

味覚センサーの開発と応用

都甲 潔

九州大学大学院システム情報科学研究所 主幹教授
味覚・嗅覚センサ研究開発センター センター長

1. はじめに

おいしさの判定には、味覚、嗅覚、視覚、聴覚、触覚といった五感のみならず、そのときの体調や気分、そして生まれ育った土地柄や食環境すらもきいてくる。従って、食品の味や匂い(香り)、食感(テクスチャー)などに起因するおいしさを評価することは機械では不可能で、人間しかできない、ということになる。このように、私たちの感じる「味」はずいぶん主観的である。各人の好み、感じ方があるのである。「味」や「匂い」は人がいて初めて意味をもつ。「化学物質」が味や匂いをもつわけではない。人が味わって、嗅いで初めて味と匂いが認識されるのである。このような味や匂いは計測できそうにもない。

しかしながら、これは人の舌の味細胞で感じる基本的かつ客観的な味すらも、これまで測ることができなかったことが少なくともその一因であろう。もしも味を数値化できる装置があれば、私たちの食に対する考え方、そして食文化は大きく変わることが期待される。

図 1 に、おいしさを構成する要素を描いている。その中で人の舌で感じる「味」は7つの要因からなる。まずは舌で感じる5つの基本味(甘味、塩味、酸味、苦味、うま味)である。そして、痛覚を刺激する味である辛味と渋味がある。五基本味に加え、辛味と渋味も大事な味である。

本稿では、舌で感じる味に的を絞り、この味を測るセンサーである味覚センサーの原理と応用例⁽¹⁻³⁾を概観してみよう。

2. 味覚センサーの原理と基本味応答

味覚センサーは、脂質と可塑剤、高分子をブレンドした膜(脂質/高分子膜)を味物質の受容部分とし、この複数の受容膜からなる応答電位出力から味を数値化(デジタル化)する。後述のように、センサーの味物質に応答し始める濃度(閾値)がヒトの閾値と近く、応答強度もヒトと同じく対数(log)的に変化するため、単純な比例計算の変換で、基本味の数値化に成功している。味覚の世界に初めて「味の物差し」が提供されたのである。現在インテリジェントセンサーテクノロジー社から味認識装置 TS-5000Z と SA-402B, SA501C が開発・販売されており、これまでに 350 台以上の味認識装置が世界各国で活躍している(図 2)。脂質/高分子膜は、脂質、可塑剤、ポリ塩化ビニルから作られている。脂質は石けんと似た化学構造をもつが、親水基(水になじむ部分)を水相側へ向け、疎水部(水をはじく部分)を膜内部に向けるという構造を自主的にとる。石けんでシャボン玉ができる原理と同じである。

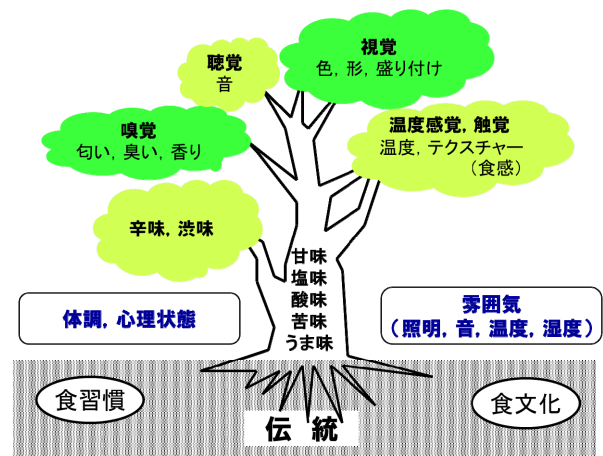


図 1 おいしさを構成する要素

図 3 に味覚センサーの五基本味応答(濃度依存性)を示す^(4,5)。特徴はその応答閾値がヒトと近いこと、また濃度の対数に線形で応答する領域があることであり、これは生体系でよく知られた Weber-Fechner の法則(感覚強度が刺激の対数に比例して変化)と合致する。各味への応答は、各味へ特化した脂質膜センサーの応答である。苦味と酸味の応答閾値が低いのは、これらが一般的に生体にとり毒であるからに他ならない。各味を計測するセンサー電極に名前が記されているが、例えば、BT0 は医薬品の苦味計測用、CA0 は酸味計測用のセ



図 2 味覚センサー(味認識装置 TS-5000Z:(株)インテリジェントセンサーテクノロジー製)

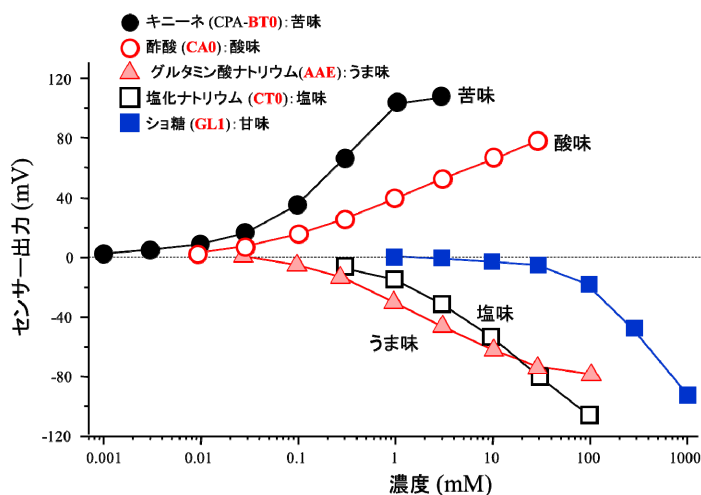


図 3 センサー膜の五基本味応答(濃度依存性)^(4,5)

ンサー電極である。また、BT0 に付した CPA とは、サンプル測定後に膜を十分に洗浄しないで、基準液に直ぐ浸け、その電位応答変化から膜に吸着した化学物質を検出する操作のことで、CPA 値は人でいうところの「後味」に相当する。CPA は、Change in electric Potential due to Adsorption of chemical substances onto the membrane (化学物質の吸着による電位の変化)の略である。CPA 値は、吸着性の味物質や味質に特異的かつ選択的に応答することを特徴とする⁽⁶⁾。

図 4 に医薬品の苦味用の味覚センサーBT0 の五基本味(塩味、酸味、うま味、苦味、甘味)と渋味への応答を示す^(4,5)。この苦味用センサーは甘味、酸味、塩味、うま味、渋味にはほとんど応答せず、苦味を呈するキニーネ、ヒドロキシジン、セチリジン、ブロムヘキシンの塩酸塩に大きく応答していることがわかる。また、センサーは人による官能検査結果と一致する出力を示す。つまり、人が苦いと感じる化学物質には大きなセンサー出力、あまり苦くない物質には小さいセンサー出力が得られることから、苦味用センサーは人の苦味を定量化できることがわかる。

他の味質に関するセンサーも同様に、味質に高い選択性を有し、人の官能値とも高い相関を示す。各味質に選択的に応答する脂質膜は、脂質と可塑剤の割合を微妙に調整すること、つまり、電荷と疎水性の巧みなバ

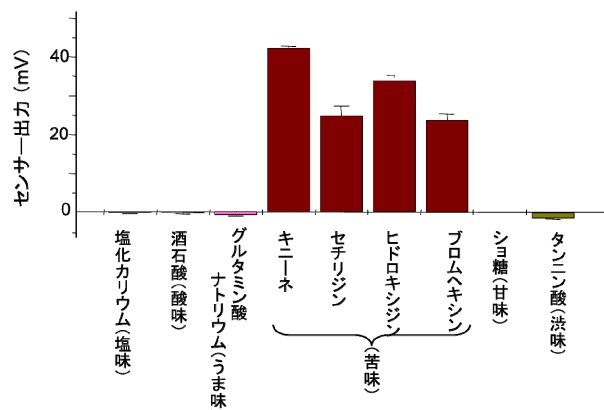


図 4 苦味用センサーBT0 の五基本味と渋味への CPA 応答値^(4,5)

ランスをとることで、その開発に成功したものである。例えば、苦味用センサーでは、電荷を有する脂質の含量を少なくし疎水性を高めている。逆に、塩味用センサーでは荷電脂質の含量を多くし、親水性を高め、イオンとの静電相互作用を起りやすくしている。このように味覚センサーは、個々の化学物質へは高い選択性をもたず、味を基本味に分解し数値化するという広域選択性(global selectivity)を有するのである。数値化できるという事実は、味覚センサーが味の絶対尺度を与えることを意味する。つまり、味覚センサーは、重さや時間といった他の量と同様に尺度を提供できる。

3. 味覚センサーの食品応用

味覚センサーは既にミネラルウォーター、塩類、ビール、日本酒、焼酎、ワイン、ウイスキー、コーヒー、緑茶、紅茶、お米、パン、牛乳、肉類、魚介類、だし、スープ、味噌、醤油、調味料、カボスやミカンなどの果物、野菜などへ適用され、味の定量化に成功している。なお、肉

や野菜、果物といった固形物も水と混ぜ、ミキサーで液状にすることで測定が行える。

図5にビール、発泡酒、新ジャンルのその他醸造酒(第3のビール)とリキュール、ノンアルコールビールの味を苦味(モルト感)と酸味(キレ・ドライ感)の軸で示す。図を見ると、エビスビールのようなオールモルトタイプは、苦味が強いことがわかる。それが、アサヒスーパードライの登場により、苦味を抑制し、酸味のキレとドライ感(辛口)をもたせたビールが増えてきた。その後、登場した発泡酒や第3のビールはさらに苦味が抑えられた傾向にある。ビールに関しては、味がキレ、ドライの方へ移っているということである。ノンアルコールビールは発泡酒の味のカテゴリーに位置している。なお、世界のビールを測定した結果、日本のビールの占める味の位置と大差ないことが判明した。保存もでき、かつ味も良い、となれば、およそこのような味に落ち着くのであろう。このように私たちは、「味を目で見る」ことができるのである。

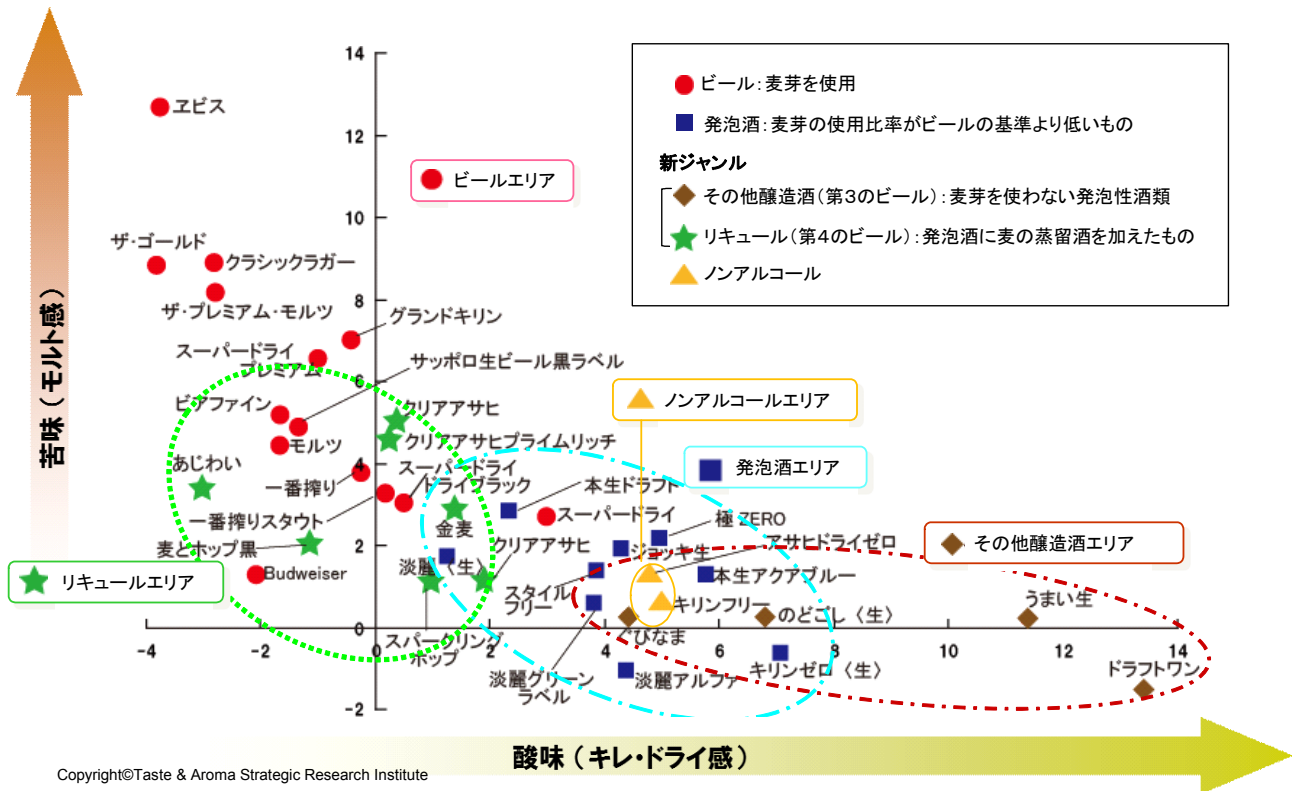


図5 ビール、発泡酒、リキュール、その他醸造酒(第3のビール)、ノンアルコールビールのテイストマップ ((株)味香り戦略研究所提供)

4. 食塩の呈味

次に味覚センサーを食塩の味計測へ適用した結果^(7,8)を紹介する。なお、この研究は今から10年前になされたものであり、センサー受容膜が上記のような広域選択性は有していなかったことをお断りしておく。そのため主成分分析といった多変量解析の一種を用いている。にがりは海水を濃縮し、食塩を析出させたあとの残液であり、苦味をもつのでこの名があるが、一般に $MgCl_2$ 、 $MgSO_4$ 等のマグネシウム塩が多く、 $CaSO_4$ 、 KCl 等の塩もその中に含む。

成分調整塩の不純物として、 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 、 $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ 、 KCl を用いて、表1に示した各濃度を設定し、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ のうち二種類の組み合わせで測定を行った。なお Mg^{2+} については、 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 、 $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ において、海水塩例としてモル比 10:3 の割合で混合した。以下、不純物の組み合わせは表1にある S、M、L を用いて各濃度を示す。各種市販塩としては8種類のものを採用した。

そこで、応答電位とCPA値の第1主成分を、それぞれ横軸と縦軸にプロットしたのが図6である。LSなどは $Mg^{2+}:Ca^{2+}=L:S$ の意である。図6には市販塩も同時に示している。ここで、第1主成分とは、多変量解析の一種である主成分分析をデータに施したときの最も情報の大きい成分を意味する。今は味覚センサー出力の(使用した5枚の脂質膜の)5次元空間情報を1次元で表したわけである。つまり、味覚センサーの応答の代表値を表している。図6を見ると明らかなように、横軸は Ca^{2+} 濃度を、そして縦軸は Mg^{2+} 濃度を反映している。つまり、この図は、塩の味を Ca^{2+} と Mg^{2+} で表現した図といえる。

表1 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の濃度

物質名	濃度(mM)		
	S	M	L
KCl	0.25	0.5	1
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	0.25	0.5	1
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ および $MgSO_4 \cdot 6H_2O$	0.75	1.5	3

注:すべてのサンプルに120 mM NaClを支持電解質として添加している
S:低濃度;M:中濃度;L:高濃度

図6からわかるとおり、「食塩」は原点に最も近く、120 mM NaCl に最も近い味と判断できる。種々の市販塩が2次元マップ上に散布していることが見て取れる。つまり、味がみな異なるのである。図6は塩の味を一目で表すテイストマップ(味の地図)である。

5. 展望

以上、味覚センサーを用いた味の数値化の現状を概観した。五感に関係した科学技術とは、ある意味「自然界または私たちの感覚の近似」である。カメラは私たちの見た景色を記録に残してくれる。しかし、私たちの感じた感性、感動まではとても再現できない。とは言っても、その写真を眺めることで、私たちはそのときの感動を多少なりとも思い起こし、感慨にふけることが多々ある。音楽における「楽譜」も曲の近似でしかない。事実、指揮者によって、その曲は随分と違った趣となる。

味覚センサーにも同様の事情が成立する。全てを記録することはできない。私たちにできることは私たちの感覚に近い近似である。味覚センサーを用い、食譜(食の譜面)でお袋の味、伝統の味、秘伝の味を時間と空間を超えて伝えることができるのである。私たちは味覚センサーを使い、いつでも、健康で、かつ美味しい食品を味わうことができる。同じ味であれば、値段の安い料理や低カロリーの食品の方が健康志向の消費者にはもちろん有り難いわけで、今後、味覚センサーを活用することで、このような例が増えることが期待される。

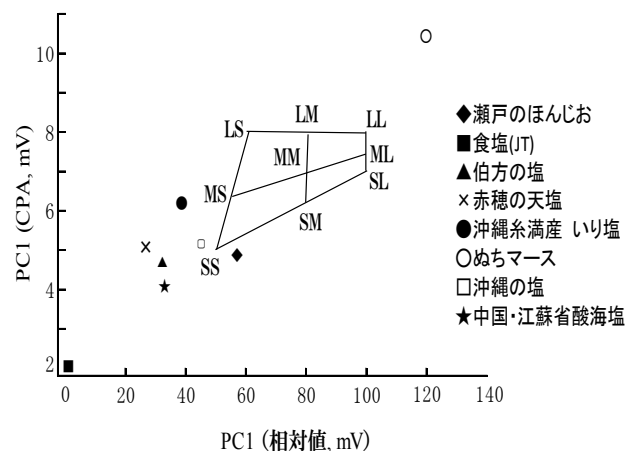


図6 市販塩の呈味性評価^(7,8)

近い将来、調理器に希望の料理を告げると、食品センサーから必要なデータベースがインターネットで届き、望む味の料理をしてくれる日が来るであろう。情報家電の普及である。人類が宇宙に飛び出そうという現代、月基地や火星基地、宇宙に浮かぶスペースコロニーと食譜(食品の譜面)を共有することで、地球上と同じ食を楽しむこともできる。味覚センサーはこれまで全く未踏の地であった、人の味覚という感性を再現することに成功した。生物の機能を取り入れ、誰にでもわかる感性情報のグローバル化を目指したものである。我が国の直面している超高齢化社会では、医・食・住のあらゆる面で人にやさしい技術がますます要求されることであろう。ここで紹介した味覚センサーはこのような社会に大きな福音をもたらすものである。

参考文献

- (1) K. Toko, ed: *Biochemical Sensors - Mimicking Gustatory and Olfactory Senses*, Pan Stanford Publishing, Singapore (2013)
- (2) 都甲 潔, 小野寺 武, 南戸秀仁, 高野則之: センサのキホン, ソフトバンククリエイティブ, 東京 (2012)
- (3) 都甲 潔, 飯山 悟: トコトン追求 食品・料理・味覚の科学, 講談社, 東京 (2011)
- (4) Y. Tahara and K. Toko: *IEEE Sensors Journal*, 13, 3001 (2013)
- (5) Y. Kobayashi, M. Habara, H. Ikezaki, R. Chen, Y. Naito and K. Toko: *Sensors*, 10, 3411 (2010).
- (6) K. Toko, D. Hara, Y. Tahara, M. Yasuura and H. Ikezaki: *Sensors*, 14, 16274 (2014)
- (7) 都甲 潔, 陳 榮剛, 羽原正秋: 日本海水学会誌, 58, 57 (2004)
- (8) 都甲 潔, 陳 榮剛, 羽原正秋: 日本海水学会誌, 59, 262 (2005)

講演者略歴

都甲 潔(とこう きよし)九州大学大学院主幹教授

昭和 55 年 3 月九州大学大学院博士課程修了、九州大学工学部電子工学科助手、助教授を経て、平成 9 年 4 月より、九州大学大学院システム情報科学研究院教授。平成 20 年～23 年、システム情報科学研究院長。21 年より、主幹教授。25 年より、味覚・嗅覚センサ研究開発センター長。1953 年生まれ。

著書

- 1) 都甲 潔編著: 「食品・医薬品のおいしさと安全・安心の確保技術」, CMC 出版 (2012)
- 2) 都甲 潔: 「ハイブリッド・レシピ」, 飛鳥新社 (2009)
- 3) 都甲 潔: 「プリンに醤油でウニになる」, ソフトバンククリエイティブ (2007)
- 4) 都甲 潔・坂口光一編著: 「感性の科学」, 朝倉書店 (2006)
- 5) 都甲 潔: 「感性の起源」, 中央公論新社 (2004)
- 6) 都甲 潔: 「味覚を科学する」, 角川書店 (2002)
- 7) 都甲 潔: 「感性バイオセンサ」, 朝倉書店 (2001)