

隧道内点検支援装置の試作研究

細谷和範

所属： 独立行政法人国立高等専門学校機構 津山工業高等専門学校 総合理工学科

概要

我が国には山間地域から導水して電力を得る中小の水力発電所が点在しており，取水用の隧道は数kmに及ぶことも珍しくはない．配管の多くは施工から数十年が経過しており，経年劣化や地震や豪雨にともなう点検が不可欠であるが，導管の点検・維持管理作業には多大な負担がかかっているようである．取水を目的とした隧道の多くは人の背丈よりも低く，また取水を停止しても漏水等により水が溜まっていることが多い．このような場所での移動と点検作業は点検者に大きな負担がかかる．本研究ではコンクリート製の隧道外壁の点検作業の省力化を目指し，作業者が低姿勢でも疲れにくい歩行補助型及び自走型のロボットを試作した．この装置には全天球カメラを取り付けられ，移動しながら撮影した周囲の画像を元に異変箇所の特定を行う．また本研究では浸水箇所の歩行負担を減らすために小型フィンを付けた長靴を考案し，フィンのパターンと流動抵抗の関係を調べた．

1. はじめに

我が国の山間地域には数kmに及ぶ導水用の隧道を持つ中小の水力発電所が点在する．高度経済成長期やそれ以前に建設された設備は施工から数十年が経過しており，中には建設から 50 年以上経過したものもある．このようなインフラ設備の維持には点検と補修が不可欠であるが，点検・維持管理作業にかかる作業者の負担は大きい．中小規模の水力発電施設における導水管や隧道には人の背丈よりも低いものもあり，内部は点検のために取水を停止しても湧水や漏水等のために水位が 20 cm 程度の流れがある区間もある．隧道の長さは発電施設の規模にもよるが数 km になることもあり，山中の地下を流れる無圧隧道ではコンクリート製の側壁とアーチ状の天井を持つカルバート工法区間の他，素掘りのままになっている区間もある (Fig. 1)．隧道には 1km 強の間隔

で点検口が設けられているが，入口は非常に狭く，また隧道内には照明や電源がないために点検作業時には必要な資材や電源を持って移動する必要がある．隧道設備の点検作業はマニュアル等[1-3]に従って行われ，年や月単位の定期検査に加えて災害や非常時等の臨時点検も行われる．検査では亀裂や漏水などの変状を目視により点

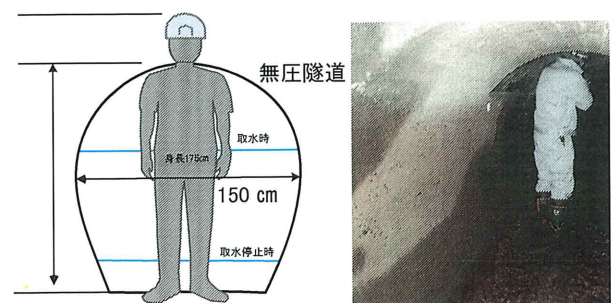


Fig. 1 Cross section of a free flow tunnel

検し、変状のある箇所は打音検査も実施される。このように隧道調査は基本的に人力で行われるが腰を屈めながら数時間の移動を伴う点検作業は、点検者に多大な身体的かつ精神的な負担を与える。こうしたトンネル点検作業の省力化・迅速化を図るための支援装置が実用化されている[4-6]。例えば道路用トンネルでは各種センサーを搭載した車両や UAV を使って不具合箇所を診断する検査システムが実用可能な状況である。また人が入れないような狭い下水管等にはアンビリカルケーブルによって給電や制御が行われる検査ロボットが実用化され、作業負担の軽減が図られている。しかしながら電源車が配車できない険しい山中にあり、人の背丈よりも低い隧道に大掛かりな点検システムの投入は容易ではない。そこで本研究では中小規模の水力発電施設につながる隧道点検作業支援装置として市販の歩行補助器を改造し、腰を屈曲した状態での移動を余儀なくされる作業者の歩行を補助する点検装置を試作した (Fig. 2a)。これまでも軽量で小型の台車を用いたトンネル点検システムはいくつか提案されているが、点検作業者の歩行補助に注目したものはないようである。また、調査に協力いただいた県職員による聞き取りから、小型軽量な自走型点検装置も活用が期待されることがわかったため、歩行補助機能を有しない自走式の移動ロボットを試作した。それぞれの移動装置にはインターバル撮影が可能な魚眼カメラにより全周囲の画像を取得する。撮影された画像は入口からの距離とともにカルテに記載され、最終的にはトンネル平面図に不具合箇所の記録を集約されることを想定している。

本研究ではさらに水流のある隧道内を歩行する点検者の負担を軽減するために長靴にかかる流動抵抗の低減にも取り組んだ (Fig. 2b)。水力発電所につながる隧道は 1 km を越えるものも少なくなく、中腰姿勢で長時間移動する際にかかる水の抵抗は大きい (たとえば水害対策マニュアル[7]によれば浸水深が大きいと歩行に支障を来し、50 cm の推進で半数の人が避難困難になること、水流が 1 m/s ある場合、水深 40 cm が移動できる限界水深であること等が示されている)。そこで長靴を想定した柱状体に魚の小離鰭 (しょうりき) をヒントとしたフィンをつけて流れの剥離制御を行い、対策を施さな

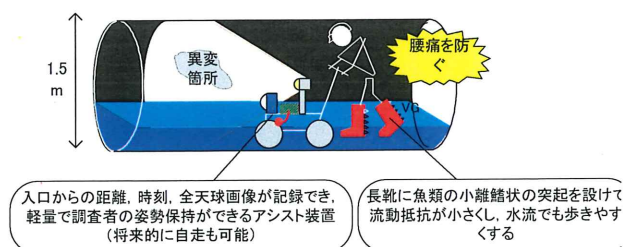
い長靴に対して抗力係数 (C_d 値) を 2 割程度減少させることを目標とした。

本報告でははじめに試作した装置の概要と試走により得られた装置の利点と課題について述べる。つづいて整流フィンによる長靴の流動抵抗について述べる。

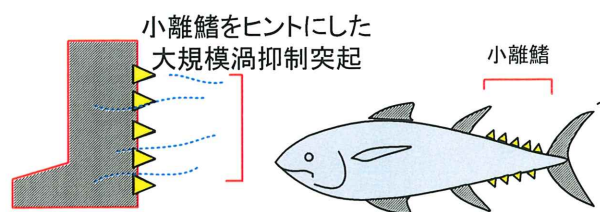
2. 点検支援装置の試作と現地試験

2.1 点検支援装置の設計

本研究では中小の水力発電所においてダムや河川から導水する無圧隧道や圧力隧道を点検・調査するための支援装置として、人力による点検を要する作業の省力化と迅速化に寄与するシステムを考えた。本装置は定期検査及び災害等の臨時点検を想定し、作業者が隧道内に入って不具合箇所を目視と打音検査により点検し、カルテ (不具合発生位置と現場写真が記録される) の作成に資するものとした。中小河川から導水される隧道には半世紀近く前に作られたものも少なくなく、山中に掘削された隧道は人の背丈よりも低いものがあり、歩行時の腰への負担は非常に大きい。水路の断面形状は無圧隧道の場合、平らなインバート部と側壁部はコンクリートで打設されているが、天井部は素掘りのままの状態の箇所とコンクリート製のアーチ部になっている箇所とが混在する。隧道内へは点検用の出入り口や点検孔から出入りするが、幅が 50 cm 程度と狭いところもあることから提案する点検装置は軽量でかつ折り畳みが可能なものとし



(a) Monitoring equipment



(b) Bio inspired low-drag boots

Fig. 2 Conceptual diagrams of the inspection support system

た. 想定される装置の運用方法は通常の定期点検時に
いて撮影された全天球画像を用いて異変箇所の詳細な
カルテや解析に活用するものであるが, 臨時点検などで
急を要する場合は魚眼カメラを動画モードに切り替え
て隧道内を踏査し, 調査後, VR ゴーグルを用いて不具
合箇所を調べることを念頭においた. また自動走行が可
能な自走型装置は, シンプルでかつ拡張性のある構造で
あることを設計要件とした.

(1) 歩行補助型の点検支援装置

前述の要件を満たす作業支援装置として, Fig. 3 に示
す手押し車型で走破性の良い歩行補助器(歩行器として
は大径の 10 インチ車輪を有する)にカメラと照明, 測
距センサーからなる構成とした. Table 1 に仕様を示す.
カメラと照明を搭載する台車(歩行器)は 51 cmの全幅
を 25 cm程に折りたたむことができる. 台車には前方か
ら側壁にかけて広範囲を均一な明るさで照らす LED 作
業灯を搭載し, これに Fig. 4 に示す魚眼カメラと車輪の
回転数より入口からの距離を示す 7 セグカウンタ, 天井
面の凹凸を把握するためのレーザーシート光源が取り
付けられる. 距離計は車輪に埋め込んだ磁石の通過数を
リードスイッチで検出するもので, 建物内での予備調査
により約 200m につき 1m 程度の誤差を有する. ライト
はパイプフレームに収められており, カメラはライトの
フレームに測距カウンタとともに固定してユニット化
し, 歩行器と分離可能とした.

(2) 自走型の点検支援装置

本研究の当初は試作する点検支援装置は隧道内に入
って行う点検作業の補助や姿勢保持を目的としていた
が, 調査協力を頂いた鳥取県企業局との打ち合わせによ
り, より作業を省力化できる可能性がある小型かつ軽量
の自走式撮影装置も試作することとなった.

Fig. 5 と Table 1 に試作した自走式の点検支援装置の
外観と仕様を示す. 全幅は 50 cm, 全長 1 m で高さはお
よそ 40 cmであり, 車輪がつくスイングアームは着脱可
能である. 水が残る水路を走行するため, 電動モータや
回路ボックスは地上高 20 cm の位置に配し, 左右それぞ
れに配置されるモーターからの動力はベルトを介して

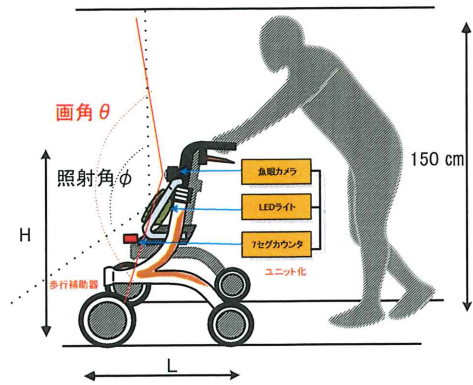


Fig. 3 Developed walking-assist type equipment

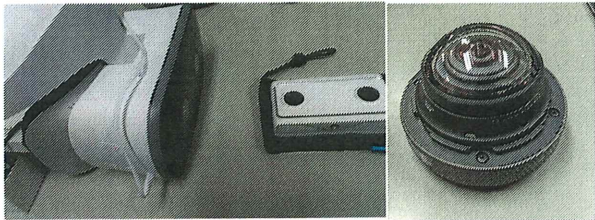


Fig. 4 Equipped fisheye cameras

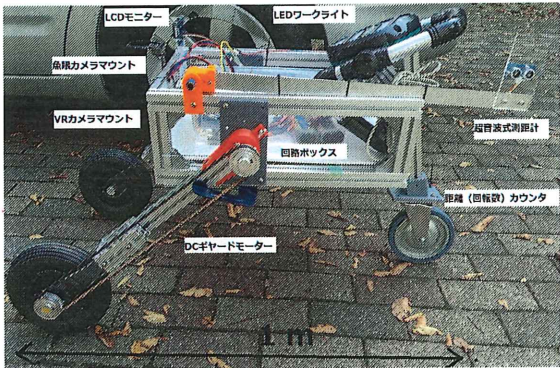


Fig. 5 Developed self-propelled moving type equipment

Table 1 Equipment specification

Walking-assist type	Kawamura cycle co., ltd. KW40 Size: Width: 51cm (fold: 25cm), Height: H=90cm, Length: L=70 cm, Weight:11.0kg
Self-propelled moving type	Size: Width: 50 cm, Height: H=40cm, Length: L=100 cm, Weight:10 kg Drive motor: DC-geared motor Control unit: Arduino UNO + GROVE Sensor: Ultrasonic distance sensor
Fisheye camera-1	Model:CASIO-EX-FR200 (3888×3888 pix/eye) Angle of view : 185°
Fisheye camera-2 (Fig. 3)	Model: Lenovo Mirage Camera (3016× 3016 pix /eye) and Google-VR180 Angle of view : 180° Movie mode: 30 fps (2560 × 1440 pix / 2 eye)
LED Light	HITACHI (UB18DGL, 250 lux/m ² ,18W)

車輪に伝達される。側方には壁との距離をcm単位で計測する超音波センサーが取り付けられる。後輪には車輪の回転数をカウントするためのリードスイッチが付き、走行距離を計測する。各センサーからの信号は Arduino マイコンで処理され、出力値や走行距離は前方のカメラマウント背後に取り付けられた LCD モニター上に表示される。車両の操舵は左右の車輪の回転数の差によって行われ、測距データに基づくフィードバック制御により車両は隧道壁面から常に 50 cm（断面の中央）を維持するよう走行する。回路ボックス上には前節の手押し型装置と同様にカメラと照明が取り付けられる。ここで本装置では魚眼カメラは前方または上方に向けて取り付けられることができる。

2.2 試走場所と試走方法

走行実験は鳥取県若桜町にある春米（つくよね）水力発電所（Fig. 6）の無圧隧道で実施した。試走を行った隧道は建設から 50 年が経過し、2018 年 12 月現在リニューアル事業中のため取水が停止されている。隧道の断面は幅 1.5 m、高さ 1.5 m のアーチ形状で総延長は 2 km を越える。隧道は 2 本敷設されており、最終的に $\phi 1.5\text{m}$ の圧力管に合流し、220m の斜面下にあるタービン建屋に導水される。

春米発電所無圧隧道における試走は複数にわたって行った。歩行補助型装置の試走は 2018 年 10 月 15 日と 11 月 19 日の 2 回にかけて行い、自走型装置の試走は 2019 年 9 月 30 日に行った。試走地点は無圧隧道の支線の一つであり、点検口にアクセスしやすい三号取水支線の上流側のカジナミ川付近とした。何れの日も晴天であったが、本稿に掲載する写真を撮影した 2018 年 11 月の調査時には隧道内におよそ 10 cm 程度の水深で 1m/s 程度の流れがあった。歩行補助型装置の試走は水路から高さ 3 m の位置にある点検口（Fig. 7）から機材一式を降ろして組み立てを行った後、直線状の隧道をおよそ 100 m 移動しながら動画撮影と静止画撮影およびインターバル撮影を行った。ここでインターバル撮影間隔は使用したカメラの設定値の中で最も高頻度の 5 秒とした。歩行速度は大雑把であるが普通歩行（おおよそ 4 km/h）のケースとその半分のケースとで行った。試走後、持ち帰

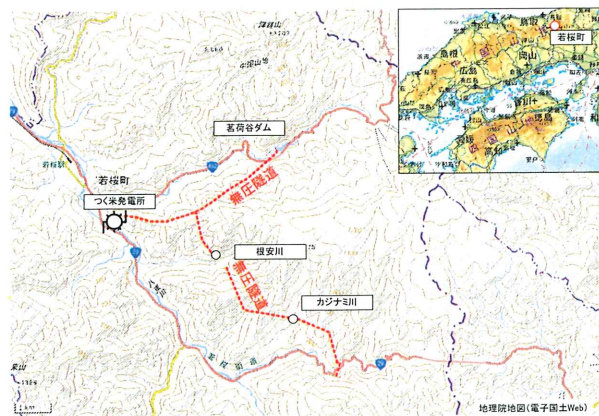


Fig. 6 Tested tunnel (Wakasa, Tottori)

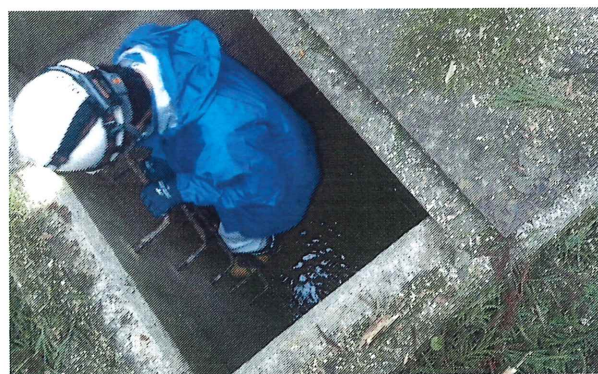


Fig. 7 Inspection port of the free flow tunnel

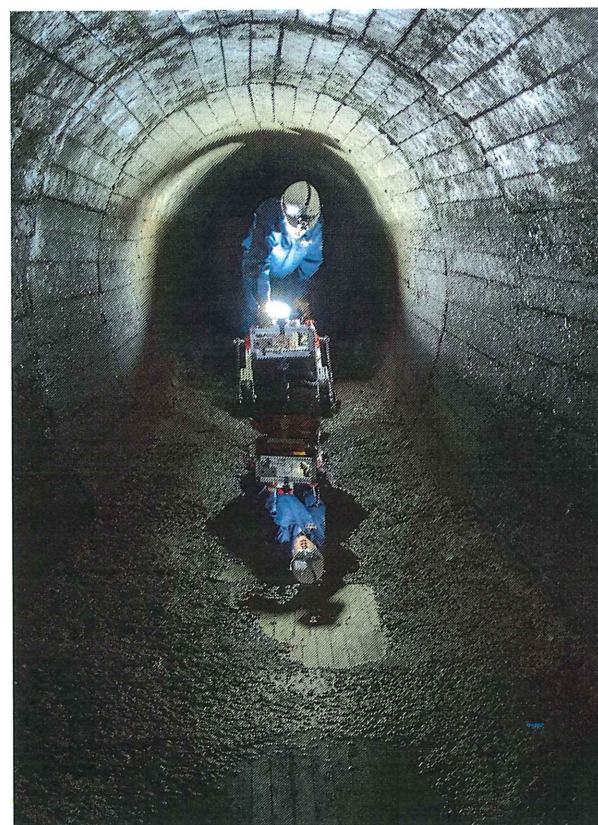


Fig. 8 Test scene (self-propelled moving robot)

った撮影画像を整理し、画像のブレや距離カウンタ値の視認性の評価を行った。併せて現地試走に参加いただいた鳥取県企業局の職員 2 名に使用感や改善点を聞き取った。また自走型装置の試走は制御用マイコンの調整を行いながらおおよそ 20 m の区間を走行させ、安定した走行を行うための条件を調べた (Fig. 8)。

2.3 装置の操作性と撮影画像

(1) 歩行補助型装置

隧道点検口から降ろされた装置の撮影画像 (単眼カメラ) を Fig. 9 に示す。カメラ他の計測装置は LED ライトのフレームに固定されてユニット化されており、折りたたまれた状態で搬入された歩行器の展開後、着座部に LED ユニットを取り付けるため準備時間は数分で終了する。画像には広角の視界の様子が円形に記録され、画面中央が大きく、周囲が小さく映っている。本来は専用のアプリケーションにより全周囲 (本カメラの場合は前方のみ) を観察するものであるが、この画像からでも周囲の様子を伺い知ることができる。画像内には測距用の 7 セグカウンタが映っており、十分に値を読み取ることができる。

Fig. 10 に隧道内をゆっくり歩行したケースの撮影画像 (単眼カメラ) を示す。LED ライトにより照らされた隧道内での撮影画像から壁面の様子を十分に把握することができ、位置情報に基づき、カルテ作りが可能であると考えられる (なお撮影時、距離カウンタは機能していたが振動と漏水によりセンサー部の回路がショートし、入口から 10 数 m の地点で故障したため本画像にカウンタ値は映っていない)。Fig. 10 には過去の調査によって記されたマークや壁面からの水の滲みが確認できる。また赤いレーザーシート光から天井の形状が視認できることがわかる。別の場所で撮影された画像には亀裂修復箇所や素掘による天井の凹凸の様子がはっきりと確認できた。隧道底面には長年の水流によって高さ 5 mm 程度の凹凸ができており、歩行器を押す手には振動が伝わった。LED ライトは歩行器の着座部のクッションにより多少振動の吸収が見られたが、通常歩行速度で移動すると画像は不鮮明になった。Fig. 11 は複眼カメラによる撮影動画のスナップショットである。静止画に比べ

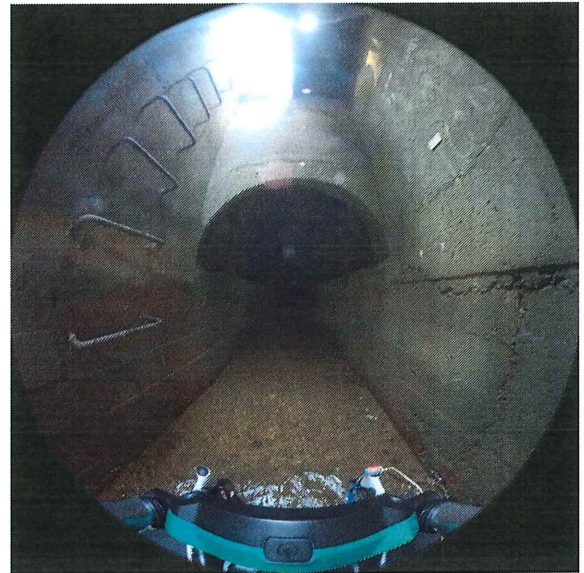


Fig. 9 Fisheye camera image (at the access bore)

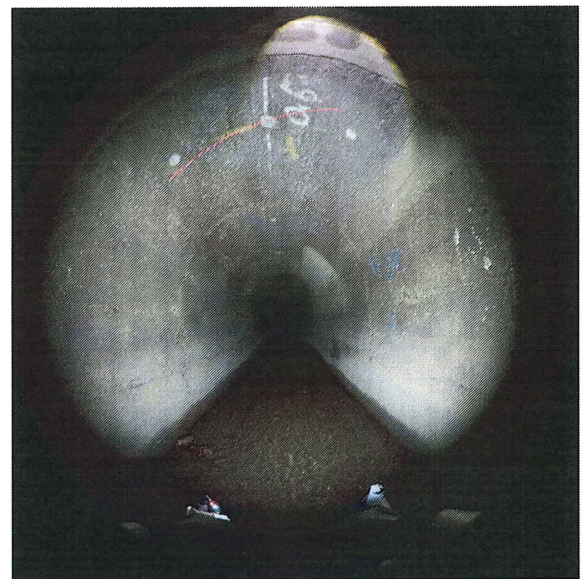


Fig. 10 Fisheye camera image



Fig. 11 VR camera image

て解像度が劣ることとカメラ自体の光感度によりやや不鮮明な画像となっている。この画像を VR ゴーグル上で見ると、あたかも現地にいるような感覚になり、緊張感をもって周囲の様子を観察しようとあたりを見回すが、画質の低さや目の疲れ（個人差があるであろう）のため、長時間の閲覧は難しいと思われる。このようにカルテ作りにはインターバル撮影による静止画を、現場の雰囲気や状況といった感覚的な情報共有には VR ゴーグルが適しているとみられる。このように、取得画像から目視により漏水や亀裂などを把握することは可能であるが、マニュアル作業による魚眼画像の展開と点検作業の省力化も必要である。今後は他のトンネル調査装置と同じく、取得画像を集約してトンネルの平面展開図を自動的に作成することや、スペクトルカメラを導入してバンド間演算による不具合箇所の抽出等が必要である。

歩行器が隧道調査に使用されることはこれまでになかったが、試走の結果、腰を屈めての歩行の負担軽減が確認された。試走では通常歩行速度で撮影をおこなったが、高さ 1.5 m の隧道内をこの速さで歩行することは腰にかなりの負担をかける。しかしながら試走を行った学生や県の職員から歩行が非常に楽であることが感想として聞かれた。また、県職員により本試走地点とは別の隧道で試走を行ったところ、水のある隧道内での移動が楽になることに加え、着座部を利用して休憩が取れることが利点として挙げられた。一方で装置重量が 10 kg を越える装置の搬入・搬出が難しい場所もあり、より軽量でかつコンパクトな装置が必要との指摘も挙げられた。

(2) 自走型装置

隧道点検口から降ろされた自走型装置を走行させて車体の挙動を観察した (Fig. 8)。現地での試走に先立ち、建物内の廊下にて試走を行ったところ、測距センサーからの信号を基に、P（比例）制御で旋回動作を与えたところ、車両はスムーズに走行したのに対して、現地では凹凸のある路面からの振動により測距センサーが振動し、さらに転がり抵抗の増大によってタイヤとモーターとをつなぐ駆動ベルトが空転し、直進せずに蛇行するケースが見られた。そこで P 制御に代わり、測距閾値を設けてモーターを ON/OFF 制御する方式にプログラムを

書き換えたところ、隧道に沿って走行することが可能になった。しかしながら、現段階では実用に耐えうるものとは言えず、今後さらなる改良が必要である。

3. 長靴の流動抵抗低減の試み

長靴のような柱状物体にかかる流動抵抗は剥離渦の発生によりその抵抗 D は流速 u の二乗に比例して大きくなる。面積を A 、流体密度を ρ とすると、抗力係数 C_D は次のように示される。

$$C_D = \frac{2D}{\rho Au^2}$$

柱状の鈍頭物体にかかる流動抵抗は後流の乱れや渦による物体回りの圧力場が大きく影響する。物体の抗力係数を低減するためには、投影面積を減じればよいが、長靴のように形状を変えることができない場合は、流れの剥離を抑え、剥離する渦のスケールをなるべく小規模なものに置き換えることにより整流された状態に近い流れ場を作り出すことが効果的である。流れの剥離制御は水中に棲息する生物にみられ、尾ビレを激しく振るマグロの小離鰭や殻の開閉によって生じる推進力を利用する二枚貝にみられる。例えば放射状のスリットを有するホタテ貝は高迎角時の揚力係数が 2 割ほど向上していることが示されている[8]。本研究ではスリット状フィンを長靴に付与した場合の抗力係数を水理実験により評価した。また併せて数値シミュレーションにより長靴後流のパターンと圧力場を推算した。

3.1 実験装置と実験条件

長靴は踵から爪先までの足の甲を覆う部分と脛部を覆う部分とから構成される。本報告では脛部を想定したウレタンブロックにスリットを入れた供試物体を回流水槽内に設置し、フォースゲージにより抗力の時間平均値を計測した。Fig. 12 にウレタンブロックの外観とスリットのパターンを示す。ブロックは高さ 12 cm、長さ 10 cm、厚さ 3 cm を有し、スリットパターンは①スリットなし、②水平パターン（スリットは凸部が約 4 mm、凹部が 6 mm の幅を有する）、③ 5° の傾斜付、④ $\pm 5^\circ$ 放射状のパターンとした。回流水槽は幅 30 cm、水深 25 cm、

長さ 1 m のテスト部を持ち、印加した流速は 20 cm/s～50 cm/s ($Re = 18,000 \sim 45,000$) とした。

数値シミュレーションは市販の有限体積法による非圧縮流体解析コード (Flowsquare) を用い、長靴を約 20° 傾けたケースについて、計算を行った。ここで、流体は水とし、流入部の印加流速は 0.5 m/s とした。

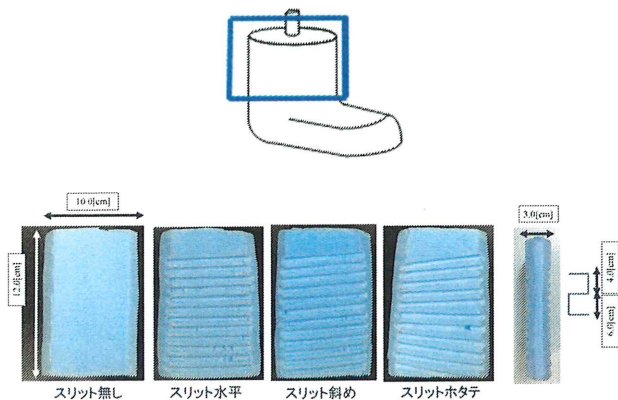


Fig. 12 Tested bluff bodies with striped pattern

3.2 計測結果

Fig. 13 と Fig. 14 に印加流速に対する抗力及び抗力係数を示す。概して見るとスリットを有するモデルはいずれもスリットなしに比べて抗力は小さく、抗力係数は水平スリットが最も小さく、次いで斜めスリット、ホタテ型（放射状）の順となり、スリットの無いモデルに比べて最大で 4 割の抗力係数の軽減がみられた。Fig. 15 に数値シミュレーション結果のスナップショットを示す。図は長靴の中央断面を示しており、流れは図の左から右に向かって流れる。カラーコンターは圧力差（入口との差）を示し、矢印は流速ベクトルを示す。両結果とも長靴の正面には高い圧力が見られるが、長靴側面から後流にかけては違いが見られ、スリットのあるモデルの方が、圧力差が小さく、長靴にかかる抵抗が小さいことが推測される。

以上の結果より、長靴に整流スリットを設けることで流動抵抗の減少が期待できる。ただし、スリットは流れの流入角に対して水平である必要があり、歩行時の足の動きに対応してスリット取り付け角が変化する工夫が必要となる。

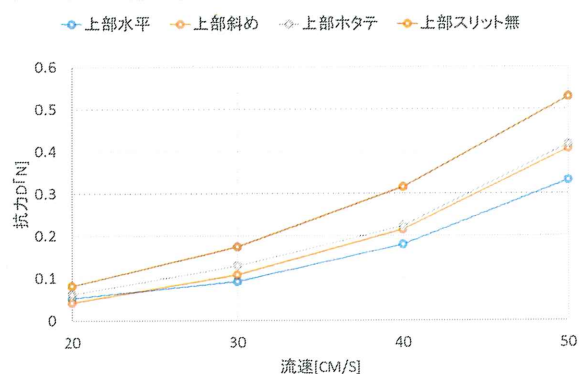


Fig. 13 Obtained drag force

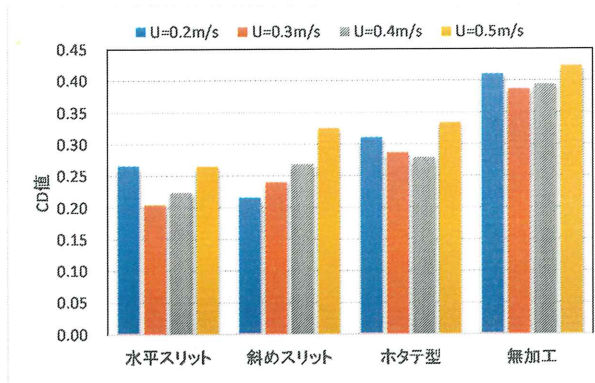
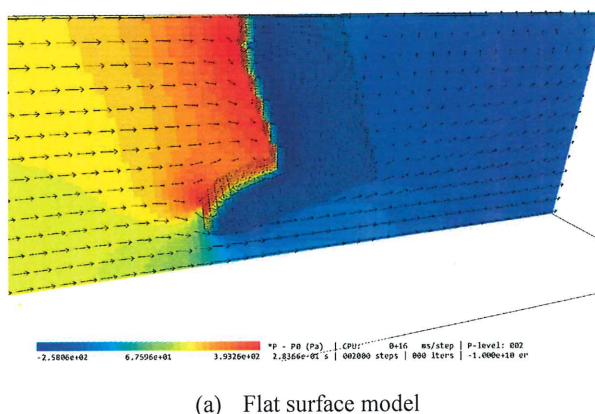
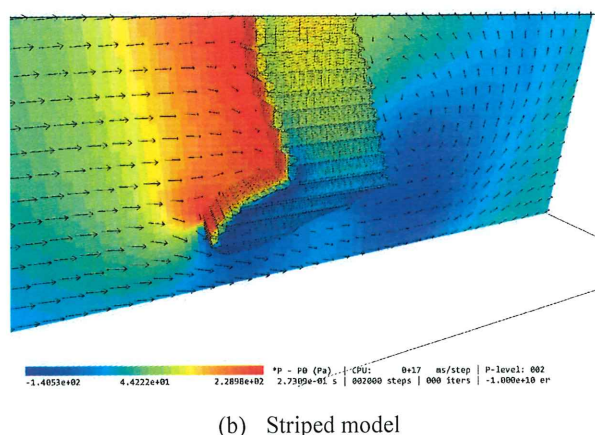


Fig. 14 Estimated drag coefficient



(a) Flat surface model



(b) Striped model

Fig. 15 Simulated pressure distributions

4. おわりに

本研究では建設から 50 年近く経過した狭い隧道調査の作業に資する装置として歩行補助器に照明と魚眼カメラ、距離カウンタを搭載した点検作業支援装置と隧道に沿って自走する装置を試作した。高さ 1.5 m の隧道内を試走した結果、歩行補助型の装置は作業者の姿勢保持や腰を屈めての歩行補助に効果があり、また魚眼カメラによる前方の周囲画像はカルテ作成に使用な壁面の様子を捉えることができることを確認した。また VR ゴーグルを使用した隧道内画像の観察により、現場の状況や雰囲気と共有できる可能性があることがわかった。一方、自走型は 20 m 程度の区間の自立走行が可能であったものの振動対策など、さらなる改良が必要である。今後は試走により取得した各画像の特徴点をもとに 1 枚の平面図に展開したカルテ作成や分光撮影による不具合箇所の識別を試みる予定である。

本研究では水流のある隧道内の歩行に伴う点検者の負担を減じるために、長靴に多数のスリット状の整流フィンを設け、抗力の低減を試みた。簡単な水理実験と数値シミュレーションの結果、スリットによる整流により、何も加工を施さないモデルにくらべて抗力係数が 4 割程度減少することがわかった。ただし、激しく動く長靴に対して整流スリットが抗力低減に寄与できるかどうかは未解明であり、今後さらに研究をすすめたい。

謝 辞

本研究は、平成 30 年度公益信託エスベック地球環境研究・技術基金の助成を受けて遂行されました。また現地調査にあたっては鳥取県企業局東部事務所の協力を得て実施されました。ここに感謝の意を表します。加えて各実験に精力的に協力してくれた津山高専の学生諸君（行本君、平石さん、山本君）に対して感謝の意を表します。

参考文献

[1] 農林水産省, 土地改良事業計画設計基準技術書(設計, 水路トンネル), 620pp, 2014.

- [2] 電力工事委員会 技術部会, 水力発電土木施設のリニューアル技術, 430pp, 2015.
- [3] 国土交通省, 道路トンネル定期点検要領, 75pp, 2014.
- [4] トンネル維持管理技術の現場検証・評価の結果, 国土交通省次世代社会インフラ用ロボット現場検証委員会, 75pp, 2016.
- [5] 水口尚司, 大西有三, 西山哲, 西川啓一, 下澤正道, 石村勝伸: 道路トンネルにおける画像およびレーザデータを用いたマネジメント手法の研究, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol. 71(1), 20-30, 2015.
- [6] 野波 健蔵, ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線, 情報管理, 59 (11), 755-763, 2017.
- [7] 国土交通省水管理・国土保全局, 洪水ハザードマップ作成の手引き (改定版)
- [8] Choi, H., Kim, J., Kim, H., Shin, H., Lee, H., Kim, D., Jung, M. and Kim, T., RECENT PROGRESS IN BIOMIMETIC FLOW CONTROL, Proceedings of the ASME/JSME/KSME Joint Fluids Engineering Conference--2015 : July 26-31, 2015, Seoul, Korea.