

児童生徒の主体的な学習を目指すための
定量実験への教材開発とその試み

2022

山下浩之

目次

	ページ
第1章 序論—「主体的な学習」の研究背景と研究目的—	
1-1. 学習指導要領における「主体的な学習」の位置づけ	2
1-2. 「主体的な学習」と理科学習	3
1-3. 「主体的な学習」と定量実験	4
1-4. 定性実験が定量実験に変化した（あるいはしつつある）2つの事例	8
1-5. 理科学習における色の定量の必要性	10
1-6. 可視光領域で色の定量化が必要な学習の具体的な例	13
1-7. 紫外領域で色の定量化が必要な学習の具体的な例	14
1-8. 赤外領域で色の定量化が必要な学習の具体的な例	14
1-9. 研究の目的	15
引用文献	16
第2章 可視光領域における自作可視光領域反射率計の作成とその応用	
2-1. はじめに	18
2-2. 自作反射率計の作成方法と試料	18
2-3. 結果	26
2-4. 考察	35
2-5. 今後の課題	37
引用文献	38
第3章 紫外領域における自作紫外領域反射率計の作成とその応用	
3-1. はじめに	40
3-2. 自作紫外領域反射率計の作成と測定方法，原理およびリファレンスの検討	43
3-3. 自作紫外領域反射率計の材料とその作成方法	44
3-4. 測定の原理	47
3-5. 実験教材用の試料入手と試料測定までの手順	48
3-6. 結果	48
3-7. 考察	51
引用文献	54
第4章 赤外領域における自作赤外領域反射率計の作成とその応用	
4-1. はじめに	55
4-2. 材料と方法	55
4-3. 結果	60
4-4. 考察	61
引用文献	64
第5章 本研究の成果の意義	
5-1. 自作反射率計の教材としての応用と展望	65
5-2. 成果と今後の課題	74
引用文献	77
謝辞	78

第1章 序論—「主体的な学習」の研究背景と研究目的—

1-1. 学習指導要領における「主体的な学習」の位置づけ

学校教育法施行規則の改正を機に、小学校学習指導要領及び中学校学習指導要領が平成29年度（2017）に公示され、小学校は令和2年（2020）から、中学校は令和3年（2021）から全面実施となった。これまでの教育方針であった「生きる力」の育成は「知識及び技能の習得」「思考力・判断力・表現力等の育成」「学びに向かう力・人間性等の涵養」の3つの柱に整理され、これらに向けた授業改善を推進するための視点である「主体的・対話的で深い学び」をさらに「主体的な学び」「対話的な学び」「深い学び」と3つの視点に分けた（文部科学省，2018a）。本来、これら3つの視点は独立した3つの「学び」を意味しているわけではなく、相互に不可分かつ相補的な関係性の上に成り立っている。特に「主体的な学び」は学習者自身の主体性に関わるものであり、学習者の自然の事物・現象に対する興味・関心の根源であるばかりでなく、問題解決の全過程において重視されるべき資質である。一方、問題解決に導くための学習方法の1つである「対話的な学び」は、学習集団が「主体的な学び」の向上を基盤にして初めて教育的な効果が期待でき、また目標や内容の現状をさらに進展させた状態の「深い学び」においては「対話的な学び」という学習方法とともに、その推進力としての「主体的な学び」が基盤として必要である。

「主体的な学び」は、主体的に「対話的な学び」を行うことや主体的に「深い学び」を行うことを含む、いわば総括的な学びのあり方を意味し、いずれの学習過程においても学習成立のための重要な基盤になっている。つまり「主体的な学び」を抜きにして、「主体的・対話的で深い学び」の実現は成立せず、最終的段階の「深い学び」は、「主体的な学び」を基盤とした体系的かつ生産的学習と言える。「主体的な学習」は次の「主体的な学習」へとフィードバックされ、学習の連続的ループを繰り返す。これらの関係を図1-1の中でモデルにして表した。フィードバックされた内容と3つの視点を経たループを繰り返すことによって学習者は指標となるべき「学びの方向」を目指すものと考えることができる。

なお、「深い学び」はさらに「理科の見方・考え方」と密接に関連していることを学習指導要領の中で示されている（文部科学省，2018b）。これについては次節で述べる。

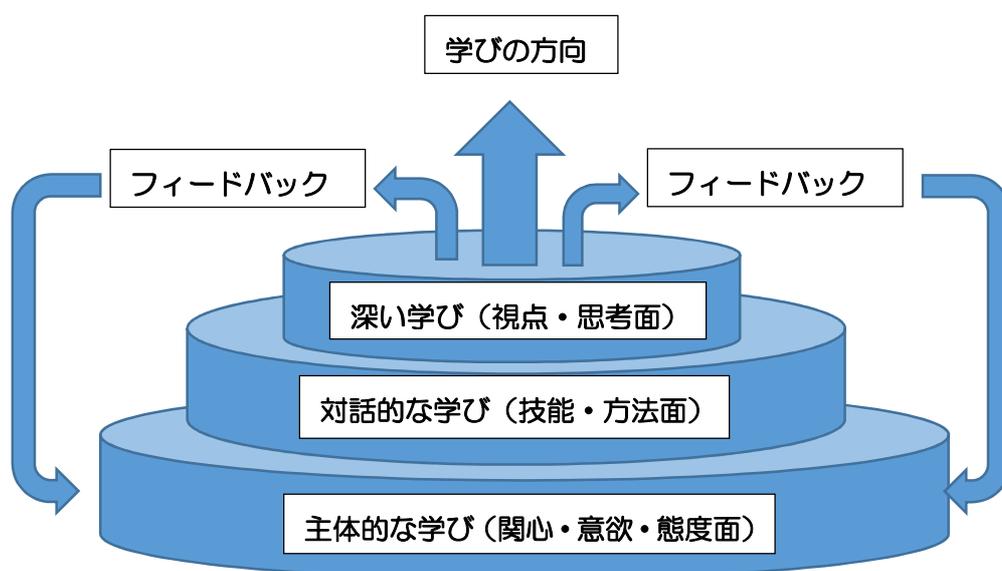


図1-1 「主体的な学び」「対話的な学び」「深い学び」と学びの方向の関係性を表したモデル図（筆者作成）

1-2 「主体的な学習」と理科学習

「主体的」の「主体」とは「他によって動かされるのではなく、自らの自発的な判断や行為をすること」と森は述べている(森, 1982)。これを理科教育の範疇で解釈すると、「学習者が目標を自分自身で設定し、その目標に対応する内容と方法を、思考というプロセスを経た上で明確化されている状態」が「主体的」な状態と言える。逆に理科学習で主体性がない状態とは「言われたことは確実にできるが、自分の意思決定に基づき学習を進めていくことができない状態」と表現できる(東 ほか, 1991)。

図1-1に示したとおり、「主体的な学び」を基盤にした際の「深い学び」は、学習内容に関する視点や思考面を重視するという点において、理科学習特有の領域特性や自然科学の方法論に深く関わっている。文部科学省は「深い学び」の実現のためにさらに具体的に「理科の見方・考え方」として学習指導要領にその内容と視点、思考の在り方を系統的に示した(文部科学省, 2018b)。表1-1は、「深い学び」を実現するための「理科の見方・考え方」を、小学校から高等学校まで整理したものである。学びの方向は、教師が目指すねらいであり、児童が目指す目標であるとする、その過程の中で常にフィードバックがなされている状況と考えることができる。

「理科の見方」については2つの内容区分「A物質・エネルギー」「B生命・地球」をさらに2つに分けて4つの概念とし、さらに「量的・関係的」「質的・実質的」「共通性・多様性」「時間的・空間的」という4つの視点にまとめられている。「理科の考え方」については小学校では学年に応じて「比較」「関係付け」「条件制御」「多面的に考える」という思考手段を設け、中学校や高等学校ではそれらを組み合わせて提示されている。

しかしながら自然科学の方法はこれら4つに留まるわけではなく、また、明確に区分されるものでもない。そこで「理科の考え方」の中には明確にかつ段階的に提示されている4つの視点「比較」「関係付け」「条件制御」「多面的に考える」以外にも「原因と結果」「部分と全体」「定性と定量」の3つを学習指導要領では補足的に加えて提示されている。いずれの考え方も論理性を構築するにあたっては重要な意味を持っているが、特にこの中の「定性と定量」は、自然科学の特質でもある実験の検証方法を決定づける点において極めて重要な考え方であり、理科学習の「主体的な学び」と密接な関係を持っている。次節では「定性と定量」について議論し、さらにその中の「定量」が「主体的な学習」と深く関わっていることについて論じる。

表 1-1 各学年の理科の見方・考え方

内容区分	A物質・エネルギー		B生命・地球		理科の考え方
	エネルギー	粒子	生命	地球	
視点	量的・関係的	質的・実体的	共通性・多様性	時間的・空間的	
小学校 3年生	↓	↓	↓	↓	比較(差異点や共通点)
4年生					関係付け (根拠ある予想や仮説)
5年生					条件制御 (解決の方法の 発想や表現)
6年生					多面的に調べる (妥当な考えを つくりだし, 表現)
	↓	↓	↓	↓	※ 原因と結果 ※ 部分と全体 ※ 定性と定量
中学校 1年生	質的・量的な関係		時間的・空間的な関係		規則性・関係性, 共通点や相違点, 分類するための観点や基準
2年生	↓				規則性や関係性
3年生					特徴, 規則性, 関係性
高校理科					比較 関係付け

(※ 文部科学省, 2018c, 文部科学省, 2018a, 文部科学省, 2019b を参考に筆者が作成)

1-3 「主体的な学習」と定量実験

理科における仮説演繹検証型実験はその目的と内容に応じて主に2つの実験法に分けることができる。1つは定性実験であり、残る1つは定量実験である。前者は物質の質的側面において、事象に潜む規則性を探究する実験であり、後者は事象を量的側面から探究するため、質を量に還元して測定を行う実験である。一般的に科学的探究の出発点は定性的なもので、順序性として定量実験は定性実験の後の段階で取り扱うことが多い(東 ほか, 1991)。実際に小学校の教育現場の理科実験は「物質とエネルギー」領域の力学的領域における「振り子の運動」等を除くと、定性実験が大半を占めている。定性実験はいわば0か1の世界であるため、「押し縮められる, 押し縮められない」「電気を通す, 通さない」「磁石に引きつけられる, 引きつけられない」など2者択一の見方が先行する。しかし初等中等教育で定性実験のみに偏ることは量の概念を習得する機会の減少につながり、近い将来定量性を中心に議論する高等教育の準備段階としては好ましいとは言えない。理科教育の全体的な方向性としては、学習者は定性的な扱いを経て徐々に測定を伴う定量的な扱いを習得し、定量的な見方や考え方を身に付けていくようなバランスある指導が重要である。表 1-2 は小中学

校の主な学習内容で行われている実験を定性実験と定量実験に分類したものである。特に「A物質・エネルギー」領域よりも「B生命・地球」領域の内容に「定性実験」が多く、そのほとんどが「定性実験」で占められていることがわかる。

この「定性実験」が実験の検証方法として多くを占める現状において、小学校からの自然現象の定性的把握から定量的理解に至る過程の考え方・思考法を習得するための不十分な教育が理科嫌いを促進しているという指摘がある（原，2003）。また、小中高等学校での教科書記述の実態調査も行われ（久田，1985）。小学校において、二元論的な扱い（重い・軽い、大きい・小さい、有色・無色）を重要視するあまり、定性的な面が強調されていることに問題がある（宮本，2007）とも指摘されている。そこで探究の過程（ここでは問題解決の過程と同一視する）における「定性実験」と「定量実験」の違いを図1-2に掲げた。

先に述べたように定性実験は一般的に二元論である。0と1の中間部分は定性実験では基本的に扱わないので2つの変数の関係性を探るための量的な議論にはなりにくい。授業者は0と1の連続的な値のどこかで定性的な境界線を引くことになるが、往々にしてその境界線は学習者の体感や感覚を基にした場合が多い。たとえば、「電気を通す」「電気を通さない」の判別については、光源が豆電球か低電圧LEDかのどちらを用いるかによって導電性の結果は異なる。同様に「磁石に引き付けられる」「磁石に引き付けられない」の判別についてもフェライト磁石かネオジム磁石かによって、微弱な反応の違いを示す紙幣や磁気カード等での結果が異なる。つまり、前者では発光の有無は電流に依存し、後者での磁性体が引き付ける力はその磁力に依存しているといえる。定性実験では途中の連続的な部分を省略する学習内容になっており、導電率の高低や磁性の強弱という相対的かつ連続的な結果の考察が十分には評価されないという学習が、主体性の伴う学習になるのかどうかは疑わしい。定性的な見方に加え、定量的な見方が加わることによって、そこから生じる多様な角度からの疑問点や仮説は、授業の中で多様な展開を可能にし、主体的な探究を保障する。

こうした状況下で、これまで定性実験で行われていた学習内容が定量実験に置き換わった事例がある。それが6年生での単元「水溶液の性質」の中のリトマス試験紙と石灰水の取り扱いである。

表1-2 小中学校の各内容で行われる実験の区分
(網掛けはB生命・地球領域) (筆者作成)

学年	主に定性実験が中心の内容	主に定量実験が中心の内容
小学校 第3学年	「風とゴムの力の働き」「光と音の性質」「磁石の性質」「電気の通り道」「物と重さ」「身の回りの生物」「太陽と地面の様子」	
小学校 第4学年	「空気と水の性質」「金属、水、空気と温度」「人の体のつくりと運動」「季節と生物」「雨水の行方と地面の様子」「天気の様子」「星と月」	「電流の働き」
小学校 第5学年	「植物の発芽、成長、結実」「動物の誕生」「流れる水の働きと土地の変化」「天気の変化」	「振り子の運動」「電流がつくる磁力」「物の溶け方」
小学校 第6学年	「電気の利用」「燃焼の仕組み」「水溶液の性質」「人の体のつくりと働き」「植物の養分と水の通り道」「生物と環境」「土地のつくりと変化」「月と太陽」	「てこの規則性」
中学校 第1学年	「物質のすがた」「生物の観察と分類の仕方」「生物の体の共通点と相違点」「身近な地形や地層、岩石の種類」「地層の重なりと過去の様子」「火山と地震」「自然の恵みと火山災害・地震災害」	「力の働き」「光と音」「水溶液」「状態変化」
中学校 第2学年	「電流と磁界」「生物と細胞」「植物の体のつくりと働き」「動物の体のつくりと働き」「気象観測」「天気の変化」「日本の気象」「自然の恵みと気象災害」	「電流」「物質の成り立ち」「化学変化」「化学変化と物質の質量」
中学校 第3学年	「エネルギーと物質」「自然環境の保全と科学技術の利用」「水溶液とイオン」「化学変化と電池」「生物の成長と殖え方」「遺伝の規則性と遺伝子」「生物の種類と多様性の進化」「生物と環境」「自然環境の保全と科学技術の利用」「天体の動きと地球の自転・公転」「太陽系と恒星」	「力のつり合いと合成・分解」「運動の規則性」「力学的エネルギー」

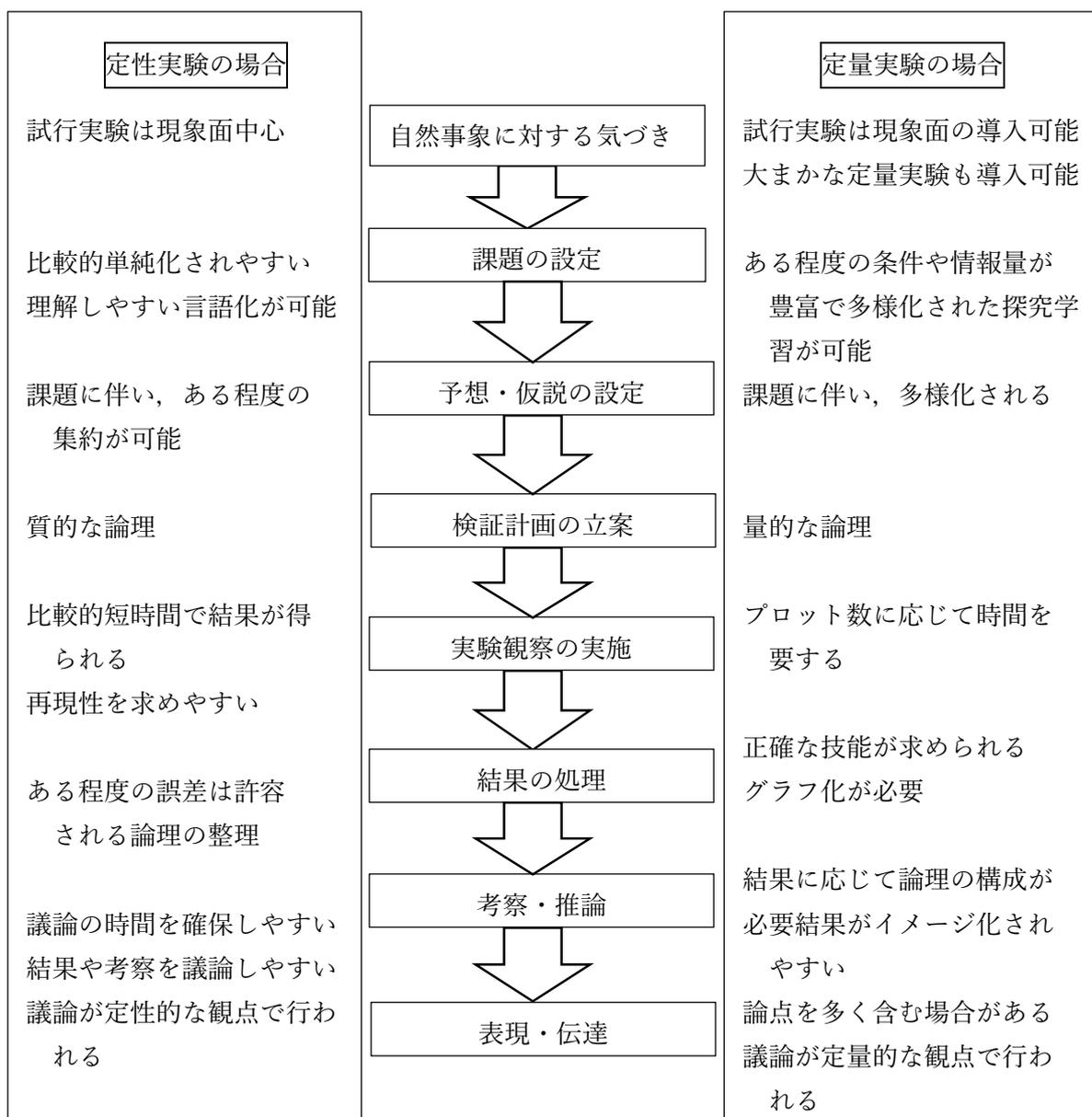


図 1-2 探究の過程（問題解決の過程）と定性実験，定量実験の関係性（筆者作成）

1-4. 定性実験が定量実験に変化した（あるいはしつづける）2つの事例

①リトマス試験紙（定性）と pH計（定量）

リトマス紙が青色から赤色に変化するかどうかで水溶液が酸性であるかどうかを二者択一で決定する実験は、「定性実験」の1つである。水溶液の性質を学ぶ上で初歩的な概念の導入方法としてリトマス試験紙の使用はこれまでの理科教育歴史の中でも一般的であった。それは水溶液の性質を赤色と青色の2種類の試験紙で

（アルカリ性） 赤→青 青→青

（中性） 赤→赤 青→青

（酸性） 青→赤 赤→赤

という3通りの色パターンのみで判別できるからであった。課題把握から結果考察に至るまで、一貫してこの3通りで学習を進めることができ、身の回りの水溶液が全てこの3種類にグルーピングできるというパターン化は簡潔に整理が可能である。

ところが、酸性雨の原因とされた「SO_x」「NO_x」等が環境問題となり始めた1980年台から、社会的問題として量的な議論が増し始め、学校現場でも理科や社会科、総合的な学習の時間等でH⁺濃度がしばしば取り上げられるようになった結果、登場したのが定量的に水素イオン濃度を測定する簡易型pHメーターであった。この測定器のメリットは上記の3通りのグルーピングをさらに細分化でき、H⁺の濃度差を簡単に比較できる点にある。これによって探究の過程（問題解決の過程）には数量的な視点からの議論が課題設定の段階から行われることになり、議論の質が定性的な実験とは大きく異なってくるようになった。

表1-3はリトマス紙とpHメーターを幾つかの視点から比較したものである。この2つの違いはいくつか上げることができるが、中でも「H⁺濃度の定量」が可能かどうかは学習内容に大きく影響する。pH1もpH5も同じ酸性として扱うのであれば廃液を水で薄めて流す意味さえも説明できないし、CO₂が水に溶解して平衡になるpH5.4の領域は変色範囲がpH5.0-8.0と中性域の幅が広いリトマス紙（久保 ほか、1989）にとって、酸性雨の説明ができないことになる。

表1-3 小学校5年生での学習内容「水溶液の性質」の定性的な実験教材として代表的なリトマス紙と定量的な実験教材として代表的なpHメーターの比較（筆者作成）

	リトマス紙（定性的な実験）	pHメーター（定量的な実験）
指標の数	3	約14
コスト	安価	高価
使用后	廃棄物（使い捨て）	廃棄物はない（廃液は除く）
実験のスタイル	個別実験可能	グループ実験が主
H ⁺ 濃度の定量	不可	可能
安全性	特に問題なし	特に問題なし

近年、教科書にムラサキキャベツ液で比色定量を行う実験やpH計を使用する計測法が紹介されるようになったが、これによって酸やアルカリの水溶液には連続した濃度の評

価が可能になり、数的評価による計測が学習者によって行われるようになった。定量的な実験結果の提供がその後の主体的な問題解決学習の過程において、定性的な見方や考え方とは異なる視点を学習者に与えることになったことは好ましい。

このように、水溶液の分類の初歩ではリトマス紙で十分に対応可能であるが、「深い学び」に進化するにつれて定量的なリトマス試験紙のみでは問題解決が困難であることを示唆している。

②石灰水（定性）と北川式気体検知管（定量）

初等中等教育理科で定量実験の普及が進まない要因の1つに、計測機器入手のための高額な費用が生じることにある。後で述べる分光反射率計や色測計でも1台につき数万円が必要なのは珍しくない。メンテナンスの費用を学校が負担し、理科担当教員が維持管理を行うというのは昨今の社会では現実的ではないし、ましてや測定機器がブラックボックス化され、学習者や教師においても測定原理さえ理解できないということになると学校現場から敬遠されるのは当然である。

それでも最近では教材機器はコンパクト化され、安価に入手が可能になり、その普及が進むと同時にこれまでの定性実験が定量実験として見直される単元も増えてきた。

例えば小学校6年生で学習する「物の燃え方と空気」で使用される、CO₂検出試薬石灰水（(Ca(OH)₂飽和水溶液）がその典型的な例である。石灰水はCO₂に対して反応性が高く、CO₂の存在をCaCO₃沈殿による白濁によって判断できるため、これまで広く理科授業で使用されてきた。しかしながら石灰水はCO₂が試料の中に「存在するか、存在しないか」の二者択一となる結果を知らしめるのみで、それ以上の情報は与えなかった。

その後教科書の中には1992年から北川式気体検知管（商品名「気体の検ちゃん」）が導入され始めた。定性実験から定量実験への変更は児童・生徒の主体的な学習に大きく関わる問題である。問題解決学習は児童生徒の問題の発見から始まるが、その問題が授業のテーマとして適しているかどうかは、その問題が解決可能かどうか大きく依存している。北川式気体検知管による定量実験の導入は、CO₂濃度の定量が可能になり、幾つかの実験を組み合わせると、有機物が燃焼しなくなる理由は燃焼後のCO₂の増加によるものではなく、O₂不足が原因であることを検証することが可能となった。定量して初めてO₂濃度が17%程度で燃焼しなくなることが確かめられ、「燃焼に容器内の全てのO₂が有機物と反応し、CO₂が生成されている」といった児童の誤概念の危険性も定量化の実験によって解消されることになったのである。

この事例からも、「定量性」は「定性」よりも学習に発展性があることは明白で、「深い学び」の実現を果たすためには、児童生徒の疑問や問題を解決に導く「定量性」を少しでも確保することが極めて重要である。なお、CO₂検出のための定性的な実験と定量的な実験とを比較し、表1-4にあげた。

表 1 - 4 CO₂ 検出のための定性的な実験と定量的な実験の比較 (筆者作成)

	石灰水 (定性的な実験)	北川式気体検知管 (定量的な実験)
指標	白濁する 白濁しないの 2 者 択一	検知管のレンジを変えて定量可能
対象気体	CO ₂	O ₂ , CO ₂ 等対象は 200 種類以上
コスト	低	高
使用後	廃液	検知管 (使い捨て)
実験のスタイル	個別実験可能	可能だが高価なためグループ実験が 一般的
安全性	危険物ではないがアルカリ性	特に問題なし

1 - 5. 理科学習における色の定量の必要性

色の評価が必要とされる学習内容は表 1 - 5 に示すように初等中等の理科教育の中に少なからず存在する。表 1 - 5 によると色を定性的に評価する内容が大部分を占めるが、中には後で述べるような色の定性的な評価が必要な内容も含まれている。色は連続的あるいはグラデーション的に色相を変化させるため、境界あるいは色と色の中間に当たる色が生じる場合は定性的な見方だけでは客観的な評価は困難である。その理由として、観察者によって次のような傾向や実態があるからである。

(i) 観察者それぞれの色覚能力によって生じる傾向や実態

ヒトの眼の感度には個人差が存在する。先天性色覚異常、後天性色覚異常、あるいはその境界にいる観察者

だけでなく、色覚が正常である観察者においても個人差があり、色の見え方も必ずしも同じではなく、1 人

1 人異なっていると言える (文部科学省 2003)。

(ii) 観察者の文化や環境等の違いによって生じる傾向や実態

観察者の文化や環境等の違い (坂上, 文田 1993) や加齢 (佐藤 1998) によっても色の見え方は異なる。海外の文化や環境を背景にしている児童の場合は、日本での公教育の中では違いが表出する恐れがある。また、海外だけでなく日本における地域差も考慮すると、今後グローバル化を迎える学校教育にこれらの傾向が反映されることは十分に予想される。

(iii) 「色の同時対比効果」の違いによって生じる傾向や実態

色の同時対比効果とは観察者が背景によって対象物の色を違う色に見てしまう現象であり、「色の捕色効果」(高橋, 江島 1982), 「色の面積効果」(曾我, 山崎 1956), 「色の照度効果」(湯尻 1990) 等によって起こりうるものが既に明らかになっている。

上記の (i)(ii)(iii) 等の実情から、色の精緻な客観的評価方法についての模索は以前から議論されてきた。その中で最も頻繁に使用されたのが 1905 年アルバート・H. マンセルによるマンセルカラーシステムである。このシステムは色の属性を尺度化して数値や記号で表示する方法であるが、その後これを基礎とした色見本 (カラーチェッカー) が幾つかの企業によって作成され、現在の学校現場でも美術系の授業等で活用されている。しかし連続的に変化するグラデーションの数が多くなればなるほど色見本も増え、学校予算を圧迫することや、似た色が数多く置かれている状況での色の確定は児童生徒にとって多くの時間を要することもあり、時間的制約がある授業の中での取り扱いは難しい。

理科学習における色の評価はこのような状況下で、肉眼での比色が数多く用いられてきた。比色による分類を行う際、フェノールフタレイン液やヨウ素ヨウ化カリウム液、BTB液などの指示薬による比色法のような、非変色域と変色域の境界領域が極めて小さい場合は、定性的な評価指示薬として実験者同士の差は生じにくく、とりわけ大きな問題は生じていなかった。しかしながら一方で、非変色域と変色域の境界領域が比較的幅広いバンドをもつ指示薬や植物の葉の色の時間的変化等、色の変化が連続的である場合、境界域における色の評価は専ら観察者の主観的判断に委ねざるを得なかった。この状況の打破には、客観的評価を得るための何らかの測定器による定量化が確保できることであり、こうした定量化を保障する教材作成は教育現場からの喫緊の要求と捉える必要がある。このことは可視光領域だけに留まらず、ヒトの視覚器で判別不能な可視光領域以外の紫外領域や赤外領域ならばなおさらである。

もともと色の定量は、主に比色分析という光学的な手法で測定された。今日では吸光度分析を指すことが多いが歴史的には肉眼による比較であった（久保 ほか，1989）。学校現場では水溶液を測定対象として、試料の反射光量、吸収光量（吸光度）、透過光量のいずれかを固定値とし、それぞれの値をや関係性を求める教材や内容は数多く紹介されている（例えば、佐川 2008 等）が、吸収光量や透過光量に比べて、反射光量を扱う教材開発についての報告数は少ないのが現状である。この状況を打開するために今回の研究内容として取り上げているのが自作反射率計である。自作反射率計は、測定対象が上記のような水溶液ではなく、試料が固体であることが特徴で、初等中等教育で取り上げられる身近な物質の物性の1つを探究的に学ぶ上では極めて容易に測定が可能な教材である。吸収光量、透過光量、反射光量のいずれであっても色の評価は光のスペクトルとその強度の評価であり、単一の波長を光源に使用することによって得られるそれぞれの強度が定量性を保証する。それでは実際に可視光領域および紫外領域・赤外領域において定量的評価が必要となる具体的な例を次に述べる。

表1-5 色の評価を伴う主な学習内容(大日本図書「たのしい理科3456年」「新版理科の世界123」から引用)

学年	単元名	色の評価の対象物	学習内容または試薬
小学校3年	自然の観察	花や葉, 昆虫の体	生物の色, 形, 大きさの比較
	植物の育ち方 昆虫の育ち方 動物のすみか	種子 昆虫 主に節足動物	生物の色, 形, 大きさの比較 生物の色, 形, 大きさの比較 生物と環境の色等の比較
小学校4年生	月や星	星	星の明るさや色の比較
小学校5年生	発芽と養分	葉	成長の比較
小学校6年生	植物の成長と日光の 関わり	葉(デンプン)	ヨウ素液 (ヨウ素デンプン反応による比較)
	体のつくりと働き	デンプンと唾液	ヨウ素液 (ヨウ素デンプン反応による比較)
	植物の成長と水の関わり	茎や葉と植物色素	蒸散作用
	水溶液の性質	水溶液とリトマス紙	酸性・中性・アルカリ性の比較
中学校1年生	植物の体のつくりと働き	葉	葉緑体
	植物の体のつくりと働き	茎や根の維管束	植物色素(赤色102号等)
	大地の変化	鉱物	有色鉱物, 無色鉱物
中学校2年生	物質の成り立ち	アルカリ性水溶液	指示薬(フェノールフタレイン液)
	生命を維持する働き	デンプンと唾液	指示薬(ヨウ素液, ベネジクト液)
	化学変化と原子・分子	金属イオン水溶液	炎色反応
中学校3年生	酸・アルカリとイオン	酸・中性, アルカリ 水溶液	リトマス紙と指示薬(BTB液・フェノールフタレイン液)
物理基礎 化学基礎	電気と磁気 物質の探究 酸と塩基	波長による色の違い 金属イオン水溶液 水溶液	電磁波(可視光) 炎色反応 指示薬(メチルオレンジ, フェノールフタレイン, BTB, 万能試験紙)
生物基礎 地学基礎	生物の特徴 宇宙の姿	ミトコンドリア 輝線スペクトル	TTC 赤方偏移
科学と人間生活	目に見える光の世界 見えない光とその応用	太陽光スペクトル 電磁波(紫外赤外領域)	分光器 ブラックライト等
物理	光	電磁波 (可視光紫外赤外領域)	光の散乱・反射・回折
化学	電子と光 化学反応と熱・光 遷移元素の単体と化合物 炭化水素 酸素を含む有機化合物 芳香族化合物	スペクトル(吸収・線等) ルミノール検査 Zn, Fe, Cu, Ag, Cr, Ni, Mn 鉄およびアセチレン アルコール, Na アルコール, フェノール類	分光器 化学発光 錯イオン 重合反応 アルコールの反応 アルコールの反応, アミド結合
生物 地学	代謝とエネルギー 地震と火山 恒星の世界	葉緑体 偏光顕微鏡, 岩石薄片 恒星のスペクトル	光合成 多色性 分光器, 赤方偏移

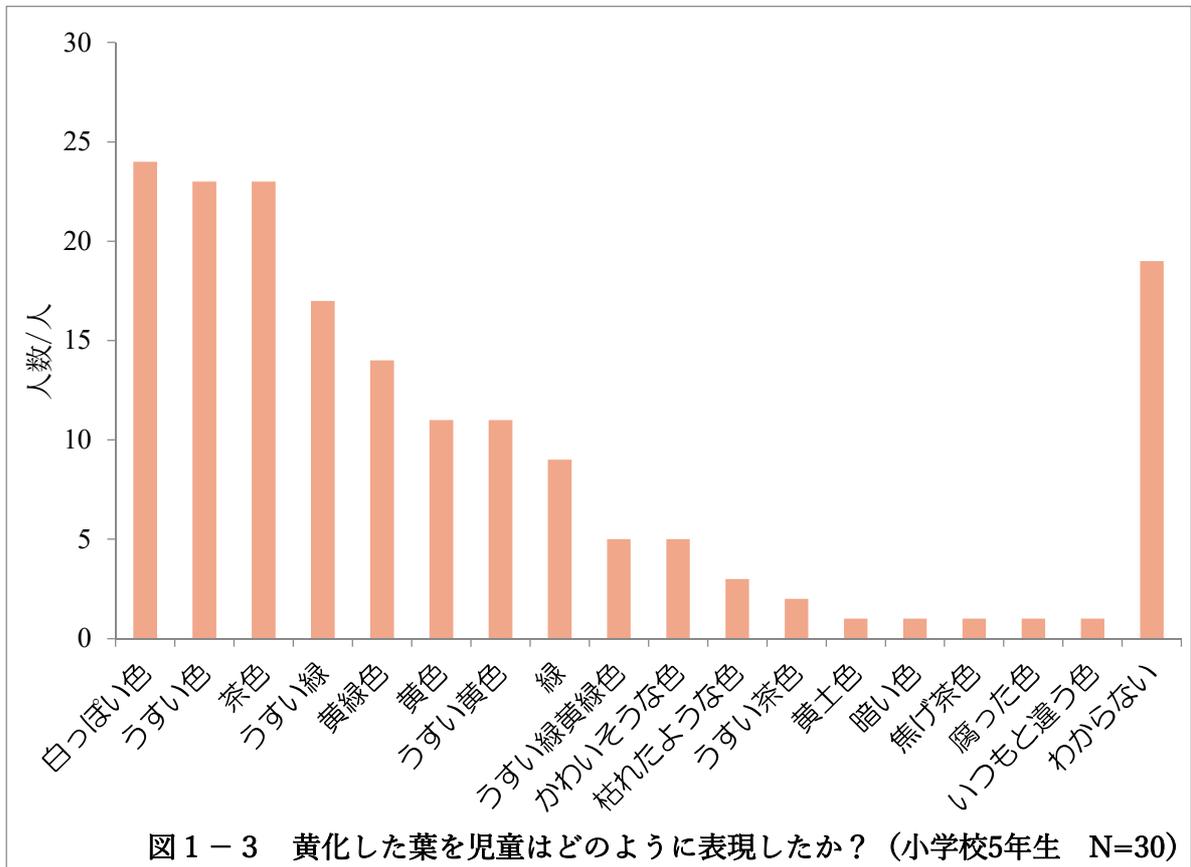


図1-3 可視光領域で色の定量化が必要な学習の具体的な例

1-6. 可視光領域で定量化が必要な学習の具体例

小学校5年生の単元「植物の成長」の単元では、植物の成長は日光による葉緑体での光合成と根から吸収される成長に必要な成分量に依存していることを学習し、検証実験では植物の成長に必要な肥料成分を与えない場合または暗条件内に置いた植物に生じる黄化現象を取り扱う。その際、判別基準となる2色（緑色と黄色）の中間部分を示す場合があり、次のような問題が生じていた。

(1)色の表現の問題

図1-3 (2016 山下) は児童が黄化現象を呈した葉を、各自思いついた表現で複数回答した結果を表にまとめたものである。この表によると、次のような傾向を示唆していることが分かる。

①児童による色の表現は「慣用色名」「系統色名」だけでなく感覚的、主観的な表現が混じっている。

②表現の仕方が児童の語彙に依存して幅広く、主観的な表現が逆に共通理解を困難にしている恐れがある。

③黄色と緑色の境界色であるにも関わらず、黄色と緑色のどちらかを選択する、いわゆる定性的な見方をする児童が混在している。

このように境界域の色の評価は主観的評価に留まり、児童同士の議論はお互いの主張を繰り返すのみで議論は収束しなかった。

(2)対象物の色を他の観察者との関係性で、考えている色とは違った色として表現してしまう場合 (Aの主張とBの主張で議論した場合の理論負荷性)

児童が検証実験として色の評価を行う際、葉の色が黄化しているように見えていても自分の主張と異なる結果を示している場合、黄化した葉を結果として認めないという状況が生じた。同一の色を観察していると証明できない以上、議論は膠着した。

これらの例は、色の表現は個人が持つ感覚器の能力の違いによって生じる個体差に加え、観察者の主観に依存しやすく、また観察者同士の関係性においても変化することを示唆している。色の評価は物差しが必要であり、客観的評価を伴う結果が信頼できる色の評価としてふさわしい。

1-7. 紫外領域で色の定量化が必要な学習の具体的な例

高等学校では、電磁波としての光の学習に付随して、可視光領域だけでなく紫外領域や赤外領域を含めて幅広く学習する。昨今では紫外領域や赤外領域は日常生活に浸透しており、それらを扱った器具の扱いは確実に増している。たとえば小学校での保健体育の領域の中で太陽高度が高くなるにつれ、紫外領域に対する皮膚の防御を徹底させる指導がなされるようになった（環境省、2008）。

紫外領域における外界からの防御はヒトだけでなく、あらゆる生物が行っており、それが形態や機能に直結している場合が多い。例えばヒトを含む動植物は体色色素のメラニン色素（図1-4）の沈着を行い、それが紫外領域の光を吸収して細胞へのダメージを軽減しているし、またUVカットクリーム（主に主成分はTiO₂またはZnO）による防御も最近では保険商品として家庭の必需品として浸透するなど、紫外領域への意識は高まっている。

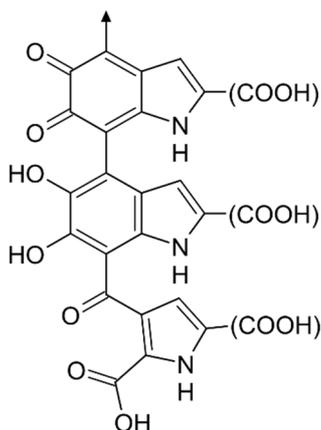


図1-4 メラニン色素の1種であるエウメラニンの構造式の一部（矢印の先はポリマー構造が続く）

可視光領域と比較しても紫外領域の場合は動物の生命を直接脅かす電磁波でもあるため、「通す」「通さない」の2元論ではなく、定量的な評価が求められることになる。

1-8. 赤外領域で定量化が必要な学習の具体的な例

赤外領域においてはリモートコントローラーやコロナ等で需要が増した赤外温度計等に使用されているため、大変身近な電磁波になった。実際に太陽光による温感には太陽光中の赤外領域によることや赤外領域の特徴である長波長が回折性の高さに影響していること等は赤外領域の検出によって検証可能であり、高等学校では温度や距離等との相関をとることが可能になる。

1-9. 研究の目的

本研究の背景は、これまで述べてきたような理科教育の現状であり、理科教育を受ける立場に位置する児童生徒の実態にある。折しも学習指導要領で提示された、新しい学力観の核心部である「主体的、対話的で深い学び」は、定量的な実験が問題解決学習あるいは探究学習において教材の必要性を強く支持している。なぜならば定性実験のみで計測が不可能であった学習内容が定量実験として可能になることで、新たな視点や観点からの疑問や問題点が児童生徒によって学習課題となれば、これまで以上の内容豊富な学習が期待できるからである。今後の理科学習は、問題解決学習あるいは探究学習の中での「深い学び」を見通した授業構築が必要である。

本研究では、問題解決学習あるいは探究の過程における主体的な学習が保障されることを目的として、定量的な実験促進のための教材開発を行うことにした。特に色の定量化は、色を頻繁に取り扱う理科では喫緊の課題であり、中心に据えることにした。具体的には次のとおりである。

本研究では、「主体的な学習」の成立を支援するために、色の定量化が可能な教材開発を行い、それらが可能であるかどうかを検証するとともに、理科教育における問題解決学習あるいは探究の過程における主体的な学習への応用を提案する。

- (1) 可視光領域の自作反射率計作製とその応用
- (2) 紫外領域の自作反射率計作製とその応用
- (3) 赤外領域の自作反射率計作製とその応用

第2章では可視光領域の自作反射率計の作成を行い、実際にどのような応用が可能かを小学校・中学校での学習内容で論じる。第3章では紫外領域の自作反射率計を作成し、主に高等学校での学習への応用について述べる。さらに第4章では赤外領域の自作反射率計を作成し、同じく高等学校での学習への応用について論じることとする。

なお、本研究で取り扱う可視光領域、紫外領域（近紫外領域）、赤外領域（近赤外領域）の波長の範囲を図1-5で提示しておく。

波長	波数 (cm ⁻¹)	振動数 (1/sec)	呼称	
50m		6×10^6	電波	
10m		3×10^7		
1m		3×10^8		
			短波	
			超短波	
			マイクロ波	
4mm	2.5	7.5×10^{10}	赤外線	
25 μm	400	1.2×10^{12}		
2.5 μm	4000	1.2×10^{14}		
			遠赤外	
			赤外	
			近赤外	
750nm	1.33×10^4	4×10^{15}	可視光線	
400nm	2.5×10^4	7.5×10^{15}		
				赤
			可視	
			紫	
			近紫外	
200nm	5×10^4	1.5×10^{16}	紫外線	
500Å	2×10^4	6×10^{16}	X線	
0.05Å		6×10^{20}		
			γ線	

図1-5 光の波長による区分

(日立ハイテクサイエンス 分光光度計基礎講座第2回から引用)

引用文献

- 浅島誠 ほか 20 名(2016)：生物基礎，東京書籍株式会社。
- 浅島誠 ほか 20 名(2016)：生物，東京書籍株式会社。
- 有馬朗人 ほか 58 名(2020)：たのしい理科 3 年，大日本図書株式会社。
- 有馬朗人 ほか 58 名(2020)：たのしい理科 4 年，大日本図書株式会社。
- 有馬朗人 ほか 58 名(2020)：たのしい理科 5 年，大日本図書株式会社。
- 有馬朗人 ほか 58 名(2020)：たのしい理科 6 年，大日本図書株式会社。
- 有馬朗人 ほか 58 名(2020)：たのしい理科 6 年，大日本図書株式会社。
- 有馬朗人 ほか 62 名(2020)：新版理科の世界 1，大日本図書株式会社。
- 有馬朗人 ほか 62 名(2020)：新版理科の世界 2，大日本図書株式会社。
- 有馬朗人 ほか 62 名(2020)：新版理科の世界 3，大日本図書株式会社。
- 金子美智雄 (2005)：「小学校の理科でも気体検知管が活躍」，ガステックニュース，Vol.51，p.1.
- 久保亮五，長倉三郎，井口洋夫，江沢洋(1989)：岩波理化学辞典第 4 版，岩波書店，p1034.
- 久保亮五，長倉三郎，井口洋夫，江沢洋(1989)：「岩波理化学辞典第 4 版」，岩波書店，p1353.
- 原俊雄 (2003)：「包括的理科の創造：自然科学的思考法の習得－自然科学の言語としての数学－」，物理教育，51(4)，282-289.
- 東 洋，大橋秀雄，戸田盛和 (1991)：「理科教育事典（教育理論編）」，大日本図書，p.106-153.
- 久田隆基 (1985)：「理科の教科書における度量や量の強弱・大小などを表すことばの使い方－小学校・中学校・高等学校理科教科書の記述に見られる使用の実態－」，科学教育研究，pp.19-4.
- 株式会社日立ハイテクサイエンス：分光光度計基礎講座第 2 回 比色分析（吸光光度法）
について (1) https://www.hitachi-tech/ana/uv/basic/uv_course2.html
(最終閲覧日 20220515)
- 松本英恵(2019)；人を動かす「色」の科学，SB クリエイティブ株式会社，pp.40-45.
- 文部科学省 (1999)：「小学校学習指導要領解説理科編」，株式会社東洋館出版社，p.9.
- 文部科学省(2003)：色覚に関する指導の資料，p14.
- 文部科学省 (2008)：「小学校学習指導要領解説理科編」，大日本図書株式会社，p.7.
- 文部科学省 (2008)：「中学校学習指導要領解説理科編」，大日本図書株式会社，pp.16-17
- 文部科学省 (2018a)：「小学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説理科編」，株式会社東洋館出版社，pp.2-4.
- 文部科学省 (2018b)：「小学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説理科編」，株式会社東洋館出版社，pp.7-8.
- 文部科学省 (2018c)：「小学校学習指導要領(平成 29 年告示)解説理科編」，株式会社東洋館出版社，pp.13-14.
- 文部科学省 (2018d)：「小学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説理科編」，株式会社東洋館出版社，pp.-.
- 文部科学省 (2018e)：「小学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説理科編」，株式会社東洋館出版社，pp.-.
- 文部科学省 (2018a)：「中学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説理科編」，学校図書株式

- 会社, p.6.
- 文部科学省 (2018b) : 「中学校学習指導要領 (平成 29 年告示) 解説理科編」, 学校図書株式会社, p.23.
- 文部科学省 (2019a) : 「高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説理科編理数編」, 実教出版株式会社, p.23.
- 文部科学省 (2019b) : 「高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説理科編理数編」, 実教出版株式会社, p.6.
- 三浦登 ほか 13 名 (2016) : 物理基礎, 東京書籍株式会社.
- 三浦登 ほか 14 名 (2016) : 物理, 東京書籍株式会社.
- 宮本直樹 (2007) : 「小学校理科における児童の探究能力に関する研究 - 数量化に着目して -」, 日本科学教育学会研究会研究報告, 21(4), 13-20.
- 森 宏一 (1982) : 「哲学辞典増補版」, 青木書店, p.212.
- 小川勇二郎 ほか 13 名 (2016) : 地学基礎, 数研出版株式会社.
- 小川勇二郎 ほか 14 名 (2016) : 地学, 数研出版株式会社.
- 佐川 演司 (2008) : 「パソコンと自作投げ込み式吸光度計による反応速度の測定 : 亜鉛とヨウ素の一次反応」, 科学教育研究第 32 巻 3 号, pp.230-235.
- 坂上ちえ子, 文田哲雄 (1993) : 「色名使用の実態」, 鹿児島県立短期大学紀要第 44 号, pp.41-57.
- 佐藤千穂 (1998) : 「加齢に伴う色の見えの変化」, 照明学会誌第 82 巻第 8 A 号, pp.530-537.
- 曾我香, 山崎勝弘 (1956) : 「色票面積と観察距離との関係について」, 家政学雑誌第 7 巻第 2 号. pp.56-60.
- 高橋成子, 江島義道 (1982) : 「同時色対比効果の測定方法」, テレビジョン学会技術報告 V V I 50-5, pp.21-26.
- 竹内敬人 ほか 17 名 (2016) : 化学基礎, 東京書籍株式会社.
- 竹内敬人 ほか 17 名 (2016) : 化学, 東京書籍株式会社.
- 竹内敬人 ほか 16 名 (2016) : 科学と人間生活, 東京書籍.
- 環境省 (2008) : 紫外線環境保護マニュアル (2008 年 6 月改訂版), pp.1-52.
- 山下浩之 (2016) : 簡易比反射率計による葉の黄化の定量比較, 日本生物教育学会第 100 回全国大会研究発表予稿集, p77.
- 湯尻照 (1990) : 「照度レベルによる表面色の色の見えの変化と個人差」, 光学第 19 巻第 9 号, pp.601-609.

第2章 可視光領域における自作反射率計の作成とその応用

2-1. はじめに

平成29年3月に新小学校学習指導要領が、7月には新中学校学習指導要領が公示され、いずれの学習指導要領でも児童・生徒の主体的、対話的で深い学びの実現に向けた授業改善の6つの留意点が示された。その一つに深い学びの鍵として「どのような視点で、どのような考え方で思考していくのか」というその教科ならではの物事を捉える視点や考え方の重要性が述べられている(文部科学省, 2017a)(文部科学省, 2017b)。

理科学習におけるいくつかの領域の中でも「エネルギー」を柱とする領域においては主として量的・関係的な視点で捉えることが理科の「見方」として整理されている(文部科学省, 2017c)。量的・関係的な視点は、定量化に導くための重要な視点であるが、残念ながら小学校・中学校の学習内容全体から見てもそれが十分に浸透しているとは言い難いのが現実である。量的・関係的な視点での授業設計が充実していかない原因の1つとして測定の困難さがある。それに代表されるのが「色」に関する評価である。特に植物を取り扱う単位では、葉や花の色の連続的な変化や多様性を取り上げる場合がしばしばあるが、そこで用いられる色に関する表記は児童生徒それぞれの持つ感性や経験、文化に依存しやすく(坂上 ほか, 1993)、主観的な表現に頼らざるを得なかった。児童生徒が使用する「なんとなく」や「・・・っぽい」といった色に対する感覚表現と並行して、色の数量的かつ簡単な評価による表現が可能になれば、児童生徒は積極的に色に着目し、色と他の変数との量的・関係的な視点を構築していくのではないかと考えた。植物を扱う単位の中に中学校1年生での「植物の体のつくりとはたらき」がある。ツバキ(*Camellia japonica*)やツユクサ(*Commelina communis*)の葉の断面を顕微鏡で観察し、葉の表面と裏面では組織が異なることを学習する(有馬 ほか, 2016)(霜田 ほか, 2016)(細矢 ほか, 2016)(塚田 ほか, 2016)(岡村 ほか, 2016)が、この単位では葉の色との関連については取り扱われていない。しかし葉の表側の色と裏側の色の違いは葉の構造の違いに関係があることを理解することは、量的・関係的な視点で学習する「深い学び」に繋がると考えられ、色の評価を目的とした反射率計導入の検討を試みた。一般的に入射した光は透過・吸収・反射光に分かれるが、試料に入射した光は境界面で一部の光を透過あるいは吸収し、一部の光を反射する。植物に光を当てる場合は植物にとって重要な太陽光に含まれる単色の光を当てることで試料が持つ色の性質を読み取ることができる。

自作反射率計による反射率の測定については、操作が容易であることから様々な活用例が報告されている。たとえば自作反射率計を高等学校の化学分野でホウ酸の定量分析に用いたり(田中 ほか, 2002)、塩化コバルト(II)紙による水分量の決定に用いたりした例(三好 ほか, 2012)がある。小学校においては自作反射率計で補色の発見に導いた実践事例が報告されている(影浦 ほか, 2014)。今回、反射率計を改良し、植物の葉の表と裏側の違いを最適な測定条件や有意な観察結果が得られたので報告する。

2-2. 自作反射率計の作成方法と試料

(1)自作反射率計の作成方法について

反射率計は、光源と検出器の組み合わせで反射光を測定する。反射率は全反射(45°鏡面反射)による測定法と拡散反射を評価する測定法があるが(宮下 ほか 1975)、今回のような測定対象が葉の場合、表面の小さな凹凸のため鏡面反射光成分が小さく、拡散反射光成分

が大きいため、三好・大賀・喜多（三好 ほか，2012）および影浦・伊藤・喜多（影浦 ほか 2014）が採用した L 字型ではなく、田中・鄭・山下（田中 ほか，2002）が用いた入射角 θ が小さい拡散反射を評価する測定法を採用した。今回の改良点としては、田中・鄭・山下（田中 ほか，2002）の装置における光源の単色光 LED を交換可能にするために LED のテーパの部分で固定できるように挿入部の大きさを調整した。また、田中・鄭・山下（田中 ほか，2002）は水道管を 55mm に切断して装置を作成しているが、切断等の操作をなくすためにフレームには塩化ビニル製水道管用キャップ（外径 54.0 mm, 内径 48.2 mm）を用い、その中心部に 5 mm の穴をドリルで開けて光源を取り付けられるようにした。光源と検出器として使用される LED（有馬 ほか，2016b）（霜田 ほか，2016b）（養老 ほか，2016a）（石浦 ほか，2016a）（毛利 ほか，2016a）や光電池（有馬 ほか，2016c）（霜田 ほか，2016c）（養老ほか，2016b）（石浦 ほか，2016b）（毛利 ほか，2016b）等は全て小学校理科で学習教材として使用されている材料である。フレームの内面は側面内部の乱反射を回避するために黒色フェルトで覆った。サンプルの下面には、葉の透過光による影響を最大限小さくするために、可視光のほぼ全ての色を吸収する厚さ 5 mm の黒色天然ゴムを敷いて測定した。

光源には赤・青・緑の 3 色の LED を用いた。それぞれの光源の波長は市販の分光器 OceanOptics 製 MAYA2000PRO で測定し表 2 - 1 にした。葉の反射率を測定する場合、主に緑色成分であるクロロフィル a, b, c を測定することになる。クロロフィル a, b, c のそれぞれの波長のピークは青紫色部では 430 nm, 455 nm, 444 nm で、赤色部では 662 nm, 628 nm, 628 nm であり、生細胞中ではこれらの吸収帯は上記の値よりも 10~50 nm ほど長波長側にシフトするので（八杉 ほか，2001），青色と赤色の LED に関してはこの吸収帯に近い波長のピークを持つ LED を選んだ。逆に、緑色部は最も大きな反射帯であるため、青色と赤色との比較のために採用した。光源には、各 LED の順方向電圧と制限電流に応じて抵抗を接続させ、直流安定電源装置（TEXIO 製 PR18-1, 2A）を使用して印加電圧をかけた。

検出器としては、検出器の感度を上げるために SANYO アモルファス製光電池 AM-1456CA2 個を直列に接続し、LED の影響を受けないように光源の両側においてボンドで接着させた。検出器はデジタルマルチメーターに接続させ、起電力を測定した。なお、自作反射率計の概念図は図 1 の通りである。

葉の試料については木本植物としては

ヤブツバキ (*Camellia japonica*)

ネズミモチ (*Ligustrum japonicum*)

ヤマモモ (*Morella rubra*)

クスノキ (*Cinnamomum camphora*)

を、草本植物としては

チューリップ (*Tulipa gesneriana*)

を用いた。いずれの種も 2018 年 10 月に行い、成葉を用いた。葉の表面の汚れを除去するためにキムワイプで表面を拭き取った後、採集して 1 時間以内の葉を測定した。測定は 10 枚の葉を用い、その平均値を測定値とした。

(2)測定の原理

反射率は、入射した光束に対する反射した光束の比である。反射率の測定は、標準拡散反射板との比較測定によるのが普通である（社団法人照明学会，1990a）。

標準拡散反射板の反射率を ρ_s 、受光器の読みの比を R とすれば試料の反射率 ρ_t は

$$\rho_t = \rho_s \cdot R \cdots \textcircled{1}$$

で求められる（社団法人照明学会，1990b）。標準拡散反射板の検出器の値を r 、試料の検出器の値を v 、入射光を 0 にした場合の受光器の値を d とおくと

$$R = (v - d) / (r - d) \cdots \textcircled{2}$$

ここで $\rho_s = 1$ とし、 $r \gg d$ かつ $v \gg d$ の場合は

$$\rho_t = v / r \cdots \textcircled{3}$$

となる。したがって葉の裏と表の反射率の比はそれぞれの起電力の比と考えることができる。標準拡散反射板は MgO を使用するのが一般的であるが（久保 ほか，1989）、ここでは教育現場で汎用性が高い白色コピー用紙（PEFC31-31-63A4）を代用し、吸収色には入手が容易な日本製教育用折紙（日本玩具協会）緑色、黒色を用いて検量線を作成した。

測定時は、白色コピー用紙、緑色および黒色の折紙、使用した全ての葉のサンプルにおいて、図 2-1 の底面部分の面積 18.2 cm^2 で行った。

ヤブツバキの葉の表面を測定試料にした場合の起電力の変化が図 2-2 である。図 2-2 によるといずれの色でも起電力が立ち上がり電圧に達してから直線的な上昇を経て限度に達することが読み取れる。これらを色ごとに分け、印加電圧と起電力が直線的な関係になっている部分を切り取った。同様にして試料を白色コピー用紙、折紙緑色、折紙黒色に替え、それぞれ 3 色の LED に対する印加電圧と起電力の関係を示したのが図 2-3、図 2-4、図 2-5 である。

図 2-3、図 2-4、図 2-5 によると、いずれの図も印加電圧と起電力の間には、相関の高い良好な直線関係を示している。なお、教育用折紙緑色と実際の葉の測定試料では、葉に含まれるクロロフィル a、b、c と顔料として使用されている色素や構造等が異なるため当然ながら吸収帯や反射帯は完全には一致していない。また、実際の測定では植物の葉は同じ個体であってもばらつきがあり、成長のステージ、季節、場所、葉に含有する水分によっても反射率は変動するため（青木 ほか，1988）、実際の葉との比較のために色の変化が比較的安定している折紙緑色の測定値も入れた。

表 2-1 使用した LED の種類（筆者作成）

色	波長 (nm)	型式	光度 (mcd)	サイズ (mm)
赤	619	砲弾型	7000	Φ5
青	465	砲弾型	5800	Φ5
緑	513	砲弾型	18000	Φ5

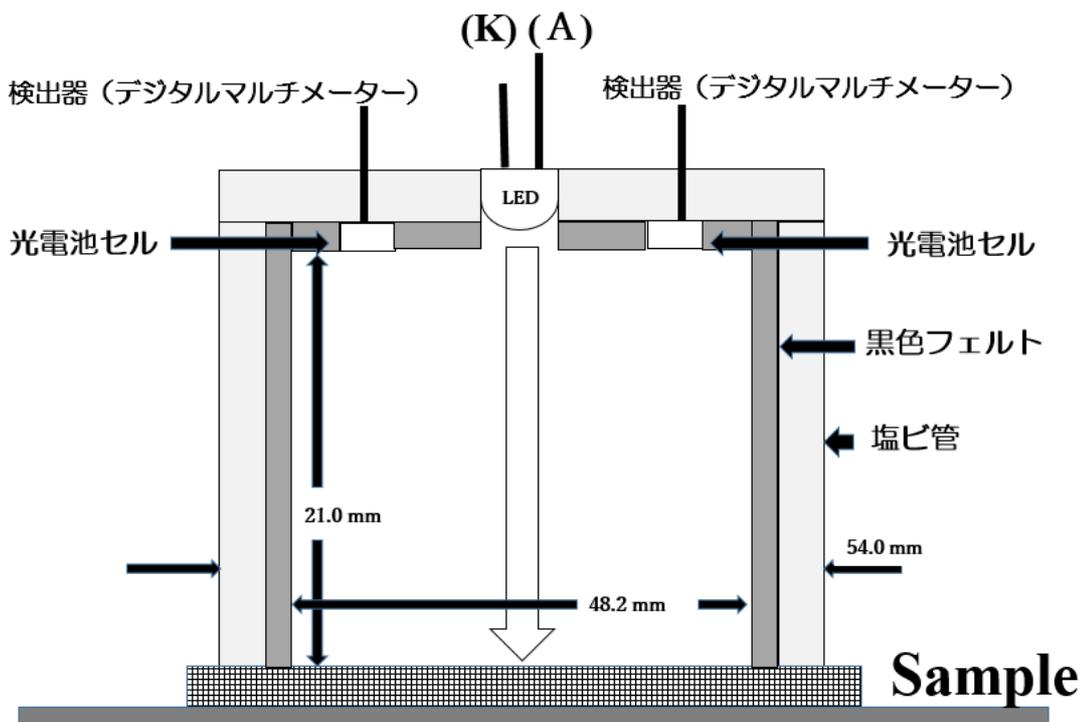


図2-1 自作反射率計の装置図 (筆者作成)

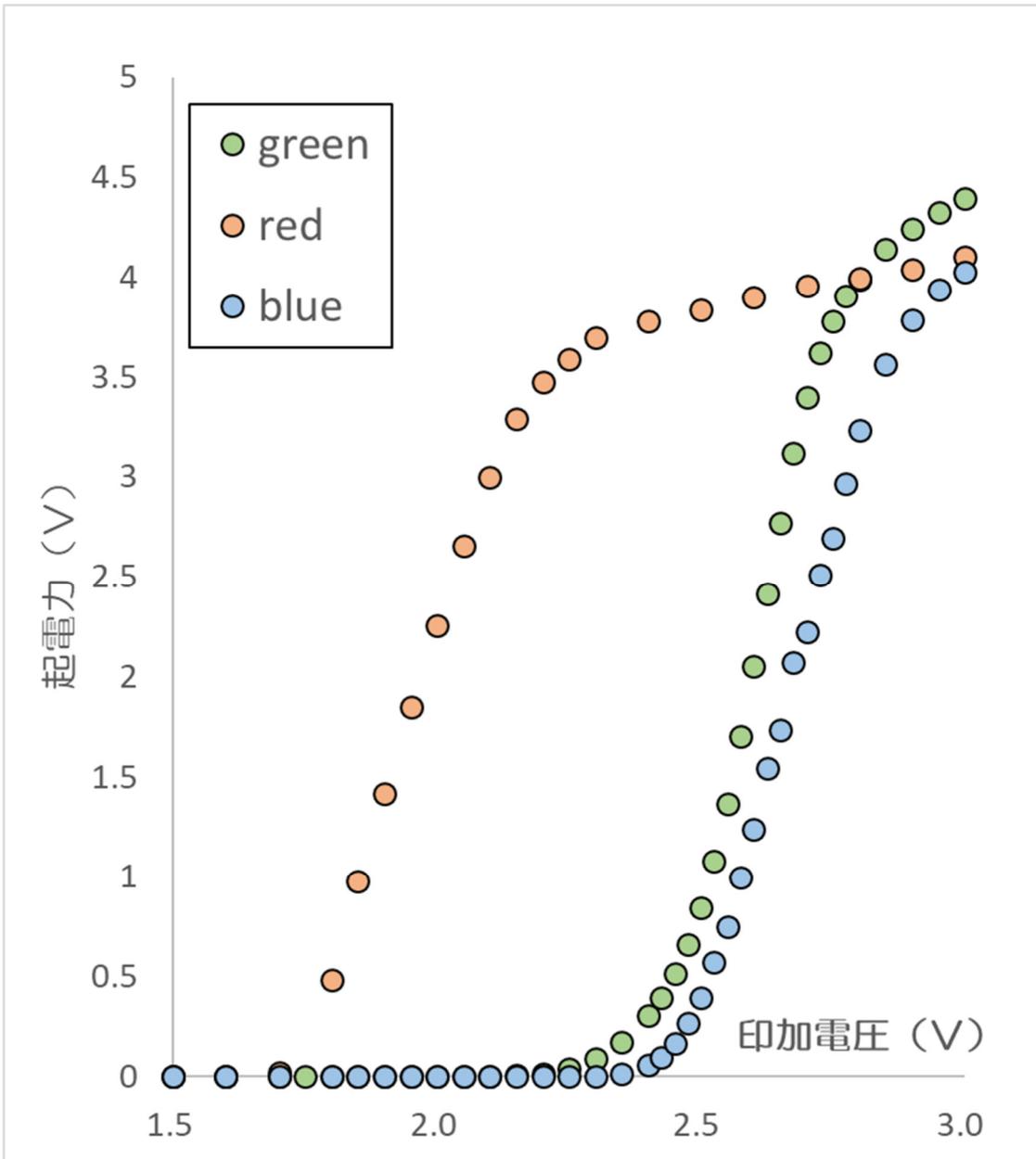


図2-2 LEDの色別の印加電圧と起電力の関係
 (試料はヤブツバキの葉の表面) (筆者作成)

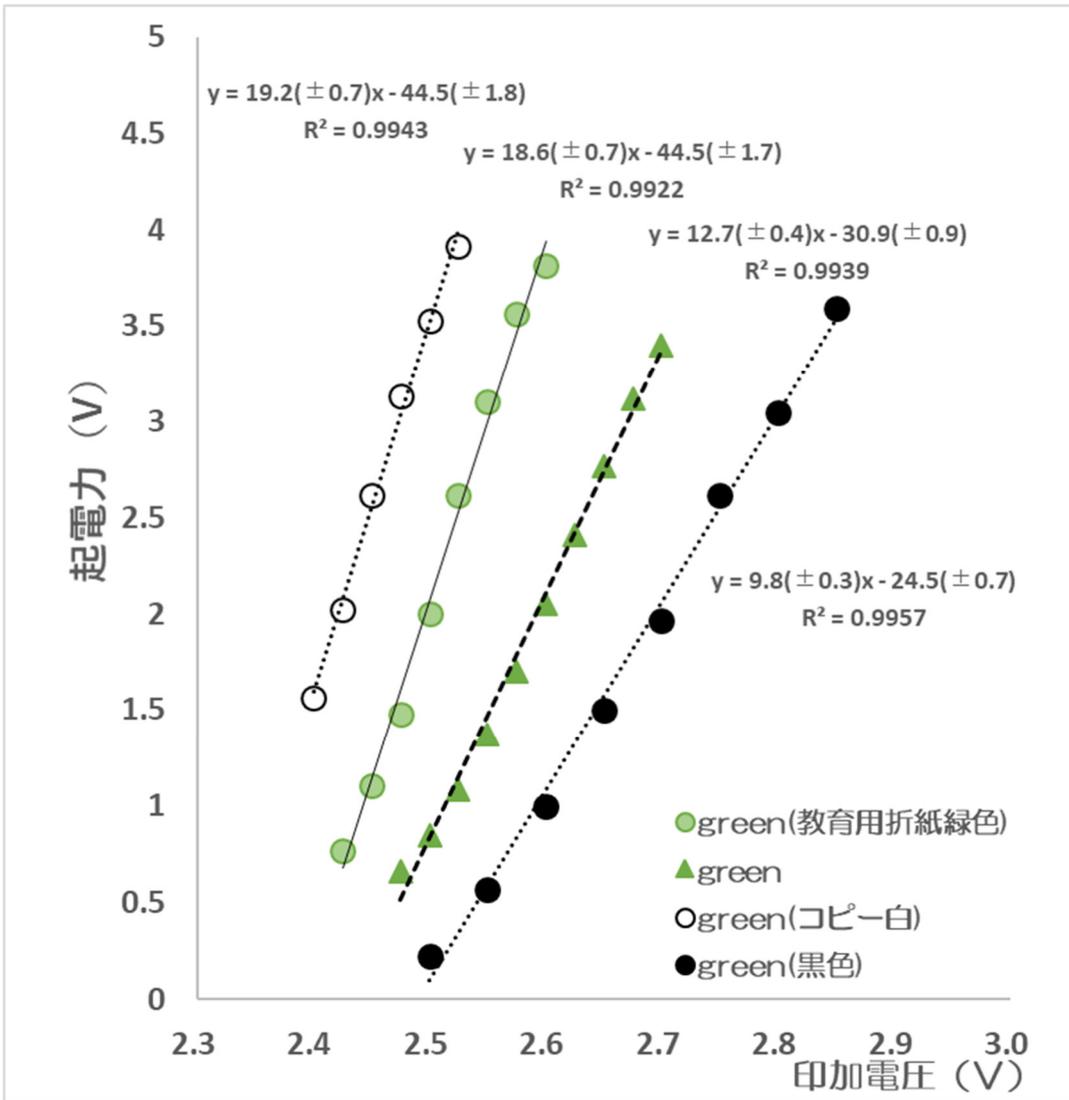


図2-3 白色コピー用紙・教育用折紙緑色・黒色・ヤブツバキに green LED 光を反射させた際の印加電圧と起電力の直線部分の比較 (筆者作成)

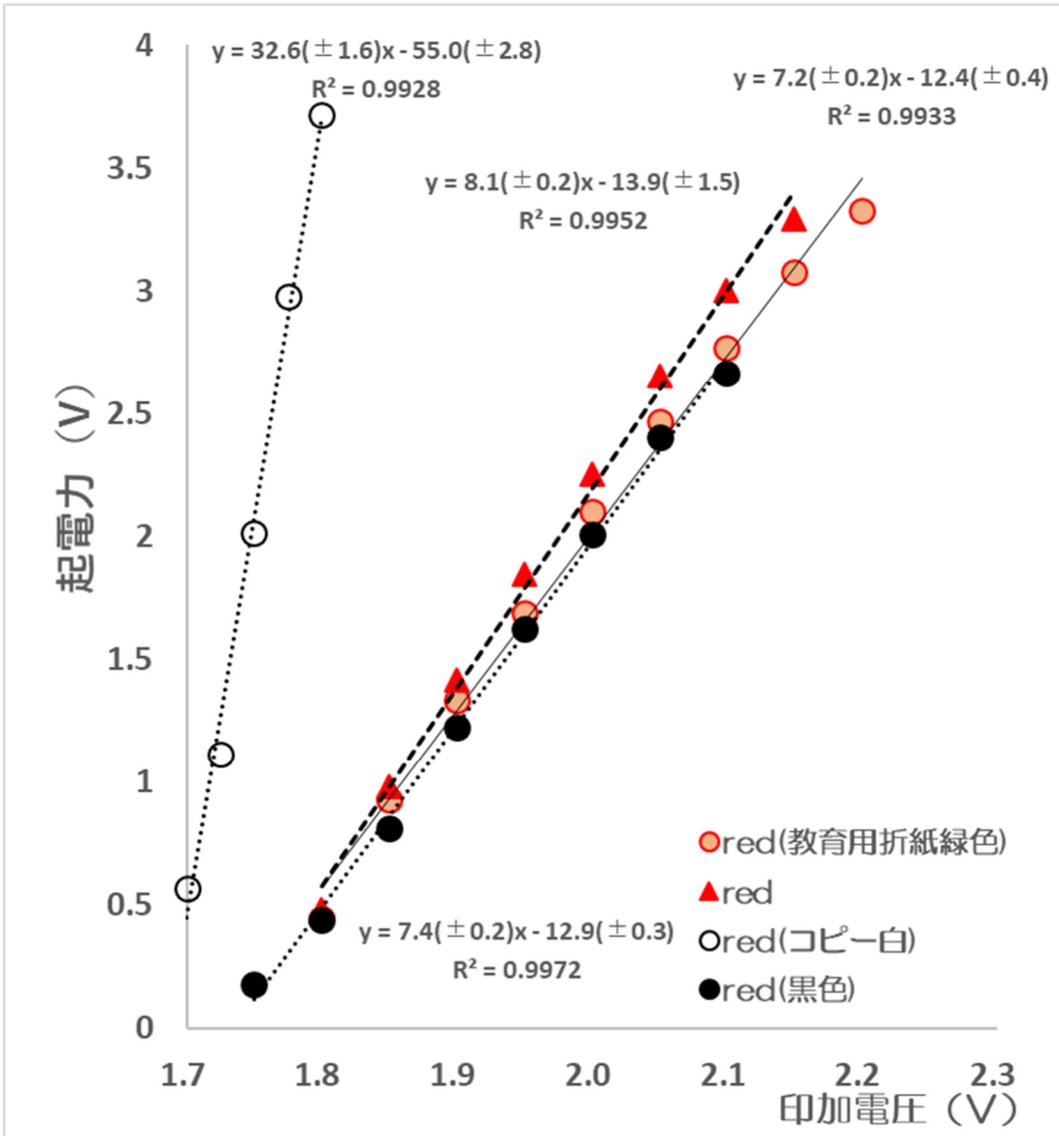


図2-4 白色コピー用紙・教育用折紙緑色・黒色・ヤブツバキに red LED 光を反射させた際の印加電圧と起電力の直線部分の比較 (筆者作成)

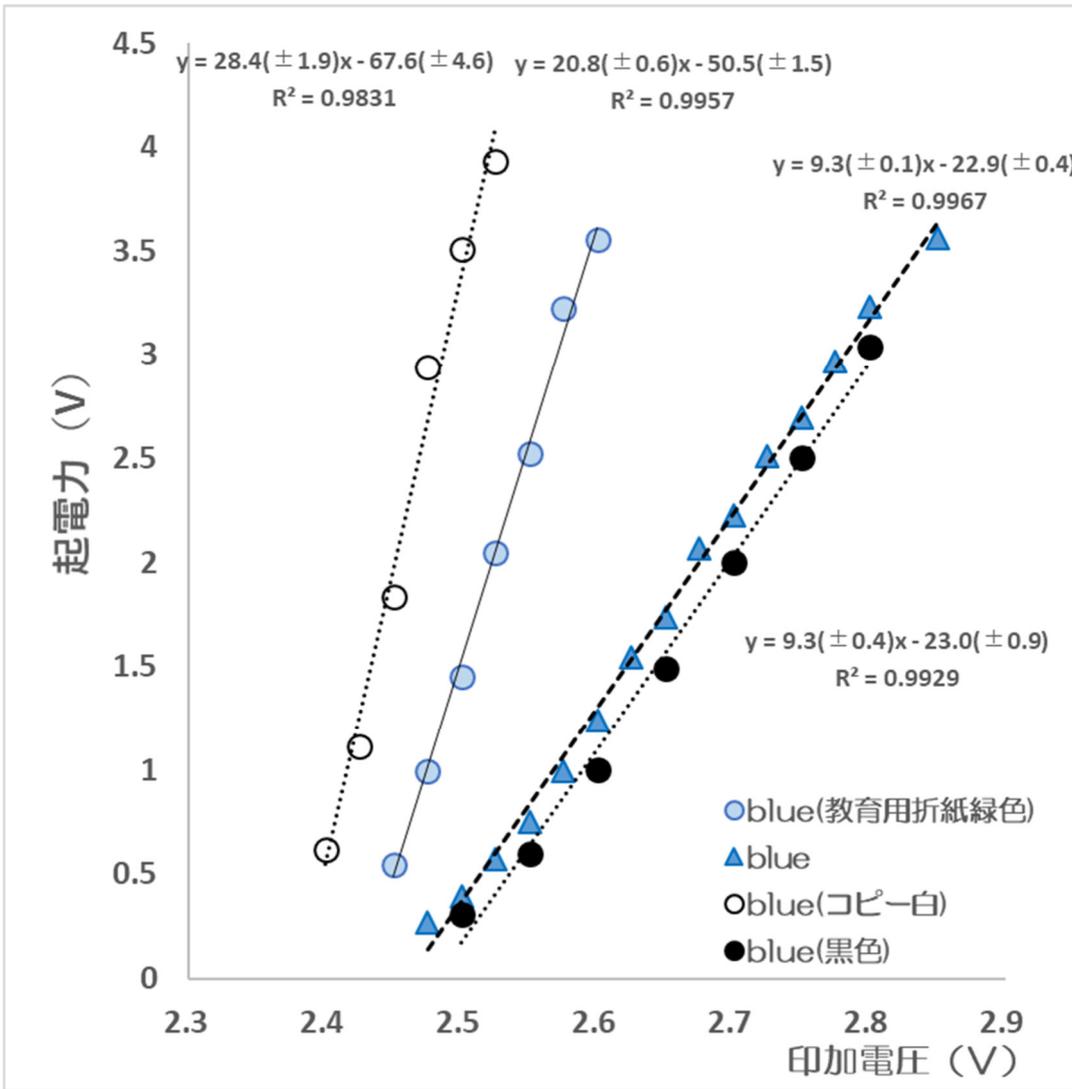


図2-5 白色コピー用紙・教育用折紙緑色・黒色・ヤブツバキに blueLED 光を反射させた際の印加電圧と起電力の直線部分の比較 (筆者作成)

図2-3, 図2-4, 図2-5から同じ印加電圧を与えた場合, いずれの色のLEDでも白色コピー用紙が高い値を示し, 黒色が低い値を示していることがわかった. 実際の葉の測定値はこの白色コピー用紙の値と黒色折紙の値との間であることが推定できたため, ヤブツバキの葉の直線部分を網羅できるように印加電圧を

緑: 2.5 V 赤: 1.8 V 青: 2.5 V

に設定した. この印加電圧によって反射された光束が検出器の太陽電池によって起電力に変換され, 反射された光束の積分値が起電力に換算されていると解釈できる.

自作反射率計と比較のために使用した市販の測定器は分光器 Ocean Optics 製 MAYA2000pro で, 反射プローブホルダ RPH-1 に 45° の角度で反射プローブを固定し, 積分時間 100 ms, 測定回数 10 回を平均化した値と比較した.

2-3. 結果

自作反射率計で, 身近な木本植物や草本植物の葉の表面と裏面の起電力の測定を行った.

a. ヤブツバキおよび照葉樹の葉の測定

図2-6はヤブツバキの葉の表と裏の画像であるが, 葉の裏面の方が白っぽく見える. これを自作反射率計で両面を測定した結果は次の図2-7である.

図2-10により, いずれの色においても有意に裏側の起電力の方が表側の起電力より大きいことがわかった.

同様にしてネズミモチ(図2-7), ヤマモモ(図2-8), クスノキ(図2-9)で測定したところ, 図2-11のような結果が得られた.

ここで入射光を0にした際の d は 0.008 Vであったため, $d \approx 0$ と見なし, 裏の起電力と表の起電力の比をとったグラフが図2-12である.

図2-12から裏面での起電力の値が有意に表面での起電力の値を上回っていることがわかった. 自作反射率計で測定した反射率の比の信頼性を確認するために, この樹種の葉の反射率の比を MAYA2000pro で測定し, グラフにしたのが図2-13である.



図2-6 ヤブツバキの葉の裏（左）と表（右）（筆者撮影）



図2-7 ネズミモチの葉の表（左）と裏（右）（筆者撮影）



図2-8 ヤマモモの葉の表（左）と裏（右）（筆者撮影）



図2-9 クスノキの葉の表（左）と裏（右）（筆者撮影）

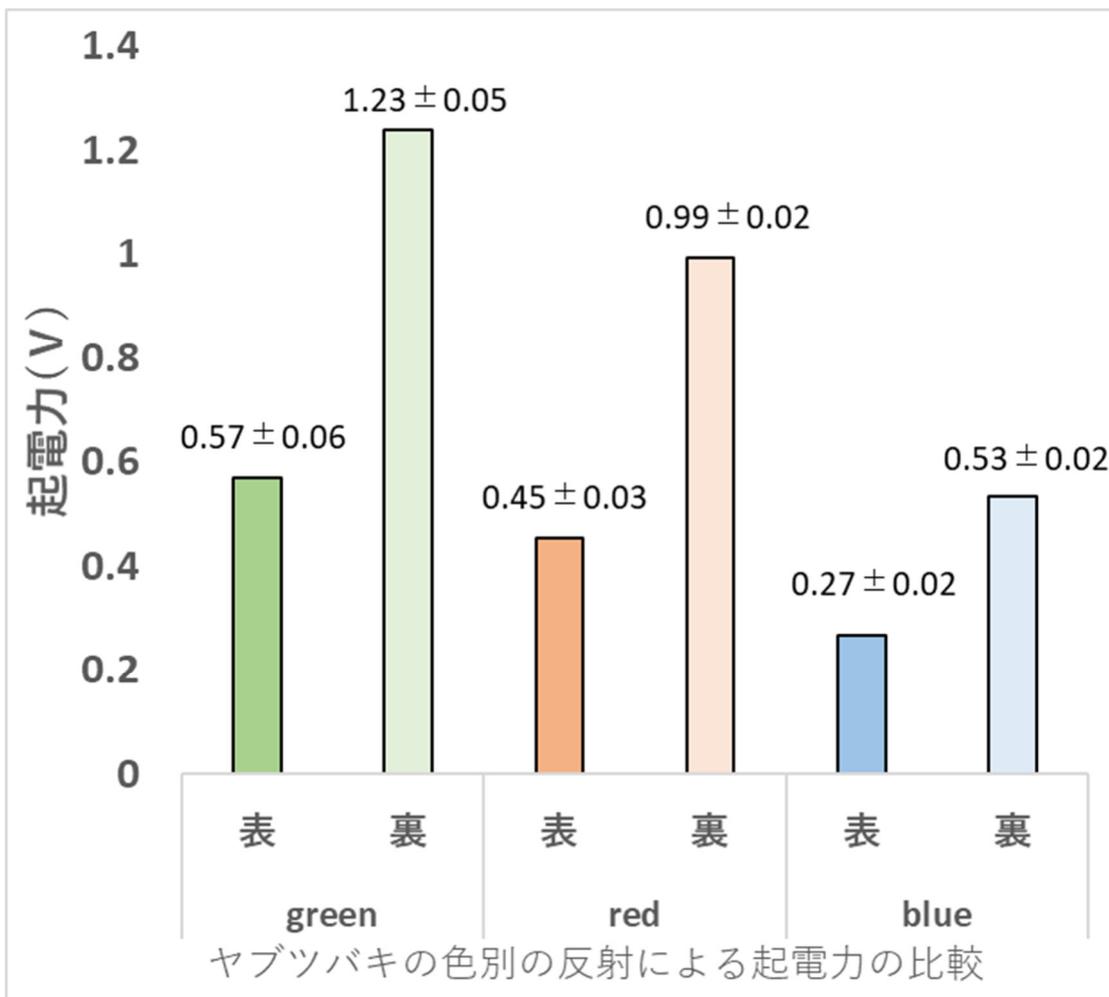


図2-10 ヤブツバキの色別の反射による起電力の比較
(いずれの値も n=10)

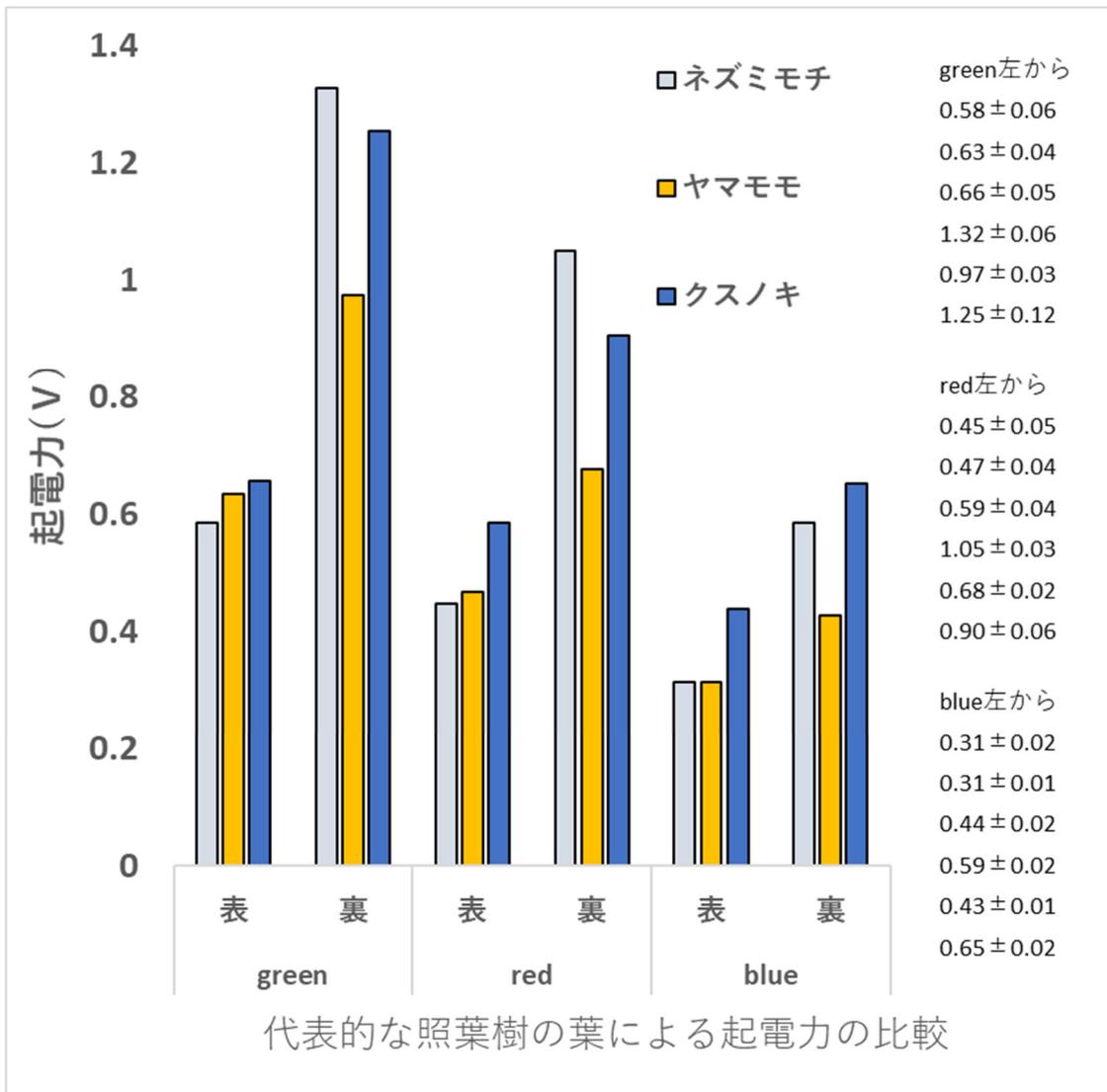


図2-11 代表的な照葉樹の色別の反射による起電力の比較 (いずれの値も n=10)

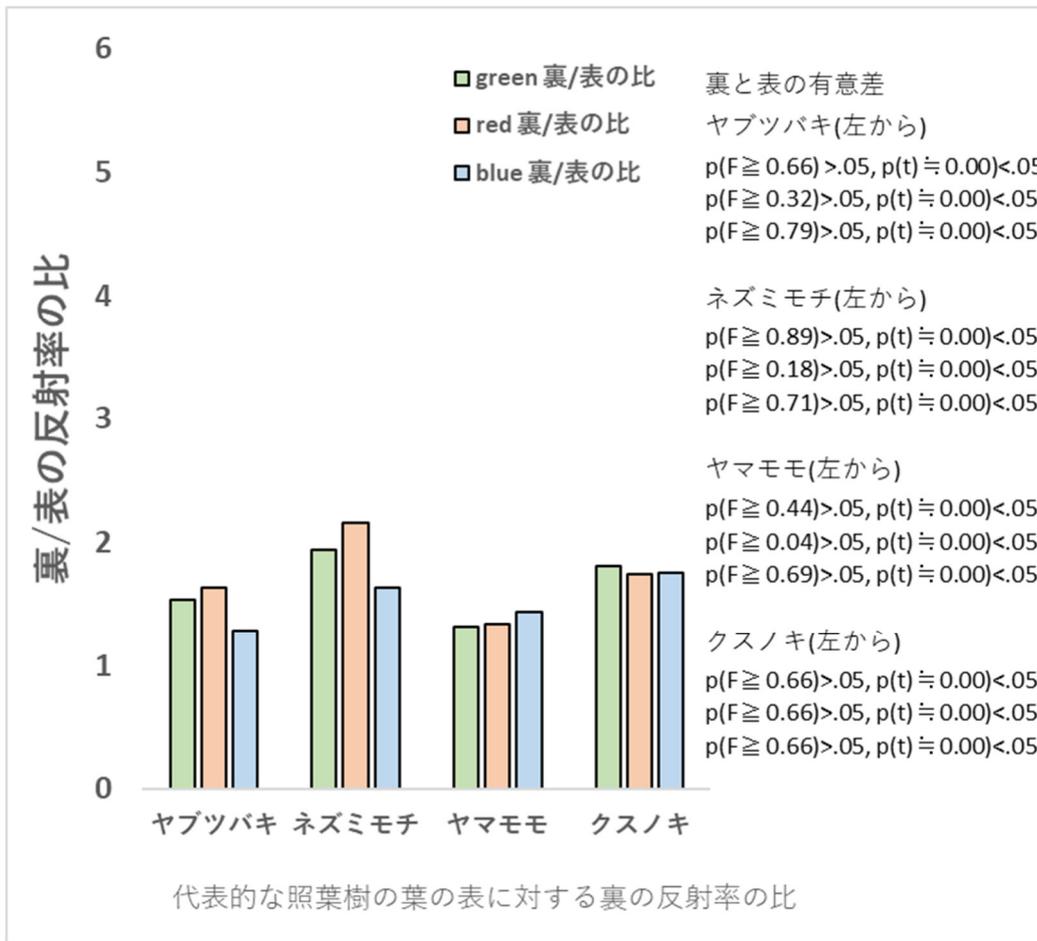


図2-12 代表的な照葉樹の葉の表に対する裏の反射率の比
(自作反射率計による測定)

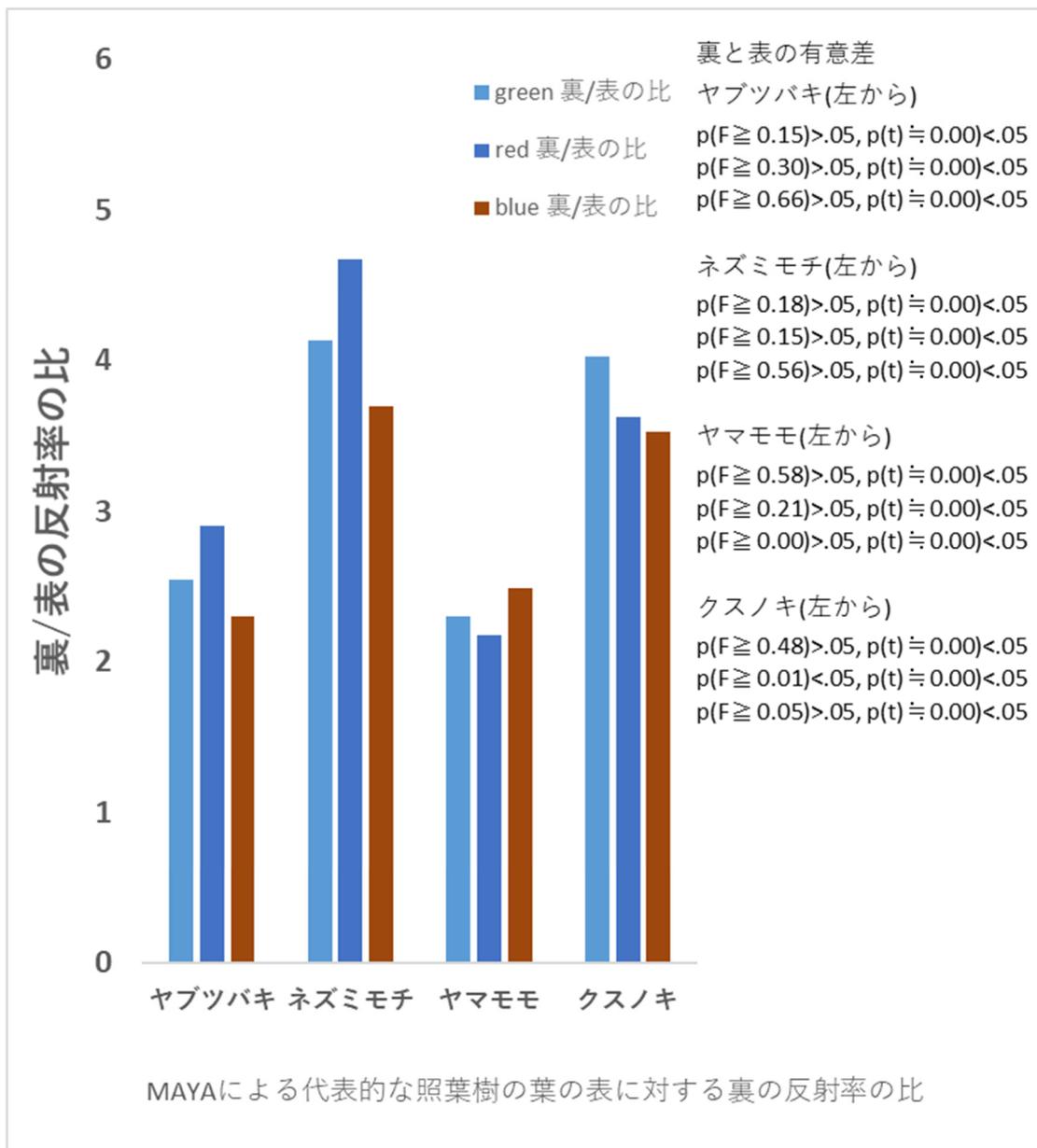


図2-13 代表的な照葉樹の葉の表に対する反射率の比 (MAYAによる測定 いずれの値もn=10)

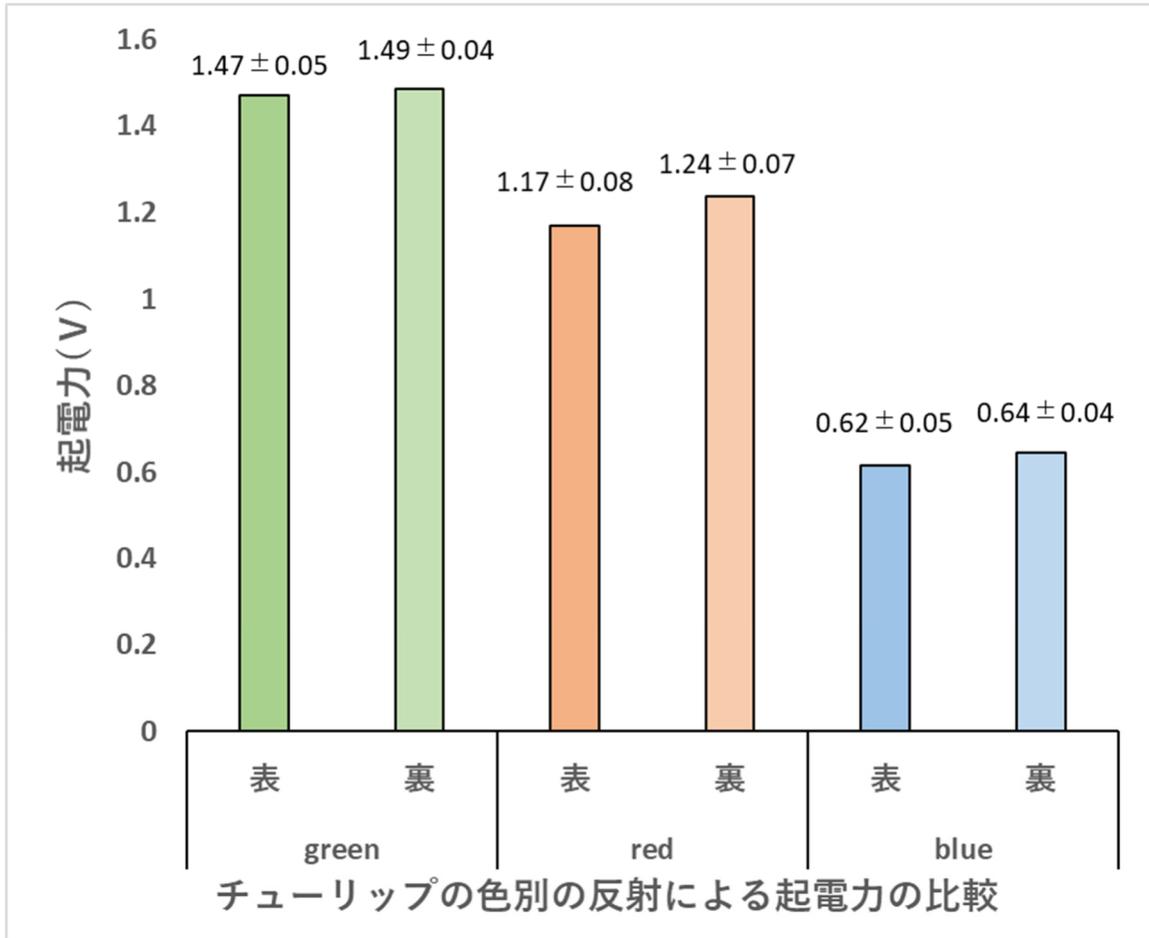


図2-14 チューリップの色別の反射による起電力の比較
(いずれの値も n=10)

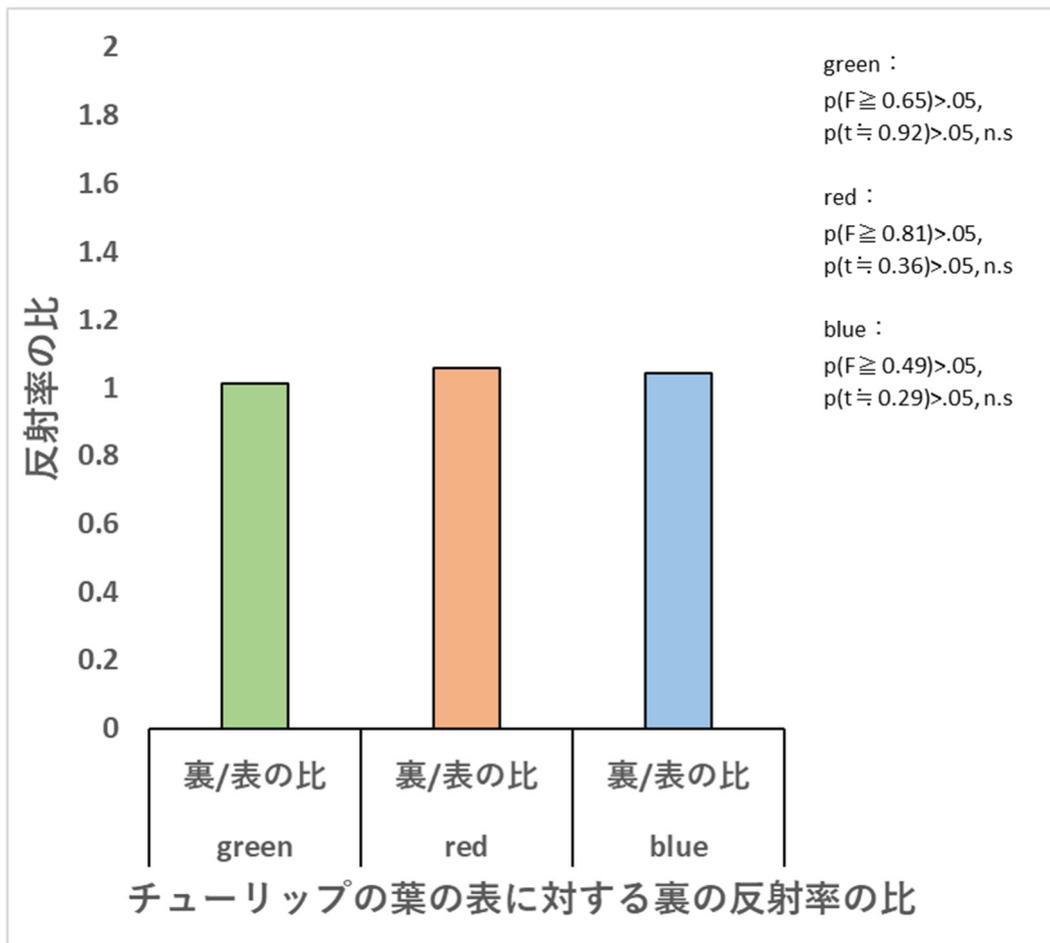


図2-15 チューリップの色別の反射率の比の比較
(いずれの値もn=10)

b. チューリップの葉の測定

ヤブツバキと同様にチューリップの葉の表面と裏面をそれぞれの波長のLEDで起電力を測定し、プロットした結果が図2-14である。ここでは緑・赤・青の全ての色において表面より裏面の起電力の値は大きかったが、表面と裏面の反射率の差をとったグラフが図2-15である。図2-15からいずれの色においても裏面の起電力の値が表面の起電力を有意に上回っているとは言えなかった。

照葉樹における図2-12と比較すると、(裏/表)の比は値が1に近く、明らかに(裏/表)の比が1を超えている図15での比の値とは異なることがわかった。

2-4. 考察

ヤブツバキに代表される照葉樹において、クロロフィルの吸収帯である赤と青、反射帯である緑の3色いずれとも、葉の裏面が表面より起電力が有意に上回っていることがわかった。光電池セルの起電力は光量を反映しているので、これらの結果は、Gateらによって先行的に行われた、可視光域においてはいずれの波長においても裏面の反射光の光量起電力が表面の反射光の光量起電力を上回るという実験結果を支持している(玖村, 1977)。葉の裏面の反射光量が表面の反射光量を上回る理由については、Gabrielsen (Gabrielsen, E.K, 1960) や Pearman (Pearman, G.I, 1966) の他、高・矢吹らが葉の表面と裏面の光学的特性と葉の解剖学的特性との関係について言及している⁽³²⁾。高・矢吹(高 ほか, 1974)は葉の構造から3つのタイプに分けたが、いずれのタイプも葉の光学的特性の表面と裏面の問題は葉の構造の違いから説明できると指摘している。一見、葉の裏面の色が表面より明るく見えるのは裏面の表面の凹凸で乱反射している光を捉えていることに加え、入射した光が海綿状組織の細胞間隙でも、乱反射している光も見ていると説明できる(園池, 2008)。

つまり、葉の表面での柵状組織では細胞が規則正しい配列をとっているため(図2-16)、入射した可視光は細胞組織の境界面を散乱しないまま葉の内部方向へ進んでいき、一方で葉の裏面での海綿状組織では細胞間隙により不規則な配列をとることにより、入射した可視光は散乱していると考えられ、その結果が反射率の差となって表れていることになる。Gatesらによる可視領域700 nm~400 nmの反射光測定の代わりにここでは赤、青、緑のLEDを用いて可視領域を代表させた。一方、図17のチューリップの葉の断面を観察すると、照葉樹の葉の反射とは様相が異なり、柵状組織と海綿状組織の区別および境界面が明確でないことが観察される。その結果、表面と裏面の色としての区別が差として現れにくく、図2-15のような(裏/表)の比になったと解釈できる。

このように、見た目のみの表現で行われてきた色の表記を自作反射率計によって数値化し、比をとることによって定量的な議論が可能となったことは、新学習指導要領で求める事象と事象を関係付け、問題解決や深い学びを可能とする。

自作反射率計の精度については、今回MAYAを使用した反射率測定値と自作反射率計による測定値との比較を行った(図2-12, 図2-13)。MAYAの場合は試料から5 mm程度の距離で測定するため、試料から21 mmの距離を持つ自作反射率計と比較すると感度に約2倍の差が出た。また、アモルファス製の光電池セルでは吸収範囲が長波長側にシフトしている(馬場 ほか, 1995)ことも影響していると考えられる。しかし図2-12と図2-13はよく対応している。

自作反射率計およびMAYAの測定結果によると、各光による反射率の比の値が植物によって異なっていることから、それぞれの植物にはその植物固有の光吸収を持ち、その差が反

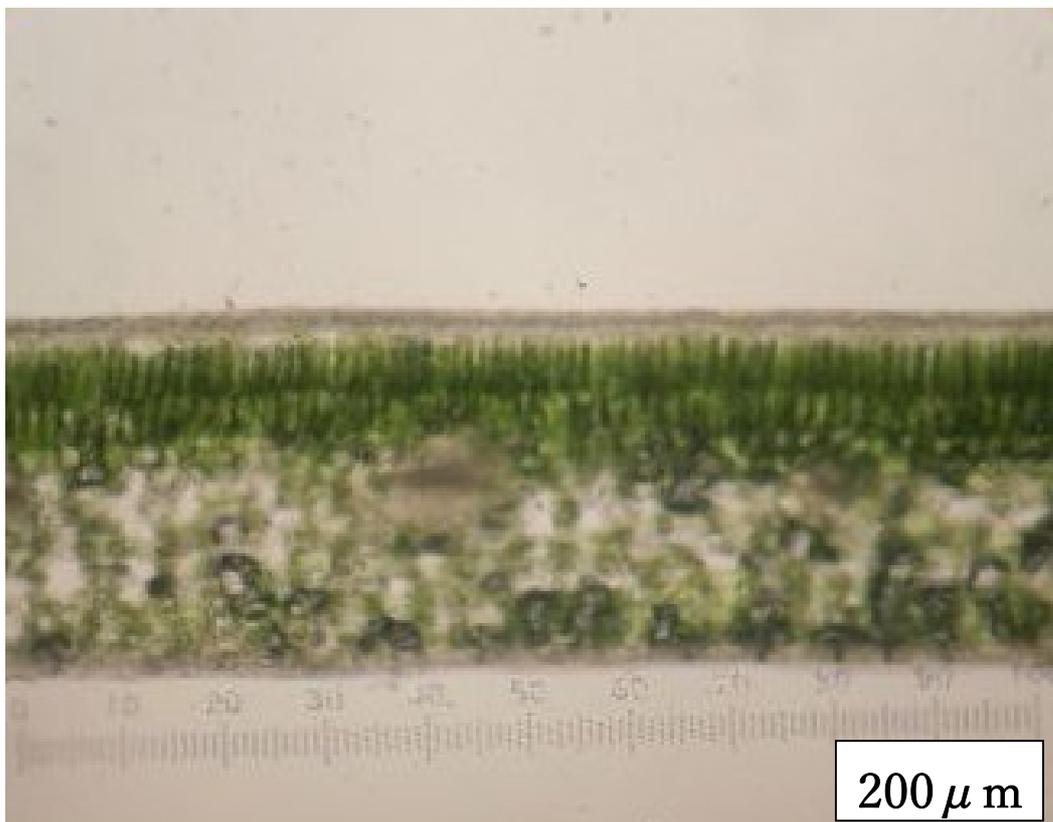


図2-16 ヤブツバキの葉の断面（筆者撮影）



図2-17 チューリップの葉の断面（筆者撮影）

射率の比の差として現れてくるのではないかと考えられる。その意味では緑・青・赤での分光反射率の測定は発展的な学習に繋げることができる。

学校現場で自作反射率計を用いる際、初等教育の場合は、色ごとの起電力を比較の材料として比をとること無しに定量化することも可能であるが、比の計算については、端末での表計算等のアプリケーションを使用することで授業中にも簡単に求めることができる。原理は極めて簡単であり、日常的に気軽に使用できる教材でもある。特に今回のように、1枚の葉を対象にした表面と裏面の起電力測定データは、葉の断面の厚さが等しくなることから小学校5年生で学習する条件制御を導入することが可能であり、起電力の比較には適切な教材であると言える。ただし、太陽光についての理解をレベルに応じて施すことは必要である。例えば太陽光には今回使用した緑・青・赤の3色が含まれていることを、植物育成用ライト等を提示したり、これら3色を混合させた色を提示したりする工夫が考えられる。中等教育では、授業の導入部において、感覚を通した主観な表現が定量的にはどのくらいの数量で表されるかといった提示の仕方などが工夫でき、変数の関係性に関わる議論の促進によって、量的・関係的な視点を育てる契機になるのではないかと考える。いずれも新学習指導要領にうたわれている深い学びに結びつく。

いわゆる市販の分光反射率計は大変高価な測定器である。今回分光器 MAYA を使用した反射率測定システムでは百万円以上となる。一方、自作反射率計は安価な費用で、直流電源装置を準備できれば班別や個別実験への対応が可能である。

2-5. 今後の課題

これまで同じ葉においての表面と裏面の反射量の大小と比についての比較をしてきたが、光源と検出器までの距離を縮め、さらに光の波長に対応した検出器の選択を行うことによって自作反射率計の精度を上げることが課題である。これによって反射率と葉の構造との関連がさらに明確に現れてくると期待できる。

引用文献

- 青木正敏, 矢吹万寿, 戸塚績 (1988): 「葉の水分量の計測に有効な分光反射特性」『農業気象』44(2), pp111-117.
- 有馬朗人 ほか (2016a): 『新版理科の世界』1年, 大日本図書, pp.39-40.
- 有馬朗人 ほか (2016b): 『たのしい理科』4年, 大日本図書, pp.33-34.
- 有馬朗人 ほか (2016c): 『たのしい理科』6年, 大日本図書, pp.161-162.
- 馬場俊明, 中野昭一 (1995): 『太陽光発電の現状と将来展望』, *Netsu Bussei* 9〔2〕, pp.92-97.
- Gabrielsen, E.K. (1960): 「Lichtwellenlänge und Photosynthese」『Handbuch der Pflanzenphysiologie』5(2), (E.D)W.RUHLAND, *Springer, Berlin. Göttingen. Heiderberg*, pp.8-48.
- 細矢治夫, 養老孟司, 丸山茂徳 ほか (2016): 『自然の探究中学校理科』1年, 教育出版, pp.156-157.
- 石浦章一, 鎌田正裕 ほか (2016a): 『わくわく理科』4年, 啓林館, pp.34-36.
- 石浦章一, 鎌田正裕 ほか (2016b): 『わくわく理科』6年, 啓林館, pp.165-166.
- 影浦美礼, 伊藤恵司, 喜多雅一 (2014): 「自作反射率計を道いる捕色の発見とその授業実践」『日本理科教育学会全国大会要項』(64), p490.
- 久保亮五, 長倉三郎, 井口洋夫, 江口洋 (1989): 『岩波理化学辞典第4版』p.502.
- 玖村敦彦 (1977): 『作物の光合成と物質生産』, 養賢堂, pp.31-33.
- 宮下正義, 小迫修治 (1975): 「簡易反射率計」『昭和50年照明学会全国大会要旨集』, p.67.
- 三好美恵, 大賀美保, 喜多雅一 (2012): 「塩化コバルト(II)紙を用いた水分量の決定とその土壌水分への応用(教材開発(6), 一般研究, 次世代の科学力を育てる: 社会とのグラウンディングを進展させるために)」『日本科学教育学会年会論文集』36, pp.478-479.
- 文部科学省 (2017a): 『小学校学習指導要領(平成29年告示)解説理科編』, p.4.
- 文部科学省 (2017b): 『中学校学習指導要領(平成29年告示)解説理科編』, p.4.
- 文部科学省 (2017c): 『小学校学習指導要領(平成29年告示)解説理科編』, p.13.
- 毛利 衛, 黒田玲子 ほか (2016a): 『新編新しい理科』4年, 東京書籍, pp.46-50.
- 毛利 衛, 黒田玲子 ほか (2016b): 『新編新しい理科』6年, 東京書籍, pp.171-172.
- 岡村定矩, 藤嶋 昭 ほか (2016): 『新編新しい科学』1年, 東京書籍, pp.31-33.
- Pearman, G.I (1966): 「The reflection of visible radiation from leaves of some western Australian species」*Aust. Jour. Bio. Sci.*9, pp.97-103.
- 坂上ちえ子, 文田哲雄 (1993): 「色名使用の実態」, 『鹿児島県立短期大学紀要』44, pp.56-57.
- 霜田光一, 森本信也 ほか (2016a): 『中学校科学』1年, 学校図書, pp.170-171.
- 霜田光一, 森本信也 ほか (2016b): 『みんなと学ぶ小学校理科』4年, 学校図書, pp.44-47.
- 霜田光一, 森本信也 ほか (2016c): 『みんなと学ぶ小学校理科』6年, 学校図書, pp.176-177.
- 園池公毅 (2008): 『光合成とはなにか』, 講談社, pp. 58-59.

- 社団法人照明学会 (1990a) : 『光の計測マニュアル』, 日本理工出版会, p.31.
- 社団法人照明学会 (1990b) : 『光の計測マニュアル』, 日本理工出版会, p.161.
- 高 博, 矢吹万寿 (1974) : 「葉の光学的特性および解剖学的特性がその光質－光合成関係に及ぼす影響(1)」 農学気象 29(4), pp.231-234.
- 田中謙介, 鄭黎, 山下伸典 (2002) : 「自作反射率計によるホウ酸の定量分析とその授業実践 (一) : 高等学校の授業実践」 『科学教育研究』 26(2), pp.165-170.
- 塚田 捷, 大矢禎一, 江口太郎, 鈴木盛久 ほか (2016) : 『未来へひろがるサイエンス』 1年, 啓林館, pp.33-34.
- 八杉龍一, 小関治男, 古谷雅樹, 日高敏隆 (2001) : 『岩波生物学事典』 第4版, 岩波書店, p.373.
- 養老孟司, 角屋重樹 ほか(2016a) : 『未来をひらく小学理科』 4年, 教育出版, pp.53-58.
- 養老孟司, 角屋重樹 ほか(2016b) : 『未来をひらく小学理科』 6年, 教育出版, pp.162-164.

第3章 紫外領域における自作紫外領域反射率計の作成とその応用

3-1. はじめに

本章では紫外線を扱う学習の支援として、紫外線反射光を精度高く定量的に扱える、安価で安全な軽量型の自作紫外領域反射率計の開発と応用について述べる。紫外領域は可視光領域と異なり、ヒトにとって知覚できないため、紫外領域を扱う学習は、紫外領域を可視光領域に変換したり定量的に測定したりする工夫が教材として必要になる。ここでは後者の定量的な測定を目的として自作反射率計を作製した。

自作反射率計による可視光での反射率の測定については、様々な活用例が報告されている。高等学校ではホウ酸の定量分析に用いたり（田中ほか，2002）、塩化コバルト(II)紙による水分量の決定に用いたりした例（三好ほか，2012）がある。小学校においては自作反射率計で補色の発見に導いた実践事例（影浦ほか 2 名，2014）や植物の葉の表側と裏側の反射率の差を測定した例がある（山下・喜多，2018）。しかしながら身近な環境に存在する紫外線の反射率を教材化した報告は見当たらない。

紫外線反射光の実験教材としては身近な教材がいくつか考えられるが、本研究では特にモンシロチョウ (*Pieris rapae*) を以下の理由から採用した。まず 1 つめに、モンシロチョウは小学校の飼育教材として広く学校現場で用いられていることである（有馬ほか，2020，石浦ほか，2020，霜田ほか，2020，毛利ほか，2020，養老ほか，2020）。2 つめの理由としてモンシロチョウはアブラナ科の農作物を食草として好むため人間の生活圏内に個体数が多く、入手が容易だからである。

モンシロチョウの♂♀の翅の色は紫外領域においては、外部的に現れる形質が性によって異なる、いわゆる性的二型をとることがわかっている（小原，2003）。チョウ目の昆虫の翅は、表面が鱗粉に覆われているのが一般的で、特にモンシロチョウについては、その鱗粉によって紫外領域の光の反射率が♂♀で異なる。モンシロチョウの翅上に波長が 365 nm 付近の近紫外光を当てると反射光の違いがわかる。写真 3-1 のような可視光の下で撮影した場合は♂♀の表側および裏側ともに白色を呈しているが、写真 3-2 のような近紫外光の下では全て♂が♀よりも暗色で近紫外光を吸収していることがわかる。♂の翅が♀の翅よりも暗色に見える理由としては、鱗粉の中に有する色素顆粒の量において♂の方が♀に比べて極めて多いことが指摘されていた（日高・岡田，1970）。写真 3-3 と写真 3-4 は（株）日立ハイテクノロジーズ走査型電子顕微鏡 TM4000 を用いて本研究のモンシロチョウの♂と♀の翅の鱗粉を撮影したものである。格子状の構造に明らかな違いが観察され、♂には格子の中に色素顆粒が観察されるが、♀にはそのような色素顆粒が極めて少ない。また、文献（日高・岡田，1970）によれば、♂♀の色素顆粒に形態上の差はないとされている。色素顆粒の成分はロイコプテリンを含むプテリジン色素であるという示唆もなされているが（Makino ほか，1952，和久・北川，1986）、紫外線吸収物質である尿酸とプテリン類の組み合わせによる（藤条，1972）という報告や総プテリジン量には有意な雌雄差は認められず、その組成比と尿酸量に雌雄差が出ているという結果も出されており（福島ほか，2003）、紫外線吸収成分はこれらの複合的な要因とみなされている。ただ、先行研究は格子状の構造内の色素顆粒が紫外光を吸収することで反射光に♂♀の差を生じさせていることではほぼ一致しており、自作紫外領域反射率計での測定はこの色素顆粒による反射の紫外線強度を測定することになる。



写真3-1 可視光下でのモンシロチョウの翅の色（左側は表側で右側は裏側。上段は♂で下段は♀）（筆者撮影）



写真3-2 紫外光（ $\lambda=365$ nm 付近）下でのモンシロチョウの翅の色（左側は表側で右側は裏側。上段は♂で下段は♀）（筆者撮影）

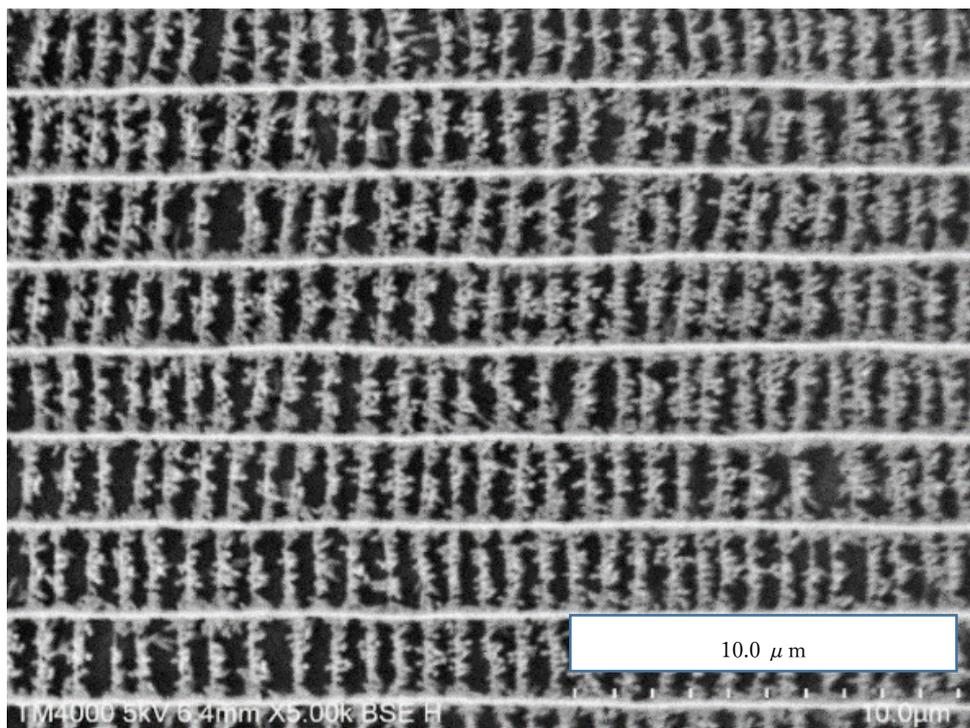


写真3-3 モンシロチョウ♂鱗粉の走査型電子顕微鏡
TM4000 による写真（格子間にあるのは色素顆粒）

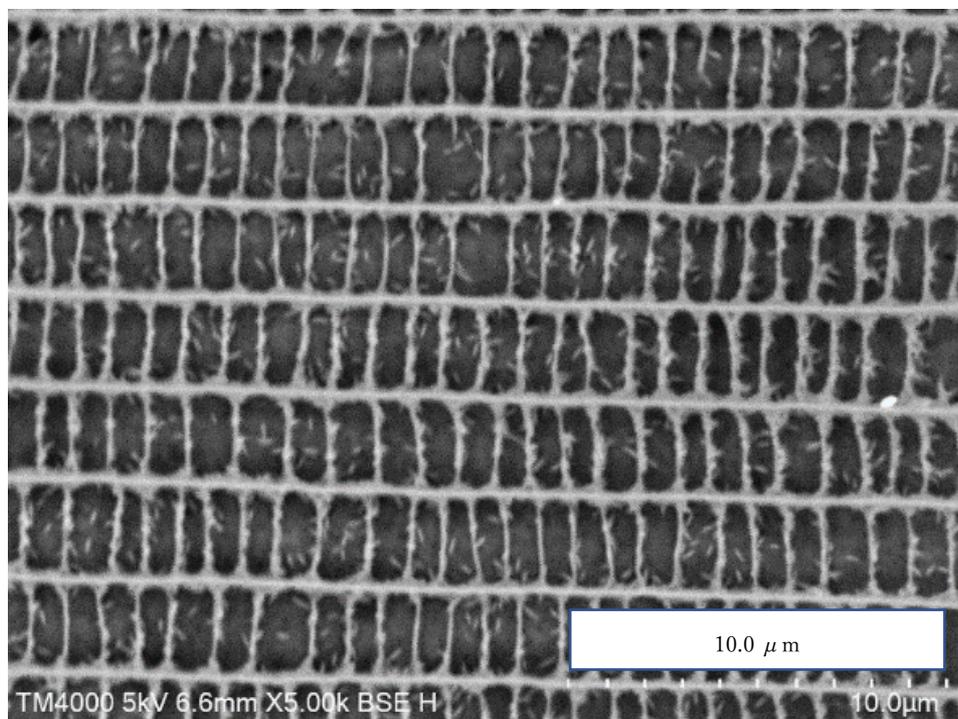


写真3-4 モンシロチョウの♀の鱗粉の走査型電子顕微鏡
TM4000 による写真（格子間に色素顆粒が観察
されにくい。）

博物館等ではそうしたモンシロチョウの♂♀の違いを、紫外領域のブラックライトを使用して反射光による判別を行う実践（小川，2018）が報告されている。ただ、生物を対象とした実験では一般的に個体差が出やすいため、多様性の存在を示唆したり、数値の変化が示している意味を検討したりするための支援には、定量化の実験は有用である。市販のブラックライトに換えて安価な紫外領域のLEDを用い、軽量な反射率計を開発できれば個別実験も可能となり、学習者のテーマに即した、主体的な探究学習も期待できる。

3-2. 自作紫外領域反射率計の作成と測定方法、原理およびリファレンスの検討

反射率計は通常光源と検出器の組み合わせで反射光を測定する。表面の小さな凹凸が存在する今回の測定対象のような場合は拡散反射光成分が大きいため、小さい入射角の拡散反射を評価する測定方法を採用した（宮下・小迫，1975）。自作紫外領域反射率計の作成は、可視光での自作反射率計を参考にした（山下・喜多，2018）。

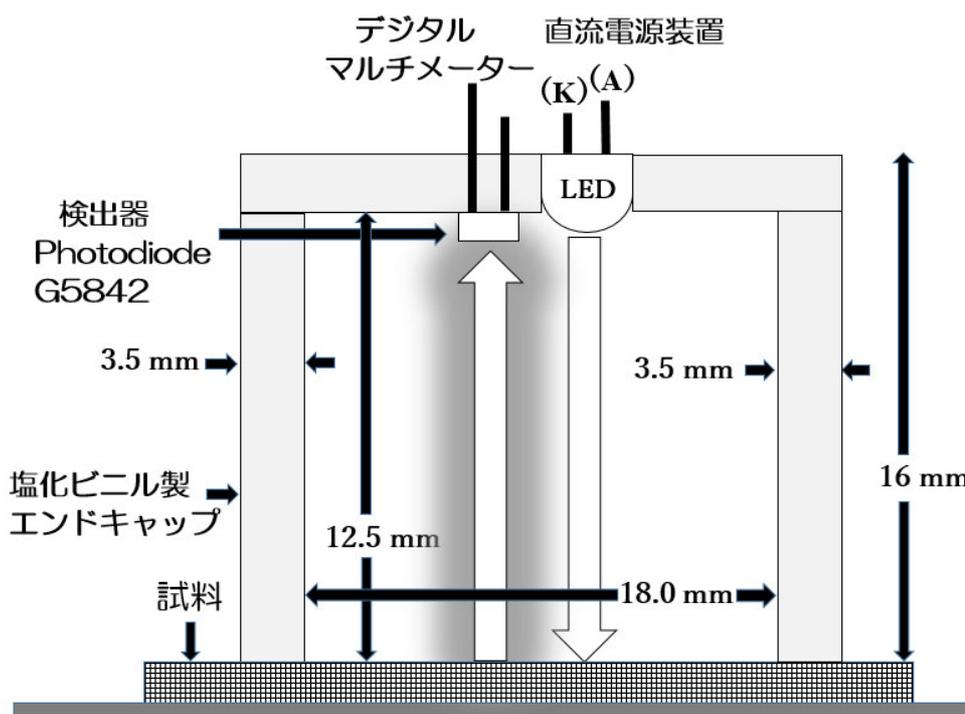


図3-1 自作紫外領域反射率計の概念図

今回開発した紫外領域での自作反射率計は、測定原理がブラックボックス化しないよう材料や配線に配慮した。材料としては LED（光源）やフォトダイオード（検出器）を用い、検出器にテスターを接続するだけで計測可能にした。また、反射光を計測する原理が学習者に理解できるように内部が直接観察できるようにした。

3-3. 自作紫外領域反射率計の材料とその作成方法

ボディは TS-C13 ポリ塩化ビニル (PVC) 製エンドキャップを用い、図 3-1 のように天井部に LED 取り付け用の $\phi 5$ mm の穴を開けた。検出器にサンプルからの十分な反射光レンジと感度を与えるために、検出器から試料までの距離は小さくした。具体的には塩化ビニル製エンドキャップの側面を、親指と人差し指で無理なく支えることができる程度の高さ（16 mm 程度）まで切り落とした。また、図 3-1 の底面にあたる円の面積は 2.5 cm^2 で、測定はこの面積で行った。

光源装置としては $\phi 5$ mm 砲丸型近紫外 LED（ピーク波長 $\lambda = 365 \text{ nm}$ ）を用い、これに 75Ω の抵抗を取り付けた。検出器としては最大感度波長 370 nm の（株）浜松ホトニクス製フォトダイオード G5842（PD と略）を用い、PVC キャップの天井の裏側に強力両面テープを用いて固定した。

(1) 自作紫外領域反射率計の測定方法

拡散照射の反射光全体の強度によってフォトダイオードに生じる起電力をデジタルマルチメーターで評価した。まず、自作紫外領域反射率計を用いて標準拡散反射板、非蛍光紙（（株）大王製紙製 PPC 用紙クレオ）、蛍光コピー用紙（（株）Canon マーケティング製 CS-068）、紫外線吸収が見込まれる厚さ 5 mm の黒ゴムの 4 種類に LED 印加電圧をそれぞれにかけ、その際の PD 起電力を測定した。それらの結果をまとめたものが図 3-2 である。さらにこの図で PD 起電力 $0 \text{ mV} \sim 1150 \text{ mV}$ あたりが LED 印加電圧と良好な直線関係を示すことから、この直線部分のみを図 3-3 に示した。反射光レンジをより大きくとり、試料の値の比較を容易にすることと、野外使用の際の電源に乾電池（ 1.5 V 3 個直列）使用を考慮に入れ、試料測定の際には印加電圧を 4.5 V に固定して起電力を測定することにした。

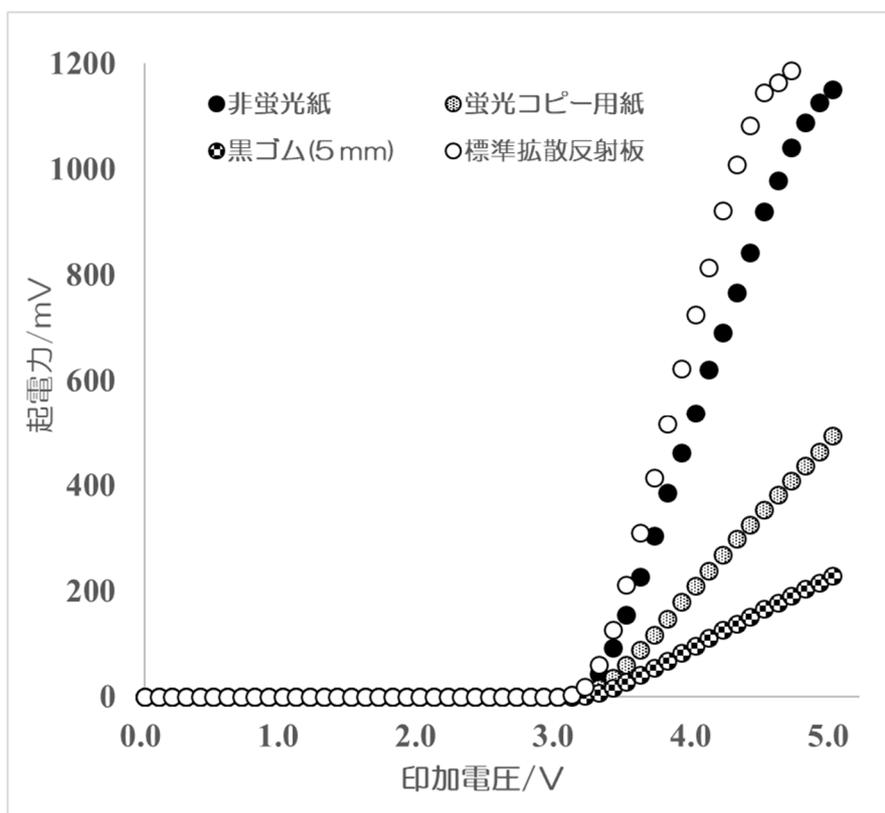


図3-2 自作紫外領域反射率計での起電力と印加電圧の関係（光源はLED $\lambda=365$ nm）

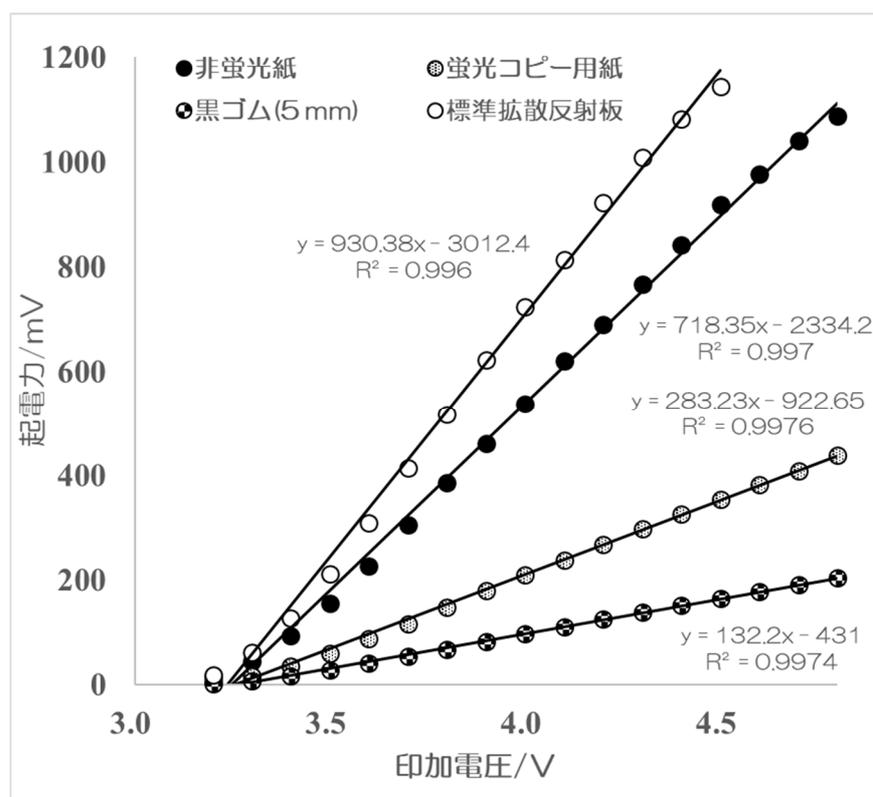


図3-3 自作紫外領域反射率計での起電力と印加電圧の関係（直線部分，光源はLED $\lambda=365$ nm）

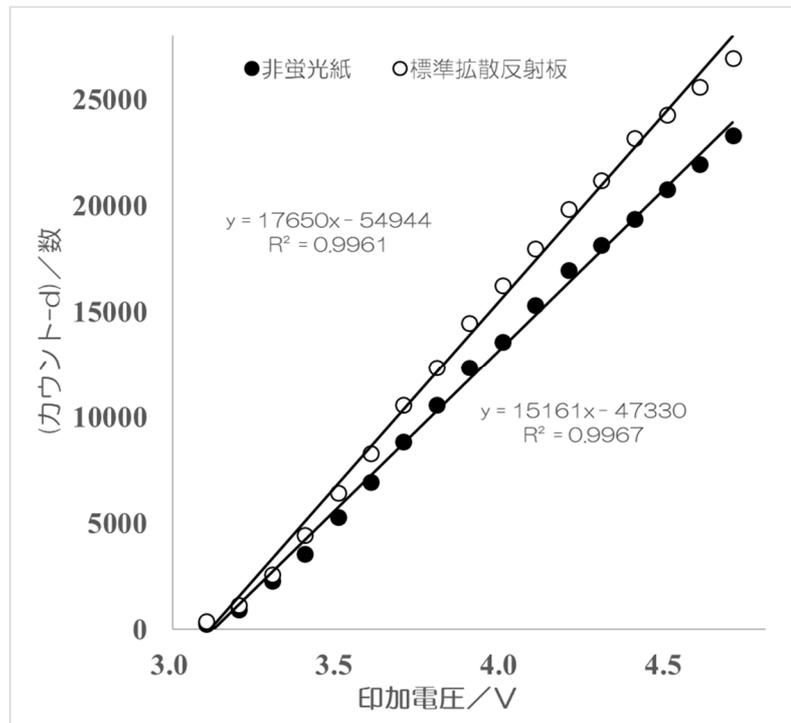


図3-4 MAYAでの(カウント数-d)と印加電圧の関係
(光源はLED $\lambda=365$ nm, dark 値 d=1980)

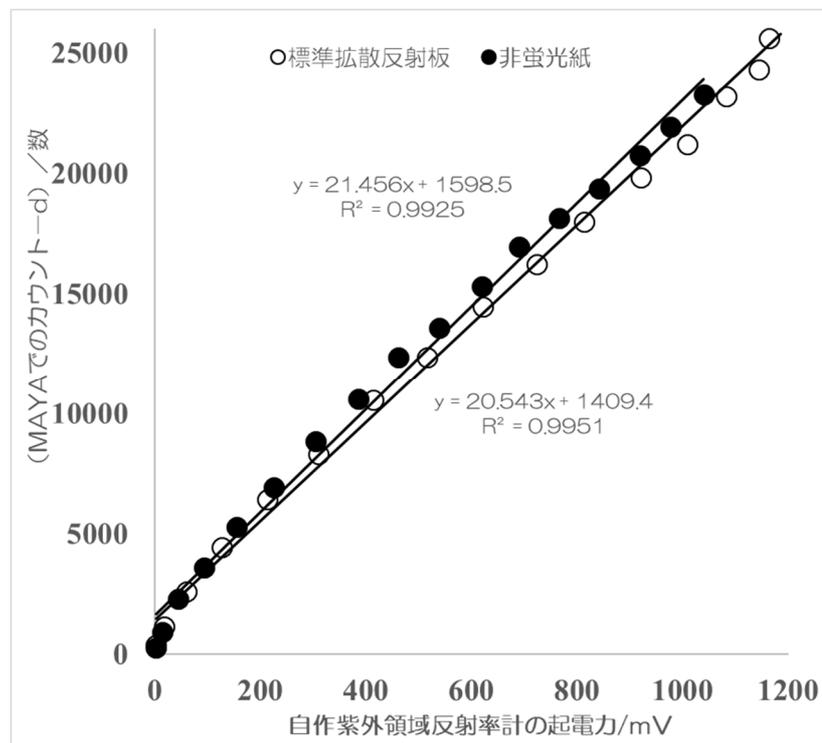


図3-5 同じ印加電圧での自作紫外領域反射率計と
MAYAによるカウント数との相関
(光源はLED $\lambda=365$ nm)
F (17, 17)=0.99, $p<.05$
傾き: $t(34)=1.524$, $p<.05$
切片: $t(34)=0.48$, $p<.05$

(2). 分光反射率計 MAYA での測定方法

自作紫外領域反射率計の測定精度を検討する際には、OCEAN OPTICS 製分光反射率計 MAYA での測定値と比較した。MAYA では反射光全体の強度を光量に対応するカウント数で表すが、入射光がない場合のカウント数を dark 値 (d と省略) とすると、対象物からの反射光強度は (カウント数 - d) で表される。MAYA での測定は、自作紫外領域反射率計のフォトダイオードによる検出の代わりに MAYA の光ファイバー検出部を挿入し、反射光を MAYA 分光器へ導いた。測定試料は同一個体、同一部位で行い、積分時間 20 ms, 平均測定回数 32 回, スムージングは 10 回の normal 状態で得た値を用いた。測定の際の dark 値は 1980 として計算した。図 4 は自作紫外領域反射率計の測定値と比較するために、LED ($\lambda = 365 \text{ nm}$) 光源での分光反射率計 MAYA による非蛍光紙と標準拡散反射板の測定値をグラフにしたものである。

リファレンスとしての標準拡散反射板は、酸化マグネシウム板 (MgO) を用いるのが一般的であるが、教育現場で入手が容易なコピー用印刷用紙 (非蛍光紙) を基準 (リファレンス) にできないか検討した。まず標準拡散反射板を試料にした際の、自作紫外領域反射率計の起電力の値と、同じ印加電圧に対応する MAYA のカウント数との関係を調べたところ、図 3-5 のように相関の高い直線関係になることがわかった。また、非蛍光紙を試料にした際の自作紫外領域反射率計の起電力の値と、同じ印加電圧に対応する MAYA のカウント数との関係も、図 3-5 の通り相関の高い直線関係になることがわかった。

次にこれら 2 つの回帰直線に有意な差があるかどうかを文献 (市原, 2010) に基づき検証した。両群とも MAYA によるカウント数は両側確率 5% の F 検定によって等分散であることを確認した後、傾きの差の検定と切片の差の検定を両側確率 5% の t 検定を行ったところ、2 つの回帰直線の傾きおよび切片に有意な差は認められなかった。そこで非蛍光紙をリファレンスに設定できると判断し、採用した。

3-4. 測定の原理

試料の反射率 ρ_t は、標準拡散反射板の反射率を ρ_s 、これらの比を R とすれば

$$\rho_t = \rho_s \cdot R \cdots \textcircled{1}$$

で求められる (社団法人照明学会, 1990)。比 R は、標準拡散反射板の検出器の値を r、試料の検出器の値 (起電力) を v、入射光を 0 にした場合の検出器の値 (起電力) を d とおくと

$$R = (v-d) / (r-d) \cdots \textcircled{2}$$

で与えられる。 $\rho_s = 1$ とし、 $r \gg d$ かつ $v \gg d$ の場合で、かつ $d \approx 0.00$ であれば $\rho_t = v / r$ とできる。(山下・喜多, 2018)。

ここで非蛍光紙の起電力を n とすると図 3 では印加電圧 4.5 V をかけたときの非蛍光紙の起電力が標準拡散反射板の 80% を示すため、標準拡散反射板を基準にした試料の反射率は

$$\rho_t = v / r = v / (n / 0.8) \cdots \textcircled{3}$$

とおける。例えば実際の測定において、リファレンスである非蛍光コピー用紙に 4.5 V の印加電圧をかけたときの起電力の値 r が 800 mV、測定試料の起電力の値 v が 600 mV、d が 0 mV とすると、 $\textcircled{2}\textcircled{3}$ より

$$R = ((600-0) / (800-0)) * 0.8$$

$$= 0.6$$

になる。このように測定試料の反射率を単独で求めたい場合は非蛍光紙の起電力値から標準拡散反射板での反射率に換算できる（算出法 i）。なお同じ条件下での分光反射率計 MAYA では 86.5% を示した。

一方、いくつかの測定試料を同時に対比したい場合は対応する 2 つの試料の起電力の値から起電力の比を求める方法が簡便である。2 つの測定試料の起電力をそれぞれ v_1 , v_2 , 反射率を ρ_1 , ρ_2 とおき, $r \gg d$ かつ $v \gg d$ の場合で, かつ $d \doteq 0.00$ であればリファレンスの起電力の値は消去されるため,

$$\rho_1 / \rho_2 = ((v_1 / r) * 0.8) / ((v_2 / r) * 0.8)$$

$$= v_1 / v_2$$

となり, 標準拡散反射板での基準値への換算を経ずに起電力の比のみで算出できることになる（算出法 ii）。なお今回の計測ではいずれも $r \gg d$ かつ $v \gg d$, $d \doteq 0.00$ であった。

3-5 実験教材用の試料入手と試料測定までの手順

自作紫外領域反射率計を用いて, 実験教材用としてのモンシロチョウの♂♀の判別を行った。

モンシロチョウの全ての個体は, 岡山市内において, 2019 年の 6 月から 10 月にかけて捕虫網を使用して採集した。採集したモンシロチョウを展翅板に固定した後, 十分に乾燥させた状態で保管したものを試料として用いた。翅にダメージを受けていない良好な♂20頭, ♀15頭を選択し, 翅のみをはさみで丁寧に切り離した後, 前翅表側, 前翅裏側, 後翅表側, 後翅裏側の各部位について自作紫外領域反射率計を用いて反射率の測定を行った。自作紫外領域反射率計での測定は, 厚さ 5 mm の黒色ゴム板の中央に試料を置き, さらに図 1 の自作紫外領域反射率計の中央が試料の中央部にくるように置いて, 光源の LED に印加電圧 4.5 V をかけた後, デジタルマルチメーターの表示が安定した後の数値を読み取った。

3-6. 結果

光源となる LED の波長は, 分光反射率計 MAYA の計測データをもとに分光反射率 (%) の測定波長を $250 \text{ nm} < \lambda < 450 \text{ nm}$ に決定した。この範囲では, モンシロチョウの♂♀における前翅表側の分光反射率は図 6 と図 7 の通りであり, これは前翅裏側, 後翅表側, 後翅裏側のいずれにおいても自作紫外領域反射率計で用いた光源の LED の波長 365 nm を含む 320~380 nm 周辺で差が大きいことを確認した。自作による紫外領域反射率計でのモンシロチョウの♂♀の翅の反射率の平均値を算出法 i に沿って標準拡散反射板に換算して図 3-8 に示した。図 3-8 では t-検定 (有意水準 5% 片側検定) を行った結果, 翅のどの部位においても♀の反射率は♂の反射率に比べて有意に大きいことがわかった。一方, 分光反射率計 MAYA で測定した結果を図 3-9 で示した。同じく標準拡散反射板に換算した反射率の平均値に関して t-検定 (有意水準 5% 片側検定) を行った結果, 自作紫外領域反射率計とほぼ同様に有意な差が出ることもわかった。また, 同一個体のそれぞれの部位の表側と裏側の比の値を取った結果を算出法 ii に沿って図 3-11 に示した。得られた値についての t-検定 (有意水準 5% 片側検定) を行った結果, ♂は前翅・後翅ともに裏側の反射率が, ♀は前翅・後翅ともに表側の反射率が有意に大きいことがわかった。

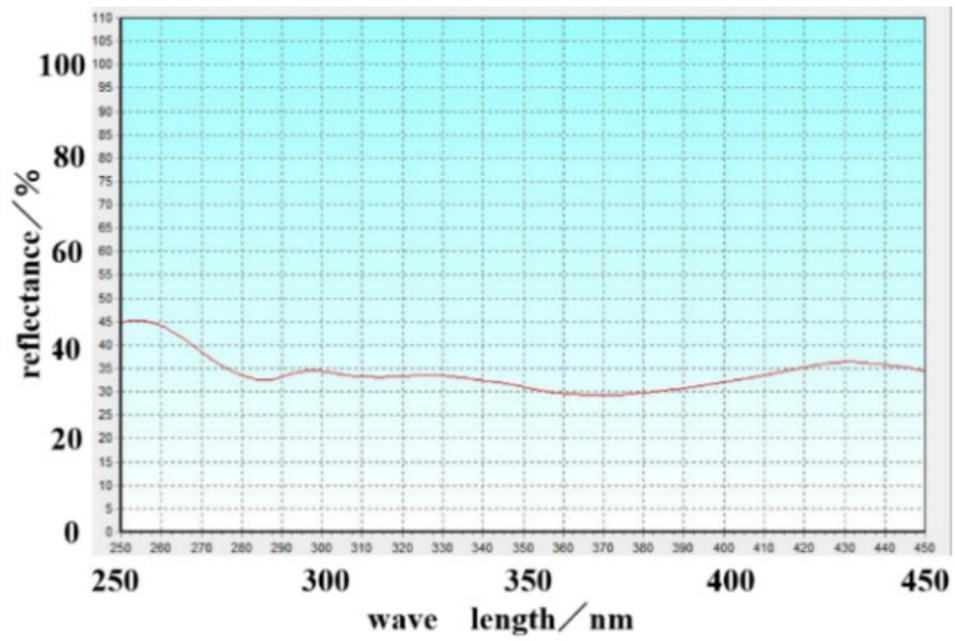


図 3-6 MAYA によるモンシロチョウ♂前翅表側の分光反射率 (単位は%, 250 nm λ <math>< 450</math> nm)

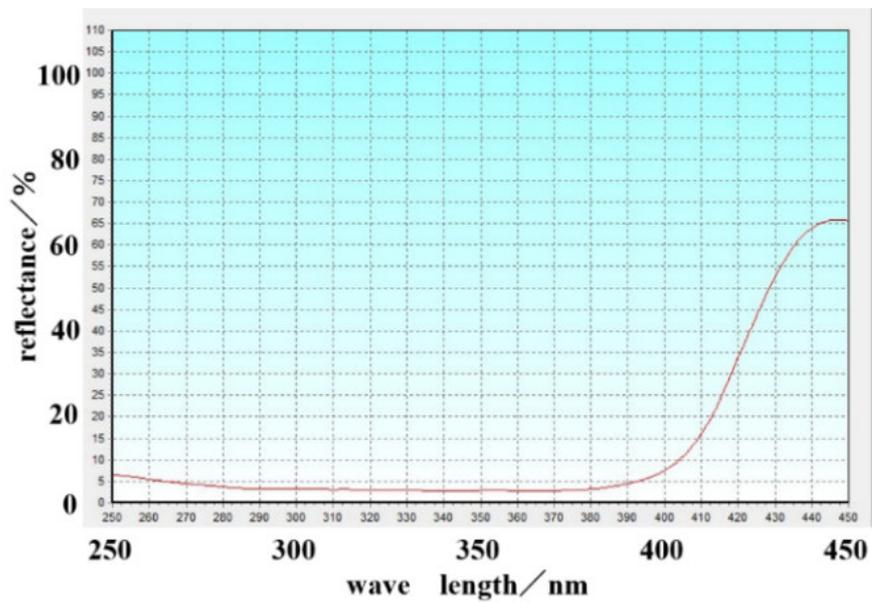


図 3-7 MAYA によるモンシロチョウ♀前翅表側の分光反射率 (単位は%, 250 nm λ <math>< 450</math> nm)

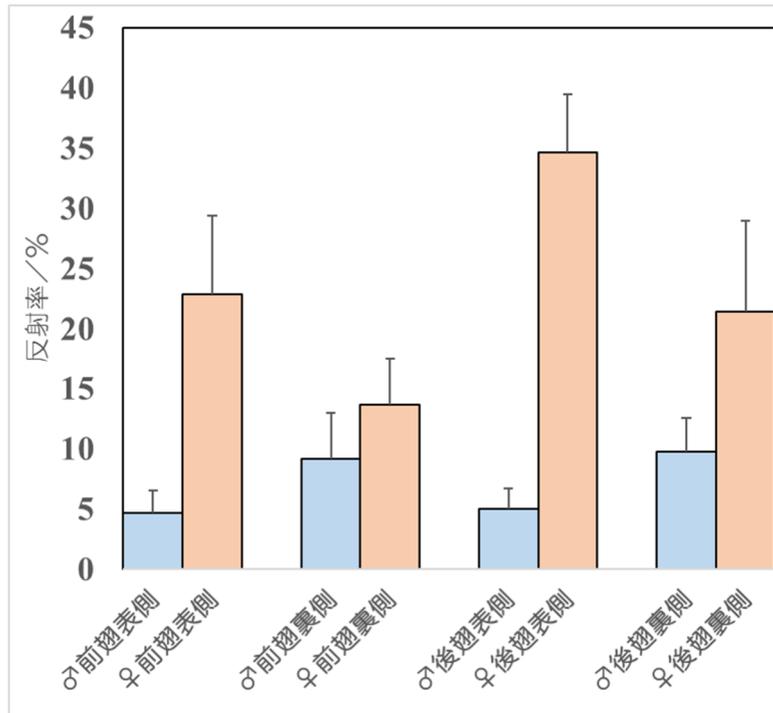


図 3-8 自作紫外領域反射率計によるモンシロチョウの翅の反射率の♂♀平均値
(算出法 i による換算) (N=20 (♂), N=15 (♀))

前翅表側 F (19,14) ≒ 0.00, p < .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05
 前翅裏側 F (19,14) ≒ 0.00, p < .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05
 後翅表側 F (19,14) ≒ 0.00, p < .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05
 後翅裏側 F (19,14) ≒ 0.00, p < .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05

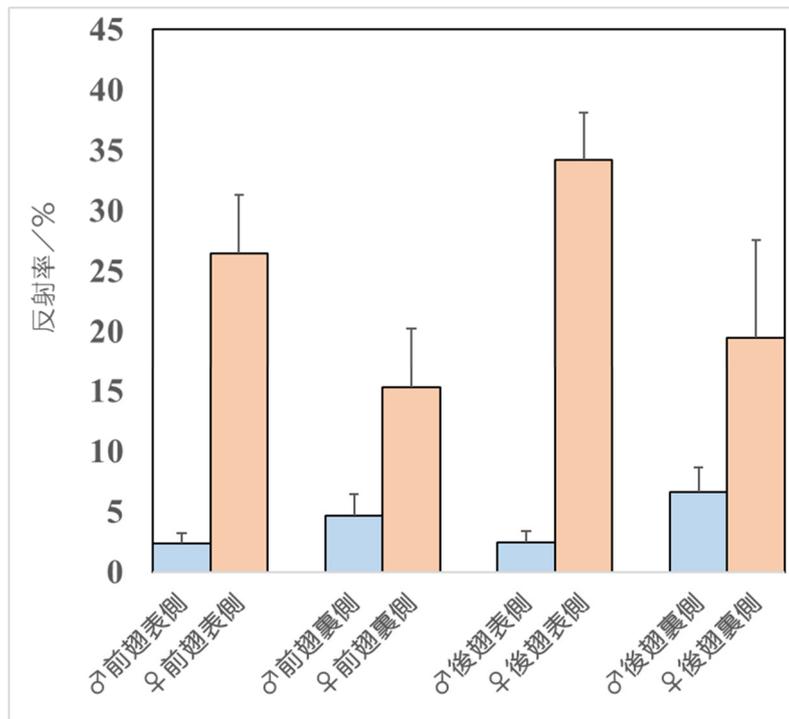


図 3-9 分光反射率計 MAYA によるモンシロチョウの翅の反射率の平均値
(算出法 i による換算) (N=20 (♂), N=15 (♀))

前翅表側 F (19,14) ≒ 0.00, p < .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05
 前翅裏側 F (19,14) ≒ 0.77, p > .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05
 後翅表側 F (19,14) ≒ 0.00, p < .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05
 後翅裏側 F (19,14) ≒ 0.00, p < .05 , t (33) ≒ 0.00 p < .05

3-7. 考察

自作紫外領域反射率計の定量的な精度について検討するために、自作紫外領域反射率計での反射率の平均値を示した図3-8と、図3-9で示したMAYAでの反射率の平均値の相関をとって比較してみたところ、図3-10のような良好な直線関係が得られることがわかった。自作紫外領域反射率計のデータとMAYAのデータとの差は自作紫外領域反射率計での測定面積がMAYAの測定面積(ϕ は2mm程度)よりも極めて大きいことから、モンシロチョウの翅の乱反射や模様等による影響と考えられる。また、同じ個体の表側と裏側の反射率を比較するために算出法(ii)を用いて両者の比を取ってみたところ、図3-11では翅の全ての部位において♂の翅は♀の翅よりも紫外光を吸収しており、その中でも特に前翅と後翅の表側の差が大きく、性的二型が顕著に現れていた(Obara, 1970)。図3-11のように♂の反射率比(表側/裏側)は前翅後翅ともに裏側の0.5以下であり、逆に♀の反射率比(表側/裏側)は1.73以上の反射率を示した。顕著な性差による近紫外光の吸収が見られるだけでなく、♂の表側と裏側の近紫外光の吸収差が有意に存在し、同様に♀についても表側と裏側の近紫外光の吸収差が有意に存在していた。

図3-11で用いた算出法iiは、標準拡散反射板への換算を経ずに試料同士の起電力の比で比較できることから、対応する試料の測定を授業などの限られた時間内で行う場合は有用と思われる。

市販の分光反射率計は高価であり、生徒の個別実験やグループでの使用は困難である。しかし本研究で開発した自作紫外領域反射率計は安価(デジタルマルチメーターを除けば1式で650円程度)でいくつも作成することができるため、通常の授業でも一人一人に与える(または作製させる)ことで、個別実験が可能である。また、測定部の内部を直接観察でき、原理を生徒に簡潔に説明することができる。SSHの課題研究などでは、自然の仕組みや生物の巧みな戦略に触れながら、生徒の創意工夫を容易に取り込むことが可能で、原理は同じでも用途ごとに特化した反射率計用プローブを作製させることもできる。4.5Vの印加電圧での測定では、単4乾電池3個の直列つなぎで、野外での使用も可能である。ただ、学校現場で自作紫外領域反射率計を実験で使用する場合は、UVカットを施したサングラス等で身体の保護に徹することは安全上当然であり、使用法を事前に指導する必要がある。

自作紫外領域反射率計は紫外光への理解を支援する教材としてモンシロチョウだけでなく、他の実験教材での利用が期待できる。身の回りの生活の中には紙幣の紫外線処理(偽札防止)、紫外光で光る食品や岩石鉱物など紫外線に関係する材料は数多く存在する。本研究の自作紫外領域反射率計は蛍光強度ではなく、どれだけ紫外線を吸収しているかを示している。紫外線吸収における発光である蛍光との関係を、図3-3の非蛍光紙と蛍光コピー用紙の起電力の差から、授業の導入に示すことも可能である。

今回の研究ではチョウの翅のような平面上の試料を取り扱ったが、今回よりも測定面積が小さい試料や、甲虫の翅のように曲面をもつ試料に対しても対応できる反射率計の作成は今後の課題である。

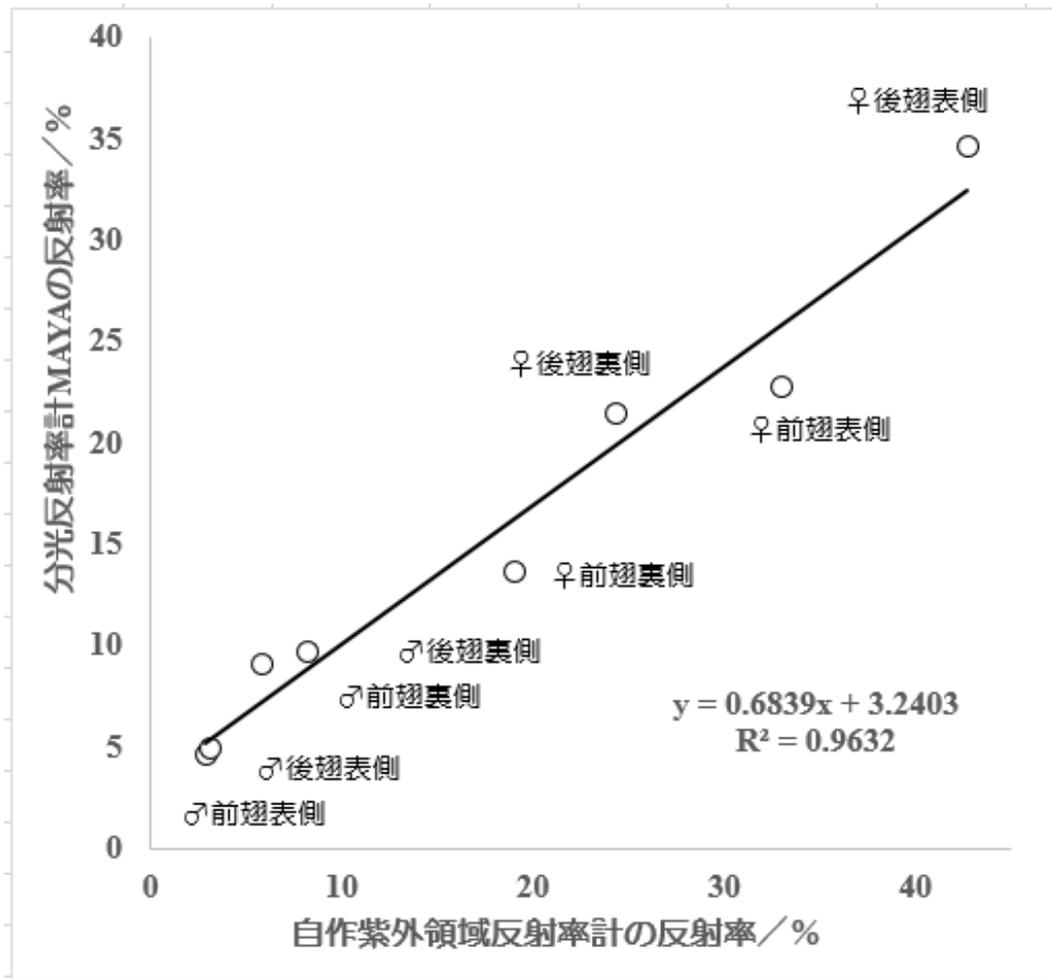


図3-10 自作紫外領域反射率計と分光反射率計 MAYA による、モンシロチョウの各部位の反射率（平均値）の相関
 (いずれも印加電圧 4.5 V, 光源は LED $\lambda=365$ nm)

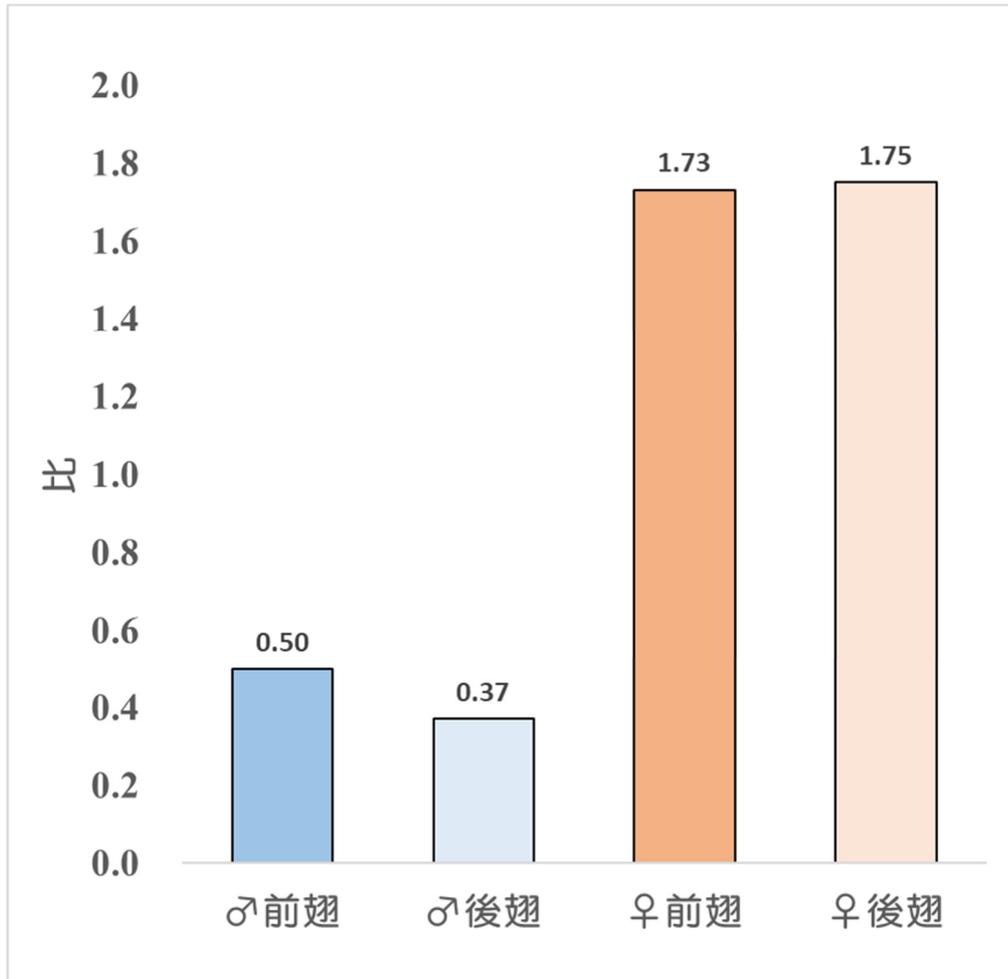


図3-11 モンシロチョウの同じ個体での前翅と後翅の（表側／裏側）の比の比較（算出法 ii）（N=20（♂），N=15（♀））

前翅（♂）F (19,19) ≐ 0.00, p < .05 , t (38) ≐ 0.00 p < .05
 後翅（♂）F (19,19) ≐ 0.00, p < .05 , t (38) ≐ 0.00 p < .05
 前翅（♀）F (14,14) ≐ 0.99, p > .05 , t (28) ≐ 0.00 p < .05
 後翅（♀）F (14,14) ≐ 0.00, p < .05 , t (28) ≐ 0.00 p < .05

引用文献

- 有馬朗人ほか 58 名 (2020) : たのしい理科 3 年, 大日本図書, 24-43.
- 福島慶子ほか 4 名 (2003), モンシロチョウ, *Pieris rapae crucivora* 翅の色彩発現に伴う GTP-CH_I_の酵素
活性及び遺伝子発現の解析, 日本蚕糸学会第 73 回学術講演会講演要旨集 2003 (0), 1-1.
- 日高敏隆, 岡田益吉 (1970) : 走査電子顕微鏡による観察で認められたモンシロチョウ鱗粉の
性差, 動物学雑誌, 79, 181-184.
- 市原清志 (2010) : バイオサイエンスの統計学, 南江堂, 206-222.
- 石浦章一・鎌田正裕ほか 105 名 (2020) : わくわく理科 3, 新興出版社啓林館, 22-35.
- 影浦美礼ほか 2 名 (2014) : 自作反射率計を用いる補色の発見とその授業実践, 日本理科教育
学会全国大会要
項, 64, 490.
- Makino, K. ほか 3 名 (1952) : Sex in *Pieris rapae* L., and the pteridin content of their wings,
Nature, 4335,
933- 934.
- 宮下正義, 小迫修治 (1975) : 簡易反射率計, 昭和 50 年照明学会全国大会要旨集, 67. 三
好美恵ほか 2 名 (2012), 塩化コバルト (II) 紙を用いた水分量の決定とその土壌成分への
応用, 日本科学教育学会年間論文集, 36.
- 毛利衛・大島まりほか 100 名 (2020) : 新しい理科 3, 東京書籍, 22-35.
- 小原嘉明 (2003) : モンシロチョウ, 中央公論新社, 14-27, 39-40, 214-216.
- Obara, Y. (1970) : Studies on the Mating Behavior of the White Cabbage Butterfly, *Pieris rapae
crucivora*
Boisduval, Z. *vergl. Physiologie* 69, 99-116.
- 小川誠 (2018) : 徳島県立博物館におけるブラックライトを用いた自然教育の実践, 徳島県
立博物
館研究報告, 28, 99-106.
- 霜田光一・森本信也ほか 44 名 (2020) : みんなと学ぶ小学校理科 3 年, 学校図書, 46-65.
- 社団法人照明学会 (1990) : 光の計測マニュアル, 日本理工出版会, 161.
- 田中謙一ほか 2 名 (2002) : 自作反射率計によるホウ酸の定量分析とその授業実践 (一) -
高等学校の授
業実践 -, 科学教育研究, 26(2), 165-170.
- 藤条純夫 (1972) : チョウの翅の尿酸とその代謝物, 生物と化学, 10(1), 63-67.
- 和久義夫・北川全宏 (1986) : モンシロチョウ鱗粉顆粒の形成過程, 日本応用動物昆虫学会
誌, 30(1), 35-
42
- 山下浩之・喜多雅一 (2018) : 自作反射率計を用いた葉の色の定量化, 教育実践学論集, 20,
121-128.
- 養老孟司・角屋重樹ほか 32 名 (2020) : みらいをひらく小学理科 3, 教育出版, 38-53.

第4章 赤外領域における自作赤外領域反射率計の作成とその応用

4-1. はじめに

これまで光の可視領域および紫外領域における自作反射率計を作成し、試料の反射率で定量的に物性を比較することを試みてきたが、本章では赤外線を扱う学習の支援として、赤外線反射光を精度高く定量的に扱える、安価で安全な軽量型の自作赤外領域反射率計の開発と応用について述べる。赤外領域は紫外領域と同様に、可視光領域と異なり、ヒトにとって知覚できないため、赤外領域を扱う学習は赤外領域を可視光領域に変換したり定量的に測定したりする工夫が教材として必要になる。

赤外領域の反射を利用した研究は数多く報告されている。例えば乾草の成分および栄養価の推定に利用した研究(水野 ほか, 1988)や赤外領域による半導体の不純物分布の検出(阿部 ほか, 1967)などがある。赤外領域に関連する教科書の表記については中学校1年生のエネルギー領域でコラムとして掲載されている他(例えば有馬 ほか, 2020)、高等学校「物理基礎」では、電磁波の利用として赤外線の観察実験(例えば三浦 ほか 13名)が、「物理」では光の性質や電磁波の種類として、「科学と人間生活」では見えない光とその応用として(例えば竹内 ほか 16名)赤外線が取り上げられている。しかしながら赤外領域の自作反射率計による測定および光に関する理科学習への応用についてはほとんど報告されていない。赤外領域は輻射熱を測定するサーモグラフィやリモコンスイッチなど日常生活に頻繁に活用される現状があることから、その原理や応用について、児童生徒に実験を通して定量的に赤外領域についての理解を促進することはエネルギー領域の学習として意義がある。

4-2. 材料と方法

材料としては、光源として近赤外領域 LED ($\phi=5\text{ mm}$, $\lambda=940\text{ nm}$) を使用し、電流制限抵抗として 30Ω を接続した。検出器としては光変調型フォトダイオード(浜松ホトニクス株式会社製 S4282-51) を使用し、本体は塩化ビニル製水道用 HI 継手管で作成した。継ぎ目は全てプラスチック用接着剤で接合し、接合部はさらに黒色のビニルテープで覆った。

赤外領域反射率計の概念図は図5-1の通りである。天井の中央部分に近赤外領域 LED を固定し、近赤外照射された赤外領域の光を拡散反射させ、その間接照度を反射光としてデジタルマルチメーターで測定した。

測定は、サンプルが自作赤外領域反射率計の中央部にくるように 5 mm 黒色天然ゴムシートの上のせ、デジタルマルチメーターが示す数値が安定してから行った。

検量線は黒体に近い素材から鏡面体に近い3つの素材(黒色、白色塩ビ板、平面鏡)まで試したところ、全ての素材で起電力が $100\text{ mV}\sim 300\text{ mV}$ の間で1次線形になることがわかったため(図5-2)、起電力の傾きの値が最も低い黒色天然ゴムを採用した。なお、電圧に関しては、野外でも測定できるように乾電池1個(1.5 V)で測定可能にした。

自作赤外領域反射率計における試料の測定値については F 検定を行った後、t 検定を用いて、平均値に有意な差があるかどうかを比較検討した。

葉の試料としては、岡山理科大学キャンパスで採集したアカメガシワ (*Mallotus japonicus*) 10枚、コナラ (*Quercus serrata*) 19枚、ソメイヨシノ (*Cerasus \times yedoensis*) 15枚の3種を用いて葉の表側と裏側の起電力を測定した。

水分の測定に関してはパーライトとバーミキュライトをシャーレに厚さ約 5 mm に敷き

詰め、純水 5 mL を加えて 5 回測定を行った。水は波長が 900 nm 以上の近赤外領域においてはやや高い吸収を持つため物体表面上に水分がある場合、近赤外領域の波長における反射率は小さくなる（奥山ほか，2019）性質を利用した。

食肉各部位に関してはスーパーで購入した国産牛サーロイン，国産牛脂肪部，米国産豚ロース，米国産豚脂肪部の 4 部位を厚さ 10 mm に調整して 5 回測定を行った。

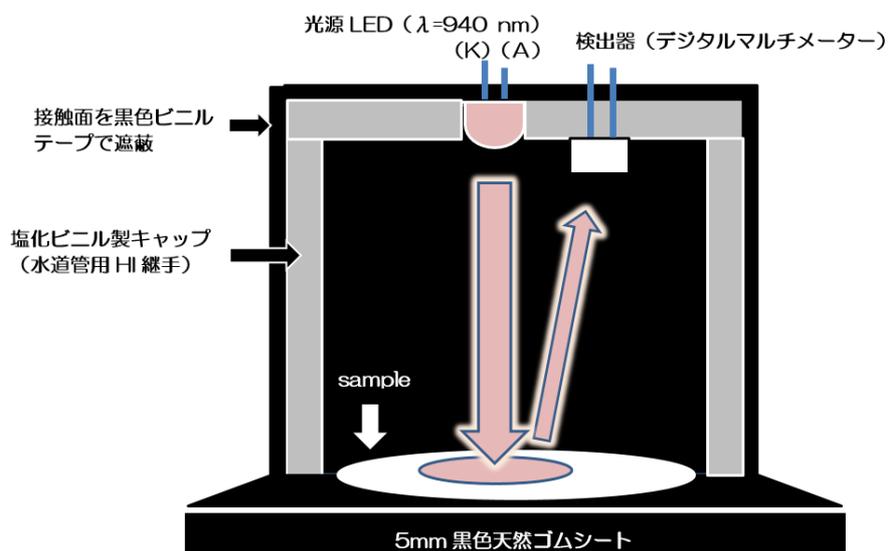


図 4-1 自作赤外領域反射率計の概念図

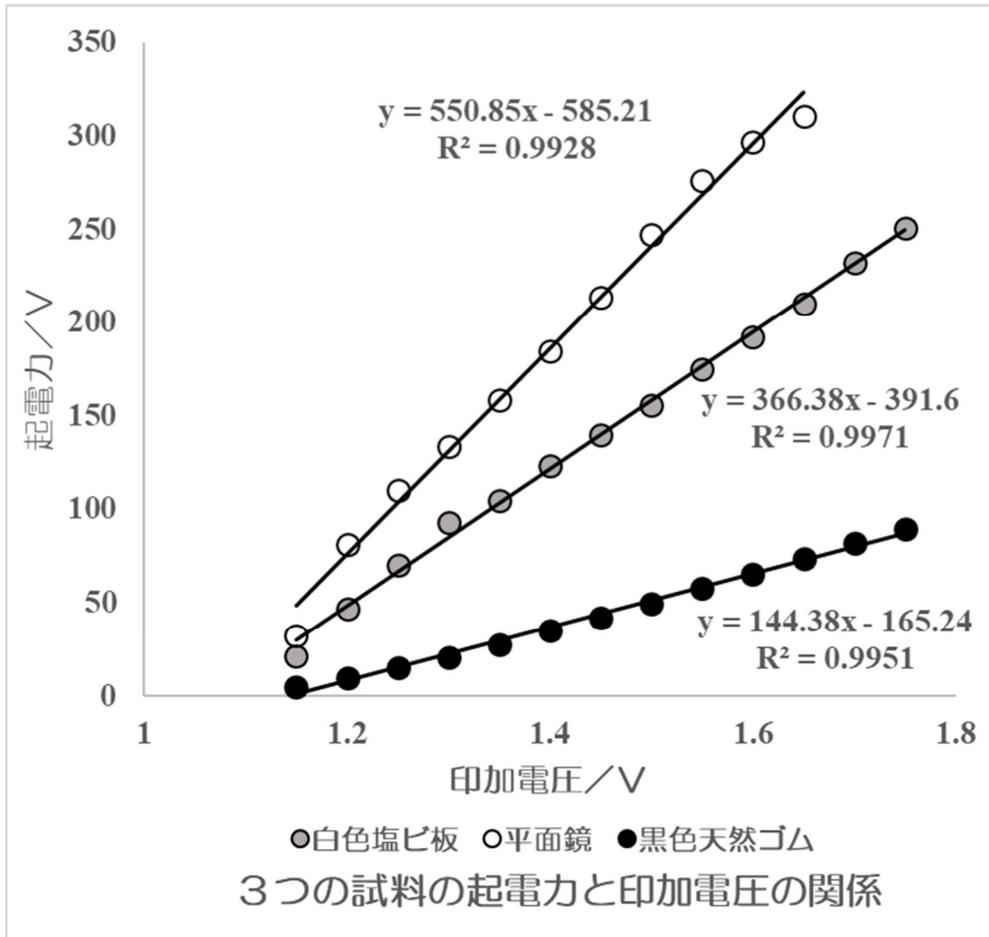


図4-2 3つの試料の起電力と印加電圧の関係

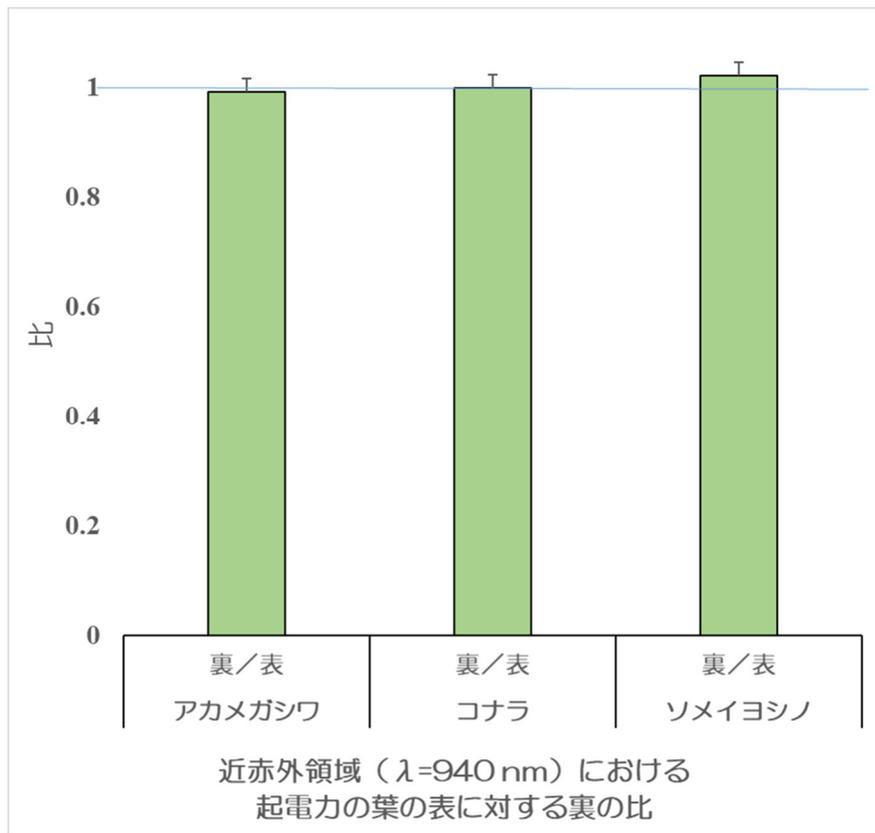


図4-3 近赤外領域 ($\lambda=940\text{ nm}$) における起電力の葉の表に対する裏の比

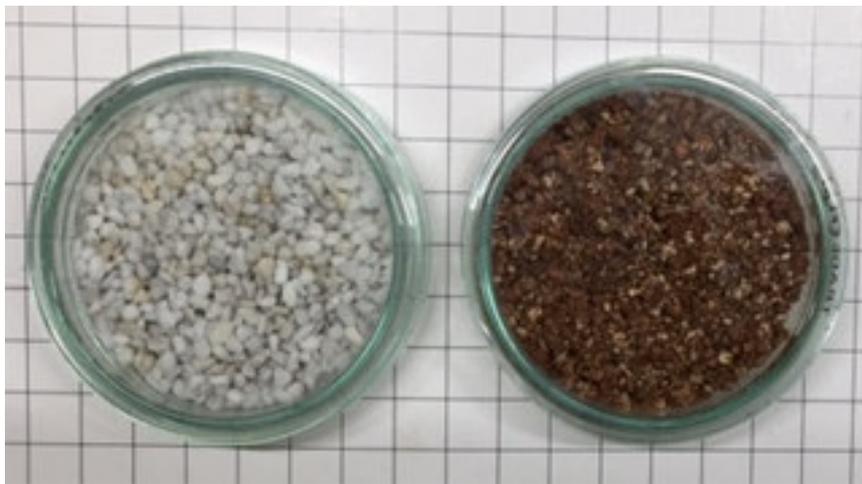


図4-4 パーライト (左) とバーミキュライト (右)

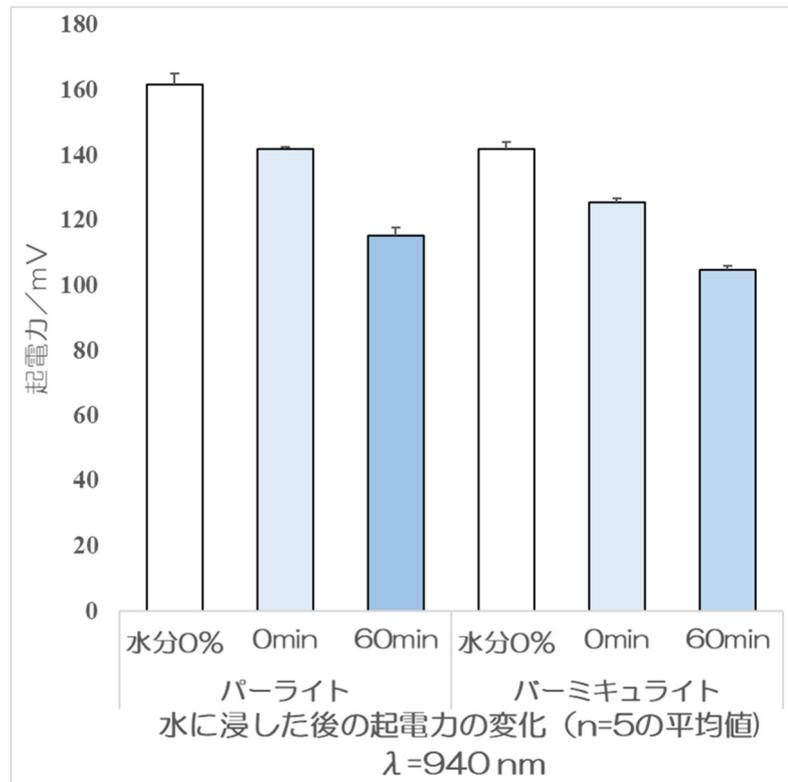


図4-5 水に浸した後の起電力の変化 (n=5の平均値)
 $\lambda=940\text{ nm}$

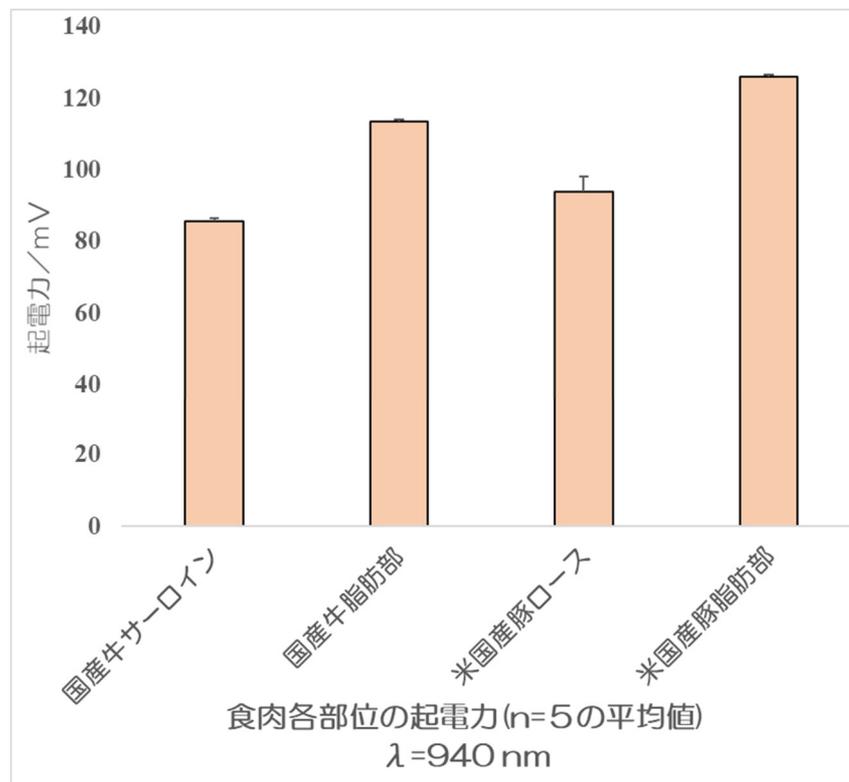


図4-6 食肉各部位の起電力 (n=5の平均値)
 $\lambda=940\text{ nm}$

4-3. 結果

(1) 葉の試料についての比較

アカメガシワ (*Mallotus japonicus*), コナラ (*Quercus serrata*), ソメイヨシノ (*Cerasus × yedoensis*) の3種の葉の表側と裏側の起電力を測定し、両者の比をとったところ、図4-3のような結果が得られた。葉の表側と裏側と表側の起電力をF検定で分散を調べた後、t検定を用いて有意な差があるかどうかを調べたところ、表4-1のような結果が得られ、いずれの種においても表側と裏側の起電力に差がないことは否定されなかった。

表4-1 葉の表側と裏側の起電力の差の検定結果

	F-test(有意水準 5%)	t-test(両側検定 有意水準 5%)
アカメガシワ(n=10)	F=0.932 (>.05)	t=0.449 (>.05)
コナラ (n=19)	F=0.423 (>.05)	t=0.455 (>.05)
ソメイヨシノ(n=15)	F=0.220 (>.05)	t=0.187 (>.05)

(2) 試料に含まれる水分比較

シャーレの中に約5mmの厚さにパーライトとバーミキュライトを敷き詰め(図5-4), 5mLの純水を加えて測定した結果は図4-5のようになり、F検定とt検定の結果は以下の表4-2の通りである。

表4-2 パーライトとバーミキュライトに水分を与えた際の起電力の差の検定結果

	F-test(有意水準 5%)	t-test(両側検定 有意水準 5%)
パーライト(n=5)		
水分0%時と水分を与えて0min後の比較	F=0.087(>.05)	t≐0 (<.05)
水分を与えて0min後と60min後の比較	F=0.198(>.05)	t≐0 (<.05)
バーミキュライト(n=5)		
水分0%時と水分を与えて0min後の比較	F=0.476(>.05)	t≐0 (<.05)
水分を与えて0min後と60min後の比較	F=0.593(>.05)	t≐0 (<.05)

両者ともに水分を入れる前と入れた直後、及び入れて60分を経過後の測定値はそれぞれ差がないことは否定された。

(3) 食肉各部位による比較

食肉各部位では、国産牛サーロインと国産牛脂肪部、米国産豚ロースと米国産豚脂肪部を比較して見た(図4-6)。F検定とt検定の結果は以下の表4-3の通りである。

表4-3 各食肉部位の起電力の差の検定結果

	F-test(有意水準 5%)	t-test(両側検定 有意水準 5%)
国産牛サーロインと国産牛脂肪部	F=0.296(>.05)	t≐0 (<.05)
米国産豚ロースと米国産豚脂肪部	F=0.012(<.05)	t≐0 (<.05)

国産牛と米国産豚では筋肉部分と脂肪部において差がないとは言えないことがわかった。

4-4. 考察

(1) 葉の試料についての表側と裏側の比較に関しては差がないことは否定されなかった。第3章では可視光領域の照射光を用いて表側と裏側の差を確認することができたが、赤外領域ではそれらと異なる結果が得られたことになる。Gates ら (Gates ほか, 1965) が作成した図4-7では可視光領域では葉の表側と裏側では異なる値を示しているが、波長が700 nmを超えたあたりから反射率において殆ど差が見られないことが示されている。したがって今回用いた赤外領域反射率計では差があるとは言えず、Gates らと同様の結果が得られたことになる。

可視光領域の場合は光合成を行う目的から、太陽光の波長を選択的に取り入れると同時に表側と裏側の異なる役割をそれぞれ果たしているように思われるが、赤外領域ではそのような役割の差はないと思われる。

ここで、照射光の波長が異なると結果が異なることを理解することは、生物の環境への適応を議論する際の有力な証拠となり得、赤外領域を学ぶ高等学校ではSSH等では非探究して欲しい材料である。また中学校での発展的な学習にも十分に応用できる内容と思われる。

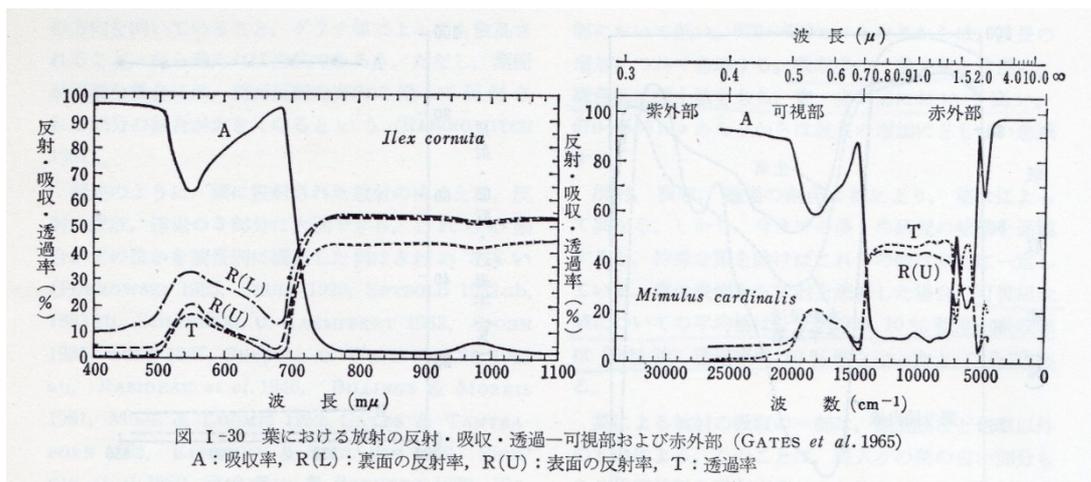


図 I-30 葉における放射の反射・吸収・透過—可視部および赤外部 (GATES et al. 1965)
A: 吸収率, R(L): 裏面の反射率, R(U): 表面の反射率, T: 透過率

図4-7 葉の放射の反射・吸収・透過と波長との関係 (Gates ら, 1965)

(2) 土壌中の水分については、パーライトおよびバーミキュライトの両者とも、時間的経過とともに反射率が小さくなることがわかった (図4-5)。図4-8では水の吸収が示されているが、使用した照射光の波長940 nm付近に小さな吸収ピークがあることがわかる。

土壌中の水分を測定する応用としては、畑やプランターの土壌中の水分を反射率計で測定できることが期待できる。これは小学生でも気軽に測定でき、しかも定量による判断が可能である。あるいはパーライトやバーミキュライトの水分量を触感で体感した後、どの程度の水分を含んでいるかを定量的に相関させることも考えられる。水分量は菌類の大鋸屑栽培や細菌培養のための寒天培地等にも微妙な影響を及ぼすことから、こうした応用は有用であると考えられる。

(3) 食肉部位による赤外領域反射率の差については図4-6のような結果が得られた。食肉の赤い部分は筋肉中のミオシン、アクチンの色素成分である酸化型メトミオグロビンと血液中の酸化型ヘモグロビン由来のものである。さらに筋肉中に含まれる酸化型チトクロームオキシダーゼの赤外吸収の影響もあり、赤外波長の吸収はこれらの混合成分に由来すると考えられる。

図4-8、図4-9ではヘモグロビンに今回使用した波長940 nmに小さな吸収ピークが現れており、これが測定結果に反映されていると思われる。

食肉部位の反射率に関しては生物におけるヘモグロビンの導入だけでなく、家庭科での食肉の学習内容にも十分に利用できるデータとなりうる。今後、照射光を担うLEDや検出器がこれまで以上の大きな波長に対応し、それらが市場に安価に供給されることになれば、さらにさらに反射率計の測定範囲は広がり、反射率計の有用性高くなると期待できる。

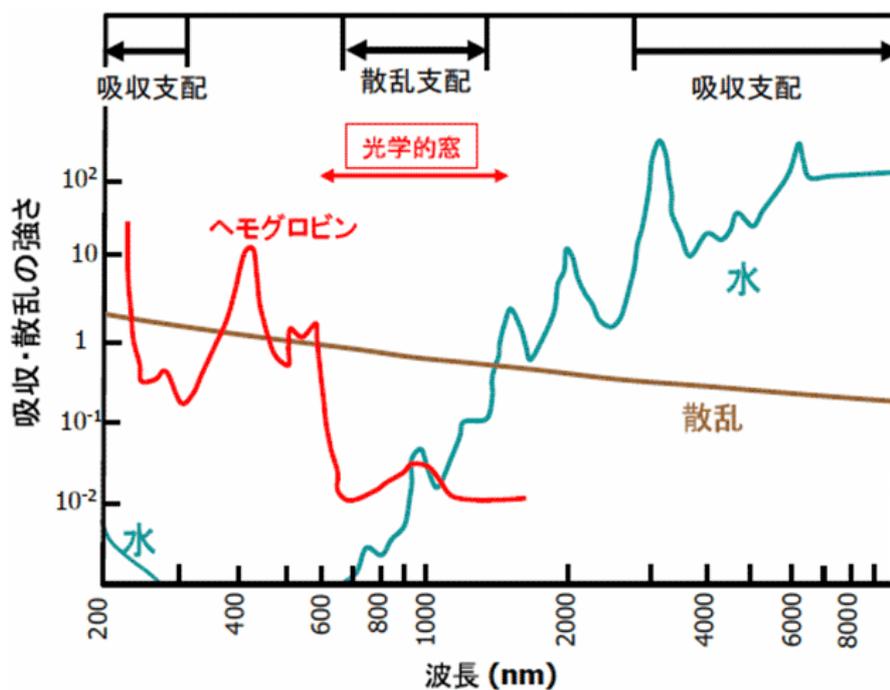


図4-8 水とヘモグロビンの吸収・散乱波長(文部科学省, 2007a)

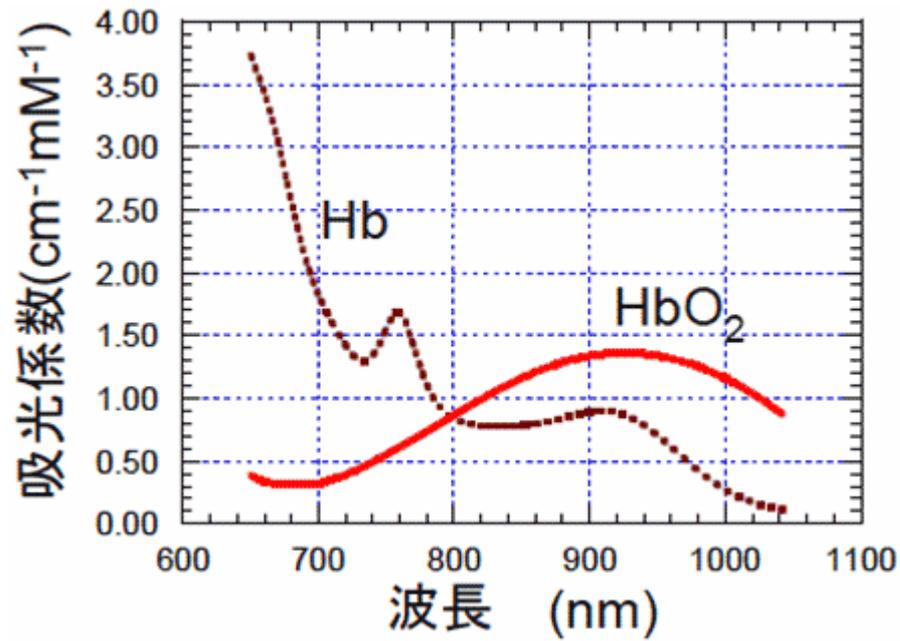


図4-9 酸素化ヘモグロビン (Hb) と脱酸素化ヘモグロビンの吸収スペクトル(文部科学省, 2007b)

引用文献

阿部敏雄, 西義雄 (1967) : 不純物分布をもつ半導体の赤外線反射率, 応用物理, 36(7), 562-568.

有馬朗人ほか 62 名 (2020) : 新版理科の世界 1, 大日本図書株式会社, 157.

Gates, D.M, H.J.Keegah, J.C.Schleter and V.R.Weidner (1965) : Applied Optics 4. 11-20.

三浦 登ほか 13 名 (2016) : 物理基礎, 東京書籍株式会社, 194.

三浦 登ほか 14 名 (2016) : 物理, 東京書籍株式会社, 158, 312.

水野和彦, 石栗敏機, 近藤恒夫, 加藤忠司 (1988) : 近紫外線反射率測定法による乾草の成分および栄養価の推定(1) : 成分および栄養価の推定精度とその評価, 草地試験場研究報告, 38, 35-47.

文部科学省(2007a) : 「光資源を活用し, 創造する科学技術の振興－持続可能な「光の世紀」に向けて－」第 3 章 3 光を用いた非侵襲生体診断, 文部科学省科学技術学術審議会資源調査分科会報告書.

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333543.htm.

(22020504)

文部科学省(2007b) : 「光資源を活用し, 創造する科学技術の振興－持続可能な「光の世紀」に向けて－」第 3 章 3 光を用いた非侵襲生体診断, 文部科学省科学技術学術審議会資源調査分科会報告書.

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333543.htm

(22020504)

奥山享彦ほか 2 名 (2019) : 分光反射率道の物体表面における水の検出, 情報処理学会第 81 回全国大会 1V-07, 533-534.

竹内敬人ほか 16 名 : 科学と人間生活, 東京書籍株式会社, 108-114.

第5章 本研究の成果の意義

5-1. 自作反射率計の教材としての応用と展望

これまで第2章から第4章までそれぞれの波長での自作反射率計の作成と応用について述べてきたが、それぞれの章での成果について補足する。

第2章で述べたヤブツバキの葉の断面写真(図2-16)は、中学校理科1年生の教科書では柵状組織や海綿状組織の説明として頻繁に掲載されている(例えば大日本図書(有馬ほか, 2020)の図5-1矢印など)。主に葉の表と裏の違いは気孔と蒸散の関係を中心に述べられており、柵状組織や海綿状組織などの葉の構造の違いについては事実のみの記述で、組織と光の関係については述べられていない。

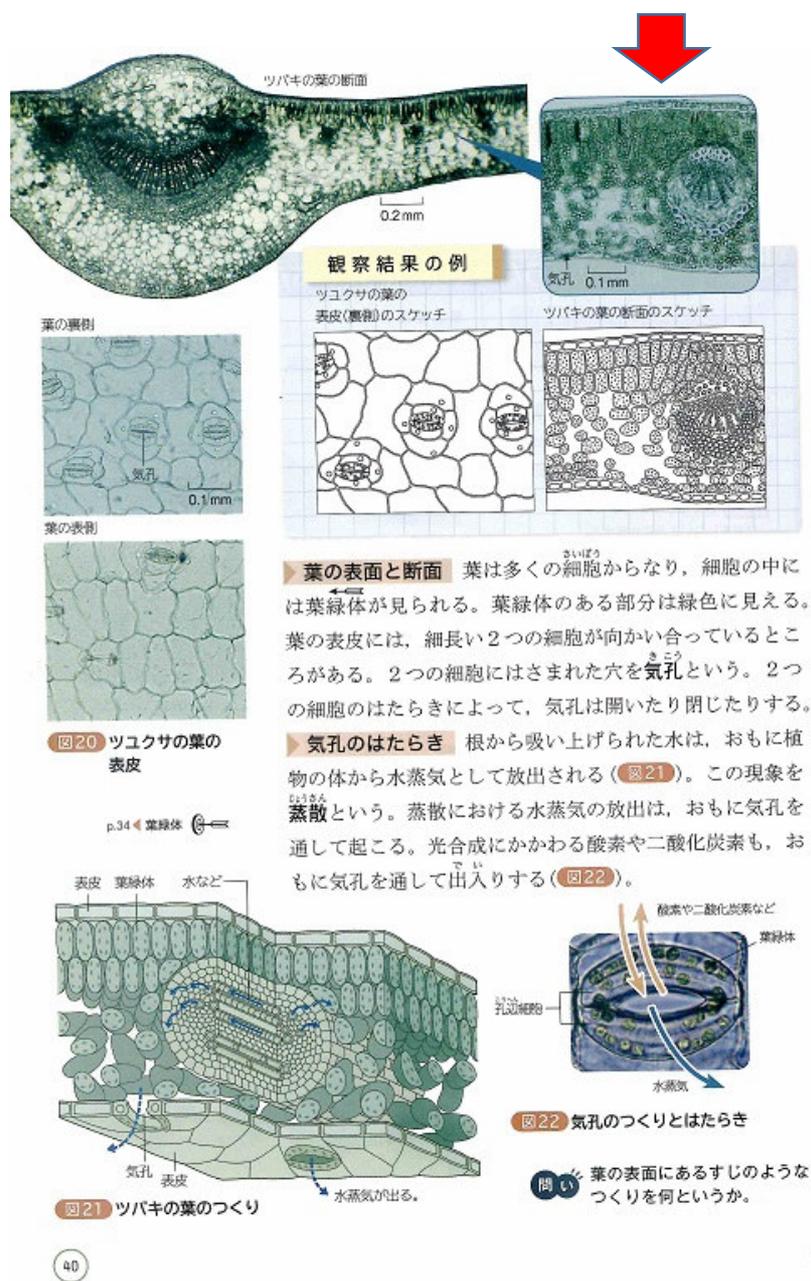


図5-1 葉の構造を説明した中学校理科教科書(有馬ほか, 2020)

全反射 図19のように、水槽の中を横から見ると、水槽の外側が見えないときがある。この現象は、水から空気中に出る光の屈折角の大きさが、入射角よりも大きいことによって生じる。

水から空気中に出る光の入射角を大きくすると、屈折角も大きくなって屈折光は水面に近づき、やがて屈折角は90°に達する。さらに入射角を大きくすると光は空気中に出ていかなくなり、水面ですべて反射してしまふ。この現象を**全反射**という(図18)。

図18 全反射の原理

図19 全反射の例

魚から見える景色

水中では、ほぼ真上には外の景色が見えるが、ななめの方角に外の景色は見えない。水面が鏡のようになっていて、水中のものが水面にうつって見える。これは、ななめ上の方角の水面で、水中からの光が全反射しているからである。

図の場合、魚にはほぼ真上に太陽が見えて、ななめ上の方角には、海底のものが見えている。

魚の見える方角

魚がうつった水面

図20 光が屈折する場合、空気中から水に入るときと、水から空気中へ出るときで、屈折角が入射角より大きくなるのはどちらか。

図5-2 光の性質(全反射)を説明した中学校理科教科書(有馬ほか, 2020)

鏡だけでなく水やガラスなど、光を通す物体でも、その表面で光の一部が反射する。そのため、水面やガラスに物体の像がうつって見えることがある(図9)。

乱反射 でこぼした面では、光はいろいろな方向に反射する。これを**乱反射**という。どの方向に反射する場合でも、光は反射の法則にしたがって進む(図10)。

ほとんどの物体の表面は、でこぼこしている。そのため、光は表面で乱反射し、どの方向からでも見える。

図10 乱反射

図11 いろいろな反射

やってみよう 全身がうつる鏡の大きさを調べてみよう

A 鏡を使って調べる

- 鏡の上端がうつっている位置と、つま先がうつっている位置の間にテープを貼る。
- テープの端の距離を量り、全身がうつる鏡の大きさを求める。
- 鏡までの距離を変えて実験を行う。

B 作図をして調べる

- 鏡と身体間の位置に線をかく。Aさんの目と像の頭(●部分)を直線で結び(1)、鏡で反射する光の通すじをかいて(2)、鏡がうつる位置を調べる。
- 草のように、Aさんのつま先がうつる位置を調べてAさんの距離を量り、全身がうつる鏡の大きさを求める。

物体から図のように進んできた光は、鏡にあたるとどのように進むか、光の通すじをかきなさい。

図5-3 光の性質(乱反射)を説明した中学校理科教科書(有馬ほか, 2020)

一方、同じ中学校理科 1 年生の教科書では光の性質について学習する。具体的には光の直進性、反射性（全反射、乱反射）、屈折等である。葉の表と裏の構造の違いは、葉の表の柵状組織による全反射、裏の海綿状組織による乱反射という光学上の違いを示している。同じ教科で学習するのであれば葉の構造と光の性質のそれぞれの内容を関連づけた学習の方が児童生徒にとっては意味づけされやすいはずである。児童生徒に、なぜ表と裏で構造が違うのかという疑問が生じたときに、可視領域自作反射率計を用いて測定値で比較することが可能であれば、学習は意味づけが行われ、主体的な問題解決に導くことができる。双子葉植物の場合は殆どの場合、葉の裏側において乱反射が生じているため、それに伴い反射率が高くなる傾向がある。さらにそれは海綿状組織の細胞間の空隙という構造上によるものであり、気孔が裏側に多く観察されるのは細胞間の空隙に存在する空気と関連していることまで推測することも可能になってくる。この場面で「なんとなく白っぽい」「表が濃い緑色をしている」等という主観的あるいは感覚的な表現は、これまで述べたように客観性を持つ表現に転換すべきであり、可視領域自作反射率計によって定量化された数字での議論を可能にすることを期待したい。

第 3 章では紫外領域の反射率について扱った。この紫外領域自作反射率計では主にモンシロチョウの性差を扱ったが、同じ個体を用いて翅の鱗粉が欠落させたときの反射率の比較も行ってみた。

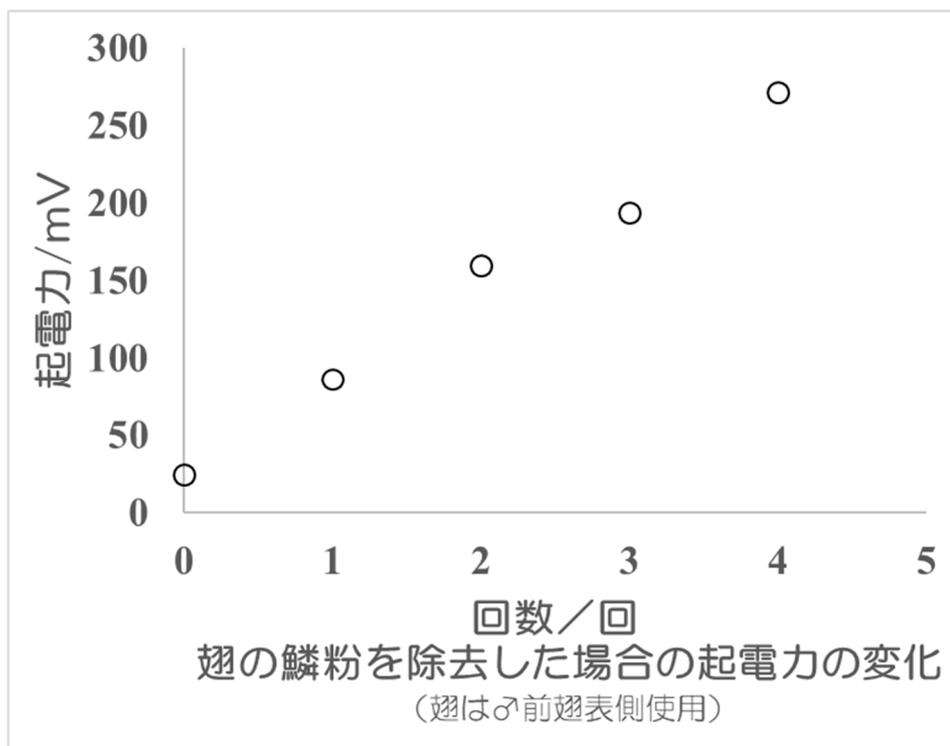


図5-4 翅の鱗粉を除去したときの起電力の変化



図5-5 鱗粉欠落がない個体の翅の表面（♂前翅表側）

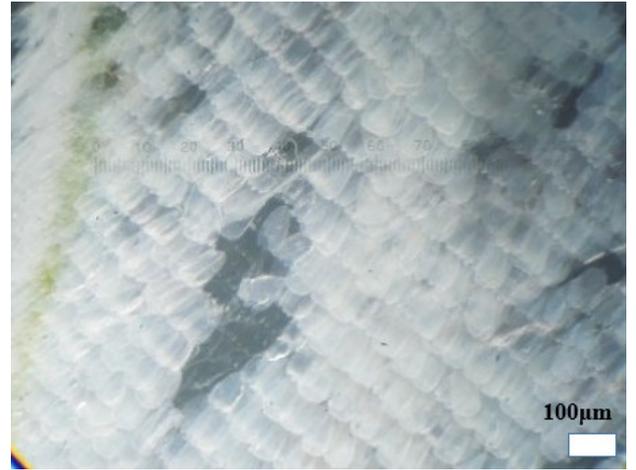


図5-6 除去処理を行ったときの翅の表面（♂前翅表側）
中央部分は鱗粉が除去された部分

翅の表面の鱗粉が部分的に欠損している♂のある個体の翅の反射率を調べたところ、反射率が通常の前翅平均値よりも高い値を示す傾向がわかったため、鱗粉の状態と反射率の関係を調べるために、反射率が最も低い値を示す♂翅の表面に弱粘着性の付箋用紙の接着面を当てて翅の鱗粉を人為的に除去し、除去回数毎に反射率の変化を測定した値を図5-4に示した。この結果から、鱗粉の欠損のない翅から鱗粉を取り除くと起電力の値は高くなり、翅の鱗粉を除去する回数が増すほど反射率も増していくことがわかった。

チョウの鱗粉はクモの巣などに捕捉された場合の逃避のための手段として使われることが観察されている（新開，2014）。ただ、モンシロチョウの♂が鱗粉を欠損することで仮に捕食者からの一時的な逃避に成功したとしても、一度鱗粉を翅から落としてしまうと結果的に翅による反射光が変化し、鱗粉に欠損がない♂の反射率との差が生じ、求愛行動に支障が出る可能性も探究できる。

理科教育の分野だけでなく、保健体育や学校行事での保健領域における活用も可能である。例えば Sun screen 剤（粉末状 ZnO 使用）を肌に塗布した場合としない場合の差を紫外領域反射率計で示すことができる。実際の実験は次の通りである。

Sun screen 剤としては BioreUVperfectMILK を用いた。塗布した部分は前腕部内側（図5-7 対照実験，図5-8 Sun screen 剤塗布）で対照にはグリセリンを用いた。



図5-7 グリセリン塗布(対照)



図5-8 Sun screen 剤塗布

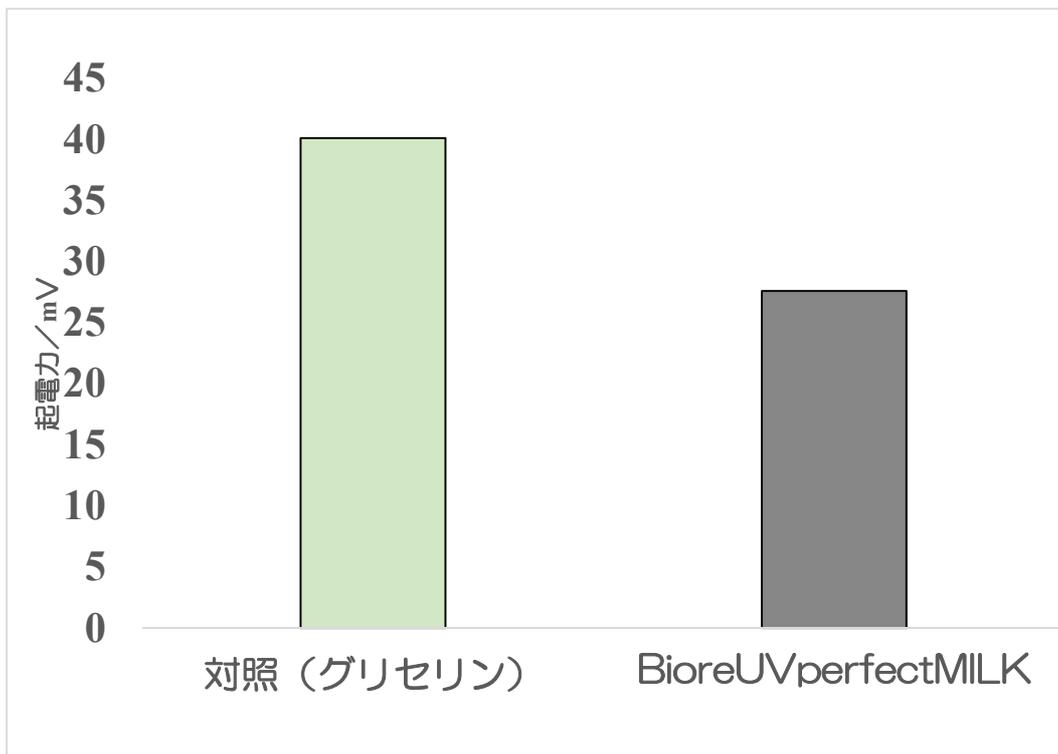


図5-9 対照 (グリセリン) と Sun screen 剤の塗布後の起電力の比較

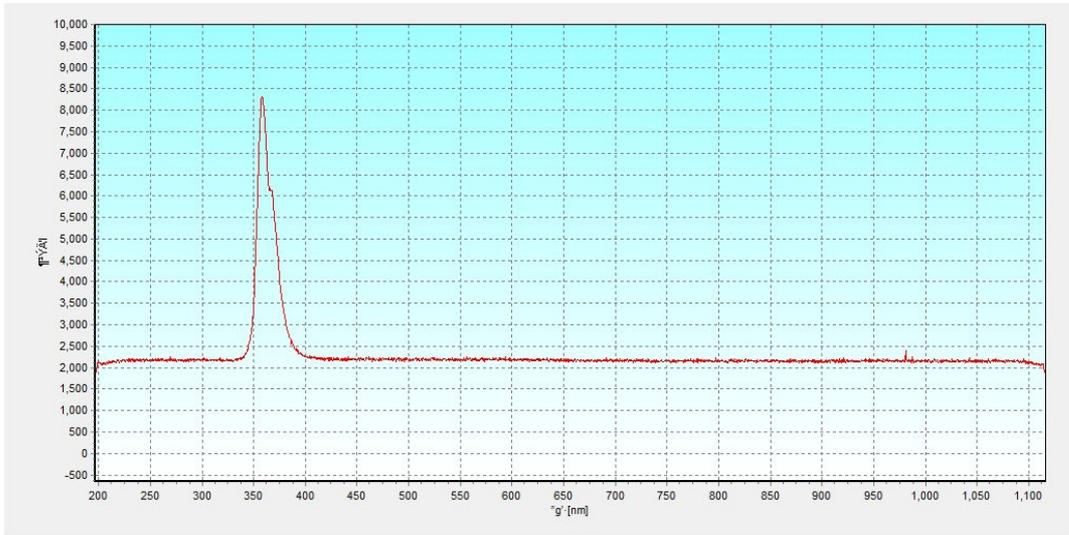


図 5-10 対照 (グリセリン) を Maya で測定した際の反射率

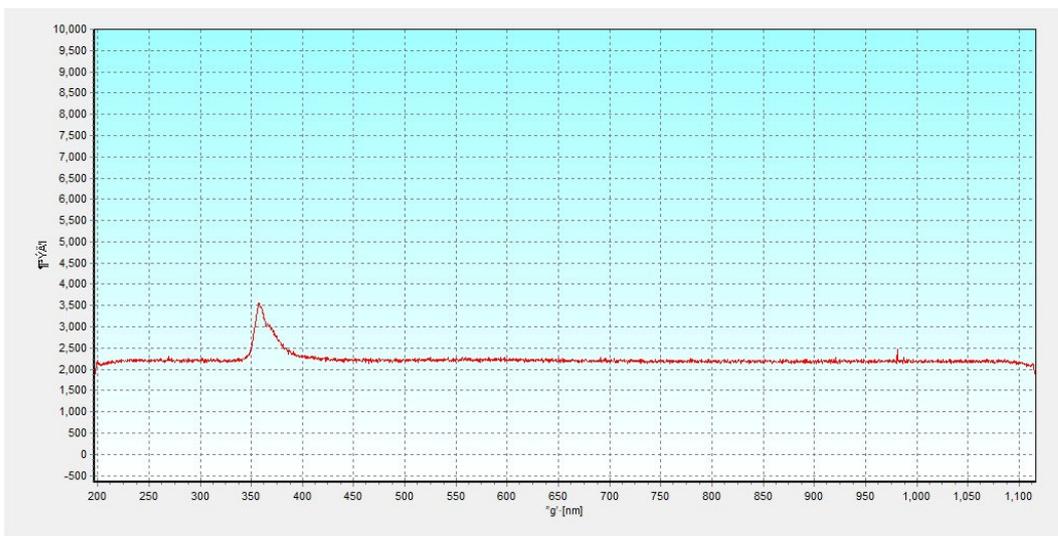


図 5-11 Sun screen 剤塗布後 Maya で測定した際の反射率

図5-9から, Sun screen 剤は紫外領域の光を吸収していることがわかる. これらを Maya で測定した際の対照 (グリセリン) の反射率を図5-10に, Sun screen 剤を塗布した際の反射率を図5-11に示した. 365 nm 付近のピークが反射率を反映している. 学校現場では Sun screen 剤の紫外領域に対する有効性を提示するだけでなく, 実際に塗布し, 測定してその原理を体得させることができる.

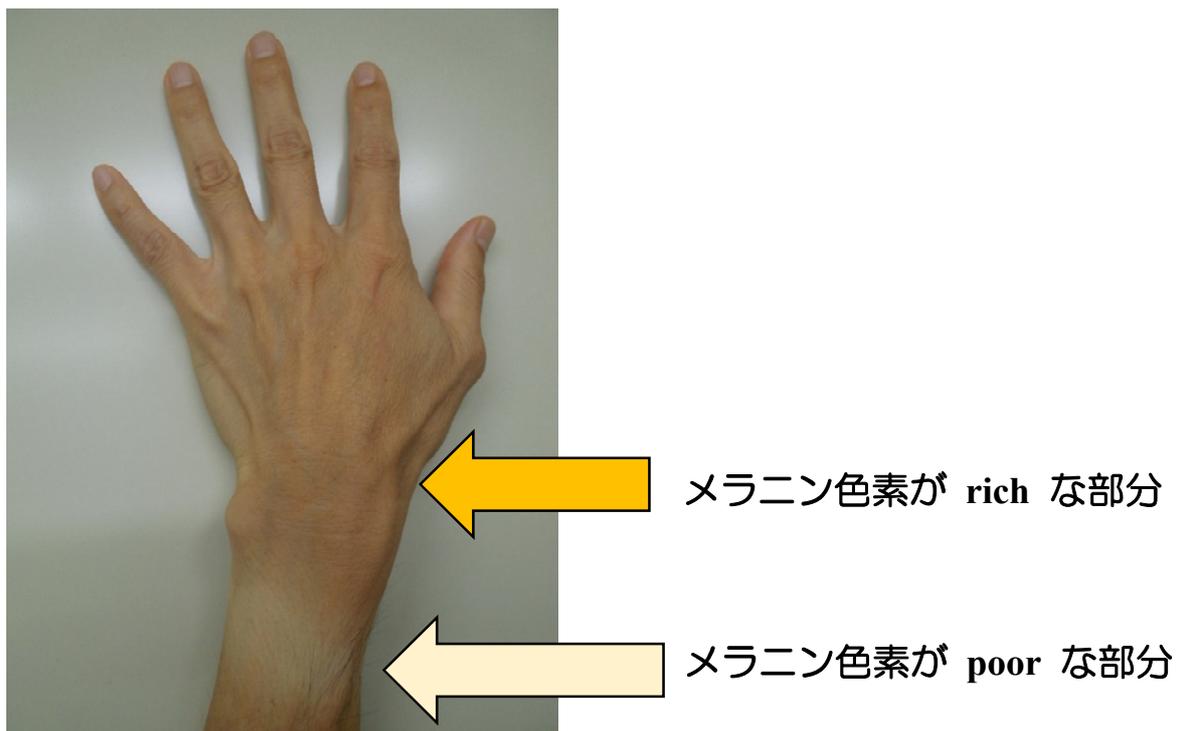


図5-12 日焼け部位と非日焼け部位 (著者撮影)

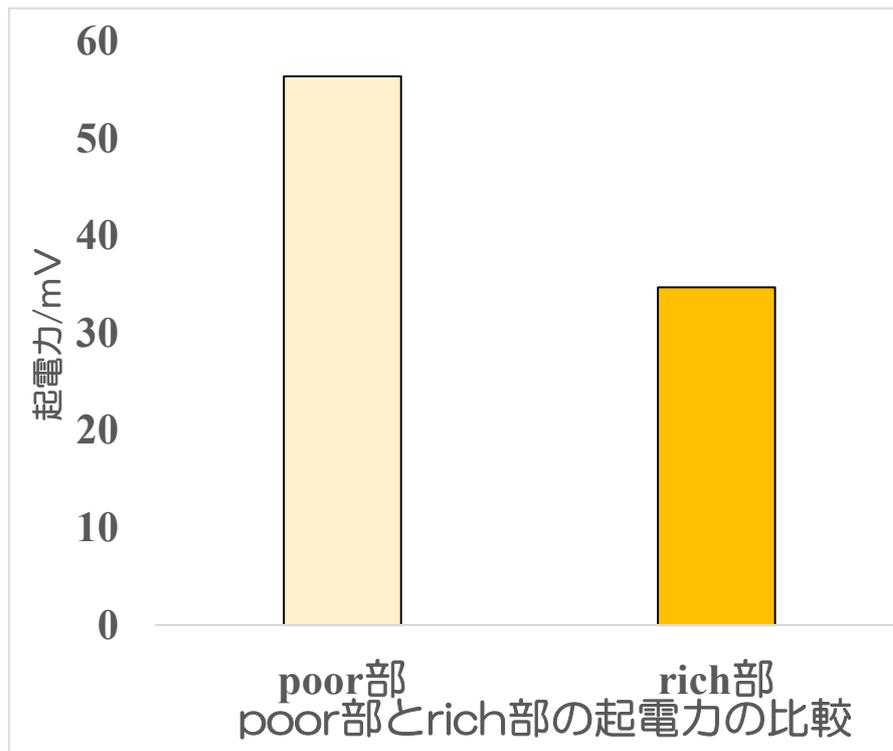


図5-13 図5-12の部位の自作紫外領域反射率計での測定値の比較

実際のヒトの手でも応用が可能である。図5-12はヒトの手の甲の部分の写真である。濃い黄色の矢印で示した部分がメラニン色素 rich な部分であり、薄い黄色の矢印の部分はメラニン色素が poor な部分である。メラニン色素が poor な部分は、腕時計等を用いて日光を肌から遮蔽することで人為的に整えた。この2つのメラニン色素が rich な部分と poor な部分に自作紫外領域反射率計を当て、測定した結果が図5-13である。この結果からメラニン色素が紫外領域を吸収していることがわかった。図5-14ではメラニンの反射スペクトル（河合 ほか，2003）を、図5-15ではメラニンの吸収スペクトル（河合 ほか，2003）を示したが、これらは図5-13で示した結果を支持している。

紫外領域を学習する高等学校等で扱う場合は、ZnOの粉末を用いて自作紫外領域反射率計で実際の反射率を測定したり、あるいは別の粉末と比較したりしてその効果を検討することに応用できる。ZnO（酸化亜鉛）が使用される理由として、極大吸収波長が280～390nm(UVB-UVA領域)、屈折率が2.00～2.02の間にあるからであるが、この性質がなぜ利用されるのかという原理等はSSH等で探究可能な課題となり得る。

保健体育で扱う場合は、学校現場でも話題になることが多いSun screen剤の効果を児童生徒や保護者に定量的に説明することができる。一方的な教師によるSun screen剤塗布の指導は教育的な効果が期待できないが、実際の測定を授業の中に組み込むことによって客観的な根拠をもたせることができる。現在、紫外線防御に関しては年齢が低くなるほど保護者の関心が高くなりつつあり、小学校低学年や幼稚園での実施も可能である。

では、最後に第4章で扱った赤外領域の反射率を扱った学習内容の応用について触れる。赤外領域は紫外領域や可視領域と比較して波長が長いことから回折の度合いも大きいという特性をもっている。近赤外領域に吸収を持つ主な物質を表5-1にあげた。

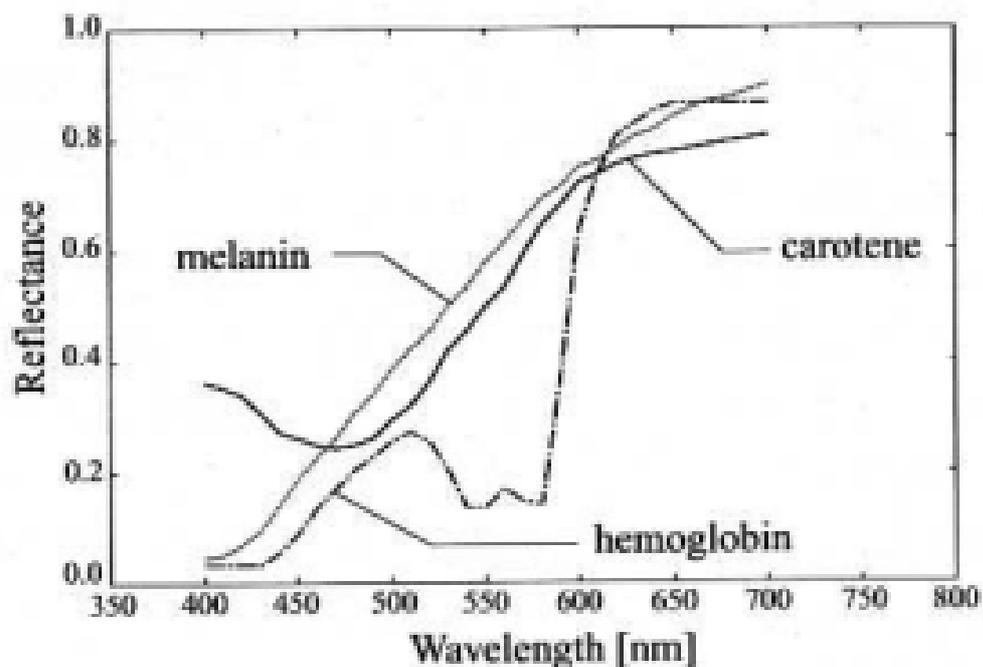


図5-14 色素の反射スペクトル (河合 (2003) から引用)

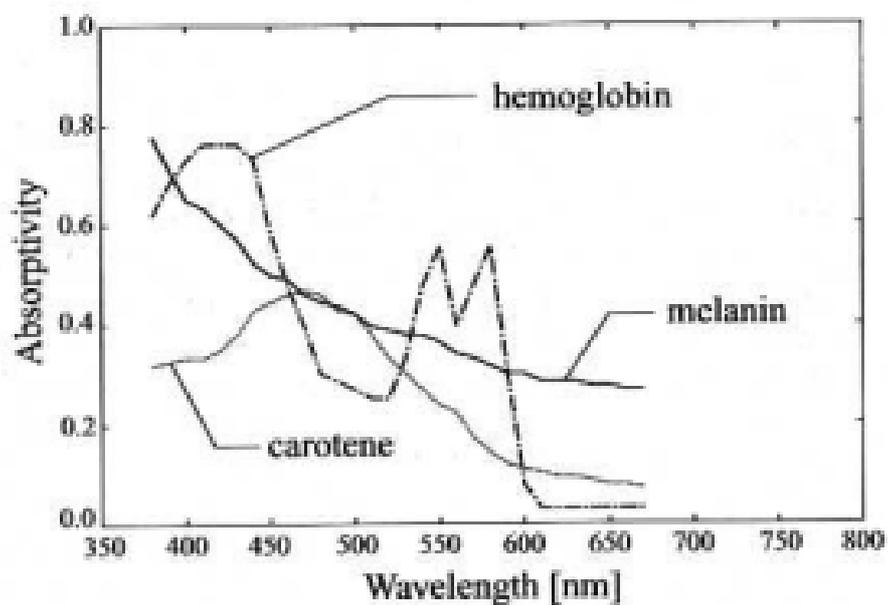


図5-15 色素の吸収スペクトル (河合 (2003) から引用)

表5-1 近赤外領域における吸収バンド
(岩元 ほか, 近赤外分光法入門から引用)

波長(nm)	帰属	構造
740	C-H str.fourth overtone	CH ₃
760	O-H str.third overtone	H ₂ O
880	C-H str.third overtone	CHCl ₃
910	C-H str.third overtone	ptotein
970	O-H str.second overtone	H ₂ O
990	O-H str.second overtone	starch

今回の自作赤外領域反射率計では、表5-1に掲げた物質の検出について、吸収ピークが検出能力に対して十分に大きいわけではなく、さらなる工夫が必要ではあるが、検出器の精度向上によって精緻な定量化が可能になればさらに教材としての意義は大きくなると思われる。教科書の中で赤外領域に関する内容が、紫外領域よりも少ないのは、こうした検出器が現在ではなかなか得られにくいことも考えられる。

5-2. 成果と今後の課題

GIGA スクール構想により学校現場では ICT 教育が今後大きな比重を占めると予想される現代において、理科教育も率先してその対応をすべきである。しかしながら理科教育の基盤には学習者による直接体験が必要であることを忘れてはならない。自作反射率計は理科学習における直接体験を支援し、「主体的な学習」を保障する重要な教育的機器になり得る。

理科教育の中で自作反射率計が果たす役割は次の点にある。

- ①個別実験に対応して定量化できる点
- ②野外に持ち出して定量化できる点
- ③測定値から簡便に反射率を算出できる点
- ④主観的あるいは感覚的な表現を客観的あるいは数理的な表現に変換できる点

①については、第1章で述べたように個別学習は「主体的な学習」に大きく影響する学習形態である。高価な測定器具だと1台の機器を教師実験で行われることになり、複数個備えられていたとしてもグループでの測定に留まり、その実験結果は概ね実験を得意とする、あるいは実験に慣れているグループの代表者が行ったデータを共有することになる。しかしこれらは真に「主体的な学習」を保障することにはならない。理科学習において最も重要な直接体験を全員に求める以上、グループ実験は必ずしも学習者全員が直接体験を行うことにはならないからである。グループ実験は往々にしてグループでの役割分担が決定されており、しかもそれがその後の別の実験においてさえも役割のローテーションは希であり、固定化されている場合が多い。例えば、作業が手早く行う学習者は実験を担当し、丁寧に字を書く学習者は記録係を、簡単な作業を得意とする学習者はストップウォッチによる時間測定係を、というようにである。「主体的な学習」はあくまで個別のデータを基にして結果を検討・考察し、議論されるべきである。そういう意味では個別実験に対抗できる自作反射率計の、教材としての意味は大きく、安価でクラス分を作成することができることは理科教育の今後の発展に十分に貢献できるものである。

②については、野外での使用の可能性についてである。試料を教室内に持ち込み、測定す

る手法はもちろんのことであるが、教室に持ち込めない試料（たとえばコンクリートなどの建材等）に対して自作反射率計がその場で対応できる点の特筆できる点である。学習者はその場で得られたデータを基にして考えや論理を進めることができるし、データを教室に持ち帰って整理することもできる。③で述べるように簡便な計算法での比較が可能なので現場で反射率の算出ができることは、限られた時間内の授業で時間を有効に使えることになる。

野外での使用目的のために作成したこれらの自作反射率計は意図的に印加電圧を $(1.5 \times n)$ V（ただし n は乾電池の個数）に設定している。野外は教材の宝庫であり、数多くのサンプルを学習者自身が選定することができるため、測定によって様々な議論や意見交換が可能になることは「主体的な学習」を保障する意味でも意義がある。

③については学習者による反射率の簡便な算出によって、ブラックボックス化されず、原理の理解も簡便になることである。通常、デジタル系の測定器は内部に複雑な IC 回路を組み込まれており、何をどのような原理で測定されているのか不明な場合が殆どであるが、自作反射率計は内部が敢えて観察できるように設計してあるため原理が理解しやすく、それによって計算の意味も分かりやすい。学習者が高等学校の生徒であるならば次の様な法則から説明することも可能である。

色は光の波長に依存し、蛍光物質以外では一般的に次の式が成り立つ。

$$I_o = I_r + I_a + I_t$$

（ただし I_o : 光源から物体への照射光量、

I_r : 試料の反射光量、

I_a : 試料の吸収光量、

I_t : 試料の透過光量）

反射率、吸収率、透過率をそれぞれ R 、 A 、 T とおくと光のエネルギー保存則から

$$R + A + T = 1$$

が成立する（佐藤 1986）。自作反射率計はこの I_r を測定していることになる。

④については、図 1 - 3 を再度見直してみる。図 1 - 3 では「白っぽい色」「かわいそうな色」などといった児童の主観的あるいは感覚的な表現が数多く観察された。そしてこれらの表現が議論を阻害している恐れがあることについても触れた。これらの主観的あるいは感覚的な表現の使用頻度を、客観的あるいは数理的な表現に変換させることは、議論が阻害される恐れがある場から議論が成立する場に変換されていることに他ならない。理科学習での児童生徒による物性の表現において、彼らの日常用語としての主観的・感覚的な言葉の使用は、入門期である小学校 3 年生や 4 年生ではある程度は認めざるを得ない。その場合はそれらの言葉は相手の意図を注意深く汲み取りながら解釈されることが必要で、誤解が生じないように教師が適切な言葉の変換や配慮を通して初めて成立するといっている。しかしながら高学年や中高等学校では客観的あるいは数理的な表現が議論には極めて重要であることを学ぶ必要がある。客観性とは、お互いの配慮を通して成り立っている関係性とは無縁の、心理的あるいは距離的に乖離した場所にいる対象者にさえも的確に伝達され、理解が可能にならなくてはならない論理性を伴う。小学校の高学年から中高等学校にかけて定性実験から定量実験が徐々に増していくことは表 1 - 2 で示したが、これは表現法の変換でもあり、極めて自然のことと言える。

ある調査結果では、「理科の授業の内容がよく分かる」には、「数学がよく分かる」「国語がよくわかる」(略)など多様な要素が重要になることが指摘されている(株式会社リベルタス・コンサルティング, 2014)。

理科学習への興味関心が児童生徒の計算能力と相関していることはよく知られているが、いわゆる国語による言語表現の客観性や的確さについては、まさしくこれまでに述べてきた定性から定量への表現法の変換が円滑に行われてきたかどうか大きく影響されていると思われる。学年が上がるにつれて理科の内容は必然的に客観的あるいは数理的な表現による記述が占めるようになるが、それへの移行が小中学校を通して徐々に行われていけば、理科の客観的あるいは数理的用語への理解は促進されることになる。

客観的あるいは数理的表現方法を獲得するためには、定量化された実験を小学校の段階からいくつも経験しておく必要がある。教師は定量化された実験結果の議論の中で、「こんな表現を使ってはどうか?」「〇〇君は客観的なことばを使っているね。」などと促すことができる。これを繰り返すことで図1-1のような「主体的学び」が「深い学び」へと成立することになる。児童生徒にとって一見難しい内容に見えても、意外にも簡単に順応できることを著者は経験則から知っている。教師が児童生徒を低く見積もっている「主体的な学習」は持続可能とはなりにくい。

現代の理科教育は問題解決学習または探究学習の中で、問題発見から解決に至るまでの一貫した論理を、自らが表現し、自らが評価できる児童生徒の育成が重要であり、その過程の中で定量実験が担う役割は極めて大きいと思われる。その定量実験の中で、少しでも自作反射率計が理科教育に寄与できるのであればこれほど嬉しいことはない。

最後に今後の自作反射率計の課題として、2つの点をあげる。これらはいずれも自作反射率計の構造上の問題でもあるが、様々な試料で測定可能になることは今後の理科学習の指導において、問題解決学習あるいは探究学習の課題設定が幅広く取り扱えることを意味している。既に第1章で触れたように「主体的な学習」は児童生徒の十分な直接体験や試行実験を保障することが必要である。

改善点の1つは、反射率の測定面積をさらに小さくすることである。これが実現すれば生物の各部位の反射率の測定に大きく貢献できることになる。現在、照射光の近傍に光ファイバーで反射光を回収し、検出器に送る教材を開発中である。

改善点の2つめは同様に、平面ではなく曲面にも対応できる反射率計の作成である。試料が凸面を持つ場合、周辺部に散乱する怖れがあるため、検出器の数を試料の周辺に置き、それらを直列に組むことが考えられる。

今後、高輝度のLEDや感度が高い検出器が出現すると予想されるため、測定対象も大幅に増すことを期待している。学校現場からの要望をなるべく実現可能にするために、今後も十分な連携をとりながら教育実践を行い、研究を進めて参りたい。

引用文献

- 有馬朗人(2020a)：「新版理科の世界1」，大日本図書株式会社，p40.
- 有馬朗人(2020b)：「新版理科の世界1」，大日本図書株式会社，p143.
- 有馬朗人(2020b)：「新版理科の世界1」，大日本図書株式会社，p147.
- 河合利幸，栗岡佳弘(2003)：「ボリュームモデルによる人工皮膚の表現法」，電気学会論文誌 C，123(11)，pp.1936-1943.
- 株式会社リベルタス・コンサルティング（2014）：平成25年度学力調査を活用した専門的な課題分析に関する調査研究「全国学力・学習状況調査の結果を用いた理科②に対する意欲・関心等が中学校段階で低下する要因に関する調査研究」調査報告書，p100.
- 岩元睦夫・河野澄夫・魚住純（1994）：「近赤外分光法入門」，pp.47-48.
- 佐藤信紘(1986)：「生体の光学特性」，医用電子と生体工学第24巻第4号，p232.

謝辞

本研究を行うにあたり、課程入学時から研究の在り方や指導の方法に至るまで適切な確、かつ常に温かいご助言とご鞭撻を賜りました 元岡山大学教育学部教授（現岡山大学特命教授） 喜多雅一博士，主査として物理学の専門的立場から貴重なご助言を賜りました岡山大学教育学部教授 稲田佳彦博士，教育学の専門的な観点からご助言を賜りました元兵庫教育大学連合大学院教授 松本伸示博士，物理学の専門的立場からご助言を賜りました岡山大学教育学部教授 伊藤恵司博士，鳴門教育大学教授 本田亮博士，兵庫教育大学教授 庭瀬敬右博士，数学の専門的立場からご助言を賜りました岡山大学大学院教育学教育研究科数学教育講座教授 岡崎正和博士に心から感謝とお礼を申し上げます。

さらに修士時代から常に厳しく常に背中で研究への姿勢をご教示下さいました鳴門教育大学名誉教授 故山下伸典博士におかれましては，研究のみならず人生そのものに数多くのご教示を頂きました。現在に至ってもそれらが強力かつ絶大な心の支えとなっております。ここに心からの感謝と哀悼の意を申し上げます。

最後になりますが，兵庫教育大学大学院連合学校教育学研究科，所属大学の岡山大学教育学部大学院，岡山理科大学の関係の先生方および事務の方々のお力添えに心から感謝の意を表します。ありがとうございました。

山下浩之