

楽音の波形構造と音色知覚について
— 細切れ音の場合 —

高澤嘉光

電気通信大学情報工学科

〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1

Tel:0424-83-2161 ext.4332

takasawa@cs.uec.ac.jp

あらまし 著者は、口琴の発音機構の解析の際、細切れ音という概念を導入した。細切れ音とは、ある一定の周期で何らかの刺激によって励起し、ある一定の時間長だけ続く音から構成されている音である。さらに、弦楽器の音も細切れ音になっており、三味線においてはその特徴が顕著に出ている。細切れ音は、励起される周期とそれによって発生する音の周期の2つの周期を持つという構造をしている。われわれが細切れ音を聞いた時、この2つの周期の関係によって聞き取る音色が非常に異なって来る。本稿ではその関係について述べる。

キーワード 口琴、三味線、ホーミー、母音、細切れ音、分子音、音色知覚

on the Structure of Sound Wave and its Tone Sensation
— in the Case of Chopped Sound —

Yoshimitsu TAKASAWA

The University of Electro-communications, Chofu, Japan 182

Tel:0424-83-2161 ext.4332

takasawa@cs.uec.ac.jp

abstract: The sound of jew's harp has a special structure. We gave it a name "chopped sound". When the mouth cavity is tuned to low frequencies, the harmonic series of fundamental frequency dominates the sound as the mouth tuning is changed. At high frequencies, the dominant sensation of pitch coincides with the natural resonance frequency of the mouth and may be tuned continuously. We found the sounds of Xöömij and 'Shamisen' had the same structure as a jew's harp. Here we discuss the tone sensation of these chopped sounds.

key words: jew's harp, Shamisen, Xöömij, vowel, chopped sound, primitive, tone sensation

1. はじめに

著者は、口琴(図1)[1]の発音機構の解析の際、細切れ音という概念を導入した[2]。細切れ音とは、ある一定の周期で何らかの刺激によって励起し、ある一定の時間長だけ続く音から構成されている音である。このような細切れ音の最も身近な例は音声であろう。特に母音や中央アジアのホーミー(喉歌)の場合には励起される音は、かなり長時間にわたって同じ波形が継続する。さらに、弦楽器の音も細切れ音になっており、三味線においてはその特徴が顕著に出ている。

細切れ音は、励起される周期とそれによって発生する音の周期の2つの周期を持つという構造をしている。われわれが細切れ音を聞いた時、2つの周期の関係によって聞き取る音色が非常に異なって来る。そこで本稿ではその関係について述べる。

2. 細切れ音の定義

口琴の音は、上で述べたようなある特殊な構造を持っている。このような構造を有する音を細切れ音と呼ぶことにし、それを次ぎのように定義する。

細切れ音(chopped sound): 図2のようにある一定の周期 $T(= \frac{1}{f_0})$ で発生し、ある一定の時間長 L だけ続く音から構成されている音である。なお、この一定の時間長 L だけ続く音を分子音(primitive)と呼ぶことにする。

これら細切れ音において分子音を励起する機構は、口琴の場合には、枠の間を弁(薄片)が通過する際に発生する音圧パルスであり、音声の場合には声帯流であり、これらの刺激により一定体積の空気の共鳴を発生させている。また、弦楽器の場合には、駒における弦の振動により、共鳴膜や共鳴板に共鳴(共振)を励起している。ここで発生する分子音 P は、刺激を E 、系のインパルス応答を I とした場合、次の式で求められる。 a はインパルス応答の継続時間である。

$$P(t) = \int_0^a E(t-\tau)I(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここで、刺激 E ならびにインパルス応答 I のフーリエ変換を $F_E(\omega)$ と $F_I(\omega)$ とすると、分子音 P のフーリエ変換は $F_P(\omega) = F_E(\omega)F_I(\omega)$ となるので、もし刺激 E がパルス状であれば、分子音 P はインパルス応答 I に近いものになる。口琴の場合はその例であり[4]、図3はその音圧パルスである。これにより口腔内においてヘルムホルツ共鳴を励起させ、分子音を発生させる。図4(a)は口琴の細切れ音である。口琴の分子音はほぼ単一周波数から構成され、また、その位相や振幅は発生の際に初期化され、その振幅は指数関数的に減衰し、次の分子音が発生する時までには消滅してしまうとみなすことができる。さらに、位相の初期化が毎回逆転しているが、これは図3の音圧パルスから推測できる。このように、細切れ音の特色は、連続し

た2つの分子音において振幅や位相に関して連続していないことである。ここで波形関数 $f(t)$ に含まれる周波数 ω の連続性を判定する2つの関数 $C(t, \omega)$ と $D(t, \omega)$ を考える。

$$C(t, \omega) = \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) \exp(j\omega\tau) d\tau \right| / \int_{t-T/2}^{t+T/2} |f(\tau)| d\tau \quad (2)$$

T は周波数 ω の1周期であり、 $T = 2\pi/\omega$ である。さらに、 $\int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) \exp(j\omega\tau) d\tau$ の位相を $D(t, \omega)$ とする。なお、関数 $C(t, \omega)$ の最大値は $\pi/4$ になる。図4には口琴の、また、図5には三味線音、図6には母音/a/の波形と関数 $C(t, \omega)$ と $D(t, \omega)$ を示す。各関数の計算において ω として一番強い倍音の周波数を用いた。これらの図から、音を構成する周波数が分子音の発生時において、不連続になっていることが分かる。

図7と図8にはホーミーの歌声の波形とその連続性を示す。“ホーミー”とは、中央アジアのトヴァ共和国やモンゴル共和国で歌われている特殊な歌唱方法である。この歌唱方法では喉を極度に緊張させた状態によって2つの音程を有する声を発生させている。このホーミーの発声機構に対して過去多くの研究があり、「二音源説」と「特定倍音共振説」の2つが提唱されてきたが、前者は矛盾があり最近退けられた[3]。図7は通常のホーミーの歌声であるが、周波数に関して不連続性がない。同じ声帯から発生される母音においては明確に不連続性が現われていることを考えると、ホーミーの発声方法は特殊なものであることが分かる。しかし、ホーミーの歌声で時々、図8のような不連続性が見られる。

3. 細切れ音のフーリエ変換

継続した同一の分子音のいくつかをデータ長として細切れ音のフーリエ変換を行った場合、その結果は分子音に含まれる周波数構成に関係なく必然的に倍音構成になる。これは次のように容易に導き出せる。ここで関数 $f(t)$ は次の条件を満たすものとする。また、分子音が発生する間隔 T をデータ長にしたフーリエ変換を $F_0(\omega)$ とする。

$$f(t) = f(t+nT), n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$F_0(\omega) = \int_0^T f(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (4)$$

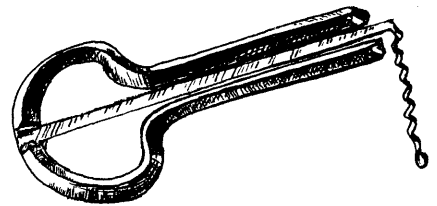


図1 金属製口琴

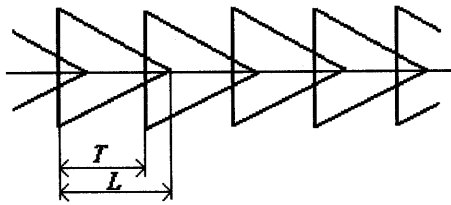


図2 細切れ音とは

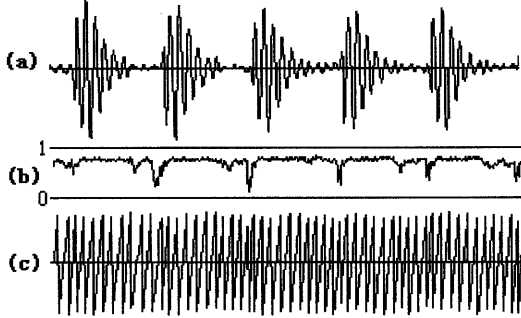


図4 口琴(a) 波形(b) 相関度 $C(t, \omega)$ (c) 位相 $D(t, \omega)$

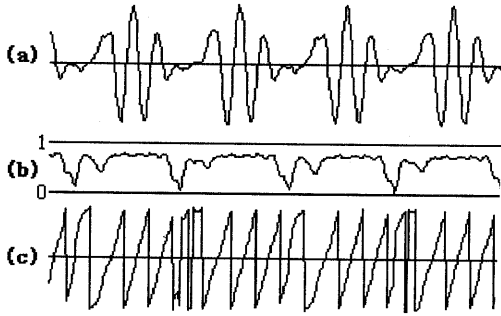


図6 母音/a/ (a) 波形 (b) 相関度 (c) 位相

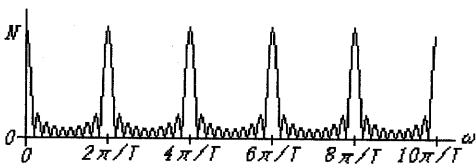


図9 $\left| \frac{\sin(\frac{N}{2}\omega)}{\sin(\frac{\omega}{2})} \right|$ のグラフ

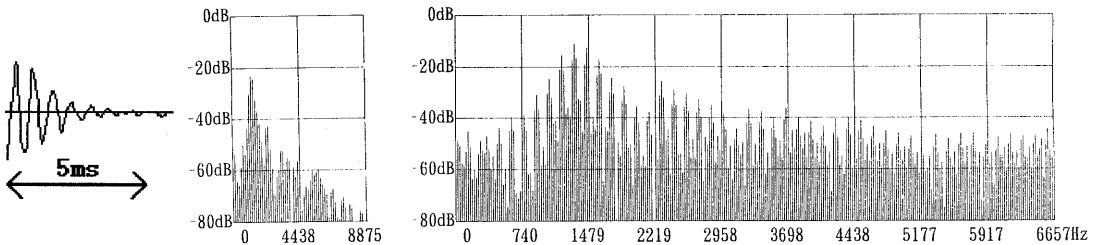


図10 口琴の音の分析 (a) 分子音の波形

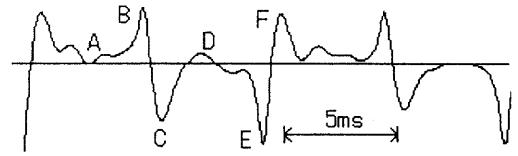


図3 口琴の音圧パルス

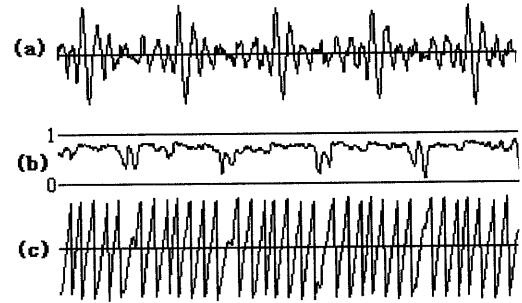


図5 三味線 (a) 波形 (b) 相関度 $C(t, \omega)$ (c) 位相 $D(t, \omega)$

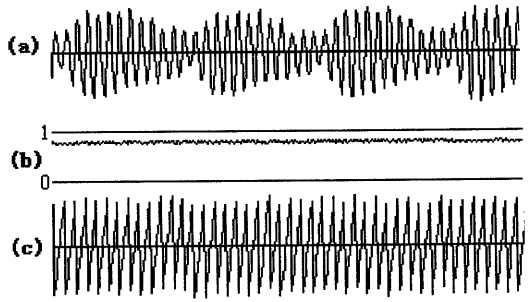


図7 ホーミー1 (a) 波形 (b) 相関度 (c) 位相

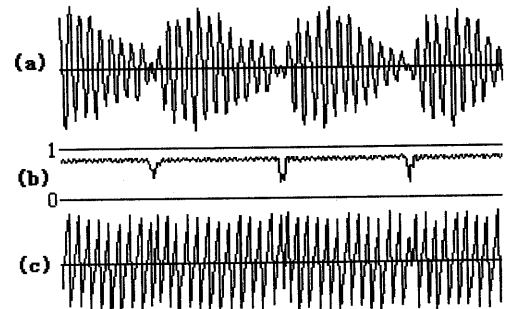


図8 ホーミー2 (a) 波形 (b) 相関度 (c) 位相

(b) 1分子音のFFT (c) 4分子音のFFT

この時、 N 個の分子音をデータ長にしたフーリエ変換を $F(\omega)$ とする。

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= \int_0^{NT} f(t) \exp(-j\omega t) dt \\
 &= \int_0^T f(t) \exp(-j\omega t) dt + \int_T^{2T} f(t) \exp(-j\omega t) dt \\
 &\quad + \dots + \int_{(N-1)T}^{NT} f(t) \exp(-j\omega t) dt \\
 &= \{1 + \exp(-j\omega T) + \exp(-2j\omega T) + \dots \\
 &\quad + \exp(-(N-1)j\omega T)\} \int_0^T f(t) \exp(-j\omega t) dt \\
 &= \frac{1 - \exp(-Nj\omega T)}{1 - \exp(-j\omega T)} F_0(\omega) \\
 &= \frac{\exp(j\omega \frac{NT}{2}) - \exp(-j\omega \frac{NT}{2})}{\exp(j\omega \frac{T}{2}) - \exp(-j\omega \frac{T}{2})} \\
 &\quad \exp(-j\omega \frac{(N-1)T}{2}) F_0(\omega) \\
 &= \frac{\sin(\frac{NT}{2}\omega)}{\sin(\frac{T}{2}\omega)} \exp(-j\omega \frac{(N-1)T}{2}) F_0(\omega) \\
 |F(\omega)| &= \left| \frac{\sin(\frac{NT}{2}\omega)}{\sin(\frac{T}{2}\omega)} \right| |F_0(\omega)| \quad (5)
 \end{aligned}$$

この式より、 N 区間をデータ長にするフーリエ変換 $F(\omega)$ は単一区間のもの $F_0(\omega)$ に $\left| \frac{\sin(\frac{NT}{2}\omega)}{\sin(\frac{T}{2}\omega)} \right|$ という窓を掛けたものになる。この窓は図9のようになり、したがって $F(\omega)$ は倍音構成になる。

図10に口琴音の1個の分子音と6個の分子音をデータ長にしたフーリエ変換を示す。(a)は分子音の波形である。この1個分のフーリエ変換が(b)であり、その6個分のフーリエ変換が(c)であるが、これは倍音であるが、(b)のグラフを6間隔で並べ直したものにほぼ近い。このように細切れ音は分析する時間長によって、それは倍音構成になったり、単純な周波数構成にもなったりする。さて、ここで問題になることは、この細切れ音をわれわれはどのように聞いているかということである。

4. 細切れ音の音色知覚

「細切れ音はフーリエ変換の対象とする時間長によって、倍音になるかどうかが決まる。」ということから、もしわれわれが細切れ音が発生する間隔 T 以上の時間を要するならば倍音として聞こえ、もしその時間以内にその音を知覚してしまえば、それは単純音として聞こえる。ここで細切れ音を構成する分子音が発生する単位時間当たりの数を f_0 、分子音の周波数を f_1 とする。もし、前者のように聞けばそれはピッチ f_0 の倍音として聞こえ、 f_1 を変化しても音程が変わることはない。しかし、後者のように聞けば f_1 の変化がピッチ (音程) の変化になる。一方、我々は低

い周波数の音の知覚には長い時間を要するが、高くなると短い時間で知覚すると言われている [4]。

そこで、実際に2つの周波数 f_0 と f_1 をパラメータにして、音声合成を行い、次の試聴実験を行った。 f_0 を 174.6Hz (音名 F_3) に固定して、 f_1 を 261.6Hz (音名 C_4) から 4184Hz (音名 C_8) までの4オクターブ間を連続的に変化させ、その音を聞いた時に我々が聞き取る音程がどのように変わるかを調べた。その結果は図11に示すように、 f_1 が 1kHz 以下では f_1 が変化しても聞き取る音程にほとんど変化がなくそれはほぼ f_0 に近い。しかし、 f_1 が 1kHz より高くなると聞き取る音程は f_1 の変化とともに連続的に変化する。この実験から、「人間の聴覚器官は低い音に対してはその認識までに長い時間を必要とするが、高い音に対しては高くなればなるほど短い時間で用が足りている。」ことが確認出来た。実際、口琴の音色はその分子音の周波数によって非常に異なって聞える。

5. まとめ

音の波形構造が同じでも、それを構成する周波数によってわれわれが感じる音色が大きく異なって来ることが分かった。これは聴覚器官の働きの非線形性によるものである。本稿の試聴実験では分子音の単一の周波数のみに着目したが、今後は複数の組み合わせや減衰の仕方などを変化させて実験を行ってみる必要がある。

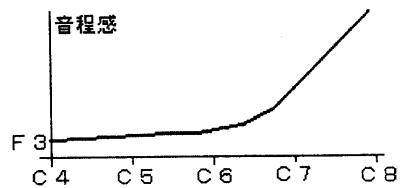


図11 分子音の周波数と知覚する高さ

参考文献

- [1] 直川礼緒, 口琴の魅力, 口琴ジャーナル, 1, 7-11(1990).
- [2] 高澤, 口琴の発音機構とその音色知覚について—ホーミー (喉歌) の発声機構への類推, 音楽音響研究会資料 MA97-61, 日本音響学会 (1997).
- [3] 菰池, 山田, 足立, ホーミーの発声機構—第一空間共振説—, 音楽音響研究会資料 MA97-3, 日本音響学会 (1997).
- [4] C.J. Adkins, Investigation of the sound-producing mechanism of the jew's harp, J. Acoust. Soc. Am. 50, 667-670(1974).