

Title	物理学実験「空気の振動と音速」における粉体の選定
Sub Title	Microparticle selection for physics experiment on "air vibration and speed of sound"
Author	森本, 睦子(MorimotoY., Mutsuko)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2019
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of natural science). No.66 (2019. 9) ,p.33- 40
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	教育
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20190930-0033

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

物理学実験「空気の振動と音速」における粉体の選定

森本睦子*

Microparticle Selection for Physics Experiment on “Air Vibration and Speed of Sound”

Mutsuko Y. MORIMOTO

1. はじめに

慶應義塾大学では、1949年以來、日吉キャンパスに在籍する文系4学部（文・経済・法・商）の学生を対象に、講義と実験を隔週で行う実験を重視した授業が展開されている。そのうちの1科目として「物理学I・II（実験を含む）」がある。そこで実施される物理学実験の「空気の振動と音速」の項目では、クントの実験を用いて音速を求める実験を行う¹⁾。クントの実験とは、クント（1839-1894）が1866年に考案した実験で、クント管と呼ばれるガラス管内に発生させた空気の定常波の節では波の振動がないことを利用したものである。水平なガラス管の中にコルク等の粉末を入れ、ガラス管の片方を閉じ、もう片方から音を鳴らし定常波を発生させると、その定常波の節に粉末が集まる。そのため、発生した空気の定常波の波長が視覚的に分かり、その波長と音の振動数とから最終的に音速を求めることができる。本学の実験では図1の装置を使用して実験を行っている（詳細は後述）。クント管の中にガラス棒の一部を入れ、ガラス棒を摩擦することにより、音波を発生させる。装置は半分手作りであり、装置によって若干の特性の違いが見受けられる。装置は6台あり、2人1組になって実験を行い、およそ3時間の実験内に、データを出し、音速を求め、考察しレポートを完成させる。実験は概ね時間内に終わらせることが出来ているが、粉末を定常波の節に集める段階で、粉末がガラス管の内壁に付着し、その位置から動かなくなり苦勞する学生が多い。また、現在スプレー用のシリカを使用しているが、高価で入手が困難なため、上新粉を混ぜて実験を行っている。そこで本稿の目的は、安価で入手しやすい粉末への変更と、粉末が集まりにくい理由を解明することで

* 慶應義塾大学法学部日吉物理学教室（223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1）：Department of Physics, Faculty of Law, Hiyoshi Campus, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan. [Received April 9, 2019]

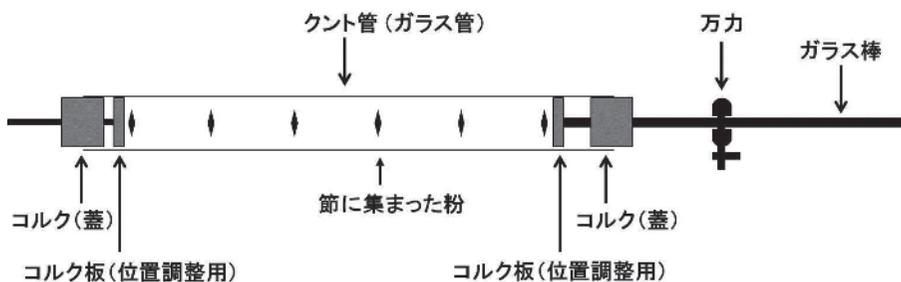


図1. クント管実験装置

ある。本稿では、粉体のいくつかの候補を挙げ、実験結果をおよび考察を行う。

2. 実験方法

本学で用いる実験装置は図1に示されているように、ガラスのクント管（ガラス管）の中にガラス棒を挿入し、ガラス管の両端をコルクの蓋で密閉する。さらにコルクでできた可動式の板が内部にあり、位置の調整ができる。ガラス棒は真ん中の部分を万力に固定する。ガラス管の中に粉体を少量流し入れ、管を傾けて外から軽くたたき、ガラス管壁にうっすらとまんべなく端から端まで付着するくらいに広げ、余った粉はクント管の外に出し、再利用される。その後、ガラス棒をこすって音を出しながら、音圧による粉の振動や移動を確認する。ガラス棒の一方に取り付けられているコルク板の振動によって出た音波は他方の可動式コルク板に当たり、跳ね返ってきた波と合成される。可動式コルク板を操作し、その位置を変化させ、定常波が発生する場所を探りながら粉を定常波の節*に集めることで、定常波を可視化することができる。節と節の間は音波の波長の半分に相当する。測定誤差を少なくするために、はっきりしている節のうち、最も離れた2つを選び、その節の間の長さとその間の腹*の数を記録しておく。さらに、この実験を5回繰り返して、5回分の長さとの腹の数を合計し、長さの合計を腹の数の合計で割ることで、波長の測定精度を上げる。定常波が発生した時は粉が綺麗に節に集まるが、粉の量が多いと粉が集まりにくく、また集まったときの幅が広いので、実験の精度が悪くなる。また、ガラス棒をこすって出す音が小さくても集まりにくいので、粉の量は少ない方が望ましい。[*定常波の一番振動している所を「腹」、動かない所を「節」という。]

3. 粉体の候補

上記のように、文系を対象とした学生実験では、限られた時間内に実験を行う必要がある。また、学期を通してこの実験を行う学生数は約700名（2018年度春学期）で月曜日から金曜日まで常に実験が行われ、複数人の教員またはティーチングアシスタントが指導する。この

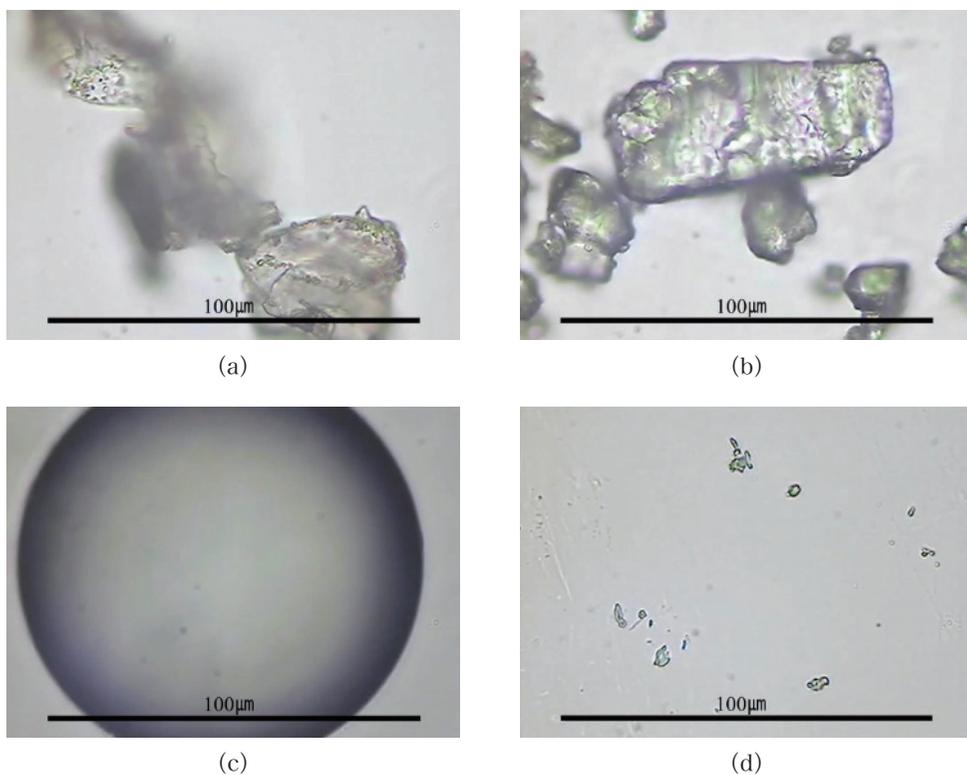


図2 粉体の顕微鏡写真
(a) コルク粉 (b) 上新粉 (c) ガラスビーズ (d) シリカ

ため、使用する粉体は、安価で入手しやすく、誰が用いても同じクオリティのものが望ましい。現在使用中のスプレーシリカは100g二千円程とかなり高価であり、今後の入手が可能か不明である。

粉体の候補として①コルク粉、②上新粉、③ガラスビーズを挙げる。上新粉は、うるち米を細かく砕いたものであるが、他の米粉よりも粗く、また定義がはっきりしているため、製造メーカーに依らない。また、原料が米であることから、小麦粉やそば粉よりもアレルギーに配慮できる。図2 a)-d) は、上記①～③と現在使用中のスプレーシリカの顕微鏡写真である。①コルク粉は、文系用学生実験の後期の「分子の大きさとアボガドロ数」に使用しているコルク粉である。約 $50\mu\text{m}$ ほどの大きさで角があり、いくつかの粉体が絡まっている。②上新粉は市販のもので、やや丸みを帯びており、大きさは $100\mu\text{m}$ に近いものからその十分の一くらいのもまで様々な大きさがある。③ガラスビーズはアズワンの【AXEL】ガラスビーズBZ-01でありこのシリーズでは一番小さいものを用いた。大きさは約 $100\mu\text{m}$ である。現在用いているスプレーシリカは、これらに比べてかなり小さく、複数が絡まって凝集している。大きなものでは目視で確認できる程の大きさの凝集体となっている。

表1 候補粉体の実験結果

	① コルク粉	② 上新粉	③ ガラスビーズ
1)	クント管の中に流し入れると、管の内側に大量に付着し、外からたたいても取れなかった。	クント管の中に流し入れると、管の内側に大量に付着し、外からたたいても取れなかった。	サラサラしすぎて、まんべんなく広げることが難しかった。
2)	ガラス棒をこすると、ガラス棒からの音の圧力で吹き飛ばされた。節で集まったが、吹き飛ばされた先の部分でのみ集まった。	吹き飛ばされることはなかった。定常波が発生した時に節の所に筋ができることがあり、節の場所を正確に特定することができる。	節に集まりにくい。
3)	管内に付着したまま取れなかった。毎回清掃を必要とする。	管内に付着したまま取れなかった。毎回清掃を必要とする。	サラサラしているので、管内にほとんど付着せず、清掃なして繰り返し実験ができる。



図3 上新粉の時に節に現れる線

4. 実験結果

候補粉体に関して、「1. 実験方法」と同じ方法で実験を行った。実験では、以下のことに注目をした。

- 1) クント管壁にうっすらとまんべんなく端から端まで付着するくらいに広げられるか。
- 2) 粉が定常波の節で集まるか。
- 3) 実験後粉を回収し、繰り返し実験ができるか。

上記の観点で実験結果を表1にまとめた。

①のコルク粉は、粉体が軽すぎると思われる。ガラス棒をこする時の音圧によって遠くまで吹き飛ばされるため、可動式コルク板を動かしても、ガラス棒近くに戻ってくることはない。しかし、跳ね飛ばされた先の場所では定常波の節の所で粉が集まった。②上新粉は、定常波の節に粉が集まり、さらに管壁に細く筋ができることがあった(図3)。この筋が発生すると節

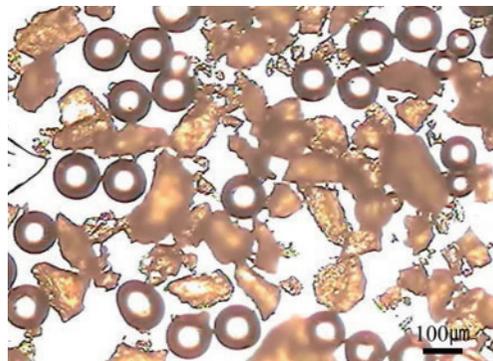


図4 ガラスビーズと上新粉の混合 (混合比1:1)

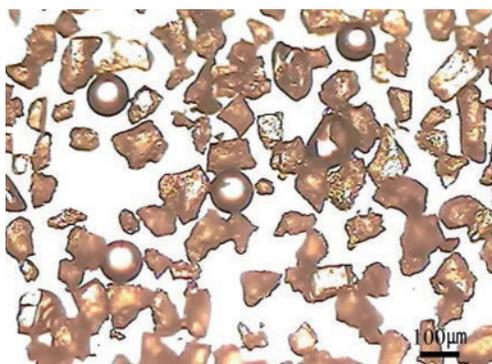


図5 節に集まった粉体



図6 壁に付着した粉体

の場所が分かりやすいため精度の高い測定ができる。①コルク粉と②上新粉で共通点は、ガラス管に流し入れた時に、粉体の通り道の壁面に付着して取れないことである。そのため、繰り返し実験をする時に毎回清掃をする必要がある。③のガラスビーズはサラサラしていて、ガラス管にまんべんなく薄く広げることが出来なかった。またビーズも集まりにくく、コルク粉や上新粉のように壁面に付着して動かないのではなく、重さがあるために動かないと考察できる。

5. 上新粉とガラスビーズの混合

上記の実験を元に、上新粉とガラスビーズのそれぞれの特性に着目し、2つを混合させることにより、ガラス管に付着した上新粉をガラスビーズにひっかけてガラス管内に広げやすくすることを期待した。図4はその混合物の顕微鏡写真である。上新粉は大きさにばらつきがあるが、大きい方とガラスビーズが概ね同じ大きさであることが分かる。ガラス管内に流し入れて全体に広げると、スパーサーシリカの時と同じようにサラサラしつつも、管内にうっすらとまんべんなく付着した。また定常波ができるようにコルク板の場所を調節すると節の所にも綺麗

に集まった。図5は定常波の節に集まった粉体の顕微鏡写真である。予測に反して、集まっている粉体はほとんどがガラスビーズではなく、上新粉であった。また、上新粉の大きい方の粉体がより多く集まっていることが分かる。これにより、ガラスビーズは、ガラス管内にまんべんなく広げて余った粉体をガラス管の外に出す時にその多くが出ていき、上新粉が管内に付着しすぎるのを防ぐ役割をしていることが分かった。一方でガラス管の壁面に付着した粉体成分は上新粉の小さい方の粉体ばかりであった(図6)。これにより、上新粉の節に見える線(図3)は小さい方の粒子の存在によるものであることが分かる。また、繰り返し実験を行うために中の粉体をガラス管から出すと、ガラス管にほとんど残らなかった。これは、ガラス管に入れた粉が元々少ないことと、わずかに残っているガラスビーズが掃除の役割をしているためと考察できる。

6. ガラス管への付着

ガラス管の壁面に付着するメカニズムを考察する。一般的に粉体工学では粒子が壁面に付着する力(「付着力」)として「液架橋力」「静電気力」「ファン・デル・ワールス力」の3つがあるとされている²⁾。基本的には粉体が大きいほど付着力も大きくなる。ただし、粉体自体にも重さがあるため、壁に着いている場合は、付着力が重力よりも大きい時である。また、「付着力」の他に、粒子の凸凹がガラス表面にできた細かい傷や付着力によりくっついた粒子やホコリなどに引っかかることも考えられる。それぞれの力について簡単に説明する²⁾⁻⁴⁾。

液架橋力……粒子間や粒子壁面間の間隙部に存在する液体によって生じる力である。湿度の多い日はこの付着力を考慮する必要があり、ファンデルワールス力の10倍以上になることもある。

ファンデルワールス力……分子または原子内の電子の運動に伴って生じる力であり、物体間では必ず作用する。力の大きさは粒子の表面間距離の二乗に反比例し、なめらかな表面では表面間距離を0.4 nm (4Å)を用いることが多い。表面が凸凹している時は、表面間距離が増加したのと同じ効果になり、ファンデルワールス力は低下する。

静電気力……帯電量に左右され、また湿度が高いと帯電量は少なくなる。静電気は接触・摩擦・剥離・粉碎など複数の要因により発生する。

それぞれの力は、粉体の大きさ形状、環境によって力の大きさが変わるためどの力が有意に働いてガラス管壁に付着しているかは特定できない。例えば、コルクは上新粉に比べて凹凸のある形状からファンデルワールス力は小さいと考えられる。

液架橋力とファンデルワールス力は目視では確認できいが、静電気力については目視で確認した。それぞれの粉（コルク粉、上新粉、ガラスビーズ、スパーサーシリカ、ガラスビーズと上新粉の混合）にガラス棒を近づけると磁力線を描くように粉体がくっついたが、少し離すとほとんどのものが剥離した。ただし、ガラスビーズについては確認ができなかった。また、上新粉は単体ではわずかに確認できた程度であったが、ガラスビーズと上新粉の混合でははっきりと確認できた。スパーサーシリカは保管している状態では目視では確認ができなかったが、実験用の容器に取り出したものについては実験用容器に入れて振られることにより凝集しているためはっきりと確認できた。これらは混ぜる作業における摩擦や、凝集したものを粉砕する過程でより大きな静電気が発生していると考えられる。

以上により、粉体のガラス管の壁面への付着は、季節によって原因が異なると考えられる。実際の実験は春学期（4月から7月）に行われ、梅雨の季節には雨の日に実験をすることが多い。このことから、粉体は実験の直前まで湿度40%程度に管理された保管庫に入れている。雨の日はガラス管に粉体が付着し、音を鳴らしても粉体が移動しないことが多い。実験を行う度にガラス管内を布で巻かれた棒で清掃しており、清掃直後に実験を行うと粉体が移動しやすくなり、清掃の効果が出ていた。この季節では、やはり水架橋力の影響が大きいと考えられる。しかし、冬の乾燥する時期に実験をした時は、ガラス管内を清掃しても効果が出なかった。これは、付着力として静電気力が優位に働いている可能性が高く、清掃時の布とガラスの摩擦によりさらに静電気が発生し付着力を高めてしまうことも考えられる。よって、季節により原因を見極め、実験を進める必要がある。

また付着力は実験に常に不利に働くわけではない。ガラス管にまんべんなく薄く広げるためには付着力の効果を積極的に用いており、定常波の節に線状に粉体が付着する現象もまた付着力の効果である。

7. まとめ

現在使用しているスパーサーシリカは高価かつ今後の入手に不安がある。そこで、その代案として、コルク粉、上新粉、直径約100 μm のガラスビーズの3種を検討した結果、上新粉と直径約100 μm のガラスビーズの混合が最も適しているとの結論を得た。また実験を通して、下記の現象を確認した。上新粉のガラス管への付着力と、ガラス管に付着した上新粉を機械的な力である程度引き離す効果のあるガラスビーズの両方を用いることにより、粉体を全体に薄くまんべんなくガラス管に付着させることができる。ガラスビーズはガラス管内に余った粉体を外に出す時に多くが一緒に排出される。また、上新粉には、100 μm 級の大きさのものからその十分の一の大きさのものが混ざっており、音波によって移動し定常波の節に集まる粉体は大きいサイズの上新粉とガラスビーズであり、管壁に付着したままの粉体は細かい方の上新粉である。この細かい上新粉によって、定常波の節に管壁に沿って筋ができることがあり、節の位置を厳密に測定することができる。気象状況によって付着力の原因が変わるため、湿度の高

いは液架橋力が優位に働くと考えられる。そのため、布を巻きつけた棒でガラス管内を清掃すると中の水分が拭き取られ粉体の動きが良くなるが、乾燥した日は静電気が優位であると考えられるため、布でガラス管内をふき取るとさらに静電気を発生させる可能性がある。季節により原因を見極め実験を行うと、よりスムーズに進めることができる。

謝辞

この実験は一人で行うのが難しく、実験の補助をして下さったり、また、私の考えを整理するための議論に付き合ってくださった同教室の小林宏充教授に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 慶應義塾大学日吉物理学教室編 (2019) 『物理の実験』
- 2) 椿淳一郎, 鈴木道隆, 神田良照 (2016) 『入門 粒子・粉体工学』日刊工業新聞社.
- 3) 内藤牧男, 野田直希, 牧野尚夫 (2014) 『粉体の科学 (B&T ブックス, おもしろサイエンス)』日刊工業新聞社.
- 4) 近沢正敏, 武井孝 (1987) 「粉粒体の表面化学と付着現象」, 日本海水学会誌 第 41 巻第 4 号, 168-180.
- 5) 「静電気ハンドブック」, 株式会社キーエンス.