

論文 コンクリートの湿気移動解析に関する基礎的研究

竈橋 忍*¹・小澤 満津雄*²・森本 博昭*³

要旨: コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート内の水分移動による含水量の変化を伴って進行する。このため、コンクリートの含水量と乾燥収縮ひずみ量は密接に関連している。一方、コンクリート中の空隙の蒸気圧は、周囲の含水量と平衡状態にあると考えられる。このことから、コンクリート中の蒸気圧分布を解析することによりコンクリート中に発生している乾燥収縮ひずみの分布を推定することが可能であると考えられる。本論文は、コンクリート中の水分移動に伴う蒸気圧分布解析法の定式化を行うとともに、小型供試体に対する解析結果と実測値とを比較、検討して本解析手法の適用性を検証したものである。

キーワード: 乾燥収縮, 水分移動, 湿気移動解析

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート内の水分移動による含水量の変化を伴って進行する。このため、コンクリートの含水量と乾燥収縮ひずみ量は密接に関連している。一方、コンクリート中の微細空隙中の蒸気圧、周囲の含水量と平衡状態にあると考えられる。このことから、コンクリート中の蒸気圧分布を解析することにより、コンクリート中に発生している乾燥収縮ひずみの分布を推定することが可能であると考えられる。本研究は、コンクリート中の水分移動に伴う蒸気圧分布の解析法の定式化を行うとともに、小型供試体に対する解析結果と実測値とを比較、検討して、本解析手法の適用性を検証したものである。

2. 湿気移動と乾燥収縮

コンクリート中の水分は、コンクリート中の種々のサイズの微小空隙（ゲル空隙、毛細間隙）に存在している。微小空隙中の水の表面は曲面（メニスカス）を形成しており、平面状の表面をもつ水より蒸気圧が低く蒸発しにくい性質を

持っている。従って、乾燥（水分蒸発）は比較的大きな空隙中から徐々に小さな空隙中の水分蒸発へと進行していき、それに伴い含水率も徐々に低下していく。すなわち、含水量と空隙水が存在する空隙サイズは密接に関連していると考えられる。また、空隙水の蒸気圧と空隙中の蒸気圧は平衡状態にあると考えられるので、**図-1**に示すような相関図を考えることができる。以上のことより、コンクリート中の含水量と湿度（蒸気圧）とは密接に関連すると考えることができる。

さて、実際のコンクリート中の水分移動は水

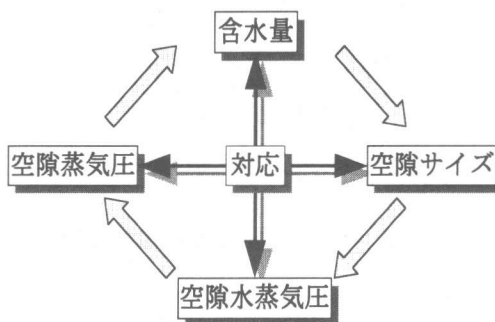


図-1 コンクリート中の水分と空隙

* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

* 2 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工修 (正会員)

* 3 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

の形での移動と湿気の形での移動とが考えられるが、本研究ではこれを一括して見かけ上の湿気移動と考えた。ここで湿気移動は、**図-2**に示すように蒸気圧勾配によって発生すると仮定することができる。例えば、飽和状態のコンクリートからの蒸発を考えると、まず表面付近の大きな空隙中の水が蒸発する。それに伴い、表面付近の空隙中の蒸気圧が低下して、中心部から表面部への湿気移動が発生する。この内部から表面部への湿気移動が連鎖的に発生し、徐々に乾燥が進行していくと考えられる。

このような湿気移動が生じると、いくつかのメカニズムが組み合わさって乾燥収縮が発生するのである。従って、湿気移動に伴うコンクリート中の含水率分布の変化から乾燥収縮ひずみの分布を推定することが可能となる。一方、**図-1**に示したように含水量と蒸気圧（相対湿度）とは密接に関連しているので、コンクリート中の蒸気圧分布（相対湿度分布）から乾燥収縮ひずみ分布を推定することも可能であると考えられる。

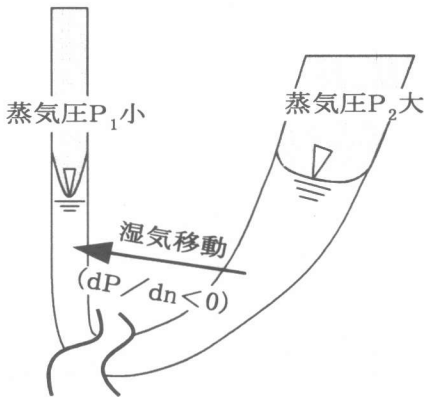


図-2 コンクリート中の湿気移動

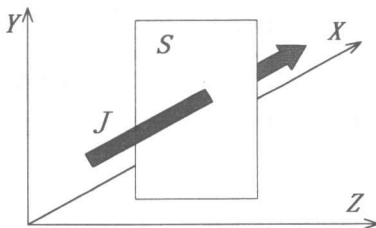


図-3 湿流

3. 湿気移動の定式化

前述したように、コンクリート内の湿気移動は含水量及び空隙微細構造と密接に関連するので、水和の進行も影響すると考えられる。水和の進行を考慮した水分移動の定式化も行われているが¹⁾、本研究では、実用的観点から水和の影響を省略した湿気移動の支配方程式を用いることにした。

3.1 湿気移動則²⁾

質量 w 、体積 v の物体の湿気密度 q を次式により定義する。

$$q = \frac{w - w_0}{v} \quad (g/m^3) \quad (1)$$

ここで、 w_0 : 相対湿度0%での物体の質量

図-3に示すような x 方向の湿気の移動について次式を仮定する。

$$J = -\lambda S \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

ここで、 J : 湿流の強さ (g/h)

λ : 透質率 ($g/h \cdot m \cdot mmHg$)

P : 水蒸気圧 ($mmHg$)

3.2 湿気移動解析の定式化³⁾

図-4に示すように、物体内に微小な立方体 ($dx \cdot dy \cdot dz$) について、微小時間 dt の間に湿気の流入、流出により増加する湿気量 (dQ)_R は、

$$(dQ)_R = \left[\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial P}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial P}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial P}{\partial z} \right) \end{array} \right] dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (3)$$

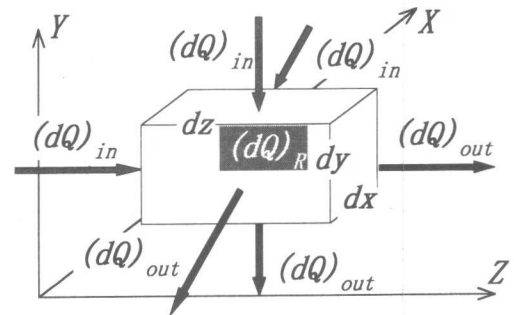


図-4 微小立方体の湿気の流入と流出

となる。一方、この湿気増加による微小立方体の湿気密度の増加量を dq とすれば、

$$(dq)_R = \frac{dq}{dt} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (4)$$

式(3)、(4)から、基礎微分方程式として次式が求められる。

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (5)$$

今、式(5)の左辺を、

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dP} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

とおき、かつ λ を一定とすると次の基礎微分方程式が得られる。

$$\frac{dq}{dP} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

ここで、 (dq/dP) は湿気変化-蒸気圧微分比を表すが、本研究ではこれを湿気容量と定義する。

次に、境界条件のうち、湿気伝達境界については現在までにいくつかの形式のものが提案されている⁴⁾が、最も一般的に採用されている次の形式を採用する。

$$-\lambda \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_0 - P_c) f_w \quad (8)$$

ここで、 α : 蒸発率 ($g/m^2 \cdot h \cdot mmHg$)

P_0 : 物体表面の蒸気圧 ($mmHg$)

P_c : 周囲の蒸気圧 ($mmHg$)

f_w : 周囲の空気の流動に関する係数

4. コンクリート中の湿気移動解析

前節で導いた基礎微分方程式に含まれる湿気移動に関わる物性値、すなわち透湿率 λ と湿気容量 (dq/dP) はいずれもが湿度依存性を有しており、一般的に湿度が高くなるに伴い λ と (dq/dP) とともに大きくなる傾向を示すことが実験により明らかにされている²⁾。このため、 λ 及び (dq/dP) の湿度依存性を無視してこれらを一定とした線形解析を行うと、ある湿度領域において推定精度が低下する現象が現れる⁵⁾。ただしこの場合でも、部材寸法、解析期間及び環

境条件等を考慮して λ と (dq/dP) の値を適当に調整すれば誤差をある程度小さくすることは可能であると考えられる。さらに、線形の基礎式を用いることにより解析の簡略化を計ることもでき、また、現在広く用いられている線形温度解析プログラムに若干の変更を加えることにより、これを湿気移動解析プログラムとして用いることができる。

以上の理由により、本研究では、 λ と (dq/dP) を一定値と仮定することとし、この場合の推定精度を検討するため図-5に示す小型供試体を作成し、これを対象とした湿気移動解析と供試体中の蒸気圧計測実験を実施した。本研究では、①透湿率など湿気移動に関わる物性値が解析結果に及ぼす影響、及び②解析値の実験値に対する適合性の2項目を検討するため2系統の解析を実施した。解析は有限要素法を用いた。

4. 1 湿気移動に関わる物性値が解析結果に及ぼす影響

湿気移動に関わるコンクリートの特性は、基

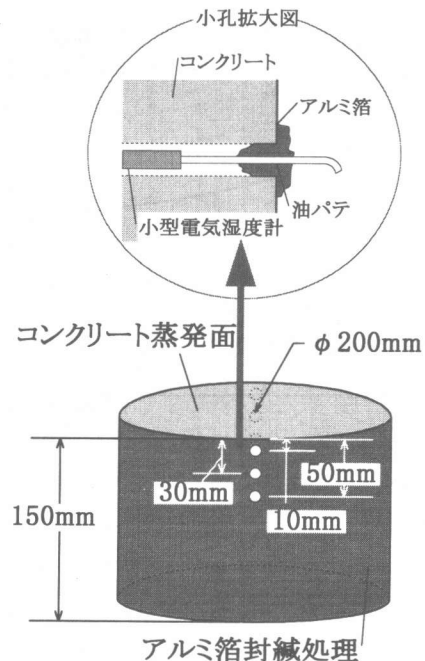


図-5 円柱供試体

礎微分方程式(7)及び境界条件式(8)に含まれる透湿率 λ , 湿気容量(dq/dP)及び蒸発率 α である。これらのいずれもが, 解析結果に影響を及ぼすと考えられるので, 本研究では解析により各物性値の影響を明らかにした。解析対象物は図-5に示した $\phi 200 \times 150$ mmの円柱供試体である。解析は, 透湿率 $\lambda(g/h \cdot m \cdot mmHg)$ を 1.1×10^{-3} , 2.2×10^{-3} , 4.4×10^{-3} と変化させた3ケース, 湿気容量(dq/dP)($g/m^3/mmHg$)を914, 1828, 3656と変化させた3ケースおよび蒸発率 $\alpha(g/m^2 \cdot h \cdot mmHg)$ を 0.5×10^{-1} , 1.0×10^{-1} , 2.0×10^{-1} と変化させた3ケースの合計9ケース

を実施した。境界条件は, 供試体側面と底面は封緘面(蒸発なし)とし, 蒸発面(湿気伝達境界)は上面のみとした。周囲の環境条件は, 蒸気圧9.146mmHg(温度20°C, 湿度50%R.H.)一定とした。

図-6~8に, 透湿率 λ を変化させた場合の供試体上面(蒸発面)から10mm, 30mm及び50mmの各点における蒸気圧の計算結果を示す。透湿率は湿気移動のしやすさを表す物性値であるが, 図-6~8から, 透湿率が大きくなるとコンクリート内部の蒸気圧の低下の速さが全体的に増大するとともに, 内部各点の蒸気圧差が

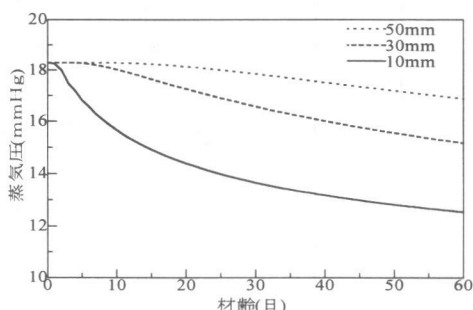


図-6 蒸気圧変化 ($\lambda = 1.1 \times 10^{-3}$)

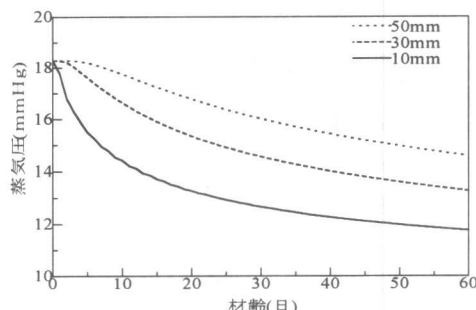


図-9 蒸気圧変化 ($dq/dP=914$)

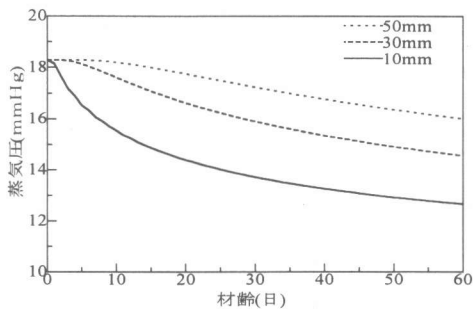


図-7 蒸気圧変化 ($\lambda = 2.2 \times 10^{-3}$)

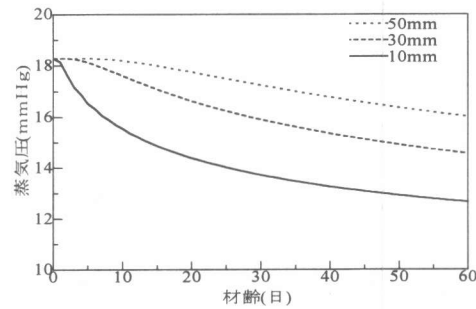


図-10 蒸気圧変化 ($dq/dP=1828$)

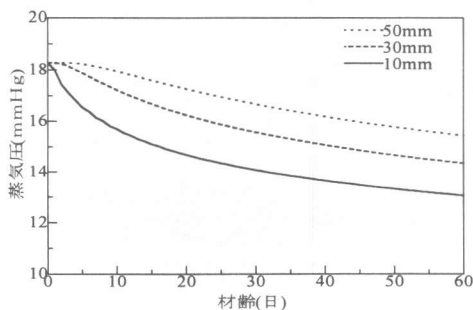


図-8 蒸気圧変化 ($\lambda = 4.4 \times 10^{-3}$)

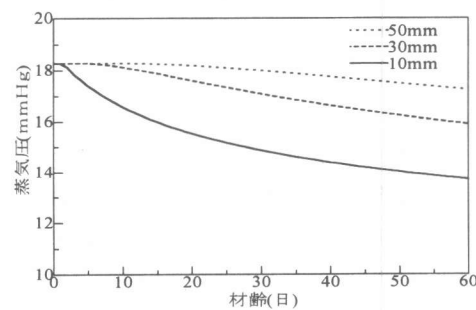


図-11 蒸気圧変化 ($dq/dP=3656$)

小さくなる傾向を示す。

図-9~11に、湿気容量(dq/dP)を変化させた場合の計算結果を示す。 (dq/dP) は、蒸気圧を1mmHg変化させるのに必要な湿気密度変化を表す。図-9~11から、湿気容量が増大すると、各点の蒸気圧変化が緩やかになるとともに、各点の蒸気圧差が大きくなる傾向を示す。

図-12~14に、蒸発率 α が変化した場合の計算結果を示す。蒸発率は、境界面からの水分の蒸発の強さを表す係数であるが、図-12~14から、蒸発率が増大すると各点の蒸気圧の低下の割合が大きくなるが、特に表面部の蒸気圧変化

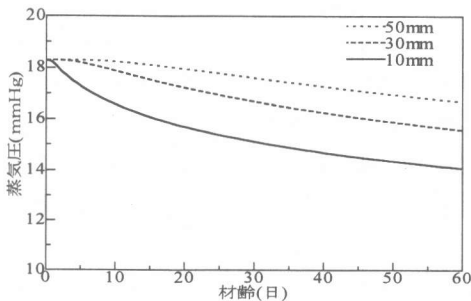


図-12 蒸気圧変化 ($\alpha = 0.5 \times 10^{-1}$)

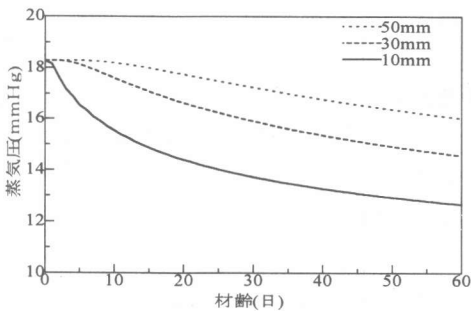


図-13 蒸気圧変化 ($\alpha = 1.0 \times 10^{-1}$)

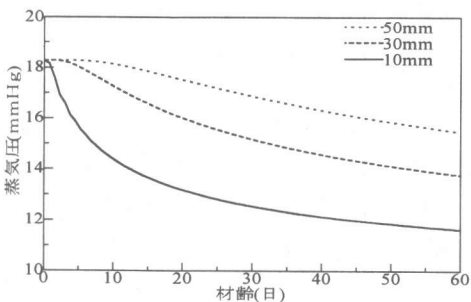


図-14 蒸気圧変化 ($\alpha = 2.0 \times 10^{-1}$)

が大きく、表面部に大きな蒸気圧勾配が発生する。

4.2 コンクリート中の湿気移動実験

図-5に示した蒸気圧計測用供試体の側面に、上面から10mm、30mm及び50mmの位置に蒸気圧計測用小孔を設けた。各供試体の上面のみを蒸発面とし、側面及び底面はポリエステルフィルムおよびアルミ箔で厳重にシールを施した。

供試体は材齢1日で脱型し、直ちに乾燥を開始した。小孔中の温度と湿度は、小型電気湿度計(S社, SK-80TRH型)を用いて計測した。

コンクリートは表-1に示すように高強度コンクリート($f_c = 60\text{MPa}$)を用いた。環境条件は温度を 20°C 一定とし、湿度を図-15に示すように80%から段階的に変化させ実験を行った。透湿率、湿気容量及び蒸発率は試行錯誤によりそれぞれ $\lambda = 2.0 \times 10^{-3}$, $(dq/dP) = 1800$ 及び $\alpha = 5.0 \times 10^{-1}$ とした。

図-16に各小孔中の蒸気圧変化に対する実測値と解析値を示す。温度 20°C における飽和蒸気圧は 18.29mmHg となるので、図-16の解析値は飽和蒸気圧を起点として材齢の進行に伴い次第に低下している。一方、蒸気圧実測値も全体的には材齢の進行に伴い低下する傾向にある

表-1 示方配合

f_c (MPa)	スランブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)				
					W	C	S	G	混和剤
60	18.0	3.8	30.0	44.2	110	440	840	1060	22 ^{*1}

*1 高性能減水剤標準形(I種) 日産 SP8S-3X

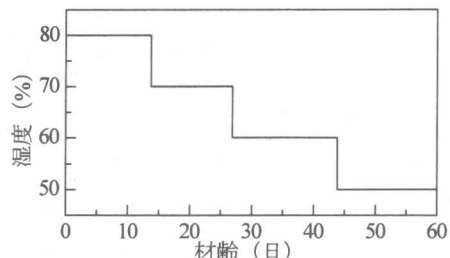


図-15 環境条件

が、乾燥初期の段階では20℃の飽和蒸気圧より大きな蒸気圧が計測されている。特に、内部の計測点（表面より50mm）ほどこの傾向は大きい。これは、セメント水和熱の影響で供試体内部の温度が20℃より高くなるためである。本研究の解析では、コンクリート温度の変化は考慮して

いないが、水和熱等による温度変化が大きい部材を対象する場合は温度と蒸気圧の関係を考慮した解析を行う必要がある。

さて、**図-16**から各小孔中の蒸気圧は乾燥後2～3日以降、表面部から順次、低下していくことがわかる。表面から10mmの位置における蒸気圧は周囲の蒸気圧変化を受けながら次第に低下して行くが、表面から30mm及び50mmの位置に比べてその速さは特に大きく、表面近傍では大きな蒸気圧勾配が生じていることがわかる。解析値と実測値との対応については、周囲の湿度が**図-15**のように急激に低下した場合、表面近傍の実測値は比較的敏感に反応しているのに対して、解析値は反応がやや鈍く、遅れる傾向が見受けられる。全般的にはいずれの計測点においても実測値とよく合致している。ただし、さらに詳細に吟味すると、表面から30mmの位置における計算値は乾燥開始40日までは実測値よりは小さく、それ以降は逆に大きくなる傾向を示している。表面から50mmの位置についても、温度上昇による蒸気圧上昇の影響がなくなる材齢14日付近以降については同様の傾向が認められる。これは、前述のように湿気移動に関わる物性値 λ と (dq/dP) を一定として解析したための推定誤差と考えられる。従って、要求される推定精度によっては λ と (dq/dP) の温度依存性を考慮した解析が必要となる。

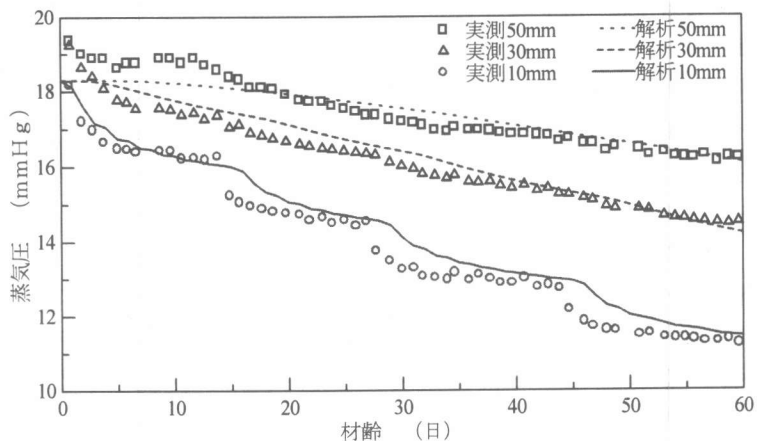


図-16 小孔中の蒸気圧変化

5. まとめ

本論文では、コンクリート中の湿気移動の基礎微分方程式にもとづき、湿気移動に関わる透湿率 λ 、湿気容量 dq/dP 及び蒸発率 α が解析結果（湿気移動現象）に及ぼす影響を明らかにした。さらに、乾燥中のコンクリートの蒸気圧変化についての解析を行ない、水和の進行の影響、部材の温度上昇及び透湿率 λ と湿気容量 (dq/dP) の温度依存性を省略した簡易解析の推定精度を明らかにした。

参考文献

- 1) Rajesh P. CHAUBE and Koichi MAEKAWA: Coupled Moisture Transport, Structure Formation and Hydration in Cementitious Materials, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17-1, pp. 639-644, 1995
- 2) 西岡栄香, 原田 有: 多孔質物質の透湿率および湿気拡散について, セメント技術年報, XV, pp. 274-278, 1961
- 3) 例えば, 一色尚次: 伝熱工学, 基礎機械工学全書 9, 森北出版, 1967
- 4) 竹内俊雄, 石原一成: 蒸発計係数, 土木技術資料, 16-1, pp. 15-21, 1974
- 5) 例えば, 阪田憲次: 硬化コンクリート中の水の移動, コンクリート工学, Vol. 32, No. 348, pp. 16-19, 1994