

〔報告〕 静岡県立美術館における温熱環境の測定

犬塚 将英・新田 建史*・白石 靖幸**・石崎 武志

1. 緒言

1986年4月に開館した静岡県立美術館（静岡県静岡市）は、自然石を使った二階建ての本館（1986年開館）とロダン作の彫刻を中心とした展示が行われているロダン館（1994年開館）とで構成された美術館である。静鉄の「県立美術館前駅」で下車し、彫刻プロムナードを見ながら15分ほど丘を登ると本館が現れる（図1(a)）。図3は館内の展示室の配置などを示した概略図である。本館2階からブリッジ・ギャラリー（図1(b)）を通り抜けると、ロダン館に到着する。図2はロダン館内を入口付近から撮影した写真である。

美術館の空調設備の稼働時間は8時から18時までであり、年間を通して館内の温度が 20 ± 5 ℃、相対湿度が 60 ± 5 % RHとなるように設定されている。中央監視室では1時間毎に館内各所に設置されたセンサーの数値を目視で計測及び自動記録が行われており、状況に応じて設定値を手動で切り替えることもある。



図1 静岡県立美術館。(a)彫刻プロムナードより望む本館と(b)ブリッジ・ギャラリーの外観



図2 ロダン館内

*静岡県立美術館, **北九州市立大学

以上の問題点について定量的な評価を行うためには、来客者の動線に沿った体感温度の変化、及びその時間依存性を測定する必要がある。そのために本研究では、次節から示されるように、館内の温熱環境、温湿度、屋外の気象観測を行った。ここでは、これらの測定結果と今後の予定を報告する。

2. 測定

2-1. 温熱環境測定装置を用いた温熱環境の評価

人が体感として受けとめる「暖かい」「涼しい」などの温冷感に与える要因は気温のみならず、相対湿度、風速、輻射温度、人体の活動量、衣服の断熱性の6つの因子が挙げられる^{1,2)}。このことは例えば、(i)暑いときに団扇であおぐと涼しく感じる(風速)、(ii)冬期に暖房を行っている部屋に居ても、冷たい窓のそばにいと寒く感じる(輻射温度)、(iii)寒い日に厚着をする(衣服の断熱性)、など我々の普段の経験から直感的に理解できることも多い。

ここでは、温冷感による快適さを表す指標の中で、ISO7730として国際規格化されている、P.O.Fangerによって提案されたPMV (Predicted Mean Vote, 予測温冷感申告) について紹介する¹⁾。PMV値は上記の6因子を、熱的中立温度を予測する快適方程式に代入することにより求めることができる²⁾。このようにして算出されたPMV値と人が体感する温度との関係は表1のようになる。

同様にP.O.Fangerによって提案されたPPD (Predicted Percentage of Dissatisfied, 予測不満率) とPMV値とは図4に示されているような関係がある。例えばPMV値が+1.0の場合には、およそ26%の人たちが温熱環境に対して不満を持つことになる。そして、ISO7730では、PMV値が 0 ± 0.5 以内、PPDが10%以下である場合に、快適な温熱環境であるとしている。

今回の調査では、静岡県立美術館の動線の沿った体感温度の変化を調べるために、京都電子工業株式会社製“アメニティメータ(AM-101)”を用いてPMV値の測定を行った³⁾。測定に用いた温熱環境測定装置は図5に示されているように、本体、温湿度センサー、グローブ温度計(輻射温度の測定)、風速計から構成されている。人体の活動量(met値)と衣服の断熱性(clo値)は設定値として本体に入力する。met値とclo値の目安は表2と表3に示されている通りである。以上、4つの測定値と2つの設定値からPMV値は算出され、本体部分に表示される。一回の測定にかかる所要時間は3分程度であり、これは主にグローブ温度計の応答時間によるものである。

表1 PMV値と温冷感との関係

PMV 値	温冷感
+ 3	暑い
+ 2	暖かい
+ 1	やや暖かい
0	暑くも寒くもない
- 1	やや涼しい
- 2	涼しい
- 3	寒い

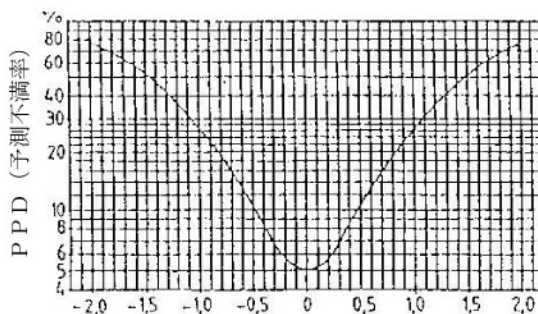


図4 PPDとPMVとの関係³⁾

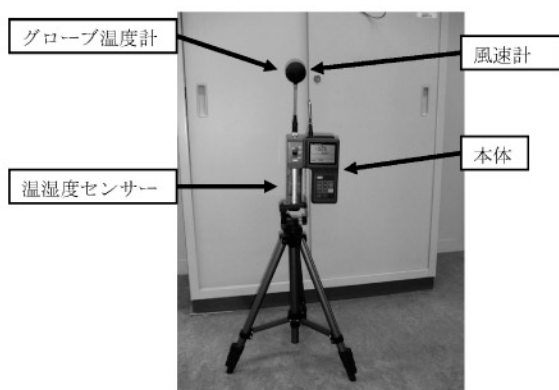


図5 温熱環境測定装置

表2 met値の目安³⁾

1 met = 58.2W/m ²	
安静状態	0.8 met
座ってくつろいでいる	1.0 met
事務作業	1.2 met
立ってよく働いている	2.0 met
テニスをしている	4.0 met

表3 clo値の目安³⁾

1 clo = 0.155m ² K/W	
裸体	0
水着	0.1~0.2 clo
夏服(半袖シャツに長いパンツ)	0.5 clo
長袖シャツに長いパンツ	0.7 clo
スリーピース	1.0 clo

2-2. 屋外の気象観測

屋外の気象条件は館内の温熱環境に影響を与える。また特に夏期や冬期においては、屋外と館内との温熱環境のギャップは人の温冷感を考察するうえで重要である。このような理由から、Davis Instruments社製「Davis気象観測装置」を本館の屋上に設置した(図6)。ソーラーパネルを用いて気象観測装置を駆動し、1時間毎の気温、相対湿度、風速、風向、雨量、日射量、紫外線量の自動計測を2006年8月25日から開始した。

2-3. データロガーを用いた館内の温湿度測定

館内の温湿度測定には、温湿度データロガー、HOB0(オンセット社製)を用いて行った。本館、ブリッジ・ギャラリー、ロダン館内の設置箇所は図3の★で示されている通りである。図3には示していないが、ロダン館における日射の影響を調べるために、ガラス張りの天井付近にもデータロガーをひとつ設置した。さらに、ロダン館内の垂直方向の温度分布を調べるために、照明付近とテラスにもそれぞれ設置をした。設置箇所は合計17箇所であり、30分毎の温度と相対湿度の自動計測を2006年8月25日から開始した。

これらのデータロガーを用いるにあたっては、事前に一定温度(25℃)の条件下で、3種類の飽和塩類水溶液(塩化ナトリウム、臭化ナトリウム、硝酸マグネシウム六水和物)を用いて検定を行った。この検定結果に基づいて、相対湿度の測定値の補正を行った。



図6 気象観測装置

3. 測定結果

2006年9月26日に、温熱環境測定装置を用いた館内の温熱環境の測定を行った。測定ポイントは図3の①から⑩に示されているように、来客者の動線(エントランス→本館展示室→

リッジ・ギャラリー→ロダン館) に沿うように定めた。測定は、朝(10:30~11:15), 昼(13:30~14:25), 夕方(16:00~16:50)と3回に渡り実施した。

3-1では、9月26日がどのような日であったのかを知るために、8月25日からの気象観測データと館内の温湿度データを示す。そして、3-2で温熱環境測定装置を用いた温熱環境の測定結果について説明する。

3-1. 気象観測データと館内の温湿度データ

図7に気象観測装置から得られた8月25日から11月15日までの気温、相対湿度、風速、雨量、

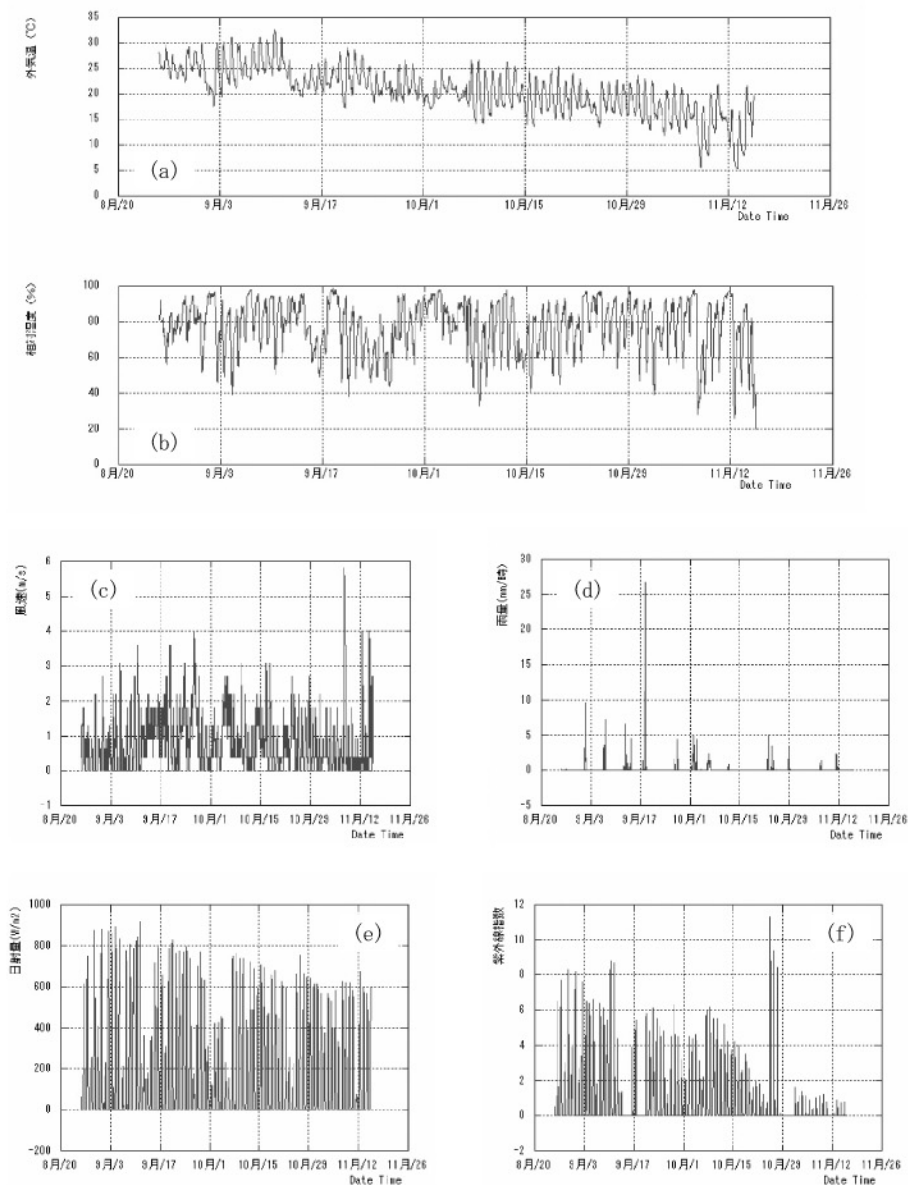


図7 気象観測装置の測定結果: (a) 気温, (b) 相対湿度, (c) 風速, (d) 雨量, (e) 日射量, (f) 紫外線指数。

日射量, 紫外線指数の測定結果を示した。当初の温熱環境測定装置を用いた測定の目的は夏期の体感温度に関する問題を明確にすることだったが, 夏期実測を実施するための予備調査として, 9月に秋季実測を行った。図7(a)からわかる通り9月26日は既に「涼しい日」となってしまった。また, この日の午前中は曇り, 正午頃から雨という天候であったため日射量も少なく(図7(e)), ガラス張りの天井を有するロダン館に入っても, さほど「不快」とは感じられなかった。

次に図8に館内に設置した温湿度データロガーから得られた8月27日から10月1日までの温

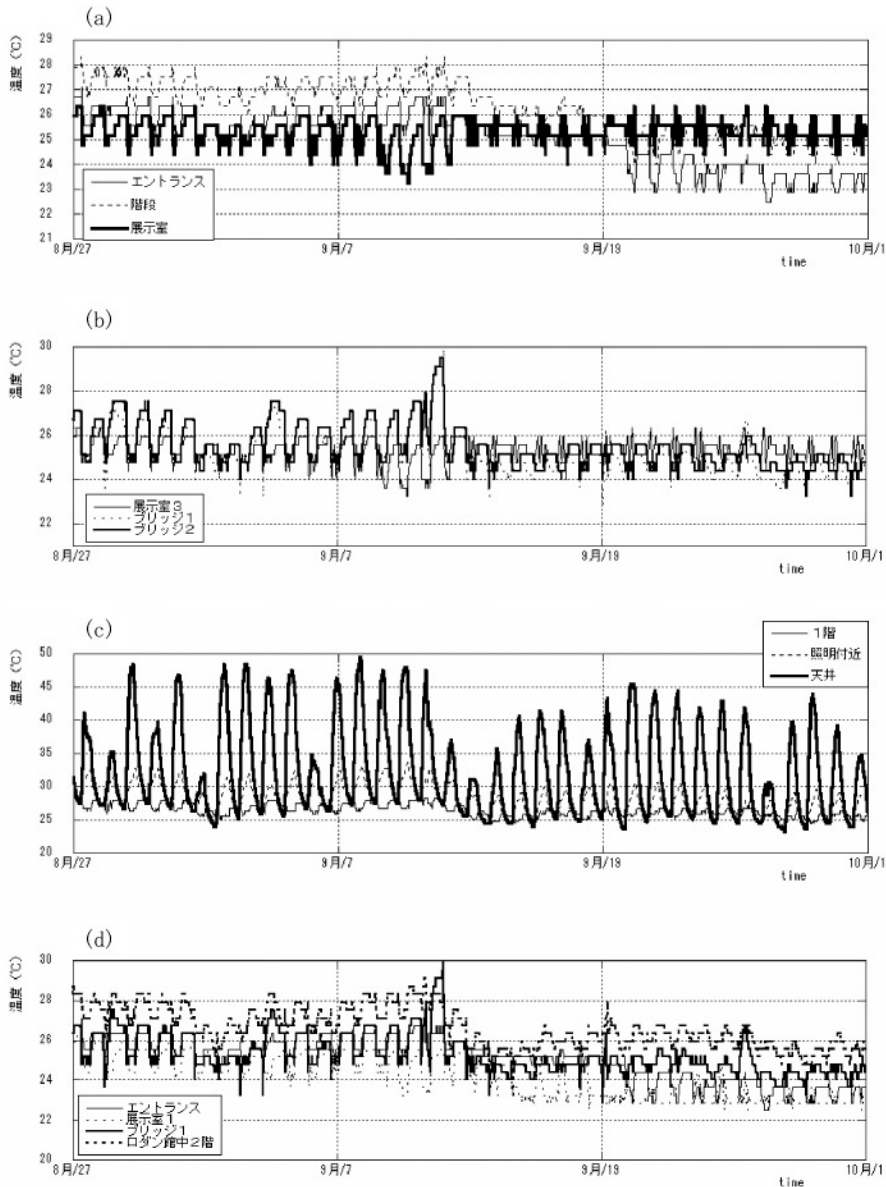


図8 データロガーを用いた温度の測定結果:(a)エントランス→本館展示室, (b)本館展示室→ブリッジ・ギャラリー, (c)ロダン館, (d)エントランス, 本館, ブリッジ・ギャラリー, ロダン館の比較。

度の測定結果を示した。図8(a)はエントランスから階段、受付を経て、本館展示室を通した温度の比較である。9月中旬までは階段付近の温度が高く、展示室は場所に寄らずほぼ様な温度分布であった。9月下旬以降のエントランス近傍は外気の影響のために夏期よりも低めの値を示し、展示室は入口から出口に向かって温度が約2℃上昇する傾向があった。図8(b)は本館展示室出口からブリッジ・ギャラリーを通した比較である。9月中旬まではブリッジ・ギャラリーの方が約1℃高温、9月下旬以降はブリッジ・ギャラリーの方が約1℃低温になる傾向が見られた。本館内部と比べると、ブリッジ・ギャラリー一部は若干断熱効果が低く、より外気の影響を受けていると推測できる。図8(c)にはロダン館の各場所での温度の比較をした。天井のガラス張りの窓の真下では日射の影響を強く受けるために、晴れた日の昼間は40℃を超えることも多い。また、空調機の吹き出し部分よりも高いところに位置するテラスや照明の近傍も、昼間は30℃近くまで上昇する日変動を繰り返していた。そして、図8(d)ではエントランス、本館展示室入口、ブリッジ・ギャラリー、ロダン館の温度の比較をした。この測定期間を通じて、展示室からロダン館に進む動線に従って明らかに温度が3℃から4℃ほど上昇していく傾向が観測された。

3-2. 温熱環境測定結果

9月26日に温熱環境測定装置を用いて行った温熱環境の測定結果は以下のようになった。

気温と平均輻射温度は図9(a)と(b)のようになった。ロダン館の気温は本館と比べると1から2℃くらい高い傾向が見られた。朝と夕方の計測と比較すると、昼の計測の際に本館展示室に入ったところで、「午前中よりも涼しくなっている」と体感した。この日は13時において一度外気温が低く観測されており(18.6℃)、このような外気を空調設備が取り入れたことが原因であると考えられた。

相対湿度の測定結果は図9(c)のようになった。エントランス付近では外気の影響もあって比較的低温であったが、本館展示室、ブリッジ・ギャラリー、ロダン館と進むに従って、高温になる傾向が見られた。朝の測定時と比べると、昼や夕方の測定時の方が高温度となった。これは(i)昼頃から雨が降り始め、その外気を取り入れた空調が行われた、(ii)午前中に200人くらいの児童の見学があった、などの要因が考えられる。

風速の測定結果は図9(d)のようになった。エントランス付近を除けば、概ね0.1m/s前後の値となっている。測定ポイント⑧と⑩の風速は大きな値となっているが、これは排風口の位置などに関連があると思われる。そして、以下で見る通り、PMV値を小さくさせる要因となっている。

最期に、以上の測定結果から算出されたPMV値の推移を図9(e)に示した。特に、測定ポイント⑤、⑥、⑦では空調の設定によるものと思われる温度の変化が反映されている。また、風速が大きい傾向にあった⑧と⑩はPMV値が若干小さくなっている。全体として、ロダン館に向かうに従って、PMV値は若干大きくなる傾向が見られた。そして、夏期と比べると比較的「快適」と感じられた9月26日であったが、一日を通じてロダン館においては、ISO7730で「快適な温熱環境」の基準($PMV=0\pm 0.5$)よりも「暖かかった」ことが確認できた。

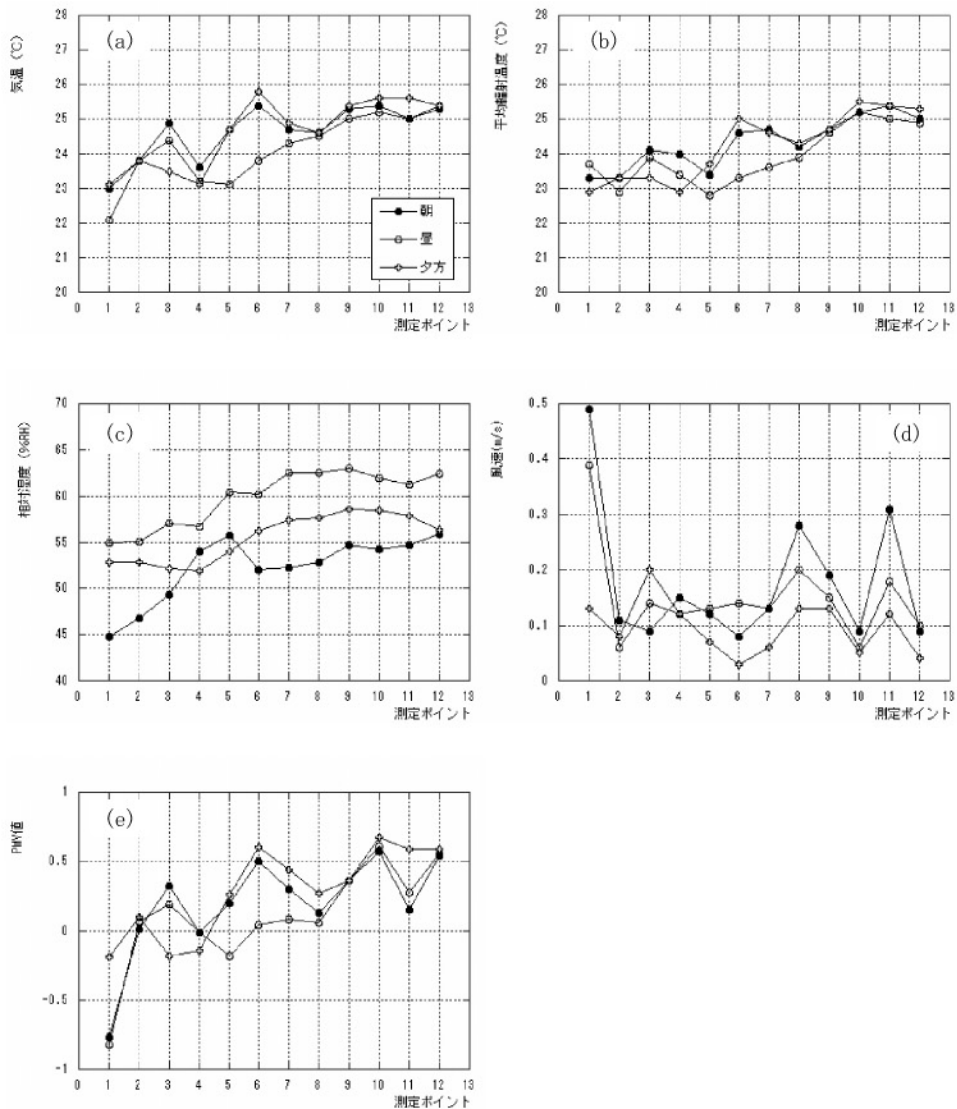


図9 温熱環境測定装置を用いた測定結果。(a)気温, (b)平均輻射温度, (c)相対湿度, (d)風速, (e)PMV値。

4. まとめと今後の予定

1986年に開館した静岡県立美術館は本館とロダン館から構成される。来客者を対象にしたアンケートによると、特に夏期において、動線に従って移動した時に生じる体感温度の急激な変化に対する意見が寄せられた。本研究では、問題点の定量的な評価を目的として、館内の温熱環境、温湿度、屋外の気象観測を行った。

9月26日に温熱環境測定装置を用いて行った温熱環境測定では、本館からロダン館に向かうに従って、PMV値は若干大きくなる傾向が観測された。そして、夏期と比べると比較的「快適」と感じられた測定日であったにもかかわらず、一日を通じてロダン館においては、ISO7730で「快適な温熱環境」の基準($PMV=0\pm 0.5$)よりも「暖かかった」ことが確認できた。さらに、体感温

度の差が最も顕著に現れる夏期やその他の季節においても同様の測定を行う予定である。

そして、温熱環境の測定と平行して、ロダン館の温湿度環境に関する解析をコンピューター・シミュレーションを用いて行う予定である。熊本城「細川家舟屋形」の保存環境に関する研究⁴⁾でも用いられた熱・換気回路網計算プログラムNETS⁵⁾を使って、問題点のより定量的な検証と改善策の検討を行う予定である。

シミュレーション解析の際に必要な境界条件の入力、および実測データとの比較のために、気象観測装置と温湿度データロガーを用いた測定は継続して行っていく。

謝辞

気象観測装置、温湿度データロガーの設置、および館内の温熱環境測定の際に、静岡県立美術館の皆様には多大なご協力をいただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) P.O.Fanger: Thermal Comfort, Danish Technical Press(1970).
- 2) 『建築環境学1』, 木村健一編, 丸善株式会社, (1992).
- 3) 『アメニティメータ MODEL AM-101 取扱説明書』, 京都電子工業株式会社.
- 4) 石崎武志, 白石靖幸, 肥塚祐美子: 熊本城「細川家舟屋形」の保存環境に関する研究, 保存科学, 45, 227-240(2006).
- 5) 奥山博康: 熱・換気回路網計算プログラムNETS, 伝熱WGシンポジウム「最近の建築伝熱シミュレーションと設計ツール」日本建築学会・熱環境小委員会・伝熱ワーキンググループ, 63-70(1998).

キーワード: 静岡県立美術館 (Shizuoka Prefectural Museum of Art), 温熱環境 (thermal environment), 予測温冷感申告 (Predicted Mean Vote, PMV), シミュレーション(simulation)

Measurement of Thermal Environment at Shizuoka Prefectural Museum of Art

Masahide INUZUKA, Kenshi NITTA^{*}, Yasuyuki SHIRAISHI^{**}
and Takeshi ISHIZAKI

Shizuoka Prefectural Museum of Art is an art museum in Shizuoka city which was opened in 1986. It takes about fifteen minutes by foot from the nearest station to the museum, which consists of two buildings, the main building and the Rodin Wing.

Questionnaire reveals that some visitors feel uncomfortable when they walk in the museum, especially in summer. This is because they experience rapid changes in sensible temperature while moving inside the museum. In order to understand this problem quantitatively, measurements of the thermal environment, temperature and relative humidity in the buildings were conducted.

The measurement of the thermal environment in the buildings was conducted by using an amenity meter on September 26th, 2006. Although this day was relatively cool and cloudy, high PMV values were observed in the Rodin Wing, which means the thermal condition of the exhibition room was relatively warm and beyond the acceptable level.

In order to improve the thermal environment in the Rodin Wing, we plan to analyze the data in more detail by introducing computer simulation technique.

^{*}Shizuoka Prefectural Museum of Art, ^{**}The University of Kitakyushu