

ホットディスク法を用いた二層素材の見かけの熱物性把握の試み —床下空調のための適切な床下地材・仕上材の構成に向けて その1—

井上健太^{*1}、早川紀朱^{*2}、横江彩^{*3}

An Attempt at Measuring Apparent Thermal Characteristics of Bi-layered Material Using the Hot Disc Technique -Towards a Better Combination of Floor Materials for an Underfloor Air-conditioning System, Part 1-

Kenta INOUE^{*1} Noriaki HAYAKAWA^{*2} Aya YOKOE^{*3}

(Received, February 18, 2022)

The objective of this work is to compare the apparent thermal characteristics of ten different types of bi-layered materials using the hot disc technique. In this paper bi-layered material refers to the components of a floor that consists of structural board and finishing materials; both are considered mainly wood-based materials (except one slate board as a flooring board). Let us consider the following case. An architect already has candidates for finishing materials for flooring and only needs their thermal characteristics for the final decision. In this context, the architect does not need the theoretical/ideal properties of the finishing material, but only needs their apparent value. A hot disc sensor of diameter 7mm is set on the side of the finishing material, and the process of trial and error is used to achieve as deep a probing depth as possible so that the heat sensor penetrates the flooring board and reaches the structural board. In this process, probing depth is prior to any other parameters, such as total/char.-time, temp.-incr. and mean-dev. accompanying the usual hot disc technique. Though the condition of measurement is rough and not ideal, it was a discussion point whether or not, even in such non-ideal conditions, it is still possible to judge apparent thermophysical properties. As a result, most of heat from the disc sensor did not reach the structural boards. However, the conductivity values obtained in the experiment shows there is a strong correlation between measured thermal conductivities and known thermal conductivities of finishing materials. Since the results are acceptable as far as the range where heat reached, it would be possible to compare thermophysical properties of bi-layered materials if heat reached far enough into the structural boards using a larger hot disc sensor and larger samples; this type of experiment remains for further and future development.

Keywords : Hot Disc Technique, TPS (Transient Plane Source), Thermal Conductivity, Floor Material

* 1 中部大学大学院建設工学専攻修士課程
* 2 * 3 中部大学工学部建築学科准教授、博士（工学）
〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200

*1 Master's Course, Chubu University, Graduate School of Engineering, Department of Constructional Engineering,
*2, *3, Associate Professor, Chubu University, Faculty of Engineering, Department of Architecture, PhD

1. はじめに

床構成材の下地材と仕上材を想定した全 10 種類の二層素材（複層素材である合板と区別するため、本稿では下地材と仕上材の二層からなる素材という意味で「二層素材」という言葉を用いる）の試料を対象とし、ホットディスク法により見かけの熱物性の比較を試みた。ホットディスク法とはヒーターと温度を測るセンサーを兼ねたディスク状センサーを二つの同一試料で挟み込み、ディスク状センサーを一定継続発熱させてセンサー自身の温度上昇を観察することにより、試料の熱伝導率と熱拡散率を求める測定方法である（2009 加納）^{注1)}。したがって、試料を両面から完全に横断するような熱物性値を測定するわけではなく、片面に設置したセンサーから熱が到達したと想定される範囲までの熱物性値を測定する。本研究ではディスク状センサーは仕上材側に設置し、プロービング・デプス（以下「Pr.D」と記す）と呼ばれる試料からの熱の到達距離が仕上材を超えて下地材に至るよう、あるいは、少なくとも仕上材を構成する複数プライを横断するように、なるべく Pr.D を大きくするよう試みた。これにより、仕上材と接着部、下地材の一部を含む領域のなんらかの見かけの熱物性が得られ、比較できると期待した。ディスク状センサーと試料の関係、熱の到達具合のイメージを図 1 に示す。本稿では比較的小さな呼称 7 Φ のホットディスクセンサーと小さな試料（平面約 50mm 角）を用いることとした。小さな試料で目的が達成できるなら、実験の負担が軽く、そのほうが良い。そのうえで必要があれば、次報以降、より大きなセンサーを用いて、同様の試みをしたいと考えている。

2. 研究の背景と目的

本稿で研究の対象とした二層素材は、近年実例が散見されるようになった簡易的床暖房である床下空調（床下エアコン）の床材として利用することを想定したものである。床下空調とは、床下空間に設置したエアコンからの熱流が、床面からの伝導で直接足裏に伝わ

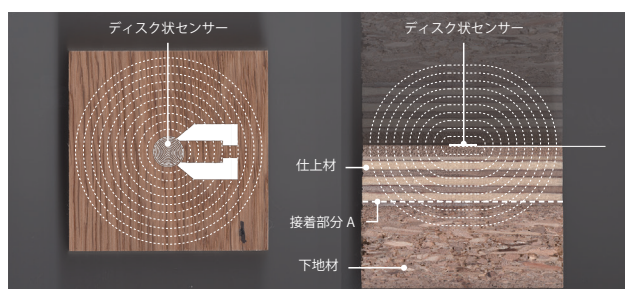


図 1 二層素材試料とディスク状センサーの位置関係。同一の二つの試料でセンサーを挟む。左が平面的な関係、右が断面的な関係を示す。細点線はセンサーからの熱の到達のイメージ。

るとともに、部屋周囲に設置されたスリット部分からの対流としても室内を温めるという手法である。ヒートポンプの熱効率の良さから他の床暖房形式と比較して経済的であると言われている。

二層素材（下地材＋仕上材）をひとつの素材と捉えた場合、材料の組成として最もイレギュラーなのは二素材が接着する部分（接着部分 A とする。図 1 中に示す）である。仕上材であるフローリング材には裏足などがついており、下地材とぴったりとくっつく訳ではない。

さて、二素材のうち床下地材は採用する床の構造形式によってある程度自動的に決まる。一方、仕上材は柔らかさや見た目、クライアントの好みなどによりさまざまな選択肢がある。したがって、ここで求めたいのは、接着部分 A と仕上材を横断し、下地材を一部含むような部材範囲での複合的な熱物性である。別の言い方をすれば、クライアント・設計者の選択により影響を受ける領域に限定した範囲での見かけの熱物性の知見を得られれば良いという考えである。このとき利用したいデータの精度としては、複数の仕上材間での選択に迷いがある場合に、相対的にベターな熱物性上の選択をすることを助けるようなレベルのものであればよい。この考えのもと、本研究では二層素材の絶対的な熱物性（理想的な理論値）を得ることは目指さず、10 種類の試料間で見かけの熱物性を比較することを目的とした。

3. ホットディスク法の概要と測定の様子

理論の説明に先立ち、ホットディスク法の概要と測定の様子を紹介する。測定の様子を図 2 で示す。またディスク状センサーの様子を図 3 で示す。本研究で用いたディスク状センサーはニッケル線の二重スパイラルとなっていて、ポリイミドで被覆されたものである。

ホットディスク法は物質中の温度差 ΔT が時間的に変化する状態で熱物性値の測定を行う非定常法測定法である。適切に測定時間を設定すれば、熱伝導率だけでなく、熱拡散率も同時に測定できるという特徴がある。また、測定時間が比較的短く、また比較的小さな試料を用いるため測定の負担が小さいというメリットがある^{注2)}。ホットディスク法を用いて木材の理論的な熱物性を把握しようとする試みはすでにある（2020 前田）。

測定手順や操作も明快で、熱伝導の専門家でなくても比較的容易に測定ができる。ただし、後述するように信頼性の高い、理論値・絶対値としての熱物性を求めるためには熱伝導の知識と経験が必要となる。一方、同一条件にて異なる試料を測定した場合、温度上昇の高さで熱伝導率の大小が分かるとある^{注3)}。絶対的な熱物性（理想的な理論値）を得ることは目指さず、相対

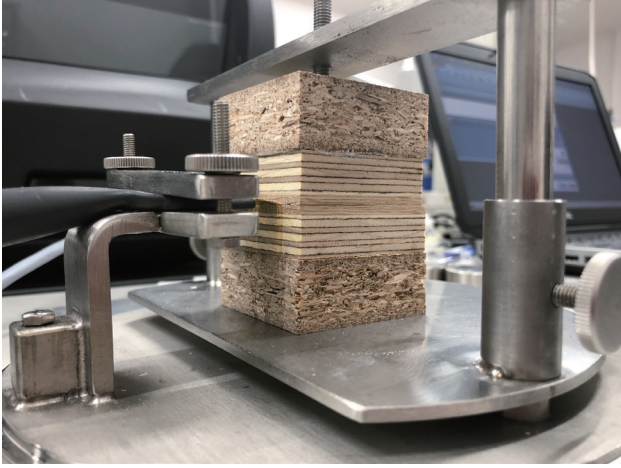


図2 ホットディスク法の測定の様子。二つの同一の試料でセンサーを挟み込む。



図3 ディスク状センサーの様子。この写真はセンサー直径Φ4のもの。実際に利用したのはセンサー直径Φ7のもの。

的に熱物性を比較することを目的とする場合には、上述した測定手順や操作の明快性が手助けとなる。

4 センサーと測定原理

本節では既往文献（1959 Carslaw, 1991 Gustafsson, 2000 Bohac, 2005 He, 2009 加納）からの抜粋により、センサーと基本理論の説明を行う。ホットディスク法では先述したように、ディスク状のセンサー部を二個の同一試料で挟み込み、センサーに一定の電流を流して発熱させる。このときのセンサーの昇温スピードは挟み込んでいる試料の熱伝導率による。このとき抵抗値とセンサーの平均温度上昇値 $\overline{\Delta T(\tau)}$ の関係は以下のように表される。抵抗値の増加を記録することにより、式 (1) から演繹的にセンサーの温度上昇が正確に導かれる^{注4)}。

$$R(t) = R_0[1 + \varphi \overline{\Delta T(\tau)}], \quad (1)$$

ここで R_0 は電気抵抗の初期値、 φ はセンサーに固有の抵抗率の温度係数である。 t と τ は後述するが、時間の変数である。

さて、非定常状態での加熱の間、 $\overline{\Delta T(\tau)}$ は時間だけの関数であり、以下のパラメータに依存する^{注5)}。

- i) センサーへの電力出力 P_0
- ii) 抵抗体の形状を説明するパラメータ（スパイラルの形状を示す半径 r とスパイラルの数 m ）
- iii) 試料の未知の熱伝導率 λ と試料の未知の熱拡散率 α

最終的に求めたいのは iii) の熱伝導率 λ と熱拡散率 α である。ここで、熱伝導微分方程式より $\overline{\Delta T(\tau)}$ は

$$\overline{\Delta T(\tau)} = \frac{P_0}{\sqrt{\pi^3 \cdot r \lambda}} D(\tau) \quad (2)$$

で表される。この式から $\overline{\Delta T(\tau)}$ は試料の熱伝導率 λ に反比例することが分かる。すなわち金属のような熱伝導率の大きい試料なら、熱が試料側に逃げてしまい、昇温スピードは緩やかになる^{注6)}。

さて、ここで、 $D(\tau)$ は後述する無次元の時間 τ の関数である。二重スパイラル熱源を m 回繰り返す同心円の円形熱源と見なすと、既知の円形熱源の理論^{注7)} から $D(\tau)$ は次式で表される^{注8)}。

$$D(\tau) = \frac{1}{[m(m+1)]^2} \times \int_0^\tau \sigma^{-2} d\sigma \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \times \exp \left\{ -\frac{l^2 + k^2}{4m^2 \sigma^2} \right\} I_0 \left(\frac{lk}{2m^2 \sigma^2} \right) \right], \quad (3)$$

m はセンサーのスパイラルの数、 I_0 は修正ベッセル関数である。また σ は t から τ へ変数変換する際に用いられた積分変数である。式 (3) の導出にいたる過程については (2005 He) に詳しい。ここで既出の τ は無次元の時間変数であり、

$$\tau = \sqrt{t/\theta} \quad (4)$$

で表される。ここで t は熱伝導経過時間（熱伝導率 λ と熱拡散率 α の導出に用いた測定時間）、 θ は非定常計測での特性時間と呼ばれる時間スケールであり、センサーの半径 r 、試料の熱拡散率 α から次式で表される。

$$\theta = \frac{r^2}{\alpha} \quad (5)$$

また、式 (4)、式 (5) から次式が導かれ、 τ は熱伝導経過時間 t と熱拡散率 α の関数であることが分かる。

$$\tau = \sqrt{\alpha t} / r \quad (6)$$

したがって、式 (3) の $D(\tau)$ も熱伝導経過時間 t と熱拡散率 α の関数である。式 (2) の示す昇温カーブの横軸である時間軸を、試料の熱拡散率 α をパラメータとして適切に変換すれば昇温カーブが直線になり、その直線が熱伝導率 λ の逆数に比例することになる。逆に直線状になるように α を求めれば、これが試料の熱拡散率となる^{注9)}。この過程は付属の解析ソフトの最適化処理による^{注10)}。詳細な理論は開発者による論考 (1991 Gustafsson) を参照されたい。

さて、試料の熱伝導率 λ と熱拡散率 α が求めれば、試料の容積比熱 Cp は試料の密度 ρ より次式のように求められる。

$$\lambda = \alpha \times \rho \times Cp \quad (7)$$

一方、熱拡散率 α は熱伝導経過時間 t と組合せると次のような長さの尺度、先述したプロービング・デプス (Pr.D) を得る。

$$Pr.D = 1.42 \sqrt{\alpha \times t} \quad (8)$$

これは伝熱現象において t 時間後に温度が拡散、すなわち伝播する距離を表す。定数 1.42 はこの測定法の開発者である S.E.Gustafsson が実験により求めたものであるが、我が国での販売元である京都電子工業では安全を見て定数を 2 としている^{注11)}。

また、式 (4) に現れる t/θ は全特性時間と呼ばれ、一度だけの非定常計測により熱伝導率 λ と熱拡散率 α の両方を決定するための最適な時間範囲は、

$$0.3 \leq t/\theta \leq 1.1 \quad (9)$$

を満たす熱伝導経過時間であるとされる^{注12)}。この時間範囲が「熱拡散率と熱伝導率の測定感度情報が混在した時間範囲」に対応していることによる^{注13)}。ただし、本稿ではなるべく Pr.D を大きくすることを重視したことから、後述するように結果的にはこの条件は満足しなかった。

以上が既往文献からまとめた基礎理論であるが、実際の測定・計算は計測機器と付属の解析ソフトのふるまいに依存するため、以降は計測機器の取扱説明書に基づいて測定の流れを説明する。

5 測定の流れ

まず、試料サイズとの関係から適切なサイズのセンサーを選択する。センサー直径 a に対して直径が $3a$ 、厚さが a 以上の試料が必要となる^{注14)}。また、木質系のような不均質な素材を測定するには、そのイレギュ

ラーな幾何学 (材料組成) のサイズよりもずっと大きなセンサー径が必要であるとの指摘がある^{注15)}。本研究のようにマルチプライの合板の熱物性を扱う場合は、複数プライを超えるようなセンサー直径が必要であると考え。本研究で使用したセンサー「Hot Disk 5465 3.189mm Kapton」は直径が 6.378mm であり、その意味ではもう少し大きなセンサーが望ましい。

次いで測定時間 (s) と加熱量 (mW) を決定する。初めて測定する試料に対して最適な測定条件を 1 回で設定することはできず、解析しながら設定を行う。特に積層材・不均質素材については、測定条件の設定が難しく、経験が必要であるとされている^{注16)}。

測定後、測定時間を 0 ~ 200 の範囲として、そのうち熱伝導率 λ と熱拡散率 α の導出に用いる時間範囲をスタートポイント・エンドポイントとして規定し、計算を行う。例えば 100 秒の計測時間との場合、100 秒を 200 の区間に区切る。スタートポイントを 10、エンドポイントを 190 とすると、1 ポイント (1 区間) は 0.5 秒であることから、5 秒後から 95 秒後までのデータを用いて熱伝導率 λ と熱拡散率 α を計算することになる。

解析ソフトの計算結果では、各時間のセンサーの抵抗値はセンサーの平均温度上昇値として出力される。この時間と平均温度上昇値のデータから、解析ソフトが熱伝導率 λ と熱拡散率 α 、容積比熱 Cp を計算し出力する。平均温度上昇値の偏差データも出力される。

計算完了後、指標のチェックを行なう。満足しない場合は、計算するポイントを変更し、計算 / 指標のチェックを繰返すこととなる。このとき、計算結果の良好性を見る指標は 5 つあり、その基準が示されているので以下にまとめる^{注17)}。

指標①無次元化された時間と温度のグラフ (T-f(τ) グラフ) の直線性

(この傾きが熱伝導率と関係する。「T-f(τ) グラフ」という呼名は付属ソフトによる出力の表記に従ったものである。T-f(τ) グラフは、熱拡散率 α をパラメータとして第 4 節の式 (2) $\Delta T(\tau) - D(\tau)$ を、カーブフィッティング技術により直線状にしたものに対応する。)

指標② Pr.D (この値が試料サイズよりも大きいと熱が試料を突き抜けたと判断され NG である。)

指標③偏差の判断 (均質に ± 1mK より小さければよいが、試料が不均一、積層材の場合は波状になり、偏差が大きい傾向にあるとされる。)

指標④全特性時間 (良好な値は 0.33 ~ 1.0 で、1.0 に近いほど良い。そのため 0.33 ~ 1.0 内になるようにデータをカットすることが望ましい。)

表 1

試料の詳細一覧。下地材・仕上材の厚さ、熱伝導率とそれらを接着した二層素材の熱通過率

試料 No	試料略称	下地材の厚さ t1(m)	仕上材の厚さ t2(m)	下地材の熱伝導率 λ_1 (W/mK)	仕上材の熱伝導率 λ_2 (W/mK)	二層素材の熱通過率 $1/\left(\frac{t_1}{\lambda_1} + \frac{t_2}{\lambda_2}\right)$ (W/m ² ・K)	試料の詳細	仕上材の詳細
1	PB t20+MPFB t15-A	0.02	0.015	0.16	0.16	4.572	下地：パーティクルボード t.20 仕上：複合フローリング材 t.15 (突板：オーク材 t.3.5)	表面材：オーク (t.3.5) 芯材：耐水合板 裏打ち材：単板
2	PB t20+MPFB t15-B	0.02	0.015	0.16	0.16	4.572	下地：パーティクルボード t.20 仕上：複合フローリング材 t.15 (突板：オーク材 t.2.0)	表面材：オーク (t.2) 芯材：バーチ合板
3	PB t20+FB t15	0.02	0.015	0.16	0.11	3.827	下地：パーティクルボード t.20 仕上：無垢フローリング材 t.15 (アカマツ)	
4	PB t20+PRSF t15	0.02	0.015	0.16	0.138	4.28	下地：パーティクルボード t.20 仕上：圧密無垢フローリング材 t.15 (杉)	
5	LVL t20+MPFB t15	0.02	0.015	0.16	0.16	4.572	下地：構造用合板 t.20 仕上：複合フローリング材 t.15 (突板：オーク材 t.3.5)	表面材：オーク (t.3.5) 芯材：耐水合板 裏打ち材：単板
6	LVL t15+MPFB t15	0.02	0.015	0.16	0.16	4.572	下地：構造用合板 t.15 仕上：複合フローリング材 t.15 (突板：オーク材 t.3.5)	表面材：オーク (t.3.5) 芯材：耐水合板 裏打ち材：単板
7	LVL t12+FLXB t12	0.012	0.012	0.16	0.35	9.151	下地：構造用合板 t.12 仕上：フレキシブルボード t.8	
8	LVL t12+MPFB t15	0.012	0.012	0.16	0.16	6.667	下地：構造用合板 t.12 仕上：複合フローリング材 t.15 (突板：オーク材 t.3.5)	表面材：オーク (t.3.5) 芯材：耐水合板 裏打ち材：単板
9	LVL t12+FB t15	0.012	0.015	0.16	0.087	4.042	下地：構造用合板 t.12 仕上：無垢フローリング材 t.15 (杉)	
10	LVL t12+PRSF t15	0.012	0.015	0.16	0.138	5.444	下地：構造用合板 t.12 仕上：圧密無垢フローリング材 t.15 (杉)	

指標⑤温度上昇 (K) (スタートポイントとエンドポイント間での温度上昇を示す。温度増加の値が、0.4 ～ 4K であると解析がより良いと判断される。)

さて、計算のポイントは、上記指標①～指標⑤を満足することで、少なくとも、指標①、②は必須だとされている^{注 18)}。一方で、木材のように不均質な材料では指標①～指標⑤をすべて満足させるには試行錯誤が必要となる。「均一な材料でセンサーサイズに適した試料サイズおよび最適な条件で測定すると、指標①～指標⑤は満足する^{注 19)}」とあるが、逆にいえばすべて満足することがない場合もありうる。そこで、本研究ではなるべく Pr.D を大きくすることを最優先とし、指標①、②を満足させれば良しとした。そのうえで、同一条件にて異なる試料を測定した場合、温度上昇の高さで見かけの熱伝導率等を比較することができるのかどうかを考察することにした。指標①、②を満足させれば良しとした判断の可否も結果により判断したい。

6 測定試料の説明

試料は下地材と仕上材の組み合わせを変えた 10 種類の二層素材である (表 1)。平面サイズは 50mm x 50mm で厚さは試料によるがおよそ 35mm 前後である。測定には同じ試料が二つ必要になるので計 20 個の試料を作成している。試料にはそれぞれ No.1 から No.10 の ID を割り振った。それぞれの試料の下地材、仕上材の種類、厚さ、既知の熱伝導率^{注 20)}、「二層素材

の熱通過率」を表 1 に記した (本稿中では「下地材・仕上材の熱伝導抵抗の合計値の逆数」を、固体間の熱の伝わりやすさを表す指標として、「二層素材の熱通過率 (W/m²・K)」と呼ぶことにした。一般的に用いられる熱伝導率 (W/m・K) とは単位が異なる)。

また、表中に試料の詳細と仕上材の断面構成の詳細も併記した。グラフ結果の読み取りを容易にするために、それぞれの材料に下記略称を使用する。略称は「下地材」+「仕上材」の順に記してある。

下地：

PB：パーティクルボード

LVL：構造用合板

仕上：

FB：無垢フローリング材

MPFB：複合フローリング材

PRSF：圧密無垢フローリング材

FLXB：フレキシブルボード

材料は以下の 5 つの検証を行なえるように選択している。

検 証 1) No.1(PB t20+MPFB t15-A) と No.2(PB t20+MPFB t15-B) を比べることで仕上げ表面材の突板・芯材の差異による違いがあるかどうかを検証する。

検 証 2) No.1(PB t20+MPFB t15-A)、No.5(LVL t20+MPFB t15)、No.6(LVL t15+MPFB t15)、No.8(LVL t12+MPFB t15) を比較することで下地材の種類・厚さによる違いがあるかどうかを検証す

る。

検 証 3) No.1(PB t20+MPFB t15-A)、No.2(PB t20+MPFB t15-B)、No.3(PB t20+FB t15)、を比較することで複合フリーリング材と無垢フローリング材（アカマツ）による違いがあるかどうかを検証する。

検 証 4) No.9(LVL t12+FB t15)、No.10(LVL t12+PRSFB t15) を比較することで無垢フローリング（杉）と圧密無垢フローリング（杉）による違いがあるかどうかを検証する。

検証5) No.7(LVL t12+FLXB t12) は唯一の非木質

系の仕上材（フレキシブルボード）なので他と比較する。

7 テストから二つの設定にいたる流れについて

前節の 10 種類の二層素材試料の見かけの熱物性を測定し比較するための同一条件（加熱量、測定時間、ポイント範囲）を決定するために、No1 の試料に対して加熱量・測定時間・スタート/エンドポイントを変えてテストを行い、指標のチェックを行なった。以降の測定における共通条件を表2にまとめる。

前述したとおり、本研究ではなるべく Pr.D を大きく

表 3

測定結果一覧。テストを含めて掲載。青地は目標の Pr.D に近い数値、赤字は理論的な測定のためには問題がある数値を示す。「ポイント」とあるのが、熱物性値の導出に用いた時間範囲。同欄 tc は時間補正（Time Correction）の略語で、ポイント 0 から加熱 と サンプリングを始めていることを示す。

Sample ID	Outp.power.	Meas.time	(Points)	Th.Conductivity	Th.Diffusivity	Spec.Heat	Pr.D	Temp.Incr.	Total/Char. Time	Mean Dev.
試験ID	加熱量 (mW)	測定時間 (s)	ポイント	熱伝導率 (W/mK)	熱拡散率 (mm ² /s)	容積比熱 MJ/m ³ K	熱の到達距離 mm	温度上昇 K	全特性時間	平均偏差
test1	50 mW	3s	(10-200,tc)	0.254	0.430	0.590	2.35 mm	2.18	0.119	0.0006
test2	60 mW	10s	(10-200,tc)	0.251	0.421	0.596	4.11 mm	3.72	0.363	0.0005
test3	60 mW	20s	(20-200,tc)	0.254	0.408	0.623	5.71 mm	3.43	0.702	0.0003
test4	50 mW	40s	(85-200,tc)	0.251	0.290	0.863	6.82 mm	1.06	1.000	0.0002
test5	40 mW	80s	(80-200,tc)	0.218	0.503	0.433	12.7 mm	0.72	3.46	0.0007
test6	50 mW	40s	(85-200,tc)	0.251	0.290	0.863	6.82 mm	1.06	1.000	0.0002
test7	60 mW	80s	(20-200,tc)	0.248	0.272	0.912	9.32 mm	3.43	1.87	0.0035
test8	40 mW	80s	(80-200,tc)	0.218	0.503	0.433	12.7 mm	0.72	3.46	0.0007
test9	40 mW	160s	(20-200,tc)	0.237	0.352	0.672	15.0 mm	1.90	4.86	0.0037
test10	60 mW	20s	(40-200,tc)	0.239	0.328	0.727	5.13 mm	2.59	0.565	0.0011
test11	50 mW	10s	(15-200,tc)	0.242	0.342	0.707	3.75 mm	2.85	0.303	0.0003
test12	50 mW	5s	(40-200,tc)	0.243	0.366	0.662	2.71 mm	1.66	0.158	0.0002
test13	60 mW	5s	(12-200,tc)	0.236	0.328	0.722	2.56 mm	2.92	0.141	0.0004
test14	60 mW	3s	(150-200,tc)	0.260	0.412	0.630	2.30 mm	0.39	0.114	0.0004
test15	60 mW	10s	(50-200,tc)	0.243	0.330	0.737	3.63 mm	2.12	0.284	0.0002
test16	60 mW	20s	(20-200,tc)	0.244	0.329	0.741	5.13 mm	3.56	0.567	0.0005
test17	60 mW	20s	(20-200,tc)	0.232	0.291	0.795	4.83 mm	3.58	0.502	0.0002
test18	60 mW	20s	(20-200,tc)	0.263	0.296	0.889	4.87 mm	3.22	0.510	0.0030
test19	60 mW	20s	(20-200,tc)	0.236	0.290	0.815	4.82 mm	3.55	0.499	0.0003
test20	80 mW	80s	(40-160,tc)	0.251	0.223	1.127	7.56 mm	2.76	1.23	0.0017
test21	80 mW	160s	(40-120,tc)	0.264	0.174	1.522	8.17 mm	1.98	1.44	0.0007
test22	100 mW	160s	(40-120,tc)	0.262	0.212	1.231	9.03 mm	2.38	1.76	0.0005
test23	150 mW	160s	(40-120,tc)	0.265	0.186	1.425	8.46 mm	3.64	1.54	0.0009
test24	300 mW	80s	(40-160,tc) ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
test25	200 mW	320s	(20-180,tc)	0.269	0.181	1.485	14.4 mm	8.27	4.49	0.0020
test26	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.308	0.106	2.901	16.5 mm	12.82	5.84	0.0332
test27	250 mW	320s	(10-200,tc)	0.268	0.194	1.385	15.7 mm	15.40	5.33	0.0100
test28	100 mW	1280s	(10-200,tc) ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.268	0.143	1.868	13.5 mm	6.53	3.95	0.0131
1B	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.317	0.074	4.281	13.8 mm	13.63	4.08	0.0581
2A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.271	0.138	1.965	13.3 mm	6.47	3.81	0.0155
2B	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.320	0.063	5.048	12.7 mm	14.03	3.49	0.0843
3A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.175	0.270	0.649	18.6 mm	8.49	7.43	0.0095
3B	240 mW	640s	(10-200,tc) ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.260	0.204	1.275	16.1 mm	6.17	5.61	0.0052
4B	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.323	0.067	4.787	13.1 mm	13.71	3.72	0.0615
5A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.273	0.174	1.573	14.9 mm	6.11	4.79	0.0094
5B	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.341	0.049	6.995	11.2 mm	13.87	2.69	0.1004
6A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.267	0.158	1.693	14.2 mm	6.43	4.35	0.0163
6B	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.319	0.059	5.389	12.3 mm	14.33	3.27	0.0956
7A	100 mW	320s	(10-200,tc)	1.004	0.168	5.982	14.7 mm	1.71	4.62	0.0049
7B	240 mW	640s	(10-200,tc)	1.413	0.043	33.077	10.5 mm	3.50	2.35	0.0454
8A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.273	0.141	1.934	13.5 mm	6.38	3.89	0.0128
8B	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.327	0.078	4.164	14.2 mm	13.18	4.32	0.0738
9A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.166	0.137	1.208	13.2 mm	10.65	3.78	0.0127
9B	240 mW	640s	(10-200,tc) ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10A	100 mW	320s	(10-200,tc)	0.247	0.200	1.236	16.0 mm	6.47	5.51	0.0070
10B	240 mW	640s	(10-200,tc)	0.313	0.081	3.869	14.4 mm	13.79	4.45	0.0911

表2
測定における共通条件

測定器具	TPS 2500S (京都電子工業)
センサー	Hot Disk 5465 3.189mm Kapton. 直径 6.378mm (呼称: φ7)
センサー被覆材	ポリイミド被覆
室温	20℃
解析モード	標準解析 (λ < 1[W/mK] のときの推奨解析)

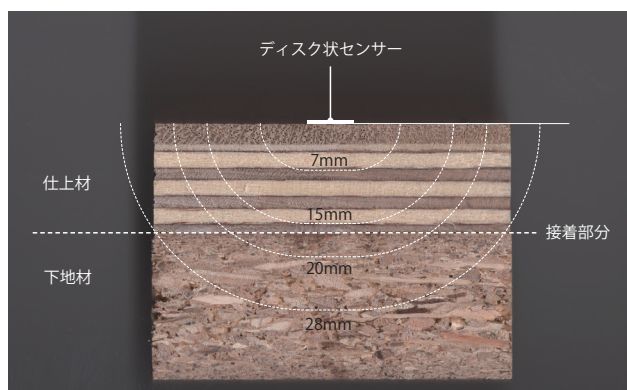


図4 熱の到達距離を示す Pr.D (プロービングデプス) と試料断面の関係。7mm だと 2 プライ程度を測定しているだけになる。

することを最優先とし、第5節で述べた指標①、②を満足させれば良しとするのだが、もちろん可能であれば他の指標も満足していることが望ましい。そのため、テストは加熱量 (50mW)・測定時間 (3s) といった小さな数値から始めて徐々に大きくしていった。テスト測定結果のリストと本測定のリストを表3に示す。表中赤字は計算結果の良好性の基準から外れているもの、Pr.D 列の青地は仕上材の厚さに近いところまで熱が到達したもの (本研究にとっては望ましいもの) を示している。

表中左列のテスト 1 ~ 28 (test1 ~ 28) が試行錯誤の結果である。テスト 19 まで (テスト 5, 7, 8, 9 を除く) はどの指標も計算結果の良好性の基準を満たしているが、Pr.D が良くても 7mm 程度である。これではフローリングの突板と 2 プライ分の厚さくらいしか測定できていないことになる (図4)。

テスト 9 は Pr.D が 15mm と大きく、下地材と仕上材の境界付近まで熱が到達している。テスト 9 は測定時間が 160s と長いことが Pr.D が深いことの要因であると考え、テスト 21 以降は測定時間を長くしてテストしている。これらのテストは計算結果の良好性の基準指標③~⑤からは外れているが指標①、②を満たしているので良しとした。

テスト 25 ~ 27 では加熱量、測定時間ともに大きくして (加熱量 200 ~ 300mW) テストしたが、それでも Pr.D が仕上材を大きく超えることはなかった。テスト 28 では再度加熱量を 100mW に落とし測定時間を

長く (1280s) したが、測定はエラーとなった。エラーの原因は不明だが、オーバーヒートが原因ではないかと推測している。なお、測定時間 (1280s) は測定に使用した TPS2500S の測定時間の限度である。

以上のテストを経て、最終的には設定 A (100mW, 320s)、設定 B (240mW, 640s) の二つの設定で本試験を行うこととした。また、測定ポイントは (10-200) とした。最適な設定を求めたわけではないため、よりベターな設定は有り得る。

8 設定 A、設定 B の結果の概要

前節で定めた加熱量と測定時間の二つの同一条件、すなわち設定 A (100mW, 320s)、設定 B (240mW, 640s) のもと、測定ポイントは (10-200) として、10 種類の二層素材試料の仕上材側からの見かけの熱物性を測定した。表3中で試験 ID がたとえば 1A となっているものは試料 No.1 に対して設定 A で測定を行った結果を意味している。以後試験を指すのにこの試験 ID を用いる。

まず、試験 1A の T-f(τ) グラフを図5に示す。前述したように、T-f(τ) グラフは式 (2) の $\overline{\Delta T(\tau)}$ -D(τ) グラフに相当するものであるが、この直線性を目視で確認できれば、なんらかの熱伝導率が得られたことを意味

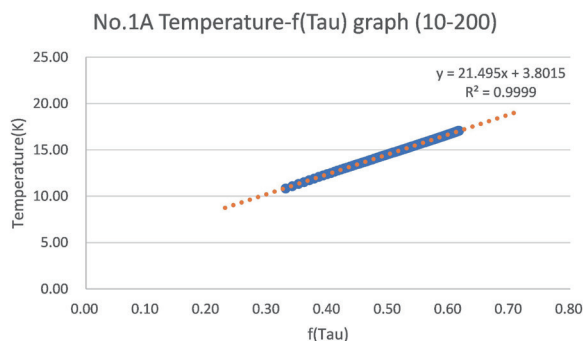


図5 試験 1A の T-f(τ) グラフ。直線であることが熱伝導率が測定されたことを示す。

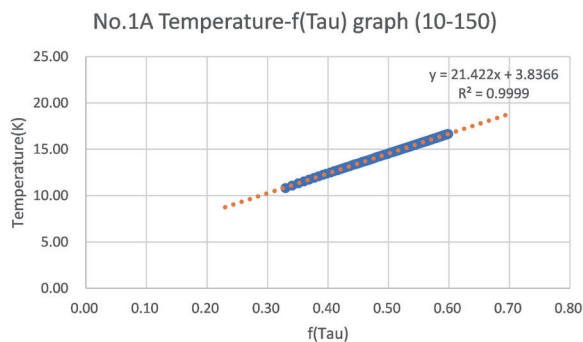


図6 試験 1A の T-f(τ) グラフ。エンドポイントを変えても直線の傾きが変わらないことを確認する。

し、測定の指標①を満たす。また、この傾きが熱伝導率と関係する。エンドポイントを変えても熱伝導率が変化しなければ、直線と判断できるとされるため^{注20)}、(10-200)の測定ポイントから最後の50ポイントを

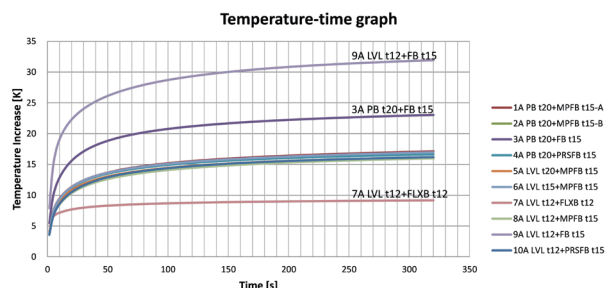


図7 設定Aの測定結果の昇温曲線。

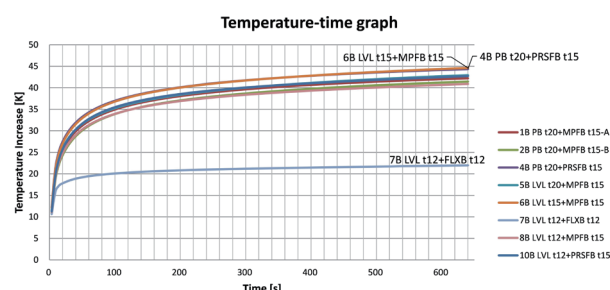


図8 設定Bの測定結果の昇温曲線。設定Aよりも値が大きくなっている。

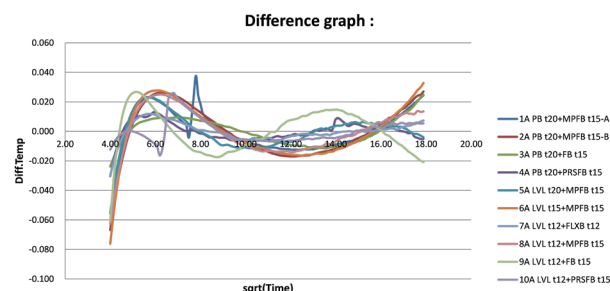


図9 設定Aの測定結果の温度偏差。均質な素材の場合、±1mK以内に収まることが良好な測定であることの基準となる。

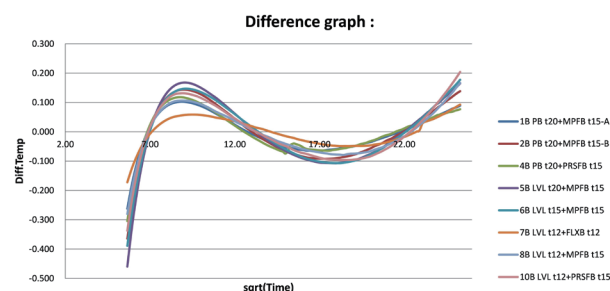


図10 設定Bの測定結果の温度偏差。設定Aに比べると大きな値となっている。

削除し、測定ポイント(10-150)にしたときの試験1AのT-f(t)グラフを図6に示す。回帰直線の決定係数R2はどちらも0.9999で直線と見なせる。また、同回帰係数(傾き)は21.495と21.422とであり、十分近似値であると言え、指標①を満たすと判断した。また、Pr.Dは試料厚さ内にとどまっており、指標②を満たした。以降の試料No1～10のA,B設定による試験はすべて上述したチェックを経て、指標①、②を満たしていることを確認した。

設定Aの測定結果の昇温曲線を図7に、設定Bの測定結果の昇温曲線を図8に示す。試験3B、9Bはオーバーヒートが原因ではないかと推測されるエラーとなったため、これらを除いた結果を示す。両設定ともに昇温の傾向は同じであり設定を変えても見かけの熱伝導率の相対関係は変わっていないことが分かる。設定Bの昇温曲線のほうが値が高い。

設定Aの測定結果の温度偏差を図9に、設定Bの測定結果の温度偏差を図10に示す。どちらも測定的良好性の判断基準である±1mKを超えているが、設定Aの測定結果のほうが偏差が小さく、相対的に良好であると判断した。設定Bはエラーにより欠損値が出ていることもあり、設定Aの結果を既知の材料熱伝導率の傾向と比較することにする。

9 設定Aの詳細結果について

前節により、設定Aの結果は温度上昇・温度偏差がともに設定Bよりも小さく、またデータが10種類揃ったため、得られた熱伝導率の結果を既知の仕上材の熱伝導率、および、二層素材の熱通過率と比較する。

Pr.Dが仕上材を大きく超えることはなかったため、仕上材の影響が強く出ていることがあらかじめ想定されるが、測定されたPr.Dの値が実際にその深さを測定しているのかどうかを確認することは測定機器の測定特徴の理解につながり意義があると考えた。

設定Aの熱伝導率の測定結果と既知の仕上材の熱伝導率の関係を図11に示す。また、同じく二層素材の熱通過率との関係を図12に示す。本測定は第5節で述べた指標③～⑤を満たしていないため理論的な熱物性値は得られていない。従って絶対値には意味がなく、傾向の符号具合を見る。

結果として設定Aの熱伝導率の測定結果と既知の仕上材の熱伝導率の回帰直線の決定係数R2は0.9422であり、両者には強い相関があると言える結果となった。一方で、二層素材の熱通過率との回帰直線の決定係数R2は0.2681であり相関は弱い。したがって、やはり熱はほとんど仕上材の中に留まり、二層を横断するような熱物性値の測定には至っていない。ただし、仕上材部分については、既知の熱伝導率との強い相関がみ

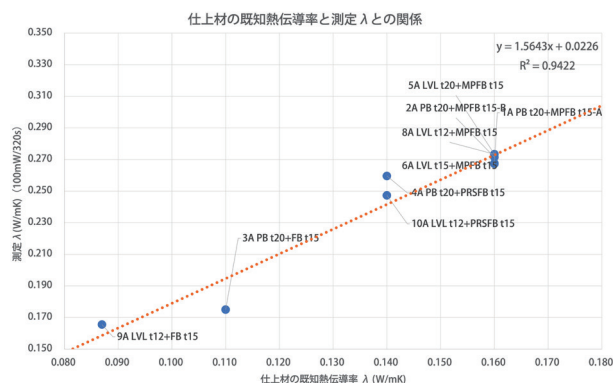


図 1-1 設定 A の熱伝導率の測定結果と既知の仕上材の熱伝導率の関係

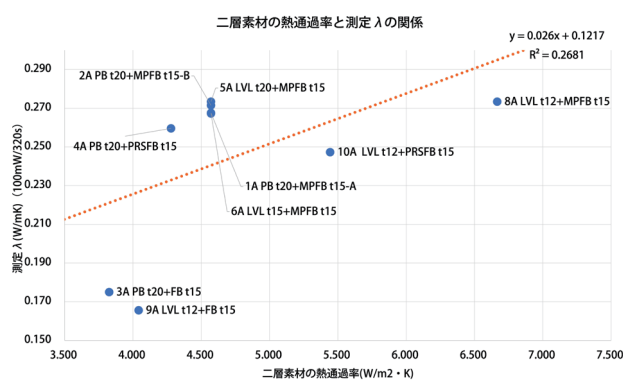


図 1-2 設定 A の熱伝導率の測定結果と二層素材の熱通過率との関係

られたことから、第 5 節で示したすべての指標を満たしていなくても相対的な熱物性値を比較することはある程度可能であると考えられる。このような判断のもと第 5 節で示した検証項目を図 1-1 で見ていく。

検証 1) No.1(PB t20+MPFB t15-A) と No.2(PB t20+MPFB t15-B) は近い熱伝導率を示した。したがってこの仕上材における限り、仕上げ表面材の突板・芯材の違いは無視し得る。

検証 2) No.1(PB t20+MPFB t15-A)、No.5(LVL t20+MPFB t15)、No.6(LVL t15+MPFB t15)、No.8(LVL t12+MPFB t15) は近い熱伝導率を示した。したがって本測定における限り下地材の種類・厚さによる違いはなかった。ただし、熱は下地材まで届いていなかったため、この結果はあまり意味がないかもしれない。

検証 3) No.1(PB t20+MPFB t15-A)、No.2(PB t20+MPFB t15-B)、No.3(PB t20+FB t15)、を比較すると無垢フローリング材（アカマツ）は複合フローリング材よりも熱伝導率が低くなる。熱をより多く通したい場合は複合フローリング材が良く、熱をあ

まり通したくない場合は無垢フローリング材（アカマツ）材が良い。

検証 4) No.9(LVL t12+FB t15)、No.10(LVL t12+PRSFB t15) を比較すると圧密無垢フローリング（杉）のほうが無垢フローリング（杉）よりも熱伝導率が高い。熱をより多く通したい場合は圧密無垢フローリング材（杉）が良く、熱をあまり通したくない場合は無垢フローリング材（杉）が良い。

検証 5) No.7(LVL t12+FLXB t12) は唯一の非木質系仕上材（フレキシブルボード）であるが、とびぬけて高い熱伝導率（1.004）を示した。熱をより通す材料を仕上材にしたい場合、フレキシブルボードは有効な選択肢となりえる。

以上の知見は、測定熱がほとんど仕上材の中に留まったために、各仕上材の既知の知見をトレースしただけのものであり、新規性はない。しかし、本研究の設定による測定が理想的なものではなかったにも関わらず、熱が到達した範囲においては既知の知見と一致した傾向を示していることには意味があるといえる。今後、Pr.D をさらに大きくすることができれば、二層素材の複合的な熱物性値を比較することができるのではないかと考えている。

10 まとめと展望

床を構成する下地材と仕上材を想定した二層素材（全 10 種類）を対象に、比較的小さなセンサー（呼称 7 Φ）と小さな試料（平面約 50mm 角）を用いて、ホットディスク法により複合的な熱物性値の比較を試みた。具体的には熱の到達距離が仕上材を超えて下地材に至るように、あるいは、少なくとも仕上材を構成する複数プライを横断するように、なるべく Pr.D を大きくしようと試みた。また、ホットディスク法での木質系材料の熱物性値の測定については知見が不足しており、この試み自体にホットディスク法の特徴を把握する意味があると考えたため、テスト段階のデータから、徐々に Pr.D を大きくする試み自体をペーパー中で示した^{注 21)}。テストを受けて最終的には（設定 A100mW,320s、設定 B240mW,640s）の二つの設定で本試験を行ったが、結果として、どちらも熱の到達距離はほとんど仕上材の厚さ内に留まり、二層を横断するような熱物性はほぼ得られなかった。しかし、熱が到達した範囲においては既知の熱伝導率の知見と一致した傾向を示した。これにより、今後 Pr.D をさらに大きくすることができれば、二層素材の複合的な熱物性値を求めることができるのではないかと考えている。センサーを大きくする、ワット数を下げて加熱時間を長くする、等の工夫をためてみたいと考えてい

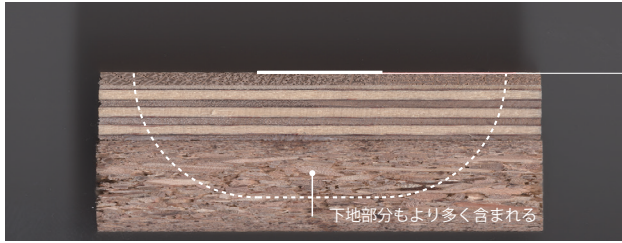


図13 ディスク状センサーを直径 30mm、試料サイズを 100mm x 100mm とした場合の Pr.D と試料の関係

る。この場合、図13のように試料サイズを大きくする必要はあるが、センサーが大きくなるに従い、熱が到達する範囲のなかでの下地部分の割合が増える傾向にあるため、二層素材の複合的な熱物性値を求めるという目的に向けては有利になると考えている。

謝辞

本研究は第38回（2021年度）日東学術振興財団研究助成を受けて実施されたものである。厚く御礼申し上げます。また、富山県産業技術研究開発センター生活工学研究所主任研究員の高田耕児さんからは測定機器の使用方法についてご教示をうけた。京都電子工業株式会社田口博幸さんからは測定結果の解釈について貴重なアドバイスをいただいた。両氏に深く感謝申し上げます。本稿の内容に不備・不適切があれば、それはすべて筆者らの不明によるものである。

■注

- 注1) 参考文献3)、p.222
 注2) 参考文献4)、p.101
 注3) 参考文献8)、p.23
 注4) 参考文献1)、p.797
 注5) 参考文献1)、p.798
 注6) 参考文献4)、p.102
 注7) 参考文献2)、p.260
 注8) 参考文献1)、p.800
 注9) 参考文献4)、p.102
 注10) 参考文献10)、p.126
 注11) 参考文献4)、p.102
 注12) 参考文献9)、p.2455。マニュアル中においては $0.33 \leq \theta / \theta \leq 1.0$ とされている
 注13) 参考文献3)、p.226
 注14) 参考文献4)、p.102
 注15) 参考文献5)、p.074901-2
 注16) 参考文献8)、p.16
 注17) 参考文献8)、p.24
 注18) 参考文献8)、p.24
 注19) 参考文献8)、p.24
 注20) 天然木材 0.12（2015 住宅性能評価・表示協会）
 合板 0.16（2015 住宅性能評価・表示協会）
 パーティクルボード 0.16（2015 住宅性能評価・表示協会）
 圧密木材 0.138（2003 北海道立林産試験場）

フレキシブルボード 0.35（2019 せんい強化セメント板協会）
 杉 0.087（木材工業ハンドブック）
 アカマツ 0.110（2004 木材工業ハンドブック）
 とした。

それぞれの数値の出典は以下による。

一般財団法人 住宅性能評価・表示協会、「長期優良住宅認定等に係る技術的審査マニュアル」、2015、pp.353-358

北海道立林産試験場、マイウッド・ツー株式会社、「H15 年度共同研究報告書 圧密化木材を用いた床暖房用フローリングおよび床仕様の検討」、2003、p.14

（厳密には 0.1378 が圧密無垢フローリングの測定結果平均値）

せんい強化セメント板協会、「スレートボード」、2019、p.6

住宅金融普及協会監修 「住宅工事共通仕様書」

丸善出版 森林総研監修、「木材工業ハンドブック」、2004

注21) 参考文献7) に以下のような記述がある。「建築材料の熱湿気物性値の測定方法は日本工業規格（JIS）に規定されているが、これらは建築材料一般を対象にしており、木質系面材料に関しては現実的な方法とならない場合も多く、測定時に工夫や検討が必要になっている。しかしながら、木材関係の実験書にはこれらの試験方法についての記述は多いとは言えない」（p.602）本稿で得られたデータも、なんらかの役にたてば幸いである。

■参考文献

- 1) S.E. Gustafsson, "Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials", Review of Scientific Instruments 62, 797, 1991
- 2) H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford Univ Pr; 第2版, 1959
- 3) 加納喜代継, 「熱伝導率・熱拡散率の制御と測定評価方法」, 2009, pp.220-230
- 4) 加納喜代継, 「最新の熱伝導測定装置 ホットディスク法物性測定装置 TPS2500s/TPS1500 の紹介」, 計測技術 37(2), 101-104, 2009
- 5) A. Sizov, et.al. "Thermal conductivity versus depth profiling of inhomogeneous materials using the hot disc technique", Review of Scientific Instruments 87, 074901, 2016
- 6) 前田啓, et.al. 「ホットディスク法と平板比較法により求めた木材の熱伝導率の比較」, 木材工業 = Wood industry 75(7), 286-291, 2020
- 7) 朝倉靖弘, 「実験講座 (9) 木質系面材料の熱湿気物性値の測定」, 木材工業 = Wood industry 68(12), 602-605, 2013
- 8) 京都電子工業株式会社, 『ホットディスク法熱物性測定装置 TPS シリーズ 取扱説明書（補遺）』
- 9) V. Bohac, et.al. "Parameter estimations for measurements of thermal transport properties with the hot disk thermal constants analyzer", Review of Scientific Instruments 71, pp.2452-2455, 2000
- 10) Yi He, "Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations", Thermochimica Acta, Volume 436, Issues 1-2, 1, pp 122-129, 2005