

# 4Dソナーによる施工管理システム

五洋建設株式会社 土木本部船舶機械部 眞鍋 匠

4Dソナーによる施工管理システムは、海底や水中構造物の形状を4次元(X,Y,Z,時刻)で計測し、表示および記録することができる施工管理システムである。ソナーを艀装した船体の動揺を計測して瞬時に補正することができ、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、位置情報を有するリアルタイムな水中可視化計測による施工管理が可能となった。本稿では、システムの概要について紹介するとともに、その性能について精度検証実験を通して明らかにする。

## 1. はじめに

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。また、工種によっては施工箇所を観察し、船舶機械の重機オペレータを誘導するために、施工箇所近傍に潜水士を配置して重機オペレータと連絡を取りながら作業する必要があるが、重機や吊り荷と潜水士が接触する危険がある。従来、ナローマルチビームソナーを用いて、海底計測が行われてきたが、2次元ソナーという特性上、リアルタイムの海底形状把握には不向きで、作業の手戻りなどの防止が困難であった。そこで、水中施工において、作業効率や安全性を向上させるため、海底や水中構造物などの形状を4次元で計測し表示する4Dソナーによる施工管理システム(以下、4Dソナーシステムと略す)を開発した。

## 2. 技術の内容

4Dソナーシステムは海底地形や水中構造物の形状を、超音波を立体的に照射して計測し、表示および記録することができる施工管理システムである。ソナーにより $50^{\circ} \times 50^{\circ}$ の範囲を $128 \times 128$ (16,384)本のビームで最大150mの距離まで計測することができる。16,384個の計測点は、各々4次元(X,Y,Z,時刻)データであるため、計測結果は立体映像として可視化される。データ更新レートは最大12Hzであるため、水中の動体計測も可能である。また、ソナーを艀装した船体の動揺を計測して補正することができ、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な4次元の測量結果の表示が可能である。また、ソナー部を遠隔操作や自動操縦でパン(水平方向)、およびチルト(鉛直方向)可動させることができるため、ソナーの計測範囲である $50^{\circ} \times 50^{\circ}$ 以上の範囲を計測して表示することも可能である。4Dソナーシステムにより、捨石投入、捨石均し、浚渫、ブロック据付、障害物撤去などの海上工事において、潜水士の誘導なく、船舶機械の重機オペレータが水中作業状況をリアルタイムに確認しながら作業を行えるため、作業効率および安全性の向上が実現される。

概要を図-1に示す。

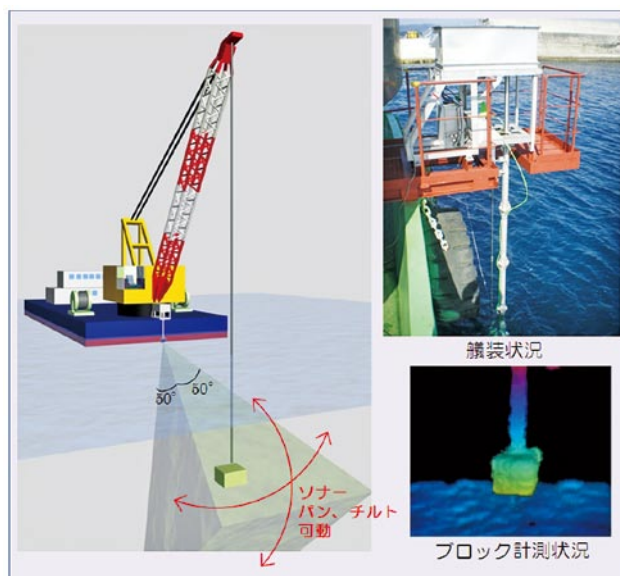


図-1 システム概要

### 3. 従来の技術

港湾工事の施工管理における海底や水中構造物の形状計測は、古くは単素子や4素子の音響測深機、昨今ではナローマルチビームソナーを用いて行っている。そのほかに、サイドスキャンソナーなどを用いて詳細な海底地形形状を計測する場合もある。これらの技術は2次元ソナーとも呼ばれているもので、超音波により点または線状に海底を連続して計測し、それらのデータを繋ぎ合わせるにより、3次元データによる地形把握を可能とするものである。現在、いずれの技術も、港湾工事の施工管理には不可欠な技術であるが、2次元ソナーという特性上、リアルタイムに海底地形や水中構造物を把握するには不向きであるといえる。図-2と図-3にナローマルチビームソナーと4Dソナーシステムの概念図を示す。

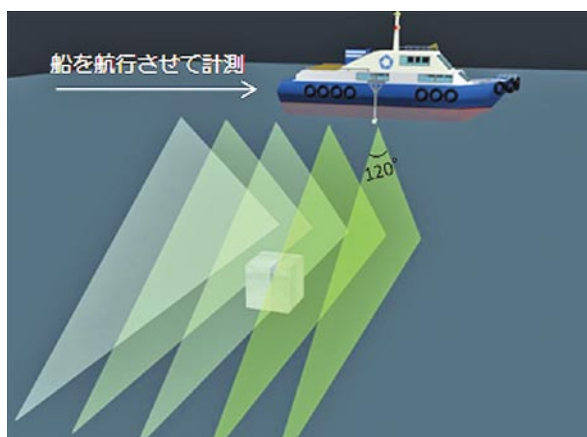


図-2 ナローマルチビームの計測概念図

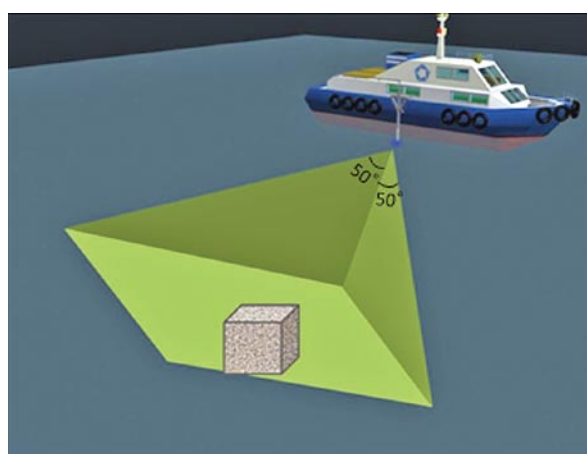


図-3 4Dソナーシステムの計測概念図

### 4. 特長

4Dソナーシステムの特長を以下に示す。

①海底や水中構造物の形状を4次元(X,Y,Z,時刻)で計測

し、リアルタイムに記録および表示することができる。

- ②ソナーを艀装した浮体の動揺を計測し、ソナーの計測に瞬時に反映して計測結果を表示することができるため、従来は不可能であったリアルタイムな海底の施工状況把握に有効である。
- ③ナローマルチビームソナーと同等の精度で、海底形状を計測して表示することができ、船舶機械などの重機のオペレータが視認しながら作業を行えるため、作業効率、および安全性が向上する。
- ④水中における現況と計画のそれぞれの3次元形状を重ね合わせて常時表示しながら施工することができるため、水中施工の過不足を感覚的かつ定量的に把握することができる。
- ⑤超音波を立体的(四角錐状)に照射するため、ナローマルチビーム測量などでは困難であった複雑な形状の構造物の計測が可能である。
- ⑥ソナー部を遠隔操作や自動操縦でパン、チルト方向に稼働させることができるため、広範囲を計測することができる。

### 5. 性能確認

#### 5-1 計測精度の検証

##### (1) 実験概要

4Dソナーシステムの精度を検証するために、他の計測方法との比較を行った。

まず、超音波計測機器であるナローマルチ測量と同一箇所を測量し、取得したデータの比較を行った。ナローマルチ測量は、水路測量に使用されており、適用可能な機器の精度については、“海上保安庁告示第102号”および“マルチビーム(浅海用)音響測深実施指針”に記載されている。実験で使用したナローマルチビームソナーと構成機器は、水路測量において広く使用されている機種であり、ビームフォーミング方式とインターフェロメトリ方式を組み合わせそれぞれの方式における特性を生かし、海底の様々な形状を計測できるようになっている。特にソナーの直下付近で取得する反射波はビームフォーミング方式を採用している。ビームフォーマーは複雑な海底形状を捉える場合に適した方式である。4Dソナーシステムもビームフォーミング方式を採用しているため、同様の結果が予想される。表-1に実験に使用した4Dソナーシステムとナローマルチビームソナー、およびその構成機器の仕様を示す。

表-1 実験に使用した構成機器の仕様

機器	項目	4Dソナーシステム	ナローマルチビームソナー (SEABAT8125)
ソナー	受波信号処理方法	ビームフォーミング	ビームフォーミング インターフェロメトリー
	ビーム数	16384	240
	最大レンジ	150m	120m
	計測範囲	50° × 50°	120° × 1°
INS	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	
RTK-GPS	精度	水平 8mm+1ppm RMS	
		垂直 15mm+1ppm RMS	
音速・圧力センサ	音速度計測精度	±0.05m/s	
	音速度測定範囲	1400~1600m/s	
	圧力計測精度	±0.05%FS	
	圧力測定範囲	100m	

次に超音波とは異なる方法により海底地形を計測し、本システムの計測結果と比較する。海底計測方法として、レッド測深や水中スタッフによる測量があるが、より精度の高い水中スタッフ測量、および水中水準測量器により、各々2mピッチで計測を行った。

計測は、沖防波堤のケーソンマウンドの基礎捨石部で実施した。捨石マウンド天端部は水深約11mで、法面箇所は水深約19mまで1:2の法となっている。基礎捨石は1t/個である。使用した計測機器一覧を表-2に示す。

表-2 計測機器一覧

項目	4Dソナーシステム	ナローマルチビームソナー (SEABAT8125)	水中スタッフ + トータルステーション	水中水準測量器
計測項目	平面座標(x,y)	平面座標(x,y)		
	水深	水深	水深	水深
	時刻			
測深精度	実験により検証	実験により検証	5mm (測距離200m、測角精度5°)	±20mm

(2) 実験方法

a) ソナーによる計測

測量船に4Dソナーシステムとナローマルチビームソナーを設置し、予め設定した2測線を25回ずつ測量する。計測時の航行速度は約3knotで、4Dソナーシステムは5Hzでデータ収録を行った。RTK-GPSと船体の動揺を計測するINS(Inertial Navigation System)は、本システムとナローマルチ

ビームソナーで共有して同じデータを使用している。  
b) 水中スタッフ、および水中水準測量器による計測

水中スタッフにミラーを取付け、予め設定した測点をトータルステーションで測量するとともに、水中水準測量器で計測した。測点は、測線上に2mピッチで設定した。計測概念図を図-4に、計測状況を写真-1に示す。

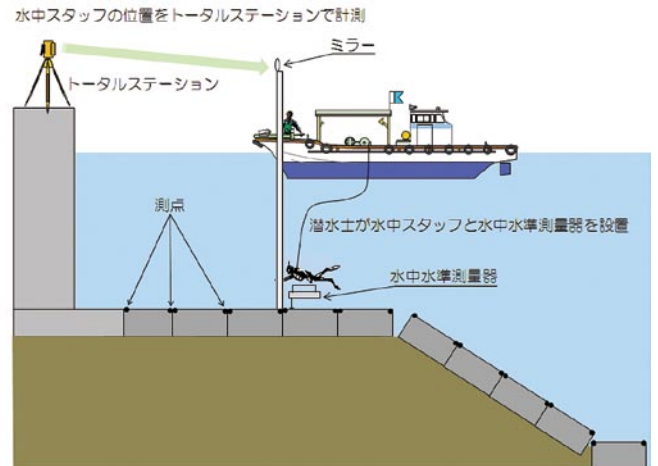


図-4 水中スタッフと水中水準測量器による計測



写真-1 水中スタッフおよび水中水準測量器による計測状況

(3) 実験結果

比較断面を図-5に示す。水中スタッフによる計測は、スタッフを最大限使用し、-13mまでデータを取得することができた。水中スタッフと水中水準測量器の計測結果は、ほぼ同じ結果となったため、図-5では、データが重なっている。ナローマルチビームソナーの計測結果は、水中水準測量器の計測結果より深くなる傾向となり、4Dソナーシステムの計測結果は、より水中水準測量器に近い値となった。

4Dソナーシステムと、ナローマルチビームソナーの25回分の計測データを、2mピッチの各測点毎(c1~c16)で平均し、他の計測方法と比較した。

水中水準測量器の計測値を真値と仮定すると、図-5より、ナローマルチビームソナーの誤差は、最大0.77mで平均0.35mであった。一方、4Dソナーシステムでは、最大0.25mで、平均0.08mであった。



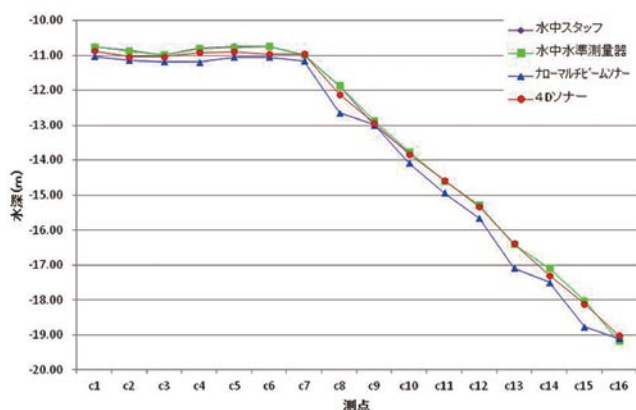


図-5 各測点における計測値比較

各測点における4Dソナーシステムとナローマルチビームソナーの水中水準測量器との計測差の頻度分布を図-6に示す。水中水準測量器と4Dソナーシステムの計測差の平均値±2σに含まれるデータ数は、全データ数の96%であった。

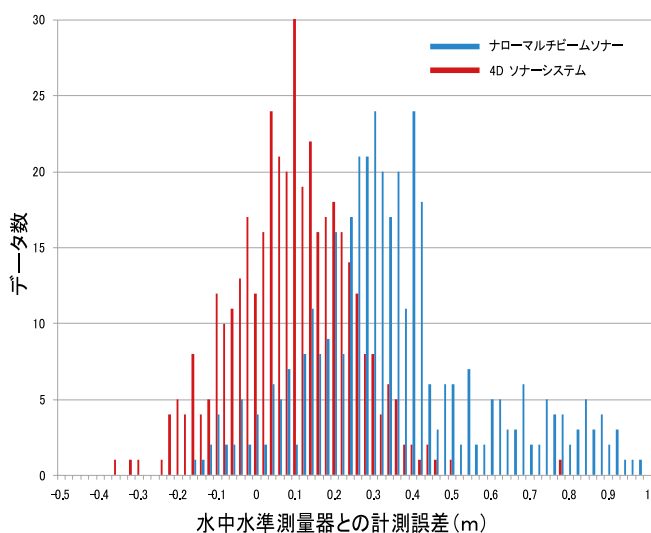


図-6 水中水準測量器との計測差の頻度分布 (標本数400)

4Dソナーシステムの計測差

標準偏差 0.149m

平均値 0.082m

ナローマルチビームソナーの計測差

標準偏差 0.240m

平均値 0.349m

### 5-2 ブロック据付工事における性能確認

4Dソナーシステムを、ブロック据付の実証工事へ導入し、効果の検証を行った。

比較のため、4Dソナーシステムを活用した据付と、従来の方法による据付について行い、それぞれの据付

精度について検証を行った。なお、精度確認のための測量は、ナローマルチビームソナーを用いて実施し、ブロック1個につき3点を計測して、据付位置や向きを算出した。

比較は、通常施工箇所のビーハイブ(30t型)9個とホロースケヤー(40t型)6個、実証工事施工箇所のビーハイブ(30t型)9個とホロースケヤー(40t型)6個を対象として実施した。表-3、表-4に示すように、据付位置および据付方向ともに、4Dソナーシステムによる誘導据付が良い結果となっているが、顕著な差ではなく、本実証工事では施工数量が少なかったため、今後の施工実績の蓄積により評価したいと考える。

表-3 ブロック中心座標の差の標準偏差

検証項目	工事形態	目標との差の標準偏差(m)
据付位置精度	システムによる誘導据付	0.20
	通常施工	0.36

表-4 方位角度差の標準偏差

検証項目	工事形態	向き	目標との差の標準偏差(°)
据付方位精度	システムによる誘導据付	法線平行	2.45
		法線直角	1.92
	通常施工	法線平行	2.56
		法線直角	2.99

## 6. おわりに

4Dソナーシステムは、現在までに、50件以上の現場導入実績があり、そのなかで様々な工種への適用を実施してきた。本システムにより、従来は不可能であったことが可能になったため、格段に効果のある工種もあれば、さらなる改良を要する工種もある。最近では、電動の可動架台を小型化、高精度化し、人力による運搬と設置が可能になったため、適用範囲がさらに広がった。

今後、さらなる改良に取り組み、この新しい施工管理方法の普及に努めたいと思う。

### 参考文献

(一財)沿岸技術研究センター、港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書、第12004号