

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

DEVELOPMENT OF FOUR-DIMENSIONAL IMAGING AND SURVEYING SONAR SYSTEM WITH UNDERWATER ACOUSTIC LENS

野口孝俊¹・鈴木紀慶²・松本さゆり³・吉住夏輝⁴・
片倉景義⁵・白石哲也⁶

Takatoshi NOGUCHI, Noriyoshi SUZUKI, Sayuri MATSUMOTO, Natsuki YOSHIKUMI,
Kageyoshi KATAKURA and Tetsuya SHIRAISHI

¹正会員 国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-3-1)

²正会員 国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所 (同上)

³正会員 博 (工) 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 博 (工) 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (同上)

⁵工博 港湾空港技術研究所 (同上)

⁶正会員 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (同上)

In the present situation, the slope of underwater mound after construction is checked by divers by using level survey and visual confirmation. From such backgrounds, a new technique, which is independent of the water turbidity, is needed to replace the direct diver works. Then authors have developed a four-dimensional wide angle imaging and surveying SONAR system with acoustic lens. The 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 surveying precision is within 5%. And more advanced function 4) the real-time monitoring / recording data is at a 4 fps. Such performance ability satisfies the demand in the practical usage in airport site.

Key Words : *new technique, underwater acoustic lens, four-dimensional underwater imaging, underwater surveying, maintenance management, frequency control beam searing*

1. はじめに

羽田空港の沖合に埋立部と栈橋部からなる新しい滑走路 (D滑走路) が建設されている。海中における構造物の出来上がり確認や維持管理段階における水中部の健全度の把握や被災時の状況確認作業は測量や写真および潜水士の目視による空間的な位置確認により行われている。しかしながら、この海域においては水質の富栄養化状況に起因する‘濁り’に加え、作業そのものによる底泥の巻き上げも加わり、透明度が十分でないため、通常の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場合が多い。

このような背景から、濁度に左右されない音響的手法を用いた水中の視認及び測量への関心は従来から高い。視認技術に関しては、国内外を含めて音響

的手法を用いた基礎研究例は多数存在する¹⁻⁵⁾。実用される既存の技術としていくつか存在するが、ナローマルチビームソナー⁶⁾は、航行しながら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する。動揺の補正をしないリアルタイム映像の表示は可能である。事後処理により、水中の三次元映像と測量データを得る。広範囲なデータを取得できるメリットはあるものの、即時性は劣る。また、音響ビデオカメラ⁷⁾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を表示するものである。画像の更新が1秒あたり20フレームと速く即時性の面では優れているものの、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、三次元映像と測量データ（XYZデータ）の取得においては実用のための研究を要する。以上より、土木的な出来栄え確認や被災調査を1台で実現する機器は現存しない。

一方、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⁾。その成果は当時としては画期的な視程距離10m、視野角25度の二次元映像の取得を実現したが、四次元化への検討はなされず実験室レベルにとどまるものであった。さらに、これらの取得映像は視野の狭さと映像の中心付近を除く収差、すなわち水中音響レンズにおいては改善の余地が見られた。

そこで、これまでに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、送受波原理として周波数掃引法を採用し、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。試作段階では水中映像の三次元・オフライン表示を¹²⁻¹³⁾、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¹⁴⁻¹⁵⁾。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システム、すなわち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（以下、4-DWISS）について、その特徴及び性能緒言と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と羽田空港D滑走路¹⁶⁾工事区域内の実海域にて試験を行ったので報告する。

2. 4-DWISS について

(1) 4-DWISSの特徴及び性能緒言

4-DWISS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-1は4-DWISSと取得映像のイメージ図である。船舶から吊下した4-DWISS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。

4-DWISSのシステムブロック図を図-2に示す。図中左下側の点線で囲った領域は水中部（写真-1）であり、上側は陸上部のシステムである。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、受信信号の解析及び画像の生成や記録を行う。図-2のパン・チルト装置は水中音響カメラを上下・左右に向ける機構である。

性能諸元を表-1に示す。水中部の大きさは0.50 m×0.13 m×0.66 m（巾×奥行×高さ）、重量135 kg（水中音響レンズ含む）である。送波器は2 ch. 送信周波数は0.5～1.0 MHzのFMパルス波、音波送波範囲は縦・横共に約33度、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128 ch. 配置した。視程距離10 mの場合、視野範囲

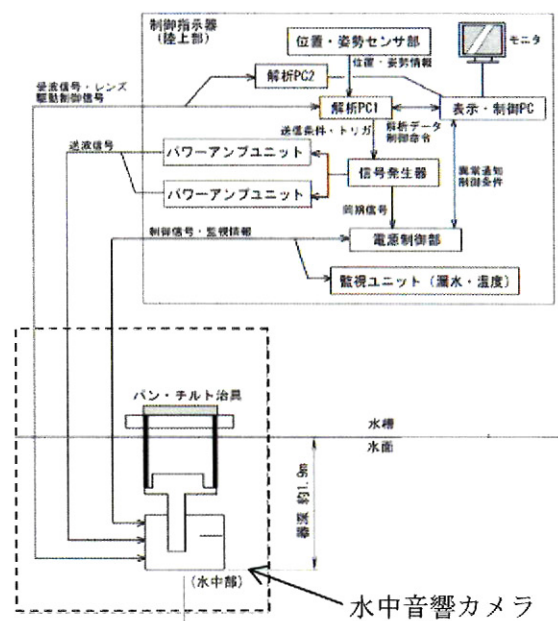


図-2 4-DWISSのシステムブロック図

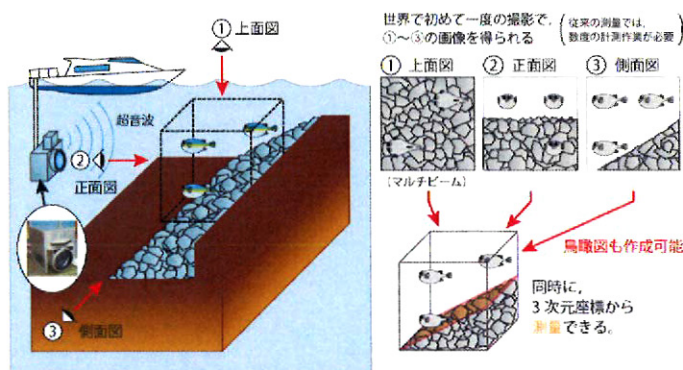


図-1 4-DWISSの完成イメージ図



写真-1 4-DWISSの水中部（水中音響カメラ）

6 m×6 m (縦×横), 1画素の大きさ約5 cm×10 cm×13 cm (縦×横×奥行き) の直方体である。画像の更新速度は最速1秒あたり4枚である。水中音響レンズは3群3枚構成として収差を抑え、ピント合わせ機能を持つ。実海域の水深に合わせて視程距離を25 m, 対水速度3ノット以下及び耐水压を10 m程度に対応している。

表-1 4-DWISSの主要スペック

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	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
送信系	測量		10m前方で±5%以内(後処理)
	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、耐水压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

(2) 4-DWISSの計測原理

4-DWISS の計測原理を概説する。図-3 は周波数掃引法による映像取得イメージである。音波を発信し、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 度、縦方向に 33 度の扇型である。(a) は側面からの図であり、縦方向の分割を示す。送波器より縦方向に 33 度のビームを送信し、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 度のビームを送信し、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。送信周波数と方位は一つ一つであるから、受信信号は FFT 解析をすることで周波数の順に、すな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を特定する。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 で受信信号の例を示す。初めに 752 kHz の、遅れて 650 kHz 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

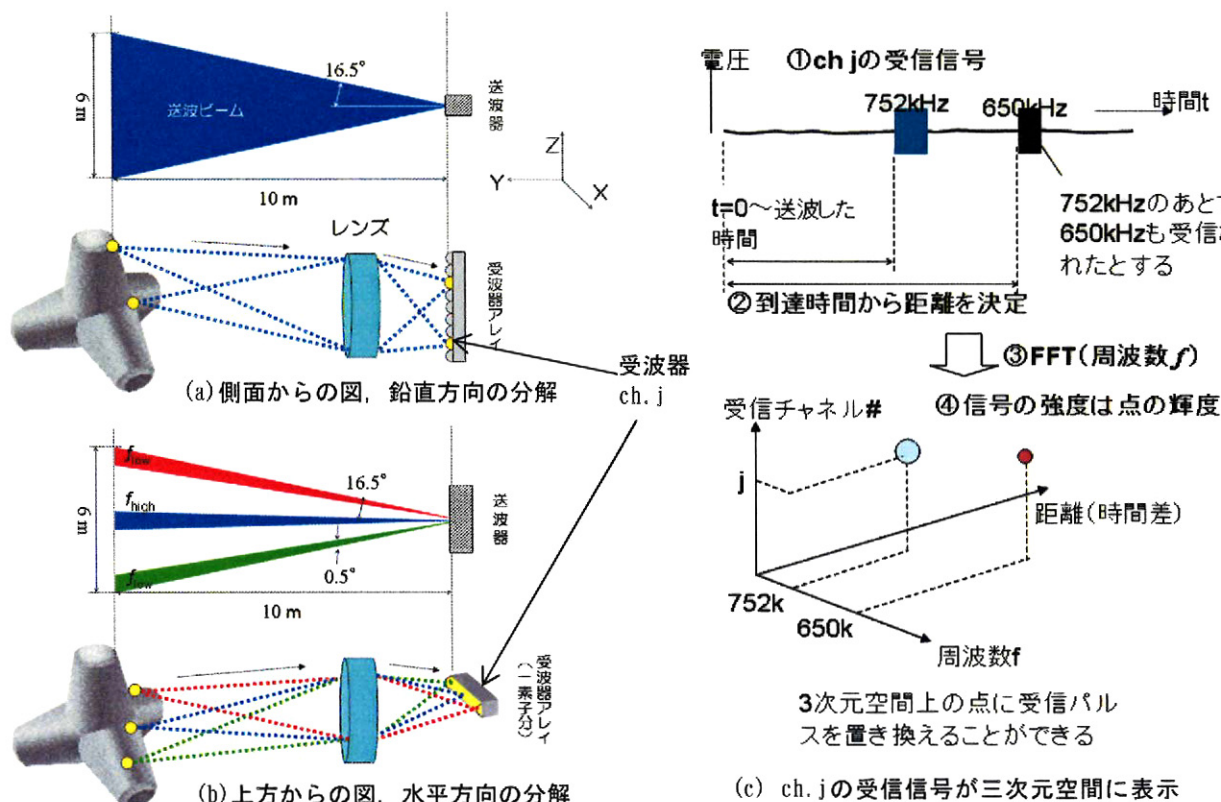


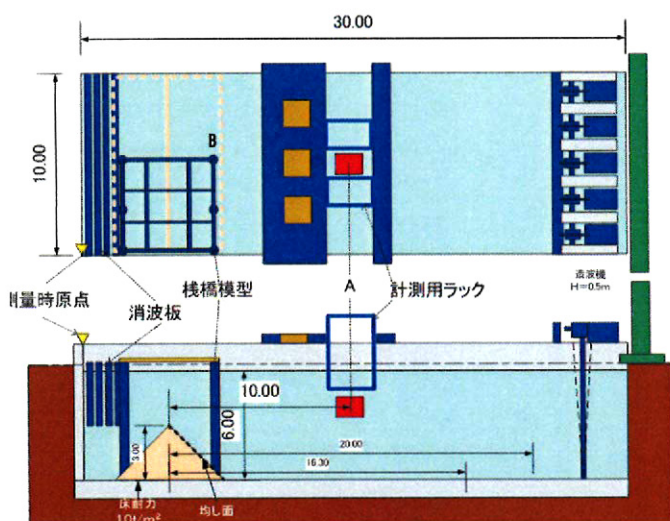
図3 周波数掃引法による映像取得イメージ図

きる。この映像を逐次更新することで、四次元映像を得る。

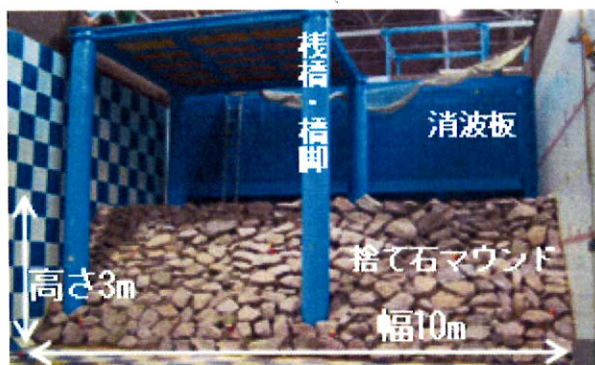
尚、送受波器と水中音響レンズの詳細は文献15を参照いただきたい。

3. 測量精度の確認（水槽試験）

水槽試験は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－4）にて行った。水槽は30 m×10 m×6 m（長さ×巾×水深）、真水、静水である。水槽内には5 m×5 m×6.5 m（縦×横×高さ）で橋脚φ0.5 mとする模擬栈橋が設置されており、その直下に捨石材は30～200 kg/個程度を用い、巾10 m、高さ3 m、法面勾配1:1.1、出来高精度±15 cmとしたマウンドがある（写真－2）。4-DWISSは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2 mの位置に吊下され、マウンドの頂上との距離が約10 mとなるよう観測台車の位置を調整した。



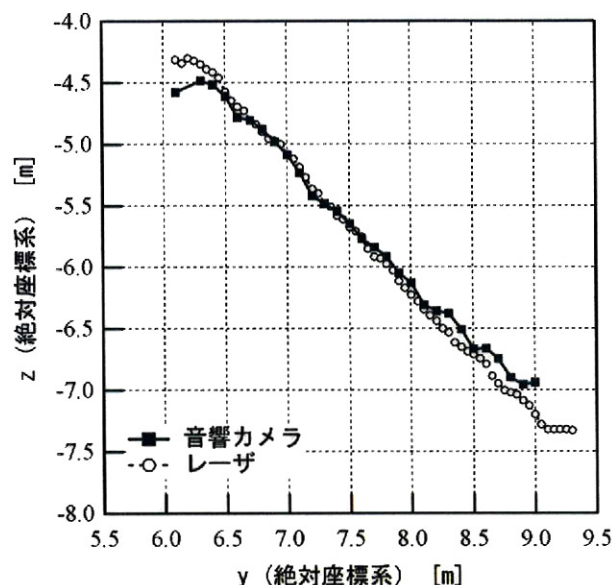
図－4 水中作業環境再現水槽内の4-DWISSの設置状況



写真－2 水中作業環境再現水槽内のマウンド

4-DWISSによりマウンドの法面高さを取得した。10 m遠方では6 m×6 mの範囲を取得できるが、水槽内のマウンドは巾が10 mあるため、治具に内蔵されているパン・チルト装置を用いて、4-DWISSの向き

を変更しながら計測した。X=6.2 mに沿ったYZ面図すなわちマウンドの法面高さを図－5の赤線で示す。図中の青線は比較のため、事前に計測したレーザによる法面高さ（真値）である。4-DWISS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、



図－5 水槽内マウンド法面の高さ、4-DWISSとレーザ測量による測量結果の比較

その精度は±5%以内であることを確認した。4-DWISS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=6.0 m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=8.0～9.0 m付近の差異は装置と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。

4. 実海域試験

(1) 実施概要

実海域試験は、東京国際空港のD滑走路の外周において、2010年の2月16～23日に実施した。ここでは図－6に示す埋立部・現空港側のマウンド法面高さ測量と、連絡誘導路のジャケット部の水中視認例について述べる。実験当日の現地の状況は、水中部



図－6 試験実施場所（東京国際空港沖のD滑走路工事区域内）

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1 mであった。尚、現地座標系はA滑走路北端の基点をX=2000.000 m, Y=2000.000 mとし、方向角59度52分57秒をX軸、149度52分57秒Y軸とした。

図-7に本装置のシステム構成概略を示す。4-DWISSをクレーン付き19 tの船舶の舷側に、専用架台で固定した。GPS、方位センサ、およびTSS（動揺センサ）を接続し、それぞれ位置、方位、および動揺情報を取得した。また、吊下治具に備え付けられた俯角・旋回角度モニタにより、装置の観察方位を取得した。制御・表示装置（陸上部）は船室内に設置し、AC100 V電源は発動発電機により供給した。

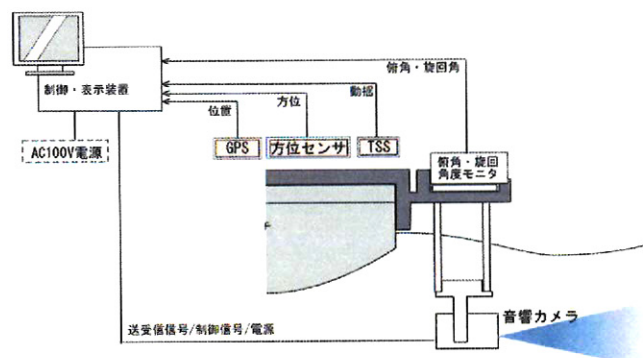


図-7 海上試験時のシステム構成概略

(2) 測量結果

現空港側の埋立部に沿って4ノット以下で船を移動させながらマウンドの法面高さの計測を行った。4-DWISSとマウンドとの距離をおおよそ7.5～30 m、パン30度、チルト0～20度、データ取得モードを2倍速とした。同期計測した位置、方位、動揺データによる補正を行った後、同一場所のデータについて累加平均処理しXYZデータを取得した。取得データ量にもよるが、船上にて数分程度で完了する処理である。

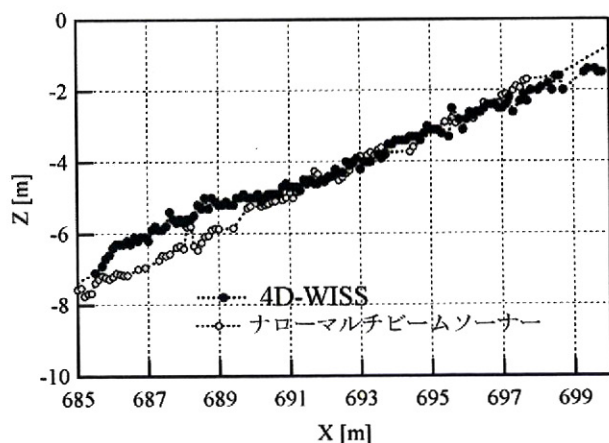


図-8 4-DWISSで取得したマウンド法面高さ (X=2419.7 m)

4-DWISSで取得したマウンド法面高さの一例を図-8に示す。同一場所でのナローマルチビームソナーの結果も、比較のため示している。X=700～685 mは緩やかな下り勾配であり、設計図面通りである。4-DWISSとナローマルチビームソナーとを比較すると、X=690～685 mの範囲では4-DWISS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べて浅い値を示す傾向が見られた。4-DWISSは反射強度で単純な閾値処理をしているが、送信ビームの特性等を勘案した条件が必要と考えられた。X=700～690 mの範囲では両者は非常に近く、4-DWISSの法面高さはナローマルチビームソナーの値を真とするとその±5%程度以内に収まることが分かった。

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、4-DWISS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、過去のデータよりスタッフ測量とナローマルチビームソナーの関係を調べた。検討の詳細は示さないが、X=690 m上のスタッフ測量による法面高さとナローマルチビームソナーとのそれは、許容誤差内で一致することが確認された。

以上の結果を踏まえて、間接的ではあるが、X=690 m上においては4-DWISSはスタッフ測量と同等の結果を取得したものと推察された。

(3) 映像取得結果

試験対象は北側場周導路（現空港側）のジャケット部に取り付けられた電気防食陽極である（写真-3）。船舶を視認対象のジャケットに添って航行させながら、船上でモニタした映像の一部を図-9に示す。このときの計測条件は船速3 kt程度、4-DWISSとジャケットの距離が15～30 mであり、パン30度、チルト10度として4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ている。また、図中の左側にある四角錐状のフレームはリアルタイムで視認している範囲を、‘30.0[m]’は4-DWISS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JL3の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。



写真-3 北側場周導路（現空港側）

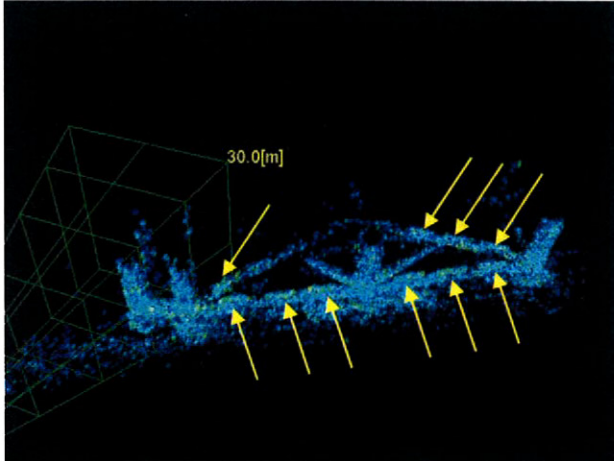


図-9 北側場周導路（現空港側）のジャケッ J3 の水中部、矢印は電気防食陽極

5. おわりに

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にリアルタイムで視認し、同時に測量も可能とする機器として4-DWISSの開発を行い、実海域試験を行った。より運用に近い測量データの取得と検証を実施し、マウンドの法面高さはスタッフ測量と概ね同等のデータを出力できることを示し、四次元映像による視認では船上でジャケットの水中部構造を確認ができることを示した。

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H21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。

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）—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：アブラナー・トレンズ音響レンズの集束特性，海洋音響学会誌 35, pp.29-37, 2008.
- 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, pp.104-113, 2008.
- 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, pp.43-48, 2008.
- 6) RESON A/S, <http://www.reson.com/>, 2009.
- 7) SOUND METRICS CORPORATION, <http://www.soundmetrics.com>, 2009.
- 8) Kageyoshi KATAKURA : Ultrasonic Imaging Device, United States Patent 3794964, 1974.
- 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, pp.716-724, 1975.
- 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, pp.323-324, 2008.
- 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, pp.297-298, 2008.
- 12) 野口孝俊，鈴木紀慶，松本さゆり，宮田正史：捨石マウンドにおける水中音響レンズによる不陸状況確認の適用性検討，土木学会全国大会第64回年次学術講演会講演概要集，713-714, 2008.
- 13) 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, pp.91-94, 2009.
- 14) 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，297-298, 2009.
- 15) 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, pp.13-24, 2010.
- 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>, 2009.