

気導音と骨導音を用いた口笛音楽検定試験システムの開発

森 幹男[†] 荻原慎洋[†]

[†]福井大学大学院工学研究科

本研究では PC 上で能力検定試験を実施する口笛音楽検定試験システムを提案する。提案するシステムでは吹音・吸音判定に気導音，ピッチ判定に骨導音を用いる。60dB の騒音下で 10 名に対してピッチ判定部の評価実験を行った結果，期待通りに動作することを確認した。また，システム開発に先立って行った，口笛に対するアンケート調査や口笛音の分析等の基礎的検討結果について述べる。25 名に対し音域測定を行い，最低音の限界のピッチは約 500Hz で音域は平均すると 1 オクターブを少し超える程度であること，提示音よりピッチが 1 オクターブ高くなることを明らかにした。

Development of a Musical Whistling Test System Using Air-Transmitted Sounds and Bone-Transmitted Sounds

MIKIO MORI[†] MITSUHIRO OGIHARA[†]

[†]Graduate School of Engineering, University of Fukui

In this paper, we propose a musical whistling test system. This system consists of two parts. One is a blow/draw notes detection part using air-transmitted sounds. And the other is a pitch detection part using bone-transmitted sounds. This paper shows that the proposed system using air-transmitted sounds and bone-transmitted sounds gives good performance under the noisy environment. In addition, we describe a basic study of the whistling. The compass (total pitch range) of a whistling was measured by a chromatic tuner.

1. はじめに

最近，主に伴奏に合わせて口笛で曲を演奏する口笛音楽がテレビやラジオ，新聞でも取り上げられ流行の兆しがある。そして，口笛奏者による口笛音楽教室も存在する。しかし，現在のところ口笛音楽には，そろばんやピアノ教室のような能力検定試験がない。これは，口笛音楽は楽器を必要としないため利益のない楽器メーカーが積極的に口笛音楽検定を提案しないことも一因と考えられる。

本研究では，PC（パーソナルコンピュータ）上で能力検定試験を実施する口笛音楽検定試験システム構築を目指して，口笛に対するア

ンケート調査と口笛音の分析を行った。また，口笛音には呼気によって発音する吹音と吸気によって発音する吸音がある。そこで，吹音・吸音判定に気導音，ピッチ判定に骨導音を用いる方法を提案する。従来技術としてカラオケの採点システムがあるが，後で述べるように口笛音を入力した場合，正しく採点されない。また，骨導音を用いた音声認識¹⁾や話者識別²⁾，歌声評価システム^{3),4)}が提案されているが，口笛音入力に骨導音を用いるのは本システムが初めてである。

口笛音入力に骨導音を用いる利点として次の 3 点が挙げられる。

(1) 騒音耐性に優れている。

(2) 音声入力で問題となる音がこもる現象が起こらない[a].

(3) 息による雑音が入らない。また、このため、吹いて出す音(吹音)と、息を吸って音を出す音(吸音)が同じように収録できる[b].

しかし、口笛音入力に骨導音を用いることについての分析・調査研究は従来なされていない。

本報告では、まず口笛に対するアンケート調査結果、口笛音の音域を実測によって調べた結果について述べ、次に提案する口笛音楽検定試験システムの吹音・吸音判定処理とピッチ判定処理について述べる。そして最後にシステムの評価実験結果について述べる。

2. 口笛の音域

口笛音楽検定試験システムの市場性を調べるためにまず、口笛を吹くことのできる人の割合をアンケート調査によって推定し、考察を行った。次に口笛を実際に吹いてもらい、音域の測定を行った。

(1) アンケート調査

大学生 158 名に対してアンケート調査を行った。「あなたは口笛を吹くことが出来ますか?」の問いに対して、回答は「1.吹ける」「2.少し吹ける」「3.吹けない」の三者択一とした。結果を図 1 に示す。

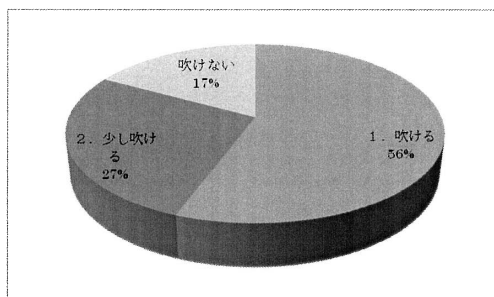


図 1 158 名に対するアンケート結果

a) 口笛音は純音に近く、倍音成分をほとんど含まないため⁹⁾、音声入力の場合とは異なり、骨導音を用いても音がこもる現象が起こらない。

b) 口笛音楽には吹いて音を出すだけでなく、息を吸って音を出すことが必要であり、口笛教室でもこの点が重要視されている。しかし、通常の(気導)マイクロホンでは吹いて音を出すときの息による雑音により、両方の音を同じ音質で収録することが困難である。骨導音入力を用いることによって、この問題が解決できる。

そのうちの 25 名に対して「あなたは口笛で曲を吹くことが出来ますか?」の問いに対して、「1.吹ける」「2.少し吹ける」「3.吹けない」の三者択一で回答するアンケートを行った結果を図 2 に示す。後で述べるように、曲を「1.吹ける」または「2.少し吹ける」と回答した人の人数が 1 オクターブ以上の音域の口笛音を出すことが出来る人の人数と一致した。

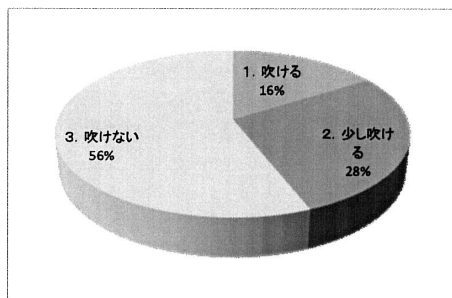


図 2 アンケート結果 (曲を吹けるか)

(2) 音域の測定 (予備実験)

予備実験としてまず口笛を吹くことができる大学生 4 名 (男性 2 名, 女性 2 名) に対して 2 ヶ月間に渡り、週 1 回のペースで 7 セットの収録を行い、音域の測定を行った。計 7 回の音域推移の例を図 3~6 に示す。

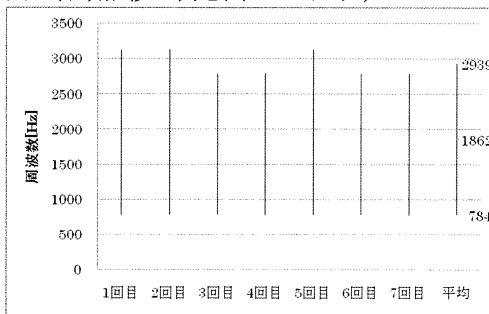


図 3 2 ヶ月間の音域の推移 (女性 A)

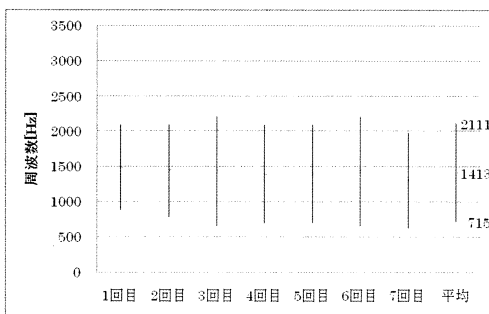


図 4 2 ヶ月間の音域の推移 (女性 B)

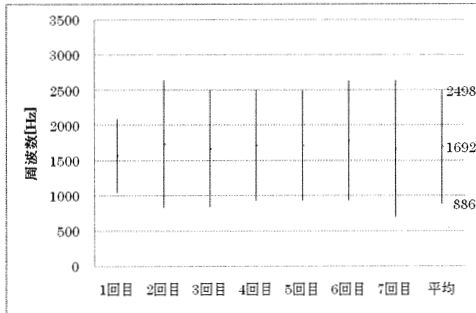


図 5 2ヶ月間の音域の推移 (男性 C)

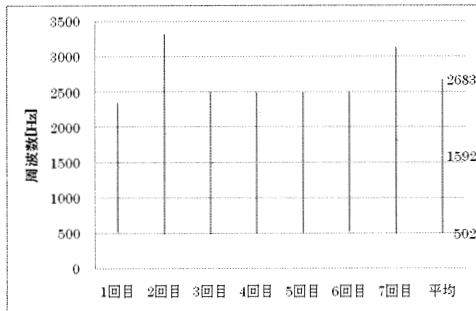


図 6 2ヶ月間の音域の推移 (男性 D)

2ヶ月間の音域の変化は比較的小さいことが明らかになったので、以下の音域測定では測定回数を1回とした。

(3) 音域の測定

次に口笛の音域測定を無作為に選んだ大学生25名(20歳~22歳)に対して行った。上昇音階、下降音階それぞれ半音階で音を出すことの出来る限界まで口笛を吹いてもらいチューナー(SEIKO ST-1100)を用いて音域を測定した。なお、正しいピッチを確認して覚えるため、電子ピアノを用いた。ところが25名中8名は音が全く出ない、または提示された音を正しく出すことが出来ないため音域の測定が出来なかった。音域の測定が出来た17名の音域を図7に示す。

平均すると1オクターブを少し超える程度という結果になった。これは簡単な曲なら演奏できる音域である。図8は音域測定結果を「1オクターブ以上」、「1オクターブ未満」、「正しい音が出ない」の3つに分けたときのそれぞれの割合を表している。「1オクターブ以上」の音域の口笛音を出すことが出来る人の人数とアンケート調査のところで述べた、曲を「1.吹ける」「2.少し吹ける」を合わせた人数が一

致している。

次に最低音のピッチ周波数に着目すると500Hzより少し低い周波数となっており、声道の長さが17cmと考えると、これが口笛で出すことのできる最低音の物理的な限界だと考えられる。また、最高音の周波数は訓練次第で上げることが可能で、3kHz以上のピッチ周波数で吹くこともできる。また、口笛で曲を演奏する場合、実際の(楽譜上の)1オクターブ上の音で演奏されることが多い。この実験でも指定した音階と演奏した音階に1オクターブのズレが生じることが判明した。これにより、システムには、指定音階の1オクターブ上の周波数との比較を行う必要があることが分かった。カラオケの採点システムに口笛音を入力した場合、正しく採点されないのはこのためである。

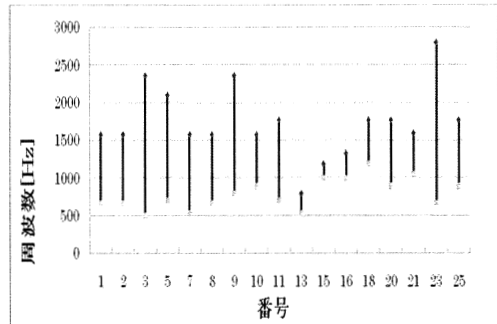


図 7 音域測定結果

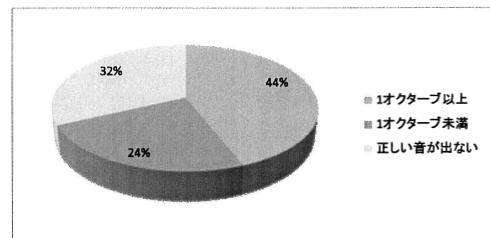


図 8 音域測定結果の分布

3. 口笛音楽検定試験システム

提案する口笛音楽検定試験システムはPC上で能力検定試験を自動的に実施するシステムである。口笛音楽検定試験システムは口笛音楽教室に通っている口笛奏者の目標を生み出すと同時に、広く家庭での受験を可能とする。

現在のところ以下のような検定グレードを

考えている。

<初級>

10級 単一の音を正確なピッチで発音できる。
9級 10級の内容を吹音・吸音で行うことができる。

8級 1オクターブの音階を上昇音階・下降音階でそれぞれ発音できる。

7級 8級の内容を吹音・吸音で行うことができる。

<中級><上級>では課題曲を伴奏下で演奏する。上位のグレードになるほど使用する音域が広がり、テンポの速い曲も課題に加わる。曲目はオリジナル曲や著作権切れのクラシック曲などを用いる予定である。また、ゆらぎ、ピッチの安定性、ビブラートも評価項目として入れたいと考えている。

図9に口笛音楽検定試験システム<初級>の処理の流れを示す。以下<初級>のシステムについて述べる。

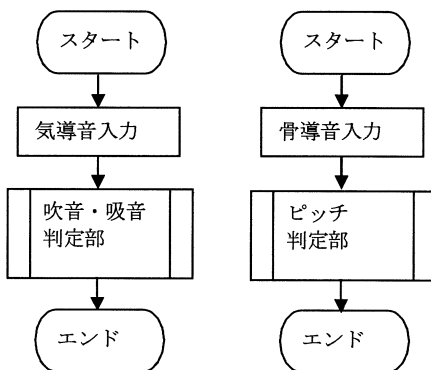


図9 システムの処理の流れ<初級>

3.1 吹音・吸音判定

吹音・吸音判定には呼気による雑音成分を用いる。気導音の47~187[Hz]の帯域における対数パワーの平均値 (P_L) が閾値 (P_S) を超えた場合、吹音と判定する。図10に吹音・吸音判定処理の流れを示す。閾値は予備実験から吹音と吸音の P_L の平均値とした。吹音と吸音を発音できる男性3名がC5,G5,C6の音高で吹音と吸音それぞれ約1秒間発音し、気導音をサンプリング周波数48kHz 量子化レベル16ビットでデジタル化した。これを10セット行い、窓幅2048ポイントのハミング窓をかけ最大値で規格化し、FFTを行う。このとき1024ポイントずつシフトし、窓ごとに対数パワー

スペクトルを求める。

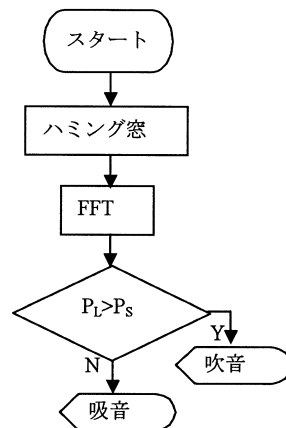


図10 吹音・吸音判定処理の流れ

3.2 吹音・吸音判定実験

今回の実験では、180個のデータ(吹音と吸音それぞれ90個)に対して判定を行った。誤差が1シフト幅の範囲内であるとき正しく判定されているとした。吹音では90個全て、吸音では85個が正しく判定された。また、(吸音・吹音それぞれの持続時間表示機能を今後システムに追加するため)同時に、吸音・吹音それぞれ時間長についても求めた。このとき、誤った5個の判定誤りの時間長はそれぞれの発音時間の3%以内であった(ただし後述のピッチ判定処理においてピッチ周波数が口笛で出すことのできる最低音である500Hz未満と判定された場合は無音区間とした)。

3.3 ピッチ判定処理

ピッチ判定には騒音耐性の高い骨導音を用いる。口笛の骨導音入力には図11に示すようにピックアップマイク(SEIKO STM-10)を演奏者の額に装着して行う。図12に口笛音(吹音D5)の気導音と骨導音の時間波形を示す。気導音・骨導音ともに見た目では正弦波に極めて近いことが分かる。口笛骨導音をサンプリング周波数22.05kHz、量子化ビット16ビットでデジタル化し、ハミング窓をかけ、8192点でFFTを行い、対数パワースペクトルを求める。このときの周波数分解能は約2.7Hzとなる。口笛音は極めて純音に近いのでFFT対数パワースペクトルから最大値を検出することによってピッチを求めることが可能である。

そして、正しい音（提示音）とのピッチの差を求め、その差が一定の範囲内であれば正しいピッチで発音していると判定する。図13に口笛音楽検定試験システムのピッチ判定処理の流れを示す。評価は「OK」、「おいしい(高い)」、「おいしい(低い)」、「要練習」の4種類とした。骨導音をサンプリング周波数 22.05kHz、量子化ビット 16 ビットでデジタル化し、ハミング窓をかけ、8192 点で FFT を行い、対数パワースペクトルを求める。このときの周波数分解能は約 2.7Hz となる。口笛音は極めて純音に近いため、FFT 対数パワースペクトルから最大値を検出することによってピッチを求めることが可能である（無音区間では 500Hz 未満で最大となる）。正しい音（提示音、または 1 オクターブ上の音）とのピッチの差を求め、その差が±2%の範囲内であれば正しいピッチで発音していると判定する。

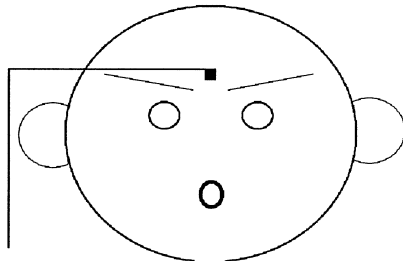


図 11 口笛の骨導音入力

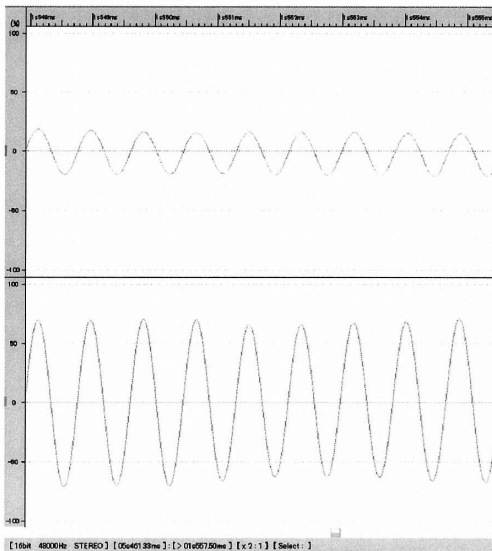


図 12 口笛音の時間波形の一例
(上：骨導音 下：気導音)

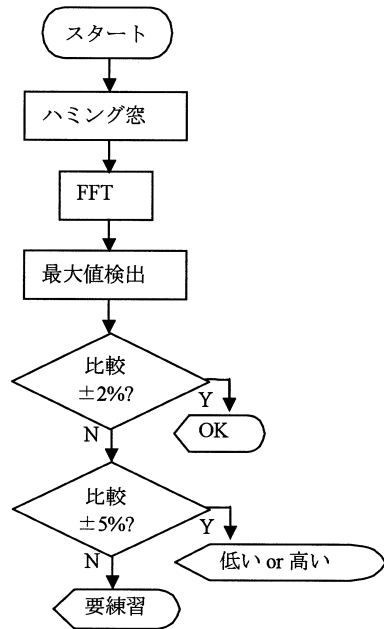


図 13 ピッチ判定の流れ

3.4 ピッチ判定処理の評価実験

システムの評価実験は、騒音環境下で行った。これは<中級><上級>では伴奏下で演奏してピッチ判定を行う必要があることと、<初級>の場合でも、家庭での受験を考えたとき、騒音下で使用された場合でもピッチ判定が正しく行われる必要があるからである。入力に骨導音を用いることにより騒音環境下でも正しくピッチ判定を行うことが出来ることが期待できるが、これを実証するために、成人 10 名 (A~J) にシステムを騒音レベル 60dB の環境下で実際に使用してもらい連続 10 回評価した結果を表 1 に示す。なお、10 名のうち A~F の 6 名は簡単なメロディを演奏することができ、G~J の 4 名は音はでるもののメロディを演奏することを普段していない。

評価実験の結果、期待通りに動作することを確認した。結果のうち、失敗に分類された要因は録音した声の継続時間が短かったためである。また、本システムは、60~100dB の騒音下では、問題なく動作した。

表1 評価実験結果 (騒音レベル 60dB)

	音高	OK	低い	高い	要練習	失敗
A	E5	9		1		
B	E5	7	3			
C	E5	8		1		1
D	E5	8		2		
E	E5	5	1	3		1
F	A5	7	1	1		1
G	E5	2	1		5	2
H	E5	1	2	1	4	2
I	E5				7	3
J	E5	3	1	5	1	

4. おわりに

気導音と骨導音を用いた口笛音楽検定試験システムを提案し、検討を行った。気導音を用いた吹音・吸音判定処理、骨導音を用いたピッチ判定処理がある程度正しく行われていることを定量的に確認した。今回はこれらの処理に対する評価を別々に行ったが、今後両処理をPC上に実装する。将来的には中級・上級を対象に、課題曲に対してピッチやリズムに加え、ビブラート・音の立ち上がり・抑揚といった評価項目を総合的に判断し、上手く吹けているかを評価するシステムの作成を考えている。

謝辞 本口笛音楽検定試験システムの開発にあたり、助言いただきましたプロ口笛奏者の日本口笛音楽協会もくまさあき氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山田芳靖, 土方啓暢, 川原伸章, 藤坂洋一, 中川誠司: “骨伝導音による音声認識の検討,” 電学論 E, 124, 8, pp.272-277 (2004-8)
- 2) 森 幹男, 竹田 勉, 荻原慎洋, 谷口秀次, 高橋謙三: “気導音声と骨導音声のスペクトル比を用いた話者識別の検討,” 電学論 C, 127, 3, pp. 456-457 (2007-3)
- 3) 森 幹男, 荻原慎洋, 谷口秀次, 高橋謙三, 佐川晋也: “骨導音声による歌声の評価,” FIT2004, 分冊 2, G-015, pp.375-376 (2004-9)
- 4) 森 幹男, 吉田千夏, 荻原慎洋, 谷口秀次, 高橋謙三: “自己聴取音に占める気導音と骨導音の割合の推定,” 電学論 C, 127, 8, pp.1268-1269 (2007-8)
- 5) 森 幹男, 黒谷直人, 上野有輝, 荻原慎洋, 谷口秀次, 高橋謙三: “口笛音楽検定試験システムの開発,” 信学総大 2008, A-10-12, 2008.