

飛行船型水路トンネル調査ロボット「トンネルマンボウ」の開発 Development of airship robot for inspection of water-channel tunnels

| | |
|----------------|-------------------|
| 松浦 誠司* | 原田 耕司** |
| Seiji Matsuura | Koji Harada |
| 山本 郁夫**v | 西見 宣俊**** |
| Ikuo Yamamoto | Nobutoshi Nishimi |

要 約

小規模な水力発電の導水路や農業水路など小断面の水路トンネルは、震災等の災害後の調査では、安全性等の理由から無人で被災状況を把握することが重要となる。水路トンネルの調査では、狭いトンネル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水路トンネル内での自律飛行が可能な飛行船型水路トンネル調査ロボット「トンネルマンボウ™」を開発し、実トンネルにおいて適用性を確認した。

目 次

1. はじめに
2. トンネルマンボウの概要
3. 自律飛行のための制御
4. 実構造物での適用事例
5. まとめ

§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¹⁾。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水路トンネル調査ロボット「トンネルマンボウ」(以下、トンネルマンボウ、写真-1)を開発し、実構造物において適用性を確認した。

§2. トンネルマンボウの概要

トンネルマンボウは、飛行船型のロボットであり、ヘリウムガスを封入したバルーンを浮体とし、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。

2-1 トンネルマンボウの特長

トンネルマンボウ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²⁾、長距離調査が可能である。



写真-1 トンネルマンボウ

* 技術研究所先端技術グループ

** 技術研究所

*** 長崎大学大学院

**** 土木設計部設計三課

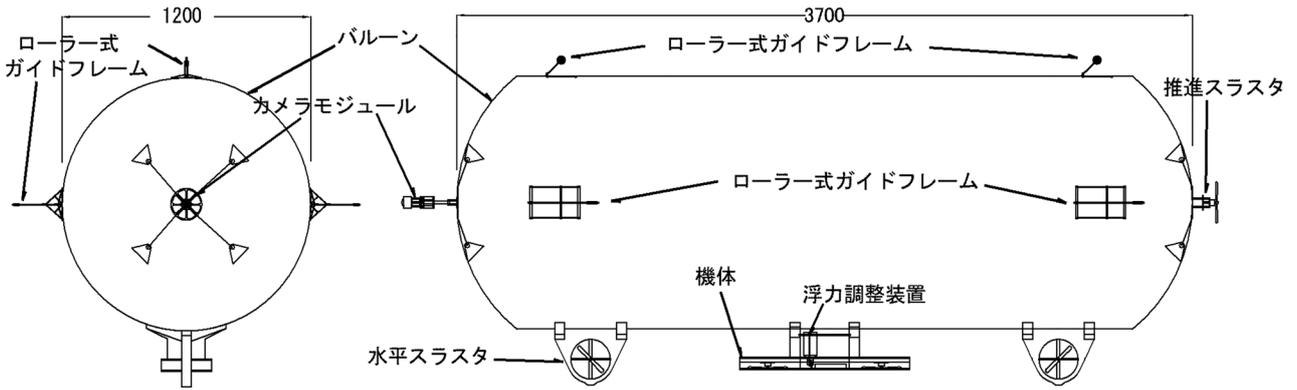


図-1 トンネルマンボウの構成

2-2 トンネルマンボウの構成

トンネルマンボウは、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 4,970 g である。以下にそれぞれの仕様を記す。

(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 1,200 mm × 長さ 3,700 mm である。バルーン内にヘリウムガスを注入することでトンネルマンボウを浮遊させる。浮力は、気温、気圧等の条件により異なるが 5,000 ~ 5,600 g である。

(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トンネルマンボウ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、浮力調整装置である。

(3) 浮力調整装置

ヘリウムガスは分子が小さいため、塩化ビニル製シートで密閉したバルーンにおいてもガスが徐々に抜けて浮力が低下する。このため、バラスト水を入れた PET ボトルに点滴装置を接続した浮力調整装置（写真-2 (b)）を機体に搭載し、浮力の低減に対してバラスト水の滴下速度を設定することで、飛行中の浮力を確保した。

(4) カメラモジュール

カメラモジュールは、360 度カメラと 54 W の LED 照明をフレームに装着したものの（写真-2 (c)）であり、バルーン前端に固定する。トンネル前方を中心に撮影することで、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 30 fps (1 : 1)）を取得する。

(5) 推進スラスト

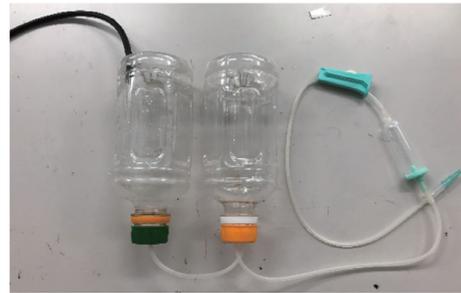
ヘリウムガスで浮遊したトンネルマンボウに推力を与えるための推進スラスト（写真-2 (d)）は、バルーン後端に設置する。

(6) ガイドフレーム

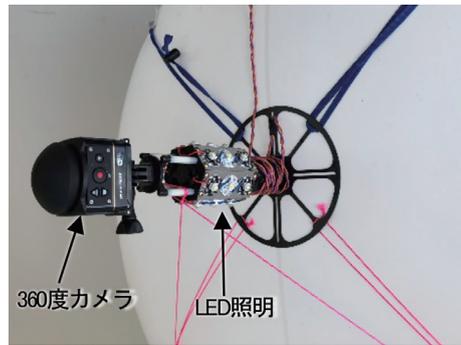
トンネル壁面や壁面に取り付けられた金具等のトンネル附属物にバルーンや機体が接触し、損傷することを防止するため、バルーンにガイドフレームを取り付けた。ガイドフレームは設置箇所に応じて、それぞれ下記のタイ



(a) 機体



(b) 浮力調整装置



(c) カメラモジュール



(d) 推進スラスト

写真-2 トンネルマンボウの主な機器

ブを採用した。

① ローラー式ガイドフレーム

ローラー式ガイドフレームを写真-3に示す。カーボン製のアーム先端にジュラコン製のローラーを取り付けてあり、壁面と接触時の摩擦による飛行船の速度低下を抑制できる。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。

アームの角度を変えることで、ガイドフレームの張出し寸法を調整でき、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 X形状ガイドフレーム

X形状ガイドフレームを写真-4に示す。バルーン下部には、全長1,700mmのカーボンパイプをX字状に交差させ、前後のサイドスラスタを覆うように装着してあり、サイドスラスタおよび機体がトンネル床面へ接触することを防止する。

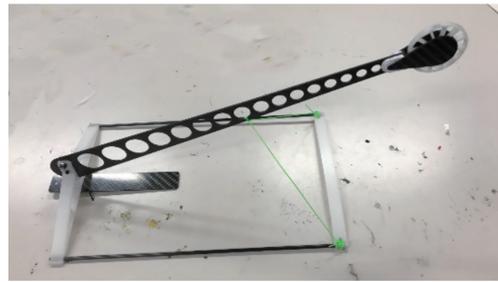


写真-3 ローラー式ガイドフレーム

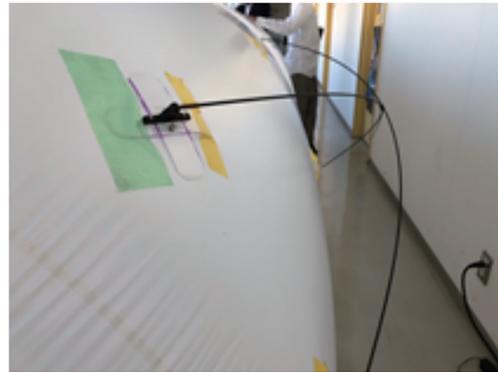


写真-4 X形状ガイドフレーム

2-3 トンネルマンボウによる調査手順

調査フローを図-2に示す。片方のトンネル坑口から発進させたトンネルマンボウは、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。なお、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. 自律飛行のための制御

トンネルマンボウの制御システムは、鉛直制御と水平制御を独立して行っている。それぞれの概要について以下に示す。

3-1 鉛直制御

鉛直方向(z軸方向)のトンネルマンボウの位置の把握には、検出対象の材質や色の影響を受けず、溜まった水に対しても正しい距離が測定可能な超音波センサを採用した。

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 δz (図-3)を条件式に当てはめ、バルーンの中心がトンネルの中心にくるようにモータのPWM(出力)を制御して鉛直スラスタを作動させた。

モータのPWM(出力)と距離センサの値 δz の関係を図-4に示す。 δz の原点 δc は、トンネルマンボウがトンネルの鉛直方向中心にあることを示し、赤線は上向きの推力、青線は下向きの推力、黒線は推力0を表す。

トンネルマンボウの高度が下がる(δz が小さくなる)場合、 $\delta 2 \sim \delta 1$ の時に δz に応じてPWM値をP2~P1としてモータを正転させ、トンネルマンボウを上昇させる。また、トンネルマンボウの高度が上がる(δz が大きくな

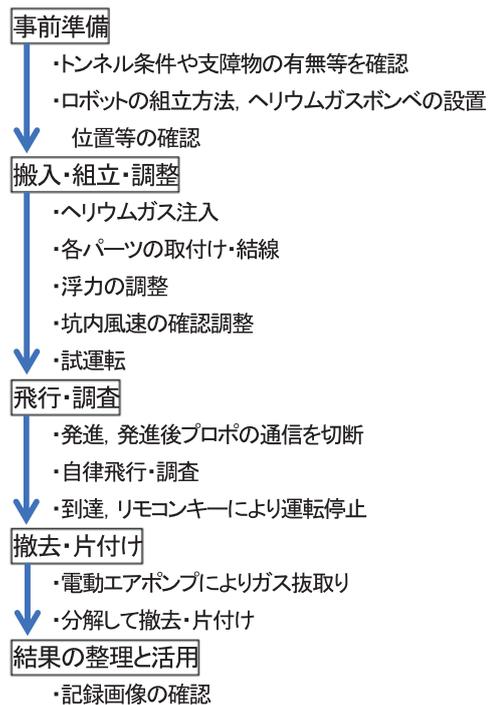


図-2 トンネルマンボウによる調査フロー

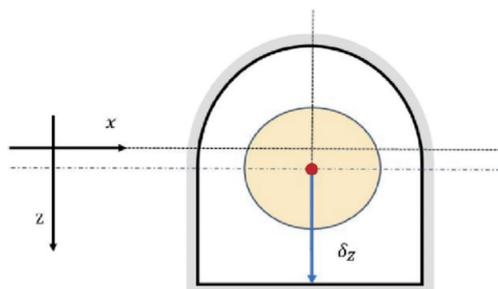


図-3 鉛直制御の概念 (x-z座標)

る) 場合, $\delta_3 \sim \delta_4$ の時に δ_z に応じて PWM 値を P3~P4 としてモータを逆転させ, トンネルマンボウを下降させる。

距離が $\delta_2 \sim \delta_3$ のときにモータを停止させるのは, 正逆転の過度な変化によるモータの焼き切れを防ぐためである。また, PWM 値の上限を正転逆転でそれぞれ P1 および P4 に設定することで, モータの過度な回転を防止している。

3-2 水平制御

水平方向の壁面との距離測定には, 測定精度が高く, 応答速度が速いレーザセンサを採用した。

機体の前後に2つのレーザセンサを搭載し, それぞれ距離 δ_F および δ_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 θ およびバルーン中心と壁面との距離 δ_x を演算している (図-5)。

θ および δ_x 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, 許容傾き角度範囲内である場合は, 壁面との距離 δ_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。

モータの PWM (出力) と距離センサからの演算値 δ_x の関係を図-6 に示す。 δ_x の原点 δ_c は, バルーン中心がトンネルの水平方向中心にあることを示し, 赤線は左向きの推力, 青線は右向きの推力, 黒線は推力 0 を表す。なお, 水平スラストのロータは可変ピッチを採用しているので, 同じ PWM 値でもロータのピッチ (翼角) を変えることにより, 逆向きの推力を発生させることができる。

トンネルマンボウが右側の壁に近づく (δ_x が小さくなる) 場合, $\delta_2 \sim \delta_1$ の時に δ_x に応じて PWM 値を P0~Pmax として左向きの推力を発生させさせる。また, トンネルマンボウが左側の壁に近づく (δ_x が大きくなる) 場合, $\delta_3 \sim \delta_4$ の時に δ_x に応じて PWM 値を P0~Pmax として右向きの推力を発生させる。

鉛直制御と同様に, 距離が $\delta_2 \sim \delta_3$ のときにモータを停止させ, また, PWM 値の上限を Pmax に設定することで, モータの過度な負荷を防止している。

§4. 実構造物での適用事例

実証実験として, 実構造物の水路トンネルでトンネルマンボウを自律飛行させ, 現場適用性の検証を行った。

4-1 現場概要

対象となる水路トンネルは, 図-7 に示すように標準断面が単心円 (三心円) の馬蹄形で幅, 高さともに 2,040 mm であり, 最小曲線半径 30 m, 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

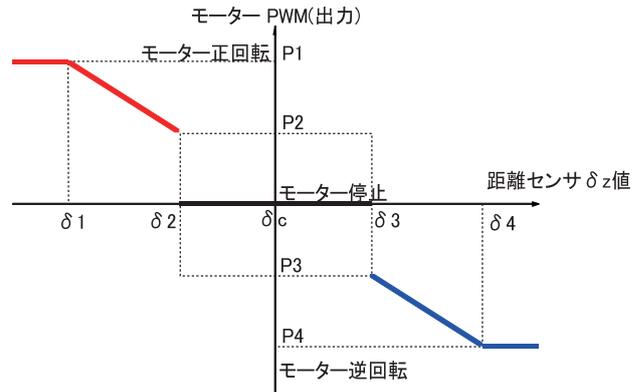


図-4 距離センサの値とモータ出力の関係 (鉛直制御)

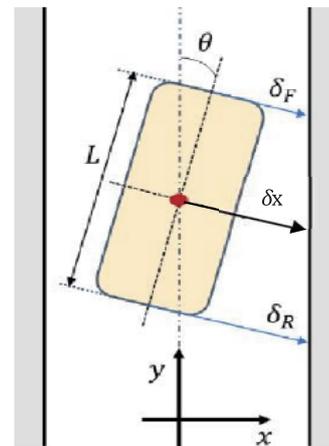


図-5 水平制御の概念 (x-y 座標)

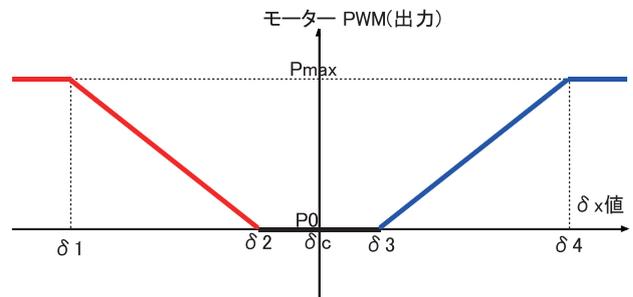


図-6 距離センサの値とモータ出力の関係 (水平制御)

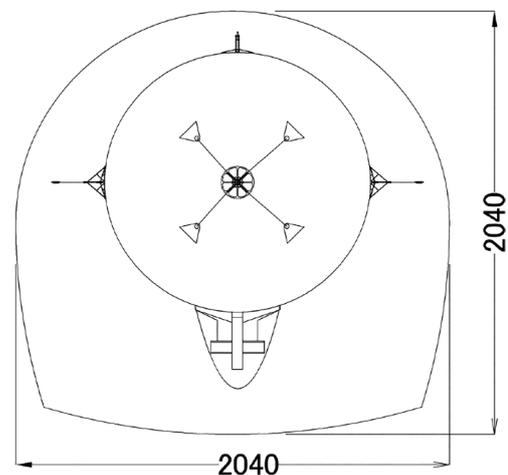


図-7 水路トンネル断面

に接続する下流側の水槽（作業スペース長さ 8.7 m × 幅 3.8 m × 高さ 2.8~4.0 m）においてトンネルマンボウの組立て、調整を行い、上流に向かって自律飛行させた。

4-2 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

トンネルマンボウを水路トンネル内の 2,500 m を自律飛行させ、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。鉛直方向は自律制御により行い、水平方向については、水平スラストを作動させず、ガイドフレームによる制御を行った。

(3) 取得画像の確認

画像取得状況は、図-8 に示す 1~15 mm の太さを変えた線（線と線の間隔も 1~15 mm）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。

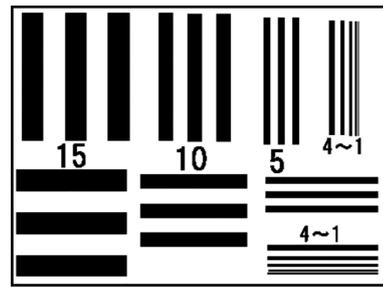


図-8 チェックシート
(数字は黒帯の太さとその間隔 (mm) を表す)

4-3 実験結果

(1) 作業性の確認

トンネルマンボウの組立調整を行った下流側水槽は、地上の 1,200 mm × 800 mm の開口部より水槽床面までタラップで約 5 m 降りた位置にあった。このため、トンネルマンボウは各パーツをロープを用いて水槽内まで荷降ろしし、写真-5 に示すように水槽内で組み立てた。ヘリウムガスポンペは地上に配置し、長さ 10 m 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。



写真-5 組立状況

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、トンネルマンボウによる調査では、2,500 m 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。

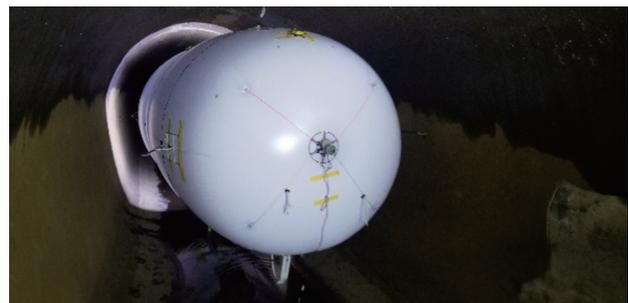


写真-6 飛行状況

(2) 長距離自律飛行試験

発進箇所では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、自律飛行させた。2,500 m の距離の長距離自律飛行を 2 回行った（写真-6）。

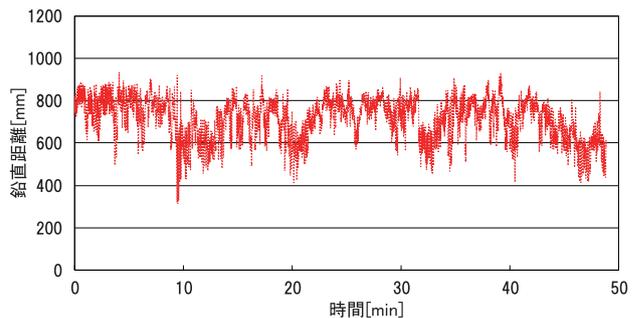


図-9 長距離自律飛行時の機体とトンネル床面の距離

① 鉛直方向制御結果

長距離自律飛行時の機体とトンネル床面の距離を図-9 に示す。床面との距離 300 mm 以上を保ち、下部ガイドフレームがほとんど当たることなく飛行できた。これは、図-10 に示すようにトンネルマンボウと床面までの鉛直距離が小さくなると PWM 値（モータ出力）が上昇して鉛直スラストが作動することによる。また、浮力調整装置により、ヘリウムガスの抜けに起因する飛行高度の低下を抑制できた。

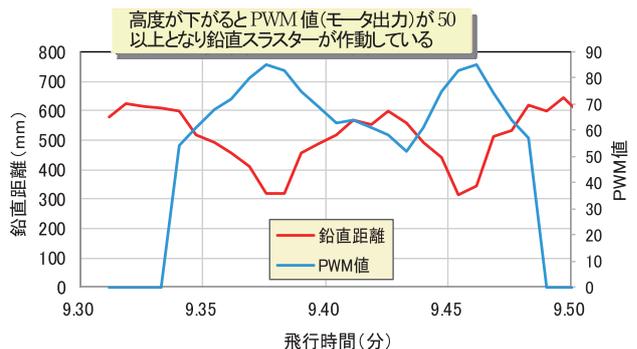


図-10 長距離自律飛行時の鉛直距離測定値と PWM 値 (抜粋)

② ガイドフレームの稼働状況

バルーン上部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が壁面に衝突したり、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3 km/hでの2,500 m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-11に示す。残圧100%の12.4 Vから2,500 m飛行後の電圧の測定値(1回目11.82 V, 2回目11.77 V)から、使用限度の10.8 Vに低下するまでの飛行可能距離は6,000 m以上となっており、2,500 m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1.5 km/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10 mmが判別できた(写真-7)。一方、飛行速度が3 km/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15 mmがようやく判別できる程度であった。よって、10 mm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3 km/hの飛行では6,000 mの飛行が可能であることから、半分の1.5 km/hまで低下させても2,500 mの調査は十分に可能である。

§5. まとめ

飛行船型水路トンネル調査ロボット「トンネルマンボウ」の開発で得られた成果を以下に記す。

- ① トンネルマンボウは、ヘリウムガスを注入したバルーンにより得た浮力と、自律制御機能およびガイドフレームにより、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2,500 mの自律飛行が可能である。
- ② トンネルマンボウの総質量は5 kg程度と軽量であり、分割・運搬が可能である。また、ヘリウムガスは、ホースを用いることでガスボンベから離れた場所から注入可能であるため、坑口部が立坑下にある場合でも運搬、組立、発進が可能であった。
- 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、2,500 m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。

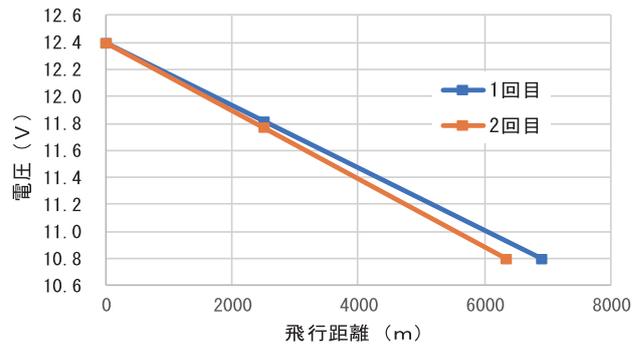


図-11 飛行距離とバッテリー電圧の関係 (10.8Vになるまで飛行可能)

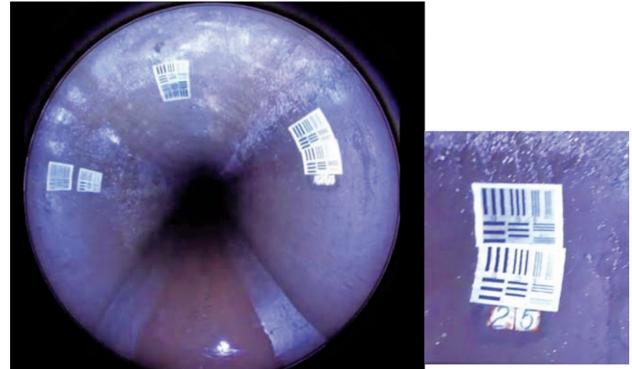


写真-7 画像取得状況

- ④ 前部に搭載した360度カメラと照明装置により、トンネル壁面の連続画像で10 mmを判別できることがわかった。

トンネルマンボウは、災害後の概査を目的として開発した。今後は、トンネルマンボウの適用事例を増やすことで、断面の違いや坑内の通風状態など、トンネルの条件が異なる場合の適用性について確認するとともに、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。

謝辞. 現場実証にあたり、早くトンネルを提供いただいたトンネル管理者様および現場への案内や打合せなどの場所を提供していただいた西松の現場関係各位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