

乾燥過程における大根の遠赤外線分光放射特性

松岡 孝尚・宮内 樹代史・孫 徳明
(農学部施設生産工学講座)

Characteristics of Far-Infrared Spectral Emission of Radish in Drying Process

Takahisa MATSUOKA, Kiyoshi MIYAUCHI, and Deming SUN
Chair of Biomechanical Systems, Faculty of Agriculture

Abstract : To investigate the characteristics of far-infrared spectral emission for agricultural products in drying process spectral emissivities of radish in a range of ordinary temperature were measured by spectro-radiometer systems. The following results were obtained:

- (1) Total emissivities of radish in drying process decreased by falling moisture contents regardless of surface temperature. However the maximum emissivity was nearly 1 at moistureless state.
- (2) The difference of emissivities between short and long wavelength increased by drying and it took maximum difference at moistureless state.
- (3) The spectral emissivity was not affected by surface temperatures in the range of measured wavelength.
- (4) Fresh radish was so moist but it had no relation between the spectral emissivities of radish and water.

It is considered that these results contribute to the analysis for far-infrared drying process of agricultural products.

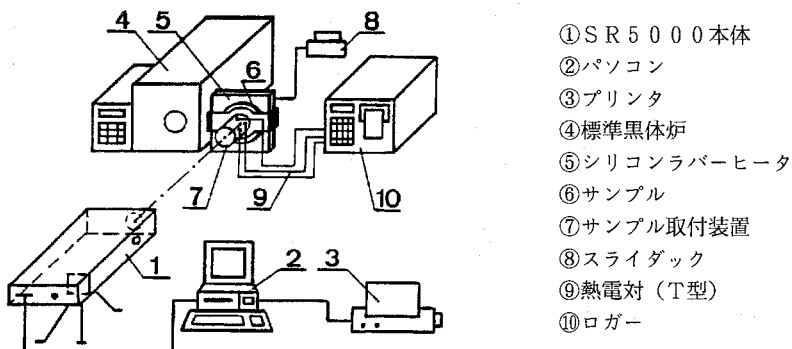
緒 言

現在、遠赤外線は工業分野や医療分野をはじめ、様々な分野で利用されている¹⁾。食品加工分野においても、加熱・乾燥操作に利用されており、熱源や乾燥特性に関する研究は数多くなされている²⁻⁵⁾。遠赤外線の利用に際しては、熱源の分光放射特性とともに、乾燥対象物の分光放射特性を把握することが重要であるが、常温付近（ここでは約50℃以下とする）の放射率の測定が難しい⁶⁾ことから、乾燥過程における農産物の遠赤外線放射特性に関する報告はほとんどみられない。

そこで、本研究では、スペクトロラジオメータシステムを用い測定装置と測定方法を検討し、乾燥過程における農産物の遠赤外線分光放射特性を測定した。一般に、赤外線放射加熱の分野における遠赤外線とは、2.5 μ m以上1000 μ mまでの波長域と区分されているが、ここでは長波長域では放射エネルギーが微量であること、また、生体への影響がある波長域に着目するという点から、測定波長範囲を2.5~14.5 μ mとし⁷⁾、供試材料に大根を用い、その分光放射率、全放射率、特定波長間での分光放射率等を含水率との関係で求めたのでこれを報告する。

測定方法

1. 測定装置 測定装置の概略を第1図に示す。スペクトロラジオメータシステムは、本体 (CI SYSTEMS, SR5000)、制御用コンピュータ (HEWLET PACKARD, VECTRA, IBM-PC/AT 互換機)、プリンタ及び標準黒体炉で構成され、波長 $2.5\mu\text{m}$ から $14.5\mu\text{m}$ までの遠赤外線分光放射エネルギーの測定・解析が可能である。測定時、サンプルから反射された放射線はSR5000内部の第1ミラーに照射される。サンプル表面からSR5000の第1ミラーまでの距離は 3.25m である。

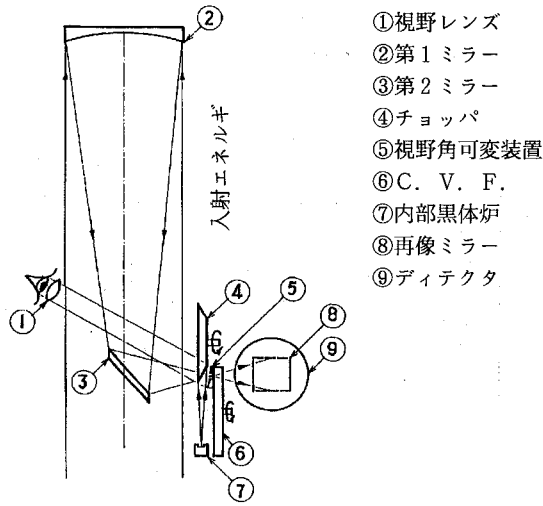


第1図 実験装置の概略図

サンプルは、表面の自然対流をできるだけ防ぐため、直径 30mm 、高さ 30mm の円筒形で内面黒塗のカバーを用いて、シリコンラバーヒータに密着固定し、スライダックによりラバーヒータの加熱電圧を 50V に調節し加熱した。サンプルの表面温度は 0.1mm T型熱電対により測定したが、表面の分光放射エネルギー検出部に熱電対を取り付けることができないため、検出部の周囲3ヶ所に熱電対を取り付け、測定開始時と終了時の温度をデータロガーで記録し、6点の平均値を求め、サンプルの表面温度とした。

2. SR5000の測定原理⁸⁾ 第2図にSR5000の光学システムを示す。SR5000に入射した放射線は、第1、第2ミラーにより水平方向 90° に反射され、チョッパに到達する。遠赤外線は可視光線に比して光エネルギーが非常に小さく、背景光(ノイズ)と区別するため、このチョッパにより、入射光は断続的に遮断されパルス光となる⁹⁾。このとき得られる信号は内部黒体炉と測定対象物との温度差のパルス信号になり、内部黒体炉より高い温度の対象物ではプラス、低い温度ではマイナス信号となる。チョッパを出たパルス信号は視野角可変装置を通過し、連続可変フィルタ(以下C.V.Fとする)に入る。C.V.Fは波長 $2.5\sim 14.5\mu\text{m}$ のみの遠赤外線を通し、波長別に振り分ける円板状の装置である。この円板の中には $2.5\sim 5$ 、 $5\sim 8$ 、 $8\sim 14.5\mu\text{m}$ という波長間に対応した3枚の扇形フィルタが入っており、円板が1周する時間が長いほど正確に振り分けられる。波長別に振り分けられた信号はディテクタに到達する。ディテクタはアンチモン化インジウム(InSb)、テルル化カドミウム水銀(HgCdTe)という2種類の半導体赤外線センサとアンプが備わっており、InSbは波長 $1.0\sim 5.5\mu\text{m}$ 、HgCdTeは波長 $5.5\sim 14.5\mu\text{m}$ の遠赤外線を吸収し電気信号に変換し、アンプによりこの信号は増幅される。これらのセンサは、液体窒素により -196°C まで下げて使用する。

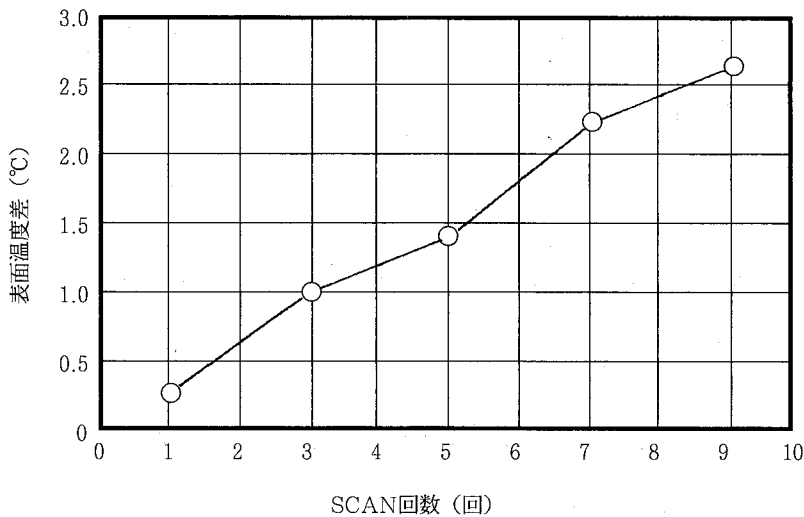
ディテクタにより、変換増幅された電気信号はコンピュータに入力、処理され、分光放射エネ



第2図 SR5000の光学システム図

ギのデータが得られる。この処理は、較正により求められた比を用いて行われる。

3. SR5000の測定パラメータ SR5000の主な測定パラメータとしては、視野角 (FIELD OF VIEW, 以下F.O.Vと略記), C.V.F SCAN TIME (以下SCAN TIME), NUMBER OF SCANS (以下SCAN回数)の三つがある。これらのパラメータは、サンプル及び環境条件に応じて決定される。常温付近の分光放射エネルギー測定において、検出部の表面温度が正確に測定できる場合、F.O.Vは大きいほど、SCAN TIMEが長いほど、またSCAN回数が多いほど正確な測定データが得られる。今回の測定では予備試験の結果から、F.O.V: 4 mrad (測定距離3.25 mで、約直径1.2 mmのスポット), SCAN TIME: 8秒に設定した。



第3図 SCAN回数によるサンプル表面温度差の変化

また、この設定でSCAN回数を多くすると、第3図に示すとおり、測定開始時と終了時の平均表面温度の差が大きくなる。このため、SCAN回数は測定開始・終了時の差が0.4℃以内である1回とした。

4. 供試材料 供試材料は市販の新鮮な大根の中央部で、これを直径55mm、厚さ5mm（ほぼ絶乾状態まで乾燥させるものについては直径70mm、厚さ15mm）に成形したものをを用いた。第1表にサンプルの乾燥条件を示す。サンプル表面温度は約35～45℃の範囲で3段階、含水率は約72～約95%w.b.及びほぼ絶乾状態の5段階とした。成形したサンプルを70℃の恒温乾燥機で所定の含水率まで乾燥させ、ほぼ絶乾状態のサンプルについては測定直前に取り出し、それ以外の含水率のサンプルは食品包装用ラップフィルム（ポリエチレン製）で包み約15時間経過した後、測定に供した。

第1表 乾燥条件

表面温度 (°C)	測定時の含水率 (%w.b.)				
	30	95.3	84.8	76.7	72.8
40	94.7	86.4	77.6	73.3	
45	95.2	85.2	77.2	72.6	

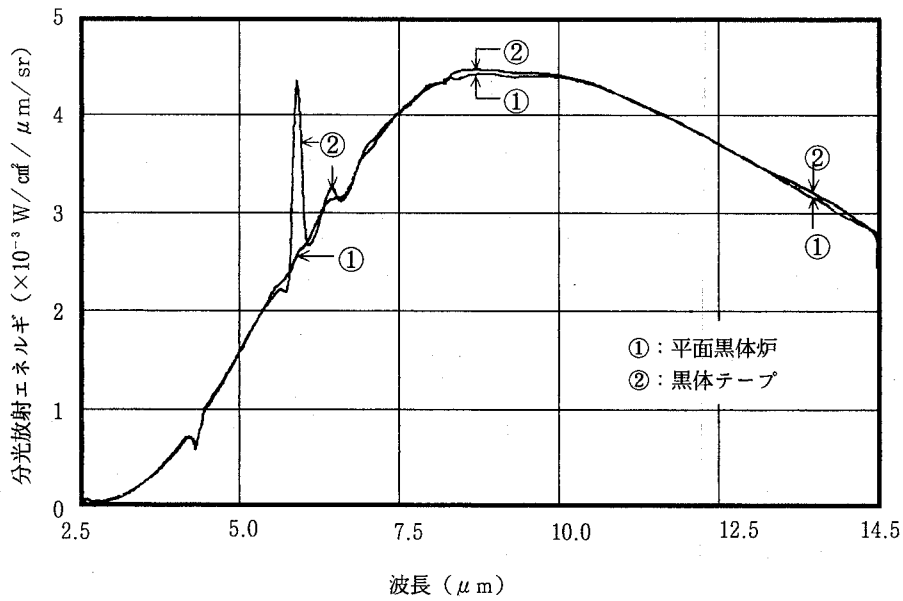
5. 測定方法 測定は、太陽光の影響を避けるため、暗幕を張った室内で、比較的室温の安定している午後に行った。測定時の室温は約20℃である。

測定前には、必ず標準黒体炉を用いてSR5000本体の較正を行う。これはプランクの式より標準黒体炉設定温度における黒体の分光放射エネルギー理想値と標準黒体炉の測定値との比をコンピュータに記憶させる操作である。較正時のパラメータは、F.O.V: 4 mrad (分光放射エネルギー測定時と同じでなければならない)、SCAN TIME: 16秒、SCAN回数: 10回で、標準黒体炉の温度は250℃である。

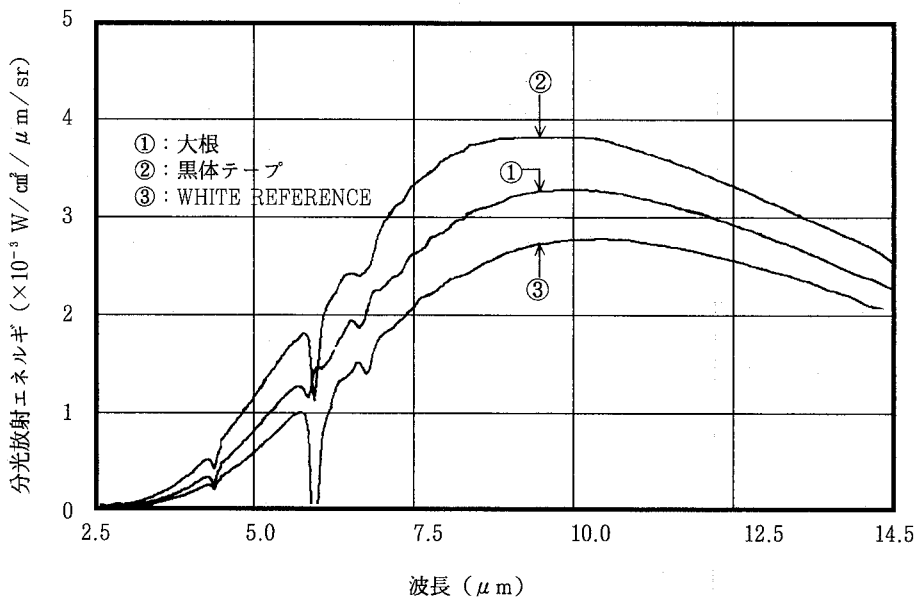
較正を行った後、サンプルを加熱し、目的の表面温度になると同時に、分光放射エネルギーの測定を開始し、同時に表面温度をデータロガー (CHINO, PROCOS) で、重量を分析天秤 (chyo, JP160W) で測定した。15個の分光放射エネルギー、表面温度及び重量測定データを得た後、サンプルの表面温度と同一表面温度の黒体テープ及びWHITE REFERENCE (以後、WRと略記する) を測定した。この黒体テープとWRの測定データは、サンプルの分光放射率を求める際に必要となる。黒体テープを用いたのは、SR5000の標準黒体炉では、150℃以下に設定することができないためである。黒体テープの測定データが、表面温度に対応したデータであるか確認するため、同一表面温度 (50.5℃) における、黒体テープと低温域の表面温度制御がよい平面黒体炉の分光放射エネルギーを比較したところ、第4図に示すとおりよく一致した。これにより、黒体テープの精度は非常に高いことがわかった。また、WRはほぼ完全反射体であるため、環境からの放射エネルギーのみを検出することができる。

結果及び考察

1. 乾燥過程における大根の分光放射率 サンプル、黒体テープ及びWRの分光放射エネルギーの測定結果を第5図に示す。これらの結果から、次式によりサンプルの分光放射率を算出した。



第4図 平面黒体炉と黒体テープの分光放射エネルギーの比較



第5図 大根、黒体テープ及びWHITE REFERENCEの分光放射エネルギー

$$\varepsilon = (S - W) / (B - W) \tag{1}$$

同様に全放射率は次式で求められる。

$$\varepsilon_t = (S_t - W_t) / (B_t - W_t) \tag{2}$$

また、任意の波長間の放射率は

$$\varepsilon_d = (S_d - W_d) / (B_d - W_d) \quad (3)$$

となる。ただし、それぞれ同一波長間を積分する。

ここで、

- ε : サンプルの分光放射率
- S : サンプルの分光放射エネルギー
- B : 黒体テープの分光放射エネルギー
- W : WRの分光放射エネルギー
- ε_t : 全放射率
- S_t : サンプルの分光放射エネルギーの全波長域積分値
- B_t : 黒体テープの分光放射エネルギーの全波長域積分値
- W_t : WRの分光放射エネルギーの全波長域積分値
- ε_d : 波長間放射率
- S_d : サンプルの分光放射エネルギーの特定波長域積分値
- B_d : 黒体テープの分光放射エネルギーの特定波長域積分値
- W_d : WRの分光放射エネルギーの特定波長域積分値

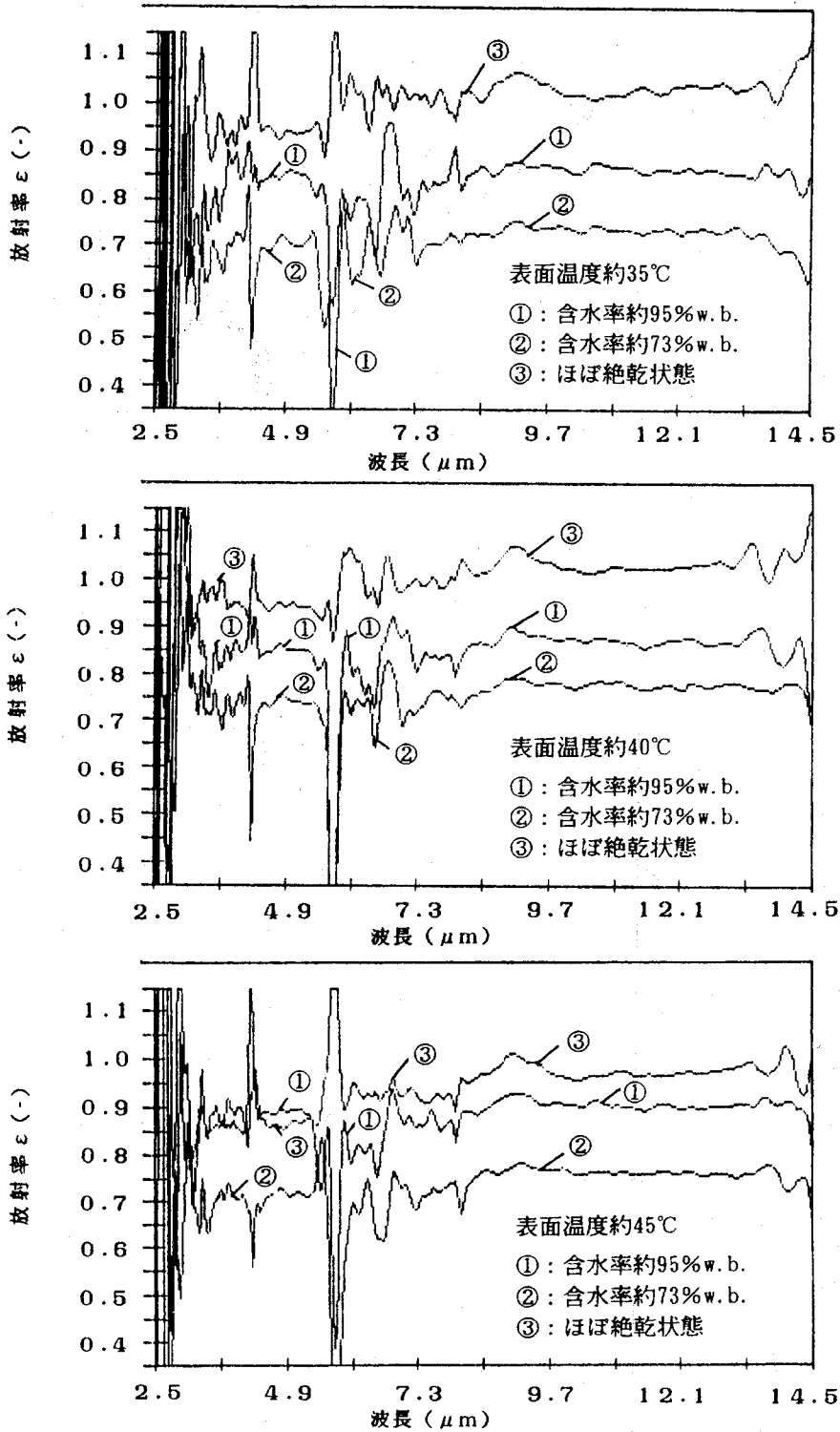
である。これらの計算はSR5000付属のソフトウェアにより行った¹⁰⁾。

以上のようにして求めた、ほぼ同じ表面温度での乾燥過程における大根の分光放射率を第6図に示す。なお、含水率約75, 86%w.b.の分光放射率データは図中に示していないが、約95, 約73%w.b.のデータの間位置する。炭酸ガスの吸収波長帯である4.28 μ m付近、ディテクタに備わっている2種類の赤外線センサの境界である5.5 μ m付近、及びC.V.Fによる分光開始・終了点である測定波長の両端(2.5 μ m, 14.5 μ m付近)でのデータは、補正できないのでこれを考慮する必要がある。

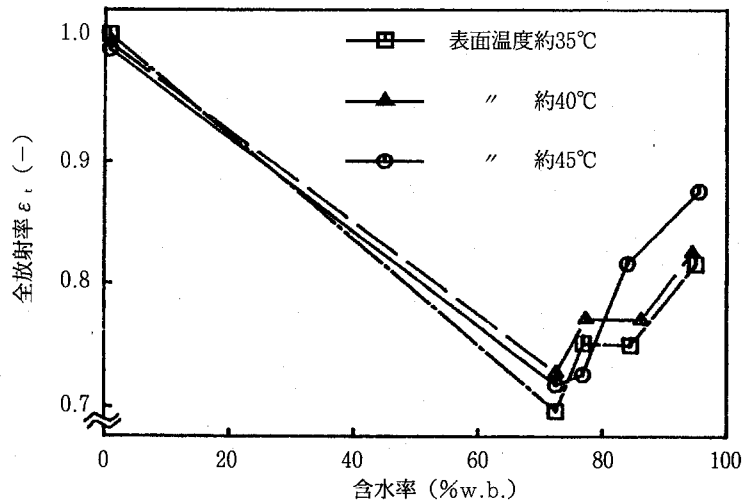
2. 乾燥過程における全放射率の変化 第7図に乾燥過程における大根の全放射率の変化を示す。初期含水率95%w.b.の生の大根を乾燥させていくと、全放射率は徐々に低下し、含水率73%w.b.では、表面温度35°Cの場合約15%, 40°Cで約12%, 45°Cで約18%初期の値から低い結果となった。しかしながら、ほぼ絶乾状態まで乾燥させた場合、全放射率は1に近い値となり、表面温度35°Cでは約25%, 約40°Cでは約22%, 約45°Cでは約9%初期値を上回る結果となった。このことから、乾燥過程において、大根の全放射率は、ある含水率までは含水率の減少に伴い低下するが、それ以下になると逆に上昇し、ほぼ絶乾状態では初期状態よりも高い値となると考えられる。

次に、各表面温度における分光放射率のデータより、波長4.35~5.27 μ m及び波長9.57~14.60 μ m間について比較するため、これら二つの波長間放射率の比と含水率との関係を求めた。その結果を第8図に示す。表面温度に関係なく含水率が下がるにつれてこの値は小さくなる。したがって、乾燥が進むにつれて、これら二つの波長間放射率の差は大きくなると考えられる。

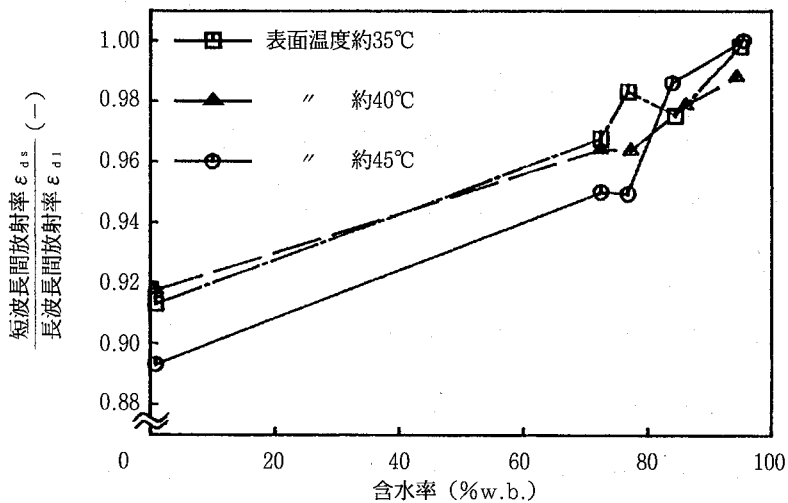
3. 表面温度による放射率の相違 第7図に示したとおり、ほぼ絶乾状態では三つの表面温度の全放射率は同程度であった。しかし、含水率95%w.b.においては、全放射率は表面温度35°Cで約17%, 40°Cで約16%, 45°Cの場合に比して低かった。同様に85%w.b.では35°Cで約14%, 40°Cで約10%, 45°Cより低く、77%w.b.では35°C及び45°Cの全放射率は40°Cより、それぞれ約6%低く、73%w.b.では全放射率はほぼ同じであった。ほぼ絶乾状態のサンプルは唯一つであったため、表面温度の差による全放射率の違いはみられなかったが、他の含水率においては、一つの含水率につき設定表面温度が3種類あるため、それぞれのサンプル間に差が生じ、全放射率に違いがでたものと考えられ



第6図 全波長域における大根の分光放射率



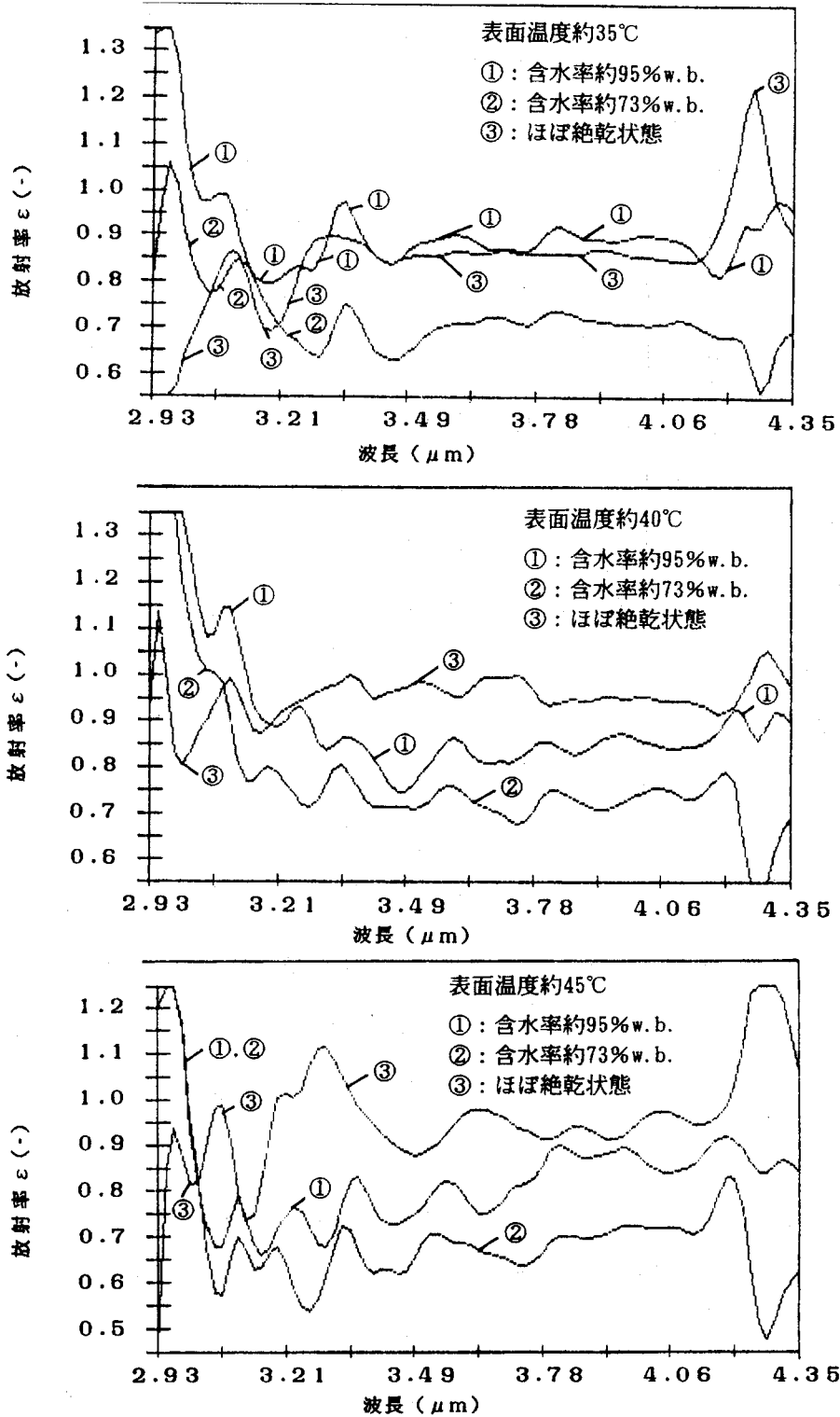
第7図 乾燥過程における全放射率の変化



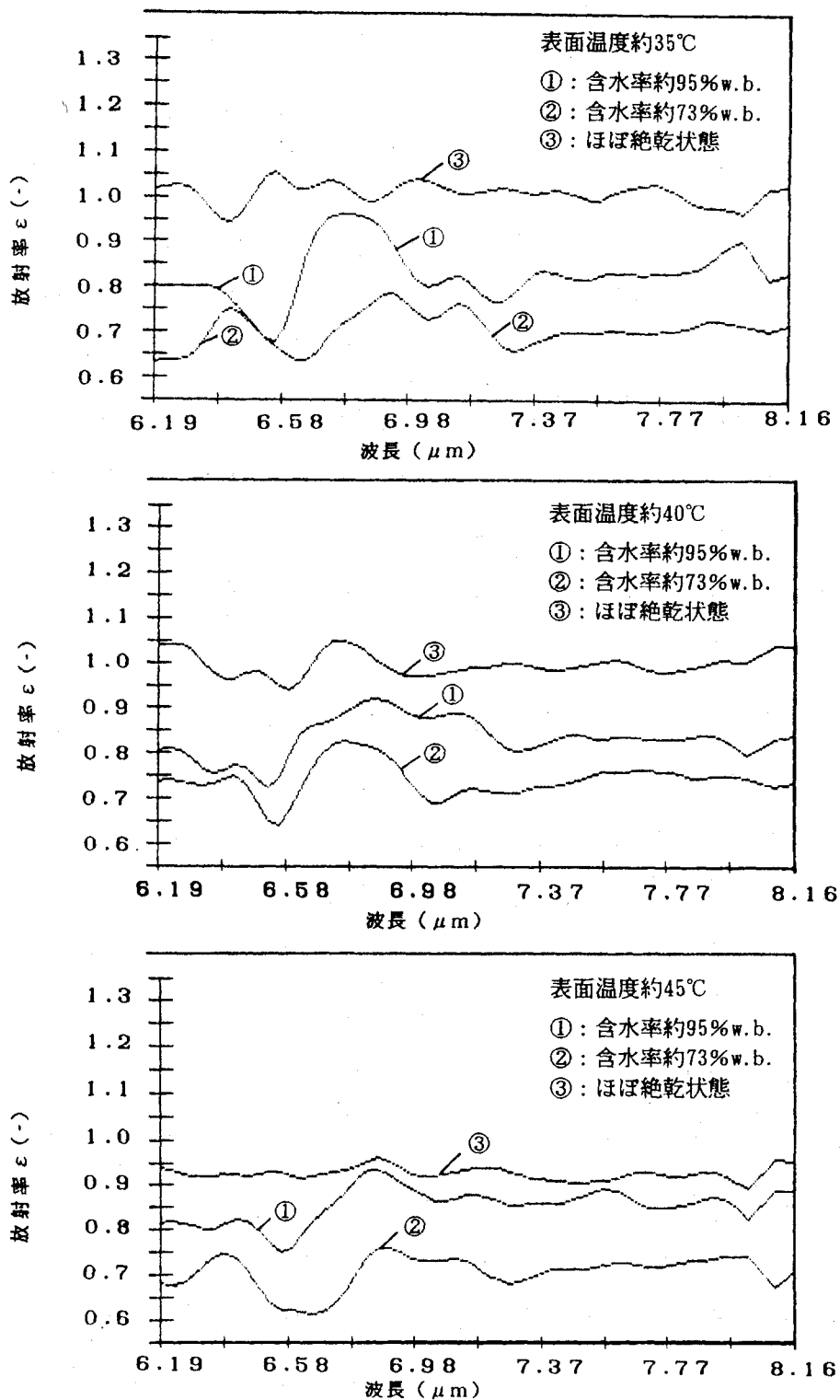
第8図 乾燥過程における短・長波長間放射率の比

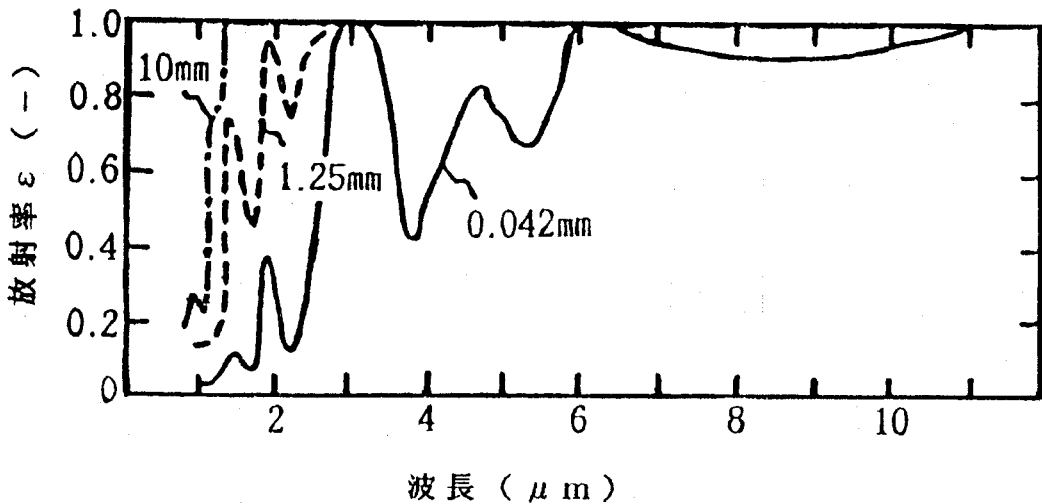
る。しかし、サンプル間の差がない場合は正確に測定できることは明らかであるため、表面温度の違いによる分光放射率の差はないと考えられる。

4. 水の放射波長帯付近における分光放射率 水の放射波長帯（放射率が1.0に近い波長帯）である $3.16\ \mu\text{m}$ 及び $6.26\ \mu\text{m}$ を含む波長 $2.93\sim 4.35\ \mu\text{m}$ 及び $6.19\sim 8.16\ \mu\text{m}$ 間の各表面温度における分光放射率を第9図及び第10図に示す。含水率76, 85%w.b.のデータは図中に示していないが、95, 73%w.b.のデータの間位置する。生の大根はその重量のほとんどが水分であるため、分光放射特性は水のそれと似た傾向になると考えられる。そこで、これらの二つの波長帯の分光放射率を第11図に示す既往の水の分光放射率¹¹⁾と比較した。しかし、これら二つの水の放射波長帯付近の大



第9図 特定波長間の大根の分光放射率 (2.93~4.35 μm)

第10図 特定波長間の大根の分光放射率 (6.19~8.16 μm)

第11図 水の分光放射率¹⁾

根の分光放射率は、1.0に近いにも関わらず、また含水率に関係なく、これら以外の波長帯の分光放射率より小さい値を示した。つまり、水と大根の分光放射率の差が明らかでないのは、構成されている成分・物質が違うためであり、また、それらの分光放射率は同レベルでは比較・検討できないと考えられる。

要 約

乾燥過程における農産物の遠赤外線分光放射特性を明らかにするために、スペクトロラジオメータシステムを用いて、常温付近での大根の分光放射率を測定したところ、以下の知見を得た。

- 1) 乾燥過程における大根の全放射率は、表面温度に関係なく、含水率の減少とともに低下したが、ほぼ絶乾状態で最大値を示し、その値は1に近かった。
 - 2) 乾燥の進行に伴い、短波長側と長波長側の放射率の差も大きくなり、ほぼ絶乾状態でその差は最大となる。
 - 3) 本研究の測定範囲においては、表面温度の影響による分光放射率の差は認められなかった。
 - 4) 生の大根は、水分を多く含んでいることから、水の分光放射特性が大根のそれと対応するのではないかと考えられたが、二つの分光放射特性の間に明確な関係は認められなかった。
- 以上の結果は、農産物の遠赤外線乾燥プロセスの解析に大きく寄与するものと考えられる。

キーワード：大根，乾燥，遠赤外線，分光放射率

引用文献

- 1) 池上良一・岩浅繁・岩出功・江川芳信・大森豊明：遠赤外線放射セラミックスのすべて，p.59-61，オプトロニクス社，東京(1989)。
- 2) 堀部和雄・大下誠一・中川健治：穀物の放射乾燥法に関する研究（第1報）。農機誌，49(1)，93-101

(1987).

- 3) 松岡孝尚：遠赤外線加熱による粉の乾燥特性，農業施設，21(2)，85-93(1990).
- 4) 堀部和雄・中川健治・東条孝史：穀物の放射乾燥法に関する研究（第2報）．農機誌，52(4)，67-74(1990).
- 5) 佐藤秀美・畑江敬子・島田淳子：食品のクラスト層形成および着色状態に及ぼすヒータの放射特性の影響．日食工誌，39(9)，784-789(1992).
- 6) 遠赤外線セラミックス産業対策調査研究委員会：通産省遠赤外線セラミックス産業対策調査報告書．平成2年度，139-152，(1990).
- 7) 西川兼康・藤田恭伸：伝熱学，p.289-290，理工学社，東京(1985).
- 8) CI SYSTEMS ed.，: SR5000 Computerized IR Spectro-Radiometer Manual Part A SR5000 SYSTEM OVER VIEW-6，(1987).
- 9) 宮尾巨・所沢均・伊東孝・木滑寛治・峰松陽一：光をはかる，p.143-144，日本理工出版会，東京(1987).
- 10) CI SYSTEMS ed.，: SR5000 Computerized IR Spectro-Radiometer Manual Part B，SR5000 SYSTEM OVER VIEW-7，(1987).
- 11) 池上良一・岩浅繁・岩出功・江川芳信・大森豊明：遠赤外線放射セラミックスのすべて，p.15-18，オプトロニクス社，東京(1989).

平成5年(1993)9月28日受理

平成5年(1993)12月27日発行