

GX の展開に寄与する高熱伝導コンクリートの技術について 未利用熱が活用できる無散水融雪施設の舗装用コンクリートと製造方法について

美寺寿人*1 浅野宏*2 五十嵐直人*3

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 $1.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ とされています。「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倍になるとどうなるのでしょうか。」

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 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、2019年10月からチャレンジしました。

開発過程において、無散水融雪施設の舗装の熱伝導率を向上すると、北海道や多積雪地において、 10°C 前後の下水道熱や地中熱といった未利用熱を、再加熱しないで活用できることが、わかってきました。

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、安価で効率よく、現場で製造する方法について紹介します。

2. 高熱伝導コンクリートの技術の概要と特徴

2. 1 技術 (NETIS 登録番号 HR-230007-A) 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 (Al_2O_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磚子、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。

2. 1. 2 高熱伝導コンクリートの試験室での製造

コンクリートの標準配合は、新潟太平洋生コン (株) の新潟工場での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 (1DAY 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

4.5 N/mm^2 を保証するものとししました (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) 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「 $36 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (25°C)」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、5ケースの配合について製造しました。

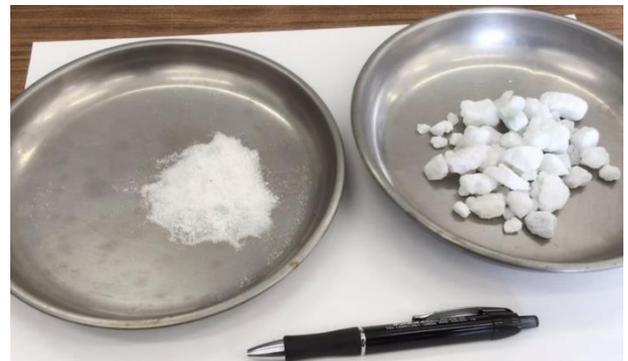


写真1 使用したアルミナ骨材

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 」 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ という非常に高い値が得られました。

標準配合と5ケースの配合について、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、次頁の式1のような相関式となります。

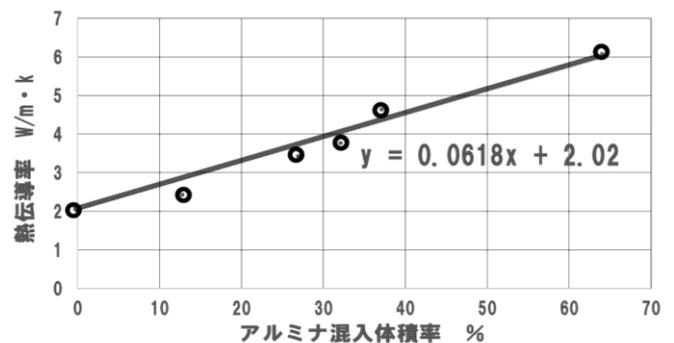


図1 アルミナ混入体積率と熱伝導率の関係図

*1 東邦産業株式会社

*2 新潟太平洋生コン株式会社

*3 見附市建設課

Y : 熱伝導率 (W/m·K) = 0.0618 (W/m·K·%) ×

X : アルミナ混入体積率 (%) + 2.02 (W/m·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。

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。

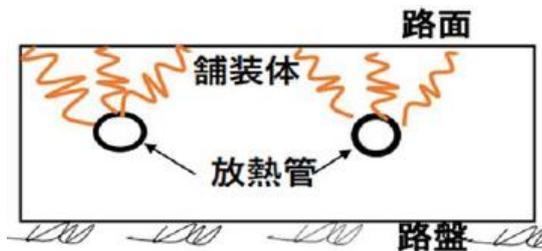


図2 ロードヒーティング断面模式図

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、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】²⁾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。

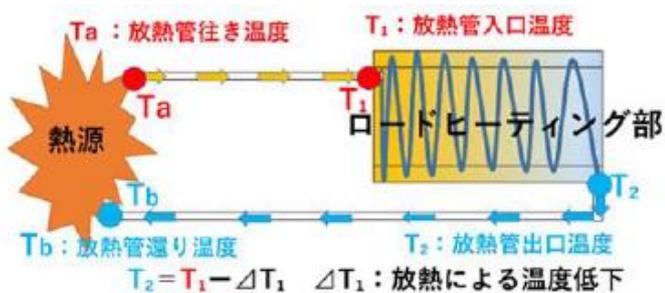


図3 ロードヒーティング模式図

ゆきみらい 2025in 上越 (2025. 1. 30~31) 発表論文
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個所は、「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。

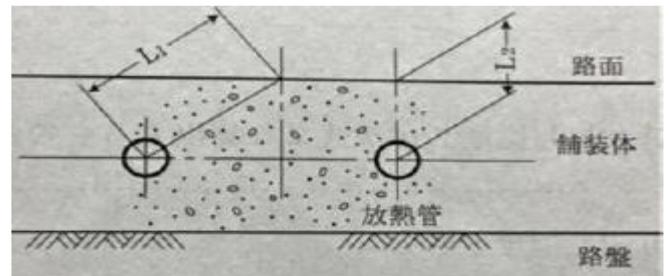


図4 放熱管と舗装体、路面 (出典: 要領より)

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

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 : 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/m²) L1 : 放熱管中心から路面までの最長距離 (m) L2 : 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L₁、L₂」が長くなると大きくなり、「舗装体の熱伝導率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 \bar{T} 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: 200m²・単位面積当たり必要熱量q: 250W/m² (道央地区)・上部放熱量qu: 225W/m²・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10m²・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°C (推定値)・L₁0.087m・L₂0.1m

- 路面温度T_m (凍結防止を考慮) 1°C

熱伝導率を1.6~6 W/m²・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

熱伝導率λ (W/m ² ・K)	放熱管行き 温度Ta(°C)
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

表1の見方として、熱伝導率が1.6 W/m²・Kの時の放熱管行き温度は、16.3°Cが必要な温度となり、熱伝導率が6 W/m²・Kの場合は、その値が6.7°Cとなり、約10°C低下することができます。

活用できる下水熱を12°Cとしますと、熱の不可逆性で12°C以上にはヒートポンプ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/m²・Kの範囲ではヒートポンプ

での利用はできないことになります。

熱伝導率を2.4 W/m²・K以上にすることによって、放熱管行き温度を12°C未満にすることができます。

つまり、熱伝導率1.6~2.3 W/m²・Kの範囲では12°Cの下水熱の活用ができませんが、熱伝導率を2.4 W/m²・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/m²の条件をクリアできるのです。

また、熱伝導率を6 W/m²・Kにすることによって、放熱管行き温度を7°C以下にすることができます。

このことは、7°C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 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 W/m²・Kの生コンクリートは、1m³当たり約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

ゆきみらい2025in上越(2025.1.30~31) 発表論文 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。

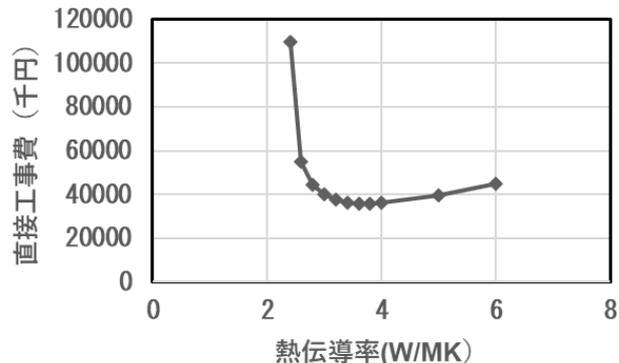


図5 関係図(熱伝導率と直接工事費)

熱伝導率を変数として採熱管の設計を行い、図5は、舗装の熱伝導率が、3.8 W/m²・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、【全体最適】となるのです。

3. 開発にあたって行った実証試験

3. 1 実証試験(室内)

写真2の恒温槽をマイナス1°Cに設定し、マイナス1°Cに冷やした3種類の熱伝導率の異なるサンプル(10cm×10cm×5cmの直方体)の上に氷を置き、図6のポンチ絵



のようにサンプルの底面に同流量の水温約10°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:(株)スノーテック新潟)



図6 実験ポンチ絵

写真3は、試験開始時の状況です。



写真3 試験開始時

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分後よう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。



写真4 試験終了時

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

3. 2 実証実験(屋外)

別途論文発表する令和5年度に新潟県見附市において施工した実証実験報告【見附駅前広場の無散水融雪施設に使用した高熱伝導コンクリートについてヒートパイプ方式の融雪施設のコスト削減効果を実証】を参照してください。

4. 高熱伝導コンクリートの製造方法の技術の概要

4. 1 製造方法の課題

ゆきみらい 2025in 上越(2025.1.30~31) 発表論文
令和5年度の施工においては、当初、生コン工場で骨材をアルミナに代えて高熱伝導コンクリートを製造することを想定していました。

しかし、実際に直面すると、アルミナ骨材が高価、かつ使用数量が少ないなどの理由により、生コン工場でのアルミナ専用サイロの設置ができず、生コン工場での製造が困難となりました。



写真5 全景

そこで、現場練りでの製造に切り替えて、生コン工場で製造したセメントミルクと粗骨材を別々の

アジテータ車で現場に運び、それらとアルミナ骨材を可搬型の電動式の傾胴式ミキサー

(120%)を使用して混合する方法により、作業員7人掛で約 1m^3 (1バッチ当たり 88%)を10バッチの製造を約半日かけて行いました。

写真5~7は、当時の現場写真です。

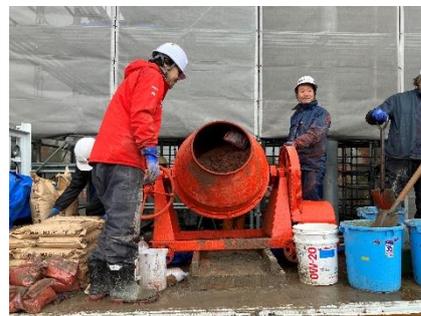


写真6 傾胴式ミキサー



写真7 打設状況

この方法による 1m^3 当りの製造費用(材料費を含まない)は、1日当たり 4m^3 製造できたとした場合でも、直接工事費ベースで約7万円となります。

一方、令和5年度は、約 1m^3 の高熱伝導コンクリートの製造でしたが、令和6年度は、約 6m^3 の製造を予定しています。

同じ方法で製造するには、昨年度の6倍の量なので、困難が予想されました。

高熱伝導コンクリートを全国に普及するには、製造方法の効率化とコスト削減対策が課題でした。

4. 2 製造方法の技術概要

4. 2. 1 アジテータ車を使用した製造方法

上記の課題に対して、移動プラントでの製造を検討しました。しかし、製造方法の効率化は満足しますが、製

造コスト（1m³当り7万円以上）と汎用機械ではないことが課題でした。

そこで、以前からアイデアとして持っていた【アジテータ車を使用した製造：アルミナ以外を生コン工場で製造して、現場で運搬してきたアジテータ車にアルミナを投入して混合する方法】について検討を始めました。

まず、アルミナが高価であることから、砂をアルミナに見立てて実験を行い、アジテータ車で製造できることを確認しました。

その成果を生かしてアルミナを用いて、実験を行いました。

その内容は、令和5年度の見附駅前広場の無散水融雪施設に使用した高熱伝導コンクリートの1m³の配合の内、アルミナ骨材を除いた【セメント・砂利25mm・水・混和剤】の1m³相当を新潟太平洋生コン(株)新潟工場の実機ミキサーで練り混ぜ、それをアジテータ車に積み込み、実験ヤードまで運搬（距離約50km）し、アルミナを投入後に高速攪拌により混合し生コンを製造する方法です。大まかな工程については以下のとおりです。

1) 工場の実機ミキサーで1 m³相当の配合からアルミナ抜きで計量し、練り混ぜる。

↓ 現場へアジテータ車で運搬

2) アルミナをアジテータ車に積み込み高速攪拌を行い練り混ぜる。

①空気量調整剤を投入後、アルミナ 1/2 相当を高速攪拌しながらアジテータ車に投入し、投入完了後3分間高速攪拌を行う。

②残りのアルミナ 1/2 を投入し高速攪拌を3分間行う。

③その後、3分間ドラムを低速攪拌する。

3) 所定の空気量が確認を行う。OK→製造完了

写真8～11は、実験時の写真です



写真8 使用したアルミナ



写真9 アルミナ投入状況1



写真10 アルミナ投入状況2



写真11 高熱伝導コンクリート打設状況

4. 2. 2 均一性を確認する方法

練り混ぜの均一性を確認する方法は、アジテータ車から排出されるコンクリートの前半部（始め）、中間部（中間）、後半部（最後）のそれぞれの部分で試料を採取し、性状試験、圧縮強度試験及び熱伝導率測定を行うほかに、生コン工場のバッチミキサーなどに適用するJIS A 8603-2の練り混ぜ性能試験方法を準用し、単位体積当たりのモルタル量と粗骨材量の測定を行いました。測定結果を表2、次頁の表3に示します。

表2 採取位置毎の各種試験数値の表

採取位置	スランブ	空気量	圧縮強度 (材齢28日)	熱伝導率
	c m	%	設計値 21N/mm ²	実設計値3.8 W/m k
始め	7	3.6	35.8N/mm ²	3.97 W/m k
中間	10.5	6.8	35.5 N/mm ²	4.14 W/m k
終り	15	7.8	34.9 N/mm ²	3.97 W/m k

表 3 採取位置毎の各測定値 (JIS A 8603-2 準用)

採取位置	コンクリート中のモルタルの単位体積当たりの質量 (kg/m ³)	コンクリート中の単位粗骨材量 (kg/m ³)
始め	2,877	1,063
中間	2,913	1,099
終り	2,910	1,020

4. 3 製造方法の技術の評価

アジテータ車を使用した高熱伝導コンクリートの製造方法について、準用した JIS 生コン工場のミキサーの練り混ぜ性能試験 (JIS A 8603-2: アジテータ車は適用外) の規格値と測定値等の関係を表 4 に示します。

表 4 測定結果と準用した JIS A 8603-2 練り混ぜ性能試験方法の規格値との関係表

No.	試験の種類	規格値	測定	判定
		許容差	結果	
		(%)	(%)	
1	コンクリート内のモルタル量の偏差率 ΔM	0.8	0.64	規格値内
2	コンクリート内の粗骨材量の偏差率 ΔG	5	3.72	規格値内
3	圧縮強度の偏差率 $\Delta \sigma$	7.5	1.27	規格値内
4	熱伝導率 (アルミナ混入率) の偏差率 ΔW	5 (※1)	2.1	規格値内

偏差率 = (最大値 - 最小値) / (最大値 + 最小値) %

※1: 熱伝導率の偏差率は、JIS の規格値にはない項目熱伝導率とアルミナ細骨材量は正の相関関係があることから、粗骨材量の規格値の許容差を準用する。

性状試験の空気量とスランプのバラつきがありました。が、「圧縮強度」の偏差率が規格値許容差内であることから、それぞれの強度測定用の供試体中の空気量のバラつきは、小さいものと推測できます。

これは、現地での 1 日養生した際に、ミキサー車で攪拌した際に巻き込まれた空気が外部に出たものと推測されます。

「モルタル量」・「粗骨材量」・「圧縮強度」は、それぞれの規格値を満足していることから、コンクリートは均一に練り混ぜられていると推測できます。

また、熱伝導率のバラつきも小さかったことから、アルミナ骨材も均一に練り混ぜられていると推測でき、スランプのバラつきがコンクリート打設に悪影響を与えることもありませんでした。

また、1m³当りの製造費用は、直接工事費ベースで約 1 万円 (製造規模: 約 6m³) となり、大幅にコストダウンできました。

以上のことから、アジテータ車を使用した製造方法は、高熱伝導コンクリートの製造方法として妥当な方法であると考えます。

5. 最後に

この製造方法は、特殊機械などを必要としないことから、全国どこでも簡単に製造できます。(特許出願済)

当初は、「そんなので、できるの?」と思う方が、多数いました。

この製造方法開発の最大のボトルネックは、「アジテータ車は生コンを運ぶ車で、練り混ぜなんかできないという私たちの既成概念」でした。

しかし、やってみたら、上手くいきました。

今回の実験結果を踏まえて、高熱伝導コンクリート製造仕様書と積算資料を作成し、令和 6 年度の見附市の工事に適用していく予定です。

また、【NETIS 登録技術: 高熱伝導コンクリート】の製造方法に関する事項の変更も行う予定です。

路面に熱を伝える舗装材に、価格は高いですが、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考えます。

謝辞

今回の製造方法の開発において、新潟大学の佐伯教授、日本軽金属(株)、日軽産業(株)、吉田建設(株)に、多大なご協力を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

《参考文献》

- 1: 美寺寿人・佐伯竜彦・浅野宏: 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関する高熱伝導コンクリート, 月刊コンクリートテクノ 2024 Jun, pp. 41-47
- 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 NO. 35 ヒートポンプで低 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・岡田明也・野本孝史・浅野宏: 北海道の未利用熱活用に関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
- 4: 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削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