一般財団法人 大成学術財団　第5回研究成果発表会

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

九州大学大学院 工学研究院
〃　　　　システム情報科学研究院

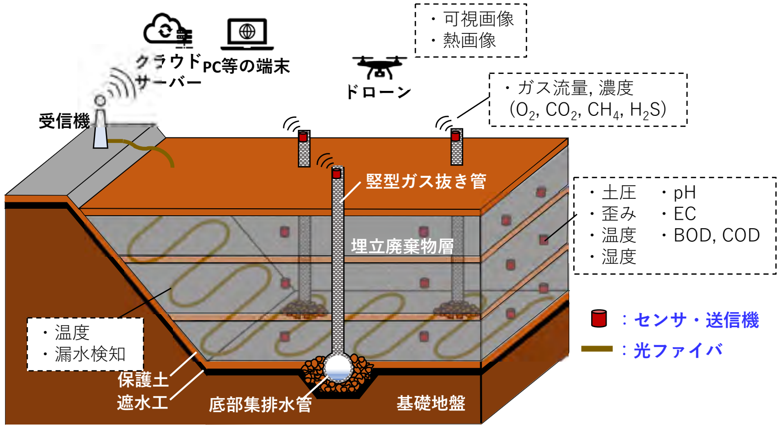
2023年10月16日

九州大学

1．IoTを活用した高度な埋立地の管理

1．環境モニタリング
温度、湿度、ガス、水質等を計測する各種センサにより、埋立地内の物理、化学、生物学的環境を総合的に捉えてリアルタイムに環境情報を取得し、適切な維持管理に役立てる。

2．破損の未然検知
遮水システム等の健全性に関する情報をリアルタイムに取得し、データをクラウドサーバに保存してビッグデータ化し、解析することにより、施設の破損に伴う汚染事故の未然防止に役立てる。



2．埋立地内部（埋立廃棄物層）のモニタリング

2-1　埋立地で使用するセンサに関する検討

適切なセンサの選定
- 埋立廃棄物の性状を把握するため温度センサ、pHセンサ、ECセンサを対象とした。
- 各センサの測定原理を調査し、廃棄物埋立地での過酷な環境下での運用と、IOT化に適したセンサを評価した。

埋立地の過酷な環境に耐えIoT化に適したセンサは？（温度センサの例）

廃棄物埋立地の過酷な環境下での測定およびIOT化の観点からは熱電対またはIC温度センサが適している。

熱電対は、IoT化の際には、アナログ出力をデジタル信号に変換する変換器とインターフェイスが必要

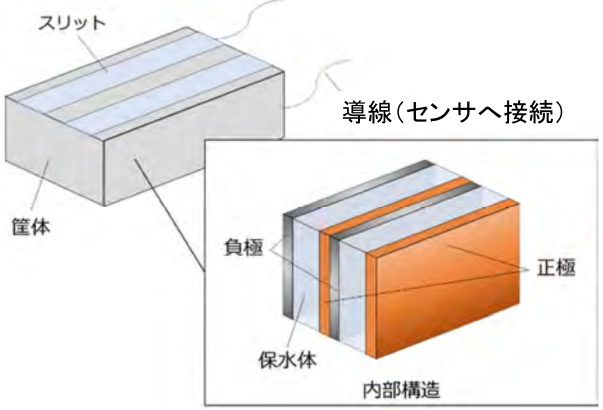
IC温度センサは、デジタル出力を持つため、データの取得や処理、通信が簡単になるという利点があり、低電力で作するものも多く、IoT化に適している一方、耐環境性を持たせるためにはセンサの保護が必要となる。

センサの種類	埋立地内の耐環境性、長期信頼性	IoT化適性	コスト	備考
熱電対	○	△	○	特定のタイプの熱電対は高温や過酷な環境に耐えることができる。しかしながら、アナログ出なので、IoT化には変換が必要であり消費電力が増える。
測温抵抗体	△	△	△	精度は良好だが、過酷な環境にはそれほど適ていない場合がある。
サーミスタ	△	△	○	高温や化学的影響にはあまり耐えることができない場合がある。
IC温度センサ	△	○	○	多くの場合、デジタル出力を持ち、消費電力もなく、IoT化によるデータ取得、処理、通信が容易。通常、一般的な環境向けに設計されていためセンサの耐久性を高める工夫が必要。

2-2 埋立廃棄物層内の保有水を電解液として用いる”ごみ電池“

埋立廃棄物層内では焼却残渣中の可溶性の塩類が雨水と接触することで溶解している。ごみ電池は、埋立廃棄物層内に存在する保有水（**高pH**、**高い電気伝導度（EC）**）を電池の電解液として用い発電する。

本研究で用いた模擬保有水の性状	
L/S[-]	10
pH[-]	11.7
EC[mS/cm]	24.5



ごみ電池の起電力はセンサモジュールの要求駆動電圧を満たすか？

実験手順

体各セルに焼却残渣溶液を1ml滴下

↓

頁の抵抗（1、4.7、10 kΩ）を接続したとき E値、電流値を測定

↓

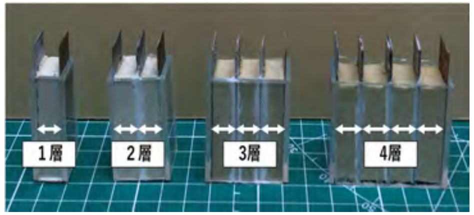
フにプロットし、回帰から起電力E、内部抵計算

$$V = E - rI$$

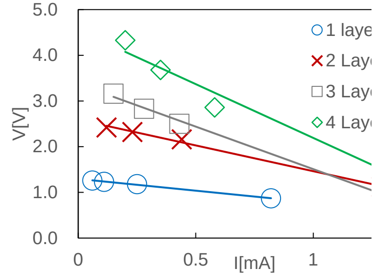
↓

れた起電力、内部抵抗最大電力P_{MAX}を計算

$$P_{MAX} = E^2 / 4r$$



実験に用いた多層構造のごみ電池



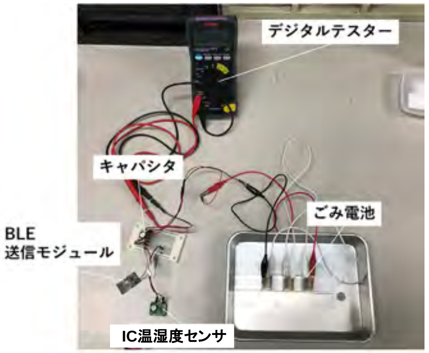
各ケースの起電力、内部抵抗、最大

	1 Layer	2 Layers	3 Layers	4
起電力[V]	1.29	2.59	3.37	
内部抵抗[Ω]	510	1,120	1,860	
最大電力[mW]	0.82	1.50	1.53	

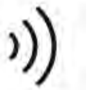
- ごみ電池の層数に比例して起電力、最大電力が大きくなることを確認した。
- ３層以上のごみ電池の起電力は、本研究で用いたセンサモジュール（温湿度センサ、マイコン、送信モジュール）が必要とする駆動電圧（3. 3V）以上であった。

ごみ電池を電源としたセンサモジュールによる無線通信は可能か？

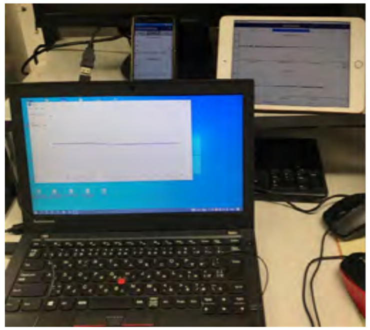
ごみ電池とセンサモジュールの構成



ごみ電池を電源としたセンサモジュール

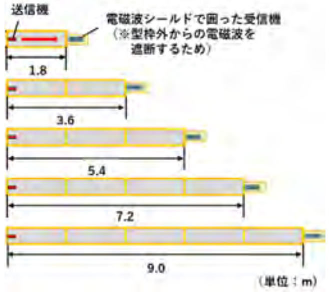


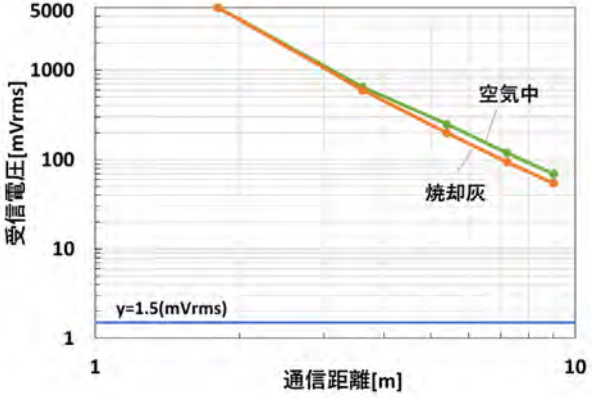
無線通信



センサモジュールから発信された温湿度のデータを受信し、グラフ化できることを確認

2-3 廃棄物埋立層内における低周波無線通信：通信可能距離は？

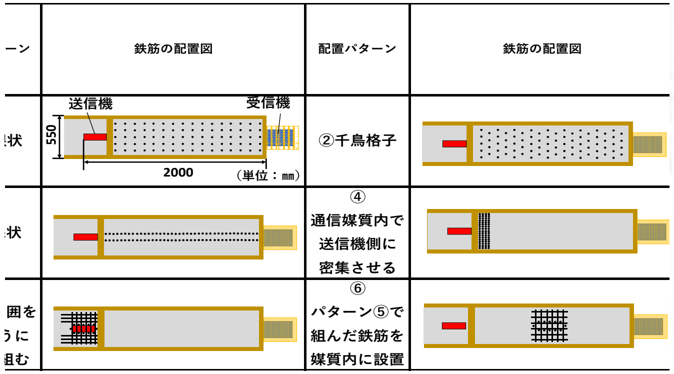




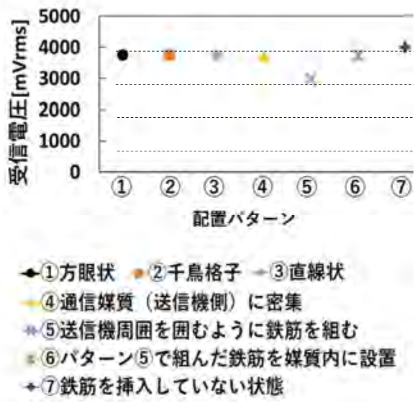
- 通信距離に伴う減衰率は、空気中よりも焼却灰中の方がや大きかった。
- 本研究で用いた低周波送信機の焼却灰中における通信可能距離は26mと算出された。
- 低周波無線通信可能距離26mは、我が国の平均の一般廃棄物処分場の埋め立て深さ(約10m)と比べて十分に長い

埋立廃棄物中の鉄スクラップによる低周波通信への影響

鉄筋の配置図



鉄筋の配置パターンごとの受信電

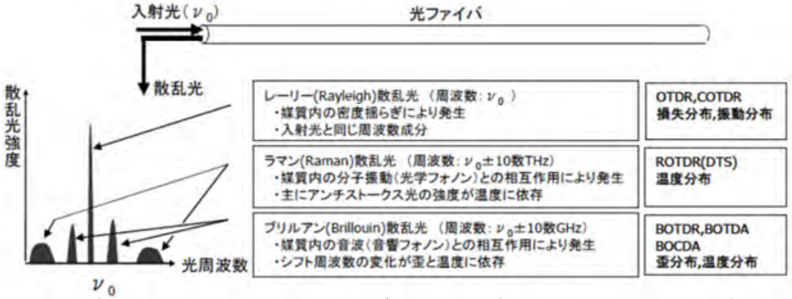


- 送信機の周囲を鉄スクラップが囲むように存在する場合（パターン⑤）には、受信電圧の減衰し、通信阻害が発生する可能性がある。

3．埋立地境界のモニタリング

光ファイバセンサ

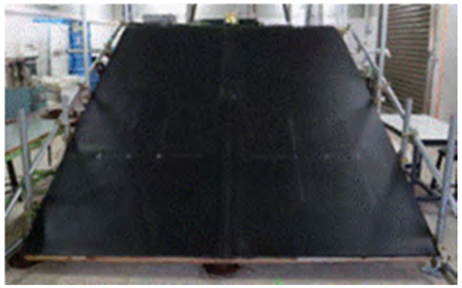
- 光ファイバは石英ガラス等で形成される細い繊維状物質
- 入射した光の反射や散乱等を利用して温度、歪、圧力、電流等が計測可能
- 特長：小型・軽量、長寿命、過酷環境下でも耐久、分布計測が可能



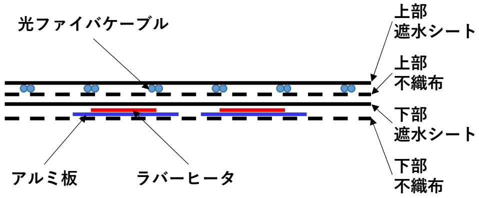
光ファイバ中で発生する散乱光および光ファイバセンサで計測可能な物理量

廃棄物埋立地の周辺環境との境界部（遮水工、キャッピング）のモニタリングに適すると考えられる。

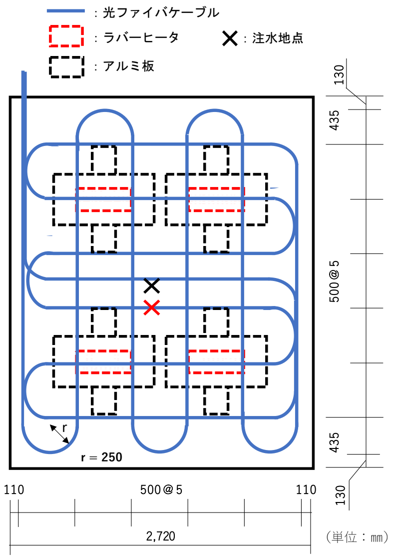
埋立地法面模型を用いた遮水工の面的温度分布推定、漏水検知実験



埋立地法面模型



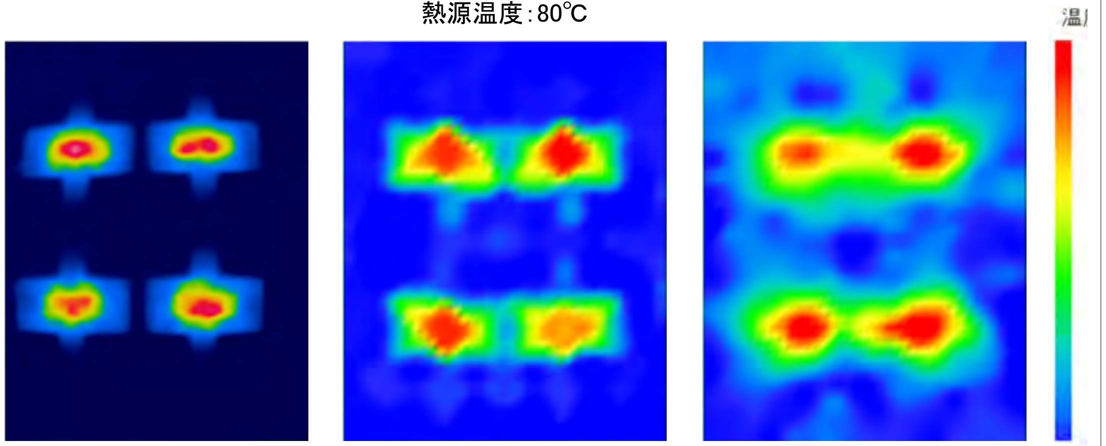
遮水シートの構造と光ファイバケーブル
および熱源の設置位置



光ファイバケーブル、熱源および注水地点の配置

光ファイバセンサによる面的温度分布の把握

熱源温度：80℃



熱赤外線画像

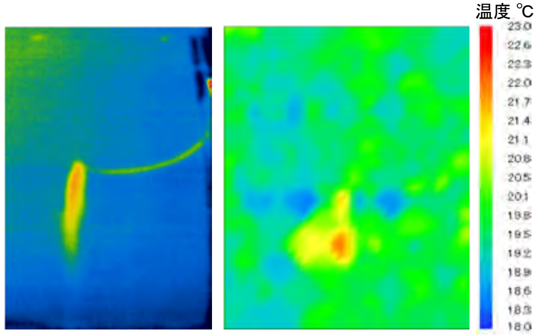
ブリルアン計測
（空間分解能：5cm）

ラマン計測
（空間分解能：100cm）

- ✓ 光ファイバセンサで得られた線方向温度分布からコンター図作成ソフトを用いて二次元温度分布を作成した。
- ✓ 光ファイバセンサにより一定の精度で面的温度分布を把握できることが確認された。

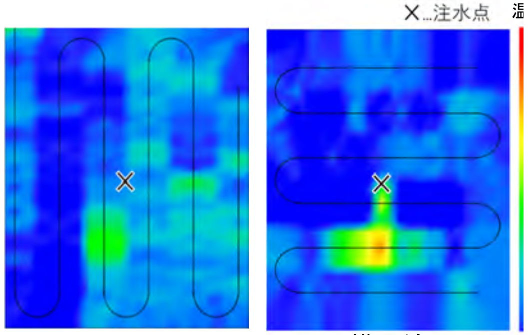
光ファイバセンサによる漏水検知

- 法面の中央部の上部遮水シートを穿孔してホースニップルを設置
- 微量定量ポンプを用い、27.0℃に調整した純水（気温19.7℃よりも約7℃高い）を流量17.1 mL/minで注水



熱赤外線画像　　ブリルアン計測

注水時の温度分布
（注水開始から48分後）

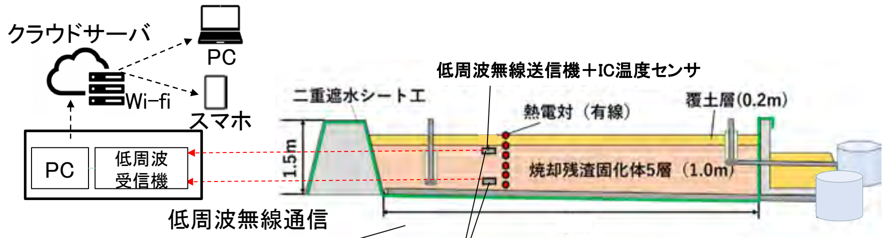


縦配線　　横配線

配線方向による温度分布の相違

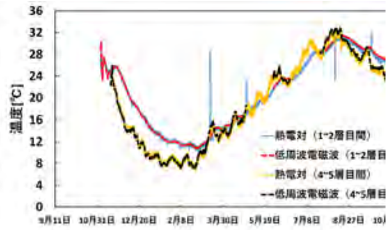
ブリルアン計測では、熱赤外線画像でみられる注水に伴う高温部と似た形状の高温部（＝常温＋約2℃）が認めら
法面の漏水検知においては、横配線（法面の勾配方法に垂直な方向に光ファイバを配線すること）が効果的である

4．IoTモニタリング：模擬埋立処分場における実証実験



模擬埋立処分場

低周波無線送信機と
IC温度センサの埋設状況



1年間に亘ってIoTモニタリングに
測定された廃棄物層内温度デー

5．まとめ

廃棄物埋立地に適したセンサ

- 各種センサの測定原理を調査し、廃棄物埋立地での過酷な環境下での運用と、IoT化に適したセンサを評価
選定した。

ごみ電池の開発

- 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、センサモ
ジュールの駆動電圧を満足する起電力を有するごみ電池を製作することができた。
- ごみ電池を電源としてセンサモジュールに電力を供給し、温湿度データをPCに無線送信することに成功した。
ごみ電池を電源としたIoTモニタリングシステムを実証できた。

低周波通信による埋立廃棄物層内の通信

- 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、本研究で用いた低周波送信機を埋立廃棄物
層内に設置した場合の通信可能距離は26mと算出された。
- 低周波送信機の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し、通信阻害が発生する可能
性があることが分かった。

埋立地境界（遮水工）のモニタリング

- 光ファイバセンサによる遮水工の面的温度分布の把握や漏水検知の可能性が示された。

IoTモニタリングシステムの構築

- 本研究において構築したIoTモニタリングシステムにより、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。

研 究 成 果

○ 査読付き学術論文（2編）

- 小宮哲平、浜田梨央、島岡隆行、今井道男、小澤一喜：廃棄物埋立地の遮水シートの温度分布推定および漏水検知における光ファイバセンサの適用可能性, ジオシンセティックス論文集、Vol.37, pp.113-118、2022年12月
- Hirofumi Nakayama, Tomoya Tazoe, Takayuki Shimaoka, Haruichi Kanaya: Wireless communication technology for environmental monitoring at waste landfills, Journal of Material Cycles and Waste Management (in press)

○ 講演論文（10編）

- 全国都市清掃研究・事例発表会（1編）、廃棄物資源循環学会研究発表会（4編）、土木学会西部支部研究発表会（5編）

○ 特許（2件）

- 発明の名称：監視装置、出願番号：特願2021-101088, 2021年6月
- 発明の名称：遮水工、温度監視方法、整理番号：202200142