

熱流束を用いた含水量連続測定技術に関する研究

林伊久¹ 中村裕章¹ 山本博美¹ 吉村賢二¹ 長谷部建二¹ 工藤久²

Study on Continuous Measuring Technic of Moisture Content with Heat Flux

Tadahisa Hayashi Hiroaki Nakamura Hiromi Yamamoto Kengi Yoshimura Kengi Hasebe Hisashi Kudo

食品および食品廃材加工機器業界では、60%～80%程度の水分を含んだ食品、食品廃材等に関する加工機械の省エネルギー、高効率化が課題になっている。加工処理工程では、含水量の調整が加工処理効率を左右するほど重要要因である。しかし、現状では、食品や食品廃材等に特有な多孔質体を連続的に精度良く測定できる安価な含水量計が、存在しないため、完全自動化が出来ず、加工処理効率が悪い。本研究では、食品や食品廃材等に特有な多孔質体の含水量を、熱流束（熱移動特性）を用いて手軽に精度良く連続測定¹⁾ができる技術を開発することを目的としている。本年度は、①被測定物内の熱移動特性に関する基礎実験と数値解析②センサーの最適構造の検討と設計を行い、センサーの基本特性を明確にすると共に最適構造を提案したので報告する。

1 はじめに

食品や食品廃材等の加工処理工程では、含水量の調節が、品質を左右する重要因子である。例えば、製麺等の食品では、含水量が品質を決め、食品廃材では、含水量の変動により処理量も増減する。現状では、含水量は、熟練技術者の経験や勘によって調節されている。食品業界では、含水量の調節を自動的に行えるシステムを開発し、現在の食材加工の省力化、高効率化を図ることにより、食品製造工程の高度化を図ることが求められている。しかし、現存する含水量測定方式（誘電式、電気抵抗式、近赤外線式）では、使用する電流や光が、食品や食品廃材等に特有な多孔質体内で散乱してしまうため、これまで食品や食品廃材等の含水量を精度良く測定することができなかった。

そこで本研究では、これまで困難とされてきた食品や食品廃材等に特有な多孔質体の含水量を簡単に精度良く連続測定できる技術を開発することを目的とする。開発する本含水量測定方式は、現存する含水量測定方式とは、全く異なった新しい方式である。

熱流束を用いた含水量連続測定センサーの原理は、被測定物（特に多孔質体）内部を伝わる熱移動特性が、外部から一定の熱量を加えると被測定物内部の含水量の変化に応じて一定の変化量を示す現象を利用したものである。技術課題は、熱移動特性が微弱であるため含水量との相関精度が悪く実用化に必要な測定精度±2%以下を満たし難い事である。そこで、本年度は、被測定

物内の熱移動に関する基礎実験と数値解析を行いセンサーの基本特性を明確にし測定精度改善要因を究明した。さらに、この成果を基にセンサーの最適構造の検討、設計を行った。

記号

Qs: ヒータ熱容量 (W/m³) C_{PH}: 測定物比熱 (W/KgK)
λ_H: ヒータ熱伝導率 (W/mK) ρ_H: ヒータ密度 (m³/Kg)
C_{PS}: 測定物比熱 (W/KgK) λ_S: 測定物熱伝導率 (W/mK)
ρ_S: 測定物密度 (m³/Kg) C_{Pr}: 樹脂比熱 (W/KgK)
λ_r: 樹脂熱伝導率 (W/mK) ρ_r: 樹脂密度 (m³/Kg)
h: 空気熱伝導率 (W/m³K) T_{ENV}: 表面温度 (°C)
T_{sv}: 周囲空気温度 (°C)

2 研究, 実験方法

本研究では、微弱な熱移動特性の原因を、①熱拡散率等の物性値解析。②測定物の乾燥特性解析③測定物内の熱伝導特性解析。の3項目から解明する。また、微弱な熱移動特性の原因を解明することにより、センサーの測定精度を±2%まで向上できるセンサーの構造を求めることを目的に、次のような実験を行った。

2-1 熱拡散率測定実験について

熱移動特性は、測定物内を伝わる熱量を表す熱伝導率と測定物内の水分を暖めるのに必要な熱量を表す熱容量（定圧比熱 C_p × 密度）の両物性値の相互関係によって求められる。

* 1機械電子研究所

* 2(有)九州シムス

熱拡散率 a は、下記の計算式により熱伝導率 λ 、定圧比熱 C_p 、密度 ρ をもとに熱移動特性を総合的に表すことができる。

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

熱拡散率測定実験では、熱拡散率を含水量 20% ~ 80%の範囲で熱伝導率 λ 、定圧比熱 C_p 、密度 ρ を測定することにより求めた。熱伝導率測定は、測定物(おかくず)を迅速熱伝導率計(京都電子工業株)を用いて行った。また、定圧比熱測定は、示差走査熱量計(セイコーインスツルメンツ株)を用いて行った。密度は、水とおかくずの物性値(熱物性ハンドブック 日本熱物性学会編)の体積比から求めた。各測定物の含水量は、赤外線水分計(株)ケット科学研究所)を用いて行った。

2-2 乾燥特性測定実験について

乾燥特性は、80%、60%、40%、20%の各含水量を含む測定物を 105℃、80℃、60℃で90分間加熱した場合の測定物内部の温度を測定する事で求めた。実験装置の構成を図-1 に示す。測定物内の温度測定は、測定物内の上段、中段、下段の3箇所で行い、3箇所の平均値を代表温度としている。

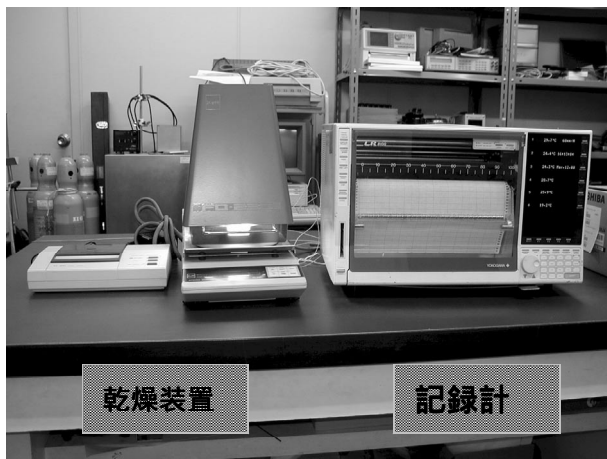


図-1 乾燥特性測定実験装置概要図

2-3 熱伝導特性測定実験について

熱伝導特性は、図-2 に示すように温度、湿度を一定に出来る恒温恒湿器、センサー用ヒーターに一定電力を供給する電圧調整器、温度等を計測記録するデータロガーと記録したデータを解析するコンピュータの4点を使用して測定した。測定は、恒温恒湿器内部で行った。

測定容器は長さ 300mm × 幅200mm×高さ60mmの木製を用いその内部におかくずとセンサー用ヒーター(150×100×2t)を設置した。センサー用ヒーターは、両面の熱発生量を均等にするために木製容器の中央部(底面からの高さ30mm)に設置した。また、センサー用ヒーターと壁面の距離は、壁面からの熱の影響を避けるために十分となっている。

本実験は、初期温度として20℃、40℃、50℃の3パターン、初期含水量として、20%、40%、60%、80%の4パターンの組み合わせで合計12パターン行った。実験は、各パターンともヒーターの熱量を90W(10⁷W/cm²)一定で行った。本実験では、センサー用ヒーターにステップ的に与えた熱量90Wに対してセンサー用ヒーターと測定物との接触面の温度を5点、接触面より5mm上部の温度を5点と接触面より10mm上部の温度を5点を測定した。熱伝導特性は、各測定点の温度上昇特性から求めた。

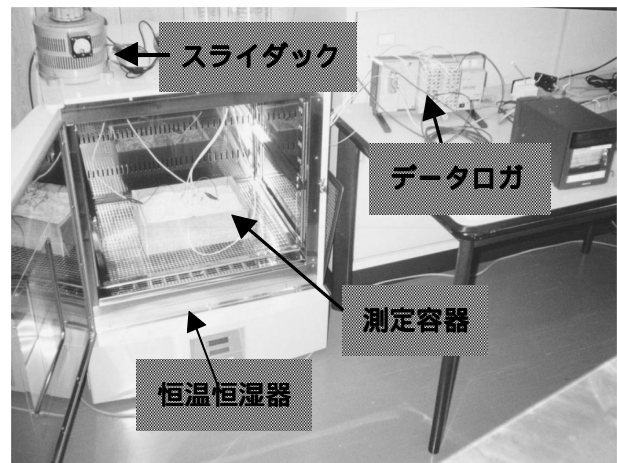


図-2 熱移動特性測定実験装置概要図

2-4 熱伝導特性数値解析について

熱伝導特性数値解析では、熱伝導特性測定実験と同一条件で次元非定常熱伝導数値解析を行った。解析モデルは、図-3 に示す。次元非定常熱伝導式は、ヒーターによる加熱が 200 秒程度と短時間であることとヒーターの接触体積が、全体の 0.4%程度であることから水の移動と蒸発を無視して導出した。

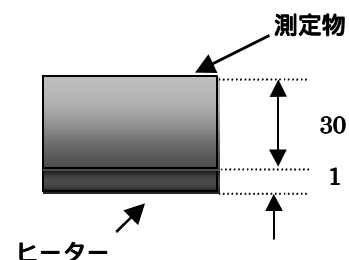


図-3 解析モデル

・ヒータ内部

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_H}{\rho_H C_{pH}} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q_s}{\rho_H C_{pH}}$$

・測定物内部

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s C_{ps}} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

境界条件は下記の通りである。

$$x = 0 : \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$x = 31 : -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial t} = h(T_{ENV} - T_{SV})$$

3 結果と考察

3-1 熱拡散率測定実験結果について

図-4 は、測定物内の各含水量に対する熱拡散率である。含水量に対する熱拡散率が、相関係数で 0.95 以上の高い線形性があることから、含水量に対する熱移動特性は、この線形を基準に変化する可能性がある。

その可能性は、3-3 熱伝導測定実験と熱伝導数値解析結果にて明らかにする。

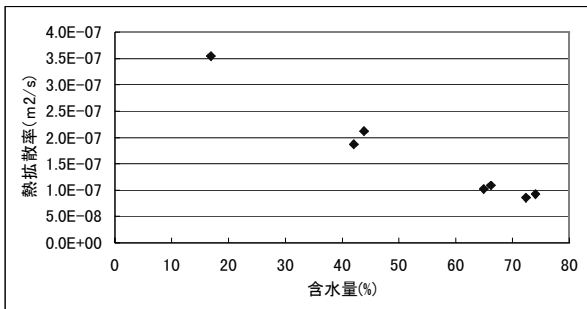


図-4 含水量に対する熱拡散率測定結果

3-2 乾燥特性測定実験結果について

図-5 は、含水量 40% の測定物 10g を 105℃、80℃、60℃ で 90 分間加熱した時の乾燥特性である。含水量 20%、60%、80% においても同様の結果を得た。

乾燥特性測定実験では、同一の測定物であっても、測定物に与える熱量が、異なれば、乾燥特性も異なることを確認した。これにより、局所的に熱を測定物に加える本含水量測定センサーは、すべての乾燥域において測定物内の温度を上昇させることができる。したがって、含水量測定に関して、特に乾燥特性の影響を受けないことが判明した。

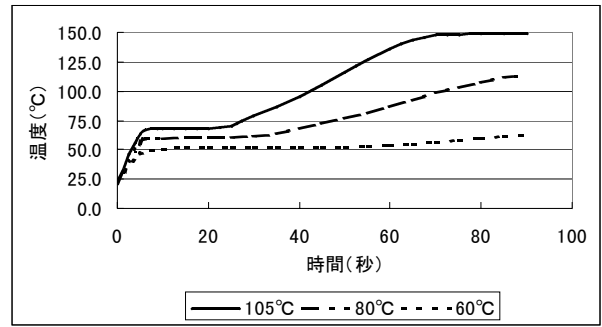


図-5 含水量に対する乾燥特性測定結果

3-3 熱伝導測定実験と熱伝導数値解析結果について

図-6 は、熱伝導特性に関する実験と数値解析の結果を示したものである。図-6 は、初期温度 27℃、含水量 19.8% の解析結果を代表としているが、12 ケースすべてにおいて実験値と数値解析値がほぼ一致している。

図-7 は、各含水量に対するセンサー用ヒーター表面の熱伝導特性である。

また、熱伝導特性測定実験と数値解析により下記の結果を得た。

本研究で取り扱う熱伝導特性は、実験結果と数値解析結果が、ほぼ一致することから、水の移動および蒸発を無視することが可能である。したがって、含水量測定中に測定物内の含水量が変化することはない。

熱伝導特性測定実験から、図-7 に示すように、含水量 20% から含水量 80% に対して、各温度上昇カーブが、一定の幅で低くなっていることが確認できた。すなわち、3-1 熱拡散率測定実験結果で得た含水量と熱拡散率の相関関係によるものと考えられる。

③②から、熱移動特性を増幅させるためには、センサーの構造と材質により、熱拡散率を増幅させる必要がある。

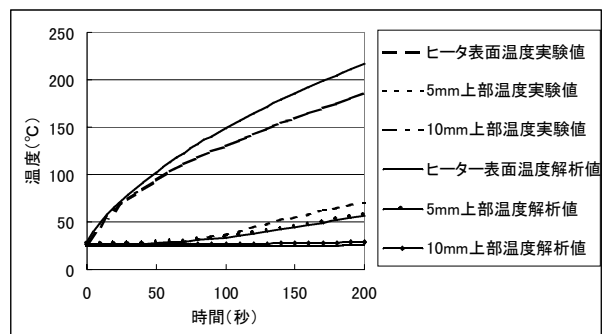


図-6 伝熱特性実験および数値解析結果

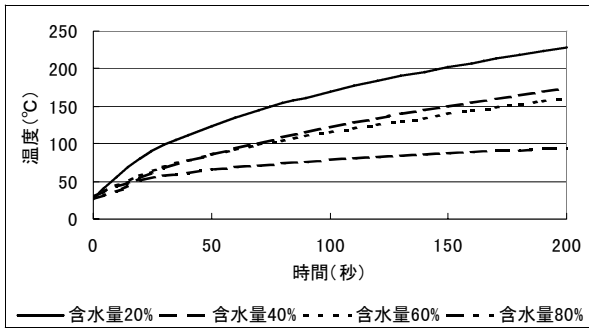


図-7 ヒーター表面熱伝導特性測定結果

3-4 センサーの最適構造の検討と設計について

被測定物内の熱移動特性に関する基礎実験と数値解析の結果を基に導出した一次元非定常熱伝導数値解析式を下記のようにセンサーの構造設計手法に拡張した。

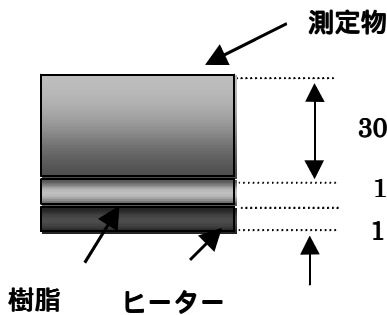


図-8 解析モデル

・ヒーター内部

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_H}{\rho_H C_{pH}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q_s}{\rho_H C_{pH}}$$

・樹脂内部

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_{pf}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

・測定物内部

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s C_{ps}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

境界条件は、下記の通りである。

$$x = 0 : \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$x = 32 : -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial t} = h(T_{ENV} - T_{SV})$$

本研究では、図-9 に示すような多層構造のセンサーを検討し、表-1 に示すような 5 種類の構造モデルを設計した。また、各構造モデルに対する数値解析を行

った。その結果を表-2 に示す。

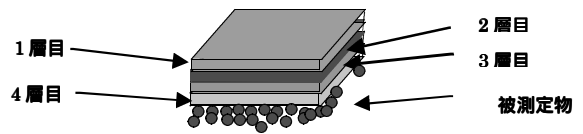


図-9 センサー構造概要図 (4層構造の場合)

表-1 センサーの構造モデル

CASE	1層目	2層目	3層目	4層目
1	断熱材	ヒーター	ステンレス	-
2	断熱材	ヒーター	銅	-
3	断熱材	ヒーター	樹脂	-
4	断熱材	空気層	ヒータ	樹脂

数値解析の結果、CASE 4 の断熱材 + 空気層 + ヒーター + 樹脂の 4 層構造は、次の 2 項目の効果がある。

①断熱層とヒーター間に空気層和を入れることにより、断熱性が増し、ヒーターからの熱量を測定物側に最大限、伝えることを可能にした。

②ヒーター上層部に樹脂を使用することにより、測定物と樹脂の総合的な熱拡散率を測定物単独の熱拡散率よりも増幅することを可能にした。

この2項目により、CASE1 ~ CASE 3 に比べて測定精度を 5 ~ 15%改善できる。このことから CASE4 を最適構造とした。数値解析結果を図-10 に示す。

表-2 数値解析結果

CASE	数値解析結果
1	非定常時の各時間における各含水量間の温度差が 10 ~ 15 °C であった。
2	非定常時の各時間における各含水量間の温度差が 10 ~ 15 °C であった。
3	非定常時の各時間における各含水量間の温度差が 20 ~ 25 °C であった。
4	ヒータ下部に断熱材に比べて 10 分の 1 熱伝導率の低い空気層を入れることにより、各含水量に対してヒータ表面の温度上昇率が CASE3 より約 5%改善された。

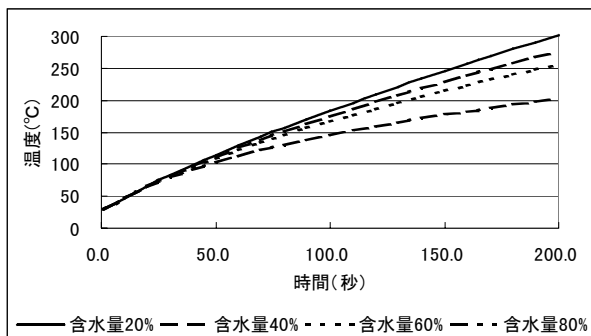


図-10 数値解析結果 (CASE5)

4 まとめ

本研究では、被測定物内の熱移動特性に関する基礎実験と数値解析によりセンサーの基本特性を明確にすると共にこの成果を基にセンサーの最適構造の検討し設計を行った。各成果を下記に述べる。

含水量と熱拡散率が、含水量20%～80%の広範囲で高い線形性(相関係数0.95以上)があることを確認した。

②すべての乾燥域において、測定物の含水量を測定することが可能であることを確認した。

③熱伝導特性に関する実験値と数値解析が全てのケースで一致したことから、200秒程度の短時間であれば、センサーから測定物に加熱しても、水の移動や蒸発が生じないことを確認した。これにより、本含水量測定センサーは、現在よく使用されている乾燥重量式含水量計で1時間測定に要しているのに比べて、200秒以内に短縮する事が可能となる。

④微弱な熱移動特性の原因が、測定物内の水の移動や蒸発や乾燥特性などによるものではなく、熱拡散率等の物性値の影響を受ける事を確認した。これにより、センサーの構造を、表-1のように設計することにより、測定物の物性値を変化させ改善することができ、熱移動特性を増幅することができる。

⑤③で導出した数値解析法をセンサーの構造設計法に拡張し、最適構造体(断熱材+空気層+ヒーター+樹脂の4層構造)を求めることが出来た。

表-3は、設計したセンサーの最適構造体に対する含水量測定実験の結果である。本研究の技術課題である微弱な熱移動特性を改善し、測定精度±2%を達成した。

表-3 含水量測定実験結果

NO	本含水量測定センサー (%)	加熱式含水量計(JIS仕様) (%)	測定誤差 (%)
1	8.81	7.31	+1.50
2	33.13	36.43	-3.30
3	57.23	52.99	+4.24
4	12.38	11.39	+0.99
5	67.15	68.34	-1.19
6	45.80	46.53	-0.73
7	80.81	79.81	+1.00
8	19.40	19.80	-0.40
9	40.40	39.60	+0.59
10	61.48	61.81	-0.33
11	81.37	79.50	+1.87
12	37.61	40.13	-2.52
二乗平均誤差			1.95

5 参考文献

- 1) 林伊久：生ゴミ処理機含水率測定法，第27回機械金属連合会計測分科会，P63-P66(1998)
- 2) 中村裕章：高含水率難燃物質の乾燥機構の研究，第5回研究報告 福岡県工業技術センター，P165-P169(1994)