

## 研究報告書

### 「機械学習を用いたケミカルシグナルフローの逆解析」

研究期間：平成29年10月～平成31年3月

研究者番号：50155

研究者：松倉 悠

#### 1. 研究のねらい

廃棄物埋立地では、微生物が廃棄物を分解する過程でメタンガスが発生する。メタンガスは高い温室効果を持つので、地球温暖化防止のため、埋立地からの発生量を正確にモニタリングし、発生を抑制するための対策を早急に講じることが求められる。しかし、メタンガスの発生箇所や発生量に関するデータが不足し、有効な対策が取られていない。現状では、メタンガス発生量を計測するために、地面に直径 50 cm 程度の覆いを被せ、一定時間に覆い内に溜まったガスの濃度を測定する方法(チャンバー法)が用いられる。しかし、数キロメートル四方の大きさの埋立地の中で、小さなチャンバーを用いて人の手で計測できる測定点の数には限りがあり、埋立地から発生するメタンガスの総量を正確に求めることは困難である。

本研究では、ある場所である濃度のガスを検出した際に、そのガスがどこから発生したかを逆算し、メタンガスの高精度モニタリングを実現することを目指す。空気中に放出されたガスの挙動は移流拡散方程式などの非線形方程式に従うため、これを逆解析してガスの発生箇所や発生濃度を推定するのは困難である。これまでの研究例を見ても、ガス源の個数が既知の場合や、気流が定常で一樣な場合など、ごく単純な状況下でしか推定に成功していない。現実環境では、風速や風向が絶えず変動し、それに伴ってガスの挙動も乱れる。この乱れを反映して逆問題を解析的に解くことは困難である。

そこで本研究では、現実環境における測定で得られたデータを基に機械学習を行うことを提案する。乱れがある中で測定されたガス濃度や風向風速の時系列データを入力として機械学習を行うことで、精度良くガス源位置を推定することを目指す。もともと乱れを含むデータを用意し、その時系列値を学習に用いることで、風向風速やガス濃度の変動を考慮しながらガス源位置を推定することを可能にする。

本研究では具体的な目標として、20 m 四方の領域において 5 m 程度間隔で測定を行い、1 m 四方の分解能でガス放出位置を推定することを目指した。廃棄物埋立地におけるメタンガス発生を想定し、屋外でメタンガス(または、メタンと比重や拡散係数の近いガス)を放出する実験を行い、自律移動ロボットや地面に固定したガスセンサアレイによりガス濃度分布を計測する。ガス濃度分布と風向風速の時系列データを学習させ、ガス発生位置を推定するソフトウェアを開発する。

#### 2. 研究成果

##### (1) 概要

ガスの挙動は、移流拡散方程式などの非線形方程式に従うため、これを逆解析して発生箇所や発生濃度を推定するのは困難である。しかも、現実環境では風速や風向が絶えず変

動し、それに伴ってガスの挙動も乱れる。そこで本研究では、現実環境における測定で得られた乱れを含むデータを基に機械学習を行うことを提案した。ガス濃度の時空間分布を測定し、ガス発生箇所を推定することを試みた。

初めに、メタンガスの空間分布を計測するロボットシステムを構築した。自律移動ロボットの上に、パンチルト雲台を介してレーザメタン計を固定したシステムを製作した。レーザを様々な方向に向けて照射し、地表付近に存在するメタンの濃度が測定できることを実験的に確認した。

また、地表にガスセンサを並べたセンサネットワークを用意し、ガス濃度の時間変動データを収集する実験も行った。与えられた環境を 1 台のロボットでスキャンし、センサデータを収集した場合に比べ、センサネットワークを用いると同時に多点で測定したデータが入手できるため、ガス源位置の推定には有利である。縦 9 m、横 7.5 m の実験領域を 1.5 m 四方のセルに区切り、各セルの中央に半導体ガスセンサを、領域の中央には三次元超音波風向風速計を設置した。エタノール飽和蒸気を 500 mL/min の流量で放出するガス源を 30 個のセルのうちの一つに設置し、実際に屋外環境でガスセンサの応答値と風速ベクトルの時系列データを収集した。

このようにして集めたデータを用い、深層学習ニューラルネットワークを用いてガス源位置を推定することを試みた。ガス源の位置を変えて測定を行い、CNN-LSTM ニューラルネットワークでガス源の位置を推定した結果、95%の正解率を得ることができた。ガスセンサアレイで測定したガス濃度の空間分布の特徴を CNN(convolutional neural network)を用いて抽出し、LSTM(long short-term memory neural network)を使って時間変動を学習する。粒子フィルタを用いてガス源位置推定を試みた先行研究(J.-G. Li, et al., Auton. Robot., 30, 281–292, 2011)では同様の環境で 80%の正解率しか得られておらず、正解率を大幅に改善することができた。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A「レーザメタン計を搭載したロボットの作製とメタンガス濃度分布測定」

レーザメタン計をパンチルト雲台に固定し、図 1 に示すように屋外走行用ロボットベースに搭載した。パンチルト雲台を動かせば、レーザを様々な方向に向けて照射でき、ロボットを移動させることなく、測定領域内のメタンガスの濃度を素早く測定することができる。



図 1 作製したロボット

図 2 は、実験室内において行った様子を表す。2 m 四方の領域を確保して実験を行なった。爆発限界に達しないように、3%の濃度に調整したメタンガスを充填したガスボンベを用意してメタンガスを放出し、20 cm の間隔でレーザを床面に照射した。その結果、3 分ほどで 2 m 四方の領域内をスキャンするように測定することができた。

このロボットを屋外で使用すれば、20 m 四方程度の領域において 1 m 程度の間隔でガス濃度分布を計測することが可能である。しかし、二次元平面をスキャンしてガス濃度分布を計測する手法では、データ収集に時間を要する。気流場の時間変動が大きい場合には、ガス濃度分布の変動が捕らえきれず、ガス源位置を特定することができない欠点がある。

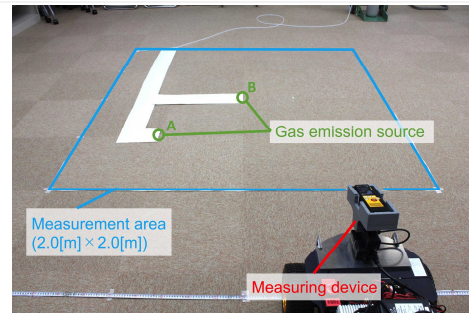


図 2 屋内における実験の様子

#### 研究テーマ B 「ガスセンサアレイを用いた屋外におけるガス濃度分布と風向風速の収集」

ガス発生源の位置を機械学習により求めるためには、時間的・空間的に緻密なセンサデータを用意した方が有利となる。そこで、二次元平面上に固定式のセンサを配置したセンサネットワークを用意し、センサデータを収集する実験を行なった。実験の様子を図 3 に示す。屋外に 9 m x 7.5 m の領域を確保して 30 個のセルに分割し、各セルの中央にガスセンサを 1 個ずつ設置した。また、三次元超音波風向風速計を実験領域の中央に一つ設置した。



図 3 実験の様子

一つ選択したセルにエタノールの飽和蒸気を放出するガス源を設置し、各センサの応答を 30 分間測定した。ガス源を設置するセルを変えて測定を行い、得られたデータを x 軸や y 軸に関して反転させることで、全てのセルそれぞれにガス源が存在するデータを得た。この時系列データを 300 タイムステップ(150 秒)ずつに分け、学習用と評価用のデータセットを 180 個ずつ用意した。

#### 研究テーマ C 「深層学習によるガス源位置の推定」

本研究で用いたニューラルネットワークの構造を図 4 に示す。本研究ではガスセンサアレイを用い、ガス濃度の二次元分布の時系列データを取得した。この二次元分布を画像に見立て、画像認識などでよく用いられる畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を利用し、特徴を抽出する。その後、様々な時系列データの解析に実績のある LSTM (Long short-term memory)と呼ばれるニューラルネットワークで、ガス分布と風向風速の変動を解析する。最終的に、LSTM から出力された信号を深層学習ニューラルネットワーク

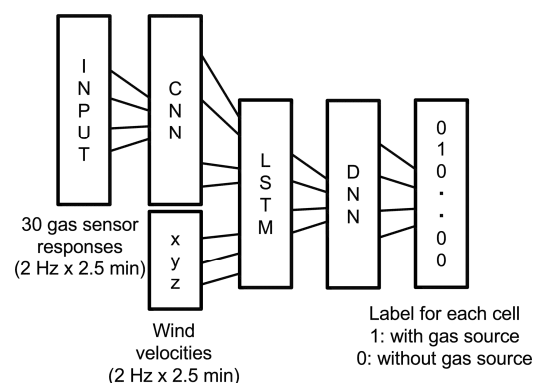


図 4 ニューラルネットワークの構造

(DNN)に入力する。二次元平面を分割したそれぞれのセルにガス源が存在するかないかを、0 から 1 の数値(0:ガス源が存在しない、1:ガス源が存在する)で出力する構造となっている。

このニューラルネットワークに、センサネットワークから得た 2.5 分間の時系列データを入力した結果、95%の正解率でガス源位置を推定することができた。また、LSTMとDNNのみを接続したネットワークを用い、ガス源位置の推定に必要なセンサデータの長さを調べたところ、20 秒程度の長さのセンサデータを用意すれば高い確率でガス源位置を推定できることが確かめられた。

#### 研究テーマ D「ドローンによる気流操作」

研究テーマ A では、ガスの空間分布を計測する陸上走行式ロボットを開発した。しかし、車輪で走行するロボットを不整地や湿地で用いることは困難である。そのため、ガスセンサを搭載したマルチコプタによりガス源探索を実現することも試みた。

マルチコプタには位置や姿勢が制御しやすいという利点があるが、飛行する際にロータから強い気流を吹き降ろす。この気流が地面に到達すると放射状に広がり、地上付近を漂うガスを撒き散らしてしまうため、マルチコプタにガスセンサを取り付けても、ガスを検出することは困難である。

しかし、この下降気流を上手く使えば、地表付近を漂うガスをマルチコプタ上のセンサで検出することが可能となる。図 5 に示すようにマルチコプタを低空飛行させると、複数のロータで生成された下降気流が地表を広がり、互いに衝突して上昇気流が発生する。このような上昇気流を作れば、地表付近を漂うガスが巻き上げ、マルチコプタ上のセンサで検出することが可能となる。数値流体力学シミュレーションや実験により、本手法が実現可能であることを確かめた。

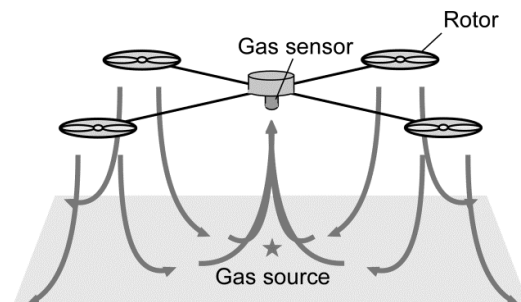


図 5 ドローンの気流を利用したガス捕集

### 3. 今後の展開

本研究では、ガスセンサネットワークを用いて高い時間分解能、空間分解能でガス濃度分布データを測定し、機械学習を用いてガス源位置の推定を試みた。その結果、2.5 分間の測定データをニューラルネットワークに与えるだけで、95%の成功率でガス源の位置を推定することに成功した。気象条件が変化した場合にも同様に高い成功率が得られるか、今後、検討を進める必要がある。しかし、実際に屋外環境で実験を行い、ここまで高い成功率を得た例は、現時点で他にない。

本研究期間において、センサネットワークやメタンガス計測ロボットを構築し、実際の廃棄物埋立地で実験を行う準備を整えることができた。今後は、各所の廃棄物埋立地で実験を行い、提案した手法の有効性を確かめることを計画している。ガス源の位置を推定することができれば、その場所にロボットを移動して詳細な測定を行い、地中から大気中に放出されるメタンガスの総量を正確に求めることができる。したがって、地球温暖化対策の策定などに大きく貢献するものと期待される。また、高濃度のメタンガスが放出されている場所が分かれば、その位置にガス抜き管を打



ち込み、メタンガスを回収することも可能となる。埋立地の適切な管理に貢献するだけでなく、回収したメタンガスを資源として再利用することも可能となる。

画像処理の分野では、画像圧縮などのアルゴリズムの性能を比較するために、各種画像を集めたデータベースが公開され、広く利用されている。しかし、ガス源探索の分野では、このようなデータベースは存在していない。本研究では、今後も屋外環境におけるデータ収集を継続し、得られた結果をデータベースとしてまとめ、公開する予定である。このデータベースを使えば、機械学習だけでなく様々なガス源位置推定アルゴリズムをテストすることが可能になり、この分野の研究の進展に貢献できるものと期待される。ガス源位置やガス放出量の計測技術が進展すれば、廃棄物埋立地におけるメタンガス発生モニタリングだけでなく、森林における水蒸気・二酸化炭素放出量の計測など、環境モニタリングに幅広く応用することが可能になると期待している。

#### 4. 自己評価

##### ・研究目的の達成状況

当初は、ガス源の位置だけでなく、そこから発生するガスの量まで推定することを目的としていた。また、提案した機械学習手法を様々な気象環境下でテストする計画であった。以上の点は今度の課題として残ってしまったが、センサデータ収集に必要なセンサネットワークや移動ロボットを作成し、実際に屋外環境で測定したセンサデータを使い、ガス源位置を推定することに成功した。当初の目的を達成する準備は整っており、今後も研究を継続する所存である。

##### ・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

初年度は年度途中で研究が採択されたため、学生のマンパワーが不足していたが、東京農工大学のグループの協力を得て、途中からは研究を加速できた。

初年度に各種購入物品の手配を行うところで時間を要したが、その後は適切なタイミングで研究費を執行し、研究を進めることができた。

##### ・研究成果の波及効果

本研究では、十分な量のセンサデータを用意すれば、高い精度でガス源の位置を推定できることを示した。実際に屋外環境で 95%の成功率を出した例は、他にない。ガス源探索システムの研究を、基礎研究から応用フェーズへと進めることができた。廃棄物埋立地におけるメタンガス発生モニタリングだけでなく、提案した計測手法が様々な環境センシングに活用されるものと期待する。

##### ・研究課題の独創性・挑戦性

実測したガス濃度や風向を基に、ガス源の近くにロボットを誘導する研究(中国・天津大学)や、ロボットやドローンで測定したガス濃度を、そのまま補完してマッピングする研究(高知工科大、スウェーデン・Örebro 大学など)は既にある。しかし、国内外において、実測値に機械学習を適用し、数メートル四方程度の領域でガス位置推定を行った研究は前例が無い。今後、異なる気象条件下で実験を行い、提案した手法の評価を行う必要はあるが、機械学習の高いポテンシャルを示すことはできた。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Christian Bilgera, Akifumi Yamamoto, Maki Sawano, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida. Application of Convolutional Long Short-Term Memory Neural Networks to Signals Collected from a Sensor Network for Autonomous Gas Source Localization in Outdoor Environments. *Sensors*. 2018, 18(12), 4484, 12 pages.

### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. (学会発表) Kento Tanaka, Saki Koguchi, Ryohei Sato, Jane Pauline Ramos Ramirez, Haruka Matsukura, and Hiroshi Ishida. Using Airflows Generated by Multicopter for Gas Detection in Midair. 17th International Meeting on Chemical Sensors. 2018, pp. 470-471.
2. (学会発表) 山本晃史, Christian Bilgera, 松倉悠, 石田寛. 風防付きガスセンサを用いた領域絞り込み法によるガス源探索. 第35回「センサマイクロマシンと応用システム」シンポジウム. 2018, 30pm4-PS-56, 3 pages.
3. (学会発表) 松倉悠, Christian Bilgera, 山本晃史, 澤野真樹, 石田寛. ガスセンサアレイおよび風向風速計を用いた深層学習によるガス源位置推定の検討. 電気学会ケミカルセンサ/バイオ・マイクロシステム合同研究会. 2019, pp. 31-33.
4. (学会発表) Akifumi Yamamoto, Christian Bilgera, Maki Sawano, Haruka Matsukura, Naoki Sawada, Chee-Siang Leow, Hiromitsu Nishizaki, and Hiroshi Ishida. Application of Sequence Input and Output Long Short-Term Memory Neural Networks for Autonomous Gas Source Localization in an Outdoor Environment. IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose. 2019, 発表採択.
5. (招待公演) Haruka Matsukura. Gas Source Localization Using Deep Learning Neural Network with Gas Sensor Array. IEEE International Conference on Sensors and Nanotechnology. 2019, 7月発表予定.