

### 橋梁振動を対象とした二質点同調質量系発電デバイスの実橋梁への適用

東京工業大学大学院 学生会員 ○竹谷 晃一, 東京工業大学大学院 正会員 佐々木 栄一  
(株)高速道路総合技術研究所 正会員 長船 寿一, (株)高速道路総合技術研究所 正会員 岩吹 啓史  
特許機器(株) 非会員 洞 宏一, スバル興業(株) 非会員 名見耶 武

#### 1. はじめに

橋梁の損傷を早期に発見するため、ワイヤレスセンサなどを用いたヘルスマニタリングシステムが重要視されているが、システムの長期的な電源供給が課題の1つとなっている。その解決方法として注目されているのが、近年、様々な分野で研究開発が活発に進んでいる環境発電 (Energy Harvesting) である。橋梁振動を利用した環境発電によって、課題となっているモニタリングシステムの電源供給のほか、発電エネルギーをバッテリーへ蓄電することで様々な応用も期待できる。これまで、劣化や騒音の原因である橋梁の振動を制御するため、同調質量ダンパー (TMD) の設置が検討されているが、TMDのダンパーを発電装置 (Transducer) で置き換えて振動エネルギーを積極的に吸収、電気エネルギーへと変換することで、橋梁の振動制御と装置の吸収エネルギーを利用した環境振動発電が可能となり得る。しかしながら、橋梁の卓越する固有振動数は一般に数Hz程度であり、環境振動発電の主な対象である機械振動に比べると非常に低く、発電が困難であった。本研究では、橋梁振動を対象としたEnergy Harvesterとして二質点系の同調質量系発電デバイス (Tuned Mass Generator: TMG) を提案し、TMGの発電・制振特性を評価し、発電を目的とした調整方法と橋梁における発電効果を検証した。

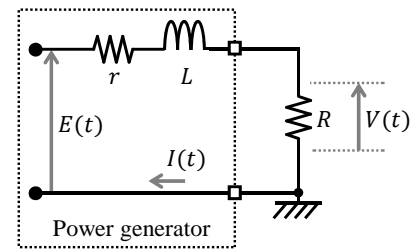
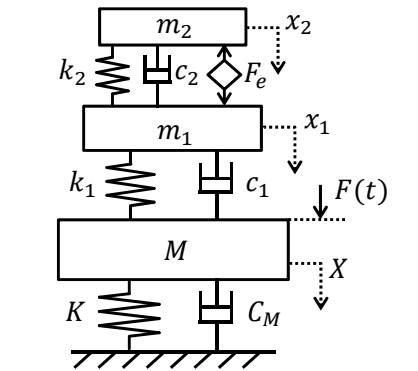


図-1 TMG 解析モデル

#### 2. TMGの制振・発電特性

図-1に示す二質点系の同調質量系発電デバイス—橋梁モデルの解析を行う。モデルはバネ定数Kのバネと減衰定数CMのダンパーで支持された橋梁の等価質量Mがあり、ばね、電磁誘導型発電装置および2つの質量である主マスm1と副マスm2で構成された二質点同調質量系発電デバイスが付加されている。質量Mに調和外力F = F0 sin ωt が作用した時、発電電力と橋梁変位の伝達関数を求める。Feは図-1に示す電磁誘導式発電装置を用いた発電回路によ

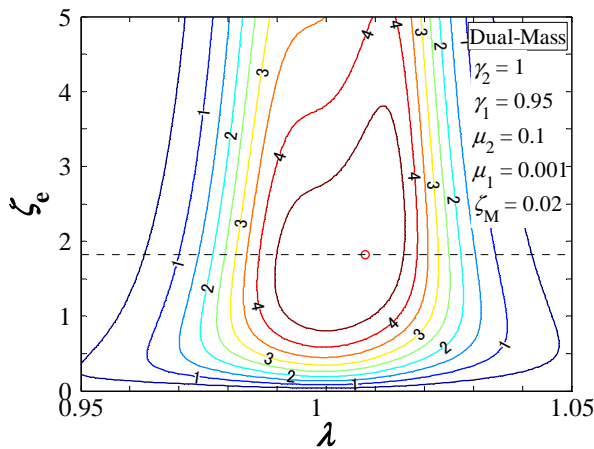


図-2 二質点系の減衰率と発電電力比スペクトルの等高線図

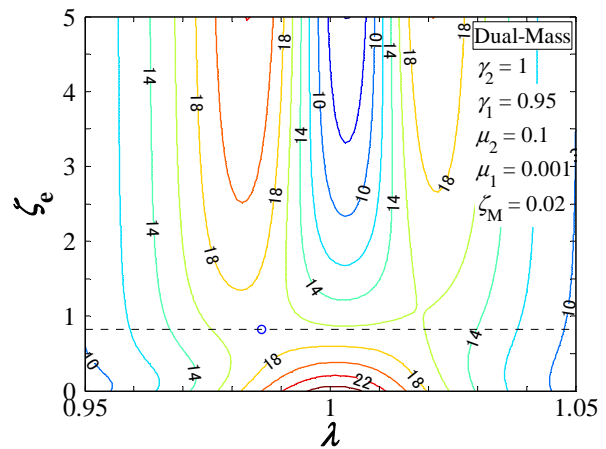


図-3 二質点系の減衰率と変位振幅比スペクトルの等高線図

キーワード 橋梁 環境振動発電 TMD 電磁誘導発電

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 M1-23 東京工業大学大学院 佐々木栄一研究室 TEL 03-5734-3099

る減衰力であり、発電装置の誘導起電力定数を $k_{emf}$  [Vs/m]とすると発電による減衰力は $F_e = k_{emf} I$ で表される。一般性を持たせるため、無次元量 $\zeta_e = k_{emf}^2 / \{2\sqrt{m_2 k_2} (r+R)\}$ を発電による減衰率とする。静的変位 $F_0/K$ に対する定常振動状態の橋梁変位振幅の比を変位振幅比、振動系の仕事率 $F_0^2 \sqrt{K/M}$ に対する発電電力振幅の比を発電電力比と定義する。加振力の振動数比 $\lambda$ と減衰率 $\zeta_e$ に対する発電電力比と変位振幅比を図-2と図-3に示す。振動数比は $\lambda = \omega / \sqrt{K/M}$ で表される無次元量である。ここでは、主マスの橋梁に対する質量比 $\mu_1 = m_1/M$ は0.001(1%)としている。図-2の赤い丸は発電電力比の極大値の位置を示しており、破線はそのときの減衰率 $\zeta_e$ を示している。図-3の青い丸は振幅比の極大値の最小値の位置を示しており、破線はそのときの減衰率を示している。大きな発電電力比スペクトルを与える $\zeta_e$ と小さな振幅比スペクトルを与える $\zeta_e$ は一致しないことが分かる。すなわち二質点同調質量系発電デバイスにおいて、橋梁の振動制御を目的とした設計と橋梁振動発電を目的とした設計では、パラメータの設計値が異なることを示している。

### 3. 設置位置の検討

本研究における目的は、自動車交通による対象橋梁の振動に対して発電エネルギーを最大とすることである。対象橋梁は中央自動車道にかかる三径間連続トラス橋で、多点加速度計測と固有ベクトル法より得られる振動モードと等価質量から発電対象振動数を6.1Hz、設置位置を第一径間の1/4L地点に決定した。

### 4. パラメータ設計

対象振動に対する発電エネルギーを最大とするTMGのパラメータを決定するため、図-1に示した橋梁-TMGのモデルに自動車交通による等価加振力 $F$ を解析モデルに与え、発電エネルギーを算出する。等価加振力は大型車が単独で通過したと思われる代表的な加速度波形より算出した。本研究で開発した同調質量系発電デバイスの主マス質量は104kgであり、対象モードの橋梁等価質量233tonの約0.045%(0.45%)である。橋梁の発電対象振動モードの減衰率はバンドパスフィルターを通して得られる加速度の自由減衰波形より算出した。TMGの機械的な減衰率はハーフパワー法より同定した値を用いる。設計対象としたパラメータは主マスと副マスの振動数 $f_1, f_2$ と発電による減衰率 $\zeta_e$ である。これら3つのパラメータを変化させ、繰り返し計算によって最大の発電エネルギーとなるパラメータを決定した。設計したパラメータを表-1に示す。

### 4. 振動発電実験

24時間の発電実験を行った結果、計測したTMGの発電電圧から算出した10分間毎の発電エネルギーの推移を図-4に示す。青色のグラフは10分毎の発電エネルギーの推移を示しており、赤色のグラフは60分の移動平均を示している。発電エネルギーが大型車両の交通状況に大きく依存しているため、10分毎の発電エネルギーの変動が大きいと考えられる。発電エネルギーの60分移動平均は大型車両の時間交通量と相関関係がみられる。

### 5. まとめ

振動発電を目的とした場合、減衰率の設計値が制振を対象とした従来のTMDの設計値と異なることを明らかにした。対象橋梁の多点加速度計測からTMGの効果的な設置位置を検討し、同定した等価質量と等価加振力を用いた発電エネルギーの繰り返し計算によってTMGのパラメータを設計した。24時間の発電実験結果より、大型車交通量が約5000台/日の橋梁で約300J/日の発電エネルギーが供給できることを示し、低消費電力センサの電力供給やバッテリーへの蓄電によって様々な用途で利用できると考えられる。さらに、大型車両の交通量と相関関係があることより、発電量を用いて交通荷重や交通量のモニタリングができる可能性を示した。

表-1 TMGの設計パラメータ

副マス質量	$m_2 = 31\text{kg}$
主マス質量	$m_1 = 104\text{kg}$
副マス固有振動数	$f_2 = 10.2\text{Hz}$
主マス固有振動数	$f_1 = 6.92\text{Hz}$
副マスばねの減衰率	$\zeta_2 = 0.009$
主マスばねの減衰率	$\zeta_1 = 0.009$
発電による減衰率	$\zeta_e = 2038\text{Ns/m}$

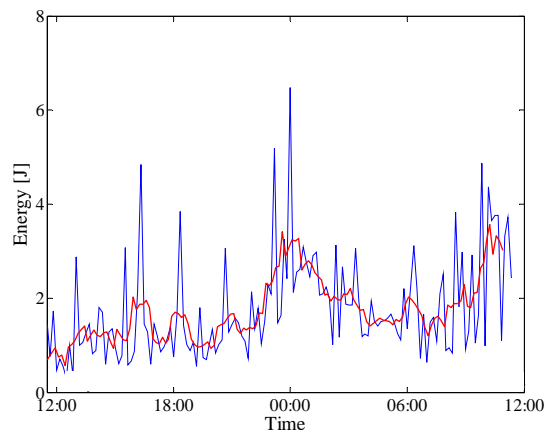


図-4 TMGによる発電エネルギーの推移