

## 数値地形情報を用いた森林土壌炭素蓄積量の推定

— 関東・八郷盆地における事例 —

森林総研北海道  
森林総研  
森林総研東北

伊藤 江利子・相澤 州平・阪田 匡司  
松浦 俊也・三浦 覚・吉永 秀一郎  
山田 毅

### はじめに

日本列島においては、森林は主として起伏のある山地に分布している。このため、日本の森林土壌の特性は複雑な地形の影響を受けて空間的異質性が高いことが知られている。森林土壌に貯留される炭素量（以下、炭素量）も地形的な位置、傾斜に応じて変化すると考えられる。森林土壌が炭素貯留に果たす役割をより正確に推定するためには、地形と炭素量との関係を定量的に解明し、流域として面的に評価することが必要である。

数値地形情報から算出される地形特性値と土壌特性との関係については、日本では土層厚の推定が行われているのみであり(8)、京都議定書関連で社会的要請が高い炭素量に関する研究例は少ない。これまでに著者らは急峻な四国山地を調査地として地形特性値と炭素量の関係を解析した(3)。本報では、傾斜が比較的緩やかで火山灰の影響を受ける関東・八郷盆地における事例を報告する。

### 調査地と方法

調査対象地域として茨城県石岡市の八郷盆地北部(45km<sup>2</sup>)を選定した。調査地域では、西側の山塊は花崗岩、東側の山塊は中生代の堆積岩を母材とし、火山灰(関東ローム)の堆積の影響が認められる。

調査流域の標高は20-705mの範囲にあり、後述する10格子の標高データを用いて算出した平均標高(±SD)は137±132mであった(n=449201, 図-1)。同じく平均傾斜度は12±11°と比較的緩やかであったが、一部には急峻な斜面も認められ、最大傾斜度は69°に達した。東西の山塊の麓部には緩傾斜の扇状地形が認められた。

調査地域を包含する1/25000「加波山」図幅上で、3次メッシュを四分割する南北15秒(約500m)、東西22.5秒(約600m)間隔の経緯線から作成した格子点のうち、土地利用が森林であった87点において炭素量調査を実施した(図-1)。土壌調査地点は標高36-564mの範囲にあり、平均標高(±SD)は236±137mであった。また調査地点の平均傾斜度は24±11°であり最大で48°であった。

炭素量調査では30cm深までの鉦質土壌炭素蓄積量を算出した。土壌断面調査ならびに炭素量の分析は、森林土壌インベントリ方法書(4,5)に準じて行った。炭素量調査は格子点の直下(代表土壌断面調査地点)を基準にして地形的に同質な方向へ5-10m離れた両側2か所の計3地点で実施した。比較的単純な計算によって求められる傾斜、斜面曲率、上部集水面積などの地形特性値を対象地全体に渡り、



図-1 八郷盆地における土壌調査地点  
(背景は標高および100m等高線)

平面直角座標系第19-9系にて10m間隔で算出した。地形特性値の算出には約10m格子の標高データ(GISMAP Terrain, 北海道地図株式会社製)を10m間隔に再補間したものを用いた。

地形特性値は局所的な地形特徴に関する指標(標高、標高の局所的なばらつき(12)、斜面傾斜(1, 9, 13)、斜面方位(1)、曲率(12)、ラブラシアン、符号付き傾向面偏差)、斜面位置に関する指標(尾根および谷からの垂直距離・水平距離・ユークリッド距離)、集水域内の位置に関する指標(比集水面積、SPI(Stream Power Index,  $A \times \tan B$ )、TWI(Topographic Wetness Index,  $\ln[A/\tan B]$ )、ただしAは比集水面積、Bは斜面傾斜(7, 12)に大別される。比集水面積については、D8(deterministic 8)法(1, 13)およびD $\infty$ (deterministic infinite)法(9)の2通りで算出した。あるセルにおける比集水面積は流入面積と当該セル面積の和をセルの辺長(10m)で除したものとした。水系網の作成において、D8法は上位セルから流入した累積雨水量を最大傾斜方向セルに全配分し、D $\infty$ 法は流下方向ベクトルに基づき按分比率で下方セルに配分する点異なる。斜面位置については、落水開始地点を尾根、上部比集水面積が閾値面積(5ha)以上になる点を谷と定義し、尾根および谷からの距離を算出した。尾根と谷の特定にはD8法を用いた。D $\infty$ 法による地形特性値の算出にはGISソフトウェアArcGIS(ESRI)にフリープラグイン地形分析ツールTauDEM(Tarboton, 2004)を用いた。

炭素量調査が格子点と地形的に同質な5-10m離れた2点で行われていることを鑑み、格子点の近傍4点の地形特性値を平均して、炭素量との単相間関係を解析した。ただし、調査地点の地形と著しく異なる近傍点は除外した。また、

Eriko ITO, Shuhei AIZAWA, Tadashi SAKATA (Hokkaido Research Center, Forestry and Forest Products Institute, Sapporo 062-8516), Toshiya MATSUURA, Satoru MIURA, Shuichiro YOSHINAGA (FFPRI, Tsukuba 305-8687), Tsuyoshi YAMADA (Tohoku Research Center, FFPRI, Morioka 020-0123)  
Estimation of forest soil carbon storage using Digital Elevation Model – a case study in the Yasato basin, the Kanto region.

人為影響などで調査地点をずらした場合には調査地点の近傍4点平均を用いた。

地形特性値を説明変数、炭素量を目的変数として重回帰分析を行った。重回帰分析は既往の類似研究(10,14)でも用いられる基本的な解析手法である。変数増減型ステップワイズ解析により、赤池の情報量基準(Akaike's information criterion, AIC)を最小とするモデルを選択した。説明変数間の共線性は Variance inflation factor (VIF) < 5 を基準として排除した。選択された説明変数を用いて炭素量の広域推定モデルを作成した。

**結果と考察**

八郷盆地の調査地点における炭素量は 30 cm 深で最小 3.9 kgC m<sup>-2</sup>, 最大 13.5 kgC m<sup>-2</sup>, 平均 (±SD) 8.1 ± 2.1 kgC m<sup>-2</sup> であった。林野庁森林吸収源インベントリ情報整備事業(6)による 2006-2007 年度調査分の 30 cm 深までの炭素量(11)と比較すると、八郷盆地は全国平均 (7.03 kg m<sup>-2</sup>, n = 807) よりやや高く、関東地方の平均と同等の値を示した。

地形特性値と炭素量との単相関解析では、標高と炭素量の間には正の相関が認められた (図-2)。急傾斜地である四国山地における先行研究でも、尾根の土壌で炭素量が大きいことが顕著に認められている(3)。これは緩やかで幅広い尾根の上は土壌が安定しているためだと考えられる。他方、上述の林野庁インベントリ事業の中間報告でも、東北を除くすべての地方において、標高と炭素量との間に正の有意な相関が認められている(11)。このことは標高にほぼ比例して変化する気温が炭素量に影響を及ぼしている(2)ことを示唆しており、今後の研究課題である。

D8 法は流下水を最大傾斜方向セルに全配分するため、D8 による TWI は扇状地では不自然な計算結果となった。このため、以下の解析においては D $\infty$ 法による TWI のみを用いた。D $\infty$ 法による TWI と炭素量の間には正の相関が認められた (図-3)。TWI は集水面積が広く、緩傾斜な地点ほど大きい値を示す指数である。この結果は八郷盆地で特徴的な緩傾斜の扇状地地形において炭素量が大きいことを示唆している。実際、斜面麓部の緩傾斜地には火山灰が被覆しており、扇状地地形の炭素量は 11.7 ± 2.6 kgC m<sup>-2</sup> (n=2) と山地の平均 (±SD) 7.9 ± 2.0 kgC m<sup>-2</sup> (n=83) より有意に大きかった。

ステップワイズ解析により標高(p < 0.0001), D $\infty$ 法による TWI(p < 0.0001)および比集水面積(p = 0.0009), 谷からのユークリッド距離(p = 0.0732)が選択された。これらの変数を用いた重回帰分析によって炭素量のばらつきの30%が説明された (R<sup>2</sup>=0.306, 自由度調整 R<sup>2</sup>=0.272, p < .0001, AIC=103.7)。モデルの予測能は中間程度の炭素量を示した地点で高かった。炭素量が大きい (12 <), ないしは小さい (<5) 地点では、モデルはより平均値に近い値を予測した (図-4)。四国山地では、土壌の堆積様式、安定性と関連する地形特性値 (傾斜, 符号付き傾向面偏差, TWI, 谷からの標高差) を説明変数とした重回帰分析によって、30 cm 深までの炭素量のばらつきの 48 % が説明できている(3)。本研究ならびに四国山地における先行研究で作成した炭素量推定モデルは、基本的に斜面中・上部における土壌の安定性を考慮したものである。言い換えれば、完全に安定した土壌断面における炭素蓄積量からの炭素の損失量を推定するモデルである。したがって、モデルの予測能は平

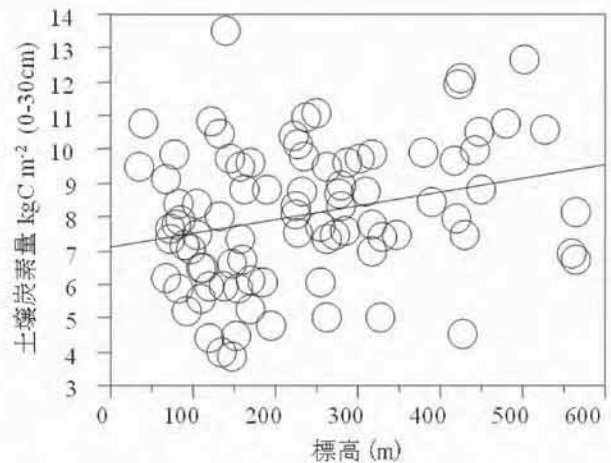


図-2 標高と炭素量の関係

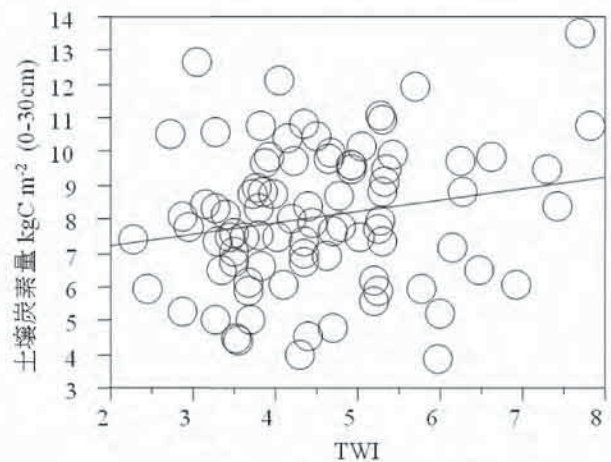


図-3 TWIと炭素量の関係

衡斜面と凸型斜面で向上し、また重力作用に起因する侵食等の物質移動の影響が顕著な流域ほど向上すると予想される。八郷盆地は火山灰の被覆が顕著な地点が多いことから示されるように土壌が比較的安定している。このように侵食などの物質移動の影響が小さい地域では、モデルの予測能はあまり高くない一方で、急傾斜地である四国山地

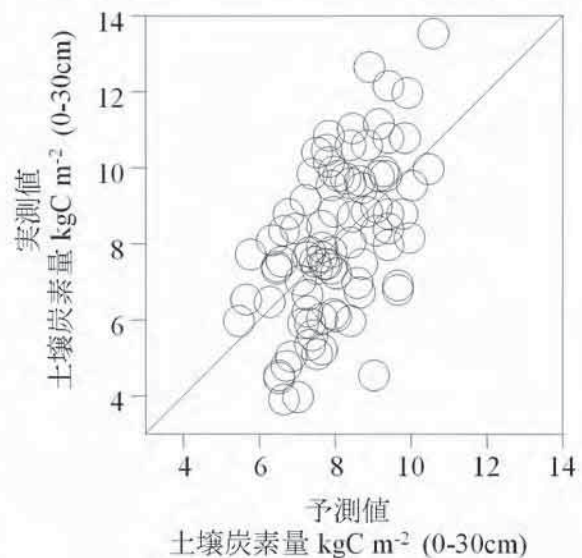


図-4 炭素量実測値とモデル予測値の関係

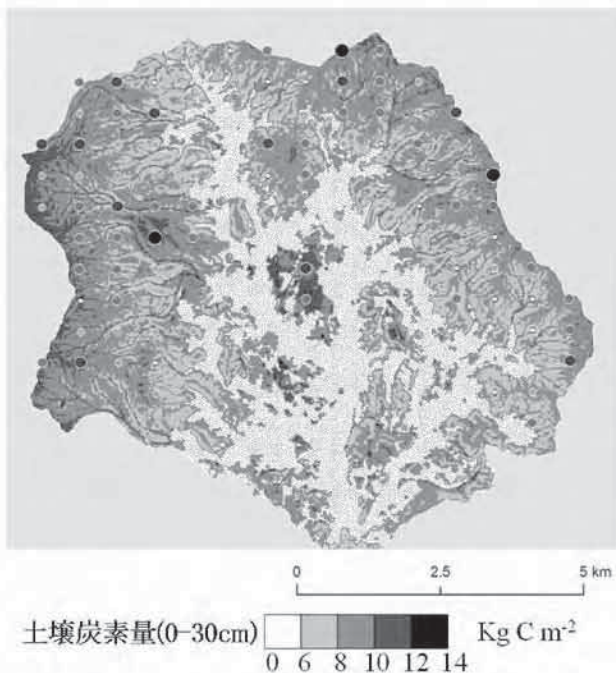


図-5 炭素量実測値(丸印)および予測値(背景)の空間分布(流域内の点描部は森林外の土地利用)

では炭素量変動の大部分が説明できたと考えられる。

作成した炭素量推定モデルを用いて、八郷盆地全域の炭素量を試算した(図-5)。このうち森林域のみを抽出した点における平均炭素量(±SD)は $8.6 \pm 1.1 \text{ kgC m}^{-2}$  ( $n=297885$ )であり、実測値の平均とモデル予測値の平均の差は実測値平均の5%以下となった。モデル予測値の頻度分布は実測値の頻度分布と比較して、中央値付近に分布が集中する傾向が認められた(図-6)。この傾向は大小両極端な値を再現しきれていないモデルの予測能(図-4)に由来すると考えられる。

実測値のモデルでは標高とTWIで正の効果、比集水面積で負の効果が認められており、炭素量は緩傾斜尾根および扇状地、低地で大きく、中間斜面や急斜面で小さい傾向が表現された。ただし、八郷盆地における斜面麓部の緩傾斜地は侵食・堆積の影響を受けにくい(累積性)土壌と考えられる。このような地点は、モデルが想定する物質の移動プロセスから外れている。これらの地点は炭素量が大きく、調査地域における炭素量上限値を示していると考えられる。今後は、斜面下部、麓部における比較的安定した扇状地や台地の炭素量を安定した土壌断面における炭素蓄積量としてモデルの初期値に組み込むことで、モデルの改善が見込まれる。異なる解像度のDEMの利用・地形区分を

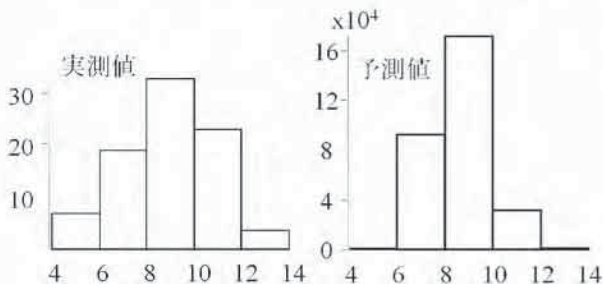


図-6 炭素量実測値および予測値の頻度分布

組み込んだ階層的モデルの構築・ノイズフィルターの適用等を通じてモデルを改善し、他地域への適用可能性を検討することが必要である。

### 引用文献

- (1)Hodgson ME. (1995) What cell size does the computed slope/aspect angle represent? Photogramm. Eng. Remote Sens. 61:513-517.
- (2)Imaya A. (2008) Chemical properties and pedogenesis of yellowish/yellow brown forest soils in the submontane and mountain zones of Kyushu district, southwestern Japan. Soil Sci. Plant Nutr. 54 : 424-433.
- (3)伊藤江利子・松浦俊也・鳥居厚志・酒井寿夫・稲垣善之・篠宮佳樹・野口享太郎・吉永秀一郎(2009) 数値地形情報を用いた森林土壌炭素蓄積量の推定-四国山地西部における事例-。日本森林学会大会学術講演集 120 : 563.
- (4)吸収源インベントリ作業部会 (2008) 森林土壌インベントリ方法書改訂版(1) 野外調査法. 森林総合研究所. A86pp. +B30pp.
- (5)吸収源インベントリ作業部会 (2008) 森林土壌インベントリ方法書改訂版(2) 炭素分析・データ入力. 森林総合研究所. C20pp.+D49pp.
- (6)森貞和仁・インベントリ作業部会 (2008) 森林における土壌炭素量の全国調査(1)-京都議定書に対応した測定プロトコル-. 日本森林学会大会学術講演集 119: 489.
- (7)O'Callaghan JF. and Mark DM. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer vision, graphics, and image processing 28:323-344.
- (8)沖村孝・渡辺桂秀・吉永秀一郎 (1991) 推定表土層厚を用いた崩壊発生位置の予測: 仙台入菅谷 W 地区. 建設工学研究所報告 36: 237-256.
- (9)Tarboton DG. (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resour. Res. 33:309-319.
- (10)Thompson JA. and Kolka RK. (2005) Soil Carbon Storage Estimation in a Forested Watershed using Quantitative Soil-Landscape Modeling. SSSAJ 69 :1086-1093.
- (11)鶴川信・インベントリ作業部会 (2009) 森林における土壌炭素量の全国分布-森林吸収源インベントリ事業の結果を用いた解析(1)-。日本森林学会大会学術講演集 120 : 575.
- (12)Wilson JP. and Gallant JC. (2000) Terrain analysis: principles and applications. John Wiley & Sons Inc.
- (13)Zevenbergen LW. and Thorne CR. (1987) Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surf. Proc. Landforms 12:47-56.
- (14)Zhong B. and Xu YJ. (2008) Topographic Effects on Soil Organic Carbon in Louisiana Watersheds. Environ. Manage. 43:1-11