

令和 5 年 3 月 31 日

京都府商工労働観光部ものづくり振興課 殿

所在地	東京都渋谷区代々木一丁目25-5
名称	株式会社Archeda
代表者氏名	代表取締役 長田大輝

衛星画像を用いた森林二酸化炭素吸収量管理システムの導入可能性調査業務

業務報告書

令和5年2月16日付けで委託した標記事業を実施しましたので、衛星画像を用いた森林二酸化炭素吸収量管理システムの導入可能性調査業務(本業務)の仕様書に基づき、関係書類を添えて報告します。

記

- 1 業務報告書
- 2 本業務により生じた資料・調査結果等

衛星画像を用いた森林による二酸化炭素吸収量(CO₂e)の推定

● 土地被覆の推定

○ 使用データについて

- 今回、教師データとして、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 地球観測研究センター(EORC)が作成する高解像度土地利用土地被覆図を使用した。今回使用した土地被覆図はVer21.11と呼ばれるバージョンを採用した。Ver21.11では、Sentinel-2・Landsat-8・ALOS-2といった3種類の衛星画像をSACCLASS2と呼ばれる畳み込みニューラルネットワークで分類している。

なお、入力データである衛星画像として、以下の2種類の衛星を活用した。

■ Sentinel-1A/1B

- 運用機関: 欧州連合(EU)および欧州宇宙機関(ESA)
- 衛星打ち上げ時期: 2014年(1A)、2016年(1B)
- 搭載機器: Cバンド合成開口レーダー (SAR)
- 解像度: 5m・20m・40m
- 観測幅: 20km・80km・250km・400km
- 取得モード: 4種類
- 特徴: EUとESAの地球観測プログラム「コペルニクス計画」により運用されている地球観測衛星であり、地球の自然環境のモニタリングや自然災害時での利用といった幅広い用途で活用されている衛星である。また、SAR衛星であることから、雲や照度不足に影響されない波長で動作し、昼夜を問わずあらゆる天候でデータを取得できる点も特徴である。

■ Sentinel-2A/2B

- 運用機関: 欧州連合(EU)および欧州宇宙機関(ESA)
- 衛星打ち上げ時期: 2015年(2A)、2017年(2B)
- 搭載機器: マルチスペクトルイメージャ
- 搭載機器: Cバンド合成開口レーダー (SAR)
- 解像度: 10m・20m・60m
- 観測幅: 290km
- 取得モード: 13種類
- 特徴: Sentinel-1と同じく、EUとESAの地球観測プログラム「コペルニクス計画」により運用されている地球観測衛星であり、全部で13バンドの観測波長帯を持っている点が一番の特徴である。主に陸域における土地被覆変化の把握や作物の生育状況のほか、災害時の利用など、幅広い用途で活用されている衛星である。

○ 推定手法について

- 前述の高解像度土地利用土地被覆図を教師データ、Sentinel1およびSentinel2の衛星データを入力データとして推定を行った。なお、入力衛星データの撮像時期は、2018年以降の春季を採用した。今回は、京都府を含みかつ植生が近い地域として以下の領域を選択した。
 - 北緯34.5°～35.5°
 - 統計134°～136°
- 高解像度土地利用土地被覆図では、下記表の通り12種類の被覆情報が格納されているため、土地被覆の推定の上で、落葉広葉樹/落葉針葉樹/常緑広葉樹/常緑針葉樹/竹林に該当するエリアを森林と定義し、土地被覆の推定を行った。

No	名称	内容
1	水域	海、川、湖などの水域で覆われている領域
2	人口構造物	建築物、道路など人口構造物で覆われた土地
3	水田	水稲をはじめとする水を張って耕作する土地
4	畑地	水を張らずに耕作する土地
5	草地	樹木以外の草本植物を含む土地
6	落葉広葉樹	落葉広葉樹で覆われている土地
7	落葉針葉樹	落葉針葉樹で覆われている土地
8	常緑広葉樹	常緑広葉樹で覆われている土地
9	常緑針葉樹	常緑針葉樹で覆われている土地
10	裸地	植物が存在せず岩や土がむき出しの土地
11	竹林	竹で構成されている土地
12	ソーラーパネル	ソーラーパネルが設置されている領域

また、今回の機械学習モデルとしては、香港中文大学とSenseTimeが主催するオープンソースコミュニティOpenMMLabが公開しているライブラリ「MMsegmentation」を採用した。

- 今回、10m×10mを1ピクセル(地点)として、以下のデータを活用して、推定を実施した。
 - 学習データと検証データ数の合計:1億4400万地点
 - 検証データ数:2880万地点

○ 技術的な成果について

- 前述の推定方法を用いて森林および非森林の分類を実施した結果、以下の表のとおりとなった。

	正解データ:森林	正解データ:非森林	
推定結果:森林	15848603	401691	
推定結果:非森林	2359365	10190341	
全地点数			28,800,000

- **結果**
推定結果が森林で、実際に森林だった数が15,848,603地点
推定結果が非森林で、実際に非森林だった数が10,190,341地点
- 上記の推定結果の合計値を、全検証データ2,880,000地点で割った値を分類精度と定義する。
 $(15,848,603+10,190,341)/28800000=0.90413$
- したがって、分類精度は90.4%であった。この数字は仕様書の精度目標88.5%を上回った結果であり、森林の範囲の殆どを、我々の土地被覆分類アルゴリズムでは森林と推定できている。
- 今回推定した過去5年間の京都府の森林においては時系列的な変化は見られなかったものの、継続して活用することで、土砂災害・違法伐採等が発生した際の森林状態把握の利用に繋がられる精度であると結論付けることができる。

土地被覆推定結果について



- **樹高の推定**
 - 使用データについて
 - 地域: 静岡県の富士山南東部・伊豆東部エリア
 - [VIRTUAL SHIZUOKA](#)
 - データ: ドローンに搭載したLiDARで取得した点群データ
 - 時期: 2020年～2021年
 - 推定手法について
 - 推定対象期間で撮影されたSentinel-1及びSentinel-2の衛星画像を基にArcheda社で開発した機械学習モデルを用いて10m分解能で森林樹高を推定した。
 - 教師データは、日本国内にてドローンで撮影された3次元点群データを使用。1000km²以上の森林をLiDARで撮影したものから、CHM(Canopy Height Model)を使用し樹高を測定した。
 - 「ミニバッチ学習」と「損失関数から計算された誤差」によって学習モデル(特定の種類のパターンを認識・識別するようにトレーニングされた仕組みのこと)内のパラメータ更新を繰り返すことで、特定のパターンを推定できるようになる。

- ミニバッチ学習

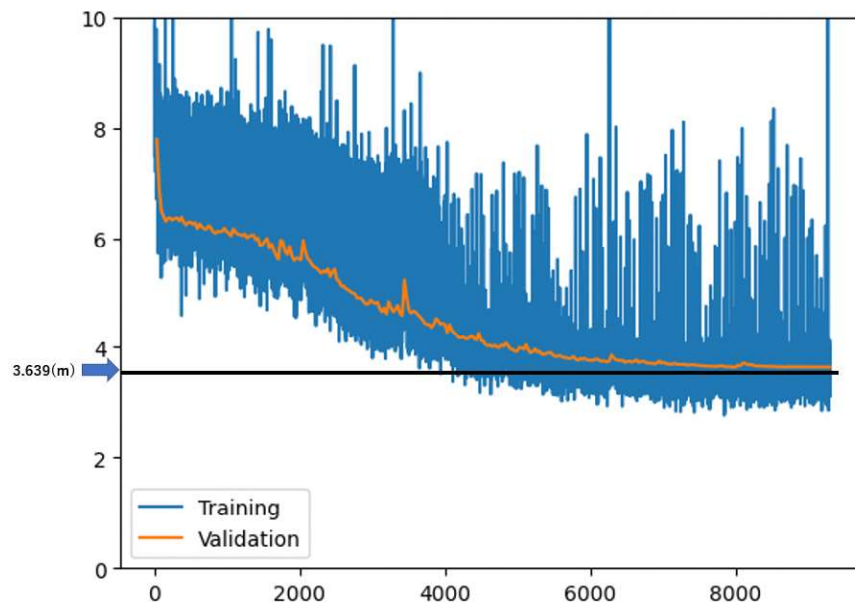
データを分割し、分割したデータごとに学習を実施した。この学習方法は今回利用したニューラルネットワークではよく利用される手法で、途中で精度が上がらなくなる勾配消失問題に陥りにくく、学習結果が安定しやすいという利点がある。

- 損失関数

機械学習モデルが推定した結果と正解値の誤差を計算する関数である。学習した結果として、正解データにどの程度誤差があるか評価するために利用する。

- 技術的な成果

- 開発したモデルの精度は、論文調査から技術的に可能であるとした平均誤差4.5m以内を目指していた。今回は、自社で開発したアルゴリズムの精度をより向上させるため、学習モデルの性能向上に寄与する、ハイパーパラメータのチューニングを実施した。
- 特徴量の削減とハイパーパラメータチューニングと呼ばれる学習モデルにおけるパラメータ更新を繰り返すことで、誤差が小さくなり3.7m以内になった。
- 以下、損失関数(RMSE)の学習曲線を示す。縦軸は樹高の精度、横軸は学習回数(1epochで複数回の学習を行うため、エポック数×1エポックあたりの学習回数に当たる)。合計して258エポック(学習回数)を行い、最終的に平均誤差3.7m以内の結果を得られた¹。



- 異なるバイオマス量推定手法の比較

- 推定手法について

- 一つ目の推定手法は、推定対象期間で撮影されたSentinel-1及びSentinel-2の衛星画像を基にArcheda社で開発した機械学習モデルを用いて30m分解能でバイオマス量を推定した。

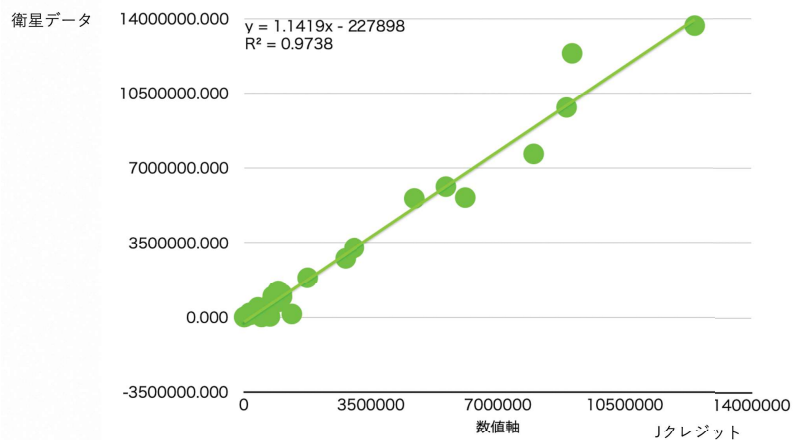
¹論文の解析手法・評価データと全く同一のものを使用していないので、単純比較はできないことはご了承ください。

- 二つ目の推定手法は、Jクレジット制度の算出方法に準じて算定した幹材積成長量を基にバイオマス量を推定した。その際、樹種などの森林情報には、京都府の開示する森林資源情報を使用し、樹高は本調査の衛星データを基に推定したパラメータを使用。また、胸高直径は、推定した樹高を基に、世界的に広く使用されているChapman-Richards(von Bertalanffy)式を使用し算出した。得られた森林情報、樹高、胸高直径のパラメータを基に、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所が提供する幹材積計算プログラム²を用いて幹材積を算定した

○ 技術的な成果

- 2022年の各市区町村ごとの、Jクレジットと衛星画像をそれぞれ用いて推定したバイオマス量は、有意な相関関係(線形な比例関係)が見られた。

衛星画像から直接予測したAGBと、Jクレジットを準用して算出したAGBの比較



- 値のズレを今回得られた式で補正すれば、衛星画像からAGB(地上部バイオマス)を直接推定可能であることが示唆された。森林資源情報の情報がなくとも、衛星画像からAGBを直接推定可能であることが示唆された。

² <https://www.ffpri.affrc.go.jp/database/stemvolume/index.html>

- 森林の二酸化炭素吸収量の算出
 - 算出方法について
 - 調査内容3で算出したJクレジット制度を応用して推定したバイオマス量及び1で推定した土地被覆分類モデルの情報から対象となる京都府全域の二酸化炭素吸収量の時系列トレンドを分析した。

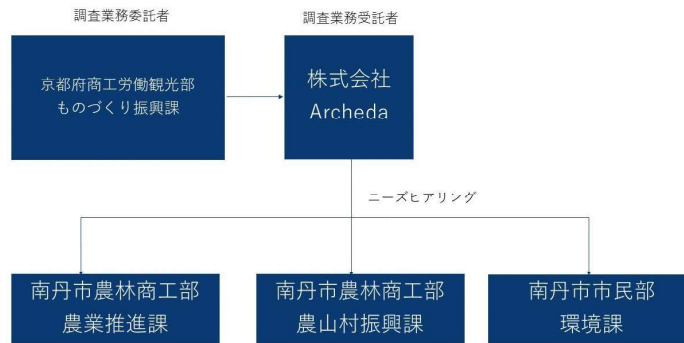
調査結果

area	二酸化炭素吸収量(t)					CO2吸収量 増減率(%) 5ヵ年比較
	2018	2019	2020	2021	2022	
京都市	219,994	226,699	217,858	215,646	211,245	98.99%
南丹市	195,527	201,433	193,331	191,760	187,843	99.00%
福知山市	160,151	165,113	158,583	156,897	153,857	99.00%
京丹後市	124,775	128,517	123,549	122,379	119,665	98.96%
綾部市	101,691	104,750	100,596	99,634	97,554	98.97%
京丹波町	96,225	98,988	95,257	94,311	92,367	98.98%
舞鶴市	88,146	90,690	87,388	86,409	84,678	99.00%
亀岡市	52,860	54,271	52,432	51,635	50,724	98.97%
宮津市	42,029	43,270	41,680	41,270	40,432	99.04%
与謝野町	26,711	27,493	26,416	26,143	25,696	99.04%
伊根町	17,443	17,867	17,292	17,066	16,745	98.98%
和束町	17,265	17,824	17,061	16,927	16,599	99.02%
南山城村	16,599	17,056	16,449	16,211	15,958	99.02%
宇治田原町	16,520	17,032	16,350	16,147	15,846	98.97%
木津川市	9,814	10,099	9,704	9,668	9,430	99.01%
笠置町	5,640	5,815	5,569	5,542	5,399	98.91%
京田辺市	4,040	4,167	4,001	3,959	3,894	99.08%
井出町	2,958	3,036	2,951	2,877	2,861	99.17%
長岡京市	2,139	2,199	2,128	2,109	2,046	98.90%
城陽市	1,850	1,897	1,813	1,822	1,774	98.94%
精華町	861	887	853	849	834	99.21%
宇治市	506	518	496	499	486	98.98%
八幡市	215	219	215	215	212	99.60%
大山崎町	137	142	135	134	130	98.64%
久御山町	128	132	132	125	122	98.65%
向日市	30	31	29	30	29	99.42%

算出データの利活用による脱炭素まちづくりの推進支援の検討

● 南丹市ヒアリング

- 実施日時: 3月28日(火) 10:00~11:30
- 開催場所: 南丹市役所(京都府南丹市園部町小桜町47-47)
- 参加者
南丹市農林商工部農業推進部: 稲荷貞人様、松本宏樹様
南丹市農林商工部農山村振興課: 清水易様
南丹市市民部環境課: 平井幹人様
株式会社Archeda: 長田大輝、津村洸匡



○ ヒアリング結果

衛星画像を用いた森林二酸化炭素吸収量の推計結果について、市町村の脱炭素関連施策へ活用するにあたっては、以下の点を組み込んだシステム開発が求められる。

- 市町村が既に使用している森林GISがある場合、既存システムとの連携が求められる。
- 特に南丹市においては、R2年度に、外部企業に作成を委託した赤色立体地図を市として所有しており、該当の森林GISを日々の業務の中で活用している。
- 森林クレジットをはじめとしたカーボンニュートラルに向けた施策については、まずは市民を巻き込んだ施策を打ち出していくことが重要。そのためには、目指すべき吸収量などの目標値の設定などが鍵になる。
- 森林を本システムで解析した際に、該当の地域や歴史まで考慮して森林の適切な使い方を考えることが可能になれば、自治体としてより森林の活用となる。
- プロダクト上での選択エリアの自動遷移、地図の拡大縮小ボタンの配置などを進め、自治体現場でのよりスムーズな活用を。

その他本業務により生じた資料・調査結果等

- 南丹市へのヒアリングの際に使用した資料を別添する。
- 参考資料
 - 高解像度土地利用土地被覆図ホームページ
 - <https://earth.jaxa.jp/ja/data/2562/index.html>
 - 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所が提供する幹材積計算プログラム
 - <https://www.ffpri.affrc.go.jp/database/stemvolume/index.html>
 - 小林 勇太・堀内 颯夏・鈴木 紅葉・森 章“日本の主要樹種 75 種の樹高と胸高直径の関係” 日林誌 (2021) 103: 168-171
 - 京都府の令和2(2020)“年度温室効果ガス排出量について”
 - <https://www.pref.kyoto.jp/tikyuu/documents/2020ghg.pdf>
 - 南丹市“現状の課題について”
 - https://www.city.nantan.kyoto.jp/www/resource/kankyuu/pdf/honpen_2.pdf
- 使用データセット一覧
 - VIRTUAL SHIZUOKA 静岡県 富士山南東部・伊豆東部 点群データ
 - <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/shizuoka-2019-pointcloud>