

特集 ■ 食とVR

味見ができるロボットの開発



橋本 篤

Hashimoto Atsushi

三重大学



亀岡孝治

Kameoka Takaharu

三重大学



島津秀雄

Shimazu Hideo

NEC システムテクノロジー

1. はじめに

現在、様々な分野で新たな人手としての役割や、人間以上に高度な知能・技術を持ち、人間生活をより豊かにする存在としてのロボット開発が期待されている。また、「衣食住」という言葉があるように、「食べる」という行為は人間にとって最も根源的な欲求のひとつといえる。さらに、昨今の健康ブームや高齢者の在宅介護問題などを考えると、五感を備えたパートナーロボット実現への社会的要請は今後強まると予想される。

三重大学と NEC システムテクノロジー（株）は、2006 年 7 月に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援を受けて、「味覚」を備えた世界初のパートナーロボット「健康・食品アドバイザーロボット（味見ロボット）」を開発した。味見ロボットは、赤外線センサを装着し、食品をそこに提示すると数秒で食品を分析し健康や食品についてのアドバイスを行う。味見ロボットは、ロボットに味覚を持たせることの意義や可能性を主張する狙いもあったので、ソムリエを模倣させるという娯楽性も考慮して設計開発した。しかし、事業化を前提にした場合は、実社会で労働力が不足している領域でのロボットの実現期待がより高い。例えば、劣化食品や食べ頃を教示することで食品の無駄な廃棄を是正させる冷蔵庫ロボット、人工舌や人工鼻を持ち患者を見守るロボット、食事療法を支援する介護ロボットなど、食品に対する味覚が必要なロボットへの期待がある。一方、食品ではないモノに対する特殊用途のロボットの活用への期待も高い。例えば、ダイオキシンのような有害物質の発見、自動車排気ガス中の不完全燃焼したガソリンや一酸化炭素等の汚染物質の監視、など労働者

や工場の安全管理をする安全管理ロボットや、火薬を内蔵する地雷のような危険物質を発見する人工の舌や鼻を持つ犬型ロボットなどの実現性への期待も高い。

本稿では、味見ロボットの味見能力の理論的背景を中心に解説する。はじめに、赤外線を利用した食品の計測原理について簡単に説明した後、味見ロボットのコンセプトと概要について解説する。その上で、赤外分光情報に基づいた味見に関する新展開、さらには食と VR（Virtual Reality）との関わりについて述べる。

2. 食品の赤外分光計測

分子には電子状態、分子振動、分子全体の回転運動に基づくエネルギー順位がある。ある振動数の電磁波が分子に照射されると、その電磁波のエネルギーの一部はその分子によって吸収される。このとき、吸収された電磁波のエネルギーは、分子のあるエネルギー準位と別のエネルギー準位間との差に等しい。このような遷移は、フォトン（光子）のエネルギーが2つのエネルギー準位間のエネルギー差に合致しさえすれば起こるというものではなく、ある種の選択則を満たすものだけが許される。

赤外吸収は、おもに分子振動あるいは格子振動と関係する。ある分子振動によって分子全体の双極子モーメントが変化する場合、その分子振動と等しい振動数の赤外光が吸収される [1][2]。たいていの分子は常温では基底状態にあるので、赤外光の吸収により基底状態（振動量子数 $v=0$ ）から第1励起状態（ $v=1$ ）への遷移が起こる。この遷移に対応する吸収を基本音という。倍音に対応する吸収はより高い励起状態（ $v=2, 3, 4, \dots$ ）への遷移によって生ずるものであるが、これらの遷移確

率は一般に低い。したがって、倍音の吸収は基本音よりも通常はるかに弱くなる。

食品を構成する成分の多くは多原子分子であり、その振動運動は非常に複雑であるが、すべての可能な運動は基準振動とよばれる単純な運動によって表すことができる。ここで、最も単純な多原子分子として直線形3原子分子である二酸化炭素 (CO_2) と非直線形3原子分子である水 (H_2O) の基準振動について考えてみる。 CO_2 は $3 \times 3 - 5 = 4$ 個の基準振動を持ち、 H_2O は $3 \times 3 - 6 = 3$ 個の基準振動を持つ (図1)。また、 CO_2 の対称伸縮振動は赤外吸収に関して不活性であるが、その他の基本振動はすべて赤外光に関して活性を有する。

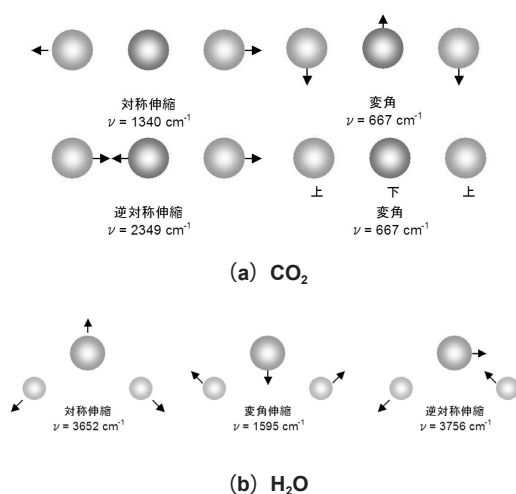


図1 CO_2 分子および H_2O 分子の基本振動

分子の基準振動は分子全体にわたって起こっているが、ある特定の原子団に振動が局在することがしばしばある。このようなグループ振動の振動数は比較的一定で、周囲の状況に影響されることが少ない。したがって、グループ振動に基づく振動スペクトルは、分子を同定するのに非常に有用である。分子内に一定の原子団は、固有の吸収帯を持っている。ある原子団が吸収する振動数は、分子の残りの部分の構造に依存してごくわずかな変化を示すだけである。

現在、一般的に使用されている赤外分光光度計は、赤外光を干渉計に入射し、干渉縞からスペクトルへの変換にフーリエ変換を用いているフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) である。この FTIR 法は、積算による SN 比の向上やスペクトル間の演算処理などが容易に行えるなどの特徴を有する。また、近年の赤外スペクトル測定法は著しく進歩している。赤外スペクトル測定の基本は透

過法であるが、透過法による測定が不可能、もしくはきわめて困難な試料も多く存在する。このような場合、試料の物理的性質、化学的性質によって分析に有利なサンプリング方法もあれば、不利なサンプリング方法もある。そこで、ATR (attenuated total reflection) 法、拡散反射法、光音響分光法、顕微赤外法、発光測定法などもしばしば用いられる [3][4]。食品や生体などのように水分を多く含む試料の測定に関しては、ATR 方が用いられる場合が多い。また、ATR 法は、オンラインあるいはインラインセンサとしてセンサ化の可能性が高い。

食品成分スペクトルの一例として、食品の甘味成分であり、デンプンなどの多糖類の最小構成糖である単糖の ATR スペクトルを図2に示す。図2は、単糖水溶液スペクトルから水のスペクトルを差し引いて得られたスペクトルである。グルコーススペクトルでは、 3200 cm^{-1} 付近に OH 伸縮、 2925 cm^{-1} 付近に CH 伸縮、 1363 cm^{-1} 付近に CH 変角、 1079 cm^{-1} 付近にエーテル CO 伸縮および 1033 cm^{-1} 付近にアルコール C-OH 伸縮に起因する吸収が認められる [5]。また、グルコースと化学式が同じ4種類の単糖 (グルコース、フルクトース、ガラクトース、マンノース) の $1200 \sim 950\text{ cm}^{-1}$ の領域のスペクトルは、エーテル CO 伸縮とアルコール C-OH 伸縮の吸収帯が複雑に重なり合っており、スペクトルパターンが糖の種類によって大きく異なることがわかる。

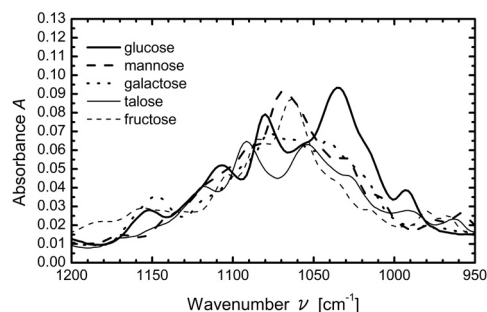


図2 水溶液 (1.0 mol/dm^3) 中の単糖類の吸光度スペクトル

3. 味見ロボット・ソムリエロボットのコンセプトと概要

ここでは、味見ロボット、およびワインの味見をするソムリエロボットの開発例について紹介する。

味見ロボットは、赤外線センサーを NEC のパートナーロボット PaPeRo [6] に装着したものであり、PaPeRo の大きさに合わせた腕を製作し、人間の舌の役割をする赤外線センサを一体化するように装着した (図3)。また、

食品の赤外吸収スペクトル情報を解析することにより、特徴的な成分の有無や含有量によって、食品名の推定を行う。さらに、予め登録しておいた個人の身体情報をマッチングさせることにより、食品や健康に関するアドバイスをロボットが行なう。



図 3 味見ロボットの外観写真

取得したスペクトルの処理は、検量線に基づく定量分析と、パターン認識による食品名推定の 2 つに分かれ、それぞれ独立に処理される。その概略を 図 4 に示す。定量分析に関しては、食品の主成分のスペクトル特性の濃度依存性をあらかじめ検討することにより行う。一方、食品名を推定する場合には、取得したスペクトルをパターンとしてとらえ、スペクトル同士を比較して、パターン認識技術を使って食品の識別や分類を行う。そのためには、事前に種々の食品のスペクトルを蓄積し、食品名と対にして辞書に格納しておく必要がある。

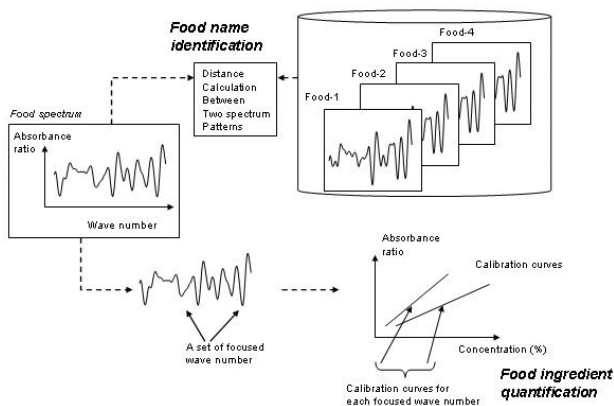


図 4 味見ロボットによるスペクトル処理

上記の機能を有した味見ロボットのコンセプトと機能

をベースとし、ソムリエロボットへの展開が試みられた。まず、ワイン成分スペクトルの特徴抽出を行い、対象ワインのスペクトル間の差異を最大化するポイントを自動抽出して判別する。さらに、人間のソムリエのように、お客様の好みに合わせて、必要最小限の質問をすることで、確率的に最少の質問数で多くのワインからひとつのワインに絞込む機能をロボットに搭載した。その結果、数十種類のワインの識別とその特徴を言葉で表現するソムリエロボットの開発に成功した。このロボットは世界初のソムリエロボットとして 2008 年度版のギネスブック [7] に登録された。

4. 赤外分光情報に基づいた味見に関する新展開

代表的な嗜好飲料であるワインとコーヒーを対象とし、赤外分光法情報に基づいた VR への展開に必要な食品の特徴抽出例について説明する。ワインとコーヒーの共通点として、有機酸類などのイオン解離性成分がその味品質の鍵を握っていることがあげられる。ここでは、それらイオン解離性成分と赤外分光情報との関連について解説する。

4.1. ワイン [8]

pH を変化したワインおよび各主要成分（エタノール、グルコース、フルクトース、酢酸、クエン酸、乳酸、リンゴ酸、コハク酸、酒石酸）を混合して調製したワインモデルのスペクトルを図 5 に示す。ワインのスペクトルにおいて、1130, 1155, 1272 cm^{-1} 付近の吸収の増減や、ピーク波数のシフトが認められ、その挙動はワインモデルスペクトルと同様である。また、ワインモデルの各構成成分の赤外吸収スペクトル特性を解離平衡の理論を用いた解析結果より、ワインモデルスペクトルの変化はワイン中の有機酸類に由来することがわかっている。

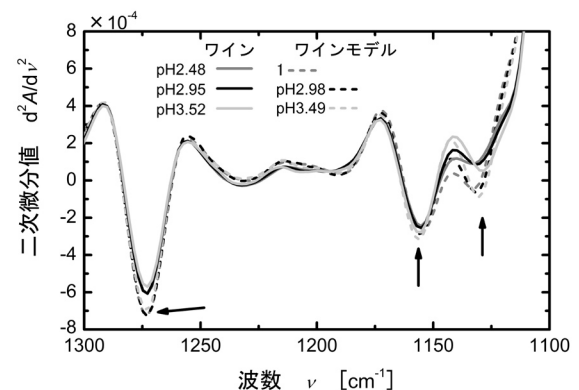


図 5 pH を変化したワインおよびワインモデルのスペクトル

次に、ワインのスペクトルはエタノールスペクトルに類似しているため、ワイン中のエタノール以外の成分情報の抽出方法を示す。図6は、ワイン、ワインモデルスペクトルから、水およびエタノールスペクトルを差し引いたスペクトル、およびワインモデルの各構成成分の濃度とpHを考慮して計算した合成スペクトルである。主な吸収帯がほぼ一致し、ワイン中のエタノール以外のワインの銘柄に固有の成分情報を抽出できていることが分かる。よって、ワインの赤外吸収スペクトルを解析することで、品質情報の抽出およびワインの銘柄識別が可能と言える。

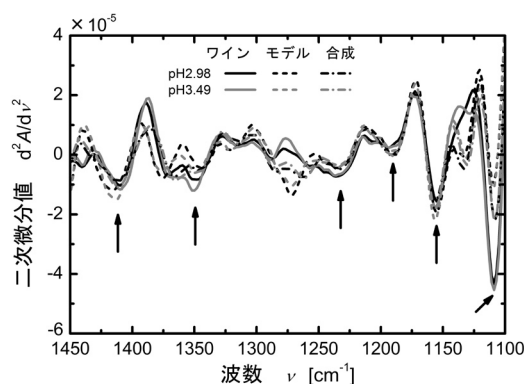


図6 pHを変化させたワイン、ワインモデル、合成スペクトル
(水およびエタノールとの差)

4.2. コーヒー [9]

コーヒー抽出液スペクトルのpHおよび温度依存性について説明する。コーヒーは、ホットコーヒーやアイスコーヒーなどのように、異なる温度で飲まれ、またその温度の差異によって味わいが変わる飲料である。

温度およびpHを変化させたコーヒー抽出液（インスタントコーヒー水溶液）の赤外吸収スペクトルを図7に示す。温度およびpHの違いによって、ピーク波数のシフトが認められる。

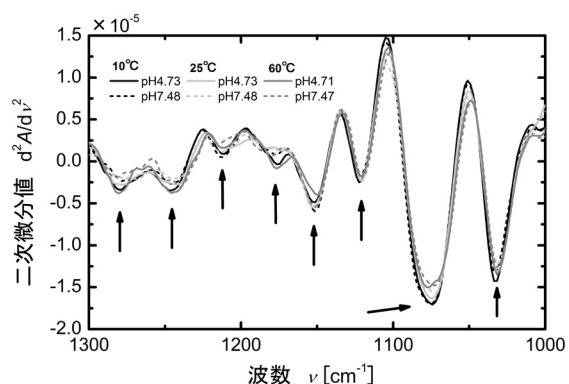


図7 温度、pHを変化させたコーヒー抽出液のスペクトル

そこで、コーヒー抽出液スペクトルの温度およびpH依存性を把握するために、コーヒー抽出液中の個々の主要成分スペクトルの温度およびpH依存性について解離平衡の理論を用いた検討がなされている。図8は、その上で、主要成分を混合して調製したコーヒーモデルと、個々の成分スペクトルの温度およびpHを考慮して計算から求めた合成スペクトルとの比較である。コーヒー抽出液のスペクトルとコーヒーモデルスペクトルの主な吸収帯がほぼ一致している。また、コーヒーモデルと合成スペクトルで、ピーク波数のシフトなど、同様の挙動が確認された。これらの結果より、コーヒー抽出液の特徴抽出に関し、赤外吸収スペクトルの温度およびpH依存性により説明できることがわかる。

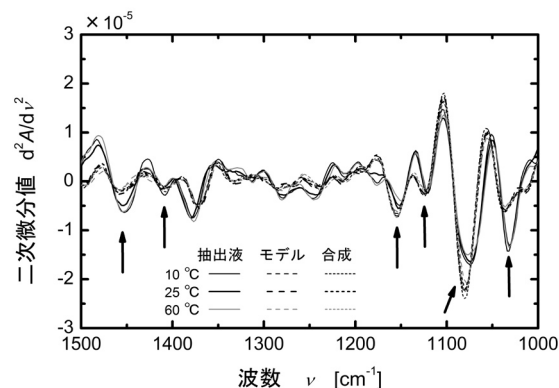


図8 温度を変化させたコーヒー、コーヒーモデルおよび合成スペクトル (pH4.7)

5. おわりに

本稿で解説した赤外分光解析法は、液体や固体のみならず気体でも計測可能であるため、味覚とともに臭覚の役割を果たすことが原理的に可能であり、フレーバにも対応できる広義の「味見ロボット」への展開が期待される手法である。一方、他の波長領域の電磁波との情報融合や、スペクトル情報に基づいた官能情報の理解などといった課題が残されている。

近年、情報可視化学など複雑な情報を人間に判読しやすい形式で可視化する技術研究が盛んとなっている。「仮想的な空間」をあたかも現実らしく見せるVR（仮想現実）に続き、正反対の技術と言えるAR（拡張現実：Augmented Reality）これらの中間的な技術であるMR（複合現実）が登場している。VRでは、実在しない空間に人が入り込み、動き回るといった処理が可能であるが、すべての空間や状況を仮想的に作り出すには膨大な時間と労力が必要であり、その空間を広げるには限界があった。

2012 年 11 月に開催された MR と AR の国際シンポジウムで、「食」の様々な様相に対するこれらの技術の適用可能性が報告されており [10]、こうした流れの中で、リアルな空間にデータを重ね合わせるインタフェースを持つ AR あるいは現実の情報と仮想的な情報をミックスさせる MR の「味見ロボット」への展開が、今後期待される。

味見ロボットの農業・食品業界への適用としては、原材料評価、日本人向けあるいは特定の海外市場を意図した農産物の開発や加工食品の味付けの設計支援、食品生産ラインでの早期問題診断などが考えられる。さらに将来的には、劣化食品や食べ頃が検出出来るセンサとしての展開にも期待したい。

参考文献

- [1] 尾崎幸洋, 田中丈洋: ラマン分光法による食品の非破壊分析の可能性. 日本食品工学会誌, 1, pp.31-37(2000)
- [2] 水島一三, 島内武彦: 赤外線吸収とラマン効果, 共立出版 (1958)
- [3] 田隅三生: FT-IR の基礎と実際, 第 2 版, 東京化学同人 (1994)
- [4] 錦田晃一, 岩本令吉: 赤外法による材料分析, 講談社サイエンティフィック (1986)
- [5] 亀岡孝治, 奥田知晴, 橋本篤, 野呂明美, 椎木靖彦, 伊藤健介: FT-IR/ATR 法を用いた糖水溶液の赤外分光分析, 日本食品科学工学会誌, 45, pp.192-198 (1998)
- [6] Fujita, Y.: Personal robot PaPeRo. J. Robot. Mechatron., 14, pp.60-63 (2002)
- [7] Guinness World Records: Guinness World Records 2008, Guinness Book, London, p.159 (2007)
- [8] Hashimoto, A., Sugimoto, Y., Kanou, M., Suehara, K., Kameoka, T., Kobayashi, K., Shimazu, H.: Mid-Infrared Spectroscopic Analysis on Wine Characteristics, Abstract of 10th ICEF (Vina del Mar, April 2008), M21 (2008)
- [9] Hashimoto, A., Sugimoto, Y., Suehara, K., Kameoka T.,:

Influences of pH and Temperature on Infrared Spectroscopic Features of Brewed Coffee, *Procedia Food Sci.*, 1, pp.1132-1138 (2011)

- [10] Wei, J., Zhao, S., Nakatsu, R., Duh, H.: When AR Meets Food: A Structural Overview of the Research Space on Multi-Facets of Food, *Proceeding of International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-AMH) 2012*, pp.97-98 (2012)

【略歴】

橋本 篤 (HASHIMOTO Atsushi)

三重大学 大学院生物資源学研究科 教授

1992 年東京農工大学大学院工学研究科博士課程修了。
1992 年三重大学生物資源学部助手, 同助教授を経て,
2004 年から同教授. 博士 (工学)。

亀岡孝治 (KAMEOKA Takaharu)

三重大学 大学院生物資源学研究科 教授

1984 年東京大学大学院農学系研究科博士課程修了。
1984 カナダ国サスカチュワン大学工学部博士研究員。
1985 年三重大学農学部助手, 同大生物資源学部助手,
助教授を経て 1998 年より同教授. 2004 年より 2007 年
まで三重大学理事・副学長. 2007 年から三重大学大学
院生物資源学研究科教授. 農学博士。

島津秀雄 (SHIMAZU Hideo)

NEC システムテクノロジー (株)

執行役員兼システムテクノロジーラボラトリ所長

1982 年慶応義塾大学大学院 (修士) 修了後, 日本電気
㈱入社. 2003 年 NEC システムテクノロジー株式会社シ
ステムテクノロジーラボラトリ所長. 2011 年同社執行
役員, 博士 (政策・メディア)