

L 波による各種味溶液の検出

小 島 洋一郎*

Detection of various taste solution from longitudinal wave

Yoichiro KOJIMA

要 旨

味覚はヒトの持つ化学的感覚であり、この感覚を再現するために様々な研究が行われている。センサの分野でも、味覚を厳密に表現する高度なセンシング機器の開発が進んでいる。一方、液体の物性を知る方法の一つに超音波を利用した超音波スペクトロスコピー技術がある。本報では、超音波スペクトロスコピー技術の一手法であるパルス法についての概要と、超音波による液体計測を行う上で必要となる基本的な知識と技術を解説した。また、このパルス法による味溶液の計測は、味覚の要となる味溶液の識別に有効であること、さらに、味覚を表現するために重要な要素となる粘度・濃度・密度も同時に計測できることを提案した。

Abstract

The taste is person's chemical sense. To reproduce this sense, various researches are done. The device with a high performance by which the taste is strictly expressed is developed in the field of the sensor. On the other hand, one of the methods of examining physical properties of the liquid is an ultrasonic spectroscopy. In this report, the outline of the pulse method which was the technique of the ultrasonic spectroscopy was described. Basic knowledge and the technology of ultrasonic wave needed to measure the liquid were explained. Moreover, the measurement of the taste solution which uses the pulse method is effective to the identification of the taste solution. In addition, the pulse method can also measure the viscosity, the concentration, and the density which are an important factor to express the taste at the same time.

Key words : taste, ultrasonic spectroscopy, pulse method, viscosity, concentration, density

1. はじめに

味覚は、口腔内などに存在する味覚受容器で捕らえられた化学物質に反応する感覚である。味覚で応答する味には、古くから甘味、酸味、塩味、苦味の4つの基本味、さらに5番目の味として加えられたうま味がある。これらの味以外にも数多く存在するが、狭い意味での味はこの5つとされている。

これまでに、ヒトの感覚器の構成成分を模倣した味覚センサ、たとえば、脂質膜を水晶振動子に張り付け、膜に化学物質が吸着すると、振動子の振動数に変化が現れることを利用したセンサ¹⁾

や、人工脂質膜と味物質の間で起こる電気化学的変化を利用したセンサ¹⁾などが報告されており、対象の味溶液を特定すればよい結果が得られている。

しかし、これらの味覚センサは特定した味溶液の識別には有効であるが、実際にヒトの感じる「おいしさ」を表現するには、溶液の差異を検出する他にもテクスチャーなど様々な要因を加味しなければならない。

そこで著者らは、5つの基本味溶液の識別だけではなく、味溶液以外にも「おいしさ」を表現するために重要な要素である舌触り、特に溶液状になっている食品の粘度・濃度・密度に関しても、同時に検出できる方法として、超音波スペクトロスコピー²⁾を提案する。この方法は、味溶液に限

* 一般教科 講師

らず多種多様な物質に超音波を入射し、物質中の音速と吸収と周波数依存性を測るものであり、物性研究に利用されている。

本報では、音波物性の基礎技術である超音波スペクトロスコピーについての概要と、超音波による液体物性計測を行う上で必要となるパルス法の基本的な知識と技術をそれぞれ述べる。また、実際に液体の各試料において行われた研究の例を示し、どのような実験がなされ、それからいかなる知見が得られたかについて解説する。さらに、パルス法による味溶液の計測は、味覚の要となる味溶液の識別に有効であること、味覚を表現するために重要な要素となる粘度・濃度・密度をも同時に計測できること、の2点について示唆した。

2. 超音波スペクトロスコピー

今日、超音波は工業・医療など様々な分野で幅広く用いられており、液体の物性研究でも超音波による音速と音波吸収の測定は重要な値となる。超音波スペクトロスコピー^{2,3)}とは、広義な意味で物質中の音速と音波吸収を測ることである。音速は弾性的性質を表す物質の基本的物理量であり、吸収は音波のエネルギーが物質内の他の自由度に流れていく機構を反映する。一般に音速は周波数に依存せず一定である。つまり周波数が波数に比例する正常な分散関係となる。しかし周波数と波数が比例せず、音速が周波数によって変化する場合がある。これを異常な分散あるいは単に分散があるという。このような分散が現れるのは、様々な液体が混合されているときが多いので、分散がなければ単一味物質の溶液、分散が起これば混合味物質の溶液と判別にも使える。音速には位相速度と群速度の2種類があるが、通常の縦波や横波では分散が現れることはないので、音波物性では位相速度を使う。

次に代表的な超音波スペクトロスコピー技術の一つであるパルス法を紹介する。パルス法は、短い超音波パルスを試料中に伝搬させ、伝搬時間から音速を、パルス幅の減衰から吸収を測定する方法である。液体と固体の試料に加える超音波の平均パワーが低く、温度上昇などの影響が少ないという利点を持つため、最も広く用いられている。実験方法としては、対向する2枚の圧電振動子間、あるいは1枚の振動子と平行な反射面との間に試料を置き、パルスを送受する。液体試料であれば試料セルを取り付ける。パルス法の問題点は、受

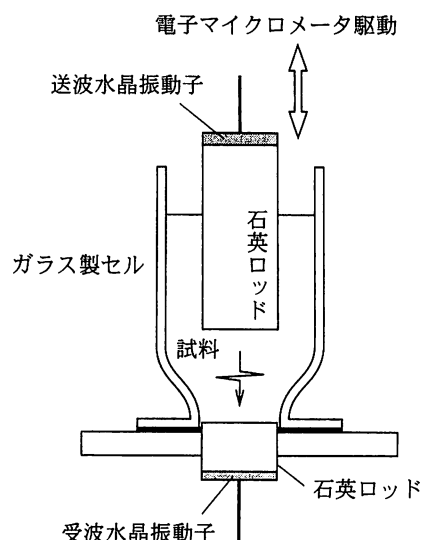


図1 音路長可変型パルス法セル

波された超音波振幅は振動子の接着部での損失、電気機械結合による回路での損失、試料中の音波回折などの原因でも減衰することが挙げられる。改善法は、音路 X を変えながら振幅変化を測定すれば、 $\exp(-AX)$ のように減衰する様子が観察される。その対数プロットの傾きから A を決めれば、これらの装置損失の影響をほとんど受けることなく真の吸収を測定することができる。

図1に音路長可変型のパルス法装置を示す。振動子を介して試料に超音波パルスを送受する。上部の送波振動子と下部の受波振動子の面が平行になるように微調され、平行を保ったまま上下に移動する。吸収の大きさに応じた適当な音路長になるように位置を粗動で決め、電子マイクロメータで距離を変え精密に読みとる。振動子の基本周波数、およびその奇数倍の周波数で測定が可能となる。送波と受波2枚の振動子を用いる透過型に対して、1枚で送受を兼ねる反射型も利用されている。パルスの駆動と受信の時刻がずれているために可能な方法であるが、駆動信号が直接受信されないような工夫が必要となる。試料の片側から測定できるという利点がある。

超音波測定において、超音波の回折広がりや送受2面の平行からのずれは重要な問題であり、特に吸収測定への影響が大きい。振動子面のピストン運動により円柱状の超音波ビームが媒質中に放出されるとき、電極の直径とほぼ同じ断面の近距離場が形成されるが、波長の回折効果により次第に広がって遠距離場へと移行していく、したがって同じ面積の振動子で受波すると、見かけ上の損失が加わる。これは長波長ほど顕著に現れ、振動

子径が大きいほど目立たない。

平行度の問題は、超音波の波長を基準にして考える。たとえば振動子面の両端で伝搬距離が半波長ずれると、信号はほとんど0になる。液体用セルでは、平行度を得る方式として固定式、マイクロメーター式、スタック式がある。固定式では、平行度の保証されたセル対向面に振動子を直接固

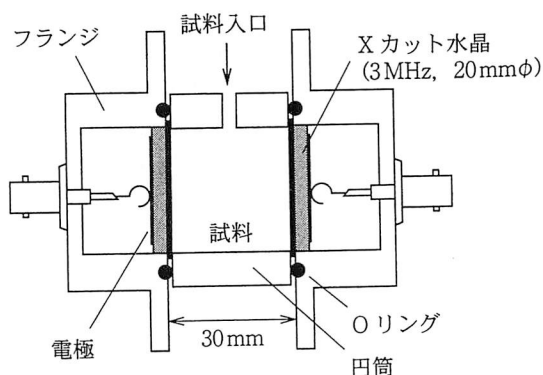


図2 音路長固定型パルス法セル

定する。概略を図2に示す。一般によく用いられるのは、マイクロメータねじを3本で平行度を調節できるようにしたものである。10MHzまでであれば標準的なものでよいが、より高周波で測定するときは、ねじピッチの小さい光学調整用のマイクロメータを用いる。調整には手動のほか、電動の遠隔駆動式がある。さらに精密な調整には圧電スタックが用いられる。

3. 音響インピーダンス整合層

音波の伝搬媒質は固体、液体、気体と多様でありその固有音響インピーダンスも媒質によって大きく異なる。一方、圧電トランスデューサは、高分子圧電材料や複合圧電材料を除けば、一般に単結晶やセラミックスのような硬質の無機材料が多い。このため、伝搬媒質によってはトランスデュー

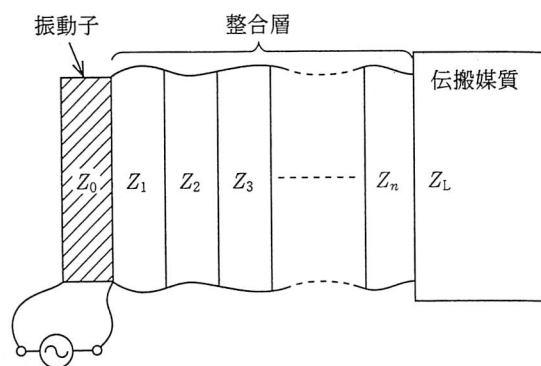


図3 音響インピーダンス整合層

サとの音響的な整合性が悪い場合がある。たとえば圧電セラミックトランスデューサから水中に音響を放出する場合、トランスデューサの固有音響インピーダンスが約 $34\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ であるのに対し、水は約 $1.5\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ であり、その比は約23と極めて整合性が悪い。このような不整合に起因する音波の内部反射を押さえ、なるべく効率よく水中に波のエネルギーを放出するために音響インピーダンス整合層を用いる²⁾。図3に示すように整合層は、固有音響インピーダンス Z_0 のトランスデューサと Z_L の伝搬媒質との間に、インピーダンスが Z_1 から Z_n 間で徐々に変化する n 層の媒質を挟み込み作成する。

4. 溶液の濃度・密度・粘度測定

4.1 濃度の測定

溶液中の濃度測定^{5,6)}には概ね2つの方式がある。一つは溶液に固形物などを混入することによって散乱や吸収が大きくなることを利用するもので、2点間で超音波の透過減衰率を測定し予め得られた検量線から濃度を推定する方法である。例えば、図4には石灰及び石膏の水溶液濃度と超音波減衰率の関係が示されている。その他汚泥濃度計もこの方式で開発されている。もう一つは2種類の液体の混合液のような場合にも、濃度によって音速が変化するのでそれに起因する位相変化量や共振周波数を測定するか、または音速を直接測定して濃度を求めるものである。図5は超音波送受波器の前方Lの位置に反射板を配置した構造で、これを液体中に入れて測定する方式である。さらに図6は位相差法の一例であり、測定構成図およびNaCl溶液の濃度と位相差の関係を示して

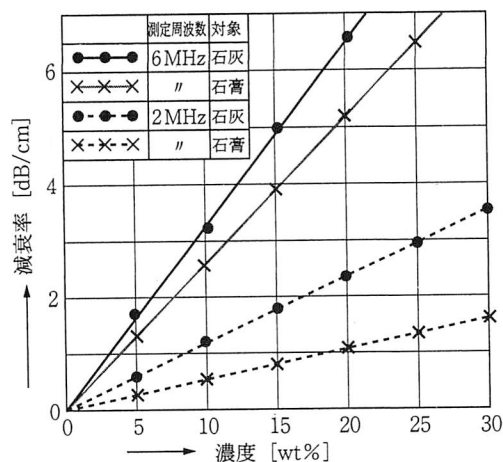


図4 石灰及び石膏の水溶液濃度と超音波減衰率の関係

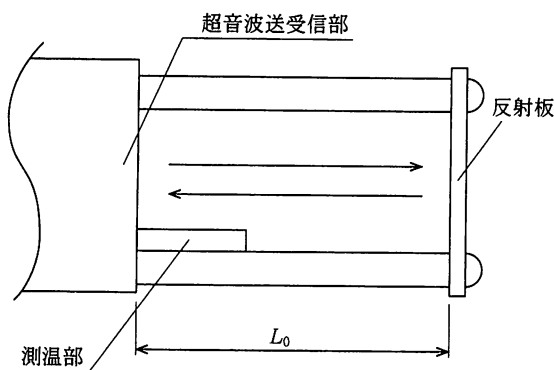


図5 反射型超音波濃度計

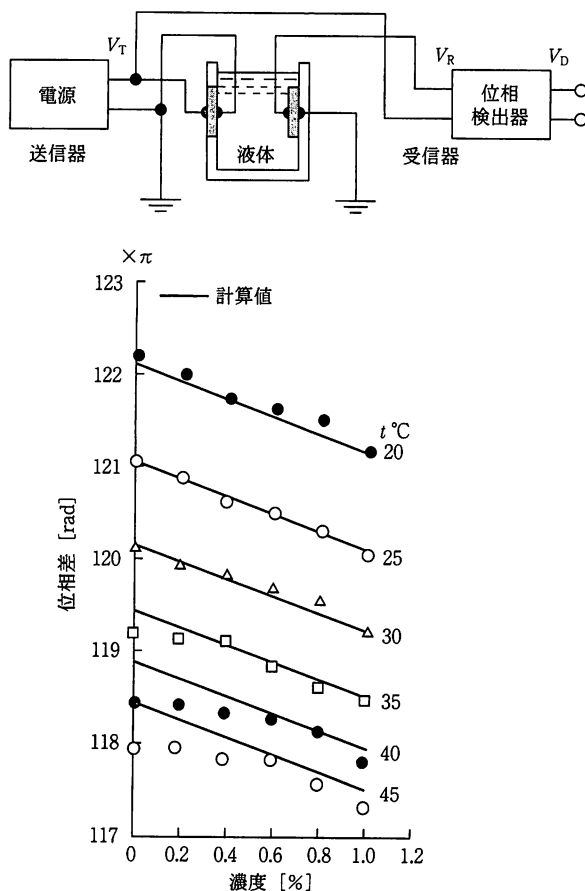


図6 位相差法による濃度の測定系とNaCl溶液に対する測定例

いる。これらも予め得られた検量線から濃度を推定する。図の検量線からも分かるように音速は温度の影響も強く受ける。従って、校正データ（検量線）は少なくとも温度 T と音速 C をパラメータにして濃度 D を求めているが、その特性が線形ではなく2次以上となる場合もある。仮に、温度と音速を各2次項まで扱い、それらの積として次のような特性関数を考えると、係数 K を決定するた

めには最低でも9点の測定が必要となる。

$$D(C, T) = K_1 + K_2 C + K_3 T + \dots + K_9 C^2 T^2$$

なお溶液の濃度測定については、減衰測定、速度測定の如何に関わらず、気泡混入の制御が難しいのでセルの構造に注意しなければならない。

4. 2 粘度測定

溶液の粘度測定^{7,8,9)}の原理は、振動子を溶液中で振動させたときの粘性抵抗を電氣的付加として測定して溶液の粘度を算出するものであり、粘度計の中では振動式粘度計に分類される。図7に示

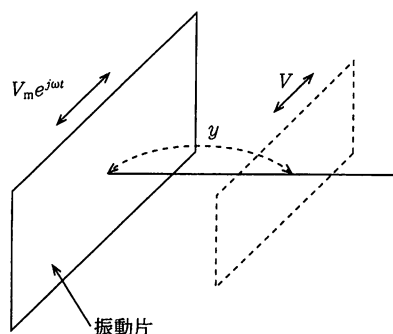


図7 振動式粘度計の原理（粘性抵抗を計算するためのモデル）

すように液体中（ニュートン流体）で薄い振動片が面に平行に振動する場合、振動片から y だけ離れた面における振動速度 V は次式で表される。

$$V = V_m \exp\left(-\sqrt{\frac{j\omega\rho}{\eta}} \cdot y\right) \cdot e^{j\omega t}$$

ここで、 V_m は振動片の振幅、角速度は ω 、液体の密度は ρ 、液体の粘度は η である。

液体が振動片に作用する力 F は、粘性率の定義から次式で与えられる。

$$F = A\tau = -A\eta(dV/dy)y=0 = A\sqrt{j\omega\eta\rho} V_m e^{j\omega t}$$

ただし、 A は振動片表面の面積、 τ は単位面積当たりの力である。この力と振動片の速度の比から機械的インピーダンス Z は次のように決まる

$$Z = R_z + jX_z = A\sqrt{j\omega\eta\rho}$$

$$R_z = X_z = A\sqrt{\frac{\omega\eta\rho}{2}}$$

この振動片のインピーダンスを等価回路で表すと図8のようになる。ここで L_1 、 C_1 、 R_1 は振動

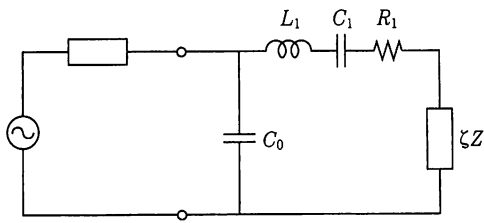
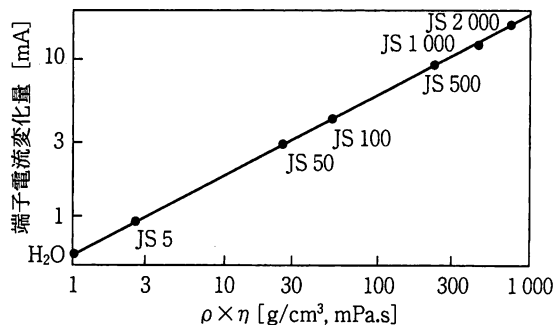
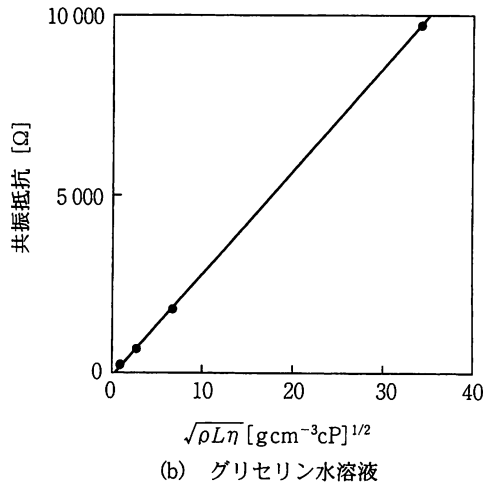


図8 振動片の等価回路

体を接液しない状態での振動系のインピーダンスであり、 C_0 は圧電素子を主とした並列容量である。粘性抵抗による機械インピーダンスは電気機械系の変換係数 k を乗じて表されている。図9は



(a) 標準粘度液 (JIS Z 8809)



(b) グリセリン水溶液

図9 粘土液の校正特性の測定例

校正特性の例でありセンサ接液前後の端子電流の変化量を示す。(a)はボルト締めランジュバン振動子振動を用いて標準粘度液 (JIS Z8809) を測定したものである。(b)はATカット水晶振動子のずり振動を用いてグリセリン水溶液を測定した例である。

4. 3 密度の測定

密度測定^{10,11,12)}の方式は、薄肉の円筒体内部に液体を接した場合、あるいは円筒体を液体中に浸漬した場合、円筒体自身の振動周波数が液体の密度が大きいほど低下することを利用するもので、振動式密度計といわれている。例えば断面一様なパイプの中に液体が存在する場合、パイプの横方向振動数は次の式で与えられる。

$$f = \frac{k}{4\ell^2} \sqrt{\frac{E}{\rho_1}} \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2}{1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{D_2^2}{D_1^2 - D_2^2}}}$$

ここで ℓ 、 E 、 ρ_1 、 ρ_2 、 D_1 、 D_2 はそれぞれパイプの長さ、ヤング率、密度、液体の密度、外径、内径である。 k は振動体の構造によって決まる係数である。実際にセンサに用いられている振動体の振動数の式は、構造の違いにより上式とは少し異なるのが普通である。このような円筒動体の側面の一部に圧電素子を一对装着し、一方を駆動用、他方を振動検知用に用いて、これを発信回路の一部に組み込むと、円筒体が上記の振動数で自励発振する。この振動数を測定することで密度が求められる。

5. おわりに

本論文では、超音波スペクトロスコピー技術を用いて味溶液の物性計測をするために必要な理論的・実験的手法をまとめた。以上のことから、味覚で見知される基本的味物質を含んだ溶液に直接超音波を放出すると、味溶液の識別と、おいしさを表現させるために必要不可欠な舌触り、特に濃度や粘度や密度を同時に検出できる手法であることが示唆された。今後この技術を実際に行い、ヒトの味覚との対応付けを行うことで、味覚の一部を再現できるセンサに応用可能であると思われる。

謝 辞

日頃ご指導いただく本校 加藤初儀助教授、ならびに有益な議論をしていただきました川口雄一助教授をはじめ、本校の関係諸氏に感謝いたします。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(基盤研究(C)11650062)により行われものである。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 都甲潔編：味覚センサ, 朝倉書店, 東京 (1993)
- 2) 超音波便覧編集委員会 編：超音波便覧, 丸善 (1999)
- 3) 丹羽：超音波計測, 昭晃堂 (1989)
- 4) 根岸, 高木：超音波技術, 東京大学出版会, (1984)
- 5) 豊岡：超音波式液体濃度計 FUD-1シリーズ, 計測技術, 17-10, 64/68 (1989)
- 6) 池田：超音波を用いた溶液濃度の簡易測定法, 超音波テクノ, 8-4, 51 (1996)
- 7) 計量管理協会編：計量管理技術双書(1)改訂粘度, コロナ社 (1986)
- 8) 谷沢：振動ランジュバン型超音波粘度計, 超音波テクノ, 7-2, 23/27 (1995)
- 9) 村松：水晶振動子化学計測システム, 超音波テクノ, 7-2, 28/34 (1995)
- 10) 桂：プロセス用振動式密時計 DM8C, 計測技術, 16-10, 76/85 (1994)
- 11) 三奈木：高性能・取扱い容易な卓上形振動式密度計 Model DM61, 計測技術, 16-10, 76/81 (1987)
- 13) 出水：薄肉円筒振動式ガス密度計, 計測技術, 増刊号,

(平成11年11月30日受理)