

マルチチャネル味覚センサによる旨味の温度依存性の再現

八尋 美希 江崎 秀* 飯山 悟*

Temperature Dependence of Umami Taste Reproduced Using Multichannel Channel Taste Sensor

Miki Yahiro Shu Ezaki Satoru Iiyama

Abstract

In this study, taste solutions containing umami substances were measured at 25°C, 10°C, and 60°C, were also evaluated by sensory evaluation, and their sensitivities were compared with the output of a taste sensor. The temperature dependence of the basic taste was measured at different temperatures using the taste sensor. The response to saltiness, acidity, and umami solutions other than bitterness was larger at the higher temperatures, but the response to bitter solutions decreased as the temperature increased.

In the sensory evaluation of the basic tastes, the results of the taste sensor showed no clear temperature dependence for saltiness, acidity, and umami, in contrast to the results of the taste sensor. In the case of umami, however, different results were found. The sensory evaluation of salty and salty solution mixtures indicated an increase in taste intensity at high temperature. Since the taste sensor and the human sense of taste did not match, the temperature proportional component of the sensor was removed. As a result, the temperature dependence of the taste sensor output for umami matched that of the sensory evaluation when it was a salty solution, and the same results were obtained for the other basic.

Keywords: multichannel taste sensor, temperature dependence, *Umami* taste, sensory evaluation

1. はじめに

食べ物のおいしさの要因は狭義の味と広義の味がある。狭義の味は基本味である塩味・酸味・苦味・旨味・甘味の5つの味であり、広義の味は基本味以外の辛味・渋味、舌触りや風味などがある。人の味覚は主観的であるため、客観的に表現することが難しい。膜電位型マルチチャネル味覚センサはこれまでにビール、コーヒー、トマト、清酒、牛乳、ミネラルウォーター、醤油など様々な食品に適用され、定量化に成功している⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

生体膜を模倣した脂質高分子膜を用いたマルチチャネル型味覚センサはヒトの舌の細胞

の主要な成分である脂質を利用し幾種類かの脂質を高分子、可塑剤と混合させたものを成膜化した8本の電極を持つマルチチャンネルの構造を持つ。8本の電極は受容器として作用し、味を呈する化学物質と脂質膜との電位差により味を識別するトランスデューサの役割を持つものである。味覚センサは実用化され、食品メーカーや研究所にてすでに利用されている⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾。

味覚センサは基本味に対し固有の応答パターンを出力する。さらにその感度は人間を超えている。その応答感度は塩化ナトリウム（以下 NaCl、塩味）約 0.02%、酢酸（酸味）約 0.00006%、グルタミン酸ナトリウム（以下 MSG、旨味）約 0.002%、キニーネ（苦味）0.00005%、ショ糖（甘味）約 0.4%である⁽⁶⁾⁽¹¹⁾。

著者らは苦味の温度依存性を味覚センサを用いて明らかにすることで基本味により味覚の温度依存性が異なっていることに着目した。さらに苦味以外の基本味の一つである旨味について応答特性を調べた。旨味は池田菊苗により発見され、出汁をはじめ多くの食品に含まれ、利用されている。かつお節やいりこ、昆布、干ししいたけ等どれも和食には欠かせない食品である。味噌汁の主な材料は出汁と味噌であるが、旨味を豊富に含む出汁を除いた味噌だけではまろやかで深みのある味に欠ける。味噌汁は通常温かい状態で食することが多く、冷えると味噌の中に含まれる塩味が引き立ち、旨味を弱く感じることもある。このことから食べ物の味には温度が影響していると推察できる。

味覚センサの出力は、温度に依存する。一方、ヒトの味覚にも温度依存性があり、味覚の再現を目的とする味覚センサには、ヒトの味覚と一致する温度依存性が求められる。本研究では、旨味物質を含む味溶液を室温（25℃）、低温および高温で測定し、あわせてヒトの官能評価を行い、これら二つの結果を比較、対応から旨味の温度依存性の再現を試みた。

2. 実験方法

(1) 脂質膜

味覚センサは8本の脂質膜電極から構成されている。脂質膜は高分子であるポリ塩化ビニル（PVC）を可塑剤として DOPP（ジオクチルフェニルホスフォネート）および脂質を合わせて作成できる。以下異なる脂質膜と電極をチャンネルとする。

ポリ塩化ビニル（PVC）を支持剤とした人工脂質膜（PVC 脂質混入膜）は以下の手順で作成した。

- ①有機溶媒テトラヒドロフラン（THF）を試験管に約 18mg とり、それにポリ塩化ビニル（PVC）を 800mg 加えた。
- ②脂質を加える。加えた脂質の種類とその割合を表 1 に示す。なお、表中の x : y は加えた脂質のモル比に対応させている。
- ③可塑剤ジオクチルフェニルホスフォネート（DOPP）を 1ml 加え、30 分放置した後に

ホットプレート上で室温より 5℃高い温度に保ちながらゆっくり（2時間）と THF を揮発させた。生体膜の厚みが約 10nm に対し、この脂質高分子膜は 2 万倍の厚みがあるが、生体膜と同様に両新媒性であり、親水基は水相へ向き、疎水鎖は内側に向け配列していることから生体膜の受容膜の最外層と似ている。

Table 1 Lipid membranes used in this study

Channel	Lipid membrane (abbreviation)	Electric charge
3 : 7	DOP : TOMA = 3 : 7	+
TOMA	Triooctyl methyl ammonium chloride	
5 : 5	DOP : TOMA = 5 : 5	0
OAm	Oleyl amine	+
DOP	Diocetyl phosphate	—
9 : 1	DOP : TOMA = 9 : 1	
DA	Decyl alcohol	
OA	Oleic Acid	

(2) 測定装置

図 1 に電極、図 2 に測定装置を示した。味覚センサは大きく分けると検出部（電極部）とデータ処理部により構成されている。検出器ではそれぞれ脂質高分子膜を貼った 8 本のセンサプローブと参照電極（TOA, HS205C）の 2 電極からなる。その脂質高分子膜の膜電位を検出し、複数の脂質膜から構成されている電位出力応答パターンから味を識別する。

脂質膜電極であるセンサプローブはプローブ本体、脂質高分子膜、Ag/AgCl 電極、内部液には 3MKCl 溶液を充填している電極端子から構成されている。参照電極はプローブ本体、Ag/AgCl 電極、内部液（3MKCl、AgCl 線）、電極端子、3MKCl 3%寒天から構成されている。脂質膜電極の内部が細胞内、味溶液である外部を細胞外として生体系と同じ対応である。

測定の概略は以下のようなものである。味溶液の入ったビーカーにマルチチャンネル電極と参照電極を入れて、この電極と各脂質膜との間の電位を測定する。電位

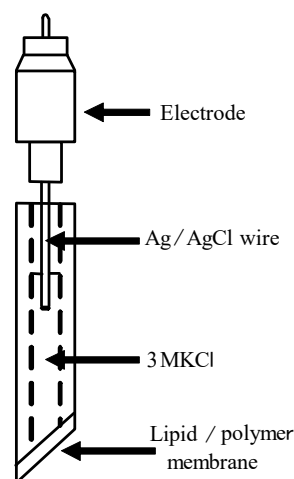


Fig.1 Electrode

は味物質の脂質膜へ及ぼす影響で変化する。各チャンネルからの電位は、高入力インピーダンスアンプ（ Analog Devices AD820 ）を介してデジタル電圧計（ Keithley 2001, 最大 10 チャンネルのスキヤナー）でデジタルコードに変換されコンピュータに記録される。電極の先端にはアクリル板を取り付け、その上に脂質膜を貼付した。

ここで脂質高分子膜型味覚センサの応答の特徴を述べると基本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、酸味を呈する物質は負荷電膜および中性荷電膜は大きく正值に応答する。特に負に荷電した膜は水素イオンが膜の親水基に吸着することで、膜の表面電荷密度が変化する⁽¹²⁾。その結果、膜と水溶液の界面の電荷が変化し、それが応答電位として計測される。旨味は中性膜が負に応答する特徴を持ち、グルタミン酸ナトリウム本体の吸着効果と Na^+ イオンによる遮蔽効果が同時に現れる⁽¹²⁾。MSG、イノシン酸ナトリウム（以下 IMP）、グアニル酸ナトリウム（以下 GMP）はセンサでも同様に似たパターンを示すが、これらはすべて同じ旨味で

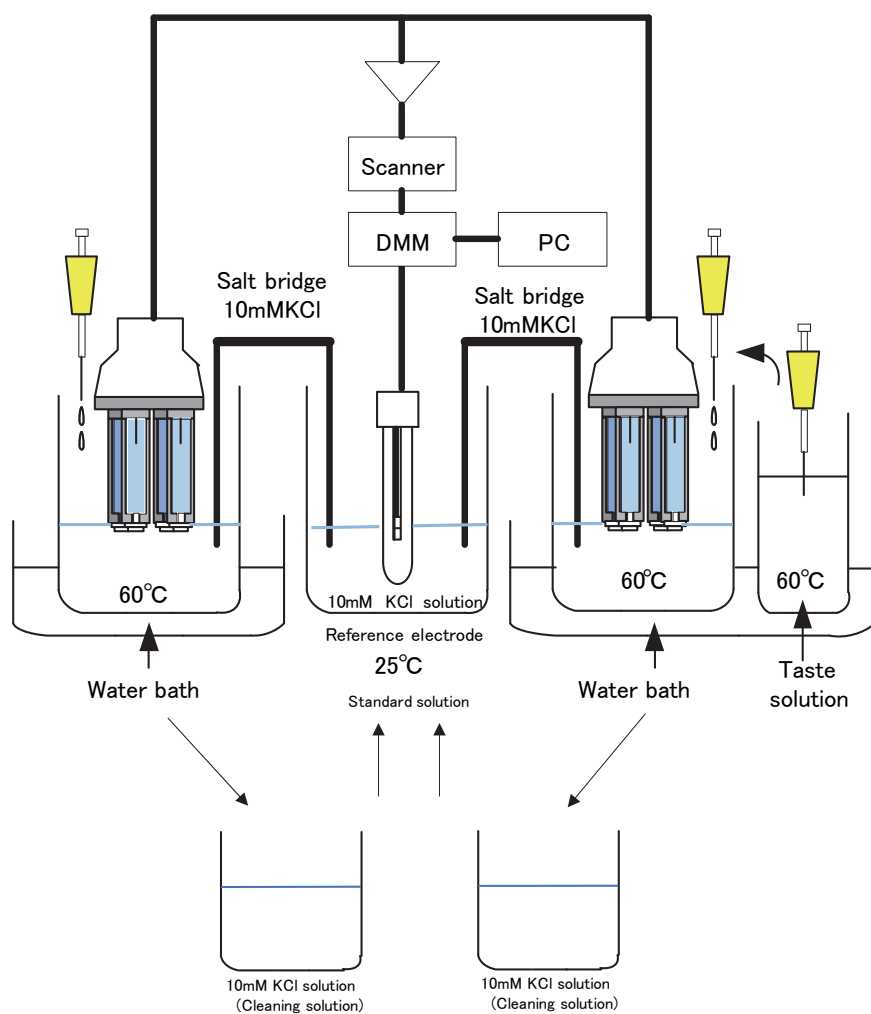


Fig.2 Measuring system for temperature dependence

あるから味も似ており、個々の物質の化学物質ではなく味そのものに応答していることを意味している⁽¹³⁾。苦味物質であるキニーネは膜の疎水鎖の部分に入り込み、その表面電荷密度を変え、表面電位、さらに膜電位を変える。

(3) 測定方法

異なる温度の溶液を継続して測定するため、脂質膜電極と参照電極ともに 25°C に保ち、サンプル溶液は恒温槽を用いて異なる定温に保った。高温での実験では、サンプルを熱して 60°C に調整し、低温の場合は容器に氷を入れ、10°C に保った。参照電極とサンプルの間を塩橋で連絡し、脂質高分子膜電極を測定時に 5 秒間先端部だけサンプルに浸すことで、添加により濃度を変え、脂質膜以外の温度変化を防いだ。

実験は室温と高温または低温の順にサンプルの応答電位を測定し、サンプルと基準溶液との電位差を記録する。

実験手順は以下のようである。

- ① 脂質膜表面の電位が安定するまで待つ。
- ② 25°C のサンプルの応答電位を測定する。
- ③ 60°C のサンプルまたは 10°C のサンプルの応答電位を測定する。
- ④ サンプルの電位差を記録する。
- ⑤ 濃度を変化させてこれを繰り返す。

(4) 基本味物質

基本味に使用した 4 種の呈味物質は、NaCl (塩味)、酒石酸 (酸味)、キニーネ塩酸塩 (苦味)、MSG (旨味) である。苦味を呈する物質として他にアルギニン、L-トリプトファン、ピクリン酸ナトリウムをサンプルとした。

(5) 官能評価

官能評価と味覚センサの出力が合えば、ヒトの感覚に近い状態でセンサが対象とする測定物の味の評価が可能となる。そこでまずヒトの基本味の温度依存性を明確にするために官能評価を行った。評価のための基本味の濃度はあらかじめ予備実験を行ったうえで決定した。

基本味の閾値が温度による影響を呈味物質の濃度と認識率から明らかにすることとした。次に温度による味の変化を調べた。閾値は一般にある刺激が感覚的に反応を引き起こすか起こさないかの限界を「閾」と言い、その最小の刺激量を閾値 (threshold) という、閾値には刺激閾 (または検知閾) 認知閾、弁別閾 (または識別閾) などがある。刺激閾は水と区別できる最小量の濃度のことをいい、認知閾はどの刺激の特性を認知することができる最低濃度のことであり、弁別閾は濃度の異なる両者の差を識別することが出来る最小の刺

激量をいう⁽¹¹⁾。旨味物質を含む味溶液を味覚センサで測定するとともに、官能評価では、温度が異なる濃度の味溶液に対する味の強さを評価した。

評価は以下のように行った。

(i) 官能評価のパネル

官能評価のパネルは 10~15 名とした。パネルとは官能評価をする人のことである。

(ii) サンプル調整

サンプルの濃度は明快に味を感じる範囲で低濃度の味溶液とした。同じ濃度の味物質であるが、温度のみ異なる味溶液に対し、強度の順位付けを実施した。パネルと呼ばれる検査員が濃度の異なるサンプルを約 30ml ずつ味わい、評価した。サンプルは蒸留水に味物質を添加した。

評価の方法は強・中・弱の 3 段階で行った。味の強さ順に強いものを 3、中程度のものを 2、弱い味を 1 として点数化したものである。それらのサンプルの検査結果から得られた平均を算出し、データとした。

(iii) サンプルの温度

サンプルの温度は 10℃、25℃、60℃とした。この温度設定にした理由は食べ物の冷たい飲み物等は 10℃前後であることが多く、温かい飲み物も 60℃程度のことが多いからである。

(iv) 味物質の濃度

NaCl (塩味) を 30mM、酒石酸 (酸味) を 3mM、MSG (旨味) を 3mM、キニーネ塩酸塩を 0.1mM、アルギニン 8mM、L-トリプトファン 15mM、ピクリン酸ナトリウムを 0.05mM である。

上記の味物質を 10℃、25℃、60℃となるように氷や IH ヒーター (KZ-120A (ナショナル)) を使って調整した。パネルには評価前に蒸留水でかるく口をゆすいでもらい、上記 3 つの異なる温度の溶液の 25℃から味わい、10℃と 60℃の味の強弱の評価を行ってもらった。

(6) 旨味の混合溶液の官能評価

旨味単独と旨味と塩味の混合溶液となるよう 3 つのサンプルを準備した。10mMMSG を基準とし、10mMMSG に 30mMNaCl を添加したものとさらに 0.1mM IMP を加えたものをサンプルとし官能評価を行った。評価方法は (5) と同様に行った。評価サンプルの混合液を以下に示した。

【評価サンプル】

(a) 10mMMSG、(b) 10mMMSG+30mMNaCl、(c) 10mMMSG+0.3mMIMP+30mMNaCl

3. 結果と考察

(1) 基本味物質の濃度依存性と味覚センサの応答

図3は各味溶液の濃度の溶液温度変化にともなう電位差を示している。4つの味物質についての応答の特徴は、25℃、60℃と温度が異なっても電位応答パターンには大きな特徴の変化は見られないことである。これは、味覚センサが異なる温度の基本味の温度依存性が可能であることを明らかにしている。温度依存性は、おおむね閾値やその形状は変えず、キニーネ塩酸塩を除き温度上昇により応答が大きくなることがわかった。

一方、旨味は OAm 膜について負への応答が大きくなる特徴があることがすでにわかっている⁽¹⁰⁾。図3の MSG の 5:5 膜に着目し、味覚センサの MSG 応答特性の濃度依存性は 25℃において高濃度になると負への応答が増大し、濃度と比例関係であることが明らかである。つまり 60℃の方が旨味を強く感じていることを意味する。

これまでの研究成果から旨味物質ではグルタミン酸ナトリウム本体の吸着効果と Na⁺イオンによる静電遮蔽効果が同時に現れていることがわかっている。例えばマイナス荷電膜は味物質のプラス荷電成分に応答する。しかし、DOP 膜は低濃度において膜電位は負の方向に変化するが、あるところを境に正に反応するがこれは MSG の中に含まれる Na⁺に起因している。膜電位の上昇は NaCl と似ているため、センサの応答では塩味を強く感じているように見える。また、60℃でも同様に低濃度から高濃度になると正への応答がより大きく見られ、旨味は高濃度になると塩味が強くなりすぎるとも言われている⁽¹⁰⁾。図3から旨味を呈する MSG は 5:5 膜、OAm 膜に濃度依存性が見られ、60℃の測定についても応答パターンは似ており、旨味を維持していることから高温において旨味の測定が可能であることがわかった。

一般的にそれぞれの応答のメカニズムは、KCl の場合は静電遮蔽効果であり、キニーネ塩酸塩の場合は静電的な応答と疎水的な応答であると考えられている。さらに、疎水結合は一般に温度が上昇すると、結合が強くなることが知られ、疎水結合は温度上昇に伴い、キニーネ塩酸塩の疎水結合の部分は強くなる。疎水結合の相互作用は膜の疎水部とキニーネ塩酸塩の疎水部分の間で弱くなるため、キニーネ塩酸塩は脂質膜に吸着しなかったことを推測した。溶液温度が上昇すると、キニーネ塩酸塩の疎水的な応答は減少し、結果として電位は減少するものと考えられる。

(2) 基本味と官能評価

基本味の官能評価として NaCl、酒石酸、MSG、キニーネ塩酸を対象とした結果を図4に示す。サンプルはパネルが味を認識できなければならないため、閾値よりも濃度を高く設定した。NaCl、酒石酸および MSG は温度依存性の明確な反応を示さなかった。

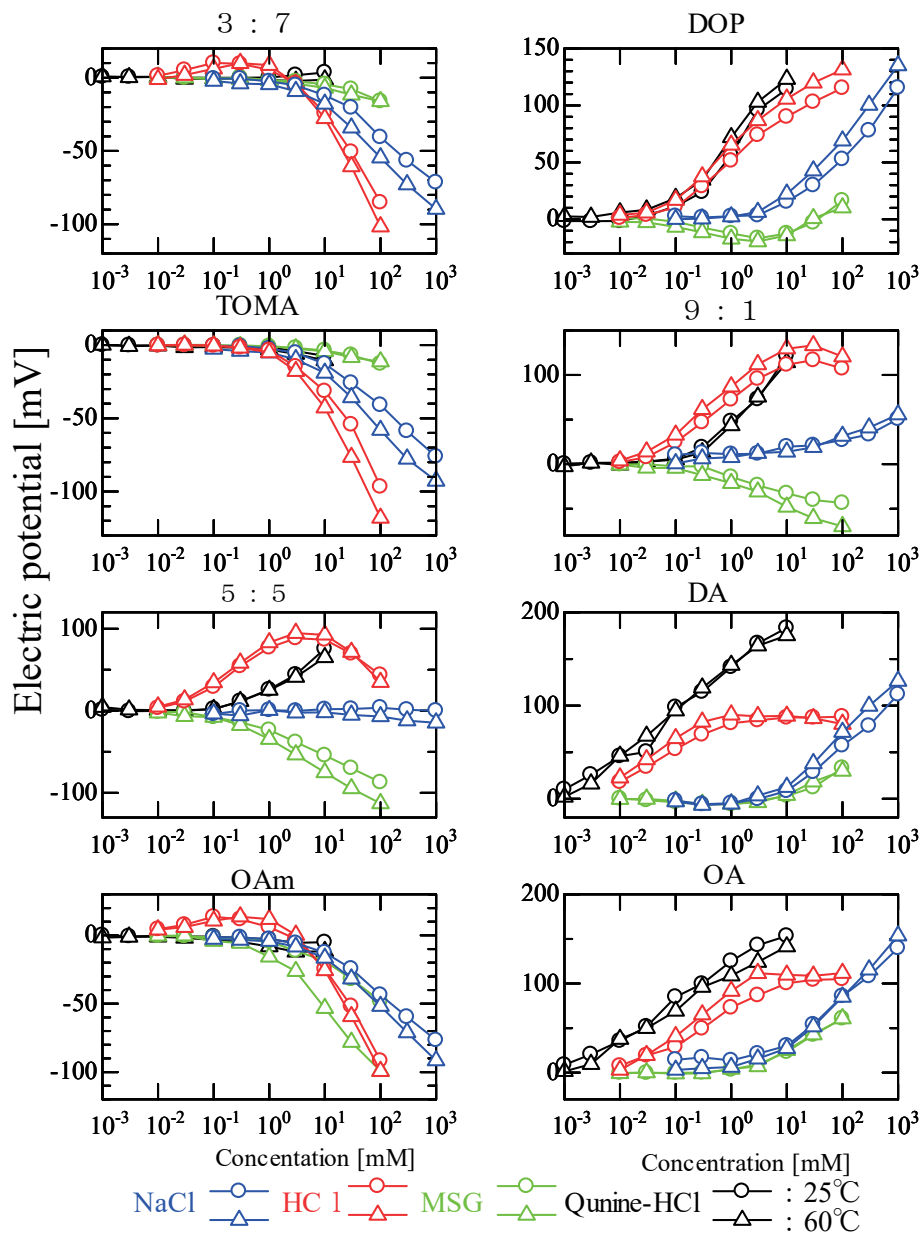


Fig.3 Potential difference with change in concentration of basic taste

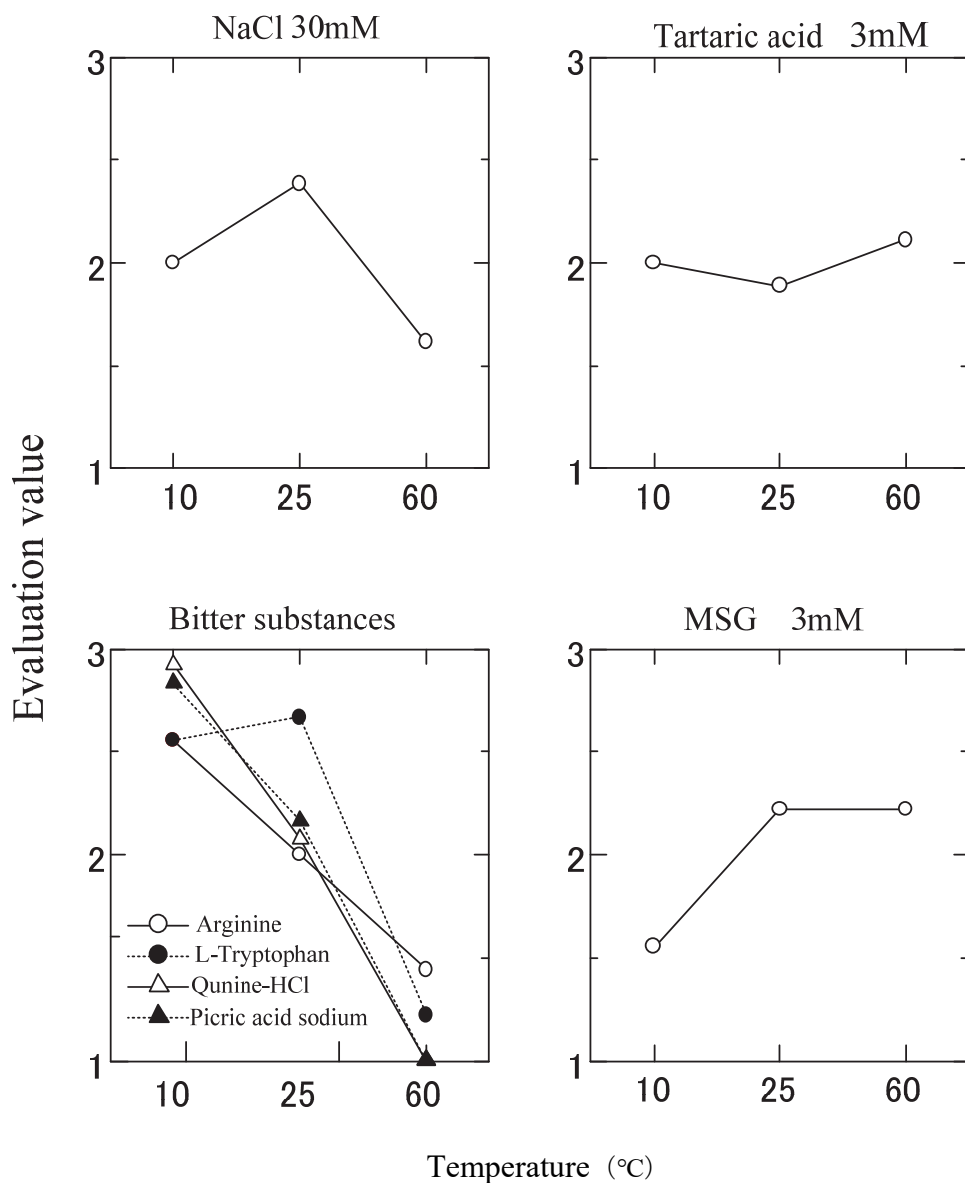


Fig.4 Result of sensory evaluation

一方、塩味や他の味を混ぜ合わせた混合味溶液の温度による味の官能評価をこれまでと同様の方法で調べた。MSGを含む混合味溶液に対して明確な温度依存性が得られた結果を図5に示した。予備実験の段階で旨味については単独で味わう機会が少ないことから旨味がどのような味であるのかを認識することが困難であることがわかった。旨味は多くの食品について存在し、単独よりも塩味と組み合わせて味わうことが多い。旨味を塩味と混合溶液にしたものをサンプルとすることで 10mMMSG に 30mMNaCl を加えても、個人差

が大きく温度に対し明確な傾向は見られなかったが、さらに 0.1mMIMP を加えると、味覚センサと同様に高温ほど強く味を感じる結果となった。この結果は、MSG と IMP の相乗効果により旨味が増強されたためと考えられる。

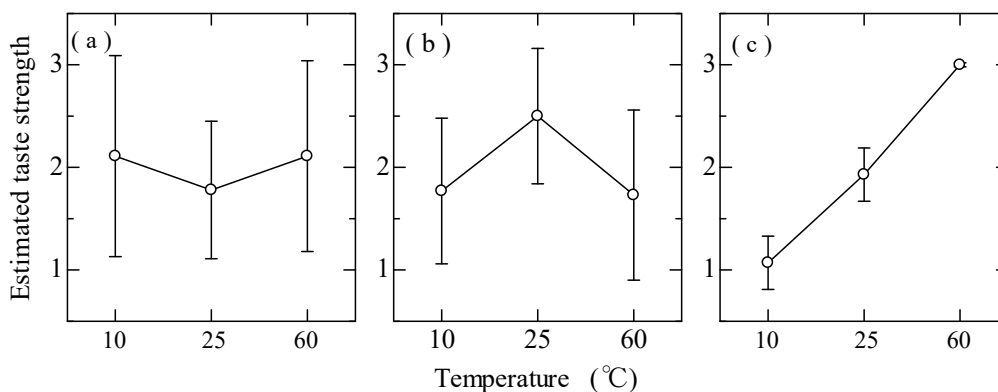


Fig.5 Result of sensory test for “umami”

(a) 10mMMSG (b) 10mMMSG+30mMNaCl

(c) 10mMMSG+0.3mMIMP+30mMNaCl

(3) 味覚センサ応答と官能評価との関係

塩味溶液のみの官能評価の塩味に対する温度依存性を味覚センサの塩味に対する応答と比較したのが図6である。味覚センサの塩味に対する応答はほぼ温度に比例していることから、NaClの感度については、膜電位応答は温度にほぼ比例し、官能評価と比較すると温度依存性のないことがわかる。

次に旨味溶液の味覚センサ応答と官能評価との関係について図7に示す。図4でグルタミン酸ナトリウム (MSG) の 10°C、25°Cおよび 60°Cの MSG 溶液に対し、味覚センサの応答を求めたところ、0.1mM から 100mM の範囲で、濃度の対数に対してほぼ直線的な応答特性が得られた。pH 電極の膜電位は温度に比例する場合は一般的であるが、味覚センサの MSG に対する感度は図7に示すように温度上昇に対して比例関係よりも著しい増加が見られ、MSG の応答の温度依存性については膜電位応答から判断すると温度に比例しないことがわかった。さらに MSG は脂質膜への吸着があることがわかっているが、それは脂質内部へ味物質が入り込むことで食べた後も旨味を長く感じることでできていることからではないかと推測される⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

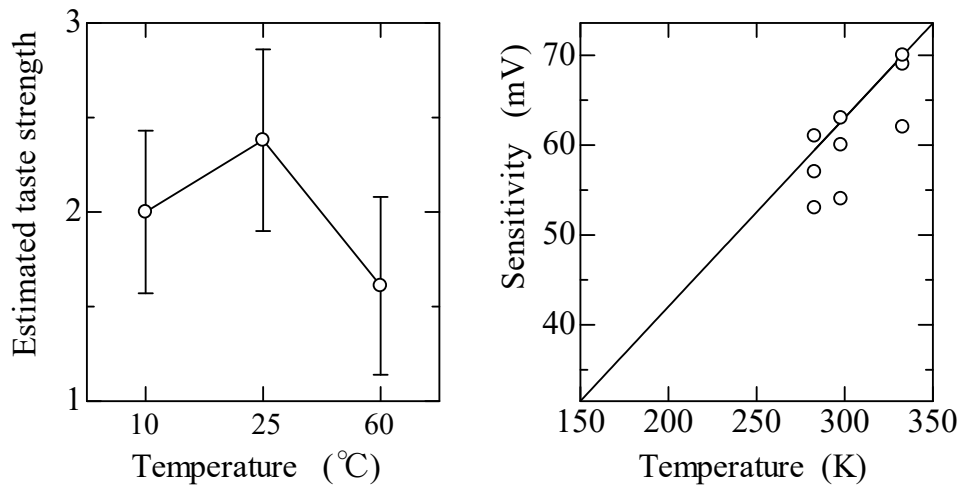


Fig.6 Temperature dependence of taste sensor sensitivity to NaCl

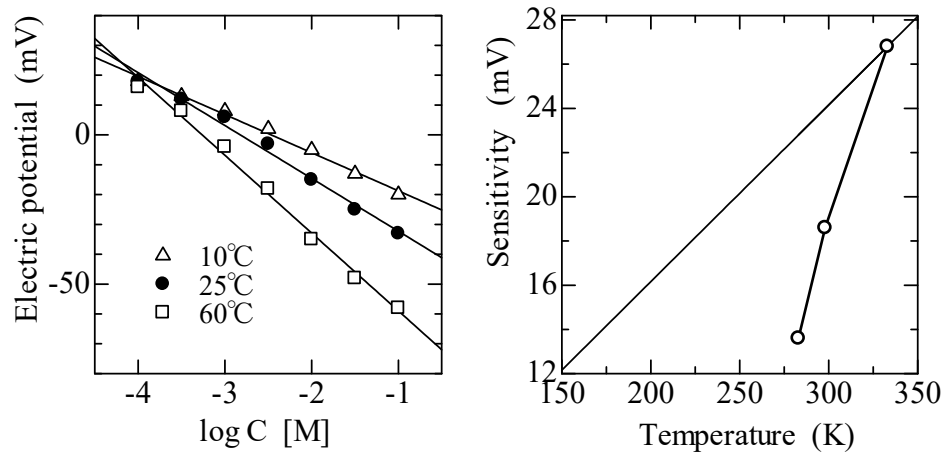


Fig.7 Temperature dependence of taste sensor sensitivity to MSG

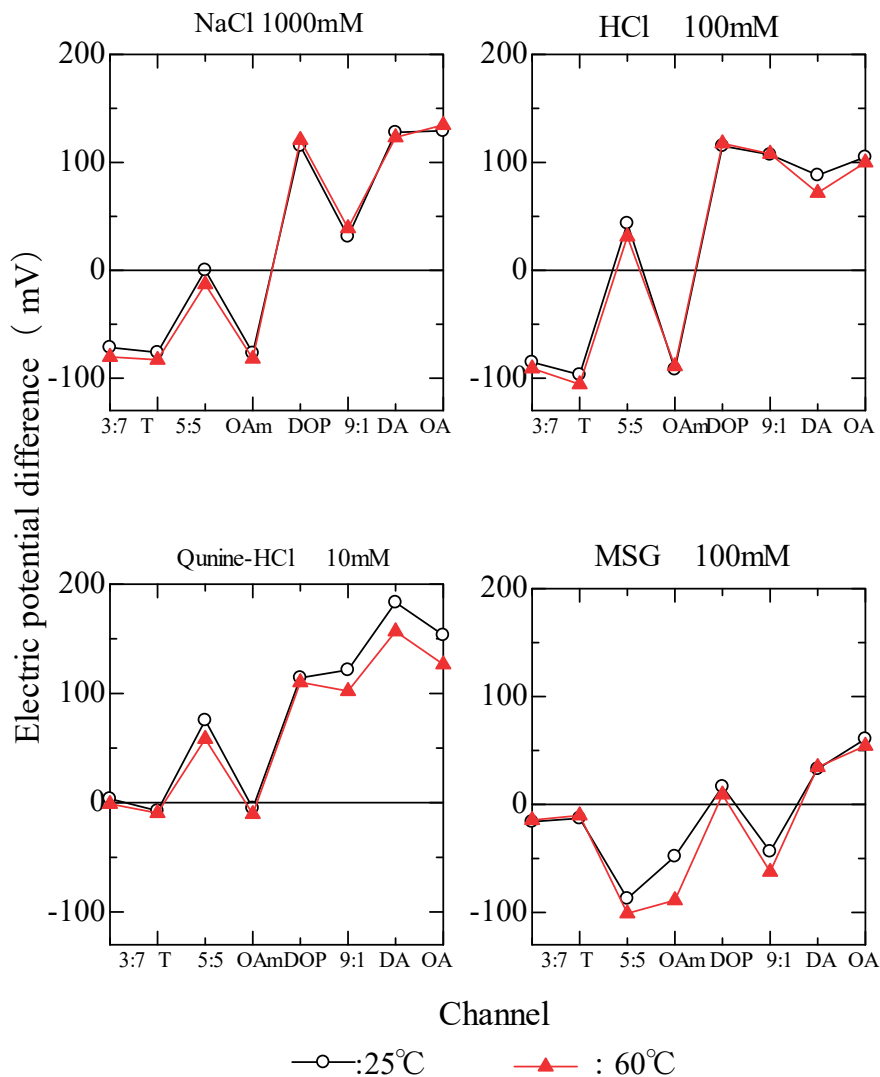


Fig.8 Response pattern after temperature compensation

(4) 補正後の応答電位

様々な温度下で味覚センサを用いて基本味溶液を測定すると官能評価との対応がなく、味覚センサにおいてはヒトの味覚が再現されていない結果となった。味覚センサの出力をさらに詳細に調べると、塩味溶液に対しては脂質高分子膜電極の膜電位はおおよそ絶対温度に比例していることがわかった。

一般的なセンサに温度依存性がある場合、温度補償により影響を除去し、味覚を再現することが好ましいと考える。脂質高分子膜の電極電位は、脂質高分子膜の膜電位と銀塩化銀線の電極電位の和であり、何れも温度依存性を有する。膜電位の様々な理論があるが、基本的には RT/F の要因があり、Nernst の式がある。

$$V_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{C_2}{C_1} \dots \dots \dots (1)$$

V_m は膜電位、 R は気体定数、 F はファラデー定数、 T は温度[K]、 C_1 および C_2 は膜の内外の濃度である。式(1)から明らかなように、 RT/F の係数は温度に比例する。pH計の場合、JIS規格でもNernst電位が想定されている。そして温度補償は RT/F による温度勾配で算出する。

先の温度比例成分は味覚に関係ないと仮定し、味覚センサか出力から温度依存性を差し引く補正を行った。すると図7の60℃のセンサの結果を補正したところ図8のようになり、塩味、旨味や他の基本味についても味覚センサ出力の温度特性を官能評価の温度傾向と一致させることができた。

4. まとめ

膜電位型マルチチャネル味覚センサは、基本味に対し固有の応答パターンを出力し、その出力は、温度に依存性する。人間の味覚にも温度依存性があり、味覚の再現を目的とする味覚センサには、人の味覚と一致する温度依存性が求められる。本研究では、旨味物質を含む味溶液を室温、低温および高温で測定し、併せて人の官能評価を行い、それらの感度を比較した。

味覚センサで異なる温度において基本味溶液の温度依存性を調べ、苦味以外の塩味、酸味、旨味溶液は温度が高いほど、応答は大きい、苦味溶液に対しては、温度が上昇するほど応答は低下した。同じ基本味における官能評価では味覚センサの結果とは異なり、塩味、酸味および旨味に関しては、明確な温度依存性は見られなかった。ただし、旨味については異なっていた。塩味と塩味溶液の混合液に対しての官能評価は高温で味強度は増加した。苦味に関しては高温で苦味強度は減少し、味覚センサ温度特性と同じ傾向を示した。味覚センサとヒトの味覚が一致していないことから、センサの温度比例成分を取り除いた結果、旨味は塩味の混合溶液であるときに味覚センサ出力の温度依存性を官能評価の温度と一致させることができ、他の基本味も同様の結果となった。

本研究は日本家政学会九州支部大会第54回大会に発表したものに加筆したものである。

参考文献

- (1) K. Toko, T. Murata, T. Matsuno, Y. Kikkawa and K. Yamafuji: "Taste Map of Beer by a Multichannel Taste Sensor", *Sensors and Materials*, 4, pp. 145 - 152 (1992)
- (2) Y. Arikawa, K. Toko, H. Ikezaki, Y. Shinha, T. Ito, I. Oguri and S. Baba: "Analysis of Sake Taste Using Multielectrode Taste Sensor", *Sensors and Materials*, 7(4), pp.261 - 270(1995)
- (3) T. Fukunaga, K. Toko, S. Mori, Y. Nakabayashi and M. Kanda : "Quantification of Taste of Coffee Using Sensor with Global Selectivity", *Sensors and Materials*, 8(1), pp.47 - 56(1996)
- (4) S.Iiyama, M.Yahiro and K.Toko : " Quantitative Sensing of Mineral Water with Multichannel Taste Sensor", *Sensors and Materials*, 7(3), pp.191 - 201(1995)
- (5) Satoru Iiyama, Miki Yahiro, Kiyoshi Toko : " Measurements of soy sauce using taste sensor", *Sensors and Actuators B:Chemical*, Volume 66, Issues 1-3, pp. 205-206(2000)
- (6) 都甲 潔 : 味覚を科学する, 角川書店, 平成 14 年 (2002)
- (7) 都甲 潔、飯山 悟著 : トコトン追及 食品・料理・味覚の科学, 講談社, 2011 年
- (8) K.Toko: "Biomimetic Technology", Cambridge University Press, Cambridge (2000)
- (9) M.Yahiro, S.Ezaki, R.Takamatsu and K.Toko : " Temperature Dependence of Bitter Taste and Output Characteristics of Taste Sensor" ,*Sensors and Materials*, Vol.20.No.4, pp.161 - 169(2008)
- (10) 都甲 潔編著 : 光琳テクノブックス 19 食と感性, 光琳, 平成 11 年
- (11) 山野善正, 山口静子編 : おいしさの科学, 朝倉書店, 1994, p98
- (12) 都甲 潔 : "味覚機構の解明およびそのセンサ化" , 計測と制御 第 37 卷 第 7 号, 1998 年
- (13) 都甲 潔・宮城幸一郎 共著 : センサ工学, 培風館, p175, 1995 年
- (14) K.Hayashi, Y.Matsui, K.Toko, T.Murata, Ke.Yamafuji and Ka.Yamafuji:"Sensing of "Umami" Taste and Synergistic Effects with Synthetic Lipid Membranes",*Sensors and Materials*,1-6, pp.321-334(1989)
- (15) Tsuyoshi Horio and Yojiro Kawamura;*Chemical Senses*, "Studies on after-taste of various taste stimuli in humans ", Volume 15, Issue 3,pp.271-280(1990)