

飲用時喉頭部皮膚表面温度変化と摂取量による食味認知予測と温度提示による食味認知変化

上堀 まい^{1,2,a)} 大津 耕陽^{3,b)} 伊藤 雄一^{3,c)}

概要: 「のど越し」に代表される飲料摂取時の主観的な食味認知の定量化およびその制御は、依然として困難な課題である。本研究では、嚥下時の喉頭周辺の温度変化に着目し、その皮膚表面温度をセンシングすることで食味認知を定量化し、温度提示することで食味認知を変化させることを試みる。まず「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」に関する食味認知評価が、喉頭部の皮膚温度と摂取量から関連研究と同等の精度で予測可能であることを示した ($R^2 = 0.65-0.70$)。次に、この感覚特性に基づき、喉頭へ直接温度刺激を提示することによる食味認知変化を調査した。実験の結果、喉頭への温度提示によって食味認知が変化すること、またその効果に個人差が存在することが明らかになった。これらの結果は、喉頭部が飲料の感覚を評価し変容させるための重要な身体部位であることを示しており、個人の感覚特性に応じた飲用体験のデザインに応用できる可能性を示した。

1. はじめに

食品や飲料の摂取における体験は、味覚、嗅覚、体性感覚といった複数の感覚情報が統合され、食味認知という統一された知覚が構築される [1]。そのため、これらの主観的な感覚体験を客観的な指標に基づいて定量化することは、依然として重要な課題となっている。特に、飲料の食味認知の評価に重要な役割を果たす「のど越し」は、飲料が咽頭を通過する際に生じる感覚であるが [2]、その知覚メカニズムは未だ十分に解明されておらず、定量的な評価手法も確立されていない。

この課題に対し、顔面の皮膚温度変化といった末梢生理指標から内的な感情状態を推定する手法が報告されている [3-7]。これらの手法は、主観的な情動感覚が特定の身体部位に局在するという知見 [8] に基づき、顔面皮膚表面の温度変化が内的な生理・情動状態の代理指標となり得ることを報告している。しかし、顔面の温度変化は全身的な状態を反映するため、「のど越し」のような特定の部位に強く結びついた感覚体験を捉える上では課題が残る。「のど越し」は飲料が身体内部の咽頭部を通過する際に生じる局所的な感覚であり、その知覚には嚥下の機械的側面だけでなく、その外側に位置する喉頭部が感覚的にも重要な役

割を果たす [2,9]。特に、喉頭部には飲料の温度変化などを感知する TRP チャンネル (Transient Receptor Potential channels) といった温度受容体が存在しており、これが「のど越し」の感覚形成に寄与していると考えられている。したがって、この感覚が生じる部位そのものである喉頭部の状態を計測することが「のど越し」を含む食味認知を理解し、定量化する上で有効であると考えられる。

一方で、食味認知を変容する研究がなされている。化学物質を用いて味覚を提示する研究 [10,11] や、舌への電気刺激によって味覚を再現する研究 [12] などが存在するが、これらの手法は化学物質の管理の煩雑さや、「のど越し」のような食味認知の変容が困難であるといった課題がある。これらの課題に対し、視覚や聴覚といった感覚を組み合わせて提示することで、感覚相互作用を生み、その感覚知覚を強調するクロスモーダル技術が注目されている [13-15]。中でも温度刺激は、食味認知に影響を与える要因の一つと考えられており、これまでに、鼻、舌、下唇を含む顔面領域への温度提示が食味認知に影響を与えることが明らかになっている [16-19]。また、後頸部への温度刺激が食品の知覚温度を変化させることも示されている [20]。「のど越し」は咽頭部で生じる局所的な感覚体験であり、かつ喉頭部は TRP チャンネルのような温度受容体を有している [2,9]。これらの知見に基づけば「のど越し」が知覚される領域の直上である喉頭部の皮膚に熱刺激を与えることで、食味認知を変容させることも可能であると考えられる。

そこで本研究では、「のど越し」という感覚が生じる部位

¹ 青山学院大学 大学院理工学研究科

² 日本学術振興会 特別研究員

³ 青山学院大学 理工学部

a) mai.kamihori@x-lab.team

b) otsu.kouyou@it.aoyama.ac.jp

c) itoh@it.aoyama.ac.jp

そのものである喉頭部に着目し、飲用時の喉頭部の皮膚温度変化と摂取量をセンシングすることで食味認知の定量化を試みる。さらに、このセンシングによる知見に基づき、喉頭部への温度提示が、食味認知に変化をもたらすかを調査する。なお本稿では、ユーザが知覚する基本五味のことを「味覚」、飲料の後味やのど越しのような、味覚以外の感覚を「食味認知」として扱う。また、本稿において「咽頭」とは飲料が通過する身体内部の管状器官を指す。一方、本実験で温度計測および提示を行うのは、解剖学的には頸部前面の喉頭隆起付近の皮膚表面であり、本稿ではこの部位を内部の器官と区別して「喉頭部」と呼称する。

2. 関連研究

2.1 生理・行動指標に基づく食味認知の定量化

食味認知の評価は、伝統的に記述分析や主観的な質問票に依存してきたが [21]、これらの手法では時間的な動態や個人差を捉えることに限界があるため、近年は客観的な生理学的指標の特定に関心が移っている。脳波 (EEG) [22]、脳磁図 (MEG) [23]、磁気共鳴機能画像法 (fMRI) [24] といった脳を対象とした計測によって、味覚や嗅覚と関連する神経活動が明らかにされている。しかし、装置内での静止や体動に起因する制約から、自然な飲食行動の計測には課題が残る。

より生態学的妥当性の高い環境で感覚体験を捉えるため、末梢部での生理・行動計測への関心が高まっている。自律神経系の活動は飲食体験の情動的側面を評価する上で重要であり、心拍変動や皮膚電気活動といった指標が、快・不快といった味覚刺激に対する生理的応答を捉えるために用いられている [25–27]。また、顔の表情分析も自発的な情動反応を捉えるための非侵襲的な手法として確立されており [28]、微細な顔の表情から異なる飲料の種類を識別するシステムや [29]、幸福や嫌悪の表情を食品の主観的な嗜好と相関するシステムが開発されている [30]。

さらに、顔面部の皮膚温度変化を計測することは、これらの末梢応答を別の角度から捉える手法である。三叉神経は顔面の血流に影響を与え、局所的な皮膚温度を変化させることが知られている。熱画像計測を用いた研究では、この機構を利用して感情的・快楽的な状態を推定する試みがなされている。具体的には、鼻部の皮膚温度の変化が、情動喚起 [3,31] や味覚に関連する快感 [4,5] と関連することが知られている。さらに、咀嚼のような口腔運動は、筋活動に起因する測定可能な温度変化を引き起こし [6]、ストレスの変化と関連する [7]。これらの知見は、身体表面の温度変化が、内的な感覚状態を反映する指標となることを示している。しかし、これらの手法が生理的センシングの有用性を確立してきた一方で、「のど越し」が生じる部位である喉頭領域は未だ十分に調査されていない。

2.2 感覚提示による食味認知変化

味覚や食味認知を変化させることを目的とした、様々な感覚提示手法が研究されている。具体的には、化学物質を用いて味覚を再現するシステム [10,11] や、舌への電気刺激によって味覚を提示するデバイス [12] が提案されている。これらの手法は味覚を直接生成・変化させる手段となる。しかし、化学物質の管理の煩雑さが課題であり、電気刺激では味覚以外の複雑な食味認知の提示が困難である。

この課題に対し、感覚を組み合わせて提示することで、感覚相互作用を生み、その感覚知覚を強調するクロスモーダル技術が注目されている。視覚領域では、クッキーの外観と香りを変えることで異なる味覚を知覚させる “Meta Cookie” [13] や、AR を用いて食品の外観を動的に変化させる研究 [14] などがある。聴覚領域では、改変した咀嚼音を骨伝導ヘッドホンで提示し、食品の食感を変化させる試み [15] が報告されている。特に、温度は食味認知に影響を与える重要な要素であり、鼻周辺に温度を提示することで、飲料の後味や心地よさ、苦味が変化することが示されている [16] 他、舌への局所的な温度提示が味覚やミント感のような食味認知を変化させることが報告されている [17,18]。また、先行研究では、下唇周辺への温度提示 [19] によって味覚や食味認知が変化することを示しているが、これは嚥下直前の感覚提示に留まっている。さらに、嚥下と同期させた後頭部への冷却刺激が、食品の冷たさの知覚を増強することが報告されている [20]。

これらの研究では、口腔内外や身体の特定位点への温度提示が味覚や食味認知を変化させることを示している。しかし、飲料の評価に重要な役割を果たす喉頭部への直接的な温度提示が「のど越し」のような食味認知に与える影響は未だ十分に検証されていない。

3. 実験 1: 喉頭部皮膚表面温度と飲料摂取量による食味認知の定量化

3.1 実験条件

図 1(a),(b) に実験で使用した喉頭部の温度計測装置を示す。飲用中の喉頭部皮膚温度を計測するため、4つのサー

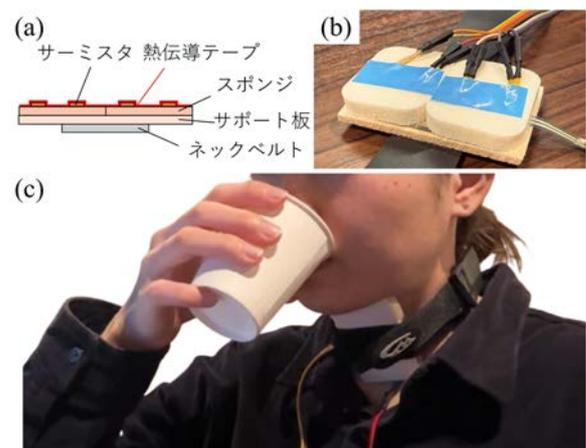


図 1 喉頭部皮膚表面温度の計測装置と実験の様子

ミスタ (103JT-025, SEMITEC 社製) とネックベルトを使用した。サーミスタの 25 °C におけるゼロ負荷抵抗値の許容差は ±1 %, B 定数 ($B_{25/85}$) の許容差は ±1 % である。サーミスタと 10k Ω の固定抵抗で構成した分圧回路の出力電圧を, Arduino Uno R4 (AD コンバータ: 14 ビット) で測定した。これにより, 測定温度範囲 (25–40 °C) において, 計算上の温度分解能は約 0.0063 °C である。サーミスタは熱伝導性粘着テープを用いてスポンジに固定し, 皮膚との安定した接触と正確な温度測定を可能にする。温度計測は, 約 315 Hz のサンプリングレートでデータを取得した。

実験では 5 種類の飲料条件を用いた。そのうち, 3 種類は異なる温度の水であり, それぞれ 5–10 °C に冷却した冷却水 (cw), 24 °C の常温水 (nw), そして 50–60 °C に加温した加温水 (いずれもサントリー社製, hw) とした。これらに加え, 快・不快の感情価が対照的になるように, 2 種類の刺激を用意した。不快刺激として, 常温の天然水に 50 mg/100 mL のカフェイン (エスエス製薬社製) を溶解させたカフェイン溶液 (cff) を, 快刺激として常温のリンゴジュース (えひめ飲料社製, aj) を用いた。なお, 全ての飲料は提供直前に温度を測定し, 目標範囲内であることを確認した。

3.2 実験手順

本実験には, 18 歳以上の大学生および大学院生の男女計 31 名の参加者 (男性 15 名, 女性 16 名, 年齢: 21.3 ± 1.37 歳) が参加した。リンゴジュースへの苦手意識, リンゴアレルギー, カフェイン溶液の摂取不可を参加の除外基準として設定し, これらに該当しない方を募集した。実験前に実験の内容について説明し, 同意書に署名をしてもらった。実験は休憩を含み, 1 日あたり約 2 時間, 計 2 日間にわたって実施した。実験環境は, 室温 24.3 ± 1.2 °C, 湿度 43 ± 10 % であった。なお, 本実験は青山学院大学の研究倫理審査委員会の承認を得て実施し (承認番号: H22-032), 各参加者には謝礼を支払った。

各参加者は, 飲料条件ごとに 50 試行を実施した。実験は 10 試行を 1 ブロックとし, ブロック間で参加者は水で口をすすぎ, 最低 3 分間の休憩を取った。飲料条件の提示順序は, 順序効果を考慮して参加者間でランダム化した。

図 1(c) に実験の様子を示す。参加者が嚙下をしているタイミングを計測するために実験室の机上にはボタンを設置し, 参加者がボタンを押しているタイミングを記録できるよう設定した。参加者には, 飲料を飲んでもらう際に, 飲料が唇に触れた瞬間から嚙下が完了するまでの間ボタンを押すように指示した。なお, このボタン押下期間を「飲用中」区間とした。各試行では 100 g の飲料を提示し, 参加者は任意の量を摂取できた。摂取量はデジタルスケール (分解能 0.1 g) で測定した。各試行後には「のど越し」「お

いしさ」「心地よさ」「のどの渴き」の 4 項目について, 100 mm の視覚的アナログ尺度 (VAS) を用いて主観評価を回答してもらった。ここで, 本実験における「のど越し」の評価については, キレや滑らかさといった物理的な質感そのものではなく, それらの質感に由来する飲料が咽頭を通過する際の感覚が好ましいと感じたかどうかを評価するよう, 事前に参加者に教示した。これにより, 参加者個々人が抱く「のど越し」の質感の差異に関わらず, その感覚に対する主観的な好意度として評価してもらった。

3.3 温度データの処理

喉頭部皮膚温度は試行を通じて連続的に記録した。記録したデータから, 参加者がボタンを押下していた期間を「飲用中」とし, ボタンを離した直後から飲用中と同時間の長さを「飲用後」と定義して抽出した。まず各サーミスタについて, 飲用中区間の開始前 3 秒間の平均温度をベースラインとして算出した。次に, 直前の値との差が 0.4 °C を超えるサンプルや, 四分位範囲 (IQR) 法によって検出された外れ値を, センサの接触不良等に起因するノイズとしてデータから除去した。続いて, 飲用中と飲用後の各時点の温度とベースラインとの差分から温度変位を算出した。この温度変位の絶対値が 0.4 °C 以上となる区間が, 飲用中全体の 20 % 以上を占める試行は, 体動等によるセンサの浮きや接触ノイズが大きい試行と判断し解析から除外した。これらの閾値 0.4 °C は, 皮膚温度が約 31 °C の際の冷覚の知覚閾値 (-0.40 ± 0.30 °C) の知見に基づき [32], 生理的な温度変化として妥当な範囲を逸脱した急激な変化を判定するために設定した。最後に, ノイズ除去のため, 得られた温度変位に対し 50 フレームのウィンドウサイズで移動平均を適用し, 平滑化を行った。

処理後のデータから, 各試行の飲用中および飲用後の区間について, 複数の特徴量を算出した。具体的には, 温度の平均値, 分散, 最大値, 最小値, 最大温度変位 [5], 飲用中の最初と最後のデータ間の変化率, 飲用中の最初のデータと極値 (最大値または最小値) との間の変化率, そして飲用中と飲用後の区間内の最小値と最大値の間の変化率が含まれる。

3.4 実験結果と考察

本節では, 喉頭温度データと摂取量および主観評価について分析する。3.4.1 項では, 飲料の種類が参加者の主観評価および摂取量に与える影響を確認する。次に, 3.4.2 項では, 本研究で計測対象としている喉頭部の皮膚温度について, 飲料自体の温度が皮膚温度に直接影響を与えるかを検証する。続いて, 3.4.3 項では, 本章の目的である食味認知の定量化の可能性を検証するため, 取得した喉頭温度データと摂取量を特徴量として用い, 主観評価を予測する回帰モデルを構築し, その精度を評価する。3.4.4 項では, 構築したモデルの解釈手法 (SHAP) を用いて, どの特徴量が主

観評価の予測に寄与しているかを分析する。

3.4.1 飲料の種類が主観評価および摂取量に与える影響

5種類の飲料条件（リンゴジュース (aj), カフェイン溶液 (cff), 常温水 (nw), 冷却水 (cw), 加温水 (hw)) における参加者 31 名の主観評価（のど越し, おいしさ, 心地よさ, のどの渇き）と摂取量を分析した。飲料の種類が与える影響を評価するため, 各主観評価項目と摂取量を目的変数とし, 飲料条件を固定効果, 参加者をランダム効果とした線形混合モデルを適用した。その結果, 全ての食味認知および摂取量において, 飲料条件の有意な主効果が確認された (全て $p < 0.001$)。図 2 に各評価項目の結果を示す。aj と cw は摂取量, 食味認知の項目で一貫して評価が高く, cff は摂取量が最も少なく, 食味認知の項目で最も低い評価であった。

主観評価と摂取量の関係性を調査するため, 各参加者 ($n = 31$) について, 主観評価と摂取量間のスピアマン相関係数を算出した。参加者ごとに全 250 試行に基づく 5×5 相関行列を構築し, 各行列要素にフィッシャーの z 変換を適用した。その際, 参加者間で z 変換係数を平均化し逆変換を適用することで平均相関係数を算出した。結果として「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」は互いに強い相関を示し ($r=0.77-0.85$), それぞれが摂取量とも正の相関を示した ($r=0.66-0.67$)。これらの結果から, 参加者が飲料を好意的に評価したときほど, より多くの量を摂取する傾向があることが明らかになった。

3.4.2 飲料温度が喉頭皮膚温度に与える影響

飲料自体の温度が喉頭部の熱応答に与える影響を調査するため, 3つの異なる温度の水条件 (cw: $5-10^\circ\text{C}$, nw: 24°C , hw: $50-60^\circ\text{C}$) の試行を分析した。

各温度特徴量に対し, 温度条件を固定効果, 参加者をランダム効果とした線形混合モデルを適用した。結果として, 飲料温度と皮膚温度の応答との間に単純な単調関係はなかった。このことから, 飲料の温度が喉頭部の皮膚温度に直接的な影響を与えていないと考えられる。

3.4.3 喉頭温度と飲料摂取量による食味認知の定量化

喉頭温度と摂取量から, 食味認知を予測できるかを調査するため, 個人内で層化 5 分割交差検証を用い, 複数の回

帰アルゴリズムの性能を評価した。特徴量の組み合わせとして, (1) 喉頭温度のみ, (2) 喉頭温度と摂取量の両方, (3) 摂取量のみ, の 3 パターンを比較し, 性能評価には決定係数 (R^2) と二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。表 1 に結果を示す。

表 1(2) より, 喉頭温度と摂取量の両特徴量を組み合わせた場合に高い予測性能が得られた。特に, ランダムフォレストモデル (RF) の平均決定係数は「のど越し」で 0.6989, 「おいしさ」で 0.6456, 「心地よさ」で 0.6653 と比較的高く, 多くの項目で最高の精度を示した。対照的に, 喉頭温度のみを特徴量とした場合の性能は大幅に低く, 最も良いモデル (非線形 SVR) でも R^2 は 0.10-0.33 程度に留まった。摂取量のみを特徴量とした場合, 誤差逆伝播法 (BPNN) モデルが「のど越し」で $R^2 = 0.6993$ となり, 単独でも非常に高い性能を示した。一方, 喉頭温度と摂取量の特徴量を組み合わせた場合においても, ランダムフォレスト (RF) 等で同等の予測精度 ($R^2 \approx 0.70$) が確認された。このことは, 食味認知の予測において摂取量が支配的な要因であるものの, 喉頭温度の特徴量が一部のモデルにおいて予測精度に寄与する情報を含んでいる可能性を示している。

3.4.4 SHAP による特徴量の分析

構築した予測モデルにおいて, 喉頭温度や摂取量が食味認知の予測にどのように寄与したかを解釈するため, SHAP (SHapley Additive exPlanations) を用いた分析を行った。SHAP は各特徴量がモデルの予測値に与える貢献度を算出する手法であり, 本実験では, RF モデルを対象に各特徴量の SHAP 値を算出し, 特徴量重要度と, 特徴量の値が予測値に与える影響の方向性を分析した。参加者全体では「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」の評価において, 摂取量が最も影響力の高い特徴量であり, 次いで飲用中の温度分散, 飲用後の温度平均値, 飲用中の温度平均値が続いた。

摂取量については, 食味認知の評価が高い場合には摂取量が多く, 評価が低い場合には摂取量が少なくなる傾向があった。この結果から, 摂取量は快・不快の指標として機能していると考えられる。しかし, 喉頭温度の変化と, 食味認知の評価の関連性には個人差があった。例えば, 飲用中の温度分散の増大が, ある参加者では不快評価と関連する一方で, 別の参加者では快評価と関連するような違いがあった。これは, 個人が持つ潜在的な感覚特性の違いを示しており, 個人が過去の経験や遺伝的背景, 心理状態に基づき, 快・不快として処理していると考えられる。

4. 実験 2: 喉頭への温度提示による食味認知変化の調査

前章の結果から, 喉頭の温度変位がのど越しのような食味認知と関連する可能性があることが分かった。関連研究では, 快感情と鼻周辺の温度変化が関連することに基づき,

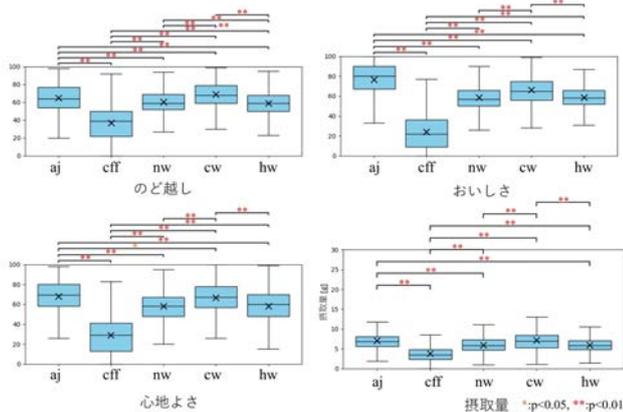


図 2 飲料の種類が食味認知評価および摂取量に与える影響の結果

表 1 異なる特徴量による主観評価に対する個人内回帰モデルの結果

| (1) 特徴量: 喉頭温度のみ | | | | |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Model | のど越し: R^2 (RMSE) | おいしさ: R^2 (RMSE) | 心地よさ: R^2 (RMSE) | のどの渇き: R^2 (RMSE) |
| BPNN | 0.1302 (19.5855) | 0.0664 (23.7847) | 0.0911 (22.4140) | 0.2265 (17.6706) |
| RF | 0.1488 (19.0023) | 0.0700 (23.2262) | 0.1186 (21.6665) | 0.3229 (15.8150) |
| Linear SVR | 0.1627 (18.9629) | 0.0940 (23.1106) | 0.1418 (21.6048) | 0.3116 (16.1715) |
| Nonlinear SVR | 0.1702 (18.8427) | 0.0989 (23.0321) | 0.1477 (21.5049) | 0.3280 (15.9482) |
| k-NN | 0.1247 (19.6986) | 0.0521 (24.1695) | 0.1002 (22.4103) | 0.2837 (16.4839) |
| XGBoost | 0.1018 (20.5313) | 0.0398 (25.2098) | 0.0745 (23.5083) | 0.2527 (17.1767) |
| LightGBM | 0.1016 (20.4896) | 0.0445 (24.9624) | 0.0781 (23.3083) | 0.2736 (16.8380) |
| (2) 特徴量: 喉頭温度と摂取量 | | | | |
| Model | のど越し: R^2 (RMSE) | おいしさ: R^2 (RMSE) | 心地よさ: R^2 (RMSE) | のどの渇き: R^2 (RMSE) |
| BPNN | 0.6104 (12.8443) | 0.5347 (16.3248) | 0.5739 (15.0007) | 0.3143 (16.4062) |
| RF | 0.6989 (11.1567) | 0.6456 (14.0791) | 0.6653 (13.1672) | 0.4493 (14.1969) |
| Linear SVR | 0.5408 (13.9838) | 0.4661 (17.5200) | 0.5122 (16.1432) | 0.3736 (15.3730) |
| Nonlinear SVR | 0.5293 (14.1014) | 0.4595 (17.9164) | 0.5045 (16.3561) | 0.3804 (15.2388) |
| k-NN | 0.6821 (11.5183) | 0.6318 (14.4179) | 0.6381 (13.7778) | 0.3830 (15.2245) |
| XGBoost | 0.6530 (12.0952) | 0.5857 (15.4308) | 0.6033 (14.5356) | 0.3786 (15.4411) |
| LightGBM | 0.6643 (11.8974) | 0.6040 (15.0643) | 0.6270 (14.0500) | 0.4061 (14.9989) |
| (3) 特徴量: 摂取量のみ | | | | |
| Model | のど越し: R^2 (RMSE) | おいしさ: R^2 (RMSE) | 心地よさ: R^2 (RMSE) | のどの渇き: R^2 (RMSE) |
| BPNN | 0.6993 (11.1499) | 0.6460 (14.0718) | 0.6656 (13.1617) | 0.4484 (14.2090) |
| RF | 0.6499 (12.1596) | 0.6051 (15.0252) | 0.6100 (14.3866) | 0.3416 (15.9591) |
| Linear SVR | 0.5398 (14.0062) | 0.4651 (17.5482) | 0.5113 (16.1663) | 0.3714 (15.4047) |
| Nonlinear SVR | 0.6419 (12.4217) | 0.5788 (15.7456) | 0.6038 (14.6029) | 0.3977 (15.0366) |
| k-NN | 0.6695 (11.7720) | 0.6146 (14.8301) | 0.6234 (14.0979) | 0.3595 (15.5361) |
| XGBoost | 0.6247 (12.7109) | 0.5785 (15.6972) | 0.5853 (15.0020) | 0.2996 (16.9390) |
| LightGBM | 0.6784 (11.5794) | 0.6300 (14.4511) | 0.6358 (13.8096) | 0.3687 (15.3945) |

その部位に温度を提示することで、食味認知が変化することを示している [16]. また、先行研究 [19] では、飲料の温度に対して飲み口の温度を $\pm 2^\circ\text{C}$ 変えることで、食味認知が変化することを示している. 本章では、これらの知見に基づき、喉頭への温度提示によって食味認知が変化するかを調査する.

4.1 実験条件

図 3 に喉頭部の温度提示装置を示す. 喉頭への温度提示を実現するために、ネックベルトに 2 つのペルチェ素子 (B10-7952-01) とサーミスタ (103JT-025) を取り付けた. 先行研究 [19] を参考に、飲料はリンゴジュース、オレンジジュース、緑茶、水の 4 種類を用いた. 喉頭への温度提示条件は 3 条件とし、飲用開始前 3 秒間の皮膚温度を基準として、ペルチェ素子で提示する最大温度差 (PID 設定値) を基準温度に対して $\pm 2^\circ\text{C}$ に設定する. なお、本装置を喉頭部に装着した状態における、ペルチェ素子の駆動開始からの実効応答速度は、加温時において約 $0.7^\circ\text{C}/\text{s}$ 、冷却時において約 $0.2^\circ\text{C}/\text{s}$ であることを確認した. しかし、実装の都合上、ペルチェ素子の放熱機構を装備できなかったため、達成可能な冷却には限界があり、冷却条件では最大 -1.25°C であった. 飲料の温度の 3 条件は、冷却: 5°C 、常温: 24°C 、加温: 60°C とした. 評価は、喉頭への温度提示がない状態での試飲を基準として、その後の試飲 (比較刺激) の「喉頭で感じた温度」「飲料の温度の感じ方」「口中香」「後味」「味の濃さ」「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」「甘味」「塩味」「酸味」「苦味」「うま味」に関する強さを、基準を 1 として対比で回答するマグニチュード推定法によって実施した. なお、温度の評価は「温かさ」と「冷



図 3 喉頭部の温度提示装置

たさ」の基準を設けた.

4.2 実験手順

前章の参加者の一部である男女計 20 名 (男性 11 名、女性 9 名、平均年齢 21.7 ± 1.08 歳) を対象とした. 実験前に本実験の説明をし、同意書に署名をもらった. 参加者にはあらかじめ飲料を試飲し評価する実験であること、実験はいつでも中止できることを伝えた. その際、提示する飲料が嫌いでないこと、アレルギーがないことを確認した.

のどの渇きが食味認知の評価に影響を与えることを避けるため、実験開始前に、VAS 法で「のどの渇き」具合を評価してもらった. 数直線は「乾いていない」を 0「とても乾いている」を 100 とした. 評価値が 70 以上の場合、水を一口飲ませてから実験を実施した.

実験は、基準刺激と比較刺激を対で提示する形式で行った. まず参加者は、喉頭への温度提示がない状態の飲料を基準刺激として摂取した. 次に、喉頭への温度提示 (冷却または加温) を伴う同じ飲料を比較刺激として摂取し、基準刺激の感覚の強さを 1 とした場合に、比較刺激の感覚が何倍に感じられたかを口頭で回答した. 参加者には、コップが唇に触れる直前と嚙下後の 2 つのタイミングでボタンを押すよう指示した. 比較刺激の提示時には、最初のボタン押下でペルチェ素子を駆動させ、2 回目の押下で駆動を

停止した。この一連の手順を1セットとし、全24条件(飲料4種×飲料温度3種×喉頭への温度提示2種)について各1セットを実施した。飲料は50g提示し、その温度は提示直前に赤外線放射温度計で測定した。順序効果を考慮して、提示する飲料および喉頭への温度条件の順序は参加者間でランダム化した。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 全体の結果

マグニチュード推定法で得られたデータは対数変換をした後に、個人間で尺度のスケールが違うため、参加者ごとの値を平均が0、標準偏差が1となるように標準化した。標準化は、参加者のすべてのデータの平均値と標準偏差を求め、各評価値から平均値を減算し、さらに標準偏差で除算した。標準化した評価データに対し Shapiro-Wilk 検定を実施したところ、すべての評価項目で正規分布ではなかったため、ノンパラメトリック検定である Friedman 検定を実施した。そして、Bonferroni 法で多重比較を行い、各評価データとの有意差を調査した。図4に、有意差を示した条件が多かった評価項目の実験結果を示す。

喉頭への加温刺激は、加温オレンジジュース ($p < 0.01$) と加温水 ($p < 0.05$) の条件で、基準よりも有意に喉頭の温かさを強く感じる事が分かった。また、冷却ジュース ($p < 0.05$) と冷却緑茶 ($p < 0.05$) では、基準よりも有意に喉頭の冷たさを強く感じた。

また、喉頭への加温刺激は、飲料の温度の知覚にも影響を与えることが分かった。加温オレンジジュースと加温緑茶では基準よりも飲料の温かさを強く感じる傾向があり ($p < 0.1$)、加温水では基準よりも有意に飲料の温かさを強く感じる事が分かった ($p < 0.05$)。冷却リンゴジュース ($p < 0.1$) と常温リンゴジュース ($p < 0.05$)、冷却水 ($p < 0.05$) において、基準よりも有意に飲料の冷たさを強く感じる事が分かった。

加温緑茶において、喉頭への加温刺激は基準よりも「口中香」が増す傾向があった ($p < 0.1$)。加温リンゴジュースと加温緑茶において、喉頭への加温刺激は基準よりも「味の濃さ」が増す傾向があることが分かった ($p < 0.1$)。

喉頭への冷却刺激は、冷却飲料の飲用時に「のど越し」が向上し、冷却または常温のジュースや緑茶では「おいしさ」と「心地よさ」の評価が向上する傾向があることが分かった ($p < 0.1, p < 0.05$)。一方で、喉頭への加温刺激の効果は、飲料の温度に依存することが分かった。常温飲料の飲用時に喉頭を加温すると「のど越し」や「心地よさ」の評価は低下する条件があった ($p < 0.1, p < 0.05$)。しかし、加温オレンジジュース ($p < 0.1$) や加温緑茶 ($p < 0.05$) のように飲料自体が温かい場合には、喉頭を加温することで「心地よさ」が向上することが分かった。

常温オレンジジュースにおいて、喉頭への加温刺激は冷

却刺激よりも「酸味」が増加する傾向があった ($p < 0.1$)。その他の条件において、有意な差はなかった。

4.3.2 飲用中の喉頭温度変化(実験1)との関連性

本章の実験結果の個人差が、実験1で得られた個人の感覚特性から予測可能であるかを調査するため、相関分析による定量的評価を行った。なお、ここで用いる個人の感覚特性は、実験1において参加者ごとに構築し、高い予測精度を示したランダムフォレスト (RF) 回帰モデルから算出された、各特微量の SHAP 値の平均絶対値と定義する。

4.3.2.1 個人差に応じた温度提示効果の定量的分析

喉頭への温度提示に対する個人差が、実験1で特定された感覚特性によって予測可能であるかを調査するため、全20名の参加者を対象に相関分析を実施した。各参加者について、実験1の個人モデルから得られる各特微量の SHAP 値の平均絶対値を算出することで、個々の感覚特性を定量化した。全体の特微量重要度の分析結果に基づき、最も影響力の高かった3つの温度特微量、飲用後の平均温度、飲用中の平均温度、そして飲用中の温度分散に着目した。喉頭への温度提示における効果の大きさは、マグニチュード推定法で得られた評価値から1を減算した値を変化量として定義した。

線形関係性を評価するためにピアソンの積率相関係数 (r) を、単調関係を評価するためにスピアマンの順位相関係数 (r_s) をそれぞれ算出した。結果を表2に示す。

分析の結果、飲用後の平均温度の SHAP 値と、冷却刺激が「のど越し」評価に与える効果との間に、統計的に有意な正の線形相関があった ($r = 0.542, p = 0.014$)。しかし、対応するスピアマンの順位相関係数は有意ではなかった ($r_s = 0.137, p = 0.563$)。さらに、飲用後の平均温度の SHAP 値と、冷却刺激が「心地よさ」評価に与える効果との間のスピアマン相関において、有意傾向があり ($r_s = 0.382, p = 0.097$)、この評価項目に対しては弱い単調関係が存在することが分かった。その他の相関については、有意な差はなかった。

4.3.2.2 事例分析

定量的分析で示された個人間の異なる応答をさらに具体的に示すため、これらの差異を示す2名の参加者 N と W の詳細な分析を提示する。図5(a)に、飲料の種類に応じた飲用中の喉頭温度分散の結果を示す。

各参加者について、マグニチュード推定法で得られたデータを分析し、喉頭への温度条件(冷却、基準、加温)における食味認知の変化を検証した。データは Shapiro-Wilk 検定の結果、正規分布に従わなかったため、Friedman 検定を行い、その後 Bonferroni 法による事後比較を用いて有意差を検定した。参加者 N と W の結果を図5(b)に示す。

図5(a)に示すように、参加者 N は実験1において、不快刺激 (cf: カフェイン溶液) を摂取した際の飲用中における喉頭温度の分散が、他の飲料と比較して有意に大きかつ

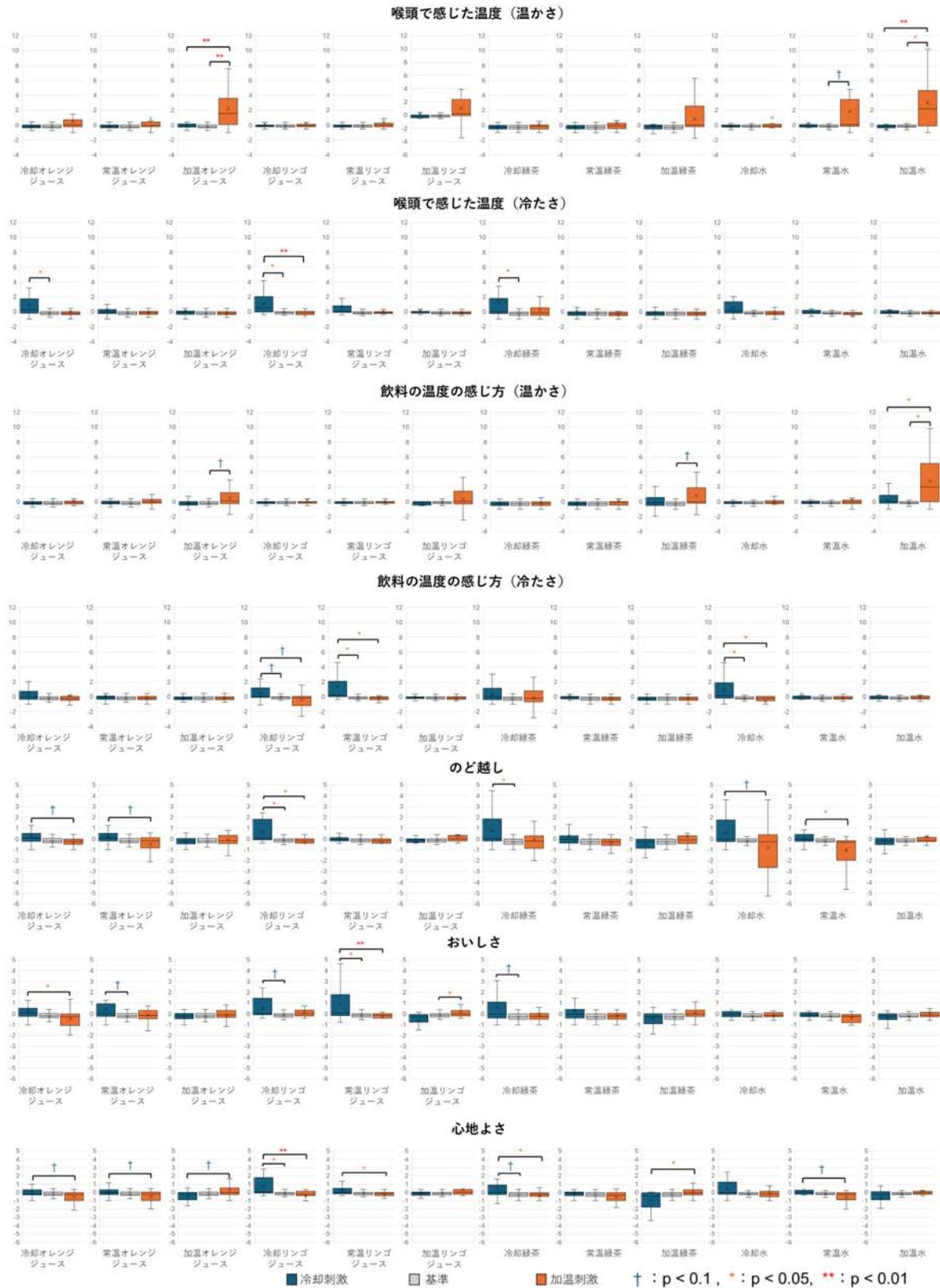


図 4 喉頭への温度提示が各食味認知評価に与える影響

た。参加者 N の食味認知は喉頭への温度提示によって有意に変化した (図 5(b))。具体的には、喉頭への冷却刺激により「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」の評価が基準と比較して有意に向上した。

対照的に、参加者 W は実験 1 において、飲料の種類に

よる喉頭温度特徴量への統計的に有意な影響はなかった。これに対応して、実験 2 においても、参加者 W は喉頭への温度提示による食味認知の有意な変化はなかった。

表 2 SHAP 値の絶対値の平均値と喉頭への温度提示による主観評価への影響との相関関係

| 特徴量 | 喉頭への冷却刺激 | | 喉頭への加温刺激 | |
|------|---------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| | Pearson's r | Spearman's r_s | Pearson's r | Spearman's r_s |
| のど越し | 飲用後の平均値 | 0.542 (p=.014) | 0.137 (p=.563) | 0.083 (p=.728) |
| | 飲用中の平均値 | -0.155 (p=.513) | -0.002 (p=.995) | -0.082 (p=.730) |
| | 飲用中の分散 | 0.229 (p=.332) | 0.182 (p=.441) | -0.142 (p=.549) |
| おいしさ | 飲用後の平均値 | 0.021 (p=.932) | 0.190 (p=.422) | 0.058 (p=.810) |
| | 飲用中の平均値 | 0.042 (p=.861) | 0.125 (p=.598) | 0.160 (p=.501) |
| | 飲用中の分散 | 0.076 (p=.750) | -0.004 (p=.987) | 0.093 (p=.697) |
| 心地よさ | 飲用後の平均値 | 0.064 (p=.788) | 0.382 (p=.097) | 0.149 (p=.529) |
| | 飲用中の平均値 | 0.000 (p=.999) | 0.173 (p=.466) | 0.016 (p=.947) |
| | 飲用中の分散 | -0.069 (p=.774) | 0.200 (p=.399) | -0.130 (p=.584) |

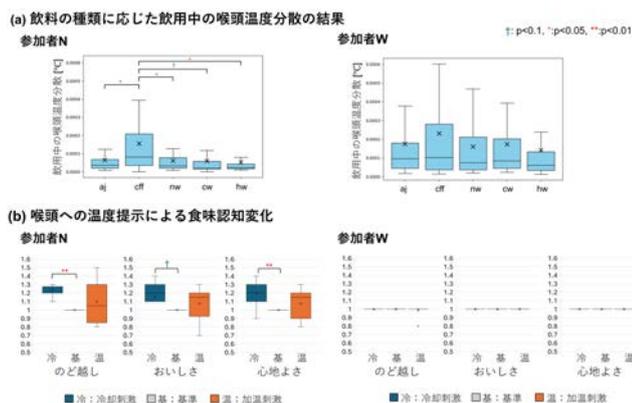


図 5 飲用中の喉頭温度の分散の結果と喉頭への温度提示による実験結果

5. 議論

5.1 実験 1 の考察: 食味認知の定量化における個人差

3.4 節より、飲料摂取中の主観的な食味認知である「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」が、喉頭部の皮膚温度と摂取量の組み合わせから定量的に予測可能であることを示しており、個人内の機械学習の結果、高い予測精度 (平均 $R^2 = 0.65-0.70$) を達成した。この性能は、EEG や他の末梢生体信号といった、より複雑なマルチモーダルな生体信号を用いて感情状態を推定した関連研究と同等の精度である。例えば、鼻部のサーモグラフィを用いた味覚応答に関する関連研究では、最大で R^2 が 0.49 に相当する性能が報告されている [5]。本研究で得られた決定係数 ($R^2 = 0.65-0.70$) は、数値予測としては中程度の精度ではあるものの、個人の嗜好の傾向や、快・不快の大きな判別を行うインタラクションの入力としては十分な水準であり、関連研究と比較してもより高い決定係数となっている。このことから、本手法は食味認知を推定するための、実用的で負担の少ない手法である可能性を示している。

また、摂取量は「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」といった評価の最も強力な予測因子であった。この結果は、人が好ましいと感じるものをより多く消費するという原則と一致しており [33]、摂取量が食味認知における快評価の主要な行動指標として機能することを示している。しかし、摂取量は「飲み終わった後の総量」という事後的な結果であり、飲用中のリアルタイムな状態推定には適さない

という課題がある。これに対し、本手法で用いた喉頭温度は、嚥下という瞬間の生理反応を捉えることができる。表 1 に示す通り、ランダムフォレスト等の特定のモデルでは、喉頭部の皮膚温度変化を組み合わせることで予測精度が向上することも確認された。これは、摂取量が嗜好の結果としての行動指標を示すのに対し、喉頭温度のような生理的信号は、飲料の特性や嚥下に伴う身体的反応そのものを捉えており [2]、その嗜好の質的な側面や個人差を捉える上で補助的な情報となることを示していると考えられる。例えば、最初の一口目の喉頭温度変化からユーザの「のど越し」を推定し、不足している場合は即座に喉頭部に冷却刺激を提示して食体験を増強することを目的とする場合、事後的な摂取量ではなく、リアルタイムな喉頭温度の情報が不可欠となる。また、次章で述べるように、この生理指標の変化が生じる部位に温度を提示することで食味認知が変容するという事実は、この部位の状態計測の重要性を支持するものである。

最後に、SHAP 分析により、摂取量が予測の主要な要因である一方で、喉頭皮膚温度変化の寄与度は個人によって異なることが明らかになった。この定量化された感覚特性は、個人に合わせた食味認知を提示する上で重要な指標となり得る。

5.2 実験 2 の考察 1: 温度提示の全体的効果

特定の顔面領域への温度提示が味覚や食味認知を変化させることを示した関連研究 [16-19] と一致して、喉頭への温度提示も食味認知を変容させることが明らかになった。

喉頭への温度提示は、その温度提示条件が飲料の温度と一致している場合にのみ、より強く知覚された。これは、飲料が身体内部の咽頭を通過する際に生じる身体内での温度感覚と、喉頭皮膚表面への温度刺激が、近い身体部位で同時に生じたため、それらの情報が統合されて知覚された可能性があると考えられる。飲料の温度と喉頭への温度条件が一致する場合 (例: 冷却飲料と冷却刺激) は、感覚が強調されてより強く知覚され、一致しない場合 (例: 冷却飲料と加温刺激) は、予期しない温度感覚となり、喉頭への温度提示が明確に感じられなかったと考えられる。

さらに、喉頭への加温刺激は加温飲料をより温かく感じさせ、冷却刺激は冷却飲料をより冷たく感じさせた。また、

喉頭への冷却刺激は、冷却飲料の飲用時に「のど越し」が向上し、冷却または常温のジュースや緑茶では「おいしさ」と「心地よさ」の評価が向上する傾向があり、飲料自体が温かい場合には、喉頭を加温することで「心地よさ」が向上することが分かった。この結果は、嚥下と同期させた後頭部への冷却刺激が食品の冷たさの知覚を増強することを示した関連研究 [20] と一致する。本実験の結果は、この効果が「のど越し」という感覚が生じる部位そのものである喉頭部でも誘発されることを示している。そして、飲料から期待される温度感覚と、喉頭への温度刺激が一致した場合（例：冷却飲料と冷却刺激）、感覚は増強され「のど越し」「おいしさ」「心地よさ」の向上といった肯定的な評価につながったと考えられる。

5.3 実験2の考察2:

個人差に応じた喉頭への温度提示の効果

実験1の感覚特性（SHAP 値）と実験2の温度提示効果の相関分析は、喉頭への温度提示の効果に個人差があることを示している。「のど越し」と冷却刺激の効果について、飲用後の平均温度の SHAP 値との間にピアソンの相関分析では有意な差があったが ($r = 0.542, p = 0.014$), スピアマンの順位相関は有意な差はなかった ($r_s = 0.137, p = 0.563$)。この結果の不一致は、一部の参加者の結果が強く影響していると考えられる。

参加者 N と W の事例分析は、このような個人差の具体例を示している。参加者 N は、実験1において不快刺激（カフェイン）で喉頭温度の分散が有意に大きくなるという特徴があり、実験2では冷却刺激によって食味認知の評価が有意に向上した。これは、実験1での喉頭温度の分散と、実験2での温度提示の効果に関連している可能性があると考えられる。一方で、参加者 W は実験1で飲料による喉頭温度の特徴量に有意な差はなく、実験2でも温度提示による有意な食味認知の変化はなかった。このような個人差がある理由として、喉頭部の TRP チャネルの密度や、皮膚の厚さ、血流量といった違いが、実験1での飲用中の喉頭温度変化や、実験2での温度提示による食味認知変化に影響を与えた可能性があると考えられる。

また、このような個人差は、本研究で提案する手法を汎用的なシステムとして実装する上での課題となる。この課題に対応するため、個人の感覚特性を把握し、喉頭への温度刺激を調整する方法が有効であると考えられる。例えば、実験1と同様に飲用時の喉頭温度変化を計測し、その計測結果に基づいてユーザをいくつかの類型に分類する。そして、その類型に応じて、喉頭への温度刺激の有無や強弱を調整することで、個人に最適化された食味認知の変化が期待できる。

5.4 本研究の限界

本研究にはいくつかの限界が存在する。食味認知が喉頭

温度にどのように影響を及ぼし、喉頭への温度提示が食味認知を変容させるのか、そのメカニズムは明らかになっていない。本実験で示したのは相関関係であり、喉頭温度の変化が食味認知の変化を引き起こすという因果関係の実証はできていない。今後は、この因果関係を特定し、その背景にあるメカニズムを解明する必要がある。

また、本実験の参加者は、日本の大学生および大学院生に限られている。文化的背景や過去の経験が、食味認知とそのクロスモーダルな変容に重要な役割を果たすことが知られている [1, 34]。したがって、本研究の知見が異なる年齢層や食習慣を持つ人々にも当てはまるかは、今後の検証が必要である。

5.5 今後の展望

今後の研究では、センシングモデルと温度提示をリアルタイムで接続するシステムを開発する。ユーザの生理状態に基づいて、喉頭への温度提示を動的に制御するシステムの実装を目指す。さらに、複数のペルチェ素子を嚥下に合わせて駆動させることで喉頭部に温度の仮現運動を生成するシステムの構築も今後の課題である。また、本研究で提案した手法が、多様な飲料や食品に対して有効であるか検証する。加えて、本実験ではモデルの精度検証のために1人あたり計250試行のデータを取得したが、実用的なアプリケーションを想定した場合、ユーザごとの学習コストの削減が不可欠である。今後は、数回の試行でモデルを適合させる学習の導入や、日常的な飲用行動から半教師あり学習的にモデルを更新する枠組みの検討も必要である。今後は、年齢や文化的背景が異なる、より多様な参加者を対象とした研究も必要である。また、嚥下中の筋活動を測定する筋電図など、他の生理センサを組み込むことも考えられる。これにより、嚥下の強さや速度を取得することができ、予測精度の向上や、メカニズムの理解に繋がる可能性がある。

6. まとめ

本研究では、「のど越し」に代表される主観的な食味認知を客観的に捉え、変容させる手法として、感覚が生じる喉頭部に着目した。具体的には、喉頭部の皮膚表面温度と摂取量を用いた食味認知の定量化、および喉頭部への直接的な温度提示による食味認知の変容という、2つの側面から評価した。

実験の結果、喉頭部の皮膚温度と摂取量を組み合わせることで、個人の食味認知を精度良く推定できることを示した。さらに、喉頭部への局所的な温度提示が「のど越し」を含む食味認知を有意に変化させること、またその効果が個人の感覚特性を反映して変化することを明らかにした。

本研究で得られた知見は、喉頭部が飲料の感覚を評価し変容させるための重要な身体部位であることを示している。これは、食味認知のセンシングとその提示が喉頭部で

完結するインタラクションの可能性を示すものである。今後は、本研究で明らかになった個人差の定量的分析をさらに進め、リアルタイムでの計測と食味認知変化を実現するシステムの構築が課題となる。提案手法は、将来的には多様な飲料や食品へと適応し、個人の状態や嗜好に合わせて食体験を動的に変化させることで、より豊かで健康的な食生活を支援する基盤技術となることが期待できる。

謝辞 本研究は砂原秀樹教授（慶應義塾大学）と池永全志教授（九州工業大学）に有益な助言をいただいた。本研究の一部は、JSPS 科研費 JP22K18424 と JP24KJ1917 の助成を受けた。また、JST ACT-X, JPMJAX24M3 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Spence, C.: Multisensory Flavor Perception, *Cell* (2015).
- [2] Takatsuji, H. et al.: Physiological and pharmacological actions involved in the pharyngeal and laryngeal sensation, *Folia Pharmacologica Japonica* (2015).
- [3] Kosonogov, V. et al.: Facial thermal variations: A new marker of emotional arousal, *PLoS One* (2017).
- [4] Kashima, H. et al.: Palatability of Tastes Is Associated With Facial Circulatory Responses, *Chemical Senses* (2014).
- [5] Asano, H. et al.: Comparison with Amount of Gustatory Sense and Nasal Skin Temperature, *Journal of Robotics and Mechatronics* (2009).
- [6] Hidetaka, N. et al.: Changes in Masticatory Muscle Activity Over Time by Facial Skin Temperature Area During Gum Chewing, *Oral Health and Dental science* (2021).
- [7] Koizumi, S. et al.: Chewing reduces sympathetic nervous response to stress and prevents poststress arrhythmias in rats, *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* (2011).
- [8] Davey, S. et al.: Where is emotional feeling felt in the body? An integrative review, *PLoS One* (2021).
- [9] Aihara, K. et al.: Development and validation of a device for monitoring laryngeal motion during swallowing, *Frontiers in Robotics and AI* (2023).
- [10] Chen, S. et al.: A sensor-actuator-coupled gustatory interface chemically connecting virtual and real environments for remote tasting, *Science Advances* (2025).
- [11] Chalmers, A. et al.: Virtual Flavor: High-Fidelity Simulation of Real Flavor Experiences, *IEEE Computer Graphics and Applications* (2023).
- [12] Aoyama, K. et al.: Galvanic tongue stimulation inhibits five basic tastes induced by aqueous electrolyte solutions, *Frontiers in Psychology* (2017).
- [13] Narumi, T. et al.: Augmented Reality Flavors: Gustatory display based on edible marker and cross-Modal interaction, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2011).
- [14] Nakano, K. et al.: Enchanting Your Noodles: GAN-based Real-time Food-to-Food Translation and Its Impact on Vision-induced Gustatory Manipulation, *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Osaka, Japan, IEEE (2019).
- [15] Koizumi, N. et al.: Chewing Jockey: Augmented food texture by using sound based on the cross-modal effect, *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2011).
- [16] Suzuki, C. et al.: Affecting Tumbler: Affecting our flavor perception with thermal feedback, *Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2014).
- [17] Karunanayaka, K. et al.: New Thermal Taste Actuation Technology for Future Multisensory Virtual Reality and Internet, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2018).
- [18] Cruz, A. et al.: Thermal stimulation of taste, *Nature* (2000).
- [19] Kamihori, M. et al.: Effects of ± 2 °C cup rim temperature variations relative to beverage temperature on flavor perception, *Applied Food Research* (2025).
- [20] Komiya, S. et al.: Enhancing Food Coldness Perception via Synchronous Posterior Neck Cold stimulus during Swallowing, *ACM Symposium on Applied Perception 2024*, SAP '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2024).
- [21] Meilgaard, M. C. et al.: *Sensory evaluation techniques, fourth edition*, CRC Press, Boca Raton, FL, 4 edition (2006).
- [22] Ninenko, I. et al.: An experimental paradigm for studying EEG correlates of olfactory discrimination, *Front. Hum. Neurosci.* (2023).
- [23] Yoshikawa, T. et al.: Suppressive responses by visual food cues in postprandial activities of insular cortex as revealed by magnetoencephalography, *Brain Research* (2014).
- [24] Gagnon, L. et al.: Neural correlates of taste perception in congenital olfactory impairment, *Neuropsychologia* (2014).
- [25] Kreibitz, S. D.: Autonomic nervous system activity in emotion: A review, *Biological Psychology* (2010). The biopsychology of emotion: Current theoretical and empirical perspectives.
- [26] Roussmans, S. et al.: Autonomic nervous system responses associated with primary tastes, *Chem. Senses* (2000).
- [27] Muroi, P. et al.: Emotional Responses to Pleasant and Unpleasant Oral Flavour Stimuli, *Chemosensory Perception* (2011).
- [28] Ekman, P.: An argument for basic emotions, *Cogn. Emot.* (1992).
- [29] Danner, L. et al.: Make a face! Implicit and explicit measurement of facial expressions elicited by orange juices using face reading technology, *Food Quality and Preference* (2014). Special Issue: 5th European Conference on Sensory and Consumer Research (Eurosense) 2012 "A sense of inspiration".
- [30] de Wijk, R. A. et al.: Autonomic nervous system responses on and facial expressions to the sight, smell, and taste of liked and disliked foods, *Food Quality and Preference* (2012).
- [31] Shelepenkov, D. et al.: Bodily markers of basic emotions: a thermographic study, *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* (2025). PMID: 40380804.
- [32] Filingeri, D. et al.: Characteristics of the local cutaneous sensory thermoneutral zone, *J. Neurophysiol.* (2017).
- [33] Genschow, O. et al.: The color red reduces snack food and soft drink intake, *Appetite* (2012).
- [34] Wan, X. et al.: Cross-cultural differences in crossmodal correspondences between basic tastes and visual features, *Front. Psychol.* (2014).