

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1303 March 2015

栈橋上部工点検用ROVの提案と現場実証試験によるその運用支援機能の検証

田中 敏成
加藤 絵万
野上 周嗣
平林 丈嗣

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 棧橋上部工点検用ROV	6
2.1 半没水型ROV試験機の試作	7
2.2 運用支援機能の構築	16
3. 水槽および現地実証試験	19
3.1 水槽での動作確認試験	19
3.2 現地実証試験	20
4. 技術的課題とその対策案	23
4.1 ROV方位のかく乱	23
4.2 音響測位の測位異常点	23
4.3 撮影画像の画質低下	27
5. まとめ	30
6. おわりに	30
参考文献	31
付録1 実海域での調査事例(実証試験)	A1-1
付録2 <資料> ROVを用いた棧橋上部工下面部の点検診断マニュアル作成のための要件	A2-1

A proposal of a ROV for visual inspection of superstructure of open-type wharves and a verification of the operational assistance features through field experiments

Toshinari TANAKA*

Ema KATO**

Shuji NOGAMI***

Taketsugu HIRABAYASHI*

Synopsis

Periodic inspection and diagnosis plays a crucial role in the series of maintenance works of port structures. In the general periodic inspection of concrete superstructures of an open-type wharf, the appearance of the bottom surfaces of concrete beams and slabs are visually observed by divers and/or inspectors with a small boat. However, conducting the visual inspection is greatly influenced by tidal and wave conditions and utilization situation of the facility such as mooring and/or cargo handling, and, developments of ever safer and ever more efficient inspection methods are coveted.

In order to ensure the safety and efficiency of the inspection work, the authors developed a test model of semi-submergible type ROV equipped with upward cameras. The developed ROV has measurement devices of position and motion of the vehicle under the superstructures, where GPS signal is not available. The acoustic positioning system and the applied motion estimation with the optical flow worked as the tele-operation assistance features for operator. The position data was automatically associated with obtained pictures, and, it worked as management feature of inspection position. The utility of these operational assistance features were verified through field experiments of the visual inspection.

Key Words: concrete superstructures of open-type wharves, general periodic inspection and diagnosis, ROV(Remotely Operated Vehicle), operational assistance features, positioning under the superstructures, management of inspection positions

* Senior Researcher, Sensing and System Technology Group, Frontier Technology and Engineering Division

** Head, Structural mechanics Group, Structural Engineering Division

*** Researcher, Structural mechanics Group, Structural Engineering Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:tanaka_t@pari.go.jp

栈橋上部工点検用 ROV の提案と現場実証試験による その運用支援機能の検証

田中 敏成*・加藤 絵万**・野上 周嗣***・平林 丈嗣*

要 旨

定期的な点検診断は港湾施設の維持管理において重要な役割を果たしている。栈橋のコンクリート上部工の一般定期点検診断においては、梁や床版底面の外観を潜水士や小型ボート等に乗船した調査者によって目視点検を実施している。しかし、その実施は波浪や潮汐等の海象状況や、船舶の係留や荷役作業等の施設の利用状況に左右されることが多く、従来よりも安全かつ効率的な点検手法の開発が求められている。

その点検診断の安全性と効率を確保するために、筆者らは上方撮影カメラを装備した半没水型 ROV 試験機を開発した。開発した ROV は、GPS 信号を直接利用できない栈橋上部工下における自身の測位と運動計測機能を有している。ここで適用した音響測位機能とオプティカルフローによる ROV の簡易運動推定機能は、オペレータのための遠隔操作支援機能として働くものである。また、逐次取得される位置情報は撮影画像に自動的に関連付けられて点検位置情報の管理機能として働くものである。これらの運用支援機能の有用性については、栈橋上部工下面の目視点検の現場試験を実施して検証を行った。

キーワード：栈橋上部工，一般点検診断，ROV(Remotely Operated Vehicle)，運用支援機能，栈橋上部工下での測位，点検位置情報の管理

* 新技術研究開発領域計測・システム研究チーム主任研究官
** 構造研究領域構造研究チームリーダー
*** 構造研究領域構造研究チーム研究官
〒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:tanaka_t@pari.go.jp

1. はじめに

港湾構造物の維持管理を効率的かつ効果的に実施するためには、点検診断により構造物や部材の変状の発生に関するデータを取得し、これに基づいて構造物や部材の保有性能および将来の性能を定量的に評価・予測したうえで、対策の要否判定や適切な対策工法を選定することが重要である。

港湾構造物を構成する部材のなかでも、栈橋上部工コンクリートについては、塩害に起因するコンクリート内部の鋼材腐食により、予定供用期間中に部材の性能低下が生じる事例がこれまで国内に数多く存在するため、特に、効率的かつ効果的な維持管理の実施が求められる部材である。栈橋上部工コンクリートの点検診断のうち一般点検診断は、通常、船上からの部材下面の目視調査により行われる(写真-1.1)。しかし、その実施は波浪や潮汐等の海象状況や、船舶の係留や荷役作業等の施設の利用状況に左右されることが多く、従来よりも効率的かつ効果的な点検手法の開発が求められている。



a) 小型ボートによる目視



b) 潜水士作業

写真-1.1 栈橋下での点検作業の様子

また、一般点検診断の結果、必要と判断された場合、または定期的な実施される詳細点検診断では、潜水士により栈橋上部工下面の近接目視調査の実施や、栈橋上部工下面に足場を設置してコンクリート内部の鋼材腐食に関する非破壊試験を行うなどして、変状の詳細な外観情報や、変状に関する数値データを取得する。しかし、すべての部材に対してそれらの調査を実施することは困難である。このため、栈橋上部工コンクリートの一般点検診断においては、すべての部材について外観から得られる変状の状態を把握し栈橋上部工の保有性能評価に資するデータを取得すること、また、詳細点検診断を実施する部材や箇所を適切に選定(スクリーニング)することが重要となる。

このような現状を鑑み、近年ではROV (Remotely Operated Vehicle)等の水中ビークルを利用した水中部無人の点検装置による栈橋下の構造物の目視点検用画像の取得も試みられているところである(写真-1.2)。ROV等による目視点検の利点としては、1)船舶の係留や荷役作業等の施設の利用に支障を来さずに点検作業を実施できること、2)点検者の安全の確保(点検の実施が気象・海象に左右されにくい)、3)点検画像のリアルタイムチェックと同時に記録が可能であること、などが挙げられる。

しかしながら、このような作業環境下においては、上部を構造物に塞がれていることから、GPSを利用した点検装置の直接的な測位は期待できない。結果として、構造物下における点検装置の位置やその運動状態を把握することができず、その遠隔操作を困難なものとしている。また、どの部材を点検しているのかという基本情報が把握できないことは、特に上記の利点3)にとって極めて不利であり、これらのことがROV等の遠隔操作による点検装置の運用を著しく妨げる要因となっている。



写真-1.2 ROVを用いた点検作業の試み

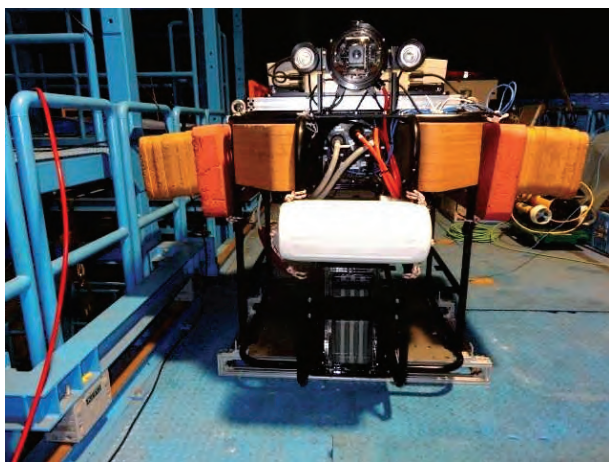
本研究開発は、栈橋下にあるROVの位置情報を地図(図面)上に表示する形でROVオペレータに逐次提示することでその遠隔操作支援を行い、目視点検を行いたい部材までのROVを遠隔操作で移動可能とするだけでなく、杭との衝突や干渉を確実に回避可能として、栈橋上部工下におけるROVの操作・運用性の向上を図るものである。

また、逐次得られる位置情報を撮影画像に関連付けて点検位置情報を管理することで、点検作業の報告書作成時に行われる栈橋上部工の展開図に対してひび割れや浮

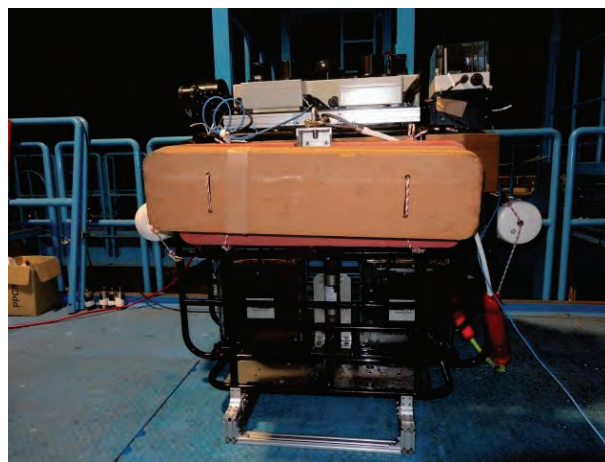
き・剥離などの変状を書き込む作業が不要あるいは大幅に簡素化され、当該作業の省力化を期待するものである。

なお、ROVのカメラと点検対象部材とのクリアランスが小さい場合は撮影範囲が制限され一つの部材を分割して撮影する場合は想定されるが、位置情報と撮影画像の関連付けにより画像のつなぎ合わせが可能である。

本稿では、提案手法の検証を目的として試作した栈橋上部工点検用ROVの試験機について詳述し、実証試験によるその運用支援機能の検証結果を記した。また、その



正面



側面

写真-2.1 栈橋上部工点検用ROV試験機

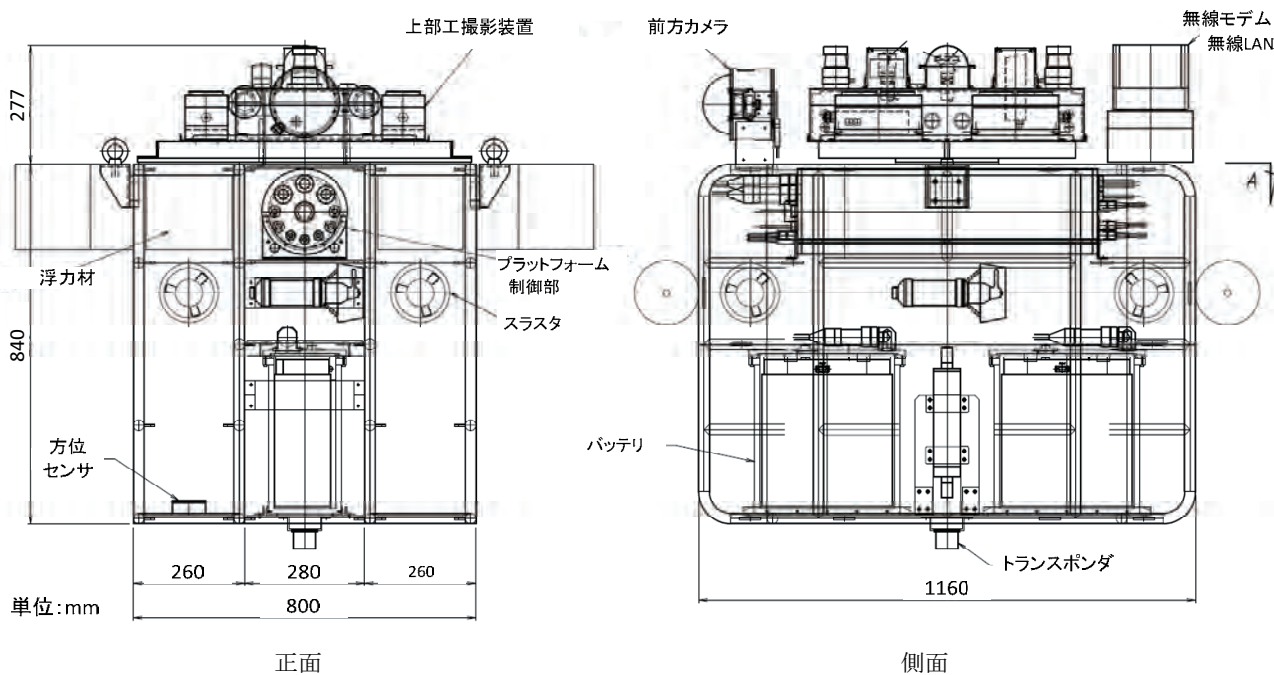


図-2.1 栈橋上部工点検用ROV試験機

結果から提案手法の技術的課題とその対策案を整理した。

さらに、ここで得られた結果に基づいて、「<資料> ROVを用いた栈橋上部工下面部の点検診断マニュアル作成のための要件」を取りまとめた。

2. 栈橋上部工点検用ROV

1. 章で述べた課題に対応して栈橋上部工点検用ROVの試験機を製作した。試験機は、上方撮影カメラを装備し

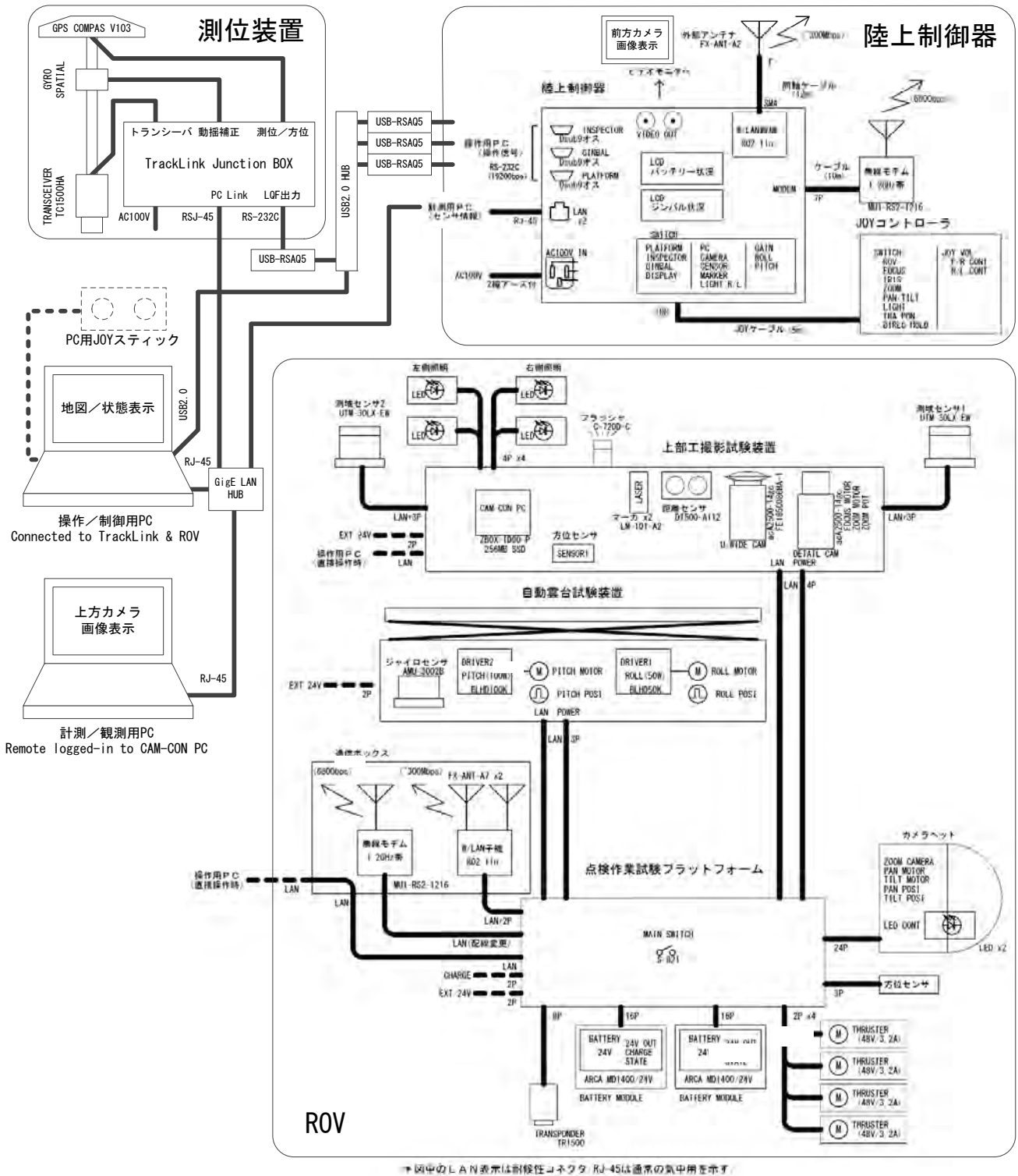


図-2.2 システムの全体構成

た半没水型ビークルであり、棧橋下に入って水中部無人で棧橋上部工下面の床板裏や梁など棧橋上部工各部の画像撮影を連続的に行う新たな点検手法の検証を目的とした実証試験機である。狭隘でかつ測位の困難な構造物下における遠隔操作に対し、直接的にはGPSに依らない測位を棧橋下で実現し、運動計測情報と合わせてオペレータに提示することでその遠隔操作を支援すると同時に、点検位置情報の管理に寄与するものである。

2.1 半没水型ROV試験機の試作

当該試験装置は多様な装置構成やそれらを用いた試験が可能となるよう、ROV試験装置本体「プラットフォーム」に必要な観測装置を選択的に搭載可能な構造とした。ここでは、「プラットフォーム」の上面に「棧橋上部工撮影試験装置」を設置する構成とした。写真-2.1、図-2.1および表-2.1に棧橋上部工点検用ROV試験装置を示す。

表-2.1 棧橋上部工点検用ROV試験装置主要緒元

形 式	半没水型
推進器	前後(150W)×2基, 左右(150W)×2基
観測機能	カメラ(操縦用×1台, 上方撮影用×1台, 上方撮影用超広角×1台) LED照明(前方×2灯, 上方×8灯) 音響測位機能×1式 上方距離計×1台 レーザーマーカー×1式 測域センサ×2台 方位計×1台
外形寸法	L1160mm(浮体含1460mm)×W800mm(浮体含1350mm)×H1117mm
質 量	約190kg(バラスト含む, 自動雲台含まず) 約230kg(バラストおよび自動雲台含む) ※自動雲台の詳細は4.3節(2)項④を参照

前表で示したように、当該試験機は画角の異なる2種類
の上方撮影用カメラを搭載し、用途に合わせて切り替えながら棧橋上部工の床板裏や梁を撮影可能である。また、GPSの利用できない環境下での運用を想定してUSBL(Ultra Short Base Line)型の音響測位装置を装備し、棧橋下で運用中のROVの位置情報をリアルタイムでオペレータに提示するとともに、この位置情報を棧橋上部工の撮影位置情報の管理に活用することとした。図-2.2にシステムの全体構成を示す。

(1) プラットフォーム

① プラットフォームビークル筐体部

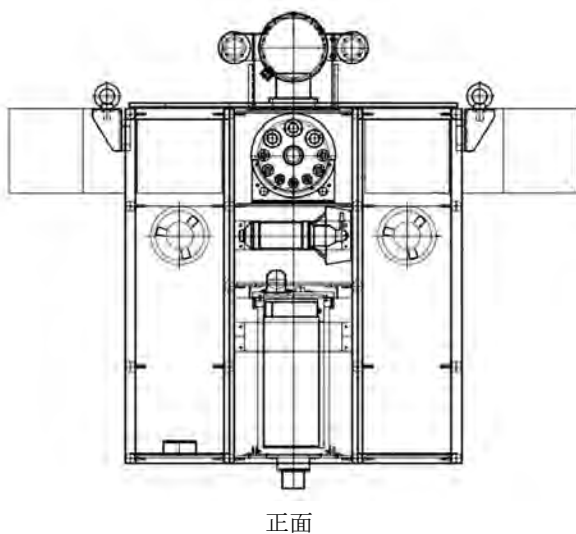
プラットフォーム筐体部には前後スラスト2基、左右スラスト2基が設置されている。また、筐体下面に磁気方位センサを設置しており、後述する制御BOXを介して接続されたPCでROVの船首方向を参照可能である。試作したプラットフォームを表-2.2と図-2.3に示す。

表-2.2 プラットフォーム主要緒元

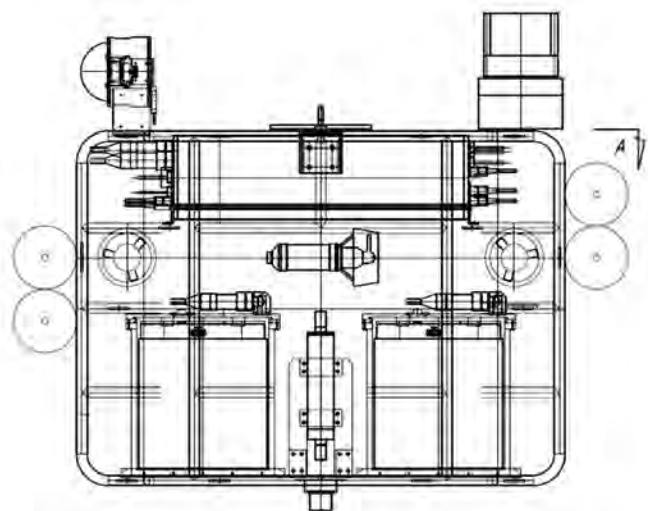
形 式	半没水型
推進器	前後スラスト(150W)×2基 左右スラスト(150W)×2基
外形寸法	L1160mm×W800mm×H840mm (突起部含まず)
質 量	約150kg(バラスト含まず)

② 陸上制御器

陸上制御器は制御BOXとジョイスティックコントローラで構成されており、これらを用いて陸上から遠隔操作によりプラットフォームの前後スラスト2基、左右スラスト2基の操作を行う。また、制御BOXとジョイスティック



正面



側面

図-2.3 プラットフォーム

コントローラの盤面には多数のボタンやスイッチが集中的に配置されており，スラスト以外の付帯装置の操作もここで行う．陸上制御機器を図-2.4に示す．

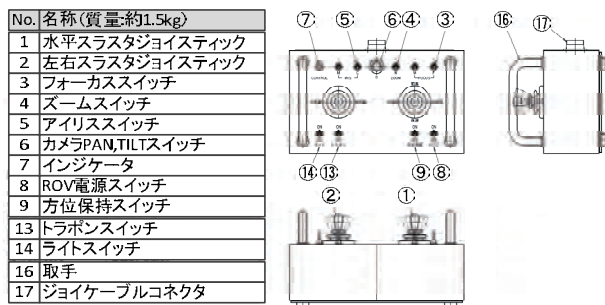
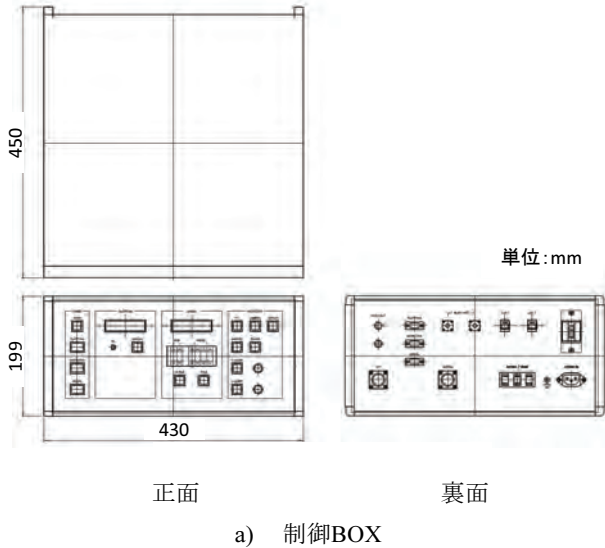
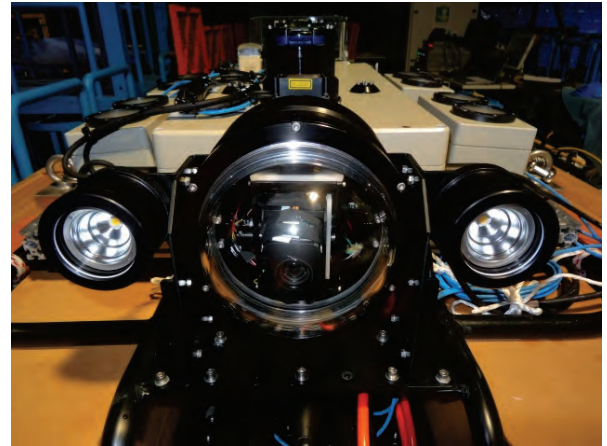


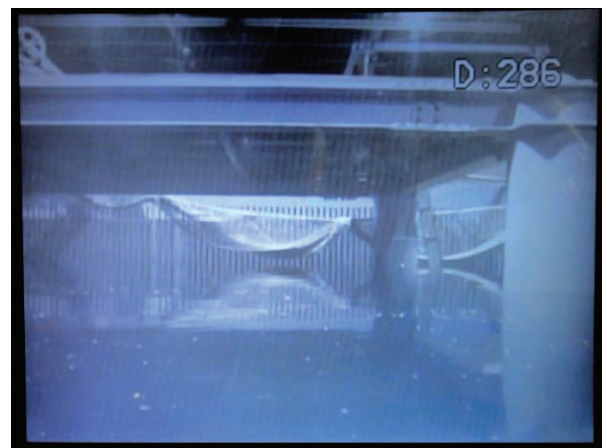
図-2.4 陸上制御器

③ 前方カメラ

前方カメラは，ジョイスティックコントローラにより，パン・チルト・ズーム操作に加え，アイリス，フォーカス操作が可能で，オペレータによるROV操作のための前方視認用NTSCカメラである．前方カメラによる取得映像は，陸上御器の制御BOXを介してNTSC信号で出力され，有線あるいは無線いずれかのLAN系統で陸上制御器まで伝送される．また，カメラの両側にLED前照灯を2灯装備した．写真-2.2に前方カメラおよび照明と，その撮影例を示す．



a) カメラ部(NTSCカメラ，LED前照灯)



b) 撮影映像(実験水槽内の栈橋模型)

写真-2.2 前方カメラ

④ 音響測位装置

音響測位装置は1つの音源から発せられる超音波を複数の受波器で受波した際のそれぞれの伝搬時間や位相差から三角測量的に音源の位置を同定する装置である．その音源部は一般的には移動体側に設置され，これを移動局という．音響測位装置は，超音波の送波タイミングの管理方法とベースライン長から，表-2.3に示すようにそれぞれ三種に大別することができる．

表-2.3 音響測位装置の分類

a) ベースライン長による分類

種別(BL=ベースライン)	ベースライン長
LBL (Long Base Line) 方式	数十m以上
SBL (Short Base Line) 方式	数十cmから数m程度
USBL/SSBL (Ultra/Super Short Base Line)方式	cm以下のオーダー

b) 送波タイミングの管理方法による分類

種 別	概 要
ピング方式	一定周期で移動体側の音源から超音波を発し、移動局と固定局の時計を正確に合わせることで送波タイミングを管理する方式。
レスポнда方式	固定局から有線で移動局の送波を指示することで、固定局で送波タイミングを管理する方式。
トランスポнда方式	固定局から超音波で移動局に対してその音源からの送波を指示することで、固定局で送波タイミングを管理する方式。

一般に、ベースラインが長いほど測位精度は高くなるが、LBL型は受波器を海底に設置するなどして長いベースライン長を確保する必要がある。一方、基線長がSBL以下の型では、受波器一式を母船などに取り付けられる程度にまで小型化が進んでおり、極端にベースラインの短いUSBL/SSBL型については、超音波の伝搬時間に替えて各受波の位相差を用いることで測位精度を確保するものが多い。

また、トランスポнда方式はピング方式やレスポнда方式と比較して超音波の伝搬距離が2倍となって音速誤差の影響が大きくなるが、送波タイミング同期のための装備が不要なため、移動体の測位に用いられることが多い。

よって、栈橋上部工点検用ROV試験機の測位には、トランスポнда方式のUSBL型音響測位装置を適用した。表-2.4、写真-2.3および写真-2.4に適用した音響測位装置を示す。

表-2.4 TC1500HA及びTN1505BR主要諸元

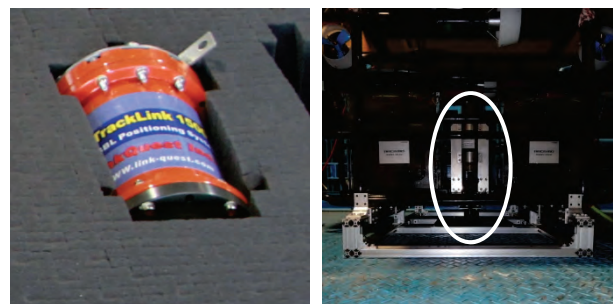
a) トランシーバTC1500HA(固定局)

項 目	仕 様
位置精度	0.25deg (better than 0.5% of slant range)
傾斜距離精度	0.2m
計測距離	1000m
ビーム角度(指向角)	120~150deg(半減全角)
ターゲット数	最大16個
使用周波数	31.0~43.2kHz
耐圧水深	20m
寸 法	φ 126mm×L240mm
空中重量	3.5kgf
水中重量	1.2kgf

b) トランスポндаTN1505BR(移動局)

項 目	仕 様
ビーム角度(指向角)	210deg(半減全角)
寸 法	φ64mm×240mm
水中重量	0.65kgf
空中重量	1.45kgf

※バッテリー内蔵リモートヘッドタイプ(外部電源切替可)



a) トランシーバTC1500HA b) トランスポндаTN1505BR
(固定局) (移動局, ROV底面に設置)

写真-2.3 音響測位装置LinkQuest社TrackLink1500



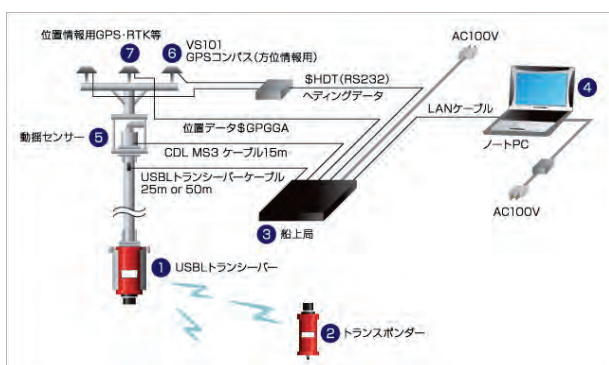
写真-2.4 トランスポндаTN1505BR
(メーカーHPより引用)

ここで、トランスポнда型の音響測位装置はトランシーバとトランスポндаとの間の超音波通信を成立させる必要があるため、移動局であるトランスポндаが固定局であるトランシーバの半減全角の範囲内にある場合のみその測位が可能とされている。つまり、ビーム角度が広いトランシーバであるほど、移動局の測位範囲が水平方向に広いと言える。しかしながら、一般的な音響測位装置のトランシーバのビーム角度はせいぜい90deg程度とそれほど広くはなく、必然的に移動局はトランシーバ直下での運用に制限されてしまう。しかしながら、ここでの用途は海上を航走する半没水型ROVの測位であることから、ほぼ真横の水平方向での測位が求められている。

これは音響測位装置の使用条件としては厳しいもので

あるが、採用したTrackLink1500は、トランスシーバのビーム角度は公証で120~150degと広く、トランスポンダもビーム角度210degの広い指向角を有している。加えて過去の試験により、トランスシーバのほぼ真横方向に位置するトランスポンダの測位について、鉛直位置の測位精度に低下がみられるものの、水平位置の測位は概ね可能であることを確認していたことから本装置を適用したり²⁾。

トランスポンダは、通常、水中に潜航する移動体では固定局との超音波の送受を考慮して移動体の上面に送受波面を上向きにして設置する。しかしながら本用途では移動体は海上を航走することから、トランスポンダを水中部に上向きに設置しようとする超音波がROV本体に干渉してしまう。そこでここでは、トランスポンダを移動体の下面に送受波面を下向きにして設置し、固定局のトランスシーバを水深の浅い位置に設置した。図-2.5に当該音響測位装置を用いた測位システム全体の模式図を示し、図-2-6にそれらの配置を示す。



※⑤ADVANCE NAVIGATION社SPATIAL使用

※⑥HEMISPHERE社V103使用

図-2.5 測位システム(代理店HPより引用)

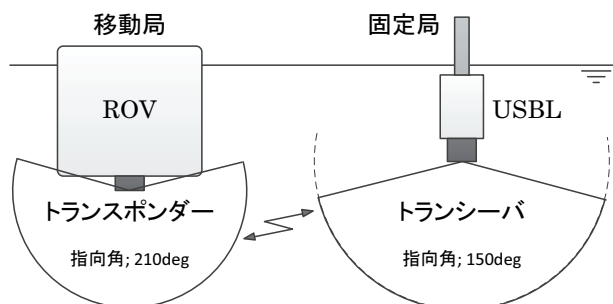


図-2.6 トランスポンダの配置とビーム角度

⑤ 通信機器

プラットフォームと陸上制御器間の操作系統は無線モデムで接続され、無索での遠隔操作を実現している。表-2.5に適用した無線モデムの主要諸元を示す。

表-2.5 サーキットデザイン社MU-1-RS2-1216主要諸元

項目	仕様
通信方式	シリアル通信(RS232フォーマット)
同期方式	調歩同期(非同期)
送受信周波数	1216.0375~1216.4875MHz
チャンネル数	19ch(連続通信)
送信出力	10mW
変調方式	2値FSK, 9600bps(最大)
動作電圧	3.0~5.0V
消費電流	送信時60mA, 受信時35mA(3V時)
通信距離	見通し約600m, 地上高1.5m(参考)
寸法	50mm×30mm×9mm(アンテナ含まず)
動作温度範囲	-15~+60℃
質量	23.5g

ここで適用したモデムは特定小電力無線モデムである。これは電波法による免許を要しないことから手軽に利用できる反面、電波の干渉や輻輳が懸念される。そこで、400MHz帯と比較してまだ無線機数自体が少なく、比較的ノイズの少ないクリーンな電波環境を利用可能な1200MHz帯の無線モデムを適用した。なお、どの周波数帯でも同様であるが、同じ周波数帯の電波を利用する機器との干渉には留意する必要がある。1200MHz帯については、BS/CS放送の中間周波数と共用し、GPSのL2バンド(1227.60MHz)とは隣接している。

なお、後述する栈橋上部工撮影試験装置の上方撮影カメラは前方カメラと同様にLANで接続されており、有線あるいは無線いずれかのLANシステムを選択的に使用可能である。

以上の無線モデムと無線LANに関わる通信装置は、プラットフォーム上面に設置された保護BOX内に格納することで防水構造を採っている(写真-2.5)。

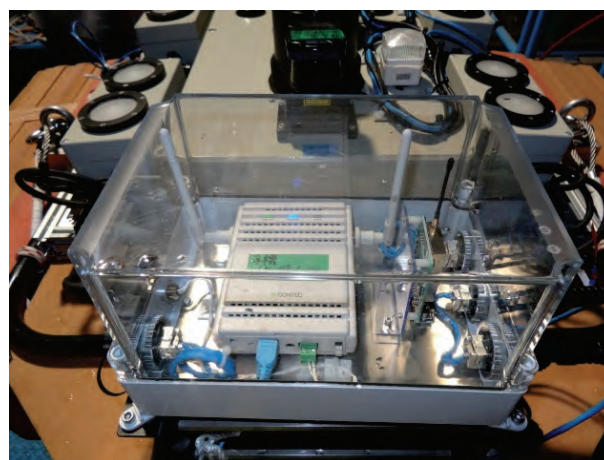


写真-2.5 無線モデムおよび無線LANの保護BOX

⑥ バッテリ

無線による無索の遠隔操作の実現に合わせて、プラットフォーム本体の動力源もバッテリー式とし、民生用の大容量リチウムイオン蓄電池を適用した。ここでは、プラットフォームの下端にバッテリー2台を並列接続で搭載した。表-2.5に適用したバッテリーの主要諸元を示す。

表-2.5 BAYSUN社ARCA MDA1400/24V主要諸元

項目	仕様
電池種類	リチウムイオン蓄電池
電池容量	1.4kWh(55Ah)
標準充電	定電流定電圧充電方式 CC=10A(0.2C) CV=29.4V 充電時間 約6時間
最大連続充電電流	50A(セル温度45℃を超えないこと)
最大連続放電電流	50A(セル温度60℃を超えないこと)
外形寸法	305mm×130mm×343mm
質量	15kg
使用温度範囲	充電時 -10～40℃ 放電時 -20～40℃
使用湿度範囲	20～85%(結露無きこと)
寿命	4000サイクル

リチウムイオン蓄電池は、ニッケル水素蓄電池と比較してガス発生の危険性が低いことから、適切な電源制御装置との組み合わせによって密閉容器内で使用することが可能である。また、リチウムイオン蓄電池のエネルギー密度は通常100～250Wh/kg程度であり、一般的に入手可能な蓄電池としては最大級である。よって、当該方式の蓄電池を採用した。

ここで、ROVの機器構成から最大連続電流を25Aと想定し、連続稼働時間を日中作業時間の半分となる4時間以上と設定したことから、電池容量は100Ah以上が必要である。適用した蓄電池の容量は1ユニットあたり55Ahであることから、これを2台並列搭載して110Ah(2.8kWh)とした。

なお、ROVの消費電流は瞬間的に30Aを超えることがあるが、スラスト駆動は断続でかつほとんどの場合において15A以下の消費電流であった。よって、実質的には6～10時間程度の連続稼働時間が見込まれ、運用方法によっては蓄電池の充電や交換不要で終日利用が期待できる。

(2) 栈橋上部工撮影試験装置

① 栈橋上部工撮影試験装置の筐体部

栈橋上部工撮影試験装置は上方撮影カメラ2台を装備し、筐体内のCAM-CON PCで制御される。陸上の計測/観測PCからLANを介してCAM-CON PCにリモートログインすることで、カメラの操作や画像の確認・記録が可能となる。写真-2.6、図-2.7および表-2.6に栈橋上部工

撮影試験装置の筐体部を示す。

表-2.6 栈橋上部工撮影試験装置主要諸元

項目	仕様
主要機器	カメラ(上方用×1, 上方用超広角×1) LED照明(上方×8灯, 拡散板付) 上方距離計×1台 レーザーマーカ×1式 測域センサ×2台
外形寸法	L650mm×W580mm×H222mm(突起部含まず)
質量	約25kg

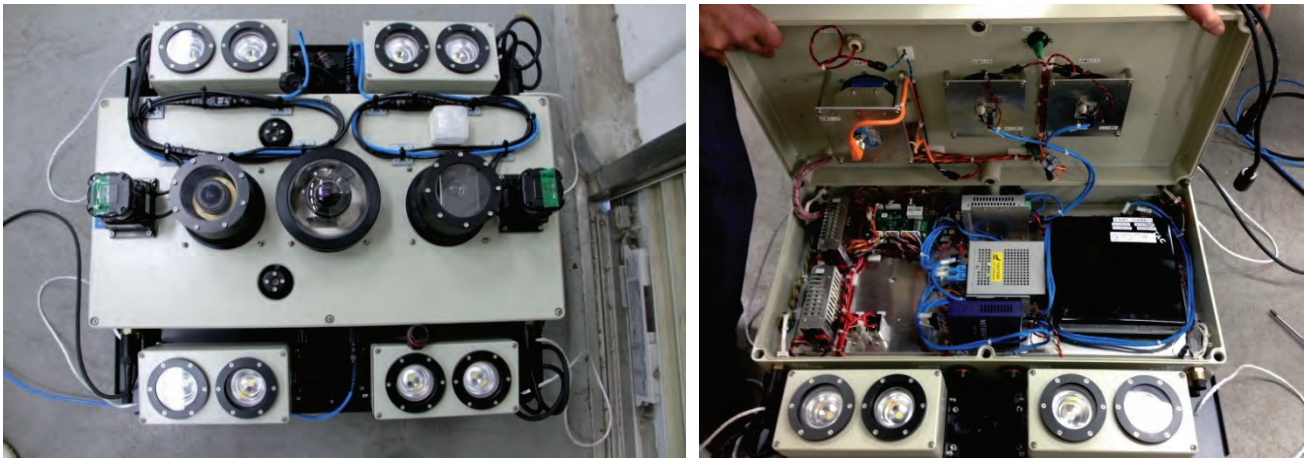
② 上方撮影カメラ

ここでは、GigE Vision規格の工業用カメラを採用した。GigE Vision規格とはGigE(Gigabit Ethernet ; 1000Mbps)のデータ転送帯域に対応した工業用カメラの規格であり、EthernetのUDP/IP上にGigE Vision Protocolを構築したものである。これは、データの伝送効率が高いUDP/IPに対して、高速伝送により低下する信頼性を本Protocolが補う形式を取っている。なお、GigE Vision規格のカメラは画像データの伝送や機器への入出力のすべてをGigE対応のLANデバイスで行うことができることから機器への組み込み時の自由度が高く汎用性が高い。ここではシステムへの機器の組み込み用途を考慮して採用した。表-2.7に適用したカメラの主要諸元を示す。

表-2.7 BASLER社aceシリーズacA2500-14gc主要諸元

項目	仕様
画素数	2590×1942pixel
センサータイプ	Progressive Scan CMOS Rolling Shutter/Half Global Shutter
画像素子サイズ	1/2.5inch CMOS
ピクセルサイズ	2.2μm (H) ×2.2μm (W)
フレームレート	14 fps
モノクロ/カラー	カラー
ビデオ出力タイプ	Gigabit Ethernet (GigE Vision)
出力フォーマット	8, 12 bit
同期モード	外部同期またはフリーランモード
露光制御	プログラマブルモード
外形寸法	L29mm×W29mm×H42mm
電源	Power over Ethernet または12VDC
レンズマウント	C/CS-mount

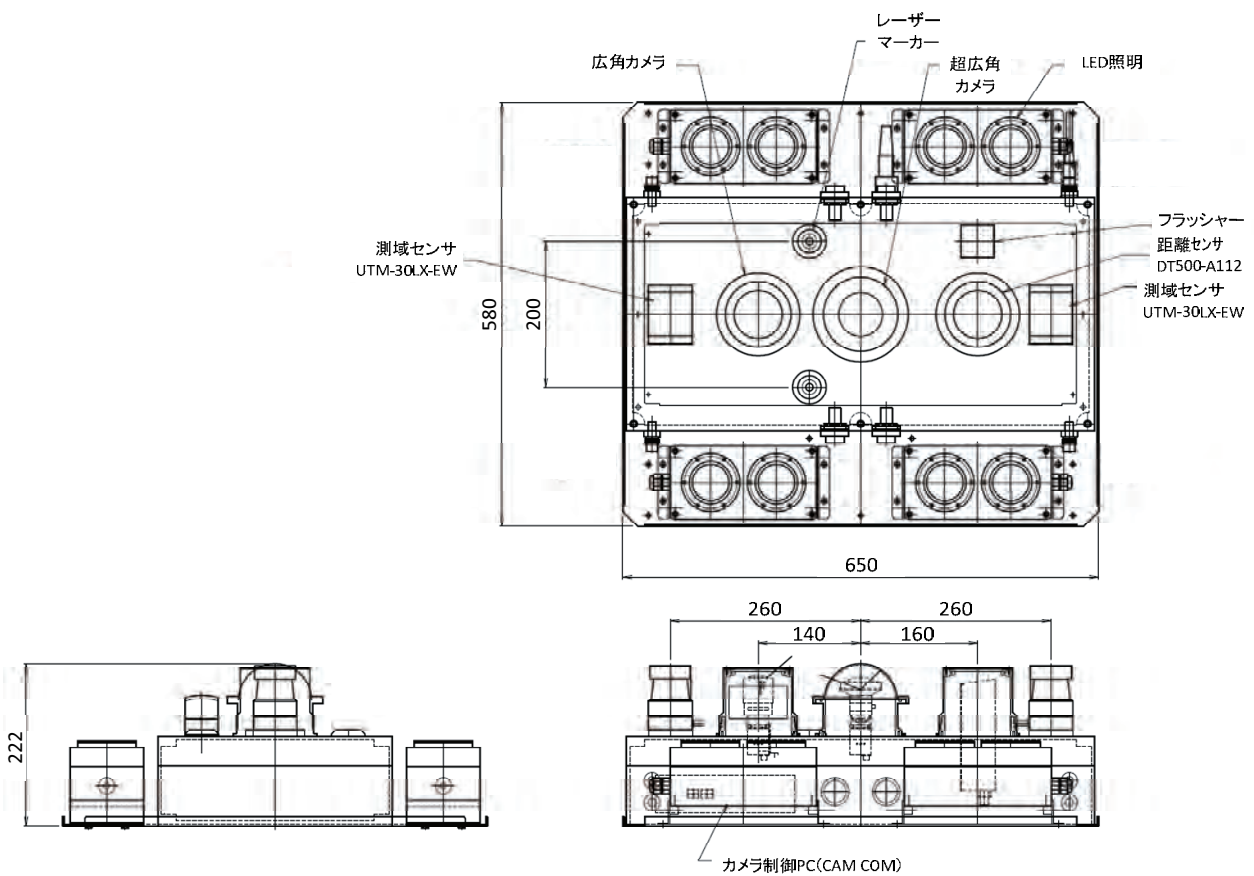
ここでは画角の異なる2種のレンズを使用するために、このカメラを2台搭載した。表-2.8に適用したズームレンズの主要諸元を示す。



a) 外観

b) 内部

写真-2.6 栈橋上部工撮影試験装置



単位:mm

図-2.7 栈橋上部工撮影試験装置

表-2.8 TAMRON社M12VM412主要諸元

項目	仕様
マウント	C
焦点距離	4.0~12mm
絞り範囲	F1.4~Close
画角(水平×垂直)	
1/2型6.8mm×5.1mm	Wide100.5°×73.4°, Tele33.4°×25.1°
1/2型6.4mm×4.8mm	Wide93.9°×68.8°, Tele31.4°×23.6°
1/3型	Wide68.8°×51.0°, Tele23.6°×17.7°
フォーカス範囲	0.3m~∞
操作方法	フォーカス 手動(ロック付き) ズーム 手動(ロック付き) アイリス 手動(ロック付き)
バックフォーカス	Wide9.05~Tele18.90mm (in air)
質量	58.5g±5g

栈橋上部工撮影試験装置では1/2.5型のカメラを用いていることから上記のズーム範囲でいわゆる標準域の画角となる。また、このズームレンズの画角側の画角不足を補うためにもう1台のカメラには超広角レンズを採用した。表-2.9に超広角レンズの主要諸元を示す。

表-2.9 FUJIFILM社FE185C086HA-1主要諸元

項目	仕様
マウント	C
焦点距離	2.7mm
絞り範囲	F1.8~F16
画角(水平×垂直)	
1型	185°×185°(ø8.6mm)
2/3型	185°×140°35'
1/2型	136°18'×102°19'
フォーカス範囲	∞~0.2m
操作方法	フォーカス 固定 アイリス 手動(ロック付)
バックフォーカス	9.75mm
射出瞳位置	-49mm
質量	160g

ズームレンズを取り付けたカメラと同様、もう1台のカメラも1/2.5型のカメラであることから、この画角は水平画角で概ね120deg程度を確保している。

③ LED照明

上方撮影カメラでの撮影時の照度を確保するために、照明方向を上方に向けたLED照明を装備した。LED照明は2灯を一組として防水BOXに組み入れて合計で8灯を装備し、これらは左右の照明の列の照度を独立して64段階で調整可能である。

LED照明は発熱と消費電力の点で優位である反面、光

の直進性が比較的高く、広範囲の照明には工夫が必要である。ここでは照明の拡散効果を期待して、前面のガラス面にディフューザー(拡散膜)を設置するとともに、照明BOXを外向きに約4.4deg傾斜して配置した。写真-2.8および表-2.10に適用したLED照明を示す。

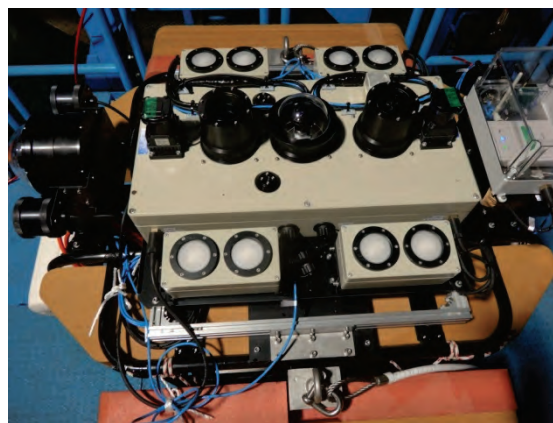


写真-2.7 LED照明

表-2.10 LED照明主要諸元

a) LED照明素子仕様

項目	仕様
使用素子	白色パワーLED
色温度	4000K
最大定格	11W(1A, 11V)
仕様全光束	450lm(@400mA)

b) ROVへの組込仕様

項目	仕様
使用電力	約7.5W(放熱性を考慮し出力抑制)
通電電流調整値	700mA(約10.5V)
調整全光束	約720lm(特性グラフからの推定値)
集光形式	反射板による
反射板ビーム角	45deg
拡散板仕様	微少レンズアレイ板 60deg(上方のみ)
数 量	栈橋上部工撮影試験装置 8灯(2灯×4) プラットフォーム 2灯(1灯×2)

④ 上方距離計

上方の撮影対象までの距離を計測するために、防水カバー内に上方に向けたレーザ距離計を設置した。距離計は可視赤色レーザであるため撮影の支障とならないよう遠隔でON/OFF操作と距離の確認が可能である。写真-2.8および表-2.11に上方距離計を示す。



写真-2.8 上方距離計SICK社DT500-A112

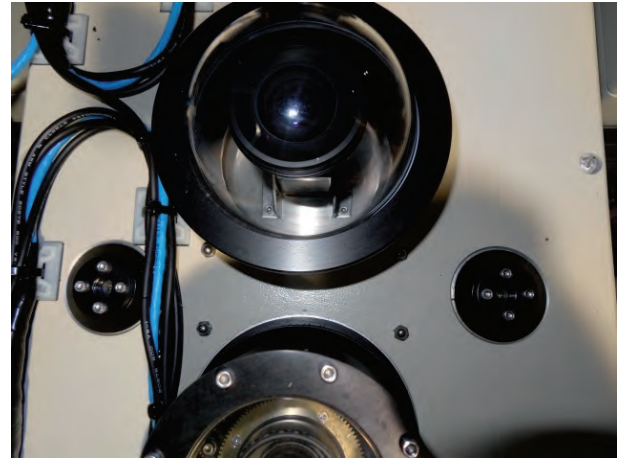


写真-2.9 レーザーマーカ

表-2.11 DT500-A112主要諸元

項目	仕様
測定範囲	0.2~18m (対象物6%黒色) 0.2~18m (対象物90%白色)
測定分解能	1mm
測定角度	±3mm
繰り返し精度	1mm
スポット径	30mm/距離20m
投光光源	レーザダイオード (可視赤色)
レーザクラス	クラス2
電源電圧	DC18~30V
リップル	<5Vpp
消費電力	2W
測定レート	250ms
出力インタフェース	RS422, 19.2kBd
保護構造	IP65
周囲温度	操作時-10~+50℃ 保管時-25~+75℃
質量	1000g
筐体材質	ダイカスト
起動時初期化時間	代表値500ms

⑤ レーザーマーカ

上方に2つのレーザ平行光を照射するレーザーマーカを装備した。平行光の照射点間距離はレーザ発振器の設置間隔と等しいことから、画像上の写る2つの照射点の間隔から同じ画像平面の任意の部位の寸法を推定することができる。写真-2.9にレーザーマーカを示す。

ここで、平行光の間隔は200mmに設定しており、距離計と同様に光源は可視赤色レーザであるため撮影の支障とならないよう遠隔でON/OFF操作が可能である。写真-2.10に水槽にて栈橋模型の床版裏にレーザーマーカを照射した様子を示す。

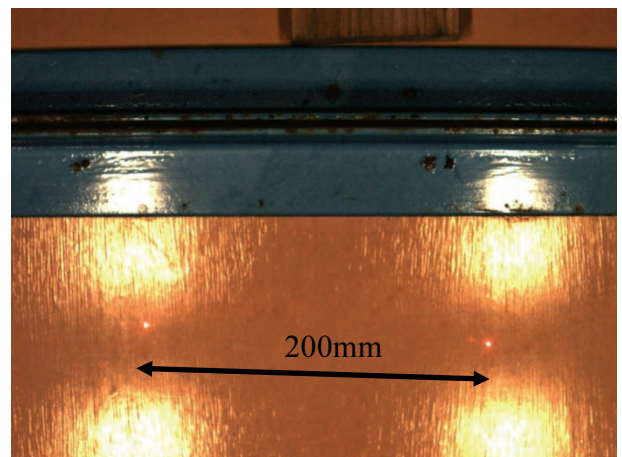


写真-2.10 レーザーマーカの照射例
(ズームカメラで撮影)

⑥ 測域センサ

操縦用カメラで把握可能な周囲の状況はその視界の範囲内に限られている。栈橋下のような鋼管杭が錯綜する環境下においては、より広範にわたる周囲の状況が把握できればその操縦がより安全で確実にできる可能性がある。ここでは、周囲の鋼管杭の状況を全周にわたって把握するために、前後に計2台の測域センサを栈橋上部工撮影試験装置に設置した。写真-2.11および表-2.12に測域センサを示す。



写真-2.11 測域センサ
北陽電機株式会社UTM-30LX-EW

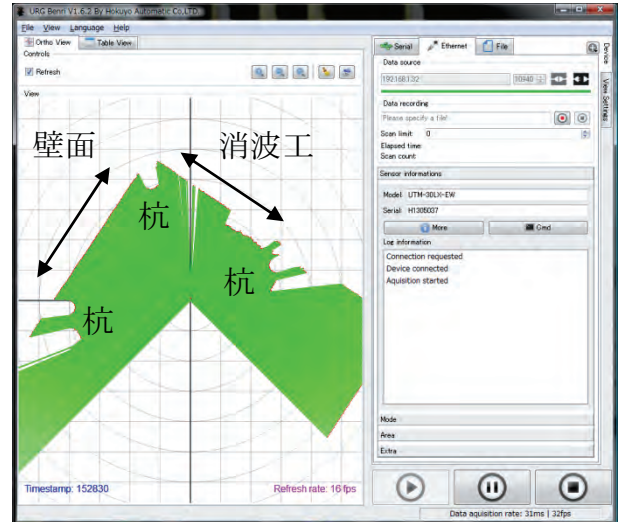


図-2.8 水槽試験

表-2.12 UTM-30LX-EW主要諸元

項目	仕様
光源	半導体レーザー $\lambda=905\text{nm}$ FDA レーザ安全クラス1
電源電圧	DC 12V $\pm 10\%$
電源電流	700mA 以下但し起動時は約1A
検出距離等	検出保障値0.1~30m(白ケント紙), 最小検出物130mm(10m)
測距精度	<ul style="list-style-type: none"> 0.1 ~ 10m : $\pm 30\text{mm}$, 10 ~ 30m : $\pm 50\text{mm}$(白ケント紙) 周囲照度3000lx以下 白ケント紙0.1~10m : $\pm 30\text{mm}$ 周囲照度 100000lx 以下 白ケント紙 0.1~10m : $\pm 50\text{mm}$
測距分解能及び繰返し精度	1mm 単位 <ul style="list-style-type: none"> 0.1~10m : $\sigma < 10\text{mm}$, 10~30m : $\sigma < 30\text{mm}$ (白ケント紙) 周囲照度3000lx以下 : $\sigma < 10\text{mm}$ (白ケント紙10mまで) 周囲照度 100000lx 以下 : $\sigma < 30\text{mm}$ (白ケント紙 10m まで)
走査角度	270deg (走査時間25ms/scan, 分解能約0.25deg)
インターフェース	Ethernet100BASE-TX (Auto-negotiation)
使用周囲環境	使用時-10~+50°C 保管時-25~+75°C 85%RH以下(結露, 凍結除く)
保護構造	IP67
外形寸法	W62mm×D62mm×H87.5mm
質量	210g(ケーブルを除く)

測域センサで水中作業環境再現水槽の杭間隔5mの栈橋模型の観測した例を図-2.8に示す。

図中の中央のグレーの領域はレーザーの到達範囲である。またその領域の境界部が反射点である。この図から、測域センサの照射範囲であるセンサ前面270degの範囲に位置する鋼管杭3本のほか、壁面や消波工、その他の設置物を確認することができるがわかる。

⑦ フラッシュャ

ROVのトラブル時の対策の一つとして栈橋上部工撮影試験装置の上面フラッシュャを装備した。これは不測の事態の際に点灯させることでROV本体を見失うことを防止するための目印となるものである。点灯の方法は2種類あり、遠隔操作によって任意のタイミングで点灯させる方法と、操縦システムの通信断が1秒以上続いた場合に自動的に点灯させる方法である。写真-2.12にフラッシュャを示す。



写真2.12 フラッシュャ

2.2 運用支援機能の構築

(1) 構造物下での測位

鉄筋コンクリートの栈橋上部工で上部を遮蔽された栈橋下ではGPSの電波は直接的には利用できない。そこで、次図に示すような測位情報の中継により、基準点位置をGPSで測位し、そこを起点とした音響測位により栈橋下でのROVの測位を行うシステムを構築した。

式(2.1)から式(2.3)に各座標系における測位対象の位置ベクトル \mathbf{P} を示す。ここで、位置ベクトル \mathbf{P} の左肩の添え字は座標系、右下の添え字は測位対象を表す。なお、座標系の添え字はそれぞれ、 W ;世界座標系、 GPS ;GPS座標系（アンテナ位置原点）、 $USBL$;USBL座標系（固定局/トランシーバ位置原点）、 ROV ;ROV座標系（移動局/ROV位置原点）である(図-2.9)。

GPSアンテナの位置ベクトル

$$\begin{aligned} {}^{GPS}\mathbf{P}_{GPS} &= \mathbf{0} \\ {}^W\mathbf{P}_{GPS} &= ({}^Wx_{GPS} \quad {}^Wy_{GPS} \quad {}^Wz_{GPS})^T \end{aligned} \quad (2.1)$$

USBL固定局(トランシーバ)の位置ベクトル

$$\begin{aligned} {}^{USBL}\mathbf{P}_{USBL} &= \mathbf{0} \\ {}^{GPS}\mathbf{P}_{USBL} &= (0 \quad 0 \quad L)^T \\ \begin{pmatrix} {}^W\mathbf{P}_{USBL} \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{T} \cdot \mathbf{R} & {}^W\mathbf{P}_{GPS} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{GPS}\mathbf{P}_{USBL} \\ 1 \end{pmatrix} \\ {}^W\mathbf{P}_{USBL} &= \mathbf{T} \cdot \mathbf{R} \cdot {}^{GPS}\mathbf{P}_{USBL} + {}^W\mathbf{P}_{GPS} \end{aligned} \quad (2.2)$$

ROV(トランスポンダ)の位置ベクトル

$$\begin{aligned} {}^{ROV}\mathbf{P}_{ROV} &= \mathbf{0} \\ {}^{USBL}\mathbf{P}_{ROV} &= ({}^{USBL}x_{ROV} \quad {}^{USBL}y_{ROV} \quad {}^{USBL}z_{ROV})^T \\ {}^{GPS}\mathbf{P}_{ROV} &= {}^{GPS}\mathbf{P}_{USBL} + {}^{USBL}\mathbf{P}_{ROV} \\ \begin{pmatrix} {}^W\mathbf{P}_{ROV} \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{T} \cdot \mathbf{R} & {}^W\mathbf{P}_{GPS} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{GPS}\mathbf{P}_{ROV} \\ 1 \end{pmatrix} \\ {}^W\mathbf{P}_{ROV} &= \mathbf{T} \cdot \mathbf{R} \cdot {}^{GPS}\mathbf{P}_{ROV} + {}^W\mathbf{P}_{GPS} \end{aligned} \quad (2.3)$$

ただし、

緯経度変換行列(メートル単位→緯度経度表記)

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_x & 0 & 0 \\ 0 & t_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

動揺回転行列(3×3)

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\theta_z) \cdot \mathbf{R}_y(\theta_y) \cdot \mathbf{R}_x(\theta_x) \quad (2.5)$$

とし、動揺回転(ここでは固定局の設置方位・姿勢)の補正機能は音響測位装置に包含されている。

ここで、式(2.3)で示した ${}^W\mathbf{P}_{ROV}$ が世界座標系におけるROVの位置ベクトルとなる。この場合、 xy 平面上のROVの位置は緯度経度で表される。

一方、任意のトランシーバ設置位置 ${}^{USBL}\mathbf{P}_{USBL}$ を原点とし、世界座標系における xy 平面と平行となるように設置姿勢を補正されたローカル座標系 L におけるROVの位置ベクトルは次式で示される。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} {}^L\mathbf{P}_{ROV} \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{USBL}\mathbf{P}_{ROV} \\ 1 \end{pmatrix} \\ {}^L\mathbf{P}_{ROV} &= \mathbf{R} \cdot {}^{USBL}\mathbf{P}_{ROV} \end{aligned} \quad (2.6)$$

この場合、 xy 平面上のROVの位置はローカル座標系原点からの相対位置としてメートル単位で表される。なお、左肩の添え字 L はローカル座標系を表している。

当該システムにおいては、通常利用時は任意の点を原点とするローカル座標系の利用を想定しているが、USBL固定局であるトランシーバの設置方位の真北補正が必要である。この真北補正のためには方位計が不可欠であるが、磁気方位計で計測した磁北とその偏角補正では、局地的な磁気異常の影響で十分な補正ができない現象が確認されている。詳細は4.1節で述べるが、その対策としてローカル座標系を利用した運用の場合であっても、トランシーバの設置方位はGPS方位計で計測することとした。

また、GPS方位計の副次的な効果として、方位計の設置位置を測位可能であることから、ローカル座標系の原点位置を世界座標系における絶対位置として把握することができる。この結果、式(2.1)から(2.5)を利用することで、構造物下にあるROVの絶対位置を、世界座標系におけるROVの位置として算出することが可能となった。

当該システムにおいては、ローカル座標系と世界座標系を自由に選択可能であり、これらは点検結果の利用形態に合わせていずれかを選択すれば良い。すなわち、点検位置を直感的かつ直接的に利用したい場合にはローカル座標系を選択すると良い。一方、市販の汎用的なGIS等のアプリケーションとの連携を想定する場合は、それらとより親和性の高い世界座標系を選択すれば良い。

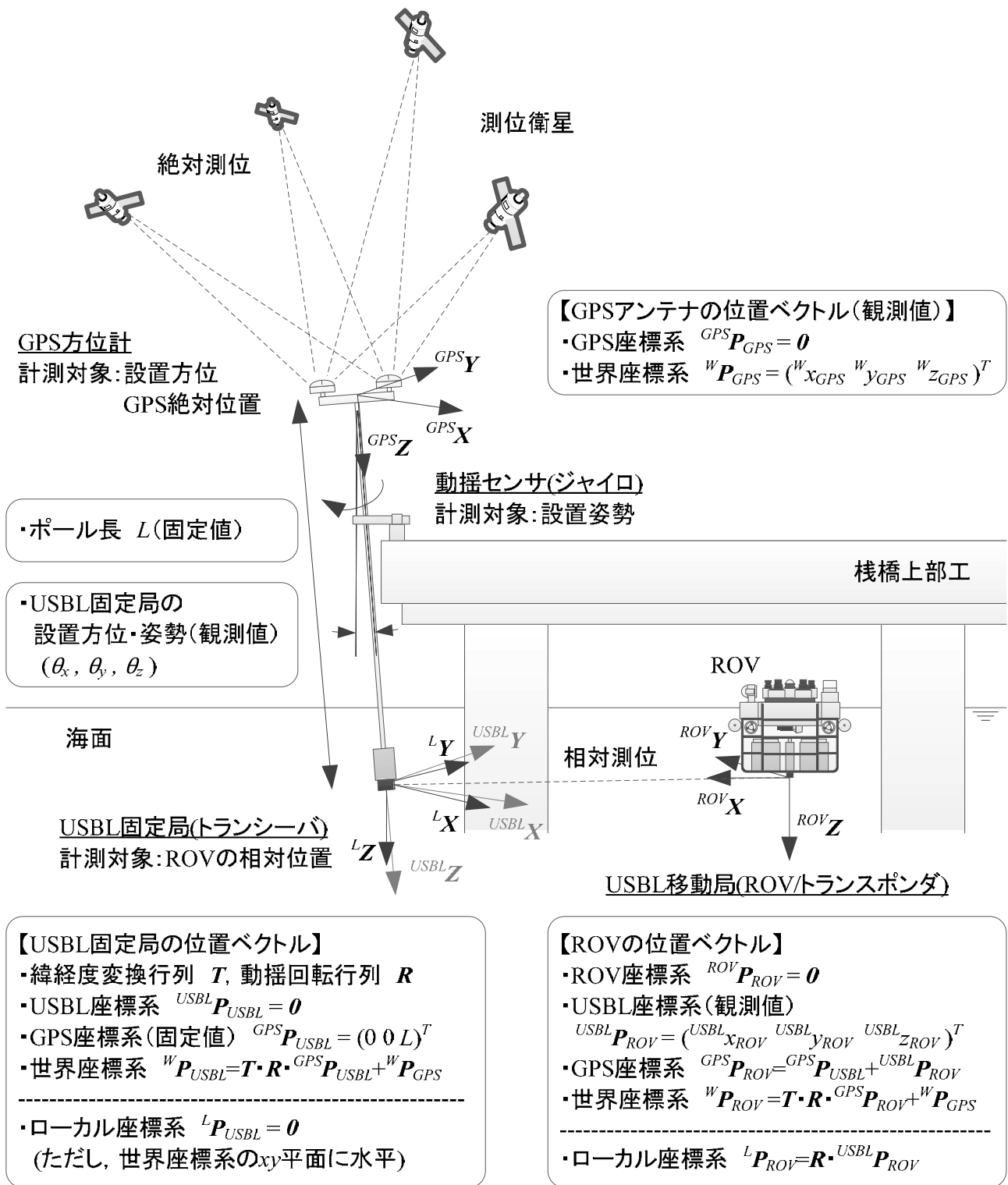


図-2.9 測位情報の中継による栈橋下での測位
(各座標系と位置ベクトルの表記)

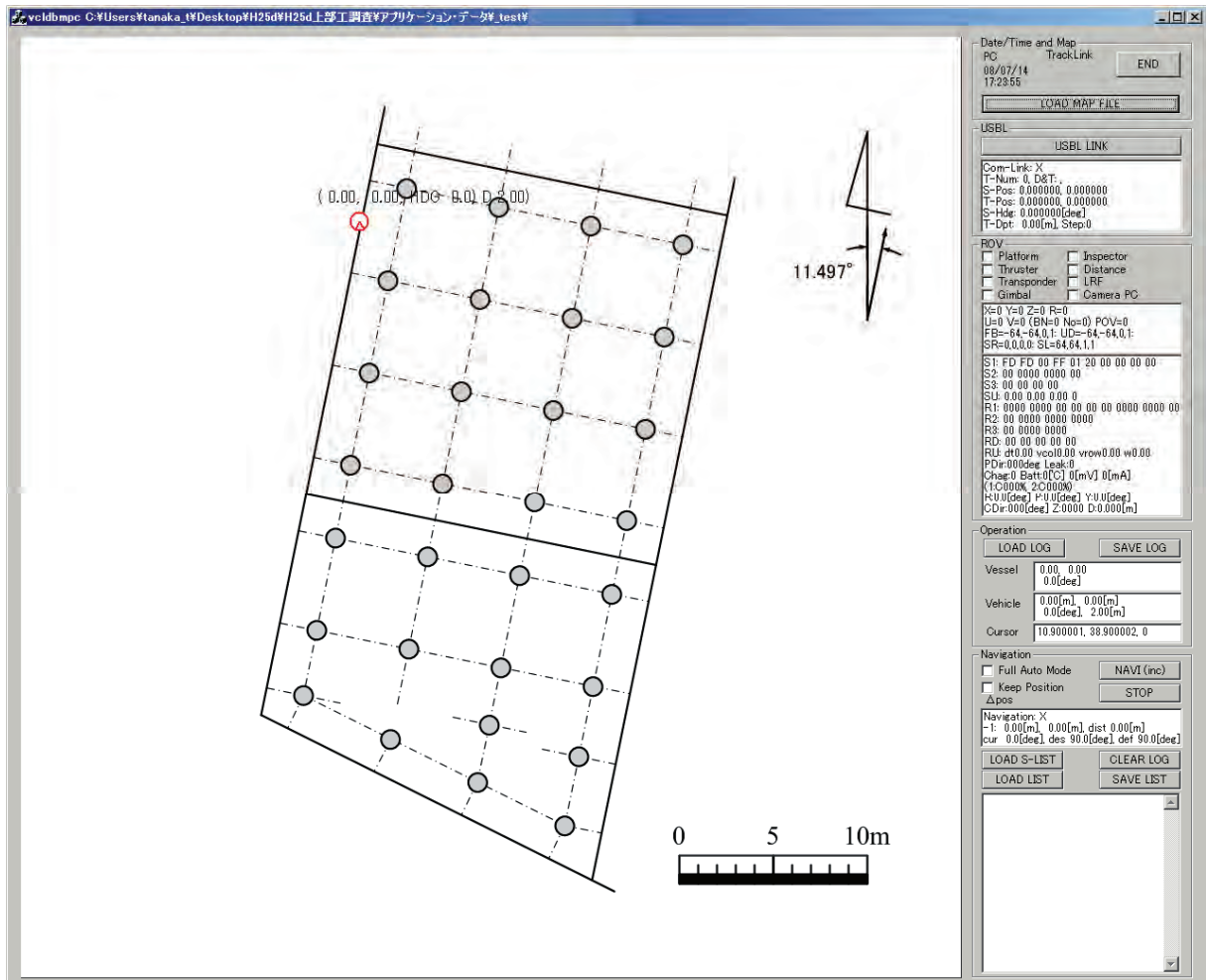


図-2.10 操作/制御用 PC 上で動作するソフトウェア

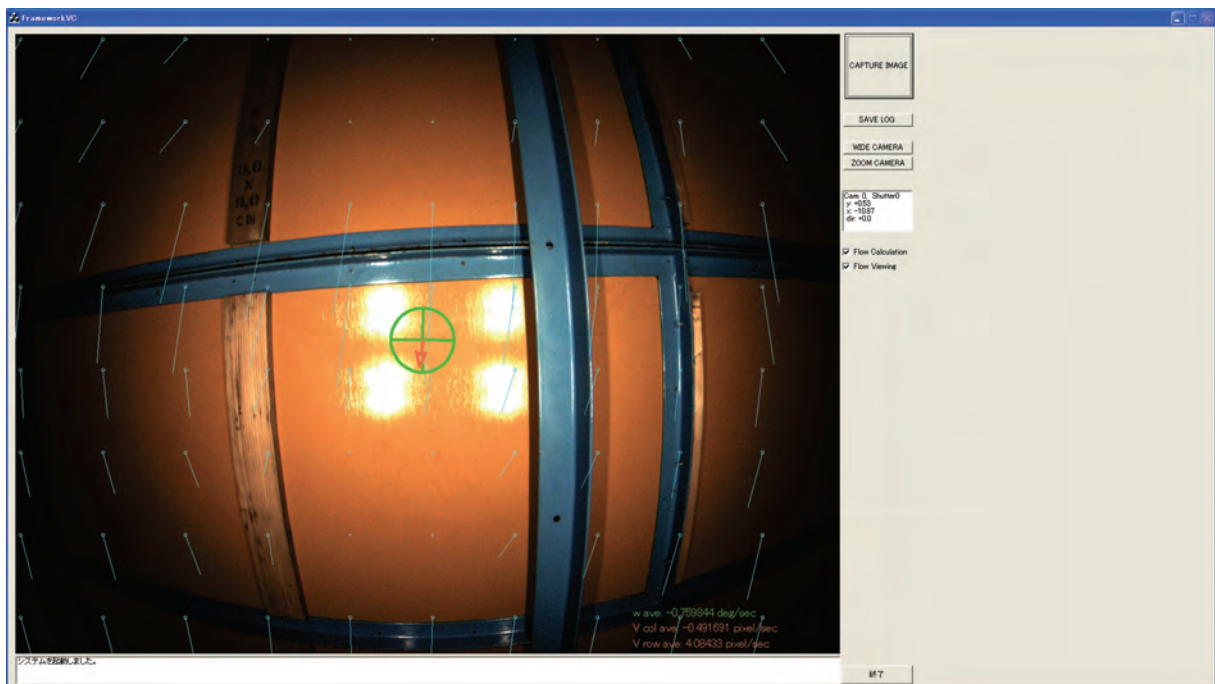


図-2.11 計測/観測用 PC 上で動作するソフトウェア

(2) ソフトウェア

ここでの運用支援機能とは、主に前項で取得される点検装置の位置情報を利用して、本ソフトウェア上に構築された遠隔操作支援機能と、点検位置情報の管理機能を指す。本項ではソフトウェアの体裁について記述し、機能については3.2節で実証試験の結果を通して詳述する。

① 操作/制御用PC上で動作するソフトウェア

画面左側に1000×1000pixelサイズの地図を表示し、固定局と移動局(ROV)を表示する(図-2.10)。画面の右側は上段から、「LOAD MAP」ボタンで左側に表示する地図画像を読み込む。USBLグループの「USBL LINK」ボタンでTrackLinkからの測位情報の受信開始/終了を行う。ROVグループの各チェックボックスはそれぞれの電源コントロールである。Operationグループの「LOAD LOG」ボタン、「SAVE LOG」ボタンはそれぞれ移動軌跡の読み込みと記録ボタンである。Navigationグループの「LOAD S-LIST」ボタンは撮影点リストの読み込み、「CLEAR LOG」ボタンは読込んだ移動軌跡と撮影点リストの消去である。

② 計測/観測用PC上で動作するソフトウェア

画面左側に上方撮影カメラの画像をリアルタイムで表示する(図-2.11)。画面の右側は上段から「CAPTURE IMAGE」ボタンで画像を記録する。次に、「WIDE CAMERA」ボタンと「ZOOM CAMERA」ボタンで画面左側に表示するカメラ画像を切り替える。チェックボックス「Flow Calculation」と「Flow Viewing」でオブティカルフローの計算と表示のON/OFFを行う。なお、「SAVE LOG」ボタンでオブティカルフローのログの記録開始/終了を行う。

オブティカルフローを利用した運動推定の詳細は、測位補完の可能性と合わせて4.1節(2)項の③で詳述する。

3. 水槽および現地実証試験

3.1 水槽での動作確認試験

試作した栈橋上部工点検用ROV試験機を用いて水中作業環境再現水槽にて各部の動作確認を実施した。ここでは遠隔操作によるROV操縦と床版裏撮影機能の確認を行った。

写真-3.1に水槽での動作確認試験の様子を示す。ここでは、遠隔操作によりROVを杭間隔5m四方の栈橋模型の下に進入させ、その床版裏を撮影した。

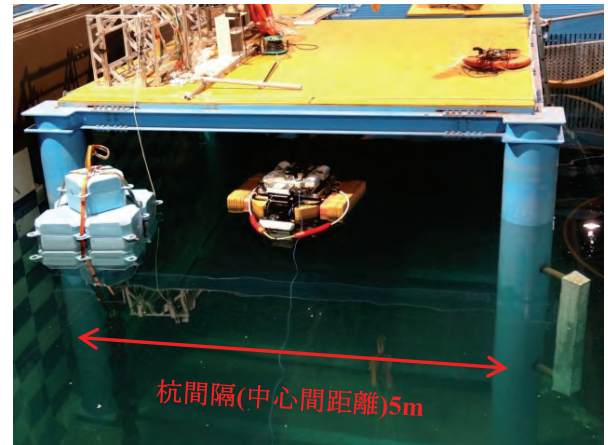


写真-3.1 水槽試験の様子

写真-3.2に本試験でROVが撮影した床版裏の超広角カメラ画像とズームカメラ画像を示す。なお、ズームカメラでの撮影時にはレーザーマーカを照射した。



a) 超広角カメラ画像



b) ズームカメラ画像

写真-3.2 栈橋模型の床版裏の撮影

また、音響測位の確認も行い、水槽の壁からの多重反射等の影響で測位結果にばらつきが見られたが、トランシーバとトランスポンダ間の超音波の送受を確認できた。

3.2 現地実証試験

平成26年2月10～13日の期間に、供用中の栈橋において、当該試験機を用いた栈橋上部工調査の現地実証試験を実施した。ここでは装置の機能的な観点のみから試験結果を述べ、ROVが撮影した画像の点検診断への適用性の評価や運用上の留意点については付録1で取りまとめた。

(1) 測位装置設置・撤去

ここでの測位装置は、栈橋下でROVの測位を行うための音響測位装置である。本調査に用いたROV用の測位装置は、次の写真に示すように栈橋前面に設置する必要があったため既設の車止めを利用して設置した(写真-3.3)。



写真-3.3 測位装置の設置状況



写真-3.5 ケーブル繰り出し状況

(2) ROVによる栈橋上部工調査試験

① ROVの投入と揚収

本調査試験に用いたROVの総重量は約230kgであるため、写真-3.4に示すように投入はクレーン付きトラックによってROVを海面まで吊降ろし、着水後に待機していた船外機船にてフックを外した。調査完了後は、船外機船にて再びフックを掛けて吊上げて揚収した。



写真-3.4 ROVの海上への吊降ろし

② 栈橋上部工調査試験

ROVの操作は、栈橋上に設置した操作機器を用いて実施した。操作画面には、ROVの位置情報、ROVの進行方向および上方の映像(連続静止画像)が表示され、操作はこれらの情報に基づいて実施した。なお、本調査に用いたROVは画像を伝送するためのLANケーブルが陸上制御機器との間で接続されているため、このケーブルを繰り出



写真-3.6 ROVの陸上制御機器

すための作業員を配置した。

ここでは、陸上からの操作によってROVを栈橋下へ進入させてその栈橋上部工下面の撮影を行った。栈橋下では太陽光がほとんど遮られているため、操作および撮影時は前方と上方のLED照明を点灯して実施した。写真-3.5に調査時のケーブル繰り出し状況を示し、写真-3.6にその際の陸上制御器の配置例を示す。

(3) 調査試験の結果

ROVを遠隔操作にて栈橋上部工下まで誘導し、床板裏の撮影を行う調査の実証試験を実施した。ここでのROVの誘導は、その進行方向と上方カメラ画像に加えて、地図上に示される自機の位置情報のみに基づいて遠隔操作を行った。調査試験の範囲は、16m四方の栈橋上部工1スパン分とした。写真-3.7に実証試験の状況を示す。



a) 栈橋外から撮影



b) 栈橋下での様子

写真-3.7 ROVによる調査状況

また、写真-3.8に、ROVで撮影した栈橋上部工下面側の画像例を示す。なお、ここでは計測／観測用PC上で動作するソフトウェアにより、調査時に取得した各撮影画像には、表-3.1に示すフォーマットでファイル名が自動的に付与される。これは、栈橋上部工下面の撮影画像に測位情報等を関連付ける点検位置情報の管理機能であり、この機能により大量に取得される撮影画像の撮影日時や撮影場所などを容易に特定可能とするものである。

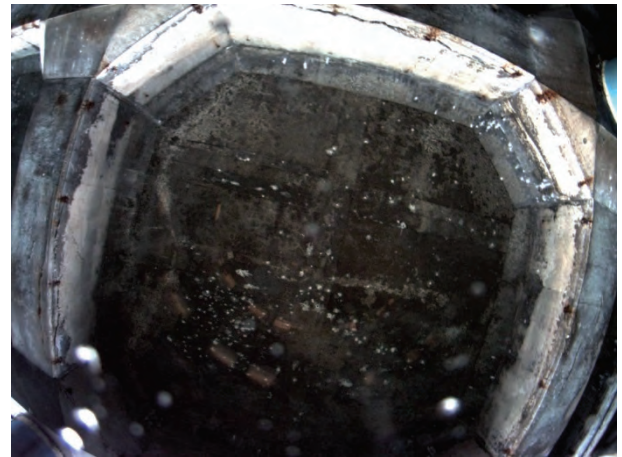


写真-3.8 ROVによる撮影画像例
(140213,104652,0546,-1.66,+10.19,+143.0,0.jpg)

表-3.1 ファイル名の付与フォーマット

年月日	時刻1 時分秒	時刻2 ミリ秒	位置 南北	位置 東西	撮影 方位	カ メ ラ
yyymmdd	hhmmss	xxxx	xxx.xx	xxx.xx	xxx	0/1

※各項目をカンマで区切って接続し、拡張子にjpgを付与

図-3.1に調査時に記録したROVの移動軌跡(移動ログ、ライン)と撮影点(点列)を示し、写真-3.9に本調査試験で取得して位置情報を付した写真群の一部を示す。

本調査試験では、ROVは419秒で16m四方の調査範囲の全域にわたる移動を完了し、任意の位置の栈橋上部工下面の画像を取得した。移動軌跡は1秒毎に1点を記録し、ここでは419点を記録した。なお、本試験の際には測位異常点が4点記録されたが、図-3.1上ではそれらを除いて表示した。測位異常点については4.2節の(1)項で詳述する。

また、図-3.1において撮影点のリストは最下段のエディットボックスに表示され、スクロールバーにより全点を参照可能である。なお、最上段に表示された撮影点は地図上に赤点で強調表示される。

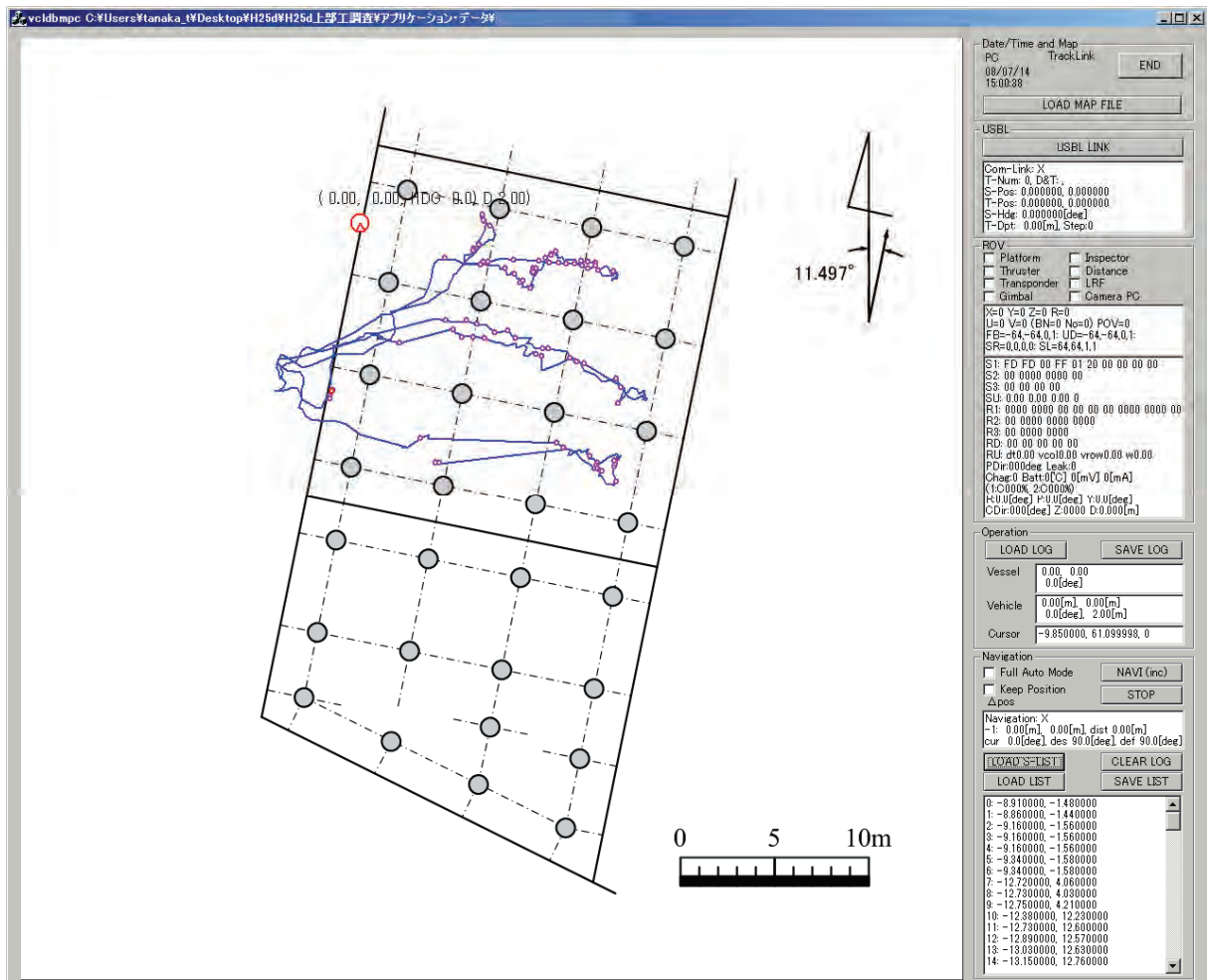


図-3.1 栈橋下における移動軌跡と撮影点

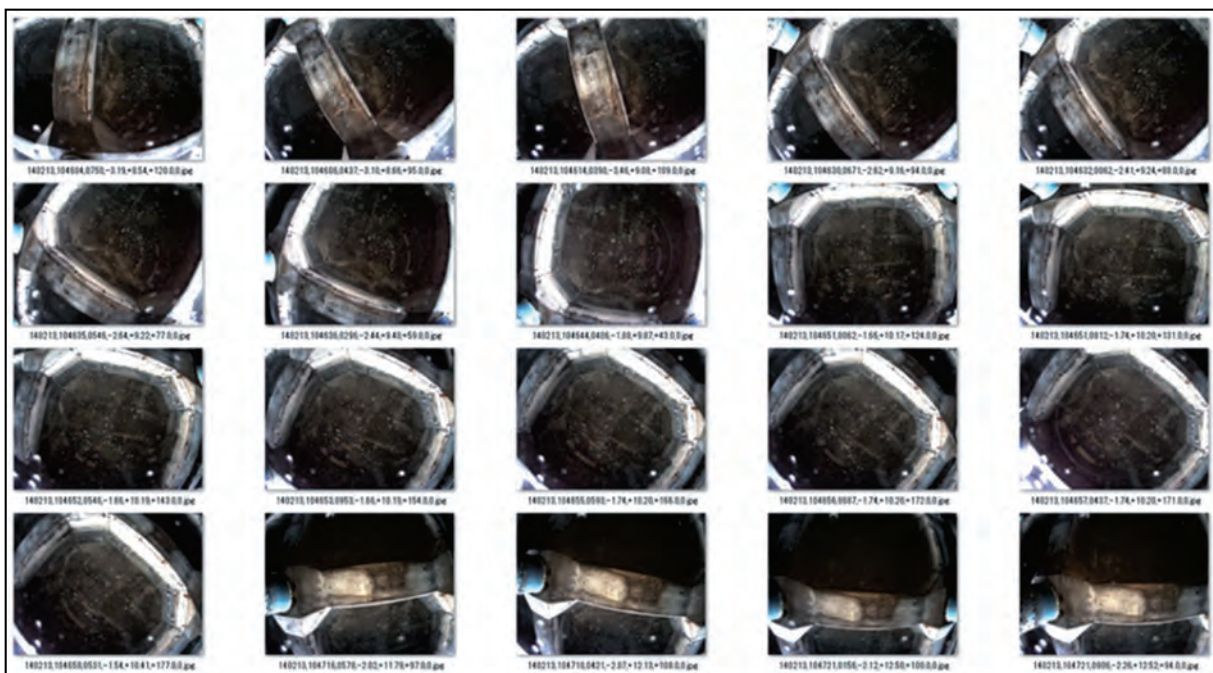


写真-3.9 本調査試験で取得して位置情報を付した写真群の一部

なお、本調査試験においては、ローカル座標系の原点に写真-3.3で示した測位装置のポールが設置されており、その前面からはROVは栈橋下に進入できない。そこで、本試験では隣の杭列からROVを栈橋下に進入させ、杭を1本かわしてからポールの裏側の杭列にROVを進入させた。

通常では困難なこれらの一連の遠隔操作は、ROVのカメラ画像と地図(図面)上に表示される自機の位置情報や方位情報のみに基づいて容易に実施することができた。

4. 技術的課題とその対策案

実証試験の結果、提案手法により、「栈橋下でのROVの測位と地図表示」、「これに基づく遠隔操作によるROVの誘導と操縦」、「床板裏と梁の撮影」が可能であることを示した。

そのうえで、試験の過程で確認できた技術的な課題は大別して3種類であった。それらの考える要因と対策案を表-4.1に挙げる。

表-4.1 技術的課題の想定される要因と対策案

項目	内容	
(1) ROV方位のかく乱	要因	・磁気異常点の影響による乱れ
	対策案	・方位ジャイロの適用
(2) 音響測位の測位異常点	要因	・鋼管の影になったため
	対策案	・移動ログの逐次表示 ・他のセンサ情報による測位の補完
(3) 撮影画質の低下	要因	・カメラのダイナミックレンジが狭く(白飛び、黒潰れ)、感度や露出の設定が難しい ・照明の拡散不足による画面中の白飛びと周辺部の黒潰れの同時発生 ・水滴等による画像の乱れ
	対策案	・カメラ方式の変更 ・照明の拡散度合の強化 ・撥水・親水被膜の形成 ・動揺補正

以下にこれらの課題の要因の推察と対策案を詳述する。

4.1 ROV方位のかく乱

(1) 要因の推察

ROV自身の方位はプラットフォームの下面に取り付けられた磁気方位計によって計測されている。しかしながら、ROVの方位がかく乱されて実際の方位と異なる表

示・記録がなされる場合が多々あった。この原因として考えられるのは、栈橋に含まれる大量の鉄筋や鋼管などの鉄材が磁気異常点となってROVの磁気方位計に悪影響を及ぼしていることである。実際、固定局として設置した測位基準点にも磁気方位計を取り付けていたが、同様に方位が最大で40deg程度ずれる現象が確認されたことから、場所に起因する要因が推察される。

(2) 対策案

ROV方位のかく乱は操作に混乱を招くだけでなく、画像の方向判別に支障をきたすため、この問題の解決は重要である。固定局については磁気に依らないGPS方位計に変更したところ不具合が解消したことから、ROVについても磁気に依らない方位計への換装により状況の改善が見込まれる。ROVは栈橋下にあつてGPS方位計は利用できないため、高精度な方位ジャイロに換装する対策が考えられる。表-4.2に高精度な方位ジャイロの一例を示す。

表-4.2 日本航空電子株式会社JG-35FD(Digital)

主要諸元

項目	内容	
計測範囲	±200deg	
角度レンジ	±180deg	
角速度レンジ	±200deg/s	
周波数応答	20Hz(可変)	
分解能	角度	0.01deg
	角速度	0.01deg/s
直線性	≤±0.1%FS	
バイアス安定性	≤3deg/h(全作動温度環境において1σ)	
角度ドリフト	≤0.5deg/h(温度安定環境において1σ)	
電源電圧	DC12V	
消費電流	1A(最大)	
外形寸法	L86mm×B86mm×H76mm	
質量	≤600g	
機能	1軸, 角速度出力, 角度出力, RS-232C	

長時間使用する方位計として特に注視すべき性能は角度ドリフト特性であり、本器の場合は1時間あたり0.5deg(1σ)のドリフトに抑えられている。また、運動を伴う移動体での使用においては、その運動に応じて誤差の累積状態が変化する。よって、オペレータによる運用状況に照らし合わせて角速度レンジや周波数応答が十分高いものを選択する必要がある。これらの性能については試用などにより事前にチェックすることが望ましい。

4.2 音響測位の測位異常点

(1) 要因の推察

試験結果を例に取り、音響測位の測位異常点について

推察する。図-4.1にその移動ログとそこで観測された測位異常点を示す。

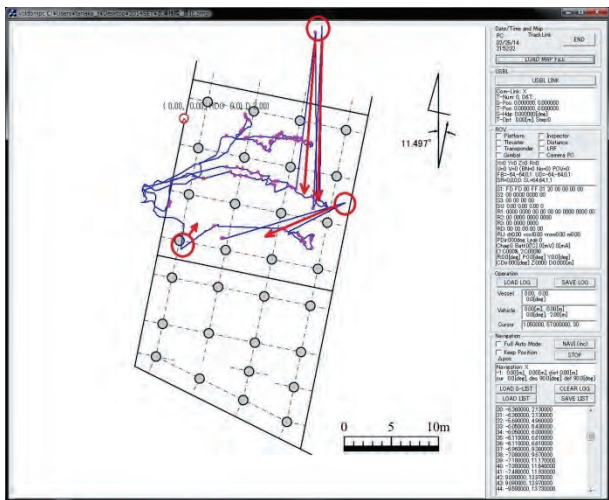


図-4.1 移動ログと測位異常点

ROVの移動は連続的であることから、移動ログの不連続点は測位異常点とし、丸で囲んだ4点が該当する。移動経路の連続性を勘案すれば、矢印で指し示した位置の周辺にROVの真の位置があったと推測できる。図-4.2にROVの推定位置とトランシーバの位置関係を示す。

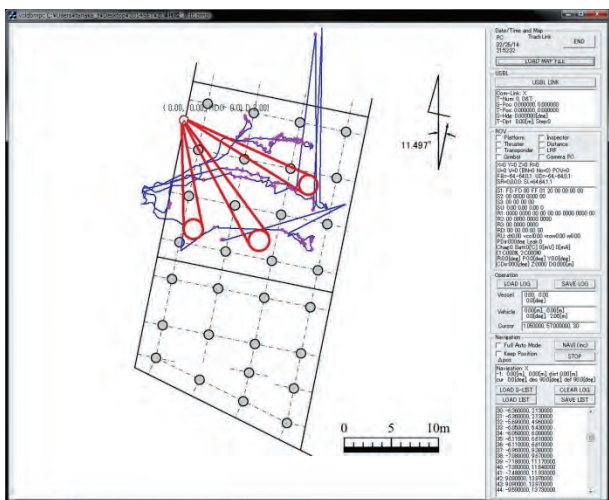


図-4.2 測位異常点と鋼管杭の位置関係

この図から測位異常点はトランシーバとトランスポンダ(ROV)の間に鋼管杭が入ってしまい、ROVがそれらの陰になる位置にある場合であることがわかる。しかしながら、この図を見る限りではROVが杭の影に位置した場合に必ずしも測位異常となるとは限らず、超音波の回折現象によるものと考えられるが、測位が可能な場合がほと

んどであった。この移動ログは1秒間隔で419点を記録したもので、それらのうち明らかな異常点は4点のみであった。これは全体の0.95%に相当し、エラー率としてはそれほど高くはない。以上の結果から、ROVが複数の鋼管の陰となる場合や鋼管の真後ろに位置する場合に測位異常となりやすい傾向が読み取れる。

(2) 対策案

全体として異常点の発生ケースは多くはないが、運用時において考えられる測位異常点の影響は、操作中のROVの位置を見失うこと、また撮影位置が不明となることである。この影響を低減する方法としては次の3つの対策が考えられる。

- ① 移動ログを運用中にリアルタイムでオペレータに提示することで、前後の移動ログの位置関係から正しいROV位置をオペレータに想起させる。
- ② 他のセンサ情報等を利用して補完する(測域センサ)
- ③ 他のセンサ情報等を利用して補完する(オプティカルフロー)

① 移動ログの逐次提示

この方法は単純な方法であり、現在記録後にのみ提示している移動ログを、点検作業中にもオペレータに逐次提示することで実現可能である。オペレータは地図上に表示されている自機の位置の連続性から、現在表示されている自機の位置の確からしさを判断することができるものと考えられる。また、位置の連続性を評価の指標として異常点を自動で判別し、オペレータに警告を提示することも可能と考えられる。

② 測域センサによる測位の補完の可能性

構造物下で運用中のROVの絶対測位方法としては、民生品の応用の範囲ではGPSと組み合わせた音響測位以外は現段階では考えにくい。しかしながら、障害物との相対位置を計測する方法は比較的容易に実現可能である。例えば、鋼管杭の位置は実証試験時に使用した地図でも示した通り、施工図面等の情報から既知の絶対位置として利用することが可能である。そこで、栈橋上部工撮影試験装置の項で示した測域センサなどによって得られるROVの周辺情報から鋼管杭との相対位置を算出し、既知の地図とのマップマッチングが可能となれば、ROVの絶対位置を推定することができると考えられる。図-4.3に現地試験の際に試用した測域センサによる鋼管杭(杭間隔4m)の観測例を示す。

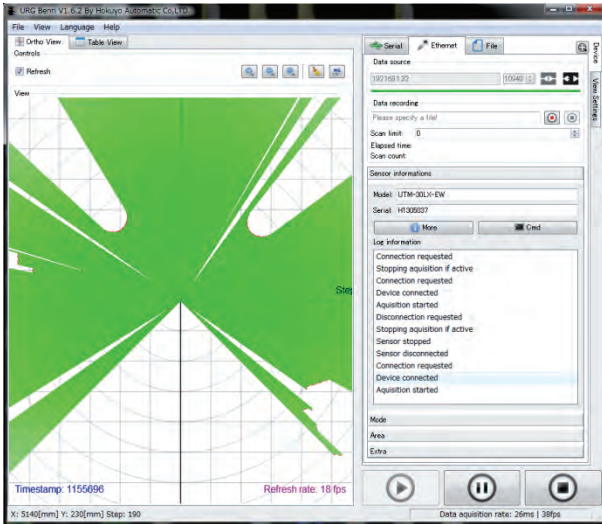


図-4.3 測域センサによる周囲状況の観測例

現状では測域センサの観測情報は操作中のオペレータに提示するのみとなっているが、前図に示した通り、鋼管杭からの反射は明確に捉えることができています。しかしながら、情報としては無数の反射点の点列の集合があるのみであるため、この状態では位置の特定には至らない。以降に測域センサを利用した相対測位情報からROVの絶対位置を推定するアイデアを示す。

- 無数の反射点から同一杭からの反射点をグループ化して分類する。
- 同一グループの点列の集合から杭の相対位置を推定する(ROVの杭との相対位置が分かる)。
- 反射で捉えた杭を地図上の杭位置にマッチングさせる。
- ROVの絶対値が推定される

上記のa.やb.の処理で多少誤差があっても結果に大きな影響は出ないが、c.の処理では隣の杭とマッチングしただけで測位結果が大きく異なってしまう。そこで、ROV自身の周辺にある杭を限定する、つまりどの杭に囲まれたブロックにROVはいるのか、といった大まかな測位情報は重要である。この情報に対して精度は大きく問われないため、音響測位のほか、構造物へのRFIDの埋め込みや画像による識別等の利用も考えられる。マッチングの処理自体は、ROV方位と杭1本以上との相対位置、あるいは杭3本以上との相対位置を利用し、地図上の杭位置との相関をとるなどしてマッチングを図ることができる。また、SLAM(Simultaneous localization and Mapping)的な手法によって位置を推定することも考えられる。

ただし、測域センサの現場での利用時には、センサ表

面に付着した水滴や汚れに起因すると想定される欠測が見受けられた。センサ表面の異物に起因する欠測はレーザの到達距離から容易に判別してオミット可能ではあるが、既設物の一部との誤認がないよう留意が必要である。

③ オプティカルフローによる測位の補完の可能性

床版裏を撮影するための上方撮影カメラは逐次画像取り込むことができることから、その画像を利用して自身の運動を推定する方法が考えられる。ROVの運動と画像変化は密接に関係しており、ここではオプティカルフローで画像変化を捉えることとする。オプティカルフローとは画像フレーム間の各画素の位置変化をベクトルで表現したものである。ただし、ここでは計算量低減のため、画像をいくつかのセクションに分割して、その代表点のフローのみを計算した。以下に、ROVの運動を2自由度の並進運動と1自由度の旋回運動で表現する二次元平面内の運動と規定し、床版裏の連続撮影画像のオプティカルフロー群からその並進運動と旋回運動を分離する手法について述べる(図-4.4は運動推定の模式図)。

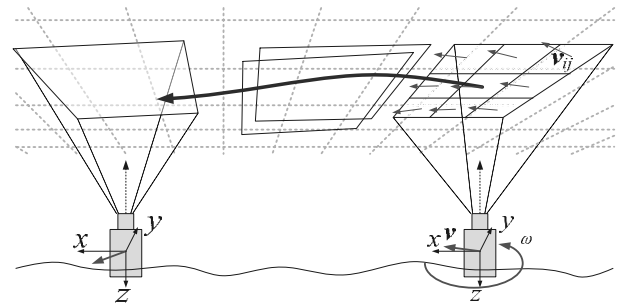


図-4.4 オプティカルフローを用いた運動推定

旋回運動を伴わない並進運動の場合、全てのセクションの速度ベクトルは等しくなる。一方、並進運動と旋回運動の組合せからなる一般運動は、セクション毎に異なるフローベクトルで示される。これらの特性を整理すると、各々のフローベクトルは画像中心の並進運動の速度ベクトルと画像中心周りの旋回運動の接線方向の速度ベクトルの合成ベクトルとなる。すなわち、各セクションのフローベクトル v_{ij} の総和をとることでその旋回運動成分を相殺することができることから、画面全体の並進運動の速度ベクトル v は次式で推定できる^{3),4)}。

$$v = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j v_{ij} \quad (4.1)$$

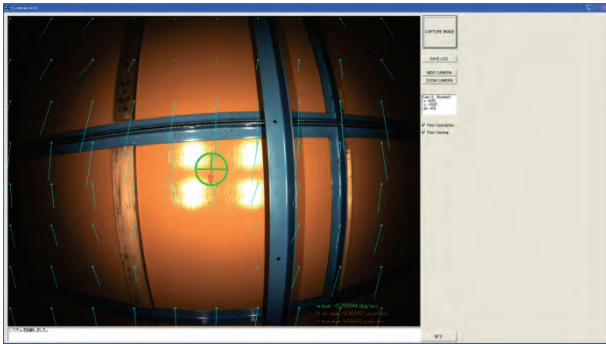
i, j : 行と列の要素番号

n : セクション分割数

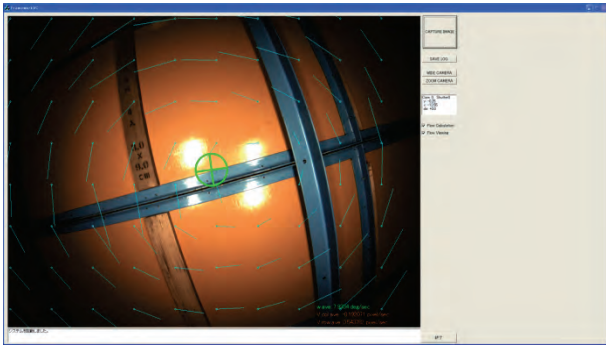
また、各セクションのフローベクトル v_{ij} から前式で推定された並進運動の速度ベクトル v を減ずることで、画像中心周りの旋回運動の接線方向速度ベクトルのみを抽出できる。よって、画像中心周りの旋回角速度 ω は次式で推定できる。なお、 r_{ij} は画像中心から各セクション中心までの距離である。

$$\omega = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j \frac{v_{ij} - v}{r_{ij}} \quad (4.2)$$

床板裏を撮影した画像のオプティカルフローを算出すると写真-4.2のようになる。



a) 直進時



b) 旋回時

写真-4.2 オプティカルフローの計算例

上段はROVが栈橋模型の下を船首方向にほぼ直進している状況である。短い線分がそれぞれの代表点のフローベクトルを表しており、一様に画像下方を向いて画像が画面の上から下へ流れている状況と一致する。下段はROVが栈橋模型の下で時計回りに旋回している状況である。フローベクトルは旋回中心の上下と左右で反対方向を向いており、画像が旋回する状況と一致する。

式(4.1)を用いて算出した画面全体の並進速度は、画面中

央の矢印で提示した。また、式(4.2)を用いて算出した画面全体の旋回速度は画面中央の十字の傾きで提示した。オペレータはこれらの情報を参照しながら、ROVの運動状態を推測することが可能であり、この機能までが現段階で実装されている。

ここではさらに、測位情報の補完を目的として、これらの運動情報を利用して移動経路を推定し、その描画を試みた(写真-4.3、図-4.5)。

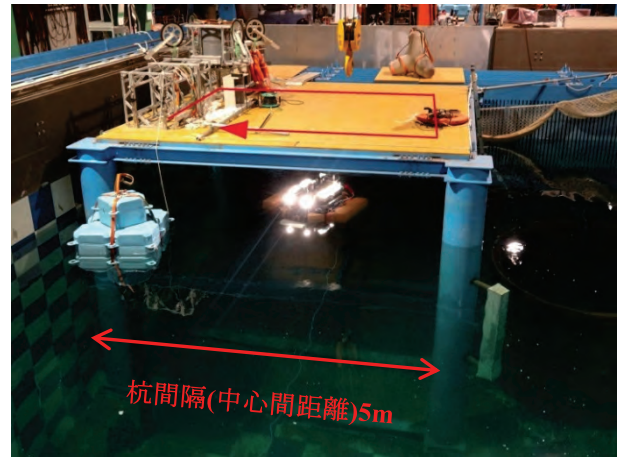


写真-4.3 移動経路

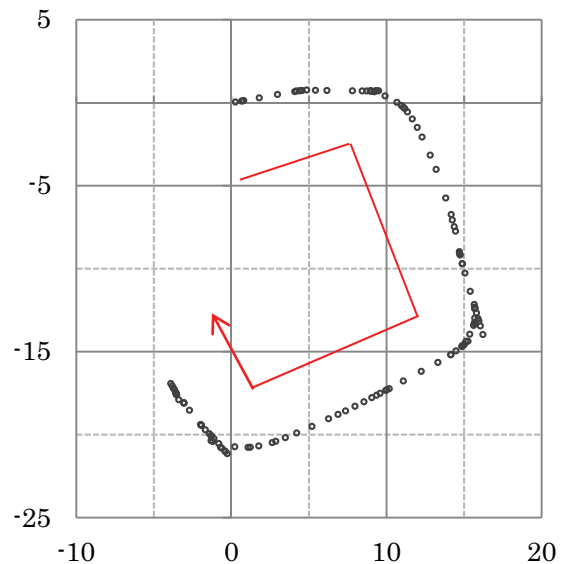
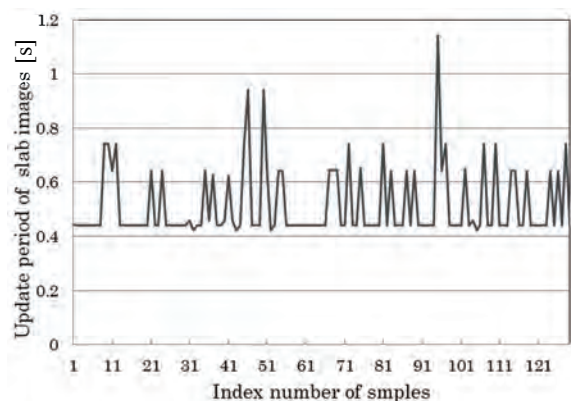


図-4.5 オプティカルフローによる移動経路の推定結果[pixel]

オプティカルフローによる移動経路の推定結果はその形状的特徴をよく表している。反面、レーザーマーカーから算出された画像スケール0.579mm/pixelを考慮すると、実際の移動距離と合致しないことを確認した。これは経

路が閉合していないことから推測できるように、フローベクトルの絶対値の算出精度が影響していると考えられる。その計算精度は画質によるところが大きく、模様の少ない画像や照明むらがある画像ではその変化が捉えにくく誤差が大きくなる傾向にあった。また、このケースにおける平均計算周期はリアルタイム画像処理の負荷から0.514秒と遅く、これも誤差の累積に影響したと考えられる(図-4.6)。以上の結果から、画質向上と計算周期の短縮は精度の改善に有効であり、計算周期の短い音響測位の補完用途では累積誤差は少ないと想定される。



Update period; Ave.0.514s (Min.0.424, Max.1.143)

Total number of samples; 129

図-4.6 画像の更新頻度

4.3 撮影画像の画質低下

(1) 要因の推察

実証試験の際、カメラ画像に白飛びや黒潰れが発生し、カメラ感度や露出を適正に設定することが困難な場合があった。これは屋外の強い太陽光に影響されたものと考えられ、その影響を受ける栈橋の入口部でアイリスを合わせてしまうと奥の暗部で画像が黒潰れする傾向にあり(写真-4.4)、逆に、暗部でアイリスを合わせてしまうと入口部で白飛びしてしまう傾向にあった(写真-4.5)。これは、カメラのオートアイリス機能不足と、カメラのダイナミックレンジが狭いことが要因と考えられる。

とりわけ、照明の強く当たる画像の中央部と照明が届きにくい周辺部とが一つの画像内にある場合、非常に困難な状況が想定される。このことはカメラの特性によるものだけでなく、照明の拡散不足も要因と考えられる。

また、運用中にカメラの前面に水滴や汚れが付くことが時折あり、以降の撮影画像に写り込むなどして悪影響を及ぼすことがあった(写真-4.6)。



写真-4.4 白飛び画像の例

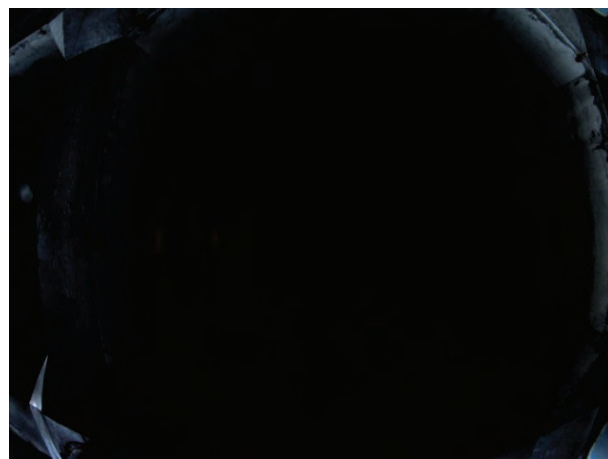


写真-4.5 黒潰れ画像の例

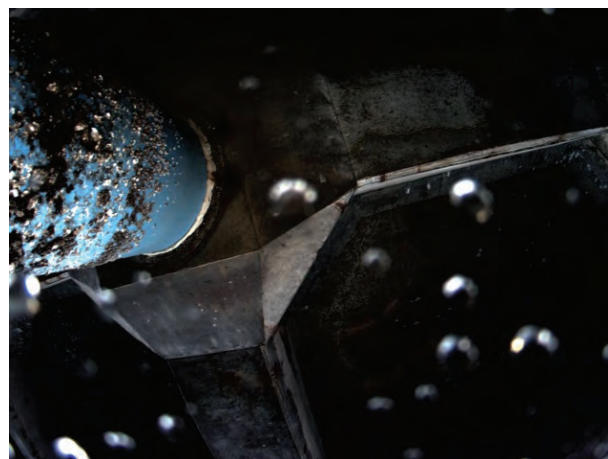


写真-4.6 水滴が付着した画像の例

(2) 対策案

撮影画像の画質低下の要因は数多く想定され、これらの要因が重なって重度の画質低下を招く場合が想定され

る。これらの対策案としては以下の方法が考えられる。

- ① カメラ方式の変更
- ② 照明の拡散度の強化
- ③ 撥水・親水性被膜の形成
- ④ 動揺補正

① カメラ方式の変更

試験機ではGigE Vision規格の工業用カメラBASLER社aceシリーズacA2500-14gcを採用した。これはGigE規格のLAN接続のみで利用できるため組み込み用途には適していたが、屋外での利用については特に考慮されていない。また、小型で高画素である反面、1/2.5型と受光面積は小さく、受光面の感度は特別高いものではなかった。さらに、シャッター方式がRolling Shutterであるため、動体の撮影にはあまり適していない。よって、これらの問題を解決するカメラ方式への変更が最も容易かつ効果的な対策であると考えられる。

カメラの受光感度を上げるためには、画素ピッチを増やすことが最も単純な方法であるから、同じGigE Visionカメラであっても、画素数を減らすかイメージセンサ自体のサイズを大きくすることが有効である。あるいは、受光感度の高い特殊なイメージセンサを持ったカメラを選択する方法もある。受光感度が向上すれば、少なくとも暗部方向のダイナミックレンジが広がることとなるため、画質の改善が期待できる。

なお、個々のレンズの光学的特性や性能に起因する樽型や糸巻型収差に代表される幾何学的な画像の歪みは、レンズの設計が難しい広角レンズに出やすい傾向にある。これらの収差は、撮影画像からクラックや剥離等を検出することに対しては大きな影響を及ぼさないと考えられるが、つなぎ写真の作成時には対応点の探索を困難にする可能性がある。しかしながら、収差に関する情報は一般的に既知であるかキャリブレーションによって把握することが可能であり、市販のアプリケーションでこれらの情報を利用して容易に補正することが可能である。

また、民生用デジタルカメラの性能は既に高いレベルに達しているため、それらをROVのシステムに組み込む方法も考えられる。しかしながら、それらは単体で完結している製品が多く、レリーズ操作を除いてシャッタースピードや絞り、フォーカス操作などを遠隔で行える製品は皆無である。中には無線LANなどを介して遠隔で基本的な操作を行うことができるものもあるものの、それらは特殊なカメラであることが多く、当該点検装置の主カメラとして利用することは容易でない。

ところで民生用の製品として、デジタル一眼レフカメラ(DSLR)をPCに接続してPCからカメラを操作するアプリケーションが提供されている。栈橋上部工点検用ROV試験装置を例にとれば、CAM-CON PCにDSLRを接続し、同PCに本アプリケーションを導入して計測/観測用PCからリモートデスクトップで本アプリケーションを操作する方法が考えられる。この場合、接続したDSLRのほとんどの機能を遠隔地から利用することが期待できる。なお、PCから操作可能なカメラ機能の範囲は異なるものの、同様のアプリケーションはいくつかのカメラメーカーから提供されており、用途に応じて選択することが望ましい。

② 照明の拡散度の強化

上方撮影カメラでの撮影時の照度を確保するために、照明方向を上方に向けたLED照明8灯を装備しているが、これらは発熱と消費電力が低い反面、光の直進性が比較的高く広範囲の照明には工夫が必要である。既に照明の前面ガラスにはディフューザ(拡散版)を取り付けて1灯当たり60degまで照射範囲を広げている。ディフューザは照明から離れた位置にあるほど効果が大きくなるため、さらに照明から数百mm程度離れた位置に新たなディフューザを加えることで、より高い拡散効果が得られると考えられる。また、LED照明を筐体の外側にさらに傾けて設置することで、さらに広範に照射が可能となる。

③ 超撥水・超親水性被膜の形成

カメラ前面のガラス面に付着する水滴や汚れが、撮影画像の品質を著しく低下させてしまうことは既に述べた。この解決には、ワイパーなどによるガラス面の清掃機能の具備が有効ではあるが、より簡易な方法としては、水滴や汚れがガラス面の一所に留まらないようにすることで解決できると考えられる。その方法としては次の2種類考えられる。

- a. ガラス面に超撥水性の被膜を形成して水滴との接触角を大きくし、水滴が流れ落ちるようにする
- b. ガラス面に超親水性の被膜を形成して水滴との接触角を小さくし、水滴がすぐに潰れるようにする

ガラス形状や使用環境に応じてどちらが適しているのかを判別する必要があるが、通常の平板ガラスにおいては水滴を積極的に移動させる外力が見込めないため、超親水被膜が適していると考えられる。一方、水滴を吹き飛ばすブローアとの組み合わせや球面ガラスの採用などにより水滴を移動させる外力が見込める場合は、超撥水性被膜が機能すると考えられる。

④ 動揺補正

ROV本体の動揺はカメラの「手振れ」に相当することから、撮影画像の画質低下を抑えるためにはROV自体の動揺を低減することが望ましい。当該試験機は半没水型としていることから、通常の船体と比較して浮心-重心間の距離が大きく取っており、形状的には安定的なものとなっている。さらに積極的に動揺低減を図る方法としては、いわゆる動揺補正がある。ここでは栈橋上部工撮影試験装置を載せて姿勢を自動で水平に保つ自動雲台を試作したので試験を行った。図-4.7に自動雲台を示す。

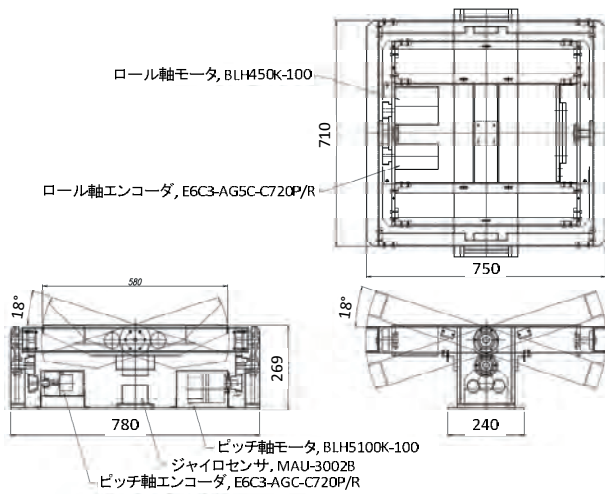


図-4.7 自動雲台(約40kg)

自動雲台の可動範囲はRoll方向, Pitch方向ともに $\pm 15\text{deg}$ である(リミット; $\pm 18\text{deg}$)。プラットフォームの上面と接合する自動雲台の底面にはジャイロが搭載されており、これによってプラットフォーム, すなわち船体の動揺を計測する。自動雲台はその逆相の傾斜を発生させて自動雲台の上面の姿勢を水平に近づけようとするものである。ここでの補償器は次式のとおりである。

$$\begin{aligned} u_x &= k_{p_x} e_x + k_{d_x} \dot{e}_x \\ u_y &= k_{p_y} e_y + k_{d_y} \dot{e}_y \end{aligned} \quad (4.3)$$

ただし、

- u_x, u_y : モータの制御量
- e_x, e_y : プラットフォームと自動雲台の姿勢の偏差
- k_{p_x}, k_{p_y} : 比例ゲイン
- k_{d_x}, k_{d_y} : 微分ゲイン

添え字の x, y は各々 Roll, Pitch 軸周りの別を示す。

制御量 u はそれぞれ PWM (Pulse Width Modulation) へと変換されて自動雲台のモータ各軸の速度指令となる。この補償器は比例制御と微分制御を組み合わせた PD 制御補償器である。比例制御は目標値と現在値の偏差の大きさに応じてフィードバック制御を行い目標値に近づける制御であるが、比例制御だけでは応答特性の改善が期待できないため、偏差の微分値に応じたフィードバック項を設け、予測制御的な動作を実現するものである。

自動雲台を搭載した ROV を水槽に投入し、波高 100mm, 周期 2.4 秒の造波を行って、自動雲台による Pitch 軸の動揺補正を試みた(写真-4.8, 写真-4.9, 図-4.8)。

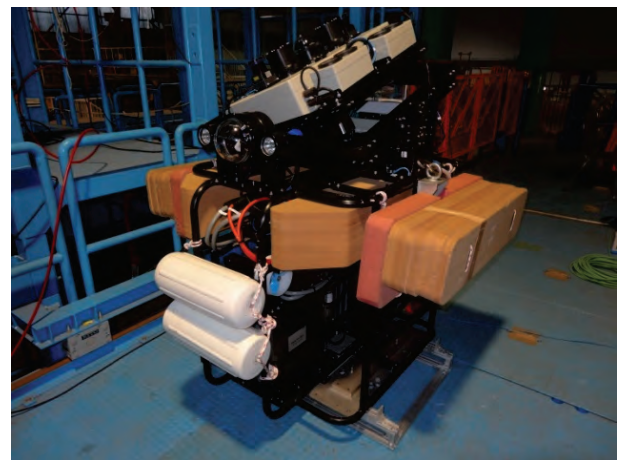


写真-4.8 試験機への自動雲台の搭載状況(約230kg)

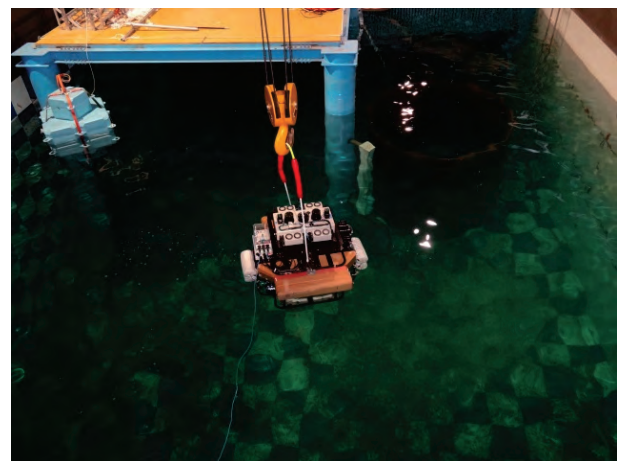


写真-4.9 動揺補正試験

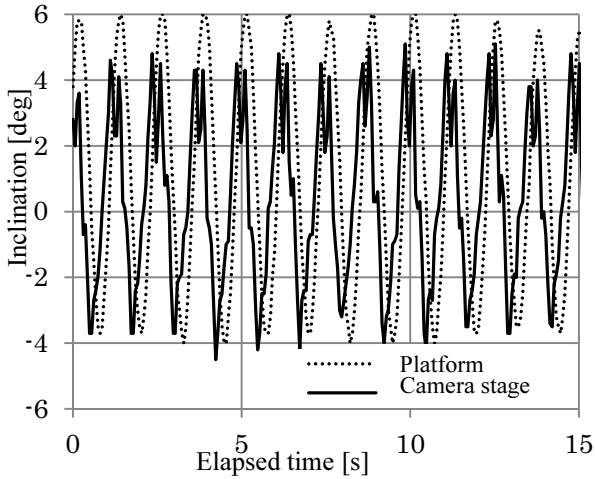


図-4.8 動揺補正効果

なお、ここでのゲインの設定値は次式のとおりである。

$$k_{py} = 2.5, k_{dy} = 0.1 k_{py} \quad (4.4)$$

結果、プラットフォームのPitch軸姿勢が-4deg~+6degであるのに対し、自動雲台のPitch軸姿勢は-4deg~+4.5deg程度であり、-15~20%程度の動揺補正効果を示した。

なお、ここでのROVの全質量は約230kgであり、動揺補正される部位の質量は上部工撮影試験装置約25kgに自動雲台の取り付け部を加えて約35kgである。これが全質量に占める割合は約15%であり、この質量の絶対値および全質量に対する相対値を低減させれば、一層の補正効果が期待できる。また、現状では、装置保護の観点からゲイン設定範囲が制限されており、現状以上の最適化はできなかったが、この制限がなくなればさらなる動揺補正効果が見込まれ、撮影画像の品質改善が期待できる。

5. まとめ

栈橋上部工下面の目視点検を目的とし、その画像を水中部無人で連続的に取得する点検装置として、栈橋上部工点検用ROV試験機を試作した。これは半没水型のROV型試験機であり、陸上から遠隔操作にて運用可能な水中部無人の点検装置の試験機である。

また、本試験機上にその運用支援機能を構築した。その一つは、見通しの効かない栈橋下において点検装置の測位と運動計測を実現し、オペレータにこれらの情報を提示してその操作を支援する遠隔操作支援機能である。もう一つは、ここで取得した測位情報を栈橋上部工下面の撮影画像に関連付ける点検位置情報の管理機能である。

さらに、これまでに述べた提案手法について、実海域

において実証試験を実施した。ここではROVがリアルタイムに取得する画像や映像に加えて、遠隔操作支援機能が提供する構造物下のROVの位置情報や運動状態をオペレータに提示し、杭が錯綜する栈橋下を遠隔操作にて航走させた。その結果、オペレータはROVを杭に衝突させたりテザーケーブルを絡ませたりすることなく、移動ログを記録した419秒の間に16m四方の1スパンのほぼ全域にわたってROVを移動させ、栈橋上部工下面の任意の箇所の写真を取得することができた。また、点検位置情報の管理機能によって、撮影した多量の写真に所定の書式で付帯情報を自動的に関連付け、点検時刻や点検位置情報の管理を試みた。

以上の結果から、栈橋上部工下面の目視点検を目的とした栈橋下での点検装置の運用に対して、提案する遠隔操作支援機能や点検位置情報の管理機能が有効に機能することを確認し、これらの運用支援機能を具備する提案手法の妥当性を示した。

同時に、当該提案手法を一層確実な点検手法へと改善するための技術的課題を提示した。これらの技術的課題については、実証試験を通して発生が確認された、あるいは想定されたものであり、これらの要因の推察と対策案を提示した。

6. おわりに

本稿は、栈橋上部工下面の目視点検を水中部無人で実施するための新たな手法を提案するものであり、主にその提案手法を実験的に検証する初期の取組みについてその過程を取りまとめたものである。その結果、ここで得られた知見は、これまで困難であった栈橋下における水中部無人の点検作業の実施に対して、当該提案手法が有力な解決策になり得ることを示すものであった。

なお、実証試験については、本編における記述に加えて「実海域における調査事例(実証試験)」として付録1に取りまとめた。また、実証試験の結果から得られた知見に基づき、「<資料> ROVを用いた栈橋上部工下面部の点検診断マニュアル作成のための要件」を取りまとめ、付録2として付した。付録2については、今後の研究開発の進展や議論を通して修正や追記が想定されるものであるが、資料として周知することで当該新技術の導入に関する議論の活性化を期待するものであり、ひいては当該新技術の一般化や普及の一助となることを期待するものである。

(2014年12月12日受付)

参考文献

- 1) 加藤直三, 山崎智弘, “ROV を用いた広域の海底面の空間線量分布と計測位置のリアルタイム・モニタリングシステム”, 作業船, No.312, pp.27-30, 2013.
- 2) 加藤直三, 鈴木博善, 浅川賢一, 田中敏成, 吉江宗生, 中村昌彦, 清水悦郎, “海中ロボットによる放射線計測の方法と現状”, 第 24 回海洋工学シンポジウム論文集, pp.OES24-012, 2014.
- 3) 田中敏成, “栈橋床版下部点検装置のための遠隔操作支援システムの提案,” *ROBOMEC 2009* 講演論文集, pp.1P1A-17, 2009.
- 4) 田中敏成, “錯綜構造物下における水中ビークルの遠隔操作支援システムの開発” 第 12 回建設ロボットシンポジウム論文集, pp.339-344, 2010.

付録 1 実海域における調査事例（実証試験）

1. 目的

ROV を用いた栈橋上部工下面の点検診断手法の実用化に資することを目的とし、実海域において以下の内容を確認するための調査（実証試験）を実施した。なお、実証試験の実施時期は、2014年2月10日から同年2月13日までの4日間であった。

- ① 実海域における ROV の操作性（遠隔操作支援機能）と、位置情報と画像の関連付け（点検位置情報の管理機能）
- ② ROV による栈橋床版下面の画像取得とその評価
- ③ 当該提案手法による栈橋上部工下面の点検診断実施に関する課題の抽出

本付録では、実証試験における調査対象の詳細情報を記載するとともに、上に記した試験の結果について運用性の観点からその評価を行い、主に ROV が撮影した画像の点検診断への適用性の観点からその結果を取りまとめた。なお、これらの試験の結果に基づく試験機の機械的な性能の評価や、その装置構成に起因する技術的な課題とそれらの対策案については本編で取りまとめた。

2. 調査対象施設

表-2.1、図-2.1 および図-2.2 に実証試験における調査対象施設を示す。

表-2.1 調査対象施設の主要項目

項目	内容
構造	直杭式横栈橋
供用年数	36年（実証試験実施時）
水深	-12m
潮位	H.WL +2.4m L.WL ±0.0m

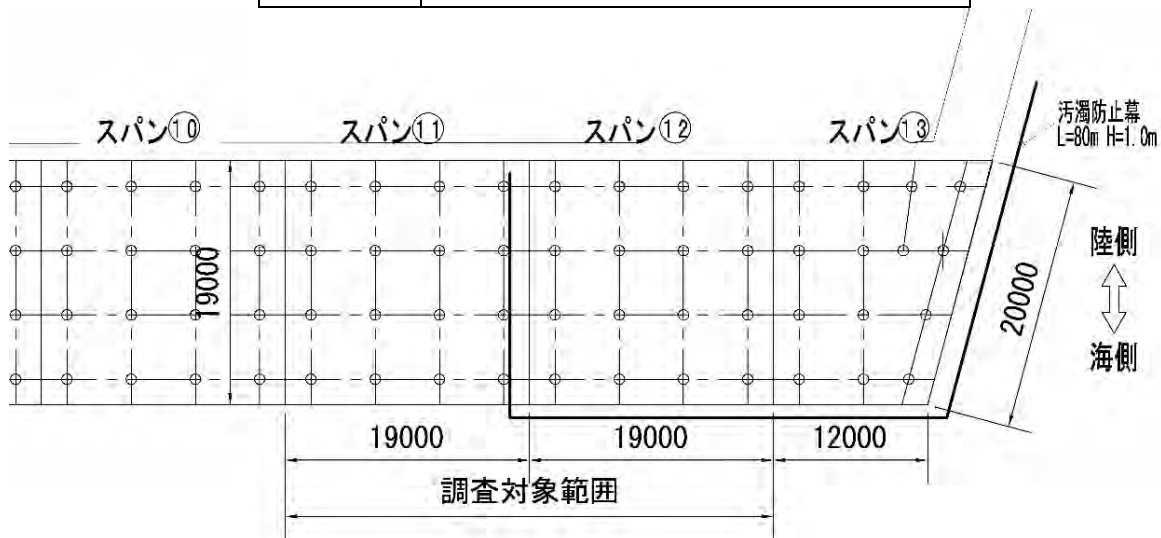


図-2.1 調査対象施設平面図

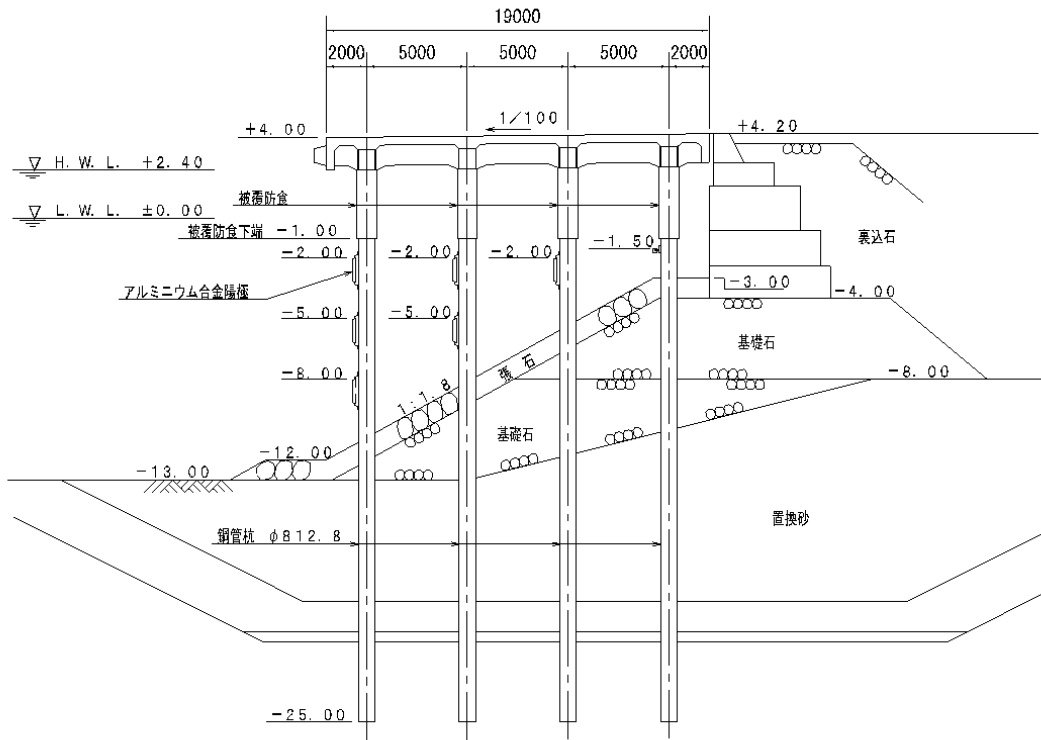


図-2.2 調査対象施設断面図

3. 調査主要機材

表-3.1 に調査のための主要機材を示し、表-3.2 に試験のための補助機材を示す。

表-3.1 調査主要機材一覧

名称	規格	目的	数量
栈橋上部工点検用 ROV 試験機	(独)港湾空港技術研究所	栈橋上部工下面の点検診断	1 基
測位装置	GPS 方位計 磁気方位計 音響測位装置	ROV の調査位置把握	1 式
クレーン付トラック	2.9t 吊 4t 積	ROV 吊降ろし・吊上げ	1 台
船外機船	40 PS 級	ROV 吊降ろし・吊上げの玉掛作業 調査状況監視	1 隻

表 3-2 補助機材一覧

名称	規格	目的	数量
流向流速計	電磁式	海象条件 (表層) 確認	1 基
波高計	水圧式	海象条件確認	1 基
ラフテレンクレーン	25 t 吊	汚濁防止膜設置・撤去	1 台
汚濁防止膜	φ 濁防止, H=1.0 m	静穏状態の再現	80 m

4. 調査内容

4.1 全体フロー

調査の全体フローを図 4-1 に示す。

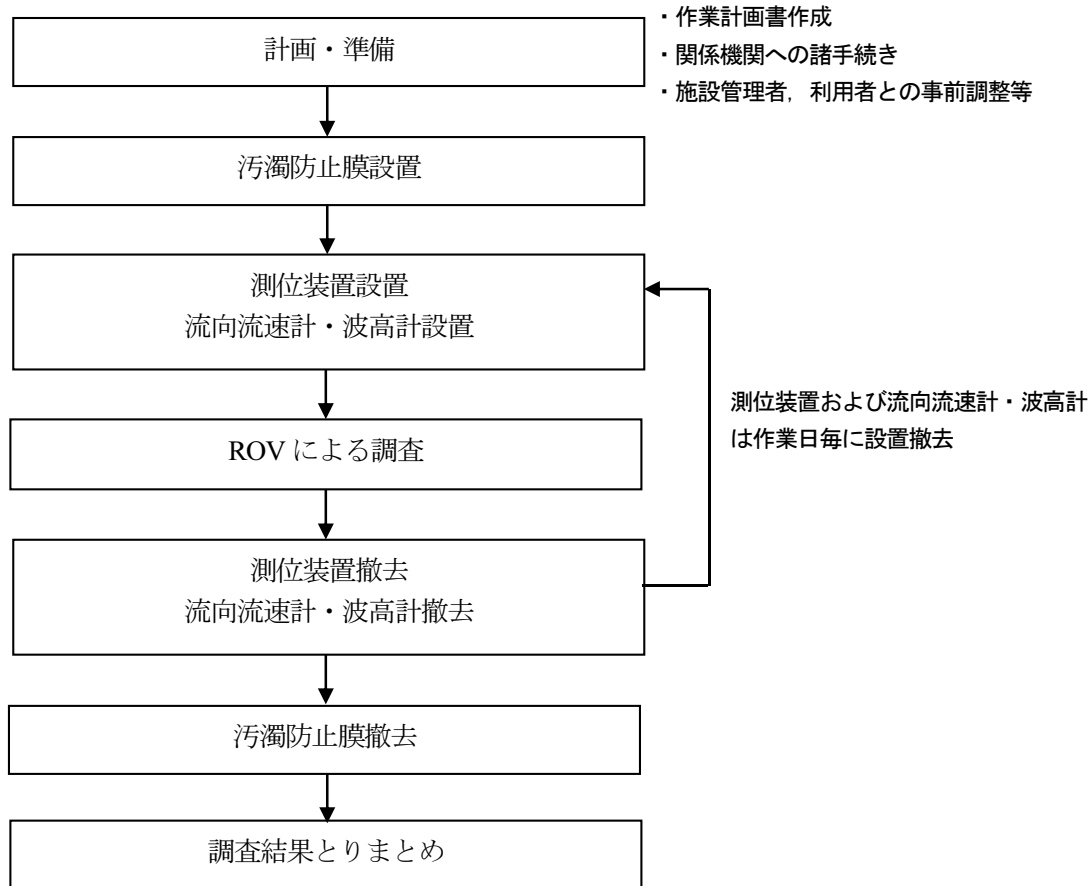


図-4.1 調査手順全体フロー

なお、「汚濁防止膜設置・撤去」、「流向流速計および波高計設置・撤去」については一般事項であるため、ここでは記載を省略する。

4.2 計画・準備

ROV による調査は海上調査であるため、事前に関係機関に対して必要な諸手続きを行うとともに、調査箇所には施設管理者や施設利用者等が存在したため、これらに対しても事前調整や諸手続き等を実施した。なお、本調査では以下に留意して対応した。

- ① 調査対象範囲のおよび岸壁上での作業範囲（資機材の設置箇所等）の明確化
- ② 離接岸船舶の日時の把握

4.3 測位装置設置・撤去

測位装置は、栈橋下で ROV の測位を行うための音響測位装置である。本調査に用いた ROV 用の測位装置は、栈橋前面に設置する必要があったため既設の車止めを利用して設置した。

4.4 ROV による上部工調査試験

(1) ROV 吊降ろし・吊上げ

本調査試験に用いた ROV の総重量は約 230kg であるため、投入はクレーン付きトラックで ROV を海面まで吊降ろし、着水後に待機していた船外機船にてフックを外した。調査完了後は、船外機船にて再びフックを掛けてクレーン付トラックで吊上げて

揚収した。

(2) ROV による調査

ROVの操作は、棧橋上に設置した操作機器を用いて実施した。操作画面には、ROVの位置情報、ROVの進行方向および上方の映像（連続静止画像）が表示され、操作はこれらの情報に基づいて実施した。なお、本調査に用いたROVは画像を伝送するためのLANケーブルが陸上制御機器との間で接続されているため、このケーブルを繰り出すための作業員を配置した。

ここでは、陸上からの操作によって ROV を棧橋下へ進入させてその上部工下面の撮影を行った。棧橋下では太陽光がほとんど遮られているため、操作および撮影時は前方と上方の LED 照明を点灯して実施した。

4.5 調査結果取りまとめ

(1) 調査時の海象条件

調査実施時の海象条件は以下のとおりであった。

③ 潮位 L.W.L+0.8 m (気象庁 HP より)

④ 流向 (表層)

汚濁防止膜内外ともに東西 (岸壁法線直角) 方向の流向が卓越 (観測値)

⑤ 流速 (表層)

平均流速：汚濁防止膜内外ともに約 0.1 m/sec

最大流速：約 0.2 m/sec (観測値)

⑥ 波高 平均波高：約 0.1 m, 最大波高：約 0.3 m (観測値)

⑦ 風向風速 北西および北北西 5.5 m/sec～7.3 m/sec (10 分間平均) (気象庁 HP より)

(2) ROV による調査結果

ROV による撮影画像を整理し、「港湾の施設の維持管理マニュアル」(財団法人 沿岸技術研究センター, 平成 19 年 10 月)に記載のある表 4-1 に基づき、各部材の劣化度判定を試みた。また、本調査箇所は平成 25 年度に目視点検が実施されているため、ROV による調査結果と比較できるように取りまとめを行った。それらの内、代表的な結果を図-4.2 から図-4.5 に示す。

表-4.1 部材の劣化度判定基準

点検項目	点検方法	判定基準
コンクリートの劣化・損傷	目視 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数, 長さ ・かぶりの剥落状況 ・錆汁の発生状況 ・鉄筋の腐食状況	a スラブ： □網目状のひび割れが部材表面の 50%以上ある。 □かぶりの剥落がある。 □錆汁が広範囲に発生している。 はり・ハンチ： □幅 3 mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。 □かぶりの剥落がある。 □錆汁が広範囲に発生している。
		b スラブ： □網目状のひび割れが部材表面の 50%未満である。 □錆汁が部分的に発生している。 はり・ハンチ □幅 3mm 未満の鉄筋軸方向のひび割れがある。 □錆汁が部分的に発生している。

		<p>スラブ：</p> <p>□一方向のひび割れ若しくは帯状又は線状のゲル析出物がある。</p> <p>□錆汁が点状に発生している。</p> <p>c</p> <p>はり・ハンチ</p> <p>□軸と直角な方向のひび割れのみがある。</p> <p>□錆汁が天井に発生している。</p> <p>d</p> <p>□変状なし。</p>
--	--	---

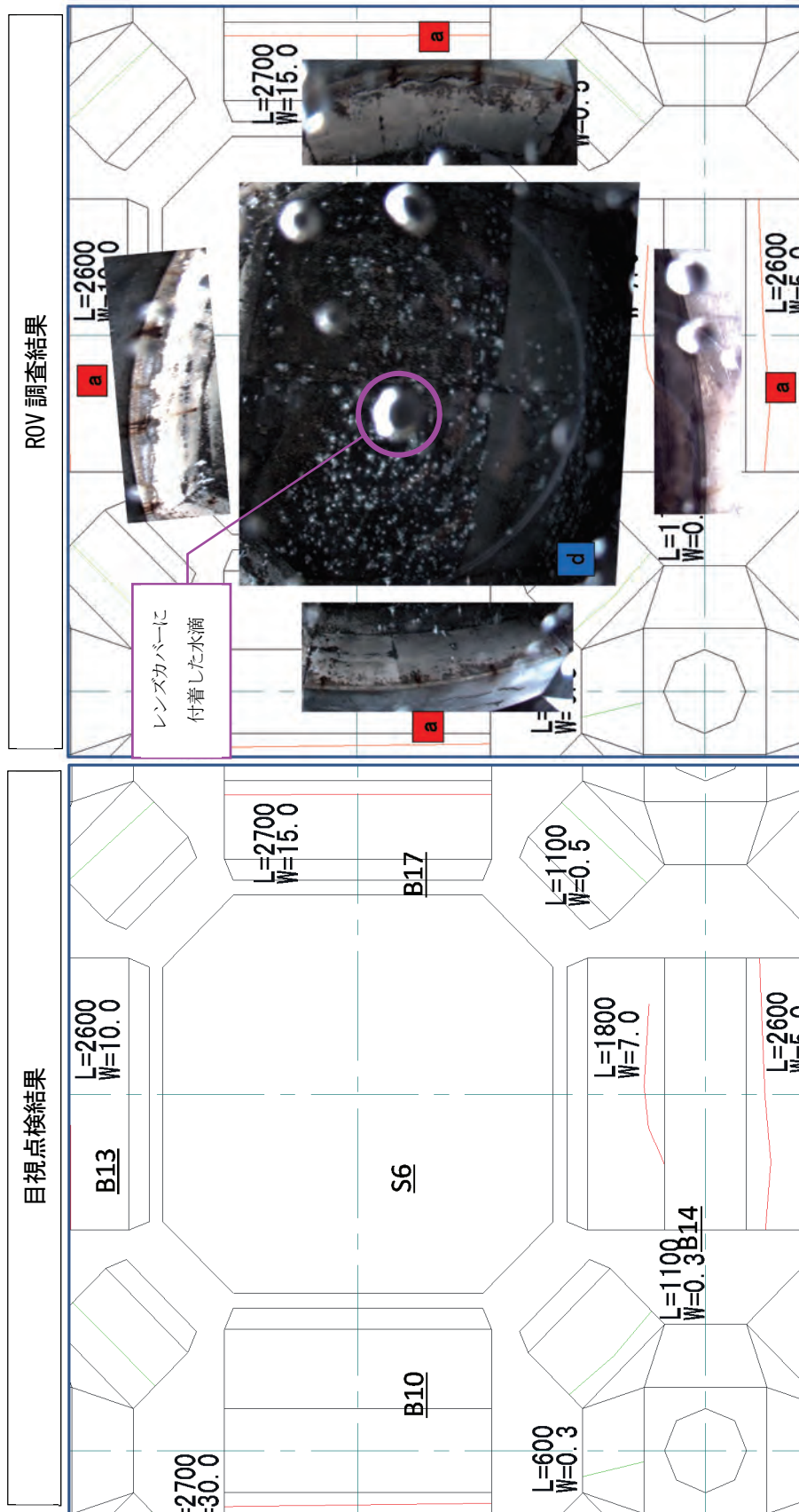


図-4.2 目視点検結果と ROV 調査結果との比較

調査結果1 : ROV 調査結果によって判定できる事例 (汚濁防止膜あり)

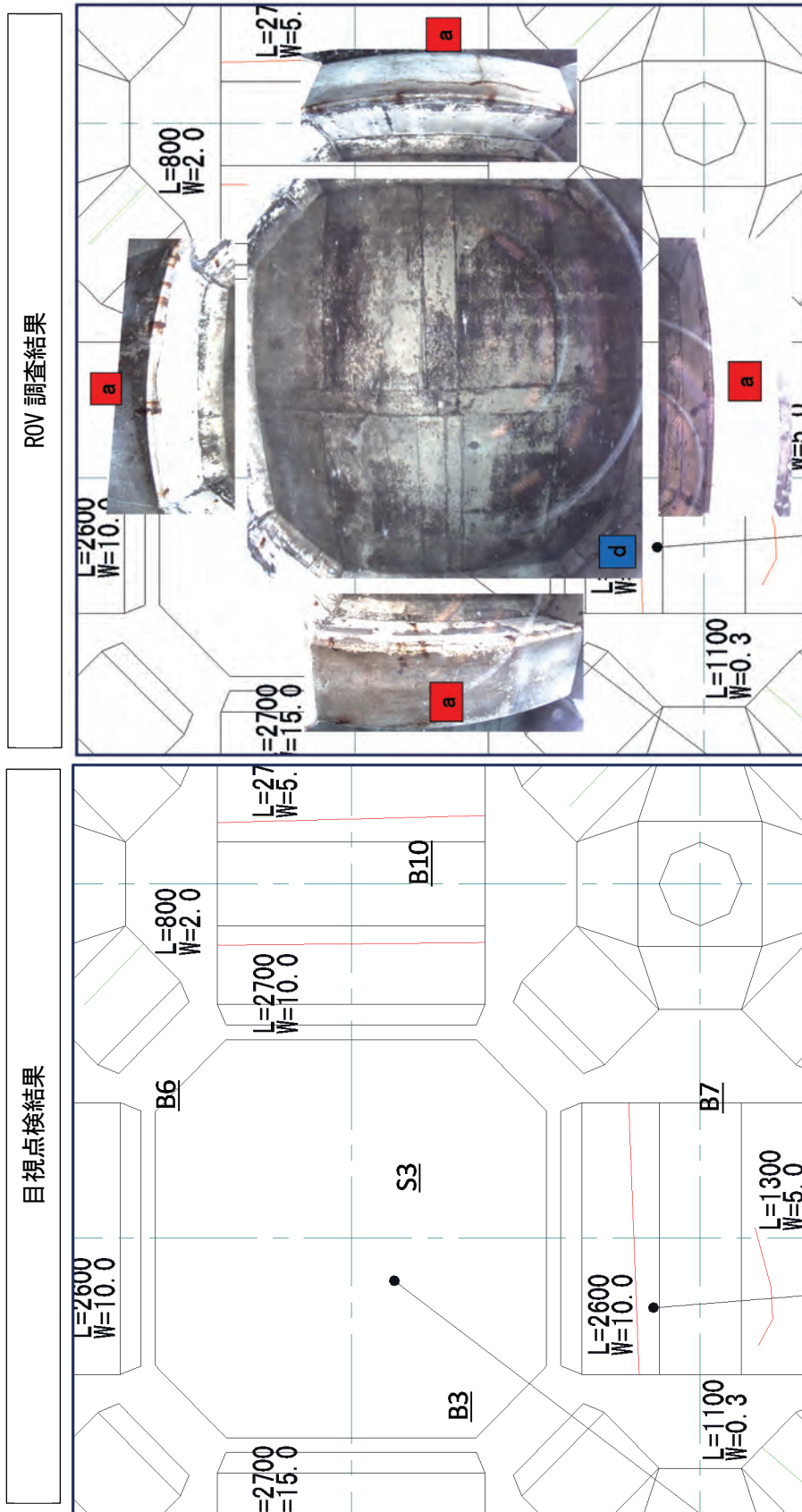


図-4.3 目視点検結果と ROV 調査結果との比較

調査結果 2 : ROV 調査結果によって判定できる事例 (汚濁防止膜なし)

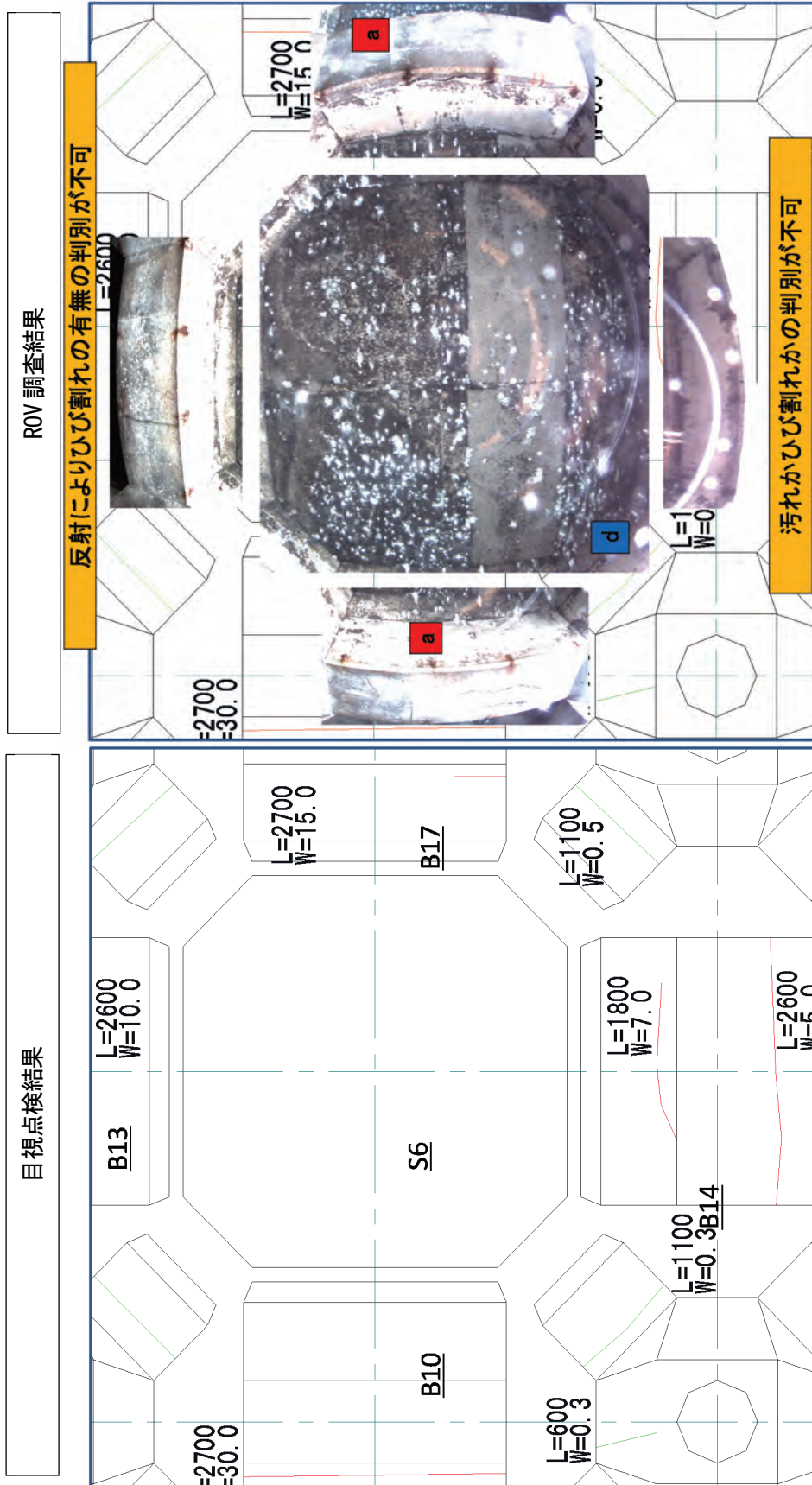


図-4.4 目視点検結果と ROV 調査結果との比較

調査結果 3 : ROV 調査結果によって判定できない事例 (汚濁防止膜あり)

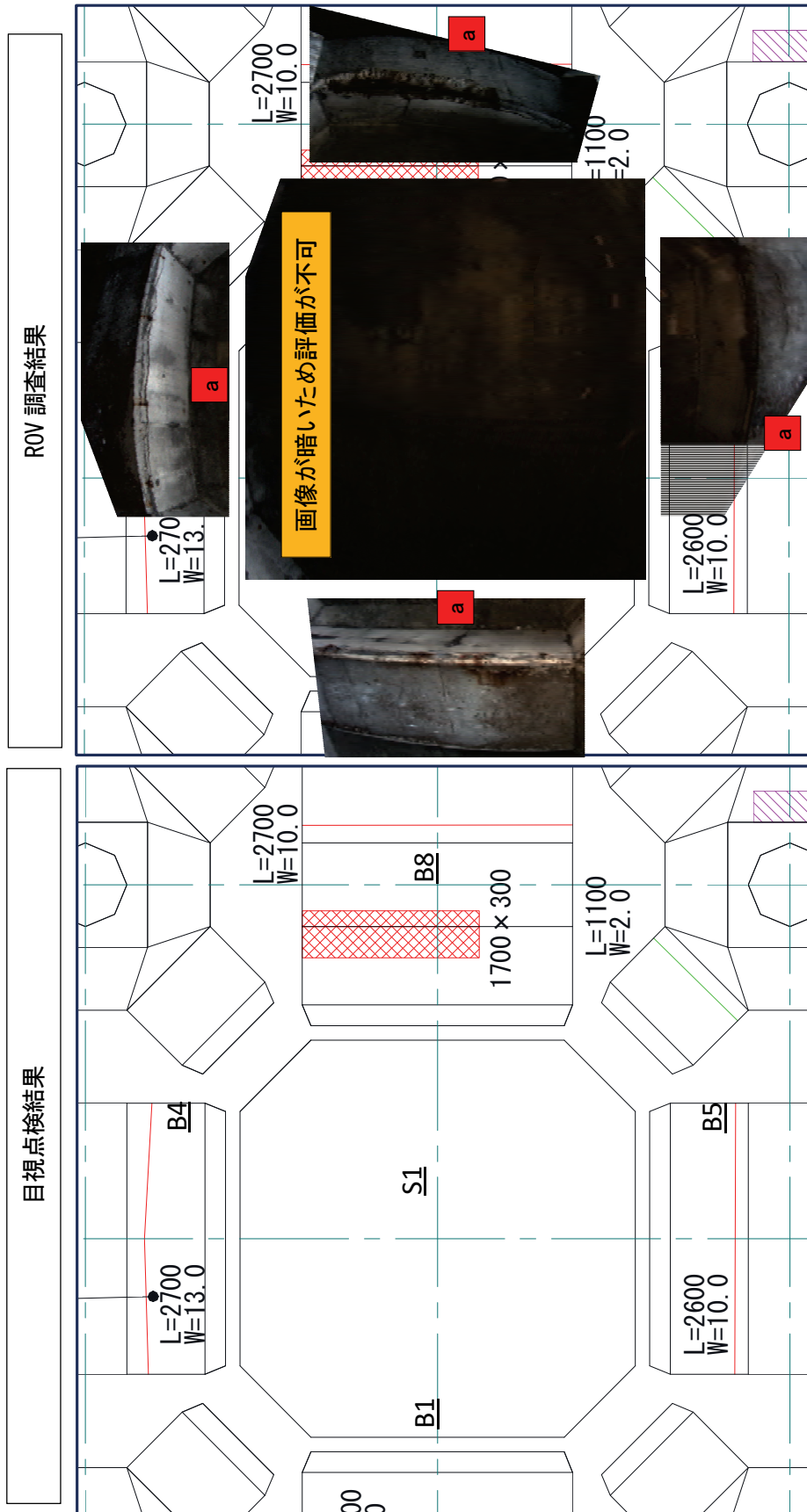


図-4.5 目視点検結果と ROV 調査結果との比較

調査結果 4 : ROV 調査結果によって判定できない事例 (汚濁防止膜なし)

5. まとめ

ROV 画像の整理および目視点検結果との比較を行った結果、以下の事項が明らかとなった。

ROV のオペレーションに関する事項

- ✓ 汚濁防止膜の有無によって ROV が撮影した画像に相違は見られなかった。調査実施時の海象は静穏が望ましいが、静穏を確保するための汚濁防止膜は不要である。
- ✓ 水面で調査を実施するため、カメラには飛まつ等による海水が付着しやすい。付着した海水の水分が無くなると塩分だけが残り ROV が撮影した画像に写り込むため、適宜確認が必要である。
- ✓ 本調査では ROV の操作と撮影を 1 人の技術者が実施した。その結果、画像の欠落や撮り残し箇所の確認など、調査中にこれらの精査を実施することが困難な場合が見受けられたため、ROV の操作と撮影の作業を 2 人程度で分担して実施することが望ましい。

ROV 画像による判定・記録に関する事項

- ✓ 本調査の ROV が撮影した画像においては、目視点検と同一箇所においてひび割れの有無や剥離を確認することができた。
- ✓ ROV 等により取得した上部工下面の画像は、解像度や照度に大きく影響される。ひび割れ、剥離、錆汁等の正確な検出や劣化度 a~d の判定のためには、調査の対象とする栈橋上部工コンクリート下面における照度や海面から部材までの距離等の撮影条件を明らかにしなければならない。
- ✓ ROV 画像を従来の調査報告書の変状写真として活用するためには、ROV により取得される画像のゆがみ、まがり（部材に対して垂直であること）の補正が必要である。

付録2 <資料> ROVを用いた栈橋上部工下面部の 点検診断マニュアル作成のための要件

平成26年11月

(独)港湾空港技術研究所 ライフサイクルマネジメント支援センター

目次

第1章 総論	A2-2
1.1 本資料の目的	A2-2
1.2 適用の範囲	A2-3
1.3 用語の定義	A2-3
1.4 適用基準	A2-4
第2章 ROVによる点検診断の基本事項	A2-5
2.1 一般	A2-5
2.2 ROVによる点検診断の基本的な流れ	A2-5
第3章 ROVに求められる機能	A2-7
3.1 ROV(本体)の機能	A2-7
3.2 ROVに搭載する撮影機材	A2-7
3.3 そのほか、ROVに搭載することが望ましい機能	A2-8
第4章 判定および評価の方法	A2-10
4.1 判定の方法	A2-10
4.2 評価の方法	A2-13
4.2.1 評価の基本事項	A2-13
4.2.2 栈橋上部工の保有性能評価の方法	A2-13
4.2.3 詳細点検診断の実施箇所の選定方法	A2-13
第5章 ROVによる点検診断結果の記録・保存	A2-15
参考資料 ROVを利用した栈橋上部工下面の点検診断の将来展望	A2-16

第1章 総論

1.1 本資料の目的

本資料は、遠隔操作無人探査装置（以下、ROV という.）を利用した栈橋上部工下面部の点検診断、判定、評価、記録の方法について整理し、栈橋の効率的かつ効果的な維持管理の実現に資するためのものである。

【解説】

港湾構造物は、他の社会基盤施設と比較して、一般的に厳しい自然環境下に置かれることから、材料の劣化や部位・部材の損傷等の変状により、供用期間中に性能の低下が生じることが多い。今後、限られた投資の中で、港湾構造物を所要の期間にわたって供用し有効に活用していくためには、構造物が有する機能や性能が要求水準を満たすよう、適切に維持管理が実施されなければならない。

港湾構造物の維持管理を効率的かつ効果的に実施するためには、点検診断により構造物や部材の変状に関するデータを取得し、これに基づいて構造物や部材の現在および将来の性能を評価・予測したうえで、対策の要否判定や適切な対策工法を選定することが重要である。つまり、点検診断は維持管理の根幹をなす行為といえる。

港湾構造物を構成する部材のなかでも、栈橋上部工については、塩害に起因するコンクリート内部の鋼材腐食により、予定供用期間中に部材の性能低下が生じる事例がこれまで国内に数多く存在するため、特に、効率的かつ効果的な維持管理の実施が求められる部材である。栈橋上部工の点検診断のうち一般点検診断は、通常、船上からの上部工下面部、上・側面部の目視調査により行われる。しかし、その実施は波浪や潮汐等の海象状況や、船舶の係留や荷役作業等の施設の利用状況に左右されることが多く、従来よりも効率的かつ効果的な点検診断技術の開発が求められている。

また、一般点検診断の結果、必要と判断された場合、または定期的に実施される詳細点検診断では、上部工下面に足場を設置してコンクリート内部の鋼材腐食に関する非破壊試験を行うなどして、変状の詳細な外観情報や、変状に関する数値データを取得する。しかし、すべての部材に対してそれらの調査を実施することは困難である。このため、栈橋上部工の一般点検診断においては、すべての部材について外観から得られる変状の状態を把握し上部工の性能評価に資するデータを取得すること、また、詳細点検診断を実施する部材や箇所を適切に選定することが重要となる。

本資料は、栈橋上部工下面部の点検診断の高度化・効率化に向けて、遠隔操作無人探査装置（以下、ROV という）を利用した点検診断の方法について記述し、ROVにより得られた画像データを用いた上部工部材の劣化度の判定方法について整理するものである。あわせて、栈橋上部工下面部の評価、または、詳細点検診断を実施する部材や箇所の選定のために、ROVにより取得すべき画像データや調査実施の留意点、ROVにより取得した画像データを用いた栈橋上部工の保有性能評価、および詳細点検診断を実施する部材や箇所の選

定手法（スクリーニング）についての考え方を取りまとめたものである。

1.2 適用の範囲

本資料は、技術基準対象施設を適切に維持するために必要となる点検診断のうち、栈橋上部工下面部の点検診断に適用する。

【解 説】

本資料は、ROVによる栈橋上部工下面部の点検診断、判定、評価、記録を実施する技術者が利用することを想定してとりまとめたものである。

本資料での記述は、上部工に鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリートを用いた直杭式横栈橋および斜め組杭式栈橋の点検診断を対象とするが、類似の施設についてもその特性を考慮した上で適用することができる。

なお、上部工部材下面が平均干潮面以下に位置する栈橋も存在するが、このような栈橋上部工については、本資料の適用対象外とする。

1.3 用語の定義

本資料において使用する用語を、以下のように定義する。

(1) ROV

遠隔操作無人探査装置。

(2) 点 検

構造物や部材に変状がないか調べる行為等。

(3) 点検診断

あらかじめ定めた点検の項目及び方法により点検を行い、部材の劣化度を判定する行為。

(4) 判 定

本資料においては、ROVにより得られた画像データから部材の劣化度を判定する行為。

(5) 評 価

本資料においては、判定結果から栈橋上部工下面部の保有性能を評価する、あるいは詳細点検診断を実施する部材や箇所を選定する行為。

(6) 変 状

栈橋上部工下面に生じる劣化や損傷の総称。

(7) 劣化度

栈橋上部工部材（スラブ、はり、ハンチ）に生じた変状の程度。4段階（a, b, c, d）で表す。

(8) 保有性能

本資料においては、各部材の劣化度（a, b, c, d）を総括した栈橋上部工1ブロックあ

たりの劣化度 (a, b, c, d).

1.4 適用基準

本資料に示していない事項については次の基準等による。

- (1) 港湾の施設の点検診断ガイドライン：国土交通省港湾局，平成 26 年 7 月
- (2) 港湾の施設の維持管理技術マニュアル；国土交通省港湾局監修，(独)港湾空港技術研究所編著，平成 19 年 10 月，(財)沿岸技術研究センター発行
- (3) 2013 年制定 コンクリート標準示方書〔維持管理編〕；平成 25 年 10 月，(社)土木学会

【解 説】

本資料は，(1)～(3)の基準類を基本にして作成した。したがって，本資料に示していない事項については(1)～(3)の基準類によるものとした。

第2章 ROVによる点検診断の基本事項

2.1 一般

- (1) ROVによる栈橋上部工下面部の点検診断は、以下のために必要な画像データを取得することを目的として実施する。
 - ・ 栈橋上部工下面部の保有性能評価
 - ・ 詳細点検診断を実施する部材や箇所を選定
- (2) 栈橋上部工のすべての部材（スラブ、はり、ハンチ）を対象として、調査を実施することを基本とする。

【解説】

(1)および(2)について


栈橋上部工の変状は、上載荷重などの外力によるもの、船舶の衝突や災害などによる損傷、塩害やアルカリ骨材反応などによる劣化が主な原因となる。塩害による劣化では、コンクリート内部の鉄筋が腐食することでひび割れが発生し、鉄筋の腐食が進行するにつれて、徐々にひび割れ幅が大きくなり、やがてかぶりコンクリートが剥離・剥落する。腐食による鉄筋の断面減少は部材の耐荷力などの構造性能の低下に繋がるものであり、これを放置した場合、施設の安全性や利用上の機能が急速に損なわれる恐れがある。

鉄筋コンクリート（RC）製ではなく、プレストレストコンクリート（PC）製の栈橋上部工の場合、ひび割れの発生やPC鋼材・鉄筋の腐食が直ちに部材・構造物の安全性に影響を及ぼすこととなる。このため、万一、ひび割れや錆汁が発見された場合には、速やかに原因の究明と対策の実施を検討しなければならない。

ROVによる栈橋上部工下面部の点検診断は、上記の変状が部材・構造物の性能に与える影響を踏まえて、すべてのスラブ、はり、ハンチの変状の発生とその程度を視覚的に把握するために行う。外観から得られる変状の状態を把握し、それらの劣化度を判定することにより、調査の対象とする栈橋上部工下面部の保有性能を評価することができる。また、得られた画像データから、コンクリート中の塩化物イオン濃度調査や、鉄筋の自然電位・分極抵抗の測定、はつり出しによる腐食状況調査など、変状に関する数値データを取得するために詳細点検診断を実施する部材や箇所を選定することができる。

栈橋上部工の劣化度分布や変状に関する数値データは、栈橋上部工部材の劣化進行予測に活用できる。このため、ROVによる点検診断により、栈橋上部工の将来の維持管理計画の策定に有効な情報も得ることができるといえる。

2.2 ROVによる点検診断の基本的な流れ

- (1) ROVによる栈橋上部工下面部の点検診断は、-2.2.1に示す流れに従って行うことを標準とする。
- (2) ROVによる栈橋上部工下面部の点検診断の実施にあたっては、調査の対象とする構

造物の設置環境，形状，施設の利用状況，周囲の海象条件等を勘案して，あらかじめ適切な資機材等を準備する。

【解説】

(1)について

ROV による栈橋上部工下面部の点検診断は，適切な手順で安全に実施されなければならない。ROV による点検診断と，ROV により取得した画像による判定，評価，記録の流れの標準と，本資料の構成を図-2.2.1 に示す。

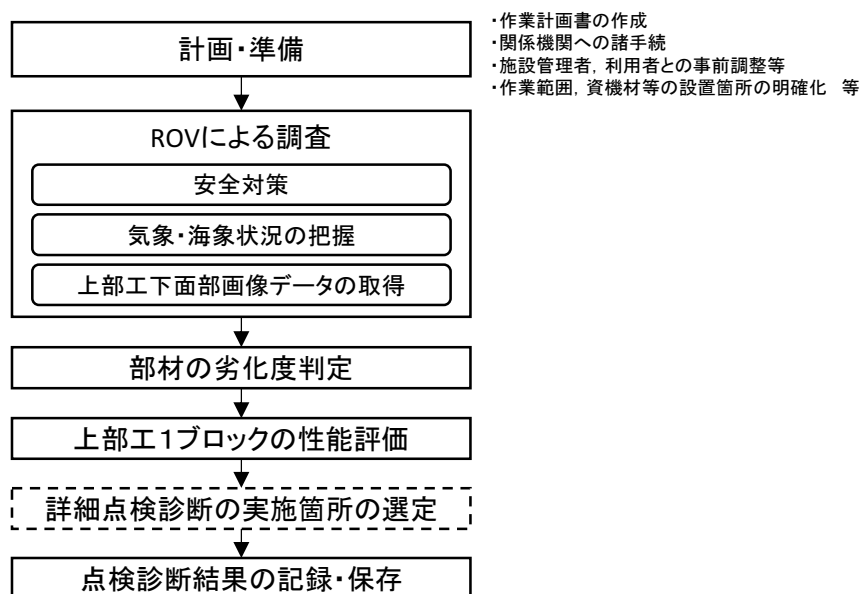


図-2.2.1 ROV による栈橋上部工下面部の点検診断の基本的な流れ

(2)について

栈橋およびその周辺海域は，施設の設置状況に応じて潮流や波浪等の条件が大きく異なるほか，荷役作業や船舶の航行が常時行われている環境にある。そのため，調査対象施設の海象条件や利用状況を勘案して，調査に必要な資機材等を準備するとともに，適切な手順にて調査を実施する必要がある。なお，栈橋上部工下面部の調査のため ROV に求められる機能については第 3 章に記す。

ROV による栈橋上部工下面の点検診断の実施にあたっては，ROV の操作担当者，撮影担当者，作業補助員等を準備するなどして，作業を分担できる体制を予め整えておくことよい。また，ROV を岸壁から海面へ下ろすためにクレーン付トラック等を用いる場合，クレーン等への玉掛作業のため船外機船等を配置する必要がある。船外機船等は，ROV へ接近する船舶への警戒，航跡波からの保護，故障等の問題発生時の対策などにも活用できる。

第3章 ROVに求められる機能

3.1 ROV（本体）の機能

ROVによる栈橋上部工下面部の点検診断では、点検診断の目的に応じて、必要な機能および性能を有するROVを用いるものとする。

【解説】

栈橋上部工下面部の点検診断に使用するROVの本体は、必要最低限の調査機材を搭載し、極力軽量で小さい形状・寸法であることが望ましい。また、波浪等による動揺によりROVと岸壁と接触した際に双方の損傷を防ぐための防護構造をあらかじめ搭載する必要がある。

ROVに搭載する撮影機材に求められる性能については、3.2に記述する。そのほか、有効な画像データを取得するためには、ROV本体の動揺を制御する機能、撮影レンズに付着する海水の水滴を除去する機能などを有することが望ましい。

さらに、調査時の作業性を考慮すれば、ROVは無索式とすることが望ましいが、現在のROVの技術開発状況を踏まえれば、有索式が一般的である。ROVの動作や画像データ取得のためのケーブル等を有する場合は、ケーブル等の鋼管杭への絡まりに留意しながら、調査を実施する必要がある。この際、ケーブル送り出しのための作業員を陸上に配置することが有効であるが、例えば、ROVを栈橋法線に対して楕形に移動させるなどしてROVの移動経路を工夫することで、作業負担を軽減することが可能である（図-3.1.1参照）。

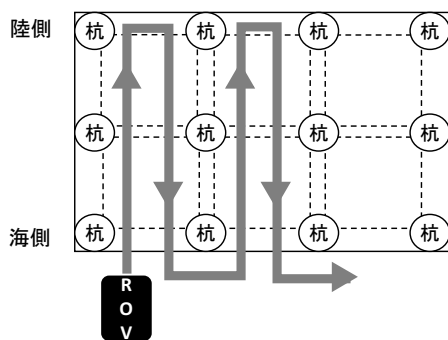


図-3.1.1 ROVの移動経路の工夫（例）

3.2 ROVに搭載する撮影機材

ROVに搭載する撮影機材は、点検診断の目的や調査の対象とする構造物の設置環境等に応じて、機材を適切に選定しなければならない。

【解説】

栈橋上部工下面部の保有性能評価もしくは詳細点検診断の実施箇所の選定を行うためには、栈橋上部工下面において部材のすべてに生じた変状等を確認できるよう、画像データを取得する必要がある。このため、撮影機材は、調査の対象とする栈橋上部工下面におけ

る照度や海面から部材までの距離等の撮影条件を踏まえたうえで、ひび割れ、剥離、錆汁等の検出に適したものを選定することが重要である。

特に、コンクリート表面のひび割れの検出に主眼を置く場合、調査の対象とするひび割れ幅、撮影画角（対象とするコンクリート表面の大きさ）の関係をあらかじめ認識する必要がある。表-3.2.1 は、陸上の実構造物を対象とした実験結果に基づいて提案された標準的な方法の一例である¹⁾。また、既往の報告によれば、抽出可能な最小ひび割れ幅は、画素×1/2 程度となる²⁾。図-3.2.1 は、デジタルカメラの画素数と撮影時の被写体の横方向視野（被写体の幅）と抽出可能な最小ひび割れ幅の対応の一例である。ただし、これは、コンクリート表面の汚れが少なく、撮影時の照度が十分に確保できる条件の基に成り立つものである。

表-3.2.1 鉄道構造物の標準的な撮影方法¹⁾

項目	留意点
カメラ	有効画素数約 500 万画素以上
画角	0.2mm 未満のひび割れを対象とする場合は 1m×1m 程度
撮影距離	光学ズームにより画角を確保する。一般に 3 倍程度の工学ズーム機能を備えたデジタルカメラを使用する場合は、距離を 10m 以内にすることで条件を満足する。
撮影角度	正面からの角度が 45 度以内を標準
明るさ(照度)	照度は 100 ルクス以上。フラッシュは使用しない

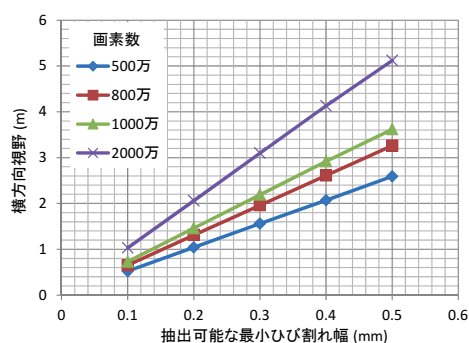


図-3.2.1 抽出可能な最小ひび割れ幅²⁾

【参考文献】

- 1) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，附属資料 5-2 デジタルカメラによるひび割れ解析，丸善，2007.1.
- 2) 庄野昭・齋藤淳：コンクリート表面のひび割れ評価方法，ハザマ研究年報，2009.12.

3.3 そのほか、ROVに搭載することが望ましい機能

ROVによる栈橋上部工下面部の点検診断を効率的に行うためには、ROVに以下の機能を搭載することが有効である。

- (1) 画像データ取得の位置もしくはROVの位置を把握する機能
- (2) 潮流や波浪，航跡波等によるROVの動揺を抑制する機能
- (3) 画像データの寸法を把握する機能

【解説】

(1)について

ROV等により取得した画像データに加えて、位置情報，方位等の情報を同時に取得することができれば、画像データを栈橋上部工部材の展開図として記録することが容易になる

など、点検診断の記録および評価に極めて有効なデータを同時に得ることが可能となる。しかし、ROV を用いた調査では、栈橋上から ROV を視認できないことに加えて、栈橋上部工による電波等の遮断により光波測距儀や GPS 等による測位が不可能であることから、位置情報を把握することが極めて困難である。これらの課題に対応するため、(独)港湾空港技術研究所では、音響による測位機能を搭載した ROV を開発している (写真-3.2.1)。

測位装置を搭載しない ROV を利用する場合、例えば、栈橋法線に対して有索式 ROV 等を楕形に移動させ、法線直角方向のケーブル繰り出し距離を把握することによって、ROV 等の位置を大まかに把握することも可能である (図-3.1.1 参照)。



a) 音響測位の例 (機器は水中に設置)

b) 音響測位の結果

写真-3.2.1 位置情報の取得 (例)

(2)について

ROV による栈橋上部工下面部の調査では、潮流や波浪、航跡波等により ROV の動揺が生じ、画像データを鮮明に取得することが困難となることが予測される。この対策として、ROV に搭載したカメラのシャッター速度を高速に設定する方法が考えられるが、この場合、鮮明な画像を取得するに足る光量が必要である。このため、十分な光量の確保に加えて、雲台など ROV の動揺を抑制する機能を搭載することが有効である。

(3)について

ROV と栈橋上部工下面部との間隔は干満や波浪等によって逐一変動するため、得られる画像データのスケールを一定とすることは困難である。この場合、ROV から撮影対象物に対してレーザースケール等を照射することで、ROV と撮影対象物の間隔を把握しておくことにより、画像データから得られる変状等の寸法・範囲を把握することが可能となる。

第4章 判定および評価の方法

4.1 判定の方法

- (1) ROVにより取得した画像データを用いて判定を行うにあたっては、判定結果の利用の目的に応じて、判定を行う基準をあらかじめ定めておかなければならない。
- (2) 判定は、スラブ、はり、ハンチを区別して、部材ごとに行うことを基本とする。

【解説】

(1)について

ROV等により取得した栈橋コンクリートの画像データについては、栈橋上部工下面部の保有性能評価、または詳細点検診断を実施する部材や箇所の選定などの目的に応じて、あらかじめ定められた基準により判定しなければならない。劣化度の判定基準は、港湾の施設の点検診断ガイドライン【第1部 総論】のとおり、表-4.1.1によることができる。

栈橋上部工下面部の保有性能評価を目的とする場合、画像データから変状の有無や状態を把握し、部材ごとに劣化度を判定する。4段階の劣化度(a, b, c, d)の判定の基準は、港湾の施設の点検診断ガイドライン【第2部 実施要領】4.1.6にしたがって、表-4.1.2を用いてもよい。ただし、ROVにより取得した上部工下面の画像は、解像度や照度に大きく影響されるため、変状の発生状況を4段階で判別できない場合がある。この場合、3段階(a, b, d)の劣化度判定基準を定めるとよい。

3段階の劣化度の判定においても、通常の4段階の劣化度の判定と同様に、部材ごとに劣化度a, b, dの判定を行う。この場合、スラブではかぶりの剥落の有無、あるいは網目状のひび割れや錆汁の発生の程度が、はり・ハンチでは3mm以上のひび割れ幅の検知あるいは錆汁の発生の程度が、劣化度aと劣化度bの境界となる。船上からの目視による点検診断においても、劣化度bと劣化度cで判定を迷う場合が多いとの意見がある。この場合、劣化度判定の安全性を確保するため、劣化度bと判定すべきである。3段階の劣化度判定基準(案)を表-3.1.2右列に示す。

なお、PC部材の場合、ひび割れの発生やPC鋼材・鉄筋の腐食が直ちに部材・構造物の安全性に影響を及ぼすことから、港湾の施設の点検診断ガイドライン【第2部 実施要領】4.1.6のとおり、劣化度をaとdの2段階で判定するものとする。

2.2で述べたように、ROVによる点検診断に用いる撮影機材は、調査の対象とする栈橋上部工下面の照度や、海面から部材までの距離等の撮影条件を踏まえたうえで、変状の検出、特に鉄筋コンクリート部材の場合はひび割れ、剥離、錆汁の検出に適したものを選定することが重要である。しかし、調査時の天候・海象条件等により、4段階あるいは3段階の劣化度判定が不可能な画像が取得される可能性もある。この場合、再調査を実施することが望ましいが、それが困難な場合、2段階の劣化度判定基準により簡易的に部材の劣化度を判定せざるを得ない。以下に、2段階の劣化度判定基準に関する試案を示す。

2段階の劣化度判定では、部材ごとに劣化度aおよびcの判定を行う。この場合、スラブ

では網目状のひび割れあるいは錆汁の発生が、はり・ハンチでは鉄筋軸方向のひび割れあるいは錆汁の発生が劣化度 a と劣化度 c の境界となる。また、この場合、外観の変状が見られない場合も劣化度 c と判定されることとなる。これは、4 段階の劣化度判定において劣化度 d と判定されるものを劣化度 c と判定することにより、低解像度・低照度の画像データによる劣化度判定の安全性を確保するためである。

画像データの解像度および照度と 2, 3, 4 段階の劣化度判定のイメージを図-4.1.1 に示す。

表-4.1.1 点検診断における劣化度判定の基準

劣化度	劣化度の判定の基準:部材の状態
a	部材の性能が著しく低下している状態
b	部材の性能が低下している状態
c	変状はあるが、部材の性能の低下がほとんど認められない状態
d	変状が認められない状態

表-4.1.2 劣化度の判定基準 (案)

構造	部材	判定基準案	劣化度	3段階の劣化度
RC	スラブ	<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%以上ある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剥落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。	a	a
		<input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%未満である。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。	b	b
		<input type="checkbox"/> 一方向のひび割れもしくは帯状又は線状のゲル析出物がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。	c	
		<input type="checkbox"/> 変状なし。	d	d
	はり ハンチ	<input type="checkbox"/> 幅 3mm 以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剥落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。	a	a
		<input type="checkbox"/> 幅 3mm 未満の鉄筋軸方向のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。	b	b
		<input type="checkbox"/> 軸と直角な方向のひび割れのみがある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。	c	
		<input type="checkbox"/> 変状なし。	d	d
PC	スラブ	<input type="checkbox"/> ひび割れがある。 <input type="checkbox"/> 錆汁がある。	a	a
	はり ハンチ	<input type="checkbox"/> 変状なし。	d	d

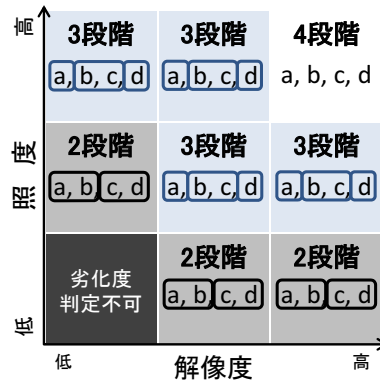


図-4.1.1 解像度および照度に応じた上部工下面部の劣化度判定のイメージ (RC の場合)

(2)について

栈橋上部工下面部の劣化度判定は、スラブ、はり、ハンチを区別して、1部材ごとに行う。
 ここで、超広角レンズを取り付けたカメラを搭載している場合、ひとつのスラブの中央を撮影することにより、周囲のはり 4 体の側面と下面の画像を同時に取得することができる (図-4.1.2)。この場合、それぞれのはりのもう一方の側面の画像を取得し、それらを総合してはり 1 体の劣化度を判定する。

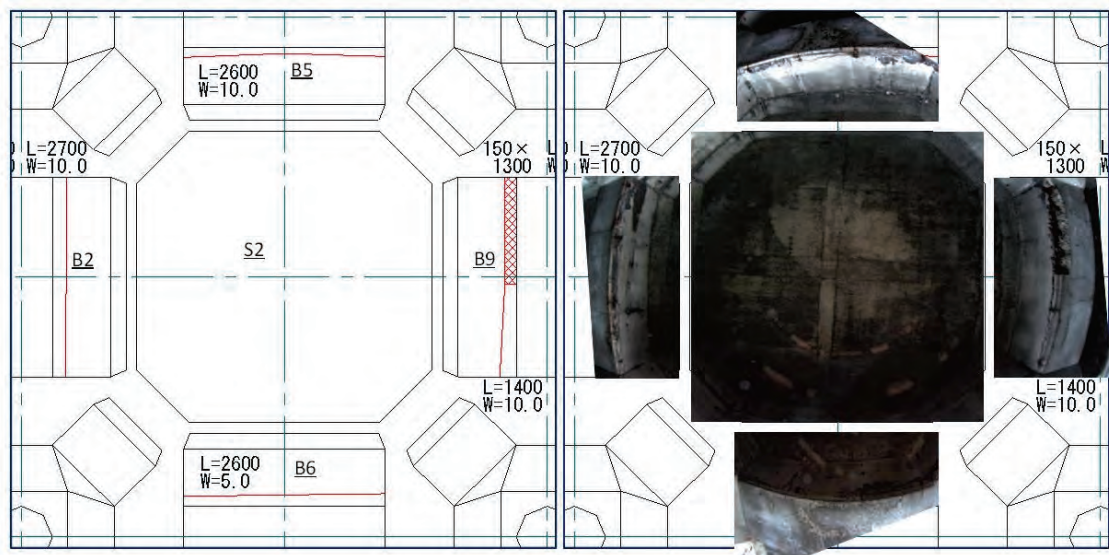


図-4.1.2 超広角レンズカメラによる画像データのイメージ (左は展開図)

4.2 評価の方法

4.2.1 評価の基本事項

- (1) ROV による点検診断結果の評価を行うにあたっては、評価を行う基準をあらかじめ定めておくことを基本とする。
- (2) 評価は、栈橋上部工 1 ブロックごとに行うことを基本とする。

【解説】

(1)および(2)について

ROV による点検診断の結果は、栈橋上部工下面部の保有性能評価、または詳細点検診断を実施する部材や箇所を選定などの目的に応じて、あらかじめ定められた基準により評価することが望ましい。評価は、栈橋上部工の標準的な点検診断の単位である 1 ブロックごとに行うことが望ましい。

4.2.2 栈橋上部工の保有性能評価の方法

各部材の劣化度 (a, b, c, d) を総括して、栈橋上部工下面部 1 ブロックあたりの劣化度 (a, b, c, d) を評価する。

【解説】

ROV により得られた画像データから判定したスラブ、はり、ハンチすべての部材の劣化度 (a, b, c, d) を総括して、栈橋上部工 (下面部) 1 ブロック当あたりの劣化度 (a, b, c, d) を評価する。評価基準は、港湾の施設の点検診断ガイドライン【第 1 部 総論】を参考にし、あらかじめ定めておく必要がある。このとき、栈橋上部工が RC 製であるか、PC 製であるかによって、変状が栈橋上部工の安全性に及ぼす影響の程度が異なることを鑑み、性能評価の方法を区別しなければならないことに注意する。栈橋上部工下面部の保有性能評価にあたっては、港湾の施設の点検診断ガイドライン【第 2 部 実施要領】4. 1. 6 の【参考】として、1 ブロックにおける劣化度の判定方法の例が示されているので、参考にするとよい。

4.2.3 詳細点検診断の実施箇所を選定方法

詳細点検診断の目的および方法をふまえて、各部材の劣化度 (a, b, c, d) および画像データから、詳細点検診断を実施する部材および箇所を選定する。

【解説】

詳細点検診断では、栈橋上部工に生じた変状の要因分析、劣化進行予測等に必要なデータの収集など、目的に応じたデータが取得できるように点検・調査を行う。詳細点検診断を実施する部材および箇所を選定にあたっては、詳細点検診断の目的および方法をふまえて、適切に部材および箇所を選定しなければならない。特に、機器等を用いる場合には調査の目的および結果の利用方法等を十分に理解した上で、適切な調査方法を選定することが重要である。

ROV により得られた画像データ，およびそれを基に判定したスラブ，はり，ハンチの劣化度 (a, b, c, d) は，例えば，コンクリート中の塩化物イオン濃度調査や，鉄筋の自然電位・分極抵抗の測定，はつり出しによる腐食状況調査などに関する数値データを取得する部材や箇所を選定するための基礎資料となる．詳細点検診断の目的および方法に応じた部材および箇所を，劣化度判定結果あるいは ROV による画像データから選定するための基準の試案を，表-4.2.1 に RC 部材について，表-4.2.2 に PC 部材について示す．

表-4.2.1 目的・方法に応じた部材・箇所の選定の試案 (RC 部材)

詳細点検診断の実施の目的	調査の方法	調査の実施が望ましい部材・箇所	
		劣化度から選定する場合	画像データから選定する場合
より詳細な外観調査の実施	船上からの目視調査, 潜水士による目視調査	劣化度 a, b, c, (d)	変状が見られた箇所について重点的に実施するとよい
塩害による劣化の進行程度の把握, および劣化進行予測	コア/ドリル粉末によるコンクリート中の塩化物イオン量の測定	劣化度 c, d	変状が見られない箇所
上記のうち, 特に, コンクリート中の鉄筋の腐食状況の把握 (非破壊)	自然電位・分極抵抗の測定	劣化度 c, d	変状が見られない箇所
〃 (微破壊)	はつり出しによる鉄筋の腐食状況調査	劣化度 a, b, c, d	希望する箇所
かぶり厚さの把握 (非破壊)	電磁波レーダ法による鉄筋位置の確認	劣化度 c, d	変状が見られない箇所
〃 (微破壊)	はつり出しによる鉄筋位置の確認	劣化度 a, b, c, d	希望する箇所
コンクリート強度の把握	コアによる圧縮強度試験, テストハンマによる反発度の測定	劣化度 c, d	変状が見られない箇所

表-4.2.2 目的・方法に応じた部材・箇所の選定の試案 (PC 部材)

詳細点検診断の実施の目的	調査の方法	調査の実施が望ましい部材・箇所	
		劣化度から選定する場合	画像データから選定する場合
より詳細な外観調査の実施	船上からの目視調査, 潜水士による目視調査	劣化度 a, (d)	変状が見られた箇所について重点的に実施するとよい
かぶり厚さの把握 (非破壊)	電磁波レーダ法による鋼材位置の確認	劣化度 d	変状が見られない箇所
塩害による劣化の進行程度の把握, および劣化進行予測	コア/ドリル粉末によるコンクリート中の塩化物イオン量の測定	劣化度 d	変状が見られない箇所
上記のうち, 特に, コンクリート中の鉄筋の腐食状況の把握 (非破壊)	自然電位・分極抵抗の測定	劣化度 d	変状が見られない箇所

第5章 ROVによる点検診断結果の記録・保存

- (1) ROVにより取得した画像データおよび判定・評価の結果は、適切な方法で記録・保存するものとする。
- (2) ROVにより取得した画像データおよび判定・評価の結果は、当該施設を供用している期間、保存することが望ましい。

【解説】

(1)について

ROVにより取得した画像データは、栈橋上部工下面部の保有性能評価もしくは詳細点検診断の実施箇所を選定に活用される。このため、画像データは一般的な目視調査と同様に展開状に作成することが望ましい。このとき、画像データに、撮影時刻、位置情報、方位等の情報が同時に記録されていれば、容易に展開図を作成することが可能となる。また、撮影の状況により、撮影画像のスケールおよび向き（方角）、照度が異なることが予測されることから、今後、それらを自動で補正するソフトウェアの開発が期待される。

画像データから評価した栈橋上部工下面部の保有性能、もしくは詳細点検診断の実施箇所を選定の結果についても、一定の書式により記録することが重要である。一般的に、港湾の施設は50年以上の長期にわたって供用されるため、供用期間中に管理担当者の交代や維持管理体制の変更が生じることが想定される。このため、画像データに基づいた評価の結果は、内容を容易に判読できる一定の様式を用いて記録しなければならない。

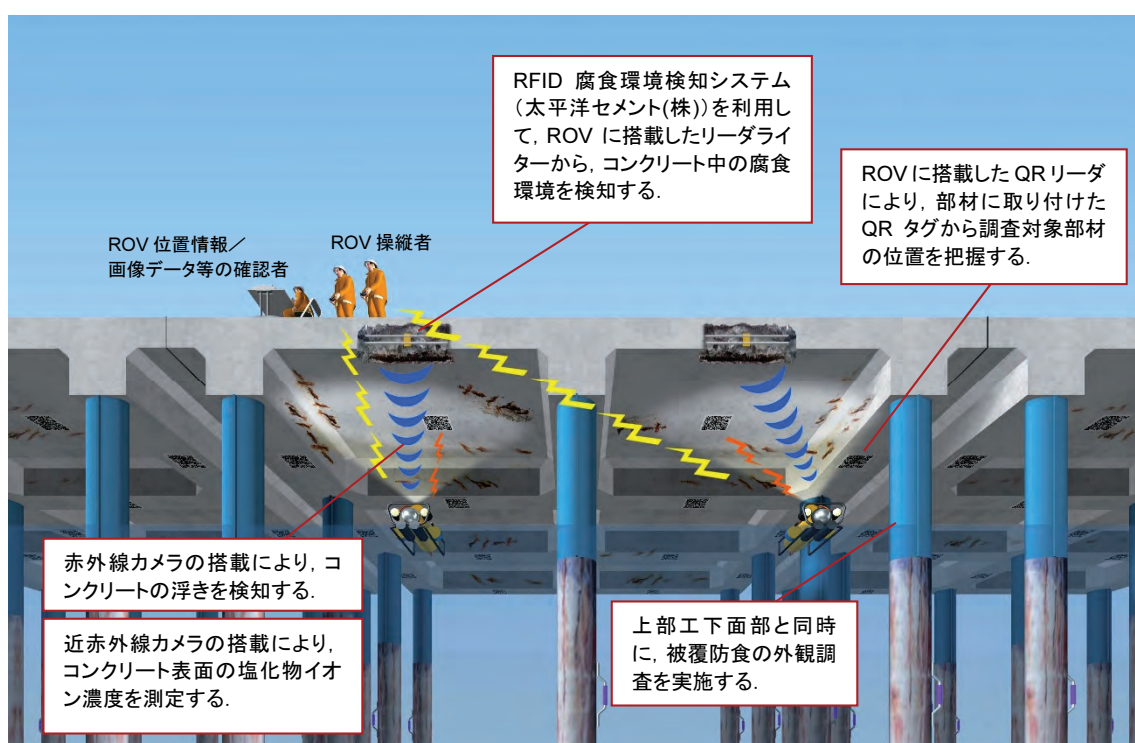
(2)について

ROVにより取得した画像データを蓄積することで、栈橋上部工下面部の変状の経時変化が把握できる。これにより、当該栈橋上部工の変状傾向の把握が可能となるため、画像データは当該施設を供用している期間、保存することが望ましい。

画像データから評価した栈橋上部工下面部の保有性能、もしくは詳細点検診断の実施箇所を選定の結果についても、当該施設を供用している期間、保存することが望ましい。これらの記録は、当該栈橋上部工の変状進行予測のみならず、当該施設周辺の類似施設の変状傾向の予測にも有効であり、結果として港湾の施設の効率的な維持管理の実現に繋がることを期待される。

参考資料 ROV を利用した栈橋上部工下面の点検診断の将来展望

港湾の施設の点検診断ガイドライン【第1部 総論】によれば、技術基準対象施設の点検診断においては、効率性、客観性を重視し、新技術の活用を積極的に検討することが望ましいとされている。ROV を利用した栈橋上部工下面の点検診断は、点検診断の高度化・効率化の1つの方法として有効である。本資料では、一般点検診断における ROV の利用について述べたが、ROV の利用によって、より詳細な栈橋上部工下面の状況（コンクリート中の塩化物イオン濃度や、コンクリート中の鉄筋腐食状況など）を把握することも可能と考えられる。ROV を利用した点検診断の将来展望を参考図-1 に示す。



参考図-1 ROV による栈橋上部工下面の点検の将来展望

港湾空港技術研究所資料 No.1303

2015. 3

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 大 應

Copyright © (2015) 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。