

## ◆ 都市気候特集 ◆

## 路面発電システムが気温に及ぼす影響

木嶋 健\* 明嵐政司\*\*

## 1. はじめに

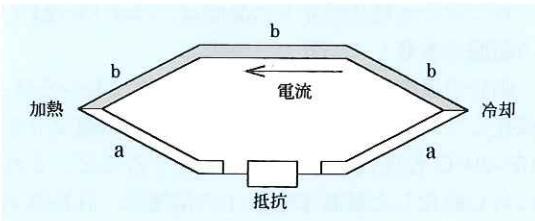
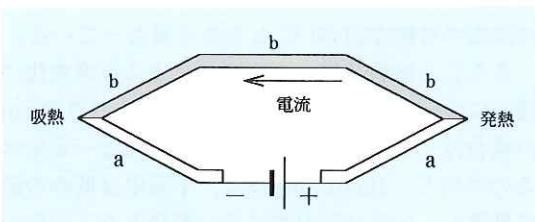
都市部は、道路舗装やコンクリート建築物など熱容量の大きい構造物で覆われた空間となってい。特に、道路舗装表面は、太陽熱エネルギーにより真夏には約 70 °C 以上にまで上昇し、ヒートアイランド現象を発生させる原因の一つとなっている。都市部のヒートアイランド現象は深刻な問題であり、早期の解決が望まれる課題の一つである。本稿では、ヒートアイランド現象を解決する方策の一つとして、熱電素子で構成された路面発電システムによる気温緩和の方策を提案して検討する。

熱電素子で構成された路面発電システムは、システムの上下面に温度差が生じると、ゼーベック効果により太陽熱エネルギーが電気に変換される。その結果、路面発電システム内部には電流が流れ、ペルチエ効果により高温部では熱を吸収し、低温部では熱を放出する現象が生じる。このように、路面発電システムは、太陽熱エネルギーにより高温となった舗装表面から熱を吸収し、気温を低下させる機能を有すると考えられる。

路面発電システムは、道路構造の基層に設置することとしているが、都市部における舗装の大部分に設置された場合を想定すると、路面発電システムが気温に及ぼす影響は非常に大きいと考えられる。なお、熱電変換により得られた電気エネルギーについては、道路管理等の分野で有効活用する方策が考えられる。

2. 热電素子の概要<sup>1)</sup>

種類の異なる二つの物質 a, b で構成された図-1 のような接合回路において、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、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、

図-1 ゼーベック効果の概念図<sup>1)</sup>図-2 ペルチエ効果の概念図<sup>1)</sup>

上記と同様の物質 a, b で構成された図-2 のような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・発熱作用の基本原理となっている。

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 の物質 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接合対である。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用いた II 型素子を

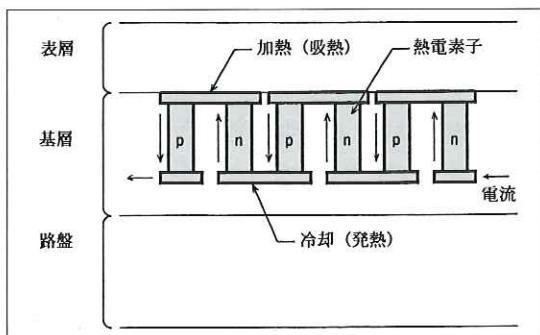


図-3 路面発電システム

適用する。路面発電システムは、図-3 のように基層に設置される。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る。システムに直流電流が生じると、ペルチエ効果により、加熱した高温部では吸熱作用が、低温部では発熱作用が生じる。

熱電半導体として最も効果的な材料はビスマス・テルル系の材料とされている。曲げに対する強さを考えた場合、ビスマス・テルル系材料の曲げ強度は 78.4~101.9MPa となっており、コンクリート舗装の曲げ強度が 4.9MPa であることを考慮すると、曲げに対しては十分な強度を有していることが分かる。

### 3. 数値計算モデル<sup>2)</sup>

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を把握するため、その基本性能を数値計算により評価する。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、地表面温度式、土壤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、鉛直方向の一次元熱輸送モデルを基本としている。数値計算モデルの構成式は以下の通りである。

- 運動量の輸送方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{mz} \frac{\partial U}{\partial z} \right] \quad (1)$$

$U, K_{mz}$  : 風速、z 方向の拡散係数(運動量)

- 大気中の熱輸送方程式

$$\frac{D\Theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{hz} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$\Theta, K_{hz}$  : 溫位、z 方向の拡散係数(熱)

- 地表面温度式

$$\frac{\partial \Theta_{sfc}}{\partial t} = \frac{Q_{sfc}}{\Delta z_s \rho_s C_s} \quad (3)$$

$\Theta_{sfc}, \Delta z_s$  : 地表面温位、土壤層の厚さ

$Q_{sfc}$  : 地表面の熱収支式により算出

$C_s, \rho_s$  : 土壤の比熱、密度

- 土壤中の熱輸送方程式

$$\frac{\partial \Theta_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 \Theta_s}{\partial z^2} + q_R \quad (4)$$

$\Theta_s, k_s$  : 地中温位、熱拡散係数

$q_R$  : 热電素子による吸熱・放熱量

$Q_{sfc}$  は、日射(短波放射)による加熱、大気か

らの長波放射による加熱、地表面からの長波放射による冷却、顯熱輸送、及び地中への熱伝熱の収支計算から得られる。ただし、潜熱輸送については無視している。熱電素子の吸熱量  $q_a$ 、放熱量  $q_d$  は以下のように示される。

$$q_a = \alpha_e T_{hj} I - \frac{1}{2} r_e I^2 + K_e \Delta T_j \quad (5)$$

$$q_d = \alpha_e T_{cj} I + \frac{1}{2} r_e I^2 + K_e \Delta T_j \quad (6)$$

$\alpha_e$  : ゼーベック係数  $T_{hj}$  : 高温側の温度

$T_{cj}$  : 低温側の温度  $I$  : 素子内の電流

$r_e$  : 内部抵抗  $K_e$  : 热コンダクタンス

式(5), (6)において、第 1 項はペルチエ熱<sup>1)</sup>、第 2 項はジュール熱、第 3 項は熱伝導を示している。計算にあたっては、表-1 に示す熱電素子の物理性値を用いた。

表-1 热電素子の物理性値

	単位	
熱コンダクタンス	W/K	$281 \times 10^{-3}$
内部抵抗	$\Omega$	$220 \times 10^{-6}$
ゼーベック係数	V/K	$399 \times 10^{-6}$

### 4. 数値計算結果

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、アスファルト舗装あるいは多孔質弹性舗装、基層として、路面発電システム+アスファルトあるいはアスファルトを想定した。なお、多孔質弹性舗装は、基層に設置した路面発電システムパネルの縦手部分から生じるリフレクションクラックへの対策として用いていることを考えている。

道路を構成する各構造について、熱容量及び熱伝導率を表-2 に示す。表-2 は、表層として用いられる多孔質弹性舗装とアスファルト、基層として用いられる路面発電システムとアスファルト、路盤に対する値を示したものである。

数値計算モデルを検証するため、計算値と実測値との比較を行った。比較対象とした道路構造は、路面発電システムを含まない普通のアスファルト舗装構造であり、表層・基層の厚さは各々 5cm、路盤の厚さは 71cm としている。設定した境界条件は、実測値との整合を考慮に入れて、上部境界(地上 4000m)の風速を 5m/sec、下部境界(地下 81.3cm)の温度を 37.9 °C としている。

る。また、数値計算にあたっては、空気層を 19 分割（層厚 3.0~817.5m）、土壤層を 27 分割（層厚 0.016~0.13m）し、最小の時間ステップを 1 秒とした。

図-4 は実測値と計算値との比較を示したものである。実測値と計算値とは、大気中に設置された

表-2 道路構造材料の物性値

		熱容量 (J/m <sup>3</sup> /K)	熱伝導率 (W/m/K)
表層	アスファルト	$188 \times 10^4$	1.45
	多孔質弾性	$134 \times 10^4$	0.145
基層	アスファルト	$188 \times 10^4$	1.45
	熱電素子	$114 \times 10^4$	1.58
	路盤	$263 \times 10^4$	1.67

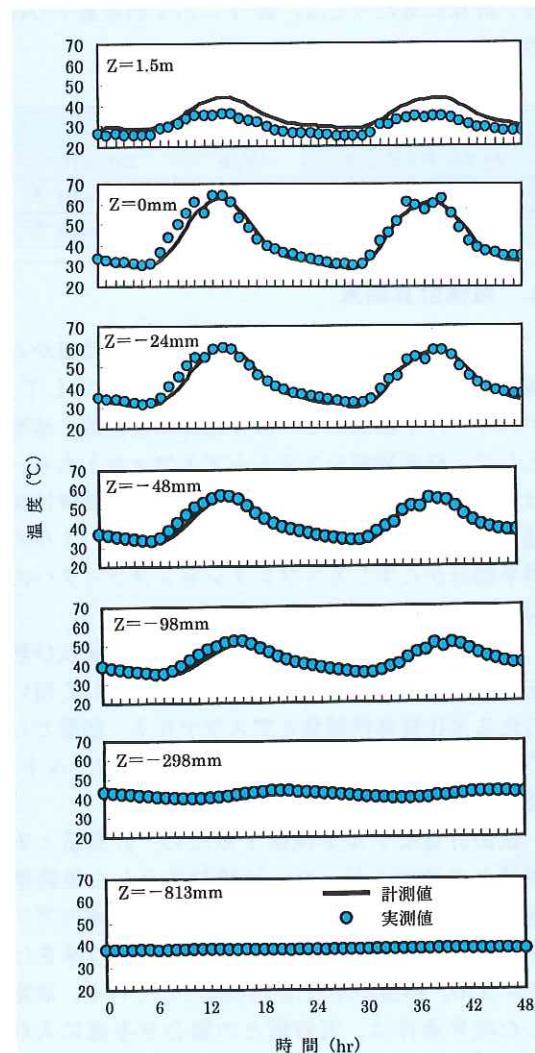


図-4 温度の時間変化 (z は鉛直高さ : 鉛直上向き+)

点を除けば、比較的よく一致していることが分かる。大気中に設置された点で計算値と実測値とが異なる理由として、実測値の測定空間が一次元となっていないことがあげられる。つまり、実測値は地表面の一部が舗装区間となっているフィールドで測定されたものであり、測定空間は鉛直方向に一次元となっていないのである。従って、舗装区間の上空で測定された実測値は、未舗装区間上空の空気の影響を受けるため、一次元熱伝導を仮定した計算値よりも低くなると考えられる。

図-5 は、表層を 5cm、基層に路面発電システムを設置した場合の地表面温度を示したものである。表層をアスファルト舗装として、路面発電システムの厚さを 5~20cm と変化させた場合、地表面温度の最高値は、路面発電システムを設置しない場合と比べて 0.8~3.7 °C 低下するが、最低値は 0.4~1.8 °C 上昇する。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、上面では吸熱が、下面では放熱が行われ、地表面温度の方が低くなる夜間ににおいてはこれと反対の現象が起きているためと

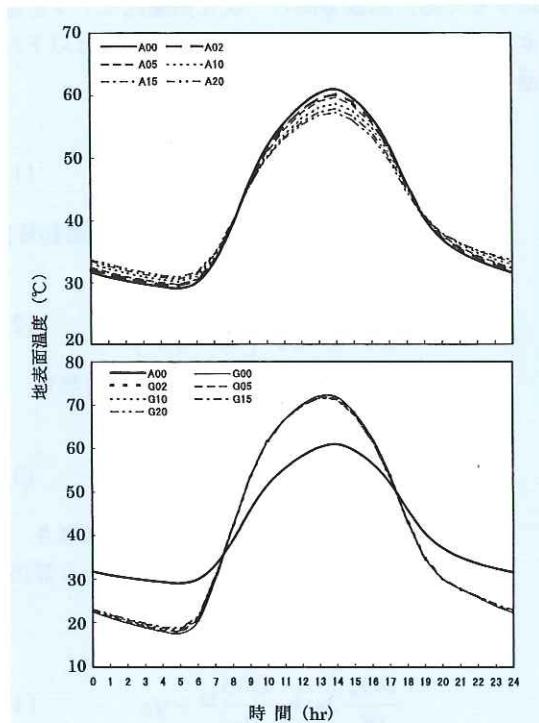


図-5 地表面温度の時間変化

A, G は、それぞれ表層がアスファルト、多孔質弾性舗装を示す。A, G の後の数字は路面発電システムの厚さ(cm)を示す。

考えられる。表層を多孔質弾性舗装として、路面発電システムを基層に設置しない場合、地表面温度の最高値は、アスファルト舗装に比べて 11.1 °C 上昇し、最低値は 11.6 °C 低下している。一般に、地表面温度の時間変化量は、土壤層の熱伝導率の 1/2 乗に反比例する<sup>3)</sup>。多孔質弾性舗装は、アスファルト舗装に比べて熱伝導率が 1 オーダー低いために、地表面温度の時間変化が大きくなっている。また、表層を多孔質弾性舗装として、基層に路面発電システムを設置した場合には、路面発電システムを設置しない場合と比較して、最高温度が 0.1 ~ 0.5 °C 低下し、最低温度が 0.3 ~ 1.2 °C 上昇している。

路面発電システムを設置した道路構造(表層は多孔質弾性舗装)と通常の道路構造(表層はアスファルト舗装)とを比較すると、前者の地表面温度については、表層を多孔質弾性舗装に置き換えたことにより、最高値はより高く、最低値はより低くなる現象が生じている。一日の平均温度については、路面発電システムを設置した多孔質弾性舗装の方が低くなるが、最高温度の一層の低下を目指す場合には、多孔質弾性舗装にかかる熱伝導率の高い材料を用いる必要があろう。

次に、札幌、東京、新潟、大阪の 4 地点で測定された 1995 年 12 月 ~ 1996 年 11 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検討した。ここでは、2cm の多孔質弾性舗装、2cm の路面発電システム、6cm のアスファルト、71cm の路盤で構成された道路構造を想定した。表層を多孔質弾性舗装として、路面発電システムを設置した場合の気温変化を表-3 に示す。年間平均で見ると、路面発電システムの設置により、日最高気温は 4.6 ~ 5.0 °C 上昇するが、日最低気温は 4.5 ~ 6.2 °C、日平均気温は 0.6 ~ 1.6 °C、各々低下する。ヒートアイランドが問題となる夏季・晴天時においては、路面発電システムの設置により日最高気温は 4.3 ~ 5.0 °C 上昇するが、日最低気温は 5.9 ~ 7.7 °C、日平均気温は 1.0 ~ 2.2 °C、各々低下する。以上より、日平均気温については通常舗装の場合よりも低下しており、路面発電システムが気温低下に一定の効果を有することが確認された。また、表層として多孔質弾性舗装よりも

表-3 路面発電システムの設置効果

地点	季節	地上気温変化 ( °C )			路面温度変化 ( °C )		
		日最高	日最低	日平均	日最高	日最低	日平均
札幌	年間	+4.9	-4.9	-0.8	+10.6	-8.4	-1.2
	夏季	+4.9	-5.9	-1.0	+9.5	-10.4	-2.0
新潟	年間	+5.0	-4.5	-0.6	+10.7	-7.5	-0.8
	夏季	+5.0	-6.2	-1.2	+10.3	-10.8	-2.3
東京	年間	+5.0	-5.9	-1.4	+10.7	-9.8	-2.2
	夏季	+4.3	-6.4	-1.7	+9.1	-10.8	-2.9
大阪	年間	+4.6	-6.2	-1.6	+10.0	-10.3	-2.5
	夏季	+4.4	-7.7	-2.2	+9.5	-13.1	-3.7

\* 地上温度変化・路面温度変化は、路面発電システムを設置した場合の温度(表層は多孔質弾性舗装)と設置しない場合(表層はアスファルト舗装)の温度との差を示している。

熱伝導率の高い材料を使用した場合には、日最高気温を低下させることも可能である。

## 5. おわりに

本稿では、都市部の気温緩和に資する路面発電システムを提案し、その基本的な性能について、一次元を仮定した数値計算モデルによる評価を行った。その結果、路面発電システムは、都市部の気温緩和に一定の効果を有することが確認された。今後、数値計算で得られた性能をフィールド上でも確認すると共に、その力学的特性についても検討を行っていく必要がある。

## 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) S. Meiarashi and T. Ohara : Road Electric Generation System with Use of Solar Power, Proc. of the American Power Conference, Vol.59.1, pp.265-270, 1997.
- 3) J. W. Deardorff : Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, with Inclusion of a Layer of Vegetation, J. of Geophysical Research, Vol.83 (C4), pp.1889-1903, 1978.

木嶋 健\*



建設省土木研究所  
材料施工部化学研究室  
主任研究員  
Takeshi KISHIMA

明嵐政司\*\*



同 化学研究室長、工博  
Dr.Seishi MEIARASHI