【論文】

窓の赤外放射が室内の温熱環境に与える影響 —暖房期の結露による放射率変化— Influence of Infrared Radiation of Windowpanes on Indoor Thermal Environment —Emissivity Variation due to Condensation in Heating Period—

渡部 剣太*,** 垣内田 洋**
Kenta Watanabe and Hiroshi Kakiuchida

低放射フィルムの放射率(カタログ値 0.13)を、結露時を含め測定し、小規模部屋の窓ガラス(放射率 ≈ 0.9)に後貼りして、冬の窓の結露が室内の温熱環境と快適性に与える影響を調べた。放射率測定では、乾燥・結露時の表面で値を得た。小規模部屋の温熱環境実験では、窓表面、室内外空気、窓際の黒球温度を測定し、夜間データを解析した。乾燥時、単板ガラス窓の部屋に比べて低放射フィルム窓の部屋は、表面温度が低く黒球温度が高かったが、結露時は、表面と黒球の温度はともに、これら二部屋間で差が縮まった。以上の結果を放射・対流熱伝達の観点で説明した。さらに標準有効温度(SET*)を用い、低放射フィルム導入および結露発生と快適性との関係を考察した。

We examined the influence of condensation on infrared radiation of windows and indoor thermal environments in winter when condensation forms. Two windows, which had high- and low-emissivity (-e) surfaces, were installed in practical-sized rooms. One was a single glazing with an emissivity of ≈ 0.9 and the other consisted of a low-e film (0.13 on catalogue) retrofitted on single glazing. We measured emissivity of dry and wet window surfaces, as a function of surface temperature. In the practical-sized rooms, we measured air, window-surface, and globe temperatures, and discuss the indoor thermal environment at different atmospheres. The condensation on the windows increased the surface temperature and decreased the globe temperature, whereas it maintained air temperature constant indoors. The variation in these temperatures was explained based on emissivity change due to condensation. We discussed the relationship of indoor comfort with installation of low-e films and occurrence of condensation, using standard effective temperature (SET*).

[**Keywords:** Infrared radiation, thermal environment, humidity, condensation, emissivity, low-e film]

1. 緒言

日本の温暖地での旧形式の住宅は、夏季の高温多湿に対処したものが多く、軒を深くとったり、開口部を大きくしたりといった特徴があった。その一方で、建物には隙間が点在し、室内の空気が自然と循環して熱や湿気が制御され、とくに冬季では、結露が問題になることは少なかった。

た。これに対し、現代の住宅は気密性が高まったことで、室内の生活で発生する水蒸気などが原因で相対湿度が上がり、室内の低温部位が結露する事例が増えてきた[1]。とくに、窓は採光するという役割上、使われる部材や構造が制限され、他の部位に比べて断熱性を高めにくい。そのため、夜間は冷える傾向にあり、結露が発生しやすいという問題がある。近年、複層ガラスや低放射コーティング膜、また樹脂や木製サッシなどの普及で断熱化が進んでいるが、壁や屋根など、他の建築部位の断熱性が向上したこともあり、窓は依然として結露しやすい部位であることに変わりはない。

窓と室内の温熱環境との関係については、様々な研究がされてきている。加藤らは、窓の種類・面積と室内外温度差や室内上下方向で生じる温度分布との関係を調べ、複層ガラスの導入効果を示した[2]。また、森らは、窓の断熱改修が温熱環境や高齢居住者の生活・健康に与える影響を、主観評価や活動量・睡眠量などの系統的な観測によって調査した[3]。千福地らは、自ら開発した木製高断熱サ

* 三重大学生物資源学研究科，〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577. Dept. of Biological Resources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan

E-mail: 520d102@m.mie-u.ac.jp

** 産業技術総合研究所極限機能材料研究部門，〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98. Structural Materials Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2266-98 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama, Nagoya, 463-8560, Japan.

E-mail: h.kakiuchida@aist.go.jp

ッシを気密・断熱改修した建物に取り付け、実験と計算シミュレーションにより暖房負荷の削減効果を検証した[4]. 高性能窓についての効果も検討されている. 櫻井らは、低放射ガラス、窓用遮熱フィルムおよび透明フロートガラスの分光透過率・反射率を解析し、建物に導入した際の室内温熱環境への影響を明らかにした[5]. 武田らは、詳細な熱伝達の理論計算プログラムを作製し、光学特性や放射率の異なるフィルムを、窓に貼付した場合の室温変動について、理論値と実測値の検証を行っている[6].

このように、窓が室内の温熱環境に及ぼす影響に関しては多くの報告があるが、窓表面の結露発生と温熱環境との関係を定量的に調べた事例はない. 従来、結露の問題は、主にカビの発生や建材の腐朽助長であり、建物の維持や居住者の健康への悪影響といった長期的な懸念が主流であった[7-10]. 一方で、結露と放射率の関係についての報告はあり、例えば、今らは結露量と放射率との関係を半経験的に定式化し、ビニールハウス内の温熱環境への影響の考察を試みている[11]. このような過去の研究を踏まえ、我々は乾燥および結露時の窓表面の放射率を定量化して、乾燥⇄結露で生じる室内の温熱環境の変化を、放射・空気・窓表面の三つの温度に着目して詳細に調べた. さらに、この温熱環境での居住者の快適性を評価した.

2. 実験内容

本実験では、まず、窓として施工するガラスおよび低放射フィルム表面の放射率を結露状態も含めて詳細に測定した. 次に、それらを実験用建物内の小規模部屋に施工し、エアコンと加湿装置を使って温湿度を制御しながら、窓表面の熱放射と室内の温熱環境の関係を調べた. 以下に、実験内容を詳細に示す.

2. 1 放射率測定

窓と室内の間の赤外放射による表面熱伝達を見積もるため、窓表面の放射率を異なる温湿度環境で調べた. 本研究では、放射率測定器を使い、窓ガラスと後貼り用の低放射フィルム(SOLUTIA グループ CP 社, LEP70)の二つの部材の放射率 ε を、乾燥と高湿の二つの雰囲気下で測定した. 本研究で使った低放射フィルムの ε は、カタログ値で0.13と最高クラスの低放射性能を有する一方、窓ガラスの値0.9程度、水表面の値0.95程度と大きく違うことから、明瞭な比較実験ができると見込まれる. より具体的には、温湿度が制御された雰囲気中で、ペルチェ温調ステージに対象部材を密着させ、表面を10~40℃の異なる温度

$T_{sg}(^{\circ}\text{C})$ にし、非結露あるいは結露状態にして、放射率測定器(ジャパンセンサー, TSS-5X)を用いて測定した. 結露状態では、表面に数ミリ程度の水滴が形成され、その凹凸により光拡散し、本測定器では正しく測定されていないようであった. そこで、試料表面をUV オゾン洗浄で親水処理し、大きな水滴が形成されないようにして放射率を測定した.

Table 1 Structure and surface condition of windows, and schedule for experiment. See the text in Section 2.2.

Room	Window structure	Window surface	Period
A	Low-e film on single glazing	Dry	Mar/8~18
		Wet	Feb/26~Mar/4
B	Single glazing	Dry	Mar/8~18
		Wet	Feb/26~Mar/4

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental rooms (a) A and (b) B. Right-hand side in the figures are facing southward. The thermal environment was examined using thermocouples (○), globe thermometers (●), hygrometers (△), and anemometers (□). (c) and (d) are the snapshots of the windows with dry and wet surfaces on them, respectively.

2. 2 温熱環境実験

南北3.2m×東西2.5m×高さ2.8mの室内空間に、縦1.1m×横1.7mの窓が真南に施工された同タイプの二部屋(以後、部屋A、Bとする)を準備した. それぞれの部屋の窓表面を異なる放射率 ε にして、窓が室内の温熱環境に与える影響を部屋間で比較して調べた. 具体的には、Table 1に

示すように、部屋 A には、室内側に低放射フィルムを後貼りした単板窓ガラス、部屋 B には、単板窓ガラスそのままを施工した。単板窓ガラスは、横 813×縦 1010×厚さ 5mm の単板ガラスがアルミサッシ(YKK AP, 233-036)に嵌め込まれた仕様である。実験では、非結露と結露状態とを、冬季で数日ごとに切り換えて、窓を含む建築部位の表面温度、窓付近の黒球温度、空気温度、相対湿度、風速を測定した。部屋 A および B の簡易図を Fig. 1 に示す。各部屋の窓・内壁・天井・床の表面および室内外空気の温度測定は、熱電対(中部助川興業, T-6F-0.32-2)を用いた。黒球温度(T_r)の測定は、黒球温度計(クリマテック, C-BB-15cm)を窓付近(窓面中央から 25cm 離れた位置)に設置して行った。室内の空気温度は、黒球と窓との間(T_{ag})および窓から 160cm 離れた部屋中央の位置(T_{am})で測定した。外気温(T_o)は、窓中央から 10cm 離れた位置で測定した。室内の気流は、床中央から高さ 100cm に設置した温熱環境測定器(京都電子, AM-101)の気流計を用いて測定した。上記の測定は、10 分毎に 24 時間連続で行い、今回の実験では日射の窓への直接の温熱的影響がない夜間(18時～翌日 6 時)のデータを解析した。部屋 A と B の空気温度は、エアコン暖房(ダイキン, F36HTNV-W, 暖房時:消費電力 1.17kW, エネルギー消費効率 4.27)を調整し、20℃近傍に維持した。エアコンにより室内は乾燥状態になったが、窓表面を結露しやすくするため、市販の加湿器(パナソニック, FE-KLF05)をエアコンと併用して加湿状態を実現した。実験期間中の夜間、エアコンのみ稼働時は、室温 22℃程度、相対湿度 30%以下となり露点は 4℃以下、加湿器を併用した際は、室温 22℃程度、相対湿度 55～60%で露点は 13～14℃となった。

3. 測定結果および考察

3.1 表面結露と放射率の関係

低放射フィルムとガラス、また比較用にアルミニウム平板を準備し、表面温度 T_{sg} と放射率 ε との関係を調べた。Fig. 2(a)は、測定時の雰囲気気を乾燥あるいは高湿として測定した結果である。Fig. 2(b)左の写真は低放射フィルムの乾燥表面で、乾燥雰囲気では、10～40℃の温度範囲で、結露は目視で確認されなかった。Fig. 2(a)に示すように、低放射フィルムおよびアルミニウム平板の ε はどちらも 0.1 付近、ガラスは 0.9 程度を推移した。ガラスは高放射率材料($\varepsilon \approx 0.9$)として知られ、一方の低放射フィルムはカタログ値で 0.13、アルミニウム平板は 0.1 程度と、我々が今回測定した値に近い。また、温度依存性が小さいことも併せて

(a)

(b)

Fig. 2 (a) Emissivity (ε) as a function of surface temperature (T_{sg}) of low-emissivity (-e) film and bare glass, where the measured data of aluminum (Al) plate are plotted for reference. The data were obtained in dry and wet atmospheres. Dew point was about 17 °C in the wet atmospheres. (b) Snapshots of the low-e film pieces with dry and wet surfaces, where they were on thermo-regulator during the measurements.

考えると、放射率測定器を用いて異なる温度で測定した結果は、概ね妥当と結論づけられる。

一方、高湿雰囲気とし、結露しやすい環境下(本雰囲気では、17℃付近に露点)で同様に観測したところ、表面温度を下げていくと、低放射フィルム、ガラス、アルミニウム平板は、17～18℃で結露が生じ、温度の低下とともにそのまま結露状態を維持していることが目視できた。Fig. 2(b)右の写真は結露時の低放射フィルム表面で、親水処理によりしっかりと結露している様子が見られる。Fig. 2(a)に示すように、低放射フィルムおよびアルミニウム平板の放射率は、降温時に結露が始まった 18℃近傍で、0.1 程度から 0.6～0.8 付近まで上昇している。ガラス表面の放射率も、温度が低下し 18℃付近で結露が生じると上昇し、約 0.9 から 0.95 まで上昇した。

3.2 温熱環境実験結果

3.2.1 日変動

室内の中央の空気温度 T_{am} および窓付近(黒球と窓の間に位置)の空気温度 T_{ag} と外気温 T_o の日変動を Fig. 3 に示す. Fig. 3(a) が室内を乾燥させた 3 月 8 日と 9 日(以降, 乾燥期間と呼ぶ)の結果, Fig. 3(b) が室内を加湿した 3 月 1 日と 2 日(以降, 加湿期間と呼ぶ)の結果である. 室内の夜間(図中の灰色ハイライト)の空気温度をエアコンで制御し, 部屋 A と B 間および乾燥と加湿の期間で, その差をできるだけ抑えた. 室内の建築部位の表面温度として窓 T_{sg} , 内壁 T_{sw} , 天井 T_{sc} , 床 T_{sf} , また窓付近の黒球温度 T_r の日変動を乾燥期間と加湿期間で, それぞれ Figs. 4 と 5 に示す. 本研究の主題ではないが日中の結果について先に触れておくと, 窓表面の結露は, 乾燥と加湿の期間に拘らず目視されなかった(但し, 加湿時, 日の出直後は結露残存). 日中の T_{sg} は, 低放射フィルムが施工されている部屋 A の方が, 施工されていない部屋 B より高く推移するのに対し, T_{ag} および T_r は, 部屋 A が部屋 B より低く推移している. これは, 低放射フィルムの日射吸収率(カタログ値で 31.4%)が, ガラス(透明フロートガラスで 12%程度)より高いことが主要因である.

本研究の主旨となる夜間に改めて着目すると, 乾燥期間では, Figs. 3(a), 4 に示されるように, T_{ag} は部屋間の差異がほぼ無かったのに対し, T_{sg} は部屋 A が部屋 B より低く, T_r は反対に高く推移していた. それに対して, 加湿期間では, Figs. 3(b), 5 に示されるように, T_{ag} , T_{sg} , T_r の何れにおいても, 部屋 A と B との間で大きな差は現われなかった. なお, この加湿期間中, 部屋 A と B がともに結露状態にあったことを, 夜間を挟む時刻 18 時および翌朝 9 時頃に目視で確認している. Figs. 4 と 5 の T_{sw} および T_{sf} で示されるように, 内壁と床は, 日中の日射で直接温められ, その蓄熱が結果的に夜間まで引いていた. その一方で, 乾燥期間では, Fig. 4 の T_r で示すように, 夜間の黒球温度は部屋 B が部屋 A より 1~2℃低く, 反対に T_{sg} で示すように, 夜間の窓表面温度は部屋 B が部屋 A より 2℃程度高い. そしてこれらの温度の差異は, Fig. 5 で明らかなように, 加湿期間に失われている. 以上のことは, 結露の有無による窓の放射率の違いが, 放射熱伝達の大きさの違いとして現れたことを示唆している. 今回は, より窓からの影響が現れやすい窓際を想定し, 黒球温度計を窓から 25cm 離して設置(黒球と窓の間の形態係数は約 0.34 となる)したことで, 今回の差異が現れたと考えられ, もし黒球をより部屋中央付近(形態係数 0.05 となる)に置いて同様に測定すれば, 差異は減少すると見込まれる.

3.2.2 窓表面温度

Table 1 に示すスケジュールで行った実験(2.2 節参照)の夜間(18 時~翌 6 時)の測定データを抽出し, 窓表面温度 T_{sg} と外気温 T_o との関係を Fig. 6 に示す. 乾燥期間では, T_{sg} は, 低放射フィルムを貼り付けた面の方がガラス表面そのままに比べて下がり, その傾向は T_o が低くなるほど強まった(Fig. 6 の●と■). 一方, 加湿期間になると, 低放射フィルムとガラスの表面は結露し, 両者の T_{sg} は差が小さくなるとともに, 乾燥期間より高くなった(Fig. 6 の○と□). 乾燥期間では, 窓と室内との放射熱伝達は, 低放射フィルム面の方が放射率が高いガラス表面に比べて小さくなる(Fig. 2). これにより, 低放射フィルムが施工された窓の T_{sg} は, 室内側より外気の温熱環境の影響を強く受けて, ガラス窓の T_{sg} に比べて低くなったと考えられる. 一方, 加湿期間で結露が生じると, 低放射フィルムとガラスの表面の放射率はどちらも同程度に高くなる(Fig. 2(b)). その結果, 低放射フィルムかガラスかに拘らず, T_{sg} は同程度に高くなっている(Fig. 6 の○と□). ここで, Fig. 2(b) に示したように, ガラスの放射率は元々高く, 結露しても僅かしか上がらないため, 乾燥状態から結露してもガラ

Fig. 3 Indoor air temperatures at the center (T_{am}) and near the window (T_{ag}) in the rooms, and outdoor air temperature (T_o) as a function of time. The data were taken while maintaining (a) dry and (b) wet atmospheres in the rooms. The data at night, as highlighted by gray color, were used for analyses.

Fig. 4 Indoor-surface temperatures and globe temperature (T_r) as a function of time while maintaining dry atmosphere in (a) Room A (Low-e window) and (b) Room B (Glass window). T_{sg} , T_{sw} , T_{sc} , and T_{sf} are temperatures of glazing (windowpane), indoor wall, ceiling, and floor, respectively. The data at night, as highlighted by gray color, were used for analyses.

Fig. 5 Indoor-surface temperatures and globe temperature (T_r) as a function of time while maintaining wet atmosphere in (a) Room A (Low-e window) and (b) Room B (Glass window). T_{sg} , T_{sw} , T_{sc} , and T_{sf} are temperatures of glazing (windowpane), indoor wall, ceiling, and floor, respectively. The data at night, as highlighted by gray color, were used for analyses.

ス面の T_{sg} は変わらないと予想していたが、実際には上がっている (Fig. 6 の■と□)。これは、結露水滴による窓と室内側の空気との接触表面積の増加で対流熱伝達が増大したか、窓表面で室内の水蒸気から水滴に変わる際に凝縮熱を得たことによるもの、あるいはそれら両者を原因とする結果と考えられる。

3.2.3 黒球温度

Table 1 の実験スケジュールの内、夜間の測定データを抽出し、黒球温度 T_r と外気温 T_o との関係を図 7 に示す。乾燥期間では、 T_r は低放射フィルムを施工した部屋 A が施工していない部屋 B に比べて高かった (Fig. 7 の●と■) のに対し、加湿期間で結露が生じると両部屋間の差が小さくなった (Fig. 7 の○と□)。より詳細に見ると、結露の発生で部屋 A の T_r は低下し、部屋 B の方は上昇している。部屋 A では、結露によって低放射フィルムの放射率

が増加し、黒球温度 (室内方向) から窓表面に向かう放射が増加したことで、 T_r が下がったと考えられる。一方、部屋 B での結露にともなう T_r の上昇は、結露による窓表面温度 T_{sg} の上昇 (Fig. 6 の■と□) で、窓から黒球温度計 (室内方向) に向かう放射が増大したことが要因と考えられる。

3.2.4 温熱環境と快適性

窓の表面結露が室内の快適性に及ぼす影響を、標準有効温度 Standard effective temperature (以後: SET*) の比較によって検証した。SET* は、人体の温冷感を評価する尺度で、臓器を中心とする体深部 (core) と皮膚で主構成される体表部 (shell) との二層に体温が分けられることに基づき、人体を二層モデルとして血流量や発汗などの温熱生理調整過程を考慮している。環境因子の、気温・相対湿度・風速・放射と、人間側の因子である、着衣量・代謝量の六要素を入力値として、人体周囲、人体 shell、人体 core の

Fig. 6 Relationship between window-surface temperature (T_{sg}) and outdoor air temperature (T_o). The data were obtained after installing windows with and without low-e films in dry and wet atmospheres. Condensation formed on the surface of the windows in the wet atmosphere. Error bars indicate the standard deviation of data for the same values of T_o .

Fig. 7 Relationship between globe temperature (T_r) and outdoor air temperature (T_o). The data were obtained after installing windowpanes with and without low-e films in dry and wet atmospheres. Error bars indicate the standard deviation of data for the same values of T_o .

間の熱収支から算出される[12]. SET*は、人体の温冷感覚と放熱量が実在環境でのものと同等になる相対湿度 50%の標準環境での気温と定義され、すべての温熱要素を考慮して温冷感の予測や温熱環境の評価が単一の数値により可能になる。黒球温度計を据え付けた、窓から 25 cm の位置での 1 時間おきの SET*を、シェアウェア計算プログラム(ASHRAE SET* 演算ソフト for Windows)を使って見積もった[13]. その結果の日変動を Fig. 8 に示す。ここでは、冬季で標準的な着衣量 1.0clo, 代謝量 1.0met を使って計算した。風速は、各測定期間での平均値を用いた。なお、

(a)

(b)

Fig. 8 SET* as a function of time. The data were taken while maintaining (a) dry and (b) wet atmospheres in the rooms.

ASHRAE が定める快適範囲は 22.2~25.6°Cである[13].

Fig. 8(a)に示すように、乾燥期間の夜間では、SET*は低放射フィルムを貼った部屋 A の方が、ガラスのままの部屋 B より高い。一方、結露が発生すると、Fig. 8(b)で示すように、部屋 A と B 間で SET*の差が 1°C程度小さくなっている。Table 2 は、温熱環境四因子の測定期間中の夜間平均値で、これより平均 SET*を算出した。Fig. 9 に、部屋 A と B で算出した平均 SET*を示す。加えて、Table 2 に示す部屋 B の温熱環境四因子を一つずつ部屋 A の値に入れ替えて、見積もった平均 SET*も示す。Fig. 9(a)中の SET*を比べると、Table 2 に示す乾燥雰囲気での空気温度 T_a 、相対湿度 RH、風速 WS の部屋間の差は実験的に上手く抑えられ、SET*の差として寄与していないことがわかる。これに対し、黒球温度 T_r の部屋間での 1°C以上の差が、そのまま SET*の差として現れている。このことから、部屋 B より部屋 A の T_r が高かったことが主要因となり、平均 SET*が ASHRAE の定める快適範囲内に入ったと結論付けられる。これは、乾燥時の単板窓ガラスに低放射フィルムを貼付することによって、黒球温度の上昇に留まらず、窓際の温熱快適性の向上に繋がったことを意味する。これに対し、高湿時では、Table 2 に示す温熱環境四因子は、部屋 A と B 間で差が小さく、Fig. 9(b)中の SET*間でも特

段の差は見られない。一方、Fig. 9(b)の SET*が Fig. 9(a)のそれに比べて全体的に高く快適範囲に入ったのは、加湿によるものである。上述したように、SET*の計算では発汗など温熱生理調整過程が考慮されており、高湿度条件下では、皮膚からの発汗に伴う熱放出が抑制され SET*が上昇する。今回の実験と解析から、黒球温度 T_r が SET*の振る舞いに強く影響していることがわかった。低放射フィルムを貼付することで、放射熱伝達を通して快適性を効果的に制御することが期待できる。

Table 2 Four environmental factors for SET*, T_{sg} , and T_o averaged over the measurement duration in dry or wet period. The standard deviations are shown in parentheses.

Room	Dry		Wet	
	A	B	A	B
T_{ag} (°C)	21.1 (±0.5)	20.8 (±0.8)	21.3 (±0.2)	20.9 (±0.3)
T_r (°C)	20.6 (±0.4)	19.4 (±0.7)	20.3 (±0.3)	20.0 (±0.4)
Relative humidity (RH) (%)	27.6 (±3.1)	29.4 (±4.0)	62.8 (±2.0)	63.0 (±4.4)
Wind speed (WS) (m/s)	0.09 (±0.04)	0.13 (±0.05)	0.08 (±0.05)	0.05 (±0.04)
T_{sg} (°C)	11.0 (±2.1)	12.8 (±1.9)	14.4 (±1.1)	14.8 (±1.0)
T_o (°C)	4.9 (±3.6)		7.4 (±2.4)	

4. 結 論

本研究では、窓表面の結露が室内温熱環境に与える影響を、窓の放射率と結露との関係に着目して調べた。窓表面の放射熱伝達を決める放射率と表面温度が、結露状態により変わることを定量的に示し、この放射熱伝達と室内の温熱環境および快適性との関係を小規模部屋で実験的に明らかにした。得られた結果を以下にまとめる。

1. 低放射フィルム表面が乾燥⇔結露で変わると、放射率は 0.1⇔0.7 で変化する。一方、ガラスの放射率は 0.9 以上と水の値 0.95 に近く、結露有無による違いは僅かしか見られない。
2. 冬季、暖房した部屋の窓に低放射フィルムを貼付すると、窓表面温度は下がる一方、室内の黒球温度は上が

る。なお、空気温度に変化は見られない。

3. 単板窓ガラスに低放射フィルムを貼付することで、乾燥雰囲気では、窓付近で、快適性の指標である標準有効温度(SET*)に差が生じ、結露が生じるとその差は減少する。

本研究は、冬の暖房期の限られた期間で行われたが、上記の結果は、それに制約されるものでなく、結露現象を考える上では、立地条件・外気温・窓構成などが異なっても成り立つため、より一般的な建物温熱環境を考える上で有意義な知見である。ここで扱った高性能な低放射フィルムは、乾燥時では有効な断熱材であり、本研究での熱放射測定から、その省エネ効果に繋がる知見を得ることができた。しかし暖房期の結露で断熱効果が下がることは予想されることであり、本研究ではそれを空気、放射、窓表面の温度で数値的に示し、さらに快適性にまで踏み込んで考察した。窓表面の状態と放射熱伝達は、温熱環境への影響として無視できるものでなく、その積極的な制御は、省エネや快適性の向上に重要である。

Fig. 9 SET* calculated from the average thermal data tabulated in Table 2. (a) and (b) are of dry and wet atmospheres, respectively. Bar charts indicate SET* estimated using the data for i: Room B and vi: Room A, and the data when ii: T_a , iii: T_r , iv: RH, or v: WS for Room B was replaced by the one for Room A.

[謝辞]

本研究の準備に際し、三重大学 中井毅尚教授より支援、助言を頂いた。熱放射に関し、産総研 山田保誠グループ長と有意義な意見交換を行った。

参考文献

- [1] 池田哲郎；「住宅の結露防止 防露手法の基礎から防露設計法まで」，防露研究会，(2004) 22-35，学芸出版社。
- [2] 加藤友也，山岸明浩，山下恭弘；「一戸建住宅の窓仕様と冬期室内温熱環境の関係—長野市を中心とした一戸建住宅の場合—」，日生気誌，32 (4)，(1995) 143-150。
- [3] 森郁恵，都築和代，安岡絢子，坂本雄三，高橋龍太郎；「窓の断熱改修が住宅の温熱環境と高齢者の生活および健康に及ぼす影響に関する研究」，日本建築学会環境系論文集，Vol. 79，No. 706，(2014) 1061-1069。
- [4] 千福地航平，浅野良晴，高村秀紀，岩井一博，福島功二，新井光一郎，富澤佑太；「高断熱木製サッシの性能に関する研究—実証試験による暖房負荷計測—」，日本建築学会技術報告集，Vol. 21，No. 47，(2015) 183-186。
- [5] 櫻井希，飯野秋也，日下部征信；「遮熱フィルムとLow-E ガラスの分光特性の測定およびアトリウム空間における日射遮蔽効果の検討」，日本建築学会技術報告集，Vol. 13，No. 26，(2007) 653-658。
- [6] 武田仁，鈴木宏和；「建物開口部位の温熱実験とシミュレーション」，日本建築学会環境系論文集，Vol. 77，No. 678，(2012) 641-650。
- [7] 大澤元毅；「建築の結露と健康性」，空衛，1月号，(2012) 103-109。
- [8] 吉野博，長谷川謙一，阿部恵子，池田耕一，三田村輝章，柳宇；「児童のアレルギー性症状と居住環境要因との関連性に関する調査研究—アンケート調査結果を用いた健康影響要因に関する統計分析—」，日本建築学会環境系論文集，Vol. 79，No. 695，(2014) 107-115。
- [9] 吉野博，北澤幸絵，長谷川謙一；「住宅における結露・カビの発生要因に関する調査研究 児童のアレルギー性疾患と関連する居住環境要因の改善に向けて」，日本建築学会環境系論文集，Vol. 79，No. 698，(2014) 365-371。
- [10] 土井修一，西本孝一；「ナミダタケによる木造住宅の被害に関するケーススタディ」，木材研究・資料，Vol. 22，(1986) 77-98。
- [11] 今久，土井富恵，羽生寿郎，中山敬一；「結露に伴うプラスチックフィルムの放射率の変化に関する実験」，農業気象，41(2)，(1985) 115-120。
- [12] 大橋唯太；「温熱指標（新用語解説）」，天気，57(1)，(2010) 57-59。
- [13] 石井昭夫；「新版快適な温熱環境のメカニズム 豊かな生活空間をめざして (4 章 快適環境の評価手法)」，社団法人空気調和・衛生工学会，(2006) 67-86，丸善。

[Received May. 2, 2020, Accepted Aug. 12, 2020]