

圧電素子への力の加え方と電圧の関係について

宮城県仙台第三高等学校 萩田 泰晴

1. 背景・目的

圧電素子とは、加えられた力を電圧に変換するものである。現在、圧電素子に力を加えるとなると、押して力を加える場合がほとんどであるが、圧電素子で電圧が得られるのは押す力に限ったことではない。そのため、現状では圧電素子の性能を十分に生かすことができていないのではないかと考えた。そこで、押す力以外にも有効な力の加え方があるのを示すことで、圧電素子の利用の幅を広げることを目的として、この研究を始めた。

2. 圧電素子の原理

圧電素子の結晶は図1のような構造で、陽イオンである金属と、陰イオンである酸化物イオンがそれぞれ図のように配置されている。圧電素子にはキュリー点という特定の温度が存在し、キュリー点以上のときは図1左のような立方体の結晶になり、電気的に安定するが、キュリー点以下になると中心の陽イオンの位置がずれ、図1右のように結晶が伸びる。同時に、双極子モーメントの、結晶が伸びた向きの成分が増え、電気分極が起こる。

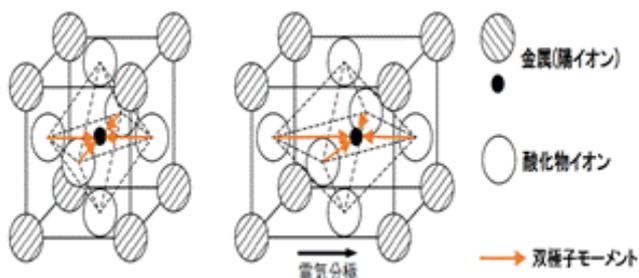


図1 結晶の電気分極の様子
(参考文献[1]より引用)

圧電素子は上記のような結晶の集合体であるが、結晶ごとに自発分極の向きは全く異なっている。この状態では、自発分極同士が打ち消し合ってしまう、圧電素子全体としては分極していない。だが、圧電素子に強い電界を加えると、それぞれの結晶の自発分極の向きが電界の向きに近い向きに揃い、電界を取り除いた後もこの状態はほぼそのまま保たれる。これにより、圧電素子全体としての分極が生じる。

分極が生じた圧電素子では、図2左のように片側の表面層に正電荷、もう片側には負電荷が過剰に存在し、これを

中和するため、空気中の浮遊電荷と結び付く。この圧電素子に対して、図2右のように力を加えると、1つ1つの結晶が縮むとともに中心の陽イオンのずれが小さくなり、圧電素子全体の分極が減少して、表面層の電荷が小さくなる。その結果、表面層の電荷と対になっていた電荷が余り、これによって電圧が生じる。

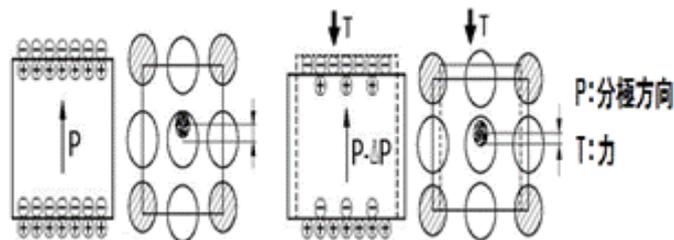


図2 圧電素子に力を加えた際の様子
(参考文献[2]より引用)

3. 実験器具

今回の実験で使用した圧電素子は、写真1に示したタイセイ製の円筒型圧電振動子C-26である。メーカーが出している仕様表によると、寸法は外径36.8mm、内径31.6mm、高さ27.5mmで、絶縁抵抗はDC100Vのときで10MΩ以上であった。

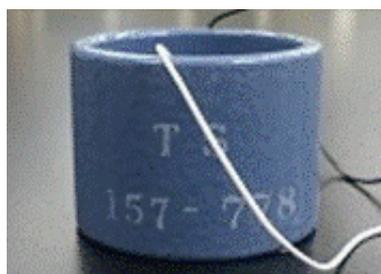


写真1 使用した圧電素子

また、実験装置は写真2のようなもので、圧電素子を2枚の板で挟んでスタンドに固定し、片方の板に糸を付けておもりを吊るし、おもりを持ち上げて下に落としたときの衝撃で圧電素子に力が加わるようになっている。今回は押す力、引く力、剪断力の3種類の力で実験を行い、圧電素子と2枚の板の配置を図3のように変えることで、圧電素子への力の加え方を変えた。

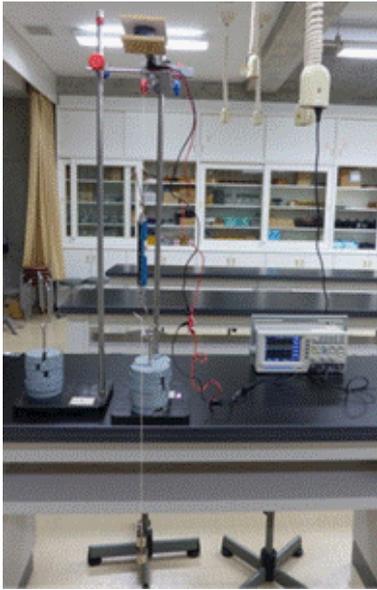


写真 2 実験装置

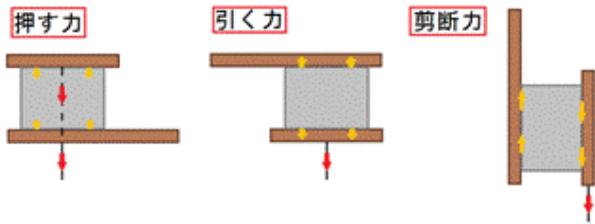


図 3 圧電素子と木板の配置

4. 実験方法

今回の実験では、力の加え方だけでなく、力の大きさも何通りか試して、電圧との関係を調べた。圧電素子に加わる力の大きさを F [N] は、おもりの質量を m [kg]、糸が伸びきって減速を始める直前のおもりの速さを v [m/s]、おもりが減速を始めてから速度が 0m/s になるまでの時間を Δt [s] とすると、運動量と力積の関係より

$$F = \frac{mv}{\Delta t}$$

という式から求めることができる。今回は、 m を 0.050kg 、 0.10kg 、 0.15kg 、 0.20kg の 4 通りにして、それぞれの値を式に代入した。 v に関しては、重力加速度を g [m/s²]、おもりを持ち上げる高さを h [m] とし、おもりが受ける空

気抵抗を無視すれば、 $v = \sqrt{2gh}$ から求めることができる。

今回は、 $g = 9.8$ [m/s²]、 $h = 0.50$ [m] とした。また、 Δt については、事前におもりを落としてみてスローカメラで撮影し、その映像から測定した。

このようにして力の大きさを計算したところ、結果は以下に示したようになった。

$m = 0.050$ [kg] のとき $F = 6.5$ [N]

$m = 0.10$ [kg] のとき $F = 12$ [N]

$m = 0.15$ [kg] のとき $F = 16$ [N]

$m = 0.20$ [kg] のとき $F = 20$ [N]

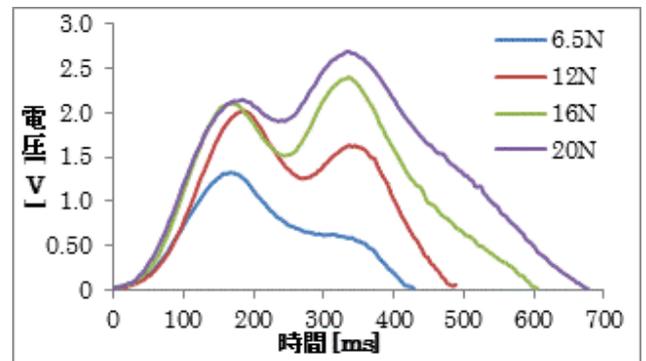
したがって、今回はこれら 4 通りの力の大きさと実験を

行った。

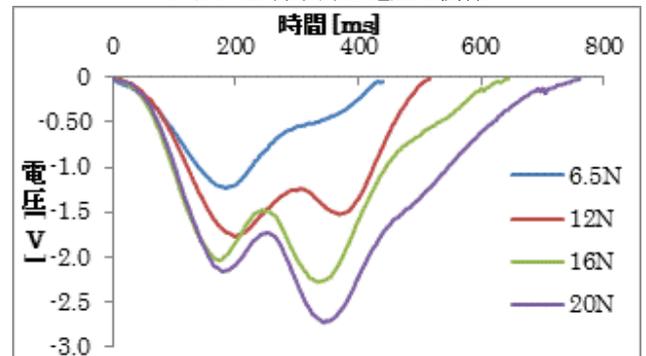
また、電圧の測定にはオシロスコープを用いて、圧電素子が力を受けている間の電圧の変化を波形として記録できるようにした。測定方法としては、圧電素子をオシロスコープにつなぎ、おもりを落とした瞬間にオシロスコープの画面上に現れた波形をストップさせ、一度 0V を超えてから再び 0V を下回るまでの電圧の値を 4.0ms ごとに記録した。各条件でこの測定を 5 回行い、5 回分を平均したデータで波形のグラフを作成した。

5. 実験結果

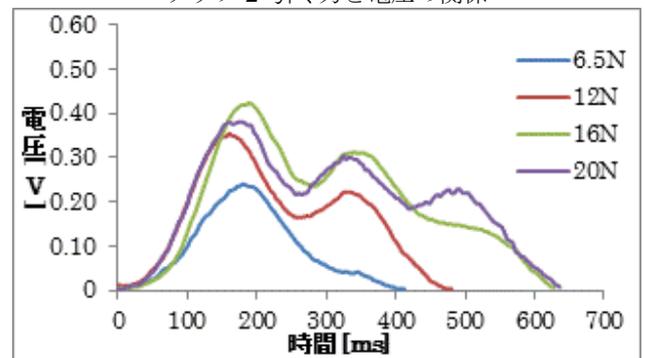
各条件での電圧の波形はグラフ 1~3 のようになった。また、それぞれの波形について、同じ時間だけ一定の大きさの力 F が加わったとして長方形のグラフを考えたとき、もとの波形と長方形の面積が等しくなるような F の絶対値を求めると、グラフ 4 のようになった。



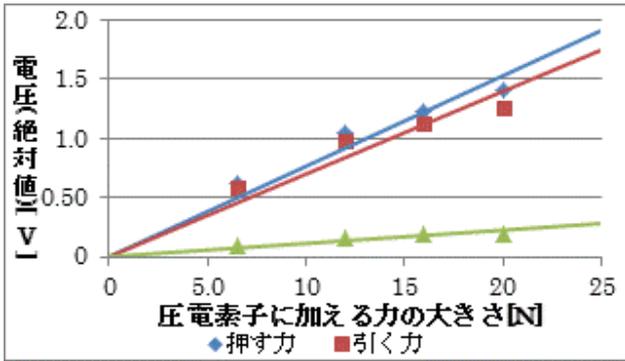
グラフ 1 押す力と電圧の関係



グラフ 2 引く力と電圧の関係



グラフ 3 剪断力と電圧の関係



グラフ 4 力の加え方ごとの平均電圧

グラフ 2 を見ると、押す力と引く力では波形はあまり変わらないが、電圧の向きが逆になっていることが分かる。また、グラフ 4 を見ると、押す力と引く力の電圧の大きさはあまり変わらないが、剪断力での大きさはかなり小さくなっていることが分かる。

6. 考察

まず、多くの波形において、電圧の大きさが最大となる山の部分が 2, 3 か所存在しているが、これは、おもりを落としたときに圧電素子を固定するスタンドが揺れてしまい、その振動がおもりにも伝わったことが原因と考えられる。そのため、これは圧電素子の性質ではなく、実験の不備によるものと考えられるので、詳細な考察は避けた。

次に、押す力と引く力とで電圧の向きが逆になったことだが、これは、押す力の場合は先に述べた原理と同様にして電圧が生じたのに対し、引く力の場合は圧電素子に力を加えた際、1 つ 1 つの結晶がさらに伸びて中心の陽イオンのずれがより大きくなり、押す力とは逆に表面層の電荷がより大きくなって、それと対になる電荷が足りなくなったと考えられる。その結果、表面層の電荷が余り、電圧が生じたと考えられる。このとき、余る電荷が押す力のときと逆になるので、電圧の向きが逆になったのだと考えられる。

そして、剪断力での電圧の大きさが小さかったことについては、圧電素子に力を加えたときの結晶内の陽イオンの動きから考えた。図 4 において、圧電素子に力 F を加えたとき

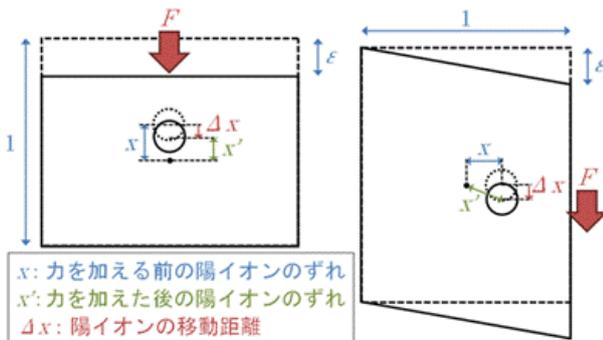


図 4 圧電素子に力を加えたときの結晶の様子

のひずみを ϵ とし、陽イオンがずれている方向の結晶の長さを 1 とすると、左の押す力、右の剪断力ではそれぞれ図に示した部分に ϵ が現れる。そして、中心の陽イオンについて図の左下に示したように長さを定義すると、 x と Δx

の比は $1:\epsilon$ となり、このときの陽イオンの中心からのずれの変化、すなわち $x'-x$ は、押す力では Δx 、剪断力では $x' = \sqrt{x^2 - \Delta x^2}$ より $\sqrt{x^2 - \Delta x^2} - x$ と表せる。なお、引く力については、陽イオンの動く向きが押す力と逆なだけで、移動距離 Δx は押す力と同じなので、ずれの変化は押す力同様 Δx である。 $x > 0$ 、 $\Delta x > 0$ のとき $\Delta x > \sqrt{x^2 - \Delta x^2} - x$ が成り立つことから、押す力、引く力より剪断力の方がずれの変化が小さいと分かり、このため剪断力の電圧が小さくなったのだと考えられる。

7. まとめ

ここまでの実験の中で、引く力では押す力とほぼ同等の電圧が得られたことから、引く力も十分有効であると結論付けた。その上で、引く力で発電する場合の例として、下津井瀬戸大橋という吊り橋の接合部に圧電素子を配置した場合の発電量を計算してみた。

30t の電車 5 両が通過したときを想定すると、接合部に加わる張力の変化量 ΔF [N] は

$$\Delta F \approx 2.0 \times 10^6 [\text{N}]$$

これをグラフ 4 の引く力の回帰直線 $V = 0.070F$ に代入すると、電圧の大きさ V [V] は

$$V = 1.4 \times 10^5 [\text{V}]$$

圧電素子の抵抗の値を仕様表より $10 \text{M}\Omega (= 1.0 \times 10^7 \Omega)$ 、電車が橋に乗り切るまでの時間を 3.0s とすると、1 日に 300

回電車が通過するときの 1 日の発電量は、 $W = \frac{V^2}{R} t$ より

$$\frac{(1.4 \times 10^5)^2}{1.0 \times 10^7} \times 3.0 \times 300 = 4.9 \times 10^2 [\text{Wh}]$$

参考文献[5]より、1 世帯の 1 日あたりの消費電力が約 10kWh であるので、下津井瀬戸大橋での発電でこれを賄うには約 20 個の圧電素子が必要ということになる。

8. 今後の展望

中心から「く」の字に曲げるような力の加え方など、今回の 3 種類以外の力の加え方でも電圧を測定したいと考えている。また、圧電素子に加わっていた力がなくなったときにも電圧を生じるので、その電圧も測定し、利用方法を探りたいと考えている。

9. 参考文献

1. NEC トーキン「圧電セラミックス Vol.06」2015 年
http://www.nec-tokin.com/product/pdf_dl/atuden_ceramic.pdf
2. FDK 株式会社「技術資料 圧電セラミックス」2011 年
<http://www.fdk.co.jp/cyber-j/pdf/BZ-TEJ001.pdf>
3. 加藤寛 酒井徹「下津井瀬戸大橋の設計」1988 年
http://www.nihon-kyoryo.co.jp/nihonk_img/05007.pdf
4. ROPE FACTORY「吊橋主索の張力計算」
http://www.rope.co.jp/products/technical/th_03.html
5. 電気事業連合会「一世帯あたりの電力消費量の推移」
http://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyuu/japan/sw_index_04/index.html