

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06155

研究課題名（和文）日本の山地の複雑地形に最適化した先進的な土壌サンプリング

研究課題名（英文）Soil sampling optimization for complex topography in mountainous, upland and hilly area of Japan

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：AIの発展によって土壌の性質をマッピングする技術が急速に進歩している。しかし、マッピングに最適化した測定地点選択（サンプリング）の手法に関する情報は少なく、特に複雑な地形を持つ日本の山地における適用についてはほとんど知見がない。本研究では、様々な地理空間情報（傾斜・斜面の位置等）を考慮に入れて調査前に適切な測定地点を選択する手法を、初めて日本の山地で適用してその性能を評価した。その結果、従来法に対する明らかなアドバンテージが認められ、特に少ない地点数で土壌の性質を広域にマッピングする際に有用であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土壌特性値のマッピングを最適化するサンプリング手法の開発は平野部や農地が多くを占める欧州を中心に発展してきた。日本の山地のように非常に複雑な地形上で手法の開発・検証を行った例はほとんどなく、学術的な意義が大きい。市町村・全国スケールにおける森林生態系サービスの空間評価の必要性は年々高まっており、本手法を活用した精度の高い土壌空間情報は、適切な炭素管理や防災機能評価等の行政ニーズに大きく貢献する。また、土壌調査を効率化できるため、様々な事業においてコスト削減の効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The digital soil mapping (DSM) is rapidly developing due to the progress of AI. However, there is limited information on methodology for appropriate sampling for DSM, and there is insufficient evidence and assessment against traditional approach, especially in Japanese mountainous areas with complex topography. In this study, we applied for the first time a sampling method that considers various geospatial information available prior to the survey (e.g., slope and slope location) to appropriate sampling in a Japanese mountainous area and assessed the performance of this method. The results showed a clear advantage over traditional approach, especially useful for mapping soil properties at regional scale and with fewer sampling points.

研究分野：森林土壌

キーワード：森林土壌 広域評価 マッピング 土層厚 実験計画法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土壌特性値の空間分布(マップ)は災害・環境に関わる森林生態系サービス機能の評価のための重要な基盤情報である。近年、標高データ等の高空間解像度を持つ地理空間情報の発展を背景とした機械学習マッピングが広まる一方、その精度を高めるための新たな土壌サンプリング(地点選択)のアプローチが注目されている。特に共変量サンプリングは、複数の環境因子(傾斜、斜面位置、気象等)による土壌特性値(土層厚、炭素濃度等)への影響を最適化した調査点を事前に選択し、採取・測定後の機械学習マッピングの精度を高めることができる。これは従来の土壌調査における格子点・ランダムサンプリングによる様々な制約や課題を克服できる可能性があるが、日本の山地における適用例はない。

2. 研究の目的

既存の多点土壌データを用いたサンプリングシミュレーションや追加・新規調査地での実証調査によって共変量サンプリングの有効性を検証し、日本の山地の複雑地形における広域評価に適応した次世代の土壌サンプリング技術を提案する。

3. 研究の方法

(1) データセットの整備と追加調査

表1に本研究で解析の対象とした調査地域と土壌特性値を示した。KTR、API、MR、IVTの4つのデータセットをサンプリングシミュレーションに供し、より正確な位置情報を得るための高精度GNSSを用いた緯度経度の再測位や追加的な土層厚測定などを一部で実施した。一方、OZTにおいて実証調査をおこなった。

表1 本研究で用いた多点データセットの概要

名前	略号	面積ha	地形特徴	地点数	対象特性値	場所	使用DEM	引用
桂試験地	KTR	2.3	小集水域	600	土層厚(cm)	茨城県城里町	AW3D 1m	
安比試験地	API	4.5	山麓斜面	400	土層厚(cm)	岩手県八幡平市	AW3D 0.5m	
森吉山	MR	9	山麓斜面	415	土層厚(cm)	秋田県北秋田市	AW3D 0.5m	
土壌炭素インベントリ	IVT	2500万	-	2300	炭素濃度(g/kg)	全国	DEM10B	
小里郷県有林	OZT	120	複数小集水域	138	土層厚(75cm以下の存在確率)	茨城県常陸太田市	DEM10B	新規

(2) 環境因子データ(説明変数)の収集と整備

本研究では各調査地の面積や測定間隔に応じてAW3DとDEM10Bの2つのDEMを利用した。SAGA-GISを用いて18の地形因子(傾斜、凹凸、斜面方位・位置、曲率等)を算出して土壌調査地点選択と機械学習マッピングに用いたほか、対象範囲の広いIVT、OZTについては地形分類、気象因子、植生指数も利用した(表1、DEM以外のデータソースの詳細は引用を参照)。

(3) シミュレーション

表1のKTR、API、MR、IVTの各データセットについて、全地点から疑似的な共変量サンプリング(PCS)と疑似的なランダムサンプリング(PRS)によって同じ地点数の地点セットを選択し(表2)各地点セットにおける機械学習マッピング(詳細は引用を参照)の精度を R^2 とRMSEで比較した。PCSのために調査地ごとに選択された3-5個の地形因子を用い、サンプリングのコストを評価するために選択地点数に対する感度も評価した。PCSとPRSでは選択される地点がランダムに変化するため、100回の選択シミュレーションの平均値を用いて比較をおこなった。

(4) 実証調査

過去に土層厚調査の履歴がないOZTにおいて、予備調査での測定(AS)、CSISによる追加測定(AS+CSIS)、ASISによる追加測定(AS+ASIS)、マッピングと精度評価を実施した(表2)。

表2 本研究で比較検討した測定地点選択(サンプリング)手法の概要

サンプリング手法	略称	概要
シミュレーション		
疑似的な共変量サンプリング (pseudo covariate sampling)	PCS (kmeans)	k平均法によって全グリッド(本研究では疑似的に多点調査地点)の共変量について任意の数のクラスタリングを実施し、各クラスタの重心グリッドをサンプリング点として選択。
	PCS (fuzzy kmeans)	上記のクラスタリングにファジーk平均法を用いる。
	PCS (cLHS)	条件付きラテン超方格法により共変量の組み合わせが重複しないようにサンプリング点を選択。
疑似的なランダムサンプリング (pseudo random sampling)	PRS	従来法。全グリッド(本研究では疑似的に多点調査地点)から乱数生成器で無作為選択。
実証調査		
共変量空間追加サンプリング (covariate space infill sampling)	CSIS(kmeans)	既測定地点のクラスタの重心として固定した上で、さらに必要な地点数だけ新たなクラスタを追加し、その重心グリッドを新規サンプリング地として選択。
任意サンプリング (arbitrary sampling)	AS	従来法。予備調査において斜面沿いに任意サンプリングしたもの。本研究ではこれを既測定地点のデータとしてその後の追加サンプリングを実施した。
任意空間追加サンプリング (arbitrary spatial infill sampling)	ASIS	従来法。既測定地点以外の空間カバー率が高まるように探索的に任意サンプリングした。

土層厚測定には土層強度検査棒を用い、目標地点への到達のために高精度 GNSS(Trimble R2 (RTX 補正) と Drogger DG-PR01RWS (CLAS 補正))を用いた(水平精度<1m)。最終的に AS31 地点、CSIS47 地点、ASIS60 地点、計 138 地点の新規の土層厚データを解析に用いた。精度評価データ選択(25 地点)と各手法による選択シミュレーションを 50 回実施した。各データセットを用いて(2)と同様に機械学習マッピングを実施し、土層厚が 75cm より深い確率を ROC-AUC(Area Under the ROC Curve, 0-1 で精度が高い)で精度評価した。全ての解析は R ver 4.3 をプラットフォームとし、サンプリング関連 (sswr, clhs, spcosa, fields)と機械学習マッピング関連 (caret, ranger, raster)のパッケージを主に用いた。

- サンプリング手法
- PCS (cLHS)
 - PCS (fuzzy k-means)
 - PCS (k-means)
 - PRS

4. 研究成果

(1) サンプリングシミュレーションによる共変量サンプリングの評価

各サンプリング手法における選択地点数とマッピング精度の関係を図 1 に示した。全調査地で、選択される地点数が増加するとともにマッピング精度も増加した。KTR においては地点数 500 を除く幅広い地点数の範囲で PCS(k-means)の精度が PRS の精度を上回っていた。PCS(cLHS)の精度は地点数 200 以下で PRS より高かったが、地点数が多くなるとその差が認められなかった。一方、API では地点数 200 前後で PCS(k-means)の精度が PRS より高かったが、その他の範囲では精度向上の効果ははっきりしなかった。MRY では地点数 200 以下で PCS(cLHS)の精度が PRS を上回っていた。IVT は 750 地点以下で PCS(fuzzy k-means)の精度が PRS より高かった。以上より、API を除くと特に地点数が少ない場合に PCS によるマッピング精度向上への寄与が認められた。なお、KTR、MRY、IVT ではサンプル数が増加すると R² 上昇への寄与度が低下したが、これは機械学習マッピングにおける説明変数の不足による誤差が地点数の不足による誤差を上回るためと推察された。すなわち、共変量サンプリングによる精度向上効果は、地点数による精度への寄与が大きい(マップの不確実性が大きい)状況で特に高いと考えられた。

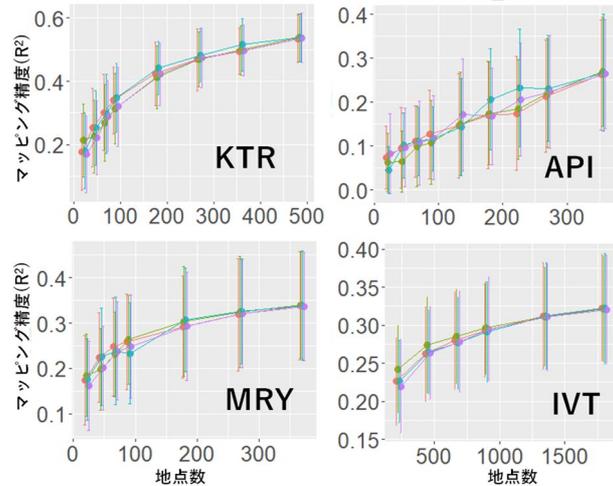


図 1 シミュレーションによるマッピング精度の比較。誤差線は 100 回実施したシミュレーションの標準偏差を示す。

(2) 実証調査による共変量サンプリングの評価

実証調査による各手法の精度を図 2 に示した。地点数・手法でシミュレーション毎に大きなばらつきがあるものの、CSIS(k-means)によって選択された地点を使用したマッピング精度は予備調査時の AS、面的な探索による ASIS、全地点から無作為に選択した PRS のいずれよりも明瞭に高かった。

次に各手法の最大地点数を用いて作成された土層厚確率マップを全 138 地点のデータによる全地点数マップと比較した(図 3)。全地点数マップを最も真に近いマップと仮定して比較すると、CSIS、ASIS ともにおおよそ同様の空間変動パターンが予測できていた。予備調査の AS のみで作成されたマップは、未測定エリアを中心に全地点数マップと大きく異なっていた。なお、ASIS はマップでは良好な結果だが、実際の精度は高くない(図 2)。これは、検証用にデータを一部除去した場合、その空白部分を埋める性能が低かったためと考えられ、モデルが教師データの予測に極端に偏った過学習の状態になっていると推察された。

最後に CSIS と ASIS による 10 km スケールのマップを作成した(図 4)。両者とも、尾根谷の密度が低く傾斜が緩やかな北部で土層が厚く急峻な南部で土層厚が薄いといった OZT の特徴が、広域においてもよく反映されていた。一方、CSIS は土層が全体に厚いエリアにある谷部で土層が薄く予測されており、OZT の傾向と一致したが、この特徴の ASIS での再現性は低かった。CSIS ではあらかじめ関連が予測される共変量を意図的に組み込み、それらが幅広く得られるように地点が選択されるため、調査者の専門知識や経験を組み込んだ機械学習モデルが作成できる。土層厚のように特定の地形因子との関連が強ければ強いほど、CSIS によるマップ精度の改善効果や外挿に対する強度が増加すると考えられた。

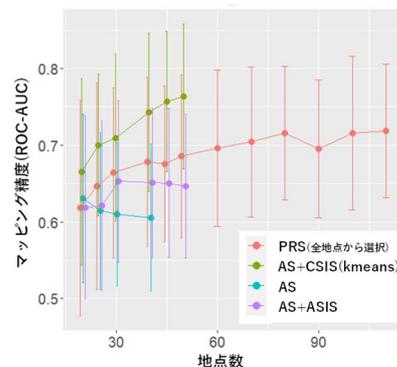


図 2 実証調査によるマッピング精度の比較。誤差線は 50 回実施したシミュレーションの標準偏差を示す。

(3) まとめと課題

本研究を通して明らかになった共変量サンプリングの長所と課題について表 3 に示した。特に本手法は日本の複雑な地形を持つ山地・丘陵地において、地点数を削減しながらマッピング精度

を向上させるための有効な手法であることが示唆された。また、既存の測定地点を活用する追加サンプリングに共変量サンプリングの考え方を取り入れることで、地理的な空白を埋めるように調査するより効率的にマッピング精度を高めることができた。既存データの利用率を高めることは、近年注目されるオープンデータ、データシェアリングとの親和性も高い。

一方、マッピング精度にはかなり大きなばらつきがあり、特に検証地点を無作為抽出する際のケースによって精度が著しく低下する場合がある。適切な検証のためにはさらに多くの無作為に選択された地点での測定が必要である。しかしながら、今回の実証調査でも明らかであったように、複数の小集水域を持つ 100ha スケールの山地において、事前選択された大量の地点に到達するには多大な労力が必要である。この分野は欧州の平地・農地を中心に発達してきたため、同様のメソッドを山地で実施するノウハウが不足している。山地特有のアクセスの困難さを考慮に入れた手法の開発（表 3）に加え、ロボティクスやドローン、様々な近接センシングを活用した新たな土壌調査技術の開発が期待される。

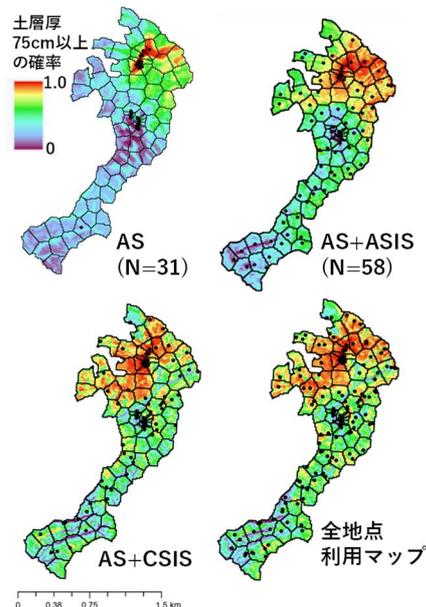


図 3 OZT における土層厚確率マップ。黒点は各手法の選択地点を示す

< 引用文献 >

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
 大貫ら, ブナ林土壌の保水機能の二面的定量評価 - 岩手県安比高原を対象として - 森林立地 62(2), 2020, 91-100
 大貫ら, ブナ林土壌の保水機能の定量的評価 - 安比高原・胆沢川上流部・森吉山麓高原における比較研究: 第 1 報 - 日本地理学会発表要旨集 53, 2022 (https://doi.org/10.14866/ajg.2022s.0_53)
 林野庁森林吸収源イベント情報整備事業 (<https://www.ffpri.affrc.go.jp/lab/s/fsinvent/results/index.html>)
 AW3D 日本全国高精細 3D 地図 (Maxar Technologies, NTT DATA, RES TEC)
 国土地理院基板地図情報ダウンロードサービス (<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>)
 Yamashita et al. 2022 National-scale 3D mapping of soil organic carbon in a Japanese forest considering microtopography and tephra deposition. Geoderma 406:115534
 Brus 2023 Spatial sampling with R (<https://dickbrus.github.io/SpatialSamplingwithR/>)

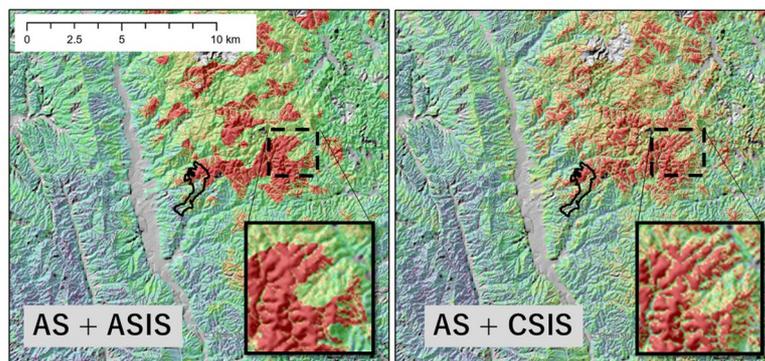


図 4 OZT 周辺を含めた 10km スケールでの土層厚確率マッピング。凡例は図 3 と同じ。背景は地理院タイル（陰影起伏図）。一部を拡大して表示。

表 3 実証調査で明らかになった従来法に対する共変量サンプリングの長所と課題

長所
・目標の精度に達するために必要な地点数を減らせるため、調査効率を改善できる (OZT の場合、全 13 日間の調査日程のうち 5 日間程度のコスト削減効果があった)
・過学習のリスクを緩和できるため、外挿に強い可能性
・複数の尾根谷を含むエリアで「無作為」もしくは「代表性」を考慮して 1 点の調査地点を現場で選択する事は非常に難しいが、CSIS はあらかじめ緯度経度が選択されているため迷わない (調査者の経験に左右されない)
課題と解決策
・安全上の観点から調査が困難な箇所が選択されたり (急傾斜地、崖下など)、測定不可能な地点が選択されるリスク (溪流、作業道、林道法面など) → 選択時にあらかじめ除外する必要
・地点数以外の調査効率が考慮されていない (藪こぎ・林道からの距離など) → 林道からの距離や通行の困難などを考慮するアルゴリズムを考案する必要

< 謝辞 >

本研究は研究協力者である森林総研 大貫靖浩氏による多大な貢献のもと、氏との共同研究として実施した。また、本研究の一部には農林水産省委託プロジェクト研究「管理優先度の高い森林の抽出と管理技術の開発」JP21453194 の補助による成果が含まれる。茨城県林業技術センターの鈴木孝典氏、富田衣里氏をはじめとした職員の皆様、茨城県県有林グループの黒航氏、森林総研 渡壁卓磨氏には OZT における土層厚調査に際してご協力をいただいた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4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 Toriyama Jumpei, Hashimoto Shoji, Osone Yoko, Yamashita Naoyuki, Tsurita Tatsuya, Shimizu Takanori, Saitoh Taku M., Sawano Shinji, Lehtonen Aleks, Ishizuka Shigehiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Estimating spatial variation in the effects of climate change on the net primary production of Japanese cedar plantations based on modeled carbon dynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 0247165 ~ 0247165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0247165	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 Yamashita Naoyuki, Ishizuka Shigehiro, Hashimoto Shoji, Ugawa Shin, Nanko Kazuki, Osone Yoko, Iwahashi Junko, Sakai Yoshimi, Inatomi Motoko, Kawanishi Ayumi, Morisada Kazuhito, Tanaka Nagaharu, Aizawa Shuhei, Imai Akihiro, Takahashi Masamichi, Kaneko Shinji, Miura Satoru, Hirai Keizo	4. 巻 406
2. 論文標題 National-scale 3D mapping of soil organic carbon in a Japanese forest considering microtopography and tephra deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 115534 ~ 115534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geoderma.2021.115534	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 大貫靖浩、小野賢二、安田幸生、釣田竜也、森下智陽、山下尚之	4. 巻 62(2)
2. 論文標題 ブナ林土壌の保水機能の二面的定量評価 - 岩手県安比高原を対象として -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 森林立地	6. 最初と最後の頁 91-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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 大貫靖浩、野口麻穂子、太田和秀(秋田県立大)、星崎和彦(秋田県立大)、延廣竜彦、山下尚之	4. 巻 28(1)
2. 論文標題 段丘面上に分布するブナ林土壌の保水機能の定量評価 - カヌマ沢溪畔林試験地における実証研究 -	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 東北森林科学会誌	6. 最初と最後の頁 10-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
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 山下尚之	4. 巻 3月号
2. 論文標題 足元の地下世界を可視化する	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 森林と林業	6. 最初と最後の頁 18-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 山下尚之、大貫靖浩
2. 発表標題 打ち切りデータを含む土壌断面情報を用いた土層厚マッピング
3. 学会等名 日本森林学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山下尚之、大貫靖浩
2. 発表標題 山地小流域における土層厚測定点選択の最適化
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下尚之、大貫靖浩、渡壁卓磨
2. 発表標題 市町村スケールにおける土層厚確率マップの作成
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下尚之
2. 発表標題 デジタルソイルマッピングによる全国の森林の高解像度土壌炭素マップの作成
3. 学会等名 第70回日本生態学会大会講演要旨集（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoyuki YAMASHITA, Yasuhiro OHNUKI
2. 発表標題 National-scale mapping of surface soil-thickness in mountainous, upland and hilly area of Japan
3. 学会等名 Soil Mapping for a Sustainable Future: 2nd joint Workshop of the IUSS Working Groups of Digital Soil Mapping and Global Soil Ma（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下尚之、大貫靖浩
2. 発表標題 山地小流域における土層厚分布推定に適した地点選択手法の探索
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会予稿集(2021)
4. 発表年 2021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
研究協力者	大貫 靖浩 (Ohnuki Yasuhito)		

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
---------	---------