

無線給電を用いたバッテリーレス 下水道管渠内モニタリングシステム

榊 裕翔*
Hiroto Sakaki
坂本寛明*
Hiroaki Sakamoto
長竹栄二*
Eiji Nagatake

矢田 進†
Susumu Yada
川田卓嗣‡
Takushi Kawada

Battery-less Monitoring System of Sewage Pipe Using Wireless Power Transfer

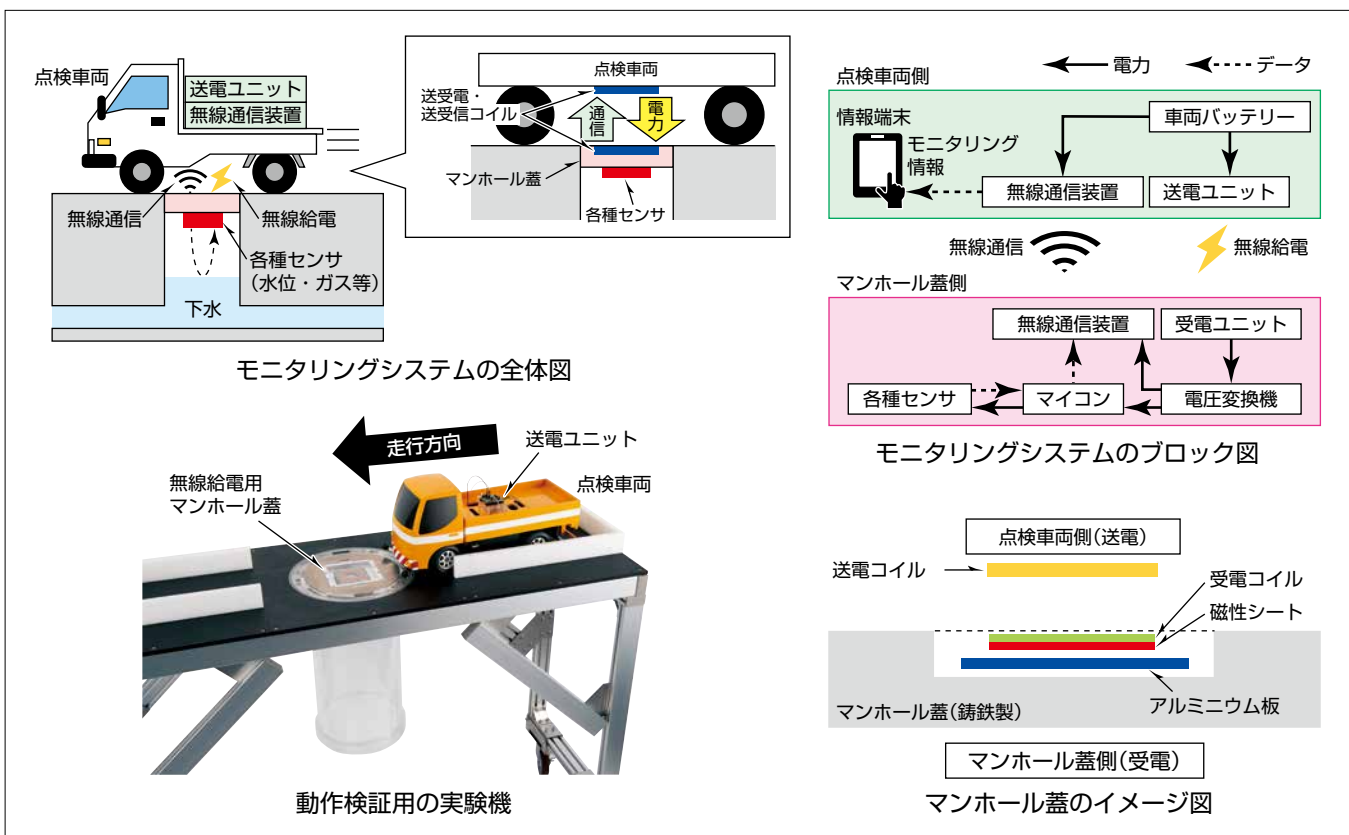
要 旨

現在、使用されている下水道管渠(かんきょ)(以下“管渠”という。)内には、油分を含有した排水が流れており、油分が管渠内で冷却されて管渠が閉塞する。これによって管渠内での異臭やコンクリート壁の腐食が発生するので、閉塞箇所を把握・除去する必要がある。閉塞箇所を把握するためには、重量物であるマンホール蓋を複数回開け閉めしなければならず、これらの作業が大きな負荷になっている。

三菱電機では、マンホール蓋を開け閉めせずに管渠内の状態をモニタリングするシステムを開発した。管渠内の状態をセンサでモニタリングして、その結果を無線通信で点検車両へ送信する。さらに、センサの駆動電力を外部から無線給電で供給することでマンホール蓋側のバッテリー

レス化を実現したこともこのシステムの特長である。マンホール蓋に無線給電のコイルを設置する場合、強磁性体材料であるマンホール蓋の影響で効率良く無線給電することが難しい。そこで、受電コイルとマンホール蓋の間に、磁性シートと非磁性体であるアルミニウム板を設置した。これによって伝送効率が27.5%から74.2%へと向上した。伝送効率の向上によってセンサを駆動させるために必要な電力を短時間で供給できるので、点検車両を走行させながらのモニタリングが期待できる。

システム全体の動作検証用の実験機を作製し、無線給電とセンサ情報のための無線通信の動作を実験で確認した。



マンホール蓋の開け閉めが不要な下水道管渠内モニタリングシステム

マンホール蓋側に取り付けられたセンサの駆動電力を点検車両側からの無線給電によって供給することで、センサのバッテリーを不要とする下水道管渠内モニタリングシステムを開発した。これによって、マンホール蓋の開け閉めが不要になり、下水道管渠の維持や管理作業の効率化が期待できる。受電コイルとマンホール蓋の間に磁性シートとアルミニウム板を設けることで強磁性体であるマンホール蓋の影響を低減し、高効率な無線給電を実現した。また、システムの動作検証用の実験機を作成し、システムの有効性を確認した。

1. ま え が き

少子高齢化に起因した労働人口の減少は、日本での産業課題であり公共事業も例外ではない。国土交通省水管理・国土保全局下水道部によると、下水道事業に携わっていた職員数は1997年の時点で約47,000名であったが、2018年には約27,400名まで減少している⁽¹⁾。下水道事業は社会インフラであり、人手不足の状況下でも安定的に事業を継続する必要があるため、下水道関連業務の効率化・省人化は今後強く求められる。

現在、使用されている管渠内には、家庭や事業所から油分を含有した生活・産業排水が下水道へと排出される。管渠内で油分が冷却され、管渠の壁に固体の油分が癒着するので管渠が閉塞してしまう。これによって、管渠内の異臭発生やコンクリート壁が腐食することが知られている⁽²⁾。

管渠は地中に敷設されているため、管渠と地上を結ぶ縦孔(マンホール)を介して、目視を使って管渠内の水位などをセンシングすることで閉塞箇所を把握する。しかし、点検作業をするために質量が数十kgのマンホール蓋を開け閉めしなければならず、複数名の職員が点検作業には従事する⁽³⁾。このように、管渠の維持管理では、管渠の閉塞や異臭の発生などの課題に対処するための作業が大きな負荷になっている。先に述べたような労働人口の減少に対応するためにこれらの作業の効率化・省人化が要求されている。

本稿では、マンホール蓋を開けることなく管渠内の状態をモニタリングするシステムを提案する。具体的には、管渠内の状態をセンサでモニタリングし、その結果を無線通信によって点検車両へ送信するものである。さらに、センサの駆動電力を外部から無線給電することでマンホール蓋側のバッテリーレス化を実現したこともこのシステムの特長である。2章ではこのシステムについて、3章ではこのシステムの実験結果について述べる。

2. 下水道管渠内モニタリングシステム

2.1 システムの全体について

下水道管渠内モニタリングシステムは、管渠内の状態をモニタリングするために各種センサ(水位を測定する場合は水位センサ、硫化水素の濃度を測定する場合はガスセン

表1. 駆動電力の確保手段と各手段の長所・短所

| | バッテリー | 太陽電池 | 無線給電(今回方式) |
|----|--|---|---|
| 長所 | ・現地での電力供給が不要 ・荒天時でもデータ取得可能 | ・三つの手段の中で最も安価 ・現地での電力供給が不要 | ・バッテリーが不要なため省コスト ・管渠閉塞時以外にマンホール蓋の開栓が不要 |
| 短所 | ・バッテリー交換のためマンホール蓋の定期的な開栓が必要 ・バッテリーが高価 | ・太陽光が当たりにくいビル群周辺への設置は不向き ・荒天時や夜間の動作が困難 | ・現地での電力供給が必要 ・荒天時のデータ取得は困難 |

サなど)をマンホール蓋の裏に取り付ける。

表1に駆動電力の確保手段と各手段の長所と短所を示す。設置箇所の制約を避ける目的で有線での電力供給を必要としない手法が求められていることから、バッテリー、太陽電池、無線給電の三つを候補とした。どの手段でも長所及び短所がある。管渠閉塞時以外にマンホール蓋を開け閉めする必要がないこと、設置箇所の制約が少ないこと、そして、コストの観点からこのシステムでは無線給電を使ってセンサの駆動電力を確保することにした。

図1に下水道管渠内モニタリングシステムの全体図を示し、図2にブロック図を示す。送電ユニット内で、点検車両のバッテリー(直流電力)から無線給電用の電力を生成する。その後、送電ユニット内のコイルと受電ユニット内の

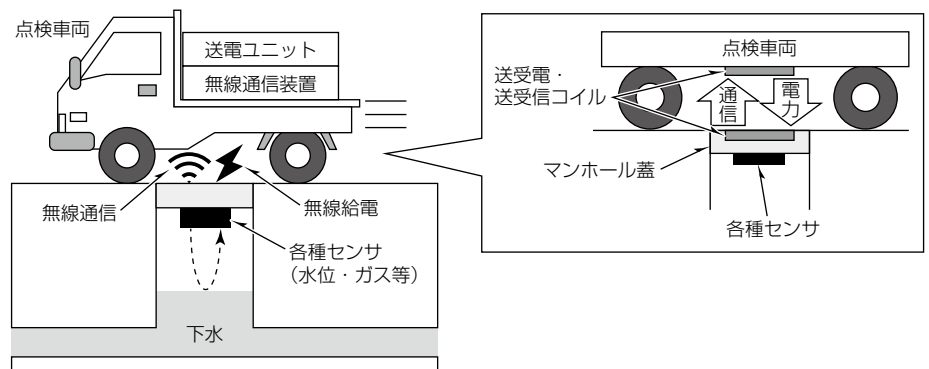


図1. 下水道管渠内モニタリングシステムの全体図

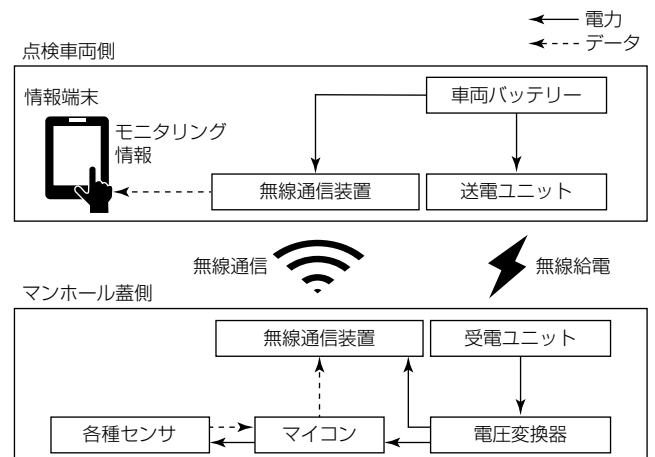


図2. 下水道管渠内モニタリングシステムのブロック図

コイルを介して、点検車両からマンホール蓋側へと電力を送電する。受電ユニット内ではコイルで受電した交流電力を整流回路に入力することでマイコンや無線通信装置などを動かすために必要な直流電力を得る。

整流回路が出力する直流電圧は、マイコン及び無線通信装置が駆動するために必要な電圧と一致しないので、電圧変換器(DC-DCコンバータ)によって、個々の部品に適した電圧へと電圧変換を行う。電圧変換器が出力した直流電圧によって、マンホール蓋内のマイコンと無線通信装置がそれぞれ起動する。マイコンは各種センサに対する電力供給だけでなく、センサに管渠内の状態をセンシングするように命令を出す。センサはセンシングした結果をマイコンへと出力し、マイコンはその結果をマンホール蓋側の無線通信装置へと出力する。マンホール蓋側の無線通信装置から点検車両側の無線通信装置へ無線通信でセンサ情報が送信される。その後は、点検車両側の情報端末にセンサ情報が表示される。

2.2 無線給電用マンホール蓋

下水道管渠内モニタリングシステムでは磁界共振型無線給電を採用しており、点検車両側の送電コイルで発生する磁束がマンホール蓋側の受電コイルを貫通し、貫通した磁束を基に電力を得る。得られる電力は、受電コイルを貫通する磁束密度に比例する。しかし、送電・受電コイル付近に鋳鉄のような高透磁率の金属が存在すると、レンツの法則に従って受電コイルを貫通する磁束を打ち消すような渦電流が金属表面上で発生する。受電コイルを貫通する磁束密度が小さくなるので、現在、街中に敷設されているマンホール蓋に受電コイルを付けても十分な電力を得ることができない。

そこで、金属製マンホール蓋の構造を工夫することで、マイコンやセンサを駆動させるために必要な電力を得られるようにした。図3に無線給電が可能なマンホール蓋の構造の断面図を示す。マンホール蓋に切り込みを入れてマンホール蓋内に形成された空間に受電用のコイルを配置し、受電側のコイルとマンホール蓋の間に磁性シートとアルミニウム板を設けている。この構造によってアルミニウム板

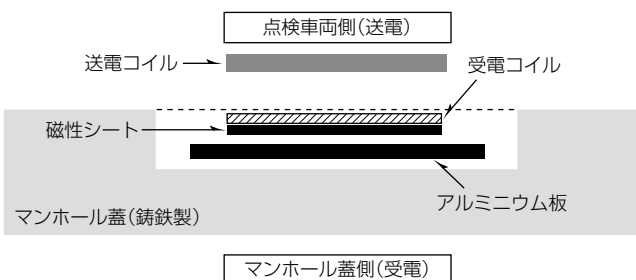


図3. 無線給電可能なマンホール蓋のイメージ図

表2. 送電・受電コイル間の伝送効率の計算結果

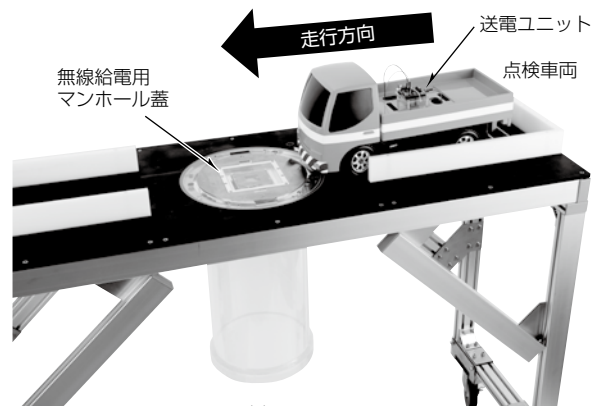
| | 磁性シート/アルミニウム板 なし | 磁性シート/アルミニウム板 あり |
|------|---------------------|---------------------|
| 伝送効率 | 27.5% | 74.2% |

を貫通してマンホール蓋へ届く磁束が弱くなり、マンホール蓋の表面で発生する渦電流が小さくなる。結果として、送電コイルから受電コイルへと伝わる磁界を打ち消す逆方向の磁界は弱くなるので、高効率な無線給電を実現できる。

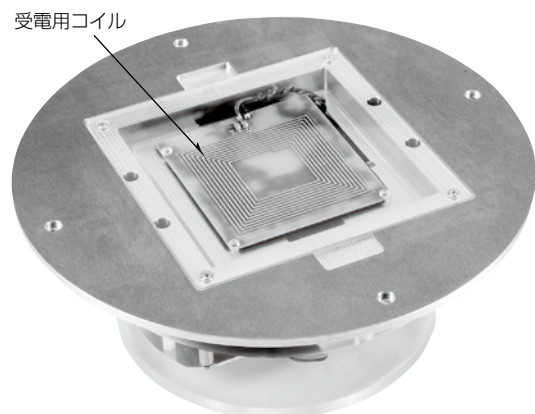
表2に送電・受電コイル間の伝送効率のシミュレーション結果を示す。磁性シートとアルミニウム板を設けることで、送電・受電コイル間の効率が27.5%から74.2%へと46.7pt向上した。この結果から、受電コイル間とマンホール蓋の間に磁性シートとアルミニウム板を挿入することの効果を確認された。

3. 実験結果

本稿で提案した下水道管渠内モニタリングシステムのうち、下水の水位を測定する動作検証用の実験機を作製した。このシステムの有効性を確認するための実験機を図4に示す。サイズは約1/5のスケールである。無線給電と無



(a) 実験機



(b) 無線給電用マンホール蓋

図4. このシステムの有効性を確認するための実験機

線通信の動作確認を目的とするため、実験機の点検車両（トラックの模型）では、図2で示すようにバッテリーではなく、直流電圧源から送電ユニットに直流電力を供給した。点検車両からマンホール蓋（1/5スケールモデル）へ無線給電する。整流した直流電力を用いてマンホール蓋に設置した無線通信装置によって超音波センサ（水位センサ）の測定結果を送信し、点検車両の無線通信装置で受信する。

超音波センサは、センサから出力される超音波が対象物に当たって、反射した超音波がセンサに戻ってくるまでの時間を計測することでセンサと対象物の距離を測定するものである。センサが超音波を出力して超音波を受信するまでの時間をT、音速をc(m/s)とすると、センサと対象物の距離dは次式で計算される。

$$d = c \cdot \frac{T}{2} \dots\dots\dots (1)$$

なお、音速cは次式で計算される。

$$c = 331.45 + 0.61t \dots\dots\dots (2)$$

式(2)内のtはセンサ周囲の温度である。マイコンは、超音波センサが超音波を送信して受信するまでの時間Tと式(1)を使って水位を計算する。なお、この実験機には温度センサは取り付けられていないため、温度計で測定した実験室の室温(26.5℃)データをあらかじめマイコンに書き込んだ。また、今回は水位を40cmに設定して実験を行った。

図5に実験結果の一部を示す。図5は点検車両側の無線通信装置が受信したセンサ情報を示している。図5の左側は受信時刻を示しており、右側は点検車両の無線通信装置で受信したデータを示している。図5の結果を参照して設定した水位とセンサ情報を比較すると、今回の実験機での誤差は約1cmであった。超音波センサが超音波を出力し

| | | |
|--------------|----|--------------|
| 10:54:54.444 | -> | 水位は38.79cmです |
| 10:54:54.945 | -> | 水位は38.86cmです |
| 10:54:55.446 | -> | 水位は38.83cmです |

図5. 実験結果の一部

て超音波を受信するまでの時間Tの測定精度などによって誤差が生じたと考えている。ただし、このシステムの目的に照らし合わせると、1cm程の誤差はシステムを運用していく上で大きな問題とはならない。これらの結果から、無線給電を使って供給した電力によって、マンホール蓋側に搭載しているマイコンやセンサや無線通信装置が正常に動作していると判断し、このシステムの有効性を確認した。

4. む す び

マンホール蓋側に取り付けたセンサの駆動電力を点検車両側から無線給電することで、センサのバッテリーを不要にする下水道管渠内モニタリングシステムを開発した。これによって、マンホール蓋を開け閉めせずに管渠内の状態をモニタリングすることが可能になるので、下水道管渠の維持や管理作業の効率化が期待できる。

マンホール蓋に無線給電のコイルを設置する場合には、強磁性体材料であるマンホール蓋の影響で効率良く無線給電することは難しいことが課題であった。そこで、受電コイルとマンホール蓋の間に磁性シートと磁性体ではない材料であるアルミニウム板を設置し、伝送効率を高める構造を開発した。開発した構造によって伝送効率が27.5%から74.2%へと向上することをシミュレーションで確認した。伝送効率の向上によってセンサを駆動させるために必要な電力を短時間で供給できるので、点検車両を走行させながらのモニタリングが期待できる。さらに、このシステムの実験機を作成し、水位状態の把握を例として、このシステムの有効性を確認した。実験によって、無線給電とセンサ情報のための無線通信の動作を確認した。

参 考 文 献

- (1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：「人口減少下における維持管理時代の下水道経営のありかた検討会」報告書—持続可能な下水道事業経営の実現に向けて— (2020)
<https://www1.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001372485.pdf>
- (2) 竹内準一、ほか：硫酸還元菌の計数法および硫酸還元活性の測定法、水質汚濁研究, 11, No.1, 33~49 (1988)
- (3) 川崎市上下水道局：マンホールの点検・補修・取替 (2017)
<https://www.city.kawasaki.jp/800/page/0000083572.html>