

# 水路トンネル調査ロボットの開発

## 自律飛行可能な飛行船型ロボットによる水路トンネル調査の適用性確認

西松建設株式会社  
西松建設株式会社  
長崎大学

○ 松浦 誠司  
原田 耕司  
山本 郁夫

### 1. はじめに

水路トンネルには、主として電力関連や農業関連のトンネルがある。電力関連の導水路・放水路などの水路トンネルは総延長が 4,700 km に達しており、平均経過年数は約 50 年である<sup>1)</sup>。また、農業用水路トンネルは総延長が約 2,000 km である。

水力発電の導水路や農業水路など水路トンネルは、震災等の災害後の調査では、安全の確保のため無人で被災状況を把握することが重要であり、小断面の水路トンネルでは狭い坑内を長距離調査することが必要となるが、マルチコプターでは電源等の問題があり適用が難しい。

そこで、飛行のための消費電力が少なく小断面水路トンネル坑内での自律飛行が可能な飛行船型の水路トンネル調査ロボット(写真-1)を開発し、実構造物において適用性を確認した。

### 2. 水路トンネル調査ロボットの概要

水路トンネル調査ロボットは、ヘリウムガスを封入したバルーンを浮体とした飛行船型であり、制御機器、各種推進装置、カメラ・照明装置等を搭載し、小断面の水路トンネルにおいて自律飛行し、トンネル壁面の画像を取得することで、無人調査を行う装置である。トンネル壁面との距離を保持する制御システムにより、トンネル線形に追従して水路トンネル内を自律飛行する。



写真-1 水路トンネル調査ロボット

#### 2.1 水路トンネル調査ロボットの特長

水路トンネル調査ロボットは飛行体とすることで、水路トンネル底面の水や瓦礫等の影響を受けずにトンネル内を移動して調査することができる。また、ヘリウムガスを注入したバルーンにより浮力を得るため、マルチコプターと比較して飛行で消費するエネルギーが少なく、航続時間が長いことから<sup>2)</sup>、長距離の調査が可能である。

#### 2.2 ロボットの構成

水路トンネル調査ロボットは、浮体(バルーン)に機体やカメラモジュール等、図-1に示す一連の機器で構成され、総質量は 4,970g である。以下にそれぞれの仕様を記す。

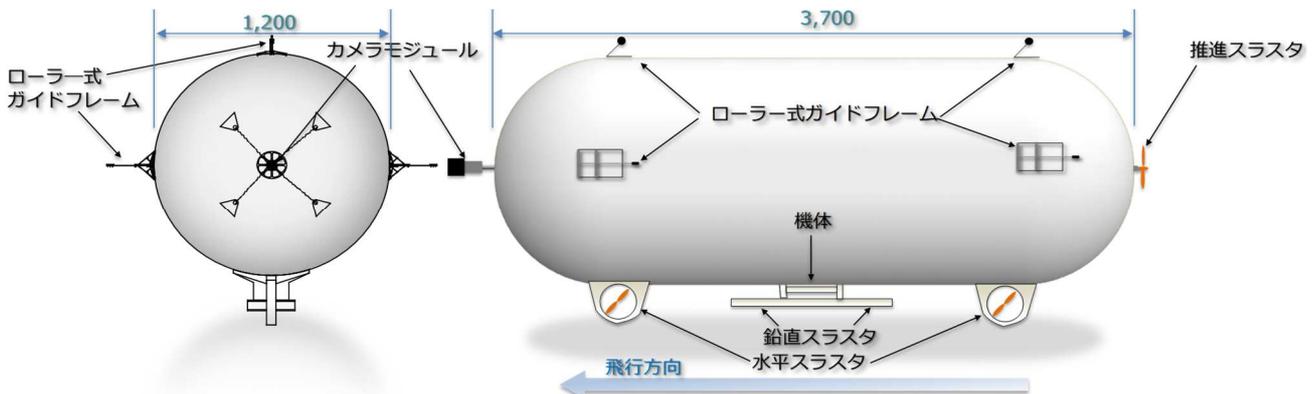


図-1 水路トンネル調査ロボットの構成

### (1) バルーン

バルーンは、塩化ビニル製シートを円筒形状に貼り合せたものであり、設計寸法は、直径 1,200mm × 長さ 3,700mm である。バルーン内にヘリウムガスを注入することで水路トンネル調査ロボットを浮遊させる。

### (2) 機体

機体は、ポリスチレンフォーム製のメカデッキモジュールに水路トンネル調査ロボットの動作を制御するための一連の機器を搭載したものである(写真-2 (a))。主な搭載機器は、電波受信部、制御用マイコン、バッテリー、鉛直スラストである。

### (3) カメラモジュール

カメラモジュールは、360度カメラと 54W の LED 照明をフレームに装着したものである(写真-2 (b))であり、バルーン前端に固定する。トンネル前方を中心とした半球画像を撮影することで、トンネルの天端・側壁から底部までの連続画像(2880 × 2880 ピクセル 30fps (1:1))を取得できる。

### (4) 推進スラスト

推進スラストは、ヘリウムガスで浮遊した水路トンネル調査ロボットに推力を与えるためのものであり、バルーン後端に設置する。

### (5) ローラー式ガイドフレーム(写真-2 (c))

ローラー式ガイドフレームは、トンネル壁面や壁面に取り付けられた金具等のトンネル附属物にバルーンや機体が接触し、損傷することを防止するため、トンネル壁面と接触する頻度が高いバルーンの上部と左右側部に設置した。カーボン製のアーム先端にジュラコン製のローラーを備えており、壁面と接触時の摩擦による飛行速度の低下を抑制する。

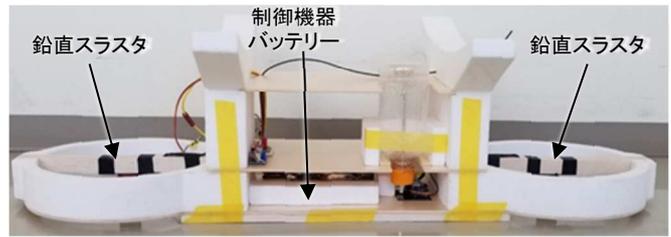
また、張出し寸法を調整することで、トンネルの断面寸法やトンネル附属物の壁面からの突出寸法などのトンネルの条件に対応できる。

## 2.3 自律飛行のための制御

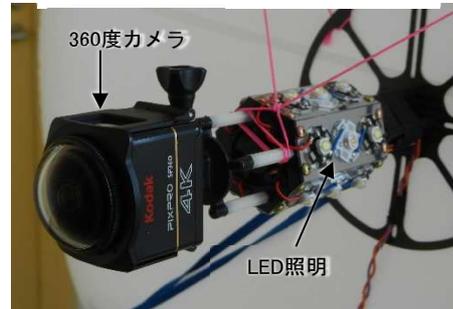
水路トンネル調査ロボットの制御システムは、以下の鉛直制御と水平制御を独立して行っている。

鉛直制御は、超音波センサで得たバルーン中心とトンネル床面までの距離  $\delta_z$  を条件式に当てはめ、 $\delta_z$  の変化に応じてモータの PWM (出力) を制御してモータを正転あるいは逆転させることで、バルーン中心がトンネルの中心にくるように自律制御する。

水平制御は、前後の水平スラスト基部に 2 つのレーザセンサを搭載してそれぞれ 距離  $\delta_F$  および  $\delta_R$  を取得し、トンネルの進行方向に対する機体の傾き角度  $\theta$  およびバルーン中心と壁面との距離  $\delta_x$  を演算している(図-2)。



(a) 機体



(b) カメラモジュール



(c) ローラー式ガイドフレーム

写真-2 水路トンネル調査ロボットの主な機器

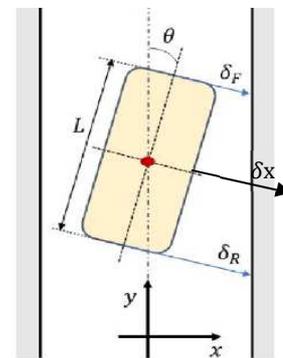


図-2 水平制御の概念 (x-y 座標)

$\theta$  に対して、許容傾き角度の範囲を超えた場合は、前後の水平スラストを前後逆位相で作動させ、機体を回転させる。また、 $\theta$  が許容傾き角度範囲内である場合は、壁面との距離  $\delta_x$  に応じて前後の水平スラストを同位相で作動させ、バルーン中心がトンネル中心にくるように水平位置を制御する。

## 2.4 調査手順

水路トンネル調査ロボットによる調査は、発進側と到達側に人員を配置し、その間は無人で水路トンネル調査ロボットを自律飛行させることにより行う。片方のトンネル坑口から発進させた水路

トンネル調査ロボットは、壁面の画像を取得しながら自律飛行を行い、反対側の坑口へ到達する。到達後にカメラから SD カードを取り出し、記録画像から顕著なひび割れや壁面の崩壊、その他変状の有無などを確認する。変状の位置は、壁面の距離表示や飛行時間と飛行距離の関係から把握する。

### 3. 実構造物での実証実験

実構造物の水路トンネルで水路トンネル調査ロボットを自律飛行させ、現場適用性の検証を行った。

#### 3.1 現場概要

対象となる水路トンネルは、**図-3**に示すように幅、高さともに2,040mmの馬蹄形であり、最小曲線半径30m、平均勾配は0.07%でほぼ水平である。実験時は水路は稼働しておらず、坑内湧水などにより最大水深15cm程度の流水がみられた。坑口に接続する下流側の水槽（作業スペース長さ8.7m×幅3.8m×高さ2.8~4.0m）において水路トンネル調査ロボットの組立て、調整を行い、上流に向かって自律飛行させた。

#### 3.2 実験内容

##### (1) 作業性の確認

搬入・組立て・準備・片付けなど一連の作業の所要時間や作業手順を確認、記録した。

##### (2) 長距離自律飛行試験

水路トンネル調査ロボットを水路トンネル内の2,500mの距離の長距離自律飛行を行い、速度や飛行の安定性、バッテリーの消耗状況等の確認を行った。

##### (3) 取得画像の確認

画像取得状況は、**写真-4**に示す1~15mmの太さを変えた線（線と線の間隔も1~15mm）を記入したチェックシートをトンネル壁面に貼り付けておき、取得した画像で判別可能な範囲を確認した。

#### 3.3 実験結果

##### (1) 作業性の確認

水路トンネル調査ロボットの組立調整を行った下流側水槽は、地上の1,200mm×800mmの開口部より水槽床面までタラップで約5m降りた位置にあった。このため、各パーツをロープを用いて水槽内まで荷降ろしし、水槽内で組み立てた。

ヘリウムガスボンベは地上に配置し、長さ10mのホースを用いて水槽内のバルーンにガスの注入を行った。

水槽への資機材の投入開始からの組立て、調整を行い、飛行準備が完了するまでの時間は約90分だった。また、解体搬出作業は、組立設置と逆の手順で行い、開始から坑外へ全ての資機材の搬出までの時間は約50分だった。以上より、水路トンネ

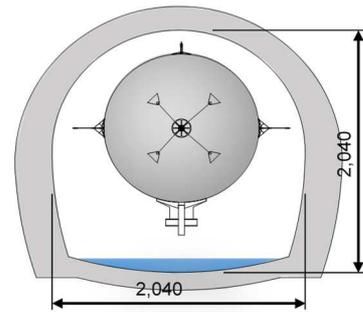


図-3 水路トンネル断面



写真-3 飛行状況

ル調査ロボットによる調査では、2,500m程度の距離を2回調査するのであれば1日の作業時間内に十分に収まることがわかった。

##### (2) 長距離自律飛行試験

発進箇所プロポにより推進スラストの出力（トリム値）を調整して固定し、2,500mの距離を自律飛行させた（**写真-3**）。

##### ①鉛直方向制御結果

鉛直スラストの作動により床面との距離300mm以上を保って飛行できた。

##### ②ガイドフレームの稼働状況

バルーンの上および側部に取り付けたローラー式ガイドフレームは、壁と衝突した際、アーム部分が適度に撓ることで衝撃を和らげつつ反発し、かつ先端のローラーが回転して摩擦抵抗を低減していた。これによりバルーンの壁面への衝突や、壁面に取り付けられた金具（高さ70mm）が飛行に支障することを防止できた。

##### ③バッテリー消費状況

時速約3km/hでの2,500mの長距離自律飛行におけるバッテリーの電圧低下状況を**図-5**に示す。残圧100%の12.4Vから2,500m飛行後の電圧の測定値から、使用限度の10.8Vに低下するまでの飛行可能距離は6,000m以上となっており、2,500mの調査に関してバッテリー残量にはかなり余裕がある状態であった。

##### (3) 取得画像の確認

飛行速度が約1.5km/hの場合、飛行方向（トンネ

ル軸方向)および飛行と直角方向(トンネル軸と直角方向)ともに10mmが判別できた(写真-4)。一方、飛行速度が3km/hを超えた場合、飛行と直角方向(トンネル軸と直角方向)は15mmがようやく判別できる程度であった。よって、10mmを判別したい場合は、飛行速度を落として飛行させる必要があることがわかった。飛行速度が遅くなると距離当たりのバッテリー消費量が増加することが懸念されるが、時速約3km/hの飛行では6,000mの飛行が可能であることから、半分の1.5km/hまで低下させても2,500mの調査は十分に可能である。

#### 4. まとめ

飛行船型水路トンネル調査ロボットの開発で得られた成果を以下に記す。

- ① 水路トンネル調査ロボットは、トンネル線形に合せたスムーズな飛行ができ、小断面水路トンネル内で2,500mの自律飛行が可能である。
- ② 水路トンネル調査ロボットの総質量は5kg程度と軽量であり、分割・運搬が可能であるため、坑口部が立坑下にある場合でも運搬、組立、発進が可能である。
- ③ 調査の準備と撤収の所要時間は、それぞれ約90分および約50分であり、2,500m程度の距離を2回調査するのであれば1日の作業時間内に十分に収まる。
- ④ 前部に搭載したカメラモジュールにより、トンネル壁面の連続画像で10mmを判別できる。

今回の開発では、画像は360度カメラから得られた動画をそのまま確認していたが、これに加えて360度カメラによる半球画像から展開図を作成するソフトの導入を検討している。

本ソフトは、トンネル前方を中心に撮影した半球画像を2次的に展開して展開画像を作成するものである。本ソフトにより作成した展開画像を写真-5に示す。

本ソフトでは2点以上の距離が既知である点を与えるとその間の距離を画像の特徴から判別して自動的にトンネル延長方向の距離程を演算して展開図を作成できる。このため、水路トンネル調査ロボットのような飛行速度が一定でなく移動距離の測定が難しい飛行体ロボットにでも距離精度の高い展開図を作成することができる。水路トンネルの状況の記録として、俯瞰的に確認可能な展開図を併用することは有効である。

本飛行船型ロボットは災害後の概査を目的として開発した。今後はこのような展開図の活用に加え、撮影画像の高精度化や画像処理等により、災害時の応急点検だけでなく、定期点検に使えるようなシステムへの改良を検討する予定である。

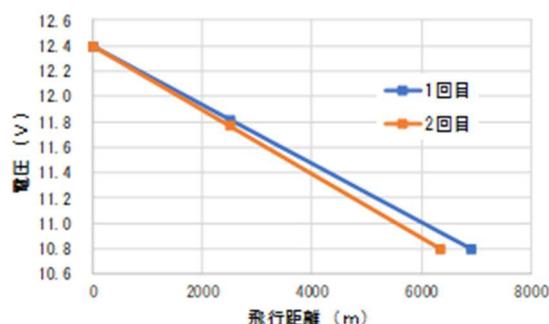


図-4 飛行距離とバッテリー電圧の関係 (10.8Vになるまで飛行可能)

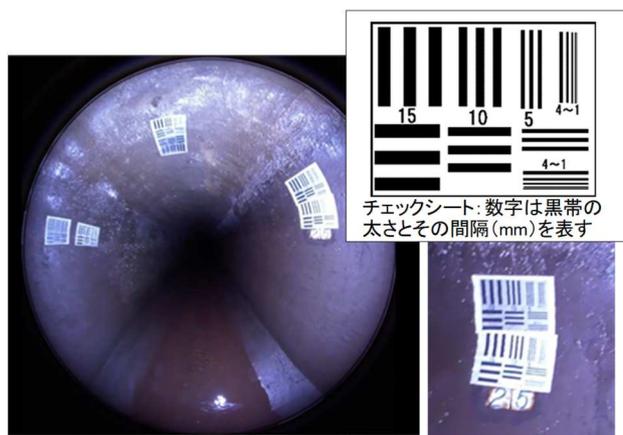


写真-4 画像取得状況

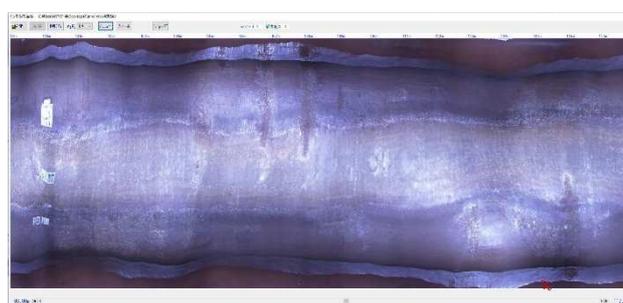


写真-5 画像展開ソフトによる展開画像の例 (左端の断面が写真-4の位置)

謝辞. 現場実証にあたり、快くトンネルを提供いただいたトンネル管理者様、また、半球画像からの展開図の作成にご協力いただいた磯貝信男氏に、深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会 電力工事委員会: 水力発電土木施設のリニューアル技術【増補改訂版】, p.276, 2015
- 2) 国土交通省: 点検支援技術 性能カタログ(案), pp.2,9,16,23, 2019