T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	多成分調合型嗅覚ディスプレイの評価に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	伊関方晶
Author(English)	Masaaki Iseki
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11836号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中本 高道,三宅 美博,山村 雅幸,小野 功,長谷川 晶一
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11836号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

博士論文

多成分調合型嗅覚ディスプレイの評価に関する研究

伊関　方晶

東京工業大学大学院
総合理工学研究科
知能システム科学専攻
中本 高道 研究室

令和 4 年 3 月

目　次

第 1 章　緒論 4
1.1　はじめに 4
1.2　ヒトの嗅覚 5
1.2.1　匂いの受容機構 5
1.2.2　匂いの知覚 6
1.2.3　表象 7
1.3　嗅覚と官能検査 8
1.3.1　分析型・嗜好型 8
1.3.2　3 点識別法 8
1.3.3　嗅覚と官能検査 8
1.4　匂い提示装置 10
1.4.1　オルファクトメータ 11
1.4.2　映画と匂い提示装置 13
1.4.3　匂い提示装置の製品化 14
1.5　匂い提示の再現 17
1.5.1　匂いのセンシング 17
1.5.2　匂いセンサ 19
1.5.3　質量分析器 20
1.5.4　先行研究（匂い提示の再現） 21
1.5.5　関連研究（匂い提示の再現） 23
1.6　嗅覚ディスプレイと要素技術 26
1.6.1　気化技術と搬送技術 26
1.6.1.1　気化技術（匂いの生成方法） 27
1.6.1.2　搬送技術（匂いの供給方法） 34
1.6.2　その他の技術 37
1.6.2.1　匂いの調合・切替え技術 38
1.6.2.2　残臭の低減技術 38
1.6.2.3　身体との関係性 39
1.7　嗅覚ディスプレイの評価 40
1.7.1　関連研究（嗅覚ディスプレイの評価） 40
1.7.2　評価項目と評価手法 44
1.8　本研究の目的・意義 45
1.9　本論文の構成図 46

第 2 章　多成分調合型嗅覚ディスプレイの仕組み 48
2.1　電磁弁高速開閉型 48
2.2　弾性表面波霧化器型（据置型） 51
2.3　弾性表面波霧化器型（ウェアラブル型） 54

第 3 章　制作したコンテンツ 56
3.1　クロスモーダル知覚 56
3.1.1　視覚と聴覚 57
3.1.2　視覚と体性感覚・力触覚 57
3.1.3　視覚と自己受容感覚 58
3.1.4　味覚と嗅覚 58
3.2　Virtual Reality 59
3.2.1　入力・出力インターフェース 59
3.2.2　臨場感 59
3.3　匂いと記憶 61
3.4　制作したコンテンツ 62
3.4.1　Virtual Desserts using Olfactory Display 62
3.4.1.1　実験手順 62
3.4.1.2　実験結果 63
3.4.1.3　改善点（ユーザーの動作検知） 66
3.4.1.4　実験系 66
3.4.1.5　センサユニットを用いた実験結果 67
3.4.1.6　まとめ 68
3.4.2　Cocktail Maze 70
3.4.2.1　体験方法（ウェアラブルバージョン） 70
3.4.2.2　デモンストレーションとアンケート結果 71
3.4.2.3　まとめ 74
3.4.3　匂い手がかりによる臨場感の研究 75
3.4.3.1　実験手法 75
3.4.3.2　官能検査 77
3.4.3.3　実験結果 77
3.4.3.4　考察 78
3.4.3.5　まとめ 79
3.4.4　デモンストレーション・実験から得た知見 79

第 4 章　匂いの提示速度による評価 80
4.1　評価する嗅覚ディスプレイ 80
4.2　実験 81

4.2.1　実験 1（官能検査）..... 81
4.2.2　実験 2（機械計測）..... 82
4.2.3　実験 3（官能検査）..... 84
4.3　実験結果..... 86
4.4　考察..... 89
4.5　まとめ..... 90

第 5 章　匂い提示の再現による評価..... 91
5.1　提案手法..... 91
5.1.1　用いる精油と要素臭..... 91
5.1.2　匂い提示の再現..... 92
5.2　20 成分調合型嗅覚ディスプレイ..... 93
5.2.1　機器の概要..... 93
5.2.2　匂い提示部（presenting section）..... 93
5.2.3　制御部（control section）..... 95
5.2.4　吐出量の計測..... 96
5.2.5　計測結果..... 106
5.2.6　電圧・周波数の組合せ..... 107
5.2.7　対象臭における組合せ..... 108
5.3　官能検査..... 110
5.3.1　予備実験..... 110
5.3.2　本実験..... 111
5.4　考察..... 112
5.5　まとめ..... 114

第 6 章　結論..... 115

謝辞..... 116

参照文献..... 117

発表文献..... 121

第 1 章　緒論

本章では先ず、ヒトの嗅覚について概観する（1.1 および 1.2）。そして、本論文で示す主要な 2 つの研究（第 4 章、第 5 章）に関わる官能検査について説明する（1.3）。また、匂い提示装置の歴史的な経緯を俯瞰する（1.4）。一方、提示する匂いの再現性の観点から、嗅覚情報の記録と再生について記す（1.5）。続いて、匂い提示装置の一つである嗅覚ディスプレイを構成する要素についてその技術的側面から考察し（1.6）、それに基づいて嗅覚ディスプレイの評価に関して記す（1.7）。そして最後に、本研究の目的と意義（1.8）、および本論文の構成について示す（1.9）。

1.1　はじめに

ヒトにとって匂いの感覚：嗅覚は重要である。食物の鮮度や安全性を確認し、異臭を感じて身に迫る危険を回避するなど、現代の日常生活においてもその役割は大きい。けれども、その重要性にはなかなか気付かないことも多い。嗅覚を失ったアノスミーの患者が抱く絶望感は私たちの想像をはるかに超えるもので、実際に自殺を企てる者もある[1]。飲食で得られる悦びの大半は匂い（フレーバー）に依拠している。さらに花の香りで気が付く季節の移り変わりや潮風を感じたときの独特の気分など、文化に根差した匂いの情報は私たちの生活を豊かにしてくれる[2]。また、匂いは遠い昔の記憶を呼び起こす作用が視覚刺激や聴覚刺激よりも優れており、物事の想起の手がかりとなることはよく知られている[3]。

一方、匂いに関わる研究は医学・生理学、心理学、工学、そして脳科学など多岐にわたるが、嗅覚のメカニズムの解明に歴史的な知見が示され[4]、様々な分野で新たな研究がスタートした。これまでは視覚と聴覚、そして力・触覚が中心であったヒューマンインターフェースの領域において匂い情報の記録と再生の研究がさかんとなり、ヒューマン嗅覚インターフェースと呼ばれる分野が確立された[5]。

ヒューマン嗅覚インターフェースにおいては匂いセンサや質量分析器が匂い情報の記録・抽出を行い、そのデータに基づいて”嗅覚ディスプレイ（olfactory display）”と呼ばれる装置が匂いの再生（提示）を実現する。

本論文では、嗅覚ディスプレイの開発および嗅覚ディスプレイの評価に関する研究の動向を調べ、本研究室で製作した多成分調合型嗅覚ディスプレイの評価に関して論ずる。

1.2 ヒトの嗅覚

嗅覚は匂いあるいは香りを検出する感覚で、ヒトの場合は検出器官が鼻にある。ヒトの嗅覚経路を図 1.2-1 に示す。嗅覚は化学的感覚であり、私たちが日常生活で接する匂いには多様な匂い物質（分子）が混在している。匂い物質の種類は 40～50 万あるといわれている[6][7]。

匂いの発生源から空気中に揮発した様々な匂い分子は鼻腔から呼気とともに取り込まれ、鼻腔の奥の上部にある嗅上皮の嗅粘膜に吸着する。あるいは、飲食物を摂取した際、口腔の奥から吸気が鼻に抜けることで匂い物質が取り込まれる。前者をオルソネーザル前鼻腔性嗅覚（orthonasal olfaction）、後者をレトロネーザル後鼻腔性嗅覚（retronasal olfaction）と区別することがある。

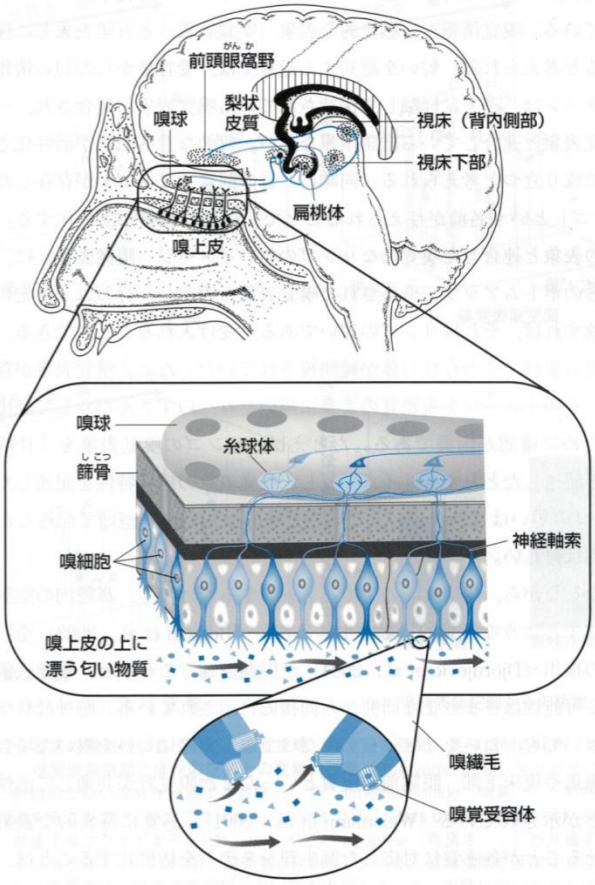


図 1.2-1　嗅覚経路, [6], p.93

1.2.1 匂いの受容機構

ヒトの嗅細胞は嗅粘膜に存在する。嗅細胞には異なる種類の受容タンパク質があり、それぞれの構造を持った嗅覚受容体（olfactory receptors）を構成している。それらの嗅覚受容体の構造に応じて匂い分子を選択的に受容する。ヒトの嗅覚受容体遺伝子の数は 396 個である[7]。

嗅覚受容体と匂い分子との対応関係は 1 対 1 ではなく、1 つの受容体は複数の匂い分子を受容し、1 つの匂い分子は複数の受容体で受容される。匂い分子と受容体の間には多対多の関係が成り立っている。

つまり、匂い分子が数百種類のうちどの嗅覚受容体と結合するかという組合せは匂い分子によって異なり、その特有のコーディングが匂いの質（匂いの種類）を決めている。なお、この受容体の反応は興奮性の場合と抑制性の場合がある。

次に、匂い分子に対する嗅細胞の応答は電気信号に変換され、各嗅細胞から神経軸索を経て嗅球（嗅覚の 1 次中枢）に投射される。同じ嗅覚受容体からの神経軸索は同一部位に投射され、それぞれ糸球体を形成する。嗅球からの投射は、→ 偏桃体 → 視床下部 → 前頭眼窩野背側後部を通る神経路と、→ 梨状皮質 → 視床背内側部 → 前頭眼窩野中央後部を通る神経路の 2 つが確認されている。

1.2.2 匂いの知覚

化学物質の集合体である匂いをヒトが知覚するための指標として閾値、感覚強度、分類がある[6][8]。

・閾値には、検知閾、弁別閾、認知閾がある。検知閾は何かしらの匂いを検出できる最小の匂い物質の濃度を指す。弁別閾は匂いの感覚的強度の差異を識別できる最小の匂い物質の濃度差をいう。そして、認知閾はその匂いが何であるかが分かる（同定できる）最小の匂い物質の濃度である。

匂い物質の種類によって閾値は異なるため、これまでに様々な匂い物質に対する検知閾が計測され、報告されている。閾値の情報は特に悪臭の規制など、実生活に関わる場面で必要とされてきた。しかし、同一の匂い物質の閾値であっても、温度や湿度、匂いの提示手法や嗅ぎ方などによる匂い物質の物理的・化学的な挙動の変化、測定方法、評定者の体調、そして性別や生理周期等によるホルモンバランスの差異などが影響して、その値は大きく異なる。

また、嗅覚における閾値は外部情報の入り口における感度ともとらえられ、知覚的な経験の繰り返しによってその値は変化することが知られている。

・感覚強度は匂い物質に対して感じる強さの度合いであり、一般的にはその匂い物質の濃度に依存する。カテゴリー尺度のような差の判断に基づく強度評定法ではフェヒナー（G. T. Fechner）の法則に基づく”対数関数”が成り立ち、一方、マグニチュード推定法のような比率判断に基づく強度評定法では、スティーヴンス（S. Stevens）の法則に対応する”べき関数”が成立する。これらの関数は匂い物質ごとに異なる。また、べき関数については多くの匂い物質が 1 以下のべきを示すといわれている。

そして、鼻が同じ匂いに一定期間さらされているとその匂いの強度が低下し、やがて感じられなくなる現象を順応（adaptation）という。順応のメカニズムは、抹消レベルでは同じ匂い刺激が連続して入力されることにより、嗅細胞が匂い分子を受けつけなくなる状態となる。また、中枢レベルでは一定期間に入力され続ける同じ匂い刺激に対して、中枢処理反応が慣れて知覚が生じなくなることによって起きる現象である。順応は”嗅覚疲労”と呼ばれることもあり、その個人差には幅がある。

・匂いの分類に関しては、その知覚的な質を定性的に分ける方法がかなり古くから試みられており、20 世紀初頭の H. Henning の匂いプリズムなどがあげられる。彼は心理学的実験に基づいて匂いを 6 つのグループ（薬味、花、果実、樹脂、焦性、腐敗）に分類し、どのグループにも属さない匂いはプリズムの面上の 1 点で表せると考えた。しかし、この説では複合的な匂いを表現できない等の不合理な点が指摘され、現在では歴史的な意味しか持たない[9]。

匂いの分類は環境や文化的背景に基づいており、匂いの認知を言語化する方略が違えば匂いの質の分類は必然的に異なってくる。それでも、匂いの質を言語的に評価して分類する手法により、幾つかの用語セットが研究されてきた。花の香りに限定した形容詞セット[10]、快い匂いのみを記述する形容語セット[11]、そして 146 の記述子への当てはまり度合いから匂いのプロファイルを作成する提案[12]等があげられる。さらに、匂い分子の受容体が解明された近年では匂いの質を匂い分子の化学的特性と結びつけて分類を行った研究（Khan et al., 2007）などもみられる。

1.2.3 表象

表象（representation）とは、知覚心理学においては外界における事物を表す心のなかの表現を指す[6]。一般に、ヒトが外界の情報を保存する際にはその感覚モダリティに特有な表象と言語的な表象による二重符号化が行われる（Paivio, 1971）[8]。

大脳皮質に至った匂い情報は多数の受容体の応答パターンの組合せから成り立つ。ヒトはこの応答パターンを知覚し、最終的には認知する。匂いの認知における嗅覚情報は、感覚的な表象（嗅覚表象）と言語表象とに符号化される。そのプロセスでは、受容体からの匂い情報の応答パターンが過去に経験して保持されている嗅覚表象と照合され、一致した嗅覚表象と連合している言語情報などの一般的な意味記憶が活性化されると考えられている。

嗅覚表象に関わる研究では、脳神経科学の分野において、ヒトがある匂いをイメージしただけで実際に匂いを嗅いだ場合と同じ部位：海馬、視床下部、眼窩前頭皮質といった 2 次嗅覚野が共通して活性化することが示された（Weismann et al., 2001）。また、複数の匂いイメージの類似度から構成した嗅覚表象空間と、匂いを実際に嗅ぎ比べた場合の類似度から構成された感覚空間との関係性を比較した知見（Carrasco & Ridout, 1993; Chrea et al., 2005 ; Sugiyama et al., 2006）などがあげられる。これらの研究成果は嗅覚表象が確かに存在し、その嗅覚表象には実際の匂いの感覚的特徴があることを示唆している。

1.3 嗅覚と官能検査

ヒトの感覚器官を使って行う検査を官能検査という[13][14]。官能検査は主に、新製品や改良製品の品質・特徴を確かめて、工業製品等における品質管理や研究開発に役立てることを目的とする。さらに、評価パネル（官能検査の実験参加者）の感覚機能および心理的な特性を測る目的でも行われる。

1.3.1 分析型･嗜好型

官能検査はその手法から、分析型官能検査と嗜好型官能検査に分けられる。代表的な官能検査方法とその内容を表 1.3-1 に示す。識別法に属する検査方法は主に分析型、嗜好法に属する検査方法は嗜好型である。前者はヒトの感覚器官を測定器として用いて、ある試料（製品）の特長や試料間の差異を明らかにする。評価パネルに提示する刺激の物理量に対応する感覚量を測ることで得られたデータを解析する。

一方、後者は試料を使ってヒトの嗜好性を調べ、消費者の感覚的・心理的な傾向等を把握する。分析型官能検査に比べて物理量と感覚量の対応が明確ではなく、嗜好を形成する要因について仮説が立てにくいため、データの解析においては予め、評価パネルの属性等を把握した上で考察が行われる[15]。

1.3.2 3 点識別法

本研究における実験で用いた 3 点識別法は、A, B の 2 種類の試料の違いを判定させるために、2 つの同じ試料と異なる 1 つの試料の計 3 試料を評価パネルに一度に提示し、その組合せの中から異なる 1 つを選別させる（逆に、同種の 2 つを選定させる手法もある）。これを繰り返すことで得られた正答率から、2 種類の試料間に違いがあるか、あるいは評価パネルにおいて試料に対する識別能力があるか等を調べることができる[16]。

3 点識別法は、2 点識別法と比較して集中して該当するものを選ばせることができるうえ、さらに区別は出来ていないがたまたま正解を選んだ評価パネルの正答率（まぐれ当たり）を下げることができるため、より精度の高い検査を行うことが可能となる。フレーバーやフレグランスにおける香料の開発プロセスにおいては頻繁に用いられている。

1.3.3 嗅覚と官能検査

匂いを測る際、臭気ガスをオルファクトメータ（後述）により機械的に計測してヒトに提示する方法が従来から使われている。一方で、実際にヒトの嗅覚を用いた官能検査の重要性は変わらず、依然として行われている。香料の開発などにおいては調香師等のプロフェッショナルパネルによる分析型の官能検査と、一般ユーザーによる嗜好型の官能検査の両方が行われるケースが多い。また、臭気公害への対策としては臭気判定士による悪臭の評定が行われている。さらに、ヒトの嗅覚の能力が正常であるかを確かめるため、耳鼻咽喉科分野では嗅覚障害の診断等においても、T&T オルファクトメータ法（匂い検査の簡易型キットで日本独自のツール）を使った官能検査が実施されている。

官能検査によって匂いを測る際、その測定対象は検知閾、認知閾といった嗅覚強度に基づくものの他に、匂いの同定（識別）能力等があげられる[17]。

表 1.3-1　代表的な官能検査方法, [13][14]より作成

検査方法	内容
識別法	
1点識別法	盲試料Aをm個、盲試料Bをn個、ランダムに提示し、AとBを識別
2点識別法	2つの盲試料を比較して、AとBを識別（前提：盲試料間に客観的な差異がある）
2点同定法	2つの盲試料を2通りのペアでランダムに提示し、ペア間の違いを識別（前提：盲試料間に客観的な差異は不要）
1:1点識別法	明試料Aをm個、明試料Bをn個、ランダムに提示し、AとBを識別
1:2点識別法	明試料Aを最初に提示し、後に2つの盲試料を提示してBを識別
2:2点識別法	明試料Aおよび明試料Bを最初に提示し、後に2つの盲試料を提示しAを識別
3点識別法	2つの盲試料を、AABのように3つを1組として提示し、異なると感じた1つを識別（前提：盲試料間に客観的な差異は不要）
ふりわけ識別法	盲試料Aをm個、盲試料Bをn個、ランダムに提示し、A群とB群に振り分ける
嗜好法	
1点嗜好法	盲試料1つを提示し、好き・嫌い、美味い・不味い、買う・買わない等の2件法で判断
2点嗜好法	2つの盲試料を比較して、好ましい方を指摘（前提：盲試料間に客観的な差異は不要）
3点嗜好法	3点識別法による半端試料の選択後、対試料との嗜好を比較
評定法	
順位法	n個の盲試料を同時に提示し、刺激の大小、好みの大小等に関して順位付けをする
1対比較法	n個の試料から2個ずつ組合わせてn(n−1)/2個のペアを作り、大小、強弱、嗜好等を比較
選択法	n種類の試料をランダムに提示し、最も好ましい1つあるいは最も嫌いな1つを選ぶ
その他	
配偶法	n種類の試料各1個からなる組を2つ作り、各々の組内で記号・順序をランダム化して提示後、同じ試料によるペアを再構成
格づけ法	試料を優・良・可・不可、特級・一級・二級、大・中・小のようにカテゴリーを使い分類する
採点法	試料の特性・好ましさ等に評点をつける（数値尺度を使用）別名：等現間隔法
記述法	試料の質的・量的特性について、数字、言語、グラフ等で詳細に描写、SD法、プロファイル法、QDA法等

1.4 匂い提示装置

匂い情報をヒトへ提示する装置を広義にとらえて”匂い提示装置”という。匂い提示装置の規模は、匂い源である香料から香気をヒトへ届けるその空間の大きさに従って類別される。装置の規模と匂い提示空間の大きさは図 1.4-1 のように示すことができる[18]。この関係性は、例えば映画館で使う目的で古くから考案されてきた匂い提示装置（後述）から、現在普及している室内芳香器（ルームディフューザー）等に至るまで全てに共通する概念である。

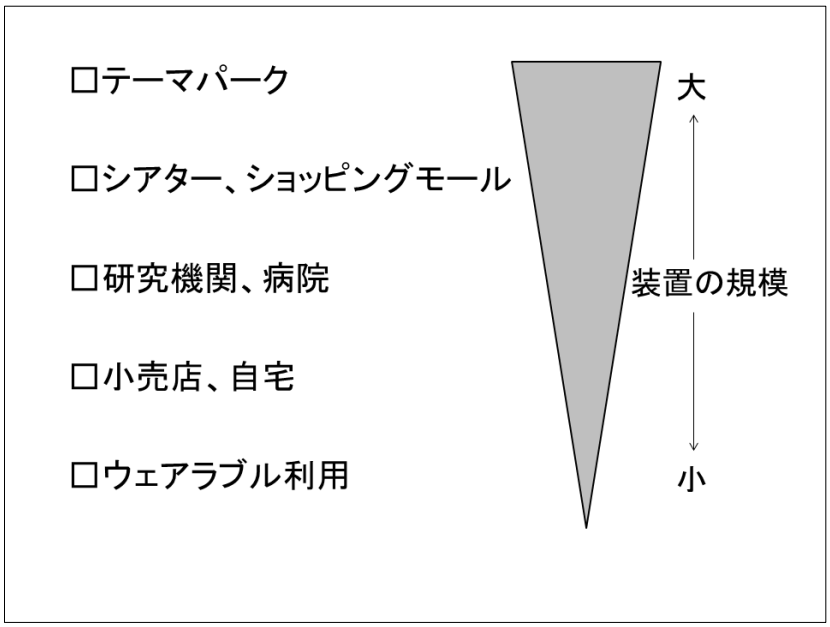


図 1.4-1　匂い提示装置の規模と提示空間, [18]を改訂

一方、嗅覚ディスプレイはコンピュータもしくはスマートフォン等のコントローラからの指令により匂いを発生させ、ヒトへ届ける装置である[19]。そして、匂いを届ける（提示する）際に嗅覚ディスプレイに要求される主な機能は次の 2 点である。

・時間的・空間的な匂い提示の制御ができること
・所望の匂いを任意の比率で調合可能であること

これらの要件を満たせばヒトに提示する匂いの質・濃度をリアルタイムに変化させることができ、VR（Virtual Reality）をはじめとする様々なコンテンツや心理物理学の実験等において幅広く利用可能となる。図 1.4-1 との関連でみると、嗅覚ディスプレイの規模は、ユーザーの身体に装着するウェアラブル型のものから、大掛かりなアトラクションで使われる装置まで様々である。

なお、複数の香料を調合して匂い提示を行う嗅覚ディスプレイを多成分調合型嗅覚ディスプレイ（multi component olfactory display）と呼ぶ。その成分数（チャンネル数）に厳密な定義はないが、1 つのチャンネルを嗅覚ディスプレイ内部のパーツの洗浄等に充てるケースがみられる点を考慮すると、ほぼ 2 成分以上のものを多成分調合型嗅覚ディスプレイととらえられる。

近年の嗅覚ディスプレイの利用例をみると、「感覚ミュージアム」（宮城県）における香りの演出[20]

や、日本航空の空港内ラウンジにおける空間デザイン[21]は比較的大きな規模の匂い提示を商業ベースで実施した例である。一方、新型コロナウィルス（Corona Virus Disease 19）の感染で引き起こされる嗅覚障害の予防に応用されている研究例[22]は私たちの生活にとっても身近な話題である。また、映像や音楽と組み合わせて様々な香りの変化を実現し、ディジタルサイネージ等において手軽に利用できるアロマシューター[23]は、SDK の提供体制が備わっていることもあり国内外で既に話題となっている。

次に、匂い提示装置の研究に注目して、主要な学術論文の検索サイトで”嗅覚ディスプレイ（olfactory display）”を調べると、主に 2000 年代前半から幾つかの論文が見つかる。嗅覚ディスプレイが関わるヒューマン嗅覚インターフェースの研究分野は比較的新しく、前途が広い。ここ数年の研究では、VR の文脈において視聴覚・力触覚刺激提示デバイスと組み合わせて行われたクロスモーダル効果に関する実験が多数みられる。一方、2000 年代よりも前から存在する匂い提示装置については多数のレビュー論文があり、興味深い内容が読みとれる。

医学・生理学や環境学・社会工学といった分野における産業の最前線では主にオルファクトメータが活躍してきた。一方、映画や初期の VR 装置とも呼べるようなエンターテインメントの分野では多感覚提示を前提としたユニークな仕組みが考案されてきた。そして、20 世紀の終わりにパーソナルコンピュータの普及が多くの企業や一般家庭に浸透し始めた頃、マーケットでの成功を志して多様な製品版の匂い提示装置が出現した。しかし、これらの製品は市場においてマイルストーンの位置付けまでに至らなかったケースが多く、消えていったモデルも少なくない。

1.4.1 オルファクトメータ

オルファクトメータとは一般的に、匂いガスの濃度や単位時間あたりの提示量（流速）を機械的に制御・調整してヒトに匂い提示を行う装置である[24]。利用目的は、嗅覚閾値や匂い強度の計測、匂い知覚に伴う脳部位の活動を調べること等である。他の計測機器・医療機器と組み合わせて使う場合も多い。

歴史は古く、1886 年に Zwaardmaker（蘭）が匂い物質の閾値を測定するために 2 重のガラス管からなる器具を製作したことに端を発する[24][25]（図 1.4-2 参照）。その後、機構や機能面において多くの改良が加えられ、製造コストも見直された[26]。その一例の写真を図 1.4-3 に示す。

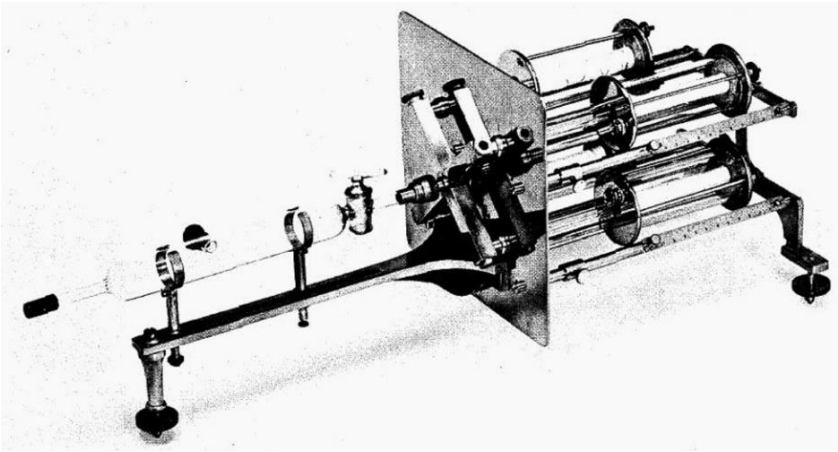


図 1.4-2　Zwaardmaker が開発したオルファクトメータ（1886）, [25], p659

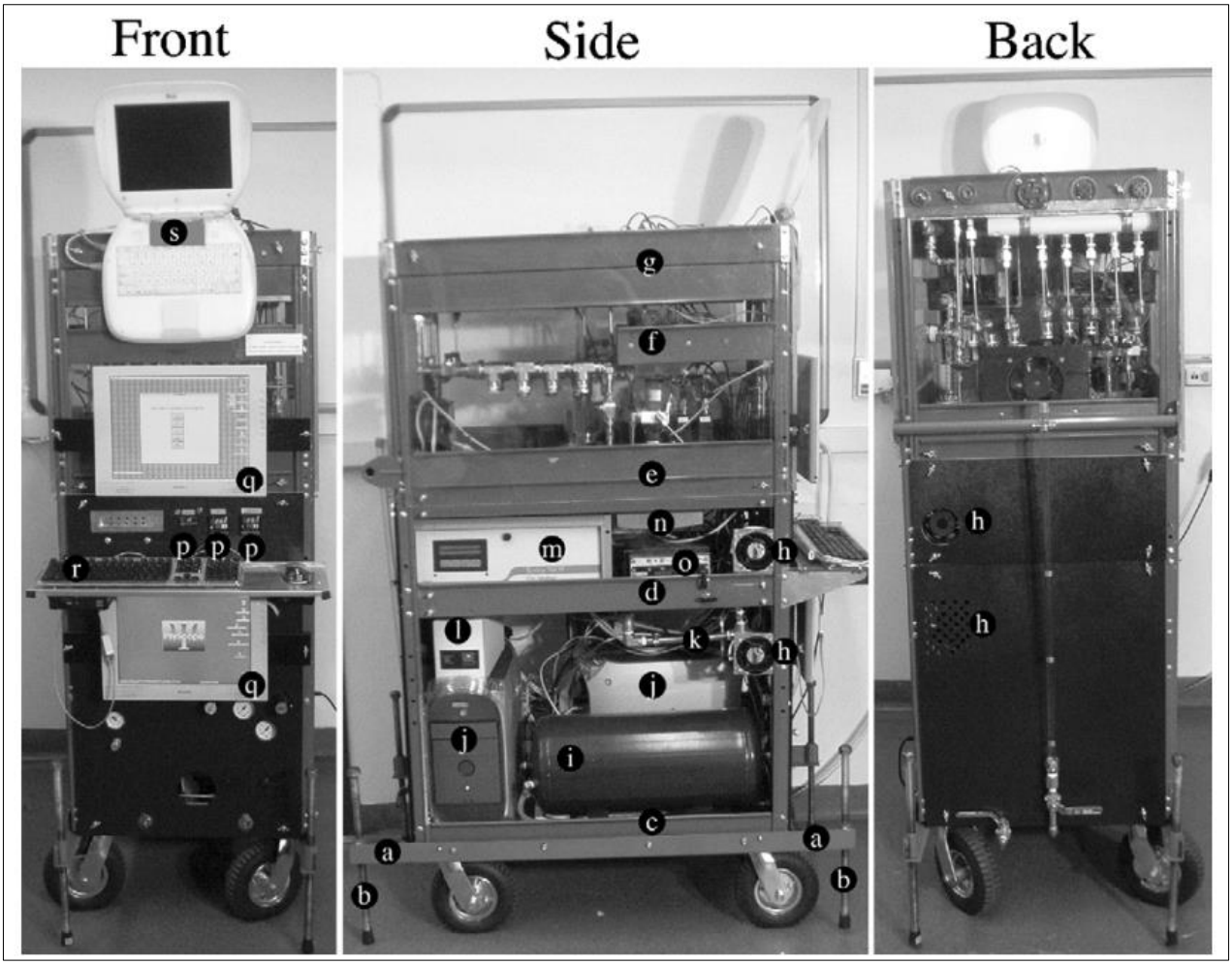


図 1.4-3　自己完結型オルファクトメータ, [26], p233

（写真説明）Side panels were removed for visibility. The following components are visible: parking legs (a and b), individual shelves (c–g), cooling fans (h), vacuum tank (i), two computers (j), inline air heater (k), and 110 V ac uninterruptible power supply (l), photo-ionization detector (m), humidity probe controller module (n), a dc power supply providing +5, +15, −15, and +24 V (o), three temperature controllers (p), two flat-panel monitors (q), keyboard and mouse (r), and additional laptop (s)

オルファクトメータの利用目的は医学・生理学分野における嗅覚の臨床試験や、GC（Gas Chromatography）と組み合わせて臭気成分の解析を行い、公害対策の基準を探る定量的な研究等が中心である。例えば、混合匂い物質の知覚における嗅覚の時間特性の実験[27]に用いられる。

改良が施された現代のオルファクトメータでも重厚長大でその仕組みは複雑であり、また製造コストも比較的高いため、利用可能な場面は限定される。

一方、国内におけるオルファクトメータの状況[28]は、1970 年代における公害の社会問題化を背景に、政府や自治体が悪臭への対策の一環として利用した経緯がある。現在でも、オルファクトメータを活用した計測システムは、例えば住宅建築における建材が放つ匂い物質の評定等に用いられている[29]。

1.4.2 映画と匂い提示装置

黎明期の匂い提示装置は映画とともにその表現手段が開発された。表 1.4-1 に主要なトピックを示す[30][31]。

表 1.4-1　黎明期における匂い提示装置のトピック, [30]より作成

発表年	内容・映画タイトル	装置名	開発者
1906	ニュース映画「Pasadena Rose Bowl Game」において、綿をバラの香りに浸し、扇風機の前でそれを保持して香りを拡散		S. L. Rothafel
1929	映画「Lilac Time」と一致するように設計された換気システムでライラックの香りを拡散		the manager of Boston's Fenway Theatre
1930	映画館や劇場での香りの自動配信に関する米国で最初の特許：U. S. PATENT 1749187		John H Leavell
1939	英語の長編映画「My Dream」：20の香りを提示	Odoranted Talking	H. E. Laube et al.
1955	論文「The Cinema of the Future」、5本の短編映画	SENSORAMA	M. Heilig
1959	イタリア映画「万里の長城を超えて」：ニューヨーク デミル劇場の空調システムに実装	AromaRama	C. Weiss
1960	映画「スペインの休暇」：改造された映画館に設置された匂い提示装置	Smell-O-Vision	H. E. Laube et al.

・先ず 1906 年、米国カリフォルニア州パサデナのローズボウル・スタジオで行われたカレッジフットボールゲームのニュース映画の上映に際し、映画館内をバラの香りで満たす試みが行われた。バラの香料を綿に浸して、映画館後方の大型扇風機で館内全体に花の香りを拡散させた。

・1929 年には、米国ボストンのフェンウェイ劇場のマネージャーが、上映された”Lilac Time”という映画に合わせて、映画館の換気システムからライラックの香りが放出されるように工夫を行った。

・1930 年には、J. H. Leavell が映画館や劇場での香りの自動配信に関する米国で最初の特許を取得した。これはフィルムの側面で匂い（海のシーンに伴う海の香り等）をトリガーし、2 番目の匂いが必要な場合はフィルムの両側に切り込みを入れる技術であった。提示する匂いの変化は、専属のオペレーターが手動で匂い源の切替えを行った。

・1939、チューリッヒの広告会社の役員であった H. E. Laube を中心として” Odorated Talking Pictures”という会社が設立され、”My Dream”という映画の上映において 20 種類の匂いを映画館内で使った。この話題は当時、ニューヨークタイムズ紙でも取り上げられた。

・一方、1955 年には Morton Heilig が多感覚提示劇場に関する構想を”The Cinema of the Future”というタイトルの論文で著し、1963 年には”SENSORAMA”を開発した。これは立体映像、ステレオ音響、振動する椅子、風を生成するファンに加えて匂い提示装置を備えていた。また、SENSORAMA を使った 5 本のショートムービーも公開された。VR 技術史においては非常に意義深いといえる。

・1959 年には、C. Weiss が”AromaRama”を発表した。これは、米国ニューヨークのデミル劇場において上映された”Beyond the Great Wall”において、映画館の空調システムから様々な匂いの提示を行ったものである。しかし、観客に対し適切に匂いが届いたのは最初にオレンジが剥かれる瞬間のみで、他のシーンにおいては視聴覚と嗅覚の不一致が起きて混乱を招き、残臭（residual odor）が問題視された。

・1960 年、H. E. Laube が開発した”SMELL-O-VISION”が映画”スペインの休暇”において利用された。この時、館内には映画に表示される物体と関連した 30 種類の匂いが次々に提示され、匂いは館内の客席へ個別にチューブで搬送された。また匂いのトリガーは映画のサウンドトラックの出音を利用した

仕組みとなっていた。機械化された匂い提示装置としては歴史的に重要といえる。

黎明期の匂い提示装置は映像や音といった他の感覚刺激の提示とともに考案された。現在、私たちが体験する 4D シネマや超臨場感ゲームコンテンツ等のコンセプトを先取りしていたことは興味深い。

けれども、当時開発された大規模な匂い提示装置は映画館において 1 度のみ試用されたケースも多く、匂いの切替えのタイミングや残臭の問題により不評を買い、これらの技術は長くは存続しなかった。

1.4.3 匂い提示装置の製品化

アロマキャンドルは火を灯すと香りを発生させるロウソクである。古くからアロマテラピーのアイテムとして広く親しまれている。また、昔のヨーロッパにおいてはカトリック教会において蜜蝋を焚き、祭儀のときに良い香りで教会内を充たしたとされる。一方、香道は東南アジアで産出される貴重な香木を使い、仏教における儀礼や禅の精神を取り入れた独特の芸術であり、朝鮮半島から日本へ伝わり平安時代以降に普及した。

人々の生活や文化に溶け込んだ匂い鑑賞アイテムがいつ頃から広まったのか正確にはつかみ難いが、匂いを提示するアイテムが”デバイス”として位置付けられたのは比較的新しい時代のことである。パーソナルコンピュータと接続して使うことを前提とした匂い提示装置はアカデミックな場よりもむしろ商業市場を狙い、ユーザーにとってより手軽に利用でき、リーズナブルに入手可能なデバイスが次々と開発されてきた。これらの技術情報が論文誌等で公開されることはごく稀ではあるが、嗅覚ディスプレイの開発がさかんとなる土壌を形成した点において、その意義は大きい。また、製品化された匂い提示装置のレビュー論文がみられる[32] [33][34]。これまでに製品化された主な匂い提示装置を表 1.4-2 に示す。

表 1.4-2　製品化された主な匂い提示装置, [32] [33][34]より作成

発表年	装置名	会社名等	参照 Webサイト URL
1999	iSmell	DigiScents	https://en.wikipedia.org/wiki/Ismell
2000	Pinoke	AromaJet	http://www.microfab.com/vapor-generation/aromajet
2003	Scent Dome	TriSenx	https://www.newscientist.com/article/dn4705-smelly-device-would-liven-up-web-browsing/?ignored=irrelevant
2004	KaoriWeb	辻ウェルネス・フランステレコム	https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_scent_technology
2005	XML Smell	University of Huelva	https://www.engadget.com/2005-01-25-get-a-whiff-of-xml-smell.html
2005	アロマトリックス	プロモツール	https://www.promotool.jp/service/aroma_business/entertainment/
2006	Vortex Active Scent Dispensing System	Dale Air'sr in Brunel University	https://www.researchgate.net/figure/Dale-Airs-Vortex-Active-Scent-Dispensing-System_fig1_220214388
2006	Aroma Geur	NTTコミュニケーションズ	https://www.techdigest.tv/2006/09/smelly_radio_co.html
2008	Mist Shine:Wearable Smart Scent	INDIEGOGO	https://www.indiegogo.com/projects/mist-shine-wearable-smart-scent#/
2009	i-Aroma	NTTコミュニケーションズ	https://oshirase.ocn.ne.jp/2009/06/16_2.html
2011	ScentScape Programmable Aroma Generator	ScentSciences	https://www.everythingusb.com/scentscape-20808.html
2012	Aroma Shooter	アロマジョイン	https://aromajoin.com/products/aroma-shooter
2013	Baloon	Scentee	http://scentee.com/_balloon
2014	Swallowable Parfum	Lucy McRae	https://www.nowness.com/story/lucy-mcrae-swallowable-parfum
2014	oPhone DUO	INDIEGOGO	https://www.indiegogo.com/projects/ophone-duo#/
2014	ScentDirect	ScentAir	https://scentair.com/jp
2015	Sensory Mask	FEELREAL	https://feelreal.com/
2016	AROMASTIC	SONY	https://scentents.jp/aromastic/
2016	Cyrano Digital Scent Speaker	CYRANO	https://www.digitaltrends.com/cool-tech/cyrano-digital-scent-speaker/
2017	X-Scent	ScentRealm	http://xn--btry2dz25ap0g.com/en/product-technology.html
2017	VAQSO VR	VAQSO.com	https://vaqso.com/
2019	Machina	Scentee	https://scentee-machina.jp/
2021	PROFESSIONAL 10-SCENTS COMPACT GENERATOR	OLORAMA TECHNOLOGY	https://www.olorama.com/
2021	AROMAPRO HVAC	AROMATECH	https://aromatechscent.com/collections/extra-large-space-scent-diffusers

表 1.4-2 に示した製品のなかで、嗅覚ディスプレイの開発を考察するうえで特筆すべきデバイスとその注目点について以下に記す。

・iSmell（DigiScents, 1999）

1999 年、DigiScents 社は”iSmell”という匂い提示装置を開発した。これは、ユーザーが Web サイトにアクセスする際や、電子メールを開いたときに匂いを発するように設計されていた。この装置には 50-128 種類の香料カートリッジをセットすることが可能で、このカートリッジの加熱気化により発生した香気を混合して匂いの提示を行う仕組みであった。DigiScents 社は数千の一般的な匂いのインデックスを作成し匂い情報のコーディングとディジタル化を行い、パーソナルコンピュータと USB で接続して Web サイトや電子メールでの利用を想定していた。2,000 万ドルの投資を受けたが、その後必要な追加資金を得ることができず、2001 年に同社は倒産した。注目点は“多成分調合型”の概念を先取りしていることである。

・Scent Dome（TriSenx, 2003）

2003 年、TriSenx 社（1999 年に設立）は”Scent Dome”を発売した。この装置はほぼティーポットのサイズであり、20 種類の液体香料で満たされた 1 つの匂いカプセルを複数利用して香気を放つことにより、最大 60 の異なる匂いを生成することができた。Scent Dome はパーソナルコンピュータと接続してソフトウェアを使用し、Web サイトや電子メールに埋め込まれた匂い識別コードの認識を行う。2004 年までには英国のインターネットサービスプロバイダー（Telewest）よって製品試験が行われた。また、医療シミュレーションの VR コンテンツに利用された研究事例がみられる[35]。注目点は“tele olfaction”の概念に基づいていることである。

・Aroma Shooter（株式会社アロマジョイン, 2012）

2012 年、株式会社アロマジョインは”Aroma Shooter”を発表した（図 1.4-4 参照）。据置型の匂い提示装置で、ユーザーが選べる専用の 6 種類の個体香料カートリッジをセットし、提示する匂いの濃度変化や調合レシピを時間軸に沿って任意に変えられる。詳細な技術情報は不明である。パーソナルコンピュータ、タブレット端末、そしてスマートフォンとも接続可能で、専用の SDK を備えている。発表当初より堅調な売り上げを維持している。注目点は“匂い提示の切替え時間”を重視していることである。開発プロセスに関する情報：https://www.protolabs.co.jp/resources/case-studies/aromajoin/

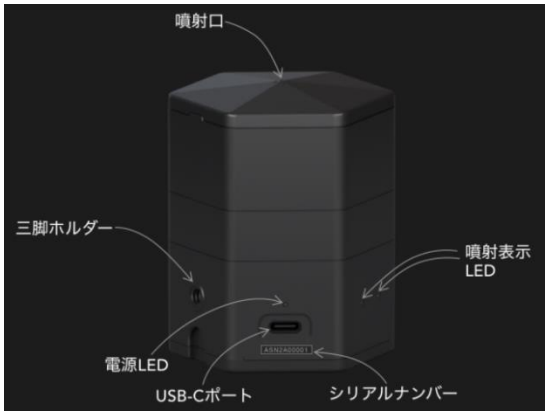


図 1.4-4　Aroma Shooter, [23]

・ScentDirect（ScentAir, 2014）

ScentAir 社は当初から一貫して、大規模な空間に匂い提示を行うことを目指して製品開発を進めてきた。リテール店舗やホテルロビー等における空間演出や販売促進が目的で、特許を取得した噴霧技術により匂い提示を行う。2014 年に発表した”Scent Direct”は比較的大型の装置で、液体香料をナノサイズ粒子に霧化する技術を使っている。こうした装置に求められる機能は、ある香りを広範囲に長時間提示することである。同社は近年、複数の匂い提示が切替えられる装置も発表しており、多彩な製品を揃えている。注目点は”提示する匂い物質の粒子を極限まで最小化していること（特許技術）”である。

・AROMASTIC（ソニー株式会社, 2016）

パーソナルアロマディフューザーという位置づけで 2016 年、ソニー株式会社が”AROMASTIC”を発表した。重さは 33 g 、片手で持てるサイズである。5 種類の液体香料を保持する専用カートリッジを挿入することで、ユーザーの半径 15cm 程度の周囲に局所的に匂い提示が可能で、また数秒単位の時間制御ができる。AROMASTIC 内部の小型ポンプの送風により香気を生成させている[36]。クラウドファンディングを利用して製品開発を進め、市場においては一定の成功を収めた。2020 年に製造・販売が終了している。注目点は”匂い提示の空間的分布に配慮していること”である。
開発プロセスに関する情報：https://scentents.jp/aromastic/report/inside_story.html

製品化された匂い提示装置の大部分はユーザーにとって利用が簡便であり、小型・軽量化を志向し、製造コストを抑えたものである。それに引き換え、任意の複数の香りを調合する機能に欠けている場合が多くみられる。本来、多成分調合型の嗅覚ディスプレイに求められる機能とは、実時間により任意の複数の匂いサンプル（香料）を調合する機能であり、その実現のために必要とされる要素技術（後述）が存在する。

1.5 匂い提示の再現

ビデオカメラで撮った動画を Blu-ray ディスクに記録し、それをプレイヤーで再生してモニターで動画を鑑賞するのと同じように、匂い情報を何らかの形で記録し、匂い提示装置で再生して体感できないであろうか。こうした要求に応えるかたちで、主にヒューマンインターフェースの研究領域がその具体化に取り組んでいる。

ユーザーに対してある感覚刺激（コンテンツ）を提示する際、画像や音声といった物理的感覚はその情報を電気的に変換してリアルに伝えることが可能なため、A/D・D/A 変換や情報通信技術等が発達した現在のディジタル社会においてはめざましい成長を遂げた。一方、フレーバーやフレグランスの知覚は化学的感覚に基づいており、同じように電気的に変換することが困難である。さらに、視覚刺激を記録・再生する場合はヒトが持つ 3 種類の錐体細胞に対応する赤、緑、青の光の 3 原色が使えるが、匂いにおいては「原臭」と呼べる存在が特定されていない。そこで、所望の匂いを作る際には匂いの記録と再生を行うための嗅覚インターフェースの概念が必要となる。

嗅覚インターフェースの基本構成を図 1.5-1 に示す。機械側からみた場合、外界の匂い情報の入力には主に匂いセンサが用いられ、匂いの検出、匂いの強度測定、香りの分類、そして混合臭における各成分の濃度定量等に利用される。一方、機械側からヒトに匂い情報を提示する装置は嗅覚ディスプレイ（olfactory display）と呼ばれる。

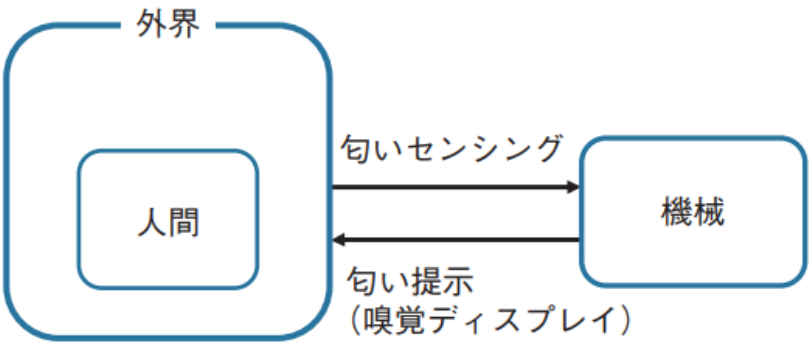


図 1.5-1　ヒューマン嗅覚インターフェース, [5], p.15

1.5.1 匂いのセンシング

匂い情報を記録するためには、匂いセンサを用いた方法がある[37]。生体の嗅覚機構において、嗅細胞は特定の匂いに応答するよりは緩やかな選択性をもって多くの匂いに応答する。そこで、特性の異なる多数の嗅細胞の応答パターンを認識することによって匂いの認識が行われる。この仕組みを人工的に応用したのが匂いセンシングシステムである。匂いセンサの仕組みを図 1.5-2 に示す。

匂いセンシングシステムは E-Nose と呼ばれることもある。嗅細胞の代わりにセンサを使い、嗅覚神経系の代わりにニューラルネットワークもしくは多変量解析等の統計的手法を用いてパターン認識を行う。センサの特異性は嗅細胞と同じく緩やかであり、特性の少しずつ異なるものを組合せてセンサアレイを構築する。

センサ素子の違いによる主な匂いセンサとしては、

・半導体ガスセンサ

・導電性ポリマセンサ

・MOS FET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）ガスセンサ

・電気化学式ガスセンサ

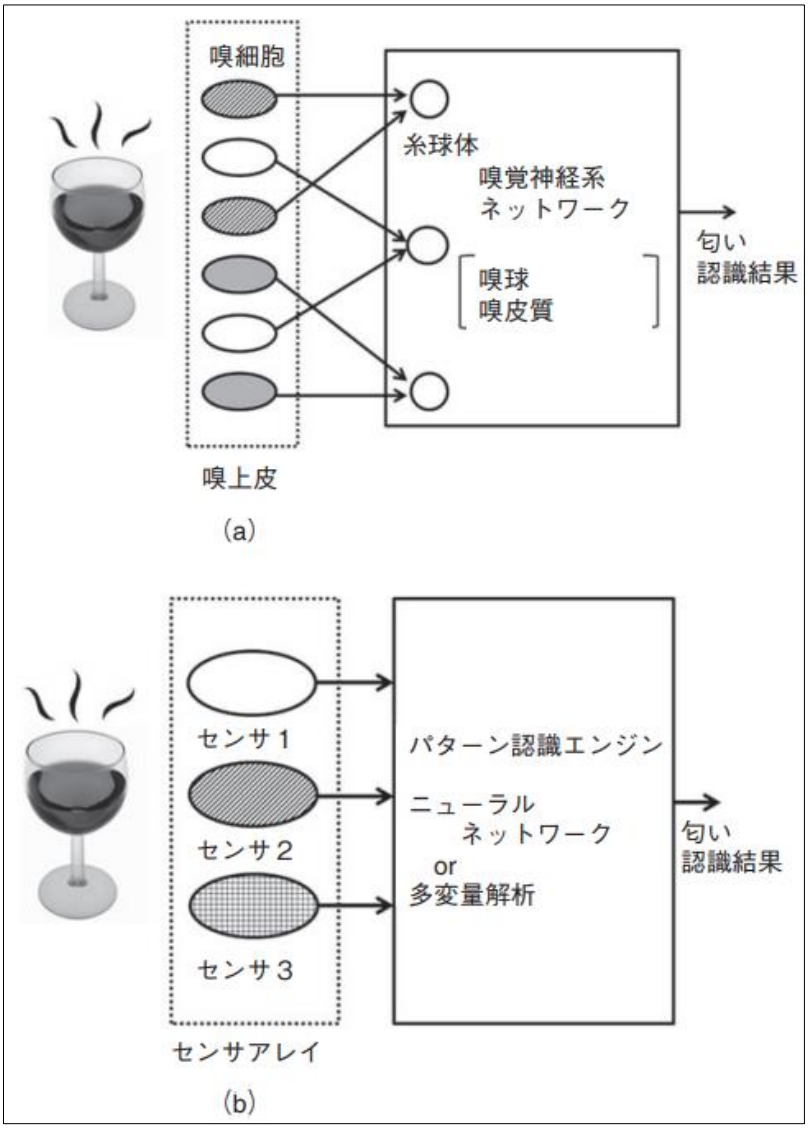
・SAW（Surface Acoustic Wave, 弾性表面波）ガスセンサ

・QCM（Quartz Crystal Microbalance, 水晶振動子）ガスセンサ

・光学式ガスセンサ

・MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術を利用したカンチレバー

などがあげられる。



(a) 生物における仕組み (b) 人工センサの仕組み

図 1.5-2 匂いセンサの仕組み, [5], p.17

図 1.5-3 はロバストセンシングシステムの一例である。SAW（Surface Acoustic Wave, 弾性表面波）デバイスをペルチェ素子で冷却し、その表面に匂い分子を凝結させて蓄積する。その後、SAW ストリーミング現象により匂いを霧化し、近傍に設置した QCM センサによりセンシングを行うシステムである。従来のセンサ素子では匂いの脱着に時間を要し、センサ応答のパターンが安定しない問題があったが、このセンシングシステムでは匂い分子の蓄積が可能であり、応答の安定性の向上が実現できる。

他に、昆虫など生物の嗅覚受容体の利用や嗅覚受容体を発現させた細胞を使ったバイオセンサによるセンシングシステムが近年、研究されている。生物の機能そのものを利用することで、個々のセンサの選択性（selectivity）と感度（sensitivity）を向上させることが期待される。

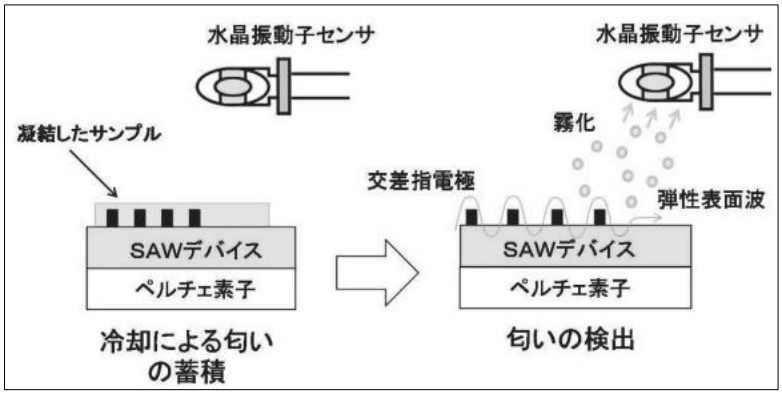


図 1.5-3　SAW デバイスとペルチェ素子を使ったセンシングシステム, [38], p.248

1.5.2 匂いセンサ

匂いのセンシングシステムと提示システムを組合せた嗅覚インターフェースとして、匂いの記録再生システムや遠隔匂い再現システムがある（図 1.5-4 参照）。匂いの記録再生システムでは、匂いセンサで香りを検出し、その情報に基づいて複数の匂いを調合したものを嗅覚ディスプレイが再生を行う。

また、遠隔匂い再生システム（tele olfaction）は匂いセンサが取得した情報を遠隔地へと伝送し、そこで匂いを再現するものである。

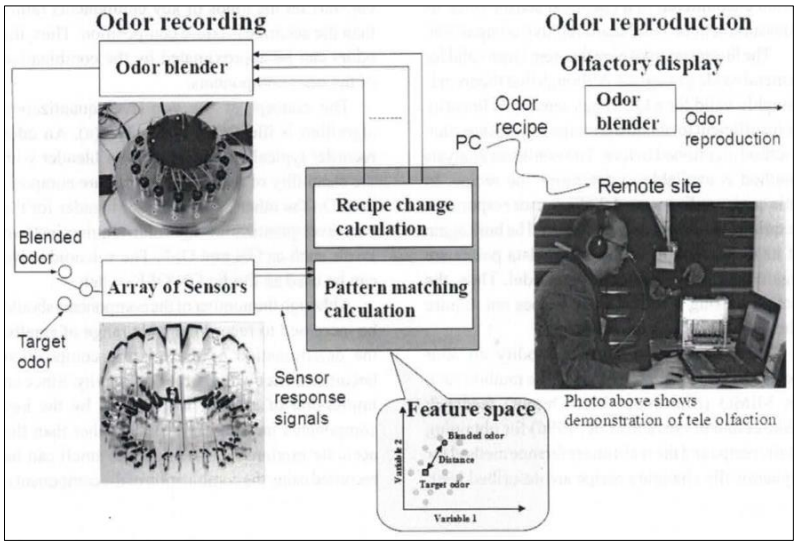


図 1.5-4　センサアレイによる匂いの記録・再生の概念図, [37], p149

1.5.3 質量分析器

元となる香りをセンシングする場合に質量分析器を利用する手法がある。GC/MS（Gas chromatograph/Mass spectrometry）質量分析器を使ってある匂い情報を定量的に分析し、そのデータをさらに機械学習の方法論によって解析を行い、その匂いのレシピを求めて匂いを再現する手法が研究されている。オレンジ精油を例に、その概念を図 1.5-5 に示す。

ある複合的な匂いをユーザーへ提示する場合、その複合臭の特徴を抽出してマススペクトルデータを構築する必要がある。さらにそのデータを非負値行列因子分解法（NMF method）および非負拘束最小二乗法といった手法により、幾つかの要素臭（odor component）を割り出す。そして、レシピに基づいて要素臭を調合して近似臭（approximated odor）が作られる[39]。

例えば、オレンジ精油の香りをユーザーに提示する場合、嗅覚ディスプレイにおいて複数の要素臭を予め決められた体積比率に従ってブレンディングを行い提示し、再現したオレンジ精油の調合臭（blended odor）を嗅ぐことが可能となる。

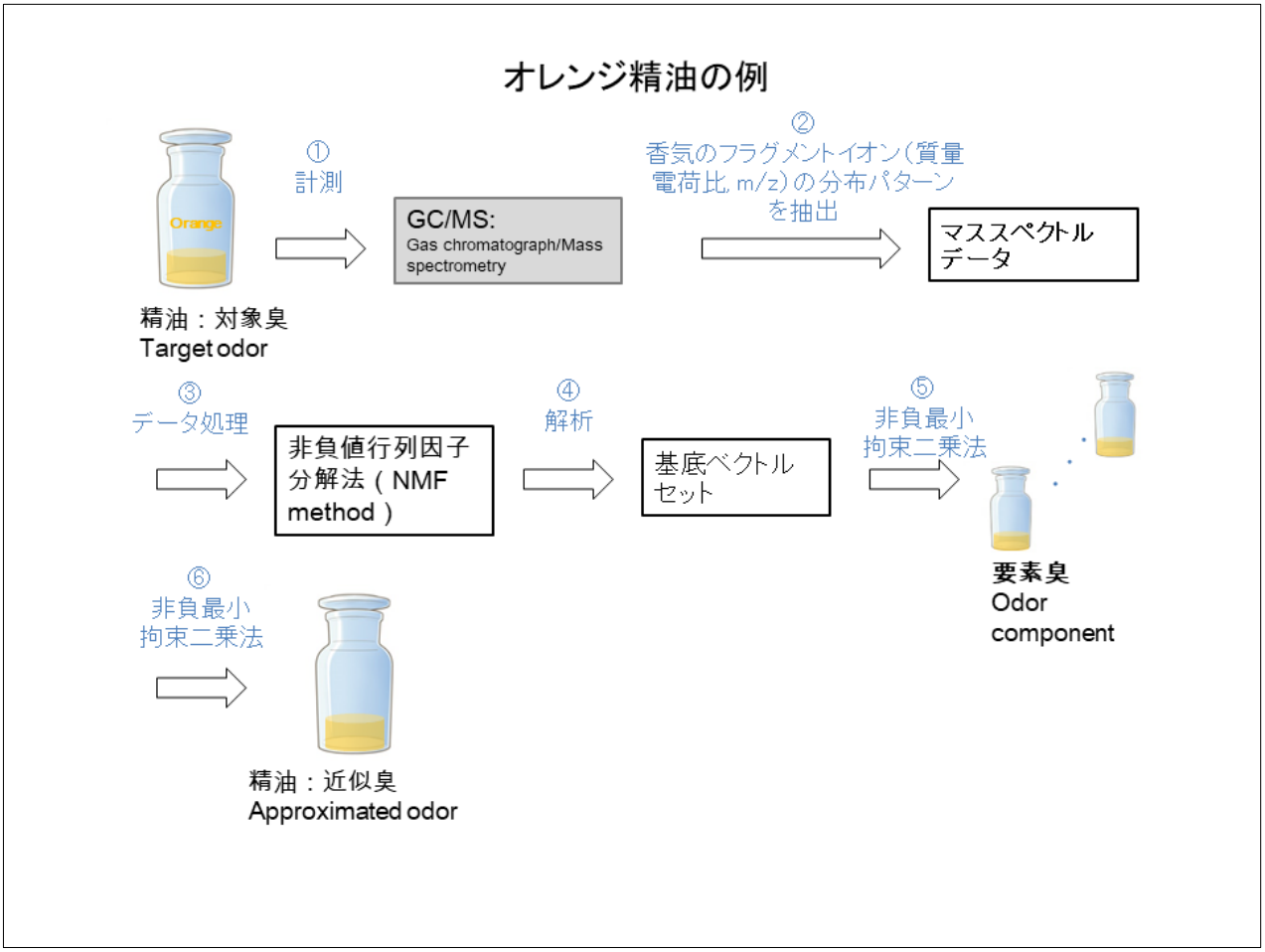
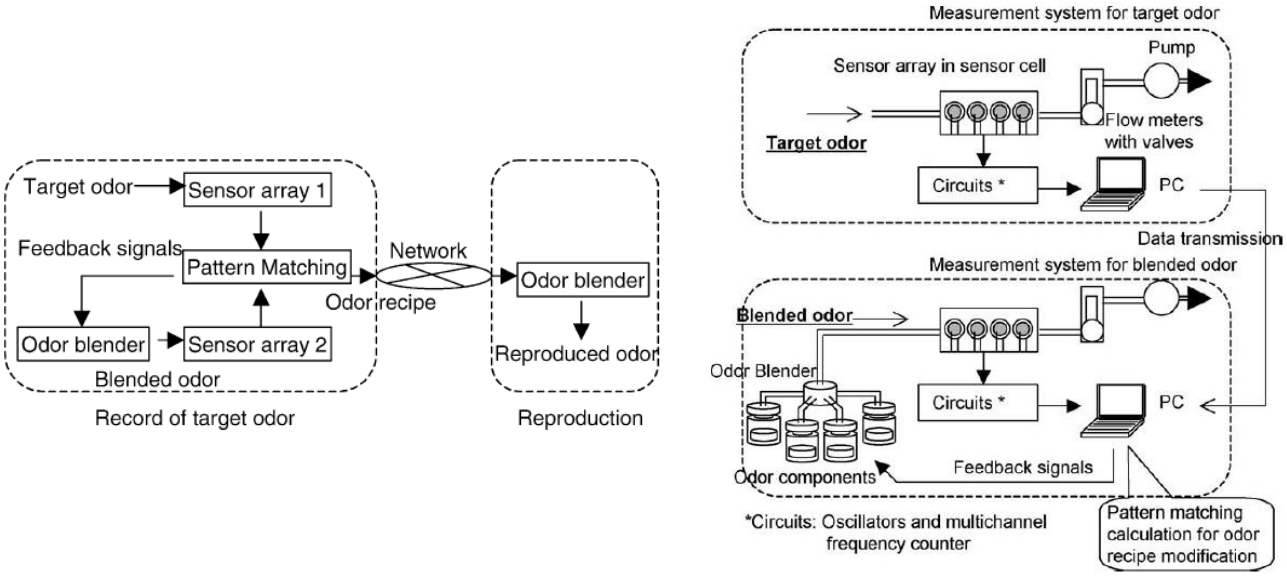


図 1.5-5 質量分析器システムを使った概念図, [40]より作成

1.5.4 先行研究（匂い提示の再現）

匂いセンサや質量分析器を使った匂いの再現研究は本研究室において 2000 年代初めから行われている。

MIMO（Multi Input Multi Output）フィードバック制御の概念に基づき、2 基の水晶振動子のセンサアレイと”Odor blender”をネットワークでつなぎ、センサ応答のパターンマッチングを実時間で抽出して匂いの再現を動的に行った研究[41]があげられる。実験系の概念図を図 1.5-6 に示す。



(a) (b)

(a) センサアレイによる匂いの記録システム (b) 動的な匂いの記録・再生システム

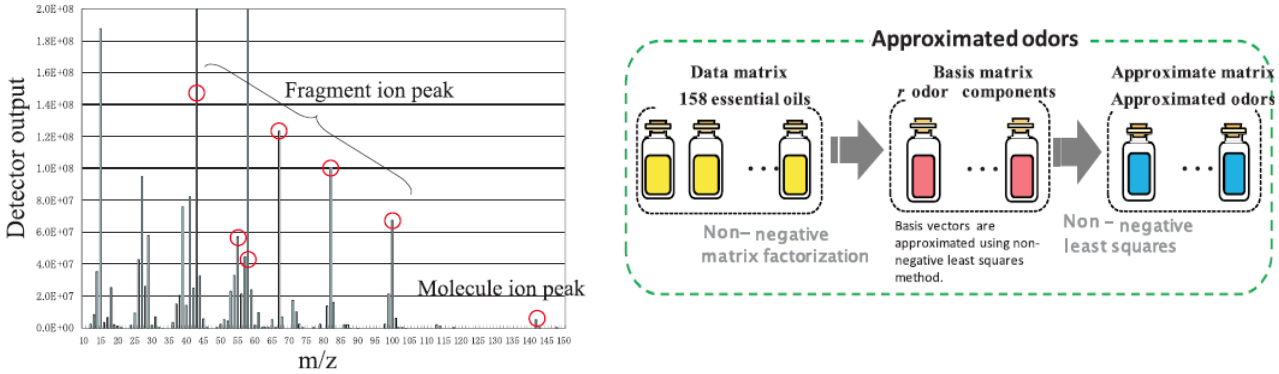
図 1.5-6 水晶振動子センサアレイを用いた匂いの記録・再生システム[41]

同図に示す通り、動的な匂いの再現とは、対象臭から得られたセンサアレイの応答を調合臭の再生システムへと伝送し、対象臭から得られるセンサアレイの応答とのパターンを比較しながら近似させて調合臭のレシピを求める手法である。求めたレシピに従って要素臭（odor component）をブレンディングして匂いの再現が可能となる。

一方、質量分析器を使った匂いの再現の先行研究がある[39]。数百種類の匂い物質のマススペクトルから成るデータベースを構築し、マススペクトル空間上における基底ベクトルを抽出することにより、汎用的な役割を果たす要素臭を作成する。これらの調合比率を変えることで、元となったデータベースに存在する多様な香りを近似臭として再現可能となる。この匂い再現システムを図 1.5-7 に示す。

同研究では質量分析器を使い 158 種類の精油のフラグメントイオンの情報を抽出し、NMF 法により基底ベクトルの抽出を行った。そして、再現したい精油のマススペクトルを要素臭の組み合わせで近似的に再現するために、非負拘束最小二乗法を用いて調合レシピを求め、そのレシピに基づいて要素臭を調合することで精油の近似臭を作成した。

水晶振動子センサアレイを使った実験では、匂いの成分数が多い場合に多重共線性が問題となるが、質量分析器の使用ではこの問題に対応が可能となる。



(a) (b)

(a) 質量分析器の出力結果　(b) NMF 法による近似臭の作成プロセス

図 1.5-7　質量分析器を利用した匂いの再現システム[39]

さらに、質量分析器を使った精油の匂いの再現において、NMF法においてマススペクトルの類似性を測るコスト関数としてIS divergence（Itakura-Saito divergence）とKL divergence（Kullback-Leibler divergence）の比較を官能検査実験により示した先行研究がある[40]。その官能検査の結果を表1.5-1に示す。

表 1.5-1　1 対 2 点識別法による官能検査の結果（6 種類の精油）[40]

	Number of Subcjects	Number of Subjects to Choose NMF-IS	Number of Subjects to Choose NMF-KL	Z Score
Orange	24	19	5	2.654
Mint	24	20	4	3.062
Origanum	24	12	12	−0.204
Ylang-ylang	24	18	6	2.245
Clove	24	11	13	−0.612
Cypress	24	7	17	−2.245
Total	**144**	**87**	**57**	**2.417**

同表における官能検査の結果より、IS divergence コスト関数は匂い成分の数を減らす過程において、近似精度の改善に有効であることが示された。さらに、ヒトの知覚に大きく寄与する m/z 値について、NMF-IS の手法を官能検査によって評価したところ、NMF-IS を使用すると香気成分の数を減らして匂いの近似精度を高められることが判明した。さらに、初期値が NMF-KL の手法に基づく計算から得られた場合、IS ベースの手法による近似精度は向上した。なお、同研究における官能検査は精油を液相ベースで行ったものである。

本論文の第 5 章で示す”匂い提示の再現による評価”の研究は、これらの先行研究の蓄積から得られた知見のうえに成り立っている。

1.5.5 関連研究（匂い提示の再現）

匂いの再現性とその評価を扱った研究事例は非常に少ない。それでも、匂いセンサ（E-Nose）によって取得したデータに基づいて匂い提示の再現を行った近年の研究事例を紹介する。

また、所望の匂い（target odor）を再現するための基本的な構成要素となる匂いは、その割り出すプロセスや方法論において、研究グループによって差異がある。従って、本研究で要素臭（odor component）と呼ぶ匂いの構成要素は、他の研究グループが示す概念とは異なっていることを前提とする。

複数の匂い源をさまざまな比率でブレンディングすることにより、匂いを再現する能力を備えた ORS（Odor Reproduction System）と呼ばれるシステムを提案する研究[42]がある。そのシステム構成を図 1.5-8 に示す。

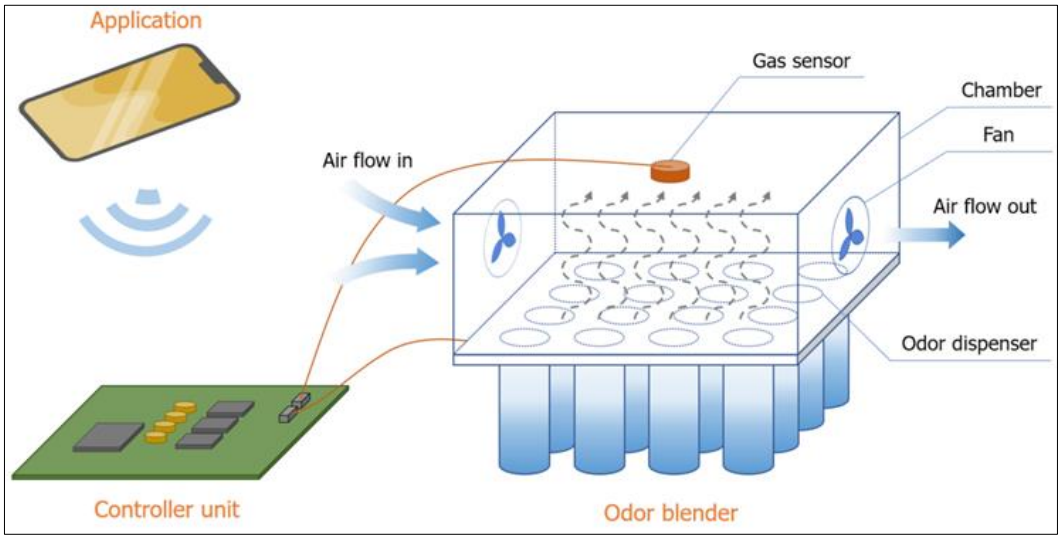


図 1.5-8　“Odor Reproduction System”の構成図[42]

同システムには、液体香料を噴霧するための微孔性圧電トランスデューサを使用した 16 チャンネルの香気ディスペンサーが含まれている。線形分類器（PCA–LDA）と組み合わせた市販の E-Nose を使用して、システムの有効性の評価を行った。

トレーニングデータは予め準備した匂いの混合物からサンプリングされ、テストデータはいくつかの高純度の匂い化学物質を使用して再現された匂いからサンプリングされた。同実験で使用された匂いサンプルを表 1.5-2 に示す。

表 1.5-2　匂いの再現実験で使われた 4 つの匂いサンプル[42]

Index	Chemical	Manufacturer
C1	Ethanol	Shanghai Macklin Biochemical Co., Ltd.
C2	Isopentylacetate	Chengdu Kelong Chemical Reagent Factory
C3	Benzyl alcohol	Anhui Jinrong Flavor and Fragrance Co., Ltd.
C4	Allyl cyclohexanepropionate	Penda Flavors and Fragrances (U.S.A.) LLC

提案システムによる匂いの再現の有効性を検証するため、市販の E-Nose: PEN3 によってサンプリングされたデータを用いて、線形分類器を使った。トレーニングデータは、混合匂い源によって噴霧された香気からサンプリングされ、一方、テストデータは、比例混合（純粋な匂い源をさまざまな比率で混合）によって噴霧された香気からサンプリングされた。実験には、4 つの高純度の匂いサンプルを使用した。10 のガスセンサから成る E-Nose の応答パターンを主成分分析（PCA）および線形判別分析（LDA）の組合せによって検証した結果、提案された ORS は、混合臭の識別において満足のいく結果（96.67%の精度）を示した。即ち、匂いの再現の有効性を評価するのに十分な結果が得られた。

同研究においては匂いの再現性を評価する際、E-Nose による機械計測の手法を採用している。機械計測による評価は、ヒトによる官能検査に比べて嗅覚順応（疲労）が起きにくいことや、評価パネル間の差異が無い点が長所となる。けれども、対象臭によってその揮発性は異なり、匂いの特徴は様々である。最終的には再現した匂いはユーザーへ提示することが前提であり、実際にヒトによる官能検査を行う必要性があると考えられる。

他の関連研究として、複合体ガスセンサの応答パターンを用いて匂いの再現実験を行った研究がある[43]。香気の計測システムとして、ドリフトの大きなカーボンブラック・ポリマー複合体ガスセンサを用いた。ガスセンサの数は 32 個である。調合臭を気相で調合して、対象臭に対する E-Nose の応答パターンを調べた結果、既述の実時間参照方法による動的な匂い調合が可能であることが示された。

同研究の実験系の構成図を図1.5-9に示す。市販のE-Nose のなかでも内蔵するガスセンサの個数が32基と多いCyranose 320（Sensigent LLC）を使っている。対象臭の匂いを再現するために、複数のバイアル瓶の中に予めセットした匂い化合物を気相で混合し、Cyranoseの32基のガスセンサの応答をPCで測定し、対象臭の匂いとセンサ応答のパターンが等しくなるように、気化した匂い化合物の調合比を変更した。実験で使用した化合物は1-butanol, butyl propionate, butyric acidの3種類である。

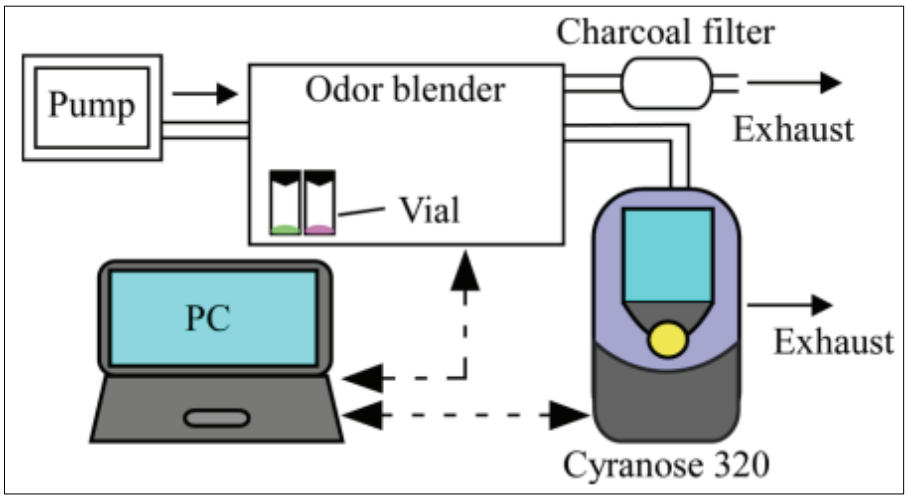


図 1.5-9　実験系構成図[43]

Cyranose 320に内蔵されているカーボンブラック・ポリマー複合体ガスセンサは大きなドリフトを示し、同一の香気を測定しても測定回ごとにセンサの応答値が変化する。カーボンブラック・ポリマー複合体ガスセンサはポリマーにガスが吸着すると膨潤し、電気抵抗が増加する。測定サイクルを150 秒とし、

各サイクルの初めの60 秒間は清浄空気を吸引してセンサ抵抗値を測定した。続く30 秒間は匂い蒸気（香気）を吸引してセンサ応答の測定を行い、残る60 秒間は再び空気を吸引して、センサの応答を初期値に戻した。実時間参照方式を採用して、E-Nose の応答を線形一次システムで近似し、最適制御を利用して混合比の調節を行った。E-Noseのセンサドリフトに対応するため、対象臭と調合臭の匂いを交互に測定しながら匂いの再現を試みた結果、実時間参照方法による動的な匂い調合が可能であることが示された。

同研究においても同様に匂いの再現性の評価は機械計測の手法を用いているが、同論文では官能検査の必要性に言及されている。今後は対象臭の種類を増やし、官能検査を併用する手法が望まれる。

1.6 嗅覚ディスプレイと要素技術

嗅覚ディスプレイは匂い提示装置の一種である。様々な原理を応用した多様な装置が存在し、その用途に合わせた独自の機構を持つものもある。そして、これらの機構は嗅覚ディスプレイにおける要素技術を形成している。

また、各要素技術は、嗅覚ディスプレイに求められる諸機能を実現するために行われている研究開発の成果を示している。嗅覚ディスプレイの評価を行うことは、嗅覚ディスプレイに求められる機能の一つに的を絞り、その性能を技術面から精査することである。その意味において、嗅覚ディスプレイの要素技術と求められる機能との関係性を考察することに意義がある。

1.6.1 気化技術と搬送技術

保存されている形態の液体・個体香料から香気を作りだし、その香気をヒトの鼻孔へと届けることが嗅覚ディスプレイにおいて最も不可欠な役割である。その観点から、嗅覚ディスプレイに求められる根幹の要素技術は次の 2 点である。

・気化技術（匂いの生成方法）
・搬送技術（匂いの供給方法）

この 2 つの要素技術と嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性を表 1.6-1 に示す。表中の 4 つの記号は次の通りである。

A: 要素技術は、嗅覚ディスプレイに求められる機能の実現に望ましい
B: 要素技術は、嗅覚ディスプレイに求められる機能の実現において可能である
C: 要素技術は、嗅覚ディスプレイに求められる機能の実現において不可能である
－: 要素技術は、嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性がみられない、あるいは不明である

表 1.6-1　気化・搬送技術と嗅覚ディスプレイに求められる諸機能

要素技術:	構成部品・機構の例	時間的な正確さ	空間的な正確さ	任意の比率の多成分調合	低揮発性香気物質の匂い提示	装置の小型化	残臭の低減
気化技術							
自然蒸散	コンテナ、多孔質材料	C	C	C	C	A	B
送風（ヘッドスペース法、個体香料吹きつけ）	エアポンプ、ファン、送風チューブ	B	B	B	B	B	B
加熱	電熱線、ペルチェ素子、レーザーダイオード	B	B	B	A	B	B
霧化	圧電素子、インクジェットヘッド、音響流ベッセルビーム	B	B	B	A	B	B
直噴	エアポンプ、送風チューブ	A	A	B	B	B	－
搬送技術							
自然拡散	コンテナ、多孔質材料	C	C	C	C	A	B
送風	エアポンプ、ファン、送風チューブ	B	B	B	B	B	B
管内伝搬	テフロンチューブ	B	A	B	B	B	B
直噴	エアポンプ、送風チューブ	A	A	B	B	B	－
その他	エアキャノン、音響流ベッセルビーム	B	A	B	B	C	B

1.6.1.1 気化技術（匂いの生成方法）

香料には天然香料（動物: 4 種類; ムスク，シベット，カストリウム，アンバーグリス、植物性: 1500 種類程度）と合成香料（5000 種類程度）がある。天然香料は希少で高価なものも多く、品質が劣化しやすいという難点がある。一方、合成香料は大量生産が可能であり、安価で安定供給が可能という利点がある[44]。香料の形態としては液体または個体が大部分であるが、液体香料をしみ込ませた多孔質材料やゾル状・ゲル状香料等も存在する。そのままでは匂い分子が拡散され難いため、香気を生み出すためには気化が必要であり様々な技術が考案されている。その代表的な技術について関連研究とともに紹介する。

①自然蒸散・・・香気の生成機構としては特別な仕組みを用意せず、自然な気化・蒸散に任せる方法である。特に、揮発性の高い香料の利用においては有効である。多孔質材料を用いることもある。

自然蒸散気化・自然拡散搬送技術を使ったケースとして、心理学やコミュニケーションを研究分野としているスウェーデンのグループ（マルメ大学、ストックホルム大学）が行った研究がある[22]。

新型コロナウィルス（Corona Virus Disease 19）感染症によって引き起こされる嗅覚障害を想定して、ユーザーによる匂いの識別と嗅覚トレーニングを簡易型の嗅覚ディスプレイおよび遠隔操作で行うためのメディカルシステム“EXERSCENT”を提案している（図 1.6-1 参照）。

ユーザーは匂いサンプルの入った小さなバイアルボトル（香りユニット）をつかみ、それらを直接、鼻元に動かして嗅ぐ。パーソナルコンピュータに接続されたハードウェアボックスは匂いの ID を記録し、ソフトウェアを介した対話によりコンピュータ画面上でユーザーへの応答オプションやその他のフィードバックを生成する。したがって、ユーザーのパフォーマンスをリアルタイムで監視する機能や実験データのログ記録とアーカイブ機能など、ディジタルのインタラクティブデバイスの利点を組み合わせている。個々の香りユニットをインターフェースとデータベースにリンクする手段として、RFID（Radio Frequency Identification）タグを採用している。これらのタグは、任意の数のバイアルボトルセットに取り付けることができる。ケーススタディでは、11 人の実験参加者により 54 種類の匂いを識別する嗅覚改善のトレーニングを 16 日間連続で行った結果、正答率は 81%から 96%へと向上した。

このシステムでは、嗅覚ディスプレイ（バイアルボトル）は最もシンプルで最も効率的な手段を採用している。ユーザーの直感的で慣れたジェスチャーを優先して、自然蒸散気化技術を採用した。

A: ラップトップ、タグ付きの香料、MFRC522 モジュール、RFID リーダー／アンテナ
B: ラップトップによる嗅覚トレーニング
C: RFID タグリーダーおよびマイクロコントローラ
D: EXERSCENT のインターフェース

図 1.6-1 “EXERSCENT”のコンセプト[22]

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、香料の自然な気化に任せるのみで、風圧等により香気の生成を促進する技術はないため、匂い提示の時間的精度を高める、あるいは局所的に匂い提示を行うことは極めて難しい。そのため、ユーザーには受動的匂い嗅ぎ（passive sniffing）ではなく能動的匂い嗅ぎ（active sniffing）が求められる。

また、香料を任意の比率で調合する場合、匂い提示のコントロールを時間的に正確に行うことが前提となるため、多成分調合には不向きである。

さらに、香気が発生しにくい低揮発性香気物質（例：バニリン、β-ionone 等）の利用は厳しい状況である。香料メーカーの開発段階において、例えばコロイド溶液を工夫して匂い分子の揮発性を高める等のプロセスを経た香料であれば利用が可能となる。

一方、ウェアラブル型嗅覚ディスプレイにとって重要な小型化に関しては、その機構が簡便であることから期待が持てる。

残臭の低減技術に関しては、空気中に蒸散した香気を何らかの形で回収する機構がなければ期待はできない。

②送風（ヘッドスペース法）・・・香りを含まない空気を送り込み、揮発・気化を促進する技術である。香料は液状でバイアル瓶等の密閉された容器に入れるか、綿等にしみ込ませてコンテナに封入する場合が多い。また、より揮発・気化しやすいように液体香料にバブリングを施し、あるいは加熱を併用して液体香料の温度を上昇させるといった工夫もみられる。

ヘッドスペース法気化・エアポンプ送風搬送技術を使ったケースとして、コンピュータサイエンスを主に研究している英国のグループ（ブリストル大学、サセックス大学）が行った研究がある[45]。

児童心理における形状と香りのクロスモーダル知覚、そして感情について検証することが研究目的である。3 成分嗅覚ディスプレイを使い、感情的連想課題における児童のクロスモーダル効果を調べた。

使用した嗅覚ディスプレイでは、3 セットのガラスのバイアル瓶のうち、2 本に天然エッセンシャルオイルのレモンとバニラを充填した（図 1.6-2 参照）。エアコンプレッサー（ポンプ）から出力した加圧空気は分かれて、電磁弁を通過して個々のチャネルに届く。エアレギュレーターを介した香気の出力は、3D プリンターで製作されたマージノズルを通って実験参加者に届く。実験参加者は香りを知覚し、必要に応じて形状をタイル状に探る時間が 4～8 秒の間で変化する。

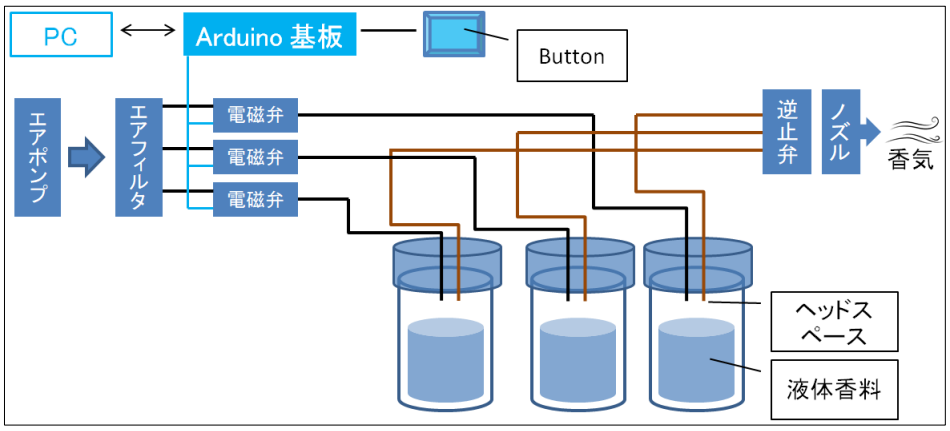


図 1.6-2　“ヘッドスペース法”の仕組み, [45]より作成

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、ボトルのヘッドスペースを利用して香料の気化を強制的に行うため、匂い提示の時間的な精度には期待が持てる。一方、匂い提示の空間的な精度に関しては「匂いの供給方法」次第であるが、ユーザーの鼻孔へと匂いを搬送するための前段階としての役割は果たすと考えられる。

また、香料を任意の比率で調合するには匂い提示の時間的制御が正確に行えることから、概ね望ましい技術といえる。

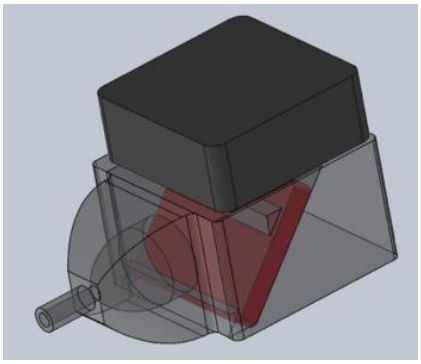
低揮発性香気物質に関しては、バブリングや加熱による気化の促進技術と併用するのであれば利用は可能となる。

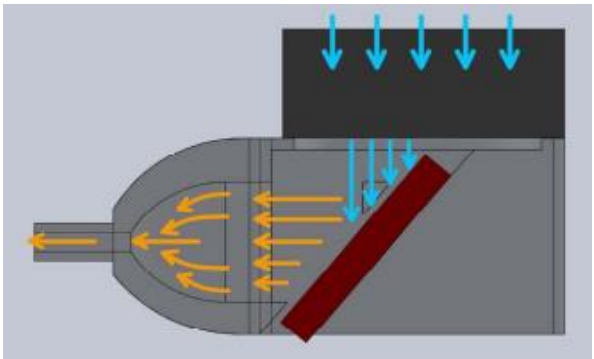
装置の小型化に関しては、多成分調合を前提に複数のバイアル瓶をレイアウトする場合には不向きである。また、残臭の低減技術については、匂いの供給機構と併せて、活性炭フィルター等へ臭気を逃がす仕組みが備わっていれば期待が持てる。

③送風（個体香料吹きつけ）・・・固体香料に向けてファンやチューブから風を吹きつけて揮発・気化を促進する技術である。香料は固体状で専用のコンテナに設置されていることが多い。近年、小型のウェアラブル型嗅覚ディスプレイにおいて使われる場合が多く、匂いの供給方法における送風機構を共用している事例もある。

ファンによる個体香料吹きつけ気化・搬送技術を使ったケースとして、工業デザインを主に研究しているイタリアのグループ（ミラノ工科大学、Oikos Fragrances 社）が行った研究がある[46]。

研究目的は、美術館の展示空間において来訪者が嗅覚ディスプレイを装着し、展示内容に関連した香りの提示を受けることによって拡張現実感（augmented reality）を提示することである。嗅覚ディスプレイの製作においては様々な匂いの生成・供給方法を検討したが、エアフロー（送風）気化方式を採用した（図 1.6-3 参照）。具体的には、発生する香りの量と濃度、および香気をカバーできる距離を正確に制御する必要がある。加えて、Oikos Fragrances 社製の固形香料のトローチを使用した。二酸化ケイ素粉末を用いた合成多孔質ベースの香料である。送風において、商業用エアポンプは大き過ぎてウェアラブルデバイスとしては重く、またノイズが発生する。逆に、ファンは非常に小さくて軽く、ノイズがない場合がある。選ばれたファンは SUP1800575001 で、小さくて軽い。同時に信頼性が高く、適切な空気の流れを提供可能である。個体香料のトローチが入ったコンテナとファンは 45°の角度を作るように開発された。いくつかの予備テストでは、この角度が香気の生成に最適であることが示された。





(a) モックアップ図（ファンユニットは黒、香料トローチは赤で示す）
(b) 12V 駆動のファンが 4 種類の香料トローチに 45°で風を吹きつける（制御は 9V 供給の Arduino）

(a) (b)

図 1.6-3　実験のために開発したウェアラブル型嗅覚ディスプレイ[46]

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、香料の気化は強制的に行うが、香気成分のアウトレット部分をバイアル瓶のようなパーツで実装していないため、匂い提示の時間的な精度には機構間で差がみられる。また、匂い提示がユーザーの鼻元であれば空間的な精度は保てるが、ユーザーとの距離が離れる場合には匂いの供給方法次第となる。

任意の比率による調合については、匂い提示の時間的な精度に幅があるため一概には断定できない。

低揮発性香気物質に関しては、コンテナの加熱等により気化の促進技術を併用するのであれば利用は可能となる。

装置の小型化に関しては、基本構成は香料コンテナとファン、あるいはチューブが中心であり、期待が持てる。

残臭の低減に関しては、匂いの供給機構と併せて、活性炭フィルター等へ臭気を逃がす仕組みが備わっていればある程度は可能となる。

なお、研究例として紹介した嗅覚ディスプレイで示されるように、匂いの生成・供給方法を同時に兼ねたファンを利用する場合が多くみられる。

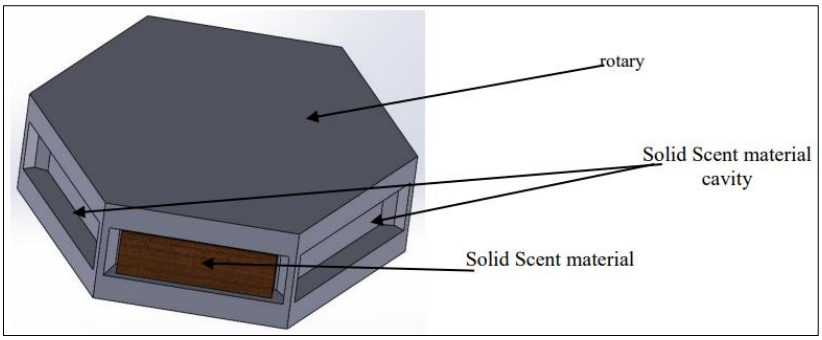
④加熱・・・液体・固体香料から香気を揮発・気化させるために熱を用いる技術である。香料の化学的性質に委ねられる部分が大きい。また、香料にコロイド粒子が入っているもの等では加熱によってゾル状とゲル状の転換を利用した技術もみられる。匂いの供給プロセスにおける送風技術と併せて利用される場合が多くみられる。

レーザーダイオードによる加熱・ファンによる送風技術を使ったケースとして、コンピュータサイエンスと電子工学を主に研究している中国とイラクのグループ（湖南大学、中南大学、アル・マンソア・ユニバーシティ大学）が行った研究がある[47]。

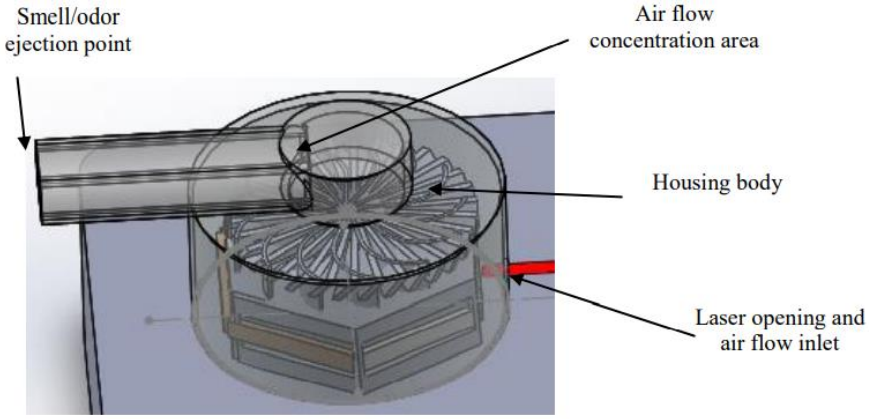
レーザーベースの加熱技術によって香気を生成する多成分調合型嗅覚ディスプレイを開発し（図 1.6-4 参照）、ユーザーがインタラクティブにゲームを行えるシステムを構築することが研究目的である。開発した 6 成分嗅覚ディスプレイを使い、ゲームコンテンツで用いられることを想定し、匂いセンサによる嗅覚ディスプレイの評価を行った。評価プロセスにおいては、レーザーダイオードの照射時間、六角形の筐体の回転、そしてファンの On と Off を適宜行った。

実験環境において、MQ-2 ガスセンサを使い、匂い提示と応答時間に関する実験結果が得られた。嗅覚ディスプレイの匂い提示点から数 cm 離れた場所では、様々な強度値で連続して嗅覚ディスプレイを制御し、ppm オーダーの応答値が示された。元の匂い／レーザー照射後の匂いについて調べ、正確な匂い提示が可能であることがわかった。また、匂い提示への応答時間はゲームコンテンツへの応用に耐え得る結果となった。

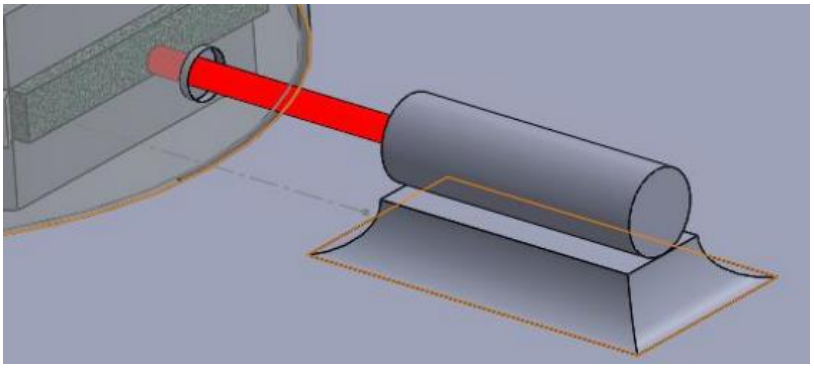
開発した嗅覚ディスプレイは 6 成分の据置型嗅覚ディスプレイで、筐体は六角形であり、6 種類の個体香料に 1 か所からレーザーダイオードによる照射を行って加熱気化により香気を生成する。そのため、六角形の筐体にセットされた各香料をレーザー照射口に一致させるために回転を伴う。また、香気搬送方法はファンによって行う。レーザーダイオードによる照射で香料が燃焼して匂いに変化が生じないか配慮を要する旨の言及がみられる。



(a)



(b)



(c)

(a) 6 種類の個体香料を入れた六角形のロータリーの筐体　(b) 匂いの生成・供給機構を実装した嗅覚ディスプレイのハウジング内部　(c) 個体香料を照射して気化を促進するレーザーダイオード

図 1.6-4　開発した 6 成分据置型嗅覚ディスプレイ[47]

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、加熱による匂いの生成は香料の性質に大きく依存しており、匂い提示の時間的・空間的精度については断定が難しい。それでも、自然蒸散技術に比べれば気化が促進されるため望ましい技術である。

任意の比率による調合については、匂いの供給方法に大きく委ねられる。また、多成分化に関しては、加熱に素早く応答する香料と気化が遅い香料が混在する場合には不向きである。さらに、加熱によって香料の性質が大きく変化しないように配慮する必要がある。

低揮発性香気物質に関しては、加熱により気化が促進される場合が多くみられるため、有効である。

加熱に使われる機構は様々であるが、その仕組みに用いられるパーツがシンプルであれば小型化には期待が持てる。

残臭の低減に関しては、匂いの供給機構と併せて、活性炭フィルター等へ臭気を逃がす仕組みが備わっていればある程度は可能となる。

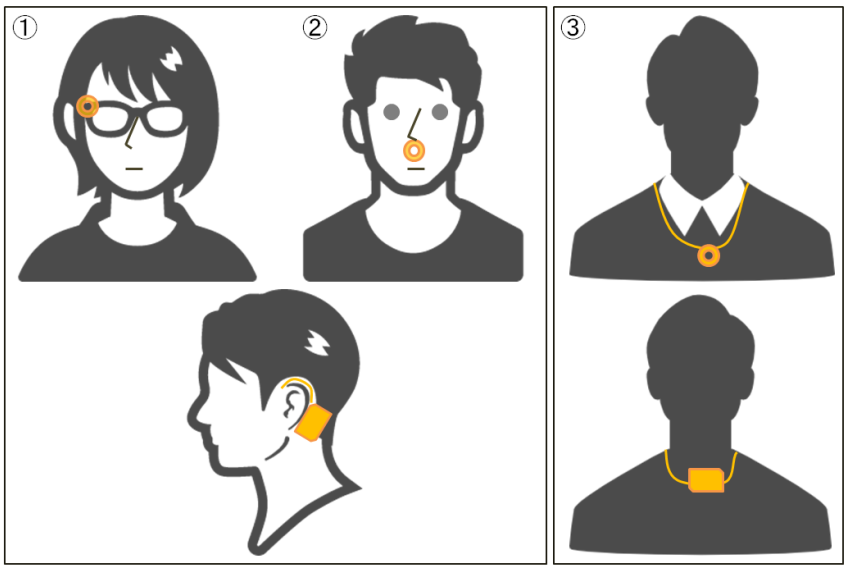
⑤霧化（圧電素子）・・・液体香料を超音波エネルギーによって微粒子にして空気中に放出することで気化を促進する技術である。液体を霧化する超音波振動子には主に圧電素子が使われる。これらの機構はアトマイザーと呼ばれる。また、ノズルの先端に空気流を当てて負圧により吸引して微小液滴を生成する手法もあり、ディフューザー等において利用される。

圧電素子による霧化・自然拡散による搬送技術を使ったケースとして、工業デザインやメディアアートを研究している米国と中国のグループ（MIT メディアラボ、浙江大学）が行った研究がある[48]。

ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイの開発にあたり、顔と頭部付近に装着する香りインターフェースに注目し、異なる部位に装着したプロトタイプのユーザビリティを実験参加者の協力を得て評価を行い、今後の開発課題を探った（図 1.6-5 参照）。

3 か所の装着位置は、眼鏡、鼻孔の下、そしてネックレスである。実験参加者 12 人により、3 か所の装着と匂い提示の評価をリッカート尺度法により行い、快適度合いと社会的受容性についての意見を得た。実験参加者は装着者と観察者に分かれていた。装着者は顔で感じる湿度、匂いの感覚強度、ノイズの大きさについて評定を行った。実験結果は、眼鏡や鼻孔の下とネックレスでは 3 つの項目で有意な差がみられなかった。今後は、実験参加者をさらに増やし、気流のない実験環境を整えて研究を継続する。

嗅覚ディスプレイの機構としては、ピエゾ素子による霧化によって匂いを生成する。液体香料はコットンフィルターに収納され、香気は細いテフロンチューブ内を伝搬する。プロトタイプのため、1-3 成分のモデルが製作された。



① 眼鏡に装着 ②鼻孔下に装着 ③Olfactory neckless（ユーザーはPCB 基板とバッテリーを背中側に置く）

図 1.6-5　On - Face olfactory Interfaces 3 種類のプロトタイプ, [48]より作成

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、超音波霧化技術は液体香料を微粒子にするため、少量の香料により局所的な匂い提示が可能となる。一方、匂いの時間的な精度は匂いの供給方法に依る部分が大きい。

任意の比率による調合と多成分化は匂いの供給方法に委ねられるが、粘性の異なる液体香料でも微小液滴を生成できるため、利点がある。

低揮発性香気物質に関しては、圧電素子により液体香料の霧化が促進するため望ましいと考えられる。

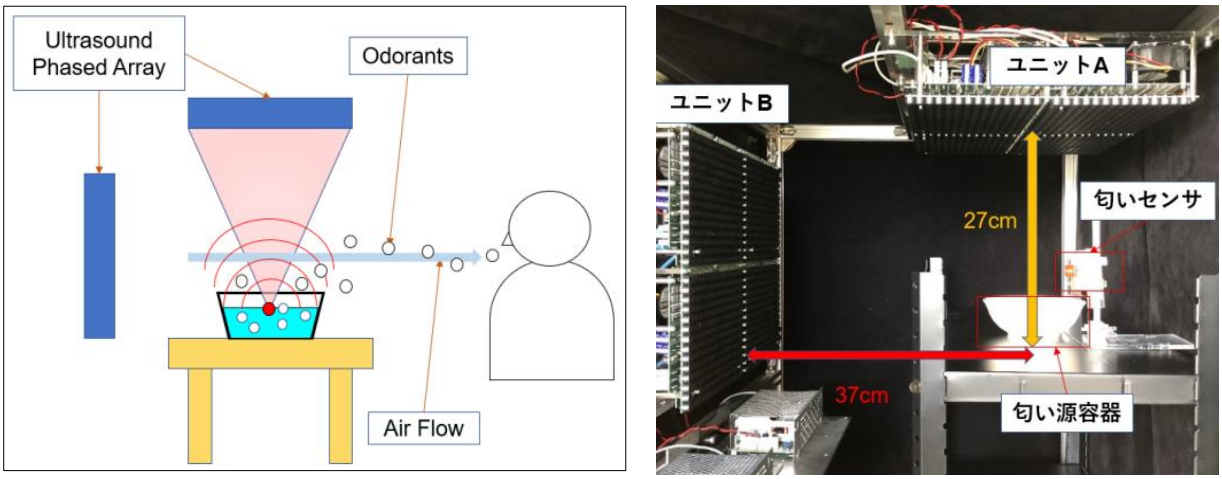
超音波霧化に用いられる機構において、その仕組みがシンプルであれば小型化には期待が持てる。

残臭の低減は、匂いの供給機構と併せて活性炭フィルター等へ臭気を逃がす仕組みが備わっていればある程度は可能となる。

⑥霧化（音響流ベッセルビーム）・・・液体香料に超音波ビーム（音響流ベッセルビーム）を照射して香料の霧化を促進する技術で、比較的新しい手法である。また、発生した香気の搬送においても同様の技術が利用可能である。コアとなる一つの技術で匂いの生成と供給を実現できる点は評価に値する。

気化・搬送ともに音響流ベッセルビーム技術を使ったケースとして、計数工学や VR を研究分野としている国内のグループ（東京大学）が行った研究がある[49]。従来までになかった新しい匂い生成方法と匂い供給方法の提案である（図 1.6-6 参照）。

まず、液体香料（アロマオイルを含んだ水溶液）に超音波ビーム（音響流ベッセルビーム）を照射することによってキャピテーション気泡を作る（霧化）。そして、その香気を同じく超音波ビームにより、ユーザーの鼻元を想定した位置へと搬送し、さらに、匂いセンサを使って照射時間に対する匂い濃度を計測し、この嗅覚ディスプレイの性能評価を行った。装置の上部および左側に超音波フェーズドアレイが搭載されており、真下に照射する方向（ユニット A）と水平に照射する方向（ユニット B）を実現している。匂い源（液体香料）はユニット A の真下の容器内にあり、超音波ビームを照射すると匂い物質が霧化される。ここで、霧化した匂い物質をユニット B から生成した超音波ビームで照射すると、音響流によって匂い物質は遠隔のユーザーの鼻孔付近まで搬送される仕組みである。



(a) (b)

(a) 提案手法の概略図　(b) 提案手法の実機および計測器具

図 1.6-6　超音波走査による匂いディスプレイ[49]

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、研究例の報告（匂いセンサによる計測結果）から、匂い提示の時間的・空間的な精度は実用に足る機能を備えている。研究例では 2 成分による実験が示されているが、任意の比率による調合や多成分化については今後の研究展開に期待が持てる。

低揮発性香気物質に関しては、液体香料が水溶性であったことから、超音波ビームの照射が匂いサンプルの性質に依存するか否かについては一概にいえない。

小型化に関しては、超音波ビームの生成システム自体が大きいため、困難である。

残臭の低減については、匂い切替え時に匂いセンサが残臭に反応した旨示されており、今後の課題となっている。

1.6.1.2 搬送技術（匂いの供給方法）

匂いの供給は時間的側面および空間的側面と関わりがある。時間的な側面、即ち香りの持続時間は拡散範囲と結びついている。伝統的な香り鑑賞法の多くは長時間、背景的に香りを提供する形態である。広範囲に香りを拡散すれば自ずと持続時間も長くなる。逆に、香りの拡散範囲を狭めれば必要な香料は少量となり、自然散逸とともに比較的速く匂い濃度がヒトの検知閾以下になるため、香りの鑑賞時間は短い。

また、空間的側面については図 1.4-1 に示した通り、匂いを提示する空間の大きさにより装置の規模も変わってくるが、匂いを確実に届けることは必須の条件である。

嗅覚ディスプレイの出現により、テンポの速い動画コンテンツ等と同期した匂い提示や、匂い刺激をアクセントとして使う短時間提示が可能となった。その実現のために、少量の香料をユーザーの鼻孔へと供給（搬送）する方法も開発されている。代表的な香気の搬送技術について紹介する。

①自然拡散・・・匂いの生成方法において自然蒸散の手法を使った場合、匂いの供給方法も自ずと自然蒸散の手法を利用することとなる。自然蒸散と同様に、香気の搬送には特別な仕組みを必要としない。

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、香料の自然な蒸発・拡散に委ねられており、匂い提示の時間的・空間的精度を高めることは難しい。

また、香料を任意の比率で調合する場合、匂いの供給の制御を時間的に正確に行うことが前提となるため、多成分調合には適さない。

低揮発性香気物質を多く含む匂いサンプルの利用は、気化技術の手法次第であるが、香気の搬送には厳しい条件となる。

また、装置の小型化に関しては、その機構が簡便であることから期待が持てる。

さらに、残臭の低減技術に関しては、空気中に放出された香気を何らかの形で回収する機構がなければ期待はできない。

②送風（ファン）・・・気化した香りをユーザーの鼻元へと届ける際、最も多く用いられる匂いの供給方法である。自然拡散技術に比べると、匂いの提示空間は風の届く範囲に限定される。ただし、据置型の嗅覚ディスプレイでは匂い提示部とユーザーの鼻孔に距離がある一方、ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイではユーザーの鼻元で香気を発するため、利用可能なファンの規模（風圧や駆動電圧）には非常に大きな差がみられる。

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、据置型の嗅覚ディスプレイでファンを使う場合、匂いの提示空間は一定の正確さを保てるが、距離が離れているために外乱気流等の影響を受けやすく、時間的な正確さはケースバイケースで異なる。一方、ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイで小型の DC ファンなどを使う場合は時間的・空間的精度は向上する。

多成分調合については、ファンの機能が香気の搬送のみにとどまらず、揮発性の異なる匂い分子を空間でブレンディングする役割があることが示唆される。

装置の小型化については、ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイにおいて小型の DC ファンの利用が可能であり、期待が持てる。

残臭の低減に関しては、ファンの大小に関わらず羽根に香気物質が付着する場合が多く、取り外して洗浄するなどのメンテナンスを要する。

③管内伝搬（テフロンチューブ）・・・発生した香気がテフロン等のチューブ内を伝搬して、ユーザーの鼻元へ届く仕組みである（2.1 で後述）。使用する香料が小量ですむことや、匂いの提示が短時間から連続の長時間まで対応できる点が長所である。一方、チューブの取り回しによる扱いの問題等があげられる。

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、管内伝搬技術は匂いの提示空間においては非常に高い精度を実現できるが、チューブの長さに起因するレイテンシーの問題があり、時間的な正確さは用いる匂いサンプルの揮発性に依るところが大きい。

多成分調合については、匂い提示の時間的な正確が前提となるため、一概には断定が難しい。

また、装置の小型化については、ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイにおいて比較的短いチューブをポンプと組み合わせて利用する場合などにおいては可能となる。

残臭の低減に関しては、チューブ素材のテフロン等に匂いが付着することは考えにくいが、連続して異なる匂いを提示する場合などに、前に提示した香気の管内の残臭が次に提示する匂いと混じる問題は頻発する。

④直噴・・・嗅覚ディスプレイの匂い提示部分を鼻孔、あるいは鼻孔近傍に装着し、鼻腔内へ香気を直接送り込む手法である[50]。装着時の煩雑さは避けられないが、匂い提示の局所性と嗅覚の応答性においては理想的といえる。

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、直噴技術はユーザーの鼻元で利用するウェアラブル型の嗅覚ディスプレイにおいて使われることが前提であり、匂いの生成機構（エアポンプ）と供給機構（チューブ）が一体化した場合もみられる。匂い提示における時間的・空間的な精度は極めて高い。

一方、多成分調合については小型化されたシステム内部において匂い切替えを実現する仕組みが実装される場合には可能となる。

装置の小型化については、ウェアラブル型嗅覚ディスプレイでの利用が前提となるため、望ましい。

また、残臭の低減に関しては香気を直接、鼻腔内へと搬送するため、残臭という概念が適用されない。

⑤その他（渦輪による搬送）・・・エアキャノン（air canon, 空気砲）から渦輪（vortex ring）を発射させる手法である。渦輪の発射の際に、エアキャノンの開口部近傍に香料を分布させることで、香気を含

んだドーナッツ状の渦輪をユーザーへと供給することが可能である。この特殊な技術は、ユーザーへ局所的に匂いの提示を行うことに重点を置いて開発が進められている。短時間の匂い提示には適するが、連続的な提示には不向きである[19]。

嗅覚ディスプレイに求められる機能との関係性は、まず、渦輪による搬送技術は匂い提示の空間的な正確さに重点を置いている。エアキャノン自体の仕組みに加えて、ユーザーの鼻位置のトラッキングシステムを構成する全体の規模は大掛かりである。また、多成分調合や匂いの切替え技術に乏しかったが、近年、多くの改良点を施した新たな嗅覚ディスプレイシステムが開発され、大きな期待が寄せられている（後述）。

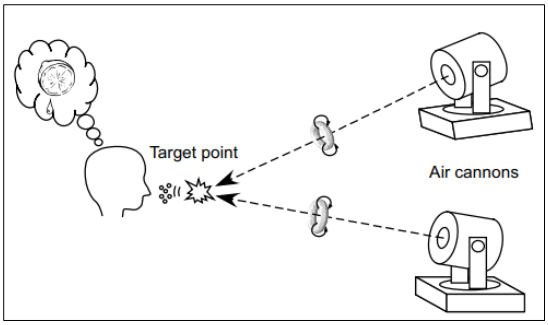
香気の搬送にエアキャノン技術を使ったケースとして、情報工学や VR を研究分野としている国内のグループ（名城大学）が行った研究がある[51]。

これまでに培ってきたエアキャノンによる匂いの生成・供給技術を改善し、Clustered Digital Air cannon（CDA）と呼ばれる機構を開発した（図 1.6-7 参照）。匂い提示の時間的・空間的精度をさらに高め、装置の小型化を計った。エアキャノンは円形の開口部を備えたチャンバーで、チャンバーの内容積が減少したとき、追加量の空気がチャンバー内に注入される。短時間で空気が開口部から押し出されて、渦輪が形成される。この渦輪に香気を導入する際に匂いが生成され、ユーザーの鼻孔へと搬送可能となる。

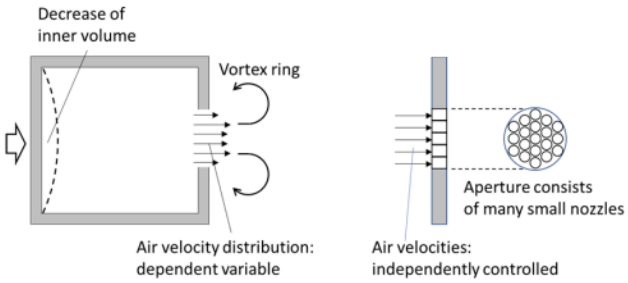
近年、提案された Clustered Digital Air cannon（CDA）は単一の開口部ではなく、多数の小さな開口部で構成されている。CDA では各開口部はエアバルブを介して空気圧源に接続されている。バルブの開放タイミングを制御することで、各小口径から吹き出す空気のタイミングと量を制御できる。空気源の気圧値を制御すれば、各小口径から吹き出す風速も制御できる。このデバイスは、多くの小さなピクセルで構成されるデジタルビジュアルディスプレイに由来して、デジタルエアキャノンと名付けられた。

CDA 開口部での任意の速度の空気分布による渦輪の生成は、従来のエアキャノンでは不可能であった開口部において、最適化された空気速度分布を提供できる可能性を示している。外部の陰圧の利用を含めて、速度分布のさまざまなパターンをテストする予定である。

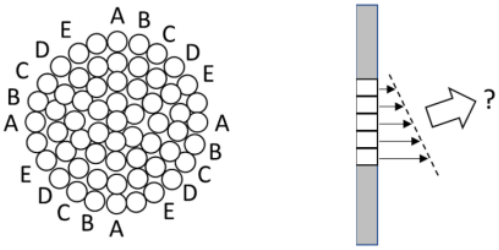
匂い切り替え機能は、複数の開口部に異なる香りを割り当てることで実現可能となる。従来のエアキャノンを使用してこの機能を実現するには、限られたスペースに局所的に香りを放出する特殊な香り注入メカニズムが必要であったが、CDA では、渦輪を構成する空気が排出されるノズルにのみ香気を導入することで実現できる。



(a)



(b)



(c)

(d)

(a) 従来の手法（2 基のエアキャノンから渦輪を発生させ、衝突した位置 ＝ ユーザーの鼻孔で匂いを感じさせる）(b) 従来型エアキャノンと CDA エアキャノンの比較 (c) 匂い切替えの割当てイメージと機械動作機構を伴わない提示方向の制御 (d) CDA ヘッドのプロトタイプ

図 1.6-7　CDA 手法によるエアキャノンを使った匂い提示装置[51]

1.6.2 その他の技術

嗅覚ディスプレイの要素技術について考察する際に重要なことは、各要素は組み合わせて機能している場合が大部分であり、それらが相互関係を保っているため、要素技術一つ一つを個別に論じても実際の研究開発のプロセスには当てはまらないケースがみられることである。匂い提示装置として完成された総体を個別に調べることが重要である。

具体的に挙例すると、ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイは装置全体の小型化に最も重点を置くため、概して匂いの生成と供給を共通の送風ファン 1 基で実現している。しかし、送風機構をファンからポンプに変更し、さらに個体香料から液体香料へ入れ替えたならば、嗅覚ディスプレイに求められる諸機能との関係性においては一律ではなくなる。

また、近年主流となっている小型の嗅覚ディスプレイにおいては匂いの調合・切替え技術や残臭の低減技術を必ずしも備えていないものが多く見られる。こうした実情に鑑み、本項においては表 1.6-1 に示したような各要素技術のランク付けは行わないこととした。

1.6.2.1 匂いの調合・切替え技術

多成分調合型嗅覚ディスプレイにおいて、複数の香料を所望の割合で調合する、あるいは時間軸に沿って提示する匂いを切り替える技術である。

2000 年代初頭には、エタノール等で希釈した香料を 1 滴単位で滴下し調合する「液状ブレンド」技術がみられたが[52]、装置が大掛かりになることもあり、現在は「気化後ブレンド」が主流となっている。

主な技術は次の 3 種類である。

①空気との混合比率の調整・・・従来、マスフローコントローラ（流量調整器）を使った大規模なシステムがあったが、高速電磁弁開閉による手法が多く用いられている（2.1 において後述）。

②液体香料における射出時間の制御・・・時間の制御技術としては、パルス波のデューティ比を変化させるために PWM（Pulse Width Modulation, パルス幅変調）方式が主に用いられている。

③液体香料における射出量の制御・・・圧電素子に液滴を射出して匂いの生成を行う際に、液滴の射出量の制御が必要となる。機構としては、マイクロポンプやマイクロディスペンサー、そしてオートサンプラーが主に用いられる（2.2 において後述）。

1.6.2.2 残臭の低減技術

嗅覚ディスプレイに実装される残臭の低減技術の大部分は活性炭フィルターを応用した機構である。その例を図 1.6-8 に示す。なお、この嗅覚ディスプレイについては 2.3 において後述する。

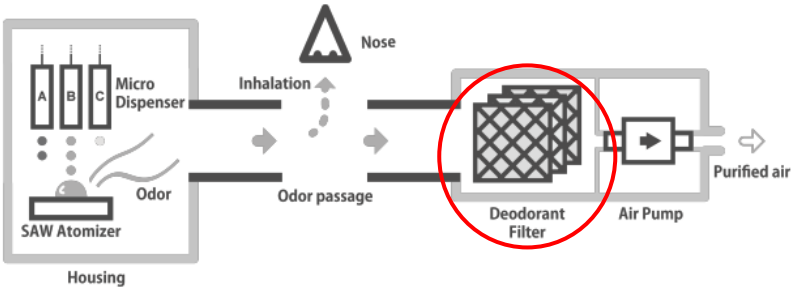


図 1.6-8　ウェアラブル型嗅覚ディスプの内部構造, [53]

また、特段こうした残臭の低減技術を使った機構は持たず、提示した匂いを空間内にて霧散させる嗅覚ディスプレイは非常に多い。

なお、嗅覚ディスプレイに空気清浄機能を実装した研究例は未だないと考えられるが、官能検査における実験参加者に対して残臭の低減目的で、OH ラジカル技術[54]やプラズマクラスター機構[55]を利用した空気清浄機と組み合わせて用いることがある。これらの技術は主に空調システムの研究開発に携わっている家電メーカーが保持している場合が多い。

1.6.2.3 身体との関係性

嗅覚ディスプレイから提示された匂いをヒトが嗅ぐ際、ユーザーの身体との位置関係において 2 つの形態に類別される。

①据置型・・・嗅覚ディスプレイは、匂いの生成部、匂いの調合部、そして匂いの提示部等から成り立っており、様々なパーツの集合体である。さらに成分数が多くなれば装置が大型化するため、水平な台の上などに設置して利用する。このタイプを据置型という。ユーザーの鼻孔との距離設定が重要となる。

②ウェアラブル型・・・近年は VR コンテンツを構築するため、HMD（Head Mounted Display）と一体化して嗅覚ディスプレイが利用される機会が多い。こうした用途で用いられる際、嗅覚ディスプレイをユーザーの身体の一部に装着することとなる。このタイプをウェアラブル型という。ウェアラブル型嗅覚ディスプレイの先駆的な存在は、南カリフォルニア大学が開発した”Scent Collar”の研究[56]にみることができる。Scent Collar はユーザーの首にかけたデバイスから匂いを提示する多成分調合型の嗅覚ディスプレイである（図 1.6-9 参照）。

4種類の香料カートリッジを実装したデバイス。ユーザーの首にかけて利用する。

図 1.6-9　Scent Collar の装着写真[56]

また、既述した圧電素子による霧化技術を使ったウェアラブル型嗅覚ディスプレイ[48]は比較的新しいケーススタディである。装置の小型化と簡便化が進む傾向は加速しており、今後は主流となる可能性もある。

1.7 嗅覚ディスプレイの評価

1.6 で示した研究例では、様々な要素技術の開発と嗅覚ディスプレイへの利用の過程でその評価に言及した論文がみられた。本節では、嗅覚ディスプレイに求められる性能に主軸を置いた関連研究を中心に嗅覚ディスプレイの評価について考察を行う。

1.7.1 関連研究（嗅覚ディスプレイの評価）

まず、嗅覚ディスプレイにおける匂い提示の時間的精度についてフォーカスした研究例を示す。計測工学を主な研究分野としている国内のグループ（慶応義塾大学、キャノン株式会社）が行った研究である[57]。

ヒトの呼吸と嗅覚ディスプレイからの匂い提示のタイミングに注目し、自然なスニッフィングを実現させるための手法を模索した。プリンタインクジェット素子の機構を用いた嗅覚ディスプレイからパルス射出による匂い提示を行い、ユーザーの嗅覚順応を軽減させるために、風速と残臭の関係を調べる実験を行った。

評価した嗅覚ディスプレイは 0.1 秒単位で液体香料の提示量を制御することが可能である。3 つの大タンクと 9 つの小タンクを実装し、最大で 12 種類の香料をブレンディング可能である。

嗅覚ディスプレイの評価は実験参加者 12 人により官能検査を実施した（図 1.7-1 参照）。射出時間 0.3 秒の射出において、風速と残臭の関係を計測した。ラベンダーの香料は射出量を 2 段階で提示し、香気搬送のファンの風速は 0.8m/sec, 1.0m/sec, 1.2m/sec, 1.4m/sec, 1.6m/sec, 1.7m/sec, 1.8m/sec で変化させて、香りを感じ終えた瞬間に参加者はマウスをクリックし、香りの感じ終わりの時間を測定した。

図 1.7-1　官能検査の様子[57]

図 1.7-2 は官能検査の実験結果を示す。射出量 10 ピコリットル、80 ピコリットルにおけるそれぞれの香りを感じ終わるまでの時間を 12 人の平均値で示している（近似曲線）。グラフは、射出量によらず風速が上昇するに従い香りを感じている平均時間が短くなっていることを示している。そこで、射出量・風速が、香りの知覚時間に及ぼす影響を調べるため、分散分析と多重比較を行った結果、香りが残留しない空間を作るためには、ファンの風速を 1.2m/sec 以上に設定する必要があることが判明した。

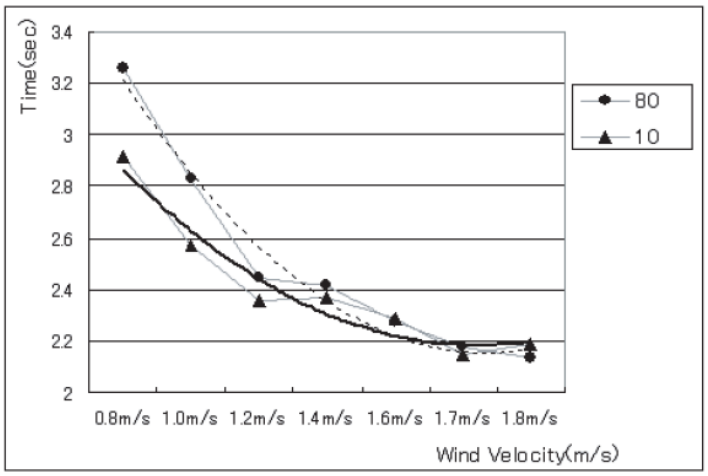


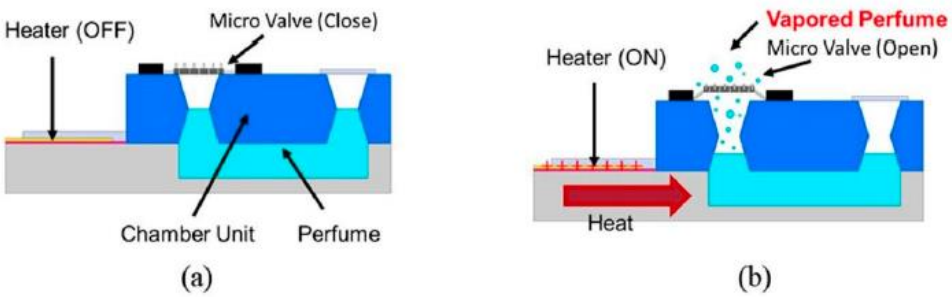
図 1.7-2　風速と香りを感じ終わる時間の関係[57]

同研究では要素技術の一つである香気の搬送技術に的を絞り、ユーザーにとって最適なファンの速度を官能検査実験により調べた。香料の射出量（提示量）を 2 段階に切替え、さらに時間的制御を 0.2m/sec ずつ細かく変えて行った点は評価に値する。

しかし、同一装置のパラメータを変えて評価を行ったのみで、アーキテクチャーの異なる複数の嗅覚ディスプレイを対象としたわけではない。

次に、新たに開発した超小型嗅覚ディスプレイにおける匂い提示の空間的精度に焦点を当てた研究例を示す。MEMS 技術を主に研究している国内のグループ（香川大学、RICOH 株式会社）が行った研究である[58]。

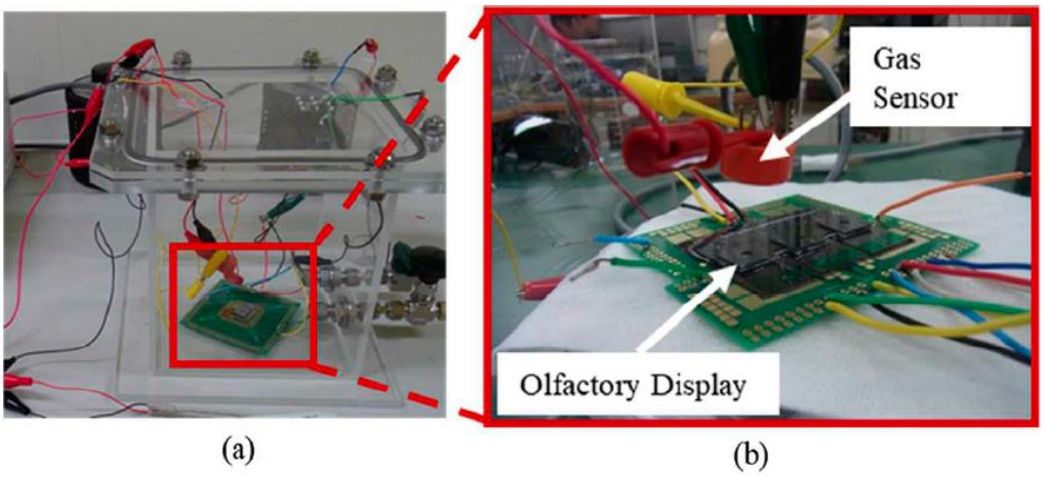
同グループは MEMS 技術を使い、サイズがわずか数平方センチメートルの加熱気化方式を使った匂い発生ユニットを開発した。ヒーターとバルブは微細加工を施し、匂い発生ユニットは加熱部分と香料を保管するための機械式バルブを備えたチャンバーで構成されている。貯蔵された香料はヒーターを介して気化され、香気の搬送はマイクロバルブを通じて有効化／無効化される。香料の拡散量はヒーターの出力とバルブの開閉時間によって決まる（図 1.7-3 参照）。



(a) ヒーターとマイクロバルブ（OFF/Close の状態）(b) ヒーターとマイクロバルブ（ON/open の状態）

図 1.7-3　MEMS 嗅覚ディスプレイの基本構造[58]

また、嗅覚ディスプレイの評価は、香料の拡散性能を匂いセンサシステムを利用して行った（図 1.7-4 参照）。



(a) 密閉容器に設置した嗅覚ディスプレイ　(b) ガスセンサによる計測

図 1.7-4　香料拡散エリアの計測実験系[58]

図 1.7-5 は匂い発生ユニット（嗅覚ディスプレイ）の性能評価実験の結果を示している。ガスセンサは、ヒーターとバルブがそれぞれオン状態とオープン状態のときに、香水の拡散を正常に検出した。バルブが開いた状態にある時間の増加とともに拡散の持続時間が増加することがわかり、バルブが閉じた状態に切り替わると拡散が終了することが確認された。香料は、ヒーターとバルブがオンとオープンの状態になった直後に拡散した。しかし、ヒーターとバルブがオフとクローズの状態になった後、拡散はすぐには止まらなかった。香料の拡散を高精度に制御するには香料の物性を考慮する必要がある。

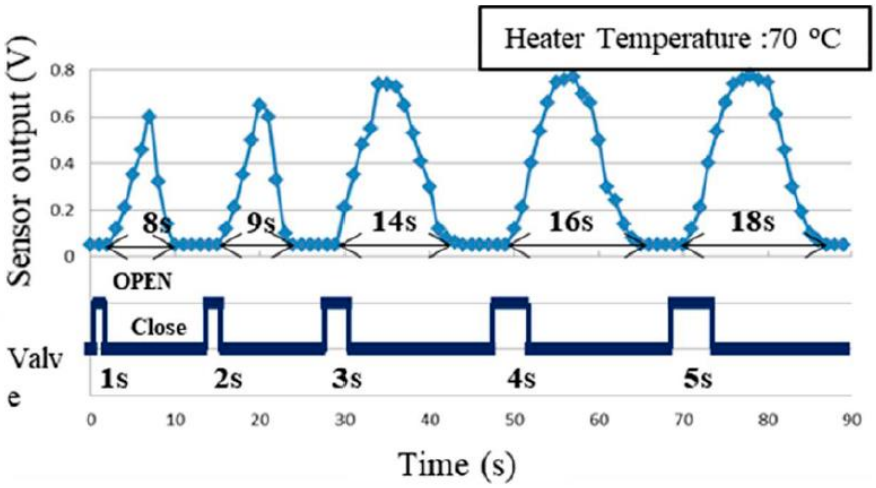


図 1.7-5　時間とセンサ出力の関係[58]

同研究は微細加工による超小型嗅覚ディスプレイのプロトタイプにおける匂い提示の空間的特性を、匂いセンサで行ったものである。この研究時点では加熱気化による香気の生成技術が香気の搬送技術を兼ねている。香料の拡散状態を匂いセンサシステムで計測した点は評価できるが、ユーザーに向けて実際に匂いを提示することを前提として、官能検査実験を併用すべきである。さらに、匂いセンサシステムの計測環境は密閉された容器内だけでなく、通常の空間内でも計測を行う必要があると考えられる。

最後に、コンピュータスクリーン（液晶ディスプレイ）を利用した嗅覚ディスプレイにおける評価の

研究例を示す。電気電子工学を主に研究している国内のグループ（東京農工大学）が行った研究である[59]。同グループはコンピュータスクリーンに沿って匂いの分布を生成できる新しい匂い提示システム（Smelling screen）を提案している（図 1.7-6 参照）。

ファンが生成する気流は複数回衝突して、スクリーンからはユーザーに向けて気流を作り出す。空気の流れに匂い蒸気を導入することにより、ユーザーはスクリーン上の特定の位置から香気が発生しているように感じる。このバーチャル匂い源の位置はスクリーン上の任意のポジションに設定が可能である。また、匂い蒸気を運ぶ気流の速度はヒトの匂い検出閾より低く設定することができる。

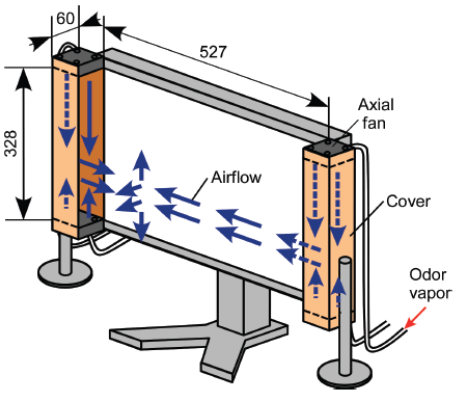
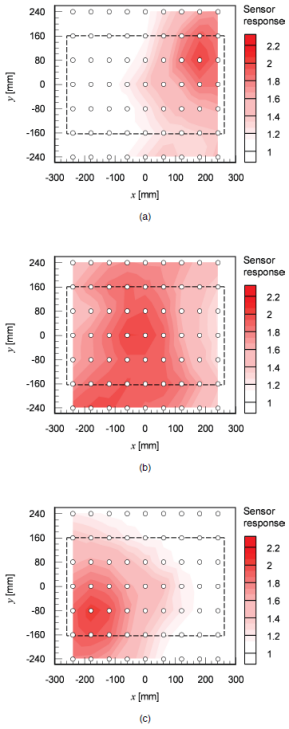


図 1.7-6　Smelling screen ダイアグラム（単位：mm）[59]

この嗅覚ディスプレイにおける匂い分布の評価は、ガスセンサによる機械計測、および実験参加者による官能検査の双方を利用して行われた。金属酸化物ガスセンサー（TGS2620、フィガロ技研）で香気分布を測定した際のセンサ応答が示されている（図 1.7-7）。1 回の測定で 9 つのガスセンサを調整し、7 回測定を繰り返し、63 の測定ポイントでセンサ応答のデータを収集した。



破線の長方形は画面のサイズと位置を示し、白丸はガスセンサの応答を測定した位置を示す

図 1.7-7　スクリーン表面から 230mm の位置における香気分布[59]　(a) 右上 (b) 中央 (c) 左下

同実験では桃フレーバーの液体香料を使用したが、リキッドコーヒーフレーバーを設定すればコーヒーの香りを拡散する。また、提案システムは多成分調合型嗅覚ディスプレイとして使用すると、複数の匂いを切り替えることができる。

この嗅覚ディスプレイシステムの主な弱点は、複数のバーチャル匂い源を同時に生成できないことである。さらには、流量計の精度が限られているため、香気を含む蒸気の拡散速度を正確に制御することができない。同システムでユーザーが匂いを知覚できる最大距離は 0.5m であり、大型 LCD 画面を備えたディジタルサイネージには不十分な可能性がある。

課題点として、提案した嗅覚ディスプレイシステムを様々な画面サイズに適応させるために、スクリーンのスケールアップおよびスケールダウンを試行することが望まれる。

同研究は、匂い提示における香気の分布を、まず機械計測で行っている点が客観性を満たしている。さらに、香気の分布位置や匂いの知覚に要する時間についても官能検査で検証しており、より実用的な側面を意識した研究である（官能検査の実験結果は本稿では割愛）。同論文に言及されている通り、この嗅覚ディスプレイシステムは多成分化が可能ではあるが、スクリーン上の異なった位置で複数の匂いの同時提示ができないことが難点の一つとなっている。

そして、ディジタルサイネージにおける利用を想定しているのであれば嗅覚ディスプレイの評価項目として、スクリーンの近傍だけではなく匂いが放出された空間内における匂い分布についても、残臭の濃度等のパラメータについて機械計測と官能検査を行う必要があると考えられる。

1.7.2 評価項目と評価手法

前項までは嗅覚ディスプレイの評価を行った関連研究について説明し、考察を行った。さらに、本章末に、過去約 20 年間における嗅覚ディスプレイに関連した主要な論文を載せた（本研究室が発表した論文を除く）。これら 38 報の論文のうち、13 報は嗅覚ディスプレイの評価に言及した内容となっている。

それぞれ異なった機構を持つ嗅覚ディスプレイについて、各要素技術に的を絞って評価が行われている。これらには、ユーザー（実験参加者）による機能面の評価、あるいは匂いセンサによる計測評価等が含まれている。それらの知見に基づき、嗅覚ディスプレイにおける評価項目と評価手法についてまとめて表 1.7-1 に示す。

表 1.7-1　嗅覚ディスプレイの主な評価項目と評価手法

嗅覚ディスプレイに求められ機能	時間的な正確さ	空間的な正確さ	任意の比率の多成分調合	低揮発性香気物質の匂い提示	装置の小型化	残臭の低減	その他
評価項目	匂いの知覚時間 ファンの風速	臭気の空間分布 香気拡散エリアの計測	匂い再現性の精度	装置の残留物質	ユーザビリティ 外観	残臭	匂い強度の変化 香料の取扱い 出音ノイズ
評価手法	ユーザーによる官能検査 マウスクリック応答	ユーザーによる官能検査 匂いガスセンサによる測定 金属酸化物センサによる計測	匂いガスセンサによる測定 液体ベースの調合による官能検査	匂いセンサによる測定	ユーザーによる感覚評定 他者による評価	ユーザーによる感覚評定	ユーザーの感覚強度（尺度評定） ユーザーの尺度評定 ユーザーの尺度評定

1.8 本研究の目的･意義

＜目的＞

本研究の目的は、多成分調合型嗅覚ディスプレイに求められる主要な機能に焦点を当てて行った評価実験の成果を示すことである。また、そこで得られた知見が嗅覚ディスプレイの評価手法の提案につながることを期した側面もある。まだ研究開発の途上にあり、その要素技術が成熟していない嗅覚ディスプレイにおいては、評価手法が確立されていないためである。

＜意義＞

嗅覚ディスプレイの評価については、前節において考察を行った。これらの研究事例では、嗅覚ディスプレイの開発を行った際にその性能評価を実施する場合が多い。さらに、同一の研究グループであれば先行研究で使っているものとほぼ同じ要素技術に改良を加えて進化させ、新たなプロトタイプの製作へと結びつける。そして、その技術的な差異について言及されるケースが多く散見される。

しかし、アーキテクチャーが異なる複数の嗅覚ディスプレイの評価を同一の実験環境において実施した研究はみられない。ユーザーが用途に合わせて嗅覚ディスプレイを選択する際には、同一条件における比較および評価は重要な役割を果たす。さらには、開発を進める研究グループにとっても指針の一助となる。

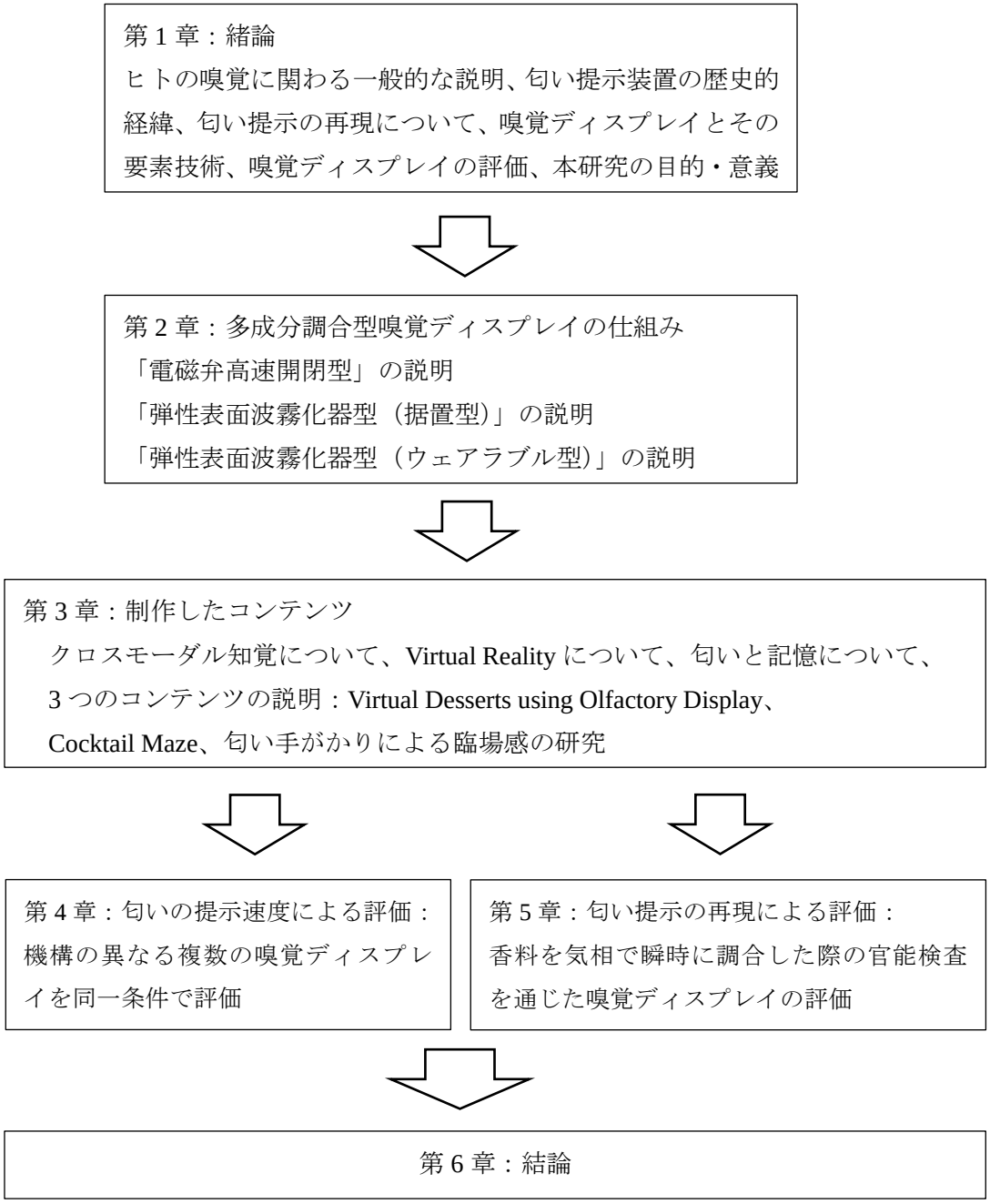
一方、多成分調合型嗅覚ディスプレイに最も期待される機能の一つは多種多様な匂い（香り）の再現である。匂い提示の再現の研究については 1.5 においてみた通り、関連研究自体が非常に少ない。そして、再現実験における評価を行う際、匂いセンサ（E-Nose）を使った事例がみられた。さらには、官能検査実験による評価も実施されているが、予め液体香料ベースにより調合が行われている[60]。本来、エッセンシャルオイル等の液体香料は瞬時に気相で調合して匂いの提示を行うことが望ましい。さらに、実際に嗅覚ディスプレイで調合した匂いに関する香りの再現精度を官能検査実験により評価した事例はまだない。

これらの背景を踏まえて、まず、嗅覚ディスプレイの匂いの提示速度について評価実験を行った（第 4 章）。先行研究・関連研究との違いは、機構の異なる複数の嗅覚ディスプレイを同一条件で評価した点である。

次に、要素臭を調合して対象臭を再現するため、多成分調合型嗅覚ディスプレイを使い、官能検査による評価実験を行った（第 5 章）。数種類の代表的な精油を、要素臭を用いて嗅覚ディスプレイを通して再現し、官能検査による評価でその再現精度の検討を行った。先行研究・関連研究との違いは、液体香料を気相で瞬時に調合して、官能検査によって香り再現精度の評価を行った点である。

上記の 2 つの点が本研究の意義である。

1.9 本論文の構成図



本論文の構成において主要となるのは第 4 章および第 5 章である。第 4 章、第 5 章へと論旨を導くため、まず緒論ではヒトの嗅覚に関わる基本的な知見、嗅覚と官能検査、匂い提示装置の歴史的経緯、匂い提示の再現、嗅覚ディスプレイにおける要素技術、そして嗅覚ディスプレイの評価について言及する。

次に、第 2 章では第 4 章、第 5 章で示す研究で使用した嗅覚ディスプレイについて記す。続く第 3 章においては、第 4 章、第 5 章の研究の端緒（動機付け）となったコンテンツについて述べる。

そして、第 4 章および第 5 章における嗅覚ディスプレイの評価実験の内容を踏まえ、第 6 章の結論に至る。

表 1.7-2　嗅覚ディスプレイに関連した主要な論文（2004-2021 年）

発表年	論文等タイトル	論文著者／開発者	研究分野	掲載文献	デバイス名	研究目的（コンテンツ／実験等）
2021	A Method for Computerized Olfactory Assessment and Training Outside of Laboratory or Clinical Settings	S. Niedenthal et al.	アート、コミュニケーション、心理学	i-PERCEPTION	Exerscent	嗅覚の識別能力テスト
	Does virtual odor representation influence the perception of olfactory intensity and directionality in VR?	S. E. Tsai et al.	コンピュータサイエンス、情報工学	IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces		ウェアラブル型嗅覚ディスプレイの開発とVR空間の評価
	Augmented reality flavor: cross-modal mapping across gustation, olfaction, and vision	O. Halabi et al.	コンピュータサイエンス	Multimedia Tools and Applications		視覚および嗅覚との味覚におけるクロスモーダル効果の検証
	aBio: Active Bi-Olfactory Display using Subwoofers for Virtual Reality	Y. Y. Hu et al.	HCI、電気電子工学、アート	ACM Multimedia	aBIO	サブウーファーにより生成した渦輪の衝突を利用した嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
2020	Towards smart gaming olfactory displays	G. Tsaramirsis et al.	情報工学、工業デザイン	SENSORS	n-dimension	多成分調合型嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
	Development of a Thermal-Based Olfactory Display for Aroma Sensory Training	A. Tiele et al.	電気電子工学	IEEE SENSORS JOURNAL		多成分調合型嗅覚ディスプレイの開発と嗅覚トレーニングゲーム
	ReminiScentia: shaping olfactory interaction in a personal space for multisensory stimulation therapy	C. F. Raúl et al.	コンピュータサイエンス、HCI、心理学	Personal and Ubiquitous Computing	ReminiScentia	多成分調合型嗅覚ディスプレイの開発と脳活動の測定
	Gas flow simulations for olfactory displays to synchronize videos	Y. Seta et al.	VR、AR、HCI	IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics		多成分調合型嗅覚ディスプレイの開発とE-MPSによる性能評価
	Aura: maton: A Wearable Olfactory Display for Immersive Scentscapes	C. McMillan	医学	TEI 2020	Aura: maton	ウェアラブル型嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
	Scents and Sensibility: Evaluating Information Olfactation	A. Batch et al.	コンピュータサイエンス	CHI 2020	viScent 2.0	多成分調合型嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
	Clustered Digital Air Cannon: A Novel Device for Projection-based Olfactory Display	Y. Yanagida et al.	情報工学、その他	PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS	Scent Projector	エアキャノン方式による嗅覚ディスプレイの開発
	Augmentation of perceived sweetness in sugar reduced cakes by local odor display	H. Aisala et al.	情報工学、コミュニケーション	ICMI '20 Companion		嗅覚ディスプレイを使った嗅覚と味覚とのクロスモーダル効果の検証
	Transferring Scents Over a Communication Network	P. Isokoski et al.	センサー、バイオ計測、ナノシステム	Academic Mindtrek		嗅覚ディスプレイとIMSを使った匂いの計測
	On-Face Olfactory Interfaces	Y. Wang et al.	メディアアート、精神医学、その他	CHI 2020		ウェアラブル型嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
2019	Wearable Olfactory Display for Museum Exhibitions	Monica B. et al.	工業デザイン、その他	ISOEN 2019		ウェアラブル型嗅覚ディスプレイを用いたアート作品の評価
	30 種類の香料の即時切替およびブレンド提示可能な微小バルブ制御 VR 用嗅覚ディスプレイ	藤田修二ら	企業における研究開発	エンタテインメントコンピューティングシンポジウム（EC2019）		ウェアラブル型嗅覚ディスプレイの開発
	4-ary Odor-Shift Keying Using Multi-channel Olfactory Display	S. Wisayataksin et al.	電子工学	International Conference on Information Technology and Electrical Engineering		嗅覚ディスプレイとセンシングシステムを使ったデータ転送実験
	微細液滴吐出型嗅覚ディスプレイ	坂内祐一ら	情報工学	日本VR学会誌	Fragrance Jet Mobile	嗅覚ディスプレイの開発
	Smelling Screen: Application to a Museum Exhibition and a Challenge for Scaling Up	H. Matsukura et al.	機械システム、その他	ISOEN 2019	SMELLING SCREEN	嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
	"Like Popcorn: Crossmodal Correspondences Between Scents, 3D Shapes and Emotions in Children	O. Metatla et al.	コンピュータサイエンス、情報工学	CHI 2019		嗅覚ディスプレイを使った3次元形状と香りのクロスモーダル効果の検証
2018	Development of a Portable, Multichannel Olfactory Display Transducer	J. A. Covington et al.	電子工学	IEEE SENSORS JOURNAL	Aroma Generator	嗅覚ディスプレイの開発とセンシングシステムによる性能評価
	Development of a Heat-Driven-Type MEMS Olfactory Display	H. Ishizuka et al.	機械システム、その他	MDPI Proceedings		嗅覚ディスプレイの開発とガスセンサーによる性能評価
	BioEssence: A Wearable Olfactory Display that Monitors Cardio-respiratory Information to Support Mental Wellbeing	J. Amores et al.	HCI、精神医学	Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society	BioEssence	ウェアラブル型嗅覚ディスプレイの開発と医学への応用
	超音波走査による匂いディスプレイ	篠田裕之ら	計数工学	日本VR学会誌		嗅覚ディスプレイの開発とセンシングシステムによる性能評価
	A Demonstration of Season Traveller: Multisensory Narration for Enhancing the Virtual Reality Experience	N. Ranasinghe et al.	コンピュータサイエンス、その他	CHI 2018		ウェアラブル型嗅覚ディスプレイを使ったVRシステムの構築
2017	Compact SAW aerosol generator	A. Winkler et al.	工業デザイン、その他	Biomedical Microdevices		弾性表面波デバイスの実装と霧化実験
	A method of olfactory display: Odor characterization and reproduction	H. Li et al.	情報工学	ISOEN 2017		匂い再現システムの構築と評価
	InScent: A wearable olfactory display as an amplification for mobile notifications	D. Dobbelstein et al.	HCI	International Symposium on Wearable Computers	InScent	ウェアラブル型嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
2015	Heat based odors delivery apparatus for interactive game playing	Z. Li et al.	コンピュータサイエンス、情報工学	International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering	Hexagon Rotary	嗅覚ディスプレイの開発とゲームコンテンツの制作
2012	Smellware: Olfactory Feedback for Code Smell in Software Development	Y. T. Tsai et al.	電子工学、コンピュータサイエンス	COMPUTER SCIENCE	Smellware	嗅覚ディスプレイを使った匂いの符号化と通信システム
2011	Olfactory Feedback System to Improve the Concentration Level Based on Biological Information	M. Hirose et al.	システム工学	IEEE Virtual Reality Conference		嗅覚フィードバックシステムの構築
2010	Scent Emitting Multimodal Computer Interface for Learning Enhancement	A. Czyzewski et al.	電子工学、情報通信	2010 Workshops on Database and Expert Systems Applications		嗅覚ディスプレイの開発と教育への応用
2009	Development of Aroma-Card Based Soundless Olfactory Display	D. W. Kim et al.	マルチモーダル・コミュニケーション、材料工学	ICECS 2009		嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
2008	一呼吸中での2種類の香り提示における嗅覚の時間特性の測定	岡田謙一ら	HCI	電子情報通信学会	Fragrance Jet	嗅覚ディスプレイの開発と嗅覚特性の評価
2006	SpotScents: A Novel Method of Natural Scent Delivery Using Multiple Scent Projectors	F. Nakaizumi et al.	情報工学、その他	IEEE Virtual Realty	SpotScents	嗅覚ディスプレイの開発と性能評価
	Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment	T. Yamada et al.	計数工学、その他	IEEE Virtual Realty		ウェアラブル型嗅覚ディスプレイを使ったVR空間の構築と評価
2004	Fragra: A Visual-Olfactory VR Gam	K. Chihara et al.	HCI、その他	ACM SIGGRAPH	Fragra	ウェアラブル型嗅覚ディスプレイを使ったVR空間の構築
	COULD OLFACTORY DISPLAYS IMPROVE DATA VISUALIZATION?	D. A. Washburn et al.	人間工学	Computing in Science & Engineering	Scent Collar	屋外における匂い探知のための、VR環境を利用した訓練

※　黄色でマークした論文は、嗅覚ディスプレイの機能の評価に言及している。

第 2 章　多成分調合型嗅覚ディスプレイの仕組み

ヒューマン嗅覚インターフェースにおいては、匂いの記録と情報の抽出は匂いセンサや質量分析器が行う。それに基づいて、多彩な匂いの提示を行うには多成分調合型嗅覚ディスプレイが必要となる。

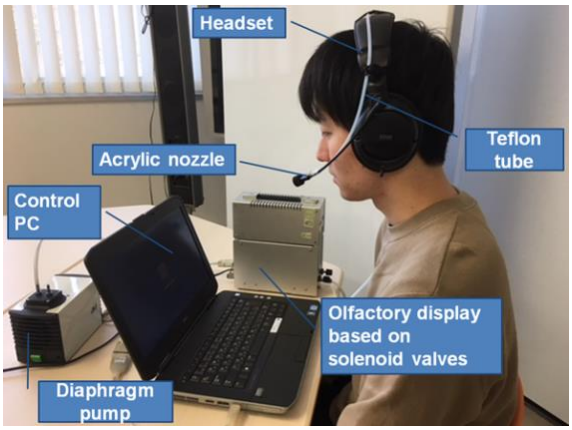
本研究室ではこれまで様々な多成分調合型嗅覚ディスプレイを開発してきた。匂いの生成方法、匂いの供給方法、匂いの調合・切替え技術、そしてユーザーの身体との位置関係等においてタイプの異なる 3 種類の嗅覚ディスプレイの仕組みについて説明する。

2.1　電磁弁高速開閉型

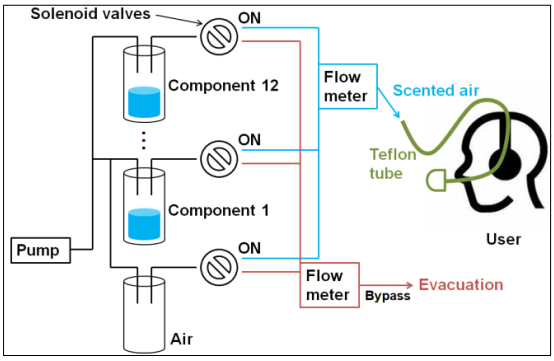
13 成分の据置型の嗅覚ディスプレイである[61]。匂いの生成方法は送風（ヘッドスペース法）、匂いの供給方法はテフロンチューブを利用している。システム全体の写真を 2.1-1(a)に、システム構成を(b)に、そしてブロック図を(c)に示す。

匂いの気化技術は、エタノール等で希釈した液体香料が底部から 1-2cm まで充填された 12 本それぞれのバイアル瓶内へダイアフラム式エアポンプから空気を送り込み、そのヘッドスペースの香気を出口に送る。なお、13 本あるバイアル瓶のうちの 1 本は常時、空気で満たされている。

(a)



(b)



(c)

(a) システム全体 (b) システム構成 (c) ブロック図

図 2.1-1　13 成分電磁弁高速開閉型嗅覚ディスプレイ

匂いの調合・切替え技術は電磁弁（solenoid valve）を高速開閉させて On と Off を切替え、13 ある各チャンネルへ送る空気の流量を FPGA（Field Programmable Gate Array）回路から制御して香気が調合される。電磁弁の On 時間を変化させることで香気と空気の調合比を変えることができ、それにより匂いの強度を変化させ、また複数の匂いの調合が可能となる。

匂いの供給方法は、嗅覚ディスプレイ本体のアウトレット部につなげた約 60cm のテフロンチューブ内を香気が伝わり、アクリル製ノズルからユーザーの鼻元へ供給される。高速電磁弁が On のときは電磁弁が開いた状態となっていて匂いはチューブ内を搬送される。一方、Off のときは電磁弁が閉じた状態となっており、匂いは脱臭用の活性炭側に運ばれてユーザーには提示されない。活性炭は適宜、交換される。匂い提示に関わる全ての操作は、嗅覚ディスプレイと RS232C 経由で接続した PC において専用のソフトウェア（EZ Blender）からユーザー自身が行う（ソフトウェアの GUI：図 2.1-2 参照）。なお、図 2.1-2 内の各チャンネルの数値は、全体に占める各チャンネルの電磁弁の On 時間の割合を示している。

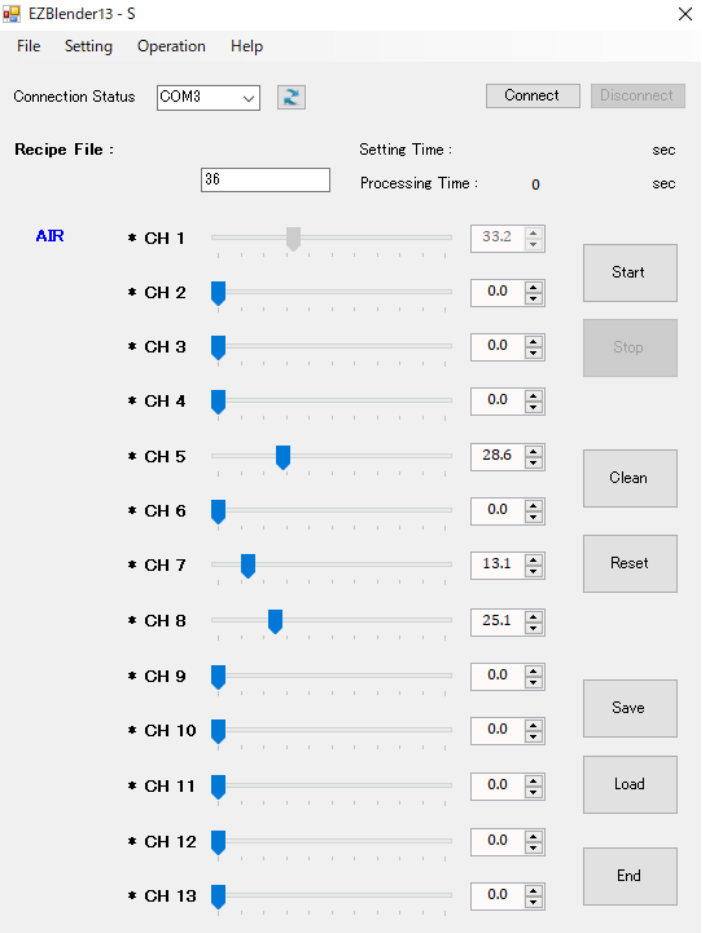


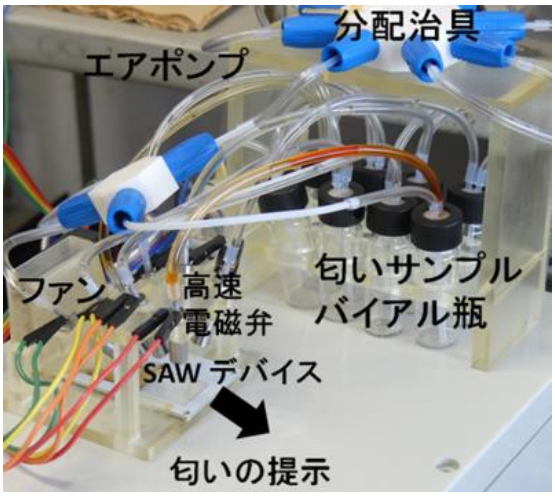
図 2.1-2　専用ソフトウェア（EZ Blender）の GUI：
各チャンネルの匂い濃度の比率と提示時間を個別に制御

匂い分子は空気によって完全な気体として運ばれるため液滴が飛翔することはなく、ユーザーは自然に匂いを感じることができる。しかし、テフロンチューブ内に香気が残存して匂いの切り替えがうまくいかないことや、匂いの供給に際してテフロンチューブの長さに起因する時間的遅延が生じる等の問題

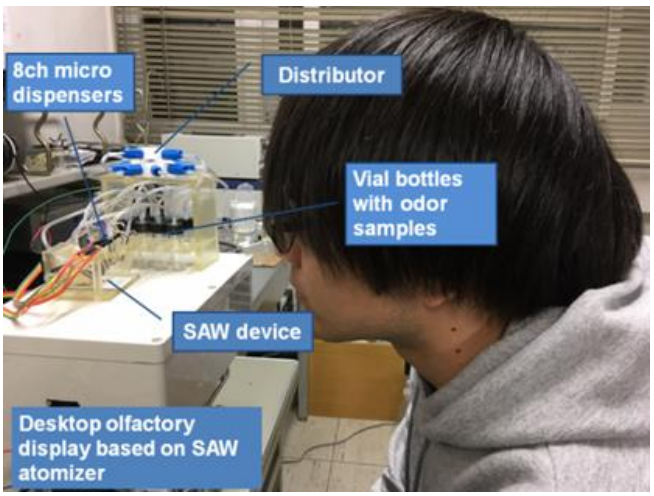
がある。また、送風（ヘッドスペース法）技術を用いる場合、低揮発性香気物質を香料として使うにはバブリングや加熱といった手法との併用が望ましく、ヘッドスペース法だけでは使用可能な香料に制限がある。

2.2 弾性表面波霧化器型（据置型）

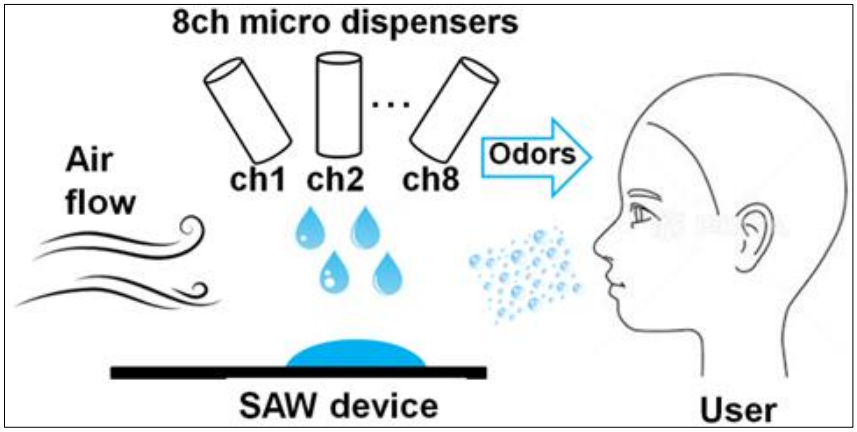
8 成分の据置型の嗅覚ディスプレイである[62][63]。匂いの生成方法はマイクロディスペンサー（高速電磁弁）による液滴射出と超音波による霧化、匂いの供給方法は小型 DC ファンによる送風を利用している。匂い提示部の写真を図 2.2-1(a)に、システム構成を(b)に、そして模式図を(c)に示す。



(a)



(b)



(c)

(a) 匂い提示部 (b) システム構成 (c) 模式図

図 2.2-1　8 成分弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイ（据置型）

気化技術は SAW（Surface Acoustic Wave: 弾性表面波）デバイスの超音波霧化原理を使っている。 SAW デバイスに滴下された液体香料の液滴は SAW ストリーミング現象によって霧化される。その基本原理を図 2.2-2 に示す。

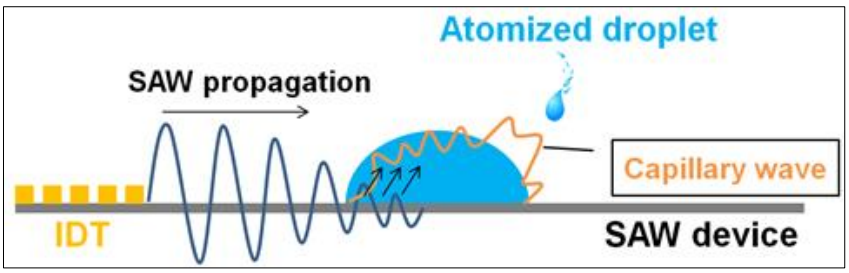
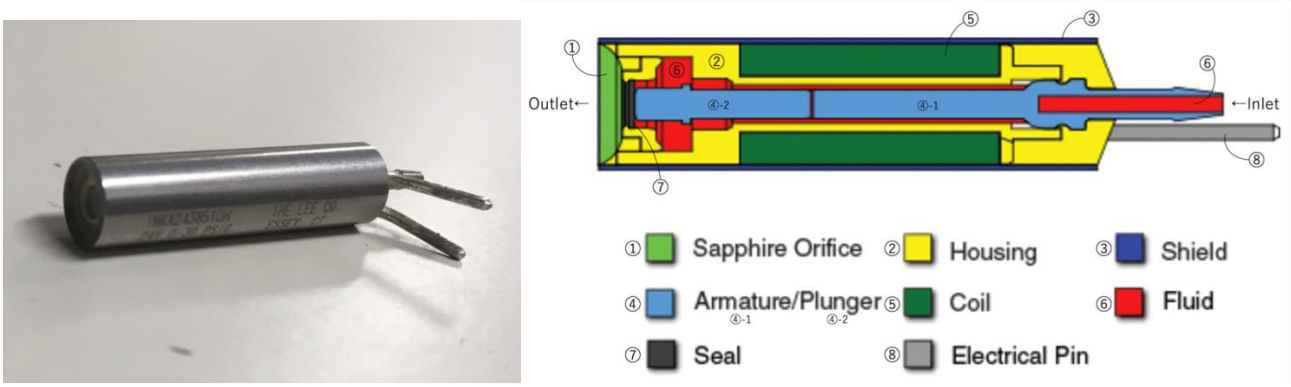


図 2.2-2　SAW デバイスによる霧化の原理

この嗅覚ディスプレイシステムで液滴射出のために利用しているマイクロディスペンサー（LEE Company, VHS シリーズ INKA2438510H, Direct dispense Outlet 型）は高速電磁弁開閉機構を有している。マイクロディスペンサーの外見と構造図を図 2.2-3(a)と(b)にそれぞれ示す。



(a)　　(b)

(a) 外見 (b) 構造図

図　2.2-3　マイクロディスペンサー[63]

電圧を印加することで電磁弁内のコイルに磁界が形成され、プランジャーがコイル内部に引き込まれる。その際、オリフィスとの間に液体が入り込み、プランジャーが元の位置に戻ることでオリフィス上の液体が射出される。液体射出部のオリフィスは直径が 76μm であり、微小な液滴を射出することが可能である[63]。

匂いの調合・切替え技術は、独立して駆動可能な 8 つのマイクロディスペンサーが任意のレシピにより最大で 8 種類の香料をブレンドすることで実現する。各マイクロディスペンサーは SAW デバイス上の 1 点に液滴を射出し、その際に匂いが調合される。

匂いの供給プロセスは、液体香料をバイアル瓶からマイクロディスペンサーに供給するために圧力をかける必要があるため、まずエアポンプから分配用の瓶に空気を送り込み、さらに香料が入った 8 本のバイアル瓶内に空気を送ることでマイクロディスペンサーに香料を供給する。SAW デバイス上で霧化した液体香料は小型 DC ファンによる気流がその香気をユーザーの鼻元へと搬送する。液溜めには 5ml のバイアル瓶を 8 本使用している。

この嗅覚ディスプレイの制御は MATLAB により開発したアプリケーション（図 2.2-4 参照）で行う。

嗅覚ディスプレイはパーソナルコンピュータと USB で接続されており、匂いを提示する際、アプリケーションから対象チャンネル番号やマイクロディスペンサーを駆動する周波数、そして匂いの提示時間をオールインワンで実行可能である。

電磁波高速開閉型嗅覚ディスプレイと比較すると、低揮発性香気物質を使う場合でも、少量の液体香料で十分な匂いをユーザーに提示することができる。また、残香の問題につながりやすいチューブは使用せず、さらに液滴の瞬間的な噴霧化（atomization）により、迅速な匂いの提示とその除去が可能となる。

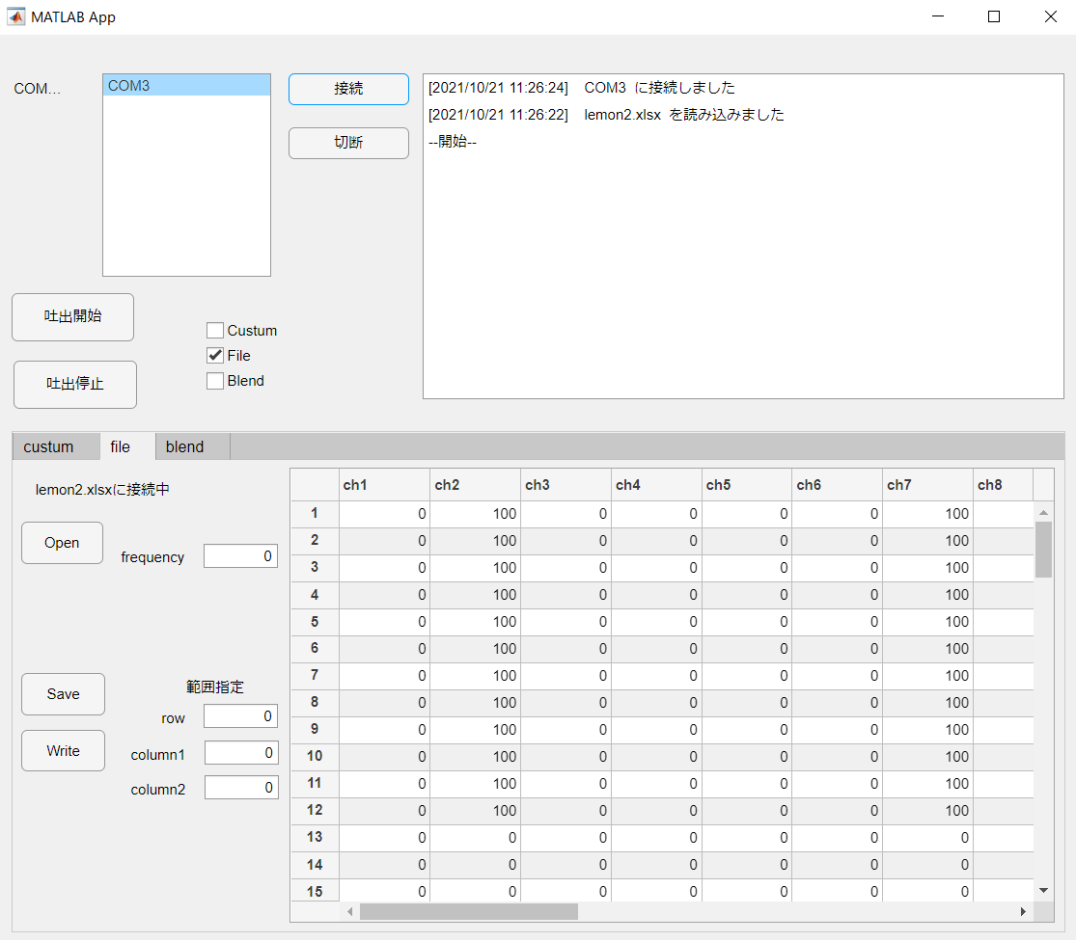
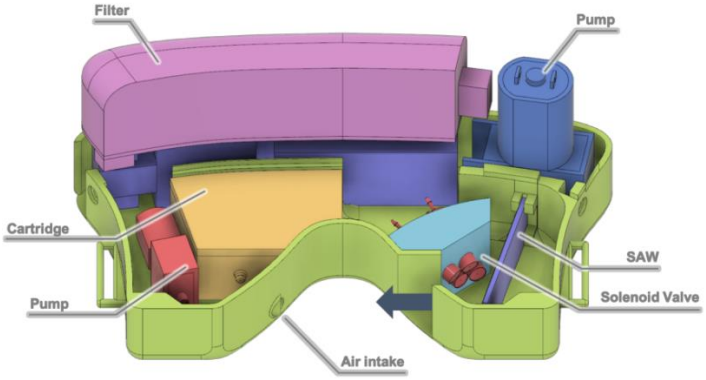


図　2.2-4　制御アプリケーションの GUI（8ch）

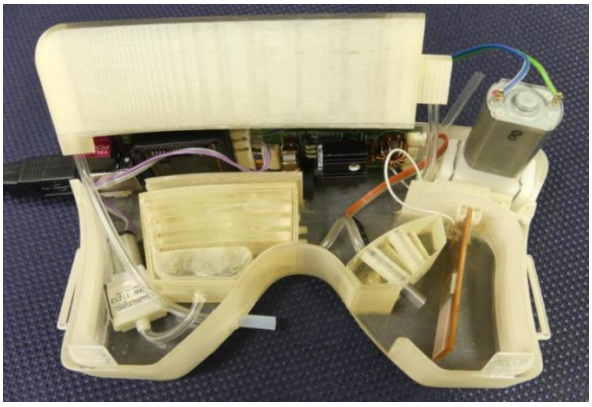
なお、この嗅覚ディスプレイに改良を加えた 20 成分弾性表面波霧化器型を本研究で用いた（第 5 章で後述）。

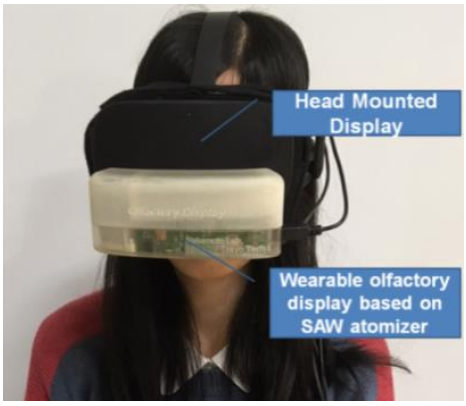
2.3 弾性表面波霧化器型（ウェアラブル型）

ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイの開発は従来から本研究室において行われており、近年では SAW デバイスによる気化技術とマイクロポンプによる香気の搬送技術を利用したシステム[64][65][66]があげられる。この先行研究に続いて開発されたのがこの 4 成分のウェアラブル型の嗅覚ディスプレイである。嗅覚ディスプレイの内部構造のイラストを図 2.3-1(a)に、写真を(b)に、HMD と一体化した写真を(c)に、そしてダイアグラムを(d)に示す。

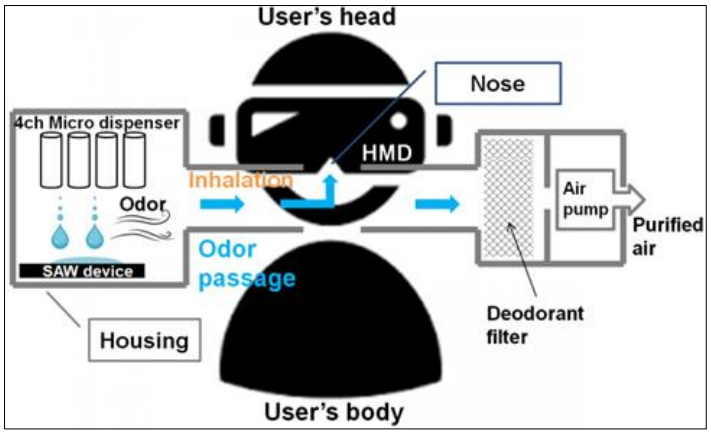


(a)





(b) (c)



(d)

(a) 内部構造 (b) 写真 (c) HMD との一体化 (d) ダイアグラム

図 2.3-1　4 成分弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイ（ウェアラブル型）

匂いの生成方法は超音波による霧化、匂いの供給方法は送風を利用している。機構面においては前述の 8 成分弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイをベースにして、ウェアラブル化を計ったものである。

気化技術は SAW デバイスの超音波霧化原理を使っている。 SAW デバイスに滴下された液体香料の液滴は SAW ストリーミング現象によって霧化される。

匂いの調合・切替え技術は、独立して駆動可能な 4 つのマイクロディスペンサー（高速電磁弁）が任意のレシピにより最大で 4 種類の香料をブレンドすることで実現する。8 成分の嗅覚ディスプレイと同様に、各マイクロディスペンサーは SAW デバイス上の 1 点に液滴を射出し、その際に匂いが調合される。

香気の搬送技術は、霧化された液体香料の香気がエアポンプによってユーザーの鼻元を横切り、活性炭フィルターユニットへと届く際にユーザーは匂いを感じとる仕組みである（香気自己回収方式）。

嗅覚ディスプレイは PC と USB で接続されており、その制御は 8 成分の嗅覚ディスプレイと同じく、MATLAB により開発したアプリケーションで行う（図 2.3-2 参照）。

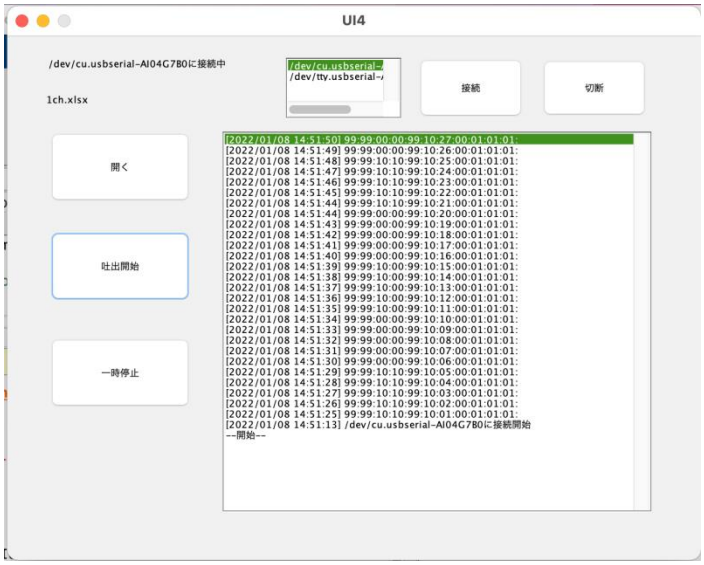


図 2.3-2　制御アプリケーションの GUI（4ch）

この嗅覚ディスプレイの主な特徴は以下の 3 点である。

・ウェアラブル化に際して必須であった装置の小型化を実現するため、共振周波数が 10MHz の SAW デバイスの駆動回路に必要な小型 RF アンプをディスクリート素子により構成した（class E amplifier）。

・SAW デバイス上への液体香料の滴下（射出）を、従来型のマイクロポンプからマイクロディスペンサーへと変更し、霧化の安定化と匂い提示の精度向上が実現した。

・香気の自己回収というコンセプトに基づき、空気中に余分に匂い物質が放出されることを極力避け、残臭（residual odor）の低減化や匂い切替え時における時間的精度を向上させた。

第 3 章　制作したコンテンツ

前章では本研究室で開発した嗅覚ディスプレイの仕組みを説明した。これらの嗅覚ディスプレイを利用して制作した 3 つのコンテンツについて本章では記す。

“Virtual Desserts using Olfactory Display”は主に嗅覚と味覚のクロスモーダル知覚に焦点を当てた体感型のコンテンツである。また、”Cocktail Maze”は Virtual Reality 技術を使ったゲームコンテンツで、HMD と一体化したウェアラブル型嗅覚ディスプレイを用いたバージョンと、コンピュータディスプレイとともに体験する据置型嗅覚ディスプレイを用いたバージョンがある。そして、”匂い手がかりによる臨場感の研究”では 8 成分の弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイを利用し、匂い情報による情景の想起を調べる実験を行った。

3.1　クロスモーダル知覚

ヒトの感覚を 5 つに区分する考え方は一般的であるが、知覚心理学の分野においては、ヒトが知覚するモダリティは視覚、聴覚、嗅覚、味覚、皮膚感覚、さらには自己受容感覚と平衡感覚に類別される。それらの特徴を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1　感覚の種類, [67], p72

モダリティ	感覚器官・受容器	通常の適刺激	感覚の性質
視覚	眼：網膜第1層の視細胞（錐体と棹体）	光（可視光）	明暗（白黒）や赤、黄、緑、青などの色
聴覚	耳：内耳蝸牛基底膜上のコルチ器の有毛細胞	空気の疎密波（音波）	純音、周期的複合音、雑音などの音
嗅覚	鼻腔の嗅粘膜：嗅上皮の嗅覚受容細胞	揮発性匂い物質	花、果実、樹木、薬味、腐敗などの匂い
味覚	舌・一部の口腔内部位：乳頭の味蕾の味覚受容細胞	溶解性の物質	甘、鹹味、酸、苦、うま味などの味
皮膚感覚	皮膚：自由神経終末、毛包受容器、被包性終末、メルケル細胞	機械的刺激、温度刺激、侵害性刺激など	蝕、圧、擽、温、熱、冷、痛、痒など
固有感覚（自己受容感覚）	骨格筋、腱、関節：伸張受容器（筋紡錘、腱紡錘）、腱受容器、関節受容器など	筋、腱、関節に加わる機械的刺激など	四肢の位置、運動の方向・速度・力（抵抗・重さ）、圧、痛など
前庭感覚（平衡感覚）	内耳の膜迷路：耳石器および半規管の有毛細胞	重力、身体や頭部の直進および回転加速	（結果としては）身体の傾き、移動、目眩、乗り物酔いなど

視覚や聴覚、触覚といった個々の感覚モダリティの情報処理メカニズムに関しては、これまでに多くの知見が示されてきた。しかし、ヒトの知覚の本質により迫るならば、複数の感覚モダリティの情報が

どのように包括的に知覚され、統合的に処理されているかについて理解することは重要である。

単一の感覚モダリティにおける情報の知覚処理が、他の感覚モダリティの情報から影響を受けることでその振る舞いが様々に変容する現象を”クロスモーダル知覚（crossmodal perception）、”あるいは多感覚知覚（multimodal perception）という。この現象は従来から、感覚間相互作用（intersensory interaction）として知られていた。ヒトが日常生活で体験する様々な事象においては、ある単一の感覚モダリティの情報のみが切り離されて知覚処理されるといった状況はほとんどみられず、本質的には多感覚における知覚処理に基づいて無意識的に生活している。

以下に、学術的によく知られた代表的なクロスモーダル知覚の例[68]を示す。

3.1.1 視覚と聴覚

・腹話術効果（Ventriloquism Effect）

視覚情報が音声の聞こえ方に影響を及ぼす効果である。音源定位は視覚からの影響を受け、視覚優位に知覚される。例えば腹話術で人形が話をしているように聞こえたり、映画やテレビを観ているときに、あたかも音声が映像の人物の口から出ているように聞こえる現象である。

・マガーク効果（McGurk Effect）

提示された音声音節と口の動きが一致しない場合、提示された刺激とは異なる音節が知覚される効果である。実際には、実験参加者に聴覚的に ba を、視覚的に ga を提示すると、大部分の実験参加者は da と聞こえたと報告する。

・ダブルフラッシュエフェクト（Double Flash Effect）

実験参加者にピッピッという複数のトーンパルス列（音）を提示すると、物理的には連続した視覚刺激（光）が断続的にチカチカと瞬いて見える錯覚である。

3.1.2 視覚と体性感覚・力触覚

・シュード・ハプティクス（Pseudo Haptics）

パーソナルコンピュータのマウスなどの操作に対応したモニター上の視覚刺激（ポインタ等）の移動速度を変化させることで、実験参加者が操作している身体部位に疑似的な力覚が生じる現象。

・触覚 2 点弁別閾に及ぼす視覚情報

2 点弁別閾とは触覚の空間的分解能を表す指標の一つである。2 点弁別閾を測定するプロセスにおいて、空間的に離れた 2 点刺激（コンパスの針先等）を皮膚上に提示し、実験参加者がそれを 1 点あるいは 2 点と感じるかについて回答してもらう。その際、実験参加者に閉眼条件で課題に取り組んでもらった場合に比べて、視覚あり条件における 2 点弁別閾は有意に低くなるという研究結果である。

3.1.3 視覚と自己受容感覚

ラバーハンド錯覚（Rubber Hand Illusion）などが該当する。ゴム等で出来た偽の手（ラバーハンド）を机の上に、自分の手をその横に置き (このとき、ラバーハンドと自分の手の間には自分の手が直接見えないように衝立などを置いておく)、その状態でラバーハンドと自分の手を同時にブラシなどで撫で続けられると、自分の手ではないはずのラバーハンドが自分の手のように感じられるようになる現象である。身体保持感を自分以外の物体に対して感じる錯覚によるものである。

3.1.4 味覚と嗅覚

ヒトが食事をするときに味を感じる体験に大きく関わっているのは嗅覚刺激や口内の触感、喉越しなどである。こうした複数の刺激を総体的に「味覚」と呼ぶ場合もあるが、複数の感覚統合が生み出す飲食物の印象はフレーバー（flavor）が決め手となる。とりわけ、フレーバーの主な要素としては嗅覚刺激（香り）が深く関わっており、味覚と嗅覚の相互作用が食べ物・飲み物の印象を決定付けている。

ヒトが感じる香りは、第 1 章で述べた通り、経路によってオルソネーザルとレトロネーザルに分かれる。そして、何かの飲食の際、ヒトは様々な感覚刺激情報の高次処理を脳内の OFC（眼窩前頭皮質）と呼ばれる部位で行っている。即ち、フレーバー知覚は脳内における一種のクロスモーダル知覚ととらえることができる。

3.2 Virtual Reality

Virtual Reality（VR）という用語が使われ始めたのは 1989 年であるが、1980 年代初頭からコンピュータインターフェース、コンピュータ支援設計・製造、シミュレーション、インタラクティブアートやコミュニケーション、そしてロボティクス等の分野では研究の萌芽がみられた[69]。

“人工現実感”とも訳される VR は「見かけや形状は実物そのものではないが、本質あるいは効果としてはそのものである」環境等を創出する技術の総体を指す。また、VR 技術の利用はヒトの様々な感覚モダリティと深く関連しているが「3 次元空間」、「実時間相互作用」、「自己投射」が VR における 3 要素である。VR 技術を用いたコンテンツの制作においてはこれらの要素を重視する必要がある。

3.2.1 入力・出力インターフェース

ヒトに何らかの感覚提示を行う VR インターフェースにおいては入力と出力の概念が伴う。その基本構造を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1　バーチャルリアリティ・インターフェースの基本構造, [69], p.66

	ハードウェア	ソフトウェア
入力インターフェース	センサ	認識エンジン
出力インターフェース	ディスプレイ	ディスプレイドライバ

入力インターフェースのハードウェアはヒト（ユーザー）の感覚特性を計測する各種センサであり、センシングしたデータからヒトの状態を認識するのがソフトウェア（認識エンジン）の役割である。

一方、出力インターフェースのハードウェアはヒトの感覚器官に刺激を提示する多様なディスプレイである。また、バーチャル世界からフィードバックされる感覚情報を、ディスプレイが生成する刺激提示の質・量へと変換する機能はソフトウェアが行い、ディスプレイドライバと呼ばれる。

これらの概念を嗅覚に当てはめて考えると、入力インターフェースにおいてはヒトの嗅覚特性を模倣した匂いセンサあるいは質量分析器が匂い情報を取得し、そのデータを基に機械学習等による手法で解析が行われる。

そして、出力インターフェースにおいては嗅覚ディスプレイが匂い提示を行い、提示する匂いの種類と調合比率、強度等のブレンディングレシピの適化はディスプレイドライバがその役割を果たすと考えられる。

3.2.2 臨場感

VR 技術を用いたコンテンツに求められる要素の 1 つに”臨場感”があげられる。臨場感とは「あたかもその場に居るがごとく感じる」感覚を指す。臨場感を構成する要素は複合的であり、各々が相互に関連し合っている。臨場感の構成要素と生起要因を図 3.2-1 に示す。同図では空間要素、時間要素、そして身体要素に分解し、これらに加わる外的・内的要因との関係性が示されている。

嗅覚刺激を伴う VR コンテンツは様々であるが、視覚・聴覚刺激と相まって体感する場合が多くみられる。後述する 3 つのコンテンツにおいて、ユーザーに対して VR の文脈における臨場感を提示できたか否かを考察する際に参考となる。

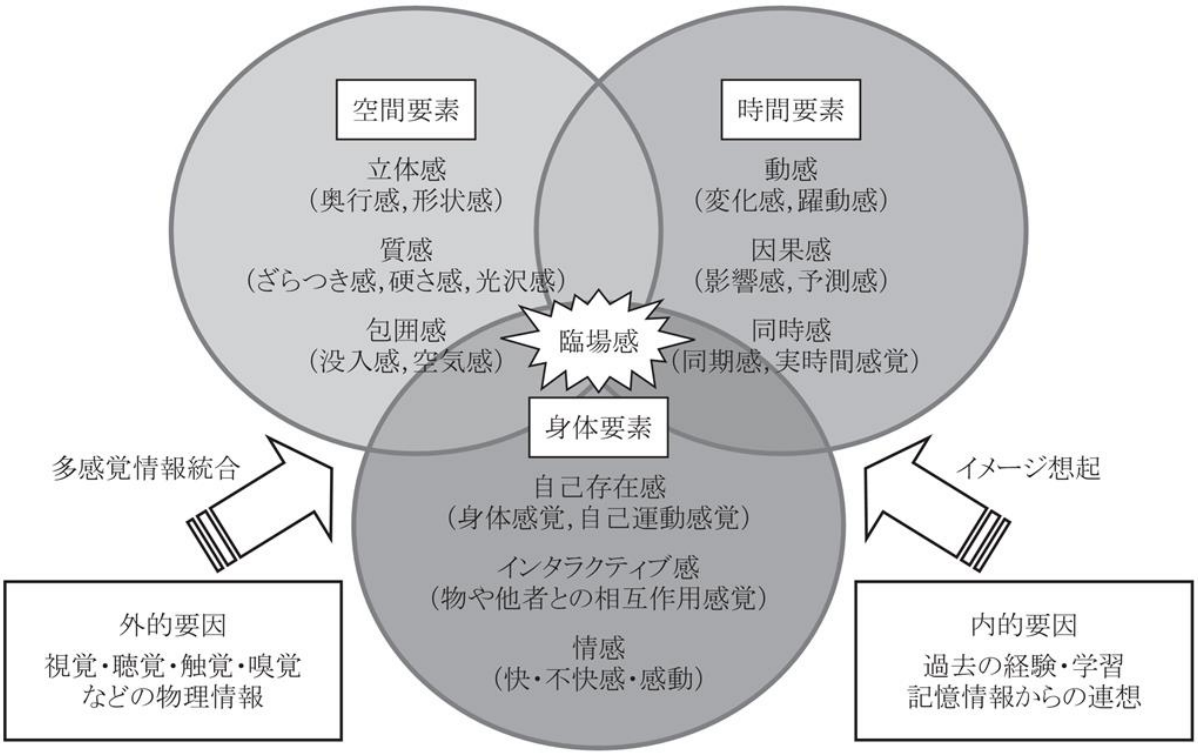


図 3.2-1　臨場感の構成要素と生起要因, [70] copyright (C) 2006 IEICE

3.3 匂いと記憶

紅茶に浸したマドレーヌの香りを嗅いだ瞬間、主人公は過去の情景をありあり想い出す。これは作家 M. Proust が著した自伝的長編小説『失われた時を求めて』のなかで表現した感覚描写であり、これに因んで、ある匂い情報が過去の記憶を呼び起こす現象を”プルースト現象（proust phenomenon）”と呼ぶ[3]。

なお、匂い情報と物事の想起手がかりとの関連性を示す研究においては、文脈依存記憶と自伝的記憶の 2 つが重要とされる。文脈依存記憶とは、物事を覚えるときと想い出すときの状況の類似性が高いほど、その記憶成績は良くなるという現象に象徴されるもので、関連する研究は非常に多い。単語や写真といった記銘材料の学習時とテスト時では、匂い刺激がある場合の方が成績はよくなるといった知見が示されている。

一方、自伝的記憶とはあるヒトが生活のなかで経験した様々な出来事の総体である。匂い刺激を提示されたヒトが想起する過去のエピソードについて、その鮮明度や情動性に関して評定値を計り、内容の定性的な分析を行うなどの研究手法がとられる。これらの研究からは、匂い手がかり（odor cue）によって想起された自伝的記憶は、言語ラベルや視覚刺激といった他の手がかりによって想起された記憶よりも情動的であり、追体験に酷似した感覚を多く伴うことなどが示されている（Herz & Schooler, 2002; Herz, 2004）。近年では fMRI（functional magnetic resonance imaging）装置を使用して、匂い刺激の提示と記憶の想起に関わる脳の活動部位の神経心理学的研究も行われている。匂い手がかりにおける想起と言語的手がかりにおける想起の比較では、匂い手がかりを用いた際に海馬近傍、後頭葉、楔前部、そして情動処理を行う辺縁系においてこれらの脳部位がより賦活されることが示された（Arshamian et al., 2013）。

3.4 制作したコンテンツ

第 2 章において説明した多成分調合型嗅覚ディスプレイを使って制作した 3 つのコンテンツについて記す。なお、” Virtual Desserts using Olfactory Display”については拙稿: ”2.4 香りと噪音の提示”, 嗅覚ディスプレイを用いた香りと音のクロスモーダル効果の研究, 東京工業大学修士論文（2015）において、その研究成果を示した。本稿で同じ内容の継続実験に言及するに当たり、その一部は重複した実験結果を記す。

3.4.1 Virtual Desserts using Olfactory Display

ヒトが飲食物を摂取する際、そのフレーバーの基となっている主要な要素は香りである。一方、食感や喉越しを知覚させる要素としては触感や力覚が主要な役割りを果たしているが、音の効果も大きいと考えられる。そこで、本実験では香りと噪音（効果音）が生み出すクロスモーダル効果について調べるためバーチャルデザートのコンテンツを制作し、一般ユーザーを対象にデモンストレーションを行った。本実験で使った嗅覚ディスプレイは弾性表面波霧化器型（据置型）である。

3.4.1.1 実験手順

実験参加者は本学の第 37 回すずかけ祭（2015 年 5 月 16 日・17 日）の研究室公開における一般来場者で女性 49 人、男性 65 人、年齢層は 10～60 代で、クリームソーダおよびコーヒーフロートを一般来場者にバーチャルな形態で提示した。

クリームソーダでは実験参加者は無味・無臭の炭酸水（アサヒ・ウィルキンソン: 炭酸水あるいはサンガリア: 天然炭酸水）のみを飲む。その際に嗅覚ディスプレイからバニラ、ミルク、サイダー、メロンの各フレーバーを提示すると同時に、ヘッドフォンからストローで吸う音、液体を飲む音、気泡がかすかにはじける音を合成し、効果音として提示を行った。

一方、コーヒーフロートでは実験参加者は無糖のブラックコーヒー（UCC: ブラック無糖プレミアムアロマ）のみを飲む。その際に嗅覚ディスプレイからバニラ、ミルクの各フレーバーを提示すると同時に、ヘッドフォンからストローで吸う音、液体を飲む音を合成し、効果音として提示した。

なお、これらの香料（匂いサンプル）は香料メーカーから提供してもらったものを使用し、効果音は著作権フリーのものを DAW（Digital Audio Workstation）アプリケーション上で編集し、オーディオデータとしてパーソナルコンピュータに保存し（拡張子は.wav）、ヘッドフォンから実験参加者へと提示した。

実験参加者は合計 114 人で、このうち 81 人がクリームソーダを体験し 33 人がコーヒーフロートを体験した。クリームソーダとコーヒーフロートの各コンテンツは同時進行で実施したため、2 台の同型の弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイと 2 台のパーソナルコンピュータを用意した。体験の様子を図 3.4-1 に示す。また、実験手順を以下に記す。

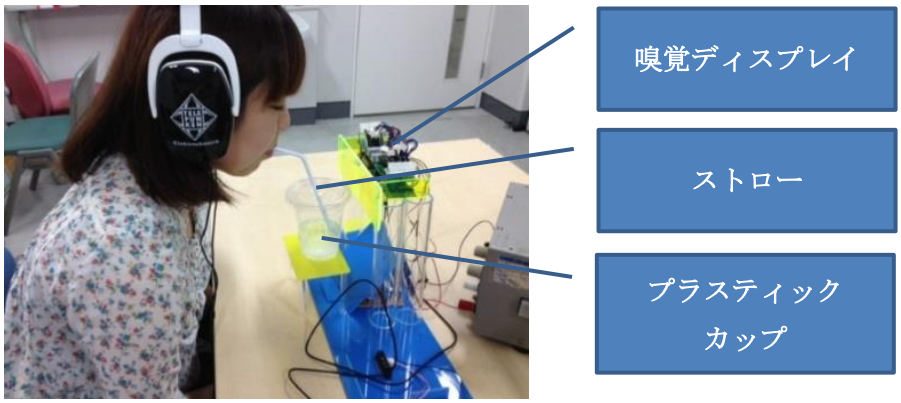


図 3.4-1　デモンストレーションの体験の様子（再現）

＜実験手順＞

①実験参加者は炭酸水（またはブラックコーヒー）だけをプラスティックカップからストローにより飲む。

②実験参加者は嗅覚ディスプレイからの匂い提示を受けながら、炭酸水（またはブラックコーヒー）を飲む。

③実験参加者は嗅覚ディスプレイからの匂い提示およびヘッドフォンからの効果音の提示を受けながら、炭酸水（またはブラックコーヒー）を飲む。

④アンケート用紙上で 3 つの質問に回答し、さらに体験の印象などを自由記述する。

3.4.1.2　実験結果

実験参加者から回収したアンケート（図 3.4-2）に基づき、コンテンツの各段階で体験の印象がどのように変化したかについて調べた。

第 37 回すずかけ祭　研究室デモアンケート（クリームソーダ）

・性別　男性/女性

・年齢　10 代以下　20 代　30 代　40 代　50 代　60 代　70 以上

以下の3つの質問で，体験した印象を一つ〇で囲んでください．

（質問1）香りがあったほうが，炭酸水だけを飲むよりも

とてもおいしい　おいしい　とくに変わらない　まずい　非常にまずい

（質問2）香りと効果音があったほうが，炭酸水だけを飲むよりも

とてもおいしい　おいしい　とくに変わらない　まずい　非常にまずい

（質問3）デモを体験して”本物のクリームソーダ”が

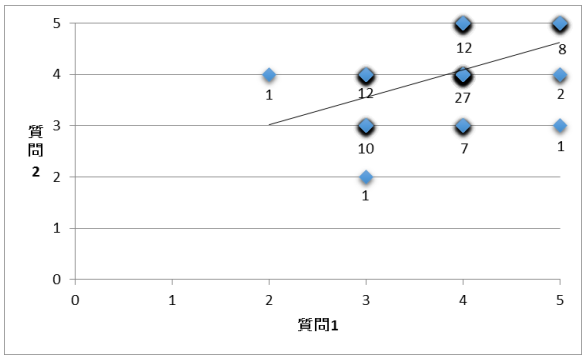
とても飲みたくなった　飲みたくなった　どちらでもない（特に関係ない）

飲みたくなくなった　まったく飲みたくなくなった

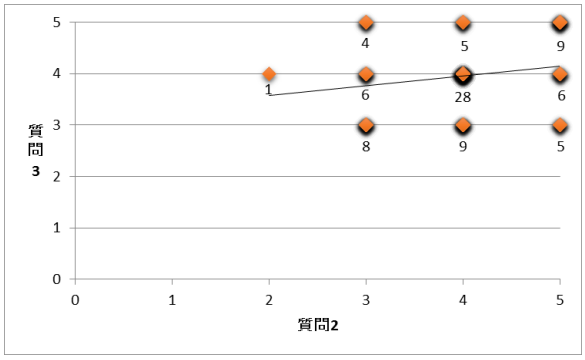
デモを体験した印象など，自由にお書きください．

図 3.4-2　アンケート用紙

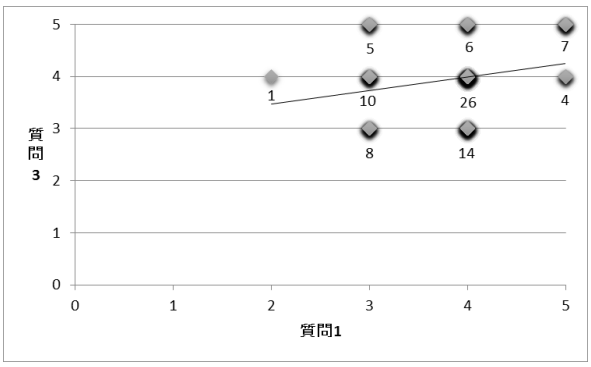
アンケート結果の集計に際してはクリームソーダとコーヒーフロートを別々に行った。なお、質問 1～3 において実験参加者が選択した印象は、それぞれ左方から 5, 4, 3, 2, 1 の 5 段階によるランク付けを行い、数値化したデータを基に可視化を試みた。例えば、質問 3 においては「とても飲みたくなった」= 5、「飲みたくなった」= 4、「どちらでもない（特に関係ない）」= 3、「飲みたくなくなった」= 2、「まったく飲みたくなくなった」= 1 という具合である。また、各質問に対する回答間の相関関係を調べるため、数値データを図示した。同図内の直線は線形回帰式の結果である。これらの結果を図 3.4-3 および図 3.4-4 に示す（各散布図にプロットされた点の下部には、集計した当該回答数の数値を記入）。さらに各質問 1～3 に対する回答間の相関係数を算出したものを併せて示す（四捨五入）。



(a)



(b)

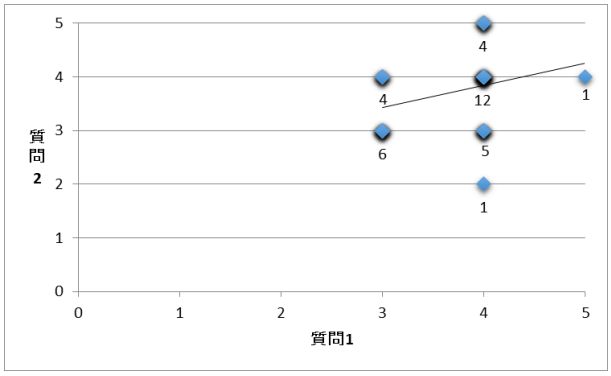


(c)

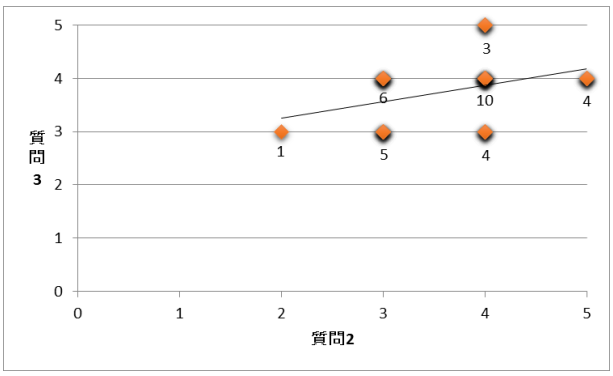
(a) 質問 1 および質問 2 (b) 質問 2 および質問 3 (c) 質問 1 および質問 3

図 3.4-3　クリームソーダ（下欄の各数値は相関係数を示す）

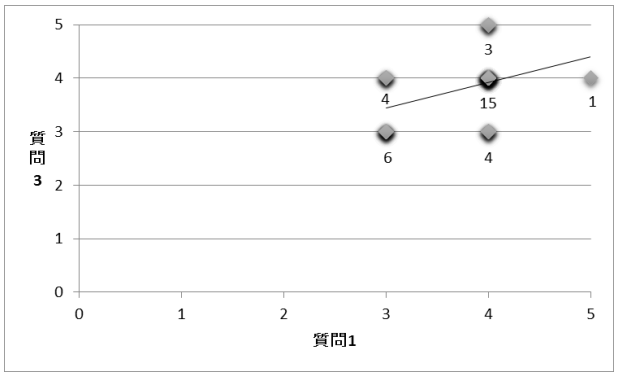
質問 1・質問 2 の回答間: 0.4915、質問 2・質問 3 の回答間: 0.1957、質問 1・質問 3 の回答間: 0.2473



(a)



(b)



(c)

(a) 質問 1 および質問 2 (b) 質問 2 および質問 3 (c) 質問 1 および質問 3

図 3.4-4　コーヒーフロート（下欄の各数値は相関係数を示す）

質問 1・質問 2 の回答間: 0.2982、質問 2・質問 3 の回答間: 0. 3688、質問 1・質問 3 の回答間: 0.4124

図 3.4-3 および図 3.4-4 の各散布図および相関係数から推察できることが何点かある。

クリームソーダのコンテンツにおいては質問 1 と質問 2 の相関係数が他より高く（0.4915）、香りの提示に加えて効果音の提示が体験者になされたことで何らかの相乗効果が生み出された可能性がある。

一方、コーヒーフロートのコンテンツにおいては質問 1 と質問 3 の相関係数が他より高く（0.4124）、本物のコーヒーフロートが飲みたくなったと回答した実験参加者にとっては、効果音の提示よりもむしろ香り（フレーバー）の提示に意味があったと考えられる。

さらに、質問 2 と質問 3 の相関係数を比較するとクリームソーダのコンテンツでは 0.1957 に止まった

が、コーヒーフロートのコンテンツでは 0.3688 とより高い値を示した。このことから「本物のデザートが飲みたい」と回答した実験参加者の印象評価においては、クリームソーダのコンテンツにおける効果音の寄与は小さいが、一方コーヒーフロートのコンテンツにおける効果音の寄与はある程度認められるととらえられる。

また、実験参加者がアンケートに記した体験印象の自由記述から、本物のデザートへの欲求については嗅覚ディスプレイからの匂い提示に拠る影響が大きく、効果音の提示による寄与はあまり大きくないといった内容が多くみられた。

3.4.1.3 改善点（ユーザーの動作検知）

“Virtual Desserts using Olfactory Display”においては、実験参加者の飲む行動（drinking action）に同期した匂い提示・効果音提示がなされていなかったことが懸念される（刺激の提示タイミングのズレ）。

そこで、赤外線温度センサユニットをもちいてストローの表面温度を計り、実験参加者の行動に合わせたコンテンツへと改善し、実際に改善したシステムによるデモンストレーションを実施してユーザーの反応を調べた。

3.4.1.4 実験系

赤外線温度センサユニット（Melexis, MLX 90615）を用いて飲料が通過する時のストローの表面温度の変化を検出し、実験参加者の飲む行動に合わせた刺激提示が可能なシステムを構築した。その実験系を図 3.4-5 に示す。

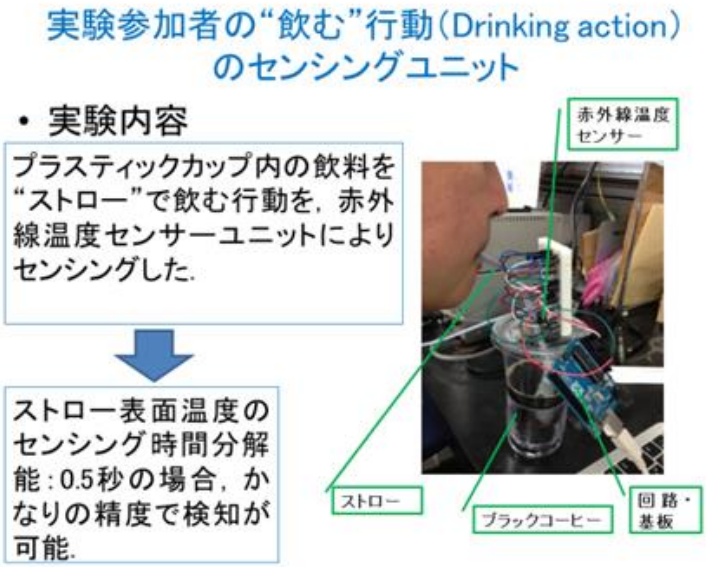


図 3.4-5　赤外線温度センサユニットを用いた実験系

3.4.1.5 センサユニットを用いた実験結果

図 3.4-6 は、ユーザーが無糖炭酸水およびブラックコーヒーを 5 秒毎にストローから吸引した場合の、赤外線温度センサの反応を示している。なお、各々の飲料について、センサの時間分解能は 0.5 秒で実験を行った。ユーザーがストローから液体を吸ったタイミングは赤色縦矢印↑で示されている。

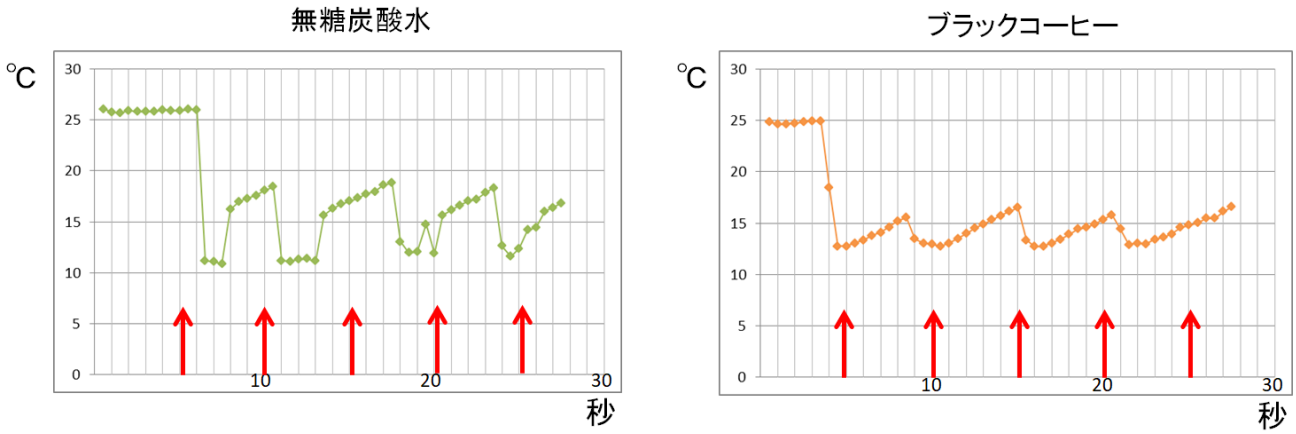


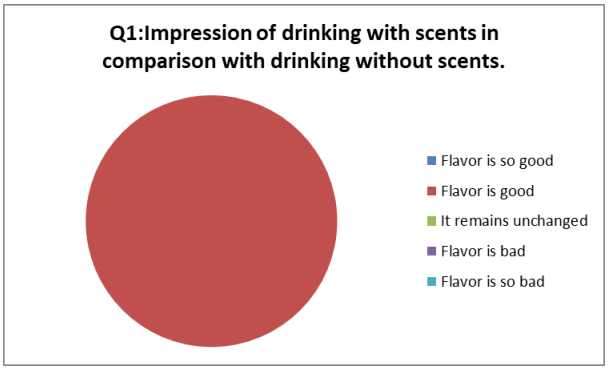
図 3.4-6　ストロー表面温度のセンシング結果（時間分解能: 0.5 秒）

図 3.4-6 において↑の直後に概ねセンシング温度の上昇がみられることから、温度センサの振る舞いはユーザーが無糖炭酸水あるいはブラックコーヒーをストローから吸った行動を時間的にほぼ的確にとらえているといえる。

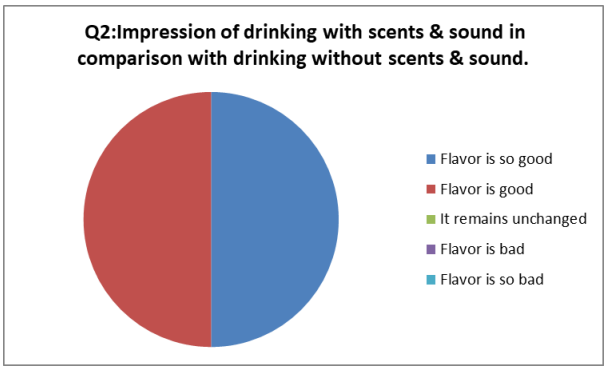
次に、実際にこの温度センサユニットを用いて、すずかけ祭と同様にクリームソーダのバーチャルデザートのデモンストレーションを実施した。実験参加者は 4 名（男性：30 代 2 名、女性：20 代 1 名・40 代 1 名）で外国人であった。デモンストレーションにおけるアンケートとその結果（回答人数）を表 3.4-1 に示す。また、回答の集計結果を図 3.4-7 に示す。

表 3.4-1　温度センサユニットを使った Virtual Dessert のアンケートと結果（単位：人）

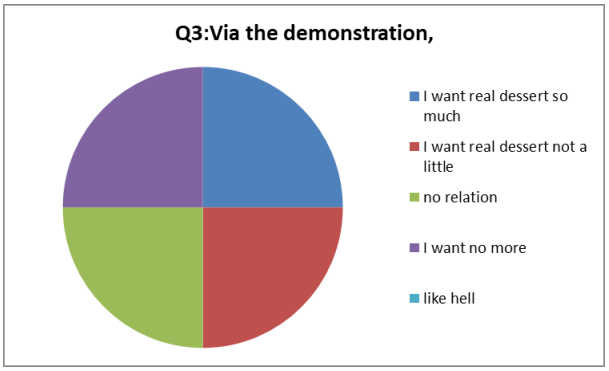
Q1	Impression of drinking with scents in comparison with drinking without scents.	Flavor is so good	0
		Flavor is good	4
		It remains unchanged	0
		Flavor is bad	0
		Flavor is so bad	0
Q2	Impression of drinking with scents & sound in comparison with drinking without scents & sound.	Flavor is so good	2
		Flavor is good	2
		It remains unchanged	0
		Flavor is bad	0
		Flavor is so bad	0
Q3	Via the demonstration,	I want real dessert so much	1
		I want real dessert not a little	1
		no relation	1
		I want no more	1
		like hell	0



(a)



(b)



(c)

(a) 香り提示有／無で飲んだときの比較 (b) 香りと効果音の提示有／無で飲んだときの比較 (c) 本物のデザートへの欲求

図 3.4-7　アンケート集計結果（パイチャート）

アンケート結果より、質問項目、あるいはユーザーによって印象は別れた。さらに、下記のフリーコメントが得られた。

・I don’t enjoy ice cream soda. But if it were a root beer float, I would probably like to eat the real thing.

・This was an amazing experience. My brain was fooled.

・Good approximation of cream soda…Now, how to simulate rich mouth feel?

フリーコメントから、コンテンツに対する興味を抱いた旨の内容が読み取れる。また、香りや効果音の提示タイミングのズレは指摘されなかった。

3.4.1.6 まとめ

嗅覚と聴覚のクロスモーダル効果を調べるため、嗅覚ディスプレイを用いて香りと効果音の提示におけるデモを行った。実際に食品フレーバーを使い、合成した効果音を実験参加者へ提示した結果、嗅覚ディスプレイからの匂い提示はデザートのバーチャルな体験にとって概ね有効であるとの評価が得られた一方、飲食時の効果音に対する評価は疑問視された。また、ユーザーがストローで液体を飲むタイミングと、フレーバーや効果音の提示のタイミングの同期に配慮すべき必要があった。そこで、赤外線温度センサユニットによりユーザーの「飲む行動」を検知し、刺激提示のタイミングの改善を計り、この

実験系を用いて同一のデモンストレーションを行った。

図 3.2-1 に示された臨場感の構成要素と生起要因に照らし合わせてみると、同期感や実時間感覚の欠如はバーチャルなデザート体験における臨場感を低減させる懸念因子となる。さらに、クリームソーダやコーヒーフロートといった身近な飲食物においては、ユーザー個人の過去の経験や記憶情報からの連想が体験時の印象に深く関わってくると考えられる。

3.4.2 Cocktail Maze

ユーザーが VR 空間を動き周りながらフレーバーを体感できるゲームコンテンツである[71][72]。HMD（Oculus Rift）とともに弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイを装着してプレイするウェアラブルバージョンと、パーソナルコンピュータの大型スクリーンを見ながら弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイから匂い刺激を受けるデスクトップバージョンの 2 つがある。前者で使う嗅覚ディスプレイは 4 成分ウェアラブル型で、後者で使う嗅覚ディスプレイは 8 成分据置型である。

ゲームのストーリーはシンプルで、巨大迷路を進み、ゴールとなる”Cocktail Bar”を目指す。ユーザーが迷路内を実際に動き回る際の HMD で見える画像を図 3.4-8 に示す。

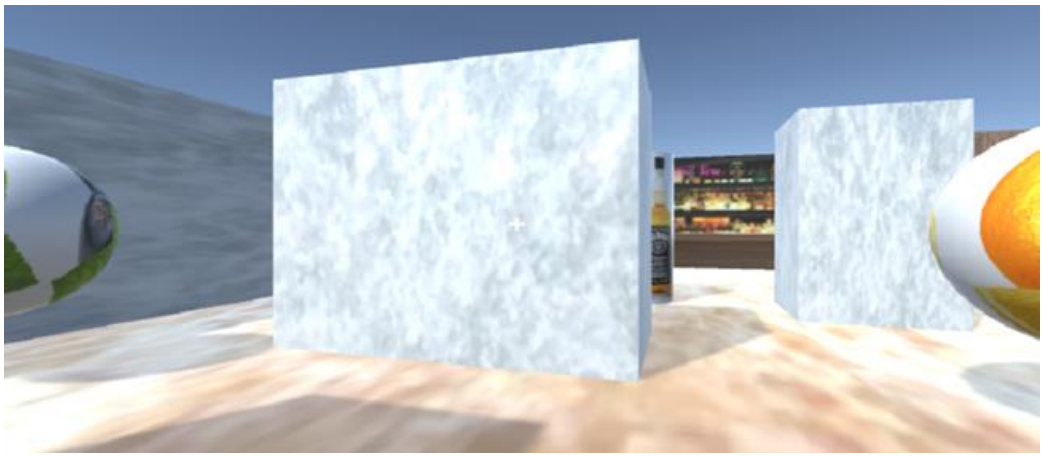


図 3.4-8　Cocktail Maze における HMD の迷路画像

3.4.2.1 体験方法（ウェアラブルバージョン）

ユーザーはウェアラブル型の嗅覚ディスプレイと一体化した HMD を装着する（図 3.4-9 参照）。

汎用型ゲームコントローラ（ジョイスティックタイプ）を操作しながら、迷路内を進む途中で、ウォッカが描かれた円柱とオレンジおよびカシスが描かれた巨大ボールに衝突して入手し、これらのカクテルの材料をゴール（Cocktail Bar）に持ち込む。ゴールでは、手に入れたフレーバーをブレンディングしたカクテルの香りを楽しむことができる。

例えば、迷路においてカシスのボールのみを手に入れたならば、Cocktail Bar ではカシスソーダの香りが体験できる。また、ウォッカの円柱とオレンジのボールを手に入れれば、スクリュードライバーの香りが楽しめる。そして、迷路で何も入手しないで Cocktail Bar に到達すればユーザーへの匂い提示は行われない。さらに、迷路においてフレーバーが描かれたボールに衝突する際には効果音（クラッシュ音）が HMD のヘッドフォンより提示される。この音はフレーバーの種類によって異なる。また、カクテルの材料を入手してゴール（Cocktail Bar）にたどり着いた際にはファンファーレが鳴り、何も持たずにゴールに着けば、残念な結果を表現した効果音が提示される。さらに、迷路内の壁に衝突した際の反発感は視覚的に、開発アプリケーションの UNITY によって実装している。

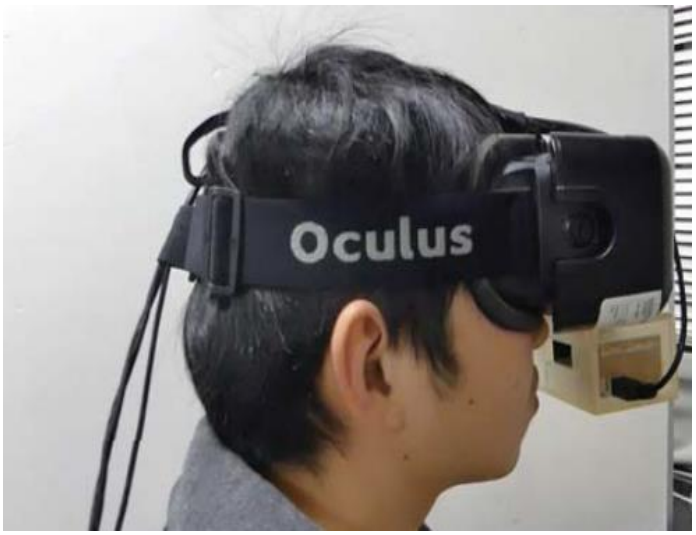


図 3.4-9　HMD を装着したユーザー

3.4.2.2　デモンストレーションとアンケート結果

最初に行ったデモンストレーションはウェアラブルバージョンで、IEEE VR 2016（米国／サウスキャロライナ州）において実施した（図 3.4-10）。参加者は約 25 人で、デモンストレーションの体験と同時にアンケートへの自由記述を依頼した。アンケートの集計結果を表 3.4-2 に示す。

図 3.4-10　IEEE VR 2016 におけるデモンストレーションの様子

表 3.4-2　Cocktail Maze デモンストレーション（IEEE VR 2016）におけるアンケートの集計結果

Please write a comment freely.

1	Really enjoyed the sense of immersion that the ability of smell gave me. I definitely believe smell will be an added value to the overall sense of presence.
2	Good demo. Working well. Flavor are easy to smell. Next step: you have to integrate it into HMDs and manage synchronization with video control.
3	Yes, I smell something but it was difficult to recognize an orage or a cassis.
4	VERY INTERESTING DR.BHUIYAN TUSKEGEE UNIVERSITY
5	Very interesting! michael.thomas@sas.com
6	I like how it is simple to smell different things. I would only add some visual flying particles to enhance the immersion.
7	香り発生のタイミングがよく制御されていて、コンテンツとしてうまくできていると思いました。 2つの香りの違いがあまりよくわかりませんでした。
8	普通にデモは、香りだけでも消せたら良かったです。 実物と比較したかったので、比べるデモだとより良かったと思いました。
9	匂いのするディスプレイは夢があって良いが、ベースになるオイル等が決まっているので、 商品化を考えると応用先が狭くなるので、その辺りの改善があると、適用先が広がるように思います。 デモありがとうございました。
10	匂いは強力で分かりやすい。 映像やヘッドマウントディスプレイには改善の余地がある。
11	Oculus で首の方へ移動(カーソルキーとの関係) 操作法の変更(壁に当たる) カシスが残る 当たり判定のフロアへの誘導 音(get音、ゴール音) ゴールの壁を遠くに(近づきすぎて、見えない) 嗅覚ディスプレイの付け方

（表左端の番号はデモンストレーション参加者の別を表しており、No.11 はデモンストレーションを実施した本研究室の学生の意見である。）

アンケートの自由記述内容からはコンテンツに対する興味が窺えるが、課題点もみられる（下記）。

・匂い刺激と HMD 画像の同期に関する改善（レンダリングの必要性）

・オレンジフレーバーとカシスフレーバーの違いが感じ難い

・残臭の低減

2 回目に行ったデモンストレーションはデスクトップバージョンで、ACM IUI 2018（国内／千代田区）において実施した。デモ参加者は 30 人である（男性 20 人、女性 10 人、うち日本人 12 人）。デモンストレーション体験と同時にアンケートへの自由記述を依頼した。アンケートの集計結果を表 3.4-3 に示す。

表 3.4-3　Cocktail Maze デモンストレーション（IUI 2018）におけるアンケートの集計結果

参加者番号	性別	年齢（代）	フリーコメント
1	男性	30	Enjoyable game. Realistic sensation at the end. Citrus smell was very effective. Hitting things gave notable audio shock.
2	女性	20	As I walked around the virtual maze and hit many fruit balls, I was confused by my sense of smell.
3	男性	50	Unexpected interesting game. Smell is an interesting addition to virtual games. Think about virtual tours to cities, markets restaurants.
4	男性	30	Very cool. I do not know what my drink was, but smelled good. Would be good to make clear that the items ya hit in the maze make a specific cocktail.
5	男性	20	Loved the smell! A little bit blurry, might need to adjust lenses.
6	女性	30	I smelled a slight bit of orange but not much. It could be because I have a cold.
7	女性	50	Very impressive, I liked the colors and smell the fruits.
8	女性	20	It's really a good work! I feel immersive in the VR environment, especially when I smell the juice. I think in the future, maybe you can add some ″wind feeling″ in to this system. So when people play VR games, they will have more immersive experience. Thank You!!
9	男性	20	Very interesting project. I have never tried virtual reality with smells!
10	男性	20	This might be a great example to make more advanced VR games as MR as using other physical effect such as ″smell″ & ″taste″. Nice.
11	男性	30	I expected to smell more. Maybe it is because I have a cold or because I was not close enough to the device. But only at the end when I reached the Cocktail Bar I smelled something sweet. Thank you for this cool demo!
12	男性	30	The smell was vivid though too intense some work on air deliverry needs to be done it was realistic smell. Good work.
13	男性	20	Really enjoyed the game, the smells are great! I would love to see combination of smells too. Thanks for the experience!
14	女性	20	The interaction was good. Can include some markers for important mile stones.
15	女性	20	I was interested in but had not experienced multisensory VR experience before, so it was nice to have been able to try the demo. It was fun to have been corresponding smell but I think the results of an experiment in a more immersive environment (not at loud conference) may be very interesting, it reminds me of connection to smell nostalgia. Thank you!
16	男性	30	Good fine sensation & also good display.
17	男性	30	It's a little difficult to know how to get to make a whisky. My first trial failed. Maybe in the future, you can add some direction marks in the air as a demo. Thanks.
18	男性	20	Getting an odor while doing a game is an interesting feature. It would be interesting if I can also smell multiple odors because a game setting might involve multiple components that can show smell.
19	男性	20	装置をコンパクトにできればゲームへの応用もでき非常に面白いと思います。
20	女性	20	オレンジやカシスのボールに衝突した際も香り提示が欲しい。
21	男性	20	カシスに当たったのに、オレンジの香りを感じた。
22	男性	20	香りがとてもよかったです。香りとかで誘導とかってできるんですか？
23	女性	30	VR×臭いは面白かったです。甘い水×VR×匂いだと錯覚がおきると思いました。このシステムが他にどう応用できるのかは気になりました。
24	女性	20	楽しかったです。VRゲームだけでなく、特性（におい広がらない、その場でブレンド可）を活かした他の応用例もあると、より有用性がアピールしやすそうだな、と思いました。
25	男性	30	よいにおいでした。においの違いが体験できるデモだと良いかと。
26	男性	40	匂いがウイスキーっぽくないのが残念です（人間の嗅覚ってするどいのだと思います）。匂いの強さでナビゲートするなどのデモもおもしろかったのではないかと思います。
27	男性	20	今後、匂いの種類が増えれば、いろいろなことに応用できると思いました。
28	男性	20	ウイスキーをゲットしたらウイスキーの匂いがする、という仕様にするとより没入感が増すと感じた。
29	男性	50	想像したよりも一瞬で香りが出てくるのがおどろきでした。
30	女性	50	ハナが悪いので途中のニオイはあまり感じませんでした。風を感じない方がいいです。FANは回しっぱなしでいいような。

アンケートの自由記述内容からはコンテンツおよび嗅覚ディスプレイに対する課題点がわかる。黄色でマーキングしたコメントは特に考慮すべき意見と考えられる（下記）。

- 匂い提示のタイミングの正確さ（時間的制御）
- 匂い提示の局所化（空間的制御）
- 残臭の低減
- 装置の小型化

3.4.2.3 まとめ

嗅覚 VR の技術を用いたゲーム Cocktail Maze を制作し、国内外において大規模なデモンストレーションを 2 回行った。米国においては、HMD とともに弾性表面波霧化器型の 4 成分ウェアラブル型嗅覚ディスプレイを使った。また国内においては、パーソナルコンピュータの大型スクリーンとともに弾性表面波霧化器型の 8 成分据置型嗅覚ディスプレイを使った。

2 つのデモンストレーションの参加者から得られたフリーコメントから、嗅覚ディスプレイに求められ機能として、匂い提示の時間的・空間的制御の精度が浮かび上がった。特に、匂い提示における時間的精度の向上が図られれば複数の匂い提示の切替えや残臭の問題においても利点につながる。

図 3.2-1 に示された臨場感の構成要素と生起要因に照らし合わせてみると、特に HMD を装着したウェアラブルバージョンでは、HMD 内画像における包囲感（没入感）やゲームコントローラによる移動を伴うことに起因する同期感が相まって臨場感が醸成されると考えられる。さらに、これらに加わる外的要因として、Cocktail Maze においては視覚刺激、聴覚刺激、そして嗅覚刺激の多感覚統合が必要とされる。

3.4.3 匂い手がかりによる臨場感の研究

ある風景と匂いをユーザーに同時に提示した場合、嗅覚情報が視覚情報の手がかりとなり、臨場感が変化するかについて調べることが研究目的である[73]。さらに、ヒトが日常の複合臭から嗅ぎ分けられる匂い数は平均的に約 2 種類[74]といわれているが、複合的な匂いの提示において実験参加者が同定できる匂いの数を調べることが第二の研究目的である。匂い提示は弾性表面波霧化器型の嗅覚ディスプレイ（8 成分据置型）を使用した。

3.4.3.1 実験手法

実験参加者に対して、ある風景と匂いを同時に提示してその印象について官能評価とアンケートによる実験を行った。匂いと結びつきの強い風景を客観的視点から選別するため、環境省選定の「かおり風景 100 選」[2]を対象とした。

さらに、これらを物体風景 24、状況風景 65、行為風景 11 に分類した。分類の基準は「かおり風景 100 選」に載せられた写真および説明文に依拠している。そして本研究では、物体風景 2 つ（梅花、線香）および状況風景 2 つ（針葉樹林、鶴橋駅商店街）に絞り込み、その静止画像（図 3.4-11）とともに匂い提示を嗅覚ディスプレイから行った。

(a) 梅花 (b) 線香 (c) 針葉樹林 (d) 鶴橋駅商店街

図 3.4-11　提示した静止画

実験参加者は 20 人（男性 17 人、女性 3 人）で、留学生を含む本学学生および教職員（年齢は 20 歳代から 50 歳代）、全員嗅覚能力においては健常である。なお、本実験の履行に際しては、ヘルシンキ宣言

に則った本学の研究倫理審査委員会の承認を得ている。

匂いサンプル（香料）は嗅覚ディスプレイの各チャンネルのバイアル瓶に充填した（表 3.4-4）。1 つの風景場面において、その代表的な匂いサンプル提示（1 種類提示）と、さらに補完的な匂いサンプルを加えた提示（2 種類提示）を行った。匂いサンプルの選定においては前掲「かおり風景 100 選」に記載された各風景の“かおりの源”を参照した。なお、各サンプルの希釈は主にエタノールを用いて行い、希釈比率はサンプル間で異なる。

匂い提示は 4 つの風景場面それぞれについて行った。1 種類の匂いサンプルを提示した実験参加者と 2 種類の匂いサンプルを提示した実験参加者は同一である。また、物体風景において匂いサンプルを提示した実験参加者（10 人）と状況風景において匂いサンプルを提示した実験参加者（10 人）は重複しない。表 3.4-5 に嗅覚ディスプレイから匂いサンプルを提示した 15 秒間の時間的流れを示す。なお 5 秒間を 1 ユニットと捉えた理由はヒトの呼吸リズムに基づく。

表 3.4-4　8 成分調合型嗅覚ディスプレイの各チャンネルで用いた匂いサンプル

	チャンネル	匂いサンプル	役割り	メーカー
嗅覚ディスプレイ各チャンネルの匂いサンプル	1	梅の花（エッセンシャルオイル）	代表的匂い	長谷川香料
	2	イランイラン（エッセンシャルオイル）	補完的匂い	Zefir
	3	線香フレーバー	代表的匂い	長谷川香料
	4	スモーク（Cade Oil）	補完的匂い	長谷川香料
	5	針葉樹（エッセンシャルオイル）	代表的匂い	Zefir
	6	青葉アルコール（cis-3-Hexen-1-ol）	補完的匂い	東京化成工業
	7	焼肉フレーバー	代表的匂い	長谷川香料
	8	キムチフレーバー	補完的匂い	長谷川香料

表 3.4-5　4 つの風景における匂い提示の時間的流れ

風　景	匂いサンプルの数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	秒（提示時間）
梅花	1	チャンネル1															
	2	チャンネル1					チャンネル2					チャンネル1					
線香	1	チャンネル3															
	2	チャンネル3					チャンネル4					チャンネル3					
針葉樹林	1	チャンネル5															
	2	チャンネル5					チャンネル6					チャンネル5					
鶴橋駅商店街	1	チャンネル7															
	2	チャンネル7					チャンネル8					チャンネル7					

3.4.3.2 官能検査

実験参加者による官能検査の流れは以下である。

①実験参加者は事前にアンケートシートの内容を注意深く読む。

②実験中、実験参加者はパーソナルコンピュータ画面の当該風景の静止画像を見る。

③嗅覚ディスプレイの SAW デバイスから約 5cm 離れたところに鼻孔を保つ。

④実験参加者に対する匂い提示（1 回目の匂い提示＝15 秒、休憩および実験室の換気＝60 秒、2 回目の匂い提示＝15 秒）

⑤下記のアンケート用紙（英語表記）で、アンダーラインの選択肢から一つ選んでもらう。

・Gender　Male/Female

・Age　20’s 30’s 40’s 50’s 60’s

・Q1　Which odor presentation do you feel that scene is more realistic?　1st 2nd

・Q2　Which odor presentation do you feel that it matches the image at the PC?　1st 2nd

・Q3　How many kinds of odors did you feel during the 1st odor presentation?

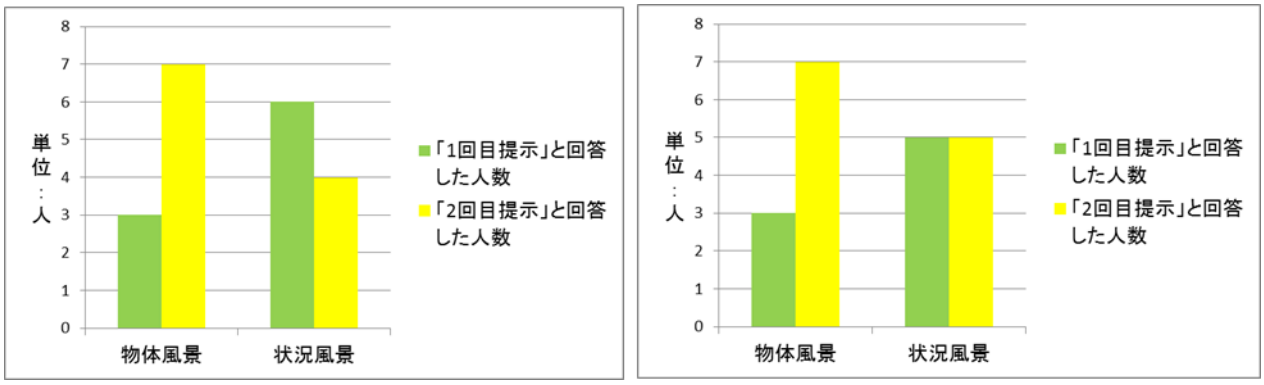
0　1　2　3　4　Over5

・Q4　How many kinds of odors did you feel during the 2nd odor presentation?

0　1　2　3　4　Over5

3.4.3.3 実験結果

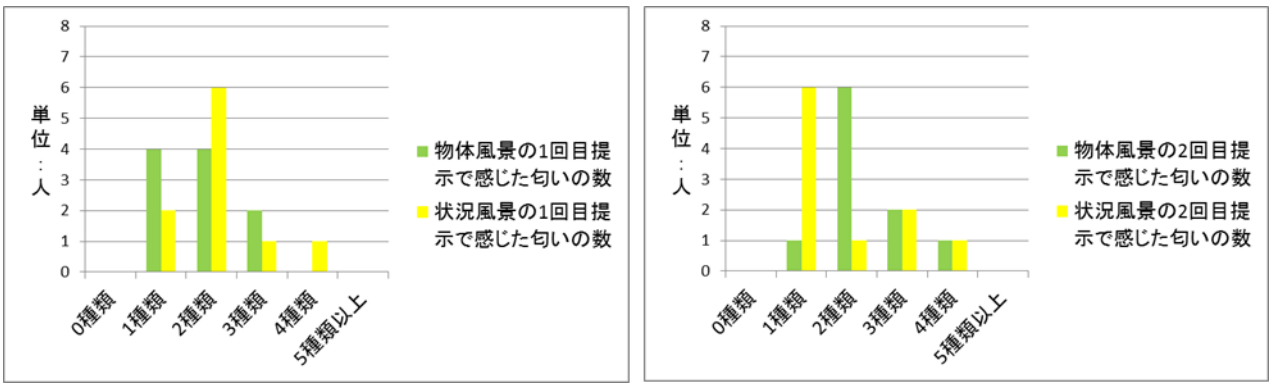
<Q1>および<Q2>　4 つの風景全てにおいて 1 回目の匂い提示では 1 種類の匂い(代表的匂い)を用い、2 回目の匂い提示では 2 種類の匂い（代表的匂いおよび補完的匂い）を用いた。例えば、大阪の鶴橋駅商店街では 1 回目は焼肉の香りを提示し、2 回目はさらにキムチフレーバーの香りを 6～10 秒目に付加して提示している。アンケートの Q1 における比較および Q2 における比較を図 3.4-12 に示す。臨場感についての比較では、物体風景においては 2 種類の匂いを提示する方が“匂い手がかり”としては効果的であるといえる。この傾向は画像との調和度においても同様である。2 点嗜好法による検定では p 値＜0.05 を示した。一方、状況風景においては臨場感の比較で概ね 1 種類（代表的匂い）を提示する方が効果的であるといえるが、画像との調和度の比較では違いがみられなかった。



(a)　(b)

図 3.4-12　(a) Q1 における比較（臨場感）　(b) Q2 における比較（画像との調和度）

<Q3>および<Q4>　アンケートの Q3 における比較および Q4 における比較を図 3.4-13 に示す。1 回目の匂い提示（代表的匂い）で感じた匂いを 1 種類と回答した人の合計は 6 人、2 種類と回答した人の合計は 10 人である。一方、2 回目の匂い提示（代表的匂いおよび補完的匂い）で感じた匂いを 1 種類と回答した人の合計は 7 人、2 種類と回答した人の合計も同じく 7 人である。この 2 回目の提示で感じた匂いの数の 1 種類と 2 種類の比較において、物体風景と状況風景では正反対の傾向が顕著にみられる。即ち、梅花と線香の物体風景で 2 種類の匂いを提示したとき、感じた匂いの数を正答した実験参加者は多いが、一方、針葉樹林と鶴橋駅商店街の状況風景では感じた匂いの数を 1 種類と誤答した実験参加者が多かった。



(a)　　(b)

図 3.4-13　(a) Q3 における比較（物体風景／状況風景）　(b) Q4 における比較（物体風景／状況風景）

3.4.3.4 考察

匂い手がかりにより、ある風景に抱く実験参加者（ユーザー）の臨場感および映像との調和度について官能検査実験を通して調査を行った。対象がより具体的な物体風景においては代表的匂い、および補完的匂いを組み合わせて提示する方が有効であった。また、提示された匂いの数の知覚については対象がより抽象的な状況風景よりも物体風景において正しい認識傾向がみられた。

これらの背景には、提示した匂いの印象に対する実験参加者の自伝的記憶が大きく関わっていると考えられる。実際に見たことのある風景が具体的でその時・場所で嗅いだ匂いの記憶情報が強く残っていれば、実験参加者総体ではその印象の幅が拡がる。一方、抽象的で曖昧な風景においては嗅覚情報を画像やテキストにより補う傍ら、“代表的な匂い”が実験参加者の嗅覚情報を心内で構築するのに役立つと推察される。

図 3.2-1 に示された臨場感の構成要素と生起要因に照らし合わせてみると、臨場感の醸成においては、情感的要素が深く関わっている。外的要因としては視覚刺激および嗅覚刺激による感覚情報の統合と、さらに内的要因としての過去の経験・学習、そして記憶情報からの連想がイメージ想起に際して極めて大きな役割を果たしていると考えられる。

3.4.3.5 まとめ

この研究においては実験参加者に提示する風景が 4 つに限定されていたため、提示する匂いのバリエーションも必然的に限られたものとなった。匂い手がかりの効果についてより広範かつ包括的に調べるためには、実験参加者の文化的背景や経験・記憶を考慮した匂い提示が必要となる。その実現のために、ソフト面においては提示する多彩な風景と匂いの選定方法を再考する必要がある。さらにハード面においては、より多種多様な匂いを正確に再現して提示が可能となる多成分調合型嗅覚ディスプレイの利用が不可欠となる。

3.4.4 デモンストレーション・実験から得た知見

本章においては 3 つの制作したコンテンツを紹介した。クロスモーダル知覚の観点から“Virtual Desserts using Olfactory Display”、Virtual Reality 技術を使った”Cocktail Maze”、そして匂い情報よる情景想起に焦点を当てた”匂い手がかりによる臨場感の研究”である。

これらの制作したコンテンツはユーザーに対してデモンストレーションを行い、アンケート結果を考察した。それらから得た知見として、嗅覚ディスプレイに求められ機能は次の 2 点である。

・匂い提示の時間的な制御性の向上（素早い匂い提示、残臭の低減）・・・”Cocktail Maze”から得た知見
・複数の匂い提示における再現精度の向上（より、多種多様な匂いを正確に再現して提示する）・・・
”匂い手がかりによる臨場感の研究”から得た知見

第 4 章　匂いの提示速度による評価

第 3 章ではコンテンツのデモンストレーションを通して、嗅覚ディスプレイに求められ機能として匂いの提示における時間的な精度の重要性について言及した。そこで、匂い提示の速さに関わる嗅覚ディスプレイの特性を調べるため、評価実験を行った。揮発性の異なる 3 つの匂いサンプルを使用して評価した。評価の実施にあたっては、PID（光イオン化検出）モニターによる匂い濃度の計測、および実験参加者による官能検査の結果に基づいて、予め匂い提示環境の調整を行った。

4.1　評価する嗅覚ディスプレイ

第 2 章において説明した機構の異なる 3 種類の嗅覚ディスプレイを評価した。電磁弁高速開閉型（以下、SV と略記）、弾性表面波霧化器型（据置型）（以下、DS と略記）、そして弾性表面波霧化器型（ウェアラブル型）（以下、WS と略記）の 3 基である。

この 3 基の嗅覚ディスプレイを評価対象とした理由は、それぞれが匂いの生成方法、匂いの供給方法、そしてユーザーの身体との位置関係において異なった要素技術を持つ典型的な嗅覚ディスプレイであることによる。

SV は、匂いの生成方法はエアポンプを使ったヘッドスペース法による気化、匂いの供給方法はテフロンチューブ内の香気搬送、そして匂いの提示はユーザーの鼻元でアクリルノズルから行われるが据置型に類別される。

DS は、匂いの生成方法はマイクロディスペンサーによる液体香料の射出と圧電素子（SAW デバイス）による霧化（気化）、匂いの供給方法はファンによる送風、そしてユーザーの鼻からは離して設置する据置型である。

WS は、匂いの生成方法はマイクロディスペンサーによる液体香料の射出と圧電素子（SAW デバイス）による霧化（気化）、匂いの供給方法は小型ポンプによる送風、そして HMD と一体化してユーザーの鼻元で匂いの提示を行うウェアラブル型の嗅覚ディスプレイである。

4.2 実験

官能検査実験（実験 1 および実験 3）と PID モニターによるセンシング測定実験（実験 2）を行った。

用いた匂いサンプル（芳香化合物）は 3 種類で、沸点の昇順により 1-プロパノール、酢酸イソアミル、α-ピネンである（表 4.2-1 参照）。3 種類ともに希釈は行っていない。選択に偏りがないように、アルコール系、エステル系、テルペン系より 1 種類ずつを選んだ。なお、フレグランスの分野におけるトップノート、ミドルノート、ラストノートの概念[75]に因み 3 種類とした。参考として、揮発性が高いトップノートは香気の持続が 5〜10 分、揮発性が中程度のミドルノートは 0.5〜2 時間、揮発性が低いラストノートは概ね 2 時間以上である。

表 4.2-1　用いた 3 種類の匂いサンプル（芳香化合物）

Odor samples	1-propanol	isoamyl acetate	α -pinene
Functional group type	Alcohol	Ester	Terpene
Boiling point（Celsius）	97-98℃	142℃	155-156℃
Viscosity（Centi Poise）	2.256 cP	1.030 cP	1.303 cP
Manufacturer	純正化学	東京化成工業	東京化成工業

実験参加者は 30 人（男性 22 人、女性 8 人）である。うち、実験 1 においては 20 人、実験 3 においては 30 人で一部の実験参加者は重複している。本学の学生と教職員（20 代〜50 代）で全員、嗅覚に異常がない旨の自己申告を得た。また、実験のプロトコルはヘルシンキ宣言に従い本学の研究倫理審査委員会によって承認されている（承認番号：2018020）。

本実験では、機構の異なる嗅覚ディスプレイから匂いサンプルの提示を行うに際して、ヒトの嗅覚の感覚強度と客観的な濃度の双方を調整する必要があった。そのため、実験参加者による官能検査によって匂いの強さを調整した（実験 1）。また、実験 1 で得られたデータに基づいて PID モニターによる匂い濃度を計測し、3 基の嗅覚ディスプレイ間、さらに 3 種類の匂いサンプル間における濃度差を検証した（実験 2）。そして、実験 3 では実験参加者が匂いを感じ始めた瞬間（Feel Odor, FO と略記）と匂いが弱くなったと感じた瞬間（Feel Weaker, FW と略記）を計測・記録し、その結果を可視化した。

4.2.1 実験 1（官能検査）

3 基の嗅覚ディスプレイを用いて、3 種類の匂いサンプルの感覚強度を調整するために官能検査を実施した。実験中は、室温を常に 23℃に保ち、窓を遮光カーテンで保護し蛍光灯で適切な照明環境を整えた。また、大型エアコンと空気清浄機は常時稼働させた。実験 1 は次の 3 つの手順で構成される。

<手順 1>　提示する匂いの強さの基準を設定するために、参照嗅覚ディスプレイとして DS を選択した。DS を選んだ理由は、3 基の嗅覚ディスプレイのうち、匂い提示部分とユーザーの鼻の距離が最も離れており（約 20cm）、官能検査結果におけるバラつきに配慮したことによる。

マイクロディスペンサーの駆動周波数を 5Hz 刻みで調整し、官能検査の前提となる周波数はそれぞれ、1-プロパノール: 15Hz、酢酸イソアミル: 5Hz、α-ピネン: 10Hz に設定した。なお、各駆動周波数の順序は

臭気のそれぞれの検知閾の値の順と一致した。0.094 ppm（1-プロパノール）[76]、0.0034 ppm（酢酸イソアミル）[77]、および 0.018 ppm（α-ピネン）[78]である。

<手順 2>　最初に、10 人の実験参加者が手順 1 で決定された駆動周波数に基づいて DS から 15 秒間提示される各香気の強度を記憶した。

次に、同じ 10 人の実験参加者がパーソナルコンピュータで SV の制御ソフトウェア（EZ Blender）を操作して、記憶された感覚強度に一致させ、SV から提示される 3 つの匂いサンプルの濃度を調整した。最後に、各実験参加者が EZ Blender で決定した結果を報告し、平均値を計算した（単位: %）。

<手順 3>　最初に、手順 2 とは異なる 10 人の実験参加者が手順 1 で決定された駆動周波数に基づいて DS から 15 秒間提示される各香気の強度を記憶した。

次に、この 10 人の実験参加者がパーソナルコンピュータで WS の制御ソフトウェア（MATLAB）を操作し、記憶された感覚強度に一致するように 5 Hz 刻みでマイクロディスペンサーの駆動周波数の調整を行い、WS から提示される 3 つの匂いサンプルの濃度を決めた。最後に、各実験参加者がソフトウェアで決定した結果を報告し、平均値を計算した（単位: Hz）。

これらの 3 つの手順から得られた実験結果を表 4.2-2 に示す。同表内の”Determined rate”の項目は同じ匂い強度を感じた時の濃度パラメータをまとめたものである。なお、WS における”Determined rate”の平均値は 5 Hz 刻みによる切り上げ・切り捨て処理を行った。

表 4.2-2　官能検査の結果

Type	Odor samples	Method to control concentration	Determined rate	Standard deviation
SV	1-propanol isoamyl acetate α-pinene	Control ratio with the EZ Blender	56% 57% 37%	11% 14% 17%
DS	1-propanol isoamyl acetate α-pinene	Driving frequency on the solenoid valves	15Hz 5Hz 10Hz	– – –
WS	1-propanol isoamyl acetate α-pinene	Driving frequency on the solenoid valves	10Hz 10Hz 10Hz	3% 4% 7%

4.2.2 実験 2（機械計測）

PID モニター（ppb RAE 3000）を使用して、実験 1 で決定した各々の”Determined rate”に基づき、3 基の嗅覚ディスプレイから 60 秒間匂いが提示される 3 種類の匂いサンプルの濃度を計測した。計測方法は 3 基の嗅覚ディスプレイの匂い提示部から空間へ放たれる香気の気相測定である。SV の計測の様子を参考に示す（図 4.2-1）

また、PID モニターによる計測手順は次の通りである。

①PID モニターの外気校正を行う（センサ機構のキャリブレーション）。

②PID モニターのスパン校正を行う（キャリアガスとして、イソブチレンガスによるセンシングを実施）。

③ppb RAE 3000 の” Technical Note TN-106”より、3 種類の芳香化合物それぞれの CF（Correction Factor）係数を見つける（表 4.2-3 参照）。イソブチレンガスを使った場合、同表の”10.6 列”に該当する。

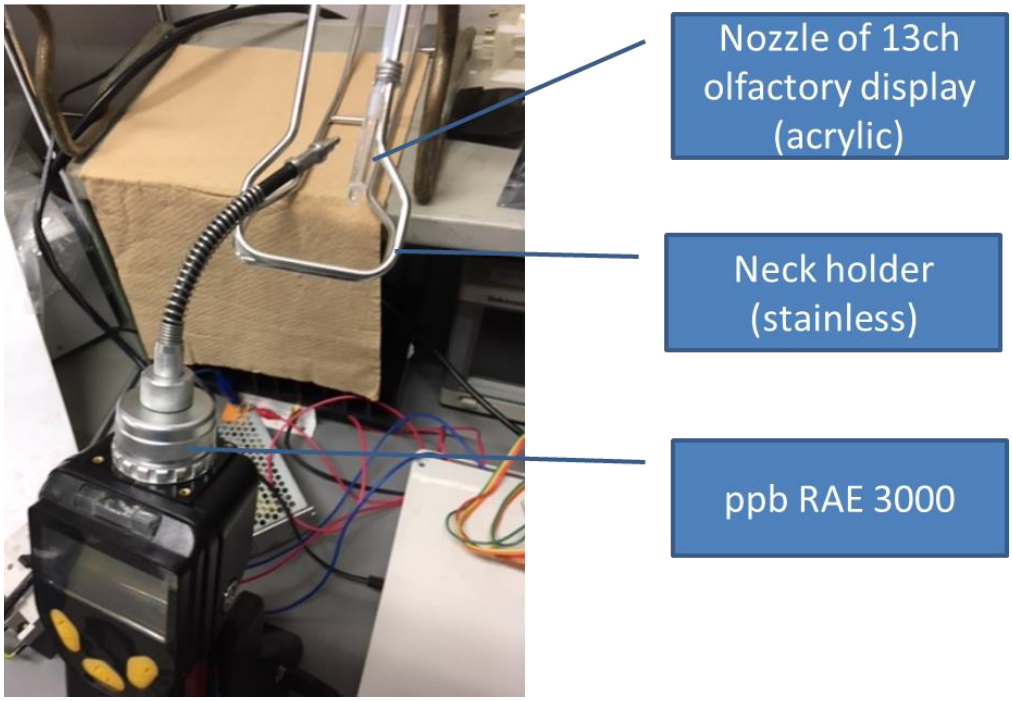


図 4.2-1　電磁弁高速開閉型嗅覚ディスプレイ（SV）の匂い提示部
における PID モニターによる計測

表 4.2-3　ppb RAE 3000 の Technical Note TN-106（抜粋）

Compound Name	Synonym/Abbreviation	CAS No.	Formula	9.8	C	10.6	C	11.7	C	IE (eV)	TWA
Iodine**		7553-56-2	I_2	0.1	+	0.1	+	0.1	+	9.40	C0.1
Iodomethane	Methyl iodide	74-88-4	CH_3I	0.21	+	0.22	+	0.26	+	9.54	2
Isoamyl acetate	Isopentyl acetate	123-92-2	$C_7H_{14}O_2$	10.1		2.1		1.0		<10	100
Isobutane	2-Methylpropane	75-28-5	C_4H_{10}			100	+	1.2	+	10.57	ne
Isobutanol	2-Methyl-1-propanol	78-83-1	$C_4H_{10}O$	19	+	3.8	+	1.5		10.02	50
Isobutene	Isobutylene, Methyl butene	115-11-7	C_4H_8	1.00	+	1.00	+	1.00	+	9.24	ne
Isobutyl acetate	2-methylpropyl ethanoate, β-methylpropyl acetate	110-19-0	$C_6H_{12}O_2$			2.1	+			9.97	150

例えば、酢酸イソアミルの係数は同表の○で囲んだ 2.1 となる。PID モニターによる計測結果を表 4.2-4 に示す。

表 4.2-4　PID モニターによる濃度の計測結果

Type	Odor samples	CF (10.6) coefficient	Measured concentration (ppm)	Standard deviation	Determined rate
SV	1−propanol	5.00	51	14%	56%
	isoamyl acetate	2.10	28	11%	57%
	α −pinene	0.31	27	56%	37%
DS	1−propanol	5.00	74	23%	15Hz
	isoamyl acetate	2.10	50	28%	5Hz
	α −pinene	0.31	38	37%	10Hz
WS	1−propanol	5.00	67	4%	10Hz
	isoamyl acetate	2.10	36	10%	10Hz
	α −pinene	0.31	18	18%	10Hz

表 4.2-4 に示した数値は左側より、3 種類の芳香化合物の係数（CF）、PID モニターによる計測値、標準偏差、そして右端は既定値の”Determined rate”である。

”Measured concentration (ppm)”に注目すると、3 基それぞれの嗅覚ディスプレイにおける匂いサンプル間の濃度差はヒトの嗅覚の検知閾の観点からみて、官能検査には問題がないと判断した。また、同じ匂いサンプル内における嗅覚ディスプレイ間の濃度差も同様に問題がない範囲であると考えられる。そもそも、異なる匂いサンプルの濃度が同じでも匂いの感覚強度が変わるため、表 4.2-2 に示すように官能検査による調整が必要となった。

そして、PID モニターの計測位置は次のとおりである。SV ではアクリルノズルから約 3cm、DS では SAW デバイスの中心から約 20cm、WS では匂いのアウトレット部分から約 1cm の位置である。実験中、WS は HMD から分離した。なお、これらの計測位置はユーザーが嗅覚ディスプレイから実際に匂い提示を受ける位置とほぼ一致している。

4.2.3 実験 3（官能検査）

3 基の嗅覚ディスプレイそれぞれから 3 種類の匂いサンプルを 15 秒間提示し、官能検査を実施した。SV の官能検査の様子を参考に示す（図 4.2-2）。また、実験参加者の匂い知覚行動は、開発した GUI アプリケーション（Microsoft Excel）を利用して CSV データとして収集した。アプリケーションのパーソナルコンピュータにおける画面を図 4.2-3 に示す。

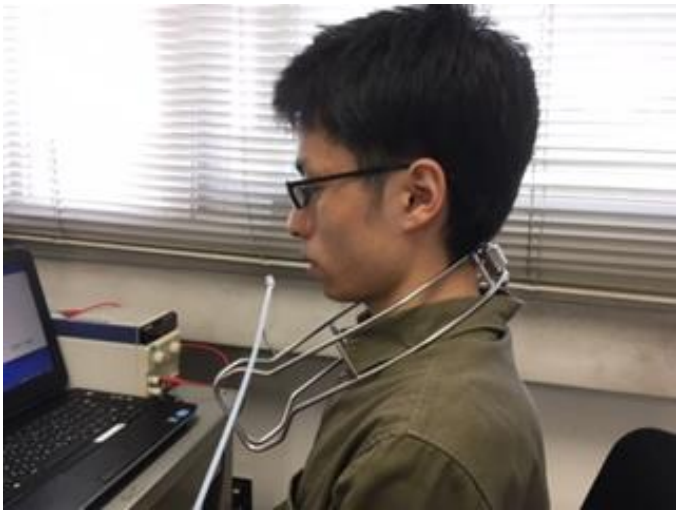


図 4.2-2　SV の官能検査実験の様子（この後、イヤーマフを装着）

実験手続きは次のとおりである。

・官能検査は、嗅覚ディスプレイ 1 基において 1 人ずつ行う。
・実験参加者は、匂いサンプルの種類とその提示時間について予め知らされていない。
・実験参加者は嗅覚ディスプレイの前の椅子に座り、鼻の位置を調整する。利き手でマウスを持ち、イヤーマフを装着する。
・実験中、実験参加者はノート型 PC のアプリケーションの GUI を見続ける。

・デモンストレーターの最初のジェスチャーで検査を開始する。
・実験参加者は、匂いを感じた瞬間に Feel odor アイコンをクリックする。
・実験参加者は、匂いが弱まったと感じた瞬間に Feel little アイコンをクリックする。
・デモンストレーターの次のジェスチャーで検査を終了し、退室する。

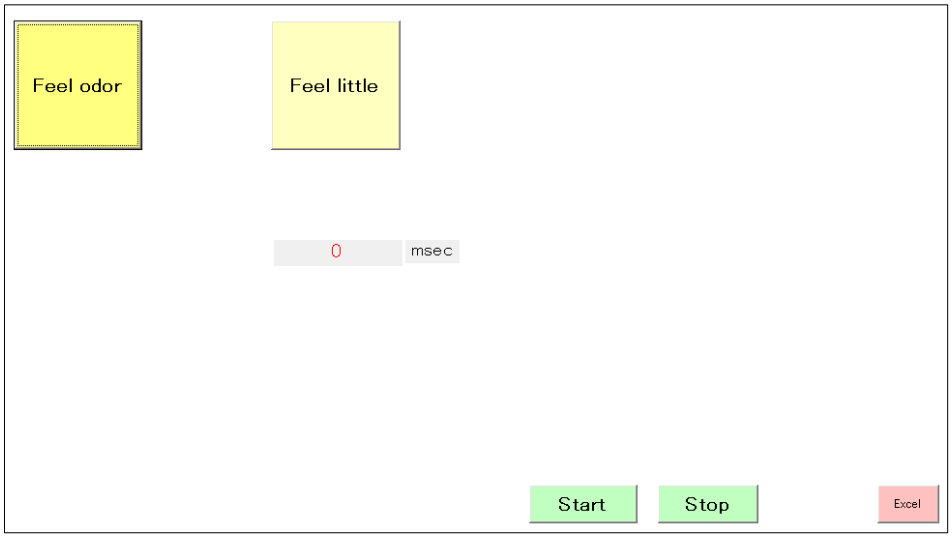


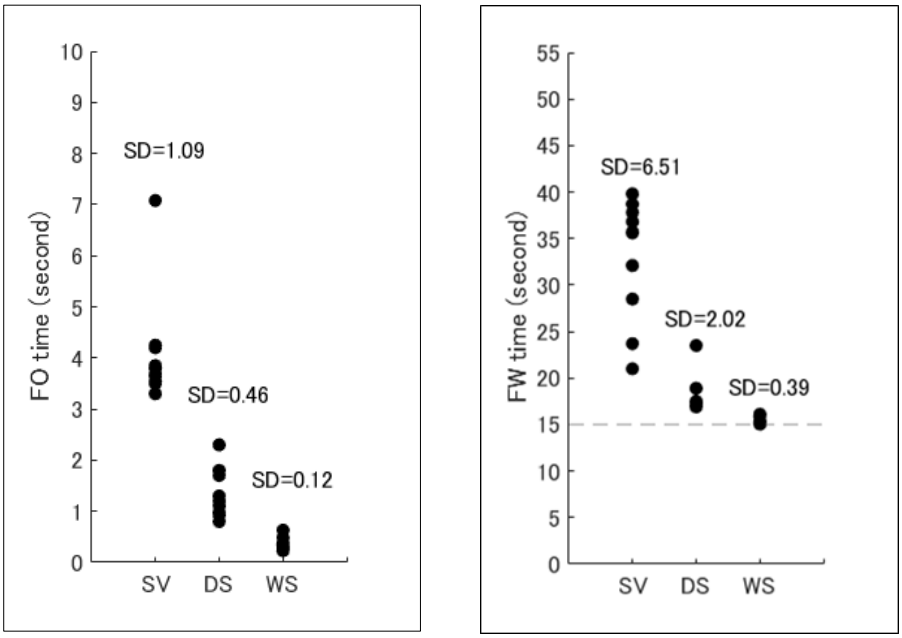
図 4.2-3　実験参加者がクリックアクションを行うアプリケーションの画面

実験参加者数は、SV、DS、WS それぞれにおいて 10 人で（合計 30 人）、実験 3 の参加者は実験 1 の参加者と一部は重複している。

実験参加者がマウスをクリックしたタイミングを、時系列により自動的に CSV データとして出力し、パーソナルコンピュータに保存した。これらのデータに基づきソフトウェアを使用して、10 人の実験参加者が匂いを感じた FO 時間と匂いが弱まったと感じた FW 時間を解析した。

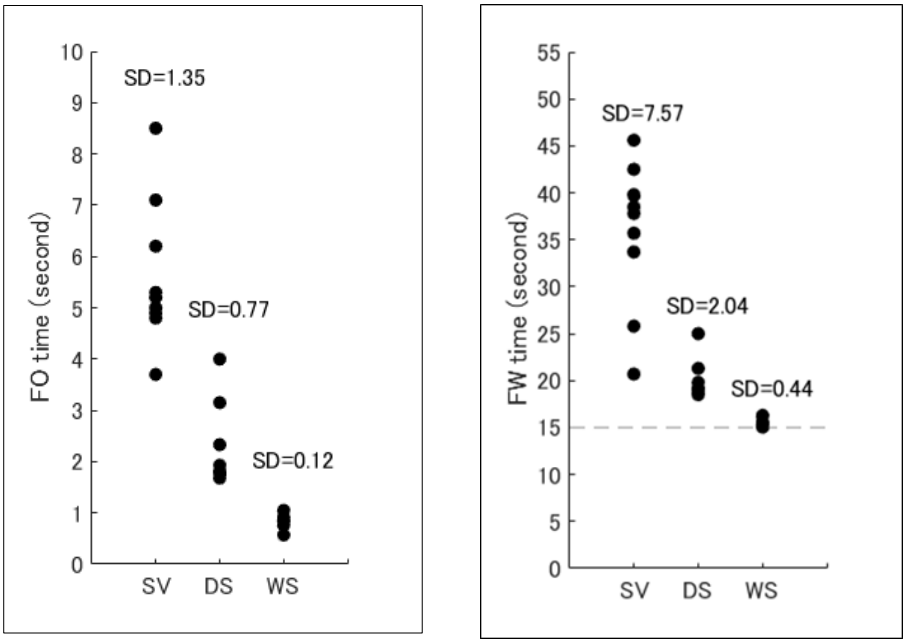
4.3 実験結果

実験結果を図 4.3-1、4.3-2、4.3-3 にそれぞれ示す。なお、各図 (b) では 15 秒の位置に破線を示した。図 4.3-1（a）と（b）は 1-プロパノールにおける 3 基の嗅覚ディスプレイの比較を示し、図 4.3-2（a）と（b）は酢酸イソアミルにおける 3 基の嗅覚ディスプレイの比較を示し、図 4.3-3（a）と（b）は α-ピネンにおける 3 基の嗅覚ディスプレイの比較を示す。



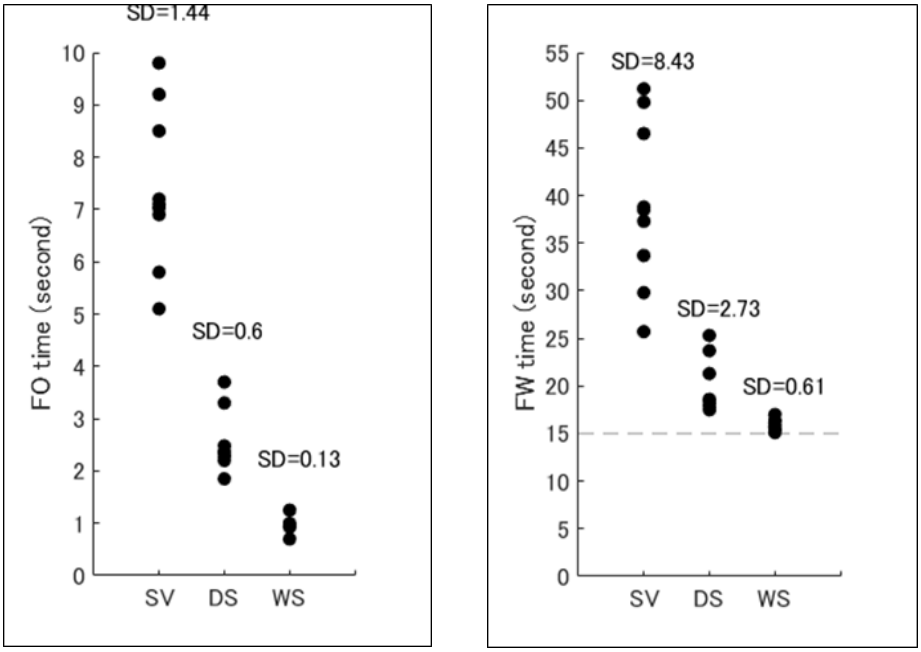
(a) FO　　(b) FW

図 4.3-1　時間的知覚（1-プロパノール）



(a) FO　　(b) FW

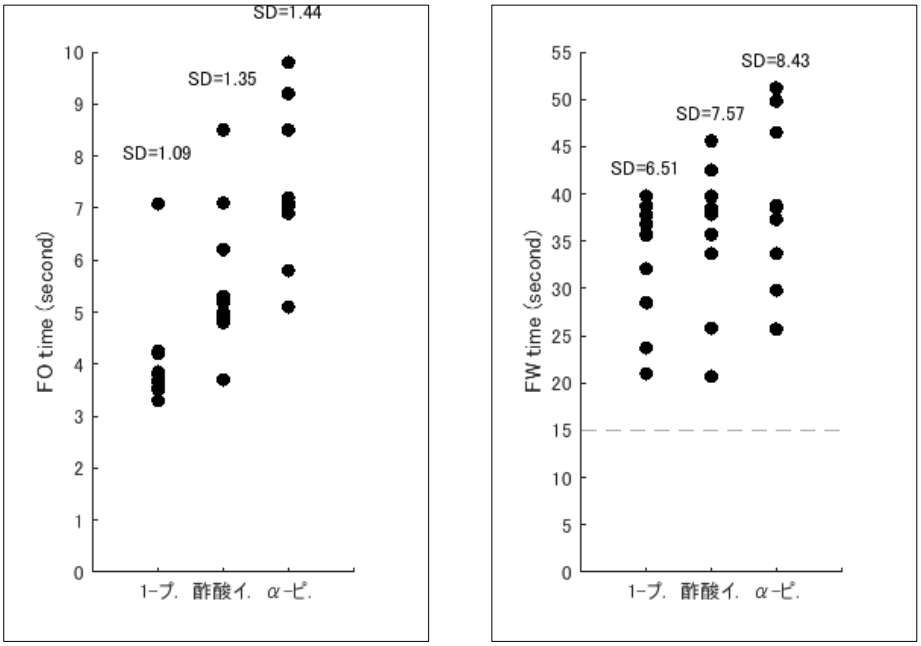
図 4.3-2　時間的知覚（酢酸イソアミル）



(a) FO　　(b) FW

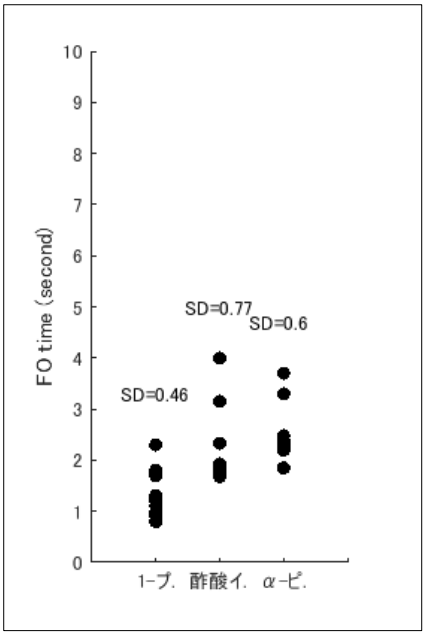
図 4.3-3　時間的知覚（α-ピネン）

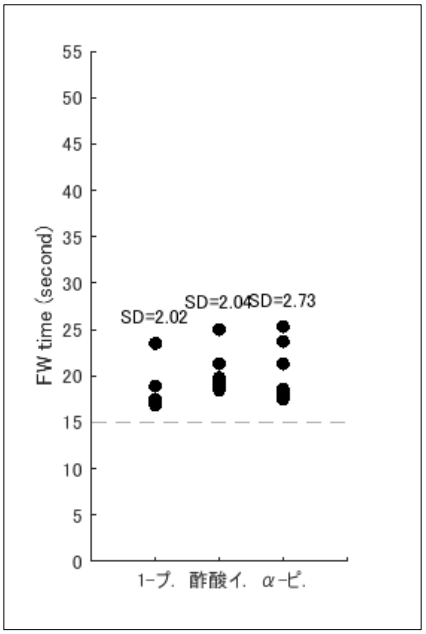
次に、図 4.3-1, 2, 3 に示した同一の実験結果について、3 基の嗅覚ディスプレイそれぞれにおける匂いサンプル間の比較を行う。図 4.3-4（a）と（b）は SV における 3 種類の匂いサンプルの比較を、図 4.3-5（a）と（b）は DS における匂いサンプルの比較を、そして図 4.3-6（a）と（b）は WS における匂いサンプルの比較をそれぞれ示す。なお、同図に示す”1-プ”は 1-プロパノール、”酢酸イ”は酢酸イソアミル、そして”α-ピ”は α-ピネンを表している。また、同様に各図 (b) では 15 秒の位置に破線を示した。



(a) FO　　(b) FW

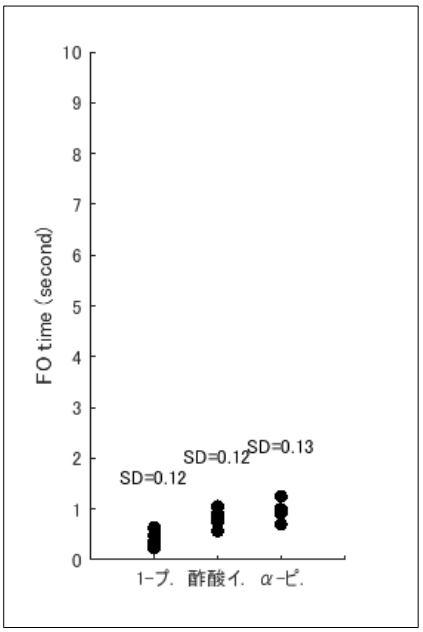
図 4.3-4　時間的知覚（SV）

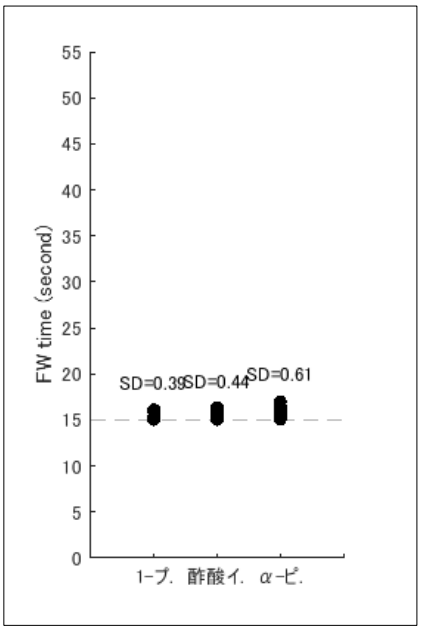




(a) FO　　(b) FW

図 4.3-5　時間的知覚（DS）





(a) FO　　(b) FW

図 4.3-6　時間的知覚（WS）

4.4 考察

まず､FO 時間についての比較では､すべての匂いサンプルにおいて WS が最も速い匂いの知覚を示し、次に DS、そして SV と続いた。特に酢酸イソアミルと α-ピネンにおける SV の分散が大きかった。

FW 時間については SV が DS や WS よりも知覚時間が遅れたことが明確となった。したがって、他の 2 つ（DS と WS）については、2 標本の t 検定を行った。1-プロパノール、酢酸イソアミル、および α-ピネンについて、p 値はそれぞれ 1.0×10^{-3}、4.4×10^{-6}、3.5×10^{-4} を示した（3 つの匂いサンプルは 5%の有意水準で棄却された）。従って、DS における分布と WS における分布は互いに接近はしていても重複はなかったと考えられる。

実験 3 では、WS は匂いの生成・供給位置がユーザーの鼻に非常に近いため、残臭の問題を低減させる可能性を示唆している。また、SV を評価した実験参加者の匂いの時間的知覚には大きな変動がみられたが、他の 2 基の弾性表面波霧化器型の嗅覚ディスプレイではその変動幅は比較的小さかった。SV が持つ問題の背景には、香気がテフロンチューブを通ってユーザーの鼻孔に到達するまでの待ち時間が、香気物質の種類（特に揮発性）に大きく依存していることがあげられる。テフロンチューブの使用はチューブ内の香気パルスが広くなり、知覚時間のレイテンシーの増大につながる可能性がある。

なお、パーソナルコンピュータ周辺機器の各メーカーが発表しているユーザーのクリック押下への応答時間は、比較的速いもので平均 0.16 秒である。実験参加者のマウスのクリックによる時間的な遅延の問題については、実験環境の構築における今後の検討課題の一つである。

4.5 まとめ

機構が異なる 3 種類の嗅覚ディスプレイの性能を評価するため、揮発性に差異のある 3 つの芳香化合物を用いた官能検査実験により、匂い知覚の時間的特性を明らかにした。弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイは、電磁弁高速開閉型嗅覚ディスプレイと比較して、匂いが知覚され始める速度と残留臭気（residual odor）の低減速度の双方に利点がみられた。さらに、弾性表面波霧化器型のウェアラブルタイプの嗅覚ディスプレイでは、こうした利点が顕著であった。香りの提示とともに映像や音を伴う VR コンテンツの制作においては、匂い提示の時間的な制御が正確に行える嗅覚ディスプレイが求められる。

第 5 章　匂い提示の再現による評価

先行研究においては、多様な匂いを少数の要素臭を調合して再現する方法を提案し[39]、精油（essential oil）の匂いを近似的に再現できることを示した。この方法では多量のマススペクトルデータを収集し、そのデータに基づいて要素臭を作成する。マススペクトルの類似性を測るコスト関数としては IS divergence が適切であることを官能検査結果より示した[40]。

けれども、この官能検査では要素臭を液体ベースで調合し、そのヘッドスペースの香気を嗅ぐ実験であった。気相中で瞬時に調合可能な嗅覚ディスプレイを用いて所望の匂いをユーザーに提示できれば有用である。

そこで、対象とする精油製品の香り（対象臭）と、要素臭を調合して得られる近似的香り（調合臭）にどれ位の差異が存在するのか、匂い提示の再現性を調べるため官能検査実験を行うこととした。なお、官能検査においては改良を施した 20 成分調合型嗅覚ディスプレイを使用した。

5.1　提案手法

5.1.1　用いる精油と要素臭

本研究で用いた精油と、要素臭による構成比率を表 5.1-1 に示す。なお、構成比率が 0.5μL 以上 1.5μL 未満のものについては四捨五入して 1.0μL とした。

表 5.1-1　本研究で用いた 7 種類の精油と要素臭の構成比

μL

Category		Citrus	Exotic	Spice	Resin	Floral	Woody	Herb
Essential oil		Lemon	Palmarosa	Carrot Seed	Elemi	Lavender	Cypress	Mentha Arvensis
Odor	1			2.2		1.0	1.0	
Component	2							
	3	6.3	1.0	10.7	12.9	10.7	24.1	
	4			1.0		7.3		
	5				32.8			
	6	4.1	48.2	9.9		8.0		
	7							
	8	34.3	3.0	1.0	21.7	1.0		
	9			1.0	2.6	1.0		
	10	1.6		6.8	4.5			
	11			46.5	7.3	1.0		
	12				5.2	1.0		
	13				1.0			
	14				2.5			
	15		4.1			30.4		
	16				5.8			
	17			7.7				59.3
	18					1.0		
	19			2.6				
	20			3.5	2.7			1.0

精油はアロマテラピーなどの分野で使われる植物由来の液体香料である。先行研究では 185 種類の精油を質量分析器で測定し、非負値行列因子分解法（NMF 法）を用いて 20 の要素臭を作成した[79]。この 185 種類の精油を質量分析器で測定し、非負値行列因子分解法（NMF 法）および非負拘束最小二乗法を

用いてそれらの精油を調合し、20 の要素臭を作成した[80]。なお、NMF 法で算出した基底ベクトルは数値的に得られたものなので、複数の既存の精油のマススペクトルから近似的に合成する必要があり、そのために非負拘束最小二乗法を用いた。

本研究ではこれらの要素臭を用いて、代表的な精油を選んで匂いの再現実験を行った。精油は主に 7 つのカテゴリーに分類される[81]ため、各カテゴリーから代表的なものを 1 種類ずつ再現実験に用いることとした。即ち、柑橘系（Citrus）からレモン、エキゾチック系（Exotic）からパルマローザ、スパイス系（Spice）からキャロットシード、樹脂系（Resin）からエレミ、フローラル系（Floral）からラベンダー、樹木系（Woody）からシプレー、そしてハーブ系（Herb）からメンタ・アルベンシス（通称：コーンミント）をそれぞれ選んだ。

表 5.1-1 において、例えばパルマローザの調合臭を作る場合、要素臭 3 は 1μL、要素臭 6 は 48.2μL、要素臭 8 は 3μL、要素臭 15 は 4.1μL を混ぜて再現することが可能となる。なお、表 5.1-1 に示した値は各精油における要素臭の体積の構成比率として相対的にとらえることができる。また、要素臭 2 および要素臭 7 は本研究で対象とした精油の調合においては使用されない（同表のグリーン部分）。

5.1.2 匂い提示の再現

官能検査実験において実験参加者に対象臭および調合臭を提示する際、20 成分調合型嗅覚ディスプレイを使用した。この嗅覚ディスプレイは第 2 章で説明した 8 成分調合型の弾性表面波霧化器型嗅覚ディスプレイを 20 成分に拡張し、さらに改良を加えたものである。最大 20 種類の匂いサンプルを任意の割合で調合して、パーソナルコンピュータからの制御に従い、時間的に正確にユーザーへ匂い提示が可能である。

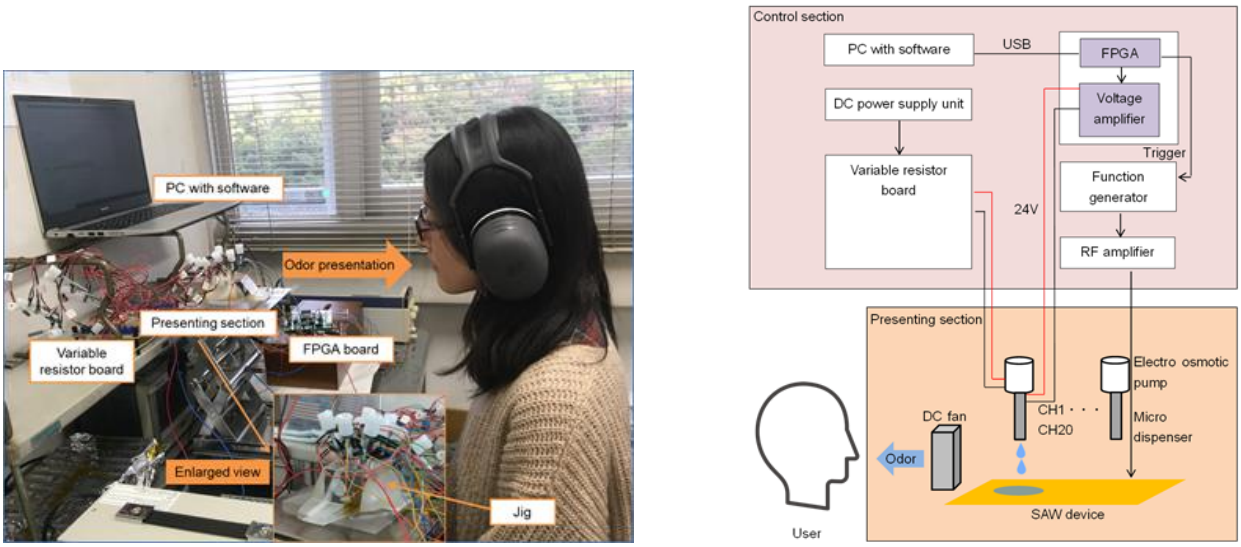
なお、表 5.1-1 に示した要素臭（Odor Component）番号 1 から 20 はこの嗅覚ディスプレイのチャンネル番号 1 から 20 にそのまま合致する。この実験では、Ch2 および Ch7 からは対象臭のみを提示した。

官能検査実験では、嗅覚ディスプレイにおいて要素臭を混ぜて作った調合臭と、予め用意した製品版精油の対象臭をそれぞれ実験参加者へ提示した。実験参加者は提示された調合臭と対象臭の識別が可能か否か、3 点識別法により実験を行った。匂い提示を 3 回行ったのち、何回目が違うと感じたかを答えてもらい、その回答の正否を集計した。

5.2 20 成分調合型嗅覚ディスプレイ

5.2.1 機器の概要

20 成分調合型嗅覚ディスプレイの機器の概要を図 5.2-1 に示す。



(a) (b)

(a) 写真 (b) ダイアグラム

図 5.2-1 20 成分調合型嗅覚ディスプレイ

この嗅覚ディスプレイは据置型で、システムの観点から匂い提示部（presenting section）と制御部（control section）に分けられる。この嗅覚ディスプレイシステムは、小型の液溜め内に貯蔵された液体香料を電気浸透流ポンプがチューブ内へ押し出し、さらにマイクロディスペンサーへ送り込まれた液体香料が SAW デバイス表面に射出されることで霧化現象が起き、匂いが生成される。さらに DC ファンによって生み出される微風により匂いはユーザーの鼻孔へと搬送される。

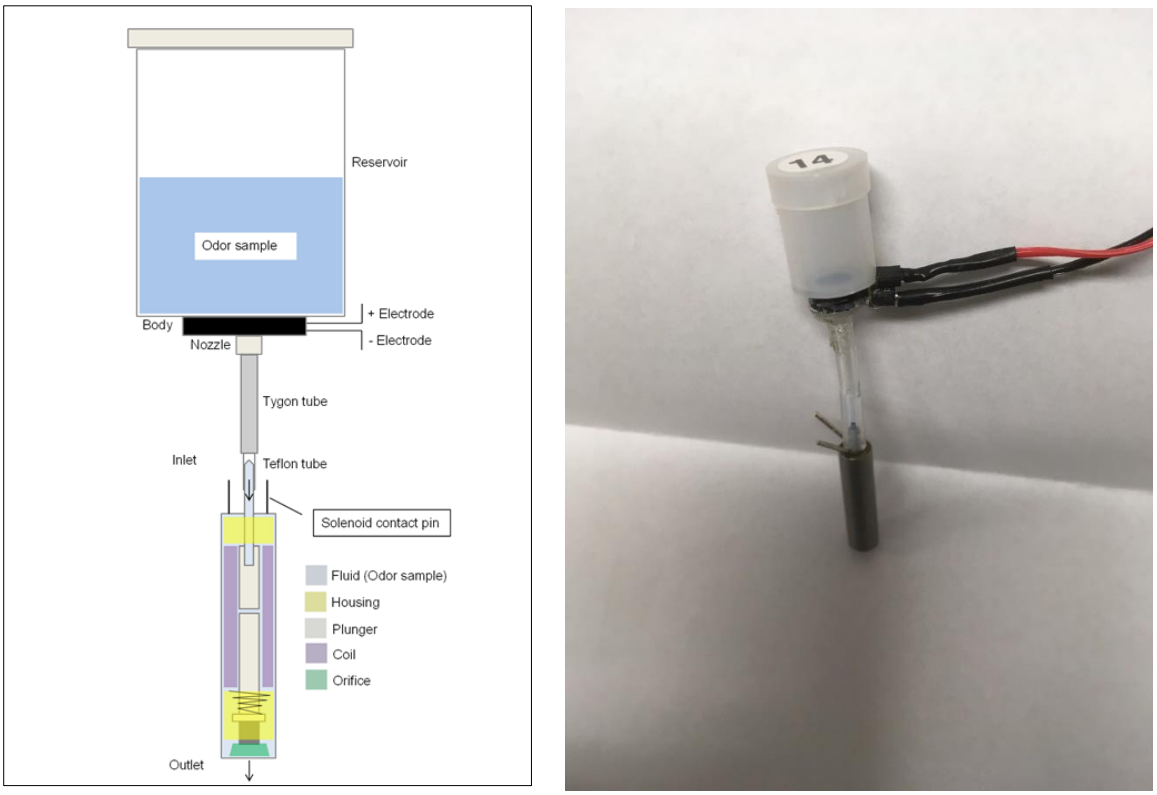
5.2.2 匂い提示部（presenting section）

匂い提示部は嗅覚ディスプレイシステムにおいて、実際に匂いをユーザーへ提示する役割を担う幾つかの機構から構成されている。

・SAW デバイスは圧電基板に櫛型電極（IDT: Interdigital transducer）を実装したデバイスであり、RF 電圧を印加すると SAW streaming 現象によって霧化が起きる[82]。実験で用いた SAW デバイスは圧電基板（128°回転 Y 板, X 伝搬 $LiNbO_3$）上に 21 対 IDT と 32 対リフレクタが実装されている。なお、本システムではファンクションジェネレーター（Tektronix: AFG3251）からの RF バースト波（9.68MHz）を RF パワーアンプで増幅して SAW デバイスに供給した。

・電気浸透流ポンプは電気浸透現象を利用した小型低速のポンプである。8 成分調合型嗅覚ディスプレイにおいてはエアポンプを用いたが、より確実に液体を導入できる電気浸透流ポンプに変更した。本

システムで使用する電気浸透流ポンプ（Nano Fusion Technologies: RP5A-RL-N311）は液体を溜める容量1.6mL の小型リザーバーと一体化しており、ポンプからの液体の流量は印加電圧に従う。



(a) (b)

(a) 模式図　(b) 写真（チャンネル 14 番）

図 5.2-2　射出ユニット（電気浸透流ポンプとマイクロディスペンサーを接合）

・マイクロディスペンサー（LEE Company: INKA2438510H）は液滴を射出する電磁弁である。本システムではタイゴンチューブおよびテフロンチューブによって電気浸透流ポンプと接合して液滴が SAW デバイス上に射出される（図 5.2-2）。各構成部品の接合部には衝撃と圧力に強い多用途接着剤：ボンド・ウルトラ多用途 S・U クリヤー（コニシ株式会社）を使用した。この電気浸透流ポンプと一体化したユニット（以下、射出ユニット）は各チャンネルごとに全部で 20 セットあり、SAW デバイス上の一点に集中して射出されるようにドーム型のポリカーボネート製治具にセットされる（図 5.2-3 参照）。

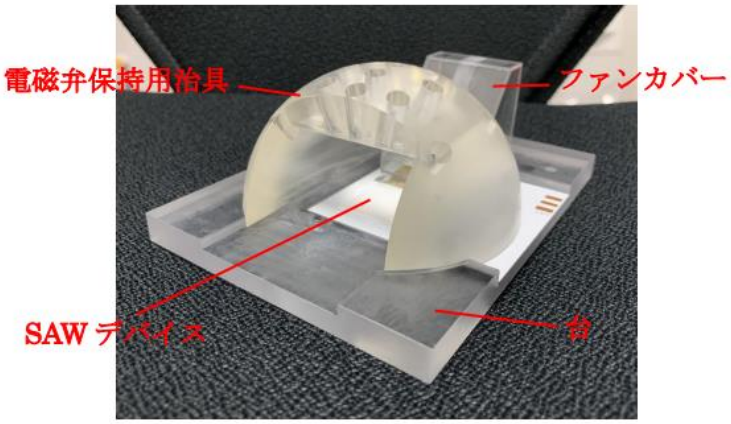


図 5.2-3　ポリカーボネート製治具

・DC ファンユニット（シコー技研: F3010EB-12UVC）は SAW デバイス上で霧化した匂いサンプル液をユーザーの鼻孔まで届ける役割がある。図 5.2-3 に示す位置とは反対に、このシステムでは SAW デバイスの前方、即ちユーザー側へと設置した。嗅覚ディスプレイの匂いの搬送は、その風圧をユーザーに感じさせない程度の微風（Breeze）が理想的とされている[83]。実験においては直流安定化電源ユニット（KIKUSUI: PMC18-5A）から駆動を行った。

なお、確実な匂い提示と適切な風圧の両立を計るため、事前に匂いの強度と風圧の度合いの評価を行った。実験参加者は 7 人（男性 3 人, 女性 4 人, 年齢は 20 才代から 50 才代）で全員、本学の学生および教職員である。直流安定化電源ユニットの出力電圧は 6V, 12V, 18V の 3 つを設定し、20 成分嗅覚ディスプレイからオレンジ精油（エタノールで 10 倍希釈）を実験参加者に 15 秒間提示し、匂い強度と風圧について各々、1（弱い）, 2（中程度）, 3（強い）の 3 段階で評価をしてもらった。

3 つの電圧における 7 人の評価平均値はそれぞれ、6V の匂い強度 = 1.36, 風圧 = 1.43、12V の匂い強度 = 2.29, 風圧 = 2.14、18V の匂い強度 = 2.64, 風圧 = 2.71 となった。これらの評価結果より、6V による駆動では匂いの感じ方が弱くなり、一方、18V では風圧が強すぎるため、官能検査においては 12V で DC ファンユニットを駆動させることとした。

5.2.3 制御部（control section）

制御部は提示部の各機構を適切に駆動させるためのシステムである。主要なデバイス等について記す。

・FPGA（Intel: Cyclone V, 5CEBA4U15C8N）はパーソナルコンピュータと UART（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter）を介して USB で接続されている。パーソナルコンピュータから送られたコマンドに従い、マイクロディスペンサーの高速電磁弁の開閉周波数を制御している。また、ファンクションジェネレーターから RF バースト波を出力するためのトリガー信号を送信している。

・RF パワーアンプ（Mini Circuits: ZHL-5W-1+）は同軸ケーブルを介して、ファンクションジェネレーターから送られた正弦波を増幅して SAW デバイスを励起する役割を担っている。長時間の使用による過熱に留意を要する。

・可変抵抗器基板には、20 基ある電気浸透流ポンプそれぞれに異なった電圧を印加するための可変抵抗器（Bourns. Inc.: 多回転半固定ボリューム縦型, 3296W, 10KΩ）20 個が実装されている。電源は直流安定化電源ユニット（KIKUSUI: PMX70-1A）を用いた。

・専用に開発したアプリケーションソフトウェアは、嗅覚ディスプレイから匂い提示を行う際、対象チャンネル番号、電気浸透流ポンプに印加する電圧、マイクロディスペンサーを駆動する周波数そして匂いの提示時間をオールインワンで GUI から制御するソフトウェアである（図 5.2-4 参照）。

具体的には、対象チャンネル番号、印加電圧、および駆動周波数は、Microsoft Excel で作成したデータを MATLAB のアプリケーションが CSV データとして読み込み、その情報を UART へと送って嗅覚ディスプレイの制御が行われる。例えば、図 5.2-4 においては COM3（USB ポート番号）に接続された FPGA 回路の UART との毎秒における通信状態を表示している。毎秒 1 行ずつ更新される 2 桁の整数 20 個の文字列は､嗅覚ディスプレイの 1-20 チャンネルのマイクロディスペンサーの駆動周波数を示す。

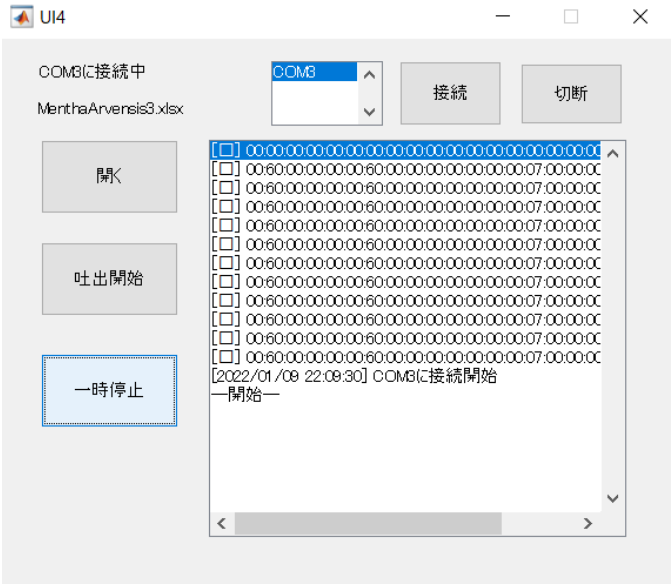


図 5.2-4　MATLAB で実装した制御ソフトウェアの GUI

5.2.4 吐出量の計測

7 種類の精油それぞれにおいて調合臭を作る際、表 5.1-1 に示す通り幾つかの要素臭を正確な体積比で調合する必要がある。また、調合臭と対象臭の総体積は等量を実験参加者に提示する必要がある。これらを実現するため、SAW デバイス上に射出される液滴の吐出量の制御を電気浸透流ポンプの印加電圧とマイクロディスペンサーの駆動周波数の組合せで調整することとした。

当初は駆動周波数のみによる制御を考えていたが、マイクロディスペンサーのプランジャー機構における背圧に射出性能が依存することが判明したため、本研究では、確実にマイクロディスペンサー内に液体香料を導入できるように電気浸透流ポンプを使うこととした。ポンプの吐出量は背圧と周波数の両方の関数となるため、この計測実験が必要となった。

計測実験は、電気浸透流ポンプに印加する電圧ごとにマイクロディスペンサーの駆動周波数を変えて、エタノールの吐出量（60 秒間）を電子微量天秤（As One ASP123F）により計った（図 5.2-5 参照）。この

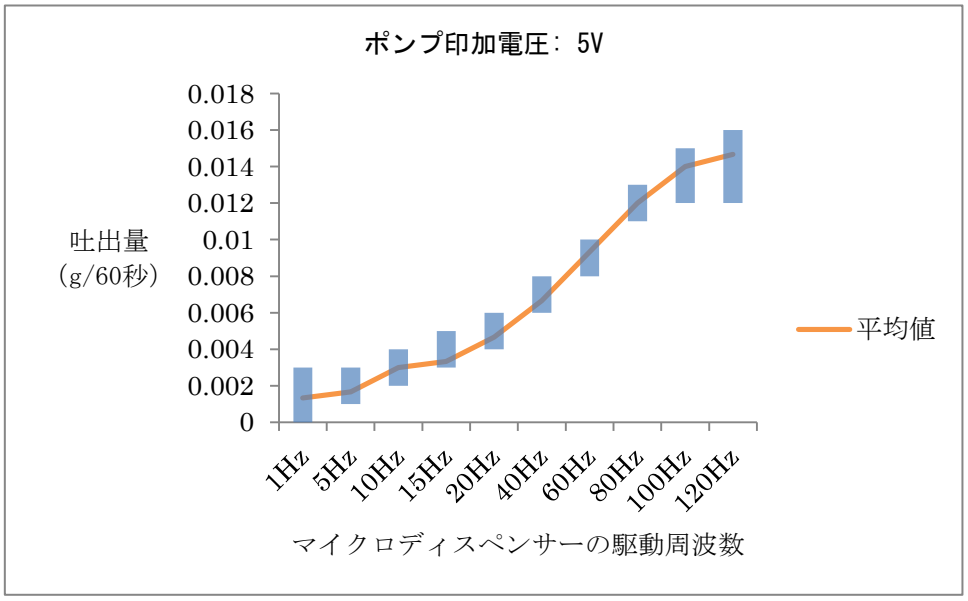
電子微量天秤の重さ検出精度は 0.001g 刻みである。空のバイアル瓶の重さと吐出後のバイアル瓶の重さとの差分は、電子微量天秤により自動的に計測・表示される。

図 5.2-5　電子微量天秤でエタノールの重さを計測（バイアル瓶の差分重量から計測）

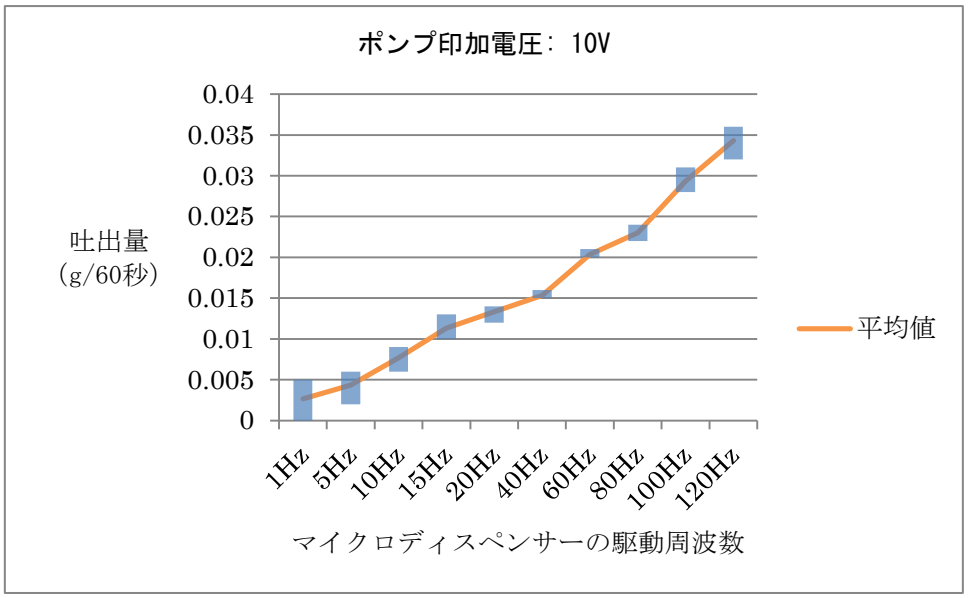
図 5.2-6 に電気浸透流ポンプの印加電圧: 5V から 65V まで 5V 刻みの 13 点において、それぞれマイクロディスペンサーの駆動周波数: 1Hz, 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz, 40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hz, 120Hz の 10 か所で計測したエタノールの吐出量（60 秒間）を 13 枚のグラフに示す。

グラフにオレンジ色で示した曲線は、駆動周波数 10 か所における 3 回計測の平均値を直線で補間したものである。また、同図における青色の縦バーは 3 回計測における最大値と最小値を示している。

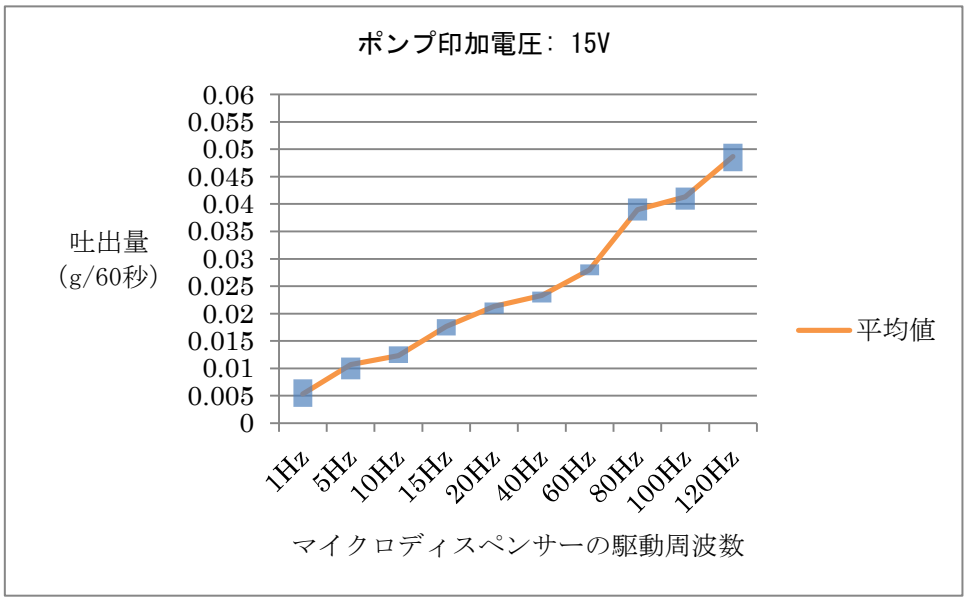
図(a)のみ縦軸の 1 目盛りは 0.002 g となっており、他図の縦軸の 1 目盛りは 0.005 g である。



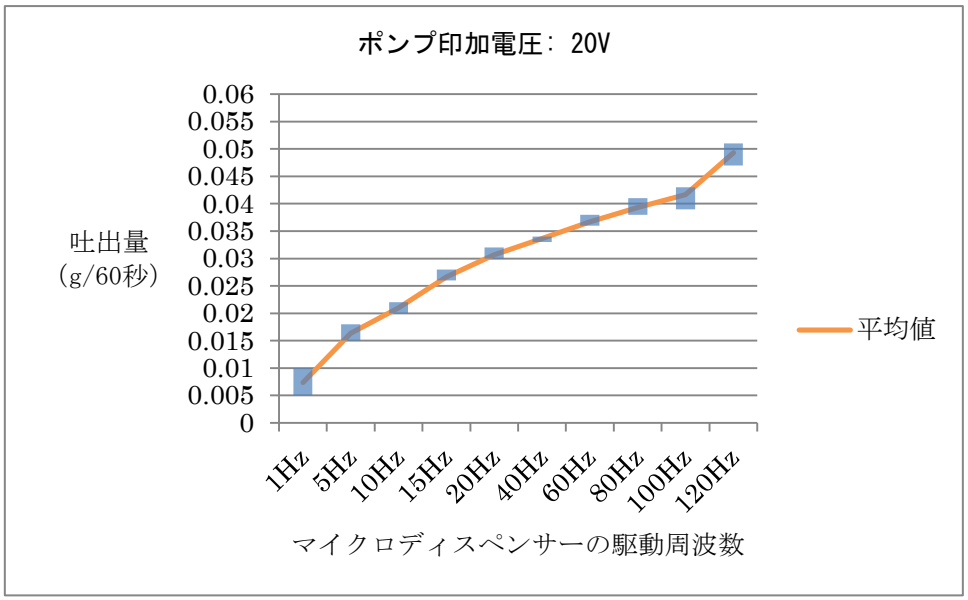
(a)


ポンプ印加電圧：10V
吐出量
(g/60秒)
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

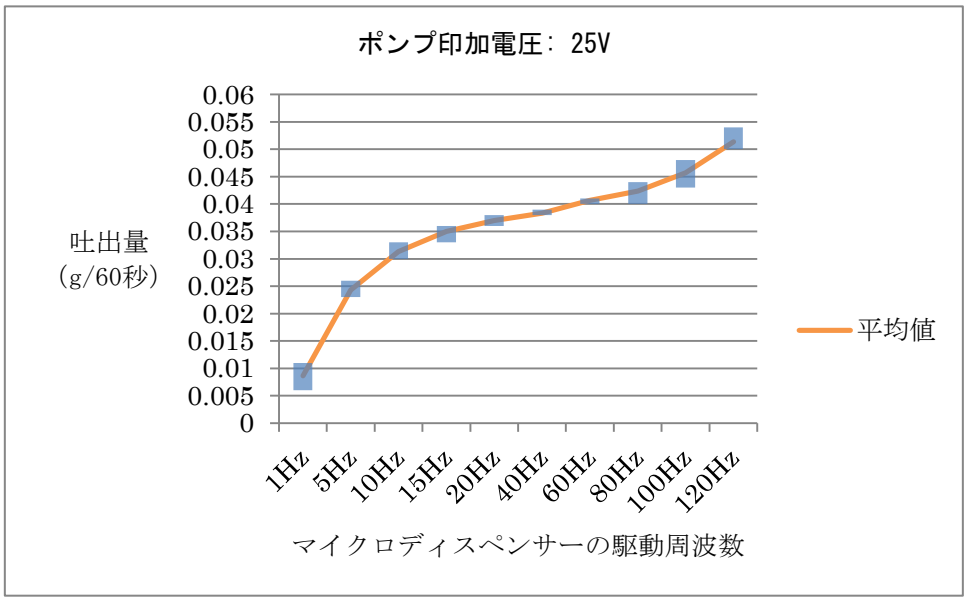
(b)


ポンプ印加電圧：15V
吐出量
(g/60秒)
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

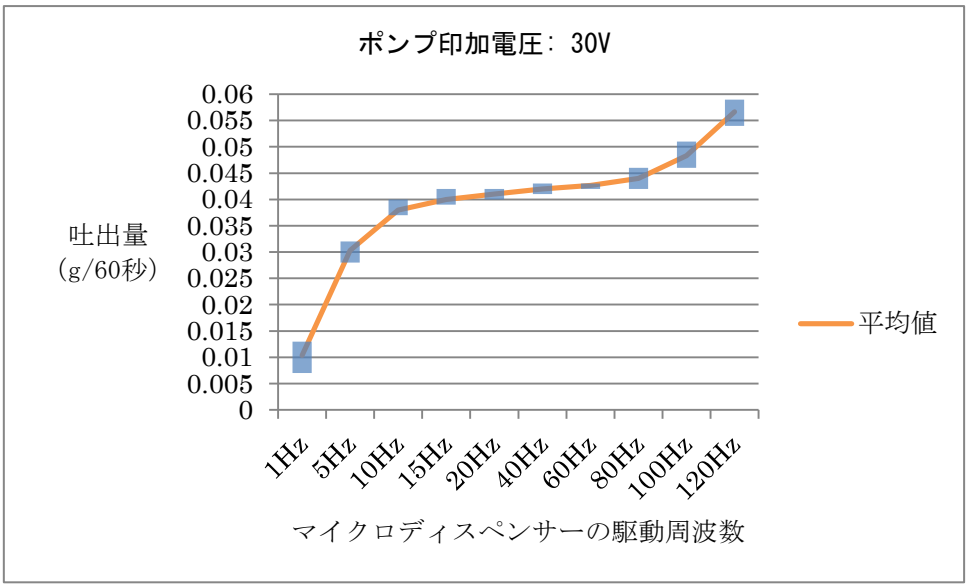
(c)


ポンプ印加電圧：20V
吐出量
(g/60秒)
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

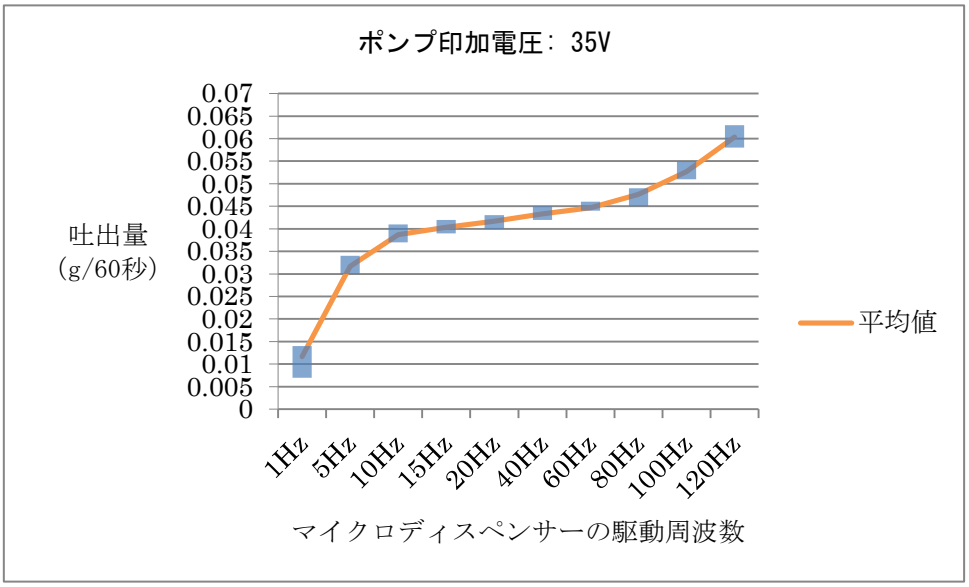
(d)


ポンプ印加電圧：25V
吐出量
(g/60秒)
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

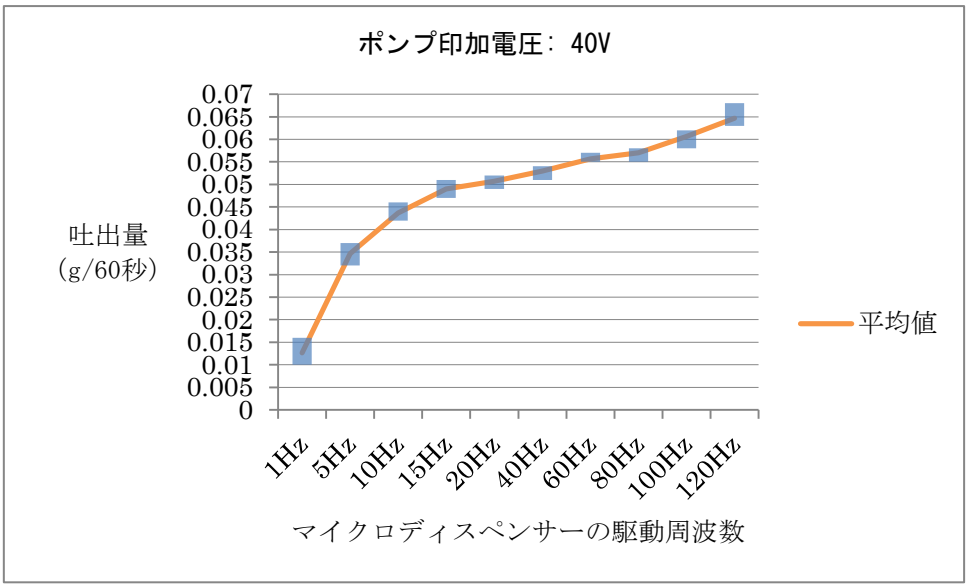
(e)


ポンプ印加電圧：30V
吐出量
(g/60秒)
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

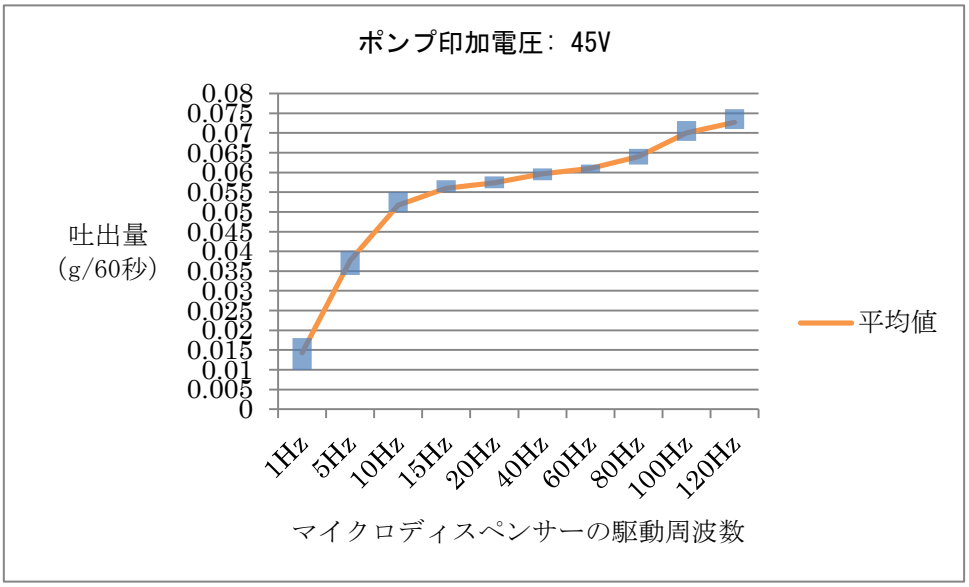
(f)


ポンプ印加電圧：35V
吐出量
(g/60秒)
0.07
0.065
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

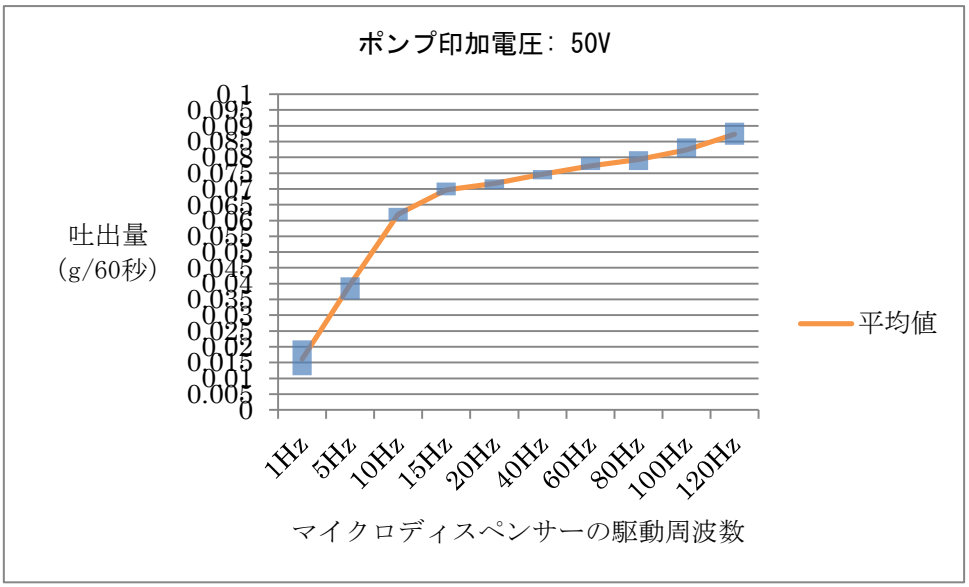
(g)


ポンプ印加電圧：40V
吐出量
(g/60秒)
0.07
0.065
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

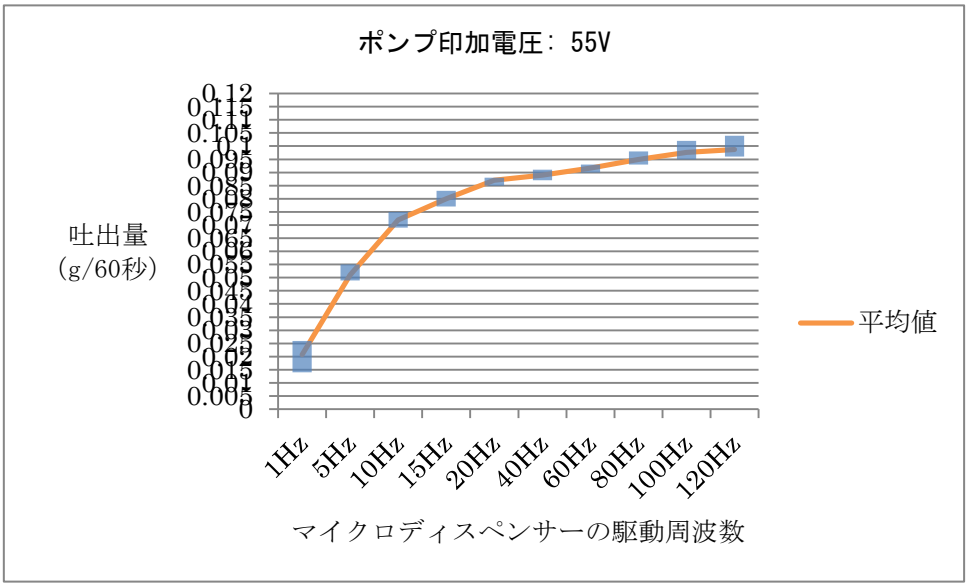
(h)


ポンプ印加電圧：45V
吐出量
(g/60秒)
0.08
0.075
0.07
0.065
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

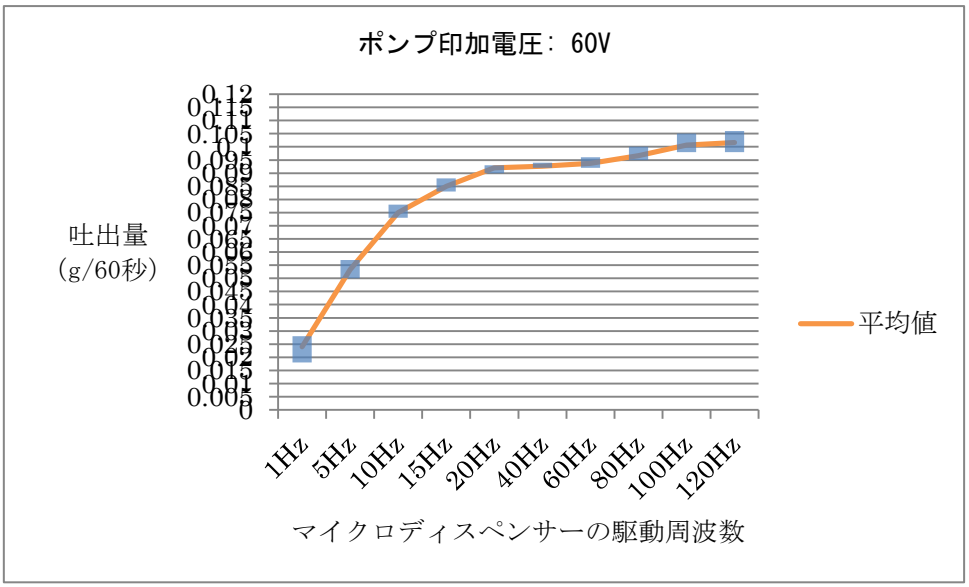
(i)


ポンプ印加電圧：50V
吐出量
(g/60秒)
0.1
0.095
0.09
0.085
0.08
0.075
0.07
0.065
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

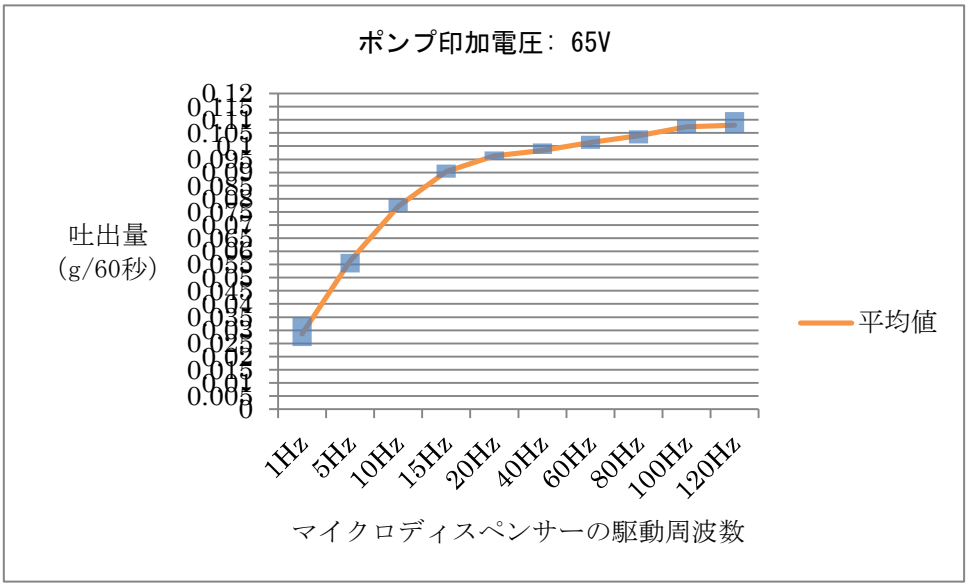
(j)


ポンプ印加電圧：55V
吐出量
(g/60秒)
0.12
0.115
0.11
0.105
0.1
0.095
0.09
0.085
0.08
0.075
0.07
0.065
0.06
0.055
0.05
0.045
0.04
0.035
0.03
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
1Hz
5Hz
10Hz
15Hz
20Hz
40Hz
60Hz
80Hz
100Hz
120Hz
マイクロディスペンサーの駆動周波数
平均値

(k)



(l)



(m)

各図における電気浸透流ポンプの印加電圧：

(a) 5V, (b) 10V, (c) 15V, (d) 20V, (e) 25V, (f) 30V, (g) 35V, (h) 40V, (i) 45V, (j) 50V, (k) 55V, (l) 60V, (m) 65V

図 5.2-6　駆動周波数を変えた際のマイクロディスペンサーのエタノールの吐出量（60 秒間）

図 5.2-6 より、ポンプへの印加電圧が異なっても共通してみられる傾向は概ね、次の 3 点である。

・駆動周波数 1Hz においては、吐出量に大きなバラツキがみられる。

・100Hz および 120Hz においては、吐出量にバラツキがみられる。

・吐出量が比較的安定しているのは、20Hz, 40Hz, 60Hz である。

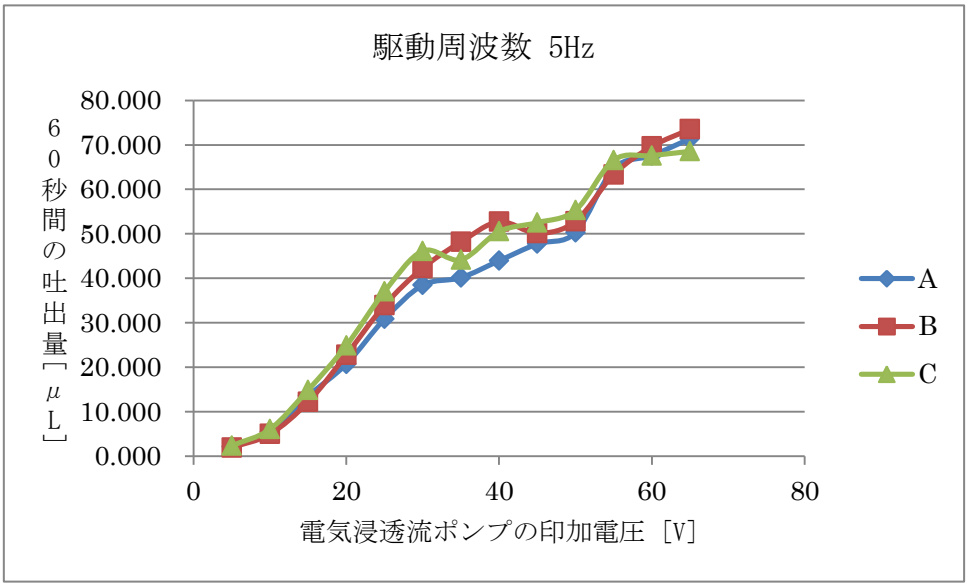
マイクロディスペンサーの駆動周波数が小さい場合、パルス周期が大きくなり、吐出間の時間が長くなるため、高速電磁弁が閉じた状態で圧力がかかり続けて、吐出時にオリフィスに溜まったエタノールが一気に放出されるため、動作が不安定になると考えられる。一方、駆動周波数が高い場合にはマイクロディスペンサーの固体差が影響していると推測される。

図 5.2-7 にマイクロディスペンサー3 基（A, B, C）のエタノールの吐出量（60 秒間）の比較を示す。3 基ともに同型（LEE Company: INKA2438510H）である。同様に、吐出量の計測結果はそれぞれ 3 回計測の平均値である。横軸の単位が電気浸透流ポンプの印加電圧を示していることに留意されたい。また、縦軸にはエタノールの係数 0.78 で除算して体積値（μL / minute）を算出して示した。なお、図(a)のみ縦軸の 1 目盛りは 10μL となっており、他図の縦軸の 1 目盛りは 20μL である。

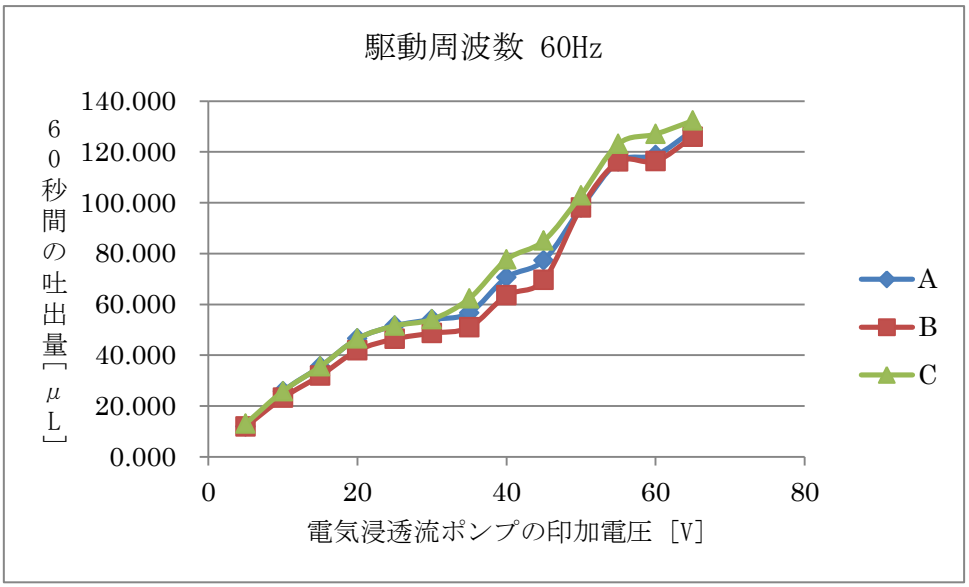
駆動周波数 5Hz においては、3 基ともに印加電圧 30V から 50V にかけて吐出量の増加が鈍化したが、マイクロディスペンサーA は他の 2 基に比べ印加電圧の上昇に伴う吐出量の増加が比較的安定している。

駆動周波数 60Hz においては、印加電圧 35V 以上において、3 基の吐出量に差が顕著となっている。

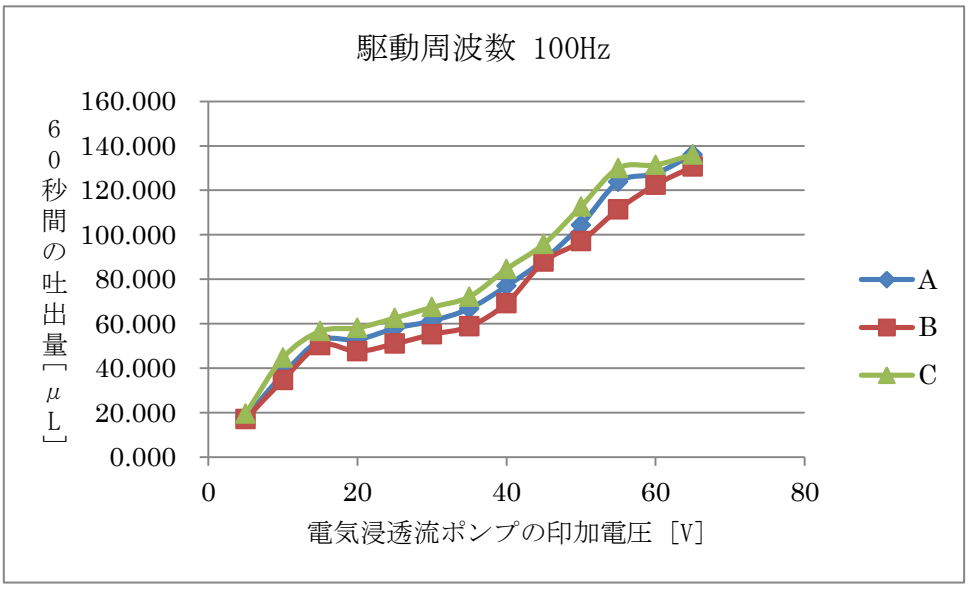
駆動周波数 100Hz においては、印加電圧 5V-65V の間で吐出量の差が明確であり、吐出量の多い順に C（グリーン）、A（ブルー）、B（レッド）と並んだ。この傾向は駆動周波数 120Hz においてもほぼ同様である。図 5.2-8 に示す吐出量のデータの計測では、A（ブルー）のマイクロディスペンサーを使用した。



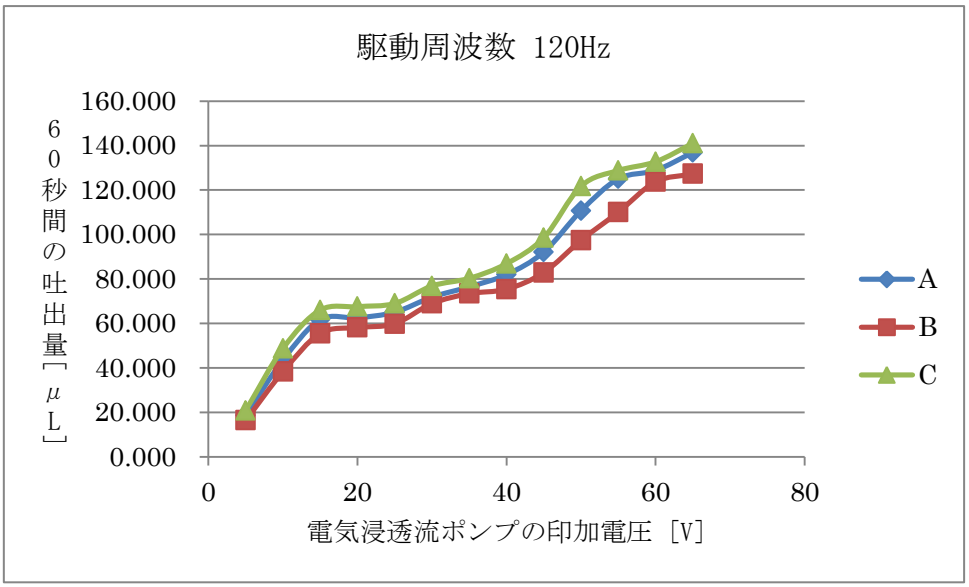
(a)


駆動周波数 60Hz
60秒間の吐出量［μL］
140.000
120.000
100.000
80.000
60.000
40.000
20.000
0.000
0
20
40
60
80
電気浸透流ポンプの印加電圧［V］
A
B
C

(b)


駆動周波数 100Hz
60秒間の吐出量［μL］
160.000
140.000
120.000
100.000
80.000
60.000
40.000
20.000
0.000
0
20
40
60
80
電気浸透流ポンプの印加電圧［V］
A
B
C

(c)



(d)

各図におけるマイクロディスペンサーの駆動周波数：

(a) 5Hz, (b) 60Hz, (c) 100Hz, (d) 120Hz

図 5.2-7　同型の 3 基のマイクロディスペンサーによる吐出量の比較

5.2.5 計測結果

吐出量の計測結果を図 5.2-8 に示す。同図は図 5.2-6 でそれぞれ示したエタノールの吐出量を集約したものである。計測点は全部で 130 である（電気浸透流ポンプの印加電圧: 5V から 65V まで 5V 刻みの 13 点 × マイクロディスペンサーの駆動周波数: 1Hz, 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz, 40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hz, 120Hz の 10 点）。計測点間は直線で補間している。

1Hz においては電圧の上昇に伴う吐出量は微増を示した。一方、120Hz においては 15V まで急峻な増加を示した。他の周波数においては 55V までは吐出量の増加がみられたが、さらに高い電圧では鈍化する傾向が概ね一致した。

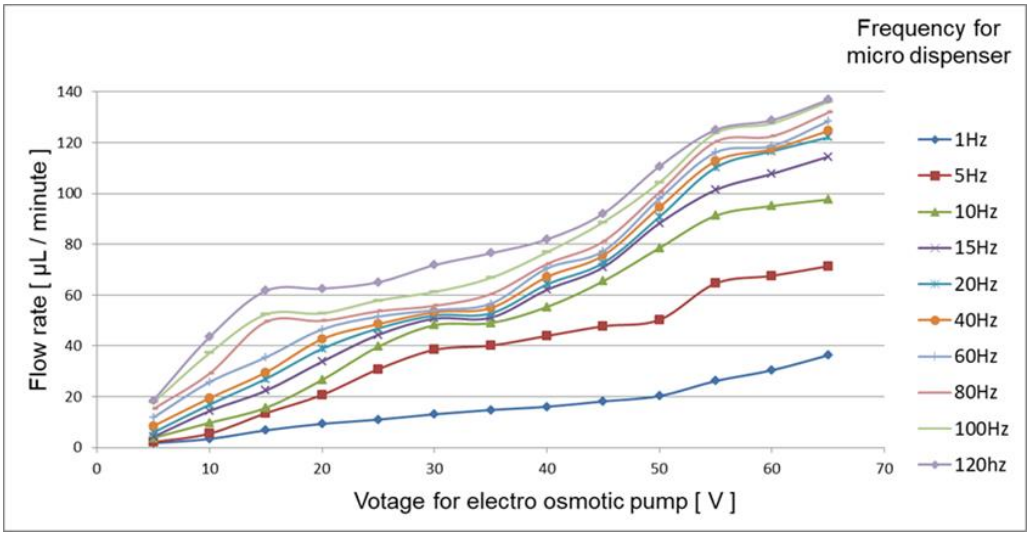


図 5.2-8　ポンプの印加電圧・ディスペンサーの駆動周波数の
組合せによる吐出量（60 秒間）

5.2.6 電圧･周波数の組合せ

表 5.1-1 における要素臭の最小値は 1.0μL、最大値は Mentha Arvensis の Odor Component17 番における 59.3μL である。即ち、射出ユニットからの吐出量の体積比が 1 : 59.3 をほぼ実現できれば 7 種類の精油の調合臭を作ることができる。そこで、130 の計測点で得られたデータのうち、5V/5Hz の組合せによる吐出量 2.112μL を最小値＝1 とみなし、他については計測結果に基づき表 5.1-1 に示した構成比率に従い、吐出量の値が最も近い電圧／周波数の組合せを選んで割り当てを行った。

なお、全ての印加電圧において、マイクロディスペンサーの駆動周波数 1Hz の組合せは避けた。その理由は既述した通り、マイクロディスペンサーのプランジャー機構における背圧の問題により、1Hz による高速電磁弁の開閉は吐出する液滴の粒径が大きくなり、表面張力によってオリフィスの先端部分に香料の液滴が付着して動作が安定しない現象が度々みられたことによる。

設定した電圧と周波数の組合せに従い、各チャンネルで実際に使う射出ユニットからの吐出量が表 5.1-1 に示す構成比率に合致しているか、官能検査実験を行う条件と全く同じように各チャンネルの射出ユニットの電圧／周波数を整え、60 秒間のエタノールの吐出量を微量天秤で計測した（3 回計測の平均値）。表 5.2-1 に、表 5.1-1 における要素臭の構成比率との割合を示す。

ピンク色でマークしたレモンの Ch10 およびキャロットシードの Ch20 において 1 割を超える誤差がみられた。この誤差を修正するため、図 5.2-6 および図 5.2-8 に示したデータを基に新たな電圧／周波数の組合せを探った。レモンの Ch10 は 5V/10Hz から 5V/8Hz へ、キャロットシードの Ch20 は 5V/40Hz から 5V/35Hz へ変更し、新たな組合せで同じく 60 秒間のエタノールの吐出量を計測した。その結果、それぞれ 3.126μL、7.182μL を示し、表 5.1-1 に示す構成比率との割合は 0.925、0.971 となった。

表 5.2-1　表 5.1-1 における要素臭の構成比との比較

Value of ratio

Essential oil		Lemon	Palmarosa	Carrot Seed	Elemi	Lavender	Cypress	Mentha Arvensis
Number of channel	1			0.909		0.920	0.920	
	2							
	3	1.016	1.100	0.991	0.992	0.991	0.996	
	4			0.920		0.986		
	5				1.018			
	6	0.976	0.996	0.990		0.900		
	7							
	8	1.003	0.933	1.100	1.014	1.100		
	9			0.920	1.077	0.920		
	10	1.125		1.059	1.022			
	11			0.998	0.986	1.100		
	12				1.077	0.920		
	13				0.920			
	14				1.040			
	15		0.976			1.033		
	16				0.966			
	17			0.961				0.998
	18					0.920		
	19			1.077				
	20			1.143	1.037			1.000

Reference value

Value beyond the range
(< 0.9, 1.1 <)

5.2.7 対象臭における組合せ

対象臭における吐出量は調合臭における吐出量と可能な限り一致させる必要がある。そこで、Ch2 および Ch7 の射出ユニットからの吐出合計量が調合臭の吐出合計量と一致するように電圧／周波数の組合せを割り当てた。また、両者の誤差について調べた。これらの結果を含めて、それぞれ表 5.2-2 と表 5.2-3 に示す。

表 5.2-2　20 の射出ユニットに適用する印加電圧と駆動周波数の組合せ

Voltage / Hertz

Essential oil		Lemon	Palmarosa	Carrot Seed	Elemi	Lavender	Cypress	Mentha Arvensis
Number of channel	1			5V/15Hz		5V/5Hz	5V/5Hz	
	2	25V/40Hz	35V/80Hz	50V/60Hz	50V/100Hz	35V/100Hz	20V/10Hz	40V/20Hz
	3	15V/5Hz	5V/5Hz	15V/15Hz	15V/20Hz	15V/15Hz	30V/15Hz	
	4			5V/5Hz		5V/80Hz		
	5				40V/60Hz			
	6	5V/40Hz	55V/15Hz	20V/5Hz		10V/20Hz		
	7	25V/40Hz	35V/80Hz	50V/60Hz	50V/100Hz	35V/100Hz	20V/10Hz	40V/20Hz
	8	45V/20Hz	5V/20Hz	5V/5Hz	20V/60Hz	5V/5Hz		
	9			5V/5Hz	10V/5Hz	5V/5Hz		
	10	5V/8Hz		10V/15Hz	10V/10Hz			
	11			50V/60Hz	5V/80Hz	5V/5Hz		
	12				5V/60Hz	5V/5Hz		
	13				5V/5Hz			
	14				10V/5Hz			
	15		5V/40Hz			40V/20Hz		
	16				5V/60Hz			
	17			15V/10Hz				55V/120Hz
	18					5V/5Hz		
	19			10V/5Hz				
	20			5V/35Hz	5V/20Hz			5V/5Hz

Related to target odor

Related to blended odor

表 5.2-3　対象臭の吐出量と調合臭の吐出量の比較（60 秒間）

Essential oil	Lemon	Palmarosa	Carrot Seed	Elemi	Lavender	Cypress	Mentha Arvensis
Total of the target odor [μL]	97.169	120.828	196.029	208.703	133.502	53.232	128.433
Total of the blended odor [μL]	97.761	118.082	195.480	211.914	131.559	52.640	127.165
Ratio	0.994	1.023	1.003	0.985	1.015	1.011	1.010

5.3 官能検査

5.3.1 予備実験

対象臭と調合臭の違いの識別について 20 成分嗅覚ディスプレイを使った実験を行う前に、官能検査の手法として 3 点識別法がふさわしいかを調べるため、液体レベルで調合した精油による官能検査の予備実験を行った。予備実験の結果を表 5.3-1 に示す。なお、表中の A は対象臭の提示、 B は調合臭の提示を示す。また、○は回答結果が正しいことを、×は回答結果が正しくないことを表す。

表 5.3-1　7 種類の精油の官能検査（予備実験）の結果

(a) Lemon

Presenting order									
1	A	A	A	A	A	A	B	B	B
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A
3	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Answer	1	2	1	2	3	3	1	1	3
Result	×	×	×	○	×	×	○	○	×

(b) Palmarosa

Presenting order									
1	A	A	A	A	A	A	B	B	B
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A
3	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Answer	1	2	3	2	2	1	2	3	3
Result	×	×	○	○	○	×	×	×	×

(c) Carrot seed

Presenting order									
1	A	A	A	A	A	A	B	B	B
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A
3	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Answer	3	2	2	2	3	3	2	2	2
Result	○	×	×	○	×	×	×	×	×

(d) Elemi

Presenting order									
1	A	A	A	A	A	A	B	B	B
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A
3	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Answer	1	2	1	1	3	3	3	2	1
Result	×	×	×	×	×	×	×	×	○

(e) Lavender

Presenting order									
1	A	A	A	A	A	A	B	B	B
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A
3	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Answer	1	2	2	1	1	2	2	1	3
Result	×	×	×	×	×	○	×	○	×

(f) Cypress

Presenting order									
1	A	A	A	A	A	A	B	B	B
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A
3	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Answer	1	1	3	3	3	1	1	1	3
Result	×	×	○	×	×	×	○	○	×

(g) Mentha arvensis

Presenting order									
1	A	A	A	A	A	A	B	B	B
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A
3	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Answer	1	1	3	2	2	3	2	3	3
Result	×	×	○	○	○	×	×	×	×

予備実験は 7 種類の精油につき、3 個の同じバイアル瓶（容量 5mL）を 1 組で用いた。各精油それぞれの構成比率に基づく体積の要素臭を調合した盲試料（調合臭）をバイアル瓶から直接 1 回提示し、製品版精油の盲試料（対象臭）をバイアル瓶から直接 2 回提示した。何回目が違うと感じたかを口頭で伝えてもらった。

調合臭および対象臭ともに嗅覚ディスプレイで使う場合と同じように、匂いサンプルの体積：エタノールの体積＝1:9 の比率とした（10 倍希釈）。各バイアル瓶に入れた量は 2mL である。

実験室の温度は常に 23℃に保ち、窓は遮光カーテンで覆い蛍光灯で適切な照明環境を整えた。また、エアコンと空気清浄機を常時稼働させて残香の軽減に配慮した。

実験参加者は 9 人（男性 3 人、女性 6 人、年齢は 20 才代から 50 才代）、全員本学の学生および教職員で、嗅覚に異常がない旨の自己申告を得た。1 種類の精油において実験参加者が重複することはない。

なお、予備実験および本実験はヘルシンキ宣言に従って本学の研究倫理審査委員会によって承認されている（承認番号: 2020287 号）。

5.3.2 本実験

本実験は 20 成分調合型嗅覚ディスプレイを使い、予備実験とは別の日時に行った。同じく 3 点識別法による。匂いサンプルの体積：エタノールの体積＝1:9 の比率である（10 倍希釈）。実験室における諸条件は予備実験と同じである。実験の手順を以下に記す。

①実験参加者は椅子に座り、鼻の位置を DC ファンから約 24cm に保つ。

②アンケート用紙上の説明を読み、実験への同意のサインをする。

③イヤーマフを装着し、目を閉じる。

④嗅覚ディスプレイから 12 秒間 ×3 回、匂い提示が行われる。その間、30 秒間 ×2 回の休憩を設ける。

⑤匂いの感じ方が異なったのは何回目か、そして感想を自由にアンケート用紙に記入する。

実験参加者は 40 人（男性 18 人、女性 22 人、年齢は 20 才代から 60 才代）で全員本学の学生および教職員で、嗅覚に異常がない旨の自己申告を得た。1 種類の精油において実験参加者が重複することはない。本実験の結果を表 5.3-2 に示す。なお、表中の A は対象臭の提示、 B は調合臭の提示を示す。また、○は回答結果が正しいことを、×は回答結果が正しくないことを表す。

表 5.3-2　7 種類の精油の官能検査の結果

(a) Lemon

Presenting order																		
1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Answer	1	3	2	2	1	2	1	2	3	1	1	2	1	1	1	1	2	1
Result	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○

(b) Palmarosa

Presenting order																		
1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Answer	1	3	3	3	2	1	2	3	3	3	1	1	2	1	3	2	3	2
Result	×	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×

(c) Carrot seed

Presenting order																		
1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Answer	1	2	1	3	3	3	1	3	1	3	3	1	2	2	2	3	3	2
Result	×	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

(d) Elemi

Presenting order																		
1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Answer	2	1	1	2	1	1	2	2	3	1	3	1	1	2	2	2	3	2
Result	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×

(e) Lavender

Presenting order																		
1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Answer	2	1	1	2	2	3	2	2	3	3	3	1	2	1	1	2	2	3
Result	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×

(f) Cypress

Presenting order																		
1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Answer	2	3	1	2	1	2	3	2	3	1	2	2	2	3	3	1	2	1
Result	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×	○	×	○

(g) Mentha arvensis

Presenting order																		
1	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B
2	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
3	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Answer	1	3	2	3	1	3	2	2	1	1	3	2	1	1	1	2	3	2
Result	×	○	×	○	×	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×

5.4 考察

3 点識別法において実験参加者が偶然正答する確率 p は 3 分の 1 である。なお、帰無仮説：盲試料 A, B は等しい、対立仮説：盲試料 A, B は等しくない、とする。

今回の実験において、実験参加者数 n のうち正答者数を X とすると統計量 z は

$$z = \frac{X-np}{\sqrt{np(1-p)}} \cdots\cdots (1)$$

(1) 式で示され、これは正規分布に従う[13][14]。

予備実験および本実験における正否の結果と z 値を表 5.4-1 に示す。

表 5.4-1　官能検査（予備実験・本実験）における有意の検定

Essential oil	Lemon	Palmarosa	Carrot Seed	Elemi	Lavender	Cypress	Mentha Arvensis
Preliminary sensory test							
Number of correct	3	3	2	1	2	3	3
Number of error	6	6	7	8	7	6	6
z value	0.0000	0.0000	-0.7071	-1.4142	-0.7071	0.0000	0.0000
Sensory test							
Number of correct	8	5	3	3	5	6	9
Number of error	10	13	15	15	13	12	9
z value	1.0000	-0.5000	-1.5000	-1.5000	-0.5000	0.0000	1.5000

有意水準 $\alpha = 0.05$ とした際、統計数値表において $Z_{0.025} = 1.96$ であり、$-1.96 < z < 1.96$ であれば帰無仮説は棄てない。両実験において z 値はこの範囲内であり、有意水準 5%において提示した盲試料 A と B の間に有意差はみられない。即ち、7 種類の精油すべてにおいて、調合臭と対象臭の有意差がないことを表している。

さらに、本実験において有意水準 α の値を変えた場合、盲試料 A と B の間に有意差がみられない正答数の範囲について調べた。その結果を表 5.4-2 に示す。

表 5.4-2　α 値の変化に伴う、盲試料 A と B の間に有意差がみられない正答数の範囲

α 値	z値の範囲	実験参加者数（回答合計数）	「調合臭と対象臭に有意差がみられない」正答数の範囲
0.01	$-2.57 < z < 2.57$	18	1～11
0.05	$-1.96 < z < 1.96$	18	3～9
0.1	$-1.64 < z < 1.64$	18	3～9
0.5	$-0.67 < z < 0.67$	18	5～7

同表では、α 値を小さくすることは「調合臭と対象臭に有意差がある」とする見方により厳しい条件を付与することを意味している。α の値が小さいほど正答数の範囲は広がり、逆に α の値が大きいほど正答

数の範囲は狭まることを示している。

ところで、予備実験で正答者が 3 人みられたレモンやメンタ・アルベンシス（コーンミント）は日常生活において比較的馴染みのある匂いである。一方、正答者が 1 人であったエレミはスパイシーな独特の匂いで、その印象が抽象的で難しく感じられたことが推察される。

本実験で正答者が比較的多くみられたのはレモンおよびメンタ・アルベンシスであり、少なかったのはキャロットシードやエレミなど香りの同定が難しいと思われる精油であった。3 点識別法の結果から、精油については調合臭と対象臭の識別が困難であることがわかった。

ただし、予備実験と本実験では匂い提示の方法に違いがあったことを考慮すべきである。予備実験においては、実験参加者はバイアル瓶のヘッドスペースの香気成分を嗅いで判断したため、高揮発性香気物質を多く含有する精油では匂いを強く感じた筈である。一方の本実験においては、匂いサンプルは SAW デバイス上でキャピラリー波の波頭から微小な液滴となって提示が行われたため、低揮発性香気物質を多く含んだ精油の匂いも確実に鼻孔へ届いたと考えられる。

さらに、官能検査実験において実験参加者が調合臭と対象臭を識別する際、何に着目したのかを調べることは有用である。回答の正否に関わらず、アンケートにおけるフリーコメントから共通して読み取れることは、匂いの特徴（甘い、渋い、刺激臭、爽快感、草に近い、オレンジっぽい、心地よい、不快等）を手がかりとした実験参加者と、匂いの強度（intensity）を手がかりとした実験参加者に分かれたことである。また、匂いの強度に言及した実験参加者で「風の違いを感じた」と述べる者もみられた。

対象臭に近似すべく要素臭の構成比率を整え、吐出量の合計を調整して臨んだ実験ではあるが、例えば DC ファンから生成される微風の向き等、多成分調合型嗅覚ディスプレイの機能面においてはさらに改善すべき点がみられる。

5.5 まとめ

精油の匂い提示の再現について、20 成分調合型嗅覚ディスプレイを使った官能検査実験を 3 点識別法により行った。用いた精油はレモン、パルマローザ、キャロットシード、エレミ、ラベンダー、シプレー、メンタ・アルベンシスである。これらは精油における 7 つのカテゴリーから各 1 つを選んだ。官能検査の結果を検証し、調合臭と対象臭の識別が困難であることがわかった。即ち、精油における匂い提示の再現性は概ね可能であると同時に、多成分調合型嗅覚ディスプレイを使った気相における匂いの調合が可能であったと結論付けられる。一方で、嗅覚ディスプレイの機能面においては今後、改善すべき点がみられる。

第 6 章　結論

本論文では、多成分調合型嗅覚ディスプレイに関して 2 つの異なる観点から行った評価実験の研究について記した。

最初の研究は、機構の異なる 3 種類の嗅覚ディスプレイにおける匂いの提示速度に着目して実施した官能検査実験である。これは、VR 空間内で香りが体感できるゲームコンテンツ”Cocktail Maze”のデモンストレーションを通じて、匂い提示の速さが視覚情報との同期に不可欠であることや、また残臭の問題が匂いの切替えの妨げとなることを痛切に感じた経緯に由来する。

この匂いの提示速度による評価実験では、匂いの生成方法に弾性表面波による霧化技術を使い、匂いの供給方法にエアポンプを用いた 4 成分ウェアラブル型の嗅覚ディスプレイにおいて、匂い提示の切替えと残臭の低減の双方に利点が期待できることがわかった。

第二の研究は、20 成分調合型嗅覚ディスプレイを使い、7 種類の精油の匂い提示の再現性を調べるために行った官能検査実験である。これは、より多彩な種類の匂いをその場でブレンディングしてユーザーに正確に提示可能な嗅覚ディスプレイの必要性を前提として行った実験である。その端緒は、匂い手がかりによる情景想起と臨場感の醸成を調べるために制作したコンテンツのリサーチデモンストレーションを通じて、限られた匂いサンプルの利用に実験環境の限界を感じたことに因る。

7 種類の精油の匂い提示において、実験参加者による対象臭・近似臭の 3 点識別法を行った結果、対象臭と 20 成分を調合した近似臭の間には有意差がみられないことがわかった。液体レベルでは有意差がないことは既に示されているので、本研究では 20 成分調合型嗅覚ディスプレイにより、充分な精度で近似臭を調合できることが示された。本研究で官能検査を行ったのは 7 種類の精油であるが、多様な精油を 20 の要素臭どうしの調合比率を変えることで提示が可能になると考えられる。

近年、嗅覚ディスプレイを利用した実験は非常に多くみられるが、VR 空間の構築の一翼を担うために使われる場合や、また、多感覚提示をユーザーに対して行った際の心理物理学の実験プロセスにおいて用いられる研究例が顕著である。嗅覚ディスプレイそのものの開発を目的とした研究がさらに盛んとなり、匂いの新しい気化技術や搬送技術が進展することが望まれる。

そしてまた、嗅覚ディスプレイの用途や利用されるシーンも、学術的な分野のみではなく家庭における一般ユーザー層へと拡がることが期待される。例えば、クックパッド（https://cookpad.com/）を参考にして新しい料理を作ろうとするユーザーに対して調理プロセスを香りで演出すれば、より臨場感を高めることが可能となり、ユーザーの意欲向上につながるであろう。こうした利用に適応させるためには、匂い提示の時間的・空間的正確さのさらなる向上と多彩な香りの再現精度が嗅覚ディスプレイの開発に求められる。

謝辞

本研究を進めるに当たり、中本高道先生には多岐にわたるご指導を賜りました。研究生、修士課程、博士課程を通じてお世話になりました。心より、御礼申し上げます。

三宅美博先生、山村雅幸先生、小野功先生、長谷川晶一先生には研究と講義を通して貴重なご指導を賜りました。心より、御礼申し上げます。

実験等において貴重なアドバイスを頂いた横式康史先生に心より、御礼申し上げます。

中本研究室に所属の皆様、そして未来産業技術研究所のスタッフの皆様に心より、御礼申し上げます。

参照文献

[1] 高木貞敬, “嗅覚について”, 耳鼻と臨床, 1979

[2] 岩崎好陽, “優れたにおい環境を維持するには”, かおり風景 100 選, フレグランスジャーナル社, , 2002

[3] 山本晃輔, “においの記憶”, 斉藤幸子・小早川達編, 味嗅覚の科学, 朝倉書店, 2018

[4] L. Buck and R. Axel, “A novel multigene family may encode odorant receptors : A molecular basis for odor recognition”, Cell, Vol. 65, No. 1, pp.175-187, 1991

[5] 中本高道, “ヒューマン嗅覚インタフェースの動向”, 精密工学会誌 Vol. 82 No.1, 2016

[6] 杉山東子・綾部早穂, “嗅覚”, 感覚知覚心理学, サイエンス社, 2014

[7] 東原和成, “におい物質の受容”, 斉藤幸子・小早川達編, 味嗅覚の科学, 朝倉書店, 2018

[8] 中野詩織・斉藤幸子, “においの知覚”, 斉藤幸子・小早川達編, 味嗅覚の科学, 朝倉書店, 2018

[9] 斉藤幸子, “匂いの感覚・知覚”, 綾部早穂・斉藤幸子編著, “においの心理学”, フレグランスジャーナル社, 2008

[10] 竹内晴彦ら, “花の香りの官能評価用語の選定”, 生命工学工業技術研究所研究報告 3 (2), 1995

[11] 樋口貴広ら, “香りを記述する感覚形容語の心理学的検討”, 感情心理学研究 8 巻, 2002

[12] A. Dravnieks, “Atlas of odor character profiles”, Philadelphia: ASTM, 1985

[13] 佐藤信, “官能検査入門”, 日科技連, 1978

[14] 佐藤信, “統計的官能検査法”, 日科技連, 1985

[15] 國枝里美, “製品開発の官能評価、分析型パネルと嗜好型パネルの違いについて”, 化学と生物 Vol. 50, No. 10, 2012

[16] 國枝里美, “官能評価技術の現状と今後の展望について”, におい・かおり環境学会誌, 45 巻 5 号, 2014

[17] 斉藤幸子, “嗅覚のテスト方法”, 綾部早穂・斉藤幸子編著, “においの心理学”, フレグランスジャーナル社, 2008

[18] 伊関方晶・中本高道, “弾性表面波デバイス及びマイクロポンプを使った嗅覚ディスプレイ”, アロマリサーチ No 64. フレグランスジャーナル社, 2015

[19] 柳田康幸, “嗅覚ディスプレイの研究開発動向”, IEEJ Trans. SM, Vol. 128, 2008

[20] 吉武利文, 香りのデザイン研究所, https://www.sakonnotachibana.com/

[21] プロモツール株式会社, https://www.promotool.jp/case_study/043/

[22] S. Niedenthal et al., “A Method for Computerized Olfactory Assessment and Training Outside of Laboratory or Clinical Settings”, i-PERCEPTION, 2021

[23] aroma join, https://aromajoin.com/products/aroma-shooter

[24] 斉藤幸子, “ニオイと官能”, 日本醸造協会誌, 1989

[25] C. M. PHILPOTT et al., “A brief history of olfaction and olfactometry”, The Journal of Laryngology & Otology, 2008

[26] B. N. Johnson et al., “Methods for building an olfactometer with known concentration outcomes”, Journal of Neuroscience Methods, 2007

[27] D. G. Laing et al., “Evidence for the temporal processing of odor mixtures in humans”, BRAIN RESEARCH, 1994

[28] 高木貞敬, “Standardized olfactometries in Japan - a review over ten years”, Chemical Sensors Vol.14, 1989
[29] 岩下剛, 羽田陽, “室内空気汚染の知覚評価のためのオルファクトメーターシステムの開発”, 日本建築学会技術報告集, 2010
[30] C. Spence, “Scent and the Cinema”, i-PERCEPTION, 2020
[31] M. Angel et al., “Design, Evaluation and Impact of Educational Olfactory Interfaces”, Proceedings of the Nineteenth Americas Conference on Information Systems, 2013
[32] Bernadette Emsenhuber, “Scent Marketing Subliminal Advertising Message”, INFORMATIK 2009, 2009
[33] Alper Efe, “Using Olfactory Displays as a Nontraditional Interface in Human Computer Interaction”, Journal of Learning and Teaching in Digital Age, 2017
[34] Y. PAN et al., “A REVIEW OF OLFACTORY DISPLAY DEVICES FROM A HABIT-FORMING PERSPECTIVE”, Journal of the Science of Design, 2021
[35] B.S. Spencer, “Incorporating the Sense of Smell Into Patient and Haptic Surgical Simulators”, IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION TECHNOLOGY IN BIOMEDICINE, VOL. 10, 2006
[36] 藤田修二ら, “30 種類の香料の即時切替およびブレンド提示可能な微小バルブ制御 VR 用嗅覚ディスプレイ”, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム, 2019
[37] Takamichi Nakamoto ed., “Human Olfactory Display and Interfaces”, IGI GLOBAL, 2012
[38] 中本高道, “ロバスト匂いセンシングシステム”, 計測と制御 第 55 巻 第 3 号, 2016
[39] Takamichi Nakamoto, Masashi Ohno and Yasunori Nihei, “Odor Approximation Using Mass Spectrometry”, IEEE SENSOR JOURNAL, vol. 12, No. 11, pp.3225-3231, 2012
[40] Dani Prasetyawan and Takamichi Nakamoto, “Sensory Evaluation of Odor Approximation Using NMF with Kullback-Leibler Divergence and Itakura-Saito Divergence in Mass Spectrum Space”, Journal of The Electrochemical Society, 167 167520, 2020
[41] Takao Yamanaka, Kenjiro Yoshikawa and Takamichi Nakamoto, “Improvement of odor-recorder capability for recording dynamical change in odor”, Sensors and Actuators B 99, 2004
[42] Tengteng Wen, Dehan Luo, Yongjie Ji and Pingzhong Zhong, “Development of a Piezoelectric-Based Odor Reproduction System”, electronics 8080870, 2019
[43] 高橋秀, 松倉悠および石田寛, “E-Nose を用いた匂い再現システムに関する基礎的研究”, 日本機械学会 S12102, 2020
[44] 長谷川香料株式会社著, “香料の科学”, 講談社, 2013
[45] Oussama Metatla, Clare Cullen, Emanuela Maggioni and Marianna Obrist, “Like Popcorn: Crossmodal Correspondences Between Scents, 3D Shapes and Emotions in Children”, ACM CHI Paper 459, 2019
[46] Monica Bordegoni1, Marina Carulli1 and Stefano Bader, “WEARABLE OLFACTORY DISPLAY FOR MUSEUM EXHIBITIONS”, IEEE ISOEN 2019, 2019
[47] Saad Hameed Abid, Zhiyong Li, Renfa Li and Jumana Waleed, “Heat based Odors Delivery Apparatus for Interactive Game Playing”, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering Vol.10 No.5, 2015
[48] Yang Wang, Judith Amores and Pattie Maes, “On-Face Olfactory Interfaces”, ACM CHI Paper 608, 2020
[49] 篠田裕之ら, “超音波走査による匂いディスプレイ”, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2018

[50] Tomoya Yamada, Satoshi Yokoyama, Tomohiro Tanikawa, Koichi Hirota and Michitaka Hirose, “Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment”, IEEE Virtual Reality 1087-8270, 2006
[51] Yasuyuki Yanagida and Haruo Noma, “Clustered Digital Air Cannon: A Novel Device for Projection-based Olfactory Display”, PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS VOL. 27, 2020
[52] 重野寛, 岡田謙一, 松下温, “香りあふれる仮想空間を目指して”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 第 7 巻 3 号, 2002
[53] Shingo Kato and Takamichi Nakamoto, “Wearable Olfactory Display with Less Residual Odor”, IEEE ISOEN, 2019
[54] https://panasonic.jp/nanoe/
[55] https://jp.sharp/plasmacluster/about/
[56] J. F. Morie, K. Iyer, K. Valanejad, R. Sadek, D. Miraglia, D. Milam, J. Williams, D-P. Luigi and J. Leshin, “Sensory Design for Virtual Environments”, ACM SIGGRAPH 2003, 2003
[57] 佐藤淳太, 門脇亜美, 大津香織, 坂内祐一, 岡田謙一, “順応効果を軽減できるパルス射出による香り提示手法”, 情報処理学会論文誌 Vol. 49 No. 8, 2008
[58] Hiroki Ishizuka, Kenta Kashiwagi, Kyohei Terao, Hidekuni Takao and Fusao Shimokawa, “Development of a Heat-Driven-Type MEMS Olfactory Display”, EUROSENSORS 2018, 2018
[59] Haruka Matsukura, Tatsuhiro Yoneda and Hiroshi Ishida, “Smelling Screen: Development and Evaluation of an Olfactory Display System for Presenting a Virtual Odor Source”, IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, VOL. 19 NO. 4, 2013
[60] Hui Li, Yunlong Sun and Dehan Luo, “A METHOD OF OLFACTORY DISPLAY: ODOR CHARACTERIZATION AND REPRODUCTION”, ISOCS IEEE ISOEN 2017, 2017
[61] Takamichi Nakamoto and Hai Pham Dinh Minh, “Improvement of olfactory display using solenoid valves”, IEEE Virtual Reality, pp. 179-186, 2007
[62] Takamichi Nakamoto, Shiori Ito, Shingo Kato and Gui Ping Qi, “Multicomponent Olfactory Display Using Solenoid Valves and SAW Atomizer and its Blending-Capability Evaluation”, IEEE SENSOR JOURNAL, Vol. 18 No. 13, 2018
[63] 伊藤史織, “液滴射出用高速電磁弁を用いた多成分調合型嗅覚ディスプレイの開発と評価”, 東京工業大学学士論文, 2018
[64] Shingo Kato and Takamichi Nakamoto, “Wearable Olfactory Display with Less Residual Odor”, IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose, 2019
[65] 加藤真悟, “自己吸引方式による低残臭ウェアラブル嗅覚ディスプレイの開発と評価”, 東京工業大学修士論文, 2019
[66] Kazuki Hashimoto and Takamichi Nakamoto, “Tiny Olfactory Display Using Surface Acoustic Wave Device and Micropumps for Wearable Applications”, IEEE SENSOR JOURNAL, 2016
[67] 中川敦子, “発達的視点から見た感覚知覚心理学”, 綾部早穂・熊田孝恒編, 感覚知覚心理学, サイエンス社, 2014
[68] 茅原拓朗, “モダリティ間相互作用と認知特性”, 日本バーチャルリアリティ学会編, バーチャルリア

リティ学, 工業調査会, 2010
[69] 日本バーチャルリアリティ学会編, バーチャルリアリティ学, 工業調査会, 2010
[70] 安藤広志, “高臨場感映像の心理・脳活動・行動計測に基づく定量的解析・評価”, 電子情報通信学会誌, 101 (8), pp. 825-831, 2018
[71] Kazuki Hashimoto and Takamichi Nakamoto, “Olfactory display using surface acoustic wave device and micropumps for wearable applications”, IEEE Virtual Reality 2016, 2016
[72] Shiori Itou, Masaaki Iseki, Shingo Kato and Takamichi Nakamoto, “Olfactory and Visual Presentation Using Olfactory Display Using SAW Atomizer and Solenoid Valves”, IUI '18 Companion: Proceedings of the 23rd International Conference on Intelligent User Interfaces Companion, Article No.: 23, 2018
[73] 伊関方晶・中本高道, “匂い手がかりによる臨場感の研究”, 日本味と匂学会第 52 回大会, 2018
[74] A. Livermore and David G. Laing, “The influence of chemical complexity on the perception of multicomponent odor mixtures”, *Perception and Psychophysics, 60, 1998*
[75] http://japanfragrance.org/pdf/fragrance-abc.pdf
[76] https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_JP_CB9854149.htm
[77] https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/pv2142.pdf
[78] https://orea.or.jp/gijutsu/kyuukakusokuteihou/odor-threshold-values/
[79] DANI PRASETYAWAN AND TAKAMICHI NAKAMOTO, “Suppression of Interference of Fixative With Odorant Samples in Mass Spectrum Using ICA”, IEEE Access, 2021
[80] Dani Prasetyawan and Takamichi Nakamoto, “Comparison of Autoencoder with NMF for Odor Component Exploration Using Mass Spectrometry”, 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, PHS-18-016, CHS-18-002, MSS-18-002, BMS-18-018, 2018
[81] Wanda Sellar 著, 高山　林太郎訳 :「アロマテラピーのための 84 の精油」, フレグランスジャーナル社, 1992
[82] M. Kurosawa, T. Watanabe, A. Futami and T. Higuchi, “Surface acoustic wave atomizer”, Sensors and Actuators, vol. 50, pp. 69-74, 1995
[83] Fumitaka Nakaizumi, Yasuyuki Yanagida, Haruo Noma and Kenichi Hosaka,” SpotScents: A Novel Method of Natural Scent Delivery Using Multiple Scent Projectors”, IEEE Virtual Reality, pp.213-218, 2006

発表文献

○　査読付き論文

・Masaaki Iseki and Takamichi Nakamoto, “Evaluation of Temporal Characteristics of Olfactory Displays with Different Structures”, IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E104-A No.4, pp.744-750, 2021

・伊関方晶, Dani Prasetyawan, 横式康史および中本高道, “多成分調合型嗅覚ディスプレイを用いた匂いの再現の研究”, 電気学会, 論文誌 E, 2022

○　国際会議

・Shiori Itou, Masaaki Iseki, Shingo Kato and Takamichi Nakamoto, “Olfactory and Visual Presentation Using Olfactory Display Using SAW Atomizer and Solenoid Valves”, IUI '18 Companion: Proceedings of the 23rd International Conference on Intelligent User Interfaces Companion, Article No.: 23, 2018

・Shingo Kato, Masaaki Iseki and Takamichi Nakamoto,“Demonstration of Olfactory Display Based on Sniffing Action”, IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp.761-762, 2018

○　ポスター発表および **Proceeding**

・伊関方晶・中本高道、“匂い手がかりによる臨場感の研究”、日本味と匂学会第 52 回大会、2018

○　書籍

・伊関方晶・中本高道、“嗅覚ディスプレイの開発”、都甲潔・柏柳誠編、おいしさの科学とビジネス展開の最前線、第 18 章、シーエムシー出版、2017

・伊関方晶・中本高道、“弾性表面波デバイス及びマイクロポンプを使った嗅覚ディスプレイ”、アロマリサーチ No 64. フレグランスジャーナル社、2015