様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　７ 年　 ６ 月　 ３ 日現在

機関番号：８２１０５
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2022～2024
課題番号：２２Ｈ０２４００・２３Ｋ２３６６５

研究課題名（和文）近接・衛星センシングと深層学習を駆使した土壌特性マップ群の創出

研究課題名（英文）Creation of a set of soil property maps using proximity and satellite sensing and deep learning

研究代表者
今矢　明宏（Imaya, Akihiro）

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：６０３５３５９６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　13,500,000円

研究成果の概要（和文）：日本全国の森林土壌における任意の深さにおける土壌特性値を推定するため、地形や気候条件などの広域データを用いた機械学習モデルを構築した。火山灰起源の土壌に多い非晶質アルミニウム量の指標となる酸性シュウ酸塩可溶アルミニウム濃度の予測モデルから全国の火山灰土壌分布マップを作成した。また、過去に実施された土壌調査の深度情報をもとに土層が一定深度以上となる確率をモデルにより導き、土層厚確率マップを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
日本のような起伏に富んだ地形に分布する森林の多面的機能を広域で評価し、その将来を推測するためには、その基盤となっている土壌の特性を知る必要がある。しかし、これらを網羅的に調査することは現実的ではないことから、本研究では機械学習によりこれらの予測を行った。生成した火山灰土壌分布マップは土壌炭素蓄積量の推定精度向上に資することで地球温暖化対策に貢献する。また、山地・丘陵地における全国土層厚確率マップデータについては、防災機能評価など、森林の多面的機能に関わる施策の立案等に貢献する。

研究成果の概要（英文）：To predict soil properties at various depths in forest soils across Japan, a machine learning model was constructed using spatial data such as topography and climatic conditions. A map of volcanic ash soil distribution throughout Japan was created based on the model's prediction of acid oxalate extractable aluminum concentration, an indicator of amorphous material content, which is common in soils of volcanic ash origin. The model also derived the probability of soil layers being above a certain depth based on depth information from previous soil surveys, and produced a soil layer thickness probability map.

研究分野：森林土壌学

キーワード：火山灰土壌　デジタルソイルマッピング　機械学習　近接センシング　土壌特性　広域評価

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１（共通）

１。研究開始当初の背景

土壌理化学性(土壌特性値)は森林生態系サービスの評価にとって重要なパラメータ群である。例えば、炭素循環の予測モデル（例：Biome-BGC モデル）や水、土砂、物質の流れの予測モデル（例：SWAT モデル）では、土層厚、土壌窒素量、土性（粒度組成)、透水係数を入力データとして精緻化される。森林生態系サービスの評価対象を全国スケールなど広域とする場合、日本は、１）地形や地質が複雑なことに加え、２）土壌の成り立ちが複雑で、土壌特性値の空間変動が極めて大きく、土壌情報をいかに高精細かつ高精度に整備できるかが、生態系サービスの広域評価を精緻化するうえで極めて重要となる。特に日本の場合、様々な起源、量の火山灰が幾度となく降り注ぎ、堆積、流亡していてその混入度合の実態が明らかでなく、さらにはこの火山灰の風化生成物が土壌有機物と強く結合したり、微生物の活動を阻害したりするために、様々な土壌特性値に大きな影響を及ぼしていると考えられており、火山灰の混入度合の空間分布の把握が一つの鍵となっている。

機械学習手法は膨大なデータ量を必要（数千点以上）とするが、地形、地質、気象、植生など生成因子の複雑かつ非線形な関係性により決定される土壌特性値を、それまでの線形モデルと比べて飛躍的に精度よく予測できる。特に、衛星・航空機リモートセンシング技術の発展に伴い「機械学習マッピング」は急速な発展を遂げた。 しかし、土壌特性値の実測データ、特に火山灰混入度合については観測数が少なく、観測数を大幅に増加させる工夫が必要となる。

様々な特性値を迅速に同時測定する手法として、近年、近赤外分光など光学分析器で得られた測定スペクトルを機械学習により解析する研究が進んでいる。この近接土壌センシング（Proximal Soil Sensing）は欧米を中心に 1500 編以上の論文が発表されている土壌学の一大分野であり、日本の森林土壌での有効性検証も進んでいる。

２。研究の目的

日本の森林土壌特性の空間変動が土壌への火山灰の混入度合によってどの程度説明できるかを踏まえつつ、近接土壌センシングを用いた複数特性値の迅速同時測定によるデータ拡張と、深層学習を用いた機械学習マッピングによって土壌特性値の空間分布特性、支配要因を明らかにすること、さらに、土壌特性（土壌炭素、窒素、pH、交換性塩基類、塩基交換容量、容積重、石礫率、土性、土層厚）を高精細な空間情報（マップ）として可視化し、WebGIS によって誰でも利用できるようにすることを目的とする。

３。研究の方法

日本の森林土壌の特性値（土壌炭素、窒素、pH、交換性塩基類、塩基交換容量、容積重、石礫率、土性、土層厚）の空間分布について、近接センシングによるデータ蓄積に基づく火山灰混入度合の全国評価データと既存調査データに基づく土壌分布予測を基に、土壌特性値データと高空間解像度衛星センシングデータから R/Python 言語による機械学習マッピングを駆使して土壌特性の空間分布構造をモデル化し、その空間分布支配要因を明らかにすることで、高精細マップを創出し可視化する。

そのため、近赤外分光反射スペクトルと実測値を基に、土壌のシュウ酸可溶性アルミニウム、pH および交換性塩基類を推定する AI（人工知能）を作成する。2500 地点の保管試料のスペクトルを取得し、本 AI に適用して土壌特性値のデータベースを構築する。このデータと DEM（数値標高モデル）から算出される各種地形因子や降水量等の気象データを AI に学習させ、高解像度火山灰影響マップを作成する。小型近赤外センサーによる現場簡易測定システムを開発し、マップの現場検証を行う。

既存の土壌型分布を基に、国有林野土壌図の読み取りデータならびに 10000 地点の国有林野土壌調査データを基に土壌型分布推定モデルを構築する。火山灰影響評価モデルと統合し全国スケールの土壌型分布マップを作成する。

土壌特性値データベースを基に各特性値の深度別分布モデルを構築する。火山灰影響度マップならびに土壌型分布マップを基に、土壌特性値マップ群の高精度化を進める。また、一般利用者向けに Web-GIS を活用したブラウザ上でのマップ閲覧の仕組みを構築し、国内外のモデル研究者に向けたデータ提供ページを作成して、web 上でのマップ群のデータ公開を行う。これらにより、気候変動下での広域での樹木成長予測モデルの構築など様々に求められる解析の基盤となる土壌情報を広域かつ高精細に整備する。

４。研究成果

全国の森林土壌約 830 地点を対象にして行われた土壌断面調査試料の層位毎の酸性シュウ酸塩可溶アルミニウム（Alo）濃度値を教師データとし、10m 解像度の数値標高モデルとそこから求められる地形解析値、降水量などの気象データ、降下火山灰量などの既存の広域環境情報を説明変数として、ランダムフォレスト（RF）法およびニューラルネットワーク（NN）法により深さ毎に濃度推定を行う機械学習モデルを構築した。ここでは、国際的土壌分類体系において改訂さ

れた土壌深度評価方法を適用し、土壌深度を鉛直方向ではなく斜面傾斜に垂直な方向での層の厚さに換算した値を用いた。モデルは 10 分割クロスバリデーションにて訓練し、全地点の 15%相当数をあらかじめ分取した検証データセットを用い RMSE 値により推定精度を評価した。推定精度は RF 法、NN 法とも同程度であった。RF 法におけるモデルに対する説明因子の重要度の代替手法として、NN 法では SHAP（SHapley Additive exPlanations）値を Deep SHAP 法により求め、機械学習モデルの解釈を試みた。RF 法では降下火山灰量が最重要の説明因子となっていたが、NN 法ではモデル出力への寄与は温量指数と年平均気温が最も高く、地表の粗度や地下開度、地上開度が次いで高く、降下火山灰量はこれらより寄与が小さく、RF 法とは異なる傾向を示した。SHAP 値からは、例えば、粗度が小さい、すなわち地形の起伏が少なく地表が平滑なほど、SHAP 値が正で大きい、すなわち Alo 推定値が大きいことが示され、なだらかな地形では侵食作用が小さく降下した火山灰が残存しやすいことを、モデルが反映していることが考えられた。

この NN 法による Alo 濃度推定モデルを用いて、全国の森林域における深度別の Alo 濃度マップを作成した（図１左）。また、これらの Alo マップデータを基に土壌分類を行い火山灰土壌分布マップを作成した（図１右）。

同様の方法により、交換性カリウム濃度などの土壌特性値推定モデルを構築し、それらの濃度分布マップを作成した。

また、800 地点の森林土壌の試料における近赤外分光反射スペクトルと分析データの関係を畳み込みニューラルネットワーク法により学習した Alo 含量推定モデルを構築した。この AI モデルを、2500 地点の保管試料から取得した近赤外分光反射スペクトルに適用し、Alo 含量のデータセットを構築した。土壌観測用プローブを試作し小型近赤外測定システムを開発した。

加えて、過去の多地点における土壌調査データに基づき勾配ブースティング決定木法により、林野土壌の分類における土壌型と立地、地形解析データとの関係を学習し、四国及び九州地方を対象として土壌の乾湿を判別するモデルを構築した。

また、過去に実施された土壌調査の深度情報をもとに土層が一定深度以上となる確率をモデルにより導き、土層厚確率マップを作成した。これらのデータについてはリポジトリにおいて公開した。

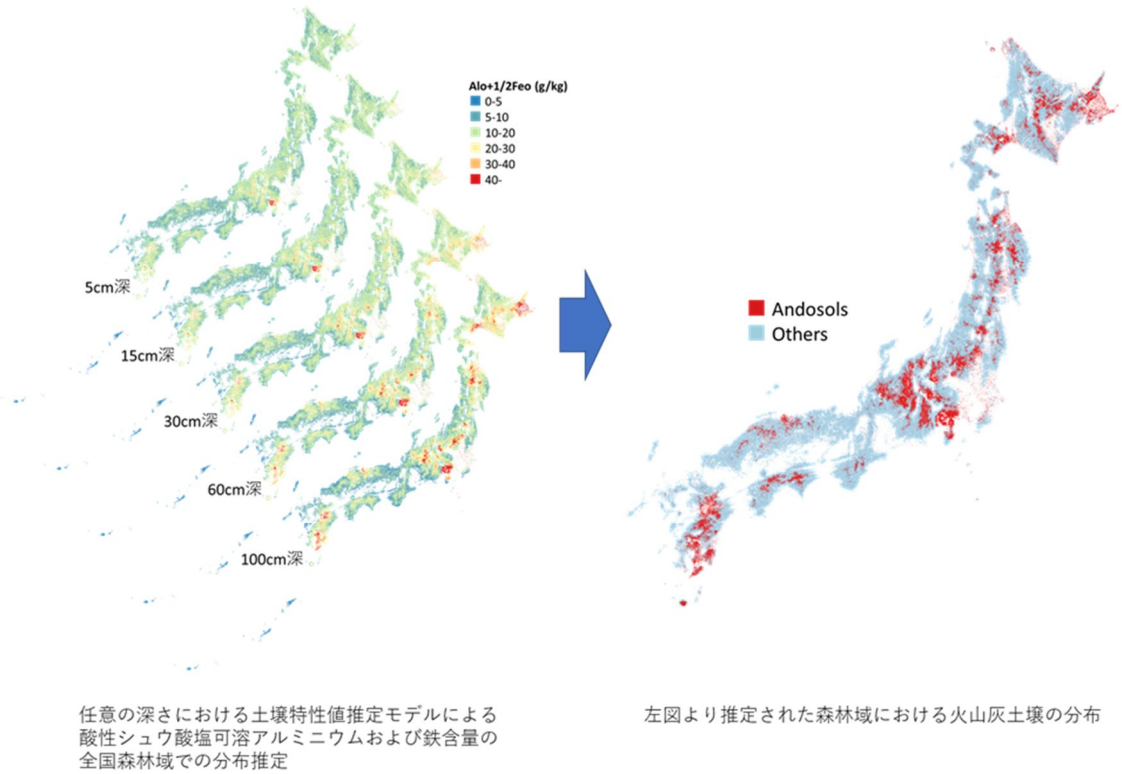

図１　ニューラルネットワークモデルによる土壌中の酸性シュウ酸塩可溶アルミニウムおよび鉄濃度の任意の深さでの推定値のデジタルマップ（左図）とそれを基に分類した火山灰土壌（Andosols）分布推定マップ

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計3件（うち査読付論文　2件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　2件）

１．著者名 HASHIMOTO Shoji, ITO Akihiko, NISHINA Kazuya	４．巻 460
２．論文標題 Divergent data-driven estimates of global soil respiration	５．発行年 2023年
３．雑誌名 Communications Earth & Environment	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43247-023-01136-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

１．著者名 石塚成宏、山下尚之、田中永晴、森貞和仁、木田仁廣	４．巻 64
２．論文標題 ウェブサイト「森林土壌デジタルマップ」の紹介	５．発行年 2022年
３．雑誌名 森林立地	６．最初と最後の頁 77-82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18922/jjfe.64.2_77	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 Yamashita Naoyuki、Ohnuki Yasuhiro、Iwahashi Junko、Imaya Akihiro	４．巻 446
２．論文標題 National-scale mapping of soil-thickness probability in hilly and mountainous areas of Japan using legacy and modern soil survey	５．発行年 2024年
３．雑誌名 Geoderma	６．最初と最後の頁 116896～116896
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geoderma.2024.116896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

〔学会発表〕　計14件（うち招待講演　0件／うち国際学会　4件）

１．発表者名 今矢明宏
２．発表標題 傾斜地における土壌深度の取り扱い変更が森林土壌の分類結果に及ぼす影響
３．学会等名 日本土壌肥料学会
４．発表年 2023年

１．発表者名
山下尚之、石塚成宏、橋本昌司、今矢明宏

２．発表標題
機械学習による森林土壌炭素マッピングの不確実性評価

３．学会等名
日本土壌肥料学会

４．発表年
2023年

１．発表者名
今矢明宏、山下尚之、橋本昌司

２．発表標題
地形特徴量による森林土壌中交換性塩基量推定モデルの機械学習を用いた検討

３．学会等名
日本森林学会

４．発表年
2024年

１．発表者名
稲垣昌宏

２．発表標題
DEMスケールの違いが地形パラメータと土壌型予測に及ぼす影響

３．学会等名
日本森林学会

４．発表年
2024年

１．発表者名
今矢明宏

２．発表標題
範囲の異なる2枚のDEMを用いた深層学習による森林域における火山灰土壌の分布推定

３．学会等名
日本土壌肥料学会

４．発表年
2022年

１．発表者名
今矢明宏

２．発表標題
用いるDEM範囲が深層学習による火山灰土壌の分布推定に及ぼす影響

３．学会等名
日本森林学会

４．発表年
2023年

１．発表者名
稲垣昌宏

２．発表標題
褐色森林土の土壌型を特徴づける地形因子の比較-九州地方と四国地方について-

３．学会等名
九州森林学会

４．発表年
2022年

１．発表者名
石塚成宏、山下尚之、田中永晴、森貞和仁、木田仁廣、村上亘、大丸裕武

２．発表標題
「森林土壌デジタルマップ」の公開と今後の予定について

３．学会等名
日本森林学会

４．発表年
2023年

１．発表者名
山下尚之、大貫靖浩、渡壁卓磨

２．発表標題
Efficient sampling approach for digital soil mapping in mountainous forests of Japan

３．学会等名
IUFRO World Congress（国際学会）

４．発表年
2024年

１．発表者名
橋本昌司、阪田匡司、山下尚之、森大喜、森下智陽、石塚成宏

２．発表標題
Topographically high-resolution mapping of catchment-scale soil carbon dioxide and methane fluxes

３．学会等名
IUFRO World Congress（国際学会）

４．発表年
2024年

１．発表者名
今矢明宏

２．発表標題
Differences between WRB 2022 and earlier classification results for sloping soils in Japan

３．学会等名
International Soil Classification Congress（国際学会）

４．発表年
2024年

１．発表者名
今矢明宏、山下尚之、橋本昌司、石塚成宏

２．発表標題
機械学習による全国森林域における火山灰土壌マッピング

３．学会等名
日本土壌肥料学会

４．発表年
2024年

１．発表者名
木田仁廣、山下尚之、橋本昌司、今矢明宏、石塚成宏

２．発表標題
Mapping carbon stocks in forest litter considering vegetation, topography, climate, and soil parent material factors

３．学会等名
IUFRO World Congress（国際学会）

４．発表年
2024年

１．発表者名
今矢明宏、山下尚之、橋本昌司、石塚成宏

２．発表標題
土壌中交換性塩基類の機械学習による広域推定

３．学会等名
日本森林学会

４．発表年
2025年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

―

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	山下　尚之 (Yamashita Naoyuki) (30537345)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	
研究分担者	石塚　成宏 (Ishizuka Shigehiro) (30353577)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	
研究分担者	稲垣　昌宏 (Inagaki Masahiro) (00343781)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	
研究分担者	橋本　昌司 (Hashimoto Shoji) (90414490)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	
研究分担者	木田　仁廣 (Kida Kimihiro) (00828113)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関