



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	温度伝導率, 熱伝導率, 比熱の同時測定法と湿潤材料への適用結果について
Author(s)	絵内, 正道; Enai, Masamichi; 荒谷, 登 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 75, 11-21
Issue Date	1975-07-26
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41270">https://hdl.handle.net/2115/41270</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	75_11-22.pdf



# 温度伝導率，熱伝導率，比熱の同時測定法 と湿潤材料への適用結果について

絵内正道\* 荒谷登\*

(昭和49年9月29日受理)

## A Simultaneous Measuring Method of Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity and Specific Heat, and its Experimental Results applied to a Wet Building Material

Masamichi ENAI and Noboru ARATANI

(Received September 29, 1974)

### Abstract

The authors proposed a measuring method of thermal diffusivity, thermal conductivity and specific heat of building materials both in wet and dry conditions.

The characteristics of this method are as follows :

- 1) The measurement is performed by giving a ramp functional curve of temperature at both sides of the material.
- 2) Thermal diffusivity, thermal conductivity and specific heat are readily and simultaneously obtained from previously calculated charts.
- 3) The influence of the thermal capacity of heating plates to the results is sufficiently compensated.
- 4) It requires a mere 3~12 minutes to run this test, therefore this method can be applied even to wet building materials.

The authors measured the thermal coefficient of a wet autoclaved lightweight concrete, hebel ( $\rho_0=500 \text{ kg/m}^3$ ) and obtained the following such results from this measurement :

1) Assuming that the thermal capacity of the wet material is equal to the sum of the thermal capacity of the material under dry conditions and that of material containing water, the specific heat  $C$  under wet conditions is expressed by the next equation and measured results were in agreement with the theoretical equation.

$$C = (C_0 + \varphi) / (1 + \varphi)$$

where  $C_0$  = specific heat under dry condition (kcal/kg $^{\circ}$ c)

$\varphi$  = water content ratio (weight) (kg/kg)

- 2) Thermal conductivity increased considerably between 0.0 and 0.4 of  $\varphi$
- 3) Thermal diffusivity has the maximum value at  $\varphi=0.2$ .

## 1. 解 析 法

### 1. ま え が き

建築材料の内でも、特に断熱材またはそれに近い材料に不幸にして内部結露水、雨水などの影響がある場合、保温力の低下が予想される。多孔質系、繊維系も含めて材料の湿潤状態が、熱的特性値にどれ程の影響をあたえるかという疑問に答えるには、従来法を用いての測定では、次に述べるような種々の困難をとまらう。

その最大の問題は、蒸発、凝結潜熱の他に材料内部の気体部分の容積変化によって、個体伝導成分以外の物質（水、水蒸気）移動熱の影響が現われることである。そのため絶乾、気乾時の熱伝導率の測定方法としては、既に定常法が確立しているけれども、定常に達するまでに長時間を要し、温度差もある程度確保する必要があるため、湿潤材の対象として用いるには無理がある。

また、非定常状態での室温変動や熱負荷解析に欠くことのできない温度伝導率などは、例えば周期的温度波の位相のずれや振巾の減衰を利用して求めたりするけれども測定に相当の時間を要する。投入法による比熱測定の場合にも吸水性の材料であれば難しく、どれでも適用できるという訳ではない。その他にも、岡垣<sup>1)</sup>、Joy<sup>2)</sup>などが用いた極めて短時間の測定ですむというプローブ法があるが、プローブ熱容量の考慮を必要とし、その作製が困難であったり、一般に試料が粉体に限定されたりするという。

今回報告する測定法は、その1部について逐次積分法<sup>3)</sup>を応用したものであって、試料の両表面温度をランプ関数状に上昇させ、熱伝導率、温度伝導率、比熱を図式より得ようとするものである。

その特徴とするところは、①表面温上昇のための加熱板は、熱容量の少ない方が望しいが、その容量の大小とか熱特性上の制約が比較的少ない。②測定時間は、試料およびその厚さにもよるが、多くは3~12分程度で充分である。従って③湿潤材も対象とした熱伝導率、温度伝導率、比熱の測定も可能であり、しかも、その同時測定ができるなどをあげることができよう。

解析式の導入とともに、ここでは測定装置の概要についても紹介し、試料両表面温度をランプ関数状に上昇させる際の発熱操作とその手動制御による再現性、および測定のための採用分割時間など、精度上の諸影響因子を検討した。

### 2. 基礎式の導入

最初温度  $0^{\circ}\text{C}$  で、図1の如く試料片面に単位温度のステップ入力をあたえ、他面を  $0^{\circ}\text{C}$  に保った場合の単層壁体内の温度分布は次のようになる。

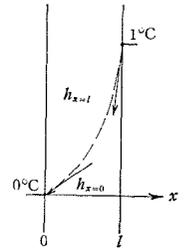


図 1

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_{t=0} &= 0 \\ \theta_{x=0} &= 0 \\ \theta_{x=l} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\theta(x, t) = \frac{x}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \sin \left( \frac{n\pi x}{l} \right) e^{-a(n\pi/l)^2 t} / (n\pi \cos n\pi) \quad (3)$$

Step-1:  $x=0$ ,  $x=l$  での試料表面熱流は

$$h_{x=l} = \lim_{x \rightarrow l} \lambda \frac{d\theta}{dx} = \frac{\lambda}{l} + \frac{2\lambda}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-a(n\pi/l)^2 t} \quad (4)$$

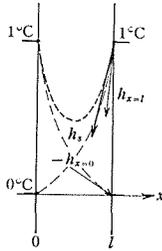


図 2

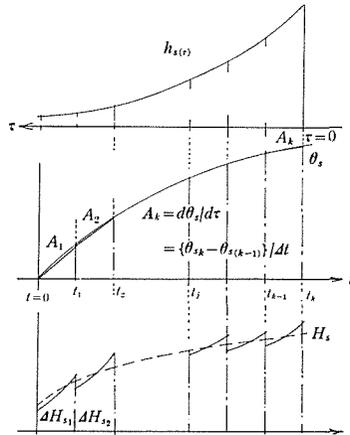


図 3 温度変動による流入熱流

$$h_{x=0} = \lim_{x \rightarrow 0} \lambda \frac{d\theta}{dx} = \frac{\lambda}{l} + \frac{2\lambda}{l} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n e^{-a(n\pi/l)^2 t} \quad (5)$$

次に, 図 2 の如く  $x=0$ ,  $x=l$  の両面に単位温を与えた場合の  $x=l$  での表面熱流は (4), (5) 式の差から

$$h_s = h_{x=l} - h_{x=0} = \frac{4\lambda}{l} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-a((2m-1)\pi/l)^2 t} = B \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta_m t} \quad (6)$$

$$B = 4\lambda/l, \quad \beta_m = a\{(2m-1)\pi/l\}^2 = A(2m-1)^2 \quad (7)$$

となる。 $x=0$ ,  $x=l$  で同じく  $\theta_s$  なる温度変動した場合の  $x=l$  での表面熱流は Duhamel の積分から

$$H_{s,x=l} = \int_0^t \theta'_s(\tau) h_s(t-\tau) d\tau$$

となる。図 3 の如く等時間々隔に分割し, その間の温度変化を直線で近似できるものとすれば

$$\begin{aligned} H_{s,x=l} &\doteq \sum_{j=1}^{k-1} A_j \int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} h_s(t-\tau) d\tau + A_k \int_{(k-1)\Delta t}^t h_s(t-\tau) d\tau \\ &= \sum_{j=1}^{k-1} A_j B \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_m} (1 - e^{-\beta_m \Delta t}) e^{-\beta_m(t-j\Delta t)} \\ &\quad + A_k B \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_m} \{1 - e^{-\beta_m(t-(k-1)\Delta t)}\} \end{aligned} \quad (8)$$

従って,  $(k-1)\Delta t \sim k\Delta t$  間の熱量  $\Delta H_{sk}$  は

$$\begin{aligned} \Delta H_{sk} &= \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} H_s dt = \sum_{j=1}^{k-1} A_j B \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{1 - e^{-\beta_m \Delta t}}{\beta_m} \right)^2 e^{-\beta_m(k-j)\Delta t} \\ &\quad + A_k B \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_m} \left\{ \Delta t - \frac{1}{\beta_m} (1 - e^{-\beta_m \Delta t}) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

$$\left. \begin{aligned} X_m &= B \{ (1 - e^{-A(2m-1)^2 \Delta t}) / A(2m-1)^2 \} \\ X_0 &= B \sum_{m=1}^{\infty} \{ \Delta t - (1 - e^{-A(2m-1)^2 \Delta t}) / A(2m-1)^2 \} / A(2m-1)^2 \\ E_m &= e^{-A(2m-1)^2 \Delta t} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

とすれば, 熱供給開始後の各時間内の温度傾度  $A_k$  と熱量との間の関係は, それぞれの逐次積和<sup>3)</sup>の形で表わすことができ, 次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} k=1 \quad \Delta H_{s_1} &= A_1 X_0 \\ k=2 \quad \Delta H_{s_2} &= A_2 X_0 + A_1 \sum_{m=1}^{\infty} X_m \\ k=3 \quad \Delta H_{s_3} &= A_3 X_0 + A_2 \sum_{m=1}^{\infty} X_m + A_1 \sum_{m=1}^{\infty} X_m E_m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

**Step-2:** 試料片面が  $\theta_s$  の変動をする場合の内部温度  $\Theta$  は、同じく *Duhamel* の積分から

$$\Theta(x, t) = \int_0^t \theta'_s(\tau) \theta(x, t-\tau) d\tau \quad (12)$$

$\theta'_s(\tau) = d\theta_s/d\tau = A = \text{Const}$  の場合

$$\Theta(x, t) = \frac{Axt}{l} + \frac{2Al^2}{a\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \{1 - e^{-a(n\pi/l)^2 t}\} / (n^3 \cos n\pi) \quad (13)$$

となる。従って、試料の両面の両面が同じく  $\theta'_s = A$  で、上昇した際の内部平均温度  $\bar{\Theta}_s$  は

$$\bar{\Theta}_s = \frac{2}{l} \int_0^l \Theta(x, t) dx = A \left[ t + \frac{4l^2}{A\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-An^2 t}) \frac{1 - \cos n\pi}{n^4 \cos n\pi} \right] \quad (14)$$

となる。

### 3. 温度伝導率, 熱伝導率, 比熱の解法

(i) 温度伝導率, 熱伝導率について: **Step-1** の (10) 式の  $X_0, \Sigma X_m$  から熱伝導率を含む  $B$  を消去して

$$P = X_0 / \sum_{m=1}^{\infty} X_m \quad (15)$$

(11), (15) 式を  $P$  について整理すれば

$$P = A_1 \Delta H_{s_1} / (A_1 \Delta H_{s_2} - A_2 \Delta H_{s_1}) \quad (16)$$

$$Q = X_0 / B = \Delta H_{s_1} / A_1 B \quad (17)$$

として熱伝導率の算定式を導くことができる。試料表面温度上昇から温度傾度  $A_1, A_2$  および流入熱量  $\Delta H_{s_1}, \Delta H_{s_2}$  が既知であれば、分割時間に応じて  $P, A$  を決定することができる。あらかじめ  $A, \Delta t$  を温度伝導率決定因子  $P$ , 熱伝導率推定因子  $Q$  のパラメータとして項数  $m$  について収束させておけば、図式 (図5参照) より熱伝導率, 温度伝導率を得ることができる。

(ii) 温度伝導率, 比熱について: **Step-2** の (14) 式から, 図4に示す場合の  $t_1, t_2$  時刻までの各々の内部平均温度と流入熱量との間の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{t_1} H_s dt &= 2 \Delta H_{s_1} = c\rho V \bar{\Theta}_s(t_1) \\ &= c\rho V A_1 \left\{ t_1 + \frac{4l^2}{A\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-An^2 t_1}) \frac{1 - \cos n\pi}{n^4 \cos n\pi} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{t_2} H_s dt &= 2(\Delta H_{s_1} + \Delta H_{s_2}) = c\sigma V \bar{\Theta}_s(t_2) \\ &= c\rho V A_2 \left\{ t_2 + \frac{4l^2}{A\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-An^2 t_2}) \frac{1 - \cos n\pi}{n^4 \cos n\pi} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

(18), (19) 式中の  $\{ \}$  内を  $S_k$  とすれば, 両式から比熱を消去したときの流入熱量と温度伝導率の関係は

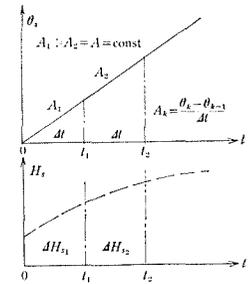


図4 ランプ関数上昇時の流入熱量

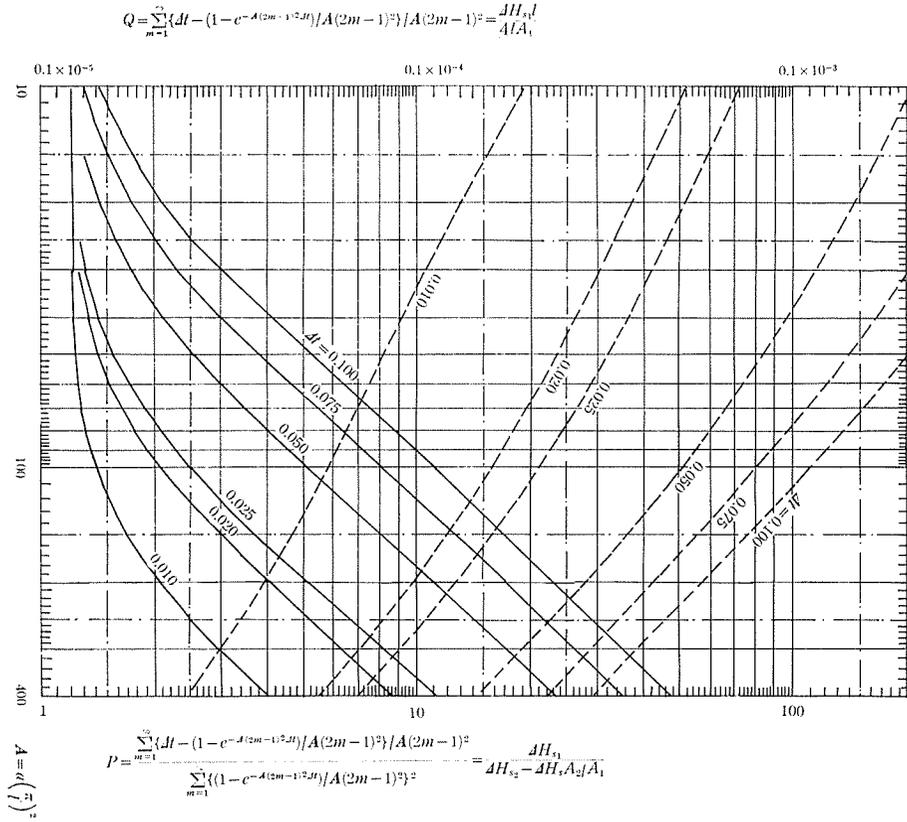


図5 P, Q, A の関係

$$S_k = t_k + \frac{4l^2}{A\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-An_1 t_k}) \frac{1 - \cos n\pi}{n^4 \cos n\pi} \tag{20}$$

$$R = S_1 / S_2 = \Delta H_{s1} / (\Delta H_{s2} + \Delta H_{s1}) \tag{21}$$

となり, 比熱の算定は次のように

$$S_1 = 2\Delta H_{s1} / c\sigma VA \tag{22}$$

となる。(i) と同じく, 媒介パラメーター  $R$  から温度伝導率を得ると同時に  $S_1$  から比熱を決定することができる。図6, 7にその関係を示す。

(i) に関しては, (11) 式でも明らかなように, 測定時間内 ( $2\Delta t$  または  $t_2$ ) の温度傾度は  $A_1 \doteq A_2$  であっても補正が可能であるが, (ii) の場合必ず  $A_1 \doteq A_2$  でなければならない。

この解析法は (i), (ii) とともに一律の直線で近似可能な温度上昇であれば, そのオーダーに関与されることなく, 温度伝導率を含む因子  $A$  で整理された (16) 式の  $P$ , (21) 式の  $R$  を伸だちとして熱伝導率, 比熱を得ることができる。このように図解法によって簡便に計算できること, 測定が短時間であること, 温度伝導率, 熱伝導率, 比熱が同時に求められることなどが本法の特徴である。

図5は  $m=30$  まで, 図6, 7は  $n=60$  まで採用して計算した結果をもって図示したものである。

$$R = \frac{t_1 + \frac{At^2}{A\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-An^2t_1}) \frac{1 - \cos n\pi}{n^4 \cos n\pi}}{t_2 + \frac{At^2}{A\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-An^2t_2}) \frac{1 - \cos n\pi}{n^4 \cos n\pi}} = \frac{\Delta H_{s_1}}{\Delta H_{s_1} + \Delta H_{s_2}}$$

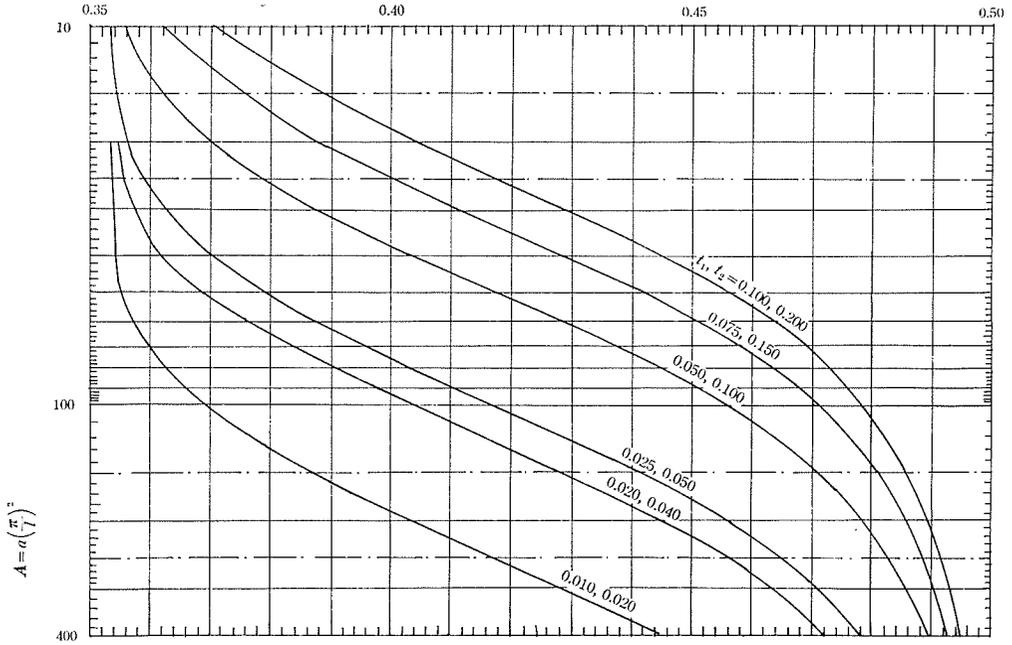


図6 R, A の関係

$$S_1 = t_1 + \frac{At^2}{A\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - e^{-An^2t_1}) \frac{1 - \cos n\pi}{n^4 \cos n\pi} = \frac{2\Delta H_{s_1}}{c\rho V A_1}$$

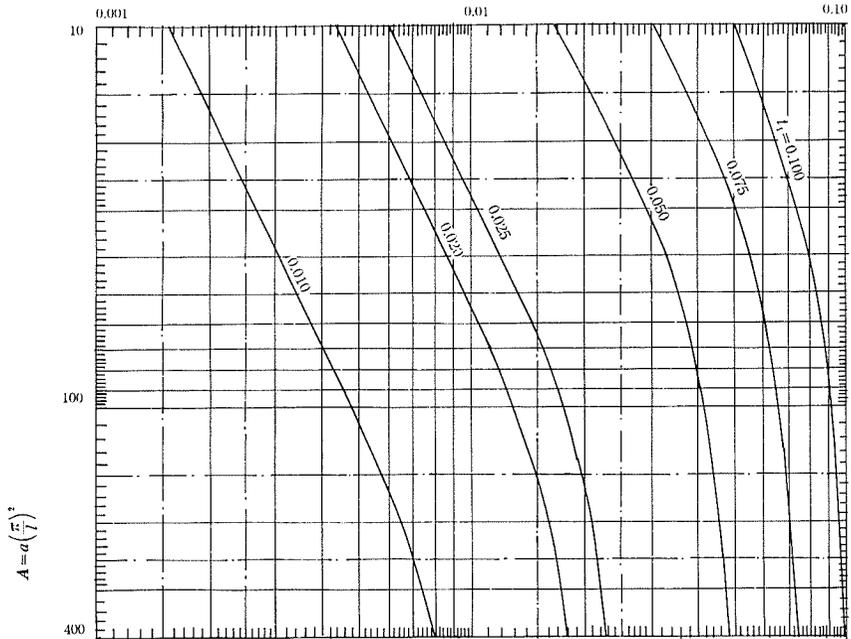


図8 S, A の関係

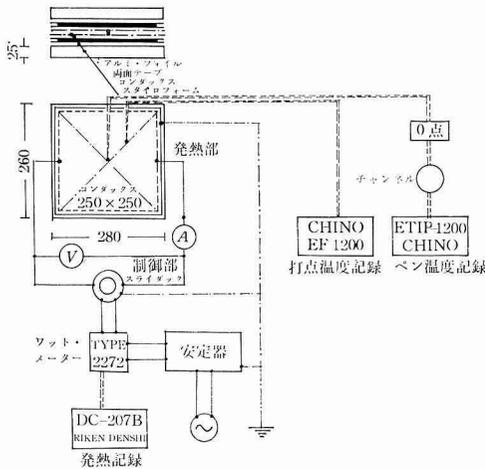


図8 装置概要

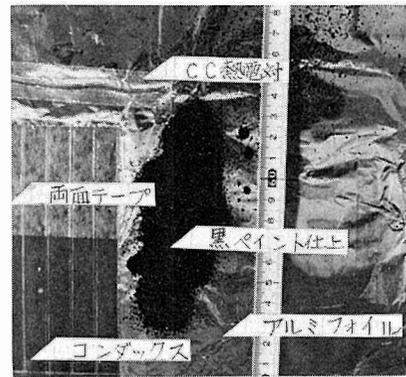


写真1 加熱板

#### 4. 装置概要および操作上の検討事項

(i) 装置概要: 図8に示すように発熱量, 熱特性の同じ加熱板からなる発熱部, 同制御部, 発熱量・温度記録部で構成される。加熱板は, 写真1で示すように発泡ポリスチレンを母板とし, 両面テープにて, 面発熱体(コンダックス), アルミ箔(防湿層)を貼り付けたものである。温度は加熱板の面発熱面, 試料両面のほぼ中央にテフロン被覆した  $0.1\phi$ cc 熱電対を取り付けて, 発熱電源は AC 100 V で発熱量はワットメーターの DC 出力信号を自記計測して求めた。

(ii) 測定の手順: **trial-1** として加熱板・試料ともに一樣温度にあることを確認し, 温度記録紙上にあらかじめ指定されているランプ関数状上昇線に沿って, 試料表面温度が変化するようにスライダック操作する。**trial-2** として, 試料無し状態で加熱板が同じく, 一樣温度にあることを確認後, 既に **trial-1** で記録されているヒーター表面温度上昇線に沿って, 同表面温度が上昇するように熱供給量を

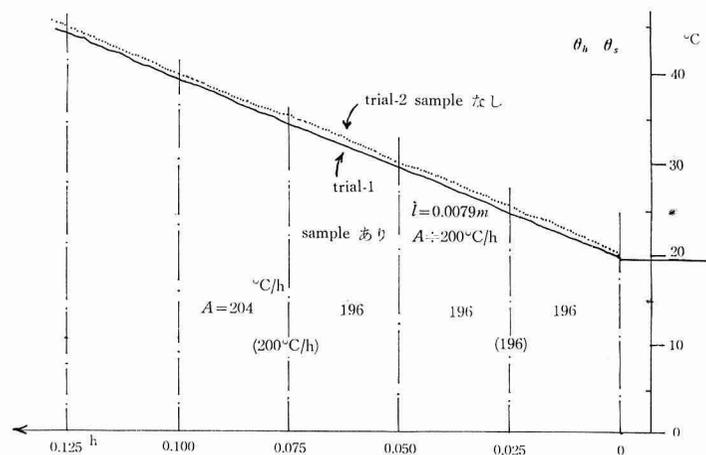


図9 Sample 表面温度  $200^{\circ}\text{C/h}$  のときの温度変動の様子 (Sample, ALC 材,  $\rho_0 = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $\varphi = 0.353$ )

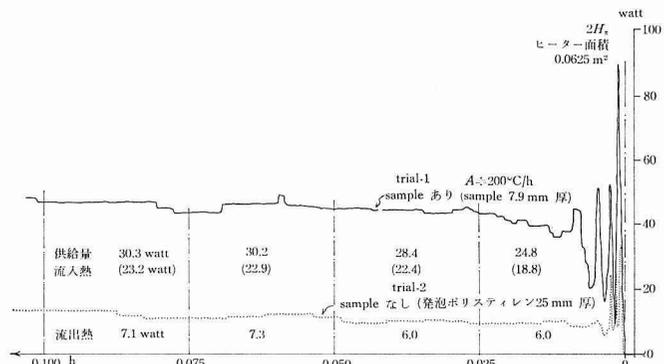


図10 Sample 表面  $200^{\circ}\text{C/h}$  のときの熱供給の様子 (Sample, ALC 材,  $\rho_0 = 500 \text{ kg/m}^3$ ,  $\varphi = 0.353$ )

表1 ヒーター表面温度を 400°C/h 時の熱供給量 (試料無)

分割時間	時間経過 $k$	発泡スチロール 50 mm, コンダックス2層, 0.0625 m <sup>2</sup> の場合の $2\Delta H_{hk}$ (watt)						偏	差
		測 定 番 号					平 均		
		1	2	3	4	5			
$\Delta t = 0.01$ h	1	0.1610	0.1770	0.1600	0.1477	0.1642	0.1623	0.091	-0.091
	2	0.1591	0.1591	0.1458	0.1524	0.1653	0.1563	0.058	-0.067
	3	0.1505	0.1449	0.1704	0.1543	0.1676	0.1575	0.082	-0.080
	4	0.1643	0.1704	0.1477	0.1610	0.1636	0.1616	0.055	-0.085
	5	0.1633	0.1543	0.1638	0.1789	0.1657	0.1652	0.066	-0.083
	6	0.1666	0.1780	0.1808	0.1780	0.1562	0.1719	0.051	-0.091
	7	0.2197	0.2026	0.1704	0.1761	0.1780	0.1894	0.160	-0.100
	8	0.1998	0.1856	0.1931	0.2064	0.1931	0.1956	0.055	-0.051
	9		0.1949	0.1950	0.2111		0.2003	0.030	-0.036
	10		0.2121	0.2121	0.2055		0.2099	0.047	-0.041
$\Delta t = 0.02$ h	1	0.3201	0.3361	0.3058	0.3001	0.3276	0.3179	0.057	-0.056
	2	0.3152	0.3153	0.3191	0.3153	0.3312	0.3192	0.038	-0.031
	3	0.3299	0.3569	0.3446	0.3825	0.3219	0.3420	0.043	-0.058
	4	0.4195	0.3882	0.3635	0.3825	0.3711	0.3850	0.089	-0.056
	5		0.4070	0.4071	0.4166		0.4102	0.015	-0.008
$\Delta t = 0.03$ h	1	0.4706	0.4810	0.4762	0.4544	0.4971	0.4759	0.045	-0.011
	2	0.4946	0.5027	0.4923	0.5179	0.4855	0.4966	0.038	-0.026
	3		0.5831	0.5585	0.5936		0.5784	0.026	-0.034

図10の如き測定結果をプランメーターにて算出偏差は  $(\Delta H_{h \max} - \Delta H_{h \min}) / \Delta H$  で表わす。

制御する。

一般には、温度上昇線と指定上昇線との間で、偏差が生じるため、この2回の操作を省くことができない。(11)式の $\Delta H_s$ はこの供給熱量の1/2に相当する。

指定温度上昇線の勾配は、面発熱体の能力、試料厚および熱特性(吸水量も含めて)、採用割時間を勘案し、適当なものを選択すれば良い。その結果の1例として、湿潤した気泡コンクリート(後述)の場合の温度上昇と手動制御による熱供給の様子を図9, 10に示す。

(iii) 操作上の検討事項: 指定上昇線に沿って、一定の温度傾度で上昇させるための操作は記録紙上の温度変化を注目しながらの一種の見込み運転を含めた記行錯誤を繰返す作業となるため、図10に示すように、試料の有無にかかわらず、非常に凹凸の激しい発熱状態となる。それ故、上述操作にともなう過不足分を打ち消し合い、ある分割時間内ではある値に落ち着くような区間熱流積分値を用いるが、表1に示すように分割時間を大きくするに従って平均値に対する偏差は、減少傾向をみせ、手動操作上の変動は、吸収されるようになる。一方、試料・加熱板の端部からの熱流失による影響は、測定時間の増大とともに大きくなると予想されるため、その考慮として、① 試料・加熱板面積に比較して相対的に材厚を薄くする、② できるだけ測定時間を短縮して端部偏熱流の影響を少なくすることを心掛ける必要があろう。例えば加熱母板厚が50 mmのとき、測定時間が6分程度であれば、端部の影響を板中央において完全に無視し得るという結果も得ている。

## 2. 湿潤材への適用

### 1. ま え が き

測定法の適用例として, 断熱材ではないが, 最近, プレファブ建築に用いられている軽量で比較的断熱性の良い気泡コンクリートを採用し, 湿潤状態のときの熱伝導率, 温度伝導率, 比熱を求め熱特性値を重量含水率との関係で整理し, 比熱をもとにして検討を加えた。

気泡コンクリート (Autoclaved lightweight concrete : Hebel) は, 高温高圧蒸気養生で工場生産された建築材料で (表 2 参照), 写真 2 にみるように粗骨材もなく, 気泡が均一に散在し, 熱的に等方的と予想される

表 2 気泡コンクリートの公称性状

構成素材	砂, 生石灰, セメント, アルミニウム粉末, 水		重量含水率
絶乾時	$\rho_0 = 500 \text{ kg/m}^3$	$\lambda_0 = 0.08 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$	$\varphi = 0.00$
気乾時	$\rho = 600 \text{ kg/m}^3$	$\lambda = 0.13 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$	$\varphi = 0.20$
一面吸水率	22°/volum		$\varphi = 0.44$
全面吸水率	39°/volum		$\varphi = 0.78$

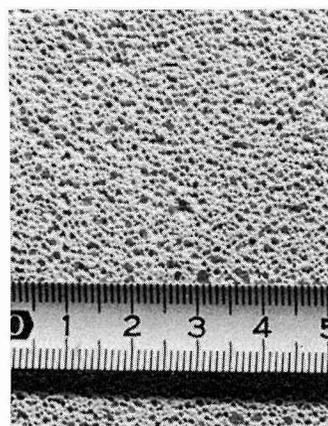


写真 2 気泡コンクリートの表面

### 2. 測定結果およびその検討

220×220 mm の気泡コンクリート材を加熱板能力の制約から, 0.0079 m 厚にスライスし 70~80°C の温水に 3 時間浸し, 次いで冷水中に 3 昼夜放置し, 取り出し後, 表面付着水を除去して 4. の (ii) の測定の手順に従って測定を開始した。

測定条件:

測定室温 19.7~24.1°C

分割時間 0.025~0.050 h

気乾重量  $\rho = 563 \text{ kg/m}^3$ ,  $\varphi = 0.17 \text{ kg/kg}$

温度傾度 (試料表面) 200°C/h

測定時間 0.2 h (12 分)

測定範囲  $\varphi = 0.11 \sim 1.04 \text{ kg/kg}$

(i) 測定結果について: 図 11~13 に乾燥過程にあるヘーベルを途中, 途中で秤量 (ただし, 測定時間の 0.2 h 内では, 秤量計測できる程度の重量変化は認められなかった) し, 重量含水率  $\varphi$  で整理した熱伝導率, 温度伝導率, 比熱の結果を示す。

重量含水率と熱伝導率の関係をみると, 含水率が増加するに従い増加する傾向をみせるが, その増加率は, 特に, 含水率  $\varphi = 0.4$  までの方が著しい。

温度伝導率は, 熱伝導率とは異なり, 含水率が, 増加するにつれて, 一旦増加傾向をみせた後に減少する<sup>5)</sup>という非常に興味ある現象が現われた。

比熱は, 熱伝導率と同じく, 含水率が, 増加すると単調増加するという傾向をみせた。

また, (23) 式によって求めた比熱と,  $C = \lambda / \rho \varphi$  から逆算した比熱, および試料表面温度をランブ関数状に上昇させた場合, 試料内温度分布が, 表面温度上昇に近似的に対応するものとして (0.05 h 以後)

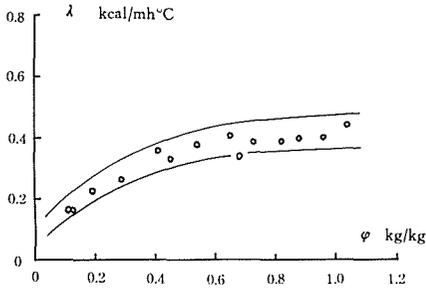


図 11 熱伝導率と重量含水率 (測定時間 0.2 h, 分割時間 0.025, 0.050)

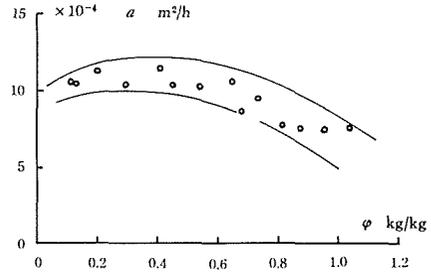


図 12 温度伝導率と重量含水率

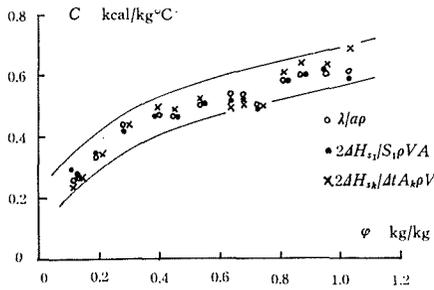


図 13 比熱と重量含水率

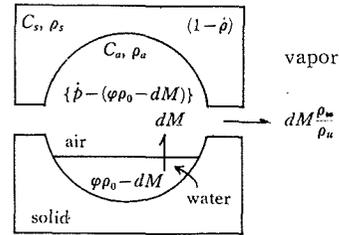


図 14 空隙モデル

$$C \doteq 2\{\Delta H_{sk} - \Delta H_{hk}\} / (dt A_k \rho V) \tag{23}$$

上式から推定した比熱は、比較的良く一致しているといえよう。

(ii) 結果の検討: 図 11~13 に示した測定結果に、潜熱変化の影響が入っているかどうか、図 14 の如き空隙モデルを想定し、単位容積が、温度上昇に必要なとする熱量の方から検討を加えた。

試料実質部を除く可秤量重量 (吸着、附着水なども含めて) を  $\varphi\rho_0$  とすれば、水としての相当容積は、 $\varphi\rho_0$  となる。 $d\theta$  温度上昇に必要なとする熱量を  $d\dot{Q}$ 、水が水蒸気に変化する容積を  $dM$  とすれば、

気体部分:  $C_a \rho_a \{\dot{p} - (\varphi\rho_0 - dM)\} d\theta$

実質部分:  $C_{s0} \rho_{s0} (1 - \dot{p}) d\theta$

水蒸気変化分:  $C_v \rho_v (dM \rho_w / \rho_v) d\theta$

潜熱分:  $L dM \rho_w$

水状部分:  $C_w \rho_w (\varphi\rho_0 - dM) d\theta$

の合計が  $d\dot{Q}$  に等しくなる。

測定中に秤量変化が認められなかったことから、次の仮定を用いて

$$\left. \begin{aligned} dM &\doteq 0 \\ C_a \rho_a \dot{p} + C_{s0} \rho_{s0} (1 - \dot{p}) &\doteq C_0 \rho_0 \\ C_w \rho_w &\doteq 1 \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

とすれば、次のように整理される。

$$\frac{d\dot{Q}}{d\theta} = C_0 \rho_0 + \varphi \rho_0 = c \rho_0 (1 + \varphi) \tag{25}$$

湿潤時相当比熱:  $C = (C_0 + \varphi) / (1 + \varphi)$  (26)

絶乾時推定比熱:  $C_0 = C(1 + \varphi) - \varphi$  (27)

(27) 式を用いて、湿潤時の比熱、重量含水率から絶乾比熱を推定したものが、図 15 であるが、推定絶乾比熱は含水率に関係なくフラット<sup>5)</sup>に求まった。

絶乾比熱は、当然、一定のものと考えられるから、今回の測定の場合、加熱初期の段階では、

潜熱変化の影響が入っていない。かつ、仮説も成立するものと思われる。

ある含水率のときの熱容量は (25) 式から  $(C_0 + \varphi)\rho_0$  となつて、含水率に関して直線的に増加する。一方、気泡コンクリートの熱伝導率は、含水量の少ない方がその増加割合が大きいため、温度伝導率は増加傾向を示し、含水量の増大にともなつて熱伝導率の増加割合が、相対的に減少するため減少傾向を示すというように  $a = \lambda/c\rho$  の式から、上に凸なる現象<sup>5)</sup>の妥当性を説明できよう。

空隙モデルが開放系の場合、試料の温度変化にともなう気体の容積変化によって、水分、水蒸気移動を常に考慮しなければならないが、加熱初期において、気体成分の移動のみであれば、熱容量も小さいためその影響は少なく、さらに当測定法の場合は温度上昇による熱流方向への水分移動があつたとしても両面加熱方式をとっているため、その移動は温度勾配の少ない試料中央部への移動であつて、それによる大きな影響は現われにくいとも考えられる。

### 3. ま と め

測定法に関しては

① 手動による発熱制御であるが、分割時間を適当に選択すれば、それにとまらぬ偏差を減すことができ、特に、温度傾度が一律の場合積算熱供給量から、温度伝導率、熱伝導率、比熱を同時に求め得ることが確認できた。

② 両面加熱方式を採用したことによって、特に、湿潤材を対象とした場合の熱流方向への物質移動を少なくすることが可能となり、また、測定を短時間で済ますこともできるため湿潤材の熱特性把握のための手段として、有効であることが確認された。

多孔質系の湿潤材を対象とした測定結果からは

① 気泡コンクリートにおいて、水蒸気・水分移動、潜熱変化が無視できる状態では、表面付着水を取り除いた含水状態で、測定範囲 (重量含水率  $\varphi = 0.11 \sim 1.04$ ) にわたつて、線型性 ( $a = \lambda/c\rho$ ) が成立することが確認できた。

② 温度伝導率は、極大値を有し、熱伝導率は重量含水率  $\varphi = 0.4$  までの増加割合が著しい。従つて、気泡コンクリートのように比較的断熱性能の良い多孔質材料の場合、内部結露・雨水などによる保温力の低下 (気乾時の 1/3 程度) をなんらかの方法によって避ける必要がある。

最後に、京大教授堀江悟郎氏の御教示を得たことを感謝します。

記号および単位 (補足分):

$a$ ; 温度伝導率 ( $\text{m}^2/\text{h}$ ),  $\lambda$ ; 熱伝導率 ( $\text{KCal}/\text{m h}^\circ\text{C}$ ),  $C$ ; 比熱 ( $\text{KCal}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ),  $\rho$ ; 密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $V$ ; 容積 ( $\text{m}^3$ ),  $\varphi$ ; 重量含水率 ( $\text{kg}/\text{kg}$ ),  $\dot{p}$  空隙率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  $o, so, a, w, v$  絶乾状態, 実質部, 空気, 水, 水蒸気を示すサフィクス。

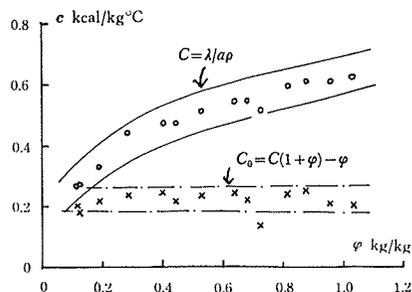


図 15 絶乾比熱の推定 (図 13 中の  $C = \lambda/a\rho$  の値を用いた)

### 参 考 文 献

- 1) 斎藤, 岡垣: 北大工学部研究報告, 14 (昭 31), p. 83-97.
- 2) 相川: 保温材の特性と応用, (昭 38), p. 196, 日刊工業新聞社.
- 3) 荒谷, 佐々木, 絵内: 北大工学部研究報告, 51 (昭 43), p. 185-200.
- 4) 絵内, 荒谷: 日本建築学会道支部, 41 (昭 49), p. 139-140.
- 5) 絵内, 荒谷, 鈴木: 日本建築学会大会号 (昭 46), p. 175-176.