

# 「巢」の環境の築き方の時代から、その在り方の時代へ

*From the age of how to build a "nest" environment to the age of how it should be*

## 序文：建築環境工学のこれまでと、これからの展望

### ～熱・湿気環境分野の研究をもとに～

助教 高取伸光

#### はじめに

夏は涼しく、冬は暖かく過ごしたい。あるいは、梅雨頃のじめっとした湿気をどうにかしたい、冬季に暖房をつけると喉が乾燥するのをどうにかしたい。そのように健康で快適に暮らしたいと思ったことは誰しも一度はあるだろう。こういった健康性・快適性に対するニーズはある程度叶えられつつあるものの、全てのニーズを同時に叶えるというのは中々難しい。

例えば、28℃が快適と感じる人と22℃が快適と感じる人がいるように快適性に対する感度が異なる人が一つの居住空間の中で暮らした場合、両方のニーズを同時に満足させるのが難しいのは想像に難くない。あるいは、冬場に暖房をつけた結果、窓面で結露が生じカビが繁殖してしまうことがあるように、ヒトにとって快適な環境が建物にとっては不適切なこともある。逆に、スーパーのように食材（モノ）の衛生状態が優先される施設では、過剰な冷房を使用せざるを得ないためヒトの快適性あるいは健康を損ないかねない場合もある。このように、ヒト・モノ・建物といった対象ごとに適切な環境が異なることは往々にしてあり、建築がその全てのニーズを満遍なく満たすというのは極めて難しい。

また、これらのニーズは対象ごとに一定とは限らず、時間と共に変化することもある。例えば、ひと昔前に比べ地球環境の保全に対する社会的要請は年々増加しており、建築においても近年省エネルギー基準が制定されZEBあるいはZEHへの意識が高まっているのは周知の事実であろう。そういった時々刻々と変化するニーズや社会の要請を設計時に予測することは困難であり、その時々に応じて設備機器の更新や改修工事などによって対応するしかない。一方で、ル・コルビジェの建築群のように建築自体に文化的価値が後々付与されそのオーセンシティの維持が求められるような場合や、コストの問題から建築の改修や設備の更新に対して大きな制約が課される場合には、建築や設備側の対応だけでなく人自身による環境調整行動（例えば窓やカーテンの開閉による換気や日射の取入れなど）が必要とされることもあるだろう。

そのように考えると、多様なニーズと隣り合わせにある建築物の室内環境というものの目標値をどのように定めるのか、あるいは建築を運用していく中で時間と共に絶えず変化するニーズや社会的要請をどのように満たしていくのか、これは中々に難しい問いではないだろうか。

#### プロジェクトページの趣旨説明

筆者の所属する生活環境制御学分野、小椋・伊庭研究室は建物や文化財に関わる熱や湿気の問題を中心に健康で快適な建築の実現方法や、文化遺産を保存・公開する方法を研究している、建築環境工学分野に属する研究室である<sup>1)</sup>。ここでは、建築環境工学という研究分野の現状を私なりに俯瞰し、まとめた上で、後述する我々の研究室が取り組む個別のプロジェクト紹介の趣旨説明とした。

ご存じの読者もいるかと思うが、建築環境工学は1964年に建築計画原論から派生した学問分野である<sup>2)</sup>。建築計画原論は、科学的な根拠に立って設計・計画を為すこと<sup>3)</sup>を目標としていたように、設計行為を中心としたトップダウン型の学問であった。

一方で、近代化に伴い熱や空気、音、光などの物理現象に対する学術的専門性を向上させる必要性や建築設備の発展に伴い、科学的根拠を元に建築における工学的な解を探索するボトムアップ型の学問として建築環境工学は成立してきた<sup>2)</sup>。建築環境工学の開拓者の一人である前田敏男は建築計画原論の目的の一つを「建物を設計するときには建ち上がった後の状態を予測すること」<sup>4)</sup>であると述べるように、自然科学に基づいた環境の予測技術に関する研究が精力的に行われてきた。なお、私の専門である熱や湿気分野では、近年（無論、課題は多く残るものの）かなりの精度で建築壁体および建築内の温度および湿度状態を予測できるソフトウェア<sup>例えば5),6)</sup>も開発されつつあり、環境の築き方についてはそれなりに知見が溜まりつつあるといえよう。



写真 エネマネハウス 2017

京都大学小椋研究室・柳沢研究室合同プロジェクト「まちや+こあ」  
(撮影：トヨタヤスシ)

一方で、冒頭で示したような環境の在り方、言い換えれば建築計画原論のもう一つの目的であった科学的な根拠に立って“設計”を為すという点については、未だ多くの課題が残っているのではないだろうか。例えば、ヒト・モノ・建物といった**対象**ごとに異なる多様なニーズをどのように取舍選択し、環境の目標値を決定するのか。建物の**運用**に伴うニーズの変化や、運用段階における用途変更をどのように考慮するのか。人の**環境制御行動**を建築物の室内環境にどう活用していくのだろうか。こういった定量的な科学的根拠に立って環境の在り方を決め、環境を設計する、そういった知見については十分であるとはいえないのではないだろうか。

一方で、産学連携でZEHのモデル住宅を実際に建てるプロジェクトである“エネマネハウス”<sup>7)</sup>(写真)や、2015年に日本建築学会近畿支部が主催となり開催された<環境が形態を決める>というタイトルのシンポジウム<sup>8)</sup>が行われるなど、デザインにおける環境の役割が増加傾向にあることは間違いないだろう。すなわち、建築環境工学で培われてきた知見を活かし、設備設計だけでなくデザインの設計行為に携わり、ヒト・モノ・建物の多様なニーズをトータルで考えた建築環境の在り方を考えることがこれからの建築環境工学という分野の役割の一つではないだろうか。

本研究室のプロジェクト紹介ページではこのような趣旨のもと、建築環境工学の知見をもとに実際の設計行為に寄与してきた研究事例を紹介すると共に、環境の予測技術に関して未だ不十分と考えられる点や、設計行為への関わり方あるいは建築環境の在り方に対する想いを、執筆者である教員および研究室の学生それぞれのこれまでの経験をもとに自由に述べてもらうことにした。

#### 【参考文献】

- 1) 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 生活空間環境制御学 HP：<https://www.ar.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/control>
- 2) 尾島俊雄：1964年に「建築計画原論」から「環境工学委員会へ」, 建築雑誌, pp.38-39, No.1646, 2013
- 3) 荒谷登：現状と未来の在り方—計画原論再考—, 建築雑誌, p.131, No.1248, 1986
- 4) 前田敏男：建築計画原論の発展のために, 建築雑誌, pp.39-42, No.857, 1958
- 5) 株式会社アドバンスドナレッジ研究所：“FlowDesigner”, [Online]. Available: <http://www.akl.co.jp/>. [Accessed 02 09 2020]
- 6) Fraunhofer IBP, "WUFI," [Online]. Available: <https://wufi.de/en/>. [Accessed 24 12 2019].
- 7) エネマネハウス 2017 学生が考える実現可能な一次エネルギー消費量0の家, [Online]. Available: <https://www.enemanehouse.jp/>. [Accessed 02 09 2020]
- 8) 公益社団法人大阪府建築士会：日本建築学会近畿支部主催シンポジウム<環境が形態を決める>—建築・エンジニアリングデザインの最前線— 4/20, [Online]. Available: <http://www.aba-osakafu.or.jp/info/1504/other01.html>. [Accessed 02 09 2020]

## 「快適な／健康な住まいの環境とは」

准教授 伊庭千恵美

### はじめに—いのちを守る住まい

今年の夏も平年以上の猛暑となった。2020年8月京都市で日最高気温が35℃を超えた日は22日である。住宅内で熱中症になり、救急搬送されるケースも多い。

住まいをつくる・選ぶ時に何を重視するかは人によって異なると思うが、「安全・安心に暮らせること」の優先度は高いのではないだろうか。その意味で、耐震性や構造安全性を気にする人は多いが、適切な温熱環境を維持できることもまた、命を守る住宅の基本性能の一つである。

エアコンなどの設備を入れたら良いという問題ではない。まずは住宅自体の底力とも言える熱性能を高めることが大切で、それは夏季や冬季の災害時に停電が起きてもある程度の室温を保つことにも繋がる。その上で、設備を上手に活用していくことが大切である。

これを前提として、快適な／健康な住まいとは、ということについて少し考えたい。

### 快適さは人それぞれ、でも健康は？

多くの人が利用するオフィスや店舗と異なり、住宅は非常にプライベートなものなので、基本的には居住者が満足する環境であれば良い。ただし、地球環境を考えるとできるだけエネルギーを使わない方が良いし、居住者自身の健康を損ねるものではない方が良い。

人間が環境に対し温かさや冷たさをどう感じるか(温冷感)とそれを快適・不快と感じるかどうか(快適感)は、暮らしてきた地域や育った環境の影響が非常に大きい。例えば、インドネシアなどの蒸暑地域では、近年エアコンが普及し非常に低温での冷房が好まれる<sup>1)</sup>。また、筆者は京町家の温熱環境調査を約5年にわたって行ってきたが、北海道出身の筆者にとっては寒いと思われる冬季の室温であっても、町家の居住者は「こういうものだと思っている」とのお話であった。

住まい手自身の住経験により快適な環境や許容できる環境は様々であり、さらに季節により変化し得るものでもあることを考えると、どのような環境で生活することが良いという基準を示すことは難しい。住宅の仕様・性能・設備、そして住まい方によってどのような環境になるか、ということ予測し提示することが、環境工学の技術者としての役割であると考えられる。

一方で、居住環境が居住者の健康を害する可能性については明らかに示さねばならない。最近では、人体の皮膚と環境の熱伝達や汗の蒸発、皮膚と深部の熱伝導、血流による熱移動、代謝による熱生産をモデル化し、環境・衣服・運動の条件を入力すれば人体の温度や血圧を予測することができるようになってきている。住宅内で特に問題となる冬季の入浴時のヒートショックについての研究が進んでいる<sup>2)</sup>が、夏季の熱中症についても早急な検討が必要であろう。

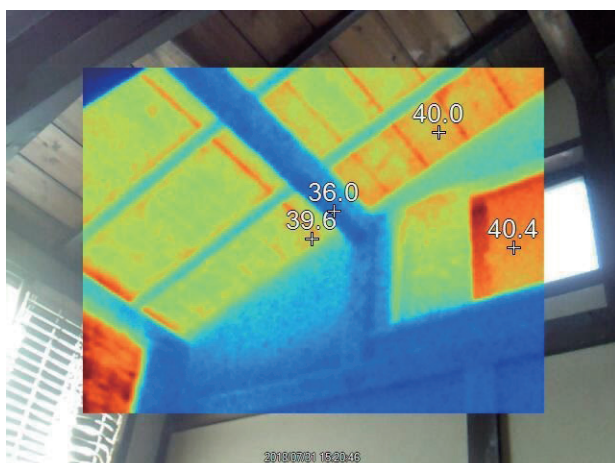


写真1

室温が32℃(外気温が36℃)の時、日射が当たる無断熱の屋根の内側表面温度は40℃を超えている。自分でも気づかないうちに体温が上昇することがある。

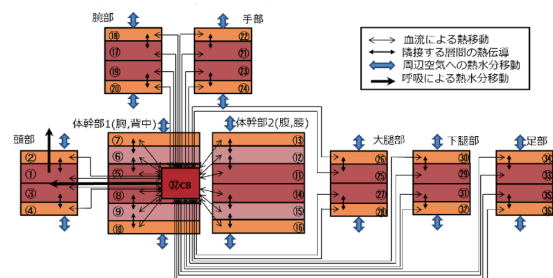


写真2

周囲の環境要素と衣服・行動に応じて人間の皮膚温や深部温がどう変化するかを計算する人体熱モデルの例。これに、血圧や血流量を予測する血液循環予測モデルの研究が進められている。

## 環境を構成する要素

室内での人間の温冷感に影響を与える環境要素としては、空間の温湿度、室内の壁や床、天井の表面温度、室内の気流の速度がある（人間側の要素として着衣量と代謝量がある）。

設計においては、住宅本体の断熱と蓄熱、日射の遮蔽・取得、吸放湿と防湿・透湿、通風と気密、換気のバランスを取り、環境要素をどう制御するかを考えることが大切である。特に防湿性と気密性は混同されやすく、「高断熱高气密住宅は息苦しい」というような誤解を招くことがある。熱と湿気と空気がどのように関係し合い、それぞれどのような制御が可能であるかというのを、居住者にも設計者にも丁寧に説明する必要があると日々感じている。

快適さには、温湿度や気流だけではなく明るさや音、素材感も関係する。大きな窓は光や景色を取り込むが、熱の取得・損失を増加させ、室の防音性も低下させる。吹き抜けは解放感のある気持ちのよい空間をつくることができるが、冷暖房を効率よく行うことは難しく、冬季暖房時に不快な冷気が降りてくることがある。現在（2020年）のように室内の空気質や換気が注目される場合には、熱負荷の増加には目をつぶっても換気量を増やしたいという要望もあるだろう。環境を構成する要素にはこのようにその影響がトレードオフの関係にあるものも多い、ということを知っておくことが大事である。

## 環境の調整・制御は誰が行うのか

様々な選択肢がある中で何を重視するかは居住者の好みによる。

住宅の熱性能を高めた上で、機械設備で制御された空間を好む人もいるだろうし、太陽や風を取り込むパッシブな住宅を好む人もいるかもしれない。このような住宅では、居住者が自分で環境を調整できる仕掛けを作っておくことが大事で、季節に応じた日射の取り入れ・蓄熱と遮蔽、夏季の夜間通風により蓄冷、断熱雨戸の開閉で熱損失を減らす、といった住まい方の工夫で、エネルギーをあまり使わずに温熱環境をより良いものにすることができる。このようなパッシブな住宅で快適に暮らすには、住まい手がよく考えてアクティブに動く必要がある、ということも大事な視点である<sup>3)</sup>。

いずれにしても、居住者が満足できる環境を設計者がつくりあげる、環境工学者はそのための技術的な支援をする。あるいは一緒になってつくり上げることができるようになれば良いと思う。



写真3

京町家の深い庇は夏季の日射を遮り、冬季はこのように室内に日射を取り込むすぐれた仕掛けである。断熱雨戸やハニカムスクリーンを併用して断熱性を高めることで、このような大きな開口と省エネも両立できる。

## 【参考文献】

- 1) Ekasiwi, S.N.N., N.M. Abdul Majid, S. Hokoi, D. Oka, N. Takagi, and T. Uno. 2013. Field survey of air conditioner temperature settings in hot, humid climates: Questionnaire results on use of air conditioners in houses during sleep. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 12(1):141-8
- 2) Liu Han, Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, and Chiemi Iba. Development of blood circulation prediction model for the design of healthy bathing thermal environment, Part 1: Experiment of human physiological response considering blood flow and dehydration during bathing. *日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学*, pp.181-182, 2020.9
- 3) 伊庭千恵美: 住まいの温熱環境と省エネルギー「スマートでアクティブな」環境調整で健康な住宅を, *建協会報*, 京都府建築工業協同組合, No.96, 2014

## 「応急仮設住宅の温熱環境」

修士課程 1 回生 難波良樹

### 仮設住宅の温熱環境に関する現状と課題について

災害大国である日本では近年、地震や豪雨など、特定の地域に甚大な被害をもたらす自然災害が毎年のように起こっている。災害によって住む場所を失った人々に対し、応急仮設住宅（以下、仮設住宅）が建設され、供与される。仮設住宅の建設時には低コストで短工期かつ大量供給といった要素が優先されるため、恒久住宅と同等の環境性能を与えることは難しい。これまで仮設住宅の環境に関して多くの研究がなされてきており、その成果もあってか、環境性能は近年かなり向上してきたといえる。しかし、夏の暑さ、冬の寒さや結露やカビの発生など、入居者が温熱環境について抱える問題はなくなるのが現状である。

そこで仮設住宅の仕様を決める都道府県等の自治体や建設を行う業者に対し、単に「もっと断熱材を増やしてくれ」などと求めれば良いという話でもない。上述の通り災害時にはできるだけ早くたくさんの人々を助けるために、短期間で多くの仮設住宅を建設することが求められる。断熱材など仕様の変更があった場合、コストの増大や工期の遅れに繋がり、被災者への供与が遅れる恐れがある。また利用終了後の再利用システムにも支障が生じてくるという。

### 研究での取り組みについて

こうした制約の中で、筆者らが取り組んでいる研究では仮設住宅の温熱環境改善のためにできるアプローチの一つとして、「入居後において、入居者自身の住まい方の工夫や、入居者あるいはボランティア等、専門ではない人でも実践できる改善策」を提案することを重視している。具体的には、2018年西日本豪雨で被災した岡山県倉敷市に建設された仮設住宅について、実際の仮設住宅の環境や住み心地がどのようなものを把握するために、入居者への聞き取りや温湿度実測といった現地調査、住宅モデルに気流解析手法を適用した室内の温湿度分布の評価を行っている。また倉敷市ではプレハブ（軽量鉄骨造）・木造・トレーラーハウスといった異なる構造の仮設住宅が建設されているため、それぞれに対し温熱環境の課題を明らかにした上で、改善策を示したいと考えている。

### 被災者の生活環境を改善するために

仮設住宅はあくまで仮設であり、恒久住宅ではないため、ある程度環境性能が低くても仕方がないと考える人もいるかもしれない。しかし仮設住宅は、被災者の生活手段の確保だけでなく、被災者が災害から立ち直り、人生の新たな一歩を踏み出す「復興」の前段階を担う場という大きな役割があると考えられる。したがって、その新たな一歩を踏み出す準備の場として、その環境をより快適なものにすることは極めて重要だろう。上述のとおり、供給側に対し仮設住宅の高性能化を単に求めるだけでは現実的でないが、より住み心地のよい住宅を提供することの必要性を訴え続けていくことが大切であると考えられる。仮設住宅供給を所管する内閣府では柔軟に運用できる制度の設計であったり、設置者である都道府県等の自治体では用地の確保や迅速な対応体制の強化であったりと、それぞれの役割がある。筆者らは建築環境工学の立場から、入居後における効率的な温熱環境改善手法を検討し、被災者に示すことに加え、実際に建設・供給を行う事業者には、居住後にも環境改善を図ることが出来る余地を残しておくことを提案し、被災者の生活改善に貢献したいと考えている。



写真1 軽量鉄骨造の仮設住宅  
(岡山県倉敷市)



写真2 木造の仮設住宅 (岡山県倉敷市)



写真3 トレーラーハウス型仮設住宅  
(岡山県倉敷市)

### 【参考文献】

- 1) 難波良樹, 伊庭千恵美, 小椋大輔:「倉敷市のトレーラーハウス型応急仮設住宅における温熱環境の改善点の検討」, 日本建築学会近畿支部研究発表会, vol.60, pp.273-276, 2020
- 2) 大水敏弘:「実証・仮設住宅 東日本大震災の現場から」, 学芸出版社, 2013

## 「建築における湿害の予防・対策について：旧甲子園ホテルでの事例を中心に」

博士後期課程 3 回生 福井一真， 修士課程 2 回生 山田皓貴

### はじめに

序文にある通りヒト・モノ・建物それぞれに与える影響を考慮し、快適または適切な環境を設定することは難しい問題である。このうち、特に建物にとって環境が適切でない場合には、空気中の水蒸気や雨水、生活水といった水分が原因となり、建築物の機能や性能が損なわれたり、居住環境の悪化が引き起こされたりする湿害が大きな問題となりうる。

近年では、長年蓄積されてきた知見をもとに「日本建築学会環境基準 AIJES-H0003-2013 建物における湿害の診断と対策に関する基準・同解説」が日本建築学会より発行され、これを参考に国際規格 ISO が発行されようという動きがあり、湿害は国際的にも関心が高まっている問題といえる。同基準の序では、湿害の事例が後を絶たない原因として、「条件や現象の多様さ」、「建物の構造や機能、居住者の生活スタイルは千差万別であり、そこに気候条件のばらつきが絡んでいる」ことが挙げられている。本研究でも、例えば、環境条件や水分の浸透経路を考慮した粘土瓦の凍結融解による劣化に関する研究<sup>1)</sup>、近年増加しているガラスのカーテンウォールのスパンドレル部における結露現象に関する研究<sup>2)</sup>、蒸暑地域におけるカビの生育リスクについての研究<sup>3)</sup>のように、多様な条件において起こりうる現象を把握し、解決策を確立しようとする研究が多く行われている。ここでは特に、文化的価値をもちながら現在も学舎として使用されている旧甲子園ホテルでの事例について述べる。

### 旧甲子園ホテルにおける湿害の事例<sup>4),5)</sup>

兵庫県西宮市にある旧甲子園ホテルは遠藤新の設計により 1930 年に竣工し、現在は武庫川女子大学の学舎として使用されている。この建築物では現在、修復のために用いられたものも含め 2 種類の石材が外装材として用いられており、その物性や、雨水の供給や夜間放射といった環境条件の違いに応じて変色、塩の析出、藻類の繁殖、乾湿や凍結の繰り返しによるひび割れや剥離といった実に様々な湿害が観察されている(写真 1、2)。さらに、その対策として防水処理やモルタルを用いた補修が行われているが、そのような箇所でも劣化が生じており、状況はかなり複雑である。

現状としては、使用されている石材について、採石場の閉鎖により同じ種類の石材で交換することが難しくなっていること、さらに、石材自体に文化的価値があることを踏まえ、観察されている劣化のうち最も深刻な被害である石材の剥離や欠損に焦点を絞り、現地調査や、気象条件や物性値の測定といった地道な検討により劣化のメカニズムの検討を行っている。今後、これらの検討をもとに劣化を抑制するための対策を講じる予定である。

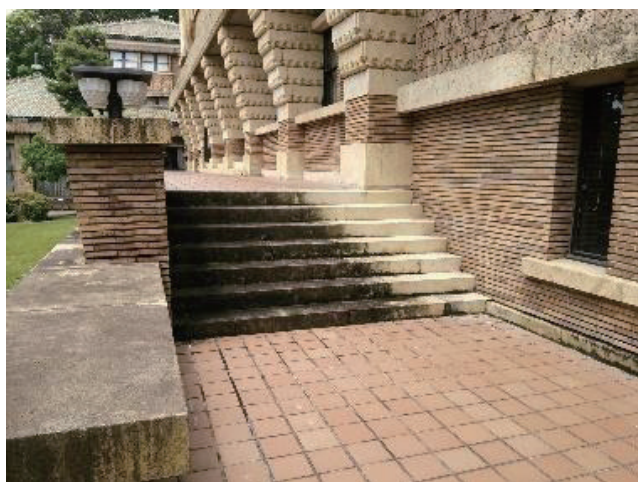


写真 1

旧甲子園ホテルでの湿害の例として、屋外では降雨を受ける部分の石材が藻類の繁殖により黒く変色している。この石材は比較的水分を通しやすく、方位によっては乾湿の繰り返しが原因と考えられる剥離も観察された。



写真 2

天空に開いた屋上テラスでも石材が剥離を起こしている。排水の悪さや夜間放射により温度が下がりやすいことから、降雨により供給された水分が凍結融解をおこすことが原因と考えられる。

このように、湿害の予防・対策を考える際には、個々の建築部材のおかれた環境、材料などの特有の条件に注意する必要がある。例えば、気候変動や、改修による建築や室の用途の変更などがあれば、考慮すべき条件はより複雑になるかもしれない。明治時代のレンガ造建築がイベントスペースとして再利用されている例では、空調の使用が内壁表面での塩の析出に影響を与えている可能性が示されている<sup>6)</sup>。また、特有の条件を適切に考慮すれば、起こりうる湿害や、既に起こっている湿害の原因や解決策をある程度まで推察することができるような幅広い知見が既に蓄積されつつある。しかし、すべて全ての問題に有効な方策を講じることは依然として難しい。使用者のニーズに応じて、材料の保存や美観、各種の機能性などのうち何を優先し、どのような種類や程度の湿害に対して予防策や対応策を講じるべきかという判断も、設計者や技術者にとっての課題といえる。

#### 【参考文献】

- 1) 植田あゆ美, 伊庭千恵美, 銚井修一, 小椋大輔. 温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究: その5 実環境条件が塀瓦の含水率分布に与える影響. 日本建築学会 2016 年度大会 (九州) 学術講演梗概集, 環境工学 I, pp. 1375-76.
- 2) 権藤尚, 三原邦彰, 銚井修一. ガラス面結露対策のシミュレーション検討: ガラスカーテンウォールスパンドレル部の結露防止に関する研究 その2. 日本建築学会環境系論文集, vol. 81, pp. 697-706, 2016.
- 3) 孫雪萊, 小椋大輔, 松田まりこ, 三浦尚志. 蒸暑地域における住宅の高湿問題に関する研究: RC 住宅の温湿度環境の調査と住宅モデルの熱解析. 日本建築学会 2019 年度大会 (北陸) 学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 7-8.
- 4) 山田皓貴, 伊庭千恵美, 宇野朋子, 福井一真, 小椋大輔. 甲子園会館に用いられる凝灰岩外装材の保存に関する研究—現地環境条件調査と物性値測定による劣化メカニズムの検討—, 日本文化財科学会第 37 回大会, pp212-213, 2020.
- 5) Koki Yamada, Chiemi Iba, Tomoko Uno, Kazuma Fukui, and Daisuke Ogura. Investigation on deterioration mechanism of tuff stones used as exteriors at the former Koshien Hotel. In proceedings of the 12th Nordic Symposium on Building Physics, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017220008>
- 6) 西村奏香, 小椋大輔, 水谷悦子. 歴史的煉瓦造建築物の塩類風化に関する研究—内壁の塩析出メカニズムについての検討—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, vol.58, pp.157-160, 2018.

## 「屋内環境における文化財資料の劣化と収蔵・展示施設の計画・運用について」

修士課程 2 回生 石川和輝

### 屋内環境における文化財資料の劣化と温湿度制御の目標について

博物館をはじめとした文化財資料の収蔵・展示を行う施設の内部でも、資料のまわりの温湿度・空気質・光環境などの条件によっては、さまざまな劣化現象が生じうる。特に、適切でない環境温湿度が引き起こすものとして、温湿度の急変動による材料の変形、金属腐食や紙の加水分解といった化学反応の促進、カビや虫の繁殖による生物被害などが知られている。

資料の安全な保存を目的とした温湿度制御の目標値は、ICOM、IIC や ASHRAE [ 註 ] といった機関により、これまで示されてきた<sup>1),2)</sup>。しかし、これらの環境基準は、環境側の条件 (例:許容される温湿度の幅や変動速度) や適用できる資料側の条件 (例:素材や形状) について明確でない部分を残しており、劣化と環境条件の関係性についてより詳しく検討した内容に更新していく余地を残しているだろう。

### 実際の文化財収蔵・展示施設と環境制御の方法について

実際の文化財収蔵・展示施設には、窓の日射遮蔽や熱的緩衝のための二重壁構造、エアタイトケースの利用など、外気や滞在者に由来する影響を緩和し、環境制御をしやすくするための工夫がみられるものもある。しかし、その一方で、収蔵・展示環境の温湿度制御を行う設備が設置されていない施設が多数存在することや、環境制御に関する専門家が不足していることが全国的な調査や現場の報告の中で挙げられてきた<sup>3),4)</sup>。本研究室においても、京都市内の博物館を対象とし、収蔵室を中心とした保存環境の調査を 2018 年から継続しておこなっている。そこでは、計画当初に想定していない室用途の変更や空調設備の更新、換気経路に関する設計上の問題、負荷に対して過大な空調容量や室内温湿度のセンシング、モニタリング設備の不備、また、換気量制御や空調制御において現場の環境管理に関する人員の不足を十分に考慮しない建築・設備仕様が確認された。さらに、それらが収蔵室の過度な高湿度や温湿度の急変動といった、資料にとって不利な環境の形成に繋がる事例がみられた<sup>5)</sup>。

文化財収蔵・展示施設の設計・運用に求められる条件については、資料の安全な保存と省エネルギー、マネジメントの観点から、これらを両立させられるような環境制御の方法が検討されてきた。例えば、本研究室では先に述べた博物館の収蔵室の一つを対象とし、空調の新規導入による環境制御に加え、建築的仕様の変更により空調負荷を低減する方法の提案を目的として検討を行ってきた<sup>5),6)</sup>。ここで、空調負荷を減らすことは、省エネルギー需要に対するものにとどまらない。例えば除湿においては、除去した水をタンクから手で排水する必要があるため、除湿負荷の低減は、運用者にかかる負担を減らすことに繋がる。他の関連した研究においても、空調の運転に加えて建築的な改修や外気温湿度によって換気量の制御をして負荷を減らす方法、換気方法の工夫や調湿性材料の利用により空調を用いずに温湿度制御を行う方法などが検討されてきた<sup>7),8),9)</sup>。しかし、現状で、収蔵施設全般について、要求される環境条件に対しどのような制御の在り方が望まれるか、具体的な目安を示すには至っていないと考えられる。さらに、展示環境については、来訪者の滞在による熱水分負荷とその経時変化、資料の保存に適切な環境条件が滞在者の快適性と合致するとは限らないなど、考慮すべき課題が増え、より応用的な問題となりうる。

### 文化財収蔵・展示施設の計画について

文化財資料の収蔵・展示施設の建築・設備の計画に関しては、資料をとりまく環境が劣化に与える影響を十分に検討して制御の目標を設定していくこと、また、文化財の管理を行う現場の事情に配慮し、設計意図と運用のミスマッチが起きないように環境制御の方法を考案していくことが必要だろう。そのためにも、文化財収蔵・展示施設に対する建築環境工学的な知見の益々の蓄積と、それらを総合して設計活動に還元していくことが望まれる。



写真1 収蔵庫の例1



写真2 収蔵庫の例2

【註釈】

ICOM: International Council of Museums (国際博物館会議)

IIC: International Institute for Conservation (国際文化財保存学会)

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (アメリカ暖房冷凍空調学会)

### 【参考文献】

- 1) 三浦定俊ら, 2016, 『文化財保存環境学 第2版』, 朝倉書店
- 2)ASHRAE, 2019, 『2019 ASHRAE Handbook—HVAC Applications』 Chapter24
- 3) 佐野千絵, 2007, [報告]文化財公開施設の空気調和設備等の設置状況—保存環境調査から—, 保存科学, 46, 301-310.
- 4) 神庭信幸, 2011, 東京国立博物館の保存環境の管理. 文化財の虫菌害 61号(2011.6), 3-9
- 5)Kazuki Ishikawa, Chiemi Iba, Daisuke Ogura, Shuichi Hokoi, Misao Yokoyama, "Commissioning of air-conditioning and ventilation systems in a public museum storing historical cultural properties", REHABEND 2020, Abstract No.408, September, 2020.
- 6) 石川和輝, 伊庭千恵美, 小椋大輔, 鉦井修一: 空気の移動を考慮した熱水分移動解析による博物館収蔵室の温湿度・気流性状の分析, 日本建築学会大会(関東), 2020.9 (COVID19対策のため中止、梗概集に掲載)
- 7)Hans Janssen et al.,2013, Hygrothermal optimization of museums storage spaces. Energy and Buildings, 56, 169-178.
- 8) 和田拓也, 小椋大輔, 鉦井修一, 伊庭千恵美: 2019, 法隆寺金堂焼損部収蔵庫における壁画の保存・公開に関する研究 数値解析による小屋裏の送風ファンによる環境調整方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, 75-76, 2019.7.
- 9) 石崎武志ら, 2016, 空調のない文化財展示・収蔵施設内の温湿度環境解析および環境改善の試み, 日本建築学会大学術講演梗概集(九州), 2016.8.



# 「遺跡・遺構・磨崖仏など屋外文化財の保存・公開方法～元町石仏の保存を事例に～」

教授 小椋大輔， 助教 高取伸光

## 1. はじめに

当研究室では、文化遺産の保存と公開における劣化進行の抑制を目的とした物理環境の制御の目標値設定とその方法を明らかにするための研究を行っている。ここでは、その中でも建造物、遺跡、遺構など屋外にある文化財（以下、屋外文化財）を取り上げた保存の問題を考えてみたい。文化財は、その物が有する価値（オーセンティシティ）を損ねるような急激な劣化進行が生じないように保存し、後生に引き継ぐこと、また、それを公開し、その価値を広く知ってもらうことの両方が重要であるが、保存が担保された上で公開を行うことが原則といえる。これまで多くの屋外文化財は保存のために樹脂処理を行うなど文化財自身の強度を上げることによって対策を講じることが多かったが、劣化進行の要因をできる限り取り除く有効な対策の一つとして環境制御による保存方法の重要性が増してきている<sup>1)</sup>。

## 2. 文化財と劣化現象とその要因

文化財の劣化現象と物理環境の関係は、劣化現象の要因となる現象から整理することができる。例えば、筆者らは敦煌莫高窟第285窟壁画の劣化要因の検討を行い、表1に示すような劣化現象と要因の関係について整理を行ったものである。変色・褪色、亀裂・剥離・剥落、カビ等による汚損は、光、温度、湿度等の環境要因による影響が大きい<sup>2,3)</sup>。損傷の要因の一つであるとして、気流による砂粒子等の衝突も環境要因に含まれる<sup>4)</sup>。虫等の生息場所の温・湿度等は重要な要素の一つと考えられ、環境要因が間接的に関係している。

表1 敦煌莫高窟第285窟の劣化現象と要因<sup>2)-4)</sup>

劣化現象	要因となる現象
変色・褪色	光、温度、湿度等による化学変化
亀裂・剥離・剥落	光、熱膨張・収縮、湿潤膨張・乾燥収縮、凍結・融解、塩類析出
汚損	微生物（カビ等）の生長、動物（昆虫、鳥等）の排泄物や分泌物、落書き・横写痕跡
損傷	生物、人等による接触、気流による砂粒子等の衝突

## 3. 屋外文化財の保存・公開における環境条件と制御について

屋外文化財は、地盤との接し方や晒される屋外環境の違いと、それを構成する材料の違い、またそれを保護する覆屋のような保存管理施設などの有無を含めた違い等があり、それぞれの屋外文化財が抱える劣化現象は、表1で示すように複数あり、対象ごとに主となる現象は異なる。多くの文化財が常に劣化進行の懸念があるため、その現象の要因となる条件を明らかにすることが保存・公開のためには必要である。

その中で筆者らが取り組んできている屋外文化財の一つである元町石仏という磨崖仏を例に紹介する<sup>5)</sup>。

元町石仏は、1934年に国指定史跡に指定された大分市を代表する磨崖仏の一つである（写真1、2）。磨崖仏は、岩壁に直接彫られた石仏であり、空間側の環境だけでなく岩盤を通じた熱や降雨、地下水などの影響も受けるため劣化の生じやすい環境にある。近年では、特に冬期に塩析出やそれに伴う劣化、いわゆる塩類風化が懸念されており、複数年に亘る現状把握と現地での各種対策の予備検討結果を踏まえ、その対策として2015年11月に覆屋内温湿度環境を調整することで硫酸ナトリウム（以下  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ）による塩類風化を抑制することを目的とした覆屋改修が行われた。具体的には塩類風化を進行させる  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  が Thenardite の状態をとらない高湿環境条件が設定され、それを満たすように覆屋の断熱性向上、気密性向上、日射遮蔽性向上を目的とした窓・扉の断熱・気密化、日射遮蔽板の設置、常時閉まるような扉の設置などの改修が行われた。図3に  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  の



写真1 元町石仏を保護する覆屋



写真2 元町石仏薬師如来像（膝部を中心に塩の析出がみられる）

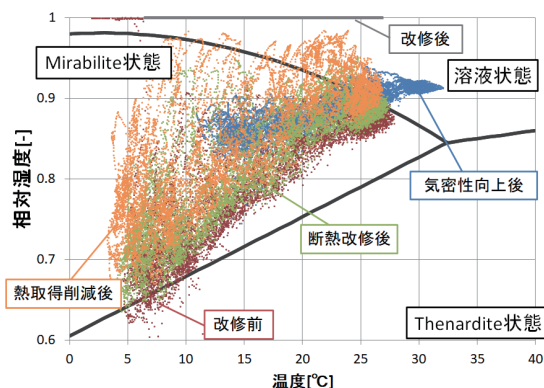


図 石仏膝部の1時間ごとの温湿度計算値  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  の相図の関係

温湿度と相状態の関係を表す相図に、石仏の劣化進行が懸念されている膝部の改修前後の温湿度の計算結果を重ねたものを示す。図より、改修前では石仏膝部が冬期に Thenardite の相状態を取るが、改修後にはその相状態にならないことが分かる。結果として、改修後には  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  の塩析出がほとんど生じず、劣化進行を大幅に抑制できていることが確認された。

ただし、高湿であるが故にカビの発生は抑制できておらず、観覧環境としての管理の課題と、析出の抑制された塩が石仏表面に蓄積してくるため脱塩を定期的に行う必要があり、特に後者の方法の開発が求められている。当研究室では脱塩手法の物理化学的な基礎理論から検討を進めている<sup>6)</sup>。

以上のように、屋外文化財の保存・公開上の難しい所ところは、文化財の劣化対策といった保存の観点だけでなく、観覧者の存在を考慮した公開の観点から環境条件を設定する必要があることである。全ての要求条件を満遍なく満たす解があれば良いが、多くの場合満たすべき条件の優先順位をつける必要がある。

#### 4. 屋外文化財の保存・公開のための環境設計

「1. はじめに」で述べたように文化財の保存・公開のための環境設計において、まず保存の観点から環境条件を考える必要がある。その際、現状把握を元にした文化財の劣化原因を同定し対策を講じることが求められる。そのための検討手法の一つとして当研究室では数値解析いわゆるシミュレーションを用いることが多い。上の例で挙げた元町石仏では、計測だけでは分からない材料内部の温湿度等を把握しつつ劣化現象の形成メカニズムを明らかにすることや、保存対策の効果を定量的に予測することができた。

上記のとおり、劣化要因が特定でき環境条件が設定できたとしても、覆屋などの建築的対応や、空調などの設備的対応により環境を実現させる方法はオーセンティシティを前提とした条件の下で考える必要がある。また、環境制御の運用方法、複合的な劣化現象が生じた場合の環境条件の設定方法、今後の気候変動を考慮した文化財の劣化対策など課題も多い。

これらを考慮した環境設計手法を確立するために、常に個々の文化財の現状に向き合いながら、保存・公開のための環境設計におけるより最適解を導き出せるような汎用的な技術を開発していければと考えている。

##### 参考文献

- 1) 建石 徹：模擬古墳 一遺跡・遺物の保存と活用を考えるための実験的取り組みー ①史跡の現地保存と遺跡の露出展示ー取り組みの理念と歩みー、考古学研究、第 67 巻第 1 号 . pp.12-16, 2020.
- 2) D. Ogura, S. Hokoi, T. Hase, K. Okada, M. Abuku, T. Uno: Degradation of Mural Paintings of Mogao Cave 285 in Dunhuang, Proceedings of the 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP 2013), Vienna, Austria, September 9 -11, pp. 499-506, 2013.
- 3) 中田雄基, 銚井修一, 小椋大輔, 岡田健, 蘇伯民, 宇野朋子, 高林弘実, 渡辺真樹子：敦煌莫高窟第 285 窟壁画の劣化要因の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 . D-2, pp. 301-302, 2014
- 4) Akane Mikayama, Shuichi Hokoi, Daisuke Ogura, Ken Okada, Bomim Su: The effects of windblown sand on the deterioration of mural paintings in cave 285, in Mogao caves, Dunhuang, Journal of Building Physics, pp.1-10, May 30, 2018
- 5) 高取伸光, 小椋大輔, 脇谷草一郎, 安福勝, 桐山京子：覆屋の改修が石仏の塩類風化に与える影響の熱水分移動解析による評価 一元町石仏の保存に関する研究 その 2ー, 日本建築学会環境系論文集, 第 85 巻, 第 768 号, pp.137-147, 2020.2
- 6) 高取伸光, 小椋大輔, 脇谷草一郎, 安福勝, 桐山京子, “電荷を有する多孔質材料中の熱水分塩同時移動と浸透現象”, 日本建築学会近畿支部研究報告集・環境系, 第 60 号, pp.313-316, 2020.