

# リアルタイム水中ソナーを用いた 海上工事の施工・維持管理に向けた検討

道前 武尊<sup>1</sup>・樋渡 和朗<sup>2</sup>・帯田 俊司<sup>3</sup>・琴浦 毅<sup>4</sup>・  
西畑 剛<sup>5</sup>・平山 達也<sup>6</sup>・野口 孝俊<sup>7</sup>

<sup>1</sup> 五洋建設 (株) 技術研究所土木技術開発部  
(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: Takeru.Michimae@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup> 五洋建設 (株) 船舶機械部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)  
E-mail: Kazuaki.Hiwatari@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup> 五洋建設 (株) 船舶機械部 (同上)  
E-mail: Syunji.Obita@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>4</sup> 正会員 五洋建設 (株) 技術研究所土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)  
E-mail: Tsuyoshi.Kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>5</sup> 正会員 五洋建設 (株) 技術研究所土木技術開発部 (同上)  
E-mail: Takeshi.Nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>6</sup> 五洋建設 (株) 船舶機械部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)  
E-mail: Tatsuya.Hirayama@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>7</sup> 正会員 国土交通省関東地方整備局 港湾空港部 (〒231-8436 神奈川県横浜市北仲通 5-57)  
E-mail: noguchi-t83ab@pa.ktr.mlit.go.jp

建設産業における生産性向上, 現場の労働力不足解消のため, 港湾の「i-Construction」が推進されている. 港湾の「i-Construction」化を進めていく上では, 水中部を高精度かつリアルタイムに可視化する技術の開発が必要不可欠である. 一般的に, 水中部の可視化に使われているナローマルチビームソナーは, リアルタイムに水中部を把握するとは困難である. 本稿は, 水中部をリアルタイムに可視化可能な水中ソナーを用いた施工実験を実施し, ドック内を排水後に地上レーザー測量で施工出来形を測定した. 施工出来形と設計断面を比較することでリアルタイム水中ソナーを使用した際の施工精度, 有用性を確認するとともに, ノイズ処理による精度向上について評価したことを報告する.

**Key Words :** *underwater, four-dimensional underwater visualization, wave dissipating block, 4D sonar system, noise processing, port construction, Port I-Construction*

## 1. はじめに

建設産業における生産性向上を図るとともに, 現場の労働力不足の解消のため, 国土交通省を主体とした「i-Construction」への取り組みが進められている. 例として, ドローンによる測量技術の開発や, 建設機械の自動化システムの開発が挙げられる. これらの陸上工事における生産性向上技術の開発はメディアなどにも取り上げられ着実に進展がみられる.

港湾工事における生産性向上技術の開発を進めていく上で重要になってくるのが水中部の「見える化」である. 港湾工事における水中施工では, 作業状況の視認が困難なことにより, 陸上施工と比較し, 作業効率や施工精度が低下する. 現在, 一般的にナローマルチビームソナーが使用されているが, 2 次元ソナーという特性上,

リアルタイムに水中部を把握することは困難である. 水中施工の生産性を向上させるためにはリアルタイムかつ高精度な水中部可視化技術が必要とされている. また, 水中施工における機械化施工の導入や更なる潜水士の安全性を向上させる技術の開発が求められている.

近年, 港湾工事施工や維持管理の生産性向上に活用され始めているリアルタイム水中ソナー (以降, 水中ソナーと略記) がある. 水中ソナーはリアルタイムに水中部を 3 次元として捕えることができ, 港湾工事の一役を担い始めている. しかし, 水中ソナーの精度は, ナローマルチビーム, 水中スタッフと比較することで検証されているが, いずれの計測手法も陸上で用いられる計測手法に対し誤差を有していることから, 絶対的な精度検証がなされていない. また, すべての水中構造物を出来形管理基準値内に施工可能な精度を有していないこともあり

補助的な役割にあまじっている。そこで、本検討では水中作業終了後に排水状態での測量が可能な大型ドック（水深6.0m）を用いて、精度検証とノイズ処理による精度向上を図ることを目的とした。

## 2. 水中ソナーシステム

水中ソナーシステムの構成機器と仕様を表-1 に示し、特徴を以下に列記する。

- ・海底地形や水中構造物の形状を4次元（X, Y, Z, 時刻）で計測し、表示および記録をすることができる。ソナーにより50°×50°の範囲を128×128（16,384）本のビームを四角錐状に照射し、最大150mの距離まで計測することができる。
- ・データ更新レートは最大12f/sであるため、水中の動体計測も可能である。船を静止させた状態でも計測することができる。

表-1 水中ソナーシステムの構成機器と仕様

機器	項目	
ソナー	周波数	375~700kHz
	ビーム数	128×128(16,384)
	最大レンジ	150m
	最少レンジ	1m
	レンジ分解能	0.03m
	更新レート	最大12f/s
	計測範囲	50°×50°
	1ビーム当たりの角度	0.39°
	ソナー寸法	380mm×300mm×160mm
	ソナー空中重量	22kg
INS (Inertial Navigation System)	ソナー水中重量	12kg
	ソナー耐水圧	600m
	方位計測精度	0.01°
	ロール計測精度	0.01°
	ピッチ計測精度	0.01°
	ヒープ計測精度	5% or 5cm
	出力レート	最大100Hz
RTK-GPS	寸法	160mm×160mm×160mm
	重量	4.5kg
	精度	水平 8mm+1ppm RMS 垂直 15mm+1ppm RMS
	更新レート	20Hz
	重量	1.55kg



写真-1 水中ソナーシステム機装状況

- ・水中ソナーを機装した船体の動揺をINS(Inertial Navigation System：慣性航法装置)で計測し、補正することができる。超音波のノイズデータの除去も自動で行うため、従来は不可能であったリアルタイムの3次元表示があらゆるアングルで可能である。

・計測データは4次元で記録されているため、動画として再現が可能である。

・機器は重量、構成ともにナローマルチビームソナーと同等で軽量かつ簡易であるため、船体に後付けの機装をすることが可能であり、写真-1に示すように特定の船舶や特別な装備を用意することなく対応することができる。

・作成した3次元モデルを水中ソナーシステム機器に取り込み、現地で映し出される3次元データと同時に表示することが可能である。

## 3. 現地実証実験概要

### (1) 実証フィールドの選定

実証フィールドを選定する要素として以下の3点が挙げられる。1つ目として、実際の施工を再現するためには実物大の構造物を使用した試験を行う必要がある。次に、GPS(Global Positioning System)の取得および実海域の海水再現のため、周囲にGPSの電波を阻害する建造物が無く海水が取水可能な海際の施設であること。最後に、施工後に高精度な陸上測量機器を用いて施工精度検証を行うために、排水可能な施設であることであった。

上記に述べた条件に対応する施設として、国土交通省関東地方整備局が管理する大型ドックを実証フィールドとして選定した。このドックは大正15年に完成し、昭和元年からこれまで、主にケーソン製作が行われ港湾施設整備に貢献してきた。現在は次世代の海洋・港湾技術の開発のために実証フィールドとして提供されている。このドックは、幅23.3m・延長109.0m・最大水深8.5mと十分な大きさを有しており、周囲に高層な建造物もなく実海域の海水を取水可能である。

### (2) 実証フィールドの整備

水中ソナーは超音波を発生し、跳ね返ってきた超音波を受信することで3次元の点群データとして水中部の可視化を行う。ドライドックのように閉鎖された空間においては実海域と異なり超音波が乱反射し、精度の低下や取得データに多量のノイズが発生する可能性がある。対応策としてドライドック底面に砕石を敷き均した。これは、実海域における海底地盤を再現する意味合いもある。

計測精度検証実験の観察対象物として鋼矢板(SP-II型)と方塊ブロック(1m×1m×1m)を注水前にドライドック底面に設置した。鋼矢板にはφ1cm~φ30cmの穴を設

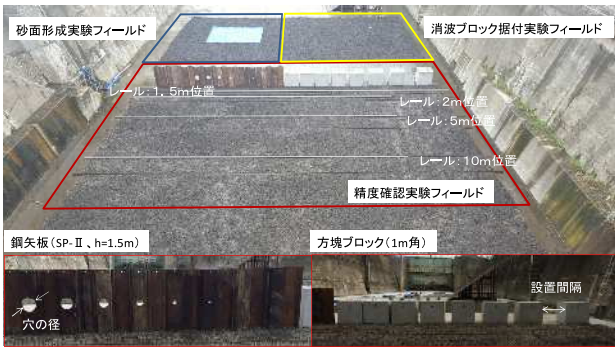


写真-2 実証フィールド整備完了

け、方塊ブロックは5cm~100cmの目地間隔を変えて設置した。また、計測精度検証実験では水中ソナー単体の計測精度検証を目的とするため、GPSおよびINSを使用せず、1.5m・2.0m・5.0m・10.0mの一定距離から対象物を計測できるように底面にレールを設置した。(写真-2)

ドライドック内の碎石敷き均しおよび観察対象物の設置後、水中ポンプにより水深6.0mまで注水した。

#### 4. 消波工への導入（消波ブロック据付実験）

##### (1) 3次元モデルの作成

現地実証実験を行うにあたり、消波ブロックの3次元モデルを作成した。また、ドック内を事前に測量を実施し、世界測地系で施工位置の座標を把握することで消波ブロックの3次元モデルに座標データを付加させた。

本実証実験における消波ブロックの積み方は下段9個、上段4個の水平2層積みとした、消波ブロックの3次元モデルを図-1に示す。

##### (2) 施工方法

水中ソナーを艀装した船舶を、消波ブロック据付実験フィールドを計測可能な位置に固定し、固定点から映像を取得し続けた。3次元モデルで表示した消波ブロックを目標とし水中ソナーから得られる映像をもとにオペレーターが誘導・設置し、設置後に吊具を切り離す。消波ブロック据付サイクルを写真-3に示す。

下段9個については、将来的な機械施工を見越し、潜水士による玉外しが不要な自動切り離し装置を使用し、設置を行った。

##### (3) 施工結果

2段目については1段目の据付精度に影響を受け、正確な据付精度の検証が困難なため、1段目(9個分のうち8個分)についてのみ精度を評価した。評価内容は各消波ブロックについて、設計位置からの水平変位および回



図-1 消波ブロック3次元モデル



写真-3 消波ブロック据付サイクル

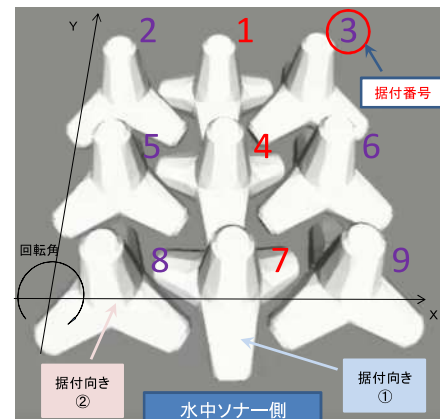


図-2 施工・出来形管理図

転角とし、出来形管理図を図-2に示す。本実験では、水平面であるドック底面に消波ブロックを設置するため、高さ方向の評価は行わないものとした。

港湾管理基準に記載されている、水中部に構造物を設置する精度目標の中で一番厳しい据付精度 $\pm 5\text{cm}$ を据付目標とした。

消波ブロックの据付向きによって据付精度に大きな差が出る結果となった。原因として、写真-4に示すようにソナーに対して反射角が小さい据付向き②は視認性が高く据付精度も良好な結果になったのに対し、ソナーに対して反射角が大きい据付向き①は視認性が低いため据付精度が悪くなったと考えられる。

据付向き①に対する据付位置誤差は、X軸について最大値で1mm、最小値で-75mm、Y軸について最大値で198mm、最小値で162mm、回転角について最大値で3°、最小値で-7°、平均値で-2°となった。(表-2)

据付向き②に対する据付位置誤差は、X軸について最大値で20mm、最小値で-39mm、Y軸について最大値で38mm、最小値で-11mm、回転角について最大値で3°、最小値で-6°、平均値で-2°となった。(表-2)

音波反射角が小さく、視認性の高い条件では現状の出来形管理基準に適応しており、水中構造物の自動据付に対し、有用であることが確認された。また、1段目を高精度に据えることで2段目についても潜水士による誘導を必要とせず、据付が可能であった。(写真-5)

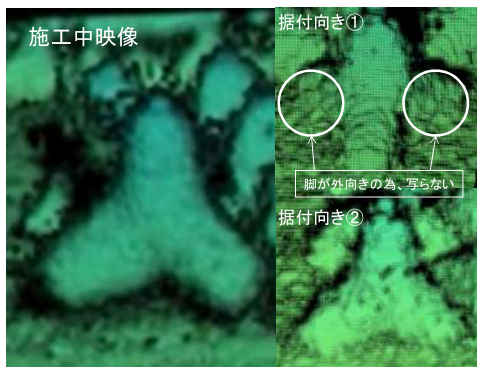


写真-4 据付向きによる違い



写真-5 消波ブロック据付完了

表-2 出来形管理表

据付番号	据付向き	据付位置誤差				
		x軸(mm)		y軸(mm)		水平方向の回転角(°)
		出来形	目標値	出来形	目標値	
1	①	-75		198		3
2	②	-5		4		-6
3	②	20		17		3
4	①					
5	②	-39	±50	38	±50	-1
6	②	-28		-11		-3
7	①	1		125		-7
8	②	10		36		-2
9	②	-15		1		-3
据付向き① 平均値		-37		162		-2
据付向き② 平均値		-10		14		-2

## 5. 浚渫工への適用 (砂面形成実験)

### (1) 施工方法

砂面形成実験も消波ブロック据付実験と同様に、世界測地系の座標を保持した3次元モデルを作成し、砂を積めたホッパーを水中ソナー映像をもとにしたオペレーターの誘導により投入位置へ移動した。移動後、潜水士によりホッパーを開閉し、砂を投入、投入後、潜水士によりφ5.0m、高さ0.8mの円錐形状に均し、港湾管理基準に記載されている、水中土工の精度目標の中で一般的な精度±30cmを目標とした。

### (2) 施工結果

ホッパーにより砂を投入する際に発生する濁りにより、一時的に視認不能になる時間が存在した。ドライドックのような水の流れが無い場所では濁りが落ち着くまで作業ができない結果となり、流れのない場所で砂等の巻きあがりのある対象物を施工する際は、濁りに留意して施工する必要がある。

図-3, 4 に設計断面と出来形断面を比較した標高差の分布図および分布表を示す。比較方法は地上レーザー測量によって得られた、出来形データをもとに、法線方向と法線直角方向に対し法尻から10cm間隔で格子を作成し、各格子鉛直方向にあるデータの平均値を標高とした。設計断面については各格子の中心位置の設計高さを使用し、出来形断面との比較を行った。

設計断面と出来形断面との標高誤差は最大値で113mm、最小値で-190mm、平均値で-38mmの施工精度であることが確認された。

結果として、港湾管理基準を十分に満たす施工が可能であり、有用性が確認された。

一方で、図-3を見て分かるように天端付近に向かっていくにつれ、出来形断面の標高が設計に比べ低くなっている。原因として写真-6に示すように、排水時に表層の砂が流出したことが考えられ、排水前は排水後の結果よりも精度がよかったと考えられる。



写真-6 砂面形成完了

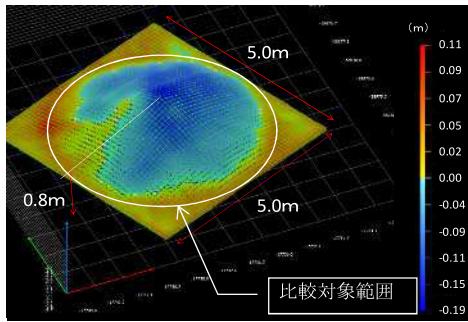


図-3 標高差分布図

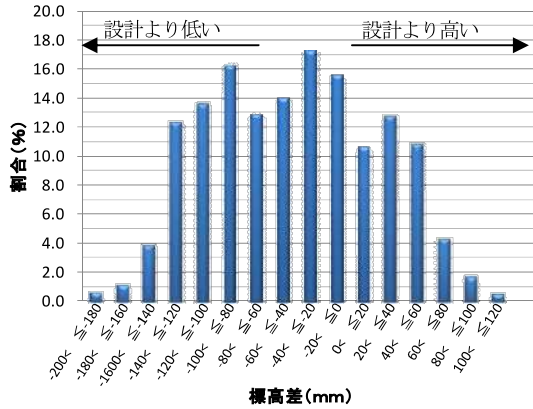


図-4 標高差分布表

## 6. 維持管理への展開 (計測精度確認実験)

### (1) 測定方法

台車上に水中ソナーを固定し、フィールド整備の際に設置したレール上を移動させることで観察対象物から一定の距離(1.5m, 2.0m, 5.0m, 10.0m)を保持した状態で計測を行った。

観察対象は、矢板法線、方塊ブロック法線、矢板の損傷孔、方塊ブロック間の隙間幅とし、設置した鋼矢板には損傷孔( $\phi 1\text{cm}$ ,  $\phi 3\text{cm}$ ,  $\phi 5\text{cm}$ ,  $\phi 10\text{cm}$ ,  $\phi 15\text{cm}$ ,  $\phi 20\text{cm}$ ,  $\phi 25\text{cm}$ ,  $\phi 30\text{cm}$ )を設け、方塊ブロックは隙間(5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 100cm)を設けて設置した。潜水士により台車を観察対象の正面に水中ソナーが位置するように移動させ、固定点から計測を行った。

### (2) ノイズ除去方法

本実験は、閉鎖空間であるドライドック内での測定であるため、実海域にくらべて多重反射による影響を受けて、計測精度の低下がみられた。そこで、水中ソナーから得られた点群データを以下に述べる3種類のフィルタを使用してノイズ除去および統計処理を行った。

#### a) 水深フィルタ

床面(海底面)から水面にかけての計測結果のみ表示し、水面よりおよび床面からの反射ノイズをカットする。

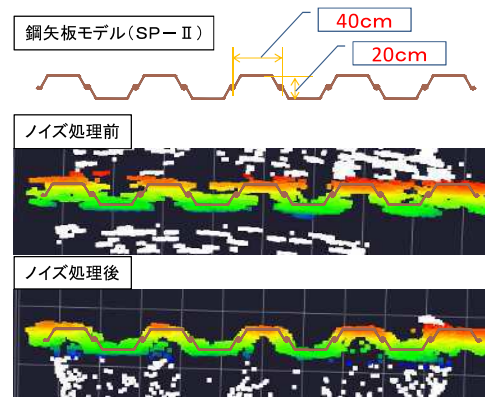


図-5 鋼矢板ノイズ処理前後比較 (上部から鋼矢板)

表-3 ノイズ処理後の計測精度

測定対象	対応する計測精度(mm)、判別可能な大きさ			
	測定距離1.5m	測定距離2.0m	測定距離5m	測定距離10m
矢板法線	$\sigma = \pm 11$ (前面) $\sigma = \pm 20$ (背面)	$\sigma = \pm 11$ (前面) $\sigma = \pm 12$ (背面)	$\sigma = \pm 30$ (前面) $\sigma = \pm 17$ (背面)	$\sigma = \pm 24$ (前面) $\sigma = \pm 47$ (背面)
ブロック法線	$\sigma = \pm 20\text{mm}$	$\sigma = \pm 19\text{mm}$	$\sigma = \pm 13\text{mm}$	$\sigma = \pm 17\text{mm}$
矢板損傷(孔径)	20cmまで	25cmまで	25cmまで	30cmまで
ブロック目地(幅)	5cmまで	10cmまで	20cmまで	30cmまで

#### b) 音圧フィルタ

音圧 34dB 以下の受信信号はノイズとしてカットし、ドック側面や多重反射に伴う計測ノイズが低減する効果が期待される。

#### c) 統計処理フィルタ

ソナー計測距離方向の観測値について、9個×9個分を平均化することで計測面位置の計測精度向上を図る。

### (3) ノイズ除去結果

上記のフィルタを用いて、鋼矢板法線のノイズ処理前後の計測平面図を図-5に示す。矢板前面(凸部、ソナー側)のみならず、背面(凹部)においても計測精度の向上が見られる。

各計測距離において、同様にフィルタ処理を行った際の測定精度を表-3に示す。計測距離 10m 以内において、INS と GPS を併用せず、水中ソナー単体を用いた場合の矢板およびブロック法線の計測精度が  $\sigma 50\text{mm}$  以内に収まることが確認できた。

一方で、損傷孔径と目地幅の計測について、計測距離が 1.5m の場合はブロック目地幅が 5cm まで視認可能であったが、船舶に艀装して運用するには計測距離が近すぎる問題がある。現実的な運用距離である 10m を超えるとノイズ処理後でも損傷孔径や目地幅を確認できる大きさとして、30cm 以上が必要となる結果となった。これは、対象物までの計測距離が大きくなるにつれ、取得する隣り合う点群同士の間隔が広くなるのが原因と考えられる。これに関しては、機械性能としての向上は見込めないため、後処理による精度向上方法が必要となる。

## 7. まとめと今後の展望

### (1) まとめ

各実験結果に対してのまとめを以下に述べる。

#### a) 消波ブロック据付実験

・音波反射角が小さい向き、もしくは構造物の据付は、測量による位置出しを行わずに、水中構造物を港湾出来形管理基準値内で据付けでき、水中ソナーの有用性が確認できた。

・音波反射角が大きい向き、もしくは構造物の据付は大きく据付精度が低下するため視認性を高めるための改善が必要となる。

#### b) 砂面形成実験

・目標の管理基準である港湾出来形管理基準値内に収まり、水中土工に対する水中ソナーの有用性が確認できた。

・閉鎖空間のように潮の流れがない場所で砂等を投入もしくは掘削する場合は、砂等の巻上がりにより、作業が止まる時間が発生することに、留意する必要がある。

#### c) 計測精度確認実験

・護岸の法線管理をしていく上での有用性が確認でき、今後の護岸法線の管理に有用である。

・閉鎖空間での精度向上がみられたため、実海域ではさらなる精度向上が期待できる。

### (2) 課題と今後の展望

各実験に対しての課題と今後の展望について以下に述べる。

#### a) 消波ブロック据付実験

・水中ソナーに対して音波反射角が大きい構造物に対する表示方法や欠損部の補間方法の検討が必要である。

・水中構造物の据付を完全機械化施工するためには、吊

具を機械的に回転させることが可能な吊具の開発が必要である。

#### b) 砂面形成実験

・浚渫や床掘など、一定の濁度以上が発生する作業においても視認性を確保できる必要があり、濁りによるノイズの処理方法が課題になる。

・水中ソナーのリアルタイム映像を潜水士が水中にて同時に視認できる必要があり、視認用装置の開発が必要である。

#### c) 計測精度確認実験

・今回使用したノイズフィルタをリアルタイムに機器に実装することでさらなる精度向上が見込める。

なお、本検討は、国土交通省関東地方整備局「海洋・港湾技術の早期実用化に向けた実証実験」の公募に応募し、選定された実験である。また、本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:NEDO)に関連する研究開発として実施した。

ご協力いただきました関係各位に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書第12004号 4D ソナーによる施工管理システム 一般財団法人沿岸研究センター
- 2) 眞鍋匠：4D ソナーによる施工管理システム，港湾荷役，No.6, Vol158.pp.617-622, 2013.
- 3) 野口孝俊，内藤裕之，守屋典昭，眞鍋匠：4D ソナーシステムを活用した航路障害物啓開作業の効率化に向けた検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発) No.2, Vol70.pp.990-995, 2014,

(2017.2.2 受付)

## CONSIDERATION OF THE PORT CONSTRUCTION AND MAINTENANCE WHICH UTILIZED 4D SONAR SYSTEM

Takeru MICHIMAE, Kazuaki HIWATARI, Syunji OBITA, Tsuyoshi KOTOURA, Takeshi NISHIHATA, Tatsuya HIRAYAMA and Takatoshi NOGUCHI

Construction industry is eager to promote the Port I-Construction which is domestic policy to solve labor shortage and productivity improvement. It is indispensable to visualize high precision and Real-time underwater structure for the Port I-Construction.

Generally, the Narrow multibeam surveying system is used for under water visualization. However, this system difficult to apply for Real-time visualization.

In this study, we conducted a series of experiment in dry dock to measure the underwater structures by using 4D sonar system. To evaluate the accuracy, the results were compared with that of ground laser measurement which was surveyed after drainage, and the design configuration.

To fulfill the requirements for Port I-Construction, a practical 4D sonar system which can survey the form, size, coordinates, etc. of the structures at Real-time was introduced. The accuracy, usefulness and noise processing method were taken into account for evaluation the applicability of the 4D sonar system in port and harbor works.