

電力生成技術「エネルギーハーベスティング」に関する研究

新井 浩成, 浦池 隆文, 多田 達実, 大村 功

Study on Energy Harvesting Technology

Hironari ARAI, Takafumi URAIKE, Tatsumi TADA, Isao OHMURA

キーワード：圧電素子, 電気二重層コンデンサ, DC-DCコンバータ, カンチレバー, ランダム振動

1. はじめに

エネルギーハーベスティングとは環境中に様々な形態で存在する振動・熱・電磁波などのエネルギーから電力を生成することを意味している。これまで我が国における事業化の取り組みは欧米と比べ10年以上遅れていたが昨年5月, 本技術に関する利用促進や標準化に向けて, エネルギーハーベスティングコンソーシアムの設立, 各種エネルギーハーベスティング用IC製品の発表が相次ぐなど注目を集めている。

これらの背景には, 増え続ける電子機器の電力消費量とそれに伴う二酸化炭素削減, 電子機器の電池交換や充電頻度の削減, 電子機器を“いつでも・どこでも・誰でも・何にでも”使用するユビキタス社会実現などの手段としてエネルギーハーベスティング技術の応用が期待されているためである。

本研究では変形することで起電力が発生する圧電素子を用い, 構造物や自動車などの振動エネルギーを対象に電子回路の省電力化技術および共振現象を得るための機械設計, 振動解析技術の活用によって電力生成効率向上を図る取り組みを行った。

2. 圧電素子の特性

圧電素子はコンロの着火装置, 電子ブザーや各種センサなどに幅広く用いられている。材料は水晶や特定のセラミックなどで, 通常は図1に示すように結晶体の中央にプラスイオンが存在しているが, 圧力を受けるとプラスイオンが移動することで圧力に応じた分極(表面電荷)が現れる。¹⁾ また, 圧電材料を上部電極と下部電極で挟み込んだ単純な構造によって素子化が可能であるため, 薄く, 軽いという特徴を有する。

断面構造と電子ブザーを分解して取り出した圧電素子の一例を図2に示す。

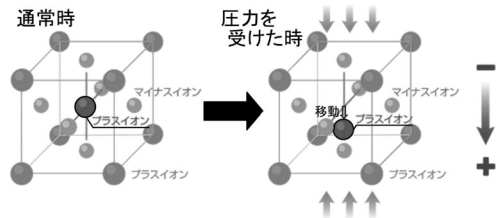


図1 分極の原理

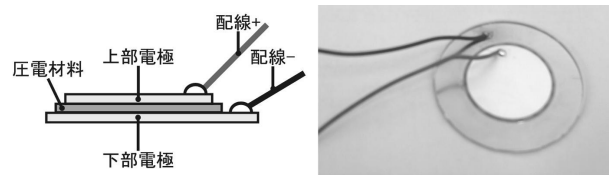


図2 圧電素子の断面構造と電子ブザーの分解例

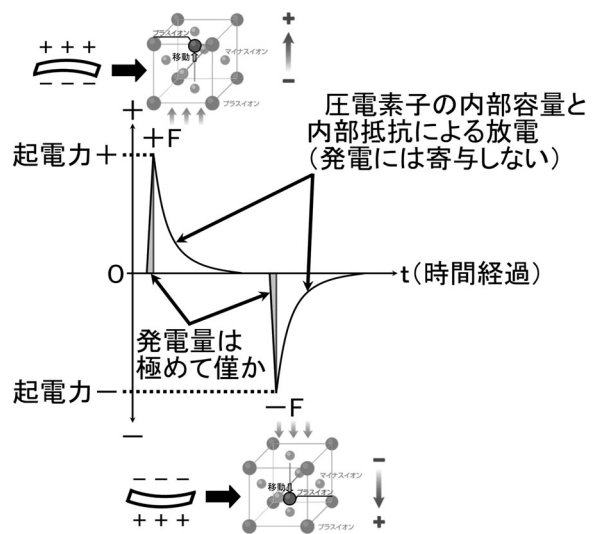


図3 圧電素子の応答特性

事業名：経常研究
 課題名：電力生成技術「エネルギーハーベスティング」に関する研究

圧電素子に衝撃を加えると図3に示すようなインパルス応答波形が観測される。実際の起電力は観測された波形の立ち上がり部分のみで極めて僅かとなる。波形の立ち下がり時は圧電素子内に存在する静電容量と内部抵抗による放電現象であるため、発電には寄与しない。さらに変形したままの状態では放電現象によって起電力がゼロになってしまうため、圧電素子に加わる力を連続的に変化させることが電力を生成する上で重要となる。

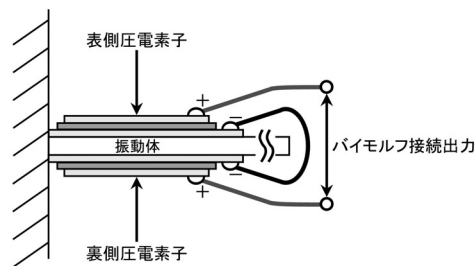


図5 バイモルフ接続 (片持ち梁の例)

3. エネルギーハーベスティングシステムの検討

電力生成効率を上げるためには①小さな圧力(応力)に対して起電力の大きい圧電素子の採用, ②低消費電力でかつ電気損失の少ない電子回路, ③共振現象を得られやすい振動体(機械系)が主な要素である。①の圧電素子は価格面や入手性から市販されている電子ブザーの圧電素子を取り出して使用している例が多く, 本研究では接続方法などを主に検討した。②の電子回路は圧電素子から得られる起電力が僅かであるため, 電気二重層コンデンサへの蓄電とDC-DCコンバータによって必要な電源電圧へ変換する方式とし, 回路および制御方法について検討を行った。③の振動体は3種の機構に関して検討し, 片持ち梁は正弦波振動による評価, カンチレバー(片持ち梁先端に錘を取り付けた構造)については自動車輪送振動を模擬したJIS Z0232に基づくランダム振動による評価を行った。

3.1 圧電素子の接続方法について

圧電素子を貼り付けた振動体からの起電力は僅かであるため, 複数枚の圧電素子を用いることが一般的となっている。その際, 図3に示したように圧電素子に加わる応力によって起電力の極性が変わるため, 接続に当たっては起電力を打ち消し合わないような接続が重要となる。

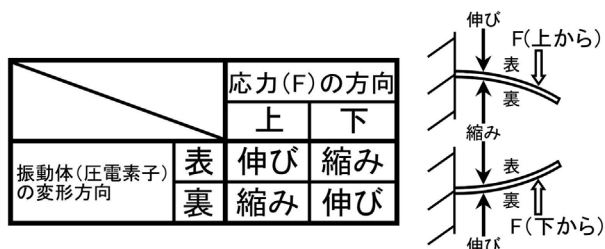


図4 振動体を受ける応力と変形の関係 (片持ち梁の例)

圧電素子をモジュール化している例もあるが, 図4に示すように振動体への応力と変形の違いを利用し, 図5に示すように振動体の表裏に圧電素子を貼り付け起電力を合成するバイモルフ接続が圧電素子を複数枚接続する際の基本単位となる。さらにこれらを振動体からの起電力(電圧)が小さい場合は直列接続, 大きな場合は並列接続とする複数の組合せによって必要な発電量を確保する。

3.2 蓄電回路の検討

圧電素子から得られる起電力だけで電子機器を動作させるのは消費電力との乖離や安定的に電源を供給する観点から難しい。そこで, 本研究では得られた起電力を整流し直流化, 電気二重層コンデンサへ蓄電した後, DC-DCコンバータによって電子機器が必要とする電源電圧へ変換を行う図6に示すような構成とした。なお, DC-DCコンバータには, 0.9Vから動作可能で自己消費電力が16 μ AのMAXIM社製MAX1675を用いている。

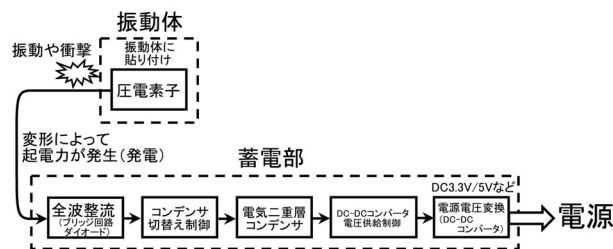


図6 蓄電回路(電気系)の構成

全波整流を行うブリッジ回路のダイオードには順方向電圧降下の少ないショットキーバリアダイオードを用いた。本研究では順方向電圧降下0.475V(順方向電流3A時)の1N5820を使用した。データシートでは漏れ電流が約500 μ Aと大きい。そのため, 圧電素子から起電力が得られない期間に電気二重層コンデンサに蓄電された電気エネルギーが図7に示すようにブリッジ回路のダイオードを経て放電してしまうことが問題となった。

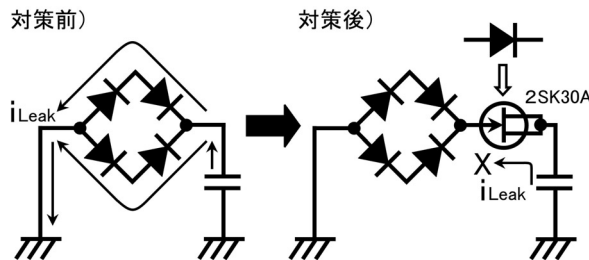


図7 漏れ電流の経路とJ-FETによる対策

対策としてブリッジ回路と電気二重層コンデンサ間にnチャネルJ-FETの2SK30Aのソースとドレイン間を短絡したも

のを低漏れ電流特性を有する等価的なダイオードとして用いる方法で漏れ電流を低減した。しかし、一般のダイオードと同様な順方向電圧降下を有するため、ブリッジ回路にショットキーバリアダイオードを用いた優位性を生かすことは出来ていない。ショットキーバリアダイオードを用いると一般のダイオードと比べ約1Vまでの低電圧領域における蓄電特性の優位性を確認している。そのため、ブリッジ回路には順方向電圧降下が小さく、漏れ電流の少ないショットキーバリアダイオードを用いることが重要となる。

電子機器の駆動時間を長くするためには蓄電する電気二重層コンデンサの静電容量を大きくする必要がある。しかし、コンデンサの蓄電（充電）は過渡現象によって静電容量と蓄電時間の比例関係により、単一のコンデンサでは最適化を図ることは出来ない。そこで、複数のコンデンサの切り替え（並列接続）によって静電容量の拡大と蓄電時間の短縮を図るための検討を行った。

3.2.1 アナログ方式の検討

アナログ方式では電圧制御素子であるnチャンネルMOS FETとpチャンネルMOS FETを組み合わせた図8に示すような切り替え回路によって1組当たり数μAで制御可能となった。²⁾

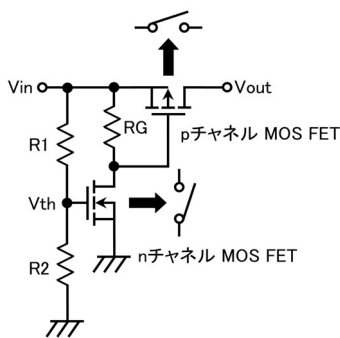


図8 MOS-FETの組合せによる切り替え回路

本回路ではnチャンネルMOS FETのゲートソース間電圧がしきい値電圧Vthを超えるとONになり、切り替え制御を行うpチャンネルMOS FETのゲートを駆動（ゲートソース間に電位差が発生）することでpチャンネルMOS FETも同時にONとなり、VinからVoutへ電圧を供給する。そこで、Voutへ電圧を供給（制御）するための入力電圧Vinは、

$$V_{in} = \frac{R1+R2}{R2} V_{th} \dots(1)$$

で表される。抵抗R1, R2（消費電力を低減するため、抵抗値はMΩ台）による入力電圧Vinの分圧とFET個々でVthが異なるため、設定の自由度という点で若干の制約を受ける。本研究で使用したnチャンネルMOS FET 2SK2009のVthは0.5V~1.5Vであるとデータシートに示されているが、実際には0.4V前後でONになった。試作した蓄電回路を図9に示す。

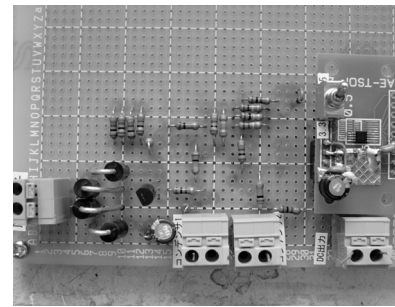


図9 アナログ方式の蓄電回路

3.2.2 デジタル方式の検討

マイクロコンピュータを使用したデジタル方式として、本研究では10Bitの分解能を有するA/Dコンバータを内蔵したPIC12F675を用い、図10に示すような構成について検討を行った。

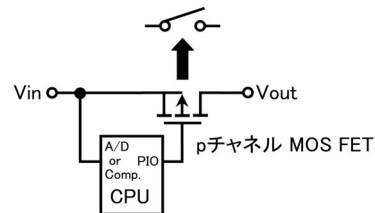


図10 マイクロコンピュータによる切り替え回路

マイクロコンピュータを用いると切り替え制御を行うPチャンネルMOS FETをパラレル出力ポート（PIO）から直接駆動可能となるため、nチャンネルMOS FET、分圧抵抗が不要など回路を簡略化出来る。さらにソフトウェアによって入力電圧をA/Dコンバータで読み取り、その電圧に応じてpチャンネルMOS FETをONにすることが可能となるため、複数の電気二重層コンデンサの切り替えなど制御面の機能向上に適している。また、電圧比較機能（コンパレータ）を有しているマイクロコンピュータであれば、A/Dコンバータを使用しなくても同等の機能を実現することが可能である。しかし、本研究で使用したマイクロコンピュータでは最大1mA程度の消費電流となるため、本方式を用いるためにはある程度の発電能力を必要とする。

3.3 振動体の検討

振動体は（運動エネルギーから効率的に起電力を得るためには）目的とする周波数で共振すること、単純な構造で小型であることが求められる。しかし、振動体の共振周波数は形状（長さや重さ）、材料の弾性係数などに依存するため制約が生じる。そこで、以下の構造に関する検討を行った。

3.3.1 片持ち梁の検討

最も単純な構造、即ち一端を固定し、他端を自由にした片

持ち梁の第一次から第四次までの固有振動モードを図11に示す。腹は固定端付近で曲率がきつく、節は不均等に現れているため、圧電素子を貼り付けるのは固定端側が望ましい。

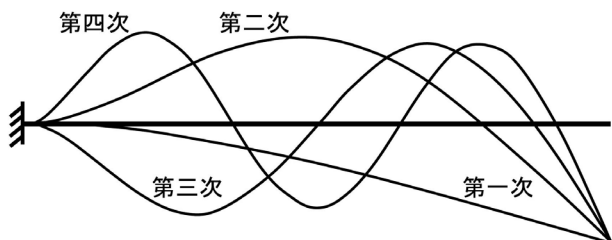


図11 片持ち梁の固有振動モード

全長の異なる2種類の片持ち梁と静電容量0.22Fの電気二重層コンデンサを使用した蓄電回路の組合せで、それぞれの梁が有する第一次共振周波数の正弦波電圧を固定端側に貼り付けた加振用圧電素子へ加え、3時間加振をした際の蓄電特性を評価した。主な試験条件を表1に示す。

表1 片持ち梁正弦波加振試験条件

	片持ち梁試験条件		備考
梁寸法 (mm)	200(L)X1.2(H)X40(D)	150(L)X1.2(H)X40(D)	材質はアルミ
第一次共振周波数 (Hz)	29.6	49.8	それぞれの共振周波数で加振
圧電素子寸法 (mm)	65(L)X0.5(H)X20(D)	30(L)X0.5(H)X20(D)	富士セラミックス社製の特注品
加振時電圧 (V/rms)	148	148	加振用とエネルギーハーベスティング用は同じ仕様
加振時電流 (mA/rms)	2.40	1.73	

本試験を通じて、先に述べたブリッジ回路に用いたショットキーバリアダイオードの漏れ電流の大きさなど蓄電回路の問題が明らかとなり改善を図って行った。3時間経過後における電気二重層コンデンサの電圧はそれぞれ5.2V、3Vとなり、第一次共振周波数29.6Hzを有する梁の方が大きな電圧を得られた。コンデンサへ蓄電された電気エネルギーWは、

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \dots(2)$$

で表される。Cはコンデンサの静電容量 (F)、Vはコンデンサの電圧 (V) となる。(2) 式に静電容量0.22と電圧を代入するとそれぞれ2.97J、0.99Jの電気エネルギーを蓄電した。この結果、第一次共振周波数29.6Hzを有する梁は約3倍大きくなったが、加振用圧電素子への供給電力は約1.38倍、圧電素子の面積は約2.16倍、第一次共振周波数29.6Hzを有する

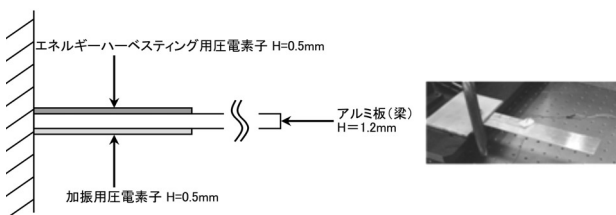


図12 片持ち梁の断面構造および試験風景

梁が大きいかを考慮すると2種の梁に用いた圧電素子単位面積当たりの発電能力はほぼ同じであることを示している。断面構造および第一次共振周波数29.6Hzを有する片持ち梁の試験風景を図12に示す。

3.3.2 両持ち梁の検討

本構造で振動体自体の小型化には適していないが、構造物からの応力を受ける梁の両固定端側に圧電素子を配置することによって片持ち梁と比べ、エネルギー回収量増加に寄与する可能性がある。そこで、圧電素子配置に関する構造解析を図13に示すようなモデルを基に行った。なお、第一次共振周波数を約2Hzとするため、全長600mmのアルミの両持ち梁中央部へ鉄の錘重量1kgを取り付け、圧電素子は加振用およびエネルギーハーベスティング用共に同じ仕様(形状)という想定である。

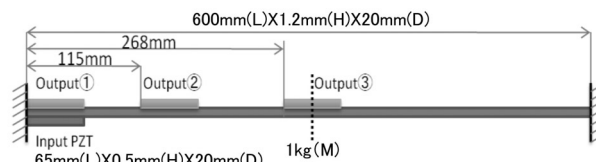


図13 両持ち梁の構造解析モデル

エネルギーハーベスティング用圧電素子の配置位置は梁の上面固定端側のOutput①、固定端から115mmのOutput②、固定端から268mm(梁中央部)のOutput③の3ヶ所で、固定端裏側のInput PZT(加振用圧電素子)で加振した場合の応答特性である。解析結果では固定端側Output①および梁中央のOutput③で、第一次共振周波数に対する応答特性を有していたが、それらに間に配置したOutput②は、節にあたるため応答性は見られなかった。一例として固定端側のOutput①の応答特性を図14に示す。

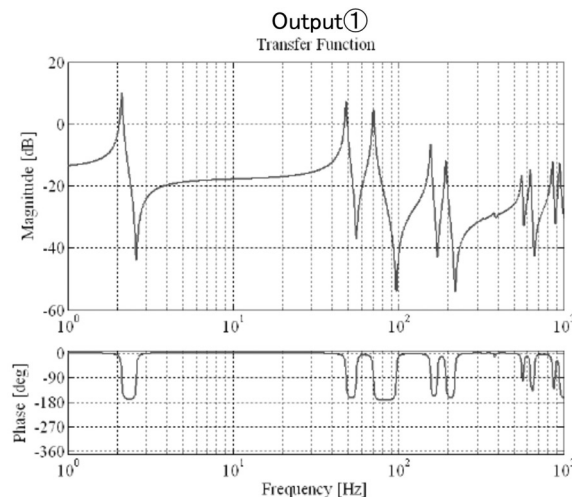


図14 両持ち梁Output①の応答特性

3.3.3 カンチレバーの検討

カンチレバーの固有振動モードは片持ち梁に準じ、先端部の錘によって梁の全長が短くても第一次共振周波数を下げることが可能となる。約2 Hzの第一次共振周波数で応答特性が最大化した構造解析の一例として、解析用モデルと評価パラメータおよび応答特性を図15に示す。その際の条件はアルミの梁全長350mmに鉄の錘重量80gの場合で、表1で示した研究当初の片持ち梁に比べ、約2倍程度の全長しか有しないにも関わらず、第一次共振周波数は約2 Hzと約1/10以下へと低下している。

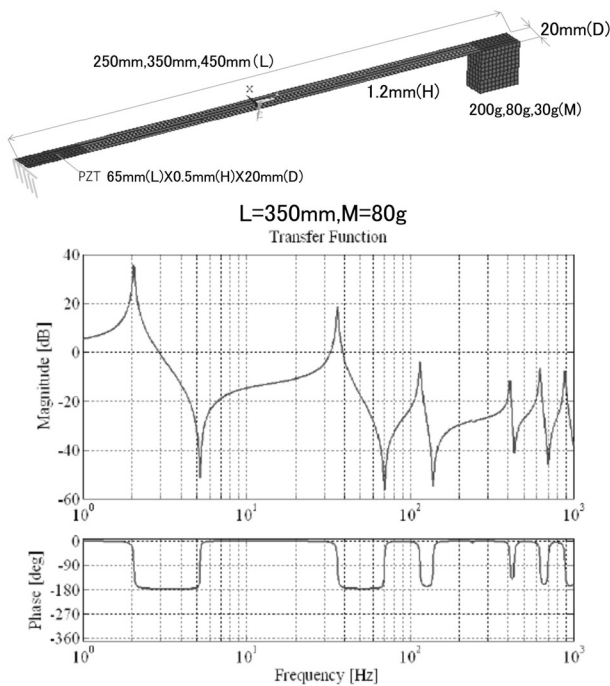


図15 カンチレバー構造解析の一例

4. エネルギーハーベスティングシステムの評価

エネルギーハーベスティングシステムの評価として車載向け用途を対象とした場合、自動車走行時の主な振動は数Hz程度の周波数域に大きく分布している。³⁾ このような条件下ではカンチレバーが小型化に有利で振動体として適している。そこで、振動体として第一次共振周波数を約2 Hzに設計した4種のカンチレバーを用意し、これらに蓄電回路として静電容量0.1Fの電気二重層コンデンサを組み合わせたエネルギーハーベスティングシステムを構築した。本システムを当場が所有する振動試験装置を用い、自動車輸送振動を模擬したJIS Z0232に基づくランダム振動試験によって蓄電特性の評価を行った。なお、主な試験条件を表2に、ランダム振動試験風景の一例を図16に示す。

図17に示した試験結果より、観察された共振現象の大きさ、即ち定常状態の振動に比べ大きく振動する出現頻度および振

表2 ランダム振動試験条件

	ランダム振動試験条件	備考
梁寸法 (mm)	250(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=200g
	280(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=170g
	300(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=120g
	350(L)X1.2(H)X20(D)	材質はアルミ、錘は鉄 M=80g
圧電素子寸法 (mm)	65(L)X0.5(H)X20(D)	富士セラミックス社製の特注品
ランダム振動実効加速度 (m/s ²)	5.8	
試験時間 (分)	30	

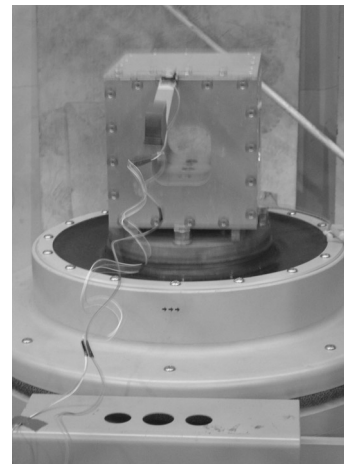


図16 ランダム振動試験風景

幅の大きさが発電能力に反映された。構造解析では全長350 mm、錘80gの条件が最も第一次共振周波数における応答特性が良い結果であった。しかし、実際の試験では全長280mm、錘170gの条件が最も大きく、電気エネルギーは0.98J、発電量は494 μW・hであった。また、全長250mm、錘200gの条件が最も小さく、電気エネルギーは0.13J、発電量は72 μW・hであり、約7倍の差となった。

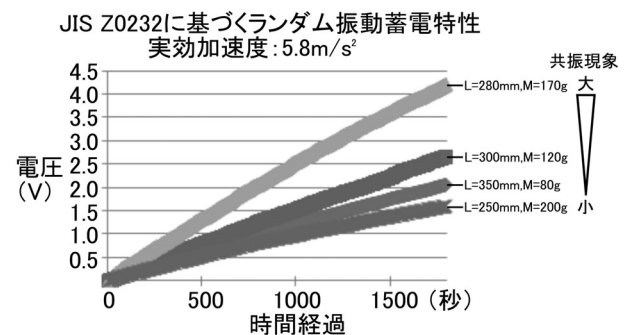


図17 ランダム振動試験結果

自動車走行時を想定したランダム振動の場合、構造解析で得られた第一次共振周波数に対する振動だけではなく前後数Hzの帯を持った振動に対する感度が必要であることを示している。主な電気的特性の最大と最小を表3に示す。

表3 ランダム振動試験による主な電気的特性（最大と最小）

	最大	最小
梁の全長と錘の重量(条件)	L=280mm M=170g	L=250mm M=200g
コンデンサ端子間電圧(V)	4.22	1.60
エネルギー量(J),($W = \frac{1}{2} CV^2$)	0.89	0.13
電力量($\mu W \cdot h$),($P = \frac{W}{1000}$)	494	72
電荷量(C),($Q = CV$)	0.42	0.16
平均電流(μA),($i = \frac{Q}{t}$)	233	89

5. まとめ

車載向け用途を対象としたエネルギーハーベスティングシステムの開発および評価として、自動車輸送振動を模擬したJIS Z0232に基づくランダム振動試験を行い、以下の結果が得られた。

- ①振動体に圧電素子を貼り付け、電気二重層コンデンサ、DC-DCコンバータなどで構成されるエネルギーハーベスティングシステムを試作した。電気二重層コンデンサの切り替え制御ではアナログ方式が1回路当たり数 μA 程度と低消費電力化に有効であることを確認した。また、デジタル方式では切り替え制御の柔軟性や拡張性に対して有効であることを確認したが、消費電流は約1mAとやや大きいことが課題となった。そのため、発電規模を踏まえた上で最適な切り替え制御方式を選択する必要がある。
- ②振動体として、片持ち梁、両持ち梁、カンチレバーの構造検討および評価を行った結果、カンチレバーが第一次共振周波数の低下と小型化に有効で、車載用途を想定した周波数数Hz程度の振動に適していることを確認した。また、両持ち梁は梁の両固定端側に圧電素子を配置することで片持ち梁と比べエネルギー回収量増加に寄与する可能性を確認した。
- ③エネルギーハーベスティングシステムの評価として、JIS Z0232に基づくランダム振動試験を全長と錘重量の組合せが異なる4種類のカンチレバーに対して行った結果、ほぼ同じ約2Hzに第一次共振周波数を有するにも関わらず発電量に約7倍の差が生じ、共振現象の有効性を確認した。自動車走行（ランダム振動）を想定した場合、第一次共振周波数の応答性だけでなく、それ以外の周波数領域に対する応答性も重要であることを確認した。

今後、振動体の適正化などを進め、圧電素子1枚当たり1mW・h以上へ発電能力の引き上げと車載用途以外への展開を目指して行く。また、エネルギーハーベスティングコンソーシアムで検討されている試験方法の統一など客観的な評価手法が必要と考えられる。

本研究を通じて蓄積した電子回路設計・評価技術および振動に関わる機械設計・評価技術は当場の基盤技術として、企業の技術開発支援へ活用して行く予定である。

さらに発電能力が高く安価な圧電素子の開発によって本技術分野の発展が加速されることを期待する。

謝辞

本研究で使用した振動試験装置は財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

最後に、本研究に当たって振動体の機械設計・シミュレーションなど機械系全般に渡って北海道大学大学院工学研究院教授梶原逸郎先生、准教授原田宏幸先生、大学院生の櫻井努氏の協力を頂いたことに紙面を借りて深く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) テクの雑学第89回力で電気を生み出す仕掛け—身の周りにおける圧電効果—, TDK株式会社
- 2) トランジスタ技術, CQ出版社, pp.148-150, (2010年11月号)
- 3) 吉川毅・新井浩成・大村功, ランダム振動試験による耐振性能評価手法, 北海道立工業試験場報告No.306