

超音波センサとソフトコンピューティングによる味センシング

小島洋一郎*・三上 剛**・木村 太***

Taste sensing using ultrasonic sensor and soft computing

Yohichiro KOJIMA , Tuyoshi MIKAMI and Futoshi KIMURA

あらまし

本研究の目的は、超音波により五基本味溶液ならびに市販飲料の音響特性を実験的に求め、得られた特性から味センシングの可能性を検討するものである。これまでに著者らは様々な溶液に超音波を入射し、音速と振幅の違いから溶液の識別を行ってきた。しかしながら、数多くの味物質を含んでいる飲料にこの手法を適用するには、より詳細な検討が必要である。そこで本報では、甘味と塩味の混合溶液中を伝搬する超音波波形を測定し、種々の音響特性を求めた。その結果、溶液の種類の違いが特性に現れた。またこれらのデータにニューラルネットワークを適用したところ、判別が可能であった。さらに、距離型ファジィ推論を用いて溶液の混合率を推定することができた。

Abstract

In this study, ultrasonic wave acoustic properties of five basic taste solutions and marketed beverages were investigated, and the possibility of taste sensing based on the acoustical properties obtained was examined. In previous studies, properties of solutions were differentiated based on sound velocity and amplitude of ultrasonic waves propagating through the solutions. However, to make this method applicable to beverages which contain many taste substances, further studies are required. In this report, the waveform of an ultrasonic wave with frequency of approximately 5 MHz propagating through mixed solution composed of sweet and salty substance was measured. As a result, differences among solutions were clearly observed as differences in their properties. Furthermore, these mixed solutions were discriminated by a self-organizing neural network. The ratio of volume in their mixed solutions was estimated by a distance-type fuzzy reasoning method. Therefore, the possibility of taste sensing was shown by using the proposed method.

1. はじめに

様々な環境条件に対して知的に応答し行動している生物は、生命を維持するために食物を摂取している。その際、多くの化学成分が主因となり発現する味覚は、食物受諾・忌避行動を決定させるシグナルであり、適正な生命活動を誘導するインシュエーターでもある。また、食生活を豊かにし、人々の交流の輪を拡げ、食文化を育む起因となっている。このような背景から、食物に対するヒトの味覚や嗜好を何らかの手法で計測し、再現性や客観性の高い数量化された情報を得るセンサのシステムが確立されれば、食品工業の分野のみならず、高齢化社会が到来する中、医療福祉、健康、介護への応用が期待できる。

生体が保有する味覚などの化学センシング [1-9]・通信・認識システム等のメカニズムの解明が進んでいる。それと同時に、有機材料を用いた味センシングの研究においては、ヒトの味細胞膜を模擬した人工脂質膜に対する味物質の吸着作用を、電気的および光学的に検出し、味を同定しようとする手法が試みられている。その中でも、異なる性質を有する脂質高分子膜をマルチチャネル化し、膜の電気的特徴パターンから味を認識しようとするものが注目を集めている [1]。

一方、センサ材料という点において、生体関連物質などの有機材料を全く使用せず、無機材料のみによるセンサを用いた、新しいタイプのセンシング法も近年報告されるようになった。例えば、電気化学的なものとしては金属電極表面分極制御法や、超音波デバイスの表面弾性波素子 [7] を用いたセンサなどが挙げられる。また、光学的な手法として近赤外分光法 [8] が、米食味推定器に応用されている。これら機器の利点は、有機材

*助教授 機械工学科

**助 手 情報工学科

***助 手 電気工学科

料による脂質膜センサを製作する上で生じる、膜応答の再現性や安定性といった問題点を少なからず回避できることである。そのためバイオセンシング方式の一つとして、有効な手段であると考えられる。

このような状況の中、著者らは有機膜を使用しないセンシング法として、これまでに報告例の少ない超音波による測定を取り入れ、様々な味溶液に対する超音波伝搬特性を検討してきた[9]。その結果、五基本味溶液ならびに市販飲料を伝搬する超音波の音速・振幅ならびに周波数スペクトル特性から、各種味溶液を識別する可能性を見出すことができた。超音波は物質の状態を問わずその中を伝搬し、その伝搬特性は媒質となっている物質の構造や性質を反映する。例えば、溶液の物性値である音速度や振幅変化(吸収量に相当)が、それぞれ、化学種に依存するだけでなく、溶質濃度、測定温度、周波数にも、依存することが知られている[10-13]。そのため、超音波の伝搬に関する研究は、液体や溶液の物性や状態を探る上でも非常に重要であり、味センシングの一手法としての可能性を有するものと示唆される。

本報では、これまでの研究に引き続き、縦波である超音波を用い、さらにグローバルセンシング[1]という考えに基づき測定を行った。グローバルセンシングは、従来のセンサのようにある物質を特異的に検出するというものではなく、幅広い情報を非特異的に検出し、そこから得られる情報を信号処理することにより、人の感じる味や匂いを推定しようとするものである。超音波による実験の結果、甘味(Sucrose)溶液と塩味(NaCl)溶液、さらにこれらを混合した溶液の種類に応じて、音速、振幅、周波数特性に差異のあることを確認した。今回はパラメータを一つ追加し減衰による評価も可能であることを示すことが出来た。また、第2反射波の周波数特性のデータに対して自己組織化ニューラルネットワークを適用したところ、混合比の異なる溶液を視覚的に判別できることを見いだした。さらに、距離型ファジィ推論を今回新たに用い、混合溶液の混合比を自動推定する手法を提案し、検討を行った結果、実験的に求めた混合比に近い値を示した。これまでに、超音波の伝搬波形とファジィを組み合わせ、混合比を推定する研究の報告例は非常に少ない。以上、混合溶液の超音波計測とニューラルネットワークとファジィを組み合わせた味センシングの有効性とその可能性の一端を示唆した。

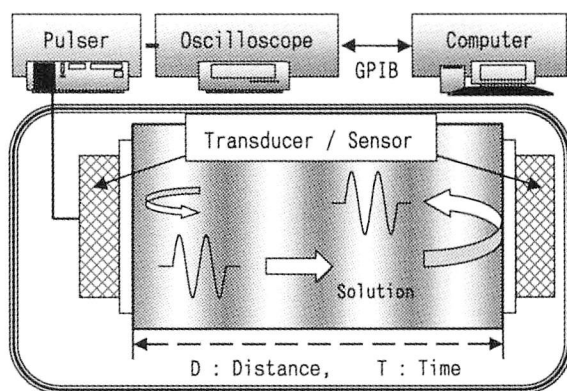


図1 実験装置の概略

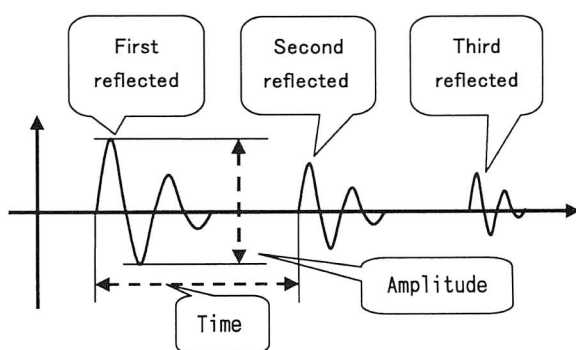


図2 超音波の伝搬波形の概略

2. 超音波による混合溶液の測定

2.1. 実験方法

本研究で使用した実験装置の概略を図1に示す。パルサー (PANAMETRICS社製Model500PR) から送信された数100Vの高電圧パルスを電気音響変換素子(振動子)によって超音波パルスに変えて、被測定溶液中に入射する。パルスは溶液内を伝搬して、端面で反射し戻る。この際、電気音響変換素子は音響電気変換素子(振動子)として働き、被測定溶液中の物性を写し取った超音波パルスをパルス電圧に変換する。その後、オシロスコープ (SONY Tektronix社製TDS3012)に取り込み、コンピュータにより解析を行った。図2は、オシロスコープ上に表れる超音波の伝搬波形の概略図である。被測定溶液中を伝搬する第1反射波(T1)と第2反射波(T2)の時間間隔をサンプリング間隔0.8nsにて測定し、伝搬時間Tを求めた。音速度の計算には、距離の正確な値が必要となる。本実験装置において、振動子と反射板との距離を直

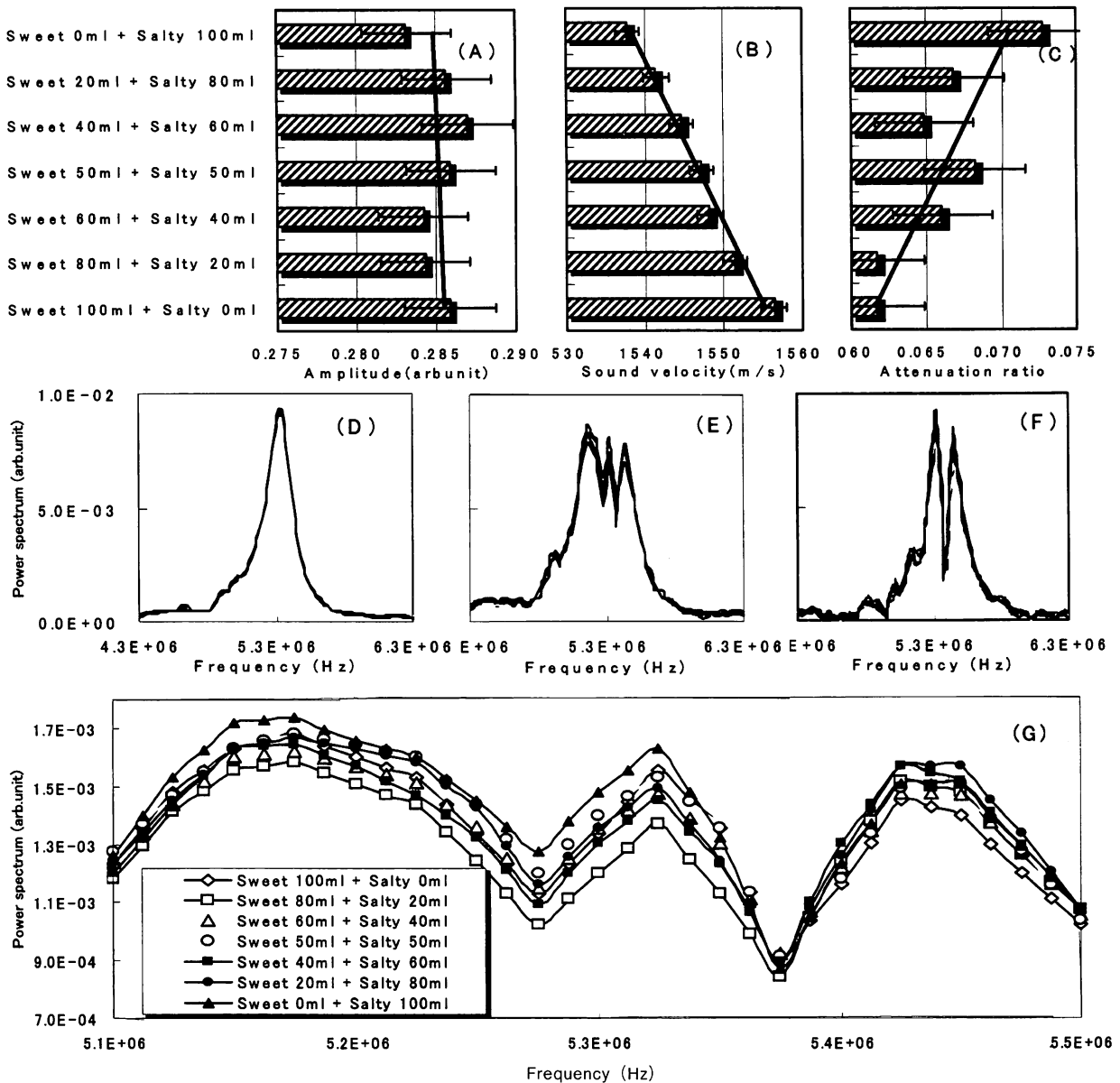


図3 甘味と塩味の混合溶液に対する音響特性 (A) 振幅特性、(B) 音速特性、(C) 減衰特性、(D) 第1反射波、(E) 第2反射波、(F) 第3反射波それぞれの周波数特性、(G) 第2反射波の周波数特性のピーク値

接, 精度良く測定することが困難であるため, これまでに報告されている水の音速値 [10] を利用し, 校正した値として振動子反射面間の距離を算出した. 最終的に溶液中を伝搬する音速値は, 振動子反射面間の距離と伝搬時間より求めた. 超音波の振幅は図2の概略に示すように, 波形の最大値と最小値から求めた. また反射波の周波数特性を観察するために, 測定した反射波の全体, 及び第1, 第2, 第3反射波のみを抽出した波形に

FFTをかけた. なお, 超音波振動子の中心周波数は約5.3MHzであり, 発信パルスの繰り返し周波数は, 373Hzとした. これは, 超音波パルスどうしが液体試料中で干渉し合うことを避けるためであり, 一連のエコー列が完全に減衰しきってから次のパルスを励起している.

2.2. 測定溶液

測定に使用した溶液には, イオン交換膜を通した純水, 基本味には, 甘味にスクロース (Sucrose),

塩味に塩化ナトリウム (NaCl) を選び、それらの濃度は500mMに調整したものを使用した。混合の割合を体積比で示し、甘味：塩味で、10:0, 8:2, 6:4, 5:5, 4:6, 2:8, 0:10の7種とした。なお測定の際、溶液の温度は、30.0℃に設定し保持した。一般的に人の甘味 (Sucrose) に対する認知閾値はおおよそ100mM、塩味 (NaCl) では約30mMと言われており、ここではそれ以上の濃度の500mMで実験を行っているため、十分に味質の違いは感じられる。

2.3. 実験結果

超音波の伝搬時間を正確に測定するには外的要因を受けず、高精度で再現性があるセンサの構築と、計測法を用いることが重要である。従来は反射型センサを用い、シングアラウンド法により測定したが、この方法はセンサの調整や校正に時間とコストを費やし測定環境により計測精度に影響がでるなどの不都合が生じる。そこでこのような影響を解消するために、パルスエコー法にて実験を行った。

この装置でパルス波を甘味溶液と塩味溶液の混合溶液に入射したときに、超音波振動子から得られた音響特性の結果を図3に示す。(A)は振幅特性、(B)は音速特性、(C)は減衰特性、(D)は第1反射波、(E)は第2反射波、(F)は第3反射波それぞれを抽出し、FFTにかけたときの周波数特性である。なお、(G)は特徴の違いを確認するために、(E)の5.1~5.5MHzまでの周波数帯を拡大表示したものである。

図3(A)より、それぞれ個々の振幅の変化にはばらつきが大きく、甘味40ml+塩味60mlの振幅値が大きくなっている。全体的な傾向としては甘味 (Sucrose) 溶液の体積の割合が増加するに従い振幅の値が大きくなっている。実際に試飲してみると甘味や塩味の単一の溶液より味が強く感じられたため、官能評価を行うことで何らかの相関関係が得られる可能性がある。しかし、混合溶液の混合比を振幅の変化から導き出すのは非常に難しい。また、味センシングを考慮した場合、振幅パラメータの差だけでは、混合味溶液それぞれの識別は困難である。

そこでより明確な判別を行うために、音速についても検討を加えた。その結果を図3(B)に示す。甘味 (Sucrose) 溶液の塩味溶液に対する混合比率が上昇するに伴い、各混合溶液それぞれの音速は線形的に速くなっている。また、音速値は各溶液によって異なることがわかる。塩味溶液と甘味溶

液、さらにそれらの混合溶液との間には、音速に明らかな違いが現れたので超音波による識別が可能である。甘味溶液と塩味溶液の化学組成を比較すると、甘味溶液は非電解質であり、塩味溶液は強電解質である。これら溶液組成の違いが音速の差として現れたと考えられる [9]。

これまでに著者らは、溶液内を伝搬する超音波の音速と振幅ならびに周波数特性から、各種味溶液の識別を行ってきた。しかし、多種多様な味物質を多く含んでいる市販飲料などへ適用するためには、単一のデバイスから得られる情報を最大限引き出す必要がある。その結果、パラメータが増加し、より明確な識別が可能になると考えられる。そこで、今回新たに音響特性の一つである減衰特性を追加し、図3(C)に示した。減衰率は、第2反射波の振幅値の二乗平均を第1反射波の振幅値の二乗平均で除算し求めた。振幅特性と同じように誤差は大きいですが、標準偏差の領域内で減衰していく様子が見える。混合比に応じて線形的に変化することは確認できないが、味溶液の物性値を確認することが出来た。誤差は全ての点で約3%以内の範囲であった。なお、振幅値ならびに減衰率は装置内での反射や屈折の影響などを加味した値であり、実際の溶液中での絶対的なものではない。

混合溶液中に超音波を入射したときに得られる反射波の伝搬波形にFFTをかけ、周波数特性による味センシングの可能性を検討した。本実験装置では反射体による位相のずれはあるかもしれないが、パワースペクトルを評価しているので考察には影響しないものと考えられる。今後、反射波の位相に着目すると、純水での位相を基準にして、各種味物質を純水に滴下した場合の位相差を測定することにより、味物質識別の可能性が期待できる。さらに反射体裏面からの反射の影響については、裏面が空気となっているので反射の影響は非常に少ないものと考察される。

図3の(D)、(E)、(F)より、各反射波の周波数特性を全体的に見ると大きな差異が認められにくいですが、ピーク値付近ではそれぞれの混合溶液の混合比に応じた特性の差が現れている。第1反射波、第2反射波、第3反射波、それぞれの周波数特性の極大値は1つ、3つ、2つである。そこで、第2反射波にFFTをかけた図3(E)より、ピーク値付近の周波数帯の変化を図3(G)より検討した。周波数特性には特徴的な違いが確認できる。これらの結果は、共に低周波数側からおおよそ同じ周波数の5.18, 5.32, 5.43MHzに、3つの大

きな極大値が現れた。各周波数でのパワースペクトルの値は混合溶液の混合の違いに伴いそれぞれ異なった特性を示すが、これらの値から混合比を検出するのは難しい。なお、パワースペクトルが著しく減衰を示す周波数は、振動子の反射面による超音波の吸収と考察される。以上、各混合溶液の混合比に応じて、音速と減衰に有意な差異を今回新たに見出した。さらに、周波数特性のパワースペクトルの値に特徴的な違いを初めて確認した。これは溶液自体の密度や体積弾性率に変化が生じ、音響特性へ影響を及ぼしたものと考えられる。しかし、ここでは甘味と塩味溶液それぞれ1種類ずつの特性でしかない。今後はさらに別の味物質についても詳細な検討を進めていく必要がある。

超音波による味センシングを念頭に置いた場合、超音波センサの高感度、高機能化だけでは不十分な場合も多く、センサから得られる出力信号の情報処理技術が重要になってきている。そこで、図3(G)に示した第2反射波の周波数特性のデータを基に、自己組織化ニューラルネットワークによるパターン分類を行った。さらに、今回は距離型ファジィ推論により溶液の混合比を推定した。以下に、これらの手法と結果についてそれぞれ述べる。

3. 自己組織化ニューラルネットワークによる混合溶液の識別

3.1. 自己組織化マップによるパターン分類

自己組織化マップ (Self-Organizing Map, 以下SOM) は、高次元属性を有するデータに対して、類似性の高いものをいくつかの代表点(コードブックベクトル)により表現する教師なし学習法であり、パターン分類において広く用いられている。ニューラルネットワークを用いたパターン分類では、多層パーセプトロンが最も一般的な手法として知られているが、味溶液の成分が未知の場合、以下のような問題が生じる。

1. カテゴリ数をあらかじめ設定しなければならないが、未知の溶液に対して適切な数を設定することはできない。
2. 多層パーセプトロンはパターン of 類似度を可視化できない。

一方、SOMは出力ニューロンの数は一定であるが、カテゴリ数に関しては自由度が高い。また、パターン間の類似度を二次元平面上で可視化することが可能である。今回は、甘味 (Sucrose)、塩味 (NaCl) の混合度合いを可視化することを

試みた。

SOMに与える入力データは、甘味と塩味の混合溶液それぞれの第2反射波に対しFFTをかけたものと音速を使用した。特徴的なパワースペクトルの代表点として、図3(G)より、パワースペクトルの極大値3つと極小値2つを使用した。これら5つの点を5次元の特徴ベクトルとして用い、6次元目の値として音速を用いた。混合の度合いを分類する場合は音速のみで問題ないが、溶液の成分も可視化することを考慮するとスペクトルも特徴ベクトルとして考慮することが望ましい。SOMは、出力ニューロンを 24×22 の六角格子状に配置し、それぞれのニューロンと入力層を全結合させた。

3.2. 実験結果

3.1の設定の下で実験を行った結果、図4に示すような特徴地図が獲得された。5種類の混合溶液はそれぞれ固有の領域を確保しており、地図上の濃淡は隣り合うセルの類似度の差をグレースケールで表している。尚、図中の数値は、SucroseとNaClの混合比を表す。今回の実験では、パワースペクトルの値に対して $\pm 10\%$ の誤差を付与し、学習を行った。その結果、濃度比に沿った分布が獲得可能となっている。0:10と8:2の領域は濃度比が大きく異なるため、強い境界線が得られた。

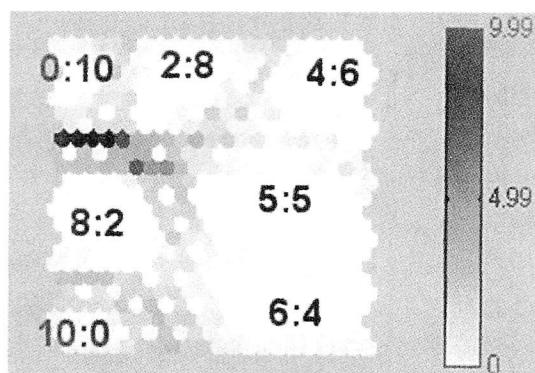


図4 混合比の相違による特徴地図

4. 距離型ファジィ推論による甘味溶液と塩味溶液の混合率の推定

4.1. 距離型ファジィ推論法

距離型ファジィ推論法 [14] はファジィ集合間の距離に基づく推論方法であり、前件部ファジィ集合に空集合があっても (いわゆるファジィ集合が疎な場合) 推論が行えるという特徴を持つ。例えば、ばらつきの少ない測定値からファジィ集合

を構築する条件下では、ファジィ集合が疎となる可能性があり、適合度型推論を用いることはできない。これに対し、距離型推論ではファジィ集合が凸型であれば推論が可能であるため、前件部ファジィ集合がシングルトンでも適切な推論結果が得られる。

4.1.1. 距離の定義

いま、図5に示すような有界凸のファジィ集合AとBとの距離は(1)式で定義される。

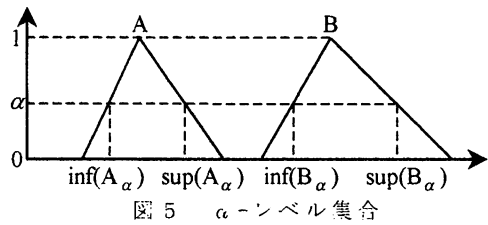


図5 α-レベル集合

$$d(A,B)=\left[\int_0^1|\inf(A_\alpha)-\inf(B_\alpha)|^p d\alpha\right]^{1/p} + \left[\int_0^1|\sup(A_\alpha)-\sup(B_\alpha)|^p d\alpha\right]^{1/p}$$
 (1)

ただし、 $1\leq p<\infty$ であり、 $\sup(A_\alpha)$ と $\inf(A_\alpha)$ は、それぞれファジィ集合Aにおけるα-レベル集合A_αの上限と下限を表す。ファジィ集合Bについても同様である。また、

d(-)はファジィ集合間の距離を定義する実数関数であり、距離関数と呼ばれる。

4.1.2. 推論方法

次のようなif-thenルールにおいて、推論結果は(2)式から求められる。なお、距離がゼロとなるルールは2つ以上存在しないものとする。

Rule i : If x₁ is Aⁱ¹ and x₂ is Aⁱ² ... and x_m is A^{im} then y=Bⁱ

ただし、i = 1,2,...,n;nはルール数、j = 1,2,...,m;mは前件部変数の数である。またA^{ij}、Bⁱはそれぞれ前件部および後件部のファジィ集合であり、x_jは前件部変数である。

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \left(B^i \cdot \prod_{j=1, j \neq i}^m d_j \right)}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^m d_j}, \quad d_i = \sum_{j=1}^m d(A^{ij}, x_j)$$
 (2)

4.2. 混合率の推論

本研究では、甘味溶液と塩味溶液の混合溶液に対する第2反射波の周波数特性からif-thenルールを生成し、ファジィ推論によって任意試料の混合率推論を試みた。

4.2.1. 前件部変数の設定

if-thenルールにおける前件部変数は、周波数特性での極大値または極小値の周波数に対するパワースペクトルとした。今回は、図3(G)の実験結果から5.175MHz、5.275MHz、5.325MHz、5.425MHzのパワースペクトルを採用したため、前件部変数は4変数となっている。

4.2.2. ルールの生成

ファジィルールは、パワースペクトルの最大値または最小値を含む混合溶液の周波数特性を、ルールとして採用した。以上の設定条件から、本実験では次のような4変数、4ルールのif-thenルールが生成される。

Rule i : If x₁ is Aⁱ¹ and x₂ is Aⁱ² x₃ is Aⁱ³ and x₄ is Aⁱ⁴ then y=Bⁱ
ただし、i=1,2,3,4

表1 パラメータ

Rule	A ^{ij} : パワースペクトル×10 ⁻⁶				B ⁱ : 混合率	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		
	5.175 MHz	5.275 MHz	5.325 MHz	5.425 MHz	Sweet	Salty
1	1681	1131	1556	1450	100ml	0ml
2	1581	1019	1369	1519	80ml	20ml
3	1699	1162	1494	1569	20ml	80ml
4	1737	1275	1631	1506	0ml	100ml

4.2.3. 推論結果

上記のファジィルールを用いて、3種類の試料に対する混合率の推論を行った結果を図6および表2に示す。

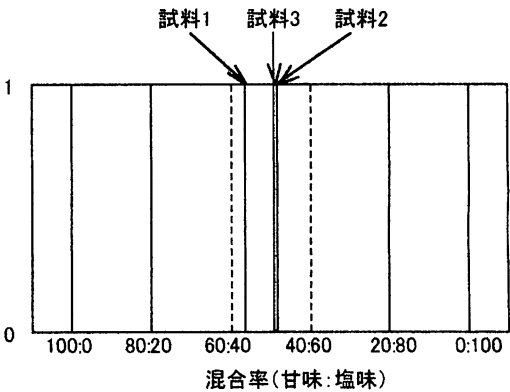


図6 後件部ファジィ集合

表 2 推論結果

試 料			推論結果		誤差率
No	Sweet	Salty	Sweet	Salty	
1	60ml	40ml	56.2ml	43.8ml	6.3%
2	50ml	50ml	48.0ml	52.0ml	4.0%
3	40ml	60ml	49.1ml	50.9ml	22.7%

5. おわりに

本研究ではこれまでにない新たな味センシング法を見出すことを目的としている．そこで多種多様な物質の物性研究に利用されている超音波に着目した．様々な味物質をより多く含んでいる市販飲料などへ適用するためには，単一のデバイスから得られる情報を最大限引き出し，識別ためのパラメータを増やす必要がある．本論文では，混合溶液中に超音波を入射したときに得られる音速，振幅，周波数特性，そして今回新たに減衰を計測した．その結果，混合溶液の混合比の違いに応じて，音響特性に差異を見出した．また，これらのデータにニューラルネットワークならびにファジィを新規に適用し，味センシングの可能性の一端を示唆することが出来た．今後は多くのサンプルを測定し，人工的に味覚の一部を再現できるセンサへの可能性をさらに追求する予定である．

謝 辞 常日頃から，ご指導いただく本校の加藤初儀助教授，岡本幸雄教授，ならびに本校およびケミカルセンサ関連の関係諸氏に感謝いたします．

文 献

[1] 都甲潔 編著，感性バイオセンサ，朝倉書店，東京，2001.

[2] 白鳥世明，交互吸着自己組織化膜のナノ構造制御とデバイス応用，応用物理，Vol.69，No.5，pp.553-557，2000.

[3] 中本高道，森泉豊栄，“匂いセンシングシステム”，電子情報通信学会論文誌，C-II，Vol. J82-C-II，No.4，pp.146-159，1999

[4] 張文芸，安彦剛士，渡部俊一郎，Elder Alpes de Vasconcelos，内田秀和，勝部昭明，“SPV法とイオンセンサを用いた高安定なお茶味検出”，電気学会論文誌，Vol.118-E，No12，pp608-613，1998.

[5] 三澤顕次，小島洋一郎，佐伯吾一，有澤準二，

松本伍良，“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，Vol.114-C，No.9，pp938-945，1994.

[6] 羽原正秋，向井達哉，堂上長則，草野英二，金原 榮，南戸秀仁，都甲 潔，“日本酒の製造工程管理用表面プラズモン共鳴化学センサ”，日本味と匂学会誌，Vol.5，No.3，pp.291-294，1998.

[7] J. Kondoh and S. Shiokawa，“New application of shear Horizontal surface acoustic wave sensors to identifying fruit juices”，Jpn. J. Appl. Phys.，33，3095,1994.

[8] 岩本睦夫，河野澄夫，魚住 純，近赤外分光法入門，幸書房，東京，1994.

[9] Y. Kojima and H. Kato，“Fundamental study of various taste solutions by ultrasonics”，Sensors and Materials，Vol.13，No.3，pp.145-154，2001.

[10] 超音波便覧編集委員会，超音波便覧，丸善，東京，1999.

[11] 実吉純一，菊池喜充，能本乙彦 監修，超音波技術覧，日本工業新聞社，東京，1985.

[12] 野村浩康，川泉文男，香田忍，液体および溶液の音波物性，名古屋大学出版会，名古屋，1994.

[13] 根岸勝雄，高木堅志郎，超音波技術，東京大学出版会，東京，1984.

[14] 王碩玉，土谷武士，水本雅晴，“距離型ファジィ推論法”，バイオメディカルファジィシステム学会誌，Vol.1，No.1，pp61-78，1999.

(平成14年11月20日受理)

