

# スマートメンテナンスを実現する アセットマネジメントの新技术と今後の展望

松田 貞則<sup>1</sup>

<sup>1</sup>個人正会員 日本工営株式会社 河川水資源事業部 (〒102-8539 東京都千代田区麴町 5-4)

E-mail: matsuda-sd@n-koei.jp

地方公営企業が実施する水道・工業用水事業は、日常生活、産業活動に必要な用水を供給するため、水源から各需要者に至る間に各種の施設が連鎖している。そのため、適切な維持管理なくして、水の安定供給は達成できない。施設の状態把握の基本は点検であるが、特に導水施設の場合、従来、導水停止と排水作業が必要不可欠となる。また、大口需要者との間では、水運用の調整に1年もの時間を要することもある。この問題に対して、導水停止と排水作業を省く新たな点検手法として、通水点検ロボットを実装することで、管理職員の負担を大幅に軽減し、メンテナンスの効率化とコスト削減において成果を上げている。最後に「人×ロボット×AI」の協働が進む未来を展望し、今後のアセットマネジメントについて考察する。

**キーワード:** デジタル、ロボット、地方公営企業、導水施設

## 1. はじめに

長期間にわたり供用されている水供給および水力発電施設は、経年劣化および自然災害のリスクという脅威にさらされている。これらの状況は、社会経済に重大な影響を及ぼす可能性がある。特に、導水施設はこれらのサービスに不可欠な要素であり、その損傷は供給の安定性や安全性に影響を及ぼすことがある。これに対する効果的なメンテナンス戦略の実施が急務である。

これまでの施設の維持管理は、人による物理的な点検に依存しており、それには高コストがかかるばかりか、施設を一時的に停止させる必要があった。しかし技術の進歩により、リモート監視や自動化された点検プロセスが可能になりつつある。

それでもなお、現在の技術では、特にアクセスが困難な導水トンネルなどの施設における詳細かつ効率的な点検は難しく、導水停止と排水作業を行う必要がある。また、現場の専門知識を持つ管理職員の不足は、これらの問題の解決をより複雑なものにしている。

ここに紹介する事例は、これらの課題を解決するために、アセットマネジメントにおけるスマートメンテナンスの実現を目指すものである。デジタル・ロボット技術を活用した新しい施設保全業務モデルの構築により、地方公営企業等が保有する導水施設の定期点検の効率化とコスト削減を図る。具体的な施策として、“モモタロウ”

と名付けられた通水点検ロボットの開発と導入を通じ、通水中の施設状態の迅速かつ正確な評価を可能にし、従来に比べて時間とコストを大幅に削減し、施設の安全性とサービスの信頼性を向上させることを目指す。さらに、本研究は「人×ロボット×AI」の統合による持続可能な



図-1 導水トンネルの崩落事例<sup>1)</sup>



図-2 導水トンネル直上の陥没事例<sup>2)</sup>

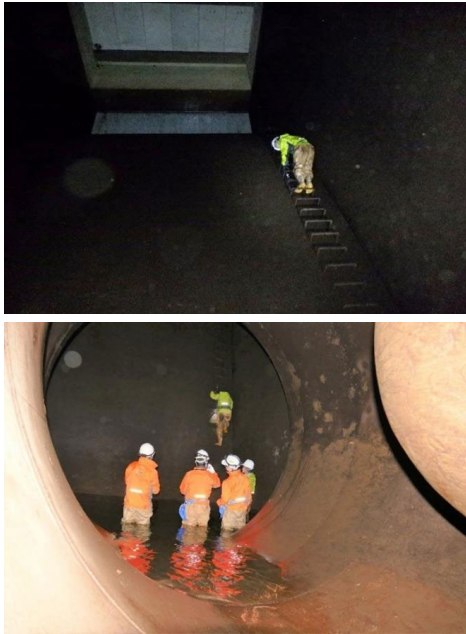


図-3 人による導水トンネルの点検事例<sup>3)</sup>

点検システムの構築を視野に入れ、先進的なアプローチが維持管理活動にどのように受け込むかを探求する。これにより、アセットマネジメント分野において、新たな未来を切り拓く基盤を築くことを目指すのである。

## 2. 導水施設の点検・評価の現状

導水施設のうち、導水トンネルの多くは、自然の地山内に構築される構造物のため、トンネル覆工に生じるひび割れ等の変状は、長期的な地山の風化・劣化作用に伴う地圧の影響が複合することがある。そのため、定期的な点検・モニタリングを実施することが重要である。しかしながら、背面の地山自体の状態について直接的に点検・評価することは容易でなく、トンネル覆工に変状が顕在化する前の段階で予防診断的に実施可能な実用的な手法は現状確立されていない。

道路トンネルの場合を例に示すと、国や地方公共団体等の道路管理者が日常的にトンネル内部の巡回を行うとともに、道路法に基づく国土交通省令により、5年に1回の頻度にて、近接目視等による内部点検を実施し、施設の状態監視を行っている。しかし、導水トンネルの場合には、日常的に人が入坑して内部を巡回することは不可能であり、平常時の施設内部の状態とその変化に気づく機会は非常に限られる。また、定期的実施されるトンネル点検の多くは、トンネル覆工の外観に生じた変状箇所をマーキングし、手書きのスケッチやデジタルカメラによる写真撮影によって記録するやり方が一般的に行われている。このような作業は、トンネル全線に渡って行われるため人海戦術かつ多大な時間を要するほか、点

検員の技能の差や見落とし、記載の漏れなど人的ミスが生じやすい作業であった。そのため、点検の効率化や点検データの精度の一貫性において課題があった。また、導水トンネルの場合、坑内に常設の照明設備はないために暗く、トンネル底版部の形状や残水等による足元の状態によっては滑りやすく、点検しながら移動していく際には細心の注意が必要である。加えて、体力的にも負担がかかるうえ、高所から暗いトンネル内部への入出坑を余儀なくされる場合もあるなど、安全性や作業時の労働環境においても課題がある。

近年では、人が行うこれらの点検作業の時間短縮や作業負担の軽減を目的として、デジタルカメラやタブレットを用いて撮影した画像から点検調書の作成を行うシステムの開発・導入を行うことで、効率化を図ろうとする事例がある。このような事例の多くは、従来、人が行ってきた業務プロセスは変えずに、業務を構成する作業の一部をデジタル技術によって置き換え、効率化や省力化を目指すものであり、ロボットや AI 等との協働による生産性改革や事業の競争力の向上を目指す本質的な DX の未だ初期段階の取組みといえる。

## 3. 導水施設の点検・評価技術の開発経緯

### (1) 点検・評価技術の開発

導水トンネルの現況を知るために必要な情報の主要 3 項目は、①覆工表面の変状（表面情報）、②覆工巻厚と背面空洞の有無（背面情報）、③トンネル内空断面形状（断面情報）である。トンネル調査手法は、従来型の目視点検から物理計測機器を用いた調査手法を経て、より高度なデジタル機器へと進化している。目視点検は、導水停止後に相当数の調査員を動員し、覆工表面状況の観察を行う。背面状況は削孔数によるが、トンネル覆工に重大なダメージを与えないよう箇所数が限定的となり、十分な情報が得られない。

これを克服するため、官民連携新技術開発事業（平成 14 年～18 年）において、「効率的な農業用水路維持管理のための非破壊調査技術および劣化診断システムの開発」プロジェクトが実施され、トンネル壁面撮影を行うレーザー計測や、覆工厚および背面空洞確認を目的とした地中レーダの開発を行った。その結果、省人化・省力化が図られるとともに、覆工の表面および背面から取得する状態に係るデータの偏りが解消され、適切な状態把握が可能となった。その後、この手法は数多くの健全性診断に適用され、調査の迅速化と高度化が実現された。

一方で、水道用水や工業用水、それらを兼用する施設では通水の停止が困難な導水トンネルもあり、不断水で適用可能な調査手法が待望されていた。そこで、官民連

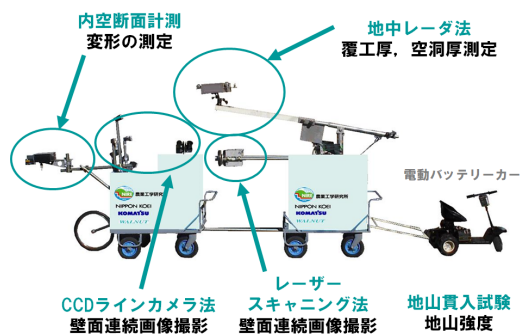


図4 農業用水路計測診断システム<sup>4)</sup>

表-1 農業用水路計測診断システムの仕様

	項目	性能
システム全体	搬入・搬出条件	最小通過径0.9×0.9m
	計測条件	滞水:50cm以下
	迅速性	短い断水時間で計測が可能
	再現性	計測者に依存せず同じデータが計測可能
壁面連続画像計測	記録性	延長距離で各データを同期化し、デジタルデータとして記録
	計測項目	ひび割れ、漏水、目地の損傷等の目視で観察可能な変状
	計測速度	1.0km/h程度 (安全に歩行しながら、遅滞なく調査ができる速度)
	1日の標準計測距離	5.0km程度
覆工背面調査	最小検出ひび割れ幅	0.1mm(汚れがない良好な条件下)
	計測項目	覆工厚、覆工背面の空洞の有無・厚さ、覆工背面の地山性状
	計測速度	連続計測1.0km/h程度 (安全に歩行しながら、遅滞なく調査ができる速度) 地山計測30分/箇所
	1日の標準計測距離	5.0km程度
	計測誤差	±5cm程度
内空断面計測	地山性状評価	3~4段階(土砂、軟岩、硬岩)
	計測範囲	覆工表面から1m程度
	計測項目	内空断面形状
	計測ポイント数	1断面当り200ポイント程度
内空断面計測	計測誤差	±1~3mm程度
	計測時間	1断面当り10分程度

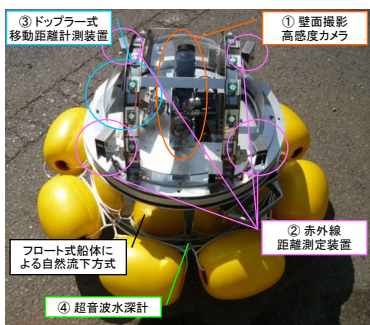


図-5 フロート式点検ロボット“モモタロウ”<sup>5)</sup>

表-2 モモタロウの仕様

項目	仕様	
形状・寸法	円筒形、φ×H=735×528mm(本体φ450mm)	
重量	約35kg	
航行方式	自然流下方式	
搭載機器	撮影装置	白黒高感度ビデオカメラ(1/3inch CCD) 画角 TELE47.1°×35.4° WIDE111.3°×83.5° 気中部3台(上方、左右方) 最低被写体照度0.0002lx F1.4
	撮影可能時間	1h/1GB(挿入するSDメモリーカード容量に依存)
	撮影用照明	1W(82lm)白色LED×48灯
	水深計測	超音波式水深計測装置0.5~99.9m
	移動距離検出	マイクロ波ドップラーセンサ
	壁面距離計測	赤外線距離計測計:壁面-船体間距離を計測 撮影方向(姿勢)制御に使用
主電源	12V、20Ah、完全密封型鉛蓄電池×2個	

携新技術開発事業(平成19年~23年)を活用し、トンネル検査装置(通称“モモタロウ”)を開発した。この初期型のモモタロウは、通水中のトンネル内を自然流下し、壁面を自動追尾しながら水面上の覆工表面画像を取得する無人で調査可能なロボットとして、点検・調査機会の制約を解放した。また、画像データは連続したトンネル展開図となり、そのデータから健全性診断を行う。

このように無人ロボットによる導水トンネルの調査が可能となったが、搭載されたセンサは目視の代わりとなる表面情報のみの取得であったため、導水トンネルに必要なデータが不十分であったことや、暗所で衛星測位システム(GNSS)が使えない環境では、距離ドップラー距離計を用いてロボットの移動距離を検出していたが、より精度向上が望まれていた。DXの推進が求められる時代を迎え、自動運転技術やセンシング技術等は飛躍的発展を遂げている。このような状況下、暗所で非GNSS環境下においても、ロボット自身が空間を認識しながら自律的に移動し、無人で覆工の表面および背面、水中部に対して計測・モニタリングが可能な次世代型の調査装置“新型モモタロウ”の開発を行った。

## (2) 自律フロート型装置“新型モモタロウ”の開発

導水トンネルの健全性を診断するためには、覆工背面の状態や水中部も含めた全断面の状態把握が必要である。“新型モモタロウ”の開発では、非破壊計測データ等の取得にも対応できるように、全方位移動水上ロボットの制御技術を応用し、流下方向はほぼ流れに任せ、主に左右方向位置および旋回角度をスラスト推力によって制御することで、常に導水トンネル中央(トンネル軸)に流下する自律機構<sup>6)</sup>を搭載した。また、フロート型装置本体(プラットフォーム)は、初期型よりも薄型化・軽量化を行い、重量に関しては20kg未満となり、投入・回収時の作業性が向上した(昭和63年から始まった調査機器の開発は、約30年を経て、装置の重量は2tから約20kgへ1/100にダウンサイジングされた)。また、自己位置の取得は、海洋等ではGPS(Global Positioning System)を使われることが多いが、導水トンネルの場合、GPSによる位置情報の取得は不可能であり、トンネル軸に沿うように制御するためには、導水トンネルの実形状との相対的位置の把握が必要である。船体の位置と姿勢の制御は、フロート型装置本体(プラットフォーム)に測域センサ(LiDAR)とIMU(ジャイロセンサ)を搭載し、センサ情報をもとにスラストを制御する機構を持たせた。トンネル壁面との距離など、船体の自己位置の検出は、測域センサから得られたトンネル内部の形状データから行い、船体の姿勢検出は、IMUから得た慣性運動データをもとに行っている。また、船体の移動距離は、カメラで撮影した画像データを処理することで検出している。

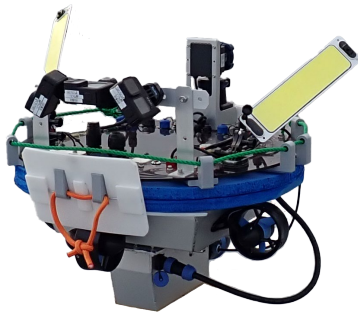


図-6 自律フロート型「新型モモタロウ」

表-3 新型モモタロウの仕様

項目	仕様	
形状・寸法	円盤形、φ×H=500×510mm(レーダ装置未装着時)	
重量	約16kg	
航行方式	自然流下方式	
位置・姿勢制御	測域センサ(LiDAR)とIMU(ジャイロセンサ)のセンサ情報をもとに船体の位置と姿勢を制御	
	推進装置	スラスタ 出力390W×4個
	自己位置計測	測域センサ×2個、ジャイロセンサ
	測位装置	GPS
移動距離検出	カメラ画像を用いたSLAM(自己位置推定技術)による距離データの取得	
主電源	22.2V、Li-ionバッテリー	

### (3) 計測機能の拡充に向けて

本装置に用いて導水トンネルの健全性の診断に必要な基礎情報を取得するためには、水面上部のトンネルアーチ部を撮影するためのカメラだけでなく、①水面下の水没している部位の状態を計測するための水中部の映像化や形状の把握と、②導水トンネルの安定性において問題となりやすいトンネル覆工背面の空洞の有無・規模の計測が必要である。

上記①については、これまでの実証試験の結果から、通常の光学式水中カメラでは、水の透明度の影響を受けて安定した映像化が難しい場合がある。現在、水中ソナーによって得られた形状データから部材の欠損や堆砂の有無を検出する機能に加えて、超音波を利用した映像記録装置である「水中音響カメラ(米国 Sound Metrics 社製の ARIS (Adaptive Resolution Imaging Sonar) 8)」の適用を目指して開発中である。流下しながらの計測となるため、

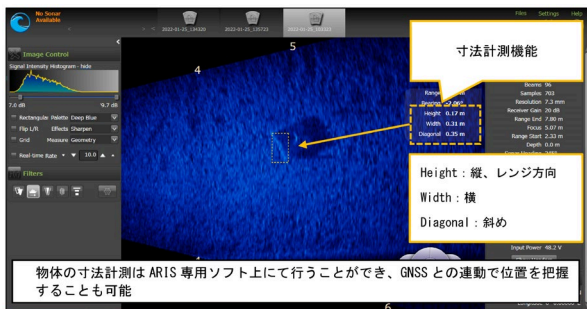


図-7 フロー式装置に搭載した水中音響カメラの計測例

安定した映像記録ができるように水中音響カメラの設置角度等の取付方法について、現在、開水路にて性能検証を実施している。水面下の水没している部位(側壁下部やインバート)では、コンクリート打設時の締固め不足等に起因する欠損穴が発生することがあり、既往の知見<sup>9)</sup>によれば、20cm以上の大きさになると、穴からの漏水によって地山の状態を悪化させることがある。欠損穴を模擬した供試体を用いた実証試験の結果によると、流速1m/sと一般的な流況において、直径10cmの穴状の凹みは、寸法計測が可能であった。ひび割れについては、現状、検出は困難であるが、トンネル覆工の施工目地の開き・破損(幅1cm以上)であれば、発生有無は識別可能な結果を得ている。点検項目に対する計測性能を示す。

上記②については、道路トンネルの走行型計測装置として実績のある非接触型レーダ計測装置<sup>10)</sup>の搭載を可能にしている。取得したデータの解析精度の向上には、さらなるデータの蓄積が必要であるが、通水中の導水トンネル内部を自然流下しながら、覆工コンクリートの厚さや覆工背面の空洞の有無を把握できる段階に達している。

導水トンネルでは、これまで水を止めて排水し、人が中に入って点検するしか方法がなかった点検・調査を革新する技術として引き続き機能の拡充を進め、先進性をより高める。

## 4. スマートメンテナンスの提案

### (1) 導水施設の保全業務モデル

本取組みは、「点検省人化・省力化」、「施設事故最小化」、「労働災害・ヒューマンエラーゼロ化」、メンテナンスあるいは事故等による計画外の「停止作業機会最小化・作業労力最小化」等をキーワードに、メンテナンスのスマート化の実現を目指している。

具体的には、デジタル・ロボット技術を活用した新たな施設保全業務モデルの構築を行い、品質の維持・向上

表-4 点検項目に対する計測性能

項目	現在の実用性
ひび割れ	mm単位の計測(ひび割れの有無は幅0.3mm程度以上から検出) ※水面下の部位は水の透明度等による
剥離・剥落	数cm単位の計測 ※側壁・アーチ部の水面上の部位
浸入水	浸入水の有無 ※水量は動画から程度の区分
目地損傷	開きはmm単位の計測 ※水面下の部位は水の透明度等による
欠損・洗掘	10cm単位の計測 ※水面下の部位は水の透明度等による
変形・沈下	変形・沈下の有無 ※水面下の部位は不可
覆工背面空洞	空洞の有無 ※覆工背面30cm程度の範囲まで

を図りながら保全業務を大幅に省力化し、管理職員がより創造的な業務に取り組めるようにすることで、事業者の技術レベルの強化、保全コストの無駄を省き、さらには労働環境改善の実現を図る。水力発電事業者であれば、CO<sub>2</sub>フリーの再生可能エネルギーである水力発電所の競争力を高め、電力安定供給に貢献することで、単に作業の効率化やコスト削減といった観点に偏らない価値創造型のメンテナンスを目指すものである。

ここに提案する導水施設の保全業務モデルは、「人×ロボット×AI」を統合し、施設保全の活動プロセスを通じて得られた新たな知識や認識をベースに、より合理的なモデルへと発展させて、人とデジタルのベストミックスを追求するものである。その特長を次に示す。

## (2) 保全業務モデルの特長

①導水トンネル内部の状態把握は、3章で紹介した通水状態かつ一貫した精度で計測可能な通水点検ロボット“モモタロウ”を点検・調査実務に導入し、施設管理者が行う導水停止・排水作業を省く点検・調査業務の再構築（バリューチェーンの再構築）を図る。これとともに、現場での人の作業は投入と回収のシンプルな手法にすることで「点検省人化・省力化」を実現する。また同時に「労働災害・ヒューマンエラーゼロ化」、メンテナンスによる「停止作業機会最小化・作業労力最小化」を図る。

②点検・調査業務が簡易化されることで、施設のライフサイクルの中での接点（点検機会）が増えて、施設の状態に関するデータが日常的に取得しやすくなることで、施設の状態変化をより連続的に把握できる。これらのデ

ータをベースとなる地図（管内図）に重ねて人が分析・評価を行うことで施設の現状や危険箇所を把握しやすくする。既に“水路のみかた”と名付けられたデータ統合ブラウザを構築している。将来的には機械学習を用いた損傷リスクの予測診断へ発展されることが期待できる。

③長年蓄積してきた膨大な診断や研究の成果をもとに構築している“水路エキスパートシステム<sup>14)</sup>”によって、保全の意思決定を支援する。これに従来の限られた機会の点検では得られなかったデータを多数加えることで、新たな知識や認識をベースに、保全モデルを深化と進化で革新させて、より合理的な意思決定を実現する。これを著者は、デジタルの持つ利点を活かして、複利で知見を増やす効果を期待している。その結果として、「施設事故最小化」を図る。

2章で述べたとおり、導水トンネルの場合、日常的に人が入坑して内部を巡回することは不可能であるため、平常時の施設内部の状態とその変化に気づく機会是非常に限られる。そのため、トンネル覆工に生じる変状がいつ発生し、どのような過程で進展していくのか、変状の連鎖の過程・機構について把握できていない部分がある。著者が開発を進める通水点検ロボット“モモタロウ”は、施設の状態把握を容易にし、取得したデータは、施設保全を合理的に進めていくうえで、価値あるデータとなる。現在、水道用水・工業用水を供給する施設管理者に対して、本手法を標準化していくため、令和3年度から現場実装を開始し、現在、導入効果を確認しながら実務運用している段階である。

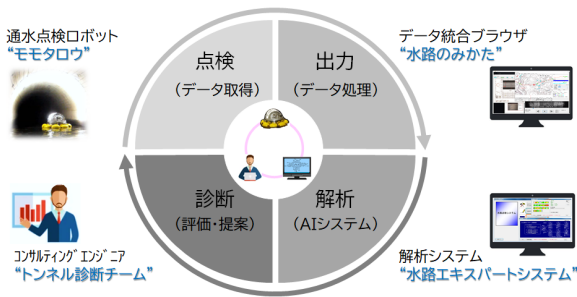


図8 導水施設の保全業務モデル

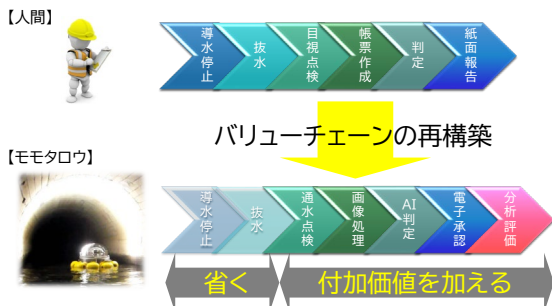


図9 保全業務におけるバリューチェーンの再構築

## 5. デジタル社会におけるアセットマネジメントの未来

デジタル・ロボット技術とデータ分析・評価技術の活用は、社会インフラにおけるアセットマネジメントの効率性と効果性を大幅に向上させる鍵となっている。ここに紹介した保全業務モデルは、データ駆動の戦略を中心としており、複数のキーポイントでデータの力を発揮し、その価値を最大限に引き出すものである。

### (1) 省人化・省力化

通水点検ロボット“モモタロウ”の使用により、装置の投入と回収作業以外には、人が直接関与することなくインフラの健全性を監視することが可能となる。この自動化は、労働力をより高度な分析や意思決定のタスクに再配置することを可能にし、同時に安全性を向上させる。

### (2) 施設の状態把握の向上

ロボットによる継続的な点検は、施設の健康状態に関

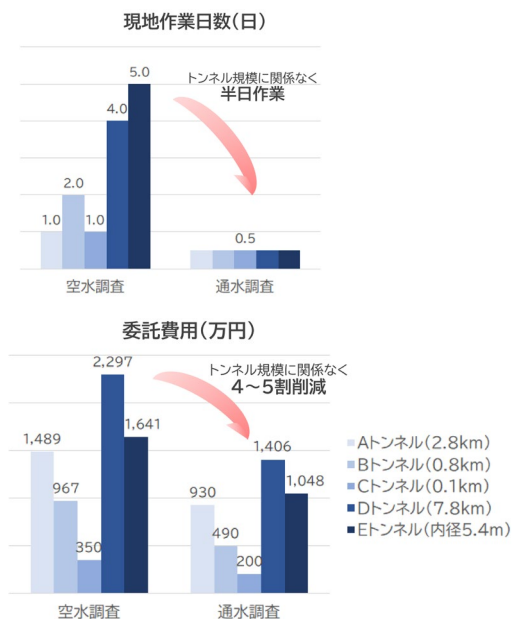


図-10 点検実務における導入効果

表-5 施設管理者側の導入効果

項目	送水状態	調査可能時間	管理職員対応	受水者対応
通水調査 (提案手法)	通水を維持 (一部の導水施設では流量調整)	制限なし	ほぼ通常通り (一部の導水施設で取水ポンプ操作)	特になし
空水調査 (従来手法)	断水(導水停止)	大口受水者の予定に合わせた限られた時間(深夜~早朝の時間帯など)	細かいスケジュールによる複雑な水運用	切替や受水調整など細かい水運用調整
	バックアップ機能による送水(一部の導水施設に限られる)	時間稼ぎの側面が強く限られた時間	特殊な水運用	特になし

するデータをより頻繁に取得・蓄積する。これにより、突発的な問題や急激な劣化を事前に特定し、適切な予防措置を取ることが可能になる。

### (3) リスクの予測診断と事故の最小化

収集したデータの分析により、将来的なリスクや損傷の可能性を予測することができる。これは機械学習の技

術を応用し、変状のパターンを理解することにより、未来のリスクを予測し、必要なメンテナンスと修繕の計画を立て、施設事故を最小限に抑えることが可能である。

特に強調すべきは4章でも述べた「複利で知見を増やす」というアプローチである。この表現は、知識や情報が時間とともに累積し、そのプロセス自体がさらなる知見や学びを生み出すという意味で、金融の「複利」に喩えられる。これにより、データや知識の層を重ねることで、さらなる価値や洞察を生じ、結果として事業やプロジェクトに多大な影響を与える期待が含まれている。

デジタル技術を利用することの利点として、次のような点が考察できる。

#### a) 連続的な学習と改善

デジタルシステムは、新しいデータが絶えず追加されることにより、過去のデータから学び、将来の予測や決定を改善する機会を提供する。これは、人が単独で行う分析よりも高速かつ大規模なデータセットが可能である。

#### b) エラーの減少と精度の向上

人によるデータ分析やメンテナンスの決定には、バイアスや誤解を含む可能性がある。デジタルシステムと機械学習モデルを使用することで、一貫性が保たれ、エラーが減少し、分析精度の向上に資することが期待される。

#### c) 迅速な意思決定

デジタルシステムは、すばやく情報を処理し、緊急を要する問題に対して迅速に対処するための支援を提供する。これにより、インフラやプロジェクトの持続可能性と安全性が保たれる。

#### d) コスト削減と効率化

自動化されたプロセスとデータに基づく意思決定により、運用のムダを減らし、業務の効率化を図られる。こ

【現状】知見は単利でしか増えない

マニュアル作成当初の知見をもとに評価される



【DX】知見が複利で増えて飛躍的に進歩

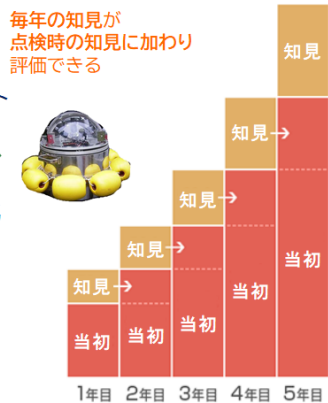


図-11 複利で知見を増やすデジタル点検

れは、長期的には運用コストの削減と、リソースの最適化に寄与する。

#### e) 予測分析とリスク管理

データの蓄積と分析により、将来的な施設のリスクを予測し、効果的な予防措置を立案することが可能である。これは、事故や損傷の予防、ならびにシステムの信頼性と安全性の向上に直結する。

これらの戦略は、「知識の複利」を通じてアセットマネジメントのイノベーションを推進するものであり、連続的な改善、進化する予測分析、そして包括的なリスク管理を実現する。これにより、インフラの寿命が延伸し、事業の持続可能性が高まり、結果として社会的価値の創出に寄与することにつながる。

#### (4) 知識の深化と意思決定の合理化

長期間にわたるデータの収集と“水路エキスパートシステム”への統合は、施設の状態とパフォーマンスに関する深い理解を提供する。この洞察は、保全の意思決定をより情報に基づいたものにし、事業の効率と安全性を高める助けになる。

#### (5) サステナビリティと競争力の強化

効率的なメンテナンスモデルは、事業者が持続可能な方法でインフラを維持し、例えば、CO<sub>2</sub>フリーの再生可能エネルギー源としての水力発電所の競争力を高めることを可能にする。また、計画外の停止を減らし、安定したサービスを提供することで、顧客への信頼を深め、事業の成長をサポートする。

## 6. おわりに

ここに紹介した事例は、データ駆動の意思決定と高度な自動化を活用して、社会インフラの効率性、信頼性、そして持続可能性を強化するための強力なフレームワークを提供する。これは、技術的進歩と組織的変革を通じて、長期的な社会的、環境的利益をもたらすものである。

現在、水道用水・工業用水を供給する地方自治体を中心に、本手法を標準化していくための現場実装を進めており、サービス範囲の拡大も視野に入れて、技術開発とあわせてビジネスモデルとしての確立に向けた展開を行っている。市町村などの地方自治体においては、道路課が水関連施設の維持管理を担っている場合もあるため、道路インフラマネジメント分野との連携も強化しながらDXの実現による顧客への価値提供を目指して取り組み

を継続・発展させる。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本水道協会：広範囲に影響を及ぼす施設事故に関する課題検討会（広島県事故ケーススタディー）報告書、p.16, 2007.3
- 2) 中部電力株式会社：水力発電所無圧導水トンネル健全度の定評評価手法の提案と試行、技術開発ニュース、No.128, p.31, 2007.9
- 3) 宮崎県企業局：職員ブログ 2021年
- 4) 伊藤保裕ら：工業用水道トンネルの実態と機能診断調査等について、工業用水、第600号、pp.18-23, 2010
- 5) 森充広、浅野勇、川上昭彦、川邊翔平：農業用導水トンネル壁面連続画像撮影技術の現地適用性の評価、農工研技報、第218号、pp.51-63, 2016
- 6) 齋藤佑樹ら：導水トンネル点検のためのロボットシステムの開発、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（CD-ROM）、20th, 2019.12
- 7) 中山宣洋、松田貞則、工藤晶子、久保田直行、武居直行、藤本泰成、高橋文緒、財部伸一、笠原翔、高岩庸博：DX時代における農業水利施設保全へのロボット活用、農業農村工学会誌、第91巻、第6号、pp.373-376, 2023.6
- 8) 株式会社アーク・ジオ・サポート：水中音響カメラARIS
- 9) 東北電力株式会社：水力発電所導水路調査要領、pp.47-49, 1989
- 10) 株式会社ウォールナット：道路トンネル防災車（トンネルマスター）
- 11) 安保秀範、田中雅弘、吉田典明：導水トンネル管理支援システムの開発、電力土木、287号、pp.44-46, 2000.5