

手づくり楽器の開発

—塩ビパイプ製リコーダー—

Development of Handcrafted Musical Instrument —Recorder made of Vinyl Chloride Pipe—

鞍谷 文保
Fumiyasu KURATANI

2005年10月11日受理

Abstract

This paper presents a method to make a handcrafted recorder. In order to use a handcrafted recorder as a teaching material for object-making, a vinyl chloride pipe is used as the main material of the recorder because of popular price and ease of cutting and drilling. In addition, some adjust functions are developed to improve the acoustical property of the recorder. For sound production, the space for air to pass through at the windway is adjustable using a movable partition of a plastic plate and the width and length of the window at the sound hole is also adjustable by attaching a plastic plate with a slit to the window. For pitch or scale, the diameters of the tone holes are modified by reaming. This allows to skip the step of correct positioning of the tone holes.

1. はじめに

ものづくりは作る喜びや完成の達成感が味わえる。このことから、ものづくりの教育的効果として学習者の集中力や忍耐力を高める、さらに主体的に取り組む態度を育てるなどが挙げられている。別の教育的意義として、教科や生活で学んだ知識や理論を実感を伴って理解させる手段、さらに科学的な見方や論理的な思考力を向上させる手段としての有効性も考えられる。

科学的な見方や論理的な思考力を養うためには、ものづくりの題材として企画・設計・製作・評価・改良などのものづくりのプロセスが明確であることが求められる。さらに、学習者が興味・関心を持ち、完成の達成感（成功体験）が味わえる題材であることも重要である。

学習者が興味を引きやすい題材の一つとして、楽器づくりがある。それに関する書物^{1)~3)}も多く出版されている。また、実験を通して音や楽器のしくみを学ぶための書物^{4)~6)}も出版されている。楽器の中でもリコーダーは身近であり、そのしくみに関してもある程度の理論的な説明が可能である。さらに、音の測定・分析を行うことで製作品の評価も可能である。リコーダーづくりをものづくりの題材とする上での問題点は、製作と改良の困難さである。

本報では、ものづくり教育の題材としてリコーダーづくりを取り上げる。市販のリコーダーをそのまま忠実に再現することは困難であるので、塩ビパイプを材料とするリコーダーを開発する。塩ビパイプを材料とすることで、身近な工具だけで加工が可能となり、さ

らに安価であるので学校現場への導入も容易になると考える。しかし、塩ビパイプは切断や除去加工すると修復ができないため、音が出ないあるいは正確な音階が作れない場合の改良が困難である。そこで、種々の調整機能を取り入れ、製作品の楽器としての完成度を高める。また、リコーダーのしくみと調整機能の働きを理論的に考察する。その結果をもとに、理論の実感を伴う理解や科学的な見方、論理的な思考力を養うための学習教材としての利用を検討する。

2. リコーダーの科学

リコーダーはエアーリードの木管楽器に分類される。その発音のしくみと音階の作り方を説明する。現在、学校などで使用されている市販のリコーダーは、図1に示すように頭部管、中部管、足部管の3つの部分からできている。発音に関わる部分は頭部管で、特に歌口の形状が発音特性に影響を及ぼす。また、音階に関わる部分はリコーダーの長さおよび中部管と足部管にある指孔の位置と形状である。

2.1 発音のしくみ

リコーダーに息を吹き込むと歌口のところで空気の振動が起こる。その振動が音源となりリコーダー内の

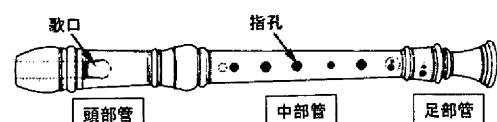


図1 リコーダーの構造

空気柱が共鳴することで、大きな音が外部に放出される。したがって、歌口のところで生じる空気の振動、すなわち音源を作り出すことがリコーダーの重要な機能となる。

図2の頭部管の断面図を用いて、発音のしくみをもう少し詳細に説明する。リコーダーに吹き込まれた空気はウィンドウェイの出口を出るときに渦動を伴い、上下の横ゆれ振動を有する空気流となる。その空気流がラビュームのエッジ（とがった部分）にぶつかり上下に分けられると、窓から管の外と管の中への二つのルートを交互にとる。これが空気の振動を引き起こし、小さいながら音源となる。これをエッジトーン⁶⁾と呼び、リコーダーの発音原理である。

強い空気の振動（大きな音源）を起こさせるためには空気の流れの方向が重要で、空気流が正確にエッジにぶつかるようにする必要がある。なお、エッジトーンの周波数は、ウィンドウェイ出口とエッジまでの距離や空気の流速により広い範囲で変化する。ウィンドウェイ出口とエッジまでの距離が短いあるいは流速が速いと高い周波数の音が出る傾向にある⁶⁾。

2. 2 音階の作り方

歌口のところで発生する音は非常に小さいが、それを増幅する役割を担うのが円筒形の筒である中部管と足部管（頭部管の一部）である。これらは音響的には空気柱共鳴器であり、その形状や管の長さに応じた固有の共鳴周波数を持っている。すなわち、歌口で発生した音源の周波数のうち、共鳴器の共鳴周波数と一致したものだけが大きな音となって外部に放出される。そこで、音階を作るためには、共鳴器の共鳴周波数を任意に変える必要がある。リコーダーでは、図1のように管側に指孔をあけ、それらを指で開閉することで共鳴器の共鳴周波数を変えている。

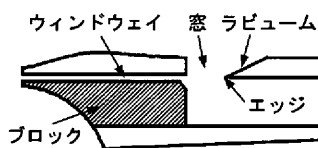


図2 頭部管断面

リコーダーの共鳴器は、単純化すると両端が開放された円筒形共鳴管（開開管）と見なすことができる。開開管の基本共鳴周波数 f [Hz] は、開開管の長さ l_R [m] の場合、次式となる⁷⁾。

$$f = \frac{1}{2} \frac{c}{l_R} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 c は空気中における音波の伝播速度で、約340 m/sである。式(1)から、共鳴管の共鳴周波数を高くするためには、管の長さを短くすればよいことがわかる。共鳴周波数が与えられたときの共鳴管の長さは、式(1)を変形した次式から算定できる。

$$l_R = \frac{1}{2} \frac{c}{f} \dots\dots\dots (2)$$

本研究で製作するリコーダーはソプラノリコーダーで、その音域は表1に示すC (523.25Hz) からD (1174.66Hz)である。表2に、表1の各音について算出した共鳴管の長さを示す。ただし、音の伝播速度 $c = 343.5 \text{ m/s}$ ($t = 20^\circ\text{C}$) の場合である。なお、表2には併せて隣の音との共鳴管の長さの差を明記している。表2において、音が高くなる（周波数が大きくなる）ほど管の長さが短くなっていることがわかる。

リコーダーの場合、前述のように管側に指孔をあけ、それを開閉することで共鳴管の音響学的な長さを変えている。ただし、実際のリコーダーの指孔位置は表2のとおりではない。その理由として、次のことが考えられる。

- ① 開口端補正⁸⁾のために、実際に必要な低いCの管長は表2の値より短くなる。
- ② 低いC以外は管側に指孔をあけて共鳴管の実効長を変えているために、単純な開開管と見なせない。
- ③ EとFの間およびBと高いCの間の共鳴管の長さの差は、他の場合より短くなっており、そのままでは指で指孔を押さえにくい。

そこで、実際のリコーダーでは、指孔の位置と指孔の大きさ、さらに管の内部の形状を複雑に変えることで、指で押さえやすい指孔位置を実現している。

しかし、学習者に表1と表2を示すことで、音が高くすなわち周波数が大きくなるほど指孔の位置が歌口に近づく理由を明確に説明できる。さらに、後述するFの指孔の穴径が他の穴径と比べて小さい（ジャーマ

表1 ソプラノリコーダーの音域と周波数

音名	C (ド)	D (レ)	E (ミ)	F (ファ)	G (ソ)	A (ラ)	B (シ)	C (ド)	D (レ)
周波数 [Hz]	523.25	587.33	659.26	698.46	784.99	880.0	987.77	1046.5	1174.66

表2 ソプラノリコーダーの音域と共鳴管の長さ

音名	C (ド)	D (レ)	E (ミ)	F (ファ)	G (ソ)	A (ラ)	B (シ)	C (ド)	D (レ)
長さ [mm]	328.2	292.4	260.5	245.9	219.1	195.2	173.9	164.1	146.2
差 [mm]	-	35.8	31.9	14.6	26.8	23.9	21.3	9.8	17.9

ン式の場合) 理由なども説明が可能となる。

3. 塩ビパイプ製リコーダーの製作

学校現場におけるものづくりでは、簡単に入手可能な材料で、特殊な工具や設備を用いずにリコーダーが製作できる必要がある。そこで、材料として水道用配管である塩ビパイプを用いる。図3に、製作した塩ビパイプ製リコーダーの全体を示す。なお、運指はジャーマン式を想定している。

塩ビパイプ製リコーダーの製作で重要なことは、2章で述べたように、音源となる空気の流れを生成するための歌口と音の高さを決める指孔の加工である。

製作手順は、大きくは①塩ビパイプの切断、②歌口の加工、③低いCの音合わせ、④指孔の加工、⑤低いC以外の音合わせである。

3.1 パイプ長の決定

製作するソプラノリコーダーの全長は、低いCと共鳴するための共鳴管の長さ l_R とウィンドウェイの長さ l_W の和を考えればよい。共鳴管の長さは、窓からパイプ先端までの長さ l と考えることができるので、表2のCの共鳴管長さ l_R から開口端補正 Δl_R を引いた長さに、ウィンドウェイの長さ l_W を加えた

$$l = l_R + l_W - \Delta l_R \dots \dots \dots (3)$$

がパイプ長となる。式(3)に $l_R = 328.2\text{mm}$ 、 $\Delta l_R = 13\text{mm}$ 、 $l_W = 40\text{mm}$ を代入すると $l = 355.2\text{mm}$ が得られる。ここで、開口端補正の長さは実験的に、ウィンドウェイの長さは吹きやすさを考慮して決めた。

なお、実際の加工では音合わせの調整分を考慮し、のこぎりでパイプ長を $l = 356\text{mm}$ に切断する。

3.2 歌口の構造

発音を良くするためには、ウィンドウェイの出口で渦動が生じ、さらに渦動を伴う空気流がラビュームのエッジに正確にぶつかることが重要となる。市販のリコーダーでは、ウィンドウェイやラビュームの形状、ラビュームのエッジの位置などを設計で決め、それを実現するための複雑な加工が行われている。これらの工夫をまねるには、高度な加工技術や特殊な設備が必要である。ここでは、教材化を念頭において身近な工具と材料だけで製作できるものを考案した。

a. 試作1

図4に考案した歌口の形状を、図5に実際に加工したラビュームの写真を示す。ラビュームの加工で重要なことは、発音を良くするためには、窓を管の長手方向に細長く加工することである。

ラビュームのエッジに空気流を正確にぶつけるために図4中に示すブロックを製作し、塩ビパイプに詰め

る方法を試みた。ブロックの製作では、加工を容易とするために発泡スチロールを削ってブロックを成形した。しかし、この方法では製作したブロックを改良することが困難で、再度、ブロックを製作しなおす必要があった。すなわち、容易に調整・改良できる教材として問題がある。

b. 試作2

ラビュームのエッジに空気流を正確にぶつけるための調整機能を持たせた歌口に改良することを試みた。

加藤⁹⁾の考案した仕切り板を参考に、図6に示す歌口を考案した。図4の歌口と比較するとウィンドウェイそのものがなくなったが、プラスチック板を左右に移動させることで、パイプ上部のすき間を調整することが可能になった。図6の場合、プラスチック板を右に移動すればすき間が広がる。この改良により、パイプ上部のすき間から出た空気流をエッジに正確にぶつけることが可能となった。図7に、ウィンドウェイのすき間の写真を示す。

このような調整機能を持たせ実際に調整することで、学習者は2.1節で説明した発音のしくみを理解する助けとなる。

しかし、アクリル板を左右に動かし、ウィンドウェイのすき間を調整しても発音が悪く、音が小さい場合が現れた。多くの場合、ラビュームの加工において窓

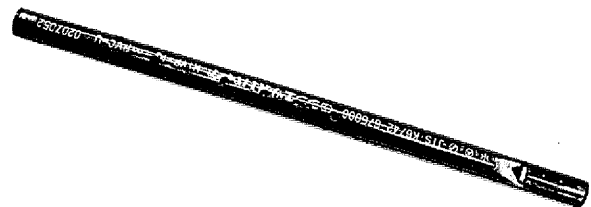


図3 塩ビパイプ製リコーダー

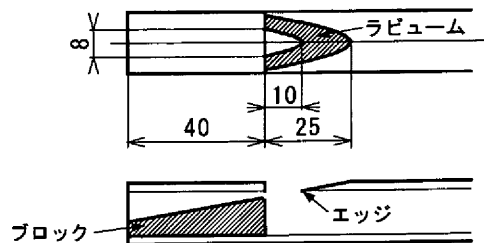


図4 歌口の形状(試作1)



図5 ラビュームの加工

を大きくしすぎた場合である。窓が横に広すぎるとすき間から出た空気流が左右に流れてしまい、効率よくラビュームのエッジにぶつからない。また、ウィンドウェイの出口とエッジの距離が長すぎると音源として高い周波数の音が出にくい傾向にあり⁶⁾、結果として高音が出にくくなる。その場合は、ラビュームの加工をしない必要がある、容易に調整・改良できる教材として問題がある。

c. 試作 3

発音を良くするためには、ラビュームの加工において、窓を管の長手方向に細長く加工することが求められる。しかし、細長い窓を加工することは、塩ビパイプを削るだけでは容易ではない。そこで、窓の大きさを調整可能な歌口に改良することを試みた。

図8に考案した歌口の形状を示す。この歌口は、試作2(図6)の歌口に、窓が適切な形状となるように加工をしたプラスチック板を貼り付けたものである。

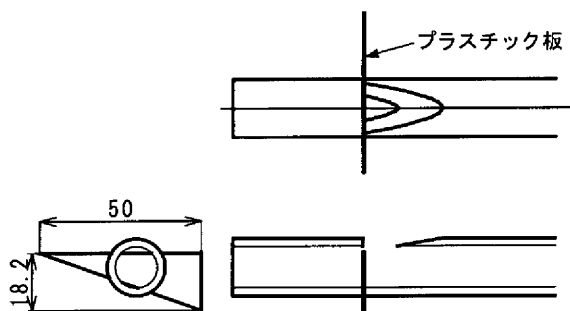


図6 歌口の形状(試作2)

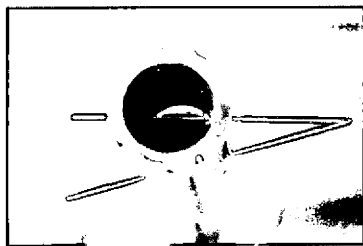


図7 ウィンドウェイのすき間

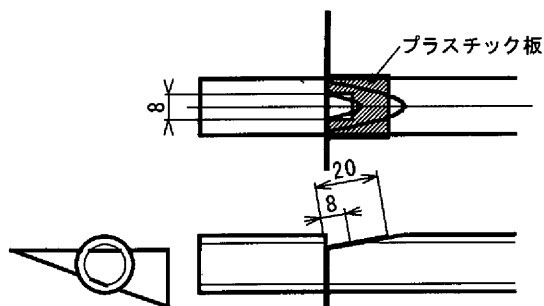


図8 歌口の形状(試作3)

窓の大きさを変更する場合は、プラスチック板を加工しなおすだけなので、容易にエッジの位置および窓の幅が調整できる。これにより、ラビュームの作りなおしを防ぐことが可能となった。

3.3 指孔の位置と穴径の決定

低いCの場合、パイプの長さを変えることで共鳴管の実効長を変える。しかし、Dから1オクターブ高いDまでは、指孔をあけることで共鳴管の実効長を変える必要がある。指孔位置として表2の値が直接利用できないので、表2の値を参考に音の測定・分析を繰り返しながら指孔位置と穴径を決定した。

最初に、低いCを音合わせしたりコーダーに対して、低いDの指孔位置と穴径を決めた。残りの指孔位置は、指で押さえやすいように各指孔間の間隔が20mm~25mm程度になるようにし、穴径を調整した。ただし、加工のことを考慮し、穴径が5mmを超えないように指孔位置を再調整した。最終的に得られた指孔位置と穴径を図9と表3に示す。

3.4 音合わせ

授業実践などにおける製作では、音合わせは市販のチューナーを用いて行う。低いCから順に音を合わせていく。低いCは管の長さをヤスリで短く削りながら調整する。低いC以外の音については、表3の穴径より少し小さい径のドリルで各位置に指孔をあけ、その後、穴径をテーパリーマなどで広げることで調整する。指孔位置が多少ずれても穴径を調整することで音合わせが可能になる。したがって、指孔の加工で注意すべき点は、最初は穴径を小さめにあけることである。

穴径を小さめにあける理由は、次のように考えることができる。前述のように管側に指孔をあければ、共鳴管の実効長が短くなり共鳴周波数が高くなる。また、穴径を広げても共鳴周波数すなわち音が高くなる。したがって、穴径の修正(拡大)では音を低くすることは困難である。そこで、指孔位置が図8の位置より歌口側にあけられた場合を想定し、穴径を小さめにあけ徐々に広げることで音を合わせる。

なお、穴径を広げると共鳴周波数すなわち音が高くなる理由は、次のように考えると理解できる。管側に指孔をあけ、その穴径を広げていくと最終的には指孔位置付近で管を切断したときの共鳴管に近づく。したがって、穴径を広げることも共鳴管の実効長を短くする働きと考えることができる。

なお、穴径と共鳴周波数の関係から、Fの穴径が他の穴径と比べて小さい(ジャーマン式の場合で、図8では指孔位置105mm)理由を説明できる。低いCとDおよびDとEの間の音程は全音(周波数比 $2^{\frac{1}{2}}$ (=1.122))であるが、EとFの間の音程は半音(周波数比 $2^{\frac{1}{4}}$ (=1.059))となり、再びFとGの間の音程は全

音となっている。したがって、半音のEとFの間だけ周波数比が小さい、すなわち周波数の差が少ないことになる。これが、表2でEとFの間の共鳴管長さの差が他の場合と比較すると短くなっている理由である。しかし、他の場合と比べて間隔が極端に狭い指孔位置では指で孔が押さえにくいので、Fの穴径を小さくしてFの指孔位置を歌口の方に近づけている。なお、Bと高いCの間も音程は半音であるが、この場合は、運指を工夫することで押さえやすい指孔位置を実現している。

このような、実際のリコーダーで実現されている様々な工夫を理論的に説明することで、理論の実感を伴った理解が進む。これは、ものづくりにおける知識の重要性や科学的な見方、論理的な考え方の必要性を認識させることにつながると思われる。

4. まとめ

本報では、ものづくり教育の題材としてリコーダーづくりを取り上げ、塩ビパイプを材料とするリコーダーを開発した。学習教材とするために、種々の調整機能を取り入れ、楽器としての完成度を高めた。塩ビパイプを材料とすることで、身近な工具だけで加工が可能となり、さらに安価であるので学校現場への導入も容易と考える。

組み込んだ調整機能は、ウィンドウェイのすき間調整と窓の大きさの調整である。その結果、発音特性を向上させることが可能となった。

なお、製作上の注意点は、管の全長を仕様より短く切断しないこと、初期の指孔の穴径を大きくしすぎないことである。これは、低いCについては全長を短くすることで音合わせを行い、他の音については穴径を広げることで音合わせをするためである。

リコーダーの歌口や指孔は、簡単な理論だけでは直接的に設計することはできない。しかし、発音のしくみや音階の作り方の理論を説明し、ウィンドウェイのすき間や窓の大きさ、さらに指孔の位置や穴径の調整を行うことで、理論の実感の伴う理解が可能となる。これは、ものづくりにおける知識の重要性や科学的な見方、論理的な考え方の必要性を認識させることにつながる。したがって、本報で開発した塩ビパイプ製リコーダーは、学習教材として有効に活用できる可能性がある。

文 献

- 1) 藤原義勝、手づくり楽器の工作、2000、有紀書房
- 2) 藤原義勝、リサイクル手づくり楽器、2000、日本書籍
- 3) 神代充史、創造力をつける手づくり楽器、2001、音楽之友社
- 4) 杉木優子、音のすがたをみつけよう、2001、ポプラ社
- 5) 繁下和雄、実験音楽室、2002、音楽之友社
- 6) 早坂寿雄、楽器の科学、2000、193-196、電子情報通信学会
- 7) 文献6、26-30
- 8) 文献6、230-235
- 9) 加藤 孜、ほんとうに動くおもちゃの工作、1999、98、コ罗纳社

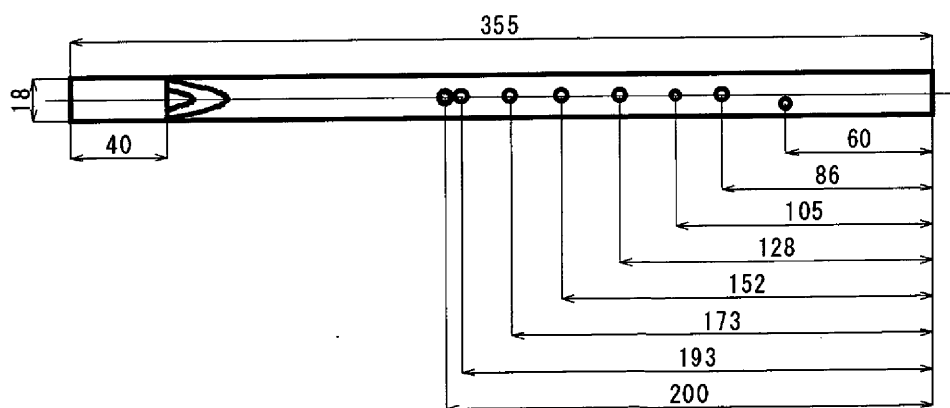


図9 指孔位置

表3 指孔位置と穴径

指孔位置 [mm]	60	86	105	128	152	173	193	200
穴直径 [mm]	4	5	3.5	5	5	5	5	5