

### 1-3 社会基盤等を活用した省エネ及び都市の気候緩和に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 10～平 14

担当チーム：新材料チーム

研究担当者：明嵐政司、木嶋 健

#### 【要旨】

本研究では、熱電素子で構成された路面発電システムを利用して、都市部における温度上昇を緩和する方策、および使用電力の削減を目的としたロードヒーティングシステムを提案し、その効果について検討を行った。都市の気候緩和について、数値計算モデルにより効果を算定したところ、路面温度が、東京で最大 1.59℃、大阪で最大 1.25℃低下した。路面温度の低下に寄与する要因として、路面発電システムの発電機能や熱伝導機能が考えられるが、この中では熱伝導機能による温度低下の割合が大きいと判断された。また、ロードヒーティングシステムに適用して省エネ効果を算定したところ、札幌で約 1.9 倍、新潟で約 3.2 倍の効果が得られることが確認された。

キーワード：路面発電システム、ロードヒーティングシステム、熱電素子、路面温度、消費電力

#### 1. はじめに

都市部においては、道路舗装やコンクリート構造物など、熱容量の大きい構造物で覆われた空間が形成されており、赤外放射熱等による温度上昇が生じやすい環境となっている。特に、路面は太陽熱エネルギーにより真夏には約 70℃以上にまで上昇し、都市部の温度を上昇させる原因の一つとなっており、路面温度を低下させることは重要な課題の一つである。一方、積雪寒冷地域においては、凍結防止方法および融雪方法の一つとしてロードヒーティングシステムが多用されているが、ランニングコストの削減が急務となっており、省エネ効果をもつロードヒーティングシステムの開発が求められている。本研究では、都市部における温度上昇を緩和する方策、および、省エネ効果をもつロードヒーティングシステムの一つとして、熱電素子で構成された路面発電システム（Road Electric Generation System）を提案した。

路面発電システムを都市の気候緩和に用いる場合、路面に供給される太陽熱エネルギーを電気エネルギーへと変換する熱電素子の発電機能、および、路面に供給された太陽熱エネルギーを地中へと移動させる熱電素子のヒートポンプ機能を用いる。このような熱電素子の発電機能及び熱伝導機能を用いることにより路面温度の低下を図ることが可能となる。一方、路面発電システムをロードヒーティングシステムとして用いる場合には、地中熱を汲み上げて路面より放熱させる熱電素子のヒートポンプ機能のみを用いる。

路面に供給された太陽熱エネルギーにより、路面発電システムの上下面に温度差が生じると、熱電素子のゼー

ベック効果により、太陽熱エネルギーが電気エネルギーに変換される。さらに、変換された電気エネルギーは路面発電システムを構成する回路に電流として流れ、熱電素子のペルチエ効果により、高温部では吸熱し低温部では放熱する現象を生み出す。このように、太陽熱エネルギーにより高温となった道路舗装表面から熱が吸収されることにより路面温度は低下する。一方、路面発電システムに電気を供給すると、熱電素子のペルチエ効果により、高温部である地中から熱を汲み上げ、低温部である路面から熱を放出する。既存のロードヒーティングシステムは、ジュール熱のみによる発熱であるが、本システムは、地中熱とジュール熱の両方を用いており、消費電力が従来システムに比べて著しく低減する。以下では、路面発電システムの効果について検討を行った結果を報告する。

#### 2. 研究方法

本研究では、路面発電システムの効果を、数値計算モデルに基づくシミュレーション計算により評価するものである。本数値計算モデルは、一次元熱輸送モデルを基本として構築したものであり、適用にあたっては実験値との比較検討を行った。路面発電システムを都市の気候緩和に適用する場合には、東京および大阪を対象にシミュレーション計算を実施して評価するものとした。また、路面発電システムをロードヒーティングシステムに適用する場合には、札幌および新潟を対象にシミュレーション計算を実施して評価するものとした。

### 3. 研究結果

#### 3.1 熱電素子材料<sup>1)</sup>

二種類の材料 a, b で構成された図-1 の接合回路において、片方の接合部を加熱し、もう片方の接合部を冷却すると、接合回路の端子間に開放電圧が生じる。このような効果はゼーベック効果と呼ばれ、端子間に外部抵抗を接続すると電気エネルギーを取り出すことができる。一方、上記と同様の材料 a, b で構成された図-2 の接合回路に電流を流すと、片方の接合部で熱を吸収し、もう片方の接合部で熱を放出する。このような効果はペルチエ効果と呼ばれ、ゼーベック効果と併せて路面発電システムによる吸熱・放熱作用の基本原則となっている。

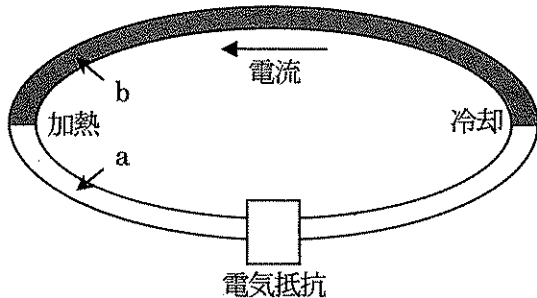


図-1 ゼーベック効果の概念図

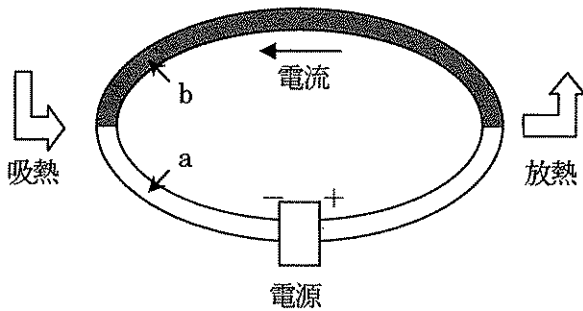


図-2 ペルチエ効果の概念図

路面発電システムは、構成要素である熱電素子を直列に結合したものである。熱電素子は、図-1, 2 に示す材料 a, b の代わりに p 型熱電半導体と n 型熱電半導体を用いたものであり、一つの接合対を形成している。路面発電システムとする場合には、p 型熱電半導体と n 型熱電半導体の接合部に、抵抗率及び熱伝導率が半導体に比べて極めて小さい金属電極を適用した Π 型素子を用いる。路面発電システムを道路に適用する場合には、図-3 に示す通り、路面発電システムを表層直下の基層に設置するのが適当と考えられる。路面発電システムの一方の面を加熱すると接合回路には直流電流が生じ、熱電素子のペルチエ効果により、加熱された高温部では吸熱作用が、もう一方の低温部では放熱作用が生じる。

次に、路面発電システムが常温付近で適用されることを考慮して、常温付近で性能を最大限に発揮する熱電素子について概観する。図-4 は、現在までに開発されている熱電素子の無次元性能指数 (ZT: 性能指数×絶対温度) を示したものである。図-4 を見ると、常温付近で性能を最大限に発揮する熱電素子は Bi-Te (ビスマス・テルル) 系であり、その値は 1 程度となっていることが分かる。近年、無次元性能指数が 3 に達するような Bi-Te/Sb-Te 系の薄膜超格子構造素子が開発されている。

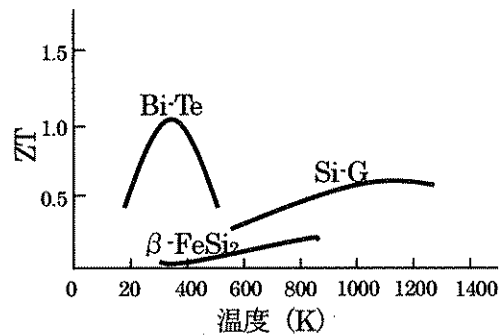


図-4 熱電材料の性能指数  
(日経メカニカルニュース (2000.7) より作成)

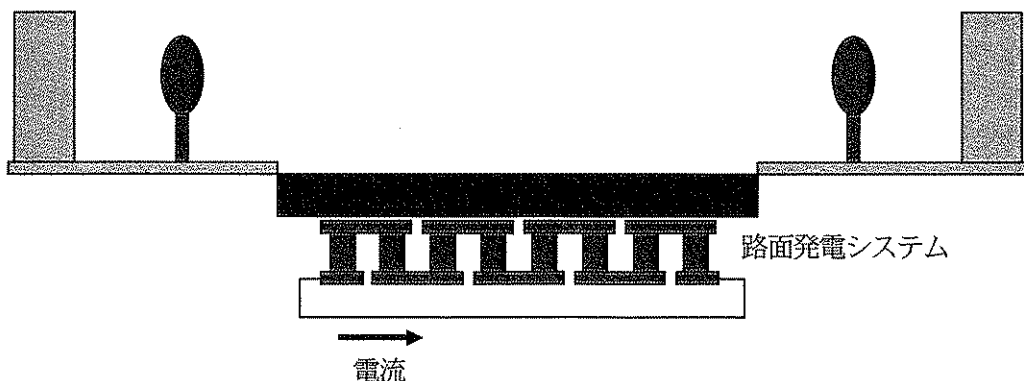


図-3 路面発電システムのイメージ図

しかし、積層構造の厚さは  $10\mu\text{m}$  程度となっており、路面発電システムとして用いる場合には、システム上下面に十分な温度差を形成することが課題となる。

代表的な熱電素子材料に関する性能指数は下記の通りである。

- ① Bi-Te 系熱電素子材料 (性能指数: 約  $3\sim 4 \times 10^{-3}$ )  
 現在、室温から数  $100^\circ\text{C}$  の温度範囲で最も多く使用されており、他の熱電素子材料に比べて性能指数が一桁高い。
- ②  $\beta\text{-FeSi}_2$  系熱電素子材料 (性能指数:  $0.3 \times 10^{-3}$ )  
 耐熱性があるため性能指数は低いが、高温度領域で使用されている。
- ③ SiGe 系熱電素子材料 (性能指数:  $0.25\sim 0.4 \times 10^{-3}$ )  
 耐熱性・機械的強度があり、高温度領域での熱電性能が高い。

現在、開発に重点がおかれている熱電素子は、数  $100^\circ\text{C}$  の高温で動作するものが中心となっている。常温付近で性能を発揮する熱電素子材料は Bi-Te 系が中心となっており、現時点で最大の効果を発揮する素子は、無次元性能指数が 1.2 程度、性能指数が  $4 \times 10^3 \text{K}^{-1}$  程度のものである。Bi-Te 系熱電素子材料の当面の開発目標は、性能指数を今後 5 年以内に現在の 2~3 倍に増大することとされている。また、Bi-Te 系熱電素子材料は、毒性が強いため環境に及ぼす影響が懸念されている。さらに、Te (テルル) の埋蔵量が少ないために資源的にも問題があると考えられている。路面発電システムへの適用にあたっては、これらの点も十分に踏まえて検討することが必要である。一方、 $\beta\text{-FeSi}_2$  系熱電素子材料は、Bi-Te 系熱電素子材料のように毒性の問題が存在せず、安価で大量供給することが可能なため、使用面・供給面での問題は生じないと考えられる。しかし、性能指数が Bi-Te 系材料に比べて一桁低いために、発電量・吸熱量等に及ぼす効果は Bi-Te 系材料に比べて低くなると考えられ、適用にあたっては、効果について十分に検討することが必要である。

熱電素子の機械的物性値については、弾性係数が  $40\text{GPa}$ 、圧縮強度が  $20\text{MPa}$ 、引張強度が  $9\text{MPa}$  程度となっている<sup>2), 3)</sup>。熱電素子を改良すると、圧縮強度は  $50\text{MPa}$  程度にまで上昇する。一方、圧縮強度の疲労特性について実験した結果では、載荷重が  $5\text{MPa}$  の場合に 100 回の試験回数で破壊に至った。熱電素子を路面発電システムとして用いる場合には、載荷重に対して強度が十分に確保されるような構造とすることが重要である。本研究では、熱電素子をアルミ枠で強化したモジュールと仮定して検討を行った。実際に適用する場合について

も、モジュールとして使用することが適当と考えられる。

### 3.2 数値計算モデル<sup>4), 5), 6)</sup>

数値計算モデルは、運動量の輸送方程式、大気中の熱輸送方程式、地表面熱収支式、土壌中の熱輸送方程式の 4 方程式から構成される。本モデルにおいては、取り扱いを簡単にするため、鉛直方向の一次元モデルを基本とした。本数値計算モデルの概念図を示すと、図-5 の通りになる。

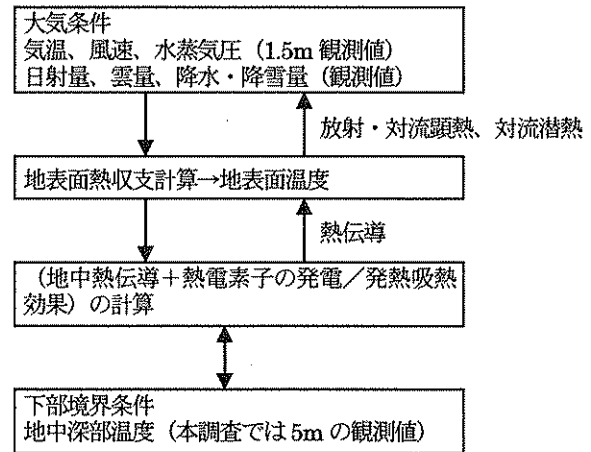


図-5 数値計算モデルの概念図

本計算モデルにより観察される路面発電システムの特性は以下の通りになる。一般に、発電量あるいは吸熱量とシステムの性能指数・システム上下面の温度差・システム上面の温度・システムの熱伝導率との間には、下記のような関係式が成立する。

$$[\text{発電量}] \propto [\text{システム性能指数}] \times [\text{システム上下面の温度差}]^2$$

$$[\text{吸熱量}] \propto [\text{システム性能指数}] \times [\text{システム熱伝導率}] \times [\text{システム上面の温度}] \times [\text{システム上下面の温度差}]$$

発電量を増大させるためには、性能指数を向上させると同時に、システム上下面の温度差を増大させることが重要である。現状では、性能指数の向上に限界があるため、システム上下面の温度差を増大させることが課題となる。一方、吸熱量を増大させるためには、システム上下面の温度差を増大させる他、システムおよびシステムに接触する材料の熱伝導率について性能を向上させることが重要と考えられる。一般に、路面発電システムとし

て使用する熱電素子の大型化を図り、システム上下面の温度差を増大させることが機能の向上に大きく寄与すると考えられる。

### 3.3 実験値との比較

本数値計算モデルの適用性を調査するため、路面発電システムを設置した柱状供試体による室内実験を行って比較検討した。柱状供試体の作成にあたっては、鉛直方向の一次元性を確保するため、周囲を断熱材で囲うものとした。また、計算条件を単純化するため、路面発電システムの下部は乾燥砂で敷き詰め、底面は恒温槽に接触させて一定温度に保つものとした。実験にあたっては、柱状供試体の上面にランプを照射するものとした。供試体の概要は図-6に示す通りである。

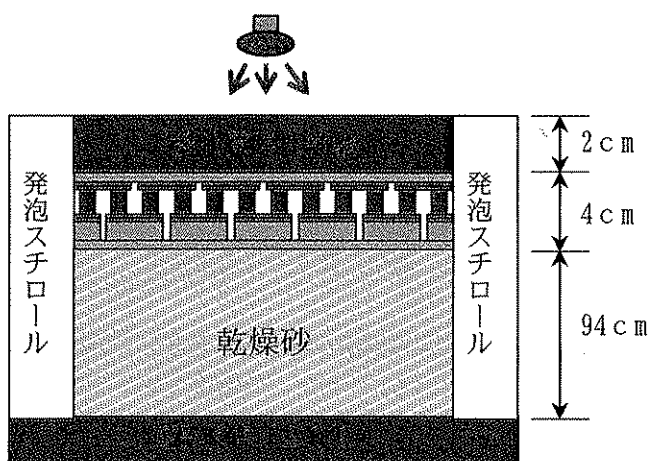


図-6 柱状供試体の概要

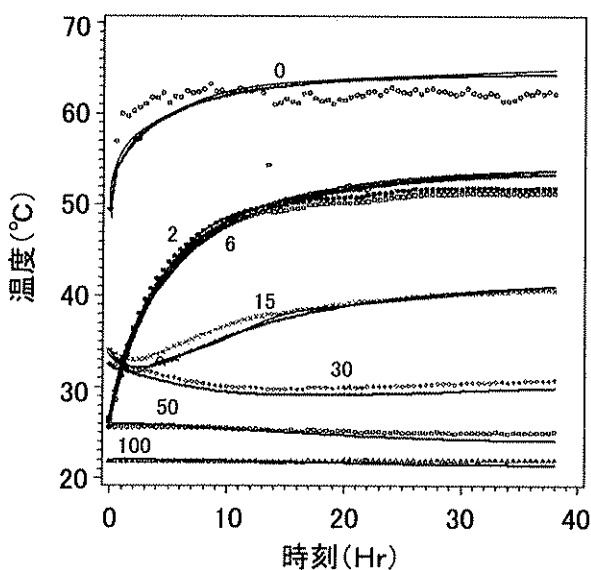


図-7 実験値との比較結果

図-7は、供試体上面にランプを照射した場合の鉛直方向の温度分布について、数値計算モデルと実験値とを比較した結果を示したものである。なお、図中の数字は地表面からの深さ、○△×等は実験値、実線は計算値を示している。図-7によると、計算値と実験値とは比較的良く一致しており、鉛直方向に一次元性が確保されている場合には、本計算モデルが十分に適用できることが確認された。

### 3.4 都市気候の緩和効果

数値計算にあたっては、表層、基層、路盤から構成される道路構造を対象とした。表層としてアスファルト舗装、基層として、路面発電システム+アスファルトを想定した。路面発電システムを構成する熱電素子モジュールの特性値を表-1に示す。表-1は、現時点で製造可能なBi-Te系材料を対象として設定されたものである。

表-1 熱電素子モジュールの特性値

	単位	
熱伝導率	W/K	0.6
内部抵抗	Ω	1.4
ゼーベック係数	V/K	0.024

東京、大阪の2地点で測定された1995年1月～1995年12月の気象データを用いて、路面発電システムが気温に及ぼす影響を、一次元を仮定した数値計算モデルにより調査する。ここでは、4cmの密粒アスコン、4cmの路面発電システム、4cmの密粒アスコン、50cmの路盤で構成された道路構造を想定した。路面発電システムを設置した場合の路面温度の変化は、図-8に示す通りである。路面発電システムの設置による路面温度の低下量は、東京で最大1.59℃、大阪で最大1.25℃である。いずれも、ヒートアイランドが問題となる夏季8月における数値である。一方、夜間においては、路面発電システムの設置により、東京で最大1.0℃、大阪で最大0.87℃上昇する。これもヒートアイランドが問題となる夏季8月の数値である。これは、路面発電システムの熱電変換作用により、地中温度の方が低くなる日中においては、上面で吸熱が、下面で放熱が行われるが、地表面温度の方が低くなる夜間においてはこれと反対の現象が起きていることを示している。なお、夜間における路面温度の上昇は、路面発電システムの機能を停止させることにより、ある程度抑えることができると考えられる。また、地表面温度の低下量から気温の低下量を推定すると、東京で最大0.48℃、大阪で最大0.44℃となる。

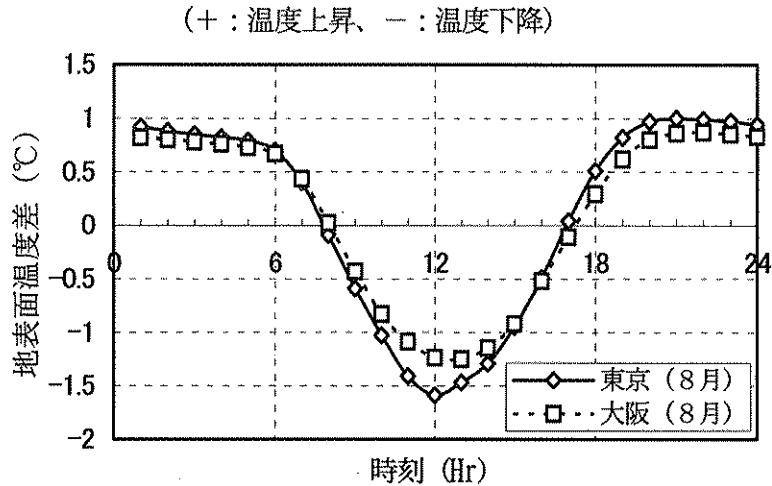


図-8 路面温度の変化

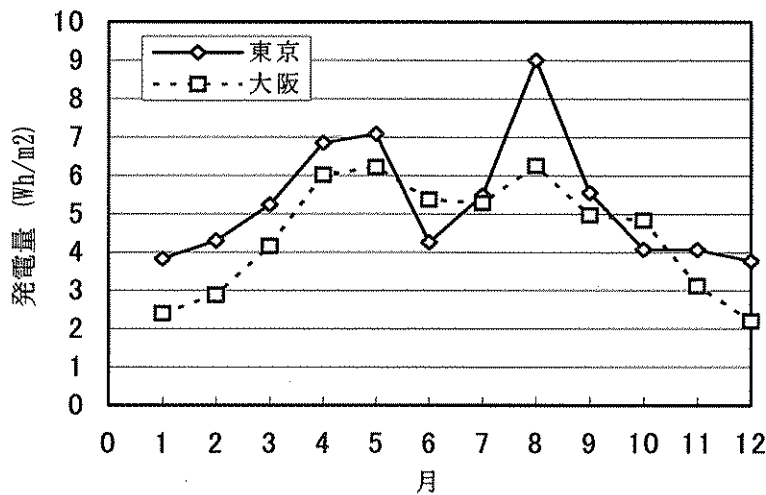


図-9 発電量の年間推移

発電量の年間推移を示した結果は図-9に示す通りである。通年で見ると、東京で  $63.51 \text{ Wh/m}^2$ 、大阪で  $53.67 \text{ Wh/m}^2$  となる。効率 (発電量/日射量) を見ると、東京で  $0.0051\%$ 、大阪で  $0.0046\%$  と非常に低くなっていることが分かる。これより、路面温度の低下は、発電よりも熱伝導による部分が大きいと判断される。

### 3.5 ロードヒーティング効果

札幌、新潟の2地点で測定された1994年12月～1995年12月の気象データを用いて、路面発電システムをロードヒーティングシステムとして適用した場合の効果を、一次元を仮定した数値計算モデルにより調査する。ここでは、5cmの密粒アスコン、4cmの路面発電システム、6cmの密粒アスコン、50cmの路盤で構成された道路構造を想定した。路面発電システムの運転方法としては、

下記に示す方法を用いた。

- ① 初期電流  $0.005 \text{ A}$  を通じる。
- ② 時間ステップごとに残留積雪を時間で溶かすために要するエネルギーフラックスとシステムから上部に向かう熱フラックスを比較し、その大小により  $0.005 \text{ A}$  だけ電流を増減させる。ただし、最大電流  $10 \text{ A}$  を超えないものとする。
- ③ 地表面熱収支の計算により、地表面温度が  $0^\circ \text{C}$  以上に計算された場合に融雪が生じるとし、融雪量を求める。部分的な融雪であれば、地表面温度を  $0^\circ \text{C}$  に保持し、完全に融雪された場合は、地表面温度を再計算する。

札幌、新潟における融雪運転の結果は、表-2に示す通りである。消費電力効率は投入電力と融雪エネルギーの比で表すものとし、値の低い方が効率が高くなっている。

ることを表している。また、融雪エネルギーは0℃の雪の融解エネルギーとする。

表-2 消費電力の効率

	月	降雪時間 (h)	消費電力効率
札幌	1	96	0.801
	2	54	0.242
	3	20	0.067
	11	37	0.0795
	12	131	0.616
	年間計	338	0.528
新潟	1	96	0.358
	2	22	0.080
	3	1	0.000
	11	0	—
	12	52	0.286
	年間計	171	0.306

本シミュレーションの結果をまとめると、下記の通りになる。

- ① 札幌では、降雪時間 338 時間に対して、融雪運転時間（通電した時間を 5 秒単位で積算した時間）353 時間を要した。また、新潟では、降雪時間は 171 時間に対して融雪運転時間 181 時間を要した。
- ② 融雪に要した電力は月によって大幅に変化した。これは、初冬、早春は表層地中温度が高いため、微小な通電によって（あるいは通電しなくても）地中からの熱フラックスにより融雪されるケースが多いためと考えられる。
- ③ 通年で融雪エネルギーに対する投入電力量の比は、札幌で 0.53、新潟で 0.31 と評価される。

#### 4. まとめ

路面発電システムを都市気候の緩和方策ならびにロードヒーティングシステムとして適用した場合について、数値計算モデルに基づくシミュレーションを行った結果、下記の通りにまとめられた。

- ① 都市気候の緩和方策として適用した場合、今回の計算ケースでは路面発電システムの効果が大きく現れなかった。表層・基層・路盤等構成材料の熱伝導率を適切な値とすることにより、路面温度の低下が図られる可能性はある。
- ② ロードヒーティングシステムとして適用した場合、

消費電力効率が札幌で 0.53、新潟で 0.31 となる結果が得られた。ロードヒーティングシステムとしての利用は、消費電力を大きく低減させると考えられる。

今後、費用対効果を踏まえて、路面発電システムをロードヒーティングシステムとして実際に適用するための検討を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 上村欣一、西田勲夫、熱電半導体とその応用、日刊工業新聞社、1988
- 2) Howard T. Leong and Richard T. Martorana, "Finite-Element Thermal Stress Analysis of Thermoelectric Cooler", Proc. Of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Thermoelectrics, Arlington, Texas USA, pp86-89, 1980
- 3) 渡部 充、中田芳雄、鎌田真一、Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>系 p 型熱電半導体の熱電特性および圧縮強度に及ぼす凝固速度と Pb の影響、秋田大学鉱山学部研究報告、第 9 号、pp41-48、1988
- 4) 木嶋 健、明嵐政司、路面発電システムが気温に及ぼす影響、土木技術資料 42-3、pp60-63、2000
- 5) S. Meiarashi et al., "Road Electric Generation System with Use of Solar Power", Proc. of the American Power Conference, Vol.59.1, pp265-270, 1997
- 6) 木嶋 健、明嵐政司、熱電素子で構成された路面発電システムが気温に及ぼす影響、舗装 36-9、pp28-31、2001