味覚センサ

解説

キーワード:

味, 食品, インテリジェントセンサ, 広域選択性, 感性工学, バイオミメティック, 水質モニタ用センサ

正 員 都 甲 潔

九州大学 大学院 システム情報科学研究所

1. はじめに

センサは五感を再現、そしてそれを超えることを目的としており、人のもつ主観的かつあいまいな感覚を定量化することを目指すものである。近年の科学技術の発展にともない、センサは視覚・聴覚・触覚(光・音・圧力)といった、単一の物理量を捉えるものから、味覚や嗅覚を含めた総合的情報を捉えるものへと要求が高まってきている。五感の中でも味覚や嗅覚は、現時点でも多分に主観的・生物的感觉といえよう。しかし科学の発展の歴史が「主観的量」を「客観的量」で表現する計測技術の発展とともにあったことを思うと、味覚や嗅覚もその例外ではないであろう。事実、時間や長さの定量化については、エジプト時代にもさかのぼる歴史をもっているが、これらも当初は多分に主観的量であったはずである。

一般に化学物質を拾うセンサは化学センサであろう。ところで、代表的な化学センサはタンパク質(酵素)を高分子の膜に吸着させた酵素センサであることからわかるように、物理センサが光や圧力といった特定の量を選択的に拾うように作られているのと同様、化学センサも物質選択性が重要視され、開発が進められていた。このような高選択性センサはすでに医療方面でも使われており、今後ますますその需要は増すであろう。

しかし、この種の選択性の高いセンサで味覚をセンシングするには、全ての味物質に対応したセンサを用意しなければならないため現実的ではない。私たちが毎日飲むコーヒーやお茶には千種類ともいわれる味や匂いの物質が含まれている。しかも、これらの化学物質を仮に全て検出したからといって、味覚や嗅覚が再現できるわけではない。

さらに、味覚センサでは、味物質間の相互作用といった味覚現象を再現しなければならない。例えば、互いに相手を強めあったり(うま味物質間の相乗効果)、弱めあったりする効果(苦味と塩味間の抑制効果)がそうである。最近開発された味覚センサは、人が感じる味を出力すると同時にその感度・耐久性共に人の舌を超えている¹⁻³⁾。

2. 味覚センサの開発

味覚センサは脂質/高分子ブレンド膜を味物質を受容する部分とし、この複数の脂質膜からなる電位出力応答パターンから味を識別する。これは舌の細胞の生体膜が脂質とタンパク質からできていることに着目し、その構成成分の一つである脂質を実際に利用できる形で作り上げたものである。図1

に示すように、脂質膜電極はエナメルの中空棒にKCl溶液と銀・塩化銀線を入れ、その断面に脂質/高分子膜を貼りつけたものである。なお、これらの膜のことを以下「チャネル」と呼ぶことにする。脂質の選択には任意性があるが、まずは生体膜の脂質の官能基を網羅する形で選ばれた。味覚センサはすでに味認識装置SA401(アンリツ(株)製)として市販されている。

図1 味覚センサの脂質膜電極。

図2 味覚センサの酸味物質に対する応答。

酸味に対する応答パターンを図2に示す⁴⁾。誤差は1%を切っているため、各味の識別が明瞭にできる。注目すべきは、5つの味(酸味、塩味、苦味、甘味、うま味)に対しては異なる応答パターンを示すのに対し、似た味では似たパターンを示すことである。例えば酸味を呈する塩酸、酢酸、クエン酸では似たパターンを示し、うま味を呈するグルタミン酸ナトリウム(MSG)、イノシン酸ナトリウム(IMP)、グアニル酸ナトリウム(GMP)でも同様に似たパターンを出す。この事実は、味覚センサが個々の味物質ではなく味そのものに応答していることを意味する。

Taste Sensor

By Kiyoshi Toko (Kyushu University)

膜の膜電位変化のメカニズムもかなり解明されている^{5,6)}。例えば酸味物質に対しては水素イオンが膜の親水基に吸着した結果、膜の表面荷電密度が変わる。その結果、膜と水溶液の界面の電位が変化し、それが応答電位として計測される。

図3 アミノ酸に対するセンサ応答の主成分分析結果。

味覚センサはアミノ酸に特によく応答し、各アミノ酸を酸味や苦味といった味質に応じて分類することが可能である。図3にアミノ酸の測定データに主成分分析を施した結果を示す⁷⁾。図からわかるように、甘味を呈するアミノ酸、苦味のアミノ酸そして双方の味を呈するアミノ酸が第1主成分(PC1)方向に順に区別されている。

味細胞の味物質受容メカニズムはまだ明らかにされていないが、アミノ酸が複合的な味を呈する理由についてもまったく解明されていない。ここでの味覚センサの結果はアミノ酸の受容メカニズムを探る意味でもたいへん示唆的である。

一般に狭義の味は5つの基本味で表現できるといわれている。「辛味」と「渋味」は舌の痛覚を刺激すると考えられており、広義の味覚ととらえられている。味覚センサでこれらを測定した結果⁸⁾、センサはカプサイシンなどの辛味物質にはまったく応答しなかった。この結果は、辛味は味細胞で受容されない味という生理学的知見と矛盾しない。しかし、味覚センサは渋味を呈するタンニン酸やクロロゲン酸などには応答したのである。この結果は、渋味は必ずしも痛覚のみを刺激する味ではなく、味細胞でも受容される味であることを意味している。他の味質とその応答パターンを比較した結果、渋味は酸味と苦味の間味の味質であると結論された⁸⁾。実際味覚生理学において、渋味は苦味と関連しているという報告がなされており⁹⁾、味覚センサの結果を支持する。このように、渋味は痛覚と味覚の両方が刺激された結果生じた感覚と考えられる。

3. ビールとミネラルウォーターの味

味覚センサは当然のことながらスポーツ飲料、ビール、コーヒーなどの味のまったく異なる飲料は直ちに識別できる¹⁰⁾。

ビールの応答電位パターン^{11,12)}に主成分分析を施した結果、「さわやか」や「濃厚」といった官能表現を定量化したテイストマップ(味の地図)を作ることができる。またビールの種々の物理化学的分析値との相関を調べた結果、センサ出力はアルコール濃度、pH、Bitter (BUs) と高い相関があることがわかった¹³⁾。味覚センサはビールのロットの違いを容易に識別できるほどの高い識別能を持つが、このように種々の分析値の測定も行える。

あらかじめ電位応答パターンを覚え込ませておくと、未知のビールを測定して銘柄を当てることも容易である。1ヶ月以上も前に取ったデータを用いてパターンマッチングすることが可能である。実際、これは研究室紹介などの機会では大変有用であり、参加者は皆一様に驚きの声を上げる。もっとも、中学生や高校生相手のときには、さすがにビール測定はやめて、ミネラルウォーターやスポーツ飲料にしている。

図4は41種類のミネラルウォーターを味覚センサで測り、主成分分析して得られたテイストマップである¹⁴⁾。数値は硬度を表している。第1主成分(横軸)がほぼ硬度を反映していることがわかる。また図を上に行くほど1価イオン濃度が高く、下に行くほど2価イオン濃度が高くなる。従って図の上方がNaClなどに起因するソルティーな味、下方がMg²⁺やCa²⁺によるビターな味といえる。同時に官能検査も試みたが、硬度が低い左半平面では再現性のある味の表現ができず、たかだか図4の右と左の離れた位置にあるミネラルウォーター同士の識別がついた程度であった。

図4 ミネラルウォーターのテイストマップ。

この結果は、味覚センサが水質モニタ用センサとして使えることを示唆している。これまでの水質検査は特定の汚染源に的を絞って、原因を探るという本質的に後追い検査であった。しかしながら、人が水を口にする前に水質の安全性を迅速に判断するセンサは事故の未然防止のために必須のものである。味覚センサは不特定多数の化学物質を検出できるため、本質的に簡易・迅速リアルタイム計測が可能である。

4. コーヒーと牛乳の味

コーヒーの計測は60℃という高温状況で行った¹⁵⁾。図5は酸味と苦味に対する相関をみたものである。また味覚セン

サが作るテイストマップは、コーヒーがどのような味を呈しているかを目で見える形で平易に示すものであり、どの味のコーヒーが市場に出回っているのか、また新しい味の提供という意味でも今後のコーヒー開発の指針を与えるものである。もちろん工場の製造ラインでも、異常風味検出などでオンライン計測器として使うことも可能であろう。

図5 コーヒーの酸味と苦味。

牛乳は加熱滅菌処理がなされている。私たちは低温殺菌乳が美味しいだの、高温殺菌乳が美味しいだの、よく口にするが、本当のところはどうなのだろうか。市販の牛乳では、異なる銘柄では一般に原乳が異なるため、原乳に由来する味の違いが顕著に出る可能性がある。従って、上記の疑問に答えるには、原乳を同じにして加熱処理を施し、それに由来する味の違いを論じる必要がある。

まず100℃における処理時間が異なる5つのサンプル(0, 1, 5, 15, 30 min)を準備した¹⁶⁾。これら5つのサンプルに対し、官能検査を試みた結果、処理時間の短いサンプル(0, 1, 5 min)は区別が付かなかった。他方、味覚センサを用いて、これら5つのサンプルを識別することができた。

次に、表1のように処理温度と時間が異なる7つのサンプルに対し、「こく」、「加熱臭」、「美味しさ」の3つの量の官能検査を行うと同時に、乳清タンパク質窒素指標(WPNI)なる量を計測した。WPNIが小さいほど加熱によるタンパク質変性が大きい。表1から65℃ 0minは最もタンパク質変性が少なく、100℃ 15minは最も多いことがわかる。こくと加熱臭が強いのも100℃ 15minの牛乳である。この事実からわかるように、WPNIはこくと高い相関(-0.82)を持つ。他方、美味しさは他の量と高い相関を持たなかった。

表1 牛乳の味の官能表現とWPNI

	65℃ 0min	65℃ 30min	80℃ 0min	80℃ 15min	100℃ 0 min	100℃ 15min	110℃ 3sec
こく	-0.33	-0.67	-0.07	0.20	0.40	0.47	0.00
加熱臭	-0.33	-0.47	0.33	-0.07	-0.07	0.53	0.00
美味しさ	-0.27	-0.13	-0.20	0.00	0.60	-0.13	0.07
WPNI	0.82	0.48	0.28	0.02	0.03	0.00	0.22

センサ出力と官能表現「こく」、物理化学量WPNIとの相関は、それぞれ-0.88と0.95であり、味覚センサはこれらの量を測ることができる。通常WPNIを測るには、サンプルに飽和NaClを入れて変性乳清タンパク質を沈殿させて濾液の透過度を光度計で測るという分光学的方法をとる。味覚センサは電極をサンプルに浸けるだけで数秒で測定が完了する。この簡易迅速計測が味覚センサの最も得意とするところであ

り、今後この種の化学分析にも使われる可能性がある。もちろん、味覚センサの最大の長所が、これまで述べてきた通り、味そのものを総合的に測れることにあることは論を待たない。

5. 清酒の識別と醸造管理

味覚センサは、平成5年に長野県で開催された信州博覧会に出展され、参加者と日本酒の銘柄当てを連日行い、3ヶ月間同一の膜で無事完走した。

図6は醸造過程のもろみの滴定酸度とセンサチャネル1との関係を示したものである^{17,18)}。約1ヶ月間の醸造過程において酸度は単調に増加し、センサ出力との相関は0.99であることから、味覚センサの醸造管理用センサとしての可能性が示唆される。清酒の場合、滴定酸度は10mlの酒をpH7.2まで上昇させるのに要した0.1N NaOHの量で表す。酒に含まれる成分(アミノ酸、有機酸等)による緩衝効果があるため、必ずしも初期pHが低いからといって、滴定酸度が高いとは限らない。滴定酸度は、清酒製造にあたり、発酵管理、ブレンド、成分指標としてきわめて重要な量である。

図6 清酒もろみの滴定酸度とセンサ出力。

また清酒中のアルコール濃度にも応答し、簡便なアルコールセンサとして使うことも可能である¹⁸⁾。味覚センサの最大の長所はサンプルをそのまま計測することが可能である点であり、事実濾過などの操作なしにアルコール濃度を測れることが示されている。このようなポータブル投げ込み式の簡易型センサの普及には、今の複数のチャネルからなるロボットアーム駆動の固定型センサシステムを、2チャネル程度のコンパクトな形に作り上げることが必要であり、現在このラインを検討中である。

6. 味噌の熟成管理

味噌は日本の伝統的な発酵食品である。現在味噌の熟成管理は、麹菌の酵素による分解作用と微生物の育成、発酵作用が食塩の存在下でバランスよく行われるように味噌の温度を管理し、適当な時期に切り返しを行っている。味噌の熟成度評価は、これまで主に人間の経験(見た目や味)に頼っており、このような評価はその時々々の体調や環境に影響を受けやすい。それゆえ、体調や環境に左右されない客観的尺度の導入が待ち望まれていた。

味覚センサを用いて、まず米味噌、合わせ味噌、麦味噌の識別を行った¹⁹⁾。その結果、各味噌間のパターンの差は数mVあるのに対し、標準偏差は0.1mV程度であり、容易に識別可能であった。

次に合わせ味噌に的を絞る、その熟成中の味覚センサ応答パターンの変移を調べた。その結果、センサ出力は熟成日数に対して単調に増加しており、他の米味噌や麦味噌でも同様の傾向が見られたことから、味覚センサの味噌の熟成管理用センサとしての応用が十分に期待される。味噌は熟成中に各種アミノ酸が増加しており、味覚センサ応答との相関を取った結果、高い相関が得られた。これは、清酒もろみの醸造過程を調べた結果と酷似している。

加えて、出荷後の味噌について味覚センサを用いて測定を行った結果、ゆっくりとではあるが、単調な電位増加が見られ、出荷後の味の変質をとらえることができた。

7. 新しい食文化の創造

味覚センサは、従来のセンサのもつ「高選択性」という概念と異なる「広域選択性 (global selectivity)」とでも呼ぶべき概念をもつセンサである⁽²¹⁾。つまり、味覚センサは個々の物質選択性はあまり重視せずに、個々の物質と味細胞との相互作用を質的に分類して、それを出力情報にもつ。これが私たちが感じる味質に他ならない。

食品の「美味しさ」は、多くの因子を含む複雑な感覚である。しかし、少なくとも舌で受容される化学的な味については客観的に判定できる方法がないと、いつまでたっても味の文化は成長しないであろう。もちろん、味細胞で受容される狭義の味を定量化できたからといって最後に好き嫌いを決めるのは私たち人間である。さきのビールにしても、こくのあるビールとさわやか味のビールのどちらを選ぶか、これは人により好き好きであろう。しかしそれにしても、味に関する共通の定量的言葉は他の感覚同様必要である。長さはそのさしで何cmといった具合に非常に簡単に測ることができる。時間も同様であり、主観の時間と客観の時間が見事に共存している。味覚センサは味のもののさしを与えるものである。

音楽は、本来聴覚の分野に属する文化である。しかし、それを視覚で処理できる楽譜が普及したために、私たちは20世紀にあってバッハやベートーベンの曲を再現できる。味覚も、たしかにいまは主観だけが一人歩きをしている。しかし、この状況は、今後どんどん変わっていくことだろう。味を客観化できる機器を用いることで、万人共通の「食譜」を作ることでも夢ではない。繰り返すが、味覚センサは単に「味の尺度」を与える装置にすぎない。それを上手に使いこなすのは私たち人間である。今後、マルチメディアの振興とあいまって、味の共通言語を構築することで、万人が共通の尺度をもって味を語り合う時代が来るであろう。

(平成8年8月1日受付)

文 献

- (1) 都甲 潔、山藤 馨：「美味しさを測る－舌を超えた驚異の味センサ」、講談社、(1991)
- (2) 都甲 潔 編著：「味覚センサ」、朝倉書店、(1993)

- (3) 都甲 潔、宮城幸一郎：センサ工学、培風館、(1995)
- (4) K. Hayashi, T. Yamanaka, K. Toko, K. Yamafuji: "Multichannel taste sensor using lipid membranes", *Sens. Actuators*, **B**, 2, 205-213 (1990)
- (5) K. Oohira, K. Toko, H. Akiyama, H. Yoshihara, et al.: "Electric characteristics of hybrid polymer membranes composed of two lipid species", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **64**, 3554-3561 (1995)
- (6) K. Oohira, K. Toko: "Theory of electric characteristics of lipid/PVC/DOPP membrane and PVC/DOPP membrane in response to taste stimuli", *Biophys. Chem.*, **61**, 29-35 (1996)
- (7) Y. Kikkawa, K. Toko, T. Matsuno, K. Yamafuji: "Discrimination of taste of amino acids with a multichannel taste sensor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, 5731-5736 (1993)
- (8) S. Iiyama, K. Toko, T. Matsuno, K. Yamafuji: "Responses of lipid membranes of taste sensor to astringent and pungent substances", *Chem. Senses*, **19**, 87-96 (1994)
- (9) B. J. Lyman, B. G. Green: "Oral astringency: effects of repeated exposure and interactions with sweeteners", *Chem. Senses*, **15**, 151-164 (1990)
- (10) K. Toko, T. Matsuno, K. Yamafuji, K. Hayashi, et al.: "Multichannel taste sensor using electric potential changes in lipid membranes", *Biosens. Bioelec.*, **9**, 359-364 (1994)
- (11) 池崎秀和、林 健司、山中章己、立川理江子、他："Multichannel taste sensor with artificial lipid membranes," 電子情報通信学会論文誌, J74-C-II-5, 434-442 (1991)
- (12) K. Toko, T. Murata, T. Matsuno, Y. Kikkawa, et al.: "Taste map of beer by a multichannel taste sensor, *Sens. Materials*", **4**, 145-151 (1992)
- (13) 江崎 秀、都甲 潔、津田泰弘、中谷和夫、他：味覚センサを用いたビールの味質と成分の分析、第43回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 1114 (1996)
- (14) S. Iiyama, M. Yahiro, K. Toko: "Quantitative sensing of mineral water with multichannel taste sensor", *Sens. Materials*, **7**, 191-201 (1995)
- (15) T. Fukunaga, K. Toko, S. Mori, Y. Nakabayashi, et al.: "Quantification of taste of coffee using sensor with global selectivity", *Sens. Materials*, **8**, 47-56 (1996)
- (16) K. Toko, T. Iyota, Y. Mizota, T. Matsuno, et al.: "Heat effect on the taste of milk studied using a taste sensor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 6287-6291 (1995)
- (17) Y. Arikawa, K. Toko, H. Ikezaki, Y. Shinha, et al.: "Analysis of sake taste using multielectrode taste sensor", *Sens. Materials*, **7**, 261-270 (1995)
- (18) Y. Arikawa, K. Toko, H. Ikezaki, Y. Shinha, et al.: "Analysis of sake mash using multichannel taste sensor", 日本生物工学会論文誌 (1996) 印刷中。
- (19) T. Imamura, K. Toko, S. Yanagisawa, T. Kume: "Monitoring of fermentation process of miso (soybean paste) using multichannel taste sensor", *Sens. Actuators*, **B** (1996) in press.
- (20) K. Toko: "Multichannel chemical sensor with global selectivity", *Reviews on Heteroatom Chemistry*, **14**, 245-270 (1996)
- (21) K. Toko: "Taste sensor with global selectivity", *Materials Sci. Eng.*, **C4**, 69-82 (1996)

都 甲 潔

(正員) 1980年九州大学工学部電子工学科卒業、1985年九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。現在九州大学大学院システム情報科学研究科電子デバイス工学専攻 助教授。感性化学センサ (味覚センサ) と生物の自己組織化 (非線形・非平衡機能性材料、システムへの応用) に関する研究に従事。応用物理学会、膜学会、生物物理学会、電子情報通信学会などの会員。