◇◇◇◇ 解説 (2004 年度日本食品工学会奨励賞) ◇◇◇◇

食品加工プロセスにおける赤外線利用技術の開発

橋 本 篤

三重大学大学院 生物資源学研究科 資源循環学専攻

Development of Infrared Radiative and Spectroscopic Applications to Food Processing

Atsushi HASHIMOTO

*Division of Sustainable Resource Sciences, Graduate School of Bioresources, Mie University
1577 Kurimamachiya-cho, Tsu. Mie 514-8507, Japan*

Integrated investigation on application of infrared rays to food processing was dissertated from the view points of infrared radiation and spectroscopy. Drying and pasteurization of the food models were dealt in the most effective application of infrared radiation. The infrared drying characteristics of the food models were studied by focusing on the factors influencing their characteristics, and the importance of the diffusive infrared spectroscopic characteristics was emphasized for the quantitative evaluation of the effects of infrared drying. Moreover, infrared pasteurization of bacteria was more effective than the conventional thermal heating methods, and it was suggested that the infrared pasteurization effect was due to the absorption of infrared radiation energy by the sample in a very thin domain near the surface and to the bulk temperature. Then the infrared spectroscopy was studied for the qualitative and quantitative analysis of foods. In addition, the developed infrared spectroscopic methods were applied to get a good grasp of the sugar metabolic kinetics of suspension cells, the monitoring of the enzyme reaction associating with ionic dissociative metabolites, and the food tasting. Consequently, these studies represented an important step in the developments of the effective thermal operations and the on-line monitoring for food processing.

Keywords: infrared radiation, infrared spectroscopy, drying, pasteurization, sugar, plant cell, metabolic kinetics, enzyme reaction, tasting

1. は じ め に

食品加工プロセスにおける赤外線の利用は、熱エネルギー源としての利用と、成分センシングに代表される分光分析ツールとしての利用に大別される。前者の代表的な熱的操作としては、乾燥や殺菌があげられる。赤外線照射による加熱は、物理的な側面としては食品の水分活性を低下させるための乾燥があげられ、微生物学的側面としては加工食品の初発菌数を低減させるための殺菌があげられる。また、赤外線乾燥は、さまざまな分野で広く用いられており、食品分野でもその伝熱効率の良さと仕上がり製品の風味などが優れているとの理由から多用されている。一方、赤外分光分析は、

各種官能基の基本振動情報に関する理論的基礎が存在し、解析も官能基の帰属波数帯だけを用いる単回帰で十分なことが多いという特徴を有している。しかしながら、食品分野では食品中の高水分が障害となって応用研究には限界があった。この問題点は近年普及してきたATR (Attenuated Total Reflection) 法 [1,2] により克服されつつある。また、赤外線などを用いた分光計測 (電磁波計測) の最大の特徴は、様々なバンドの光を用いた一斉同時計測による情報量の多さと、計測に要する時間の短さにある。クロマトグラフィなどによる計測では、カラムの選択などにより最終的に得られる情報が限定されるが、分光計測では原スペクトルがもつ一次情報には基本的に情報の欠落がなく、新たな解析法が見つかった時点で原スペクトルを用いた新たな検討が可能になるという大きな利点も持ち合わせている。

本稿では、赤外線の特徴を生かした食品加工プロセス

スにおける熱的操作, モニタリング, 制御技術の開発を目的とし, 工学的観点から行ってきた基礎的な研究について概説する. 主な課題は, 赤外線加熱 [3-6]・乾燥・殺菌, 発酵過程・イオン解離性物質が関与する酵素反応過程の赤外分光モニタリング, 嗜好食品の味覚関連情報の抽出である.

ところで, 赤外線は大変広い分野において利用されているが, それぞれの利用分野において異なる呼び名の組み合わせを用いており, われわれは利用目的において赤外線の分類が異なることを理解しておかなければならない. Fig. 1 に各利用分野における赤外線の分類を示す. 分光学的分野においては, 分子の基準振動に基づく波長帯を中赤外線とし, この波長帯よりも短波長側を近赤外線, 長波長側を遠赤外線とする. 一般的に中赤外線は波数を単位とし, $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ と定義され, 波長では $2.5 \sim 25 \mu\text{m}$ に対応する. また, 遠赤外線は $400 \sim 10 \text{ cm}^{-1}$ となり, 波長では $25 \sim 1000 \mu\text{m}$ の範囲である. 中赤外域に現れる官能基の基準振動の倍音・結合音が得られる近赤外線では, 波長が使われることが多いが, 波数も用いられる. 一方, 熱利用においては, $3 \mu\text{m}$ よりも短波長域を近赤外線, 逆に $3 \mu\text{m}$ よりも長波長域を遠赤外線とよんでいる [7]. このように, 熱利用の分野においては, 波長を単位として用いるのが一般的である.

2. 赤外線を利用した熱的操作

赤外線による食品加熱が関与している現象は多岐にわたっているが, 各々の現象は食品の赤外線による放射伝熱機構の特色に起因するものと考えることができる. 食品の保蔵性向上に関与する赤外線の放射加熱による現象は, 物理的な側面としての乾燥と, 微生物学的な側面としての殺菌とに分けて考えることができる.

2.1 湿潤多孔質食品モデルの赤外線乾燥特性

被乾燥物による赤外線エネルギーの吸収を水による吸収と固体成分による吸収とに分けて考え [5, 6, 8, 9], 蒸留水を含浸させたメンブランフィルタ (試料 1, 試料 2, 試料 3 の平均空孔径は, それぞれ $3.94, 2.10, 0.74 \mu\text{m}$) を 16 枚重ねた湿潤多孔質食品モデルの赤外線乾燥特性の把握を試みた. Fig. 2 は, 遠赤外線乾燥特性に及ぼす平均空孔径の影響を検討した結果である [10-12]. 恒率乾燥速度に関しては, 平均空孔径による顕著な差異は認められないが, 恒率乾燥期間後の乾燥速度の低下に顕著な差異が認められた. 最も平均空孔径が大きい試料 1 の乾燥速度は, 恒率乾燥期間後, 最も高含水率で乾燥速度が低下しはじめ, 試料 2 の乾燥速度は, 恒率乾燥期間後, 最も低含水率で乾燥速度が低下しはじめた. また, メンブランフィルタの拡散反射スペクトル

		波長 [μm]																					
		10 ⁻²	10 ⁻¹	0.38	0.75	1	1.3	2	2.5	3	3.5	5	6	8	14	15	25		10 ³	2000	10 ⁴		
赤外分光分野	X線ハレントゲン写真▽	紫外線ハ殺菌▽	可視光線	赤外線 (0.75～1000 μm)																	マイクロ波ハ無線通信や電子レンジ▽	電波ハテレビやラジオ▽	
				近赤外線 (0.75～2.5 μm)				中赤外線 (4000～400 cm ⁻¹)								遠赤外線 (25～1000 μm)							
								赤外分光器 (4000～400 cm ⁻¹)								遠赤外分光器 (400～5 cm ⁻¹)							
				近赤外分光器 (13300～2875 cm ⁻¹)																			
熱利用分野				近・中赤外線 (0.75～3 μm)				遠赤外線 (3～1000 μm)															
センシング分野	リモート			赤外線 (熱放射利用)																			
		近赤外線		短波長赤外線			中間赤外線			熱赤外線		遠赤外線											
カメラ分野	赤外線			近赤外線				中赤外線			遠赤外線			極端遠赤外線									
照明分野				近赤外線				中赤外線			遠赤外線												

Fig. 1 Denomination of infrared ray in each application field.

Fig. 2 Effect of mean porous diameter of membrane filter on drying characteristics ($q_{ir}=1.71 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

情報を用いて恒率乾燥期間における乾燥試料による赤外線エネルギーの吸収量を推算したところ、乾燥実験から求めた値と高い相関が認められた [10]。さらに、湿潤多孔質野菜の水分収着特性の解析 [13, 14] と湿潤多孔質食品モデルの通風乾燥特性のシミュレーションを行い [12]、赤外線乾燥で非常に重要となる光学特性が FT-IR と拡散分光法の組み合わせで得られることを示した [10, 11]。つまり、これらの結果は、被乾燥物の赤外線吸収特性に及ぼす乾燥過程における被乾燥物の水分変化および幾何学的構造変化の影響が、赤外線乾燥機構の解明に重要であることを示唆している。

2.2 赤外線照射による細菌の殺菌効果

細菌懸濁液のバルク温度に着目し、遠赤外線照射による殺菌効果と伝導加熱による殺菌効果を比較した [15]。遠赤外線照射もしくは伝導加熱された細菌懸濁液のバルク温度の経時変化の差異を無視できる条件下において、遠赤外線照射もしくは伝導加熱した場合の大腸菌の殺菌結果を Fig. 3 に示す [15]。ここで、 N_1 は細菌懸濁液中の生菌数濃度、 N_{10} はその初期値であり、 N_1/N_{10} は生残率を意味する。Fig. 3 に示すように、加熱時間が同じであるならば遠赤外線照射した場合のほうが伝導加熱した場合よりも生残率が小さくなった。黄色ブドウ球菌に関しても、同様の実験結果が得られた。つまり、遠赤外線照射による殺菌のほうが伝導加熱による殺菌よりも効果的といえる。

また、固体表面および内部に存在する細菌に関して、遠赤外線照射による殺菌効果と伝導加熱による殺菌効果を比較した [16]。その際、伝導加熱された寒天平板内の各点の温度の経時変化と遠赤外線照射された寒天平板内の各点の温度の経時変化とを実験的に揃えることはきわめて困難であるので、供試細菌の寒天平板内における熱死減定数を用いて生残率を推算することにより、遠赤外線照射による殺菌効果と伝導加熱による

殺菌効果とを比較した。Fig. 4 にその結果を示す [16]。ここで、 N は寒天平板内の生菌数、 N_0 はその初期値であり、 N/N_0 は生残率を意味する。また、パラメータ d は、寒天平板表面から供試細菌までの距離である。大腸菌と黄色ブドウ球菌の両供試細菌とも、 $d \geq 1 \text{ mm}$ の領域においては、実験結果と計算結果とは良好に一致している。一方、寒天平板表面 ($d=0 \text{ mm}$) の供試細菌に関する遠赤外線照射による殺菌結果は、計算結果よりも小さくなった。したがって、遠赤外線照射された寒天平板表面温度の経時変化と伝導加熱された寒天平板表面温度の経時変化が同じであるならば、遠赤外線照

Fig. 3 Comparison of pasteurization effects on *Escherichia coli* suspension buffered saline heated by IR irradiation or conventional method. N_1/N_{10} is viable ratio where N_1 is concentration of viable cells in bacterial suspension and subscript 0 means the initial state.

Fig. 4 Comparison of pasteurization effects on bacteria on or within agar heated by IR irradiation or conventional method. N/N_0 is viable ratio where N is colony-forming unit per agar-plate [$\text{CFU} \cdot \text{plate}^{-1}$] and subscript 0 means the initial state. (a) *Escherichia coli*, (b) *Staphylococcus aureus*

射された寒天平板表面上の細菌の N/N_0 は、伝導加熱された寒天平板表面上の細菌の N/N_0 よりも小さいと考えることができる。一方、 $d \geq 1$ mm の領域においては、 N/N_0 の計算結果は、遠赤外線照射された供試細菌の殺菌結果とほぼ一致した。このような殺菌効果の比較より、寒天平板上の細菌の殺菌に関しては、遠赤外線照射のほうが伝導加熱よりも効果的であることがわかった。したがって、加工食品表面に付着した微生物などに関しては、伝導加熱殺菌よりも遠赤外線照射殺菌を行う方が効果的であると考えられた。

さらに、抗生剤を利用した細菌の損傷部位の新たな検索方法を提示し、赤外線照射によって引き起こされた損傷は、伝導加熱によって引き起こされた損傷と同様な傾向を示した [17-21]。このことは、赤外線照射された細菌は、熱的效果によるストレスを受けた損傷とみなすことができるが、遠赤外線照射は伝導加熱よりも殺菌に関して効果的な伝熱形態であることを示唆した。また、赤外線照射による細菌芽胞の殺菌効果 [22] および対数増殖期の細菌の殺菌効果 [23] を明らかにすることにより、赤外線照射殺菌の有効性は殺菌試料表面近傍における照射エネルギーの吸収機構に起因することを伝熱工学的側面から明らかにした。

3. 糖類の赤外分光スペクトル

3.1 単糖・二糖類のスペクトル

解糖系の起点となり、デンプンなどの多糖類の最小構成糖であるグルコースの水溶液中における ATR スペクトルを Fig. 5 に示す [24]。これは、グルコース水溶液スペクトルから、水溶液のモル分率を用いて重みづけを行った補償法により水のスペクトルを差し引いて得られたものである。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

Fig. 5 IR spectrum of glucose in aqueous solution (1 M).

アルコール C-OH 伸縮のそれぞれの吸収が認められる。Fig. 6 に 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 1.0 M 濃度水溶液の指紋領域におけるスペクトルを示す [24]。1200 ~ 950 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いるため、スペクトルパターンが糖によって大きく異なり、この指紋領域のスペクトルは糖の定性分析に利用できることがわかる。

次に、最も単純なオリゴ糖である二糖類の構造、および糖分子と水との相互作用に着目し、二糖類の赤外分光特性について検討した [25, 26]。D-グルコース 2 分子が結合したトレハロース (α -1,1 結合)、コウジビオース (α -1,2 結合)、ニゲロース (α -1,3 結合)、マルトース (α -1,4 結合)、およびイソマルトース (α -1,6 結合)、ならびに D-グルコースと β -D-フルクトースが α -1,2 結合したスクロースの指紋領域 (1200 ~ 900 cm^{-1}) における ATR スペクトルを Fig. 7 に示す [25, 26]。この領域には、1150 cm^{-1} 付近のピラノース環の

Fig. 6 IR spectra of monosaccharides in aqueous solutions (1 M).
— glucose, ---- mannose, galactose, - · - fructose

Fig. 7 IR spectra of disaccharides in aqueous solutions (30 mM).

振動, 1100 cm^{-1} 付近の C-C, C-O, および C-OH の複合振動, 1060 cm^{-1} 付近の C-1-H の変角振動, および 1030 cm^{-1} 付近の C-OH の伸縮振動等, 様々な官能基の振動の吸収が混在する. Fig. 7 より, 糖分子の構造により若干の差異があるものの, D-グルコース 2 分子が結合した二糖では, 各振動の吸収帯はほぼ同じ波数に存在することが確認された. トレハロースは他の二糖と比較して特異的なスペクトルパターンを有することが示された.

また, トレハロース, マルトース, およびスクローススペクトルの代表的なピーク波数である 992 cm^{-1} , 1035 cm^{-1} , および 996 cm^{-1} における検量線を求めたところ, スクロースだけが, 0.5 M 以上で非直線性を示した [25]. つまり, スクロースの 996 cm^{-1} は C-OH の伸縮振動に起因する吸収帯と考えられ, 糖と水との相互作用を受けていることが示された. さらに, トレハロース, マルトース, およびスクローススペクトルの上記 3 ピーク波数について, 最も安定している飽和溶液濃度近くのスペクトルを基準に波数シフトを求めた. その結果, トレハロースのみ, 波数シフトが 3 cm^{-1} 以内になり, 水との相互作用が濃度によって大きく変化しないことが示された [26]. 以上より, 最も単純なオリゴ糖である二糖類に関しても, その構造および糖分子と水との相互作用が赤外分光特性に影響を及ぼすことがわかった.

3.2 オリゴ糖のスペクトル

近年, 砂糖に代わる甘味料として, オリゴ糖などの低甘味度甘味料の需要が年々増大している. オリゴ糖はまたさまざまな生理活性機能も有しており, 任意の重合度のオリゴ糖精製が求められるようになり, オリゴ糖の精製過程における高精度の品質管理に関わるオンラインセンサの必要性も高まっている. そこで, グ

ルコースからグルコース重合度が 7 の直鎖オリゴ糖まで赤外分光スペクトル (G1 ~ G7) を計測し, それぞれのスペクトルの特徴を Fig. 8 に示した [27]. グルコース重合度が 1 から 4 までの G1, G2, G3, G4 の波形は似ているものの, それぞれのスペクトルは明らかに異なることが分かる. また, 重合度が 5 から 7 にかけてのオリゴ糖 (G5, G6, G7) ではスペクトルパターンは非常に近いものとなった. さらに, これらのスペクトルを波形分離し, 重合度により基数が変化する官能基 (C-O-C) に起因する吸収に着目し, その官能基数と吸光度との関係を考察することにより, 重合度の推定を試みた. その結果, 相関係数が 0.999 の精度で重合度を推定することができたが, 重合度が大きくなるほどその推定が困難になることがわかった [27].

3.3 イオン水溶液中の糖のスペクトル

生体内における塩類は細胞内浸透圧の調整等の機能を持ち, その塩類を構成する陽イオン種として Na^+ や K^+ が挙げられる. そして, 単・二糖類に代表される糖類とともに代謝に関連する重要な物質であり, それらの相互作用を考慮した赤外分光計測が望まれている. そこで, 塩類が塩水溶液および塩水溶液中の糖類の赤外分光特性に及ぼす影響とその濃度依存性について検討した. Fig. 9 に水のスペクトルおよび KCl 水溶液の濃度変化スペクトルを示す [28]. KCl 濃度の変化に対して, OH 伸縮および OH 変角のスペクトルパターンが連続的に変化した. 5 種類のアルカリ金属塩化物について, その傾向は, OH 伸縮の吸収帯において顕著であった. さらに, 2.0 M 水溶液中のグルコーススペクトルに及ぼすアルカリ金属塩化物の濃度の影響について, 糖の指紋領域 ($1200 \sim 950\text{ cm}^{-1}$) に着目し解析を行った. その際, グルコース水溶液およびグルコース-KCl 水溶液スペクトルから, 重みづけを行った水および KCl 水

Fig. 8 IR spectra of maltooligosaccharides in aqueous solutions (0.2 g-sugar/4.0 g-solution).

Fig. 9 IR spectra of KCl aqueous solutions.

溶液のスペクトルをそれぞれ差し引くことにより、KCl 濃度 (0 ~ 3.5 M) の影響を受けた水溶液中のグルコーススペクトルを抽出した。なお、重みは各溶液の体積モル濃度より計算した。そして、KCl 濃度 0 M のグルコーススペクトルを基準として、それぞれのスペクトルとの差を求めた。この波数領域におけるグルコーススペクトルには、 1150 cm^{-1} 付近のピラノース環の振動、 1079 cm^{-1} 付近の C-1-H の変角振動、 1032 cm^{-1} 付近の C-OH の伸縮振動、および 992 cm^{-1} 付近の CH_2OH の振動等、様々な官能基の振動の吸収が混在する。その結果、各官能基が KCl 濃度から受ける影響は、スペクトルにおける吸収波数よりも低波数側に認められ、KCl 濃度に対応して増加することがわかった [28]。

4. 食品・農産物の赤外分光解析

4.1 果汁モデルの定量分析

Figs.6, 7 に示したように、指紋領域に各糖固有のスペクトルを測定できるので、FT-IR/ATR 法を用いることにより、各糖濃度を同時に定量できるものと考えられる。そこで、単糖類・二糖類の混合糖水溶液に対して、FT-IR/ATR 法を用いて糖の定性・定量分析を行った。モデル食品としてナシ果汁を想定した混合糖水溶液の吸光度スペクトルと、スペクトルの加成性を想定して計算により合成したスペクトルの指紋領域における吸光度スペクトルを比較したところ、2つのスペクトルは、定性的、定量的にもよく一致し、指紋領域での精度の高い加成性が示された [29]。ナシ、モモ、ブドウ、リンゴ、ミカンの模擬果汁の吸光度スペクトルから通常法で求めたグルコース、スクロース、フルクトースの濃度と実際の濃度の関係では、相関係数は 0.985 となり PLS 解析などには若干劣るものの良好な結果が得られた [29]。

また、収穫後も典型的な追熟現象を示すトマトを対象とし、その追熟過程における内部品質変化を評価するために、赤外分光法を用いて糖成分の計測を行った。その結果、トマト各部位間においてグルコース、フルクトース、スクロース含量に若干の差異はあるものの、貯蔵前後では大きな差異は認められなかった [30]。追熟過程において呼吸代謝により糖が消費されていることを考慮すると、追熟にともなう軟化、つまり細胞壁多糖類の分解により生成された糖を炭素源として呼吸代謝が営まれていることが推測できた。このように、FT-IR/ATR 法は、簡易に糖含量を定量できることから、その定量結果を利用した代謝等に関する研究の発展にもきわめて有効な手段と考えられる。

4.2. みかん果汁の赤外分光解析

有機酸の多くは代謝を制御する重要な物質であると

ともに、食品においてはその味覚に大きな影響を及ぼす成分である。また、理論的にはすべての酸について赤外分光分析は可能である。そこで、ミカン果汁を例にとり、酸 (クエン酸) と糖類との同時定量の可能性について研究した。

まず、クエン酸水溶液と水との差スペクトルを求めたところ、 3600 cm^{-1} に OH 基の OH 伸縮、 $2400 \sim 3050\text{ cm}^{-1}$ に COOH 基の幅広く強い OH 伸縮、 1722 cm^{-1} に COOH 基の C=O 伸縮、そして 1224 cm^{-1} に CH_2 基の縦ゆれ振動に基づく吸収ピークが認められた [31]。また、定量分析の前提となるクエン酸、スクロース、フルクトース、グルコースのスペクトルの加成性について検討したところ、計算上の果汁モデルスペクトルと果汁モデルの実スペクトルには良い一致が認められた [31]。そこで、糖類による主たる吸収ピークがなく、クエン酸に特徴的なピークが認められる 1722 cm^{-1} においてクエン酸の検量線を作成し、みかん果汁スペクトルからクエン酸濃度を算出して、酸度測定より得られたみかん果汁の酸度から求めたクエン酸濃度と比較した (Fig. 10) [31]。この図より、計算値と実測値が良く一致し、中赤外分光法を用いたクエン酸の定量は 1722 cm^{-1} 近傍で可能であることが判明した。

Fig. 10 Comparison of calculated content of citric acid in orange juice with actual one.

5. 懸濁細胞の糖代謝計測

発酵を利用した製品製造は、食品分野に限らず様々な分野で行われており、発酵停止のタイミング、もしくは発酵過程のモニタリングは重要な課題である。食品分野に関連する主な研究としてアルコール発酵と乳酸発酵である。アルコール発酵では、キー物質としてグルコース、フルクトース、グリセロール、エタノールが用いられ、赤外分光スペクトルを用いたこれらの

成分の連続計測が研究されている [32, 33].

5.1 ヨーグルト発酵過程のモニタリング

ヨーグルトスタータとして用いられる乳酸菌は、ラクトースを炭素源として発酵して乳酸を生成し、乳酸の解離した水素イオンがタンパク質の等電点まで pH を低下させてタンパク質を凝固させる。通常の中和滴定法による乳酸酸度測定は、測定者による誤差が大きく、また測定時間を有するためタイムリな発酵の制御は困難である。そこで、ラクトーススペクトルの吸光度の減少から乳酸酸度を求めることにより、乳酸発酵過程のモニタリングを目指し、とくにヨーグルトスタータの接種量と培地濃度を変えて培養したときの結果について説明する。Fig. 11 はヨーグルト発酵過程におけるヨーグルト中のラクトーススペクトルであり [34], 発酵中にラクトースが消費されてゆく挙動がわかる。また、培地濃度を 12% で固定し、スタータの接種濃度を 1%, 3%, 5% の条件下でヨーグルト発酵させたときの吸光度と滴定酸度との関係を検討したところ、ラクトーススペクトルの 1075 cm^{-1} における吸光度と滴定酸度に関する検量線は非常に高い直線性を示し、スタータの接種濃度に依存しないことが示された [34]。一方、ヨーグルト発酵の際に生じるタンパク質変性の様子を Fig. 12 に示した [34]。ヨーグルトが固まりはじめる前後 (3 ~ 4 h) でのタンパク質の変化がよくわかる。

5.2 植物細胞の糖代謝解析

懸濁細胞の生命活動は、外界に存在する培地情報だけではなく、他の細胞の存在状態に関する情報を入手し、培地から能動的に物質を取り込みつつ営まれる。このような細胞の活動の場である培地の成分濃度計測では、培養の初期状態として存在する成分以外の成分が細胞によって創り出されることが多い。このような状況での培地内部の成分変化計測に関して、FR-IR/

ATR 法を適応した例 [35, 36] を以下に示す。

懸濁植物細胞としてイネ細胞、培地としてショ糖が主成分の R2S 培地を用いた。この実験系では、イネ細胞から分泌されるインベルターゼなどの酵素によって培地中のスクロースがグルコースとフルクトースに分解されることが知られている。Fig. 13 に培養過程での培地のスペクトル変化を示すが [36], 8 日後のスペクトルパターンはスクロースのパターンと異なり、グルコースとフルクトース混合物のスペクトルパターンに酷似していることが確認された。また、12 日後には 1045 cm^{-1} 付近にエタノール生成に起因すると考えられるシャープな吸収ピークが認められた。そこで、このスペクトルがスクロース、グルコース、フルクトース、エタノールの 4 成分からなるとの仮定で計算した各糖濃度、および従来法として HPLC を用いて求めた各糖濃度の経時変化を Fig. 14 に示す [36]。両者の経時変化は定性的・定量的に類似しており、FT-IR/ATR 法が植物細胞培養過程の糖代謝計測に有効な手段であることがわかる [35, 36]。さらに、このような手法を援用し、

Fig. 12 Time behavior of IR spectra of protein in yogurt fermentation medium.

Fig. 11 Time behavior of IR spectra of lactose in yogurt fermentation medium.

Fig. 13 Time behavior of IR spectra of culture medium component during sucrose cultivation of rice cells.

懸濁植物細胞の動的糖代謝解析が可能であることが示されている [37-39].

Fig. 14 Time courses of sugar content, ethanol content, and dry cell weight during sucrose cultivation of rice cells.

6. イオン解離性物質が関与する酵素反応モニタリング

代謝関連物質のなかには、解糖系やペントースリン酸回路における糖リン酸、TCA 回路における有機酸、エネルギー代謝物質としてのアデノシンリン酸などイオン解離性物質が数多く存在している。イオン解離性物質の赤外分光スペクトルは pH によって顕著に変化するため [40, 41], これら代謝系の酵素反応などを赤外分光法によって測定する際には、その赤外分光スペクトルの pH 依存性に関する情報が重要である。ここではエネルギー代謝全般に関わるアデノシンリン酸、および解糖系の初期の反応に関わるグルコース-6-リン酸 (G6P)、フルクトース-6-リン酸 (F6P) を対象とし pH 依存性を考慮した赤外分光特性について説明する。

6.1 イオン解離成分のスペクトル

Fig. 15 は G6P の赤外分光スペクトルに及ぼす pH の影響である [40]。吸光度スペクトルが pH の変化に対して連続的に変化し、主要なピークが顕著に消長する様子が示されている。そこで、解離によって生じた各イオン種の吸光度スペクトルは pH によらず一定であること、各イオン種のスペクトルの加成性が成り立つことを仮定し、吸光度と各イオン種の濃度との関係に対して重線形回帰を行うことにより各イオン種の吸光度スペクトルを抽出した。Fig. 16 は ATP, ADP, AMP についてそれぞれ弱酸性域で支配的となるイオン種のスペクトルを示したものである [40]。リン酸基が多い程スペクトルは複雑化していき吸光度も大きくなっている。とくに $1050 \sim 1150 \text{ cm}^{-1}$ 付近のピークはリン酸基の数に対応して増していくことがわかる。このように、解離性物質の分光スペクトルの pH 依存性を解離平衡の理論を用いて解析することにより、各イオン

種の赤外分光スペクトルを抽出することができ、そこから代謝関連物質の赤外分光特性に関する詳細な情報を得る可能性が示唆された。

Fig. 15 pH dependency of molar absorbance spectra of G6P.

Fig. 16 Comparison of the spectra of ATP^{3-} , ADP^{2-} , and AMP^- , whose abundances are the greatest in the pH range from 4 to 6.

6.2 酵素反応過程の連続モニタリング

様々なイオン解離性代謝物質が代謝反応に関与し、極めて重要な役割を果たしている。そこで、6.1 で述べた手法により得られる各解離成分のスペクトルの加成性に基づき、各解離成分の吸収波数における 2 次微分値を用いて、G6P-F6P-Tris 溶液中の各解離成分濃度の線形重回帰分析を試みた。そして、pH の緩衝成分である Tris の解離成分比から解離平衡を仮定して pH を推定し、さらにその pH に基づいて G6P, F6P, Tris 濃度を求めた [42, 43]。その結果、pH と各成分濃度に関する調製値と推定値の相関係数はすべて 0.995 以上であった (Fig. 17) [42]。

さらに、リアルタイム赤外分光計測法を援用することにより、イオン解離性の酵素反応過程の連続モニタリングを試みた。その際、解糖系の入り口にあたる部分の反応に着目し、G6P から F6P への異性化反応を対

Fig. 17 Comparison of calculated value and actual value: (a) pH value, (b) Tris concentration, (c) G6P concentration, (d) F6P concentration.

象とした。また、酵素には好熱性細菌由来のグルコース-6-リン酸イソメラーゼを用い、溶媒には 100 mM の Tris-HCl 緩衝液を使用した。酵素反応連続モニタリングシステム [44] を用い、酵素反応の設定温度 (40℃) でスペクトルを測定し、そのスペクトル情報に基づいて G6P-F6P-Tris 混合溶液の定量を試みた。その際、解離定数 pK 値の温度依存性を考慮することで、選択された吸収波数ごとに混合溶液の吸光度二次微分と各イオン解離成分の吸光度二次微分との関係に対して線形重回帰を行い、40℃における G6P-F6P-Tris 混合溶液の pH と各成分濃度を求めた。Fig. 18 は、酵素反応過程における各成分濃度と pH を求めた結果である [44]。定量した G6P および F6P 濃度の経時変化は、理論計算結果とほぼ一致した。また、赤外分光スペクトル情報から推定した pH 値は反応中ほぼ一定であった。つまり、赤外分光法を援用することにより、イオン解離性物質が関与する酵素反応液中の成分変化および pH 値のリアルタイムモニタリングが可能となった。これらの結果は、複数の解糖系酵素反応を連続・並列反応に進行させた場合の反応動力学パラメータの取得、およびそれら反応動力学パラメータの再構築の可能性を示唆したもののといえる。

Fig. 18 Time courses of metabolite concentration and pH value during enzyme reaction: (a) G6P concentration, (b) F6P concentration, (c) Tris concentration and pH value.

7. 赤外分光法を援用した味覚関連情報の抽出

味覚に影響を与える要因として食品中の化学成分があり、化学成分を客観的に評価することが、安定した食品の味覚評価、生産、および供給につながる。そこで、複数成分の同時計測、定性、および定量の可能性を有し、成分の相互作用を把握できる赤外分光法が注目されている。ここでは、代表的な嗜好飲料としてコーヒーに着目し、各主要成分の赤外分光特性を把握するとともに、ワインの銘柄の識別の可能性などに関して概説する。

7.1 コーヒーの赤外分光特性

コーヒー（サントス）抽出液の二次微分スペクトルに及ぼす加水比の影響を検討したところ、特徴的なピークが 1385, 1286, 1242, 1213, 1190, 1151, 1122 cm^{-1} 付近に確認できた [45]。そして、それぞれのピークにおける二次微分値とコーヒー濃度の指標である Brix との間に高い相関が得られたので、これは抽出液中の成分のピークであるものと考えられた。また、加水比を 25 g/150 g とし、コーヒー抽出液の二次微分スペクトルに及ぼす原産地の影響を検討した (Fig. 19) [45]。1385 cm^{-1} でサントス、インドネシア①、インドネシア②、1369, 1286, 1242 cm^{-1} でインドネシア①、インドネシア②、1292, 1190, 1151 cm^{-1} でインドネシア②の識別ができた。つまり、焙煎度、品種が異なるものは識別でき、アラビカ種の中ではサントスの識別が可能と考えられた。

一方、コーヒー主要成分として、コーヒー抽出液中の含有量が多くかつ味覚に影響を与えるカフェイン、トリゴネリン、クロロゲン酸、クエン酸、キナ酸およびアラビノガラクトンに着目し、様々な濃度および pH

の各水溶液の赤外分光スペクトルを測定した。その結果、コーヒー抽出液の主要 6 成分は、濃度と赤外分光スペクトルの吸光度の二次微分値との間に高い相関が認められた [46]。また、pH の変化による赤外分光スペクトルへの影響は、カフェイン、アラビノガラクトンには認められなかったが、解離性成分であるクロロゲン酸、クエン酸、キナ酸、およびトリゴネリンについては、その影響が認められた [46]。解離性を有する 4 成分については、赤外分光スペクトルの pH 依存性を解離平衡の理論を用いて解析することにより各イオン種のスペクトルの抽出を行い、実際のコーヒー抽出液スペクトルと pH 依存性を考慮した主要 6 成分の合成スペクトルと比較した結果、特徴的な波数において、類似性が認められた [46]。

7.2 「健康・食品アドバイザーロボット」の開発

より人間に近づこうとするロボットの研究開発の中では、人間の五感をセンサに置き換える試みが積極的に行われているが、「嗅覚」と「味覚」については、その研究開発が遅れているとされてきた。そこで、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて、NEC システムテクノロジー株式会社と三重大学が共同で、赤外線センサを用いた味見のできるロボット「健康・食品アドバイザーロボット」を開発した。これは、人間の舌の役割をする「赤外線センサ」を NEC のパートナーロボット PaPeRo [47] に装着し、食品や飲物をこのセンサで測定することにより、含まれている成分の種類や量を推定し、味見や食品についてのアドバイスなどを可能にした [48, 49]。Fig. 20 に示すように、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、赤外線センサに食品や飲物をかざして赤外線を照射して食品の脂肪分や糖分を測定できる [48]。また、それらの成分の有無や含有量による食品名の推定 (ワインの銘柄識別 [50] やチーズの種類判定 [48])、および推定した食品情報や含有成分と健康に関する情報の提供が行なうことが可能となる [49]。さらに、時間経過や温度変化に伴う測定では、スペクトルに変化が生じることがあり、このような現象を解析することにより、例えば、劣化食品や食べ頃を検出することができるセンサ開発、添加物検知やトレーサビリティなどへの展開が期待される。

8. おわりに

上述のように、赤外線乾燥および赤外線照射による殺菌効果に及ぼす試料の赤外分光特性の重要性は実験的に示され、赤外域における拡散分光情報が赤外線乾燥機構の解析に有効と考えられる。そこで、主要な食

Fig. 19 Influences of varieties, geographical origins and roasting degree of coffee beans on IR spectral characteristics of brewed coffee.

Fig. 20 Appearance and analytical structure of the tasting robot.

品成分の解析に加え、構造を有する食品そのものの赤外分光スペクトルの直接取得も期待される。一方、FT-IR と非常に多彩なアクセサリの登場で、さまざまな赤外分光スペクトルが取得できるようになっており、光音響法、顕微 ATR 法、ファイバ ATR 法、ラマン分光法、偏光子を用いたスペクトルなど興味深い話題は非常に多い。そのなかで、本稿では、ATR 法による糖類の赤外分光を起点として、食品加工などの分野への赤外分光法の様々な応用例を示した。食品の主要成分のひとつであるタンパク質などに関する振動分光研究は古くから行われ、近赤外分光、ラマン分光 [51] を含めて新たな展開をみせている。さらに、光波と電波の境界（束縛並進レベルでの分子振動に基づく遠赤外とミリ波の間）にあり、技術的に立ち後れていたテラヘルツ帯（300 GHz ～ 10 THz、波長に換算すると 30 ～ 1000 μm ）では、近年ブレイクスルーとなりそうな装置が開発されたこともあり、この周波数帯の電磁波の特徴をいかした分光、イメージング、各種検査、そして食品、バイオ、医学への応用など THz 領域の研究が活発になってきている [52]。

謝 辞 本稿で述べた研究は、大学院生時代から現在に至るまで続けている研究テーマである。東京農工大学名誉教授・清水賢先生、三重大学副学長・亀岡孝治先生をはじめ多くの先生方からは研究の方向性から解析方法に至るまでご教示いただき、また多くの先輩・後輩諸氏や優秀な院生・卒論生などとともに本研究に関わる機会を得、本賞を受賞する榮譽に浴したことを深く感謝いたします。

引用文献

- [1] N. J. Harrick; "Internal Reflection Spectroscopy", Harrick Scientific Corporation. 1967.
- [2] F. M. Mirabella, N. J. Harrick; "Internal Reflection Spectroscopy: Review and Supplement", Harrick Scientific Corporation. 1985.
- [3] 橋本篤, 高橋誠, 本多太次郎, 清水賢, 渡辺敦夫, 柴田行男; サツマイモの充填層加熱におけるマルトースの生成量と伝熱機構. 化学工学論文集, **17**, 634-638 (1991).
- [4] J. Sawai, T. Nakai, A. Hashimoto, M. Shimizu; A Comparison of the Hydrolysis of Sweet Potato Starch with β -Amylase and Infrared Radiation Allows Prediction of Reducing Sugar Production. Int. J. Food Sci. Technol., **39**, 967-974 (2004).
- [5] 橋本篤, 高橋誠, 本多太次郎, 清水賢, 渡辺敦夫; サツマイモ内における赤外線エネルギーの浸透性. 日本食品工業学会誌, **37**, 887-893 (1990).
- [6] A. Hashimoto, T. Kameoka; Penetration of Infrared Radiation within a Vegetable Model. Food Sci. Technol. Int. Tokyo, **3**, 373-378 (1997).
- [7] 日本工業標準調査会; 遠赤外線用語, JIS Z 8117 (2002).
- [8] A. Hashimoto, K. Hirota, T. Honda, M. Shimizu, A. Watanabe; Factors Influencing Constant Drying Rate of Wet Granular Bed Irradiated by Infrared Radiation. J. Chem. Eng. Japan, **24**, 748-755 (1991).
- [9] A. Hashimoto, Y. Yamazaki, M. Shimizu, S. Oshita; Drying Characteristics of Gelatinous Materials Irradiated by Infrared Radiation. Drying Technol., **12**, 1029-1052 (1994).
- [10] A. Hashimoto, T. Kameoka, M. Nitta; Infrared Drying Characteristics of Wet Porous Materials, Food Sci. Technol. Int. Tokyo, **3**, 294-299 (1997).
- [11] A. Hashimoto, T. Kameoka; Effect of Infrared Irradiation on Drying Characteristics of Wet Porous Materials. Drying Technol., **17**, 1613-1626 (1999).
- [12] A. Hashimoto, S. Stenström, T. Kameoka; Simulation of Convective Drying of Wet Porous Materials. Drying Technol., **21**, 1411-1431 (2003).
- [13] A. Hashimoto, T. Kameoka; Prediction of Water Sorption in Vegetables by a Modified Dubinin-Astakhov Equation.

- Food Sci. Technol. Int. Tokyo, **4**, 227-229 (1998).
- [14] A. Hashimoto, K. Nakanishi, T. Kameoka; Water Sorption Analysis on Vegetables Using Modified Dubinin-Astakhov Parameters. *Drying Technol.*, **22**, 225-236 (2004).
- [15] 橋本篤, 清水賢, 五十嵐英夫; 生理的リン酸緩衝液中に浮遊する細菌の殺菌に及ぼす遠赤外線の影響. *化工論文集*, **17**, 627-633 (1991).
- [16] A. Hashimoto, H. Igarashi, M. Shimizu; Far-Infrared Irradiation Effect on Pasteurization of Bacteria on or within Wet-Solid Medium. *J. Chem. Eng. Japan*, **25**, 666-671 (1992).
- [17] A. Hashimoto, J. Sawai, H. Igarashi, M. Shimizu; Effect of Far-Infrared Irradiation on Pasteurization of Bacteria Suspended in Liquid Medium below Lethal Temperature. *J. Chem. Eng. Japan*, **25**, 275-281 (1992).
- [18] A. Hashimoto, J. Sawai, H. Igarashi, M. Shimizu; Irradiation Power Effect on IR Pasteurization below Lethal Temperature of Bacteria. *J. Chem. Eng. Japan*, **26**, 331-333 (1993).
- [19] J. Sawai, K. Sagara, H. Igarashi, A. Hashimoto, T. Kokugan, M. Shimizu; Injury in *Escherichia coli* in Physiological Phosphate-Buffered Saline Induced by Far-Infrared Irradiation. *J. Chem. Eng. Japan*, **28**, 294-299 (1995).
- [20] J. Sawai, K. Sagara, S. Kasai, H. Igarashi, A. Hashimoto, T. Kokugan, M. Shimizu, H. Kojima; Far-Infrared Irradiation-induced Injuries to *Escherichia coli* at Below the Lethal Temperature. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, **24**, 19-24 (2000).
- [21] J. Sawai, K. Sagara, A. Hashimoto, M. Shimizu; Inactivation of Enzymes and Bacteria by Far-Infrared Radiative Heating. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **38**, 661-667 (2003).
- [22] J. Sawai, M. Fujisawa, T. Kokugan, M. Shimizu, H. Igarashi, A. Hashimoto, H. Kojima; Pasteurization of Bacterial Spores in Liquid Medium by Far-Infrared Irradiation. *J. Chem. Eng. Japan*, **30**, 170-172 (1997).
- [23] J. Sawai, K. Sagara, M. Miyagawa, T. Kokugan, M. Shimizu, H. Igarashi, A. Hashimoto, H. Kojima; Injuries in Exponential Phase Cells of *Escherichia coli* Suspended in Physiological Phosphate Buffered Saline by Far-Infrared Irradiation. *J. Chem. Eng. Japan*, **30**, 669-676 (1997).
- [24] 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**, 192-198 (1998).
- [25] 狩野幹人, 中西健一, 橋本篤, 亀岡孝治; 溶媒効果を考慮した二糖類の赤外分光解析. *日本食品科学工学会誌*, **50**, 57-62 (2003).
- [26] M. Kanou, K. Nakanishi, A. Hashimoto, T. Kameoka; Influences of Monosaccharides and Its Glycosidic Linkage on Infrared Spectral Characteristics of Disaccharides in Aqueous Solutions. *Appl. Spectrosc.*, **59**, 885-892 (2005).
- [27] 狩野幹人, 橋本篤, 椎木靖彦, 伊藤健介, 元永佳孝, 亀岡孝治; FT-IR/ATR法によるマルトオリゴ糖の重合度推定. *日本食品科学工学会誌*, **48**, 401-408 (2001).
- [28] M. Kanou, A. Yamanaka, A. Hashimoto, T. Kameoka; Infrared Spectroscopic Analysis of Saccharides in Aqueous Solutions with Alkaline Metal Salts. *Proceedings of 10th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Conference (CD-ROM version)*, 3P-01-056 (2004).
- [29] 亀岡孝治, 奥田知晴, 橋本篤, 野呂明美, 椎木靖彦, 伊藤健介; 食品糖成分分析へのFT-IR/ATR法の応用. *日本食品科学工学会誌*, **45**, 199-204 (1998).
- [30] ウィン ウィン ミィ, 元永佳孝, 橋本篤, 亀岡孝治; 貯蔵トマトの呼吸特性(第1報) - 実験用貯蔵装置の試作と大気圧下での貯蔵特性 - . *農業機械学会誌*, **63**, 73-80 (2001).
- [31] A. Hashimoto, S. Takada, Y. Motonaga, K. Nakanishi, T. Kameoka; Spectroscopic Determination of Acid and Sugar Content in Fruit Juice. In "Control Applications in Post-Harvest and Processing Technology 2001", Elsevier Science Ltd., Oxford, 2002, pp.209-214.
- [32] J. C. Alberti, J. A. Phillips, D. J. Fink, F. M. Wacasz; Off-Line Monitoring of Fermentation Samples by FTIR/ATR: A Feasibility Study for Real-Time Process Control. *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, **15**, 689-722 (1985).
- [33] P. Fayolle, D. Picque, B. Perret, E. Latrille, G. Corrieu; Determination of Major Compounds Alcoholic Fermentation by Middle-Infrared Spectroscopy: Study of Temperature Effects and Calibration Method. *Appl. Spectrosc.*, 1325-1330 (1996).
- [34] A. Hashimoto, T. Kameoka, Y. Shiinoki, K. Ito; Mid-Infrared Spectroscopic Determination of Sugar Contents in Culture Media. In "Computer Applications in Biotechnology 1998", Elsevier Science Ltd., Oxford, 1998, pp.411-416.
- [35] A. Hashimoto, T. Kameoka; Mid-Infrared Spectroscopic Determination of Sugar Contents in Plant-Cell Culture Media Using an ATR Method. *Appl. Spectrosc.*, **54**, 1005-1011 (2000).
- [36] A. Hashimoto, A. Yamanaka, M. Kanou, K. Nakanishi, T. Kameoka; Simple and Rapid Determination of Metabolite Content in Plant Cell Culture Medium Using an FT-IR/ATR Method. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, **27**, 115-123 (2005).

- [37] A. Hashimoto, K. Nakanishi, Y. Motonaga, T. Kameoka; Sugar Metabolic Analysis of Suspensions of Plant Cells Using an FT-IR/ATR Method. *Biotechnol. Prog.*, **17**, 560-564 (2001).
- [38] A. Hashimoto, A. Yamanaka, M. Kanou, F. Nahar, T. Kameoka; Effects of Pre-Cultivation on Sugar Metabolic Kinetics of Suspension Plant Cells Measured by Mid-Infrared Spectroscopy. *J. Food Agric. Environ.*, **1**, 168-175 (2003).
- [39] A. Yamanaka, A. Hashimoto, M. Kanou, T. Kameoka; MIR Spectroscopic Analysis on Sugar Metabolic and Ethanol Productive Kinetics of Suspension TBV-2 and Rice Cells Pre-Cultured in Various Media. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, **27**, 125-133 (2005).
- [40] K. Nakanishi, A. Hashimoto, M. Kanou, T. Pan, T. Kameoka; Mid-Infrared Spectroscopic Measurement of Ionic Dissociative Materials in Metabolic Pathway. *Appl. Spectrosc.*, **57**, 1510-1516 (2003).
- [41] A. Hashimoto, K. Asada, T. Matsuo, C. Teraura, T. Yamamura, K. Yasui, A. Yamanaka, M. Kanou, T. Kameoka; Mid-Infrared Spectroscopic Characteristics of Glycine in Aqueous Solution. *Proceedings of 7th Asia-Pacific Conference of Biochemical Engineering (CD-ROM version)*, CUR-06 (2005).
- [42] T. Pan, A. Hashimoto, M. Kanou, K. Nakanishi, T. Kameoka; Development of a Quantification System of Ionic Dissociative Materials in the Glycolytic Pathway Using an FT-IR/ATR Method. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, **26**, 133-139 (2003).
- [43] T. Pan, A. Hashimoto, M. Kanou, K. Nakanishi, T. Kameoka; Mid-Infrared Spectroscopic Quantification of Ionic Dissociative Metabolites Based on Three Spectral Extraction Methods. *Japan J. Food Eng.*, **5**, 23-31 (2004).
- [44] A. Hashimoto, T. Pan, M. Kanou, K. Nakanishi, T. Kameoka; Mid-Infrared Spectroscopic Monitoring of Enzyme Reaction Associating with Ionic Dissociative Metabolites. In "Computer Applications in Biotechnology 2004", Elsevier Science Ltd., Oxford, 2005, pp.375-380.
- [45] A. Hashimoto, H. Mori, M. Kanou, A. Yamanaka, T. Kameoka; Mid-Infrared Spectroscopic Analysis on Brewed Coffee Characteristics. *Proceedings of 10th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Conference (CD-ROM version)*, 3P-01-068 (2004).
- [46] 森久典, 橋本篤, 東原誠, 木村良太郎, 亀岡孝治; コーヒー抽出液主要成分の赤外分光解析. 日本食品科学工学会第50回大会講演要旨集 (2003) .
- [47] Y. Fujita; Personal Robot PaPeRo. *J. Robotics Mechatronics*, **14**, 60-63 (2002).
- [48] H. Shimazu, K. Kobayashi, A. Hashimoto, T. Kameoka; Tasting Robot: a Personal Robot with an Optical-Tongue. *Proceedings of ISR2005* (2005).
- [49] 島津秀雄, 橋本篤; 味見ができるロボットの開発. 「超五感センサの開発最前線」, エヌ・ティー・エス, 東京, pp.465-474 (2005).
- [50] A. Hashimoto, M. Kanou, A. Yamanaka, T. Kameoka, K. Kobayashi, H. Shimazu; Mid-Infrared Spectroscopic Analysis for Characterizing Wines. *Abstracts of 3rd International Conference of Vibrational Spectroscopy*, P11.14 (2005).
- [51] 海野雅司, 山内清語; ラマン分光法と量子化学計算による光受容タンパク質の動的構造の解析. *生物物理*, **43**, 58-63 (2003).
- [52] 川瀬晃道, 伊藤弘昌; テラフォトリクス光源一波長可変THz波の発生と応用可能性一. *応用物理*, **71**, 167-172 (2002).

要 旨

食品加工プロセスにおける赤外線利用に関して、放射伝熱学と分光学的な側面から総合的に論述した。赤外線の熱的操作への応用として、食品モデルの乾燥と殺菌に関する研究を行った。食品モデルの赤外線乾燥特性に及ぼす因子に着目し、赤外線乾燥の定量的評価には試料の赤外域における拡散分光情報の理解が重要であることが示された。また、細菌の赤外線殺菌は従来法加熱殺菌よりも効果的であり、その効果は試料表面近傍における赤外線エネルギーの吸収とバルク温度に起因することが示唆された。そこで、赤外分光法による食品の定性・定量解析に関する研究を行った。それらの成果に応用することにより、懸濁細胞の動的糖代謝挙動の把握、イオン解離性代謝物質が関与する酵素反応過程のモニタリング、および食味ロボットの開発が可能となった。以上より、これらの研究成果は、食品加工プロセスにおける赤外線利用に関する重要な指針となりうるものである。