

スキャナを利用した土壌検査に関する研究*

長谷川 辰雄**、高橋 良学***、大和田 功****

安全な農作物が求められている中で、作物を育てる良い土壌づくりに関心が高まっている。良い土壌を判断するための検査には多くの項目があり、多大な時間を費やしている現状がある。そこで、検査時間の短縮化を目指し当センターと岩手県農業研究センターは共同で、容易に土壌の検査が可能となるシステムを開発した。従来の方法は、検査装置が高額で手間がかかるという問題を抱えていた。これに対して、開発した手法は土壌の色をスキャナで画像化し、その色から全炭素含有量を推定し品質を判定する。パソコンとスキャナさえあれば、容易に土壌の品質を推定できる特徴がある。

キーワード：土壌品質、スキャナ、画像処理

The Soil Quality Inspection by the Scanner

HASEGAWA Tatsuo, TAKAHASHI Yoshinori and OOWADA Isao

The good soil where crop grows healthily contains organic substance and microorganism abundantly. There were many items in the inspection of the soil, and it took much time. The joint research to examine the quality of the soil easily was conducted between our Center and Iwate Agricultural Research Center. Though the usual method is high precision, the soil inspection device has the problems that are high price and inspection times are long. By the color of the soil acquired with scanner, all carbon content in the soil is estimated and it judges soil quality. If only there are a personal computer and a scanner, it becomes possible that the quality of the soil is estimated simply.

key words : soil quality, scanner, image processing

1 結 言

開発した土壌検査システムは、スキャナで土壌の画像（RGB 値）を取得し、R 値から土壌中の全炭素含量を高速に推定することで、有機物量の概算を判断する仕組みとなっている。全炭素量と有機物量はおおよそ比例関係にあり、有機物が豊富な土壌は、気象の変化や病害虫に対して抵抗力が強いことが分かっている。

有機物量は、枯れ葉が微生物によって分解され、土壌が黒色化する「腐食」の影響が大きいとされる。一般的に腐食含量が 10%以上で黒色、5～10%で黒褐色となることが知られている。このように有機物と土色に関係があることから、土色帳と呼ばれる土色の見本を用いて検査が行われていた。

しかし、目視による検査はバラツキがあり、安定した色の評価方法が求められていた。また、色以外の検査では、pH、窒素、リン酸、カリ等を分析しており、多くの時間を要していた。

そこで、本研究では、簡単に画像が得られるスキャナに着目し、検査の高速化と安定した土色評価のために、複数画像の自動処理方法及び色補正方法を開発した。この方法では、複数の土壌をスキャナ面に並べ、個々の土壌ごとに色補正用の色票パッチを準備し、測色計の値

にスキャナ値を補正する。これによると、従来のシェーディング補正を必要とした方法に比べて、短時間で正確に土壌の色を取得することができる。

また、全炭素量は有機物量を示すだけでなく、土壌の特性を示す陽イオン交換容量と関係があることが知られており、全炭素量は土壌品質を評価する重要な要素となっている。本報告書では、開発した土壌検査システムにおける色補正の内容について報告する。

2 実験方法

2-1 全炭素量と陽イオン交換容量の関係

土壌の検査には、水分量、pH、電気伝導度、陽イオン交換容量、窒素、リン酸、カリなどを分析する化学性分析と、粘り、比重、乾湿などを分析する物理性分析がある。このうち、陽イオン交換容量は、肥料中の Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 H^+ の陽イオンを、土壌が帯びているマイナス電荷で保持する力を示すもので、この値が大きいほど肥料を蓄える力の強い土壌とすることができる。図 1 に示す通り、陽イオン交換容量と炭素量は相関関係にあるため、全炭素量を測ることで陽イオン交換容量の傾向を知ることができる。

* 夢県土いわて創造研究推進事業

**** 有限会社イグノス

** 電子機械技術部

*** 岩手県農業研究センター

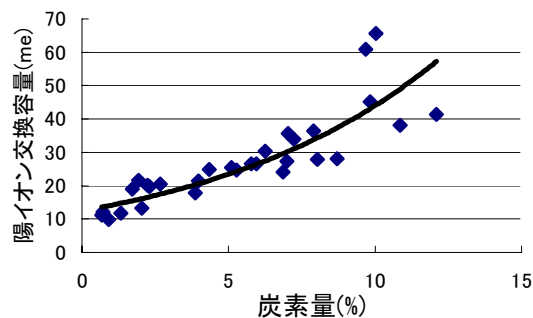


図1 全炭素量と陽イオン交換容量の関係

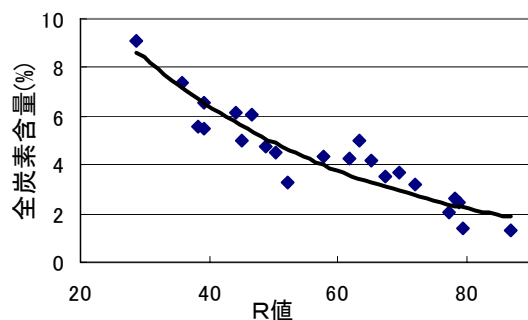


図2 R値と全炭素含量の関係

現状の全炭素含量の測定法は、特別な装置を用いているが、測定時間が長いという問題がある。そこで、従来、土色帳で土色を調査していたことをヒントにし、土色 (R 値) と全炭素量の関係を調べると、図2に示すような関係があることが分かった。この結果から、色を簡単に取得できるスキャナを利用すれば、容易に画像 (R 値) から全炭素量を推定できると判断した。

2-2 スキャナの色補正

PC 用スキャナは、被写体の画像取得が目的であり、色を比較・評価するためには工夫が必要となる。従来、厳密な色測定には、被写体の分光特性を測定する測色計が用いられる。しかし、測定径が小さく、複数の土壌を調べるには時間を要していた。一方、スキャナは読み取り面積は大きい、測色計のように高精度な色情報を得ることは難しい。

そこで、スキャナを測色計の代わりに使用する方法として、色校正用チャートによる校正法¹⁾がある。この方法は、被写体の色範囲から代表的な色をいくつか選び、それを色票パッチと呼ばれる一定の面積領域で印刷し、その色票パッチを測色計で実測した値と、スキャナで得た値から変換係数を求める方法である。

光のスペクトルを3刺激値(XYZ)に分けて測定する装置が測色計であり、スキャナの読み取り画像を RGB、変換係数を ($a_{11} \sim a_{33}$) とすると、その線形変換は式(1)で表される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

しかし、実際の色の関係は非線形となるため、変換係数 ($a_{11} \sim a_{33}$) は、最小二乗法による近似解として計算する。非線形最小二乗解を求めるには、拘束式を付加する方法や、減衰最小二乗法、Levenberg-Margquardt法など、幾つかの解法があるが、本研究では計算コストの速い拘束式を用いる方法で係数を求めた。拘束式に関して、スキャナでは $R=G=B=k$ のとき $X=Y=Z=k$ である必要があるため、拘束式は式(2)で示される。

$$\begin{cases} a_{11} + a_{12} + a_{13} = 1 \\ a_{21} + a_{22} + a_{23} = 1 \\ a_{31} + a_{32} + a_{33} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

最小二乗法は、式(3)の E が最小となるように変数を決定することである。つまり、測色計の値 (XYZ) とスキャナの読み取り値 (RGB) の誤差の二乗が最小となるように変換係数 $a_{11} \sim a_{33}$ を求めることである。

$$E = \sum \{ (X-R)^2 + (Y-G)^2 + (Z-B)^2 \} \quad (3)$$

式(1)を式(3)に代入し、式(2)の拘束式をLagrangeの未定係数法の式として表現したものが式(4)である。式(3)の誤差が最小となるように係数 $a_{11} \sim a_{33}$ を求めることは、式(4)について各係数の偏微分が0となることである。

$$F = \sum \left\{ \begin{aligned} & (a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B - R)^2 \\ & + (a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B - G)^2 \\ & + (a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B - B)^2 \end{aligned} \right\} \\ + \lambda_1(a_{11} + a_{12} + a_{13}) + \lambda_2(a_{21} + a_{22} + a_{23}) \\ + \lambda_3(a_{31} + a_{32} + a_{33}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_{ij}} = 0 \quad (i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

2-3 色票パッチの設計

従来の色校正は、シェーディング補正と色票パッチによる色校正の2段階の作業が必要であり時間がかかっていた。そこで、スキャナ面に配置した土壌の位置ごとに、複数の色票パッチを配置することで、それぞれの土壌ごとに補正係数を求める方法を開発した。図3はスキャナ上の土壌の位置と色票パッチの例を示しており、図3(a)の土壌H1に対応する色票パッチは、図3(b)のP1となる。P1は階調値の異なる9個の色票パッチ・グループから成り、この色票パッチそれぞれについて、測色計の値を式(1)のXYZに代入し、スキャナの撮像値を式(1)のRGBに代入して連立方程式を立てる。

つまり、補正係数はこの9個の連立方程式について、式(4)及び式(5)を解くことで得られる。今回の手法は、土壌の周りに配置した色票パッチが、全面に配置する従来方法よりも局所的であるため、位置の違いによる色ムラを吸収する補正が行われる。また、土壌ごとに補正係数を求めるため、従来の1つの補正係数で全てを補正するよりも高精度な補正が可能となる。

従来のシェーディング補正は、スキャナを構成するセンサ感度のバラツキを修正するために、白色チャートを用いて行われ、この後に色校正用チャートで色校正が行われていたため、作業が煩雑で時間がかかっていた。本手法では、このシェーディング補正の必要が無いため、短時間で校正ができる。

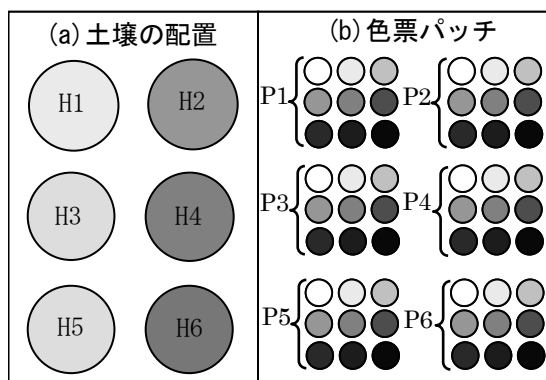


図3 土壌の配置と色票パッチの位置関係

3 実験結果

3-1 色校正実験

色校正の実験は、スキャナのバラツキが特に大きい4隅とバラツキが少ない中央部の計5箇所について行った。本手法は1つの被検体（土壌）に対応する色票パッチは3行3列の9個で構成し、測色計の測定径の形状に合わせて直径12mmの円形とした。一方、従来手法は6行4列（24個）の四角形色票パッチを、A4全面に印刷した色校正用チャートを用いて校正した。図4は本手法と従来法のそれぞれの色票パッチによる実験結果で、測色計による測定値との比較を示している。これと近いほど良い補正となる。

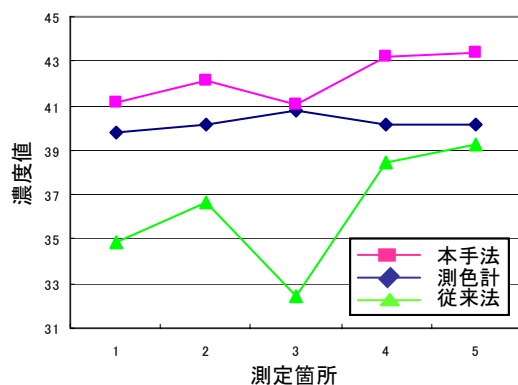


図4 本手法と従来法の校正の比較

このグラフが示す通り、本手法はバラツキが少なく測色値に近い値を示している。表1に本手法と従来法の誤差と標準偏差を示す。単位はR値の階調値（最小値0～最大値255）である。

表1 試験仕様

	本手法	従来法
誤差	1.9	3.9
標準偏差	1.2	2.9

3-2 開発システムの特徴

開発したシステムは、PC上で稼働するソフトウェアとスキャナで構成され、スキャン時間を含めて1回30秒以内で全炭素含量の割合を推定する。作業手順は、予め乾燥・粉砕した土壌を透明のガラスシャーレに入れ、70%程度のアルコールで湿らせる。次にシャーレを固定するためのトレイにセットし、開発したソフトウェアのメニューから測定ボタンを選択する。次に、スキャナの解像度、補正方法などの確認画面が表示され、撮影条件を確認後、実行ボタンを選択すると、自動的にスキャンが始まり、全炭素含量の割合を表示する（図5）。

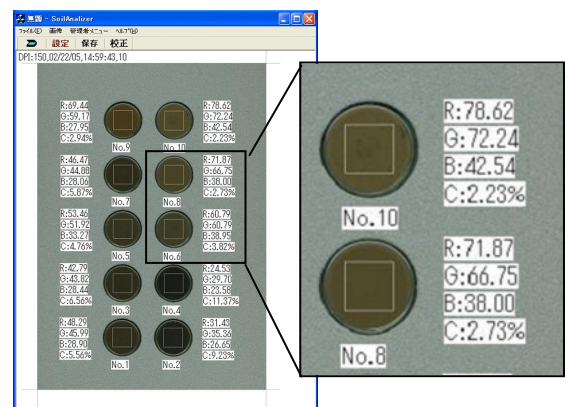


図5 測定結果のイメージ

開発したソフトウェアは、2値化、ヒストグラム、輪郭線追跡、最小/最大値、最小二乗近似式記憶、TWIN画像取得、色校正処理を機能とする画像処理プログラム(MFC V6.0)で構築した。

特に、専用トレイの作成について、シャーレを自由な位置に設定・変更できるように、柔軟性のある画像処理プログラムとして構築した。これによって、大きさや配列が異なるシャーレに柔軟に対応することができた。

3-3 色校正による効果

R値と全炭素含量の関係式は、全炭素含量が異なる約40種類の土壌について、スキャナのR値と全炭素含量の実験値から、その関係を最も良く表すように近似式を求めた。この近似式は図6のグラフで表される。このグラフから分かるように、非線形の近似式となるが、ほぼ線形変化として考えると、その割合は Δ 全炭素含量/ Δ R

値 = $(2-8) / (85-30) = -0.1090$ となり、変化量は小さい。つまり、R 値が大きく変化しても、全炭素含量の変化の割合は小さい。ここで、R 値 = 50 近辺に着目すると、この前後から勾配が小さく変化していることが分かる。

つまり、R 値 < 50 のとき変化率が大きく、R 値 > 50 は小さいという傾向が見て取れる。このことから、R 値の誤差の影響を受けやすいのは R < 50 の範囲となる。そこで、R 値 = 40 について、その影響がどれくらいになるかを調査した。表 2 は R 値の誤差が炭素推定に与える影響の度合いを示している。推定近似式全体では、表 1 から本手法の誤差が 1.9 なので、R = 40 で推定近似式を計算すると炭素推定誤差が 0.3% となる。従来法では、誤差が 3.9 で、炭素推定誤差が 0.7% となる。

この実験において本手法は、図 3(b) に示すような円形色票パッチ (φ 1.3mm) を土壌ごとに配置した A4 板チャートを用い、従来法は、正方形の色票パッチ (4.3mm 角) を 6 行 4 列 (計 24 個) に並べた A4 板チャートで色校正を行った。

測定時間は、シェーディング補正にかかる時間が無いため、本手法が速くなっている。シェーディング補正は、色校正用のチャートとは別に、白色チャートを読み込む必要があるため時間を要している。表 2 の比較結果から、誤差の影響と測定時間において、本手法が有効に作用していることが分かった。

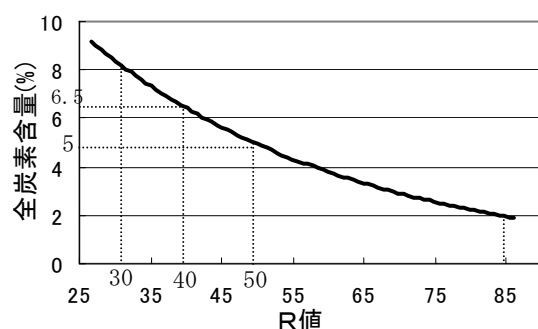


図 6 R 値と全炭素含量の近似式

表 2 誤差の影響 (R=40)

	本手法	従来法
R 値誤差 (階調値)	1.9	3.9
炭素推定誤差 (%)	0.3	0.7
測定時間	30 秒	1.5 分

4 考 察

スキャナ装置は、その照明の分光放射率 $E(\lambda)$ 、光学系の分光特性 $L(\lambda)$ 、3 色分解フィルタの分光透過率 $F_i(\lambda)$ 、センサの分光感度 $S(\lambda)$ とすると、式(6)の関数が成立すれば、スキャナで得られる色特性は、3 刺激値 (X、Y、Z) に対応することができる^{2),3)}。

$$\begin{aligned}\bar{x}(\lambda) &= E(\lambda)L(\lambda)F_r(\lambda)S(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) &= E(\lambda)L(\lambda)F_g(\lambda)S(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) &= E(\lambda)L(\lambda)F_b(\lambda)S(\lambda)\end{aligned}\quad (6)$$

しかし、通常、スキャナの照明光が一定化しないことや、センサの分光感度のバラツキが起因となって式(6)は成立しない。

そこで、スキャナの出力値を安定化させるために、色票パッチを用いて校正する必要がある。これを精度良く行うためには、どの色をいくつ選択するかが重要となる。色票パッチの選択色と個数は多ければ精度が良くなるが、計算コストや作業量が膨大となり効率が悪くなる。

つまり、効率を考慮して適切なサンプリング数を選ぶことが重要となる。土壌の R 値範囲の差である 60 を 24 段階にサンプリングすることは、数が多すぎて作業コストが高くなる。そこで、本研究では、土壌の色域が非常に狭いことに着目し、実験から 9 段階のサンプリング値で十分精度が得られると判断した。この結果、表 2 に示す通り測定時間と精度のバランスがとれた色校正を行うことができた。以上のことから、色票パッチの作成は、作業コストを考慮し適切にサンプリングすることが重要と思われる。

5 結 言

新たに開発した色校正方法により、全炭素含量の誤差精度を向上することができた。本手法は、複数個の被検体をスキャナ面に配置し、それぞれの全炭素含量を高速に測定できる特徴がある。現状の測定では、専用装置により 1 つの被検体に 10 分程度の時間を必要としている。つまり、10 個の被検体に 100 分必要であるのに対し、本手法は 10 個の検査に 30 秒と高速である。

しかし、45 < R < 55 の範囲、全炭素含量では 4~6% の範囲における、全炭素含量の推定値誤差が非常に大きい問題がある。これは、この範囲の土色と炭素量の関係が数値モデル化し難いほど、一定的ではないことが主な原因と考えられる。

この範囲以外では、炭素推定の誤差を 1% 以下にすることができた。以上のことから、用途として、誤差が大きい範囲は他の装置で測定するなど、他手法と連携することで全体的な測定時間を短縮化することが有効と考えられる。今後、本手法の製品化を目指し、企業への技術移転や商品開発支援を行っていく予定である。

文 献

- 1) 三宅 洋一：デジタルカラー画像の解析・評価，東京大学出版会 (2002)
- 2) 山内 二郎，金沢 寿吉：新編色彩科学ハンドブック，日本色彩学会，東京大学出版会 (1985)
- 3) 日下 秀夫：カラー画像工学，オーム社 (1997)