

中村 大<sup>1</sup> 後藤 隆司<sup>2</sup> 伊藤 陽司<sup>3</sup>  
山下 聡<sup>4</sup> 鈴木 輝之<sup>5</sup> 山崎 新太郎<sup>6</sup>

### Frost Damage to Bricks Observed in Kitami City, Hokkaido

by Dai NAKAMURA<sup>a</sup>, Takashi GOTO<sup>b</sup>, Yoji ITO<sup>b</sup>, Satoshi YAMASHITA<sup>c</sup>,  
Teruyuki SUZUKI<sup>c</sup> and Shintaro YAMASAKI<sup>a</sup>

- a. Research Associate, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, Koen-cho 165, Kitami, 090-8507 JAPAN  
(\*Corresponding author E-mail: dnaka@mail.kitami-it.ac.jp)
- b. Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
- c. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

At two different locations in Kitami City, Hokkaido, cracks have been found in bricks, seemingly due to frost damage.

In this research, the mechanism of the occurrence of the cracks in the bricks has been looked into through field investigations and exposure experiment.

The field investigations have revealed that some bricks located in sun-exposed areas have a higher frequency to crack and cracks occur in the protruded part of bricks.

From the exposure experiment, cracks in the bricks have been found to occur in late winter from the end of February to the end of March.

It has also been confirmed that the following unique temperature distribution exists when cracks occur in bricks; in late winter, bricks melt due to the daytime heat. If bricks do not melt completely during the daytime leaving some frozen parts and these remain overnight, the melted areas created during the daytime then refreeze surrounded by the frozen parts due to the low night temperatures.

In this research, this frost damage caused by such temperature distribution has been defined as closed-type freeze-thaw phenomenon.

From the above results, this article describes the mechanism of frost damage to bricks in Kitami City.

The research results are considered useful when brick structures are built in cold regions like Hokkaido, ensuring the appropriate use of bricks.

**KEY WORDS:** Brick, Frost Damage, Freeze-Thaw, Frost Heave, Temperature Distribution, Closed-Type Freeze-Thaw Phenomenon

#### 1. はじめに

北海道北見市内の2箇所において、凍害が原因と思われる煉瓦のひび割れが確認された。煉瓦は古くから建築・土木材料として広く用いられているが、北海道のような寒冷地において煉瓦を使用する場合には、必ず凍害という問題が付きまとう。以下に、凍害による煉瓦構造物の被害事例について示す。

石崎<sup>1,2)</sup>は、福島県柳津町軽井沢銀山跡の煉瓦煙突で発生した

凍害について報告している。この事例では、煉瓦煙突が概ね北西方向の基礎部で著しく劣化していた。著者らは、この原因を、北西にある道路によって積雪がたまりやすく、融雪期の水分供給や温度低下などによって、劣化が進行したものと推測している。

大久保ら<sup>3)</sup>は、北海道函館市の旧函館軍事要塞施設で発生した凍害について報告している。煉瓦は、主に掩蔽部の腰壁に用いられており、その損傷は特に外気に曝された領域において顕著で、広範囲に渡って剥落していた。著者らは、アーチ天井のひび割れや背面土砂から供給された水分が凍結し、煉瓦を押し出しているのを確認している。

この他にも、煉瓦と同様の多孔質材料である岩石を用いた構造物においても、凍害現象が発生することが報告されている。

高見ら<sup>4)</sup>は、北海道札幌市・北海道開拓の村に移設された旧小樽新聞社で発生した凍害について報告している。この建築物の外壁は積み上げた溶結凝灰岩(札幌軟石)で構成されており、その南向き壁面において顕著な劣化が確認された。著者らは、この

\*2010年8月5日受付 2011年1月3日受理

1. 普通会员 北見工業大学 工学部社会環境工学科 助教  
2. 普通会员 北見工業大学 工学部社会環境工学科 准教授  
3. 普通会员 北見工業大学 工学部社会環境工学科 准教授  
4. 北見工業大学 工学部社会環境工学科 教授  
5. 北見工業大学 工学部社会環境工学科 教授  
6. 北見工業大学 工学部社会環境工学科 助教  
【著者連絡先】FAX: 0157-23-9408 (北見工業大学・中村)

E-mail: dnaka@mail.kitami-it.ac.jp

キーワード: 煉瓦, 凍害, 凍結融解, 凍上, 温度分布, 閉塞型の凍結融解現象



Fig.1 Appearance of flower bed in private house.

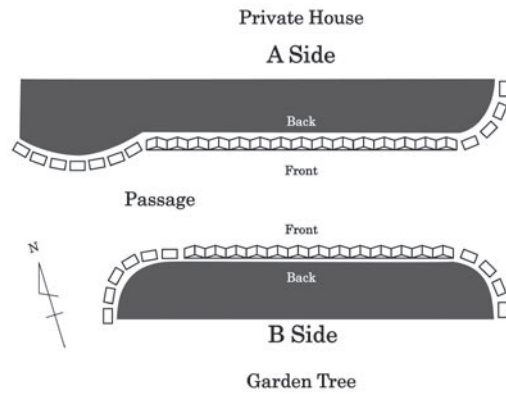


Fig.2 Arrangement of bricks at flower bed of private house.

劣化が、南向き壁面の凍結融解回数の多さと、過酷な温度条件によって引き起こされたと結論付けている。また、同新聞社については、福田<sup>5)</sup>も調査を行っており、北向き壁面に設置したセンサで、3月中旬から下旬にかけて、凍害にかかわると思われる温度変動が出現していることを報告している。

以上のように、凍害による被害事例については様々な報告がなされており、その発生機構についても多種多様に考えられてきた。例えば、氷層の分離析出、いわゆる凍上 (Ice segregation, Frost heaving。例えば、Penner<sup>6)</sup>や Everett<sup>7)</sup>など) や、9%の体積膨張を起こすその場での間隙水の凍結 (In situ freezing) を代表的な凍害機構としてあげることができるが、今回の事例がどの凍害機構に当てはまるのか、判断することは非常に難しい。

本研究では上述の被害事例をふまえて、北海道北見市において確認された煉瓦のひび割れの発生機構を解明することに取り組んだ。まず、北見市内の2箇所において現地調査を行い、煉瓦のひび割れの発生状況を把握した。その後、現地調査結果を踏まえて、暴露実験を行った。本研究で得られた知見は、北海道のような寒冷地において煉瓦構造物を施工する際に、その使用方法の注意を喚起する意味で、非常に有意義なものになると考えている。

## 2. 現地調査

北見市は北海道の東部、常呂川、無加川の流域に位置し、北見盆地からオホーツク海にいたる広大な面積を有する都市である。気温は年間を通して寒暖の差が激しく、冬期には -30℃ 付近まで冷え込むこともある。降水量は年間 800mm 程度と道内でも比較的少なく、日照時間は年間 1800 時間程度と道内では極めて高い地域である<sup>8)</sup>。

今回、煉瓦のひび割れが発見されたのは、北見市東陵町の民家の花壇と、JR 北見駅駐車場の外壁である。本研究ではこの2箇所において現場調査を行った。以下に調査結果の詳細を示す。

### 2・1 北見市東陵町の民家の花壇

現地調査に先立って、住人へのヒアリングを行った。

ヒアリングから、設置されていた煉瓦は、全て市内のホームセンターで購入した普通煉瓦であることが明らかとなった。設置時期は 2000 年前後とのことであったが、記憶が定かではなく、具体的な時期については不明である。また、煉瓦は夏から秋にかけて設置され、一冬を越えて、春にはひび割れていたとのことであった。

以上を踏まえ、民家の花壇の現地調査を 2008 年 7 月に行った。

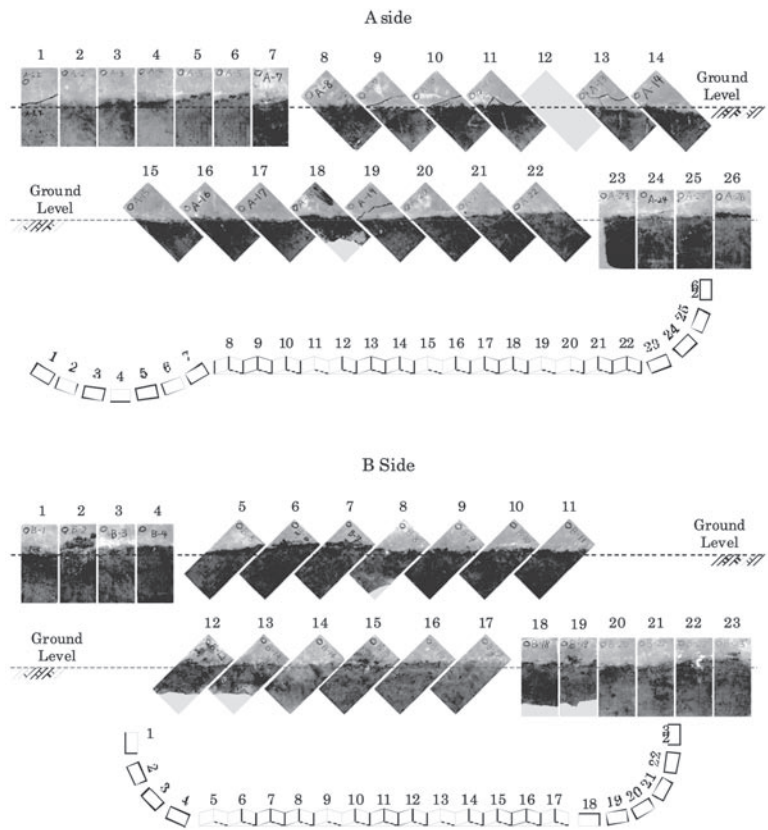


Fig.3 Installation situation of bricks at the flower bed of private house.

Fig. 1 に民家の花壇の様子を、Fig. 2 に煉瓦の配置図を示す。Fig. 2 に示すように、煉瓦は花壇と通路とを分ける、間仕切りとして使用されていた。また、煉瓦は通路を挟んで2列に、向かい合うように配置されていた。本研究では、民家側に配置された煉瓦を A サイド、その対面の庭木側に配置された煉瓦を B サイドとして、区別して調査を行った。また、A、B、どちらのサイドの煉瓦も、通路側の面を正面、その逆の面を背面として区別した。

A サイドの煉瓦は正面が南を向くように配置されており、日中良く日が当たることが確認された。これに対し、B サイドの煉瓦は正面が北を向くように配置されており、庭木や植物の陰となってしまうため、日中でもあまり日が当たらないことが確認された。

現地調査後、住人の許可を得て、設置されていた煉瓦を採取し、実験室にて、写真撮影、表面観察等の解析を行った。Fig. 3 に A、

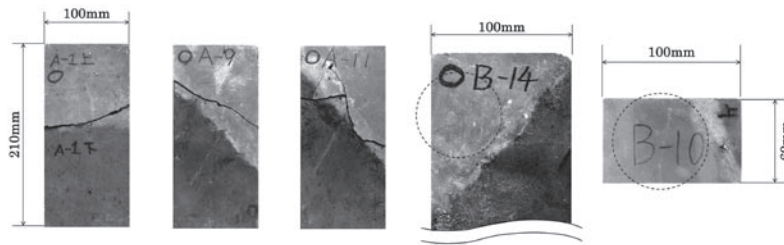


Fig.4 Typical cracks of bricks.

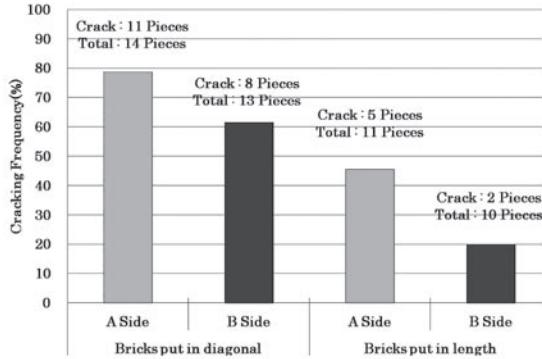


Fig.5 Cracking frequency of bricks (However, A-12 exchanged for the new article is excluded).

B, 両サイド, 全ての煉瓦の設置状況と正面から撮影した写真を示す。Fig. 3に示すように, 煉瓦は2種類の方法で設置されていた。一つはA-1やB-1のように煉瓦を立てて設置する方法である。もう一つはA-8やB-5のように煉瓦を斜めに設置する方法である。どちらの方法でも煉瓦の上部は地表から突き出すように, 下部は地中に埋まるように設置されていた。Aサイドでは, 縦に設置された煉瓦が11本, 斜めに設置された煉瓦が15本, 合計26本の煉瓦が使用されており, Bサイドでは, 縦に設置された煉瓦が10本, 斜めに設置された煉瓦が13本, 合計23本の煉瓦が使用されていた。ただし, A-12の煉瓦は調査以前に新品のものに取り替え済みであったため, 採取しなかった。また, A-18, B-12, B-13, B-18, B-19の5つの煉瓦は, 調査以前に煉瓦のひび割れを確認した住人によって, 上下を逆にして設置し直されていた。

煉瓦の表面観察によって確認された, A, B, 両サイドにおける代表的な亀裂の発生状況を Fig. 4に示す。A-1, A-9, A-11, B-14は, 煉瓦を正面から, B-10は煉瓦を上面から撮影した写真である。Fig. 3とFig. 4から, Aサイドの多くの煉瓦で, 煉瓦を

破断させる致命的なクラックが, 地表面に対して平行に発生しているのが確認できた。これに対し, Bサイドの煉瓦では, Aサイドに較べて軽微なクラック(図中の点線の円で明示)が煉瓦の上面などで確認されるのみであった。クラックの発生箇所は, A, B, どちらのサイドでも, 地表面近傍, もしくは地表面から突き出した煉瓦の上部である。また, いずれのクラックも地表面に平行に進展していた。ただし, 例外的に, A-11やA-13のように地表面に対して, 垂直方向にクラックが進展している煉瓦も確認された。

さらに, Fig. 3とFig. 4から, 亀裂の発生している煉瓦の数を集計し, 配置場所別, 設置方法別に分けて整理した。Fig. 5に斜めに設置した煉瓦, 縦に設置した煉瓦の亀裂の発生頻度を示す。Fig. 5から, 斜めに設置した煉瓦, 縦に設置した煉瓦, どちらの設置方法においても, Bサイドに較べて, Aサイドに配置された煉瓦の方が亀裂の発生頻度が高いことは明らかである。また, A, B, どちらのサイドでも, 縦に設置された煉瓦に較べて, 斜めに設置された煉瓦の方が亀裂の発生頻度が高いことも明らかである。

以上の調査から, 北見市東陵町の民家の花壇では, 南向きで, 日当たりの良い場所に配置された煉瓦に, ひび割れが多く発生することが明らかとなった。また, ひび割れは, 地表面近傍, もしくは地表面から突き出した煉瓦の上部で発生することも明らかとなった。

2・2 JR北見駅駐車場の外壁

JR北見駅駐車場の外壁の現地調査を2009年9月に行った。Fig. 6にJR北見駅の様子を, Fig. 7にJR北見駅駐車場の平面図を示す。JR北見駅駐車場は, Fig. 8のような煉瓦を積み上げてできた壁面で囲まれている。

本研究では, Fig. 7のように駐車場の壁面をA~Iに分類し, 各壁面の向きをベクトル表示した。図中の角度は, 壁面の向きが, 北を基準にして, 時計回りに何度傾いているかを表している。つまり, 0°で真北, 180°が真南を表していることになる。例えば, Fig. 7の壁面Dの向きは, 40°と表すことができる。



Fig.6 Appearance of JR Kitami Station.

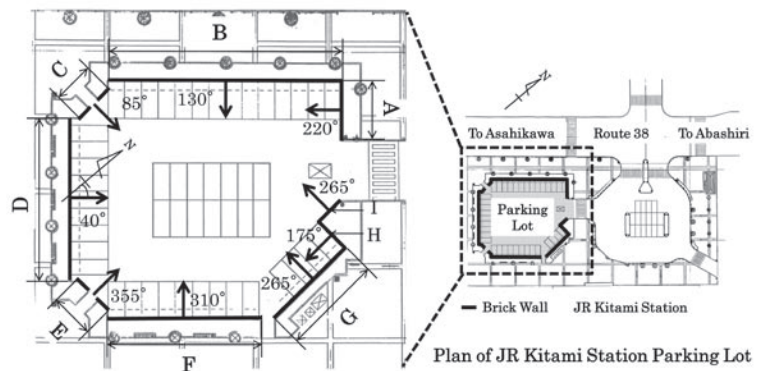


Fig.7 Classification of wall and the direction (We retouched in the document of Kitami road office).

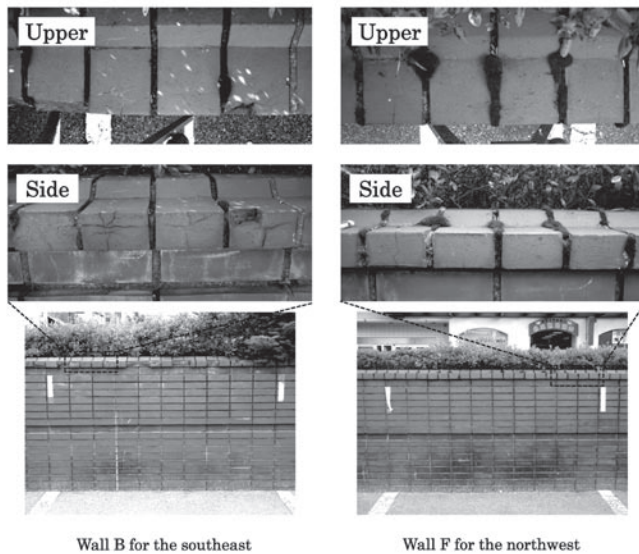


Fig.8 Appearance of wall B and F.

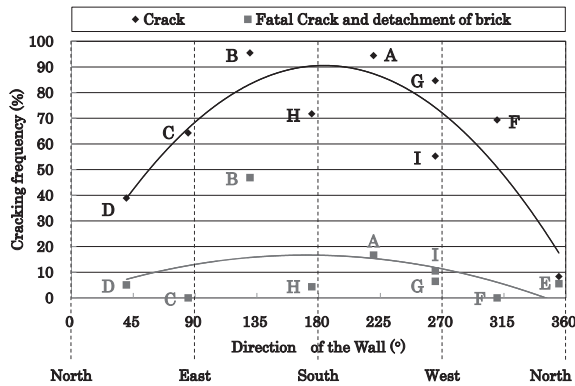


Fig.10 Cracking frequency of JR Kitami Station parking lot.

Fig. 8 に、多くの亀裂が確認された南東向きの壁面 B の様子、壁面 B の対面にあたる北西向きの壁面 F の様子を示す。Fig. 8 から、南東向きの壁面 B では、最上段において、煉瓦を縦横断する大きく開口した致命的な亀裂や、ブロック化した煉瓦の剥落を多数確認することができた。また、最上段以外の煉瓦では亀裂はほぼ発生しておらず、健全な状態を保っていることも確認できた。

一方、北西向きの壁面 F では、最上段のいくつかの煉瓦において、微細なクラックが確認できるものの、壁面 B で確認されたような大きく開口した亀裂は確認されなかった。また、壁面 F においても、壁面 B と同様に、最上段以外の煉瓦では亀裂はほぼ発生していなかった。

Fig. 9 に壁面上部の縦断面図を示す。Fig. 9 から、壁面の最上段に設置された煉瓦は、図中の点線で示すように、その直下の煉瓦より 40mm 突き出ていることがわかる。Fig. 8 から、亀裂が煉瓦の突き出た部分、もしくはそれと平行する位置で、発生していることを確認できる。

壁面最上段において、亀裂が発生している煉瓦の数を壁面ごとに集計し、壁面の向きで整理した。Fig. 10 に煉瓦の亀裂の発生頻度を示す。図中の正方形のマーカーは、煉瓦を縦横断する大きく開口した致命的な亀裂や、ブロック化した煉瓦の剥落の発生頻度を表している。菱形のマーカーは、それらを含む亀裂の発生頻

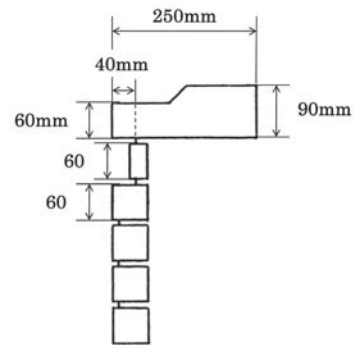


Fig.9 Cross section diagram in the upper part of wall.

Table 1 Basic physical properties of brick.

Water Absorption Ratio (%)	12.21	
Porosity (%)	24.85	
Bulk Density	2.01	
Apparent Density	2.68	
Elastic Wave Velocity (km/s)	Dry Condition	2.60
	Wet Condition	3.04

度を表している。Fig. 10 から、南向きで日当たりの良い壁面において、亀裂が多発していることが確認できる。特に壁面 A, B における亀裂の発生頻度は、約 90% 以上にも達している。また、致命的な亀裂や剥落の発生頻度に着目すると、壁面 B では約 50% にも達しており、最上段に設置されている煉瓦のほぼ半数が深刻なダメージを受けていることが明らかとなった。この南向き壁面で劣化が著しいという調査結果は、高見ら<sup>4)</sup>が旧小樽新聞社の外壁で確認した傾向と良い一致を示している。

以上の調査から、JR 北見駅駐車場の外壁では、南向きで、日当たりの良い場所に設置された煉瓦にひび割れが多く発生すること、ひび割れは煉瓦の突き出た部分、すなわち、大気に曝される面を多く持つ部分で、発生することが明らかとなった。

上記の 2 点は、北見市東陵町の民家の花壇における亀裂発生状況と共通している。このことから、本研究では、北見市の 2 箇所における煉瓦の凍害現象は、設置方法に違いがあるものの、同様の機構で発生していると結論付けた。

### 3. 北見市東陵町の民家の花壇から採取した煉瓦の物理的性質

ひび割れが確認された煉瓦の物理的性質を把握する目的で、北見市東陵町の民家の花壇から採取した煉瓦に対して、種々の物性値試験を行った。Table 1 にその基本物性を示す。これらに加えて、本研究では、一軸圧縮強度、円盤圧裂引張強度、細孔分布についても測定を行なった。以下に、試験方法、実験結果についてまとめた。

#### 3・1 試験方法

3・1・1 一軸圧縮強度試験 万能材料試験機を用い、載荷

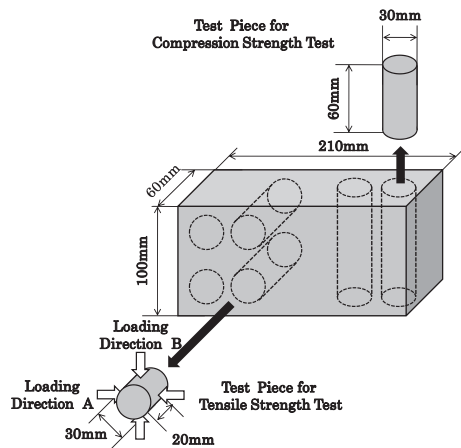


Fig.11 Sampling of test pieces for compressive strength test and tensile strength test.

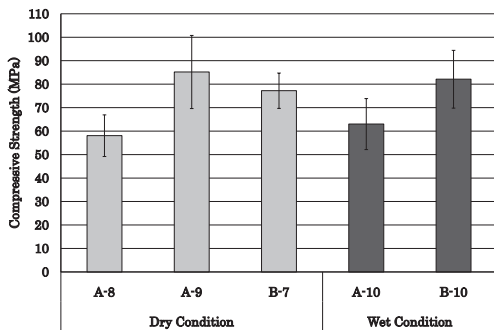


Fig.12 Compressive strength test results.

速度は 1000N/s で試験を行った。

煉瓦に対して、Fig. 11 のようにボーリングを行い、供試体を採取した。供試体は円柱形で、直径 30mm、長さ 60mm である。100°C のオープンで 24 時間かけて乾燥させた乾燥供試体と、蒸留水中で真空ポンプを用いて 24 時間かけて脱気した後、数日間放置し、重量変化がなくなった湿潤供試体を使用した。

Fig. 3 の A-8, A-9, B-7 からは乾燥供試体を、A-10, B-10 からは湿潤供試体を採取した。試験本数は、A-8 が 5 本、A-9 が 3 本、B-7 が 5 本、A-10 が 3 本、B-10 が 4 本である。

**3・1・2 円盤圧裂引張強度試験** 万能材料試験機を用いて、載荷速度 100N/s で試験を行った。

煉瓦に対して、Fig. 11 のようにボーリングを行い、供試体を採取した。供試体は円柱形で、直径 30mm、長さ 20mm である。載荷方向は、異方性を考慮して、Fig. 12 のように A, B の 2 方向とした。実験には、一軸圧縮強度試験と同様、乾燥供試体と湿潤供試体を使用した。

Fig. 3 の A-20, A-16 からは乾燥供試体を、A-21, B-17 からは湿潤供試体を採取した。試験本数は、それぞれの煉瓦から 12 本ずつである。また、12 本のうち、載荷方向 A に 6 本、載荷方向 B に 6 本を供した。

**3・1・3 水銀圧入式ポロシメータ試験による細孔分布測定**

水銀圧入式ポロシメータ（島津製作所製、オートポア III 9420）を使用して、細孔の大きさとその容積を測定した。

試験に用いた試料は、煉瓦の表面付近と中央付近から採取した。ハンマーで砕いた煉瓦をふるいにかけて、5mm ふるいを通過し、2.5mm ふるいに留まったものを測定に使用した。

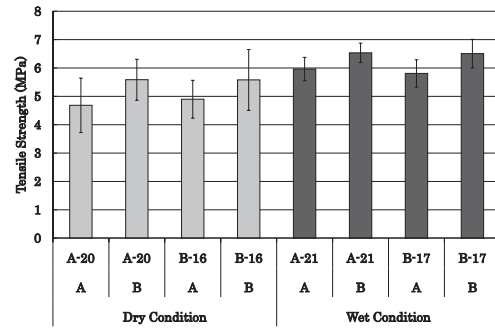


Fig.13 Tensile strength test results.

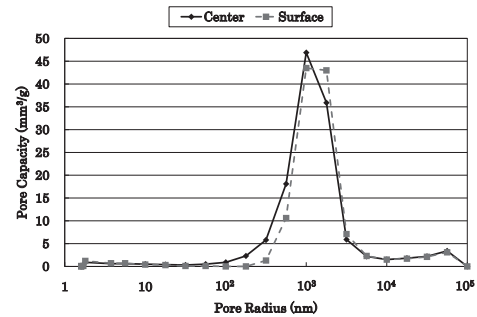


Fig.14 Relationship between pore capacity and pore radius by mercury porosity meter.

### 3・2 試験結果

**3・2・1 一軸圧縮強度試験** 乾燥・湿潤状態における一軸圧縮強度試験の結果を Fig. 12 に示す。図中のエラーバーは標準偏差を表している。Fig. 12 から、乾燥状態と湿潤状態の圧縮強度の間には特に差は見られなかった。

図から、煉瓦間のばらつきが非常に大きいことが確認できる。また、一つの煉瓦では、乾燥状態で ± 10 ~ 20% 程度のばらつきが、湿潤状態で ± 15 ~ 20% 程度のばらつきがあった。

**3・2・2 円盤圧裂引張強度試験** 乾燥・湿潤状態における円盤圧裂引張強度試験の結果を Fig. 13 に示す。図中のエラーバーは標準偏差を表している。Fig. 13 から、乾燥状態と湿潤状態の圧裂引張強度の間には、約 20% 程度の差が見られた。ただし、一軸圧縮強度ではこのような差は見られないことから、これは個体間の強度差によるものではないと思われる。

また、載荷方向においても、微小ではあるが差が見られ、異方性が確認された。載荷方向 B に比べて、載荷方向 A の方が強度は小さい。つまり、載荷方向 A と直行する方向に引張応力が作用すると、煉瓦が割れやすいことが明らかとなった。

図から、煉瓦間のばらつきは一軸圧縮強度ほど大きくはない。一つの煉瓦では、乾燥状態で ± 10 ~ 20% 程度のばらつきが、湿潤状態で ± 5 ~ 10% 程度のばらつきがあった。

**3・1・3 水銀圧入式ポロシメータ試験による細孔分布測定**

細孔分布の一例を Fig. 14 に示す。採取した煉瓦には、細孔半径 10³nm 付近の空隙が多く存在していることが明らかとなった。採取位置で比較すると、煉瓦の表面と、中央付近とは、大きな差は見られなかった。

## 4. 暴露実験

上述の現地調査結果を踏まえ、煉瓦の暴露実験を行った。本研究では、北見工業大学の敷地内で、北見市東陵町の民家の



Fig.15 Appearance of exposure experiment site (Picture taken in April, 2009).

花壇における煉瓦の設置方法を再現し、煉瓦の凍害機構を解明することに取り組んだ。実験期間は2008年11月29日から2010年4月30日までの約1年5ヶ月である。

4・1 供試体

暴露実験には、民家で採取した、実際に花壇に設置されていた煉瓦を用いた。これは、新たに市販の煉瓦を購入して使用する場合には、現場の煉瓦との物性の違いといった問題が付きまとうためである。ただし、過去数年間に渡って、屋外に設置されていた煉瓦を用いるため、実験当初から少なからず劣化しているというデメリットも考えられる。

実験には、現場から採取してきた煉瓦のうち、ダメージの少なかったA-5, A-6, A-22, B-3, B-4, B-5, B-9, B-11, B-14, B-15, B-22, B-23, B-24, B-26の合計14本を使用した。

4・2 実験方法

4・2・1 煉瓦の配置 Fig. 15 に暴露実験サイトの様子を、

Fig. 16 に暴露実験の煉瓦の配置図を示す。

Fig. 16 に示すように、敷地内を2箇所、縦100cm、横140cm、深さ30cmで掘り起こし、園芸用の黒土に置き換えた。その後、それぞれに煉瓦を7本ずつ配置した。煉瓦は北見市東陵町の民家の花壇における煉瓦の設置方法と同様に、斜めに、正面が南を向くように設置した。

また、冬期間の積雪の影響を明らかにするため、2箇所のうち、左側は除雪を行った。右側は除雪を行わず、雪をそのまま放置した。以下、本研究では、除雪を行った左側を(a)雪なし、除雪を行わなかった右側を(b)雪ありとして、記述していく。

4・2・2 煉瓦の内部及び表面温度の測定 煉瓦の温度変化を解析するため、Fig. 16 に示すように、(a)雪なし、(b)雪あり、それぞれ1本の煉瓦の内部及び表面に、25本の温度センサを設

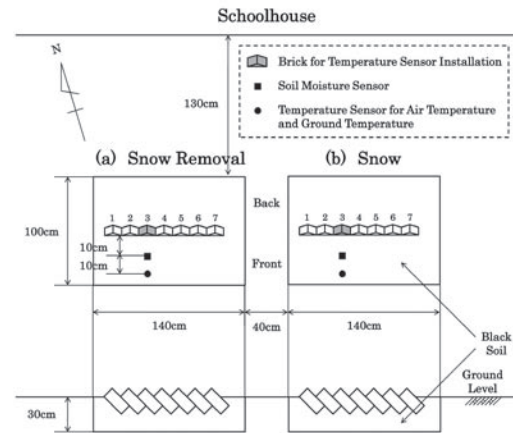


Fig.16 Arrangement of bricks for exposure experiment.

置した。温度センサの詳細な設置位置を Fig. 17 に示す。温度センサは2つの断面を想定して設置し、一つを東西方向のE-W断面、もう一つを南北方向のN-S断面とした。温度センサには熱電対を用い、エポキシ樹脂系接着剤を用いて固定した。

本研究では、このようにして得られた温度データから、2つの断面の温度分布を作成した。センサ間の温度は、5mm毎に、線形補間して求めた。

4・2・3 気温及び土中温度の測定 Fig. 16, Fig. 17 に示すように、

温度センサを設置して、(a)雪なし、(b)雪あり、それぞれの気温及び土中温度を測定した。各温度センサは、熱伝導率を考慮して、木材にエポキシ樹脂系接着剤を用いて固定した。温度センサには、煉瓦の温度測定と同様に、熱電対を用いた。

本研究では、(a)雪なしの最上部に設置した温度センサの計測値を、この実験サイトの気温として扱うこととした。

4・2・4 土中水分量の測定 Fig. 16, Fig. 17 に示すように、

土中水分計を地表面から15cmの深さに設置し、(a)雪なし、(b)雪あり、それぞれの土中水分量を測定した。測定方法にはTDR法を用い、土中水分計にはDECAGON社製ECH<sub>2</sub>Oプローブを用いた。プローブによって測定される土の誘電率から、体積含水率を推定する。

上述の温度及び土中水分量は、どちらもデータロガーによって、1時間毎に自動計測される。

4・2・5 その他の測定 上記以外にも、積雪深の測定、写真撮影を行った。積雪深の測定は、Fig. 15のように、(b)雪ありの煉瓦の背面側に設置されたスケールを用いて、目視で行った。

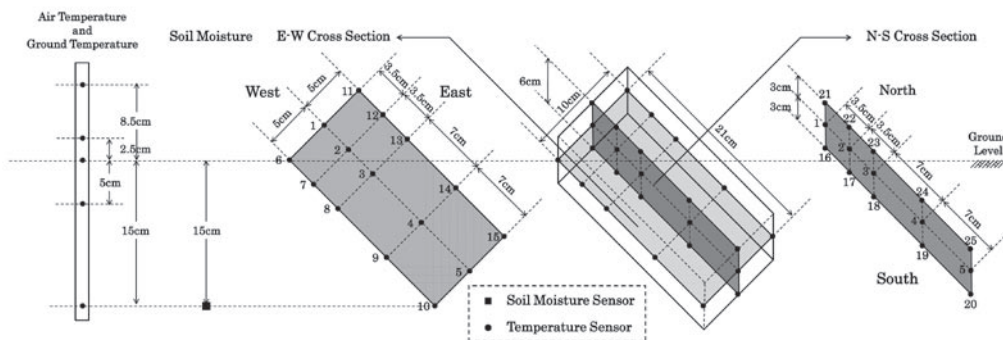


Fig.17 Installation positions of the temperature sensor and the soil moisture sensor.

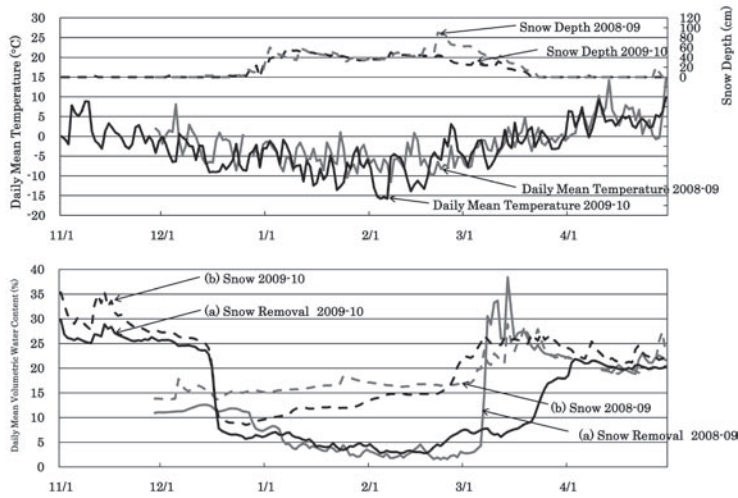


Fig.18 Daily mean air temperature, snow depth and daily mean volumetric water content at the two seasons. (1st season is from November 29, 2008 to April 30, 2009 and 2nd season is from November 1st, 2009 until to April 30, 2010) .

1st season  
(Picture taken on February 25, 2009)



2nd season  
(Picture taken on February 23, 2010)

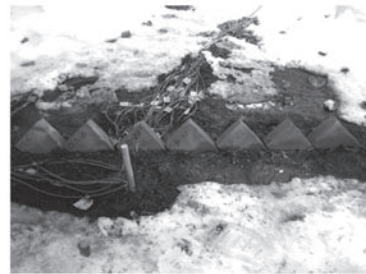


Fig.20 Appearance of (a) Snow removal in late winter .

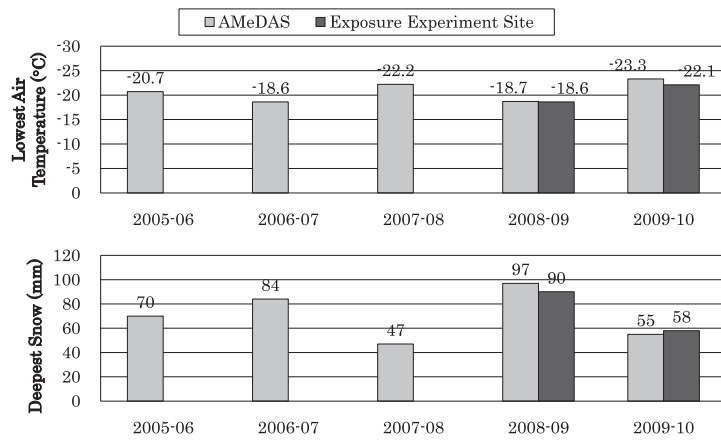


Fig.19 Lowest air temperature and deepest snow at the past five seasons.

積雪深の測定 及び写真撮影は、どちらも一日に一度、午後1時前後に行った。

これらに加えて、アメダスから、降水量、積雪深、日照時間、日最高・最低気温の5項目を引用し、記録した。

#### 4・3 実験結果と考察

**4・3・1 実験期間の気温と積雪** Fig. 18 に、2008年11月29日から2009年4月30日までと、2009年11月1日から2010年4月30日までの2シーズンにおける日平均気温と積雪深、日平均体積含水率の経時変化を示す。以下、2008年から2009年にかけての冬期間を1シーズン目、2009年から2010年にかけての冬期間を2シーズン目として、記述していく。Fig. 18 から、2シーズン目の日平均気温は、1シーズン目に比べて、低い値を示している。積雪深は、2月中旬まで、1、2シーズンともにはほぼ同様の値を示しているが、下旬の大雪で、1シーズン目のほうが大きな値を示している。

Fig. 19 に過去5シーズンにおけるアメダスと2シーズンにおける実験サイトの最低気温と、最深積雪を示す。Fig. 19 から、2009年から2010年にかけての最低気温は過去5シーズンにおいて最も低く、積雪は2番目に少ないことが明らかである。

以上のことから、本研究における2シーズン目は、比較的雪が

少なく、極めて寒い冬であったことがわかる。

**4・3・2 実験期間の土中水分量** Fig. 18 から、1シーズン目の(a)雪なしの含水率は、日平均気温が0°Cを上回らなくなる12月下旬頃から低下し始め、3月上旬までの約2ヶ月間、5%前後であることが確認できる。これは、土中水分が凍結することによって、土の誘電率が低下したためだと考えられる。つまり、この含水率が低下していた約2ヶ月間、煉瓦周囲の土は地表面から深さ15cm付近まで凍結していたと考えることができる。同様に、2シーズン目の(a)雪なしの含水率は、12月中旬頃から低下し始め、3月下旬までの約3ヶ月間、5%前後の低い値を示している。このことから、2シーズン目は、1シーズン目に比べて、約1ヶ月間長く、煉瓦周囲の土が地表面から深さ15cm付近まで凍結していたと推測することができる。

Fig. 20 に1シーズン目、2シーズン目の晩冬における暴露実験サイト(a)雪なしの様子を示す。写真から、1シーズン目、2シーズン目、ともに2月下旬には地表面に融雪水を確認することができる。(a)雪なしでは実験期間を通して除雪を行っていたことから、これらの水分は、(a)雪なしの周囲の積雪の融解によるものと考えられる。これらの写真から、2月下旬には、既に土の表層部分において凍結融解現象が発生していたことが明らかである。

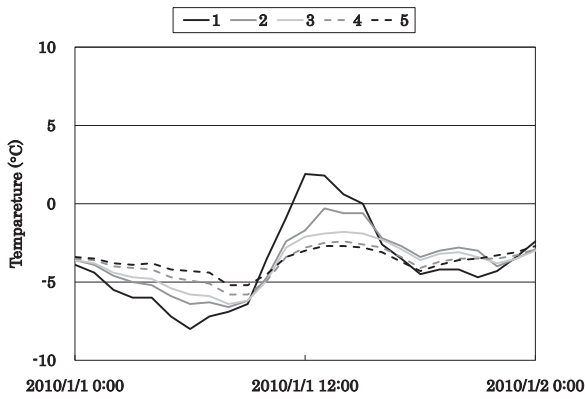


Fig.21 Temperature changes of brick at (a) Snow removal on January 1, 2010 in 2nd season.

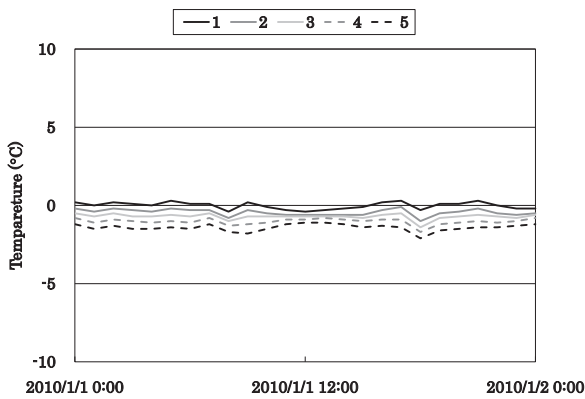


Fig.22 Temperature changes of brick at (b) Snow on January 1, 2010 in 2nd season.

以上から、2009年では2月下旬から3月上旬までの約2週間、2010年では2月下旬から3月下旬までの約1ヶ月間、煉瓦の上部で凍結融解現象が発生していたのではないかと推測できる。

Fig. 18から、1シーズン目の(b)雪ありの含水率は、実験開始当初から3月上旬まで、全く低下していないことが確認できる。1シーズン目の(b)雪ありでは、12月下旬の段階で積雪を観測していることから、積雪の断熱効果によって、地表面から深さ15cmまで凍結が進行しなかったものと考えられる。2シーズン目の(b)雪ありの含水率は、日平均気温が0°Cを上回らなくなる12月中旬頃から低下し始めるが、積雪が観測された12月下旬から横這いとなり、2月下旬まで約10%付近で推移していることが確認できる。このことから、2シーズン目の(b)雪ありも、1シーズン目と同様に、積雪の断熱効果によって、土が地表面から深さ15cmまで、完全に凍結していなかったと推測することができる。

**4・3・3 煉瓦の温度変化と積雪の断熱効果** 冬期間における煉瓦の温度変化の代表的な一例を以下に示す。Fig. 21は2010年1月1日の(a)雪なしにおける煉瓦の温度変化を、Fig. 22は(b)雪ありにおける煉瓦の温度変化を表している。Fig. 21, Fig. 22には、煉瓦に設置した25本の温度センサのうち、煉瓦の中心線に沿って設置された1, 2, 3, 4, 5番のセンサの計測値のみをプロットした。凡例の数字はFig. 17の温度センサ番号と一致している。

Fig. 21から、積雪のない(a)雪なしでは、センサの設置位置が上方に向かうに従って温度変化が大きくなっていることがわかる。煉瓦表面に設置された1番のセンサは、日中は日射の影響を

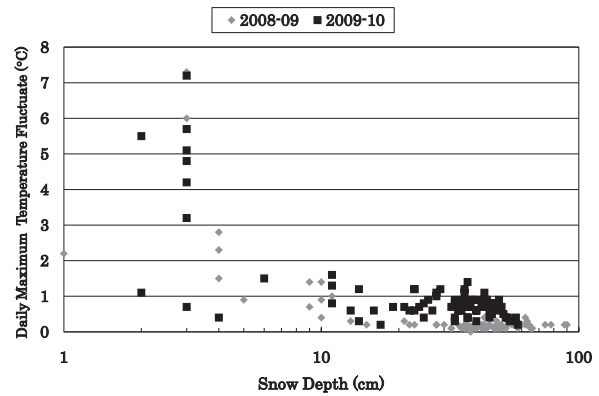


Fig.23 Relationship between daily maximum temperature fluctuate of the sensor No.1 and snow depth at (b) Snow.

受けて上昇を、夜間は冷気の影響を受けて下降を示している。一方、下端に設置された5番のセンサは、日中の日射や夜間の冷気の影響を受けず、温度変化は非常に小さい。また、下部は0°Cを上回ることがなく、冬期間を通して、常に凍結した状態であると考えられる。

これに対し、Fig. 22から、積雪のある(b)雪ありでは、センサの設置位置に関わらず、温度が0°C付近でほぼ変化していないことがわかる。Fig. 18から、2010年1月1日における積雪深は21cmを記録しており、厚い積雪によって、煉瓦が断熱されていることは明らかである。

以上のような積雪の断熱効果を明らかにする目的で、前述の5本のセンサのうち、最も温度変化の大きい1番のセンサの計測値を用いて、日最大温度差と積雪深との関係を求めた。Fig. 23に(b)雪ありにおける1番の温度センサの日最大温度差と積雪深との関係を示す。図の日最大温度差は、日最高気温と日最低気温との差から求めた値である。

Fig. 23から、1シーズン目、2シーズン目ともに、積雪深が10cmを越えると日最大温度差は2°C未満となり、非常に小さくなっていることが明らかである。また、Fig. 18から、暴露実験サイト(b)雪ありの煉瓦は、1, 2どのシーズンにおいても、冬期間のうちでも気温の低い12月下旬から3月下旬までの3ヶ月間、上記のような断熱性の高い10cm以上の積雪に覆われていることがわかる。以上のことから、暴露実験サイト(b)雪ありの煉瓦は、冬期間を通して、低温の影響をほとんど受けていないと考えられる。

**4・3・4 ひび割れの発生及び進展** 実験は上述したように約1年5ヶ月に渡って行ったが、煉瓦のひび割れは2シーズン目の2010年2月下旬以降にしか確認できなかった。

また、ひび割れは、実験サイトのうち、Fig. 16の除雪を行った(a)雪なしの1, 2, 3番の煉瓦で確認された。これに対し、除雪を行わなかった(b)雪ありの煉瓦では、ひび割れは確認されなかった。これは、先に述べたように、(b)雪ありの煉瓦が冬期間を通して雪に覆われてしまうためだと考えられる。

Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26に、暴露実験サイト(a)雪なしの煉瓦において観察された、ひび割れの発生の様子の一例を示す。図中の模式図は、亀裂の発生位置を示している。Fig. 24から、2010年2月23日には亀裂が発生していなかった3番の煉瓦に、24日になると亀裂が発生しているのが確認できる。同様に、Fig. 25, Fig. 26から、2010年3月11日には亀裂が発生していなかった2番の煉瓦に、12日になると煉瓦の2面に亀裂が発生しているの





Fig.24 Crack of the brick No.3 that occurred at (a) Snow removal (Picture taken on February 23 & 24, 2010) .



Fig.25 Crack of the brick No.2 that occurred at (a) Snow removal (Picture taken on March 11 & 12, 2010) .



Fig.26 Crack of the brick No.2 that occurred at (a) Snow removal (Picture taken on March 11 & 12, 2010) .



Fig.27 Appearance of the brick at (a) Snow removal (Picture taken on March 22, 2010) .

が確認できる。以上のように、健全に見えた煉瓦に、たった1晩で、亀裂が発生したことが確認できた。

Fig. 27 には、亀裂の発生が確認された (a) 雪なしの 1, 2, 3 番の煉瓦の、2010 年 3 月 22 日の様子を示す。写真は、地表面から突き出た煉瓦の上部を、4 方向から撮影したものである。Fig. 27 から、全ての煉瓦において、4 面全てに亀裂が発生していることが確認できる。また、Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26 で確認された亀裂が、Fig. 27 において、進展していることも確認できる。

**4・3・5 煉瓦の温度分布** 上述したように、2010 年 2 月 24 日、(a) 雪なしの 3 番の煉瓦で、ひび割れの発生が確認された。そこで、ひび割れの発生が確認された 2 月 24 日の前日 23 日の E-W 断面における温度分布に着目する。Fig. 28 は 2010 年 2 月 23 日の明け方から夜間にかけての温度分布を表している。

Fig. 28 から、明け方、煉瓦の温度分布はマイナスの温度を示しており、煉瓦は概ね凍結していると考えられる。その後、日中、日

が昇り、日射を受けることにより、煉瓦は上部から、ほぼ一次元で融解されているのが確認できる。しかしながら、夜になり、煉瓦が冷却されるにつれて、煉瓦の温度分布は不均一になっている。

また、Fig. 28 から、寒気によって最深部まで完全に凍結していた煉瓦が、日中の日射によって表面からプラスの温度に変化しているのが確認できる。これに伴って、地表面より露出している煉瓦の上部では、クラックや空隙中に形成されていた間隙氷が融解していると考えられる。

その後、煉瓦の下部は凍結したままで夜を迎えるが、夜間の冷気で、煉瓦の上部にはマイナスの低い温度に囲まれた特徴的な温度分布が発生していることが確認できる。このことから、日中に発生した融解部分は、夜間の冷気によって閉じこめられるように再凍結しているのではないかと考えられる。上記のように再凍結すると、煉瓦の上部に存在する水分は閉塞するように凍結するため、内部圧力が高まり、煉瓦が割れるのではないかと推測できる。

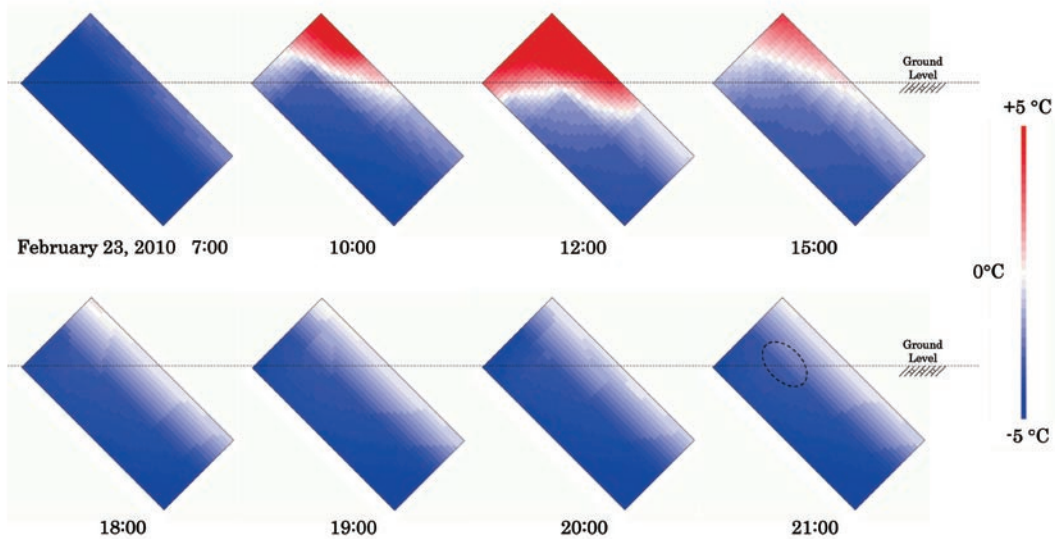


Fig.28 Temperature distributions of the brick No.3 at (a) Snow removal from dawn to nighttime, February 23, 2010.

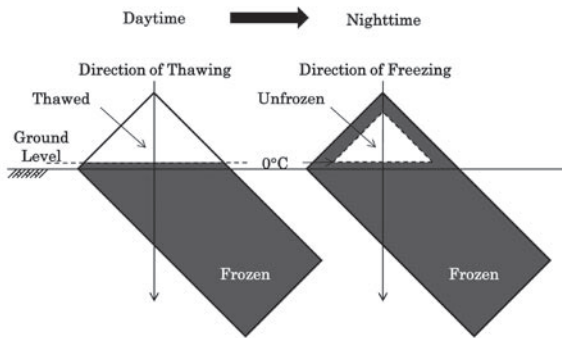


Fig.29 Mechanism of frost damage that occurs in bricks put at the flower bed of private house.

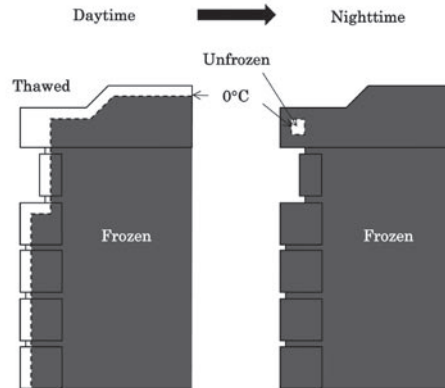


Fig.30 Mechanism of frost damage that occurs in bricks constructed to the wall of parking lot.

本研究では、このような温度分布によって発生する凍結融解現象を、閉塞型の凍結融解と定義する。

このような閉塞型の温度分布は、2009年では、2月に17回、3月に4回、2010年では、2月に4回、3月に12回、発生していることが確認できた。ただし、既に述べたように、土中水分量の計測結果と実験サイトの写真撮影から、煉瓦の上部で凍結融解現象が発生した期間は、2009年では2月下旬から3月上旬までの約2週間、2010年では2月下旬から3月下旬までの約1ヶ月間に限られている。この期間に発生した閉塞型の温度分布は、2009年で5回、2010年で12回であった。ひび割れは2シーズン目にしか確認されなかったが、上記のように、閉塞型の温度分布が発生した回数が、1シーズン目に少なく、2シーズン目に多かったためだと考えられる。また、閉塞型の凍結融解が繰り返されることによって、ひび割れの発生、進展が引き起こされると考えられる。

### 5. 暴露実験結果から推測される凍害機構

暴露実験結果から以下のような凍害機構を推測した。

Fig. 29は、民家の花壇に設置されていた煉瓦で発生した凍害の機構を、模式的に表している。晩冬、夜間の寒気によって最深部まで完全に凍結していた煉瓦が、日中の日射によって表面から

融解していく。これに伴って、煉瓦内部には温度勾配が生じ、0°C線が深部へと移動していく。0°C線より上方では、クラックや空隙中に形成されていた間隙水が融解する。その後、0°C線は地表付近に達し、煉瓦の上部は融解する。晩冬は日差しが弱いため、煉瓦は完全には融解しない。煉瓦の下部は凍結したままであるが、この状態で夜を迎えると、日中に発生した融解部分は夜間の冷気によって閉じこめられるように再凍結することとなる。このため、煉瓦の上部に存在する水分は閉塞するように凍結し、高まった内部圧力によって、煉瓦が割れると考えられる。

Fig. 30は、駐車場の外壁に施工されていた煉瓦で発生した凍害の機構を、模式的に表している。民家の花壇と同様、晩冬、煉瓦は日中の日射によって表面から融解していく。最上段の煉瓦の突き出た部分は、上面と側面の2面から当たる直射日光と、下面の暖気によって、他の部分の煉瓦より、深部まで融解する。加えて、上面に積雪が存在する場合には、日中の日光によって暖められて融雪水となり、その水分の供給によって煉瓦の飽和度が高まる可能性も考えられる。その後、夜を迎えると、日中に発生した融解部分は夜間の冷気によって閉じこめられるように再凍結することとなる。このため、煉瓦の突き出た部分に存在する水分は閉塞するように凍結し、高まった内部圧力によって、煉瓦が割れると

考えられる。

以上のような閉塞型の凍結融解は、天然の露出した岩塊や、一章で述べたような石造建築物においても発生する可能性が大いにある。

## 6. ま と め

北海道北見市内の2箇所において、凍害が原因と思われる煉瓦のひび割れが確認された。本研究では、煉瓦のひび割れの発生機構を解明するために、現地調査と暴露実験を行った。以下に、本研究で得られた新たな知見を示す。

### ・ 現地調査

(1) 南向きで、日当たりの良い場所に設置された煉瓦にひび割れが多く発生する。

(2) ひび割れは煉瓦の突き出た部分で発生する。

### ・ 暴露実験

(1) 煉瓦のひび割れは、2月下旬から3月下旬にかけての晩冬に発生する。

(2) この際、煉瓦が以下のような特徴的な温度分布を示すことが確認された。晩冬、寒気によって最深部まで完全に凍結していた煉瓦が、日中の日射によって表面からプラスの温度に変化する。

その後、煉瓦の下部は凍結したままで夜を迎え、夜間の冷気で、煉瓦の上部にはマイナスの低い温度に囲まれた閉塞型の温度分布が発生する。日中に発生した融解部分は、夜間の冷気によって閉じこめられるように再凍結し、煉瓦の上部に存在する水分は閉塞するように凍結する。このため、内部圧力が高まり、煉瓦が割れるのではないかと推測できる。

本研究で得られた上記の知見は、北海道のような寒冷地において煉瓦構造物を施工する際に、その使用方法の注意を喚起する意味で、非常に有意義なものとなると考えている。

## References

- 1) T. Ishizaki : Proc. 10th International Symposium for Building Physics (1999) , Vol.2, pp. 827-832.
- 2) T. Ishizaki : Ground Freezing 2000, (Balkema, Rotterdam, 2000) , pp. 79-84.
- 3) I. Ohkubo, R. Kobayashi, K. Asakura and Y. Sekishita : Proc. Hokkaido Chapter of JSCE (2005) , Vol.61.
- 4) M. Takami and T. Ishizaki : Reports of Grants-in-Aid for Scientific Research (2002) , pp. 1-23.
- 5) M. Fukuda : *Sekizo Bunkazai no Hozon to Shufuku*, (Tokyo Kokuritu Bunkazai Kenkyusho, 1985) , pp. 41-46.
- 6) E. Penner : Highway Reserch Board Bulltin (1957) , No.168, pp. 50-64.
- 7) D. H. Everett : Transactions of the Faraday Society 57 (1961) , 1541-1551.
- 8) Kitami Shi Toukei Syo Heisei 21 Nen Ban (2009).