

橋梁のコンクリート部材-空気間の温度差を利用したエネルギーハーベスティングの提案

東京工業大学 正会員 ○竹谷 晃一, 東京工業大学 (研究当時) 非会員 木村 優里
 東京工業大学 正会員 佐々木 栄一, 正会員 伊藤 裕一
 山梨大学大学院 (研究当時) 学生会員 小森 誠太, 山梨大学大学院 正会員 吉田 純司

1. 背景

道路橋の持続可能な維持管理を実現するため、センサを用いた構造モニタリングが注目されているが、現地での電源確保が大きな障壁となっている。そのため、必要な場所で必要な電力を発電する分散型電力供給の需要があり、環境中のエネルギーを利用したエネルギーハーベスティング（環境発電）はその思想に強く基づいている。

太陽光は有用な環境エネルギーのひとつであるが、太陽光パネルの橋梁上や盛土等への設置には制限があるため、特にセンサ部分への給電は一次電池に依存しているのが現状である。このほか、橋梁では交通による振動を利用した振動発電が提案されているが、交通量が多い幹線道路や振動が生じやすい鋼橋が主な対象である。

橋梁の材料は主にコンクリートと鋼であるが、特に床版などのコンクリート部材は体積が大きく熱容量も大きい。日射によってコンクリート部材が一旦温められると熱を保持するため、空気との間に温度差が生じやすい。物体の温度差が起電力を生じさせるゼーベック効果を利用したのが熱電発電である。ゼーベック効果による起電力は微小であるため、一般的に熱電素子は半導体アレイで構成することで起電力を増幅させている。

橋梁は体積が大きく熱容量が大きいため保持している温度差エネルギーの総量や持続性は見込めるが、橋梁部材-空気間の温度差は数℃～数十℃程度であるためエネルギー密度が小さい。そのため、橋梁環境の温度差を利用するには発電効率の向上が重要といえる。発電効率の向上によってセンサなどの IoT デバイスに必要な電力を温度差から発電できれば、二次電池に蓄電せずに直接電力供給できる可能性がある。蓄電によるエネルギーロスやシステムコストの増加は環境発電の障壁となっており、実現への期待度は高い。

本研究は、橋梁のコンクリート部材と空気の温度差を利用したエネルギーハーベスティングの提案を目的とした。はじめに、コンクリート橋において温度環境の計測を行い、有効な設置場所の検討を行った。次に、有限要素解析によって空気温度を効果的に用いる発電デバイスの設計を行った。そのうえで、供用中のコンクリート橋を対象として発電実験を行った。

2. 実橋梁の温度分布の計測

対象橋梁は大学敷地内にある RC 歩道橋である。図-1 に橋の外観と計測対象断面の位置を示す。断面 A は橋台近く、断面 B は支間中央付近である。対象断面における小型温度ロガーによる温度計測位置を図-2 に示す。

図-3 は断面 B における計測温度の時間推移である。断面内で比較すると床版裏（計測位置 B-2, B-5, B-8）のほうが桁部（計測位置 B-4, B-6）に比べて最大温度が 2℃程度小さいが、これは比表面積の影響と考えられる。一方、断面 A, B 間の平均温度に有意な差はなかった。そのため、橋軸方向の設置位置の依存性は少ない可能性がある。

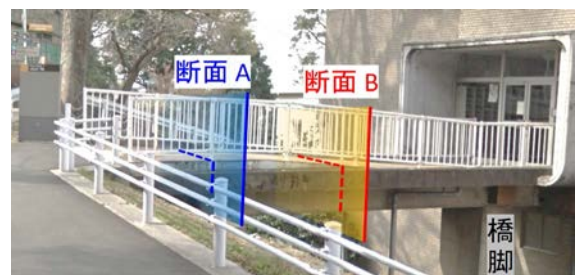


図-1 対象のコンクリート歩道橋

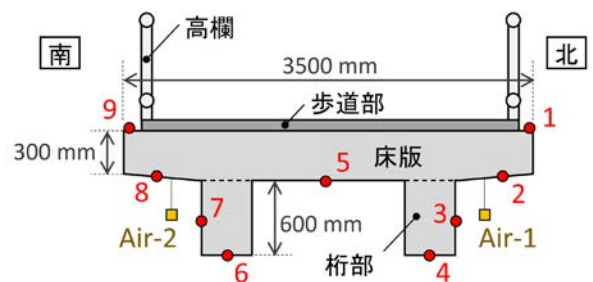


図-2 対象橋の断面図と温度計測点

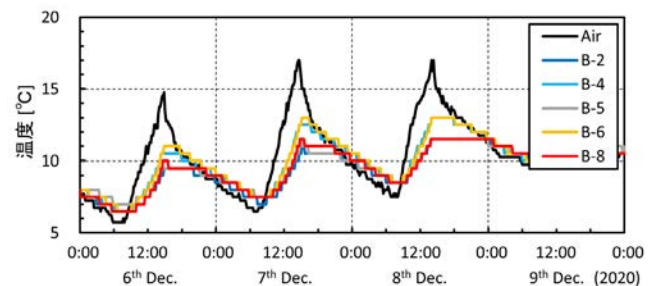


図-3 断面 B における計測温度の時間推移

キーワード 橋梁, コンクリート, エネルギーハーベスティング, 環境発電, 温度差, 熱電発電

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学 TEL : 03-5734-3426 E-mail : takeya.k.aa@m.titech.ac.jp

3. 数値解析と実験計測によるパラメータ解析

熱電素子は厚さ数ミリの板形状であり、両面に温度差を与えることで起電力が生じる。橋梁のコンクリート部材-気温間の温度差を最大限発電に利用するため、熱の伝達機構を含めた発電デバイスの構造形式を検討した。COMSOL Multiphysics® version 5.5 による有限要素モデルを用いてパラメータ解析を行った。図-4 は解析モデルの外観である。発電デバイスは熱電素子とヒートシンクで構成され、コアプレートが熱を伝導している。パラメータ解析では最適なヒートシンクの寸法とコアプレート高さ、材質の検討を行った。風速条件は 1.0m/s と 0.1m/s、空気と熱源の温度差は 5°C である。図-5 に解析結果の一部を示す。銅の熱伝導率はアルミの倍以上であるが、起電力に関する熱電素子両面の温度差への影響は小さい。解析上はコアプレートが高いほど発電に有利となるが、コアプレート高さの増加による温度差の増加幅は徐々に鈍化するためコストパフォーマンスが下がる。以上より、コアプレート高さは 20mm とし、コスト面で有利なアルミ材を選択した。

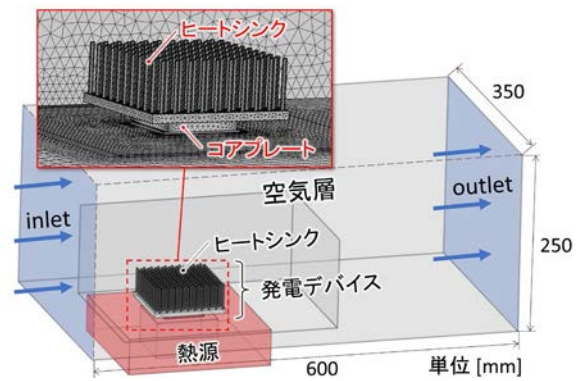


図-4 発電デバイスの有限要素解析モデルの外観

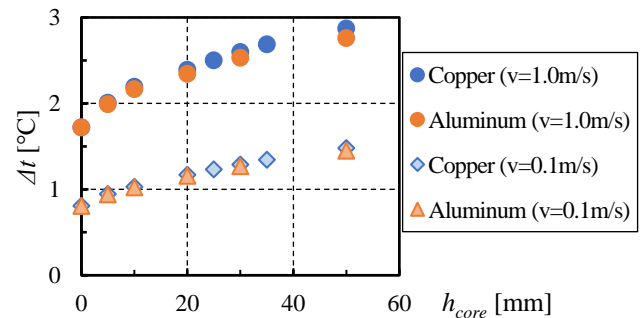


図-5 コアプレート高さ h_{core} と熱電素子の温度差

4. 熱電発電デバイスのプロトタイプ的设计と実験

熱電発電デバイスのプロトタイプを図-6 に示す。コンクリート部材に鋼板を接着し、磁力吸着により着脱が容易な機構とした。熱電素子 (KELGEN KTGM199-2) は Bi-Te 多結晶材料の半導体アレイで構成され、常温条件下で高い電気的性能を発揮する。簡易的な小型風洞 (250×250×750 mm) による発電実験の結果を図-7 に示す。実橋を想定して風速 ($v=0.0, 1.0, 3.0 \text{ m/s}$) とベースプレート下部の熱源 ($Q=0.8, 3.1, 6.6 \text{ W}$) の条件を変えたときの熱電素子両面の温度差 ($\Delta T = |T_2 - T_1|$) と起電力 (開放電圧) を示している。

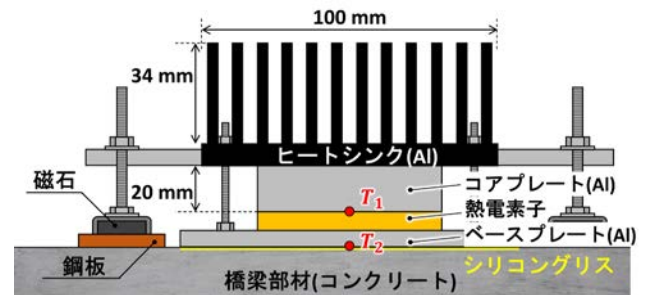


図-6 磁力による設置を想定した発電デバイスのプロトタイプの側面図

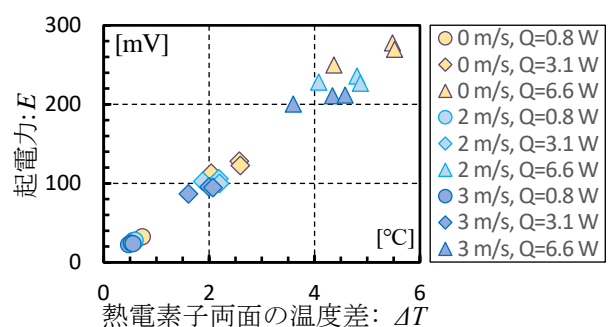


図-7 発電デバイスの温度差 ΔT と起電力 E の実験値

最後に、実橋梁に発電デバイスを設置して発電実験を行った。図-8 は南側床版裏面 (図-2 の位置 8、断面 B) における発電電力と計測温度の時間変化である。日中と夜間で気温と床版温度の関係が逆転しており、日中に温められた床版が夜間に気温との温度差を生じさせるため夜間でも発電可能であった。

5. 考察とまとめ

本研究は、橋梁コンクリート部材を対象とした熱電発電デバイスを提案し、日中だけでなく夜間にも発電できることを実験で示した。一方で、発電量は温度差に対して想定より小さく、その傾向は夜間で顕著であった。この原因として、ヒートシンク-空気間の熱伝達効率が風速で変化することや、夜間は床版温度が空気温度より高いことが影響している可能性がある。この原因を解明することで発電量が向上する余地は十分あると考えている。

参考文献

- 1) 竹谷ら, 橋梁振動を対象とした同調質点系発電デバイスの開発と実橋梁への適用, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 2, pp. 290-301, 2016.

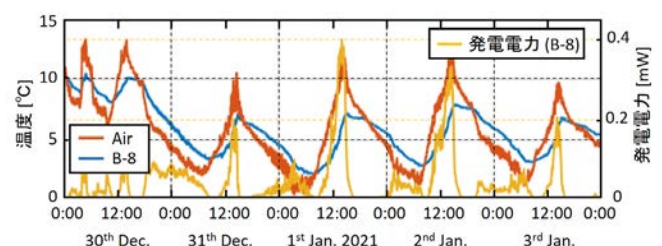


図-8 南側床版裏に設置した発電デバイスの発電電力