

防振パレットを用いた物流振動発電の研究

47-136698 岩越 智哉
指導教員 保坂 寛 教授

For the energy source for distribution tracking system, we made a new type of vibration proof pallet that reduces vibration and in the same time generates electricity. We made a model to simulate the motion of a rigid body that is connected to several links, consisted of spring and damper, and we did a simulation to evaluate electrical power generation and vibration isolation characteristic. For the electricity generating part, we made actual generator using electromagnetic induction and piezoelectric elements, and determined that piezoelectric elements are suitable for the use for vibration proof pallet. We also made actual generator using piezoelectric elements with structure near to actual Vibration Proof Pallet, and examined its electrical generation.

Key words: Energy Harvesting, Distribution, Vibration Proof Pallet, Vibrations, Generator, Piezo Electric Element

1 序論

近年の国際物流量の増大に伴い、パレットやコンテナなど物流機器の位置追跡へのニーズが高まっている。パレット等は保守間隔が数か月～数年と長いので、物流追跡では、GPS や通信機器の電池切れが一つの課題となっている。また追跡対象は精密機器や食品であり、位置とともに防振性を要求されることが多い¹⁾。一方近年、Energy Harvesting または環境発電と呼ばれる、身の周りに拡散するエネルギーを利用する電源技術が各種開発されている²⁾。このうち、振動エネルギーは最も研究例が多い一方、実用化例は少ない。これは慣性力を使うために発電量が発電機の質量に比例し、小型化が難しいためである。これらの背景のもとに、本研究では、防振により吸収したエネルギーを電力に変換し、GPS の電源とする発電パレットを提案する。パレットの場合、積載物の慣性力がエネルギー源となるため、発電機のサイズに依らず大きな電力を得ることができる。このため、発電機部品は既存技術で対処可能と考えられる。一方、防振性能と発電量を両立させる最適設計が必要であり、実際の物流状況を考慮した運動解析が必要である。以下では、発電パレット実現の第一歩として、輸送物を剛体と見なした発電量の推定と、発電方法の検証を行う。

2 発電パレットの原理と動特性解析

2.1 発電パレットの基本原理解

まず、Fig. 1 のように一般的にバネとダンパによるリンクでつながれた剛体の運動を考える。ここで、剛体とリンクとの接触点は回転自由であるとする。絶対座標系 XYZ 上に剛体があり、その物体座標系を、剛体の重心を中心とする o -xyz とする。物体座標系の絶対座標系から見た姿勢行列を R 、剛体の慣性テンソルを I 、質量を M とする。また、一つのリンクは Fig. 2 のようにモデル化される。リンクはバネ定数 K_i のスプリングと、発電部をダンパ係数 C_i としたものによりつながれている。リンクの、物体との結節点の絶対座標系上での位置ベクトルを \vec{r}_{ei} 、他方を \vec{r}_{bi} とする。また、物体側の結節点の物体座標系上での位置ベクトルを \vec{r}'_{ei} とする。また、静止状態でのリンクの長さを L とし、リンクの変位により物体に発生する力ベクトルを \vec{f}_i とする。このような条件で、各リンクが任意の運動を行った際の剛体の運動を考える。

まず、剛体の直線方向の運動を考えると、一つの点において発生している力 \vec{f}_i は

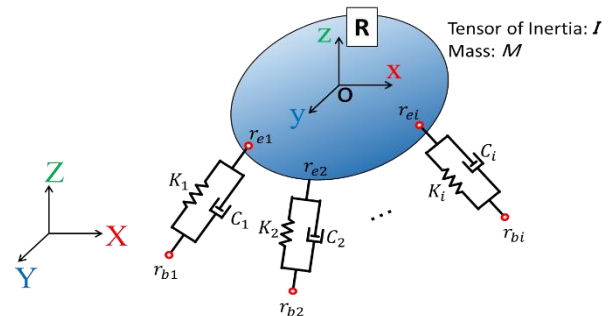


Fig. 1 General model of rigid body connected to several links

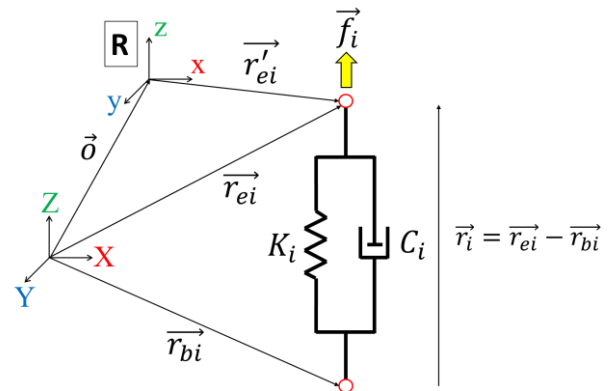


Fig. 2 Dynamical model of a link

$$\vec{f}_i = K_i(L - |\vec{r}_i|) \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} - C_i \left(\dot{\vec{r}}_i \cdot \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} \right) \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} \quad (1)$$

とあらわされる。ここで、 \vec{r}_i はリンク結節点間の相対位置ベクトルを $\vec{r}_i = \vec{r}_{ei} - \vec{r}_{bi}$ である。よって剛体の重心 δ の直線運動は、各点における力ベクトルの合計を \vec{F} とすると

$$\vec{F} = \sum_{j=1}^i \vec{f}_j = M \frac{d^2}{dt^2} \delta \quad (2)$$

次に、剛体の回転運動を考えると、一つのリンクから力が加わる際、物体座標系上においてあらわされる剛体に加わる重心周りのトルク $\vec{\tau}_i$ は、

$$\vec{\tau}_i = \vec{r}'_{ei} \times R \vec{f}_i \quad (3)$$

とあらわされる。よって、各リンクから力が加わる際の重心周りのトルク \vec{T} は、各リンクによるトルクのベクトル和となるため、物体座標系上における角速度を ω とすると、

$$\vec{T} = \sum_1^i \vec{\tau}_i = I \frac{d}{dt} \omega \quad (4)$$

とあらわされる. このとき, 剛体に対してリンクの変位が充分微小であるとする. ω は, x 軸周りの回転角を θ , y 軸周りの回転角を φ , z 軸周りの回転角を ψ とすると, $\omega = \{\dot{\theta}, \dot{\varphi}, \dot{\psi}\}^t$ とあらわすことができるため, 式(4)は,

$$\vec{T} = I \frac{d}{dt} \{\dot{\theta}, \dot{\varphi}, \dot{\psi}\}^t \quad (5)$$

とあらわすことができる. このとき, 姿勢行列 R は, x 軸周りに θ , y 軸周りに φ , z 軸周りに ψ 回転させた回転行列 R_θ , R_φ , R_ψ の積として考えることができるため,

$$R = R_\theta R_\varphi R_\psi \quad (6)$$

とあらわされる. ここで, たとえば x 軸周りの回転行列 R_θ は以下のようにあらわされる.

$$R_\theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

また, ダンパにて発生する発電エネルギーを考える. ダンパにて消費されるエネルギーが全て電気エネルギーに変換されると仮定すると, N 個のリンクによる合計の発電量 P はリンクの伸縮速度とダンパ係数から

$$P = \sum_{i=1}^N C_i \dot{r}_i^2 \quad (8)$$

とあらわされる.

ここで, たとえばエンドプレートのある一点 \vec{r}_{ei} の運動を考えると,

$$\vec{r}_{ei} = \vec{o} + R \vec{r}'_{ei} \quad (9)$$

とあらわされ, 式(2), (6)を用いて

$$\vec{r}_{ei} = \iint \frac{\vec{F}}{M} dt + R_\theta R_\varphi R_\psi \vec{r}'_{ei} \quad (10)$$

となる. しかし, この点の運動は別の点に加わる力やその変位に影響を受けるため, 式(10)は非線形となり手計算により解くことが出来ない. よって, このような剛体の運動を求めるには, シミュレーションにより数値的に解析を行う必要がある.

2.2 パラレルリンクを用いた発電パレット

実際に防振を行うことを考えたとき, 物流において発生する振動は縦振動のみでなく横方向や回転方向の振動も発生する. そこで, 6 自由度全ての方向の振動を吸収出来る機構を考える. その基本理論モデルを, Fig. 3 に示す. 基本構成はパラレルリンクステージと同一である. 上面と下面を 6 本のリンクで繋ぎ, 各リンクの結節点をユニバーサルジョイントにより固定し, 各リンクは, 互いに平行にならないように取り付ける. リンクにはスプリングが挟まれており, 各リンクが伸び縮みすることで 6 自由度すべてに対して振動を吸収することができる.

下の面をベースプラットフォーム, 上の面をエンドプレートと呼び, 質量 M , 慣性テンソル I の積載物が乗っているものとする. それぞれの位置ベクトルは \vec{p}_b , ベースの中心をエンド側の重心を \vec{p}_e とし Fig. 3 のように絶対座標系, 物体座標系を置く. その他のパラメータは 2.1 の基本

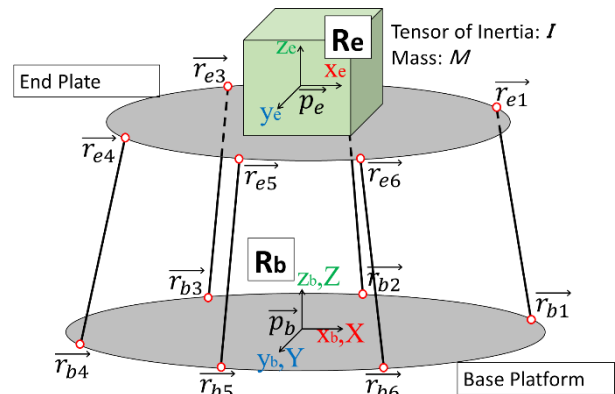


Fig. 3 Theoretical model of pallet using parallel mechanism

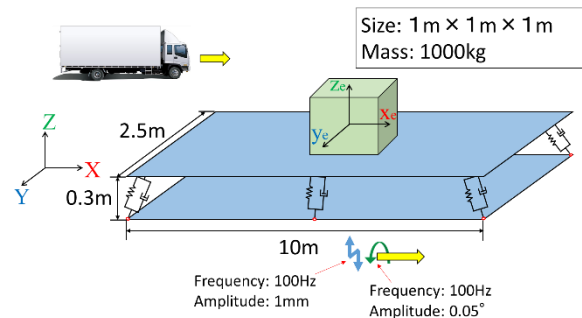


Fig. 4 Simulation model

理論と基本的に同様に考えられる. 基本理論との違いは, ベース側の点それぞれ物体座標系において固定されていることである. ここでベース側の点 \vec{r}_{bi} は,

$$\vec{r}_{bi} = \vec{p}_b + R_b \vec{r}'_{bi} \quad (11)$$

であらわされる.

ここで, Fig. 4 のように, 大型トラック程度のサイズの自動車による輸送を想定したシミュレーションを行う. 進行方向を x 軸, 垂直方向を z 軸とする. 防振パレットの大きさを高さ (z) 0.3m \times 縦 (x) 10m \times 横 (y) 2.5m とし, $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$, 重さ 1t の積荷がパレット中心に載っているものとした. また, スプリングのばね係数を $4.0 \times 10^5 [\text{N/m}]$, 発電部のダンパ係数を $0.7\text{N} \cdot \text{s/m}$ とした. また入力する振動は, 垂直方向 (z 軸方向) の直線振動と, 進行方向周り (x 軸周り) の回転振動の足し合わせであるとし, 直線振動の振動数と振幅を 100Hz と 5mm , 回転振動を 100Hz と 0.25° とした.

そしてそのシミュレーションの結果発電量は瞬間最大で 22W 程度得られ, 貨物に加わる加速度は $1/100$ 程度に減少させることが出来るということが確認できた.

2.3 現状のパレットの理論解析

現在実際に使われている防振パレットは, パラレルリンクとは違い 4 本のリンクで垂直に取り付けられている. これは, 実際のスプリングが曲げ方向に対しても弾性を有するため, 縦振動以外の方向の衝撃に対してもある程度の防振性を発揮することが出来るためである. そこで, 共同研究者南部氏により行われた, 実際のパレットに近づけた場合の力学モデルとその理論解析を紹介する.

スプリングの曲げ方向を考慮した力学モデルは, Fig. 5 のように考えられる. ベースとエンドプレートは 4 つの

リンクにより垂直に取り付けられており、曲げ方向の弾性はエンド側の接合部に取り付けられた x 軸と y 軸に平行なリンクにより表現できる。その他の力学的な理論は平行リンクと同様であるが、それぞれのリンクは平行な軸の一方方向の成分しか持たない。

そして、このモデルを用いて以下のようなシミュレーションを行った。パレットのサイズは高さ(z)0.1m×縦(x)1.1m×横(y)1.1mとし、1m×1m×1m、重さ 1t の積荷がパレット中心に載っているものとした。また、スプリングのばね係数を z 軸方向は 5.0×10^4 [N/m]、x 軸、y 軸方向は z 軸方向の 10 倍の 5.0×10^5 [N/m]、ダンパ係数を $20 \text{N} \cdot \text{s/m}$ とし、発電効率は 10%とした。加える振動は 6 リンクと同様に垂直方向 (z 軸方向) の直線振動と、進行方向周り (x 軸周り) 回転振動の足し合わせであるとし、直線振動の振動数と振幅を 100Hz と 1mm、回転振動を 100Hz と 0.5° とした。その結果、発電量は約 38W 得られ、振動は約 2%に抑えられた。

3 発電部の検証

3.1 発電パレットに求められる特性

次に、実際の発電部の検証を行った。発電パレットに求められる特性として、不意の振動から貨物を守るようダンピングが高いこと、微小な振動から電力を取り出すことが出来るように高い応答性があることがあげられる。機械的な運動を電力に変換する手法は各種存在するが、ここではダンピングの高い電磁誘導式と、高い応答性を持つ圧電素子式による手法に着目した。

3.2 電磁誘導型の発電理論

電磁誘導を用いた発電方法の基本原則を、Fig. 6 に示す。上下面の相対運動を、リンク機構などにより回転運動に変換し、発電機に運動を伝える。また、発電機はコストや性能の点から、市販のモータやハブダイナモなどを用いる。

ここで、電磁誘導によって発生する電圧 V と電力 W は

$$V = K_e \omega [\text{V}] \quad (K_e: \text{トルク定数}) \quad (12)$$

$$W = \frac{V^2}{R} = \frac{K_e^2 \omega^2}{R} \quad (13)$$

とあらわせる。ここで、通常ハブダイナモなどの発電機は一定方向の定常回転が入力されることを想定されており、コイルと磁石が多極になっているため、微小な往復運動から取り出せる電力を大きくするためには、歯車などの増速機構によって直線運動の増速を行う必要がある。

3.3 圧電素子型の発電理論

圧電素子を用いた発電方法の基本原則を、Fig. 7 に示す³⁾。圧電素子は、市販で安く簡単に手に入るバイモルフ型を用いる。表面積 A 、厚み h の圧電素子に外部から力 f が加わると、応力 σ が発生し、外部抵抗 R に電荷 Q_1 が流れ、圧電素子には電荷 Q_2 が蓄えられる。外部振動により

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (14)$$

のような応力が素子に加わっているとすると、その発生電圧 V と電力 W は

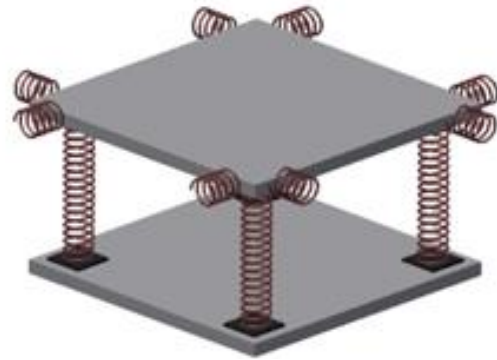


Fig. 5 Dynamic model of 4 link pallet

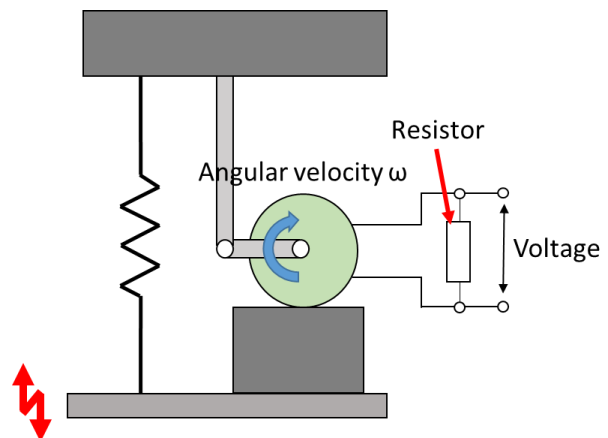


Fig. 6 Theoretical model of electromagnetic induction type

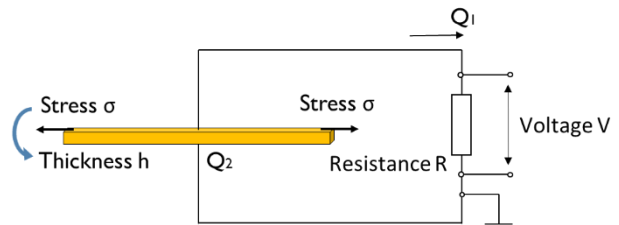


Fig. 7 Theoretical model of piezoelectric element type

$$V = \frac{hd_{31}\sigma_0}{e_0e} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{e_0e\omega AR}\right)^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (15)$$

$$W = \frac{V^2}{R} = \left(\frac{hd_{31}\sigma_0}{e_0e}\right)^2 R \left\{R^2 + \left(\frac{h}{e_0e\omega AR}\right)^2\right\}^{-1} \cos^2(\omega t - \varphi) \quad (16)$$

とあらわされる。ここで、 d_{31} とは素子に対して応力変動が発生した際に、応力の向きと垂直方向に発生する電荷の比率、 e は比誘電率、 e_0 は真空の誘電率である。また、電力 W は以下の抵抗値で最大となると考えられる。

$$R = \frac{h}{e_0e\omega A} \quad (17)$$

式(16)より、圧電素子による発電量を考えると、その発

電量は応力 σ と角周波数 ω に依存している。また、圧電素子はその特性上微小な振動からでも大きな電圧を発生させることがわかっている。物流における微小な振動からでも十分な発電量を得るためには、圧電素子に効率よく力を伝える機構を考える必要がある。

3.4 実験

電磁誘導型、圧電素子型それぞれにおいて実験機を作製した。

まず電磁誘導型は、増速機構を歯車を用いた実験機を作製したが、歯車はガタにより微小振動が吸収されてしまい微小振動からの発電が出来なかった。

次に圧電素子型は、素子に力の伝える方を 3 種検証した。その結果、リニアガイドなどの運動の方向を限定する機構は必要なく、コイルばねを用いて直接素子に力を伝える方式が最も良いということが分かった。

現在用いられている防振パレットの防振性が充分高いことを考慮し、その防振パレットに後付けで取り付けられる圧電素子を利用する方式を検討する。

4 パレット型実験機

4.1 パレット型実験機

パレットに圧電素子を取り付けることを考え、Fig. 8、Fig. 9 に示すようなパレット型の実験機を作製した。Fig. 8 がその模式図、Fig. 9 がその実際の実験機である。素子をスプリングと並列に取り付け、上面と下面の相対運動から電力を取り出す。また、ベアリングを取り付けることにより、素子が s 字状に曲がってしまうことを防いでいる。そして、この実験機による発電量を Fig. 10 に示す。素子を 8 枚接続し、初期振幅 5mm の自由振動をさせている。瞬間最大で 37mW の発電量が得られており、単位面積当たり換算すると同程度の振動条件で 3.09[W/m²] の発電量が、単位堆積あたりでは 618[W/m³] 得られる計算になる。また、実際の防振パレットに搭載することを考えると、防振パレットの大きさが 0.25m × 縦 1.47m × 横 1.1m なので、パレットの体積一杯に圧電素子を敷き詰め、5mm 一層計 50 層重ねたとすると、同様の振動条件で瞬間最大約 250W の発電量が得られる計算になる。

4.2 シミュレーション

実験の結果から、実験機を一自由度のバネマスダンパ系であると仮定して圧電素子一枚による電気的なダンピングを計算すると、 $C = 0.01273[N \cdot s/m]$ となる。これを 2 章 2.2、2.3 で行ったシミュレーションに当てはめる。まず現状のパレットの構造を用いたシミュレーションでは、縦 0.9m × 横 0.8m、高さ 0.15m に 30 層分の圧電素子計 14,400 枚を敷き詰めたとし、振幅 5mm、振動数 100Hz の縦振動を加えると瞬間最大約 18kW の発電量が得られた。

また、パラレルリンクを用いたシミュレーションでは、パレットの上下面が縦方向以外にも相対運動を行うことを考慮しなくてはならないため、パレットに敷き詰める形ではなくスプリングの内側に、一層 2 枚、30 層リンク 6 本で計 360 枚圧電素子を組み込んだとした。同様の振動を与えた結果、瞬間最大で約 11W の発電量が得られた。

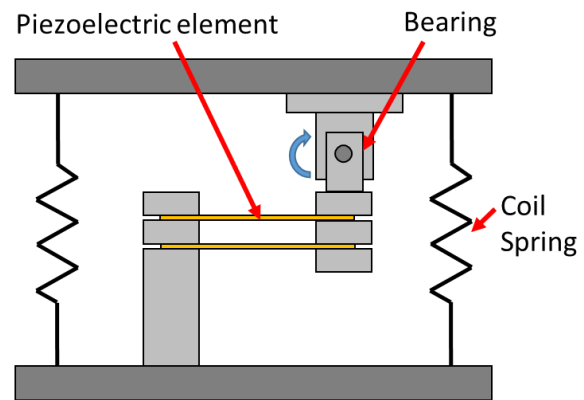


Fig. 8 Schematic diagram



Fig. 9 Experimental setup

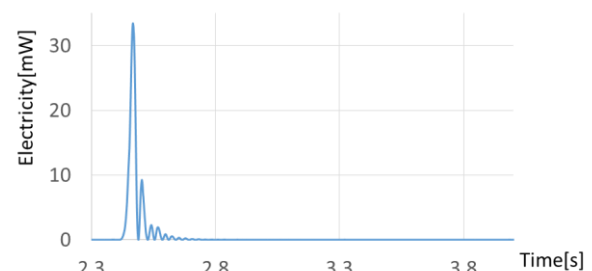


Fig. 10 Experimental result – Electricity

5 まとめ

物流追跡システムのため、防振パレットを用いた新たな発電機の考案、理論検証を行った。シミュレーションにより、約 1/100 程度の防振を行いつつ瞬間最大 20W 程度の発電量を得ることが出来るということが確認できた。また、発電部の検証のため圧電素子を用いた実験機を作製したところ、単位面積当たり 3.09[W/m²] の発電量が得られるという結果が得られた。

参考文献

- 1) たとえば、日本通運ホームページ
<http://www.nittsu.co.jp/press/2013/20130131-1.html>
- 2) 鈴木雄二監修、環境発電ハンドブック、NTS、2011。
- 3) たとえば、辻知章：「変動荷重を受ける圧電素子の発電特性解析」計算力学講演会講演論文集、pp.36-37、一般社団法人日本機械学会、(2011)