超音波とソフトコンピューティングによる混合味溶液の識別

正員 小島 洋一郎* 正員 木村 太*
 非会員 三上 剛* 非会員 北間 正崇**

Discrimination of Mixed Taste Solutions using Ultrasonic Wave and Soft Computing

Yohichiro Kojima*, Member, Futoshi Kimura*, Member,
 Tsuyoshi Mikami*, Non-member, Masataka Kitama**, Non-member

In this study, ultrasonic wave acoustic properties of mixed taste solutions were investigated, and the possibility of taste sensing based on the acoustical properties obtained was examined. In previous studies, properties of solutions were discriminated based on sound velocity, amplitude and frequency characteristics of ultrasonic waves propagating through the five basic taste solutions and marketed beverages. However, to make this method applicable to beverages that contain many taste substances, further studies are required. In this paper, the waveform of an ultrasonic wave with frequency of approximately 5 MHz propagating through mixed solutions 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 ultrasonic wave acoustic properties and the soft computing, such as the self-organizing neural network and the distance-type fuzzy reasoning method.

キーワード：超音波，自己組織化ニューラルネットワーク，距離型ファジィ推論，味センシング，ソフトコンピューティング

Keywords: Ultrasonic wave, Self-organizing neural network, Distance-type fuzzy reasoning method, Taste sensing, Soft computing

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ニシエーターでもある。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，食品工業のみならず，高齢化社会が到来する中，医療福祉，健康，

介護分野への応用が大いに期待できる。

生体が保有する味覚などの化学センシングや認識システムに関するメカニズムの解明が進んでいる。それと同時に，有機材料を用いた化学センシングの研究^{(1)~(7)}，特に味センシングにおいては，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⁽¹⁾や，超音波デバイスの表面弾性波素子⁽⁸⁾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⁽⁹⁾が，米食味推定器に应用されている。

このような状況の中，著者らは有機膜を使用しないセン

* 苫小牧工業高等専門学校
 〒059-1275 北海道苫小牧市字錦岡 443 番地
 Tomakomai National College of Technology
 443 Aza-Nisikioka, Tomakomai, Hokkaido 059-1275

** 北海道工業大学福祉生体工学科
 〒006-8585 北海道札幌市手稲区前田 7 条 15 丁目 4 番 1 号
 Department of Biomedical Engineering, Hokkaido
 Institute of Technology
 7-15-4-1 Maeda, Teine-ku, Sapporo, Hokkaido 065-8585

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。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^{(10)~(12)}。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^{(13)~(16)}。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⁾という考えに基づいて測定を行った。グローバルセンシングとは、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、周波数特性に有意な差異のあることを確認した。今回はパラメータの一つを追加し、減衰による評価の可能性を示すことが出来たが、減衰特性や振幅特性からは明確な差を見出しにくかった。次に、音速、周波数特性に対して、以下に示すソフトコンピューティング技術を用いて情報処理を行った。まず、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パターン分類できることを見出した。次に、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、溶液の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理論を組み合わせ、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技術と、ニューラルネットワークやファジィ理論などのソフトコンピューティング技術を組み合わせ、味センシングシステムへの有効性とその可能性の一端を示唆した。

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

図1 実験装置の概略

Fig. 1. Schematic diagram apparatus.

図2 超音波の伝搬波形の概略

Fig. 2. Propagation waveform of ultrasonic.

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(T_1)と第2反射波(T_2)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⁽¹³⁾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、全量で 100ml となるようにした。甘味：塩味で、10:0(甘味のみ)、8:2, 6:4, 5:5, 4:6, 2:8, 0:10(塩味のみ)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라운드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単一味とこれら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)は減衰特性であり、(D)は第1反射波、(E)は第2反射波、(F)は第3反射波それぞれのデータを抽出し、FFTにかけたときの周波数特性である。なお、(G)は溶液7種の特性の差を確認するために、第2反射波にFFTをかけた(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、個々の振幅の変化にはばらつきがある。甘味 40ml+塩味 60ml の振幅が大きな値を示している。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。図には示していないが、30.0℃に設定した純水の振幅値は 0.257 であり、これを基準(ベース)にして比較すると、甘味や塩味といった味物質混入後の溶液との間に違いは見られる。全体的な傾向としては甘味溶液の体積の割合が増加するとともに、振幅の値が緩やかに大きくなっているようである。しかしながら、純水との比較ではなく混合比の異なる溶液同士の比較では、有効な信号と誤差の兼ね合いに関する注意深い議論も必要である。たとえば、甘味や塩味のみ の 応答値は、0.283, 0.286 である。それぞれの応答値に対しての誤差は±1%に収まっており、小さいと見なすことが出来るが、センサとして使用する場合、応答の変化幅と誤差の比からはそれぞれの試料を識別するだけの有意な差を見いだすことは非常に困難である。本実験では、第一反射波の振幅特性のみを比較しているが、今後は第二、第三反射波の振幅特性を用いた溶液の比較実験を考えていかなければならない。

このように、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。塩味溶液に対する甘味溶液の混合比が上昇するに伴い、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明確に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。実際、音速値から検量線を引き濃度を測定する装置が市販されている。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⁽¹⁴⁾。

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⁽¹²⁾。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、超音波測定で多用されている音響特性の一つである減衰特性を今回新たに追加し、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。その結果、応答値の変化幅は振幅特性のときと同じようにそれほど大きくはならなかった。また、試料それぞれの応答値に対する誤差は±2%となった。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、徐々に減少していく傾向を示し、味溶液の物性値を確認することが出来た。このように混合比を減衰特性から評価するのは、現段階では難しいと推察できる。振幅特性と同じように減衰特性でも応答の変化幅と誤差に関する注意深い議論が必要となるが、塩味や甘味といった単一の味溶液に関しては識別の可能性を示唆できた。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。

最後に、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影響は非常に少ないものと考察される。

図3の(D)、(E)、(F)に、甘味と塩味のみ の 単一味溶液をそれぞれ1種の計2種、さらにこれらの味溶液を混合させた溶液5種、合わせて7種の周波数特性を示している。そのため、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、ピーク値付近ではそれぞれの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

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, 超音波を入射したときに得られる(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拡大
Fig. 3. Acoustic characteristics of mixed taste solution in sweet and salty. (A) amplitude, (B) sound velocity, (C) attenuation ratio, Frequency characteristics of (D) the first reflected wave, (E) the second reflected wave, (F) the third reflected wave and (G) magnify of Fig.(E) when ultrasonic wave was transmitted into solutions.

1つ, 3つ, 2つである。

これら周波数特性のうち, 混合比7種の差異が大きく現れ識別しやすいのは, 第2反射波にFFTをかけた図3(E)である。しかし, 周波数特性全体ではわかりにくいので, 5.1~5.5MHzまでの周波数帯を拡大表示したものを図3(G)に示す。混合比7種の差異が確認できる。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比の違いに伴い,

それぞれ異なった特性を示しており, 溶液の識別には有効であることがわかる。その一方で, この周波数特性を読み取り混合比を検出するのは, 線形的に変化しないため難しい。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種類づ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。

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

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、これらの音響特性に対して、ニューラルネットワークやファジィ理論などのソフトコンピューティング処理を行った。まず、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。また、次章で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検討する。

〈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⁽¹⁷⁾ (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。

- (A) 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。
- (B) 多層パーセプトロンはパターン間の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いる。地図上の濃

図4 味溶液の特徴地図

Fig. 4. Characteristic map of taste solutions.

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、濃いと類似度は低く、淡いと類似度が高くなっている。なお、図中の混合比は、左が甘味 (Sucrose)、右が塩味 (NaCl) である。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。

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比の推定

人間の感覚は、時として非常にあいまいな場合がある。しかし、人間は様々な感覚受容器から得られた情報に対して、高度で知的な処理を行い判断している。このようなファジィ理論を応用した家電製品が近年数多く販売され、その工学的応用が非常に有効であることが知られている。

ここでは、自己組織化ニューラルネットワークによる味溶液の混合比のパターン分類に引き続き、ファジィ理論に基づいて、人間の感覚の一つである味覚を模倣したセンサシステムへの構築をはかる。具体的には、超音波センサから得られた周波数特性の情報をファジィ量へ変換し処理することで、味溶液の混合比を推定できるか、その可能性を検討した。

〈4・1〉 パワースペクトルと混合比の If-then ルール表現

ファジィ推論における If-then ルールは、「勘」や「コツ」のような数式モデルでは表現できない因果関係を表すことが可能である。2章で述べたように第2反射波のパワースペクトルは特定の周波数において極大値または極小となり、さらに混合比の違いに伴いそれぞれ異なった特性を示しているが、混合比との相関性は感じられない。しかし、パワースペクトルと混合比の間には何らかの因果関係があると考えられる。そこで、次のような If-then ルールを用い、スペクトルから混合比を推論する方法を試みた。

If " f_1 [Hz]のスペクトル" is "大きい" and

" f_2 [Hz]のスペクトル" is "小さい" and...

then "混合率" is "Sweet100ml+Salty0ml"

ここで、前件部ファジィ集合は実験データから図5のよ

(a) データに誤差がある場合
(a) Data with an error

(b) データに誤差がない場合
(b) Data without an error

図5 ファジィ集合の構成

Fig. 5. Constitution of a fuzzy set.

うに構成した。図5(b)から実験データに誤差がない場合は、ファジィ集合はシングルトン集合となり空集合が生じる。また、誤差が小さい場合も集合の広がり小さいため、空集合を生じる可能性がある。ファジィ集合において空集合が生じると、全てのルールにおいて適合度がゼロとなる可能性があり、適合度型ファジィ推論での推論は不可能となる。このため、本手法では距離型ファジィ推論を用いた。

〈4・2〉 距離型ファジィ推論 距離型ファジィ推論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⁽¹⁸⁾。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、適合度型ファジィ推論を用いることはできない。これに対し、距離型ファジィ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。以下に、距離型ファジィ推論についての概要を簡単に述べる。

(1) 距離の定義 ファジィ集合間の距離についての定義を以下に示す。図6に示すような有界凸の正規なファジィ集合AとBとの距離は(1)式で定義される。

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

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

図6 α -レベル集合

Fig. 6. α -level set.

を表す。ファジィ集合Bについても同様である。また、 $d(\cdot)$ 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。

(2) 推論方法 次のようなIf-thenルールにおいて、推論結果は3つのステップから求められる。なお、推論において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 x_1 is A^{i1} and x_2 is A^{i2} ...
and x_m is A^{im} then y is B^i

ただし、 $i=1, 2, \dots, n$ はルール数、 $j=1, 2, \dots, m$ は前件部変数の数である。また、 A^j, B^i 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。なお、推論結果は $y=B$ とする。

Step1: 個々のルールにおいて前件部 A^j と変数 x_j から距離 d_i を(2)式から求める。

$$d_i = \sum_{j=1}^m d(A^j, x_j) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Step2: 次のように推論結果Bの α -レベル集合を求める。

$$B_\alpha = [\inf(B_\alpha), \sup(B_\alpha)]$$

$$\inf(B_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\inf(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j}$$

$$\sup(B_\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\sup(B_\alpha^i) \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^n d_j} \quad (3)$$

Step3: 合成定理（分解定理とも呼ばれる）により(4)式で推論結果Bを求める。

$$B = \bigcup_{\alpha \in [0, 1]} \alpha B_\alpha \quad (4)$$

〈4・3〉 混合比の推論 If-thenルールにおける前件部変数は、周波数特性において極大値または極小値をと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。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、本実験では表1のような4変

表 1 ファジィ推論に使用したパラメータ

Table 1. Parameter of fuzzy reasoning.

Rule	A^i : Power spectrum $\times 10^{-6}$				B^i : The ratio of mixture	
	x_1	x_2	x_3	x_4	Sweet	Salty
	5.175MHz	5.275MHz	5.325MHz	5.425MHz		
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

表 2 ファジィ推論の結果

Table 2. The results of fuzzy reasoning.

Sample			The result of Fuzzy rezoning		Error
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%

数, 4 ルールの If-then ルールが生成される。

Rule i : If x_1 is A^{i1} and x_2 is A^{i2}

and x_3 is A^{i3} and x_4 is A^{i4} then $y=B^i$

ただし, $i=1,2,3,4$

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比の推論を行った。その結果を表 2 に示す。3 種のうち 2 種が実際の混合比に近い値を示した。誤差は数%に抑えられ, 限定されたルールであっても推論できることが見出された。また, 混合比とパワースペクトルとの関係が非線形であっても推論への可能性を有することが分かった。これらの結果は, 食品工業分野において使用する場合コスト削減につながり, 大変有効な手法といえる。

今後, 未知の混合比といった通常の測定にも対応出来るようにするには, まず, ある程度測定回数を増やし学習させてから, このシステムを運用させることが考えられる。例えば試料 No.3 のように, 推論結果と真値の誤差率は 22.7%と非常に大きな値を示したが, この結果を新たなルールとして加えることで, 推論の精度は上がり, 次回からの測定においては数%以内に誤差率を収えることができる。次に, 測定原理の異なる様々なセンサとファジィ理論を有機的に融合して, 人間に近い判断や推論を行うファジィセンシングシステム⁽¹⁹⁾を構築した事例が多く見受けられることから, 著者らの進めている超音波と表面プラズモン共鳴を利用したセンサシステム⁽²⁰⁾からの情報をファジィ理論へ応用することで, 未知の混合比にも対応できるものと考えられる。

5. 超音波センサとソフトコンピューティングによる味溶液の評価

本研究では, 超音波センサとソフトコンピューティングにより味溶液の識別を検討している。超音波測定は, 画像

診断装置として医療分野での需要も高く, 現時点でも多くの研究が行われている。一方, 濃度計や流速計としての応用も数多く報告されている。濃度計として活用する場合, 既知の試料の音響特性から検量線を引きセンシングを行っているが, 多種類の物質が混在する測定には適さない。味センシングに使用する場合も同様に考えられるが, 化学分析機器のように未知の味溶液を同定しようと現時点では考えておらず, あくまでも既知の味溶液を識別する基礎的な段階である。これまでの濃度計は検量線を引かなければ判別できなかったが, 本報では味溶液に対する音響特性をソフトコンピューティングにかけることで溶液識別の可能性を明らかにし, 化学センシングへの有効性や新規性の一端を示唆できた。従来報告されてきた脂質膜を用いた味センサは, グローバルセンシング⁽¹⁾を採用している。グローバルセンシングとは, 特定の物質を選択的に検出するのではなく, 幅広く情報を非特異的に検出し, 得られた情報を信号処理することにより人が感じる味を推定しようというものである。本研究でもこのグローバルセンシングを採用し実験を行っており, 超音波実験装置ならびに測定法に関する検討は既に報告⁽¹²⁾している。

6. 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, これらのデータにソフトコンピューティングといわれるニューラルネットワークやファジィ理論を新規に適用し, 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, ご指導頂く電気学会ケミカルセンサ研究会の関係諸氏に感謝の意を表します。なお, 本研究の一部は(財)道央産業技術振興機構 高度技術研究開発助成金により行われたものである。ここに記して深謝いたします。

(平成 16 年 3 月 1 日受付, 平成 16 年 8 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 都甲 潔 編著: 感性バイオセンサ, 朝倉書店, 東京 (2001)
- (2) S. Shiratori: "Nanostructural Control of Layer-by-Layer Self-Assembly Film and Device Application", *OYO BUTURI*, Vol.69, No.5, pp.553-557 (2000-5) (in Japanese)
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, 69, 5, pp.553-557 (2000-5)

- (3) T. Nakamoto and T. Morizumi : "Odor Sensing System", *IEICE*, Vol. J82-C-II, No.4, pp.146-159 (1999-4) (in Japanese)
中本高道・森泉豊栄 : 「匂いセンシングシステム」, 信学論 C-II, J82-C-II, 4, pp.146-159 (1999-4)
- (4) Z. Wenyi, T. Abiko, S. Watanabe, E. Vasconcelos, H. Uchida, and T. Katsube : "Highly Stable Tea Taste Detection Using SPV Method and Ion Electrodes", *T. IEE Japan*, Vol.118-E, No.12, pp.608-613 (1998-12) (in Japanese)
張 文芸・安彦剛士・渡部俊一郎・E. 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」, 電学論 E, 118, 12, pp.608-613 (1998-12)
- (5) K. Misawa, Y. Kojima, G. Saeki, J. Arisawa, and G. Matsumoto : "Changes of Electric Conductivity and Optical Transmittance of Monoolein-PVC Membrane of Taste Solutions", *T. IEE Japan*, Vol.114-C, No.9, pp.938-945 (1994-9) (in Japanese)
三澤順次・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」, 電学論 C, 114, 9, pp.938-945 (1994-9)
- (6) Y. Kojima, J. Arisawa, K. Misawa, and G. Matsumoto : "Electric Resistance and Capacitance Characteristics of Taste Receptor Model Membrane", *JJME*, Vol.32, No.4, pp.262-269 (1994-4) (in Japanese)
小島洋一郎・有澤準二・三澤順次・松本伍良 : 「味受容モデル膜の電気抵抗・容量特性」, 医用電子と生体工学, 32, 4, pp.262-269 (1994-4)
- (7) M. Iwakura, Y. Isomoto, T. Inoue, and K. Toko : "Development of a Flow-Type Taste Sensor", *Sensors and Materials*, Vol.15, No.7, pp.371-380 (2003)
- (8) J. Kondoh and S. Shiohara : "New Application of Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Sensors to Identifying Fruit Juices", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.33, No.5, pp.3095-3099 (1995)
- (9) 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)
- (10) Y. Kojima and H. Kato : "Fundamental Study of Various Taste Solutions by Ultrasonics", *Sensors and Materials*, Vol.13, No.3, pp.145-154 (2001)
- (11) Y. Kojima : "Fundamental Study of Taste Sensing by Ultrasonic Wave", *T. IEE Japan*, Vol.122-E, No.4, pp.223-224 (2002-4) (in Japanese)
小島洋一郎 : 「超音波による味センシングの基礎的検討」, 電学論 E, 122, 4, pp.223-224 (2002-4)
- (12) Y. Kojima and T. Mikami : "Fundamental Study of Taste Sensing by Acoustical Properties in Various Taste Solutions", *T. IEE Japan*, Vol.122-E, No.6, pp.318-325 (2002-6) (in Japanese)
小島洋一郎・三上 剛 : 「各種溶液中の超音波伝搬特性による味センシングに関する基礎的検討」, 電学論 E, 122, 6, pp.318-325 (2002-6)
- (13) 超音波便覧編集委員会 : 超音波便覧, 丸善, 東京 (1999)
- (14) 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)
- (15) 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)
- (16) 根岸勝雄・高木堅志郎 : 超音波技術, 東京大学出版会, 東京 (1984)
- (17) T. Kohonen : Self-Organizing Maps, Springer (1994)
- (18) S. Wang, T. Tsuchiya, and M. Mizumoto : "Distance-Type Fuzzy Reasoning Method", *Journal of Biomedical Fuzzy Systems Association in Japanese*, Vol.1, No.1, pp.61-78 (1999-1)
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・システム学誌, 1, 1, pp.61-78 (1999-1)

- (19) 大藪多可志・勝部昭明・木村春彦 : 化学センサシステムとソフトコンピューティング, 海文堂出版, 東京 (2001)
- (20) Y. Kojima : "Measurements of Taste Solutions using Ultrasonic Wave and Surface Plasmon Resonance", *IEEE Trans. SM*, Vol.124, No.4, pp.150-151 (2004-4) (in Japanese)
小島洋一郎 : 「超音波と表面プラズモン共鳴による味溶液の計測」, 電学論 E, 124, 4, pp.150-151 (2004-4)

小 島 洋一郎

(正員) 1967 年 11 月 23 日生。1995 年 3 月北海道工業大学大学院工学研究科応用電子工学専攻博士課程修了。現在, 苫小牧工業高等学校機械工学科助教授。博士 (工学)。主として, 超音波と情報処理による味センシングに関する研究に従事。電子情報通信学会, 日本エム・イー学会, 日本味と匂学会会員。

木 村 太

(正員) 1964 年 1 月 28 日生。1988 年 3 月室蘭工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。1991 年 9 月より苫小牧工業高等学校電気電子工学科助手, 現在に至る。主として, ファジィ推論に基づく学習アルゴリズムに関する研究に従事。計測自動制御学会, 日本知能情報ファジィ学会会員。

三 上 剛

(非会員) 1972 年 11 月 9 日生。1998 年 3 月北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。現在, 苫小牧工業高等学校情報工学科助手。主として, ニューラルネットワークを用いた画像パターン認識, 情報可視化に関する研究に従事。日本神経回路学会会員。

北 間 正 崇

(正員) 1965 年 9 月 12 日生。1995 年 3 月北海道大学大学院工学研究科生体工学専攻博士課程修了。現在, 北海道工業大学福祉生体工学科助教授。博士 (工学)。主として, 光と超音波を用いた生体計測の研究に従事。電子情報通信学会, 日本エム・イー学会会員。