

# 熱電素子による道路舗装面の熱エネルギーを利用した発電システム

北海道大学大学院工学研究科 学生会員 上川優貴 正会員 長谷部正基

## 1. 背景と目的

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、赤外放射等による温度上昇が発生しやすい環境となっている。特に道路舗装面は太陽熱エネルギーにより真夏には70℃以上にまで上昇する。近年、地球温暖化防止、一次エネルギー消費量削減のために新エネルギーの普及促進、未利用エネルギーの利用促進が求められており、こうした道路舗装面に蓄積された太陽熱エネルギーの有効利用は省資源、省エネルギーの見地から重要である。利用方法としては温水供給などの直接利用方式と電気エネルギーへ変換する間接利用方式とがあるが、直接利用方式は需要、立地などの観点から今後とも大規模な利用は困難であると思われる。発電システムでは熱源の温度変動などに即応できる性能が要求される。道路舗装面の太陽熱エネルギーによる熱電発電の場合、システムの構成要素が熱電素子を含む熱交換器のみで、負荷の変動による燃料所要量の変化に対する追従性が良いこと、可動部分が無いため信頼性が高く保守が容易である等の利点がある。

そこでわれわれは道路舗装面の熱エネルギーを熱電素子の発電機能により電力として回収する発電システムを提案した。我々は当該システムを路面熱利用発電システム(RTEC: Road Thermal Energy Conversion System)と称する。本研究はRTECの概念設計を行い、その実用化の可能性を明らかにしようとするものである。なお、アスファルト舗装は舗装材料の物性により高温になると軟化し、その結果通行車両から受けるせん断力によりわだち掘れが発生する。これは舗装の耐用年数を短縮させる主因となっている。RTECの機能として、発電により路面温度が低下し、アスファルト舗装の耐久性が向上することも期待される。

## 2. システム設計

(独)土木研究所の明嵐らは熱電素子を道路舗装中に埋設し、素子上下面の地中深度方向の温度分布による温度差をエネルギー源として発電を行うシステムを提案している<sup>1)</sup>。RTECではより大きな温度差を確保するために冷熱源についても配慮した。RTECの冷熱源には大気、雪氷等も考え得るが本報では図のように道路周辺の河川水を冷熱源とした熱電発電システムについて考察した。熱電発電においては熱源の温度差を可能な限り熱電素子に負荷させる構造設計が基本となる。我々が提案するRTECの構造は図1に示すように、道路路面下に埋設された熱交換パイプ中の熱媒体により強制対流伝達を介して熱エネルギーを回収し、熱電変換素子に伝熱板を介して熱流速を与えるものである。河川水を利用することにより、より大きな温度差が素子に

負荷され、熱容量が大きな熱媒体に熱交換されることにより素子にかかる温度がより均一に近くなることが期待されるとともに、発電器が排熱回収場所から分離されたレイアウトとなる。

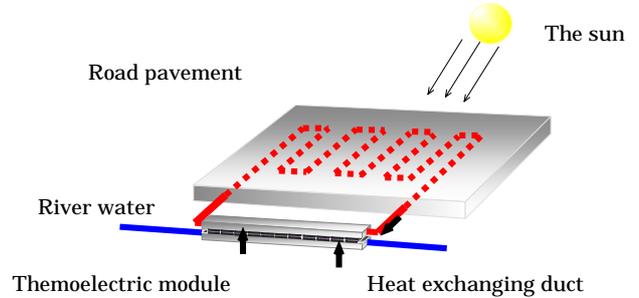


図1 RTECの概念図

## 3. 熱電発電システムの概念設計

道路舗装面に蓄積された太陽熱と河川水の冷熱をエネルギー源として考える。高温側熱交換媒体としては熱媒体油などが考慮されるが本報では常圧水を使用した場合について考察した。

熱電発電ユニットにおいて各構成部材の同一伝熱面内の温度は均一であるとして計算を行う。熱電素子部の入熱量:  $Q_1$  及び放熱量:  $Q_0$  は素子内で発生するジュール熱の半分が低温側に、残りの半分が高温側に流れると仮定すると次式で表現できる。

$$Q_0 = (\alpha_p + |\alpha_n|) \cdot n \cdot T_{hj} \cdot I + \frac{1}{2} \cdot (\rho_p + \rho_n) \cdot \frac{H_e}{W_e L_e} \cdot n \cdot I^2 + \frac{(\kappa_p + \kappa_n) \cdot W_e \cdot L_e \cdot n}{H_e} \cdot (T_{hj} - T_{cj})$$

$$Q_1 = (\alpha_p + |\alpha_n|) \cdot n \cdot T_{cj} \cdot I - \frac{1}{2} \cdot (\rho_p + \rho_n) \cdot \frac{H_e}{W_e L_e} \cdot n \cdot I^2 + \frac{(\kappa_p + \kappa_n) \cdot W_e \cdot L_e \cdot n}{H_e} \cdot (T_{hj} - T_{cj})$$

ここで  $T_{hj}$ :高温側素子温度、 $T_{cj}$ :低温側素子温度、 $\rho$ : p型熱電素子のゼーベック係数、 $n$ : n型熱電素子のゼーベック係数、 $\rho$ : p型熱電素子の電気抵抗率、 $n$ : n型熱電素子の電気抵抗率、 $\rho$ : p型熱電素子の熱伝導率、 $n$ : n型熱電素子の熱伝導率、 $W_e \times L_e$ :素子断面積、 $H_e$ :素子高さ、 $n$ :素子対数、 $I$ :回路電流。モジュール内部抵抗と発電電力を消費する外部抵抗が等しい場合の発電電力: $P$  は次式で表される。ここで  $n_m$ :モジュール数。

$$P = (Q_1 - Q_0) \cdot n_m = \frac{W \cdot L \cdot n_e \cdot (\alpha_p + |\alpha_n|)^2 \cdot (T_{hj} - T_{cj})^2}{4H \cdot (\rho_p + \rho_n)} \cdot n_m$$

このシステムでは熱電素子の動作温度は20～70℃の範囲にある。図2はこれまでに開発された主な熱電素子材料の性能指数の温度特性を示すものである。システム動作温度付近ではBi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>化合物系材料が高い性能を呈しており、本報ではこの材料を使用した場合について出力および効率を見積もった。

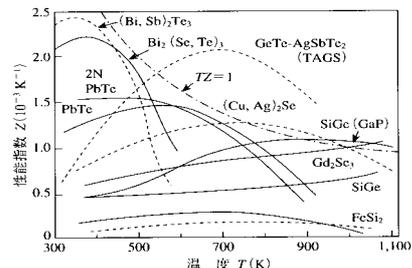


図2 熱電材料性能指数の温度特性

キーワード 熱電、舗装、太陽熱、発電

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目北海道大学大学院工学研究科空間性能システム専攻 TEL&FAX 011-706-6292

道路舗装面の温度: $T_{road}$  は気象条件、立地条件および時間等により変化する。本報では例として、1995年6月1日の東京都内の観測地点での路面温度と気温より一日当たりの発電量を計算する。図3は(独)土木研究所の明嵐らが気象データをもとに地表面の熱収支条件により計算した路面温度の時間変化である。これらは実測値とよく一致することが確認されている。また河川水温度: $T_{river}$  は気温: $T_{atm}$  より一般に5度程度低いことから、 $T_{river} = T_{atm} - 5$  として計算する。

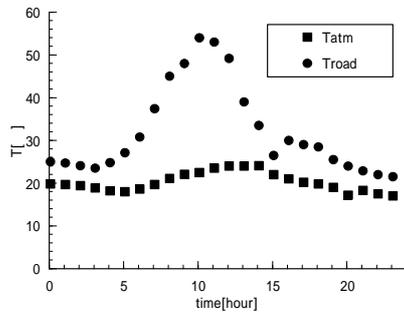


図3. 路面温度

路面温度の時間変化は連続的であるが計算では一日を24分割して算出した。熱交換パイプは十分に長く、パイプ出口温度は道路舗装材料温度と等しく、また道路舗装面は無限に広く、熱容量が大きい材料により構成されていることから熱交換パイプからの採熱による路面温度の低下は発生しないと仮定した。また、本報では熱電発電装置の流路方向長さの影響は無視し、熱電モジュールには常に熱源温度差が全て負荷される場合について考察する。計算に使用した各種条件を表に示す。例えば上述の諸条件では熱電発電システムより一時間当たり最大2.96Wが得られる。

表1 計算条件

	p-type	n-type
Material	$\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$	$\text{Bi}_{1.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te}_{2.85}\text{Se}_{0.15}$
at 300K[ $\mu\text{V}/\text{K}$ ]	160	-230
at 300K[ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]	1.4	1.8
$L_e[\text{m}] \times W_e[\text{m}] \times H_e[\text{m}]$	0.0019 $\times$ 0.0019 $\times$ 0.0027	
$n_e$	127	
$n_m$	19	

#### 4.基礎実験

道路舗装面に蓄積された太陽熱と河川水の冷熱をエネルギー源とした熱電発電の有効性の実証をするために熱電発電ユニットを作成して実験を行った。図4は実験装置を示したもので熱電モジュールを熱交換ダクトで挟み込み、アルミ製ボルトで固定した構造となっている。19枚の熱電モジュールが直列に接続されている。高温側熱交換ダクトに温水が流れ、強制対流熱伝達を介して熱電素子に熱流速が与えられており、低温側熱交換ダクトに冷水が流れモジュール下面より熱流速が除去されることで熱起電力が発生する。発生した電力は電子負荷装置により消費させた。温水はガスボイラーにより昇

温して供給した。冷水は便利のために市水を使用した。熱電モジュールはP型を $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ 、n型を $\text{Bi}_{1.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te}_{2.85}\text{Se}_{0.15}$ を材料とし、これらをアルミ製絶縁熱交換基盤で挟み込んだ構造のものを使用した。熱交換ダクトはアルミ製で内部には流路方向と平行に伝熱フィンが設置されている。接触部には接触熱抵抗の低減のために伝熱性シリコングリスが塗布されている。温度はT型熱電対により、起電力はデータロガーにより測定した。

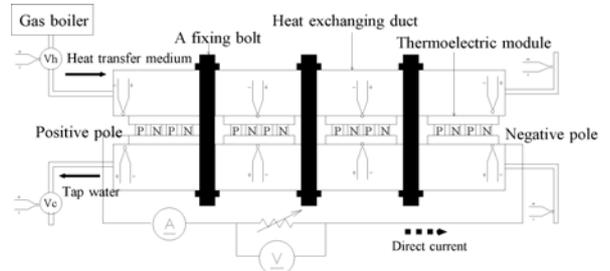


図3 実験装置

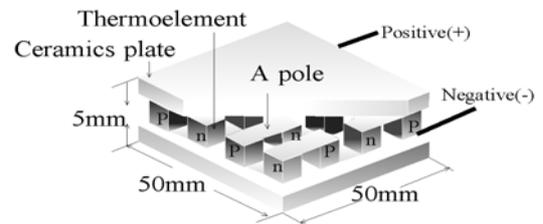


図4 熱電モジュール

ここで、モジュール側面からの放熱は無視した。高温側熱媒体の温度: $T_{th}$  および流量: $Q_h$  をそれぞれ 82.1、11.4[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]、低温側熱媒体温度: $T_{cl}$  および流量: $Q_c$  を 31.4、9.6[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]、外部負荷抵抗: $R$  を 12.25[ $\Omega$ ]とした。定常状態において3.19[w]の発電量が得られた。また、熱電発電装置内部において温度差が発生している箇所を熱抵抗に置換して熱流等価回路を構築し、実験の測定結果を使用して $T_{hj}$  および $T_{cj}$  を計算した。その結果、 $T_{hj}$  は 74.0、 $T_{cj}$  は 37.7 であり、熱源間温度差:50.7 に対して利用可能温度差は 36.3 に留まった

#### 5.まとめ

道路舗装面の太陽熱エネルギーと河川水の冷熱をエネルギー源とした本システムの場合には、熱電モジュールを19枚使用した場合、例えば夏季には最大2.96Wの出力が得られることが計算された。熱電発電方式は可動部が無く、信頼性が高いなどの特徴を持っていることを考慮すると広大な道路面における太陽熱を利用した大規模発電の可能性も考えられ、さらに詳細な検討と技術開発が望まれる。

1) 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による気温への影響: 舗装 36-9 (2001)