

論文 可視化モデルによるひび割れ内雨水の挙動に関する実験的研究

藤岡正見^{*1}・鈴木計夫^{*2}

要旨：鉄筋腐食に深く関係するひび割れ内水分に関する基礎的なデータを得るため、現実のひび割れ表面を模した粗面をもつ塩化ビニル板と、これを型枠としたモルタル接触部との間に、その幅を0.01mmの精度でひび割れを作り出す手法を開発した。このひび割れ内に雨水が浸入してゆく状況を観察調査し、その結果に基づき雨水浸入のメカニズムを考察した。

また、雨水がモルタルのひび割れ部へ浸透した後のひび割れ内の湿度を、小型静電容量式相対湿度センサを改造して計測できることを確認し、その変化状況を明らかにした。

キーワード：ひび割れ、湿度、雨水、耐久性、可視化

1. はじめに

鉄筋コンクリート建物の老朽度調査をすると、雨がかりする部分において鉄筋の腐食がしばしば観察される。ひび割れ内での雨水の挙動を実験的に検証した研究は、雨漏り防止の見地からは多数なされてきたが、耐久性の問題としてとらえた研究は、様々な理由からこれまでほとんどなされてこなかった。従来鉄筋コンクリート部材の耐久性は、中性化深さの観点から論じられることが多かった。しかし鉄筋腐食は通常の場合、ひび割れのある断面から始まることは明らかであり、ひび割れ内の水分移動、およびひび割れ部の鉄筋近傍における水分の状態を明らかにすることは耐久性上重要な課題である。

本実験は、現実のひび割れとはやや異なるが、研究の足がかりを得るために、浸入水が見えるモデル試験体を製作し、ひび割れ内への雨水の浸入状況および雨水がモルタルへ浸透した後のひび割れ内の湿度変化を調査し、考察を行ったものである。実験は以下の3実験に分かれている。まず実験Ⅰではひび割れ面の粗さの差異について調べている。実験Ⅱはひび割れ幅およびモルタルの乾湿状態と水の浸入状況との関係を調査し、雨水浸入のメカニズムを考察した。実験Ⅲでは小型の薄膜ポリマー静電容量式相対湿度センサーを用いて、ひび割れ内の湿度変化を計測した。

いずれの実験で用いた試験体も、ひび割れ幅は筆者らの考案したヘアラインシフト法と名付ける以下の本文に述べる方法によって制御した。

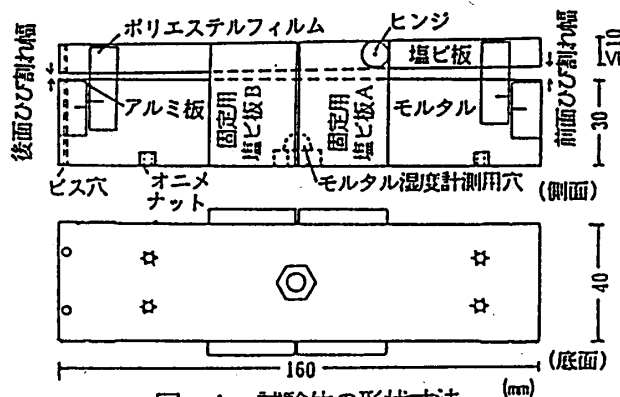


図-1 試験体の形状寸法

2. ひび割れ幅の制御と注水

2. 1 試験体の形状寸法

試験体は、図-1に示すように塩化ビニル板（以下塩板と略記）とモルタルとの間にひび割れを模した隙間をあけたもので

* 1 長崎総合科学大学助教授 工学部建築学科、工修（正会員）

* 2 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

ある。製作には先ずセメント強度試験体製作用の型枠を用いて、塩ビ板を型枠底にセットし、標準砂を用いたモルタル ($W : C : S = 0.65 : 1 : 2$) を打設した。翌日脱型後 7 日間水中養生し、その後は気中養生した。

2. 2 ひび割れの作製とひび割れ幅の制御

モルタルと塩ビ板との間に隙間を生じさせ前面および後面のひび割れ幅を所定の値にする手順は以下のとおりである。先ずモルタル下面に埋め込んでおいた 4 個のオニメナットにアルミアングル ($L : 900 \text{ mm}$) をビス止めし、ひび割れ発生用架台に塩ビ板を固定した後、アルミアングルの先端をビス回転によって微小移動し、前面ひび割れを生じさせた (図-2 参照)。このとき図-1 左方に示すビス穴に 2 本の長ビスを通し塩ビ板とモルタルの微細な凹凸がずれないように仮止めしてあるので試験体後面は開かない。また図-1 に示すように後面部にはアルミ板が埋め込まれており、モルタルがつぶれないように配慮してある。

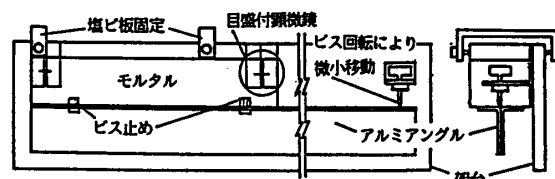


図-2 ひび割れ作製方法

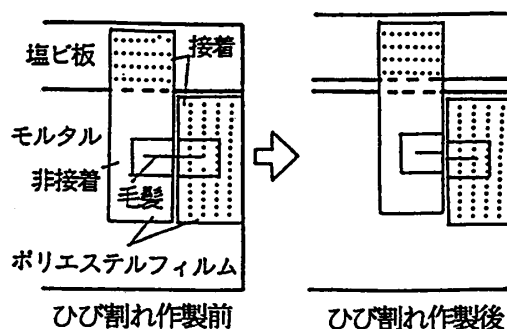


図-3 ヘアラインシフト法によるひび割れ幅の制御

ひび割れ幅の制御は、筆者らが考案した図-3 に示すヘアラインシフト法によった。すなわち 0.01 mm の精度で所定のひび割れ幅を作る方法は、裏面に接着剤の付いたポリエステルフィルムシートを塩ビ板とモルタルにわずかの隙間をあけて貼り付け (ただし塩ビ板に貼り付けたシートのモルタルにかかる部分の接着剤はアセトンでふき取っておく)、これらのシートにまたがるように直径が 0.03 mm 程度の毛髪を同様なフィルムシートにより貼り付けた後、隙間部で毛髪をカミソリによってカットする。ひび割れ作製後は左右の毛髪位置がシフトし、このシフト量がとりもなおさずひび割れ幅となる。このシフト量を目盛り付き顕微鏡によって観察しながらひび割れ幅を制御する。直接ひび割れ部を顕微鏡観察して得られるひび割れ幅が、ときとしてセメント析出物やひび割れの凹凸によって精確さが損なわれる欠点があるが、この方法によって克服された。

ひび割れ幅を固定するため固定用塩ビ板 A (図-1) をモルタル側面にのみ接着し、上部塩ビ板はヒンジ回転するように取り付ける。次に後面を開けるため長ビスをはずし、同様の方法でひび割れ幅を制御しながら固定用塩ビ板 B (図-1) を上部塩ビ板とモルタルとに接着する。

なおひび割れ後の塩ビ板側にペーストの付着はなく、実際のひび割れ面とは片面は異なる。

2. 3 注水方法

今回の実験では水平ひび割れのみを想定している。試験体を水平な台上にひび割れが水平となるように置き、滴下制御装置と注射針とを用いて雨滴 (実験では蒸留水を使用) が 20 秒に 1 滴ひび割れ内に入るようにした。注射針先端から出た滴が前面ひび割れ上部の塩ビ板小口に垂れるようにしておくと、滴はひび割れ内に浸入していった。1 滴の量は 12 mg 程度であった。

3. 実験 I : ひび割れ面の粗滑に関する実験

3. 1 実験の目的

以前筆者の 1 人はアクリル板を用いたモデルひび割れ試験体により雨水浸入に関する実験を行ったが [1]、このときはひび割れ面に微細な凹凸を付ける手法が見つからず、ひび割れ面は平

滑な状態で試験を行わざるをえなかった。

現実のひび割れ面には微細な凹凸が存在し、平滑な場合と比較すると、ひび割れ幅が同一でもひび割れの実表面積には差異があるために雨水浸入量に差異が生じることは容易に想像される。

今度塩化ビニル樹脂は90℃程度で表面が軟化し、それに研磨布を押し当てることによって粗面を転写できることが分かったので、均質な粗面を持つ塩ビ板を大量に製作できる目処がついた。

また、海砂使用のモルタルシリンドラーの割裂面に沸騰水中で塩ビ板を押し当てて得た粗面は現実のひび割れ面にかなり近いものと思われる。

この実験の目的は、ひび割れ面が平滑な場合と、現実に近いひび割れ面の場合とで、浸入水量にどの程度量的な差異が生じるかを明らかにするとともに、研磨布の粗面を転写した場合には、両者間のいずれの辺りに位置することになるのかを調べることにある。

表-1 試験体種別

試験体記号	転写面	前面ひび割れ幅	後面ひび割れ幅
M 1	モルタル	0.10mm	0.05mm
M 2	モルタル	0.20mm	
F 1	平滑	0.10mm	
F 2	平滑	0.20mm	
#40-1	研磨布	0.10mm	
#40-2	研磨布	0.20mm	

3.2 塩化ビニル板への粗面の転写方法

沸騰水中においてモルタルシリンドラーの割裂面に塩ビ板を押し当てその粗面を転写するための加圧には3トン、30分を要した。出来上がった塩ビ板は、細かい凹凸以外にうねりも含み、その厚さは加圧前の10mmから7～9mmに減少した。

研磨布からの粗面転写は、スチールプレート間に塩ビ板と研磨布とを挟み、2個の小型万力で締め30分間煮沸して行った。使用した研磨布の研磨材はアルミナ質のものである。その粗さは、小売店で流通している最も粗い#40とした。

3.3 試験体の種別

表-1に試験体種別を記す。各種別について3体ずつ製作し試験している。20秒に1滴の速さで注水し、5または10滴毎に浸入水量を10mg単位で計測し、また浸入水部分の記録（スケッチ）を行った。注水は、後面に浸入水が達した時点で終了した。

3.4 実験結果およびその考察

モルタル割裂面転写試験体での水滴の浸入状況例を図-4に示す。前面から後面へ均一に浸入してゆくわけではなく、複雑な地模様を描きながら進んでゆくことが分かる。塩ビ板面積64cm²の内、浸入水が占める面積の比率を浸入水面積率と呼ぶことにして、これを縦軸に、横軸には浸入水量をとった両者の関係を図-5に示す。各線は3体の平均曲線である。同図から研磨布転写の場合は、モルタル割裂転写面と平滑面とのほぼ中間にあることが分かる。

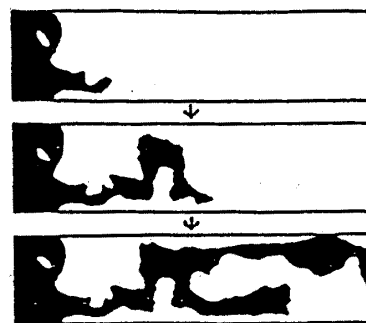


図-4 浸入状況例

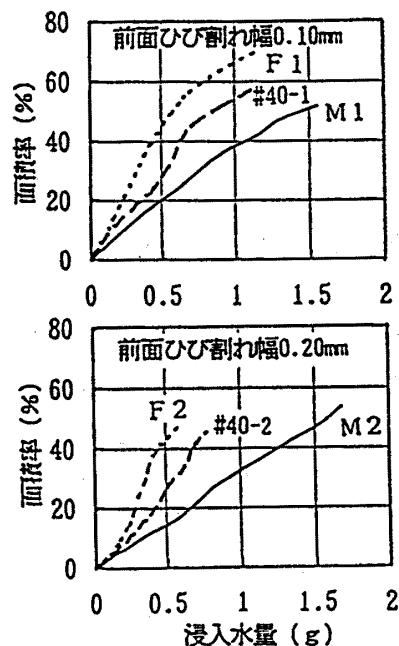


図-5 浸入水量-面積率関係

4. 実験Ⅱ：ひび割れ幅とモルタルの乾湿に関する実験

4.1 実験目的

この実験の目的は、ひび割れ幅およびモルタルの乾湿の状態が、ひび割れ内への雨水の浸入状況に対してどのように影響するか、またそのメカニズムを明らかにすることにある。

実験Ⅰから分かるように、ひび割れ面が平滑な試験体では現実のひび割れ内への浸入水量とは大きく異なってしまう。可視化実験としては、現実のひび割れ面からその粗面を転写して実験するのが好ましいが、多数の試験体について同一の粗面を得るのは困難である。

本実験では研磨布の粗面を転写して行うことにする。

4.2 試験体種別

試験体の前面ひび割れ幅は0.05, 0.10, 0.20, 0.30 および0.40mmの5種類、後面ひび割れ幅は0.05および0.10mmの2種類とした。同じひび割れ幅の試験体を3体ずつ製作した。

注水は先ず試験体が乾燥した状態で行い、終了後半日水道水に浸けた後、気中放置し試験体モルタル底部中央穴（図-1）の湿度が90%程度の湿潤なときに再び注水し湿潤状態での試験をした。乾燥状態での同じ穴の湿度は60%前後であった。

4.3 実験結果とその考察

浸入水量と浸入水面積率との関係を、代表例により図-6に示す。また表-2には浸入水面積率が30%のときの各試験体の浸入水量（3体の平均値）を示す。同表中の仮定しみ込み量は、浸入水が前面から4.8cm（30%）まで隙間なく詰ま

ったと仮定し、その容積を浸入水量から減じた値である。試験体が乾燥している場合の仮定しみ込み量は、例外もあるがひび割れ幅にかかわらずあまり変わらない値となっ

ている。一方試験体が湿潤な場合には仮定しみ込み量にばらつきがみられる。この原因の一つとして湿潤の指標にひび割れ面の湿度ではなくモルタル穴の湿度を採っていることも考えられる。

前面ひび割れ幅が大きな試験体の典型的な浸入水状況を図-7に示す。浸入は次の3段階に分かれる。第1段階では、モルタルへしみ込まずに残った浸入水が入口部全体を満たしながら徐々に奥へ進んでゆく。ひび割れ面は水平であり一部の水は下へ垂れてしまいそうにも思われるがそうならない理由は表面張力のためであろう。第2段階では、ほぼ一定の幅で奥方向へのみ一筋伸びる現象が見られる。伸びた筋は先端程狭くなっているため毛管力が働き、また入口部でのモル

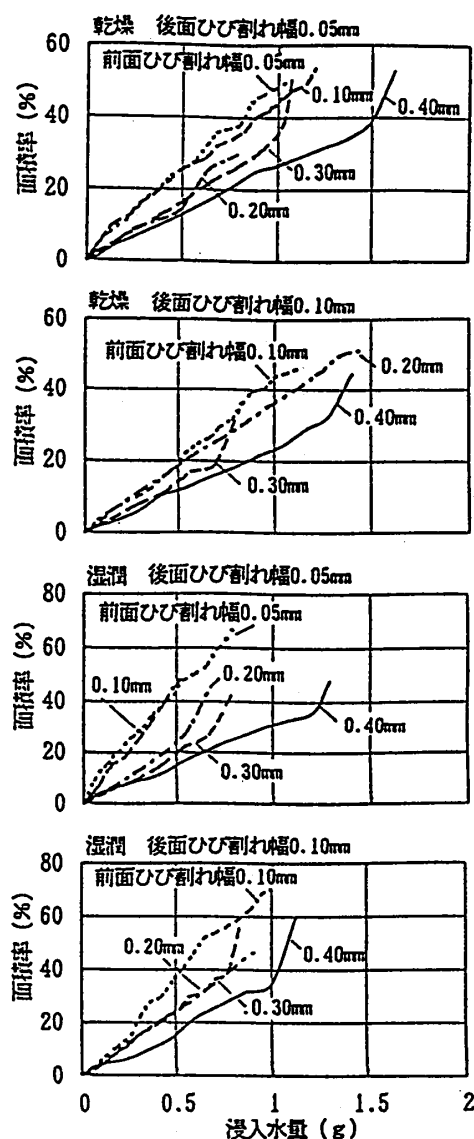


図-6 浸入水量-面積率関係

表-2 面積率30%のときの浸入水量平均値(g)

前面ひび割れ幅(mm)		0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.10	0.20	0.30	0.40
後面ひび割れ幅(mm)		0.05					0.10			
乾	浸入水量(g)	0.51	0.64	0.75	0.89	1.14	0.65	0.79	0.73	1.10
	仮定しみ込み量(g)	0.41	0.46	0.41	0.49	0.47	0.46	0.43	0.21	0.42
湿	浸入水量(g)	0.28	0.33	0.52	0.63	0.93	0.42	0.63	0.65	0.87
	仮定しみ込み量(g)	0.18	0.15	0.18	0.13	0.26	0.23	0.27	0.13	0.19

タルへのしみ込み速度がにぶっているため、20秒に1滴注水される度に筋の先端部のみが伸びてゆくように見える。第3段階ではひび割れ幅の狭い最奥部で吸い込み現象が見られる。すなわち第2段階での筋の先端が急激に進展し幅も拡がり後面に達する。このとき毛管力が強く働き、入口部の水の一部をも吸い込んでしまう。

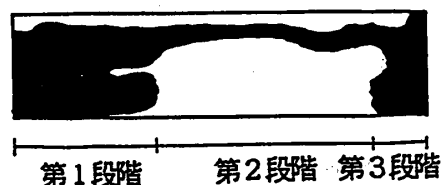


図-7 浸入状況典型例

大部分の試験体では上記のような単純な段階分けはできないが、ひび割れの隙間内での毛管力を含む表面張力とモルタルへのしみ込みが複雑に絡み合って、浸入水はひび割れ内を奥へ進んでゆくものと考えられる。

5. 実験Ⅲ：ひび割れ内湿度に関する実験

5. 1 実験目的

ひび割れ内に浸入した水は、大部分はコンクリート（モルタル）にしみ込んでゆき、ひび割れ開口部およびコンクリート表面から蒸発するものと考えられる。ひび割れ内に水（液体）が無くなった後も、鉄筋が接しているひび割れ内の空気湿度が臨界相対湿度より高ければ、ひび割れ部にある鉄筋が腐食する可能性は無くならない。鋼の場合、臨界湿度は50%と70%の間に存在し、この臨界湿度を超えている時間（ぬれ時間）は腐食と密接な関係があるといわれている〔2〕。しかし、ひび割れ内の湿度に関しては、これまで全く情報がなく実験もなされていない。

湿度の計測方法は近年著しく進歩しているが、コンクリートのひび割れ内のような微小空間の湿度を計測するセンサは未だ開発されていないようである〔3, 4〕。この度比較的小型の相対湿度センサを改造し、試験体のひび割れ内湿度の計測を試みたところ、計測が可能であることが分かった。

本実験はこのセンサを用いて、浸入した水がモルタルにしみ込んだ後のひび割れ内の湿度が、どのように変化するかを調べることを目的としている。

5. 2 センサおよび試験体

実験に用いたセンサは、薄膜ポリマー静電容量式相対湿度センサであり、その形状寸法を図-8に示す。市販品からの改造点は、軸部をくりぬいたプラスチックねじにセンサ端子をエポキシ樹脂で固定したことと保護キャップの一部を切り取った2点である。このセンサを用いれば、ポリマー膜への水分子の吸脱着によって比誘電率が変化し、静電容量変化を電気信号として取り出し、相対湿度を測定することができる。ただし、相対湿度が高すぎると（90～95%以上）、ポリマー膜への水分子の吸脱着の繰り返しができなくなり2次吸着現象が生じてセンサに異常が生じるので、浸入水がモルタルにしみ込んだ後しばらくの間は計測ができず、ひび割れへの注水後2日目から計測を開始した。

試験体の形状寸法は実験Ⅱと同様であるが、上記のセンサを入れるため、塩ビ板に3か所直径12mmの穴を開け、外周部を削ったプラスチックナット（M8）がはめ込んである。穴の位置は前後面からそれぞれ2cm入ったところと中央部である。また、試験体の底面および側面モルタル表面からの水分の蒸発を防ぐために、これらの面にエポキシ樹脂を塗布した。

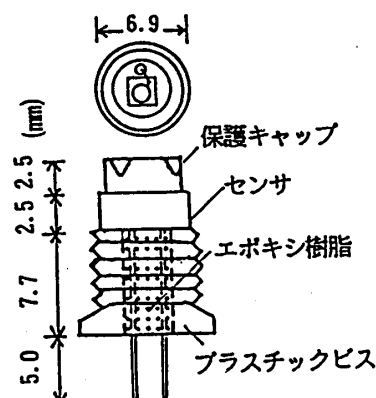


図-8 湿度センサ形状寸法

5.3 実験条件

試験体は全部で6体あり、前面ひび割れ幅は0.40, 0.20および0.05mmの3種類とした。後面ひび割れ幅は全て0.05mmである。20秒に1滴ずつ注水し、浸入水量は6体とも1.5グラムとした。注水終了後直ちに恒温恒湿器（容積105l）に入れ、翌々日から計測を始めた。恒温恒湿器の設定条件は、25℃、55%および25℃、75%の2種である。

5.4 実験結果とその考察

実験結果を図-9に示す。恒温器の湿度が55%のときは試験体中央部のひび割れ内湿度の減少速度が特に緩やかである。また、湿度75%では、3点ともその変化量は微小であった。

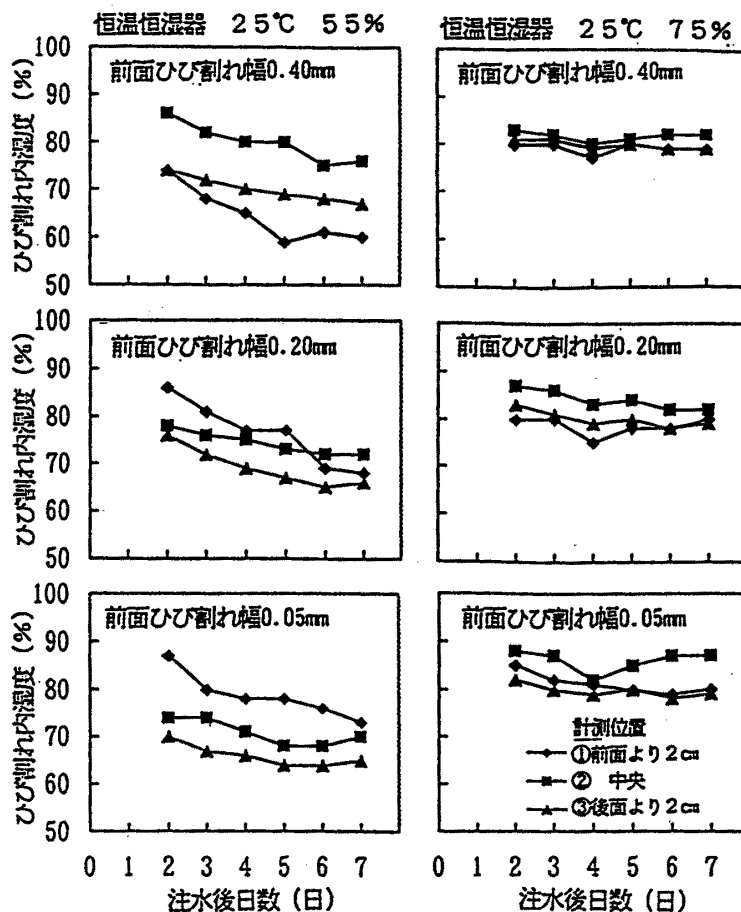


図-9 ひび割れ内湿度変化状況

6. まとめ

モルタルと塩ビ板とのすきま

を、ひび割れに模した可視化モデル試験体を用いた実験から、以下のことが明らかになった。

- 1) 筆者らが考案したヘアーラインシフト法によって、ひび割れ幅を精確に制御することができた（図-3参照）。
- 2) ひび割れ内への雨水の浸入に関連する要因の影響は次のようであった。
 - ① ひび割れ内への雨水の浸入は入口部から均等に浸入してゆくのではなく、複雑な地模様を描きながら奥へ進展していった（図-4参照）。
 - ② ひび割れ面の微細な凹凸は、雨水浸入に多大な影響を及ぼした（図-5参照）。
 - ③ モルタルの乾湿状態は、浸入状況を大きく左右した（表-2および図-6参照）。
 - ④ 浸入水面積率が30%のときのモルタルへのしみ込み量は、ひび割れ幅にかかわらず、ほぼ一定量であった（表-2参照）。
 - ⑤ 雨水浸入のメカニズムは、典型例において段階をおって少なくとも3種類考えられた（図-7参照）。
- 3) 小型の相対湿度センサを用いて、雨水がモルタルへ浸透した後のひび割れ内の湿度を計測することができ、その変化は緩やかなことが分かった（図-9参照）。

参考文献

- [1] 藤岡正見：外壁ひびわれ内への雨水浸入に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.175-176、1995.8
- [2] H.H.ユーリック、R.W.レヴィー：腐食反応とその制御、産業図書、1989
- [3] 日本機械学会編：湿度・水分計測と環境のモニタ、技報堂出版、1992
- [4] 湿度計測・センサ研究会編：湿度計測・センサのマニュアル、学献社、1989