

構造部材間の温度差を利用した熱電発電の提案と鋼床版橋梁への適用

東京工業大学 正会員 ○竹谷 晃一, 非会員 芦澤 那南, 正会員 阿久津 絢子
東京工業大学 正会員 伊藤 裕一, 正会員 佐々木 栄一
琉球大学 正会員 下里 哲弘

1. 背景・目的

電子機器による構造物のセンシングにおいて電源確保は重要な課題である。環境エネルギーを利用する環境発電の中でも太陽電池は有力な解決策であるが、対象の構造形式によって適用が限られるなど課題もある。一方、太陽エネルギーの活用法として構造物の蓄熱に注目すると、材料や日射条件等の違いで部材間には温度差が生じている。熱電発電はゼーベック効果で温度差を電気に変換する環境発電技術であり¹⁾、部材間の温度差から発電できれば橋梁裏面など直接日射が届かない場所への電源供給が可能となる。そこで本研究は、構造部材間の温度差エネルギーに注目した熱電発電の提案と適用を目的とした。具体的な対象として図-1に示す実橋梁の一部を切り出した鋼床版橋梁（沖縄県琉球大学内）を事例とするが、発電シミュレーションの提案や環境条件と発電量の関係を分析することで一般性を高めることを目指した。

2. 鋼床版橋梁の温度環境分析

温度環境計測は2022年9月12日~12月22日の期間行った。ここでは9月13日の日中の計測結果を示す。図-2は熱電対で計測した鋼床版橋梁の温度の時刻歴である。a, b点は鋼床版上面, c₁, c₂点は舗装を模したコンクリート板($h=50$ mm)上面の温度である。図-3はサーモカメラで計測した11:00と13:00の鋼床版裏面側の温度分布である。サーモ画像は熱電対の計測データで補正した温度で示している。鋼床版はコンクリート板に比べて日射で加熱されやすく、かつ桁やUリブへ熱が拡散するため温度低下が早い。そのため鋼床版と舗装間では温度差が生じやすいと考え、その界面で発電する熱電発電デバイスの検討を行った。

3. 熱電発電デバイスの設計

鋼床版を対象とした熱電発電デバイスを設計するため、図-4に示す鋼床版の部分モデルの有限要素解析(Finite Element Analysis: FEA)を行った。熱電素子は薄板状であり、その両面に温度差が生じることで発電する。そこで様々な検討の結果、舗装の熱を熱電素子に伝熱する「コア」と、コア周囲で舗装と鋼床版の伝熱を防ぐ「断熱層」からなる構造を熱電発電デバイスの基本設計とした(図-5)。最適化設計の対象パラメータはコアと断熱層の寸法である。

キーワード 熱電発電, 環境発電, 温度差, 鋼床版, 橋梁, 舗装

連絡先 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 W8-94 東京工業大学 竹谷晃一 TEL 03-5734-3426

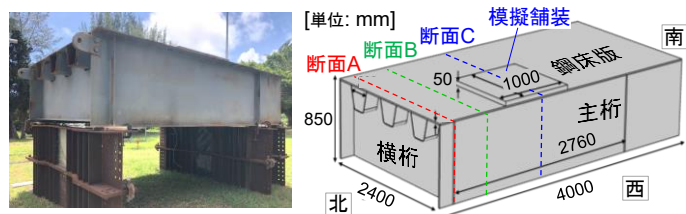


図-1 対象とする鋼床版橋梁モデル

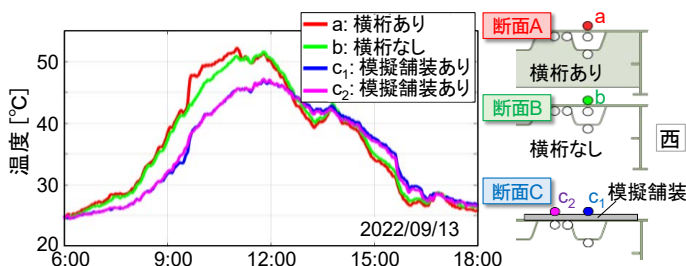


図-2 鋼床版表層の温度の時間変動

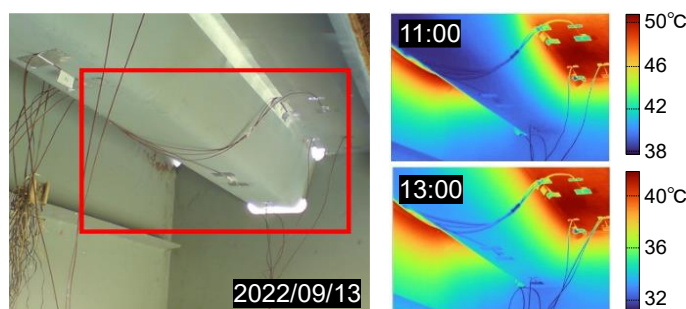


図-3 鋼床版裏面側の温度分布の計測結果

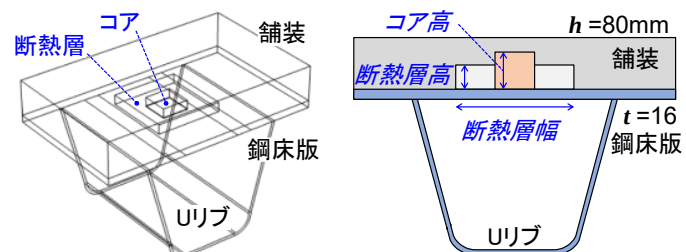


図-4 鋼床版の部分モデルと設計対象パラメータ

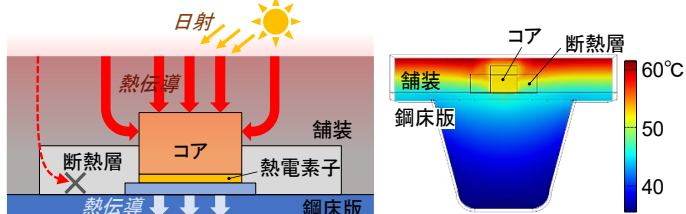


図-5 (左)コアと断熱層の設計意図 (右)FEMの熱解析例

FEAによるパラメトリック解析の結果、図-6(左上)に示す熱電発電デバイスを設計した。舗装上からの荷重を緩和するため断熱層は150×150×40mmの錐台形とした。コア

は $60 \times 60 \times 50 \text{ mm}$ の直方体で、舗装の熱を熱電素子に伝える。施工性からデバイス全体を $200 \times 200 \times 60 \text{ mm}$ のモルタルで固めている。熱電素子は図-6(左下)に示すKELGEN汎用タイプ($48 \times 57 \times 1.4 \text{ mm}$, $59.6 \text{ mV/}^\circ\text{C}$, 3.9Ω)を採用し、断熱層は図-6(右下)に示すようにグラスウールを充填した。

4. FEモデルによる温度解析と発電シミュレーション

図-7(上)に示す鋼床版橋梁のFEモデルに気象庁が公開している那覇市の日射と気温を入力した温度解析を行い、熱電発電デバイスの発電量を推定した。ただしこの温度解析は自然風による空気流と発電による吸熱は考慮していない。夏と冬の晴天日における発電推定結果を図-7(下)に示す。横桁がある断面やUリブ溶接位置付近の発電量が高い結果となった。この理由として、鋼床版の熱が横桁やUリブに伝熱することで拡散しやすくなることが挙げられ、鋼床版と舗装の温度差が拡大したと考えられる。

5. 発電検証実験と考察

図-8は鋼床版上に設置した熱電発電デバイスと舗装施工の様子である。熱電発電デバイスはUリブ溶接位置付近で横桁ありとなしの各断面(A2とC2')に設置した。横桁なしの断面は計測の都合で発電シミュレーション位置から約70 cmずらした断面C'とした。舗装は実測値で基層・表層合計約10 cm厚の一般的なアスファルト舗装である。

発電検証実験は2022年12月23日から開始しているが、ここでは2023年1月1日から18日間の計測結果を図-9に示す。発電電力は温度差の二乗に比例するため、温度の時間変化を生みだす日射量が発電量の支配因子となっているとみられる。位置A2とC2'ともに発電が確認できたが、横桁ありの断面Aの方が総発電量は数%大きかった。この傾向は発電シミュレーションの結果と一致している。

最後に環境因子と発電量の相関分析の結果を表-1に示す。発電量は日射量と高い正の相関があり、次いで日較差の相関が高かった。風速と湿度は発電量と負の相関傾向がみられる。ただし、日較差や湿度は日射の従属因子とみられることや分析対象期間が短いため、発電量との因果関係の判断は難しい。今後これらの環境因子と発電量の分析を進め、熱電発電の適用条件を整理したい。

6. 結論

本研究は構造部材間の温度差を利用した熱電発電について、鋼床版橋梁を具体的な例として熱環境の計測とFEAを基にした発電解析を行い、デバイスの設計と適用を行った。今後長期計測と対象構造を増やして環境因子と発電量の関係を整理し、適用方法の一般化を進めたい。

参考文献

- 1) 和田英男, 芳賀将洋: 発電排熱を利用した熱電発電システムの研究, 日本熱電学会誌, Vol.14, No.3, pp.124-131, 2018.

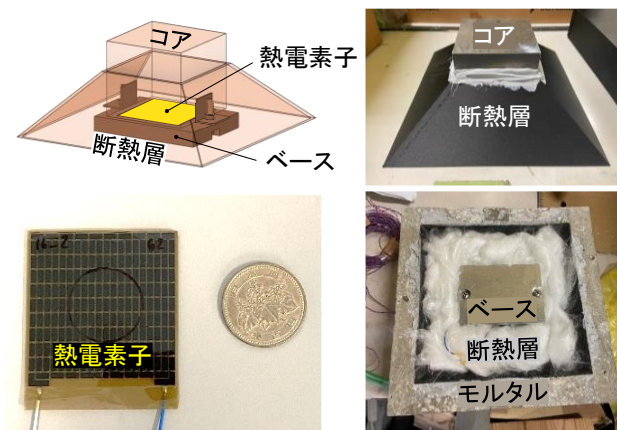


図-6 埋込型熱電発電デバイスの構成と制作の様子

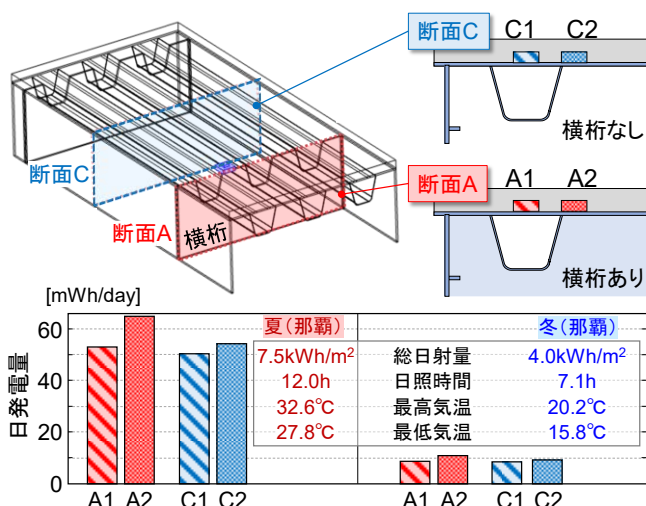


図-7(上) 鋼床版橋梁のFEモデル

(下) FEモデルの温度解析を用いた発電量の推定値



図-8 埋込型熱電発電デバイスの鋼床版橋梁への設置

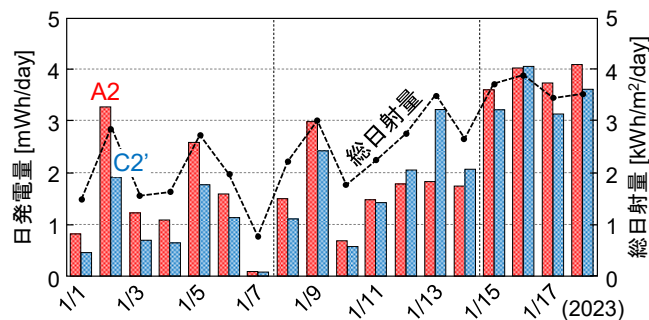


図-9 熱電発電デバイスによる1日の発電量と総日射量

表-1 発電量と環境因子の相関係数

	日射量	日較差	風速	湿度
相関係数	+0.94	+0.68	-0.29	-0.37