

随想

湿気研究を振り返って

京都大学 名誉教授 銚井 修一



1. はじめに

建築環境工学の湿気分野の研究を続けて45年になります。湿気物性の測定から出発し、文化財保存や人体生理応答へと湿気研究を展開してきました。また、昨年からは中国・南京の東南大学で教育研究をさせていただき、文化財の保存研究を通して感じる物性値の重要性などについて、取り留めもないことを書かせていただきます。このような機会と場を与えていただきましたこと、大変感謝致します。

2. 大学での研究

2.1 建築環境工学と湿気研究の選択

建築学科に入学したのは勿論デザイナーになりたかったからです、設計能力は無いし、構造のような厳密な世界にははじめなさそうだったという消去法により、卒論で、そしてその後の進路として建築環境工学を選択しました。当時は現在と比べるとはるかに環境工学は人気がなかったのですが、その中でも結露のようなジメジメしたことを研究テーマに選ぶような物好きはそう多くはなかったというか、皆無に近い状況でした。誰も選ばない人気の無い領域を選ぶことのメリットは、比較的早く専門家の仲間入りができること、競争が少ないのでゆったりとした気持ちで研究を進められることであり、デメリットは誰も関心を払わないので研究費がなかなか獲得できないことでした。両方を同時に求めるのは虫が良すぎると今でも思います。と書きましたが、人気の無い領域なので研究費を獲得できないというのは一方的な見方であることを、科研の審査にも携わるようになってから理解しました。言うまでも無く研究テーマの重要性、新規性を分かり易く上手に伝えることが重要であり、従って科研を獲得できなかったのは、(そう思いたくはないのですが) 僕が申請したテーマが重要でないと評価されたか、書き方が拙かったかのどちらかであったことを今では理解しています。ただ、総合的に評価して湿気研究を

選択したこと自体は、現在になってみると大変良かったと思っています。結露や湿気に関する問題は以前に比して増加していますし、他の問題と比べて相対的には比重を増しているように思われます(我田引水でしょうか)。少なくとも水は我々の内外に存在するものであり、人間とは現在は健康という観点で密接に関係していますし、これからもあり続けると思われます。我ながら賭けの才能があったのだと思います。

2.2 平衡含水率測定(卒論、修論)

僕が卒論、修論そして学位論文で行ってきたことは、今振り返ってみるとほぼ全てが物性測定に関するものでした。これは全く意図していなかったことで、偶然結果的にそうってしまったということなのか、あるいは、水分移動現象を何らかの(現象論的)数理モデルで表現しようとすると、モデルに現れる(主に流速-ポテンシャル関係に現れる)物性値と合わせて考えざるを得ず、決して両者を分離できないことに由来しているからかもしれません。

卒論、修論では周囲の相対湿度が100%のときに、建築材料が平衡する含水率を測定により求めるということをテーマとしました。卒論ではそれなりの良い結果(と思ったもの)が得られ、丁度京大にいられていた松本衛・神戸大学教授(当時は助教授)に結果を説明したところ、「それは君、原理的におかしいよ。」と指摘され、その時は返す言葉も無く、というより知識も能力も無く、ただ多分呆然としていたのだらうと思います(記憶力が悪くこういう時のことを覚えていないのは、僕が他の人々に対して誇れる能力だと思っています)。従って、卒論はほんの数頁のメモを締切りぎりぎり提出することになりました。ただ、それから一生懸命、松本先生の言われていた熱力学を中心とする理論を勉強し、残念ながらなるほど間違えていたのかと納得したものでした。これは本当に良い経験と勉強になりました。僕のような鈍な人間には、これ位きつい失敗がその後の意欲を沸かせてくれて丁度良かったのだらうと思います。

2.3 熱水分移動係数の測定（博士課程）

博士課程に進んでから暫くは水分移動係数（水分拡散係数）を測定しました。水分拡散係数の測定については、神戸大学・松本先生の下で助手として勤務するようになってからも、卒論生のテーマとして継続しました。その後、熱伝導率の測定に重点を移しました。それは水分移動を扱う場合、温度、熱移動との相互作用が無視できないためですが、その当時は湿った材料の熱伝導率の測定は大変難しいと聞いていたことが、挑戦する気にさせたのかもしれません。修士の二回生のときに出席した日本建築学会・環境工学委員会主催の熱シンポジウムで、当時第一線で活躍されていた研究者の方々の発表を、理解できないながら聞いたことが頭の隅に残っていたように思います¹⁾。熱移動と水分移動は互いに影響し合い不可分なため、熱伝導率を測定すべく温度差をつけると水分が移動し、一定の含水率に対する熱伝導率が測定できないことが最大の問題でした。従って、水分分布をできるだけ一様に保つことができる測定法を考える必要があり、結果として周期法を採用しました。試料の一端を短時間加熱した後冷却するというサイクルを繰り返すことにより、時間平均としては試料の温度を一定とし、それにより含水率分布も一様にしようという機械分野の棚沢泰先生の論文²⁾をベースにしました。

直感的には頷ける考え方ですが、それで本当に一様性が保たれるのか、またどのような測定条件であればそれが満たされるのかなどは、多孔質材料中での水分移動がまだ十分には分っていないため、理解されていませんでした。その問題を、当時松本先生を中心として研究が進められつつあった熱と水分移動を同時に考慮した方程式系を用いて評価を試みました。また、測定法として確立するためには、物性値や測定条件と含水率分布の非一様性、熱の伝わり方の違いとの関係が数式の形で表現される必要があります。ただ、これらの方程式は非線形で解析解は得られないため、摂動法を用いて線形化された方程式群を解くことによりそれらの関係を求めました。その結果に基づき周期法による熱伝導率測定装置を作成し、測定を行いました。この実験で初めて電気回路を自分で作成し、階段状のパルスを生じさせたことが懐かしく思い出されます。

2.4 湿潤時熱伝導率測定法とそのISO化

試料の平均含水率と平均温度を種々変えて測定を行い、それに基づき熱伝導率を求めた結果が図-1に示すものです。試料の平均含水率の増加とともに熱伝導率は増加します。興味深いのは、試料の平均温度が異なると熱伝導率も大きく変化し、平均温度が高いと大きくなるという結果です。これは、湿った材料中では相変化が起き蒸発し

た水蒸気が移動しますが、この水蒸気とともに（潜）熱が運ばれ、見かけ上熱伝導率が増加することによります（飽和水蒸気圧が温度により増加することが大きく影響します）。熱水分同時移動方程式によると、熱と水分の移動は分離できず、従って熱伝導率と呼んでいるものは両者を合わせて定義すべきであるというのが僕の結論でした。さらに、簡易な水分移動のモデルを用いてこの温度による変化を表現し、熱伝導率の温度変化と対応させることにより水分移動係数を液と水蒸気成分に分離して推定できることなどが分りました。また、平均温度、平均含水率を一様にしようという周期法においても系の非線形性により平均の含水率には（温度にも）非一様性が生じることを示すと共に、測定に必要な振幅と周期、温度測定位置などについても測定のための公式を導出しました。

当時は考えても見ませんでした。名古屋工業大学の水谷先生のお奨めがあり、この結果をISO化することにし、2016年にISO16957として発行されました。基準の類に殆ど関心の無かった僕ですが、近年はTC205（Technical Committee 205）、TC163の委員としてISOに参加する中で、その重要性が理解できるようになりました。このような国際的なスタンダードは大袈裟に言うと、国力を確保し維持するためにも必要なものであると思うようになってきました。

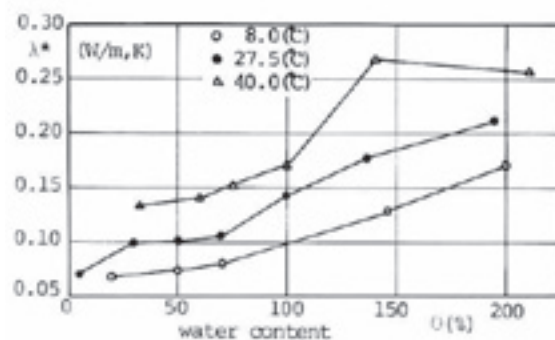


図-1 平均含水率 θ と熱伝導率 λ^* の関係（軟質繊維板）

2.5 物性値測定の重要性

湿潤時の熱伝導率とともに、当然前述の平衡含水率、水分拡散係数などの水分移動係数が水分に関する問題の解析や評価には必要になります。測定法については建築学会の湿気物性に関する測定規準³⁾などに纏められていますが、実際の測定は日本では、特に大学などではあまり多くなされていません。水分物性測定は通常長時間を要する地味な作業であり、新しい知見を得ることに重点を置き、比較的短期間のうちに成果が要求される近年の研究環境とは相性が良くないためかと思われます。ただ、物性値の重要性は明らかであり、公的な研究機関で

の水分関係の物性値測定システムの完備が望まれます。アメリカ、カナダでは、住宅メーカー、不動産業界などの民間も資金を提供して集中的に物性測定を進め、水分に関する物性資料を完備させており⁴⁾、日本の状況とはかなり違います。物性値データベースが完備していることは関連業界の体力を示しているように思われます。

3. 中国での湿気関連研究

3.1 南京、東南大学

ところで話は代わりますが、昨年から中国・南京市にある東南大学の建築学院で教育と研究に携わるようになりました。毎月のように中国に行っていることを話すと、よくそんな遠い所に行くねという反応をされますが、関空から3時間前後で南京の禄口空港に到着します。北海道より少し遠いという程度で、僕にとってはむしろ気分転換にもなっています。また、南京の人口が820万人（2013年）に達していることをご存じない方も多いかと思いますが、人口2300万人の上海の西の江蘇省には、蘇州1300万人（2013年）、合肥790万人（2016年）などのレベルの都市が多く存在し、南京が州都となっている江蘇省は現在大きな変貌を遂げつつあります。

東南大学は京都大学・建築学科とほぼ同じ位の歴史をもっており、中国では一番歴史のある大学です。キャンパスは大きくは4つに分かれていますが、市内中心の四牌樓のキャンパスに建築学院があり、そこで学部、大学院教育を行っています（他の学院の学部教育は別なキャンパスで行われています）。大学キャンパスは、プラタナス（鈴懸の木）が大変特徴的で、30m以上ありそうな高い木がキャンパスの正門から大礼堂に向かう中央部を占め、独特の美しい景観を形成しています。春から夏には緑が涼しい木陰を提供し、秋から冬にかけては落葉が中庭を敷き詰めます。写真-1の正面奥には噴水と大礼堂があり（写真-2）、その堂々とした姿はなかなかのものです。写真-3の中大院の1階に僕の研究室があります。



写真-1 中央大通のプラタナス(冬景色)



写真-2 大礼堂と噴水



写真-3 建築学院の中心的建築・中大院

3.2 東南大学での教育

東南大学は、中国の「世界一流大学A類」36大学の中の8位に位置付けられる有名大学ですが、中でも建築学院は学科評価がA+であり、清華大学の建築学院とともに中国で一位に位置付けられています。従って、国から潤沢な教育・研究費が投入されており、優秀な学生が集まってきています。建築学院は、正規の教員が130名位で、京都大学でいうと工学研究科と建築学科の間位の規模になります。僕は建築学院の中のArchitecture Internationalization Demonstration Schoolに属しています。大学の国際化を推進するために昨年設立されたもので、最終形としては5つのセンターで構成されることになっているようです。僕が主任となっているセンターは、Architectural Heritage and Environment Research Centerで、文化財の保存と建築環境工学に関係する教育と研究を行うことを目的としています。現在は、教授である僕と准教授の李永輝先生が教員で、大学院生が8名及び秘書の方で構成されています。院生のうち3名は昨年の9月から僕のところに配属された学生です。彼らには僕の拙い英語で苦勞をさせていますが、Japanese Englishを越えてHokoi's Englishに慣れたら、世界のどこに行っても怖いものは無いので勉強になると励ましています。

僕のセンターの修士学生は全員ですが、建築学院の修士学生の多くは東南大学生え抜きの学生ではなく、他大学の学部を卒業した後、かなりの競争率の試験をパスして東南大学の大学院に入学した学生です。出身の研究領域も建築の学生は少なく、機械や農学、情報など幅広い分野から来ています。従って、必ずしも建築の基礎を学んでいない彼らに対して、僕は京大の学部で教えていたことを少しアレンジして教育していますが、今後順調に建築環境工学をマスターしてくれるものと信じています。修士課程は日本と異なり3年間です。十分な教育ができそうに思いますが、前述のように基礎を教える必要があること、中国では就職直後から即戦力となることが要求されるらしく、3年生の前半はインターンシップなどに時間が割かれるため、結局日本の修士課程と同じ程度の研究時間になるのではないのでしょうか。

彼らを教育していて、特に授業で感じるのは、意外とshyであることです。日本人学生が世界で一番shyと思っていたのですが、結構近い感じを持ちました。授業は僕の英語でするため、また専門用語も初めてのことが多いためなかなか理解してもらいづらく、しばしばわかった？と聞くと返事がありません。僕の英語の発音のせいと考え白板に英単語を書きどう？と聞くと、やはり何の返事も無く、じゃこれでどうだと日本の漢字を書くと、頷く学生が見られます。これでは苦勞して日本語を英訳した意味が無かった訳ですが、そこは国際化を標榜するSchoolですから、英語教育で貫いていこうと思っています。言い訳ですが、僕が中国語を話せないのは、彼らにとって良いことであると思っています。

南京にきて感じるのは、やはりその変化の激しさです。いつ来ても身近などこかで建設工事をしており、いつのまにやら新しい建物や施設が作られています。お金の支払いなど何をするのもスマホで行い、紙幣で買い物をするのが肩身が狭い感じです。実際、多少使い古した紙幣だと駄目といわれることもあります（偽札を恐れて）。自転車も街中のいたるところにあり、スマホで使用でき乗りっぱなしでもOKとなっています。授業の資料もプリント配布をするつもりでしたが、スマホで配信（授業補助の学生にってもらって）しています。情報化の進行は早く、良いか悪いかは別にして、今後の展開から目を離せないという気がします。

変化という点では、一般社会に限らず教育機関である大学も例外ではないようです。東南大学も例外ではなく、僕自身が所属する国際化schoolの設立がまさにその一環であることを知りました。また、京大で十年以上に互

り経験した教育改革を進めようとしており、建築学院の教員会議でも、教育の在り方に関して議論が進められています。これは建築学院に限ったことではなく、大学全体としての課題であると聞きました。中国の全国の大学が進めていることなのだろうと思います。

3.3 東南大学での研究

南京（中国）に来て大変幸運だったことは、研究対象に事欠かないことです。日本ではここ10年近く文化財の保存に関係する研究をしていますが（これも水分に関係する研究を続けてきたおかげです）、中国は文化財が山ほどあり、その公開と保存が近年急速に問題になってきているようです。南京市にも南京城壁という大物が存在し、僕もその劣化原因の究明と対策に関与しています。また、孔子廟（曲阜市）や北京の故宮についても調査研究に携わる機会を与えられています。このような文化財に接するようになった理由の一つは、僕が文化財と環境研究センターの教員であることですが、更に（こちらの方が大きな理由だろうと思いますが）、李准教授が「文物保存工程責任設計師」の資格を持っていることが大きく関係しています。

このような文化財の保存に関与するようになって感じるものの一つが、やはり物性値が完備されていないことです。顔料の紫外線劣化や乾燥湿潤による収縮膨張など、環境要因と劣化程度の関係が特に必要となります。

中国では文化財の保存などに関係する建築歴史やデザイナーの方々は多くおられますが、建築環境工学の研究者はまだ少なく、李先生のところに声がかかるようです。その関係で色々なプロジェクトに関与させていただけるので、日本では退職した身ですが、こちら中国では現役の教育者、研究者としてもう少し仕事をしたいと思っています。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会環境工学委員会：第4回熱シンポジウム，熱定数小委員会報告，1974.
- 2) 棚沢泰：湿れる物質（特に土砂）の熱常数測定法（第1報），日本機械学会誌，第35巻，第1号，pp.390-399，1932
- 3) 日本建築学会編：日本建築学会環境基準 AIJES-H001-2006 湿気物性に関する測定規準・同解説，2006
- 4) Kumaran M.K.: ASHRAE Research Project 1018-RP, "Thermal and Moisture Transport Property Database for Common Building and Insulating Materials", 04, 2002.