

潜水作業における安全性の向上に向けて 水中ポジショニングシステムの開発

杉本 英樹

水中でのブロックや構造物の据付けでは潜水士による誘導や玉掛け、玉外し作業が伴う。水中の潜水士位置はクレーンオペレータから目視確認することは難しく、クレーンオペレータは潜水士が吐く気泡の位置や水中電話によるやりとりで潜水士位置を見当つけている。しかし、気泡は海流によって流されたり、視界の悪い水中では潜水士本人が吊荷に対する位置を見誤ったりして正確な位置を知るのは困難である。そこでクレーンオペレータが水中の潜水士の位置を把握して、作業の安全性を向上する目的で開発した水中ポジショニングシステムについて紹介する。

キーワード：水中作業，水中測位，潜水士，構造物据付

1. はじめに

近年、周辺環境や一般の海上交通の事情から大きな工事エリアを確保することが困難であり、近傍で施工機械が稼働する場所や、一般船舶が往来する航路に近接する場所での潜水士作業が多くなってきた。また、ブロックや構造物などの吊荷の誘導や玉掛け・玉外し作業は3～5mを超える深度になり、クレーンオペレータから目視確認することは難しい。特に、大都市近傍などの港湾工事現場では、視界が数十cmから数m程度しかない。こうした場合、クレーンオペレータは潜水士が吐く気泡の位置や水中電話によるやりとりで潜水士位置を見当つけてクレーン操作を行っている。しかし、作業深度が大きく潮流のある海域では気泡は海流によって流されたり、視界の悪い水中では潜水士本人が吊荷に対する位置を見誤ったりして正確な位置を知るのは困難である。そこでクレーンオペレータが水中の潜水士の位置を把握して、作業の安全性を向上する目的から、潜水士や吊荷などの測位・監視を行うために開発した水中ポジショニングシステム（以下、本システムと記す）を紹介する。

2. 音響測位の概要

一般的に船舶の測位には衛星測位が用いられるが、水中では電磁波の減衰が大きく水中測位は困難である。そのため、水中にある構造物の測位やロボットの位置を求める手段として超音波を利用した水中音響測

位が用いられる。水中音響測位は船舶に設置した送受波器と呼ばれる音響測位装置や海底に設置するトランスポンダと呼ばれる応答器の座標を基準に測位対象物の相対位置を算出し、座標基準となる音響測位装置やトランスポンダの位置座標から測位対象物の絶対位置を求める。

音響測位装置は、基準座標の取り方によって、LBL（Long Base Line：長基線）方式、SBL（Short Base Line：短基線）方式、SSBL（Super Short Base Line：超短基線）方式の3つに分類される。それぞれの特徴は以下の通り。

(1) LBL方式

LBL方式は、図1のように海底に3台以上のトランスポンダを設置して、海上の船舶などに設置した送受波器と各トランスポンダ間の直距離を音響信号の

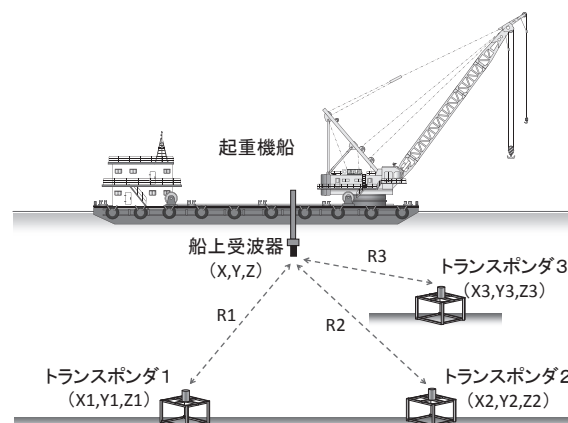


図1 LBL方式概要

やり取りによって求めて海上の船舶などの位置を算出するものである。この方式は海底に設置するトランスポンダの位置座標が基準座標となるため、あらかじめ正確に求めておく必要がある。トランスポンダ間の距離をベースラインとしている。

(2) SBL方式

SBL方式は、図-2のように海上の船舶などに3台以上の受波器を設置して、水中のトランスポンダと各受波器間との直距離を音響信号のやり取りによって求めて水中のトランスポンダの位置を算出するものである。この方式は海上の船舶に設置する受波器の位置座標が基準座標となり各受波器間隔が使用する船舶の大きさによって決定される。受波器間の距離をベースラインとしている。また、測位対象物の絶対座標を算出するには受波器を設置する船舶のロール、ピッチおよびヨー角の高精度な検出が必要である。測位対象物と海上の船舶に設置する受波器をコントロールする船上装置とを有線でつなぐことができる場合、音響信号のやり取りのうち呼出信号を有線で送って応答信号を音響信号で返すレスポンスをトランスポンダの代わりに使用することができる。

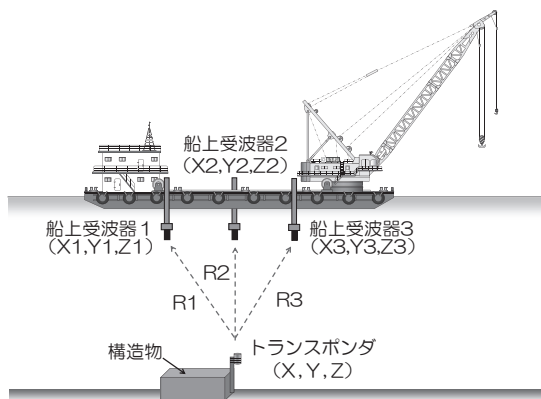


図-2 SBL方式概要

(3) SSBL方式

SSBL方式は機器の構成はSBL方式と同じであるが、受波器を一ヶ所の平面に配列させ送波器と合わせて一つの筐体に組み込んでいる。この方式は受波器の設置が一ヶ所というメリットから最近ではSSBL方式が多く用いられている。本システムもSSBL方式を採用している。

3. 従来の海上工事における水中位置の把握

(1) 潜水士の位置把握

潜水士と海上の潜水士船もしくは起重機船など（以

下、作業船と記す。）との連絡方法は、電話用通信ケーブルによる音声での連絡が一般的であり、海中での潜水士の位置は船上から繰り出した送気ホースの長さや潜水士からの気泡の位置で見当をつけている。しかし、グラブ船や起重機船などの近傍で潜水作業を行う場合、吊荷との接触・挟まれなどの危険がともない、また作業中は濁りによって視界確保が困難な状態が想定されることから、船上の監視員の細心の注意が必要となる。

(2) 水中構造物の据付誘導

水中構造物の据付作業は起重機船や揚重機台船などで行う。吊荷はクレーン先端部シーブの真下に位置するため、クレーン先端部にGPSや光波用プリズムを設置して算出する吊ワイヤーの中心位置を吊荷の平面位置として誘導・据付を行う。しかし、作業海域の潮流が速い場合はクレーン先端部シーブと吊荷の位置関係が一定に保たれないため、吊荷位置を個別に検出することが必要となる。

4. システムの構成

本システムは潜水士や吊荷などの測位対象物（以下、対象物と記す。）にトランスポンダを設置して、作業船上の船上装置で対象物の位置表示・監視を行うものである。

潜水士の位置監視を行う場合のシステム概要を図-3に示す。

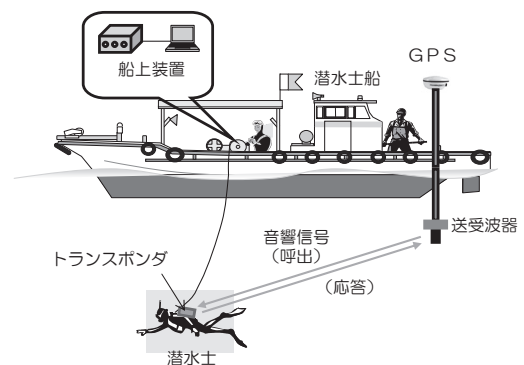


図-3 システム概要

- ①潜水士は作業船に設置した送受波器からの呼出に応答するトランスポンダを携帯する。作業船に制御ユニットおよびパソコンからなる船上装置、トランスポンダとの通信を行う送受波器、GPSアンテナ、コンパスなどを設置する。
- ②送受波器から所定のトランスポンダを呼出し、応答したトランスポンダの信号を送受波器で受信する。
- ③送受波器で送受信した信号の位相差などでトランス

ポンダの位置を算出する。

- ④ GPS アンテナとコンパス、傾斜計などから、送受波器の位置と方向を求めて潜水士の絶対位置を確定する。
- ⑤ 潜水士があらかじめ定められた管理区域に侵入した場合、モニタに警報を表示する。

5. システムの特徴

(1) 同時に6つの対象物を作業半径150m×水深30mの範囲で測位可能

潜水士が行う通常の水中作業全般に適用できる。ただし、現場ごとの潜水作業中止基準を超える海象気象条件下では適用範囲外とする。

(2) 対象物の水中位置を作業船上のモニタで監視することが可能

管理範囲や指標となる既設構造物などを配した工事エリア図に測位した対象物の位置をプロットできるため、潜水士船の監視員がモニタを見ながら潜水士を誘導することや、ブロック据付時のクレーンオペレータが潜水士や吊荷の位置を確認しながら作業を行うことができる。

(3) 管理範囲内に対象物が入るとモニタに警告を表示することが可能

航路近傍や吊荷を中心から任意を管理範囲として、進入時にモニタに警報を表示して注意喚起をすることができる。

(4) 対象物に取り付けるトランスポンダはワイヤレスのため作業性がよい

測位のための送受波器の呼出信号、トランスポンダの応答信号は超音波伝送しているため、通信ケーブルなどの養生や管理が不要なので潜水士の通常の作業性を損なわない。

6. システムの測位精度の検証

本システムは方向余弦で測位するため、水面近くや近傍に強い音響反射物があると演算位置が実際の位置と大きく違うことがある。運用にあたっては、作業現場の構造物や作業船の配置を考慮した測位計画が必要である。

本システムの精度を検証するために安定した実海域で測位試験を行った。

(1) 平面精度検証試験

岸壁から送受波器を写真-1のように張り出して設置して、図-4のようにトランスポンダとの距離を20～150mに変化させた場合の平面測位値の精度を検証した。

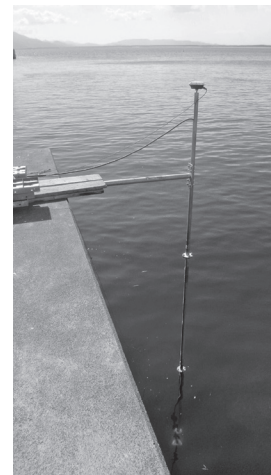


写真-1 送受波器設置状況

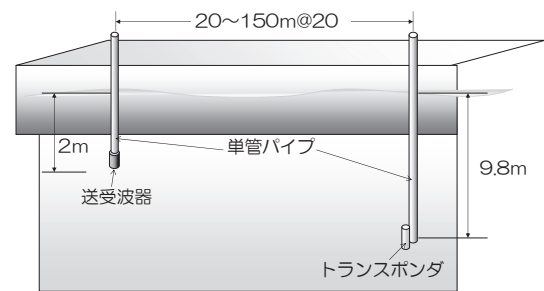


図-4 平面精度検証試験機器配置図

送受波器とトランスポンダは岸壁からそれぞれ2m張り出して、各設置ポイントで10分間測位を行った。各トランスポンダ設置位置での測位データで確率分布としてまとめ、平均値からの $\pm 2\sigma$ (95%)以内のパラッキを誤差とした。また、平面測位精度は誤差の10分間の平均測距値に対する比で評価した。表-1に統計結果を示す。

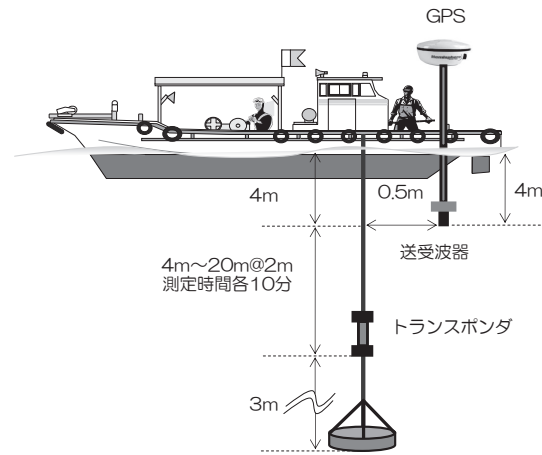
表-1 平面精度検証試験結果

トランスポンダ 設置ポイント	平均 測距値	X 座標		Y 座標	
		誤差(m)	精度(%)	誤差(m)	精度(%)
20 m	22.6	0.39	1.73	0.49	2.17
40 m	44.9	0.97	2.17	1.23	2.74
60 m	67.3	1.93	2.87	2.5	3.72
80 m	94.1	1.84	1.96	2.21	2.35
100 m	99.5	1.06	1.07	1.21	1.22
120 m	120	1.05	0.87	1.14	0.95
140 m	139.3	1.34	0.96	1.28	0.92
150 m	149.4	0.85	0.57	0.72	0.48

これより、平面測位は送受波器とトランスポンダ間の距離に対して±4%以内の精度で行なえることが検証できた。

(2) 測深精度検証試験

図一5のように海上の船舶からトランスポンダを水深8～24mまで2mごとに設置してそれぞれのポイントで10分間データを収録して測深精度を評価した。各ポイントの10分間におけるデータを中央値から10cmごとの分布表にしたものを表一2に示す。平面測位精度と同様にトランスポンダ設置ポイント8mおよび12mでは、バラツキが大きいものの全ての測深値が中央値±50cm以内であることから良好であるといえる。トランスポンダ設置ポイント14m以深では、-40cmから20cm以内に収まっており安定した測深ができたと評価できる。



図一5 測深精度検証試験機器配置図

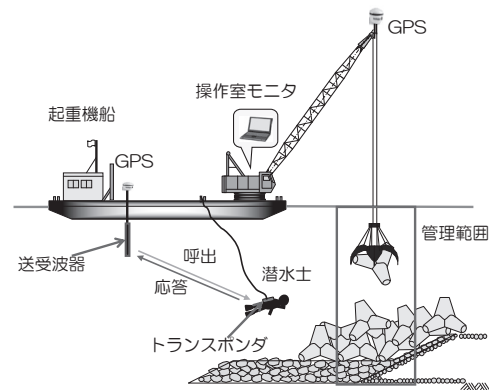


写真一2 クレーン操作状況

7. 導入事例の紹介

(1) 潜水士の位置把握

ブロック据付・撤去作業では潜水士が吊荷位置の誘導や、吊荷の玉掛け・玉外しを行うが、クレーンオペレータは直接潜水士の位置を確認することはできない。そこで、クレーンブーム先端部を吊荷中心とした任意の半径範囲を管理範囲として、潜水士位置に重ねてクレーンオペレータ席に取り付けたモニタに表示した。クレーンオペレータはこのモニタで潜水士位置を確認して吊荷作業を行った。写真一2にクレーン操作状況を示す。水中電話と合わせて視覚的に潜水士位置を確認できるので上下作業の防止、挟まれ・接触事故防止が図れた。図一6にブロック据付時のシステム概要図を示す。



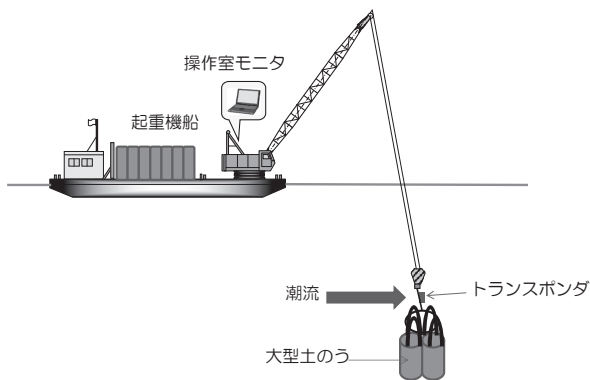
図一6 ブロック据付時システム概要

表一2 測深精度検証試験結果

トランスポンダ 設置ポイント	中央値 (m)	測深データの中央値, ± 10 cm, ± 20 cm, ± 30 cm, ± 40 cm, ± 50 cm の全データ数に対する割合 (%)											
		-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	合計
8 m	8.0	1.0	4.0	4.7	16.7	14.3	21.0	18.7	13.0	4.0	2.7	0.0	100
12 m	11.5	0.3	0.7	2.0	7.0	27.0	54.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
14 m	13.6	0.0	0.3	0.3	5.3	16.3	62.0	15.3	0.3	0.0	0.0	0.0	100
16 m	15.6	0.0	0.0	0.3	4.3	9.0	53.5	32.9	0.0	0.0	0.0	0.0	100
18 m	17.7	0.0	0.7	0.7	4.0	23.0	70.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	100
20 m	19.8	0.0	0.0	1.0	1.7	11.2	61.0	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	100
22 m	21.9	0.0	0.0	0.0	2.1	7.6	41.7	48.6	0.0	0.0	0.0	0.0	100
24 m	24.0	0.0	0.0	2.5	8.3	37.7	44.6	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	100

(2) 水中構造物の据付誘導

大深度や潮流のある海域での構造物据付では、吊荷が流されてしまい起重機船のブーム先端を吊荷位置として管理することができないため、個別に吊荷の測位が必要となる。そこで、図一七の土のう据付時のシステム概要図のように吊荷の真上にトランスポンダを取付けて、クレーンオペレータが吊荷位置を確認しながら精度のよい据付作業を行った。



図一七 土のう据付時システム概要

8. おわりに

本システムは一般財団法人沿岸技術研究センターに港湾関連民間技術の確認審査・評価を依頼し、評価証を2012年7月に取得した。これまでケーソンの被覆ブロック据付・撤去時の潜水士の位置監視、水深50m、最大潮流4～5ノットの海域での土のう設置、

最大潮流1.7ノット、水深300mでのブロック据付など8現場の導入実績(2012年5月現在)を積んでいる。

本システムは超音波を使った水中音響測位がコアとなっている。海上工事では近傍にケーソンなどの構造物や他の作業船があり、音響反射や干渉によって測位に影響を及ぼす劣悪な水中音響環境といえる。構造物や吊荷、作業船などが輻輳する現場ほど潜水士の安全確保のために位置監視は重要な技術となる。そのため、信号処理方法などの試行錯誤を重ねて、より安定した測位ができるシステムの確立に継続して取り組んでいきたい。

今後も現場導入とシステムの安定性を高めるデータの蓄積を行い、大深度や狭隘な施工場所への導入など適用範囲の拡大やシステム信頼性の向上に努めたいと考えている。

JCMA

《参考文献》

- 1) 海中ロボット、浦環・高川真一、株式会社成山堂書店、平成9年4月28日発行
- 2) CDIT、一般財団法人沿岸技術研究センター機関誌、2011.10 Vol.36

【筆者紹介】

杉本 英樹 (すぎもと ひでき)
五洋建設㈱
土木部門 土木本部 船舶機械部
専門部長

