

## 研究成果報告書

- ・機関及び学部、学科等名

富山高等専門学校

専攻科 制御情報システム工学専攻・エコデザイン工学専攻

- ・所属ゼミ

的場研究室・袋布研究室

- ・指導教員

的場 隆一(電子情報工学科・准教授)

袋布 昌幹(物質化学工学科・教授)

- ・代表学生

大毛利 寛太(制御情報システム工学専攻・2年)

- ・参加学生

竹脇 愛翔(制御情報システム工学専攻・2年)

CERVANTES GINNO JAMES PAPILLERA(制御情報システム工学専攻・1年)

平尾 栄悟(制御情報システム工学専攻・1年)

向林 蒼空(エコデザイン工学専攻・1年)

### 【研究題目】

空き家・空き地問題を解決する雑草抑制・炭素固定緑化技術の開発

#### 1. 課題解決策の要約

富山県では高齢化の進行や人口減少に伴い、空き家・空き地の増加が顕在化している。空き家・空き地の管理が困難となることで、雑草繁茂による景観悪化、害虫発生、周辺住民への心理的負担、防犯面の不安などが発生し、地域の生活環境に影響を与えることが課題となっている。一方、除草や草刈りを継続して実施することは、人的コスト・金銭的コストの両面で困難であり、地域社会において「継続できる管理手法」が強く求められている。

本研究では、上記課題を解決するため、雑草繁茂を抑制しながら緑化を実現する地被植物(カバープラント)に着目し、空き家・空き地へ導入可能な「とやま型脱炭素緑化」技術の確立を目指した。単なる緑化・景観改善にとどまらず、緑化が持つ脱炭素効果(炭素固定)を科学的根拠に基づいて示すことを目的とした点に特徴がある。

課題解決策として、本研究では「低コストで現地運用可能なCO<sub>2</sub>計測システム」と「機械学習によるCO<sub>2</sub>濃度変動推定モデル」を組み合わせ、緑化によるCO<sub>2</sub>吸収の挙動を定量的に把握する仕組みを構築した。これにより炭素固定量を算出する重要なファクターを得ることができる。具体的には、Raspberry Pi と複数のNDIR方式CO<sub>2</sub>センサ、環境センサ(温湿度・照度・土壌温度・土壌水分)を用いて屋外環境データを高頻度で収集し、その時系列データに対して機械学習を適用することで、屋外環境下でのCO<sub>2</sub>濃度変動を推定・評価した。

本研究の成果は、地域課題(空き家・空き地管理)への実装可能性が高いだけでなく、緑化による脱炭素価値を“見える化”できる点に意義がある。今後、自治体や教育機関と連携しながら、緑化の効果を定量的指標として示し、地域の自立的な維持管理策へと展開することが期待される。

## 2. 調査研究の目的

本研究は、空き家・空き地対策の一環として「雑草抑制型緑化」を社会実装する際に、緑化がもたらす脱炭素効果(炭素固定)の価値を、客観的・定量的に評価できる技術基盤を確立することを目的とした。

従来、地被植物は土壌侵食防止、景観改善、保水性向上、地温安定化など多様な効果が知られている。しかし、CO<sub>2</sub>吸収・炭素固定の効果については、屋外環境における変動要因が複雑であることや、計測装置が高価・大型であることから、十分な定量化が進んでいなかった。また、自治体・教育機関が地域で継続的にモニタリングを実施するには、装置価格・運用性・保守性の観点から障壁が大きい。このため本研究では、次の3点を研究目的として設定した。(1) 地被植物周辺におけるCO<sub>2</sub>濃度変動を、低コスト装置で高頻度に計測し、屋外環境下のCO<sub>2</sub>動態を把握することができるシステムを構築する。(2) 環境要因(照度、温度、湿度、土壌温度、入口CO<sub>2</sub>濃度等)とCO<sub>2</sub>濃度変動の関係を整理し、機械学習モデルにより炭素固定量推定の基盤を構築する。(3) 現地導入可能な技術として、自治体・地域住民が扱える形で提示し、「とやま型脱炭素緑化」の展開に資する知見を得る。

本研究の最終目標は、「雑草抑制」「景観改善」「脱炭素」を一体化させた地域施策の実現であり、特に“緑化による炭素固定量を見える化して説明できる”状態を作り、空き家・空き地対策を単なる維持管理から、環境価値創出へと転換する道筋を提示することである。今回行ったシステムの構築および推定モデルの構築はこれのファーストステップとして位置づけられる。

## 3. 調査研究の内容

### 3.1 フィールドワークの対象と実施方法

本研究は富山県魚津市にある地被植物植栽フィールドを対象に実施した。空き地・空き家の緑化を念頭に、屋外環境下で地被植物の近傍CO<sub>2</sub>濃度がどのように変動するかを把握することを目的に、現地で連続計測を行った。屋外環境は気温・湿度・日射・風などが時間的に変動し、CO<sub>2</sub>濃度の変動も非線形となるため、短時間の測定ではなく「長時間連続計測」を重視した。

測定は、地被植物通過前後の空気のCO<sub>2</sub>濃度差を捉えることを目的とし、CO<sub>2</sub>センサを3箇所(流入部・植物直後・排出部)に設置した。これにより、植物周辺のCO<sub>2</sub>濃度変動を相対的に比較でき、環境変化や周辺の影響を含む屋外条件下でも吸収の兆候を追跡できる構成とした。

### 3.2 計測システム構築(低コスト・可搬性)

計測装置は、Raspberry Pi 5を中心に構築した。CO<sub>2</sub>濃度計測にはNDIR方式センサ(SCD30搭載モジュール)を複数台使用し、温度・湿度も同時取得した。加えて、照度センサ、土壌水分・土壌温度センサを組み合わせ、光合成活動の影響や土壌環境の影響も捉えられるようにした。

複数のCO<sub>2</sub>センサを同時利用する際には、I<sup>2</sup>Cアドレスの衝突が課題となるため、I<sup>2</sup>Cマルチプレクサ(TCA9548A)を導入し、センサをチャンネル切り替えで運用できるようにした。これにより、同一型センサを複数台用いた安定計測を実現し、測定点の同時性を確保した。

### 3.3 取得データの形式と解析方法

計測は5秒間隔で実施し、CO<sub>2</sub>(入口・中間・出口)、温度、湿度、照度、土壌温度、土壌水分をタイムスタンプ付きで保存した。データは日ごとにCSV形式で保存し、日単位で連結して時系列データセットを構築した。

解析では、屋外環境データの“生の揺らぎ”を評価対象とするため、外れ値補正や平滑化などの加工は基本的に行わず、取得データをそのまま使用した。これは、将来的に自治体や教育機関が導入する際に「複雑な前処理に依存しない評価手法」を確立することを重視したためである。本研究で使用したシステムの概要を図1に示す。

### 3.4 機械学習モデル構築(ベースラインと時系列モデル比較)

機械学習では、CO<sub>2</sub>濃度変動が時間依存性を強く持つことに着目し、単一時刻の情報のみを入力とするモデル(MLP)と、過去の履歴を入力する時系列モデル(CNN+GRU)を比較した。

時系列モデルでは、照度の急変、温度変動、CO<sub>2</sub>の微細な揺らぎといった短期パターンをCNNで抽出し、日周変動などの中期依存性をGRUで捉える構造とした。過去10分相当のデータを入力として与え、未来のCO<sub>2</sub>濃度(出口側)の推定を行った。学習・評価は日単位で分割し、未知の日(未観測期間)に対する予測精度を検証した。

また、入力特徴量(温度・湿度・照度・土壌温度・入口CO<sub>2</sub>)の寄与を調べるため、特徴量削除実験を実施し、どの要因が予測精度に影響するかを分析した。

図2はMLPによる予測値と実測値の散布図である。横軸には実測された出口CO<sub>2</sub>濃度(CO<sub>2</sub>.out)、縦軸にはMLPが推定したCO<sub>2</sub>.outをプロットしており、理想的な一致を示す45°の破線との距離が予測誤差の大きさを表している。点群は広い範囲で理想直線から外れて分布しており、特に高濃度領域(800-1200ppm)では体系的な過小評価が顕著である。また、低濃度領域には0ppm近傍の異常値が存在し、MLPはこれらの欠陥データに敏感に反応して大きく外れた予測値を出力している。こうした傾向は時刻tの単点特徴のみを入力とする非時系列モデルでは、CO<sub>2</sub>濃度の非線形的な変動構造や時間的依存関係を十分に捉えられないことを示している。以上より、MLPはCO<sub>2</sub>濃度のたまかなレベルは把握できるものの、日内変化の振幅や短時間の上昇・下降を再現する能力には乏しく、本研究におけるベースラインとしての限界が明確に確認された。

図3はCNN+GRUによる予測値と実測値の時系列データを示している。横軸には測定時刻、縦軸にはCO<sub>2</sub>.out(ppm)を配置している。両日もとも夜間から早朝にかけての緩やかな減少、日中の上昇、夕方以降の再上昇といった日周変動が繰り返し現れており、CNN+GRUはこれらのトレンドやピーク位置を概ね良好に追従していることが分かる。一方で、散水やセンサリセットに起因すると考えられる急激なスパイクや、0ppm近傍の明らかな異常値が含まれる区間では、予測値との乖離が残っており低コストセンサ固有の異常挙動や外乱の影響を完全に吸収できていない様子も確認できる。

しかしながら、全体としてみるとCNN+GRUは2日間にわたる日周サイクルの立ち上がりりと減衰を滑らかに再現しており、単点の状態量のみを入力とするMLPと比べて時間的文脈を考慮した予測が可能になっている。実際、MLPの精度がMAE約200ppm、R<sup>2</sup>=0.24程度であったのに対し、CNN+GRUモデルは同じ評価条件下でMAE約130ppm、R<sup>2</sup>≈0.62を達成している。



図1 構築したCO<sub>2</sub>濃度測定システムの概要

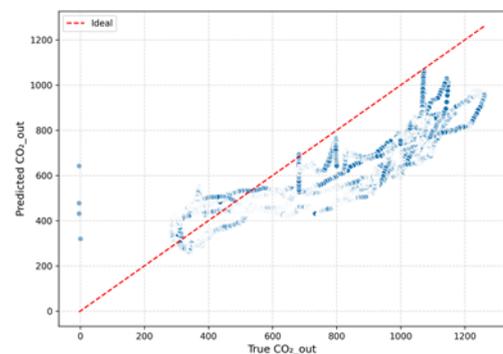


図2 MLPによる予測結果

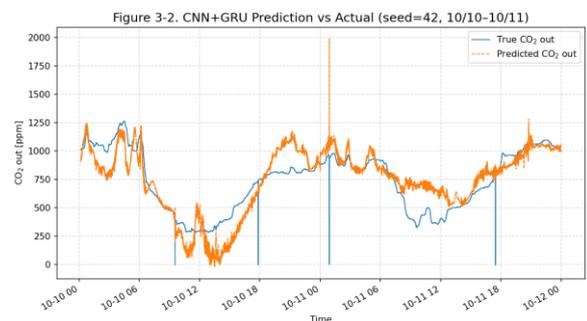


図3 CNN+GRUによる予測結果

## 4. 調査研究の成果

### 4.1 低コスト・多点計測システムの実装成果

本研究により、屋外環境で地被植物周辺の CO<sub>2</sub>濃度を多点で連続測定できる低コスト計測システムを構築した。複数の CO<sub>2</sub>センサを用いて入口・出口の差分を取る構成は、屋外の変動要因を含みながらも、緑化が CO<sub>2</sub>動態に与える影響を追跡するための基盤となる。

特に、PC マルチプレクサを導入して同一型センサを複数運用できる構成は、今後の拡張性(測定点の追加・複数地点運用)にも有効である。可搬性の高い構成により、空き地・空き家周辺でも展開可能な「現地導入性」を確保した点が成果である。

### 4.2 屋外時系列データの蓄積と特徴的変動の確認

連続測定により、屋外 CO<sub>2</sub>濃度が日内変動(夜間～早朝の減少、日中の上昇、夕方以降の再上昇)を示すことを確認した。これは気象条件・日射量・周辺環境の影響を含む現象であり、短時間測定では捉えにくい。時系列データとして蓄積できたことは、機械学習モデル構築において重要な成果である。

また、低コストセンサ特有の 0 ppm 近傍の異常値や、散水・作業介入などの外乱によるスパイクが発生する区間があることも確認できた。これらは現場運用における課題であるが、一方で「現実の屋外環境で起きる問題を含めて評価できた」という点で、社会実装型研究としての意義がある。

### 4.3 機械学習による CO<sub>2</sub>変動推定精度の向上

推定精度の比較により、時系列情報を考慮しない MLP モデルでは、CO<sub>2</sub>濃度の変動を十分に捉えられず、推定精度は限定的であった。一方で、CNN+GRU の時系列モデルでは、日周変動のトレンドやピーク位置を概ね追従でき、推定性能が大きく向上した。

本研究で得られた代表的な結果では、MLP が MAE 約 200 ppm、R<sup>2</sup>約 0.24 程度であったのに対し、CNN+GRU モデルは MAE 約 130 ppm、R<sup>2</sup>約 0.62 と改善し、屋外 CO<sub>2</sub>推定における時系列モデルの有効性が定量的に確認された。これは、屋外環境での炭素固定量推定の基盤として重要な成果である。

以上より、「低コスト計測+時系列モデル」による炭素固定量評価手法の可能性を示し、空き家・空き地対策の緑化技術の定量評価に向けた技術的基盤を確立できた。

## 5. 調査研究に基づく提言

本研究の成果から、空き家・空き地対策として地被植物による雑草抑制型緑化を進める場合、景観改善だけでなく、炭素固定効果を“定量的に説明できる形”で示すことが、地域施策としての説得力を高めると考えられる。特に、自治体の施策では「実施の根拠」「効果の見える化」「継続性」が重要であり、本研究の評価手法はそれに資する。以下に、本研究に基づく実装提案を示す。

### (1) 低コスト計測装置の地域導入

Raspberry Pi と低コスト CO<sub>2</sub>センサを組み合わせた構成は、自治体・教育機関でも導入可能であり、測定機器の導入コストを抑えられる。今後、装置構成を標準化し、簡易マニュアル化することで、現場運用を容易にできる。

### (2) 緑化効果の“見える化”による合意形成

空き地緑化は地域住民の理解が重要である。CO<sub>2</sub>濃度変動の計測結果や推定モデルの結果をグラフ化し、「緑化が環境改善に寄与している」ことを説明することで、継続的運用の合意形成につながる。

### (3) 複数地点の比較と長期データ蓄積

屋外環境は季節・天候で変動するため、長期観測が有効である。複数地点(射水市・富山市など)で同様の計測を行い、地域特性に応じた炭素固定効果の推定精度向上を目指すべきである。

### (4) 地域イベント等でのアウトリーチ

地域住民や自治体に広く理解してもらうには、環境フェア等の場で成果展示を行うことが有効である。

学生主体で装置を展示し、データ可視化を示すことで、教育的効果と地域普及を同時に実現できる。

本研究は「とやま型脱炭素緑化」を国内外へ展開する基盤となり得る。今後、自治体との対話を通じて、維持管理を含む運用モデル(設置・計測・評価・報告)を確立することが重要である。

## 6. 課題解決策の自己評価

本研究は、空き家・空き地問題という地域課題に対して、緑化による景観改善だけでなく脱炭素効果の定量化を目指した点に独自性がある。また、低コスト計測装置によるフィールドでのデータ取得、解析、モデル比較までを学生主体で実施した点は、本助成事業の趣旨に合致した成果であると考えられる。

特に、時系列モデル(CNN+GRU)が屋外 CO<sub>2</sub>変動の推定精度を大きく改善できたことは、炭素固定量評価の基盤として有効であることを示した。一方で、課題として以下が残る。

### (1) 観測期間の限定性

短期間の測定では季節変動や気象条件の多様性を十分に含められないため、長期観測が必要である。

### (2) 低コストセンサの異常値対策

0ppm 近傍の異常値や外乱によるスパイクが存在し、推定精度の上限を規定する。異常値検出・マスクング、ロバスト推定などの対策が必要である。

### (3) 炭素固定量評価の高度化

本研究では CO<sub>2</sub>濃度変動を中心に扱ったが、将来的には風速や通気量などの影響を考慮し、より厳密な固定量換算手法へ発展させる必要がある。

以上の課題はあるものの、本研究は「とやま型脱炭素緑化」の実装に向けた技術基盤を構築した点で有意義であり、今後の継続研究により地域社会に還元可能な形へ発展させていきたい。