

〔報文〕石水博物館千歳文庫内の温湿度解析

犬塚 将英・龍泉寺 由佳*・石崎 武志

1. 緒言

文化財を保存するための温度と相対湿度の条件として、IIC, ICOM, ICCROMなどでは約20℃, 60%RHを基準値として定めており、さらに温度と相対湿度の履歴も考慮すべきだとしている¹⁾。一方で実際には、(1)最適な温湿度環境を保ち続けるのが困難、(2)設備の老朽化により不具合が生じ、改修工事が必要となってくる古い建造物も増えてきている、(3)空調設備を設置することが不可能な建造物もある、などの問題を抱えている博物館・美術館などの展示・収蔵施設もある。しかし、このような問題を検討する場合に、文化財に与える影響や費用を考慮すると、調査や実験の目的のために施設や空調設備の改修工事を行うことは現実的には不可能である。

一方、コンピューターシミュレーションを用いた手法を導入することにより、空調設備や建造物の変更や改修工事を想定して、低コストに抑えつつ、温湿度環境に与える影響を定量的に予測することが可能となるだろう。本研究では、熊本城「細川家舟屋形」展示ケースの温湿度解析²⁾などで実績のある熱・換気回路網計算プログラムを用いて、石水博物館千歳文庫内において実測した温湿度データと比較することにより、その有用性の評価を試みた。

ここでは、今回温湿度環境調査を行った石水博物館の千歳文庫について説明してから、そこで行った温湿度測定の結果を示す。次に、熱・換気回路網計算プログラムを用いてここまで得られた計算結果、そして実測データとの比較することにより、計算モデルの有用性に関する考察と今後の予定を報告する。

2. 石水博物館千歳文庫

財団法人石水会館は昭和5年に川喜田半泥子によって創設された文化財団である。昭和50年から石水博物館（三重県津市）の活動が始まり、同博物館では川喜田家に伝来した資料や半泥子の作品などの展示が行われている。石水博物館から2kmほど離れた千歳山中において昭和5年に建設された千歳文庫は、総床面積504m²、エレベーター付鉄筋コンクリート4階建の洋館である（図1）。建設当初は川喜田家所蔵品収蔵のために用いられていたが、現在は2階から4階までが石水博物館の収蔵庫として利用されている。2階には油絵、工芸品、屏風など、3階には古書典籍類が主に収蔵されている。4階に収蔵してあった全ての所蔵品は、耐震工事に先駆けて、2006年に他所への移動が済んでいる。4階には温度のみを制御するエアコンが設置されているが、来客者がある場合を除き、通常は使用されていない。

千歳文庫では主に1階と4階の耐震工事が予定されている。建物自体が登録文化財であることから外観を大幅に変えることができないため、耐震工事は内側からのコンクリート打ち増しとする予定である。この工事によって、①収蔵庫室内の温湿度環境の変化、②白華現象による外観の損傷、③打ち増したコンクリートからのアルカリ性のVOCの発生、などが懸念される。今回は主に①に関して調査をするために、次節から示す通り、千歳文庫内の温湿度測定と熱・換気回路網計算プログラムを用いた温湿度解析を行った。

*石水博物館



図1 石水博物館千歳文庫の外観

3. 温湿度の測定結果

耐震工事の後でどのように温湿度環境の変化が生じるのかを調べるためには、耐震工事が行われる前の現状について把握しておく必要がある。このような目的のために、収蔵庫内18箇所に、オンセット社製温湿度データロガー（ホボH8プロ）を設置した。設置箇所は図2に示した通りである。また、エレベーターの動力部分が備え付けられている屋上ペントハウスに1個、屋外の温湿度環境を調べるために千歳文庫から数十メートル離れた箇所に1個のデータロガーも設置した。今回使用するデータロガーは恒温恒湿槽内（25℃）にて、KCl(84%RH)、NaCl(75%RH)、NaBr(58%RH)の飽和水溶液を用いて検定済みである。データの記録は2006年9月8日15:00から10分間隔で行うように設定した。

2006年9月8日から2007年6月4日までの温度と相対湿度の測定結果は図3のようになった。図3では使用した20個のデータロガーのうち、外気(20)、1階(15)、2階(13)、3階(9)、4階(3)から得られたデータの比較をしている。

千歳文庫内の温度変化を屋外と比較すると、日変動は大幅に軽減されているが、平均的には千歳文庫内の温度変化は屋外の温度変化をほぼ追随していると言える。特に外気温が高い季節では、上の階に行くに従って温度が高くなっていく傾向が見られた(最大で3℃程度の温度差)。これは日射の影響であると考えられる。

相対湿度に関しては、屋外では20%RHから100%RHまでの幅を持って激しく変動しているのに対して、千歳文庫内の相対湿度の日変動は極めて小さく抑えられていることがわかった。特に外気温が高い時期では、下の階に行くに従って相対湿度が高くなっていった。これは前述した通り、下の階に行くに従って温度が低くなっているのが主な原因であり、絶対湿度で比較するとほぼ同じ値を示した。

このように千歳文庫内の温度、相対湿度ともに外気と比較すると、1年を通じて日変動が小さく抑えられている。しかし、夏期を中心に相対湿度が70%RHを超える高い状態の続く時期があるのだが、通常は人が立ち入らない施設なので、例えば除湿器を設置することによる対応が容易ではない。既に文化財害虫の侵入防止を目的として、窓などにはビニールシートで目張りをするなどの工夫が施されているが、高湿度環境下における生物被害に関しては今後も注意が必要であることがわかった。

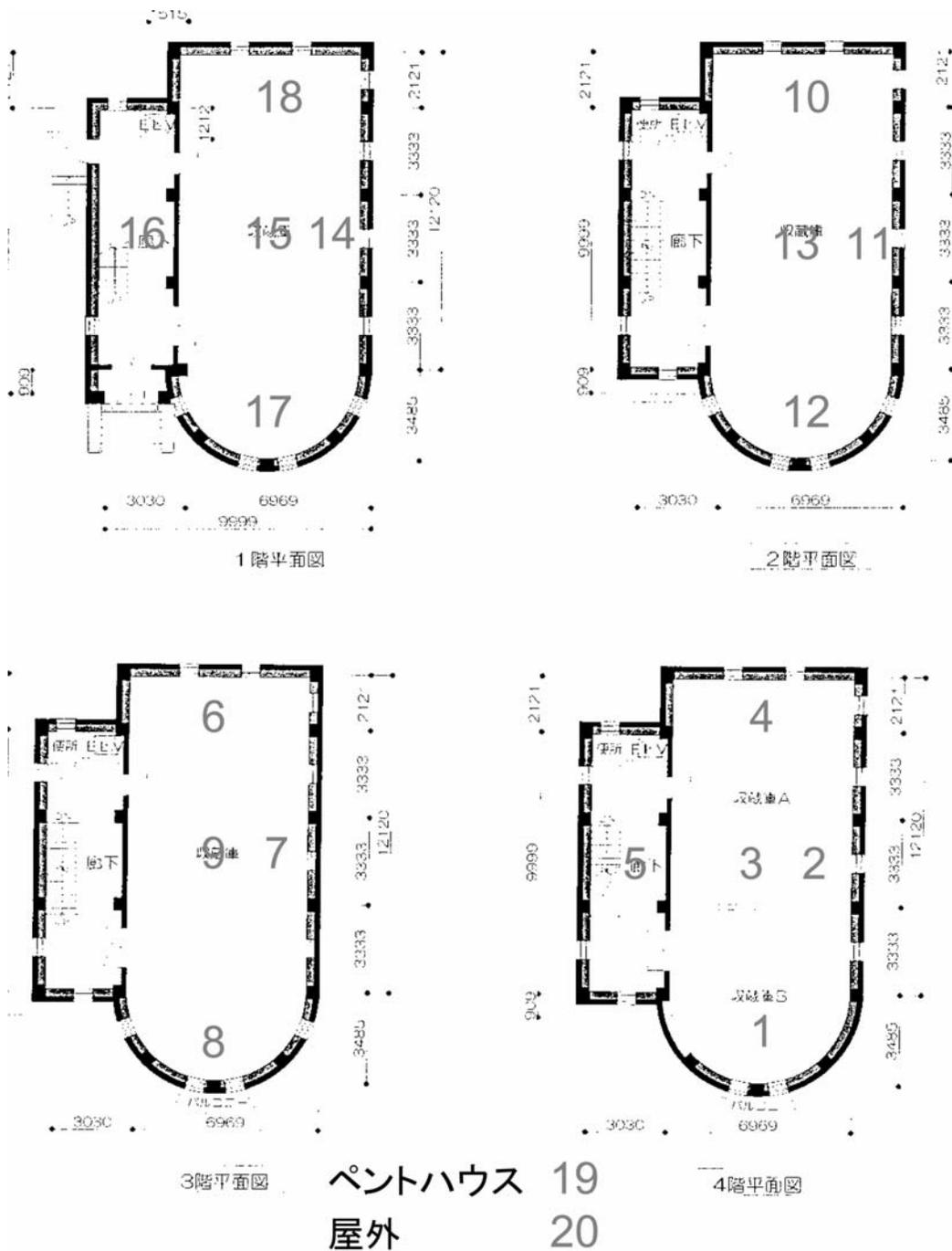


図2 温湿度データロガー設置箇所

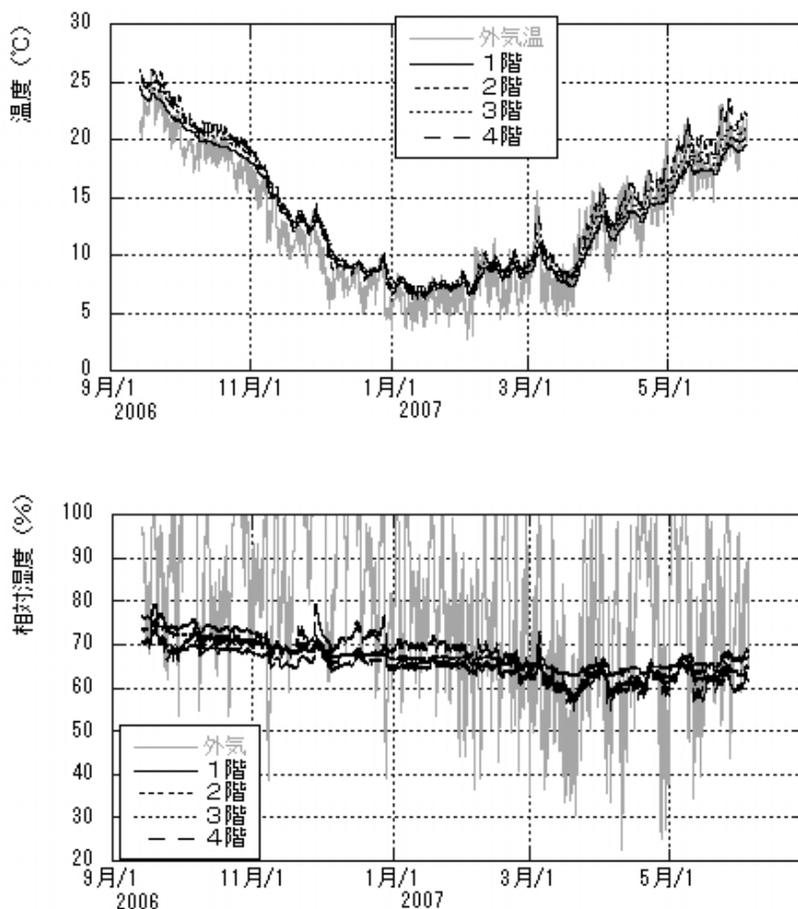


図3 データロガーを用いて測定した温度（上）と相対湿度（下）の測定結果

4. コンピューターシミュレーションを用いた温湿度解析

コンピューターシミュレーションを用いて耐震工事による千歳文庫内の温湿度環境への影響を論ずるためには、工事前の現時点における状態を再現できるような計算モデルをあらかじめ構築しておく必要がある。ここでは、本研究で使用した熱・換気回路網計算プログラム、それを用いた計算モデル、実測データとの比較を報告する。

4-1. 熱・換気回路網計算プログラム

温湿度解析には、清水建設技術研究所で開発された熱・換気回路網計算プログラム、NETS³⁾を使用した。NETSでは、建物を有限体積法などにより熱容量節点系にモデル化する。異なる節点間の伝熱、放射、対流伝達、移流や貫流などの全ての熱移動形態を一般化コンダクタンスと呼ぶ一種の係数で表現し、その節点方程式から構成される連立常微分方程式を解くことにより、空間内の温度や湿度分布などを解析する計算プログラムである。

4-2. 計算モデル

NETSを用いて千歳文庫内の温湿度環境を調べるために、熱回路網と換気回路網を作成した。これらの回路網を作成した時の主要な留意点について以下で説明する。

千歳文庫の各階は約100m²の収蔵部屋と約30m²の廊下から構成されている。これら8つの空間に加えて、屋根裏、ペントハウス、床下に相当する位置に、空間の容積分の空気に相当する節点をひとつずつ配置した。これらの空間はお互いに壁と床で仕切られているが、熱回路網上では厚さ200mmのコンクリートに相当する一般化コンダクタンスで接続した。図4は熱回路網の1階部分の拡大図である。各階の収蔵部屋、廊下における温度変化を計算するためには、千歳文庫の外壁の構造を正しく入力することが重要であった。千歳文庫では耐震工事に向けて壁体のボーリング調査が行われており(図5)、外部から千歳文庫内に向かって順に、200mmのコンクリート(節点で4分割)、200mmの空気層(節点で4分割)、40mmのモルタル(節点で1分割)で形成されていることがわかった。図4に示されている壁を意味する一般化コンダクタンスには、このような壁の層構造が反映されている。室内への熱伝達を計算する時に、壁体と同様に重要な窓に関しては、図4に示されているように配置をした。壁と窓を構成する主要部材の熱物性値として、表1に示されている値を使用した。外気の状態と放射冷却の影響⁴⁾を正しく反映させるために、各壁体と窓は方角も考慮した上で、外気節点と天空節点に接続されている。宇田川による直散分離の方法を用いて、全天日射を直達成分と拡散成分とに分離した⁵⁾。外気節点には三重県津市で観測された気温、相対湿度、風向、風速、日射量、雲量に関する気象庁のデータを入力した。

表1 主要部材の熱物性値

材質名	熱伝導率(W/mK)	比熱(kJ/kgK)	比重(kg/m ³)
コンクリート	1.5	0.80	2400
モルタル	1.5	0.80	2000
ガラス	0.78	0.75	2500
空気	0.022	1.0	1.3

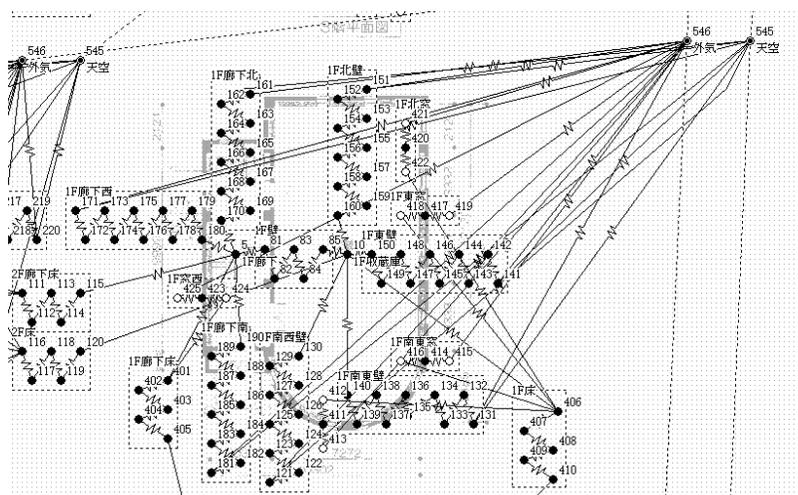


図4 熱回路網の1階部分の拡大図

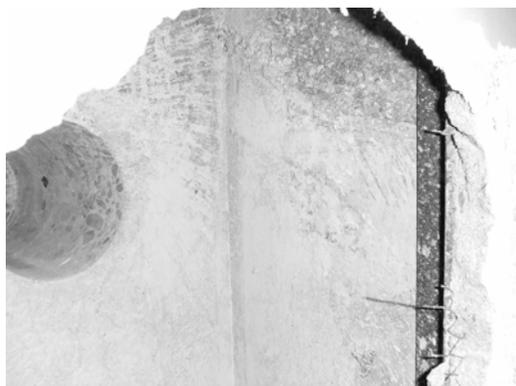


図5 ポーリング調査

千歳文庫内の水分の移動を計算するために換気回路網を作成した。ここでは各階の収蔵部屋と廊下に加えて、ペントハウス、床下からなる10個のゾーンから形成される。今回の計算モデルでは、各階の廊下をつなぐ階段、廊下と収蔵部屋との間の扉のすきまの流路面積を実測により、それぞれ 4.5m^2 、 0.002m^2 とした。外壁の通気特性に関しては、参考文献^{6,7)}に紹介されている実験値を参考にした。この参考文献では外壁の通気特性を3段階のグレードに分類していて、最も気密性の高いグレードの外壁の通気特性は $0.5\text{cm}^2/\text{m}^2$ としている。3節で前述した通り、千歳文庫では虫害対策として目張りを行った箇所があることを考慮し、廊下と外気との間の壁体のすきまの流路面積は $0.5\text{cm}^2/\text{m}^2$ の $1/2$ 、収蔵部屋と外気との間の壁対のすきまの流路面積は $0.5\text{cm}^2/\text{m}^2$ の $1/4$ と設定して計算を行った。今回の計算モデルでは収蔵されている文化財や壁体の吸放湿は考慮していない。

次節で示されている実測データとの比較を行った期間は千歳文庫への人の出入りが少なかったため（典型的には1～2名の作業者が10日に1回程度、1回あたり30分程度の作業時間）、人の入室による室内条件への影響は無視した。

4-3. 実測データとの比較

4-2で作成した計算モデルへ、三重県津市で観測された2006年7月1日から2007年5月20日までの気象庁のデータを入力して計算を行った。計算の初期値は全節点に対して温度 $=25^\circ\text{C}$ 、絶対湿度 $=0.014\text{kg}/\text{kg}$ とし、最初の10日分は助走計算とした。そして、各階の収蔵部屋における温度、絶対湿度、相対湿度の時間変動に関する計算結果と、1階(15)、2階(13)、3階(9)、4階(3)から得られた実測データとの比較を行った（括弧内は図2に示されているデータログの番号である）。

図6では、温度に関する実測データと計算結果との比較を行った。図3では、特に外気温が高い季節では、上の階に行くに従って温度が高くなっていく傾向が見られたが、日射の影響が主な原因であると考えられるこの観測結果はNETSによる計算結果にも反映されている。年間を通じて1階から4階までの収蔵部屋の温度変動は平均値、変動幅ともに、NETSを用いて再現できた。しかし、計算結果は実測データよりも夏期においては約 1°C 高く、冬期においては約 1°C 低くなる傾向が見られた。窓における日照面積率と受熱に関するパラメーターを最適化することによって、さらに改善する予定である。

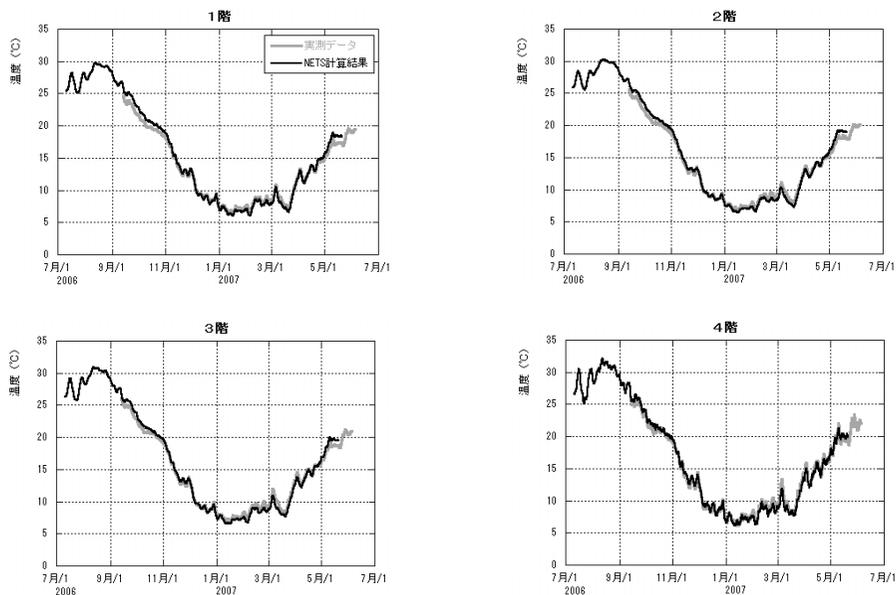


図6 温度に関する実測データと計算結果との比較

図6と同様に、図7では絶対湿度に関する実測データと計算結果との比較を行った。実測データに関しては、3節で記述したような検定結果に基づいて相対湿度の補正を行い、温度と補正後の相対湿度の値から絶対湿度を算出した。実測データが示す季節変動については、NETSによる計算で再現できた。しかし、冬から春にかけて外気温が上昇する季節では計算から得られた絶対湿度が実測値よりも低くなる傾向があり、特に2階の収蔵部屋では著しかった。このような差異は、以下のように相対湿度で比較してみるとさらによくわかる。

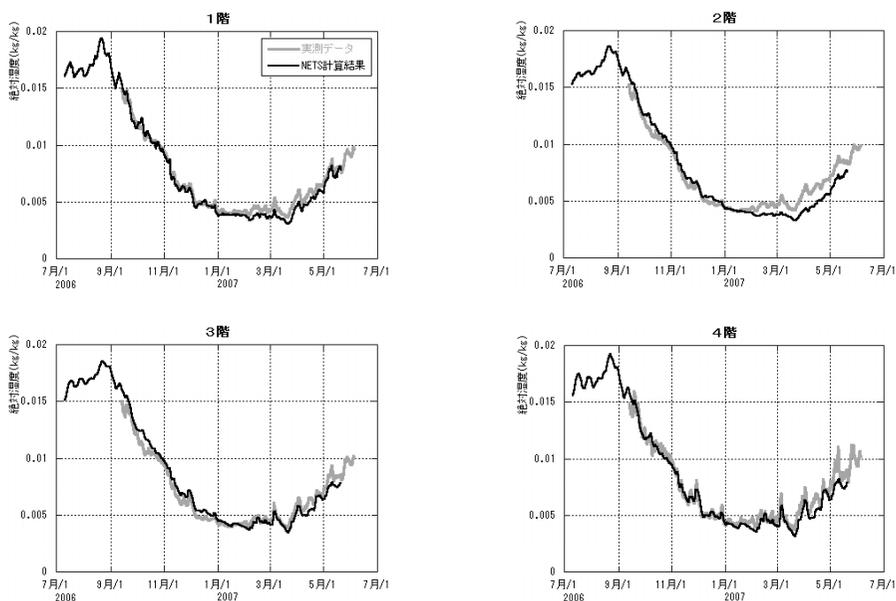


図7 絶対湿度に関する実測データと計算結果との比較

図8では、相対湿度に関する実測データと計算結果との比較を行った。実測値を見ると、特に2階と3階の収蔵部屋では年間を通じて10%程度の変動しか起こっておらず、日変動も小さく、安定している。一方、計算結果では季節変動、日変動ともに著しく大きくなってしまった。このような差異が生じた主な原因として、収蔵されている文化財の表面で起こっている吸放湿が挙げられる。今回の計算モデルでは吸放湿性能を有する物体の存在を考慮していない。このような現象を導入した新しいモデルを作成するのが次の課題である。

耐震工事に備えて収蔵品が移動されている4階収蔵室内の相対湿度の計算結果は、2階や3階と比べると、比較的実測データを再現している。さらに計算の精度を向上させるためには、流路面積などのパラメーターの最適化が必要である。

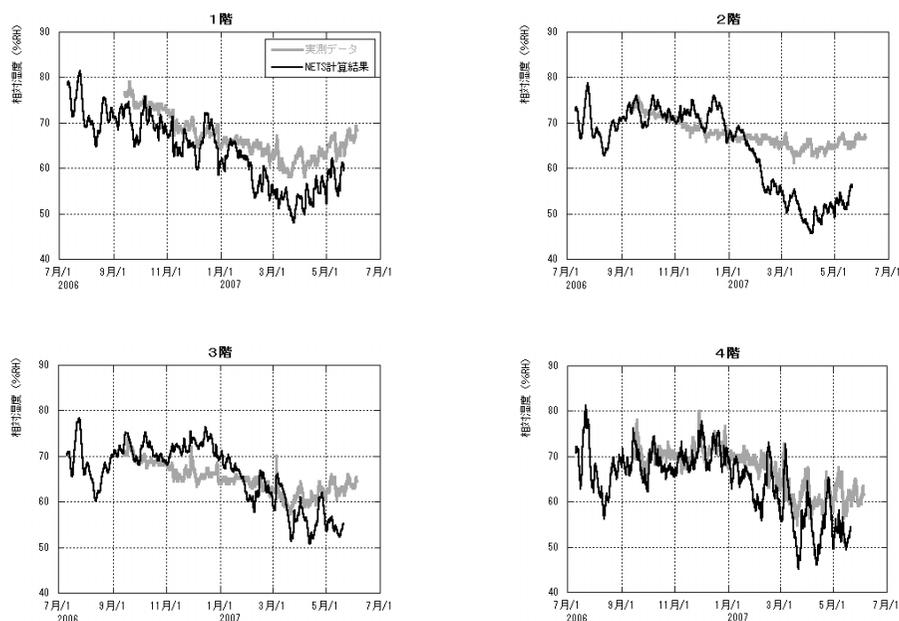


図8 相対湿度に関する実測データと計算結果との比較

4-4. 今後の予定

以上のような結果を踏まえ、今後は以下のような手順に従って温湿度解析を進めていく予定である。

- ・窓における日照面積率と受熱に関するパラメーター、流路面積に関するパラメーターの最適化を行う。
- ・多孔質材質の表面における吸放湿のモデル化、及び計算モデルへの導入を行う。
- ・以上の修正を行い、実測データを十分に再現できることが確認できたら、1階と4階で予定されているコンクリートの打ち増しを熱・換気回路網に取り入れて、耐震工事後の温湿度環境への影響を評価する。

5. まとめ

文化財の展示・収蔵施設における空調設備や建造物の変更や改修工事について検討する場合、

文化財に与える影響や費用を考慮すると、調査を目的とした実験を現地で行うことは現実的には容易でない。しかし、コンピューターシミュレーションを用いた解析手法を導入することにより、低コストに抑えつつ、温湿度環境に与える影響を定量的に予測することが可能となるだろう。本研究では、熱・換気回路網計算プログラムを用いて、耐震工事が予定されている石水博物館千歳文庫において実測した温湿度データとの比較を行った。

今回作成した計算モデルから得られた結果は、文化財が収蔵されていない4階で測定した温湿度データを比較的良く再現していた。さらに計算結果の精度を向上するための改善策を施してから、耐震工事後の温湿度環境への影響を評価する予定である。

謝辞

館内の温湿度測定の際に、石水博物館の皆様には多大なご協力をいただきました。清水建設名古屋支店からは千歳文庫に関する資料提供をいただきました。また、清水建設技術研究所の奥山博康氏と大西由哲氏からは、NETSの技術面に関する多くの有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) G. de Guichen: Climate in Museums, ICCROM, 1988
- 2) 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)
- 3) 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・熱循環小委員会・伝熱ワーキンググループ, 63-70 (1998)
- 4) 奥山博康: 熱・換気回路網モデル計算プログラムNETSの検証, IBPSA-Japan講演論文集, 15-22 (2002)
- 5) 宇田川光弘: 『パソコンによる空気調和計算法』, オーム社 (1986)
- 6) G.T.Tamura and C.Y.Show: Studies on Exterior Wall Air Tightness and Air Infiltration of Tall Buildings, ASHRAE TRANS. 122-134 (1976)
- 7) G.T.Tamura and C.Y.Show: Air Leakage Data For The Design of Elevator and Stair Shaft Pressurization System, ASHRAE TRANS. 179-190 (1976)

キーワード: 石水博物館 (Sekisui Museum), 温度 (temperature), 相対湿度 (relative humidity), 絶対湿度 (absolute humidity), シミュレーション (simulation)

Analysis of Temperature and Humidity in Chitose-Bunko of Sekisui Museum

Masahide INUZUKA, Yuka RYUSENJI* and Takeshi ISHIZAKI

The most suitable temperature and relative humidity for the conservation of cultural properties are said to be about 20°C and 60%RH, respectively, by ICCROM. In addition, care has to be taken so that cultural properties would not suffer from rapid changes in temperature and relative humidity. However, it is not easy to maintain these conditions because of aging facilities, equipments and other factors.

Nevertheless, it is almost impossible to conduct experiments on site or renovations only for investigations to study environmental conditions such as temperature and humidity. In such cases, the analysis technique using computer simulation can be a useful tool because it can be utilized without causing any damage on cultural properties and it does not cost much.

Analysis of temperature and humidity in Chitose-Bunko, which is a storage of Sekisui Museum in Mie prefecture, was conducted by using a simulation software, NETS. In this paper, the current situation of this study and the results of comparison with measured data are reported.

*Sekisui Museum