

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760468

研究課題名(和文) 流体と熱交換を行う潜熱蓄熱材の蓄・放熱挙動推定式の提案

研究課題名(英文) A Method for Estimating Amount of Stored Heat in PCM that Exchange Heat with Flowing Water

研究代表者

藤田 浩司 (FUJITA, KOJI)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40513536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：流体(温水)と熱交換する潜熱蓄熱材の蓄熱量の時間変化を、潜熱蓄熱材の物性値に応じて推定できる式を提案した。潜熱蓄熱材には相変化温度に幅を持たないものと幅を持つものがあるが、それぞれの場合の推定式を提案した。この条件の厳密解析解を得ることは困難であるため、いくつかの近似を適用した近似解析解を推定式とした。この推定式の妥当性は、詳細に計算した数値計算結果と比較して確認した。

研究成果の概要(英文)：We derived equations to estimate the temporal change in the amount of stored heat in phase change material (PCM) that exchange heat with flowing water. There are two types of PCM concerning the range of the phase-change temperature. One has the range, and the other doesn't have the range. We derived the equations for the both types of the PCM. No rigorous analysis has been carried out for these cases. Therefore, we considered methods to obtain approximate solutions based on a number of approximations. By visualizing the approximate analytical results and comparing them with the numerical simulation results, we checked the applicability of the approximate analytical results as the equations to estimate the temporal change in the amount of stored heat in the PCM.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：潜熱蓄熱材 蓄熱量 推定 近似解析

1. 研究開始当初の背景

電力利用の平準化や自然エネルギーの有効利用を目的として、蓄熱技術が研究・開発され、実用化されてきている。

蓄熱材には、温度変化に伴う熱を蓄える顕熱蓄熱材と、相変化に伴う熱を蓄える潜熱蓄熱材があり、潜熱蓄熱材は相変化温度前後における蓄熱密度の大きさや温度の安定性の点で優れている。

潜熱蓄熱材には多くの種類があり、その熱物性値等によって蓄熱特性が異なる。現在、潜熱蓄熱材を用いた設備を設計する場合、まず使用する潜熱蓄熱材を特定し、その蓄熱量の時間変化を実験や数値計算で求めることが多い。このような実験や数値計算には多大な労力を要するが、もし潜熱蓄熱材の蓄熱量の時間変化をその熱物性値に応じた一般的な式で表現できると、それらの労力を削減でき、有用であると考えられる。

潜熱蓄熱材への熱の供給源としては、ヒートポンプや燃料電池により加熱された流体(温水)が用いられることが多いと考えられる。また、潜熱蓄熱材には、相変化温度に幅を持たないものと、相変化温度に幅を持つものがある。潜熱蓄熱材の相変化を伴う伝熱現象については、限られた条件においてのみ厳密解析解や近似解析解が得られており、流体と熱交換する場合や相変化温度に幅を持つ場合についての厳密解析解や近似解析解は得られていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、流体と熱交換する潜熱蓄熱材の蓄熱量の時間変化を、潜熱蓄熱材の物性値に応じて推定できる式を提案することである。

3. 研究の方法

検討対象としている伝熱現象については厳密解析解や近似解析解が得られていないため、何らかの近似を適用し、近似解析解を導出する。

(1) 相変化温度に幅を持たない場合 (図1(a))

相変化温度に幅を持たない潜熱蓄熱材と流体(温水)が熱交換する場合について、蓄熱量の時間変化の推定式を提案する。

まず、数値計算により流体および潜熱蓄熱材の温度分布を確認し、解析解を得ることができる近似方法を検討する。

そして、その近似解析と数値計算で得られる蓄熱量の時間変化を比較し、近似解析解を蓄熱量時間変化の推定式として使用することができるかどうかを確認する。

(2) 相変化温度に幅を持つ場合 (図1(b))

相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱材と温水が熱交換する場合について、蓄熱量の時間変化の推定式を提案する。

まず、潜熱蓄熱材の表面温度が一樣で一次元熱伝導となる場合の蓄熱量時間変化の推定式を検討する。相変化温度に幅を持たない

場合の近似解析解は既に提案されているため、その解を相変化温度に幅を持つ場合に利用する方法を検討する。

そして、その推定式を流体(温水)と熱交換し二次元熱伝導となる潜熱蓄熱材の蓄熱量時間変化の推定に適用する方法を検討する。

その適用の妥当性は、数値計算結果との比較により確認する。

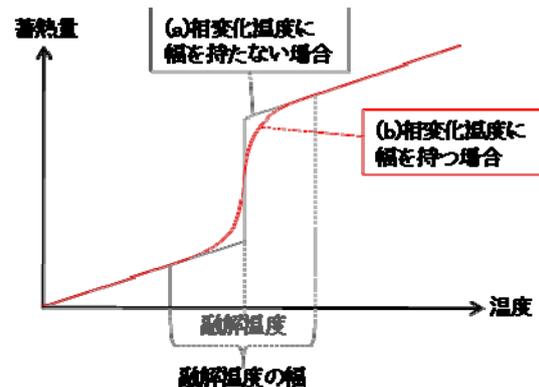


図1 潜熱蓄熱材の相変化温度が幅を持たない場合(a)と幅を持つ場合(b)の温度と蓄熱量の関係

4. 研究成果

(1) 相変化温度に幅を持たない場合 (図1(a))

相変化温度に幅を持たない潜熱蓄熱材と流体(温水)が熱交換する場合について、数値計算(潜熱蓄熱材の内部は二次元の非定常熱伝導方程式を前進型有限差分法により解き、温水部分は流れ方向についてのみ差分化して風上差分により解き、温水と潜熱蓄熱材の表面の間の対流熱伝達率は流速に対応させて $960\text{W/m}^2\text{K}$ とした)により流体および潜熱蓄熱材の温度分布を確認したところ、次の近似が可能であると考えられた。

- ① 流体の温度分布を無視し、流入温度に等しいとする。(入口から1m程度の範囲)
- ② 潜熱蓄熱材の長さ方向(流体の流れ方向)の温度分布を無視し、一樣とする。
- ③ 潜熱蓄熱材の固液境界面と流体との間の熱移動については瞬時定常とする。

これらの近似を用い、固液境界面に流入した熱は全て相変化に用いられると考えると、固液境界面における熱収支式は式(1)となる。

$$\rho q \frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{h + \lambda} (T_{w,in} - T_m) \quad (1)$$

ここで、 ρ は潜熱蓄熱材の密度[kg/m^3]、 q は潜熱蓄熱材の相変化熱量[J/kg]、 δ は潜熱蓄熱材の表面から固液境界面までの距離[m]、 t は時間[s]、 h は対流熱伝達率[$\text{W/m}^2\text{K}$]、 λ は潜熱蓄熱材の熱伝導率[W/mK]、 $T_{w,in}$ は温水の流入温度[$^{\circ}\text{C}$]、 T_m は潜熱蓄熱材の相変化温度[$^{\circ}\text{C}$]。

式(1)を δ について解くと、時間 t の関数として式(2)が得られる。

$$\delta = -\frac{\lambda}{h} + \sqrt{\frac{\lambda^2}{h^2} + \frac{2\lambda(T_{w,in} - T_m)t}{\rho q}} \quad (2)$$

蓄熱量の時間変化は式(2)の δ を用いて式(3)で表すことができる。

$$Q = \rho L B \delta \left\{ q + \frac{c(T_s - T_m)}{2} \right\} \quad (3)$$

ただし、

$$T_s = T_{w,in} - \frac{1}{1 + \frac{h\delta}{\lambda}} (T_{w,in} - T_m)$$

ここで、 L は潜熱蓄熱材の長さ[m]、 B は潜熱蓄熱材の幅[m]、 C は潜熱蓄熱材の比熱[J/kgK]。

図2に、表1の条件で計算した蓄熱量の時間変化について、数値計算と近似解析(式(3))の結果を示す。近似解析の蓄熱量は数値計算の蓄熱量よりもやや小さいが、概ね数値計算の蓄熱量を表現できていることがわかる。

以上より、相変化温度に幅を持たない潜熱蓄熱材と流体(温水)が熱交換する場合、式(2)を代入した式(3)を蓄熱量時間変化の推定式として提案する。

ただし、この式の適用範囲や誤差の定量化については今後の課題とする。

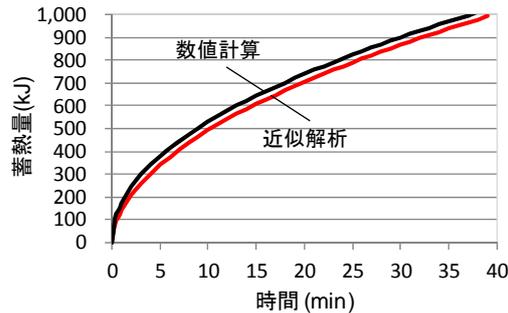


図2 蓄熱量の時間変化

表1 図2の計算条件

潜熱蓄熱材	長さ	1m	水	流入温度	70°C
	厚さ	0.01m		流速	0.1m/s
	熱伝導率	0.2W/mK		対流熱伝達率	960W/m²K
	相変化熱	100kJ/kg		比熱	4,200J/kgK
	相変化温度	60°C			
	比熱	1,000J/kgK			
	密度	1,000kg/m³			

(2)相変化温度に幅を持つ場合(図1(b))

初期温度 T_i で一様な相変化温度に幅を持たない潜熱蓄熱材による半無限固体の表面温度を T_s としたときの液相及び固相の温度の近似解析解 $T_1(x, t)$ 及び $T_2(x, t)$ は次の式(4)、(5)で表される。

$$T_1(x, t) = T_s - (T_s - T_m) \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa_1 t}} \right) / \operatorname{erf}(\psi) \right\} \quad (4)$$

$$T_2(x, t) = T_i + (T_m - T_i) \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa_2 t}} \right) / \operatorname{erfc}(v\psi) \right\} \quad (5)$$

ただし、

$$\psi = \frac{1}{2} \left[-\frac{St_2}{v\sqrt{\pi}} + \sqrt{2St_1 + \left(\frac{St_2}{v\sqrt{\pi}} \right)^2} \right], \quad v = \sqrt{\frac{\kappa_1}{\kappa_2}}$$

ここで、 κ_1 は液相の温度伝導率[m²/s]、 κ_2 は固相の温度伝導率[m²/s]、 St_1 は液相のステファン数、 St_2 は固相のステファン数。

また、液相の潜熱量 $Q_L(t)$ 、顕熱量 $Q_{S1}(t)$ は式(6)、(7)、固相の顕熱量 $Q_{S2}(t)$ は式(8)で表される。

$$Q_L(t) = 2\rho q \psi \sqrt{\kappa_1 t} \quad (6)$$

$$Q_{S1}(t) = 2\rho C \sqrt{\kappa_1 t} \left\{ \psi(T_m - T_i) - \frac{(T_s - T_m)(e^{-\psi^2} - 1)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\psi)} \right\} \quad (7)$$

$$Q_{S2}(t) = \frac{\rho C(T_m - T_i)}{1 - \operatorname{erf}(v\psi)} \left\{ Z - 2\psi \sqrt{\kappa_1 t} - Z \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{2\sqrt{\kappa_2 t}} \right) - 2\sqrt{\frac{\kappa_2 t}{\pi}} e^{-\frac{Z^2}{4\kappa_2 t}} + 2\psi \sqrt{\kappa_1 t} \operatorname{erf}(v\psi) + 2\sqrt{\frac{\kappa_2 t}{\pi}} e^{-v^2 \psi^2} \right\} \quad (8)$$

ここで、 Z は潜熱蓄熱材の表面から底面までの距離[m]。

図1(b)に示したような相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱材の温度と蓄熱量の関係を温度について微分して温度とみかけの比熱 C [kJ/kgK]の関係を表すと、図3および式(9)のようなガウス分布に近似することができる。

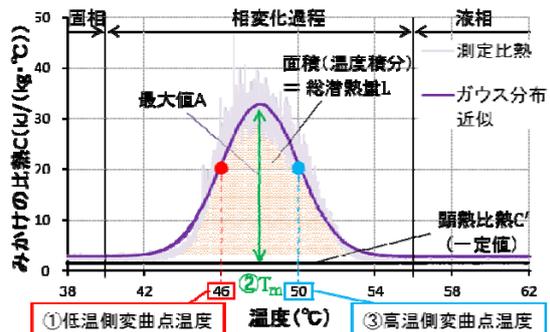


図3 潜熱蓄熱材の温度とみかけの比熱の関係

$$C = A e^{-B(T - T_m)^2} + C' \quad (9)$$

ただし、

$$B = A^2 \pi / q^2, \quad A = 30[\text{kJ}/(\text{kgK})],$$

$$q = 150[\text{kJ}/\text{kg}], T_m = 48[^\circ\text{C}],$$

$$C' = 2.5[\text{kJ}/(\text{kgK})]$$

初期温度が40°Cで一様な相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱材(C は式(9)、 $\lambda = 0.235$ [W/mK]、 $\rho = 840$ kg/m³)の表面温度を時刻0で56°Cに上げた場合の1,800秒後の温度分布の数値計算(1次元の非定常熱伝導方程式を前進型有限差分法により解いた)の結果を図4に示す。同図には、みかけの比熱を表すガウス分布(図3)の①低温側変曲点温度(46°C)、②中心温度(48°C)、③高温側変曲点温度(50°C)をそれぞれ相変化温度とする相変化温度に幅を持たない場合の近似解析解(式(4)、(5))も示す。

図4より、相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱

材の温度分布は、そのみかけの比熱をガウス分布に近似した時の低温側変曲点温度 (①) を相変化温度とする近似解析解 (式(4), (5)) で概ね表現できることがわかる。これより、顕熱蓄熱量は、式(7),(8)の相変化温度に低温側変曲点温度を用いると概ね表現できると考えられる。

図5に潜熱蓄熱量の時間変化を破線で示す。相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱材の数値計算結果と、みかけの比熱を表すガウス分布 (図3) の①低温側変曲点温度 (46°C), ②中心温度 (48°C), ③高温側変曲点温度 (50°C) をそれぞれ相変化温度とする相変化温度に幅を持たない場合の近似解析解 (式(6)) を示す。

図5より、相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱材の潜熱蓄熱量の時間変化は、そのみかけの比熱をガウス分布に近似した時の中心温度 (②) を相変化温度とする近似解析解 (式(6)) で概ね表現できることがわかる。

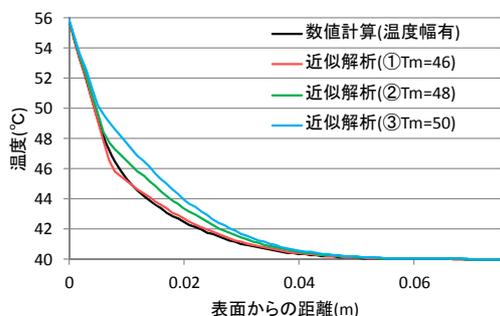


図4 温度分布 (1,800 秒後) (1次元熱伝導)

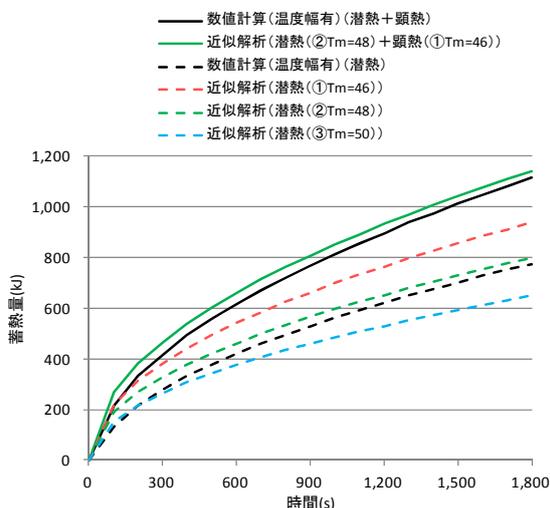


図5 蓄熱量の時間変化 (1次元熱伝導)

図5には、総蓄熱量 (潜熱蓄熱量と顕熱蓄熱量の和) について、相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱材の数値計算結果と、近似解析解を実線で示す。近似解析解は、式(7),(8)の相変化温度に低温側変曲点温度を用いて得た顕熱蓄熱量と、式(6)の相変化温度にガウス分布近似の中心温度を用いて得た潜熱蓄熱量との和である。近似解析解は数値計算結果を概ね表現できていることがわかる。

上記の潜熱蓄熱材の表面温度が一様で一次元熱伝導となる場合の蓄熱量時間変化の推定式を、流体 (温水) と熱交換し二次元熱伝導となる潜熱蓄熱材の蓄熱量時間変化の推定に利用する方法を検討する。

幅 1m、長さ 1m、厚さ 75mm の潜熱蓄熱材 (初期温度は 40°C で一様、 C は式(9)、 $\lambda=0.235$ [W/mK], $\rho=840$ kg/m³) の表面を温水が流入温度 56°C、0.1m/s の流速で一方向に流れる場合を考える。

図6に蓄熱量の時間変化を示す。

数値計算は、潜熱蓄熱材の内部は2次元の非定常熱伝導方程式 (C は式(9)) を前進型有限差分法により解き、温水部分は流れ方向についてのみ差分化して風上差分により解き、温水と潜熱蓄熱材の表面の間の対流熱伝達率は流速に対応させて 960 W/m²K とした。

潜熱蓄熱量の近似解析解は、表面温度を温水の流入温度と等しい 56°C とし、みかけの比熱をガウス分布に近似した時の中心温度 (②) を相変化温度とする近似解析解 (式(6)) である。

総蓄熱量 (潜熱蓄熱量と顕熱蓄熱量の和) は、潜熱蓄熱量の近似解析解 (式(6)) と、表面温度を温水の流入温度と等しい 56°C とした低温側変曲点温度 (①) を相変化温度とする近似解析解 (式(4), (5)) との和である。

表面温度が一様で一次元熱伝導となる場合 (図5) と同様、近似解析解は数値計算結果を概ね表現できている。

以上より、相変化温度に幅を持つ潜熱蓄熱材と流体 (温水) が熱交換する場合、表面温度を温水の流入温度とし潜熱蓄熱材のみかけの比熱をガウス分布に近似した時の中心温度 (②) を相変化温度とする潜熱蓄熱量の近似解析解 (式(6)) と、低温側変曲点温度 (①) を相変化温度とする顕熱蓄熱量の近似解析解 (式(4), (5)) との和を、蓄熱量時間変化の推定式として提案する。

この近似解析による蓄熱量時間変化の推定法を用いると、蓄熱設備の設計の際の実験や数値計算の労力を削減でき、有用であると考える。今後は、この推定式の適用範囲について検討する必要がある。

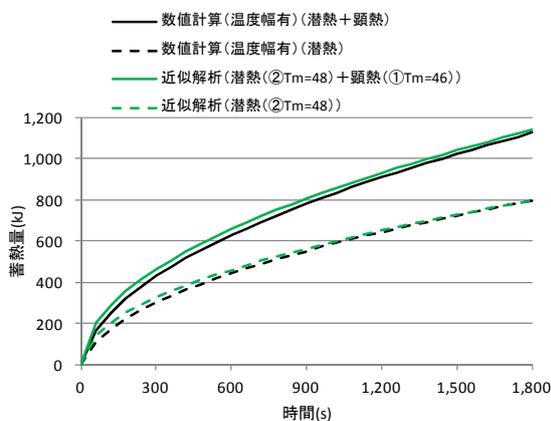


図6 蓄熱量の時間変化 (流体 (温水) と熱交換)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計5件)

- ① 齊藤睦, 藤田浩司, 松下敬幸: 潜熱蓄熱材の融解性状に関する研究－相変化温度が幅を持つ場合の温度分布の近似解析－, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ (D-2), 2014.9, 神戸
- ② 齊藤睦, 藤田浩司, 松下敬幸: 潜熱蓄熱材の融解性状に関する研究－相変化温度が幅を持つ場合の蓄熱量時間変化の近似解析－, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第54号 環境系, 2014.6, 大阪
- ③ Koji Fujita, Takayuki Matsushita: A Method for Estimating Amount of Stored Heat in PCM that Exchange Heat with Flowing Water, 2nd Central European Symposium on Building Physics, pp.835-840, 2013.9.11, Vienna, Austria
- ④ 藤田浩司, 松下敬幸: 潜熱蓄熱材の固液混相域における熱移動性状の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ (D-2), pp.55-56, 2013.8.30, 札幌
- ⑤ 藤田浩司, 松下敬幸: 潜熱蓄熱材の固液混相域における熱移動性状の検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第53号 環境系, pp.253-256, 2013.6, 大阪

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 浩司 (FUJITA KOJI)

神戸大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40513536