

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：80122

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05935・19K21101

研究課題名（和文）多孔質建材の内部損傷評価に基づく促進試験条件の検討

研究課題名（英文）Study on Test Conditions of Acceleration Based on Evaluation of Internal Damage of Porous Building Material

研究代表者

高橋 光一（TAKAHASHI, Kouichi）

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・建築研究本部北方建築総合研究所・研究職員

研究者番号：00826787

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、窯業系サイディングを対象に、内部損傷の観点から、実環境と促進凍結融解試験の対応を明らかにし、実環境における内部損傷を再現可能な促進試験条件を提案することを目的とした。まず、従来から用いられているJIS A 1435の気中凍結水中融解試験後および長期間暴露後のサンプルについて、X線CTにより得られた断層画像より、ひび割れの分布を評価した。次に、実環境を再現しうる促進条件を明らかにするために、促進条件として新たに下面吸水凍結融解を提案し、従来の促進条件とのサンプルのひび割れ分布の差異を比較した。最終的に、長期間暴露後の内部損傷を再現しうる促進試験方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築材料の耐凍害性を評価する場合には促進凍結融解試験が行われる。しかし、促進凍結融解試験における実環境における劣化の再現性や、耐用年数との対応は明らかとなっていない。本研究の成果は、実環境に対応した、新たな促進凍結融解試験法の提案に向けた知見の一つとして活用可能である。今後、実環境の凍害劣化を再現可能な促進凍結融解試験が確立されれば、建築材料の適切な寿命予測や、建築材料の長寿命化に寄与できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Purpose of this study is defining a relationship between actual environment and freezing and thawing test from internal damage with ceramic siding and suggesting of condition of accelerating test to damage to the inside in actual environment. First, distribution of crack is evaluated from tomographic image obtained by X-ray CT about sample after freezing and thawing test in JIS A 1435 in traditional method and longtime exposure. Next, we suggested test method of water adsorption from bottom, then difference of distribution of crack is compared with traditional accelerating condition to reveal accelerating condition to imitate actual condition. Finally, we suggested test method of acceleration to imitate to internal damage after longtime exposure.

研究分野：建築材料

キーワード：多孔質建材 内部損傷 X線CT 凍害 暴露試験

# 様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー等の観点から、建築物の長寿命化は重要な課題である。建築物の長寿命化は構成する材料の性能に依存するため、材料の高耐久化が必要といえる。つまり、建築材料の耐久性の定量的な評価は、建築物の寿命予測を行う上で必要不可欠である。

建材の大半は多孔質材料であり、寒冷地における長期使用では、材料内の水分が凍結・融解を繰り返すことにより生じる凍害による損傷が問題となる。凍害劣化は耐久性低下や美観を損なう要因となるため、凍害劣化を定量的に評価可能な手法の確立が求められる。

一般的に、材料開発時において、耐凍害性の評価は室内での促進凍結融解試験により行われる。しかし、促進凍結融解試験の結果と、実環境における劣化の再現性や、耐用年数との関係は明らかとなっていない。このことから、実環境と促進凍結融解試験の対応を把握し、促進凍結融解試験結果を、実環境における劣化と結びつける手法の確立が必要といえる。

研究代表者が所属している北方建築総合研究所においては、H14年より、実環境における耐凍害性の検討のため、一般的に住宅の外装材として使用されている窯業系サイディング(以下、サイディングとする)を対象とした暴露試験を実施している[1][2]。また、同一のサンプルに対して、JIS A 1435による気中凍結水中融解試験を行い、暴露試験結果と比較を行った。その結果、暴露試験後のものは下部・外周部に損傷が見られたのに対し、促進試験後のものは、暴露試験で見られたような外観の損傷は見られなかった。つまり、促進凍結融解試験では実環境の損傷を再現できないことが明らかにされている。実環境の損傷を再現できない理由のひとつとして、材料内部の水分分布が影響を及ぼすことが考えられる。

また、サイディングの耐凍害性の評価は、外観上の劣化や試験前後での厚さ変化率による評価が一般的である。そのため、現状の評価指標では局所的な劣化や、内部損傷の分布を評価することができない。つまり、凍害劣化の発生箇所や内部損傷に対する定量的な評価方法の確立が望まれる。

一方で、近年、産業用 X 線 CT により非破壊検査を行った例がある。X 線 CT 装置により、多方向から X 線を照射し、物体を透過して検出器に到達した X 線のデータを基に、コンピュータで画像を再構成することで、物体の断層画像が得られる。これまでに、X 線 CT 装置を用いてコンクリート内部の空隙・ひび割れの観察や定量的な評価を行った事例が存在する[3][4]。

以上のように、X 線 CT により得られた断層画像から、これまでは確認できなかった材料内部の損傷の分布や形態を把握できる可能性がある。しかし、これまでに多孔質建材の内部損傷に着目し、X 線 CT を用いて内部損傷程度を観察した例はない。

## 2. 研究の目的

本研究では、多孔質建材を対象に、内部損傷の観点から、実環境と促進凍結融解試験の対応を明らかにし、実環境における内部損傷を再現可能な促進試験条件を提案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究の流れを図 1 に示す。

### (1) X 線 CT による多孔質建材の内部損傷評価手法の検討

X 線 CT で得られた断層画像により、建材内部の損傷状態を検討するため、ひび割れ・空隙等を認識可能な装置の撮影条件を検討する。また、得られた断層画像に市販の画像解析ソフト等を適用し、内部損傷の定量的評価手法を検討する。

#### ①試験体概要

本研究では、サイディングを対象とした。研究代表者が所属している北方建築総合研究所では、劣化なし、気中凍結水中融解試験後、長期間暴露後のサイディングのサンプルをそれぞれ保有している。本研究においては、これらのサンプルを使用し、実環境と促進凍結融解試験の対応を検討した。

サンプルの外観写真および暴露状況を図 2 に示す。試験体寸法は、200mm×100mm×12mm であり、製法は抄造法である。気中凍結水中融解試験後のものは、JIS A 1435 に準じて 200 サイクル、促進試験を行った後のものである。しかし、過去に試験体の下部を耐久性試験に使用しており、40×40mm の欠けが生じている。そのため、欠けが生じている箇所については、評価の対象から外した。長期間暴露後のものは、平成 14 年 9 月～平成 30 年 10 月までの約 16 年間、旭

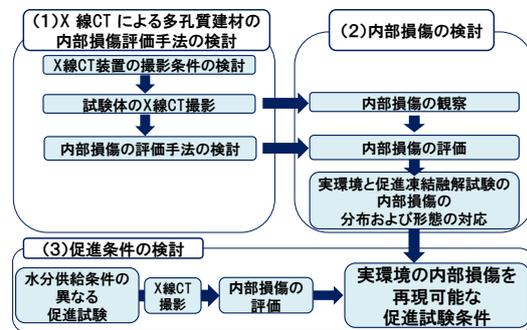


図 1 研究フロー

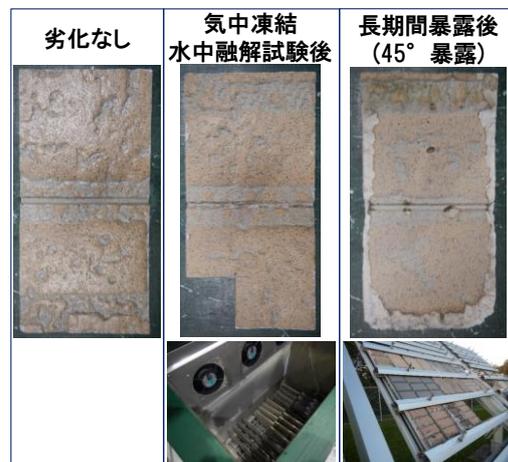


図 2 サンプルの外観写真および暴露状況

川市にて南面 45° で暴露したものである。暴露台の試験体の受枠は、雨水・融雪水が溜まる形状となっている。

## ②X線CT装置について

X線CT装置は、(株)ニコンインステックス製のXT H225 STを使用した。最大管電圧は225kV、X線の検出器としてフラットパネル型の検出器を搭載しており、検出器は一辺が2048pixel/16inchである。また、断層画像の再構成には、Volume Graphics(株)製のVG STUDIO MAX 3.1を使用した。

## (2) 内部損傷の検討

暴露試験などで生じる劣化損傷と促進凍結融解試験による劣化損傷の相違を明らかにするため、(1)で示した当研究所で蓄積している長期間暴露(H14~H30)を行ったサンプルおよび気中凍結水中融解試験後(JIS A 1435による)のものについて、内部損傷の分布状況を明らかにする。

### ①試験体概要

(1) ①に示したものをを用いる。

### ②内部損傷の評価方法

断層画像を観察し、内部の損傷状況を目視により定性的に評価する。さらに、(1)で検討した評価手法により、定量的に内部損傷の分布状況を明らかにする。

## (3) 促進条件の検討

長期間暴露を行ったサンプルの損傷を再現できる促進試験条件を明らかにするため、水分の供給条件を変えた促進試験を実施する。試験後のサンプルについて、内部損傷の分布の評価を行い、(2)の結果と対比し、実環境での損傷状況を再現しうる促進条件を明らかにする。

### ①試験体

使用した試験体の概要を表1に示す。試験体寸法は、200mm×100mm×15mmである。また、寒冷地用ではなく、本州にて一般的に使用可能なものを対象とした。

表1 試験体の概要

板厚	成形法	基材	その他
15	抄造	パルプ繊維混入セメントケイ酸カルシウム板	一般地用

### ②促進試験条件

長期間暴露後の損傷を再現できる促進試験条件を明らかにするために、水分供給条件が異なる促進試験を実施した。促進条件については、従来の評価方法(JIS A 1435)の中から気中凍結水中融解(以下、気中水中)および片面吸水凍結融解(以下、片面吸水)の2種類と、新たに提案する下面吸水凍結融解(以下、下面吸水)の1種類の、計3種類の促進試験の模式図を図3に示す。



図3 水分供給条件が異なる促進試験の模式図

気中水中については、JIS A 1435に準じて、試験体を48時間水中に浸漬させた後、試験を実施した。融解過程は水中で10℃を1時間、凍結過程は空気中で-20℃を2時間とし、1サイクルを計3時間とした。

片面吸水については、JIS A 1435に準じて行った。試験装置として、エスペック(株)製のPR-2KPを使用した。試験体は、促進試験に先立ち24時間水中に浸漬させた。試験体の吸水用の容器の底には、厚さ10mmとなるように綿タオルを敷いた。また、吸水材上面からの水の蒸発を防ぐために、吸水材が露出している範囲について、アルミニウム箔およびビニールシートで覆った。24時間水中に浸漬させた後、試験体表面が吸水材と接するようにして置き、さらに24時間室内に静置させた後、試験を開始した。試験体表面温度が凍結過程において-20℃、融解過程において+10℃に到達するように、試験装置内の温度を設定した結果、凍結融解1サイクルに要する時間は5時間となった。

下面吸水については、RILEM-CIF試験を参考に実施した。試験装置は、RILEMの規格に適合したものを使用した。試験槽には予め高さ5mmのスペーサーと、試験体が倒れるのを防ぐためのステンレス製の支えを入れた。試験体をスペーサーの上に設置し、支えを使って試験体が直立の状態になるように静置した。試験体の下部が15mm水中に浸漬されるように、試験槽に水を入れた。その後、試験開始に先立ち、試験槽内を20℃に保った状態で7日間の吸水期間を設け、吸水終了後、促進試験を開始した。凍結融解1サイクルは+20℃から-10℃/hourの勾配で-20℃まで冷却させ、-20℃で3時間保持し、その後、+10℃/hourの勾配で+20℃まで融解させ、+20℃で1時間保持する条件とした。

測定項目は、質量、厚さ、超音波伝播時間とした。試験体の厚さについては、試験体端部から20mmの箇所を4点測定した。試験体のサンプル数ほどの促進条件においても5個とし、試験体の厚さ変化率が10%以上となるまで実施した。下面吸水のみ、試験体下部2点の厚さ変化率が10%以上に達したときに促進試験を終了することとし、気中水中は1220サイクル、片面吸水は700サイクル、下面吸水は140サイクルで終了した。

### ③内部損傷の評価方法

(2) ②に示した方法と同様の方法で実施する。

#### 4. 研究成果

(1) X線CTによる多孔質建材の内部損傷評価手法の検討

##### ①X線CTの撮影条件の決定

対象とする試験体のひび割れおよび空隙を確認できることを確認し、撮影条件を表2のように決定した。得られた断層画像の画素のサイズは1pixelあたり119 $\mu$ mであった。

##### ②内部損傷の定量的評価手法の提案

内部損傷の定量的評価手法の流れを図4に示す。まず、試験体の内部損傷の分布を検討するために、試験体の長辺側の断面となる試験体のx方向(水平方向)と試験体の短辺側の断面となるy方向(鉛直方向)それぞれで、4枚の断層画像を抽出した。抽出位置については、x方向は、12.5、37.5、62.5、87.5mmの位置、y方向は、下部から25、75、125、175mmの位置とした。

次に、断層画像の輝度値の閾値を境に、白色と黒色のみで構成される二値化画像を作成した。二値化画像の作成および画像の解析にはMedia Cybernetics製のImage-Pro Plusを使用した。二値化の輝度値の閾値については、二値化画像と元画像を目視で比較し、ひび割れおよび空隙が黒く表示されるか、確認しながら決定した。

続けて、Image-Pro Plusにより、作成した二値化画像から、二値化画像の白く表示された部分(試験体の断面積に該当する)および黒く表示された部分(空隙・ひび割れ部分)の面積を算出した。また、黒く表示された部分の面積には、ひび割れだけでなく、空隙の面積も含まれている。そのため、黒く表示された部分については楕円形で近似し、アスペクト比(楕円の長軸の長さ)と短軸の長さの比)が3.0以上のものを、ひび割れとして扱うこととした。

最終的に、画像解析により得られたひび割れの面積を、試験体の断面積で除することにより、試験体の断面積あたりのひび割れ面積を算出した。本研究においては、試験体の断面積あたりのひび割れ面積を用いて、試験体の内部損傷の分布を定量的に評価する手法を提案した。

##### (2) 内部損傷の検討

劣化なし、長期間暴露後および気中凍結水中融解試験後のサイディングについて、断層画像からひび割れの分布を評価した。断層画像の一例を図5に示す。

気中凍結水中融解試験後のものは、どの断面においても表面と平行にひび割れが生じていた。一方、長期間暴露後のものは、下部で断面損失が生じていた。

(1)で提案した評価手法により得られた試験体の断面積あたりのひび割れ面積を図6に示す。気中凍結水中融解試験後のものは、試験体の欠けのために、x方向の12.5mm、37.5mmとy方向の25mmにおいては該当データがない。

気中凍結水中融解試験後のものは、ひび割れが全体的に生じており、断面積あたりのひび割れ量はどの位置でも1.5%以上となり、劣化なしのものに比べてひび割れ量が顕著に増加した。

一方、長期間暴露後のものは、x方向においては、ひび割れ量の分布にさほど差は見られな

表2 撮影条件

試験片寸法 [mm]	撮影条件					
	電圧 [kV]	電流 [ $\mu$ A]	フィルタ 材質	フィルタ厚 [mm]	露光時間 [msec]	解像度 [ $\mu$ m]
200×100	210	210	Al	2.5	286	119

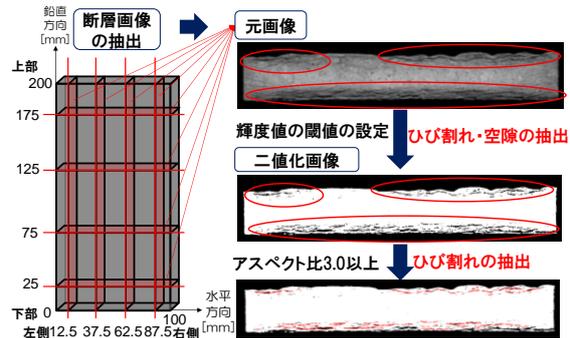


図4 定量的評価の流れ

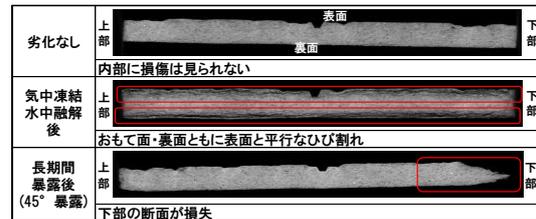
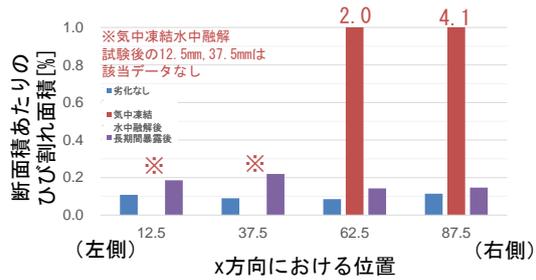
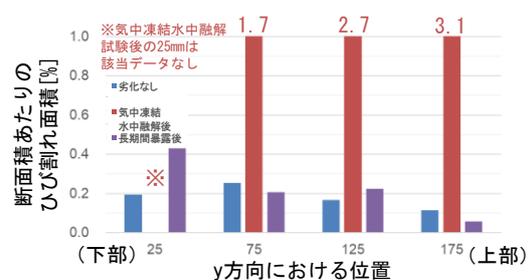


図5 気中水中凍結融解試験後および長期間暴露後の断層画像の一例



(a) x方向(水平方向)



(b) y方向(鉛直方向)

図6 気中凍結水中融解試験後と長期間暴露後の内部損傷の分布の比較

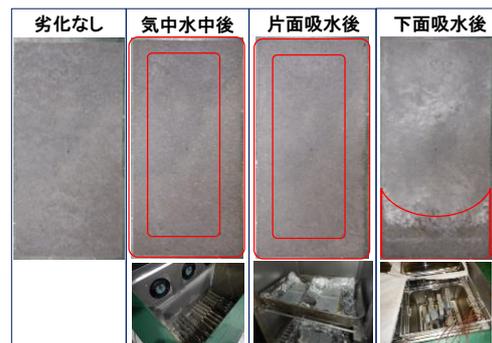


図7 水分供給条件が異なる促進条件による促進試験後のサンプルの外観

かった。y 方向については、ひび割れが下部に集中しており、断面積あたりのひび割れ量は最大で 0.4%程度となった。また、試験体上部にあたる 175mm においては、他の箇所 (25mm~175mm) と比べてひび割れ量が少ない傾向であった。

以上のように、長期間暴露後のものと気中凍結水中融解試験後のもので、内部損傷の分布に差異があることを確認できた。

### (3) 促進条件の検討

促進試験後のサンプルの外観について、図 7 に示す。赤線で囲った部分が、外観上劣化が見られた範囲である。促進試験後、X 線 CT 撮影を実施し、(1)、(2) で示した方法により、内部損傷の分布について評価を行った。水分供給条件が異なる促進試験後のサンプルの断層画像を図 8 に示す。

気中水中後のものは、どの断面においても、おもて面・裏面ともに表面と平行なひび割れが生じた。片面吸水後のものは、どの断面においても、おもて面のみに表面と平行なひび割れが生じた。下面吸水後のものは、下部にひび割れが集中し、下面から約 50mm の範囲で上面に向かって、ひび割れが生じた。どの促進条件においても、長期間暴露後のサンプルに見られた断面損失は生じなかった。

(1) で示した手法により算出した、試験体の断面積あたりのひび割れ面積を図 9 に示す。x 方向では、どの促進条件でも、試験体左右の両端から 37.5mm の位置よりも試験体左右の両端から 12.5mm の位置において、ひび割れ量が増加する傾向であった。また、y 方向において、気中水中・片面吸水の場合、ひび割れ量の分布は見られず、どの断面においても劣化なしのものよりひび割れ量が多い。一方、下面吸水については、試験体上面にあたる 175mm において、他の箇所 (25~125mm) よりも顕著にひび割れ量が少なく、劣化なしとほぼ変わらない 0.1%であった。以上のように、水分供給条件が異なることにより、内部損傷の分布も異なることが明らかになった。また、水分の供給箇所と劣化箇所に対応が見られることも明らかになった。

図 10 に図 6 (b) の長期間暴露と図 9 (b) の y 方向における断面積あたりのひび割れ面積を併せて示す。(2) で得られた長期間暴露後のものと比較すると、y 方向の下部においてひび割れ量の増加傾向があること、上部である 175mm で劣化なしと変わらないひび割れ量となることから、3 種類の促進条件のうち、下面吸水凍結融解後の内部損傷の分布が、最も長期間暴露後の内部損傷の分布に近いことを明らかにした。

以上より、本研究においては、実環境を再現しうる促進試験条件として、下面吸水の促進条件を提案する。しかし、本研究の中では、抄造法のサイディングのみを対象としており、他製法のサイディングを対象とした試験は行っていない。そのため、促進条件の妥当性については、今後も続けて検討していく必要がある。

### <引用文献>

- [1] 吉野利幸, 桂修, 松村宇, 谷口円:「窯業系サイディングの耐凍害性に関する屋外暴露実験」, 日本建築学会構造系論文集 72 (613), pp. 23-28, 2007.
- [2] 吉野利幸, 谷口円:「屋外曝露における窯業系サイディングの耐凍害性の評価 屋外曝露 13 年目までの結果」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (材料施工), pp. 1049-1050, 2016.
- [3] 谷口円, 板橋孝至, 田中大之, 中村拓郎:「凍結融解作用による内部損傷の評価」, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 863-868, 2019.
- [4] 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規:「高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視」, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 3, pp. 351-360, 2011.

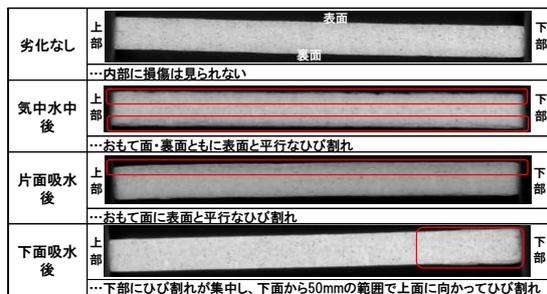
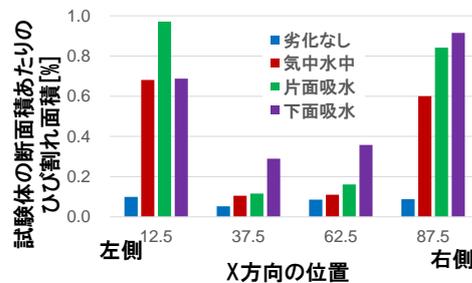
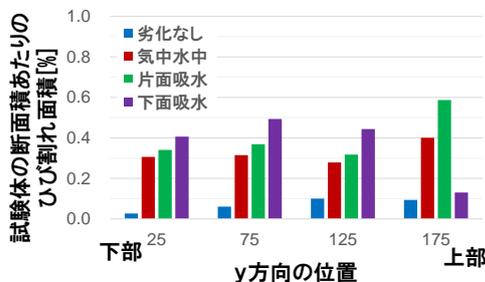


図 8 水分供給条件が異なる促進条件による促進試験後の断層画像



(a) x 方向 (水平方向)



(b) y 方向 (鉛直方向)

図 9 水分供給条件が異なる促進条件ごとの内部損傷の分布の比較

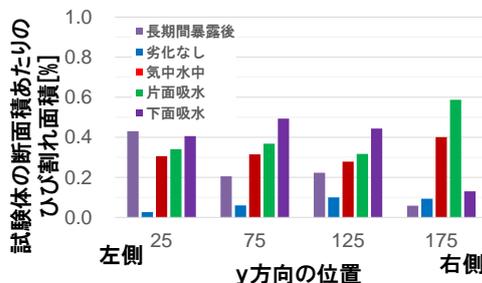


図 10 y 方向 (鉛直方向) における内部損傷の分布の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	谷口 円  (TANIGUCHI Madoka)  (20462351)	地方独立行政法人北海道立総合研究機構・建築研究本部北方建築総合研究所・研究主幹    (80122)	