研究報告

自動車励起ガストエネルギーを利用した発電の試み An Energy Recovery from Vehicle-Induced Wind Fluctuation

北川徹哉^{*1}

嶋澤善大^{*2}

Tetsuya KITAGAWA, Yoshihiro SHIMAZAWA

SUMMARY

Many strategies and methodologies toward the reduction of environmental and energy loads have been developed, and they are under trials in various industries. In this study, a co-generation device is proposed aiming at reducing the energy loads of highway tunnel facilities. The device generates electricity through the flat-panel vibration caused by the aerodynamic forces due to the wind fluctuations of which the vehicles passing in front of the device induce. The characteristics of the vehicle-induced wind fluctuations and the wind-response characteristics of the device are investigated with field measurements.

key words : co-generation, energy load, field measurement, gust response, vehicle, wind fluctuation

1. まえがき

近年、地球温暖化や環境への配慮の重要性の高まりを背景に、様々な分野においてエネルギー負荷軽減・環境負荷軽減への取り組みが進められている。自動車交通に着目すると、自動車本体の低燃費・低排出ガス性能はめざましく向上しつつある上、FCVの開発も進んでいる。これに対して、自動車交通の基幹である高速道路では照明、サービスエリア、トンネルの換気システム、ロードヒーティング、電光表示板ならびに各種情報システム、ITVを含む各種センサーなどの多くの設備は電力を恒常的に消費している。例えば、あるトンネルは年間1GWh以上の電力を消費し、これは火力発電換算でおよそ1千トンのCO₂排出量に相当する。全国に多様な規模・設備を有するトンネルが多数存在し、トンネルだけでも膨大なエネルギー負荷ならびに環境負荷を強いられている。事故防止やドライバーの安全のため、ひいては円滑な社会活動や経済活動のために、高速道路交通を支えるこれらの設備は必要不可欠なものであるが、その“ランニングエネルギー”のエネルギー負荷軽減が必要である。

そこで本研究においては、高速道路のトンネルを走行する自動車からエネルギーを回収して、そのトンネルの設備エネルギーに循環利用することを考える。自動車はガソリンが持つエネルギーの一部を自動車自身が走行するための運動エネルギーに変換しているが、同時に周囲の空間に気流の変動を生む。例えば、無風の気象時においても高速道路の中央分離帯の植生が激しく揺れるのは、この“自動車励起ガスト”によるものである。本研究は、この自動車励起ガストが持つエネルギーを回収するための手法を提案し、その動特性を屋外実験により検討するものである。

なお、本手法は気流を利用する点で風力発電と似ているが、自動車の走行の結果生じる2次的なエネルギーを利用するので、ガソリンがソースであり、いわゆるクリーンエネルギー技術ではない。一種のコ・ジェネレーションである。また、一般の風力発電は稼働率が気象条件に左右される間欠型発電であるのに対し、本手法は気象としての風を利用せず、自動車が通常に高速走行していれば常に稼働する。

*1 名古屋大学 エコトピア科学研究所 助教授
Associate Professor, EcoTopia Science Institute, Nagoya University

*2 全日本空輸株式会社
All Nippon Airways Co. Ltd.

(原稿受理年月日：2006年8月11日、採用決定：2007年1月25日)

2. 自動車励起ガスト発電ユニット

2. 1 発電ユニットの概要

自動車励起ガストのエネルギーを回収するために試作した発電ユニットの概要を図-1に示す。本ユニットはガスト空気力を受ける受風パネルとこれを支持するヒンジおよびバネから成り、ヒンジを中心とする回転運動を行う1自由度バネマス系である。受風パネルの下端、幅方向中央には円弧状の部材を介して永久磁石が取り付けられており、受風パネルのガスト応答にともなって永久磁石がコイル内を往復運動し、電磁誘導により電位を生む。本ユニットは、受風パネルの幅方向と道路軸方向（自動車の走行方向）とが平行となるように設置することを想定している。近年、人体の運動や機械振動による動的なエネルギーを回収する試み（例えば文献1）、2））があり、本ユニットもこれらに類するものである。

本ユニットの受風パネルの回転振動の固有振動数 f_0 はSanz-Andresら³⁾の道路標識の変動抗力モデルに基づいて設定した。Sanz-Andresらは道路脇に設置された道路標識やガードレールを平板とみなし、ポテンシャル流れの仮定の下で、自動車が通過する際に平板に作用する変動空気力を理論的に推定している^{3)~5)}。Sanz-Andresら³⁾が導いた2次元平板の抗力モデルは、平板の幅方向と道路軸とが平行となっている場合、

$$c_{FP} = \frac{F_D}{1/2\rho U_v^2(2B)} = -\frac{3}{4}c_s \frac{T}{(T^2 + 1)^{5/2}} \quad (1)$$

である（図-2）。ここで F_D は抗力であり、 ρ は空気密度、 U_v は自動車の走行速度、 B は平板の幅の1/2である。また、 c_s は BA_b/d^3 と定義される無次元スケールであり、ここで A_b は自動車の断面積の2倍、 d は自動車の進行方向中心軸から平板までの距離である。 T は自動車が平板を通過する瞬間を原点とする無次元時間であり、 tU_v/d （ t ：時間）と定義されている。図-2をみると c_{FP} は自動車の接近（ $T < 0$ ）にともなって正值（平板を道路外へ押し出す方向に作用）となり、通過後（ $T > 0$ ）は負（道路内へ引き込む方向に作用）となる。また c_{FP} は $T = \pm 0.5$ において極小値・極大値をとり、本研究においてはこの極小値－極大値間の無次元時間の2倍、すなわち $T=2$ に相当する周期と共振するように本ユニットを設計した。 $T=2$ の下で本ユニットの受風パネルの前方5mの位置（ $d=5$ m）を自動車が100km/h（ $U_v=27.8$ m/s）で通過することを仮定すると、受風パネルに作用する変動抗力の周波数は2.8Hzと推定され、固有振動数 f_0 がこの2.8Hzとなるように本ユニットの材料と緒元を以下の

図-1 発電ユニットの概要

図-2 自動車通過により平板に作用する抗力のモデル（平板が道路に対して平行に置かれた場合：式(1)）

通り決定した。図-1の受風パネルは高さ300mm、幅280mm、厚さ20mmの発砲スチロール製平板である。バネはバネ定数が1.16N/mm、長さ30mmの円錐バネであり、受風パネルの幅方向中央、上端から30mmの位置に設置されている。用いた永久磁石は直径18mm、長さ20mmの円柱状の希土類磁石（住友特殊金属：NEOMAX-48BH）である。一方、コイルは長さ30mm、内径28mmの円筒形であり、直径0.26mmの絶縁銅線により作成した。このコイルは100回巻のコイルを5層に重ねた構造になっており、各層が直列に結線されている。

なお、本ユニットは振動型発電であることから出力電圧も交流となるため、本来であればダイオードブリッジやコンデンサ等による整流化が必要であるが、次節以降では基礎的なデータを得るために整流化しない状態のまま検討を行う。また、本研究においては本ユニット単体を検討対象とするが、実際は本ユニットをトンネルの壁際にトンネル軸方向に多数並べるとともに、高さ方向にも複数段で設置することをイメージしている。

図-3 自由振動波形の一例

図-4 図-3 のパワースペクトル

図-5 構造減衰

図-6 コイルの回路を閉じたときの
パネル変位のパワースペクトル

図-7 発電電圧の時刻歴
(前半 3 秒間のみを拡大)

図-8 図-7 のパワースペクトル

2. 2 発電ユニットの自由振動特性

図-1の発電ユニットを用いて自由振動実験を行い、受風パネルの構造特性およびコイルの誘導電圧特性を調べた。受風パネルの振動については同パネル上端から30mm下における水平変位をレーザー変位計を用いて計測し、これを回転変位角 θ (rad)に換算した。サンプリング周波数は θ および誘導電圧 V_0 (V)ともに100Hzとした。なお、 θ は図-1において時計周りを正としている。

まず、コイルの電極を AD 変換器に接続しない状態で自由振動実験を行った。得られた θ の時刻歴の一例を図-3に、また、このパワースペクトルを図-4に示す。図-4より固有振動数 f_0 は2.7Hzであり、目標の振動数2.8Hzに概ね一致する。また、自由振動波形から構造減衰を求めた結果が図-5であり、構造減衰は振幅が0.05rad以下の場合を除いて2.8%前後と得られた。次にコイルを AD 変換器につないで通電し、同様に自由振動させて θ と V_0 とを同時に計測した。 θ のパワースペクトルを図-6に示す。図-4と比較すると f_0 は2.5Hzに低下しており、これはコイルを流れる電流により発生した磁場による反力を磁石が受けた結果と思われるが、この反力の影響については今後の課題とする。なお、これ以降、回路を閉じた状態での支配的な振動数である2.5Hzを f_0 とする。一方、 V_0 の時刻歴が図-7である。

一般に電磁誘導においては誘導電圧は磁界の変化速度に比例するため、磁石の変位変動が単一の周波数を持つ場合、誘導電圧も磁石の変位周波数と同じ周波数を持つ。ところが図-7の時刻歴のパワースペクトル(図-8)をみると、 V_0 の支配的な周波数は f_0 のほぼ2倍の4.9Hzとなっている。この理由は、磁石がコイル内を一往復する間にS極およびN極の両方による磁界が作用するためである。実際、磁石の片方の磁極のみが電磁誘導に関与するようにコイルを磁石から遠ざけた位置に設置し、同様な実験を行ったところ、 V_0 の周波数も f_0 に一致した。また、図-7の V_0 の時刻歴は特に振幅が大きい時間帯で非正弦波形的な波形となっている。この原因については、磁石による磁界の強さの空間勾配は磁極付近において非線形的に大きく(例えば文献1))、この影響が磁石の変位振幅が大きい場合に V_0 に現れたためと思われる。図-8には4.9Hzの2倍(9.8Hz)および3倍(14.6Hz)の周波数成分もあり、これらは図-7にみられた V_0 の非正弦波形的な変動による高調波を表している。

3. 屋外実験による自動車励起ガストの特性と発電ユニットの応答特性の検討

3. 1 屋外実験の概要

自動車励起ガストの特性と図-1に示した発電ユニッ

図-9 屋外実験における発電ユニット、自動車超音波風速計の位置関係

トの自動車励起ガストによる応答特性とを調べるために、屋外実験を行った。図-9および図-10に示すように本発電体を道路脇に設置し、その前方を自動車を100km/h前後の速度で通過させた。本ユニットの底面の地面からの高さは75cmとした。 U_v および d をランダムに変えつつ繰り返し自動車を通過させて受風パネル法線方向の風速変動 u 、応答変位角 θ 、および発電電圧 V_0 を同時計測した。ここで、 u については超音波風速計（図-10においては手前側）により計測し、測定部の高さが本ユニットの発電パネル中央高さに位置するように設置した。 θ 、 V_0 、 u のいずれについてもサンプリング周波数は100Hzである。また、自動車の走行速度 U_v については、やや厳密性に欠けるがドライバーが自動車の速度メーターの値を読み取り、これを記録した。さらに、路面に水をまいておき、これをマーカーとする2本のタイヤ跡と受風パネルまでの距離をそれぞれ測り、両者の平均値を d として記録した。なお、実験に用いた自動車は直方体に近い形状のトヨタ・ハイエースであり、60回の計測を行った。また、比較のためにやや小型のスズキ・ワゴンRを用いた計測も15回行った。

3. 2 自動車励起ガストの特性

図-11(a)～(c)は計測された時刻歴データの一例であり、それぞれ u 、 θ 、 V_0 である。まず、図-11(a)の u を見ると、自動車が通過した瞬間の3.5s付近においてスパイク状の変動がみられ、つづいて自動車走行による後流の乱れの通過にともなう風速変動が15s付近まで継続している。 θ （図-11(b)）はスパイク状の風速変動（図-11(a)）が生じた3.5s付近において局所的に大きく変動し、減衰してゆく。乱流の到達により、7.5sにおいて θ の振幅は一旦上昇するが、その後は減衰してゆく。一方、 V_0 （図-11(c)）については、2.2に述べたように f_0 の2倍の周波数が卓越するため、図-11(b)の θ に比べて高周波数で変動しているが、変動の経時的变化は θ とほぼ同様である。このケースでは V_0 の最大値

図-10 屋外実験の様子

図-11 屋外実験において計測された時刻歴の例
(a)風速変動 (b)応答変位角 (b)発電電圧

図-12 図-11(a)の前半6秒間と c_{FP} / c_s (式(1), 図-2) との比較

は1.5V程度である。

以上のように、本ユニットの応答は自動車が通過した瞬間のスパイク状の風速変動の影響が支配的である。そこでまず、このスパイク状ガストを本ユニットのエネルギーの源とみなして着目し、この周波数特性を調べた。ただし、スパイク状ガストは局所的な変動なので、例えば図-11(a)の時刻歴全体をスペクトル解析してもこの周波数を特定するのは不可能である。実際、そのパワースペクトルからは支配的な周波数成分を読み取ることができなかった。そこで図-12に示すように、このスパイク状ガストが図-2の c_{FP} / c_s と相似であると仮定し、 $c_{FP} / c_s = \phi(t)$ において u との内積

$$a_{s,p} = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \phi\left(\frac{t-p}{s}\right) dt \quad (p, s \in \mathbf{R}) \quad (2)$$

を計算した．これを図-11(a)に適用した結果が図-13であり， $|a_{sp}|$ をコンターで表している．本来，縦軸は時間スケールの倍率を表す s であるが，理解を容易にするために f_0 で無次元化した周波数へ置き換えている．3.5s付近に大きな $|a_{sp}|$ があり，スパイク状ガストの存在を意味すると同時に， $\phi(t)$ とよく似た波形が u に含まれてことを示唆する．さらに，スパイク状ガストの発生がみられた3.5s付近において $|a_{sp}|$ が最大となる f/f_0 を抽出し（図-13においては約 $f/f_0=1.2$ ），このときの f をスパイク状ガストの周波数とした．全ての計測データについて同様の計算を行い，スパイク状ガストの周波数を $f_s = f d / U_v$ のように無次元化した結果が図-14である． f_s にはややばらつきが見られるもののその平均は $f_s=0.3$ と得られ，これを本研究におけるスパイク状ガストの無次元周波数とする．一方，図-2ならびに式(1)のSanz-Andresら³⁾のモデルの場合，本研究においては自動車励起ガストの空気力の無次元周期を $T=2$ としたことから $f_s = 1/T = 0.5$ である．本研究で得られた無次元周波数はこの6割となった．

3. 3 発電ユニットの応答特性

全計測ケースについての $|\theta|$ の最大値 θ_{max} を抽出した． θ_{max} は例えば図-11(b)の3.5sに見られた局所応答の振幅である．図-15は θ_{max} を U_v に対してプロットしたものであり，両者には明確な相関がみられない．また，図-16は d と θ_{max} との関係であるが，やはり両者の相関は不明瞭である．これは式(1)のところで述べたSanz-Andresら³⁾の空気力の定義より推論されるように，本ユニットの応答を励起する空力モーメントの大きさには U_v と d の双方が関与するためである．さらに図-15と図-16の両方において，トヨタ・ハイエースを用いたケースの θ_{max} よりも，軽自動車であるスズキ・ワゴンRを用いたケースの方がやや小さい．これはやはり空力モーメントの大きさに自動車のスケールも関与するからである．

そこで風速変動が受風パネルの面に一様に作用すると仮定して，式(1)の基準空気力である $1/2\rho U_v^2(2B)$ を空力モーメントへ変換し，これを用いて θ_{max} を整理する．空力モーメントの基準を $1/2\rho U_v^2(2B)L^2/2$ とし，さらに自動車のスケールと本ユニットから自動車までの距離を考慮するために，これに c_s を乗じた $1/2\rho U_v^2 BL^2 c_s$ を基準値とする．ここで， L は受風パネルの高さ， B は受風パネルの幅の1/2である（ $L = 0.3 \text{ m}$ ， $B = 0.14 \text{ m} : 2.1$ を参照）．図-17は $1/2\rho U_v^2 BL^2 c_s$ を横軸として θ_{max} をまとめたものである．ややばらついてはいるものの両者は比

図-13 $|a_{sp}|$ の分布（図-11(a)に式(2)を適用した結果）

図-14 スパイク状ガストの無次元周波数

図-15 車速と最大変位角との関係

図-16 受風パネル-車軸間距離と最大変位角との関係

例関係にあり， θ_{max} は $1/2\rho U_v^2 BL^2 c_s$ を用いて整理できる．また，数は少ないが，図-17中の塗りつぶしたプロットは前節で抽出したスパイク状ガストの周波数と固有振動数 f_0 との比が $0.95 < f/f_0 < 1.05$ の範囲にあったケースである．総じて，スパイク状ガストの周波数が f_0 に近い場合に θ_{max} は大きくなる傾向にある．ただし $1/2\rho U_v^2 BL^2 c_s$ が0.3程度より大きい場合には，この傾向は明確ではなく，スパイク状ガストの周波数と f_0 との一致度が θ_{max} に及ぼす影響は少ない．一方，図-18は $|V_0|$ の最大値 V_{max} を θ_{max} に関してプロットしたものである．

両者は明確な相関を示し、応答が予測できれば最大発電電圧の推定が可能と思われる。また図-18には、 V_{max} の2乗をコイルの抵抗値（14.8Ω）で除すことにより求めた最大電力 W_{max} もあわせて示している。たとえば $c_s = 0.06$ 、 $U_v = 27.8\text{m/s}$ （100km/h）で自動車が走行しているとする、図-17の近似直線より $\theta_{max} = 0.13\text{ rad}$ 、つづいて図-18より W_{max} は約100mWと推定される。この条件の下で、本ユニットの発電量を試算してみる。本ユニットの電圧波形は図-7に示したように非正弦波形的であるので電力の波形も非正弦波形的となるが、これを正弦波とみなす。かつ、自動車が通過した瞬間のスパイク状ガストによる風速変動1波のみが発電に寄与するものと単純化し、1時間あたりの発電量を

$$Wh^n = n \int_0^{1/(2f_0)} W_{max} |\sin 2\pi(2f_0)t| dt \quad (3)$$

より概算する。ここで n は1時間あたりの自動車の通過台数である。仮に車間距離を100mとすると $U_v = 27.8\text{m/s}$ （100km/h）の下で $n = 1000$ 台/hであり、本ユニット1体あたりの Wh^{1000} はおおよそ400Whと見込まれる。

4. まとめ

高速で走行する自動車が励起する変動気流をエネルギー源とする受風振動型発電ユニットを提案し、屋外実験においてその挙動を調べた。以下にその結果をまとめる。

- (1) Sanz-Andresらが導いた抗力モデルを参考に発電ユニットを設計・試作し、その自由減衰振動波形より応答特性と発電特性を得た。
- (2) 屋外において本ユニットの前方を自動車を通過させ、変動風速、応答、発電電圧を計測した。その結果、自動車が通過した瞬間のスパイク状の風速変動が本ユニットの応答ならびに発電電圧に支配的に影響を及ぼすことが示された。
- (3) 自動車が通過した瞬間のスパイク状の風速変動の周波数を抽出し、自動車の走行速度と本ユニットー自動車中心までの距離とで無次元化したところ、約0.3と得られた。
- (4) 本ユニットの応答の最大値は、自動車の速度、本ユニットー自動車中心までの距離、自動車の断面積を考慮した空力モーメントによりほぼ整理できる。さらに、応答の最大値と発電電圧の最大値とは明確な相関がみられた。
- (5) 風速変動に含まれるスパイク状の変動の周波数と固有振動数とが近い場合に、本ユニットは大きな

図-17 基準空力モーメント $1/2\rho U_v BL^2 c_s$ と最大変位角との関係

図-18 最大変位角と最大電圧および最大電力との対応
応答を示す傾向がみられた。

謝辞：屋外実験において日本大学・野村卓史教授よりご支援を賜りました。ここに記して謝意を表します。

また、本研究は科学研究費補助金（若手研究(B)）の補助により実施されました。

参考文献

- 1) 中野公彦, 中山敦志, 斉藤俊, 黒瀬智広：人の歩行と共振する質量一ばね系を利用した携帯用動電型発電機, 日本機械学会論文集 (C 編), 68 巻 670 号, pp.19-24, (2002)
- 2) 則次俊郎, Kahar SAMSAK, 高取弘之：エネルギー回収型空気式アクティブサスペンションの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), 66 巻 648 号, pp.2583-2588, (2000)
- 3) Sanz-Andres, A., Santiago-Prowald, J., Baker, C. and Quinn, A.: Vehicle-induced loads on traffic sign panels, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp.925-942, (2003)
- 4) Sanz-Andres, A., Laveron, A., Baker, C. and Quinn, A.: Vehicle-induced loads on pedestrian barriers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 92, pp.413-426, (2004)
- 5) Baker, C. J., Sterling, M., Huggins, T. and Quinn, A.: The slipstreams and wakes of ground vehicles, *5th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Summary Papers*, pp.553-556, (2004)