

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

2013年5月30日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656148

研究課題名（和文）生活空間の熱・ふく射環境の自律制御に関する研究

研究課題名（英文）A Research in Autonomous Control of Heat and Radiation Environments of Life Space

研究代表者

牧野俊郎 (MAKINO TOSHIRO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30111941

研究成果の概要（和文）：日本の夏の蒸し暑さや冬の温められた居住室内の乾きを抑えるには、湿気を呼吸する後づけ型の室内付設壁板を設けることが考えられてよい。そのような壁板に、人体や衣服と室内壁板の間のふく射伝熱を改善する機能を付与することができればさらによい。本研究では、そのような壁板の候補の1つとして、ハニカム的な構造をもつ多孔性の金属の板に大鋸屑を詰めた壁板を試作し、その平衡質量含水率を測定して吸放湿量の温湿度特性を推定し、湿気伝導率と熱伝導率、全半球放射率を測定する。その結果、この壁板は高い吸放湿性と高い熱伝導性をもつことが示される。

研究成果の概要（英文）：In order to overcome hot and humid air in summer days and dried up air in winter days in our inner life space, it may be a good choice to attach a wall plate which breathes the moisture on the inner room wall. It would be better if we could add the plate a function to improve the radiation transfer between the human body or cloth and the inner wall plates. As a candidate of such a wall plate, we try to produce a plate of sawdust which is filled in a porous metal honeycomb-structured plate. The equilibrium moisture mass content of the plate is measured to evaluate the temperature and humidity dependence of hygroscopicity, and the moisture permeability, thermal conductivity and emittance of the plate are measured. Higher hygroscopicity and thermal conductivity of the proposed plate are demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学・機械理工学・物性工学・熱物理工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：[生活環境と地球環境の共生]・[熱・ふく射環境]・[生活空間]・[高吸放湿性・高熱伝導性]・[室内付設壁板]・[バイオマス or 大鋸屑(おがくず)]・[熱・ふく射・物質輸送性質]

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、熱工学の立場から人間の生活環境と地球の自然環境のほどよい共生を図ることをめざす萌芽的な研究である。これまで、快適な室内環境を実現するためにはエアコン(空気調和機器)が多用されてきたが、エアコンは、その使用電力分とその電力生産にともなう熱を大気に放出して、地球の温暖化を促進する。エアコンへの依存度を最小化し

ながら快適さを求めるのがよい。

夏の室内で、暑さを和らげるためには、人体からほどよく熱エネルギーを除去すべきであるが、このことは、しかし、室内の空気を冷やすことに直結するものではない。すなわち、空気を冷やす必要はなく、人体を冷やすのが重要である。人体を冷やすには、人体からその周囲の壁に向かうふく射エネルギーに注目するのが得策である。この考え方は、

冬を暖かく快適に過ごすためにも同様である。併せて、生活環境たる室内の湿度の制御・水蒸気の輸送を考えるのが望ましい。

エアコンは夏には室内の空気を冷やし、その空気と人体の対流伝熱により快適さの実現を図るが、人体と室内壁とのふく射伝熱を促進すれば、より直接的に人体と人体外部の間のエネルギー交換を増すことができる。すなわち、夏には、室内壁を冷やせば、エアコンへの依存度を格段に低下させることができる。冬の日には暖かい生活環境をつくるためにも、対流伝熱よりはふく射伝熱に注目するのがよい。

上記の課題は、熱・ふく射・物質移動(heat, radiation and mass transfer)に関するものである(図1)。研究代表者らは、これまでその分野の研究、とりわけふく射物性・ふく射伝熱の研究に従事してきた。そこで、研究代表者らは、「**生活空間の熱・ふく射環境の自律制御に関する研究**」を企画した。この研究の要点は、(1) 壁と人体とのふく射伝熱の制御と(2) 水蒸気を呼吸する壁による湿度の制御である。電力よりは自然の制御機能に期待して快適な生活環境を追及する。図2に示す壁ユニットを提案し、生活空間の熱・ふく射環境の自律制御をめざす。

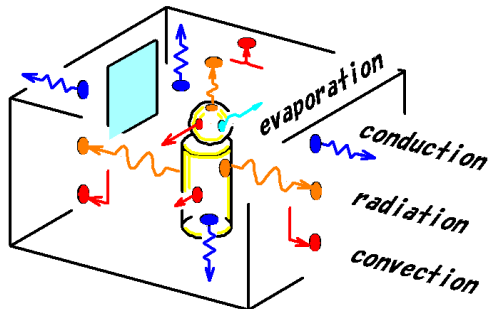


図1 生活空間におけるエネルギー・物質輸送

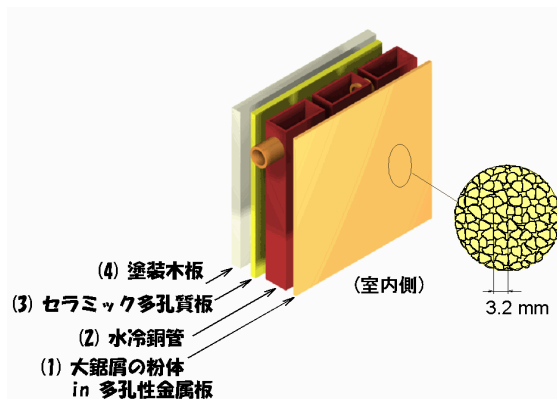


図2 壁ユニットの構成

## 2. 研究の目的

日本の夏の蒸し暑さや冬の温められた室内の乾きを抑えるには、室内の湿気を吸着しあるいは脱着して室内の相対湿度変化を緩和する、水蒸気を呼吸する壁を設けることが考えられてよい。現代的な住居にそのような壁を建物施工時に工事するのは現実的でないが、後づけの付設壁としてなら、それは実現の可能性がある。そのような壁の材料の候補の1つとして、心理的な効果もよいバイオマスの大鋸屑(おがくず)の壁板が考えられる。大鋸屑を板状に整形するには、それを厚さ方向にハニカム的な構造をもつ板状材に詰め固めるのがよい。

このような付設壁板には、ふく射伝熱の改善に関係する機能を付与することもできる。暑い/寒いの実感は、人体や衣服と室内空気との間の対流伝熱に加えて人体や衣服と室内壁の間のふく射伝熱の大きさに依存するが、ふく射伝熱の寄与は多くの伝熱研究者の想像を越えて大きい。については、壁板の裏面の温度を調整しふく射伝熱を制御することが考えられてもよい。そのためには、壁板のハニカム的な構造は熱伝導性がよい耐食性の金属製のものであるのが望ましい。

本研究では、居住空間における熱・ふく射環境を改善する付設壁板の候補の1つとして、ハニカム的な構造をもつ多孔性の金属の板に大鋸屑を詰めたものを試作する。室内の温度・湿度環境にあるその壁板の平衡質量含水率を測定して吸放湿量の温湿度特性を推定し、また、湿気伝導率と熱伝導率、半球放射率を測定する。

## 3. 研究の方法

### (1) 大鋸屑室内付設壁板の試作

居住空間における熱・ふく射環境を改善する付設壁板の候補の1つとして、厚さ方向にハニカム的な構造をもつ多孔性の金属の板(以下では「金属メッシュ(metal mesh)」とよぶ)に大鋸屑を詰めた大鋸屑室内付設壁板(以下では「大鋸屑壁板(sawdust wall plate)」とよぶ)を試作する。大鋸屑の粉末を固化させて、なるべくきめが細かく開孔の多いビスケット状の多孔質構造を金属メッシュの空隙に形成する。

### (2) 大鋸屑室内付設壁板の熱・ふく射・物質輸送の物性値の評価

大鋸屑壁板を特徴づける物性値には、熱輸送に関して熱伝導率・比熱容量、ふく射輸送に関して放射率・吸収率、物質輸送に関して含水率・湿気伝導率がある。このうち、平衡質量含水率を測定して吸放湿量の温湿度特性を推定し、湿気伝導率と熱伝導率、半球放射率を測定する。

(a) 平衡質量含水率 平衡質量含水率は、チャンバー法により、7種の大鋸屑壁板の試

料と珪藻土壁の試料についてその値を測定する。温度  $t = 30^\circ\text{C}$  ( $T = 303.15\text{ K}$ ), 相対湿度  $\phi = 30, 40, 50, 60, 70\%$  の5種の状態の湿り空気の雰囲気チャンパー内に試料を置いて、その試料の質量  $m[\text{kg}]$  を測定する。試料の質量含水率  $u[\text{kg/kg}]$  を

$$u = (m - m_0) / (m_0 - m_m) \quad (1)$$

により求める。ここで、 $m_0[\text{kg}]$  は基準乾燥の状態にある試料の質量である。 $m_m[\text{kg}]$  は金属メッシュの質量である。 $m_m$  は試料の状態(や試料が面する雰囲気)の湿り空気の状態)によらず一定であるとみなす。

(b) 吸放湿量 (一般的には)平衡質量含水率  $u_e$  は雰囲気中の(試料の面する)湿り空気の温度  $T[\text{K}]$  と絶対湿度  $x[\text{kg/kg(DA)}]$  の関数として、

$$u_e = u_e(T, x) \quad (2)$$

$$du_e = (\partial u_e / \partial x)_T dx + (\partial u_e / \partial T)_x dT = \kappa dx - \nu dT \quad (3)$$

$$\kappa = \kappa(T, x) = (\partial u_e / \partial x)_T = (1/x_s)(\partial u_e / \partial \phi)_T \quad (4)$$

$$\nu = \nu(T, x) = -(\partial u_e / \partial T)_x = (\kappa \phi)(dx_s / dT) \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、吸放湿量  $\kappa[\text{kg(DA)/kg}]$  は湿り空気の絶対湿度  $x$  の変化に対する(試料 1 kg あたりの)平衡質量含水率  $u_e$  の変化である(と定義する)。吸放湿量  $\nu[1/\text{K}]$  は湿り空気の温度  $T$  の変化に対する(試料 1 kg あたりの)平衡質量含水率  $u_e$  の変化である(と定義する)。 $x_s[\text{kg/kg(DA)}]$  は ( $T, \phi = 100\%$ ) の飽和湿り空気の絶対湿度である。

式(4)における湿り空気の相対湿度  $\phi$  の変化に対する平衡質量含水率  $u_e$  の変化  $(\partial u_e / \partial \phi)_T$  は式(4)により( $\phi$  の関数として)計算することができる。式(4)における  $x_s$  と式(5)における  $(dx_s / dT)$  はたとえば湿り空気線図から既知である(既知となる)。あるいは、たとえば Wexler-Hyland の式(6)を用いて  $x_s$  を  $T$  の関数として

$$\ln(p_s) = -5800.2206/T + 1.3914933 - 0.048640239T + (0.41764768 \times 10^{-4})T^2 - (0.14452093 \times 10^{-7})T^3 + (6.5459673) \cdot \{\ln(T)\} \quad (6)$$

$$\text{for } (273.16\text{ K} \leq T \leq 473.15\text{ K}) \quad (6)$$

$$x_s = 0.622p_s / (p - p_s) \quad (7)$$

と表すことにより、 $x_s$  と  $(dx_s / dT)$  の値を( $T$  の関数として)計算することができる。ここで、 $p$

[Pa] と  $p_s[\text{Pa}]$  は、それぞれ、湿り空気の圧力と飽和湿り空気の水蒸気分圧(飽和水蒸気圧)である。湿り空気の圧力  $p$  を  $p = (\text{const.}) = (\text{標準大気圧}) = 0.101325\text{ MPa}$  とする。

式(4)~(7)により吸放湿量( $\kappa, \nu$ )を温度  $t = 30^\circ\text{C}$  ( $T = 303.15\text{ K}$ ) において計算することができる。湿り空気の相対湿度  $\phi$  の変化に対する平衡質量含水率  $u_e$  の変化  $(\partial u_e / \partial \phi)_T$  が(湿り空気の)温度  $T$  によらず一定であると仮定すると、式(4)~(7)により吸放湿量( $\kappa, \nu$ )を任意の状態( $T, x$ )(すなわち任意の状態( $T, \phi$ ))の湿り空気の雰囲気において計算することができる。さらに、その計算した吸放湿量( $\kappa, \nu$ )により平衡質量含水率  $u_e$  を任意の状態( $T, x$ )(すなわち任意の状態( $T, \phi$ ))の湿り空気の雰囲気において計算することができる。

(c) 湿気伝導率 湿気伝導率は、透湿性測定法による測定器を製作し、7種の大鋸屑壁板の試料と(湿気伝導率が既知である標準試料としての)ベニヤ板の試料についてその値を測定する。図3は製作した測定器の概要を示す。①は大鋸屑壁板(あるいはベニヤ板)の試料である。②はアルミニウム製の容器である。③は平均の粒径が 1.5~2.5 mm である粒状の無水塩化カルシウムである。④はアルミニウム製のテープである。テープ④は試料①を容器②の(図3の紙面の)上部に(すき間なく)密着させて試料①の(図3の紙面の)上側の(300 mm × 300 mm)の上面(表面)のうちの(250 mm × 250 mm)の部分だけから試料①に湿気(湿り空気中の水蒸気)が入るようにするためのものである。

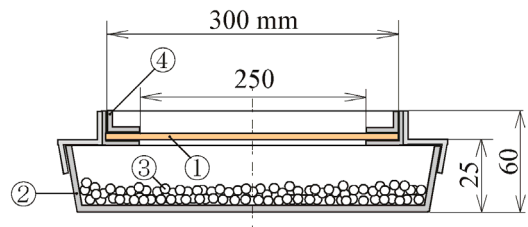


図3 透湿性測定法による測定器

(d) 熱伝導率 熱伝導率は、保護熱板法(GHP法)による測定装置を製作し、7種の大鋸屑壁板の試料、珪藻土壁の試料と(熱伝導率が既知である標準試料としての)アクリルの試料についてその値を測定する。図4は製作した測定装置(の主たる部分)の概要を示す。

①は冷却銅板(300 mm × 300 mm × t130 mm)である。③は大鋸屑壁板(あるいは珪藻土壁あるいはアクリル)の試料である。②、④は接触熱抵抗を軽減するためのシート状の高熱伝導性のアクリル製のフィラーである。⑤は主熱板(150 mm × 150 mm × t12 mm)である。⑥は保護熱板(guarded hot plate)(300 mm × 300 mm

× t12 mm)である。保護熱板⑥の中央部には主熱板⑤の外側を囲むための正方形(151 mm × 151 mm)状のくり抜き部がある。⑦はスポンジ状の断熱材(300 mm × 300 mm × t15 mm)である。⑧は補助熱板(300 mm × 300 mm × t12 mm)である。主熱板⑤、保護熱板⑥、補助熱板⑧はニクロム箔を銅板とゴムで挟んだものである。温度の測定については、冷却銅板①、主熱板⑤、保護熱板⑥、補助熱板⑧に、それぞれ、1個、2個、2個、1個の直径 100 μm の K 熱電対を用いる。冷却銅板①の温度は 15°C(=288.15 K)を目標に冷却銅板①の内部には恒温水循環装置からの冷却水を循環させて一様な温度に保つ。主熱板⑤、保護熱板⑥、補助熱板⑧の温度は 35°C(=308.15 K)を目標に一様な温度に保つ。

熱流は大鋸屑層と金属メッシュを流れるが、大鋸屑と金属の厚さ方向の温度分布は異なるので、熱流は厚さ方向だけではなく平面方向にも流れる。しかし、簡単のため熱流の主たる方向である厚さ方向のみを考えて、試料③の熱伝導率 $\lambda$ [W/(m·K)]は、

$$\lambda = d / \{ (T_h - T_c) (A/P) - (2d_f / \lambda_f) \} \quad (8)$$

により求める。ここで、 $T_h$  [K] は主熱板⑤の温度、 $T_c$  [K] は冷却板①の温度である。 $P$  [W] は主熱板⑤に供給する電力、 $d$  [m] は試料③の厚さ、 $A$  (= 150 mm × 150 mm = 0.0225 m<sup>2</sup>) は伝熱面積、である。 $d_f$  (= 1 mm) はフィルター②あるいは④の厚さ、 $\lambda_f$  (= 3 W/(m·K)) はフィルター②あるいは④の熱伝導率である。

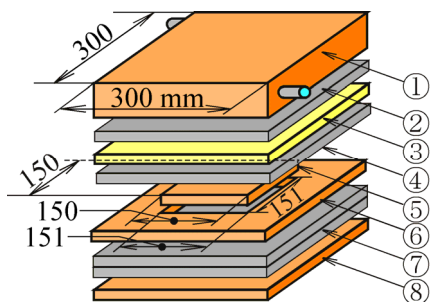


図4 保護熱板法(GHP法)による測定装置

(e) 全半球放射率 全半球放射率は、すでに(著者らが)開発した熱電堆(サーモパイル)方式のふく射流束計を用いる全半球放射率測定器を用いて7種の大鋸屑壁板の試料(と珪藻土壁の試料についてその値を測定する。また、試料の表面の温度の測定については、コルク栓上に置いた直径 100 μm の K 熱電対に t11 μm のアルミニウム箔の小片を被せて(K 熱電対・試料表面)間の接触熱抵抗を軽減する方式のプロブで試料の表面の温

度を測定する古典的ですがれた手法を発掘して用いて、温度を注意深く測定する。

#### 4. 研究成果

本研究では、居住空間における熱・ふく射環境を改善する付設壁板の候補の1つとして、大鋸屑室内付設壁板を試作し、その壁板の熱・ふく射・物質輸送特性を実験的に評価した。その結果、以下の点が明らかになった。

- (1) その壁板の吸放湿量は、温度 0~30°C・相対湿度 30~70 %の湿り空気中において、 $\kappa = 2\sim 8$  kg(DA)/kg,  $\nu = (1\sim 10) \times 10^{-3}$  (1/K) である。その値は珪藻土の値より2~5倍高い。
- (2) その壁板の湿気伝導率は  $(5.9\sim 19) \times 10^{-12}$  kg/(m·s·Pa) である。その値はベニヤ板の値と同程度である。
- (3) その壁板の熱伝導率は 0.2~1 W/(m·K) であり、その値は珪藻土の値より2~10倍高い。その値は軟質繊維板の値より2~20倍高い。
- (4) その壁板の全半球放射率は 0.81~0.96 であり、その値は珪藻土の値と同程度である。
- (5) 大鋸屑壁板は、高吸放湿性と高熱伝導性の両方の特性を併せもつ室内付設壁板の有効な候補の1つである。

#### 5. 雑誌論文・学会発表

[雑誌論文] (計1件)

- (1) 若林英信・畑 齊樹・牧野俊郎, 高吸放湿性・高熱伝導性の大鋸屑室内付設壁板の熱・ふく射・物質輸送性質, 熱物性, 第27巻, 3号, pp. ●●-●●, (9 pages), (2013-08), (掲載予定).

[学会発表] (計2件)

- (1) 井手満帆・若林英信・牧野俊郎, 冬の日の室内の生活空間におけるふく射伝熱と対流伝熱, 第49回日本伝熱シンポジウム, 富山市, (2012-05-31).
- (2) 若林英信・畑 齊樹・牧野俊郎, (大鋸屑+金属メッシュ)壁の熱・ふく射・物質輸送性質, 第32回日本熱物性シンポジウム, 横浜市, (2011-11-21).

#### 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
牧野俊郎 (MAKINO TOSHIRO)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30111941
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
若林英信 (WAKABAYASHI HIDENOBU)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 00273467