

エネルギーハーベスティングを用いた 水インフラ災害対策技術

Water infrastructure disaster countermeasure technology using energy harvesting

渦巻 拓也

Takuya UZUMAKI

株式会社富士通研究所 ICT システム研究所
FUJITSU LABORATORIES LTD., ICT System Laboratory

〒 211-8588 川崎市中原区上小田中 4-1-1
4-1-1 Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki 211-8588

e-mail: tuzumaki@icloud.com

分類番号: 12.4

近年、多発しているゲリラ豪雨による内水氾濫を予測するためには、河川水位とは異なり目視では確認できない下水道の水位をリアルタイムに計測することが重要です。そこで、下水道マンホールにエネルギーハーベスティングデバイス（熱電変換素子）を装着し、これまではできなかった下水道の水位をリアルタイムに計測することを実現しました。さらに、ネットワークの消費電力を低減することにより、5年以上電池交換せずにセンサを動作させながら、水位データをクラウドに格納できるリアルタイムモニタリングシステムの開発・製品化に成功しました。本稿では開発技術、実証実験、製品化に至るまでの経緯を説明します。

1. まえがき

人口爆発による水や食料の不足、気候変動、資源・エネルギーの枯渇、水・土壌・大気汚染、生物多様性の崩壊などの環境問題が急速な勢いで加速しています。これらの問題を解決し、持続可能で豊かな社会にしていくためにも、ICT（Information and Communication Technology）の力を利用して地球環境保護と経済成長を両立したグリーン成長を達成する必要があります。筆者はこれまでに、社会・環境に関するイノベーションを支える技術として、次世代スマートシティにおける環境負荷低減を実現する M2M（Machine To Machine）/IoT（Internet of Things）を支えるエネルギーハーベスティング技術、環境マネジメント技術、環境観測技術の研究開発を紹介してきました¹⁾。

社会課題の中でも、近年では地球規模で水問題が深刻化し、干ばつによる水不足や水インフラの劣化が大きな問題となっています。今後、循環系である水資源に対し、ICTを用いた効率的な水トータルマネジメントが重要になると考えられます。そこで、最初の取り組みとして、IoT 技術を活用した上

下水道などの水インフラ分野での新規ビジネスを創出することを目標としました。最近のゲリラ豪雨による下水道管路内の水位上昇をリアルタイムで監視することにより、局所的なゲリラ豪雨や市街化による下水道氾濫の被害を軽減することが可能になります。これまでの課題は、下水道管路内がブラックボックスとなっており、降雨時の水位状況の把握が困難であること、また、下水道があふれるまでの正確な時間が不明なため、被害軽減のための対応が遅れることでした。これに対して、マンホール鉄蓋の裏側に設置したエネルギーハーベスティングを用いたセンサモジュールを使って、下水道の水位をリアルタイムで計測し、無線によりデータを送信、クラウドにデータを格納する下水道水位リアルタイムセンシングシステムを開発し、製品化することに成功しました^{2,3)}。

2. 研究開発の経緯

エネルギーハーベスティング技術は数多くの研究開発が進められましたが、実際に製品化され、社会実装された例は多くありません。その最大の理由は、電源として1次/2次電池

を利用しており、電池が消耗すれば交換／充電することにより、大きな問題が生じないユースケースが多いからです。そこで、エネルギーハーベスティングの価値を再考しました。

2.1 ハーベスティングの価値とユースケース

エネルギーハーベスティングの価値は、バッテリーレス、メンテナンスレス、ワイヤレスにあります。ビジネス化への障壁は、1次／2次電池の交換／充電で十分である場合が多いことです。そこで、ハーベスティングが普及するための条件を整理したところ、以下の3点のユースケースに大別できることがわかりました。

①電池交換（充電）作業が困難な状況下：

高齢者や動物への適用、地下、海中、宇宙での使用

②センサ数が多く、電池交換コストが増大する状況下：

災害、環境、工場での多数のセンサの使用

③配線をなくすことで配線コスト削減・軽量化を実現：

自動車、飛行機内の配線

2.2 エネルギーハーベスティングの必要性

ビジネス化のためには、技術課題の解決は当然ですが、顧客ニーズおよび、顧客は誰で何を売るかを明確にすることが最も重要です。そこで、顧客ニーズを明確にするために、上下水道インフラメーカーにヒアリングを実施しました。その結果は以下のようにまとめられます。

- ・耐用年数を越えたマンホールが日本に数百万個存在
- ・マンホールの設置場所マップが不完全
- ・下水道点検のために、平均2年に1回マンホールを開閉
- ・ H_2S が発生する環境下ではマンホールの老朽化度が加速
- ・下水道内の遠隔監視が必要（水位、流量、pH、 H_2S など）

以上から、水インフラメーカーとのビジネスモデルを検討した結果、エネルギーハーベスティングの適用条件である電池交換（充電）作業が困難な地下環境であること、センサ数が多く、電池交換コストが増大するという災害の適用条件に該当するため、下水道の水位をリアルタイムでセンシングするシステムに対して、エネルギーハーベスティングデバイス（熱電変換素子）を電源として実現することを目標としました。

3. 提供価値と技術課題

3.1 リアルタイムセンシングシステムと提供価値

全体のシステム構成とデータの流れを図1に示します。技術的な特徴は、熱電変換に関しては独自技術を搭載し、電源交換なしで5年以上のセンサ駆動を実現していることです。下水道の点検で平均2年に1回はマンホールを開けるため、5年以上を保証できることは、点検時の作業者の負担を減らすことにつながり、大きな価値になります。このシステムにより、これまで不可能であった下水道氾濫の兆候を検知し、浸

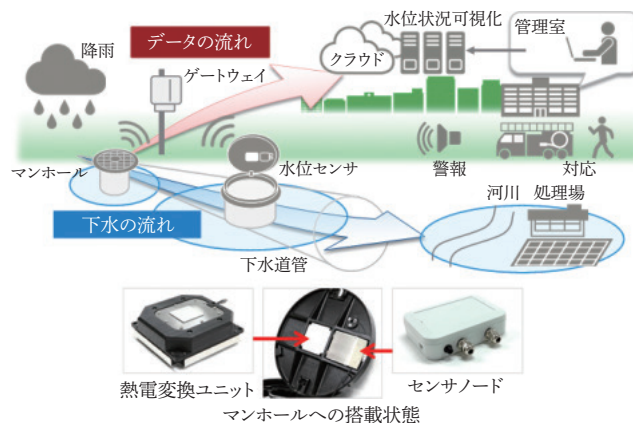


図1 下水道水位のリアルタイムセンシングシステム。

水被害軽減対策の支援が可能となります。さらに、下水道管路の更新計画策定、現場作業員の支援、浸水危険エリアの予測と通知が可能となります。

3.2 水位センシングの技術課題と解決技術

下水道の水位計測は、最も信頼性が高く、実績のある水圧センサを用いています。水位計測の課題としては、通信インフラの構築、電源の確保、メンテナンスの負担軽減（バッテリー交換など）があり、低消費電力の無線センシング技術が必要です。対策としては、920 MHz 特定小電力無線を採用、マンホール周辺にゲートウェイを設置し、センサの無線送信電力を低減しました。また、熱電変換モジュールは、マンホール鉄蓋の熱を電力に変換し、センサを駆動する電力の一部を自己発電します。さらに、センサの測定間隔やゲートウェイへの無線送信頻度を最適化し、センサの消費電力を低減するアダプティブセンシングを開発しました。

3.3 新規技術開発

3.3.1 熱電変換素子の発電量増大

今回開発した蓄熱材を活用した熱電変換ユニット⁴⁾と従来との比較を図2に示します。熱電変換素子は原理的に温度差によるゼーベック効果で発電します。夏季の昼夜でマンホール鉄蓋の温度は10℃から70℃程度近くまで上昇します。一方、下水道内部の気温は20～50℃程度であり、直接太陽で熱されているマンホール鉄蓋と比較して、下水道管内の温度変化は小さいことを実測しました。従来のフィン型熱電変換ユニットでは、マンホールの鉄蓋の温度とマンホール内部の気温との温度差で発電しますが、今回、開発した蓄熱材を用いた熱電変換ユニットでは、蓄熱材の融点とマンホールの鉄蓋との温度差を利用でき、従来のフィン型構造と比較して5倍以上の発電量を実現できることがシミュレーションによって予測することができます。

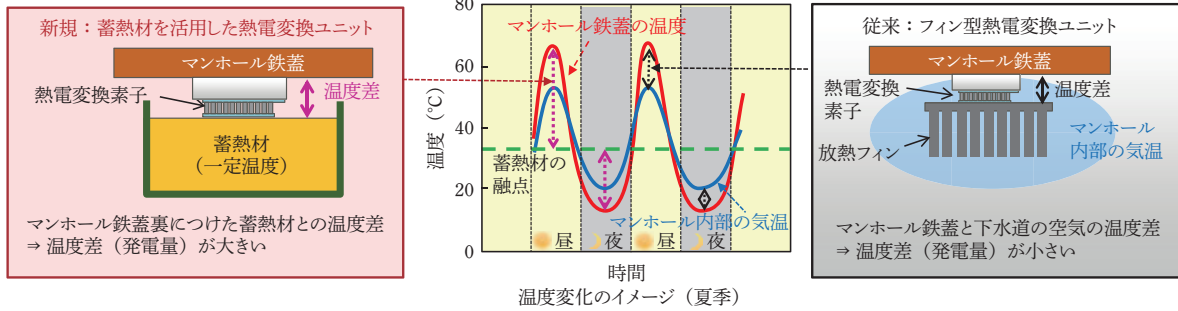


図2 蓄熱材を利用した熱電変換ユニットと従来との比較

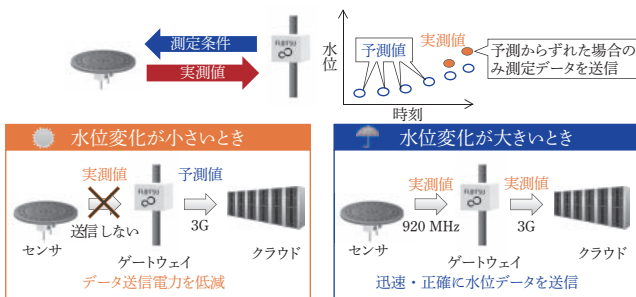


図3 無線の消費電力を低減するアダプティブセンシング技術

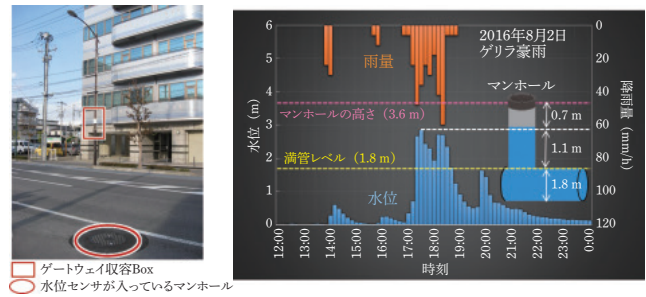


図5 ゲリラ豪雨時における下水道水位の時間変化 (2016年8月2日)

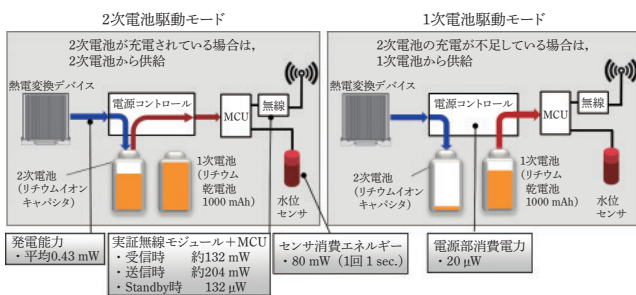


図4 全体のエネルギー収支

3.3.2 無線の消費電力低減

本ユニットが自律的に連続動作する時間を計算するためには、全体の電力エネルギー収支の見積もりが必要です。発電は熱電変換、および1次/2次電池からの出力を用いていますが、無線やセンサの消費電力を極力低減する必要があります。特に、無線の消費電力は大きいので、状況に応じて以下のパラメータを自動調整することで、測定精度を維持しつつ、省電力化を実現するアダプティブセンシング技術を開発しました。つまり、図3に示すように、水位変化が小さいときにはセンサからゲートウェイに測定値を送信せず、水位変化がある一定値より大きいときのみデータを送信し、無線の消費電力を低減することを可能としました。

3.4 全体のエネルギー収支

全体のエネルギー収支を図4に示します。後述する実証実験では、熱電変換で発生した電力は2次電池に充電され、MCU (Micro Controller Unit)、無線の駆動電力となります。2次電池の充電が不足している場合には、1次電池の電力で駆動する2つのモードを切り替える構成です。電力収支を見積もると、多くて年間20日くらいが1次電池駆動モードになるだけで、設計上では5年以上の寿命(14.2年)を確保できることがわかりました。

3.5 実証実験

3.5.1 郡山市での実証実験

郡山市の協力を得て、2015年7月~2016年11月の1年5カ月間の実証実験を行いました。最初に、下水道(雨水管)の上流・中流・下流の3カ所にセンサを設置しました。これにより、これまで観測できていなかったゲリラ豪雨時の下水道水位の状況を初めてリアルタイムに観測することができ、さらに下水道水位の急激な上昇を可視化することに成功しました。具体的には、わずか20分間で2.2mの急激な水位上昇を検知することができました。

さらに、図5に示すように、幹線道路にある合流式下水道でも、安定した水位計測が可能なることを実証しました。街路灯のポールにゲートウェイ収容Boxを設置し、交通往来の激

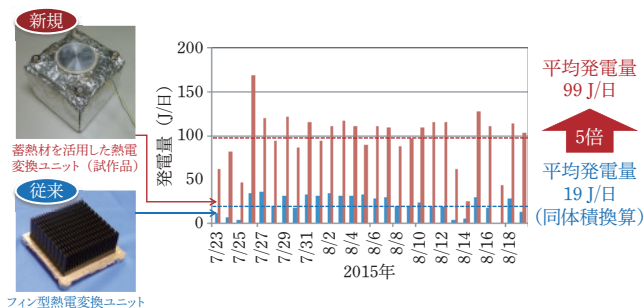


図6 新規構造と従来構造の発電量比較。

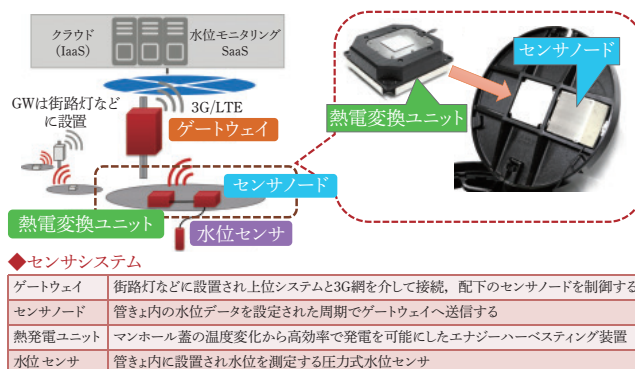


図7 製品カタログ。

しい駅前付近のマンホールにセンサを設置したところ、2016年8月2日に発生したゲリラ豪雨では、満管レベルを超え、残り70cmで内水氾濫する状況であることが判明しました。

3.5.2 エネルギーハーベスティングの性能評価

実証実験において、今回開発した熱電変換ユニットの発電能力を検証しました。従来のフィン型熱電素子と蓄熱型熱電素子との発電能力の比較を図6に示します。熱電変換ユニット単独で発電量を測定した結果、従来の空冷フィン型熱電変換ユニットと比較して、約5倍の電力を発生することを確認しました(2015年7月23日~8月18日)。

3.5.3 顧客からの評価と製品化

実証実験の結果、郡山市から以下の評価を得ました。

- ①下水道水位の監視により、現場への職員派遣や応急対応、避難情報配信などの迅速化が期待できる。
- ②水位の変化が数値化されたことで、排水性能の検証が可能になり、その数値を今後の雨水対策計画の策定に活用することによって、浸水被害の軽減が図れる。
- ③長期間バッテリー交換が不要なエネルギーハーベスティング技術を採用することにより、作業員の安全性向上と、メンテナンスコストの削減の両方が期待できる。

さらに製品には、マンホールの開閉作業をしやすいように、熱電変換ユニットをマンホールの裏の構造であるリップの高さ70mm以下に収める設計とし、作業者の視点から、使いやすい製品を実現することができました。これらの実証実験の結果を反映し、2016年8月15日に富士通(株)、富士通九州ネットワークテクノロジーズ(株)から図7に示すように製品発表しました。

4. むすび

本システムは、郡山市を中心に現在も稼働しており、展開を進めています。一方で、ゲリラ豪雨による災害は年々大きくなっており、水害は下水道の内水氾濫だけでなく、河川の外

水氾濫による大規模な災害が頻発しています。ダム貯水量・河川水位・下水道水位は、非常に密接な関係であり、総合的に最適化する必要があります。そのためにも、IoT技術を利用して、各水位を正確にかつリアルタイムでセンシングすることがますます重要になるでしょう。そして、それらの正確な水位データから雨水の連携シミュレーション、あるいは人工知能(Artificial Intelligence: AI)による水位予測の研究がさらに発展し、日本の雨水による災害を低減し、安心・安全な社会を実現できることを期待します。

謝辞

本研究の事業化への展開は、現場ニーズ、および実証実験による数多くの実験データが取得できたことによります。福島県郡山市の品川萬里市長、および関係者の方々には実証実験の場をご提供いただくとともに、データに関して貴重な議論をしていただきました。深く感謝いたします。

文献

- 1) 渦巻拓也: 雑誌 FUJITSU 65, 9 (2014).
- 2) 渦巻拓也: 環境発電・エネルギーハーベスティング技術——デバイス開発と応用展開, p. 94 (サイエンス & テクノロジー出版, 2020).
- 3) N. Kouma, K. Nakagawa, J. Kakuta, K. Kawakami, Y. Kikuchi, Y. Hida, T. Suzuki, H. Chiba, and T. Uzumaki: Proc. 3rd Int. Conf. Universal Village, Session IV-2-4 1-6 (2016).
- 4) K. Nakagawa and T. Suzuki: Procedia Eng. 168, 1630 (2016).

(2020年10月1日 受理)

Profile



渦巻 拓也 (うずまき たくや)

1986年筑波大学大学院修士課程修了。同年株式会社富士通研究所入社。93年工学博士。04年磁気ディスク先行研究部長として、富士通初の垂直磁気記録HDDを開発・製品化。11年環境・エネルギー研究センター長。15年ソーシャルイノベーション研究所長を経て、現在、ICTシステム研究所所属。