

# 浮体による通水中の水路トンネル内 点検装置の開発

森岡 宏之<sup>1</sup>・森 文章<sup>2</sup>・鶴田 滋<sup>3</sup>・山内 優<sup>4</sup>・恩知 憲正<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット (〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)  
E-mail: morioka.hiroshi@tepcoco.jp

<sup>2</sup>正会員 東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット (〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)  
E-mail: mori.fumiaki@tepcoco.jp

<sup>3</sup>東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット (〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)  
E-mail: tsuruta.shigeru@tepcoco.jp

<sup>4</sup>株式会社東設土木コンサルタント 事業推進部 新技術開発室 (〒113-0033 東京都文京区本郷 1-28-10)  
E-mail: yamauchi@tousetu.co.jp

<sup>5</sup>株式会社東設土木コンサルタント 事業推進部 新技術開発室 (〒113-0033 東京都文京区本郷 1-28-10)  
E-mail: onchi@tousetu.co.jp

水路トンネルの点検は、通常、水路全線を抜水して点検員が水路内を移動して目視により行うが、点検には労力と時間を要し、断水による発電停止の損失も大きい。東京電力ホールディングス(株)では、水路の点検において抜水を行わず、ビデオカメラを搭載した浮体を用いて水中部を含む壁面全周を無人で安全に撮影する装置を開発した。開発においては、水路断面内の水理特性を利用して機体の姿勢を安定させる制御機構としてパラシュートアンカーや姿勢安定用テールを導入することで、詳細な点検(抜水)の要否を判断するための情報が取得できることを確認した。また、線状のレーザー光を用いて水路壁面の輪郭を強調することで多少の濁りのある水中においても大きな変状の有無を確認できる見通しを得た。

**Key Words:** *waterway tunnel, tunnel inspection, floating, underwater image, laser marking*

## 1. はじめに

トンネル構造物では完成後も地圧や支保部材の劣化等により変形やひび割れなどの変状が生じ、これらの変状が大きくなると壁面の剥離・剥落に至ることがある。水路トンネル内での壁面の剥離・剥落は、大規模なものは水路の閉塞による溢水災害を引き起こす可能性がある。このため維持管理者は常にトンネル構造物の健全性を的確に把握し、性能維持や事故防止に努める必要がある。

通常、水路トンネルの点検は、通水を停止して水路内を抜水した後、点検員が水路内を移動しながら壁面の状態を直接目視により確認している。

しかし、充抜水時間を含めた水路の点検に伴う断水期間は数日に及ぶことがあるため、発電停止に伴う経済的な損失を考慮すると、点検員が日常的に目視確認することは得策ではない。点検時の断水による損失を削減するため、効率的な点検手法の確立が求められている。

水路以外の一般的なトンネルでは、変状を効率的に記録するため、カメラやレーザー等を搭載した点検用ロボットの開発が盛んに行われているが、それらの多くは水の無い安定した路盤や軌道が存在することを前提としたものである。水路トンネルを対象とした点検用ロボットについても、当初は抜水もしくは減水した状態を前提として開発が行われてきた。

近年では断水による損失を削減するために、通水中に点検を行うロボットの開発が行われるようになってきた。これまでに開発された通水中の水路点検用ロボットには、有線により機体を制御する潜水ロボット型のものと機体を自然流下させる浮体型のものがある。

潜水ロボット型の点検手法では、最大 2.5km の管路においてケーブルを介して機体を操作することで水中部の撮影を実施している事例<sup>1)</sup>などもあるものの、距離に応じて巻き揚げ設備が大掛かりとなり、ケーブル切断のリスクも大きくなるため長距離のトンネルへの適用は難しい。

また、流れのある状況での使用にも課題がある。

一方、浮体型の点検手法では、撮影装置が水流に対して安定していることが要求されるため、機体と壁面との離隔を計測してカメラの方向を自動制御する機能を持つ装置<sup>2)</sup>も開発されてきているものの、撮影範囲は気中部のみが対象となっている。

水力発電所の無圧の導水路トンネルの場合、一般的に設計最大流量を水路高さの90%程度の水深に相当する流積とする場合が多く、実際の運用上も高い水位で運転していることが多い。また、周辺地山からの大きな塑性圧や偏圧が作用するような地質条件の場合には側壁やインバート部についても変状を確認する必要があること、古い時期に矢板工法で建設された幌形トンネルの場合には底盤の隅角部に大きな変状が生じることが多いことなどから、水路トンネル点検では気中部のみならず水中部の観察も重要となる。

そこで著者らは、長距離の水路トンネル点検にも対応できる浮体型を開発対象とし、水路断面内の水理特性に着目して自然の力を利用した簡易な姿勢制御機構による通水中かつ全断面对応の壁面撮影装置の開発を行った。機体の開発にあたっては、作業性の観点から軽量かつ小型のものを指向すると共に、水中部での可視画像による点検は精度上限界があることから、本機での水中部の調査では通水に支障を来すような大規模な変状の検知（抜水点検の必要性判断）ができることを開発の目標とした。

また、水力発電所の水路トンネルでは出水直後等の影響で流水に濁りが発生しているケースもあることから、線状のレーザー光を用いて水路壁面の輪郭を強調することで多少の濁りのある水中においても大きな変状の有無を確認する方法についても検討を行った。

本稿では、室内および実際の水力発電所導水路で行った浮体型撮影装置の実証試験の結果について報告する。

## 2. 機体姿勢制御の原理

一般に、水路に浮体型の機体を流下させた場合、曲線部や断面形状の変化等の影響により水流に乱れが発生するため、機体に回転が生じる。このため、水路トンネル内の変状を認知できる可視画像を得るには流下する機体の姿勢（方向）を安定させることが最も重要となる。

そこで著者らは、容易かつ簡易に機体の姿勢を安定化させる手段として、水路断面内の水理特性を積極的に利用することとした。

水路上を自然流下する浮体型の機体は水面付近の流速で流下する。その流速以上の外力で機体を牽引することが出来れば機体は安定して流下することが可能となることから、ここでは水路断面内の流速分布に着目すること

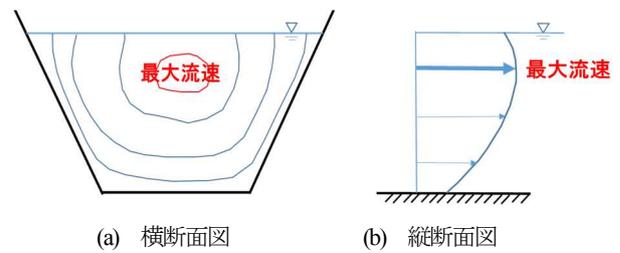


図-1 開水路の断面内流速分布（概念図）<sup>3)</sup>

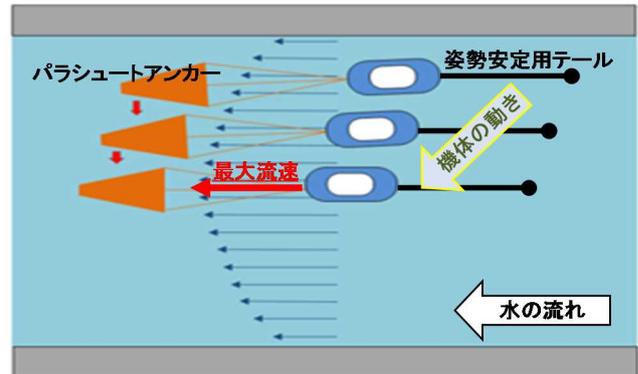


図-2 パラシュートアンカーによる姿勢制御機構<sup>3)</sup>

とした。

水路断面内の流速分布は、水路の壁面や底面との摩擦や水の粘性による内部摩擦の影響を受ける。このため、図-1に示すとおり、横断方向で見た場合、最大流速は摩擦の影響の小さい中央付近に生じるが、縦断方向に見た場合、空気による抵抗がある水面より少し下方に最大流速点が発生する。

そこで、浮力体が存在する水面より少し下方の断面最大流速点付近に水流の抵抗を受ける円錐形のパラシュートアンカーを配置することにより、機体とアンカーに流速差を生じさせた。これにより、大きな流速を受けるアンカーが機体を牽引する推進力を発生させ、機体を安定させることができると考えた。また、機体後方に発生する機体本体に起因する乱流によるふらつきや曲線部で発生する外側への遠心力を抑えるため、末端に錘を付けた姿勢安定用テールを機体の後方に取り付けた。

図-2にパラシュートアンカーによる姿勢制御機構のイメージを示す。機体が側壁付近にある場合、パラシュート部が流速の大きな位置から機体を牽引するとともに、後方の姿勢安定用テールから受ける抵抗によって機体の位置は常に水路の中央部に保たれることになる。

パラシュート部と機体の間に発生する乱流が安定した航行に影響を及ぼさないように、パラシュート部と本体を結ぶロッドの長さは現場実験を行って調整した。また、水面下の断面内最大流速点付近で機体を受ける抵抗を小さくするため、水中部撮影用カプセルとの連結部はアルミフレームのみの構造とした。

### 3. 浮体型撮影装置の仕様

図-3および写真-1に今回開発した浮体型撮影装置の基本構造を示す。浮体型撮影装置（1号機）は、長さ約72cm、幅約60cm、高さ約100cm、重量は機体安定のための錘も含めて約22kgである。

機体は気中部撮影用カプセル、水中部撮影用カプセル、浮力体、これらを連結するアルミフレーム、引き上げ時の損傷を防止するキャスタ、照明、パラシュートアンカー及び姿勢安定用テールより構成される。パラシュートアンカー（φ38cm、円錐高h=53cm）を写真-2、姿勢安定用テール（ビニロンロープ：φ8mm）と末端の錘（アイボルト：120g）を写真-3に示す。気中および水中の撮影用カプセルはいずれもアクリル製でOリングによる水密構造のものとし、カプセル内には超小型ビデオカメラを配置した。

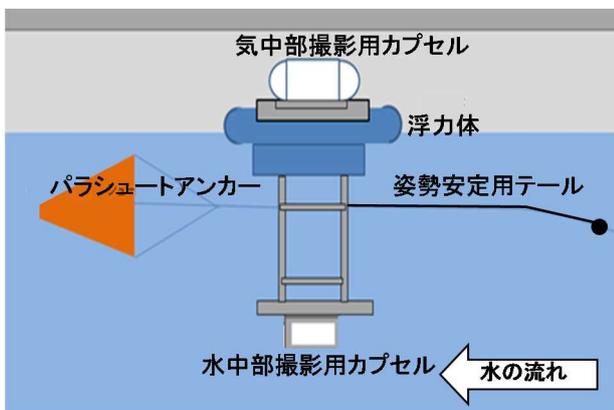


図-3 水路撮影異様浮体の基本構造（概念図）<sup>3)</sup>

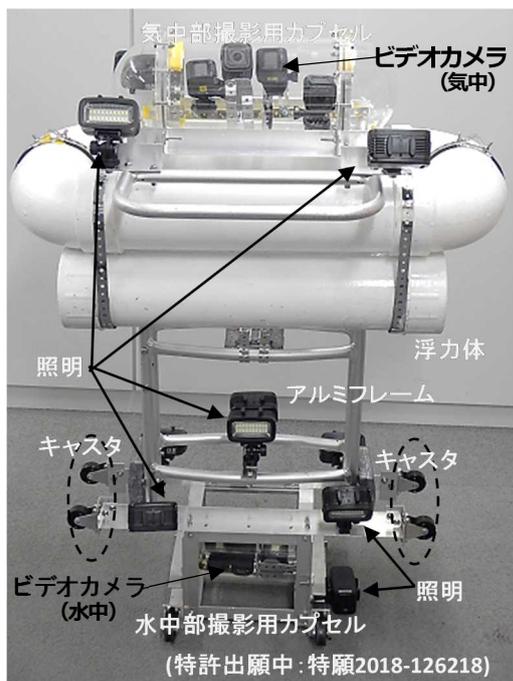


写真-1 浮体型撮影装置<sup>4)</sup>

ビデオカメラは、水路壁面撮影用と前方確認用のものを配置した。水路壁面撮影用のカメラは、気中部および水中部を分割して帯状の連続画像を取得するもので、水路内の水位とカメラの画角によって必要な設置台数が決まる。前方確認用のカメラは、浮体装置前方に配置して全線に亘って前方の連続画像を取得するためのもので、水路断面全体の概略の状況を点検員の視線で把握するために配置した。取得した画像データにより机上で水路のアナログ点検を行う際には、最初に水路の通水に大きな影響を与えるような変状の有無をこの前方視カメラの画像によってチェックし、重点監視箇所や新たに問題の見つかった箇所を壁面撮影用画像にて詳細に確認することが効率的と考えられる。

表-1にビデオカメラの仕様を示す。ビデオカメラは、内蔵バッテリーを電源として動画を連続撮影し、取得した画像データは内蔵のスロットからmicroSDカードに保存される。浮力体は塩ビパイプを加工して使用した。アルミフレームは機体の回収・運搬を容易にするため、外周に持ち手を配置した。照明についてもバッテリー内蔵の独立した防水型LED照明とし、画像撮影時の反射光の影響を避けるため外側フレームに配置することとした。



写真-2 パラシュートアンカー（φ38cm、h=53cm）



写真-3 姿勢安定用テールと末端の錘（アイボルト）

表-1 ビデオカメラの仕様

使用機器	GoPro HERO5 Session
バッテリー	内蔵(80分)
重量	約127g
ビデオ解像度	1080p
フレーム/秒	60
スクリーン解像度	1920×1080
最大画角(実験値)	116.8°

#### 4. 浮体装置実証試験の結果

実験は群馬県にある運転中の水力発電所の導水路（最大使用水量 11.13m<sup>3</sup>/s）を使用して行った。実験を行った区間（延長 4.2 km）は、トンネル部と開渠部からなり、トンネル部は幅 3.0 m、高さ 3.0 m の馬蹄形断面、開渠部は底面幅 2.1 m、上面幅 3.2 m の台形水路であり、実験当日の水深は浮体投入箇所付近（開渠部）で約 1.3 m であった。実験を行った水路トンネル部の断面を図-4 に示す。図中の青色に着色した部分が実験当日の水路の水位を示している。また、同図中に使用した壁面撮影用カメラの画角を割り当て（①～⑥）も併せて表示した。

本実験では、水路の断面と水面の位置を考慮し、浮体装置にビデオカメラを7台（壁面撮影用：6台、前方確認用：1台）を用いた。照明は、水中部での光量不足をカバーするため、外側フレームに計10台（気中部：3台、水中部：7台）を配置した。

実験当日の水面中央付近の流速は、浮体装置投入箇所（開渠部）の中央で 1.1 m/s、回収箇所付近（水槽出口）で 0.6 m/s であり、濁度は投入箇所付近で 1.0 mg/L、回収箇所付近で 3.5 mg/L 程度であった。

実際の導水路での実証実験の結果、今回開発した機体はトンネル部や曲線区間も含め、延長 4.2 km 区間全線に亘り、パラシュートアンカーに機体を牽引される形で概ね水路中央付近を安定して航行できることを確認した（写真-4）。

この結果、本機では、当初の想定どおり、パラシュートアンカーが水路中央で牽引し、姿勢安定用テールが後方からの抵抗力を与えることで機体を安定化させ、他の動力系に頼らない自律した姿勢制御が可能であることがわかった。

今回の実証試験において、水路放水後に点検員が直接撮影した水路トンネル天端の画像と浮体装置が撮影した同区間の画像を写真-5 に示す。浮体装置が撮影した壁面画像は点検員が直接撮影した画像（従来）とほぼ同程度

であり、通水に支障のある変状を確認するには十分な画像精度が確保できていることが確認できた。

得られた壁面の帯状連続画像は、各画像に台形補正を行いながら端部をパターンマッチング処理して重ね合わせることで、連続した水路の全周展開画像を作成した。今回の実験で得られた動画を切り出して合成した壁面全周の展開画像の一例を写真-6 に示す。

得られた壁面展開画像からは、気中部において水路壁面の継ぎ目等の状況を詳細に確認することができる。また、水中部においても水路壁面の継ぎ目やインバート部の洗掘状況が確認できることから、当該水路と同程度の濁度環境であれば壁面に発生した通水に支障を来す大きな変状は当機により十分確認できることがわかった。

このことは、点検員による直接目視点検の際の一次情報を無人での調査によって取得できることを意味する。さらに、前回調査結果との比較により水路全線に亘って新たな変状の発生や既存の変状の進行が確認されなければ、放水を伴う直接目視点検のインターバルを延伸できる可能性が出てくることになる。

また、連続した壁面展開画像がデジタル情報として蓄積されることになれば、前回データとの比較により、割れ目の進展や開口の状況をデジタル量で管理してアラームを発することが可能となる。これにより、今まで点検員が現地で直接行っていたクラック調査と変状の進行性の評価を、機械が自動で行うことも可能になり、現地で点検員の業務の大幅な効率化を図れると考えている。

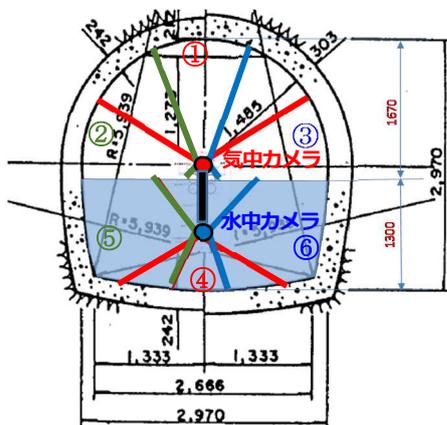


図4 トンネル断面図とビデオカメラの画角配分



写真4 浮体装置の流下状況（トンネル部出口）



(a) 直接撮影（従来） (b) 浮体装置での撮影

写真5 水路トンネル壁面の画像（天端）

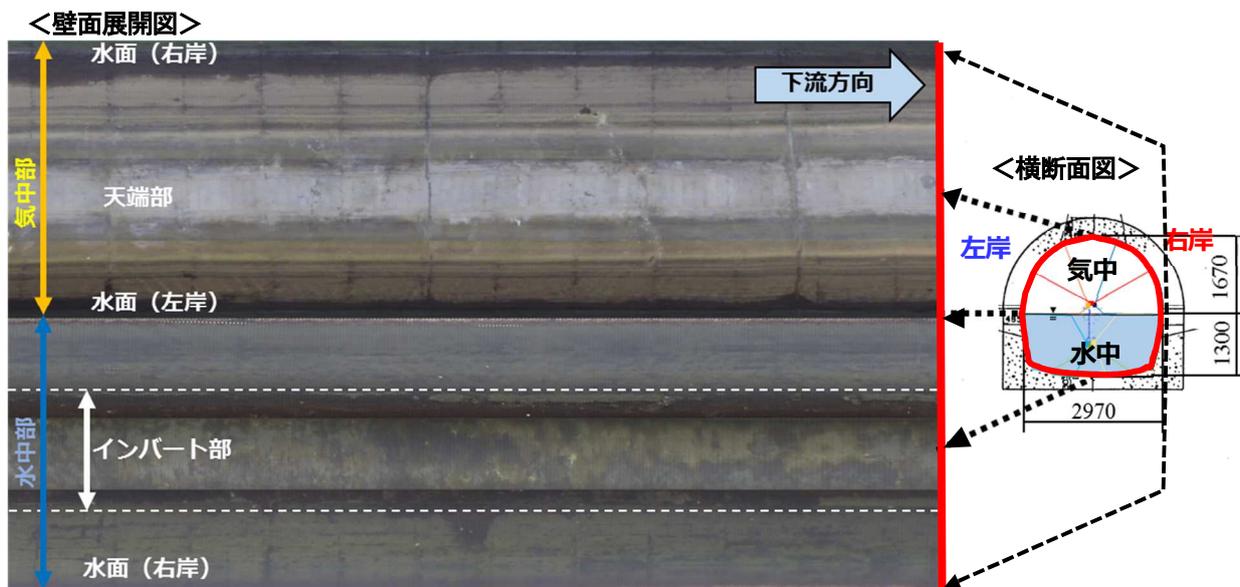


写真6 水路トンネル壁面全周展開画像（抽出区間：延長19m）

表-2 グリーンレーザー墨出し器の仕様

寸法(mm)	85X100X64
精度(水平・鉛直)	10mで±3mm
レーザー波長	510±5mm
レーザー安全基準	レベル2(出力1mW未満)
作業距離	40m(100LUX)
動作時間	約4.5時間(全照射時)
電源	単3電池X4本

## 5. レーザー墨出し器を用いた断面形状測定

水中での設備点検に可視画像を利用する場合、点検の精度は流水の濁度に大きな影響を受けることになる。水力発電所の水路トンネルの場合、地域の特性や天候の影響により濁水が長期化することもあり、多少の濁りに対しても壁面の変状を検知できるような直接可視画像に替わる新たな点検手法が必要となっている。

そこで著者らは、水中でも直線性に優れ強い光を発する緑色レーザーに着目し、濁水中においても壁面に浮かび上がる輪郭を連続で観測することにより、断面形状の変化を検知する方法の検討を行った。ここでは、水槽を使った室内検証実験の結果について以下に述べる。

レーザーの光源には、一般的な建設現場の位置出しに使う汎用の360度グリーンレーザー墨出し器（Huepar社）を用いた。レーザー墨出し器の仕様を表-2に示す。

測定は、浮体装置の気中部と水中部に固定した墨出し器から壁面に横断面方向のレーザー光を照射し、その輪郭を後方のカメラで連続して撮影するものであり、その輪郭の歪みの状況から壁面の異常を検知する。

今回開発した水路断面形状測定装置を図-5、水路での撮影イメージを図-6に示す。

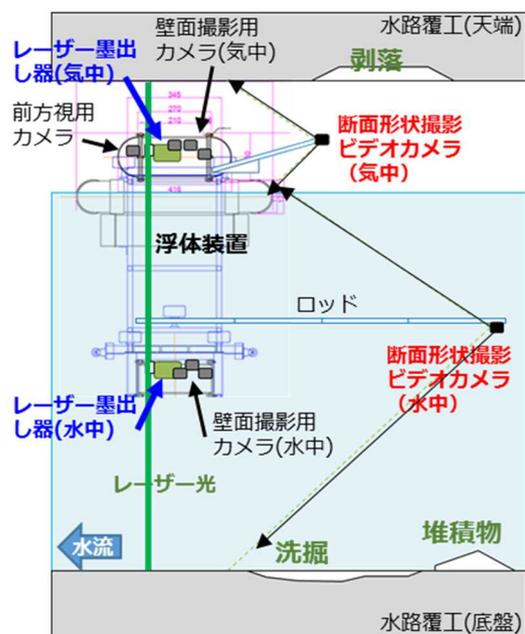


図-5 レーザー墨出し器による断面測定（概念図）

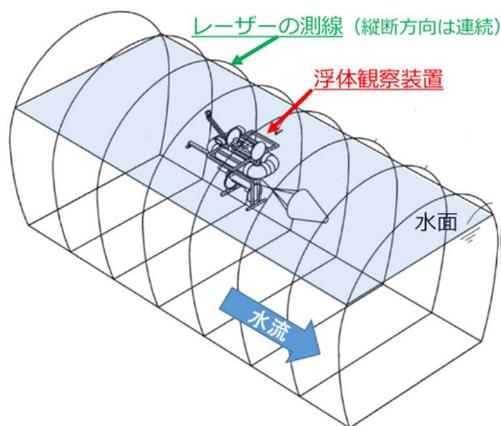


図-6 浮体装置を用いた水路トンネル内断面測定イメージ

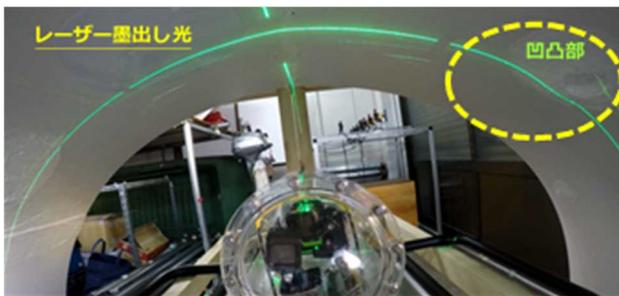


写真7 レーザー墨出し光による断面測定（気中）

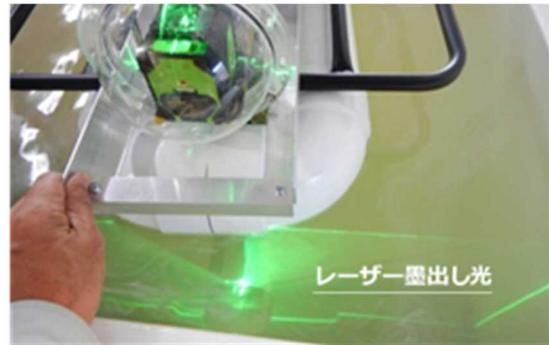


写真9 濁った水中でのレーザー墨出し光

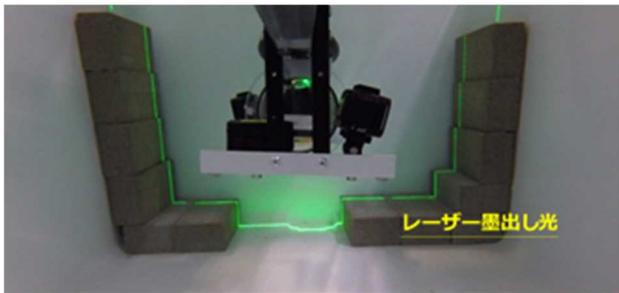


写真8 レーザー墨出し光による断面測定（水中）

室内実験では、水路トンネルを模擬した断面模型を製作し、気中および水中の壁面にそれぞれ故意の凹凸を設け、後方のカメラでどの程度の壁面の歪みを検知できるかの確認を行った。

後方カメラで撮影した輪郭の画像を**写真7**（気中）および**写真8**（水中）に示す。また、水中部の実験では、水槽内に入浴剤を混合して人工的に作り出した濁りの状態において、レーザー墨出し器による輪郭の視認性の効果の確認を行った（**写真9**）。

その結果、気中および水中共に壁面の凹凸を後方のカメラから十分認識できることがわかった。また、実際に壁面の詳細な状況まで直接確認できない濁りの状況であっても、レーザー光の透過性と明るさにより、ある程度（降雨直後でない通常取水程度）であれば壁面の輪郭の歪みを視認できることがわかった。

レーザー墨出し器が映し出す水路トンネル壁面（輪郭）の連続画像は、浮体装置に併設する壁面観察カメラの画像情報と合わせることで、抜水による詳細調査の必要性を判断するための情報となる。また、定期的を取得・蓄積した壁面輪郭の画像データは、経時的に比較することで、変状の進行性を評価するための情報にもなり得ると考えられる。

## 6. おわりに

通水中の水路トンネル壁面の全周を無人で安全に点検するツールとして、ビデオカメラを搭載した浮体型撮影

装置およびレーザー墨出し器による断面測定装置の開発を行った。

著者らは、水路断面の水理特性を利用したパラシュートアンカーや姿勢安定用テールなどの工夫により、機体を水路内に自然流下させるだけで機体の回転を抑制し、水路中心付近に機体を誘導して姿勢を安定させることができることを、延長4.2kmの水力発電所の導水路での現場試験により確認した。

今回の開発では、断面内の流速の違いに着目した自然の力を利用したシンプルな姿勢制御機構を採用していることから、難しい設定や操作の必要は無く、制御系の電気的なトラブルのリスクがないことも本装置の大きな特長と言える。

また、取得した動画から切り出した静止画をパターンマッチングにより合成し全断面の壁面展開図を出力することで、水中部においても、濁りの少ない環境であれば通水に支障を来すような大きな変状は十分検知できることがわかった。

さらに、今回開発したレーザー墨出し器による断面測定により、多少の濁りのある条件下においても通水状態での点検（抜水による詳細調査の必要性判断）が可能となる見通しを得た。

現状の撮影装置の適用延長は約4kmとなっており、ビデオカメラと照明の付属バッテリーの寿命に依存している。このため、将来的にはバッテリーの小型大容量化が進めば適用延長はさらに延伸すると考えられる。

実際の本点検装置の運用については、通水中の調査において通水に支障を来すような異常が確認されなければ、抜水を伴う目視点検のインターバルを延伸することが可能となる。これにより、点検のための断水による損失の大幅な削減が図られると共に、点検員の負担の軽減や災害時の臨時点検時の安全性向上が期待できる。

こうした浮体装置による点検の技術は、発電用水路トンネルのみならず、容易に断水することができない上下水道や農業用水路のトンネルでも活用できると考えられる。

今後は、レーザー墨出し器による断面測定の実用性を

実際の水路を使って検証していくと共に、様々な水路の点検に対応できるようにするため、多様な断面の大きさ、形状に対する適用性を検証していく予定である。

また、今回作成した合成展開画像からクラックマップの作成等を行い、ひび割れやその他変状を高精度に可視化することができれば、さらに詳細な健全性の判断を効率的に行うことができると考えている。

- 2007.
- 2) 森充広, 浅野勇, 川上昭彦, 川邊翔平: 農業用水路トンネル壁面連続画像撮影技術の現地適用性の評価, 農村工学研究所技報, 第 218 号, pp.51-63, 2016. .
- 3) 森岡宏之・青木研一郎・鶴田滋・山内優・恩知憲正: 浮体による通水中の水路壁面点検用の撮影装置の開発, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, pp.787-788, 2018.
- 4) 森文章, 森岡宏之, 山内優: 浮体型水路トンネル壁面撮影装置の開発, 電力土木 No.398, pp.68-72, 2018.

#### 参考文献

- 1) 三井造船特機エンジニアリング(株): 水路点検用水中ロボット RTV-KAM, 三井造船技報 No.191,

(2019. 8. 9 受付)

## DEVELOPMENT OF A FLOATING INSPECTION DEVICE FOR WATERWAY TUNNEL

Hiroshi MORIOKA, Fumiaki MORI, Shigeru TSURUTA, Masaru YAMAUCHI and Norimasa ONCHI

A floating inspection device equipped with a video camera was developed as a tool to safely inspect the entire circumference of the tunnel wall in the flow channel.

The authors confirmed by on-site testing that by using the hydraulic characteristics of the cross-section of the waterway, parachute anchors and tails for postural stability, the airframe can be controlled by natural flow of the airframe into the waterway. In actual operation, it is possible to extend the interval of visual inspection with discharge if no abnormality is found in the inspection during water flow by this equipment.

In addition, a cross-sectional profiling system which we developed by the laser marking device, got a prospect to be enabled to inspect the circumference of the tunnel wall under the condition with some cloudiness.