

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 宇都宮大学

氏 名 : 石川 和輝

研究課題名 : 乾燥・湿潤時のひずみを用いた
新しい Biot 係数測定方法の開発に向けた研究

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

乾燥・湿潤時のひずみを用いた

新しい Biot 係数測定方法の開発に向けた研究

Study on developing a new method for measuring Biot's coefficient using humidity-induced strain

宇都宮大学 助教 石川和輝

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究の背景

石材やレンガ、セメント系材料などの建築材料は、乾燥・湿潤や凍結・融解に繰り返し晒されることで、割れや剥離などの損傷を受ける。建築物の安全性や美観を維持するため、これら現象による建築材料の損傷危険性の予測が必要とされる。損傷の原因は材料にかかる応力であり、乾湿や凍結・融解時に弾性体にかかる応力を予測する理論として、多孔質弾性体モデル^[1]が提案されてきている。このモデルは間隙圧変化を組み込んだ応力-ひずみ関係を表し、これを用いた数値解析に必要な材料物性が Biot 係数である。従来、Biot 係数は材料を被覆した状態と被覆しない状態のそれぞれにおいて、液水により等方圧力をかけたときのひずみから測定される。この測定には特殊な設備が必要であるうえ、測定時に材料を水に浸す必要があり、土壁等に適用できない。これまでに、報告者は乾湿ひずみを用いた Biot 係数の測定手法を提案し、土壁を下地とする壁画資料の材料に適用してきた^[2]。しかし、提案手法を他の建築材料に適用することや、既存手法との比較はできていない。本研究では、凝灰岩、レンガ、ALC の 3 種類の材料を対象として乾燥・湿潤時のひずみを用いた Biot 係数測定法を適用し、他手法の測定結果と比較することで、提案手法の特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 乾湿ひずみを用いた Biot 係数測定の原理

不飽和多孔質弾性体の応力-ひずみ関係は、全応力テンソル σ_{ij} (Pa), 弾性係数テンソル E_{ijkl} (Pa), 全ひずみ ε_{ij} (-), Biot 係数 b (-), 間隙圧差 π (Pa), Kronecker のデルタ δ_{ij} を用いて、

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\varepsilon_{kl} - b\pi\delta_{ij} \quad (1)$$

として表される^[1]。自由膨潤/収縮のとき、せん断ひずみが 0 であり、垂直方向の全ひずみが乾湿により生じるひずみ（乾湿ひずみ） ε_{humid} (-)のみであるとする。さらに、このとき試験体にかかる応力は 0 であり、式(1)における左辺が 0 とする。このとき、Biot 係数について式(1)を変形することで、

$$b = \frac{E\varepsilon_{humid}}{(1-2\nu)\pi} \quad (2)$$

を得る。式(2)を用いることで、Young 率、Poisson 比、乾湿ひずみ、間隙圧変化から、不飽和状態の Biot 係数を推定することができる。間隙圧変化を直接測定することは困難であるが、理論上は、ある水分状態における飽和時を基準とした間隙圧 Π (Pa) は、液水の飽和度 S (m³/m³), 毛管圧 P_c (Pa) を用いて、

$$\Pi = -SP_c - \frac{2}{3}\int_S^1 P_c dS \quad (3)$$

として表される^[1]。間隙圧変化は、式(3)によって求められる間隙圧の湿度変化前後における差である。

3. 研究手法の概略

対象材料は、凝灰岩の一種である大谷石、および、レンガ、ALCとした。式(2)を用いて Biot 係数を求める場合、対象とする材料の Young 率、Poisson 比、乾燥・湿潤過程で生じるひずみが必要となる。さらに、間隙圧変化を予測するため、絶乾から真空飽和に至る含水域において、毛管圧から飽和度を求める曲線とその逆関数が必要となる。これら曲線は、材料の平衡含水率関係から決定することができる。本研究では、大谷石の Young 率、Poisson 比は一般的な一軸圧縮試験、平衡含水率関係はデシケータ法と加圧板法により測定した。加圧板法の実施においては、京都大学准教授・伊庭千恵美博士に協力を依頼した。レンガと ALC の Young 率、Poisson 比、平衡含水率関係は先行研究の文献値^[3, 4, 6, 7]を用いた。また、大谷石、レンガ、ALC のすべてに対して乾湿ひずみ測定を実施した。これらの測定値と文献値をもとに、対象材料に対して乾湿ひずみを用いた Biot 係数測定を適用した。さらに、本研究の Biot 係数測定値と、神戸大学准教授・福井一真博士らが実施した実験を含む、従来法と同様の原理で測定した Biot 係数^[8, 9]の比較を行った。本研究で行ったデシケータ法、加圧板法、乾湿ひずみ測定の様子を図 1 に示す。

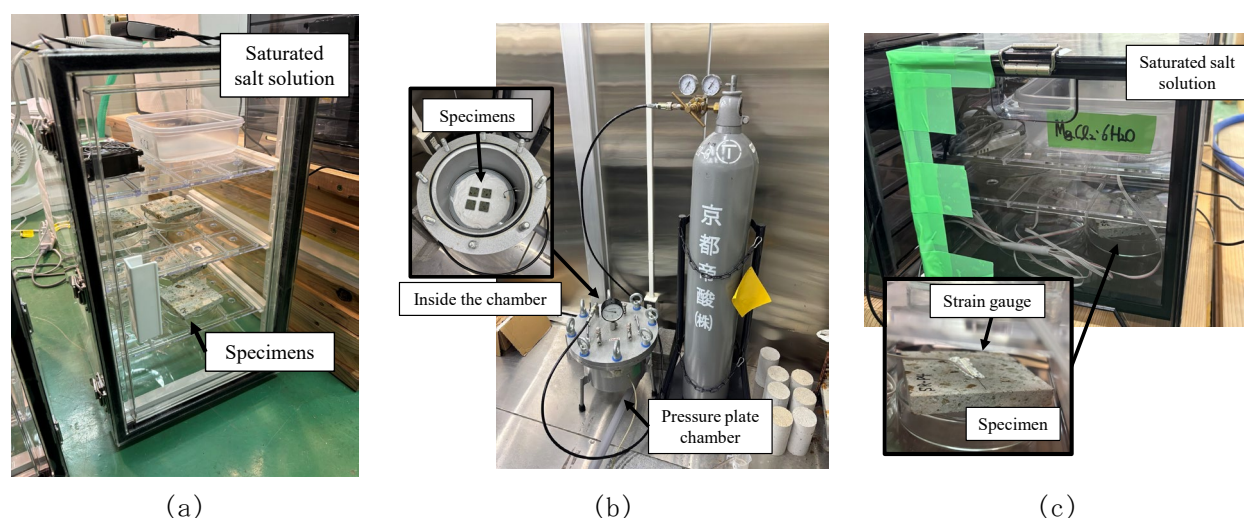


図 1 実験装置の様子 ((a) : デシケータ法, (b) : 加圧板法, (c) : 乾湿ひずみ測定)

(実験調査によって得られた新しい知見)

4. 乾湿ひずみの測定結果

乾湿ひずみ測定は、大谷石は段階的に吸湿・放湿させたときの両方、レンガと ALC は吸湿のみを対象とした。乾湿ひずみ測定の試験体寸法は、大谷石が $80 \times 80 \times 10 \text{ mm}$ 、レンガと ALC が $80 \times 50 \times 20 \text{ mm}$ の直方体とした。試験体数は大谷石が 4 体、レンガと ALC がそれぞれ 2 体とした。ひずみゲージは KFGS-30-120-C1 (共和電業) を用いた。測定装置は、メモリハイログャー LR8450 にひずみユニット U8554 (いずれも日置電機) を接続して用いた。最初に試験体を 105°C で炉乾し、ひずみゲージを張り付けた後に相対湿度 0.33 (-) に調湿したデシケータ内に設置した。時間あたりのひずみ変化が十分に小さくなった時点で平衡しているとみなし、その時点のひずみをゼロとした。ひずみ測定の時間間隔は 10 分とした。ゼロ点設定後に吸湿を開始した。吸湿時はデシケータ内の飽和塩を交換して、相対湿度を 0.53, 0.75, 0.84,

0.97 (-)と段階的に上げた．放湿時は 0.84, 0.75, 0.53, 0.33(-)と湿度を下げた．飽和塩の交換は，各湿度で時間当たりのひずみ変化が十分小さくなり平衡を確認した後に行った．

ひずみ測定値の平衡確認後，10 時間のひずみの平均値を表 1 に示す．レンガと ALC の相対湿度 0.53(-)は，測定値欠損のため塩交換直前の装置表示値を示す．Biot 係数を求めるために，表 1 に示す各材料の相対湿度 0.53, 0.75, 0.84, 0.97(-)における平均値を用いた．大谷石の 0.53, 0.75, 0.84(-)は吸湿・放湿を併せた平均値を用いた．

表 1 各材料の湿潤・乾燥時のひずみ

大谷石 (試験体 : tuff1～4)						
	tuff1	tuff2	tuff3	tuff4	平均	
吸湿 53%	345.4	334.6	321.4	332.8	333.6	
吸湿 75%	657.7	659.4	626.0	649.4	648.1	
吸湿 84%	798.0	802.6	750.7	791.7	785.7	
吸湿 97%	1038	1150	1015	1257	1115	
放湿 84%	758.0	809.1	699.6	820.6	771.8	
放湿 75%	633.8	685.9	600.1	698.3	654.5	
放湿 53%	308.3	364.3	290.4	379.8	335.7	
放湿 33%	7.608	61.93	-3.42	78.89	36.25	
レンガ (試験体 : brick1, brick2) と ALC (試験体 : alc1, alc2)						
	brick1	brick2	平均	alc1	alc2	平均
吸湿 53%	4.500	5.500	5.000	213.5	243.0	228.3
吸湿 75%	38.93	37.74	38.34	457.3	472.4	464.8
吸湿 84%	55.53	52.57	54.05	596.9	605.7	601.3
吸湿 97%	46.78	45.34	46.06	698.4	690.9	694.6

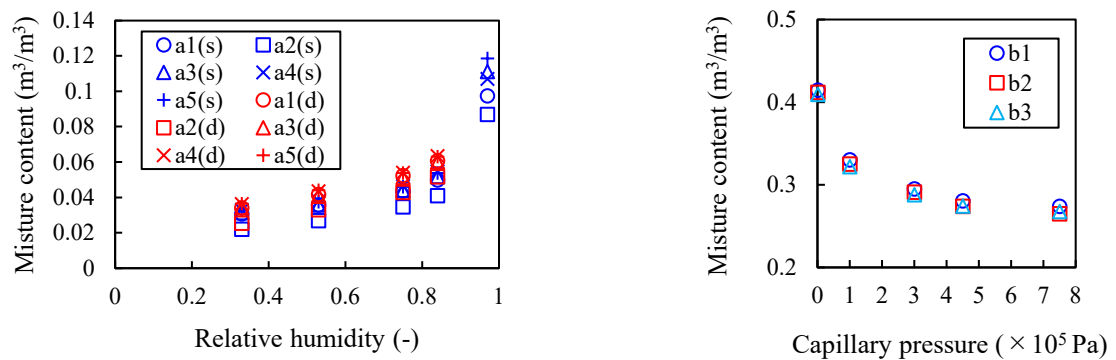
5. 平衡含水率の決定と間隙圧の算定

大谷石に対して，デシケータ法と加圧板法による平衡含水率の測定を実施した．デシケータ法の試験体数は 5 体とした．測定値は試験体それぞれの乾燥密度を用いて除して含水率を算出した．試験体は予め 105 度で炉乾燥した．その後，相対湿度 0.33, 0.53, 0.75, 0.84, 0.97(-)において，乾燥側から順に平衡させ吸湿時の含水率を測定した．相対湿度 0.97 に平衡させた後，放湿時の含水率を相対湿度 0.84, 0.75, 0.53, 0.33(-)で測定した．デシケータ法の実施前に乾燥時質量と寸法を測定した．湿度は飽和塩により調整した．実験室は 23℃に温度制御し，湿度はなりゆきとした．試験体はシャーレに乗せてデシケータに入れており，約 24 時間ごとにデシケータから取り出して質量測定を実施した．測定に用いた電子天秤は FZ-500i (A&D Co.)とした．加圧板法においては，大気圧下で浸漬し質量変化速度が十分小さくなった時点を空隙が液水で満たされた状態と考え初期条件とした．実験装置は基本的に文献に沿って構築し，チャンバ内の圧力を 1.0×10^3 Pa, 1.0×10^5 Pa, 3.0×10^5 Pa, 4.5×10^5 Pa, 7.5×10^5 Pa の 5 段階に引き上げ，各圧力に平衡した含水率を測定した．

デシケータ法と加圧板法の測定結果を図 2 に示す．デシケータ法の結果は，試験体間のばらつきが吸湿と放湿の含水率差と比較して大きかったが，相対湿度 0.33, 0.53, 0.75, 0.84

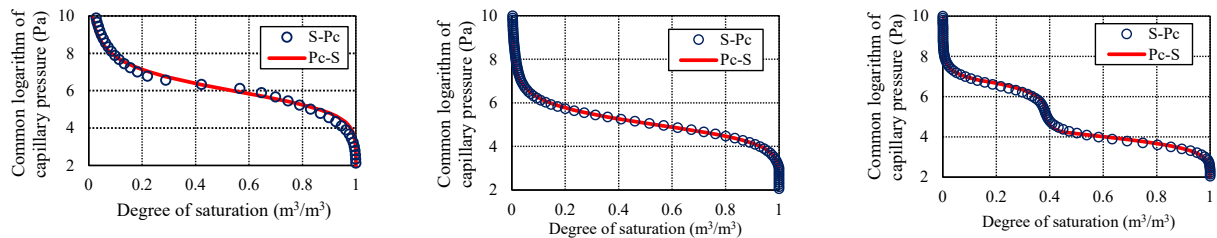
における平均含水率は、いずれも吸湿より放湿が高く、ヒステリシスの影響が確認できた。一方、加圧板法では、毛管圧の増加に伴い含水率は下に凸で低下する傾向であった。

Biot 係数測定に用いるため、大谷石、レンガ、ALC の毛管圧-飽和度関係を表す曲線とその逆関数を決定した。大谷石は平衡含水率の測定値から近似曲線を求めた。レンガと ALC は、平衡含水率曲線を文献^[3, 4]から引用し、飽和度を求める式に変換した。いずれも逆関数が直接求まらない関数形であったため、相当する関数を新たに作成した。各曲線を図 3 に示す。いずれの材料も履歴現象は無視し、飽和度と毛管圧は一対一に対応するとした。これら関係から式 (3) を用いて算出した各材料の間隙圧と相対湿度の関係を図 4 に示す。Biot 係数を算出するため、相対湿度 0.33 と各湿度の間隙圧差を用いた。



デシケータ法（試験体 a1～a5, s : 吸湿, d : 放湿） 加圧板法（試験体 b1～b3）

図 2 平衡含水率の測定結果



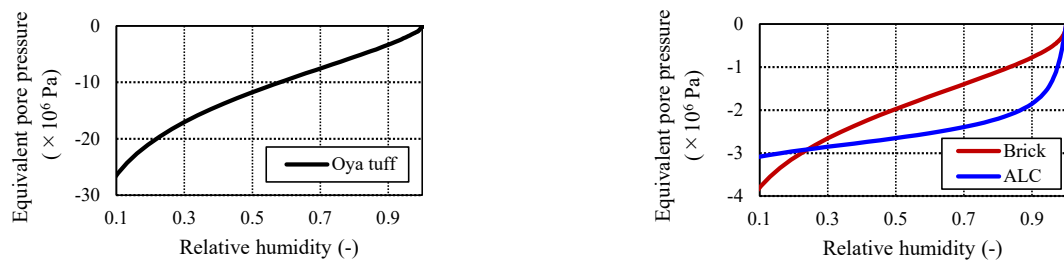
大谷石

レンガ

ALC

図 3 各材料の飽和度と毛管圧の関係

(S-Pc : 毛管圧から飽和度を定める曲線, Pc-S : 飽和度から毛管圧を定める曲線)



大谷石

レンガと ALC

図 4 各材料の等価間隙圧と相対湿度の関係

6. Biot 係数の測定結果

Biot 係数の算出において、大谷石の Young 率と Poisson 比は、地盤工学会基準^[5]に基づく一般的な一軸圧縮試験を実施し、その測定値を用いた。レンガと ALC は、文献値^[6, 7]を用いた。係数の算出に用いた各材料の Young 率と Poisson 比を表 2 に示す。

乾湿ひずみを用いた各材料の Biot 係数の測定値を図 5 に、従来法に基づく測定結果^[8, 9]を表 3 に示す。大谷石の測定値は 0.0719–0.0792(–)，レンガは 0.135–0.615(–)，ALC は 1.35–3.70(–)となった。Biot 係数は理論上は 0 から 1 の間の値とされ、大谷石とレンガはこの範囲に収まった。ALC は 1 より大きい値となった。湿度に対する増大・減少の傾向、値の範囲のいずれも材料ごとに異なる結果であった。従来法の測定結果（表 3）と比べると、凝灰岩の測定値は 0.07–0.11 倍、レンガは 0.14–0.63 倍程度で小さく、ALC は大きい値となった。本研究の結果は、既存の理論式に従って間隙圧を計算した場合に乾湿ひずみの測定値を再現する値である。本研究の測定値が既往の測定値と整合するはずであり、Young 率と Poisson 比の値が妥当であるとすれば、間隙圧予測方法の妥当性を見直す必要があると考えられる。または、Biot 係数の含水状態等に対する依存性は明らかでなく、これを新たに考慮する必要があると考えられる。

表 2 各材料の Young 率と Poisson 比

	大谷石	レンガ ^[6]	ALC ^[7]
Young 率 (Pa)	4.86×10^8	1.10×10^{10}	1.93×10^9
Poisson 比 (–)	0.268	0.190	0.210

表 3 既往研究における凝灰岩，レンガ，ALC の Biot 係数

	凝灰岩	レンガ	ALC
Li et al., 2024 ^[8]	0.69–1.00	–	–
福井ら, 2026 ^[9]	0.76, 0.85	0.98	1.00

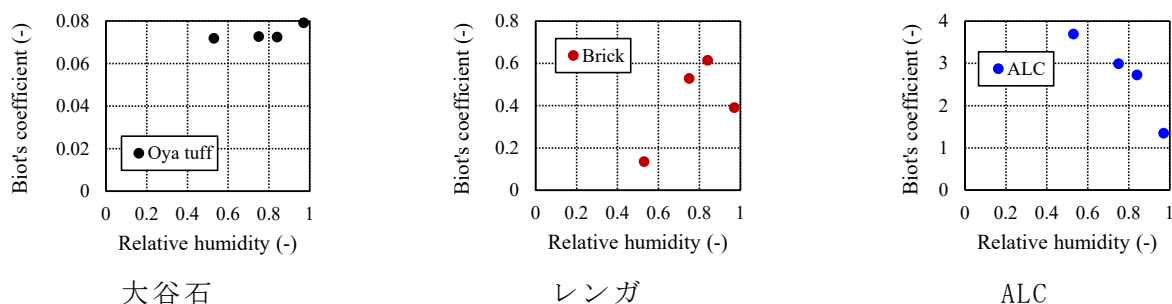


図 5 乾湿ひずみを用いた各材料の Biot 係数測定値

7. まとめ

本研究では、凝灰岩，レンガ，ALC を対象として，報告者が提案した乾燥・湿潤時のひずみを用いた Biot 係数測定法を適用し，既存手法の測定値と比較した。結果として，乾湿ひずみを用いた Biot 係数の測定値は，既存の理論式に従って間隙圧を計算した場合に乾湿ひずみの測定値を再現する値であるものの，既存手法の測定値と整合しなかった。今後は，間

隙圧予測方法と Biot 係数の材料状態への依存性について検討し、本研究の測定値と既往研究の値の関係を整理する必要があると考える。

【参考文献】

- [1]Coussy. *Poromechanics*. New York: Wiley; 2004.
- [2]Ishikawa et al. Biot' s coefficient estimation for a substrate clay material in historical wall paintings using humidity-induced strain. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2025; 552. Springer.
- [3]Fukui et al. *Jpn Archit Rev*. 2018; 1: 538-547.
- [4]Feng et al. *Build Environ*. 2021; 195: 107727.
- [5]地盤工学会基準, JGS 2521-2020.
- [6]福井. 過冷却を考慮した多孔質建築材料の凍結融解過程における熱水分挙動と変形および破壊のメカニズムの検討, 京都大学博士論文, 2021.
- [7]岡ら. ALC パネルに鋼板を接着した軽量サンドイッチ構造床版, 第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 32, 2009.
- [8]Li et al. *JRMGE*. 2024; 16: 2019-32.
- [9]福井ら. 各種建築材料の Biot 係数の推定に向けた基礎的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2026 年 9 月.

(発 表 論 文)

1. 石川和輝, 福井一真. 乾燥・湿潤過程に生じるひずみを用いた多孔質弾性係数推定方法の構築. 日本文化財科学学会大会要旨集, 中央大学多摩キャンパス, 2026 年 7 月.
2. 石川和輝, 福井一真. 各種建築材料を対象とした乾燥・湿潤過程で生じるひずみを用いた Biot 係数測定方法の適用. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2026 年 9 月.
3. 明石一乃, 石川和輝, 伊庭千恵美. 飽和付近からハイグロスコピック域を含む水分移動解析に用いるための凝灰岩の水分物性の決定. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 2026 年 9 月.

ほか, 学術論文 1 報が投稿準備中.