

# 熱流束制御技術に関する研究

## 熱流束式含水量計の開発

林伊久\*<sup>1</sup> 大熊寿\*<sup>2</sup> 工藤久\*<sup>2</sup> 七ッ矢憲輔\*<sup>2</sup> 上宇都幸一\*<sup>3</sup> 松尾孝美\*<sup>3</sup> 斉藤晋一\*<sup>3</sup>

### Study on control technique for heat flux

#### Development of moisture measurer using heat flux

Tadahisa Hayashi Hisashi Okuma Hisashi Kudo Kensuke Nanatuya Koichi Kamiuto Takami Matuo Sinich Saito

本研究では、多孔質層内に含まれる含水量の変化に対して多孔質層内を伝わる熱流束が異なる特性を利用して多孔質層内の含水量を簡単に精度良く測定できる新方式である熱流束式含水量計の実用化開発を行った。本研究の成果として、機械電子研究所の水分量検知技術、(有)九州シムスの金属蒸着印刷技術と大分大学の多孔質層内熱移動解析技術を応用し、多孔質層内の含水量を精度良く短時間(10秒以内)で測定出来るセンサーを開発した。また、熱流束式含水量計の商品化を実現したので報告する。

#### 1 はじめに

熱流束式含水量計は、平成12年度より中小企業総合事業団の開発委託事業「課題対応新技術革新促進事業」において開発した製品<sup>1)</sup>である。

現存する含水量計(誘電式、電気抵抗式、近赤外線式など)では、使用する電流や光が多孔質層内で散乱してしまうため、これまで食物、食品廃材、土木建材、農業用土壌等の生産原料に特有な多孔質層内部の水分量を精度良く連続測定することが出来なかった。そのため、生産現場では、原料等の水分管理不足による製品の品質低下が技術課題となっていた。本事業では、この技術課題を解決するため、著者らは、厳しい環境の生産現場での使用に耐えうる安価で手軽に精度良く、これまで難しいとされてきた多孔質層内の水分量を連続測定出来る熱流束式含水量計を開発してきた<sup>2)</sup>。今年度は、熱流束式含水量計の実用化開発を行った。

#### 2 原理<sup>3)</sup>

今回、開発した熱流束式含水量計の測定方式は、多孔質層内部の熱移動速度を利用して多孔質層内部の水分量を簡単に測定する事を可能にした新しい方式である。多孔質層内の熱移動速度は、外部から一定の熱流束に対して多孔質層内の水分量の変化に対し一定の変

化を示す。そして、この熱移動速度の変化の挙動は、多孔質層の種類によらず一定である。熱流束式含水量計は、この現象を利用したものである。

図-1は、熱流束式含水量計の水分量測定素子詳細図である。センサー<sup>4)</sup>は、多孔質層内の水分量に対する多孔質層内を伝わる熱移動速度の変化が、微小であるため、高感度で測定できる複雑な多層構造とした。

まず、センサー内蔵ヒーターから一定熱流束を測定物に加える。図-2の様に測定物内の水分量に応じて熱移動速度に変化が生じる。熱量束式水分量測定計では、その熱移動速度がセンサーと測定物との接触面温度と一対一に対応している。熱移動速度は、接触面温度から温度上昇速度( /秒)として求める。水分量は、図-3の様に予め求めておいた測定物の温度上昇速度と水分量との相関関数から演算して求める。

熱量束式含水量計の特徴としては、水分量測定範囲が0~100%と広い。測定時間が10秒程度と短い。重量が300g以下と軽く携帯が可能である。連続測定が可能である。センサーの構造が、簡単である。堅牛で現場向きである。耐久性に優れている。等がある。

\*1 福岡県工業技術センター・機械電子研究所

\*2 (有)九州シムス

\*3 大分大学工学部

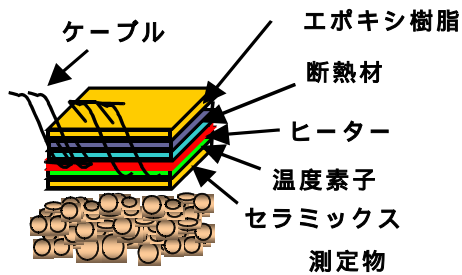


図-1 水分測定素子構成図

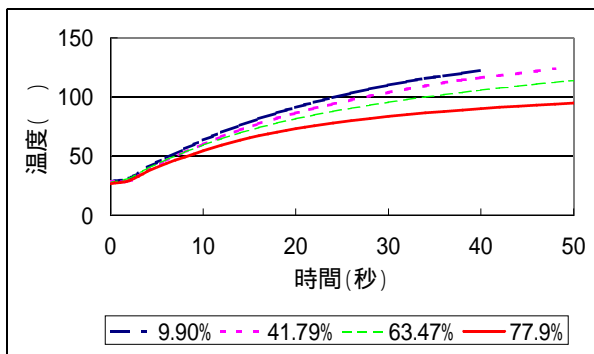


図-2 センサーと測定物との接触面温度

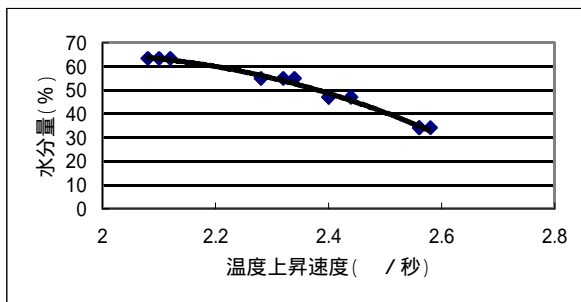


図-3 センサーと測定物との接触面の水分量に対する温度上昇速度

### 3 仕様

熱流束式含水量計は、図-4 に示す様にセンサと本体<sup>5)</sup> (熱起電力変換部、演算部、ヒーター用電力発生部、表示部、設定部を有する)で構成されている。

センサーは、図-5、図-6 に示す様に直挿式とサンプリング式の2種類を用意している。直挿式センサーは、生ゴミ、古紙スラッジ、廃材チップなど貯留槽に大量に貯留してある測定物に挿入し水分量を測定する場合に使用する。サンプリング式センサーは、主に食品加工現場で食品原料等を5g程度サンプリングして水分量を測定する場合に使用する。

図-5、図-6のセンサー先端部には、図-1に示した多層構造の水分量測定素子を配置している。

また、測定精度を確保するため、センサーは、ヒーターからの熱を最大限、測定物に伝え、側面からの熱損失を最小限に抑えなければならない。本研究では、

センサーの構造について詳細に検討し、センサー側面からの熱損失をヒーターが発生する全体熱量の1%以下に抑える事に成功した。



図-4 熱流束式含水量計全体概要図



図-5 直挿式センサー



図-6 サンプリング式センサー

表-1 熱流束式含水量計仕様

No	形式	THP-001
1	測定精度	±1%以内
2	測定範囲	0% ~ 100%
3	測定時間	10 秒
4	測定再現性	99.55%以上
5	使用雰囲気温度	Max100
6	使用雰囲気湿度	Max100%
7	電源	3V リチウム電池 4 本
9	寸法	本体190 × 88 × H27mm
10	重量	300g

#### 4 性能評価

熱流束式含水量計の性能評価試験は、次の2段階で行った。

実験室でのサンプルを使用した性能評価試験

現場でのフィールドテストによる性能評価試験  
測定物としては、生ゴミ<sup>6)</sup>、生ゴミ処理用菌床材<sup>6)</sup>、セメント、古紙スラッジ、魚肉、廃材チップ、イチゴ水耕栽培用培地等で行った。今回は、代表例として生ゴミおよび生ゴミ処理用菌床材に対する水分測定結果を報告する。

##### 4-1 サンプルを使用した性能評価試験

本試験は、現場でのフィールドテストの予備試験としてフィールドテストで用いる測定物に対する熱移動速度( /秒)と水分量(%)の相関関数を求める事を目的とした。

試験方法は、表-2 の条件の下で下記の ~ を行い、使用する測定物の標準相関関数を求めた。また、性能は、求めた相関関数の相関係数によって評価した。

JIS によって定められている加熱重量式水分量測定法を用いて4~5種類程度の水分量の異なる測定物を試作する。

試作した測定物を用いて各水分量に対する温度上昇速度を求める。

熱移動速度と水分量の相関関数を求める。

表2に標準相関関数を求める条件を示す。

試験装置は、図-8 に示す様に自動計測装置と熱流束式含水量計本体で構成されている。図-9 は、使用した測定物の一例である生ゴミ処理用菌床材である。

表-2 標準相関関数を求める条件

No	条件項目	条件数値
1	センサーと測定物間の圧力	9.8 × 10 <sup>4</sup> Pa (1Kgf/cm <sup>2</sup> )
2	測定物内初期温度	20
3	センサー内蔵ヒーター熱量	2W
4	測定時間	10 秒



図-8 試験装置構成図

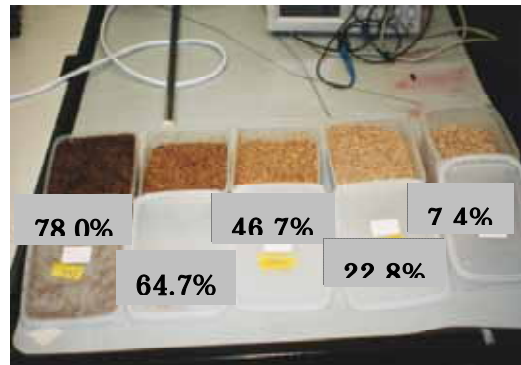


図-9 生ゴミ処理用菌床材

##### 4-2 現場でのフィールドテストによる性能評価試験

本試験は、サンプルを使用した性能評価試験により求めた標準相関関数を使用して、実際に、生産現場に熱流束式水分量測定計を持ち込みフィールドテストを行った。図-10 に生ゴミの概要を示す。図-11 は、生ゴミ水分測定風景である。

性能は、次の2項目で評価する。

全試験の二乗平均誤差

JIS に定められた加熱重量式水分量測定法による結果を基準とする。

数回の測定における再現性

再現性は、含水量測定値の標準偏差を求め、100%から引いたものである。



図-10 生ゴミ



図-11 生ゴミ水分測定風景

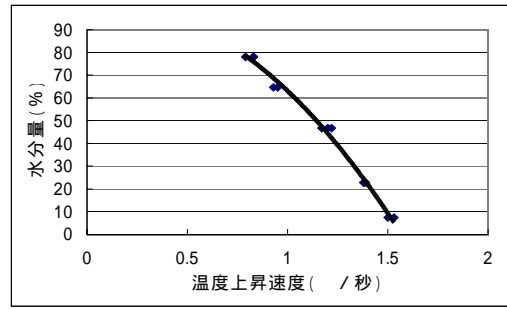


図-12 温度上昇速度と水分量の相関関

## 5 性能評価試験結果

### 5-1 サンプルによる性能評価試験結果

本試験では、一例として生ゴミ処理用菌床材についての性能評価試験を行った。表-3 に試験結果を示す。図-12 は、生ゴミ処理用菌床材に対する温度上昇速度 ( / 秒) と水分量 (%) の相関関数である。相関係数は、0.992 であった。相関式は、温度上昇速度 ( / 秒) を  $x$ 、水分量 (%) を  $y$  とすると相関関数は、

$$y = -48.008x^2 + 12.54x + 98.726$$

であった。

本試験の結果、相関係数がほぼ 1 であることから標準相関関数としてフィールドテストに使用できると判断した。

表-3 サンプルによる性能評価試験結果

No	加熱式 JIS 仕様 (%)	熱流束式水分量測定計		
		測定速度 (秒)	初期温度 ( )	温度上昇速度 ( / 秒)
1	78.0	10	20.0	0.79
2	78.0	10	20.1	0.83
3	78.0	10	20.0	0.83
4	64.7	10	20.3	0.93
5	64.7	10	20.2	0.95
6	46.7	10	20.0	1.17
7	44.7	10	20.1	1.20
8	22.8	10	20.0	1.39
9	22.8	10	20.3	1.38
10	22.8	10	20.2	1.38
11	7.4	10	20.0	1.53
12	7.4	10	20.2	1.50

### 5-2 フィールドテストによる性能評価試験結果

本試験は、サンプルによる性能評価試験結果で求めた生ゴミ処理用菌床材の標準相関関数を基に生ゴミ処理機を用いたフィールドテストを行った。表-4 は、フィールドテストの試験結果である。

表-4 フィールドテストによる性能評価試験結果

No	加熱式 JIS 仕様 (%)	熱流束式 (%)	測定誤差 (%)	再現性 (%)
1	14.20	14.20	0.00	99.39
2		12.90	1.30	
3		14.20	0.00	
4	19.50	18.00	1.50	98.90
5		17.30	2.20	
6		19.90	-0.40	
7	19.90	21.80	-1.90	98.69
8		20.50	-0.60	
9		23.70	-3.80	
10	23.15	24.30	-1.15	99.72
11		23.70	-0.55	
12		23.70	-0.55	
13	31.84	30.70	1.14	98.63
14		33.20	-1.36	
15		33.90	-2.06	
16	39.00	36.40	2.60	99.21
17		37.00	2.00	
18		35.10	3.90	
19	32.00	33.20	-1.00	99.95
20		33.20	-1.00	
21		33.10	2.10	
二乗平均誤差			1.81	99.21

## 6 まとめ

本研究では、測定物に対する熱移動速度と水分量の相関関係に基づく新方式の含水量計を開発した。開発に際し次の事項を確認した。

開発した測定方式の理論が、正しい事を各性能評価試験から実証した。

開発した熱流束式含水量計が、実際に現場で十分、使用出来る事を確認した。

この技術課題に対して、温度補正を行う事で解決し測定精度、再現性等を仕様以下にする事に成功した。

表-5 は、生ゴミおよびセメント、古紙スラッジ、魚肉、廃材チップ、イチゴ栽培用培地等の測定物に対して、これまで行ったすべての性能評価試験結果を基に技術目標値と達成値を比較したものである。

本研究では、計画した技術目標は、ほぼすべて達成する事に成功した。測定の再現性については、測定物とセンサーの接触状態により平均で技術目標値に対して 0.1 ポイント低くなった。この結果を踏まえて、本研究では、これまでの市場調査により、現状の性能で十分、市場に商品として投入する事が出来る事を確認している。

熱流束式含水量計は、平成 14 年 7 月初旬より  
(有)九州シムス(福岡県嘉穂郡稲築町大字山野 1963  
TEL:0948-83-5252 FAX:0948-83-5253)にて、商品名「ウォーターバスター」で製造販売予定である。

表-5 技術目標値と達成値

No	技術項目	技術目標値	達成値
1	測定精度	± 1%以内(実験室) ± 2.5%以内(現場)	± 0.77%以内(実験室) ± 1.38%以内(現場)
2	測定範囲	0 ~ 100%	0 ~ 100%
3	測定速度	30 秒以内	10 秒以内
4	測定再現性	99.5%以上	99.4%以上
5	使用雰囲気温度	MAX100	MAX100
6	使用雰囲気湿度	MAX100%	MAX100%
7	価格	15 万円以下	15 万円以下

注 1)測定精度達成値の実験室および現場での数値は、平均値である。

注 2)測定再現性の達成値は、平均値である。

## 7 参考文献

- 1)林伊久 ほか 6 名：熱流束式含水量計の開発，平成 12 年度課題対応技術革新促進事業成果報告書，P.83 -P.86(2002)
- 2)上宇都幸一，林伊久 ほか 3 名：含水多孔質層の非定常温度特性，大分大学工学部研究報告 第 44 号，P.25-P.29(2002)
- 3)林伊久：熱流束を用いた含水量連続測定技術に関する研究，第 8 回資源環境連合会総会地域連携研究発表会，P.27-P.29(2000)
- 4)林伊久：特開 2001-343343 水分量検知センサー及びそれを使用した含水率測定方法
- 5)林伊久，ほか 3 名：熱流束式水分量測定計の開発，第 20 回計測自動制御学会九州支部学術講演会，P.241-P.244(2002)
- 6)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，P.63-P.66(1998)