

漏水位置特定技術の研究開発

宮本恒夫、佐野 透、棚村俊二

東京都水道局経営計画部技術開発室
東京都新宿区西新宿2-8-1

概要

東京都水道局における漏水発見作業は、熟練職員による音聴法が主体である。とりわけ漏水位置の特定については、棒状音聴器や電子式漏水発見器による人の聴力を基本とし、経験的な方法に頼っている。このため、誰にでも簡単に漏水位置の特定が可能な、新たな装置の開発を行った。

この装置は、複数個の加速度センサを地表面上に設置し、地表面上を伝播する様々な振動から漏水に起因した成分のみを抽出し、そのインテンシティ（エネルギーの強さと方向）を求めることにより、漏水位置の特定が可能な装置である。

キーワード

インテンシティ、センサ、ベクトル

1 はじめに

漏水は、貴重な水資源の損失となるばかりでなく、出水不良や道路の陥没、建物への浸水等の二次的災害をもたらす危険性がある。一方、水道資源には限りがあることから、水使用の合理化とともに、第二の水資源と言われる漏水防止に対し、水道事業体では重要施策として積極的に取り組んでいる。

現在、漏水位置特定技術は、音聴調査、相関調査などが主体となり、それぞれ効果を発揮している。しかしながら、音聴調査は、熟練者の減少に加え、都市活動の延長による水道使用時間帯の拡大等により測定環境が悪化し、漏水発見は年々困難になっている。相関調査は、正確な配管図（管種、延長）が必要なことや大がかりな装置が必要なことから、可搬性の問題があった。そのため、新しい漏水発見方法の研究開発が待ち望まれていた。図1に、開発の手がかりを示す。

本研究は、音響分野における音源探査技術の応用を使い、都市雑音の影響を受けず、操作性や位置特定性の優れた漏水の位置を特定する装置の開発を行うことを目的とする。

本研究のシステムイメージを図2に示す。複数個のセンサを地表面上に設置し、地表面上を伝播する様々な振動から漏水に起因した成分のみを抽出し、そのインテンシティを求めることにより、漏水位置の特定をする。インテンシティとは、単位面

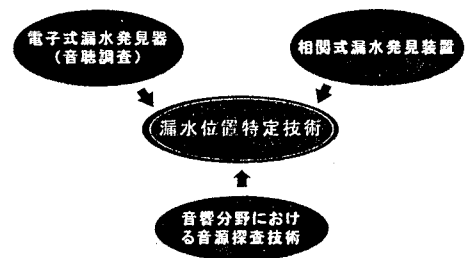


図1 開発への手がかり

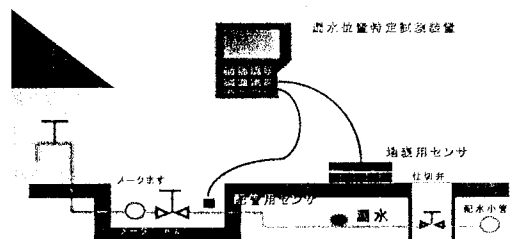


図2 漏水位置特定装置システムイメージ

積を1秒間に通過するエネルギーで、これは音圧と粒子速度の積の時間平均として定義されるベクトル量であり、大きさと方向性を有している。従って、測定位置ごとにこのエネルギーベクトルを計測することで、地下から発生した漏水振動の流れを推定することが可能となり、地表から漏水位置を特定することができる。

2 現状の課題

(1) 都市雑音除去対策

漏水検知は、地表面上で漏水により発生する微小な振動を捕らえるため、交通騒音等の都市雑音の影響を受けやすく、それらのノイズ成分を除去する必要がある。

漏水音は、地中減衰により地表へは1kHz以上の高域音は伝播しないことが本研究開発中にわかった。また、柱状トランス等のトランスノイズをカットするために、200H~1kHzのアナログフィルタを用いた。しかしながら、上記通過帯域には、歩行音、鳥の鳴き声、交通騒音など都市雑音が重畳する。そこで、図3に示すシステム構成で都市雑音除去を実施した。

配管上には都市雑音が重畳されないことから、配管上に設置したセンサで検出した信号を相関用基準信号とし、地表面上で検出した信号と相互相関処理を行い、地表面から漏水信号に起因した成分のみを抽出する。なお、漏水信号は配管の管種（伝播速度）、配管センサと地表センサとの位置関係によっては、相関基準用の配管センサよりも地表センサに先に到達する場合もあることから、図4のように相関基準信号よりも過去に取り込んだ地表データを使い、負の相関計算も実施した。

(2) 漏水真上検知精度の向上

事前に配管の埋設位置はおおよそ推定できることから、1次元表示方式にて漏水位置の特定を行う。音響分野の音源探査で用いる音響インテンシティ（アクティブインテンシティ）法により、地表に伝わる漏水インテンシティを計測した場合、漏水真上では地表センサには位相差が生じないことから、図5に示すようにインテンシティは零となる。地中にセンサを埋設できれば、深さ方向に伝わるインテンシティも検出でき、地表面インテンシティが零になっても、深さ（鉛直）方向のインテンシティが最大となり、通常の空間域における音源探査と同様の探査機能を発揮させることができる。しかしながら、現実問題として地下にセンサは埋設できないことから、地下方向インテンシティを漏水位置特定ベクトルに加えることができず、漏水真上では本来漏水から受けるエネルギーが一番大きいにも拘らず、漏水位置特定ベクトルに反映できない点が問題であった。

そこで、従来のアクティブインテンシティ法が持つ不具合を解消でき、装置構成上も単純化でき、検出精度の向上に寄与できる手法について検討した。

漏水位置真上でベクトルの最大化を図るため、アクティブインテンシティに、リアクティブインテンシティを加えて、アクティブインテンシティのベクトル方向成分とリアクティブインテンシティのベクトル強さ成分を組み合わせ、図6に示す新たなWLI（ウォーターリークインテンシティ）法を提案した。

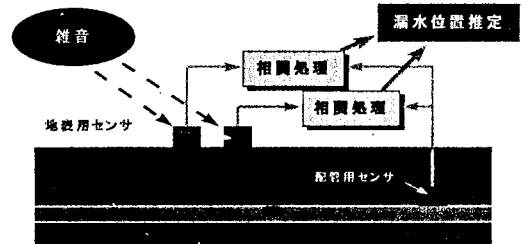


図3 都市雑音除去システム構成

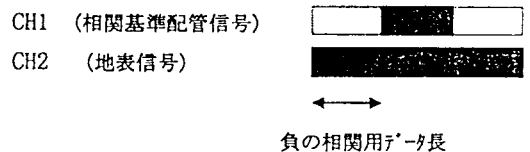
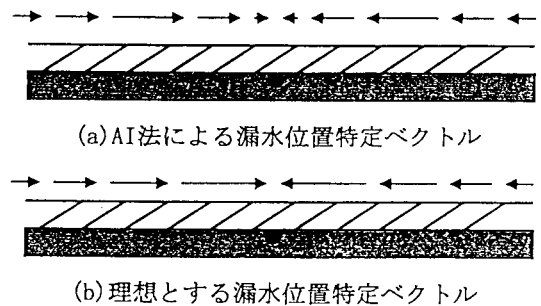


図4 取り込みデータ長



注意) ベクトルの向きは漏水の方向を示し、
インテンシティと極性が逆

図5 1次元表示方式漏水位置特定ベクトル

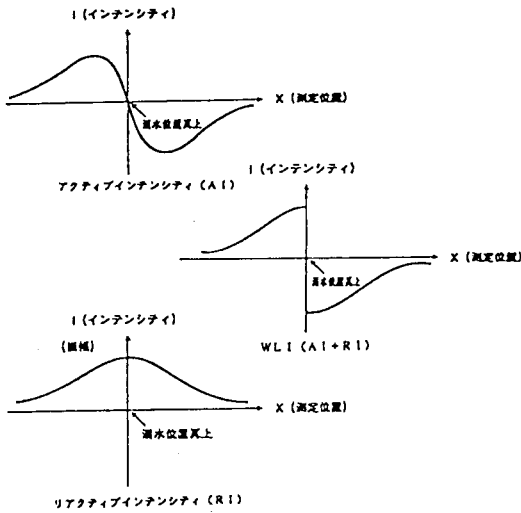


図6 WL I (ワイターリークインテンシティ)

1次元漏水特定ベクトルは、正しく漏水位置を推定している。この理由は、周波数が高くなるにつれ、地中内部の摩擦による減衰効果が働くことから、もともと、高周波数帯域成分のインテンシティは小さくなるのが幸いし、積分処理による高周波数帯域の振幅劣化による影響は受けにくいと考える。これにより積分処理によるリアクティブインテンシティの算出が可能となった。

上記により算出したリアクティブインテンシティの大きさと、アクティブインテンシティの符号を組み合わせることで、漏水位置真上でベクトルの値が最大となり、かつ、方向が反転するWL I法(図5(b))が実現した。

(3) センサ設置誤差対策

現在実施されている漏水検知の作業形態を継承するには、センサを地表面に固定せずに簡単に設置、撤収をしなければならない。従って、センサを十分に地表面には固定できず、センサ設置状態で一つの振動系を構成し、振幅、位相誤差が生じる。この誤差は接触状態により変化し、定量的な評価もできず、また、計測時間の短縮、コンパクト化の課題も克服する上では校正信号による位相補正もできない。特に、センサ間の位相差がベクトルの向きに大きく影響することから、センシング方法は空間域の音源探査と異なり大きな課題となる。

そこで、センサ設置誤差の改善対策としては、周波数帯域を分割し、各周波数帯域ごとにセンサ間隔を変えて信号を検出することを提案した。

シミュレーションにより、センサ設置誤差の影響を受けにくいセンサ間隔及び最適分割周波数について操作性を考慮した結果、200Hzから600Hzまでの低周波数帯域ではセンサ間隔を40cm、一方、600Hzから1kHzまでの高周波数帯域ではセンサ間隔を20cmとすることにした。

リアクティブインテンシティとは音圧(振動)の変化のみでエネルギーの伝播はない、電気系や機械系での無効パワーに相当する量である。アクティブインテンシティはSin関数であるのに対して、リアクティブインテンシティはCos関数となるため、アクティブインテンシティの算出過程で、どの周波数に対しても90度位相をずらすことで求められるが、そのような特性を有する移相器を製作することは難しく、コストもかかることから、別の方法として積分処理により、位相を90度ずらすことを考えた。但し、積分処理によって位相が90度ずれるとともに周波数に対する重みが振幅に付いてしまう。そこで、積分処理による振幅の重みが漏水位置特定精度に及ぼす影響についてシミュレーションにより確認した。図7に示すように積分処理を行った場合でも

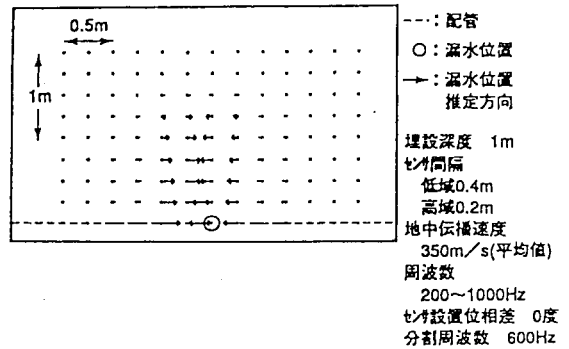


図7 積分処理による漏水位置特定ベクトル

そして、周波数帯域毎のフィルタ処理については、演算処理にて行えるデジタルフィルタを採用した。

以上、現場適用上、問題となる課題に対する対策案を検討した結果、図8に示すアルゴリズムが構築でき、模擬漏水配管、及びフィールド試験により評価した結果、その有効性が確認され、良好な結果が得られた。

3 実用試作器

(1) 実用試作器の製作

ア ハードウェアの製作

製作した漏水位置特定実用試作器は、右側面のグリップ部分下に配管用センサコネクタ、地表面用センサコネクタ、通信用コネクタ、電源スイッチを設け、左側面には持ち運ぶ場合の取っ手を取り付けた。また左下側に専用充電器を取り付ける充電用コネクタがある。装置の表側は、表示部(LCD)、操作部(キーボード)を設けた。

使用しているコネクタ、スイッチは、防滴タイプのもを採用した。また本体ケースについても防滴性を考慮してケースカバー間にパッキンを施し、また内部コネクタ取り付け部などにシーリング材を施した。

表示部となるLCDは、320×240ドットの画面に、漢字文字等のキャラクタ表示と、グラフィック表示の双方が可能な構成とした。

操作部は、標準タイプの24個のキー数を持つフラットシートキーボードを採用したが、実際に使用するキー数は10個程度となる。

漏水位置特定実用試作器本体の外形は、ほぼA4サイズに収め、電源についてもバッテリーで動作するため、屋外の現場において持ち運びながら使用可能な装置となった。またセンサについても、折り畳むことにより、コンパクト化され、現場への持ち運びに適している。

イ ソフトウェアの製作

漏水位置特定実用試作器のソフトウェアは、電源ONによるパワーオンリセット信号が発生すると、スタートアッププログラムが実行される。スタートアッププログラ

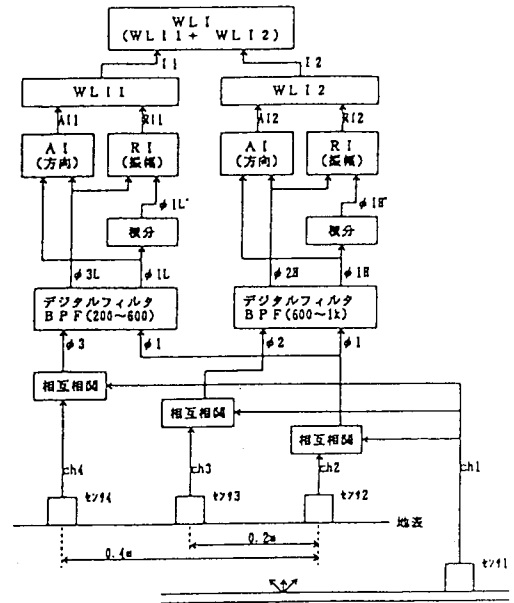


図8 漏水位置特定アルゴリズム

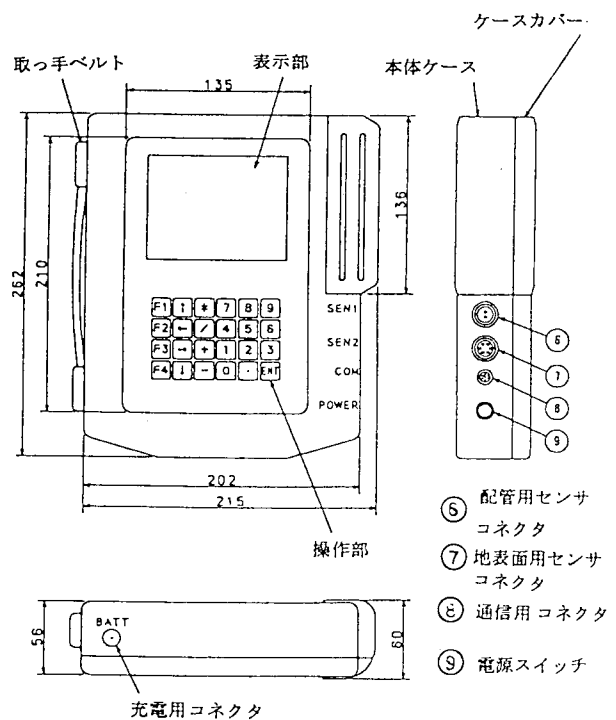


図9 漏水位置特定実用試作器本体

ムでは、レジスタ設定、メモリチェック等が行われ、その後、メインプログラムでは、LCD画面表示、キー操作の読み込み、ベクトル演算処理等の漏水位置特定実用試作器における中心的処理を行う。センサで捕えた信号の読み込みについては、サンプリング周期に基づいてA/D部より割り込みプログラムによって取り込み、データはメモリに保存される。通信プログラムでは、プリンタ等に漏水位置推定結果を印字する際にデータの送受信が行われる。これらのプログラムにより漏水位置特定アルゴリズムとヒューマンインターフェースを実現した。

(2) 漏水位置特定実用試作器の評価

ア 動作・性能確認試験

漏水位置特定実用試作器に模擬的に発生させた信号(サイン波、ノイズ波)を入力して、漏水位置特定アルゴリズムの各処理ブロックにおける動作・性能を確認した。その結果、入力された模擬信号はデジタルフィルタ処理にて、低帯域周波数成分(200~600Hz)と高帯域周波数成分(600~1kHz)に分割され、その後、基準となる配管上の信号成分を抽出するための相互相関処理が正常に行われていることが、各処理ブロックにおける波形データにより確認できた。またリアクティブインテンシティのための積分処理についても、理論どおり位相が90度ずれて、重み付けされていることが確認できた。これにより、漏水位置特定アルゴリズムの処理は正常であることが確認された。

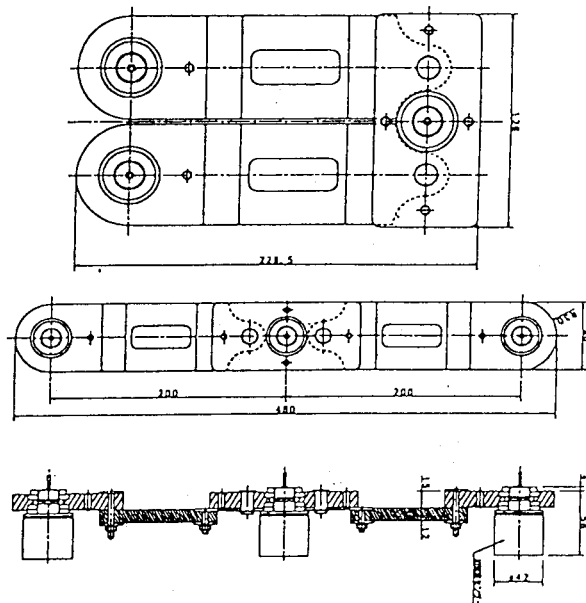


図10 センサ

次に、最終的なベクトル値を確認するため、配管をモデル化し、測定地点に対するデータのシフト値を計算で求めた。そして、求めた値により模擬的に発生させた信号(サイン波、ノイズ波)をシフトさせることにより、各センサ間に模擬的な時間差を発生させ、漏水位置推定ベクトル値を確認した。その結果、測定位置と漏水位置特定ベクトル値の関係はWLI法における理論値に近い形となっている

ことが確認できた。但し、漏水位置から1~2m距離が離れた地点でベクトルの値が大きくなっているのは、距離による信号の減衰を本実験では考慮していないためである。そのため実際には、漏水位置から距離が離れた地点では、漏水の信号が減衰するためベクトルの値は小さくなると考える。

イ フィールド試験による評価

漏水実験を行うために模擬的に作られた模擬漏水配管に漏水位置特定実用試作器を適用して推定した漏水

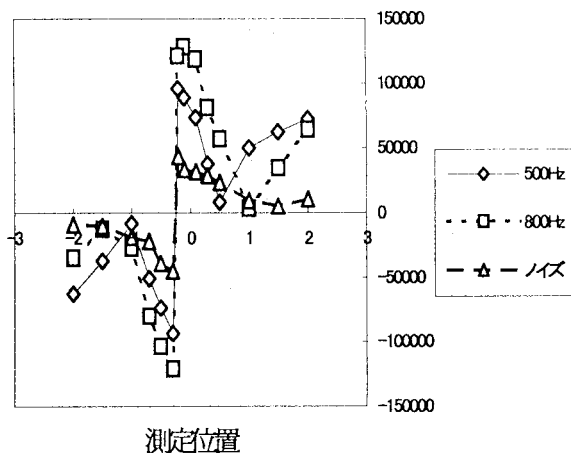


図11 模擬信号によるベクトル値

位置と実際の漏水位置について比較することにより評価を行った。その結果、実施した4個所の模擬漏水配管において漏水位置特定実用試作器の推定結果と実際の漏水位置とがほぼ一致した。但し、配管の立ち上がり部分でベクトルの値が大きくなったりする現象が見られた。

また、漏水調査の結果、漏水が有ると判明した実際の漏水発生現場において推定した漏水位置と漏水調査員が調査した漏水位置について比較した結果、13個所の漏水発生現場中、9個所の現場について一致した。一致しなかった4個所の現場中2個所は配管が宅地内に埋設されていたため、配管の埋設位置から離れて（適用範囲外）計測せざる逐えなかったためである。もう1個所については、漏水位置が2個所推定されたその内、1個所については、ほぼ一致していた。最後の1個所は測定した現場の給水管の距離が短く、配管の立ち上がり部分の影響を受けたためと考える。

4 まとめ

本研究の結果、漏水位置特定実用試作器を製作することができ、動作・性能確認試験、フィールド試験とともに有効性が実証され、良好な結果が得られた。

今後は、より多くのフィールド試験を行い、実用器に向けての改良点を調査する予定である。また、実用化に向けては、小型化、操作性の向上、測定時間の短縮化などだけではなく、多機能型の漏水検出装置として開発する必要がある。

表1 フィールド試験結果

場所	比較結果	備考
模擬漏水配管1	○	
模擬漏水配管2	○	
模擬漏水配管3	○	
模擬漏水配管4	○	
T宅	○	
N宅	○	
S1宅	○	
K1宅	○	
O荘	×	測定範囲外
H宅	○	
M宅	○	
I宅	○	
U宅	○	
K宅	×	立ち上がり部
C宅	×	測定範囲外
S宅	△	第2推定位置
H宅	○	