまり人間の視野に近い三次元の空間を広範囲で視認し、同時に測量も可能とする機器は存在しない。ここで、文献9及び10で示される既存の研究は、超音波式の二次元映像のリアルタイム表示の世界的に先駆けとなったものである(周波数掃引法)。その成果は当時としては画期的な視程距離10m、視野角25度の二次元映像のリアルタイム表示を実現しているが、三次元化への検討はなされておらず、実験室レベルにとどまるものであった。また、これらの取得映像においては、視野の狭さと、映像の中心付近を除く収差においては改善の余地が見られた。

そこで、著者らは広視野、三次元、リアルタイムを目指した水中映像取得装置の開発を行った。送受波原理として周波数掃引法を採用し、これまでに著者の一人が取り組んできた水中音響レンズの基礎研究成果¹¹⁻¹²⁾を踏まえ、水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得及び測量支援装置(以下、水中映像取得装置)の開発を行った。装置の性能確認として、港湾空港技術研究所の水中作業環境再現水槽にて映像取得実験及び測量精度確認実験を実施し、さらに羽田空港新滑走路¹³⁾工事区域内にて実海域実験を行った。

2. 超音波式三次元水中映像取得装置

2.1 装置概要

水中映像取得装置は水中の三次元超音波映像と測量データの取得を可能とするもので、港湾・空港エリアの実海域への適用を想定した新しいシステムである。図-3は本研究で目標とした装置と取得映像のイメージ図である。船舶から吊下した超音波式水中映像取得装置で水中を見ると、点線で囲まれた空間を視認でき(左図)、取得した映像は正面図、上面図、側面図のみならず回転させて任意の方向からの表示(鳥瞰図)を取得可能とするものである。前出の既存製品との比較のため、視野範囲を図-4に示す。詳細は次節に譲るが、ひとつの画像で三次元空間を捉えられ、その空間が大きいことにより、既存の機器に比して人間の視野に近い視認を可能とする。

ここで、取得される超音波映像のイメージでは、暗闇で照明を当てた範囲を観察することに似ており、その映像はモノトーンで、画質は光学画像に比して粗い。一般的に見る機会のある超音波画像は医療で用いられる腹部

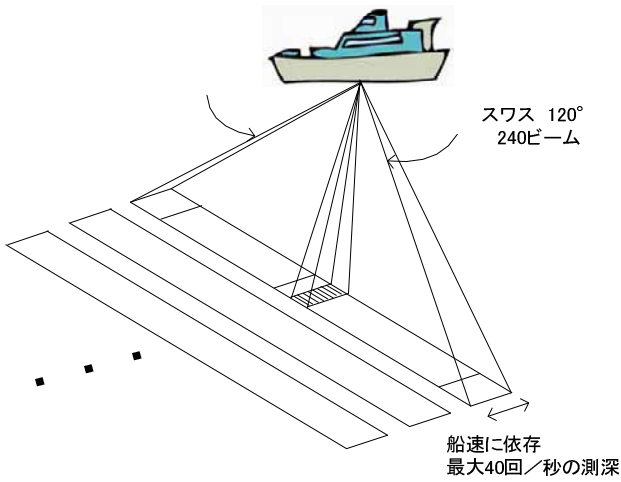


図-1 ナローマルチビームソナー (Seabat8125) の視認範囲。

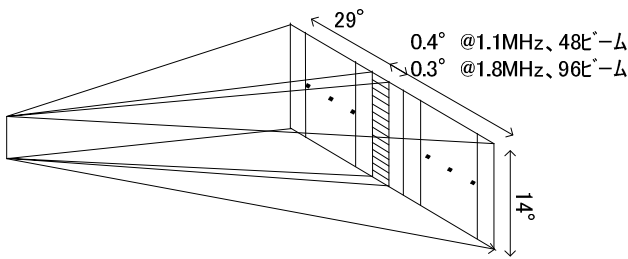


図-2 音響ビデオカメラ (DIDSON, スタンダードモデル) の視認範囲。

等のエコーによるものであるが、通常我々が視認している世界のような色は存在せず、対象から反射してくる超音波の強度によって濃淡表示されることになる。また、超音波画像は光学画像に比べて画質が粗い。これは、映像の分解能と密接に関係する超音波の波長が光の波長に比して 10^3 倍と長いことに起因する。

水中映像取得装置の開発は、装置原理の確認を目的とした試作機の開発、試作機を基に運用を目指した海上実験機の開発の二段階で実施した。試作機は、水槽内の目標を三次元静止画像のオフライン表示として映像取得を実現した。詳細については、文献¹⁴⁻¹⁶⁾を参照されたい。

海上実験機として開発した水中映像取得装置は、陸上部と水中部からなる。性能諸元を表-1、水中部の概観を写真-1に示す。水中部の大きさは $0.45\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.54\text{m}$ (巾×奥行き×高さ)、重量約150kg (水中音響レンズ含む) である。送波器は2ch. 送信周波数は $0.5 \sim 1.0$ MHzの

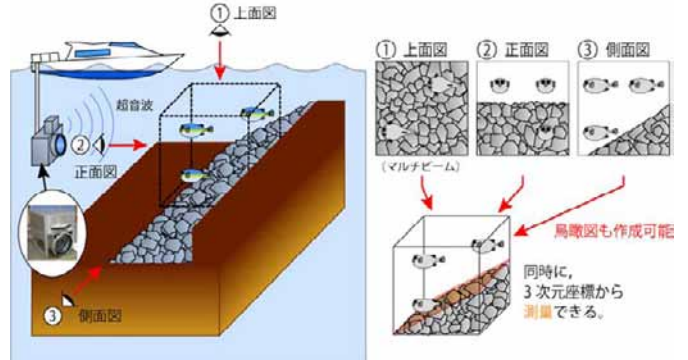


図-3 超音波式3次元映像取得装置の完成イメージ図。

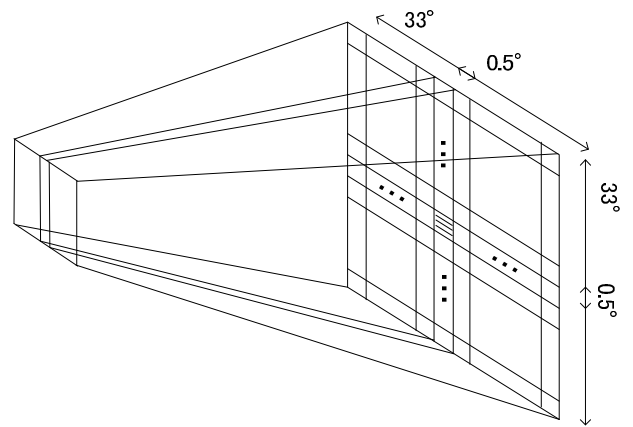


図-4 超音波式3次元映像取得装置の視認範囲。

うち使用する周波数のPCWを連結したパルス波、音波送波範囲は縦・横共に約 33° 、横方向には68ビームを送信する。受波器アレイは細長い素子を縦方向に128ch. 配置した。視程距離10mの場合、視野範囲 $6\text{m} \times 6\text{m}$ (縦×横)、1画素の大きさ約 $5\text{cm} \times 10\text{cm} \times 13\text{cm}$ (縦×横×奥行き)の直方体である。さらに、視認性能の向上のため水中音響レンズを3群3枚構成として収差を抑え、ピント合わせ機能も持たせた。実海域において映像取得と測量支援を目的としたため、試験測量予定地の水深に合わせて視程距離を25m、海水・対水速度を1ノット以上及び耐水圧を10m程度とするための本体・治具等の構造強化も行った。

水中映像取得装置のシステムブロック図を図-5に示す。図中左側の点線で囲った領域は水中部(写真-1)であり、右側は陸上部である。水中部では音波の送受波や受信信号の増幅、音響レンズの駆動などを行い、陸上部では水中部の制御、送信信号の生成、受信信号の解析、および画像の生成や記録を行う。

表-1 超音波式三次元映像取得装置の性能.

計測性能	送受波方式		周波数掃引法	
		使用限界レンジ	5~25 m	
	解像度*	視野	6×6 m ²	
		分解能・縦	0.05 m	
		分解能・横	0.1 m	
分解能・奥行き		0.13 m		
記録方式	種類	3次元動画・オンライン/オフライン表示		
	広域・低速	レンジ5~25m、視野±16.5度、0.5秒毎に1/8画面更新		
	狭域・高速1	レンジ任意の12.5m区間、視野±16.5度、0.25秒毎に1/8画面更新		
	狭域・高速2	レンジ任意の12.5m区間、視野±16.5度、0.125秒毎に1/8画面更新		
	記録	レンジ5~25m、視野±16.5度、数秒		
送信系	測定	法面高さ計測精度	±5%以内	
	送受信系	チャンネル数	2 ch.	
		信号波形	PCWを連結したパルス	
		周波数	0.5~1.0 MHz	
		レベル	200±5 dB	
受信系	送信系	水平ビーム数/巾	68/0.5°	
		鉛直ビーム数/巾	1/33°	
	受波器	チャンネル数	128 ch.	
		ゲイン	20 dB	
	レンズ	レンズ開口径	0.25 m	
	レンズ数	3群3枚		
	開口比	1.33		
水中部	外寸(治具を除く)	0.45(W)×0.8(L)×0.54(H) m ³		
	重量(治具を除く)	約150 kg		
	使用範囲	海上、耐水圧10m程度以上、水温5~25度程度、対水速度最大1ノット程度の運動をさせることがある		
陸上部	計測制御、信号送信、受信データ記録、信号解析、画像表示を可能とする解析部一式(含む、制御・映像表示ソフトウェア)			

* 解像度はいずれもレンジ10mの場合



(a) 前面



(b) 側面

写真-1 超音波式三次元映像取得装置の水中部.

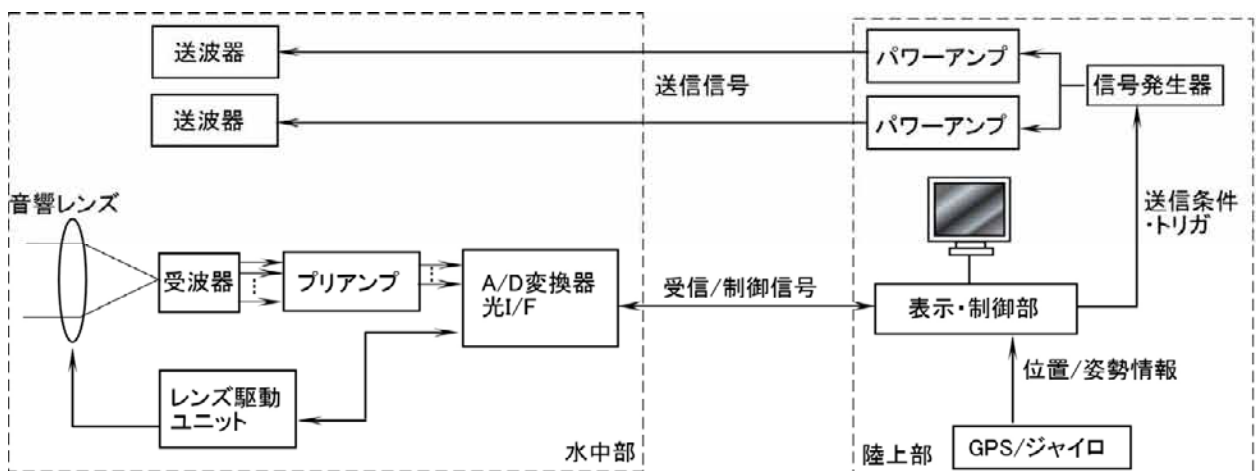


図-5 超音波式三次元映像取得装置のシステムブロック図.

システム動作を順を追って説明する。陸上部の信号発生器により生成された送信波は、全視野に対応する2台のパワーアンプにより増幅され、送波ケーブルにより、それぞれ水中部の送波器へと送信される。送波器から放射される音波は、幅が狭く、垂直方向に広い扇形ビームとなって水中を伝搬する。送信波は水中を伝搬し、その一部が観察対象により反射される。この反射波が水中部前面に取り付けられた音響レンズに届くと、音響レンズにより集束され、受波面上の一点に集まる。受信した電気信号は受信回路により増幅 (LNA)、アンチエイリアスフィルタリング(BPF)、およびA/D変換され、光デジタル信号として陸上部の表示・制御部へと送信される。表示・制御部はデータの受信、解析および表示を行うPCと送受信回路を制御する専用回路から構成される。PCで受信したデジタル信号を時間軸上で細かく分割し、解析することで三次元座標が定まる。

なお、本システムにはGPSや姿勢検出装置 (ジャイロ) を接続することが可能で、海上使用時の測定位置および船舶の姿勢情報 (ロール、ピッチ、ヨー) を撮影と同時に記録することができる。後処理により計測データから船舶の動揺をソフトウェア的に修正できる。

前出の既存製品との比較のため、視野範囲を図-3に示す。詳細は次章に譲るが、ひとつの画像で三次元空間を捉えられ、その空間が大きいことにより、既存の機器に比して人間の視野に近い視認を可能とするものである。

2.2 主要センサ部と三次元映像の取得原理

水中映像取得装置は水中の対象をある有限の空間として捉える人間の視覚に近い三次元の視認と、視認対象の位置及び大きさを把握する測量とを、同時かつ実時間で取得可能とするため、水中音響レンズと送受信方式に周波数掃引法⁹⁻¹⁰⁾を採用した¹⁴⁻¹⁶⁾。本節では、主要センサ部として、送波器、受波器、水中音響レンズについて概説し、さらに三次元音響画像を取得する計測原理を説明する。

2.2.1 送波器

周波数掃引方式における送波器構造を図-6に模式的に示す。送波素子は交互に分極方向 (矢印) を入れ替えながら配列されており、素子の上下 (音響放射面) と下側それぞれに全素子共通の電極がつけられている。隣り合う送波素子から出力される音波は、分極方位の違いのため位相が180°ずれる。両電極間に周波数 f の交流信号を入力すると、周波数 f に依存した方位 θ で左右対称に音波が送信される。周波数 f が高くなるほど、送信方位は音響放射面の正面方向に近づき、素子間ピッチを d 、周波数を f

とすると、

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (1)$$

と表せる。

本装置では、左右の視野に対応して各1台、合計2台の送波器を用いている。例えば視野のうち中央から左側への送信は、図-7のように送波器を配置する。送波器の音響放射面に対して左右対称に送信される送信波のうち、一方を観察対象に供している。もう一方の音波 (グレーティングローブ) は使用しない。図-7の配置において、

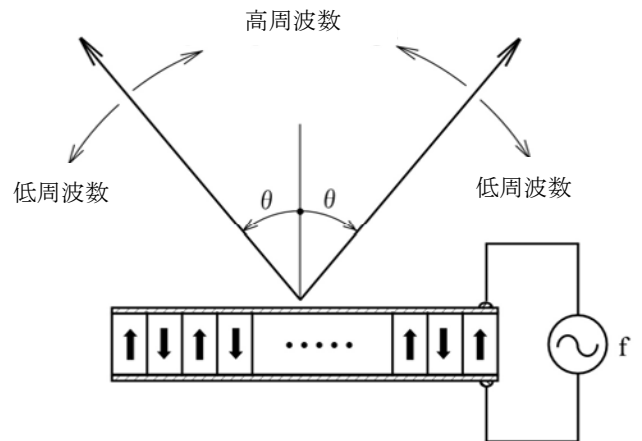


図-6 送波器の概念図 (周波数掃引法による)。周波数 f によってビームの方位が変わる。

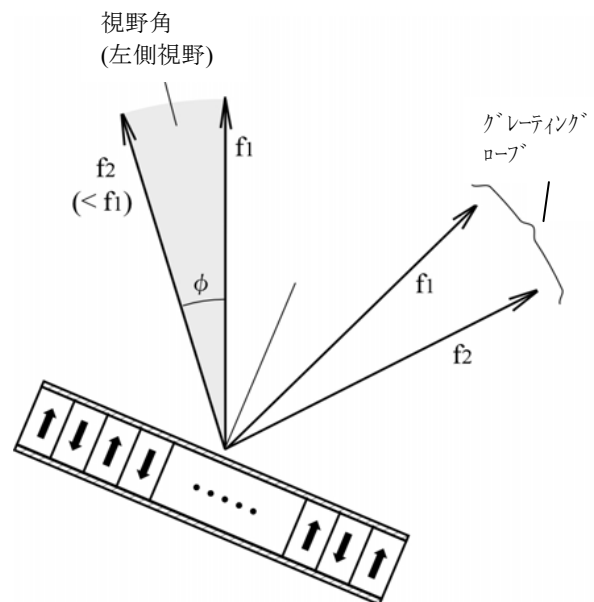


図-7 送波器の配置。左視野に向けて周波数範囲 $f_1 \sim f_2$ で送波する。

視野左側の角度 ϕ の範囲を観察するためには、ちょうど装置の正面に向かう周波数を f と、それより低い周波数 $f_1(<f)$ までの周波数範囲 $f_1\sim f_2$ の信号を用いればよい。本装置では、 $\phi=16.5^\circ$ 、 $f_1\sim 1000\text{kHz}$ 、および $f_2\sim 500\text{kHz}$ であり、 $f_1\sim f_2$ 間で、 0.5° 刻みの送信方位となるよう、34周波数(34ビーム)を設定した。よって全視野で68ビームである。

2.2.2 受波器

受波器は図-8のように垂直方向(z方向)に対して128チャンネルに分割されており、水中音響レンズにより収束された位置のチャンネルの受波素子によって電気信号に変換される。

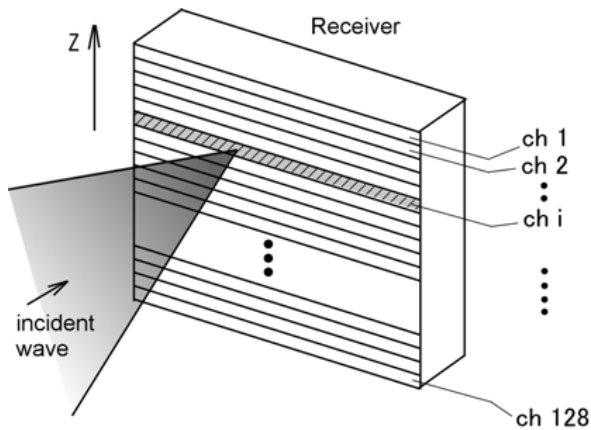


図-8 受波器の概略図。128 ch.の二次元アレイである。

2.2.3 水中音響レンズ

三次元映像取得に関する既存研究において、水中音響レンズは視程距離10m、視野角25度の三次元映像の取得を実現している。しかしながら、運用ではより広い視野を必要とし、さらに映像の中心付近を除く収差においては改善の余地が見られた。ここで、近年、光学レンズの設計ソフトウェアはデジタルカメラ等の発達とともに格段に進歩した。その結果、過去には比を見ないほど高解像度・低収差なレンズ設計が、短時間で簡易に実現できるようになった。

そこで、水中音響レンズの開発にあたって、次の5つの条件を満足するように考慮した。すなわち、(1)広い空間を一度に見渡すために広視野かつ物体距離25m程度、(2)結像面すなわち受波器アレイは平面、(3)レンズ材として過去実績のあるアクリル樹脂を採用、(4)画質確保のために良好な収差補正、(5)水温 $5^\circ\sim 30^\circ$ の環境変化に対して画質の変化を最小化。光学レンズ設計の一般論から言って、これら各条件を同時に満足するためには、単レンズでは

足りず、複合レンズ(複数枚構成)を採用することにより、各レンズ素子によって生じる収差を相互にキャンセルさせる方法が必要である。しかし音響レンズの構成枚数が多くなるほどレンズの総厚が増加するため、レンズを透過する音響エネルギーの減衰によって像強度が低下するという副作用が生じる。このため、上記条件を達成可能な最少構成枚数による複合水中音響レンズの実現を考えた。しかし、このような複合型水中音響レンズの研究例は前例がない。そこで本研究ではまず、光学設計の分野で評価の高いレンズ設計ソフトOpTaliX¹⁷⁾を導入し、これを用いて、開口径は250mm、口径比はF1.33の3群3枚構成の水中音響レンズを設計した(図-9)。このレンズは直径33°の円形視野に渡り、平面受波器アレイ上に顕著な像面湾曲を伴うことなく結像する能力を有する。すなわち、レンズに 0° より 16.5° までの角度で入射する音波は、平面受波器アレイ上で歪みや収差を少なく抑えて収束することができる。音響レンズは、精密旋盤によって加工された後、熱的・機械的な作用が各レンズに加わっても相互の音軸の不一致が無視できる程度しか生じないよう

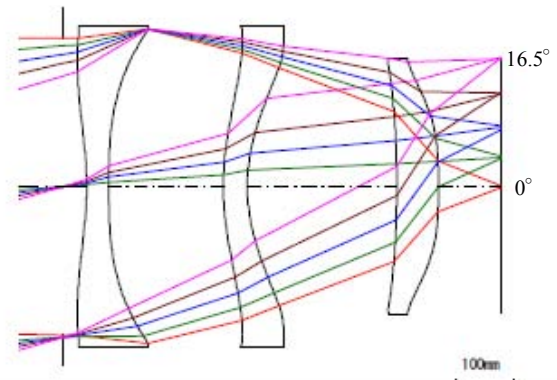


図-9 複合水中音響レンズの設計図



写真-2 超音波式三次元映像取得装置の鏡筒部

にキネマティックマウントにより保持されている。このマウンティングは、アルミ製の鏡筒部によって支持されており、また、レンズの正面からの流速3ノットの流れに対し、保持歪みによる収差の発生が十分に無視できる程度に十分な剛性を持つ(写真-2)。レンズ鏡筒は駆動ステージユニットを介して本体装置に取り付けられ、視程距離5~25mの物体距離に適合するように前後しピント合わせ機能を実現している。

このような、機能、性能をもつ複合水中音響レンズは世界的に見ても例がなく、超音波式三次元水中映像取得装置の成功に大きく寄与している。

2.2.4 三次元映像の取得原理

ここでは、2.2.1で示した送波器、2.2.3及び2.2.4で示した受波器と水中音響レンズを用いて送受信を行い、取得したデータを三次元映像として表示する原理を概説する。

図-10は周波数掃引法による映像取得イメージ図である。音波を発し、対象物から反射してきた音波は音響

レンズを介し、受波器面上に収束させ取得する。送波器から発する音波は周波数によって方位が決まり、そのビーム形状は横方向に0.5°、縦方向に33°の扇型である。縦方向の分割を示すため(a)は側面からの図である。送波器より縦方向に33°のビームを送信し、対象物上のある高さからの反射波はレンズで屈折し、受波器面上のある高さに収束する。受波器は縦方向に128個のセンサを配置しており、受信したセンサのチャンネル番号からどの高さからの反射波であるか特定する。横方向の分割を示すため(b)は上方から見下ろす図である。方位毎に周波数の異なる0.5°のビームを送信し、対象物からの反射波はレンズを介して屈折し、横方向に長いひとつの受波器に収束させ、周波数にかかわらずまとめて受信する。図-7に示す通り、周波数と方位は一对一の対応になっているため、受信信号はFFT解析をすることで周波数の順に、すな

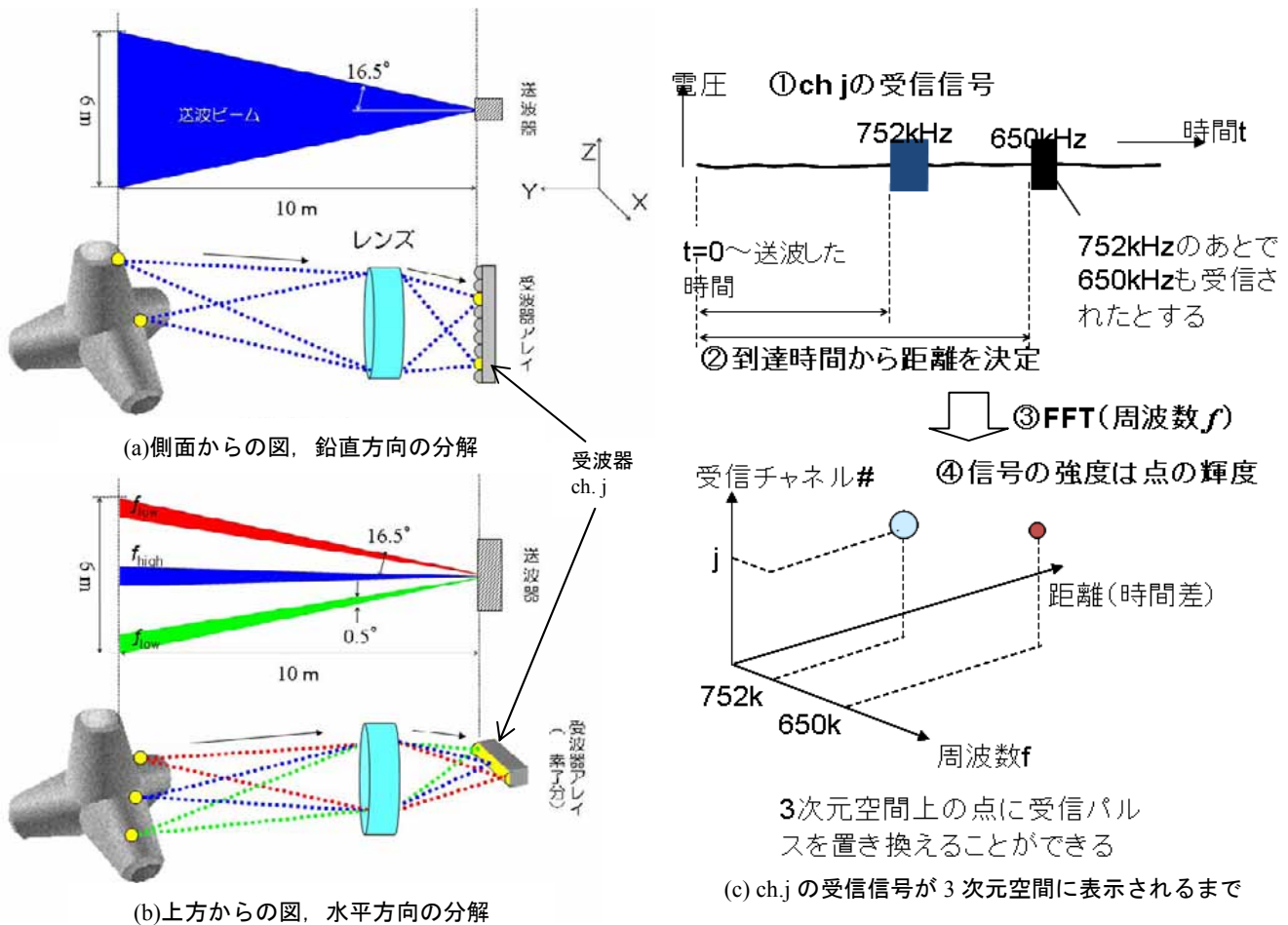


図 10 周波数掃引法による映像取得イメージ図

わち方位の順に並べられ、どの方位からの反射波であるかが特定される。さらに、奥行き方向の分割は、信号の到達遅れ時間を距離に変換する。以上より、三次元映像を取得可能となる。ここで、(c)は受波器アレイのch.jで受波信号の例を示す。初めに752kHzの、遅れて650kHzが到達する時系列信号を受信する。それぞれの遅れ時間より、対象までの距離を決定する。次に、この信号をFFTし、高さ方向に受信チャンネル番号、方位方向は周波数、奥行き方向は距離の三次元の極座標空間に点としてパルスを表現できる。なお、信号の強度は点の輝度として表した。

3. 水槽試験

3.1 試験概要

水槽実験は2009年2月17～19日、港湾空港技術研究所の水中作業環境再現水槽（図-11）にて行った。水槽は30m×10m×6m（長さ×巾×水深）、真水、静水である。水槽内には5m×5m×6.5m（縦×横×高さ）で橋脚φ0.5mとする模擬栈橋が設置されており、その直下にD滑走路埋立部を模擬した捨石マウンドを新たに設置した。捨石材は30～200kg/個程度を用い、マウンドの巾10m、高さ3m、法面勾配1:1.1、出来高精度±15cmとした。模擬栈橋後方には消波板（鋼材、スリット状）が置かれている（写真-3）。

3.2 映像取得試験

水中映像取得装置は水中作業環境再現水槽上部の観測台車に付設する観測ラックより水面下約2mの位置に吊下され、捨石マウンドの頂上との距離が約10mとなるよう観測台車の位置を調整した。なお図-12中の点線は俯角が5°（下向き）の観察領域に相当する。このときの画像例を図-14に示す。旋回角は0°、俯角は5°で、表示範囲はフルレンジ（25m）である。マウスで空間を回転させ、斜め上からの俯瞰図として示した。

(1) 映像モード／フルレンジ

視認対象を水槽内に設置された上述の捨石マウンド、で記録した映像のうち1枚を（図-13）に示す。モニタ上では、0.5秒ごとに1/8画面ずつ更新されるリアルタイム表示であり、モニタ上でマウスをドラッグしながら任意の回転、移動、拡大・縮小をさせながら描画及び録画が可能である。(a)は鳥瞰図、(b)は側面方向から見た図であり、録画されたデータからワンショットを切り出したものである。(a)において、左側より模擬栈橋・橋脚、石積みマウンドの法面、消波板を確認することができる。捨石マウンド中央には法面に沿って縦長の黒味の強い領域

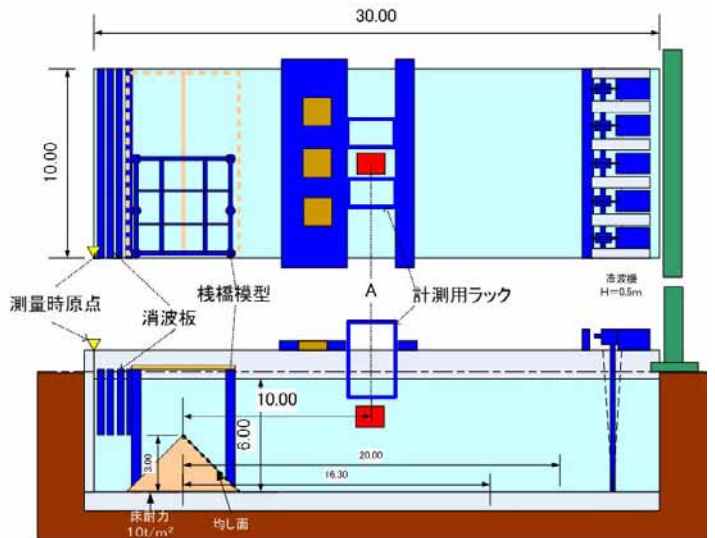


図-11 水中作業環境再現水槽内での試験外観図。

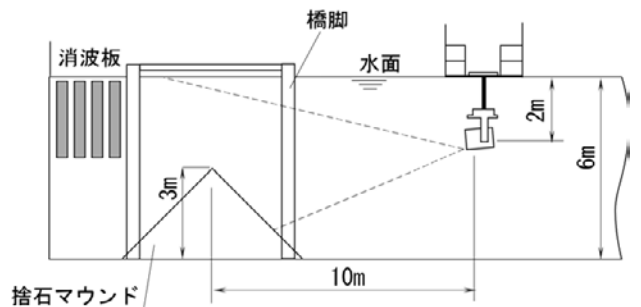


図-12 図-11の設定における、超音波式三次元映像取得装置の視野限界。

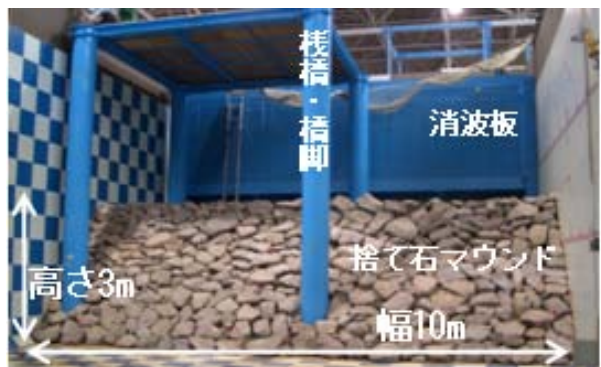


写真-3 水中作業環境再現水槽内の模擬捨石マウンド。

が見られるが、周囲の物体の大きさや位置関係から、栈橋・橋脚の音響的な影と考えられる。音響的な影の取得は、より多くの水中視認情報を得られる可能性を示唆し

ている。(b)は図内左側より模擬栈橋・橋脚、石積みマウンドの法面、消波板、水槽壁面を確認することができる。(a)図では確認することの出来ない、橋脚の太さ、橋脚と捨石マウンドとの位置関係、捨石マウンドの法面勾配、捨石マウンド、消波板や水槽壁面との位置関係をモニタ上で確認できる。

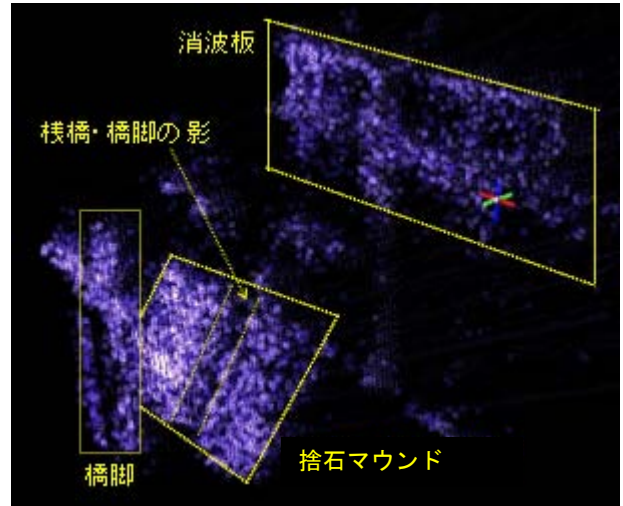
(2)映像モード／区間限定＋右視野

観測対象とする空間を、奥行きを限定し、さらに右視野のみとすることで、データ取得後の解析の負荷を下げ、0.25秒ごとに1/4画面ずつ更新される、リアルタイム表示となる。フルレンジに比してフレームレートは4倍速くなり、運動をする対象を捉えることが可能となる。そこで、観察対象として巾1.55m、奥行き0.4m、高さ0.2mのコンクリートブロック（写真-4）を水中作業環境再現水槽に付設の門型クレーンで上下させる様子を撮影した。図-14 (a) コンクリートブロックをクレーンで吊った時の様子、水槽上からの写真、(b) コンクリートブロックと捨石マウンドの位置関係を示しており、側面方向から観察している、(c)～(e)は撮影した映像記録から3枚を並べて表示してある。いずれの図も右側に捨石マウンドの法面、左側にコンクリートブロックの側面が捉えられ、順に上昇して行く様子が確認できる。なお、コンクリートブロック上部に映っている縦長の反射体はクレーンフック、スリング、浮き輪と考えられる。

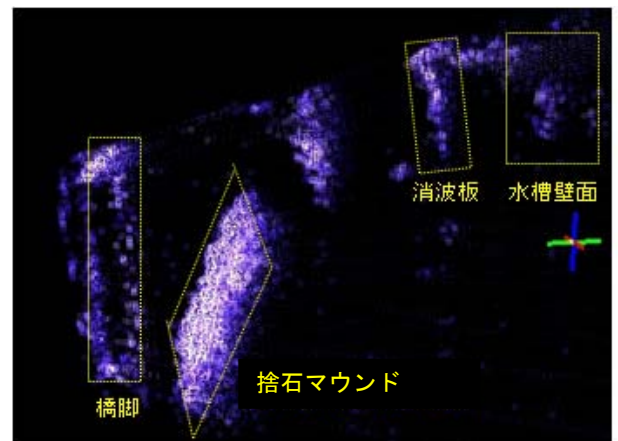
3.3 測量試験

水中映像取得装置で取得する音響データは、反射点のXYZデータ及び音響反射強度から構成される。これらより、水中映像取得装置を計測系の原点として、対象物の位置や大きさの情報を把握する測量が可能である。そこで、それらの計測精度が充分であるかを確認するため、水中映像取得装置により取得した捨石マウンドの法面高さ、レーザ測量によるそれとを比較した。

捨石マウンド（写真-3）の法面高さを把握するため、予めレーザ測量を実施した（図-15）。(a)は計測データ全てを点群表示したものである。法面の石の凹凸、橋脚が目視と同様に確認できる。ここでは、水中映像取得装置の視認最小サイズ（1画素）が約10cm³であり、測量値は1画素の中心位置をもって、XYZデータとして置き換える。これを測量値として評価するためには、水中映像取得装置で取得したXYZデータと同位置の真値と比較する必要があることから、それに相当するレーザ測量のデータを示したのが(b)であり、これを法面高さの真値として扱った。これは(a)のデータを10cmメッシュで間引きした



(a) 三次元映像をXY平面内で回転させた



(b) (a)をさらにYZ平面内で回転させた

図-13 超音波式三次元映像取得装置で撮影した、三次元水中映像。

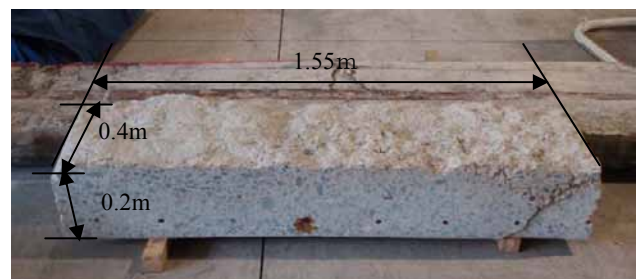
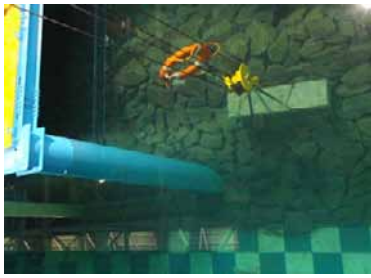
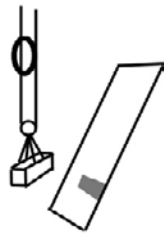


写真-4 視認対象としたコンクリートブロック。

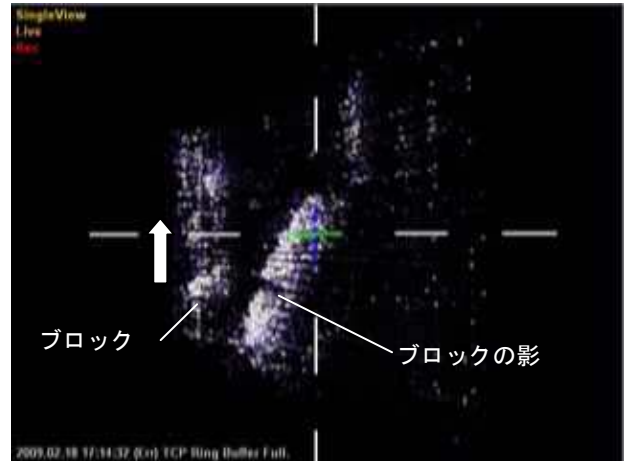
ものであり、捨石ひとつひとつの凹凸は把握しにくい、法面高さや勾配については十分確認できる。これらの図より、水中映像取得装置で取得できる測量は、捨石法面のざらつきまでは分からないが、その高さを評価できると分かる。



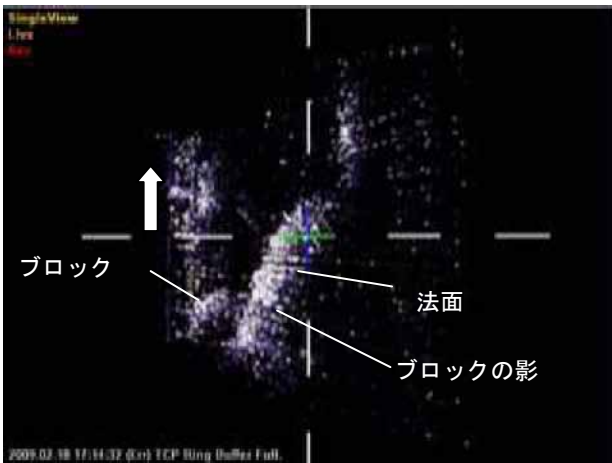
(a) 試験時の様子



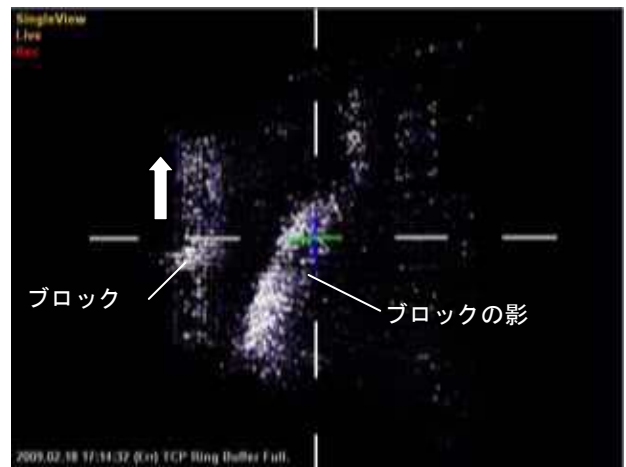
(b) コンクリートブロックと捨石マウンドの位置関係



(d) コンクリートブロックの上昇 (2/3)



(c) コンクリートブロックの上昇 (1/3)



(e) コンクリートブロックの上昇 (3/3)

図-14 超音波式三次元映像取得装置で撮影した水中三次元リアルタイム映像。

ここでは、通常は水中映像取得装置の受波器中心を座標原点としているが、比較のためレーザ測量時の座標原点(図-11参照)を用いた。

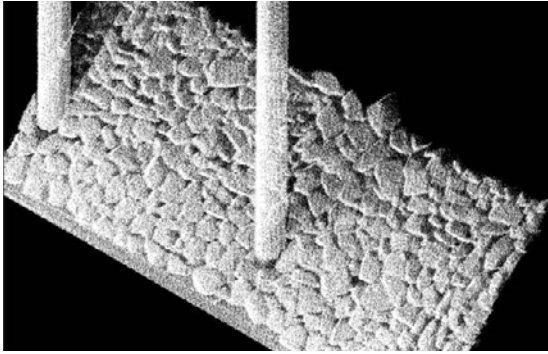
水中映像取得装置において、測量モードでは同時に映像をモニタせず、データの記録のみとした。また、10m遠方では6m×6mの範囲を取得できるが、水槽内の捨石マウンドは高さ3m、巾10mあることから、ワンショットで記録することはできない。そこで、治具に内蔵されているパン・チルト装置によって、パン角を変更しながらデータを取得した後、座標変換を行って、水槽内のXYZデータを取得した(図-15(c))。捨石マウンドの法面勾配は捉えられているようである。ここで、(b)及び(c)中に示すX=6.2mに沿ったYZ面図すなわち捨石マウンドの法面高さを図-16に示す。図中の赤は水中映像取得装置に

よる結果、青は比較のため示したレーザ測量による結果である。水中映像取得装置による法面高さ、傾きはおおよそレーザ測量による結果に近く、その精度は±5%以内であることを確認した。

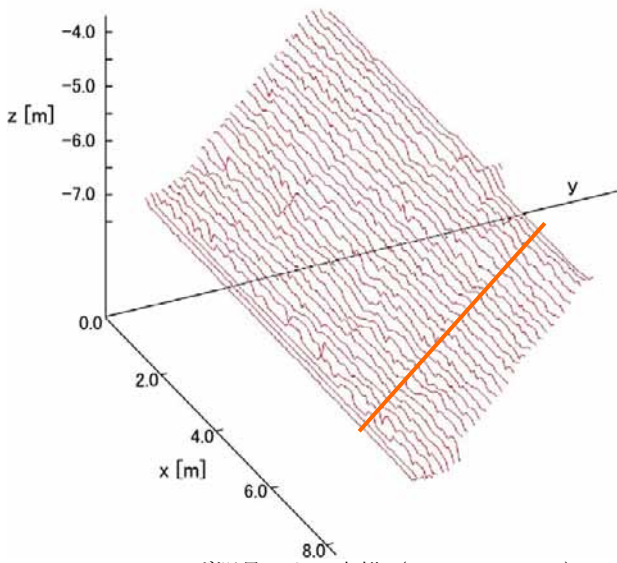
水中映像取得装置とレーザ測量との差異は、いずれもノイズ除去処理の誤差によるものと考えられ、特にY=6.0m付近の差異は捨石マウンドの法面と天板の境目付近であり、反射強度が大きく変わりS/Nが大きく変化することに起因、またY=8.0~9.0m付近の差異は装置と模捨石マウンドの距離が比較的近く、受信データ上に送信パルスが残ることに起因すると考えられる。

3.4 水槽試験の考察

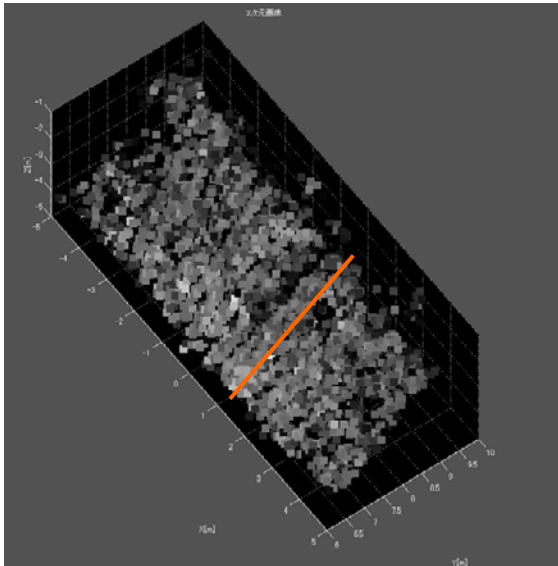
水中映像取得装置は、捨石法面の測量と出来栄確認をすることが最大の目標であった。現在の対象は、法面



(a) レーザ測量による点描 (全データ)



(b) レーザ測量による点描 (10cm メッシュ)



(c) 超音波式三次元映像取得装置による点描

図-15 模擬捨石マウンドのXYZデータを基に描画.

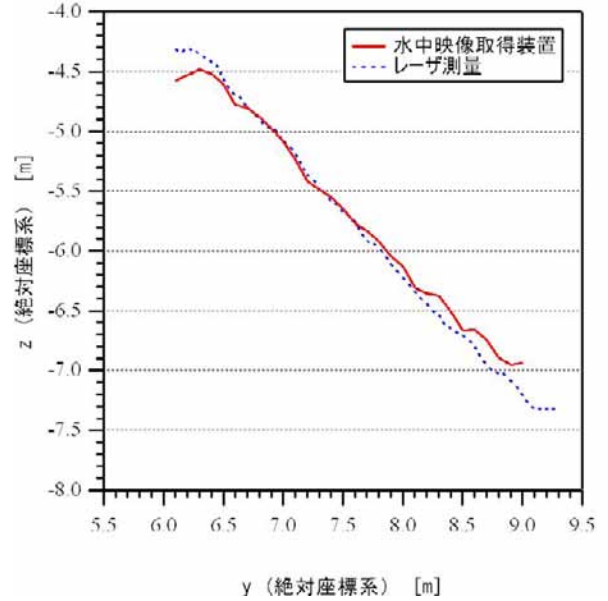


図-16 模擬捨石マウンドの法面高さ. 超音波式三次元映像取得装置とレーザ測量による測量結果の比較.

勾配1.1 : 1, 法面高さは $\pm 50\text{cm}$ 以内で測量可能とすることを一つの目安として設計性能を決定している. 特に, 映像においては広い範囲において, $\pm 50\text{cm}$ 以上の凹凸の有無を確認できること, $\pm 10\text{cm}$ 程度の寸法が分かることへの期待があり, 現状ではそれをおおよそ満たすものである.

以上より, 水中作業環境再現水槽にて, 映像取得実験を行った. フルレンジでの映像取得により水槽内に存在する対象が位置関係, 大きさともにおおよそ光学写真による視認情報と変わらない三次元映像をリアルタイムで取得することに成功した. また, 区間及び視野限定の映像取得において, 移動する対象をとらえ続ける三次元リアルタイム映像を取得することに成功した.

さらに, 映像において $\pm 50\text{cm}$ 以上の凹凸やおおよその寸法を簡易に確認するためには, さらなる画質の改善が必要である. そのためには, 環境ノイズ, 送信波の副極などに起因するS/N低下へのハードウェア対策, ノイズに強い信号処理や表示方法の工夫といったソフトウェア対策が必要となる. また, 3枚構成の水中音響レンズの間で多重反射する成分の低下への検討も必要である.

測量においては, 法面勾配, 法面高さは $\pm 50\text{cm}$ 以内で測量可能とすることが目標であった. ここでは, 精度は $\pm 5\%$ 以内で測量できることを確認し, 実用上問題ないことを示せた.

4. 海上試験

4.1 試験概要

海上実験海域は、東京国際空港のD滑走路の現空港側の護岸部において、2009年の2月24及び25日に実施した。試験海域は東京国際空港沖のD滑走路工事区域のうち、第4工区の現空港側、外側堤防である（図-17、試験海域は両矢印で示した）。実験当日の現地の状況は、護岸法面の被覆石均しまで完了しており（写真-5）、気中部の勾配が変化することなく、原地盤まで続いている。また、水中部については、透明度が最大1.0m程度であった。参考のため、ROVに搭載した光学ビデオカメラの水中映像を写真-6に示す。撮影対象までの距離は不明であるが、濁りにより極めて近づかなければ撮影できず、条件の良い時で一画面上に捨て石3個程度しかおさまらず、光学機器では広範囲にわたる視野は確保できない状況であった。水中映像取得装置をクレーン付き19tの船舶の治具に固



写真-6 光学カメラ搭載のROVで撮影した海上試験場所の海中、水深2mの様子。

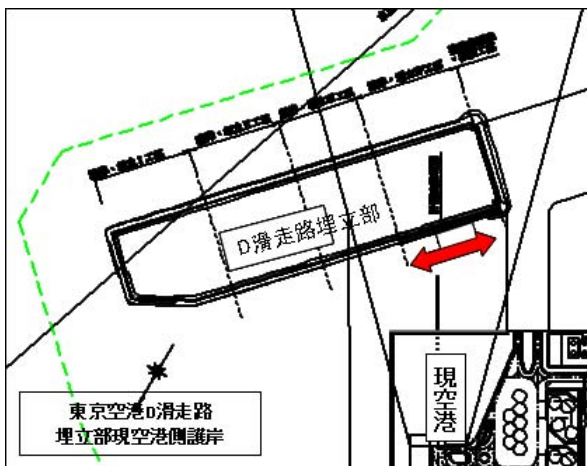


図-17 海上試験場所，東京国際空港沖。



写真-7 超音波式三次元映像取得装置を船舷に取り付ける様子。



写真-5 海上試験場所の捨石マウンド（図-17）。

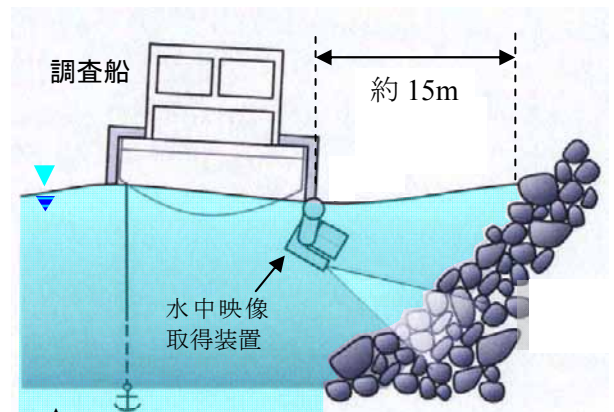


図-18 海上試験イメージ図，捨石マウンドから約15m離れた位置から撮影。計測の種類により，停泊，航行させた。

定し(写真-7), レンズとマウンドとの水平距離を約15mとなるように保ちながらマウンド法線と平行に計測を実施した(図-18)。

4.2 映像取得試験

3.2節で示した通り, 運動する対象は, 映像モードのうち, 区間限定及び右視野のみとして, 0.25秒ごとに1/4画面, つまり1秒ごとに1画面を更新させながら録画する。ここでは, 運用を意図して, 船舶が緩やかに航行しながら静止した対象の映像の取得を試みた。

ここでは, 0.6~1.0ノット程度の微速航行, 約3ノット程度の低速航行をしながら撮影を行った。図-19は微速航行時の取得映像である。(a)は鳥瞰図, (b)は側面方向から見た図である。羽田座標系において $X=2500$ 付近を航行しながら取得したものであるが, 側面図は単調な勾配ではあるが, 中腹が緩やかに凸である様子が見て取れる。ここで, 同位置でのナローマルチビームソナーの結果である図-19(c)を参考にすると, 同様の傾向があることが確認された。また, 水槽試験とは異なり, 水中環境に由来する音響的ノイズの他, 計測海域特有の電氣的なノイズも存在し, 水槽試験で取得した映像に比してノイズが多いことが分かる。

次に, 約3ノット程度の低速航行においては, モニタのみであればリアルタイム視認は可能で, 捨石法面の目視確認は十分に行うことができた。しかしながら, ここでは紹介しないが, 録画はデータの欠損が目立つことが分かった。解析及び記録時間がボトルネックとなり, 計測が間に合わないことによる。

4.3 測量試験

計測範囲は捨石マウンドの長さ方向に20m程度を目標とした。3.3節で前述したとおり, 測量には測量モードを用い, パン角を変更しながら逐次データを取得するため, アンカを用いて船舶を停泊させた。GPSと船体の動揺を計測するモーションセンサのデータも同期をとって, 収録した。

取得後に解析を行い, さらに船舶の動揺をキャンセルして得られたXYZデータを図-20に示す。鳥瞰図を見ると捨石マウンドの法面とそれに続く原地盤を面的に確認できる。勾配変化点付近においては影が見られることから, くぼみがあると推測される。このデータの内, 3測線について法面高さをナローマルチビーム深淺測量した結果と比較したものが図-21である。概ね合致しており両者の差違は3測線のそれぞれにおいて, 最大でも5%以内であった。

4.4 海上試験の考察

海上試験においては, 水中映像取得装置が海上にて所望の性能を発揮できるかが最大のポイントであった。

微速航行では視認対象を捉え続けながら, 映像を録画できることが分かった。船速を上げて航行する場合には, モニタ上で確認するのみであったが, 必要に応じて船を停泊して詳細データを取得するなどの運用の工夫が必要であると思われる。一方で, 微速走行の船舶の速度に追いつける程度のフレームレートの向上は必要であることが分かった。映像については, 録画の場合も, モニタのみの場合も, 対象となった捨石マウンドの凹と思われる箇所を確認できるなど, 船上において即時に水中の様子を把握できることが示唆された。

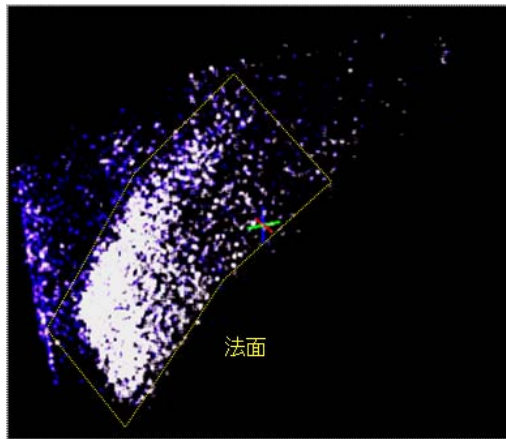
測量においては, 水中映像取装置で取得した法面高さ, ナローマルチビームで取得したそれとは, ナローマルチビームの結果を真値と仮定すると, 精度は $\pm 5\%$ 以内であった。既に実用されている信頼の高い既存の装置と同程度に測量できることを確認し, 実用上問題ないことを示せた。

5. 結論

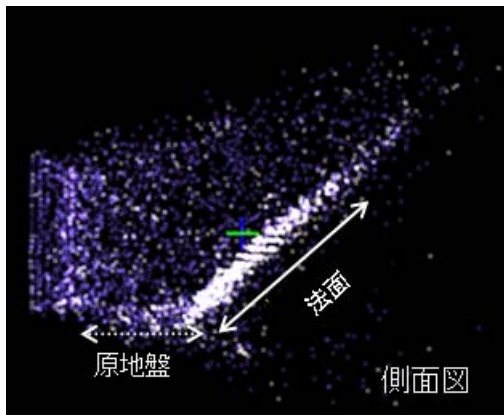
濁水中であっても水中を視認したいニーズに応えるべく, 人間の視野に近い三次元の空間を広範囲で視認し, 同時に測量も可能とする機器として, 広視野, 三次元, リアルタイムを目指した, 水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得及び測量支援装置の開発を行い, 特に本稿では実機モデルについて述べた。水中映像の三次元化には複合水中音響レンズの開発が大きく寄与し, これに周波数掃引法を組み合わせることで, 従来の周波数掃引法を前進させたものとして, 世界初の三次元リアルタイム化を実現した。

その性能は, 観察距離は5~25m, 視程距離10mの場合, 観察範囲は縦横共に33度(6m×6m), 分解能は縦5cm×横10cm×奥行き13cmであり, リアルタイム撮影時のフレームレートは最速で1秒当たり1画面を実現し, 水槽, 海上共に三次元リアルタイム映像の取得に成功した。また, 捨石マウンドの法面の高さの測量においては, 水槽, 海上共に精度 $\pm 5\%$ 以内であり, 実用上必要なレベルに達していることを示せた。

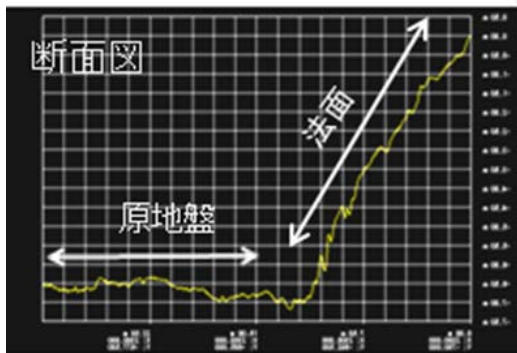
以上より, 海洋土木分野に特化した, 水中において広範囲な三次元空間をリアルタイムで一度に見ることと, 測量をも可能とする機器は他になく, 世界的に新しい機器開発に成功した。



(a) 鳥瞰図



(b) 側面図



(c) ナローマルチビームソナー (seabat8125) による深度プロフィール

図-19 超音波式三次元映像取得装置で撮影した三次元リアルタイム水中映像。(c)は比較のためSeabat 8125による深度プロフィール。

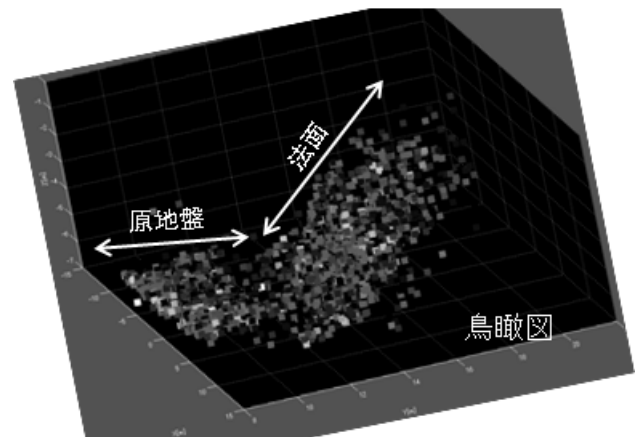


図-20 超音波式三次元映像取得装置によるXYZデータ。

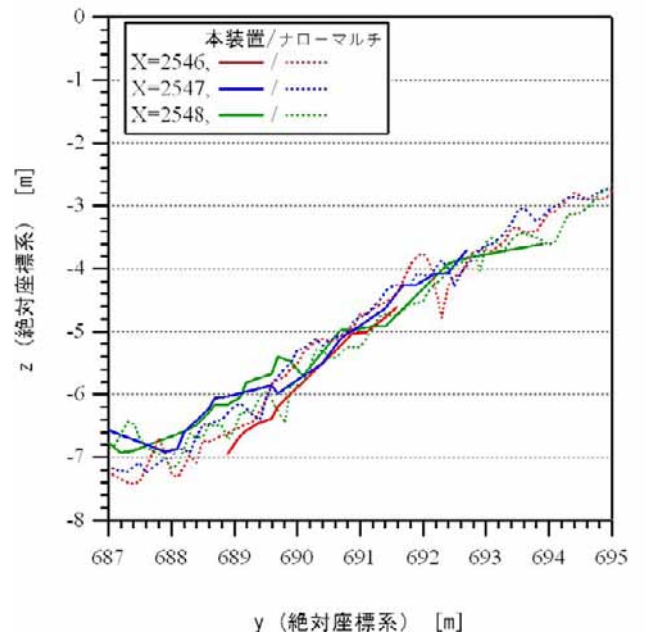


図-21 図-20で示した中から3測線について、同一場所のSeabat 8125による結果との比較。

6. あとがき

本研究成果により、濁水中でも潜水士作業に頼らざるを得なかった捨石マウンドの出来栄確認や測量、あるいは被災調査前の効率的な視認調査、広域の目視による維持管理といった視認の必要な調査等が簡易、迅速、安全に行える可能性が示された。今後は、運用性の高いユーザーインターフェイスを備えると共に、必要性の高い港湾等に配備することで水中施工等の現場で視認する方策の一つとして行政に資する。

(2009年8月14日受付)

謝辞

本研究の一部は国土交通省関東地方整備局による“東京国際空港再拡張事業基礎調査”の一環として行われたものである。また、H18年度からH20年度までの神奈川大学との共同研究による基礎研究成果の一部が反映され、研究資金の一部は文部科学省科学研費補助金18760624, 20686059, 財団法人日本科学協会笹川科学研究助成18-320Mによる援助を受けた。

参考文献

- 1) 木原純孝, 白井一洋: 大水深施工検査・海底探査技術の開発(第2報)ー海底沈埋異常物探査技術の開発研究, 港湾空港技術研究所報告, 23巻4号, 1984.
- 2) Keen, J. and Pidsley, P.: Proceedings of Underwater Acoustic Measurements, 2007.
- 3) 佐藤祐治, 宮崎綾乃, 森和義, 中村敏明, 水谷孝一: アプラナーレンズ音響レンズの集束特性, 海洋音響学会誌 35, 2008, pp.29-37.
- 4) Kamakura, T., Aoki, K., and Nakamura, T.: Focusing Ultrasonic Waves by a bi-concave lens: Normal incidence on the lens, Proceedings of acta acustica united with ACUSTICA 94, 2008, pp.104-113.
- 5) 松本さゆり, 進雄一, 内藤史貴, 土屋健伸, 武山芸英, 遠藤信行: 超音波式水中映像取得装置に用いる非球面音響レンズの収束音場の周波数及び入射角度特性, 電子情報通信学会技術報告, US08-80, 2008, pp.43-48.
- 6) RESON A/S, <http://www.reson.com/>, 2009.
- 7) SOUND METRICS CORPORATION, <http://www.soundmetrics.com>, 2009.
- 8) 倉本和興, 倉重吉範, 浅田昭, 前田文孝, 南利光彦, 半谷和祐: 船舶搭載型レーダによる撮影画像と他ソナー画像との比較, 海洋音響学会講演論文集, 2009, pp.40.
- 9) 片倉景義: 水中の物体探知用信号送受波装置, 公開特許公報, 昭47-26160, 1972.
- 10) 片倉景義, 淡中泰明, 小林正治, 越川常治: 周波数掃引による超音波水中映像装置, 日本音響学会誌, 31, 1975, pp.716-724.
- 11) Matsumoto, S., Shin, Y., Naitoh, F., Tsuchiya, T., Endoh, N., and Takeyama, N.: Precision measurement of convergence characteristic of single aspheric acoustic lens, Proceedings of USE08, 2008, pp.323-324.
- 12) Naitoh, F., Matsumoto, S., Takahashi, M., Tsuchiya, T., and Endoh, N.: Comparison of sound pressure distribution analysis with scale up experiment for small ultrasonic acoustic lens probe, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics 08, 2008, pp.297-298.
- 13) 関東地方整備局東京空港整備事務所, <http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/haneda>, 2009.
- 14) 松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝, 南利光彦, 武山芸英, 鈴木紀慶, 野口孝俊: 水中映像取得装置の試作, 海洋音響学会誌, 36, 2009, pp.91-94.
- 15) 松本さゆり, 吉住夏輝, 片倉景義, 鈴木紀慶, 野口孝俊, “水中音響レンズを用いた映像取得装置08の開発 - 水槽及び海上試験について-,” 海洋音響学会講演論文集, 2009, pp.9-10.
- 16) 野口孝俊, 鈴木紀慶, 松本さゆり, 宮田正史: 水中音響レンズによる捨石マウンドでの不陸状況海上確認試験について, 土木学会全国大会第64回年次学術講演会講演概要集, 2009, 297-298.
- 17) Optenso,【OpTaliX】Reference Manual (6.15-1), (Optenso, Germany, 2004) pp.493.

港湾空港技術研究所報告 第48巻第4号

2009.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile	Yoshiaki KIKUCHI	3
Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching	Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA	23
Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens	Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI.....	53
Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers	Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA	71
Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure	Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA	89
Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery	Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI	109