

研究成果報告書

研究開発課題名	農業用パイプラインに適した漏水探査ロボット技術の開発
研究総括者	金氏 眞
研究開発組合	東亜グラウト工業株式会社 株式会社ウォールナット
試験研究機関	国立研究開発法人 農研機構

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

(1) 事業の背景

図1の農業水利施設の突発事故（災害以外の原因による施設機能の損失）の発生状況調査（水資源課調査）によれば、農業水利施設の突発事故の約6割は管水路、約2割は用排水機場で発生しており、平成26年度のパイプラインの突発事故は国と地方自治体を合わせるとおよそ1000件近く発生している。施設の老朽化に伴って突発事故件数はさらに増加することが予想される。



出典) 農業水利施設に係る突発事故の発生状況調査(水資源課)



パイプラインの破損事故

図1 農業用パイプライン（管水路）の突発事故

漏水の初期段階で漏水の有無を発見し、漏水の発生場所を特定できればパイプラインの破損事故の大半を未然に防止することができることから、高い精度で漏水箇所を検出できる農業用パイプラインに適した技術が求められている。

このような背景から、国立研究開発法人農研機構農村工学研究部門が中心となってパイプラインの漏水箇所を検出するカプセル型の漏水探査ロボットの研究開発に取り組み、平成30年度末時点において300mの水頭圧に相当する3MPaの耐圧性能を有し8時間の連続使用で10km漏水調査が可能なカプセル型のロボットを開発し、4箇所の実パイプラインにおいて流下試験を延べ6.2km実施し、漏水音を含む管内音を収集した。

(2) 事業の目的

本研究開発は上記の漏水探査ロボット技術開発を継承するものであり、ロボットから超音波を発信する機能を新たに追加する（「アクティブ化」と呼ぶ）。さらにパイプラインの途中にあるマンホールを通過基準点として露出した管に超音波受信装置を設置することで、ロボットの通過時刻を高い精度でかつリアルタイムで計測するシステムを開発する。ロボットの基準点通過時刻を高精度で検出することによって、ロボットが漏水音を検出した時刻にロボットが管路のどの位置にいたかを高精度で算定することができることから、漏水音発生位置の推定精度が高くなる。

また、管路の平面図と縦断図から 3D 管路図を作成し、ロボットが基準点を通過する時刻を反映してロボットが管路のどの地点を流下しているかをリアルタイムで表示するシステムを開発する。これにより、パイプラインに投入後は目視でロボットを確認することはできないが、3D 管路図上でロボットの位置を把握できることから、通過基準点における超音波受信装置の設置・撤去作業ならびにロボット回収地点でのロボット回収装置の準備作業を計画的に行うことができるようになる。

さらに、上記のロボット技術の改良とともに、農業用パイプラインを主な対象として現地確認試験を実施して漏水データを数多く収集し、漏水音判定の精度向上を図るとともに、ユーザーフレンドリーな解析プログラムを開発して管路の所有者及び管理者に分かりやすい調査結果を提供できるようにする。

また、現時点で内径 200mm から 800mm の管に対応するロボット回収装置が完成しているが、大口径管に対するニーズが多いことから内径 1200mm までの管に対応するロボット回収装置を開発する。これにより約 75% のパイプラインをカバーできることになる（図 2）。

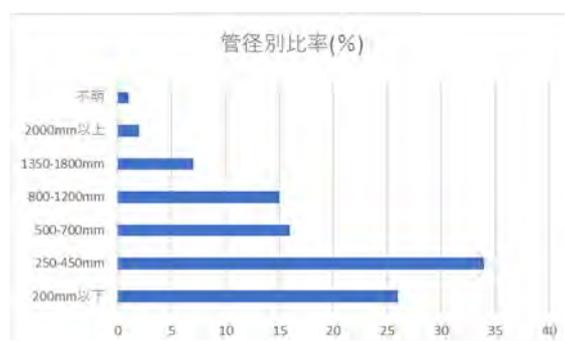


図 2 農業用パイプラインの管径別比率（農業水利ストック情報データベース）

なお、漏水探査技術の潜在的ユーザーである全国の農業用パイプラインの所有者（国、地方自治体等）ならびに日常管理を担当する土地改良区（水土里ネット）の担当者の方々に対して、本技術開発成果を知って貰うための活動を展開するとともに、新技術研究開発組合のメンバーを含む調査専門会社が活用できるように普及展開を図っていく予定である。

本事業は、既往の研究開発成果を応用して、「漏水発生位置の検出精度向上のためのアクティブ化」、「ロボット通過位置のリアルタイム表示」、ならびに「ユーザーフレンドリーな解析プログラム」を主たる開発項目とし、農業用パイプラインに適した実用化レベルの漏水探査ロボット技術を完成させることを目的として行うものである。

(3) 事業の効果

今までは農業用パイプラインに適した効果的な漏水探査技術がなかったことから、パイプラインのストックマネジメントに関しては突発事故が発生してから事後対策をとる以外に方法がなかった。

本事業によって、漏水の有無を判定するとともに漏水発生箇所を高い精度で推定する漏水探査ロボット技術が完成すれば、今までの事後保全を主体とした対策から予防保全を組み入れた効率的なストックマネジメントに転換することができる。

これまでの研究によれば、インフラ構造物の劣化は、劣化がまだ外部に現れない「潜伏期」、劣化が徐々に進行する「進展期」、劣化の速度が早くなる「加速期」、そして劣化の最終段階の「劣化期」という順番で進行すると言われており、パイプラインの漏水も例外ではないと思われる。パイプラインの漏水の場合、「進展期」で漏水が発生して水みちがはじめ、「加速期」で水みちが大きくなって地表面に現れ、「劣化期」でさらに水みちが大きくなり、劣化期の最終段階で突発事故が発生する。漏水の劣化進行過程のどの段階で漏水探査ロボットを活用した漏水調査を行うかによって、以下の効果が期待できる。

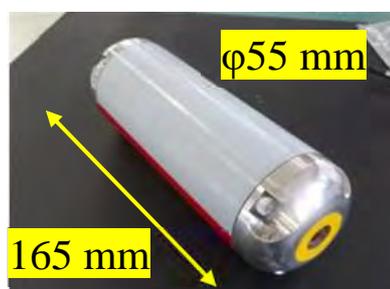
- 漏水による水みちが地表面に現れる「加速期」または「劣化期」で漏水箇所を特定することによって、「突発事故を未然に防ぐ効果」ならびに「突発事故に伴う第三者被害を防止する効果」が期待できる。
- 一つのパイプラインで漏水が発生する場合、複数カ所で漏水が発生する可能性が高い。突発事故の発生、あるいは水みちが大きくなって地表面に現れたことによって漏水対策を実施した場合、対策を実施した場所以外でも「進展期」や「加速期」の漏水が発生している可能性が高い。そのような場合、水みちが地表面に現れた箇所だけを事後対策として工事していると、同一パイプラインで繰り返し漏水対策を実施する事態になりかねない。このような場合、漏水探査ロボットを活用した漏水調査によって水みちが表面化しなかった場所で「進展期」や「加速期」の漏水を発見することによって、一度に全ての漏水箇所の対策を実施することができることから、「同一パイプラインにおける漏水事故の繰り返し発生を防止する効果」が期待できる。
- 漏水探査ロボットによる漏水調査が数多く実施されることによって、漏水の発生及び進展のメカニズムが明らかになるとともに、漏水が発生する条件等に関するデータが蓄積される。このようなデータの蓄積によって、「進展期」や「加速期」の漏水を多く検出することができれば、パイプラインの漏水事故に対する予防保全が可能になる。

1. 2 事業の内容及び実施方法

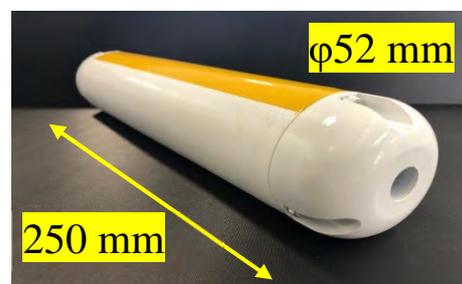
本研究開発は、国立研究開発法人農研機構農村工学研究部門が開発した漏水探査ロボット技術のプロトタイプ（図3）をベースに、ロボット技術を改良して性能を向上させるとともに、農業用パイプラインへの適用性を高める。農業用パイプラインを主な対象として改良されたロボットを使って現地確認試験を実施し、漏水音データやロボット位置検出のためのデータを収集する。これと並行して、ロボットが収集したデータを解析するユーザーフレンドリーなプログラムを開発し、現地確認試験で収集したデータを活用して解析プログラムの検証を実施する。

研究開発の内容をまとめると次の3項目となる。

- (1) ロボット技術の改良
- (2) 現地確認試験及び漏水データ収集
- (3) ユーザーフレンドリーな解析プログラムの開発



ロボット L165 (φ 200～φ 300mm)



ロボット L250 (φ 350mm 以上)

図3 プロトタイプ漏水探査ロボットの概要と探査手法

(1) ロボット技術の改良

漏水探査ロボットのプロトタイプの開発では、カプセル型ロボットを空気弁等のボールバルブ (φ 75mm 以上) から投入し、流速 0.3～0.5m/秒で流れるパイプライン中を流下させ、下流側の回収地点のボールバルブからロボットを回収する技術を確認させた (図3)。

ロボットの投入地点では、φ 75mm のボールバルブからロボットを管内に挿入して任意の時刻にロボットを発射する装置を完成させ、回収地点ではパイプの全断面をカバーする網を有するロボット回収装置を φ 75mm のボールバルブから挿入しロボットを回

収する装置を完成させた。

ロボット回収地点では、回収装置にファイバースコープを装備してロボットの到着を検知する計画だったが、農業用水の透明度が低くファイバースコープではロボットの到着を検知できないことが判明した。また、ロボットを投入した後はロボットがパイプラインのどこを流下しているかを検知できないことから、どのタイミングで回収装置を管内に挿入すべきか、また、いつロボットが到着したかを判断できないため回収装置をいつ引き上げるかを判断できないことが問題点として浮かび上がった。

上記の問題点を解決するために、本技術開発ではロボットから超音波を発信する機能を新たに追加し（「アクティブ化」と呼ぶ）、パイプラインの途中にあるマンホールを通過基準点として、マンホール内で露出した管に超音波受信装置を設置し、ロボットの通過時刻を高精度でかつリアルタイムで計測するシステムを新たに開発する。ロボットの基準点通過時刻を高精度で検出することによって、ロボットが漏水音を検出した時刻にロボットが管路のどの位置にいたかを高精度で算定することができることから、漏水音発生位置の推定精度の向上が期待できる。また、ロボット回収地点にも超音波受信装置を設置してロボットの到着を確認してから回収装置を引き上げることができる。

さらに、管路の平面図と縦断図から3D管路図を作成し、ロボットが基準点を通過する時刻を反映してロボットが管路のどの地点を流下しているかをリアルタイムで表示するシステムを開発する。これにより、パイプラインに投入後は目視でロボットを確認することはできないが、3D管路図上でロボットの位置を把握できることから、通過基準点における受信装置の設置・撤去作業ならびにロボット回収地点でのロボット回収装置の準備作業を計画的に行うことができる。

なお、ロボット技術の改良における実施項目は以下のとおりである。

1) ロボットに超音波発信機能を追加（アクティブ化）

- ・プロトタイプの開発では、ロボットに水中マイク（ハイドロフォン）を設置して漏水音を収集し、通過基準点に音波（超音波）発信器を設置してハイドロフォンで受信することによってロボットの通過時刻を算出する計画としていた。また、ロボットの到着は回収装置にファイバースコープを設置して目視確認することとしていたが、農業用パイプラインでは水の透明度が低いためにロボットの到着を目視確認できないケースが多くあることが判明した。そこで本技術開発では、新たにロボットに超音波発信機能を追加（アクティブ化）し、ロボットから円周方向に超音波を発信して通過基準点に設置した超音波受信装置によってロボットの通過時刻を高精度でかつリアルタイムで検出する方式に転換する。通過基準点におけるロボット通過時刻を高精度で計測することによって、ロボット位置の計測精度が向上する。
- ・回収地点にも超音波受信装置を設置してロボットの到着を確認してから回収網を引き上げることとする。

- ・管路平面図と管路縦断図から 3D 管路図を作成し、GIS 上に管路平面図を表示し、発射後のロボットの流下位置を GIS 管路図上にリアルタイムで表示して監視する機能を追加する。最初の通過基準点までは管内の水の流速からロボットの流下速度を推定して入力するが、基準点の通過時刻を検出することによって第一区間の平均流速を算出してこれを次の区間のロボット流下速度として入力する。この作業を繰り返すことによって、GIS 管路図上でロボットの流下位置をリアルタイムで表示して監視することができる。

2) 超音波センサの開発 (アクティブ化)

- ・ロボットから超音波信号を発信するためには、限られたロボットの空間内に超音波センサを設置しなければならない。
- ・数値解析によるシミュレーションを実施して超音波の最適な周波数ならびに超音波センサの形状ならびに設置位置を検討し、超音波センサをオーダーメイドで製作・設置する。
- ・ロボット位置計測方法の一つとして「超音波法」があり、これについてもロボットから直進方向に超音波を発信する方法の検討を実施する。超音波センサ開発の第二段階としてロボットに設置するロボット位置計測のための超音波センサの開発を実施する。

3) 超音波受信装置の開発

- ・ロボットから発信された超音波を受信し、リアルタイムでロボットの通過時刻を検出する超音波受信装置を開発する。

4) ロボット及び周辺機器の改良

- ・改良されたロボットを使って現地確認試験を実施し、ロボット及び周辺装置の性能を評価するとともに、実用化段階に備えて必要な改良を実施する。

(2) 現地確認試験及び漏水データ収集

プロトタイプの開発では、 $\phi 75\text{mm}$ のボールバルブから出し入れできるロボット発射装置とロボット回収装置を完成させたが、両装置の完成時期が遅れたため両装置の現地確認試験が十分にできていない。また、現地の確認試験は上記のロボット発射装置とロボット回収装置を使わないでロボットの投入・回収が可能なパイプラインに限定されたため、漏水音データの収集が十分にできていない。

本事業では、改良されたロボットを使って現地確認試験と漏水データ収集を実施し、ロボット発射装置、ロボット回収装置や流速計などの周辺機器を実パイプラインで使用してその性能を評価し、必要に応じてこれら装置の技術改良を実施する。また、漏水音データを数多く収集・蓄積し、漏水音の判別性能を向上させる。

現地確認試験については、すでに 8 箇所前後の管理者から農研機構に対して現地確認試験の要望が届いているが、基準点通過時刻検出のためのロボット改良ができ次第、令

和元年度に 4 箇所程度、令和 2 年度に 12 箇所程度の現地確認試験及び漏水データ収集を実施する予定である。

(3) ユーザーフレンドリーな解析プログラムの開発

プロトタイプの開発では、カプセル型ロボットの前後に設置した 2 つのハイドロフォン（水中マイクロフォン）によって漏水音を収集できること、2 つのハイドロフォンのステレオ効果によってロボットが漏水音発生場所を通過した時刻を高精度で検出できることが模擬管路における実験で確認できた。これらの実験成果によって、漏水音の検出ならびに漏水発生位置の検出において高い性能が期待できることは確認できたが、漏水音の検出及び漏水発生位置推定の解析プログラムが完成しておらず、また実管路におけるデータがないことから、漏水音の検出性能や漏水位置推定性能が実証できていない。また、ロボット位置を計測する 3 つの方法（区間平均流速法、ジャイロ法、超音波法）についても、模擬管路における実験等によってその実現可能性が高いことは確認できたが、解析プログラムができていないため、ロボット位置計測性能が実証できていない。

本事業では、上記 2 つの開発項目である「ロボット技術の改良」、「現地確認試験及び漏水データ収集」と並行して「ユーザーフレンドリーな解析プログラムの開発」を進める。まず「漏水音検出プログラム」を開発してロボットが漏水音を検出した時刻を特定し、次に「ロボット位置推定プログラム」を開発して任意の時刻におけるロボット位置を推定するプログラムを完成させる。この二つを組み合わせることによって漏水音発生位置を GIS 管路図上で表示し、漏水音の検出結果とその発生位置推定結果をユーザーに見やすい形で提供することができる。

なお、ユーザーフレンドリーな解析プログラムの開発における実施項目は以下のとおりである。

- 1) 3D 管路図：3D 管路図を作成して管路の実長（道のり）を把握する。ただし表示は「平面図」と「縦断図」とする。
- 2) 漏水音ビューア：横軸に「時刻」、縦軸に「音データ（音圧）」のグラフ
 - ・前後のマイクのステレオ効果によって「異常音（特定の場所から発信された音）」を自動抽出

- ・「異常音」の中から「漏水音」を切り分けて自動抽出（図 4）

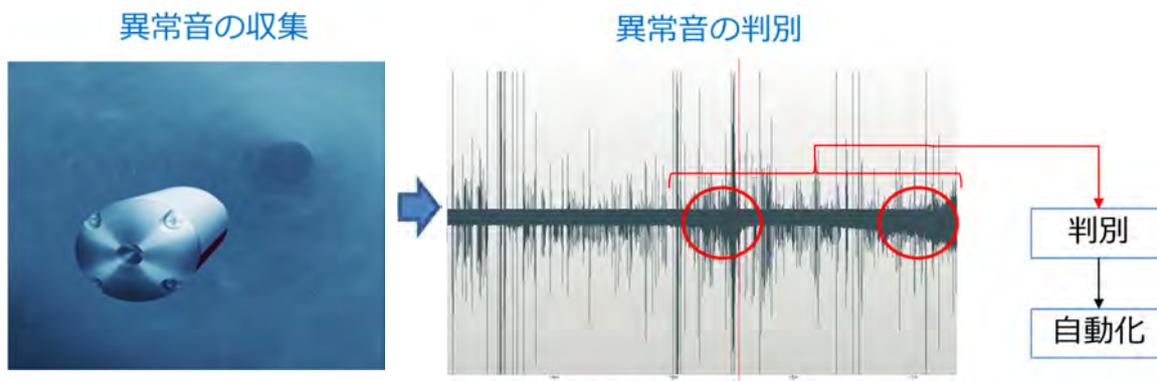


図 4 異常音の収集と判別

3) ロボット位置ビューア：横軸に「時間」、縦軸に「出発点からの距離（道のり）」

3-1) 区間平均流速法

- ・ロボットが通過基準点を通過した時刻をリアルタイムで検出し、基準点間はロボットが「同じスピードで流下している」という条件でロボット位置を推定し表示する

3-2) ジャイロ法

- ・ロボットが水平を維持しかつ管路の中央を流れているという条件のもと、X軸（ロボットの長軸方向＝進行方向）とZ軸の加速度からロボット位置を推定し表示する（図 5）。

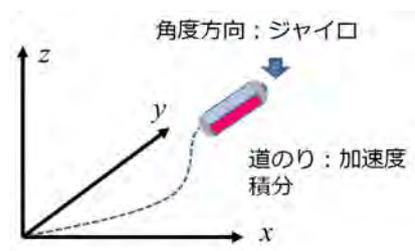


図 5 ジャイロ法の概要

3-3) 超音波法

- ・ロボットから超音波を断続的（例えば、1秒間に1パルス）に発信し、ロボットから発信した時刻と通過基準点に設置した受信装置が受信した時刻との差（音波の水中音速は 1500m/秒）からロボットの位置を推定し表示する（図 6）。

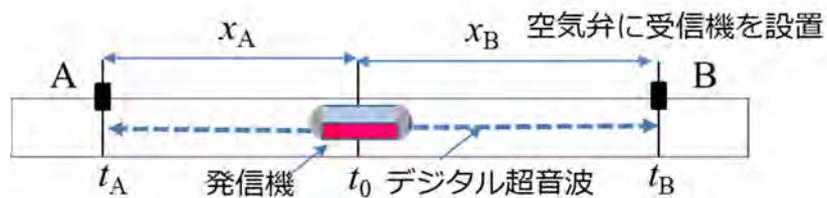


図 6 超音波法の概要

3-4) 最終結果表示 (GIS 管路図)

- ・上記の解析結果をまとめて、GIS 管路図上で漏水発生地点を表示する。

本技術開発の目標性能を表 2 に示す。

表 2 本技術開発の目標性能

項目	目標
管種	すべての管種
管径 (内径 mm)	内径 ϕ 200mm ~ ϕ 1200mm
適用水圧 (MPa)	0.3 ~ 1.0 MPa
ロボットの耐水圧 (MPa)	3.0 MPa
適用流速 (m/秒)	0.3 ~ 0.5 m/秒
漏水探査距離 (1 回あたり)	10km (0.35m/秒 \times 8 時間)
漏水検出精度 (漏水量)	毎分 1.0 リットル以上
漏水検出精度 (漏水位置)	4 m 以内

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
1) 限られたロボットカプセル空間の中に設置可能な超音波発信センサの開発	数値解析シミュレーションによってセンサ形状ならびに周波数等について最適解を求め、超音波発信センサをオーダーメイドで製作する。
2) 超音波信号を効率よく受信・記録する超音波受信装置の開発	ロボットから連続的に発信される超音波信号を、通過基準点に設置した受信センサで受信・記録するとともに、超音波信号の波形を画面に表示して計測員がロボットの通過時刻をその場で即座に判断できる「通過時刻検出装置」を新たに開発する。
3) 受信・記録した超音波信号データからロボットが基準点を通過した時刻を算出するプログラムの開発	通過時刻検出装置が記録した超音波信号をガウス関数で近似する事後処理によって、ロボットの通過時刻を推定するプログラムを開発する。
4) 収集した音データから漏水音発生地点をロボットが通過した時刻を検出する手法	カプセルの前後に設置した二つのマイクロフォンのステレオ効果を利用して漏水地点通過時刻を特定するプログラムを開発する。
5) ジャイロデータの積分によってロボットの流下速度及び移動距離を算出できるか	取得済みのデータを使ってロボットの流下速度を算出するプログラム開発の可能性を検討する。また、基準点通過時刻の検出システム完成後に、模擬管路ならびに実地確認試験で多くのジャイロデータを収集し、ジャイロ法によるロボット位置算出プログラムの検証と改良を実施する。
6) 超音波法の開発において、ロボットから発信する超音波の最適周波数や伝達距離が不明	数値解析によるシミュレーションを実施して、センサ形状ならびに周波数等について最適解を求め、その結果に基づいて超音波センサをオーダーメイドで製作する。
7) ロボットから一定間隔で発信される超音波信号とドップラー効果からロボット位置を算定することは理論的には可能だ	ロボットから発信された超音波パルス信号（バースト波）が管路内をどのように伝達するかについて既知の情報がないことから、数値解析シミュレーションを実施し、超音波発信センサの形状ならびに周波数等について最適解を求め、その後にセラミック振動子をオーダーメ

が、超音波信号の伝達距離や最適周波数が不明	イドで開発し、模擬管路における実験等を実施する。
8) ロボット発射装置、ロボット回収装置、流速計などのロボット周辺機器の開発と室内における確認試験は終了しているが、現場で使用した場合にどのような問題点が不明	現地確認試験を実施してロボット周辺機器の性能を確認するとともに、問題点をリストアップする。リストアップされた問題点を解決するために、周辺機器の改良と繰り返し試験による耐久性能の確認を行う。
9) ロボットならびに周辺機器の取扱説明書、解析プログラムの取扱説明書、漏水探査ロボットの技術内容を記載した「技術資料」が未完成	一定の成果が得られた段階で技術資料作成に着手する。

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

研究開発の項目	新技術研究開発組合	
	東亜グラウト工業	ウォールナット
ロボット技術の改良	◎	○
現地確認試験及び漏水データ収集	◎	◎
解析プログラムの開発	◎	○

◎は主担当、○は担当

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

研究開発の項目	農研機構	新技術研究開発組合
ロボット技術の改良	○	◎
現地確認試験及び漏水データ収集	○	◎
解析プログラムの開発	—	◎

◎は主担当、○は担当

1. 5 事業の年度計画と実績

研究開発の項目	令和元年度		令和2年度	
	上期	下期	上期	下期
1 ロボット技術の改良				
(1) 通過時刻検出のための超音波センサ開発				
(2) 通過時刻検出のための受信装置開発				
(3) 超音波法によるロボット位置の算出（発信&受信装置）				
2 解析プログラムの開発				
(1) 基準点通過時刻の検出プログラム				
(2) ジャイロ法によるロボット位置算出（実験&プログラム開発）				
(3) 超音波法によるロボット位置算出（実験&プログラム開発）				
(4) 3D管路図作成				
(5) 漏水音検出プログラム				
3 現地確認試験及び漏水データ収集				
(1) ロボット周辺機器の性能確認と改良				
(2) 現地確認試験				
(3) 技術資料等の作成				

注) は計画、 は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) ロボット技術の改良

1) 通過時刻検出のための超音波発信センサ開発

- ・円周方向に発信する超音波の数値解析を実施した（発電技研：JAPEIC）。
- ・上記の数値解析に基づき、ロボットカプセルにフィットする円周方向に発信するセラミック振動子（1 MHz）を開発した。
- ・コンポジットセンサ（1 MHz）をロボットカプセル（L165）に設置し、 $\phi 800\text{mm}$ 鋼管を水槽に沈めて円周方向の超音波受発信試験を実施した（令和元年 9 月 25 日）。その結果、ロボットカプセルが管断面のどこを流下しても水中に設置した受信センサ（水中センサ）で確実に超音波信号を検出できることが分かった。また、管外面に設置した 2 つ以上の受信センサを 90 度ずらした位置に設置することによって確実に超音波信号を検出できることが分かった。
- ・農研機構の大型開水路実験施設を利用したロボット流下試験を実施し（令和元年 12 月 24・25 日及び令和 2 年 2 月 14・18 日）、別途開発した通過時刻検出装置によってロボットの通過時刻をリアルタイムで計測できることを確認した。

【課題】 特になし

2) 通過時刻検出装置の開発（アクティブ型：対象管径 $\phi 350\text{mm}$ 以上）

- ・鋼管外部に設置するマグネット付き受信センサを開発した（令和元年 9 月）。
- ・空気弁ボールバルブから管内に挿入設置する受信センサ（水中センサ）を開発した。
- ・オシロスコープを用いた円周方向の超音波受信試験（令和元年 9 月 25 日）。
- ・ロボット回収装置に組込む水中センサを開発した。
- ・トリガー信号受信時刻検出機能を備えた通過時刻検出装置を開発し、農研機構大型開水路実験施設に $\phi 800\text{mm}$ 管路を設置してアクティブ型ロボットの流下試験を実施した（令和元年 12 月 24-25 日、令和 2 年 2 月 14・18 日）。
- ・通過時刻検出装置（実用機）を開発した（東亜グラウト工業：TOA・ウォールナット：WN）。
- ・水資源機構木曾川右岸用水での現地確認試験（令和 2 年 9 月 27-29 日）で、通過時刻検出装置が所期の性能を有することを確認した。
- ・水浸型水中センサの耐圧試験を実施（令和 2 年 12 月 10 日）し、3 MPa の水圧下で機能することを確認した。
- ・本管が空気弁ピット内に露出していない場合でも、空気弁下の鋼管（80A または 100A）の側面に設置して超音波を検出するためのすべりせん断型受信センサの開発に着手した。

【課題】

- ・水中センサを空気弁下ボール弁から管頂部に設置することによって、ロボットから発

信された超音波信号を確実に検出できることが分かったが、空気弁の撤去並びに再設置に時間と費用が掛かるため、設置・撤去が容易な管外設置型受信センサの活用が望まれる。

- ・管径φ800mm以上の管路では空気弁設置位置に人孔が設置されることが多いため、管外受信センサを人孔の蓋に設置することによってロボットの通過時刻を検出できることを木曽川右岸用水における現地確認試験で確認したが、管径φ700mm以下の管路では管路に人孔が設置されないため、空気弁は管路頂部から立ち上がっている空気弁と同径の管に設置される。現状の管が受信センサは面外方向の超音波信号は検出できるが面内方向の超音波信号は検出できない。すべりせん断型の超音波受信センサの開発が成功し、空気弁と同径の立上り配管の側面に設置して超音波信号を検出することができれば、通過基準点における超音波受信センサの設置作業が容易になり、調査時間とコストの節減が可能になる。

3) 通過時刻検出のための送受信装置開発（パッシブ型：対象管径φ300mm以下）

- ・ロボットカプセルから超音波信号を発信するアクティブ型は、カプセル内にセラミック振動子と超音波信号発信回路を設置するため、呼び径φ300mm以下の小口径管路に適用するL165カプセルには適用できないことが分かった。そのため魚探法の原理を応用して水中センサから超音波信号を管内に発信してロボットカプセルの通過を検出する「パッシブ型通過時刻検出システム」の開発を進めることとした。
- ・魚探法用の送受信水中センサ（プロトタイプ）を試作し、水槽内に沈めたφ300mmアクリル管で第1回予備試験を実施し（令和2年4月7日）、魚探法の有効性を確認した。
- ・東亜グラウト工業浦安技術センタ内に設置した循環型水路にて、超音波信号を発信しないL165カプセルの流下試験（第2回予備試験）を実施し（令和2年5月22日）、魚探法の有効性を確認した。ただし、カプセルが流下する位置によって一部死角があることが確認された。
- ・2回の予備試験で魚探法の有効性が確認されたことから、魚探法による通過時刻検出プログラムの開発に着手することとし、発電技研に同プログラムの開発を委託した。（令和2年9月）。
- ・死角をなくすための送受信センサの改良版を試作した（令和2年10月8日）。
- ・改良型送受信センサを使った流下試験を浦安技術センタに設置した循環型水路（φ300mm）で実施し（令和2年10月30日）、このデータをもとに魚探法による通過時刻検出プログラムの開発に着手した。
- ・通過時刻検出プログラムは令和3年3月末に完成したものの、循環型水路を浦安技術センタから農研機構の屋外試験フィールドに移設せざるを得なくなったため、性能確認試験は官民連携研究期間内に実施できなかった。

【課題】パッシブ型通過時刻検出システムの性能確認試験は令和3年度に実施することとなった。

4) 超音波法によるロボット位置の算出（発信&受信装置）

- ・直進方向に発信する超音波の数値解析を実施し（JAPEIC）、直進方向に発信された超音波（100KHz）は管内で多重反射を繰り返しながら水中を伝搬することが分かった。
- ・ロボットカプセルの前後のキャップに直進方向に超音波を発信する半ドーナツ形状のセラミック振動子をオーダーメイドで開発した。
- ・直進方向セラミック振動子を新型カプセル L280 のキャップに設置した（令和2年12月）。
- ・直進方向セラミック振動子の 100KHz 超音波発信試験を実施した。
- ・新型カプセル L280 に超音波法用のロボット基板を制作した後、農研機構の屋外試験フィールドに移設する循環型水路にて超音波法による送受信テストを実施する予定であったが、ロボット基板の製作と循環型水路の農研機構への移設が令和3年3月末までに完了できなかったことから、超音波法による送受信テストは実施できなかった。

【課題】FEM 解析結果から判断すると実用化のハードルは高いと思われるが、循環型水路での実験で FEM 解析結果の妥当性を検証した後に最終判断をすることとした。

（2）解析プログラムの開発

1) 通過時刻検出プログラムの開発（アクティブ型：対象管径φ350mm以上）

- ・トリガー時刻の記録：通過時刻検出装置がトリガー時刻を検出し記録する（完了）
- ・トリガー時刻の前後 10 秒間ずつの円周方向超音波の受信データを通過時刻検出装置からダウンロードする（完了）。
- ・円周方向超音波の受信データ（トリガー時刻の前後 10 秒間ずつ）から超音波信号のピーク時刻を算出するプログラムを開発する。これは、上記の受信データをガウス関数で近似し、超音波信号のピーク時刻（最も超音波信号が強くなる時刻）（完了）をロボット通過時刻とするものである。
- ・通過時刻検出プログラムの精度確認：循環型水路（呼び径φ300透明管）で流下試験を実施し、通過時刻検出システムによって通過時刻検出データを収集するとともに、ロボットが通過する様子を動画で撮影した（令和2年9月18日）。動画から得られたロボットの通過時刻と、トリガー時刻の前後 10 秒間ずつの超音波信号データをガウス分布で近似して得られた通過時刻とを比較し、通過時刻検出システムに内在する最大誤差を確認したところ 1.43 秒であった。試験時の流速が 0.5m/秒なので距離にして 0.7m に相当する。

【課題】特になし。

2) 通過時刻検出プログラムの開発 (パッシブ型: 対象管径: 呼び径 ϕ 300mm 以下)

- ・魚探法による通過時刻検出プログラムを開発した。
- ・通過時刻検出プログラム開発後に、循環型水路 (ϕ 300mm) において小口径用ロボットカプセル (L165) の流下試験を実施し、性能を確認する予定であったが、循環型水路の農研機構への移設作業が遅れたために研究開発期間内に性能確認ができなかった。

【課題】 通過時刻検出プログラムの性能確認試験は令和 3 年度に実施することとした。

3) ジャイロ法によるロボット位置の算出 (プログラム開発)

- ・プロトタイプ開発において取得したジャイロデータをもとに、ジャイロ法を用いたロボット位置算出プログラムの検討を実施した。(計測リサーチコンサルタント: KRC)
- ・ジャイロ法は、9 軸ジャイロデータから「ロボットの移動距離」と「ロボットの移動軌跡」を推定することを目的として開発に取り組んだものであるが、SIP インフラで収集したデータから加速度を積分して速度を求めようとする短時間で発散し移動距離の推定ができないことその他、以下のような問題点があることが分かった。

- ① 管路が鉄製の材料でできている場合 (鋼管、ダクタイル鋳鉄管、PC 管、RC 管)、地磁気データが異常値を示すことがありジャイロの姿勢を正しく推定できない。
- ② 閉鎖された管内を長時間単独で流下するため、ランダムドリフト (初期ゼロ値がずれる現象) を GPS 等で定期的に補正することができない。
- ③ 姿勢を正しく補正できないと、重力加速度成分を除去できなくなり、加速度センサーからの速度・位置の算出精度が低くなる。

- ・ジャイロ法の当初目的は断念し、ジャイロデータから管路途中の管路の変曲点 (水平・鉛直方向に管路が曲がる点、管径が変化する点など。以後「参照点」という。) の通過時刻を検出することによって、区間流速法を補完することを目的として再検討することとし、「修正ジャイロ法」という名称で取り組むこととした。

【課題】 特になし。

4) 修正ジャイロ法による「参照点」通過時刻の検出

4-1) 9 軸ジャイロを使った修正ジャイロ法

- ・古川地区 (FRPM 管) での 9 軸ジャイロデータからロボットカプセルの挙動の変化を検出した。
- ・木曾川右岸 (鋼管) での 9 軸ジャイロデータからロボットカプセルの挙動の変化を検出することができた。
- ・課題の整理: 「ジャイロ法」の検討で指摘された問題点が「修正ジャイロ法」で問題と

ならないのかを検討する必要がある。

【課題】循環型水路および現地確認試験等の結果から実用化の最終判断をすることとした。

4-2) 加速度センサを使った修正ジャイロ法

- ・ロボットに搭載した計測器（センサ）でロボットの動きを検出することによって参照点（管路の変曲点等）通過時刻を計測する方法について、地磁気の影響や重力の影響を受けないセンサとして「圧電型加速度センサ」に着目し、ロボットカプセルの前後に二つの3軸加速度センサを設置して管路内を流下中のロボットの動きを検出する方法の可能性を検討した。
- ・圧電型加速度センサ（富士セラミックス社製）の小型加速度センサを設置した模擬基板を列車模型（プラレール）に搭載して「陸上予備試験」を実施した。列車模型の出発時、停止時、カーブ通過時に加速度を計測することができたが、列車移動中に模擬基板に発生する高周波振動のノイズが大きく、計測した加速度がノイズによるものか基板の動きによるものかを判別することができなかった。
- ・水と一緒に流下するロボットに加速度センサを搭載した場合に、加速度センサの値の変化から管路の変曲点を通過したことを検出することが可能かどうかについて、メーカーにアドバイスを求めた。メーカーでは、加速度センサを水に浮く玩具（アヒル）上に設置した実験を実施し、静水上での実験ではノイズよりも大きな加速度値の変化を検出できた。次に、水が流れる小型水路（そうめん流し）の上に加速度センサを搭載した小舟を浮かべた実験では、水を循環させるモーターの振動によってノイズが発生し、加速度センサの動きに伴う加速度の変化を検出できなかった。
- ・管路を流下中のロボットに発生する加速度変化は小さいため、加速度の変化を検出するためには高感度の加速度センサを使うことになる。その場合、ノイズレベルを低く抑えることができるかがカギとなることが分かった。
- ・加速度センサ搭載用のカプセル：新型カプセル（L280・L250）及び錘及び基板固定治具完成。
- ・加速度の変化点として「片落ち管（管径がφ400mmからφ300mmに縮小）」を設置した循環型水路にて、加速度センサを搭載したロボットカプセルの流下試験を実施予定であったが、循環型水路の移設作業が遅れ等によって研究開発期間内に実施できなかった。

【課題】循環型水路および現地確認試験等の結果から実用化の最終判断をすることとした。

5) 超音波法によるロボット位置の算出（プログラム開発）

- ・ドップラー効果を利用した超音波法によるロボット位置算出プログラムのロジックを整理した。
- ・直進方向に発信された超音波パルス（バースト波）が管内をどのように伝搬するか

ついて FEM 解析を実施した。その結果、以下のことが分かった。(JAPEIC)

○軸方向の超音波の伝搬について

- ・管内（水中）で反射を繰り返し、遠距離まで伝搬する（最大距離は解析のみでは不明）。
- ・管の径に係わらず、約 2.5%の遅延で伝搬すると考えられる。
- ・エルボを通過すると強度は極端に低下するが、伝搬速度は変化しないと考えられる。
- ・複数のピークが現れ、第 2・第 3 のピークの方が振幅が大きくなる。

○径方向の強度分布について

- ・超音波のエネルギーは管の中心付近に集中、管の中心部で受信することが望ましい。（管の外側で受信するのは難しいと考えられる。）
- ・FEM 解析の結果をもとに、超音波法によるロボット位置算出システムの実用化の可能性を検討した結果、以下の理由によってハードルが高い可能性があるとの結論に至った。

○ドップラー効果を利用してロボットの位置を算出するには、一定の間隔で発信される超音波パルス（バースト波）の受信データから、受信時におけるバースト波の時間間隔を高い精度で算出する必要がある。FEM 解析結果によると、超音波は多重反射を繰り返しながら管路に沿って伝搬するため、発信時はピークが一つであったものが伝搬距離が長くなるにつれて複数のピークが現れ、最初のピークよりも 2 番目・3 番目のピークの方が大きくなる。そのためバースト波の時間間隔のずれを算出するのが極めて難しくなることが推測される。

- ・循環型水路において超音波バースト波の送受信試験を実施する予定であったが、農研機構への移設作業が遅れたことから、研究開発期間内に実施できなかった。

【課題】循環型水路および現地確認試験等の結果から実用化の最終判断をすることとした。

6) 3D管路図作成プログラム(ロボット位置表示プログラム含む)

- ・3D管路図作成プログラム及びロボット位置表示プログラムを完成させた。
- ・3D管路図作成及び手順書を作成した。
- ・3D管路図作成研修会を開催した。(第1回研修：令和2年1月20日実施)。
- ・香川用水高瀬支線の3D管路図を作成した。
- ・木曾川右岸用水の3D管路図を作成し、令和2年9月28・29日の現地確認試験において3D管路図を活用したリアルタイムビューアを使って漏水探查業務を実施した。
- ・宮城県古川地区の3D管路図を作成した。
- ・滋賀県甲賀農業農村振興事務所の横田・立場山サイフォンの3D管路図を作成し、令和2年10月15・16日の現地確認試験において3D管路図を活用したリアルタイムビューアを使って漏水探查業務を実施した。

【課題】 特になし。

7) 漏水音検出プログラム

- ・管内異常音検出プログラム作成のロジックを整理した。ロボット搭載のハイドロフォンで収集した音データと時刻データを入力した後、周波数分析を実施し、異常音が発生した際に顕著な反応を示す周波数帯に対して閾値を設け、異常音であるか判定を行う。その後、ロボットカプセルの前後に設置した2つのハイドロフォンのステレオ効果の判定を実施して、異常音発生地点を通過した時刻を特定する。
- ・令和2年度に実施した現地確認試験データ（木曾川右岸と滋賀県甲賀）及びSIPインフラで収集したデータを活用して、周波数解析を実施した。その結果、漏水音のない音データと漏水音データを比較すると、漏水音がある場合は50Hz以上の周波数帯の音圧が高いことが分かった。このことから、50Hz以下の音圧と50Hz以上の音圧を比較することによって漏水音の有無について判定できる可能性があることが分かった。
- ・異常音から漏水音を抽出するプログラムについては、漏水音データを多く収集・蓄積し、漏水判定精度を向上させる。

【課題】 将来的には、多くのデータを取得した段階でAIプログラムの開発に取り組む。

3 現地確認試験及び漏水データ収集

1) ロボット周辺機器の性能確認と改良

- ・新型ロボットカプセルの設計を実施した（L165、L250及びL280の3種類）。当初計画ではロボットカプセルはL165とL250の2種類であったが、ロボットカプセル内に設置するセンサや回路が増えたことと、流下中の安定性を向上させるために錘を前後に分散しかつカプセル底部に設置するために浮力が大きいL280を新たに追加した。
- ・回収装置φ800mmについて、令和2年2月14・18日、農研機構大型開水路に設置した模擬管路で、流速0.2m/秒～0.8m/秒での回収装置の性能確認試験を実施した。その結果、流速が遅いときにも確実にロボットを回収網の先端に誘導する回収装置の操作手順を確立するとともに、開発目標（流速0.3m/秒～0.5m/秒）を上回る流速範囲（0.2m/秒～0.8m/秒）で回収できることを確認した。
- ・水資源機構木曾川右岸用水における現地確認試験に備えて、低空頭の空気弁下ボール弁を通して管路頂部に水中センサを設置する装置を設計・製作した。この装置により空気弁下ボール弁から管路内に水中センサを設置する場合の空頭制限をボール弁上端から550mmにすることができた。
- ・ロボット発射装置の改良：木曾川右岸用水の現地確認試験のフィードバックにより発射装置を改良するとともに、ロボット発射装置の操作手順を確立した。

- ・ロボットカプセルの改良：SIP 7号機を各種実験等で使用する過程で、ロボットカプセルが管壁や回収装置の補強棒などに衝突した時に錘や基板が移動して回路が切断される、ロボットのウェイトバランスが乱れる等の不具合が報告された。この問題を解決するために、ロボットカプセルに設置する錘の設置及び調整方法、基板固定方法の改良を実施した。
- ・本技術は、ロボットカプセルのみかけの単位体積重量を現地の水の単位体積重量に等しくすることによって管の中央部を水と一緒に流下することを大前提としている。そのため、漏水探査の実施前に現地の水を採取してカプセルの単位体積重量が現地の水の単位体積重量にほぼ等しいことを確認する作業が欠かせない。この作業を簡便化するために、カプセルの浮力を計測するとともに、カプセルに設置する錘のウェイトバランスの設計を改良した。
- ・ロボットカプセルが水中で水平姿勢を保持するためには前後方向のウェイトバランス調整が必要になる。この作業を簡便化するために2つの秤を使った「ウェイトバランス調整秤」を新たに設計・製作した。
- ・木曽川右岸用水の現地確認試験のフィードバックにより、ロボット発射装置・ロボット回収装置及び水中センサを空気弁下ボール弁から管内に投入する際に使用するウインチを改良した。

【課題】官民連携研究開発期間内に多くの現地確認試験を実施できなかったが、今後、現地確認試験や漏水調査業務からのフィードバックを反映して継続的なロボット技術の改良を行うこととした。

2) 現地確認試験及び現地視察

1) 木曽川右岸（水資源機構：岐阜県美濃加茂市）

- ・現地踏査を実施した（令和元年 11 月 20 日）。
- ・予備調査を実施した（令和 2 年 3 月 11-13 日）。
- ・現地確認試験を令和 2 年 4 月 12-14 日に実施すべく準備を進めていたが、4 月 7 日に非常事態宣言が出されたことから 8 月以降に延期した。
- ・現地確認試験を実施した（令和 2 年 9 月 27-29 日）。
- ・管路途中の通過基準点及びロボット回収地点（オープンピット）において水中センサを使ってロボットの通過時刻および到着時刻を検出できた。

【課題】特になし。

2) 滋賀県甲賀市 立場山サイフォン・横田サイフォン（滋賀県甲賀農業農村振興事務所）

- ・現地踏査を実施した（令和 2 年 7 月 22 日）。
- ・現地確認試験の事前打合せに参加した（令和 2 年 10 月 1 日）。
- ・現地確認試験を実施した（令和 2 年 10 月 14-16 日）。

- ・オープンピットで水中センサを使ってロボット到着時刻を検出する予定であったが、水中センサが超音波信号をとらえられないケースがあった。
- ・水中センサを使ったオープンピットでのロボット到着時刻検出については、木曾川右岸では検出できたが、滋賀県甲賀市では水中センサが機能しないことがあった。その後の調査により、滋賀県甲賀市で使用した水中センサ（耐圧型）は木曾川右岸で使った水中センサ（水浸型）よりも感度が低いことが原因と推定された。通過基準点ではロボットカプセルから発信される超音波信号が多重反射することによって耐圧型センサ（センサがステンレスでカバーされている）でも機能したが、オープンピットでは多重反射が期待できない。その後実施した耐圧試験により水浸型（センサがステンレスでカバーされていない）でも 3 MPa の水圧に耐えられることが分かったため、水中センサは水浸型に統一することとした。

【課題】 オープンピットでのロボット到着時刻検出については、今後実施される現地確認試験の機会に水浸型水中センサが機能することを確認する必要がある。

3) 栃木県芳賀台地 小宅幹線（関東農政局 利根川水系土地改良調査管理事務所）

- ・利根川水系土地改良調査管理事務所（以下、「利根調」という。）からの要請に基づき本技術の技術説明を実施した（令和 2 年 6 月 23 日）。
- ・利根調から発注予定の本技術を活用した「パイプライン診断技術検証業務」に応募予定のコンサルタントから見積もり要請があり、小宅幹線管路（延長 4,926m、呼び径 ϕ 600~700mm）の調査費用見積を提出した（令和 2 年 7 月 9 日）。
- ・芳賀台地土地改良事務所を訪問し、調査予定の小宅幹線管路の現地視察を実施した（令和 2 年 10 月 8 日）。現地踏査によって、対象管路に設置されている空気弁（ ϕ 100mm）の下部に設置されている補修弁がボール弁でなくバタフライ弁であることが判明し、バタフライ弁ではロボットカプセルを投入・回収できないことを利根調に報告した。
- ・利根調から、本技術を活用したパイプライン診断技術検証業務の対象である小宅幹線の空気弁下補修弁の調査結果について報告を受けた。小宅幹線の補修弁はボール弁とバタフライ弁が混在しており、ほかの調査対象幹線の候補である大川幹線（管径 ϕ 450mm、空気弁径 ϕ 75mm）の空気弁調査報告も受領した（令和 2 年 10 月 13 日）。
- ・芳賀台地土地改良事務所内の小宅幹線・大川幹線におけるパイプライン診断技術検証業務に関して、利根調から見積調査の依頼を受けたコンサルタント会社に対して調査業務費用についての問い合わせに対応したが、当該業務の発注は令和 3 年度に延期されることとなったとの報告を受けた。

【課題】

- ・令和 3 年 3 月利根調の担当者から、小宅幹線の漏水調査業務については令和 3 年度に持ち越す予定であるとの連絡を頂いた。当方から、官民連携事業期間中に回収装置の性能確認試験を完了できなかったことから、令和 3 年度上期に回収装置の性能確認試

験と回収装置の改良を実施する予定であることをお伝えした。漏水調査実施前に呼び径φ600mm、φ700mmの回収装置を循環型水路施設で性能試験を実施しておく必要がある。

4) 両筑平野地区水利施設（高崎総合コンサルタント）

- ・高崎総合コンサルタントから農研機構農村工学研究部門に対して、両筑平野地区水利施設の機能診断および機能保全計画策定の一環として、漏水探査ロボットによる漏水調査を計画中であり、対象管路（11 管路、9,000m）に漏水探査ロボットを適用したいとの相談があった。
- ・農研機構から同コンサルタントに対して、事前に漏水の可能性が高い区間を絞り込んでから漏水探査ロボットを活用した漏水調査を実施するのが効率的であるとの助言がなされ、同コンサルタントは農業水利施設の機能診断業務に本技術を適用するにあたって以下の手順を進める提案を作成する方針である、との報告を農研機構から受けた。
 - ① 地元改良区と相談して漏水の可能性のある路線、区間を絞り込む。
 - ② 非かんがい期に水張り試験を行って漏水区間を特定する。
 - ③ 特定した漏水区間について漏水探査ロボットによる漏水調査の条件がそろっているかを確認する。
 - ④ 漏水探査ロボットを活用した漏水調査を実施する。

【課題】 特になし。

5) 北総東部（水資源機構：千葉県東金）

- ・農研機構農村工学研究部門から水資源機構に対して北総東部用水の現地踏査の依頼をし、令和2年8月26日、水資源機構成田北総管理所を訪問した。北総東部用水での過去の漏水による出水事故の説明を受けた後、水資源機構が直接管理している東幹線の返田機場から九十九機場までの現地踏査を実施した。
- ・東幹線と西幹線の大半がφ1800mmからφ500mmまでのPC管で、過去の漏水事故のほとんどは接手部の損傷であり一部PC管本体の損傷事故があったこと、幹線からファームポンドに水が供給され、ファームポンドから農地に水が供給されており、ファームポンドの水位が下がると自動的に幹線からファームポンドに水が供給されるため、本技術を活用した漏水調査の実施に当たってはファームポンドの水位を上げておくなどの水運用が必要になること、などの知見が得られた。
- ・踏査した区間の管径は大口徑（φ1500mm以上）であり、人孔堅配管の上部蓋に空気弁が設置されているものの、人孔の位置が偏心しているため現状の回収装置ではロボットを回収できないことが分かった。

【課題】

- ・本開発技術を管径 $\phi 1300\text{mm}$ 以上の大口径管路適用しようとする、「ケーブル付きシステム」などロボット回収方法について発想の転換が必要であることが分かった。

6) 日野川工業用水（鳥取県企業局）

- ・令和元年12月6日、鳥取県企業局工務課を訪問し、日野川工業用水道の下流側約10kmの区間（管径 $\phi 900\text{mm}$ — 800mm ）において現地確認試験の実施機会を与えて頂くようお願いした。
- ・日野川工業用水道では河川横断のための水管橋に人孔（ $\phi 600\text{mm}$ ）が設置されており人孔縦配管の蓋に空気弁が設置されている。最下流の $\phi 800$ 管路の空気弁からロボットを回収する計画で進めていたが、 $\phi 900\text{mm}$ から $\phi 800\text{mm}$ に管径が縮小される地点の上流に境港工業団地への分岐があり、分岐への配水を停止することができないことが判明し、 $\phi 900\text{mm}$ の管路でロボットを回収する計画に変更せざるを得なくなった。 $\phi 900\text{mm}$ 回収装置の設計・製作を進めたとしても期間内に農研機構の大型開水路での性能試験を完了できないことから、今年度中の現地確認試験を断念した。
- ・ $\phi 800\text{mm}$ 以上の人孔縦配管付きの空気弁下ボール弁からのロボットを回収にあたって、ロボットが回収網の上部をすり抜けるリスクを回避するために「人孔縦配管への迷い込み防止装置」の設計に取り組み、模型を製作した。
- ・日野川工業用水道は需要主導型の水運用であり、下流側での水利用に応じて流速が刻々と変化し、漏水調査中に流速を一定にすることができない。そのため、区間流速法ではロボット位置算出誤差が大きくなる。漏水位置推定精度を向上させるには、漏水調査業務中の流速を計測して区間流速法に適用するなどの対策が必要なこと、などの知見が得られた。

【課題】

- ・人孔縦配管への迷い込み防止装置については、実物大装置を製作して性能確認試験を実施する必要がある。

3) 技術資料等の作成

- ・3D管路図作成マニュアルを完成させた。
- ・ロボット取り扱いマニュアルの原案を作成した。

2 事業の成果

2. 1 成果の内容

(1) 通過時刻検出システムの開発 (アクティブ型：対象管径 $\phi 350\text{mm}$ 以上)

1) 通過時刻検出のための超音波発信センサの開発

- ・通過時刻を検出するための超音波信号は、ロボットが通過基準点の近くを通過した時に振幅が大きくなることを望ましい。そのため、ロボットの円周方向（管路の長軸に直角方向）に超音波が発信されるように超音波振動子を設置する。(図7)

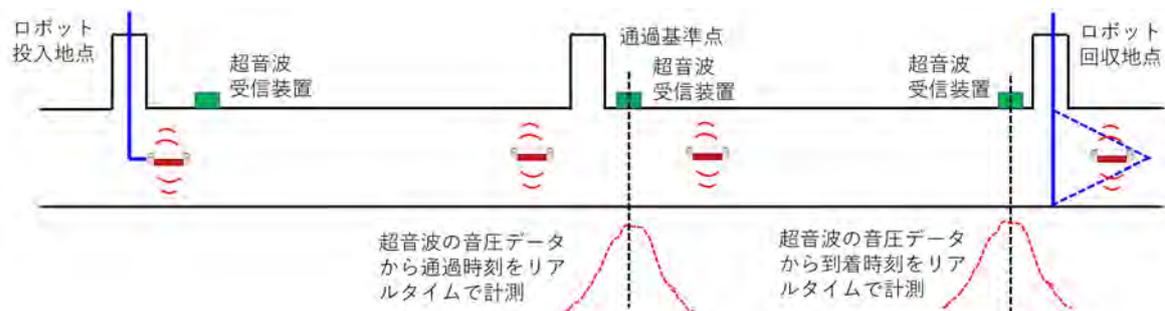


図7 通過時刻検出システムの概要図

- ・既存の（市販の）超音波振動子では対応できないことから、ロボットカプセルの円筒部分の内面にフィットする圧電セラミックスの超音波振動子をオーダーメイドで設計・製作した(図8)。圧電セラミックス振動子の仕様決定にあたってはカプセル（厚さ 1.5mm のアルミ製）の内側に貼り付けることから、アルミ板を通過して水中に超音波が発信される状況をFEM解析によってシミュレーションした。その結果、 1MHz と 0.5MHz の2種類の圧電セラミックス振動子の場合、 1MHz の圧電セラミックス振動子（厚さ 1.5mm ）の方が強い音場が発生することが確認された。

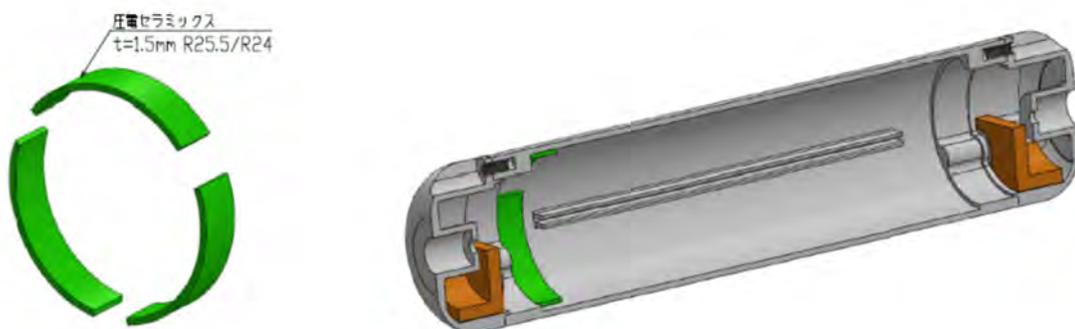


図8 円周方向に超音波を発信する圧電セラミックス振動子

- ・ 1MHz の圧電セラミックス振動子をカプセルの内側に接着して水中に超音波を発信すると周波数特性が変化します。発信周波数を変化させて計測したところ、 600KHz の周波数で発信した場合に水中での音場が最も強くなるということが分かった。(図9)

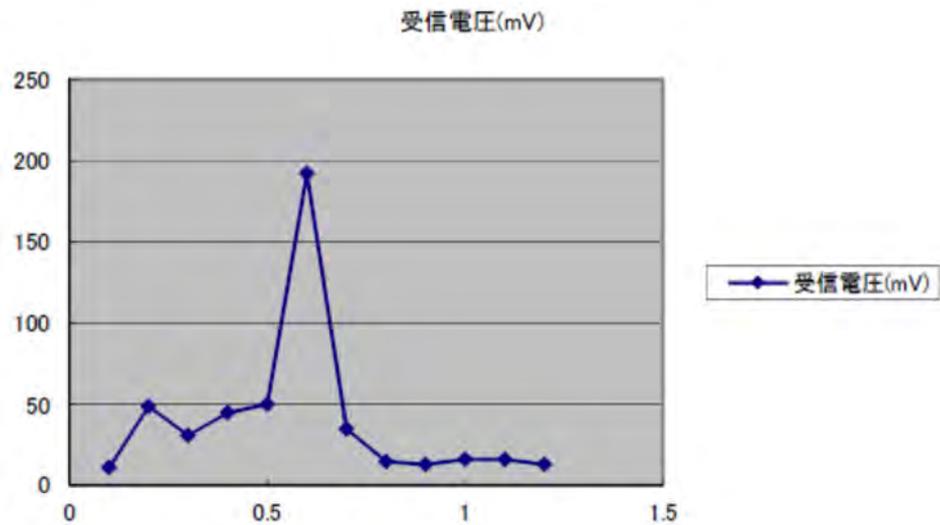
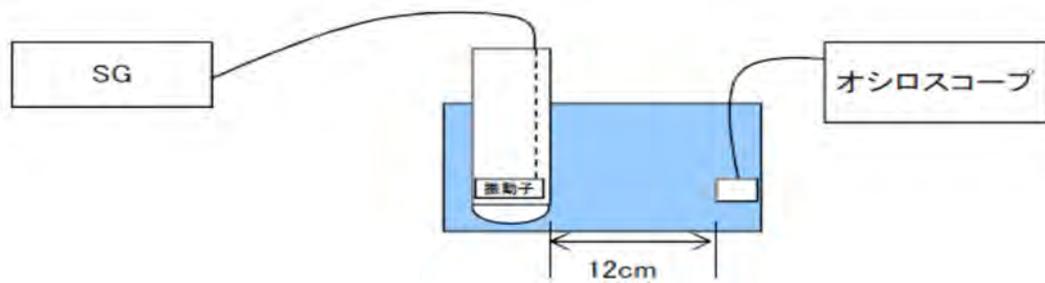


図9 圧電セラミックス振動子の最適周波数

2) 超音波受信センサの開発

- ロボットから発信される超音波信号を管路の地上露出地点である空気弁ピット内に設置した超音波受信センサで検出する。
- 超音波受信センサは、空気弁下ボール弁から管路内に挿入する水中センサ (図 10) と空気弁ピット内に露出した管路の外面に設置する管外面設置受信センサ (図 11) のいずれかとする。



図 10 水中センサ

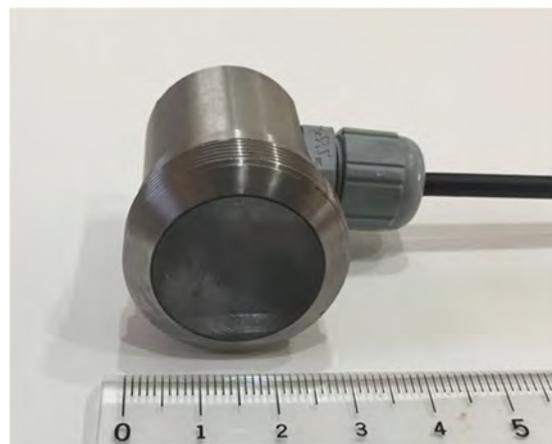


図 11 管外面設置受信センサ

- ・ $\phi 800\text{mm}$ 鋼管を水槽内に沈め、管頂部に設置した水中センサを管外面に設置した管外面設置センサで、ロボットから発信される超音波信号を、ロボットカプセルの位置を変えて受信する試験を実施した。(図 12・図 13)

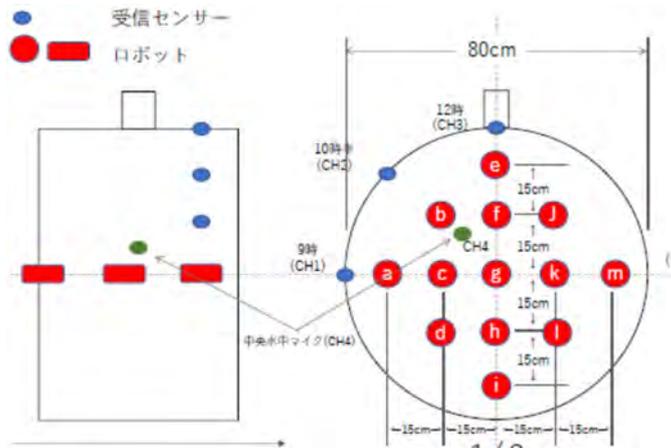
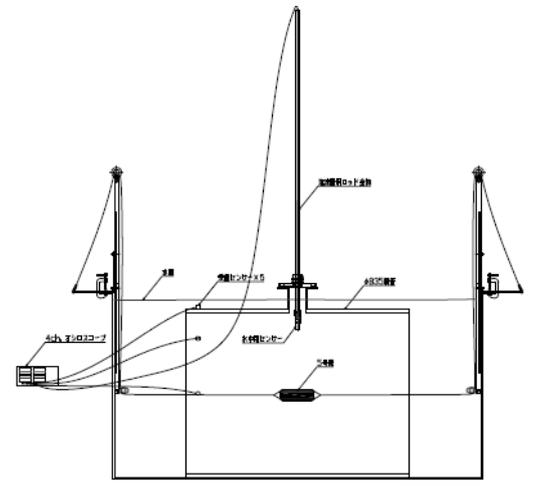


図 12 センサ設置位置とロボット位置

図 13 水槽内に沈めた $\phi 800\text{mm}$ 鋼管内のロボットから発信された超音波受信試験

- ・ 試験の結果、空気弁下ボール弁から挿入して管頂部に設置した水中センサは、ロボットの通過位置にかかわらず超音波信号を確実に受信できることが分かった。また、管外面に設置したマグネット付き受信センサの場合は、一つのセンサではロボットの位置によって受信信号が弱くなる場合があるが、2つ以上の受信センサを 90 度位相をずらして設置することによってロボットの位置にかかわらず超音波信号を確実に受信できることが分かった。

3) 通過時刻検出装置の開発

- ・ 通過基準点に設置した超音波受信センサ（水中センサまたは管外面設置受信センサ）で、管内を通過するロボットから発信された超音波信号を受信してロボットの通過時刻を検出する「通過時刻検出装置」を開発した。
- ・ ロボットが管断面の同じ位置を通過すると仮定した場合、ロボットが受信センサに近づくにつれて受信した超音波の音圧が高くなり、受信センサから離れるにしたがって音圧が低くなる。そこで超音波信号の音圧の変化からピークを探し出しその時刻を通過時刻と判断する。
- ・ 受信した超音波信号の変化を可視化するために、オシロスコープを使ってロボット通過時刻を検出した。(写真 1) その手順は以下の通りとなる。
 - ① 受信センサからの信号をオシロスコープに入力
 - ② ロボット通過時の超音波信号の変化を目視観察

- ③ 超音波信号のピークを通過時刻と判断する
- ④ トリガー値を設定してトリガー発生時刻の前後のデータを表示・記録する



写真1 超音波信号の波形（オシロスコープ）

- ・通過時刻検出装置は、オシロスコープでと同じ手順で通過時刻を検出するとともに、警報やランプによって計測員にロボットの通過を知らせる機能を追加した。その手順は以下の通りとなる。
 - ① 受信センサからの信号を通過時刻検出装置に入力。
 - ② トリガー値を超える信号を受信したらブザー・ランプで知らせる。
 - ③ トリガー値を超える信号を受信した時刻を表示・記録。
 - ④ トリガー信号受信時刻の前 10 秒・後 10 秒のデータを画面に表示・記録する。
 - ⑤ 超音波信号の画面からピーク時刻とトリガー時刻の差を即座に判断し、トリガー時刻に時間差を加えてロボット通過時刻とする。
- ・本技術を使って漏水調査業務を実施する場合は、通過時刻検出装置に表示された「トリガー時刻」に「超音波信号データから目視でピーク時刻を判断し、トリガー時刻とピーク時刻の差をトリガー時刻に加えて『通過時刻』と判断し、リアルタイムビューアに入力する。
- ・農研機構の大型開水路施設に設置したφ800の管路で実施したロボット流下試験（令和元年12月24・25日）のデータの一部（オシロスコープで取得したデータ）を図14に示す。流速0.4m/秒でロボット発射位置を変えた5回のテストの結果で、上から「水中センサ」、「3センサ合成（左横+上+右横）」、「2センサ合成（左上+右上）」での計測値である。水中センサで取得した信号が最も音圧が高く、およそ10秒間にわたって超音波信号を受信している。流速が0.4m/秒なので、水中センサ設置位置からお

よそ 2 m 上流から 2 m 下流までの位置にロボットがいるときに超音波信号を受信している。

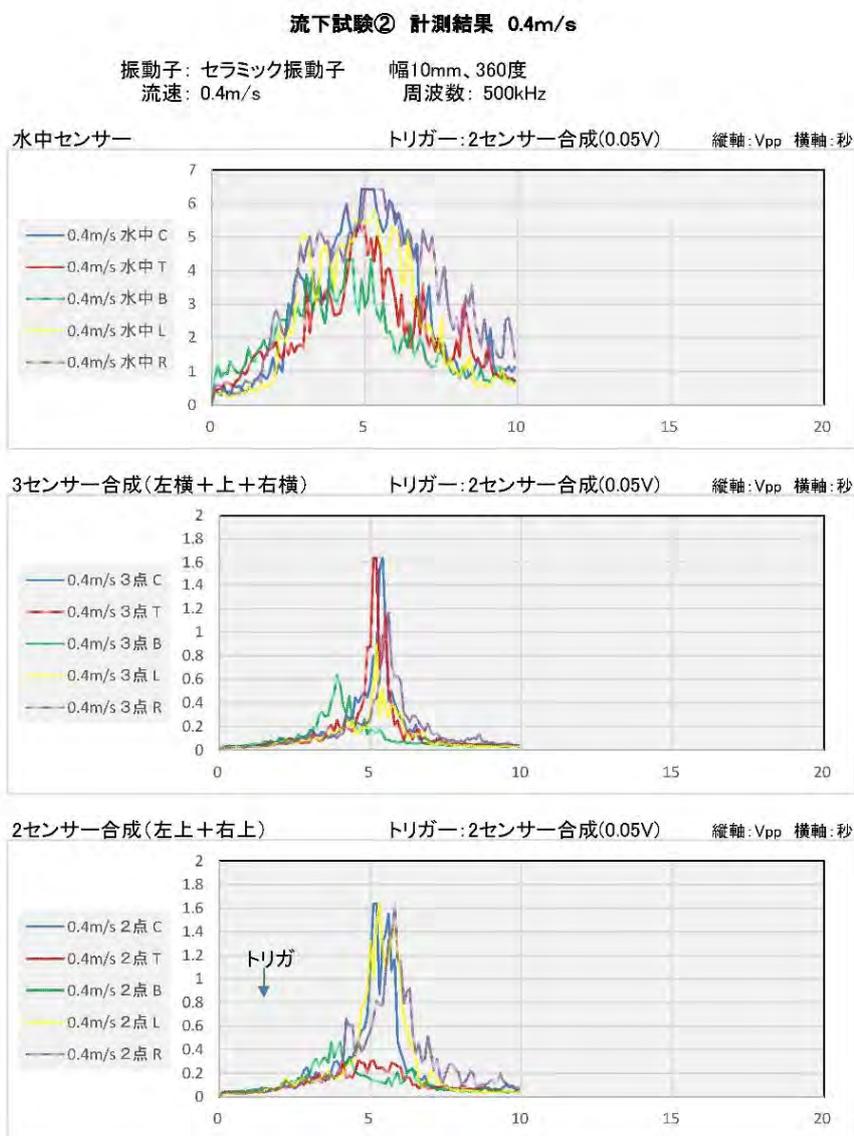


図 14 オシロスコープで取得した超音波信号

4) 通過時刻算出プログラムの開発

通過時刻検出装置に記録された超音波信号データから、ロボットが基準点を通過した時刻を推定するプログラムを開発した。

4-1) 超音波信号データの分析

超音波信号データの例を図 15 に示す。ここに示す観測データは通過時刻検出装置で収録された電圧値を 100ms 毎にマイナスピーク電圧とプラスピーク電圧の差を受信レベルとして算出した値である。

超音波信号データは理想環境では以下のような法則に従うものと仮定する。

- ・水中受信装置に近づくに連れて急激に受信強度は増加し、離れるにつれて同様に減少する。
- ・概ね左右対称的に変化する。
- ・受信装置から遠く離れると 0 に近い値に収束する。

図 15 の例では、流速 0.6m/秒、流速 0.4m/秒はピーク値がわかりやすく、理想的なデータが得られている。しかしながら、流速 0.3m/秒、流速 0.2m/秒ではデータのばらつきが大きく、特に流速 0.2m/秒はピーク値が小さい。これは流速が遅いことにより流下するロボットがふらつきやすいことや、受信機から離れた位置を流下していることなどが原因と考えられる。

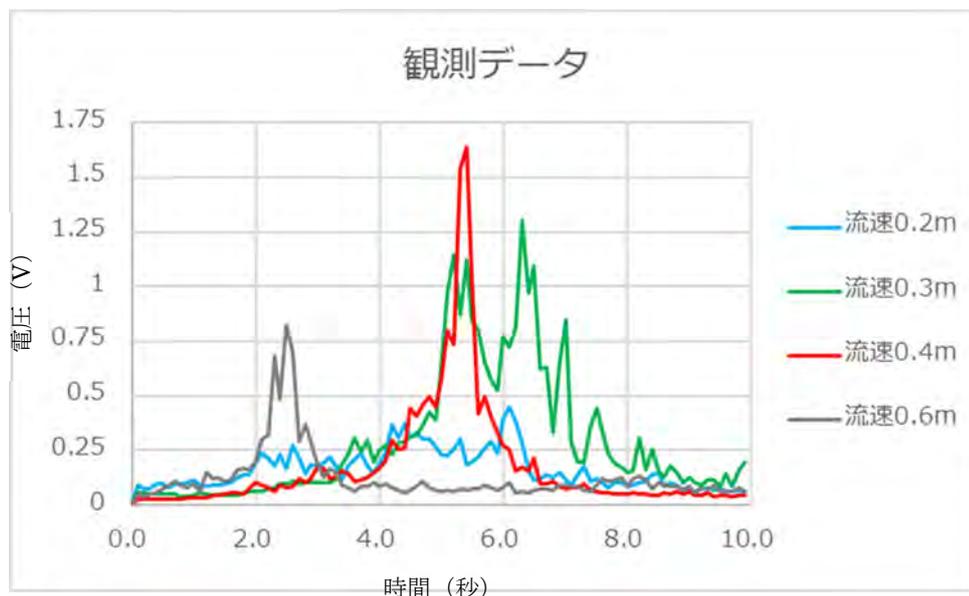


図 15 観測データ一例

4-2) 解析手法

観測データの特徴より、近似関数として正規分布等でよく知られるガウス関数を採用した。また、曲線近似の解析手法として Levenberg-Marquardt 法を採用した。

図 16 にガウス関数のグラフを示す。

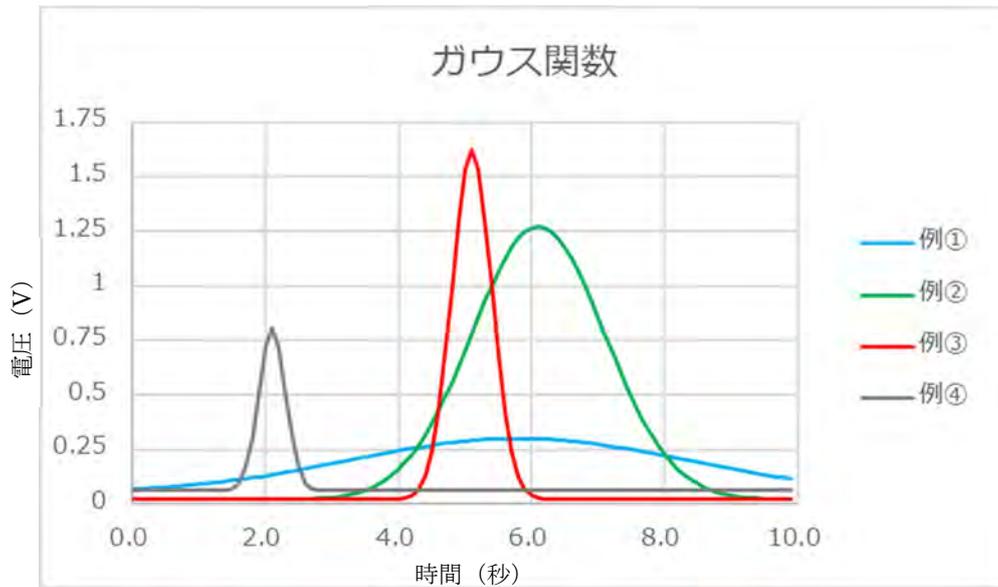


図 16 ガウス関数

4-3) 解析結果

令和元年 12 月に行われたロボット通過時刻検出試験の観測データの中の 3 センサ合成 (左横+上+右横) における C データ (ロボット発射地点が管の中央) を解析した結果を図 17 ~ 図 19 に示す。

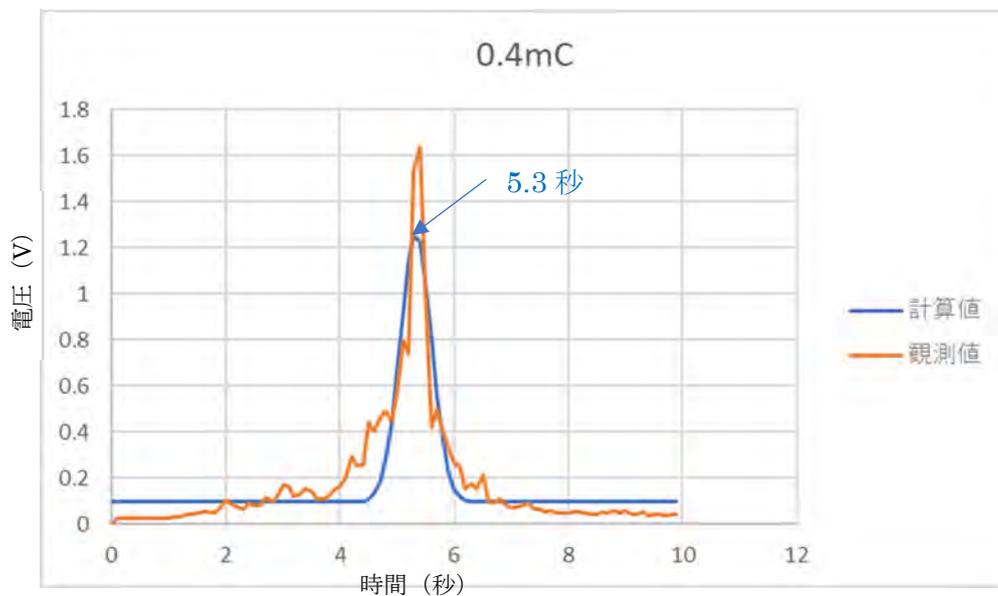


図 17 流速 0.4m/秒時の C 地点解析結果

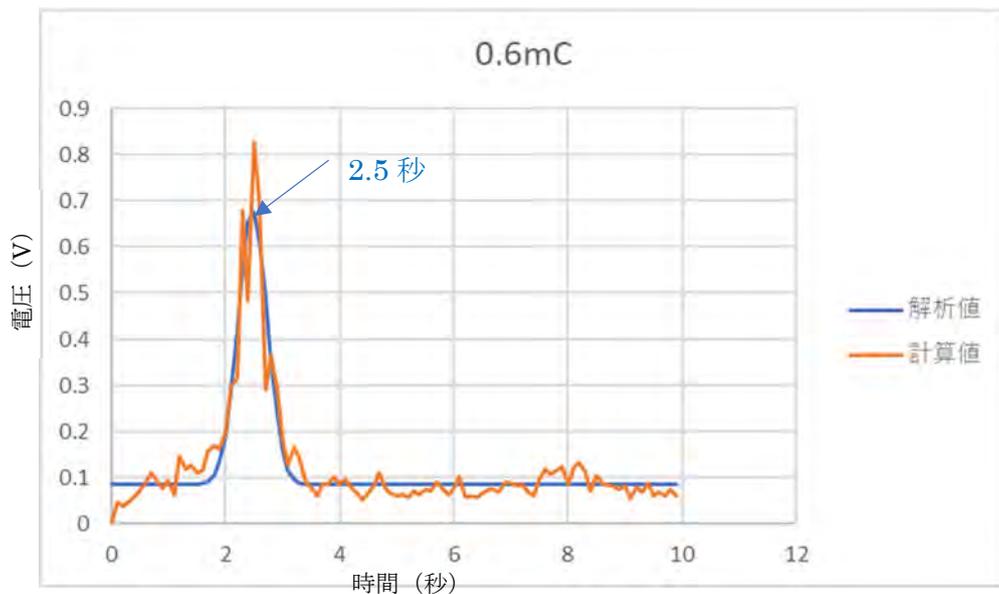


図 18 流速 0.6m/秒時の C 地点解析結果

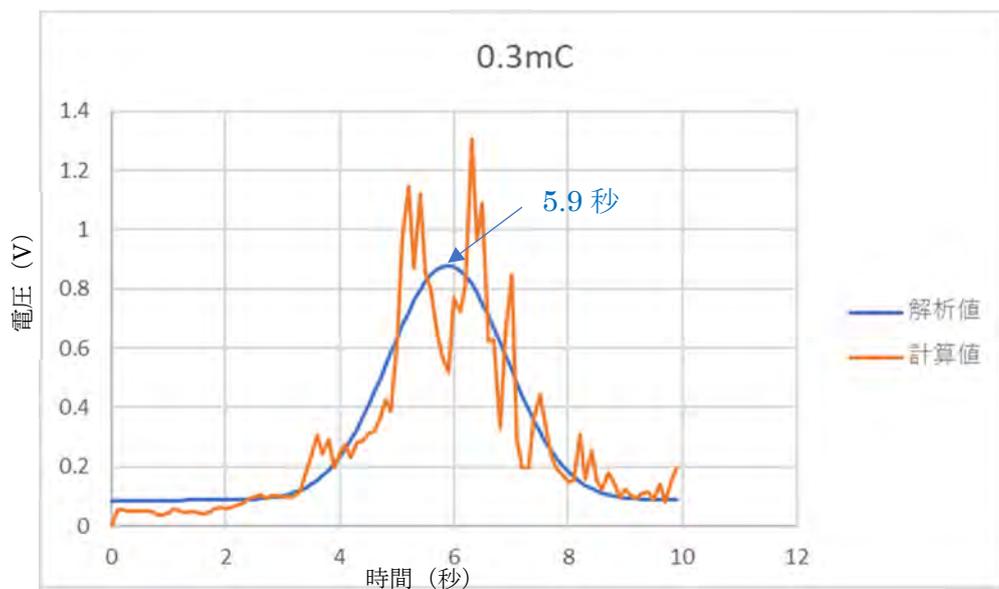


図 19 流速 0.3m/秒時の C 地点解析結果

現状、通過時刻の真値がないため正確な考察はできないが、比較的良好な近似曲線が描かれていることが分かった。現地実証実験のデータでも確認ができたためクラウドシステムへの実装を行った。

(2) 通過時刻検出システムの開発 (パッシブ型：対象管径 $\phi 300\text{mm}$ 以下)

小口径管路 ($\phi 200\text{mm} \sim \phi 300\text{mm}$) 用のロボットカプセルは長さが 165mm と短く浮力が小さいことから、ロボットカプセルに円周方向のセラミック振動子や超音波発信回路を設置してロボットカプセルのみかけ比重を 1.0 にすることは難しい。

そこで小口径管路に対してはロボットカプセルから超音波を発信する「アクティブ型」ではなく、魚群探査法 (魚探法) の原理を応用し、水中センサから管路内に超音波を発信しその反射波を検出することによってロボットカプセルの通過検出する「パッシブ型」の通過時刻検出システムの開発にチャレンジすることとした。

1) 超音波送受信センサ

- ・超音波を送受信する水中センサを管路内に挿入し、管頂部から超音波を管内に発信するための「超音波送受信センサ」を開発した。
- ・魚探法システムの開発に先立って実施した FEM 解析 (図 20) によって、管頂から真下に向けて発信した超音波はおよそ ± 10 度の範囲に広がり、ロボットがその範囲に入れば通過を検出できそうだとことが分かった。
- ・そこで、鉛直下向きとその両横に 15 度の角度を持った 3 枚のセラミック振動子からなる「3 方向センサ」を試作した。(図 21)

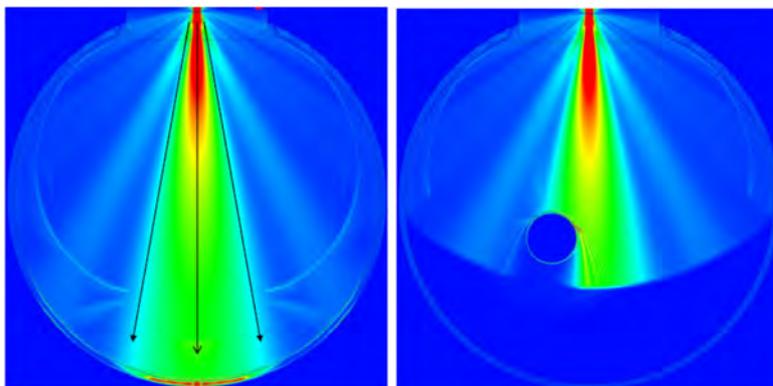


図 20 3 方向センサ FEM 解析結果

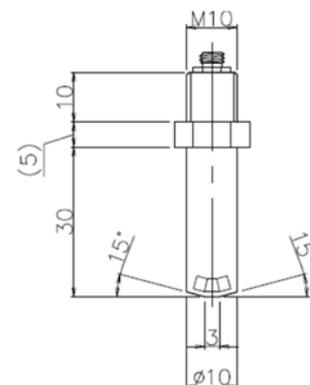


図 21 3 方向センサ

2) 魚探法の原理の応用

- ・魚探法の原理を応用した「パッシブ型通過時刻検出システム」の仕組みは以下のとおりである。
- ・ロボットカプセルが管断面のどこを通過しても超音波の反射波が得られるように管頂部の超音波送受信センサから 3 方向に超音波を発信する。(図 22)

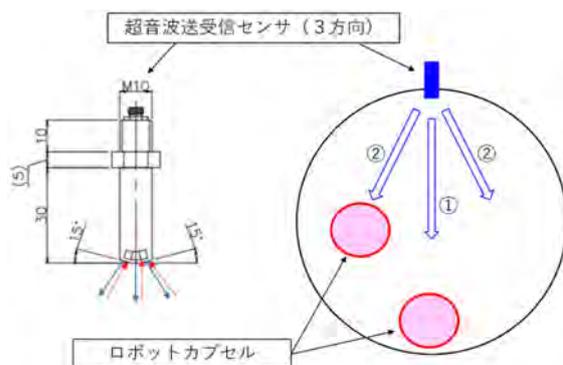


図 22 3 方向に超音波を送受信

- ロボットが通過する前は、鉛直真下に向けて発信された超音波信号の反射波を受信することで一定の位置（右図の赤い矢印）で反射波が表示される。（図 23）

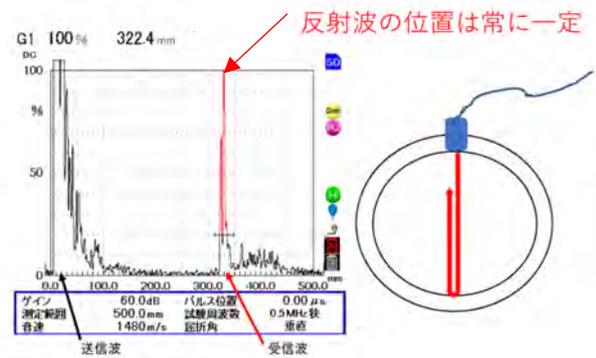


図 23 ロボットが通過する前

- ロボットが水中センサの真下を通過した時は、ロボットからの反射波の移動距離が短くなるため反射波の位置が変わる。（図 24）

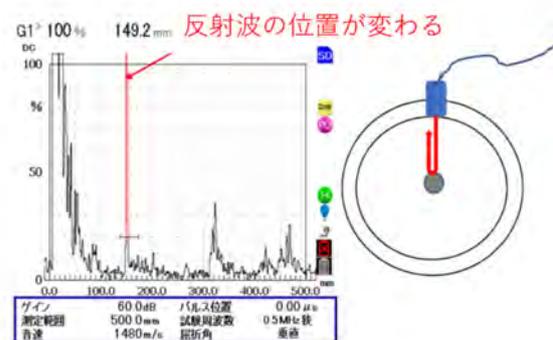


図 24 ロボットが真下を通過

- ロボットが管断面の側方を通過した場合には、斜め方向に発信された超音波の反射波を受信するが、同時に鉛直真下からの反射波も受信する。（図 25）

- このように、反射波の位置が変わることからロボットの通過を検出することができる、という考え方である。

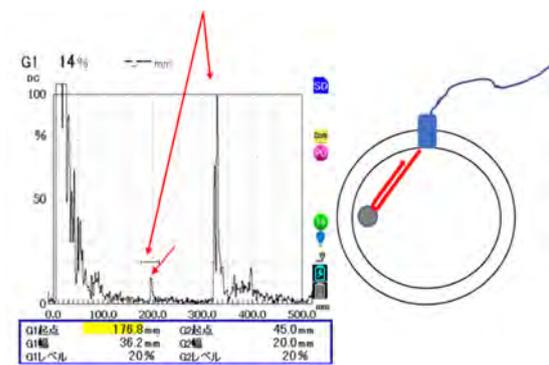


図 25 ロボットが側方を通過

3) 循環型水路での実験

- ・循環型水路でロボットカプセルを流して実験したところ、超音波の反射波によってロボットカプセルの通過を検出できることが分かった (図 26)。ただしロボットが管頂部の側方を通過した時に反射波を検出できないケースがあったため、超音波送受信センサを改良することとした。

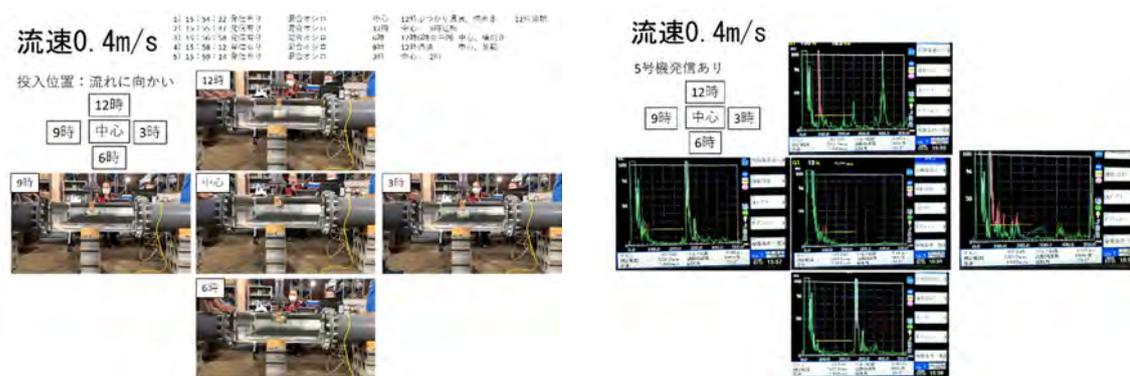


図 26 循環型水路での実験結果一例 (ビデオ映像と超音波反射波)

4) 超音波送受信センサの改良

- ・左の図のように、斜め下向きのセンサの角度を 15 度から 30 度に変更し、さらにその数を増やして全周に超音波を発信することで死角をなくすことができることが分かり、超音波送受信センサの改良バージョンを製作した。

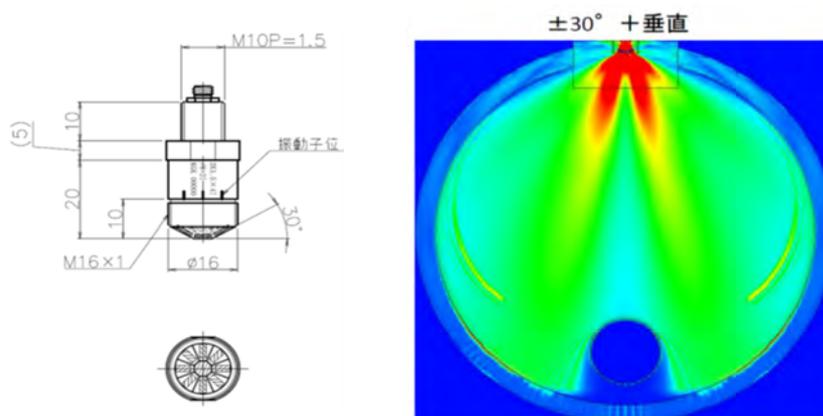


図 27 改良された超音波送受信センサと FEM 解析

5) 魚探法システムの開発 (超音波送受信装置と解析プログラムの開発)

- ・魚探法の原理を応用した「通過時刻検出システムの開発 (パッシブ型)」にあたっては、新たに超音波発信及び受信装置が必要となるとともに、得られた超音波信号からロボットカプセルの通過をリアルタイムで解析するプログラムが必要となる。
- ・超音波送受信装置及び解析プログラムの開発にあたっては、超音波信号処理において豊富な実績とノウハウを有する発電技研にシステム全体の開発を業務委託した。シス

テムの構成（図 28）及び概念図（図 29）は以下のとおりである。

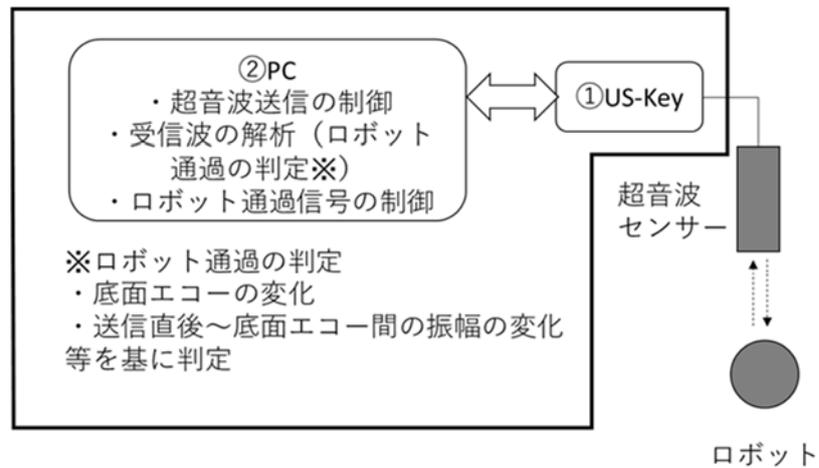


図 28 魚探法システム構成図

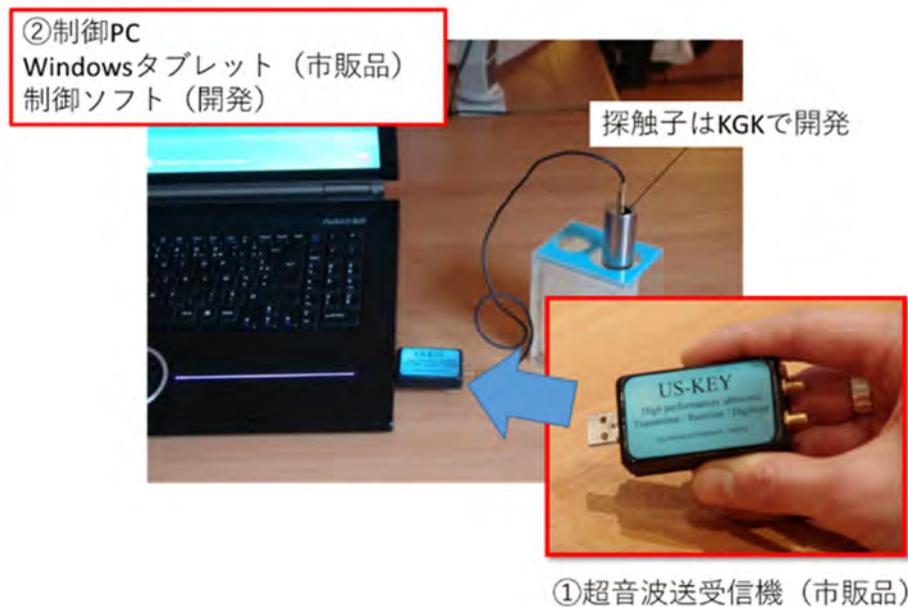


図 29 魚探法システム概念図

（3）ジャイロ法によるロボット位置の算出

ジャイロ法は、9軸ジャイロデータから「ロボットの移動距離」と「ロボットの移動軌跡」を推定することを目的として開発に取り組んだものであるが、SIPインフラで収集したデータから加速度を積分して速度を求めようとする短時間で発散し移動距離の推定ができないことが明らかとなった。

上記のほか、以下のような問題点があることが分かった。

- ① 管路が鉄製の材料でできている場合（鋼管、ダクタイル鋳鉄管、PC管、RC管）、地

磁気データが異常値を示すことがありジャイロの姿勢を正しく推定できない。

- ② 閉鎖された管内を長時間単独で流下するため、ランダムドリフト（初期ゼロ値がずれる現象）を GPS 等で定期的に補正することができない。
- ③ 姿勢を正しく補正できないと、重力加速度成分を除去できなくなり、加速度センサからの速度・位置の算出精度が低くなる。

ジャイロ法の当初目的は断念し、ジャイロデータから管路途中の管路の変曲点（水平・鉛直方向に管路が曲がる点、管径が変化する点など。以後「参照点」と呼ぶ）の通過時刻を検出することによって、区間流速法を補完することを目的として再検討することとし、「修正ジャイロ法」という名称で取り組むこととした。

（４）超音波法によるロボット位置の算出

超音波法によるロボット位置の算出は、ロボットから一定の時間間隔で超音波パルス信号（バースト波）を直進方向に発信し、通過基準点で超音波信号をキャッチして、ドップラー効果を利用してロボット位置を算出するものである。（図 30）

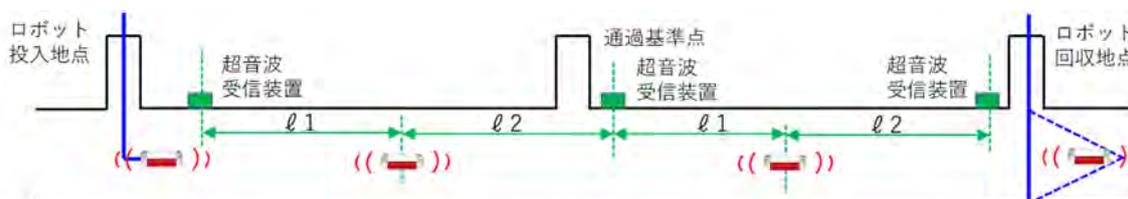


図 30 超音波法によるロボット位置の算出（概念図）

ロボットカプセルの前後のキャップに直進方向に超音波を発信する半ドーナツ形状の圧電セラミック振動子（100KHz）をオーダーメイドで開発し（図 31）、新型カプセル L280 のキャップに設置した（令和 2 年 12 月）。



図 31 直進方向に超音波を発信する圧電セラミック振動子

ドップラー効果を利用してロボットの位置を算出するには、ロボットから一定の時間間隔で発信される超音波パルス信号（バースト波）を通過基準点で確実に受信するとともに、超音波信号がロボットから通過基準点の受信センサまで一定の速度で確実に伝搬されなければならない。

超音波信号は多くの分野で利用されているが、地中に埋設された管水路の中でどのように伝搬するかについては十分な知見が得られていなし。そこで、ロボットから発信された超音波バースト波が水で満たされた管路内をどのように伝搬するかについて、FEM 解析によるシミュレーションを実施した。



図 32 呼び径φ200mm 長さ 10m のエルボモデル (FEM 解析モデル)

シミュレーションのモデルは「①長さ 10mの直管モデル (100A、200A、300A、400A)」と、図 32 のように曲り (エルボ) を含む「②長さ 10m の 200A のエルボモデル」とした。

○軸方向の超音波の伝搬について

ロボットから発信された超音波バースト波は管内で多重反射を繰り返しながら次第に中央部分に集束して伝搬する。

多重反射を繰り返しながら進むことから伝搬速度は水中の音速よりも約 2.5%の遅れが生じる。(図 33)

また、多重反射を繰り返すことが原因と思われるが、発信時は一つのピークだったバースト波は距離が長くなるにつれて複数のピークが現れるようになり、最初のピークよりも第 2・第 3 のピークの方が振幅が大きくなる。

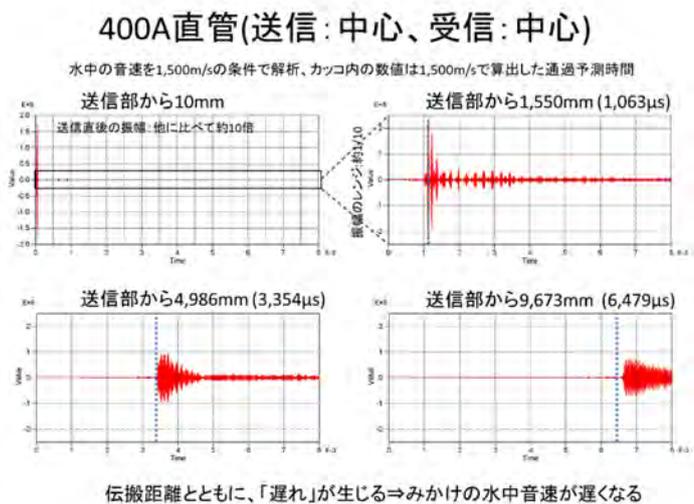


図 33 呼び径φ400mm 直管

エルボを通過すると強度は著しく低下するが、伝搬速度は変化しない。(図 34)

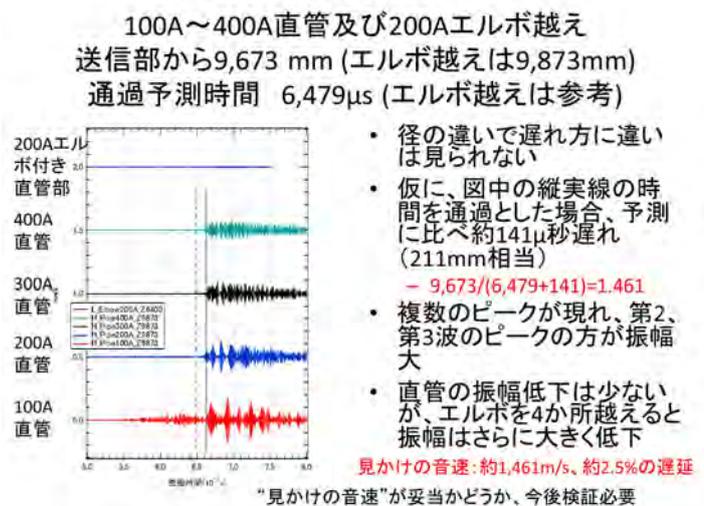


図 34 呼び径 ϕ 100-400mm 直管及びエルボ越え

○径方向の強度分布について
 超音波のエネルギーは管の中心付近に集中するため、管の中心部で受信するのが望ましい。管壁に近い位置だと受信するのが難しくなると思われる。(図 35)

【課題】解析結果から判断すると実用化のハードルは高そうだが、循環型水路での実験結果で最終判断することとする。

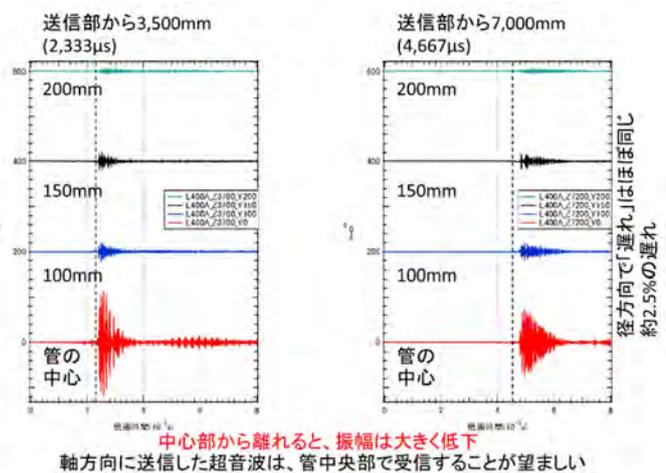


図 35 管の中心から離れると振幅が低下

(5) 3D管路図作成プログラム及びロボット位置表示プログラム

- 3D管路図作成プログラム及びロボット位置表示プログラムを完成させた。
 - 3D管路図作成及び手順書を作成した。
 - 3D管路図作成研修会を開催した(第1回研修:令和2年1月20日実施)。
 - 香川用水高瀬支線の3D管路図を作成した。
 - 木曾川右岸用水の3D管路図を作成し、令和2年9月28・29日の現地確認試験において3D管路図を活用したリアルタイムビューアを使って漏水探査業務を実施した。
- (図 36)

- 宮城県古川地区の3D管路図を作成した。
- 滋賀県甲賀農業農村振興事務所の横田・立場山サイフォンの3D管路図を作成し、令和2年10月15・16日の現地確認試験において3D管路図を活用したリアルタイムビューアを使って漏水探査業務を実施した。



図 36 3D管路図をベースに作成したリアルタイムビューアの一例

(6) 漏水音検出プログラム

管路内で収録された音データを入力・分析することで、異常音の検出を行うプログラムを構築する。

1) 異常音の検出

1-1) ロボットが収集した音データの分析

管路内で発生する音は主に以下の4種類に分類できる。

- ・漏水音：漏水個所から発生する音
- ・接触音：カプセルが管壁に接触した時に発生する音(制水弁などへの衝突音を含む)
- ・車両音：路面上を車両が通過した時のタイヤと路面との摩擦音及びの凹凸や継ぎ目を車両が通ったときに発生する音
- ・流水音：水が管内を流下するときに発生する継続的な音(ノイズを含む)

上記4種類のうち、「流水音」を除く三つの音を「異常音」と呼ぶこととし、異常音を「管路途中の特定の場所で発生する音」と定義する。漏水音検出プログラムは、ロボットが収集した音データの中から「漏水音」を検出することを目的とするものであるが、第一段階として「探査ロボットが収集した音データの中から異常音を検出」し、第二段階として「異常音の中から漏水音を検出」する方針でプログラム開発に取り組むこととした。

図 37～図 40 に、上記4種類の音データの代表的な波形を示す。図の縦軸は音圧 (Pa)、横軸はデータ数 (8000 データ=1 秒) を表す。接触音は流水音に比べて音圧が大きい、漏水音と車両音は流水音と比べて音圧の差は大きくないことが分かる。

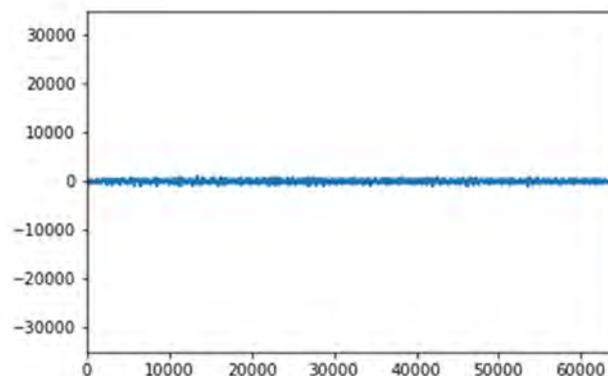


図 37 漏水音

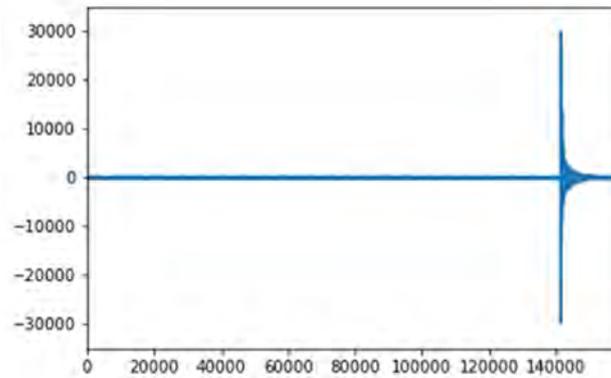


図 38 接触音

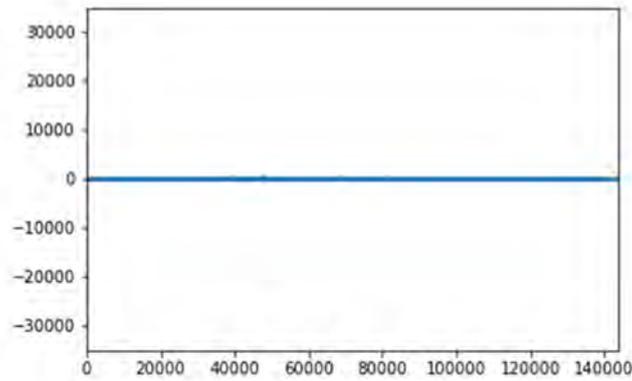


図 39 車両音

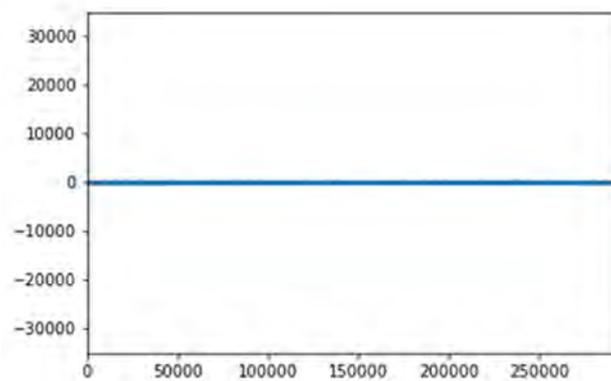


図 40 流水音

音の波形から漏水音の特徴がつかめないことから、各 4 種類の音データに対して周波数分析を実施した。

1-2) 周波数分析

異常音検出は、FFT(高速フーリエ変換)を用いた周波数分析によって行うこととした。

フーリエ級数とは、「全ての関数は無限個の三角関数の和で表現できる」という概念を元に生み出されたものであり、フーリエ級数は以下の式で表現できる。

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right)$$

フーリエ級数は式の形の性質上、周波数ごとの波の大きさを表現する事が出来るため、ある関数 $g(x)$ をフーリエ級数に変換する事で関数 $g(x)$ の周波数分析が行える。この周波数分析の結果から、各音の特徴的な周波数を特定し、閾値を設けることで異常音を検出することができる。

1-3) 周波数分析結果

図 41～図 44 に周波数分析結果の一例を示す。

縦軸が音圧、横軸が周波数を表す。今回のサンプルでは漏水音は他に比べて低周波数帯に偏っている。その他の3つの音は 700Hz 付近に音圧の最高値が存在する。接触音は 700Hz が突出しているのに対して、車両音と流水音は複数の周波数で突出が見られる。車両音は他の音には見られない、300Hz での突出が見られる。

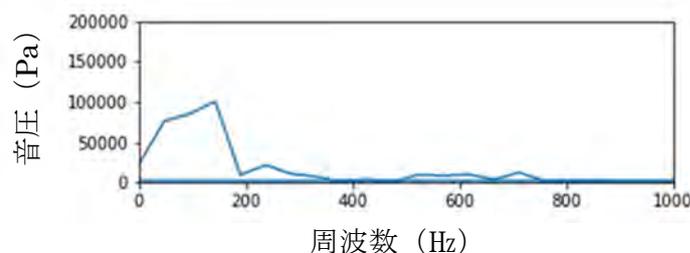


図 41 漏水音の周波数分析結果

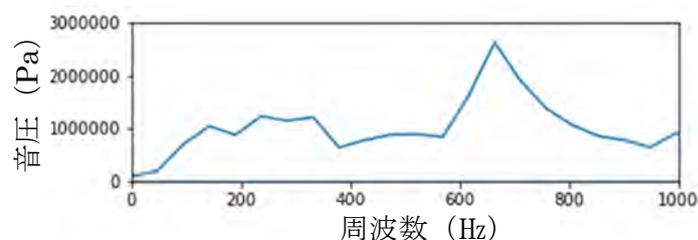


図 42 接触音の周波数分析結果

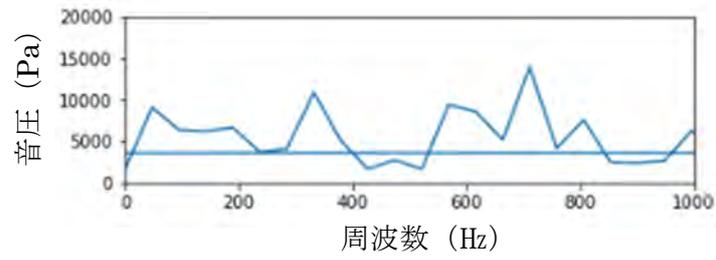


図 43 車両音の周波数分析結果

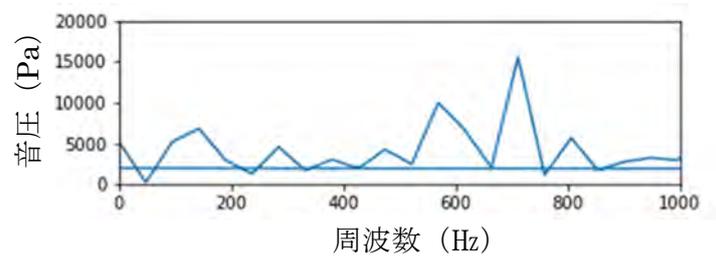


図 44 流水音の周波数分析結果

1-4) 漏水音の周波数分析結果

令和2年度に実施した現地確認試験のうち、河川を横断するサイフォンで漏水音を検出することができた。

そこで、現地確認試験で得られた音データを一秒ずつのデータに分解し、周波数分析を行った。図45は漏水発生地点、図46は異常がない地点の周波数分析結果である。漏水発生地点では50Hz前後で音圧が大きくなっているのに対して、異常がない地点では50Hz以上では顕著な音圧は確認されなかった。

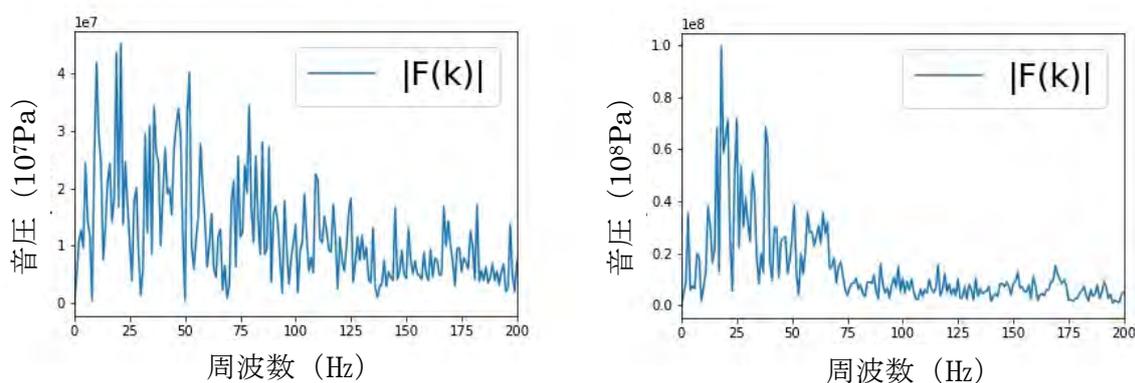


図 45 漏水発生地点の周波数分析結果

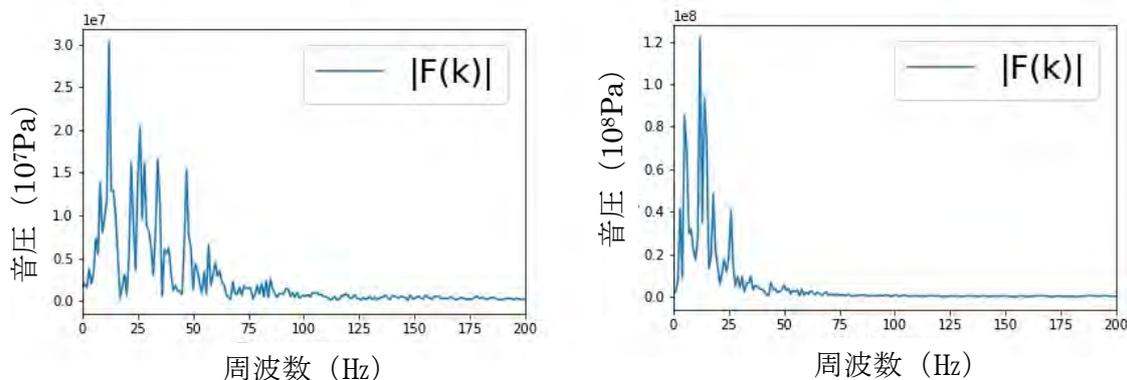


図 46 異常のない地点の周波数分析結果

今回の現地確認試験では、漏水が発生している管路(サイフォン)「漏水音と思われる音データ」を収集することができ、漏水音とそれ以外の音データに対して周波数分析をすることによって、漏水音を検出することができた。

漏水音データとともにそのほかの異常音データを収集し、それぞれの異常音データに対して周波数分析を行って当該異常音に特徴的な周波数帯を見つけ出し、異常音を区別するための閾値を見つけ出すことができれば、異常音の中から漏水音を検出することが可能であることが分かった。また、漏水音データを数多く収集・蓄積することによって、漏水音検出の精度を向上させることができる。

1-5) 処理フロー

音声データを周波数分析することによって異常音を検出し、検出された異常音を最終的に人の検聴によって漏水であるかの判断をする。現時点で得られている漏水音データに対しては前項 1-4) で述べた方法で周波数分析することによって異常音を検出できることが確認されたが、漏水音データの数がまだ少なすぎる。さらに多くの漏水音データが集まった段階で、クラウド上で漏水音を識別するシステムを構築する。(図 47)

また、カプセルの前後のマイク (ハイドロフォン) によるステレオ効果を利用して異常音発生地点を通過時刻を検出するプログラムについては、循環型水路において疑似漏水音を発生させた実験を実施し、そのデータをもとに開発を進める。

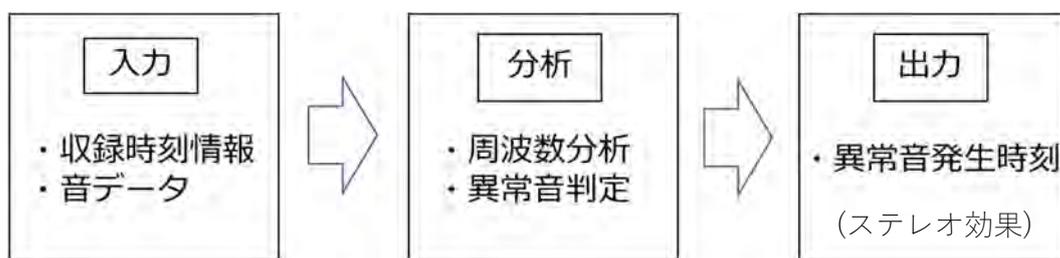


図 47 音声データの処理フロー

(7) 現地確認試験とロボット技術の改良

1) 現地確認試験

令和2年度に7か所の現地確認試験を予定していたが、COVID-19及び緊急事態宣言の発令等の影響もあり現地確認試験は2か所にとどまった。ただし、当該2か所の現地確認試験でそれぞれに有益な成果が得られた。

1-1) 木曽川右岸用水（水資源機構：岐阜県美濃加茂市）

木曽川右岸用水のうち左岸幹線水路は、トンネル区間とパイプライン（左岸分水工）からなる総延長4,769mの水路で、愛宕山トンネルを抜けて上飯田調整池に至る。左岸幹線水路のうち、15号空気弁からトランジションまで総延長1,834.5m管径φ1100mmの鋼管パイプラインで現地確認試験を実施した。令和2年9月27-29日）

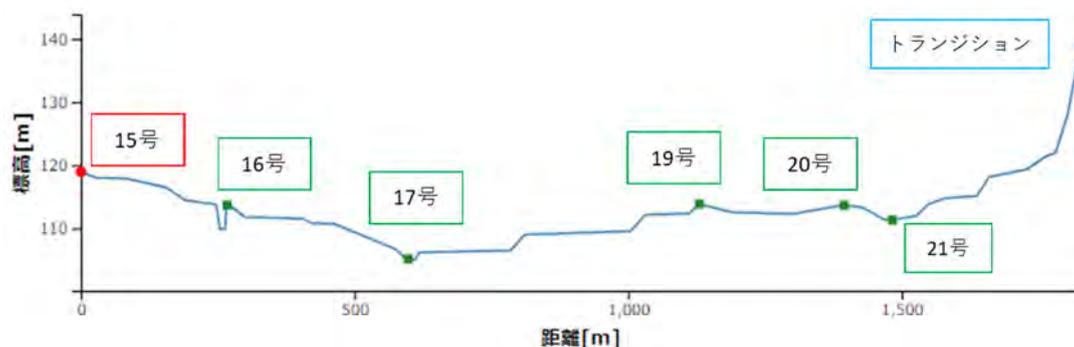


図 48 木曽川右岸用水左岸幹線水路の縦断図

左岸幹線水路のうち管路区間はコンクリート管で建設されたものであるが、漏水が複数カ所で発生したことからパイプインパイプ工法による改築工事が実施され、今回、漏水探查ロボットの現地確認試験を実施したパイプライン区間は2014年に改築工事が完了している。そのため漏水音の収集は期待できなかったが、呼び径φ100mmの空気弁下の補修弁（ボール弁）からロボットを投入し、試験区間内にある6カ所の空気弁室に超音波受信センサを設置することができることから、以下の2項目の目的で現地確認試験を計画・実施した。

- ① ロボット投入・発射装置の性能確認
- ② 通過時刻検出装置の性能確認

なお、上記②の成果として得られた基準点通過時刻をもとに、通過基準点のうちの任意の地点を「仮想漏水地点」と見立てて漏水位置検出精度を算出した。

a) 管内流速の計測

- ・ロボット投入・発射する15号空気弁に「流速計」を設置し管内流速を計測した。

b) ロボットの投入・発射

- ・15号空気弁室からロボットを投入・発射した。（図49）

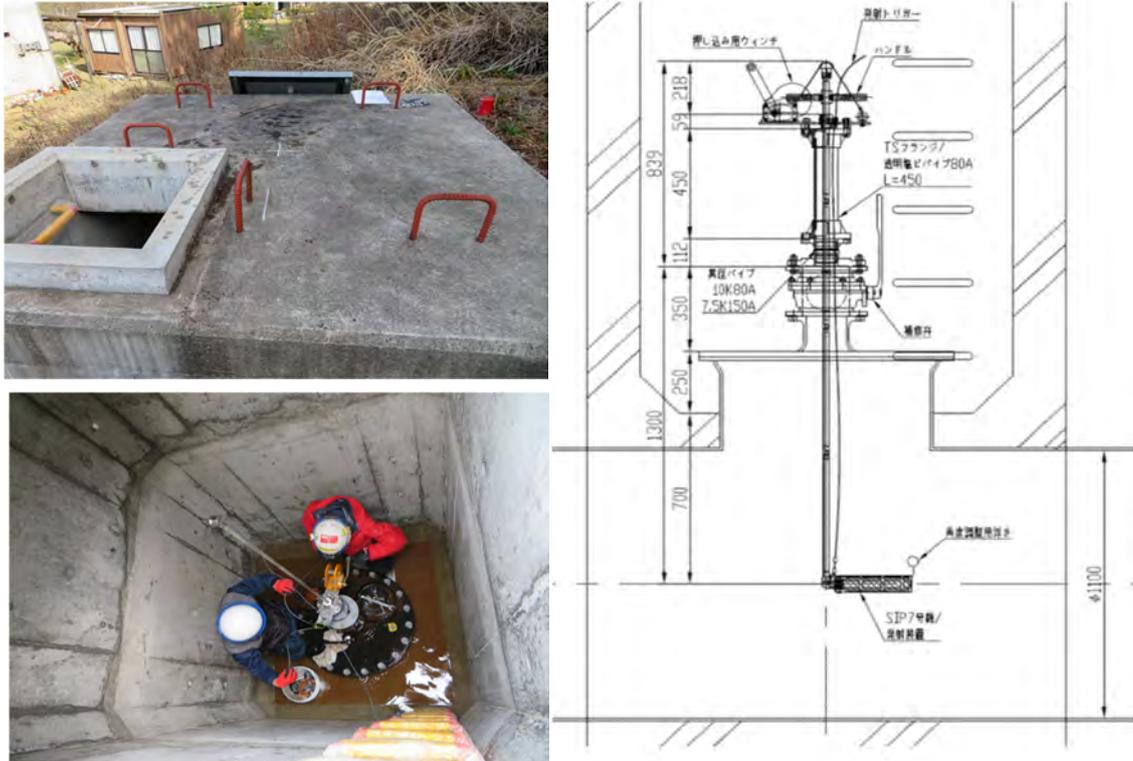


図 49 ロボット発射 (15号空気弁)

c) 通過基準点における通過時刻検出

- ・ 5つの通過基準点で空気弁を取り外し通過時刻検出のための水中センサを設置した

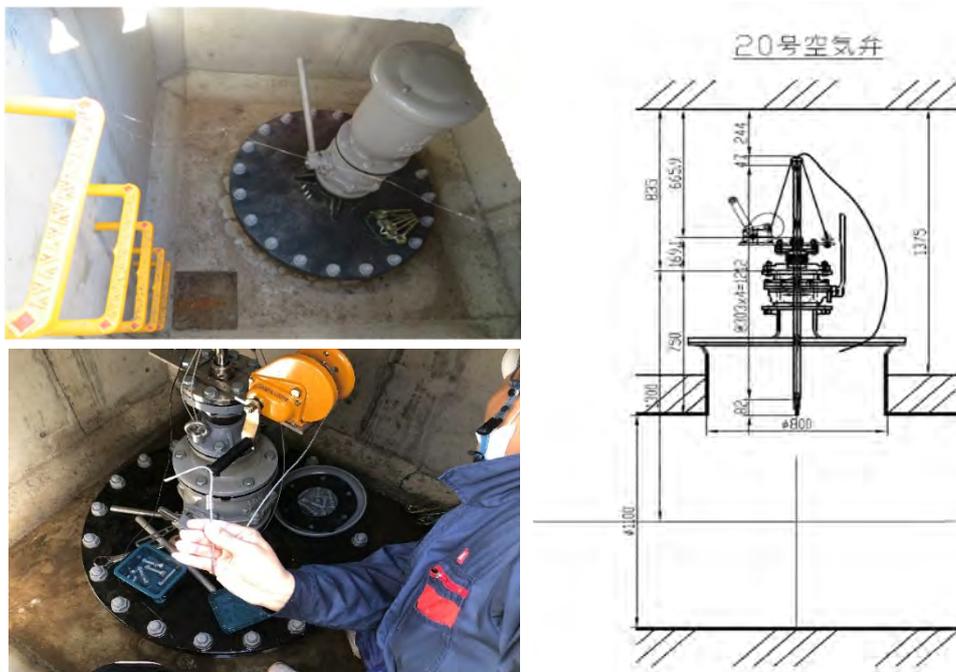
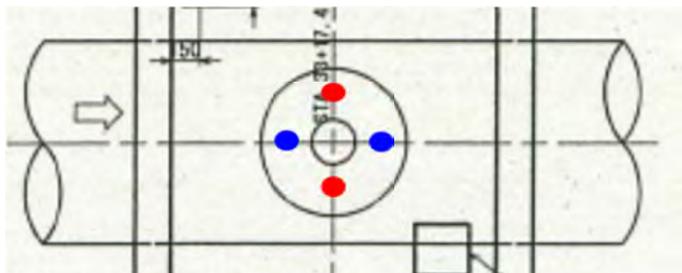


図 50 通過基準点における水中センサの設置 (20号空気弁)

- ・ 水中センサは補修弁から挿入し管の頂部に設置した
- ・ 人孔豎配管の蓋に管外面設置受信センサを2つずつ設置した。



- 1 回目：左右（赤）
 - 2 回目：前後（青）
 - 3 回目：左右（赤）
- 人孔蓋の中心から 30cm

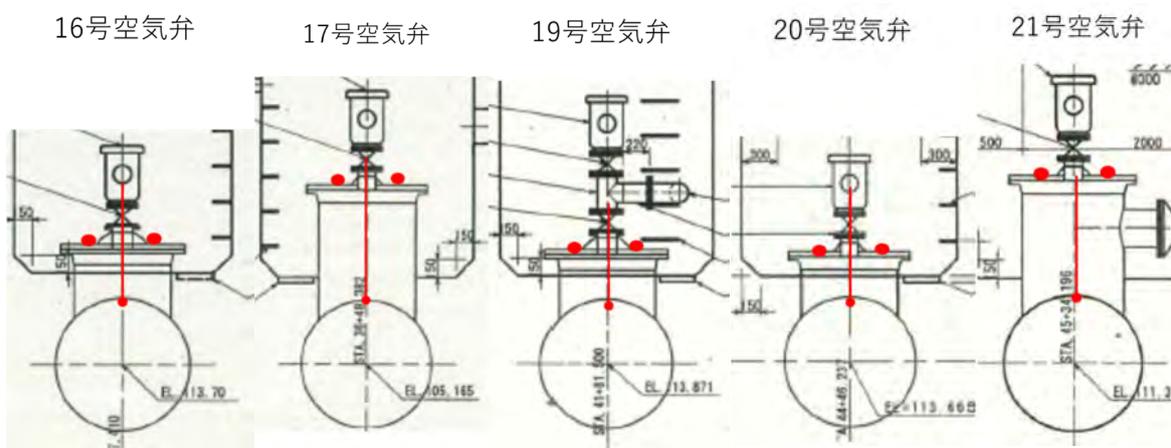


図 51 通過基準点における水中センサ及び管外面設置受信センサの設置

d) オープンピットでのロボット回収

- ・ パイプラインの最終地点トランジションのオープンピットでロボットを回収した

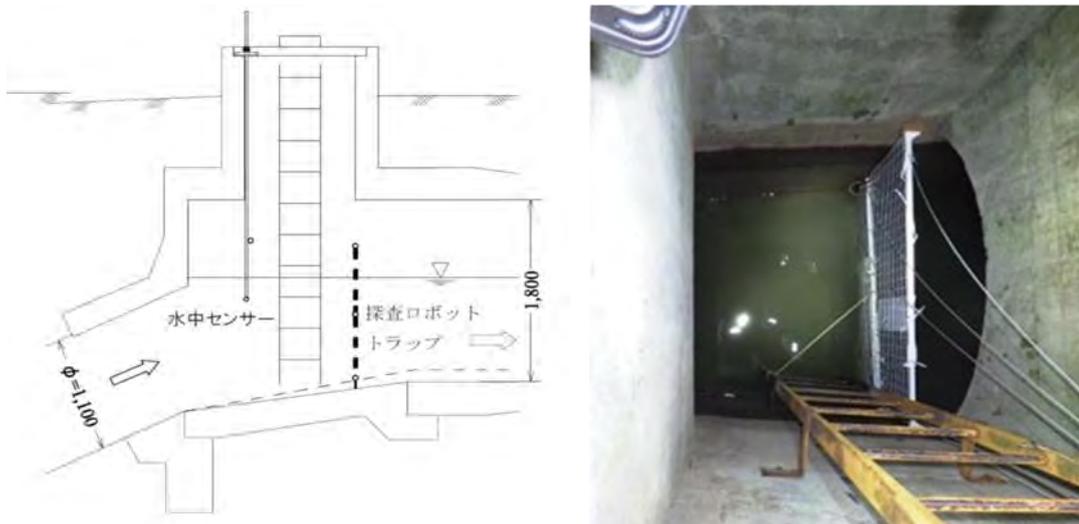


図 52 オープンピットでのロボット回収

e) 漏水位置算出精度

- 漏水探査は3回実施した。それぞれの計測におけるロボットの平均流下速度は以下のとおりであった。

1回目：0.356m/秒

2回目：0.477m/秒

3回目：0.395m/秒

- 通過基準点を「仮想漏水地点」と想定し、区間流速から漏水地点の位置を逆算することによって、漏水位置推定の誤差を試算し、「目標値＝4m」の達成率を試算した。

表3 漏水位置算出精度

通過基準点		# 0	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	目標	平均誤差
発射地点からの距離 (m)		0.0	270.3	601.5	1133.9	1398.6	1486.6	1834.5	達成率	(m)
1区間 (区間長: 1835m) (#0-#6)の流速から他地点の通過時刻推定	1回目: 0.356m/s	0.0	1.7	-12.7	-3.3	1.0	8.2	0.0	40%	7.3
	2回目: 0.477m/s		-17.1	-10.5	-14.1	-14.6	-12.4			
	3回目: 0.395m/s		-1.5	-0.1	4.2	5.7	2.2			
2区間 (平均区間長: 917m) (#0-#3)(#3-#6)の流速から他地点の通過時刻推定	1回目: 0.356m/s	0.0	2.5	-11.0		3.1	9.8	0.0	58%	5.2
	2回目: 0.477m/s		-13.9	-3.1	0.0	-5.8	-5.3			
	3回目: 0.395m/s		-2.5	-2.3		3.2	0.1			
3区間 (平均区間長: 612m) (#0-#2)(#2-#4)(#4-#6)の流速から他地点の通過時刻推定	1回目: 0.356m/s	0.0	7.5		0.2		7.4	0.0	67%	3.7
	2回目: 0.477m/s		-12.6	0.0	-0.8	0.0	-0.6			
	3回目: 0.395m/s		-1.5		0.4		-2.4			

- 5か所の通過基準点をすべて「仮想漏水地点」と想定した場合：全体を1区間としてその平均流下速度から「仮想漏水地点」の位置推定誤差を試算したところ、「最大誤差17.1m・平均誤差7.3m・目標達成率40%」となった。
- 5か所の通過基準点のうち4か所を「仮想漏水地点」と想定した場合：全体を2区間としてその平均流下速度から「仮想漏水地点」の位置推定誤差を試算したところ、「最大誤差13.9m・平均誤差5.2m・目標達成率58%」となった。
- 5か所の通過基準点のうち3か所を「仮想漏水地点」と想定した場合：全体を3区間としてその平均流下速度から「仮想漏水地点」の位置推定誤差を試算したところ、「最大誤差12.6m・平均誤差3.7m・目標達成率67%」となった。

1-2) 滋賀県甲賀市 立場山サイフォン・横田サイフォン (滋賀県甲賀農業農村振興事務所)

- 滋賀県甲賀農業農村振興事務所からの依頼により、立場山サイフォンと横田サイフォンで現地確認試験を実施した (令和2年10月14-16日)。
- 同事務所では農業用水利施設の機能診断の一環として河川横断サイフォンの目視検査のため管路内の水を排水しようとしたところ、河川からの流入水によって排水できなかった。そのため、通水時の漏水が疑われたことから漏水探査ロボットによる漏水調査の機会を得ることができた。
- 両サイフォンの縦断図及びロボット投入・回収場所の写真を以下に示す。

① 立場山サイフォン（φ800mm・延長180m）

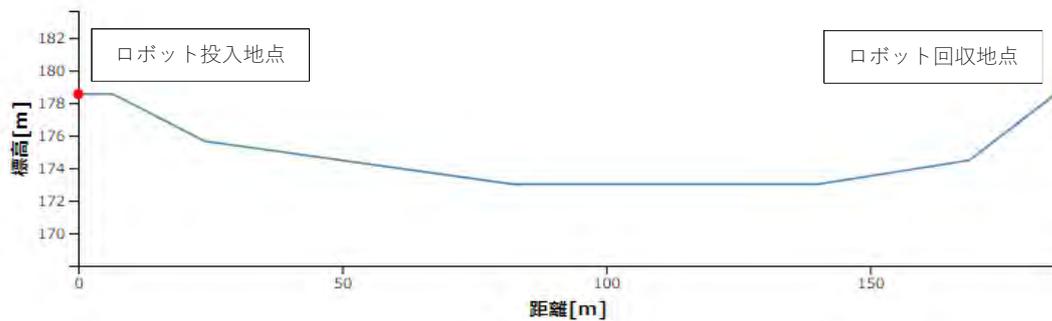


図 53 立場山サイフォン縦断面図



写真2 ロボット発射

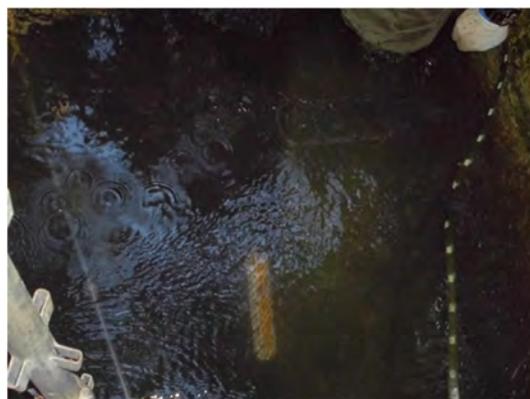


写真3 ロボット回収

① 横田サイフォン（φ1000mm・延長290m）

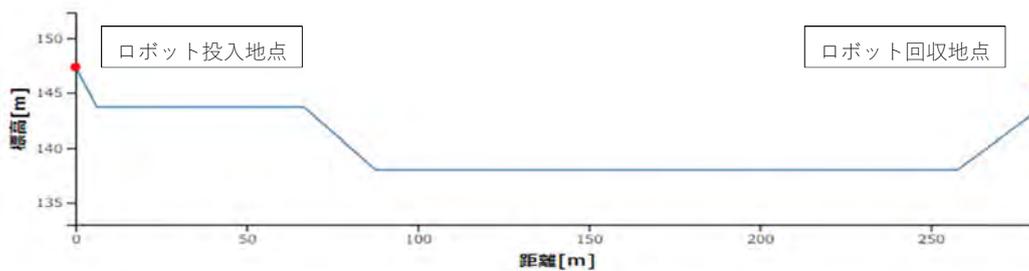


図 54 横田サイフォン縦断面図



写真4 ロボット発射



写真5 ロボット回収

② 音データの評価結果

- ・音データの評価したところ、両サイフォンにおいて漏水音と思われる異常音を検出することができた。
- ・サイフォンの始点・終点と管路の高低差はいずれも 10m 以下であることから、0.1MPa 以下の管内水圧で漏水音を検出できたことは大きな成果であった（先行技術であるスマートボールの漏水音検出圧力は公表資料では 0.3MPa となっている）。

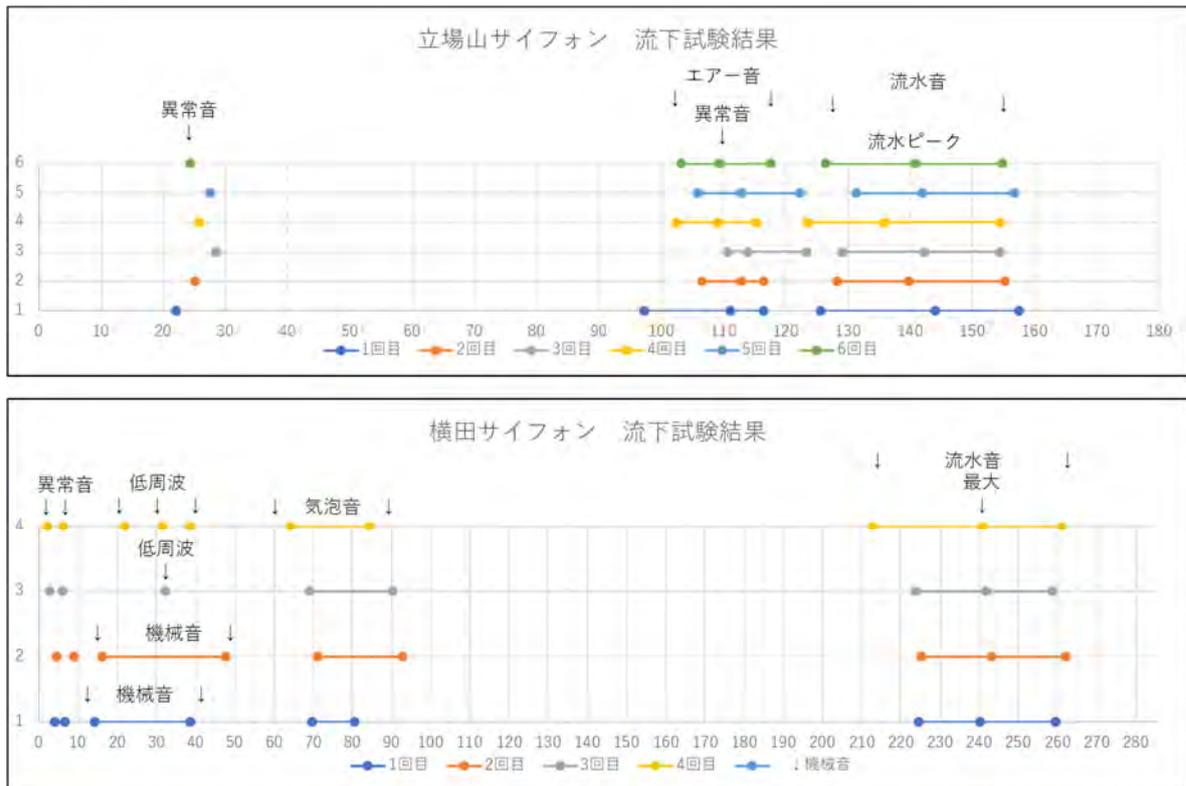


図 55 音データの音聴評価結果

2) ロボット技術の改良

循環型水路での実験や現地確認試験結果のフィードバックを反映してロボット技術の改良を行った。その中からロボットカプセルに関する二つの改良を紹介する。

2-1) ロボット基板の固定金具

- ・漏水探査中に基板が移動したり振動するのを防止するために、ステンレス薄板バネを使って基板の振動を抑制し、前後の移動を制限するための固定金具を開発した。



写真 7 ロボット基板の固定金具



写真 8 本体基板の挿入と固定

2-2) カプセルのウェイトバランス調整秤

ロボットカプセルのみかけ比重調整と前後のバランス調整を容易にするためにウェイトバランス調整秤を新たに開発した。

＜ウェイトバランス調整の手順＞

- ① 事前にロボットカプセルの浮力を計測する。
- ② ウェイトバランス調整秤で「総重量」と「前後の重量配分」を計測し、錘でウェイトバランスを調整する（写真 9・写真 10・写真 11）。
- ③ 漏水調査前に現地の水で微調整する（写真 12）。



写真 9 秤ベースのレベル調整



写真 10 秤を載せてゼロ点調整



写真 11 左右の秤で前後の重量計測



写真 12 現地の水で最終調整

2. 2 目標の達成度

(1) 成果から得られる効果

- 1) 流速の適用範囲が広く (0.2m/秒~0.8m/秒)、呼び径 $\phi 75\text{mm}$ 以上の空気弁下ボール弁からロボットをパイプライン中に投入・回収する新しい漏水探査技術を確立した。パイプラインの水運用に対する制約条件が小さくなり管理者にとって使いやすくなることから、パイプラインの定期的な機能診断に使用して突発事故を未然に防ぐ効果が期待できる。
- 2) 流下中のロボット位置をリアルタイムで監視するシステムを確立したことにより、ロボット紛失リスクの低減効果が期待できる。
- 3) パイプラインの中から漏水音を収集するので、管外から漏水音を検出する他の方法に比べて周囲の雑音が少なくクリアな漏水音を検出できる。

(2) 従来技術との比較

1) 比較する従来技術

- 音聴法
- スマートボール

2) 従来技術に対する優位性

- ①経済性：同等以上
- ②工 程：同等以上
- ③品 質：優れている
- ④安全性：優れている
- ⑤施工性：優れている
- ⑥周辺環境への影響：優れている

2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

- 管 種：すべての管種に適用できる
- 管 径：呼び径 $\phi 200\sim\phi 1200\text{mm}$
- 流 速：0.2~0.8m/秒
- 適用水圧：0.3~1.0MPa
- ロボットの耐水圧：3 MPa
- ロボット投入・回収のボール弁：呼び径 $\phi 75\text{mm}$ 以上

- 3 普及活動計画
 - 3. 1 想定される利用者
 - (1) 農業用パイプラインの所有者・管理者
 - (2) 工業用・上水用パイプラインの所有者・管理者
 - (3) パイプラインの調査・診断コンサルタント
 - 3. 2 利用者への普及啓発等の方法
 - (1) 現場実証試験による実績の蓄積
 - (2) カタログ作成による普及啓発
 - (3) 学協会の技術成果発表会での発表
 - (4) 学協会・専門誌に技術成果投稿
 - (5) 農政局・農政事務所への PR 活動
 - (6) NETIS、NNTD への登録
 - (7) 令和 4 年度からの事業化を目指す
 - 3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等
 - (1) 技術資料・積算資料作成
 - 3. 4 特許・実用新案等の申請予定
 - (1) 申請者予定者
 - (2) 申請予定時期

4 研究総括者による自己評価

審査のポイント	着眼点	申請時計画目標 ^{注1}	自己評価 ^{注2}	自己評価の理由 ^{注3}
目標の達成度	<ul style="list-style-type: none"> ・効果 (従来技術に対する優位性) 	<ul style="list-style-type: none"> ・φ75 空気弁からロボットを投入・回収できる ・適用流速 0.3m/秒～0.5m/秒 ・ロボット流下位置をリアルタイムで把握 ・適用水圧 0.3～1.0MPa 	A: 優れている	<ul style="list-style-type: none"> ・流速の適用範囲が広く(0.2～0.8m/秒)、呼び径φ75 以上の空気弁からロボットを投入・回収できる新技術を確立した。漏水調査実施に伴う水運用上の制約条件が少なくなり管理者にとって使いやすくなったことからストックマネジメントへの活用が期待できる。
	<ul style="list-style-type: none"> ・信頼性 (品質、精度、安全性、耐久性等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・管底に堆積した土砂や管の曲り等に阻害されることなく管内を流下し、ロボットの紛失リスクが低い。 ・ロボットカプセルの耐水圧 3.0MPa ・漏水検出精度: 4m 以内 ・漏水検出精度: 漏水量 毎分 1.0 リットル以上 	B: 概ね妥当	<ul style="list-style-type: none"> ・通過時刻検出システムとリアルタイムビューアによりロボット流下位置をリアルタイムで把握できロボット紛失リスクを低減できた。 ・現地確認試験においてロボットの紛失なし。 ・現地確認試験の結果、漏水音を含む異常音を収集できている。

	<ul style="list-style-type: none"> ・ 適用範囲・適用条件等 	<ul style="list-style-type: none"> ・ すべての管種に適用可 ・ 適用管径 200 ～ 1200mm ・ 適用水圧 0.3～1.0MPa ・ 適用流速 0.3m/秒～0.5m/秒 ・ 1回の探査距離最大 10km (0.35m/秒×8時間) 	B：概ね妥当	<ul style="list-style-type: none"> ・ オープンピットからロボット投入・回収できる。 ・ 模擬管路において適用流速 0.2～0.8m/秒を確認済み。
普及の可能性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 想定される利用者への普及啓発の方法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現地確認試験によるデモンストレーション 	A：十分な利用が見込まれる	<ul style="list-style-type: none"> ・ 積極的なPR活動をしていないが、共同研究機関である農研機構に対する問い合わせが増えた。
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 利用者に対するサポート体制 (設計・積算・施工等の参考資料、相談窓口等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計・積算・施工等の資料完成 	C：改善が必要	<ul style="list-style-type: none"> ・ COVID-19 の感染拡大の影響で現地確認試験が遅れるとともにサポート体制の構築も大幅に遅れた。
総合コメント 注4	<p>当初計画目標のうち一部を除いて達成することができた。未達成となったロボット回収装置の性能評価については、当初計画の最大径であるφ800mmの回収装置を製作し農研機構の開水路実験施設に設置した模擬管路でほぼ確実に回収できることが確認できたが、同施設の使用機会に制限があることと、繰り返し試験を実施して確実に回収できるように回収装置のさらなる改良が必要と判断し、令和3年度中に自社資金で新たに循環型水路実験施設を設置して回収装置の改良等に取り組む方針に切り替えた。</p>			

注1) 成果報告書に記載の研究開発目標を記載する。

注2) 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(○付け)する。

注3) 自己評価の理由を記載する。

注4) 総合的なコメントを記載する。

5 今後の課題及び改善方針

(1) 新設循環型水路での性能試験促進

- ・令和2年度は、農研機構大型開水路実験施設で各種装置の性能試験を予定していたが、同施設の改修工事等の影響で予定していた性能試験を実施できなかった。とくに回収装置の性能確認は重要で、繰り返し試験を実施して確実にロボットカプセルを回収するための改良が必要である。
- ・令和3年度に自主開発として循環型水路を設置し、ロボット回収装置をはじめとする各種装置の性能確認試験を実施する。

(2) 現地確認試験による性能確認

- ・COVID-19の影響により令和2年度に7箇所予定していた現地確認試験が2件に留まった。令和3年度は農研機構の協力を得て現地確認試験による性能確認を促進する。

(3) 装置及び技術の改良

- ・令和2年度に実施した現地確認試験からのフィードバックに基づき、各種装置および技術の改良を継続実施する。

以上