

スマートフォンで撮影した土壌画像の解析に基づく 露地野菜畑の土壌炭素含量の推定

安藤 薫¹⁾・小田紫帆里²⁾・日置雅之³⁾・山本 岳¹⁾・大竹敏也¹⁾

摘要:土の黒味が濃いほど土壌有機物含量は多くなることを利用し、スマートフォンで撮影した土壌の画像から土壌有機物含量の指標である土壌炭素含量を推定する方法を検討した。環境要因による誤差を小さくする撮影方法として、ろ紙に0.5 mm以下に粉碎した土壌を載せ十分に湿らせ、直射日光が当たらない室内灯下で照明に対し垂直にろ紙を設置し撮影する方法を考案した。スマートフォンアプリ「色しらべ」を用い土壌の画像を解析し、黒味の指標となるL*a*b*のL*値を算出した(画像解析L*値)。画像解析L*値と土壌炭素含量は負の相関関係を示し、特に土壌炭素含量が3.5%程度までは直線回帰することが可能であった($R^2=0.548$)。本県の土壌炭素含量の診断基準の上限値は2.9%(腐植含量として5%)であることから、スマートフォンを用いた本推定法は土壌有機物量の簡易診断法として有用である。

キーワード:土壌炭素含量、画像解析、土色、露地野菜畑

Estimation of Soil Carbon Content Based on Image Analysis of Soil Captured with a Smartphone In a Vegetable Field

ANDO Kaori, ODA Shihori, HIOKI Masayuki, YAMAMOTO Takeshi and OTAKE Toshiya

Abstract: Based on the positive correlation between soil blackness and soil organic matter content, we investigated a method for estimating soil carbon content, an indicator of soil organic matter content, from images taken with a smartphone. To minimize errors due to environmental factors, we developed a specific method. Finely grounded soil was placed on paper and moistened with water; a photograph was then taken of the soil without direct illumination inside the room. Using the smartphone application "Iro-shirabe," the soil images were analyzed and the L* value from L*a*b*, which is an index of blackness, was calculated (image analysis L* value). The image analysis L* values showed a negative correlation with soil carbon content, especially up to 3.5% soil carbon content ($R^2 = 0.548$), which could be linearly regressed. Since the upper limit of the diagnostic standard for soil carbon content in this prefecture is 2.9% (5% as humus content), this method using a smartphone is useful as a simple method for estimating soil organic matter content.

¹⁾環境基盤研究部 ²⁾環境基盤研究部(現園芸農産課) ³⁾環境基盤研究部(現山間農業研究所)

緒言

土づくりにおいては有機質資材を投入することで土壌有機物含量を効果的に高めることが肝要である¹⁾。愛知県の主要露地野菜品目であるアブラナ科野菜の栽培圃場506地点を対象にした調査では、土壌有機物含量(腐植含量)が土壌診断の基準値3-5% (土壌炭素含量に換算すると1.7-2.9%)となる圃場は全体の1割程度で7割近くの圃場で基準値を下回っており、有機質資材の投入による土づくりが十分でない圃場が多い²⁾。農家が簡易に土壌有機物含量を測定できる方法がないため、その蓄積量に応じて有機質資材の投入量を決定できないことが要因の一つである。土づくりのためには、土壌有機物含量を現場で測定できる簡易測定法の確立が重要となる。

これまでに、土の黒味が強いほど、土壌有機物含量の指標である土壌炭素含量が多いことが示され³⁻⁵⁾、土色計^{3,4)}(SPAD-503, コニカミノルタ, 東京)やデジタルカメラ⁵⁾を用いて判定したCIE 1976 (L*, a*, b*)のL*値、目視にて判定したMunsell⁶⁾の明度⁷⁾によって、土壌炭素含量を推定できることが明らかにされている。しかし、土色計は高価であり農家の活用可能性が低いこと、目視による判定は誤差が大きいことなど、現場での簡易測定法としては課題が残されている。本報では、デジタルカメラで撮影した画像を解析することで土壌炭素含量の推定が可能であること⁵⁾に着目し、スマートフォン搭載のカメラで撮影した土壌画像から黒味を判定し土壌炭素含量を推定する方法の確立を目指すこととした。

土色は、光条件・土壌水分含量・土壌の種類・母材などにより異なることから³⁾、これらの影響を限りなく小さくする方法の検討が必要である。そこで、標準色を用いて光(照度)が画像の黒味に与える影響を解明するとともに、その影響を可能な限り抑える画像撮影方法及び補正方法を確立する。加えて、土壌水分含量・土壌の種類・母材が、画像の黒味と土壌炭素含量の相関関係に与える影響を解明し、スマートフォンによる露地野菜畑の土壌炭素含量の推定方法を確立する。

材料及び方法

1 標準色を用いた画像撮影方法及び画像解析法の検討

画像撮影はスマートフォン (iPhone SE第2世代, Apple Inc., カリフォルニア) 付属のカメラで実施した。撮影者による影や光源による画像への影響を最小限にするため、対象物を机の上に垂直に配置し、カメラから30 cm程度離して撮影した(図1a)。Munsell標準色として、標準土色帖(富士平工業, 東京)の色相7.5YRで彩度1の明度が1.7、2、3、4、5、6、7、8の7色を供試した。Munsell標準色を照度が4-1500 lx程度となる室内及び照度が1900-5000 lx程度となる屋外で計32回撮影した。

得られた画像の解析には、kamusoftが開発したスマートフォンのアプリケーションである色しらべversion2.0.1を利用した。色しらべは、画像を構成する全ての色の割合を算出するとともに、その色を様々な表色系(RGB、Munsell、L*a*b*、

Xyzなど)で数値化するアプリケーションである。色しらべで解析するにあたり、撮影画像が対象土壌のみの画像となるよう拡大・トリミング処理をした。森塚ら²⁾が行った土色の試験をもとに、画像の黒味の指標としてL*a*b*のL*値を採用した。基太村ら⁷⁾が提案した方法をもとにMunsell標準色をL*a*b*に換算し、18、21、31、41、51、61、71、82をそれぞれMunsell標準色の理想L*値とした。Munsell標準色の撮影画像のL*値(画像解析L*値)は、式1により算出した。Munsell標準色の理想L*値と画像解析L*値を比較・検討し、光の影響を最小限とする撮影方法及びL*値の補正式を検討した。

$$L^*_{img} = L^*_1 \times S_1 + L^*_2 \times S_2 \dots + L^*_n \times S_n \dots \text{式 1}$$

L*_{img}: Munsell標準色の画像解析L*値; L*: 色しらべにより割り出された各色のL*値; S: 色しらべにより割り出された各色の面積割合(%); n: 色しらべにより割り出された構成色数

2 土壌画像の撮影方法及び土壌画像解析に基づく土壌炭素含量の推定方法の検討

2015-2016年に愛知県経済農業協同組合連合会が採取した県内露地野菜畑345地点の土壌を分析に供した(表1)。具体的には、褐色森林土・赤黄色土を主体とする名古屋・知多、渥美、豊橋、豊田と、低地土を主体とする豊川、安城、一宮・稲沢である。また、県内に占める面積は少ないものの、土壌炭素含量の多い黒ボク土(新城)10点についても参考値として解析した。有色鉱物や土性による色への影響を最小限とすることを目的に、2 mm 目で篩別した風乾土壌をさらに0.5 mm 以下の細砂に粉碎した³⁾。土壌炭素含量推定に最適な土壌画像撮影方法の検討については、渥美(n=42)、豊田(n=36)、一宮・稲沢(n=55)の計133地点の土壌を供試した。決定した撮影方法を用い、土壌炭素含量の推定方法について全345地点の土壌を供試し検討した。

土壌の撮影方法は、土壌の乾湿及び土壌の凹凸による陰影などによる誤差を最小限とする方法として、撮影 A 法、撮影 B 乾法、撮影 B 湿法及び撮影 B 混合法を検討した。撮影には、直径110 mm のろ紙(ADVANTEC No.6)を4分割したものをを用いた。撮影 A 法では圃場容水量程度まで十分に湿らせた細砂をスパチュラでろ紙に1-2 mm 程度の厚みで平らになるように塗布し撮影した。撮影 B 乾法ではろ紙に細砂を載せ、凹凸のないよう円筒側面で均一にし風乾状態で撮影した。撮影 B 湿法では、撮影 B 乾法で撮影した細砂をスポイトで圃場容水量程度まで十分に湿らして撮影した。なお、乾燥土壌はろ紙に付着しないため、湿潤土壌のように机の上に垂直に配置することが困難であったため(図1a)、撮影 B

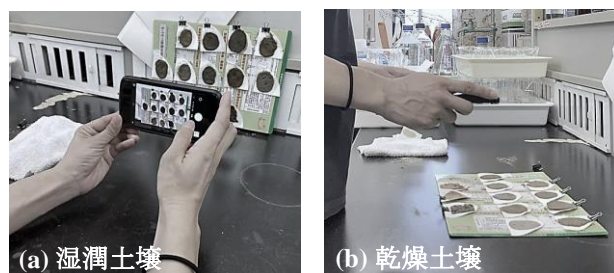


図1 画像撮影方法

乾法では机上に水平に配置し影ができにくいよう配慮しつつ撮影した(図1b)。1の試験で決定した画像解析式をもとに、撮影した画像から画像解析L*値を算出した。撮影 B 混合法では、土壌は湿ることでより黒味が強くなることを利用し、撮影 B 乾法の画像解析L*値を撮影 B 湿法の画像解析L*値で除すことで(混合L*値)、黒味の評価を試みた。

供試土壌の土壌炭素含量は、日置ら²⁾が報告したデータを利用した。画像解析L*値と土壌炭素含量(<3.5%)についてピアソンの積率相関係数を解析し、最適な土壌の撮影方法を選定した。土壌炭素含量を目的変数、撮影画像の画像解析L*値を説明変数とした単回帰式を作成した。単回帰式の決定係数及び実用可能性の観点から土壌炭素含量の推定方法を決定した。

結果及び考察

1 標準色に基づく最適な画像撮影方法

Munsell標準色の理想L*値と、式1により算出した画像解析L*値との関係を図2に示す。室内の暗所(4 lx)において、画像解析L*値は理想L*値の1/2程度の値を示し、暗い色ほどその差は大きくなる傾向を示した。室内自然光のみ(75 lx)と太陽光下の屋外(5370 lx)で撮影したところ、室内の暗所よりも画像解析L*値は理想L*値に近い値を示したものの、理

想L*値と最も近い値を示した室内灯下(320 lx、923 lx)よりは低い値であった。さまざまな照度でMunsell標準色を撮影した結果を図3に示す。照度が100 lx以下の室内環境では、照度の増加とともにいずれのMunsell標準色においても画像解析L*値が理想L*値に近い値まで増加する傾向を示した。室内灯下(105-1400 lx)ではいずれのMunsell標準色においても一定の画像解析L*値を示した。一方、屋外の太陽光下で撮影した場合(>1900 lx)、照度の増加とともに画像解析L*値は低下する傾向を示した。自然光のみでは明るさが足りず画像解析L*値は理想L*値よりも低くなり、太陽光下では色が安定せず補正が必要であることが報告されている⁹⁾。以上より、対象物とカメラの撮影距離は30 cm程度という条件下であれば、直射日光が当たらない室内灯下において、照明に対して垂直に対象物を設置し撮影することで、理想L*値と画像解析L*値の誤差を抑えることが可能であると判明した。

2 標準色を用いた画像解析の補正式

Munsell標準色の画像解析L*値は理想L*値を下回る傾向を示し、その傾向は暗い色ほど顕著であった。画像解析時に生じた誤差を小さくする方法として、色しらべにより割り出されたL*値を理想L*値に補正する式の作成を試みた。Munsell標準色の画像解析L*値を理想L*値で除した値を補正係数aとし、画像解析L*値との相関関係を解析した。解析には、図3のうち光による誤差が小さかった室内灯下(105-

表1 地域別の土性と土壌炭素含量

	n	土性 (n)				土壌炭素含量(%)			主な土壌大群及び特徴*
		砂壤土	埴壤土	埴土	平均値	最小値	最大値	標準偏差	
名古屋・知多	64	26	24	14	1.60	0.29	4.78	1.16	褐色森林土・赤黄色土
渥美	84	40	37	7	2.49	0.30	10.38	2.38	褐色森林土・赤黄色土
豊橋	76	49	26	1	1.25	0.41	5.83	0.99	褐色森林土・赤黄色土
豊田	36	9	15	12	1.86	0.35	9.58	2.36	褐色森林土・赤黄色土
豊川	14	4	8	2	1.44	0.67	2.79	0.62	低地土
安城	16	7	9	0	1.42	0.87	3.78	0.70	低地土
一宮・稲沢	55	52	3	0	0.78	0.41	2.00	0.32	低地土
新城	10	1	9	0	4.90	1.41	9.36	2.93	黒ボク土

*包括的土壌分類⁷⁾に基づく

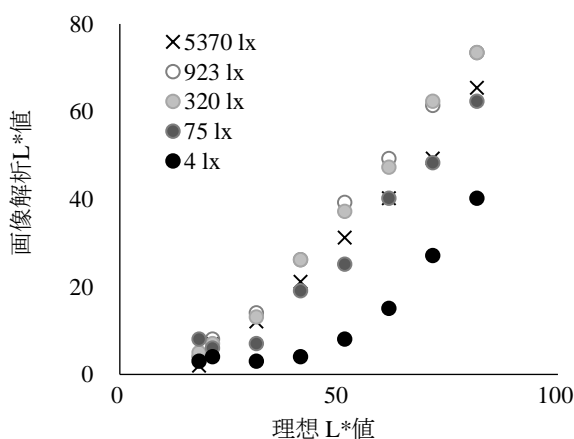


図2 Munsell標準色の理想L*値と画像解析L*値

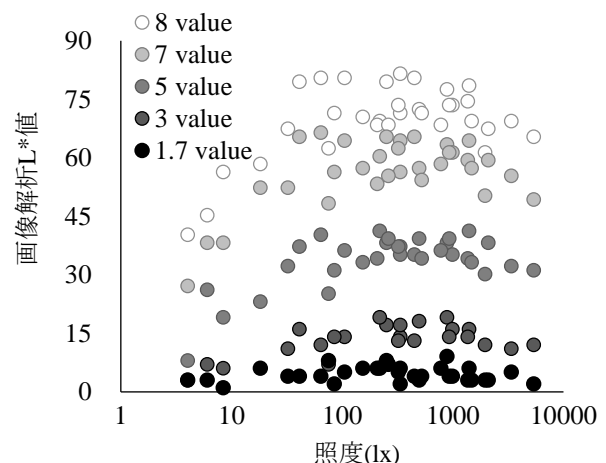


図3 Munsell標準色の画像解析L*値と照度の関係 (理想L*: 8 value: 82, 7 value: 71, 5 value: 51, 3 value: 31, 1.7 value: 18)

1400 lx、計25回)を利用した。図4は、補正係数aと画像解析L*値の平均値をプロットした図である。補正係数aと画像解析L*値の平均値には相関関係が認められ、下記のとおり二次式により近似することが可能であった($P < 0.01$)。

$$a = -0.0001224(L^*_{img})^2 + 0.018188 L^*_{img} + 0.208688 \dots \text{式2}$$

L*_{img}: Munsell標準色の画像解析L*値; a:補正係数a
(L*_{img}/Munsell標準色の理想L*値)

以降の土壌の撮影画像解析では、色しらべにより割り出されたL*値を式2より算出した補正係数aで除して補正し、土壌の画像解析L*値を算出した。

$$L^*_{soil} = L^*_1/a_1 \times S_1 + L^*_2/a_2 \times S_2 \dots + L^*_n/a_n \times S_n \dots \text{式3}$$

L*_{soil}:土壌の画像解析L*値; a:補正係数a; L*:色しらべにより割り出された各色のL*値; S:色しらべにより割り出された各色の解析面積; n:色しらべにより割り出された構成色数

3 土壌炭素含量推定に最適な土壌画像撮影方法の検討

土壌炭素含量の推定に最も適合した土壌画像の撮影方法を検討した。撮影A法、撮影B乾法、撮影B湿法及び撮影B混合法により、渥美、豊田、一宮・稲沢の土壌を撮影し、式3により土壌の画像解析L*値を算出した。図5に、撮影A法、撮影B乾法、撮影B湿法の土壌の画像解析L*値と土壌炭素含量の関係を示す。撮影A法、撮影B乾法、撮影B湿法では、土壌炭素含量の増加とともに画像解析L*値は線形の低下傾向を示し、土壌炭素含量が3.5%を超えると平衡に達した。画像解析において、一定以上に強い黒味の差の判定が難しいことは既報でも認められている³⁾。一方、撮影B混合法で算出した混合L*値と土壌炭素含量は、土壌炭素含量が8%程度までは直線的な増加傾向を示した(図6)。

各撮影法の画像解析L*値と土壌炭素含量の相関係数を表2に示す。撮影A法は、豊田と一宮・稲沢では有意な正の相関関係を示したものの($P < 0.001$)、渥美では相関関係を示さなかった($P > 0.001$)。粘質かつ堆肥施用量の多い渥美の土壌は、撮影A法でろ紙に土壌を塗布する際に有機物と粘土が強くこねられ、塗布前後で土壌の色が変化した可能性が考えられる。

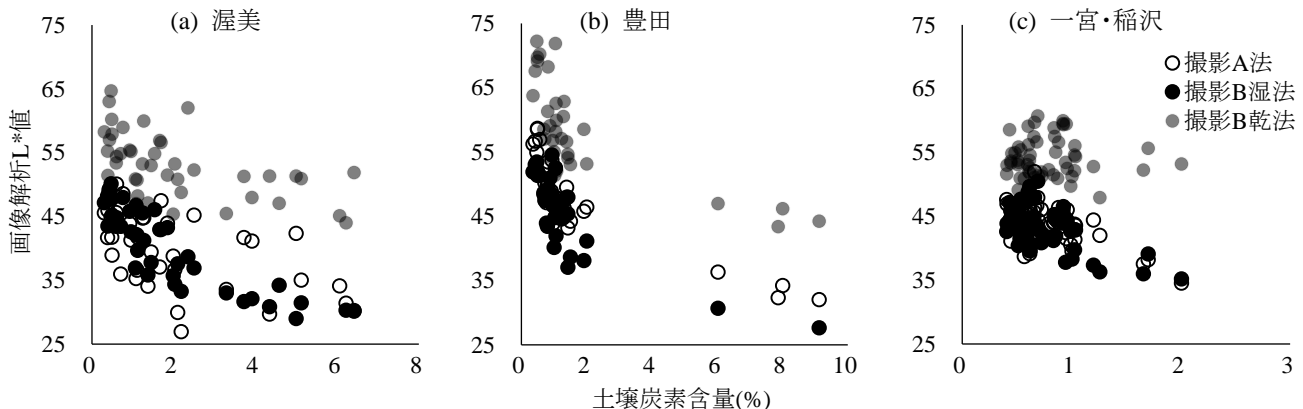


図5 異なる3つの土壌撮影法の画像解析L*値と土壌炭素含量

撮影B乾法では、いずれの地域においても土壌炭素含量との相関関係は認められなかった($P > 0.001$)。撮影B湿法及び撮影B混合法では、渥美含め3地域すべてで有意な相関関係を示した($P < 0.001$)。土壌は湿ることでより黒味が強くなることから、乾燥状態よりも湿潤状態の土壌で相関係数が高くなったと考えられる。特に撮影B混合法では、乾燥状態の黒味を勘差し湿潤状態の黒味を評価したことで、より多い土壌炭素含量まで相関したと考えられる。以上より、土壌撮影方法として撮影B湿法及び撮影B混合法を利用し、土壌炭素含量の推定精度を検討することとした。

4 土壌画像解析に基づく土壌炭素含量の推定

各地域における撮影B湿法の画像解析L*値及び撮影B混合法の混合L*値と土壌炭素含量を図7(a)・(b)に示す。全体の傾向として、撮影B湿法は3.5%まで線形の減少傾向を、撮影B混合法は8%まで線形の増加傾向を示し、上述の試験と同様の傾向が確認された。そこで、撮影B湿法では3.5%以下の土壌炭素含量を、撮影B混合法では8%以下の土壌炭素含量を、単回帰式を用いて推定した(表3)。

(1) 撮影B湿法による土壌炭素含量の推定

撮影B湿法の単回帰式は地域によって異なる傾向を示し(表3)、隣接した地域でかつ同じ土壌大群である豊橋、渥美は近い値の単回帰式となった。地域による違いは、母材や土壌大群が影響した可能性が考えられる。Lilesら¹⁰⁾は、母材や

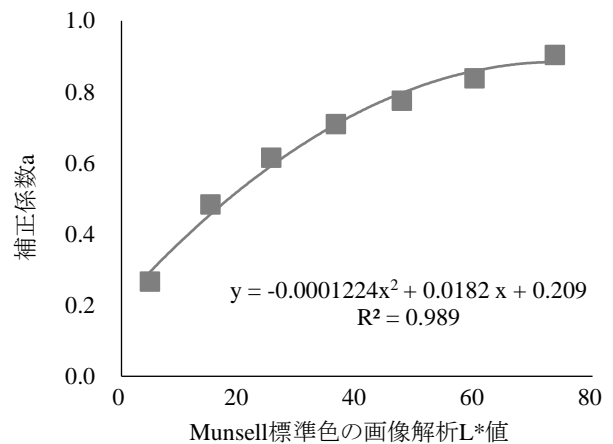


図4 Munsell標準色の画像解析L*値と補正係数a
(補正係数a:Munsell標準色の画像解析L*値を理想L*値で除した値)

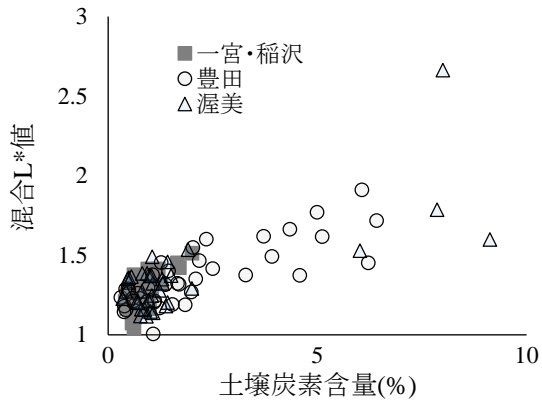


表2 土壌炭素含量と各撮影法により求めた画像解析L*値との相関係数

	n	撮影A法	撮影B 湿法	撮影B 乾法	撮影B 混合法
渥美	35	-0.397	-0.831**	-0.488	0.807**
豊田	32	-0.736**	-0.721**	-0.467	0.697**
一宮・稲沢	55	-0.626**	-0.613**	-0.036	0.698**

** P < 0.001、撮影B混合法以外は土壌炭素含量が3.5%以下のサンプルのみで検定

図6 土壌B混合法の画像解析L*値と土壌炭素含量

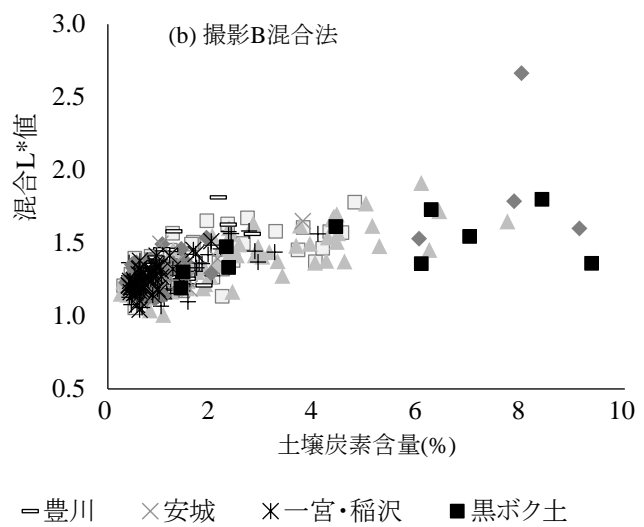
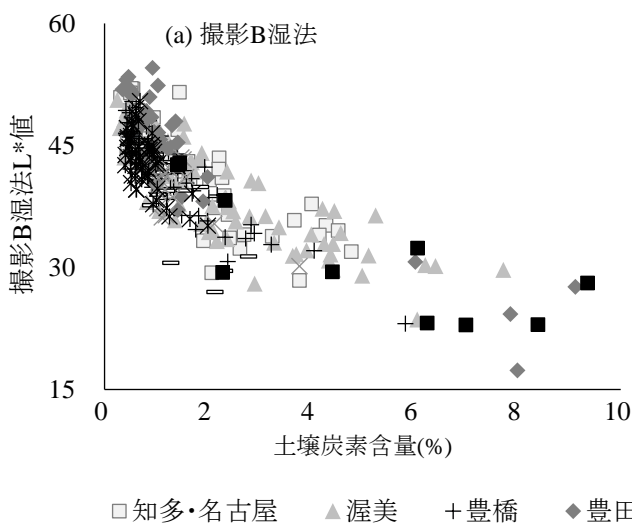


図7 土壌撮影法の画像解析L*値と土壌炭素含量

土壌大群によって土色と土壌炭素含量の相関係数や単回帰式の傾きが異なることを報告している。一宮・稲沢(図5(c))と安城の低地(表3)では、他地域よりも土壌の画像解析L*値のばらつきが大きく、単回帰式の決定係数も低い値を示した(表3)。その要因として、鉄の影響が考えられる。低地土や水田土壌では、鉄含量により土壌の黒味が異なることが報告されている³⁾。以上より、一宮・稲沢と安城の低地土では、画像解析L*値が炭素含量に加え鉄含量に影響を受けばらつきが大きくなった可能性が考えられる。

農家が現場で母材や土壌大群を判断することは困難である。そこで、全ての土壌(全体式)、低地土(低地土式)及びその他の土壌(他土壌式)の3つに分けた単回帰式を作成した(表3)。他土壌式と全体式では近い値の回帰式であった一方、低地土式では傾き切片ともに異なる傾向を示した(表3)。地域別の単回帰式の方が、地域を統合した式よりも決定係数は高い場合はあるものの、3つの単回帰式の決定係数はいずれも十分に高いといえる。以上を踏まえ、撮影B湿法を利用する場合、低地土だと判断がつかない場合は全体式を利用し土壌炭素含量を算出することが望ましい。

(2) 撮影B混合法による土壌炭素含量の推定

撮影B湿法で近い値の単回帰式となった豊橋、渥美において、撮影B混合法では異なる値の単回帰式となった。これは、撮影B混合法の回帰式では、土壌炭素含量の最大値が豊橋(4.07%)と渥美(7.73%)で異なることが影響したと考えられる。

撮影B混合法でも撮影B湿法と同様、全体式、低地土式、他土壌式の単回帰式の傾き及び切片は他土壌式と全体式で同程度の、低地土式では小さい値を示した(表3)。地域別の単回帰式の方が地域を統合した式よりも決定係数は高い場合はあるものの、3つの単回帰式の決定係数はいずれも十分に高いといえる。撮影B混合法でも撮影B湿法と同様に、低地土とそのほかの土壌で別々の回帰式を利用することで、県内露地野菜畑の土壌炭素含量(<8%)を推定可能である。

(3) 土壌炭素含量の推定方法

愛知県では、土壌有機物含量の土壌診断基準として、腐植含量3-5%と設定しており¹⁾、これは土壌炭素含量に換算すると1.7-2.9%にあたる¹²⁾。土壌炭素含量を8%まで予測できるより3.5%までを正確に予測できることが、土壌診断基準に基づいた適切な土壌有機物含量管理の実現に向け重要である。撮影B湿法と比べると、撮影B混合法は土壌炭素含量8%以下までを推定可能なものの、決定係数は低く、平均絶

表3 単回帰式による土壌炭素含量の推定

	撮影 B 湿法			撮影 B 混合法		
	(Total C < 3.5 %)	R ²	MSE ²⁾	(Total C < 8%)	R ²	MSE
名古屋・知多	y = -0.1133x + 6.1570	0.689 **	0.308	y = 5.0702x - 5.3840	0.440 **	0.662
渥美	y = -0.1274x + 6.7920	0.573 **	0.447	y = 7.5075x - 7.9910	0.614 **	0.782
豊橋	y = -0.1292x + 6.6301	0.736 **	0.266	y = 4.0959x - 4.0735	0.439 **	0.423
豊田	y = -0.0617x + 3.8790	0.520 **	0.220	y = 5.5155x - 5.9064	0.639 **	0.748
豊川	y = -0.0799x + 4.4519	0.535 **	0.324	y = 1.9248x - 1.2910	0.289 *	0.416
安城	y = -0.0187x + 2.0139	0.025	1.557	y = 0.2744x - 0.9072	0.005	1.814
一宮・稲沢	y = -0.0573x + 3.2542	0.376 **	0.201	y = 2.4578x - 2.3137	0.487 **	0.162
低地土	y = -0.0793x + 4.2535	0.571 **	0.255	y = 3.0760x - 2.9851	0.492 **	0.300
その他土壌	y = -0.0924x + 5.0809	0.607 **	0.361	y = 6.2721x - 6.7080	0.517 **	0.720
全体	y = -0.1023x + 5.5441	0.548 **	0.361	y = 5.7936x - 6.1522	0.486 **	0.700
黒ボク土 ¹⁾	y = -0.3029x + 14.361	0.635 **	1.223	y = 8.1786x - 7.1292	0.304 *	1.945

Total C:土壌炭素含量、y: 土壌炭素含量、x: 画像解析L*値、** $P < 0.001$ 、* $P < 0.01$ 、

1) 土壌炭素含量の多い特殊土壌、参考値

2) MSE: 平均絶対誤差 $MSE = 1/n \sum_{i=1}^n |Y_i - y_i|$ (Y:実測値; y:予測値; n:標本数)

対誤差(MSE)は大きい傾向を示した(表3)。よって、土壌診断に活用する場合には、単回帰式の決定係数が高くかつ簡便な方法である撮影B湿法が最適な撮影方法であると考えられる。今後、本法を活用した土壌炭素含量の簡易測定法を現場で実装するには、①測定者やカメラの性能による誤差を最小限に抑える方法を検討するとともに、②スマートフォンのアプリケーションを開発し、③現場での実用性評価をすることが必要である。スマートフォン搭載のカメラを使って土壌炭素含量を推定可能となるアプリケーションが開発できれば、有機質資材を利用した土づくりに貢献できる。

引用文献

- 中村嘉孝, 安藤 薫, 瀧 勝俊. 土壌炭素動態(RothC)モデルを用いた砂質露地畑における土壌炭素の変動解析と土壌化学性の変動予測の可能性. 愛知農総試研報. 52, 23-30(2020)
- 日置雅之, 都築宏明, 瀧 勝俊. 愛知県内アブラナ科野菜栽培ほ場における土壌窒素肥沃度の実態. 愛知農総試研報. 52, 117-120 (2020)
- Moritsuka, N., Matsuoka, K., Katsura, K., Sano, S. and Yanai, J. Soil color analysis for statistically estimating total carbon, total nitrogen and active iron contents in Japanese agricultural soils. Soil Science and Plant Nutrition. 60, 475-485 (2014)
- 八槇敦, 安西徹郎. 千葉県畑土壌における陽イオン交換容量の簡易推定法. 日本土壌肥科学雑誌. 72, 679-683 (2001)
- Viscarra, Rossel, R.A., Fouad, Y. and Walter, C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. Biosystems Engineering. 100, 149-159 (2008)
- Munsell, A.H. A color notation: a measured color system, based on the three qualities hue, value, chroma with illustrative models, charts, and a course of study arranged for teachers, p. 89. G. H. Ellis Co, Boston, MA (1905)
- 基太村洋子. 木材の色の表し方: CIELAB から MUNSELL 表色系への簡易変換方法について. 森林総合研究所研究報告. 365, 1-32 (1993)
- 小原洋, 大倉利明, 高田裕介, 神山和則, 前島勇治, 浜崎忠雄. 包括的土壌分第一次試案. 農業環境技術研究所報告. 29, 1-73 (2011)
- 大嶺政朗, 柴田洋一, 鳥山和伸, 佐々木良治, 帖佐直, 安田伸子. 水稻の群落葉色計測技術の開発 (第1報). 農業機械学会誌. 68, 101-108 (2006)
- Liles, G.C., Beaudette, D.E., O'Geen, A.T. and Horwath, W.R. Developing predictive soil C models for soils using quantitative color measurements. Soil Science Society of America Journal. 77, 2173-2181 (2013)
- 愛知県農業水産局農政部農業経営課. 農作物の施肥基準. 愛知県. (2021) <https://www.pref.aichi.jp/soshiki/nogyo-keiei/sehikijun.html> (2022.6.30参照)
- 本田親史. 9. 炭素. 土壌養分分析法. (土壌養分測定法委員会編). 養賢堂. 東京. p. 127-135(1970)