

呈色試験紙を用いた土壌分析における 人と色判別装置の正確さの比較

○瀧澤由佳子* 松井謙介** 伊藤貴康**
森田二郎*** 三浦久典* 才木常正****

Accuracy Comparison between People and Imaging Device in Soil Analysis with Color Reaction Test Paper

Yukako TAKIZAWA* Kensuke MATSUI** Takayasu ITO**
Jiro MORITA*** Hisanori MIURA* Tsunemasa SAIKI****

ABSTRACT

We assumed soil analysis by using color-reaction paper at an outdoor farm, and we compared the accuracy of the results given by people and those given by an analyzer with an imaging device. First, by using 3 kinds of pH-test papers immersed in solutions with a pH of 5, 6, and 7, we carried out a color discrimination experiment with ten participants that had no defective color vision. As a result, it was shown that between about 40 and 80 % of the pH values were correctly determined by participants and that this varied greatly with the difference in the pH values of the used test papers. Then, we carried out the same experiment with a system that mimics the analyzer with the imaging device. As a result, it was shown that the rate of pH values correctly determined by this system was about 100 %. From these results, it was found that the accuracy of the pH values analyzed with the mimicking system was much higher than that of the analysis done with people. This fact indicates that, for analyzing soil with color-reaction test paper, an analyzer with an imaging device has greater accuracy potential.

Keywords : agriculture, soil analysis, color-reaction, human error, color sensor

1. はじめに

農業においては作物の品質向上や収穫量増加のため、作物を生育させる土壌の pH 値や養分含有量を常時正確に管理することが望まれている。正確に土壌を分析するには原子吸光光度計等の高価な装置⁽¹⁾を利用すれば良いが、分析機関に依頼する必要があるためコストが必要となり農家にとって負担が大きく、更に分析結果が返ってくるまでの日数がかかり土壌の常時管理には向かない。ちなみに、pH 値の測定であれば、分析機関では一般に pH メータが使用される。しかし、これを使用するには既知の pH 値の水溶液を用いた校正や電極部の洗浄等の作業を要し、農業現場ではこれらを実施しづらい。従って、やはり常

時の使用には向かない。

そこで、変色を伴う化学反応つまり呈色反応を示す試験紙(以後、呈色試験紙という。特に、pH 試験紙やリトマス試験紙は有名である。)を用い、農家自らが土壌分析を行っている⁽²⁾。具体的には、分析者が現場で呈色試験紙を土壌の懸濁液に浸した後、この試験紙の呈色と色見本中の一致する色を目視で探して色判別を行い、pH 値等の分析結果を得ている。このため、呈色試験紙が同じであっても、現場での照明となる太陽光の差異(例えば、日中と夕方)や被験者の加齢による色覚低下度合いの違い⁽³⁾⁻⁽⁶⁾等により分析結果が異なることは容易に推測することができる。

そこで、著者らは、この分析結果に差異が生じる問題を解決するために、一定照明下で試験紙の呈色をカラーセンサ等の撮像素子で読み込んで色判別を行う、持ち運び可能なポータブル土壌分析装置が農家にとって必要であると考えた。そこで本研究では、本ポータブル土壌分析装

* 兵庫県立工業技術センター

** 明咲出荷組合

*** 神戸市立工業高等専門学校 電気工学科 教授

**** 兵庫県立大学大学院工学研究科 客員教授

置の必要性を調べるため、まず現状の pH 試験紙を用いた人による太陽光下での色判別分析の正確さについて調べた。次に、上記のポータブル装置による土壌分析の原理を模したシステムを構築して、このシステムによる pH 試験紙の色判別分析の正確さを調べた。そして、これら人とシステムによる色判別分析の正確性を比較し、撮像素子を用いたポータブル土壌分析装置の有用性について検討した。

2. 人による呈色試験紙の色判別分析

本節では、日常的に農家が行っている呈色試験紙による土壌分析作業を基に考えた汎用 pH 試験紙による人の色判別の実験方法について述べる。そして、この実験から得られた結果を基に、人の色判別分析で得られた pH 値の正確性について述べる。

2.1 実験方法

pH 試験紙を用いた人による色判別実験の様子を図1に示す。本実験は、平成29年1月18日午後1時から約20分の間に、神戸市立工業高等専門学校(神戸工業高専)の電気工学科棟の屋上で、曇天の下、被験者全員に対して一斉に行った。実験に参加した被験者は加齢による色覚低下のない年齢15~16歳の男性9名と女性1名であり、被験者全員にインフォームドコンセントを実験前に得ている。実験では、まず、被験者に机(高さ70 cm、白色の天板)脇に置かれた椅子(高さ42 cm)に着席してもらい、下記の教示を行った。

教示:「スライドガラスの上で小さな紙を順々にお見せします。この紙の色に最も近いと思われる色見本の番号を回答用紙に記入してください。」

その後、被験者に机上で小さな紙(以後、試験紙サンプルという)を順次提示し、自作の色見本(以後、実験用色見本という)と見比べて色判別分析を行ってもらった。

実験中に試験紙サンプルを照らしていた太陽光の照度と相関色温度はそれぞれ約50,000 lx と約6,000 K であり、太陽光の照度範囲(数lx~約100,000 lx)と相関色温度範囲(約2,800 K~約8,000 K)⁽⁷⁾⁽⁸⁾から考えると本実験中の太陽光はこれら範囲のほぼ中心付近であったことがわかる。ちなみに、これら実験中の太陽光の照度と色温度値は照度センサ(GRAPHTEC 製, GS-LXUV)及び分光放射計(トプコン製, SR-LEDW)で計測した。

被験者に提示した試験紙サンプル例を図2に示す。試験紙サンプルは、9 mm 角にカットした pH 試験紙(東洋濾紙製, 図3参照)を任意の pH 値に調整した無色透明の水溶液に浸した後、pH 試験紙を振り余分な水分を取り除いて作成した。このような水分除去法を採用した理由は、現場での農家の作業内容に準じたためである。こうして作成した試験紙サンプルを、被験者1人当たりにつき、pH 5, 6, 7 の3種類を各5個ずつの計15個用意した。そして、実験ではこれらの試験紙サンプルを被験者にランダムに提

示した。ちなみに、試験紙サンプルに用いた pH 5~7 は多くの作物種を生育するのに最適な pH 値である⁽⁹⁾。

次に、試験紙サンプルの色判別分析するために自作した実験用色見本を図4に示す。実験用色見本には目盛が等間隔で描かれており、これらの下部には0から16までの

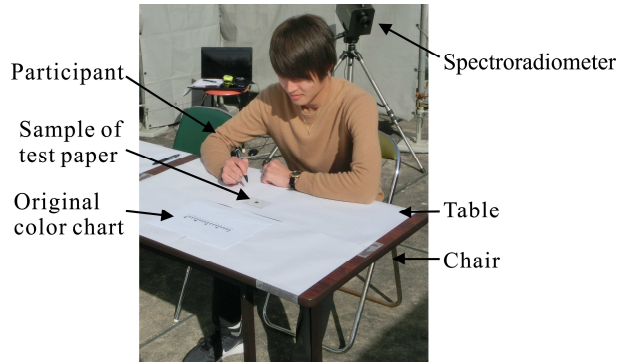


図1 pH 試験紙を用いた人による色判別実験の様子(被験者の後、分光放射計等)。

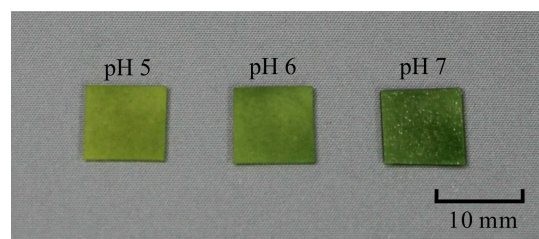


図2 被験者に提示した試験紙サンプルの例。

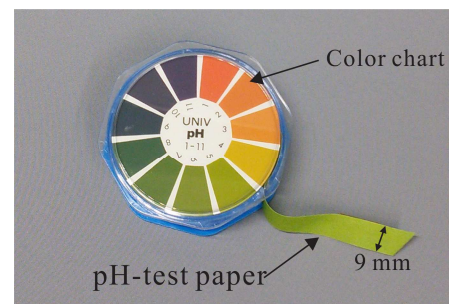


図3 実験で用いた pH 試験紙とそれに付属している色見本。

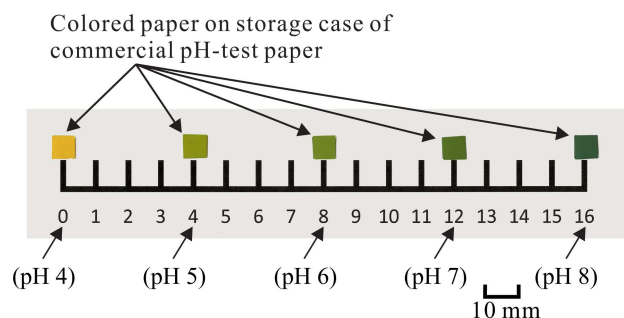


図4 試験紙サンプルの色判別分析するために自作した実験用色見本。

番号が書かれている。そして、4 目盛毎(番号 0, 4, 8, 12, 16 に相当)に pH 試験紙ケースに付帯している色見本(以後、付帯色見本という)から切り取った pH 4, 5, 6, 7, 8 に相当する色紙を貼り付けている。参考までに、実験用色見本の色紙各 5 枚の $u'v'$ 色度座標値の平均値及び標準偏差を図 5 に示す。これらの値は色比較・検査用蛍光灯照明(東芝ライテック製, FL20S.D-EDL-D65, 照度 1200 lx)下で分光放射計により測定した値から算出している。

2.2 実験結果

pH 6 の試験紙サンプルに対して各被験者が回答した実験用色見本の番号を図 6 に示す。横軸は各被験者を表し、縦軸はその被験者が答えた実験用色見本の番号を表す。また、丸印中の色は被験者がその実験用色見本の番号を回答した回数を示し、白、グレー、黒色はそれぞれ 1, 2, 3 回を表す。例えば、被験者 A であれば、実験用色見本の番号の 7, 8, 10 をそれぞれ 1 回答えており、番号 9 を 2 回答えている。この図を見ると、同じ被験者に同じ pH 値の試験紙サンプルを提示しても同じ実験用色見本の番号を回答しておらず、回答する実験用色見本の番号が分布していることがわかる。そして、この回答した実験用色見本の番号の分布は被験者毎に異なっていることもわかる。このことから、色覚正常者を対象にしても、pH 試験紙を用いた色判別分析の結果に個人差が生じることが明らかになった。ここでは詳細は述べないが、このような個人差は pH 6 だけではなく pH 5 と pH 7 の試験紙サンプルにおいても同様に生じていた。

次に、全被験者が回答した実験用色見本の番号全てを試験紙サンプルの pH 値毎に分別し、それらの平均値と標準偏差をまとめて図 7 に示す。この図から、試験紙サンプルの pH 値が大きくなるに従い、被験者が回答した実験用色見本の番号の分布が大きい方にシフトすることがわかる。そして、それらの分布を実験用色見本の番号(左の縦軸を参照)でなく図 3 に示した試験紙ケースの付帯色見本での pH 値(右の縦軸を参照)で見ると、試験紙サンプルの pH 値より小さな付帯色見本での pH 値で分布していることがわかる。定量的には、pH 5, 6, 7 の試験紙サンプルの付帯色見本での pH 値の分布は平均値がそれぞれ 4.8, 5.7, 6.4 であり、標準偏差がそれぞれ 0.3, 0.5, 0.5 であった。これらの結果から、屋外で呈色試験紙を用いた pH 値の色判別分析を行う場合、色覚正常者であっても pH 値を 0.2~0.6 小さく読み違える可能性があることが明らかになった。

そこで、各 pH 値の試験紙サンプル毎に、被験者が pH 値を pH 1 の精度でどの程度正確に判別できるかを正答率を用いて検討した。ここでは、pH 値が α の試験紙サンプルに対して被験者の回答した実験用色見本の番号に相当する付帯色見本での pH 値が $\alpha \pm 0.5$ の範囲内であれば正解、それ以外の範囲であれば不正解と定義した。

次に、この正答率の求め方を具体的な例を挙げて説明する。pH 6 の試験紙サンプルの被験者全員分の付帯色見

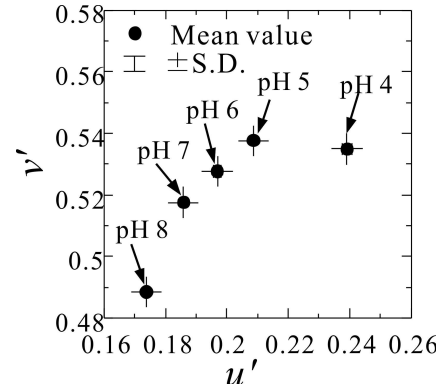


図5 実験用色見本に貼り付けた色紙の $u'v'$ 色度座標値。

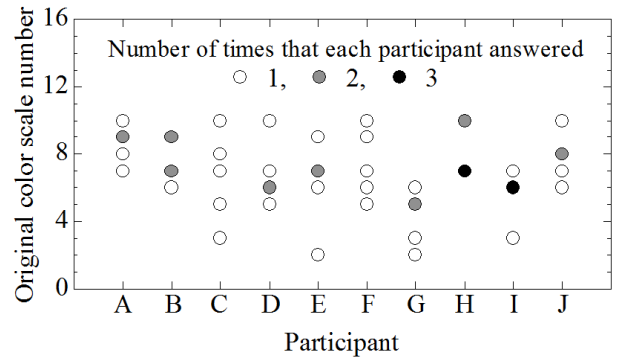


図6 試験紙サンプル(pH 6)に対して各被験者が回答した実験用色見本の番号。

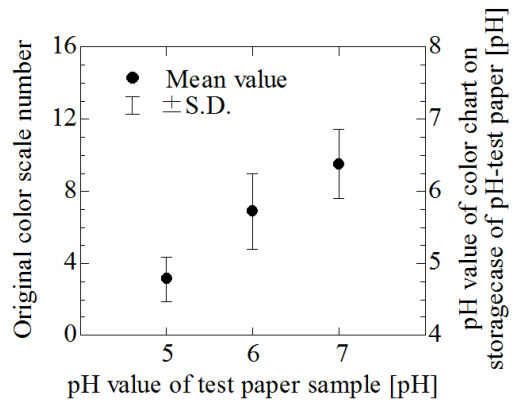


図7 試験紙サンプルの pH 値と被験者が回答した実験用色見本の番号。

本での pH 値の分布を正規分布と仮定すると、図 8 のグラフが描ける。ちなみに、図 7 の説明でも述べたが、この分布の付帯色見本での pH 値の平均は 5.7 であり、その標準偏差は 0.5 である。この分布における付帯色見本での pH 値が 5.5 から 6.5 の範囲が正解に相当するので、その正解の面積 A_C を求める。更に、それ以外の範囲に相当する不正解の面積 A_{I1} と A_{I2} も求める。最後に、これら面積比 $A_C/(A_C+A_{I1}+A_{I2})$ を計算して、pH 6 の試験紙サンプルにおける全被験者に対する正答率が得られる。この pH 6 の試

験紙サンプルにおいては、 A_c , A_{I1} , A_{I2} の面積は分布全体の面積の60%, 33%, 7%なので、全被験者に対する正答率は60%であった。

上記方法で求めた各 pH の試験紙サンプルにおける全被験者に対する正答率をまとめて、図9に示す。pH 5, 6, 7の試験紙サンプルにおける全被験者に対する正答率はそれぞれ81%, 60%, 39%であり、試験紙サンプルのpH値が大きくなるほど、正答率が低くなる傾向があった。このことから、pH 7の土壌が最適な作物を育成している場合を考えると、色覚正常者の6割程度がpH 7ではなくpH 6の土壌に調整する可能性があることが予測され、屋外でのpH試験紙を用いた人による色判別分析の不確かさが伺える。

3. カラーセンサを用いたシステムによる呈色試験紙の色判別分析

前節で、pH試験紙を用いて人が色判別分析を行う場合に、その正確さに問題があることを示した。本節では、ポータブル土壌分析装置を模したカラーセンサを用いたシステ

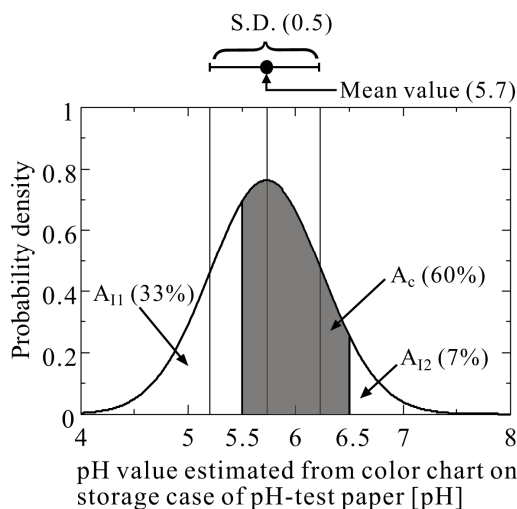


図8 試験紙サンプル(pH 6)の付帯色見本での pH 値の分布(正規分布と仮定)。

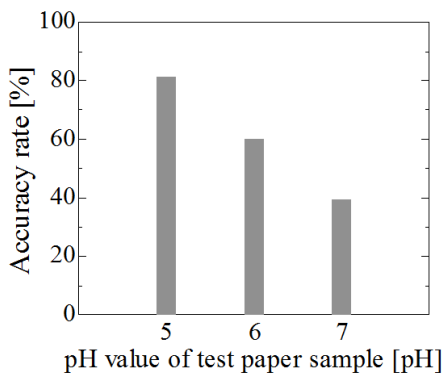


図9 各 pH の試験紙サンプルにおける全被験者に対する正答率。

ムにより、pH試験紙を用いた色判別分析の正確さがどの程度向上するかを検討する。

3.1 実験方法

試験紙の呈色をカラーセンサで読み込み、色判別を行うポータブル土壌分析装置を模したシステムを図10に示す。ちなみに、ポータブル土壌分析装置では、装置外部からの光が入射しないように遮光した上で、呈色試験紙用の照明光を配置することで照明環境を一定にできる。このシステムでは、試験紙サンプルに対して斜め55度の45cmの位置に配置した蛍光灯(MITSUBISHI/OSRAM製、EFD25ED/21、相関色温度6700K)2台で試験紙サンプルを照明し、試験紙サンプルから55cmの位置に設置したデジタルカメラ(Canon製、本体EOS Kiss X5、レンズEF-S 18-15 IS II)で試験紙サンプルを撮影する。そして、撮影された試験紙サンプルのRAW画像データ(16bit)を基に、画像処理ソフトウェア(Adobe製、Photoshop Element)を用いて、試験紙サンプルの中央部分の3mm角に相当する100x100画素領域の画像データを抽出する(図11参照)。その後、抽出した画像データである10,000画素分の階調値をR(赤色)、G(緑色)、B(青色)成分に別けて、それぞれの平均階調値(以後、試験紙サンプルから得たR、G、B成分の階調値という)を求めた。

本実験で用いた試験紙サンプルは前節と同じpH 5, 6, 7の3種類であり、それらを各20個用意した。これら試験紙サンプルの作成方法は前節とほぼ同じであるが、カラーセンサを用いたポータブル土壌分析装置でより正確にpH値

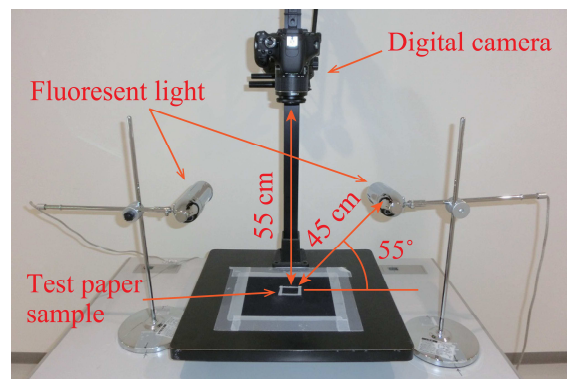


図10 カラーセンサを用いたポータブル土壌分析装置を模したシステム。

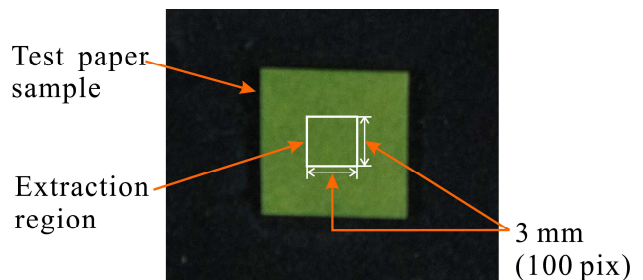


図11 デジタルカメラで撮影した試験紙サンプルの写真の例(pH 6)。

の色判別分析を行うことを考え、前節とは異なった試験紙サンプルの水分除去方法を採用した。具体的には、水溶液に試験紙サンプルを浸した後に、それを不織布(ベンコット, 旭化成製)上に置くことで水分除去を行った。ちなみに、このような不織布による水分除去機構の土壌分析ポータブル装置への組み込みは構造を少し工夫することで容易に実現できると考えられる。このようにして、試験紙サンプル上の液膜による鏡面反射の影響を無くし、試験紙サンプルの呈色を正確にカラーセンサの受光部に取り込む工夫をしている。

3.2 実験結果

カラーセンサを用いたポータブル土壌分析装置を模したシステムを用い、pH 5, 6, 7 の試験紙サンプルから得た R, G, B 成分の階調値を図 12 に示す。これら図中の白, グレー, 黒色の丸印は各 pH 値の試験紙サンプル 20 個分から得た R, G, B 成分の階調値のそれぞれの平均を表し、エラーバーはそれらの平均±標準偏差の範囲を表す。図中の R と G 成分を見ると、試験紙サンプルの pH 値が大きくなるに従い、試験紙サンプルから得た階調値の分布が小さい方にシフトすることがわかる。一方、図中の B 成分を見ると、R と G 成分とは逆に、試験紙サンプルの pH 値が大きくなるに従い、試験紙サンプルから得た階調値の分布が大きくなる方がシフトすることがわかる。更に、R, G, B 成分全てにおいて試験紙サンプルから得た階調値のエラーバーの範囲が各 pH 間で重ならないこともわかった。これらの重なり度合いより図 7 の実験用色見本の番号のエラーバーの各 pH 間でのそれらが高いことから、人による pH 試験

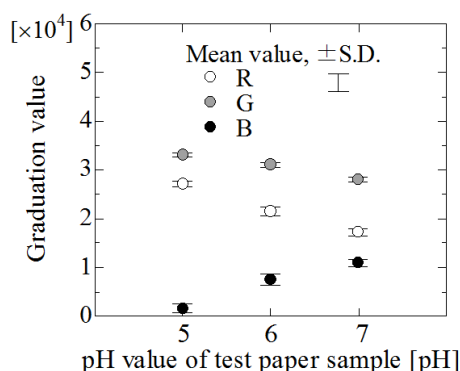


図12 各 pH の試験紙サンプルから得た階調値。

表1 各 pH 値の試験紙サンプルから得た階調値間の差異(t 値)。

Sample pair of test papers	t-value		
	R-component	G-component	B-component
pH 5 vs. pH 6	22.3	11.9	17.4
pH 6 vs. pH 7	15.6	17.6	11.2
pH 7 vs. pH 5	44.3	29.1	34.7
Mean value	27.4	19.5	21.1

紙を用いた色判別分析よりポータブル土壌分析装置のそれの方が正確に行えることが推測できる。

そこで、ポータブル土壌分析装置が人より pH 値をどの程度正確に分析できるかを検討するため、人の場合と同様にポータブル土壌分析装置を模したシステムの正答率を調べた。ここでは、試験紙サンプルから得た R, G, B 成分全ての階調値からシステムの正答率を求めるのではなく、その内の 1 つの成分の階調値から正答率を求める簡便な方法を採用した。まず、どの成分により正答率を求めるかを決定するため、R, G, B 成分毎に試験紙サンプルから得た階調値分布の pH 値間の差異を Welch の t 検定により調べた。その結果を、各 pH 間の試験紙サンプルの t 値を R, G, B 成分毎にまとめて、表 1 に示す。この表より G と B 成分より R 成分の t 値が相対的に大きい、すなわち試験紙サンプルから得た階調値分布の各 pH 値間の差異が大きいことがわかった。このことより、R 成分の試験紙サンプルから得た階調値で pH 値の分析をするのが一番正確であると推測でき、これを基にポータブル土壌分析装置を模したシステムの正答率を求めることにした。

次に、ポータブル土壌分析装置を模したシステムの正答率を求めるために、試験紙サンプルから得た R 成分の階調値から pH 値を推定する必要があり、これらの関係を決定しなければならない。ちなみに、今後、ポータブル土壌分析装置が開発され、実際に分析する際には、この階調値と pH 値の関係式を基にして、試験紙から得られた階調値そのものではなくそれから推定した pH 値を表示し分析者に見せる必要がある。そこで、試験紙サンプルから得た R 成分の階調値の平均と試験紙サンプルの pH 値が対をなすと決めて、図 13 のグラフの黒丸印をプロットした。そして、新たに作成した pH 4 と 8 の試験紙サンプルから得た R 成分の階調値の平均も加えて白丸印でプロットし、隣り合う丸印を直線で結んだ。そして、このグラフに示された関係を基に、試験紙サンプルから得た R 成分の階調値から pH 値を計算することにした。そして、pH 値が α の試験

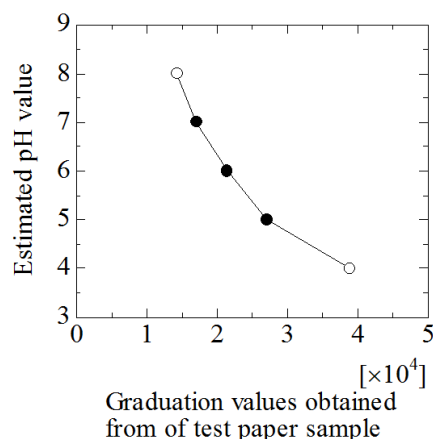


図13 試験紙サンプルから得た R 成分の階調値と推定 pH 値の関係。

紙サンプルから得た階調値を基に計算した pH 値が、人の場合と同様に、 $\alpha \pm 0.5$ の範囲にあるときを正解として、ポータブル土壌分析装置を模したシステムの正答率を求めた。

各 pH 値の試験紙サンプル毎にポータブル土壌分析装置を模したシステムの正答率まとめて、図 14 に示す。この結果より、ポータブル土壌分析装置を模したシステムを用いた場合、全ての pH 値の試験紙サンプルにおいて正答率が 97% 以上になることがわかる。このことより、pH 値の色判別分析においてポータブル土壌分析装置を用いることで正答率が人のそれら(図 9 参照)より約 20~60% 上昇すること明らかになり、本ポータブル土壌分析装置の有用性が示された。

4. 考察

2 節において、屋外で人が呈色試験紙を用いて pH 値を分析する場合には、真の pH 値より若干低い値として認識し、pH が 1 毎の判断であれば 1 つ下の pH 値として間違える可能性が大きいことを示した。このことから、試験紙ケース(図 3 参照)の各 pH 値の見本色を一つ小さな pH 値の色彩へ近づけることで、分析者の pH 値判定の正答率が上がることを期待できる。そこで本節では、試験紙ケースの各 pH 値の見本色を修正することによる人の呈色試験紙を用いた色判別分析の正確さ向上の可能性について検討する。

ここでは、実際に各 pH 値の見本色を修正して被験者に色判別の追加実験をしてもらうのではなく、図 6 に示した pH 6 の試験紙サンプルの各被験者が回答した実験用色見本の番号のデータを基に、見本色を修正した場合の色判別分析の正答率を推定する。具体的には、図 7 の右縦軸に表されている試験紙の付帯色見本の pH 値の目盛を、図 15 の上記グラフに示すように、 $\text{pH } \alpha$ の試験紙サンプルにおいて被験者が回答した実験用色見本の平均番号と試験紙の付帯色見本の $\text{pH } \alpha$ が一致するように書き換える。こうすることで、被験者全体に対して最適な色彩へ近づけ

た、pH 値の色判別分析の架空見本色を想定した。そして、この架空見本色を基に図 15 の下記グラフを作成して、被験者が回答した実験用色見本の番号から架空色見本での pH 値を求めた。そして、2 節と同様の方法により、架空色見本を用いた場合の pH 値の色判別分析の正答率を被験者毎に計算した。

架空色見本を用いた場合の被験者毎の pH 値の色判別分析の正答率と現状の色見本を用いた場合のそれらと併せて、図 16 に示す。この図を見ると、pH 試験紙ケースに付帯する色見本の色彩を修正することで、被験者 E, G, I の色判別の正答率が上がり、他の被験者のそれは下がっている。このことから、単純に pH 試験紙ケースに付帯している pH 値の色見本の色彩を全被験者にとって最適に修正しても、多くの被験者の pH 値の色判別分析の正答率が

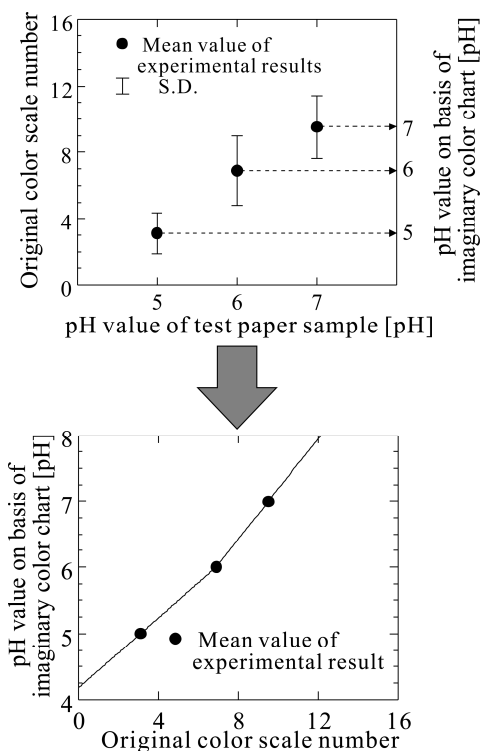


図15 試験紙サンプル (pH6) の各被験者が回答した番号から架空色見本の pH 値への推定方法。

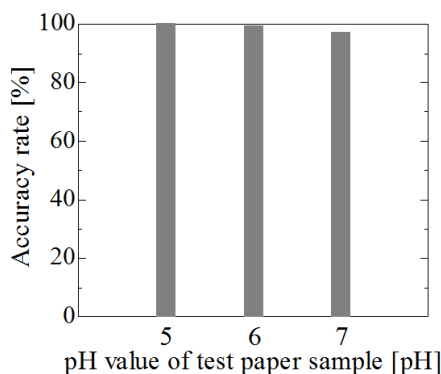


図14 各 pH 値の試験紙サンプルにおけるポータブル土壌分析装置を模したシステムの正答率。

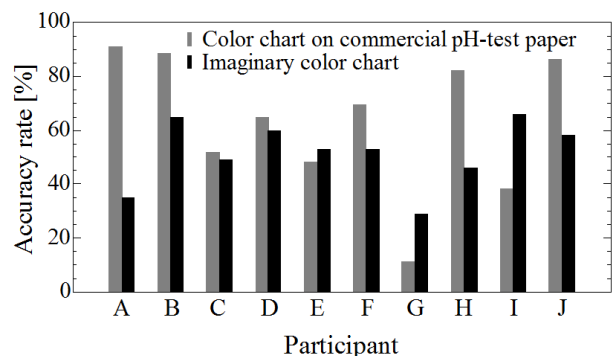


図16 実験用色見本と架空色見本を用いた場合の各被験者の pH 値の色判別分析の正答率。

高くなると限らないことがわかった。以上のことより、農業現場においては分析者の個人差が影響しないカラーセンサを用いたポータブル土壌分析装置による pH 値の色判別分析の重要性が再確認できた。

5. おわりに

屋外の農業現場において人の目で行われている呈色試験紙を用いた土壌分析の正確さに、著者らは疑問を感じていた。そこで本研究において、人の代わりに、一定照明下で試験紙の呈色をカラーセンサで読み込んで色判別を行うポータブル土壌分析装置の有効性について検討した。

まず、人による呈色試験紙を用いた土壌分析の正確さを調べるため、屋外での色覚正常な被験者 10 人に呈色試験紙の一つである pH 試験紙を用いて色判別分析実験を行った。その結果、被験者が実際の pH 値より 0.2~0.6 小さく判断していることがわかった。更に、真の pH 値を被験者が正解する率(正答率)は pH 5, 6, 7 においてそれぞれ 81 %, 60 %, 39 %であることがわかった。これらのことから、屋外において目視で行われている呈色試験紙を用いた pH 値の色判別分析の正確性に問題があることがわかった。

次に、ポータブル土壌分析装置を模したシステムを構築し、このシステムを用いて pH 試験紙の色判別分析実験を行った。そして、人と同様にこのシステムの pH 値の色判別分析の正答率を算出した。その結果、このシステムの pH 5, 6, 7 における正答率が 97 %以上となることがわかった。

以上のことより、一定照明下で試験紙の呈色をカラーセンサで読み込んで色判別を行う土壌分析装置を用いて pH 値の色判別分析を行うことで、その正答率は人のそれより約 20~60 %上昇することが明らかになり、本ポータブル土壌分析装置の有用性が確認できた。

今後、ポータブル土壌分析装置の実用化を目指し、農業現場の土壌の色(黒, 赤, 黄, 白っぽい)が及ぼす試験紙への呈色以外の着色について調べる。そして、カラーセンサから得られた階調値データ上で、この着色分を呈色反応後の試験紙色から差し引くアルゴリズムについて検討し、土壌色の影響を無視できるポータブル土壌分析装置を開発する予定である。

謝辞

本実験にご協力頂いた、神戸市立工業高等専門学校
の当時学生であった足立龍哉氏、中尾優作氏、兵庫県立
工業技術センター 吉田和利氏に感謝します。

参考文献

- (1) 一般財団法人日本土壌協会:「土壌、水質及び植物体分析法(電子版)」, CD-ROM, 東京, 2001.
- (2) 一般財団法人日本土壌協会編:「土づくりとエコ農業

2011年6・7月号」, p.50, 東京, 2011.

- (3) 湯尻照:「照度レベルによる表面色の色の見えの変化と個人差」, 光学, 19 巻 9 号, pp.41-49, 1990.
- (4) Weale RA: “Age and the transmittance of the human crystalline lens”, Journal of Physiology, Vol.395, pp.577-587, 1988.
- (5) 岩田三千子, 岡嶋克典, 氏家弘裕:「照度レベルに依存するコントラスト感度の加齢変化」, 照明学会誌, 85 巻 5 号, pp.352-359, 2001
- (6) 佐藤千穂:「加齢に伴う色の見えの変化」, 照明学会誌, 82 巻 8A 号, pp.530-537, 1998.
- (7) 大田登:「色彩工学 第2版」, p.83, 東京電機大学出版局, 東京, 2001.
- (8) 篠田博之, 藤枝一郎:「色彩工学入門」, p.49 および p.150, 森北出版, 東京, 2007.
- (9) 農林水産省 農業環境技術研究所:「農耕地土壌分類 第3次改訂版」, pp.18-28, 1995.

