

感性バイオセンサ Kansei Biosensor

都甲 潔



1. はじめに

21世紀は人の原点に立ち返り、人に優しい、人を幸せにする技術を再考する時代である。ここで紹介する味覚センサは味や香りを定量化し、人の感性を再現することを目指したものであり、人を主役とする思想を前面に押し出し、開発されたセンサである。筆者らのグループは生体のナノ構造を味覚センサに取り込み、その出力情報から人の行うマクロな出力、つまり感受性、感覚である「感性」の表現を目指している。バイオ、ナノテク、ITという21世紀の革新技術を用いて「感性」を記述する(図1)。



図1 バイオ、ナノテクとITで感性を表現する

2. 味覚センサの原理と基本特性

味覚センサは脂質/高分子ブレンド膜を味物質の受容部分とし、複数の脂質膜からなる電位出力応答パターンから味を数値化(デジタル化)する^{(1)~(5)}。脂質膜電極は塩化ビニルの中空棒にKCl溶液と銀線を入れ、中空棒の孔に脂質/高分子膜を張り付けたものである。特性の異なる脂質/高分子膜を八つ(または七つ)準備し、脂質膜電極と基準となる参照電極との間の電位差を計測する。なお、これらの膜のことを以下「チャンネル」と呼ぶことにする。

図2は味覚センサの出力結果に主成分分析を施し、三次元空間での味のグルーピングを示したものである。なお、主成分分析とは、多次元で表されたデータを少数次元で表す統計解析の一手法である。今は味覚センサの八次元データが二つの軸で表現される。情報量の多い軸から順に第1主成分(PC1)、第2主成分(PC2)、…、という。

図3に、受容膜である脂質/高分子膜と化学物質との相互作用を、各味質に分けて示している。塩味を生じる物質は、膜の近傍にて静電相互作用を行う。苦味を生じる物質はその疎水性で膜の内部に侵入するといったように、各味質と脂質/高分子膜との相互作用が異なる。その相互作用の違いが(人の感じる)味質にほかならない。

また、たとえ化学物質の構造が異なっても、同じ味を生じることがある。植物由来のアルカロイドであるキニーネは中世にはインカの秘宝と重宝され、今でもマラリアの治療薬として使われているが、これは苦味を呈する。またアミノ酸であるトリプトファンは、食欲、睡眠、学習、気分などに関連した神経伝達物質セロトニンの原料となるが、やはり苦味を呈する。このキニーネとトリプトファンは異なる化学構造を持っているにもかかわらず、同じ苦味を呈する。

味覚センサは、双方の苦味を数値化することが可能で

都甲 潔 正員 九州大学大学院システム情報科学研究所電子デバイス工学部門
E-mail toko@ed.kyushu-u.ac.jp
Kiyoshi TOKO, Member (Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, Fukuoka-shi, 812-8581 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.88 No.10 pp.776-780 2005年10月

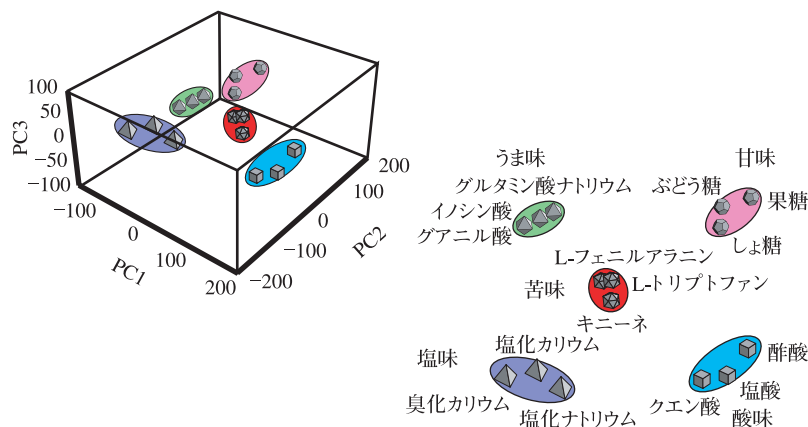


図2 5基本味へのグルーピング

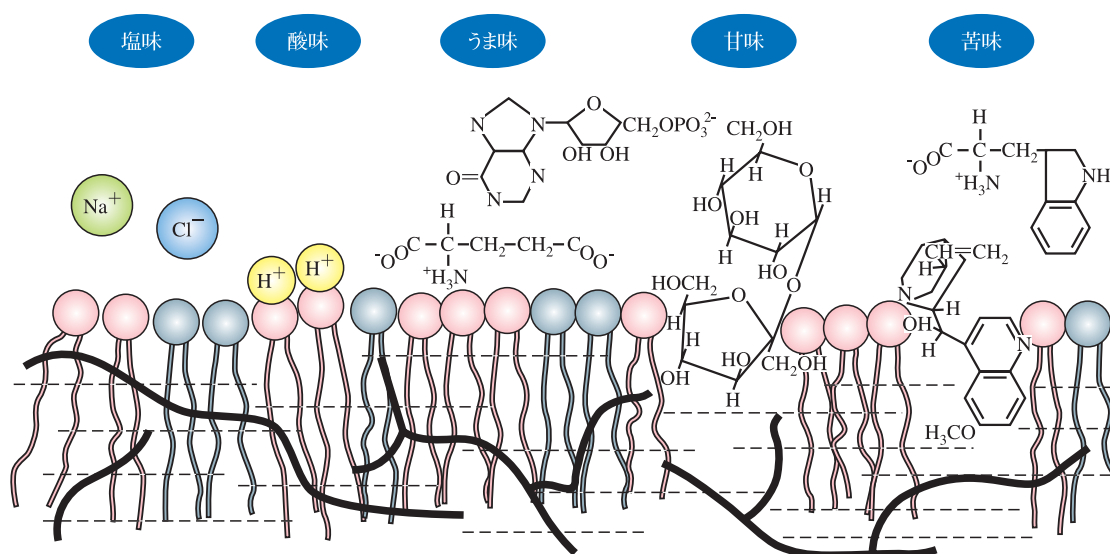


図3 五つの味物質と脂質/高分子膜との相互作用の模式図
ウムを、苦味ではキニーネとトリプトファンを示している。

うま味ではグルタミン酸ナトリウムとイノシン酸ナトリ

ある。それでは、人、そして味覚センサはこれらの物質のどこを拾って(検出して)いるのであろうか。先の「相互作用」という言葉を使えば、双方は膜との相互作用という意味において、同じ相互作用をするため同じ味質を生じるといえる。構造に目を向ければ、キニーネもトリプトファンも複素環式構造を持っているためとも考えられる。味覚や嗅覚においては、このような化学物質の「部分構造」の認識が重要な役割を果たしている。

3. 食品の味

味覚センサを用いてビールの味の数値化が可能である。ビールのテイストマップの横軸は「濃厚な味」と「さわやかな味」、縦軸は「シャープな味」と「まろやかな味」からなる。更に、アルコール濃度やpHなどの分析量とも高い相関を示した。味覚センサはビールのロット(製造年月日、工場)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や官能表現の定量化が行える。

ミネラルウォーターなどの水の味も測ることができる。測定データに主成分分析を施すことで、テイストマップを得ることができる。横軸はほぼ硬度を反映した軸、縦軸はNa⁺やK⁺といった1価イオンの濃度、Ca²⁺やMg²⁺といった2価イオンの濃度を反映した軸からなるテイストマップである。

味覚センサは、ビール、ミネラルウォーター、日本酒、コーヒー、出汁、スープ、醤油といった液状の食品のみならず固形状食品にも使うことができ、これまで米、パン、食肉、味噌、果実、野菜、チョコレート等の味の計測にも使われている。またその味についても、人の感じる味すべてを出力できるように設計されており、酸味、苦味等の五つの基本味のみならず、渋味やくとといった味の定量化にも成功している。更に、後述のように、医薬品の苦味を測ることも可能となっている。

4. コーヒー牛乳=麦茶+牛乳+砂糖

ちまたで「麦茶と牛乳と砂糖でコーヒー牛乳」というのがあふ。不思議である。麦茶にはコーヒーの苦味の基と考えられているカフェインは含まれていない。にもかかわらず、似ているとしたらなぜか？ また、それは何を意味するのか？

それは、必ずしもその化学物質が含まれていなくても、目的とする食品と同じ味を作ることができることを意味する。実際、化学物質は数十万種類ともいわれ、それらが味を示すとしたら、5種類の味質しかないことを考えると、異なる化学物質でも同じ味を示さざるを得ないことが容易に分かる。

さて、味覚センサで、コーヒー牛乳と「麦茶+牛乳+砂糖」を測った結果を図4に示す。よく似たパターンをしていることが分かる。実際、飲んでみると、ちょっと油断すると区別がつかないくらい両者は似た味をしている。

5. バーチャルテイスト

味覚センサを使えば、幾つかの味物質を組み合わせて、その応答パターンから望む味を生み出すことができる。作りたい食品の応答パターンをあらかじめ記録しておき、そのパターンに近くなるように、味物質を組み合わせる。この方法でスポーツ飲料の味の再現を試みた。

食塩(塩味)、キニーネ(苦味)、砂糖(甘味)、塩酸(酸味)を代表的味物質に選び、それぞれ4通りの濃度を準備した。そして、それらを全部組み合わせるのである。 $4 \times 4 \times 4 \times 4 =$ 計256通りの味溶液を作った。それらを味覚センサで測った。したがって、256個の応答パターンが得られるが、更にデータの補間を行う。得られた256

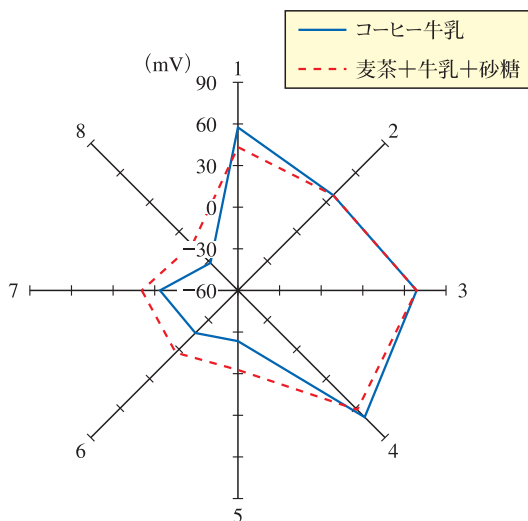


図4 コーヒー牛乳の応答パターンと「麦茶+牛乳+砂糖」の応答パターンの比較

個のパターンの間をコンピュータ上で埋める。その結果、計1万個のパターンを得た。このパターン各々に四つの味物質の組合せが一つずつ対応する。

さて、これら1万個のパターンを目的のスポーツ飲料のパターンと比較し、最も近いパターンを選び出した。ある濃度の組合せを決定したわけである。

そして、それを実際に飲んでみた。どういう味だったか？

確かにスポーツ飲料の味を示した。私たちは人工の機器(センサ)を使って、望む味のスポーツ飲料を作り上げることに成功したといえる。しかも、この話には注意しないといけないことが1点ある。

それは、市販のスポーツ飲料には一般に毒(そして薬)である塩酸やキニーネが入っていないにもかかわらず、ほとんど同じ味を作ることができたという点である。味を作るには必ずしも特定の化学物質が必要というわけではない。先の「コーヒー牛乳=麦茶+牛乳+砂糖」を思い出して頂きたい。

そう、味はバーチャルなのだ。その食品に含まれている化学物質を使わなくても、他の化学物質を使って同じ味を再現できるわけである。これは、味が五つの味質から構成されることに起因する。食品の味をセンサで五つの味(及び渋味やこく)に分解しさえすれば、各基本味を代表する適当な化学物質を使って五つの味を、そして食品の味を再現できる。

視覚や聴覚ではバーチャルが既に実現している。私たちは、東京で行われる野球、京都で催される演劇、札幌で開催されるサッカー試合をいつでもどこにいても見ることができる。テレビの前に座れば、日本全国、いや世界中のイベントや行動、出来事や事件を見ることができる。現実にはテレビの中にその事象が起っていないにもかかわらず、である。視覚や聴覚で何気なく受け入れているバーチャルな世界、それを私たちは今や味覚で体験できるのである。

6. 各味質に特化した受容膜の開発

5.まで味覚センサの電位応答パターンから味を判定すると述べたが、最近では、各味質に高い応答を示す受容膜を開発することで、応答パターンを統計処理する必要がなくなってきている。図5に、このような目的で開発された脂質/高分子膜の各味質への応答を示す。酸味やうま味、苦味といった味にはほとんど応答しないにもかかわらず、渋味に大きな応答をしていることが分かる。なお、CPA値とはChange in membrane Potential due to Adsorptionに由来するセンサ応答値のことで、人であろうところの後味に相当する。つまり、CPA値は膜に吸着した物質による膜電位の変化を反映する。なお、図5のデータは(株)インテリジェントセンサーテクノロジー

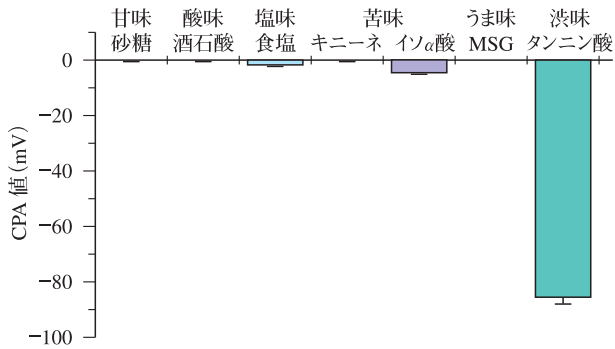


図5 渋味に特化した脂質／高分子膜の各味物質への応答

(略称、インセント)の池崎氏によるものである。

いろいろな渋味物質について、人の官能とこの膜によるセンサ応答との相関を調べた結果、相関係数が0.8と高い値を持つことが分かった。このように現在、個々の味について、直ちに出力できる段階にきており、実際、インセント製の味認識装置 SA402B では、測定後、直ちに苦味、うま味、塩味、こくなどの官能表現をグラフで見ることができるようにプログラムされている。味覚センサを用いて私たちは任意の食品、医薬品の味を定量的かつ客観的に表現できる。

7. 医薬品の苦味

医薬品業界では苦味をいかに軽減させるかは重大な課題であり、幾つかの方法が試みられている。最も一般的な方法は甘味物質を混入させることであり、小児用シロップがそうである。そこで、味覚センサを用いて苦味抑制効果を調べた^{(6),(7)}。

キニーネ(苦味)濃度を増すにつれてセンサのチャンネル1～5では応答電位が増加し、チャンネル6と7では逆に減少する。この結果に主成分分析を施し、官能検査で知られているキニーネ濃度と苦味強度の関係式を適用することで、味覚センサの出力から人の感じる苦味を定量化できる。

さて甘味物質による苦味の抑制効果であるが、しょ糖(砂糖)をキニーネ溶液に入れると興味ある応答パター

ンが得られる。しょ糖濃度増加とともにチャンネル1～3では応答電位は減少、チャンネル6と7では増加するのである。これは前述のキニーネ濃度増加の際の振舞い(つまり、チャンネル1～5では増加、チャンネル6と7では減少)と逆である。しかもキニーネに対する応答パターンの形はほぼ保持される。この事実はしょ糖の添加により等価的にキニーネ濃度が減少したことを意味する。このように味覚センサは苦味抑制効果を検出し、更に苦味を数値化することができる。

本方法を実際の市販の医薬品に適用したところ、医薬品の生じる苦味のしょ糖による抑制効果を定量化することもできた。

またリン脂質を主成分とする苦味マスキング剤が発売されているが、実際味覚センサを用いてキニーネなどの苦味が抑制されることを確認することができた。

図6に原子間力顕微鏡を用いた膜の表面像を示す⁽⁸⁾。苦味物質の膜への結合で膜の表面構造がかなり変わっているが、苦味マスキング剤の作用で膜が元へ戻っているのが見てとれる。つまり、生体系で見られる苦味抑制効果を味覚センサの電位応答で再現でき、更に表面構造解析の結果もそれを支持する。

8. 展 望

味覚センサを用いて「食の楽譜」である「食譜」を作ることができる。食譜とは、最も単純には、味覚センサやおいセンサの出力をデジタル化して、コンピュータに保存したものである。どんな食べ物でも、このデータベースと比較することで、どんな味であるか分かる。ある食品を測ったとしよう。その食品が民族・文化的背景において「おいしい」「おいしくない」などを判定できることはもちろんだが、データベースには「おいしさ」を構成する要素データも蓄積されているため、どのようにしたら望む味にできるかまで教示できるであろう。まさしくそれが、単なる一人の独断的、主観的、あいまいな意見に左右されない客観的味の創造である。デジタル化した情報、つまり食譜を基に、この味になるように調理することで、望む味が保証される。

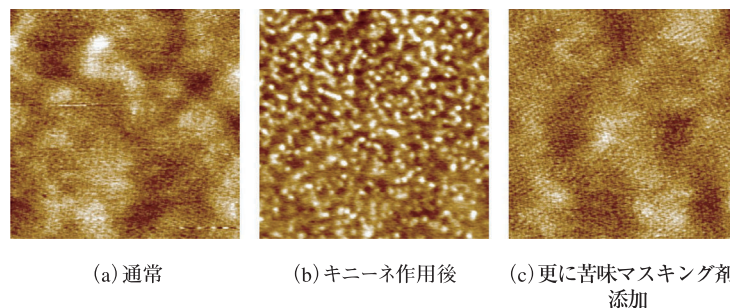


図6 受容膜の表面構造解析 スケールは400nm×400nm、高さは2nm (a),(c), 5nm (b).

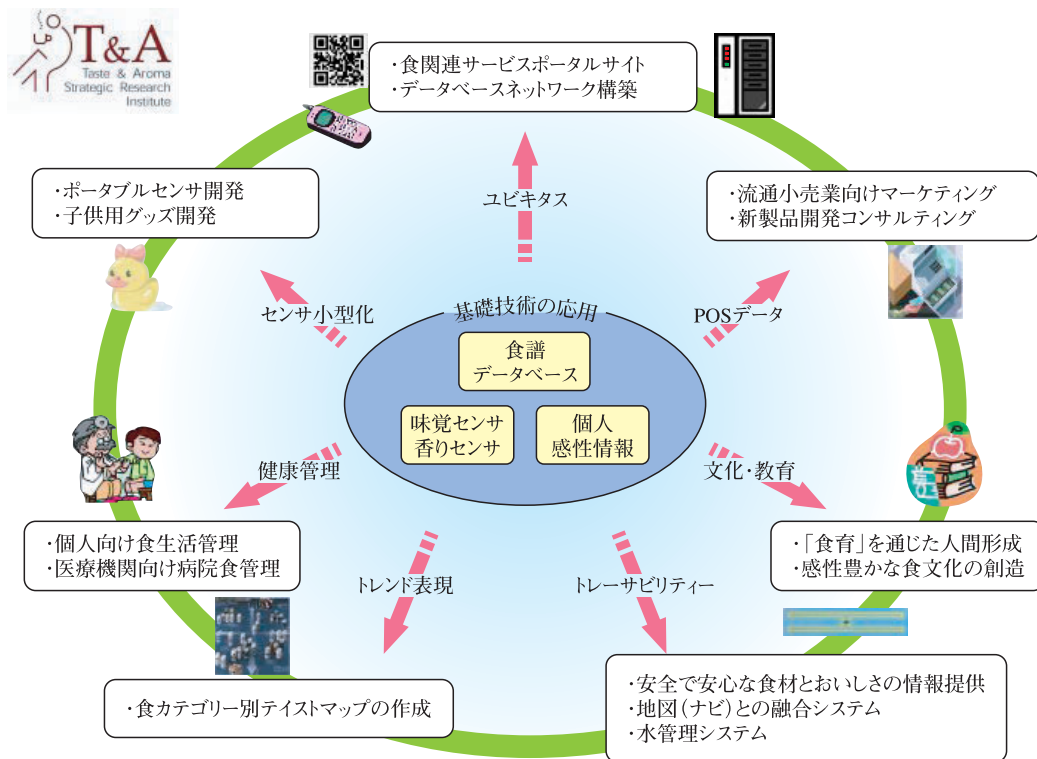


図7 ユビキタスネットワーク時代における食情報

図7は、ユビキタスネットワーク社会における食ビジネスの概要を示している。2004年9月に(株)味香り戦略研究所が設立され、そのビジネスは急激に成長している。

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くるであろう。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。味覚情報を含む五感情報通信の時代の到来である。食譜があれば、今の食文化を後世につなぐことも可能となる。お袋の味、伝統の味の伝承である。

味覚や嗅覚のセンサの更なる発展は、味覚や嗅覚の障害者への大きな福音ともなるであろう。例えば、おはしにセンサを装着することで、その味を色で表示するようにすれば、一日で味が分かる。酸味が少し、甘味が強い、こくがある、などといったことが見て分かることになる。

早晚、味覚を持つロボットが登場するであろう。このロボットは毎日私たちにおいしい料理を作ってくれる。また共に食事を楽しむこともできよう。もちろん、食の安全性も事前にチェックしてくれる。

今後、食の感性を表現し、食の安全・安心をチェックするための融合センサシステム、使い捨てセンサ、小型センサチップ、電子タグが開発され、更に食の品質記述

ツール(食譜)の普及により、日本は高品質な食糧生産のための国際的リーダーシップを形成し、世界をリードする食の品質に関する知識集約型社会を作り上げることができるであろう。

文 献

- (1) 都甲 潔, 感性の起源, 中央公論新社, 東京, 2004.
- (2) 都甲 潔, “味と匂いのセンサから見た関西・日本文化,” 信学誌, vol.86, no.10, pp.752-759, Oct. 2003.
- (3) 都甲 潔, 味覚を科学する, 角川書店, 東京, 2002.
- (4) 都甲 潔, 感性バイオセンサ, 朝倉書店, 東京, 2001.
- (5) K. Toko, Biomimetic Sensor Technology, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- (6) S. Takagi, K. Toko, K. Wada, H. Yamada, and K. Toyoshima, “Detection of suppression of bitterness by sweet substance using a multichannel taste Sensor,” J. Pharma. Sci., vol.87, no.5, pp.552-555, May 1998.
- (7) S. Takagi, K. Toko, K. Wada, and T. Ohki, “Quantification of suppression of bitterness using an electronic tongue,” J. Pharma. Sci., vol.90, no.20, pp.2042-2048, Dec. 2001.
- (8) H. Shimakawa, M. Habara, and K. Toko, “Bitterness-masking effect of phospholipids on lipid/polymer membranes,” Sens. Mater., vol.16, no.6, pp.301-307, Dec. 2004.



都甲 潔 (正員)

昭50九大・工・電子卒。昭55同大学院博士課程了。同年九大・工・助手, 平2同助教授, 平9九大大学院システム情報科学研究科教授。工博。バイオエレクトロニクス, 主として味覚センサ, 匂いセンサの研究に従事。著書「電子物性論」, 「センサ工学」など。