This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2025 年 9 月）

経皮電気刺激による味覚と嗅覚の独立制御可能性の検証

大村悠斗 [1)]，原彰良 [1)2)]，前田 叡一 [3)]，古川正紘 [1)2)]，前田太郎 [1)2)]

1) 大阪大学大学院情報科学研究科（〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5，https://www.ist.osaka-u.ac.jp/japanese/）

2) 脳情報通信融合研究センター（〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4，https://cinet.jp/japanese/）

3) KDDI アジャイル開発センター株式会社（〒 105-6490 東京都港区虎ノ門一丁目 17 番 1 号虎ノ門ヒルズビジネスタワー 28 階 https://kddi-agile.com/）

概要: 食体験において味覚と嗅覚の相互作用は重要であり，これらの感覚を独立に制御することは体験の向上に寄与する．近年，電気刺激を用いた味覚・嗅覚の即時的な変調手法が提案されているが，舌と鼻腔の位置が近いことにより配置電極が近接し，両感覚を独立に制御できない可能性が懸念される．本報告では，この課題の検証を行い，適切な電流条件下で両感覚の独立制御が可能であることを示した．

キーワード： 味覚電気刺激，嗅覚電気刺激

1. はじめに

食体験は，人間の生活の質（QOL）や心理的な満足感に大きな影響を与える重要な体験であり，近年では単なる栄養摂取を超え，食の持つ感覚的な側面に注目が集まっている．食体験の質や心理的満足度を規定する中核的要因は「フレーバー」であり，ISO によると味覚，嗅覚，そして辛みや温度感覚などの三叉神経感覚などが脳内で統合されて生じる複合感覚であると定義されている [1]．これらの感覚要素の中でも，特に味覚と嗅覚は風味の骨格を形成する中心的な役割を担っており [2]，両者の相互作用が食の楽しさや満足感を大きく左右する [3]．

しかし，従来の技術では，味覚と嗅覚をリアルタイムで任意に制御・操作することは困難であった．一般的に，食品の化学的組成や香り成分の調整を通じて感覚を操作する方法が主流であるが，感覚強度の即時性に乏しく，リアルタイムでの感覚制御には限界がある．

味覚や嗅覚を直接かつ非侵襲的に提示できる方法として，経皮電気刺激による感覚提示手法が注目されている．経皮電気刺激は電気刺激によって感覚受容器や神経を刺激し，呈味物質やニオイ物質を摂取することなく人間が感じる味覚や嗅覚をリアルタイムで制御できる可能性を持つ技術である [4,5]．

しかし，電気刺激単体では提示できる感覚には限りがあり，陽極刺激では電気味，金属味といった報告が多く，陰極刺激では苦味のような味覚に近い感覚や痛覚などの報告があり，多くは 5 基本味とはかけ離れたものである [6]．電気刺激単体でうま味以外の 4 基本味を提示できた研究として，点電極を用いて個々の乳頭を狙って刺激することでその場所ごとに酸味や塩味単体が感じられるというものもある [4,7]．しかし，特定の乳頭だけをピンポイントで指摘するというのは精密な位置合わせや個人差などを踏まえると汎用的なデバイスとして実装は困難である．一方，嗅覚の場合は刺激臭もしくは鼻への刺激感が感じられた報告があるものの，提示されているのは刺激臭類似の刺激に限定されている [5]．

そこで近年，任意の味覚や嗅覚を直接かつ非侵襲的に操作できる方法として，化学物質と電気刺激を併用した感覚提示手法が注目されている [8–10]．この手法は実際に感覚を提示する化学物質を取り込んでいるため，安定した体験を提供することができ，即時的な感覚操作と安定した感覚提示を同時に実現できる．

しかし，味覚器や嗅覚器は物理的に近接し，この方法では感覚器官および神経経路の近傍に電極を配置する必要があるため，近い場所に電極を配置する必要がある．人体には絶縁線は存在しないため，想定している刺激経路以外の経路にも電流が流れる可能性がある．つまり，味覚と嗅覚のうちどちらかに電気刺激をしている際にもう片方の受容体に電流が流れてしまう可能性がある．

そこで本報告では，味覚と嗅覚を経皮電気刺激による独立制御可能性の検証を目的とする．

1.1 電気刺激による感覚制御の独立性の検討

感覚を呈する電解質を取り込んだ状態で，受容体が存在する箇所から存在しない箇所にかけて電位勾配をかけることで，水溶液中に電離したイオンが電位勾配によって泳動し，受容体からの距離が変化する．つまり，電気刺激を行うことで受容体の発火頻度を操作できるので人の受ける感覚の変調が可能になる．

電位勾配によってイオンの受容器との距離を変化させるには，受容器がある部分とない部分を通るように電流が流れるように電極を配置する必要がある．

嗅覚の場合，嗅神経が張り巡らされている非常に狭い範囲に受容体が存在し，その周囲に受容体が存在しない粘膜が存在する．受容体の上部には頭蓋が存在する．頭蓋は内側と外側を絶縁するため，頭蓋に存在する穴を通して頭蓋内に電流が通る必要がある．嗅神経上部の頭蓋には，篩板と呼ばれる，嗅神経を通すための小さな穴が空いている．また，顔正面には眼窩上孔や上眼窩裂など，神経や血管を頭

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

蓋骨内外に通す穴が存在するので，その付近に片方の電極を配置すればこれらの穴を通り頭蓋骨内部に入り，篩板を通して嗅覚受容体付近に電流が流れるという経路が予想できる．もう片方の電極は鼻孔の外に配置すれば粘膜の中の嗅覚受容体が存在する箇所からしない箇所にかけて電流を流すことができる．

味覚の場合，受容体は主に舌上にあるため，口元から舌周辺を縦断し，喉の奥に通り，首の後ろに出ていくように電極を配置することで，味覚受容体の存在する箇所からしない箇所にかけて電流が流れる．

ここまで述べてきた味覚と嗅覚の刺激経路の間には頭蓋が存在し，絶縁性を高めている．そのため，味覚と嗅覚の電気刺激はそれぞれ独立した経路をとり，互いの電流経路上に他方の受容体は存在しない．そのため，電気刺激をしてもターゲット以外の受容体近傍のイオン濃度は変化しない．そのため，電気刺激によって味覚と嗅覚の感覚強度は独立して制御可能であると考えられる．

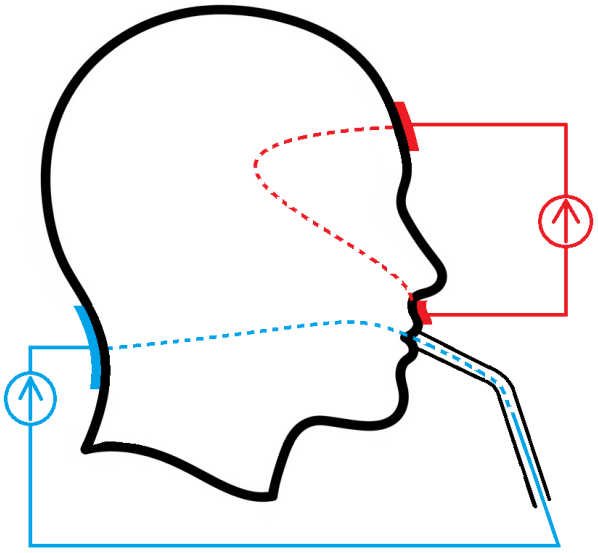

図 1: 電極配置と電流経路
実線: 電源，導線および電極
点線: 身体内の電流経路

2. 実験

2.1 実験目的

本実験では，電解質のニオイ物質と味物質を用い，味物質を口内に含んだ状態でニオイ物質を吸入中に鼻付近もしくは舌周辺に経皮的な電気刺激を行った．味覚・嗅覚のどちらかを電流刺激した際に，刺激していないほうの感覚について変調がないことを確認することを目的とした．

2.2 実験参加者

実験参加者は健常な 20 代男性 5 名で行われ，大阪大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会において承認された規定に基づき，十分にインフォームド・コンセントを得たうえで参加してもらった．

2.3 実験条件

2.3.1 電極配置および電流経路 (図 1 を参照)

味覚電気刺激 (図 1 青色) では，上記の電流経路を実現するため，ストローに陰極，首の後ろに陽極を配置した．

嗅覚電気刺激 (図 1 赤色) では，人中に陰極，額に陽極を配置した．

2.3.2 溶液条件

味覚提示物質として，0.9%塩化ナトリウム水溶液を，嗅覚提示物質として，実験参加者ごとに事前調査を行い，閾値に合わせて濃度を調整（0.5%, 1%, 2%のいずれか）したアンモニア水溶液を使用した．

2.4 実験装置

本実験システムは，実行用 PC，自作の両極電気刺激用電源，電極パッド，および味覚・嗅覚刺激提示装置から構成される．

電気刺激の生成と制御は以下の手順で行った．まず，実行用 PC と電気刺激用電源に搭載されたマイコンを USB ケーブルで接続し，Python プログラムを用いてマイコンの出力電圧を制御した．マイコンから出力された 2 系統の電圧は，それぞれボルテージフォロワ回路を介して差動増幅回路に

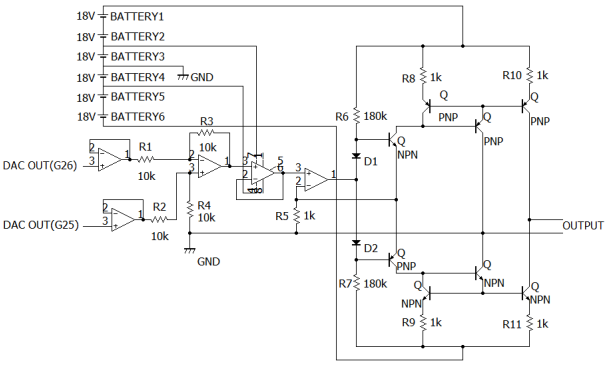

図 2: 電気刺激用電源回路図

入力され，負極性を含む精密な電圧制御を可能とした．この出力電圧を抵抗に印加して電流に変換後，カレントミラー回路を用いて安定した刺激電流を複製した．以上の構成により，PC で電気刺激用電源が人体に印加する電流値を精密に制御した（詳細は図 2 に示す）．味覚刺激実験では，片方の電極を電極パッドに接続して額に貼り，もう片方の電極を片方の先端をストロー内部に配置した導線に接続し，嗅覚刺激実験では，両方の電極を電極パッドと接続して額と人中に貼り，後述する電流を印加した．化学感覚刺激として，味覚提示には上記の味覚物質溶液を 7 オンスの紙コップに注いだものを，嗅覚提示には市販の未充填ペン（寺西化学工業株式会社製 HML ギターてづくりペン 無色彩色 大型）の芯に上記の臭気物質を含ませたものを用いた [11]．各試行における実験参加者の回答は，実験者が実行用 PC に入力し記録した．

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

2.5 実験手続

事前に変調が可能だったかを 5 回確認し，半数以上の回数で変調を報告しなかった実験参加者は除外した．5 人の参加者に上記の試験を行い，全員が条件を満たしたため，以下の実験に参加してもらった．実験では，以下の一連の手順を 1 試行として繰り返し実施した．

まず，味覚または嗅覚のいずれかを測定する部位に電極を配置する．次に，実験参加者の口に電解質である味物質を，鼻に同じく電解質のニオイ物質を提示した．続いて，味覚と嗅覚のどちらの感覚の変化に注意を向けるかを指示し，電極を配置した部位にのみ電流を 0.5mA 印加した．実験参加者は，電流の印加前後で，あらかじめ指示された感覚の強度に変化があったかどうかを回答した．回答後，電流値を 0mA に戻し，1 試行を終了した．一回の実験で，味覚刺激をしたときの味覚変調の有無と嗅覚変調の有無を各 2 回，嗅覚刺激をしたときの味覚変調の有無と嗅覚変調の有無を各 2 回，計 8 回確認した．

3. 結果

表 1: 電気刺激時の各感覚の変調の有無

(a) 味覚刺激時

	変調あり	変調なし
味覚	10	0
嗅覚	0	10

(b) 嗅覚刺激時

	変調あり	変調なし
味覚	0	9
嗅覚	4	7

味物質として塩化ナトリウム水溶液を，ニオイ物質としてアンモニア水溶液を用いた場合の実験参加者の回答を表 1 に示す．表 1(a) は味覚変調が発生する経路で電流を印加した際に，味とニオイに対して変化が「あった」または「なかった」と回答した回数を記録したものである．表 1(b) は嗅覚変調が発生する経路で電流を印加した際に，味とニオイに対して変化が「あった」または「なかった」と回答した回数を記録したものである．それぞれの表で，行は実験手続きで注意を向けるよう教示した感覚を，列が参加者の回答内容を表している．被験者への教示内容を実験中に記録しながら実験を行い，嗅覚刺激時に，味覚変調の有無を確認するよう教示した際に，一度誤って嗅覚変調の有無を教示したと記録したため，嗅覚刺激時の結果に試行回数の不一致が発生した結果となった．表 1(a) から，味覚電気刺激時は，実験参加者は味覚変調については必ず「発生した」と回答し，嗅覚変調については必ず「発生しなかった」と回答していることが読み取れる．表 1(b) から，嗅覚電気刺激時は，実験参加者は嗅覚変調については該当する試行のうち約 36%で「発生した」と回答し，味覚変調については必ず「発生しなかった」と回答していることが読み取れる．

4. 考察

本実験では，刺激経路の違いを利用し，味覚と嗅覚の感覚強度を独立に制御可能か否かを検討した．

まず，味覚刺激時は，表 1(a) に示す通り，味覚変調の有無を調べる試行の全てで実験参加者が味の変化を報告した一方，嗅覚変調の有無を調べる試行でニオイの変化を報告した参加者はいなかった．この結果は，味覚への電気刺激が，意図通り味覚の変調のみを引き起こし，嗅覚には影響しないことを示している．したがって，電気刺激による味覚強度の制御時には嗅覚強度には影響がないと考えられる．

次に，嗅覚刺激時は，表 1(b) の結果では，嗅覚変調の有無を調べる試行の約 36%で実験参加者がニオイの変化を報告したが，味覚変調の有無を調べる試行で味の変化を報告した参加者はいなかった．これは，再現性に課題を残すものの，嗅覚の変調が生じる刺激条件では味覚への影響はないことを示している．よって，電気刺激による嗅覚強度の制御時にも味覚強度には影響がないと考えられる．

嗅覚刺激の再現性が低い要因として，三点が考察される．第一に，本実験で設定した電流の変化量が 0.5mA で，先行研究で効果が報告されている 1mA に比べて小さかったことである [10]．これにより，嗅覚変調を惹起するには刺激強度が不十分であった可能性が考えられる．第二に，先行研究ではコップの中にニオイ物質の水溶液をいれ，それを直接嗅がせることでニオイを提示した．また，先行研究では 0.4%のアンモニア水溶液をニオイ物質として用いていた [10]．しかし，本実験では再現性向上のためにアンモニア水溶液の濃度を上げたものを未充填ペンにニオイ物質を充填したものを嗅覚提示物質として用いていた．この 2 点の変更によって，鼻腔内に入るニオイ物質量は多くなったが，ニオイの変調を感じさせる閾値が大きくなってしまい，かえってニオイの変調がわかりづらくなってしまった可能性が考えられる．第三に，本実験では各試行の間にインターバルをはさまずに実験を行ったことなどから，実験途中でニオイに順応してしまい，ニオイがわからなくなってしまったことが考えられる．特に，初めに味覚電気刺激を行ってから嗅覚電気刺激を行った被験者の中には，嗅覚電気刺激時にニオイに変化があったという回答を一度もしなかった者もいた．後日，この被験者を対象に，初めに嗅覚電気刺激から検証して同じ手順の実験を行ったところ，表 2 のようになった．この際に，誤って嗅覚刺激時に嗅覚変調の有無を 3 度聞いてしまったため，試行回数に不一致が発生している．表 2(b) を見ると，味覚刺激を先に行って嗅覚刺激時にニオイの変化がわからなかった参加者でも，嗅覚刺激を先に行うことでニオイの変化が少なくとも一回は知覚できたということがわかる．このことから，参加者のニオイへの順応を防ぐた

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

表 2: 嗅覚電気刺激を初めに行った場合の各感覚の変調の有無

(a) 味覚刺激時

	変調あり	変調なし
味覚	2	0
嗅覚	0	2

(b) 嗅覚刺激時

	変調あり	変調なし
味覚	0	2
嗅覚	1	2

めに，各試行の間にインターバルを設けたり，少なくとも嗅覚刺激を行う際は，日を分けて実験するなど，順応していない状態で実験を行えるような工夫をすることで実験の再現性を上げられるのではないかと考えられる．

本研究の限界として，特定の電流条件下でのみ実験を行った点が挙げられる．そのため，異なる値の電流を用いて実験を行った際に起こりうる事象について触れる必要がある．まず，流す電流を今回の実験で用いた電流より大きくすることができる．人の体を抵抗網として考えると，今回流した電流より大きな電流を流すと，ターゲットでない感覚の刺激経路に感覚強度変調を行うのに必要な大きさの電流が流れ，制御していない感覚に影響が出る可能性がある．また，味覚電気刺激時に，味覚の変化が大きすぎて，嗅覚の変化がマスクされてしまったために味覚制御時の嗅覚に変調がなかったと回答された可能性があり，前記のものとは逆に，味覚強度変調を行う際に流す電流を小さくした場合に，嗅覚に変調があったという回答が発生する可能性がある．しかし，これらの可能性を踏まえても，味覚もしくは嗅覚の強度を独立して制御することができる電流の範囲が存在すると言える．

5. おわりに

本報告では，味覚と嗅覚の感覚強度の独立制御の可否について検証した．味覚変調では嗅覚に影響が出ないことを確認できた．嗅覚変調では，嗅覚変調自体の再現性は低かったが，先行研究で嗅覚変調の発生した電流条件で味覚の変調は発生しなかった．味覚刺激と嗅覚刺激の刺激経路の違いから，電気刺激による味覚と嗅覚の感覚強度の独立制御が可能な電流範囲が存在すると結論付けた．

謝辞:JSPS 科研費 25K21249 による支援を受けておこなわれた．

参考文献

[1] International Organization for Standardization. ISO 5492:2008 Sensory analysis – Vocabulary. International Standard, 2008. Available from: `https://www.iso.org/standard/38051.html`.

[2] Jeannine Delwiche. The impact of perceptual interactions on perceived flavor. Vol. 15, No. 2, pp. 137–146.

[3] Sanne Boesveldt and Valentina Parma. The importance of the olfactory system in human well-being, through nutrition and social behavior. Vol. 383, No. 1, pp. 559–567.

[4] K. H. Plattig and J. Innitzer. Taste qualities elicited by electric stimulation of single human tongue papillae. Vol. 361, No. 2, pp. 115–120.

[5] Kazuma Aoyama, Nobuhisa Miyamoto, Satoru Sakurai, Hiroyuki Iizuka, Makoto Mizukami, Masahiro Furukawa, Taro Maeda, and Hideyuki Ando. Electrical Generation of Intranasal Irritating Chemosensation. Vol. 9, pp. 106714–106724.

[6] David A Stevens, Diane Baker, Elizabeth Cutroni, Alexander Frey, David Pugh, and Harry T Lawless. A direct comparison of the taste of electrical and chemical stimuli. *Chemical senses*, Vol. 33, No. 5, pp. 405–413, 2008.

[7] G von Bekesy. Sweetness produced electrically on the tongue and its relation to taste theories. *Journal of applied physiology*, Vol. 19, No. 6, pp. 1105–1113, 1964.

[8] Hiromi Nakamura and Homei Miyashita. Enhancing saltiness with cathodal current. In *CHI EA '13*, pp. 3111–3114. Association for Computing Machinery.

[9] Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Satoru Sakurai, Makoto Mizukami, Taro Maeda, and Hideyuki Ando. Galvanic Tongue Stimulation Inhibits Five Basic Tastes Induced by Aqueous Electrolyte Solutions. Vol. 8, p. 2112.

[10] 前田叡一, 原彰良, 宮本拓, 古川正紘, 前田太郎. 経皮的電気刺激を用いたニオイ強度抑制手法の提案. 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 3B2–07. 日本バーチャルリアリティ学会.

[11] T. Hummel, B. Sekinger, S.R. Wolf, E. Pauli, and G. Kobal. 'Sniffin' Sticks': Olfactory Performance Assessed by the Combined Testing of Odor Identification, Odor Discrimination and Olfactory Threshold. *Chemical Senses*, Vol. 22, No. 1, pp. 39–52, February 1997.

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会