

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.50 No.3 September 2011

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 50 卷 第 3 号 (Vol. 50, No. 3), 2011 年 9 月 (September 2011)

目 次 (CONTENTS)

1. 超音波式四次元水中映像及び測量取得システム (4-DWISS) の開発
..... 松本さゆり, 吉住夏輝, 片倉景義 3
(Development of Four-dimensional Wide-angle Imaging and Surveying SONAR
..... Sayuri MATSUMOTO, Natsuki YOSHIZUMI, Kageyoshi KATAKURA)

2. 繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート版の残存押抜きせん断耐荷性能
..... 川端雄一郎, 岩波光保, 松林卓 43
(Residual Punching Shear Capacity of RC Slab Damaged by Repeated Impact Loads
..... Yuichiro KAWABATA, Mitsuyasu IWANAMI, Taku MATSUBAYASHI)

超音波式四次元水中映像及び測量取得システム（4-DWISS）の開発

松本 さゆり*・吉住 夏輝**・片倉 景義***

要 旨

濁度や照度に左右されない音響技術による空間把握の可能な水中視認と同時に測量も可能とする技術開発が望まれてきた。そこで、著者らは人間の視認能力に近い、つまり広範囲な三次元の空間をリアルタイムに視認し（以降、三次元空間とリアルタイムを合わせて四次元とする）、同時に測量を可能とする水中計測システムを開発してきた。前報述べた水中映像の四次元表示と測量性能に、画像の更新速度の高速化（4fps）、受信レベルの20dB向上、画像の表示方法の工夫の改良を施しより見やすい映像の取得を実現した。また、リアルタイム位置情報システムも一式に加え、運用時の利便性が向上した。さらに、実運用に向けてジグや収納等の検討、さらに運用時の推奨条件の検討を行い、船速、パン・チルト角、海象条件につき確認した。また、東京国際空港のD滑走路周辺海域にて実験を行い、ジャケット水中部、作業中の潜水士、遊泳中の魚を視認できた。測量においては、マルチビームソナー、スタッフ測量との比較検討を行い、実用上必要なレベルのデータ取得が出来ることを確認した。

キーワード：超音波，水中可視化，四次元映像，複合水中音響レンズ，ソナー，測量

* 新技術開発研究領域 計測・システム研究チーム研究官

** 施工・制御技術部 計測・制御研究チーム特別研究員

*** 客員研究官

〒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 Four-dimensional Wide-angle Imaging and Surveying SONAR

Sayuri MATSUMOTO *

Natsuki YOSHIZUMI **

Kageyoshi KATAKURA ***

Synopsis

A new underwater technology of visual contact and survey, which isn't dependent on water turbidity and/or illuminance, has been needed. Then we have developed Four-dimensional Wide-angle Imaging and Surveying SONAR. Because performance of our former system was less enough, we made to improvement the system. We refined the system; the display update rate is 4 fps, the received signal level is +20dB, and color display methods are added. The real-time location information software is also added into the system. In addition, the jig, the storage, and recommended conditions at the real operation, which are ship speed, hydrographic conditions, etc. for the system were studied. The experiments of 4-DWISS were conducted around D Run-way in Tokyo International Airport. 4-DWISS had visual contact with underwater part of jackets, the working dive person, and the swimming fishes. In the measurement, the comparison between 4-DWISS and the multi beam sonar and the staff measurement was done. The measurement performance of 4-DWISS almost equal with other two, and data acquisition is at a necessary level on practical use.

Key Words: Ultrasonics, Underwater Imaging, Four-Dimensional Imaging, Multiple acoustic lens, SONAR, Surveying

* Researcher, New Technology Development Field

** Fellowship Researcher, Construction and Control Systems Department

*** Visiting Researcher

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	3
1. まえがき	7
2. 超音波式四次元水中映像及び測量取得装置（水中音響カメラ）	7
2.1 機能性能	7
2.2 追加機能	9
2.3 水槽実験	9
2.3.1 映像取得実験	9
2.3.2 測量性能確認実験	12
2.3.3 追加機能の評価	12
2.3.4 水槽実験のまとめ	13
2.4 海上実験	14
2.4.1 実験概要	14
2.4.2 視認実験	14
2.4.3 測量実験	16
2.4.4 追加機能の評価	17
2.4.5 海上実験のまとめ	17
3. 超音波式四次元水中映像及び測量取得システム（4-DWISS）	18
3.1 システム概要	18
3.2 運用方法の検討	21
3.2.1 ジグの検討	21
3.2.2 汎用型取付ジグの設計・製作	23
3.2.3 作業船の選定	28
3.2.4 4-DWISSの設置ならびに揚収方法の検討	28
3.3 海上実験	31
3.3.1 実験概要	31
3.3.2 地図情報ソフトウェア（LogViewer）の動作確認	31
3.3.3 4-DWISSの計測に適した条件の検討	32
3.3.4 航行中の水中視認	38
3.3.5 事後処理による合成映像	38
3.3.6 海上実験のまとめ	39
4. 結論	40
5. あとがき	40
謝辞	40
参考文献	40

1. まえがき

港湾土木分野において、水中施工後の検査や被災後の現況調査等において、潜水士によるスタッフ測量と目視による空間的な把握が行われている。しかしながら、施工現場では作業そのものによる底泥の巻き上げなどにより視界が極めて狭い場合も多く、濁度に左右されない音響技術による空間把握の可能な水中視認と同時に測量も可能とする技術開発が望まれてきた。

このような背景から、水中の濁度や照度に依存しない音響的手法を用いる視認・可視化と測量への関心は従来から高い。視認・可視化に関しては、国内外を含めて基礎研究例は多数存在する¹⁻⁵⁾が、リアルタイム視認の実例は数例存在するのみである。米国製の音響ビデオカメラ⁶⁾は、方位方向に狭いビームを複数送受信することで視野内の方位分解能を有するが、高さ方向の分解能は持たない二次元映像である。画像の更新が1秒あたり20フレームと速くリアルタイム性には優れている。しかしながら、三次元のデータ取得はしておらず、測量には向かない。一方、測量に関しては、実用される既存技術としてはナローマルチビームソナー⁷⁾が一般的である。航行しながら、船舶進行方向と直行する面内の海底等深さをスキャンし、さらにGPSによる位置データと船体動揺も同期して取得し、事後処理により水中の三次元映像と測量データを得るものである。広範囲なデータを短時間に取得できるメリットはあるものの、リアルタイム性は劣る。以上より、既存技術により、土木的な出来栄確認や被災調査を1台で実現する機器は現存しなかった。

そこで、著者らは人間の視認能力に近い、つまり広範囲な三次元の空間をリアルタイムに視認し（以降、三次元空間とリアルタイムを合わせて四次元とする）、同時に測量を可能とする水中計測システムを開発してきた。これは、片倉らによる研究は超音波式の三次元映像取得の世界的に先駆けとなった（周波数掃引法）⁸⁻⁹⁾をベースにし、著者の一部が取り組んできた水中音響レンズの基礎研究成果¹⁰⁻¹¹⁾を踏まえたものである。試作段階では水中映像の三次元・オフライン表示を¹²⁾、改良機として国際的にも新しい取り組みである水中映像の四次元表示と測量データの出力を実現した¹³⁻¹⁵⁾。しかしながら、画像の更新速度の高速化、S/Nの改善、画像の表示方法など実運用に向けて様々な課題を有した。

本稿では、実用に向けた性能向上のため更なる改良を行った超音波式四次元水中映像及び測量取得装置（以下、水中音響カメラ）の特徴及び性能緒言について述べ、水中音響カメラの実運用のための周辺機器やジグを含む水

中映像取得及び測量支援システム一式（以下、4-DWISS）、さらに運用時の推奨条件等の検討も行なったのでまとめる。また、東京国際空港のD滑走路¹⁶⁾周辺海域にて実験を行ったので報告する。

2. 超音波式四次元水中映像及び測量取得装置（水中音響カメラ）

2.1 機器性能¹³⁻¹⁵⁾

水中音響カメラは水中の四次元超音波映像と測量データの取得を可能とする、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-2.1は水中音響カメラと取得映像のイメージ図である。船舶から吊下した水中音響カメラで水中を見ると、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）を可能とする。尚、計測時は航行・停泊のいずれでも対応できる。

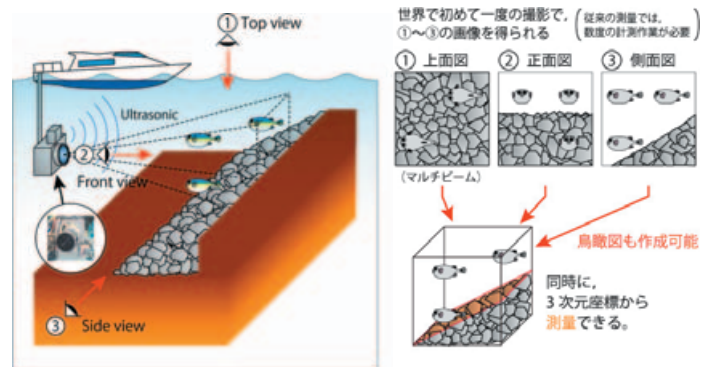


図-2.1 水中音響カメラの完成イメージ図

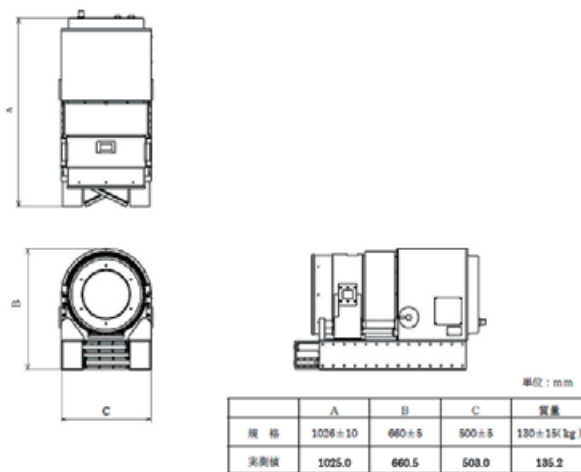
前報において、水中音響カメラは、実海域で三次元映像のリアルタイム表示・取得と同時に測量を実現した。しかしながら、画像の更新速度が最速で 1.1 fps、表示映像は音圧レベルによる濃淡表示のためその理解には慣れを要し、取得データから測量図面を起こす際にも多くの手間が必要であることから、実運用にはやや不足な内容であった。

そこで、水中音響カメラの改良を行った。改良後の概観図を図-2.2に、主機器の接続模式図を図-2.3に、主要性能を表-2.1示す。図-2.2より、水中音響カメラは陸上部と水中部から構成され、図-2.3中の点線で囲った領域は水中部であり、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

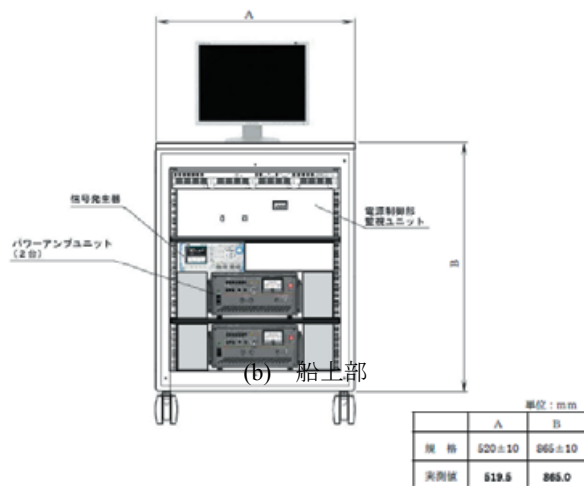
号の解析，および画像の生成や記録を行う．陸上部の表示・制御 PC には，表示・制御用のソフトウェアも含まれる．

主要部の動作は，陸上部の表示・制御部からトリガ信号を送信し，信号発生器に予めプリセットされた 0.5～1.0 MHz の PCW を連結したパルス波をパワーアンプで増幅した後，水中部の送波器より発信する（2ch. 水平方向に 68 ビーム）．観察対象からの反射波は，縦・横共に約 33° の視野をもつ複合水中音響レンズによって収束され，細長い素子を縦方向に 128ch. 配置した二次元平面受波器アレイにて受信する．受信信号はプリアンプにより増幅の後，バンドパスフィルタを経て A/D 変換され，更に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・制御部では各チャンネルからの受信信号に解析を施し，表示用ソフトウェアにて観察対象の位置情報（送信時の水平方位，受信時の垂直方位，および距離）に音圧レベルを輝度情報として付加し，三次元空間内へ表示する．視程距離 10m の場合，視野範囲 6m×6m（縦×横），分解能すなわち 1 画素の大きさ約 5cm×10cm×13cm（縦×横×奥行き）の直方体である．また，表示ソフトウェアの機能として，表示の際に，測定点の位置や輝度を空間上で平滑化を行いノイズ軽減が可能である．また，表示・制御部からは，複合水中音響レンズをピント合わせのために前後移動させる制御も行う．さらに，本システムは外部センサを接続しデータを同期して記録でき，

海上使用時における船舶の動揺はジャイロ（ロール，ピッチ，ヨー）を用いて後処理でソフトウェア的に修正し，また GPS による絶対位置を測量データに関連付けることが可能である．



(a) 水中部



付図1② 水中映像取得装置（2009VER）（制御指示器）外觀図

図-2.2 水中音響カメラの概観図

表-2.1 水中音響カメラの主要性能

		送受波方式	周波数掃引法
計測性能	解像度*	使用限界レンジ	5～25 m
		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	共通	レンジ5～25m、この範囲であれば任意	
	標準	視野縦・横33度、1fps	
	2倍速	視野縦33度・横16.5度、2fps	
	4倍速	視野縦33度・横16.5度、4fps	
	映像種類	三次元動画・リアルタイム表示	
	測量	10m前方で±5%以内(後処理)	
送信系	チャンネル数/レベル	2 ch. / 200±5 dB	
	周波数/信号波形	0.5～1.0 MHz / リニアFMパルス	
	ビーム数/巾	水平: 68/0.5° , 鉛直: 1/33°	
受信系	受波器:チャンネル数/ゲイン	128 ch. / 40 dB	
	レンズ:数/有効径/開口比	3群3枚 / 0.25 m / 1.33	
水中部	外寸(治具を除く)	0.50(W)×1.0(L)×0.66(H)	
	重量(治具を除く)	約130 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3ノット程度以下	
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及び測量データ変換ソフトウェア)		

* 解像度はいずれもレンジ10mの場合

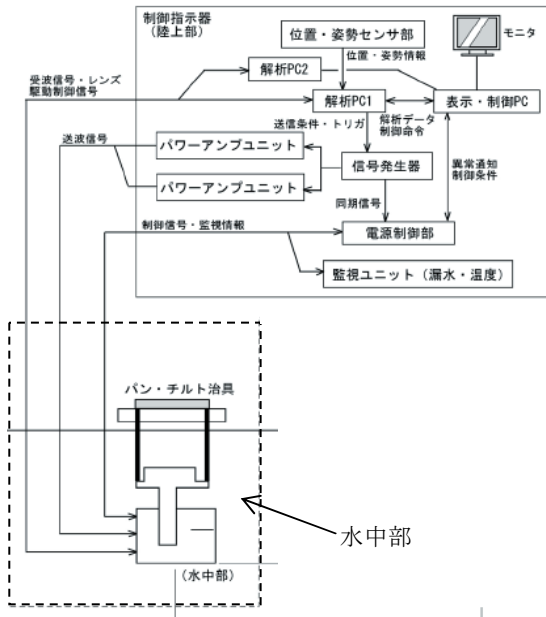


図-2.3 水中音響カメラの主機器接続模式図

2.2 追加機能

改良による主要な変更は、①画質向上及びS/N低減；受波器の後段のプリアンプの増幅度を増加，②画像のフレームレート向上；水中部のA/D増設，解析PCを1台増設，③表示用ソフトウェアの機能向上；対象によって奥行き方向や高さ方向或いは反射強度によって色を割り当てる表示，過去の映像を重ね合わせる描画表現（モザイク処理）など対象によって選択可，必要な箇所のみ拡大表示機能，④計測後XYZデータを簡易抽出；専用の測量図面作成ソフトウェア，⑤リアルタイムの地図情報；GPS等のセンサデータを用いて水中音響カメラの音響データの位置情報を補正し，リアルタイムの地図情報と同期のとれた地形データを表示するソフトウェアを追加した。以下に，各々の成果を示す。尚，④及び⑤は，装置本体とは別のノートPCとして構成される。

2.3 水槽実験

水中音響カメラは改良の後，独立行政法人港湾空港技術研究所所有の水中作業環境再現水槽にて性能確認実験を行った。

2.3.1 映像取得実験

図中のAに水中音響カメラを設置し（図-2.4），そこから10m離れた位置に東京空港D滑走路の外側堤防を模擬したマウンド，図中のBの橋脚に設置した電気防食用陽極（写真-2.1，図-2.5）を視認した。マウンドの詳細は表-2.2～2.4に示した。水槽内に設置した電気防食用陽

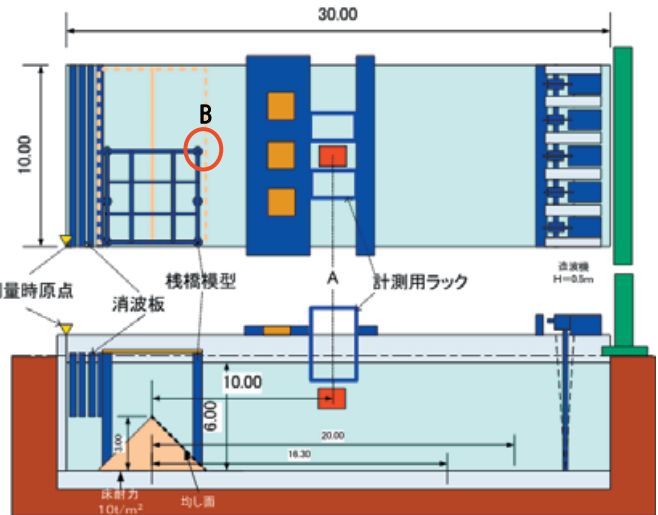


図-2.4 水中作業環境再現水槽



写真-2.1 水中作業環境再現水槽内の様子

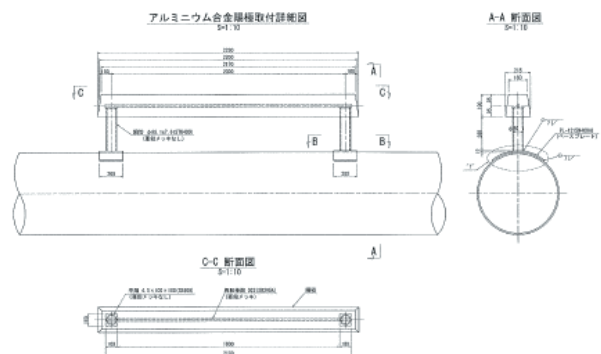


図-2.5 水槽内に設置した電気防食用陽極（取り付け方法は異なる）

極は、D 滑走路棧橋部で用いられたものと同等である。また、クレーンで吊った消波ブロック (0.5ton) を視認対象とした (写真-2.2)。

尚、実験時の水は濁りのため透明度 1.5~2.0m程度、観測台車から視認できるものは電気防食用陽極の上部のみであり、水槽の底面やマウンドは確認できなかった。実験時の水温は8~9度であった。

表-2.2 水槽内マウンド

工種	名称	工事内容				参考数量	
		工事仕様					数量
被覆工	基礎捨石	水槽底	天板巾	法勾配	延長	1式	78 m ³
		+2.8 m	0 m	1:1.1	10.0 m		
	捨石被覆	水槽底	天板巾	法勾配	延長	1式	12 m ³
		+3.3 m	0 m	1:1.1	10.0 m		
	均し被覆	水槽底	天板巾	法勾配	延長	1式	42 m ²
		+3.3 m	0 m	1:1.1	10.0 m		

表-2.3 被覆捨石の規格

品名	形状寸法	見掛比重	摘要
真鶴産安山岩	30~200 kg/個程度	2.3 以上	

表-2.4 均しの許容範囲

工種	名称	許容範囲 (均し面)	摘要
被覆工	被覆均し	±15 cm	法面は直角



写真-2.2 視認対象とした消波ブロック (0.5 ton)

①電気防食用陽極

計測条件は前述したとおり、水中音響カメラを観測台車に固定し、水槽内の橋脚に取り付けた電気防食用陽極を撮影した。装置はパン:-30~+30°、チルト:0~20° (パン・チルト共に5°ピッチ)として、2倍速モードでデータを取得し、計測後に全データを累加処理した結果を図-2.6に示す。(a)は対象とした水槽内風景(光学写真)、(b)~(d)は同一のXYZデータであり、任意の方向から視認できるよう回転させて表示したものである。それぞれ、(b)は光学写真とおおよそ同じ左斜め前方から、(c)は上方から、(d)は正面からの図である。いずれの映像も2章で概説したとおり、マウンドと橋脚は奥行き方向の色付けにより分離されており、さらに複数の角度から橋脚よりも突出する位置に像が確認されることから、電気防食用陽極を超音波映像として捉えられたと分かる。

尚、電気防食用陽極上部の水平方向に張り出した2本のエコーが存在する。これは、下側は橋脚からのサイドエコー、上側はサイドエコーの水面反射によるものと推察される。サイドエコーとは、送波器から主方向とは異なる方向へ漏れ出る不要な音波(サイドローブ)が対象に反射して発生するもので、原理的に取り除くことが難しい。図-2.6での計測時のように、水中音響カメラから見て正対する対象であることに加え、累加処理をしたことにより強いエコーレベルとなる。

尚、運用においては水中音響カメラ(水中部)を船舶の進行方向を0度として、右舷であれば120度(左舷であれば-120度)の方向に装着する。これにより、対象からのメインのエコーレベルに比してサイドエコーのレベルが低くなり、画面上ではほぼ見受けられない状態となっている。

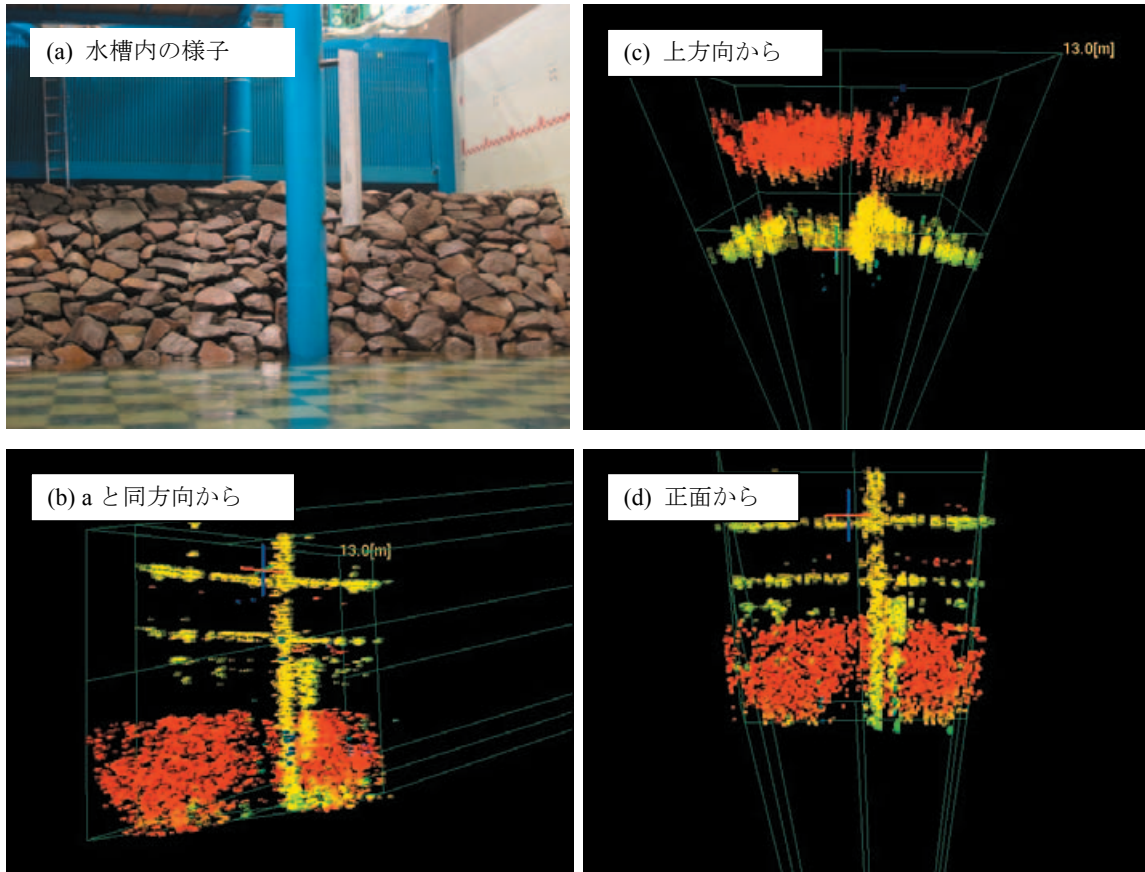


図-2.6 水槽内の橋脚に取り付けた電気防食用陽極
 撮影条件：装置固定，パン：-30~+30°，チルト：0~20°，2倍速モード

②消波ブロック

計測条件は前述した通り，水中音響カメラを観測台車に固定し，消波ブロックをクレーンで吊り水槽内を上下させる様子を撮影した．装置はパン：0°，チルト：10°として，2倍速モードでデータを取得した映像のワンショットを図-2.7に示す．前節で述べた通り，消波ブロックとマウンドとは高さ及び奥行き方向の色付けにより分離されていると分かる．ここには示さないが，移動中の消波ブロックを上方，側面から超音波映像として表示することができ，濁水中においても超音波映像から対象の動きや周辺の構造物との位置関係を確認しながらクレーン操作が可能であり，水中施工等の安全性に寄与するものと考えられた．

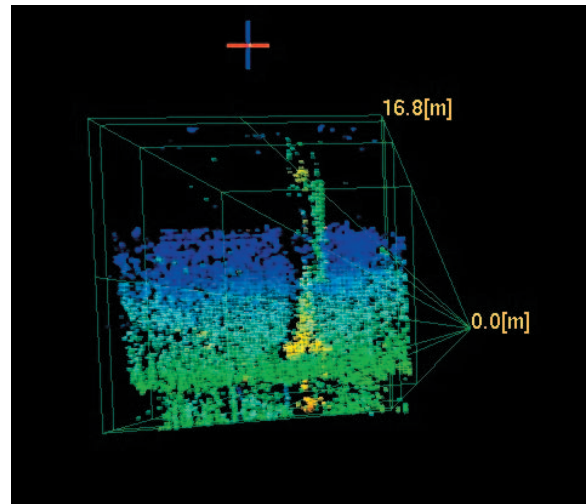


図-2.7 消波ブロックをクレーンで吊り水槽内を上下させる様子．撮影条件：装置固定，パン：0°，チルト：10°，2倍速モード．

2.3.2 測量性能確認実験

取得した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、水中音響カメラ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。昨年度も測量性能確認を実施しているが、装置性能が格段に向上しているため、改めて同一の実験を行い測量性能の確認を行う。

実験方法は、レーザ測量による法面高さを真値として、水中音響カメラにより取得したマウンド法面高さとを比較する。水中音響カメラのデータは前節①で取得し、累加処理の後、測量図面製作ソフトによりXYZデータへと変換した。尚、レーザ測量データは前年度の計測にて取得したものであり、0.1mメッシュのデータを用いた。水槽内のローカル座標原点は、図-2.4に▽で示した。

図-2.8は水槽内のマウンドの法面高さのうち、Y=3.25mに沿ったYZ断面を示したものである。図中の赤は水中音響カメラによる結果、青は比較のため示したレーザ測量による結果である。水中音響カメラによる法面高さはレーザ測量による結果に非常に近く、レーザ測量値を真値とした場合、計測範囲にわたり誤差は±3.0%以内であった。このときの法面高さの差は最大で約15cmであった。

ここで、羽田空港D滑走路の埋立部の被覆ブロックは、均し許容範囲±50cmである。ここでの結果は、船体動揺を含まない理想状態の測量精度ではあるが、装置性能として均し許容範囲±50cmよりも十分小さく、計測が可能であることを示せた。

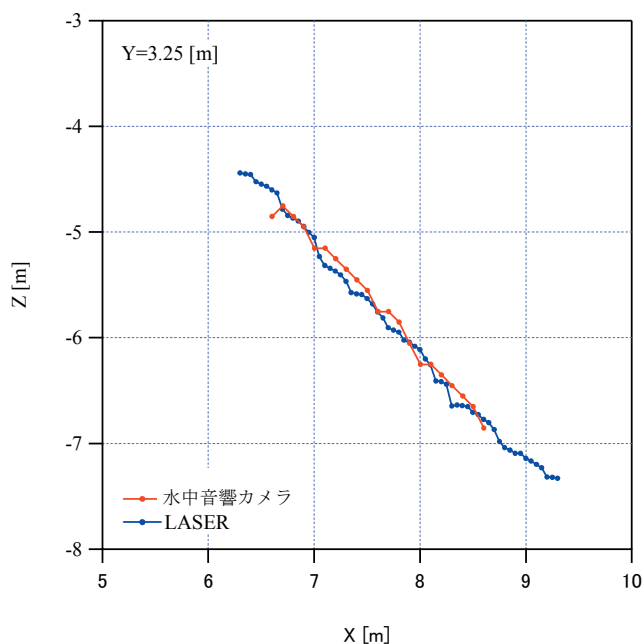


図-2.8 Y=3.25mに沿った水槽内マウンドの法面高さ

2.3.3 追加機能の評価

各節の①～⑤は2.1節で述べた、追加機能の内容に対応している。

2.3.3.1 画質向上

- ①画質向上及びS/N低減；受波器後段のプリアンプの増幅度を増加
- ③表示用ソフトウェアの機能向上；奥行き方向によって色づけを選択

ここでは、水槽内の電気防食用陽極を対象とした超音波映像(図-2.9)を比較する。水槽内の計測条件や電気防食用陽極、マウンド等の詳細は、次節を参照のこと。送受波器は変更していないが、受波器後段のプリアンプの増幅度を40dBから60dBへ変更し、20dBの感度の向上によりS/Nが改善を目指した。(b)に比して(c)の不要なノイズが低減されたと分かる。また、画像の表示法についても改善している。(b)では反射強度に合わせたモノクロの濃淡表示のみであったが、(c)では奥行き方向に色を変化させることによって、近くに存在する対象物(電気防食用陽極)と遠くに存在する背景(マウンド)を分離して確認できた。以上により、S/Nが改善と奥行き方向の色づけにより、視認性の向上が確認された。

2.3.3.2 即時性の向上

- ③表示用ソフトウェアの機能向上；必要な箇所のみ拡大表示機能の追加

表示時の色づけ方法だけでなく、指定箇所の拡大表示機能の追加をしている(図-2.10)。動画の一部を選択し、別画面に拡大表示すること、対象物の大きさ・位置関係の把握が容易になった。

2.3.3.3 測量図面の作成

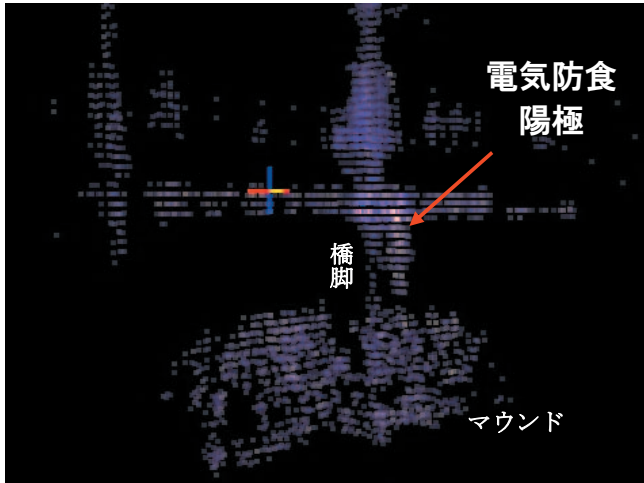
- ④計測後XYZデータを簡易抽出；本体とは別のノートPCに測量図面作成ソフトを追加した。

水中音響カメラで取得した点群データと水中部計測データを用いて、構造物等の水中部全体の三次元データを効率的に出力する測量用解析ソフトウェアである。主な機能は以下の通りである。

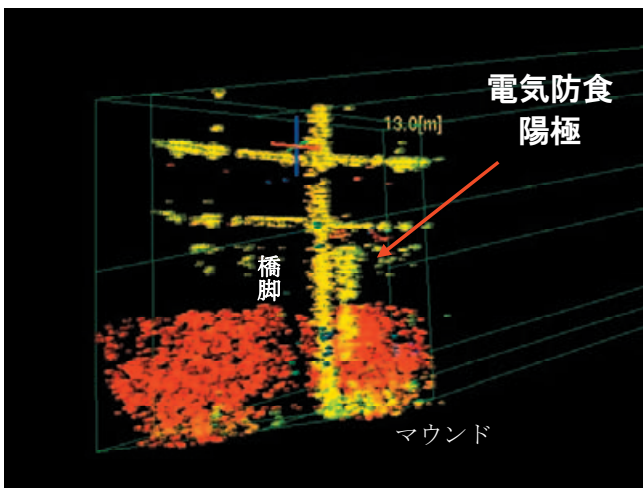
- 1) 点群データの入出力並びに三次元表示機能
- 2) 点群データの三次元表示画面上での、任意箇所選択による不良データの削除
- 3) 格子データを使用した各種図面(鳥瞰図、正面図、上面図、断面図)の作成
- 4) 3で作成したデータをDXF形式への出力



(a) 視認対象とした電気防食陽極の設置状況



(b) 改良前



(c) 改良後

図-2.9 受波器後段のプリアンプの増幅度を増加
S/N 改善し視認性向上

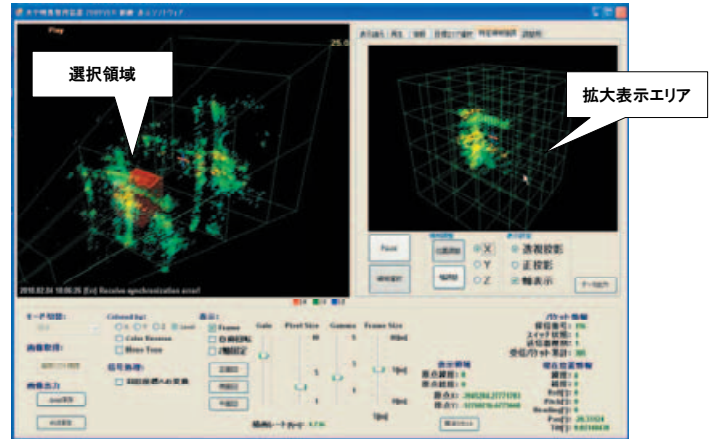


図-2.10 ソフトウェアの改善, 指定箇所の拡大表示

2.3.4 水槽実験のまとめ

水中音響カメラについて、室内水槽にて性能確認試験を行った。映像取得実験においては、三次元・リアルタイム映像、鳥瞰図、上面図、側面図、正面図のいずれも取得可能であり、さらに視認性能が向上していることを確認した。

また、測量実験においては、取得後のデータを累加処理し、測量図面作成ソフトウェアを用いて XYZ データを出力した。さらに、レーザ測量による結果（真値）との比較を行い、その誤差は計測範囲にわたって±3%以内であることを示した。

追加機能について評価し、改良前に比して画質が向上した事を確認した。また、即時性向上のため新規機能の追加、測量図面作成ソフトを追加し、運用性能の向上に寄与した。

2.4 海上実験

2.4.1 実験概要

2011年2月16～23日、実験海域は東京国際空港沖のD滑走路外周（図-2.11）において実施した。①北側場周導路（現空港側）で電気防食用陽極の撮影、②接続部～埋立Ⅲ工区（現空港側）でマウンド法面・消波ブロック撮影、③埋立Ⅳ工区（沖側）～栈橋部（現空港側）では周回しながら撮影を行った。④埋立Ⅳ工区（現空港側）でマウンド法面高さの測量を実施した。実験期間の現地状況は、水中部の工事は全て完了しており、水温は計測期間にわたり8～9度の間を推移、透明度はおおよそ1mであった。



図-2.11 海上実験の実施場所

2.4.2 視認実験

2.4.2.1 電気防食用陽極の視認

電気防食用陽極の視認は、2月18日、北側場周導路（現空港側）実施した。試験海域の北側場周導路（現空港側）の外観を（図-2.12、写真-2.3）に示す。水は濁りによって透明度最大1m程度であり、船上から目視では電気防食用陽極は確認できない。また、当日、撮影対象となるジャケットの水中部は既に工事が済んでいた。

船舶を視認対象のジャケットに沿って、船速3kt程度、水中音響カメラとジャケットの距離を15～30mとして航行させた（写真-2.4）。このとき水中音響カメラは、パン30°、チルト10°として4倍速モードでデータを収録した。船上でモニタした映像の一部を図-2.13に示す。この図は船体動揺補正処理を行い、表示にはモザイク処理と反射強度による色付けを行った。また、左側にある緑の枠はリアルタイムで視認している範囲を、30mは水中音響カメラからの距離を示している。この図より、北側場周導路（現空港側）のジャケット構造の一部が明確に見えるが、設計図面を参照し同形状であることを確認した。さらに、ジャケットの底辺部材に長方形の凸部（矢印）が見られるが、電気防食用陽極であることを潜水士により確認済である。以上より、モザイク処理をすることで栈橋ジャケット部の骨組みや電気防食用陽極の視認が実現できた。これにより、維持管理段階における陽極の脱落など短期間に確認することが可能となった。



図-2.12 電気防食用陽極の視認の実施場所



写真-2.3 視認対象としたジャケット

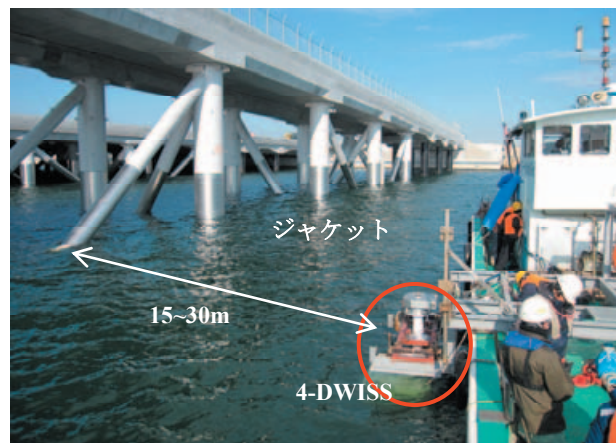


写真-2.4 ジャケット水中部の視認計測中

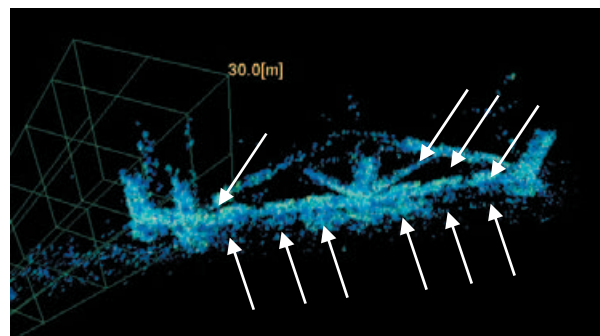


図-2.13 ジャケットの水中部(モザイク表示)

2.4.2.2 潜水士の視認

潜水調査中の潜水士を視認した。図-2.14は、潜水士船から約10m前方の構造物へ水中を移動する潜水士を撮影したビデオイメージである。手足の詳細な動きまでは判断できないが、移動しているか否か、あるいは移動方向の把握は可能である。また、呼吸のための排気を確認できる。尚、このとき水中の透明度は1m程度で、潜水士は水中で構造物まで自力で見通すことは出来ず、絶えず船上の通信員に位置確認をしていた。

これより、透明度や照度の低い水中での潜水作業のサポートや水中セキュリティーへの展開の可能も示唆された。

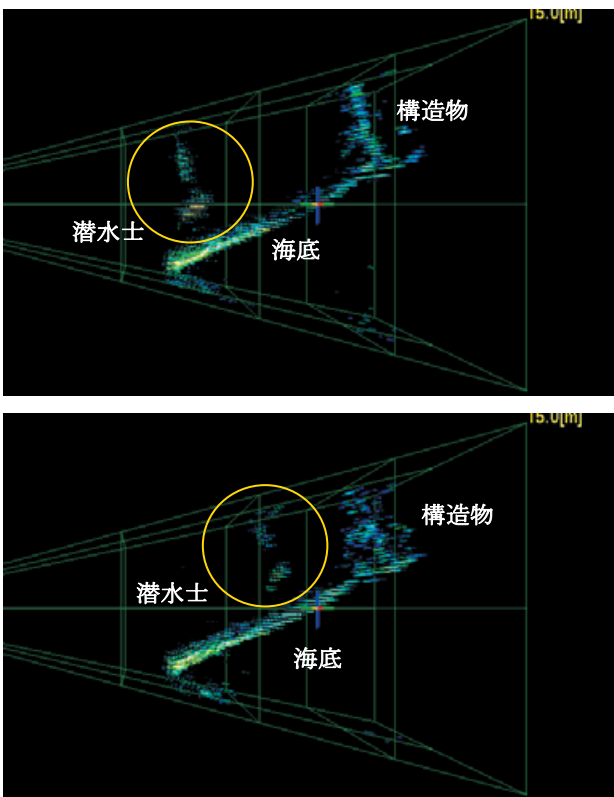


図-2.14 水中音響カメラで見た移動中の潜水士

2.4.2.3 埋立部の視認

埋立部マウンド法面を対象とした視認は、2月17日、接続部～埋立Ⅲ工区（現空港側）で実施した（図-2.15）。試験海域の外観を写真-2.5に示す。水は濁りによって透明度最大1m程度であり、船上から海底は確認できない。また、当日、撮影対象となるマウンドの水中部は、既に被覆均しは終了していた。この場所において、視認試験と測量試験を実施した。

埋立部に沿って船を移動させながら、舷側から吊下した水中音響カメラにより、敷設された消波ブロック又は

マウンドの法面の撮影を行った。図-2.16は、船舶の航行速度が3kt程度、水中音響カメラと消波ブロック又はマウンドとの距離が10～15mの場合の超音波映像である。水中音響カメラはパン30°、チルト15°として、2倍速モードでデータを収録した。この図は船体動揺補正処理を行い、表示にはモザイク処理と反射強度による色付けを行った。また、図中の黄色の□は水中音響カメラの中心位置を示した。写真-2.5に示すとおり消波ブロックとマウンドは隣り合い、回航しながらマウンドに平行な軌跡を取ったことが分かる。この図より、被覆ブロックは比較的どこでも同じ水色で示されたのに対し、消波ブロックは間欠的なまだらのパターンがみられた。繰り返し試験を行ったが、いずれの場合もこのような傾向があること、二つのブロックの境が明確に見えることから、表面の凹凸による見え方の違いがあると示された。



図-2.15 接続部～埋立Ⅲ工区（現空港側）でのマウンド法面の撮影

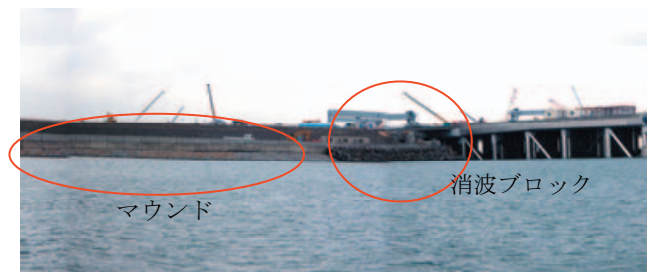


写真-2.5 接続部～埋立Ⅳ工区（現空港側）

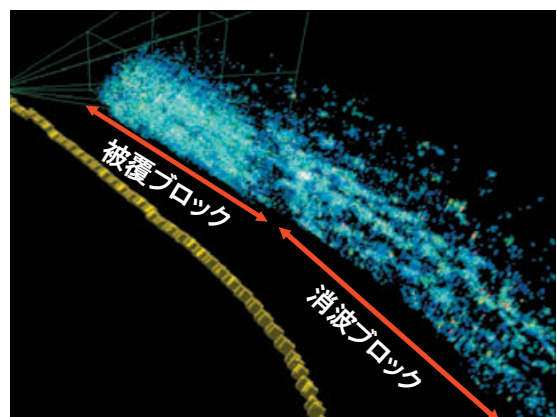


図-2.16 埋立部マウンド法面を対象とした超音波映像

2.4.3 測量実験

舷側から吊下した水中音響カメラにより、埋立・接続部～埋立Ⅲ工区（現空港側）に沿って船を移動させながらマウンドの法面の撮影を行った。船はマウンドとの距離をおよそ7.5～30mとして、4ノット以下で航行させながら、パン30度、チルト0～20度、撮影モードを2倍速としてデータを取得した。

2.4.3.1 ナローマルチビームソナーとの比較

水中音響カメラにより、上述の条件で取得した法面高さを羽田空港ローカル座標系の $X=2419.7$ 、 2429.7 、 2437.5 の3側線について図-2.17に示す。ただし、各 X 上で累加平均処理をしてある。図中の赤線は水中音響カメラ、青線は同一対象を計測したナローマルチビームの結果である。

水中音響カメラはいずれの結果においても、 $X=700\sim 685$ は緩やかな下り勾配であり、おおよそ $X=685$ を境に法面と現地盤に分かれている。(b)及び(c)においては $X=696$ 付近に立ち上がりが見られる。(b)においては通船栈橋の脚からの反射であり、(c)は通船栈橋の脚によるサイドエコーと考えられる。水中音響カメラとナローマルチビームソナーを比較すると、 $X=700\sim 685$ は緩やかな下り勾配、 $X=685$ を境に法面と現地盤に分かれるという大きな傾向は合致する。 $X=690\sim 685$ の範囲では水中音響カメラの法面高さはナローマルチビームソナーで取得したそれに比して、最大で約1m程度高くなった。水中音響カメラをジグに取り付けた際のズレがあったものと推測され、音響カメラそのものの性能によるものではない。尚、このズレは次章で述べるジグを用いた計測では解消している。一方、上述の栈橋に関するエコーを除いた $X=700\sim 690$ の範囲では両者は非常に近く、水中音響カメラの法面高さはナローマルチビームソナーで取得したその $\pm 5\%$ 程度以内に収まることが分かった。

2.4.3.2 スタッフ測量との比較

水中音響カメラとナローマルチビームソナーとの測量結果を比較した。しかしながら、ナローマルチビームソナーを測量機器として認識する歴史が浅く、水中音響カメラの測量データの検証には不安が残る。そこで、水中部の法面高さの検査方法として用いられるスタッフ測量との比較を行った。今回の海上試験ではスタッフ測量は実施しなかったため、過去の検査データ等よりスタッフ測量とナローマルチビームソナーの関係性を調べ、前述の水中音響カメラとナローマルチビームソナー関係より、水中音響カメラとスタッフ測量との関係性を推

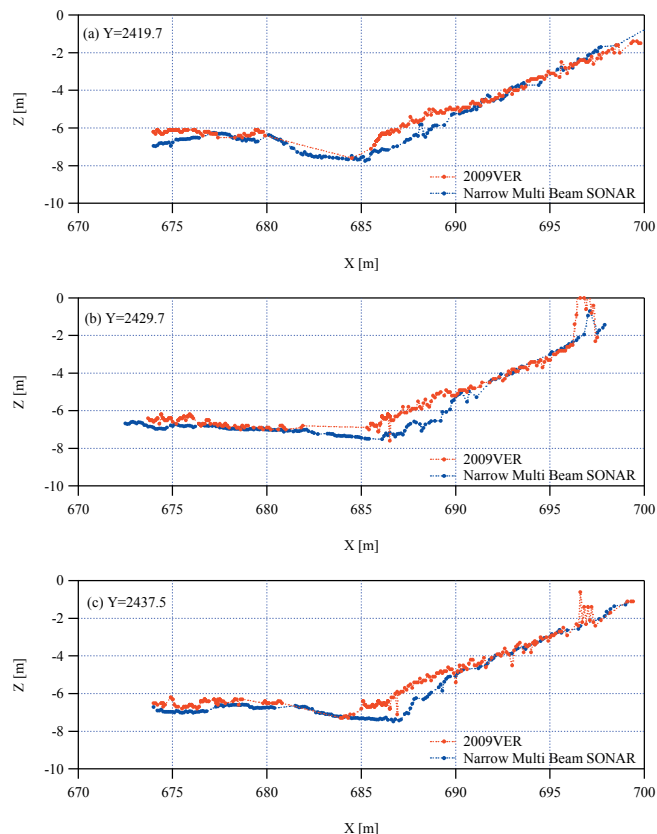


図-2.17 水中音響カメラによる法面高さ、 $X=2419.7$ 、 2429.7 、 2437.5

察した。

埋立Ⅳ工区より、現空港側のマウンドの法面高さのデータを提供いただいた。工事期間中のマウンドは常時沈下しているため、比較的短い期間内で実施されたデータを比較する。スタッフ測量は2009年2月6日の立会い検査時とナローマルチビームソナーは2009年4月21日の計測データを図-2.18に示す。 $X=2310$ 、 2350 、 2390 上の $Y=690$ の法面高さは Δ で示し、ナローマルチビームソナーは比較のため YZ 断面を示した。いずれの X においても、検査天端高は $Z=-4.9\pm 0.5\text{m}$ （この法面は勾配が1:2なので、法面垂直方向の許容誤差は $\pm 0.56\text{m}$ ）である。これより、 $Y=690$ の法面高さを比較すると、 $X=2350$ 及び 2370 においてはスタッフ測量がナローマルチビームソナーのいずれもほぼ同じ高さを示したが、 $X=2310$ ではスタッフ測量がナローマルチビームソナーに比して約1m程度高い。これは、スタッフ測量よりナローマルチビームソナーの計測時期が2ヶ月遅く沈下の現象を捉え、また $X=2138\sim 2260$ の間は未施工区間であることにより $X=2310$ と $X=2350$ 及び 2370 との沈下速度に差が生じたものと考えられた。しかしながら、いずれの方法で取得した $Y=690$ の法面高さも、検査天端

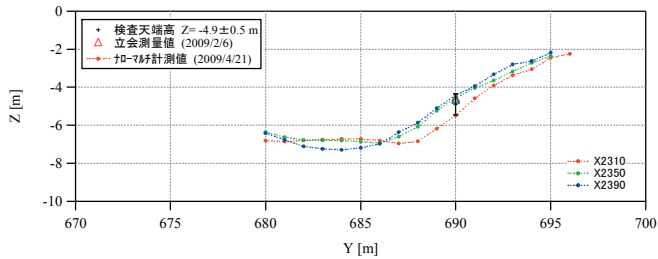


図-2.18 スタッブ測量（2009年2月6日）とナローマルチビームソナー（2009年4月21日）の法面高さの比較

高とその許容誤差内に含まれることが確認された。

参考データとして2009年2月4日の出来型測定時のデータ（ $X=2300\sim 2500$ の10mピッチ）とナローマルチビームソナー（同）も図-2.19に示した。このときの目標天端高は検査天端高と同じである。この結果より、スタッブ測量がナローマルチビームソナーに比して一般的に高めにプロットされており、ナローマルチビームソナーの計測時期がスタッブ測量より2ヶ月遅いことによりマウンドの沈下現象を反映していると考えられる。

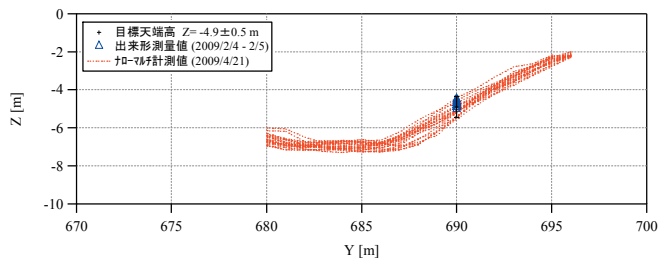


図-2.19 スタッブ測量（2009年2月5日）とナローマルチビームソナー（2009年4月21日）の法面高さの比較

以上の結果より、ナローマルチビームソナーによる測量結果は、スタッブ測量による結果と比して許容誤差 $\pm 0.5\text{m}$ に収まり、スタッブ測量と同等の結果を取得することを確認した。

これと前節の結果より、間接的ではあるが、 $X=700\sim 685$ の範囲において水中音響カメラは、スタッブ測量と同等の結果を取得したものとする。

2.4.4 追加機能の評価

即時性の向上（その2）について評価する。

- ②画像のフレームレート向上；水中部のA/D増設，解析PCを1台増設
- ③表示用ソフトウェアの機能向上；モザイク処理と反射

強度によって色づけの併用

ここでは、海上実験時の北側場周道路ジャケット部の電気防食用陽極を対象とした超音波映像（図-2.13）を例にとる。改良前の水中音響カメラでは、航行しながらの視認は可能なものの撮影は不可能であった。そこで、取得映像の高速表示のため水中部のA/D及び解析PC1台の増設を行い、改良前後では最速1fpsを4fpsへと向上させ（受信レンジ・チャンネル制限あり）、最大4ktで航行しながら（装置を移動させながら）物体を撮影可能となった。さらに、反射強度によって色づけに加えて、過去の映像を重ね合わせる描画表現（モザイク処理）の導入により、船上にて即座に対象を視認することが容易になった。尚、水中部のA/D増設に伴い、 $1.025\text{m}\times 0.5\text{m}\times 0.66\text{m}$ （奥行 \times 高さ \times 幅）と若干奥行が長くなっているが、重量約135kg（水中音響レンズ含む）であり15kg軽量化された。

2.4.5 海上実験のまとめ

水中音響カメラについて、海上にて性能確認試験を行った。電気防食用陽極の視認では、モザイク処理をすることで栈橋ジャケット部の骨組みや電気防食用陽極の視認が可能となった。また、埋立部の被災後調査を目指し、マウンド等の視認と測量試験を行った。これにより、マウンドだけでなく栈橋や消波ブロックからの反射波が、マウンドと異なる映像となることを確認できた。測量においては、マウンドの法面高さについて、ナローマルチビームソナーとスタッブ測量との比較を行い、水中音響カメラはスタッブ測量と同等の測量データを出力できることを示した。

3. 超音波式四次元水中映像及び測量取得システム (4-DWISS)

水中音響カメラを含み、水中音響カメラの実運用のための周辺機器やジグを含む水中映像取得及び測量支援システムを超音波式四次元水中映像及び測量取得システム（以下、4-DWISS）を例示し、さらに運用時の船舶や収納についても検討を行なったのでまとめる。

3.1 システム概要

4-DWISS は、以下に示す三つのパートより構成される。

- (1) 水中部：4-DWISS水中部及びそれを船舶に艀装するための取付ジグ
- (2) 船上部ハードウェア：4-DWISS船上部及びGPS等環境条件の計測機器
- (3) 船上部ソフトウェア：制御・データのリアルタイム表示，データ収録，データ解析用の各ソフトウェア

- (1) 水中部：4-DWISS水中部及びそれを船舶に艀装するための取付ジグ

取付ジグは大きく分けて固定部と可動部の2ピースから構成される（写真-3.1、図-3.1）。固定部はジグ置台（H鋼）・固定架台から成り、可動部は装置本体架台から成る。以下に治具設置イメージを掲載する。（写真は海上試験に使用した作業船を例としたものである）



写真-3.1 4-DWISS水中部及び船舶への取付ジグ

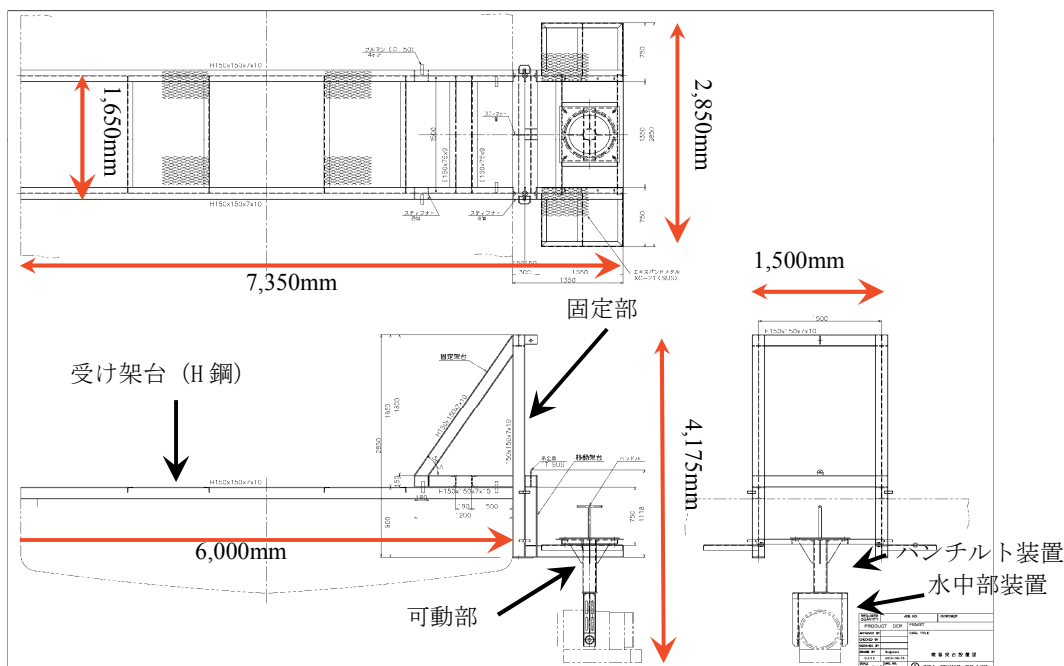


図-3.1 4-DWISS水中部の船舶への取付ジグ，CAD図面

(2) 船上部ハードウェア： 4-DWISS船上部及びGPS等環境条件の計測機器

4-DWISSによる水中データの取得と同時に、GPSによる、位置情報、動揺補正装置による船体動揺値、方位センサ

による船首方位情報を取得し、リアルタイムで船舶の位置や船体動揺の補正を行ない、情報を記録する。以下に各計測機器のデータイメージを示す(図-3.2)。

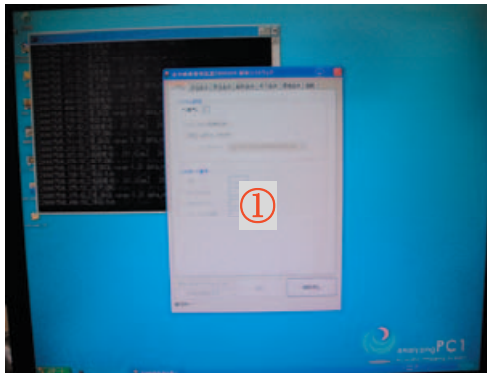


図-3.2 4-DWISS船上部ハードウェアの構成イメージ

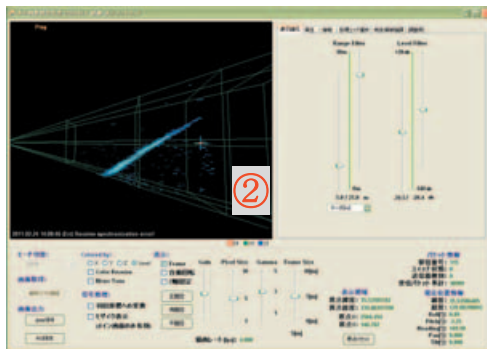
(3) 船上部ソフトウェア：制御・データのリアルタイム表示，データ収録，データ解析用の各ソフトウェア

本システムでは，各種ソフトウェアによってデータの計測・保存，及び解析などを行う．4-DWISSの制御・表示を行うソフトウェア，計測データの解析を行うソフトウ

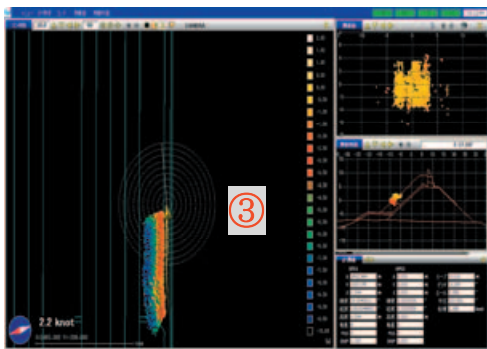
ェアの他に，地図情報を表示しての誘導と計測データの保存を行うソフトウェア，保存した計測データから図面作成を行うソフトウェアの4つで運用を行う．以下にソフトウェアのイメージを示す(図-3.3)．画面内の番号は，前頁のイメージ図とリンクする．



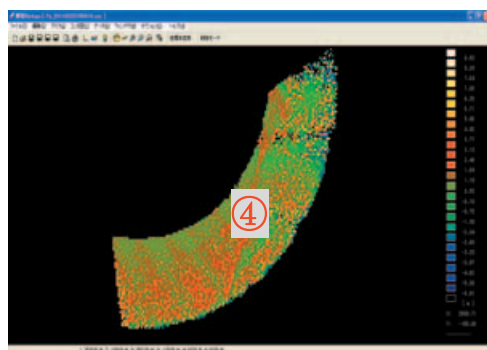
4-DWISS 解析ソフトウェア



4-DWISS 制御・表示ソフトウェア



リアルタイム地図情報ソフトウェア
(4-DWISS LogViewer)



測量図面作成ソフトウェア

図-3.3 4-DWISS船上部ソフトウェアの構成イメージ

3.2 運用方法の検討

4-DWISSの実運用に際し、効率的な計測作業を行うための作業船の要件ならびに必要な装備および取付ジグの検討を実施した。

検討にあたっては4-DWISSの技術仕様およびこれまでの実海域試験を考慮し、以下の条件設定として、①ジグの検討、②作業船の検討、③収納方法を検討した。

【条件設定】

- 1) 最大計測レンジ25mに適用するため、4-DWISS（水中部）は作業船の舷側に固定する
- 2) 作業の安全性確保のため、4-DWISS（水中部）は移動時に空中に揚収可能とする
- 3) 4-DWISS（水中部）の計測位置、向きを制御するため、4-DWISSを搭載する作業船は自走可能とする

3.2.1 ジグの検討

4-DWISS（水中部）の構造上の留意点並びにこれまでの試験状況から、水中部を舷側に取付けるジグの形状、重量、材質などにつき必要要件を以下にまとめた。

- 1) 4-DWISS（水中部）は計測時には水中に、移動時には空中に固定できる可動式構造とする。
- 2) 4-DWISS（水中部）を固定する可動架台は船上装備のみで制御（昇降）できるものとする。
- 3) 汎用性を持たせるため、4-DWISS（水中部）を装備した可動架台と船体に装着する固定架台に分離できる2ピース構造とする。
- 4) 船体に取付ける固定架台は、一般的な船体形状に適合できる構造とする。
- 5) 4-DWISS（水中部）（空中重量約135kg）の装置を、空中固定時および計測時に確実に保持できる構造とする。尚、計測時の標準的な船速は約3～4ノットとする。
- 6) 可動架台ならびに固定架台とも腐食に耐える材質とする。
- 7) 計測時ならびに空中固定時に落下防止などの安全機構を有する構造とする。
- 8) 最適な計測状況を確認するため、水中部の向きを調整できるパン・チルト機能を有する。
- 9) 上記を踏まえ、最大限の軽量化が可能な形状、材質を選定する。

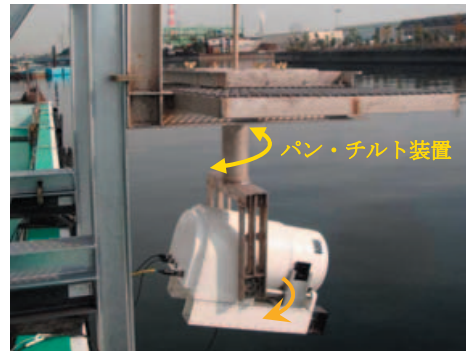
以上より、取付ジグは可動架台部と固定架台部から構成される2ピース構造で、可動架台の制御（昇降）は作業船に搭載可能な装備で行えるものとし、かつ、計測時ならびに空中固定時に確実に保持できる構造と強度を有するものとした（**図-3.1**）。また、4-DWISS（水中部）を取付ける可動架台はパン・チルト機能を有し、パン方向

は±30度（可変）、チルト方向は-30度（5度ピッチ）で取付け可能とした。**写真-3.2**に、海上試験時の取付ジグの船舶への設置状況を示す。

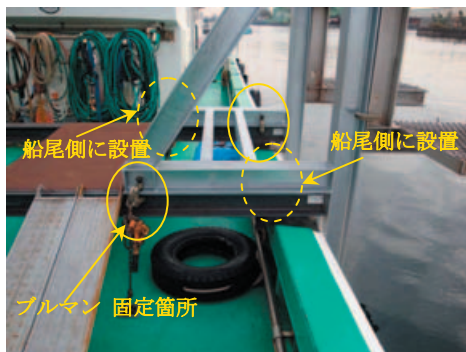
上記検討結果を踏まえ、取付ジグを製作し海上試験作業で使用した。尚、取付ジグについては海上試験での運用結果を踏まえ設計変更を実施しており、詳細は次節に記述する。



治具置台 (H 鋼 2 本) と船体を
レバーブロックで固定



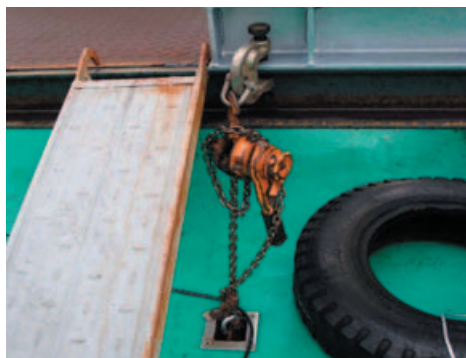
可動架台と水中部の設置状況



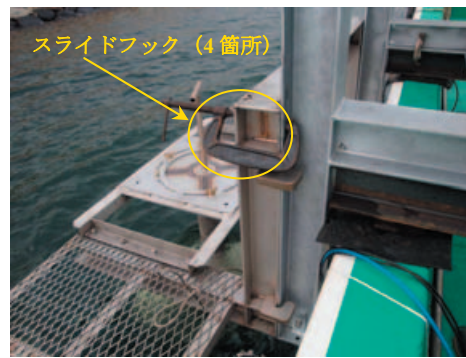
治具置台 (H 鋼) と固定架台をブルマン
4 箇所固定



航行中は移動架台を引き上げ、
シャコ万力を使用し固定



レバーブロックおよびブルマンで
固定した状況

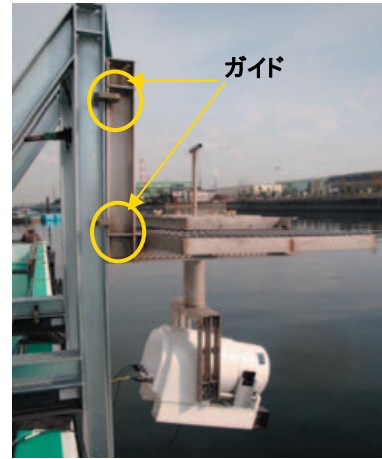


計測時は、落下防止のためシャコ万
力で固定

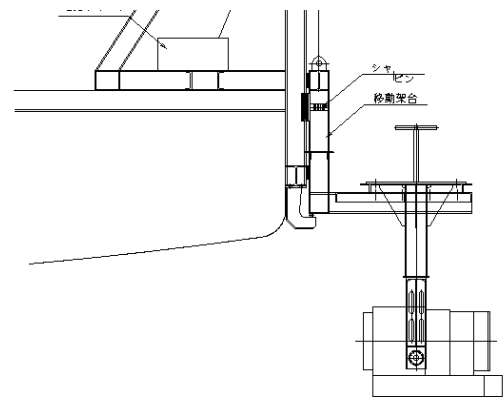
写真-3.2 海上試験時の取付ジグの船舶への設置状況

3.2.2 汎用型取付ジグの設計・製作

海上試験での運用実績から、より実運用に適し、かつ安全性の向上を目的にジグの設計ならびに製作を行った。前項の海上試験で用いたジグ（図-3.1）と外観は同様であるが、4-DWISS を取り付ける移動式架台の昇降ガイド部を可動式とし、固定式架台との固定に新たにシャープピン構造を採用し、架台衝突時、シャープピンが破断し移動式架台部が外れるよう安全性の向上を行った。また、移動式架台の昇降用に電動ウィンチを設置できるようにし、作業の効率化を図った。新旧ジグの比較を表-3.1 及び図-3.4、新ジグの設計図を図-3.5、電動ウィンチの仕様例を図-3.6 に示す。



(a)ガイドを有する旧ジグ



(b)シャープピン構造を有する新ジグ

表-3.1 新旧ジグの比較

No	項目	旧	新
1-1	シャープピンを用いた移動式架台の離脱	移動式架台にU字型のガイドを設置している。このため衝突時は固定架台のH鋼部が座屈しないと移動式架台が外れない。 *図-3.4(a) 参照	移動式架台に離脱部を設け、シャープピンにて固定する。架台衝突時はシャープピンが破断し、離脱部が外れる機構とする。 *図-3.4(b) 参照
1-2	電動ウィンチの設置	移動式架台は、調査船付のユニッククレーンを用いて昇降作業をおこなっている。	波浪時におけるクレーン作業の危険性を勘案し電動ウィンチを設置する。

図-3.4 新旧ジグの比較、参照図

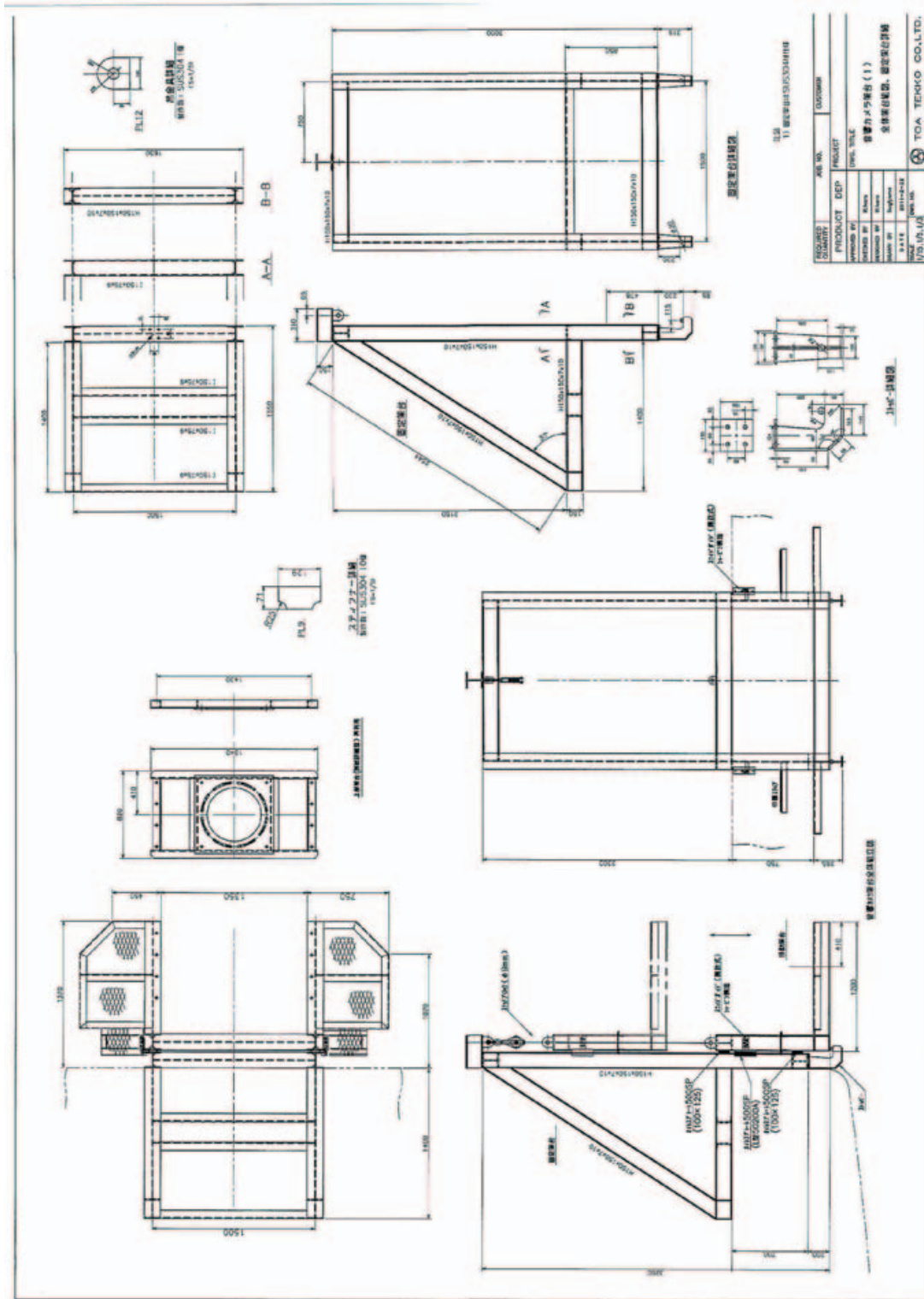


図-3.5 ジグ設計図, (a)全体架台組図, 固定架台

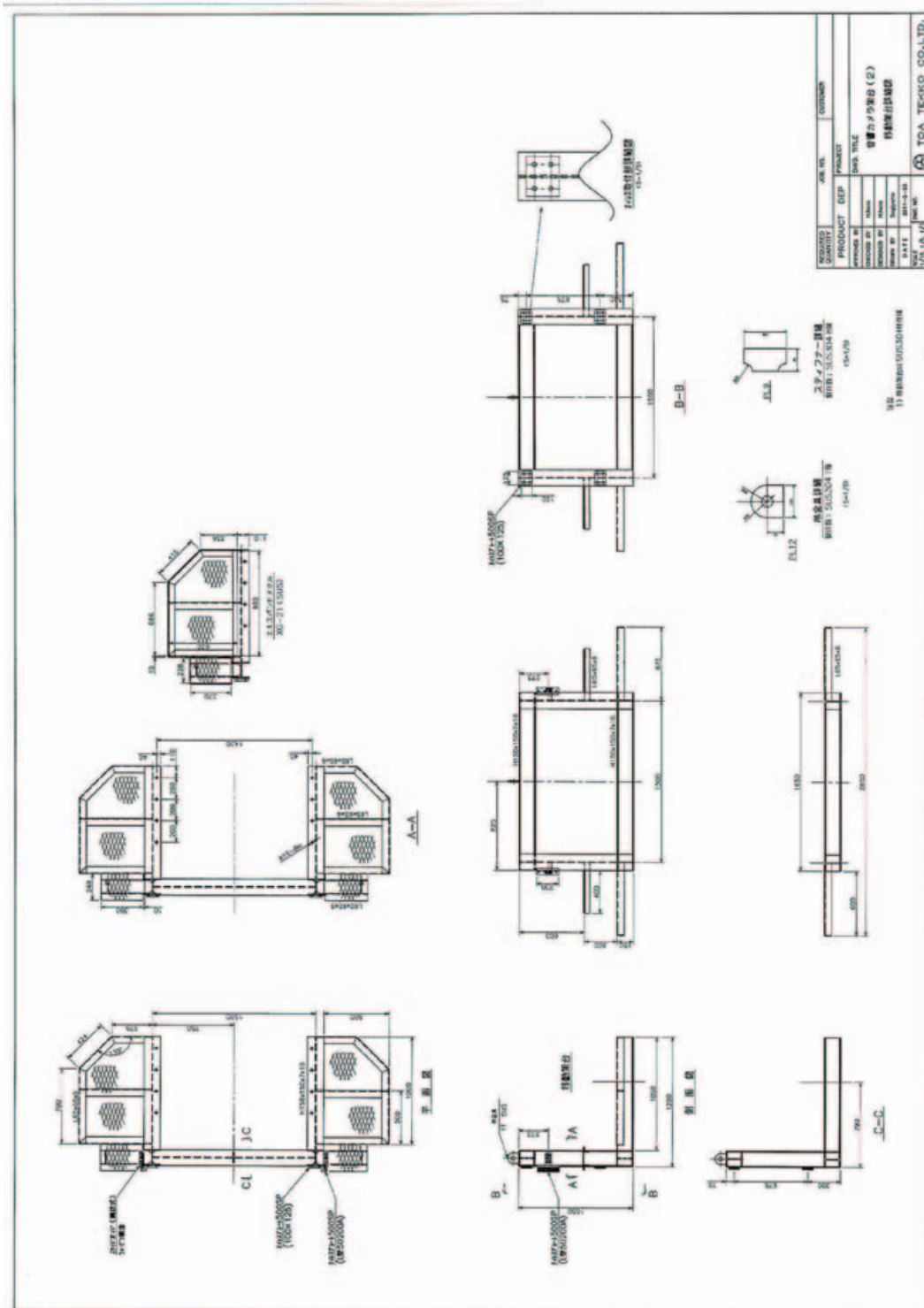
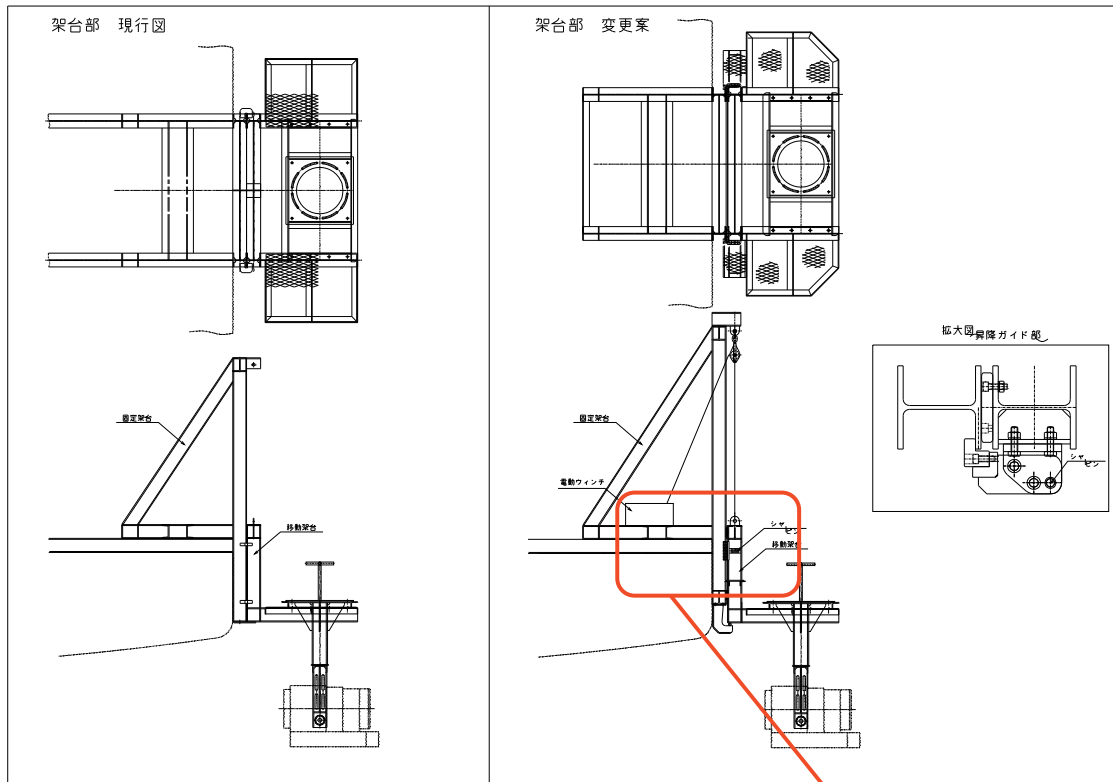


図-3.5 ジグ設計図, (b)移動架台組図



型式		SX-101	SX-103	SX-201	SX-203	SX-205	SX-210
定格荷重 (kg)	50 Hz	一層目 180	300	180	300	600	1000
		三層目 180	300	180	300	600	1000
		最上層 (5)146	(5)293	(5)146	(5)293	(6)437	(5)931
60 Hz	一層目 150	300	150	300	500	1000	
	三層目 150	300	150	300	500	1000	
	最上層 (5)122	(5)244	(5)122	(5)244	(6)364	(5)776	
定格ロープ速度 (m/min)	50 Hz	一層目 8.5	4.2	14.7	6.9	4.1	1.7
		三層目 11.0	5.5	19.0	9.0	5.5	2.4
		最上層 (5)13.4	(5)6.7	(5)23.2	(5)11.0	(6)7.5	(5)3.0
60 Hz	一層目 10.4	5.0	17.4	8.5	4.8	2.0	
	三層目 13.5	6.5	22.5	11.0	6.5	2.9	
	最上層 (5)16.5	(5)7.9	(5)27.5	(5)13.4	(6)8.9	(5)3.7	
ロープ巻取長さ (m) (累計)	一層目 7.9	7.9	7.9	7.9	10.5	8.5	
	三層目 27.2	27.2	27.2	27.2	36.8	30.8	
	最上層 (5)51.0	(5)51.0	(5)51.0	(5)51.0	(6)89.0	(5)60.0	
使用ロープ径		φ6				φ8	φ10
電動機	型式	コンデンサ始動形		コンデンサ始動、コンデンサ運転形			
	出力	0.4kW		0.75kW			
	極数	4P					
	定格電圧 定格電流	単相 100V/50Hz 9.2A 100V/60Hz 8.4A		単相 100V/50Hz 11.0A 100V/60Hz 10.4A			
絶縁		B種					
負荷時間率		25% ED					
ブレーキ制動率		150% 以上					
制御方法		2点押ボタンスイッチによる直接操作					
減速比		42.19	86.85	25.05	51.57	107.14	261.91
製品質量 (kg)		37		40		65	67

※()内の数字は最上階の巻層を示す

図-3.6 電動ウィンチの仕様例

3.2.3 作業船の選定

3.2.3.1 形状、材質、大きさの検討

前節で検討した 4-DWISS の取付ジグを搭載する作業船の形状、材質、大きさ（トン数）などの検討を実施した。検討にあたっては、取付ジグの形状ならびに重量および効率的な計測作業や安全作業の確立を重点においた。結果を以下にまとめる。

- 1) 取付ジグを搭載できるデッキスペースを有すること。
- 2) 取付ジグ（水中部含む、総重量約 1.5 トン）を艀装し、安全に航行できること。
- 3) ジグを確実に固定できる船体形状および装備（固定ピースなど）を有すること。
- 4) 効率的な計測のため、3～4 ノットの低速で自走可能とすること。

3.2.3.2 船内スペースならびに装備（ウィンチ、クレーンなど）の検討

取付ジグの可動架台の制御や 4-DWISS（船上部）装置の設置などから、船内スペースならびに必要装備の検討を実施した。結果を以下に示す。

- 1) すべての 4-DWISS（船上部）を接続した状態で、運用者 2 名が効率的に計測を実行できる室内スペースを有すること。
- 2) ジグの可動架台の上げ下げを確実にかつ安全に実施できる装備を有すること。
- 3) 取付ジグを固定できる装置ならびに設備を有すること。

3.2.4 4-DWISS の設置ならびに揚収方法の検討

3.2.2 に示した取付ジグの設置ならびに揚収（可動架台の昇降）方法の検討を行った。下記に示す三点の基本方針を基に、作業性の向上ならびに安全性の確保に重点をおいた。

- ・ 4-DWISS（水中部）やジグなど重量物の設置作業での安全性を確保すること。
- ・ 作業船に設置後は、作業船の設備のみで可動架台の昇降ができること。
- ・ 昇降作業の安全と容易性を確保する。

4-DWISS の設置ならびに揚収作業時に厳守すべき事は以下の通り。

- 1) 4-DWISS（水中部）とパン・チルト装置との取付けならびに角度変更は陸上で行う。
- 2) 4-DWISS（水中部）を装着したパン・チルト装置と可動架台の取付けも陸上で行う。

- 3) 可動架台と固定架台の取付けも陸上で行う。
- 4) ジグ（可動架台と固定架台）の作業船への取付けは陸上クレーンで行う。
- 5) 可動架台の昇降は作業船に設置された装備（クレーン、ウィンチなど）で行う。
- 6) 可動部の制御（昇降）は作業船に設置された装備（クレーン、ウィンチなど）で行う。

3.2.4.1 取付ジグの形状

取付ジグの大きさ、形状、重さならびに船内スペースおよび作業時の必要装備などの検討結果から、4-DWISS で使用する作業船の選定し、その実績例を以下に示す（写真-3.3、ジグは図-3.1）に示した。

【ジグのサイズ】

長さ	≒ 7,350mm
幅	≒ 2,850mm
高さ	≒ 4,175mm
総重量	≒ 1,500kg

【ジグの材質】

固定架台	：鋼材（亜鉛メッキ）
可動架台	：ステンレス
受け架台	：H鋼（必要な場合）



写真-3.3 取付ジグの形状と設置例

その他：取付ジグ設置時に船体が装置側に傾いた場合には、装置設置舷の反対側に約 1.5 トンのバランスウェイトを設置し、船体のバランスを確保する。

3.2.4.2 4-DWISSの船上部の要求スペース

4-DWISS（船上部）（計測器、モニタ等のハードウェア）の占有面積と運用者 2 名の作業スペースの例を図-3.7 に示す。これより、少なくとも約 4 ㎡以上のキャビンスペースを有する必要がある。

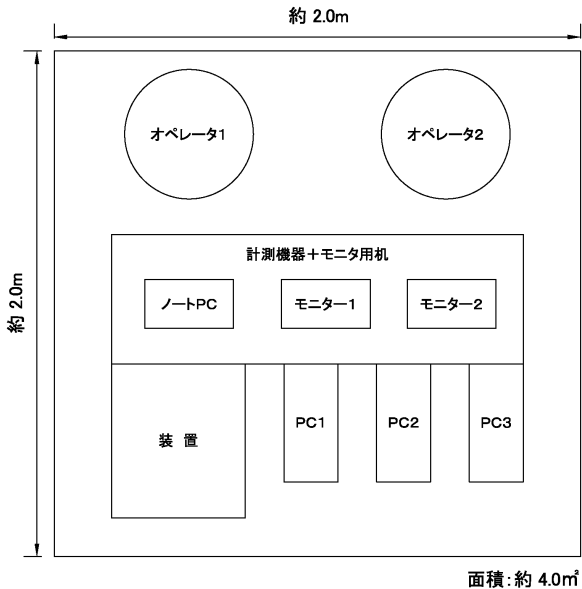


図-3.7 4-DWISS の船上部の要求スペース

3.2.4.3 推奨する作業船の要目

4-DWISS の計測には、上述の①と②の要件を満足する、作業船が必要となる。

- 船舶分類 : 小型船舶（自走船）
- トン数 : 10 トン以上, 20 トン未満
- 船長 : 15m 前後
- 船幅 : 5m 前後
- 甲板面積 : 20 m²以上
- キャビン面積 : 4 m²以上
- 必要装備 : クレーンまたはウィンチ

さらに、使用する作業船は以下の条件を満たすものとなる。

- ・ 取付ジグ（可動部ならびに固定部）を舷側に固定できること。
- ・ 取付ジグを固定した状態で航行に支障をきたさないこと。
- ・ 取付ジグ及びバランスウェイトを併せ、約3トンの重量物を搭載して航行に支障がないこと。
- ・ 取付ジグを装着した状態で、船上作業が安全に遂行できるデッキスペースを有すること。
- ・ ②の4-DWISS（船上部）を設置するキャビンスペース（約4 m²以上）を有すること。
- ・ 自航が可能で、かつ計測時の最適船速（3～4ノット）が維持可能なこと。
- ・ 可能であれば、上記の条件を満たす鉄鋼船が望ましい。

一例として、本年度の海上試験で使用した作業船の仕様を表-3.2に示す。なお、船上にクレーンの装備がない作業船の場合を想定し、取付ジグの設計変更を実施し、ウィンチ（既設または仮設）で代用できるようにした。

表-3.2 4-DWISS の計測に使用した作業船（実績例）

船舶分類	クレーン台船(潜水士船兼務)	
船体形状	幅	4.96m
	長さ	16.0m
	トン数	19t
	材質	FRP
甲板状況	平甲板またはそれに準ずる形状	
	縦	≒ 6.0m
	横	≒ 4.7m
キャビン面積	面積	≒ 28m ²
	縦	≒ 2.0m
	横	≒ 2.3m
動力	内燃機関	
	連続最大出力	589.0KW 800.0PS
	航海速力	8N
	最大速力	13N
最大搭載人員	15人	
装備	クレーン(2.9t吊)	

3.2.4.4 設置ならびに収納方法の検討

システムの運搬ならびに保管の容易性を高めるため、取付ジグを除いた4-DWISS本体（水中部及び船上部）を収納するコンテナを導入した(写真-3.4)。導入したコンテナの概要を以下に示す。

甲板スペースは十分確保できるが、キャビンスペースがない作業船の場合には専用コンテナごと船上に設置し、計測ができる(図-3.8(a))。また、4-DWISS 本体（ジグ除く）をコンテナに収納し、運搬も可能である(図-3.8(b))。

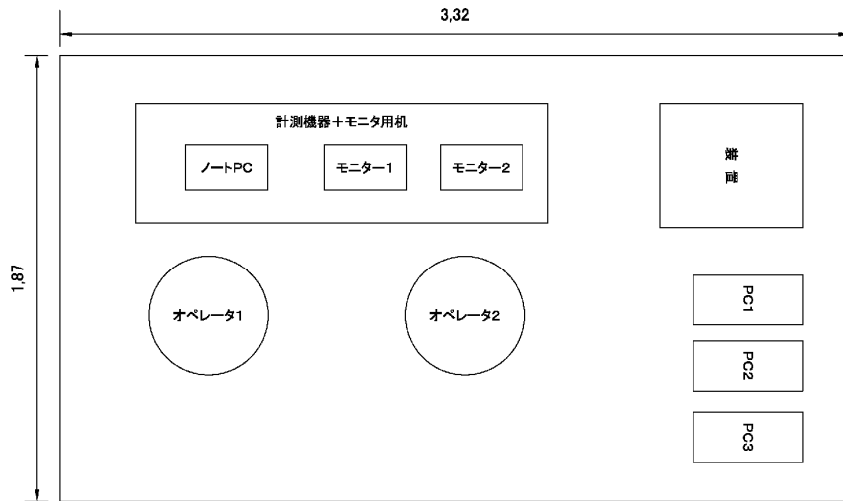


(a) コンテナの外観



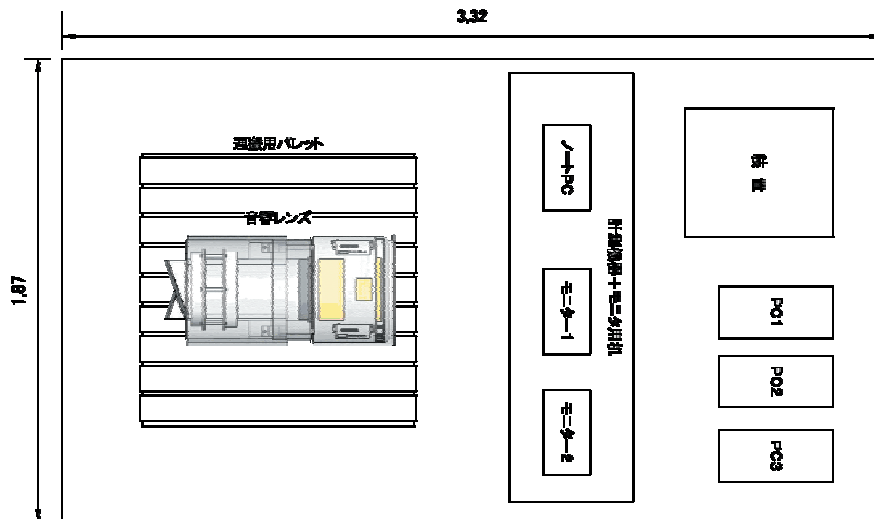
(b) コンテナの内部

写真-3.4 4-DWISS を収納するコンテナ



面積≒6.000m²

(a) キャビンがない作業船上で、計測スペースとしての配置例



面積≒6.000m²

(b) 運搬時の配置例

図-3.8 4-DWISS を収納するコンテナ内の配置例

3.3 海上実験

3.3.1 実験概要

2011年11月26～30日、実験海域は東京国際空港沖のD滑走路外周（図-3.9）において実施した。4-DWISSを用いて、D滑走路の外周全域に対し、映像及び測量データを取得した。ここでは、データ取得のみではなく、2.2節で述べたリアルタイムの地図情報ソフトウェア（LogViewer）の動作確認、4-DWISSの計測に適した条件の検討、3.2節で示したジグの実用性の検証も合わせて行なった。



図-3.9 実験海域イメージ図

使用船舶ならびに主要機器を以下に示す。

1) 使用船舶

船名：十八日海丸（クレーン台船）
 トン数：19トン
 所属：株式会社日本海洋サービス

2) 主要機器

リアルタイム収録ソフト(音響イメージ)：4-DWISS
 リアルタイム収録ソフト(測量データ)：LogViewer
 解析ソフト：2D Analyzer, 3D Analyzer
 WAGPS 測位装置：Star Fire
 GPS 方位センサー：Vector Sensor
 モーションセンサー：TSS-02

3.3.2 地図情報ソフトウェア（LogViewer）の動作確認

ここでは、地図情報ソフトウェア（LogViewer）の動作確認を行なった。4-DWISSとLogViewerのインターフェイス正常な通信を確認した後、リアルタイム表示機能の検証を行なった。図-3.10はLogViewerの画面であるが、図中の左画面内の同心円の中心が船舶位置、青線が東京国際空港D滑走路の完成断面図(平面図)、右中央画面の赤線は同(断面図)である。各図のカラーコンターは4-DWISSで取得した音響データであり、マップ上に4-DWISSで取得した音響データを重ねて表示できることを確認できた。尚、右下の窓は位置、動揺、方位などの各データが表示されている。また、データ保存ならびに出力の検証を行なった。

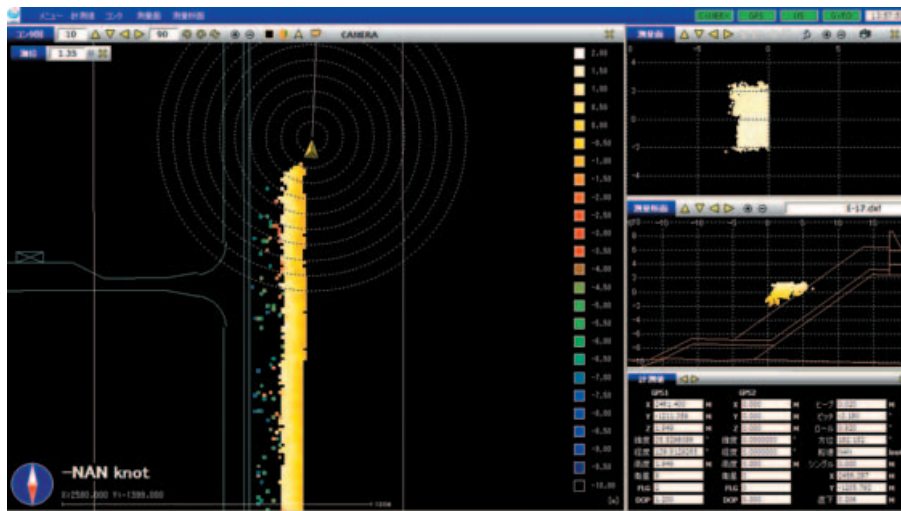


図-3.10 LogViewerの画面表示イメージ

3.3.3 4-DWISS の計測に適した条件の検討

3.3.3.1 概要

4-DWISS の好適な計測条件を押さえておく必要がある。特に、以下4点につき、試験結果を用いて検証を行った。

①船速、②計測対象までの距離、③4-DWISS（水中部）のチルト角（0度、15度、30度、但しパン角は-30度固定）、④海象条件等の検討

3.3.3.2 方法

D滑走路棧橋部・沖側の防衝杭（図-3.11）を計測したデータを対象として、複数の条件の異なるXYZデータの比較及び検討を行った。

①杭番号16, 19: 船速, 計測対象までの距離, 4-DWISS(水中部)のチルト角の検討

②杭番号18, 24: システム稼働時の海象条件の検討
海象条件としては目視で見定めるのでは主観的判断になりがちであるため、作業船に設置した動揺補正装置のヒープ値（上下動）を基にして判断した。

3.3.3.3 計測に適した船速・対象物までの距離・4-DWISS（水中部）のチルト角

杭番号16及び19の解析データを図-3.12に示す。

① 船速の検討

4-DWISSの計測レートは最速で1秒間に4回であるため、より低速で実施することが望ましい。低速で航行すれば短い移動距離間に数多くのデータ点数を得られ、反対に高速で航行すれば長い距離間にまばらなデータ点数

となるためである。しかしながら、船舶を低速で安全に航行するには限界があり、より適した航行速度の決定が望まれた。図-3.12において、杭番号16では船速3.4から4.1ノット、杭番号19では船速3.5から4.1ノットでの船速の違いによるデータのバラつき具合を比較した。いずれ杭番号においても、船速の違いによってデータ密度に大きな差は生じないと分かった。比較した船速に大きな差がないのは、船舶の性能上3ノット程度以下の船速を維持することは難しく、ジグ及び計測機器を含めた安全面から4ノット程度以上の船速での航行も難しかったためである。

② 対象物までの距離・4-DWISS（水中部）のチルト角
計測したい対象物の深度に合わせて、4-DWISS（水中部）のチルト角及び4-DWISS（水中部）と対象物の距離を定め、複数データを合成することにより広範囲のデータを取得可能となる。4-DWISS（水中部）のチルト角を変更、一旦ジグより取り外して陸上作業をし、再度ジグへ取り付けとなる。取り付け位置や取り付け角度にズレが生じた場合、同一位置の対象物を計測してもデータの結合部に階段状の歪みが出る可能性がある（2.3.3節参照）。図-3.12より、杭番号16, 19のいずれにおいても、対象物までの距離、4-DWISS（水中部）のチルト角の違いがあっても杭の面形状を捉えており、データを合成して示しても問題がないと分かった。尚、この検討結果により、取り付けジグによる位置決め及び4-DWISS（水中部）のチルト角は、取付作業の繰り返しがあっても、そのズレが計測に支障を与えない範囲であることが確認された。

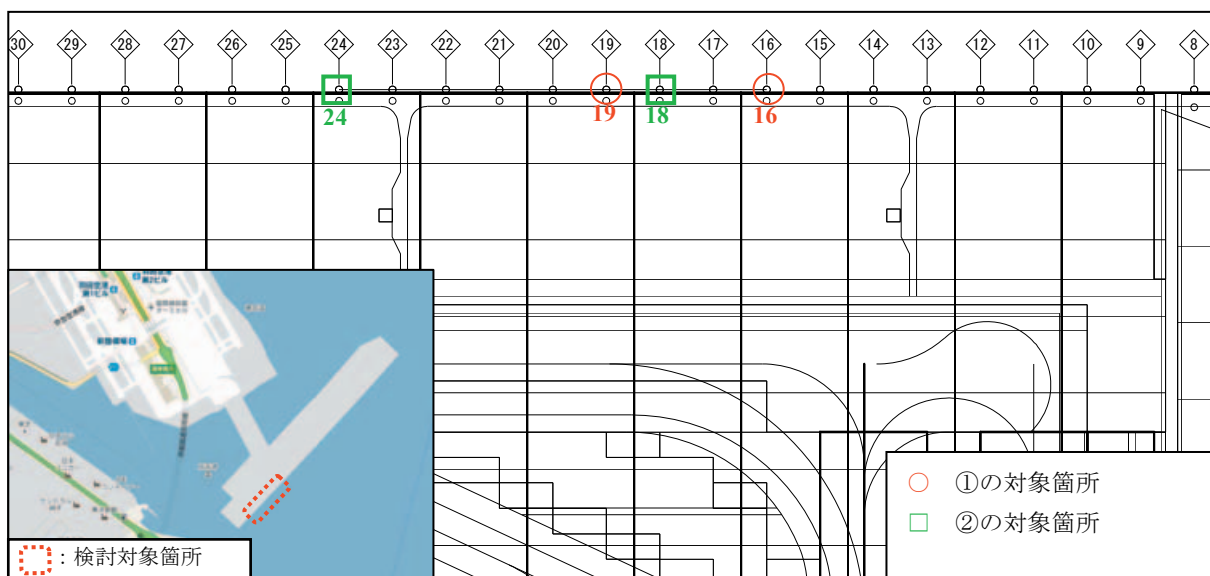
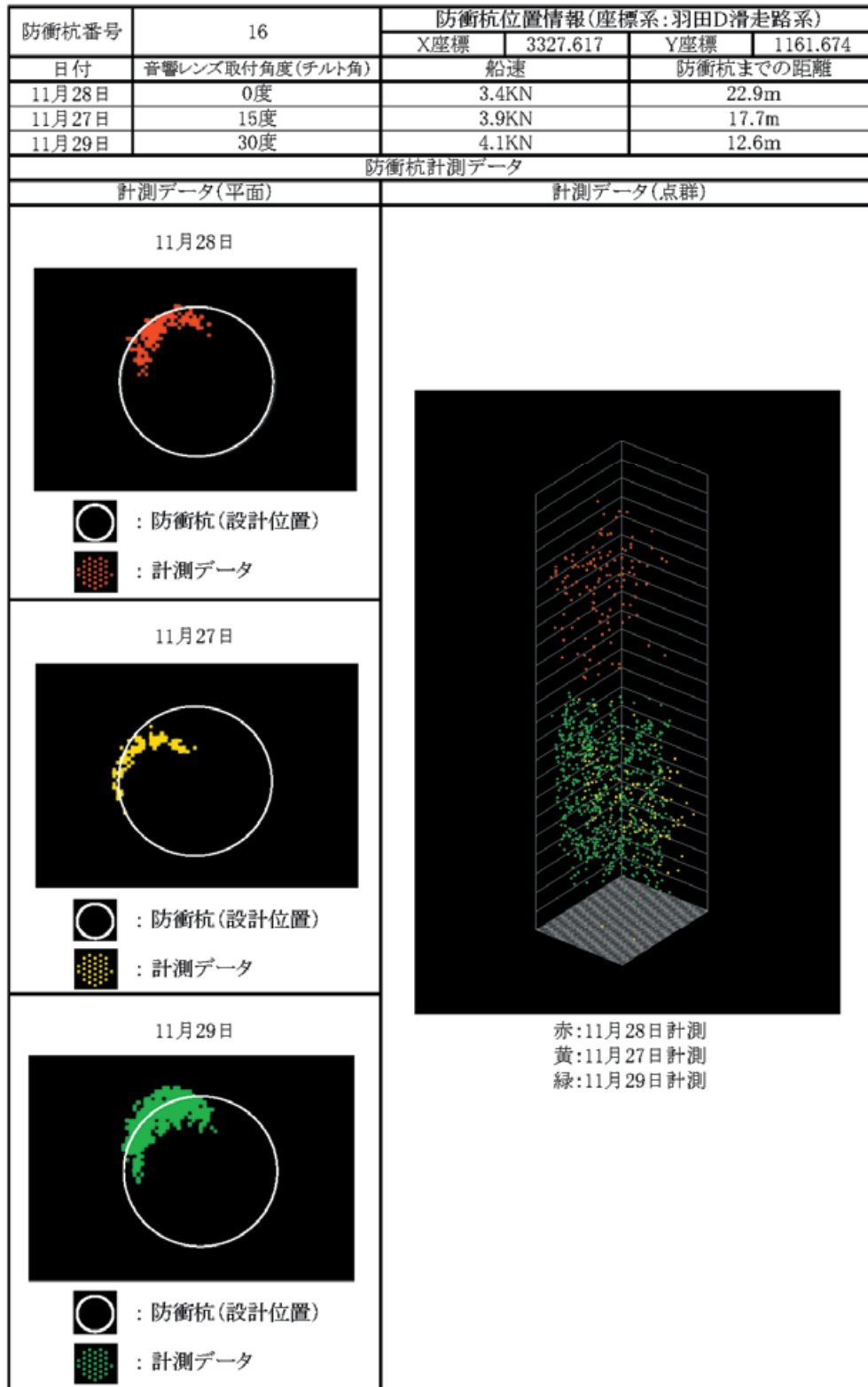
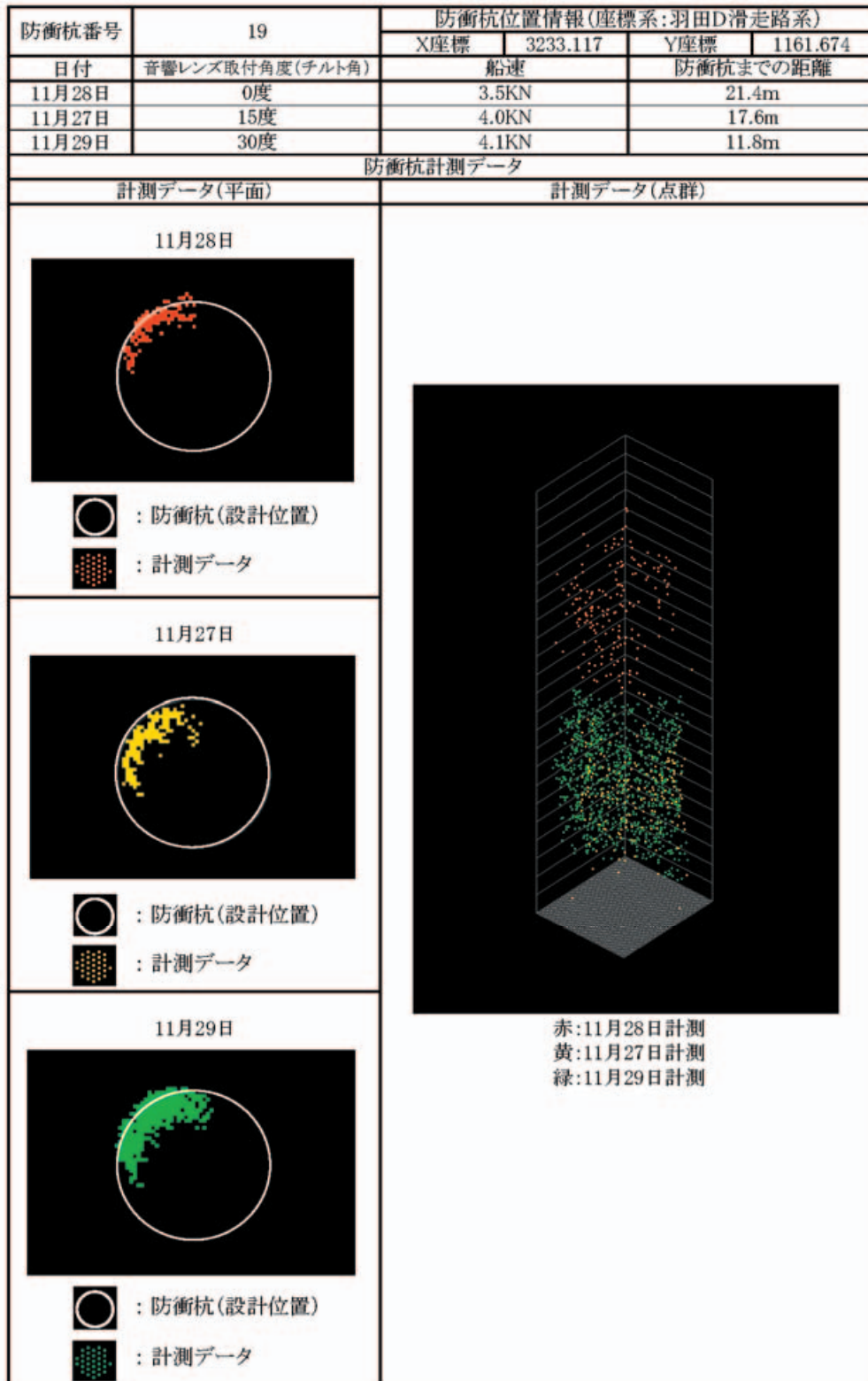


図-3.11 4-DWISS の計測に適した条件の検討箇所



(a) 杭番号16の結果

図-3.12 計測に適した船速, 対象物までの距離, 4-DWISS (水中部) のチルト角の検討



(b) 杭番号19の結果

図-3.12 続き

3.3.3.4 システム稼働時の海象条件の検討

作業船に設置した動揺補正装置のヒープ値（上下方向の動揺）を使用し、海象条件が違ふことでの計測品質の検討を行った。また計測時の気象情報を気象庁（<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>）より入手し参考資料とした。海象条件の違いを図-3.13、杭番号18及び24を対象とした結果を図-3.14に示す。

図-3.12より、海象条件の異なる計測日として、ヒープ値の振幅が大きい11月28日とあまり大きくない27及び29日の3日間を選択した。

図-3.14より、11月27及び29日の両日共に杭番号18及び24のいずれにもデータ密度に大きな変化は見られ

ない。これらに比して、11月28日は両杭共にデータ密度が低い。ヒープ値の振幅が大きかった11月28日は、船体が上方にあるとき4-DWISS水中部のレンズ部の上方が水面上に位置した。これにより、水中での超音波受信可能面積が減少し、データ取得点数が低下したと考えられる。この日は、4-DWISSのチルト角が0度の設定であり、対象物の計測高さが水面付近を狙ったものであったため、より厳しい環境条件であったと言える。しかしながら、防衝杭の様に位置や大きさが既知である対象の有無を確認する程度の情報量はあると考えられた。

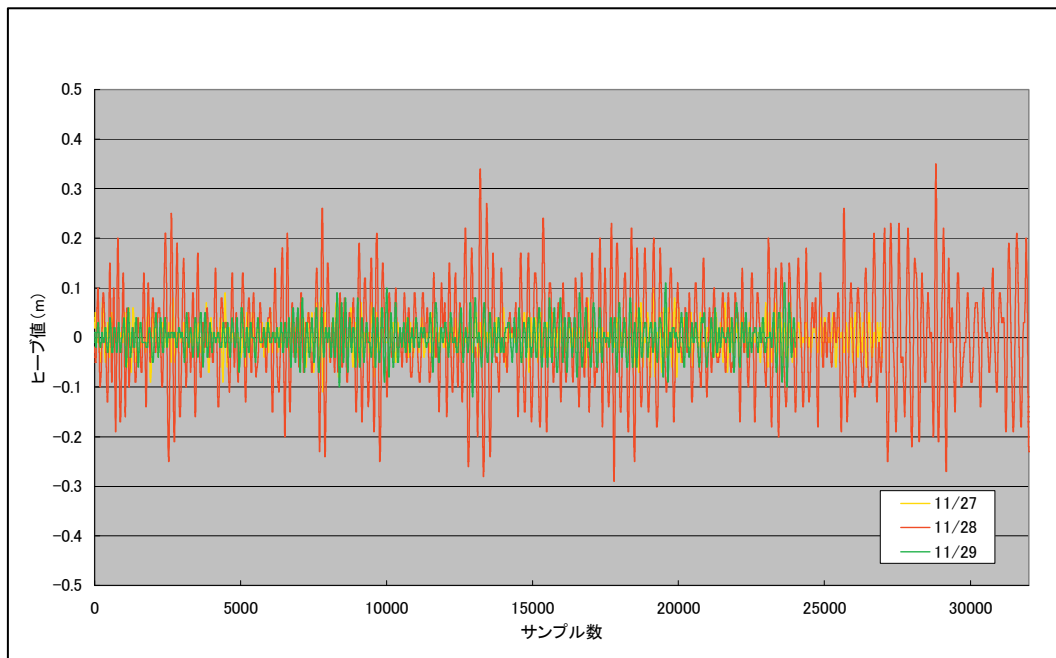
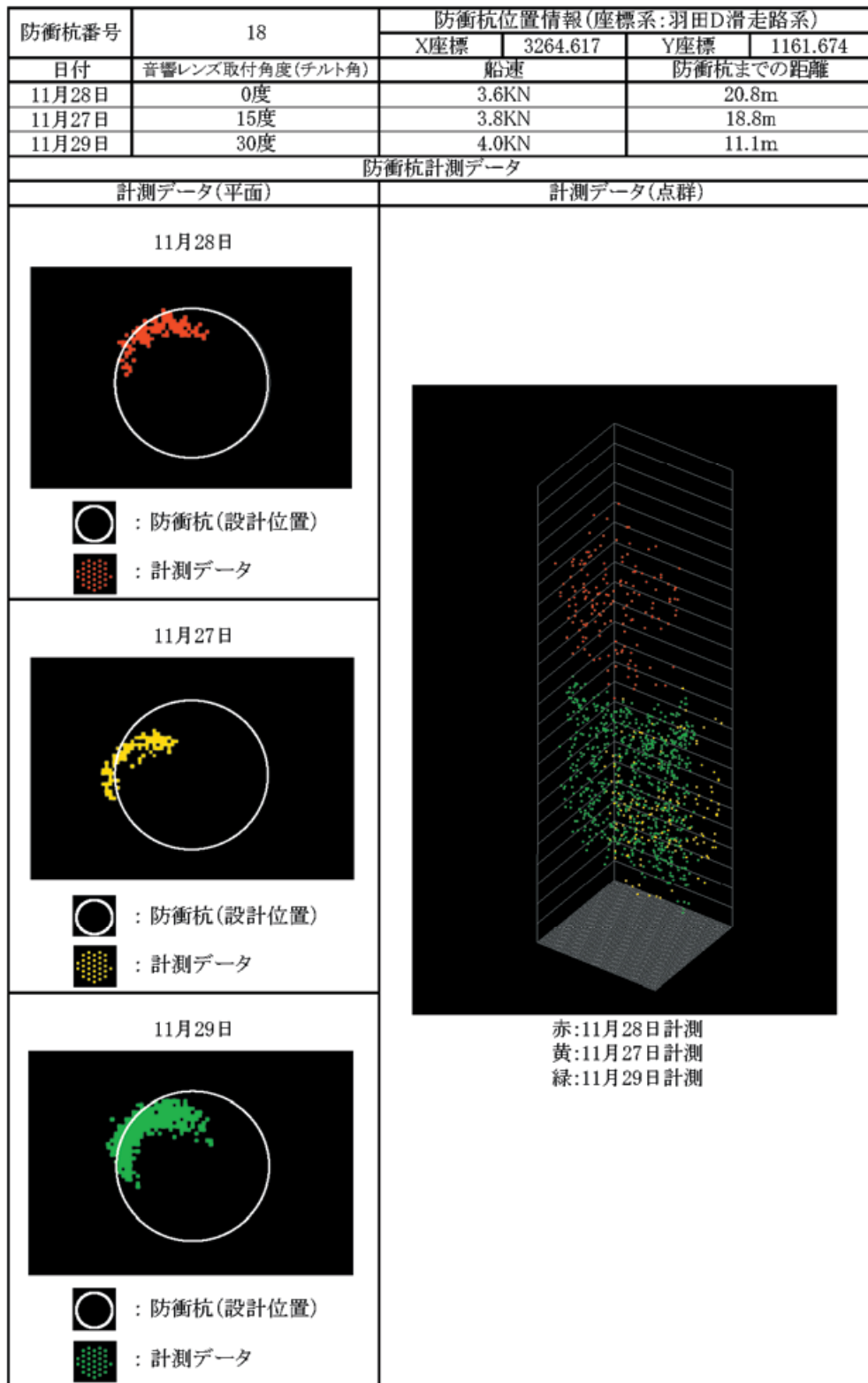
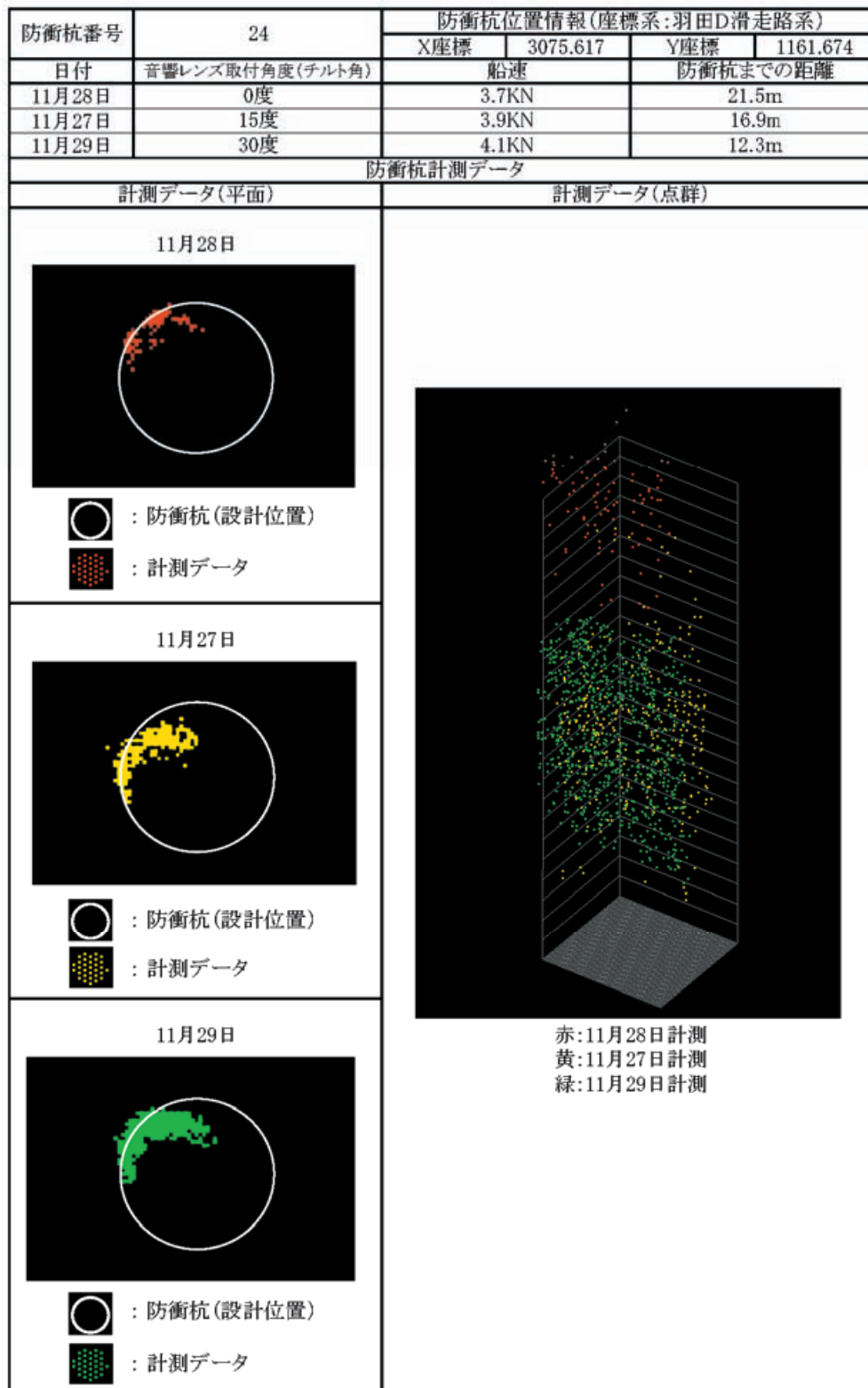


図-3.13 ヒープ値の比較



(a) 杭番号 18 の結果

図-3.14 システム稼動時の海象条件の検討



(b) 杭番号 24 の結果

図-3.14 続き

3.3.4 航行中の水中視認

D滑走路の埋立部の現空港側を10~15m程度はなれて、3~4ノットで航行した(図-3.15の黒実線矢印). 図-3.16は計測時に航行中に取得した4-DWISSのビデオイメージである.(a)は真横から見た図であるが、左側の斜面は埋立部法面であり、目立った凹凸無く現地盤まで一定の勾配となっていることが分かる. しかしながら、右側の構造物の存在しない水中の二箇所に反応が確認された(赤及び水色矢印で示した). 二箇所には何らかの物体が存在したと考えられ、それは異なる深度に存在する.(b)上方からのイメージでは数m程度はなれた位置関係である. 前後のビデオ映像も含め、同様の反応がランダムに多数存在するため、魚等の生物を捉えたものと推測される. 尚、実験当日に計測場所の近傍では魚が多く見かけられ、写真-3.5はそのうちの一例である.

本計測の目的は法面高さの取得であったが、水中空間にランダムに存在する多数の水中生物等も、三次元的な分布をとって捉えられることが分かった.



図-3.15 計測時の側線

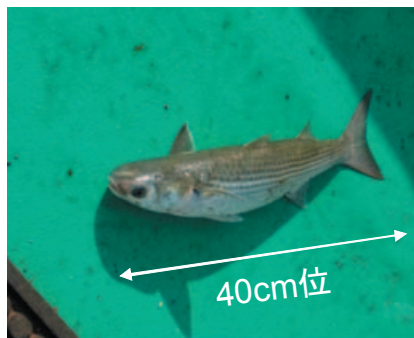


写真-3.5 計測場所の近傍で多く見られた生物

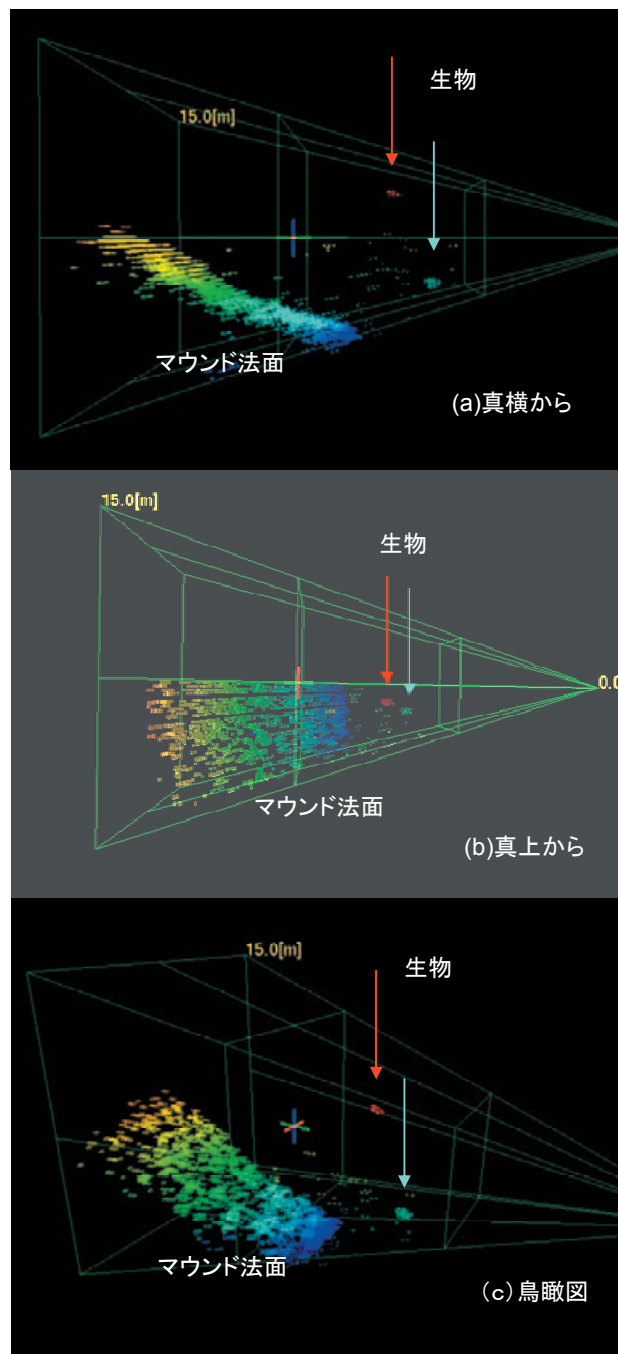


図-3.16 埋立部付近で生物を捉えたと推測される超音波映像(ビデオイメージ)

3.3.5 事後処理による合成映像

計測対象は、埋立部沖側の消波ブロックである. 写真-3.6は計測対象の気中の概観写真であるが、水面下も原地盤まで同じ勾配で積上げられている.

計測は図-3.15の黒破線矢印に沿って、消波ブロックから10~15m程度はなれて、3~4ノットで航行しながら行なわれた. 4-DWISSはパン角-30度と共通とし、チルト角0, 15, 30度として各1回、いずれも4倍速モード

で記録した。計測終了後、地形図作成ソフトで三個のデータを合成したものが図-3.17 である。色は高低を青～赤で示している。この図より、消波ブロックの凹凸形状を確認することができ、音響データの後処理においてより詳細な形状把握が可能であると分かる。

3.3.6 海上実験のまとめ

4-DWISS について、海上にて性能確認試験を行った。地図情報ソフトウェア（LogViewer）の動作確認の後、

4-DWISS の計測に適した条件の検討を行い、今回使用した船舶での船速は 3.5～4 ノット程度、4-DWISS はパン角-30 度、チルト角は視認深度（対象）に合わせて変更するが、それによるデータの劣化は認められなかった。計測対象までの距離は推奨 10～15m 程度であるが 20m 程度でも視認深度（対象）によって適宜変更が必要である。ヒープ値の振幅が大きくなる海象条件では、4-DWISS（水中部）の一部が気中に出たことにより、データ点数が少なくなる傾向があった。



写真-3.6 D 滑走路埋立部沖側の消波ブロック

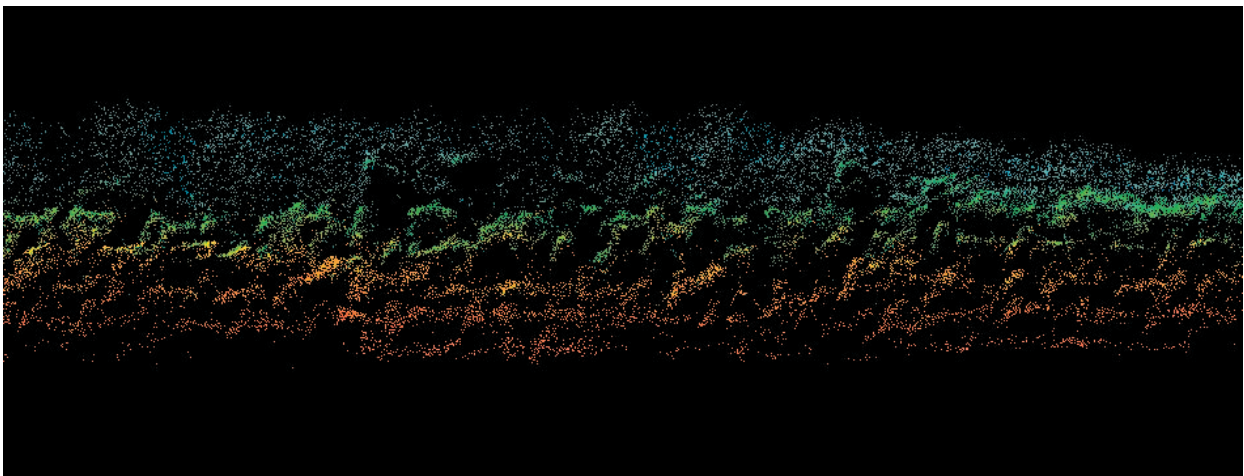


図-3.17 D 滑走路埋立部沖側の消波ブロック水中部の超音波映像（後処理）

4. 結論

平成19年度に試作した水中映像取得装置を改良し、実海域での運用に耐える改良と工夫を重ね、四次元広角映像及び測量用ソナーシステムとした。本稿では音響カメラの改良による改善点について述べた。これにより、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は従来どおりであるが、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画面から4画面への改善が得られた。また、S/Nの向上、色付けを音圧レベルによる濃淡のみから各軸方向への変更を可能とした事で、音響映像の見易さは格段に増した。これらの性能を水槽で確認し、さらに実海域でも確認する事ができた。

また、実運用に向けて、GPS等の環境計測機器やジグ、計測時に自位置を示すLog Viewer(リアルタイム地図情報ソフト)の整備と共に、海上実験の実績を元に実運用時の計測条件の整理も行ない、四次元広角映像及び測量用ソナーシステムの完成度を向上させた。

実海域での実証試験では、航行しながら対象物を捉えるモザイク表示や遊泳中の魚と推測される対象の視認、あるいは停船させて潜水士の動きを観察できた。また、測量においてはマルチビームソナー及びスタップ測量と同程度の値を得ると確認し、視認・測量共に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、実運用に耐える四次元広角映像及び測量用ソナーシステムを完成させることが出来た。

5. あとがき

本研究成果により、視界の狭い水中での効率的な視認調査、広域の目視による維持管理、あるいは施工や調査等の潜水士作業の事前調査やサポートといった水中視認が簡易、迅速、安全に行えるシステムを提示した。さらに、視認したエリアは後処理により測量図面を起こす事が可能であり、被災調査にも有効と考える。

水中視認の必要性の高い港湾等に配備することで、現場で視認する方策の一つとして行政に資する。

本研究の一部は国土交通省関東地方整備局による“東京国際空港施設の効率的な維持管理手法に関する研究”の一環として行われたものである。

(2011年4月27日受付)

謝辞

H18年度からH22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た。ここに謝意を表する。

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: アプラナート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)Matsumoto, S., Takeyama, N., Tsuchiya, T., Endoh, N.: Imaging Performance Evaluation Method of Wide-View Underwater Acoustic Lens by Geometrical Skew Ray Analysis, Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 2010, 07HG02.
- 6)SOUND METRICS CORPORATION, <http://www.soundmetrics.com>, 2011.
- 7)例えば, RESON A/S, <http://www.reson.com/>, 2011.
- 8)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.
- 9)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.
- 10)Matsumoto, S., Shin, Y., Naitho, 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.
- 11)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.
- 12)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.
- 13)松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝: 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, 独立行政法人港湾空港技術研究所報告書, **48(4)**, 2009, pp.53-70.

- 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 : 三次元水中映像取得装置の開発, 海洋音響学会誌, **37**, 2010, pp.13-24.
- 15)野口孝俊, 鈴木紀慶, 松本さゆり, 片倉景義, 吉住夏輝, 白石哲也 : 水中音響レンズを用いた水中映像取得及び測量支援システム (4-DWISS) の開発, 土木学会海洋開発論文集, **26**, 2010, pp.1293-1298.
- 16)関東地方整備局東京空港整備事務所, <http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/haneda>, 2011.

港湾空港技術研究所報告 第 50 卷第 3 号

2 0 1 1 . 9

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 株 式 会 社 シ ー ケ ン

Copyright © (2011) 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

1. Development of Four-dimensional Wide-angle Imaging and Surveying SONAR
..... Sayuri MATSUMOTO, Natsuki YOSHIKUMI, Kageyoshi KATAKURA 3
2. Residual Punching Shear Capacity of RC Slab Damaged by Repeated Impact Loads
..... Yuichiro KAWABATA, Mitsuyasu IWANAMI, Taku MATSUBAYASHI 43