

식품가공 공정에서의 원적외선 이용 기술

미에(三重)대학대학원 생물자원학연구과

자원환경학전공 생물정보공학연구실

하시모토 아츠시

E-mail hasimoto@bio mie-u.ac.jp

1. 머리말

식품가공 공정에서의 적외선의 이용은 열에너지원으로서 이용과 성분을 감지하는데 (sensing) 대표되는 분광분석방법으로 크게 구별된다 앞서 논한 대표적인 열적 조작으로서는 건조나 살균을 예로 들 수 있다 적외선건조는 다양한 분야에서 넓게 이용되지만 식품분야에서도 그 전열효율이 좋고 제품이 마무리가 잘 되어 맛 등이 우수하다는 이유에서 많이 사용하고 있다. 한편 적외분광분석은 각종 관능기(官能基, 유기화합물을 동족으로서 특징짓는 원자단)의 기본진동의 정보 등 팽대한 이론적 기초가 존재하고 해석도 관능기의 귀속파수대(帰屬波数帯)만을 가지고 단회귀로 충분한 것이 많다고 하는 특징을 가지고 있다

본고에서는 적외선을 이용한 열적조작과 시료의 적외분광특성과의 관계, 살균효과 및 식품가공프로세스에 관련한 적외분광분석에 관한 기초적 연구성과^{1, 2)}에 대해 소개한다

2. 적외선의 분류

먼저 “ 원적외선”에 대해 정리한다 일반적으로 파장이 긴 적외선을 원적외선이라고 부른다 적외선은 굉장히 넓은 분야에 걸쳐 이용되며 각각의 이용분야 따라 부르는 명칭이 다르므로, 이용목적에 따라 적외선의 분류가 다르다는 것을 이해 해 두지 않으면 안된다 그림1에 각 이용분야에 대한 적외선의 분류를 나타낸다 예를 들어

적외선건조에서는 적외선을 열원으로 이용하지만 적외선방사체에서 방출되는 방사에너지분포나 건조시료의 적외흡수특성의 측정에 있어서는 적외선분광기를 이용한다 결국 적외선건조에 관해 논할 경우, 특히 분광학과 열이용에 관해 분류의 차이에 주의 하지 않으면 안된다.

분광학의 분야에 있어서는 분자의 기준진동에 기초로한 파장대를 중적외선으로 이 파장대 보다도 단파장측을 근적외선, 장파장측을 원적외선이라고 한다 일반적으로 중적외선과 파수를 단위로 $4000\sim 400\text{cm}^{-1}$ 로 정의되며 파장은 $2.5\sim 25\mu\text{m}$ 에 대응한다 또 원적외선은 $400\sim 10\text{cm}^{-1}$ 이 되며, 파장은 $25\sim 1000\mu\text{m}$ 의 범위이다 중적외역에 나타난 관능기의 기준진동의 배음·결합음이 얻어진 근적외선은 파장이 사용되는 것이 많으나 파수도 이용된다 그런데 근년 다양한 분야에 있어서 테라헤르츠파(terahertz THz파)의 이용이 주목을 모으고 있다 테라헤르츠파와는 약 주파수가 $0.3\sim 10\text{THz}$ 파장이 $1000\sim 30\mu\text{m}$ 의 영역, 결국 빛과 전파의 중간에 있는 주파수 영역의 전자파이며, 그 정보와 물질이 유전분산(誘電分散), 격자진동, 분자의 골격진동, 비틀림 진동, 회전등 물질의 중요한 동적 움직임과 관계하고 있다

한편 열이용 분야에 있어서는 $3\mu\text{m}$ 보다도 단파장역을 근적외선, 반대로 $3\mu\text{m}$ 보다도 긴파장역을 원적외선이라고 한다³⁾ 이와 같이 열이용의 분야에 있어서는 파장을 단위로 이용하는 것이 일반적이다 건조조작으로는 적외선을 열원으로 가지는 것이 되므로, 주로 $3\mu\text{m}$ 보다도 긴파장의 영역의 원적외선조사(照射)에너지를 가지는 경우에 “ 원적외선건조” 가 된다

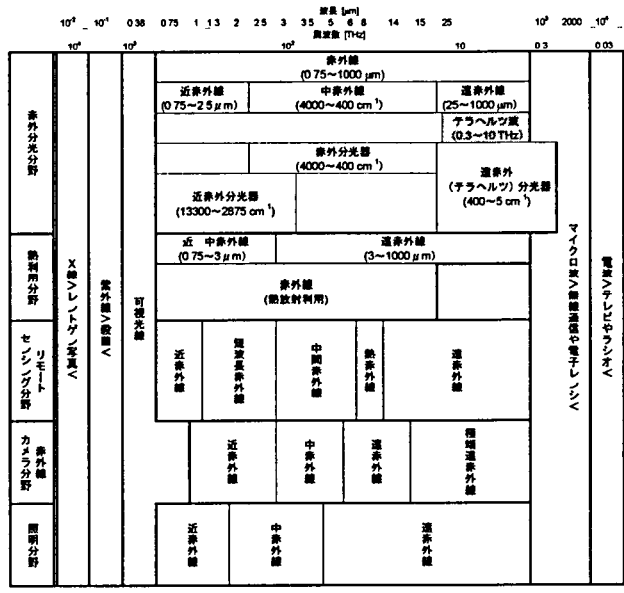


그림1 적외선의 분류

3. 적외선조사에 의한 식품모델의 건조

적외선건조의 특징을 파악하는 것을 목적으로 습윤다공질식품모델의 적외선 건조에 관한 연구를 했다 그때 피건조물에의한 적외선 에너지의 흡수를 물에의한 흡수와 고체성분에 의한 흡수로 나누어 고찰했다 그림 2는 증류수를 함침(含水)시킨 셀룰로오스 아세테이트(cellulose acetate) 타입의 멤브레인 필터(membrane filter)(시료1, 시료2, 시료3의 평균공기구멍(空孔)의 크기는 각각 3.94, 2.10, 0.74 μm)를 16장 겹쳐서 다공질식품 모델의 원적외선건조특성이다⁴⁾ 항율(恒率)건조속도에 관해서는 평균공기공경(空孔径)에 따라 현저한 차이는 확인할 수 없지만 항률건조기간후에 건조속도 저하에 현저한 차이가 인정된다.

가장 평균공기구멍(空孔)이 큰시료 1의 건조속도는 항률건조기간후 가장 고함수율로 건조속도가 저하하기 시작하였고, 시료 2의 건조속도는 항율건조

기간후 가장 저함수율로 건조속도가 저하하기 시작했다. 공극체적(空隙體積)기준함수율이 약 0.5~0.2까지의 기간에서는 건조속도가 거의 일정하게 볼 수 있고, 그 후 함수율이 0까지 건조가 진행했다 이 결과는 피건조물의 적외선 흡수특성에 미치는 건조과정에 있어서 피건조물의 수분변화 및 기하학적 구조변화의 영향은 적외선건조기구의 해명이 중요하다는 것을 실험적으로 나타내고 있다

건조시료는 셀룰로오스 아세테이트(cellulose acetate)와 물로 구성되어 있으며, 또 멤브레인 필터(membrane filter)의 공극률(空隙率)은 0.66~0.78의 범위이다 결국 평균공기구멍(空孔徑)의 크기가 다르면 건조시료표면근방이나 내부에 있는 적외선의 산란이나 미광 등에 따라 건조시료 표면의 적외흡수특성에 차이가 생겨서, 그림2와 같이 결과가 얻어진 것 같다 그러나 현시점에 있어서 습윤이 있는 복잡한 구조를 하고 건조시료의 적외흡수성을 이론적으로 해석하는 것은 극히 곤란하다 따라서 이러한 건조시료에 관해서는 적외분광 스펙트럼의 실측치를 가지고 건조특성을 해석하는 것이 유효하다고 생각된다 거기서 통풍건조기구의 시뮬레이션(simulation) 수법을 제시한 것에 더하여 그 적외선 건조특성을 검토한 바에 의하면 적외선 건조로 대단히 중요한 광학특성이 FT-IR와 확산분광법의 조합으로 얻어진다는 것을 알게 되었다^{5,6)} (그림3)

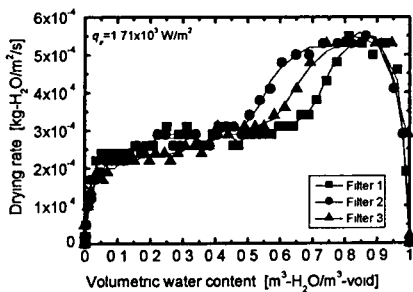


그림 2 원적외선건조특성에 미치는 시료의 기하학적구조의 영향

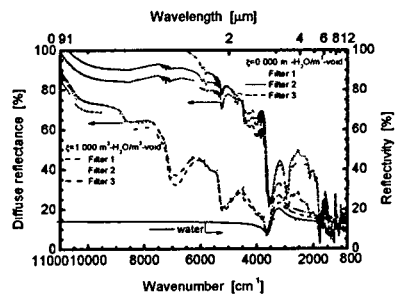


그림 3 건조시료의 적외분광특성에 미치는 기하학적구조의 영향

4. 적외선조사(照射)에 의한 살균효과

적외선조사(照射)에 의한 살균효과의 특징을 파악하는 것을 목적으로 원적외선조사 혹은 전도가열된 세균현탁액 벌크(bulk)온도의 경시(經時)변화의 차이를 무시할 수 있는 조건하에서 대장균의 살균결과를 비교했다(그림4)⁷⁾ 여기서 N_t 은 세균현탁액중의 생균수농도, N_0 은 그 초기치이며, N_t/N_0 은 생존율을 의미한다 그림4에서 나타난 것처럼 가열시간이 같으면 원적외선조사한 경우의 쪽이 전도가열한 경우보다도 생존율(生殘率)이 적어졌다 또 황색포도구균에 관해서도 같은 실험결과가 얻어져 원적외선조사에 의한 살균 쪽이 전도가열에 의한 살균보다도 효과적이라고 말하는 것을 알았다

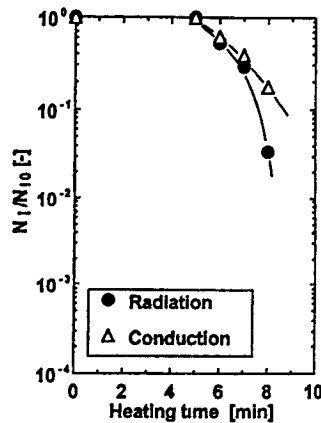


그림 4 원적외선살균효과와 전도가열에 의한 살균효과의 비교

다음은 항생제를 이용한 세균의 손상부의 새로운 검출방법을 제시하고, 적외선조사에 의해 일어난 손상은 전도가열에 의해 나타난 손상과 같은 경향이 있는 것으로 나타났다. 이것은 적외선조사된 세균은 열적 효과에 의해 스트레스를 받아 손상된 것으로 볼 수 있으나 원적외선조사는 전도가열보다도 살균에 관한 효과적인 전열 형태인 것을 시사하고 있다

5. 발효과정의 적외분광 모니터링(momitering)

발효를 이용한 제품제조는 식품분야뿐만 아니라 다양한 분야에서 사용된다 이 발효에 있어서 발효정지의 타이밍, 또는 발효과정의 모니터링은 중요한 과제이다 식품분야에 관련한 연구는 주로 알코올 발효와 유산균 발효이다 본문에서는 유산발효의 예로서 요구르트발효과정의 모니터링에 관한 연구를 소개한다^{13, 14)}

요구르트가 처음 만들어 질 때 사용되는 유산균은 락토스(lactose)를 탄소원으로 발효해 유산균을 만들고 유산의 해난(解離)한 수소이온이 단백질의 등전점까지 pH를 저하시켜서 단백질을 응고시킨다 통상은 중화적정법에 의한 유산산도를 측정해 이것에서 발효의 제어 등이 이루어진다 그러나 측정자에 의한 오차가 크고, 또 측정시간을 필요로 하기 때문에 적시에 발효의 제어는 곤란하며, 신뢰성이 높은 온라인 측정법이 바람직하다 그런까닭으로 락토스 스펙트럼(lactose spectrum)의 흡광도를 감소해서 유산도를 구하는 것으로부터 유산발효과정의 모니터링을 목적으로 하고, 특히, 요구르트가 처음 만들어질때의 접종량은 배자농도를 바꾸어 배양했을 때의 결과를 나타낸다 그림 5는 요구르트 발효과정에 있어서 요구르트종의 락토스 스펙트럼이며, 발효 중에 락토스가 소비되어 가는 것을 알 수 있다

또 그림 6에서 배자농도를 12%로 고정하고 처음 만들어질때의 접종농도를 1%, 3%, 5%의 조건하에 요구르트 발효시킬때 흡광도와 적정산도와의 관계를 나타냈다.¹⁴⁾ 락토스 스펙트럼(lactose spectrum)의 1075 cm^{-1} 에 대한 흡광도와 적정산도에 관한 검량선은 대단히 높은 직선성을 나타내고 있으며, 스타터의 접종농도에 의존하지 않는 것으로 나타났다 한편 요구르트 발효시에 발생하는 단백질 변성의 상태를 그림 7에 나타냈다¹³⁾ 요구르트가 굳어지기 시작하기 전후(3~4 h)에서의 단백질 변화를 알 수 있다

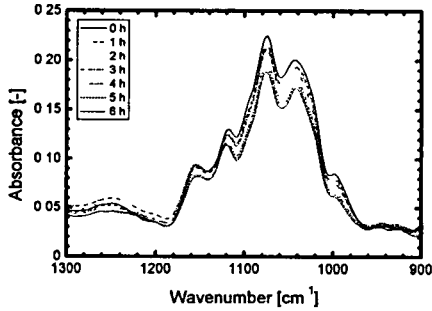


그림 5 요구르트발효과정에 있어서 배지중의 락토스의 적외스펙트럼

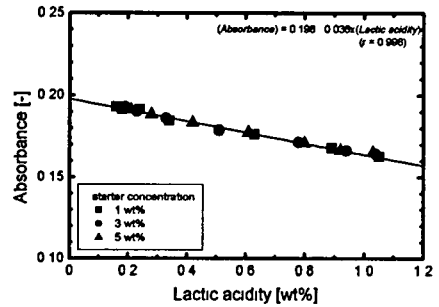


그림 6 요구르트 발효 배지의 유산산도와 락토스 스펙트럼의 흡광도와와의 관계

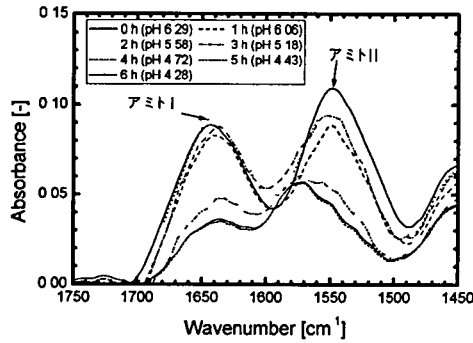


그림 7 요구르트발효과정에 있어서 배지중에 단백질의 적외스펙트럼

6. 적외분광법을 응용한 미각 관련정보의 추출

현재 다양한 로봇의 연구개발을 하고 있으며 보다 인간에 가깝고자 하는 로봇의 연구개발에서는 인간의 오감을 센스(sense)로 바꿀 수 있도록 실험하고 있다 그 중에서도, 「시각」 「청각」 「촉각」 은 일찍부터 물리센서의 개발이 진행되고 있으며, 인간의 감각을 초월한 감도의 것도 실용화 되어지고 있지만 「미각」 과 「후각」 에 대해서는 그 연구개발이 늦어지고 있다 그런 까닭으로 로봇의 「미각」 관련정보를 얻기 위해 센싱(sensing)방법으로써 적외분광법에 착목했다 미각에 영향을 주는 요인으로서는 식품중 화학성분이 있으며 화학성분을

객관적으로 평가하는 것이 식품의 미각관련 정보의 추출과 관련된다 결국 이러한 평가에는 복수성분의 동시계측, 정성(定性) 및 정량의 가능성이 있으며, 성분의 상호작용을 파악할 수 있는 적외분광법이 유효하다고 생각된다

미에(三重)대학과 NEC시스템테크놀러지(주)은 식품의 주요성분과 다양한 기호식품(알콜음료류, 커피음료, 아이스크림류, 치즈류 및 다(茶)류 등)의 적외분광특성을 파악함과 더불어 이것의 상품명을 식별 및 성분의 동시정량수법의 구축을 시험했다 또 이렇게 아는 바를 토대로 독립행정법인 신에너지· 산업기술 종합개발기구(NEDO)로 부터 위탁을 받은 것을 계기로 적외선 센서를 NEC의 파트너 로봇 PaPeRo¹⁵⁾에 장착한 「건강· 식품 어드바이스로봇」(통칭 「맛을 보는 로봇」)을 개발했다 (그림 8)^{2, 16-18)} 개발된 맛보는 로봇은 2005년도에 개발되어 아이지현(愛知縣)· 지구박람회 「프로트타입(시제품, prototype)· 로봇展」에서 시연되어 국내외 수백의 메스컴에 소개되었다.

그런데 상기의 기능을 가진 맛보는 로봇은 와인상품명을 판별하는 데 곤란했다. (1) 적외선스펙트럼의 취득방법의 개량, (2) 판별 알고리즘개량, (3) 기대획득 정보량에 기초한 와인선택질문기능의 추가를 실시함으로써, 와인의 맛을 보는 소믈리에(sommelier)로봇 (그 9)개발을 시행했다. 그 결과 와인상표명의 식별이 가능해 졌고, 인간 소믈리에처럼 손님의 기호에 맞추어 필요최소한의 질문을 하게되어, 확률적으로 최소의 질문수로 많은 와인중에서 1 개의 와인을 찾아내는 기능을 로봇에 탑재할 수 있게 되었다¹⁸⁾.

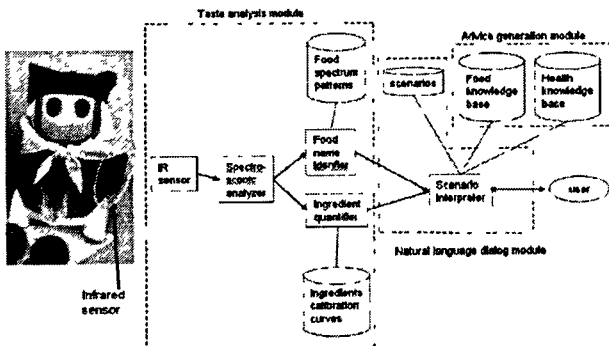


그림 8 맛보는 로봇의 사진과 내부구조의 개념도



그림 9 소믈리에 로봇 사진

7. 결 론

식품가공프로세스에 있어서 적외선의 이용은 열에너지원으로서 이용과, 성분센싱(sensing)으로 대표되는분광분석도구로서의 이용과 대체로 구별되지만, 적외선건조등의 열적조작의 발전은 시료가 되는 식품의 적외분광적 이해를 동반할 필요가 있다고 생각한다. 한편 FT-IR 과 대단히 다채로운 약세서리의 등장으로 다양한 적외분광스펙트럼이 취득 할 수 있게 되어, 흥미 있는 화제는 대단히 많다. 더욱이 개발한 맛보는 로봇· 소물리에 로봇은 금후 개량이 필요한 부분이 많으나 식품업계에 적용으로서는 원재료평가, 일본인을 위한 또는 특정 해외시장을 목적으로 하는 식품 맛의 설계지원, 식품생산라인에서 조기문제진단 등을 말할 수 있다

- 문 헌 -

- 1 하시모트아츠시(橋本篤), 가메오카다카하루(亀岡孝治) 식품의 적외분광 분석과 식품가공프로세스에 있어서 그 응용, 일본식품공학회지, 2, 11-22 (2001)
- 2 하시모트아츠시(橋本篤) 식품가공프로세스에 있어서 적외선이용기술의 개발, 일본식품공학회, 7, 61-73 (2006)
- 3 일본공업표준조사회 원적외선용어, JIS Z 8117 (2002)
- 4 Hashimoto, A , Kameoka, T , Nitta, M Infrared Drying Characteristics of Wet Porous Materials, Food Sci Technol Int Tokyo, 3, 294-299 (1997)
- 5 Hashimoto, A , Kameoka, T Effect of Infrared Irradiation on Drying Characteristics of Wet Porous Materials, Drying Technol , 17, 1613-1626 (1999)
- 6 Hashimoto, A , Stenstrom, S , Kameoka, T Simulation of Convective Drying of Wet Porous Materials, Drying Technol , 21, 1411-1431 (2003)
- 7 하시모트아츠시(橋本篤), 시미즈마사루(清水賢), 이가라시히데오(五十嵐英夫) 생리적 인산완충액속에 부유(浮遊)하는 세균의 살균에 미치는 원적외선의 영향, 화공논문집, 17, 627-633 (1991)

- 8 Hashimoto, A , Sawai, J , Igarashi, H , Shimizu, M Effect of Far-Infrared Irradiation on Pasteurization of Bacteria Suspended in Liquid Medium below Lethal Temperature, J Chem Eng Japan, 25, 275-281 (1992)
- 9 Hashimoto, A , Sawai, J , Igarashi, H , Shimizu, M Irradiation Power Effect on IR Pasteurization below Lethal Temperature of Bacteria, J Chem Eng Japan, 26, 331-333 (1993)
- 10 Sawai, J , Sagara, K , Igarashi, H , Hashimoto, A , Kokugan, T , Shimizu, M Injury in Escherichia coli in Physiological Phosphate-Buffered Saline Induced by Far-Infrared Irradiation, J Chem Eng Japan, 28, 294-299 (1995)
- 11 Sawai, J , Sagara, K , Kasai, S , Igarashi, H , Hashimoto, A , Kokugan, T , Shimizu, M , Kojima, H Far-Infrared Irradiation-induced Injuries to Escherichia coli at Below the Lethal Temperature, J Ind Microbiol Biotechnol , 24, 19-24 (2000)
- 12 Sawai, J , Sagara, K , Hashimoto, A , Shimizu, M Inactivation of Enzymes and Bacteria by Far-Infrared Radiative Heating, Int J Food Sci Technol , 38, 661-667 (2003)
- 13 가메오카다카하루(亀岡孝治) 식품의적외분광분석, 케미컬엔지니어링, 41, 435-441 (1996)
- 14 Hashimoto, A , Kameoka, T , Shinoki, Y , Ito, K Mid-Infrared Spectroscopic Determination of Sugar Contents in Culture Media, In " Computer Applications in Biotechnology 1998" , Elsevier Science Ltd , pp 411-416 (1998)
- 15 Fujita, Y Personal Robot PaPeRo, J Robotics Mechatronics, 14, 60-63 (2002)
- 16 Shimazu, H , Kobayashi, K , Hashimoto, A , Kameoka, T Tasting Robot a Personal Robot with an Optical-Tongue Proceedings of ISR2005 (2005)
- 17 시마즈히데오(島津秀雄), 하시모트아츠시(橋本篤) 맛을 볼 수 있는 로봇의 개발, 「초오감 센스의 개발 최전선」, NTS(エヌ・ティー・エス), pp 465-474 (2005)
- 18 하시모트아츠시(橋本篤), 가메오카다카하루(亀岡孝治), 카노우미키히토(狩野幹人), 미하라겐이치로(末原憲一郎), 시마즈히데오(島津秀雄), (고바야시카오리)小林香織 적외분광법을 이용한 맛보는 로봇의 개발, 제 22 회 근적외포럼강연요지집, pp 67-70 (2006)

食品加工プロセスにおける遠赤外線利用技術

三重大学大学院 生物資源学研究科
資源循環学専攻 生物情報工学研究室
橋本 篤
E-mail hasimoto@bio.mie-u.ac.jp

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。赤外線乾燥は、さまざまな分野で広く用いられているが、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く用いられている。一方、赤外分光分析は、各種官能基の基本振動の情報など膨大な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。

本稿では、赤外線を利用した熱的操作と試料の赤外分光特性との関係、殺菌効果、および食品加工プロセスに関連した赤外分光分析に関する基礎的研究成果^{1) 2)}について紹介する。

2. 赤外線の分類

まず、“遠赤外線”について整理する。一般に、波長が長い赤外線のことを遠赤外線と呼んでいる。赤外線は大変広い分野において利用されており、それぞれの利用分野において異なる呼び名を用いているので、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くてはならない。図1に各利用分野における赤外線の分類を示す。たとえば、赤外線乾燥では赤外線を熱源として利用するが、赤外線放射体から射出される放射エネルギー分布や乾燥試料の赤外吸収特性の測定においては、赤外分光器を用いる。つまり、赤外線乾燥に関して論じる場合、とくに分光学と熱利用における分類の差異に注意しないといけない。

分光学の分野においては、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、 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ と定義され、波長では $2.5\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 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 $25\sim 1000\text{ }\mu\text{m}$ 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。ところで、近年、様々な分野においてテラヘルツ波（THz波）の利用が注目を集めている。テラヘルツ波とは、おおよそ周波数が $0.3\sim 10\text{ THz}$ 、波長が $1000\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ の領域、つまり光と電波の間にある周波数領域の電磁波のことであり、おおむね分光学における遠赤外線の領域にあたり、その情報は物質の誘電分散、格子振動、分子の骨格振動、ねじれ振動、回転など、物質の重要な動的挙動と関係している。

一方、熱利用分野においては、 $3\text{ }\mu\text{m}$ よりも短波長域を近赤外線、逆に $3\text{ }\mu\text{m}$ よりも長波長域を遠赤外線とよんでいる³⁾。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。乾燥操作では、赤外線を熱源として用いることになるので、おもに $3\text{ }\mu\text{m}$ よりも長波長の領域の赤外線照射エネルギーを用いる場合に“遠赤外線乾燥”ということになる。

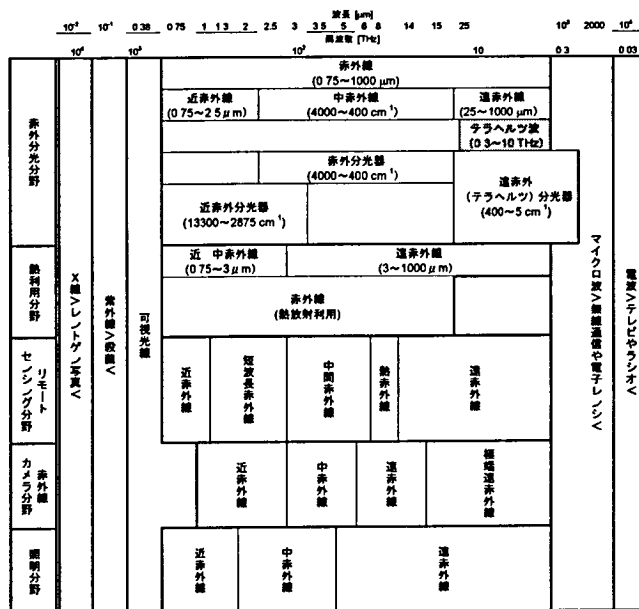


図1 赤外線の分類

3. 赤外線照射による食品モデルの乾燥

赤外線乾燥の特徴を把握することを目的とし、湿潤多孔質食品モデルの赤外線乾燥に関する研究をおこなった。その際、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た。図2は、蒸留水を含浸させたセルロースアセテートタイプのメンブランフィルター（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 μm）を16枚重ねた湿潤多孔質食品モデルの遠赤外線乾燥特性である⁴⁾。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る。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。空隙体積基準含水率がおおよそ0.5~0.2までの期間では、乾燥速度がほぼ一定とみなすことができ、その後、含水率が0まで乾燥が進行した。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は、赤外線乾燥機構の解明に重要であることを実験的に示している。

乾燥試料は、セルロースアセテートと水とから構成されており、またメンブランフィルターの空隙率は0.66~0.78の範囲である。つまり、平均空孔径が異なると、乾燥試料表面近傍や内部における赤外線の散乱や迷光などにより乾燥試料の見かけの赤外吸収特性に差異が生じ、図2に示したような結果が得られたものと考えられる。しかしながら現時点において、湿潤かつ複雑な構造を有する乾燥試料の赤外吸収特性を理論的に解析することは、極めて困難である。したがって、このような乾燥試料に関しては、赤外分光スペクトルの実測値を用いて乾燥特性を解析するのが有効と思われる。そこで、通風乾燥機構のシミュレーション手法を提示した上で、その赤外線乾燥特性を検討したところ、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がわかった^{5) 6)}（図3）。

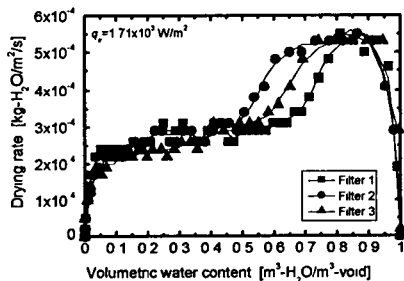


図2 遠赤外線乾燥特性に及ぼす試料の幾何学的構造の影響

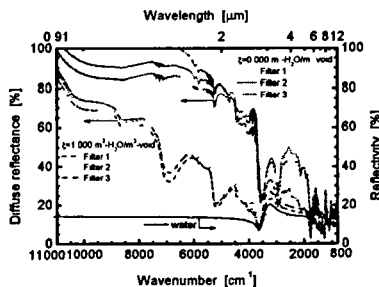


図3 乾燥試料の赤外分光特性に及ぼす幾何学的構造の影響

4. 赤外線照射による殺菌効果

赤外線照射による殺菌効果の特徴を把握することを目的とし、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、大腸菌の殺菌結果を比較した(図4)⁷⁾。ここで、 N_t は細菌懸濁液中の生菌数濃度、 N_0 はその初期値であり、 N_t/N_0 は生存率を意味する。図4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。また、黄色ブドウ球菌に関しても同様の実験結果が得られ、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ことがわかった。

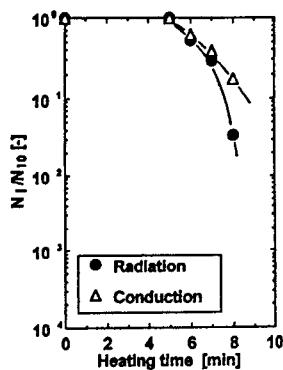


図4 遠赤外線殺菌効果と電動加熱による殺菌効果の比較

つぎに、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であることを示した⁸⁻¹²⁾。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ている。

5. 発酵過程の赤外分光モニタリング

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いる。これらの発酵において、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研究は主としてアルコール発酵と乳酸発酵である。ここでは、乳酸発酵の例としてヨーグルト発酵過程のモニタリングに関する研究を紹介する^{13 14)}。

ヨーグルトスターター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。通常は中和滴定法により乳酸酸度を測定し、これにより発酵の制御等が行われている。しかし、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ーな発酵の制御は困難であり、信頼性の高い簡便なオンライン測定法が望まれている。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、特にヨーグルトスターターの接種量と培地濃度を変えて培養したときの結果を示す。図5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、発酵中にラクトースが消費されてゆく挙動がわかる¹⁴⁾。また、図6に培地濃度を12%で固定し、スターターの接種濃度を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示した¹⁴⁾。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ており、スターターの接種濃度に依存しないことが示されている。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図7に示した¹³⁾。ヨーグルトが固まりはじめる前後(3~4h)でのタンパク質の変化がよくわかる。

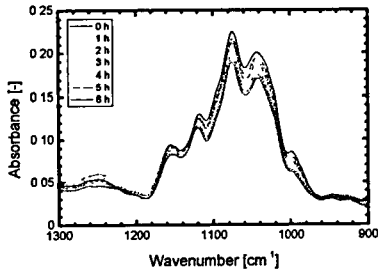


図5 ヨーグルト発酵過程における培地中のラクトースの赤外スペクトル

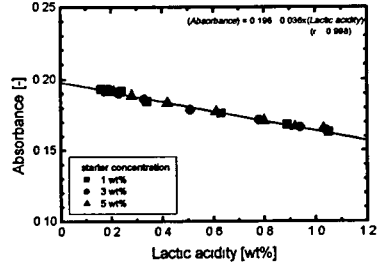


図6 ヨーグルト発行培地の乳酸酸度とラクトーススペクトルの吸光度との関係

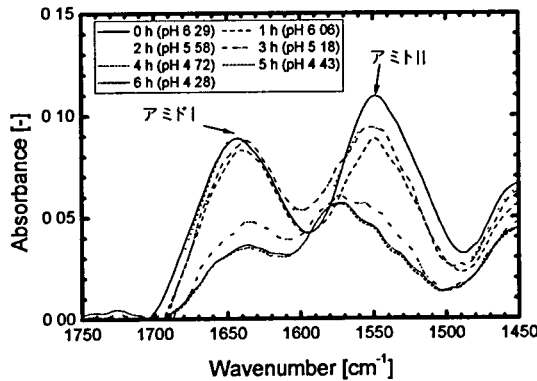


図7 ヨーグルト発酵過程における培地中のタンパク質の赤外スペクトル

6. 赤外分光法を援用した味覚関連情報の抽出

現在、様々なロボットの研究開発が進められ、より人間に近づこうとするロボットの研究開発では、人間の五感をセンサに置き換える試みがなされている。中でも、「視覚」「聴覚」「触覚」は早くから物理センサの開発が進んでおり、人間の感覚を超える感度のもも実用化されているが、「嗅覚」と「味覚」については、その研究開発が遅れている。そこで、ロボットの「味覚」関連情報を取得するためのセンシング方法として、赤外分光法に着目した。味覚に影響を与える要因としては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、食品の味覚関連情報の抽出につながる。つまり、このような評価には、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有効と考えられる。

三重大学とNECシステムテクノロジー（株）は、食品の主要成分と様々な嗜好食品（アルコール飲料類、コーヒー飲料、アイスクリーム類、チーズ類、および茶類など）の赤外分光特性を把握するとともに、それらの銘柄の識別および成分の同時定量手法の構築を試みた。また、このような知見を基礎とし、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受けることにより、赤外線センサをNECのパートナーロボットPaPeRo¹⁵に装着した「健康・食品アドバイザーロボット」（通称：「味見ロボット」）を開発した（図8）^{2, 16-18}。開発した味見ロボットは、2005年に開催された愛・地球博の「プロトタイプ・ロボット展」においてデモンストレーションされ、国内外の数百のマスコミで紹介された。

ところで、上記の機能を有した味見ロボットでは、ワイン銘柄の判別が困難であった。そこで、(1) 赤外線スペクトルの取得方法の改良、(2) 判別アルゴリズムの改良、(3) 期待獲得情報量に基づくワイン選択質問機能の追加を施すことにより、ワインの味見をするソムリエロボット（図9）の開発を試みた。その結果、ワイン銘柄の識別が可能となり、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1つのワインに絞込む機能をロボットに搭載することができた¹⁸。

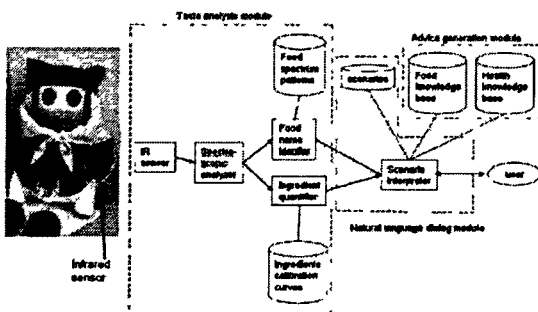


図8 味見ロボットの写真と内部構造の概念図



図9 ソムリエロボットの写真

7. おわりに

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が、赤外線乾燥などの熱的操作の発展は、試料となる食品の赤外分光的理解を伴う必要があるものとする。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、興味深い話題は非常に多い。さらに、開発した味見ロボット・ソムリエロボットは、今後改良が必要となる部分が多々あるものの、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あげられる。

文 献

1. 橋本篤, 亀岡孝治 食品の赤外分光分析と食品加工プロセスにおけるその応用, 日本食品工学会誌, 2, 11-22 (2001)
2. 橋本篤 食品加工プロセスにおける赤外線利用技術の開発, 日本食品工学会, 7, 61-73 (2006)
3. 日本工業標準調査会 遠赤外線用語, JIS Z 8117 (2002)
4. Hashimoto, A, Kameoka, T, Nitta, M Infrared Drying Characteristics of Wet Porous Materials, *Food Sci Technol Int Tokyo*, 3, 294-299 (1997)
5. Hashimoto, A, Kameoka, T Effect of Infrared Irradiation on Drying Characteristics of Wet Porous Materials, *Drying Technol*, 17, 1613-1626 (1999)
6. Hashimoto, A, Stenström, S, Kameoka, T Simulation of Convective Drying of Wet Porous Materials, *Drying Technol*, 21, 1411-1431 (2003)
7. 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)
8. Hashimoto, A, Sawai, J, Igarashi, H, Shimizu, M Effect of Far-Infrared Irradiation on Pasteurization of Bacteria Suspended in Liquid Medium below Lethal Temperature, *J Chem Eng Japan*, 25, 275-281 (1992)
9. Hashimoto, A, Sawai, J, Igarashi, H, Shimizu, M Irradiation Power Effect on IR Pasteurization below Lethal Temperature of Bacteria, *J Chem Eng Japan*, 26, 331-333 (1993)
10. Sawai, J, Sagara, K, Igarashi, H, Hashimoto, A, Kokugan, T, Shimizu, M Injury in *Escherichia coli* in Physiological Phosphate-Buffered Saline Induced by Far-Infrared Irradiation, *J Chem Eng Japan*, 28, 294-299 (1995)
11. Sawai, J, Sagara, K, Kasai, S, Igarashi, H, Hashimoto, A, Kokugan, T, Shimizu, M, Kojima, H Far-Infrared Irradiation-induced Injuries to *Escherichia coli* at Below the Lethal Temperature, *J Ind Microbiol Biotechnol*, 24, 19-24 (2000)
12. Sawai, J, Sagara, K, Hashimoto, A, Shimizu, M Inactivation of Enzymes and Bacteria by Far-Infrared Radiative Heating, *Int J Food Sci Technol*, 38, 661-667 (2003)

13. 亀岡孝治 食品の赤外分光分析, ケミカルエンジニアリング, 41, 435-441 (1996)
14. Hashimoto, A., Kameoka, T., Shinoki, Y., Ito, K. Mid-Infrared Spectroscopic Determination of Sugar Contents in Culture Media, In "Computer Applications in Biotechnology 1998", Elsevier Science Ltd, pp 411-416 (1998)
15. Fujita, Y. Personal Robot PaPeRo, *J Robotics Mechatronics*, 14, 60-63 (2002)
16. Shimazu, H., Kobayashi, K., Hashimoto, A., Kameoka, T. Tasting Robot a Personal Robot with an Optical-Tongue Proceedings of ISR2005 (2005)
17. 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, pp 465-474 (2005).
18. 橋本篤, 亀岡孝治, 狩野幹人, 末原憲一郎, 島津秀雄, 小林香織 赤外分光法を用いた味見ロボットの開発, 第22回近赤外フォーラム講演要旨集, pp 67-70 (2006)