

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26245073

研究課題名(和文) 嗅覚による味覚変化の時間特性の解明：実験心理学・脳機能計測・動物行動学の統合研究

研究課題名(英文) Temporal traits of interaction between gustation and olfaction

研究代表者

和田 有史(WADA, Yuji)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品研究部門 食品健康機能研究領域・上級研究員

研究者番号：30366546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,800,000円

研究成果の概要(和文)：前・後鼻腔経路に呼吸と連動して嗅覚刺激を呈示する装置を開発し、成人を対象とした実験を行った結果、嗅覚による味覚増強効果は摂食中の呼吸との時間特性が影響することを解明した。

非日常的な化学感覚同士の同時性判断は、物理感覚同士のそれと同等だが日常で経験する味嗅覚刺激のペアでは時間分解能が低かった。さらにERPによる脳活動測定の結果、味嗅覚同時刺激に対するピーク波形を見出した。

また幼児対象の実験を行い新奇の匂いよりも乳児期から摂食経験がある匂いの方が甘味溶液の摂取を促進した。マウスを用いた実験では味質と嗅覚刺激の組み合わせの経験によって嗅覚による味覚増強が起こる組み合わせが変化することを示した。

研究成果の概要(英文)：We developed a device for olfactory stimulation via ortho and retronasal routes synchronized with breath. We found that a retronasal odor after drinking enhanced taste, but an orthonasal odor before drinking did not. These results show that congruency with the natural temporal order of stimuli is a determining factor for odor-induced taste enhancement.

Temporal resolution of simultaneity judgment with an unusual pair of gustation and olfactory stimuli did not differ from those of the normal pair of physical senses, whereas the temporal resolution of the usual pair of chemical senses was reduced compared to that of unusual pair. In addition, we found that the P1 amplitude of the Event-related potential was large for simultaneous taste and olfactory stimulation.

Our study in toddlers showed odor, which is familiar from infancy, more greatly enhances the intake of a sweet solution than does a novel odor. In addition, the congruency of taste and olfaction in mice changes with learning.

研究分野：実験心理学

キーワード：嗅覚 味覚 感覚間相互作用 時間特性 発達

1. 研究開始当初の背景

食品が眼前にあるときには、鼻腔から匂いが嗅粘膜に届く。これを前鼻腔経路という。その一方で、食品を咀嚼し、飲み込んだ後は、口腔から嗅粘膜に匂い物質がとどく。これを後鼻腔経路という。両経路とも嗅粘膜に匂い物質が届くことは同じだが、そのタイミングが異なる。心理学、動物行動学的研究により、知覚における匂いと味の連合の強さが古くから報告されてきた。しかし、両感覚刺激の時間特性に関する研究は少ない。その原因として、食品からの匂いのタイミングは複雑であり、そのために厳密にコントロールした条件での刺激呈示が困難であることが挙げられる。

また、味嗅覚相互作用を生じさせる脳内基盤と時間特性も再検討する必要がある。一般的な知見に基づく二次味覚野である眼窩前頭皮質が味嗅覚相互作用の生じる部位の候補となる。しかし、最近、小早川らは、塩味強度でさえ、二次味覚野から第一次味覚野へのフィードバックが存在することを示し、複雑な脳内基盤と時間特性の存在を仮定できる。実験動物を用いた研究では味嗅覚連合は非常に早くに成立することは示されている。また人間においては、新生児期にも嗅覚による嗜好の存在が報告されているが人間の乳幼児期での味嗅覚修飾の成立に関する研究は少ない。

このように、味嗅覚相互作用については、①味嗅覚修飾の時間特性の心理物理学的特性、②味嗅覚修飾の脳内処理の時間特性、③味嗅覚修飾の発達・獲得過程、という3つの時間特性がミッシングピースである。

2. 研究の目的

本研究は心理物理学・発達心理学・動物行動学・栄養学・脳神経科学、さらにはマイクロデバイス工学技術の研究者を結集し、味嗅覚修飾の時間特性の解明を試みた。

3. 研究の方法

(1) 実験用嗅覚デバイスの開発と嗅覚による味覚促進効果の検討

呼吸に連動した嗅覚による味覚促進を検討するにあたり、実験参加者の呼吸のタイミングに合わせて嗅覚刺激の時間と量を正確に制御して呈示するための装置を作成した(図1)。この装置は、マイコンボードを基に自作作成した電子回路でモータを稼動する。鼻孔の近くに温度変化を測定するセンサを設置し、この装置に連動させて、呼吸の状態を把握できるようにした。さらに、マイコンボードをPCにより制御して、呼吸が吸気であるか呼気であるかとモータの動きを連動させるプログラムを作成した。このプログラムでモータの回転の強さと時間を調整して、匂いの量を制御できるようにした。この装置と、香料を入れる匂い瓶をチューブで繋ぎ匂い呈示できるようにした。呼吸センサと刺激呈示チューブを束ねてヘッドホンに固定して、ヘッドセットにして装着しやすくした(図2)。

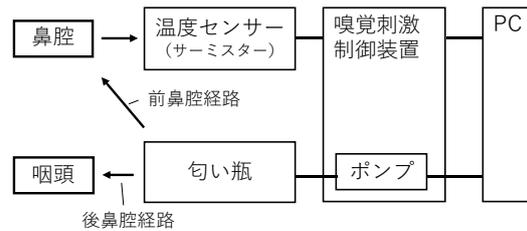


図1 嗅覚ディスプレイの模式図

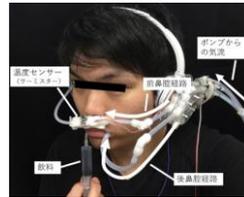


図2 嗅覚ディスプレイのヘッド

この装置を用いて嗅覚刺激を受けながら溶液の味の強度を評価させる課題をおこなった。実験参加者は18名であった。嗅覚刺激にはバニラエッセンスを、味覚刺激にはショ糖を用いた。味覚刺激は溶液

の入ったシリンジを参加者自ら持ち、指示に合わせてプランジャーを押し込んで溶液を飲ませた。その後、線尺度法を用いて味の強度の評価を求めた。なお、呼吸や溶液を飲むタイミングはモニターに表示される指示に従わせた。実験計画は匂い呈示条件3水準(匂いなし・前鼻腔経路・後鼻腔経路)と溶液濃度条件2水準(0.0%・2.0% w/w)の2要因計画とした。この実験では、10名の参加者には前鼻腔刺激を味覚刺激よりも先に呈示し、後鼻腔刺激を味覚刺激よりも後に呈示したが、別の8名の実験参加者は後鼻腔刺激を味覚刺激よりも先に呈示し、前鼻腔刺激を味覚刺激よりも後に呈示する条件下の実験に参加した。

(2) 嗅覚促進の脳内基盤の解明

嗅覚-視覚、視覚-味覚、嗅覚-味覚の組み合わせを用いた同時性判断課題を実施するための計測システム(図3)を構築した。

嗅覚刺激呈示には“Olfactometer OM4”を用いた。刺激呈示先端部にチューブを取り付け、参加者の片方の鼻腔に約1cm挿入した(図3b)。鼻腔への圧力および温度変化を避けるため、鼻腔内には常時空気を呈示し、空気の流れの中に窒素でバブリングした臭気をパルス状に挿入した。臭気の実感強度は6段階尺度([0]感知できない~[5]強烈)における「3: 楽に感知できる」程度、刺激呈示時間は400ミリ秒、流量は毎分7.5L、空気・臭気の温度は鼻腔内の温度(約36°C)と同程度とした。

味覚刺激の呈示には、自主開発した装置を

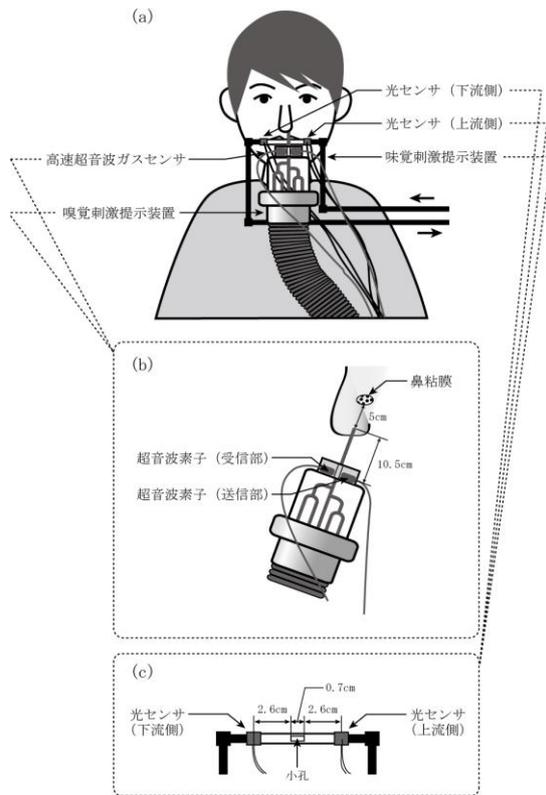


図3 嗅覚刺激と味覚刺激の呈示法

用いた。実験協力者は側面に $0.7 \times 0.3 \text{ cm}$ の小孔の空いたテフロンチューブをくわえ、小孔を舌尖中央にあてた (図3c)。テフロンチューブ内には常時脱イオン水を流し、水流の中に無味の食用色素で赤く着色した味溶液をパルス状に挿入した。小孔の両側には、光センサと光ファイバを設置した。光ファイバを介して照射された青緑LED光の透過率を電圧に変換することにより、刺激呈示の実時間モニタリングを行った。味溶液の感覚的強度は「楽に感知できる」程度、刺激呈示時間は500ミリ秒、流量は毎分120mL、脱イオン水および味溶液の温度は舌の温度 (約 36°C) と同程度とした。視覚刺激の光源としてLEDを用いた。

同時性判断課題では、実験協力者に対して様々な時間差 (以後 SOA) で二つの刺激を呈示する。便宜上、二種類の刺激の組み合わせにおける一方の刺激を「標準刺激」、もう一方の刺激を「比較刺激」と呼ぶ。視覚-味覚、嗅覚-味覚の組み合わせでは、味覚刺激が標準刺激、視覚刺激と嗅覚刺激を比較刺激とした。嗅覚-視覚の組み合わせでは、視覚刺激を標準刺激、嗅覚刺激を比較刺激とした。SOA を $-1900 \sim 1900$ ミリ秒に設定した場合には、標準刺激が比較刺激より早く呈示される15段階 (プラス表記の SOA)、比較刺激が標準刺激

より早く呈示される15段階 (マイナス表記の SOA)、二つの刺激が同時に呈示される1段階 (0秒) の計31段階を設定し、1セッションにつき各 SOA を3試行ずつ組み込んだ。SOA を $-800 \sim 800$ ミリ秒に設定した場合には、標準刺激が比較刺激より早く呈示される11段階 (プラス表記の SOA)、比較刺激が標準刺激より早く呈示される11段階 (マイナス表記の SOA)、二つの刺激が同時に呈示される1段階 (0秒) の計23段階を設定した。

【実験1】嗅覚-視覚、視覚-味覚、嗅覚-味覚の組み合わせを用いた同時性判断課題に10人の実験協力者が参加した。嗅覚刺激として桜の葉香、味覚刺激として食塩水、視覚刺激として赤色光を用いた。SOA は $-1900 \sim 1900$ ミリ秒に設定し、各組み合わせについて4セッションずつ実施した。

【実験2】嗅覚-味覚がマッチしている組み合わせ (醤油香と食塩水) とマッチしていない組み合わせ (桜の葉香と食塩水) を用いた同時性判断課題を実施し、マッチ条件11人、ミスマッチ条件10人が参加した。解析には、両条件に参加した10人のデータを用いた。SOA は $-800 \sim 800$ ミリ秒とし、各組み合わせについて3セッションずつ実施した。

【実験3】嗅覚-味覚の組み合わせ (醤油香と食塩水) を用いた同時性判断課題実施中の事象関連電位計測に5人の実験協力者が参加した。SOA は $-800 \sim 800$ ミリ秒に設定し、4セッション実施した。事象関連電位に関しては、国際10-20法における Cz から両耳朶平均を基準とする単極導出を行った。サンプリング周波数は 625 Hz とし、 100 Hz のハイカットフィルタおよび 0.16 Hz のローカットフィルタをオンラインで用いた。

(3) 味嗅覚修飾の発達・獲得過程

マウスを1週間馴化させた後、2群に分け、A群にはバニラ香を付加したショ糖溶液、B群にはオレンジ香を付加したショ糖溶液を使って、リックカウンティング連続測定装置での溶液摂取に慣れるトレーニングを2週間行った。オレンジ香、バニラ香の終濃度が $6, 12 \text{ ppb}$ となるように調製した。この期間、A群にはオレンジ香を付加した食塩水、B群にはバニラ香を付加した食塩水を呈示し、香りと味の組み合わせ対呈示を経験させた。トレーニング後、20時間絶食させたマウスに香付加したショ糖溶液・食塩水に対する10秒間のリック

数を測定した。事前の対呈示で経験させた組み合わせ通りに、水→香付加 2%シヨ糖溶液→香付加 150 mM 食塩水→水→香付加 150 mM 食塩水→香付加 2%シヨ糖溶液の順の呈示セットを 3 回繰り返した。別の日に、バニラ香を付加した 2%シヨ糖溶液、オレンジ香を付加した 2%シヨ糖溶液、水のみを用いて、同様のリック試験を行った。次に、食塩無添加にて調製した飼料に利尿作動薬の 1 種であるスピロラク톤を 0.03%になるように添加した脱塩飼料のみを呈示して 3 週間飼育した。4 時間以上絶水させたマウスを用いて、上記リックカウンターにて、香を付加したシヨ糖溶液・食塩水に対する 10 秒間のリック数を測定した。リック機器において最初に 300 秒間水を呈示した後、事前に対呈示された組み合わせ通りに、水→香付加 2%シヨ糖溶液→香付加 150 mM 食塩水→水→香付加 150 mM 食塩水→香付加 2%シヨ糖溶液の順の呈示セットを 3 回繰り返した。リックのデータ解析は上述と同様に行った。別の日に、バニラ香を付加した 150 mM 食塩水、オレンジ香を付加した 150 mM 食塩水、水のみを用いて、同様のリック試験を行った。さらには、食塩濃度を 60 mM に減じた溶液を用いた実験を行った。



図 4 匂い玉つきのマグカップ

人の幼児を対象とした実験では、48名の乳幼児(1歳児群: 24名、平均日齢 = 538.0, SD = ±87.6; 2歳児群: 24名、平均日齢 = 842.0, SD = ±72.3)が実験に参加した。なお、他に 22 名の子どもが実験に参加したが、実験への参加を途中で拒否したり、実験装置のトラブルや実験者のミスによりすべての手続きを終了できなかったため、分析対象からは除外した。実験では匂い玉付きのマグカップ(図 4)を作成し、デジタルスケールを用いて実験前および実験後のカップの総重量を記録した。カップ内のシヨ糖溶液は 70ml(濃度 1.8%)とし、匂い玉に用いるはちみつの量は 6.0g、醤油は 0.2g であった。参加児は保護者とともにローテーブルの前に座り、1 人の実験者がテーブルの向かい側からカップを保護者または幼児へと手渡した。参加児は、1 人につき 3 種類の

マグカップ(はちみつ条件・醤油条件・無臭条件)をすべて呈示した。カップの呈示時間はそれぞれ 1 分間とし、2 回繰り返して合計 6 分間カップを呈示した。その後、保護者に、参加時がはじめてはちみつや醤油を摂取した時期についてアンケート用紙へ回答してもらい、実験を終了した。

4. 研究成果

(1) 実験用嗅覚デバイスの開発と嗅覚による味覚促進効果の検討

各条件の線尺度法による評価得点について、匂い呈示条件と溶液濃度条件の二元配置の分散分析を行った。その結果、両要因の主効果が有意であった。さらに、事後検定を行ったところ、後鼻腔経路条件が匂い刺激なし条件と前鼻腔経路条件と比較して溶液の味の強度評価得点が有意に高かった(図 5)。後鼻腔刺激を味覚刺激よりも先に呈示し、前鼻腔刺激を味覚刺激よりも後に呈示する条件下では、嗅覚による味覚促進は観察されなかった。この結果は、呼吸と連動した嗅覚刺激呈示においては、後鼻腔経路からの匂い呈示が味覚強度の増強を引き起こすことを示す一方で、前鼻腔経路での匂いの効果はないか、微弱である可能性を示唆している。

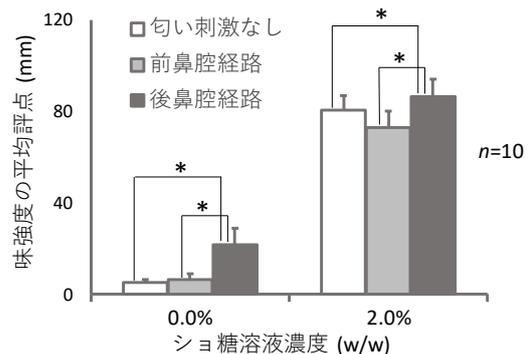


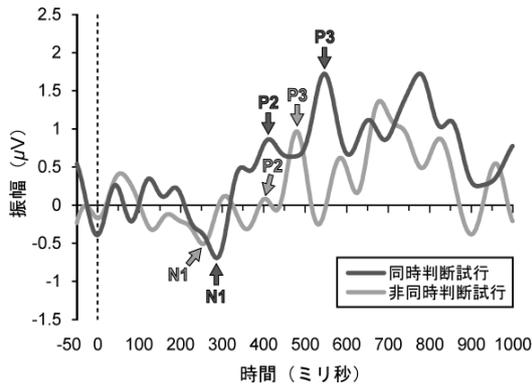
図 5 味覚刺激に先行して前鼻腔刺激を呈示し、味覚刺激に後続して後鼻腔刺激を呈示した実験での味覚強度評定の結果

*は多重比較により検出した有意差 ($p < .05$)

(2) 嗅覚促進の脳内基盤の解明

【実験 1】赤色光、桜の葉香、食塩水を用い、異種感覚モダリティ刺激の組み合わせにおける同時性判断課題を実施した。組み合わせごとに同時判断率の時間分布を求め、ガウス関

(a) 嗅覚事象関連電位



(b) 味覚事象関連電位

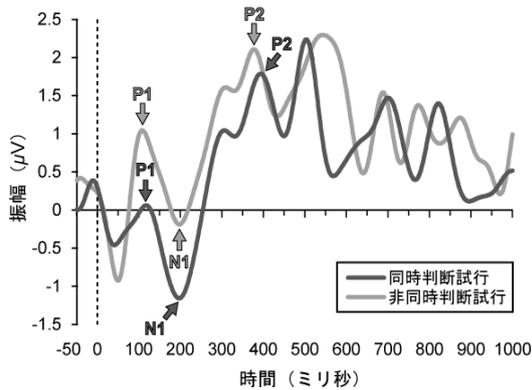


図6 同時判断試行および非同時判断試行における事象関連電位

数を仮定した上で近似式を算出した。近似式の係数が、主観的同時点および半値半幅に相当する。視覚-嗅覚の組み合わせにおける主観的同時点は、物理刺激（視覚、聴覚、触覚刺激）を用いた同時性判断課題と同様に、客観的同時点とほぼ等しい値を示した。一方、視覚-味覚、嗅覚-味覚の組み合わせにおける主観的同時点は、客観的同時点から有意に遠ざかった。半値半幅に関しては、いずれの組み合わせ間においても差はなかった。しかし、化学感覚が関わる刺激の組み合わせは、物理刺激同士の組み合わせに比べて、低い半値半幅を示した。これらの結果は、同時性知覚における化学感覚（特に味覚）の特異性を示唆している。

【実験2】嗅覚-味覚の組み合わせを用い、マッチ条件（醤油香と食塩水）と mismatch 条件（桜の葉香と食塩水）で同時性判断課題を実施した。主観的同時点に関しては、組み合わせ間で差はなかった。また、いずれの組み合わせにおける主観的同時点も、客観的同時点から遠ざかった。半値半幅は、 mismat

ch 条件より match 条件の方が有意に大きな値を示した。以上の結果から、嗅覚-味覚のマッチ・ mismatch が、同時性知覚に関わる時間分解能に影響を及ぼすことが示唆された。

【実験3】嗅覚-味覚の組み合わせ（醤油香と食塩水）を用いた同時性判断課題を実施している間の脳活動について検討するため、実施中の事象関連電位の計測を行った。取得した脳電位のデータを同時判断試行と非同時判断試行に分類し、判断試行ごとに嗅覚オンセットを起点とする加算（嗅覚事象関連電位）と味覚刺激オンセットを起点とする加算（味覚事象関連電位）を行った（図6）。味覚事象関連電位における P1 の潜時は、いずれの判断試行においても約 110 ミリ秒であった一方、味覚事象関連電位における P1 成分の振幅は、同時判断試行と非同時判断試行の間で異なった。これらの結果から、味覚刺激オンセットから約 110 ミリ秒の間に、嗅覚と味覚の組み合わせによる同時性判断に影響を及ぼす神経活動が生じていたことが示唆された。

(3) 味嗅覚修飾の発達・獲得過程

甘味とバニラ香の対呈示を経験した A 群では未経験複合刺激（オレンジ香付加シヨ糖溶液）よりも経験済み複合刺激（バニラ香付加シヨ糖溶液）を有意に多くリックし、甘味とオレンジ香の対呈示を経験させた B 群では未経験の組み合わせ刺激（バニラ香付加シヨ糖溶液）よりも経験済み組み合わせ刺激（オレンジ香付加シヨ糖溶液）を多くリックした（図7）。塩味とオレンジ香の対呈示を経験させた A 群では、塩味刺激へのリック数は、テスト時に対

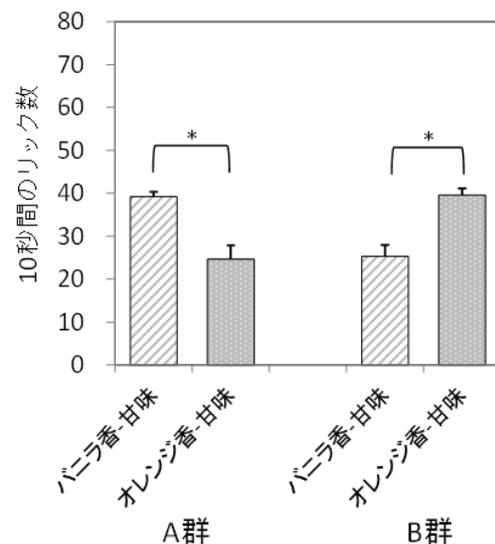


図7 各条件（甘味）におけるリック数。

呈示された香りの種類の間で有意な差は認められなかった一方で、塩味とバニラ香の対呈示を経験させたB群では、未経験の複合刺激（オレンジ香付加食塩水）よりも経験済みの複合刺激（バニラ香付加食塩水）を多くリックした。本研究の結果から、バニラ香は甘味だけではなく、塩味にも連合させることが可能であり、連合学習後は塩味を強く感じさせる効果を持つ可能性が示された。一方、オレンジ香を甘味に連合させることはできたが、塩味に連合させることはできなかった。つまり、甘味よりも塩味の方が連合学習に適した香の種類が限定的である可能性がある。

人の幼児を対象とした実験の結果、1,2歳児ともに、醤油条件において、はちみつ条件よりも有意にシヨ糖水溶液の摂取量が有意に増加した(図8: $p < .05$)。無臭条件とはちみつ条件、無臭条件と醤油条件の間では、シヨ糖水溶液の摂取量にそれぞれ有意差は認められなかった。現在の日本では、1歳未満児のはちみつの摂取は禁忌事項であるため、ほとんどの1,2歳児ははちみつの摂取歴が無い、または比較的短い期間にとどまった(平均0.26年、 $SD = \pm 0.40$)。したがって本実験の参加児にとって、はちみつの匂いは飲食行動と結びつきにくい新奇な匂いであったのかもしれない。一方で、醤油は多くの参加児が比較的長い摂取歴があり(平均1.05年、 $SD = \pm 0.53$)、醤油の匂いと飲食行動との間に高い親近性が獲得されており、シヨ糖水溶液の摂取量が増加した可能性がある。

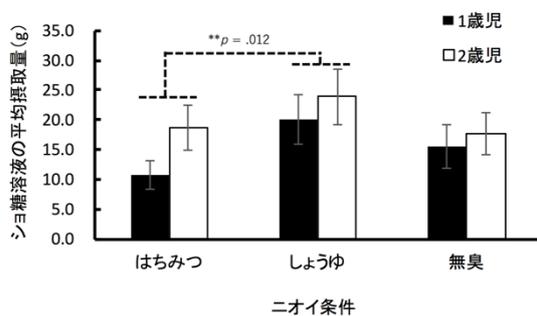


図8 匂い条件ごとのシヨ糖水溶液摂取量。エラーバーは±1標準誤差。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計28件)

- (1) Imura T., Masuda, T., Shirai N., Wada Y., Eleven-month-old infants infer differences in the hardness of object surfaces from observation of penetration events, *Frontiers in*

- Psychology*, 査読有, 6: 1005 巻1-7, (2015)
- (2) Gotow, N., Moritani, A., Hayakawa, Y., Akutagawa, A., Hashimoto, H., Kobayakawa T., High consumption sensitivity to after-flavor of canned coffee beverages, *Food Quality and Preference*, 査読有, 44, 162-171, (2015)
- (3) Gotow, N., Moritani, A., Hayakawa, Y., Akutagawa, A., Hashimoto, H., Kobayakawa T., Development of a Time-Intensity Evaluation System for Consumers: Measuring Bitterness and Retronasal Aroma of Coffee Beverages in 106 Untrained Panelists, *Journal of Food Science*, 査読有, (2015)
- (4) Narumi, T., Miyaura, M., Tanikawa, T., Hirose, M., Simplification of Olfactory Stimuli in Pseudo-gustatory Displays, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 査読有, 20(4), 504-512, (2014)
- (5) Yamada, Y., Sasaki, K., Kunieda, S., Wada, Y., Scents boost preference for novel fruits, *Appetite*, 査読有, 81, 102-107, (2014)
- [学会発表] (計40件)
- [図書] (計4件)
- (1) 今田純雄, 和田有史, 朝倉書店、食行動の科学「食べる」を読み解く、(2017)、239

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 有史 (WADA, Yuji)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品研究部門 食品健康機能研究領域・上級研究員
研究者番号：30366546

(2) 研究分担者

① 河合 崇行 (KAWAI, Takayuki)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品研究部門 食品健康機能研究領域・上級研究員
研究者番号：50425550

② 白井 述 (SHIRAI, Nobu)

新潟大学・人文学部・准教授
研究者番号：50554367

③ 小早川 達 (KOBAYAKAWA Tatsu)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・人間情報研究部門・研究グループ長
研究者番号：70357010

④ 鳴海 拓志 (NARUMI Takuji)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師
研究者番号：70614353

(3) 連携研究者

① 早川 文代 (HAYAKAWA Fumiyo)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・食品研究部門 食品加工流通研究領域・上級研究員
研究者番号：00282905