

遠赤外線による農産物の熱伝達に関する研究

劉 厚清^{a)}・毛利建太郎・難波 和彦
(農地生産力開発学講座)

Studies on Heat Transfer in Agricultural Products by Far-infrared Ray

Houqing Liu^{a)}, Kentaro Mohri and Kazuhiko Namba
(Department of Agricultural Technology of Integrated Land Use)

Heat is transferred when the object being heated has temperature differences. In this research, the difference of two heating methods (far-infrared ray heating and hot wind heating) was analyzed. To compare their differences, the heat flux was measured by setting a heat flux meter beneath the surface of the object at different depths, then the heat conductivities and heat diffusion rates were analyzed.

1. Compared with hot wind, far-infrared ray heating has more heat flux before reaching a definite depth.
2. The heat conductivity and heat diffusion rates by hot wind heating have specific properties with special objects. The heat conductivity and heat diffusion rate of far-infrared heating are higher than those of hot wind heating. The differences are considered to be caused by far-infrared rays.

Key words : heat flux, thermal diffusion rate, far-infrared ray, heat property of object

I. 緒 言

農産物の乾燥は、産物の変質防止、貯蔵性や加工性の向上を目的として行われる。また、農産物は形状や物性が各々異なっており、独特な風味をもっているものが多く、その品質を重視する乾燥方法が取られなければならない。乾燥する上で種々の制約があり、それぞれの農産物に対して乾燥方法が研究されて乾燥機は独自の構造をもったものが発達している。

農産物を対象にする従来からの乾燥システムは熱の利用上から分ければ、熱風乾燥、補助熱源付加通風乾燥および常温通風乾燥などのタイプが考えられる。熱を利用する乾燥は加熱された空気の中に被乾燥物を置き、対流熱伝達によって加熱し乾燥させるもので¹⁾、通称は熱風乾燥という。その目的は乾燥時間を短縮させ、乾燥能率を向上することであり、もっとも一般的な乾燥方法である。

従来の加熱乾燥は、被乾燥物の表面を加熱し、表

面から内部への熱伝達は、被乾燥物自身の熱伝導により物体の表面から内部に熱が伝えられ、加熱されて水分を蒸発させるものである。しかし、多数の農産物は熱伝導率が小さいので、内部温度を上昇させるには、表面の温度を高くして表面と内部との温度こう配を大きくしなければならない。そのためには熱風の温度を高くし、加熱時間を長くする必要がある。温度こう配が大きいほど加熱速度は大きくなるが、乾燥過程において焦げる、煮えるなど品質に悪影響も生ずる。

ここで、遠赤外線加熱の特徴を利用した農産物の高能率乾燥技術を確立するために、蒸したサツマイモを供試して加熱するとき、熱伝達の様子を熱流束および熱拡散率(温度伝達率)を用いて、熱風による加熱と比較しながら表面から近い部分の熱伝達に

Received October 1, 1997

a) 大学院自然科学研究科

(Graduate School of Natural Science and Technology)

ついて検討した。

II. 実験装置と方法

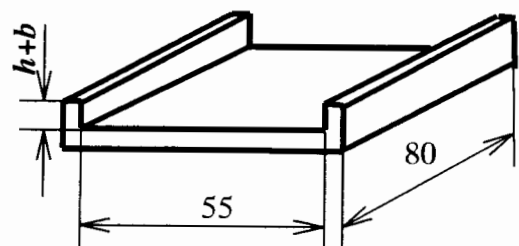
1. 供試試料

試料内部の各深さにおける熱流束の流れを正確に測定するためには、試料と熱流計が密着することが要求される。したがって、粘着性をもち、成形しやすいものを試料とし、蒸したサツマイモと水で練った小麦粉を使用した。

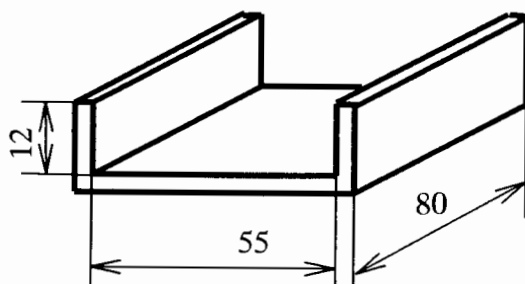
測定面以外からの熱の浸入がなく、熱流計への影響がないように供試試料の厚さは測定する最大深さの5倍以上とすることを前提に作成する。

蒸したサツマイモおよび水で練った小麦粉の試料の中に、一定深さに熱流計を埋め込むために、図1に示すようなアルミの成形型を作った。(a)は熱流計を一定深さに埋め込むための型で、熱流計の厚さを b 、埋め込む深さを h とするとき、この型の深さは $H = b + h$ としてそれぞれの深さに応じた型を製作した。(b)は全体として実験に供試する試料を成形する型とした。

試料の作り方を図2に示す。まず、図1に示した(a)型の内面にラップを敷き、型の中央部に熱流計の表を上に向けて置き、その上に試料を敷き詰めて、もう一枚のラップを試料の上に被せ、鉄ローラで(a)型の上縁に沿って、回転させながら熱流計と密着さ



(a) Model of heat sensor



(b) Sample design of sensor

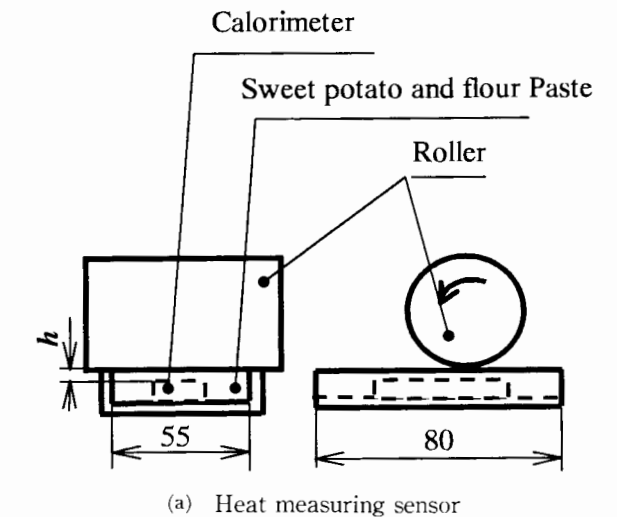
Fig. 1 Design of heat amount senses form

せる同時に、埋め込み深さ h を作成した。(a)型で作成したものを(b)型の底中央部に表を下に反転して入れる。そして、(b)型の中に試料を充分に入れ(a)型で作成したものを底に埋め込むようにする。(b)型の上面をラップを覆い、さきと同様に鉄ローラを回転させながら圧縮し、成形する。

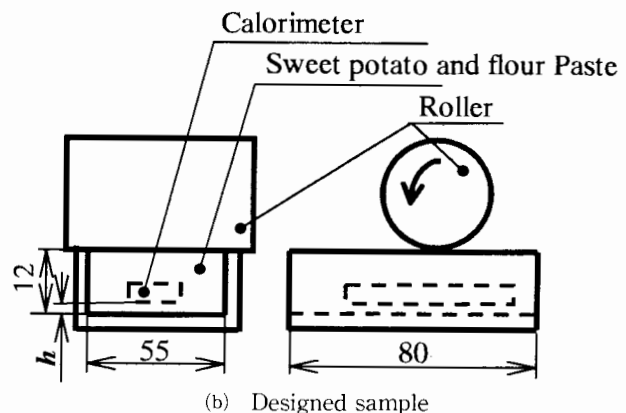
実際に熱流束の測定に供試した試料は図3に示す、一定深さに熱流計を埋め込んだ大きさ $55 \times 80 \times 12$ mmの試料である。これを遠赤外線乾燥装置および定温乾燥器に入れて熱流束の測定と表面温度の測定を行った。

2. 加熱、乾燥装置

遠赤外線による加熱の特徴を調べるために、棒状の遠赤外線ヒータをもった乾燥装置を用いて、試料表面および試料表面から一定の深さにおける熱流を熱流計で測定できるように、その概略を図4に示す。一方、遠赤外線による加熱と比較するために定温乾燥器を熱風乾燥器に改造して熱風加熱ができるよう



(a) Heat measuring sensor



(b) Designed sample

Fig. 2 Method of making the heat measuring sensor.

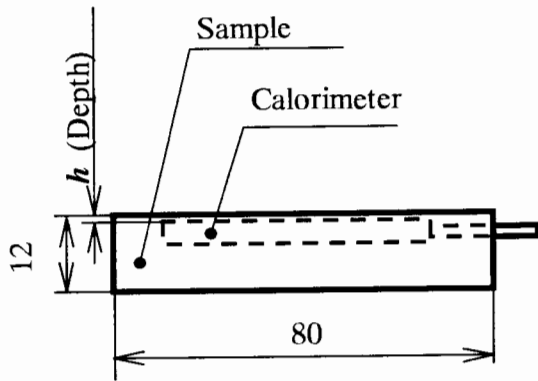


Fig. 3 Cross section of the sample.

にし、遠赤外線による加熱と同様に試料表面および表面から一定深さにおける熱流を測定できるようにした。

それぞれの加熱方法により熱流の量を比較しながら実験を行った。試料内部の熱流束はMF-9熱流計で、表面温度は放射温度計で測定した。

3. 実験方法

試料を乾燥室に入れる前に、乾燥室内の温度を(遠赤外線加熱の場合はヒータの表面温度も)安定させて、同時に乾燥室内の空気流の速度を一定にして、完成した試料をそれぞれの乾燥室に入れた。

試料を乾燥室に入れた瞬間から10秒ごとに熱流束および表面温度を測定し記録した。

この実験では、短時間の加熱で、水分の蒸発にしたがう試料の比熱、比重量がわずかに変化したがる、その少々の変化を省略して定数と見なし、熱流束が測定面に均一に流れると見なす。すなわち、比熱、比重量および測定層の厚さが一定であることを前提とした。

III. 結果および考察

1. 表面からの深さと熱流束

農産物の表面近くの熱の移動を考え、遠赤外線による農産物の加熱、乾燥過程を考察する。一般に農産物は熱伝導率が小さいので、農産物内部を加熱する場合には、農産物内部に温度こう配が生ずる。このときの熱の流れを考える。

いま、農産物内部に深さの異なる2つの等温面を想定し、その面の温度を t_1, t_2 とする。一方、それらの等温面に微小面積 dF を考え、両面間の距離を dx とすると、熱流は等温面に対して直角方向に流れ、 $d\tau$ 時間に流れる熱量を dQ とすると、 dQ は温度

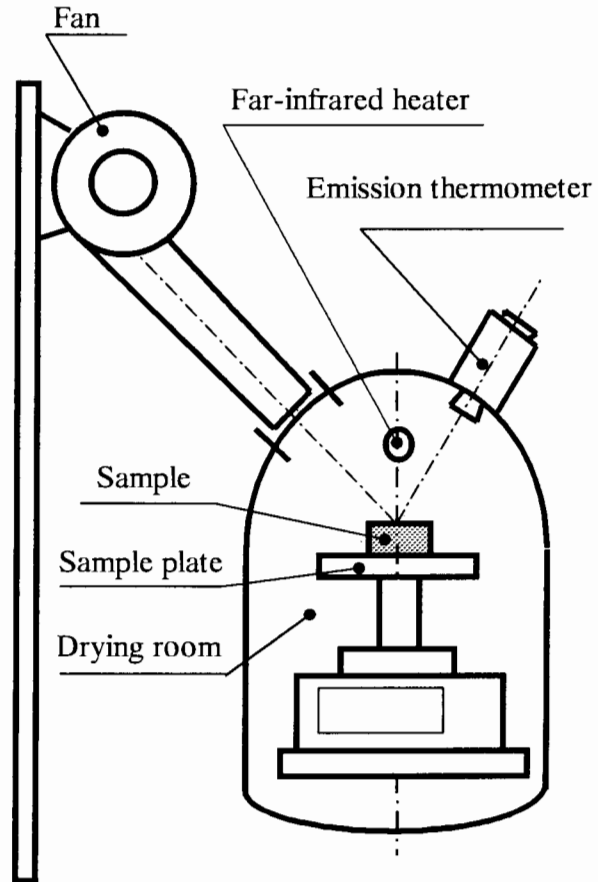


Fig. 4 Outline of far-infrared drying device.

差、面積および時間に比例し、距離に反比例するから、

$$dQ \propto \frac{t_1 - t_2}{dx} dF d\tau \tag{1}$$

と表すことができる。そこで、比例定数を λ 、距離 Δx 無限に小さくすれば温度差も無限に小さくなり、 t_1 の温度に近づく、そして、

$$dQ = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} dF d\tau \tag{2}$$

となる。

熱は高温側から低温側へ流れるとし、これをプラス (+) とすると単位時間、単位面積あたりに流れる熱量、すなわち熱流束 q は、

$$q = \frac{dQ}{dF d\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \tag{3}$$

で表せる。これは熱流束が温度こう配に比例することを表しており、その比例定数は一つの物質について温度が一定であれば定まった値となり、熱伝導率と呼ぶ。この(3)式を書き換えて、ある材料の加熱時間と表面温度が一定な場合に、内部の熱流束が一定

となり、熱伝導率 λ はつぎのような式で、

$$\lambda = q \left(-\frac{\partial x}{\partial t} \right) \quad (3')$$

で表される。そして、熱拡散率は平均比熱を c 、比重量を γ とするとき

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \quad (4)$$

ここに、 c ：平均比熱

γ ：比重量

で表される^{2)~6)}。

2. 熱流束の経時変化

遠赤外線による加熱と熱風による加熱の熱流束を測定するために、乾燥室内を39℃一定温度に保ち、熱流計を表面から0.4mmおよび1.0mmの深さに埋め込んだ試料をその中に置いたとき、それぞれの深さにおける熱流束の変化を時間の経過とともに求めた結果を図5に示す。

遠赤外線による加熱の場合は熱風による場合に比べて加熱を開始した直後から熱流束値が大きく、表面から内部に向けての熱の流れが多い、内部の温度が高くなっている。また、両加熱において深さ1.0mmより0.4mmと浅い場合に熱流束は大きくなり、深い場合は40秒前後で熱流束値は一定になった。すなわち、熱流束値が大きくなるということは、その時点でなお加熱が進んで内部温度の上昇があるということが考えられる。

3. 供試材料における熱流束

蒸したサツマイモを試料として、加熱時間60秒後において、表面からの深さと熱流束との関係を図6

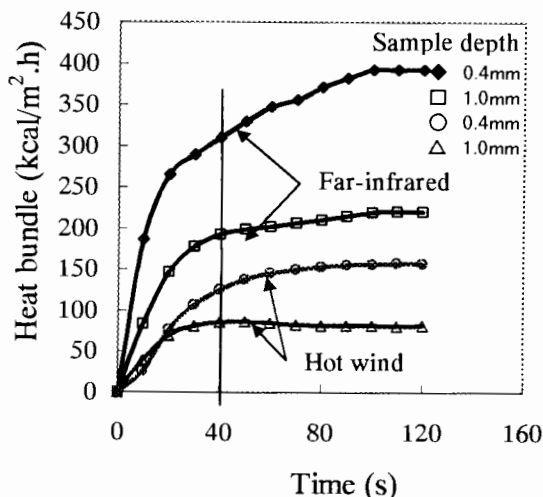


Fig. 5 Change of heat bundle in each heating method.

に示す。熱風加熱の場合に、深さ0.4mm付近から熱流束が急に小さくなり、0.6mmのところまで熱流束値は変化し、これ以降の深さにおいてはその値がほとんど変化しなかった。遠赤外線加熱は0.8mmの深さまでは熱流束値が大きくほぼ一定で、その後小さくなり、表面から1.2mmの深さのところに熱風加熱と同じような配の変化点がある。そして、それ以降は熱流束値が一定になる。この熱流束値が一定になるまでを、表面から加熱されて熱の移動の大きいところと考えると、熱風加熱では表面のごく近いところに限られるが、遠赤外線加熱の場合は約1.2mmの深さまで影響がおよんでいることが分かる。

小麦粉を供試材料にした場合の熱流束値の変化を

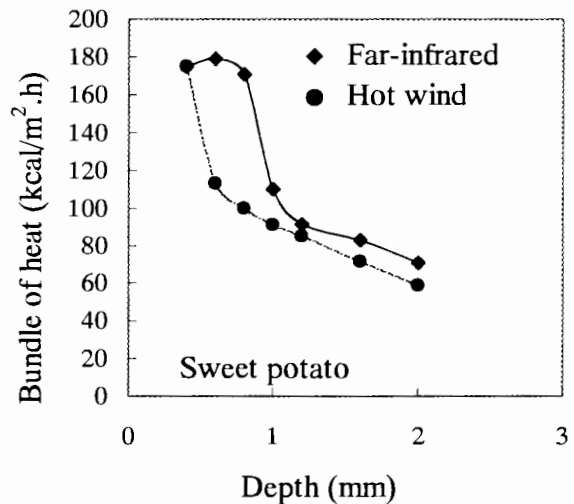


Fig. 6 Bundle of heat evaporated after 60 seconds heating of sweet potato.

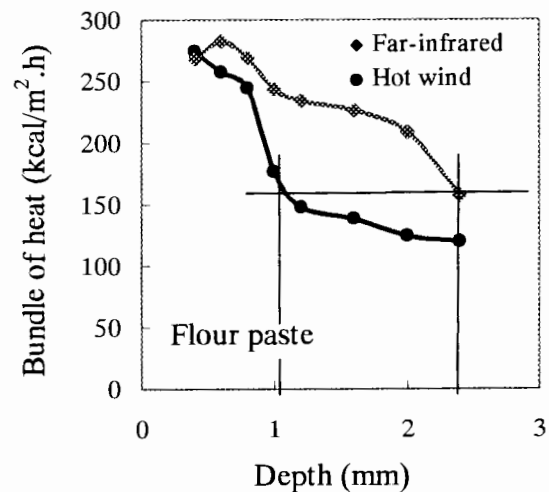


Fig. 7 Bundle of heat evaporated after 60 seconds heating of flour paste.

図7に示す. この場合は表面から約0.8mmの深さまでは遠赤外線による加熱と熱風による加熱の違いは熱流束値に見られず, それより深い2.4mmの深さまでの間で加熱方法による違いが表れ, 遠赤外線による加熱が熱流束値において大きくなり, 遠赤外線の放射効果による影響, すなわち, 供試試料の材料分子の活発化による温度の上昇の影響がおよんでいることが明らかになった.

4. 熱拡散率について

遠赤外線による加熱と熱風による加熱について, 熱流束値をもとにして, (4)式から熱拡散率を計算し, 双方の加熱状態における特徴の抽出を試みる. 蒸したサツマイモを熱風加熱した場合に, 熱流束値から求めた平均熱伝導率 $\lambda = 0.86$ である. そして, 蒸し

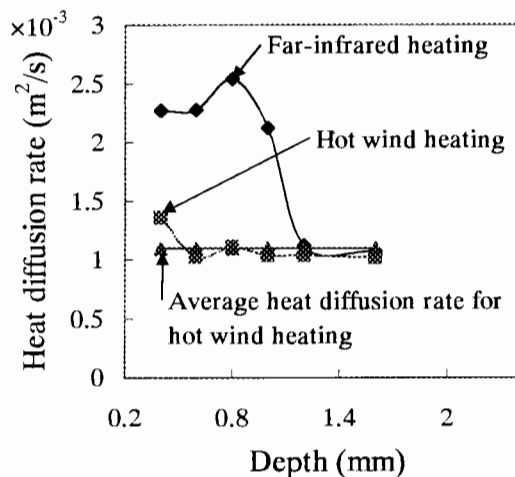


Fig. 8 Thermal heat diffusion rate for depth from surface.

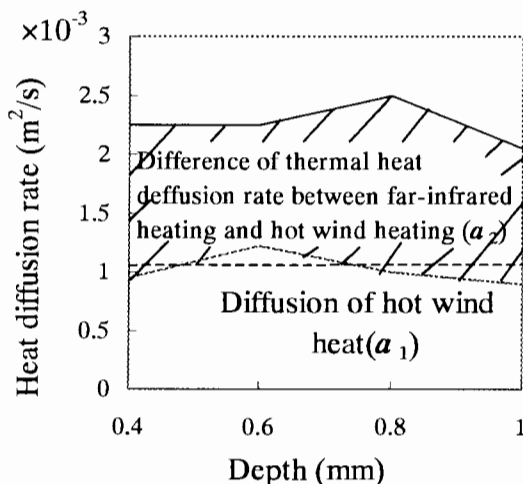


Fig. 9 Comparison of heat diffusion rate in 0.4 mm to 1.0 mm of depth.

たサツマイモの比熱 $c = 0.75 \text{ kcal/kg}\cdot\text{k}$ であり³⁾, そのときの比重量 $\gamma = 1065 \text{ kgf/m}^3$ である.

いま, 表面からの深さと熱拡散率との関係を示すと, 図8のようになる. 深さ1.2mmまでは熱風による加熱に比べて遠赤外線による加熱の場合, 熱拡散率が大きく, それだけ温度の伝導率が高いことを示している.

そこで, 熱風加熱による場合の熱伝導率 λ_1 は材料自身の熱物性によるものとし, それに加えて遠赤外線の放射作用による熱伝導率 λ_2 を考えて, この場合の熱拡散率 a_f とすると

$$a_f = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{c \cdot \gamma} = a_1 + a_2 \quad (5)$$

で表すことができる. その結果は図9に示す.

表面から深さ0.4mm~1.0mmまで, a_1 と a_2 の値はほぼ一定であり, 遠赤外線による加熱は, その物質がもっている熱物性値に加えて放射効果による内部温度の上昇があり, それは一般に言われているように遠赤外線が電磁波であるため, 物質の表面から浸透して, 内部分子の動きを活発化させて発熱を生じさせた結果であると考えられる⁷⁾.

IV. 摘 要

物質を加熱する場合に, 温度こう配があれば熱の伝達が行われる. ここでは熱流計を用いて表面から一定の深さに熱流計を埋め込んで熱流束を調べ, 表面近傍の熱伝達率および熱拡散率を求めて, 遠赤外線による加熱と熱風による加熱を比較した.

1. 遠赤外線による加熱の場合に, ある深さまでは熱風による加熱に比べて熱流束値が大きく, それだけ熱の移動が深くまでおよんでいることが確かめられた.
2. 熱風による加熱で得られた熱伝導率は, その物質がもっている固有の熱物性値と考えられる. 遠赤外線による加熱で熱伝導率および熱拡散率を求めると, 熱風による加熱で得られた値より大きくなり, それを差し引くと熱拡散率でははっきりと遠赤外線に起因する効果が認められた.

参 考 文 献

- 1) 山下律也: 農業機械学・3 新版農産機械学, pp. 115-117, 文永堂出版, 東京 (1991)
- 2) 一色尚次: 伝熱工学, pp. 5-106, 森北出版, 東京 (1975)

- 3) 農業機械学会編：新版農業機械ハンドブック, pp. 45-50, 630-649, コロナ社, 東京 (1984)
- 4) 日本機械学会編：機械工学便覧, pp.(6)34-(6)38, 日本機械学会, 東京 (1968)
- 5) 小林清志：工業熱力学, pp. 24-26, 181-204, 理工学社, 東京 (1980)
- 6) 甲藤好郎：伝熱概論, pp. 21-97, 養賢堂, 東京 (1967)
- 7) 日本電熱協会遠赤外線委員会編：遠赤外線加熱の理論と実際, pp. 68-84, オーム社, 東京 (1991)