

## vol.1 材料になりきり材料の気持ちを理解する。

筆者はほぼ40年近くを大学で過ごした。そして研究を通して学んだことも多かった。ただ研究が教えてくれたことは研究課題によって異なる。たまたま今回原稿を書く機会をいただいたので、私の印象に残るいくつかの研究とそれを通して学んだことを、思いつくままにお話ししたい。

今回は防水材料の耐候性研究を通して学んだことである。まずはこの研究の始まりからである。1968年の春、筆者が大学4年になり卒業研究を始めた時、この課題を指導教官の小池迪夫先生からいただいた。

当時の防水の主流は何といってもアスファルトであった。アスファルト防水は、今は普通過ぎて誰も意識しないが、実は衝撃的な建築技術である。それは、縄文から江戸時代までの勾配屋根一辺倒だった、わが国の屋根文化に平らな屋根という、それまで日本人の見たこともないような形態の屋根を付け加えたからである。

アスファルト防水の最初の施工は明治38年の大阪瓦斯ビルとのことである。その後はずっとアスファルトだけが防水材料である時代が続いた。ちなみに明治38年は我が国が日清、日露の戦争に勝ち、国際的に力を付け始めたころである。そしてこれは時代の先端を行く材料であった。時は流れて戦後である。合成高分子化学工業が急速に発達し、今までにない新材料が次々と登場し、これらがアスファルト防水一辺倒であった防水の分野に入り込んできた。筆者が4年生になった頃はそのような時代であった。

新しい材料というと聞こえはいいが、建築では実績がないということと同義である。確かに初期の物性はアスファルトを凌駕している。ただそれがいつまで維持されるのか？初期の物性も大事であるが、建築では耐久性がもっと大事である。しかも建築は非常に長い期間の使用である。この点が他の工業製品と根本的に違うところである。

小池迪夫先生はそのことを懸念し、これら新参の防水材料がどの程度長持ちするのか調べる目的で、屋外暴露試験を計画されていた。そして卒研生として紛れ込んで来た私に、「合成高分子防水材料の耐候性」という課題を担当するようにと指示されたのである。

私はりっぱな装置でデータを取って、卒業論文を作るという夢を描いて選んだ研究室であったが、担当した研究はひたすら試験体を作ることだけであった。先生はすでに当時マーケットに出始めていたほとんどの防水材をメーカーにお願いして取り寄せ、驚くほどの防水材料が実験室の一隅に山積みになっていた。結局試験体作成だけに卒業研究期間のほとんどを使い切った。だから私の卒業論文は、普

通の論文のような実験結果とか考察などというものは全くない。ただ試験体を作りました。お終いである。がんばって文献調査でページ数を増やそうとしたが、やはり出来上りは薄っぺらでお粗末なものであった。後年、自身で研究室をもち学生さんから、「参考にしたいので先生の卒論を見せてください」と云われるたびに、恥ずかしい思いをさせられ続けた。今も大事にとってはあるが、書棚のできるだけ人目のつかないところにひっそりと潜ませている。言い訳がましいが、**写真1**は作った試験体の北海道大学建築学科棟屋上での暴露試験の状況である。これだけの試験体を作ったのだから、それだけでいっぱいだったことを理解していただけると思う。



写真1 試験体の屋外暴露試験（前方建物にじゃまされているが、後方に北大ポプラ並木の一部が写っている。）

その後筆者は大学院の修士課程を卒業して、東京工業大学の助手となり博士論文研究として、この課題を継続できることとなった。耐候性研究では気象と材料劣化の関係を定量的に論ずることが重要である。そのためには、材料を単に外気にさらしただけという暴露試験だけでは不十分で、気象環境とマッチングしたデータ採取が必要となる。そのためそのことを意図した暴露試験を計画、実施した。この時の暴露試験状況を**写真2**に示す。そしてここからは気温や防水層温度も並行して測定し始めた。そのため毎月記録紙の交換のため暴露試験場通いがはじまった。（その後の暴露試験ではさらに紫外線量測定も加わった。）そしてこれら取得したデータは計算機で計算させるため、15分きざみでパンチングカードに削孔した。今の若い方には想像もできないと思うが、当時の電算機利用には、プログラムもデータもパンチングマシンで穴をあけたカードを自分で作り、計算センターに持ち込み、計算をお願いするという方式であった。



写真2 防水材料温度データを取りながらの屋外暴露試験状況 (右下の白い箱に記録計一式が入っている。)

データ採取は自動であるが、これをカードにパンチングするのは人力である。15分刻みで1日分というとならぬ96個のデータとなる。それを暴露している防水材料の種類ごとにつくらなければならないのだから、それだけで一時間位の仕事となる。当初は何も考えずにある程度貯まった頃にカード化すればいいやと考えていた。ところがこれを貯めると大変になることに気付いた。1ヶ月分のカードづくりには何日もパンチング作業をしなければならない。当時の計算センター専任のパンチャーの職業病に、手首に炎症を起こす腱鞘炎があったが、筆者も2ヶ月くらいぶっ通しでパンチング作業をし、とうとう腱鞘炎になってしまった。実は今も当時の後遺症があり、ひどく痛むということはないが手首を十分に曲げられないのはその名残である。

データを貯めると大変なことになることを、身をもって体験したので、その後の屋外暴露試験では前日分のデータを翌日に必ず整理するように心がけた。1日分だけだと小一時間で終わるので、手首への負担が少なくなる。ということで毎日、気象と材料のデータ化を自らに課した。きわめて単調な作業であるが、繰り返しているうちに、前日の天気はまだ覚えているので、材料がどのような状況にあったかが手に取るようにわかる。一方で化学反応速度論を勉強し、劣化を定量的に表現するために(1)式のような劣化式を導出しておいた。

$$1/(n-1) [1/y^{n-1} - 1/y_0^{n-1}] = A \exp(-Bh/T) t \quad (1)$$

(n=1の場合は左辺がln(y<sub>0</sub>/y)となる。)

ここに y：材料の物理量 (私の研究では材料の伸び率を物理量とした。)

y<sub>0</sub>：物理量の初期値

A, Bh：熱劣化試験より求められる係数

n：熱劣化試験より求められる見かけの反応次数

T：材料温度、K

式を見ればわかるように、入力データは材料温度Tと時間tである。だから前日のデータを入力すれば前日分の劣

化を計算できる。毎日この作業をつづけているうちに、天気を見ればどの程度材料が劣化してゆくのか、ある程度予測できるようになった。夏の暑い日は人間もつらいが、材料もつらく劣化が一気に進む。そして曇りや雨の日はほっと一息をつく。

暴露試験を経験した人なら理解できると思うが、作業は孤独である。広い暴露場には自分と材料しかいない。材料に愛おしい気持ちを持つようになるのも当然である。材料の気持ちがわかるようになると、茫漠としていた研究の道筋も自然と見えはじめた。そして研究は一気に完成へと向い、何とか論文をまとめあげることができた。論文を提出し学位を東京工業大学からいただいたのは、1981年8月である。卒論の試験体作成から都合13年間の友情の証であった。

ここからは続編である。話は昨年にワープする。1981年に研究は落ち着いた。自分としてはまあ満足であったが、この研究が何かの役に立ったか問われると、残念ながら社会では全く使われなかった。当時はこんなに一生懸命にやったのにと不満に思ったが、今にして思えば理由がよくわかる。

見かけは大層立派な式であるが、これを使おうとすると材料ごとに、見かけの反応次数n、材料係数AとBhと三つの係数を求めなければならない。しかもそれを求めるためには、かなり時間をかけて数段階の温度での熱劣化試験を行わなければならないのだ。研究に夢中になっていたころは前に進むだけで、周りを見る余裕がなかった。若気のいたりである。ということでこの研究の成果も、私の卒論同様書棚の片隅に追いやられていた。

ところで2020年の夏は暑かった。2019年はそうでもなかったが、2018年もけた外れに暑かった。実際、**図1**に示す気象庁データでも気温が右肩上がりで上昇してきている。そして個人的にはここ数年来、暑さが体にこたえるようになってきている。年のせいかと思い、他のひとにも聞くと皆同じように感じているとのことである。ということは防水材料も苦しい思いをしているのではないか。そして

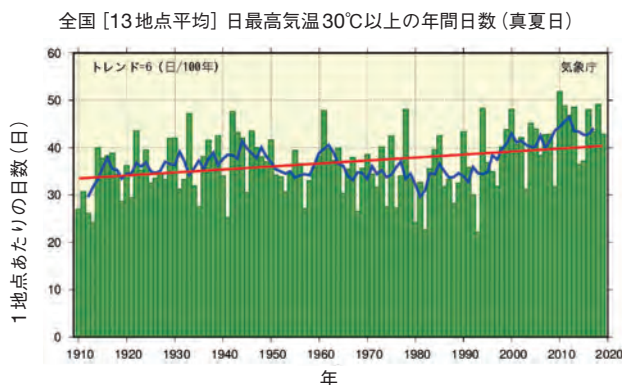


図1 上昇傾向にあるわが国の気温 (気象庁データ)  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html)

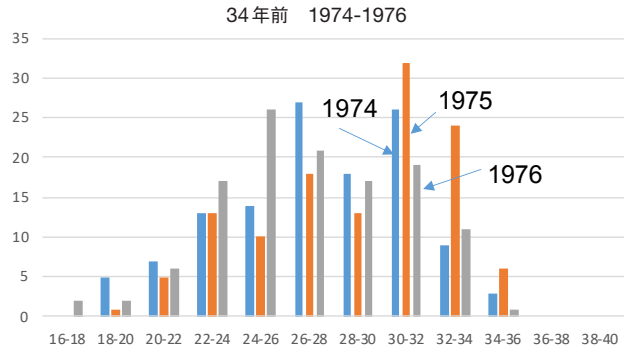
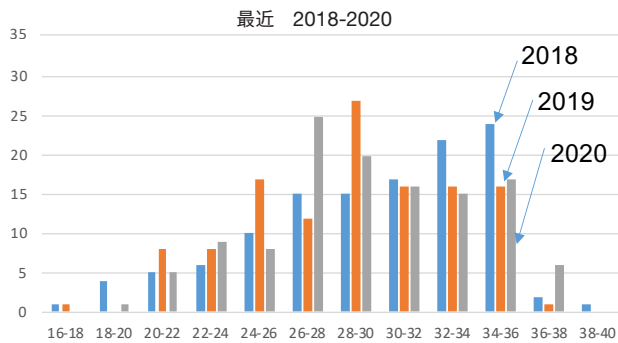


図2 夏期(6月～9月)の日最高温度の頻度(気象庁の気象データを整理)

筆者が研究に熱中していた1970年代に比べて、状況はもっと過酷化しているのではないかと。なんとかこれを定量的に比べられないか。

そしてその時、書棚の片隅に押しやっていた劣化式のことを思い出した。これを利用すれば当時と比べることができるはずだ。そう考えて早速計算をしてみた。(計算手順は文献<sup>1)</sup>による。)ここからは理屈っぽい少し込み入った話になるので、時間のない方は読むのを飛ばしてください。

まずは気温の比較である。図2は気象庁データによる日最高気温の1974-76年と2018-20年の夏期(6月から9月までの4ヶ月間)の温度別積算日数である。最高気温に着目するのは、有機材料の劣化は高温域で急速に早まるからである。そして出現頻度は明らかに高温側にシフトしている。ちなみに夏期4ヶ月間の最高気温の平均値を計算してみると、1974年からの3年間では27.7℃であったのが、2018年からの3年間では29.3℃と1.6℃も上昇している。

博士論文では劣化を定量的に評価することに合わせて、天候に応じて変わる温度環境を、年間を通しての一定温度で表現できれば、一般に理解しやすいのではないかと考えて、「相当環境温度」<sup>2)</sup>という指標を提案していた。わかりやすく言うと、年間を通して防水材料の温度は絶えず変動しており、夏の暑い時は断熱防水ならば80℃を超え、冬には放射冷却により-10℃を下回ることもある。このように変動する温度で防水材料は劣化するが、これを同じ劣化状態となる仮想の一定温度のことである。

具体的に断熱防水のある製品の黒色ゴムシートを例として説明すると、このシートの劣化式は、先ほどの実験をもとに具体的に係数を求めると(2)式で表される。

$$1/6 [(1/y^6) - 1] = 28.8 \exp (-12393.3/T) t \quad (2)$$

つくばで1974年から1976年までの3年間暴露した状態では、当時の材料温度を入力して求めた相当環境温度は36.7℃であった。これはこの期間の3年間の劣化は、一定温度ですっと行うとすると、36.7℃に3年間保持していた

時の劣化と等価ということである。

残念ながらここ3年間の材料温度データを持っていないので、相当温度が1.6℃上昇したと仮定して計算してみた。(これは先ほどの図2で、平均最高温度データが1.6℃上昇していることを根拠に仮定したものである。)

読むのを途中で飛ばしたひとは、この辺から戻ってきてください。結果は「1974年からの3年間の劣化は、2018年からの気象では2.44年に短縮化されている。」であった。最近の高温化は防水材料の寿命を明らかに短くしている。計算を終えた時は、あまりの結果にしばし茫然とさせられた。本当かと自分を疑い再度計算してみたが、答えは同じであった。

40年間書棚の片隅で埃を被っていた若い頃の仕事が、このような形で再登場するとは思ってもみなかった。ゾンビが再び現れて来たような気もするが、一方で防水材料の旧友に再会した気分もする。防水材料は建物の外皮を構成する材料として、建物の最前線で気象と戦い、体を張って我々の生活を守ってくれている。そして彼らも最近の気象の過激化に苦しんでいる。またまた同情させられたのであった。

### 参考文献

- 1) 田中享二, 古澤洋祐: 近年の気温上昇傾向が合成高分子防水材料の熱劣化評価に及ぼす影響: 日本建築学会学術講演梗概集(北陸) pp.1013-1014, 2019.9
- 2) 小池迪夫, 田中享二, 日置滋: 合成高分子防水層の耐候性—その4・屋外暴露による熱の影響の評価: 日本建築学会論文集, 第263号, pp.11-19, 昭和53年1月



### profile

#### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野: 建築材料、建築構法、防水工学



## vol.2 見える化は現象理解の最高の手段

随分昔のことであるが、大学の教養課程から建築学科に移行した時、仲間同士で建築を専攻した理由について語り合ったことがある。(私の卒業した大学では最初は理系という大括りで一般教養の教育を受け、2年生の半ばで希望と成績に応じて自分の専攻したい学科に移行するというシステムであった。)聞いてみると私のように何となく専攻してしまったという人以外にも、電気が苦手だからという人も何人かいた。理由は単純で、電気は目に見えないからというのである。そして私もその感覚をよく理解できた。講義で回路図を見せられ、電気がこう流れていると説明されても、途中で電気の流れが目に見えないからどこか不安なのである。

大学教員時代は実験のため試験装置を作ることが多かった。そして多くの装置では動作や温度の制御が必要であった。周りに製作の実務を教えてくれるひとがいなかったため、秋葉原電気街に行っては店員さんに直接教わりながら、部品を買い求めついでに制御回路も教えてもらったりして、後は自力で組み立てた。結果はというと、必ずどこかにミスがあり一回で思うように成功したことはなかった。一度は動力用の200V電源が漏電していたらしく、感電したこともある。100Vならばビリビリで済むが、200Vはビシッと来るので結構堪える。その時ほど電気が目に見えないことを恨んだことはない。

その点建築はわかりやすい。というより目に見えることを前提にすべてが作られている。頭にイメージしたことを他人に伝達する方法は図面であるが、回路図に比べるとはるかに具体的である。それが証拠に図面には縮尺が記載されていて、それを単純に拡大すれば原理的に実スケールの建築物になる。そして寸法通りに材料を切って組み立てれば、本物の建物は出来上がる。

### コンクリートには すごく微細な空隙がたくさんある

実はこれと似たことを研究の分野でも経験したことがある。私の研究室の課題は防水を中心としたものが多かったが、防水を進めるうちに、防水層単体の話では研究が完結しない場面に遭遇することが多くなった。建築部材としての防水層は厚さが数ミリ程度の薄い膜状の材料であ

り、これをコンクリート下地の上にかぶせるようにして使われる。だから防水層の出来栄は下地の影響を受ける。例えば防水層のふくれである。コンクリートには多少の水が隠れており、それが過剰だと日中日射を受け膨張し、防水層を押し上げるのである。当時はこの問題に悩まされており、ふくれの発生機構についての説明が求められていた。それにはふくれを作り出す相方のコンクリート部分の研究も必要である。このような事情から、その後は研究室の勢力の半分以上をコンクリートの物性研究に注ぎ込むことになった。

ここからは少し話が専門的になり恐縮であるが、コンクリートの細かな話に付き合っていたきたい。固まった後のコンクリートの性質は、基本的にはコンクリートの細孔構造に依存する。特にセメントペースト部分の細孔構造に依存する。コンクリートの外見は石のように密実に見えるが、実は空隙がたくさんある。ただ空隙といっても微細であり、多くは数 $\mu\text{m}$ あるいは数 $\text{nm}$ レベルのものであるため、裸眼では簡単にその存在は認識できない。そして細孔構造では空隙のサイズと量が重要である。これがコンクリートの強度を支配するし、乾燥収縮も支配する。防水層のふくれに関してはコンクリートの透気・透水といった物性が関連するが、もちろんこれにも関与する。だから一般にコンクリートの物性研究者は、この細孔構造に関心をもつ。

1960年代の終わり頃、これを測定する画期的装置が我が国にもたらされた。水銀圧入ポロシメータである。これはコンクリートを真空状態にして内部の水分を除去し、空隙に高圧で水銀を押し込むことにより細孔状態を測定するものである。圧力を高めれば、より小さな細孔にまで水銀を押し込むことができるので、圧力ごとに押し込んだ水銀量を測定することにより、細孔の径と容積の分布を求めることができる。

この装置のおかげで、コンクリートの物性研究は大いに進んだ。そして遅ればせながら私の研究室でも購入し、コンクリートの透水・透気研究に利用した。一般に細孔径が大きく、その量が増えると透気・透水性は大きくなるのだが、これを定量的に知ることができる。当然空隙の多いコンクリートでは隠れ水の量が多くなり、結果として防水層はふくれやすくなる。ということでこの装置は防水層のふくれ研究に大活躍であった。



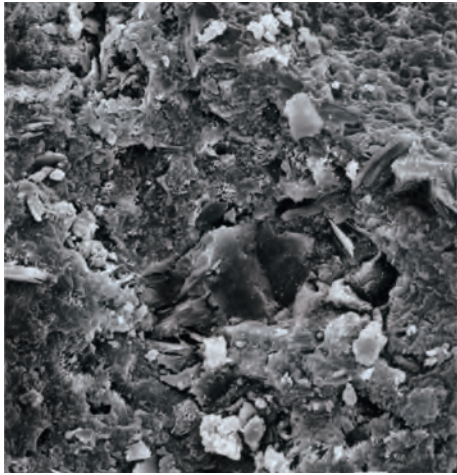


写真1 セメントモルタルの電子顕微鏡写真(倍率1000倍)

それはそれでよかったのだが、得られる細孔構造のデータには隔靴搔痒(かっかそうよう)の感が残っていた。確かに細孔径ごとに積算された細孔量のデータは取れているのだが、コンクリートの中でそれがどのような形で、どのように分布、繋がっているかまではわからないのである。細孔がどのようなになっているかを実際に見たい!

## 細孔構造の見える化

ところで細孔構造を見ようと思っても実は簡単ではない。大方のひとはコンクリートを割って、顕微鏡で拡大すれば見えるだろうと思うに違いない。実は私もそう思った。そして実際に電子顕微鏡で、セメントモルタルの破面を見てみた。写真1に顕微鏡写真を示すが、複雑な形のセメント水和物の凹凸が見えるだけで、細孔がどれなのかさっぱりわからない。まるでウサギ孔に落ちた不思議の国のアリスと同じ状態である。これは困った。

その時ふと思いついたのは、先ほどの水銀圧入ポロシメータである。この装置で細孔量測定を可能にしているのは、常温で液体状態である水銀を利用している点にある。これを加圧すれば水銀が細孔に入りこむ。しかし測定が終わり圧力を下げると押し込まれた水銀が再び外に出てしまう。だからこれを外に出てこないように固化すればよいのではないか。ただ水銀の融点は $-38.8^{\circ}\text{C}$ と極めて低い。さすがに装置全体を冷やすというわけにはゆかない。それならば普通に作業できる範囲で適当な融点をもつ材料はないか。

ここからは材料探しが始まった。低融点はんだとか、思いつくまま探しまくったあげく、ガリウムという金属にたどり着いた。これは融点が $29.8^{\circ}\text{C}$ である。だから $50^{\circ}\text{C}$ 位で液体状態にしてこれを細孔に圧入し、 $20^{\circ}\text{C}$ 位に冷やしてガリウムが細孔から出て来ないようにして、後でゆっくりとガリウムの分布状態を観察すればよい。

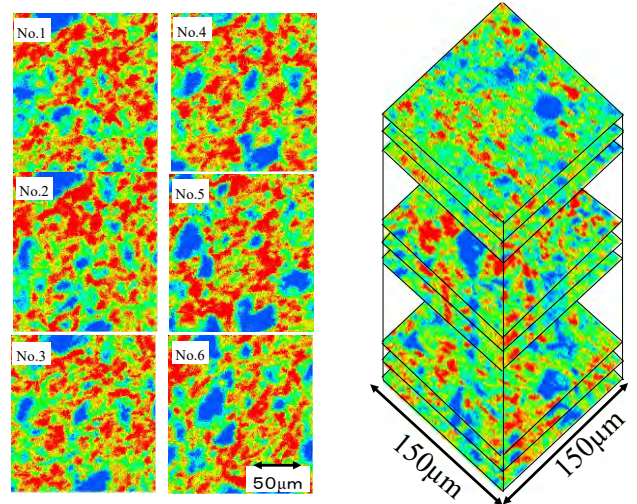


図1 セメントペースト空隙の可視化画像  
(赤が空隙、青は全く空隙が存在しないことを示す。)

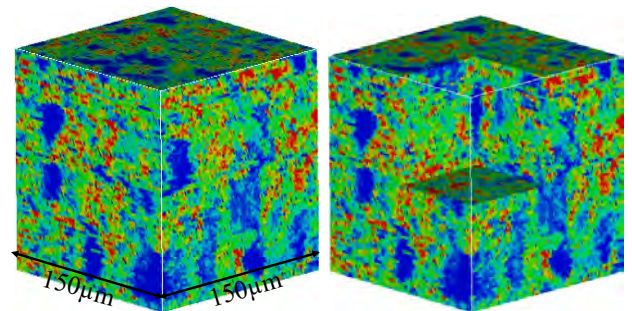


図2 水セメント比60%、材齢7日の空隙構造

次に高圧でガリウムを細孔に押しこむ装置が必要である。幸いなことに私の所属していた研究所には建築以外の分野の先生もたくさんいて、その中のおひとりが超高压物理学を専門としており、超高压装置を作るノウハウを持っていた。また研究所にはマシンショップが併置されており機械工作のプロもいて、なんとか装置を完成させることができた。なかに閉じ込めたガリウムの観察は、電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)という物体表面の元素の面分析装置を必要とするが、これもやはり研究所内の他の先生がお持ちであり、それをお借りして観察が可能であった。

図1が得られた画像である。これはセメントペーストを試料とした時のものであるが、試料にガリウムを押し込んで、EPMAで2次元画像を撮影する。この図の赤い部分はガリウム部分、すなわち空隙を表し、青の部分はペースト本体部分を表している。それ以外の黄色や黄緑部分は、残念ながら現在のEPMAの分解能が $1\mu\text{m}$ であるので、ガリウムとペースト本体とを完全に区分けすることができず、両者が混在して観察される部分である。これが現在のEPMAの分解能の限界である。もちろんもっと分解能に優れた装置が出現すればより詳細に識別できる。

次にこれを少しずつ(2 $\mu$ m程度)表層から研磨しながら多数の画像を撮影し、それらを重ね合わせて立体化する。画像は全データがパソコンに保存されているので、**図2**に示すように任意の面を取り出すことができる。そのため、赤の部分(ここは完全に空隙)を追跡すれば、細孔がどのように繋がっているのかがはっきりとわかる。あるものは裏面までつながっているし、あるものは途中で止まっている。繋がっている部分は優先して水や気体が通り抜ける。水セメント比が大きくなると、赤の部分が増え組織が粗っぽくなっていく。だから水を過剰に加えたコンクリートは通り道が多く残り、水や気体を透過しやすくなることもよく理解できる。ということで防水の観点から下地コンクリートの透水・透気背景がよく見えるようになった。

### コールドジョイントを見る

そして早速これを漏水の多発している部位に適用した。まずはコンクリートのコールドジョイントである。コールドジョイントとは、例えば壁の型枠にコンクリートを打ち込む時、現場では一階の高さ分を一気に打ち込むのではなく、一般には2、3回にわけて打ち込む。一気に打ち込むと材料が分離する、あるいは混練水が上昇してコンクリートの物性が上下方向で極端な差が出来てしまい、均質なコンクリート壁とならないからである。現場での実作業としては、1台目の生コン車からコンクリートを受け取り、半分くらいの高さまで打ち込んだ後、2台目の生コン車の到着を待ち、残りの半分のコンクリートを打ち込む。

ただその時間間隔が空きすぎると、前に打ち込んだコンクリートは凝結が始まっているので、次のコンクリートと一体化せず、**写真2**に見られるように境界線が残る。これがコールドジョイントである。時々打ち放しコンクリート

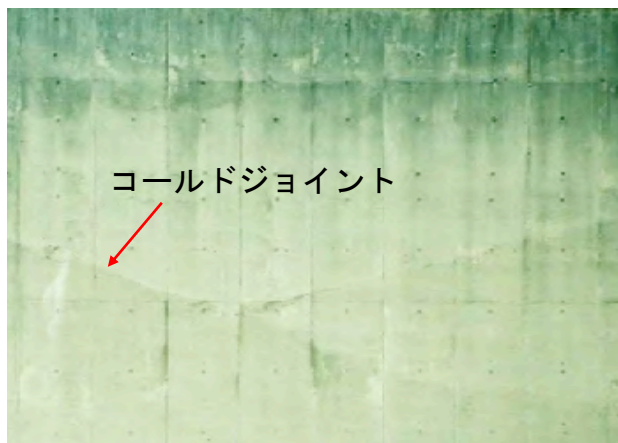


写真2 打ち放しコンクリート壁のコールドジョイント

壁に斜めに走る筋を見ることがあるが、これがそうである。今度打ち放しの壁を見ることがあったら気を付けて見ていただきたい。結構多く見られる。そしてここが水の通り道になる。よく考えてみたら当たり前である。凝結が始まろうとしているコンクリートの上に次のコンクリートが来て、さあ一体になりましようと言われても、簡単に、はいそうですかというわけにはゆかない。

そこで早速先ほどのガリウム圧入法を用いて観察した。**図3**は生コン車の到着時間をイメージして、打ち継ぎ時間を少しずつ遅らせて打ち継いだモルタルでの実験結果である。これには低温施工時と高温施工時のデータも示されているが、主に真ん中の標準的な温度20 $^{\circ}$ Cの列を見ていただきたい。2時間過ぎから赤の部分少しずつ目立ち始めている。4時間ではほぼ横一直線上に並んでいる。はっきりとした水の通り道である。ということで打ち込み時間間隔が空きすぎると、防水上脆弱なラインができるということがよくわかった。ついでに同図には高温時、低温時のデータも示してある。当たり前であるが、高温になるとセメントの水和が早くなるので、水の通り道の出来上がる時間が早くなる。そのため実務では硬化を遅延させるための薬剤を加えて調整する。

ちなみに標準仕様書類のコンクリート工事のところに

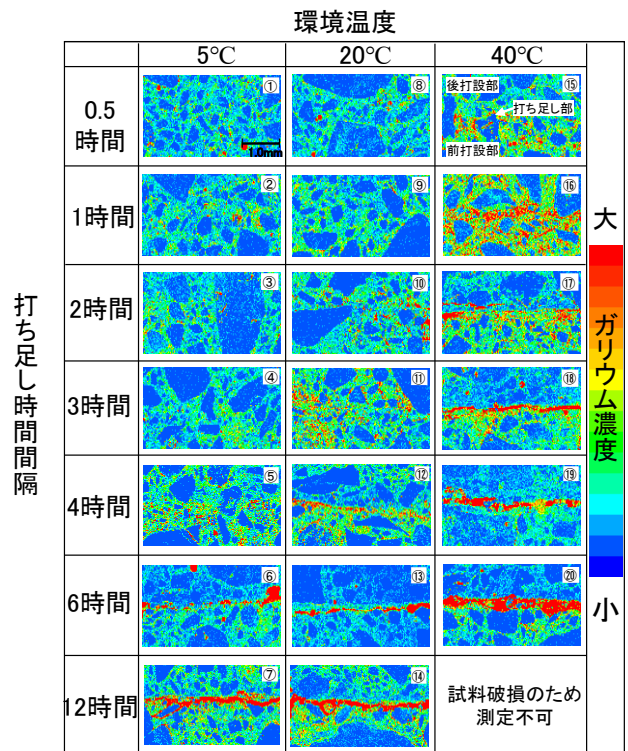


図3 コールドジョイント部の空隙(赤が空隙、青は全く空隙が存在しないことを示す。)



は、普通の温度域では打ち継ぎ時間を2時間から2.5時間以内にしないと指示されている。我々の結果でも、その範囲内ならば赤の部分がごくわずかに点在しているだけで、横にはつながっていない。上下はほぼ一体化している。この結果を見て、打ち継ぎ時間の制限を定めた、当時のコンクリート技術者の判断的確さに改めて脱帽させられた。

## セパレータ部分を見る

次はコンクリートのセパレータ部の問題である。最初にセパレータを説明する。私も学生時代に建築施工の講義でセパレータを習ったはずであるが、細かなことまでは覚えておらず、それを聞いた時それ何？という感じだったからである。

これには鉄筋コンクリートの壁を思ってもらおうとよい。現場の作業は荒っぽく見えるが、建築では厳密にミリ単位でコントロールされている。それが証拠にほとんどの設計図の寸法線はmmで書かれている。当然壁もmm単位で作られている。ベニヤで作られた型枠に、しかも鉄筋が錯綜している中に、数メートルの高さから石ころの混ぜられたコンクリートを落とし込んで、よく精度を確保できるものといぶかしく思うかもしれない。実はこれには種も仕掛けもある。

この種と仕掛けがセパレータである。写真3に示す丸いポツポツ部分がセパレータの隠れているところである。これは型枠の間隔をコントロールするために用いるためのものであり、両端にネジの切られた棒が壁の型枠を貫通して格子状に取り作られている。間隔は結構細かくて、おおよそ45cmから60cmピッチである。施工上大事な建築部品であるが、構造計算の対象ではないので表舞台に出ることはない。だから大学でさらっと習った程度では、それが忘

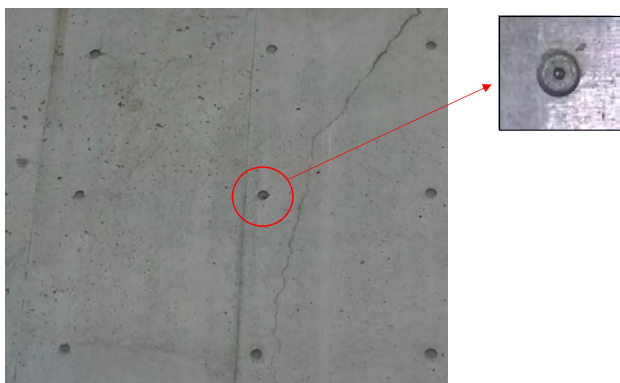


写真3 セパレータ

(丸囲いのところにセパレータが隠れている。右の写真は塞いであったモルタルを除いてセパレータを露出させたところ)

却のかなたに去っていたのも仕方がない。

施工中の壁部分を写真4に示すが、丸で囲ったところがセパレータである。これが格子状に配置されているのが見えると思う。それが取り付けられた後、手前側に内側の型枠を立て、ミリ単位で壁の厚さを調節した後、コンクリートが打ち込まれる。だから寸法通りの壁が出来上がるのである。そしてこのセパレータであるが、コンクリートの硬化した後どうなるかという、実はそのまま埋め込まれてしまう。だから実際の鉄筋コンクリート建物では、構造的には何の役割も持たされていないが、膨大な数の鉄の棒が

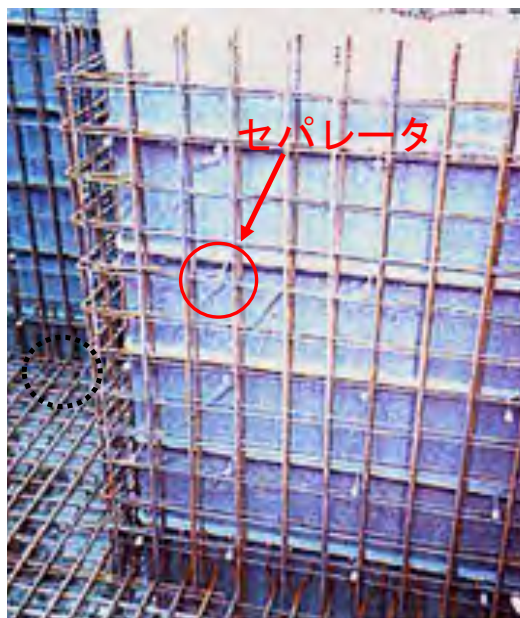


写真4 セパレータの設置

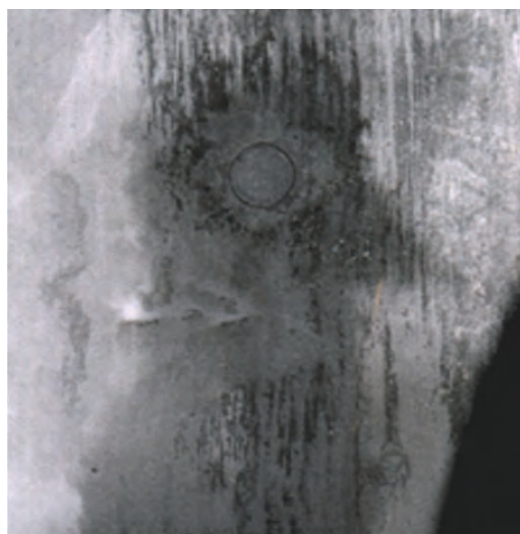


写真5 セパレータ部分からの雨水のじみ出し  
(周囲にかびが発生して黒くなっている。)



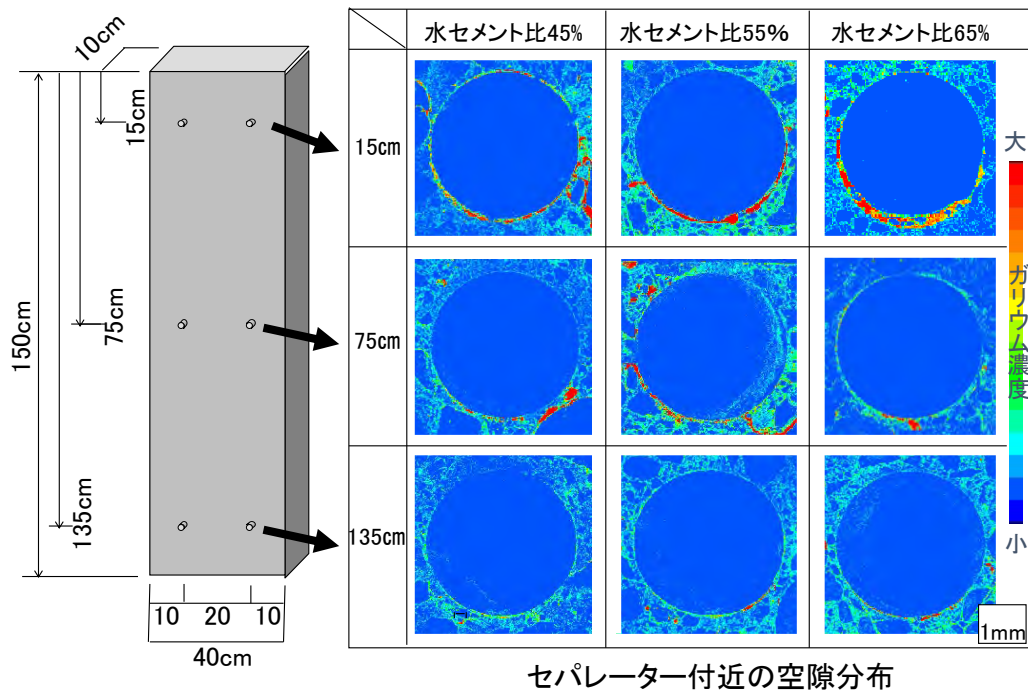


図4 セパレーター周りに生じている空隙

壁部材を貫通している。

そして防水的に見るとこのセパレーター周りが漏水危険部分となる。写真5はセパレーター周りからの漏水である。ちなみにこれは大雨の時に、当時の私の実験室の壁で撮影したものである。雨が漏れ出ているだけでなく、長いことそのまま放っておかれていたので、周りにカビが生えてきて黒ずんできている。

実はセパレーター周りのコンクリートの状態に興味をもったのは、地下防水の研究を始めたためである。地下室の漏水箇所を調査すると、セパレーター周りという例が非常に多いのである。地下は地下水があり、地上部分とは異なり水圧も作用するので、防水の観点から見ると漏水危険度が非常に高い。

さてこの部分の空隙がどうなっているかである。これもガリウム圧入法を用いて観察してみた。試験体は実際の建物のコンクリート壁をイメージして、高さ1.5mの型枠にセパレーターを設置しコンクリートを打ち込み、硬化後セパレーター周りのコアを切り出し、ガリウムを圧入して観察した。図4が結果である。写真の真ん中に大きな青い丸部分が見られるが、これはセパレーターである。そしてその周囲に沿って金環月食のように色のついた輪が見られる。特にセパレーターの輪の下側に太い赤い部分がはっきり見られるが、これが空隙部分である。これを見ればセパレーターの下側部分が主な水の通り道となっていることを実感できると思う。

さらに細かいことであるがセパレーターの取り付けられた位置も重要で、型枠の上の方のセパレーターでは、下の方に

設置されたものに比べて赤い部分が大きく、はっきりしている。型枠の上の方になるほどブリージング水が多くなり、セパレーター下側に蓄積されるためである。また水セメント比を変えたコンクリートについても調べたが、水量の多いコンクリートでは赤部分が極端に多くなっている。まるで水路である。だから過剰に水の加えられたコンクリート、いわゆる“しゃぶコン”が最悪であることも納得がゆく。

## 見える化は現象理解の最高手段

このようなことで水の通り道を目に見える形で提示することができたのであるが、大学の授業や講演でコンクリートからの漏水の話をする時、これらの写真を使うと、「ああそういうことか」と心底納得してくれる。それまでは透水試験結果を示して説明していたが、具体的イメージがわからないので、一応理解してくれたふりははしてくれるが、実感してくれていたかどうかは心配であった。ただこのような写真を見せると、本当によくわかってもらえる。やはり「見える化は現象理解の最高手段」である。



### profile

#### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防水工学

## vol.3 草ぶき屋根研究から学んだこと：趣味の研究も悪くない。

まずは私の自慢の草ぶき屋根写真コレクションの中から、いくつかを見てほしい。

**写真1**は英国セルワージー村で写したものである。この風景の中に赤いとんがり帽子の小人が出てきたら、もうメルヘンの世界である。**写真2**はポーラック村の草ぶき屋根である。棟に鳥が2羽止まっている。ここは海辺の村なので、最初はカモメかと思った。でも全然動かないので、おかしいなと思い近づいてみると(**写真3**)、なんとワラ人形のカモメであった。この辺の草ぶき職人さんは、これは俺の作品だぞと示すために、仕事の最後に作るのだそうである。日本では草花を植えている例をいくつか見たことはあるが、ここでは何と鳥だった。

これらは田舎の村の古い住宅だったが、草ぶき屋根はニュータウンにもあった。**写真4**はロンドン郊外のミルトンキーンズという新興都市である。その中に新築の建売住宅の草ぶき屋根があった。日本では防火上まず認められないが、この写真に小さく映っているご主人にお聞きしたところ、ここでは敷地が広ければOKとのことであった。英国では草ぶき屋根はかなり高価であると聞いていたが、さすがに高いだけあって素敵であった。

英国ばかり続いたが、当然ほかの国にもある。**写真5**は

北海をはさんでお向かいの国、オランダの水郷の村ヒートホールンである。運河で有名な国だけあって、住宅が運河沿いに作られている。小舟で散策したのだが、ボートののんびりした揺れと静かな景色がマッチして、何とも穏やかな気分になることができた。

もちろんアジアにもある。**写真6**は韓国の河回村の草ぶき屋根である。丸みをおびた草ぶき屋根が農村地帯に散在している。写真には写っていないがすぐ近くに洛東江という川がゆったりと流れており、穏やかな草ぶき屋根の形と調和して、しばし忙しい時間から解放された。ちなみにこの村は2010年にユネスコ世界遺産として登録された。

現在草ぶき屋根は、材料の払底と茅葺き職人さん不足のために超高価な屋根になってしまっているが、もともとは近所で材料を採取して作る身近で安価なものであった。だから豪華な屋根だけが草ぶき屋根ではない。**写真7**はカンボジア、アラン村の草ぶき屋根である。屋根の軒の出が深く、暑い日差しを遮るように作られている。材料は近所で簡単に入手できるヤシの葉と麦わらである。屋根をそれほど重装備にする必要もないので自分で作ってしまった。ということでこのような屋根になっている。また建物全体が高床式になっているのは、雨季に川の水があふれて周りが



写真1 英国 セルワージー



写真2 英国 ポーラック



写真3 ワラ人形のカモメ



写真4 英国 ミルトンキーンズ



写真5 オランダ ヒートホールン



写真6 韓国 河回



水浸しになるからである。このお宅のテラスというかベランダというか、そよそよと風の走るこの場所で昼寝をしたら、何と気持ちの良いことかと羨ましく思った。

次は遠くアフリカのマリ共和国の屋根である。マリはサハラ砂漠の南に位置する国である。雨の極端に少ない地域なのでフラットルーフしかないと思っていたが、なんと草ぶき屋根もあった(写真8)。お邪魔したのはフラニ族一家のお宅である。フラニ族は放牧を生業としているので、3ヶ月程度で次の草地を求めて移動する。そのため現地材料調達可能な短期滞在型の住居を作る。形といいサイズといい、何となくモンゴルのゲルに似ている気がする。写真にはお母さんと小さな子供しか写っていないが、お父さんと年上の子は放牧に出ているとのことであった。

いよいよ我が国である。これは余計な説明はいらないと思う。かつては草ぶき屋根王国であった。今はかなり数が減少しているといえ、まだ草ぶき屋根は残されている。もしかしたらこれを読まれている方の近所にあるかもしれない。写真9は京都府、美山の草ぶき屋根である。ここを訪れた時は、昔TVで放映されていた「日本昔ばなし」の世界にいきなり紛れ込んだ気持ちがあった。なんともいえないつかしきがあり、この番組のナレーターであった常田富士男さんの独特の語り口、「むかし、むかし・・・」が聞こえるような気がする。

そして我が国の代表選手は、何とんでも1995年に世界遺産として登録された白川郷の草ぶき屋根である。写真10に写真を示すが、山あいの平地に三角形の草ぶき屋根が美しく並んでいる。

今度は北国である。私は札幌生まれで屋根といえばトタン葺きしか知らなかったが、北海道にもりっぱな草ぶき屋根があった。写真11はチセと呼ばれるアイヌの住宅である。我が国では草ぶき屋根の材料はほとんどが茅なので、茅葺屋根と呼ばれることが多いが、実はいろいろな材料で葺かれている。ちなみにチセはアシで作られるが、地域によっては笹の葉で葺かれることもある。

北を紹介したので、反転して南国、沖縄である。亜熱帯地域は植生が豊かなので、当然草ぶき屋根はあるだろうと予想していた。ただ材料が何であるかまでは知らなかった。そして見たのは、写真12に示す琉球竹で葺かれた屋根であった。少々の台風にはびくともしなさそうな、いかにも頑強そうな屋根であった。

## 草ぶき屋根の実験

私の草ぶき屋根研究の始まりは、1983年の金沢での建築学会の帰り道に立ち寄った白川郷にある。学会での発表が無事終わり、研究室の学生さんたちは思い思いに観光や小旅行に出かけてしまい、研究室ボスの小池迪夫先生と私だけが宿舎に取り残された。後は東京に戻るだけである。「このまま東京に帰るのもつまらないので、バスで名古屋に出て新幹線で戻るといふ案はどうですか？このまま戻ってもどうせ車中でビールを飲むだけでしょう。せっかくだから、白川郷に泊って旨い日本酒を飲みましょうよ」と、言葉巧みに持ちかけた。「そうしようか」という先生の即答で、白川郷の茅葺屋根の民宿で、朴葉(ほうば)味噌



写真7 カンボジア アラン



写真8 マリ共和国、モプティからトンプクトゥヘ道すがら立ち寄ったので、正確な場所は不明



写真9 京都府 美山町



写真10 白川郷



写真11 北海道 白老町  
アイヌ住宅



写真12 沖縄





写真13 茅材とガラス棒



写真14 実験中の試験体

肴に飛騨の酒を飲むというぜいたくな時間を過ごすことができた。

そしてその夜、寝ながら茅葺きの屋根が、どうして雨が漏らないかが気になりはじめた。当時の研究室の主たる研究課題は防水であった。防水は屋根に雨合羽をかぶせて、建物内への雨水の浸入を防ぐというコンセプトである。だから雨合羽は一滴も水を通さない材料で作られる。ところが茅葺屋根は、茅という棒状の材料が積層されているだけであり、隙間だらけである。しかし雨は室内までは漏れてこない。何とも不思議である。

ところで我どもの研究分野は建築学会の分類でいうと、材料施工と呼ばれる泥臭く地味なカテゴリーである。だから建築設計を希望する学生さんは基本的には来ない。ただまれに設計希望だけでも将来のために、学生時代に材料の知識を身に着けた方がよいと考える、しっかりした学生もいる。そして運良くそういう学生さんに巡り合った。

「研究室テーマとは全く異質だけでもやってみる？」と聞くと、「面白そう」との返事で全くやったことのないテーマに学生さんと二人三脚で取り組むことになった。全く初めての研究なので、何はともあれ実験をしてみることにした。

まず材料の茅である。幸い私の勤務していた大学の第二キャンパスは、横浜の北はずれの昔の山林を切り開いて作られており、隣接して里山の植生がわずかに残っている。そして品質は良くないものの茅が自生していた。早速これを刈り取ってきて斜めに葺いた。そして雨を見立ててジョウロで水を掛けてみた。確かに水は途中で漏れることなく下端まで到達した。ただ水は下の方に流れてくるのだが、どこをどう通って流れているのかがさっぱりわからない。研究はまず現象の観察から始めるのが基本である。流れを見るためには茅を透明にすればよい。ということで写真13のように茅をガラス棒に置き換えた。(もちろん茅とガラスとはものが違うが、水の動きが見えるという誘惑には勝てなかった。ちなみに防雨の観点からは、材料表面の水に対する濡れ性質が重要であり、茅に比べてガラスの水

に対する接触角は22度と小さく濡れやすいため、防水の観点からはガラス棒の方が有利である。)

そしていろいろな直径のガラス棒をたくさん買ってきて、写真14のように何層にも重ねて、角度を変えながら上から雨を降らせてみた。雨はガラス棒に当たり、一部はガラス棒の隙間に入り込み試験体の下端に向かって流れ、一部は隙間を抜けて下に落ちてしまう。だから作業としては試験体下端での排水量と、下に抜け落ちてしまった漏水量を正確に測ることになる。そしてその総和が降らせた雨の量と一致していれば、正しく実験ができていることになる。

だからこの試験体の防水能力は図1に示すように、降らせた雨を「途中で落下させずに試験体下端までどの程度運ぶことができたか」で評価することができる。すなわち排水量と降水量(排水+漏水)の比を排水率とすれば、これが防水能力の尺度となる。排水率100%は「完全防水」、排水率0%は「ただ漏れ」である。図2の実験結果はその観点からまとめてあり、横軸がガラス棒の間隙幅(茅材の隙間に相当)、縦軸が排水率(防水能力に相当)である。これは実際の茅材の直径に近い直径9mmのガラス棒の結果であり、図では左からガラス棒の積層数1層から順次増やし、7層までの測定例である。さらにこの図では、試験体全体の傾斜(屋根勾配に相当)を10度という緩勾配から45度という急勾配までが示されている。

さすがにガラス棒1層では、間隙幅に拘わらずほとんど「ただ漏れ」である。ところが2層に重ねると一気に防水性が高まる。間隙幅0.5mm前後では100%防水可能なものが出てくる。観察での印象をいうと、ガラス棒の間で保持された水が、スーッと試験体の端まで移動してゆく。きわめて安定した流れが出来上がっている。

この研究を始めるにあたり、過去にこのような研究がなされていないか調べたが、いわゆる学術論文としての発表はなかった。ただ物理学者集団、ロゲルギストが執筆された本<sup>1)</sup>の中に、ガラス棒の間を流れる水を、「またがり流れ」という表現で説明されているくだりがあり、さすがに

$$\text{防水能力 (排水率)} = \frac{\text{排水量}}{\text{降水量 (排水+漏水)}}$$

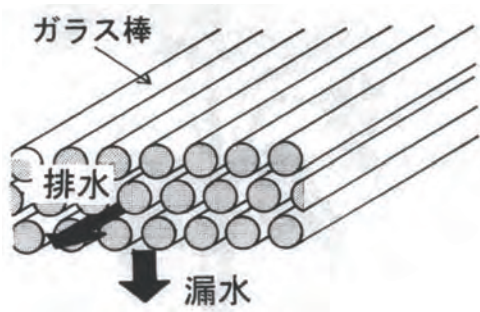


図1 防水能力の評価

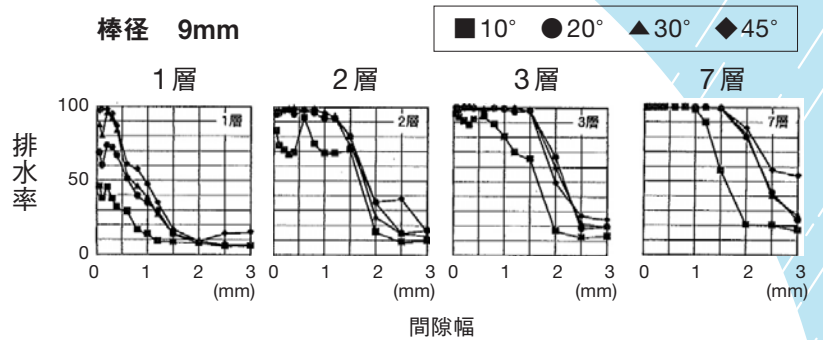


図2 実験結果<sup>2)</sup>

物理学者の観察はするどいと心底敬服した。そして我々の実験でもガラス棒を3層重ねると間隙幅1.5mmくらいまでは防水可能になった。茅葺屋根の施工現場を見ると茅をしっかり縄で束ねて、葺材として屋根に持ち上げている。作業性からは当然束ねて屋根に上げる方が効率的である。そして防水性の観点からも、縄で締め上げるといのは、茅材間隔を狭めるといった点からも意味があると思う。

さらにこの実験を通して屋根勾配も重要であることがわかった。当たり前であるが勾配がゆるいと、さすがに雨を防ぐのは厳しい。だから我が国の草ぶき屋根は、雨が多いせいもあり、一般に急勾配である。ちなみに白川郷の屋根は50度位もある。勾配が急であれば、積層数が少なくても（薄い屋根でも）雨を止めることができる。ただ我が国の草ぶき屋根の葺き屋根の厚さは、数十センチメートルと相当に分厚い。おそらくは屋根の断熱性確保のため（本当かどうかは知らないが、茅葺屋根は夏涼しくて冬暖かいといわれている）と、耐久性確保のため（実際の茅葺屋根では劣化するのは表層部分だけである）である。だからとりあえずの防水だけということだけならば、ほんの数層で事足りる。実際カンボジアで見た屋根はうすっぺらなもので

あった。

ということで我が国の茅葺屋根の技術は、防水の面からも耐久性の面からも相当に優れた性能を持つ。実際、白川郷の茅葺屋根の葺き替え間隔は30-40年位であり、北の寒い地域では地元の方に60年位持つのだと自慢されたことがあるが、あながちでたらめではなさそうである。

## 草ぶき屋根の防水メカニズム

さて、この茅葺屋根がどうして水が漏れないのかの防水のメカニズムの話である。たくさんの実験と観察の結果、おおよそつぎのようなメカニズムが見えてきた。

- ①まず雨が上から降り、それが茅材に接触する。
- ②茅材は水に対して一定の濡れ性をもつため、茅材に付着する。そして水の表面張力のため落下せず、ある程度そのまま頑張る。
- ③次の雨粒が接触して合体し、水滴が大きくなると下に落ちはじめ、次の段階として図3に示すように下層に位置する茅間の空隙を埋めるようにして水を保持する。いわば隙間だらけの、それでありながらしっかりとした水路

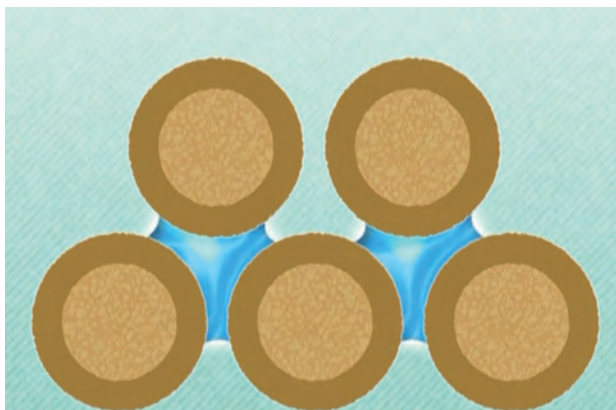


図3 ガラス棒の隙間に水が保持される。

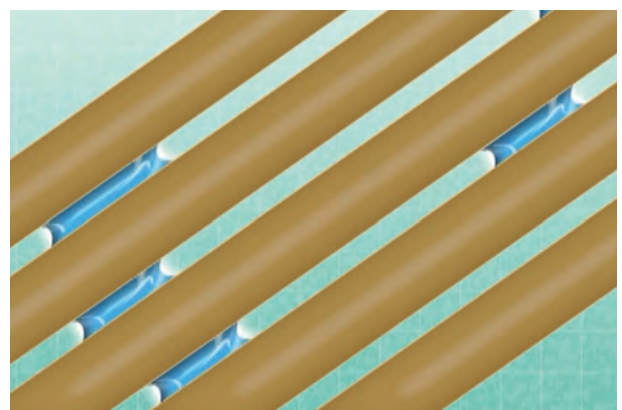


図4 斜めにするにより保持された水が動きはじめる。





写真15 茅の先端から滴り落ちる雨



写真16 試験体の作成風景

が作られる。ここが茅葺屋根の優れている点である。この濡れ性と表面張力で保持される3本の材料にはさまれた水の流れは、非常に安定している。しかもここに保持される水の断面積はかなり大きい。

- ④屋根では茅材が斜めに葺かれているため、図4に示すように保持された水は重力により走り始める。「またがり流れ」である。移動速度は当然勾配が大きければ早くなる。
- ⑤雨は降り続けるので水量が増え、この断面で支えきれなくなった水は重力により下の層へと移動する。茅葺屋根でいうと屋根の内部に入り込む。ただ何層も重ねられているので裏面には到達しない。
- ⑥そして最後に、これらの水が茅葺屋根端部から排水される(写真15)。

ということで、茅葺屋根の防水は、大きくは茅材間での水を保持と、保持水の軒先への移動によって具現化されている。だから当然屋根勾配が大きくなれば排水能力は高まるし、葺き厚さが厚くなれば、排水能力は高まる。このように研究してみると、我が国の草ぶき屋根は相当なすぐれものである。

唯一の泣き所は、燃えるということである。今のところこれだけはどうしようもない。茅材を不燃化しようという試みは今もなされているが、安価で、安全で、耐久性のある薬剤と処理方法を見つけるのはそう簡単ではない。もともと茅葺も含め草ぶき屋根は、近所で手に入る材料を使う庶民の屋根である。これにはなんとか「火伏の神様」に頑張ってもらいたくない。だからどこの国でも、都市部では茅葺屋根建設は原則禁止である。

## 皆さまにお勧めしたいこと

この研究は趣味的な色合いが強く、実務的には何の役にも立たなかった。ただ課題は一般受けをしやすく、研究室としては珍しくテレビ局の番組作りをお手伝いする機会

が3度もあった。写真16は学生さんたちと一緒に試験体を作成している風景である。しいて役に立ったといえるのは、番組制作費としてテレビ局からいただいた謝金を原資に、学生さんたちと一緒に、近所の居酒屋さんで盛大な打ち上げをできたことだけである。

最後にこれを読まれている方にお勧めしたいことがひとつ。梅雨時期の雨の日に草ぶき屋根を訪ねていただきたい。そして薄暗い部屋にゆったりと座って、茅材の端っからぼたぼたと落ちる雨粒を、何も考えずに「ほーと」見ていただきたい。これを見ていると、心の緊張が解けてゆく。茅の濡れ性と水の表面張力が作り出す素敵な音楽を聴くことができる。だから趣味の研究も悪くない。

## 参考文献

- 1) ロゲルギスト：第五・物理の散歩道；岩波書店(1972)
- 2) 田中享二，三崎裕：円形棒状材料を用いた勾配屋根の防雨性能；日本建築学会構造系論文報告集，第475号，PP.17-25，1995



## profile

### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防水工学



vol.4 塗床ふくれの謎解き研究から学んだこと：  
研究は推理小説というエンターテイメントである。

## はじめに

世界は大変なコロナ禍を経験した。そしてコロナが我が国で蔓延し始めた2020年の春頃、テレビ等で国立感染症研究所が最前線の研究機関として度々紹介されていた。そしてどこかで聞いたことのある名前だと、古い記憶をたどり、やっと30数年前にエポキシ塗床のふくれ問題で、現地調査に行った場所であったことを思い出した。調査建物は実験棟で、バイオハザードレベル4 (BSL4) 施設であった。最初BSL4と聞いた時は、何のことかわからなかったが、研究所の方から、「海外から未知の病原菌が持ち込まれたら、まずこの研究所に運び込まれ、それを直すための治療法や薬の開発が始められるのだが、担当者が誤って病原菌に感染したら、その治療法を自分で見つけるまで、この区画から永久に出られないのですよ」との説明を受け、緊張感が一気に高まり、塗床の調査どころではなくなったことを思い出した。

## 塗床のふくれ

建築の床仕上げのひとつに、エポキシ樹脂を下地コンクリートに塗布して、シームレスの床とする工法がある。ドロドロした液状の材料を現場で流して床とするのであるが、材料が程よい流動性をもつため、出来上がりが平滑で、色のきれいな素晴らしい仕上がりとなる。現場塗布なのでシームレスであり、非常に密閉性にすぐれる。さらに

硬化すると非常に硬くなり、耐薬品性もあるので、工場の床や化学実験室の床に好んで用いられる。先の施設に採用されたのもそういう理由からである。

ところがこの施設の1階の土間スラブ\*に施工したエポキシ塗床に、ところどころ火ぶくれ状のふくれが発生したというのである。写真1は違う現場での土間であるが、このような不具合がゼネコンを通してメーカーにクレームとして持ち込まれた。当時、研究室では屋上防水層のふくれのメカニズム解明の研究に取り組んでいた。そして論文もいくつか発表していたため、それを読まれた担当の方がふくれだから似たようなものだろうと、我々のところに相談に来られ、一緒に国立感染症研究所の現場調査に出かけたのである。

相談の趣旨は塗床がどうしてふくれたのか教えてほしいとのことであった。しかしこれは難問である。理由はふたつある。

ひとつ目は、下地コンクリートからエポキシ塗床材を押し上げる力である。それまで我々の研究対象としていた屋上での防水層のふくれは、駆動力が明快である。水蒸気圧である。下地のコンクリートには水分が含まれていて、それが日中太陽に温められて気化し、大きな圧力と化す。高校で習う物理、化学の教科書どおりである。ちなみに写真2は私が大学院生の頃、小池迪夫先生のお手伝いで、奈良県内のある団地の防水層調査の時に写したものである。私が見て来たたくさんのふくれの中で、これほど感動的なもの？を二度と見ることはなかった。強く印象に残っている古典的な防水層のふくれである。一方塗床のふくれは室内



写真1 土間スラブに生じたふくれ



写真2 筆者が見た中で最大級の屋上防水層のふくれ

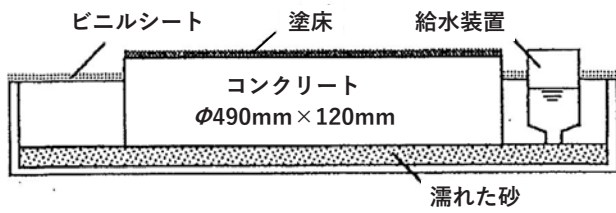


図1 ふくれの再現実験

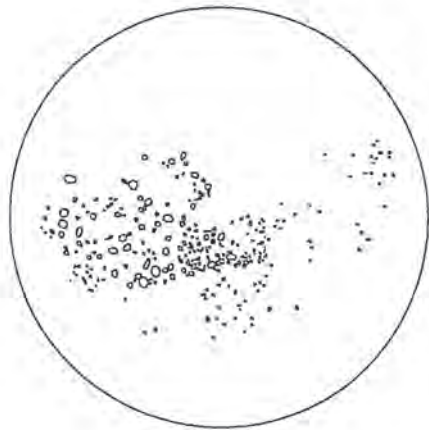


図2 3ヶ月後のふくれの発生状況

である。室温近傍での水蒸気圧はたいしたものではない。だから防水層のふくれのメカニズム論では全く説明ができないのだ。

ふたつ目は、エポキシ塗床材自身の力学的性質である。これは固まるとカチカチになる。これを変形させるためには相当な力を要する。要すれば硬い材料の床がそう簡単にふくれるとは信じがたいのだ。

そのため早速研究にとりかかることになった。まずはふくれが本当に発生するか確認しなければならない。中心となってくれたのは内田昌宏さんである。彼といっしょに、実際の土間スラブと同じ状態の試験体を作って様子を見ることにした。図1はふくれの再現を試みた実験である。コンクリートスラブの上にエポキシ塗床材を施工し、これを濡れた砂の上に置いて観察した。濡れた砂の上に置いたのは、土間スラブは湿った地面に接していることが多いからである。そしてしばらくするとぽつぽつとふくれが出て来た。図2が3ヶ月後のふくれの発生状況である。実際の建物で見られるのと全く同じふくれである。

やはり塗床は何かの力で押し上げられている。今度はこの力を測ってみようということになった。ただ何か月もかけて測定するのは大変である。そのため早くふくれを発生させる促進試験条件を模索した。その結果下地コンクリートを肩位まで（これがこの実験のポイントである）30℃の水に浸し、これを20℃の雰囲気下に置くと、比較的早くふくれを発生させることができることがわかった。液温を周りの温度よりも少し高くすることも、もうひとつのポイ

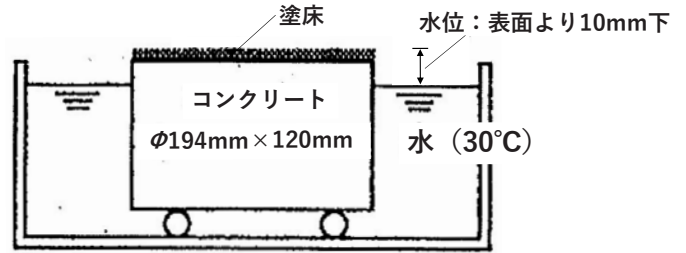


図3 ふくれ促進試験



写真3 ふくれの断面  
(内部の液水を液体窒素で凍結させ、切断して撮影)

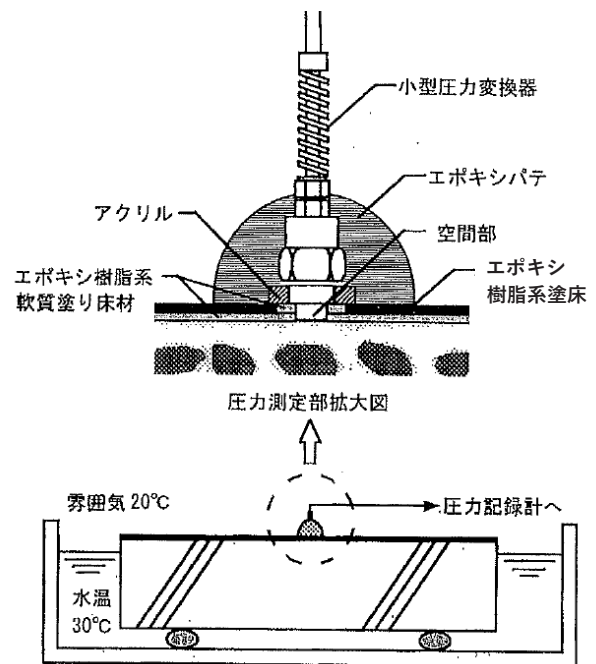


図4 エポキシ塗床背面圧力測定

ントである。図3に試験体の設置状況を示すが、この方法で行うと数週間でふくれを作ることができる。そしてふくれの内部は写真3に示すように実際と同様、液水で満たされている。ちなみにこの写真はふくれ部分を液体窒素で冷却固化し、断面を切断して撮影したものである。

これで準備が完了したので、早速圧力測定にとりかかった。小型の圧力変換器を図4に示すように先ほどの下地コンクリートの上に設置し、エポキシ塗床材を施工した。そして先ほどの試験環境（水温30℃、環境温度20℃）に置い

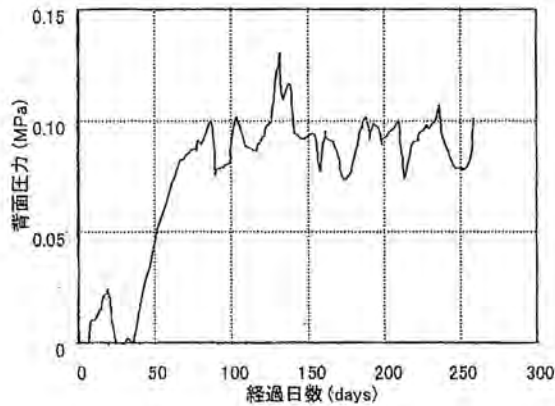


図5 エポキシ塗床背面圧力測定結果

た。試験結果を図5に示すが、5週目頃から圧力が高まり始め、最大で0.13MPa (1.3kg/cm<sup>2</sup>) を記録した。確かにエポキシ塗床材は下から押し上げられている！

## コンクリートは半透過膜的性質をもつ

次の疑問はどうしてエポキシ塗床裏面に水が集まってきたかである。今度はこの謎を解かねばならない。実はこの研究を始めるにあたって、塗り床ふくれの文献調査も併行して行っていたが、その中に浸透圧\*\*によるのではないかとする論文があった。状況から考えてこの説が合理的であるように思われた。

そしてこの考え方をエポキシ塗床に適用してみることにした。まずどの程度の水が移動してくるかである。そのため図6に示すような簡単な装置を作り水の移動量を測定した。これは蒸留水とエチルセロソルブ5%溶液の間を20mmのモルタル板で仕切ったものである。エチルセロソルブという聞いたことのない液名が出てきて面食らったかもしれないが、エポキシ塗床に含まれる成分であり、これが溶け出てきた結果である。(実際のふくれ内液水を分析すると必ず検出される。)

モルタル板を介してエチルセロソルブ溶液に浸透してくる水量は、その上にガラス管を立てて、毎日高さを測定した。この実験を私と一緒にしてくれたのは、若き日の湯浅昇先生である。(現在は日本大学教授としてコンクリート分野で大活躍であるが、当時は大学院生で、この実験をきっかけとしてセメント硬化体の半透過性による水の一方方向移動に関する研究という素晴らしい修士論文を書いてくれた。多分ふくれに関して水の移動を肉眼で見た最初の日本人と思う。)

私はどうせ上昇速度はゆっくりとなり、いずれ止まるだろうと高を括っていたが、甘かった！全然止まらないのである。ついに移動してきた水がガラス管から飛び出そうになった。これはまずい！ということで同じ径のガラス管を急遽継ぎ足した。そして継ぎ目をテープでグルグル巻きにした。まるで骨折患者の風体である。その後も止まらず、

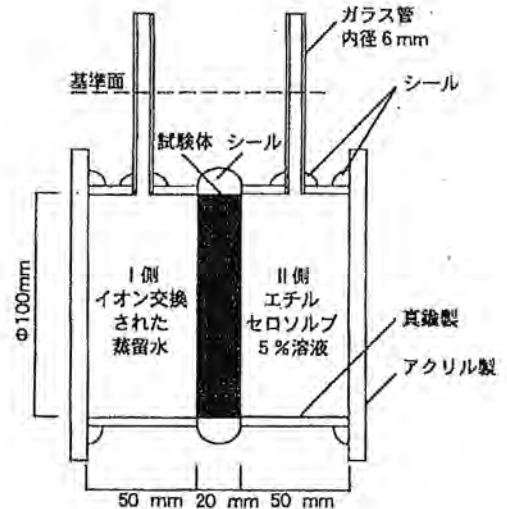


図6 水の移動量測定装置

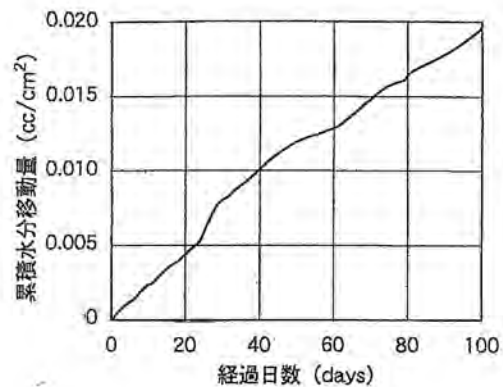


図7 水の移動量測定結果

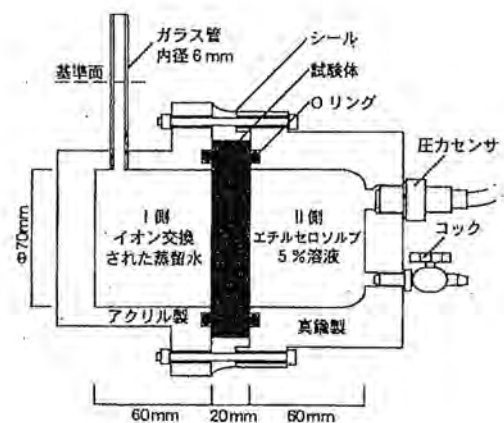


図8 浸透圧測定装置

ガラス管をまた継ぎ足した。そして数日後、ガラス管はもう自立できずテープのところで折れ曲がってしまった。そしてそれ以上は測定不能となった。ふたりでやけ酒を飲んだのは言うまでもない。

ここで示す図7の水の移動量のデータは、実験技術が向上した後、測定したものである。割と安定したデータが取れている。実験を仕掛けた翌日から水がエチルセルソルブ



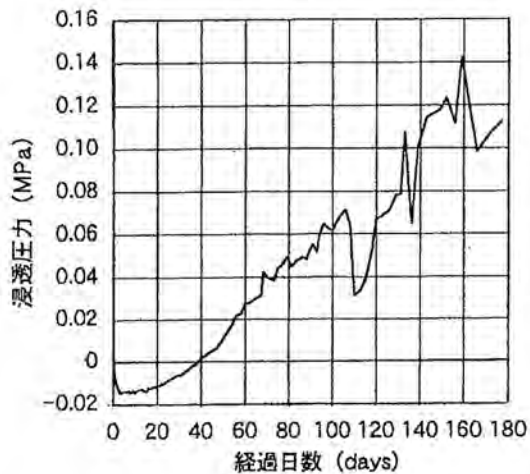


図9 浸透圧測定結果

溶液側に流れ込んできている。浸透圧説は正しそうである。

この状態でエチルセロソルブ溶液側のガラス管を取ってしまい、完全に封じると水はどんどん流れ込もうとするので、圧力が高まるに違いない。そう考えて今度はこれ（浸透圧）を直接測定しようということになった。図8に装置の断面を示す。測定装置の構成は同じであるが、エチルセロソルブ溶液側は高圧となるので、装置がひ弱では困る。そのためがっちりとした真鍮製で設計した。当然圧力センサーを組み込んである。

図9が測定結果である。当初はモルタル試験体側にエチルセロソルブ溶液が、多少吸い込まれるため圧力は少し下がるが、40日経過後からは正圧に転じてどんどん上昇する。そして160日目には最大0.14MPaを観測した。その後は下がったり上がったりで、これ以上は上昇しなかった。でも確かに浸透圧が発生している。しかも最大の値は、先ほどの模擬ふくれ実験で観測された最大値と同程度である。コンクリートが半透過膜の役割を果たしている。これが塗床のふくれ圧力の原動力となったことは間違いがない。

## エポキシはクリープする

最後の謎は、この硬いと思われるエポキシ塗床が、どうしてこの程度の圧力に負けてふくれてしまうかである。最後の段階の研究でがんばってくれたのは松原知子さんである。現在は建材試験センターの職員として活躍中であるが、当時は修士課程の学生さんであった。

まず基本となるエポキシ塗床材の基本的力学的性質を知るために引張試験を行った。結果は図10に示すとおりである。ヤング率は温度により異なるが、20℃ではざっくり  $0.4 \times 10^4 \text{MPa}$  である。ちなみにコンクリートは  $2.0 - 3.0 \times 10^4 \text{MPa}$  であるから、コンクリートほどではないにしろそれでも  $1/5 \sim 1/7$  程度はあり、先ほど程度の圧力に負ける

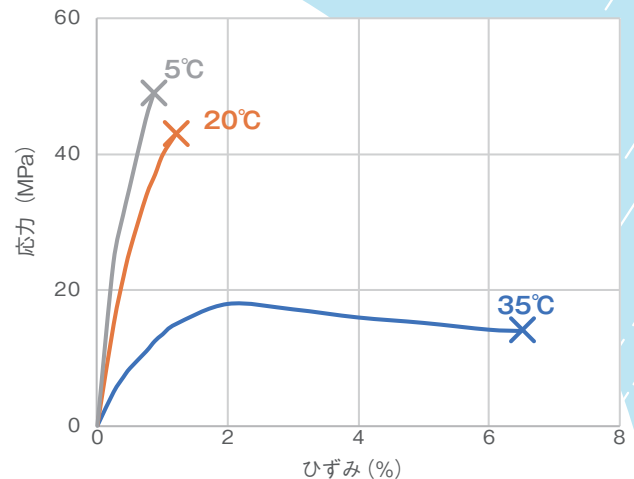


図10 エポキシ塗床材の引張試験結果

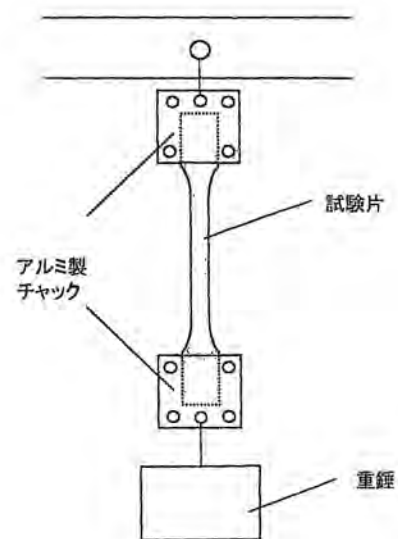


図11 引張クリープ試験装置

とは到底思えない。ただ一般に高分子材料は粘弾性的性質をもつ。筆者は合成高分子系防水材料の研究から、研究者人生をスタートさせたので、大学院生の頃高分子材料の粘弾性について多少勉強していた。だからクリープ\*\*\*を疑った。そこで持続荷重下で伸びが増加するかどうかを調べることにした。

図11が引張クリープ試験装置である。装置といってもたいしたものではない。試験片に重錘をぶら下げただけのものである。これが時間とともにどの位伸びてくるかどうか、ひずみ量を測定するのである。当然クリープ量は重錘の重さに依存し、重ければどんどん伸びてくるし、軽ければゆっくりとなる。そのため破断強度の  $1/10$ 、 $1/30$ 、 $1/100$ 、 $1/500$  の4段階で行った。さらに高分子材料の力学的性質は温度の影響を受けやすいことも常識であり、実験温度は冬期から夏期までを想定し、5℃、20℃、35℃の3段階で行った。

これらの試験結果を図12に示す。重錘が重ければどん

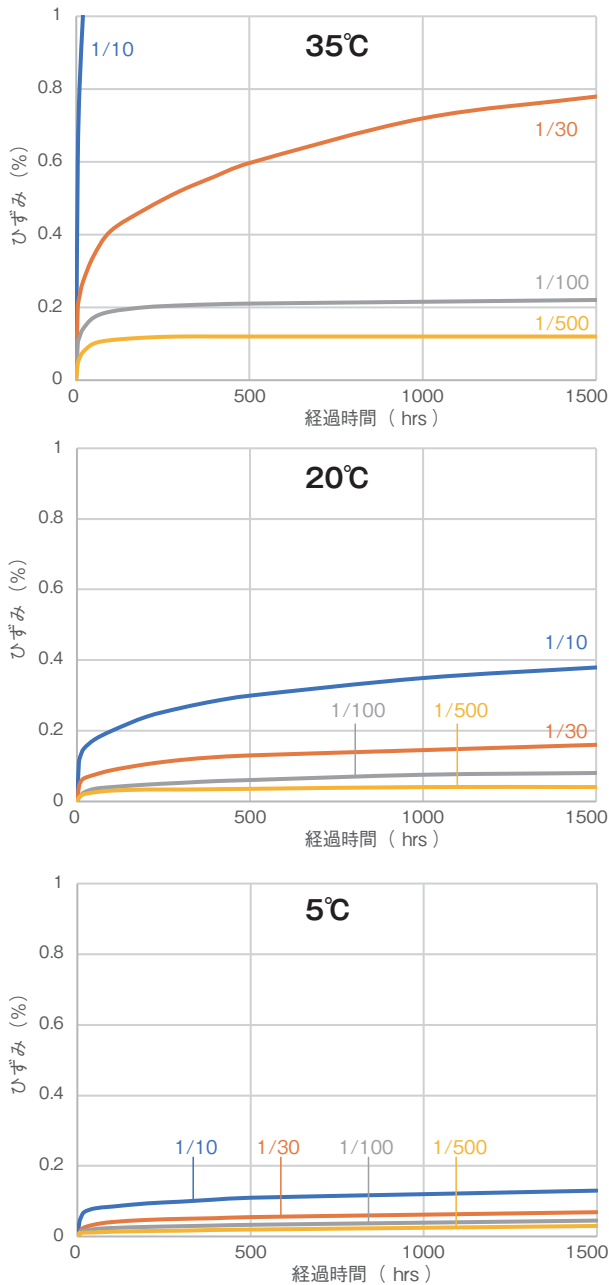


図12 引張クリープ試験結果

どん伸びてくるというのは、予想どおりであった。ただ軽くてもわずかであるが伸びが増加しており、エポキシ塗床材は見かけカチカチでも、基本的にはクリープする材料であることがわかった。

また、驚いたのはエポキシ塗床材の感温性が予想以上に大きかったことである。5℃、20℃ではそうでもなかったが、35℃では目に見えてクリープする。破断荷重のわずか1/100の負荷でも、2ヶ月程度で0.2%程度伸びるのである。これにはさすがに驚いた。実験はしてみるものである。最近気象の過激化のために、夏期には気温が35℃を超える日が珍しくなくなっている。研究を行った当時は過酷すぎるかなと思ったが、最近はこの状態が常態化しており、もはや過酷な温度とは言えない時代になった。

さてカチカチ状態のエポキシ塗床材でも、クリープにより変形が進むというところまで追い詰めた。後は塗床でふくれが大きくなるかどうかを実際に確認することだけである。その目的で長期間ふくれ圧力を作用させる試験装置を作成した。それが図13である。直径10mmのふくれをイメージして、下側から一定水圧を負荷し続けるという仕組みであり、ふくれ高さを継続して測定した。負荷水圧はこれまでの膨れ内部圧力の実測で得たデータを参考に0.1MPa、温度は先ほどと同様5℃、20℃、35℃の3段階である。

試験結果を図14に示すが、予想通り時間とともにふくれが次第に高さを増し始めた。そして普通の室温20℃でも、十分ふくれが成長することを確認した。そしてここでも温度の影響はびっくりするほど大きく、35℃という夏場想定ではふくれ成長が極端に加速された。

ということで、一見硬いと思われるエポキシ樹脂塗床も時間とともにクリープが進行し、それがふくれとなることを確認し、研究は晴れてエンディングを迎えることができた。

## 塗床のふくれメカニズム

最後にここまでの研究をもとに、エポキシ塗床のふくれメカニズムを整理し5ステップに分けて図15に記述する。

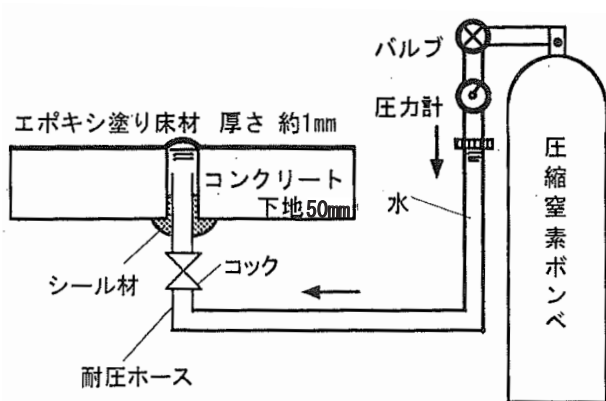


図13 ふくれ拡大試験装置概要

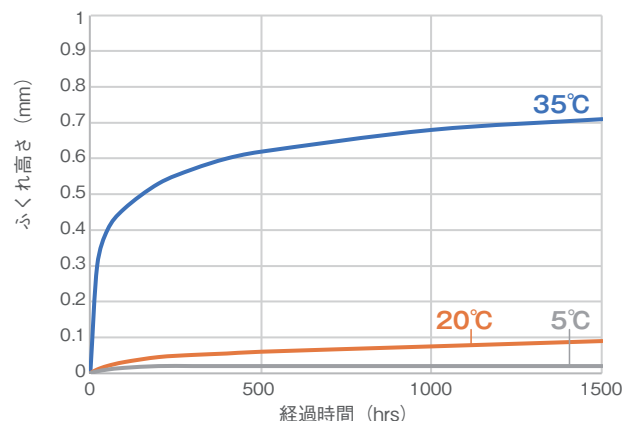


図14 0.1MPa加圧時のふくれ拡大試験結果



**ステップ1**：一番上の図は、ふくれ観察の結果をもとに作成した塗床材とコンクリート下地の模式図である。きれいにコテ仕上げのされたコンクリートでも、表面には必ず微小な凹凸があり、塗床材の下には空隙が残る。金ゴテ仕上げをしたから全く隙間がないと思うかもしれないが、決してそうではない。

**ステップ2**：その空隙の上の塗床裏面に、コンクリート中に含まれている水分が凝縮する。原因は結露である。室内の温度変化により、コンクリート温度と塗床材の温度に位相差が生じるからである。

**ステップ3**：エポキシ塗床材から水可溶成分（ここではエチルセロソルブ）が、わずかであるが溶けだす。

**ステップ4**：下地コンクリート中の水分が、コンクリートの半透過性のために移動してくる。

**ステップ5**：浸透圧が塗床材を押し上げる。そして塗床材のクリープ性のためにふくれは大きくなる。

これが我々の長期間の研究により明らかにしたエポキシ塗床のふくれメカニズムである。

## おわりに

ところでこの研究が世間の役に立ったどうかと聞かれると実は微妙である。メーカーは製品の改良や開発の根拠として役立ったかもしれないが、表向き大きな反応はなかった。ただこの研究の成果が建築学会論文集に掲載された翌日、ゴルフを趣味とされる先輩教授から朝一番電話をいた

だいた。愛用されているゴルフ場の塗床にふくれがあり、「どうしてふくれているのかわからなかったが、これでわかったよ！」とのことであった。だからちょっとは役に立ったのかもしれない。

それにしてもここまでの結論にたどり着くまで、皆で推理と実験を重ねた。幸い優秀なシャーロックホームズ君がたくさん集まってくれた。こうやって当時の事を回想していると、私は単にワトソン君に過ぎなかったのかもしれないと思う。まさに研究は、推理小説というエンターテイメントである。

### \* 土間スラブ

地面に支えられた鉄筋コンクリート床のこと。地盤に直接荷重が伝達されるため鉄筋量が少なくすむので、1階の床に用いられることが多い。

### \*\* 浸透圧

濃度の異なる液体は半透過膜を通して、濃度の高い方に移動するが、濃度の高い液が低い液から水を引き寄せる力のこと。

### \*\*\* クリープ

物体に持続荷重が作用すると、時間の経過とともに変形が増大する現象。

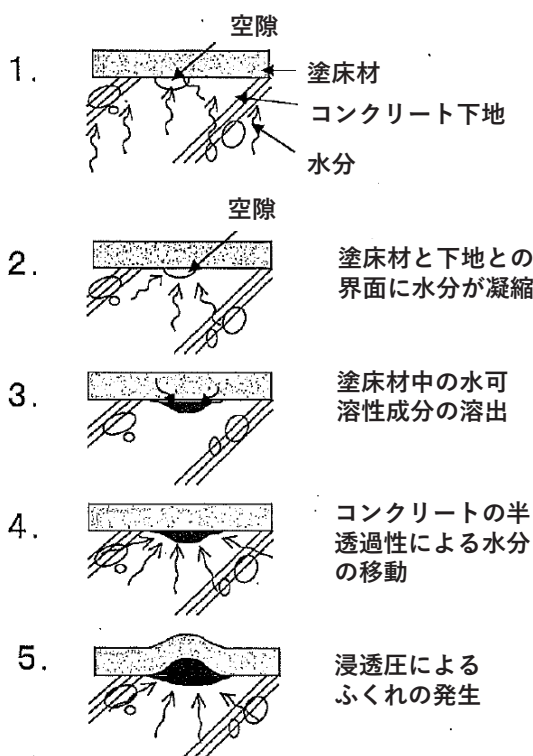


図15 エキポキシ塗床ふくれ発生メカニズム

### 参考文献とこれに関して発表した論文

- 1) W. J. Warlow, P. W. Pye: Osmosis as a cause of blistering of in situ resin flooring on wet concrete; Magazine of concrete research, Vol. 30, No.104, pp.152-156, 1978
- 2) 田中享二, 内田昌宏, 大森 修, 橋田 浩, 湯浅 昇: 塗床のふくれ発生機構の一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第488号, pp.25-30, 1996,10
- 3) 田中享二, 内田昌宏, 大森 修, 斐 基善: 塗り床のふくれ発生に及ぼす下地コンクリートの影響, 日本建築学会構造系論文集, 第493号, pp.1-7, 1997.3
- 4) 田中享二, 斐 基善, 湯浅 昇: セメントモルタルの半透過性に起因する浸透圧の測定, 日本建築学会構造系論文集, 第495号, pp.9-13, 1997.5
- 5) 田中享二, 松原知子, 内田昌宏, 池田学: エポキシ樹脂系塗り床材のクリープ性状とふくれの成長, 日本建築学会構造系論文集, 第525号, pp.15-20, 1999.11
- 6) 内田昌宏, 田中享二: エポキシ樹脂系塗り床の付着性に及ぼすセメントモルタルの表面粗さの影響, 日本建築学会構造系論文集, 第531号, pp.41-46, 2000.5



### profile

#### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野: 建築材料、建築構法、防水工学

vol.5 コンクリートの濡れ色研究から学んだこと  
コンクリートの灰色は生きている。

前にも書いたかもしれないが、私は北海道で生まれ育った。そして当時の北海道の住宅の多くはトタン葺き三角屋根で、青、緑、赤色といったクレヨンのような単純な色で塗られていた。鮮やかな色は白一色の吹雪の中でも家の存在がわかるのである。また梅雨もない比較的からっとした風土には、クレヨンの色遣いがマッチしていたのかもしれない。

大学を終えて就職のため上京したのは昭和46年4月である。そして数か月後に生まれて初めて梅雨を経験した。本当に雨続きでそれが日曜日だったりすると、独身者にはそこしか洗濯のチャンスはなかったから、下宿の狭い6畳間にロープを張っての洗濯物干しには、本当に苦労した。

ただ梅雨は意外と気に入った。静かで落ち着くのである。洗濯物に囲まれてはいるものの、本を読んだり、ラジオの音楽に耳を傾けたりするには最適であった。窓のすぐのところには柿の木があり、緑の葉の先端から雨粒がぼたぼたと落ちるのが見え、さらに通りの向こうの家は灰色に煙った墨絵のように見えた。

総じてみれば、やはり日本は高温多湿の国であると思う。多分そのせいだと思うが、伝統的にあまり極端に彩度の高い色は好まれずに、微妙な色合いが、そして控えめで上品な色使いが好まれるだという、説明を読んだことがある。それが「わび」とか「さび」といった英語に翻訳しにくい言葉が生まれたことに通じるのかもしれない。

そして伝統色の主役は何といっても灰色である。中でも有名な色は図1に示す「利休鼠」である<sup>1)</sup>。多分これを有名にしたのは、城ヶ島の雨（作詞：北原白秋）という歌だと思う。出だしの「雨はふる、ふる、城ヶ島の磯に、利休鼠の雨がふる。」の一節に登場するからである。私も北海道にいたころから時々口ずさんでいた。ただ利休鼠とは雨

表1 白・灰・黒系の色の和名

薄墨色(うすずみいろ)	墨色(すみいろ)
空五倍子色(うつぶしいろ)	石板色(せきばんいろ)
葡萄鼠(えびねず、ぶどうねず)	象牙色(ぞうげいろ)
灰白色(かいはくしょく)	消炭色(けしずみいろ)
生成(きなり)	茶鼠(ちゃねず)
銀鼠(ぎんねず)	鉛色(なまりいろ)
黒椽(くろつるばみ)	鈍色(にびいろ)
濃鼠(こいねず)	乳白色(にゅうはくしょく)
桜鼠(さくらねず)	鼠色(ねずみいろ)
紫黒色(しこくしょく)	灰色(はいいろ)
漆黒(しっこく)	利休鼠(りきゅうねず)
砂色(すないろ)	蠟色(ろういろ)
純白(じゅんぱく)	

<https://kotonohaweb.net/color-name-japanese>

にくすんだ灰色くらいだろうとは思っていたが、実際どんな色なのかはよく知らず、想像をめぐらすだけであった。ただ上京して梅雨空を毎日見るうちに、多分このような中に感じる色なのだということが少しずつ分かってきた。

ただ梅雨空の灰色といっても様々である。そこで手短かに、白から黒に至るまでの灰色の和名をネットで調べてみた<sup>2)</sup>。驚きである。表1に示すようにたくさんある。たかが灰色とあなどるなかれ、である。

## コンクリートの灰色

ここからは建築材料の話である。建築で灰色の代表選手は何といってもコンクリートである。どこの大学でも建築材料の講義で一番時間を割いて教えるのはコンクリートである。昔はコンクリートを裸のまま使うことは、建築では少なかったとのことであるが、戦後打ち放しコンクリートという名のコンクリートの地肌を見せる建築が多くなった。近代建築を可能とした建築材料は、鉄、コンクリート、ガラスの三つであると教わるが、その時のコンクリートの位置付けは構造用である。ただガラスとペアになると一転して建物外皮構成材料となる。著名な建築家の中には打ち放しコンクリートを得意とする人も多くいる。そして打ち放しコンクリートの建物は現在も作り続けられている。それほど魅力的な材料なのである。

ちなみに私の学生時代のへたくそな卒業設計も時流に乗り、打ち放しコンクリートとした。そのため提出したパースも建物を灰色に塗った。(今は模型を作ることが多くな



図1 利休鼠の色

色彩図鑑(日本の色と世界の色)

カラーセラピーライフ (<https://i-iro.com/dic/rikyunezu>)



ったと思うが、私の学生の頃は彩色パースが提出図面のひとつに指定されていた。)ただ日頃感じていると思うが、コンクリートは水に濡れると濡れ色に一変する。私の稚拙なパースも灰色に塗る時、どの程度の灰色にすればよいのか、白と黒の絵具をどのくらいの割合で混ぜればよいのか、人並みに悩んだ記憶がある。

ただ完全に濡れたコンクリートの色の話はたくさん聞くが、その途中はどうなっているのだろうか? 濁って白っぽい色から、突然暗い色に変わるはずはない。いろいろ文献を調べてみたが、途中について述べたものはない。そしてこの私の疑問に興味をもってくれた仲間がいた。劉靈芝さんと菅野拓君である。劉さんは着色コンクリートの研究をしていたことがあり、また菅野君は面白い研究をしたいとの希望をもっていただけ、3人でがんばることになった。

## 本当に湿度変化で色が変わるのか

まず乾いて白っぽい灰色から濡れ色までの、コンクリートの色の変化を調べてみようということになった。さて色の変化をどのように測るかである。幸い灰色は無彩色である。有彩色のような赤とか青とかいう、いわゆる色が無い。あるのは明るいか暗いかといった明度だけである。そうすると話は簡単で、色差計で明度変化を測ればよい。

早速そのための準備に取り掛かった。試験体は本物のコンクリートだと骨材があり面倒なので、セメントペースト(水セメント比: 40%、30%、22%)とし、円形の型枠に打ち込み、写真1に示すように薄くスライスしたものをを用いた。半月状としてあるのは単に立たせておくための配慮である。これを表2に示すいろいろな飽和塩溶液で調湿したデシケータ内に静置した。こう書くと簡単そうに見えるが、セメントペーストの水分状態が安定するまで待たなければならないので、意外と根性を要する大変な作業であった。そして実験は、一度絶乾燥してからデシケータに入れたものと、逆に十分濡らした後にデシケータに入れたものの、2系列で行った。

図2が測定結果である。乾いた環境下ではセメントペーストは白っぽく明度も高い。しかし湿度の高い環境下では予想通り明度が下がってくる。要すれば少しずつ暗くなってゆく。ただこの図を見て気づかれると思うが、乾いたものを湿らせて行く過程と濡れたものを乾かして行く過程とは、途中が同じではない。

湿らせて行くときは湿度が85%位まではそれほど明度は変わらず、それを超えると急激に下がる。しかし一度濡れていたものを乾かして行く時は、割と素直に環境湿度に合わせて明度が上昇する。

建物でいうと、乾いた状態のコンクリートの色は、湿度が高くなっても結構長い間明るい色を保っており、雨模様になり相当湿度が高くなってから暗い色になり始める。そして雨が上がり乾燥し始めると割と素直に明るい色に戻ってゆく。こんなイメージである。そしてこの結果を見ると、コンクリートの色がダイナミックに変わるのは、明らかに高い湿度



写真1 セメントペースト試験体と塩類の飽和水溶液で調湿したデシケータ

表2 各湿度環境を作るための飽和水溶液

相対湿度	調湿方法
0%	105℃,24時間→常温
8%	SiO <sub>2</sub> ・nH <sub>2</sub> O
33%	MgCl <sub>2</sub> ・6H <sub>2</sub> O 飽和水溶液
55%	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ・6H <sub>2</sub> O 飽和水溶液
75%	NaCl 飽和水溶液
85%	KCl 飽和水溶液
93%	KNO <sub>3</sub> 飽和水溶液
98%	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 飽和水溶液
100%	吸水後→表面水除去

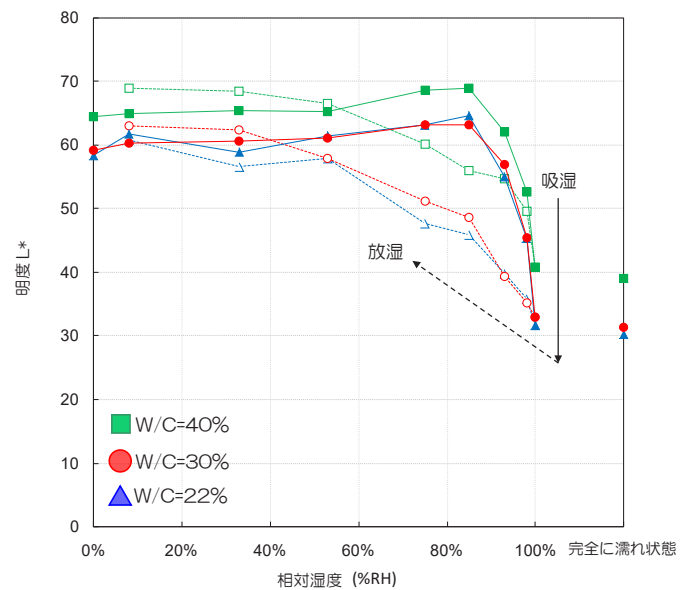


図2 明度湿度との関係

領域である。季節で言えば、梅雨の時期か秋の長雨の湿度の高い日が続く時期である。高湿度域のわずかな湿度変化が、微妙にコンクリートの明度を変える。雨の多い国ならではの、打ち放しコンクリートの密やかな演出である。

## コンクリートの色の変化は吸脱着曲線に似ている

ところでこの図を見て何か似ているな、と気づかれた方も多いと思う。そう、いわゆるコンクリートの吸脱着曲線である。我々の使った試験体の水分の吸脱着はどうなっているのか。早速データをとってみた。図3は各湿度環境

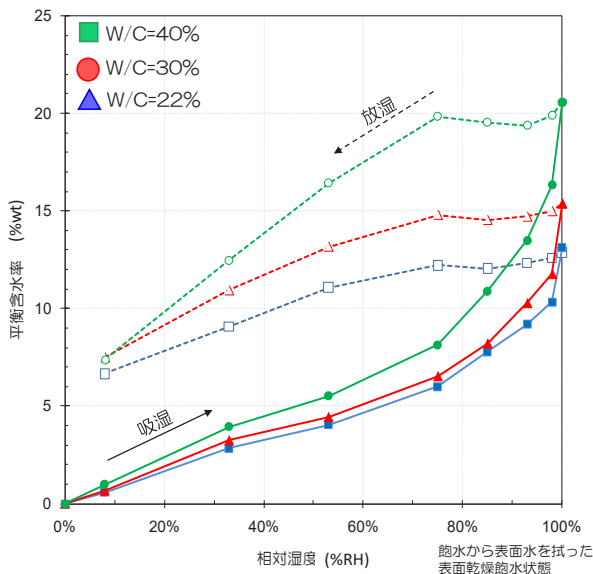


図3 平衡含水率と湿度との関係

下での平衡含水率\*の測定結果である。下側の線は、絶乾状態からの吸湿過程での変化である。当然周りの湿度が高まるに従い含水率は上昇する。そして完全に濡れると最大になる。当然水セメント比の影響があり、水セメント比の大きい試験体では平衡含水率が高くなる。理由は水セメント比の大きい試験体では内部の細孔量が多いため、水を貯めこむ空隙が多いからである。

さて次はこれを乾燥させていった時どうなるかである。これは上方の破線である。周りの湿度が低下するに従い、水を放出し始める。ただ一度貯めこんだ水は余程放出したくないらしく、低下は緩慢となる。そして今回の実験では、最も低湿8%RHの時でも平衡含水率は約7%wtまでにしか下がらなかった。ちなみに加湿過程での同じ湿度環境下での平衡含水率は約1%wtであったから、7%-1%=6%wt位の水は離さず、内部に隠し持ったままということになる。この辺はコンクリートの専門書に書いてある通りである。

## どうしてコンクリートは水を吸脱着するか

ここで話が終わってはつまらないので、これがどうしてそうなるかの理屈の話である。ただここからはマニアックな話となるので、興味のある人だけ付き合ってくださいれば良いです。

コンクリートが濡れるのは、コンクリートの細孔に水が吸着されるからである。ただ吸着にはルールがある。一般には細孔を円筒形と仮定した次のケルビン式<sup>9)</sup>で表されることである。

$$rk = \frac{2 \gamma M \cos \theta}{\rho RT (\ln P/P_s)} \quad (1)$$

(rk:ケルビン半径、 $\gamma$ :表面張力、M:分子量、 $\rho$ :液体の密度、R:気体定数、T:絶対温度、P/P<sub>s</sub>:相対湿度)

この式をいきなり見せられても何のことかわからないと

思うが、意味するところは細い細孔から順番に湿分が凝縮し始めるということである。乱暴な言い方であるが、環境湿度が低い環境下では細い細孔にしか水は凝縮していないが、湿度が高くなると太い細孔でも凝縮するというイメージである。当然材料全体の含水率は高まることになる。

コンクリートは以前「細孔構造の見える化」のところで書いたように、空隙は細いものから太いものまで入り組んでたくさん存在している。従って水セメント比が大きいほど、空隙量が多くなる。だから水セメント比の大きなコンクリートでは抱え込む水分量が多くなる。このことを踏まえると、先ほどのデータも少しは理解しやすくなると思う。

さてここからはさらに面倒な話である。湿度が高くなり順調に水蒸気を吸着し、すべての細孔が満タンになった。それではこれを乾燥環境下に戻すとどうなるかである。本来ならば来た道をたどり素直に元に戻るはずである。ところがこれが違う道に行ってしまうのだ。素直に吸着水を放出してくれないのだ。

実はこれもコンクリートを研究している人には常識のことであり、理由として細孔が単純な円筒形ではなく、**図4**に示すようなインクボトル型の細孔もあるからだと説明されている。インク瓶では口が容器本体より狭くなっている。口のところが狭まっているので中に閉じ込められた水は外に出にくい。そのために水の脱着は遅れる。乾くのが遅れる理由はこのように説明されている。



図4 水の出入りする口径は同じ細孔の円筒型モデルとインクボトル型モデル

## 細孔に水分吸着するとなぜ明度が変わるか

ここからは本からの引き写しである。外部からの光(入射光)は物体の表面に当たると反射する。ところが表面に水膜があると、**図5**に示すようにもちろん一部は表面で反射するが、残りは屈折して水の中に入り込む。ただそれは外に出てくるのが全く出来なくなるわけではなく、水膜下の物体表面で反射して表面に向かう。そして一部が表面から外に出てゆく。残りは内部反射によりまた物体表面に向かう。そしてまた物体表面で反射して・・・、という現象が繰り返される。その度ごとに減衰が起き、結果として明度が低下する。

これをセメントペースト内の細孔表面に当てはめて考えると、細孔内に凝縮水が生じる時、入射した光はそこで屈折し、内部に入り込み素直に反射できなくなる、すなわち入り込んだ光の外部への出方が悪くなる。環境湿度が高く



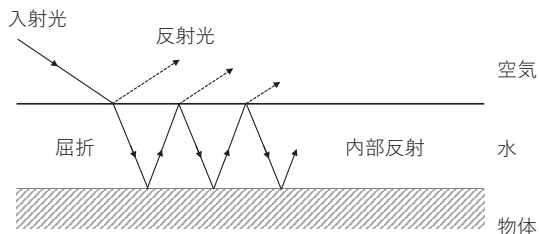


図5 物体が水が吸着した時の光の反射

なると大きい細孔まで凝結するので、水膜量が増え、入りこんだ光の外へ出る量が減り、さらに明度は下がる。

## ただ明度の変化と水の吸脱着とは微妙に違う

このように明度の変化も水の吸脱着の結果と思われるから、基本的には同じ挙動をする。このことは先ほどの図3の吸脱着曲線を上下反対にして比較すると納得がゆく。図6はこのようにして明度変化と上下反転させた含水率変化図を並べて示したものである。似ていることを実感していただけたと思う。

ただ似ているとはいえ、両者は微妙に異なる。どのあたりかというが高湿度領域である。さらに両者の関係を詳細

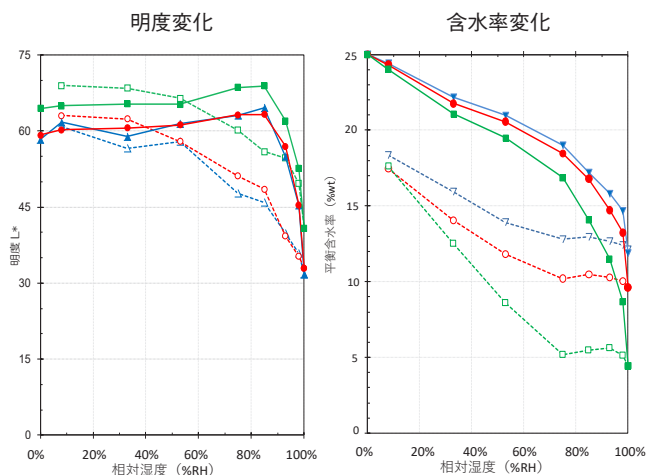


図6 明度変化と含水変化の比較  
(右側の含水率変化図は図2の上下を反転したものである。)

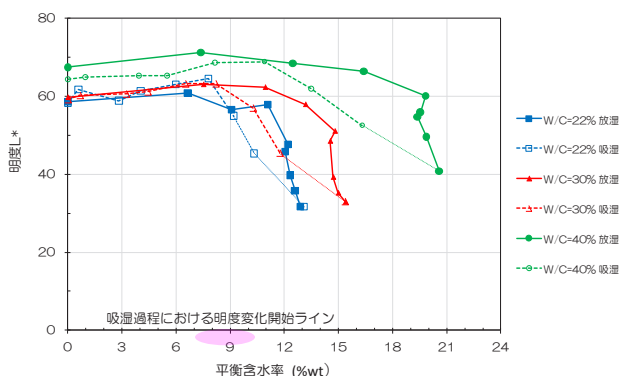


図7 明度と含水率の関係

に調べたものが図7である。はっきりしたラインがあるわけではないが、平衡含水率でいうと10%wt前後である。すなわち明度が変わるのは、かなり材料内部に水が入ってからということになる。ある程度大きい細孔まで凝結水が出現してくれないと明度は変化してくれない。

もともと明度変化は試験体表面に限った現象であるのに対して、水の吸脱着曲線は試験体内部も含めた全体の変化である。表面だけを観測した物理量と全体の変化を示す物理量とは意味が違う。この辺が両者に違いをもたらす理由ではないか。いろいろ想像をめぐらすと、本当のところは良くわからない。

## コンクリートの色は生きている。

ここまで到達したところで、3人がかかりの研究<sup>4)</sup>をおしまいにした。特に後半の理屈の部分はかなり想像が混じっている。だからコンクリート表面に吸着した水量と明度の関係など、ていねいに解明しなければならない課題は山ほど残っている。ただこの成果で菅野君は無事修士論文をまとめることができた。また研究室としても何の役に立つかわからない、この研究課題を遂行するための軍資金も底をついた。そしてここまでわかれば、梅雨時期の打ち放しコンクリートの日本的風情を楽しむには十分である。

コンクリートの色はまさしく生きている。この研究がそのことを改めて教えてくれたことは事実である。

\*平衡含水率：一定の温度、湿度の空気中において材料の水分量がその雰囲気中で平衡（一定）に達した状態における含水率。ここではそれを重量含水率で表した。

### 参考文献

- 1) 色彩図鑑 (日本の色と世界の色) カラーセラピーライフ：  
<https://i-iro.com/dic/rikyunezu>
- 2) 日本の色「色彩の和名」：<https://kotonohaweb.net/color-name-japanese>
- 3) 近藤連一：多孔材料一性質と利用：技報堂出版、1986
- 4) 劉 靈芝，菅野 拓，塚越雅幸，田中享二：セメントペーストの表面明度に及ぼす水分環境変化の影響，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第655号，pp.1595-1600，2010.9



### profile

#### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防排水学

vol.6 防水層の耐根性研究から学んだこと  
相手の出方をよく見る。

## はじめに

長い間防水の研究をしていて、よもや近しく植物の相手をさせられるとは思ってもみなかった。どう考えても防水は植物から縁遠い存在である。しいて言えば屋上に土砂がたまり、それに雑草が生えていたといった類の、どちらかといえば迷惑な存在としてのお付き合いであった。

ただ防水が対象とするフラットルーフは、建築設計の観点からは屋上に地面を作ることである。だからそこに土を入れて植物を植えれば、緑化屋根となる。学生時代に習ったル・コルビジェの近代建築五原則\*の中でも、屋上緑化が重要な一項目として選ばれている。そうは云うものの、これは近代建築だけの専売特許ではない。我が国ではそれより前からたくさん素敵で本格的緑化屋根は作られている。現存している最も有名な例は下関にある旧秋田商会(1915年)の屋上である(写真1)。東京では朝倉彫塑館(1928-1935年)も有名である(写真2)。



写真1 旧秋田商会ビルの屋上緑化(下関)



写真2 朝倉彫塑館の屋上緑化(東京)

もちろんこれらはしっかり防水されている。建設時期から判断して多分アスファルト防水と思うが、このような樹木を植えこむような本格的緑化では、防水層が裸のままでは危険である。そのため植物の根からしっかりガードできるようにコンクリートで保護されている。

防水層の上に直接植栽する  
緑化システムの登場

ところが最近、従来型の本格的緑化屋根に加えて、軽やかな緑化システムが登場してきた。発信元はヨーロッパである。これは重いコンクリートを省いて、防水層の上に軽量土壌を置き、小型の植物、芝生やセダムといった草木類を植えこむ緑化である。

屋上が重い、柱・梁といった構造部材に負担がかかる。屋上は少しでも軽くしたい。ちなみにコンクリートは、保護層として必要な厚さ80mmの場合でも200kg/m<sup>2</sup>近くある。だから保護コンクリートの上に普通の土壌を用いて芝生を植えると、全体で400-450kg/m<sup>2</sup>位になる。これが最近のコンクリート層を省いた軽量人工土壌の緑化システムでは全体で150kg/m<sup>2</sup>と一気に軽くなる。さらに進化した薄層緑化システムでは60kg/m<sup>2</sup>と、構造設計者が泣いて喜ぶくらいのわずかな荷重負担ですむ。

## 防水の観点からは緑化は怖い

構造設計者からは結構づくしの軽量緑化であるが、これは防水の側からみるとんでもない大事件となる。今まで雨しか相手にしてこなかった防水が、植物の根という新たな敵も相手にしなければならなくなるからだ。やわな防水層では対抗できない。昔の緑化で重いコンクリートを防水層の上に敷設した理由も、このような事態になるとよくわかる。

これがなければどうなるか。写真3は丸い孔のたくさん開いたパンチングメタルで作った容器の内側にアスファルト防水層を敷設し、クマザサと芝を植えこみ様子を見たものである。両者共防水にとって強敵である。これらの地下茎が槍のように突き刺さるからである。案の定、試験開始後わずか数か月で防水層はあっさり突き破られてしまった。

地下茎を槍に例えたのには理由がある。研究の最初の頃、地下茎がどのように、どのくらい伸びるかを調べたこ





クマザサ ノシバ  
写真3 地下茎はやわな防水層を突き破る

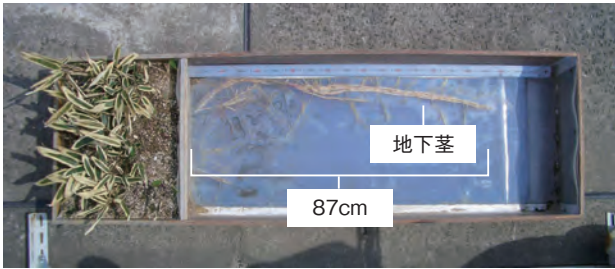


写真4 ひとシーズンを過ごしたクマザサ地下茎

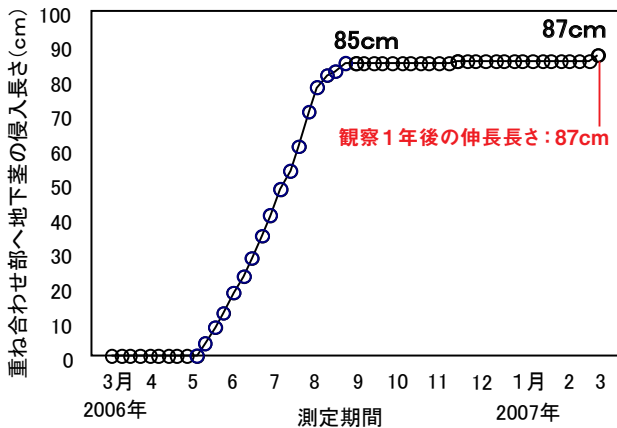


図1 クマザサ地下茎の伸び

とがある。その測定結果をみると、納得してもらえらと思う。写真4は春先にクマザサを植え、ひと夏越した状況である。ざっと1m位伸びている。さらに地下茎の先端はとがっている。これは槍そっくりと思いませんか？

そしてこれがどのような勢いで伸びてきたのかを示したものが図1である。5月頃から測定域に地下茎の先端が到達したので、その日から毎日長さを測り続けた。そしてまたまた驚いた。すごい勢いで伸び続けるのである。ざっと1日約3mmである。ただ9月半ばになるとピタッと止まった。槍の名手は引き際もあざやかである。

### 防水層を突き破ろうとする力をどう測るか

実際の建物では、この地下茎の先端が最後に建築部位に突き当たる。そして突き当たり先が防水層ならばそれを突き破るに違いない。なにせクマザサは腕の立つ槍の使い手なのだ。守備側の防水の立場ではその突き破ろうとする力を

知る必要がある。

ただ力をどう測ればよいのだ。ここからクマザサとのだましあいが始まった。実はこの研究と並行して、建築学会でも先ほどのパンチングメタル容器を用いた耐根性検討委員会が組織されていて、試験方法の検討作業が進められていた。そしてそこには園芸のプロの方も数名参加して下さっていて、そのなかのおひとりが、植物の根系\*\*は水分と栄養分を求めて伸びるのですよと教えてくださった。

それならそれを餌にクマザサの先端をだまして我々の側に呼び込み、そこに防水層を押し付ける力を測る仕組みを取り付けばよいのではないか、そう考えて作ったのが写真5と図2に示す装置である。



写真5 地下茎先端の押しつけ力測定装置

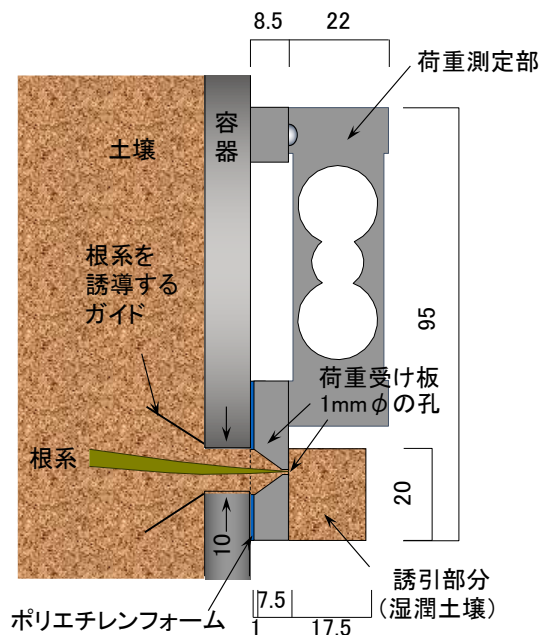


図2 測定装置の構成

単位:mm

仕組みはこうである。まずクマザサの先端をメガホンのような形の円錐ガイドの中に呼び込む。それだけでは逃げってしまうかもしれないので、先ほどのアドバイスに従って、前方に湿った土壌を餌として設置する。そうするとクマザサは水が欲しいので、それを目指して伸びてくるに違いない。その途中に力を測定する道具、ロードセルを組み込む。念のため、ロードセルに取り付けられた地下茎先端の受け板に、小さな孔を開けておく。小さな孔は、地下茎は引っかかるが、餌となる水分は移動出来るようにするための工夫である。こう書くと、あっさりと測定装置が出来たかのように思われるかもしれないが、実は失敗の連続であった。当時研究室の修士課程の学生さんだった（現在は千葉工業大学准教授として活躍中）石原沙織さんと共に試作1号機を作ったのは2002年であるが、何とか測定できるようになるまでほぼ3年を要した。

の先端と類似している。だから「爪楊枝の先を水で濡らし少し柔らかくして、それを自分の手のひらに立て、1ℓの水の入ったペットボトルをその上に載せてください。」とお願いしている。私も実際にやってみたが、結構痛い。この力が防水層にかかるのだ。やわな防水層では、地下茎先端が簡単に突き抜けてしまうのは当然ということになる。



クマザサ

ノシバ

写真6 クマザサとノシバの地下茎先端

## クマザサ先端の押し付け力

やっとクマザサを手なずけることが出来、データが取れたのは2005年である。試作何号機目かは忘れたが、4月の末に植え込んだクマザサの先端が5月の半ば過ぎになってやっと受け板に到達したらしく、ロードセルの出力が観測された。今回もまた失敗だったかと半ばあきらめかかっていた時だったので、冷静さを装っていたが、内心では飛び上がるほど嬉しかった。やっとクマザサの地下茎を捕まえた!

図3が測定結果である。クマザサの先端の押し付け力は右肩上がりでも上昇し続けた。そして6月の初旬には9.8N(約1kgf)を記録した。その先もさらに上昇しそうであったが、ここで測定を打ち切った。実は植物の根系の力はたいしたものではないだろうと高をくくって、測定許容荷重の低いロードセル(そのかわり感度は良い)を使用していたからである。ところが観測されたのは、なんと想像をはるかに超える力であった。

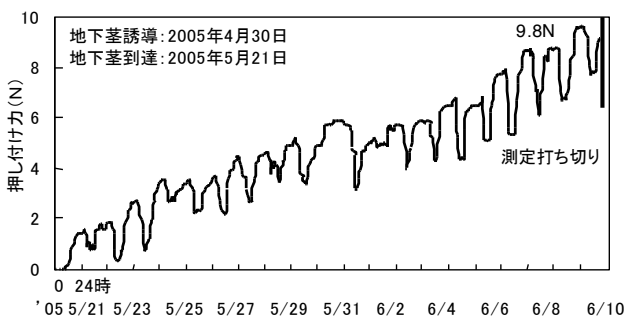


図3 クマザサ地下茎先端の押し付け力

ちなみにこれがどの位かをイメージしてもらうために、いつも次のように説明させてもらっている。まずは地下茎先端の形状からである。これは写真6に示すように爪楊枝

ついでにこの力の測定を通して、見つけたことがある。脈動しているのである。昼間は低く、夜に高くなっている。そして全体的に右肩上がりになっている。当初はこの脈動の正体がなんであるのか皆目見当もつかなかったが、植物学の本を読んで思い当たったのが、葉の裏側にある気孔の存在である。これとの連動ではないかと思ったのである。植物は根が吸い上げた水を、日中はここから蒸散させる。そして夜は閉じる。根は昼夜関係なく水を吸いあげる。そのため水の出口が閉まっている夜間には、それが植物内部に溜まり、強い力と化す。昼は水を気孔から排出するため力は弱まる。このようなことをイメージしてデータを読むと、まさしくその通りである。クマザサは夜に血圧(?)が上がり、昼間は下がる。我々人間とは反対である。ただこの話は防水層の耐根性評価とは全く関係はない。防水の観点からは何の役にも立たないが、測定をして見ると意外なことも解かり、「お前も結構大変だな」と植物の気持ちにしみじみと寄り添うことができる。

## 簡便な耐根性評価試験法の開発

さて、ここまででクマザサの地下茎の押し付け力を知ることができたので、私としては満足であり、この研究を終わりにしようと思った。ただ工学研究では、成果が具体的に何の役に立つのかも説明しなければならないというのが、最近の大学研究者に対する圧力である。個人的には何の役に立たなくても構わないではないかと思うが、研究所という職場に勤務している以上そうも云ってられない。そのため次の作業に取り掛かった。ここからは、当時研究室の留学生だった表淳珠さんとの共同作業である。

実は防水層の耐根性評価のために、先ほどの建築学会の委員会では写真7に示すような、実際の植物を用いた試験



方法を提示していたり。だから原則耐根性を評価することができる。ただこれはやろうとすると結構大変で、何よりもまず植物を元気に育て続ける必要がある。テレビ番組「趣味の園芸」の世界である。植物がしおれてしまうと根系もダウンしてしまうため、試験にならないからである。また、結果が出るまでに時間がかかる。これも実務ではつらいところである。完成した緑化システムの防水層の試験ならば、一回だけなので我慢できるかもしれないが、製品開発という現場の一线にいる立場のひとにとっては、長時間待つことはゆるされない。すぐ結果を知り次の改良に取り掛かりたいはずである。そう考えて植物を使わずに評価の可能な試験方法を検討したのである。



写真7 植物を用いた防水層の耐根性試験

## 防水層の耐根性評価試験装置

写真8が作り上げた試験装置<sup>2)</sup>である。基本的には針が防水層に突きささるイメージである。この時先端の形状が重要であるが、先ほどの写真6に似せて、先端を少し丸く(0.5mmφ)した直径2mmの鋼針とした。これを防水層に押し付けるように力を加える。一方力を受ける防水層側であるが、防水層を3mmφの貫通孔のある鋼板で挟み込んだ。できるだけ局部的に力をかけるための配慮である。

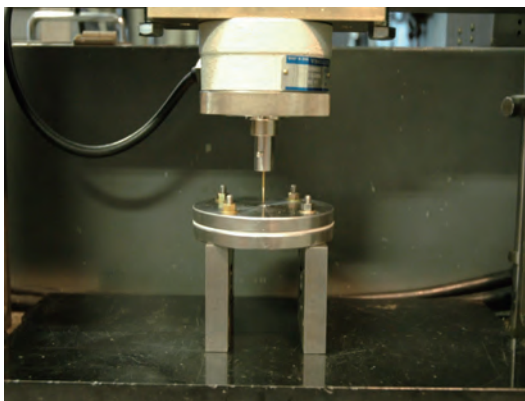


写真8 防水層の耐根性評価試験装置

これを力学試験機に取り付けて加力すると、当たり前であるが荷重増加に伴い防水層は変形し始める。そして柔らかいもの、薄いものでは途中で貫通する。試験であるから力を加え続けられれば、いずれ貫通するが、問題は防水層がどの程度の加力に耐えれば良いかである。我々の測定では10Nであったが、その後の石原先生等の測定で、タケの地下茎で20Nという値が観測されたとのことである。このようなことを踏まえると、評価には安全をみて50N、個人的にはこの辺が最低値かなと思う。すべての防水層について調べたわけではないが、普通の防水層では結構つらい数値だと思う。

## シート接合部の耐根性評価試験装置

ここまでで原則防水層の耐根性を調べることができるようになった。ただシート防水層ではシート同士の接合部がある。根系はそこにも潜り込もうとする。そしてその部分の強度が弱いと、写真9に示すように接合部に入り込み防水層の裏側に回り込む。そして水みちを作る。そのためこれも防水層の欠陥となる。この部分の耐根性も見っておかねばならない。ということで、シート防水層接合部の耐根性を調べる試験方法も考えることになった。



写真9 シート防水層の接合部への根系の侵入

写真10が作り上げた試験装置<sup>3)</sup>である。攻める側の模擬針は同じである。ただこれを受ける側はシート防水層の接合部を模擬しなければならない。そのため2枚のシートを重ね、長さ50mmで接着し、耳の部分左右に固定台に取り付ける。(この時の左右の固定台の隙間の寸法がノウハウになるが、おおよそ、模擬針の直径2mm+シートの厚さ+余裕寸法1mm位にすると具合がよかった。)実際に試験をすると模擬針はどんどん接合部に入り込むが、入り込むに従い負荷荷重が大きくなる。そしてこれの耐根性の評価であるが、先端が10mm潜り込んだ時の荷重で判断できそうで、別途実際のクマザサで行ったシート防水

層接合部の実験結果と比較した。そしてその値が20N以上ならばギリギリ大丈夫そうというのが、今の時点の判断である。結局試験結果の評価としては、これも安全を見て50N位が目安かなと思う。今までの測定の押しつけ力のチャンピオンデータは20Nであったから、その的外れではないと思う。

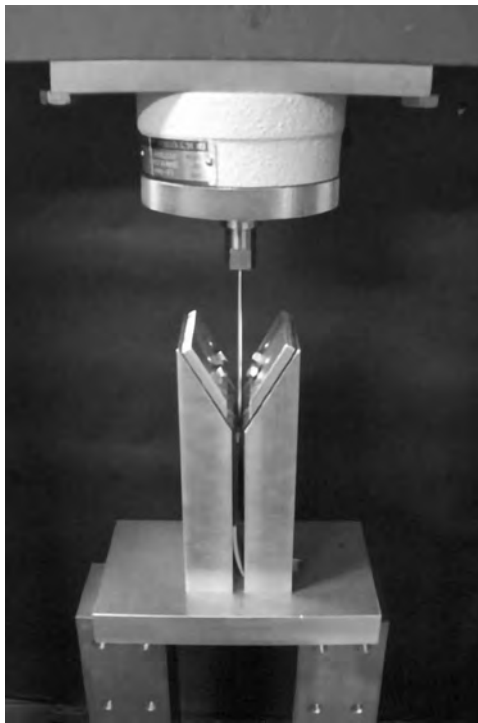


写真10 シート防水層接合部の耐根性評価試験装置

そうこうしているうちに海外でも、似た装置を使っの耐根性試験法規格化の話が持ち上がっているとの情報が伝わって来た。試験法には著作権がないので、使われるのは仕方のないことであるが、これは純日本発の試験法である。これをしっかりわが国で位置付けて置く必要がある。そう考えて、建材試験センター規格としていただいた。現在の「JSTM G 7101 防水材料等の耐根性評価のための模擬針を用いた試験方法」がそれである。

\* ル・コルビジェの近代建築五原則：西洋の伝統的な組構造に対するアンチテーゼとして提唱された、近代建築を定義づける5つの項目であり、「ピロティ」、「屋上緑化」、「自由な平面」、「自由な立面」、「水平連続窓」のこと。

\*\* 根系：植物体の地下にある部分の総称。

## おわりに

ここまでたどり着いて、やっとクマザサとの長いつきあいが終わった。動物と違って植物は反応が遅く、しかも無言なので、相手の考えていることが分からず苦労したが、なんとか結末を迎えることができた。時間をかけてじっくり相手と付き合くと、何となく対応の仕方が見えてくる。とにかく「相手の出方をじっくりと見る」、これが植物相手の研究から学んだことである。

実はこの研究には後日談がある。実験は研究室総出の作業であったが、中でも表さんは中心的に活躍してくれた。そして彼女には学位を取得させ、無事帰国させることができた。これで研究は完了したので、耐根性評価試験装置一式は不要になった。ただせっかく作った試験道具なので、建材試験センターの親友、清水市郎さんに、もし試験依頼のあった時にはセンターで対応してくれる？と聞くと、いいですよという返事で、草加の中央試験所に持って行ってもらった。その後たまたま試験依頼がありますよという話で、実務でも役立っているようで良かったと安堵した。

## 参考文献

- 1) 屋上緑化用メンブレン防水工法の耐根性評価試験方法：防水工事標準仕様書 (JASS 8)・同解説；日本建築学会，pp.440-468，2014
- 2) 表 淳珠，石原沙織，宮内博之，田中享二：防水層の耐根性評価のための簡便な試験方法の開発；日本建築学会構造系論文集，第603号，pp.35-41，2006
- 3) 表 淳珠，宮内博之，田中享二：防水層・耐根シートのジョイント部の耐根性評価のための簡便な試験方法の開発；日本建築学会構造系論文集，第73巻，第623号，pp.43-48，2008



## profile

### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防水工学



vol.7 建築材料の衝撃破壊研究で学んだこと。  
研究でも異分野交流を積極的に!

## はじめに

大学の研究室での研究活動のなかで、頭を悩ますことのひとつに、学生さんの研究課題の設定がある。一般に大学での研究テーマ設定は自由である。これは伝統的に学問の自由は保証されていることが背景にある。実際、個人的にもテーマを強制されたことは一度もない。その伝統があるので、一応学生さんには自身で考えなさいと指示はするものの、研究はある程度の水準が要求されること、また研究室の装置や予算のこともあるので、現実には学生さんが自ら考え出した課題では困難なことが多い。私も半世紀も前であるが、4年生の時の卒業研究のテーマも、自分では考え出せなかったから、結局は指導教官小池迪夫先生が提示してくれた中から選んだ。自分で考えたテーマに研究価値があり実行可能ならば、多分先生はいいよと言ってくれたと思う。これが実情である。

ただ長い教員生活の中で一度だけ、研究課題のフィールドが指示され、それに沿う形で研究を展開しなければならなかった経験がある。私の勤務先は大学ではあったが、研究所という組織であった。研究所とはいうものの授業を行い、入試も担当し、そして大学の各種委員会等にも出席させられるので、学部と大した違いはない。ただ異なるのは、研究所として組織の自立が強く求められる点である。学部は基本的には学問体系に沿って組織が作られ、固定的な安定であるのに対して、研究所は横断的もしくは逆に超専門的、いずれにしても広い意味での社会の要求にしっかりレスポンスすることが求められる。

平和に暮らしていた研究所生活であるが、一時期「大学研究所不要論」が世間の話題になったことがある。我々もその渦に巻き込まれた。研究所としての生き残りが議論され、所長のリーダーシップのもと、安心安全な社会構築を目指すセキュアマテリアル研究を推進するという大方針が定められた。建築分野は普段からそのような課題に取り組んではいるが、もっと積極的にアピールできるものとの要請であった。

## 研究課題を何にするか

さて問題は何を課題とするかである。今まで勝手気ままに課題を設定していたが、今度は厳しく研究所の方針に沿う研究をとという要請である。民間会社ならば当たり前で

るが、先ほどの理由で私としては初めてのこととなった。

思いついたのは、建築外皮構成材の衝撃破壊である。実は研究所には建築以外の分野の先生も多く、超高圧物理の分野で世界的業績をあげているグループがあり、衝撃試験の立派な装置とノウハウをお持ちであった。そことコラボすることにより所長の要望に応えられるのではないかと思ったのである。当時は中東を中心にテロ事件が多発し、爆破による建物損傷による被害が多く出ていた。それらの報道を通して私が懸念したのは、その観点からの都市の脆弱性である。我が国では外壁を構成する材料の爆破衝撃に対する抵抗性はまったく考慮されていないのだ。もちろん建築でも衝撃研究はなされている。ただ基本は構造体に対してである。建物の外皮に対する爆破衝撃は想像もされていない。

外皮構成材料の爆破衝撃で考えなければならないのは、自身の破損に加えて、吹き飛ばされた破片が高速飛翔体となり、2次的に他の建築部位に衝突し、さらに被害を拡大させる危険である。飛んでくるのは鉄の玉だけではない、一般の建築材料もある。そして受け止める材料も建築材料である。起きてほしくない光景であるが、都市セキュアという観点からは、バックデータだけは取っておく必要があるのではと考えたのである。

さて研究は私ひとりではできない。誰と進めるかである。たまたま研究室にモデルガン好きという学生さんが来てくれていた。井上健二君である。ちなみに私も子供の頃はゴムパチンコを自作し遊んでいた位で、飛び道具には興味がある。彼に相談を持ち掛けると、「やりましょう」との即答。ということで研究が始まった。イメージは極端に言えば、「都心でテロによる爆破があった時の、建築材料の高速飛翔による外装材の損傷」である。今振り返っても物騒な課題の研究であった。

## 衝撃の速度

ここで飛んでくる物体(飛翔体)の速度の概略を説明しておきたい。建築で普通、衝撃破壊が問題となるのは台風や竜巻である。これだと10-50m/sである。これが車両や航空機事故だと150-300m/sとなる。爆破事故では600m/sを超える。物理の教科書によると音速は343.3m/s(20℃)なので、爆破はマッハを超える。これがこの研究で対象とした速度である。速度の遅い方は我々だけでも何とかできそうであるが、超高速系は無理である。ここで超高圧物理

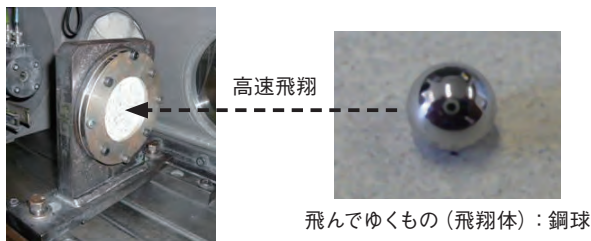
の先生とのコラボが生きてくるのである。

さて試験方法であるが、飛ばす材料（飛翔体）は**写真1**に示すような4mmφ球体、これを受ける衝突板は直径100mmφ（有効部分80mmφ）の円盤状試験体とした。これは装置の関係で自動的にそうなった。

次に試験装置である。まず台風程度の低速(?)であるが**写真2**に示すゴムパチンコである。子供だましのような方法であるが、飛ばすものが4mmφの球のせいもあり、意外と具合は良かった。次のレベルの車両や航空機衝突速度には、**図1**に示す一段式軽ガス銃を使用した。これはヘリウムガスを圧縮しその後瞬時に開放し、球体を発射する。空気抵抗による減速を避けるために、当然内部を真空

状態にする。そして球体はチャンバー内に設置された衝撃板（試験体）に衝突する。瞬間的な出来事なので、破壊状況は高速カメラで撮影する。

もっと高速の爆破レベルの実験には、**図2**に示す二段式軽ガス銃である。まず銃の端部で火薬を爆発させピストンを飛ばし、銃内部に充填したヘリウムガスを瞬間的に圧縮する。そしてこれが薄い隔壁（ダイヤフラム）を破り、球体を飛ばす。このような仕組みで超超高速を作りだす。火薬を使う実験なので、当然資格が必要であり、我々単独ではできない。これは共同研究者の田邊靖博先生のグループにお願いした。



飛翔体を受ける側（衝突板）、有効衝突面積80mmφの円盤状試験体

写真1 飛んでゆく材料（飛翔体）と受ける材料（衝突板）



写真2 ゴムパチンコ式の低速衝撃試験

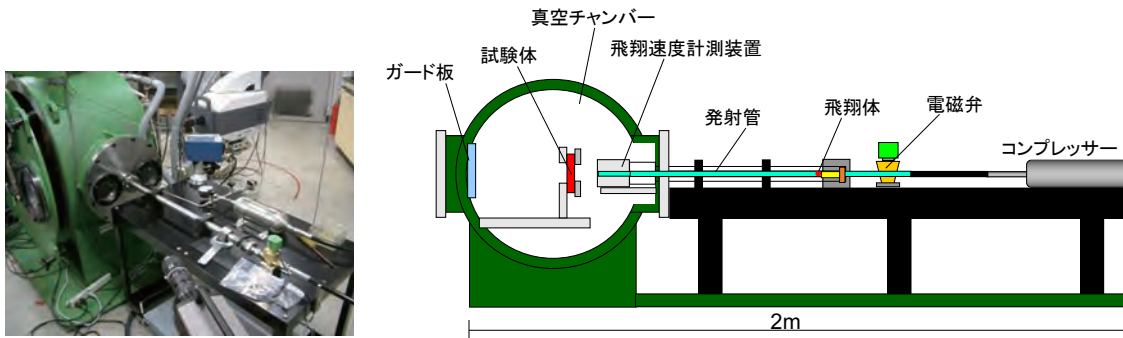


図1 一段式軽ガス銃：圧縮されたヘリウムの力で飛翔体を発射する装置、発射速度：200～400m/s

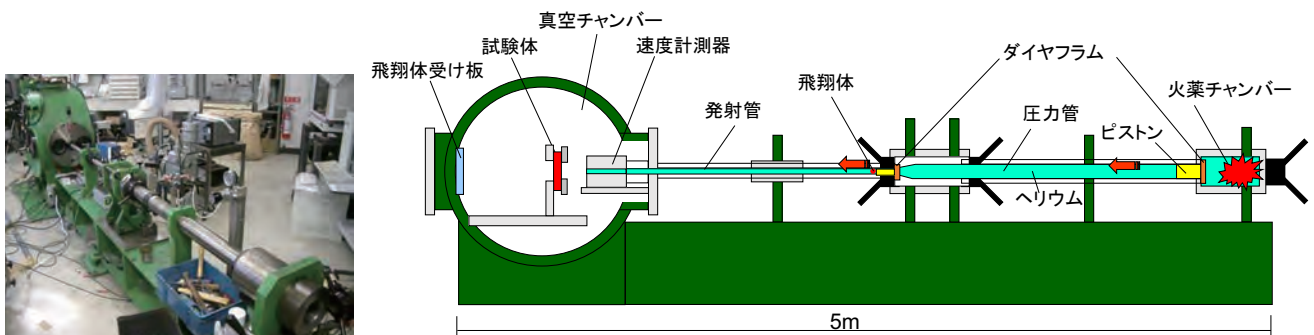


図2 二段式軽ガス銃：火薬の力で、ヘリウムガスを圧縮して飛翔体を高速発射する装置、発射速度：600m/s～1200m/s



## モルタルに鋼球をぶつける

まず建築で想定されるふつうの組み合わせということで、飛翔体は鋼球、受け手の材料はモルタル板とした。モルタル板は簡単に研究室で作ることができるので、3mmから30mmまでの数段階のものを用意した。これに鋼球をいろいろな速度でぶつけたのである。

写真3はモルタル試験体破損の瞬間を横から撮影したものである。この場合は右から飛んできた鋼球がモルタル板を破壊しながら突き抜けている。ただ破壊の様子は飛翔体の速度とモルタル板の厚さに関係する。図3はこのシリーズの実験で観察された破壊の様態を整理したものである。

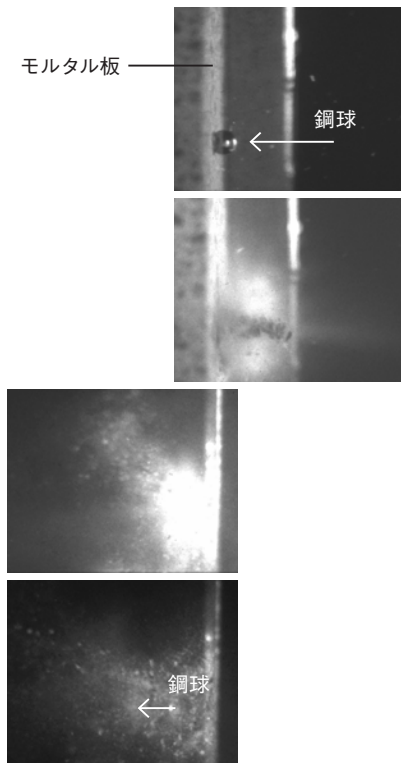


写真3 鋼球によるモルタルの衝撃破損 (鋼球が右側から左に飛翔)

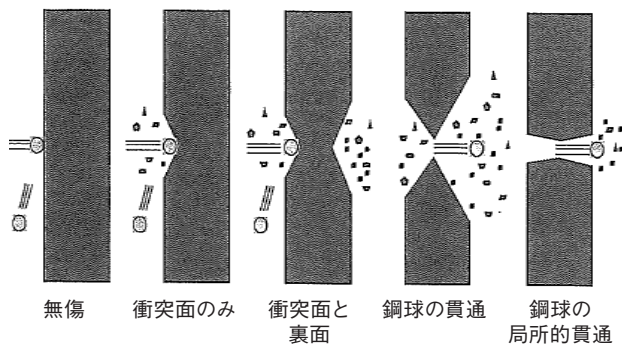


図3 モルタル試験体の破壊の様態の模式図

さらに図4にモルタル板の厚さと鋼球の衝突速度との組み合わせで、これら破壊の様態をゾーニングし図示した。

もちろん速度が遅ければ無傷である。しかし速度を上げ始めるとモルタル板に破壊が生じ始める。マッハを超えると鋼球はモルタル板を簡単に貫通する。ただその途中が興味深い。速度が遅い衝撃では表面が削れてハイお終いであるが、速度が上がリマッハに近づくると鋼球は突き抜けていなくてもかわらず、裏面のモルタルが壊れて飛び出すのである。写真4は307m/sの時のモルタル板(10mm)の衝撃面と裏面の状況である。確かに表面には損傷跡がある。それと同時に裏面のモルタルも壊れている。しかも破壊の程度は裏面の方が大きいのだ。

「飛翔体の速度により破壊の様態が変わる。」これは建築にとって大事な知見である。衝撃研究のご専門の先生には、脆性材料が衝撃波の伝搬により飛翔体が貫通しなくても裏面は剥離飛散するという、このような現象は当たり前のことであるが、初めて見た我々にはまさしく“衝撃的”事象であった。例えば、安全だと思って潜んでいた鉄筋コンクリートの建物の壁の内側の一部が、突然飛び出してくる光景が想像されたからである。

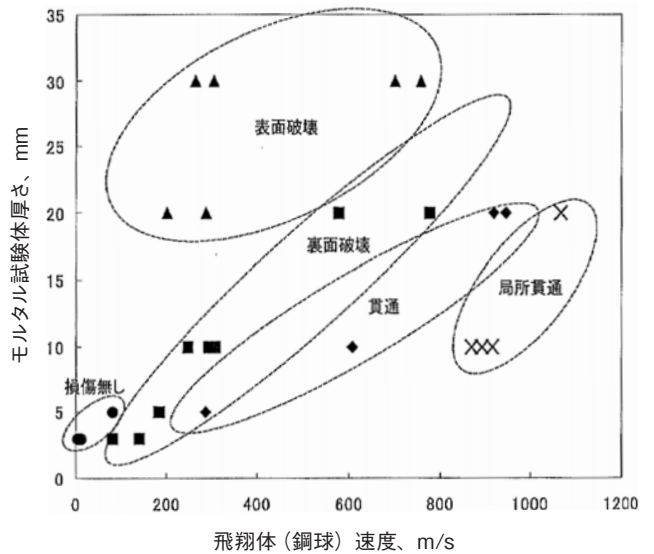


図4 飛翔体速度とモルタル厚さの違いによる破壊の様態

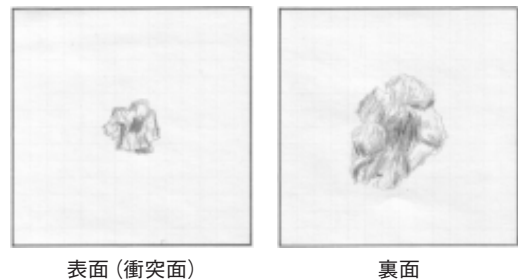


写真4 307m/sの時の10mm厚のモルタル板の衝撃破損 (鋼球は抜けていないが、裏面モルタルも破壊している。)

見たこともないような結果に興味がそそられて、学生さんには銃を撃つたびに結果報告を求めた。ただ当人は実験後の銃内部と試験装置の清掃に1~2日、発射実験の準備にまる1日という重労働で、それでいて実験そのものはマイクロセカンドという超超短時間という慌ただしい作業の中で、いちいち先生に付き合うのは大変だったと思うが、聞く方にとっては楽しみであった。

## いろいろな建材の衝撃実験

さてここからが本命である。今度はモルタルに加えてその他の建築材料でも調べてみた。試した材料は厚さ5mmの木材(杉)、ガラス板、鋼板、アルミ板、プラスチック(ポリカーボネート)板である。これに先ほどの鋼球(4mm φ)をぶつけたのである。写真5に損傷の状態の写真の一部を示すが、結果は図5に示すように大きく3つのグループに分類された。

ひとつは簡単に貫通するものである。当然ながら木材はつらい。木材は軟らかいので人間を受け止める材料としては理想的であるが、このような物騒な目的には限界がある。次は損傷面積の大きいグループである。これは脆性材料に特徴的な損傷である。飛翔体の速度が遅ければ表面を少し削るだけであるが、ある程度の速度からは飛翔体が突き抜けなくても裏面側が激しく損傷する。もちろん超超高速になると、飛翔体もあっさりと突き抜ける。

最後は比較的貫通しにくく、またダメージも小さいグループである。代表選手は鋼材である。鋼球は貫入するが貫通はしなかった。軍艦や戦車はすべて鋼製なものも納得がゆく。そしてこのグループには意外なことにプラスチック

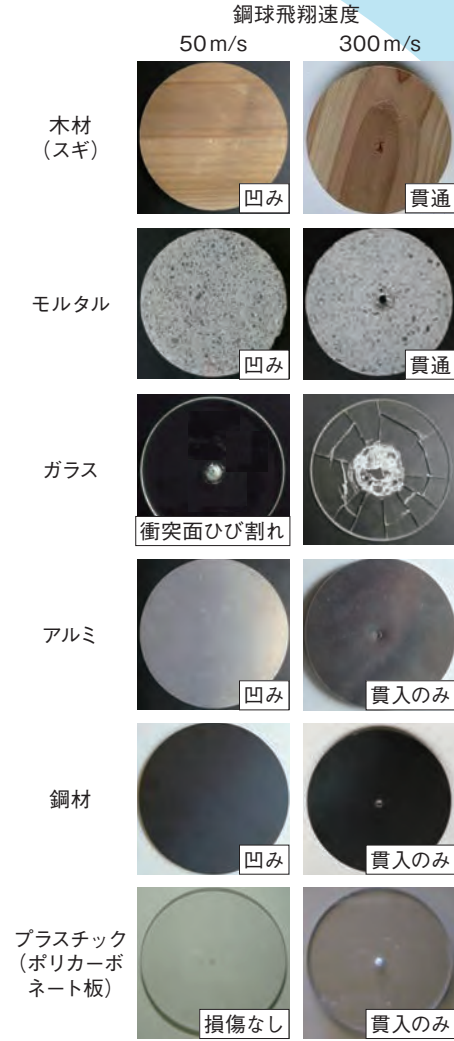


写真5 各種建築材料の鋼球衝突後の状況

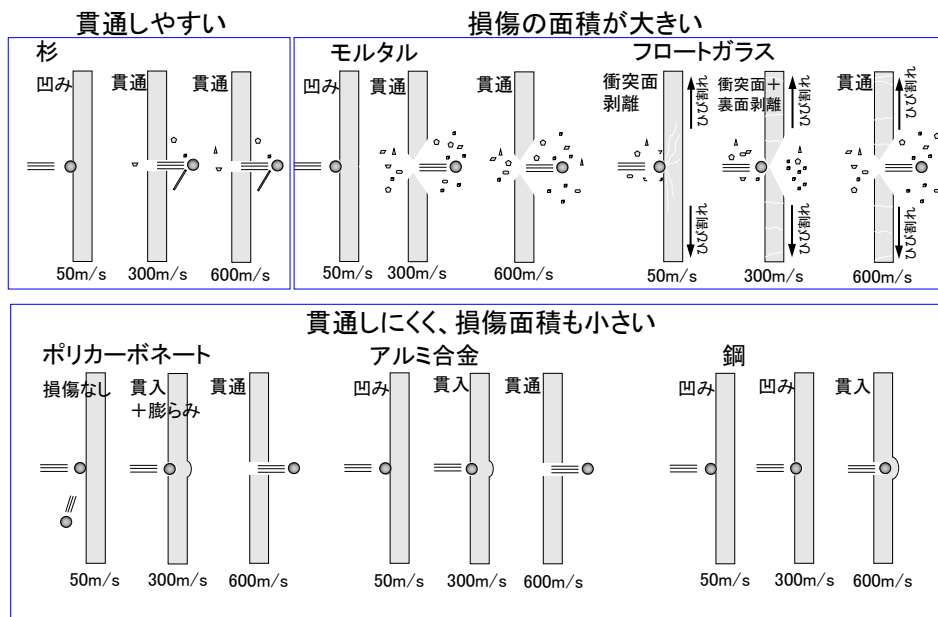


図5 鋼球衝突による各種建築材料の損傷形態





写真6 各種建築材料で作った球体がモルタル板衝突後の状況

もあった。もちろんマッハを超えると貫通するが、普通の超高速(?)では鋼球が貫入はするものの、材料を局部的に変形させるだけで、突き抜けはしない。衝撃に安全なガラスとして、ガラス層の間にプラスチックを挟み込んだ合わせガラス建材があるが、この結果を見るときほどの理由も理解できる。

## 飛んで行く建材を変えた実験

次は飛んで行く建築材料(飛翔体)の種類を変えた実験である。材料は木材(ヒノキ)、砂岩、プラスチック(ポリエチレン)、ガラス、アルミニウム、鋼材の6種であり、これを衝撃実験装置で飛ばせるように4mmφの大きさに成形した。受け手(衝突板)の材料は厚さ5mmのモルタル板とした。

どうなったか?写真6に飛ばす前の状態と、速度50m/sと300m/sでぶつけた後の状態を示す。最初はまん丸だった材料であるが、超高速になると鋼球以外は何とも無残な状態になる。アルミでも半分くらいまでに潰れてしまった。他の材料は割れるか粉々になる。ここで示した写真は、実験担当の学生さんがチャンバー内に飛散した材料を一生懸命拾い集めて撮影してくれたものである。大丈夫だったのは鋼玉だけであった。やはりここでも鋼は強い。

## 研究でも異分野交流は大事

これが功を奏したかどうかはわからないが、研究所の先生方が各々の専門性を生かしながら共同で頑張った結果、

評価が高まり何となく研究所不要論は消失した。そして私自身にとっても異分野の先生との協業の機会が与えられ、普段では考えられない実験をすることができ、しかも興味深いデータを得ることができた。きわめて消極的な理由から異分野の先生と共同研究をするはめに陥ったが、意外にも研究は面白く展開した。異分野交流はビジネス界だけの専売特許ではない。研究の世界でも有効である。異分野交流を積極的に!これがこの研究から学んだことである。

### 参考文献

井上健二, 宮内博之, 田邊靖博, 田中享二: 飛翔体の高速衝突によるコンクリート材料の破壊性状: 日本建築学会学術講演梗概集(関東) pp.403-404, 2006.9

井上健二, 宮内博之, 田邊靖博, 立花正彦, 田中享二: 高速飛翔体に対する各種建築材料の衝撃破壊性状: 日本建築学会学術講演梗概集(九州) pp.1011-1012, 2007.8



### profile

#### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野: 建築材料、建築構法、防水工学

## vol.8 根の肥大力研究から学んだこと：研究協力者はどこにでもいる。

## はじめに

植物の根系のもつ恐るべきパワーを実感させられた、第6回の耐根性研究の続きである。これら研究成果と一緒に頑張ってくれた学生さん達に建築学会や修士論文、博士論文として発表してもらったが、その発表会の折、ある先生から盛岡に石割り桜という観光スポットがあるのですがご存知ですか、と聞かれた。落雷でできた巨石の割れ目に、桜の種子が入り込み成長して、割れ目を押し広げたのだそうである。写真1は仙台で開催された建築学会の折に、盛岡まで足を伸ばし撮影したものである。確かに石の割れ目に立派な桜が育っていた。次の写真2もやはり学会出席の

ために訪れたある大学のキャンパスで写したものである。根が成長して満杯になり、擁壁の一部を割ってしまっている。写真3はカンボジアの世界的観光地アンコールワットで写したものである。アンコールワットのすぐ近くにタ・ブROOMと呼ばれるヒンズー教の寺院があるが、ここではガジュマルの根がラテライトの組石の間に入り込み、壊すというよりそれを飲み込むように一体化していた。根を撤去すると逆に建物が崩れそうであり、今やこの構築物の主要建築材料の一員と化している。

このような根の肥大が原因と思われる不具合は身近でもよく見られる。写真4は通りすがりの道で写したものである。街路樹の根がアスファルト舗装を押し上げて、表面にひび割れを生じさせている。写真5は以前勤務していた大



写真1 石割り桜 (盛岡市)



写真2 植物の根で割られてしまった擁壁



写真3 寺院タ・ブROOMに入り込んだガジュマルの根 (カンボジア)



写真4 根により持ち上げられたアスファルト舗装の歩道



写真5 根の肥大により持ち上げられたコンクリートスラブ



学の実験室の出入り口である。我々の研究は外での作業も多かったため、実験室前に鉄筋入りの本格的なコンクリートスラブを自分たちで敷設して、作業スペースとしていた。多分重さは1t以上あると思う。もともとは道路との境にある縁石と同じ高さで作ってあったものが、根が太くなり10cm以上も持ち上げられてしまった。年々床面の傾きが強くなり作業はしにくくなったが、我慢をして使っていた。

このように根系は地下茎のように先端が突き刺すことに加え、太ることに関心を払わなければならない。ということで今度は根の肥大力の話である。この研究の中心となって活躍してくれたのは明石君と石原君である。中でも石原君は千葉工業大学で教授として緑化防水の研究を、現在も精力的に展開してくれている。

## 根の肥大力(太る力)の測定装置

まず根の太る力の測定法の検討からスタートした。建築で困るのは根が材料や部材の間に入り込み、その隙間を押し広げてしまうことである。そのような状況を想定すると、根を上下から挟み込み、その間隔を広げようとする力を測ればよい。そう考えて具体化したのが図1の肥大力測定装置である。根の太さは位置によって異なるが、とりあえず装置の作りやすさも考慮して直径10cm程度の根を想定した。これを上下から二本の横棒で挟み込み、その間の力をビーム型のロードセルで測るという仕組みである。

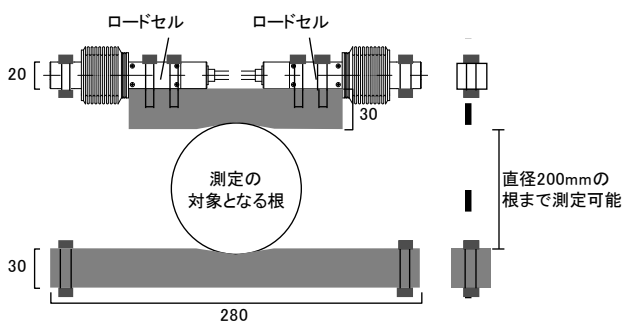


図1 根の肥大力測定装置

## まずは練習を兼ねて、枝で測定

さすがにいきなりこの装置を根に取り付けるのは憚られたので、まずは練習をかねて枝で試運転をすることにした。うまい具合に我々の実験室の側に桜の木が一本あった。これは研究所が都内から横浜の新キャンパスに引っ越した折、当時の研究室の学生さんたちが植樹してくれたものである。それが見事な大木になっていた。これに取り付けて測ってみようということになった。研究室の作業はい



写真6 枝の肥大力測定

つも総出であるが、桜の木は、まさか自分まで動員されるとは想像もしていなかったと思う。そして写真6が装置の取り付けられた枝である。これを見ながら、子供の頃読んだ漫画「ポパイ」を思い出し、思わずクスリと笑ってしまった。ポパイはホウレンソウを食べると筋肉がもりもりになるのだ。ただ我々の作業はポパイの筋力ではなく桜の木の筋力測定である。

## 根の太る力の測定

さていよいよ根である。これが意外にてこずった。枝の時は外側から眺めて適当な太さのものを見つけて装置を取り付ければよかったが、地面の下ではどこに取り付けばよいか、皆目見当がつかない。そのため適当な太さの根を見つけるため、とりあえず木の根元から掘り始めた。そしてもうその段階でめげてしまった。幹からいきなり太い根が分かれて横に走っている。イメージとしては太い枝が地面に横たわっていると思えばよい。その中の一本に目をつけ、直径10cm位の部位に到達するまでひたすら横へ横へ、そして下へ下へと掘り進んでいった。ただ根系を傷つけてはいけぬ。ひげ根のようなものもたくさんある。慎重さが必要である。そのためいきなりスコップでというわけにはゆかず、小さなショベルで少し掘って根を露出させてはブラシで余計な土を払い落とし、そしてまた先に進めるといった作業の繰り返しであった。まるで古代遺跡の発掘現場と同じである。

写真7が苦勞して掘り起こした根である。そしてこれに写真8のように肥大力測定装置を取り付けた。桜の木にとっては、枝に取り付けられる位までは何とか我慢できたかもしれないが、根まで丸裸にされしかも奇妙なものまで取り付けられてしまって、耐えられない位不快だったと思う。オネショをして母親に叱られながらパンツを脱がされた男の子状態にさせられたのだ。



写真7 丸裸にされたサクラの根



写真8 根に取り付けた肥大力測定装置

## 根の太る力

図2が測定結果である。装置を取り付けたのは3月上旬であったが、しばらくは何の音沙汰もなかった。それが4月に入ってから何となくもぞもぞし始め、5月の半ば過ぎからはっきりと肥大力が観測され始めた。そしてやはり脈動が観測された。今度はこの脈動の解釈に頭を悩まされることはなかった。植物の“血压”は葉の気孔の開閉とリンクしており、昼間は気孔が開き水分がそこから蒸散され血圧が下がり、逆に夜は気孔を閉じて、根から吸い上げる水分を植物内にため込むため血圧が上がることを、第6回の地下茎の測定で理解していたからである。

肥大力はその後も順調に上昇し続けたが、8月上旬を超えたあたりで頭打ちになり、それ以上は上昇しなくな

た。秋というのには少し早いのが、根の成長が鈍化したのか、桜の木の方でこれ以上力を出すのをあきらめたのか、いずれにしても根の細胞の話なので、植物の専門家ではない筆者にはわからない。ただ建築の立場から言えば、植物の気持ちとは無関係に、建築部材を破壊する最大の力がわかれば十分なので、測定はここまでとした。

そして測定された力はざっと400N/cmである。測定値の単位が「単位長さ当たりの力」で表記されているのは、測定装置の根と接触する部分が2cmで作られているので、2cmで除しているからである。こう示されても実感がわかないと思うので、実際の場面を想定して説明すると、例えば根の長さ1mの上にもものが載っている場面では、その力は計算上40,000N(約4t)となる。ちなみに普通乗用車の重さは1t~2tである。これを楽々持ち上げる力である。我々の作ったコンクリートスラブが簡単に持ち上げられたのは、このことを考えれば当然である。

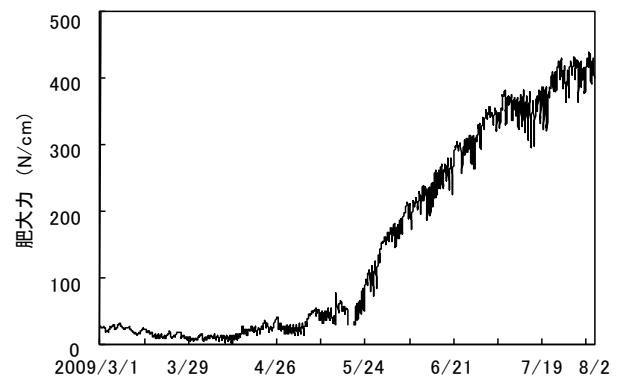


図2 根の肥大力測定結果

## 肥大力再現装置

根の肥大のおおよその力がわかったので、次にこれを建築で利用できるように、根の肥大を人工的に再現する装置の制作に取りかかった。コンセプトは油圧(血压?)で太ろうとする根の再現である。そのため根の断面を模した円形の治具を作り、内部に油圧シリンダーを組み込み上下方向押し上げる仕組みとした。写真9が作り上げた模擬根である。外側が黒いのは、根の外側が多少弾力性をもつため、それを模して厚手のゴムシートが被せられているためである。

これを調べたい部位に設置し、油圧ジャッキで加圧し肥大力を再現し、試験体の損傷を観察するという試験法である。写真10はアスファルト舗装歩道を例として試験をしたものである。路盤材としていろいろな厚さの砂層の上に、厚さ30mmのアスファルト舗装を敷設した。これは実験室内で行っているの、状態も観察出来るように片面



を透明アクリル板としている。

試験結果を図3に示すが、模擬根の油圧が上がり40N/cmを超えるあたりから、アスファルトの中央部が持ち上げられ、砂層の薄いものではひび割れが発生した。実際のアスファルト舗装歩道で見られる損傷とよく似た割れ方であった。



写真9 根の肥大による建築部材の損傷評価試験装置

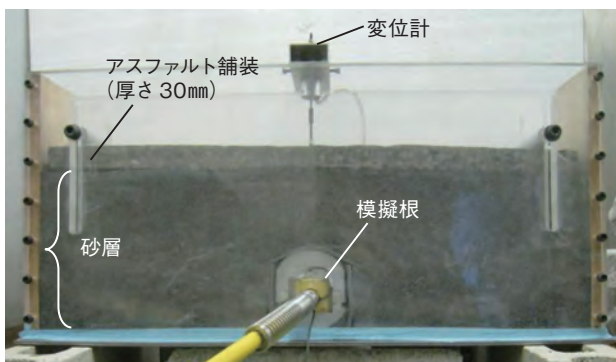


写真10 根の肥大によるアスファルト舗装の損傷試験状況

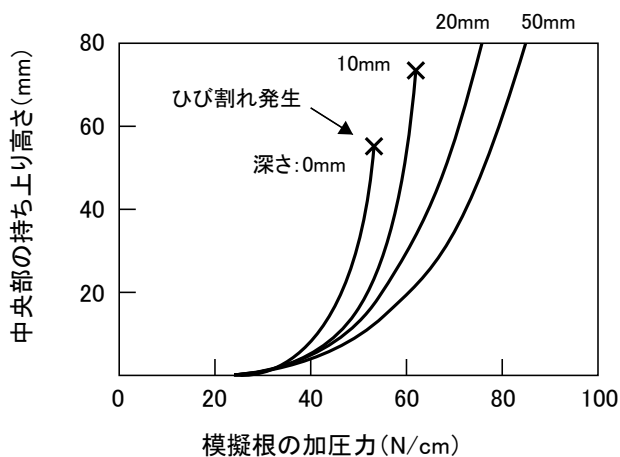


図3 舗装中央部の持ち上がり高さに及ぼす模擬根位置(深さ)の影響

## 終わりに

ということで模擬的な根も作り上げることができた。一応目的を達成したのでこの研究もおしまいとした。ただ実務との対応でいうと、今のところこの研究の出番は皆無である。普段から歩道や外構には植物の根による不具合をたくさん見るにもかかわらず、どういう訳か一般の関心は低い。お年寄(私もそうである)には歩きにくいし、ベビーカーを押している若いお母さん方も難儀しているのに、と不思議に思う。ただこれがクレームとして顕在化すると、建築の側では当然これへの対応が求められ、いずれ問題化すると思う。それまではしばしお休みである。

ところで丸裸にされた桜の木がその後どうなったかである。偉いものである。何事もなかったかのように翌年の春には美しい花をつけてくれた。東工大すずかけ台キャンパスは横浜の北のはずれにあるが、もし訪れる機会があったら、ぜひ見てやってほしい。このキャンパスはオープンで、建物にさえ入らなければ構内の出入り自由である。そしてこの桜は今も春には満開となる。

そしてこの研究を通して、研究の協力者はどこにでもいることを実感した。まわりのひと、動物、植物も大切にしよう。これがこの研究を通して学んだことである。

## 参考文献

- 1) 石原沙織, 明石礼代, 田中享二: 緑化用防水の簡便な耐根性試験方法; 日本建築学会大会学術講演梗概集 [A-1], pp.29-30, 2008.9
- 2) 石原沙織, 田中享二: 木本類植物としてのサクラの根の肥大力と肥大量の測定; 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第640号, pp.1013-1018, 2009.6



## profile

### 田中享二

東京工業大学 名誉教授

1945年 札幌生まれ

専門分野: 建築材料、建築構法、防水工学

## vol.9 駐車場防水研究から学んだこと：何事も我慢が大事

## はじめに

スーパーマーケットやホームセンターに車で行かれる方は、屋上駐車場を利用されたことがあると思う。これら建物では、来店者の商品の買い求めやすさのために上下への移動を少なくすることが求められる。そのためあまり高層化せず二、三階建ての低層の設計が望まれる。合わせて車での来店者のための十分な駐車場スペースも必要とされる。そして都市部や都市近郊では、それらは屋上に作られることが多い。屋上は広くひたすら平らで、駐車場にうつだけだからである。

## 新しいタイプの駐車場防水層の出現

もちろん屋上駐車場は以前からあったが、それらは図1に示すように防水層の上に、保護としてしっかりとしたコンクリート層が敷設されていた。なにせ重量物がその上を走り回るのだ。普通の防水層では表面から削り取られてしまう。これが長い間、駐車場防水の標準であった。ただ問題があった。重いのである。コンクリートの重量は $2.3\text{t}/\text{m}^3$ 位なので、舗装層の厚さを $10\text{cm}$ とすると $0.23\text{t}/\text{m}^2$ である。ちなみに車の重量はもちろん車種によって異なるが、普通の中型乗用車では大体 $2\text{t}$ 、車の占有面積を $2 \times 4\text{m}$ を仮定すると、ざっと $0.25\text{t}/\text{m}^2$ となり、ほぼ車1台分に匹敵する。

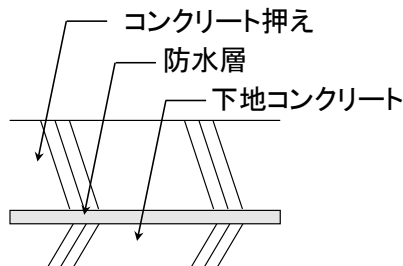


図1 従来型の駐車場防水

だからこれを省略することができれば、荷重負担を大幅に低減できる。そうすると構造力学的に楽になり柱、梁の断面を小さくすることができ、さらに施工面でもコンクリートの打設作業がなくなるため、建物コスト低減に大いに役に立つ。このようなことが背景となり開発されたのが

写真1、2に示す、いわゆる軽量型の駐車場防水である。それは図2に示すように、防水層（耐摩耗性に優れていれば何の防水層でもよいのだが、目下のところ下地との密着性のよいウレタン防水層、FRP防水層が多く使用されている）の上に、雨の日でも車が滑らないようにするため、砂を樹脂で固めた防滑層が乗るという構成をもつ。砂が使われるのはタイヤのグリップ性を高めるため、駐車場では重要なポイントである。そして重量も約 $0.01\text{t}/\text{m}^2$  ( $10\text{kg}/\text{m}^2$ ) と一気に軽くなる。



写真1 駐車場防水層

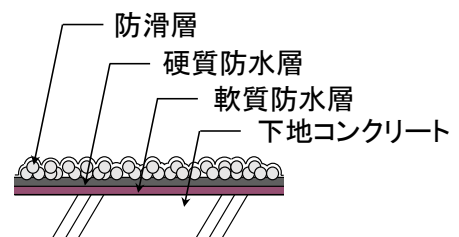
写真2 屋上駐車場の全景  
(右側のランプから屋上に上がる。)

図2 軽量型の駐車場防水

## 新しいタイプの駐車場防水層の弱点

さてこの駐車場防水であるが、やはり弱点がある。次に**写真3**と**写真4**を見ていただきたい。前者は防滑層がタイヤとの摩擦で消失し、防水層が露出した状態、後者はさらに損傷が進み防水層も摩耗し、ついには下地スラブまでも露出してしまった状態である。そしてこのような損傷は**写真5**に見られるように、車両の旋回する所に特に多く見られる。この写真は上階に上るためのランプの途中であり、ハンドルが切られ続けている場所である。屋上の平場でも駐車のためにハンドルを切り返すところに同様な損傷が発生する。ある程度使っているとこのような損傷が出てしま



写真3 防滑層が磨滅し、防水層が露出



写真4 防水層までも摩耗し、下地スラブが露出



写真5 駐車場防水の損傷は車が旋回するところに多発する

うというのが、軽量型駐車場防水層の現在の實力である。どうしても途中でメンテナンスのための改修作業が必要となる。そのためには損傷に対する抵抗性を事前を知っておく必要がある。このようなことを背景とし、研究室では駐車場防水の研究を始めることになった。この研究には香川英司君と、池田学君、そしてなによりも装置設計と製作を担当してくれた、当時私の勤務していた研究所のマシンショップのリーダーであった石井元さんの貢献が大きい。

## 駐車場防水が削り取られる理由

そもそも、なぜ駐車場防水層が削り取られるかといえば、タイヤが表面をこするからである。ただこの時、ほどよい摩擦力が生じ、我々は車を制御し前進させることができる。つるつるの表面ではタイヤは空回りするだけで、制御不能に陥るのはそのためである。ただ車は基本的に、直進時に滑らかに走るように作られている。しかし車は必ずどこかで曲がらなければならない。そのためハンドルをきり、車輪の方向を変える。その時、路面との間に大きな摩擦力、コーナリングフォースが発生するのだ。このカーブを曲がる時の状態を示したのが**図3**である。

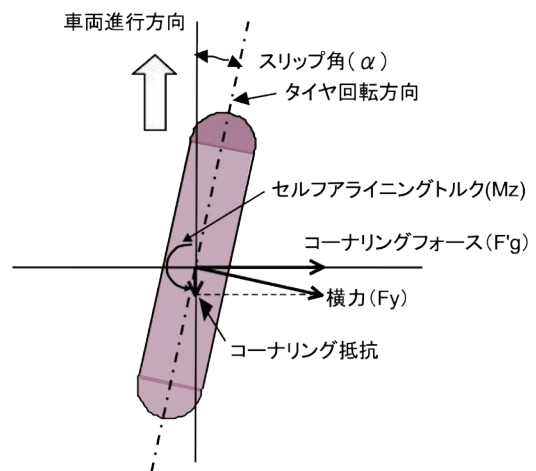


図3 カーブを曲がる時に生じるコーナリングフォース

この摩擦力がどのくらいか運転席にはわからないが、数トンの物体の方向を変えようとするのだから、これが相当な力になることは想像に難くない。この時の力は車軸にタイヤをつけて人力で押してみると実感できる。直進ならば小さな子供でも軽い力でコロコロと転がるが、少しでも角度をつけると突然重くなる。筆者も実際にやってみたがとんでもない力を要する。単純にいうと、消しゴムで路面をこする感覚といえばわかるだろうか。

タイヤが苦勞しているということは、路面（駐車場防水層）も反力として同じ力を受けていることになる。なにせ滑らないように砂粒までも組み込んである。だから摩耗す



るのである。路面が強固ならばタイヤの方が多く摩耗し、路面が「やわ」だと路面が削り取られる。いずれにせよタイヤも路面も自らの身を削りながら、我々のわがままを聞いてくれているのだ。

## コーナリングフォースはどのくらいか？

さてこのコーナリングフォースである。これがどの位か？実はタイヤ工学の分野は非常に進んでいて、理論式<sup>1)</sup>が作られており推定が可能である。長くて恐縮であるが、参考までに掲載しておく。コーナリングフォース $F'_y$ は次式で表される。

$$F'_y = F_y \cos \alpha$$

$$F_y = C_y l h^2 \omega \left[ \frac{1}{2} \tan \alpha - \left( \frac{\delta}{C_y} + \frac{4l^2}{3\gamma^2 G'_y} \right) \frac{F_y}{l} \left( \frac{1}{2} - \frac{l_h}{3l} \right) + \frac{n+1}{n} \frac{2^n F_z \mu_a}{l^{n+1}} \left\{ \left( \frac{l}{2} \right)^n (l - l_h) - \frac{1}{n+1} \left\{ \left( \frac{l}{2} \right)^{n+1} - \left( l_h - \frac{l}{2} \right)^{n+1} \right\} \right\} \right]$$

$$\text{where } \mu_a = \mu_0 - a \frac{lV}{l_h - l} \sin \alpha \quad (a: \text{係数})$$

この式のなかに中型の乗用車のタイヤを想定した表1に示す値を代入し、コンクリート（動摩擦係数 $\mu_0 = 0.8$ ）とウレタンゴム駐車場防水層（ $\mu_0 = 1.1$ ）について、スリップ角 $\alpha$ を変えてコーナリングフォースを計算したのが、図4である。スリップ角12度までの範囲では、スリップ角が大きくなるに従ってコーナリングフォースは増加するが、その増加量は緩慢になる。また軽量型駐車場防水層の方がコンクリートに比べて高いのは、滑り防止のため付けられている砂粒のおかげである。

\*スリップ角：ハンドルを切ったことによるタイヤの向きと、車両旋回中のタイヤの進行方向とは図3で示されるように、実は一致していない。その時の両者間の角度のこと。横すべり角ともよばれる。

表1 計算に用いた各種定数と数値

$G'_y$ ：タイヤボディ横剛性	24.5N/mm <sup>2</sup>
$C_y$ ：タイヤの横ばね定数	8.4N/mm <sup>2</sup>
$V$ ：タイヤの進行速度	8km/h
$\gamma$ ：有効転がり半径	270mm
$l$ ：タイヤ接地長さ	100mm
$\omega$ ：タイヤ接地幅	120mm
$F_z$ ：タイヤ荷重	2.94kN (300kg)、4.90kN (500kg)
$\alpha$ ：タイヤのスリップ角	0～12deg
$n$ ：タイヤの設置圧分布より得られた定数	4
$a$ ：係数	0.005h/km
$\delta$ ：路面の材料定数	24
$\mu_0$ ：動摩擦係数	コンクリート (0.8)、ウレタンゴム (1.1)

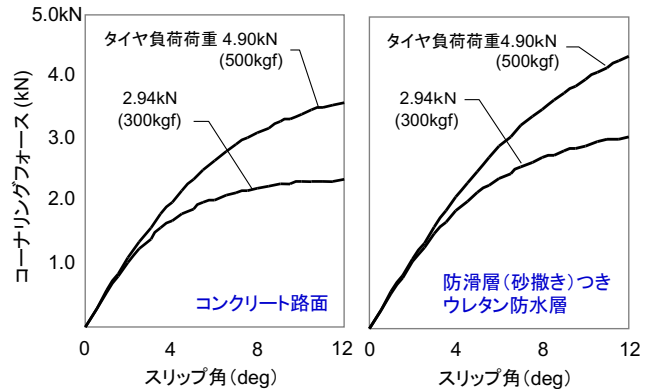


図4 スリップ角を変えた時のコーナリングフォース

## 損傷試験機

ここからは、これまでの知見をもとに試作した駐車場防水層の損傷を再現させる試験機の話である。目標は車両のカーブ時の走行状態の再現である。この時のタイヤはスリップ角をもって横滑りしている。そのためタイヤの回転方向を、進行方向とスリップ角に相当する振れ角を与え、それを強制的に直進させることにより、横方向の力を生じさせることとした。さらに我々の実験室は狭かったので、直進運動を前後に繰り返す仕組みとして装置の専有面積の小面積化を図った。

作り上げた防水層損傷試験機が写真6、図5である。図中のタイヤ部分がクランク機構により前後に動く。その走行路面の一部に、対象とする試験体の駐車場防水層を組みこむ。そしてタイヤは左図で分かるように、進行方向に対してわずかに振れ角（この装置では4度）をもって取り付けられている。ここがこの装置の重要なポイントである。振れ角がなければタイヤは音もなくクルクルと回転する。ただわずかでも振れ角をつけると、とたんに急ブレーキをかけた時のような「キィィー」という摩擦音が発生する。この甲高い音は、外部の仕事から研究室に戻ってくる時、キャンパスの入り口あたりから聞こえていたので、他の研究室にとっては大変迷惑だったと思う。ただこの音が聞こ

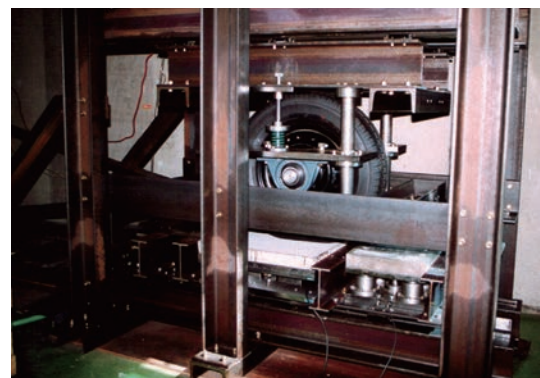


写真6 駐車場防水層損傷試験機

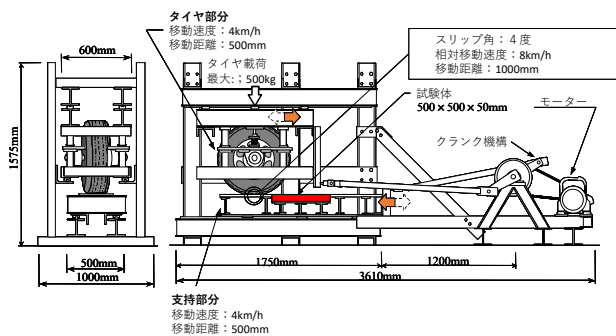


図5 駐車場防水層損傷試験機

えると、試験機が順調に動いているぞ、学生さんが一生懸命試験をしているぞということが遠くからわかり、当時のわたしにとってはホッとさせてくれる安心音であった。

さてこの試験機が当初計画したとおりのものであるかについてであるが、試験機の一部に横方向力測定のためのロードセルを取り付け、コーナリングフォースを確認した。図6が測定結果の一部であるが、実測値はほぼ計算値どおりであった。

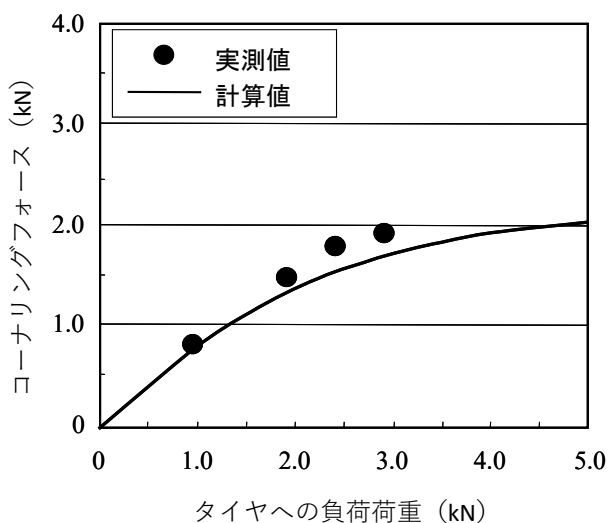


図6 コーナリングフォースの実測値と計算値の比較

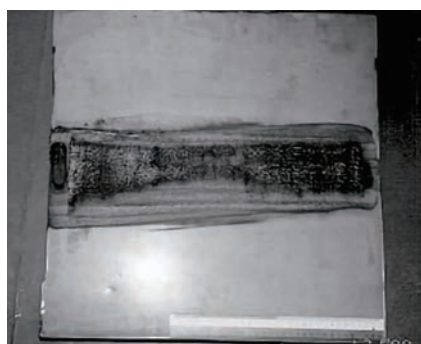
## いくつかの駐車場防水層の試験結果

試験体はコンクリート歩道板の上に駐車場防水層を施工したものであり、これを装置のタイヤ走行部に取り付けた。タイヤへの負荷荷重は、300kgf (294kN) とした。普通乗用車の重量は1~2t位なので、軽めの乗用車のイメージである。これが装置のクランク機構により試験体の上を前後に動く。この時の走行速度は駐車場内のカーブ走行速度を想定し、時速8km/hとしてある。写真7はいくつかの水準で用意された駐車場防水の試験結果である。左写真は軟質ウレタン防水層だけ (普通は用いられない) のものである。4000回走行で当然ながら摩滅してしまった。中央写真は下層に軟質ウレタン、その上に薄い硬質ウレタンをかぶせた試験体である。表層が薄いため早い時期に上層のみがタイヤ走行に沿って割れてしまった。右写真は表層の硬質ウレタン層を厚くした試験体である。これは10万回の走行に耐えたが、表層にわずかであるが、ひび割れの発生が見られた。なお写真にはないが、硬質ウレタン層を充分厚くした駐車場防水層では、10万回走行でもわずかなタイヤの痕跡程度で目立った損傷はなかった。

## 駐車場防水層としての評価

とりあえず損傷試験機は出来上がったが、性能評価の観点からは試験機と評価方法の両者がそろって初めて役に立つ。損傷試験機が出来ただけではまだ不十分である。もちろん目視観察ということでもよいが、目視は観察者によって評価の異なることが多く、できればもっとはっきりとした指標を示したい。そう考えて駐車場防水層の評価についての研究に作業を進めることにした。

駐車場防水は、実は二つの役割を担わされている。ひとつは当たり前であるが防水である。そしてもう一つが車両走行路面としての役割である。そして路面として最も重要な性能は滑らないことである。安全と直結するからである。だから砂粒を散布して、砂粒の凸凹によりタイヤが滑らな



摩耗損傷



剥離損傷



ひび割れ発生

写真7 いくつかの駐車場防水層の損傷試験結果

いようにしている。ところがたくさんの車両が通過すると表面から摩耗する。写真8は試験中の駐車場防水の表面の状態である。防滑層としての砂粒の凸部が削り取られて平らになっている。その結果滑りやすくなっているに違いない。ということで防滑性を評価の尺度とすることにした。

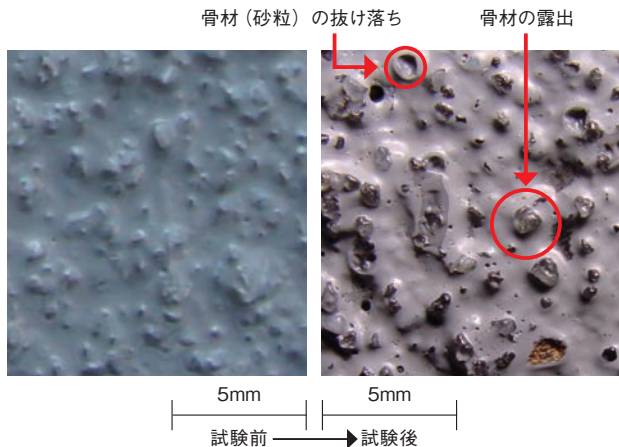


写真8 損傷試験前後の防滑層表面の変化

## 駐車場防水層表面の防滑性測定装置

前述のとおりタイヤの路面に対する抵抗は、タイヤを進行方向に対してわずかでも角度をつけることで生じる。だからこの状態の滑り抵抗を測定すればよいことになる。先ほどの損傷試験機の一部に力測定のためのロードセルを組み込むことも考えたが、複雑な機構をもつ試験機内部への取り付けは大変と思われたので、別途防滑性測定装置を作ることにした。

コンセプトは簡単で、図7に示すようにまずタイヤが円形に回る仕組みを作り、そのアームにロードセルをとりつけコーナリングフォースを測定するというものである。そしてタイヤにはスリップ角をつけておく。写真9が作り上げた防滑性評価試験装置である。タイヤの内側に鉄の円盤が数枚取付けられているが、これは車両の重量をタイヤに負荷するためである。

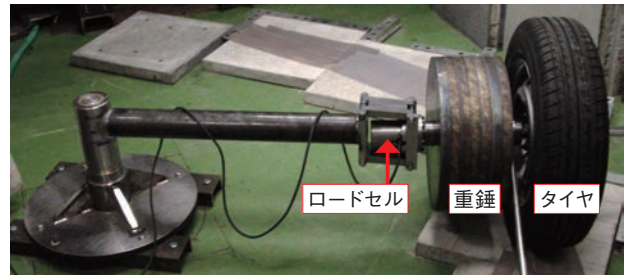


写真9 防滑性評価試験装置

タイヤの駆動であるが、これは人力である。もちろんモーター駆動にしたかったが、当時は研究室の学生さんの人数が多く、研究費が不足しており、担当者には「悪いけど人力でお願い」ということで研究室経済に協力してもらった。繰り返しになるが、非常に目の粗い紙やすりの上を消しゴムでこする作業である。大変な体力勝負だったと思う。

## 試験結果

測定作業であるが、タイヤの移動速度は1km/hとした（この研究全体ではカーブ走行時の速度を8km/hと想定して作業を進めているが、何せ人力なので無理は言えなかった。ちなみにコーナリングフォースレベルでは8km/h時の約8割位の数値とってもらえればよい）。またタイヤへの荷重であるが、500kgはさすがにつらいのでこれも200kgに負けてもらった（コーナリングフォースレベルでは4割程度の数値となる）。そのため全体としてはかなり甘めの結果であること前提としてみていただきたい。

さて結果である。図8に示すように駐車場防水層の初期値のコーナリングフォースはざっと0.94kNであるが、損傷試験機で繰り返し走行を行うことにより徐々に低下し、20万回走行では0.86kNと1割程度低下した。滑りやすくなったということである。また、たまたま1年間屋外暴露

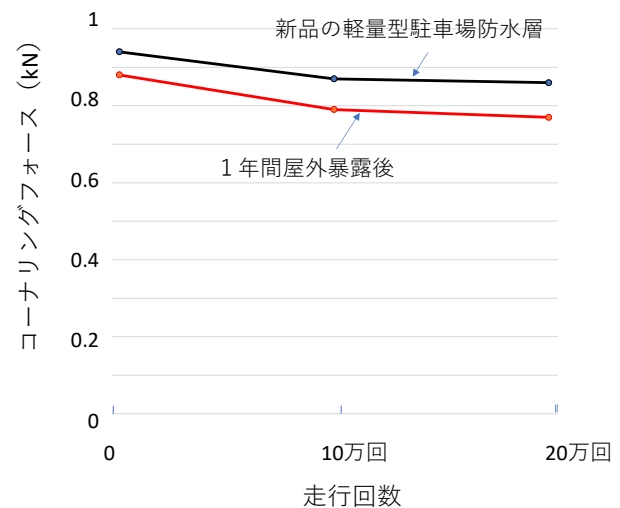


図8 屋外での劣化の影響

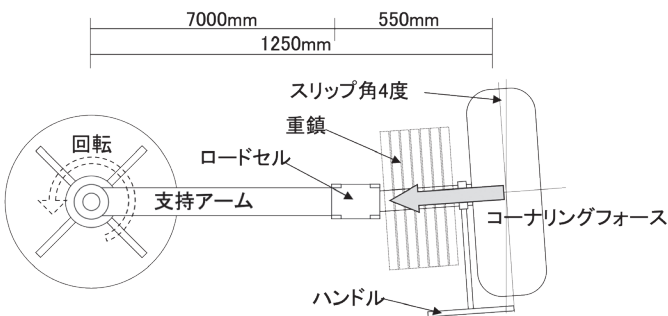


図7 防滑性評価試験装置



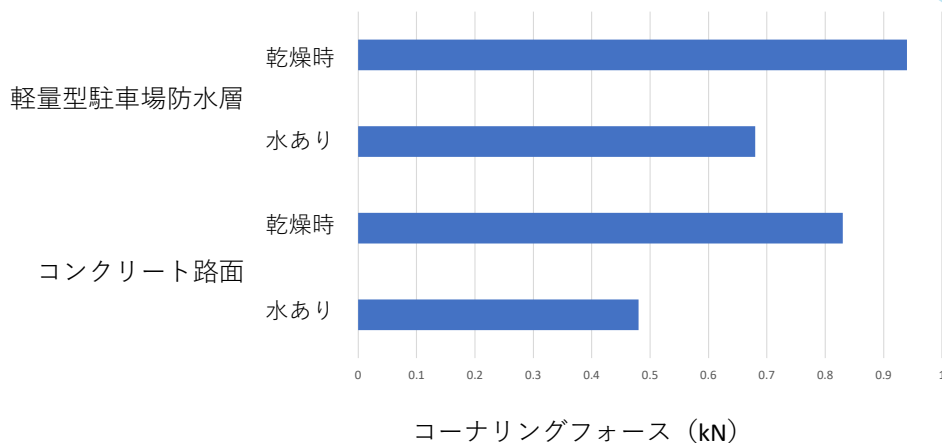


図9 路面乾燥時と濡れている時のコーナリングフォース

した試料があったので、加えてそれも測定してみると0.77kNであり、かなり滑りやすくなっている。砂粒固定に有機材料が使われているので、ウェザリングの影響を受け弱くなったためと思う。そのため実務では必ずウェザリングの影響を考慮して評価すべきであると思われる。

ついでに雨の日のことも気になるので、新品であるが試料の上に水を撒きその影響を調べた。図9に結果を示すが、乾燥時のコーナリングフォース0.94kNに比べて0.68kNと低下し、明らかに滑りやすくなっている。ただ比較のために測定したコンクリート路面の場合は0.48kNであり、それに比べるとまだ高い値を保持している。さすがに駐車場防水と銘打つだけのことはある。

## おわりに

この研究を終えてからというものF-1レースを見るのがつらくなった。レーシングカーが急発進する時、煙が出ているのだ。そして運転中のドライバーの手を見ると、加速と減速が絶えず繰り返され、ハンドルもこまめに動かされている。ということはそのたびごとにタイヤと路面の間には大きな摩擦力が生じている。レース途中でタイヤ交換が必要になるのは当然である。もしレース場の路面が駐車場防水層だったら、これも途中での全面交換が必要になるだろう。F-1はドライバーにとって過酷なレースであるが、タイヤと路面にとっても過酷である。そしてこれの縮小版が駐車場防水である。屋上の駐車場防水層も、そして相手方のタイヤもこの過酷な摩擦力に耐えている。そう思うとそのけなげさに頭が下がる。ひたすら我慢することの大事さを教えてくれる。振り返ってみればこの研究も我慢の連続であった。

ところでこの研究が役に立ったかどうかであるが、もともとニーズがあって取り組んだ研究であるので、役に立った。あるメーカーでは我々の図面をもとにこれと同じ試験機をコピー製作して、自社の材料開発に活用してくれた。

研究室でも試験依頼を数回受けた。ただ研究室は手狭で、次の学生さんの研究のスペースを準備する必要がある。場所をとって邪魔で困ったなと思っていた時、幸い建材試験センターに試験依頼があったとのことで、センターの友人、清水市郎さんが引き取ってくれた。ただ途中から見なくなった。多分試験依頼がなくなったのだろうと思う。短い期間であったかもしれないが、センター業務でも役立つのだと思う。

## 参考文献

- 1) 酒井秀雄：タイヤ工学；グランプリ出版，1987
- 2) 田中享二，香川英司，宮内博之：駐車場防水層の車両走行による損傷試験装置の開発；日本建築学会構造系論文集，第528号，pp.21-26，2000.2
- 3) 田中享二，池田学，石井元：駐車場防水層の車両走行による防滑性変化の評価方法；日本建築学会構造系論文集，第549号，pp.27-33，2001.11



## profile

### 田中享二

東京工業大学 名誉教授・工学博士

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防水工学

## vol.10 防水層の耐風研究から学んだこと：とにかく気になったら思い切ってやってみる。

## どうして防水層の耐風研究をするようになったか

2001年の春のことである。スロバキアからバルトコ・ミカエル君という留学生が、われわれの研究室のメンバーに加わった。故国の大学で屋根・防水工学を勉強したので、それを深めたいとの希望であった。当時は機械固定法による防水層施工が、本格化した時期でもあり、彼の勉強にもなるだろうと考え、これを対象とした研究を担当してもらうことにした。

この工法は写真1のようにあらかじめ固定金具を敷設しておき、その部分に防水層を接合する。分り易く云うと、柔軟な性質をもつ防水層の釘固定工法であり、従来の防水施工法とは発想を全く異にするものであった。これは多少下地が乱暴でも、問題なく防水施工ができるという圧倒的な利点があり、使用例が増えていた。ただこの工法は強風時に生じる吸い上げ力を、この固定部が一手に引き受けなければならない。そして金具自身は6-8mmもある鉄くぎなので強度的には心配はないが、気になるのは下地スラブへの固定であった。特にALCを下地とする場合は、コンクリートに比べると脆弱であり、ALC板から抜け出ることが懸念された。

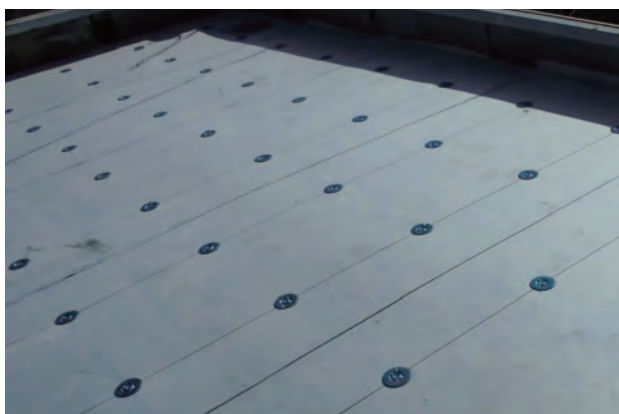


写真1 防水層機械的固定工法における固定金具設置の例

そのためALCを下地とした時の、機械的固定工法の接合問題を研究課題とすることとした。下手な英語と日本語ちゃんぽんの言語的には十分とはいえない指導體制であったが、同君は金具とALC板との接合部の破壊メカニズム

を明らかにし、それに対して安全な設計法を示し、さらに耐風性に優れる工法提案まで行ない、無事博士論文をまとめ上げてくれた。ちなみに同君は現在カナダ国立建築研究所で研究員として活躍中である。

## 防水層の耐風研究の本格化

さてこのようなことで研究は一応の結末を迎えたが、私としてはまだ気になることが残っていた。それは強風による被害のなかに、写真2に見られるように、防水層が横にも引っ張られた形跡のあるものを見たからである。断っておくが、機械的固定法では闇雲に金具を取り付けるのではない。建築学会の「建築物荷重指針・同解説」<sup>1)</sup>や建築基準法施行令に基づく告示<sup>2)</sup>による計算を行い、本数と位置を決められ施工がなされる。ただこの時の計算には、防水層が鉛直上向きにだけ吸い上げられることしか想定されていない。一方、防水層被害は荷重が鉛直方向だけでなく、水平方向からも同時に作用していたことを想像させるものであった。現在の設計法では不十分なのではないか。

ことの重大さから判断して、この問題は研究室単独で手に負えるスケールの話ではないと判断された。そのため建築学会の防水工事運営委員会の中に研究委員会を作っただけ、関係者総力で臨むこととした。そして皆で散々議論した。今までの設計の考え方では横にも引っ張られる力は生じるはずがない。ただ現実には横にも引っ張られたような痕跡がある。話は堂々巡りになってしまった。これはウダウダ考えていても仕方がない。実験をして確かめてみよう。



写真2 台風による防水層の破損

## 実大試験体の風洞試験

さてこれをどうするかである。機械的固定工法防水層は、面全体の防水層の吸い上げ力を金具が担当するので、小さな部分だけを取り出して試験をしても全体のことはわからない。最低でも数メートルのサイズは必要である。さらに実験技術として強風をどのようにして吹き付けるか？実際の台風の襲来を待つか？多分それが一番良いのだと思うが、いつ来るか定かではない。

その時研究委員会メンバーの市川裕一さん（その後この課題で博士論文をまとめてくれた。）が、勤務先の風洞試験装置を使えるように努力してくれ、合わせて同僚の風工学の専門家である加藤信男さんにも、メンバーに加わっていただけるようお願いしてくれた。これは本当にありがたかった。我々委員会メンバーは防水のプロではあるが、風のことに関しては素人だったからである。

そのようなことで、風洞の幅一杯いっばいの、幅2.4m長さ5.5mの原寸大の塩ビシート機械固定防水層試験体を、風洞内部に設置し風を吹かせることにした。**写真3**が試験中の防水層の状況である。風は手前から奥の方に向かって吹いているが、防水層がきれいに膨れ上がっている。写真では固定部がアリ地獄のようにへこんで見えるが、これは周りの防水層が風で持ち上げられているためである。ただこの結果を建築学会で発表したところ、風工学がご専門のある教授から、乱暴な実験であり、スケールエフェクトを考慮した精緻な実験をしなければなりませんよとの厳しい意見もいただいたが、そしてそれはその通りであるが、とにかく実スケールの試験体で防水層がどうなるか見たいという、野次馬的興味には勝てなかった。いずれにしても誘惑が先に立ってしまった実験であったが、はじめて本当に吸い上げられている防水層を見て、全員感動してしまった。

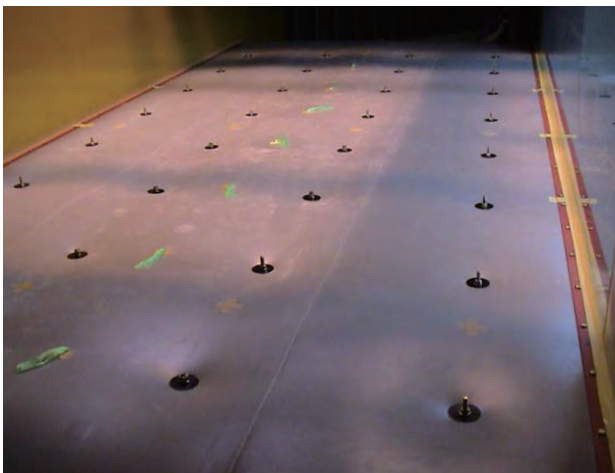


写真3 風洞実験による防水層の挙動  
(防水層が上に吸い上げられている。)

## 建物屋上での防水層の観測にむけて

ただこれが実際の建物屋上で同じようなことが起きているのか？いよいよ研究の本丸へ突入である。そのため測定に利用できそうな建物を探したが、実際の建物では屋上にいろいろな設備機器や雑物を取り付けられていることが多く、しかも測定センサー類を設置させてもらうこともお願いしなければならず、なかなか見つからない。

こうなったら自分で観測に用いる建物を作るより仕方がない。仲間のゼネコンの方をお願いして見積もってもらったら、ざっと300万円位とのことであった。そして研究室の財布を調べて見るとその位は準備できそうであった。（研究室では機械や実験装置の突然の故障に備えて、一定程度の研究資金をいつも常備しておく必要性を、長年の研究室運営で身に染み付いており、それが手つかずのまま残っていた。その代わりその後数年間の研究室は、窮乏生活を余儀なくされたのは言うまでもない。）

早速具体案の検討に入った。まずどこに設置するかである。これは確実に台風の襲来を期待できる場所ということで、沖縄を候補とした。当時、別件で日本ウェザリングセンターの宮古島暴露試験場で暴露試験していたので、特別にお願いして敷地の一部に実験建屋を建設させてもらうことにした。

そして問題の建屋であるが、これには風工学の専門家の意見を全面的に取り入れて、**写真4**に見られるような6m×6mの正方形平面、高さは3mのまるで豆腐を切ったようなのっぺりとした形状とした。これは専門家からの、できるだけシンプルな形状の方がその後の解析や風洞実験による検証等がしやすい、とのアドバイスによるものである。そして**写真5**のように、その屋根面に防水層を敷設したが、これには台風時防水層の挙動を調べるための、ひずみ計、風圧力や固定部に作用する力測定のためのロードセル（これは鉛直力だけでなく横力も同時の測定できる優れたものである。）等が取り付けられた。そのため建物内部は**写真6**に見られるように、データ取り込みのための配線やチューブが張り巡らされ、足の踏み場もない位の雑然状態になってしまった。



写真4 建設した観測建物（この屋上に試験防水層を敷設）



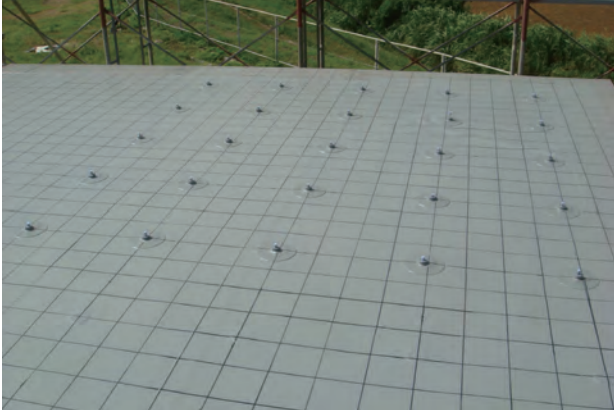


写真5 屋上面の防水層  
(観測のための機器類が取り付けられている。)



写真6 室内の状況

## 台風時の防水層の挙動の観測

さて準備は整った。後は台風を待つだけとなった。この測定で活躍してくれたのは宮内博之さん(東工大助手で、現在は建築研究所の上級研究員)である。肝心の私は、研究所で古参教授のひとりとして日程の予定のつかない出張が難しい立場となっており、研究室で地団太を踏むだけで

あった。なにせ現地に行ったら最後、台風の間ずっと現場に張り付いていなければならないのだ。そしてその前後の数日間は飛行機が飛ばないのである。台風の時合計6回の観測を行ったが、いつも彼がリーダーとなって一切を取り仕切ってくれた。

そしておあつらえ向きの台風が2009年8月6日～7日に宮古島に襲来した。そして台風の襲来の最初から最後まで観測に成功した。この時の台風は、評価時間3秒間の最大瞬間風速は30.5m/sであり、超巨大台風というわけではなかったが、我々の研究目的には十分かなうものであった。図1は特に風雨の強かった8月7日の真夜中0:05からの100秒間のデータである。

まず防水層面に作用する風力である。これは6m×6mの屋根面の角に近いあたりの1.2m×1.2m角内に9箇所、内径8mmφの測定孔を設け、ビニルホースをつなぎ室内の風圧計に引き込み測定した。(室内がジャングル状態になったのはこのビニルホースが走り回っていたためである。)この図では風力の縦軸がマイナスで表されているが、これは屋根面に吸い上げ力が作用していることを示すものである。そして風力に連動してファスナーには引っ張りの鉛直力が生じている。この辺はほぼ予想どおりである。

そして問題の水平力である。データロガーにはっきりと横方向の力<sup>3)</sup>も記録されていた。やはり固定部には水平方向の力が作用している。ついに証拠を押さえた!そしてこれがどの位なのか。そのためこの評価時間10分間における水平力と鉛直力の関係を調べたが、図2に示すように何と両者はほぼ同じ位であった。

話が入り組んで来たので、ここまでの現象を順序だてて説明すると以下の通りである。風が屋上面を走ることにより防水層は上に吸い上げられる。防水層は飛ばされると困るので、抵抗するため固定金具には引っ張り力が生じる。ここまでは教科書どおりである。ただその時同時に横力も生じる。理由は図3に示すように、防水層は軟らかい材料であり、吸い上げ力により膨れ上がるからである。そして

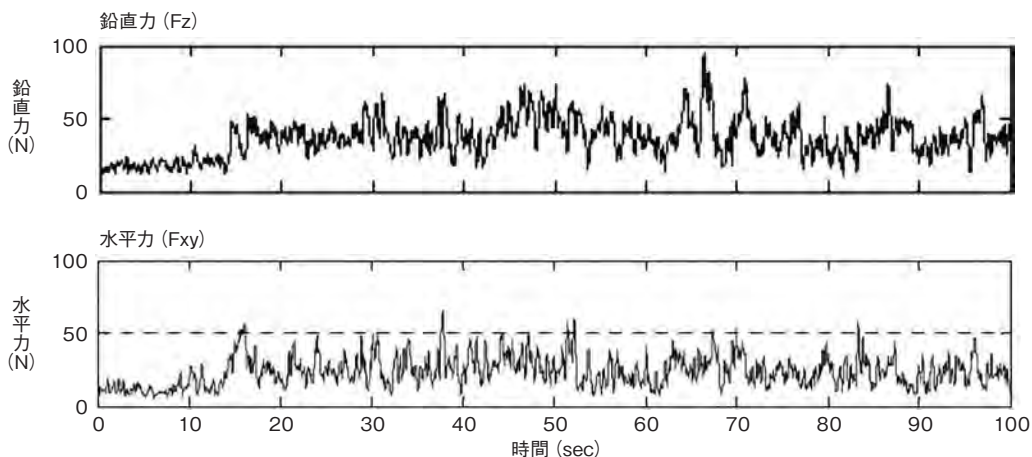


図1 測定された鉛直力と水平力の波形 (2009年8月7日0:05からの100秒間)

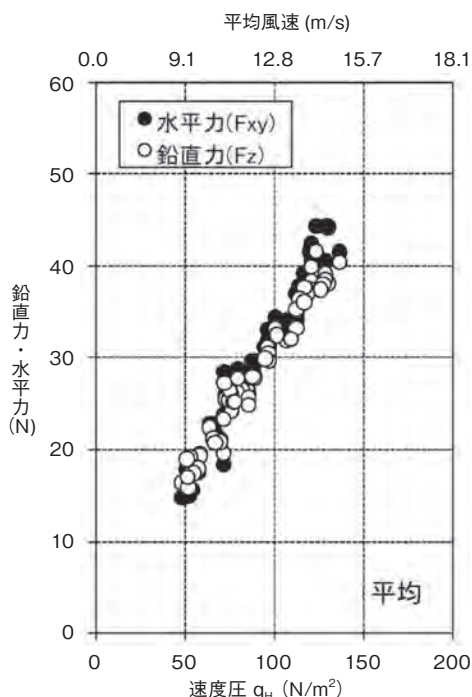


図2 鉛直力と水平力の比較

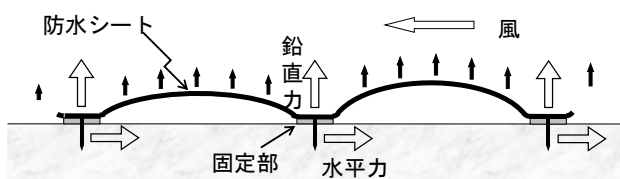


図3 強風時の防水層挙動の模式図

風の流れて、ふくれは風上から風下に向かって伝搬する。ふくれの高さが違う分だけ、防水層の横に引っ張られる力の大きさが異なる。そしてその差の分だけ固定金具は横力を負担させられるのである。

良く考えてみれば当たり前である。ただ台風の時にわざわざ滑りやすく危険な屋上に上がって、間近で防水層の挙動を克明に観察するひとはいなかったのだから、この問題が顕在化しなかったのだろう。

## 終わりに

風が吹けば、それは風上から風下に伝搬するのだから横力が生じることは、よく考えてみれば当たり前のことであるが、防水層が吸い上げられて膨らむ状態は測定されておらず、横にも引っ張られているとは想像もしていなかった。そしてこの観測で固定部には横力が生じることをデータで示すことができ、冒頭の写真の防水層が横方向に引き裂かれた被害にも得心できた。

そしてこの研究が役に立ったかどうかであるが、私が関与してきた研究の中では珍しく役に立った。この研究が契

機になって、日本建築学会発行の「建築物荷重指針を活かす設計資料」<sup>4)</sup>の中に、鉛直力と同時に横力も考慮する必要性が記載されることになった。また防水層の機械固定工法は、コンクリートやALCスラブ以外にも、最近ではデッキプレートのような比較的薄手の鋼板を対象として使用されることが多くなってきており、その場合は固定金具と下地鋼板との嵌合(かんごう)がポイントとなる。その時この横力への抵抗性評価が安全性確保のカギとなる。そのようなことでこの研究は多方面に役立つものとなった。

この研究のターニングポイントは、実大試験体をいきなり精緻な実験を行う風洞に持ち込んで、防水層の挙動を見たドン・キホーテ的実験にある。「気になったら思い切ってやってみる。」これがこの研究から学んだことである。

最後におまけであるが、このプロジェクトをやって良かったと思うこともうひとつ。実は宮古島での観測には、防水層の施工、計測装置の設置と調整、台風時観測と、そのたびに相当数の方々の協力が必要であった。昼間は宮古島の炎天下での過酷な作業であるが、夕方からは天国と化したようで、いつも5時過ぎになると私の携帯に電話が入り、耳を当てると三線やお囃子のにぎやかな音と声高な話し声とが聞こえてきた。もう10年以上も前の出来事であるが、メンバーと再会のたびにすぐその話題になる。全員が苦勞しながらも、このプロジェクトを楽しんでくれた。楽しみながらできた仕事はそうはない。

## 参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説：日本建築学会，2015
- 2) 屋根ふき材及び屋外に面する帳壁の風圧に対する構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件：建設省告示第1458号，2000.5.31
- 3) 宮内博之，加藤信男，本田宏武，中村修治，田中享二：台風0908号における防水シートの挙動(宮古島での台風時における機械的固定工法防水層の挙動の実測 その2) 日本建築学会構造系論文集，第656号，pp.1795-1802，2010.10
- 4) 建築物荷重指針を活かす設計資料2—建築物の風応答・風荷重/CFD適用ガイド，日本建築学会，p.203，2017



## profile

### 田中享二

東京工業大学 名誉教授・工学博士

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防水工学

vol.11 廃コンクリート微粉末の再資源化研究より学んだこと  
：他分野の専門家との共同研究は効率的

## はじめに

ある秋の昼下がりに、かつて私と一緒に研究をしていた橋田浩さんから電話がかかってきた。彼は小池先生の定年退職を機にゼネコンの研究所に移籍して（現在は中部大学教授）、当時は精力的にコンクリートの研究、特に解体建物から出る廃コンクリートの再利用の研究をしていた。ひとしきり昔話を花を咲かせた後、実は頼みがあるので、と切り出した。

話は、廃コンクリートから骨材を取り出すために加熱すりもみの技術を研究していたが、その取り出しに成功した。ただ同時になかなりの量の微粉末も出る。については大学でこれの活用を考えてほしい、そして実験には彼のもとから人も送り込むからということであった。現在のコンクリート製造に使われる骨材のかなりは砕石だが、高度成長期より前に作られた建物では、良質な川砂利、川砂が使われていた。そのため、その頃作られた建物の骨材の品質はすべからく優れて良いものばかりであり、貴重な資源である。

幸い当時の我々の研究所では、他機関との共同研究も強く推奨されており、若干であったが研究費も補助してくれる制度があった。何よりもついこの間まで苦楽を共にしてきた仲間だったので、二つ返事で引き受けることにした。さらにまた研究所の約1/3は我々建築系だが、残りの2/3は無機材料系の教員から構成されており、無機系の先生の協力が得られれば何とかできるのではないかと、というや

や楽観的な見通しもあった。

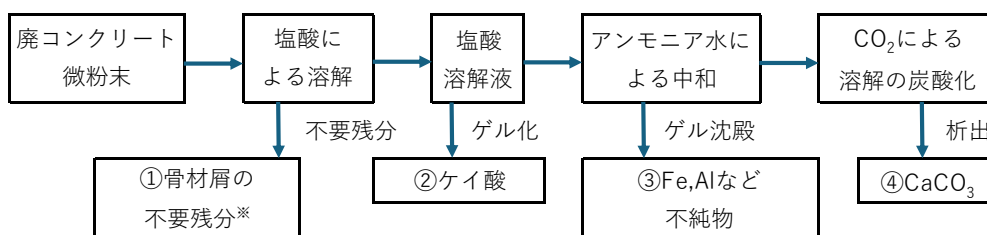
そしてゼネコン研究所から派遣されてきたのが竹本喜昭さんだった。実は彼も東工大建築学科材料講座出身のOBで、昔からの知り合いでもあった。そして研究所では無機材料化学がご専門の、榎本尚也先生と赤津隆先生に研究協力を頼み込んだ。お二人とも昔からの親友で、しかもお酒という共通のキーワードもあった。さらに研究室からは修士課程学生の新島瞬君に担当をお願いした。彼は、私の研究室としては珍しく無機材料を勉強してきた学生さんだった。これも幸運なことであった。ということできわめて仲良しクラブ的であるが、研究チームが出来上がった。だからこれからお話しする研究は、私は大した働きはせず、もっぱら竹本さんを中心とした榎本、赤津両先生、そして新島瞬君のがんばりによりできた仕事である。

廃コンクリート微粉末から  
炭酸カルシウムを取り出す

廃コンクリートから出てくる微粉末は主にセメントペースト部分が粉になったものである。だからこの粉を原材料として、何か役に立つ材料を作ろうということになった。まずは成分を調べた。すりもみ過程では骨材部分も削り取られるため、その影響を見ておく必要があるからである。表1が成分表である。カルシウムとシリカが主体であったが、やはり骨材由来のケイ素成分が倍以上と多くなっていた。そして榎本、赤津両先生のアドバイスをもとに、廃コ

表1 ポルトランドセメントと廃コンクリート微粉末の内訳 (mass%)

種類	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	Na <sub>2</sub> Oeq
ポルトランドセメント	21.2	5.2	2.8	64.2	1.5	2.0	0.005	0.63
廃コンクリート微粉末	50.8	10.1	2.7	23.5	1.3	0.8	0.015	1.94



※ケイ酸を主成分とする石英、長石類、白雲母など

図1 新品の塩酸を用いた廃コンクリート微粉末の素材分離プロセス



ンクリート微粉末を酸に溶解させ、最終的にカルシウムに二酸化炭素を固定化させて炭酸カルシウムを取り出そうという方針が立てられた。

もちろん研究は、一筋縄では行かず苦労したが、最終的に図1に示すようなプロセスで炭酸カルシウムの取り出しに成功した。ちなみに最も効率よく取り出せるのは、濃度4Nか6Nの塩酸50mLに対して廃コンクリート微粉末5.0g～7.5g程度であることもわかった。

## 廃塩酸と廃コンクリートから炭酸カルシウムを作る

何とか炭酸カルシウムを取り出すことができ、行き場のなかった廃コンクリート微粉末の利用が可能になった。とりあえずここまでで橋田さんからの依頼に応えることはできたが、研究としては何となく面白味が感じられなかった。結果は予定調和的で、それはあたりまえでしょという感じなのである。

せっかくアルカリ性をもつ廃コンクリートを使うのだから、その相棒も廃棄物を使ってはどうかという話が、研究会の後の飲み会の時に出てきた。そもそもこの研究グループは、半分飲み会が目的に出来上がったところもあったから、その席は談論風発で盛り上がる。そして酔った勢いもあり、やろうということになった。

実は私の研究室でもコンクリート実験に使った後の洗いは、そのまま排水系に流せないで、一時的にピットに蓄えておいて、酸で中和してから排水系に流すようにしていた。だから酸も行き場のない廃酸を使えば、「廃棄物×廃棄物＝役に立つ材料」という図式が出来上がるのではないかと、乱暴であるが、そう考えたのである。

幸い身近なところに、出所のはっきりしている廃酸があった。それは屋外に放置された鋼材のさび除去に使用されたものである。ただ廃酸なので中身を調べる必要がある。

表2 廃塩酸の分析値

酸濃度	pH	溶解鉄分量	ヘキサメチレンテトラミン
5.08mol/L	0.01以下 (測定限界以下)	1.7g/L	3.5g/L

表2に分析結果を示すが、塩酸以外にもヘキサメチレンテトラミンが含まれており、さらに鋼材由来と思われる鉄分も微量、含まれていた。

最終的に研究会で作りに上げたプロセスを図2に示す。これで何とか炭酸カルシウムを作り上げることが出来ることになった。ただ炭酸カルシウムを取り出した後に残る溶液は、塩化アンモニウムで毒性をもつため、これをいきなり排水系に流すことはできない。そのため研究会では、環境負担を軽減するための更なる検討が進められた。基本は各段階での中和のために用いるアンモニア水や炭酸アンモニア水溶液を、ナトリウムベースとする水溶液に置換することを考えた。このようにして環境のことも配慮して完成させた改良プロセスを図3に示す。炭酸カルシウムを取った後の残りの溶液は塩化ナトリウム、要すればお塩なので安全である。

そしてこのプロセスで得られた炭酸カルシウムは、表3に示すように95.6%はカルシウムであったが、若干それ以外のものも含まれていた。結晶は写真1に示すような細長い米粒状で、炭酸カルシウムの安定相であるカルサイトであった。またいろいろ廃塩酸と廃コンクリート微粉末の混合割合を変えた実験により、カルシウムの回収は廃塩酸50mLに対して、廃コンクリート微粉末10gの組み合わせが適当であることもわかった。

表3 廃コンクリート微粉末と廃塩酸からとり出した塩化カルシウムの分析値 (mass%)

CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
95.6	1.1	2.0	1.3

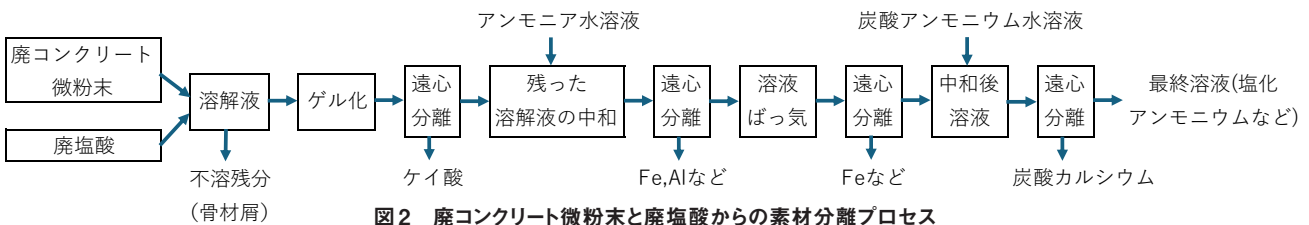


図2 廃コンクリート微粉末と廃塩酸からの素材分離プロセス

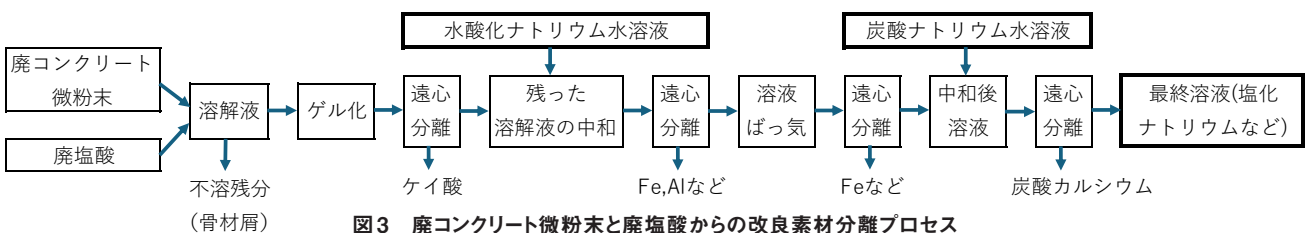


図3 廃コンクリート微粉末と廃塩酸からの改良素材分離プロセス

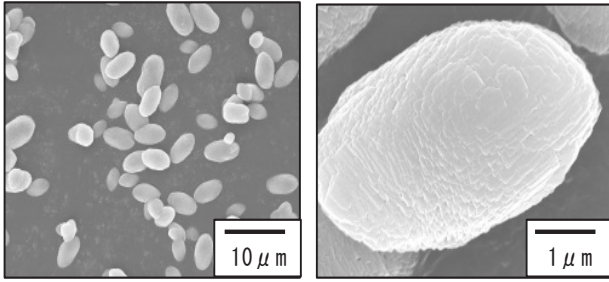


写真1 得られた炭酸カルシウムの電子顕微鏡写真

## 廃硫酸と廃コンクリートから石こうを作る

とりえず廃塩酸でできたので、もしかしたら他の酸でもできるのではないかとさらに頑張ることにした。さっそく竹本さんが、その存在を硫酸工業会まで行って詳細を調べてくれた。実は国内で生産されている酸の中で、最も多いのは実は硫酸なのだそうである。主に肥料や薬品製造、化学繊維製造に利用されている。また金属加工などの洗浄用としても利用されており、それらから出る廃硫酸は一部再利用されているものの、中和処理され廃棄される量が膨大であるとのことであった。この廃硫酸も同様に廃コンクリート微粉末処理に利用できれば、工業活動において排出される廃酸の処理可能範囲が広がり、環境負荷低減の観点からも望ましいのではないかと、やや我田引水的な理由もつけて、悪乗り感がなくても良かったが、やってみることにした。

プロセスは簡単で、廃硫酸と廃コンクリート微粉末を混ぜるだけである。そして今回使用する廃硫酸には、金属メッキの前処理に使った廃液をもらってきた。これには硫酸約50%とリン酸10%程度さらに微量の界面活性剤が添加されているものであるが、念のため中身を調べた。結果を表4に示すがやはり硫黄が圧倒的に多く、その他リン、鉄も少量であるが含まれていた。

次にこれをどの位の濃度で廃セメント微粉末と混ぜるかであるが、事前に新品の硫酸を使って予備的な検討を行い、0.05mol/L位が適当であることを見いだしていたので、濃度を0.025～0.2 mol/Lの範囲で実験を行った。結果を図4に示すが、0.075mol/Lの時が焼石膏の収率10mass%と比較的良好いことが分かった。pH値も6.3となり、さらに鉄分除去作業を行えば環境省の定める排水基準（pH5.8以上、8.6以下、リン16ppm及び溶解性鉄10ppm）もほぼクリアする。ちなみに写真2は取り出した焼石膏である。

一応ここまでで石膏を取り出すことは出来るようになったが、さらに欲を出して、収率をもっと上げることが出来るか、もうひと頑張りしてみた。プロセスは図5に示すように、1回目の操作で残った不要残分に、さらに新たな廃硫酸を投入して焼石膏を取り出すという方法であ

表4 廃硫酸の分析値 (g/L)

S	P	Fe	Na
29.0	9.7	5.8	0.01

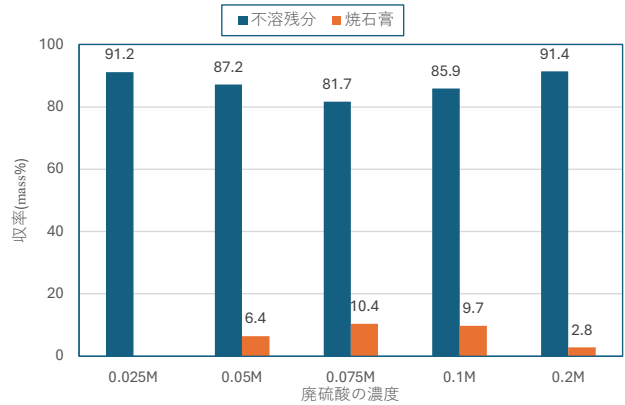


図4 廃硫酸の濃度と石膏収率との関係

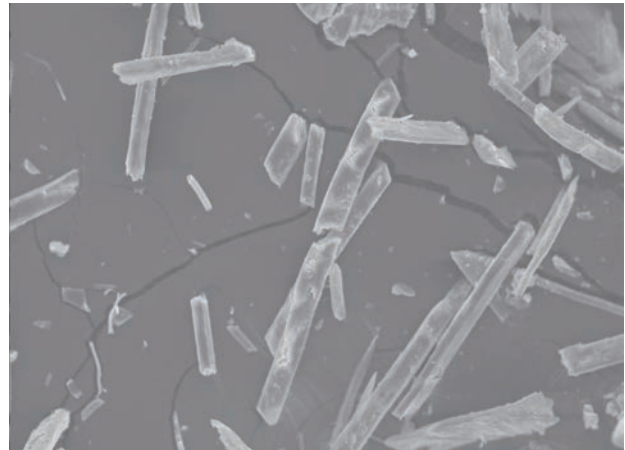


写真2 得られた石膏の電子顕微鏡写真

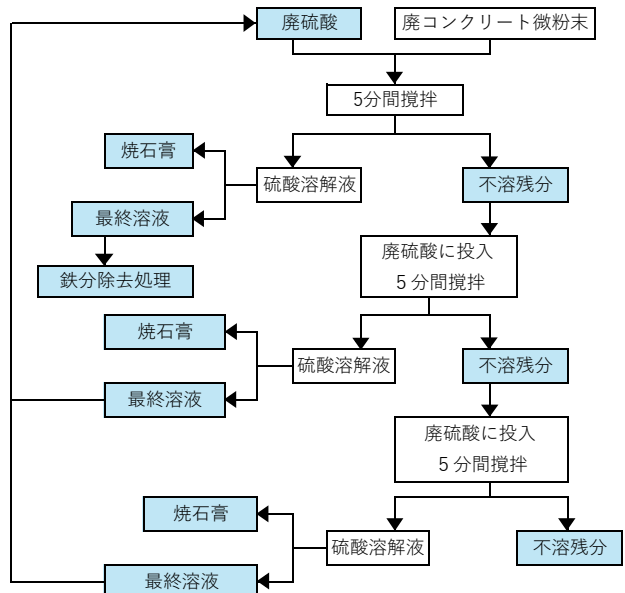


図5 廃硫酸を用いた廃コンクリート微粉末の繰返し処理プロセス



る。そしてそれを繰り返したのである。その結果は図6に示すように、さらに収率を上げることが出来、1回目と2回目の合計が22.0mass%と向上させることが出来た。さらにもう一押しということで繰り返したが、もう収率は向上せず横ばいであった。ただこうすることにより、使用する廃酸の量も増えるので当然pH値も下がり、排水は強い酸性となる。このような結果を見ると、無理をして収率を上げた方が良いのか、1回で止めて排水系に流出させる溶液のpH値を基準内に収めておく方の、どちらが良いのかは微妙である。個人的には無理をしない方が良いように思う。

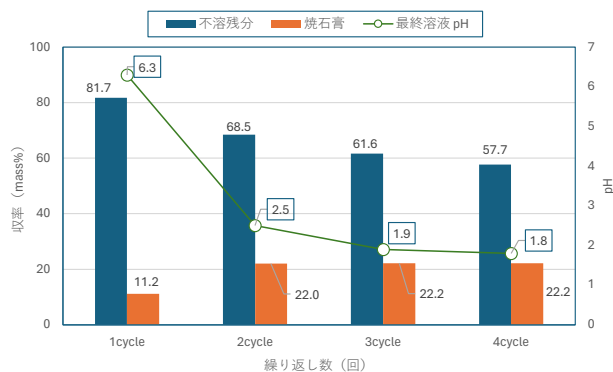


図6 繰り返し操作による石こう収率と最終溶液のpH値

## 研究に便乗して温泉にゆく

ところでこの研究にかこつけて楽しいこともあった。建築学会の大会が仙台で開催されたことがあった。東北は蔵王温泉をはじめとして酸性の温泉が多いが、なかでも強力な酸性で有名などころがある。秋田県の玉川温泉\*である。当時は酸性の廃液を探し求めていたので、温泉水も一応検討の対象になっていた。ということで竹本さんと新島君と3人で探訪した。これにはもうひとつ理由があった。この温泉水は渋黒川という川に流れ込むのだが、酸性なのでこれを中和する必要がある。そのため途中に石灰石を通して中和する処理する玉川酸性水中和処理施設が作られており、ここもぜひ見学したいと思っていた。写真3は施設内の温泉水を中和するための中和反応槽である。

温泉はさすがに強烈であった。酸性の熱水 (pH1.2、温度98℃、約8400L/分) が写真4に示すように地中から湧き出している。水蒸気と熱のために写真を撮るのも苦労する位である。温泉はこれを写真5に示すように湯畑で冷やし、さらに薄めて入浴するのであるが、その薄める濃度によって浴槽が酸性度の弱いものから強いものまで3段階に分かれていたのには、ビックリであった。もちろん弱い方に入ったが、それでも肌がヒリヒリする感じであった。帰りの車のなかで、我が国にはアルカリ性の温泉もあるので、酸性温泉水とアルカリ温泉水を混ぜたらどうなるのかと、能天気なことを話しながらの楽しい一日であった。



写真3 温泉水を中和するための反応槽



写真4 温泉水の噴出



写真5 湯畑

\*玉川温泉は湯治場として有名である。温泉水は強い酸性 (pH1.2) である。そして1940年に発電所建設と農業振興を目的に、この水を田沢湖に引き入れた。その結果水質が酸性化し、水力発電所施設の劣化と農業用水酸性化が問題化し、その是正のため1972年に石灰石を使った、玉川酸性水中和処理施設が作られた。



## おわりに

処理に困っていたもの同士を組み合わせることにより、役に立つ材料を作り出すことが出来るようになったので、この研究もここまでとした。ところでこの研究が役に立ったかどうかであるが、廃コンクリート、廃酸という、行き場のないもの同士から、炭酸カルシウムと石こうを作り出すプロセスはオリジナルであり、幸い特許として認められた。ただ苦心して取り出し物質は、材料としては極めて安価である。だから商業的にはまったく採算が合わない。ということで、本当に実務面で役に立つかどうかは疑問である。取り出したものが高価なものであったらとつくづく思うが、それは仕方がない。

このようにやや不純な動機を含みながら始められた研究であったが、他分野の専門家との共同研究は圧倒的に研究展開が速く、しかも効率的に仕事を進めることができた。そして中心となってがんばってくれた竹本さんには、研究の途中で私どもの大学の社会人博士コースに入学してもらった。博士課程はふつう3年間であるが、どんどん研究が進むので2年間という最短期間での学位取得が可能になった。(私は定年で最後まで面倒をみることはできなかったが、林静雄先生が後の指導を引き継いでくださって、無事終了させることができた。これには林先生のお骨折りも大きかったものと、今でも感謝している。)

それまではほとんど素人に近い学生さんと一緒に、ゼロから立ち上げるような研究ばかりしていたので、しょっちゅう壁にぶつかり、もたもたして学生さんによっては博士課程4年在籍という例もあった。だから私にとって2年は驚きであり、プロが集まって仕事をするとはいくつかと、そのパワーをしみじみと実感した。

ここからは本当に付けたしであるが、強く印象に残っているので書くことにする。この研究会の最終回を、私の定年直前の2011年3月11日の15:00からを予定していた。最終なので、当然終わった後飲もうという魂胆である。時間が近づき竹本さんが研究会の資料の準備を始めてくれた、その時である。突然建物が揺れ始めた。強い揺れであった。しかも揺れがいつまでも続く。これは大地震だと直感した。1968年に北海道大学の学生時代に経験した巨大地震、十勝沖地震のことを思い出したからである。すぐに別棟にあった実験室に行き安全確認を行い、その足で事務室に廻り、テレビで現地中継を見させてもらった。そこには津波に飲まれつつある町があった。

もちろん私の研究室も被害を受けた。**写真6**は揺れが収まった直後の私の机である。本は書棚から飛び出し、パソコンのモニターは横を向き、机の書類は飛び散る、であった。そうこうしているうちに、福岡から榎本さんがやっと研究室に到着した。もしかしたら途中で動けなくなってい



写真6 地震直後の私の机

るのではないかと、皆で心配していたが、電車は大学近くの駅で止まってしまったが、何とか来ることができたということであった。落ち着かない気持ちのなかでの研究会であったが、終了した。

これで研究会は完全に解散である。その後は打ち上げ会予定で、近くのお店を予約していたが、当然無理である。仕方がないので私の部屋でということになり、冷蔵庫に残っていたビールやウィスキーを取り出した。丁度準備を始めた頃、事務室から帰宅困難者のために大学で保有している非常食を供出する、との連絡があった。また研究室には私共の学生以外にも、他の研究室の学生さんも集まって来ていた。私も含め、皆ひとりでは不安なのである。非常食は率直に言って決して美味しいものではなかったが、それしかないので皆で感謝しながらいただいた。東日本大震災当日の研究室の夜の風景である。



## profile

### 田中享二

東京工業大学 名誉教授・工学博士

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防水工学

## vol.12 最終回: 大学での研究はラグビーに似ている。

もともとラグビーファンというわけではなかった。それがたまたま明治大学の建築学科を卒業した今富麻弥さんが、我々のチームにメンバーとして加わってくれた。彼女は高校生時代水泳をやっていたスポーツウーマンであった。そしてその年の冬近くの頃、「先生、ラグビーは好きですか?」と私に聞いてきた。伝統の明早戦のチケット(一般には早明戦と呼ばれることが多いかもしれないが、明大関係者は必ず明早戦と呼ぶ)を取ってあげますと云うのだ。

ラグビーに関しての知識はなかったが、ラグビー明早戦は野球の早慶戦と並び称される有名な対校戦である程度のは前から知っており、ラグビーというよりは「伝統戦」であるという言葉にひかれて、さらにミーハー的気分もあり、ぜひとお願いし貴重なチケットを入手することができた。

その日の神宮の森は、初冬であったせいもあり人影はまばらであった。しかし国立競技場に近づくにつれ人の数が急増し、ゲートのあたりは大混雑であった。もちろん国立競技場内に入ったのは初めてである。テレビ等では何度も見ていたが、入ってみてフィールドの広さと開放感には度肝を抜かれた。入口からやや薄暗い通路を通過してグラウンドに入ると風景が一転したのである。すでにスタンドは両校の応援者がいっぱい、伝統の一戦特有の熱気が漂っている(写真1)。異次元に入り込んだようで、私も一気にラグビーモードになった。



写真1 昔の国立競技場でのラグビー・明早戦(2012.12.6)

もうひとつ嬉しいことがあった。昭和39年のオリンピック時の聖火台が残っていて、遠目ではあったが、それを見ることが出来たのである。私の世代のものにとって、前回の東京オリンピックは特別の存在である。それは単なるスポーツイベントではなく、戦後日本がここまで復興したということ、世界に示す国家的イベントでもあった。新幹線が走り、高速道路が整備され、もちろん建築でも丹下健三の代々木の体育館等、数え上げればきりが無い。その総仕上げがオリンピックであった。そしてこの国立競技場では10月10日、最終ランナーの坂井義則さんが急勾配の階段を一気に駆け上り、紺碧の空の下聖火台の前で一度トーチを高々と掲げ、そして点火したのだ。すべての日本人が待ち望んだ一瞬であった。その本物を見ることができたのだ。

いよいよ試合が始まった。ラグビーの細かいルールは知らないが、手でボールを前にパスしてはいけないこと位は知っている。ボールを持った人は、敵ゴール目がけて全力で走り、相手に捕まりそうと思った瞬間にパスを出す。その時は必ず横か後方にいる仲間に渡さなければならない。ラグビーのなかで最も大事なルールである。そのためには当然他の選手も同時に走っていなければならない。テレビではボールを持っている選手ばかりがクローズアップされてわかりにくい、競技場では全体が見えるので、というよりは全体しか見えないので、ボールをもった選手が横後方にパスをする様子がよくわかるのだ。そして順送りでもパスを繰り返し、最後にボールを受け取った選手が敵陣に飛び込み、地面に着けるのだ。トライである。

ボールは横か後方にしかパスされていないのに係わらず、ボールは敵陣まで運び込まれる。ちょっと不思議に思えるが、これは全員が前方に全速力で走っているからである。そしてボールをもっている選手は、仲間が必ずその位置にいるはずだとの確信だけでパスを出しているようにも見える(写真2)。さらに順送りでもボールを回せるのは、実は選手たちによるフォーメーションがきれいにできているからだ。パスが繰り返されて、最後の選手が全力で走り切り、敵陣にトライする光景は実に気持ちが良い。熱気あふれるスタジアムの中に涼風が吹いたような快感を覚える。





写真2 仲間へのパス  
(関東オールスターゲーム、秩父宮ラグビー場 2022.7.3)

そして突然この光景は、研究室での学生の研究指導にも似ているようにも感じた。研究室にはいつも同じ人数がいるとは限らないが、それでも10人程度のメンバーがいる。そしてひとりひとりが自分の研究課題をもち研究を進めている。

ただ研究は一人ではできない。状況に応じて他の人と協業が必要になる。だから見かけ上、ひとりで研究をしているように見えても、実は研究室全体が動いている。そして学生さんごとに、目には見えないフォーメーションが作られ、パスが繰り返されている。このようにボールを回しながら研究を前にすすめ、最後に担当学生がトライを決める。卒研は卒研の位置、修士課程の学生は修士の位置、博士課程の学生は博士にふさわしい位置で走っている。もちろん課題ごとにフォーメーションは変わる。研究室で10個課題があったら、10の目に見えないフォーメーションが作られている。

4年の学生さんは研究の素人なので、最初はきめ細かな指導は必要だが、だんだん走力がつき、ひとりで走ることが出来るようになる。そして最後にトライを決めてくれる。ただ学生さんの走力には個人差があり、出来る学生さんは、かなり早い時期にフォーメーションから抜け出し、ぐんぐん速度を上げて独走してトライを決めてくれる。修士課程の学生さん位からは、走る速度が速すぎて、指導教員である私よりはるかに先に行く学生さんも出てくる。むしろ私の方が追いつくのに苦労する。博士課程になると完全に私が後方に取り残される。独走態勢に入った学生さんの疾走は本当に早い。実感である。

ただ全員がそうだという訳ではない。なかなか走力の付かない学生さんも中にはいる。本人の実力や研究に対するモチベーションが低いことも原因であるが、運悪く研究課題が合わない、あるいは難しすぎることもある。研究室の研究は、答えがあるのかどうか分からないことを課題とするので、当然そのようなことは起こりうる。さらに今の学生さんは、就職活動等に時間をとられ、自分の研究に集中

できる時間がそもそも少なくなっている。いろいろな事情が重なり走るのが遅くなり、立ち止まってしまう学生さんもいる。ひとりで相手ゴールまで走り切れないと判断される時は、研究室全員で担当学生を中心にスクラムを組み、ボールを力づくで敵陣に押し込む(写真3)。ただその時大事なことがひとつある。必ず最後のトライは担当の学生さんにさせることである。



写真3 スクラムを組んでの押し合い

このような思いで試合を見ていると、次第にフィールドにいる選手が研究室学生と重なってくる。そして〇〇君もっと頑張れとか、〇〇君無理をせずパスを横へ出せとか、力が入ってくる。研究室にいるのかラグビー場にいるのか、分からなくなってくる。

その日の試合は、残念なことに僅差で明治大学は早稲田大学に負けてしまった。周りの明治大学応援団といっしょに落胆したのは言うまでもない。その後もひとりで数回ラグビーを見に行ったが、いつも席は明治大学側と決めている。



## profile

### 田中享二

東京工業大学 名誉教授・工学博士

1945年 札幌生まれ

専門分野：建築材料、建築構法、防水工学