

廃棄物埋立処分場の予防環境保全のためのIoTモニタリングシステムの開発

九州大学 ○島岡 隆行 1\*  
九州大学 金谷 晴一 2\*\*  
九州大学 中山 裕文 3\*

廃棄物埋立処分場 モニタリング IoT センサ  
光ファイバセンサ エネルギーハーベスティング 無線通信

研究の目的

近年、環境保全への関心の高まりとともに、廃棄物処理や水処理等を担う環境関連施設の安全性の向上が強く求められている。特に、環境関連施設の中でも、施設の劣化や破損に伴う環境汚染の周辺への影響、環境汚染が発生した場合の社会的インパクトの大きさから廃棄物埋立処分場の環境モニタリングは重要である。廃棄物埋立処分場のモニタリングは、埋立廃棄物、保有水、ガス等の性状とともに、廃棄物埋立処分場の構成設備である遮水工や集排水施設等の健全性等をモニタリングし、環境汚染を未然に防ぐことが必要である。そのためには、モニタリングのための①センサの検討 ②環境発電（エネルギーハーベスティング）による発電・蓄電デバイスの開発、③計測データの無線伝送が可能なIoTシステムの構築、が必要である。そこで、本研究では、廃棄物埋立処分場を対象とし、予防環境保全の観点から上記モニタリング技術を開発し、環境関連施設の安全性の向上に資することを目的として研究を実施した。

研究の内容

1. 埋立地モニタリングのためのセンサ

広大な面積、膨大な埋立容量を有し、かつ埋立廃棄物が不均質である埋立地の温度モニタリングの方法として、従来の代表点における測定のみでは不十分である。

光ファイバセンサは、光ファイバに入射した光の散乱光の強度や周波数等が光ファイバの温度、ひずみ等により変化することを利用して、光ファイバ自身を計測部とし、光ファイバの線方向の温度、ひずみ等の分布を計測することができるものである。

埋立地と周辺地盤との境界部にあたる遮水シートに光ファイバを網目状にまたは一定間隔で配線することで、埋立地の境界部の温度分布を面的（二次元的）に把握することができると考えられ、埋立地の廃止の判定に寄与することが期待される。また、埋立地の底面部、法面部さらには地表面の温度分布から、逆解析により埋立地内部の三次元的な温度分布を推定することも期待される。さらに、遮水シートの下に光ファイバを配線することで、遮水シートの破損に伴う浸出水の漏水を異常な温度分布

として検知できる可能性も考えられる。

本研究では、遮水シートの面的な温度分布推定ならびに漏水検知における光ファイバセンサの適用可能性を検討することを目的に、遮水シートが施された埋立地法面の模型に光ファイバを配線し、ブリルアン散乱光およびラマン散乱光を用いた光ファイバセンサによる遮水シートの温度分布の再現性ならびに漏水検知の可能性を検討した。

2. 廃棄物埋立処分場の保有水を利用したごみ電池の開発

廃棄物埋立処分場では、ワイヤレスによる通信、電源線を用いないIoTセンサを設置する際の電源確保が課題である。センサの設置場所で電力を確保するエネルギーハーベスティング技術の開発が重要である。本研究では、埋設されたセンサへの給電方法として、埋立処分場の廃棄物層内の保有水を電解液として作用させ発電エネルギーを回収する“ごみ電池”の開発および、ごみ電池を電源とする無線センサネットワークの構築を試みた。

本研究では、廃棄物埋立処分場の保有水を電解液として発電し、その発電電力でセンサやマイクロコンピュータ（以下、マイコンと言う）を駆動する新しい方式のモニタリングシステムの構築を考える。焼却残渣中の水溶

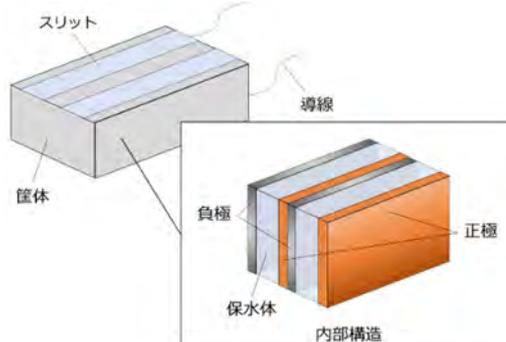


図1 ごみ電池プロトタイプデザインの図解

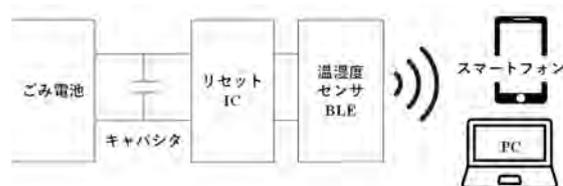


図2 システム構成

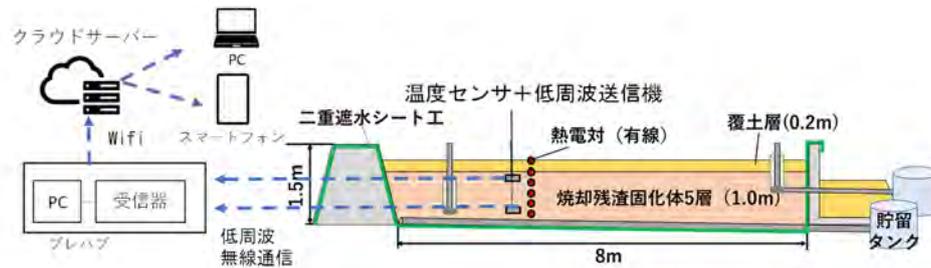


図3 模擬廃棄物埋立地における低周波無線通信を利用したIoTモニタリングシステム

性塩類が雨水に溶解する、塩類洗い出しというメカニズムによって、保有水はpHが非常に高く、ECも高い。従って、イオン化傾向の異なる異種金属が保有水に浸漬した場合、電位差によって電流が流れ、電池回路が形成される。ごみ電池のデザインとして図1に示すような管体にスリットが入っており、スリットから電池内の保水体に保有水が入り発電するシステムを考案した。

図2にごみ電池を電源とした温湿度無線センシングのシステム構成を示す。実験で用いた通信方式はBluetooth Low Energy (BLE)である。これはBluetoothの規格の一部で低電力動作に特化した無線通信技術である。

### 3. IoTモニタリングシステムの構築

廃棄物埋立地においては、埋立廃棄物の性状、温度、保有水の水質、発生ガス組成等を把握するための環境モニタリングが求められる。埋立廃棄物層内では、物理・化学・生物的反応が場所によって不均一に生じているため、広大かつ不均質な埋立廃棄物層内において適切な環境モニタリングを実施するには、埋立地内の多数の地点において長期に亘り自動観測できるモニタリングシステムが求められる。多点自動観測の実現には、無線通信を利用したセンサネットワークの構築が有効である。

本研究では、廃棄物埋立地内で無線通信システムを構築するために、埋立廃棄物層内における低周波電磁波の無線通信特性を調査した。また、図3に示すように模擬廃棄物埋立地から長期的にデータ通信が可能であることを検証した。

### 研究の成果、新発見

#### 埋立地モニタリングのためのセンサ

- 1) 実際の埋立地の規模を考慮すると、空間分解能がブリルアン計測よりも低いラマン計測器でも十分な精度で温度分布推定が可能と考えられる。
- 2) 漏水に伴い光ファイバセンサで捉えることのできる温度変化が生じる場合には、漏水検知が可能である。
- 3) 法面における漏水検知においては、光ファイバケーブルを法面勾配方向に直交するように配線することが効果的である。

#### 廃棄物埋立処分場の保有水を利用したごみ電池の開発

- 4)  $L/S=0.5\sim 20$ の焼却残渣溶液を用いて、Cu-Zn, Cu-Mg, Cu-Alの電極の組み合わせのごみ電池の性能評価を実施し、 $L/S$ が小さくなるにつれECが大きくなることで内部抵抗が小さくなり最大出力が大きくなった。
- 5) 二酸化マンガンを正極、亜鉛を負極としたごみ電池プロトタイプを作成し、Cu-Mgのプロトタイプと比べて内部抵抗が最も小さく、かつ最大電力が4.34mWと最も高い値を示した。
- 6) ごみ電池のプロトタイプのデザインおよび作製を行った結果、多層構造にすることで起電力が増加し、3層以上でマイコン動作電圧を満足するごみ電池を製作することができた。
- 7) 単層のごみ電池を2組以上直列に繋いだ場合と、4層構造のごみ電池を接続した場合、センサユニットの駆動電圧2.1V以上を出力することができ、温度、湿度データをPCに送信することに成功し、ごみ電池を用いたBLE通信による無線モニタリングが実証できた。

#### IoTモニタリングシステムの構築

- 8) 低周波電磁波は廃棄物埋立地における無線通信に有効であり、小型送信機を埋立廃棄物層内に設置した際の通信可能距離は26mと算出された。
- 9) 焼却灰の充填密度や含水比の影響による受信電圧の大幅な低下は確認されなかった。
- 10) 磁力選別を受けていない焼却灰でも通信は可能であるが、送信機近傍に鉄屑等の金属導体が密集した場合には受信電圧が低下する可能性がある。
- 11) 受信電圧は送受信機のコイル軸が軸方向に平行であるときに最大を示し、設置角が増加するほど低下したが、通信可能距離の算出値は廃棄物埋立地の平均埋立深さの11mmを下回らなかった。
- 12) 受信機周辺の設置建屋(鉄分)および電子機器の影響によるS/N比の低下が確認されたため、受信コイル(アンテナ)を本体から切り離し、屋外に設置することが望ましい。
- 13) 模擬廃棄物埋立地内から1年以上に亘り、埋立地内部の温度データを受信できた。

\* 九州大学大学院工学研究院

\*\* 九州大学大学院システム情報科学研究院

\* Faculty of Engineering, Kyushu University

\*\* Faculty of Information Science and Electrical Engineering