

研究終了報告書

「マルチスケール・マルチアングルリモートセンシングデータの統合基盤の創成」

研究期間：2021 年 10 月～2024 年 3 月

研究者：堤田 成政

1. 研究のねらい

リモートセンシングデータは、気候変動、災害対応、自然および都市空間の価値を定量化する上で有用である。そのため陸域の物理的特徴を捉えた観測値を人間が理解しやすい形式(主題図)に変換するための技術開発が求められている。本研究は、土地被覆土地利用(Land Cover Land Use: LCLU)分類図を中心とした、高精度かつ迅速な主題図の作成手法の開発を目指す。衛星観測データに基づく主題図を作成するには、地上参照データの収集が不可欠であるが、サンプリングとラベリングに伴う人的コストの高さが課題である。さらに、高解像度衛星画像の利用が可能となった現在でも、これだけでは土地被覆の正確なラベリングは困難であり、高品質な地上参照データベースの構築は難しい。本研究では、これらの課題を克服するため、スマートフォンやアクションカメラにより路上から連続撮影された地上写真(プロキシミティセンシングデータ)と衛星観測データを統合し、AIによるLCLUの推定と地図化を実現する技術を開発する。具体的には、位置情報を含む大量のプロキシミティセンシングデータから、撮影位置周辺のLCLUを推定する深層学習モデルを開発し、大規模な地上参照データベースを構築する。さらに、地上参照データと衛星観測データを組み合わせた従来型機械学習手法と、別途取得可能な地理情報データを統合することで、高精度なLCLU分類図を実現する。これらのアプローチにより、迅速かつ高精度な主題図を作成できるフレームワークの提案を目指す。

2. 研究成果

(1)概要

陸域の状況把握に不可欠な土地被覆土地利用(Land Cover Land Use: LCLU)分類に関する研究として、効率的な地上参照データ作成に向け、スマートフォンやアクションカメラにより路上から連続撮影された地上写真(プロキシミティセンシングデータ)に着目した。プロキシミティセンシングデータは、調査者自身が撮影したデータのみならず、不特定多数のユーザーが撮影したソーシャルセンシングデータとしても入手可能である。そのため、全国各地で観測された大容量のプロキシミティセンシングデータからLCLU情報を得ることが可能となる。そのため、プロキシミティセンシングデータからLCLUを推定するための深層学習モデルを構築した。Vision Transformerをもとにしたモデルにより、画像がどの土地被覆を示しているかを推定するのみならず、画像内のどの範囲を着目しているかを明らかにすることで、地上参照データ構築の基盤技術を開発することができた。しかしながら、画像内で示すLCLUの画像内領域を特定することは可能となる一方、地理的範囲を明らかにすることは現時点では難しく、挑戦的な課題としてとどまっている。一方、プロキシミティセンシングデータからは、衛星観測データからは得られることの難しい詳細な地域環境を把握することが可能となる。特に、季節変化する地域環境は土地被覆研究においても重要な対象である。そのため、当初の計画を超え、プロキシミティセンシングデータより桜の開花フェノロジーを把握する研究開発に取り組んだ。各画像に物体検

出モデルを適用し、桜の開花の有無を判断し、その結果を地図化することで、開花日、満開日、落花日の推定を 10 m グリッドの単位で実現した。本アプローチは、気象庁の生物季節観測や市民参加型いきもの調査を補完する新たな地域観測アプローチとして普及することを期待する成果であり、プレスリリースを実施した（https://www.saitama-u.ac.jp/topics_archives/2023/2023-1006-1614-9.html）。

一方で、従来型の機械学習のアプローチを発展させた土地被覆分類手法の開発にも取り組んだ。決定木ベースの教師付き分類モデルによる分類確率に対して、誰でも任意の場所で入手可能な Dynamic world と呼ばれる Convolutional Neural Network (CNN) ベースの公開モデルの分類確率とともに Decision Fusion を適用することで、分類ノイズを軽減させることを可能にした。本技術は、学習用データセットの準備に多大なコストがかかる CNN や Vision Transformer による深層学習モデルとは異なり、サンプリングベースの地上参照データを準備する従来の機械学習アプローチが、未だに有効であることを示唆している。これにより、より簡便かつ高精度な土地被覆分類図の作成が見込まれる。

(2) 詳細

【マルチアングルリモートセンシングデータの統合】

土地被覆土地利用 (Land Cover Land Use: LCLU) 分類は、気候変動、炭素循環評価、都市地域計画、環境保全計画など多岐にわたる領域で活用される。LCLU 分類図の作成は、現地調査による高精度な地上参照データと衛星観測データを組み合わせ、機械学習手法を用いて広域に推定する。従来の地上参照データセットの作成は、現地調査による土地被覆の確認から高精度な判断データを収集することが可能であるが、人的コストは高い。近年、深層学習モデルへの適用、特に Convolutional Neural Network (CNN) や Vision Transformer (ViT) などが注目されているが、これらには画像内の全ピクセルのアノテーションが必要で、高度な LCLU クラスの判断技術と労力が要求される。本研究では、効率的な地上参照データの収集技術に着目し、スマートフォンやアクションカメラで連続的に撮影された地上写真 (プロキシミティセンシングデータ) を利用する。プロキシミティセンシングデータは、調査者自身の撮影データに加え、不特定多数のユーザーが撮影したソーシャルセンシングデータとしても入手可能である。これにより、世界各地で観測された大量のプロキシミティセンシングデータから LCLU 情報の抽出が可能となる。本研究では、地上参照データの構築における人的コストの高さに焦点を当て、プロキシミティセンシングデータを用いた土地被覆推定のための深層学習モデルを開発した。CNN ベースの Inception, DenseNet、そして Transformer ベースの ViT, Swin Transformer (SiT) を用いたモデル比較により、ViT モデルが高い精度 (全体精度: 0.86) を示した (研究成果リスト 1)。さらに、GradCAM を適用することで、ViT が推定した土地被覆に関連する画像内の特定領域に明確に焦点を当てていることを確認した (図 1)。現時点では画像内の特定領域を特定することは可能であるが、写真の撮影位置および撮影角度から土地被覆の範囲を地理情報化する作業は、依然として挑戦的な課題である。

プロキシミティセンシングデータを用いることで、衛星観測データでは得られない詳細な地域環境の把握が可能となる。特に季節変化する地域環境は LCLU 研究において重要な対象である。そのため、本研究はプロキシミティセンシングデータから桜の開花フェノロジーの把握に着目し、研究開発に取り組んだ。物体検出モデル (YOLOv4) を各画像に適用し、桜の開花の有

無を判断し、撮影位置を 10 m 間隔のグリッドに落とし込んだ。各グリッドでの時系列分析を行い(図2)、開花日、満開日、落花日の推定を地図化した(図3、研究成果リスト2)。このアプローチは、市民参加型調査を補完する新たな地域観測手法としての普及が期待される成果であり、その成果に関するプレスリリースを行った。(https://www.saitama-u.ac.jp/topics_archives/2023-1006-1614-9.html)。

【LCLU 分類図の作成】

従来型の LCLU 分類図作成手法は、地上参照データに基づく LCLU クラスを、衛星観測データから得られる画像特徴量と RandomForest や Gradient Boosted Decision Tree などの決定木ベースの分類器を用いて実現する。しかし、ピクセル単位の LCLU クラス推定においては、Salt-and-Pepper noise と呼ばれるノイズの発生が問題となる。LCLU 分類は、都市面積や都市の空間分布パターン、農地の分布パターンやその変化など、空間的特徴を把握するために広く使用されるため、各地点での正確性が重要である。その結果、Salt-and-Pepper noise のような観測や分類器由来の誤差を最小限に抑える必要がある。最近では、多種多様な衛星観測データが取得され、観測データが入手され次第、CNN ベースの LCLU 分類器によって即座に分類される Dynamic World という取り組みが開始されている。Dynamic World は CNN により空間効果を取り入れているため、Salt-and-Pepper noise は比較的小さい。本研究では、既存の決定木ベースの分類器で得られた分類確率と Dynamic World の分類確率を統合するために Dempster-Shafer Theory を適用した、新たな分類図作成アルゴリズムを開発した(図4)。このアプローチにより生成された LCLU 分類図はノイズが少なく、CNN や Vision Transformer による深層学習モデルと異なり、サンプリングベースの地上参照データを用いる従来の機械学習アプローチの有効性を示唆している(研究成果リスト3)。この結果、より簡便かつ高精度な土地被覆分類図の作成が見込まれる。

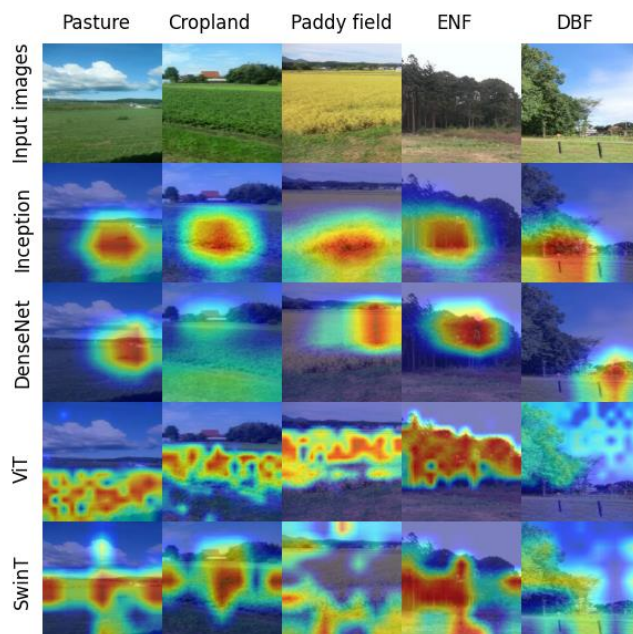


図 1 . Inception-v4, DenseNet, Vision Transformer, Swin Transformer によるプロキシミティセンシングデータからの土地被覆分類と注目領域.

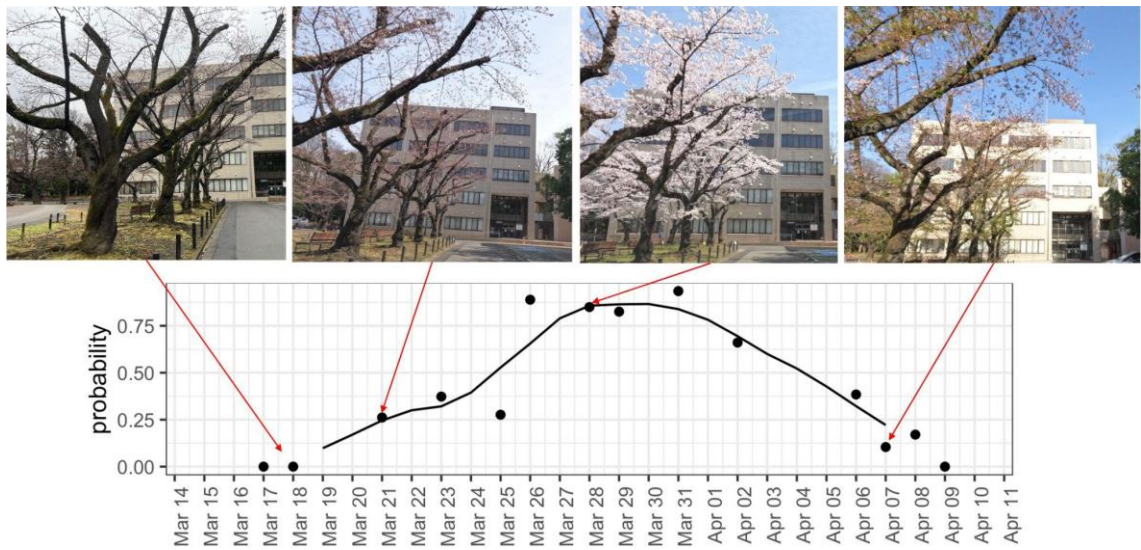


図 2 . プロキシミティセンシングデータを用いた桜開花検出確率の季節変化.



図 3 . 桜の開花日、満開日、落花日の推定.

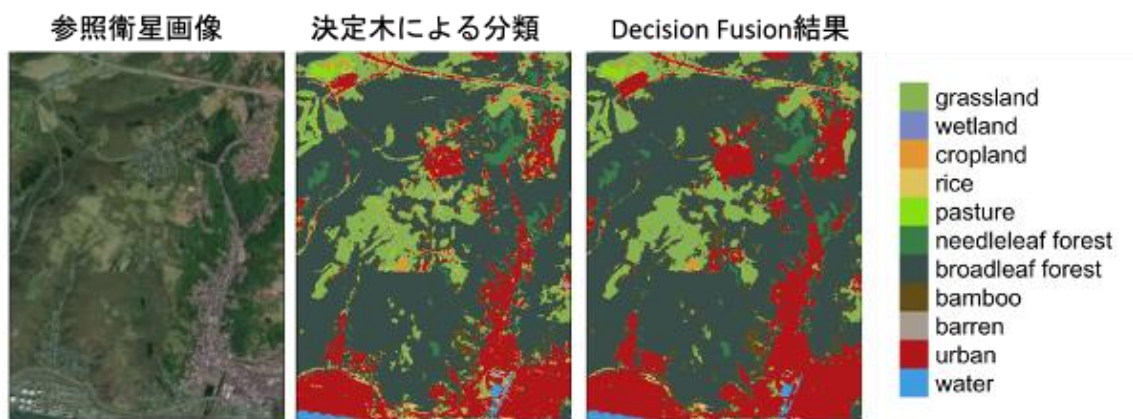


図 4. Decision Fusion による分類ノイズの軽減例.

3. 今後の展開

【マルチアングルリモートセンシングデータの統合】

画像の撮影に使用されるアクションカメラやスマートフォンの GPS センサーの精度が常に高いわけではないため、撮影位置の誤差が生じることが問題となっている。加えて、画像内で把握された土地被覆の領域は特定できているものの、その地理的範囲の推定には至っていない。そこで、プロキシミティセンシングデータの撮影位置に生じる誤差に関しては、GIS データとして入手可能な道路データに撮影位置を投影するシステムを開発中であり、このアプローチにより問題の解決が期待される。このシステムは 2024 年度に完成予定で、その後システムの公開および国際学術論文への投稿を計画している。また、プロキシミティセンシングデータから把握された土地被覆の地理的範囲の現実的な推定については、深度推定モデルをプロキシミティセンシングデータに適用し、撮影位置から対象領域までの距離を推定することを検討している。さらに、高解像度衛星画像のセグメンテーションから得られる均一な地表面領域に対し、撮影角度方向からの対象領域推定を行い、地上参照データの作成を目指す。このアプローチは 2024 年度中の実現を目標としている。加えて、プロキシミティセンシングデータを用いた桜の開花検出手法は、ソーシャルセンシングデータ(インターネット上に公開された不特定多数の撮影者による画像データ)に適用可能であり、シチズンサイエンスへの応用も期待される。この手法を通じて、生物季節観測の新たな観測手法として提案する。現在はケーススタディとして特定の地域内での実証研究となっているため、2024 年度には、広域展開に取り組む。また、現在はソメイヨシノに特化した検出モデルを用いているが、2025 年度には多種分類への発展、さらに 2026 年度以降は桜以外の生物季節観測への応用を目指す。

「LCLU 分類図の作成」

Dempster-Shafer Theory による決定木ベースの分類確率と Dynamic World の分類確率の統合は実現しているが、農地や道路、建物などのより正確な GIS データの取得も可能である。これらのデータを活用し、分類図の作成に取り組むことで、より正確な LCLU 分類図の実現が可能であると考えられる。そのため、これらの GIS データを統合する Dempster-Shafer Theory Chain を構築し、順次統合する手法を 2024 年中に開発する計画である。上記のアプローチにより、プロキシミティセンシングを用いて効率的に構築した地上参照データセットと、Dynamic World、衛星画像データ、地理情報データの統合により、分類図の高精度化を目指す。2024 年度には北海道、さらに 2025 年度以降は日本全域への展開を試みる。

4. 自己評価

【研究目的の達成状況】

研究目的は概ね達成されたと考えている。しかし、2 つの大きなテーマを結びつけるプロキシミティセンシングデータからの地上参照データの作成については、未達成の部分が残っており、この課題には早急に取り組む必要がある。一方、当初の計画を超えて、プロキシミティセンシングデータを用いた季節変化する地域環境観測の手法を開発し、予想を超える成果を実現することができた。

【研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)】

本プロジェクトの推進に際して、代表者は個人型研究の形態で主体的に研究を進めることができた。さらに、国際会議 4 件と国内学会 3 件の成果発表により、国内外に研究成果を広くアピールすることが可能となり、予算の円滑かつ効果的な執行することができた。

【研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果】

本研究では、高コストの深層学習手法のみに頼らず、従来の機械学習や統計学的手法を採用し組み合わせることで、独自のデータ分析アプローチを実現した。この手法は、LCLU 研究だけでなく、地理情報科学、リモートセンシング工学、地域情報学など幅広い分野におけるフレームワークの展開に貢献すると考えられる。特に、リモートセンシングデータとプロキシミティセンシングデータを統合した分析フレームワークは、地域環境観測分野などの融合型新規学術領域への進展に寄与することが期待される。また、土地被覆分野において重要な要素である季節変化に関して、開花フェノロジーは衛星観測では捉えにくい対象であり、その観測は調査員による記録が主である。本研究で提案されたプロキシミティセンシングに基づく開花観測技術は、開花状況をより簡便に把握できるため、新たな生物季節観測の手段となり得る。今後はこの技術を汎用的なアプローチとして発展させ、桜に限らず他の生物季節観測への応用も期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 7 件

1. **Tsutsumida N.**, Nasahara K., Tadono T., Birch T., Erickson T., 10-meter resolution land cover classification mapping using sentinel-2 and dynamic world, IGARSS 2023 – 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium proceedings, 2023, 2954–2957.

この研究の目的は、Sentinel-1 および Sentinel-2 衛星画像と Dynamic World データセットを活用し、10 メートルの空間解像度を持つ土地被覆分類図を開発することである。分類ノイズを軽減するため、Gradient Boosted Decision Tree (GBDT)による分類確率と Dynamic World の CNN 分類確率を Decision Fusion 手法で統合した。この結果、Decision Fusion によって分類ノイズが軽減されたことが確認され、従来の機械学習に基づく土地被覆分類手法が現在でも有効であることが示唆された。

2. **Tsutsumida N.** and Funada S. (2023) Mapping cherry blossom phenology using a semi-automatic observation system with street level photos, Ecological Informatics, 102314. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102314>

花の開花は気候変動の主要な指標であるが、従来の定点観測では地域レベルでの観測が困難であった。本研究では、スマートフォン等による連続撮影されたプロキシミティセンシングデータと深層学習モデルを組み合わせることにより、新たな観測システムフレームワークを提案した。具体的には、路上から撮影されたプロキシミティセンシングデータを用いて YOLOv4 モデルで桜の開花を検出し、写真の観測位置と日付から 10m × 10m の空間グリッドに桜の開

花確率を地図化した。これにより、十分な観測データが得られた場所で、桜の開花日、満開日、落花日を時系列分析により推定することに成功した。

3. **Tsutsumida N.**, Zhao J., Shibuya N., Nasahara K., and Tadono T. Investigating the use of deep learning models for land cover classification from street-level imagery, Ecological Research. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12470>

土地被覆分類は、事前に定義されたクラスによって陸域を表現するプロセスであり、衛星画像や航空画像を用いた教師あり分類手法によって実施される。しかし、高精度の土地被覆分類図を作成するためには、大規模な参照データセットの構築が困難である。本研究では、プロキシミティセンシングデータを利用して土地被覆を推定するための深層学習モデルを開発し、Vision Transformer を基盤としたモデルにより全体精度 0.86 を達成した。この成果は、位置情報付き地上写真から半自動的に参照データベースを構築するための研究への貢献が期待される。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数： 0 件（特許公開前のものは件数にのみ含む）

(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）

【海外学会発表】

- **Tsutsumida N.**, Zhao J., Nasahara K., and Tadono T. (2022) Land cover classification from street-level photos, IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium proceedings, 2022, pp. 5524–5526, <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883194>（査読付き）.
- Funada S. and **Tsutsumida N.** (2022) Mapping cherry blossoms from geotagged street-level photos, IGARSS 2022 – 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium proceedings, 2022, pp. 5645–5647, doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884256（査読付き）.
- **Tsutsumida N.**, Nasahara K. and Tadono T. Enhancing Land Cover Classification Mapping with Dynamic World and Decision Fusion, AGU Fall meeting 2023 (poster (Highlighted)、査読なし).
- **Tsutsumida N.**, Zhao J., Nasahara K. and Tadono T. Estimating Land Cover from Geo-tagged Street-level Photos, AGU Fall meeting 2021 (poster、査読なし).

【国内学会発表】

- 舟田宗弥, 堤田 成政. 車載カメラ画像を用いた桜開花マッピング, 第 69 回日本生態学会大会, 3 月 15 日(オンライン), (ポスター、査読なし).
- 堤田 成政. ソーシャルセンシングによる桜開花フェノロジー, 第 71 回日本生態学会大会, 3 月 16 日(オンライン), (口頭発表、査読なし).

【プレスリリース】

- 連続撮影のストリート写真で、桜の開花の変遷を地図化

(https://www.saitama-u.ac.jp/topics_archives/2023/2023-1006-1614-9.html)