

〔報告〕 電動集密書架の定期的散開による 環境制御効果の検討

佐野 千絵・橘川 英規

1. はじめに

東京文化財研究所文化財情報資料部文化財アーカイブズ研究室の管轄の下にある資料閲覧室は、帝国美術院附属美術研究所（昭和5（1930）年設立）時代から収集してきた文化財に関する図書資料を整理し、公開している。所蔵している図書約18万冊、雑誌約12万冊を提供しており、これらの資料の大半は庁舎2階および3階に設置された閉架書庫に収蔵されている。当所書庫の構造上の特徴、空気調和機（空調）等の設備とその制約から繰り返しカビ被害に見舞われ、温湿度安定化のためにおこなった運用の変更やカビ被害、塵埃への対応事例についてはすでに報告した¹⁾。その中でも述べてきたが、書庫は2層構造で、南西隅の階段でつながっており、3階書庫は周囲の書棚に加え、中央に電動集密書架（スタックランナー）を配している。ユニット型空調があり、空調稼働時間は平日の8時頃～18時頃で、空調設備委託業者によると現在では、夏季には冷房能力が不足した状態になるとのことである。また土日、祝休日には庁舎全体の冷却塔が停止するため書庫内温度が上昇する。例年のように、梅雨～夏季には局所的にカビの発生が見られたが、2016年に実測した温度湿度データではカビが生えそうな高湿度が長期間続くような環境ではなかった。そのため吹き出し冷気との接触による結露を疑い、2016年夏季の空調の温度設定が22℃であったことから、吹き出し口からの冷気に触れても結露しないよう、22℃ 60%rhでの絶対湿度10 kg/kg 空気を上限として絶対湿度を勘案して除湿機の稼働を決める絶対湿度管理によって運用していた。

図書館のカビ発生事例の報告はウェブ上でも散見されるが、「地下」、「集密書庫」、「自動化書庫」での特有な問題について、計測を通して諸事例について原因を明らかにし、対策を立案した事例は少ない。当所で2016年夏季に3階閉架書庫内で再度カビが発生している状況を発見した際に、著者らは電動集密書架の内部と外周では体感温度が異なることに気づいた。集密書架の棚列間の通風を促すため終業時に均等割り付けして帰宅していたが、朝には温湿度の不均衡な状態が集密書架内部にできており、終業時の均等割り付け操作では解消しないと推定された。そこで、電動集密書庫内の温湿度の推移を明らかにし、集密書架を定期的に散開することで集密書架内の環境を改善できるかどうか実地検証した。

2. 計測

当所の電動集密書架は、制御盤のプログラムを変更することで希望の日時に動かすことができるように変更できるものであった。そこで平日の温湿度設定値から乖離がもっとも大きくなる月曜日朝、始業時間前の人がない時間帯に、集密書架を自動で動かして書庫内の空気を平準化させることで、温湿度分布を平均化することを計画した。空調稼働時に散開するのがもっとも効果が高いと予測できたが、勤務時間内の設定は利用者の不便を強いることになるので、今回は8時に散開する条件で試験を行うこととした。

散開モードとして以下の3パターンを試験した。モード1：すべての棚が一斉に動きだし同

一端部に集まり、ブロックのままもう一つの端部との間で3往復し、その後均等割り付けするモード（書架16本、所要時間 2分）、モード2：端部に近い棚が1台移動し、移動終了後に待機時間なしに次の書架が1台移動し、順次書架が端部に収束した後、もう一つの端部に1台ずつ移動、これを3往復し、その後均等割り付けするモード（書架12本、所要時間 17分）、モード3：端部に近い棚が1台移動し、待機時間1分（インターバルは変更可能）で、次の書架が1台移動し、以下同様に待機時間を持って順次移動し、端部にすべての書架が収束した後に、往復移動なしに均等割り付けする（書架11本、所要時間13分）（図1）。モード1は、書棚各段上部に隙間があれば、ブロックで動かすことで空気流れが起こる（当所の場合はおよそ南北方向）ことを想定したものである。一方モード3は、当所ではほぼ北東側に吹き出し口、ほぼ南西側に吸込み口を設置し書棚間の空気流れが起こるように配置されているので、待機時間を設けて空気流れを利用する考え方である。加えて、外周の空気流動を促す目的で外周通路に送風機を5台設置している。中央部にファンをつけて開列とともに作動する案もあったが、まずは現行の空調設備と増設した床置きサーキュレータで効果が見られるか検討することにした。モード2は、モード1とモード3の折衷案で、空気流れがより促進されることを期待したものである。

均等割り付け時の書棚間の間隔は、モード2,3で使用したブロックは約10cm、モード1のテストで使用したブロックは、書棚数が多かった影響で、約6cmであった。いずれの場所も一般的に空気流れができると期待される5cmよりも幅は広かった。棚の奥行きが不足して本が棚の面から飛び出している書棚については、棚間隔はより広くなり、最大で約15cmの場所もあった。また、散開のたびに固定端に近い書棚は停止位置が数cmの幅で多少した。均等割り付け時には、空調吹き出しスリット（約1.5m長さ）は、54-59列、60-71列、76-81列、88-93列、100-104列、110-114列、121-125列の上に位置している。

散開操作の効能を評価するため、データロガー-HOBO UX100-003（オンセット社、精度 $\pm 0.21^{\circ}\text{C} \pm 3.5\%\text{rh}$ 、分解能 $0.024^{\circ}\text{C} \ 0.07\%\text{rh}(25^{\circ}\text{C})$ 、応答速度は温度で4分、相対湿度で43秒（空気流動1m/s））を用い、各列の中央部あたりに設置し5分間隔で計測した（図2、3、西から2～4区画で集密書架端部からの距離約2.2～3m、下から3段目で床から高さ約75cm）。比較的頻繁にカビが生じる67列については、ちょうど吹き出し口の中央付近に位置してい

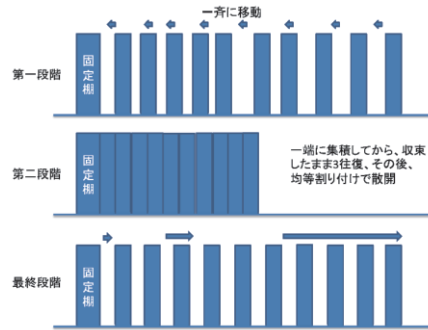


図1 左 モード1の書架の動き

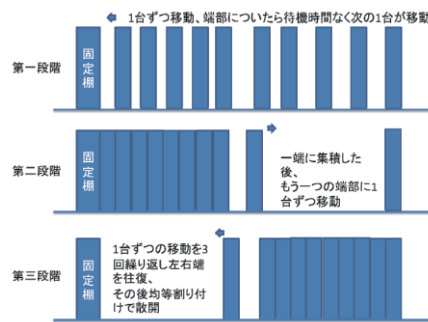


図1 中 モード2の書架の動き

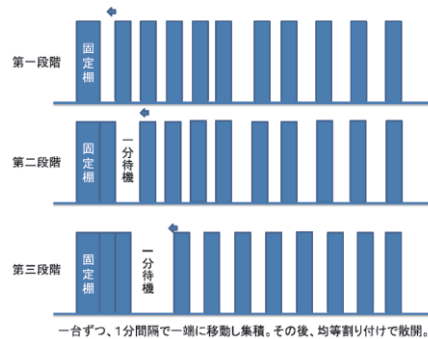


図1 右 モード3の書架の動き

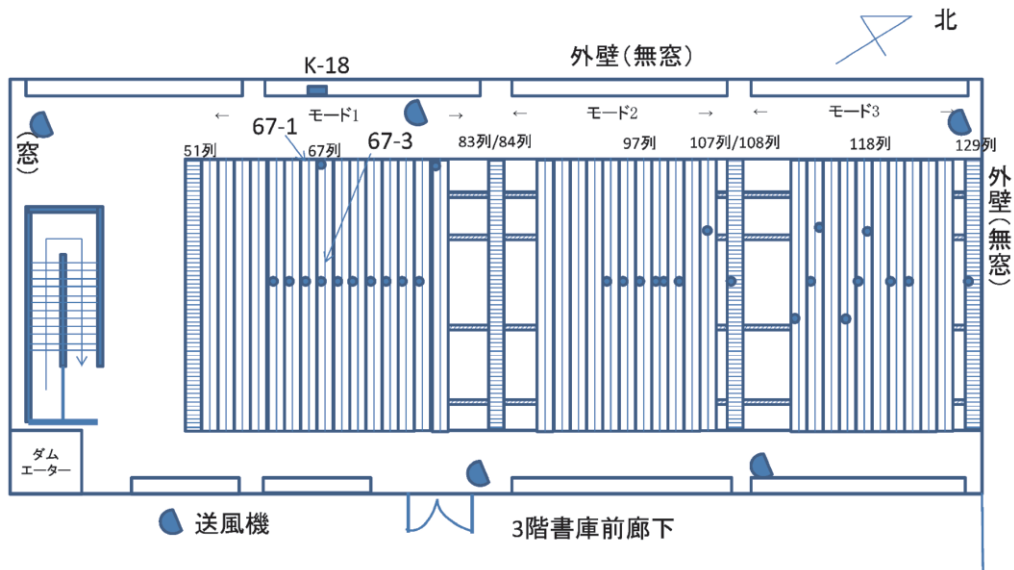


図2 3階閉架書庫内の計測器設置位置一覧

● HOBO UX100-003 ■ おんどとり ease RTR322



図3 データロガーの設置状況

左：外周固定棚 中・右：集密書架内 書籍からの影響を減らすため、10 cm 以上離れた位置に設置

ることから、西側空調吹き出し口に近い書架内にロガーを追加で1台設置した（ロガー番号67-1）。外周の測定位置は、67列近傍にはおんどとり ease RTR322（T&D 株，精度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 5\text{ \%rh}$ ，分解能は記載なし）を設置した。

冬季に得たデータから、散開モード1～3の効果の違いについて検討した。夏季はすべての棚を散開モード3で動かし、書庫内の温度分布を得た。また、2016年夏季と散開モード3で管理した状態の2017年夏季のデータを比較し、書庫の環境とカビ発生状況について検討した。

3. 結果

3-1. モードによる相違

冬季に南側51～83列をモード1で、84～111列をモード2で、112～129列をモード3で制御した。散開は月曜の朝8時に1回のみの実施である。この時期の温湿度設定値は、3階書庫では $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 40 \%rh で、2017年の空調稼働時間は9～18時であった。

大寒の頃の土日に室温が低下し、始業と共に空調が稼働しはじめ、書庫内の温度分布が大きくなると推定されることから、各モード各列の2017年1月23日（月）の温度分布を図4に示す。

温度設定値22℃に到達したのはモード1で1カ所、モード3で2カ所、いずれも18時頃であった。モード1の各書棚の温度差は最大で3.5℃、モード2での温度差は2.6℃、モード3での温度差は3.9℃（北面に接した端点を除くと3.5℃）で、書架内で比較的大きな温度差が生じていた。モード2の試験区は室内中央であり、外壁の影響や吹き抜けでつながった階下の影響が大きくないと推定される位置にあったため温度差が小さかったと考える。サーキュレータの影響も考えられるが、サーキュレータの設置は、3階閉架書庫の温熱貫入点である南側窓の影響を早期に解消するために北から南への通風を促進しており、モード2試験区の攪拌にのみ影響が大きかったとは考えにくい。北端にあたる129列は日変動が大きく、重要な資料の保管には注意が必要であることがわかった。各列の挙動は利用の程度が日によって異なることから日中は特定の書棚が常態的に高いわけではなかったが、夜間など利用のない時間帯にはモード1を除いて、ログの精度から考えて誤差の範囲内の同じ値に戻った。

図5に各モードで動く書架の中央部近傍のデータを代表として、1月23日(月)の67列、97列、118列のデータを比較のため再掲した。温度データを見ると、モード3で制御した棚内部の温度が、空調の設定温度に近づくのがもっとも速く、16時半頃には安定した。一方、モード1、モード2で制御した棚は空調を停止する18時頃に最高温度となった。

相対湿度は、通常の空間では温度上昇とともに相対湿度は減少するが、書架内では温度上昇とともに相対湿度上昇が起こっていた。多孔質体の書籍に囲まれた集密書架の特徴であるが、いわゆる「蒸れ」という現象である。この現象は12時半頃にはいったん解消するが、13~14時にもモード1のブロックでは温度上昇とともに相対湿度上昇が起こったことがわかる。12時半以降、モード3のブロックでは外周の相対湿度の上下に呼応した動きが見られ、空気流れが良い状態が保たれていると推定された。モード2のブロックでは、相対湿度の挙動については値は異なるものの、モード1とほぼ同じタイミングで相対湿度の上昇・下降が起こった。モード2の相対湿度の絶対値は、モード3に近く、書籍量の相違に依存しているのかは不明であるが、モード3の変動が緩和されているような挙動であった。露点温度の推移の傾向は相対湿度とほぼ同じであり、図は割愛した。

図5のデータを含む金曜日(2017年1月20日)~金曜日(1月28日)の推移を図6に示す。

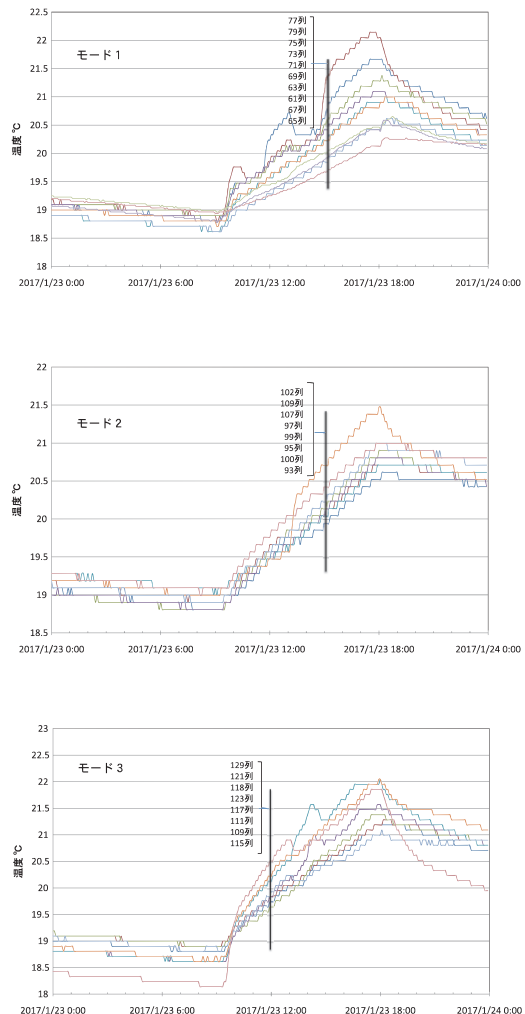


図4 各モード各列の温度推移(2017年1月23日) 番号は書棚番号(南側が小さい数字、129番は北端)

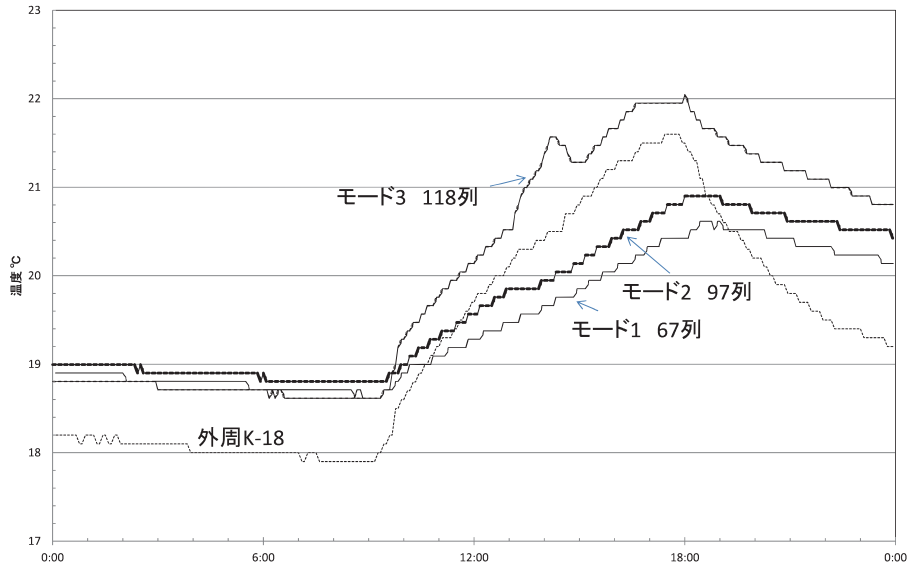


図5 左 各モード代表値と外周の温湿度推移 (2017年1月23日)
番号は書棚番号 (南側が小さい数字)

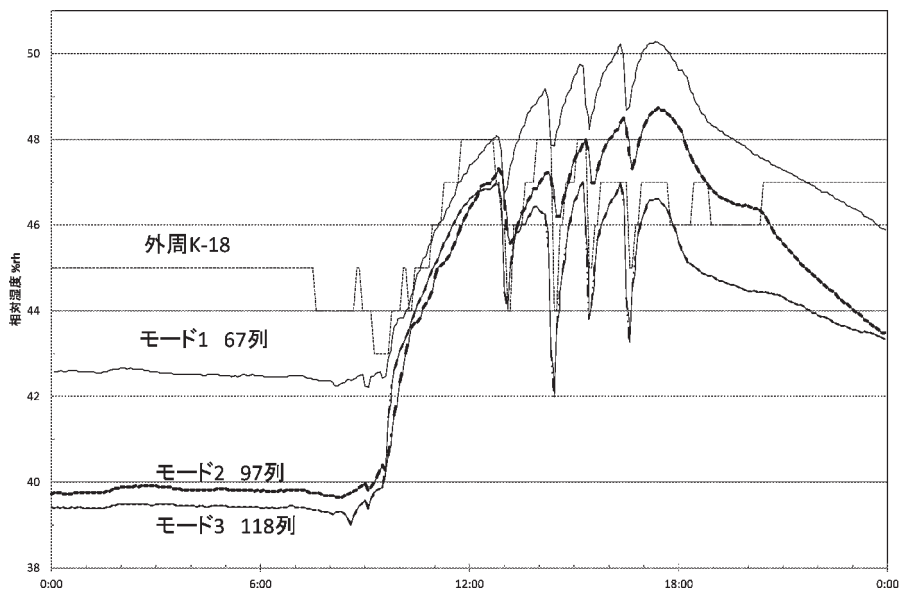


図5 右 各モード代表値と外周の相対湿度推移 (2017年1月23日)
番号は書棚番号 (南側が小さい数字)

散開は月曜日 (1月23日) の8時に1回行ったのみである。空調が稼働する平日には、徐々に空間温度は設定値に近づき、相対湿度変動が小さくなる様子がわかる。相対湿度の設定値は40 %rhであるが、機器精度を考慮しても設定値に達した地点はなかった。

図7に、1月23日～27日 (平日) の日最高温度、日最低温度、日平均温度、日変動 (温度)、日最高湿度、日最低湿度、日平均湿度、日変動 (湿度) をまとめる。モード3の書棚は、月曜

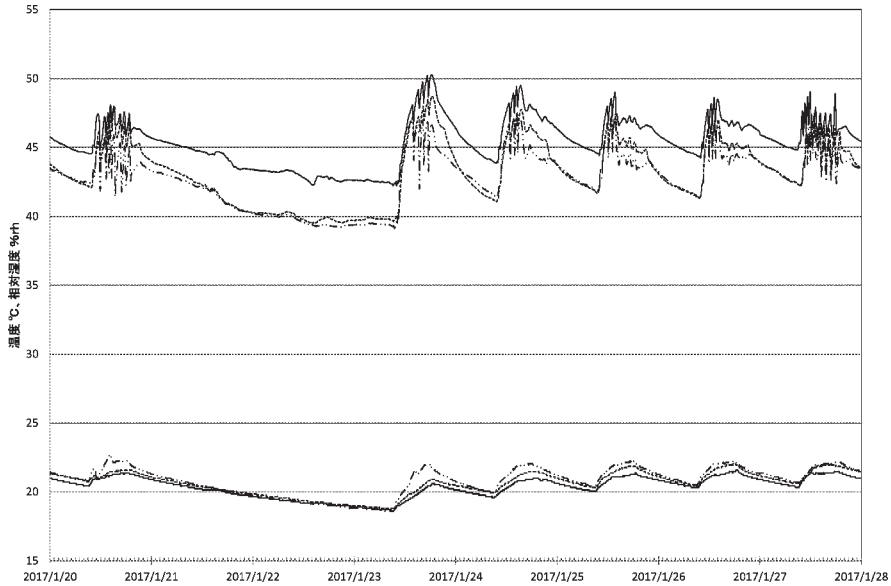


図6 大寒の頃の温度湿度推移（金曜日～金曜日）
 実線：モード1_67列、点線：モード2_97列、二点破線：モード3_118列

日（1月23日）から最高温度は設定値どおりとなり、日平均温度が設定温度に到達するのも早い。その分、温度の日変動は月曜日（1月23日）には大きく、水曜日（1月25日）にはほぼ安定した。モード1の書棚では、最高温度、最低温度ともに設定温度より低めに推移したが、その分、日変動は小さかった。モード1とモード3では、設定した温度への応答がかなり異なることが明らかになった。モード2はその中間の状況を示した。湿度については、いずれの場所

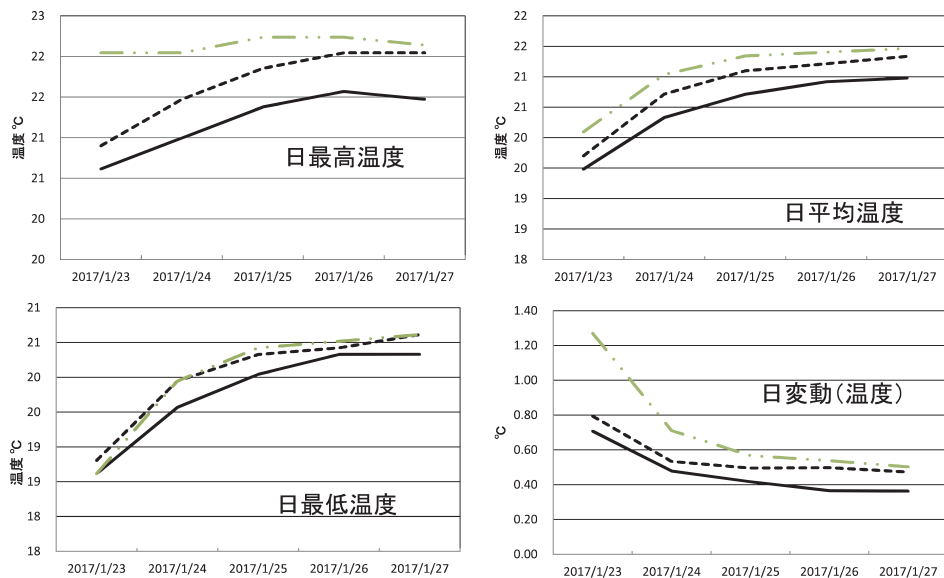


図7 大寒の頃の日最高温度、日最低温度、日平均温度、日変動（温度）
 実線：モード1_67列、点線：モード2_97列、二点破線：モード3_118列

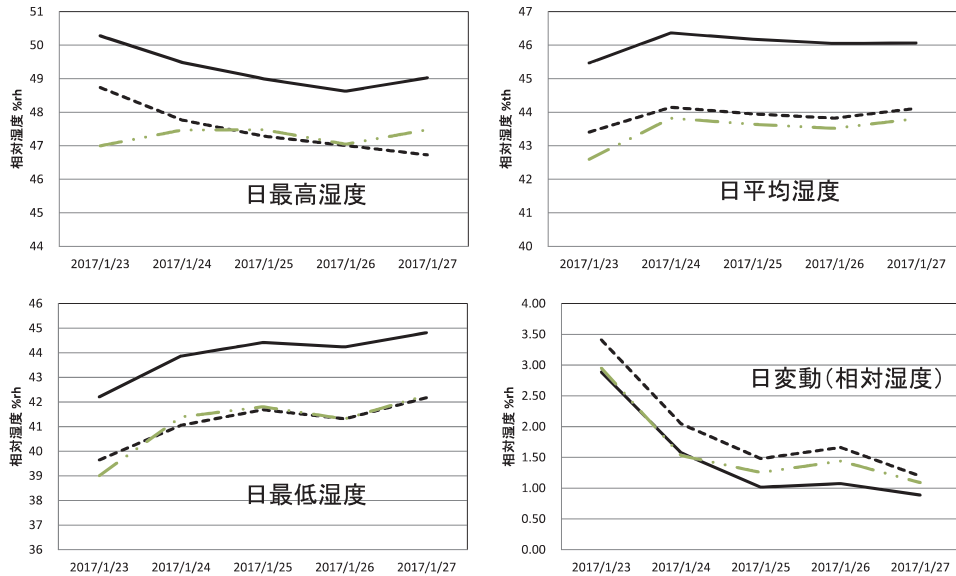


図7 大寒の頃の日最高湿度，日最低湿度，日平均湿度，日変動（温度）
実線：モード1_67列，点線：モード2_97列，二点破線：モード3_118列

も火曜日（1月24日）以降はほぼ安定しており，空調による相対湿度の大きな変化を緩和するように書籍が周辺湿度を調整していると思われる。図8に日平均温度，日平均湿度から計算した絶対湿度推移を示す。この時期の空調設定 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 40 \%rh の絶対湿度は 6.56 kg/kg 空気であるが，いずれの場所も初日の月曜日（1月23日）には設定を下回っているが，2日目の火曜日には空調機の設定値から算出した絶対湿度よりも書庫内の絶対湿度は高くなり，その後モード2，モード3での上昇は鈍るが，モード1の書架周辺は絶対湿度の上昇は続いた。

次に外周の固定棚と集密棚内部への温度湿度伝播について検討した(図9)。固定棚は西側の外壁に取り付けられており，日変動の大きな場所にある。空調の稼働と共に速やかに温度が上昇し，停止後には夜間にながっていく様子がわかる。西側吹き出し口に近いロガー番号67-1，集密書架のほぼ真中に設置したロガー番号67-3では，夕方にかけて空調の設定温度になるよう追従したが，この棚はモード1で動いていた場所のため，月曜日（1月23日）には空調の設定温度に到達しなかった。また67-3の温度上昇は67-1に比べて時間的に遅れが見られ，西側吹

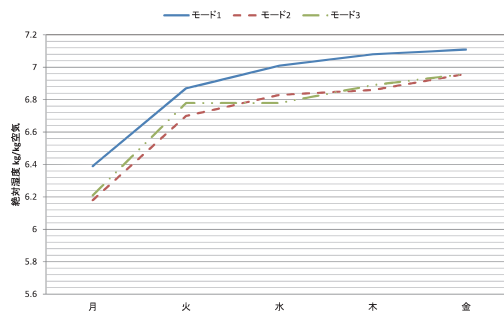


図8 平日（2017年1月23～27日）の日平均絶対湿度推移
実線：モード1_67列，点線：モード2_97列，二点破線：モード3_118列

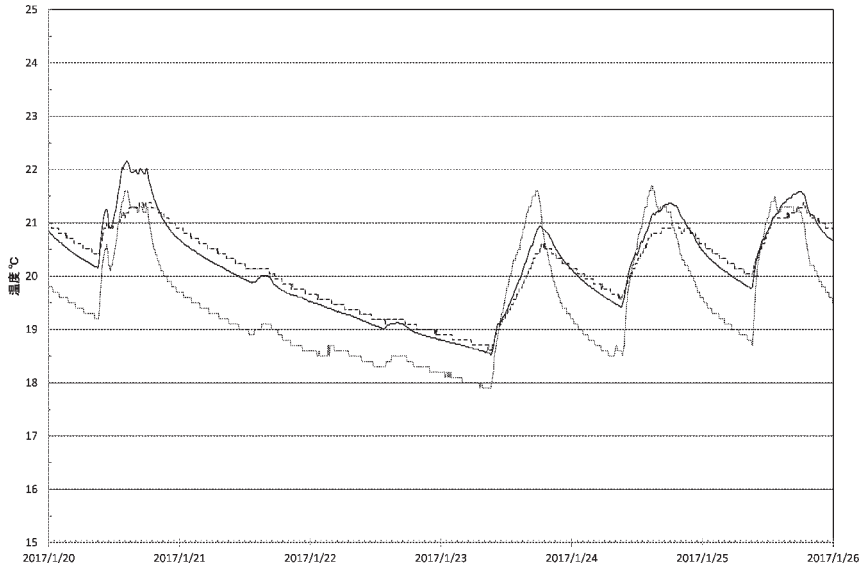


図9 外周固定棚と集密棚内部への温度の伝播

実線：67列西端（ログ-67-1） 点線：67列中央（ログ-67-3） 二点破線：外周西（ログ-K-18）

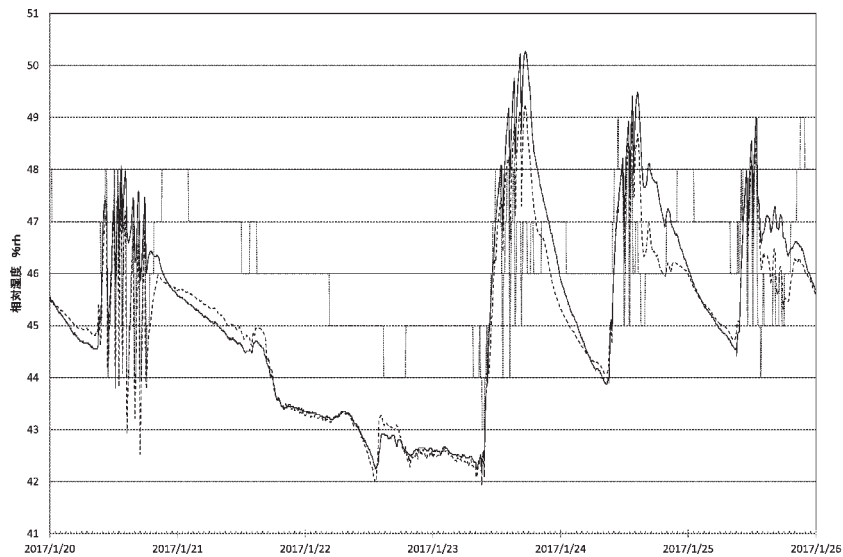


図9 外周固定棚と集密棚内部への湿度の伝播

実線：67列西端（ログ-67-1） 点線：67列中央（ログ-67-3） 二点破線：外周西（ログ-K-18）

き出し、東側吸込みの当所の3階書庫の設計の影響を受けたデータが得られた。

外周固定棚の相対湿度は、計測器周辺の書籍量が集密棚内部に比較して多くないことから、温度上昇に伴い相対湿度が大きく上昇することなく、空調稼働中は約45%で安定した。一方、集密棚内部は相対湿度が温度上昇とともに大きく上昇した。以上から、集密書架内は資料の集密度によって外周とは異なる環境となっており、環境モニタリングの際には室内の分布を勘案

して問題の生じそうな場所を選定し、監視を続ける必要があることがわかった。

これらの結果から、集密書架内は温度が上昇すると相対湿度が上昇する、「蒸れ」た状態になることがわかった。そのため閉架書庫内の絶対湿度は空調の設定を超えて上昇する現象が見られた。「蒸れ」現象の影響を低減するには、温度変動を抑え、かつ「蒸れ」た状態がすみやかに解消され空調で制御できる状況になることが必要である。初日の温度変化は大きいですが、すみやかに「蒸れ」が解消し、絶対湿度の上昇の抑制されたモード3が、集密書架環境の改善に有効と判断した。モード2は、重い書棚の移動回数が多く、集密書架の故障を招きやすくなりそうので選択しなかった。

以降、カビの生えやすい時期にはモード3で稼働することとした。2017年5月10日にすべての棚の稼働をモード3とし、週1回月曜日朝の書架移動だけでは書棚内の環境が安定するのに3日ほどかかることがわかったため、平日は毎日8時に、金曜日はさらに23時に、土日には11時と23時にと、毎日作動して環境を平滑化できるように制御方法を変更した。

3-2. 2017年夏の温度分布

夏季の3階書庫の設定値は、25℃、45%rhで、空調の稼働時間は9～18時であった。図10に、図5と同じ書棚で計測した温湿度データを示す。南側>中央部>北側の順に温度が高く、相対湿度はその順に低くなっている。盛夏の7月末を除いて、中央部と北側の環境は比較的近い値で推移している。図11に一部の計測期間の露点温度の分布を掲載するが、南側67列(二点破線)の露点温度はその他の場所に比べて、平日の空調稼働中には絶対湿度が約1℃高い状態にあった。当所の3階閉架書庫の特徴として、南側は他の場所の異なる環境となっており、年間通して監視が必要な場所であるとわかった。

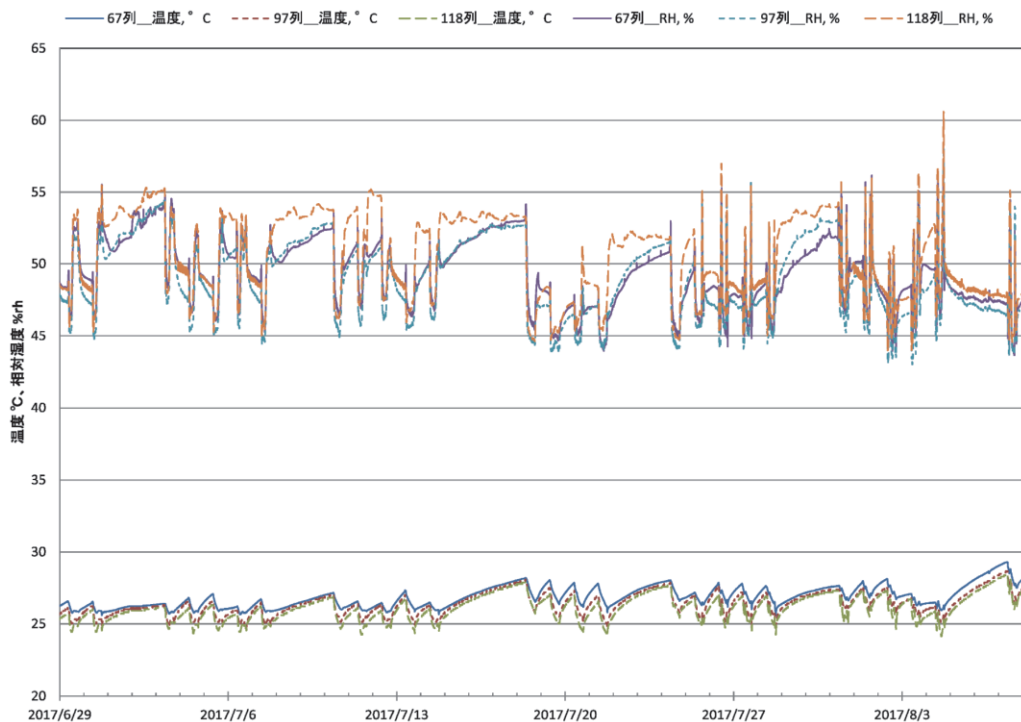


図10 夏の書庫内温湿度分布

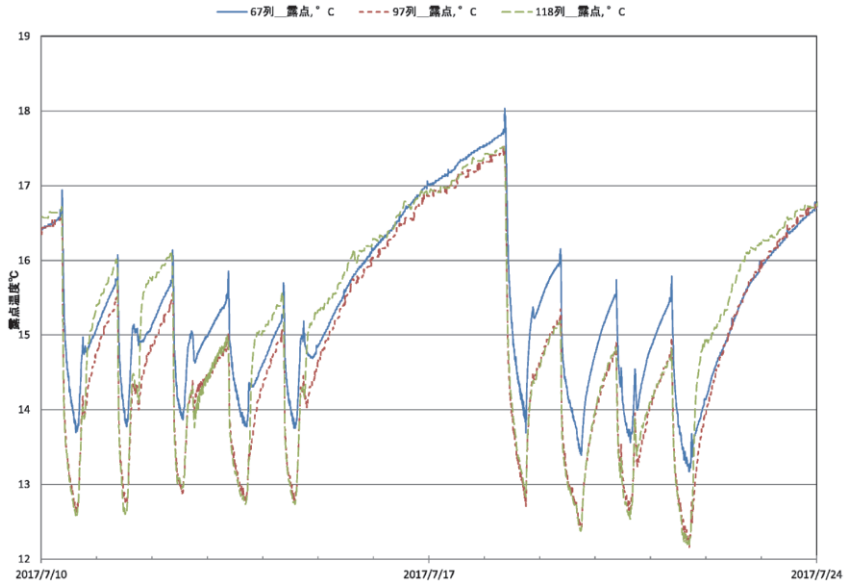


図11 夏の書庫内の露点温度の分布

すべての書棚をモード3で制御している状態での、西側（吹き出し口側）外周固定棚と集密棚内部の温度湿度の相違について、図12に示す。冬季と同様に、吹き出し口に近い固定棚では空調機稼働に伴い温度湿度設定値に近づいた。集密棚内部は外周に比較して温度変化は緩やかになり、相对湿度変化は空調稼働中、温度低下とともに低下し、夜間の空調のない時間帯に上昇した。相对湿度の大きな変動も散見されるが、わずかな温度上昇に対応して起こっており、書棚内が「蒸れ」ている状態にあることを示している。これらの結果から、集密書架を週1回稼働の時より毎日作動させることで、温湿度差の少ない環境に制御できるようになったと判断

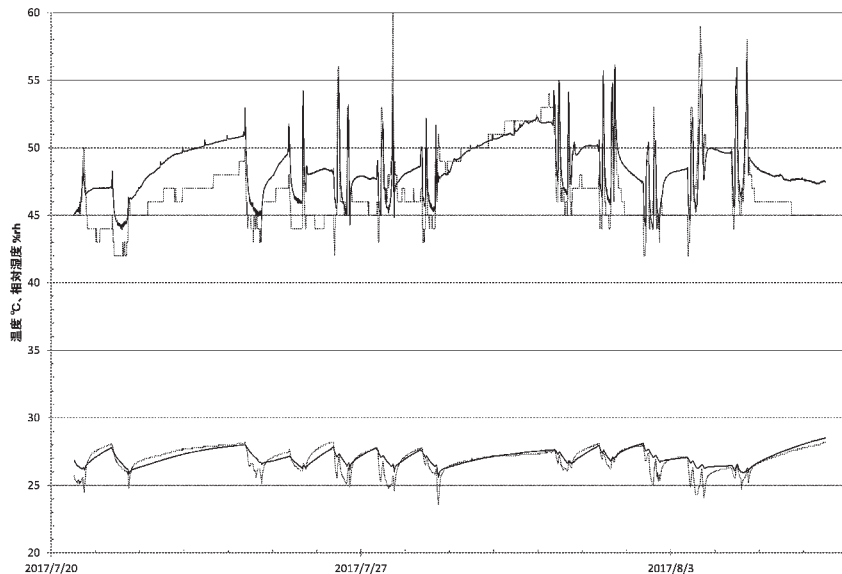


図12 固定棚と集密棚内部の温湿度推移の相違
実線 67列（ログ-6-3）、点線 外周（k-18おんどり）

した。

3-3. 2016年夏季とモード3で管理した2017年夏季の比較

書棚67列について、2016年夏季のデータと、モード3で管理した2017年夏季のデータを図13に示す(2017年67列のデータは比較のため再掲)。2017年の夏は8月中旬以降に降雨が続き例年に比べて低温であったため、盛夏を代表するデータとして、コンクリート造建物では温度伝播が3週間程度遅れることを勘案し、7月末～8月中旬のデータを選択した。

2016年と2017年の制御上での大きな変更は、土日祝日の10時、17時頃に2回行っていた換気運転を停止したことである。2016年には土日の連休のたびに相対湿度が高くなり、月曜日の露点温度が21℃を超える日も数回あった(図14)。一方2017年は、2016年に比較して相対湿度を低く維持管理でき、カビ被害に見舞われることはなかった。しかし2016年ほど高温にはならなかったものの、設定値の25℃に対して8月中旬には30℃に迫り、室温は2016年夏季と同じく制御できていなかった。以上のように2016年と2017年は外気の取り込み条件や夏季の気象条件が異なるため、集密書架を定期的に散開することで集密書架内の環境をカビの生えにくい環境に制御できたかどうかは判断できなかった。

4. まとめ

閉架書架は紙資料の集積密度が高く、温度が上昇すると相対湿度が上昇する「蒸れ」やすい状況にあり、外周とは異なる環境となっており、カビ被害の低減を図るうえで注意深い監視が必要であることがわかった。また集密書架内の温度分布があり、その環境は局所的に異なっていることが明らかになった。

集密書架内部の環境を外周の環境に近づけるため、利用者がいない時間帯に棚を1台ずつ動かす散開モードを新たに作り、外周および集密書架内部で温度湿度測定を実施した結果、9～18時の空調稼働で夜間停止している条件であっても、毎日1回、集密書架を待機時間を持って散

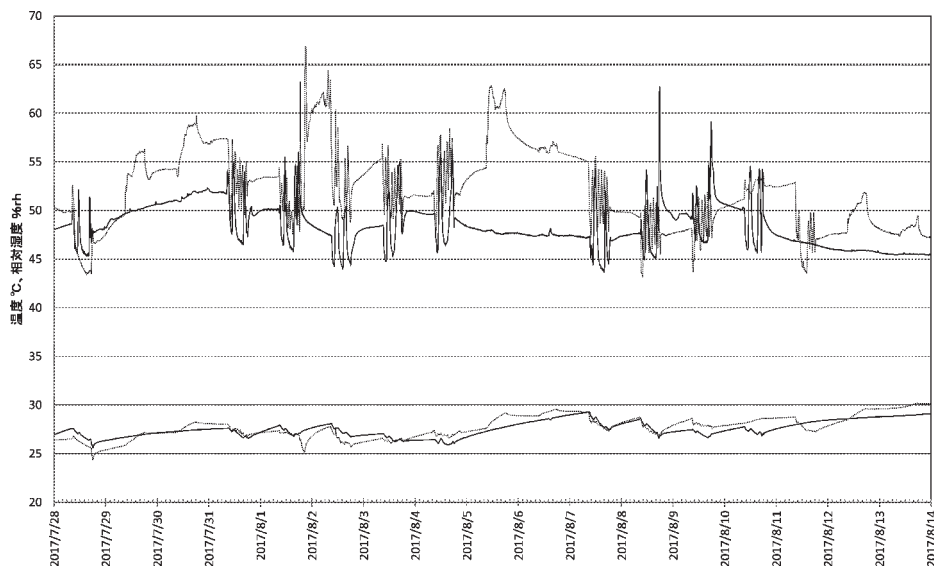


図13 書棚67列中央部の温湿度推移(金曜日～日曜日のグラフ)
実線：2017年7月28日～8月14日、点線：2016年7月29日～8月15日

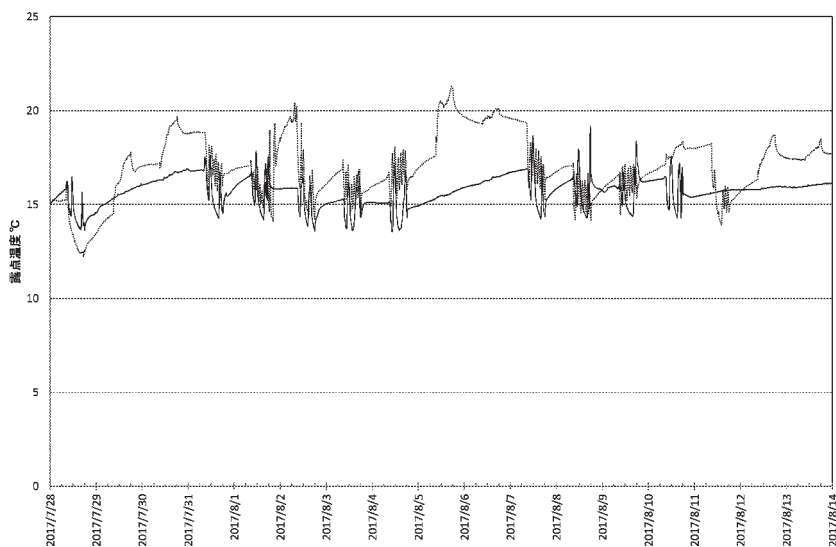


図14 書棚67列中央部の露点温度推移（金曜日～日曜日のグラフ）
 実線：2017年7月28日～8月14日、点線：2016年7月29日～8月15日

開させ通風を促すことで、集密棚内部の環境を空調の設定条件に近づけることができることがわかった。

今後は職員に周知を十分に行ったうえで、空調稼働時間内の棚の自動散開を行うことでより効果が高くなるか試験を続ける予定である。電動集密書架の自動散開モードは、集密書架と外周の環境条件を平準化＝近づける一手法であり、外周の環境条件が良い場合に効果を発揮すると思われる。環境条件を制御できない、例えば空調のない施設で電動書架を定期的に散開したとしてもその環境の平準化を促すのみであり、カビ抑制などを望む場合には平均的に相対湿度を63%rhよりも低くするような設備や手法が必要と考える。

謝辞

本研究はJSPS 科研費15H02786の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 橋川英規、安永拓世、皿井舞、津田徹英、佐野千絵：閉架書庫に発生したカビ対策事例、保存科学、56、99-112（2017）

キーワード：閉架書庫 (a closed library)；集密書架 (compact shelving)；温度湿度 (temperature and humidity)；定期的な棚の散開 (periodically moving shelves)

Study on the Environmental Control of the Stack Room in a Closed Library by Periodically Moving Shelves

Chie SANO and Hideki KIKKAWA

In addition to the open library the Institute has a closed library where around 300,000 books and magazines are stored. There is a concern that books in the closed library on the third floor often suffer from mold growth, although the measured temperature and humidity are within an acceptable range due to air conditioning operating from 9 o'clock to 18 o'clock. Last year, after detection of mold growth, it was found that there was a temperature difference between inside and outside the stack, although bookshelves are set to have an average space of about 10 cm at the end of work time to promote air draft. Thus, an experiment was conducted to eliminate the temperature difference between shelves when they were electrically moved periodically before work time. Temperature and humidity were measured inside and outside the stack. It was found that relative humidity increased as temperature increased inside, while relative humidity decreased as temperature increased outside. It was also found that the maximum temperature difference inside the stack was about 4 degrees centigrade. In order to bring the environment inside closer to the environment outside, a new way was made to move the shelves electrically at intervals of one minute. It was found that the environment inside the stack could be brought close to the condition of environment outside the stack.

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 15H02786.