

研究論文

半導体検出素子 (PSD) による振動実験の教材化

Demonstration of spring oscillations using
a position-sensitive semiconductor detector (PSD)

* 増田健二, ** 鈴木三男

*Kenji Masuda and **Mitsuo Suzuki

* 静岡大学工学部, 432 浜松市城北 3-5-1

*Faculty of Engineering, Shizuoka University
3-5-1 Johoku, Hamamatsu 432

** 福島工業高等専門学校, 970 いわき市平上荒川

**Fukushima National College of Technology
Taira, Kamiarakawa, Iwaki 970

Abstract

Position-sensitive semiconductor detector (PSD) converts the dynamic oscillation of a spring, such as simple harmonic oscillation, damping oscillation and forced oscillation, to electric oscillation. The measurement system with a combination of PSD and a digital oscilloscope can display the wave form. We show that the system has been useful for students to understand the basic oscillation phenomena.

Keywords: position-sensitive detector, forced oscillation, electric oscillation

1. はじめに

基礎物理実験の教材開発の一環として研究している「半導体位置検出素子 (PSD) による振動実験^{1, 2)}」について報告する。具体的には、ばねの固有振動や減衰振動, 強制振動など力学的振動を電氣的に測定する方法の開発である。「振動」は物理的に重要な現象であり, 教科書の中でも必ず取り上げられる項目の一つである。そのため, 工夫をこらし

た実験方法, 装置の開発改良³⁻⁷⁾が試みられている。

大学の学生実験などで取り上げられている「振動実験」は大きく分けて, ねじれ振り子などの力学的振動⁸⁾とLCR共振回路などによる電氣的振動⁹⁾の二つである。力学的振動は振動の様子を視覚的に実感できる点に大きな長所がある反面, 振動現象を逐次測定することができない。反対に電氣的振動は, オシ

ロスコープの画面上で振動現象を逐次観測することができる反面、視覚的に実感できない悩みがある。ここでは両者の長所を生かすべく、力学的振動を電氣的振動に変換する方法を用い、物理学生実験への導入の可能性を検討する。

2. PSDを用いた測定原理と方法

図1に測定原理の概略を示す。PSDの受光面を光源で照らし、その間にばねに連結した遮蔽板を吊す。遮蔽板の中心にはスリットを設け、そこを通過する光の位置から、おもりの変位を測定する。

測定系の全景を写真1に示す。遮蔽板(3×8cm)には、ばねの周期に影響しない薄手のカード紙(0.3g)を用い、下部には切断したフックを接着し、おもりを掛けられるようにした。おもりは、直径1.1cmと直径0.8cmの2種類の鉄球を用意した。

半導体位置検出素子(PSD:浜松ホトクスS1352)を信号処理基盤(C3683-01)にハンダ付けし、±15Vの電源を接続する。このPSD素子は最大±17mm(10V)の位置まで検出でき、変位1.7mmに対して1Vの出力電圧を生じる。PSDの受光面は、ばね振り子に対して水平になるように設定する。光源には、明るい部

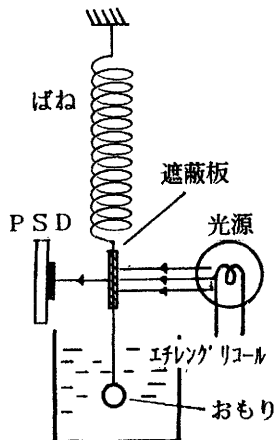


図1 測定装置の概略図

屋でもPSDが反応するようにバイク用のモールランプ(6V, 12W)を用いる。底に直径15mm程度の穴を開けたアルミ缶でランプを覆い、スポット光源としてPSDの受光面のみを照らすように工夫した。

電圧振幅の時間変化はデジタルストレージオシロスコープ(日立VC6523)の画面上に波形として表示される。

3. ばねの固有振動の測定

ばねを空気中で振動させ、その変位の時間変化を測定した(図2)。おもりは、直径1.1cm(6.082g)の鉄球を用い、空気中においては、ほとんど減衰はなく上下に単振動する。

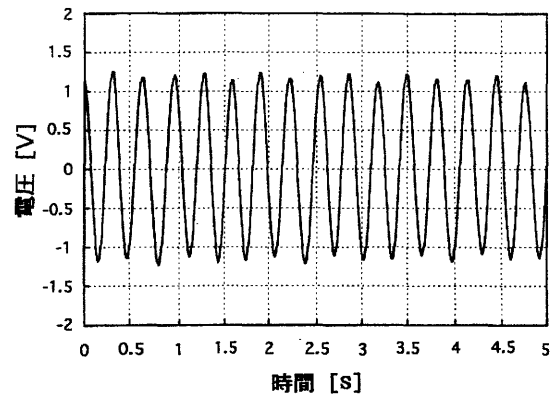


図2 板ばねの固有振動

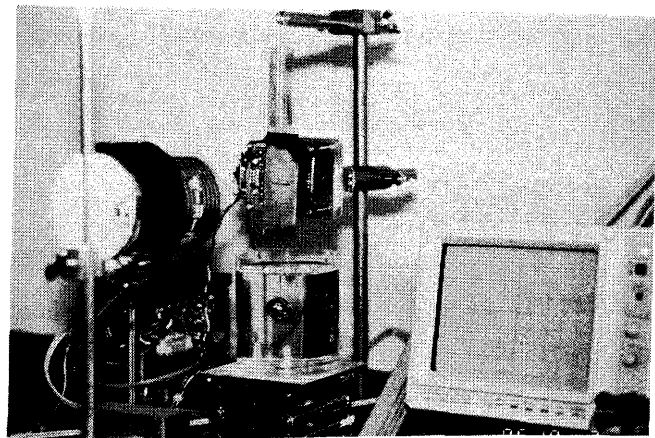


写真1 測定系の全景(減衰振動)

横軸は時間，縦軸の1Vは変位1.7mmに相当する．測定より求まる周期 T は0.318[s]で，ばね定数をもとに(1)式より求めた値とほぼ一致した．

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 0.302[\text{s}] \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{質量 } m = 6.082 \times 10^{-3} [\text{kg}] \\ \text{ばね定数 } k = 2.63 [\text{N/m}] \end{array} \right)$$

このことからPSD素子の感度及び応答時間などの精度において，ばね振動のような力学現象を測定する上でほとんど問題がないことが分った．

4. 減衰振動の測定

次におもりを直径0.8cm(2.054g)の鉄球にかえて，エチレングリコール中に入れ，振動させると減衰振動の波形がオシロスコープの画面に表示され，時間経過とともに振幅が小さくなっていく様子が瞬時に観測できる(図3)．この波形をホールドしてRS232Cでパソコンに取り込む．パソコン解析では，オシロ画面の1目盛を1cmにプリントアウトする．振動周期を求めると $T=0.242[\text{s}]$ となった．

次に，この減衰振動の振幅と振動回数の関係を片対数グラフにプロットしたものを図4

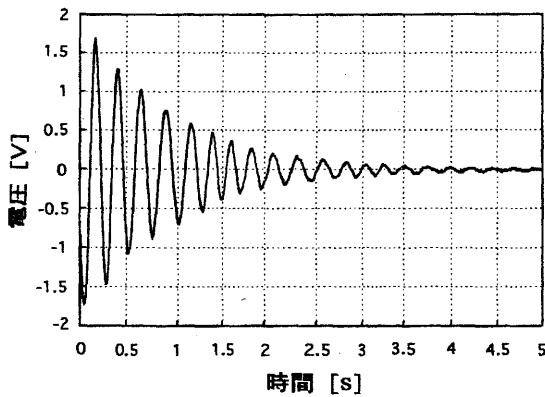


図3 減衰振動の波形

に示す．この場合振幅は，ほぼ指数関数的に減衰することから，速度に比例した抵抗を受けていることが分る．グラフの傾きから，対数減衰度 λ は0.0838となり，測定より求めた周期より，エチレングリコールの粘性係数を求める．

式を用いて説明すると，このような球体のおもりにはたらく力として，ストークス抵抗を仮定する．

$$m\ddot{x} + 6\pi\mu a\dot{x} + kx = 0$$

ストークス抵抗

速度に比例する抵抗力 $-2m\gamma\dot{x}$ を受けるときの運動方程式を立てると，

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$

$$\gamma = \frac{3\pi\mu a}{m}$$

$$\left(\begin{array}{l} m = 2.054 \times 10^{-3} [\text{kg}], a = 0.40 \times 10^{-2} [\text{m}], \\ T = 0.242 [\text{s}], \lambda = 0.0838 \end{array} \right)$$

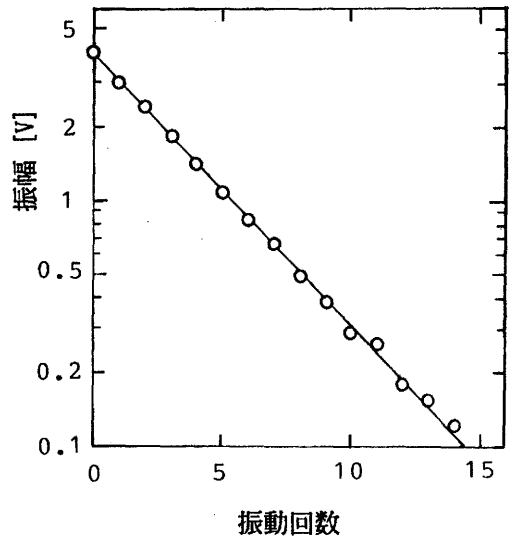


図4 減衰振動における振幅と振動回数の関係

$$\mu = \frac{m\gamma}{3\pi a} \quad \left(\gamma = \frac{\lambda}{T}\right)$$

$$= 0.0189 \text{ [Nsm}^{-2}\text{]}$$

実験より求めたエチレングリコールの粘性係数は $0.0189 \text{ [Nsm}^{-2}\text{]}$ となり、実験時(25℃)の定数値 $0.01733 \text{ [Nsm}^{-2}\text{]}$ と比べて、ほぼ妥当な値となった。

5. 強制振動の測定

図5に強制振動の原理を示す。厚さ0.3mm幅15mm長さ30cmのステンレス板を板ばねとして、先端部分に厚さ1.4mmのネオジウム磁石を2つ挟んで張り付ける。振動励起コイルとして、直径80mm巻数5000turnのコイルを2つ作り、ネオジウム磁石がコイルの中心にくるように設定する。

写真2に測定系を示す。コイルに発振器で低周波電流を流し、交流磁場をかけると板ばねが強制振動する。振動数ごとの振幅をオシロの画面上から読み取り共振点を測定する。

振動数と板ばねの振幅の関係をグラフにすると図6のようになる。測定における共振点

は 2.05 [Hz] であり、板ばねの振動周期 0.488 [s] より求まる固有振動数 f と一致した。

$$f = \frac{1}{T} = 2.05 \text{ [Hz]}$$

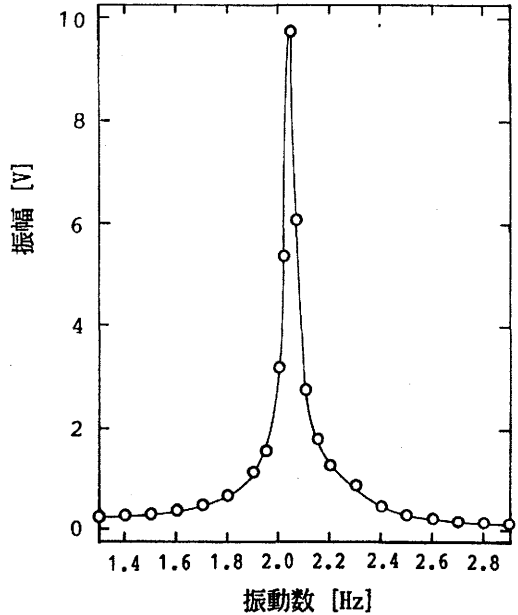


図6 共振曲線

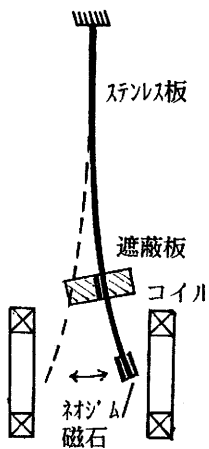


図5 強制振動の原理

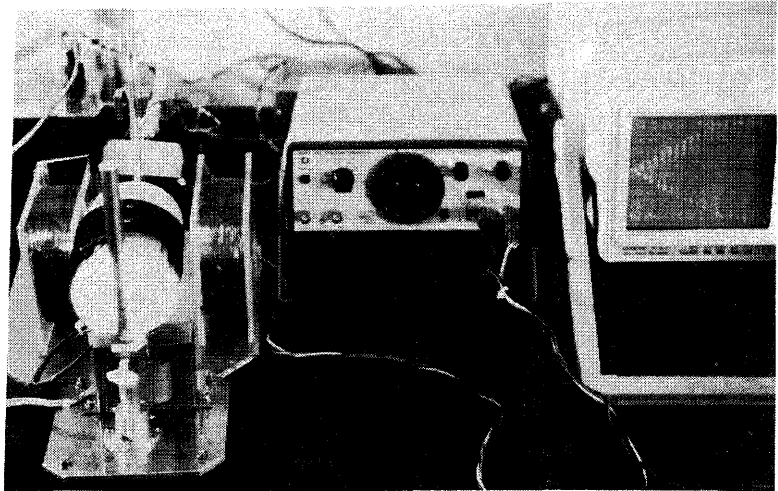


写真2 測定系の全景 (強制振動)

次に一般的な波形をオシロの画面上に表示し、振動数との関係を示す。板ばねの固有振動数 f と発振器の振動数が一致すると図7のような「共振現象」を示す。板ばねのように空気抵抗を受け やすい減衰振りの場合、共振するとスムーズに振幅が成長し、やがて一定となる。

発振器の振動数を1.50[Hz]とした場合の波形は図8のようになる。この波形は、異なる振動数の正弦曲線の合成で考えれば容易に理解できる。例えば、2つの発振器を用い、1.50[Hz]と2.05[Hz]の2つの正弦波をオシロスコープで合成する(図9)。この場合、1.50[Hz]は発振器の振動数を示し、2.05[Hz]は板ばねの固有振動数を示す。

発振器の振動数を1.80[Hz]にすると、図10のような「うなり」の波形が表示される。「うなり」現象は、振動数がほぼ等しい正弦曲線の合成によって生じる。図11は図9と同様にオシロスコープを用い、1.80[Hz]と2.05[Hz]のほぼ等しい正弦波を合成することによって生じる。

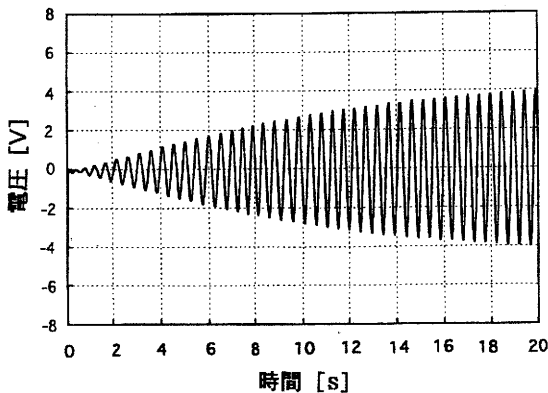


図7 共振波形

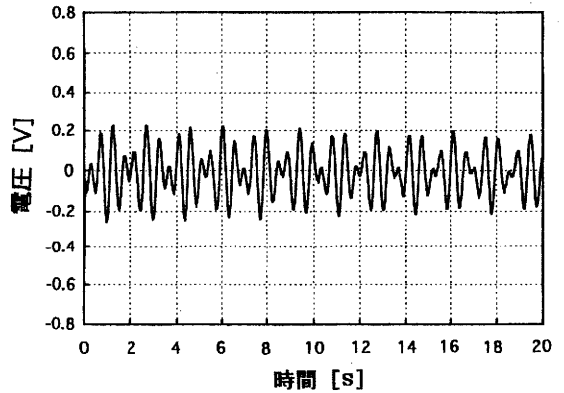


図8 振動数1.50[Hz]の波形

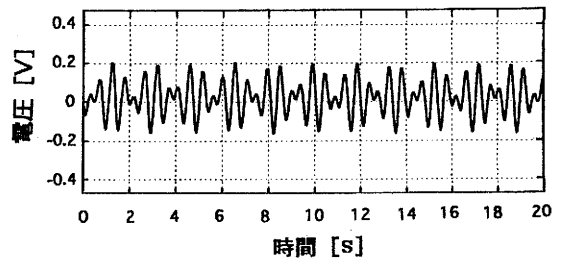
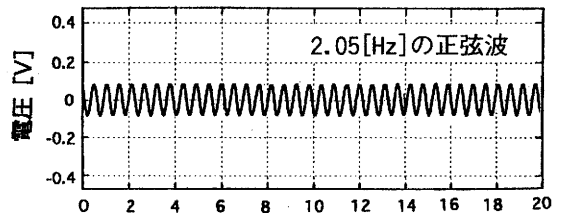
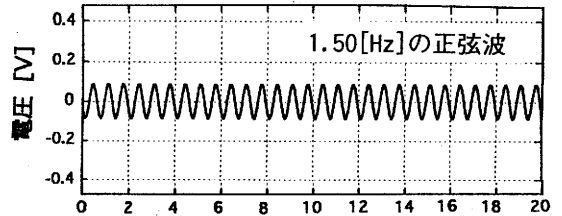


図9 異なる振動数の正弦曲線の合成

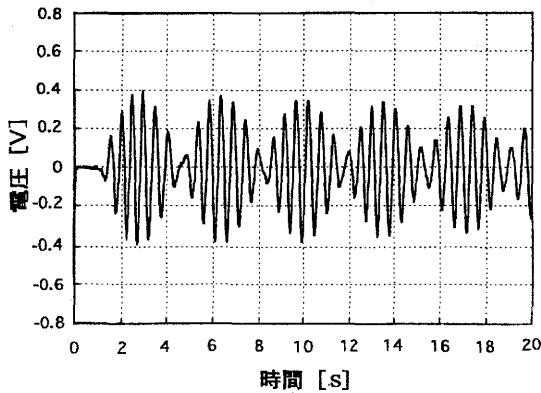


図10 振動数1.80[Hz]の波形

6. 測定結果のまとめと評価

①ばねの固有振動や振動の減衰・共振（強制）など力学的振動を電氣的に測定する今回の方法は、基礎物理実験において有効であると考えられる。

②振幅がほぼ指数関数的に減衰することから、速度に比例した粘性抵抗を受けていることが分かる。さらに、測定より求めたエチレングリコールの粘性係数は、ストークスの式より計算した値とほぼ一致した。

③板ばねによる強制振動の装置は、容易に共振（強制）振動の波形が観測でき、振動の合成の理解という点からも格好な方法といえる。

謝辞

実験に際して貴重な助言を頂きました理学部の佐藤信一助教授、千葉大学環境リモートセンシング研究センターの久世宏明助教授に感謝いたします。さらに、ばねのおもり（鉄球）の直径0.2mmのセンタ穴あけ作業にあたって、旋盤加工の技術協力を頂きました長岡技術科学大学工作センターの星野英夫技官に厚くお礼を申し上げます。

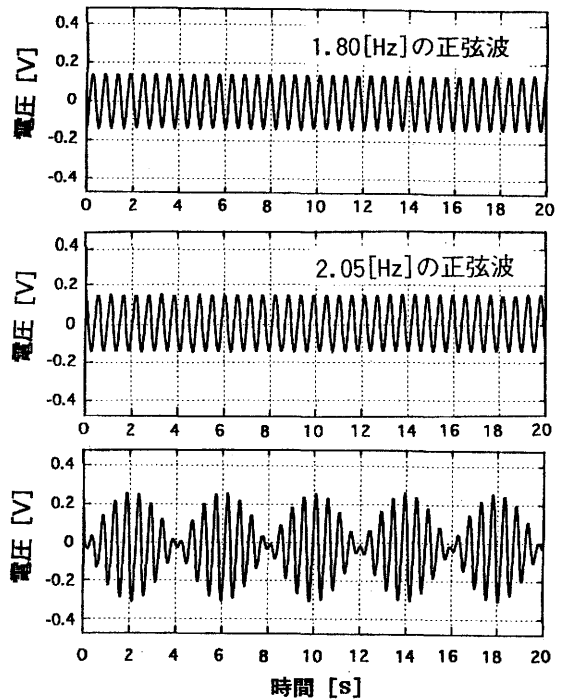


図11 振動数がほぼ等しい正弦曲線の合成

参考文献

- 1) 増田健二，久世宏明，鈴木三男：日本物理学会1995年秋の分科会予稿集4，236
- 2) 松本 永，三浦トキワ，松本節子：物理教育44，270(1996)
- 3) 物理実験指導書：静岡大学教養部物理教室(1982-1997)
- 4) 富岡誠三：物理教育41，157(1993)
- 5) 富岡誠三：物理教育41，251(1993)
- 6) 山地健次，山口幹男：応用物理教育18，199(1994)
- 7) 松本節子，増田 勤，松本 永：物理教育43，252(1995)
- 8) 例えば，三宅静雄，朝日信夫：基礎物理学実験（産業図書）74(1988)
- 9) 例えば，比企能夫他：物理実験コース（朝倉書店）128(1991)

(1997年3月24日受理)