

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19783

研究課題名（和文）空中超音波による遠隔霧化を利用した食体験拡張システム

研究課題名（英文）Enhanced Eating Experience System Using Remote Atomization with Airborne Ultrasound

研究代表者

牧野 泰才（Makino, Yasutoshi）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00518714

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、空中超音波の焦点により微小液滴が瞬時に霧化する現象を利用し、口腔近傍で調味液を霧化させ味を強調するなど、食体験の拡張を目的として始めた研究である。しかし研究が進むにつれ、霧化された調味液において、匂いについては強調可能であるものの、味については増強されにくいことが確かめられた。

そこで研究期間の後半は、舌への超音波触覚刺激による食体験の拡張にフォーカスを変え、その中で特に、舌の振動触覚に対する知覚感度を計測することとした。その結果、手指で特徴的に見られる、100-200Hz付近での知覚感度の上昇が生じないことが確認できた。このような知見は、舌への触覚刺激時に有用である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

舌の触覚的な知覚特性は、これまであまり知られていなかった。これは振動子など接触する刺激では衛生面などでの対応が煩雑となる点が影響していたと考えられる。超音波を利用した触覚刺激では、舌を拘束することなく、また衛生面を気にすることなく触覚を提示できる。同じセットアップで手指にも刺激を提示できるため、感度の比較も容易であり、そのために200Hz付近の特徴的な感度カーブが表出しないことを確認できた。超高齢社会を迎え、安全に嚥下することは重要な課題の一つである。舌のトレーニングにより筋肉を鍛えるような先行研究があるため、そのような目的での触覚フィードバックにおいて、今回の知見は非常に有用である。

研究成果の概要（英文）：This research was started with the aim of enhancing the eating experience by misting the seasoning liquid near the oral cavity to enhance the taste by making use of the phenomenon that a tiny droplet is instantly misted by the focus of airborne ultrasound. However, as the research progressed, it was confirmed that although the odor of misted condiments could be enhanced, it was difficult to enhance the taste of the condiments. In the latter half of the study period, the focus was shifted to extending the eating experience by direct ultrasound stimulation of the tongue, and in the process, the sensitivity of the tongue to vibratory tactile stimuli was evaluated. As a result, it was confirmed that there was no increase in the perceptual sensitivity around 100-200 Hz, which is observed characteristically with the fingers. These findings are useful for tactile stimulation to the tongue.

研究分野：触覚情報処理

キーワード：触覚情報処理 舌 知覚特性

1. 研究開始当初の背景

超高齢社会の到来により、基礎疾患を抱えたまま日々を過ごす高齢者も多くなってきている。そのような高齢者は食事に対する制約、特に糖分や塩分について摂取しすぎないようにする必要が多い。このような制約は、日々の食事に対する楽しみを低下させ、最終的には **Quality of Life** の低下に繋がる。これに対するアプローチとして、電気的な刺激により塩味を知覚させるというような食+テクノロジーの研究が進み始めているというのが研究開始当初の状況であった。

2. 研究の目的

上記のような状況に対するアプローチとして、本研究課題では、空中超音波の集束点において微小液滴が瞬時に霧化するという現象を利用し、食品を食べる直前に、口腔の前で調味液を霧化させ、その表面積を大きくすることで、味や匂いの増強ができるのではないかと考えた。そこで、超音波による微小液滴の霧化の条件を検証するとともに、その時に知覚される味や匂いがどの程度増強されるのかを検証することを目的とした。

しかし、この方法では、匂いは増強されるものの、味については変化しないということが確認された。霧化することで表面積が広がり、舌全面に広く接触した場合、唾液により希釈され、結果として知覚されにくいこと、つまり、液滴はある程度の塊で舌に接触した方が味は強く感じられることが確認された。当初の目的を達成するという意味では残念な結果ではあるが、挑戦的な萌芽研究として、未知の領域に踏み込んだことによる知見と考えている。

この結果を受け課題の目的を修正し、空中超音波による物理的な舌への刺激の活用を考えることとした。皮膚などにおいては、温刺激と同時に別の部位に接触刺激を提示すると、そこにも温かさ感じるというような、接触と別のモダリティとの間のクロスモーダル現象があるため、それが舌において、味と干渉しないかを検討するという目的であった。ただ、これについても、試した範囲では味と接触刺激との相互効果は観察されなかった。

一方で、このように舌上に触覚刺激を提示した場合に刺激する振動周波数に対する知覚感度が、指先における知覚感度特性とは異なることが示唆された。このような基礎的な特性は、舌という部位の場合には衛生的な観点から実験がしにくいという課題がある。超音波を利用した非接触の刺激はその点で有用であることから、舌への触覚刺激の振動周波数に対する基礎特性を検証することとした。

上述のように、当初の目的とは異なるが、本研究課題では最終的にこの舌の振動知覚特性の計測が最も有用な結果となったため、以降、この点について方法と成果を述べる。前半の霧化と味変化の関係、振動刺激と味覚の関係については、5. 付録 として最後に記載する。

3. 研究の方法

・舌への刺激提示システム

超音波の刺激としては、[1]で提案された空中超音波フェーズドアレイを利用し、図1に示すようなシステムを作成した。6台のフェーズドアレイユニットを利用し、舌尖の一点に1cm程度の直径の焦点を形成する。この焦点を振幅変調し、異なる周波数の刺激を提示できる。

・舌の湿潤状態の計測

当初、液滴を霧化させようとしていたように、超音波照射により液滴は瞬時に霧状に変化する。そのため、この装置により長時間舌に刺激を与えると、舌上の湿潤状態が変化する。後述するように、味覚では舌の乾燥状態がその感度に影響するため、舌の触覚の感度を検証するにあたって、舌の湿潤状態が感度に影響を及ぼす可能性を考慮した。そこで、少数の被験者において、超音波刺激を与えたときの舌の湿潤状態を、口腔湿潤計ムカスにより計測し、ドライマウスの基準となる数値よりも小さい範囲を基準とし、乾燥の影響が少ない条件下で振動知覚の実験を行った。

・舌の振動知覚閾値の計測

ドライマウスに至らないための時間が10秒程度であったため、10秒以内で超音波を照射し、その時の知覚閾値を被験者実験により周波数ごとに計測した。10、50、100、200 Hzの4つの周波数条件について、舌尖での知覚閾値と、指先での知覚閾値とをそれぞれ計測し比較することとした。上記周波数は、10、50 Hzがそれぞれ触覚受容器のメルケル触盤、マイスナー小体の感度ピークに、100 - 200 Hz近辺がパチニ小体の感度ピークに対応していることが知られており、手指の感度カーブと比較するためにこの周波数を選択した。

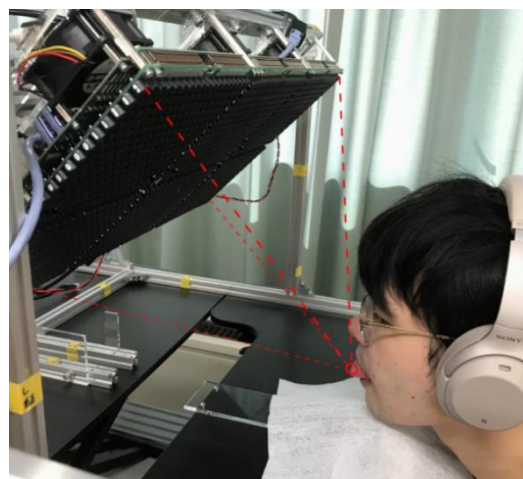


図1 超音波フェーズドアレイによる舌への触覚提示装置

[1] Suzuki et al. "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display," IEEE Transactions on Haptics.

4. 研究成果

・舌の湿潤状態の変化

図2に、舌の湿潤状態の変化を示す。一番左のNatural条件が超音波を当てずに自然乾燥状態で10、30、60秒経過したときの舌の湿潤状態を示す。その右に4つの周波数条件で超音波刺激を提示した際の湿潤状態を示す。赤い線は、利用した口腔湿潤計を販売している会社により提示されている「これ以下はドライマウス」と判断される基準の数値である。

これより、長時間超音波刺激を当てることで、舌表面が乾燥していくことが確認できる。一方で、10秒程度までであれば、ドライマウス条件よりは高く、自然乾燥条件と変わらない程度の変動であることが確認できた。

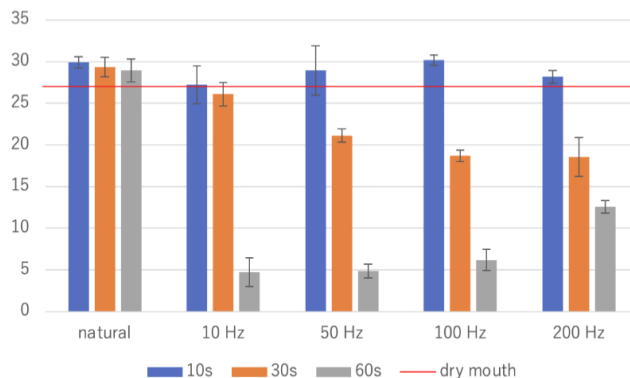


図2 超音波刺激による舌の湿潤状態の変化

・舌の振動知覚閾値の計測

上記の結果を踏まえ、ドライマウスに至らないように、刺激の持続時間を10秒までに限定し、また定期的に水を口に含み湿潤状態を保った上で、手と舌での振動知覚閾値計測を行った。

結果を図3に示す。横軸に周波数、縦軸に音圧振幅をとり、それぞれの周波数条件で知覚可能な最低音圧振幅を示している。すなわち、グラフの下に行くほど知覚感度は高い。図より、50Hzまでの低周波帯域では傾向が似ているのに対して、100Hz以上の高周波帯域では傾向が大きく異なることが示された。手では100Hzで最も知覚感度が高いのに対して、舌では50Hzよりも高周波の刺激が感じにくくなる。100Hzよりも上の高周波帯域ではパチニ小体はその振動知覚に参与していることが知られるため、手に比べ舌ではその寄与が少ないことが示唆される結果となった。

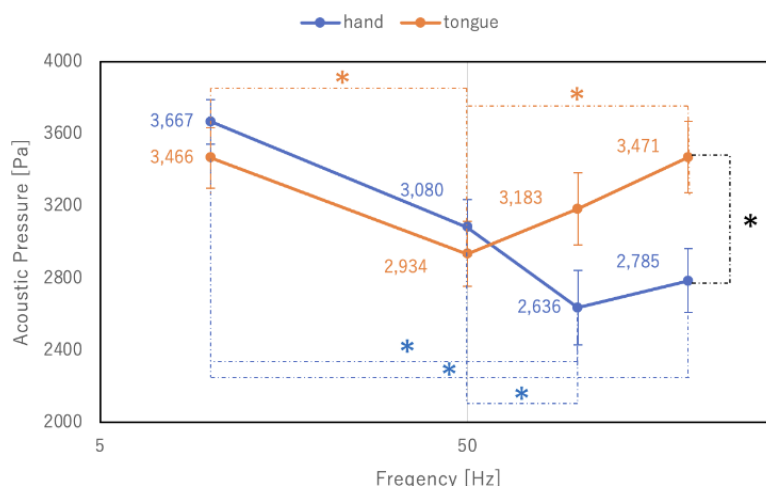


図3 超音波刺激による舌の振動知覚感度閾

・結論と今後の展望

以上のように、舌の振動知覚は、手指とは異なる傾向を示すことを確認できた点が、本研究課題の重要な成果である。舌に対して触覚的な刺激を提示するようなインタフェースを想定したときには、手指を対象としたときとは異なり、50Hz程度の変調周波数で刺激するのが効果的であることが分かる。他の先行研究においては、食品嚥下の機能低下を防ぐために舌の筋肉のトレーニングをするためのインタラクティブシステムが提案されており、そのようなシステムにおける触覚フィードバックなどを考える場合に有用な知見であると考えている。

今回は舌の振動受容特性を明らかにしたものであるが、このような特性が何に起因しているかについては明らかではない。舌にパチニ小体が存在しない可能性、あるいは舌の振動に対する共振特性の影響で感度が低下している可能性などが考えられる。このような感度特性の原因を探っていくことが今後の研究の一つの方向である。また舌に情報を提示するような場合には、その面積の知覚がどうなるかを検証する必要もある。局所的な圧点を提示する、あるいはある程度の広がりを持った面を提示するための条件を検証することも今後の課題である。

本成果は第23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にて発表を行い、優秀講演賞を受賞した。またTransaction on Hapticsに現在投稿し査読中である。

常世田光彦, 佐竹空良, 阿部拓実, 牧野泰才, 篠田裕之, “空中超音波を利用した舌触覚特性の調査”, 第23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. 2484-2486, 幕張メッセ 国際会議場, Dec. 14-16, 2022

5. 付録

当初の目的であった、液滴の霧化とそれによる食体験の拡張について、残念ながら期待したような結果にはならなかったが、行った検証内容とその結果について簡便にまとめる。

・液滴の霧化と味・匂い知覚への影響の調査

まずは液滴が霧化するための条件を調べた。多様な味に対応した溶液として、市販のレモン果汁・醤油・タバスコ・ワイン・ごま油・はちみつ・インスタントコーヒー、また、市販の食塩・味の素・砂糖を用いた水溶液を利用した。スポイトの1滴(約42 μ L)をアクリルプレート上に滴下し、超音波を照射したところ、はちみつ以外の液滴が霧化できることが確認できた。

これら9種類の液滴について、味と匂いの変化の評価を行った。図4に示すように、口を開き、液滴を載せたプレートを口前と口内の2条件で設置し、超音波を照射して霧化させたときの味と匂いの変化を調べた。霧化した液体が顔に噴霧されてしまうことを防ぐために衝立を用い、衝立に開けた穴から鼻と口元を出した状態で検証した。3名の被験者に対して、直接液滴を舌に垂らした条件と比べた際の、味と匂いの変化を口頭で解答させた。

結果を表1に示す。各調味料を味の要素で大まかに分類してまとめている。被験者3人とも共通した回答であればそのみを、全員が異なればそれぞれの回答を記載し、一人だけ異なる場合は()の中にその回答を追記した。強いと評価された条件のみを網掛け表示している。

まず味に関して、口前・口内ともに基本的に弱くなる結果となった。直接液滴を舌に垂らした条件よりも強いと評価されたのは、口前のワインとタバスコの辛味、及び口内の味の素水溶液の3つの条件のみとなった。次に匂いに関して、口前では強くなる傾向にあり、弱くなることはなかった。一方で口内については、弱くなる傾向となった。当初は霧化された調味液が、口腔内から鼻に移動することで匂いが強まると期待していたが、醤油、コーヒー、ワインという比較的匂いの強いサンプルに対して、1名のみ強いと答えただけであった。

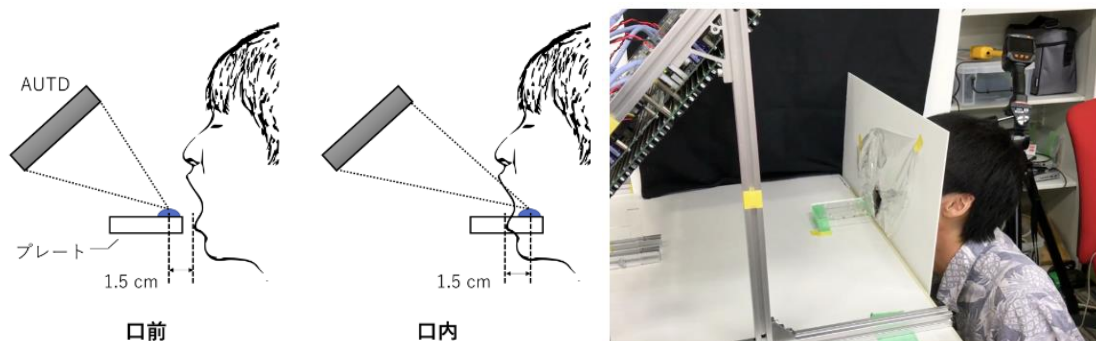


図4. 液滴霧化実験の条件と実際の実験風景

表1. 複数の液滴を霧化させたときの知覚される味と匂いの変化。
強いと評価された条件のみを網掛け表示している

調味料	口前		口内		
	味	匂い	味	匂い	
酸味	レモン	弱い	とても強い	弱い(少し弱い)	弱い(なし)
塩味	醤油	弱いが味は十分ある	とても強い	弱い	弱い(強い)
	塩水	弱い	なし	弱い	なし
苦味	コーヒー	弱い	強い	同じ	同じ(強い)
辛味	タバスコ	辛さは強い 酸味は同じか弱い	とても強い	弱い, わからない 酸味は弱いが辛さは同じ	弱い
旨味	味の素	弱い, 同じ, 微弱	なし	少し強い(弱い)	なし
渋味	ワイン	強い(弱い)	とても強い	弱い	弱い(強い)
甘味	砂糖水	弱い	なし(甘い匂い)	弱い	ほんのり甘い香り(なし)
油	ごま油	なし	とても強い	なし	微弱(弱い)

以上のように、調味液を超音波により霧化できること自体は確認できたが、それにより期待されたような味の変化は感じられないという結果であった。匂いについては口前で霧化させた場合に強くなるという結果ではあったが、これについては、超音波装置を利用しなくとも、別の手法で効率的に鼻の近くにのみ匂いを提示する方法などがすでにいくつか提案されており、またこの条件の場合、味の強度自体が低下してしまうため、食体験全体としてみると意義が低いと考えられ、これ以上の検証を断念した。

本内容は、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にて発表を行った。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, (オンライン開催), Dec. 15-17, 2021

・舌の乾燥状態と味知覚への影響の調査

舌へ直接超音波刺激を提示することで、味の知覚に影響が生じるかどうかを検証した。これは、温度と振動とのクロスモーダル現象のように、振動知覚を提示することで味の強度が変化する、あるいは、知覚される味の種類が変化する、というような効果を期待して検証したものであるが、実際にはそのような効果はほとんどなく、舌の湿潤状態の変化の影響により、乾燥しているときに味を感じにくくなるという傾向が示されたものである。

この実験では甘、塩、苦、酸の 4 種類のサンプルを用意し、それを判別できるかどうかで評価した。表 2 に 3 名の被験者における予備検討の結果を示す。結果より明らかなように、超音波を 10 秒程度提示し舌を乾燥させた状態では、通常の状態に比べ味の識別が困難になることが確認できた。

味覚の知覚機序については、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）と接触し、味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[2]。高齢者の味覚閾値が若年者よりも高いことや、ドライマウスの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く、本結果はそれを超音波で乾燥させた条件下で確認したものととなっている。このような味覚感度の低下には、例えば漢方薬のような苦い薬品について、感じにくくして摂取させるというような利用の可能性はあるが、その場合に敢えて超音波装置を利用しなければならない理由はないため、これ以上の検証は断念した。

[2] 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

表 2. 3 名の被験者による味判別実験。乾燥条件では不明とする回答や誤答が増えている

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	
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	3

本内容は、第 27 回バーチャルリアリティ学会大会にて発表を行った。佐竹空良, 阿部拓実, 下村光彦, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之, “空中超音波による舌表面への刺激が味覚に及ぼす影響の調査”, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 3B4-5, 札幌市立大学 芸術の森キャンパス, Sep 11-14, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐竹 空良, 阿部 拓実, 下村 光彦, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐竹空良, 阿部拓実, 下村光彦, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 常世田光彦, 佐竹空良, 阿部拓実, 牧野泰才, 篠田裕之
2. 発表標題 空中超音波を利用した舌触覚特性の調査
3. 学会等名 第23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
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------