

## 骨導音声による歌声の評価

## Evaluations of the Singing by Using Bone-Transmitted Speech Sounds

森 幹男†      荻原 慎洋††      谷口 秀次††      高橋 謙三†      佐川 晋也†††  
Mikio Mori    Mitsuhiro Ogihara    Shuji Taniguchi    Kenzo Takahashi    Shinya Sagawa

## 1. はじめに

声楽家やアナウンサーは正しい発声法を修得するためにボイストレーニングを行う。しかし、声楽家やアナウンサーでなくても正しい発声法を身につけることは、はっきりと聞こえるように話すことができるだけでなく、声帯にかかる負担を最小限に押さえることができ、大変有意義であるといえる。しかし、正しい発声に必要な「豊かな響き」を修得することは意外に難しい。修得を難しくしている大きな理由は、発声時には気導音と骨導音（発声時に骨を介して耳に伝わる音）を同時に聞いているため、自分で聞いている声に頼ると豊かな響きが得られないことである。そこで、客観的に「正しい発声」を自動判定するボイストレーナ作成を目指し、まず、発声された音声の共鳴の程度を定量的に評価することを考えた。

本研究では、発声された歌声の共鳴の程度を定量的に評価するための特徴量を気導音声と骨導音声（発声時に骨を介して耳に伝わる音）それぞれから求め、音楽的声域の評価を試みた。また、声帯振動が明らかに異なるにも関わらず、特に女性において聴感上判別が困難であるばかりでなく本人も認識していないことがあるといわれている裏声（ファルセット, falsetto）を骨導音声の歪み率から判別し、表声 裏声換声点の検出を試みた。

## 2. 音楽的声域と裏声

## 2.1 音楽的声域

声域には、歌声に用いられる声域すなわち音楽的声域と、その人が出しうる最低音から最高音までの声域すなわち生理的声域とがある。音楽的声域は生理的声域より狭く、生理的声域の範囲内にある。生理的声域は、成人男性で約3オクターブ、成人女性で約2.5オクターブである[1]。

また、歌声は会話音声と比べて様々な点で異なっている。その一つとして、訓練された歌声のスペクトルに現れる約3.5kHzを中心とし2.5~4.5 kHzの周波数領域に広がる歌声ホルマント(singing formant)がある。

## 2.2 裏声

声楽発声の訓練を受けていない正常な人の生理的声域の中で、生理学的にも音質の上でも最も区別しやすいのが表声と裏声の2つの声区である。男性では、その区別は明瞭である。一方、女性はその区別がつきにくい。

声の高さは主に声帯の緊張および振動部分の質量を変えることによって調節されている。この調節は、主に輪状甲状筋と甲状披裂筋の関与によって遂行される。輪状甲状筋が収縮すれば声帯は引き延ばされ、緊張は高まり、振動部分の質量は減少する。甲状披裂筋が収縮すると、声帯は厚くなり、かつ緊張は高まり、結果的に音声は高くなる。この両者が働き、声の高さの調節を行っている。この声区の声を表声と呼ぶ。高い声域では、輪状甲状筋が主に声帯を緊張させて声を高くする機構が働き、声門閉鎖期がないか極めて短い声区がある[2]。この声区の声を裏声（ファルセット, falsetto）と呼ぶ。また、表声から裏声に変わる点を換声点と呼ぶことにする。

## 3. 歌声の収録

歌声の収録は、アマチュア合唱団員6名(19~22歳の男性3名、19歳の女性3名)に対して行った。収録にはDATレコーダ(SONY製 DTC-2000ES)を用いて、防音室内において、気導音声と骨導音声を同時に収録した。気導音声は口唇から10 cmの地点に設置したコンデンサマイクロホン(SONY製 ECM-999)を用いて、骨導音声は骨伝導イヤホンマイク(JABRA製 JABRA Ear PHONE)を用いて、それぞれ左右のチャンネルを使い、サンプリング周波数44.1kHz、量子化レベル16ビットでステレオ録音を行った。また、骨伝導イヤホンマイクを装着した側の耳には気導音声の回り込みを防ぐため、耳介全体を覆うイヤーマフ(Bilsom製 バンキングマフ)を併用した。

## 3.1 発声方法

長音階でハミング/m/と母音/o/を交互に以下の要領で、一人ずつ3セット発声した。

男性はC3、女性はC4を基点とし、上昇音階、下降音階のそれぞれ歌声を出すことの出来る限界まで発声を行った。このとき、上昇音階では表声で出しにくくなら適時、裏声に変えて発声を行うものとした。

また、正しいピッチを取るため、カシオトーン(音色: ピアノ)を用いた。ただし、発声時にはカシオトーンの音を出さないようにした。

## 4. 音楽的声域の評価

歌声ホルマント領域の上限、下限の周波数をそれぞれ  $f_H = 4.0\text{kHz}$ 、 $f_L = 2.5\text{kHz}$  とし、(1)式のように、 $f_H \sim f_L$ の範囲に含まれるエネルギーと  $f_L$ 以下の範囲に含まれるエネルギーとの比をとり、これをPRとする。

$$PR = Ph/Pl \quad (1)$$

ここで、

$Ph$ :  $f_H \sim f_L$ の範囲に含まれるエネルギー

$Pl$ :  $f_L$ 以下の範囲に含まれるエネルギー

† 福井大学工学部

†† 福井大学大学院工学研究科

††† 宇都宮大学大学院工学研究科

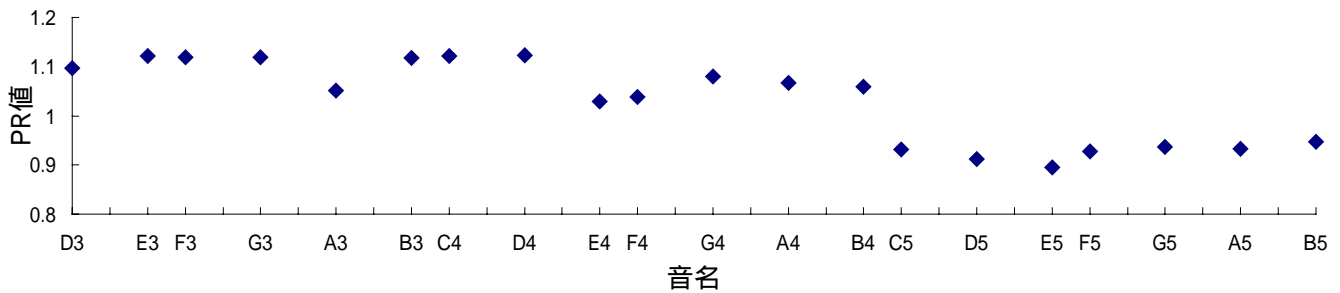
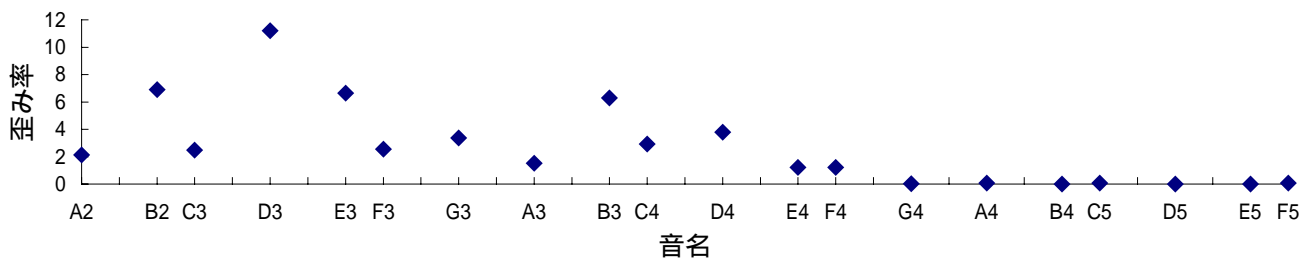


図1 発声音域における PR 値の変化の一例(女性)



同じ音名を発声していても人によって PR 値は様々である。図 1 に女性が母音/o/を発声した時の発声音域における気導音声に対する PR 値の変化の一例を示す。発声音域において、PR 値が高い音域は、歌声ホルマントがよく現れており、発声者の音楽的声域であると考えられる。この例の場合、B4 と C5 の間で PR 値が大きく減少していることから、音楽的声域は D3 から B4 までであると考えられる。出しやすいと思われる音域という観点で発声者本人に対するインタビュー及び発声者本人以外に対する聴取実験を行ったところ PR 値から求めた音楽的声域とほぼ一致することを確認している。なお、骨導音声から求めた PR 値は、骨導音声には 2.5kHz 以上の高い周波数成分がほとんど含まれていないことから非常に小さな値となり変化も小さいため音楽的声域の評価には適さない。

### 5. 表声 裏声換声点の検出

男性の場合、表声と裏声の区別は明瞭であるが、女性の場合その区別が付きにくい。そこで裏声発声時の骨導音声の時間波形が正弦波に極めて似ていることに着目し、骨導音声の歪み率がゼロに近づいているところを、裏声への変換点であると考え、歪み率から換声点の検出を試みた。本研究では、歌声に存在する揺らぎを考慮し、 $p_1$  は基本周波数を中心とする 4Hz の区間のエネルギーとし、 $p_n$  はそれ以上の周波数成分のエネルギーとして (2) 式より歪み率を求めた。

$$\text{歪み率} = \sqrt{p_n / p_1} \quad (2)$$

図 2 に男性が母音/o/を発声した時の発声音域における骨導音声に対する歪み率の変化の一例を示す。この例の場合、G4 より高い音域で歪み率がゼロに近づいていることから G4 が裏声への換声点であると考えられる。男声の場合、

発声者本人に対するインタビュー及び発声者本人以外に対する聴取実験を行ったところほぼ一致することを確認している。聴感上、換声点のはっきりしない女性についても同様の方法で換声点の検出が可能であると考えられる。しかし、女性の場合、換声点の判別が聴感上困難であるばかりでなく本人も認識していないことがあるため、発声者本人に対するインタビューや発声者本人以外に対する聴取実験によって換声点を確認するのは困難である。

### 6. 結論

本研究では、気導音声と骨導音声それぞれから、発声された音声の共鳴の程度を定量的評価するための特徴量 PR を求め、音楽的声域の評価を試みた。また、骨導音声のスペクトルから歪み率を求め、換声点の検出を試みた。その結果、気導音声の PR 値が高い音階は、発声者の音楽的声域であると考えられることが明らかとなった。また、骨導音声の歪み率から裏声を判別し、換声点の検出が可能であるとされるのが明らかとなった。

### 謝辞

歌声収録に協力いただいた福井大学グリーンエコー合唱団の方々に感謝いたします。

本研究は平成 16 年度文部科学省科学研究費補助金若手研究 B (14750288) の一環として行われたものである。

### 参考文献

- [1] 日本音声言語医学会編, 声の検査法 臨床編 (医歯薬出版株式会社, 東京, 1994) .
- [2] 日本音声言語医学会編, 声の検査法 基礎編 (医歯薬出版株式会社, 東京, 1994) .