

## 設計熱伝導率という新しい考え方！

未利用熱エネルギーの活用に資する高熱伝導コンクリート (NETIS 登録番号 HR-230007-A)

美寺寿人 (みてら ひさと MITERA Hisato) 東邦産業株式会社, 副社長, 技術士 (建設部門)

佐伯竜彦 (さえき たつひこ SAEKI Tatsuhiko) 新潟大学工学部, 教授, 博士 (工学)

浅野宏 (あさの ひろし ASANO Hiroshi) 新潟太平洋生コン株式会社, 工場次長

### はじめに

とかく、新しいことを始めるには、困難なことが多くあります。その中でも、一番の制約 (ボトルネック) は、「今までやったことがないから、やめておこう。」とか、「設計要領には、そう書いていない。昔からこのやり方でやってきた。」などという考え方です。

「高熱伝導コンクリート」という新しい技術を理解していただき、昨冬、現場で実証実験を行うことができたことは、新潟県見附市役所の方々のチャレンジ精神によるものです。この場を借りて御礼申し上げます。

### 1. 開発の背景と目的

路面融雪施設のロードヒーティングにおけるコンクリート舗装は、交通の安全性や快適性の向上という基本機能に加えて、放熱管を防護する耐荷機能と放熱管からの熱を路面に伝える熱伝導機能を有しています。一般的にコンクリートの熱伝導率は  $1.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  と言われています。

「もし、コンクリートの熱伝導率が2倍、または3倍に、つまり放熱能力が2倍、3倍になるとどういったことが起こるのでしょうか。」

強固で耐久性が高く、重負荷や摩擦に強い特徴がある従来のコンクリートの機能に、新たな機能を持ったコンクリートを開発して、その価値が社会に受け入れられれば  $100 \text{ 万円/m}^3$  の生コンがあっても、良いのではないかとという素朴な思いから、新たに熱伝導性の高い機能を加えた新しいコンクリートを開発することに、5年前からチャレンジしました。

本稿では、昨年10月に国土交通省の新技术情報提供システム (NETIS) に登録された「高熱伝導コンクリート」の技術概要と昨年の冬に新潟県見附市で行った実証実験等について紹介します。

### 2. 技術 ((NETIS 登録番号 HR-230007-A) の概要と特徴

#### 2-1 技術の概要

##### 2-1-1 コンクリートの骨材に着目

舗装材であるコンクリートの骨材として、化学的に安定かつ高い熱伝導性を有する酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (以下「アルミナ」と呼ぶ) に着目しました。汎用的なアルミナは、資源的に埋蔵量が豊富なボーキサイトを原料に、抽出精製されており、安価に大量生産できることから産業分野で広く使用されています。特性として、高融点で耐食性、絶縁性、耐摩耗性に優れていることから、ファインセラミックスの基本的な素材として絶縁碍子、研磨剤な

どに使われています。

写真-1 は、本研究で使用したアルミナ骨材です。左は細骨材、右は粗骨材として使用し、表面には、微細な凹凸があります。

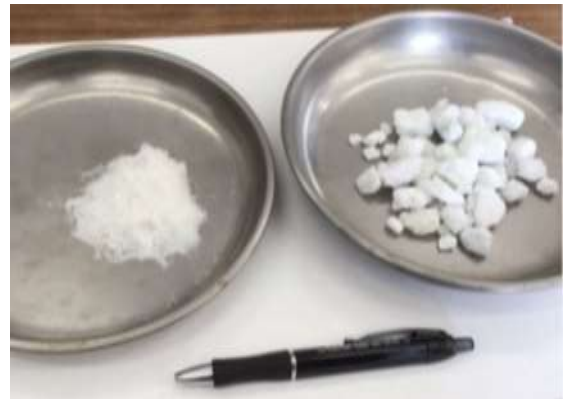


写真-1 使用したアルミナ骨材

### 2-1-2 高熱伝導コンクリートの製造

コンクリートの標準配合は、新潟太平洋生コン（株）の工場で品質確認及び出荷実績のある「早期交通開放型コンクリート舗装（IDAY PAVE）」の配合を基本とし、道路設計で定められている設計基準曲げ強度 4.5N/mm<sup>2</sup>を保証するものとし、（水セメント比 35%、細骨材率 s/a=42%、セメントの種類は早強ポルトランドセメント（太平洋セメント(株)社製）、骨材は碎石、砂）。

また、アルミナは、日本軽金属（株）製のアルミナ「36W/m・K（25℃）」を使用し、その粒度については、標準配合で使用した骨材と同等になるよう調整したものを使用しました。

### 2-1-3 熱伝導率

標準配合と比べて、骨材をすべてアルミナに置換した配合の熱伝導率は、従来の天然骨材ではありえない「6.08」W/m・K という非常に高い値が得られました。

熱伝導率の増加についてアルミナ混入体積率と熱伝導率の関係を図-1に整理しました。

天然骨材と置き換えたアルミナの「混入体積率」と熱伝導率には比例関係があり、式-1のような相関式となります。

$$\text{熱伝導率 (W/m}\cdot\text{K)} = 0.0618 (\text{W/m}\cdot\text{K}\cdot\%) \times \text{アルミナ混入体積率 (\%)} + 2.02 (\text{W/m}\cdot\text{K})$$

……… 式-1

アルミナの混入体積率を変えることで、ある一定の範囲（熱伝導率 2~6）でコンクリートの熱伝導率をコントロールできます。

なお、曲げ強度については、各配合とも標準配合と比べて約 1.2 倍以上の曲げ強度を確認できたため、強度面においては問題なしと推測します。

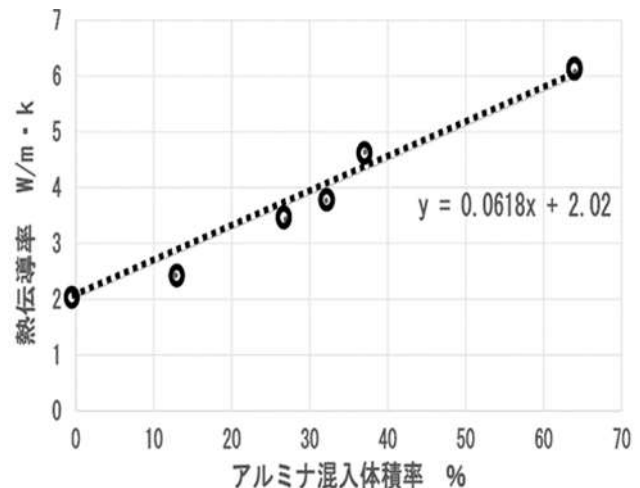


図-1 アルミナ混入体積率と熱伝導率の関係図

## 2-2 技術の特徴

### 2-2-1 未利用熱をヒートポンプで活用

無散水融雪は、図-2 のロードヒーティング断面模式図のように、舗装体内に設置された

放熱管内に温かい不凍液や地下水などを流し、その熱エネルギーが、放熱管から舗装体に熱伝導して路面が温められることにより、路面の雪を融雪する仕組みとなっています。

これまで北海道や多積雪地における無散水融雪施設では、必要な放熱量（設計放熱量）が大きいために、低温度である下水熱や地中熱などの再生可能な熱エネルギーの温度だけでは、不凍液等を必要な設計温度に温めることができず、ヒートポンプや化石エネルギーの利用に頼らざるを得ないと言われてきました。

この課題を解消する方法として、舗装体の熱伝導率を大幅に向上することで、必要な設計温度を低くすることができ、未利用熱の活用ができます。

このことを下水熱を利用した融雪技術における設計手法<sup>2</sup>に基づいて計算した結果を用いて示します。

図-3は、ロードヒーティングの模式図です。熱源によって、温められた不凍液が、ロードヒーティング部の放熱管内を流れる過程で舗装体に放熱し（それによって、路面の融雪を行う）、温度が低下して、熱源に戻って、また、温められるという循環をしています。各温度は、それぞれのポイントの温度を定義しています。図-4は放熱管と路面の位置関係を表しています。

熱伝導率が用いられる設計の箇所は、「路面消・融雪施設等設計要領」から放熱管平均通水温度 $\bar{T}$ の式-2です。

$$\bar{T} = qu \cdot \frac{L_1 + L_2}{2\lambda} + q \cdot \frac{\alpha}{2\pi \cdot \lambda_p \cdot L} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + T_m \quad \dots \text{式-2}$$

式-2における舗装体の熱伝導率が関係するのは第1項のみです。

1項の変数は、以下の通りです。

$$qu \cdot \frac{L_1 + L_2}{2\lambda}$$

qu： 上部放熱量（熱効率を考慮しない融雪または凍結防止に必要な熱量：W/m<sup>2</sup>） L<sub>1</sub>：放熱管中心から路面までの最長距離（m） L<sub>2</sub>：放熱管中心から路面までの最短距離（m） λ：舗装体の熱伝導率（W/m・K）

この第1項は、「放熱管から路面までの距離 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>」が長くなると大きくなり、「舗装体の

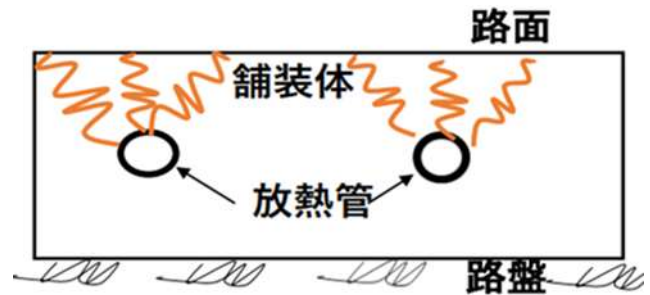


図-2 ロードヒーティング断面模式図

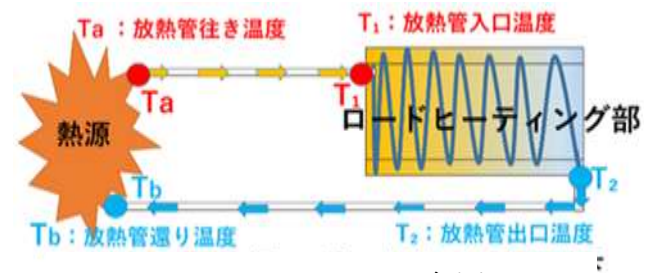


図-3 ロードヒーティング模式図

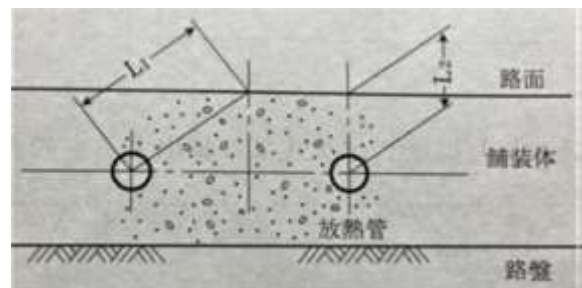


図-4 放熱管と舗装体、路面（出典：要領より）

熱伝導率λ」が大きくなると、小さくなることを表しています。

したがって、式-2の放熱管平均通水温度 $T_w$ や放熱管行き温度の値にも同じことが言えます。

計算モデル例(札幌市)として、再生可能エネルギーの一つである下水熱をヒートポンプレスでの利用困難な地域である北海道の道央地区を想定して、その適用性について考察を行います。

設計条件は、以下の通りです。

- ・融雪対象面積：200m<sup>2</sup>・単位面積当たり必要熱量 q：250W/m<sup>2</sup> (道央地区)・上部放熱量  $q_u$ ：225W/m<sup>2</sup>・総必要熱量 50,000W・放熱管の種類及び口径：SUS15A・放熱ユニット面積 10m<sup>2</sup>
- ・放熱管設置間隔：100mm・管内流速及び送水量：0.7m/s
- ・下水温度 12℃ (推定値)・L<sub>1</sub>0.087m・L<sub>2</sub>0.1m
- ・路面温度 T<sub>m</sub> (凍結防止を考慮) 1℃

熱伝導率を 1.6~6 W/m・K の間で変化させた場合の熱伝導率と放熱管行き温度の数値を表-1に示します。

表-1 熱伝導率と放熱管行き温度の表

表-1の見方として、熱伝導率が 1.6 W/m・K の時の放熱管行き温度は、16.3℃が必要な温度となり、熱伝導率が 6 W/m・K の場合は、その値が 6.7℃となり、約 10℃低下することができるのです。

熱伝導率λ (W/m・K)	放熱管行き温度T <sub>a</sub> ( ℃)
1.6	16.3
2	13.7
2.4	11.9
2.8	10.7
3	10.2
4	8.4
5	7.4
6	6.7

活用できる下水熱を 12℃としますと、熱の不可逆性で 12℃以上にはヒートポンプレスでは温めることが不可能ですので、熱伝導率が 1.6~2.3 W/m・K の範囲ではヒートポンプレスでの利用はできないこととなります。

熱伝導率を 2.4 W/m・K 以上にすることによって、放熱管行き温度を 12℃未満にすることができます。

つまり、熱伝導率 1.6~2.3 W/m・K の範囲では 12℃の下水熱の活用ができませんが、熱伝導率を 2.4 W/m・K 以上にすることによって、単位面積当たり必要熱量 q：250w/m<sup>2</sup>の条件をクリアできるのです。

また、熱伝導率が 6 W/m・K の場合に放熱管行き温度が 7℃以下になります。

このことは、7℃付近の低温度の熱エネルギーの利用も可能となることを示します。このように北海道や厳寒多雪地域などのヒートポンプレスが導入できなかった地域において未利用熱である再生可能エネルギーの導入が期待できます。

## 2-2-2 全体最適な設計

革新的な設計手法により部分最適から全体最適へ

これまでロードヒーティングの施設設計において、舗装体の熱伝導率を【定数】として取扱って放熱部の設計を行い、次に熱源部の設計を行ってきました。

しかし、熱伝導率をコントロールできる【変数】として取り扱うことで、放熱部と熱源部の設計において、相互に連係させながら全体最適な施設設計をすることが可能になるのです。



前項の設計モデル例（札幌）を用いて考察を行います。アルミナの価格が従来の骨材と比べて高価であるため、熱伝導率が  $6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  の生コンクリートは、 $1\text{m}^3$  当り約 100 万円と高価で、舗装材そのものはコストが高くなります。一方、再生可能エネルギーを利用する場合、採熱部に多額の費用が掛かると言われています。また、熱源部の費用の大半を占めるのは採熱管費用で、「舗装の熱伝導率」と「必要な採熱管の長さ」には、負の相関関係があります。

【舗装の熱伝導率】と【採熱管と舗装コンクリートの合計概算直接工事費】の関係を図-5に示します。

図-5より、舗装の熱伝導率が、 $3.8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  付近において【採熱管と舗装コンクリートの合計概算直接工事費】が最小になり、それ以上の熱伝導率の向上はオーバースペックとなることを示しています。このようにコンクリート舗装材のコストは高くなります【部分最適ではない】が、その他の採熱設備などのコストが低くなることによって、システム全体の合理的な設計ができます。【全体最適】となるのです。

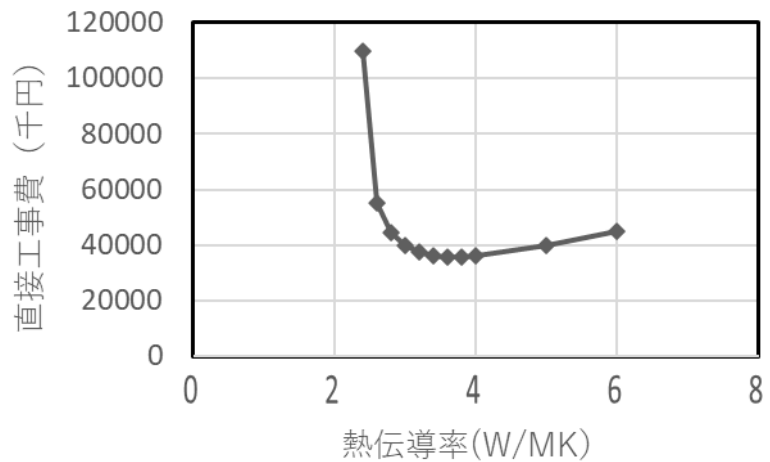


図-5【舗装の熱伝導率】と【採熱管と舗装コンクリートの合計概算直接工事費】の関係

### 3. 開発にあたって行った実証試験と実証実験

#### 3-1 実証試験（室内）

写真-2の恒温槽をマイナス  $1^{\circ}\text{C}$  に設定し、マイナス  $1^{\circ}\text{C}$  に冷やした3種類の熱伝導率の異なるサンプル（ $10 \text{ cm}\times 10 \text{ cm}\times 5 \text{ cm}$ の直方体）の上に氷を置き、サンプルの底面に同流量の水温約  $10^{\circ}\text{C}$ の水を流して熱を供給し、氷の融解する状況を観察しました。



写真-2 使用した恒温槽(協力: ㈱スノーテック新潟)



写真-3 試験開始時



写真-4 試験終了時

写真-3は、試験開始時の状況です。 サンプルは、向かって左から

1-2：普通コンクリート（熱伝導率  $2.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）

2-2：高熱伝導コンクリート（熱伝導率  $6.1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）

3-2：高熱伝導コンクリート（熱伝導率  $3.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）の順番で配置しました。

試験開始から約6分後にサンプル2-2に溶け始めの兆候が見られ、約7分後にサンプル3-2に同様の兆候が見られたが、サンプル1-2は、約16分後によやくわずかではあるが兆候が見られました。写真-4は、試験終了時（開始から約23分後）の状況です。このことにより、熱伝導率を高めることにより、同じ熱エネルギーの下で、放熱量（熱伝導）が大きくなることを確認しました。



実証試験の様子は左のQRからも確認可能

### 3-2 実証実験（新潟県見附市）

新潟県見附市では、見附駅前広場の整備の中で、歩道部に図-6のような地中熱活用のヒートパイプ方式の無散水融雪施設を設置する計画としていました。しかし、ランニングコストが不要ですが、設置費用が高額（80万円/m<sup>2</sup>：推定値）のため、今年度以降に施工する区間（計画融雪幅員1.8m）の全体工事費を縮減することが課題でした。

そこで、検討の結果、費用を安価にする方法として、舗装の熱伝導率を大きくすることで、図-7のように

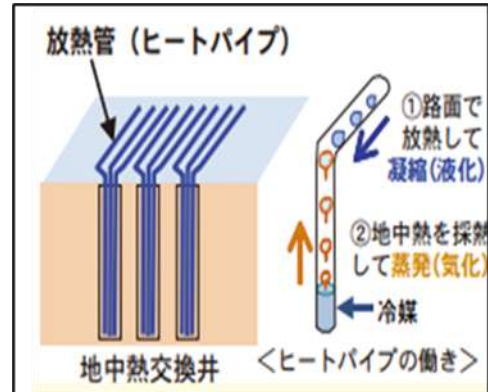


図-6 ヒートパイプ（環境省 HP 地中熱利用にあたってのガイドラインより）

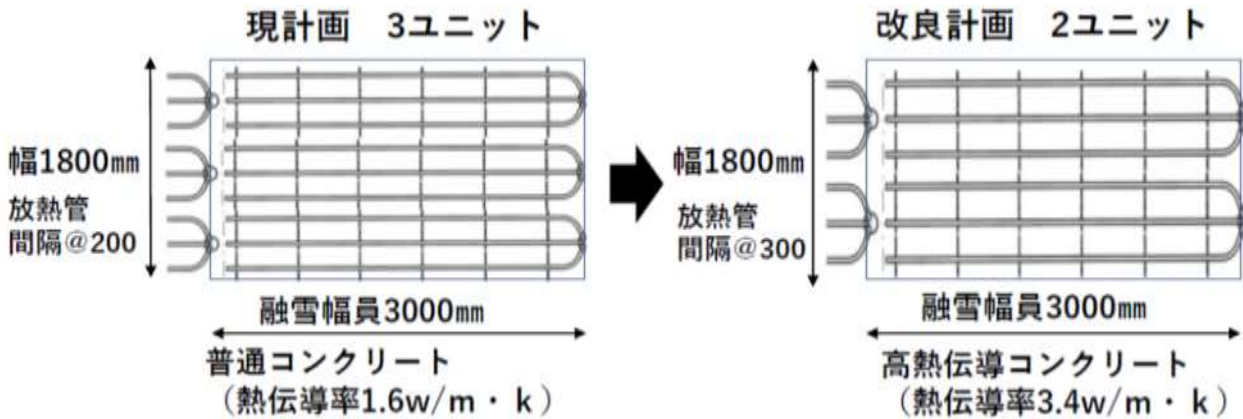


図-7 放熱管拡幅イメージ図

放熱管間隔 200 mmを 300 mm（1.5 倍）に広げることができれば、設置費用は、高熱伝導舗装による費用の増加を加味しても、地中熱交換井 1 本あたりの放熱面積を大きくすることが設計上、可能となり、約 2 割以上のコスト縮減が見込めました。

具体的には、新たに実験部を設けて、

表-2のように融雪能力が同等となるように各種諸元を設定し、一般部との融雪状況を比較検証する実証実験を行うことになり、昨年の冬前に施工を実施しました。

表-2 実証実験の各諸元表

	舗装の設計熱伝導率	融雪幅員	放熱管間隔	地中熱交換井の本数
一般部	1.6W/m·K	1.2m	200mm	2
実験部	3.4W/m·K	1.8m	300mm	2



写真-5 から写真-8 は、それぞれの施工状況と放熱状況です。意匠上、着色顔料を使用しています。



写真-5 実験部施工状況

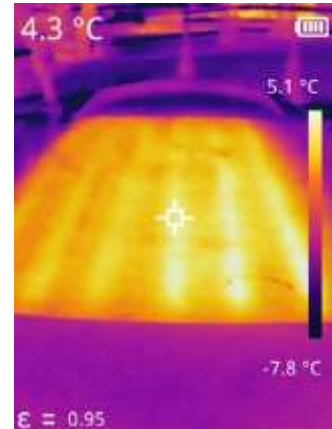


写真-6 実験部放熱状況



写真-7 一般部施工状況

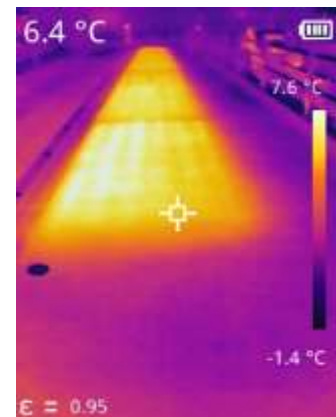


写真-8 一般部放熱状況

昨冬は小雪でしたが、最大降雪（最大積雪深 30 cm、最大時間降雪深 4 cm）を観測した 2023 年 12 月 21 日～22 日の期間において、一般部、実験部とも、設計時間降雪深 2.3 cm に対する融雪能力を満足していました。写真-9, 10 は、最大降雪時の状況です。特に、実験部は、融雪ムラが少なく融雪状況は良好でした。このことから、高熱伝導コンクリートの効果を確認することができました。



写真-9 実験部 (2023. 12. 21)



写真-10 一般部 (2023. 12. 21)

#### 4. 最後に

昨年10月のNETIS登録後から、これまでに官民から複数の問い合わせがあり、中には委託設計業務の中で、比較設計を行うような仕様書になっている案件もあり、関心は高まっていると感じています。

現在の主な課題としては、効率的な高熱伝導コンクリートの製造方法です。

路面に熱を伝える舗装材に、価格は高いが品質が安定している工業製品であるアルミナを骨材として用いることで、未利用熱活用施設の建設コストの低減や脱炭素、省エネ化が図れ、アルミナを使用した高熱伝導コンクリートのポテンシャルは高いものと考えます。この技術が、GX(グリーントランスフォーメーション)の実現に寄与し、そして質の高い道路空間の形成にも資すると思えます。

今後は社会実装に向けて諸課題に取り組んでいきたいと思えます。

なお、当社(東邦産業株)のホームページのお知らせ欄に、「高熱伝導コンクリート」に関して、これまでイベントや雑誌で発表してきた論文などを掲載していますので、ご覧いただければ幸いです。

#### 《参考文献》

- 1: 美寺寿人・五十嵐祐司・佐伯竜彦・上石勲: 高熱伝導コンクリートに関する研究, 令和2年度北陸地方整備局事業研究発表会, 令和2年9月
- 2: 国土技術政策総合研究所資料 第1158号2021年3月 BDASHプロジェクトN0.35 ヒートポンププレスで低LCCと高COPを実現する下水熱融雪システム導入ガイドライン(案)
- 3: 美寺寿人、佐伯竜彦: 高熱伝導コンクリート舗装に関する研究について, 土木施工2021Nov, pp.30-34
- 4: 美寺寿人・五十嵐悠介・浅野宏・佐伯竜彦: 高熱伝導コンクリートにおける実用化に向けた取り組みについて, 第76回セメント技術大会講演資料, 令和4年5月
- 5: 美寺寿人・佐伯竜彦・岡田明也・野本孝史・浅野宏: 北海道の未利用熱活用に資する高熱伝導舗装を用いた無散水融雪, 第38回寒地技術シンポジウム報告論文, 令和4年11月
- 6: 美寺寿人・佐伯竜彦・岡田明也・野本孝史・浅野宏:  
計熱伝導率という新しい概念を! 未利用熱エネルギーの活用に資する高熱伝導コンクリート, セメント・コンクリート2023.8, pp.14-21
- 7: 美寺寿人・浅野宏: 設計熱伝導率という新しい考え方 ロードヒーティングのコスト縮減に寄与する高熱伝導舗装について, 令和5年度 第35回 日本道路会議, 令和5年11月

#### 本論文に関する問い合わせ先

東邦産業株式会社 取締役副社長 美寺寿人 (MITERA HISATO)

〒951-8124 新潟市中央区医学町通2番町10番地1

TEL 025-228-0168 e-mail: hisato@tohos.co.jp

高熱伝導コンクリートに関する記事は、当社ホームページの【お知らせ】に掲載しています。



当社ホームページ

<https://www.tohos.co.jp>



技術名称: 高熱伝導コンクリート

NETIS登録番号: HR-230007-A