

自然素材の「香り」を活用した教材開発

メタデータ	言語: ja 出版者: 福井大学教育・人文社会系部門 公開日: 2024-05-01 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/0002000209

自然素材の「香り」を活用した教材開発

三浦 麻^{*1} 小山 裕生^{*2}

(2023年9月30日 受付)

内容要約 本研究では、長期記憶に寄与する嗅覚を用いた活動を学校教育の段階で取り入れることを想定し、自然環境学習の材料としての身近な自然素材の「香り」に着目した。まず、自然の香りを構成する化学物質の多様性と複雑性に気づくことが自然環境を意識的に学ぶきっかけを生み出すと仮定し、「香り」の多面的な教育素材としての可能性を考察した。また、「香り」を取り入れた教材開発を試みるため、学校における実験活動を想定した植物からの香り成分を抽出するための簡易水蒸気蒸留装置を確立した。さらに、抽出した身近な柑橘類およびハーブ類に含まれている香り成分をガスクロマトグラフィ質量分析法によって定性および定量分析を行い、本結果を用いた教育内容を提案した。

キーワード：嗅覚教育、香り、自然素材、化学物質、水蒸気蒸留、ガスクロマトグラフィ質量分析法

1. はじめに

自然体験は理科の基盤である。自然体験とは、人間の五感（視覚・聴覚・触覚・嗅覚・味覚）で自然を認知することであり、それによって自然のしくみや原理、法則性を学ぶ。五感のうち、視覚または聴覚による体験は、これを繰り返すことによって蓄積される短期記憶であるのに対し、触覚・嗅覚・味覚は一度の体験によって長期記憶に繋がる（山田、2002）。特に嗅覚によって感じた香りは感情や記憶と強く結合しており、時間経過後に同じ香りを嗅ぐと、それがトリガーとなってその当時の記憶を呼び覚ます効果があるとされている（山本、2008）。学校教育における自然体験では、小学校低学年の生活科において視覚を中心に展開されている。しかし、学年が上がるにつれて五感を使った自然体験の機会が減少している。それにより、低学年に得た体験の記憶が長期に蓄積され難しく、成長するとともに学びが風化することが考えられる。これに対して、嗅覚を用いた自然体験を学校教育の段階で取り入れることで、生涯忘れることのない学びが期待

^{*1}福井大学教育・人文社会系部門教員養成領域

^{*2}福井大学教育学部学校教育課程中等教育コース（現在、敦賀市立気比中学校）

される。実践例として、嗅覚を使った教育活動である香りの体験教育「香育」がある（公益社団法人日本アロマ環境協会（AEAJ））。これは植物の香りを体験するという感覚的な経験を通して、豊かな感性を育むとともに、人と植物の関わりや自然環境への意識を育てていくことを目的としている。2014年までにのべ550校の小・中・高等学校で実施されており、小学校はその8割を占めている（見目、2015）。また、小学校生活科で実施された自然物の特徴的な香りを頼りに校庭の中から同じ自然を探し出す活動によって、自然物に意欲的に関わり、経験にもとづいて予想を立てる態度に繋がったという報告もある（山下、2009）。「体験と知識を結びつけた記憶」をつくりだすことを目的として、動物の排泄物の香りを嗅いで自身の言葉で表現し、それを動物に関する情報に結びつける活動事例も報告されている（WWFジャパン、2018）。

本研究では、自然体験から展開し、嗅覚を活用した自然環境学習の材料として身近な自然素材の香り成分に着目した。まず、自然素材の「香り」を教育へ取り入れるための教材としての可能性を考察した。次に、中学校理科で「香り」を取り入れた教材開発を試みるため、学校現場で実践が容易な水蒸気蒸留法の確立と身近な植物からの「香り」物質の抽出および含有成分の定性・定量を行った。これらの結果を踏まえ、最後に「香り」を活用した教育内容を提案した。

2. 自然素材の「香り」を教育へ取り入れるための教材としての可能性

2-1 「香り」を自然環境の一部として捉える

近年の学校教育では、SDGs（Sustainable Development Goals：持続可能な開発目標）の実現に向けた「持続可能な開発のための教育（ESD for 2030）」が推進されており（文部科学省、2022）、『中学校学習指導要領解説 理科編』（文部科学省、2017）に自然環境の理解促進についての記述がある。そこには、第1分野「単元7：科学技術と人間」および第2分野「単元7：自然と人間」とともに、科学技術と人間との関わりや自然環境に関して、観察、実験などの技能を身に付けること、また、自然環境の保全と科学技術の利用の在り方について、科学的な考察や判断が身につくような指導が学校現場には求められており、学習指導要領に基づき、教科書が作成されている。調査した各社の教科書（啓林館、2022、他4社）の内容は共通して、科学技術が私たちの暮らしを支え豊かにしている一方で、発達した科学技術によって環境破壊も生じていることの記載がある。そして、これらを学んだ上で持続可能な社会をつくるために私たちができることは何かについて考えていく。ここに記述される環境とは地球スケールを示しており、身の回りの出来事を生活スケールで捉えている学習者にとってはその実感が不足することが推測される。そのため、現行の教科書では生態系の仕組みや水生生物指標による水質調査などを取り上げ、身近な環境を実感させている。この内容に自然環境における「香り」を新たに教育内容に加えるとすると、日常的な嗅覚をもって改めて自然環境を実感でき、長期記憶にとどめておくことができると考える。このようにこれまでと異なる観点を取り入れることで、これまで以上に自然環境に対する興味や意識が向くことが期待できる。「香り」は日常的に自然環境を実感させることに資すると考えられ、現学

習指導要領が示す「自然環境の理解」に近づけるのではないだろうか。

2-2 「香り」を化学として捉える

私たちの身近な製品はそのほとんどが化学工業的に製造されており、自然素材や香りを模倣した人工製品が日常にあふれている。しかしながら、「香り」を伴う人工製品は量産ができるように、人工的な「香り」を示す化学物質がその品質の管理の下で製造される。自然物の香りは、その種類も組成も非常に多様であるため、たとえ劇的に科学技術が進歩しようと自然物から香り成分である化学物質のすべてを大量に取り出すことは困難である。つまり、人工製品は同質のものを繰り返し生産できるが、自然の「香り」はそれを取り巻く自然環境に影響を受けて生み出される唯一のものである。このような自然物の「香り」を中学校の教育内容に含めるとすれば、自然環境の尊さを実感させることができるであろうと考える。たとえば現学習指導要領が示す第1分野「単元7：科学技術と人間」の内容に関連づける。そこで、機器分析によって得た成分表や組成表などを学習補助資料として示し、化学的に自然素材の「香り」を学ぶことで、自然の成り立ちの複雑さを科学的に捉えることができる。すなわち、自然素材を構成する化学物質やその特性について近年の科学技術がどの程度解明可能であるか、このようなことを知識として学ぶことが、自然素材そのものだけでなく自然環境に対する関心につながるのではないかと考える。さらに、嗅覚が人間の五感の一つであるからこそ、これらの知識と接続してより日常的な事象として捉えることが可能となり、意義深い教材となり得る。

3. 教材開発のための香り成分の抽出と分析

3-1 試料

実験に使用した試料は、温州みかん (*Citrus unshiu* (Swingle) Marcow) の果皮、ニオイテンジクアオイ (*Pelargonium graveolens*)、ローズマリー (*Salvia rosmarinus* Schleid) の3種類である(図1)。温州みかんは市販の福井県敦賀市産東浦みかんを用い、実験には果皮のみを使用した(以降、本稿ではミカンと表記する)。また、ニオイテンジクアオイはカレンソウ(蚊連草)やカヤリグサ(蚊遣草)と呼ばれる、ゼラニウム的一种である(以降、カヤリグサと表記する)。カヤリグサおよびローズマリーは福井大学文京キャンパス敷地内に繁茂していたものを採取した。ミカンの果皮は事前に実験室内の冷凍庫(-18℃前後)で凍結保存し、実験には冷凍試料を解凍せずに使用した。他の2試料は採取直後または3日以内に、生のまま使用した。

なお、本研究における試料選択の基準は、入手しやすい身近な植物であり、香りの強いものであることとした。ミカンは誰もが知っている植物である。カヤリグサやローズマリーは、ミントやレモングラスのような香りの強いハーブ類と同種であり、身近な植物といえる。



図1 実験に使用した試料（左からミカン、カヤリグサ、ローズマリー）

3-2 方法

(1) 蒸留実験

精油成分の抽出は水蒸気蒸留法により行った。水蒸気蒸留装置は市販されているが、学校現場で実施するには高額（約15～20万円）であるため装置を購入することは難しい。本研究では中学校において低予算で実施することを想定し、入手が容易な器具を用いた簡易水蒸気蒸留装置を製作し、実験を行うこととした。

簡易水蒸気蒸留装置は、市販の水蒸気蒸留装置を参考にして製作した(図2)。蒸留工程は以下のとおりである。ステンレス圧力鍋（5 L容量）に試料と水を入れて卓上IHヒーター（EIH-10：アイリスオーヤマ（株））によって加熱することで発生した水蒸気がシリコンチューブ（内径6 mm，外径9 mm）を通り、プラスチック製バケツの水によって冷却された銅管（内径4 mm，外径6 mm，長さ2 m）を通過する。銅管で冷却された水蒸気は、再び凝縮され、シリコンチューブを通過し、分液ロート（50 mL容量）に流入する。ここで、分液ロートに溜まったサンプル液は、精油（油層）と芳香蒸留水（水層）の二層に分離しており、これらを別々のバイアル瓶に分取し、成分分析を行った。なお、本実験で用いた簡易水蒸気蒸留装置の組み立て費用は3万円程度であった。

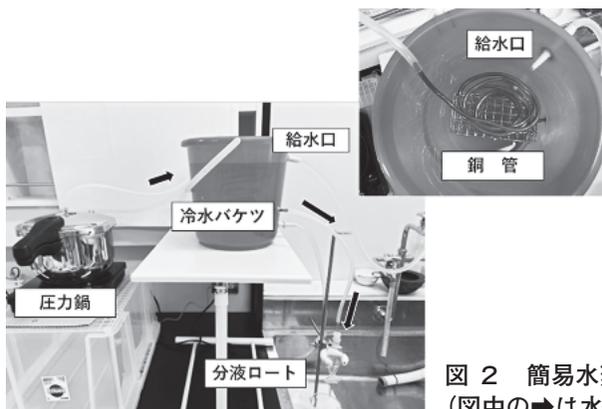


図2 簡易水蒸気蒸留装置の概観
(図中の⇒は水蒸気の流れを示す)

(2) 成分分析

蒸留実験により得られた試料溶液中に含まれる香り成分は、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS, QP-2010Ultra: (株) 島津製作所) によって定性および定量分析した。定性分析における含有成分の同定は、GC/MS のシミラリティ検索を利用してスペクトル類似度の高いものを考慮して決定した。定量分析においては、先行研究を参考にして決定した香り成分の分析を行った。具体的には、柑橘類に多く含まれている香り成分である α -ピネン、D-リモネンおよび β -リナロール (大野ほか, 2010) を分析した。なお、D-リモネンの光学異性体であり化学式が同じである樹木系の香りをもつ L-リモネンもあわせて分析した。また、カヤリグサのもつ香り成分として、ゼラニウムに多く含まれている β -シトロネロールとゲラニオール (大野, 1973) を、ローズマリーの主成分でもある (\pm)-カンファと 1,8-シトロネロール (三上, 2010) を分析した。これらの香り成分を総じて「ターゲット成分」と称し、表 1 にその物質情報を示した。表 2 には GC/MS による分析条件を示した。柑橘系分析条件は大野ら (2010) を参考に、ハーブ類分析条件は佐藤ら (2008) を参考にして設定した。いずれの試料分析においても EI (Electron Ionization: 電子イオン化) 法を採用し、分離カラムは SH-PolarWax (長さ 30 m \times 内径 0.25 mm, 膜厚 0.25 μ m: (株) 島津製作所)、キャリアガスは純ヘリウム (純度: 99.999% 以上) を使用した。

3-3 結果および考察

(1) 蒸留実験による精油および芳香蒸留水の抽出

3 試料 (ミカン、カヤリグサおよびローズマリー) の精油および芳香蒸留水を抽出するために、本研究において製作した簡易水蒸気蒸留装置を使用した。表 3 に本実験に使用した各試料の状態、蒸留に用いた試料量と水量および採用した蒸留方法を示す。蒸留方法は、試料を 4~5 cm に切断して蒸し器に乗せ、圧力鍋の底部に張った水の蒸気を試料に暴露させて蒸留する方法 (蒸留方法 A)、および粉碎機を用いて試料に水を加えて液体に近いペースト状にしたものを直接圧力鍋に入れて蒸留する方法 (蒸留方法 B) であり、各試料に対して抽出量が多く得られる蒸留方法を採用した。その結果、すべての試料から精油の抽出を確認することができた (図 3)。しかしな

表 1 ターゲット成分の物質情報

物質名	化学式	分子量	沸点 (°C)	分析に使用した試薬
α -Pinene	C ₁₀ H ₁₆	136.23	155	富士フィルム和光純薬
D-Limonene (L-Limonene)	C ₁₀ H ₁₆	136.23	176	ナカライテスク
β -Linalool	C ₁₀ H ₁₈ O	154.25	194-197	富士フィルム和光純薬
β -Citronellol	C ₁₀ H ₂₀ O	156.27	222	富士フィルム和光純薬
Geraniol	C ₁₀ H ₁₈ O	154.25	230	富士フィルム和光純薬
(\pm)-Camphor	C ₁₀ H ₁₆ O	152.23	204	富士フィルム和光純薬
1,8-Cineole	C ₁₀ H ₁₈ O	154.25	177	富士フィルム和光純薬

表 2 GC/MSによる分析条件

区分	柑橘分析条件	ハーブ類分析条件
カラム温度工程	35°C(5min)→5°C/min→220°C(5min)	40°C(5min)→3°C/min→200°C(2min)
気化室温度	200°C	250°C
イオン源温度	220°C	250°C
インターフェース温度	200°C	200°C
測定範囲(m/z)	50-250	20-300

がら、本実験において収集された精油量は極微量であったため、精油収率を定量することは不可能であった。これは、簡易水蒸気蒸留装置の構造に起因すると考えられる。試料から生じた揮発性の香り成分がシリコンチューブを介して分液ロートに収集される仕組みであったが、粘性の高い精油がチューブ内側に付着することで、分液ロートに全量を収集できなかった。これにより分液ロートに流入した正味の精油収量が抽出全体量に対して極めて少なくなったと考えられる。試料溶液の収集ロスを可能な限り削減し、効率的に抽出するためには、銅管から直接分液ロートに接続するような装置構造が望ましい。また、加熱によって精油成分が熱分解される場合には、本研究で用いた圧力鍋ではなく、減圧（真空）容器を用いることによって沸点を下げ水蒸気を発生させる方法を検討することで、精油収率の向上が期待される。

収集可能な精油量は、植物の種類にもよるが、100 kgの植物原料を仕込み、これと同じ程度の水蒸気を通過させた場合、精油約1 kgと芳香蒸留水約100 kgが得られる（長島，2021）。また、樹木等を用いた精油の抽出実験を簡易蒸留装置によって行った菊川（2022）は、試料1 kgあたり最大で 3.55 ± 0.16 mL程度の抽出量を報告している。今回使用した試料は150～200 g程度であり、報告されている値より少なくとも1 オーダ抽出量が少なかったことが推測される。より多くの精油の収集量を得るためには、精油が抽出されやすい植物を選択し、かつ試料の量を多くすることが必要である。加えて、是沢（1959）は5月下旬～6月上旬、6月下旬～7月下旬に収穫したゼラニウムの精油抽出率が他の時期と比較して高いことを報告していることから、試料とする植物の収穫時期の検討も必要となるであろう。

表 3 各試料の蒸留実験条件

試料	試料の状態	試料の量(g)	水の量(mL)	蒸留方法
ミカン	冷凍	203	850	B
カヤリグサ	生	147	1500	B
ローズマリー	生	167	1000	A



図 3 各試料の精油および芳香蒸留水（左からミカン、カヤリグサ、ローズマリー）

(2) 精油及び芳香蒸留水の前処理

蒸留実験によって得られた試料溶液から分取した精油および芳香蒸留水は、GC/MS 分析に先立ってそれぞれ異なる方法により前処理を行った。

精油の前処理方法は、菊川ら（2022）の方法を参考にし、各試料から抽出した精油を有機溶媒で希釈した。表4に示すように、ミカンの精油はメタノールによって100倍に希釈し、カヤリグサおよびローズマリーの精油はそれぞれアセトンによって500倍に希釈した。これらの希釈溶液1 μLを取ってGC/MSにより分析した。

芳香蒸留水については、シリカモノリス捕集剤（MonoTrap DCC18：ジーエルサイエンス(株)、以下、捕集剤と称す）を用いて揮発性の香り成分を捕集した。捕集工程を図4に示す。捕集剤をセットしたバイアル瓶に芳香蒸留水を適量入れ（図4（a））、アルミビーズを入れた恒温槽（DTU-1BN：TAITEC(株)）によって、60℃で60分間加温した（図4（b））。揮発成分を吸着した捕集剤を抽出溶媒（アセトン：ヘキサン＝1：1）に浸漬後、超音波を5分間照射し（図4（c））、抽出溶媒中に揮発成分を脱離させた。その後、揮発成分が含まれる抽出液1 μLをGC/MSに注入した。表5に各試料の芳香蒸留水中の揮発成分の捕集における試料溶液および抽出溶媒の量を示した。

(3) 定性分析

前処理後の精油および芳香蒸留水に含まれる揮発性成分をGC-MSによって分析した。仮に精油収量が1 kgであった場合に精油に含まれる香り成分は100%の1 kgが得られ、その時に得られる芳香蒸留水100 kgの中には0.1%（0.1 kg）の香り成分が含まれている（長嶋，2021）。本実験においても、定性分析によるクロマトグラムに現れたピーク強度は、精油中から検出された香り成

表4 精油の希釈溶媒と希釈倍率

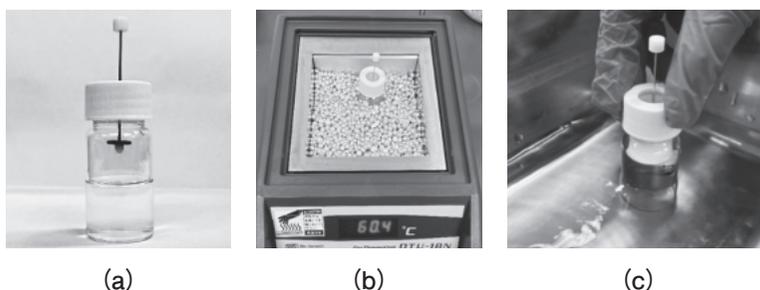
試料	希釈溶媒	希釈倍率
ミカン	エタノール	100倍
カヤリグサ	アセトン	500倍
ローズマリー	アセトン	500倍

表5 芳香蒸留水中の揮発成分捕集における試料溶液および抽出溶媒の量

試料	芳香蒸留水の量(mL)	*抽出溶媒の量(mL)
ミカン	10	0.2
カヤリグサ	5	1
ローズマリー	5	1

*抽出溶媒（アセトン：ヘキサン＝1：1）

図4 芳香蒸留水中の揮発成分の捕集工程



分は芳香蒸留水よりも顕著に示された。同定された成分は、ミカンでは精油、芳香蒸留水それぞれ23成分および15成分、カヤリグサでは37成分および21成分、ローズマリーは34成分および33成分であった。図5～7および表6～8に、GC/MSによるクロマトグラムとシミラリティ検索により同定した3試料の精油成分を示す。それぞれの試料における表中の下線部は精油および芳香蒸留水の両方に含まれていた成分であり、太字はターゲット成分を示している。3試料のクロマトグラムのピーク強度から、柑橘類であるミカンの精油成分よりもハーブ類のカヤリグサおよびローズマリーに多種類の精油成分が含まれることが示された（図5～7）。

植物の香りを作り出しているのは有機化合物のテルペン類である。テルペン類は炭素5個を持つイソプレンが複数結合したものであるが、炭素10個を持つモノテルペン類は、柑橘類、花、木の香りを与える成分である。また、炭素を15個持つセスキテルペン類は樹木の木部に含まれる香り成分である。香りの持続性は、精油に含まれている成分の蒸気圧によるもので、蒸気圧が高く揮発しやすいモノテルペンは香りが長続きしないが、相対的に蒸気圧の低いセスキテルペンアルコールなどは長時間香りが続く（長島，2021）。

ミカンに含まれる精油にはモノテルペンが多く含まれており（表6）、クロマトグラム（図5）のピーク強度をみると、保持時間10.73分に検出されたD-リモネンが香りの主成分であるといえる。D-リモネンは蒸気圧が高いため、香りの消失が速い。したがって、クロマトグラムのピーク強度は、カヤリグサやローズマリーと比較すると低く示され、水蒸気蒸留実験の際に実試料に含まれていたD-リモネンの多くが揮発されたと考えられる。芳香蒸留水にも検出された β -リナロールは、モノテルペン含酸素に分類され、親油性と親水性をもつ成分である。モノテルペンは炭素と水素だけで構成する親油性成分であるが、 β -ミルセン、D-リモネンの溶解度は、それぞれ5 mg/L、7.57 mg/Lであり（長島，2021）、わずかに芳香蒸留水に溶けていたと考えられる。

カヤリグサの精油は、モノテルペン含酸素とセスキテルペンが主要な成分として含まれることが示唆された（表7）。親油性と親水性をもつモノテルペン含酸素は揮発性が高く、芳香蒸留水にも含まれており、花や果実の香りを作り出す β -リナロール、 β -シトロネロール、ネロール、ゲラニオール（長谷川，2016）は、カヤリグサの香りの主成分といえる。その一方で、揮発性は低い香り残存しやすいセスキテルペン（長谷川，2016）も多数含まれており、これらの成分によってカヤリグサの香りを複雑にしているといえる。

ローズマリーについては、クロマトグラムのピーク強度が顕著に表れていることから（図7）、モノテルペンを中心とした精油成分で構成されていることが示された（表8）。すなわち、クロマトグラムにおける保持時間4～10分に検出された構造に酸素含まない α -ピネンやL-リモネンなどは蒸気圧が高く、揮発しやすい性質をもつ成分が香りの主成分であると考えられる。これに加えて、保持時間20分以降に検出された相対的に弱い揮発成分としてセスキテルペンが含まれていることから、ローズマリーはカヤリグサと同様に、柑橘類とは異なるハーブ植物として、多様な香り成分から構成されており、これにより複雑な香気を発生させていることを示唆した。

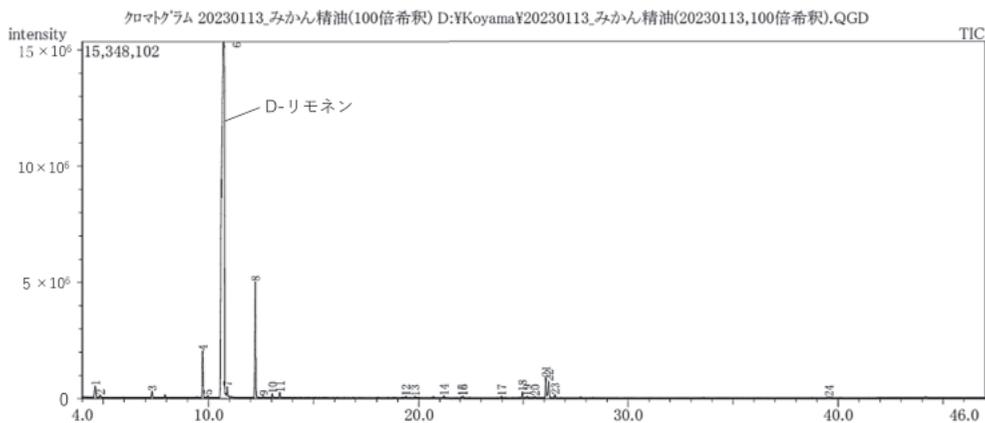


図5 ミカン精油のクロマトグラム (100倍希釈) (横軸：時間 (分) 縦軸：強度)

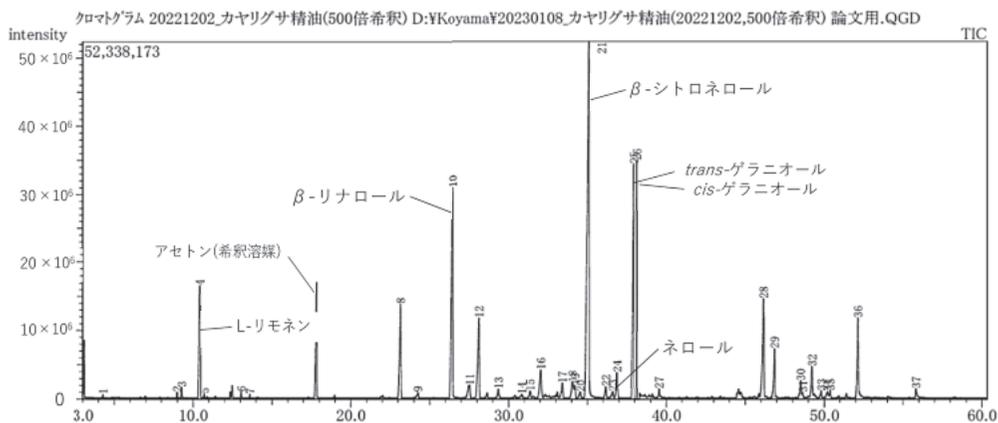


図6 カヤリグサ精油のクロマトグラム (500倍希釈) (横軸：時間 (分) 縦軸：強度)

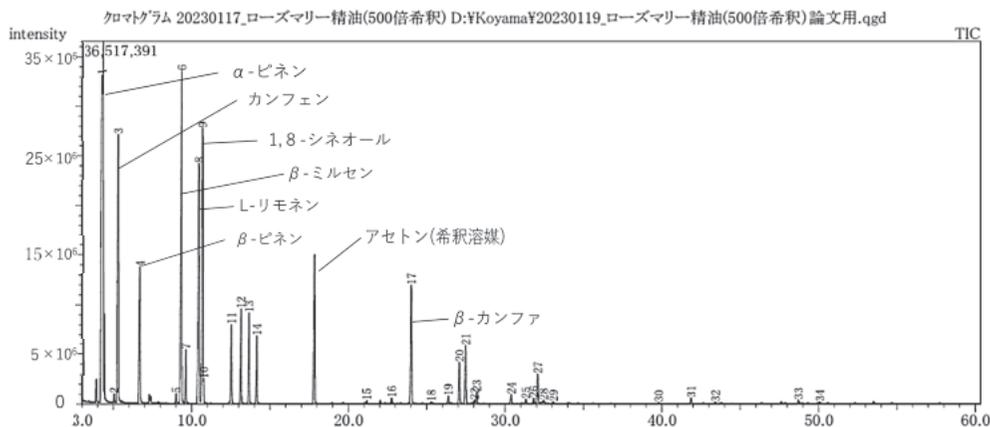


図7 ローズマリー精油のクロマトグラム (500倍希釈) (横軸：時間 (分) 縦軸：強度)

表6 ミカン精油含有の同定成分
(下線表示は芳香蒸留水にも含まれる成分、太字はターゲット成分を示す)

No.	保持時間(min)	化合物名	化学式	分類
1	4.620	α-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
2	4.855	α -Thujene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
3	7.320	β -Pinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
4	9.725	<u>β-Myrcene</u>	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
5	9.965	α -Terpinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
6	10.730	<u>D-Limonene</u>	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
7	10.900	Sabinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
8	12.230	γ -Terpinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
9	12.610	β -Ocimene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
10	13.035	<u>ρ-Cymene</u>	C ₁₀ H ₁₄	モノテルペン
11	13.395	Terpinolene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
12	19.380	Ylangene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
13	19.815	Decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	アルデヒド
14	21.185	<u>β-Linalool</u>	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
15	22.075	β -Elemene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
16	22.145	L-Isocaryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
17	23.970	α -Caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
18	24.970	Germacrene D	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
19	25.195	Aromadendrene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
20	25.565	Bicyclogermacrene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
21	26.085	α -Farnesene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
22	26.220	Germacrene A	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
23	26.510	Germacrene B	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン

表7 カヤリグサ精油含有の同定成分
(下線表示は芳香蒸留水にも含まれる成分、太字はターゲット成分を示す)

No.	保持時間(min)	化合物名	化学式	分類
1	4.285	α-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
2	8.980	α -Thujene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
3	9.275	<u>β-Myrcene</u>	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
4	10.410	<u>L-Limonene</u>	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
5	10.710	Sabinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
6	13.050	α -Ocimene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
7	13.600	<i>o</i> -Cymene	C ₁₀ H ₁₄	モノテルペン
8	23.155	<i>p</i> -Menthone	C ₁₀ H ₁₈ O	その他
9	24.250	α -Bourbonene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
10	26.440	<u>β-Linalool</u>	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
11	27.535	β -Elemene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
12	28.125	L-Aristolene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
13	29.350	<u>D-Menthol</u>	C ₁₀ H ₂₀ O	モノテルペン含酸素
14	30.840	(-)-Aristolene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
15	31.360	β -Farnesene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
16	32.035	Germacrene D	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
17	33.405	<u>α-Citral</u>	C ₁₀ H ₁₆ O	モノテルペン含酸素
18	34.040	Seychellene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
19	34.205	α -Farnesene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
20	34.540	(L/R)-Lavandulol acetate	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	酢酸エステル
21	35.090	<u>β-Citronellol</u>	C ₁₀ H ₂₀ O	モノテルペン含酸素
22	36.165	<u>nerol</u>	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
23	36.595	Geranyl acetate	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	テルペン類
24	36.890	Geranyl propionate	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	テルペン類
25	37.940	<u>trans-Geraniol</u>	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
26	38.130	<u>cis-Geraniol</u>	C ₁₀ H ₁₉ O	モノテルペン含酸素
27	39.545	Neryl acetate	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	酢酸エステル
28	46.160	γ -Maaliene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン類
29	46.855	Geranyl tiglate	C ₁₅ H ₂₄ O ₂	その他
30	48.515	T-Cadinol	C ₁₅ H ₂₆ O	セスキテルペン含酸素
31	48.645	Hinesol	C ₁₅ H ₂₆ O	セスキテルペン含酸素
32	49.235	<u>Phenyl ethyl tiglate</u>	C ₁₃ H ₁₆ O ₂	その他
33	49.815	Guaiol	C ₁₅ H ₂₆ O	セスキテルペン含酸素
34	50.205	β -Eudesmol	C ₁₅ H ₂₆ O	セスキテルペン含酸素
35	50.385	Epiglobulol	C ₁₅ H ₂₆ O	セスキテルペン含酸素
36	52.140	Decanoic acid	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	その他
37	55.820	2-Dodecenoic acid	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	その他

表8 ローズマリー精油含有の同定成分
(下線表示は芳香蒸留水にも含まれる成分、太字はターゲット成分を示す)

No.	保持時間(min)	化合物名	化学式	分類
1	4.365	<u>α-Pinene</u>	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
2	5.050	D-Camphene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
3	5.320	Camphene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
4	6.700	β -Pinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
5	9.005	α -Phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
6	9.370	<u>β-Myrcene</u>	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
7	9.630	α -Terpinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
8	10.475	<u>L-Limonene</u>	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
9	10.705	<u>1,8-Cineole</u>	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
10	10.760	Sabinene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
11	12.540	Tricyclene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
12	13.155	<u>3-Octanone</u>	C ₈ H ₁₆ O	その他
13	13.665	<u>ρ-Cymene</u>	C ₁₀ H ₁₄	モノテルペン
14	14.160	Terpinolene	C ₁₀ H ₁₆	モノテルペン
15	21.165	ρ -Cymenene	C ₁₀ H ₁₂	モノテルペン
16	22.760	Ylangene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
17	24.015	<u>(\pm)-Camphor</u>	C ₁₀ H ₁₆ O	モノテルペン含酸素
18	25.285	3-Pinanone	C ₁₀ H ₁₆ O	モノテルペン含酸素
19	26.375	<u>β-Linalool</u>	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
20	27.085	<u>Bornyl acetate</u>	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
21	27.490	Aromadendrene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
22	28.040	Isolodene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
23	28.180	4-Carvomenthenol	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
24	30.385	α -Caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
25	31.325	α -Amorphene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
26	31.825	<u>Verbenone</u>	C ₁₀ H ₁₄ O	テルペン類含酸素
27	32.080	Isoborneol	C ₁₀ H ₁₈ O	モノテルペン含酸素
28	32.450	Germacrene D	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
29	33.075	<i>cis</i> - α -Bisabolene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
30	39.795	α -Calacorene	C ₁₅ H ₂₀	セスキテルペン
31	41.870	Caryophyllene oxide	C ₁₅ H ₂₄ O	セスキテルペン含酸素
32	43.415	Seychellene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン
33	48.715	Patchoulene	C ₁₅ H ₂₄	セスキテルペン類
34	50.075	α -Bisabolol	C ₁₅ H ₂₆ O	セスキテルペン類含酸素

(4) ターゲット成分の定量分析

① 検量線の作成

各試料の精油中に含まれている香りの特徴づける成分として選択したターゲット成分7種がおおよそどの程度の濃度で含まれているかを調べるために定量分析を行った。各ターゲット成分の標準物質を用いて、絶対検量線法による原点通過の3点以上の検量線を作成し、成分濃度を算出した。それぞれの成分に対する定量濃度範囲を表9に示す。なお、試料溶液はこの定量濃度範囲内におさまるように希釈して分析した。検量線作成に用いた各標準物質の濃度調製は、柑橘類またはハーブの精油成分の希釈溶媒はそれぞれメタノールとアセトンを用い、芳香蒸留水成分の抽出溶媒は両者ともアセトン：ヘキサン＝1：1の溶媒を用いた。表10に3試料それぞれに関連するターゲット成分に対する検量線の近似式を示す。なお、D-リモネンの光学異性体である樹木系の香りを発するL-リモネンについては、標準物質D-リモネンを用いて検量線を作成した。

表9 ターゲット成分の定量濃度範囲

標準物質名	化学式	**定量濃度範囲 (mg/mL)	分析に使用した試薬
α -Pinene	$C_{10}H_{16}$	0～0.25	富士フィルム和光純薬
D-Limonene	$C_{10}H_{16}$	0～1.00	ナカライテスク
β -Linalool	$C_{10}H_{18}O$	0～0.10	富士フィルム和光純薬
β -Citronellol	$C_{10}H_{20}O$	0～0.15	富士フィルム和光純薬
Geraniol	$C_{10}H_{18}O$	0～0.15	富士フィルム和光純薬
(\pm)-Camphor	$C_{10}H_{16}O$	0～0.15	富士フィルム和光純薬
1,8-Cineole	$C_{10}H_{18}O$	0～0.15	富士フィルム和光純薬

**試料溶液は定量濃度範囲内に希釈して分析を行った

② 3試料におけるターゲット成分の定量

3試料の試料溶液（精油または芳香蒸留水）それぞれに含まれているターゲット成分の定量分析を行った。GC/MSによって分析されたターゲット成分の濃度 (mg/L) を検量線（表10）によって算出し（表11）、試料溶液1 mLあたりに含まれるターゲット成分の含有率 (%) を求めた。図8は、精油試料1 mLに含まれるターゲット成分の組成を表している。なお、芳香蒸留水中の定量は、捕集剤によって捕集した揮発成分をすべてデータに反映したと仮定している。いずれの試料についても、精油には芳香蒸留水よりもおよそ200～1000倍以上濃度が高いターゲット成分が含まれていることがわかった。柑橘類の代表的な香りをもつD-リモネンは、ミカンにおいて顕著に濃度が高く、そのほとんどが精油に含まれていた。精油試料1 mLに含まれる成分組成（図8）で見ると、ミカン精油の主成分が85%以上を占めるD-リモネンであることが明らかである。な

お、D-リモネンの光学異性体であり樹木の香りをもつL-リモネンはカヤリグサとローズマリーの精油に高濃度で含まれていた。また、カヤリグサ精油ではゲラニオールが他のターゲット成分よりも高い濃度の383.94 mg/mLであり、ローズマリーの精油では α -ピネンが最も含有濃度が高く355.40 mg/mLを示し、それぞれが主成分であると考えられる。しかしながら、成分組成（図8）では、カヤリグサ精油中にゲラニオール43.56%、ローズマリーに α -ピネン41.20%であり、他のターゲット成分とその他成分の組成率を考慮すると、これらの香りと実試料の香りとは異なるこ

表 10 3試料に対するターゲット成分定量のための検量線

試料		ターゲット成分	検量線 (C:成分濃度(mg/mL)、 A:各成分ピーク面積)	相関係数 (R)
ミカン	精油	α -Pinene	$C = 9.497 \times 10^9 \times A$	0.999
		D-Limonene	$C = 7.869 \times 10^9 \times A$	0.993
		β -Linalool	$C = 1.944 \times 10^8 \times A$	0.999
	芳香蒸留水	α -Pinene	$C = 7.172 \times 10^9 \times A$	0.997
		D-Limonene	$C = 6.191 \times 10^9 \times A$	0.998
		β -Linalool	$C = 4.048 \times 10^8 \times A$	0.999
カヤリグサ	精油	α -Pinene	$C = 1.636 \times 10^{12} \times A$	0.998
		***L-Limonene	$C = 1.570 \times 10^{12} \times A$	0.998
		β -Linalool	$C = 1.754 \times 10^{12} \times A$	0.999
		β -Citronellol	$C = 1.558 \times 10^{12} \times A$	0.999
		Geraniol	$C = 2.279 \times 10^{12} \times A$	0.999
	芳香蒸留水	α -Pinene	$C = 1.529 \times 10^{12} \times A$	0.998
		***L-Limonene	$C = 1.452 \times 10^{12} \times A$	0.998
		β -Linalool	$C = 1.909 \times 10^{12} \times A$	0.998
		β -Citronellol	$C = 2.444 \times 10^{12} \times A$	0.999
		Geraniol	$C = 2.207 \times 10^{12} \times A$	0.993
ローズマリー	精油	α -Pinene	$C = 1.636 \times 10^{12} \times A$	0.998
		***L-Limonene	$C = 1.570 \times 10^{12} \times A$	0.998
		β -Linalool	$C = 1.754 \times 10^{12} \times A$	0.999
		1,8-Cineole	$C = 1.252 \times 10^{12} \times A$	0.997
		(\pm)-Camphor	$C = 1.359 \times 10^{12} \times A$	0.999
	芳香蒸留水	α -Pinene	$C = 1.529 \times 10^{12} \times A$	0.998
		***L-Limonene	$C = 1.452 \times 10^{12} \times A$	0.998
		β -Linalool	$C = 1.909 \times 10^{12} \times A$	0.998
		1,8-Cineole	$C = 1.221 \times 10^{12} \times A$	0.999
		(\pm)-Camphor	$C = 1.344 \times 10^{12} \times A$	0.999

***標準試薬は光学異性体であるD-Limoneneを用いた。

表 11 試料溶液中のターゲット成分の含有濃度

ミカン

ターゲット成分	精油	芳香蒸留水
	含有濃度(mg/mL)	含有濃度(mg/mL)
α-Pinene	5.75	—
D-Limonene	718.76	5.14×10^{-3}
β-Linalool	1.48	1.53×10^{-3}

カヤリグサ

ターゲット成分	精油	芳香蒸留水
	含有濃度(mg/mL)	含有濃度(mg/mL)
α-Pinene	0.75	—
L-Limonene	67.22	0.44×10^{-3}
β-Linalool	57.44	35.91×10^{-3}
β-Citronellol	83.84	16.17×10^{-3}
Geraniol	383.94	138.97×10^{-3}

ローズマリー

ターゲット成分	精油	芳香蒸留水
	含有濃度(mg/mL)	含有濃度(mg/mL)
α-Pinene	355.40	2.11×10^{-3}
L-Limonene	58.25	—
β-Linalool	0.80	1.45×10^{-3}
1,8-Cineole	72.13	127.36×10^{-3}
(±)-Camphor	27.45	117.64×10^{-3}

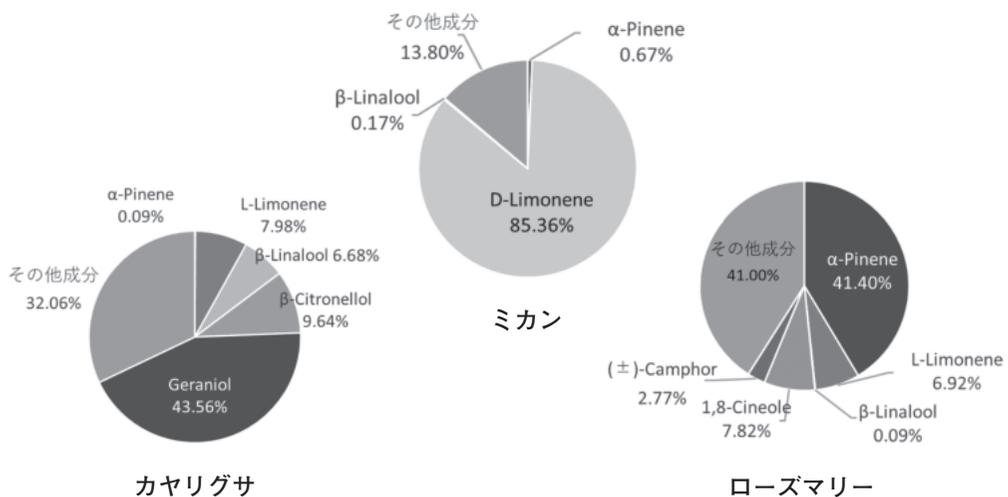


図 8 精油試料1mL中に含まれるのターゲット成分組成

とが予想される。つまり、高濃度で検出されたターゲット成分は実際に感じる植物試料の香りと同じではなく、少量の様々な種類のテルペン類が組み合わさることで、実際の植物の香りを構成する(長谷川, 2016)。このことは類似した成分を含んでいるのにもかかわらず、異なる香りを発現することでもあり、特に蒸気圧の異なる多種類の成分を含むハーブ類の香りは複雑なバランスによって成り立っているといえる。

3-4 教育内容への活用

本実験で得られたデータを用いて、教育にどのように活用可能であるかを検討した。本実験の内容は、中学校理科における第1分野では「単元2：身の回りの物質」および「単元7：科学技術と人間」、また第2分野では「単元7：自然と人間」にあたり、複数の単元に跨った教育内容として以下に提案する。

まず、日常的に身の回りにある自然観察の中で、視覚で多様な植物によって構成されていること、また、嗅覚によっても多様な植物にはそれぞれ香りが存在することを気づかせることを1つ目のねらいとする。また、採取した植物の香りの共通点や相違点などを表にまとめるなどして、自然素材の「香り」の多様性や類似性を見出し、関心を高めていく。この活動は、中学校だけでなく小学校における嗅覚を用いた自然学習としても有用かつ有効であると考えられる。

また、観察によって見出した共通または類似した「香り」の特徴を持つ植物には、同じ成分の「香り」が含まれているのか、その「香り」は取り出せるのか、などの深い探究へ導いていくことが2つ目のねらいとなる。実際に簡易水蒸気蒸留装置を用いた実験によって精油および芳香蒸留水の抽出を行うことで、「香り」を溶液として取り出し、五感を用いて抽出溶液の色や「香り」などを観察した結果、フィールドワークによって得られた植物体そのものの「香り」との違いに気づくことを想定している。

さらに、発展学習として、精油や芳香蒸留水にはどのくらいの種類の成分が入っているのか予想させ、学習支援資料として本研究で作成した成分表(表6～8)やGC/MSによるクロマトグラム(図5～7)を用いることで、自然素材の「香り」成分の多様性や複雑性を読み取らせる。あるいは、主成分の標準物質試料を調合して自分で自然素材の香りを試作する。このような作業プロセスを取り入れることで、柑橘類、ハーブ類のなど植物種の違いによって特有の「香り」成分の構成をもち、異なる植物に同一の「香り」成分が入っていることなどに気づくことができる。このように、自然素材それぞれは唯一の存在であり、人間では全く同じ「香り」を作り出すことができないことを知ることから、自然の尊さを実感することが3つ目のねらいとなる。

以上に提案したように、教育内容に「香り」を取り入れることで積極的に自然環境への理解が深まり、長期記憶として残る嗅覚での学びは成長段階において持続していくのではないかと考える。しかしながら、学習支援資料の向上のために、より多くの精油を抽出し、データ収集する必要がある。そのために蒸留装置の改善、蒸留実験条件の検討、抽出しやすい試料の選択をするなどの工夫が必要になるであろう。また、香り成分の同定および構造決定をより明確にするためには、

GC-MS 分析に加え、核磁気共鳴スペクトル法（NMR スペクトル法）や赤外吸収分光法（IR 法）を実施することが考えられるが、複数の機器分析法を取り入れるならば、高校化学「単元 4：有機化合物の性質」（文科省，2018）にまで活用が拡大される。

このように「香り」は、視覚による自然体験から発展し、嗅覚による香りの自然学習へ展開することができ、さらに化学の知識まで踏み込んだ内容までつながることが期待され、小学校、中学校、高校までの幅広い校種において活用される教材になり得る。

4. おわりに

本研究では、「香り」を取り入れた教育内容の可能性を考察し、具体的に自然素材の「香り」成分を用いた教材を開発するために、身近な自然素材を試料として精油および芳香蒸留水の抽出実験を行った。また、自然素材から抽出した試料溶液を GC/MS によって分析し、「香り」成分の同定と主要成分の濃度測定を行った。さらに、本実験で得られた成果の学習内容への活用を検討し、提案した。その結果、「香り」の教育内容における有効性が示唆され、さらに高校への学習展開の可能性が得られた。「香り」を活用した教育は、体験活動をベースとされるものであると考えられ、嗅覚が長期記憶に資することを踏まえると、初等教育内容に取り入れていくことも今後は必要である。

謝 辞 本研究は科学研究費基盤研究（B）21H00918 の助成を受けて実施しました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 山田卓三（2002）理科のベースとなる自然体験—原体験、この「無用の用」の重要性—、初等理科教育, 36, pp.14-17.
- 山本晃輔（2008）におい手がかりが自伝的記憶検索過程に及ぼす影響、心理学研究, 79, 2, pp.159-165.
- 公益社団法人日本アロマ環境協会（AEAJ）, <https://www.aromakankyo.or.jp/activity/kouiku/>（2023.2.28 閲覧）
- 見目孝雄（2015）「香育」の意義と有用性、実教出版、じっきょう家庭科資料, 54
- 山下慎二（2009）生活科の自然体験活動における嗅覚活用能力の育成に関する一考察～嗅覚を重点化した視点から～、生活科・総合的学習研究, 7, pp.41-50.
- WWF ジャパン（2018）環境教育プログラム「においてめぐる動物園 —くんくん Planet に出かけよう」<https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/3808.html>（2023.2.28 閲覧）
- 文部科学省、持続可能な開発のための教育、<https://www.mext.go.jp/unesco/004/1339970.htm>（2023.2.28 閲覧）
- 文部科学省（2017）中学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説 理科編、学校図書、pp.63-69, pp.109-113.
- 大矢禎一ほか（2022）「未来へひろがるサイエンス 3」、啓林館、pp.251-315.
- 有馬朗人ほか（2022）「理科の世界 3」、大日本図書、pp.285-327.
- 梶田隆ほか（2022）「新しい科学 3」、東京図書、pp.253-313.
- 霜田光一ほか（2022）「中学校 科学 3」、学校図書、pp.114-127, pp.242-263.
- 室伏きみ子ほか（2022）「自然の探究 中学理科 3」、教育出版、pp.262-289, pp.308-325.

- 大野一仁, 有賀久弥, 市川亮一 (2010) 柑橘の精油, 産総研四国地域イノベーション創出協議会, 食品中の健康機能性成分の分析法マニュアル
- 大野幸雄 (1973) ゼラニウム油の分析化学的考察, ガスクロマトグラフ直結質量分析計による精油類の試験法に関する研究, 4, pp.127-140.
- 三上杏平 (2010) エッセンシャルオイル総覧, フレグランスジャーナル社, p.287.
- 佐藤幸子, 数野千恵子, 西島基弘 (2008) タイムの加熱による香气成分の挙動, 日本調理科学会誌, 41, 2, pp.111-116.
- 長島司 (2021) ビジュアルガイド精油の化学2, 日本の精油と世界の精油, フレグランスジャーナル社, p.40.
- 菊川裕幸, 三輪邦興, 八尾正幸 (2022) 簡易な水蒸気蒸留装置による和精油抽出, アロマセラピー学雑誌, 23 (1), pp.1-8.
- 是沢儀明 (1959) 香料ゼラニウム精油の増収機構に関する研究, 熱帯農業, 3, 1, pp.23-28.
- 長谷川登志夫 (2016) 香りがナビゲートする有機化学, コロナ社, p127.
- 文部科学省 (2018) 高等学校学習指導要領 (平成30年告示) 解説 理科編 理数編, pp.107-111.