

1 壁面自動追尾型水路トンネル診断装置の仕様

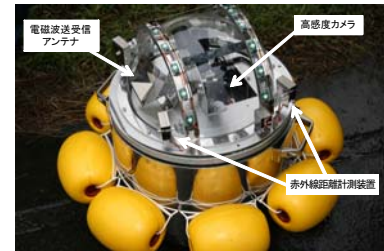
1.1 装置概要

壁面自動追尾型水路トンネル診断装置は、高感度カメラによる壁面連続画像の撮影と撮影カメラが常に壁面に対し正対する壁面自動追尾機構を特徴とした調査機器である。さらに取得した撮影画像からソフトウェアにより変状展開図を自動作成する。

1.1.1 搭載機能

以下に放流船体に搭載する計測装置、計測に必要とする機能を示す。

- 撮影装置 白黒高感度カメラ 3 台（上方、左、右）
壁面自動追尾機構付き
- 水深計測 船体直下水深計測（超音波計測）
- 姿勢検出 赤外線距離計測
- 船体移動位置 ドップラー距離計測



1.1.2 搭載機器詳細

(1) 白黒高感度ビデオカメラ

- 撮像素子 1/3 インチ CCD インターライン転送個体撮像素子
- 有効画素数 768 (H) × 494 (V)
- 最低被写体照度 0.0002lx F1.4
- レンズ メガピクセルバリアフォーカルレンズ (CS マウント)
- 焦点距離 2.6mm～6mm 可変
- 画角（水平×垂直）
TELE 47.1° × 35.4°
WIDE 111.3° × 83.5°

(2) 船体直下水深計測

船体下部に超音波式水深測定装置を取り付けて連続して水深を内部記憶装置に記録する。以下にセンサ仕様を示す。

- 超音波周波数：200kHz ■測深範囲：0.5～99.9m
- 指向角：15° ■測定精度：±2% ■表示：LED3桁（単位 m）

■測定機能：警報出力スイッチ設定・電流出力上下限位置設定・データ平均設定（1～30 回）・表示単位 切換

■出力：警報出力スイッチ（上限 1 点下限 1 点）・4-20mA 電流出力 RS232C

■メモリバックアップ：EEPROM ■電源：DC12V～24V

■消費電力：3W ■外形寸法：100×77.4×55mm ■重量：200g



(3) 撮影方向制御装置

船体上部の回転部分に搭載された赤外線距離計測結果（4 チャンネル）から船体の回転方向を判断し、撮影カメラとドップラーセンサの方向を船体上部で自動回転し、常に一定の方向を維持する機能を搭載する。詳細は、1.2 に示す。

1.1.3 船体形状

船体は円柱を基本とし、上部には透明アクリル半球にて撮影窓を設ける。底部は超音波センサを組み込む。以下に概形を示す。

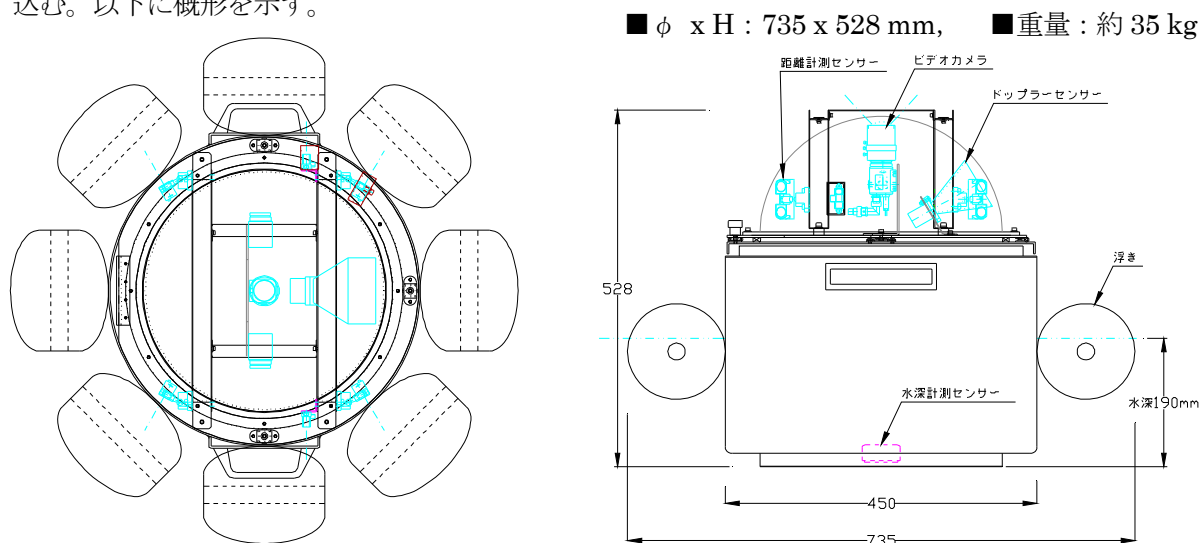


図- 1.1 壁面自動追尾型水路トンネル診断装置 概要図

1.1.4 計測結果の関連付け

各センサから得られた計測結果から次のようなトンネル内状況を得ることができる。

- 船体の移動位置把握による解析
ドップラー移動センサの情報から船体のトンネル内の計測位置を把握でき、他センサより得られた情報の位置特定が可能である。
- トンネルの気中部計測による解析
トンネル内撮影画像、船体移動位置情報からトンネル内変状の有無・位置が確認可能となる。
- トンネル内水深計測による解析
水深計測結果、船体移動位置情報からトンネル内の土砂等堆積状況、底部変形等が把握可能である。

1.2 壁面自動追尾機能

壁面自動追尾型水路トンネル診断装置の壁面自動追尾機能（自律制御機構）は、水路壁面との距離を赤外線距離計測装置により常時モニタリングし、その距離によって高感度カメラが常に水路トンネル壁面に対して正対するシステムである。その方式を図- 1.3 に示す。回転軸に対して対面となる2つの距離計の距離合計と、もう一对の距離計の距離合計が等しくなるように、回転部をこの距離の差に応じて制御する。これによって、水中部の胴体が回転しても、高感度カメラは常に壁面を向く。

本制御状況の実証試験結果を図- 1.4 に示す。船体に取り付けた目印が回転しているにもかかわらず、カメラは常に壁面に正対している状況が確認できた。（実証試験では、カメラ：0回転，船体：右4左7回転）なお、試験実施時の流速は1.2 m/sであった。

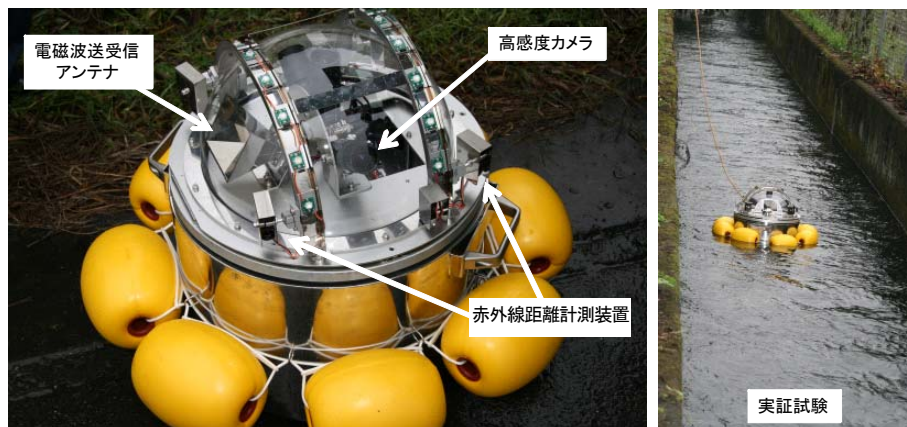


図- 1.2 診断装置の写真

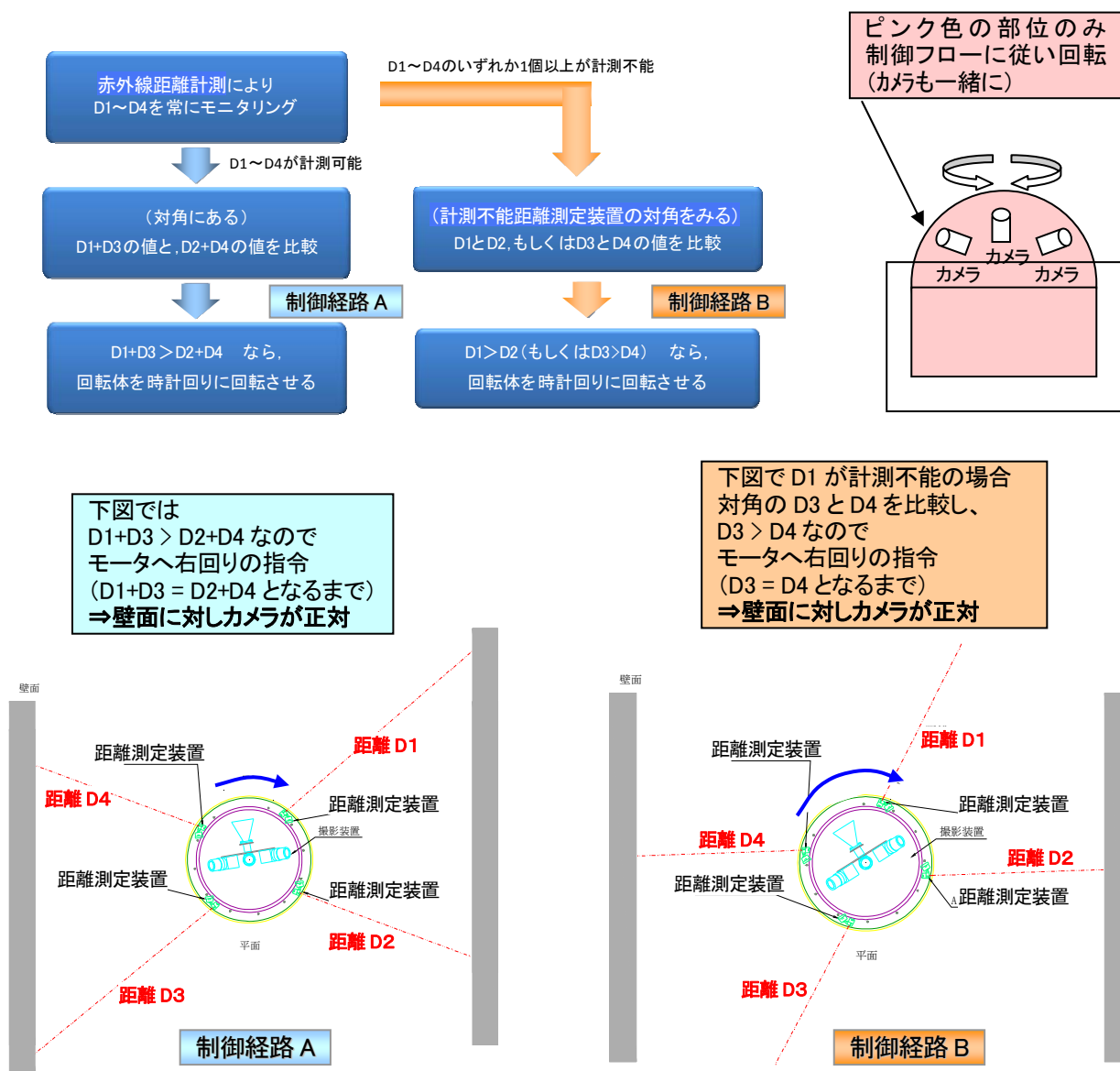
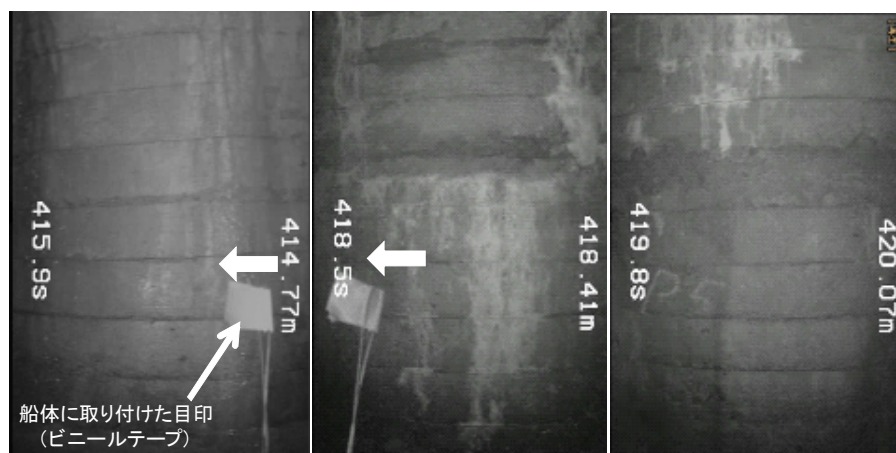


図- 1.3 制御フロー



船体が反時計回りに回転しているにもかかわらず、
高感度カメラは常に水路トンネル側壁に正対して画像を記録している

図- 1.4 実証試験による高感度カメラ制御確認結果

1.3 ドップラー距離計による移動距離検出機能

1.3.1 計測の原理

開発装置は、ドップラー効果を利用して船体の移動速度を計測して移動距離に換算する。

計測装置はマイクロ波の電磁波を発射し、空中を伝播したマイクロ波の一部はトンネル壁面表面等で反射し、計測装置で受信される。受信されるマイクロ波は、発射したマイクロ波の周波数から反射物体の速度に比例したドップラーシフト周波数分シフトされた周波数のマイクロ波で受信される。このドップラーシフト周波数を検知し、演算する事によって移動量を計測する。

$$\text{ドップラーシフト周波数の計算式} \quad fb = \frac{2v}{c-v} fo$$

fb : ドップラーシフト周波数
 fo : 発射信号周波数
 v : 移動体の移動速度
 c : 空中の電磁波伝播速度

検出されるドップラーシフト周波数はマイクロ波が反射する壁面の角度が90度の場合で本装置はトンネルの天井からの反射を捉えるように上方に角度を持ってマイクロ波アンテナを設置している。

これによりドップラーシフト周波数は以下の式で示される係数を持つことになる。

$$\text{係数} = \sin(\theta)$$

本装置例では60度の角度を持たせているので係数は0.866となる。

ドップラーシフト周波数から移動距離への換算は得られたドップラーシフト周波数の1周期に乗数(距離)を乗算して行う。60度の取り付け角度の例では1周期は約1.65 cmとなる。

(fo を 10.5 GHz とした場合)

また、角度以外にトンネル天井からの反射強度を補正係数として計測結果に加味することで、実際のトンネル延長とドップラー距離計測の結果がより誤差が低減する。

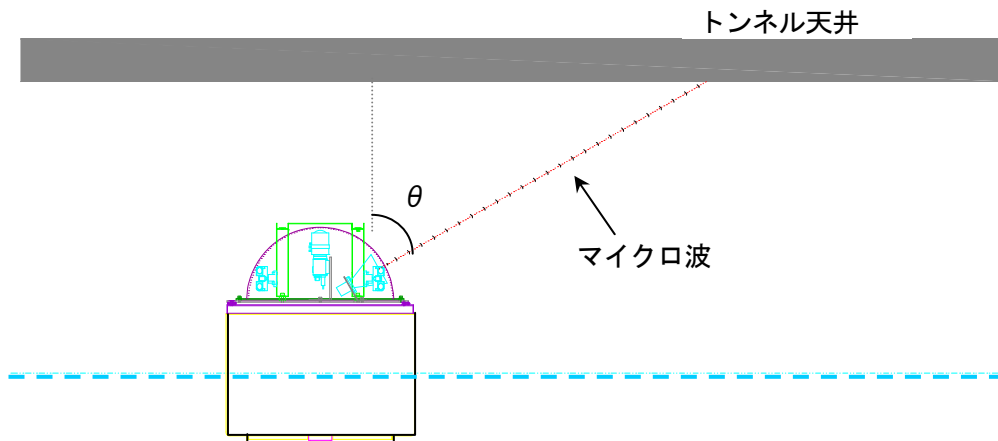


図- 1.5 ドップラー信号計測

1.3.2 移動距離や他の計測情報との同期

記録映像に情報を合成している。また製作装置では計測開始からの時間も画像に合成し、コンピュータ処理しやすいテキストファイルで計測時間と他の計測結果を記録している。

製作例では以下の計測値をテキストファイルと画面に合成して記録している。

計測開始からの時間	画面：0.1 秒単位	テキストファイル：1 秒単位
壁面までの距離	画面：cm単位	テキストファイル：mm単位
水深計測値	画面、テキストファイル：cm単位	
移動距離	画面、テキストファイル：cm単位	
ドップラー検出信号レベル	画面：目安相対値	

1.4 壁面自動追尾型水路トンネル診断装置を用いた試験成果

1.4.1 実証試験成果

以下の表に示す様に、開発した診断装置は実証試験を通し、現地における調査診断に十分資する機能を有していることが明らかとなった。

表- 1.1 診断装置の現地適用性

確認項目	試験結果	備考
撮影映像精度	○	LED 光源の届きにくい画像端部ではやや暗い
自動方向制御機能	○	制御プログラム調整後良好
変状図作成	○	十分に変状を確認可能
水深計測	○	散乱の激しいへドロ状堆積物には不適
作業性（投入・回収）	△	重量に難あり、把手形状の要再考
水密性	△	投入・回収時に若干の水浸入

診断装置によって撮影された壁面映像から、トンネル展開画像作成ソフトによって画像の展開図が吐き出される。この画像展開図に PC 画面上で変状を確認・入力し、変状展開図を作成した。なお、トンネル展開画像作成ソフトは、本研究開発で開発したものであり展開図作成方法を 1.4.2 に示す。

展開図の映像から十分に変状を抽出可能で、精度も目視調査時における写真記録と遜色ない。さらに、水路を変状箇所のみならず一気通貫の撮影画像として記録するため、後日記録を呼び起こしての比較調査等にも使用でき、施設の予防保全診断技術により資するものであるといえる。

変状が画像展開図から十分に確認できる精度を確保

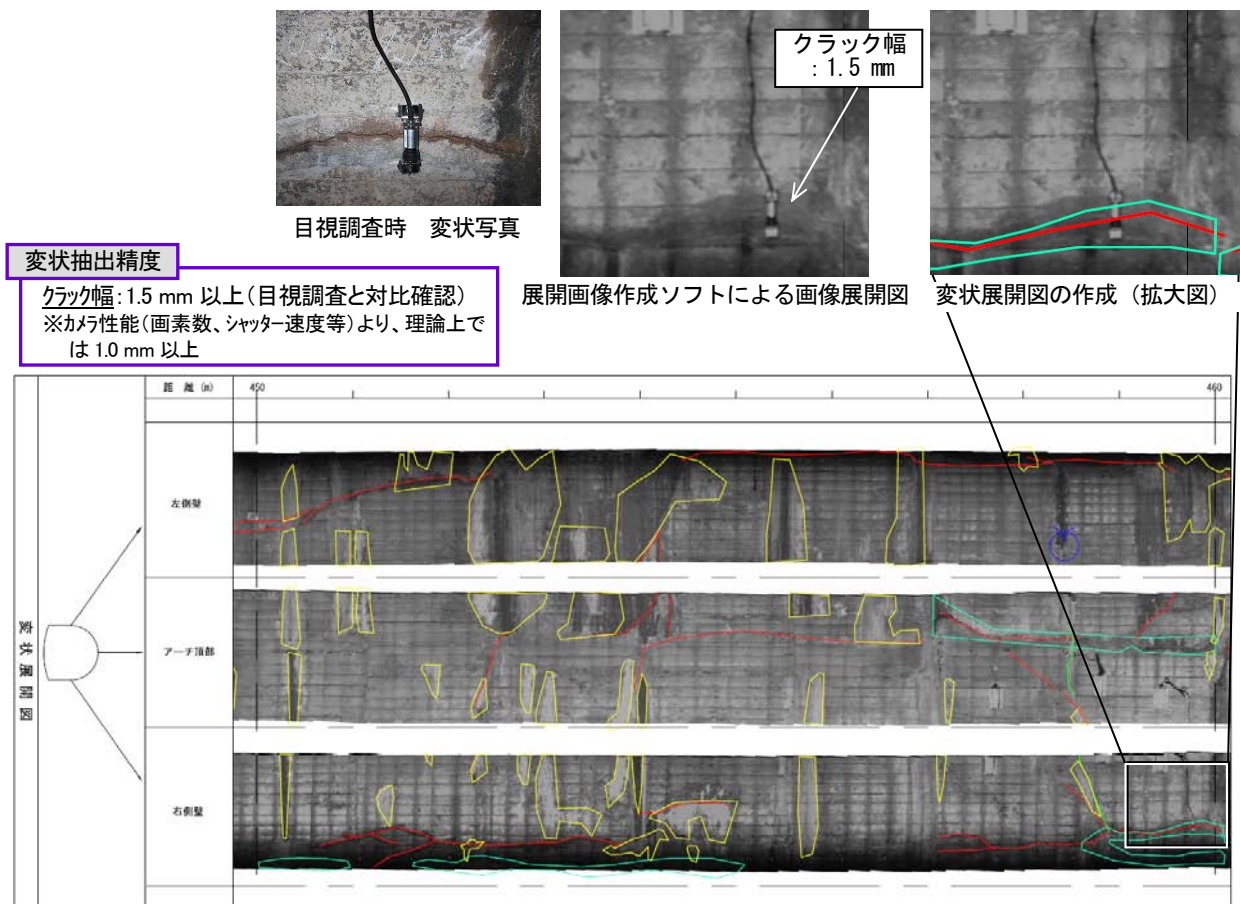


図- 1.6 壁面自動追尾型水路トンネル診断装置によって得られる成果例

1.4.2 トンネル展開画像作成ソフトによる展開画像作成処理方法

本ソフトの基本性能を概説すると、複数台のビデオカメラでトンネル壁面を連続撮影した映像をコンピュータに取り込み、映像からカメラ（映像）の移動量を計算し、切り出し合成することで連続画像を作るソフトである。以下に展開画像を作成するフローを示す。

(1) 各カメラ画像（横断方向画像）の合成

各々のカメラ映像をコマとして切り出し、カメラ台数分の画像を合成（横断方向）

(2) 移動距離算出

1フレーム前の画像と比較し移動ピクセル数を計算する。また傾きが有る場合は傾きも計算する。

(3) あおり補正（遠近による被写体のゆがみを補正）

(1)の横断画像の中から数ポイント（2～10ポイント程度）の距離（横断向）を入力し、それに対するピクセル数の比率が一定になるようにあおり補正テーブルを作る。

※ 最低2ポイントで上下の距離を入力する。

(4) 距離補正（トンネル内部に距離表等目印になるものがある場合の処理）

(1)の画像から距離標がある画像に対し距離を入力し、距離補正テーブルを作る。

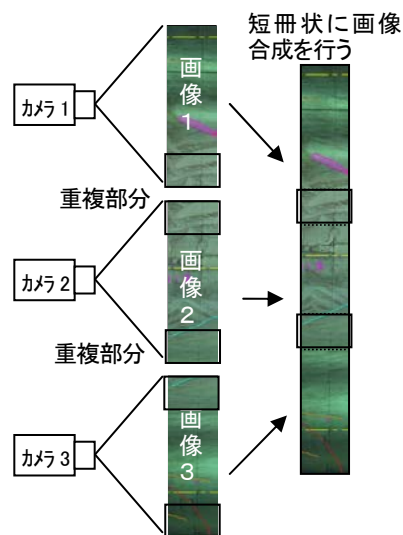
(5) 縦断方向画像の合成

(2)の縦断方向の移動距離を加算し傾きを出し、それが水平になるように補正しながら、(3)のあおり補正テーブルを使用し(1)の画像を合成する。そのときに傾きが有る場合は、傾きも加える。

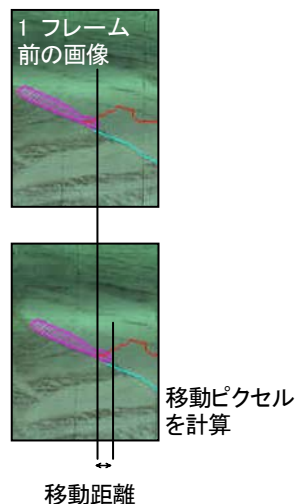
また、最終出力はJPEG または BMP で基本単位（5・10・20m程度）毎に距離補正テーブルを使用し出力する。

※出力分解能は1mm 分解能～

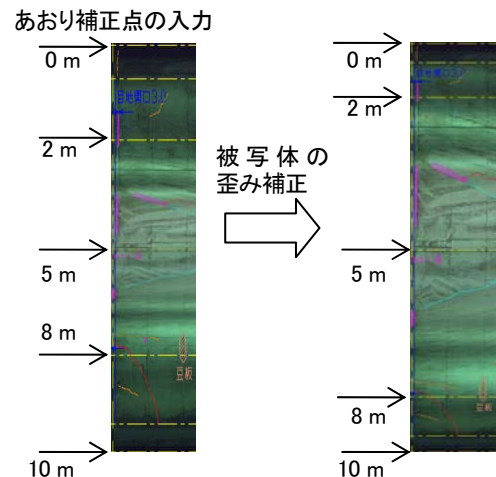
(1) 各カメラ画像の合成



(2) 移動距離算出

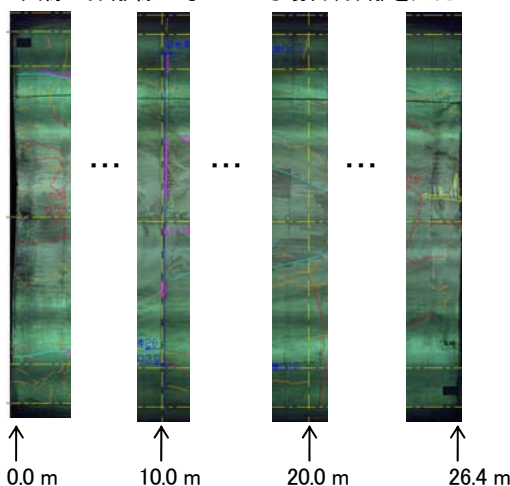


(3) あおり補正



(4) 距離補正

画像に距離標が写っている場合、距離を入力



(5) 縦断方向画像の合成

(2), (3)の補正を加味し、縦断方向に画像を合成していく。

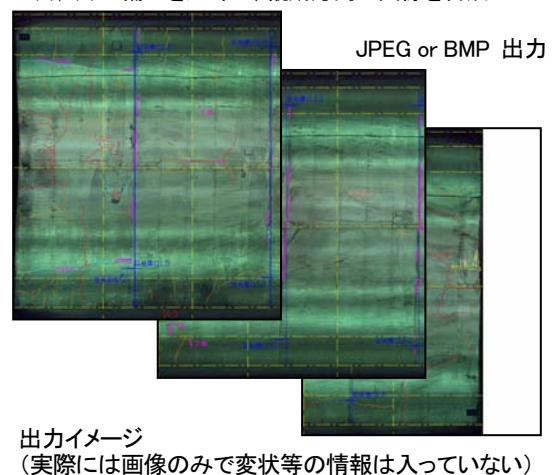


図- 1.7 トンネル展開画像作成ソフトによる展開画像の作成フロー

2 漏水音検出機能搭載水中ロボットカメラの仕様

2.1 仕様概要

漏水音検出機能を搭載する水中ロボットカメラは、撮影画像を通した目視試験に必要な基本性能（下記①～⑤）を満足しており、小型（一辺の最大が 600mm）かつ軽量（本体 20kg）で、汎用性が高いプラットフォームである。

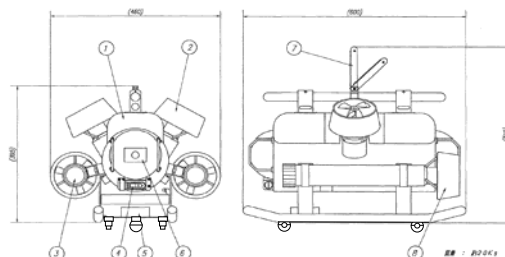
また、制御・電源ケーブルと本体との接続コネクタを改造することで、制御・電源ケーブルの 1 本のみで水中ロボットの制御と漏水音検出機能（AE センサ）のデータ通信を出来る仕様とした。

- ① 施設内部の視認性：70W 投光器 2 灯（前方）と 75W 投光器 1 灯（下方）、水平解像度 480 本の 1/3 インチ CCD により良好な条件下では一定の視認性が期待できる。
- ② 点検速度（操作性）：スラスタを 4 機搭載し、小型で水流に対する抵抗が小さく、安定した姿勢制御や操作性が期待できる。また、静水条件下では約 1.0m/sec/縦断側線の点検速度が確保できる。
- ③ 変曲部の航行性：水中浮力式ケーブルにより浮力等が作用せず変曲部における抵抗も小さく、変曲部より奥側の水利施設を対象とした調査実績を有する。
- ④ 点検の即応性：小型（一辺の最大が 600mm）・軽量（本体 20kg）で運搬や搬入出作業における制約が少ない。
- ⑤ 現場判定への対応：テレビカメラ撮影画像が、モニターリアルタイム表示、記録・再生できる。また、記録採取した水中音響をリアルタイムに聴音、モニターへ周波数毎の音圧表示が出来る。
- ⑥ 変状探査機能の拡張性：接続コネクタが同軸ケーブルであれば、AE センサの代わりに接続可能。例として、温度・濁度・圧力センサ・映像カメラなどが接続可能。

プラットフォームとして実証試験に用いる水中ロボットカメラの仕様を以下に示す。

表- 2.1 漏水音検出機能を搭載するプラットフォーム「水中ロボットカメラ」の仕様

ロボット本体	テレビカメラ	撮像素子	1/3 インチ CCD
		水平解像度	480 本
		最低被写体照度	1Lux F1.2
		レンズ	F4.0mm F2
	スラスタ	装備台数	150W 4 機
		速度	前進 約 2.5 ノット
		移動方向	前進、後進、左右、旋回、上昇、下降
	投光器	前方	70W 2 灯
		下方	75W 1 灯
	カメラ移動	旋回・首振り	上下左右 45 度以上
ケーブル	材質	主要部	耐食アルミニウム
	質量		約 20 k g
コントローラ	最大深度		150m
	長さ・外径		300m 約 9mm
	電源		AC100V 約 2.5 k W
	質量		約 22 k g
	機能	ジョイスティック	ROV 操作用モニター付きジョイスティック
		ビデオ出力	BNC 接栓
	保護機能		電源リークブレーカー付き



8	前進・後進及び旋回用スラスタ	2
7	可変式ケーブルクランプ	1
6	TVカメラ	1
5	方位センサー	1
4	ハログンランプ (DC12V 75W)	1
3	ハログンランプ (DC12V 70W)	2
2	上昇・下降及びスライド用スラスタ	2
1	浮力体	1
名 称		数 量

表- 2.2 使用している AE センサの仕様

センサ	広帯域 AE センサ (AE-2000A)
チャンネル数	1 チャンネル
増幅アンプ	30～50dB(プリアンプ 20dB)
ケーブル長	3 0 0 m (水中ロボット制御・電源ケーブルに内蔵)
電源電圧	DC1 2V

2.2 AE センサの水中ロボットへの標準装備化

プラットフォームとして使用した水中ロボットカメラは、水中ロボットの曳航とビデオカメラ・照明のみが制御できるモデルである。当初、漏水音検出機能として装備した AE センサは、水中ロボットとは完全に独立したケーブル・検出器を、水中ロボットにくくりつけて試験を行っていた (図- 2.1)。このため、水中ロボットによる調査延長が AE センサのケーブル長に制限され、また現地での水中ロボット操作性に若干難があった。

そこで、水中ロボットカメラの制御と漏水検出機能が、1 本のケーブルで行えるよう下記の様に改造を行った。

- ① 水中ロボットカメラの制御とは、別系統の同軸ケーブルを同梱したケーブルへの変更。
- ② ビデオ信号や制御信号ノイズ対策として地上受信機の直前にアンプを増設。
- ③ AE センサを接続出来る様に、ケーブル・本体間の接続コネクタの複線化。

AE センサのケーブルを本体ケーブルへ、1m ピッチにテープ等で留める作業

調査延長が、AE センサのケーブル長に制限。
調査時ハンドリングに難有。



図- 2.1 改造前における AE センサケーブルの本体ケーブルへの取付け

- ① 水中ロボットカメラの制御とは、別系統の同軸ケーブルを同梱したケーブルへの変更。
オプションの 300m 同軸ケーブル一体側のフロートケーブルを購入。
(既水中ロボット本体ケーブル 150m)
- ② ビデオ信号や制御信号ノイズ対策として地上受信機の直前にアンプを増設。

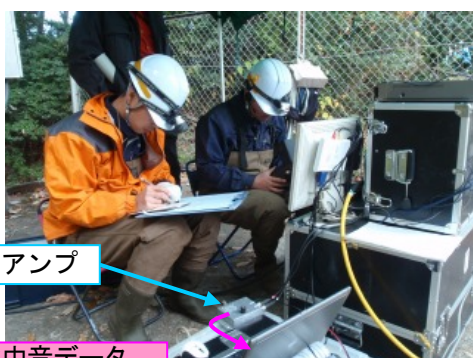


図- 2.2 水中音響用アンプの増設

③ AE センサを接続出来る様に、ケーブル・本体間の接続コネクタの複線化。



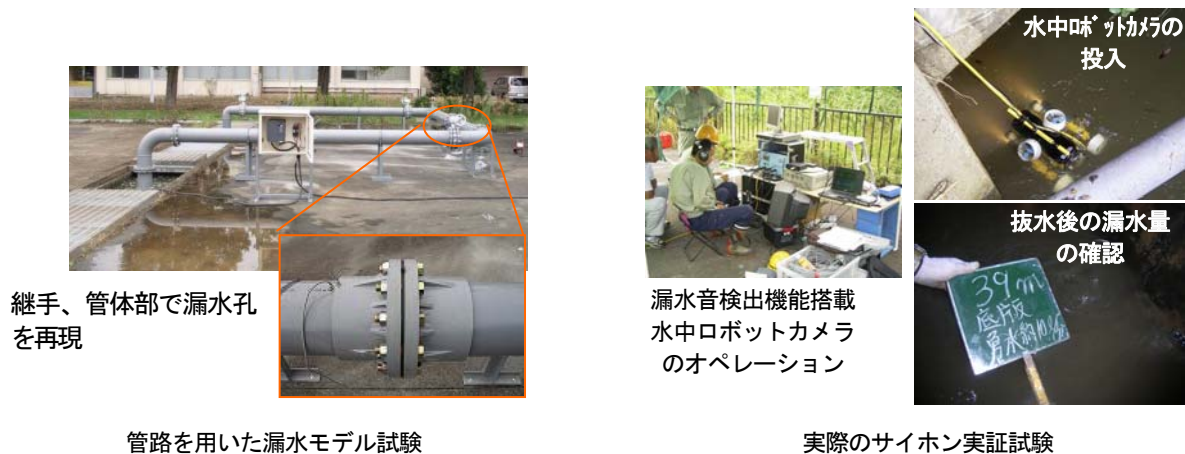
変状探査機能の拡張性: 接続コネクタが同軸ケーブルであれば、AE センサと換装可能。

Ex) 温度・濁度・圧力センサ・映像カメラなどが接続可能

図- 2.3 改造状況および実装写真

2.3 実証試験結果

水中ロボットカメラに AE センサ (AE-200AR フジタ) を搭載し、実際に漏水のあるサイホンにおいて漏水音検出の実証試験を行った。なお、実証試験結果は、水理模型試験と現地試験の比較により評価するものとした。図-7 にそれぞれの実施状況を示す。



管路を用いた漏水モデル試験

実際のサイホン実証試験

図- 2.4 水理モデル試験と実サイホンでの実証試験の実施状況

モデル試験および実証試験において計測した代表的な漏水音の FFT 解析結果を図- 2.5 に示す。

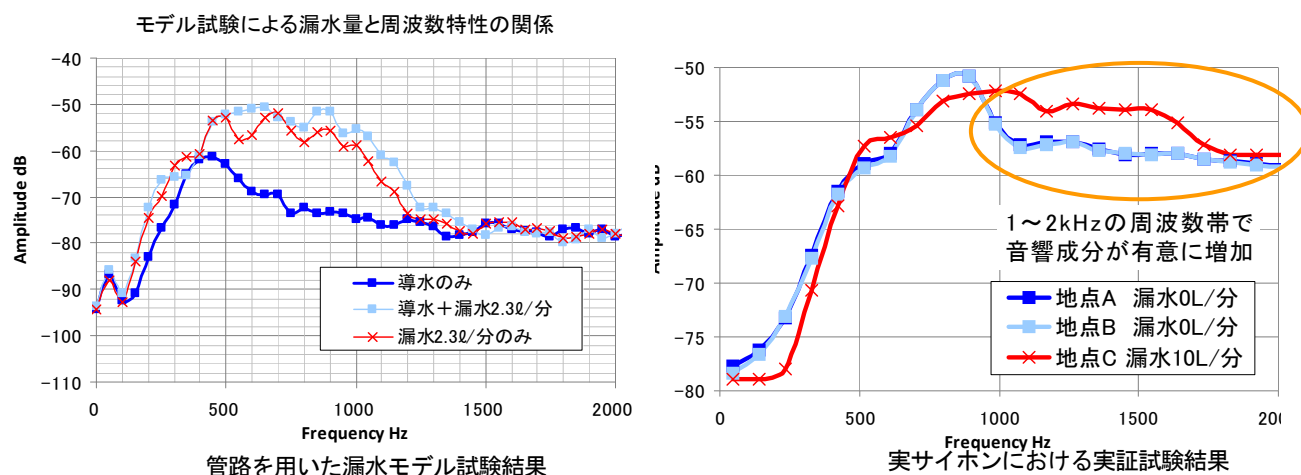


図- 2.5 水理モデル試験と実サイホンでの実証試験結果の比較

両試験の結果を比較すると、漏水モデル試験の結果においては漏水を人為的に発生したケースで 500Hz 以上の高周波成分が卓越して多くなっていることがわかる。これに対して実サイホンの計測結果では、地点 C においてやや高い周波数成分にシフトはしているものの、1～2kHz の領域に他の地点とは異なる周波数成分の音響を計測することができた。そこで、本現場では、実際に断水・排水して、各地点の漏水状況を調査したところ、地点 C において底版ハッチ部で漏水を確認した。

本試験では、これらの結果から、1～2kHz の周波数帯で音響成分に着目することで、漏水音検出機能を付けた水中ロボットカメラにより、サイホン等の漏水位置の特定が可能と判断した。

以下に本試験を通して確認した漏水音検出機能搭載水中ロボットカメラの現場適用条件について整理する。

表- 2.3 漏水音検出機能搭載水中ロボットカメラ調査の現場適用条件

項 目	適用条件	備 考
漏水量	10L/L 以上*の漏水規模より抽出可	数値は、調査した漏水箇所の漏水規模であり より少量の漏水音を現地でも検知できる可能性はある。
水路内の濁度	17 度以下*	濁度 17 度では調査対象が確認出来る離隔距離が 10cm 程度となり、調査実施可能な限界値と考えられた。
水路内の流速	0.3m/s 以下*	仕様上の最大速力は 1.2m/s。
調査所要時間	50m/h* (縦断 1 側線、横断 (φ 2.0m、4m 毎)、水中音計測記録有)	排水路では用水路 (濁度 5 以下) の 10% (濁度 17) ～ 50% (濁度 8) 程度の進行速度となる。
調査対象延長	搬入口より 300m	DELTA-150 のケーブル長により制限 ※メーカー特注品有、1500m (要モータ出力増)
投入口の開口寸法	500×500mm 以上	DELTA-150 の正面サイズ 395 x 460mm より

適用条件のうち*印は実績値

3 水路トンネル変状モニタリングシステムの基本仕様

3.1 仕様概要

3.1.1 基本仕様

通水中における農業用水路モニタリングシステムは、水路トンネル内にモニタリングシステムを設置後、通水状態でのデータ回収を行う必要があり、できるだけ簡単に短時間で回収するために専用の装置を製作した。

システム要求事項：長期間の連続計測、水路トンネル内での耐久性、ワイヤレス通信による、データ収集

表- 3.1 モニタリングシステムの基本仕様

	項目	仕様
計測システム	計測項目	亀裂変位又は温度
	亀裂変位計測	計測値
		計測分解能
		計測範囲
	温度計測	計測値
		計測分解能
		計測範囲
	蓄積データ数	32,000データ (1回/日で約3.6年)
	通信方式	特定省電力無線による無線通信
	通信距離	約400m (見通しに良い直線)
	消費電流	クラック変位計測時 約0.4mA
		温度計測時 約0.3mA
	防塵防水性能	保護等級 IP65
データ回収装置	使用電池	塩化チオニルリチウム電池
	電池寿命	5年以上
	電池容量	35Ah
	サイズ	W80xD85xH180
	防塵防水性能	保護等級 IP65
	材質	蓋：ポリカーボネート 底：ABS樹脂
	通信方式	特定小電力無線による無線通信
データ回収装置	重量	1.7kg
	サイズ	W230xD300xH90
	動作時間	約5時間



計測システム



データ回収装置

図- 3.1 モニタリングシステム外観

3.1.2 計測システムの仕様詳細

計測システムは、亀裂変位計測装置を 4 台、温度計測装置を 1 台の合計 5 台を製作した。
以下に図面、センサ仕様および装置写真を示す。

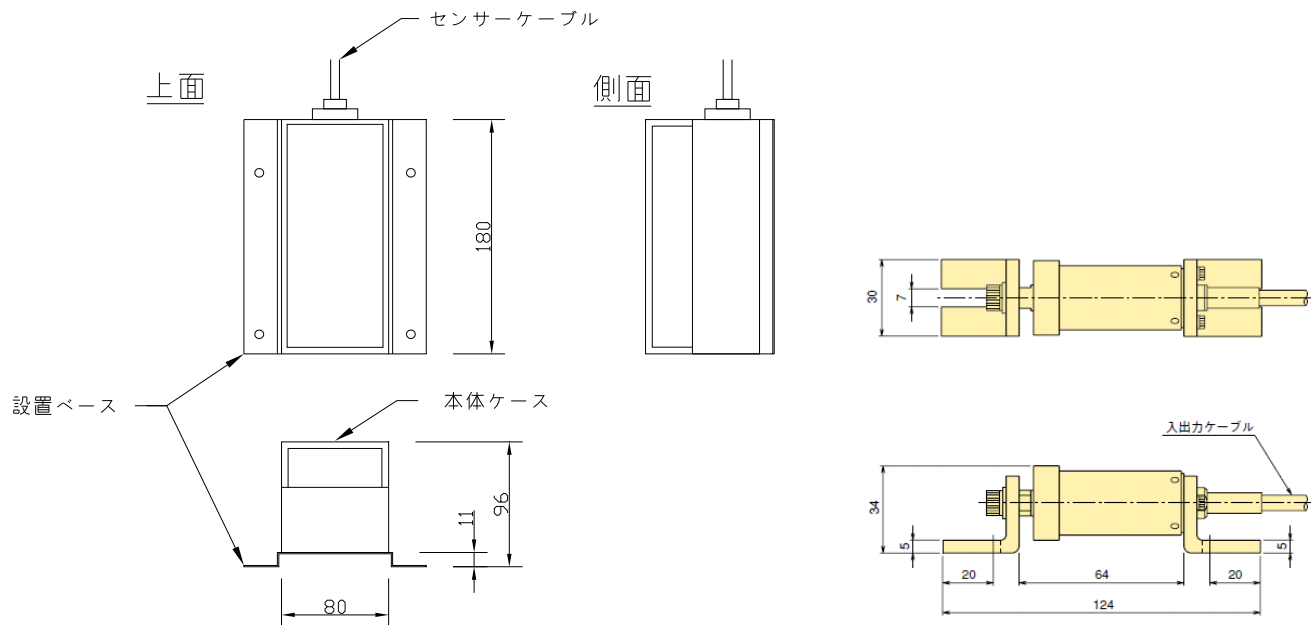


図- 3.2 計測システムおよび亀裂変位センサ図面

表- 3.2 亀裂変位センサ仕様

型名	KG-5A
容量 (mm)	±5
定格出力	約 2mV/V ($4,000 \times 10^{-6}$ ひずみ)
感度 ($\times 10^{-6}$ ひずみ/mm)	約 800
非直線性	1%R0
測定力	15N (1.5kgf)
許容温度範囲	-20~+60℃
入出力抵抗	350Ω
推奨印加電圧	2V 以下
許容印加電圧	5V
入出力ケーブル	φ 6mm 0.35mm2 4 心シールドクロップレンケーブル 2m 先端ばら線
質量	180g



図- 3.3 データロガー内部写真

3.1.3 データ回収装置の仕様詳細

データ回収には、コンピュータによるデータロガー検出および自動取得を行う必要があるため、データ回収装置は無線通信装置及びコンピュータ、電源を装備し、防水ボックスに収納するものとした。以下に図面、センサ仕様および装置写真を示す。

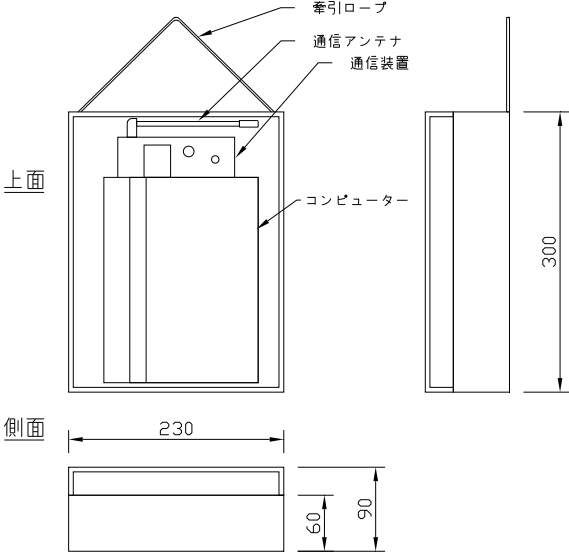


表- 3.3 データ回収装置の仕様

項目	仕様
防塵防水性能	保護等級 IP65
材質	蓋:ポリカーボネート
	底:ABS樹脂
通信方式	特定小電力無線による無線通信
重量	1.7kg
サイズ	W230xD300xH90
動作時間	約5時間

図- 3.4 データ回収措置図面



図- 3.5 データ回収装置

3.2 実証試験結果

データを実際に坑外から回収し、通水中の変状（クラック幅）の挙動データが取れているかどうかを検証した。データの回収法は、下図の样に行った。

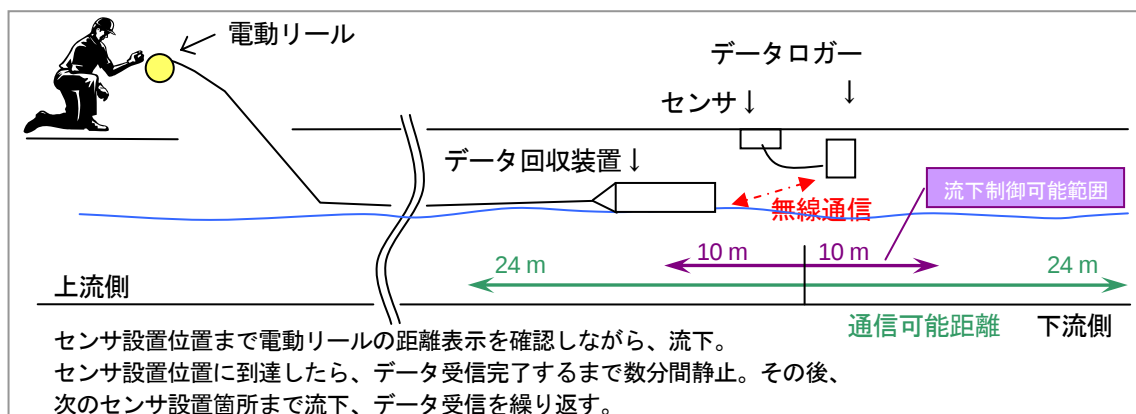


図- 3.6 データ回収概要図

1回の回収試験で5つの水路トンネル変状モニタリングセンサがストックしていたデータを、全て回収することが出来た。各モニタリングセンサのストックしていたデータ（3ヶ月分、約2000データ）は、2分20秒～4分の通信時間で回収することが出来た。また、データ回収装置とデータロガーの通信可能距離は、0～24mであった。一方、電動リールとPEラインを用いたデータ回収装置の流下位置制御は、目的とするデータロガーの直下から±10mの範囲に流下制御することが出来た。

従って、本開発によるモニタリングシステムの組合せ（データロガーの通信装置、データ回収装置の流下制御方法）によって、通信可能距離内にデータ回収装置を流下制御することが出来、坑内に進入することなく郊外からのデータ回収が確実に出来る。



図- 3.7 試験状況写真

図- 3.8 にクラック変位幅を、3ヶ月間継続的にモニタリングした結果を示す。クラックは、温度の影響による収縮を繰り返しているが、クラック幅の進展はしていないとの結果が得られた。この結果は、目視調査による結果とも一致した。

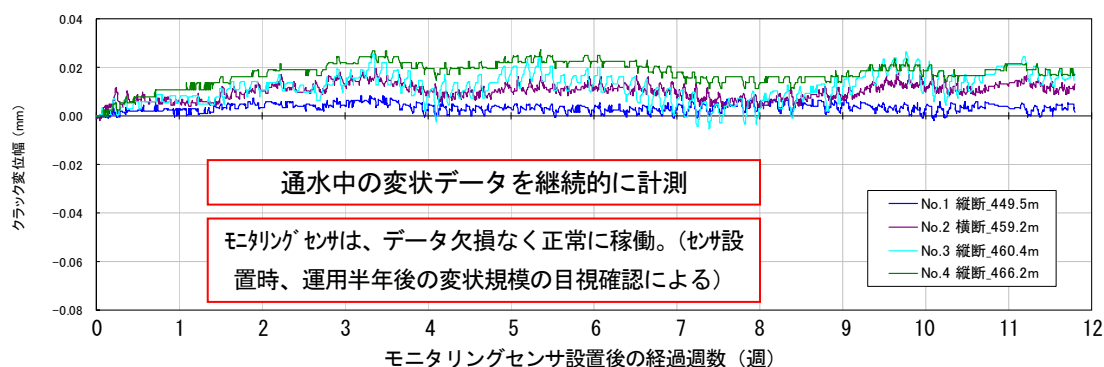


図- 3.8 通水中のクラック変位幅モニタリング結果（モニタリングセンサ設置後3ヶ月間）

研究成果報告書

研究課題名	農業用水路トンネル・サイホンの不断水調査・診断技術の開発
研究開発組合代表者名	日本工営株式会社

1. 研究目的（研究開発の概要図等添付）

総延長4.5万kmにも及ぶ我が国の主要な農業用水路は、既に施工後30年以上が経過したものが多く、機能的劣化が進んでいるものも多い。また、農業用水路トンネルやサイホンなどでは、落盤や破損などによる突発的な断水事故が発生する危険性があり、被害も甚大となる可能性があることから、定期的な機能診断が重要である。しかしながら、上水、工業用水と兼用されている農業用水路や、畑地かんがい、地域用水など常に通水されている農業用水路においては、断水が困難であり調査が実施できないため適切な予防保全が出来ないという課題があった。本研究開発事業は、これらの水路トンネル、サイホンを対象に通水・充水状態で調査・診断する技術を開発した。

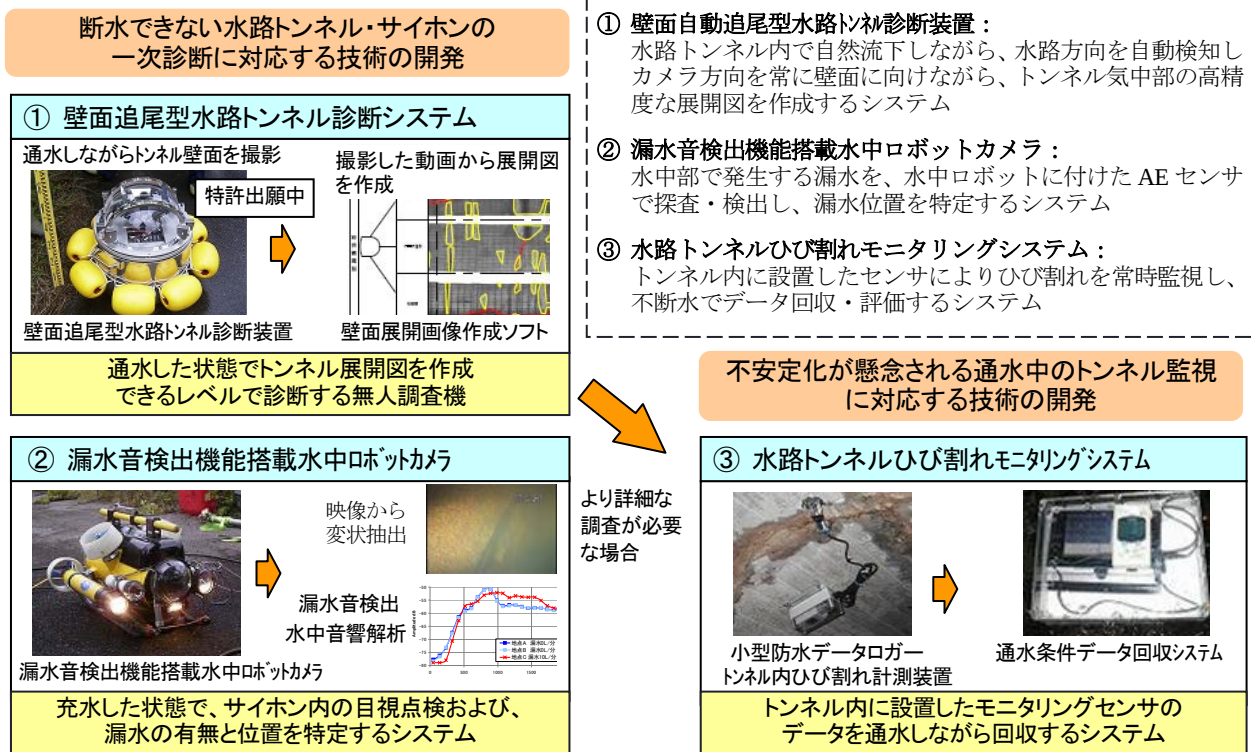


図-1 開発した技術の関係と位置づけ

2. 研究内容

本研究開発全体では、研究目的で記述した課題を解明するために以下の8項目を実施した。

技術的課題	研究内容
開発する技術の調査対象の明確化	① 不断水農業用水路の調査における機能診断指標の検討
通水・充水中で可能な調査手法の検討	② 通水・充水中の農業用水路に適用可能な無人調査移動体（プラットフォーム）の開発
明確化した調査対象の具体的な診断手法検討	③ プラットフォームに搭載可能な機能診断センサの開発
通水中の変状状態の監視	④ 通水中の水路モニタリングセンサの開発
開発技術の適用性検討	⑤ 研究開発事業実証試験の実施
	⑥ 研究開発事業実証試験結果の検証・評価
開発した技術の機能診断における位置付け	⑦ 調査結果に基づく機能診断手法の構築
機能監視	⑧ 開発した新技術の機能監視

3. 目標とする成果

3. 1 目標とする成果

本研究により開発する技術により以下の成果が得られ、今まで診断をすることの出来なかった水路における予防保全計画の策定が可能となり、より適切なストックマネジメントと安全安心な水路機能の提供が行える。

目標とする成果

通水・充水中の水路の内部変状調査技術

目的：変状・劣化区間の抽出

内容：通水・充水中の水路に無人調査機器を投入し、機器に装着したセンサで水路内の漏水や異常水圧などの情報を把握する技術

利点：断水を行わずに、変状箇所を特定できることから安全で効果的な対策工が実施できる。

通水中の水路の変状モニタリング技術

目的：劣化進行の把握や劣化原因の究明

内容：水路内に変状をモニタリングできるセンサをポイント的に設置し、定期的にデータを収集することで、劣化の進行をモニタリングする安価な技術

利点：通水中の水路で劣化進行を評価できることで、合理的に対策実施時期を決定できる。

成果から得られる効果

変状範囲の選定、詳細調査および補修・補強対策の必要性の判定

目的：内部調査およびモニタリング調査のデータに基づき、通水・充水中の水路の機能診断を実施

内容：調査結果および構造形式・地盤状況を総合的に評価し、詳細調査や対策工の必要性を判定する。

利点：経年的なモニタリングに必要な情報項目を取得し、農業水利ストック情報データベースとの連携によりデータを蓄積し、ストックマネジメント体系に位置づけられた定量的な診断が可能となる。

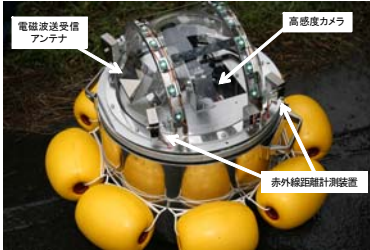
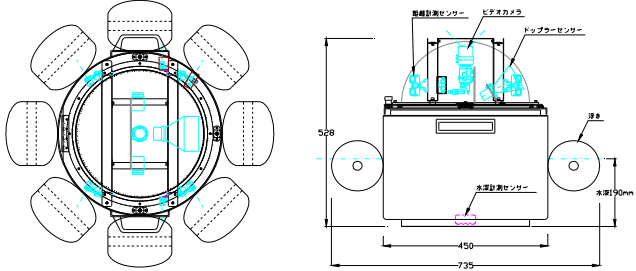
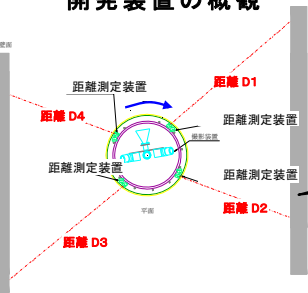
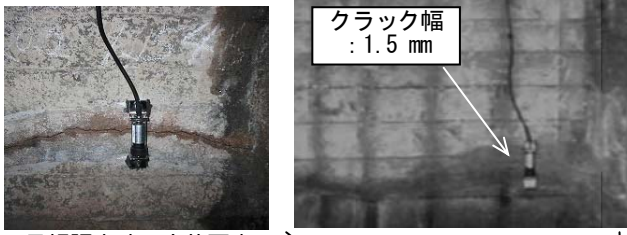
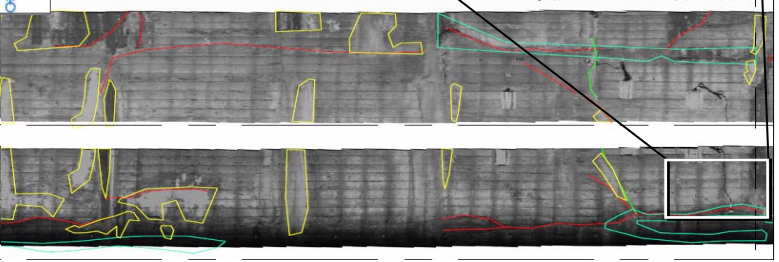
3. 2 従来技術との比較

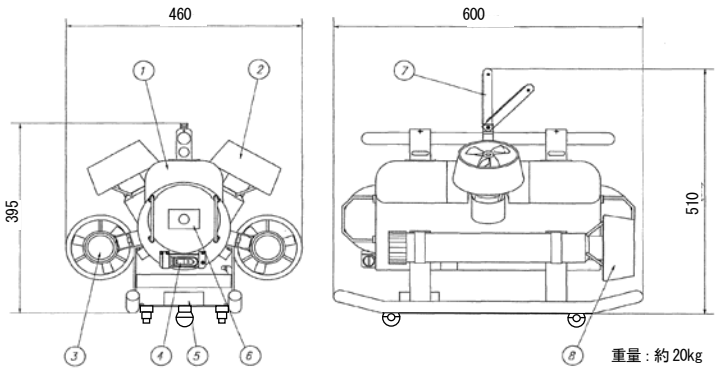
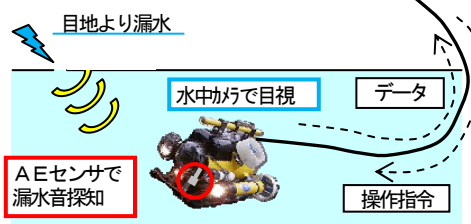
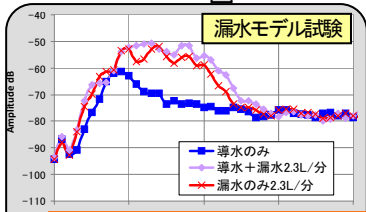
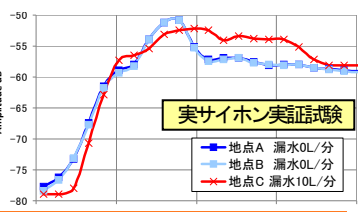
以下に、従来技術と開発目標との比較を示す。

項目	従来技術	課題点	目標とする成果内容
通水・充水中の水路の内部変状調査技術	断水を伴い、人が坑内に進入しての目視調査	- 断水による利用者への影響 - 特に短時間の断水の場合、坑内作業の安全確保に苦慮 - 実際に写真に収めた範囲しか記録に残らない	ROV および水路内視診断装置により - 通水・充水中での調査が可能。 - トンネル・サイホン内に人が進入せず安全な無人調査装置。 - 迅速・簡易に坑内調査が可能。 - 変状が無い箇所も含め水路を一体ものとして記録
	リモコン操作による船形画像撮影装置	- 無線による本体およびカメラの操作のため、調査距離が短い - 機能診断センサが撮影画像のみ	- 長大なトンネルへの適用 - 撮影映像に加え、他にも機能診断センサを搭載し、より多くの情報から正確な変状状態を把握する。
	水流圧利用推進型画像撮影装置	姿勢制御の動力を有せず、撮影カメラが回転等により安定せず良好な画像が撮影出来ない	自律型の姿勢制御装置の開発
通水中の水路の変状モニタリング技術	断水可能な機会にのみ断続的に変状データを計測	- 変状データ計測には、断水および人の坑内への進入が必要 - 通水時の変状の劣化進行を把握出来ない	変状モニタリングセンサ設置後、定期的にワイヤレスでデータ収集 - 断水および人の坑内への侵入を伴わないデータ回収 - 必要なときにいつでもデータ回収可能。 - 変状の進行程度の把握

4. 研究成果

4. 1 研究成果概要（目標とする成果との検証等）

	開発技術・装置	特徴	達成した、目標とする成果
①. 壁面自動追尾型 水路トンネル診断装置		- 計測装置をケーブルレスのフロート式とし、装置の移動を自然流下とする。 - 断水の必要性なし	通水中での調査が可能 トンネル内に人が進入せず安全な無人調査装置 長大なトンネルへの適用
		- 人肩での搬入が可能（約 35kg） - トンネル展開画像作成ソフトにより、撮影映像から水路展開画像を自動作成。	迅速・簡易に坑内調査が可能
		水路壁面を高精細白黒カメラで連続的に撮影し、後年でも比較利用の出来るデータとして記録	変状が無い箇所も含め水路を一体ものとして記録
		- 常にカメラ向きを壁面に自動追尾させる装置の実装 - ドップラーセンサによる機器移動位置の把握による変状位置の特定。	常に調査対象であるトンネル壁面を捉え続け変状を抽出 自律型の姿勢制御装置の開発
		- 有毒ガス検出機能搭載（人が進入しての詳細調査前の安全確認） - 水深計測センサ搭載（水路不陸・堆砂状況検出）	撮影映像に加え、他にも機能診断センサを搭載し、より多くの情報から正確な変状状態を把握
通 水 ・ 充 水 中 の 水 路 の 内 部 変 状 調 査 技 術	1. 壁面追尾型水路トンネル診断装置 （特許出願中：特願2010-151678号「壁面自動追尾型水路トンネル撮影装置」） 水路トンネル内で自然流下しながら、水路方向を自動検知し、カメラ方向を常に壁面に向けながら、トンネル気中部を撮影し展開図を作成するシステム		
			変状抽出精度 クラック幅: 1.5 mm 以上（目視調査と対比確認） ※カメラ性能（画素数、シャッター速度等）より、理論上では 1.0 mm 以上
			
			装置に実装された赤外線センサがトンネル側壁までの距離を常時計測し、トンネルの延長方向を判断する。この判断結果に基づき、装置内部のモーターが駆動し、装置の方向を修正することで、開発装置は常にトンネルに正対して流下します。
			
			変状展開図凡例 クラック: 赤線 剝離・剝落・洗掘: 緑線 遊離石灰: 青線 補修跡: 黄線 湧水: 水しぶきマーク アーチ頂部 右側壁
			
	常にトンネルに正対した状態で流下時の壁面のビデオ画像を撮影することができるため、撮影した画像を展開図化することができます。本開発では、撮影画像から展開図を自動作成するソフトも合わせて開発しています。		

	開発技術・装置	特徴	達成した、目標とする成果
	②. 漏水音検出機能 搭載水中ロボット カメラ	ROV による遠隔操作のため、サイホン内に人が進入せず安全。	充水中での調査が可能 サイホン内に人が進入せず安全な無人調査装置
		- 水中マイクロホン (AE センサ) による漏水音検出、漏水位置の特定 - AE センサ以外にも接続端子が同軸ケーブルの計測機器を装着可能	撮影映像に加え、他に機能診断センサを搭載し、より多くの情報から正確な変状状態を把握する
通 水 ・ 充 水 中 の 水 路 の 内 部 変 状 調 査 技 術	2. 水中ロボットによる漏水音検出 水中ロボットカメラに AE センサを搭載し、漏水音を検出することで、漏水位置を特定するシステム		
	開発の背景 - サイホンやパイプラインの主要な変状は漏水である - 漏水に伴い、特異な音響成分 (高周波) が検出されることが知られている (※文献等により既知の事実) - 高周波成分は、減衰しやすく、漏水箇所から離れた地表や 管体では検出困難		
	 開発：水中ロボットカメラで、直接変状箇所まで近接し漏水音を検出する		
	<調査フロー>		
	 人肩にて投入可能		
	 地上		
	 装置概観図		
	モデル試験・実証試験ともに 漏水が発生している場合は漏水無時に比べ、高周波帯域の成分が卓越して計測される (1~2kHz 帯域)。 1~2kHz 帯域の音響成分が卓越する位置を漏水箇所と推定可		
			
	 漏水モデル試験  実サイホン実証試験 漏水の有無による音響成分 FFT 解析結果比較		
	漏水音検出機能搭載水中ロボットカメラの仕様 流速 : 1.2m/s以下※2, (0.3m/s以下)※1 検出可能漏水規模: 10L/min以上※1 搬入出口 : 50x50cm以上 適用施設 : Φ50cm以上、水深40cm以上の水路トンネルやサイホン 調査延長 : 300m (最大1500m: ケーブル長に依存) 水路内濁度 : 17度以下 (= 変状可視距離10cm) 調査所要時間 : 50m/h (縦断1側線、横断 (φ2.0m、4m毎)、水中音計測記録有) ※1 実証試験における実績値。 ※2 機器のスペックより算出した理論値。		
	水路内の水を排水することなく調査可能で、漏水音を検出し漏水位置を特定するシステムが構築出来た。 また、AE センサを標準搭載するコネクタ改造を実施したことで、他のセンサを容易に搭載出来るので、より診断拡張性の高い変状診断システムとして確立出来た。		
	※ 漏水検出機能として標準装備の AE センサは、その他温度、濁度、PH などの水質検査用センサに換装可能。		

	開発技術・装置	特徴	達成した、目標とする成果
	③. 水路トンネル変状モニタリングシステム	● データロガーおよびデータ回収装置を防水ボックスに収納し、通信を無線で行う	断水および人の坑内への侵入を伴わないデータ回収
		● データ回収装置は、坑外よりリールにて流下制御し、任意の箇所へ停止させる	必要なときにいつでもデータ回収可能。
		● データ回収装置とデータロガーは、無線が届く範囲で自動的にデータ回収を行う	
		● 計測機器を監視したい任意の変状箇所へ設置し、通水条件下で継続的にデータを記録	変状の進行程度の把握

開発の背景

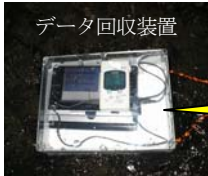
これまで水路トンネルの変状モニタリングは、トンネル内部にセンサを設置し、トンネル外までケーブルを引き回して監視を行うほか方法がなかった。このため、センサの設置には多大な時間と労力を要し、断水時間が十分に確保できないトンネルには設置できないという問題があった。

そこで、本開発では、1) 設置が容易（設置時断水短時間）で、2) 断水することなくデータ回収が可能（平時通水時でもデータ回収可能）な簡易な水路トンネル変状モニタリングシステムの検討を行った。

モニタリングシステムの開発のポイント

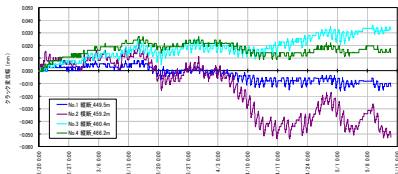
- ケーブルレス化（無線通信によるデータ回収）
- 計測システムの防水処理
- 長期バッテリー駆動

水路トンネル内では長距離無線通信は困難であることから、回収装置を計測システムに近づけ、短距離無線通信でデータ回収を行う方法を考案した。

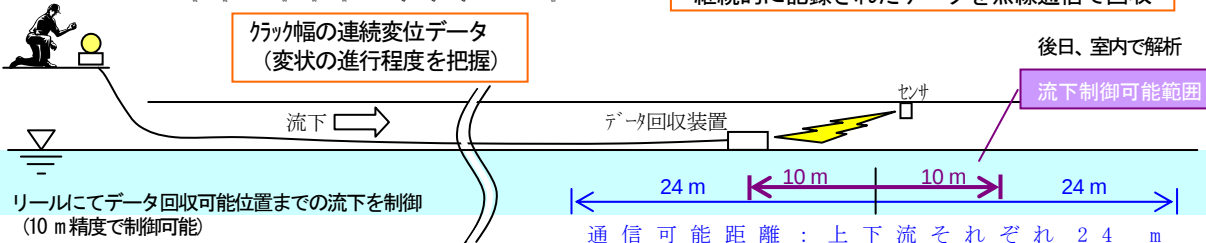


無線通信

継続的に記録されたデータを無線通信で回収



クラック幅の連続変位データ（変状の進行程度を把握）



後日、室内で解析
流下制御可能範囲

通信可能距離：上下流それぞれ 24 m

水路トンネル変状モニタリングシステムのデータ回収のイメージ

水路トンネル変状モニタリングシステムの仕様



計測システム



データ回収装置

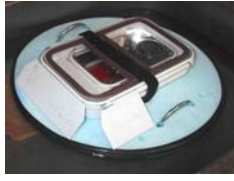
- 計測精度等
 - 搬入出口： 10x25cm以上（データ回収時）
 - 検出精度： ひび割れ幅 ±0.01mm※1
 - 適用施設： 水路トンネル、開水路等
ただし、水没しない箇所に設置のこと。
 - 調査延長： 800m（流下制御用ライン延長に依存）※2
現ラインで1400mまで
 - データストック数： 約3.6年（1回/日計測）
 - 連続稼働時間： 約5年
 - 断水の要否： データ回収・評価時 不要
センサの設置時は、一時的な断水が必要）
- オプション機能
 - 変状監視センサは、必要対象にあわせて変更可能

・データ回収・評価時の断水が不要
（センサの設置時は、一時的な断水が必要）

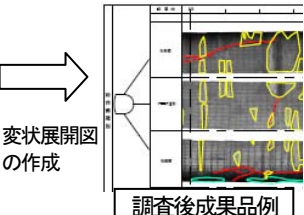
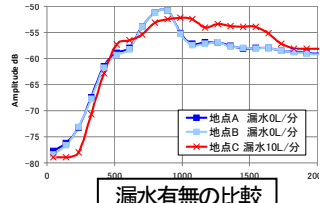
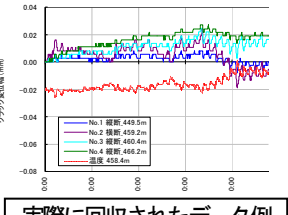
※1 検出精度は、設置センサによる。
※2 実証実験時の装備。

水路トンネル内での設置が容易で、かつ、通水状態で長期間の水路トンネル覆工のひび割れ監視が可能なモニタリングシステムが構築できた。

4. 2 実験施設における概要、結果、課題等（実験状況がわかる写真等添付）

開発装置名		概観・試験状況	機能・特徴	課題
試 作 機	フロート式水路トンネル診断装置（1号）		自立制御型開発前の装置。 断水調査前の安全確認、事前調査に使用。 機能：トンネル気中部壁面映像記録（高精細白黒カメラ3台）、有毒ガス検知器 重量：約35 kg サイズ：縦x横x高 890x430x520 mm	装置自体が旋回し、記録映像が壁面を捉えない。 （壁面自動追尾型にて克服）
	先行簡易フロート式水路トンネル診断装置		気中部飛出しが少なく、他フロート式装置が適用出来ない場合に使用。断水調査前の安全確認、簡易事前調査に使用。 機能：トンネル気中部映像記録（白黒カメラ1台）、有毒ガス検知器 重量：約35 kg サイズ：縦x横x高 890x430x520 mm	課題：画素数のやや小さいカメラ1台の搭載なので、簡易型と割り切って使う必要性あり。

4. 3 実証試験工事（現場適用）の概要、結果、課題等（工事状況がわかる写真等添付）

開発装置名	試験状況		結果・課題
壁面自動追尾型水路トンネル診断装置	壁面自動追尾型水路トンネル診断装置を、過去に断水状態の調査が行われている水路トンネルで実証試験を行った。  装置投入状況  計測時流下状況  変状展開図の作成 調査後成果品例		調査中常に壁面を撮影することが可能となった。また、ドップラーセンサにより診断装置位置を、100 m流下で1 mの誤差程度で把握可能となった。（画面とドップラー計測の補正による） 画像展開図から十分に変状抽出できる精度を確保（クランク幅 1.5mmを検出）
漏水音検出機能搭載水中ロボットカメラ	漏水が確認されているサイホンについて、漏水音検出機能搭載水中ロボットカメラと放水した場合の漏水規模調査とを比較検討した。  放水時目視調査  ROV投下状況  漏水有無の比較		漏水の有無による音響成分の変化から、漏水音を検出出来た。（採取した漏水音の解析と放水時の直接目視調査との比較より） 水中ロボットのモーター音を減ずる工夫を行うと、より調査時の操作性が向上する。
水路トンネル変状モニタリングシステム	設置したモニタリングシステムについて、実際にトンネル坑外からデータ採取試験を行った。  データ回収装置 流下制御装置  データ回収状況  実際に回収されたデータ例		モニタリングセンサは、データ欠損なく正常に稼働。（センサ設置時、運用半年後の変状規模の目視確認による） 水位が高い場合には、無線の通信範囲が狭くなる結果が得られた。 PEラインと電動リールを用いた距離制御は、一定のライン伸び率に従うので、現地にて伸び率の計算が必要。

4. 4 普及活動状況等

論文執筆等	藤原鉄朗、斎藤 豊、森 丈久、森 充広、渡嘉敷勝：通水状態での農業用水路トンネル点検手法の開発、 <i>水土の知</i> 77(4)、pp. 275～278 (2009)
	稲垣正晴、速水洋志、齋藤 豊 著：土木構造物の調査と機能診断、オーム社、東京、pp83～84 (2009)
学会発表等	森 充広、森 丈久、渡嘉敷勝、中矢哲郎、藤原鉄朗、齋藤 豊：農業水利施設の効率的な調査診断技術の開発、物理探査学会、創立 60 周年記念シンポジウム (2008)
	森 充広、森 丈久、渡嘉敷勝、中矢哲郎、藤原鉄朗、齋藤 豊：農業用水路の不断水調査技術の開発、農業農村工学会、中国支部大会 (2008)
特許出願	壁面自動追尾型水路トンネル撮影装置：特許出願申請手続き中

5. 今後の課題

- 開発した新技術の普及・認知、課題改良点・適用性のさらなる検証の上でも、様々な現地条件で運用しデータの蓄積を進める。
- 開発した技術の他施設への適用可能性の検討。(ex. ダムの漏水検出、鉄筋腐食等の多種のセンサによるモニタリング)
- トンネル診断装置は、搬入口から水面が遠いなど、シビアな現場条件では搬入方法に工夫の余地。
- トンネル診断装置は、水中部の情報として水深を 1 点で測定しているが、平面スキャンを行えばより正確な水中部（インパート）の診断が可能と考えられる。
- 水中ロボットによる漏水音検出機能については、モーター音を減ずる工夫を講ずればより操作性が高められる。
- 開発した技術を取り込んだ、診断技術のマニュアル化を進める必要性がある。

6. 試験研究機関（農工研、大学等）総括者による意見・評価等

項 目	評価結果	備 考
研究計画の効率性・妥当性	A	段階を踏んで装置の開発がなされており、研究は効率的に進められた。また、機能診断において求められている「通水状態での診断」に特化した、様々なパターンの技術が開発され、研究計画は妥当であった。
目標の達成度	A	計画していた目標は、ほぼ達成できた。実証試験地区を増やし、調査歩掛かりを精査したり、診断マニュアルを整備したりして、より「調査技術」としての完成度を高めていくことが望まれる。
研究成果の普及可能性	A	これまで農工研に問い合わせが多かった「通水中での調査診断技術」であり、特に上水道や工業用水と兼用になっている農業用水路の機能診断において活用可能である。断水が困難な農業用水路トンネルやサイホンの一次機能診断手法のスタンダードとなる普及技術である。
研究成果の出来栄	A	各装置とも、人肩で運搬できるように小型化され、出来栄はよい。
総合コメント 本研究開発事業では、断水が困難な農業用水路の一次的な調査診断技術として、無人調査移動体の開発、無人調査移動体に搭載可能な機能診断センサ、水路モニタリングセンサ、という3種類の装置の開発を行ったものである。 水路トンネル診断装置に関しては、水路壁面を自動追尾しながら正対した水路コンクリート面の変状記録が得られ、目標以上の精度のものが完成した。水路モニタリングシステムについては、従来の計測装置にデータロガーと無線通信機能を付与したことにより、ケーブルを延長することなく、水路内の変状をモニタリングすることが可能な技術が完成した。 それぞれのシステムを現地において適用する場合には、運用上さらなる作業の効率化や計測の高精度化が要求される可能性があり、今後実証試験を継続しつつ、個々のシステムのバージョンアップを図っていくことが期待される。		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。

7. 研究総括者による自己評価

項 目	評価結果	備 考
研究計画の効率性・妥当性	A	機能診断のニーズが高く、現地検証試験の現場が比較的容易に見つかったことから研究開発を順調に進めることができた。
目標の達成度	A	最新のロボット制御技術を採用することにより、当初の目論見通りの技術を確立することができた。
研究成果の普及可能性	A	特定の地域に関わらず、重要な幹線で断水ができない水路トンネルは多くあり、簡易な調査技術として普及すると考える。
研究成果の出来栄	A	3つのシステムとも、特別な技術や知識を要せず使用できる点で完成度が高く、良好と判断する。
総合コメント 今回開発した3つのシステムのいずれについても、現地検証試験が終了し、水路トンネル・サイホンの機能診断に有効であることを確認できている。既に、複数の現場から適用についての打診があり、実用性が高い技術である。今後は、広報と普及に努めるとともに、多様な水路トンネル条件での適用事例を増やし、個別の水路トンネル適用における課題を抽出することが重要と考える。		

注) 評価結果欄は、A、B、Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入する。