

下水道管路内水位のモニタリング技術の開発

Development of Internal Water Level Monitoring Technologies for Sewerage Pipelines

南雲裕樹* 山口 治*

要 旨

下水道管路の維持管理は、管路内水位をリアルタイムにモニタリングすることが有効であるが導入実績は少ない。これまでにモニタリング技術の普及に向けて、実際に運用中の管路で水位モニタリングを試行してきた結果、測定機器と通信の電力消費量の削減、設置・撤去の時間短縮などの課題が挙げられた。そこで、今回モニタリングの要素技術であるセンサ、通信、設置撤去方法の検討を行い、改善の可能性を得た。

キーワード：下水道管路、維持管理、水位モニタリング、効率化、包括的民間委託

1. まえがき

我が国の下水道は、今日において人々の生活を支える重要なインフラとなっている。高度経済成長期以降、全国で急激に下水道整備が行われ、現在では管路の整備延長が約49万kmとなり、下水道利用人口を総人口で除した下水道処理人口普及率は約91%となっている。そのうち、布設後50年を経過した管路は、令和2年度末で約2.5万km、全体の5.1%を占めており、10年後に8.2万km、20年後に19万kmと増加する(図-1)。老朽管は下水道本来の役割・機能を果たせないうえ、道路陥没の発生など、他のインフラに影響を及ぼす可能性がある。

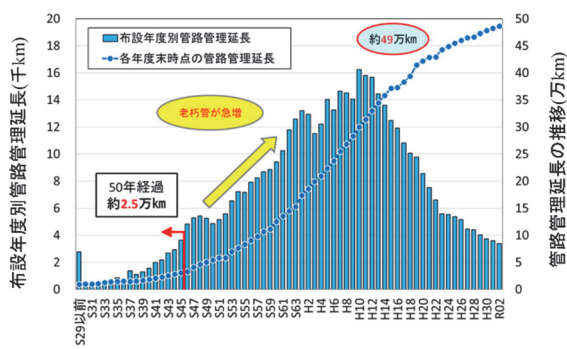


図-1 下水道管路の年度別布設延長¹⁾

一方、下水道を管理する多くの自治体では、人口減少に伴う下水道使用料の減少による維持管理予算の縮小と、労働人口の減少による維持管理技術者の不足が問題となっている。そのためこれらの有効な解決策の一つとして、官民連携事業が様々な分野で進められている。その

うち、下水道管路の維持管理では、これまでも包括的民間委託の導入件数が増加しているが、近年の下水道PPP/PFI 検討会への参画団体数の増加などから、今後も増加すると予想されている²⁾。

包括的民間委託の導入効果として、民間企業による一元的管理やノウハウ・新技術などの導入により、効率的な維持管理が実現し、従来の事後保全維持管理から予防保全維持管理への転換が期待できる。

しかし、包括的民間委託の実施のためには、対象インフラの資産価値評価(デューデリジェンス)が必要となるが、地中に埋設されている管路の点検に多くの時間と費用がかかるため、十分に行われていない。また、近年は気候変動の影響により局所的な集中豪雨の発生回数が増加³⁾している(図-2)。これにより、計画最大流量を超える雨水が下水道管路に短時間で流入することで生じる内水氾濫が増加している。そのため、維持管理や防災の観点から、管路内の水位などの情報をモニタリングできる体制や技術が求められている。

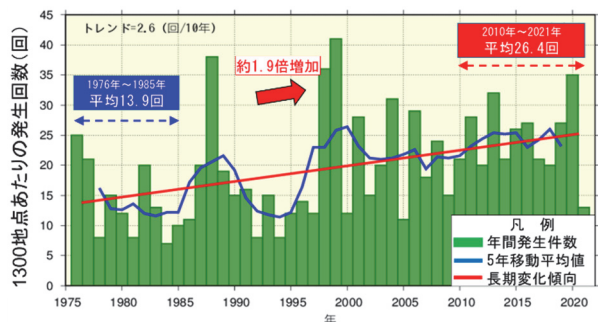


図-2 1時間の降水量80mm以上の年間発生回数³⁾

* 東日本支社リニューアル技術部

2. 下水道管路の水位情報把握の現状

国土交通省は、雨水出水に起因する大規模な内水氾濫を防止するため、2015 年に水防法を改正し、「雨水出水に係る水位情報の通知および周知について」を定めた。この中で、下水道水位に関して、警戒水位に達した旨を速報性のある伝達手段により情報発信 4) することが記載されており、リアルタイムで水位を把握する重要性が増している。

一方、筆者らが実際に下水道管路の維持管理を行う各自治体に対して、内水氾濫の防止と発生時の対応に関するヒアリングを行ったところ、下記の課題が挙げられた。

- i. 内水氾濫の予測精度の向上、効果的な対策の立案
- ii. 下水道管路の流下能力の健全性評価
- iii. 不明水の有無および浸入位置の特定

上記項目の実施には、下水道管路内の水位モニタリングが有用であり、これまでも一部の区間や時期を限定して実施されているとの回答を得た。しかし、従来の測定方法は、水位センサを管路底部に取り付けて、1 ヶ月から半年程度の測定を行ったうえで、機器を回収して事務所で解析を行う手法であった。このためリアルタイムの状況把握ができず、迅速な内水氾濫の状況分析や対応の立案には適していなかった。

3. 既往技術の調査、選定、検証

3.1 既往技術の調査

現在では、下水道管路内の水位モニタリングをリアルタイムで行うことができる技術が複数存在し、実際に運用されている。そこで既往技術のうち有力な 2 つの技術について検討した (表-1)。

「SkyManhole®」⁵⁾は、LPWA (Low Power Wide Area) 通信を用い、中継器・ゲートウェイを介して管路内情報を常時監視するシステムである。常時計測と長期計測が可能なオンラインによるリアルタイム観測と、巡回時などに管路内情報を収集するオフライン観測が可能である。

「マンホールアンテナ」⁶⁾は、スマートフォンなどに用いられる LTE 通信を用いて、中継器などを用いずに管路内情報をリアルタイムに観測する機能を有している。

3.2 既往技術の選定

既往技術の効果の検証および問題点の抽出を目的として、現在供用中の下水道管路で試行した。選定した技術は、地上での機器取付の制約を考慮し、通信中継器の設置が不要な「マンホールアンテナ」(以下、「選定技術」)とした。

選定技術で使用する LTE 通信は、スマートフォンなどに用いられているためにインフラが整備されており、場所を選ばずに使用できる。また、マンホール内部から蓋を開けずに常時クラウドサーバにデータを転送できる。計測・通信の電源は、マンホール蓋の裏に取り付けたバッテリーを使用し、測定頻度に応じて 2 ヶ月から 4 年程度までの計測が可能である。このため、設置した現地に行かずに PC・携帯端末から場所と時間を問わず管路内部のリアルタイム情報や過去の情報を確認できる。運用に際しては、下水道管路の管理対象エリアに数多く配置することで、面的な管理が実現できる。

3.3 選定技術の検証

選定技術を実際に供用している下水道管路に設置して試行した。対象地区に、首都圏の中核市を選定し、主要駅周辺エリア内で過去に内水氾濫が発生した雨水管路の 4 点に設置した (図-3)。



図-3 マンホールアンテナ設置箇所

測定地点は、雨水管路の合流点となるマンホールとし、内部にアンテナとセンサを取り付けて、水位の時間変化と水位から計算した流下能力の確認を行った。水位計測と計測データ通信は、実施間隔が短いと消費電力が増大するため、当検証では水位計測データを 1 分間隔で取得し、10 分間 (10 回分) をまとめて 1 回でクラウドに発信する仕様とした。計測期間は 2021 年 7 月から 2022 年 1 月までのおよそ 200 日である。

表-1 リアルタイム水位モニタリング技術の検討

比較項目 検討技術	技術仕様	設置機器	通信方法	検証箇所 適合性
(株)NJS SkyManhole®	・管路内リアルタイムモニタリング ・オフライン観測 ・浸水シミュレーション機能(AI)	①専用マンホール蓋と通信機器 ②計測センサー ③中継器とゲートウェイ	LPWA通信機器+中継器 +ゲートウェイ	△
(株)明電舎 マンホールアンテナ	・管路内リアルタイムモニタリング ・水位予測機能	①専用マンホール蓋と通信機器 ②計測センサー	LTE通信 (中継器不要)	○

検証の結果、計測期間中に局所的な集中豪雨で内水氾濫が発生したが、いずれも水位変化がリアルタイムに確認できた。また、図-4および表-2に示すとおり、局所的な集中豪雨発生時には、一時的ではあるが、管路流下能力の100%を超える水位が観測されるなど、管路内部の状況も知ることができた。これらの情報をもとに、流下能力の不足する区間や路線に対して、モニタリング結果が管路整備の計画に活用できることが分かった。

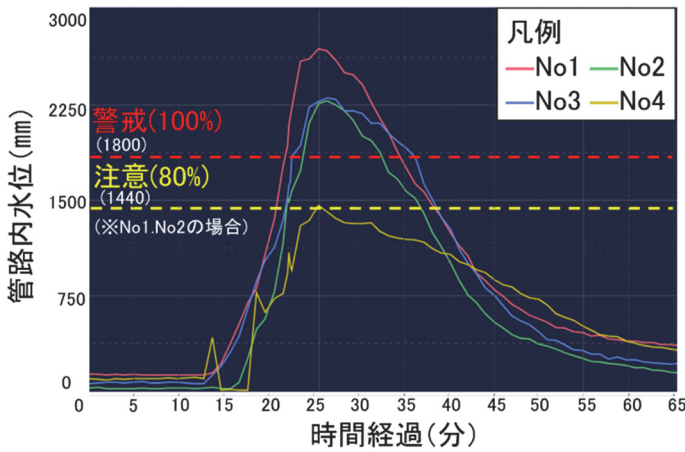


図-4 管路内水位の観測結果

表-2 管路の内寸と最大水位・流下能力の関係

	管路内寸(函幅×高さ mm)	最大水位(mm)	流下能力超過率
No1	□1800×1800	2690	149%
No2	□1800×1800	2250	125%
No3	□2700×2160	2270	105%
No4	□2700×2160	1450	67%

3.4 選定技術の問題点

以上の選定技術の検証により、水位リアルタイムモニタリングの有用性を確認できた。一方で、運用に際して、以下の問題点が明らかとなった。

- i. 内水氾濫の把握に必要な計測および通信周期の場合、水位計および通信機器の電力消費が大きく、電源交換の期間が短くなる
- ii. 水位計の設置撤去に時間が掛かり、道路占用時間が長くなる

4. 補完技術の開発

4.1 新たな水位モニタリングシステムの構築

選定技術を含めた既往技術は、これまで機器が高価なため広範囲に多数の機器を設置できなかった。そのため、実施例では雨水管合流部や内水氾濫の予測地域に数カ所設置するなど、場所と数量を限定し計測を行っていた。そこで、前述の選定技術の問題点の解決および未設置箇所を補完する廉価な開発技術の双方を活用した新たな水位モニタリングシステムの構築を目指すこととした。

4.2 要素技術の検討

前述の問題点 i、ii の解決策として、選定技術を構成する3つの要素技術である、a. センサ技術、b. 通信技術、c. 水位計センサの固定治具に着目し、省電力化と低コスト化の検討を行った。

a. センサ技術

水位センサの電力消費低減と低コスト化を同時に実現する技術として、ヘテロコア光ファイバ⁷⁾を用いた水位計(以下、「光ファイバ水位計」)の適用検討を行った。

ヘテロコア光ファイバのセンサは、コア径の異なる部分を意図的に設けて、伝搬光が漏れいする度合を感知することで変状を計測する。このセンサを用いた光ファイバ水位計は、センサ内にヘテロコア部分を設置し、水圧が作用して変形する際の変動(曲率)を感知し水位を計測する機構である(図-5)。一般的な水位測定で用いる通電式の棒状水位計との比較を表-3に示す。

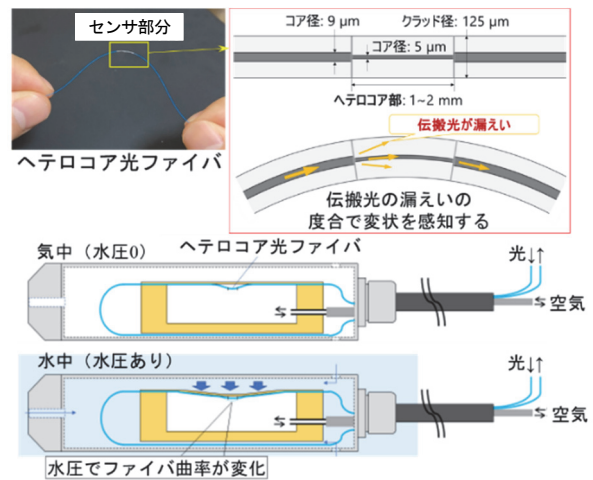


図-5 ヘテロコア光ファイバ水位計概念図⁷⁾

表-3 棒状水位計と光ファイバ水位計の性能比較

比較項目	機器名称	棒状水位計	光ファイバ水位計
消費電力	【大】	4W	【小】 0.5W
	比較	○	◎ (従来比:1/8)
形状自由度	【低】	ペン型	【高】 フリー
	比較	△	○
耐久性	耐雷性	【無】 雷等で破壊	【高】 影響なし
	比較	×	○
耐腐食性	【低】	金属線	【有】 ガラス線
	比較	△	○
生産体制		汎用品	受注生産
費用	比較	1.0(標準)	1.3

消費電力は、棒状水位計が4Wのところ、光ファイバ水位計は0.5Wであり、消費電力が1/8に抑えられることで、長期使用が可能となる。

形状は、棒状水位計は一般的にペン型であるが、光ファイバ水位計は自由度が高く、低水位でも正確に測定できるなど、対象に適した変更が可能である。

耐久性については、通電式の棒状水位計に対して、光ファイバはセンサ部分での通電を必要としないガラス製であり、耐雷性が高く、硫化水素などの化学的浸食を受けないことから、長期耐久性を有する。

センサの調達費用は、汎用製品で価格が安定している棒状水位計に対して、光ファイバ水位計は、現段階で少量生産のために 1.3 倍となった。しかし、今後は需要の増加に伴い、安定的な生産・供給体制を確立することで、低コスト化が見込める。

b. 通信技術

選定技術で使用している LTE 通信は、通信の範囲と速度が速い反面、長期間使用による費用が高く、消費電力が大きい。そこで、通信装置の電力消費量低減と低コスト化を目的として、LPWA の一種である LoRa 通信 (LoRa : Long Range) の適用を検討した。LTE 通信と LoRa 通信の比較を表-4 に、LoRa 通信を用いた下水道内部からのデータ取得イメージを図-6 に示す。

表-4 通信規格の比較

通信名称 比較項目	LTE通信	LoRa通信
通信範囲 比較	【広】 ほぼ制約なし ○	【狭】 半径100m程度 △
通信速度 比較	【速】 max150Mbps ○	【遅】 max250kbps △ (LTE比:1/600)
消費電力 比較	【大】 1.5mWh/回 △	【小】 0.03mWh/回 ◎ (LTE比:1/50)
通信費 比較	【有】 月額使用料 △	【無】 初期費用のみ ○

LoRa 通信は、消費電力が小さく安価に利用できる反面、通信可能な範囲が LTE 通信に比べて狭いうえ、鉄製のマンホール蓋を介したデータ通信ができない可能性がある。そのため、実際のマンホール内部に装置を設置して通信とデータ転送の試験を行った。

試験では、運用時の効率を考慮してデータ収集を点検車で行うことを想定し、自動車の一般運行速度での取得が可能か検証した (図-7)。

試験手順としては、マンホール内に水位計と送信機を取り付けてマンホール蓋を閉じた状態で、受信機を搭載した点検車が近傍および直上を通過した時のデータ取得の可否を調査した。送信機は、受信機を感知する信号を 20 秒間隔で発信し、受信機が存在を感知した時に水位情報を発信する設定とした。試験の結果、マンホール位置から約 100m の位置で水位情報が取得できた。

上記の結果から、受信機を搭載した点検車が 50km/h で走行した場合、送信機の待機状態間隔を 14.4 秒以下に設定することで、走行中に水位情報を取得できることを確認した (図-8)。これにより、道路占有やマンホール蓋の開閉をせずに迅速なデータ取得が可能な方法を構築できた。しかし、実際には周囲の建物や通信環境の相違、

渋滞時の車両による影響などを受けることから、様々な環境における通信距離や送受信間隔の検証が必要である。

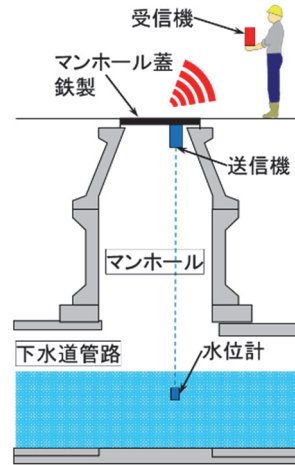


図-6 データ取得イメージ 図-7 データ取得試験状況

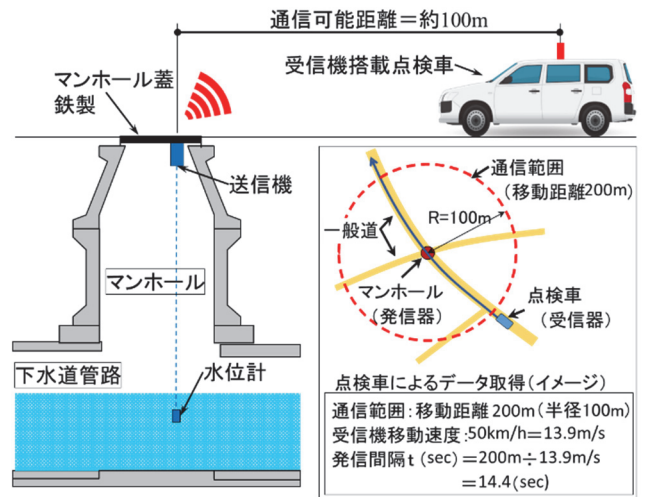


図-8 点検車によるデータ取得試験結果

c. 水位計センサの固定治具

これまでは、水位計センサを取り付ける際にマンホールの壁面にハンマードリルで削孔し、アンカーボルトで固定する方法 (以下、「従来手法」) であったため、設置に 1 時間程度を要していた。しかし、設置撤去を行うには道路占有が必要となるため、地上交通への影響を考慮し、迅速な取り付け・取り外しが求められる。

また、一般的には、棒状の水位計を高さ方向 (上下) に配置して水位を測定するが、管の内部の常時水位はごく浅く、棒状水位計では低水位の計測が困難であった。そこで、形状変更可能な光ファイバ水位計を使用し、取り付け・取り外しが迅速で容易な固定治具の検討を行った。検討にあたり、以下の点を考慮した。

- i. 固定治具設置のアンカーレス化
- ii. 固定治具と水位計の一体化
- iii. 流下阻害の回避

検討の結果、マンホールから流下する管路（下流側）の接合部にはめ込むことができる形状を採用し、管底部に光ファイバ水位計を取り付け、流下能力を確保する形状（以下、「はめ込み式治具」）を考案した（図-9）。



図-9 水位計センサの固定治具

はめ込み式治具は、腐食耐性を有する厚さ 0.3mm のステンレスシートを主材料とした。光ファイバ水位計の形状を薄板型とし、管底部から 10cm 程度偏芯させた位置に設置することで、流下物の堆積を回避した。ケーブルはステンレスシートに沿わせてコーキングをした。

はめ込み式治具の固定方法は、ステンレスシートを管径調整治具で周方向に拡張させて固定し、L 字金物を下流側管口に掛けて流下を防止した。アンカーで固定する従来手法と、はめ込み式治具の比較を表-5に示す。

表-5 水位センサ固定方法の比較

選定技術 比較項目	従来手法 (アンカー固定)	はめ込み式治具
設置時間	【長】1h/箇所	【短】0.25h/箇所
比較	△	○ (従来比:1/4)
作業性	【普通】工具必要	【容易】工具不要
比較	△	○
撤去後補修	【要】アンカー穴埋め	【不要】
比較	△	○
汎用性	【高】対象径依存無	【中】対象径に適した規格化
比較	○	△

試作した固定治具を実際の管路に取り付けたところ、1基あたり15分程度の設置時間となり、従来手法と比べて1/4の作業時間であった。また、アンカーによる固定が不要となるため、作業性が容易で、撤去後の補修が不

要となった。加えて、薄板形状にした光ファイバ水位計が管底部にあるため、低水位においても正確な測定が可能となった。今後は、センサ部分の保護形状、管路の径や形状に応じた規格化など、更なる改良が必要である。

4.3 補完技術の考察

これまで、新たな水位モニタリングシステムの構築に向けて、補完技術の開発に取り組んできた。現状の費用は、選定技術と比較し、光ファイバ水位計単体では高価となるが、LoRa 通信の使用による通信費の削減、はめ込み式治具の使用による作業時間の短縮（人件費の削減効果）が見込め、総合的に低コスト化が見込める結果となった。

消費電力は、光ファイバ水位計と LoRa 通信の技術を組み合わせることで、選定技術と比較し、大幅に低減された水位モニタリング技術の確立が見込める。消費電力が抑えられたことで、長期使用の実現や、通信回数の増加が可能となる。一方で、供給電力の小型化や、太陽光などの自然環境を利用した環境発電など代替電力の活用も考えられる。

新たな水位モニタリングシステムは、以下のように運用される。既往技術は、確実な通信によるリアルタイム計測が可能な点を活かし、面的な傾向をリアルタイムに把握するメイン機器として主要な箇所配置する。これにより、局所的豪雨時および豪雨直後の迅速な対応が可能となる。補完技術は、安価で数多く設置できる点を活かし、平面的な欠損部分を補完するバックアップ機器として、メイン機器の間に配置する。データは必要に応じて現地でマンホール蓋を開けずに取得する仕組みとし、記録の解析を行うことで、局所的豪雨の実態把握、対策の立案、整備計画の作成などを行うための資料とする。このように、新たなモニタリングシステムでは、メイン機器とバックアップ機器の双方の情報を活用することで、維持管理品質の向上と業務の効率化、コストの抑制を実現できると考える（図-10）。

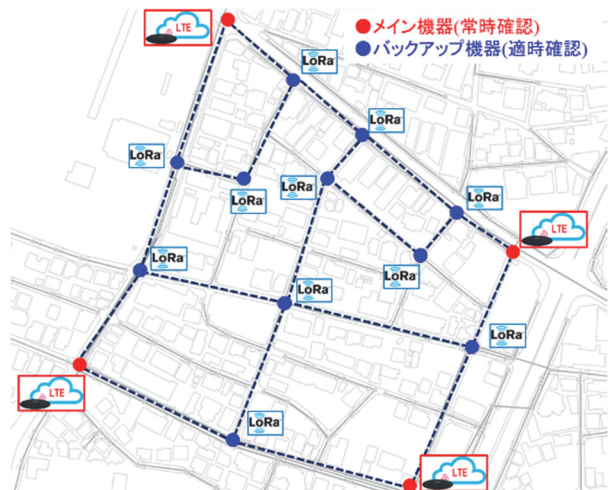


図-10 既往技術と補完技術の運用イメージ

5. 環境発電の活用に向けて

5.1 電力供給方法の検討

前章では、複数の要素技術を組み合わせることで、消費電力の低減が実現し、環境発電の適用可能性に触れた。環境発電の方法としては、主に太陽光発電、振動発電、水力発電、熱電発電が挙げられる。下水管路の水位モニタリングにおいて、環境発電で得られる電力を活用できれば、電池交換不要で長期間の使用が実現し、メンテナンスの省力化が可能となる。今回は、環境発電のうち、適用可能な技術として、熱電発電について検討した。

5.2 熱電発電技術の概要

熱電発電は、物体の温度差によって電位差が生じるゼーベック効果を用いて発電する方法である。ゼーベック効果活用例は、近年の半導体技術の進歩と自然エネルギーへの転換機運などにより増加傾向にある。

ここでは、供用中の下水道管路やマンホール内部での熱電発電の適用を考える。熱源は、季節により温度変動がある蓋を含むマンホール本体上部付近と、年間を通して安定した温度が想定されるマンホール内部⁸⁾とする(図-11)。

夏季は、外気温の上昇やマンホール蓋の直射による熱により、マンホール内部との温度差が生じる。冬季は、外気温の低下や降雪・凍結などにより、マンホール内部が暖かい状態となって温度差が生じる。この温度差がある状況において、ゼーベック効果により、高温側で電子が生成され、低温側に移動することで電流が発生する。

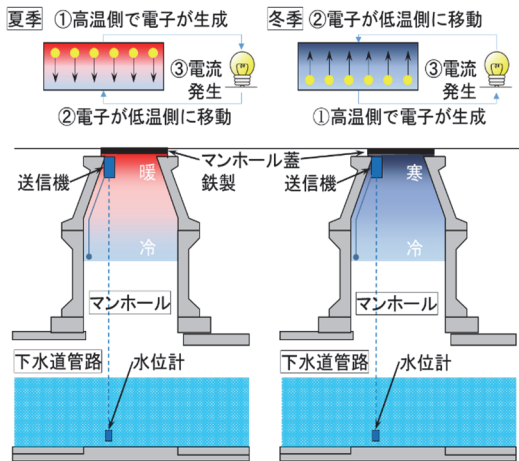


図-11 マンホール内部での熱電発電概念図

5.3 消費電力と発電電力の検討

要素技術で検証した光ファイバ水位計と LoRa 通信を掛け合わせた補完技術において、水位モニタリングに必要な電力を推算した。推算条件として、通信待機状態間隔は、通信技術で検討した 14.4 秒以下を満足する 10 秒間隔、計測および通信間隔は、実運用の範囲を想定し 10 分間隔とした。その結果、1 時間稼働に消費する電力は、通信待機状態で 1.8mWh、計測で 0.8mWh、通信で

0.18mWh となり、合計で 3mWh 程度が必要となることが分かった。

熱電発電の機構としてペルチェセルを使用し、3mWh の電力を発電する条件について検討した。ペルチェセルとは、サーモジュールと呼ばれる熱電素子で、半導体を 2 枚のセラミック基板で挟み、両面の温度差によって、電流を発生させることができる小型薄板状の電子デバイスである。大きさ 3cm 角の標準的なペルチェセルの特性⁹⁾より、ペルチェセルの両面に約 6°C の温度差が 1 時間継続することで、3mWh を発電する試算結果となる。

熱電発電を活用した水位モニタリングは、寒暖期であれば稼働に必要な電力を確保できることが想定され、課題として中間期の稼働方法など、検討する項目は複数あるが、運用可能と考える。

6. あとがき

下水道管内の水位モニタリングの既往技術調査および検証を行った結果、維持管理や防災の観点では有効な技術であった反面、配置できる場所に制約があることが明らかになった。解決策として、既往技術の間に配置する補完技術と合わせて活用する新たなモニタリングシステムの可能性を示すことができた。

今後は、補完技術に採用する要素技術の実フィールドでの検証と、熱電発電を用いた電力供給に関する実現可能性の検証を通じて、モニタリングシステムの確立に向けて開発を進めたい。

【参考文献】

- 1) 国土交通省、「下水道の維持管理」、https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000135.html
- 2) 国土交通省、「下水道における新たな PPP/PFI 事業の促進に向けた検討会」、https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo_sewage_tk_000382.html
- 3) 気象庁、「大雨や猛暑日など(極端減少)のこれまでの変化」、https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 4) 国土交通省、「水防法などの一部を改正する法律の一部施行などについて」、https://www.mlit.go.jp/river/suibou/pdf/suibouhou_kaisei_sekou_20150719.pdf
- 5) 株式会社 NJS、「SkyManhole[®]」、https://www.meidensha.co.jp/products/ict/prod_05/prod_05_01/index.html
- 6) 株式会社明電舎、「マンホールアンテナ」、https://www.meidensha.co.jp/products/ict/prod_05/prod_05_01/index.html
- 7) 渡辺一弘、松原茂明、久保田謙、「OTDR を用いたヘテロコア型光ファイバセンサ」、計測自動制御学会論文集 35(1)、32-37、1999、
- 8) 国土交通省、「下水熱利用の推進に向けて」、https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/mizukokudo_sewage_tk_000458.html
- 9) リニアテクノロジー(株)、「ペルチェセルの標準特性」、<https://www.analog.com/media/jp/technical-documentation/data-sheets/j3108fc.pdf>