

建設材料と部材の水分特性測定法の原理と技術

渡辺一正（建設省建築研究所） 多田眞作（テキスト/日本大学）
issei-2@kenken.go.jp s-tada@texte.co.jp

1. はじめに

2. 水分移動と材料の水分特性値

2-1 水分移動の基礎方程式

2-2 水分特性値の物理的意味

3. 含水率

3-1 Nuclear Method

- (1) ガンマー減衰法線
- (2) NMR法
- (3) 中性子線減衰法

3-2 熱伝導率法

- (1) 既往の研究
- (2) 測定原理
- (3) 測定例

3-3 電気的方法

- (1) 直流抵抗法
- (2) 誘電率法
- (3) 各種の電磁波を使う方法

3-4 超音波法

- (1) 既往の研究
- (2) 測定原理
- (3) 測定例

4. 平衡含水率

- (1) 塩類の飽和水溶液を利用した調湿
- (2) 温度か圧力の一方を変える方法
- (3) 分流法
- (4) 真空中で水蒸気圧を変える方法
- (5) 迅速試験法

5. 水分特性曲線

5-1 Pressure plate法

5-2 Psychrometric method

5-3 Tadaの方法

- (1) 水蒸気等温吸着の理論
- (2) 水銀圧入法の理論

6. 湿気伝導率

6-1 カップ法

6-2 2 Box法

6-3 Sorptivity method

- (1) 測定原理
- (2) 試験例

7. 水分伝導率

7-1 水分の流束と含水率分布を求める方法

7-2 保存式をBoltzmann変換して求める方法

7-3 モーメント法

7-4 CSTBの方法

8. おわりに

1. はじめに

主要な建設材料の木材やコンクリートは多孔質であり、その耐久性は水分の移動に支配される。このため、水分の移動現象を定量的に理解し、シミュレーションなどで含水量の経時変化を予測することが重要な研究課題となっている。その作業の中でもっとも時間と労力を要するのが水分収支式の中の係数となる各種の水分特性値の実測であり、迅速な測定法の開発が望まれている。本論では建設材料、部材の水分特性値の測定法の原理と事例を展望し、効率的な測定法を模索した。水分移動とカップリングする熱、電気などのエネルギー移動とイオンや空気などの他の物質の流れ、これらの交差係数の測定は重要な研究課題であるが、本論では等温条件の水分移動のみを対象とした。また測定の対象は主にセメント系材料を想定している。

2. 水分移動と材料の水分特性値

2-1 水分移動の基礎方程式

多孔質材料中の水分移動を支配する基礎式と、その中に現れる移動係数、即ち材料の水分特性値の持つ意味をDian⁽¹⁾に従って説明する。水分移動の駆動力は本来的に水分の化学ポテンシャルなのであるが、水分特性値の測定においては含水量を見かけの駆動力とするのが便利である。含水量の表記はSI単位系では濃度と同じ表現で、kg-水分/m³-多孔質材料であり、含水量と呼ぶべきであるが慣例に従って含水率と呼ぶ。含水率 θ (kg/m³) をみかけの駆動力とする等温条件の水分の収支式は次のようになる。ここで ∇ はHamilton演算子でデルまたはナブラと呼び $\left(i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}\right)$ の意味である。 i, j, k は各方向の単位ベクトルである。

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

水の質量流束 $\mathbf{J}$ は水蒸气流束 $\mathbf{J}_v$ と液水の流束 $\mathbf{J}_L$ の和と考えられている。全圧力差がなく、対流による流れが無視できるとき、水蒸気の流れ $\mathbf{J}_v$ はフィックの法則に従うので、 D_v を多孔体中の湿気伝導率とすれば次式が成り立つ。

$$\mathbf{J}_v = -D_v \nabla p_v \quad (2)$$

p_v は水蒸気圧(Pa)である。等温条件で $p_v = h p_{vs}$ を代入すれば

⁽¹⁾ Daïan, J-F., Condensation and isothermal water transfer in cement mortar, Transport in Porous Media, 3, 563-589, 1988

$$\mathbf{J}_V = -p_{VS} D_V \nabla h \quad (3)$$

となる。ここで p_{VS} はその温度における飽和水蒸気圧、 h は相対圧である。一方、液水の流れは不飽和 Darcy 流と考えられるから、重力が無視できるとき、

$$\mathbf{J}_L = -\frac{K_L}{\mu} \nabla p_C \quad (5)$$

となる。 K_L は不飽和透水係数で、 μ は液水の動粘度、 p_C は毛管圧である。 $P_C = RT(\ln h)/v$ だから

$$\nabla p_C = \frac{RT}{vh} \nabla h \quad (6)$$

となる。ここで R は気体定数、 T は絶対温度、 v は水の比容積である。水蒸気の流れと液水の流れはいずれも相対圧 h の勾配で表現できて次のようになる。

$$\mathbf{J}_V = -D_{hV} \nabla h, \quad \mathbf{J}_L = -D_{hL} \nabla h \quad (7)$$

ここで、

$$D_{hV} = \rho_{VS} D_V, \quad D_{hL} = \frac{K_L}{\mu} \frac{RT}{vh} \quad (8)$$

である。この様に多孔材料内部の相対圧（その温度の飽和水蒸気圧に対する水蒸気圧の比） h は液相と気相両方の水分の駆動力となりうるため、Bazant⁽²⁾らを始めとしてコンクリート中の水分移動の駆動力として一般的に用いられている。すなわち水分の化学ポテンシャルが駆動力となっていることがわかる。実際には測定しやすい含水率を駆動力とする方が便利である。このとき

$$\nabla h = \frac{\partial h}{\partial \theta} \nabla \theta, \quad \nabla p_C = \frac{\partial p_C}{\partial \theta} \nabla \theta \quad (9)$$

から、水蒸気の流れと液水の流れはいずれも含水率勾配で表現できて次のようになる。

$$\mathbf{J}_V = -D_{\theta V} \nabla \theta, \quad \mathbf{J}_L = -D_{\theta L} \nabla \theta \quad (10)$$

⁽²⁾ Bazant, Z. P., Najjar, L. J., Nonlinear water diffusion in nonsaturate concrete, Materials and Constructions, 5(25) 3-20, 1972

ここで、

$$D_{\theta V} = \rho_{vs} \frac{\partial h}{\partial \theta} D_v, \quad D_{\theta L} = \frac{K_L}{\mu} \frac{\partial p_c}{\partial \theta} \quad (11)$$

である。従って水分の全体の流れは含水率勾配を駆動力として

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_V + \mathbf{J}_L = -D_\theta \nabla \theta \quad (12)$$

となる。ここで、 $D_\theta = D_{\theta V} + D_{\theta L}$ である。以上結果から、水分の収支式は次のよう書ける。

$$\nabla(D_\theta \nabla \theta) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (13)$$

ここで、 D_θ は一定値ではなく含水率の関数であるため非線形の式になっている。この場合左辺は $D_\theta \nabla^2 \theta$ とはならない。

2-2 水分特性値の物理的意味

ここで云う水分特性値とは、実験で求める必要のある上記の θ 、 $\frac{\partial h}{\partial \theta}$ 、 $\frac{\partial p_c}{\partial \theta}$ 、 $D_{\theta V}$ 、 $D_{\theta L}$ などである。

$\frac{\partial h}{\partial \theta}$ は、相対湿度が変化したときの材料の含水率の変化の逆数であり、平衡含水率（吸着等温線）の測定によって得られる。 $\frac{\partial p_c}{\partial \theta}$ は含水率が変化したときの毛管圧の変化であり、水分特性曲線の勾配である。水分特性曲線は、高い圧力の部分に限れば平衡含水量から得ることが出来る。 $D_{\theta V}$ は含水量勾配による湿気拡散率、 $D_{\theta L}$ は含水量勾配による水分拡散率であり、これらはいずれも実験で求めることが出来る。本報ではこれらを水分特性値と呼び、その測定原理と測定事例を展望する。但し、水で飽和したコンクリート中の圧力差による定常流れは扱わないので、透水係数の測定法は除外している。

3. 含水率の測定

材料中の水分の測定は広範囲の産業分野の必要性を背景に研究と実践が行われてきた。

NISTと計測学会の主催による湿度と水分に関する国際会議が1963年にWashington DCで開催され、その第4巻には液体、個体中の水分の測定に関する36編の論文が収録されている⁽³⁾。第二回の会議は22年後の1985年にWashington DCで開催され⁽⁴⁾、この時は液体、固体中の水分の測定に関する論文はMaleyの総説⁽⁵⁾など13編であった。

多孔質建設材料に適用可能な含水率測定手法のほとんどは土壌物理の分野が先行しており⁽⁶⁾、建設材料への適用性に関するWormaldとBritchの解説がある⁽⁷⁾。また非破壊の現場測定を目的としたWhitingの総説⁽⁸⁾もある。

3-1 Nuclear Method

(1) ガンマー線減衰法

単色のガンマー線の平行ビームが試料を通過すると次式に従って減衰する。

$$\ln(I/I_0) = -\mu\rho d \quad (14)$$

ここで I は通過ビームの強度 (counts/sec)、 I_0 は試料がない場合の強度、 μ は吸収係数 (m^2/kg)、 ρ は試料の密度 (kg/m^3)、 d は試料の厚さ (m) である。試料は乾燥した材料自体と水との混合物だから、そこでの吸収は次式となる。

$$\ln(I/I_0) = -d(\mu_s\rho_s + \mu_w\rho_w) \quad (15)$$

ここで、サブスクリプト s 、 w はそれぞれ試料と水を表す。含水量 ϕ (m^3/m^3) は次式となる。

⁽³⁾ Int. Symp. Humidity and Moisture, vol.4, Principles and methods of measuring moisture in liquid and solid, 20-23, May, 1963, Washington DC.

⁽⁴⁾ Int. Symp. Moisture and Humidity, 15-18, April, 1985, Washington DC.

⁽⁵⁾ Marley, L. E., Continuous moisture analysis instrumentation, 649-657 in ref.(63), 1985

⁽⁶⁾ Yabe, K., Soil moisture measurement, SPCPG, (41), 90-94, 1980 (in Japanese)

⁽⁷⁾ Wormald, R., Britch, A. L., Method of measuring moisture content applicable to building materials, Build. Sci., 3, pp.135-145, 1969.

⁽⁸⁾ Whiting, D., Assessment of poential techniques for in-situ, real time moisture measurement in building envelope systems - A literature survey, DOE report, W-7405-eng-26, 85 p 1983

$$\phi = \frac{\ln(I_s / I_w)}{\mu_w \rho_w d} \quad (16)$$

ここで、 I_s は絶乾試料の強度、 I_w は含水試料の強度である。吸収係数と密度は試料の種類毎に求める必要がある。

ガンマー線を多孔質材料の含水量測定に利用する試みは土壌物理の分野で1950年代から始まり⁽⁹⁾、建設材料にはNielsen⁽¹⁰⁾によってALCの水分伝導率測定のための含水率の非破壊測定に利用された。装置は現場での測定が困難なのでDaian⁽¹¹⁾、Quenardら⁽¹²⁾、Kumaranら⁽¹³⁾の利用も実験室に於ける水分伝導率の測定である。建設材料におけるガンマー線減衰法利用の詳細はDescamps⁽¹⁴⁾に詳しい。

(2) NMR法

核磁気共鳴は量子効果であるが、古典的な解釈も可能である。水素原子のように陽子と中性子の数が異なっている原子は磁気双極子モーメント μ を有し、外部磁場 B_0 においては重力場におけるジャイロの如く振る舞う。外部の磁場に置かれると、倒れる寸前のコマのようなすりこぎ運動を生じる。この歳差運動の周波数を ω_0 は外部の場の力に比例する。 γ を材料(核の種類)によって決まる定数(磁気回転比)とすれば

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0 \quad (17)$$

⁽⁹⁾ Ferraz, E. S. B., Gamma-ray attenuation to measure water contents and/or bulk densities of porous materials, Proc. Isotope and Radiation Technology in Soil Physics, 449-460, 1983

⁽¹⁰⁾ Nielsen, A. F., Gamma-ray attenuation used for measuring the moisture content and homogeneity of porous concrete, Building Science, 7, 257-263, 1972

⁽¹¹⁾ Daian, J-F., Condensation and isothermal water transfer in cement mortar, Transport in Porous Media, 3, 563-589, 1988

⁽¹²⁾ Quenard, D. and Sallee, J., A gamma-ray spectrometer for measurement of the water diffusivity of cementitious materials, MRS Symp. Proc. Boston, 137, 165-169, 1989

⁽¹³⁾ Kumaran, M. K., Mitalis, G. P., Kohonen, R. and Ojanen, T., Moisture Transport Coefficient of Pine from Gamma Ray Absorption Measurements, ASME-HTD 123, 179-183, 1989

⁽¹⁴⁾ Descamps, .P., Continuum and discrete modelling of isothermal water and air in porous media, Thesis, Katholic University of Leuven, 1997, <http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwk/physics/fd01.htm>

二つの量子準位のエネルギー差 E は外部磁場 B_0 の大きさ及び原子核の磁気モーメントに依存する。

$$\Delta E = \frac{\gamma \cdot B_0 \cdot h}{2\pi} \quad (18)$$

ここで h はプランク定数である。上記の歳差運動の速さが、試料に照射されるラジオ波の振動数と同じになると吸収が起こる。

実際の試料中の水素原子の量を決定するには、まず試料に一定の磁場をかけ、次いで吸収されたラジオ波のエネルギーを測定する。ラジオ波の振動数と吸収率の関係は励起した核が励起状態に留まる時間（緩和時間）の長さに影響される。緩和時間は水素原子の置かれる環境に依存するので、スピン-格子緩和時間 T_1 またはスピン-スピン緩和時間 T_2 を測定する。前者は水素原子と周囲の水分子構造間のエネルギー交換であり、後者は周囲の水分子構造とは無関係なスピン間のエネルギー交換である。従って T_1 、 T_2 の測定により、水分子の固体による拘束の程度（自由水、吸着水、化学結合水など）が定量的に測定される。緩和時間はコイルに発生する誘導起電力（FID信号）に対応する。この方法は試料中に常磁性のイオンがあれば強く影響される。

核磁気共鳴法（NMR法）の建設材料の含水率測定への応用は70年代後半に Matzkaninら⁽¹⁵⁾に始まり、Gummersonらは実験室的に高精度で材料内の経時的な含水率変化を求めた⁽¹⁶⁾。Matzkaninらは更に一方向からの測定可能な機器を製作し、現場測定を行っている⁽¹⁷⁾。水分伝導率の測定には含水率が変化する試料を非破壊で経時的に測定する必要がある。Pel⁽¹⁸⁾は試料を垂直に固定し一面から吸水させながらコイルをトラバースさせて、含水率分布を測定した。Kisselら⁽¹⁹⁾は試料を水平に置き、永久磁石を用いた非常にコンパクトな装置で同様の測定を行っている。最大試料寸法（断面）は50×50mm、トラバース方向の精度は4mm、含水率測定精度は試料や測定時間にもよるが0.5-0.1 vol %である。測定時間は試料寸法（長さ）が150mmのとき3分から10分、その含水率結果は重量法、ガンマ線減衰法とよく一致したとしている。

⁽¹⁵⁾ Matzkanin, G. A. and Gardner, C. G., Nuclear magnetic resonance sensors for moisture measurement in roadways, Transport Research Record No. 532, pp. 77-85, 1975

⁽¹⁶⁾ Gummerson, R. J. et al., Unsaturated water flow within porous materials observed by NMR imaging, Nature, 281, pp.56-57, 1979

⁽¹⁷⁾ Matzkanin, G. A., DeLosSantos, A. and Whiting, D. A., Determination of moisture level in structural concrete using pulsed NMR, PB82-230491, 83p, 1982

⁽¹⁸⁾ Pel, L., Moisture transport in porous building materials, Ph. D. thesis, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 1995, <http://www.phys.tue.nl/nfcmr/cmrmmain.html>

⁽¹⁹⁾ Kissel, K. and Krus, M., Experimental Determination of Building Materials Properties for Moisture Calculation, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, 322-342, 1995

(3) 中性子線減衰法

ガンマー線やX線は電子と相互作用するが、中性子線は物質の核と相互作用し、特に水素の原子核（プロトン）で大きく吸収・散乱が生じエネルギーを失って熱中性子となる。水素原子核による影響は他の原子に比べ大きいので、検出された熱中性子は試料中の単位体積の水素原子核に比例する。しかしNMRの様に水分の拘束状態に関する情報を得ることは出来ない。また指向性ビームの線源は原子炉であり設備と取り扱いに難がある。

Roethig⁽²⁰⁾は工場での含水量管理に中性子散乱法が最良であるとした。表面押し当て方式が東独の工場で用いられているが試料の大きさは20cm立方が必要とされる。Pelはビームで試料を走査し水分伝導率の測定に利用した⁽²¹⁾。含水量の感度1%、空間解像度は1mmと言われる。最近は中性子照射による感光フィルム上の水分に対応した濃淡像⁽²²⁾を画像解析して、精度良く含水率分布を求めることも可能になっている。

3-2 熱伝導率法

(1) 既往の研究

多孔質材料中の水分は、その熱伝導率に鋭敏にしかも直線的に影響するので、湿り材料の熱伝導率を迅速に測定できればその含水率を知ることが出来る。特に塩分の影響を受けないのが利点である。この様な熱伝導率測定が出来るのは非定常熱伝導を利用した熱線法と呼ばれる方法である。

熱線法におけるセンサ部は、極細の発熱線とこれに極めて近いところに配置された温度センサのセットから成り、両者は供試体によって囲まれている必要がある。このため、主として現場用には、ドリルで掘った穴の中に、プローブを挿入する方法が用いられ、実験室用には2枚の板状サンプルにこのセットを挟み込む方式が用いられている。

熱線法の原理は1930年代、Stalhane及びPykによって発案され、1940年になって、van der Heldが数学的に定式化した。1952年より、スウェーデンGoteborgのChalmar工科大学に於いて、Granholm,及びSaare⁽²³⁾が建設材料への応用開発を行なった。一方、現場測定のニーズが土木、農業分野からあり、プローブ法についての数学的原理が

⁽²⁰⁾ Roethig, R., Zerstorungsfreie Prufung von Gasbetonelementen. Eine Untersuchung zum Stand der Technik, Baustoffind. Ausg., 19(2), 16-21, 1976

⁽²¹⁾ Pel, L., ibid.

⁽²²⁾ Justnes, H., Bryhn-Ingebrigtsen, K. and Rosvold, G. O., Neutron radiography: an excellent method of measuring water penetration and moisture distribution in cementitious materials, Adance in Cement Research, 6(22), 67-72, 1994

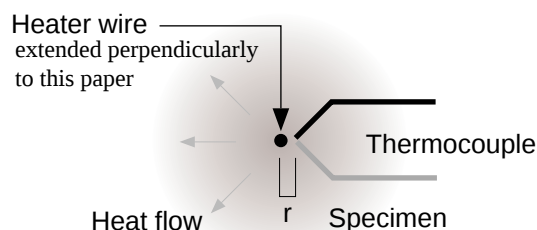
⁽²³⁾ Saare, E., Jansson, I., Measurement of thermal conductivity of moist porous building materials, RILEM Int. Conf. Lightweight Concr., Goteborg, 353-370, 1960

Blackwell⁽²⁴⁾によって報告された。Joy⁽²⁵⁾及びVos⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾はプローブを試作し、様々な湿り断熱材の熱伝導率のデータを得ている。特にVosは壁体の含水率測定に応用した。

熱線法による λ 測定法の規格はDIN 51046、JIS R 2618-79 A STM D 2326-64T等に定められており、これを準拠する測定機器も市販されるに至っている。

(2) 測定原理

発熱体と熱電対の関係は図に示される様に、発熱体のワイヤは手前から奥へ続いており、感温部の熱電対は奥行がなく、発熱体の単位長さ当りの熱量しか受けとらない。紙面から一度外へ出て、再び熱電対へ廻り込む様な熱流はないと考える。



この場合、供試体は均質であり、発熱体のワイヤは無限に長く、発熱体への供給電源をONにしたときを $t=0$ とすれば、このとき、供試体のどの場所でも $\partial \theta / \partial t = 0$ であり、測定中の外乱要因はない、などを仮定する。熱伝導の基礎式は次式で与えられる。

$$Cd \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (19)$$

この式を同心円状の熱伝導の場合について解析的に解くと次のようになる。

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_0^t \frac{1}{t'} \exp\left(-\frac{r^2}{4at'}\right) dt' \quad (20)$$

ここで、 a は熱拡散率 (m^2/sec)、 λ は熱伝導率 (W/mK)、 q は線発熱量 (W/m)、 r は発熱体と感温部の距離 (m)、 θ は温度 (K)、 t は時間 (sec)である。(21)式の積分の中の誤差関数の項は1に近似してある。重要なのは θ ではなく温度変化(時間に対する温度)な

⁽²⁴⁾ Blackerll, J. H., A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk, J. Appl. Phys., Feb, 137-144, 1954

⁽²⁵⁾ Joy, F. A., Thermal conductivity of insulation containing moisture, Symp ASTM, 65-80, 1957

⁽²⁶⁾ Vos, B. H., Non-steady-state method for the determination of moisture content in structure, Proc. Int. Symp. Humidity and Moisture, Woshington, Vol. 4, 35-47, 1963

⁽²⁷⁾ Vos, B. H., Measurement of moisture content in building, Proc. RILEM/CIB Symp. Moisture Ploblem in Building, Helsinki, 1966

ので、実験的に $\theta - \ln t$ の関係が直線となって $\partial \theta / \partial \ln t$ が傾きとして求められることから、
(20) 式を $\ln t$ で微分すれば

$$\frac{\partial \theta}{\partial \ln t} = \frac{q}{4\pi\lambda} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (21)$$

が得られる。ここでも扱いづらい $\exp(-r^2/4at)$ をなくすために、発熱体に感温部を接近させていくと $r \rightarrow 0$ によって $\exp(-r^2/4at) \rightarrow 1$ 、したがって熱線法の基本式は次式のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial \ln t} = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad (22)$$

$\theta - \ln t$ のグラフを描いて $\partial \theta / \partial \ln t$ を求めれば λ が計算できるが、含水率測定が目的の場合には λ を計算する必要はない。

(3) 測定例

センサ

熱線法のセンサは一本の発熱線と発熱線の近傍のある一点の温度変化を正確に捉える感温部から成る。試験体に埋め込まれ経時変化を測定するためにそれ自身の耐久性も要求される。センサは、より細かいほど精度が向上するが、感温部である熱電対の溶接や試料へのセットが難しい。また、熱電対が細かいほど起電力は不安定になる。そこで発熱部には、線径は細いが抵抗係数が適当で融点が高く、抵抗率の温度係数が小さいものが良い(0.32 ϕ のコンスタンタン線にテフロン被覆したもの等)。コンスタンタン線の物性は、抵抗係数 $0.5 \Omega / \text{mm}$ (20 $^\circ\text{C}$)、温度係数 $\pm 0.03 \Omega / 10^{-3} \text{K}$ 、融点 1270°C であり、単位抵抗は $6.217 \Omega / \text{mm}$ となる。

感温部には常温域の起電力が直線的に変化し、しかも、起電力が大きく耐腐食性に優れ、入手が容易な0.32 ϕ のCA熱電対にテフロン被覆したものを使用した。またセンサ部の熱容量で発熱遅れが生じるが、この程度は予備実験から30秒までで、これ以降は時間と起電圧の関係は直線になる。そこで、発熱体への通電開始後30秒以後のデータを計算に用いる。

計算法

熱線法の基本式を変形して、熱電対の熱起電力を用いて表わすと次式を得る。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{\partial \ln t}{\partial \theta} = \frac{\partial E}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \ln t}{\partial E} \cdot \frac{q}{4\pi} \quad (23)$$

ここで、 t は時間 (sec)、 θ は温度 (K)、 q は発熱量 (W/m)、 λ は熱伝導率 (W/mK) である。 $\partial E / \partial \theta$ は熱電対の熱起電力 (mV / deg) で、使用した0.32 ΦのCA熱電対の場合、40 付近で0.04065である。

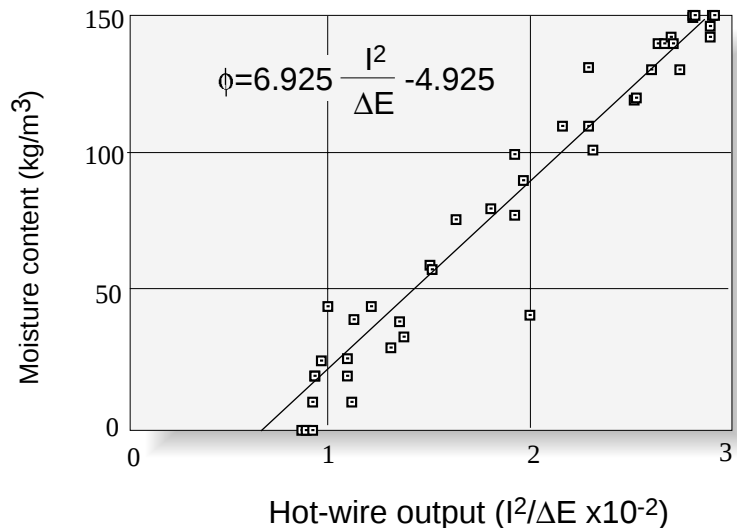
起電圧の測定時間はストップウォッチで計るため、読むことが容易な通電開始後30秒と60秒に行うことにし、測定される起電圧をそれぞれ E_{30} 、 E_{60} とする。従って $\ln t$ は $\ln 2$ となる。また $q = I^2 R$ を用いて (23) 式を計算すると次のようになる。

$$\lambda = 6.217 \frac{\ln 2}{(E_{60} - E_{30})} \cdot \frac{0.04065}{4\pi} I^2 \quad (24)$$

λ を求めることが目的ではないので、実験では測定結果の I^2 / E と重量法で測定した試料の含水率を直接対応させる。

測定例

試料として用いた密度500(kg/)のALCの含水率の測定範囲は、主に0 ~ 150(kg/)間であり、その時の熱伝導率は0.1W/mK ~ 0.4W/mK程度であるから、その範囲を精度良く測定できるように供給電力を設定する。前項で決めた30秒・60秒の計測で単位抵抗6.217Ω/mのコンスタンタン線を使用した時に電流



設定を1レンジで計測し、かつ温度上昇を最小に抑える q を設定する。しかし、 θ が分母にあるため λ が大きくなれば θ が小さくなり、熱電対の起電力分解能に近づくために精度が落ちる。この実験例では低含水量時の精度を考慮して、0.4W/mK付近の値の精度を ± 0.0025 程度に、0.1W/mK付近の精度を ± 0.001 程度になる様な供給電流を1.6Aに設定した。計測のインターバルは、最低30分以上とし、初期温度を安定させて計測する必要がある。

る。まず試料の初期温度（起電圧）を計測し $\pm 2\mu\text{V}$ 程度に落ち着くまで放置する。計測値が落ち着かない場合は計測を中止する。発熱開始の電源スイッチをONすると同時にストップウォッチで時間を計測し、30秒後と60秒後の起電圧と供給電力を計測する。

ALC試験体内部にセンサーを埋込んで含水率を調整し、さらに、予め含水率を調整したALC試験体でセンサ部を挟んだものも準備した。これらの双方について、熱線法の値と含水量の対応を調べると、両者に顕著な違いはなく、図のように1本の直線（相関係数0.951）になった。

3-3 電気的方法

(1) 直流抵抗法

コンクリートの中に2本の電極を埋設し、電極間の抵抗を測定して校正曲線から含水率を推定する方法である。純粋な水も試料自体と同様通電抵抗が大きい、溶解するイオンがもっぱら電流のキャリアとなる。従ってこの方法は必然的に含有塩分の影響を強く受け、さらにはコンクリート自体の密度の違いや温度にも影響される。温度の影響は一般に温度1度につき抵抗値が2～4%の変動と言われ、高含水率域ではさらに影響が大きい。しかし、測定自体は簡単かつ自動・遠隔計測にも適する。木材では外部から電極を差し込むことも可能なので、この方法は木材乾燥工学の分野で広く利用されている。木材の電気抵抗は繊維飽和点から炉乾状態の含水量変化に対して 10^7 程の変化を示すが、含水率と抵抗の対数を取ると直線になる。即ち経験的に次式で表される。

$$\ln \rho = -K\phi + c \quad (25)$$

ここで ρ は比抵抗、 K と c は定数である。コンクリート分野でも1955年頃から行われ実用レベル⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾にある。

(2) 誘電率法

周波数1GHzにおける水の誘電率は、広い温度範囲で乾燥した建設材料の20～40倍であり、誘電率は含水量に比例する。通常は静電容量を測定して次式から誘電率を求める。

⁽²⁸⁾ 田畑雅幸、洪悦郎、鎌田英治、電極法によるコンクリート含水率の測定、日本建築学会学術講演梗概集、昭和51年10月（東海）pp.117-118、1976

⁽²⁹⁾ 中根淳、長尾覚博、一瀬賢一、コンクリート構造体の含水率測定、セメント・コンクリート、No. 473、pp.8-14、1986

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_v A}{d} \quad (26)$$

ここで、 C は静電容量(F)、 ϵ は電荷が置かれている媒質の比誘電率、 ϵ_v は真空誘電率(F/m)、 A は平行版の面積(m²)、 d はその間隔(m)である。また、湿り材料の誘電率は

$$\epsilon_m = \sum_i \epsilon_i v_i \quad (27)$$

ここで、 ϵ_m は多孔質材料の誘電率、 ϵ_i は*i*番目の物質の誘電率で v_i はその体積分率である。この方法で使用される周波数は1kHz～1GHzのラジオ波帯であるが、高い周波数では溶解しているイオンの影響は少なくなると言われる。また温度の影響も比較的少ない。一般に静電容量と含水率の関係は直線ではないので、含水率を得るにはあらかじめ校正曲線を得ておくなど直流抵抗と同様の準備が必要である。また、得られる含水率は体積分率なので、重量ベースの含水率を得るには試料の密度を求めねばならない。主に土壌や木材の水分の測定に利用され、各種のプローブを持った多くの機器が市販されているが、コンクリートの含水率測定では⁽³⁰⁾2つの周波数で容量測定⁽³¹⁾する方法や、センサユニットとして完結された埋設用セラミックスセンサーも開発されている⁽³²⁾

(3) 各種の電磁波を使う方法

周波数1GHz～100GHzのマイクロ波を湿り材料に照射すると主に水分子によって減衰されるが、特に固有緩和周波数である30GHz付近で最も大きい。プロセス水分管理用に透過型の機器が市販されている。水分子による赤外線吸収は赤外線の波長帯の中のある波長で生じるので、フィルタにより吸収の異なる2つの波長の赤外線ビームに分けて試料に照射して表面付近の水分量を求める。この方法による機器も主に製造工程用に市販されている。あまりに鋭敏な検知方法であるため、試料表面を汚染している微量の有機物の影響を受ける。

3-4 超音波法

(1) 既往の研究

⁽³⁰⁾ Berg, A., Niklasson, G. A., Brantervik, K., Hedberg, B. and Nilsson, L. O., Dielectric properties of cement mortar as a function of water content, J. Appl. Phys., 71(12), 5897–5903, 1992

⁽³¹⁾ Hudec, P., MacInnis, C. and Moukwa, M., The capacitance method of measuring moisture and salt content of concrete, Cem. Concr. Res., 16, pp.481–480, 1986

⁽³²⁾ 笠井芳夫(他)、埋込セラミック素子によるコンクリートの含水率測定方法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、1991

超音波パルスの伝播速度を測定して試料の動弾性係数やポアソン比を求める方法はASTMにも規定があり、広く用いられている。測定は極めて容易であるが、押し当てる表面の状態に影響される。また発振子と受振子とで挟んで測定するタイプでは、現場での位置合わせが常に可能ではないこと等の欠点がある。超音波利用の非破壊検査は盛んに研究されているが⁽³³⁾、多孔質材料の含水率を測定したものは少ない⁽³⁴⁾。温度や水に溶解しているイオンに影響されないことは大きな利点といえる。

(2) 測定原理

材料内の超音波パルス伝播速度は含水率に影響される。音速は一般に次式で表される。

$$c = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (28)$$

ここで c は音速(m/sec)、 E はヤング率(Mpa)、 d は密度(kg/)である。 d は含水率に依存すると考えれば、次式のように表すことが出来る。

$$d = (1 - P)d_s + P \cdot S \cdot d_w \quad (29)$$

ここで P は空隙率(pore/material)、 d_s は材料の真密度(kg/)、 S は飽和度(water/pore)である。Biotの理論に基づき液体で飽和された多孔体中の音波の伝播理論を展開したPlonaとJohnson⁽³⁵⁾に依れば、含有水分の粘性と音波の周波数等で決まる係数 α を用いて、音速は次の様に補正される。

$$c = \sqrt{\frac{E}{(1 - P)d_s + P \cdot S \cdot d_w(1 - \alpha^{-1})}} \quad (30)$$

ここで $P \cdot d_w \cdot S$ は含水率 ϕ (kg/)にほかならない。

c と ϕ の実測値から係数 α を逆算すると平均値で $\alpha = -2.80$ となった。従ってALCの含水量と超音波パルス伝播速度の関係は次のようになる。

⁽³³⁾ <http://www.ndt.net/library/applic/concrete.htm>

⁽³⁴⁾ Okajima, T. and Ichinose, K., Effects of moisture content on the elastic modulus of concretes, Prep. Annual Meeting of AIJ, Kyushu, 173-174, 1981 (in Japanese)

⁽³⁵⁾ Plona, T. J., Johnson, D. L., Acoustic properties of porous systems: I. Phenomenological description, Physics and Chemistry of Porous Media, AIP conf. Proc. NO107, 89-104, 1984

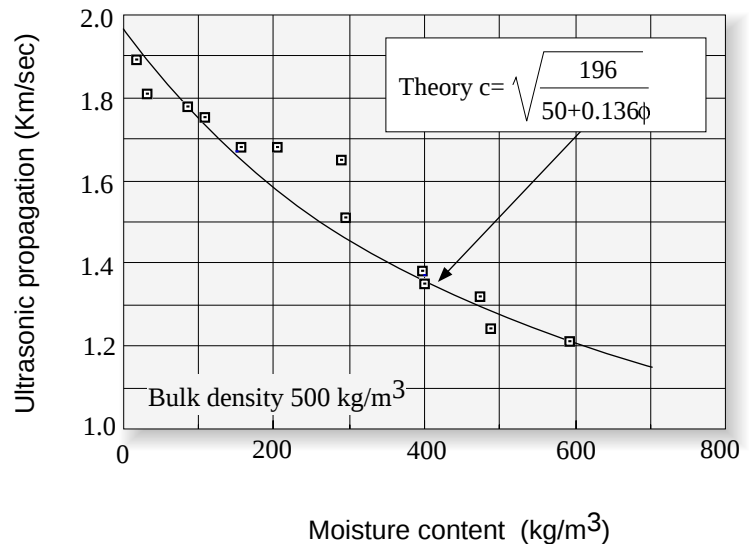
$$c = \sqrt{\frac{196}{50 + 0.136\phi}} \quad (31)$$

ここで c : (km/sec)、 ϕ : (kg/m³) である。

(3) 測定例

試料はかさ密度が500(kg/m³)、寸法が40×40×160mmの標準的なALCである。受信子と発信子で40×40mmの断面を挟んで測定した。ALCの含水量と超音波パルス伝播速度の測定結果を図に示す。理論式と実測値は非常に良く一致している。

木材やALCでは、超音波パルス伝播速度の含水率への依存性は負の相関を示し、含水量の増加と共に超音波パルス伝播速度は減少する。空隙に含まれる水は超音波パルスの伝播に寄与せず、むしろ減衰させている。これは使用する超音波の周波数や吸着水の粘性によって変化する⁽³⁶⁾。モルタルでは含水量の増加に伴い、超音波パルスの伝播速度は大きくなる。



4 平衡含水率

平衡含水率は相対湿度と吸着量の関係であり、測定技術は質量測定技術と相対湿度発生技術とに大別される。質量測定は試料が真空系にある場合にはマイクロバランス⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾を使用したり、石英スプリングの伸びをカセットメータで読み取り⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾、またはベリリウム-銅合金のカンチレバーの変形を作動トランスで検知したりする方法⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾があるが、試料の質量を測定せず、系の容積既知で吸着質の

⁽³⁶⁾ Sobue, N., Simulation study on stress wave velocity in wood above fiber saturation point, J. Timber Society of Japan, 39(3), 271-276, 1993

⁽³⁷⁾ Willems, H. H., Poullis, J. A., Massen, C. H., Microgravimetric Measurements of Water Vapour Sorption on Hydrated Cement Pastes, Thermochimica Acta, 103 (1)137-145, 1986

⁽³⁸⁾ 藤本修文, 井上博愛, バイコールガラスによる水蒸気の吸着, 化学工学論文集, 11(1), 41-47, 1985

⁽³⁹⁾ 松本衛, 松下敬幸, ハイグロスコピックの領域での気泡コンクリートの吸放湿性状, その(1)局所平衡, 線形モデルによる解析の妥当性の検討, 日本建築学会論文報告集, No.302, 37-45, 1981

⁽⁴⁰⁾ 水畑雅行, 豊田康弘, 材料の平衡含水率測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(計画系), 昭和61年, 1039-1040, 1986

⁽⁴¹⁾ 迫田章義(他), 小型実験装置へのマイコンの応用-吸着平衡と吸着速度の判定, 化学装置, 24, 31-36, 1982

⁽⁴²⁾ Schuch, M. J. and Udell, K. S., A Study of the Thermodynamics of Evaporation and

減量⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾や微小定流量⁽⁴⁵⁾を利用する方法もある。相対湿度の発生法はJIS Z 8806等にも示されるように、塩類の飽和水溶液を用いる方法、温度と圧力もしくはどちらか一方を変える方法、分流法等が利用されている。また化学工学分野では真空系で水蒸気圧のみを変化させる容量法がしばしば用いられる。

(1) 塩類の飽和水溶液を利用した調湿

塩類の飽和水溶液を利用した相対湿度は温度制御に注意し、容器内の攪拌を行なえば1% RHの精度の調湿が可能などなどが検証されている⁽⁴⁶⁾。JIS (案) 建築材料の吸放湿特性測定方法では7種の塩類の飽和水溶液から5種を選択し、大気圧下、 20 ± 0.5 で試料系外の天秤で重量測定を行なうものとし、これに基づく荒井(他)の測定例がある⁽⁴⁷⁾。同様に大気圧下で近江、鈴木はほとんど別種の塩類の飽和水溶液を用いて木材及び吸水性高分子を測定した⁽⁴⁸⁾。試料は秤量びんに入れたままデシケータ内に置き、重量測定時は秤量びんのコックを閉めて測定を行なっている。いずれの場合も基本的に密閉系であるがデシケータ外から重量測定を行なうため、一時的にデシケータが開放され調湿に乱れが起きる。また外部から攪拌用のトルクを導入することも困難で、調湿の回復、平衡時間共に長時間を要する。松本、松下は試料系を完全密閉とし重量測定は石英スプリングにより行なったが一試料に約40日を要した⁽⁴⁹⁾。Haggymassy⁽⁵⁰⁾は真空下の塩類飽和水溶液+秤量びんによる方法で各種のセメントペーストを測定した。真空下では水蒸気の平均自由行程が長くなり拡散率が大きくなって平衡時間が短縮され、セメントペーストにとっては炭酸化の防止効果もある。この方法は真空下で、精密な温度制御と攪拌を行ない、秤量びんに入れた重量測定を行なったとしても、測定できる相対湿度が限られるのが難点である。

Condensation in a Porous System, Am. Soc. Mech. Eng. Heat Transfer Div., 46, 159-165, 1985

⁽⁴³⁾ 直野博光(他), 微粒子表面と細孔構造の評価, 表面, 29(5), 364-375, 1991

⁽⁴⁴⁾ 三浦和久, 谷岡守, 多重間測定システムとして改良された水蒸気吸着測定法, 応用物理, 46(6), 589-596, 1977

⁽⁴⁵⁾ A. Raoof, J-P. Guilbaud, A. Dupas and N. L. Tran, An Automatic Micro-Gravimetric Water Sorption Apparatus, Proc. Int. Workshop on Mass-Ennergy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, 386-396, 1995

⁽⁴⁶⁾ 北野寛, 高橋千晴, 稲松照子, 塩類の飽和水溶液による湿度定点の実現方法, 計測自動制御学会論文集, 23(12), 1246-1253, 1987

⁽⁴⁷⁾ 荒井良延(他), ゼオライト系調湿パネルに関する研究開発(その2)基礎物性の検討, 建築学会大会梗概集1990年10月

⁽⁴⁸⁾ 近江正陽, 鈴木正治, 木材及び吸水性高分子の水蒸気吸着, 東京農工大農学部演習林報告, No 22, 17-23, 1985

⁽⁴⁹⁾ 松本衛, 松下敬幸, ハイグロスコピックの領域での気泡コンクリートの吸放湿性状, その(1)局所平衡, 線形モデルによる解析の妥当性の検討, 日本建築学会論文報告集, No.302, 37-45, 1981

⁽⁵⁰⁾ Haggymassy, Jr., J., Pore Structure Analysis by Water Vapor Adsorption, Department of Chemistry, Clarkson College of Technology, 1970

(2) 温度と圧力のどちらか一方を変える方法

市販の2温度法による装置では、測定温度を20℃の時に相対湿度の下限は30%程度となるので平衡含水量測定には適さない。4℃以下の飽和空気を生成できる飽和槽を有する装置は一般に利用できる状態にあるかは不明で、平衡含水量の測定例は見当たらない。またAhlgrenは2圧力法の装置を自作して、コンクリート、ALC、モルタル、石材、レンガ、各種の木材とその2次製品、プラスチックフォーム等を嵩密度を変えて広範囲に測定した⁽⁵¹⁾。相対湿度は20～98%の範囲で7点程度である。

(3) 分流法

分流法は手早く、広範囲の相対湿度が得られる方法であり、しかも調和空気は常時流出しているので試料槽は攪拌され、系外からの重量測定なども連続的に可能になる。高橋（他）は分流式相対湿度発生装置の使用条件、精度などを検討し⁽⁵²⁾、相対湿度の精度は流量制御に使用する質量流量計の精度と経時変化でほぼ決まり、JISにある式を用いる場合の精度は $\pm 1 \sim 2\%$ 程度としている。Fisherは数個の流量の異なる臨界ノズルを電磁3方弁を用いて流量の加算を行ない、分解能1%、流量分割の精度は0.02%という分流装置が可能としている⁽⁵³⁾。分流法の場合の1次空気はコンプレッサで室内空気を圧縮し、モレキュラーシーブなどの乾燥装置を通して一旦乾燥空気とするが、SomeshwarとWilkinsonは窒素ガスを直接用いて簡素化した装置で水蒸気吸着を測定した⁽⁵⁴⁾。多田は市販の分流式相対湿度発生装置を改良し、電子天秤を用いて平衡含水量測定を自動化しALCを測定した⁽⁵⁵⁾。Bristol大学機械工学科の水蒸気吸着等温線測定装置は⁽⁵⁶⁾、乾燥・湿り空気の混合により相対湿度を発生させるが、混合量を定めるファンとダンパのコントロール、試料槽内の達成相対湿度の確認を2本の相対湿度センサにより行う。試料の重量測定は、RS-232C出力を持つ電子天秤（最大秤量3.6kg、分解能0.01g）で行う。これは分流法ではないために達成された相対湿度を相対湿度センサで確認する必要があり、相対湿度発生精度はセンサの精度で決まる。湿り空気または乾燥空気を作る

⁽⁵¹⁾ Ahlgren, L., Fuktfixering i Poroesa Byggnadsmaterial., Report 36, Division of Building Technology, The Lund Institute of Technology, 1972

⁽⁵²⁾ 高橋千晴, 稲松照子, 北野寛, 分流式恒湿発生装置の試作, 計測自動制御学会論文集, 24(6), 557 - 562, 1988

⁽⁵³⁾ Fisher, R.S., An Accurate Flow-Division Humidity Generator, Proc. Int. Symp. Moisture and Humidity, 247-249, 1985

⁽⁵⁴⁾ Someshwar, A. V., Wilkinson, B. W., Study of Electric Field-Induced Effects on Water Vapor Adsorption in Porous Adsorbents, Ind. Eng. Chem. Fundam, 24 (2), 215-220, 1985

⁽⁵⁵⁾ Tada, S., Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials, in Advance in Autoclaved Aerated Concrete, Balkema, Rotterdam, 53-63, 1992

⁽⁵⁶⁾ Saidani-Scott, H. and Day, B. F., Measurement of Moisture Migration in Building Materials: Part 1, Experimental apparatus and Procedure, Part 2, Mathematical Analysis and Results, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, 295-321, 1995

際、混合槽の空気を導入しているため相対湿度を大きな変化を迅速に行うことは分流法に比べて劣るが、大容量の空気をを用い、試料槽も大きいので大型試験体に向いている。

(4)真空中で水蒸気圧を変化させる方法

このなかでも容量法は真空系で吸着質（水）を徐々に試料室に導入し、吸着質の減量、蒸気圧、死容積から吸着量を計算するもので過去に非常に多くの測定例があり⁽⁵⁷⁾⁽⁵⁸⁾、また市販装置も多く存在する。また死容積を気にせず、直接吸着量を重量として測定する場合も多い⁽⁵⁹⁾⁽⁶⁰⁾。

(5) 迅速試験法

吸着速度が現在の吸着量 m と平衡吸着量 m_e の差に比例すると考えると、吸着速度は次式で表される。

$$\frac{dm}{dt} = \psi(m_e - m) \quad (32)$$

ここで、 ψ は比例定数である。これを積分すれば

$$m = m_e(1 - e^{-\psi t}) \quad (33)$$

となる。これはラングミュアの速度式であり、平滑面などに自由吸着する前提があるから、拡散が律速となるような多孔質体への吸着への適用には限界があると思われる。また、 ψ の物理的な意味は、吸着と脱着の速度定数の和であり、固体表面と吸着分子の親和性の情報を含み、また温度にも依存するものと思われる。

渡辺、足永、シリゲルスキーは吸着速度を測定し、 m_e と ψ を同時に決定して平衡含水量を早期に推定できると考えた⁽⁶¹⁾。吸着と脱着では平衡含水量が異なるヒステリシスを考慮し、図のようにそれぞれの平衡吸着量を m_{ea} と m_{ed} とし、脱着開始時点の吸着量を m_s （既知）とした。即ち、吸着過程、脱着過程の速度式はそれぞれ次のようになる。

⁽⁵⁷⁾ 直野博光ほか、微粒子表面と細孔構造の評価, 表面, 29(5), 364-375, 1991

⁽⁵⁸⁾ 三浦和久, 谷岡守, 多重間測定システムとして改良された水蒸気吸着測定法, 応用物理, 46 (6), 589-596, 1977

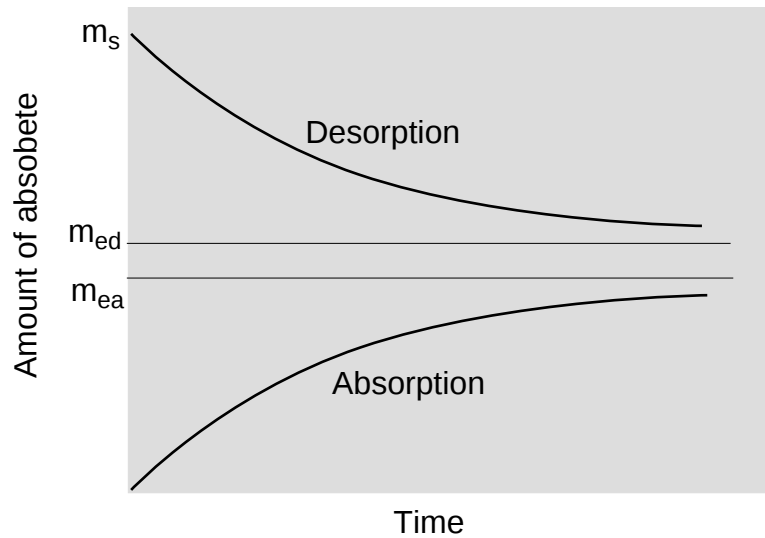
⁽⁵⁹⁾ Willems, H. H., Poullis, J. A., Massen, C. H., Microgravimetric Measurements of Water Vapour Sorption on Hydrated Cement Pastes, Thermochimica Acta, 103, (1)137-145, 1986

⁽⁶⁰⁾ 藤本修文, 井上博愛, バイコールガラスによる水蒸気の吸着, 化学工学論文集, 11(1), 41-47, 1985

⁽⁶¹⁾ Watanabe, K., Ashie, Y. and Shiligersky, I., Towards Paractical Simulation of Hygrothermal Behavior for Building Components, Part 3 Transient Mathod for Quick Measurement of Sorption Isotherm, Prep. Annual Meeting of Japan Air-conditioning and Sanitary Society, 29-32 (Hiroshima) 1995

$$m = m_{ea}(1 - e^{-\phi t}), \quad m = m_s + m_{ed}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (34)$$

吸着過程の測定において、平衡含水量を求めたい相対湿度が仮に10、20、30、・・・%であれば、その数だけ基準乾燥状態の試料を用意する。一つの試料は相対湿度0%から10%の変化を与えて平衡吸着量 m_{ea} -10を推定し、次の試料は相対湿度20%の平衡含水量として相対湿度0%から20%の変化与えて平衡吸着量 m_{ea} -20を推定し、以下同様に行う。



吸・脱着量の変化と平衡値

5. 水分特性曲線

水蒸気吸着等温線は相対湿度と材料の平衡含水率の関係で、水分の化学ポテンシャルと含水率の関係のハイグロスコピックレンジの関係を示す。高含水率部分におけるこの関係は、Water retention curveと呼ばれ、Pressure plateまたはPressure membrane法と呼ばれる方法で測定される。またこれらの二つの含水率レンジを結合したものはMoisture characteristic curveと呼ばれる。水分特性曲線は、材料内の水分の自由水に対する化学ポテンシャル差 $\Delta \mu$ と含水率との関係である。その応用範囲は極めて広く、土壌物理、植物生理学、食品工学、そして建築分野でもしばしば利用され、各々の分野の実用単位の形で測定されることが多い。土壌物理学では $\Delta \mu$ を重量ポテンシャルに換算したpFが用いられる。植物生理学では水ポテンシャル、食品工学では水分活性 a_w などと呼ばれるが、いずれも $\Delta \mu$ に対応しているので、一般的な水分の駆動力を知るために利用される。これによって物性の異なる多様な土に保持される水分を統一的に扱い、植物の吸水との関連を検討することができる。また微生物が生態膜を通じて食品から水分を移動させ、生育可能であるかどうかという問題についても実用的な応用が行われている。建設分野における水分特性曲線の応用として、例えばシルト質の土壌に接するコンクリート基礎は吸水するのか脱水するのか、コンクリート外壁に生育する微生物が生態膜を通じて水分を補給できるのはコンクリートの含水率がどれほどの場合なのか、などの問題についても明快な答えを出すことができる。

Penner⁽⁶²⁾は土壌物理におけるSuctionの概念を建築分野に初めて導入し、測定法と共にスプルース材についての水分特性曲線の測定例を示し、SeredaとHatcheon⁽⁶³⁾は気泡コンクリートについての測定例を示した。Bomberg⁽⁶⁴⁾は土壌物理の知見を建築材料に広範囲に応用し、含水率と毛管圧の関係をALC、レンガ、軟質繊維板について測定した。またプラスチックフォームではMarechal⁽⁶⁵⁾がギッブス自由エネルギーと含水率の関係を測定している。このように、建築分野での水分特性曲線の測定は、土壌物理学の知見に負うところが大きく、その測定手法もpFのそれを踏襲するところが多い。

5-1 Pressure plate法

湿り材料に毛管圧に等しい空気圧をかければ、その毛管圧に対応するケルビン半径以上の細孔に含まれる水は自由水となり重力によって移動する。空気圧 P と離脱水分の関係から毛管圧-含水率曲線すなわちwater retention curveが求められる。

$$P = -\frac{2\phi}{r} \cos \theta \quad (35)$$

ここで、 P は空気圧（毛管圧）、 r はケルビン半径、 θ は接触角、 ϕ は気-液界面自由エネルギーである。この方法では離脱した水分を系外へ導出し、精度よく重量を測定する方法が難しい。Kisselら⁽⁶⁶⁾の装置では多孔質基盤の下にゴムの膜を配し、水を集めるようにしてある。また、加圧ではなく下方から吸引する方法もあり、これらの測定法に関するFagerlund⁽⁶⁷⁾のレビューがある。この方法は動的水分排除法などとも呼ばれ⁽⁶⁸⁾、細孔分布測定用に市販の測定装置も存在する⁽⁶⁹⁾。測定には手

⁽⁶²⁾ Penner, E, Suction and its use as a measure of moisture content and potentials in porous building materials, in Waxler, A. (editor) Humidity and Moisture, Vol. 4, Reinhold publ., 1965

⁽⁶³⁾ Sereda, P. J., Hatcheon, N. B., Moisture equilibrium and migration in building materials, ASTM Special Tech. Publ., 385, 1965

⁽⁶⁴⁾ Bomberg, M., Moisture flow through porous building materials, Lund Institute of Technology, Report 52, 1974

⁽⁶⁵⁾ Marechal, J-C., Propriete mehaniques et thermiques des mateialux isolants, Annales de l'institut techniques du baiment et des travaux publics, 301, 22-42, 1973

⁽⁶⁶⁾ Kissel, K. and Krus, M., Experimental Determination of Building Materials Properties for Moisture Calculation, Proc. Int. Workshop on Mass-Ennergy Transfer and Deterioration of Building Components - Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, 322-342, 1995

⁽⁶⁷⁾ Fagerlund, G., Determination of Pore Size Distribution by Suction Porosimetry, Materials and Constructions, 6(33) 191-201, 1973

⁽⁶⁸⁾ Gelinas, C. and Angers, R., Improvement of the Dynamic Water-Expulsion Method for Pore Size Distribution Measurement, Am. Ceram. Soc. Bull., 65(9)1297-1300, 1986

⁽⁶⁹⁾ Zager, L., Porengrosenverteilung nach dem Luft-Wasser-Verdrängungsverfahren. Auswertung der Messergebnisse mit Hilfe eines elektronischen Tischrechners, Ber. Dt.

間がかかるので自動化された装置も提案されている⁽⁷⁰⁾⁽⁷¹⁾。

5-2 サイクロメータ法⁽⁷²⁾

熱力学的な原理に基づく露点温度測定により0.960から0.999の範囲の水分活性の測定が出来る。この測定に使用される熱電対サイクロメータは農業科学の分野で開発された機器である⁽⁷³⁾。その測定原理は次の通りである。露点温度降下 ΔT を測定するため、プローブ内の熱電対の一つの接点に電流を流し、ペルチエ効果によってその接点を冷却する。もう一つの接点を用いて通常のゼーベック効果による測温を行う。

温度が T 、露点温度が T_d である一モルの水蒸気の相対圧 P_s/P_s が高く、また $\Delta P = P_s - P_s$ も $\Delta T = T - T_d$ も小さいときに、クラウジウスクラペイロンの式によって

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\Delta H}{TV_g} = \frac{P_s \Delta H}{RT^2}, \quad (36)$$

ここで V_g は水蒸気の体積で、水のそれよりも十分に大きい。 ΔH は水の相変化に伴うエンタルピー変化である。また理想気体に於ける $P_s V_g = RT$ の関係をを用いている。

冷却用接点と測温接点間の熱電対の熱起電力 E は熱起電力計数 ε をとって次式で表される。

$$E = \varepsilon \Delta T = \varepsilon \left[RT^2 / \Delta H \right] \left[(P_s - P) / P_s \right] = \varepsilon \left[RT^2 / \Delta H \right] \left(1 - P / P_s \right). \quad (37)$$

37式の P/P_s を $\exp(-\Delta\mu/RT)$ で置き換えて整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} E &= \varepsilon \left[RT^2 / \Delta H \right] \left[1 - \exp(-\Delta\mu/RT) \right] \\ &= \varepsilon \left[RT^2 / \Delta H \right] \left[(\Delta\mu/RT) - (\Delta\mu/RT)^2 / 2! \right] \cong \varepsilon T \Delta\mu / \Delta H \end{aligned} \quad (38)$$

水蒸気圧が変化せず、水の相変化に伴うエンタルピー変化 ΔH も温度に依存せず、 ΔT そのものも小

Keram. Ges., 55(1)13-17, 1978

⁽⁷⁰⁾ Shishido, I., Suzuki, M., A new measurement method of liquid transport properties, Proc. Int. Symp. Drying, Vol.2, 764-768, 1984

⁽⁷¹⁾ Boels, D., van Gils, J. B. H. M., Veerman, G. J. and Wit, K. E., Theory and systems of automatic determination of soil moisture characteristics and unsaturated hydraulic conductivities, Soil Science, 126, 191-199, 1978

⁽⁷²⁾ Tada, S., Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials, France-Japan workshop on simultaneous heat and moisture transport, Tokyo, 19p, 1991

⁽⁷³⁾ Richards, L. A., A thermocouple psychrometer for measuring the relative vapor pressure of water in liquid or porous materials, in Wexler, A. ed., Humidity and Moisture, vol.4,

さいとすれば、水蒸気そしてこれと平衡状態にある材料中の水分の化学ポテンシャルは以上のようにして露点温度降下から得られることになる。測定可能な範囲は冷却能力と微少電圧の測定精度で決まり、 $-5 \times 10^3 \sim -10^2$ (J /Kg) 程度である。

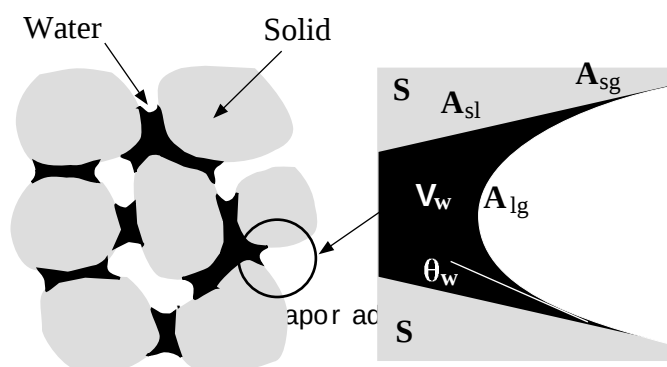
5-3 Tadaの方法⁽⁷⁴⁾

従来の方法は測定に長時間を要するものも多く、異なる測定原理に基づく方法で得られた測定値を連結する際の理論的な困難も多かった。水蒸気等温吸着では高い相対湿度の吸着測定の精度が悪く、大きな孔の測定が困難であることから、この方法は水銀圧入法の測定データを水蒸気等温吸着に帰着させ、広い範囲での水蒸気等温吸着を得るものである。

(1) 水蒸気等温吸着

空隙形状に特定の幾何学形状を仮定せず、ガスの吸着を一般的に定式化したモデルレス法はすでにBrunauerらによって示されている⁽⁷⁵⁾。しかし、水銀圧入法など広く利用されている別の測定法との連結を考慮して行くためにはより一般的な定式化を行なう必要がある。

水蒸気の等温吸着ではその温度における飽和水蒸気圧 P_s に対する実際の蒸気圧 P の比、つまり相対圧 P/P_s の変化に



よって試料に吸着された水分量が測定される。そのモデルが図に示されているが、ここで試料は常圧下 (1 atm) に保たれ、試料内の水分 (液相を l、気相を g で表す) のみで構成される系を熱力学的系と考えている。絶対温度 T 、圧力 P が一定のもとでこの系には水蒸気分圧の変化 (相対圧の変化) による水分の進入、吸着があり、これに伴って吸着水と試料 (固相 s) の界面 (sl) 及び水蒸気と試料の界面 (sg)、更に吸着水と水蒸気の界面 (lg) の自由エネルギーが変化する。この系のギブス自由エネルギーの全微分は次式で与えられる⁽⁷⁶⁾。

Reinhold publ. Co. NY, 13-18, 1965

⁽⁷⁴⁾ Tada, S., Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials, in Advance in Autoclaved Aerated Concrete, Balkema, Rotterdam, 53-63, 1992

⁽⁷⁵⁾ Brunauer, S., Skalny, J., Odler, I., Complete Pore Structure Analysis, Proc. Int. Symp. Pore Struct. Prop. Mater., 6Vols, Academia, Prague, C3-C26, 1973

⁽⁷⁶⁾ Dufay, R., Prigogine, I., Bellemans, A., Everett, D. H., Surface Tension and Adsorption, Wiley, p.54, 1966

$$dG = -SdT + VdP + A_{sg}dF_{sg} + A_{sl}dF_{sl} + A_{lg}dF_{lg} + m_w dn, \quad (39)$$

ここで、 S は系のエントロピー、 V は系の体積、 A は界面の面積、 F は界面張力をそれぞれ示す。また μ_w は水分の化学ポテンシャルで、等温で自由な水面をもつ純水を基準にして $RT\ln(P/P_s)$ で与えられる。 R は気体常数である。 n は系に進入した水分のモル数でありその体積を V 、水分子のモル比容積を v とすれば $dn=dV/v$ である。系が大気圧に開放されたまま ($dP=0$) 等温条件で ($dT=0$) 吸着平衡に達すれば $dG=0$ であるから、可逆仕事の項だけが残る次式を得る。

$$A_{sg}dF_{sg} + A_{sl}dF_{sl} + A_{lg}dF_{lg} + RT\ln(P/P_s) \cdot dV/v = 0. \quad (40)$$

ここで F_{lg} は吸着に伴って変化するが F_{sl} の変化は無視できるものと考え $dF_{sl}=0$ とおく。さらに材料と吸着水の接触角を θ_w とすれば、Young-Dupre の式 $F_{sg} = F_{sl} + F_{lg} \cos\theta_w$ を微分して $dF_{sg} = dF_{lg} \cos\theta_w$ を得る。従って(40)式は次のようになる。

$$(A_{sg} \cos\theta_w + A_{lg})dF_{lg} + RT\ln(P/P_s) \cdot dV/v = 0. \quad (41)$$

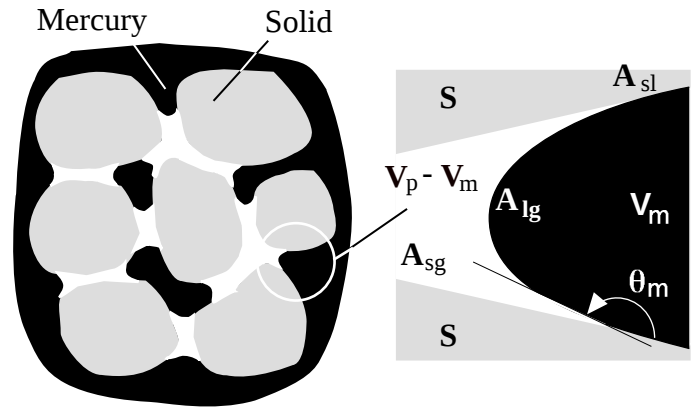
ここで、 $A_{sg} \cos\theta_w + A_{lg} = A$ とおけば、 A は吸着・凝縮相の進展により正味変化する界面の面積である。初期条件として吸着開始時に $V=0$ 、 $F_{lg}=0$ であり、また $V=V_w$ のとき $F_{lg}=F_w$ として(41)式を積分すれば一般的な形の Kelvin の式を得る。

$$\frac{RT\ln(p/p_s)}{v} = -\frac{\Phi_w}{R_H} \quad (42)$$

ここで F_w は水の表面張力、水理半径 R_H は V_w/A で定義されるもので、 V_w は吸着水の体積、 A は固相-気相界面の面積と気相-液相界面の面積を加えたものである。また気相水分の体積は液相のそれに比べて小さいので無視した。以上の導出の過程では、吸着相(水膜)と毛管凝縮相(メニスカス)の相対的な配置や形状を何ら仮定していない。吸着の初期には単分子吸着以下の場合もあるから、このときは $F_{lg}=0$ と考えるのが妥当であろう。その後の段階で、空隙の大きさに依っては自由な吸着が不可能な領域 (Hindered adsorbed region) や、毛管凝縮が生じる領域にも水分が進入すると、 $A_{sg}=0$ 、 $dA_{lg}<0$ となり、 A_{lg} は最終的に試料の見かけの表面積に近づくことになる。この面積は内部比表面積に比べれば無視できるほどに小さいが有限の値であり、 $A (=A_{sg} \cos\theta_w + A_{lg})$ はゼロにはならず、従って $P/P_s \rightarrow 1$ のときでも R_H は無限大にはならない。

(2) 水銀圧入法

水蒸気吸着法を一般化に導く際に Brunauer が準拠した Kiselev の式と同等の式が水銀圧入法においても Rootare-Plenzlow によって導かれている⁽⁷⁷⁾。しかしその目的は水銀圧入法によって比表面積を求めることであつたため、水銀圧入法を空隙形状に特定の仮定をしないで一般的に定式化するには至っていない。



水銀圧入法では、水銀を圧力 P で試料の内部に dV だけ圧入した量が測定される。図に示されるように、以下では試料の内外（スーパースクリプト i と o で区別する）の水銀のみで構成される系を熱力学的系と考える。このとき外圧により水銀（サブスクリプトで液相 l と気相 g を区別する）と試料（固相 s ）の界面に面積仕事が行なわれるので、この系のヘルムホルツ自由エネルギーの全微分は次式で与えられる⁽⁷⁸⁾。

$$dF = -SdT - P^o dV_l^o - P^i dV_l^i - P_g^i dV_g^i + F_{lg} dA_{lg} + F_{sg} dA_{sg} + F_{sl} dA_{sl} + m dn. \quad (43)$$

液相の水銀の体積は一定と考えると $dV_l^i + dV_l^o = 0$ である。また試料内部の空隙も一定だから $dV_g^i + dV_l^i = 0$ 、同様に内部表面積に関しても $dA_{sg} + dA_{sl} = 0$ が成り立つ。

q_m を試料と水銀の接触角とすれば界面張力に関して Young-Dupre の式から $F_{sg} - F_{sl} = F_{lg} \cos q_m$ が成り立つ。またこの系に新たに出入りする物質はないので $dn = 0$ 、そして等温変化つまり $dT = 0$ で平衡状態（ $dF = 0$ ）になった時に次式を得る。

$$(P_l^o - P_l^i + P_g^i) dV_l^i + (dA_{lg} - dA_{sg} \cos q_m) F_{lg} = 0, \quad (44)$$

ここで $P_l^o = P_l^i = P_g^i = P$ 、 $dV_l^i = dV$ であり、初期条件 $V = 0$ から $V = V_m$ の変化に対応して A_{lg} は試料の見かけの表面積に近い一定値 a から A_{lg} へ、 A_{sg} は比表面積に近い値から 0 まで変化する。この条件で (44) 式を積分して次式を得る。

⁽⁷⁷⁾ Rootare, H. M., Prenzlow, C. F., Surface Area from Mercury Prosimeter Measurements, J. Phys. Chem., vol. 71, pp.2733-2736, 1967

⁽⁷⁸⁾ Tada, S., Tanaka, M., Matsunaga, Y., Measurement of Pore Structure of Aerated Concrete, Proc. Beijing Int. Symp. Cem. Concr., vol.3, 384-393, 1985

$$PV_m = -F_{lg}(A_{lg} - A_{sg} \cos q_m) + a, \quad (45)$$

ここで a は小さいので無視し、 $A' = A_{lg} - A_{sg} \cos q_m$ とにおいて $R_H = V_m / A$ を用いると次式を得る。

$$P = -F_m / R_H, \quad (46)$$

ここで F_m は水銀と水銀蒸気の界面張力 F_{lg} であるが計算では水銀の表面張力の値を使用している。以上の式は、Rootare-Plenzlowの式を一般的に導いたもので、モデルレス水銀圧入法と言えるものである。

水蒸気等温吸着の過程で(42)式が成立し、一定の相対湿度と平衡した試料の重量変化を測定することで直ちに P/P_s と V_w が知られる。そして吸着される水分はより微細な空隙から順に満ちていると考えられる。一方、水銀圧入の過程では(46)式が成立し、圧力 P までに圧入された水銀量 V_m が測定される。この場合、圧入された水銀は水蒸気吸着の場合とは逆に、より大きな空隙から順に満ちている。そこでこの二つの空隙構造測定法を連結させ広い範囲での空隙分布測定を行なうために、どの R_H でも V_w と V_m 、 q_w と q_m との間に次の関係を仮定する。

$$V_w + V_m = V_p, \quad q_w + q_m = p, \quad (47)$$

ここで V_p は試料の全空隙率であり、真空飽和によるアルキメデス法等で容易に知ることができる。式(3-7)の左辺は分離圧で負の圧力であり、これを P と記すと、同じ R_H では式(42)と式(46)から

$$P = P \cdot F_w / F_m. \quad (48)$$

として水銀圧入法の圧力を分離圧に換算し、このときの V_w に相当するものを $V_p - V_m$ から求める。以上のようにして水蒸気等温吸着と水銀圧入法が連結され、広い範囲での水蒸気等温吸着と呼べるものを得ることができる。広い範囲での水蒸気等温吸着を得ることができれば、累積細孔量を含水量に、また相対湿度を化学ポテンシャルに変換して、含水量と化学ポテンシャルの関係、即ち水分特性曲線を得ることができる。

6 湿気伝導率

6-1 カップ法

カップ法はASTMなど各国の規格に定められている標準試験法⁽⁷⁹⁾である。JISでは直径60mmφ、深さ15mmの容器内の試料下面に吸湿材を入れ、試料を通して外部の湿分が透過するようにし、容器の全重量の定常的な増加を確認して湿気伝導率を求める。湿気伝導率は相対湿度の関数となるが、この方法は、各種建材のように厚さが大きく、吸放湿性のある試料では定常になるまでの時間が長くなる。また、主要な誤差要因として、試料が厚い場合にカップと接する周辺部の湿気の流れに1次元性が確保されない場合があること、表面の湿気拡散抵抗の再現性の問題が指摘されており、補正法も提案されている⁽⁸⁰⁾。この方法ではセメント系材料についての測定は多くない⁽⁸¹⁾。

6-2 2 Box法

2種の調湿剤で水蒸気圧差を付けた2つの箱の境界に試料を設置し、調湿剤の容器の重量を連続測定して定常状態を確認して湿気伝導率を求める。測定原理はカップ法と同じであるが、大版の試料の測定が可能となり、湿流の1次元性が向上する。また箱内の空気を攪拌できるので表面の湿気拡散抵抗の再現性も向上する。しかし装置の構成に標準が無く、研究者により異なるため、測定結果も一致を見ないことが多い。大沢は各装置を比較検討している⁽⁸²⁾。

6-3 Sorptivity method

(1) 測定原理

水分の保存の式(13)は、液相水分の流れが無視でき、また含水率の変化も小さく湿気拡散率 $D_{\theta v}$ が含水率に依存しないとき、等温条件で次のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_{\theta v} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (49)$$

半無限固体において、境界条件が $c = c_l (x = 0, t \geq 0)$ 、初期条件が $c = c_0 (x \geq 0, t = 0)$ であるとき、表面絶対湿度の変化に対する全移動水分量 W (kg/m^2) は次のようになる。 $\bar{D}_{\theta v}$ は変化した含水率範囲の平均の湿気拡散率である。

⁽⁷⁹⁾ Joy, F. A. and Wilson, A. G., Standardization of the dish method for measuring water vapor transmission, Int. Symp. Humidity and Moisture, Washington DC. (4), 259–270, 1963

⁽⁸⁰⁾ Andersson, A-C., Verification of calculation methods for moisture transport in porous building materials, Document, Swedish Council for Building Research, D6:1985, 223P

⁽⁸¹⁾ Kari, B., Perrin, B. and Foures, J. C., Perm éabilité a la Vapeur d 'eau de Materiaux de Construction: Calcul Numerique, Materials and Constructions, 24, 227–233, 1991

$$W = 2(c_i - c_0) \left(\frac{\bar{D}_{\theta} t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (50)$$

c は絶対湿度(kg/m^3)に対応する材料の含水率(kg/m^3)である。従って変化した含水率範囲の平均の湿気伝導率 $\bar{D}_V$ (kg/msPa)は(7)式によって次のようになる。

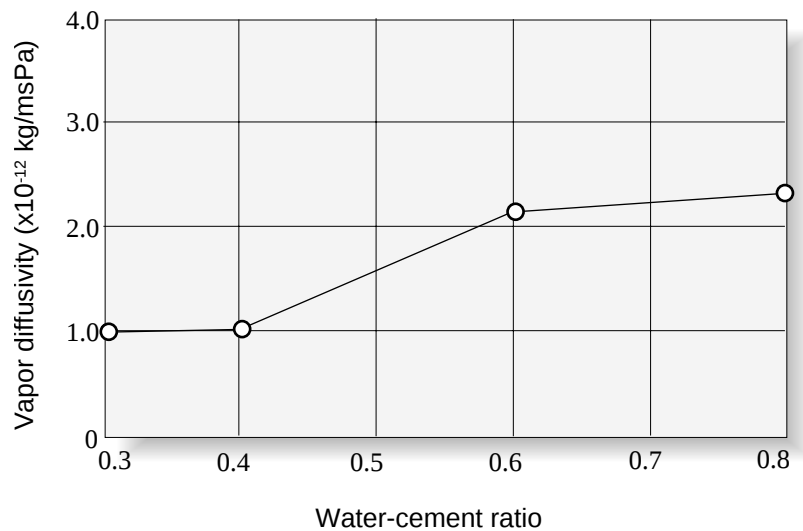
$$\bar{D}_V = \frac{\pi}{4(c_i - c_0)^2 p_{VS}} \left(\frac{\partial \theta}{\partial h} \right) \left(\frac{W}{\sqrt{t}} \right)^2 \quad (51)$$

測定は、材料の環境の相対湿度を急激に変化させ、吸湿または放湿による含水率の変化を時間の平方根に対してプロットしその傾きを求める。また $\partial \theta / \partial h$ は吸着等温線の傾きで別途測定しておく。

この方法は表面の湿気伝達抵抗を考慮せず、試験体も実際には半無限ではないこと、湿気拡散率の含水率への依存が小さいなどの仮定を含んでいるが、中尾ら⁽⁸²⁾はその誤差の評価を行い、必要な精度で測定するための条件を検討している。

(2) 試験例

精密相対湿度発生装置に、コンプレッサ、電子天秤、及びパソコンを組み合わせて実験装置とする。電子天秤は最大秤量260g、分解能は1mmgで、デジタル出力(RS-232C)を持つ。湿度変化による試料の重量変化1分毎にパソコンに取り込み、計算を行う。試料は水セメ



ント比が0.3、0.4、0.6、0.8のコンクリートでそれぞれ100 x 1000 x 10 mm程度の大きさとした。サンドペーパーにより切断面を調整し、試料の吸放湿面以外の面をアルミテープで断湿処理した。試料をステンレスワイヤで電子天秤から吊り下げ、相対湿度発生装置の試料層の中央に位置させる。まず、温度20 一定の条件の元で相対湿度60%で平衡状態となった試料を設置した後、試料槽を急激

⁽⁸²⁾ Nakao, M. and Ohshima, K. 1982: Dynamic method for measuring moisture properties of building materials, Research Paper of AIJ, No. 315, 76-82

に90%に変化させこれを維持し、積算質量変化量 $\Delta M(\text{kg})$ について、勾配 $\Delta M/S \Delta t^{0.5}$ を求める。ここで S は試料の表面積(m^2)である。湿気伝導率は(51)式から計算でき、図のようになった⁽⁸³⁾。

7 水分伝導率

建設材料分野では不飽和透水係数を水分伝導率と呼ぶことが多い。Jentz⁽⁸⁴⁾は高含水率に於ける水分伝導率測定法を各種検討している。

7-1 水分の流束と含水率分布を求める方法

この方法は、水分の流束の式

$$\mathbf{J}_L = -\rho_L D_\theta \nabla \theta \quad (52)$$

を用いて、水分の流束 $\mathbf{J}_L$ と $\nabla \theta$ を測定して D_θ を求めるものである。水分の流束 $\mathbf{J}_L$ の求め方には次の2つの方法がある。

● 試料に吸収された水分を実測する方法

Kooi⁽⁸⁵⁾、松本⁽⁸⁶⁾は重力の影響を最小限にするため、水平方向の一面吸水により水分を試料に移動させ、流入量はピペットのメニスカスの移動から求めている。流入量が一定になった時点で、試料を切断し、含水率分布を求める。この方法では得られる含水率の範囲が狭く、吸水過程の水分伝導率のみが測定される。

● 試料全体の重量増を利用する方法

Jonell⁽⁸⁷⁾らはALCの垂直方向の自由吸水試験を行ない、幾つか用意しておいた同じ試験体を一定時間

⁽⁸³⁾ Okawara, O., Kasai, Y., Matsui, I., Yuasa, N. and Tada, S., Quality of cover concretes – Hygroscopic properties, Proc. Annual Conference of College of Industrial Technology, Nihon University, 1997

⁽⁸⁴⁾ Janz, M., Methods of measuring the water diffusivity at high moisture levels, Thesis, Lund Institute of Technology, TVBM-3076, 1997, <http://www.ldc.lu.se/lthbml/e-doc.htm>

⁽⁸⁵⁾ Kooi, J. van der, Moisture transport in cellular concrete roofs, Proc. 2nd Int. Symp. Moisture Problems in Building, Rotterdam, 2.5.5, 1974

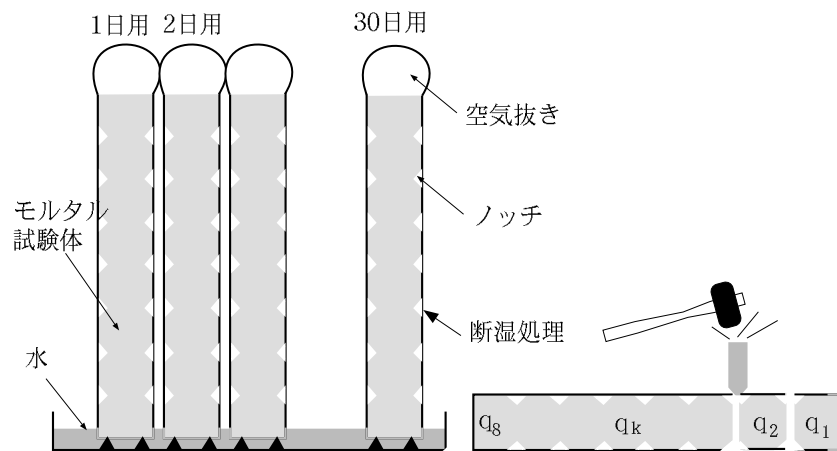
⁽⁸⁶⁾ Matsumoto, M., A Study on Simultaneous Heat and Moisture Transport and Moisture Accumulation in Building Walls, Thesis of Kyoto University, 1978 (in Japanese)

⁽⁸⁷⁾ Jonell, P., Karamustafaoglu, V., Tepfers, R., Determination of the coefficient of capillary flow for steam-cures lightweight concrete, Rilem Symp. Lightweight Concrete, Goteborg, 433-437, 1960

に順番に切り出し、流入量を全体質量増と切り出した各断片の含水率から求めている。多田⁽⁸⁸⁾は吸水過程の水分伝導率測定にJonellらの方法を、乾燥過程の水分伝導率測定にKooiの方法を用いた。乾燥過程での試験法は、飽和吸水させた5面断湿試料の一面から放湿させ、試料内の含水率量分布の経時的な変化と全体の質量減を測定して D_θ を求めた。

この方法は定常状態でなくとも実施できるので迅速であり、含水率分布を求める時間（切断する時間）を調節すれば、広い範囲の含水率における水分伝導率が得られる。しかし、時間をおいて次々

に別な試料を切り出すためにばらつきが大きく、切断しやすい試料に限られることなどが問題だが、含水率分布をガンマー線減衰法で非破壊測定したNielsen⁽⁸⁹⁾とCammerer⁽⁹⁰⁾の結果とはよく一致している。



(1) 吸水過程

プリズム形状のモルタル試験体（40 x 40 x 160 mm）を10個用意し、それぞれに分断し易い様に予め20mmピッチにノッチを付けておく。これらを20℃、98%の環境に1週間放置する。次いで下面5mmを残してアルミ фольで断湿処理する。浅く水を張った容器に解放面を水に接するように立て吸水させる。吸水開始後1、2、3、4、6、8、10、15、20、30日に各1個を回収し、8個に分断して各ピースの質量を測定する。 k 番目のピースの質量を q_k （kg）、その105℃乾燥重量を q_{dk} （kg）、その体積を v （ cm^3 ）とすれば、体積含水率 θ_k は $(q_k - q_{dk})/v$ である。試料の断面積を A （ cm^2 ）、回収のインターバルを Δt （sec）とすれば k 番目のピースにとっての水分流束は $\sum_{i=1}^8 (q_i - q_{di}) / A \Delta t$ （ $\text{kg}/\text{m}^2 \text{sec}$ ）であり、 $D_{\theta k}$ は次のように表される。

⁽⁸⁸⁾ Tada, S., Nakano, S., Microstructural Approach to Properties of Moist Cellular Concrete, Autoclaved Aerated Concrete -Moisture and Properties, ed. F. H. Wittmann, Elsevier, 71-88, 1983

⁽⁸⁹⁾ Nielsen, A. F., Moisture distribution in cellular concrete during heat and moisture transfer, Report 29, Tech. Univ. Denmark, Copenhagen, 219p, 1974

⁽⁹⁰⁾ Cammerer, W. F., The capillary motion of moisture in building materials, Proc. 2nd Int. Symp. Moisture Problems in Building, Rotterdam, 2.1.2, 1974

$$D_{\theta k} = \frac{\sum_{i=k}^8 (q_i - q_{di}) / A \Delta t}{\left(\frac{\theta_k - \theta_{k+1}}{\Delta x} \right)} \quad (53)$$

(2) 放湿過程

吸水過程と同様の試験体を準備する。前述の湿潤装置を利用して、全ての試料を20℃の水道水で飽水状態にする。全ての試料について上面のみを残してアルミ фольで断湿処理し、恒温恒湿室に放置して乾燥を開始する。およそ1、2、3、4、6、8、10、15、20、30日に各1個を回収し、8個に分割して各ピースの質量を測定する。以後は吸水過程と同様な計算により $D_{\theta k}$ が求められる。

7-2 保存式をBoltzmann変換して求める方法

この方法は、等温条件の水分収支式

$$\nabla(D_{\theta} \nabla \theta) + \rho_L \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (54)$$

を、初期・境界条件 ($x=0$ のとき、どの時間でも $\theta = \theta_0$ 、 $t=0$ のとき、どの x でも $\theta = \theta_i$) の元でボルツマン変数 $\lambda = x / \sqrt{t}$ を導入すれば上式は常微分方程式

$$\frac{d}{d\lambda} \left(D_{\theta} \frac{d\theta}{d\lambda} \right) + \frac{1}{2} \lambda \frac{d\theta}{d\lambda} = 0 \quad (55)$$

となり、 $x(\theta, t) = \lambda(\theta) t^{1/2}$ の形の解をもつ⁽⁹¹⁾。この式を積分すると、 D_{θ} は次式となる⁽⁹²⁾。

$$D_{\theta} = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\lambda}{d\theta} \right) \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda d\theta \quad (56)$$

各時刻の含水率分布を求めることにより、 θ とボルツマン変数 λ の関係を求め、 $(d\lambda / d\theta)$ と積分項を計算すれば D_{θ} がえられる。この方法は、建築材料に限っても多くの測定例があり、誤差の検討も行われている⁽⁹³⁾。

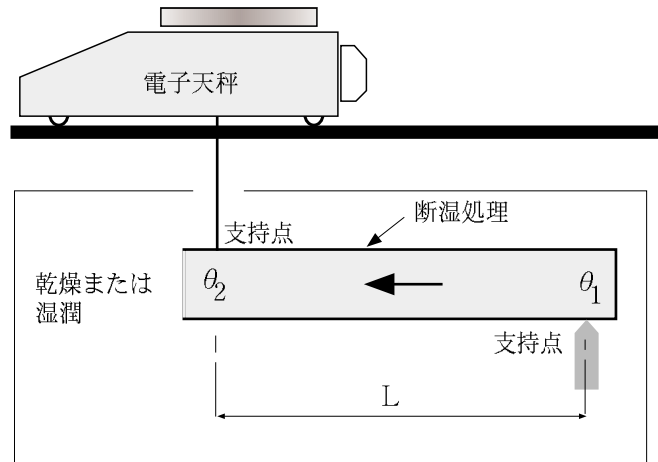
⁽⁹¹⁾ Philip, J. R., Theory of Infiltration, Adv. Hydrosci., 5, 215-296, 1969

⁽⁹²⁾ Bruce, R. R. and Klute, A., The Measurement of Soil Moisture Diffusivity, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20, 458-462, 1956

⁽⁹³⁾ Wang, B-X. and Fang, Z-H, Water Absorption and Measurement of the Mass Diffusivity in

7-3 モーメント法

ClaessonとGaffner⁽⁹⁴⁾は含水率分布も水分流束も測定することなく水分伝導率を測定する方法を開発した。長さ L 、断面積 A のプリズム形状の試験体を含水率 θ_1 に調整する。この試験体の5面を断湿処理し、残りの一面（長軸に直行する面の1つ）を異なる水分環境に解放しその含水量が θ_2 となるようにする。試料の片面は図のように支持され、片面は天秤に



乗せかけ、または吊られて水分移動による重量変化を測定する。時間による質量変化が定常状態となったとき、その直線の勾配 dm/dt と D_θ との関係は次のようになる。

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{A}{L} \int_{\theta_1}^{\theta_2} D_\theta(\theta) d\theta \cong -\frac{A}{L} D_\theta \Delta\theta \quad (57)$$

すなわち、こ θ_1 と θ_2 の差が十分小さく D_θ は一定と見なせると仮定している。従って水分伝導率は

$$D_\theta = -\frac{L}{A(\theta_2 - \theta_1)} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (58)$$

となる。ここで求められた D_θ は θ_1 と θ_2 の平均の含水率における水分伝導率である。この測定法によりALC、レンガ等が測定されている⁽⁹⁵⁾。

Porous Media, Int. J. Heat and Mass Transfer, 31 (2) 251-257, 1988

⁽⁹⁴⁾ Claesson, J. and Gaffner, D., Fukt i Porosa Byggnadsmaterial, Report 1977.1, Lund Institute of Technology, 1977

⁽⁹⁵⁾ Andersson, A-C., Verification of calculation methods for moisture transport in porous building materials, Document , Swedish Council for Building Research, D6:1985, 223P

7-4 CSTBの方法⁽⁹⁶⁾

濃度の異なるポリエチレングリコール溶液を試料の両側に配し、一定の化学ポテンシャル勾配を作る。半透膜を介しているので水分だけが低濃度側から高濃度側に移動し、その量は液面レベルの比較から求められる。しかし、2つの溶液は共に十分大量にあるため、この水分移動による濃度の変化はないものとしている。また定常状態で試料内部の厚さ方向で駆動力は一定と考えている。

$$J_L = -D_\mu \frac{RT d \ln(c_1/c_2)}{dx} \quad (59)$$

ここで、 D_μ は水分の化学ポテンシャル差を駆動力にしたときの水分伝導率、 c は溶液のモル濃度である。高分子溶液の濃度差で直接化学ポテンシャル差を与えるため、それ以外の水分駆動力（蒸気圧、温度、重力）などのはいる余地がない。また濃度の組み合わせを変化させることにより、含水率の関数として水分伝導率を求めることも出来る。装置は非常に簡単で、運転にも高度な技術を必要としない。

8 おわりに

これまでのところ、材料の微細構造あるいはその理論モデルから水分特性を予測する方法は必ずしも成功していない。その確立までは実験により水分特性を求めることは避けられないと思われる。また移動係数については、水分単独でなく、熱、電気等のエネルギーや他の物質との結合流れの交叉係数として検討することにより、実験が難しい係数を理論的に求めたり、実験そのものが容易になると思われる。今後の課題としたい。

⁽⁹⁶⁾ Duforestel, T. and Miquel, A., Advanced Hygrometric Measurements, Proc. Int. Workshop on Mass-Energy Transfer and Deterioration of Building Components – Models and Characterisation of Transfer Properties, Paris, 365–385, 1995