



空中超音波による舌表面への刺激が味覚に及ぼす影響の調査

佐竹空良, 阿部拓実, 下村光彦, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之
東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

概要: 空中超音波の焦点を液滴に形成することで, その液滴が瞬間的に霧化することが確認されている。著者らは舌表面に焦点を生成することで, 水分を霧化し乾燥させられることを確認した。そこで, 舌表面の乾燥が味覚に及ぼす影響を調査した。

キーワード: 空中超音波, 味覚

1. 緒言

近年, 食に関するテクノロジーに注目が集まっており, 様々な研究が行われている。例えば, サクサク感の高い音を咀嚼動作と同期させて提示して歯ごたえ感を増強する手法 [1] や, 電気刺激により味覚を提示する手法 [2], 基本五味を統合して任意の味を提示する手法 [3] が提案されており, 医療分野・エンタメ分野などでの応用が期待される。VR における応用も考えられており, HMD を用いて視覚情報と嗅覚情報を提示することで味覚を変化させる手法 [4] などが提案されている。また, 超音波を照射して液体調味料を霧化したときに, 味覚や嗅覚がどう影響されるかを調べた研究が存在する [5]。本研究でも同様に超音波による霧化に着目した。ただし霧化させるのは調味液ではなく, 唾液である。味は唾液に混ざって舌表面に吸収されて知覚されるので, 唾液の量は味覚に直接影響すると考えたためである。

超音波フェーズドアレイ (Airborne Ultrasound Phased Array: AUPA) は, 多数の超音波トランスデューサーを並べたデバイスであり, 空中に様々な音場を合成することができる。焦点を形成して音響放射圧により触覚を提示したり [6], 軽量物体を浮遊させたり [7] する手法が提案されている。また, 超音波焦点を液体表面に形成すると, 液体が瞬間的に霧化することが確認されている。先述の研究 [5] は, この性質によって液体調味料を霧化している。

本研究でもこの霧化の性質を利用する。舌表面の水分を霧化させて舌を局所的に乾燥させることで, 味覚がどのように変化するかを調査する。味の知覚には唾液が必要であることが知られているため, 舌が乾燥することで味覚の知覚強度が下がることが予想される。超音波による舌への触覚刺激によって味覚の変化が確認されれば, 味を思い通りに制御できる可能性が示唆され, VR における応用が期待できる。

2. 先行研究

AUPA は様々な音場を合成できるため, 多様な触覚刺激を提示できる。超音波触覚の知覚強度を向上させる手法として, Amplitude Modulation (AM) 刺激 [8] と Lateral Modulation (LM) 刺激 [9] というものが提案されている。

AM 刺激とは, 超音波の振幅を周期的に変動させることで振動感を与えるものである。それに対し LM 刺激とは, 超音波の振幅は変化させず, 刺激位置を周期的に微小に変化させるものである。位置変化の刻み幅や周波数によっては, AM 刺激と同様に振動感が付与されることが知られている。

空中超音波による触覚提示は手掌部が主な対象であるが, 口を対象とした研究も存在する。AUPA を用いて唇に触覚を提示することでユーザーに通知を行う研究 [10] では, 唇が触覚刺激の方向情報を $\pm 10^\circ$ の精度で識別できること, 刺激強度を変更することで異なる情動反応を誘起できることが分かった。HMD と超音波素子アレイを組み合わせることで, 唇や舌に触覚を提示しつつ VR 映像を提示する研究 [11] では, 唇・歯・舌の振動閾値についての周波数特性が調査されている。また, VR 映像だけの場合と比べて, 口への触覚提示を組み合わせた方が没入感・現実感などが増加するという結果が得られている。

味覚に関しては, 検出閾値 (液体が水であるかどうか判別できる閾値) と認知閾値 (液体の味が何かを特定できる閾値) が調べられている。認知閾値に関しては味覚の種類 (苦味, 甘味, 酸味, 塩味) と提示位置の関係が調べられており, 全体的に苦味の閾値がもっとも小さいなどの結果が得られている [12]。

また, 味覚の知覚機序に関しては, 味蕾の先端部にある味孔という開口部を通じて, 唾液や水分に溶けた味物質が味細胞の細胞突起 (微絨毛) と接触することで, 味覚が知覚されるという仕組みであることが分かっている。味孔は粘膜でおおわれているため, だ液に溶解しないと味細胞に到達せず, だ液に溶解しない物質は味覚を発現しないとされている [13]。高齢者の味覚閾値が若年者よりも高いことや, ドライマウス患者は味覚障害も患うことが多いといったことから, 舌が乾燥すると味覚感度が低下する可能性が高いと考えられる。よって本研究では, 超音波焦点による舌表面の乾燥が認知閾値を大きくするという仮説を立てる。

3. 実験

空中超音波焦点を舌表面に形成することで舌表面を乾燥させ, その前後で味覚感度がどう変化するかを調べた。以

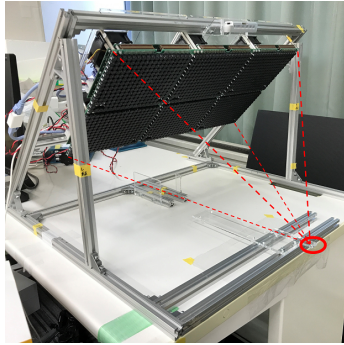


図 1: 実験装置

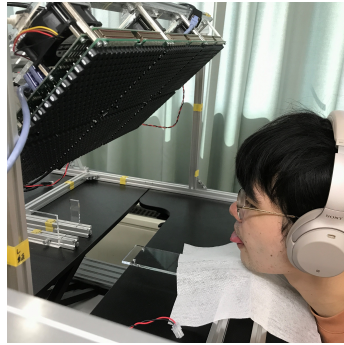


図 2: 舌を乾燥させる様子

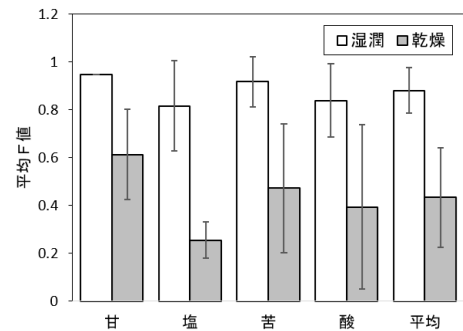


図 3: 全被験者の平均 F 値

降, 超音波を提示する前の舌が乾燥していない状態を「湿潤状態」、超音波を提示した後の舌が乾燥した状態を「乾燥状態」とする。

3.1 装置

舌を乾燥させる際に利用した実験装置の外観を図 1 に示す。6 台の AUPA を図のような配置で机に対し設置した。図 2 のように、台に顎をのせて図の赤丸付近に舌を出し、舌表面に超音波焦点を形成した。なお、安全上の問題が無いかを確かめるため、振動子アレイ正面から 40 cm 程度の赤丸で示された対象点に焦点を形成した場合の音圧を測定した。マイクへの過大な入力を防ぐために、振動子の振幅を最大値の $\frac{1}{10}$ とした場合、音圧は 880 Pa 程度、それによって生じる音響放射圧は 5.2 Pa 程度であった。

3.2 刺激

本研究では甘味・塩味・苦味・酸味の 4 種類の味について実験を行なった。各味覚にはスクロース・塩化ナトリウム・塩化マグネシウム・クエン酸を用い、水溶液を作成した。被験者によって味覚感度が異なるため、各溶液の濃度を決定する予備実験を行った。湿潤状態で各溶液をランダムに提示し、ほぼ確実にどの味かを判別できるような濃度で、できるだけ薄いものを作成した。その結果、水溶液の濃度は順にそれぞれ、被験者 A は 40, 10, 10, 10 g/L, 被験者 B は 40, 10, 4, 4 g/L, 被験者 C は 40, 4, 2, 2 g/L となった。味覚提示方法は「濾紙ディスク検査」[14] を参考にし、各辺 5 mm の正方形型に切った濾紙を水溶液に浸して舌に載せた。

舌に提示する超音波触覚には LM 刺激を用いた。焦点が空間的に移動するため、単に焦点を提示するよりも広範囲を乾燥させられると考えたためである。LM 刺激の条件として、焦点は半径 2 mm の円周上を 10 Hz で周期的に移動し、舌表面に 1 回あたり 10 秒間ほど提示した。

3.3 手順

被験者は 3 名 (男性 3 名, 23~24 歳) であり、3 名とも著者に含まれる。

刺激は、舌の湿潤・乾燥状態のそれぞれで各溶液を 10 回ずつランダムに提示した。よって、全体では $4 \times 10 \times 2 = 80$ 試行となる。実験全体の流れとして、湿潤状態の 8 試行と乾燥状態の 8 試行を 1 セットとし、それを 5 セット繰り返

した。

湿潤状態の各試行は以下のような手順で行われた。

- 1) 被験者は舌を出す。
- 2) 実験者は水溶液を浸した濾紙片を舌の先端部分に載せる。
- 3) 被験者は口を開けたまま、濾紙片が動かないように気を付けつつ、どの味であるかの回答を決める。
- 4) 濾紙片を吐き出し、「甘味・塩味・苦味・酸味・不明」の 5 つから回答する。その後、水を口に含み味覚をリセットする。

乾燥状態の各試行も湿潤状態と同様の手順で行われたが、手順 1) の前に空中超音波刺激を舌表面に 10 秒間ほど提示し、舌を乾燥させた。

4. 結果・考察

各被験者の実験結果を混同行列にまとめたものを表 1 に示した。また、各味覚の適合率・再現率・F 値をまとめたものを表 2 に示した。なお、F 値の平均に関しては、平均適合率と平均再現率の調和平均ではなく、各味覚の F 値の平均となっている。表より、全被験者において各味に関する F 値が超音波刺激の提示によって減少している。これは、舌の乾燥によって味覚感度が低下してしまったためだと考えられる。他の原因として、継続的に舌に触覚刺激を与えたことによる感度の低下の可能性も考えられる。本実験では LM 刺激を舌に提示しており、被験者には振動感覚が感じられていた。そのため、振動によって舌がしびれていた可能性がある。また、個人差はあれど、乾燥状態において塩味を提示した場合に酸味であると誤答する傾向が見られる。被験者からも、塩味と酸味は似ているという感想が得られている。したがって、乾燥具合と濃度を調整することで、塩味を酸味と錯覚させられる可能性があると考えられる。

全被験者の F 値の平均を取った結果を図 3 に示す。なおエラーバーは標準偏差を示す。図より、湿潤状態と乾燥状態で平均 F 値に大きく差があると分かる。この結果からも、乾燥により各味の閾値が大きくなっているであろうことが考えられる。また、乾燥状態における塩味の平均 F 値が特

に小さいように思われる。これより、塩味の知覚感度が特に鈍りやすいということが考えられる。

今後の展望として、まずは被験者を増やし統計的な解析を行うことが考えられる。本実験では被験者数が少なく、定性的な議論に留まるためである。次に、湿潤・乾燥状態の両方での味覚閾値を定量的に測定することが考えられる。本実験では舌を乾燥させると味覚閾値が低下するかを確かめるため、まずは定性的な実験を行った。しかし、実際の応用を考える際には閾値を定量的に求め、効果的な濃度設定を考える必要があると思われる。また、舌の部位による違いを調査するという事も考えられる。部位によって、また味の種類によって閾値が違うことが知られているため、乾燥による影響が部位によって違う可能性も十分にあるからである。扇風機などとは違い、空中超音波を用いると舌を局所的に乾燥させられる可能性があるため、部位による違いを調査することが可能になる。

空中超音波による唾液の霧化に関しても、より詳しく調査する必要がある。まず、実際に舌表面がどれほど乾燥しているかを測定する必要がある。本実験では体感として乾燥しているとしていたが、具体的にどれくらい乾燥していたのか、被験者間に違いはないのかなどの問題が残る。また、超音波の提示時間と乾燥具合の関係を求める必要がある。本実験では、十分に舌を乾燥させるため、提示時間を10秒とした。しかし、より短い時間でも乾燥させられる可能性がある。口を開けたままにする疲労感や不快感を軽減するため、提示時間をどれだけ短縮できるか調査する必要がある。

5. 結言

本研究では空中超音波焦点を舌表面に形成することで舌を乾燥させ、味覚閾値を大きくすることができるか調査した。甘味・苦味・酸味・塩味の溶液を用い、舌が湿潤した状態と乾燥した状態のそれぞれで味が判別できるかどうか被験者実験を行った。その結果、湿潤状態では味が判別できる濃度であっても、乾燥状態では判別が難しくなるということが分かった。今後の展望としては、被験者を増やすこと、定量的に閾値を測定すること、超音波による唾液の霧化を詳しく調査することなどが挙げられる。

謝辞 この研究は科研費 21K19783 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] N. Koizumi et al. “Chewing jockey: augmented food texture by using sound based on the cross-modal effect.” ACE ’11, 2011.

[2] H. Nakamura, Homei Miyashita. “Augmented Gustation using Electricity,” AH2011, 2011.

[3] H. Miyashita. “Norimaki Synthesizer: Taste Display Using Ion Electrophoresis in Five Gels.” CHI EA ’20, 2020.

[4] T. Narumi, T. Kajinami, T. Tanikawa, and M. Hirose. 2010. Meta cookie. In ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies (SIGGRAPH ’10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 18, 1.

[5] 佐竹 空良, 阿部 拓実, 下村 光彦, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “空中超音波による液体調味料の霧化が味覚に及ぼす影響の調査”, 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.2054-2058, Dec. 15-17, 2021

[6] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino and H. Shinoda, “AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display,” in IEEE Transactions on Haptics, 2021.

[7] Chi Thanh Vi, Asier Marzo, Damien Ablart, Gianluca Memoli, Sriram Subramanian, Bruce Drinkwater, and Marianna Obrist. 2017. TastyFloats: A Contactless Food Delivery System. In Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS ’17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 161–170.

[8] K. Hasegawa and H. Shinoda, “Aerial Vibrotactile Display Based on Multiunit Ultrasound Phased Array,” in IEEE Transactions on Haptics, vol. 11, no. 3, pp. 367-377, 1 July-Sept. (2018).

[9] R. Takahashi, K. Hasegawa and H. Shinoda, “Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus,” in IEEE Transactions on Haptics, vol. 13, no. 2, pp. 334-342, 1 April-June (2020).

[10] A. Jingu, T. Kamigaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda. 2021. LipNotif: Use of Lips as a Non-Contact Tactile Notification Interface Based on Ultrasonic Tactile Presentation. In The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST ’21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 13–23.

[11] Vivian Shen, Craig Shultz, and Chris Harrison. 2022. Mouth Haptics in VR using a Headset Ultrasound Phased Array. In Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 275, 1–14.

[12] Collings, V.B. Human taste response as a function of locus of stimulation on the tongue and soft palate. Perception & Psychophysics 16, 169–174 (1974).

[13] 岩田幸一, 井上富雄, 船橋誠, 加藤隆史, “基礎歯科生理学 第七版”, 2020

[14] 澤田 真人, 味覚閾値測定ならびに味覚閾値に影響する要因に関する研究, 口腔病学会雑誌, 2005, 71and72 巻, 4-1 号, p. 28-41

表 1: 実験結果 (行は実際に提示した味, 列は被験者の回答である.)

被験者 A		回答					被験者 B		回答					被験者 C		回答						
湿潤		甘	塩	苦	酸	不明	湿潤		甘	塩	苦	酸	不明	湿潤		甘	塩	苦	酸	不明		
正解	甘	9				1	正解	甘	9				1	正解	甘	9		1				
	塩		5		5			塩		10						塩		7		3		
	苦			10				苦			10					苦			8			2
	酸				1	1		8	酸				10			酸				1	9	

被験者 A		回答					被験者 B		回答					被験者 C		回答				
乾燥		甘	塩	苦	酸	不明	乾燥		甘	塩	苦	酸	不明	乾燥		甘	塩	苦	酸	不明
正解	甘	3				7	正解	甘	7				3	正解	甘	5		3	2	
	塩		1		4	5		塩		2		4	4		塩	2	2	2	1	3
	苦			1		9		苦			5		5		苦	1	1	7		1
	酸				1	1		8	酸				9		1	酸		3	2	2

表 2: 各被験者の適合率・再現率・F 値

被験者 A	再現率	適合率	F 値	被験者 B	再現率	適合率	F 値	被験者 C	再現率	適合率	F 値
湿潤				湿潤				湿潤			
甘	0.90	1.00	0.95	甘	0.90	1.00	0.95	甘	0.90	1.00	0.95
塩	0.50	0.83	0.63	塩	1.00	1.00	1.00	塩	0.70	1.00	0.82
苦	1.00	0.91	0.95	苦	1.00	1.00	1.00	苦	0.80	0.80	0.80
酸	0.80	0.62	0.70	酸	1.00	1.00	1.00	酸	0.90	0.75	0.82
平均	0.80	0.84	0.81	平均	0.98	1.00	0.99	平均	0.83	0.89	0.85

被験者 A	再現率	適合率	F 値	被験者 B	再現率	適合率	F 値	被験者 C	再現率	適合率	F 値
乾燥				乾燥				乾燥			
甘	0.30	1.00	0.46	甘	0.70	1.00	0.82	甘	0.50	0.63	0.56
塩	0.10	1.00	0.18	塩	0.20	1.00	0.33	塩	0.20	0.33	0.25
苦	0.10	0.50	0.17	苦	0.50	1.00	0.67	苦	0.70	0.50	0.58
酸	0.10	0.20	0.13	酸	0.90	0.69	0.78	酸	0.20	0.40	0.27
平均	0.15	0.68	0.24	平均	0.58	0.92	0.65	平均	0.40	0.46	0.41