

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07865

研究課題名(和文) 機械学習の応用による土層厚推定の精緻化と広域マッピング

研究課題名(英文) Regional mapping of soil thickness predicted by machine learning techniques

研究代表者

山下 尚之 (Yamashita, Naoyuki)

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：30537345

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：既存・新規の土壌断面・ボーリング・簡易貫入試験・土層強度検査棒等の大規模データを用いた機械学習回帰により、全国の山地・丘陵地における土層厚予測マップを作成した。土壌A層、A+B層および $Nc5$ 層(貫入抵抗値 Nc が5以下の土層)における各マップの R^2 は0.25, 0.3および0.6、RMSEは11, 21および105 cmであり、微地形に起因する小流域スケールでの空間変動やテフラ堆積等による全国スケールでの地域間差が可視化された。特に $Nc5$ 層厚の予測精度をさらに向上させるには、山地・丘陵地の頂部斜面における土層厚測定によって地域毎の最大土層深の分布を明らかにする必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、全国スケールの土層厚予測マップが初めて報告された。土層厚は物質循環や水文モデルにおける大きな不確実性要因であるため、本研究の予測値を入力値として利用することにより、特に広域スケール適用時のモデル精度が大きく改善される可能性がある。また、本研究では予測誤差マップを同時に示しており、昨今のモデル研究で重要度が増している不確実性評価に対する貢献も期待できる。土層厚マップの作成を通じた気候変動予測や防災リスクマップの高精度化による社会への波及効果は少なくないと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In Japan spatial information of soil thickness (soil depth) have not still developed. We predicted and mapped soil thickness in mountainous and hilly areas across Japan by machine learning regression. Legacy and new dataset of soil profile, boring survey and handy-dynamic-cone-penetrometer were used as training data. As a result, the accuracy of thickness of layer A, A+B and $\leq Nc5$ layer (penetration resistance: Nc is ≤ 5) were 0.25, 0.3 and 0.51 for R^2 square and 11, 21 and 105 cm for RMSE, respectively. This map reproduced the spatial variation at the small watershed scale and regional variation on a national scale, which might be due to micro-topographic effect and tephra sedimentation. To improve the map accuracy of $\leq Nc5$ thickness, the measurements on the top slopes of mountainous and hilly areas may be effective to determine the maximum soil thickness in the regions.

研究分野：森林土壌

キーワード：土層厚 土壌深度 機械学習 マッピング 広域評価 山地・丘陵地 デジタル土壌マッピング 空間推定モデル

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土層は陸域生態系における重要な生物活動および物理化学反応の場であるが、土層厚(土壌深)に関する空間情報は圧倒的に不足しており、グローバルな環境問題(例:炭素蓄積量)からローカルな防災(例:土壌雨量指数)まで様々な広域評価に際しての不確実性要因となっている。一方、近年の機械学習手法の発達は、生成要因が複雑かつ非線形な土層厚分布の推定を飛躍的に高める可能性がある。また、衛星リモートセンシング技術の発達を背景として、土層厚の生成要因となる地形・気象・植生に関する空間情報の高空間解像度化が急速に進んでいる。こうした技術・データを活用することで日本の山地・丘陵地における土層厚分布推定が可能になりつつあるが、土層厚分布の全国推定が実施された例はまだない。

2. 研究の目的

本研究は、日本の地形・土壌に適した土層厚の推定を、機械学習および効率的な広域土層厚調査によって精緻化することを目的とする。これにより、土壌・ボーリング調査等による既存・新規の測定データと、高空間解像度の環境因子データ(標高・植生・気象等)から、全国の日本の土層厚分布マップを作成する。

3. 研究の方法

(1) 広域土層厚調査の実施と効率化

土層厚測定によく用いられる簡易貫入試験は測定に時間がかかるため、土層強度検査棒と法面測量による土層厚調査の効率化を検討した。そのうえで、全国の複数の地域を対象とした広域土層厚調査を380地点で実施し、既存研究のデータと合わせて1548地点の表層土層厚(貫入抵抗値 $N_c \leq 5$)^① データを整備した。

(2) 土層厚データ(教師データ)の収集と整備

本研究では上述の広域データに加え、既存研究によるプロットスケールの土層厚データ(図1)および全国規模のデータセットを利用した^{①②③}など。全国をカバーする既存の土層厚データとして、国土交通省による国土地盤情報^④のボーリング情報、林野庁による森林吸収源インベントリ情報整備事業土壌等調査^⑤、森林総合研究所で所有する森林土壌データベースにおける土壌断面情報を使用した。ところで、「土層厚」には土壌学、水文学、土木工学等の様々な定義があり、これを統一的に示すことは困難である。そこで本研究では、土壌断面情報から得られる「A層厚」(50cm以下のみ)と「A+B層厚」(150cm以下のみ)に加え、既存の簡易貫入試験や本研究の広域調査による表層土層厚と、「火山灰」「ローム」等の表記があるボーリング層位下端深度(10m以下のみ・沖積地等を除く)を「 $\leq N_c 5$ 層厚」として定義し、これら3つの土層厚を教師データとして用いることとした。 $\leq N_c 5$ 層厚は風化母材(地盤)に至るまでの堆積物の深度(B層およびC層の一部)を想定しており、土壌断面調査によるA+B層で実際には過小評価される部分を含む。なお、土層厚予測ではサンプリング地点分布の偏在(クラスタリング)が問題となるため、必要に応じて3次メッシュ(1km)や1.5次メッシュ(20km)における中央値や最大値をサンプリングして利用した。

(3) 環境因子データ(説明変数)の収集と整備

地形因子として基盤地図数値標高10mメッシュ^⑥を用いて算出された18の因子(傾斜、凹凸、斜面方位・位置、曲率等)に加え、日本域表面流向マップ^⑦のHAND(直近の河道からの相対高さ)や岩橋らによる地形グループ^⑧を用いた。気象因子として平年値メッシュ^⑨による年降水量、平均気温等を用いたほか、月別の植生指数(NDVI)^⑩、表層地質や土壌図^⑪等の主題図も活用した。さらに、火山灰影響を考慮するため、活火山分布図^⑫から算出した111の火口からの距離・方位マップを用いた。ベクター地図や空間解像度の異なるデータは最近隣内挿法やキュービック内挿法によるリサンプリングによって10mラスタに変換した。

(4) マッピングの流れと実装

これらの教師・説明変数データを用い、機械学習回帰手法の一つであるランダムフォレスト^⑬による学習と予測を行った。A層厚、A+B層厚に加え、 $\leq N_c 5$ 層厚算出のための最大土層深、局所土層厚係数の計4つの目的変数を対象としたモデルを作成した(図2)。マッピング(予測)の対象推定エリアは山地・丘陵



図1 $\leq N_c 5$ 層厚調査地点(赤,*は既存研究を引用)と、解析に用いた全国の土壌断面調査地点(黒)及びボーリング調査地点(緑)

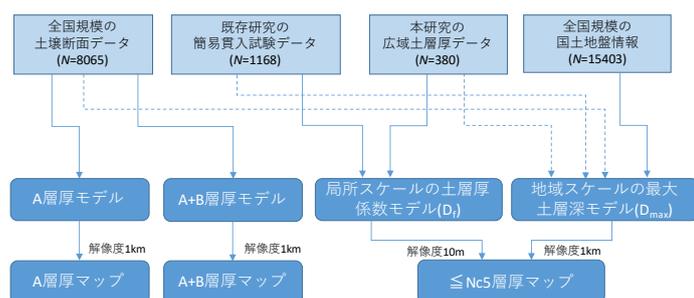


図2 マッピングに用いたデータセットとモデルの概要(点線は補助的に利用)

地の森林を主とし、沖積地・市街地・農地・離島等は除外した。計算には R ver3.6 をプラットフォームとし、ランダムフォレスト回帰 (ranger)、交差検証によるパラメータ最適化 (caret) やマッピング (sf/raster/GSIF/tmap) のパッケージを利用した。ラスター処理と地形因子計算には gdalwarp と SAGA-GIS を併用した。

(5) モデル精度と不確実性の評価

10 倍交差検証により算出した R^2 および RMSE を用いてモデル全体の推定精度を評価した。さらに、Quantile Regression Forest[®]を用いて予測誤差マップを作成し、局所的な不確実性評価をおこなった。

4. 研究成果

(1) 土層強度検査棒および林道法面調査による簡易貫入試験との比較

広域土層厚調査を効率的に実施するため、土層強度検査棒と法面測量による土層厚測定を従来法 (簡易貫入試験) と比較した。土層強度検査棒は測定時間を半分以下に短縮でき、その測定値も従来法とおおむね一致していたが ($R^2=0.94$)、根・レキが著しく多い地点では過小評価になる可能性もあった。また、法面測量は土層強度検査棒と組み合わせることで十分な精度を得ることができた。簡易貫入試験は多大な時間と労力が必要なため、土層強度検査棒と法面測量は土層厚測定の効率化に寄与することが明らかとなった。

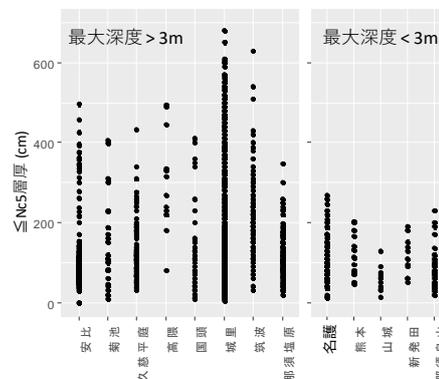


図3 既存研究と本研究の広域土層厚調査における土層厚分布の地域間比較

(2) 広域土層厚分布調査

林道法面の観察や土壌構造からテフラの影響が大きいと考えられる地域では、4m を超える $\leq Nc5$ 層厚がいくつも測定された (図3・既存研究の結果も含む)。各地域では頂部斜面や谷頭凹地などで最大深度が測定されることが多いものの、下部谷壁斜面の土層厚は非常に薄い傾向が明らかであり、同一の地域内においても微地形による局所影響が顕著であることが確認された。一方、テフラの影響が少ない地域の土層厚 (新発田・山城など) は最大でも 1.5~2m 程度であったが、同様に同一地域内での顕著な空間変動が認められた。これらの結果から、地域における最大土層深が土層厚分布のレンジを決定していると考えられた。

(3) A層およびA+B層の全国の土層厚分布予測

全国規模の土壌断面データを用いて A 層厚、A+B 層厚を予測し (図4)、全国スケールでマッピングした (図5)。全国の A 層厚分布はある程度標高の高い山間部で厚い傾向が見られるものの、テフラ分布や緯度による差は明瞭でなく、バイオマス等の生物要因も含めて複雑な環境要因が寄与していると推察された。一方、A+B 層厚の分布は九州や中部・東日本の一部などで厚い傾向があり、テフラ堆積による影響がみられた。各モデルの重要度プロットによれば、A 層厚モデルでは温量指数、降水量や月別 NDVI の寄与が相対的に大きかった。一方、B 層厚モデルでは標高、地形グループ、温量指数、土壌型や地上開度の寄与度が大きかった。

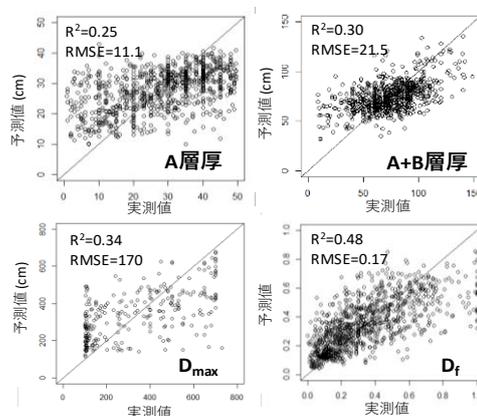


図4 各モデルの実測-予測プロットと精度

(4) 火山灰堆積を想定した全国の土層厚分布予測

広域土層厚調査の結果から、 $\leq Nc5$ 層厚は地域ごとの最大土層深に規定されることが明らかであったため、全国の 20 km メッシュにおける最大土層深を D_{max} 、各地点の土層厚 D_i における比率 (D_i/D_{max}) を局所土層厚係数 D_f と定義し、全国のボーリング調査や広域土層厚調査を用いて D_{max} と D_f をそれぞれ予測した (図4)。予測された D_{max} に D_f を乗じることにより全国の $\leq Nc5$ 層厚マップを作成した (図5)。最終的な $\leq Nc5$ 層厚マップの R^2 は 0.6、RMSE は 105 cm だった。本マップの予測土層厚は、東日本と九州でより厚く、近畿・中国・四国でより薄い傾向が明瞭であり、土層の厚い地域では予測誤差も大きかった。一方、森林小流域スケールでは斜面下部・上部で厚く、斜面中腹部で浅い土層厚が予測され、谷部での予測誤差が大きいことが示された (図6)。また、 D_{max} モデルでは火山の方位・距離バッファや植生指数の重要度が高かったのに対し、 D_f モデルでは凹凸度や曲率、斜面位置、開口度の重要度が相対的に高かった。

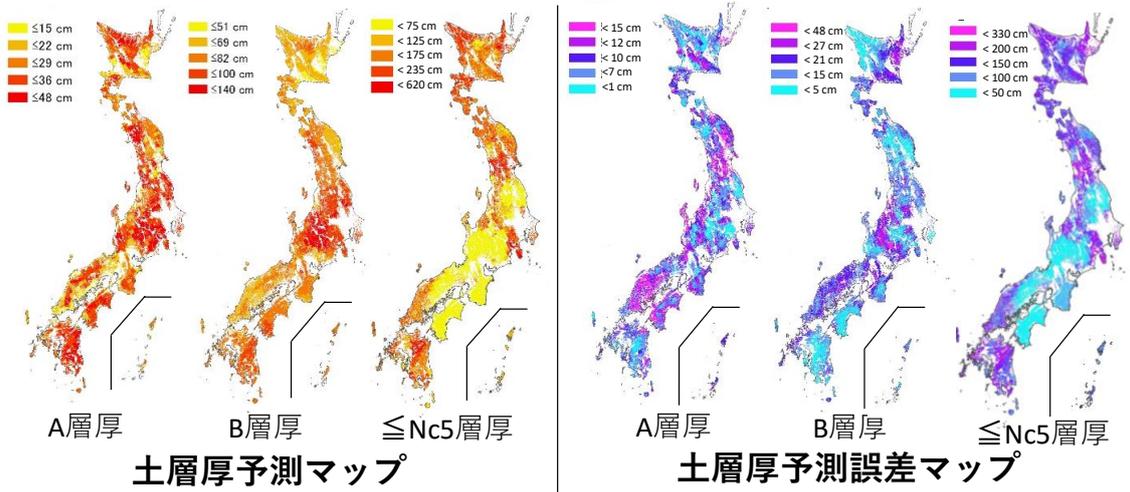


図5 全国の土層厚予測マップ (A層, A+B層, ≦Nc5層厚) とその予測誤差マップ

(5) まとめと課題

本研究によって予測された≦Nc5層厚分布は、これまで経験的に知られていた「微地形の違いによる小流域スケールでの空間変動」や「テフラの有無等による全国スケールでの地域間差」を反映していた。また、A層およびA+B層厚も生物・気象要因による層厚分布と矛盾しないと考えられた。しかし、マップの実用化に向けての課題は多い。特に、各地域の D_{max} については山地・丘陵地での実際の土層厚調査・ボーリング調査の有無による不確実性が非常に大きいことに留意する必要がある。ボーリング情報のみを用いて D_{max} を推定した場合の≦Nc5層厚分布の最終的な R^2 は0.2以下(九州に限れば0.4)であり、現状では該当する20kmメッシュの最大土層深を1点以上実測して教師データに含める必要がある。実際の広域調査でも最大土層深を強く規定するテフラ堆積の有無が数kmの範囲で大きく変化する例がみられ、この分布を地質・土壌図、テフラ分布図等で説明することは非常に困難であった。全国の≦Nc5層厚の予測精度の向上のためには、山地・丘陵部の特に頂部斜面における土層厚測定や峠道の切通を活用した法面観測等を通じ、地域毎の最大土層深の分布をより詳細に明らかにする必要がある。

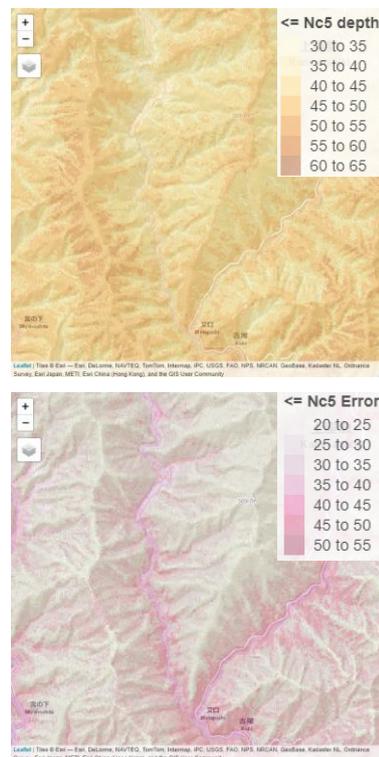


図6 ≦Nc5層厚予測・誤差マップ (cm)の拡大図の例(高知県四万十市)

<引用文献とデータの出典>

- ① 大貫ら, 桂試験地における土層厚の分布と土壌物理特性, 森林総合研究所研究報告13(2), 2014, 43-59
- ② 大貫ら, 沖縄本島南明治山における土壌の分布とその物理的特性, 日林誌76(4), 2014, 355-360
- ③ Ohnuki et al., Distribution and Physical Properties of Colluvium and Saprolite in Unchanneled Valleys in Tsukuba Experimental Basin, Japan, J.For.Res 4, 1999, 207-215
- ④ 国土情報検索サイト KuniJiban の柱状図XMLデータ (<http://www.kunijiban.pwri.go.jp>)
- ⑤ 林野庁森林吸収源インベントリ情報整備事業 (<https://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/fsinvent/results/index.html>)
- ⑥ 国土地理院ウェブサイト (<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)
- ⑦ 山崎ら, 日本全域高解像度の表面流向データ整備, 土木学会論文集B1(水工学)75(5), 2018, I_163-I_168
- ⑧ Iwashashi et al., Generation of segment data using 30-m DEMs as the base material of future hazard maps, AGU FALL MEETING 2019, EP53F-2222
- ⑨ 平年値メッシュ ver2.1 (<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html>),
- ⑩ 国土地理院と東海大学との共同研究の成果により得られたデータを使用 (<https://www.gsi.go.jp/kankyouchiri/ndvi-download.html>)
- ⑪ 国土調査20万分の1土地利用分類基本調査 (<https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html>)
- ⑫ 気象庁の活火山分布図 (http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/appendix/active_volcanoes.zip)
- ⑬ Breiman, Random Forests, Machine Learning 45(1), 2001, 5-32
- ⑭ Vaysse et al., Using quantile regression forest to estimate uncertainty of digital soil mapping products, Geoderma 291, 2017, 55-64

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 大貫 靖浩、古堅 公、生沢 均、松浦 俊也、山下 尚之、新垣 拓也	4. 巻 61
2. 論文標題 沖縄本島最北部における皆伐後の土砂移動量と林床環境との関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 森林立地	6. 最初と最後の頁 23～29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.18922/jjfe.61.1_23	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naoyuki YAMASHITA, Yasuhiro OHNUKI
2. 発表標題 Surface soil-thickness mapping and uncertainty estimation in mountainous, upland and hilly area of Japanese archipelago
3. 学会等名 AGU FALL MEETING 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoyuki YAMASHITA, Yasuhiro OHNUKI
2. 発表標題 Mapping of soil thickness in mountainous, upland and hilly area of Japan using small-catchment-scale and regional-scale sampling data
3. 学会等名 Pedometrics 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下 尚之、大貫 靖浩
2. 発表標題 日本の山地・丘陵地における土層厚マッピングとその不確実性評価
3. 学会等名 日本森林学会第131回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 嶋崎 明也、山下 尚之、橋本 昌司、益守 真也、丹下 健
2. 発表標題 秩父地域を対象とした、機械学習によるデジタル土壌マッピングの試み
3. 学会等名 日本森林学会第131回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下尚之、大貫靖浩
2. 発表標題 機械学習を用いた日本の山地部の広域土層厚マッピング
3. 学会等名 日本土壌肥料学会神奈川大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下尚之、大貫靖浩
2. 発表標題 北関東の低山帯小流域における表層土層厚マッピング -機械学習手法を用いた広域推定の試み-
3. 学会等名 日本地形学連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下尚之、大貫靖浩
2. 発表標題 日本の山地小流域における土層厚マッピング手法の開発
3. 学会等名 第129回日本森林学会
4. 発表年 2018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	大貫 靖浩 (Ohnuki Yasuhiro) (10353616)	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)	