

赤外線による食品の加熱に関する
基礎的研究

課題番号 04680064

平成5年度科学研究費補助金 一般研究 C 研究成果報告書

平成 6年 3月

研究代表者 渋川 祥子

横浜国立大学 教育学部

3478705

横浜国立大学

研究組織

研究代表者 渋川 祥子 (横浜国立大学 教育学部)

研究経費

平成4年度	1 1 0 0 千円
平成5年度	6 0 0 千円
合計	1 7 0 0 千円

研究発表

3478705

学会口頭発表

横浜国立大学

杉山久仁子、青山照美、渋川祥子

「放射加熱における赤外線浸透と食品成分との関係」

日本調理科学会 平成5年度大会 1993年9月9日

学会誌発表 1)

杉山久仁子、宮崎靖子、渋川祥子

「食品の放射加熱における波長分布の影響」

日本家政学会誌 44巻 923～928頁

目次

1. 研究目的	3
2. 放射伝熱の有効性の検討	4
3. 食品加熱における波長の影響	7
4. 浸透度の測定	17
5. 透過率の測定	26
6. まとめ	31

1. 研究目的

調理加工を行う際の加熱条件は、食品の調理成績に大きく影響する。最近、赤外線による加熱が注目を浴び、特に遠赤外線による加熱が有効であるとされている。食品加工では、乾燥や焙焼の工程に遠赤外線を利用した加工機器が使用され、調理においても加熱器具に赤外線ヒーターや遠赤外線ヒーターを使用したものが増えており、これらは経験的に有効であるとされている。また、昔から焼き加熱では、木炭が用いられているが、木炭でよい成績の得られる理由は赤外線加熱のためであろうと考えられる。しかし、これらの有効性を理論づける基礎的な研究は数少ない。

赤外線加熱、特に遠赤外線の有効性が理論的に裏付けされないまま、遠赤外線ヒーターが実用機器として使用されている現状では、これらの理論的裏付けとなる基礎的な研究を行うことが、食品加工、調理加工上、急務であると考えられる。また、赤外線の食品加熱の特徴を明らかにすることは、調理科学的にも非常に興味深いことである。

そこで、赤外線加熱が食品の加熱に有効な理由を明らかにするための研究を行おうとした。このような基礎的な研究を行うことによって、現在使用されている調理、加工用の熱源の正当な評価ができ、新しい調理機器の開発や理論的な調理方法の解明につながるものと考えられる。

本実験では、食品加熱における赤外線加熱の有効性を確認した上で、その理由を明らかにするために、食品表面に対する赤外線の浸透について、波長別に検討を加える。

2. 放射伝熱の有効性の検討

複合熱伝達率がほぼ同じで放射伝熱の割合の異なる条件下でケーキを加熱して焙焼所要時間、水分蒸発量、ケーキの硬さおよび表面の着色を測定し、放射伝熱の特長を明らかにしようとした。

〔実験方法〕

加熱条件：図1. に示すような改造オープンを使用し、熱風と上下のヒーターを組み合わせることによって、放射伝熱と対流伝熱の割合を7：3（RAD）と3：7（CON）の条件で庫内温度を200℃に設定し、ケーキを焙焼した。中心温度が90℃になってから5分で焙焼終了とした。

ケーキの調整：起泡剤を使用し、常法によってケーキバターを調整し、12cmのケーキ型に120gずつ入れた。

焼き色の測定：測色色差計（日本電色工業kk、NP-21型）によってL値を測定した。

ケーキの硬さの測定：ケーキの中心部を30×30×20mmの直方体に切り、レオロメーター（飯尾電機kk、RMT-1302）で測定した。測定条件はプランジャー、13mm、クリアランス 2mm、電圧5ボルトである。

〔結果と考察〕

焙焼所要時間、水分蒸発量および内部の硬さは表1. に示すとおりとなった。焙焼所要時間、水分蒸発量および硬さには差はみられないが、表面の焼き色には有意の差がみられ、放射伝熱の大である条件で加熱したケーキは焼き色が濃く着くことが明らかとなった。

両者の加熱条件は、その複合熱伝達率がほぼ等しいので、焙焼所要時間が同じになるのは予想通りであるが、表面の焼き色については、放射伝熱の大である方が濃くなり、放射伝熱が食品表面の着色に有効であることが実証できた。

これまでの研究で、着色は温度依存性が高いので、表面温度が上昇していることが原因であろうと考えられる。

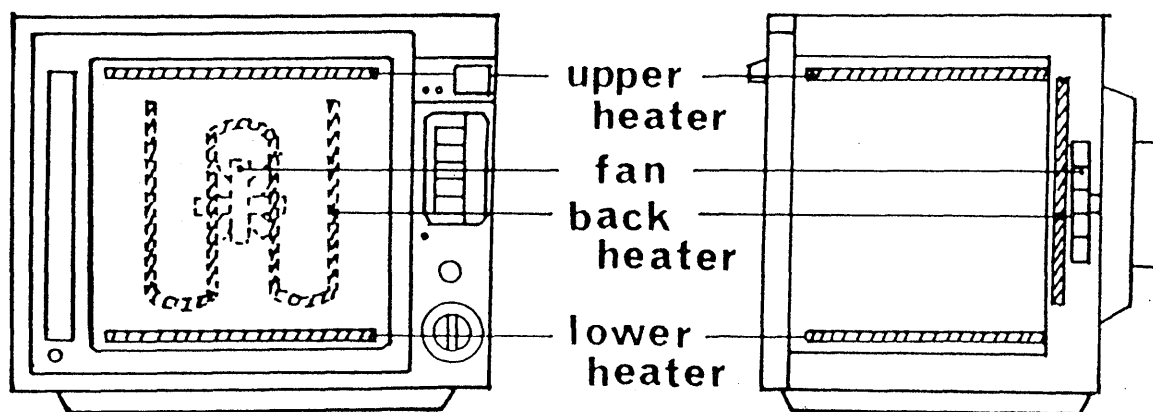


Fig. 1. Diagram of oven used in experiments.

Table 1. Results of sponge cake baking

測定項目	R A D	C O N
焼時間 (分)	1 6 . 6 ± 0 . 5 6	1 6 . 2 ± 0 . 3 6
焼上りの 水分蒸発率 (%)	9 . 6 ± 0 . 3	9 . 8 ± 0 . 3
焼色 (L 値)	4 4 . 7 ± 0 . 4 8	5 2 . 0 ± 2 . 0 3
硬さ (R . U)	1 6 . 7 ± 1 . 1 4	1 6 . 2 ± 1 . 0 6

3. 食品加熱における波長の影響

赤外線加熱が食品表面の着色に有効であることが明らかになったので、赤外線の波長の影響について検討するために、放射波長特性の異なるヒーターを用いて食品を加熱し、表面温度、表面の焼き色、水分蒸発量、中心温度およびクラスト層の厚さの測定をおこなった。

〔実験方法〕

加熱装置：対流の影響を排除するために図2に示す加熱装置を用いて 上部より、加熱をおこなった。

試料：試料としては食パンと魚のすり身を使用した。食パンは、市販の食パンの焙焼当日のものを用いた。すり身は、さばのすり身を成形した。

サンプルの形状は図3に示す通りである。

使用したヒーター：放射波長特性の異なるヒーターとして、ハロゲンヒーター、シーズヒーター、遠赤外線を放射するセラミックヒーター二種類を使用した。それらのヒーターの放射特性および形状は図4に示す通りである。

表面温度の測定：赤外線温度計（日本アビオニクスkk）によって加熱直後の表面温度を測定した。

表面の焼き色の測定：画像解析装置（日本アビオニクスkk，スピカ）で読み込み、RGBのG値を測定した。

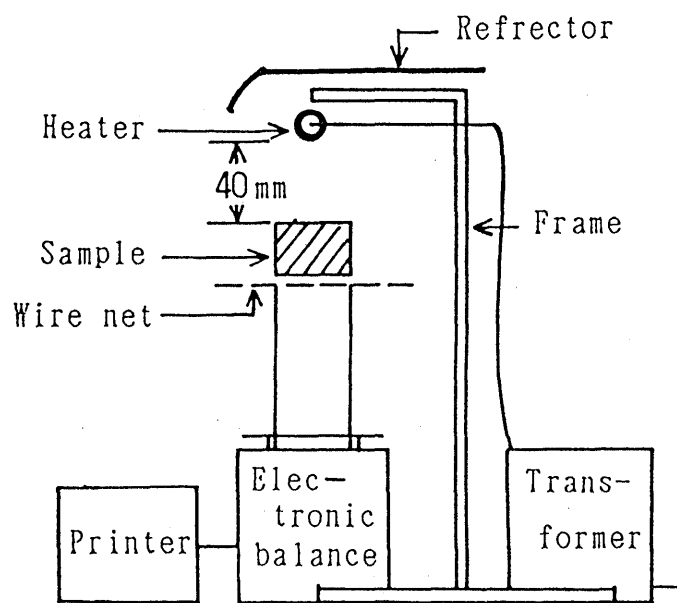
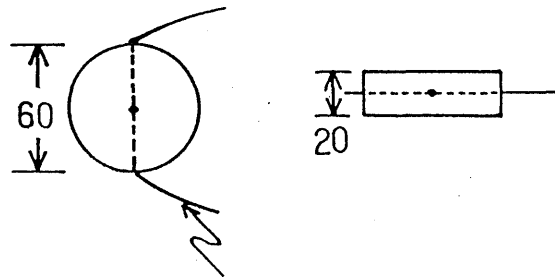


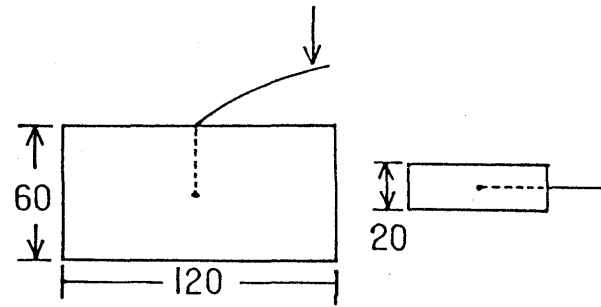
Fig. 2. Diagram of apparatus

FISH PASTE



BREAD

Thermocouple



(mm)

Fig. 3. Sample shape

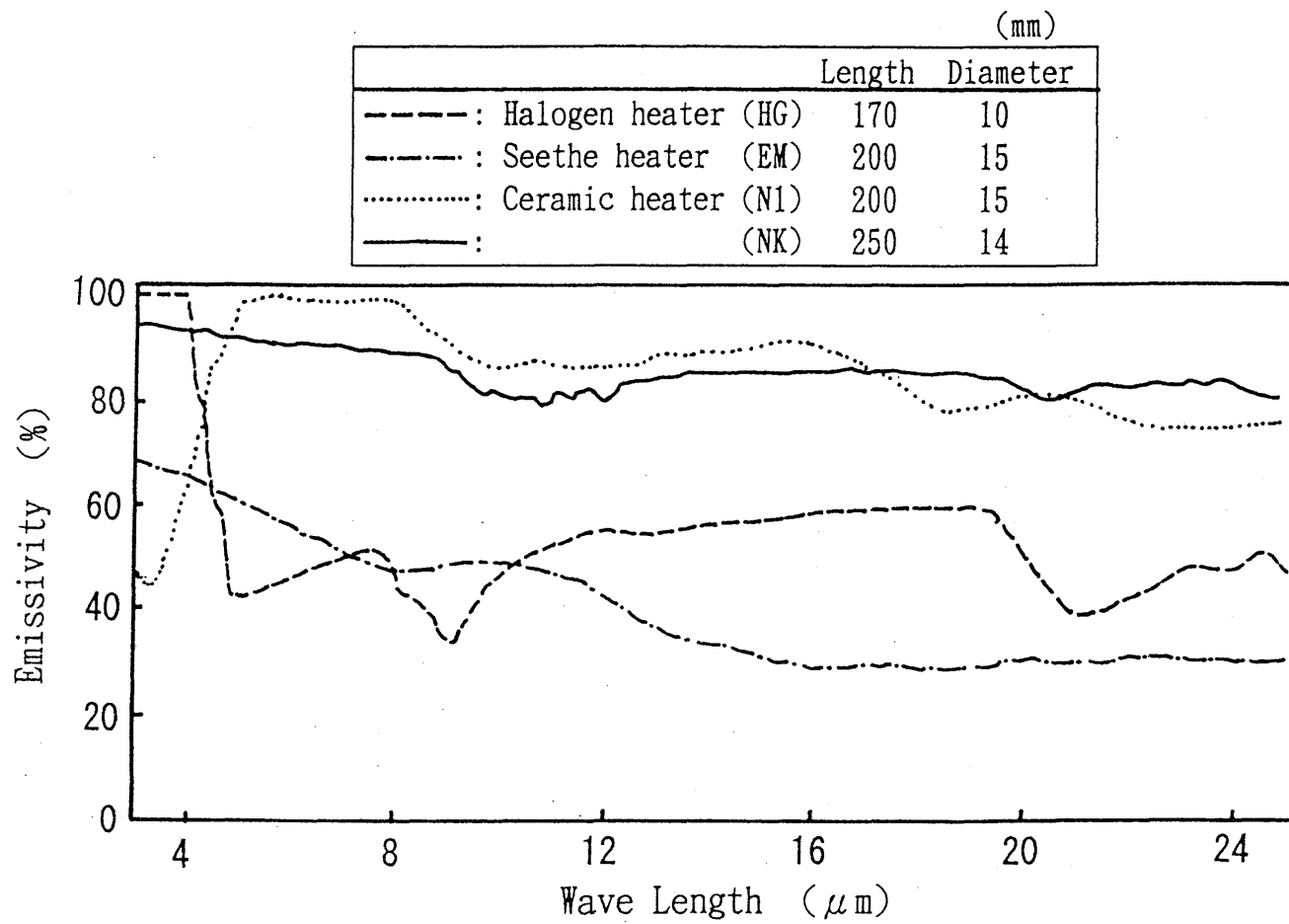


Fig. 4. Spectral emissivity of heater

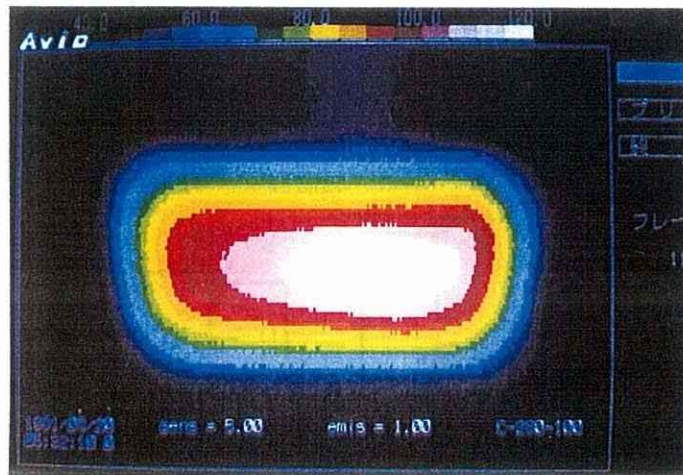
〔実験結果および考察〕

食パンを3種類のヒーターで加熱したとき表面温度は、写真1に示すとおりで、その温度分布のヒストグラムおよび平均温度は図5に示すとおりであり、ハロゲンヒーターが最も温度が低く、遠赤外線ヒーターが最も温度が高くなった。この時のパンの中心温度はハロゲンヒーターが最も高く、遠赤外線ヒーターが最も低かった。クラスト層の厚さはハロゲンヒーターが最も厚く、遠赤外線ヒーターが最も薄かった。¹⁾

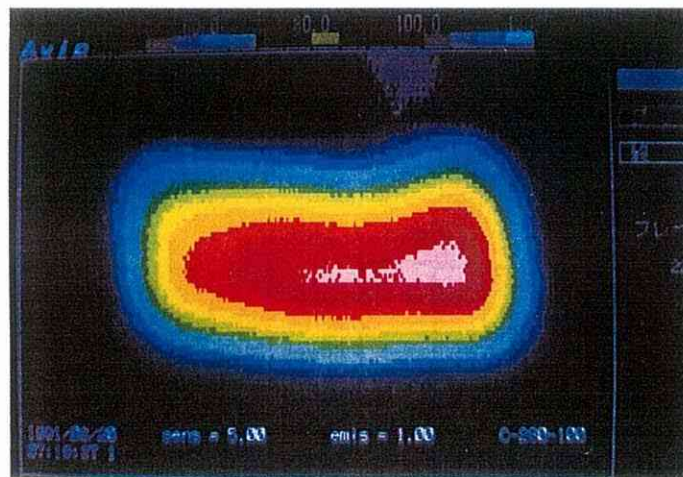
魚のすり身についても表2に示すように、ハロゲンヒーターで加熱したものが中心温度がたかく、表面温度は低かった。表面の着色は遠赤外線ヒーターによるものが濃かった。水分蒸発については、経時的な蒸発状態に差があり、時間毎の蒸発量は図6に示すようになった。クラスト層は、写真2に示すように、ハロゲンヒーターで厚く、遠赤外線ヒーターで薄くなった。

これらの結果から、長波長領域で高い放射率を示す遠赤外線ヒーターは食品の表面近傍で熱に変わり、短波長領域の放射の高いハロゲンヒーターは食品の内部にある程度浸透して熱になると推論することができる。

N 1



EM



HG

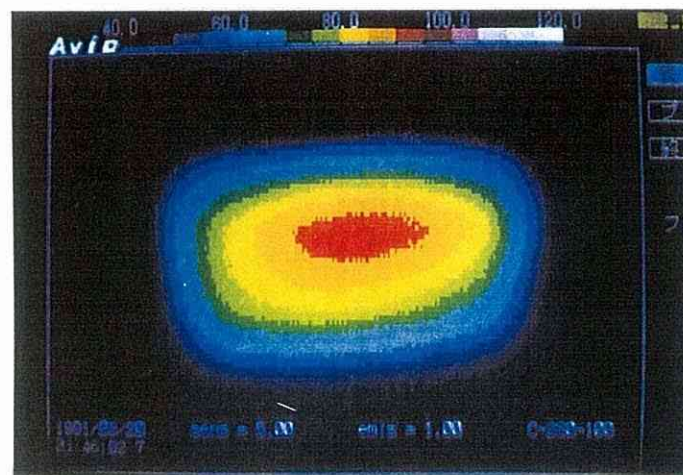


Photo 1. Surface temperature of bread

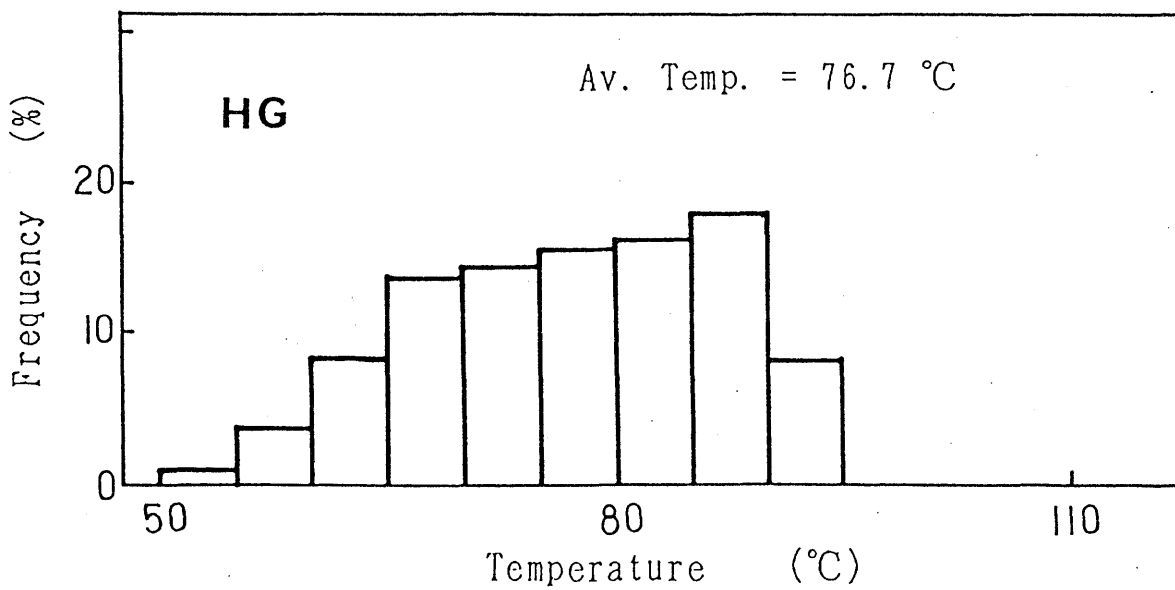
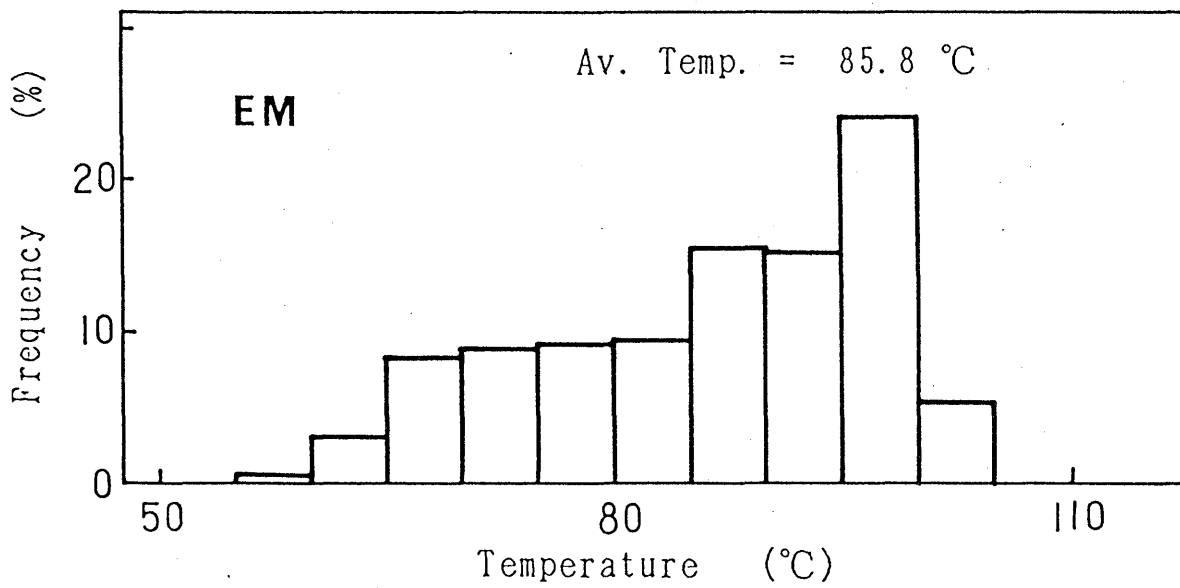
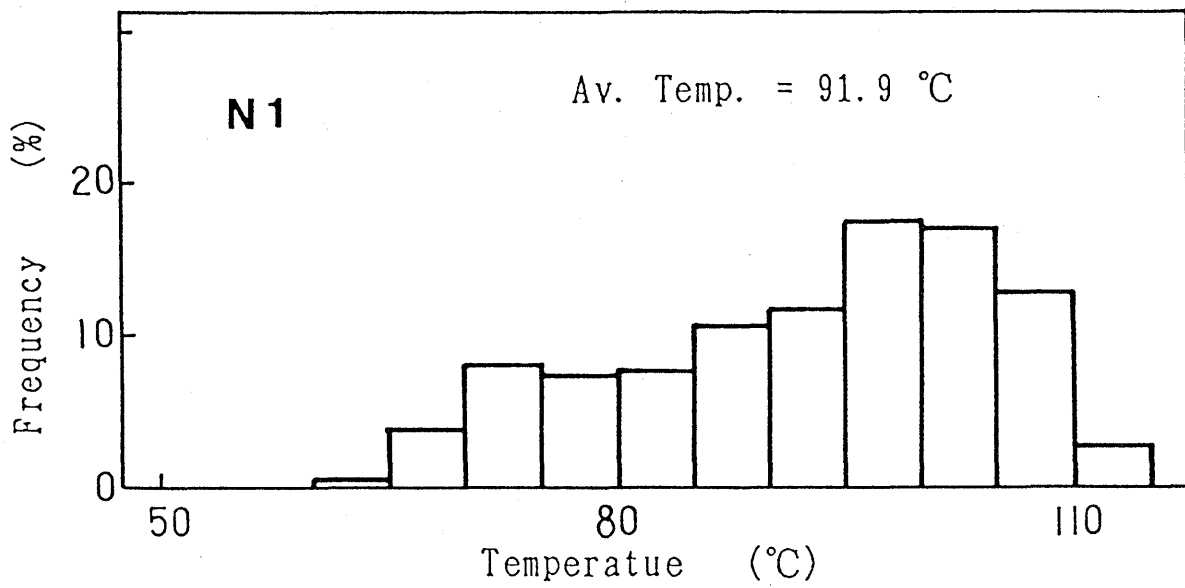


Fig. 5. Histogram of Temperature of the Surface of Bread

Table 2. Experimental results of fish paste

	one heater			two heaters			
Baking time (min)	10			20			
	N 1	EM		N 1	EM	H G	
Center temp. (°C)	27.9	27.9		77.0	79.1	82.8	
Surface temp. (°C)	48.0	48.0		141.9	143.2	131.4	*
Moisture loss (g)	0.61	0.52	*	2.61	2.45	2.81	
Surface color [G]	123.5	127.4	*	71.2	71.5	91.1	*
Thickness of crust (mm)	-	-		1.52	1.95	2.28	*

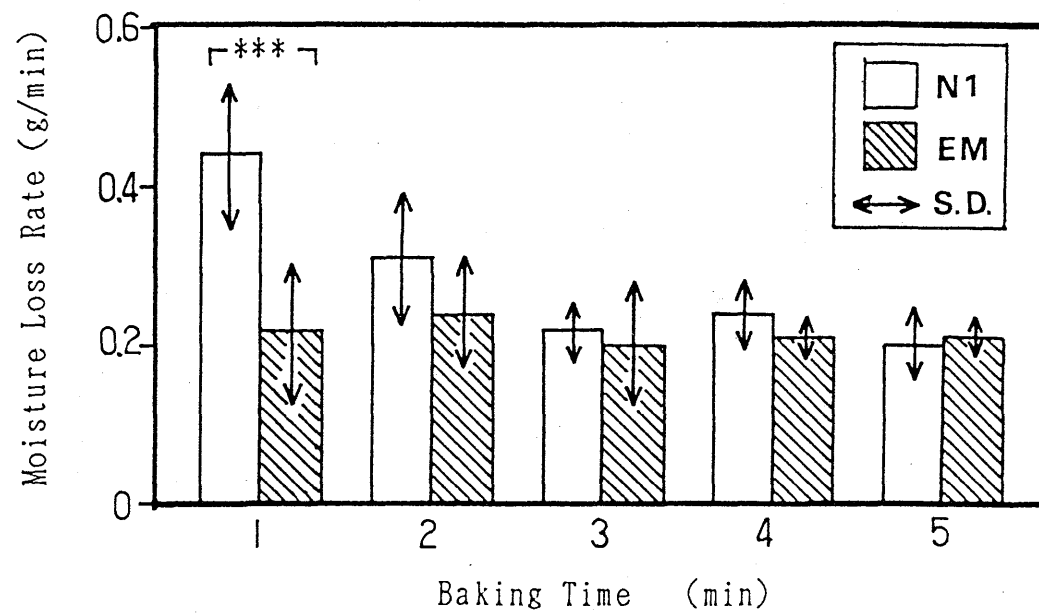


Fig. 6. Moisture loss rate of bread

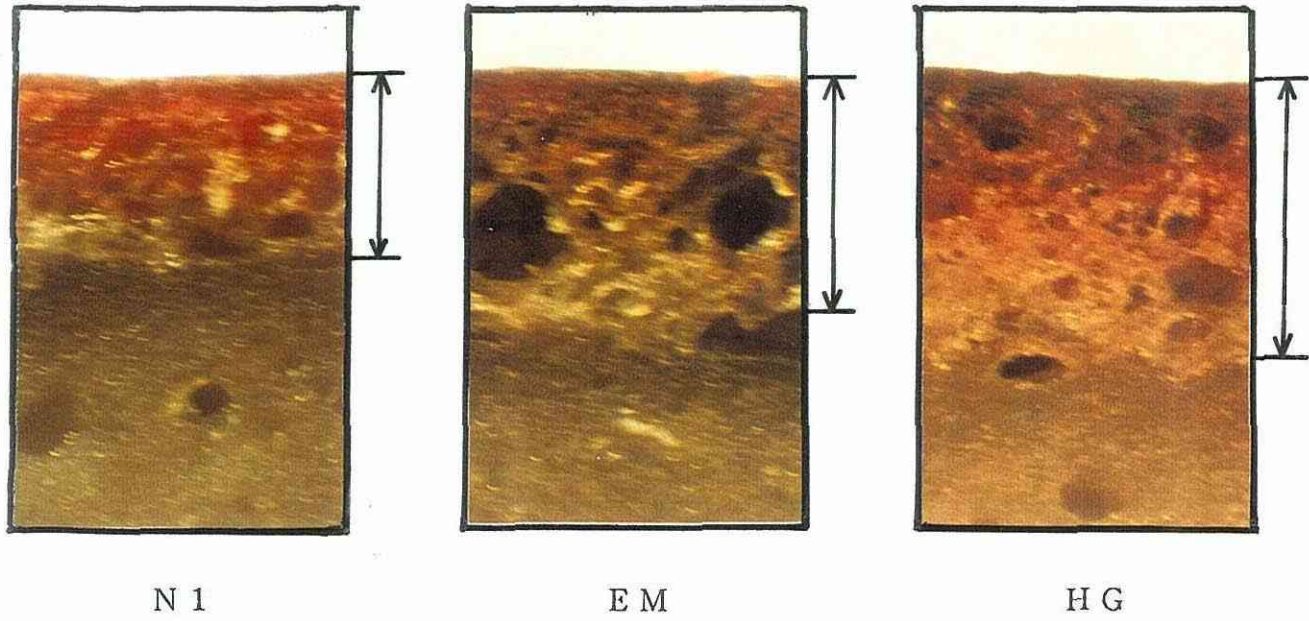


Photo 2. Sections of fish paste

4. 浸透度の測定

これまでの結果から、赤外線は食品表面への浸透が考えられること、その浸透の深さは、波長が関係していることが明らかである。そこで、波長と浸透の関係をより明らかにするために、加熱時の食品表面近傍での温度分布を測定し、伝導伝熱で熱が伝わったと仮定して計算した理論値と比較する事によって浸透の状態を把握しようとした。

(1) 温度分布の測定

〔実験方法〕

試料：A、1. 2%寒天ゲル、水に近い組成のもので、対流を防ぐために寒天を加えてゲル状にした。

B、食品成分として糖質を含むサンプルの一つとしてコーンスターチ5%を含む1. 2%寒天ゲルを作製した。

加熱装置と温度分布の測定：図7に示す加熱装置を用い、試料はステンレスの試料容器に入れ、表面の極浅い部分に図7に示す熱電対を埋め込んで加熱し、温度変化を記録した。

使用したヒーター：図4. に示すヒーターを使用した。ヒーターへの供給電圧は試料への伝熱量を同じにする目的で、黒色塗装したアルミブロックを加熱し中心部の温度上昇が同じになるように調節した。その結果、ハロゲンヒーターは90V、他のヒーターは100Vとした。

〔実験結果〕

寒天ゲルを加熱したときの測定結果の一例は図8に示す。温度と時間の関係は上図、表面からの深さと温度の関係は下図のようになる。A、Bの両サンプルについて4種のヒーターについて温度変化を測定した。

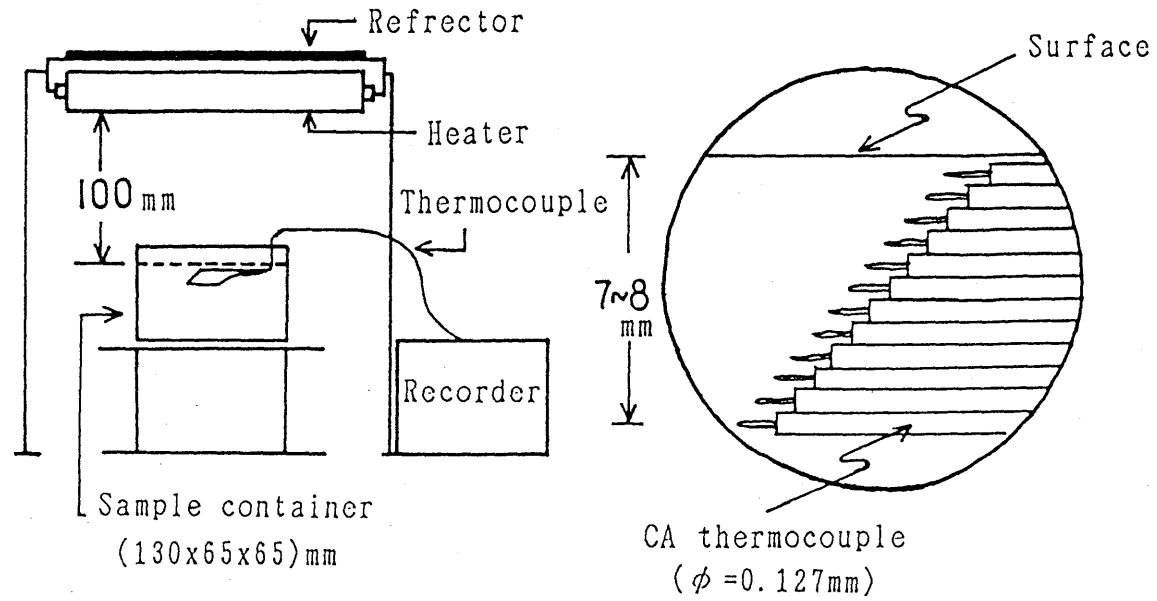


Fig. 7. Diagram of apparatus

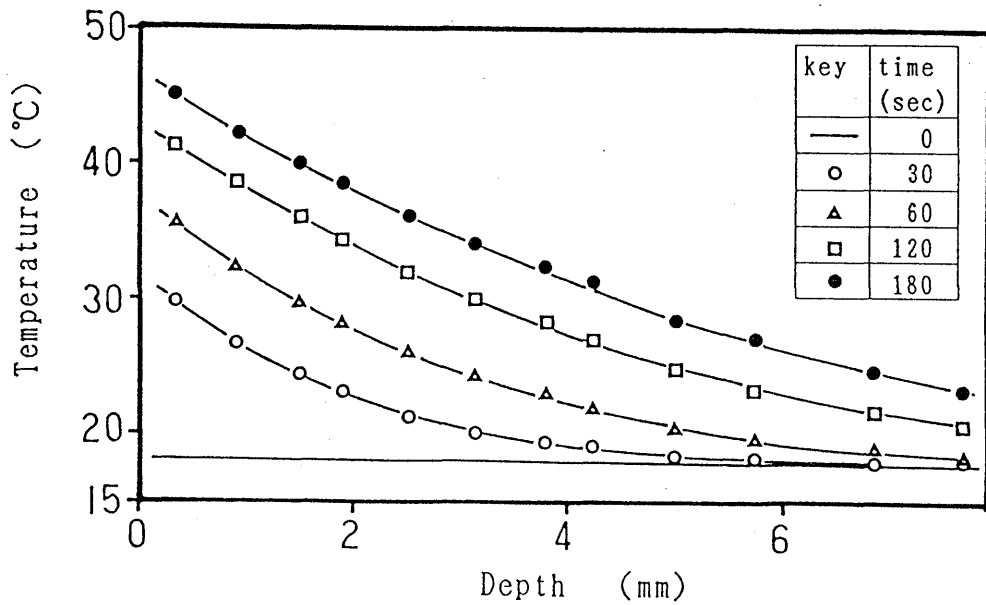
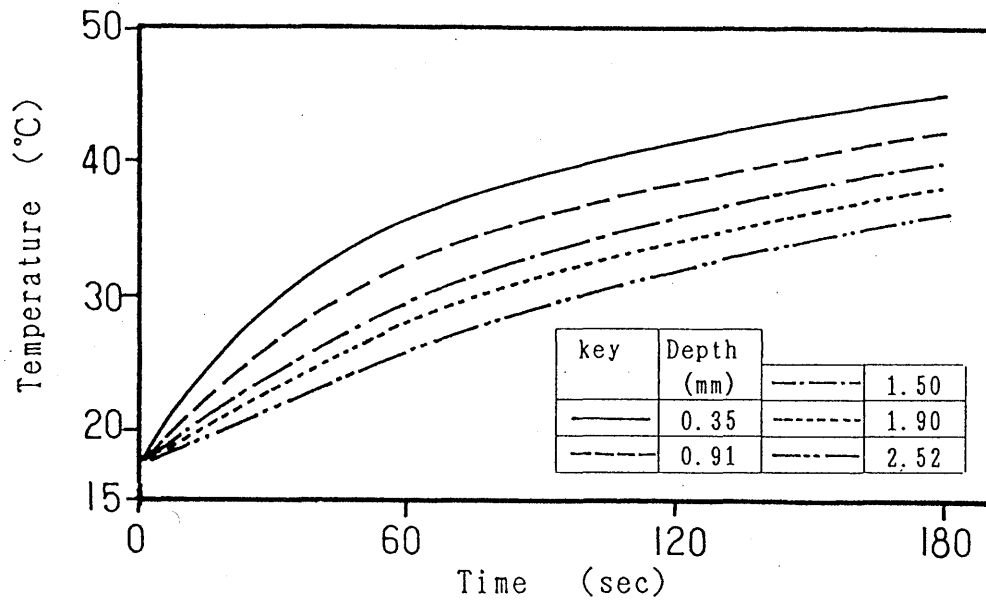


Fig. 8. Temperature distribution in 1.2% agar gel (heated with N1)

(2) 理論値と実測値の比較

〔理論値の計算〕

ダイアグラム 1 に示す非定常熱伝導、半無限固体で表面熱流速が一定である場合の式を用いて、最も表面に近い測定位置で測定した温度を基に、内部に伝導伝熱したと仮定して、熱電対の測定点の深さにおける温度を計算し、理論値とした。

このときに用いた熱拡散率は、上部に黒色塗料を塗布した銅板を試料に密着させて温度分布を測定し、実測値をダイアグラム 1 の式に代入して求めた。この値は、 $1.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{ s}$ となった。

〔理論値と実測値の比較の結果および考察〕

表面に銅板を密着させて測定した温度分布と理論値の関係は、図 9 に示すとおりとなり、最大の誤差で 1° C であり、一致がみられた。とくに、60 秒後の値はよく一致していたので、60 秒後の理論値と実測値を比較することとした。

図 10 ~ 12 は、寒天ゲル、コーンスターチゲルおよび魚のすり身の実測値と理論値の差を表面からの深さに対して表したものである。これらの結果から明かなように、いずれのヒーターで加熱したものも、理論値よりも実測値の方が高くなる。特に波長の短いハロゲンヒーターでは差が大であり、遠赤外線ヒーターではその差が小となる。

これらの結果より、赤外線加熱では、食品表面での浸透があるため表面近傍の内部温度は伝導で伝熱する場合よりも速く上昇する事、およびその浸透深度は短波長領域でより深いことが確認できた。また、予測される浸透深度は、食品によって異なることがわかった。

Diagram 1. THEORETICAL EQUATION

$$\frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} = \frac{\frac{\exp(-\xi_1^2)}{(\pi)^{1/2}}}{\frac{\exp(-\xi_2^2)}{(\pi)^{1/2}}} - \frac{\xi_1 \operatorname{erfc}(\xi_1)}{\xi_2 \operatorname{erfc}(\xi_2)}$$

$$\xi = x / 2 (a t)^{1/2}$$

- x : Distance from surface (m)
- T₀ : Initial temperature (°C)
- T : Temperature (°C)
- a : Thermal diffusivity (m²/s)
- t : Time (sec)

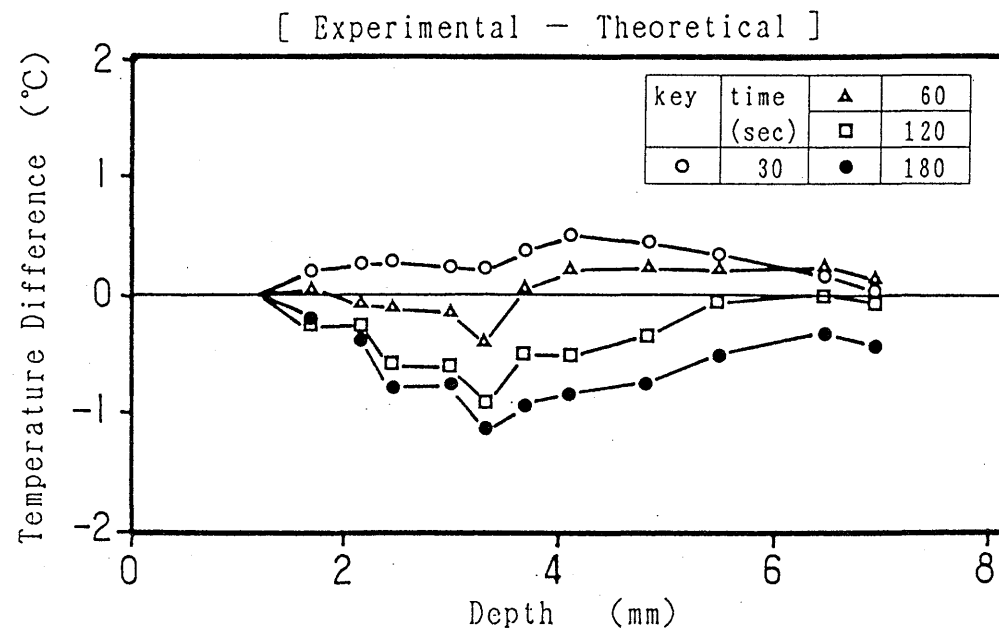


Fig. 9. Difference between experimental temperature and theoretical temperature of 1.2% agar gel (heated with only conduction)

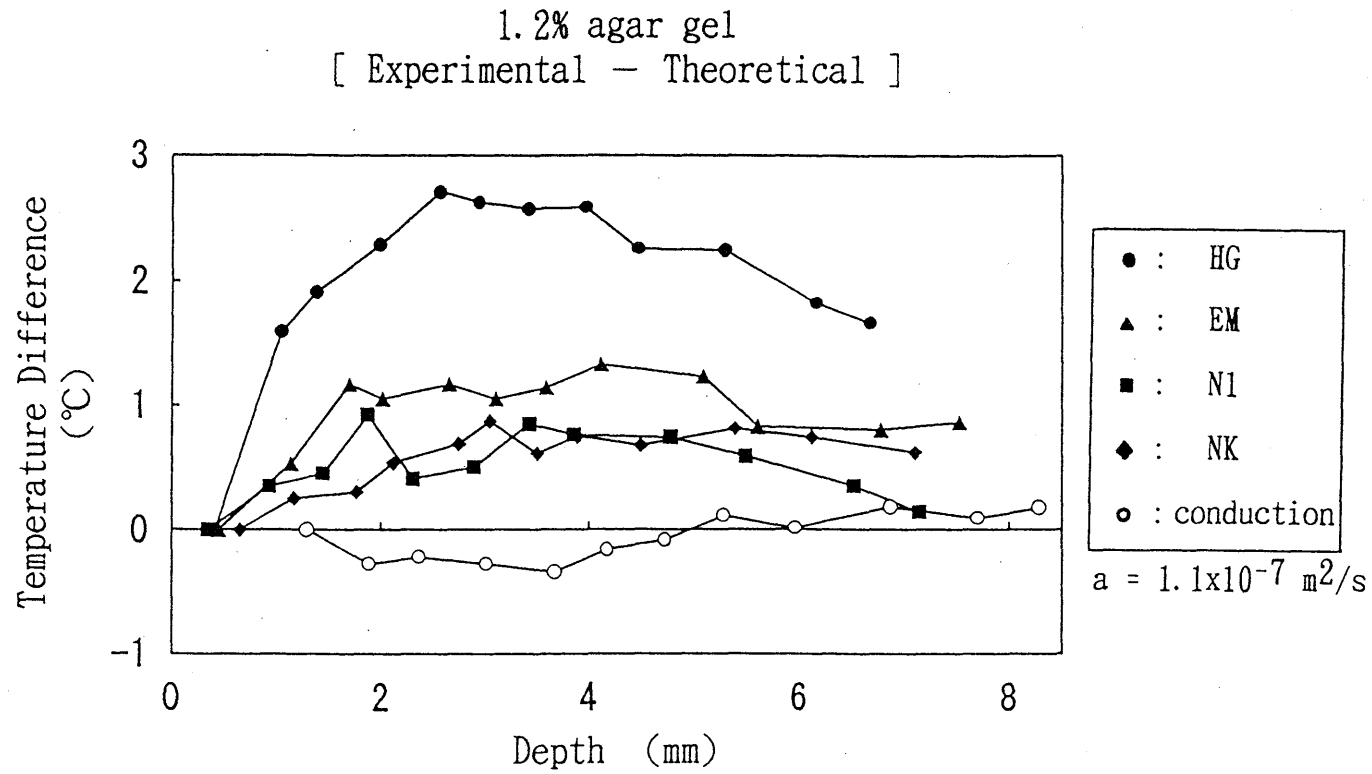


Fig. 10. Difference between experimental temperature and theoretical temperature of 1.2% agar gel baked at 60 sec

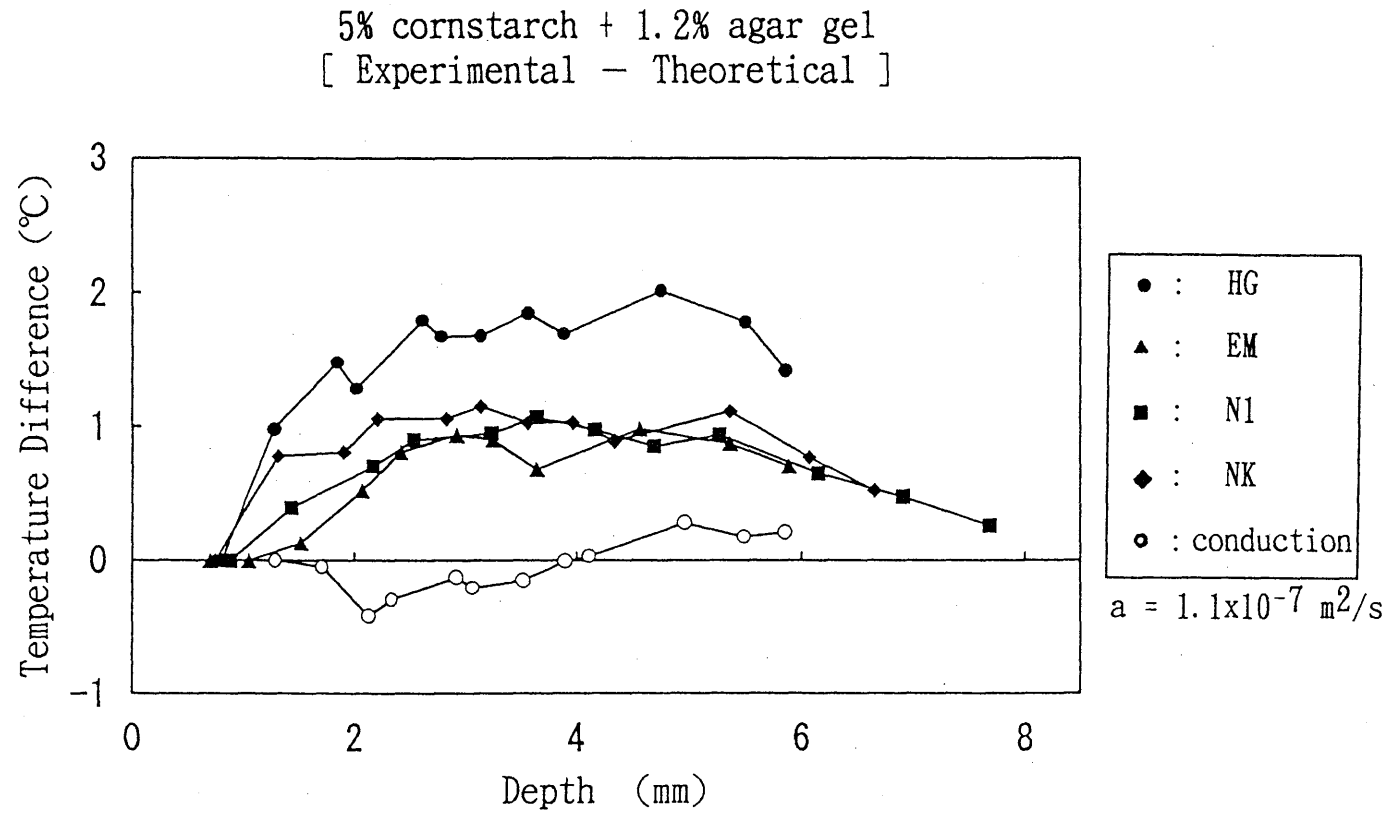


Fig. 11. Difference between experimental temperature and theoretical temperature of 5% cornstarch + 1.2% agar gel baked at 60 sec

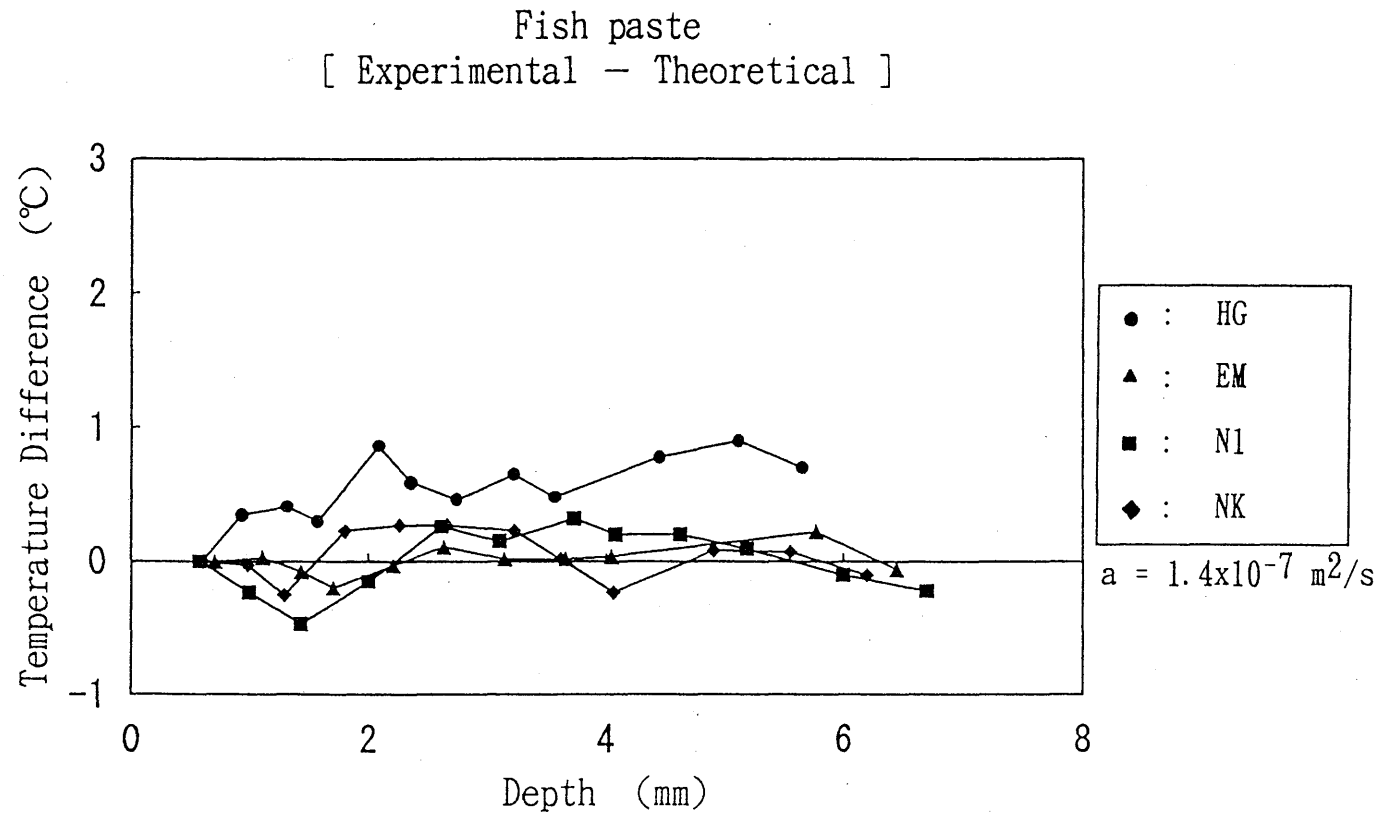


Fig. 12. Difference between experimental temperature and theoretical temperature of fish paste baked at 60 sec

5. 透過率の測定

食品表面での赤外線浸透が認められることから、食品による浸透深度の違いを知るために、分光光度計を用い、極薄い試料について各波長での透過率を測定することとした。

〔実験方法〕

測定装置：近赤外線分光光度計（ニレコkk, NIRS6500）およびフーリエ変換赤外分光光度計（日本電子kk, JIR-5400）を用いた。

試料：水、寒天ゲル、コーンスターチゲル、卵白ゲルおよび実際の食品としてじゃがいも、食パン、魚のすり身を用いた。

測定方法：近赤外線分光光度計では、調整した試料を三種の厚さの付属のセルに入れて測定した。固形の試料については、ガラス板ではさみ、セルに入れた。その際、変形しやすいものについては、アルミ棒を用いて変形を防いだ。

フーリエ変換赤外分光光度計では、薄い膜状の試料を磁石のついた金属板に挟み、透過率を測定した。

〔実験結果および考察〕

図13に水および寒天ゲルの透過率の結果を示す。水は、1460、1910nmに大きな吸収を持つが、近赤外線領域では4mmの厚さでもその80%近くが透過していた。2500nm以上の波長では1mmでも、ほとんど透過していなかった。寒天ゲルでも、2500nm以上の領域では0.5mmの厚さでもほとんど透過は認められなかった。コーンスターチゲル、卵白ゲル、パン、じゃがいもおよび魚のすり身については、図14、15に示すとおりで、近赤外線領域で透過が認められるが、波長が長くなるに従って透過率は極小さくなっている。食品による透過率の違いを比較するために、1000nmにおける透過率と厚さの関係を示すと図16のようになる。食品には近赤外線が透過するが、食品の成分、組織の違いによって近赤外線領域の透過率の異なることがわかる。

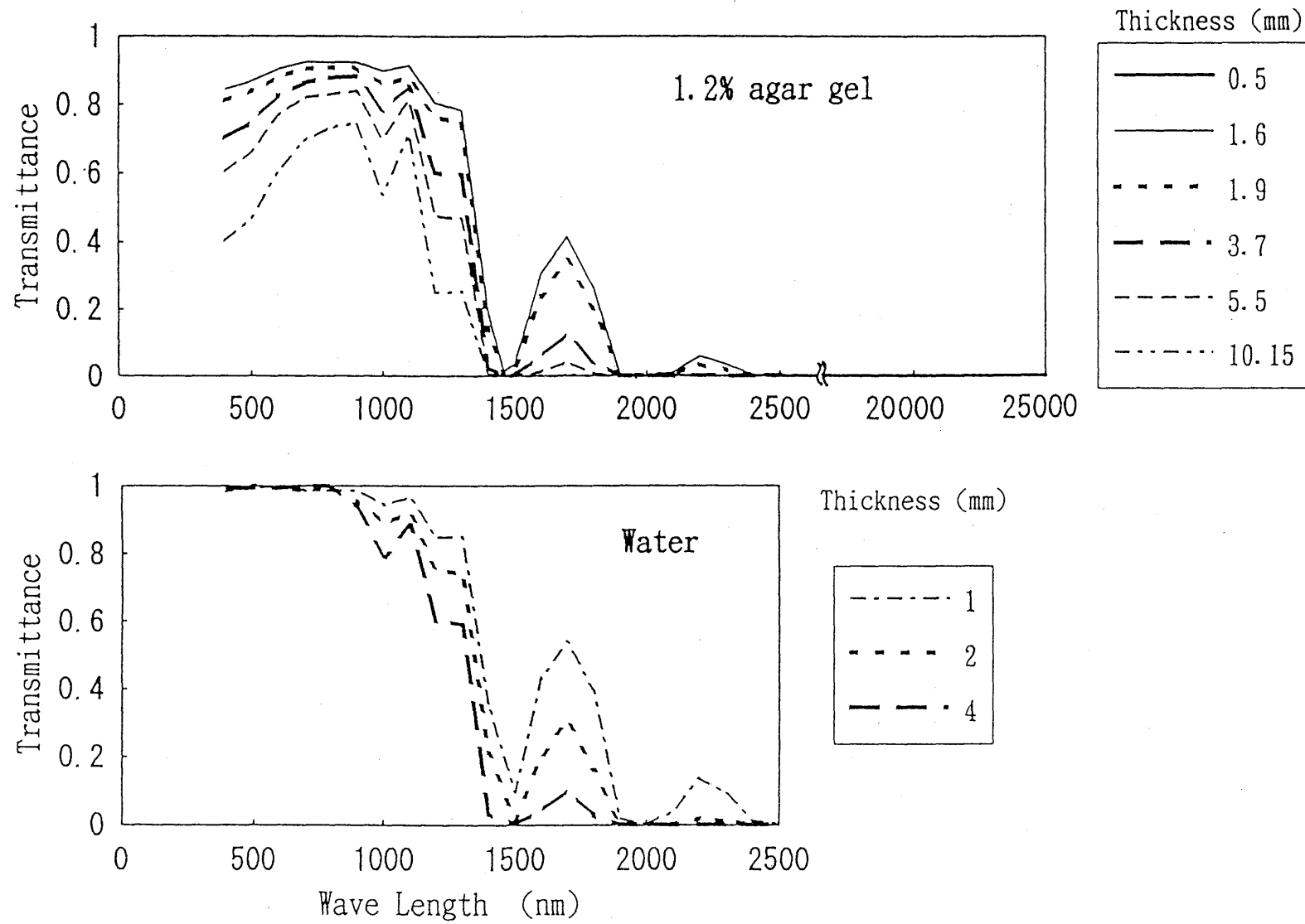


Fig. 13. Relationship between wave length and transmittance of infrared rays

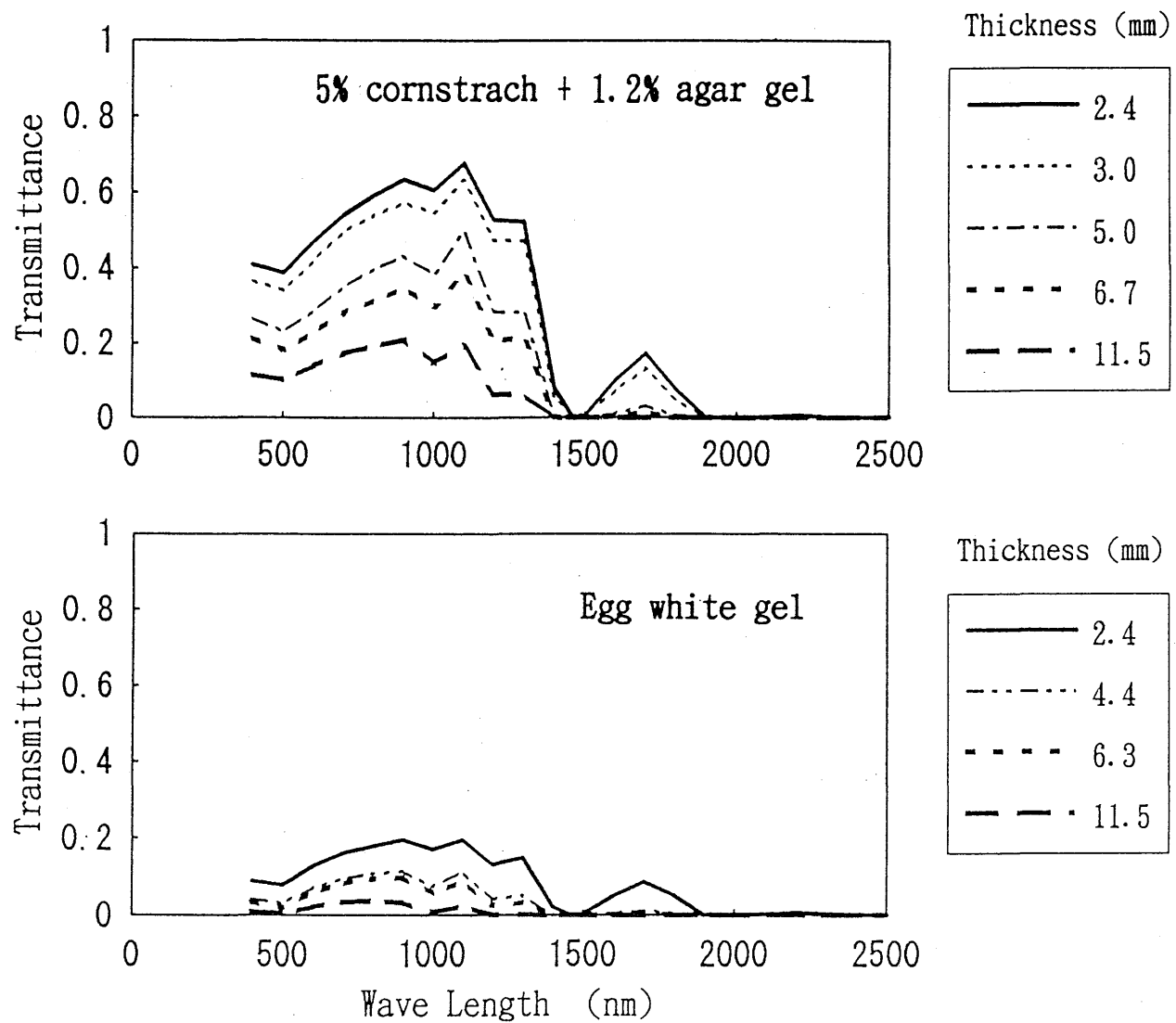


Fig. 14. Relationship between wave length and transmittance of infrared rays

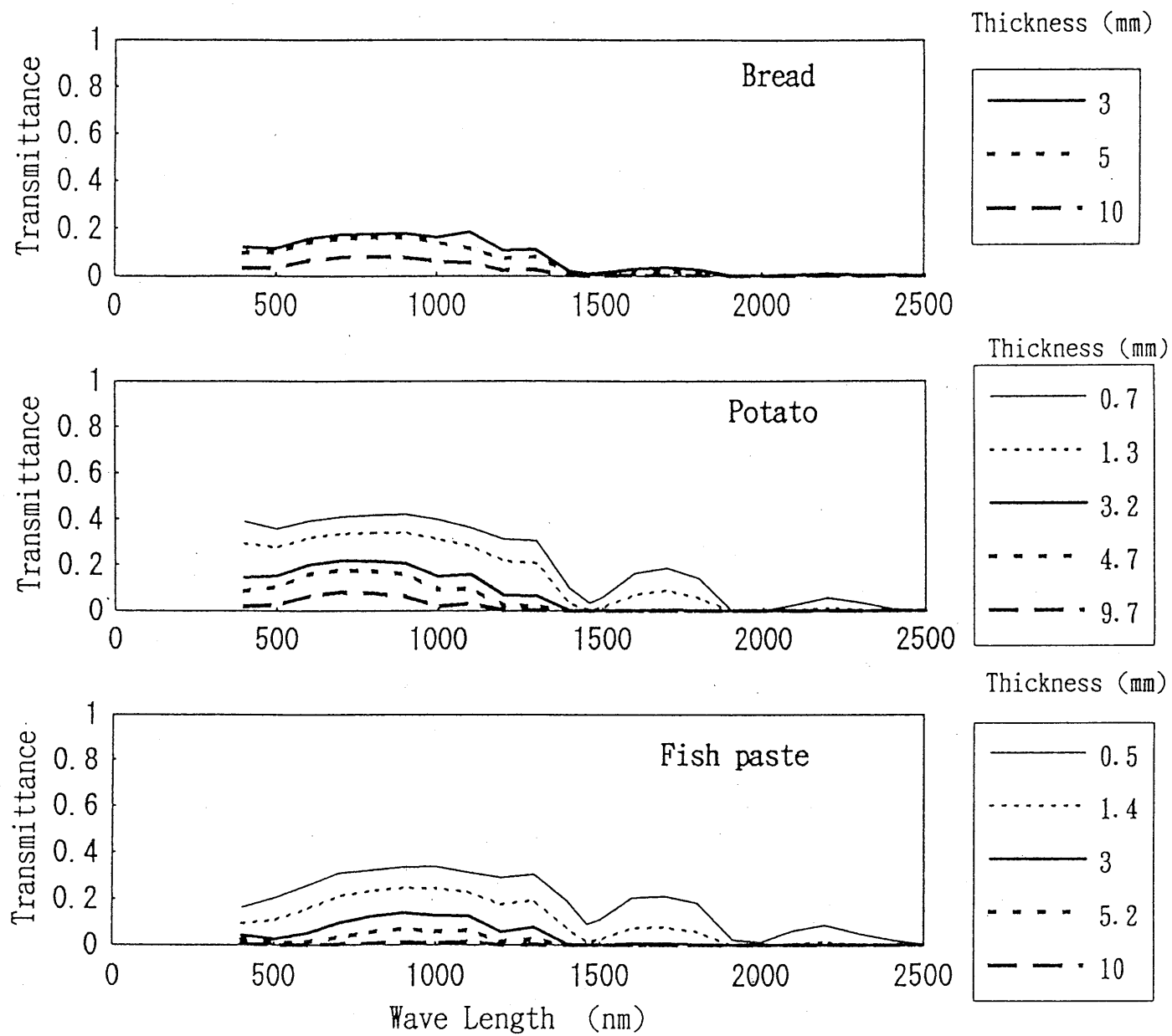


Fig. 15. Relationship between wave length and transmittance of infrared rays

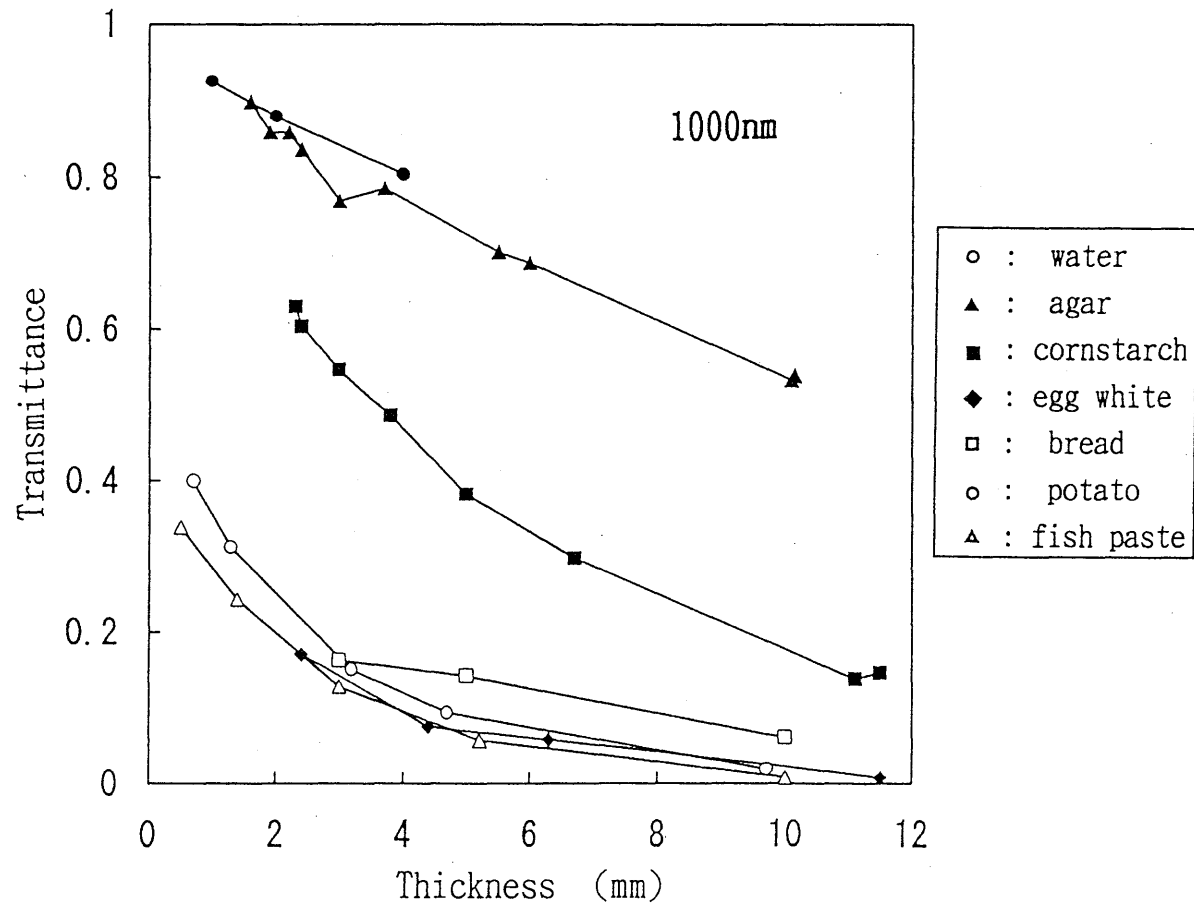


Fig. 16. Relationship between transmittance of infrared ray and thickness of sample at 1000nm

6. まとめ

食品を加熱する場合に、金属ブロックを使用して測定した複合熱伝達率がほぼ同じであっても、放射伝熱の割合が多いと食品表面の着色が進みやすいことを明らかにし、赤外線加熱は食品表面の加熱に特色を持っていることが確認された。

赤外線加熱の特性を明らかにするために、食パン、魚のすり身を波長特性の異なるヒーターで加熱した結果、波長特性によって食品表面の温度上昇、乾燥した層の形成の状態に差があり、短波長領域の浸透が見られることが明らかになった。

赤外線加熱した場合の温度上昇の実測値は、伝導で伝熱したと仮定して求めた理論値よりも高くなり、赤外線は食品表面に浸透して効果的に表面の温度上昇に寄与し、表面の着色に有効であることが示唆できた。

赤外線の食品表面への浸透状態を知るために、波長による透過率を測定することによって短波長領域では明らかに浸透が見られることが確認できた。

これらの結果から、赤外線の食品加熱における特性は、赤外線が食品表面の極浅い部分に浸透して熱に変わるためであることが明らかになった。また、短波長領域では浸透深度が深く、長波長領域では浸透深度が浅いことが明らかになった。遠赤外線加熱では、食品表面のより浅い部分で電磁波が熱に変わっているものと考えられる。