

未利用品を用いたコンパネ用薄型（5mm）断熱材の開発

Development of thermal insulation thin sheet for combination panel, to use west materials, that depth is 5 mm

(株)砂子組 ○正員 山元 康弘 (yasuhiro yamamoto)
(株)北海道アトリウム 非会員 工藤 克彦 (katuhiko kudou)
(株)砂子組 正員 黒島 美男 (Yosio Kurosima)
(株)砂子組 正員 近藤 里史 (Satoshi Kondo)
(株)砂子組 正員 佐藤 昌志 (Masashi Sato)

1. はじめに

過年度において著者らは、1) 発泡スチレンフォームを用いた断熱構造¹⁾と、2) 断熱材としても利用可能な木材チップを用いた不陸陸性シート²⁾の開発を行ってきた。

1)は厳冬期のコンクリート養生を目的とした、コンパネ+発泡スチレンフォーム+コンパネの3層断熱型枠であり、2)は本来は路面の不陸陸性の緩衝を目的とした、麻袋に木材チップを詰めたシートである。

1)はその本来の目的から大きな断熱性を有し、マスコンクリートのリフト分割を省略できる可能性を与えた。

2)に対しても熱伝導試験を行った結果、空気とEPSの中間程度というかなりの断熱性を有していた。

今回著者らは過年度の断熱材料である、発泡スチレンボード、麻布、木材チップとともに、羊毛に注目した。

木材チップは北海道で間伐材等の未利用資源として発生し、道内で廃棄物化される羊毛も容易に入手可能である。

多孔質木質チップの湿度調整効果と、ウールマルチ材としての羊毛の有する断熱性を併せ持ち、従来より安価かつリサイクル製品でもある、高断熱シートの開発を目的として発泡スチレンボード+木材チップ・羊毛混合層+麻布で構成される三層構造断熱材の熱伝導試験を実施した。

2. 供試体の概要

(1) 三層構造断熱材

カッターで30×30 cmに切断したスチレンボード（厚3 mm）と麻布に木材チップ・羊毛混合層をサンドイッチ。羊毛は廃棄物化したものを洗浄後ハサミで裁断。木材チップは8 mmスクリーンの破砕機で粉碎。混合は水で溶かした木工用ボンドとともに家庭用ミキサーにて8：2の割合で行った。供試体製作は麻布にスプレー糊を吹きかけ、羊毛・チップ混合物を60 g敷き均してスチレンボードで挟み、20 tfで5 mmに圧縮。

(2) 単一構造断熱材

(1)と同じスチレンボードを2枚重ね。

(3) 二層構造断熱材

混合率8：2の羊毛・チップ混合物75 gと150 gを、スチレンボードでサンドイッチしたものの2種類。

3. 熱伝導試験概要

熱伝導試験では図-1～3に示すように、箱型EPS材を

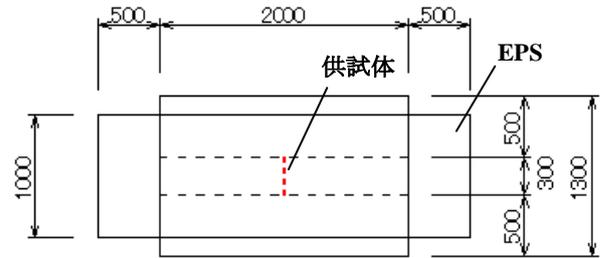


図-1 保温室 平面図

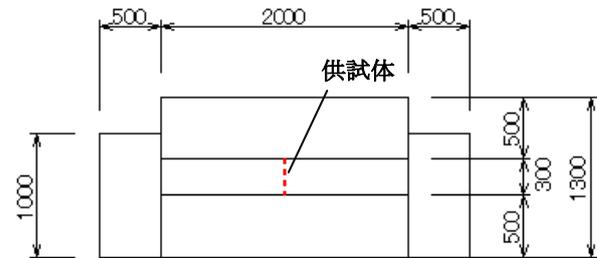


図-2 保温室 側面図

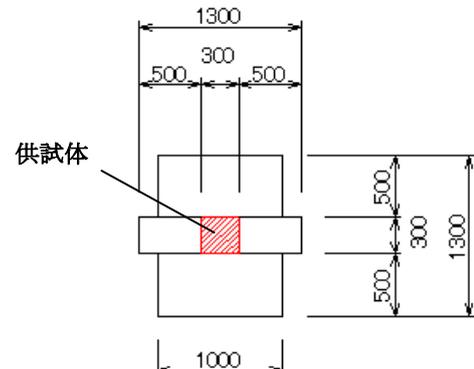


図-3 保温室 立面図



図-4 保温室内部

組み合わせて保温室をつくり、箱材の隙間はテープで目張りした。

30×30 cm の供試体シートは木製型枠に挟んで内部に設置し、スチレンボード側を熱源に向けた（図-4）。

熱源には 500 w の屋外用投光機を用い、同図に示すように供試体を直射しないよう、供試体と逆向きに置いた。

温度計は室温測定用に宙ぶりの状態で、供試体を挟んだ 2 つの空洞に 2 点、供試体温度測定用に供試体中央の表裏に 2 点である。温度計は熱電対温度計で、測定間隔は 1 秒である。図-5 に保温室全景を示す。

4. 温度測定結果

温度測定は、投光機によって熱源側室温を EPS の限界温度 80℃まで上げ、室温が 80℃に達した時点で投光機を切り、熱源側室温、供試体表面温度（熱源側）、供試体裏面温度（放熱側）、放熱側室温がほぼ等しくなるまで放熱させた。

測定温度は、投光機の背面にある熱源側室温、供試体表面、供試体裏面、放熱側室温の順に低くなり、供試体に投光機の輻射熱は直接とどいておらず、供試体表面温度計もそれによる影響は受けていないと考えられる。

図-6 に三層構造断熱材の測定結果、同供試体と単一構造、および 2 種類の二層構造断熱材の結果を、放熱側室温を基準にして、比較したものを示す。

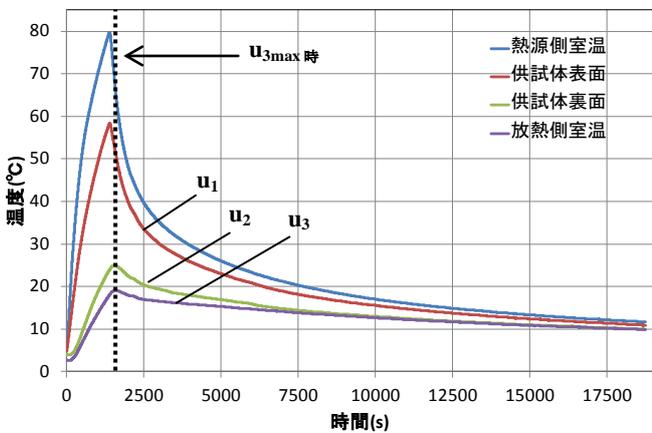
同図-(b) (c) (d) より、単一構造、二層構造 (75 g)、二層構造 (150 g) の順に、断熱性能が良くなっていく



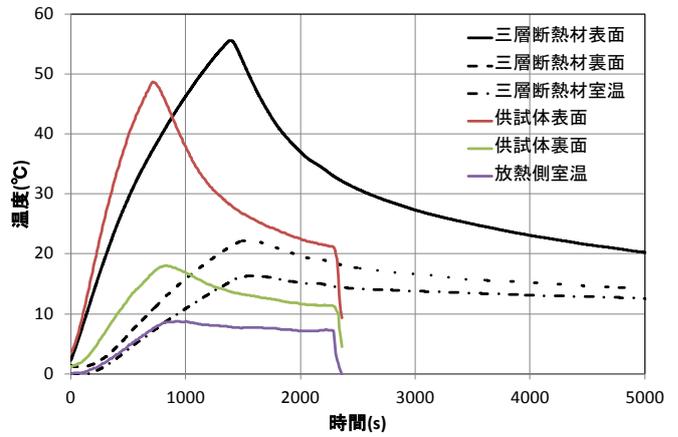
図-5 保温室全景

傾向にあるが、三層構造断熱材の温度変化は 4 つの中で最も遅く、かつ供試体表裏の温度差は最も大きく、供試体裏面と放熱側室温の温度差は、最も小さい。

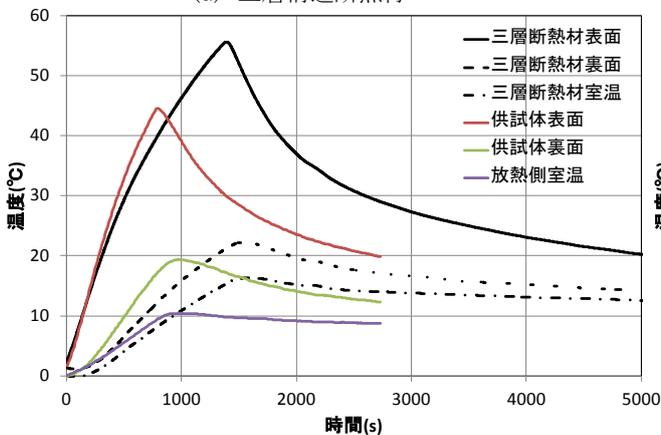
このことから、三層構造断熱材の断熱性能が最も高いと考えられる。ここでは三層構造断熱材の熱伝導率と熱容量を推定するために、図-6-(a) の供試体表裏面と放熱側室温に注目する。



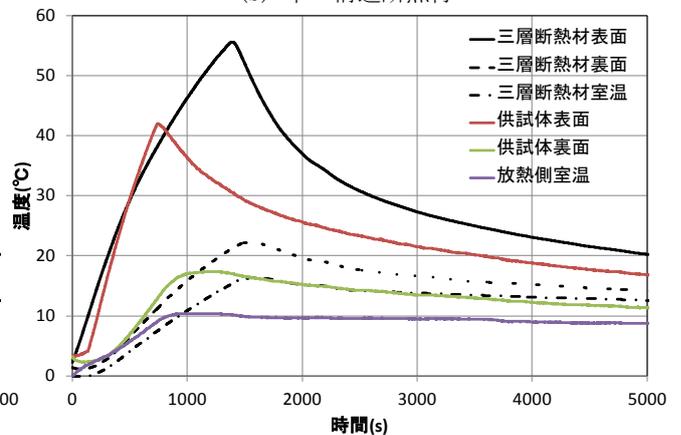
(a) 三層構造断熱材



(b) 単一構造断熱材



(c) 二層構造断熱材 (75 g)



(d) 二層構造断熱材 (75 g)

図-6 温度測定結果

5. 熱伝導方程式および温度場の推定

熱伝導方程式は、

$$c \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \Delta u \quad (式 1)$$

と書ける。ここに、

u : 供試体温度 (K) であるが、℃で代用できる。

t : 時間 (s)

c : 熱容量 (J/m³/K) .

λ : 熱伝導率 (J/s/m/K) .

Δ : ラプラシアン

である。温度計を貼付した供試体中央部分にのみ注目し、注目点の側方が熱平衡状態にあると仮定すると、(式 1) は一次元の熱伝導方程式、

$$c \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (式 2)$$

に簡略化できる。ここで x(m) は、供試体の厚さ方向を表す。

いま供試体厚 d は d=0.005 m (5 mm) と、保温室の全長 2 m と比較して十分微小なので、(式 2) 右辺の発散項は、厚さ方向に線形に変化すると仮定する。この仮定のもとに u(x, t) は、x についての 3 次関数、

$$u(x, t) = \frac{1}{6} A(t)x^3 + \frac{1}{2} B(t)x^2 + C(t)x + D(t) \quad (式 3)$$

とできる。

ただし 0 ≤ x ≤ 0.005 であり、A(t), B(t), C(t), D(t) は、時間のみに依存する未定数である。

(式 3) の 4 つの未定数を時間ごとに定める条件として、表面側 (熱源側) 供試体温度 u₁, 裏面側 (放熱側) 供試体温度 u₂ と、u₁, u₂ の時間勾配 u'₁, u'₂ を取れる。これらは、測定結果図-6-(a) および図-7 から時間ごとに定める事ができる。図-7 は図-6-(a) のデータを時間間隔 1 s で数値微分したものである。

(式 3) を x で 2 階微分し、(式 2) に代入すれば、

$$A(t)x + B(t) = \frac{c}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t}(x, t) \quad (式 4)$$

なので、x=0, d (0 : 表, d : 裏) では、

$$\begin{cases} B(t) = \frac{c}{\lambda} u'_1 \\ A(t)d + B(t) = \frac{c}{\lambda} u'_2 \end{cases} \quad (式 5)$$

を得る。(式 5) より A(t), B(t) を定め、x で二階積分すれば、

$$u(x, t) = \frac{c}{6d\lambda} (u'_2 - u'_1)x^3 + \frac{c}{2\lambda} u'_1 x^2 + C(t)x + D(t) \quad (式 6)$$

である。

(式 6) で同様に x=d, d では、

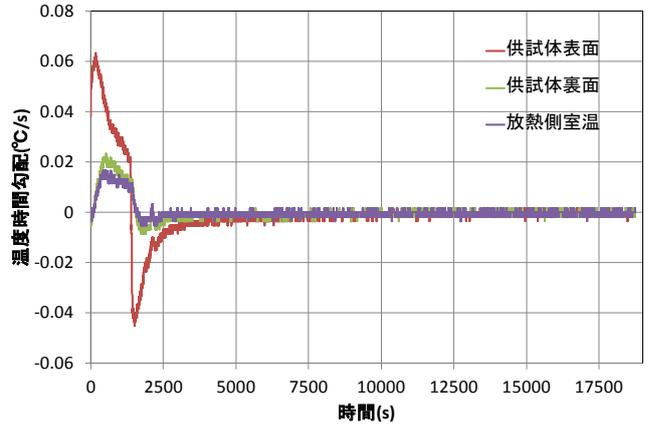


図-17 三層構造断面材 温度の時間勾配

$$\begin{cases} D(t) = u_1 \\ C(t)d + D(t) = u_2 - \frac{c}{6d\lambda} (u'_2 - u'_1)d^3 - \frac{c}{2\lambda} u'_1 d^2 \end{cases} \quad (式 7)$$

なので、(式 7) より C(t), D(t) を定め、

$$u(x, t) = \frac{c}{6d\lambda} (u'_2 - u'_1)x^3 + \frac{c}{2\lambda} u'_1 x^2 + \left(\frac{u_2 - u_1}{d} - \frac{c}{6\lambda} u'_2 d - \frac{c}{3\lambda} u'_1 d \right) x + u_1 \quad (式 8)$$

を得る。

6. 熱流速の推定

次に放熱側室温を u₃ とする。u₃ が、放熱側室温の空間平均として使用でき、EPS 側面からの熱流出がないものと仮定すると、供試体裏面から放熱側室内への熱流速 J は、

$$J(t) = \frac{c_a V}{S} \frac{du_3}{dt} \quad (式 9)$$

で計算できる事になる。

ここに、

c_a : 空気の熱容量, c_a=1257 J/m³/K.

V : 放熱側室内体積, V=1×0.3×0.3=0.09 m³.

S : 供試体面積, S=0.3×0.3=0.09 m².

しかしながら図-6-(a) の u₃ のピーク後も u₂ < u₁ であり、熱源側から放熱側への熱供給はあるにも関わらず、放熱側室温 u₃ は減少している。従って壁面材である EPS 等を通じた熱損失は、無視できない。

u₃ のピーク時に注目すると u₃' は当然 0 なので、この時、熱源側からの熱供給と放熱側からの熱損失は、等しいとみなせる。この時の供試体を通じた熱流速を J_{max} とすると、熱伝導方程式(式 2) の右辺の物理モデル、

$$J(t) = -\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \quad (式 10)$$

と(式 8) より、

$$J_{\max} = -\frac{d}{3} \left(u'_{2\max} + \frac{1}{2} u'_{1\max} \right) c - \frac{u_{2\max} - u_{1\max}}{d} \lambda$$

(式 11)

である。ただし添え字 max は、 u_3 ピーク時の時刻を意味する。

この熱損失が、 u_3 のピーク時以外では、現在の u_3 と u_3 の初期温度 u_{30} との差に比例すると仮定すれば、(式 9) に(式 11)の寄与を加え、

$$J(t) = \frac{c_a V}{S} \frac{du_{3j}}{dt} - \frac{d}{3} \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} \left(u'_{2\max} + \frac{1}{2} u'_{1\max} \right) c - \frac{u_{3j} - u_{30}}{d} \frac{u_{2\max} - u_{1\max}}{u_{3\max} - u_{30}} \lambda$$

(式 12)

を得る。ただし添え字 j は、時刻 t における j 番目の測定データである事を意味する。

(式 10) に(式 8)を代入し、 $x=d$: 供試体裏面での(式 10)の関係を考慮すると、次の(式 13)を得る。

$$\frac{d}{3} \left(u'_{2j} + \frac{1}{2} u'_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} \left(u'_{2\max} + \frac{1}{2} u'_{1\max} \right) \right) c + \frac{1}{d} \left(u_{2j} - u_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} (u_{2\max} - u_{1\max}) \right) \lambda = -J_j$$

(式 13)

7. 熱伝導率と熱容量の推定

図-6-(a)、図-7 から全ての j について(式 13)をつくり、熱容量 c と熱伝導率 λ について最小二乗法を適用すると、

$$K \begin{pmatrix} c \\ \lambda \end{pmatrix} = -M$$

(式 14)

が得られる。ここに $K=(k_{pq})$ ($p, q=1, 2$)、 $M=(m_q)$ 。

$$k_{11} = \frac{d^2}{9} \left(u'_{2j} + \frac{1}{2} u'_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} \left(u'_{2\max} + \frac{1}{2} u'_{1\max} \right) \right)^2$$

$$k_{12} = \frac{1}{3} \left(u'_{2j} + \frac{1}{2} u'_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} \left(u'_{2\max} + \frac{1}{2} u'_{1\max} \right) \right) \times \left(u_{2j} - u_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} (u_{2\max} - u_{1\max}) \right)$$

$$k_{21} = k_{12}$$

$$k_{22} = \frac{1}{d^2} \left(u_{2j} - u_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} (u_{2\max} - u_{1\max}) \right)^2$$

$$m_1 = \frac{d}{3} \left(u'_{2j} + \frac{1}{2} u'_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} \left(u'_{2\max} + \frac{1}{2} u'_{1\max} \right) \right) J_j$$

$$m_2 = \frac{1}{d} \left(u_{2j} - u_{1j} - \frac{u_{3j} - u_{30}}{u_{3\max} - u_{30}} (u_{2\max} - u_{1\max}) \right) J_j$$

(式 15)

(式 15)では 2 重に現れる添え字 j について和を取るものとする。

8. 三層構造断熱材の熱伝導率と熱容量

(式 14)、(式 15)による計算結果を示す。 u_3 のピーク後のデータでは温度値が接近し温度の時間勾配も 0 に近く、(式 14)が悪条件となりやすいため、計算に用いるデータは、放熱側室温 u_3 のピークまでとした。

三層構造断熱材の熱物性値

熱伝導率 : $\lambda = 0.0070$ J/s/m/K.

熱容量 : $c = 48000$ J/m³/K.

比較のために空気と EPS の熱物性値 (標準値) を示すと、以下となる。

空気

熱伝導率 : $\lambda = 0.024$ J/s/m/K.

熱容量 : $c = 1257$ J/m³/K.

EPS

熱伝導率 : $\lambda = 0.041$ J/s/m/K.

熱容量 : $c = 25600$ J/m³/K.

開発した薄型 (5 mm) 三層構造断熱材は、空気の約 1/3 程度の熱伝導率、EPS の約 2 倍程度の熱容量を持ち、非常に高い断熱性能があると考えられる。

9. まとめ

いわゆる廃材による安価で高い断熱性能を持つ、断熱シートの開発は、可能と思われる。

[参考文献]

- 1) 新しい 3 層断熱型枠を用いたコンクリートの温度特性とリフト割に関する一考察, 近藤里史他, 土木学会北海道支部論文報告集第 69 号, 2013 年.
- 2) 木質テップを用いた不陸陸性シートの開発, 山本康弘他, 土木学会北海道支部論文報告集第 70 号, 2014 年.