

本報告は「第 21 回 コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム」への投稿論文を再編集したものです。

X 線 CT 画像を用いた凍害によるコンクリート表面からの劣化進行メカニズム の解明

近畿大学理工学部 教授 麓 隆行

1. はじめに

凍害の主な要因は，外気温の低下により，コンクリート内部の自由水が凝固点に達して凍結する際に生じる体積膨張である．その現象が多様な細孔を有するコンクリート内で局所的に生じると，未凍結水への圧力伝播やイオン濃度変化による浸透圧などを引き起こす¹⁾．結果として生じた過剰な膨張圧によりコンクリート内部で微細なひび割れが生じる．それらの繰り返しの繰り返しにより，構造物表面から内部へと劣化が進行していくこととなる¹⁾．

既往の研究では，凍結融解による劣化の進行は，供試体の見かけの相対動弾性係数や長さ変化で計測されている^{2), 3)}．しかし，上記のような供試体内部の局所的な体積ひずみの変化を数値化した研究はほとんどない．供試体内部の表面から内部へと凍結による劣化が進行する過程を数値化できれば，構造物内部方向への劣化進行過程を予測する手立てとなり，今後の維持管理に有用な知見になると考えられる．

著者らの既往の研究⁴⁾では，X 線 CT(Computed Tomography)法と画像計測法を活用し，凍結融解作用を付与したモルタル供試体内部の体積ひずみ分布を計測し，繰り返しの体積膨張ひずみ値とその範囲の変化を評価できることを示した．この手法を用いて，凍結過程においてモルタル内部における温度と膨張量との関係や，周辺の水の有無によりモルタル内部の膨張挙動の違いを明らかにできると考えた．

そこで本研究では，消泡剤で空気をできるだけ除去したモルタルを用いて，封緘状態または水中状態の環境下で，氷点下の降温過程にともなう供試体内部の体積変化について考察した．

2. 実験概要

モルタルの配合を表-1 に示す．W は水道水，C は普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³），S1 は硬質砂岩砕砂（表乾密度 2.64g/cm³，吸水率 1.86%），S2 は石灰岩砕砂（表乾密度 2.69g/cm³，吸水率 0.59%），Zr は内部変形の計測精度向上のために混入したジルコニア球（径 0.1mm）である．ジルコニア球はモルタル全体積の 0.75%となるように混合した．また，Ad はポリエーテル系消泡剤であり，C×0.004%でモルタルに添加した．

小型プラネタリミキサで，5L のモルタルを作製し，練上り直後に JIS R 5201 に準じて計測したフロー値は 143，JIS A 1116 に準じた質量法により計測した空気量は 0.07%であった．

表-1 モルタルの配合

目標空気量 (%)	W/C (%)	S/C	単体量(kg/m ³)					g/m ³ Ad
			W	C	S1	S2	Zr	
0	68	3.39	299	440	893	600	46	17.6

直径 50mm, 高さ 100mm の供試体を 2 体作製した. 打込み時に, 熱電対を側面から 2 本挿入し, 1 本は供試体側面付近, もう 1 本は供試体中心付近に打込み面から深さ 30mm で配置した. 翌日脱型後, 20℃の水中で養生した. 材齢 33 日に水中から取り出し, 容器高さに合わせて打込み面から 20mm を切断後, 切断面を下にして図-1 のようにプラスチック容器の底面に設置した. 凍結融解時における供試体位置の移動防止を目的に, 容器底部にシリコン樹脂を高さ 10mm まで充填し, 供試体を固定した. 封緘状態で実施する場合, 供試体周囲もシリコン樹脂で覆って封緘状態を再現した. 水中状態で実施する場合, 供試体上面のみシリコン樹脂で覆い, 図-2 のように上面付近まで水を満たした.

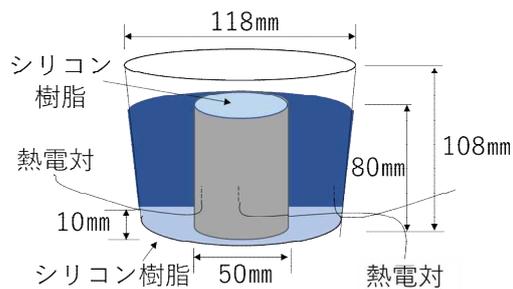


図-1 水中状態の供試体の概要



封緘状態

水中状態

図-2 封緘状態と水中状態の供試体の様子

いずれも, 容器ごと恒温槽内に設置し, 槽内温度を-20℃まで 2 時間で降温後, 4 時間保持する凍結過程と, 30℃まで 2 時間で昇温後に 2 時間保持する融解過程を合わせて 1 サイクルとして凍結融解試験を 10 サイクルまで実施した.

本研究では, 氷点下の降温過程における供試体内部の体積変化を計測することを目的としている. しかし, モルタル内部の未凍結水の凝固点は, 圧力や細孔径, イオン濃度などにより変化するため, 凝固点温度前後を目標温度とすることは難しい. そこで, 本研究では, プラスチック容器に水を注ぎ, モルタルと同じ凍結過程を与えた際の水温変化から撮影温度を決めた.

図-3 に, 水温変化の結果を示す. 恒温槽内の温度低下と共に水温も低下した. 107 分で 0℃付近に達し, それ以降, 水温低下が急激に緩やかとなった. 234 分で-3℃となった後, 低下速度が徐々に早くなった. 360 分で-20℃に達した. 以上の結果から, X 線 CT での撮影温度を, 供試体中心部が 0, -1, -3, -7.5 および-15℃とした. また, 1 サイクル目での凍結過程での膨張量は小さいと予想されることから, 10 サイクル目での凍結過程においても同じ温度で撮影を行った.

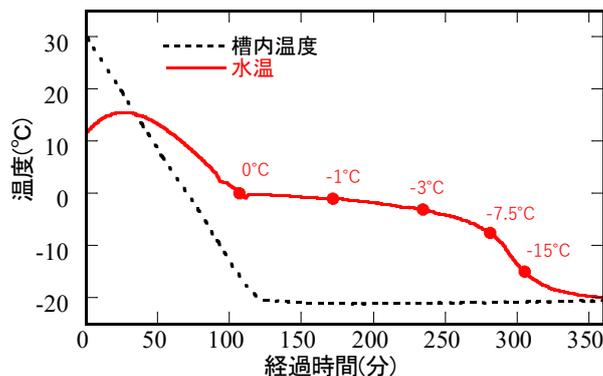


図-3 恒温槽内での水温変化に関する予備実験結果

恒温槽内で凍結過程を始めて、供試体中心が所定の温度に達すると槽内温度保持した。取り出した供試体の周囲に図-4 のように断熱材を施し、近畿大学所有の装置⁵⁾を用いて X 線 CT 画像を取得した。図-5 に X 線 CT 装置での撮影の様子を示す。撮影後は再び供試体を恒温槽内に戻し、供試体中心が次の目標温度に達するまで槽内温度を降温させた。なお、恒温槽から供試体を取り出していた時間は平均 40.4 分であり、その間の中心部の温度上昇は 0.4~2.9℃であった。なお、1 と 10 サイクル目の温度サイクルは供試体の撮影時間を除き、他サイクル目とほぼ同じとした。

1 サイクル目の供試体中心部 0℃とその後の撮影画像を用いて、3次元画像相関法(Digital Volume Correlation, 以下 DVC)により供試体内部の変形分布を計測した。計測には、Tudisco⁶⁾が作成した TomoWarp2 を用い、Correlation window を一辺約 1.5mm の立方体とし、その重心点間隔を約 0.75mm とした。隣り合う Correlation window の重心点での計測変位の差から各軸方向ひずみを算出し、その総量を体積ひずみとして算出した。

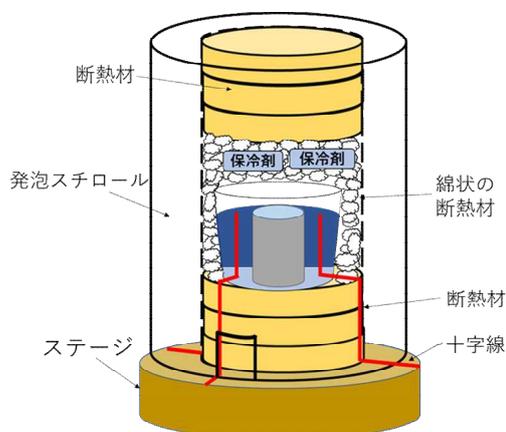


図-4 X線CT撮影時の供試体保温状況



図-5 X線CTでの撮影時の状況

3. 実験結果と考察

図-6 および図-7 に、2 サイクル目の封緘状態および水中状態の供試体内部の温度計測結果を一例として示す。図中には、槽内温度および容器内の供試体周囲の気温および水温についても示している。

封緘状態の場合、容器内の温度は、槽内の送風循環の影響もあり、やや遅れて恒温槽の温度を追随している。供試体中心の温度は-20℃まで曲線的な低下を示し、温度が一定になる状況はなかった。昇温過程では供試体の中心温度は急速に上昇し、-1℃付近で緩やかになった箇所があった。なお供試体の側面と内部での温度差は極めて小さい。

水中状態の場合、槽内の温度とは異なり、容器内の水温は 120 分経過後に図-4 と同様に-0.5℃で 60 分ほど一定となった。その後、緩やかに温度が低下し、220 分を経過すると温度低下速度が徐々に大きくなり、最終的に-18℃まで低下した。昇温過程でも-0.5℃付近で昇温速度が急激に低下した。凍結融解過程の供試体中心や側面の温度は、周辺の水温とほぼ同様に推移した。また供試体の側面と中心との差はほとんどなかった。ただし、凍結過程で一定となる供試体側面や中心の温度は-1.2℃であった。これはイオンを含む自由水の凝固点降下が原因だと考えられる。

図-8 に、1 および 10 サイクルの凍結過程終了時の中央縦断面画像を示す。封緘状態では、サイクルにかかわらず、ひびわれやスケーリングは見られない。水中状態の場合、1 サイクルでは同様に目立った劣化は見られない。しかし、10 サイクル目には赤線で囲った箇所で剥離が見られた。

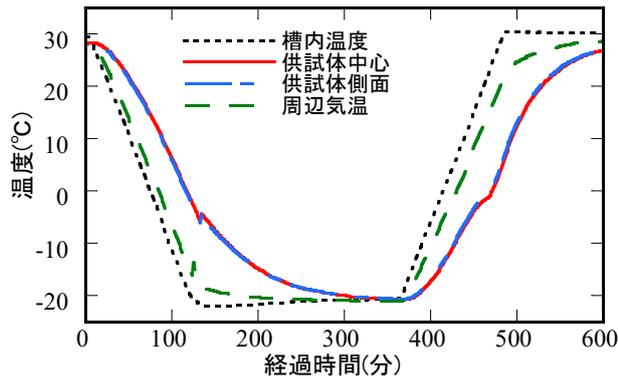


図-6 封緘状態での供試体内部の温度変化例

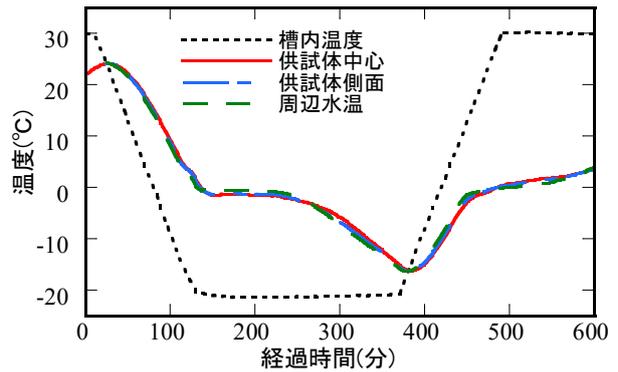


図-7 水中状態での供試体内部の温度変化例

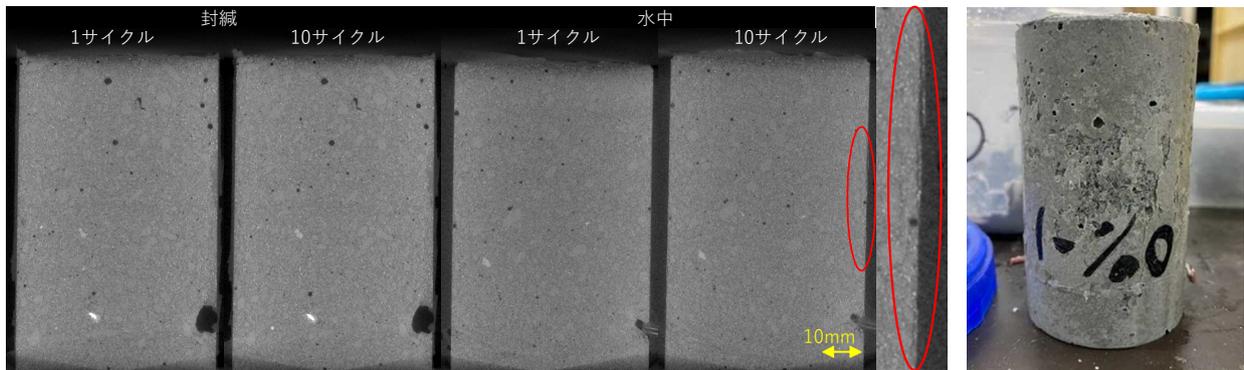


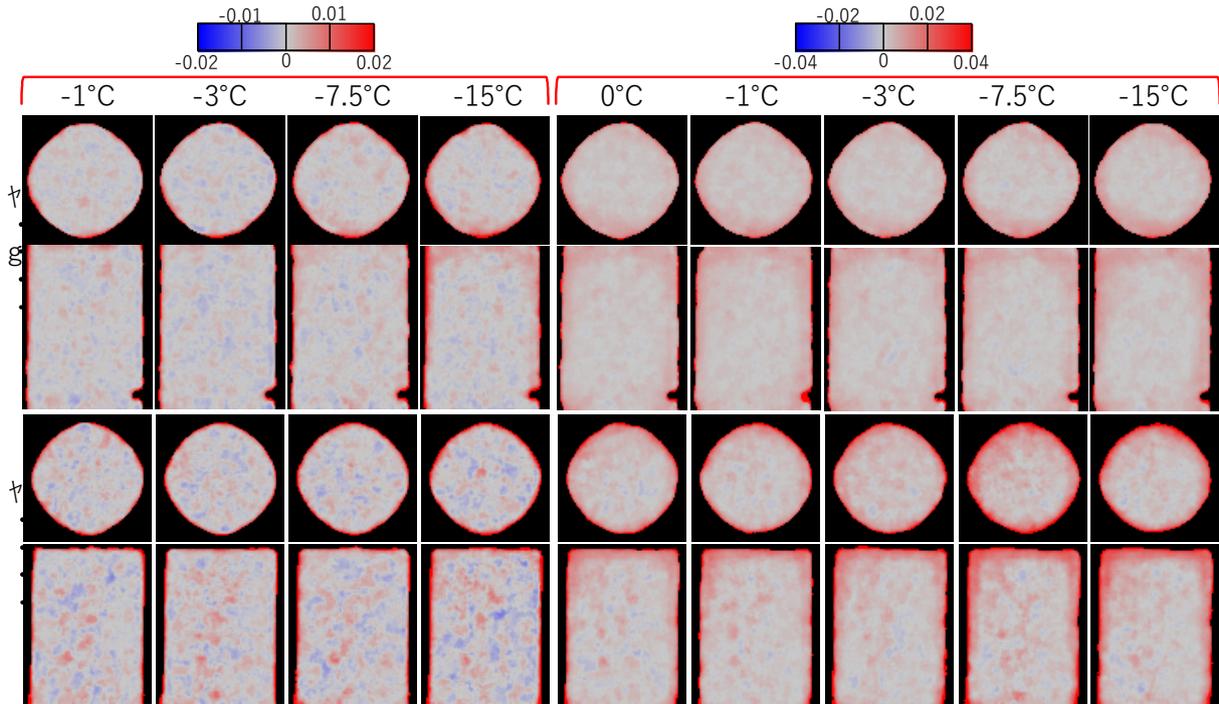
図-8 供試体の中央縦断面画像の比較, 赤丸箇所の拡大図と実験終了後の水中状態の供試体表面の様子

また、図-8 の赤丸箇所の拡大図では側面上部で剥離が、また側面中央や下部でひび割れがあった。実験終了後の供試体側面でも剥離が確認された。なお、封緘状態の供試体では全面に樹脂を塗布したため、表面は観察できていない。

図-9 に、封緘状態と水中状態の供試体について、0°Cを基準にして算出した供試体高さ中央の水平断面の体積ひずみと、供試体の中央縦断面の体積ひずみを示す。また、左4列は1サイクル目、右5列は10サイクル目の結果である。なお、サイクルによりひずみ値の範囲が大きく異なるため、凡例の範囲も異なる表記とした。凡例の正值(赤)は膨張を、負値(青)は収縮を示す。

封緘状態において、1サイクル目では-1°Cの時点で供試体表面付近や内部で小さな体積ひずみが一部で生じていた。-7.5°Cになると膨張を示す赤色の箇所が、特に側面や上端部付近で内部方向に広がった。-15°Cになると、側面での体積ひずみ値がさらに大きくなり、その範囲は表面から3~9mmとなった。10サイクル目の体積ひずみでは、0°Cにおいて、1サイクル目の-15°Cと同様の範囲で膨張が見られた。その後、-3°Cまで変化はほぼ見られないが、-7.5°C、そして-15°Cと中心温度が低下すると側面から12mm程度まで膨張範囲が広がった。

水中状態において、-1°Cの時点で封緘状態と同様の範囲で、より大きな体積ひずみが生じていた。-3°Cでは明確な変化はなかったが、-7.5°C、そして-15°Cと内部温度が低下すると、側面や上端面からわずかに内部へと膨張する範囲が広がった。なお、水中状態の体積ひずみ値は、封緘状態に比べて大きく、膨張する範囲は側面付近に集中していた。なお、本実験では収縮を示す箇所に骨材やペーストが多い等の明確な傾向は見られなかった。10サイクル目の結果では、0°Cにおいて、1サイクル目と異なり供試体上部で広範囲に大きな膨張が生じていた。-7.5°Cや-15°Cで体積ひずみ値の増加が見られ、その範囲は表面から10mm程度の範囲まで広がった。

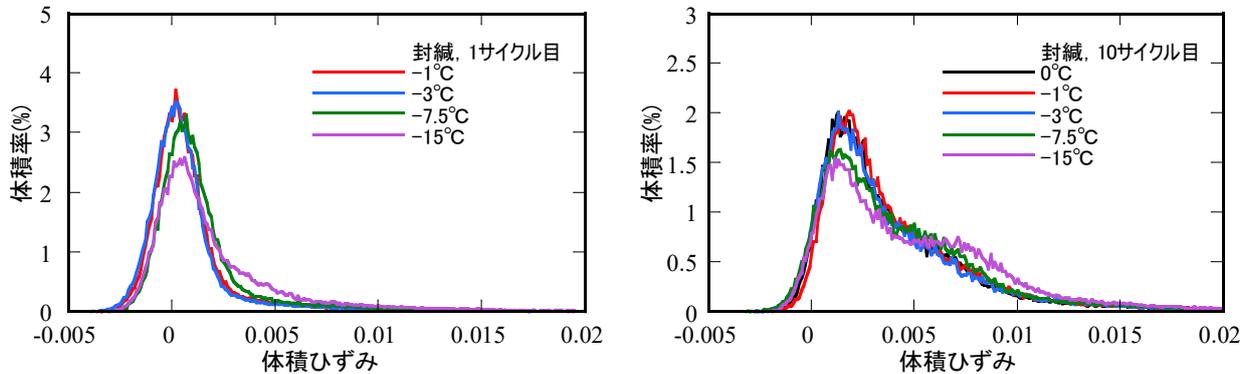


1 サイクル目 10 サイクル目
 図-9 供試体高さ中央の水平断面および中央縦断面での体積ひずみ
 (上段は封緘状態, 下段は水中状態)

図-10～11 に、1 および 10 サイクルの凍結過程の供試体内部の体積ひずみの頻度分布を示す。

封緘状態の供試体内部の体積ひずみ分布では、1 サイクル目の-1°Cと-3°Cにおける体積ひずみ分布はほぼ一致したが、-7.5°Cでは、分布が膨張側（右側）にシフトし、全体的に体積膨張が生じたと考えられる。さらに-15°Cになると、特に 0.002～0.008 のひずみ値の体積率が増加した。一方、10 サイクル目の 0°Cでは、供試体内部はほぼ膨張を示し、主に 0.001 と 0.006 を中央とする 2 つのひずみ値の範囲が存在した。-3°Cまでは 0°Cと同じ分布だが、-7.5°Cでひずみ値 0.004～0.008 が増加した。-15°Cでは、ひずみ値 0.006～0.012 で体積率が顕著に増加した。

水中状態の供試体内部の体積ひずみ分布では、-1°Cの時から、同じ温度の封緘状態に比べると、体積ひずみの範囲が広がった。-7.5°Cまでの降温により、少しずつ膨張側（右側）にシフトし、全体的



1 サイクル目 10 サイクル目
 図-10 1 サイクル目および 10 サイクルの封緘状態の供試体内の体積ひずみ

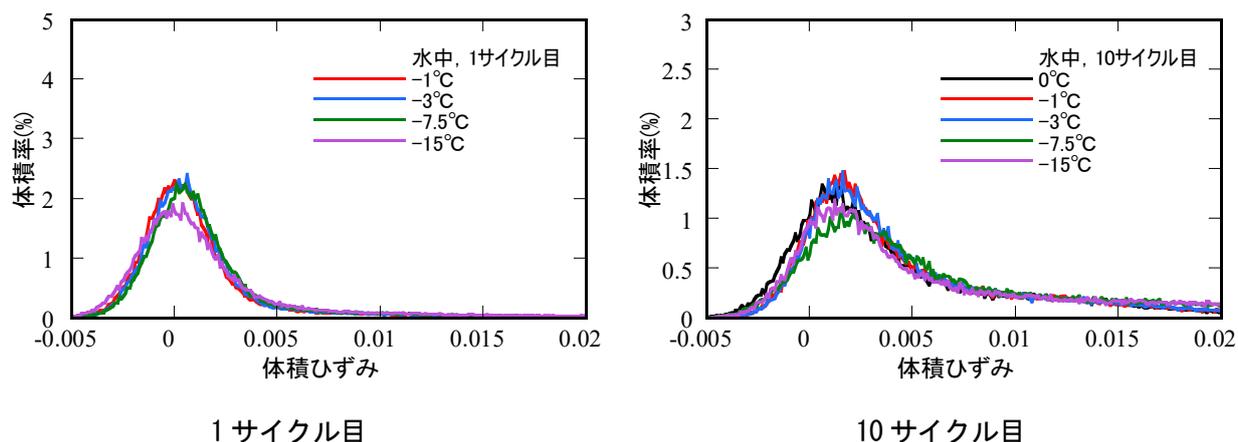


図-11 1 サイクル目および 10 サイクル目の水中状態の供試体内の体積ひずみ

に一定の膨張が生じた。-15°Cになると、読み取りにくいだが、0.004 以上の広範囲で体積率がわずかに増加していた。一方、10 サイクル目の-1°Cでは、1 サイクル目比べて全体的に膨張し、ひずみ値の範囲が広がった。-7.5°Cへの温度低下により 0.005~0.008 の範囲で体積ひずみがわずかに増加し、-15°Cとなるとひずみ値 0.015 以上の体積率の増加が顕著であった。

4. 結論

本研究では、X 線 CT 法を用いて凍結過程の空気無混入モルタル供試体内部の体積変化の数値化を試みた。得られた結果を以下に示す。

- 1) 封緘状態では、-3°C以下で凍結による膨張が明確となり、-7.5°C以下で体積膨張が顕著となる箇所が生じた。その箇所は、-15°Cで表層から 3~9mm の範囲で、ひずみ値 0.002~0.008 であった。10 サイクルの繰り返しで範囲は 12mm ほどに、ひずみ値も 2 倍程度に増加した。これは表面からの凍結が要因ではないかと考えられる。
- 2) 内部のひずみ値は封緘状態よりも広範囲の膨張および圧縮ひずみ値を示した。温度低下により表面近傍で体積ひずみが生じるが、供試体全体に生じる体積変化は小さい。10 サイクル後の表面近傍のひずみ値は 0.015 以上と大きいのが、膨張範囲は表面から 10mm 程度だった。これは、周囲の水が、供試体内部より先に凍結膨張を生じたためだと考えられる。

参考文献

- 1) 杉山隆文:コンクリートの耐久性 (改訂版), 技報堂出版, pp. 433-439, 2018.
- 2) 日本産業規格: JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法, 2010
- 3) 三浦尚他: 低温下におけるコンクリートのひずみ挙動と劣化, 土木学会論文集, No. 420/V-13, pp.191-200, 1990.
- 4) 麓隆行: X 線 CT 法によるペースト供試体内部の水分逸散による体積変化分布に関する基礎研究, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol. 19, pp. 407-412, 2019.
- 5) 麓隆行: 新しい機構の X 線 CT の開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 2, pp. 182-191, 2013.
- 6) Tudisco, E.他: TomoWarp2: A local digital volume correlation code, SoftwareX, Vol.6, pp. 267-270, 2017.