

論文 コンクリートのクリープ・収縮に与える微細空隙中の液体特性及び分布の影響

浅本 晋吾^{*1}・石田 哲也^{*2}

要旨：本研究では，コンクリートの内部にある液体の特性及び分布がクリープ・収縮に与える影響について検討を行った。セメントペースト硬化後に絶乾を施し，各種液体に浸漬させ，収縮ひずみ・飽和度の経時変化の検討及びクリープ実験を行った。その結果，水を浸漬したときのみ飽和度・絶乾による収縮が大きく回復し，クリープ挙動も発生した。水以外の液体は微細空隙に浸漬しないことから，nm レベルのゲル・層間空隙，結晶といった微視的空隙にある水の特異な特性がクリープ・収縮に大きく影響していることが解った。

キーワード：液体特性，飽和度，層間水，結晶水，クリープ

1. はじめに

コンクリートの収縮・クリープ現象は，構造物の初期から長期までその性能に大きく影響を与え，その定量的予測を行うことはライフサイクルコストを考慮した設計を施す上で非常に重要である。収縮・クリープに関する研究は歴史が深く，何十年もの長期にわたって研究が続けられているが，影響を及ぼす要因が多岐にわたり複雑に関連するため，未だこれらの現象を統一的に扱う理論は存在しない。よって，各要因の影響量を明確に捕らえ，それらを包括的に定式化し，任意の条件下における収縮・クリープを定量的評価できるモデルが必要といえる。

本研究では，コンクリートの微視的な機構に基づき，収縮・クリープの要因とされる現象を個別に評価し，発生機構を見直すことを目的に研究を行った。

2. 実験概要

2.1 実験の目的

収縮・クリープ現象は内部の水の挙動・性質に大きく影響を受けると考えられ，コンクリート内部の水を様々な液体と置き換え収縮・クリープ実験を行い，内部液体特性の違いの観点から各現象について検討を行った。液体置換は，

28 日水中養生後絶乾を施した後，内部の水分を排除させ，エタノール，潤滑油，水の各種液体に浸漬させることで置き換えた。

まず，各液体に浸漬することで，絶乾によりもたらされた収縮回復の発生について着目した。これは，表面エネルギー理論の検証が目的である。また，各液体浸漬分布の違いを検討するため，液体浸漬後，飽和度も経時的に計測した。

次に，クリープの主原因とされる浸出理論の検討を行った。液体の浸出は，理論上内部に水以外の液体が存在した場合も同様に起こりうる現象である。よって，コンクリート内部の液体の粘性・表面張力といった液体特性の違いによって生じるクリープ変形の変化について検討を行った。

2.2 実験方法

本研究では，W/C35%，60%のセメントペーストを供試体として用いた。配合は，表—1，2 に示すとおりである。収縮・収縮ひずみ回復を計測した供試体は，40×40×160mm の角柱供試体であり（図—1），クリープ試験に用いた供試体寸法は，φ50×100mm の円柱供試体である。

上記の配合で打設を行い，一日後に脱型し，28 日間の水中養生後，105℃に保たれた絶乾炉

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 （正会員）

*2 東京大学大学院講師 工学系研究科社会基盤工学専攻 博士（工学）（正会員）

で絶乾した。その後、重量の変化がなくなるまで、20℃に温度が保たれた恒温恒湿室でエタノール、潤滑油、水に浸漬した。なお、40×40×160mmの角柱供試体には収縮ひずみ計測のため、脱型後すぐに打設面以外の側面にコンタクトチップを埋め込んだ。一般にコンタクトチップの打ち込みには接着剤が用いられるが、アルコールなどの液体に浸漬させた場合、接着の劣化、チップ表面の接着剤の剥離など測定誤差を生み出す要因が考えられる。よって、本実験では接着剤を使用せず、直接チップを埋め込んだ。

クリープ試験では、長期に渡ってひずみを測定するため、液体浸透によるゲージの剥離を防ぐことを目的に、東京測器製のポリエステル系接着剤 PS により供試体表面にプレコーティングを施した。その上にゲージ長 30mm のペーパーゲージを貼り付け、封緘状態にするために供試体表面をロウでコーティングを施し、水の逸散・浸入を防いだ。さらに、ゲージ部分はロウによるコーティングの上にブチルゴム系テープを貼り付け完全に蒸気の浸入を防いだ。その後、グリスを表面に塗りラップを施した（写真—1）。

クリープ試験機は、てこ比が 1 : 10 のてこ式クリープ試験機を使用した（写真—2）。クリープ試験における載荷荷重はすべて圧縮試験で得られた各供試体の最大荷重の 20%で行った。載荷・除荷中の温度は、25℃に設定した。また、湿度は水以外の液体に浸漬させた場合には、供試体内部への水分浸入を防ぐため、できるだけ低く（約 25%）、水を浸漬させた場合には、相対湿度を 70%に設定し試験を行った。

収縮ひずみは、精度 1/1000（mm）のコンタクトゲージを用いて測定した。チップを埋め込んだ供試体の 3 面からそれぞれの収縮ひずみを計算し、その平均を供試体の収縮ひずみとした。

飽和度に関しては、28 日間水中養生後の水分保持量を規準とし、以下の式から求めた。

$$\text{飽和度}(\%) = \frac{(\text{浸漬後の重量} - \text{絶乾後の重量})}{(\text{28日水中養生直後の重量} - \text{絶乾後の重量})} \times \frac{(\text{水の密度})}{(\text{各液体の密度})} \times 100$$

表—1 W/C35%のセメントペースト配合

W/C (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
35	518	1483	1.48(0.1%)

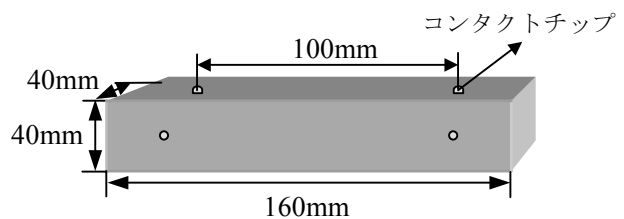
セメント：普通ポルトランドセメント 比重 3.15
ブレン比表面積 3450(cm²/g)

表—2 W/C60%のセメントペースト配合

W/C (%)	石灰石微粉末置換率 (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	石灰石微粉末 (kg/m ³)
60	15	549	916	405

セメント：普通ポルトランドセメント 比重 3.15
ブレン比表面積 3450(cm²/g)

石灰石微粉末：比重 2.70
ブレン比表面積 7400(cm²/g)
(石灰石微粉末は細骨材として置換)



図—1 収縮ひずみ計測供試体



写真—1 コーティングした円柱供試体



写真—2 てこ式クリープ試験機

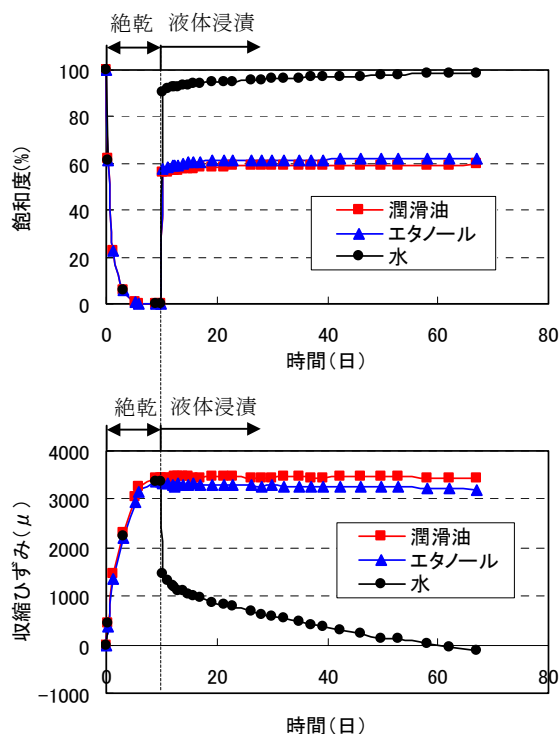
3. 実験結果と考察

3. 1 飽和度及び収縮ひずみ

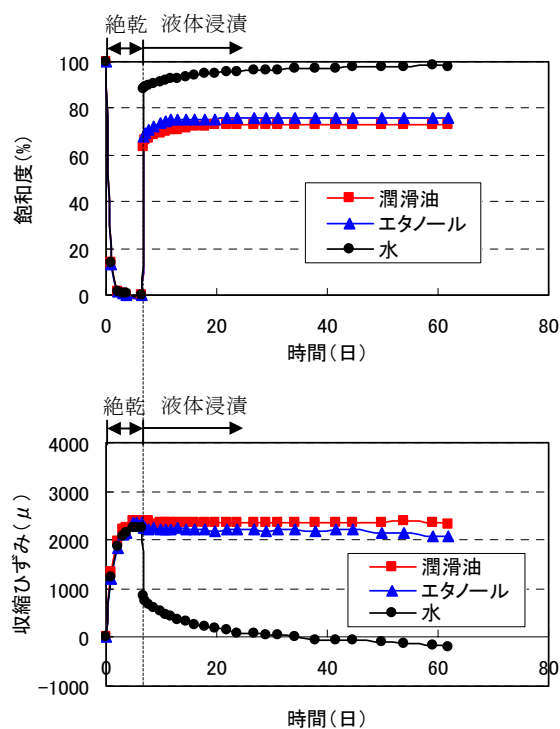
28 日水中養生後絶乾し、液体浸漬したときの収縮ひずみの変化、飽和度の変化についての実験結果を図—2, 3 に示す。

水はほぼ 100% 飽和度が回復するのに対し、他の液体では W/C35% のときには約 62%, W/C60% では約 75% の回復に留まった。毛細管張力によって液体は空隙に浸透することを考えれば、表面張力の大きさにより速度の違いはあるとしても、液体は分子サイズ以上の空隙には浸透していくはずである。ここで、水、エタノール、潤滑油の分子の大きさは、それぞれ約 3 Å, 5 Å, 8~10 Å 程度であり、寸法にさほど差はない。しかしながら、エタノール、潤滑油の場合と水に浸漬した場合は大きな飽和度の差として表れ、分子サイズの影響は小さいと考えられる。そこで、105℃で消失するナノスケールのゲル水、層間水とセメント硬化体の一部の結晶に水だけが回復可能という仮説を立てた。

直径数 nm 以下のゲル・層間空隙内の水は、空隙内に凝縮して存在するのではなく、分子レベルで水分子がゲル表面に吸着して存在する状態にあると思われる。よって、絶乾により吸着水が逸散しゲル粒子の固体表面エネルギーが増加すると、空隙半径が非常に小さいため粒子が互いに引き合い、固層と固層が吸着、もしくは、固層間距離が非常に小さくなると考えられる。水は表面張力及びセメントゲル粒子との親和性が大きいため、空隙を広げ再び吸着することで内部に侵入可能であるが、他の液体は表面張力及び親和性が小さく、微細空隙内に再浸透し得ないと考えられる。また、セメント硬化体中に存在する水和物は、CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, モノサルフェート、エトリンガイトが主成分である。これらの水和物は数多くの結晶水を持ち、結合力の弱い一部の結晶水は絶乾によって消失することが考えられる。こうした結晶水が再び水に浸漬すると元に戻り、飽和度の違いの要因になったと思われる。以上の考察を検討するため、熱力



図—2 絶乾→液体浸漬の履歴によるひずみ、飽和度の時間変化 (W/C35%)



図—3 絶乾→液体浸漬の履歴によるひずみ、飽和度の時間変化 (W/C60%)

学連成解析システム DuCOM (Durability CONcrete Model)¹⁾を用いて解析的検討を行った。DuCOMにおける層間水の定義は、105℃で逸散するCSHゲル層に挟まれた水分子と一部の結合水であり、前述の層間水・結晶水と同様である。実験と同様の配合のセメントペーストをDuCOMに入力し、28日水中養生後のペーストの空隙構造を求めた。実験結果と解析結果を表—3, 4に示す。水以外の液体の回復量と半径3nm以上の空隙率とがほぼ一致している。よって、ナノスケールのゲル・層間空隙、一部の結晶には水のみ再浸透可能であるというこの仮説も解析的アプローチと矛盾のないものとなる。

また、表面エネルギー理論に従えば、絶乾後どの液体に浸漬させてもゲルの固体表面エネルギーが減少するため、収縮が回復すると予想されたが、実際は水に浸漬させたときのみ収縮が回復した。絶乾によりもたらされた収縮は、液状水が存在せず毛細管張力などは働かないため、微細空隙内の固層間距離の減少により発生すると考えられる。従って、飽和度の実験結果から考察したように、nmレベルのゲル・層間空隙内の固層間距離は水の脱着・吸着により変化し、他の液体は浸漬しても回復しないと考えれば、上記の実験結果は説明できる。また、セメント硬化体中の一部の結晶水も同様に水に浸漬したときのみ元に戻り、水和物の結晶間距離が結晶水の回復により広がり、収縮の回復をもたらしたと考えられる。実際、エトリンガイトやモノサルフェートは脱水により結晶間距離が縮まることが報告されている²⁾。よって、吸着水が逸脱するような絶乾、低湿度といった過酷な環境下においては、数nm以下のゲル水・層間水、結晶水の消失が乾燥収縮に大きく影響していると考えられる。

3. 2 クリープ実験

クリープ実験の結果を図—4~7に示す。なお、比較のために、28日水中養生後絶乾を施さず試験を行った供試体の実験結果も掲載した。実験

表—3 実験による最大飽和度（浸漬 50 日）

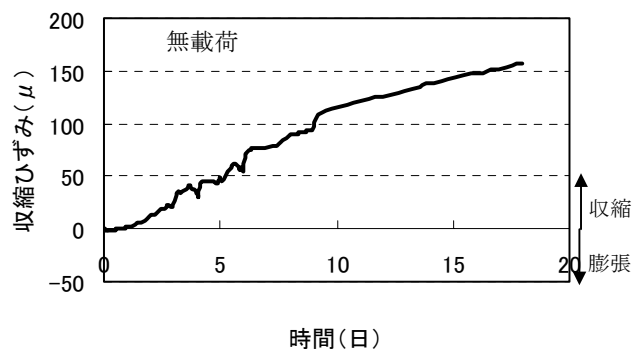
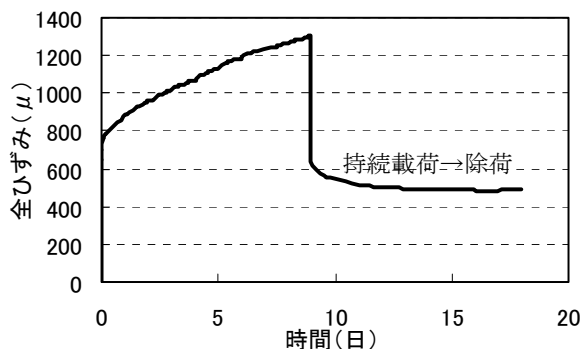
配合	水	潤滑油	エタノール
W/C:35%	98.6%	59.6%	62.0%
W/C:60%	98.2%	73.3%	76.1%

表—4 解析から求めた空隙率

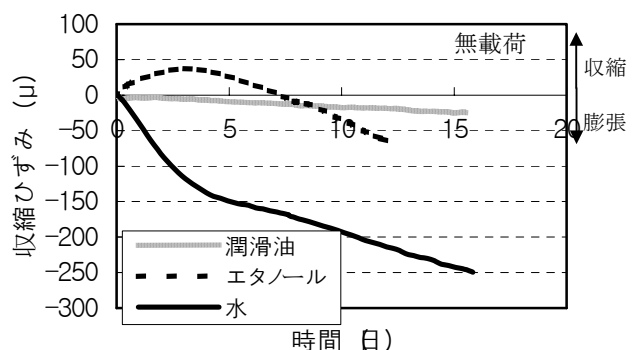
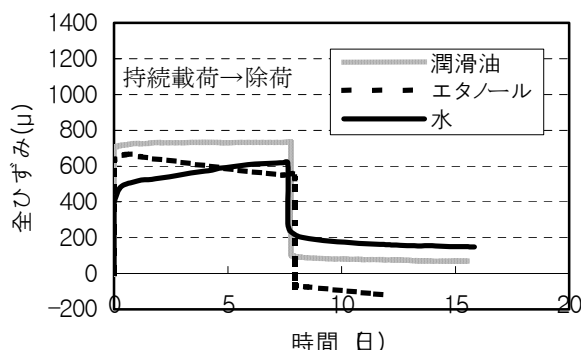
配合	半径 3nm 以上の空隙率	半径 3nm 以下の空隙率
W/C:35%	62.1%	37.9%
W/C:60%	75.3%	24.7%

の結果、内部に水が存在しているときのみクリープは発生した。エタノールに浸漬させた場合は、クリープひずみが減少する傾向が見られるが、これはアルコールによるゲージの剥離、水蒸気の浸入による膨張などが原因と考えられる。しかしながら、剥離・水浸入の影響が少ない載荷後数時間でクリープ現象が観察されないため、潤滑油と同様にエタノールを浸漬した場合もクリープは発生しないと予想される。また、弾性ひずみは各浸漬液によって異なった。これは、載荷荷重が浸漬液体によって異なるためである。持続載荷荷重はすべて圧縮強度の20%に設定したが、堀⁴⁾の報告と同様に強度は浸漬液体の表面張力の高い順に小さくなったため、載荷荷重が異なったのである。しかしながら、各材料の圧縮強度の20%の荷重におけるクリープ現象の比較を目的としたため、問題はないと考えられる。なお、弾性係数は浸漬液体によりさほど違いはなかった。

一般に、クリープ現象はコンクリート内部の空隙中にある液体（水）の圧出によって発生すると言われている。しかしながら、潤滑油、エタノールが内部に存在してもクリープは発生しなかった。一方で、内部に水を浸漬させたときには、クリープが発生するという結果になった。当初、液体の圧出は粘性に大きく影響を受けると考えられたが、その差は実験結果から観察されなかった。そこで、前章と同様、液体の浸漬状況の違いに着目した。



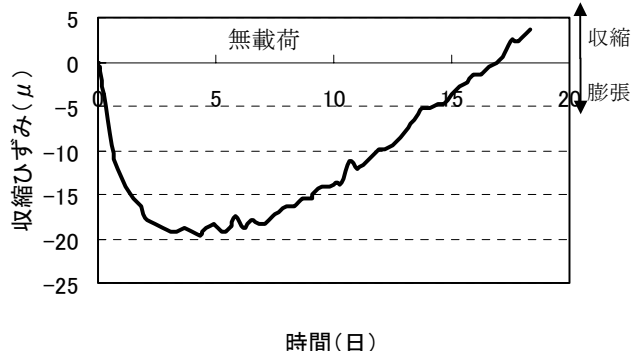
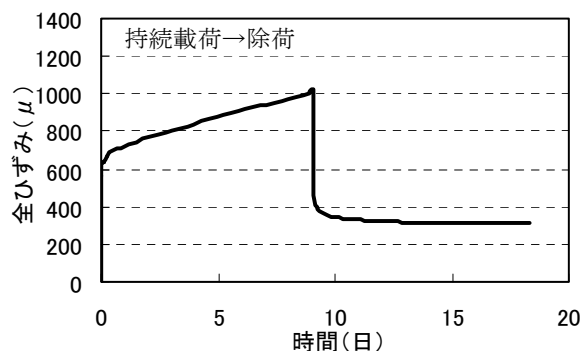
図—4 絶乾履歴を受けていないときのひずみ—時間の関係 (W/C:35%)



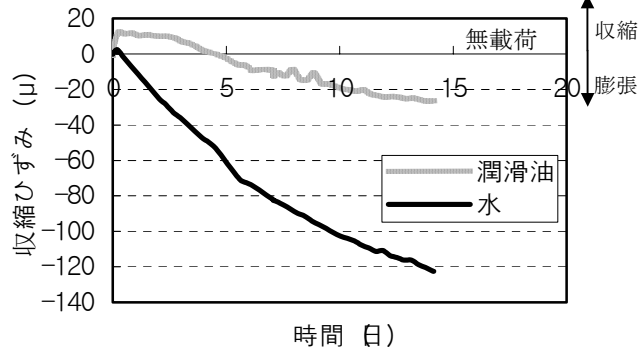
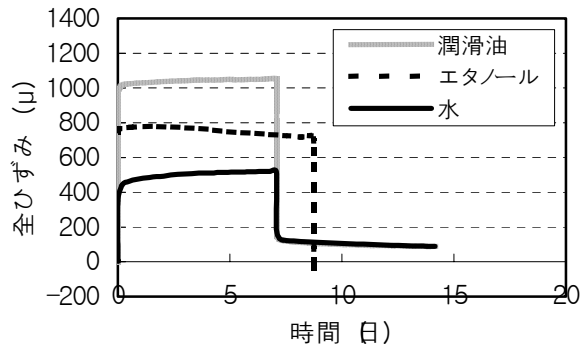
飽和度
潤滑油:64.0%, エタノール:60.3%, 水:99.5%

飽和度
潤滑油:64.5%, エタノール:60.5%, 水:99.3%

図—5 絶乾後各種液体に浸漬したときのひずみ—時間の関係 (W/C:35%)



図—6 絶乾履歴を受けていないときのひずみ—時間の関係 (W/C:60%)



飽和度
潤滑油:78.3%, エタノール:77.2%, 水:100%

飽和度
潤滑油:78.7%, 水:100%

図—7 絶乾後各種液体に浸漬したときのひずみ—時間の関係 (W/C:60%)

液体の圧出は、液体の存在する空間にも影響を受けると考えられる。すなわち、大きな空隙内に凝縮して存在する液体は空間が広く流れやすいため、圧出が速やかに進行し弾性域でほぼ完了すると考えられる。しかしながら、nm オーダーの微細空隙では数個の水分子しか存在できないような空間であるため、液体移動には時間がかかり、緩やかに圧出すると考えられる。従って、毛細管空隙など大きな空隙にしか浸透しない水以外の液体ではクリープが発生しなかったと考えられる。以上のことから、 μm レベルの毛細管空隙内の液体の圧出というより、nm レベルのゲル・層間水といった水の圧出がクリープの発生に影響を与えているのではないかと考えられる。従って、微細なスペースに存在する水分が体積収縮、膨張に大きな役割を演ずると同様、クリープにも大きな影響を与えていると結論づけられる。

また、同時に無載荷供試体に対して収縮ひずみも計測したが、絶乾を施さなかった低 W/C の供試体のみ収縮は生じた。これは、水和反応継続による自己乾燥が起こっているためだと考えられる。また、絶乾後水に浸漬させた場合は、いずれの W/C においても水から取り出した後の封緘状態において膨張が観察された。その理由に、層間水、一部の結晶水が徐々に回復していることが挙げられる。すなわち、毛細管空隙、絶乾によってもたらされたマイクロクラックにまず水は浸漬し、見かけ上飽和度は 100% 近くになる。その後、比較的大きい空間に存在する凝縮水分が、層間水、結晶水として再分配されるがゆえに、膨張が続いていると考えられる。従って、載荷した供試体についても同様な現象が起こっていると考えられ、クリープひずみも膨張の影響で実際に想定されるひずみより低く計測されたと考えられる。また、エタノール、潤滑油を浸漬させると、膨張ひずみが計測された。膨張した理由としては、封緘が完全なものではなく水蒸気が供試体に浸入したことなどが理由に考えられる。しかしながら、膨張量は

20~30 μ と微小であり、クリープ実験に影響は与えていないと考察される。

4. まとめ

コンクリート内部にある液体の特性とその分布が収縮・クリープに与える影響について検討を行った。成果をまとめると以下ようになる。

- ・絶乾後エタノール、潤滑油、水に浸漬させると、水のみ飽和度・収縮が絶乾前の状態に回復した。その理由に、nm オーダーのゲル・層間空隙及び一部の結晶は、水のみ界面張力、化学反応などの理由から回復可能という仮説を挙げた。DuCOM による解析的検討からもその妥当性が検証された。
- ・クリープは、内部に水が浸漬しているときのみ発生した。飽和度の観点から、微細なゲル・層間水の存在がクリープに影響を与えていると考察された。よって、 μm 以上のマクロ空隙や毛細管空隙からの浸出よりも、ナノスケールのゲル・層間水の圧出がクリープの挙動に大きく影響を与えている可能性があることが実験的に示唆された。

謝辞

本研究に関して、東京大学大学院の前川宏一教授には多大なご指導を頂きました。ここに、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T., Modeling of Concrete Performance, E & FN SPON, 1999
- 2) H.F.W.Taylor: The Chemistry of Cement, Vol.1, Academic Press INC., London, 1972
- 3) 石田哲也: 微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム, 東京大学学位論文, 1999
- 4) 堀素夫: 表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ, 窯業協会誌, Vol.70, pp.54-59, 1962