

# 非調和振動による表面吸着粒子の移送

森永研究室 木村沙織

## 1. 背景・目的

近年、情報技術の発展により様々なものの微細化が進んでいる。微細化が進むにつれて、今までは影響のなかったような微細な異物が故障や不具合の原因となり得る。例として半導体製造装置、デジタルカメラを挙げる。半導体製造装置では半導体チップの回路を焼き付けるためのウェーハ上に微細な異物が存在することで、正確な回路が焼き付かない等の問題が起こる。また、デジタルカメラではレンズ交換時にホコリが進入し、カメラのピントが合わない、ゴミが映り込む等の不具合が起こる。そこで、デジタルカメラにはホコリ除去機能が内蔵されており、ホコリを微細な振動によって弾き飛ばして除去するという仕組みがある。

先行研究ではノコギリ波による粒子の移送について研究されており、変位が急なときは粒子は基板の動きについていけずにその場に留まり、変位が穏やかなときは基板と共に移動するため、移送が可能たということが分かっている。そこで、本研究では衝突の際の衝撃を使った移送の方法を考えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 振り子の振動波形

単振り子は振れ角  $\theta$  が十分に小さいとき、 $\sin \theta \approx \theta$  が成り立ち、この運動を単振動または調和振動とみなすことができる。よってこのときの振動波形は図1のような正弦波となる。

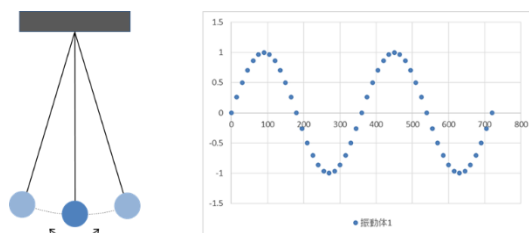


図1 単振り子(左図)と振動波形(右図)

また、図2(左)のような二つの単振り子が最下点で衝突する場合を考えると、波形は図2(右)となる。振動周期は図1の場合の二倍になり、二つの振動子は逆相となって動く。

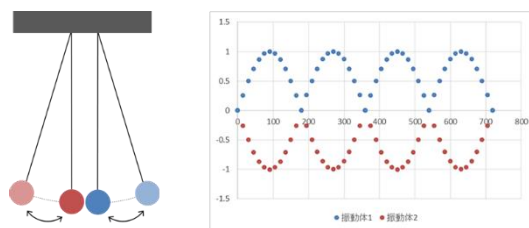


図2 二つの単振り子の衝突(左図)とその振動波形(右図)

### 2.2 電流が磁場から受ける力

本研究では、振動させる手段としてハードディスクのボイスコイルモータを用いた。コイルに流れる電流、磁石による磁場、それによって作用する力はそれぞれ垂直の関係にある。本研究で用いたボイスコイルモータは、磁石の部分が上下左右で反対になっており、電流の向きが変わることで力の向きが変わり、それによりコイルが左右に振れる。

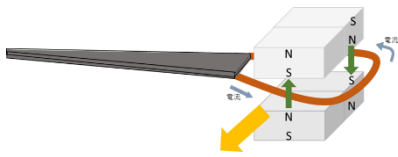


図3 ボイスコイルモータ

### 2.3 共振現象

共振現象とは、外部から物体に固有振動数と同じ周波数を与えると、振幅が大きくなり、強い振動が起こることである。

二つの振動子において共振周波数を  $f$  とすると、与える周波数が  $f$  のときは励起される振動が同相になるため、波形は図1のようになり、二つの振動子は接触した状態で振動する。また、与える周波数が  $2f$  のときは励起される振動が逆相になるため、二つの振動子は衝突しながら振動し、波形は図2(右)のようになる。

このとき、二つの振動子を周波数  $2f$  で逆相となって衝突させるために、それぞれの振り子が最下点で衝突する必要がある。そこで本研究ではコイルに流す電流のオフセットを変化させることによって、衝突の位置を調整することができる。

## 3. 実験方法

### 3.1 実験装置

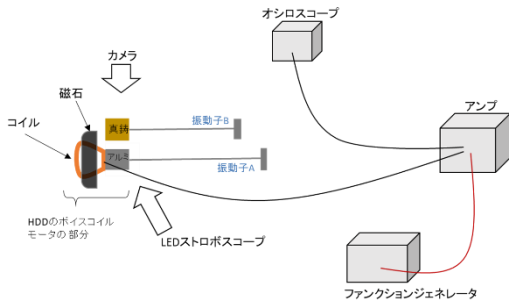


図4 実験系全体図

### 3.2 実験手順

#### (1) 実験装置の組み立て

図4のように、アンプに振動子Aのコイル、ファンクションジェネレータ、オシロスコープをそれぞれつなげた。また、振動子の上方にカメラを設置し、振動子を照らすようにLEDストロボスコープ設置した。

#### (2) 共振周波数の測定

ファンクションジェネレータを用いて、振動子Aの共振周波数を測定し、振動子Bの共振周波数も同じ値になるように調整した。ここで得た共振周波数の二倍の値を振動子Aに与えたときに、互いに衝突するようにした。

#### (3) 表面吸着粒子の移送

粉末状の粒子はあまり動かなかったため、もう少し大きい物を用いて振動子B(真鍮)の上に載せ、衝突によってどう動くかを観察した。

#### (4) 二つの振動子の振動波形

二つの振動子の衝突に関して、振動波形を観察するため横からストロボスコープで照らし、上方からカメラで動画を撮影した。その後、画像処理を行い、衝突による振動波形をグラフにした。

## 4. 結果・考察

### 4.1 共振周波数の測定

振動子Aの共振周波数は18.0 Hzとなった。これより振動子Bの共振周波数が18.0 Hzになるように棒の長さを調整した。次に、ファンクションジェネレータの周波数を共振周波数の二倍である36.0 Hzに設定し、コイルに流れる電流のオフセットを変えて二つの振動子が衝突するように調節した。

## 4.2 表面吸着粒子の移送

まず初めに表面吸着粒子として粉末状の研磨剤を用いて観察を行ったところ、振動子 B (真鍮) 上に山型に乗せると次第にその山は崩れて散らばっていくが、そのあと粒子が移送される様子は観察できなかった。そこで、粉末上でないもう少し大きく、動きが観察しやすい物として、平ワッシャー(外径 16 mm) とゴム足(直径 8 mm) を用いた。これらは振動子 B (真鍮) の上に乗せると、衝突の衝撃を受けて振動子 A (コイル) の方に引き寄せられるように移動した。

移送についての評価基準を以下のように定め、観察結果を表 1, 2 にまとめた。

- ◎：一方向にまっすぐ一定の速さで動く。
- ：一直線または一定の速さではないが、一方向に進む。
- △：動くが方向が一定でない、または、一方向に進むがかなり速度が遅い。
- ×：動かない。 -：振動しない。

表 1 ワッシャー

オフセット /V	周波数 /Hz						
	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0
0.4	○	◎	◎	○	◎	○	○
0.3	○	◎	◎	◎	◎	◎	○
0.2	○	○	◎	○	◎	○	○
0.1	△	◎	◎	◎	◎	○	△
0	△	○	◎	◎	◎	○	×
-0.1	△	△	○	○	○	△	-
-0.2	-	-	-	-	-	-	-
-0.3	-	-	-	-	-	-	-

表 2 ゴム足

オフセット /V	周波数 /Hz						
	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0	36.0	37.0
0.4	○	◎	◎	◎	◎	◎	○
0.3	○	◎	◎	◎	◎	◎	○
0.2	△	◎	◎	◎	◎	○	○
0.1	×	○	◎	◎	◎	○	△
0	×	△	○	○	◎	△	×
-0.1	×	×	△	×	△	×	-
-0.2	-	-	-	-	-	-	-
-0.3	-	-	-	-	-	-	-

これらは摩擦係数の違いにより、摩擦の少ないワッシャーの方がスムーズに速く進むが、ゴム足の方は摩擦が大きく滑りが悪いのでワッシャーに比べて衝突に合わせて小刻みに進むことが観察できた。

また、表 1, 2 の観察結果より 35.0 Hz のときが最も物体の移送がされやすいことが分かった。さらにオフセットの値は 0.2~0.4 V のときがスムーズに動くことが多く、それより小さい値では振動子同士の距離が離れてしまい振動しづらくなることが分かった。反対に 0.5 V より大きい値にすると振動子同士が近づきすぎてしまい衝突をしなくなった。よって、周波数が 35.0 Hz でオフセットを 0.2~0.3 V に設定しているときが最も表面吸着粒子が移送されやすいことが分かった。

これについて、最も移送されやすい周波数が共振周波数の二倍である 36.0 Hz ではなく 35.0 Hz となった理由は、ワッシャーやゴム足を乗せることによる共振周波数のずれと考えた。何も載せていない場合の共振周波数が 18.0 Hz になるように調整したため、物を載せることによって振動子の質量が重くなり、共振周波数が下がる。それにより、移送されやすい周波数が 36.0 Hz より小さくなったと考えられる。

## 4.3 二つの振動子の振動波形

表面吸着粒子の移送の観察結果より、共振周波数を二倍した 36.0 Hz のときよりも 35.0 Hz のときの方が粒子の移送がされやすいことが分かった。したがって、36.0 Hz と 35.0 Hz のときの動画を撮影し、画像処理により得られた二つの振動子の座標を表

にまとめ、グラフにした。このとき、振動波形のグラフに関して振動子 A が y 軸負方向に、振動子 B が y 軸正方向になるようにし、得られた測定結果において衝突時の y 座標が 0 になるようにした。つまり、振動子 A は座標が一番大きい値になるとき、振動子 B は座標が一番小さい値になるときを  $y=0$  にそろえた。

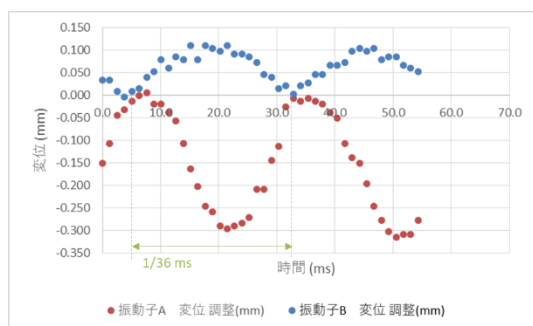


図5 36.0 Hz のときの振動波形

上の図は 36.0 Hz のときの振動波形である。35.0 Hz のときの振動波形も同様の波形をしており、特別な差はなかったためここには載せなかったが、図5を見て次のことが分かった。(1)振動子 A の方が変位の大きい波形であること。(2)振動子 B は図2のような振動波形となっているが、振動子 A は衝突直後に波形がなだらかになり、その後また元に戻るような形になっている。これらについて考えると、(1)に関しては振動子 A が直接外部からの力を受けて振動するため大きい波形になり、振動子 B は振動子 A との衝突により振動するため振動子 A ほど大きい波形は得られないと考えた。また(2)に関しては、振動子 B は振動子 A との衝突により連続して振動することができ、振動子 A は衝突によって一時的にエネルギーを失い速度が落ちるが、外部から力を受ける

ことによって元の速さに戻ると考えた。

## 5. 結論

本研究を通して、二つの振動子に共振周波数の 2 倍の周波数を与えることによって衝突が起こり、それによる衝撃で振動子上の物体を移送することができた。しかし、反省点として共振を上手く活用することができず、粒子を移送することができなかった。二つの振動子の衝突において、図2(右)のようなグラフにならなかったのは振動子の金属部分の反発係数が低いことが原因であり、共振を活かすにはもっと反発係数に関する理解が必要であったと感じた。そして、高い反発係数を実現し、共振を効率よく利用できれば、今回測定で用いた物体よりもさらに小さい物体や、粉末状の粒子の移送も可能になると考える。

## 6. 参考文献

- [1] 原田晃、吉武裕：強い非対称性を有する梁の衝突振動，日本機械学会論文集(C編)79巻798号(2013-2)
- [2] 原田晃、吉武裕、萩野弘章：二本の梁の衝突振動，日本機械学会論文集(C編)，76巻763号(2010-3)
- [3] 板橋貫人、桑原猛、出澤義人、他五名(早大理工)：羽ばたきモータのセンサレス角度検出の高精度化，応用物理学会春季学術講演会(2014-3)