

五基本味に対する人工膜の電氣的応答

小 島 洋一郎*

Electrical Responses of Artificial Membrane in Five Basic Tastes

Yoichiro KOJIMA

要 旨

ポリ塩化ビニル (PVC) のフィルムに合成リン脂質類似物質であるDOPHを包含させたPVC・DOPH膜は、その電氣的な特性が長期間維持されるため、センサ素材としての可能性を有している。本報では、このPVC・DOPH人工膜を用いて5基本味の甘味、塩味、酸味、苦味、旨味に対する電気抵抗・電気容量特性を具体的に検討した。その結果、それぞれの味物質によって異なる特性が得られ、膜抵抗測定用の印加電圧を上げることで希薄味溶液に対して高い選択性を示した。また、混合味物質に対しても有意な差異を見出すことができた。このような電氣的応答特性から、PVC・DOPH人工膜は味物質検出用センサ素材としての可能性を持つことが明らかになった。

Abstract

The PVC・DOPH membrane which consists of a polyvinylchloride (PVC) and a synthetic analogue of phosphatide (DOPH) is able to maintain the electrical characteristics for a long period. Therefore, there is a possibility that the membrane may be used as a sensor material. In this study, responses of the membrane resistance and capacitance to five basic tastes, i.e., sweetness, saltiness, sourness, bitterness and umami were investigated. The five tastes were discriminated by the electric characteristics, and the membrane had also the electrical selectivity in the dilute and mixed taste solutions. These experimental facts show the PVC・DOPH membrane had possibility to be a useful sensor material for the detection of the taste substances.

Key Words: PVC・DOPH membrane, tastes substances, resistance, capacitance, sensor material

1. はじめに

生体の五感の中で、味覚は食べ物や飲み物の中の多種多様な化学成分を感知する感覚である¹⁾。近年、複雑な味覚表現機構をセンサと情報処理により、人工的に実現することを目指した研究が活発に行われている。センサに関しては、光、リボソーム、LB膜、水晶発振子膜、弾性表面波等^{2~6)}を用いた化学センサを、味覚センサへ応用しようとする報告がある。また、人工脂質膜を多チャンネル化したセンサは生体の味覚受容機構を工学的に模倣し、特定の味物質を感度良く識別している⁷⁾。

人間の舌上に多く存在する味覚受容器は、高度に組織化されたゲル状の有機分子から構成され、主要成分の一つはリン脂質である。この受容器

は、外部からの化学的刺激により興奮現象を引き起こす。そこで著者は、リン脂質を模倣したディオレイルフォスフェート（以下、DOPH）を用いて研究を行ってきた。まず、この脂質を包含するように高分子のポリ塩化ビニル（以下、PVC）で支持したPVC・DOPH人工膜（以下、PVC膜）を作製した。その結果、膜の塩溶液に対する耐久性が向上すること、膜のDOPH自身が塩溶液濃度変化により構造変化を起こし、膜の電気抵抗・容量が変化することなどを明らかにした。このなかで、PVC膜は電流制御型の負性抵抗特性を持つので、興奮性細胞膜のモデルとみなすこともできた。さらに、味覚では膜の電氣的興奮により化学情報を識別しているので、このPVC膜は味受容モデル膜として有望であることを示した。

生体系におけるセンシングを模倣する上で、単純化した系を構築することは大変重要であり、こ

* 講 師 一般教科

のような人工系を構築する過程から、バイオミメティックなデバイスが生み出される可能性もある。

こうした観点から、本報では脂質を一種類だけ用い、これまでに報告されていない単チャネル味覚センサへの可能性を検討した。

PVC膜の5基本味溶液に対する電気的な基礎特性として、膜の電気抵抗と電気容量を実験的に求め、さらに味物質に対する膜の周波数特性から、味物質検出の可能性を示唆した。また、実際の人間の味覚は複合的な味を感じとっているのので、次に単純な味物質系として2種類の味物質を混ぜ合わせてそれらの検出を試みた。その結果、それぞれの混合味物質に有意な差異が見い出された。

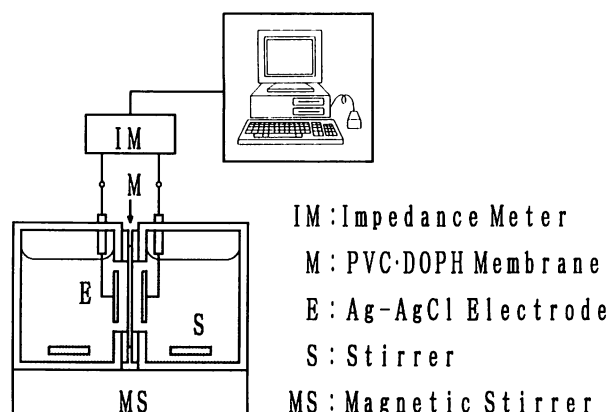
2. 実験方法

2. 1 PVC・DOPH膜の作製法

DOPHは、オレイルアルコールとオキシ塩化リンの反応物を加水分解することにより合成した^{10, 11)}。PVC膜の作製は、G.J.Moodyらの方法を参考にした¹²⁾。ここでは合成脂質のDOPHを0.05g、PVCを0.05g、2つの物質を溶かす有機溶媒のテトラヒドロフラン（以下、THF）を3mlとし、これらを5分間以上混ぜ合わせた後、直ちにスライドガラス上に0.1g滴下して直径2cmの円盤状に延ばした。その後、THFの残留による膜特性への影響が少なくなるように、最低でも6時間以上空气中（約25℃）で乾燥させ、スライドガラスごと25℃のKCl溶液300mMに12時間以上浸し、取り出したスライドガラスからPVC膜を剥がしてPVC膜とした。ここで得られた膜の厚さは約20μmであった。

2. 2 実験装置

作製した膜を直径1cmの穴を有するシリコンゴム製のガスケットで挟み、それを同径の穴を持つアクリル製のセルに装着した。それぞれのセルには同じ濃度のKCl溶液を40mlずつ満たし、測定中にはマグネティックスタラを用いて常時攪拌した。各セルには直径が1cmである円盤状の銀-塩化銀電極を膜からそれぞれ2mmずつ離して取り付けた¹⁰⁾。膜抵抗と膜容量の同時計測はインピーダンスメータ（NF回路設計ブロック社製、2340型 LCZメータ）を用いて行った。測定周波数は電極における分極を少なくするために1kHzとし、測定電圧は膜への電界影響が小さくなるように電極両端の印加電圧を50mVに設定した。測



第1図 実験装置

定はコンピュータからGP-IBを介してインピーダンスメータを自動制御することで行い、得られたデータをコンピュータで解析し、その後保存した。これら実験装置の概略を第1図に示す。各実験は、膜を作製時の25℃、300mMのKCl溶液から1mMのKCl溶液に浸し替え、膜抵抗が数100Ω程度から数10kΩ以上に上昇することを確認した後行った。

2. 3 測定溶液

測定に用いた味物質は甘味にサッカロース、塩味にNaCl、酸味にHCl、苦味に塩酸キニーネ、旨味にMSG（グルタミン酸一ナトリウム）であり、これら味物質の溶媒として人間の唾液に相当する1mMKCl溶液を使用した。また、1mMKCl溶液の入っているセル内に各味物質を滴下し、濃度はそれぞれ0.01mMから10倍ごとの4濃度（0.1、1、10mM）となるように調整した。各味物質溶液濃度に対する膜抵抗・膜容量は味物質を含まない最初の1mMKCl溶液の測定値で規格化して相対値で表した。

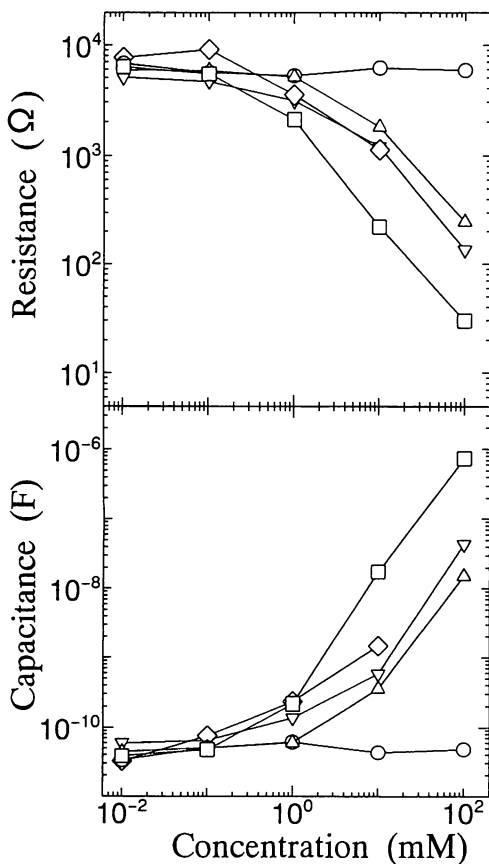
3. 実験結果

3. 1 味溶液のみの電気化学的特性

合成脂質を含ませたPVC膜の特性を検討する前に、膜をセルに挟まない状態で1mMKCl溶液に添加した5基本味物質溶液に対する電極の電気抵抗と容量の特性を検討した。第2図は5基本味溶液に対する結果である。各測定値は溶液の種類で安定に要する時間が異なっていたので、各溶液の変化が落ちついたときの値とした。初期濃度0.01mMにおける各味物質の測定値を比較すると、抵抗は数10kΩ、容量は数10pFといずれも同

じ桁の数値であった。100mMへと溶液濃度が上昇するに伴い、NaClとMSGが数百 Ω 、数10nFへ、HClは数10 Ω 、数百nFへ、塩酸キニーネは10mMで1k Ω 、数nFへと変化した。サッカロースは抵抗、容量ともにほとんど変化しなかった。なお、ここでの容量と抵抗は、電極表面に形成される電気二重層による容量とイオン電流の溶液中における拡がり抵抗などである¹³⁾。一方、膜を挟んだ場合、溶液濃度を上げていくと、これらの値は数百k Ω から数k Ω へ、数nFから数 μ Fに達したので、膜抵抗・膜容量に対する電極のみの電気抵抗・容量の影響は少ないことが分かった。

一般的に水溶液中でPVCは水を吸収し、変色・膨化することが知られている。著者らはこれらのことを踏まえ、既に脂質を全く含まないPVC膜だけの電気・光学特性についても検討を行っている¹⁴⁾。そのなかで、PVCだけの膜は溶液濃度の増加に伴って光透過率をわずかに減少させ、またコンダクタンスは多少変化することを示した。



○: Sucrose, ▽: NaCl, □: HCl, ◇: Quinine, △: MSG

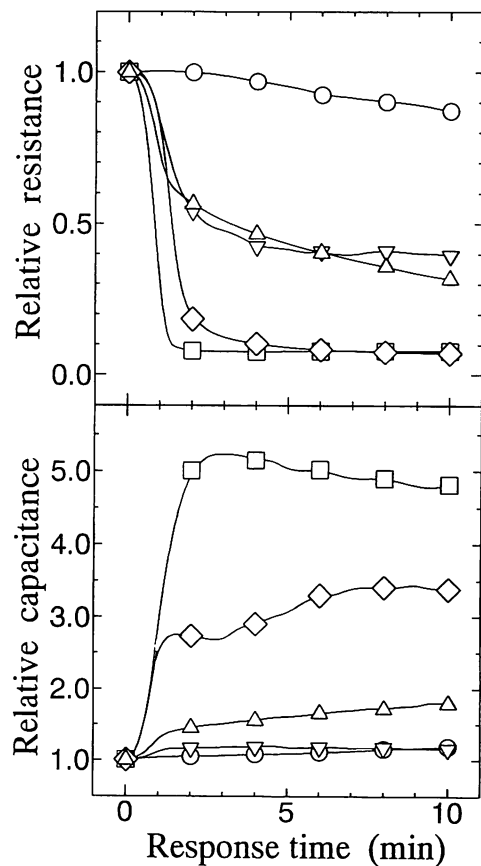
第2図 味溶液の濃度特性

3. 2 10mMの5基本味物質に対する膜抵抗と膜容量の経時変化

このように膜抵抗・膜容量に対する電極の影響は少なく、またPVCのみの特性として、溶液による変色や膜厚の変化は少ないと考えられたので、ここでは各味物質の違いを確認するために、合成脂質を含むPVC膜の5基本味溶液10mMに対する膜抵抗・容量の経時変化を測定した。その結果を第3図に示す。膜抵抗ではNaClとMSG、HClと塩酸キニーネが同じような特性を示しているが、膜容量では全く違った変化が見られる。NaClとサッカロースの膜容量はほとんど変化なく似た傾向を示しているが、膜抵抗では、NaClとサッカロースの最終値が初期値に比べ、それぞれ約0.4倍、0.9倍へと減少している。このように、同じような特性を示す味物質であっても、膜抵抗で膜容量を、その逆に膜容量で膜抵抗を補完することにより、各味物質の判別ができた。

3. 3 膜抵抗・膜容量による5基本味物質の濃度特性

5基本味物質の各濃度によって生じたPVC膜



○: Sucrose, ▽: NaCl, □: HCl, ◇: Quinine, △: MSG

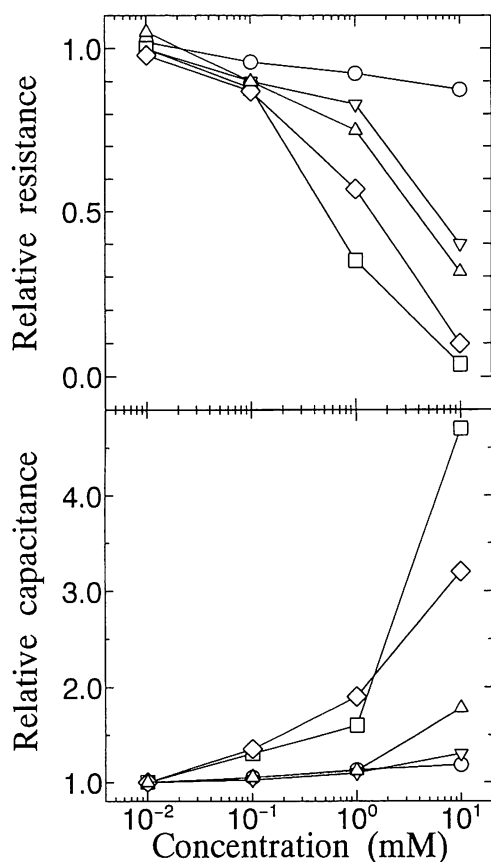
第3図 5基本味溶液10mMによる膜の経時変化

の抵抗と容量の変化を第4図に示す。なお、変化が安定するまでの時間は物質の種類やその濃度によって異なっていた。第3図に示したように高濃度の10mMでは数分であるが、濃度が低くなるに伴い応答時間は約10分にも達するので、各測定点は安定したときの値を用いた。1 mM KCl溶液の間に置いたとき、膜抵抗は実験方法で述べたように最初の値（規格値）の1であるが、セル内の各味溶液の濃度を0.01mMにすると、それぞれ数%前後の変化を示した。一方、味物質濃度の上昇に伴って、膜抵抗が大きく変化する濃度は、サッカロースを除いて他の4味物質ではほぼ同じであるが、一旦抵抗が減少し始めると、抵抗に対する濃度の傾きが大きいものは、HClである。濃度によっても異なるがHClや塩酸キニーネの膜抵抗は88~92%減少した。しかし、サッカロースはこれらの物質に比べて抵抗の変化はわずかであった。膜容量に対する味溶液の効果を第4図の下部に示した。味溶液を含まない1 mM KClの測定値で規格化した値と、味溶液0.01mMを含んだときの値に差異は見い出せなかった。一見すると濃度1 mMまでHClを塩酸キニーネ以外の味物質に顕著

な違いは見られないが、10mMにおける相対値を比較すると、サッカロースが1.18、NaClが1.3、MSGが1.78となり、味溶液の膜容量変化に対する効果の違いが見られた。HClと塩酸キニーネはこれら3味物質とは異なり、低濃度から容量の変化を引き起こしているが、濃度が上がるに伴いHClの方が傾きは大きいので、HClの作用は塩酸キニーネよりも若干強いといえる。第4図に示したものは、それぞれの味物質について行った実験の代表的な例である。同種の味物質を用いても別のPVC膜では、抵抗や容量の変化の割合は必ずしも同じ値とはならなかったが、変化が起り始める濃度および、濃度に依存した変化の傾きはほぼ似た傾向を示した。

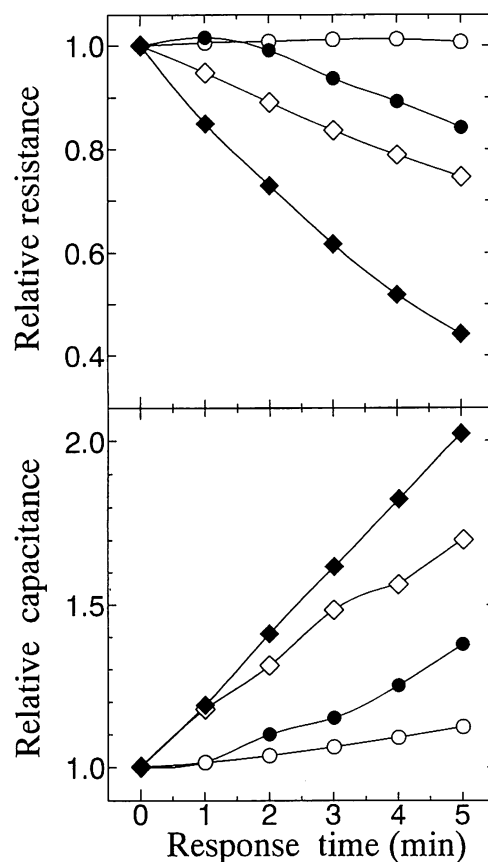
3. 4 測定電圧可変時の希薄味溶液に対する応答

生体の味受容モデルとしてPVC・DOPH膜を用い、その抵抗と容量の変化から味物質を検出してきた。一方、味溶液の濃度が希薄（1mM以下）な場合、反応するまでに時間がかかり、顕著な応答が見られないため、濃度の差異を短時間で、かつ明確に見分けることが困難であった。そこで、測定電圧を変え希



○ : Sucrose, ▽ : NaCl, □ : HCl, ◇ : Quinine, △ : MSG

第4図 単一味物質による膜抵抗・容量変化



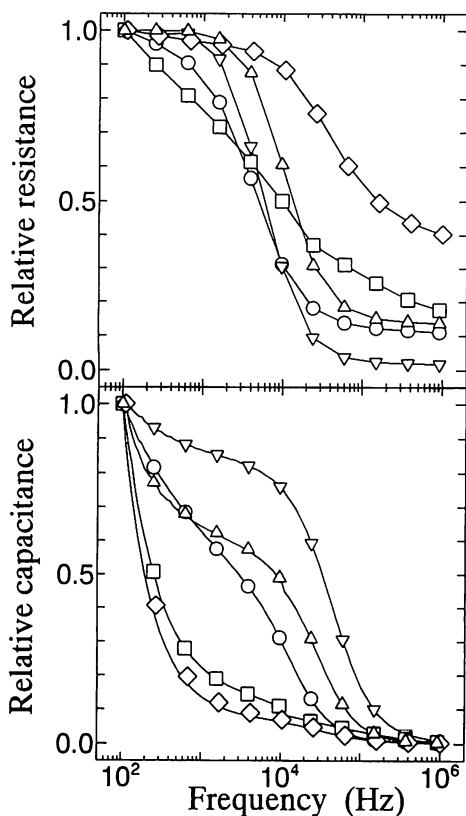
○ : 0.1mM, 0.005V ● : 0.1mM, 0.5V ◇ : 1mM, 0.05V
◆ : 1mM, 0.5V

第5図 印加電圧に対する膜応答

薄塩酸キニーネ溶液に対する膜の応答特性を検討し、第5図に示す。ただし、測定時間はセンサとして用いることを考慮し、短時間計測の観点から5分とした。比較としてこれまで行ってきた測定電圧0.05Vにおける応答を添付した。測定電圧を0.05Vから10倍の0.5Vに上げて実験を行ったところ、ほとんど変化を示さなかった0.1mMの抵抗が、2分以降に基準値より減少し始めた。また、1mMの抵抗変化率は滴下直後から、0.05Vの時よりも顕著な差違が現れた。また、膜容量でも似たように著しい変化が現れた。一方、ここに示した塩酸キニーネ以外の4味物質でも同じような傾向が見受けられた。以上のことから、測定電圧を上げることによって1mM以下の味物質を明確に検出できることがわかった。

3. 5 周波数特性

一般に生体膜の電気的等価回路は抵抗と容量で示される¹⁵⁾。この等価回路をPVC膜にも適用し、味物質に対する膜の応答を検討してきた。しかし、これまでは特定の周波数1kHzにおける抵抗と容量の値であったので、次の第6図に5基本味物質に対する膜の周波数特性を示す。ここでは、



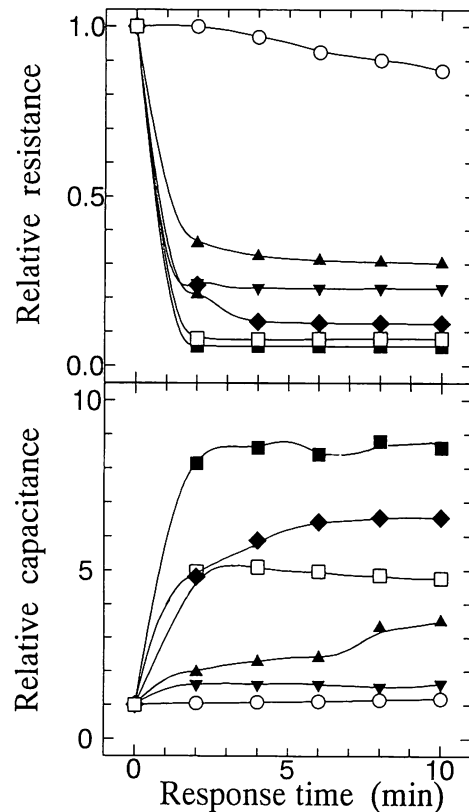
○: Sucrose, ▽: NaCl, □: HCl, ◇: Quinine, △: MSG

第6図 5基本味溶液における周波数特性

各味物質の濃度を10mMに設定し、膜の応答が安定してから、100Hzにおける測定値で規格化した。各味物質それぞれに特有の周波数分散を示しているのが分かる。膜抵抗では塩酸キニーネが低周波数から緩やかな分散傾向を示し、高周波領域で各味物質の判別ができる。膜容量では低周波領域でいわゆる α 分散、高周波領域で β 分散が起こっていると思われる。

3. 6 混合味物質に対する電気的応答

我々はこれまでに、単一の味物質に関してだけ検討してきたが、実際の人間の味覚は複合的な味を感じとっている。そこで、2種類の味物質を混ぜ合わせて、それらの検出を試みた。濃度が10mMであるサッカロースにそれ以外の4味物質をそれぞれ混ぜ合わせ、その混合溶液を1mMKCl溶液に滴下したあとの膜抵抗と容量の経時変化を第7図に示す。ただし、縦軸は味物質滴下前の1mMKCl溶液の値で規格化し、混合味物質と比較できるように単一味物質の甘味と酸味の応答を添付した。従来行ってきた抵抗の経時変化による単一味物質の検出では、第3図に示したように、10mMの塩味と旨味、酸味と苦味がそ



○: Sucrose □: HCl
▽: Sucrose + NaCl ■: Sucrose + HCl
◆: Sucrose + Quinine ▲: Sucrose + MSG

第7図 混合味物質に対する膜応答変化

れぞれ似たような傾向を示した。しかし、混合味物質では、同じような特性を示す物質はなく、それぞれの混合味物質において滴下2分後には明らかな差違が現れ、約3分ですべて物質に対する応答がほぼ安定した。次に容量の変化では、3.2節で述べたように単一味物質で約5倍と最も大きな変化を示した酸味が、甘味との混合溶液では9倍の上昇傾向を示した。他の混合味物質も単一味物質のときの変化よりも約2倍の増加傾向を示した。これらの結果から、単一のPVC・DOPH膜から得られる抵抗と容量の変化率と、応答速度の違いを利用することで、混合味物質の検出が可能であると思われる。

4. 検 討

PVC膜の構造は、PVCマトリクスが形成する多層スポンジ状孔内に、人工脂質であるDOPHが包み込まれた形状をしている⁹⁾。このDOPHは水溶液中でリン酸基の H^+ を解離するため、負の極性を有する荷電膜となる。よって、1価の K^+ イオン濃度が高い場合には、DOPHが親水性を示し、膜は低抵抗となる性質を持つ⁸⁾。各味物質によるPVC膜への吸着作用を以下に考察する。NaClとHClの経時変化における急激な膜抵抗の減少は、 Na^+ と H^+ の正電荷が、負に帯電している膜表面に引き寄せられ、DOPH分子の状態が油滴、ミセルあるいは二分子状態などに変化するために起こると思われる。この時、膜表面に引き寄せられた Na^+ と H^+ の正電荷により、膜の表面の電荷密度が増加することになるので、膜容量も増加するものと考えられる。これは一般的に、塩味、酸味は脂質膜表面の親水基に吸着する^{1, 16, 17)}という節に合致する。水溶液中において酸味と塩味は、 H^+ と Na^+ として存在しており、これはどちらも一価陽イオンであるが、第3図、第4図で示したように特性はそれぞれ異なっていた。これは、DOPHの官能基がリン酸基を有しているので、DOPHと H^+ の結合は60%が共有結合で、40%がイオン結合となっている。これに対し Na^+ イオンは水和イオンを形成してDOPHと結合しにくくなる¹⁶⁾ためと考えられる。このように、膜との相互作用の違いが膜抵抗・容量特性に反映している。次に塩酸キニーネは、その分子が正の電荷を保有していること、疎水性部位を有していることなどが知られている¹⁶⁾。また、疎水性を持つ物質が生体の感覚細胞に存在する疎水基に吸着

することも報告されている^{1, 17)}。このため、キニーネ分子の持つ疎水性部位が膜内のDOPH分子の疎水基に浸透、吸着し、前述のような脂質分子構造の変化が起きたために膜抵抗の減少や膜容量の増加現象が見られたものと考えられる。サッカロースは、非電解質で電荷を保有していない。しかし、疎水性の性質を持つため、疎水基の吸着によって膜内のDOPH分子の構造を変化させることになる。つまり、塩酸キニーネの場合と類似の分子構造の変化によって膜抵抗の減少が起きると推測される。しかし、サッカロースの疎水性は塩酸キニーネに比べて弱いので、その変化は第5図のように小さかったものと考えられる。またサッカロースは電荷を持たないことから、膜の表面電荷密度を変化させることはないが、疎水基への吸着による膜の構造変化に伴って、溶液中の K^+ イオンが、膜表面および内部に引き寄せられ、結果として膜容量が多少増加したものと考察される。MSGは疎水性の性質を有するため、DOPHの疎水基と疎水結合し、強い吸着性を示す。このため、塩酸キニーネやサッカロースのような膜の構造変化を起こし、膜抵抗の減少や、膜容量の増加が起きたものと思われる。次に第5図のような変化が現れた原因を、以前行ったKCl溶液におけるPVC・DOPH膜の電流・電圧特性⁹⁾から考察する。この膜の特性として、1V以上の電圧を印加すると、膜内部の脂質が何らかの構造変化を起こし、膜抵抗が急激に減少する⁹⁾。このような膜の構造変化には電圧が関与している。ここでは測定電圧が0.5Vと1Vには満たないが、0.05Vの時より脂質の構造が多少変化し、味物質が吸着しやすい状態になったものと考えられる。さらに、電解質溶液では電離して生じたイオンの移動速度が、電圧を上げることで増すことも一因であると思われる。生体の電気特性は強い周波数依存性を持つことが知られている¹⁸⁾。このPVC膜でも第6図に示したような5基本味物質それぞれに異なる周波数分散が現れた。このような現象については、味物質吸着後の膜構造がそれぞれ異なるため、不明確な点が多いが、次のような分極に起因すると考えられる。PVC膜は前述したように、PVCが脂質を包含した多重層構造をしており、この構造の境目に電荷が集まって界面分極を起こしていると推察される。一般にこの分極は電荷の移動とトラップを伴うので非常に応答の遅い現象¹⁹⁾である。また、DOPHは有極性分子であることから、永久双極子モーメント μ を持っている。この

DOPH分子に電界Eを印加すると、偶力 μE を受けるため分子の回転が起き、電界の方向に向こうとする。この作用によって配向分極¹⁹⁾が生じると考えられる。以上の理由が考察されるが、どれが支配的であるかについては未だ不明な点も多く、今後の検討課題である。

また、DOPHはリン脂質を模擬しているという点でリोटロピック液晶構造を有すると考えられている¹⁵⁾。液晶分子は一般に電界や磁界さらには加える電圧の周波数により配向を変える性質を持っており²⁰⁾、分子の配向が変わるとき液晶の誘電率つまり容量は低下する²¹⁾。我々が用いたPVC膜でも、DOPHが電界によりこのような分子の配向変化、すなわち5基本味物質がそれぞれ吸着した状態で脂質の構造変化が生じたため、特異的な分散特性が現れたものと思われる。数種の味を混合すると、味の種類や組み合わせによって互いに強め合ったり弱め合ったりする。このような味の相互作用はいくつかに分類できるが、そのひとつに対比効果がある²²⁾。これはなにかを継続して食べるとき、前に摂取した食べ物によって後の味覚が変調される現象をいう。例えば甘いケーキを味わった後で塩味や酸味を特に強く感じたりする。これらのことを第7図に示したサッカロースとHClの混合味の膜容量変化はよく表している。単一味物質のサッカロースはほとんど変化しないので、HClと混ぜ合わせてもHClだけの時と変わらない応答を示すと思われたが、膜容量の結果は単一系のときより大きくなった。これは脂質の疎水部にサッカロースが入り込み、その部位に酸味を呈する H^+ イオンがさらに吸着したために、単一味物質のときより大きな変化として現れたものと推測される。

5. おわりに

本研究ではPVC・DOPH膜を味受容モデル膜として用い、膜電気抵抗と膜電気容量の同時計測を5基本味物質に適用した。その結果、それぞれの物質やその濃度によって膜抵抗と膜容量の経時特性に違いが現れ、印加電圧を上げることで希薄な苦味物質に対して感度よく応答することを確認した。さらに混合味溶液では味の相互作用である対比効果を膜容量の変化として捉えることもでき、PVC・DOPH膜による味物質検出センサへの基礎的な知見を得ることができた。今後は、膜抵抗と膜容量から得られた情報を詳細に解析し、物質の

移動、物質透過の有無・大小などを求め、さらには味物質受容時の膜構造やそのメカニズムなどを解明する予定である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、多くの御助言を頂いた北海道工業大学の有澤準二教授、三澤顕次教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤 編：味覚の化学、朝倉書店、東京 (1981)
- 2) 山川、山口：膜電位感受性色素を用いた光ファイバ味覚センサ、電気学会論文誌C、112-12、798/804 (1992)
- 3) 榎本、柏柳、栗原：味およびにおいと膜、蛋白質、核酸、酵素、36、1779/1789 (1991)
- 4) 相澤、松沢、篠原：Langmuir-Blodgett膜によるアミンのオプティカルセンシング、第5回化学センサ研究発表会、29/30 (1986)
- 5) Y.Okahata, H.ebata and K.Taguchi : Specific adsorption of bitter substances on lipid bilayer-coated piezoelectric crystals, J.Chem.Soc.Chem.ComMun., 1363/1365 (1987)
- 6) 中本、森泉：ニューラルネットワークを用いたセンサー、応用物理、58、1045/1054 (1989)
- 7) 都甲潔編：味覚センサ、朝倉書店、東京 (1993)
- 8) J.Arisawa et al. : Sustained oscillation of membrane potential in a DOPH model membrane in a constant applied pressure gradient, J.Membrane Sci., 2,303/307 (1977)
- 9) 小島、有澤、三澤、松本：PVC・DOPH人工膜の電気抵抗、容量特性、膜、19-5、325/331 (1994)
- 10) Y.Kobatake et al. : Studies of electric capacitance of membranes I, biophys.J., 10, 728/744 (1970)
- 11) M.Yoshida et al. : Studies of electric capacitance of membranes II, J.Membrane Bio., 5,185/199 (1971)
- 12) G.J.Moody et al. : A calcium-sensitive electrode based on a liquid ion exchanger in a poly (vinylchloride) matrix, Analyst, 95, 910/918 (1970)

- 13) 斎藤、中山、堀原、藤森：心臓ペースメーカー電極に関する基礎的検討、医用電子と生体工学、5-3、192/198 (1967)
- 14) 三澤、小島、佐伯、有澤、松本：モノオレインPVC膜の味溶液に対する導電率・光透過率変化、電気学会論文誌C、114-9、938/945 (1994)
- 15) 嶋林、寺田、岡林編：生体コロイド(2)、101/124、廣川書店 (1990)
- 16) 飯山、都甲、山藤：合成脂質膜における味覚応答、膜、12-4、231/237 (1987)
- 17) 栗林：味覚・嗅覚、75/83、化学同人、京都 (1992)
- 18) 金井：生体物性(2)－電気特性、医用電子と生体工学、13-5、307/315 (1975)
- 19) 青木：応用物性論、257/266、朝倉書店 (1969)
- 20) 佐藤：液晶とその応用、82/115、産業図書 (1984)
- 21) S.Sato et al. : Molecular orientation effects in copensated liquid crystals, Jpn.J.Appl.Phys. 10-10, 1566/1570 (1972)
- 22) 小俣：おいしさと味覚の化学、101/218、日本工業新聞社 (1986)

(平成9年11月28日受理)