

Investigation物理と課題研究

— 音の学習の実践例 —

東京学芸大学教育学部附属高等学校

金城啓一

目次

<抄録>	100
1. はじめに	100
2. Investigation 物理	100
2.1 科学的スピリッツ	100
2.2 “Investigation in Physics World”	102
2.3 技術リテラシー	103
3. 授業展開	103
3.1 カリキュラム	103
3.2 波	103
3.3 音速計測	104
3.4 Wave Machine	105
3.5 Speed Gun	106
3.6 ばねの定常波	106
3.7 弦の共鳴	106
3.8 気柱の共鳴	108
3.9 音声分析	109
4. 課題研究 (Research)	110
4.1 ハーモニカ	112
4.2 リコーダー	113
4.3 その他	115
5. 終わりに	115

Investigation 物理と課題研究

— 音の学習の実践例 —

東京学芸大学教育学部附属高等学校

金城啓一

<抄録>

高校物理の最大の目標は、物理学の基礎を教えることよりも、一般教育として科学的スピリッツと技術リテラシーを養成することが最大の目標という立場から、教師が教えてしまわずに、次々と実験を通して自然の規則性や様々な現象の仕組みを自ら学び取って行く Investigation 活動による授業実践から、1 学期間を通して行った音の単元についての研究報告。単元末に課した『楽器を科学する』という課題研究では生徒が1ヶ月ほどかけ、思い思いの楽器から出る音のスペクトルに基づいて、どうしてそのような音が出るのかを解明したレポートの中から、ハーモニカおよびリコーダーの音の出る仕組みについての報告を紹介する。

1. はじめに

一般に『学力』とは学習問題にどれほど正解する力と考えられているが、本来、学習の本当の目的は答えのある問題に期待された答えを出すことにあるのではなく、自らがかねてより抱いていた問題や将来様々な場面で遭遇する様々な問題に自分なりの斬新な答えを出してゆく力を養うことにある。学習の中で行われる応用問題というものが、そうした場面での演習の役割を果たしているとも考えられるが、明確に違うのは答えが存在することである。生きて行く場面、研究や仕事などの場面で遭遇する問題には正解を誰かが知っているわけではない。そうした問題には皆がいろいろな切り口で様々な考え方を提案し、それを互いにすりあわせ検討する中で優劣がつけられてくる。学習の場でも、自分のそれまでの学習を活かし、まだ答えの出ていない問題を調べ上げ、自らが結論を出し、教師に評価されるのではなく自らも含めて皆との検討の中から評価されてゆく学習が、学校の学習活動の中心に位置しなくてはならないはずである。本稿で言う Investigation 学習とは、こうした学習活動を指している。

基礎学習を踏まえて、課題研究に取り組むことは、欧米では目新しいことでも何でもない。だが、〇×試験による競争の激しい社会では、実験観察までがより楽しく学べ、より興味を持ってより速くより正確に理解してより高得点を取れるようにすることに組み込まれてしまう。〇×の世界に入り込まずに、個人の自由発想を底上げし、人が気付かなかったことを見出す喜びを教える教育を目指して本実践研究は行っている。なお、本稿は、「探究学習」などすでに特定のスタイル・意味合いを持って使われている日本語との摩擦を避けることや、カタカナの方がより幅広い意味合いを持っていることなどから、カタカナ語や英語をやや多用しているが、その意図を御理解いただくと幸いである。

2. Investigation 物理

2.1 科学的スピリッツ

上述のように、本授業研究では、〇×感覚ではなく、自らの確信を築く意気込み（スピリッツ）を持たせることを主眼とする教育を目指している。つねに問題には唯一の正解が存在し、それと同じ答えを出したか否かで評価される〇×教育を受け続けると、独創的な答えを出すスピリッツは学習者の心の中から萎えてしまう。そればかりか、いろいろな考え方・切り口を学ぶことに意義が見出せず、考え方から答えまで正解以外に関心を抱けぬ生徒が育ってしまう。今日、真実か否かにも考え方が納得できるか否かにも関係なく、正解だけを知りたがる傾向が学習者に蔓延していることは、多くの方から指摘されている。

すべての問題に、本当に正解が存在するならそうした教育となることは問題ない。だが、どのような解も本当はある枠組みの範囲で正解であるだけで、現実場面ではその答えがあまりに不十分なことも少なくない。音の単元に見る一例で言うなら、固定端、自由端と言うが、実際には完全な固定端・自由端というのは少なく、音響インピーダンスの問題となる。そうしたことを知らされていないどころか、実際の管楽器でどこが固定端あるいは自由端かも見たこともないのが学習者の大半である。また、開口端補正と言うと学習参考書等には直径の0.6倍とか書いてあるが、様々な楽器について調べたところでは開口端補正は非常にデリケートなものであり、極めて多くのファクターに左右されてしまうものであることがわかる。

テスト問題で気柱の長さを補正して計算できるようになることと、実際にどの程度の開口端補正が生じるかを調べたいと思うことと、どちらを育てて行くかが問題である。これまでの日本の教育観では、前者を育てれば、時が来たときに自ずと後者を行える人間が育つはずであると考えて来た。だが、あまりに前者に没頭し、パターン化した考えを会得し得点競争を学習の目的としてしまい、学習者の心には、真実を主張して認められる喜びどころか、疑問を抱く勇気も失われてしまっている。ある枠組みで考えれば、どうなるか。また、別の枠組みで考えればどうなるか。実は投げかけられた問題に対する解はたくさんある。そしてこれまで人が言わなかったところに新たなよりすばらしい解が存在するという立場での教育が求められ、実験の重視、探究の過程の重視が求められる。

ところで、『実験を重視した学習』とは、天下りや観念的押し付けでなく、検証実験や演示実験により正しい理解に導く指導を意味していると考えるのが一般的であった。しかし、実験は納得させるため行うので良いのだろうか。筆者は実験は余計なことも考えさせる、即ち、その考え方の設定枠を理解し、設定枠の外には問題が残されていることを認識する、あるいは問題意識を持たせるために行うものではないかと考えてる。それゆえ、筆者は演示実験は講義における具ではあるが、実験学習には位置付けず、生徒実験のみを実験学習として位置付けている。実験・方法・器具も、自然法則の本質が伺えることを主眼とし、精度の良さにはこだわらない。実際の現象にはさまざまなファクターがある。それらをいかに捨象して本質を推理したときにどういう結論に至るか、そして、実際の実験結果を説明するにはどのようなファクターを考えに入れる必要があるかを理解することの方が大切である。学習の場面での秀れた実験とは、精度良く法則に合致する実験ではない。学習者の思い込みやミスコンセプトに衝撃を与え、“アバウトに鋭くものごとを見抜ける”実験、結果から“目から鱗が落ちる”ような実験こそが秀れた実験ではないだろうか。

実験をすることによって科学的なものの見方・考え方ができるようになるので、科学教育に実験を欠かすべきではないと、実験の重要性が言われる。確かにそうなのだが、ここに「科学的なものの見方を」というもの「テスト問題が解けるようになる」と狭義に捉えてしまうと、「実験をするよりも講義した方が正しく理解できるようになる。特に、生徒実験では、わけのわからないことをしてしまい、いい加減な結果からいい加減な考察を加えたのでは、全くの逆効果になる」という実験弊害論がある。それは真実をついており、実験をさせるよりも明解な講義（演示実験、図表資料を含む）を行った方が、（実験を題材にした問題も含めて）正答率を高めることができる。

では実験の重視は科学教育の立て前でしかないのか。筆者はこれに対し次のように考える。物理を文系も含めた全ての生徒に学ばせたい理由は物理の基本法則を理解させることが第一義ではない。物理を通して学ばせたいことは、“アバウトに鋭くものごとの本質を見抜く力、現実に対する適用範囲の理解・要因の階層性、量から質への転換”，科学的弁証法の学習にある。それなら物理でなくてもよいという指摘を受けそうだが、限られた空間・時間の中で、多岐にわたって自らの力で実験から自然の法則を学びとる学習ができる科目は物理を置いて他にない。実験、特に、Investigation 学習による実験を通しては、

- ・自分で現象とその結果から仮説を打ち立てる勇気

- ・その仮説が受ける友達からの批判を受け止め、他人と見方・考え方を擦り合わせてゆくフェアな判断力
- ・権威的なもの（教科書、書物、教師や専門家）をも、事実に照らし合わせて自ら判断する精神

（これらを以下、科学的スピリッツと呼んで行くことにする）が養われる。実験はこうした科学的スピリッツを育成する物理教育の第一義から不可欠なのである。教師がほとんど教えずして、実験から学び取る学習こそが理想と考えている。

2.2 “Investigation in Physics World”

科学的スピリッツを育てるために、実験が不可欠だからと言って、無闇やたらに実験を行えばいいものではない。学習者には思いがあり、イメージがあり、その上で学習者自身の発見の歴史というものがある。限られた時間の中で、学習者の発見史のストーリーを描くには、長年かけてよい実験を十分に編み出し、用意し、適切なストーリーで配列することが必要である。

本研究実践では、独自に作成した“Investigation in Physics World”という冊子を指針にしながら、学習を進めてゆく。上述のように、理想は教えない教育である。教えずに、教えたことを読み取れる現象を体験させるストーリーを持つInvestigation活動を並べる。ノルマとして課す実験を並べているのではない。ある問題が明らかになるような実験で、問題意識によっては意味のありそうな実験を、みな紹介している。学習者はそこから自分の問題意識にあった実験を選んで調べられる。従って、実験は一斉に指示して行うというより、ある期間、自分の学習進度に合わせて実験してゆく。そのため、班によってやっている実験は異なっている。それを可能にするように、器具もどれをもできるように箱に入れて各実験机に置かれている。

“Investigation in Physics World”は実験書ではない。何をどう調べ、何を求めよという指示もなければ、書き込み欄もない。プログラム学習の手法と同じく、当面の問題意識を抱かせるため、まず

「<Tell me Your Prediction>図のような現象で……したとき、どうなると考えるか？」と切り出し、

「<Probe by Experiment>予測が正しいかどうか、実験で確かめてみよう。《Method 1》……」

といくつかの実験の実験器具と実験方法を図解している。同じ実験でも問題意識によってどういう切り口で調べるかは学習者に任せている。

紹介されている実験は、基本的にスタンダードなものばかりであり、奇を衒い関心を引き付けるような派手なものは少なく、物理教師でも恐らく実際に実験してみないと面白さがわからないかと思う。学習者の思い込みやミスコンセプト、概念形成にどれだけ切り込めるかが実験選定のポイントである。ある生徒が（彼は極めて優秀な生徒だったが）二年間の物理の学習を終えた後、「物理の実験は悉く自分の予想を裏切るものだった」（彼は実験に際してしっかり予想を立て、実験結果を見て、その意味するところを察知できたのだろう）という感想は、本テキストの性格を物語っているのではないだろうか。

学習実験は簡単にでき、十分に考える材料を含んでいることがもう一つの条件である。思い込みを捨て、事実を真実として認めるところから、正しい理解・概念が形成されてゆく。結果をよく見れば思い掛けない結果となっていることに気付く。そのためには、実験結果を正確に記録することが基本である。2000年度には全頁が方眼紙のノート（方眼紙はグラフを作るのにも、表や図を書くのにも便利）を配布し、そこに実験記録を記してゆくように指示した。

なお、物は使えば壊れる。実験を通して学ぶ学習で、器具が壊れて不足して行ったのでは、学習を維持出来ない。壊れても学習を中断させないためには、できる限りの機器・器具を自作し、つねに補修用の部品をそろえておくことが大切である。音と波動の実験では発振器が様々な場面で活躍する。この発振器を自作したところが、この音と波動のInvestigation学習を可能にした要となっている。

2.3 技術リテラシー

Investigation 学習では実験で調べながら学習を進めるため、計測器を使う技術、実験器具の取扱い等々の技術リテラシーの育成が不可欠となる。ところが日本の科学教育には、技術リテラシーの育成には特段の配慮がなされていない。学習指導要領にも探究の過程の重視は指摘されているが、学習事項に知識・概念・法則が列記されているだけで、オシロスコープやジェネレーター、アンプ、電源等々の取扱い技術を身につけることといった指摘は見られない。世間一般に科学教育の主眼は知的理解にあり、実験はその補助手段、さらに実験器具の操作に至っては学習対象と意識されていない。そして生徒の意識も同様である。

そのためか、実験器具の取扱いに関しての学習者の意識は低い。現実には技術的な点に関する指導は、高校生をしつけることを意味する。物を壊したり、つなぎ間違えたり、不適切な捨て方をした程度でとがめられることが理解できない高校生が少なくない。しかし、将来、大きな化学プラントや核利用、あるいは病院で患者の命を預かること、技術軽視、操作ミス、不法投棄等々による地球環境破壊を考えると、小さな技術リテラシーの育成が科学教育で大切なことに感じられる。

3. 授業展開

3.1 カリキュラム

94年より、学芸大学附属高校では1年次に生物と地学をそれぞれ2単位、2年次に物理と化学を2単位、いずれも全員必修で学習し、3年次に物化生地のIB後半の2単位、ないしはIBとⅡとで4単位から選択履修するようになっている。従って、物理は二年で2単位を全員が学習する。学年約340名、男女比は1:1、3年で物理を履修する生徒は130名前後、理系進学希望者が200名弱、文系進学希望者が150名弱といった傾向が続いている。二年の物理学習は以上に述べたように、知識・概念・法則よりも科学的スピリッツ、Investigation 能力、そして技術リテラシーの養成を、そしてその学習は進路に関係なく高校二年の段階でぜひ行っておくべき学習をさせることを考えている。

学習内容は1学期が音、2学期には力と運動、3学期には直流回路について学習させ、最後に3～5時間、原子力と放射線の話をしている。力学から入るのでなく音から入る理由は、学習者がこれまでにあまり教わっていない単元であるとともに、多くの実験を通しての学習が可能であり、しかも結集としての研究テーマも探しやすい。また、オシロスコープや発振器、アンプ、PC計測といった機械をフルに活用することも学習目的に合致している点にある。

3.2 波

波という単元でどのようなストーリーを作り、何をターゲットにして教えるかはそう優しい問題ではない。波動、音、光と多岐にわたる単元であり、何らかの大法則に話を絞り切れないためであろう。学習する側も絞り込むことのできないいくつかの話が登場して、ばらばらの知識の羅列に見え、何がわかればよいのかがかつかめない単元でもある。本校の必修物理では、テーマを音の話、特にどのような音も基本音と倍振動のみの組み合わせででき、それが音色になっていることに思いきって絞り込み、物体の振動が特定の振動数以外の振動をしない、即ち、特定の振動数以外の振動に対しては決して共鳴を起こさないことを理解させることにして、次表の計画のようになった。

この展開ではドップラー効果がかかなり前の方に位置付けている点も特長である。

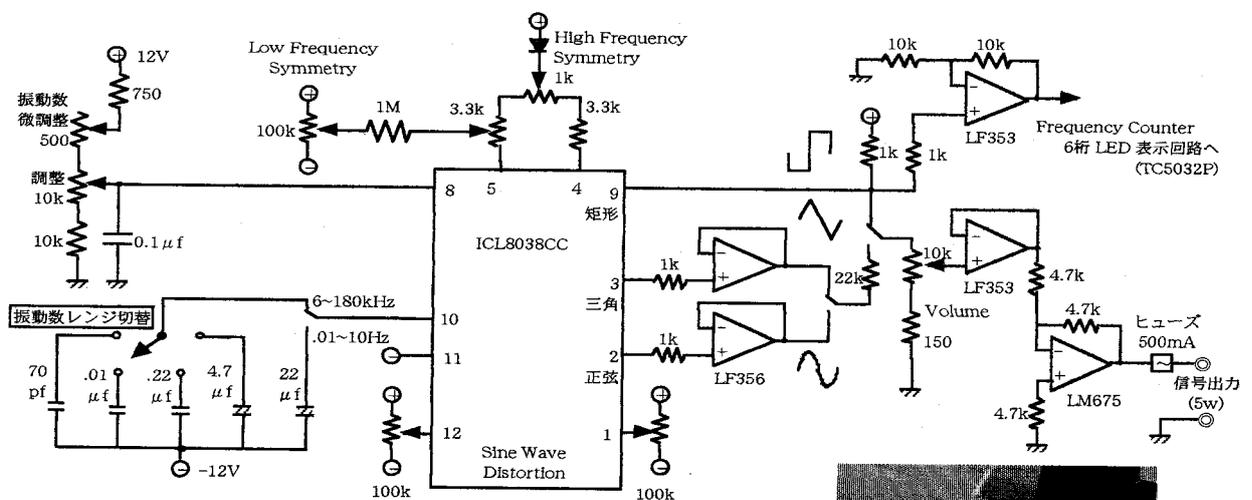
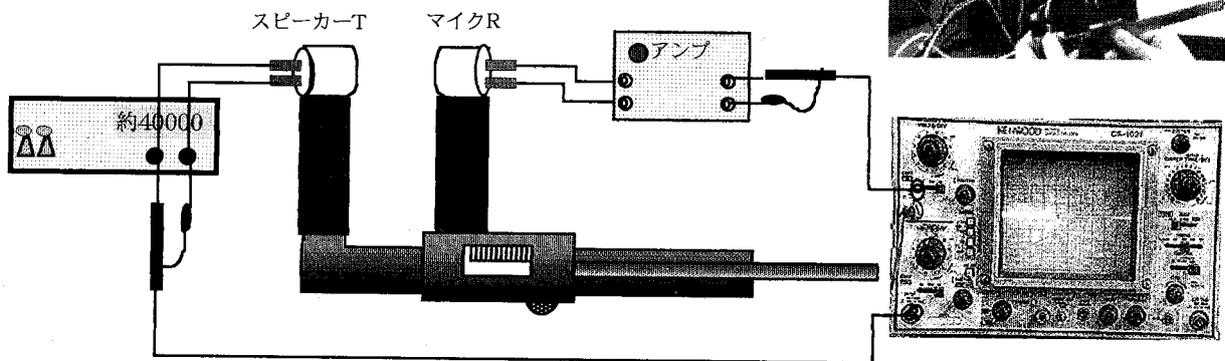
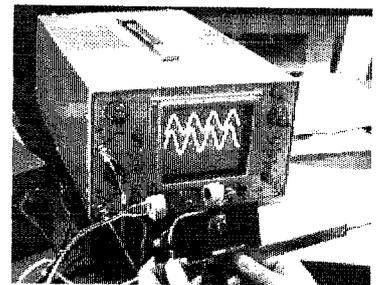
- ① V-f オシロスコープ
- ② 音速の測定
- ③ 縦波と横波表示
- ④ ドップラー効果
- ⑤ Wave Machine
- ⑥ 重ね合わせとうなり
- ⑦ スピードガン
- ⑧ ばねの定常波
- ⑨ 弦の定常波
- ⑩ 縦波の定常波
- ⑪ 気柱の共鳴(1)
- ⑫ 弦楽器・管楽器
- ⑬ 気柱の共鳴(2)
- ⑭ 音声分析
- ⑮ 課題研究

音現象（波）が本質的に媒質の現象であることを意識するのにまた、ドップラー効果が波の伝達速度が媒質の性質だけで決まるといふ、波の極めて基本的な認識にドップラー効果が格好の現象であるためである。

以下、順次、行った実験について簡単に示す。

3.3 音速計測

音速について生徒は 340 [m/s] と教えられてきているが、温度によって変わることも、湿度・成分によって異なることも知らない。340 [m/s]

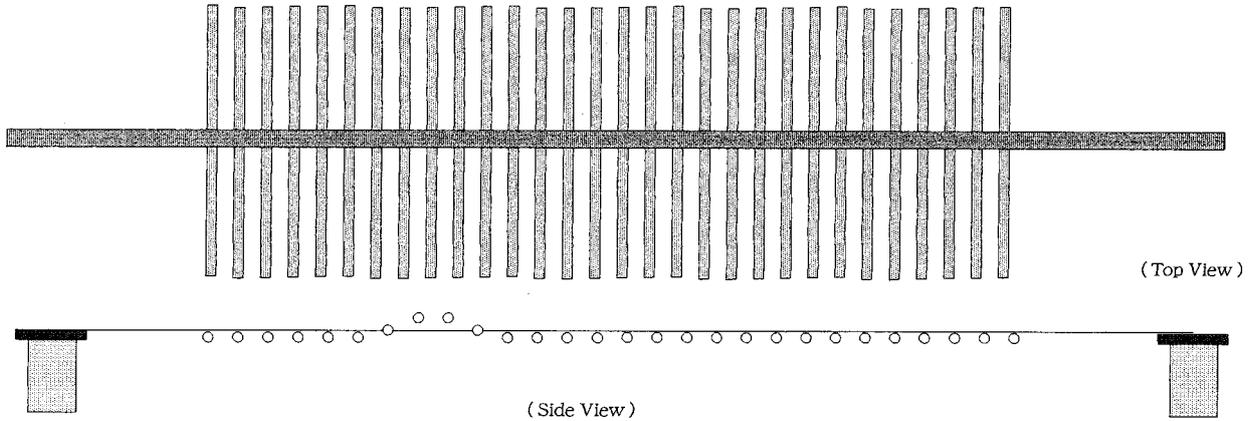


高校物理で、電力出力のできる発振器 (Function Generator)があると、波動、交流などの単元で生徒ができる実験のレパートリーがまったく変わる。だが、生徒の使用ではすぐに壊れてしまう。自作機器で生徒実験班の数そろえておくと、補修がきき、Investigation学習を続けることができる。



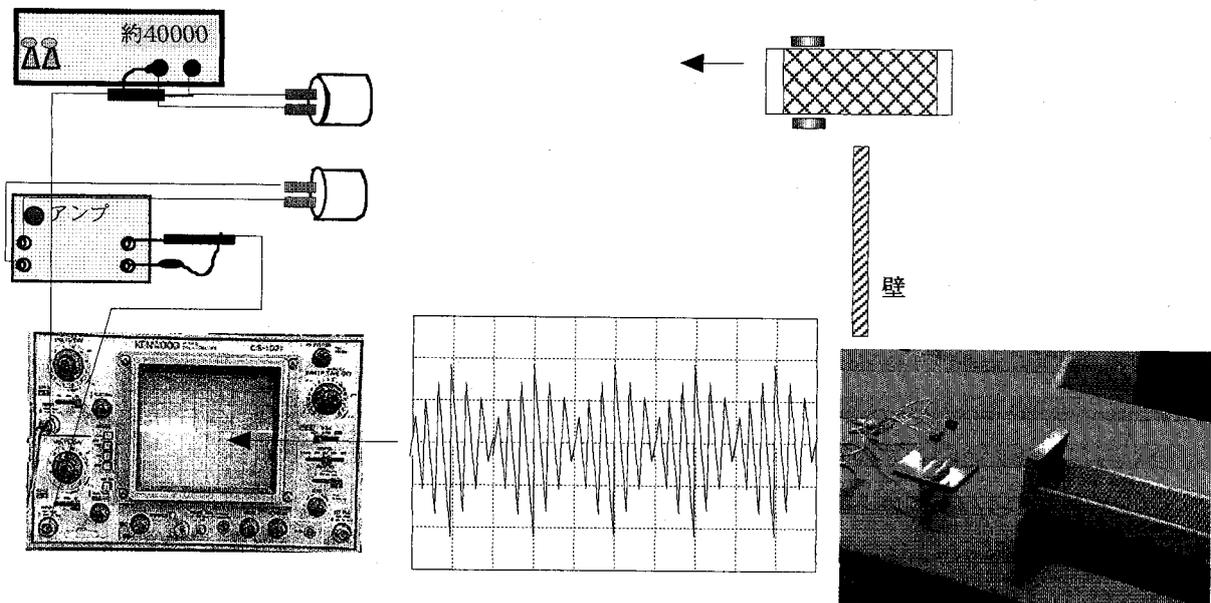
という速さを測るということがどういものかもピンとこない。測定は図のように、約4 [MHz]の超音波を、超音波素子で受信し、発振器の振動の位相とマイクの振動の位相をオシロスコープで観測し、マイクの位置を移動して行ったとき、位相が一致する隣り合う二点間の距離（ノギス）から音波の波長を測り、発振器の示す振動数とから音速が求められるというものである。

3.4 Wave Machine



波の伝達、波のすれ違い、波の重ね合わせ、波の反射を理解するにはシャイブ式Wave Machineという装置がある。だが、高価な上に大型なもので各班に1台ずつ用意できるようなものではない。そこでそれを模して考案したのがストローとセロテープで作るシャイブ式Wave Machineである。ゆっくり波動が伝わり動きがしっかりと見て取れるものが望ましいわけだが、そのためには媒質密度が大きく、復元力が小さいものでなくてはならない。そうした波動の伝わる速さに関することをも学びとる意味で、ストローだけでなく、塩ビ棒、園芸用支柱、パーティ用特大ストロー等幾種類かをを用意し、さらに棒と棒との間隔も自由に調整できるように、棒を並べてゆく下敷きも複数用意する。生徒は工作を楽しみながら波動の基本的性質を学習する。

波の伝達、重ね合わせ、固定端反射、自由端反射等は十分理解できたようであるが、密度の異なる二つのMachineを連結しての、異なった媒質の境目での透過と反射を観察するのまではうまくゆかない。

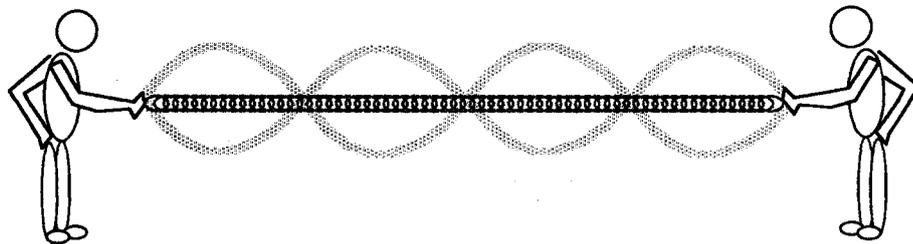


3.5. Speed Gun

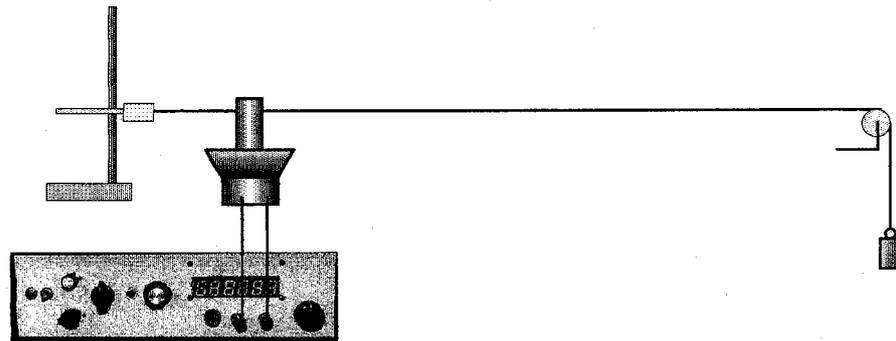
音速の測定に用いたものと同じ超音波発振器と受信器を使い、動いてくる（行く）台車からの反射波と動いていない壁からの反射波とのうなりの回数（オシロスコープで観測）から、台車の速度を求めようというもの。使用するのは通常のアシロで、うなりの周期は一瞬を捉えておおよその値を知る。目測での台車の速さと、測定結果から計算される速さがおおよそ一致することから、ドップラー効果、重ね合わせ（うなり）を応用とともに検証できる。野球や交通取締で使われている Speed Gunの理解につながる興味深い学習でもある。なお、PC計測や、台車にタイマーをつける等のことも考えられるが、そこまではしていない。

3.6 ばねの定常波

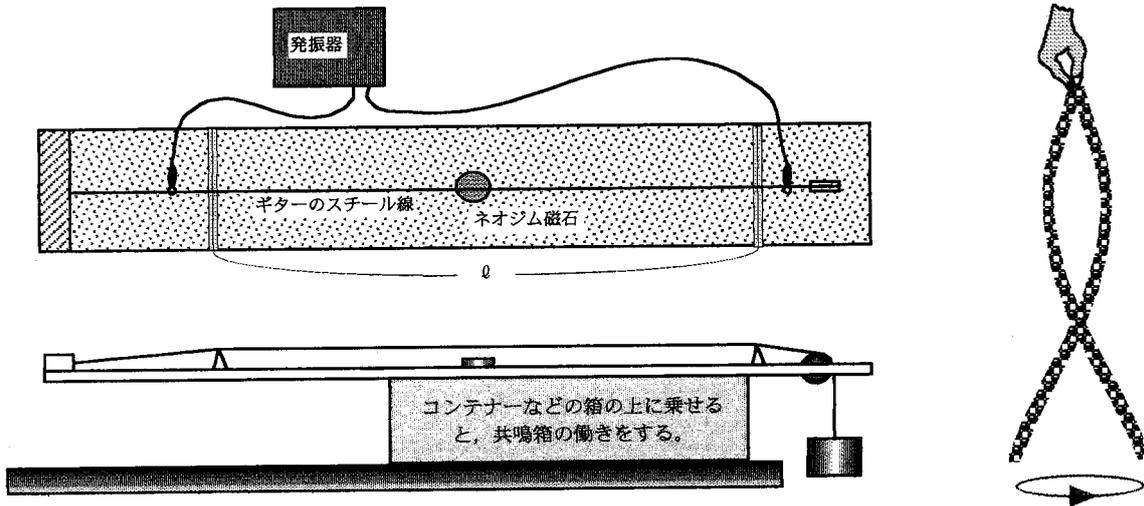
プラスチック製の弦巻ばねが安価で容易に入手でき、美しいことから何となく嬉しくさせてくれる。この弦巻ばねの両端を持ち、縦（横）に振り続けるとタイミングがあったとき、定常波ができる。振動数を変えると定常波の腹の数が変わる。二人の間隔が変わらぬように注意しながら振動数を変えたとき、10回振るのにかかる時間と定常波の腹の数の間にどのような関係があるかを調べる。簡単な関係があることがすぐわかる。ラフな実験であるが、タイミングが合わないと弦の振動が打ち消され固有振動の存在を身をもって感じることで以下の学習に与える意味は大きい。



3.7 弦の共鳴



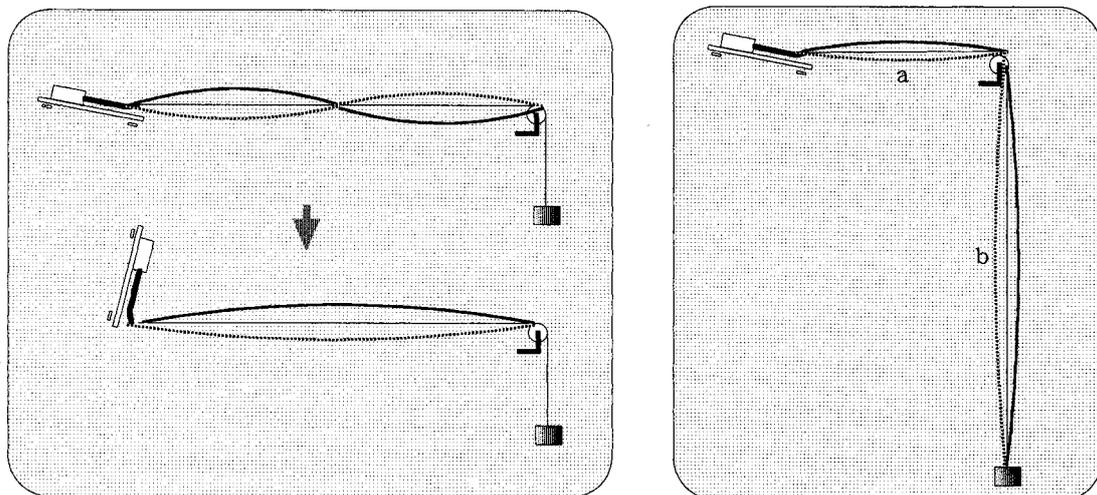
弦の振動の実験では、振動体として力学で使う50 [Hz]の交流記録タイマーを用いるものがよく行われているが、その方法は、振動数を変えることができないこと、力が強く振幅が大きすぎ、弦と共鳴しなくても弦が強制的に振動させられてしまい、共鳴が顕著に現れないことが難点である。それを解消するため、上図のようにスピーカーのコーンに軽いボール紙製または木製の円筒（ただし、音が出るとうるさいのでコーン紙は切り除く）を取り付け、スピーカーと同じに振動するような振動体を作成した。これに糸を通し、スピーカーを発振器で振動させると、弦を数Hzから数千Hzまで連続的に様々な振動数で振動させることが可能になる。また、その振幅がわずかなため、共鳴するとき以外では、弦はまったく振動せず、共鳴が顕著に見て取れる利点がある。即ち、弦が特定のいくつかの振動以外の振動数では振動しないという固有振動数の存在を明解に教えてくれる。さらに、この方法では、弦の張力、弦の密度、長さそして振動数が精度よく測定できるため理論考察を容易にしてくれる。



弦の振動については、上図のようにスチール弦に振動電流を流し、それに強い磁場をかける方法もある。この方法の長所は、わずかながら音が出るので、楽器についての実験をしている感じがつかめる点だが、それだけに弦自体の振動は非常に見づらい。電流量の大きな発振器を用い、共振したときにはっきりと音が出てくると分かりやすいのだが、張力、線密度、長さそして振動数をコントロール（測定）でき、音で共鳴を判断できるような装置には残念ながら至っていない。

吊り下げた鎖を回す実験では下端が自由端の振動を起こす。自由端での波の反射はWave Machineで理解しても、現実に反射が起こっていることを受容することは学習者にとって難しい。弦楽器で自由端になる振動は考えにくい、気柱の振動は少なくとも一方は自由端であり、空気の振動が目に見えぬことから、ここで目に見える自由端の振動を観察し理解しておくことは肝要である。ハーモニカのリードの振動にも一方が自由端の振動が見られる。

弦を振動させる方法として、弦が張られている方向に振動させることにより振動源が2回振動して弦が1回振動するパラメーター共振と呼ばれる現象があるが、それを行うにはベル型の交流記録タイマーが適している（下図左下）。また、ベル型記録タイマーを用いて実験していた生徒がたまたま発見したのだが、振動体と滑車までの糸aの長さとし滑車から錘りまでの糸bの長さとが約1：2で、弦の共振が生じると、糸bの側に糸aの側の2倍の長さの腹の定常波ができる（前図右）。これはタイマーの振動幅が大きいため、滑車のところで糸が引っ張られたり緩められたりすることにより、糸bがパラメーター共振を起こすために生じる。



3.8 気柱の共鳴

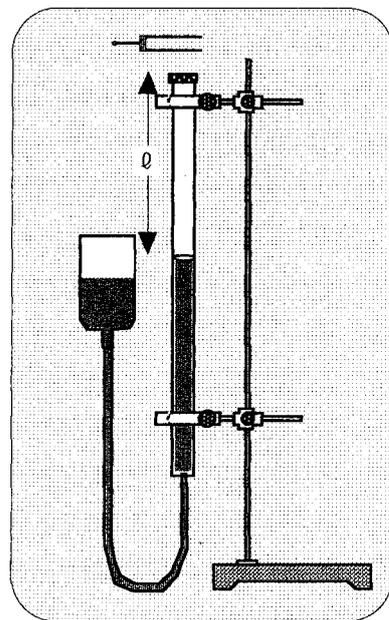
管楽器の理解へのアプローチとして、管の中の水面の上下により気柱の長さを変え、音叉との共鳴を聞く実験では、音叉の聞こえないほどの音が急に何十倍もの大きさになって聞こえるという共鳴が顕著に現れる点で非常に秀れた実験である。

管楽器でもっとも学習者に明確に捉えさせなくてはならないのは、音の媒質である空気が、振動体となることである。弦楽器の場合、振動させるものは指や弓、振動し音を出すのは弦、弦の振動と共振して音を増幅する箱、出た音を伝える媒質は空気で、目に見えてわかりやすい。それに比し、管楽器では、振動して音を出すのが空気、音を伝えるのも空気で、振動源がリードや唇の場合はまだ良いが、笛口になると振動源までが空気となり、目に見えぬ空気がすべてを演じている。管の中を伝わっていった波が同じ空気につかって反射すること、管の両端で反射し、中をいくども往復することによって、振幅の大きな定常波が作られること、その振動によって外の空気に透過した波は進行波となって伝わり、音として聞かれること、学習者にとってわかりにくい話であり、教師にとっては教えずらいところである。気柱が実際に起こしている縦振動（伸縮）の様子とともに本質的な理解があるので明確に理解させたいところである。

また、この実験の優れたところは、閉端に水が使われている点で、水は音響インピーダンスが極めて高く音をほぼ完全に反射させるため、減衰が少なく共鳴がよい上に、実験上はそこがきちんと節になってくれる。これは管の一方を塞ぐことをいろいろな方法で試してみると、水蓋の優秀さがわかるところである。

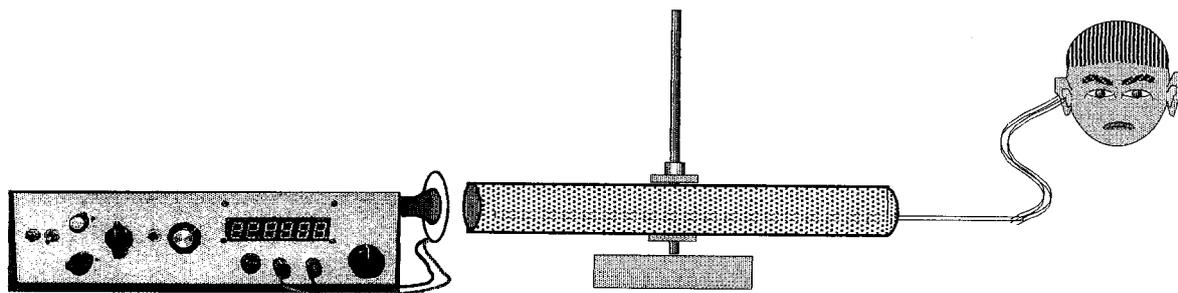
同じ実験を音叉を使わずに発振器で振動数を連続的に変えることのできるスピーカーで行う。このとき使うスピーカーの径は管の径と同程度のものが、スピーカーから直接聞こえる音が小さく、共鳴が聞き取りやすい。この場合、気柱の長さを適当な長さに止めておいて、振動数を高くしてゆき、共鳴する振動数を複数調べることができる。即ち、弦の場合と同じように、ある長さの気柱が、起こす振動は特定のしかし複数の振動であり、それら振動数には一定の規則性が見られることを確認することができる。このことは気柱が出す音には気柱の長さで決まる特定のいくつかの振動数の振動が含まれると同時に、それら以外の振動が含まれることがないということへの理解の基礎となる点で重要である。

なお、この方法で開口付近にコンデンサーマイクを取り付けオシロで観測しながら、スピーカーを三角波あるいは矩形波の適当な振動数（低めに設定した方がよい）で振動させておき、水面を管口付近から静かに下げてゆく。すると、耳での判別は難しいが、オシロでは次々に共振を起こすのが観測される。そのデータを整理してみると、フーリエ解析した振動数に



なっていることが確かめられる。要するに、三角波も矩形波も（他のどのような波形でも言えることだが）いくつかの正弦波振動の組み合わせで作ることができる（フーリエ解析）。そのことを実験的に確認することができたわけである。高校生には適さないが、大学生に行かせたらフーリエ解析を物理として認識することができるようになる意義ある実験となる。





両端の開いたボール紙の筒（長さ100[cm]，直径7～8[cm]）が手頃な価格で入手できる。これを用い，一端からスピーカーで音を出すと，160[Hz]付近と320[Hz]付近，480[Hz]付近で共鳴するのが聞き取れる。共鳴している管の中に6[mm]程度のビニール管を挿入すると，管の中のそれぞれの点での音の強弱が聞かれ，定常波が実際にできていることが確認できる。このとき，気柱の定常波の中のもっとも大きく振動する箇所では，圧力変化が生じていないため，腹の位置にビニール管の先を持って行ってもビニール管内の空気に音は伝わってこない。逆に，もっとも強く音を送ってくるのは密度変化の激しい節の位置にビニール管の先を持って行ったときになる。スピーカー付近で音が聞こえなくなるのも，外に音が出ているのに右の開口部でも音が小さくなるのも，意外に思うところである。単純な現象で難しい理論や計算を要する話でもないが，スタートに戻って素朴なごまかしの理解に戻らなくてはならない点で，科学的スピリッツを育てる実験かと思う。

ボール紙の筒は，切って自由に違った長さの筒にして調べることができることや，途中に穴を明けることによって，中の気柱の振動にどのような影響が出るかを調べることなど，自由にできる良さがある。また，右端を閉じて共鳴したところで開くと音が弱くなることや，開管の場合は整数倍振動で共鳴するのに対し，閉管では奇数倍振動でしか共鳴しないことなど比較検討できることなど，学習者の問題意識によっていかようにも実験できることから，Investigation活動に適している。

3.9 音声分析

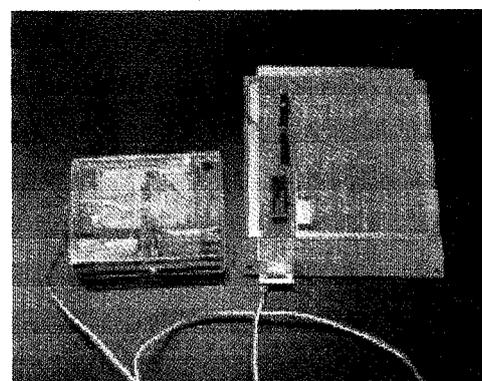
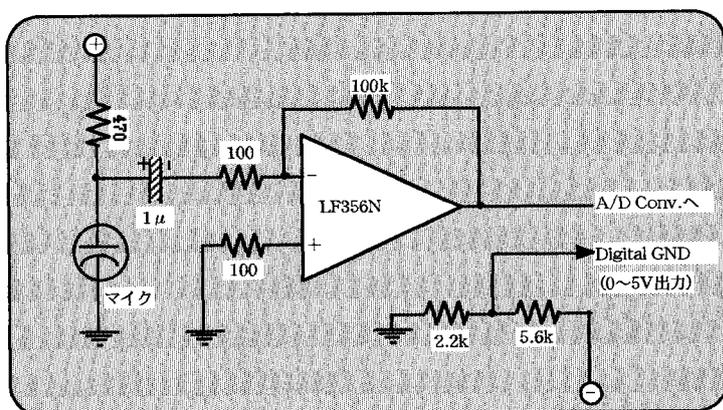
音の学習では目標点を音色と倍音に関する理解に設定するのが，もっとも単元に有機的なつながりを持ったストーリーが描くことができ，その結果，学習者も一つの世界が見えた気がする。近年，FFTプログラムはインターネットでも提供してくれる方がおられ，I/O・ADも機械が備え，メモリーもかつての1000倍以上かつ処理速度も桁違いに増しているのので，コンピューターさえあれば，即座に入力音声をリアルタイムでスペクトル分析して見ることができる。本校では，PC98系の機械で不要となったものが内部でもまた大学からも沢山放出されてきたので，これを用い，I/O・AD変換ボードを挿入し，それにマイク&アンプを接続し，C言語プログラムで，10年前より生徒実験として音声分析を行っている。いずれWindows Machineが生徒活動に耐える台数，入手できたら検討するが，ストレージシロで取り入れた様に2000程度のデータを蓄積し，それを積分区間を指定し，10秒ほどの時間をかけてフーリエ積分させ，得られたスペクトルを記録し考察するのも，教育的にはあなどれない。入力にはスピーカー，ダイナミックマイク，コンデンサーマイクと試みたが，ダイナミックマイクがもっとも取り入れた波形に歪みが大きく，スピーカーは物による違いが大きい。コンデンサーマイクを用いるのが，もっとも信頼できる波形を出してくれる。ただ，難点はコンデンサーマイクにはドライブ&増幅回路の作成が必要になる点である。

音のフーリエ解析によって何がわかるか。人の声，『あ，い，う，え，お』の違い，声の高さ，発声の違い，人による違い，さらに弦楽器，管楽器，様々な楽器の波形，簡単には前の実験でも使ったボール紙の筒に口をつけて唇で音を出し鳴らしてみる等々，いろいろ持ち込んで波形を観察するだけでも楽しめる。さらに，スペクト

ルをとると、一見、多種多様な波形が、実はある振動数 f_0 の音の整数倍の振動数 nf_0 だけがいくつか重ね合わさってできた波であることがわかる。なぜそれ以外の振動数の音が含まれていないのか。この問題に答えるべく、ここまで弦の振動でも気柱の振動でも nf_0 以外では振動しないということに力点を置いて実験してきている。学習者が得る情報（教科書や参考書ほか）に、音色の違いは波形の違いとある。だが、音色の違いはそれを構成する倍音の含み方の違いであることに言及しているものは見られない。弦や気柱の振動では基本振動、倍振動について記されているが、そうした名称の意味については説明がない。しかし、楽器の演奏等で、「どうするとなぜそのような音が出るのか」については、音が倍音によって構成されていることが説明の基本となる。

通常の展開では、音色への言及には至らず、 nf_0 の振動が可能であるということだけで、実際に自分達の声や楽器の音といった具体的な話には至らずに終わってしまう。だが、学習者に意欲と学習・研究の喜びをもたらすには、この音声のスペクトル分析とそれを活用して行う『音を科学する』ことは格好の課題研究となる。

音がいくつもの振動数の音の重ね合わせで作られているとき、その音の高さ（振動数）がいくらになるのかは、もとの音波の周期を測り、その周期がスペクトルのどの振動数に一致するかを調べるように導く必要がある。そこで基本振動に整数倍振動の振幅を指定し次々に重ね合わせた波形が表示されるようなプログラムで学習させている。



4. 課題研究 (Research)

学習単元の最後に行うのは単元のInvestigation活動を通して得られた理解・技術を使っでの研究活動 (Research) である。今回、研究課題は「音 (楽器) を科学する」とだけ与え、1学期の残りの時間全部 (5時間前後、約3週間) を研究活動に取り組みさせた。主にコンピューター (PC98DX, デスクトップ) を用い、いろいろな楽器等からの音を取り入れてスペクトル解析をし、得られたいくつかの振動数と振動体の長さ他の状態との関連を明らかにしてゆこうと言うものである。この間、実験室に縛りはしないが、そこを起点にして研究活動を行う。コンピューターが携帯できるものであったなら、持って行って調べたかっただろうが、それができぬため、皆、思い思いに様々な楽器や機械を運んで来て、精力的に調べて、山のようなデータを書き写していた。昼休みも放課後も実験室および機材を自由に使用できるようにしてある。学年8クラス、各クラスとも男女各21名の42名で全330名弱が、10台の機械と実験台を使い、3週間後に研究論文を提出しなくてはならないのであるから、昼休みも放課後も実験室は取り合い、順番待ちであり、各HR教室でデーターをまとめ、討論し、論文を1枚1枚書いては、順番がくると実験するといった光景が8教室と実験室全部を使って繰り広げられる。まるで、学校中がこれから吹奏楽か音楽のコンテストでも開催される前のような様子である。内部の教師は「またこの季節が来たな」と思うだけだが、外からの来客は何事が起きているのかと思ひ、聞くとそれが生徒の物理の課題研究活動であると聞き、非常に驚かれる。

研究は適当な仲間 (実験班、音楽部どうし、バンド仲間、等々) で行うが、研究論文は各人が提出する。分量は自由である (おおかたはレポート用紙20枚前後 (10~30枚))。評価はA, B, C, D評価だが、特に優れて

いるものはE (Excellent), AもA^o, A, A'の三段階に分ける。しっかりデータを取り、科学的に分析し、何らかの結論に至っているものはA, よくデータを取ったが一部に誤った理解をしているものはA', 独創的なテーマでどのような小さなことでも自らの発見に基づいた結論に至ったものはA^o, 中でも特に優れた研究はE評価である。データをよく取ったが、考察がほとんどなされていない(自分の考えを述べていないものは残念だがB, ろくにデータをとっていないもの, あるいは何らかの本や論文を書き写してきたものはいかに高度な内容であろうとC。文献引用は悪いことではないが, あくまで引用として出典を明記して使い, 自分独自の報告内容がしっかりあってのことで, 評価は「いかに多くを学んだか」ではなく, 「いかに人がしなかったことを科学的な裏づけをもって主張するか」に目を向けている。

従来の学校評価からすれば, 大学や大学院あるいは学会報告等で知ることを先取りして情報収集してきたかを評価されるから, 私のC判定を疑問に思う人が多いかも知れない。人が発見したことはあくまでその著者にPriorityはあるのであって, それを引用するときにはそのPriorityを尊重するというのを, しっかり教える必要がある。そして, いかなる些細なことでもその子供自身が考えたこと (Originality)は, 高く評価されることも含めて。即ち, StudyとResearchをしっかり区別して教え, OriginalityとCreativityに高い評価を与えている。ともすると学校では自分の考えは勝手なこと, それを食い下がって説明すれば分からず屋と言われかねない生徒になる。著明な人・権威ある人の主張を引用すれば友達にも先生にも高く評価されるような習慣を直さなくては, 独創性の芽は悉く摘まれ, 子供⇒大人は人の言わないことを言うことに非常に臆病な人間ができてしまうだろう。

最近の話題から例を取ると, 2000年のセンター試験で出題されたクインケ管について実際に調べた論文が, すぐに物理教育学会誌に掲載された。その結論として, センター試験での正解は教科書や学習参考書等で正解と思われる極めて単純化した捉え方からの予測であり, 実際にはそう簡単な話ではないことが述べられている。こうした例に見るように, 物理, 中でも音・光・波・流れ・熱・物質は細かくは分かっていないこと(正確には細かく調べられていないこと)がいくらでも見つかる領域である。わかっていたとして, Popularになってはなかったり, 実際の現象に対する分析はすべてがperturbationであり, 1st. order, 2nd. order, ……しかもその方法もいくらでも改善の余地がある。従って, 高校生でも基本的な捉え方を学び, データを得る手段を与えればデータにもとづいて科学的にいくらでも他の人がしていない考察と発見をする余地がある。

こうした目的からすれば, 物理の理論は単純であり, 目に見えるサイズのものも多く, 道具も安価で簡単なものが多い。しかも, 実験室の中で短時間にデータを得ることができる。物理学には教育上こうした非常に有利な特性があるのだから, これを活かさない手はない。まったく初学者の学習者が実験をして何かのわかり, そこから結論を出して行けるようなテーマを豊富に持つ科目は他にない。化学は何が起こっているかは推理で見ただけでは見ることができない。生物も事実を見て認識を新たにすることはできるが, 自分の見解・仮説に至るには大変な学習が必要であったり, 空間的にもFieldに出て研究しなくては始まらない面も少なくない。地学に至っては空間だけではなく, 時間的にも学習者が自ら調べて他の人がしなかった結論に至るテーマは思い浮かばない。物理の教育は若い人にOriginalityと科学的Spiritを涵養し, 本当の科学の自由と楽しさを知らせる意味で, 学校で学習する必要があると思うのである。

こうした意味で課題研究はこの授業実践のもっとも中核をなすものであり, 評価の考え方は本実践研究の中の非常に重要な学習者へのメッセージをなしている。評定も, この研究報告に関する評価で行う。課題研究のための基礎学習の整理として, ペーパーテストも行うが, 評定の基本は研究報告であり, テストはそれの補助として行う。実験レポートを成績にどう加味するかと言う懇談会やシンポジウムは何回か聞いたことがあるが, そうした席上でしばしば語られる「実験の成果は当然学習理解となって反影されているはずなので, 結局はテストの得点で評価するのがもっとも適切である」とする主張は, 実験レポートで測られるものはテストで測られるものに包含される論である。それに対し, 本研究では, 実験レポートという段階に留まるのではなく, それを踏まえた研究

にまで学習を進めるべきと考えており、テストで測られる成果は、報告書に含まれる要素の一部に過ぎない。研究の最も難しい点はテーマを見つけること、技術リテラシーと大変な努力によりデータを集め、その中から何かを見い出すところ、さらにそれを科学的な裏づけをして、起承転結をつけた報告書にまとめあげるところであり、その中で要求されるものはテストで要求されるものとは比べ物にならない。次に、今回の生徒の研究報告から興味深いものを記載する。

4.1 ハーモニカ

ハーモニカについての研究をまとめたのは山本裕子と滝川晶という生徒だが、以下、彼女らのレポートから紹介する。

ハーモニカはリードの振動で音が出る。リードは一端が固定された矩形の金属板であるので、その振動では奇数倍振動しか出ないはずであるが、やや弱めながらも偶数倍振動が認められる。この点について研究した生徒が次のように記している。

；ドミソのどれを見ても奇数倍振動が偶数倍振動に比べ大きくなっている。これはハーモニカのリード板の一方が固定されているためである。が、小さいとは言え、偶数倍振動が出ている。その理由を推理するに、ハーモニカのリード板はすべて1枚の薄い金属板に付けてある。そのため、金属板が振動し、リード板の両端が自由端となる偶数倍振動がおこっているものと考えられる。

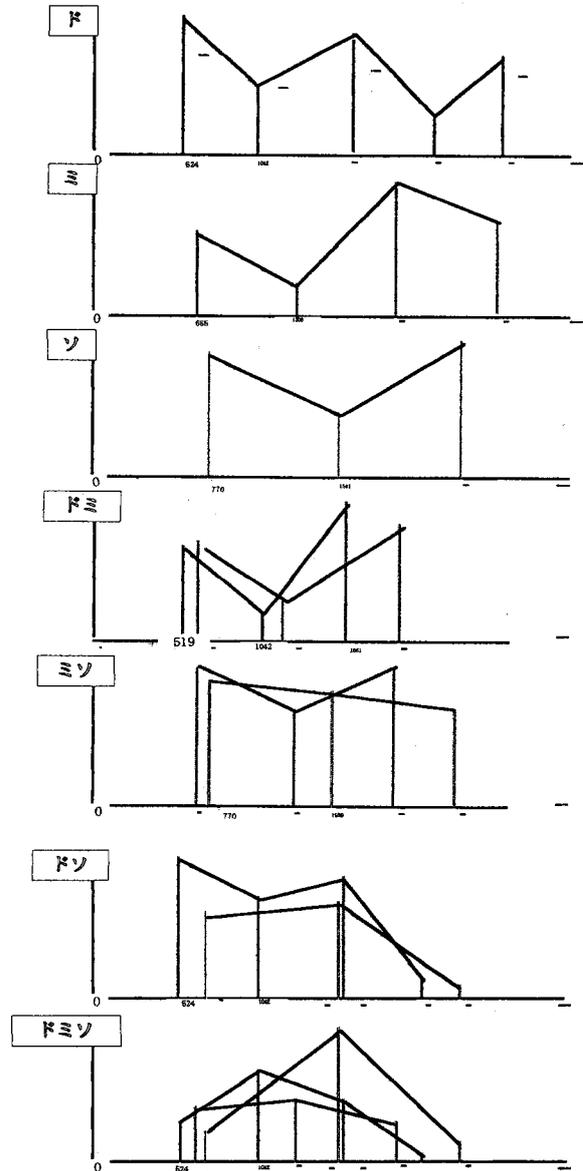
次に、二つの音を同時に吹き、フーリエ解析すると、一見規則性のないグラフが得られた。その振動数は
▽和音になったからと言って、新しい振動数になるわけではなく単音の成分がそのまま入っているだけ

▽だが、和音にすると高周波数は消えてくる

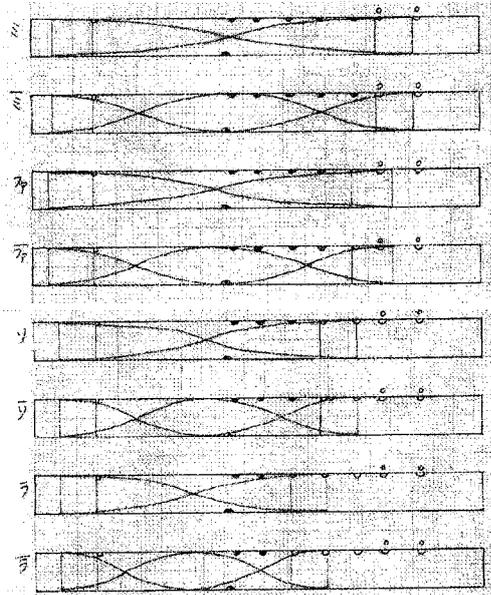
▽それぞれの偶数倍振動は奇数倍振動に比して弱い
が、和音ドソのスペクトルを見るとソの2倍振動が基本&3倍振動より強い。これはソの2倍振動

とドの3倍振動がほぼ等しいため金属板を通した共振が起きたことが考えられる。

▽だが、ミソ、ドミソなどでは振動数の近接でなく2倍振動が見られる。強く吹くとリード板の振動が大きくなり、固定されていない端が金属板に接触する。そのため、両端固定端の偶数倍振動が起りやすくなるのではないだろうか。



ラ		875.7	38.8	19.4	13.8	5.6cm
ソ#		830.8	40.9	20.5	13.8	6.7
シ		997.0	34.1	17.1	11.7	5.4cm
ラ#		930.0	36.6	18.3	11.7	6.6



音	指使い	振動数	λ	$\lambda/2$	\varnothing	$\lambda/2 - \varnothing$
ミ		659.6	51.5	25.8	20.3	5.5cm
ミ		1333.7	25.5	12.8	20.3	

ファ		701.1	48.5	24.3	18.4	5.9cm
ファ		1414.2	24.0	12.0	18.4	

ソ		785.5	43.3	21.7	16.1	5.6cm
ソ		1581.1	21.5	10.8	16.1	

ラ		875.7	38.8	19.4	13.8	5.6cm
ラ		1756.4	19.4	9.7	13.8	

◇裏穴を半空けにすると1オクターブ高い音が出るのはなぜだろうか？

裏穴を少しだけ(爪1枚分くらい)開けると1オクターブ高い音が出る。この謎を解くため1オクターブ音を上げるときに裏穴を開けるだけで他の指使いは変えない音を選んで調べてみた。測定された振動数は1オクターブ上の音はどれもたしかに2倍になっている。上面の音孔の押さえが同じであることから、裏孔を開いたときには2倍振動が起きていると考えられる。

裏孔を開けたことで空気が動けるようになり、言い換えれば音圧が高くなれなくなり、そこを節とする基本振動が消され、その付近を腹とする2倍振動が出るようになる。試しに裏孔にもっとも近い表の一番上の孔を少しだけ開けてみて吹いたところ、ミとファとソは裏孔を開けたときと同様にきれいに1オクターブ上の音が出た。リコーダーでラを吹くとき、きれいな音が出にくい。これも固有振動の起こり方で説明できそうだ。上図のように、ラでは裏孔と腹の位置のずれが大きい。そのため、2倍振動を作りにくい。ソを出した後だとラの音が出しやすいが、これは気柱が近い振動をしていたことによると思われる。

◇少し複雑な指使いをする音を見てみよう

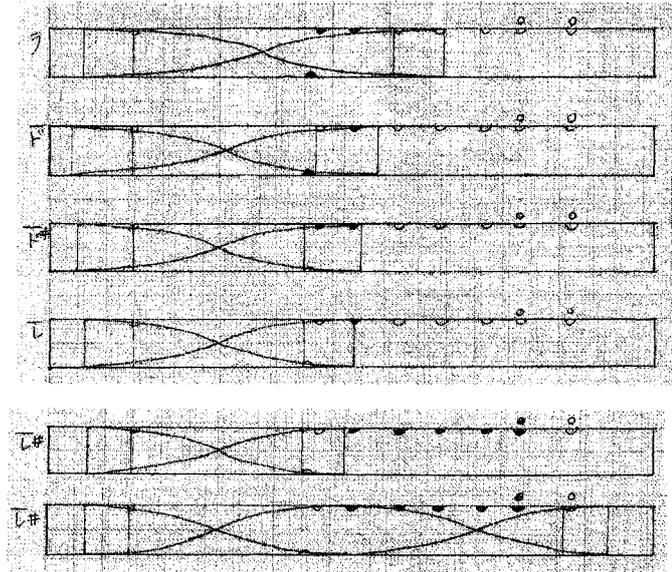
リコーダーでは「親指は閉じるけれど、人指し指は開けて……」と少し複雑な指使いをして出す音も多い。その中で、興味を持った4音について考えてみた。波長を決める孔が同じである下#とレを比較すると孔の多いレの開口端補正が短くなっている。ラと下を比較するとラから下に移るときに動かすのは左人指し指一本だけだが、その一本が波長を短くする働きをしていることがわかる。

最後にレ#の音だが、そのとき気柱は基本振動を起こしているのかそれとも2倍振動をしているのか。いずれでも説明できそうだが、右手の小指も加えると音が下がることから右最下図のように2倍振動をしているものと考えられる。

他の者のリコーダーについての報告には『閉管にしたリコーダーについて』の記載が見られた。

；空気を吹き込む口以外の孔や底の口をすべて閉じて閉管の状態（俗に「ひざ」という）でデータをとった。2点音のドを吹く指使いで足のひざで管の先端を塞いだものだ。

$f_{開} = 524\text{Hz}$ に対し、 $f_{閉} = 843\text{Hz}$ で $f_{閉} = 1.6f_{開} = (3/2)f_{開}$ となり、窓が腹、底が節の3倍振動が出た。残念ながら $f_{閉1} = 281$ の基本振動（一点音のド）は出せなかった。



4.3 その他

『音（楽器）を科学する』というテーマでの生徒の研究は多岐に渡った。また、報告書にはふれていなかったが研究途中で発見したさまざまな事柄も多い。

▽チェロなどではハーモニックという奏法で弾いた弦の途中を指で軽く振れオクターブを上げた音にしてバイオリンとの音合わせをする

▽人の声も楽器と同様に声帯の振動であり、それは弦楽器に近く、偶数倍音も奇数倍音も含まれている。のど仏の発達した低音の男性は主に声帯の振動で声を出し、多くの倍音が含まれている。それに対し、女性の多くや声楽を行っている人の声は声帯で出た音を管で共鳴させて出しているため管楽器に近く、倍音の数が少ない。170Hzの高さでは波長が2[m]あり、その腹の長さは1[m]にもなり、そのような長さの気柱は体で得られない。口鼻気管等での気柱の振動であるから、その長さは30cm以内。従って、こうした人の音声スペクトルは3ないしは4倍振動が強いという特徴が認められる。

5. 終わりに

筆者らは、もっとも望ましい授業を目指して、実践研究を行って来た。だが、物的条件の整備、周囲の理解、学習者に対する指導力、さらに教師の仕事量の限界など現実問題として、こうした授業を持続するのは容易ではない。得点競争という学習の動機付けに依らず、学習そのものの面白さでの学習の動機付けはそう簡単に得られるものではない。しかし、一方で、物的環境を整え、学習者の意欲が芽生えてくるのを待てば、学習者は非常に意欲的に研究に取り組む。生徒の自主性・純粋な学習意欲を信じた授業は、どこの学校でも成立させることはできるだろう。だが、340人もの生徒のInvestigation活動を教師一人で、しかも週2時間(年間60時間余り)で行うのは、正直に言って心身共に限界で行っている感じがするのだが、実際にこうした授業を一度行い、そこでの生徒の学習活動を知ってしまうと、もはや従来の伝達講習型の授業で、学習問題に終始する授業に戻ることはできなくなる。目先の点数に責任を感じるより、目の前の生徒の科学を楽しんでいる姿と10年後に夢を託したい。

最後にこの授業の評価は課題研究10：実験記録（ノート）5：期末試験5で行った。もちろん期末の試験問題も実験からの出題である。ペーパーテストの成績＝いかに人と同じ答えを出すかよりも、研究論文のオリジナリティ＝いかに人と違った答えを出すかを高く評価される、そのような学習体験が一生の間に少なくとも1回はなくてはいくら何でもおかしい。ユネスコの調査に現れたような中等段階でできるけど嫌いな青少年を作るより

も、学習に意欲を燃やせる青少年を育てることが、現場に強く求められているのではないだろうか。そしてこうしたInvestigation学習も、教師が腹をくくりさえすれば、今でも実行できることであろうというのが我々の思いである。