衝突音と聴感周波数*

山口 敏史^{*1}, 渡邊 鉄也^{*2}, 田中 基八郎^{*3}

Hearing Frequency by Impact Sound

Toshifumi YAMAGUCHI, Tetsuya WATANABE^{*4} and Kihachiro TANAKA^{*4} Division of Mechanical Engineering and Science, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A human hears a sound and recognizes the pitch by its frequency. However, sometimes a human recognizes a sound as different frequency from actual frequency. The frequency that human feels is called "hearing frequency". On the other hand, impact sound is defined as the sound that occurs when a collision happened. We often hear an impact sound, but its "hearing frequency" has not been studied. In this study, "hearing frequency" of impact sound is investigated by experiment. First, an experiment using sample sound is taken place. This sample sound is short term waves which has some period waves. Next experiment is carried out using an imitation impact sound. Imitation impact sound is sinusoidal wave that have damping behavior in order to detect the influence of damping. Then, an experiment with various impact sounds that were recorded as the actual sound is proceeded. After that, an experiment with actual impact sound that has center frequency is carried out, in order to detect the influence of the center frequency. Results of these experiments show that the high frequency sound tends to be recognized as lower frequency than actual frequency. And low frequency sound tends to be recognized as higher frequency than actual frequency.

Key Words: Sound, Hearing Frequency, Hearing Mechanism, Impact Sound, Damping

1. 結 言

私たちは、聴覚器官を通じて音を聞いている。このとき、聴覚器官のひとつである蝸牛の基底膜の振動が電気信号に変換され、聴覚神経を通じて脳へ伝達されて音を感じるが、音の高さ（周波数の高さ）の判断には蝸牛底にある基底膜の振動位置が関わっているという説（場所情報説）と神経インパルスの発火頻度が関わっているという説（時間情報説）があり、現在はそれらが相互に補いあって音の高さを判断していると考えられている⁽¹⁾。そのどちらの場合であっても、音の高さは、蝸牛が周波数分析器としてはたらくことにより、音波の周波数を判断しているということになる。

しかし、人間は時として、音を物理的に測定される周波数とは別の周波数で感じるがあるということがこれまでに示されている。例としてはドップラー効

果や複合音の知覚などが挙げられる。ここでは、人間が聴覚で感知する周波数を聴感周波数と呼ぶ。聴感周波数は、実際の周波数と同じ場合もあるが、異なる場合もある。特に、波の数が少ない場合、すなわち短時間の波の場合には聴感周波数は実際の周波数より低くなる。

物体同士が衝突したときに発生する音である衝突音は、身近で、普段から耳にする機会の多い音である。衝突音も短時間の波であるため、聴感周波数は低下しているはずである。衝突音については、発生機構⁽²⁾などや、擬音語での表現^{(3),(4)}などに関して研究が行われているが、その聴感周波数については検討がなされていない。衝突音の聴感周波数を明らかにすることは、聞かせようと意図する音を聞かせる事につながるため、衝突音の快音化等の基礎データとして有用であると考えられる。本研究では、衝突音の聴感周波数に関して聴感実験を行い、いくつかのサンプル音での結果を比較することにより衝突音が有する周波数と聴感周波数の関連を検討した。ここでは、音の高さ（周波数の高さ）に注目し、音の強さ（音圧レベル）は一定にする。

* 原稿受付 2009年3月19日。

^{*1} 学生員, 埼玉大学工学部機械工学科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。^{*2} 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科。^{*3} 正員, フェロー, 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: watanabe@mech.saitama-u.ac.jp

2. 聴感周波数測定方法

本研究では、以下の4種類のサンプル音について、聴感周波数を調査した。

- (a)波の数を変えた正弦波
- (b)模擬衝突音
- (c)実衝突音
- (d)実衝突音の中心周波数付近以外をカットした音

以下に、それぞれのサンプル音の概要、および、作成方法について述べる。

(a)波の数を変えた正弦波では、衝突音が短い音、すなわち音を構成する波の数が少ない音であることから、実際に衝突音の聴感周波数について検討する前に、音を構成する波の数が少ない場合に聴感周波数がどのように変化するかを調査する。波の数が少ない音（短音）と、数秒間出力される音（長音）について、聴感周波数を調べ、両者を比較する。長音と、10波～60波までの短音について、それぞれ1000Hzから1/3オクターブ刻みに8000Hzまで周波数を変化させて実験を行った。サンプル音はPCで作成し、スピーカ端子から出力した。

(b)模擬衝突音では、衝突音の要素として考えられる周波数と音の長さを様々に変えた音を作成し、それらが聴感周波数に及ぼす影響を調査した。音の長さを変えるには、減衰比を変える方法をとった。サンプル音は、正弦波に減衰を加え、その周波数と減衰比を様々に変えた音とし、式(1)から作成した。

$$f(x) = Ae^{-\zeta\omega t} \sin(\omega t) \quad (1)$$

式(1)において、 A は振幅、 ζ は減衰比、 ω [rad/s]は角振動数、 t [s]は時刻をそれぞれ表す。実験では、周波数500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 3000Hz, 4000Hz, 5000Hz, 減衰比0.005, 0.01, 0.02, 0.03のそれぞれの組み合わせについて聴感周波数を調べた。

(c)実衝突音は、実際に様々な物体同士を衝突させたときに発生した音をマイクロフォン(小野測器 MI-1431)とFFTアナライザ(小野測器 CF-5220)を使用して録音したものを使用した。スペクトルのピーク周波数と聴感周波数との関係を検討した。

(d)実衝突音の中心周波数付近以外をカットした音は、衝突音が一般的にさまざまな周波数成分の組み合わせで成っていることから、スペクトルのピーク周波数以外の周波数が聴感周波数に与える影響を調べるために用いた。ここでは、スペクトルのピーク周波数を中心周波数と呼んでいる。本サンプル音での聴感周波数測定結果を(c)の実衝突音の結果と比較することによって中心周波数以外の周波数成分の影響を調べるこ

とができる。本サンプル音は、実衝突音に、その中心周波数の前後50Hzを通過帯域としたバンドパスフィルタをかけることによって作成した。

各サンプル音において、聴感周波数の測定は、図1に示す実験装置を用いて行った。実験装置はPC(日本電気 LaVie LN500/B)、ヘッドフォン(オーディオテクニカ ATH-t2)、および発信器(NF回路設計ブロック WF1943)より構成される。ヘッドフォンは、片耳側にPCを、もう片耳側に発信器を接続し、PC側からは作成したサンプル音を、発信器側からは正弦波を出力する。このヘッドフォンを被験者に装着してもらい、左右の耳から聞く音が同じ高さに聞こえるように発信器の周波数を被験者自身に調節してもらった。被験者が同じ高さであると判断したときの発信器の周波数をそのサンプル音の聴感周波数とした。実験にあたっては、被験者の操作に影響を及ぼさないように、発信器の周波数表示を隠した上で測定を行った。また、事前に操作の練習をさせ、周波数の感知、および調整能力に問題が無いことを確認し、操作に慣れてもらった。左右の音圧レベルは極力等しくした。サンプル音は時間が短い音であるため、被験者が判断できるように繰り返し音を聞いてもらった。

Fig.1 Experimental system

3. 聴感周波数測定結果

3・1 波の数を変えた正弦波 実験から求めた聴感周波数と波の数の関係を図2～図8に示す。なお、聴感周波数は聴覚正常な20代の男性被験者10名の平均値である。結果をみると、まず図2に示した長音実験では、すべての周波数において聴感周波数と実際の周波数が一致するというわけではなかった。5000Hzまでの周波数ではほぼ音源の周波数と同じ周波数となっているが、5000Hz以上では音源の周波数と聴感周波数に誤差が生じており、その領域における聴感周波数は周波数に比例している。長音での実験に関しては、左右どちらの耳からも同じ周波数の正弦波を聞いていることになる。それにも関わらず高周波数において誤

差が生じる原因のひとつとしては高周波が一般的に不快音であり、本実験では被験者自身に周波数の調節をしてもらったため、被験者自身の心理の影響が考えられる。また、5000Hz 程度以上では周波数弁別閾が上昇すると報告されており⁽¹⁾、弁別閾の上昇も原因のひとつとして考えられる。

次に短音実験についてみる。図3の10波では1200Hz以上での値に関して実験結果の近似直線を描き、図4～図8の20波から60波に関しては1500Hz以上での値に関して実験結果の近似直線を描いている。また、それぞれの図には比較のために、長音における近似直線も示した。これらの結果から、20波から60波では1500Hz 程度までは比較的正確に認識できているが、2000Hz 以上の周波数帯において波の数の影響が生じ始める。また、近似直線をみると、聴感周波数と実際の周波数は比例関係にあると言える。

一方、10波の結果をみると、3000Hz 以下で他の波の数の場合よりばらつきが大きくなっている。また、他の波の数の場合のように1500Hz 以上で近似直線をとるとずれが大きくなるために、10波に関しては1200Hz 以上で近似直線をとっている。音の長さが短いので認識が難しく、聴感周波数の判断にばらつきが生じたためであると考えられる。

Fig.2 Hearing frequency (long sound)

Fig.3 Hearing frequency (10 waves)

Fig.4 Hearing frequency (20 waves)

Fig.5 Hearing frequency (30 waves)

Fig.6 Hearing frequency (40 waves)

Fig.7 Hearing frequency (50 waves)

Fig.8 Hearing frequency (60 waves)

3・2 模擬衝突音の聴感周波数 減衰比 $\zeta=0.005$, $\zeta=0.01$, $\zeta=0.02$, $\zeta=0.03$ のそれぞれについて, 500Hz から 5000Hz まで周波数を変化させた場合の聴感周波数を図9に示す. なお, 聴感周波数は聴覚正常な20代男性被験者19名の平均である. 周波数による聴感周波数をみると, 3000Hz以上の高い周波数では全ての減衰比において聴感周波数は実際の周波数より低下している. 一方, 500Hzでは, 全ての減衰比で聴感周波数は上昇している. また, その中間の周波数については, 1000Hzでは減衰比によって上昇したものと低下したものがそれぞれあり, 2000Hzでは $\zeta=0.005$ を除いて低下するという結果になった.

次に, 減衰比と聴感周波数との関係調べる. 周波数 500Hz~5000Hz までの, それぞれにおける減衰比と聴感周波数との対応を図10~図15に示す. 実験結果から相関分析を行ったところ, 2000Hz以下の周波数では, 聴感周波数と減衰比の間には負の相関関係が見られた. しかし, 3000Hz以上の周波数に関しては, 聴感周波数と減衰比との間に関係を見出すことはできなかった.

Fig.9 Hearing frequency of modeled impact sound

この結果を波の数を変えた正弦波の聴感周波数と比較すると, 高い周波数で聴感周波数が実際の周波数より低下する傾向は, 両方で見られた. また, 1000Hzから2000Hzでは実際の周波数より高くなる場合と低くなる場合があるという傾向も同様にみられた. 図11から図13では, 減衰比による聴感周波数の増減がある. これは, 人間の外耳道の共鳴周波数が2000Hz付近にあるため, データがばらついたものと考えられる.

Fig.10 Hearing frequency(500Hz)

Fig.11 Hearing frequency(1000Hz)

Fig.12 Hearing frequency(2000Hz)

Fig.13 Hearing frequency(3000Hz)

Fig.14 Hearing frequency(4000Hz)

Fig.15 Hearing frequency(5000Hz)

3・3 実衝突音の聴感周波数

実験で用いたサンプル音は、以下のようにして発生させた。

- 1) 木球同士の衝突
- 2) 拍手
- 3) L型金具の衝突
- 4) 陶器と金属の衝突
- 5) 陶器と硬質プラスチックの衝突
- 6) 紙材同士の衝突
- 7) 拍子木
- 8) トライアングル

測定環境として無響室内で測定を行った。実衝突音サンプルの例として、1)の木球同士の衝突させたものの時間波形を図16に、パワースペクトルを図17にそれぞれ示す。図17は、卓越周波数が帯域を有している。他のサンプル音では、4),5),8)において、卓越周波数が帯域をもたず、複数のピークを有する。複数のピークを有する場合には、最も卓越した周波数を採用した。

これらの中心周波数と聴感周波数との対応を、図18に示す。聴感周波数は聴覚正常な20代男性被験者14名の平均である。

衝突音を中心周波数から以下の3種類に分類する。

- (a)低い衝突音(中心周波数1000Hz以下)
- (b)高い衝突音(中心周波数2000Hz以上)
- (c)中間の衝突音(中心周波数1000Hz～2000Hz)

この分類から結果をみると、

- (a)低い衝突音に関しては、3つのサンプル音全てで聴感周波数は実際の中心周波数より5%水準で有意に上昇していた。
- (b)高い衝突音に関しては、8つのサンプル音全てで聴

感周波数は実際の中心周波数より5%水準で有意に低下していた。

(c)中間の衝突音に関しては、聴感周波数が実際の中心周波数より低下しているものが2例、上昇しているものが3例であり、明確な傾向は得られなかった。また、模擬衝突音では周波数2000Hz以下で聴感周波数と負の相関関係が示された減衰比に関しては、実衝突音に関しては明確な関係を得ることができなかった。

これらの結果から、高い周波数で実際の周波数より聴感周波数が低下する傾向と、低い周波数で実際の周波数より聴感周波数が上昇する傾向が模擬衝突音の場合と同様にみられた。また、模擬衝突音では聴感周波数が低下するようになる周波数は3000Hz以上であったが、実衝突音では2000Hz以上であった。

Fig.16 Sound pressure waveform

Fig.17 Power spectrum

Fig.18 Hearing frequency by impact sound

3・4 中心周波数付近以外をカットした実衝突音
聴感周波数測定結果を、比較のため実衝突音の場合と併記して図 19 に示す。聴感周波数は聴覚正常な 20 代男性被験者 14 名の平均である。

この図より、16 個のサンプル音のうち、14 個のサンプル音で、フィルタをかけた場合の聴感周波数はフィルタをかけない場合よりも実際の中心周波数に近づいている。特に、中心周波数 1000Hz 以下の低い衝突音と 2000Hz 以上の高い衝突音では、全てのサンプル音で実際の中心周波数に近づいた。すなわち、低い衝突音では実衝突音の場合と比較して聴感周波数は低下し、高い衝突音では実衝突音の場合と比較して聴感周波数は上昇した。また、フィルタをかけた場合でも、波の数を変えた正弦波・模擬衝突音・実衝突音の場合と同様に、低い衝突音では聴感周波数は実際の周波数よりも上昇し、高い衝突音では聴感周波数は実際の周波数よりも低下するという傾向はみられた。

これらの結果より、中心周波数以外の周波数によって、実衝突音の聴感周波数は実際の周波数から離れる傾向があることがわかる。特に低い音での聴感周波数の上昇幅と高い音での聴感周波数の低下幅は大きくなっているといえる。また、人間の耳で敏感な周波数は 2000Hz 付近であるとされており⁽⁵⁾、その領域を含む周波数によって、大きな影響を受けている。

Fig.19 Hearing frequency by filtered impact sound

4. 結 言

本研究では、衝突音の聴感周波数について検討し、以下の結果が得られた。

- 1) 長音の場合、5000Hz 程度までは正確に周波数を認識できるが、5000Hz 以上では判断した周波数が低下する。
- 2) 音の波の数を 20 波～60 波に変えた場合、1500Hz 程度までは正確に認識できるが、それ以上の周波数になると聴感周波数は低下する。
- 3) 模擬衝突音では、500Hz では聴感周波数は実際の周波数より高くなり、3000Hz 以上の周波数では、聴感周波数は実際の周波数より低くなる。また、周波数

2000Hz 以下では、聴感周波数と減衰比との間には負の相関関係が見られる。

- 4) 実衝突音では、中心周波数 1000Hz 以下では聴感周波数は実際の中心周波数より高くなり、中心周波数 2000Hz 以上では低くなる。その上昇幅、低下幅は、中心周波数以外の周波数の影響を受けて大きくなる。

今回得られた結果は、20 代男性十数名におけるデータに基づいているため、年齢や性別の違いは考慮されていない。また、波の数と聴感周波数や衝突音と聴感周波数の定量的な関係は明らかになっていない。しかし、正弦波で、波の数が少ない場合、1500Hz 程度を超えると聴感周波数の低下は顕著であることがわかった。また、模擬衝突音や実衝突音では、周波数が高くなると聴感周波数は低下する傾向にあることがわかった。

衝突音の快音化、たとえばゴルフクラブの打球音、バットの打球音、産業施設内で生じる衝突音をより良い音にする場合、聴感周波数は重要な要素となりうる。聴感周波数が実音の中心周波数とずれていても人体への影響はない。しかし、特に高い周波数の音では、聞かせたい音と聞こえる音が異なるとするとその補正をしないと聞かせたい音を実現できないのではないかと考えられる。

本研究は快音化の第一段階として、聴感周波数に注目した。個人差は多分にあるが、実音周波数と聴感周波数の関係を定性的であるが得られた。今後は、被験者の数や年齢、性別など考慮し、定量的な評価ができるようにしたいと考えている。

参考文献

- (1) Ogura, M., Kawase, T., Suzuki, Y., Sone, T. and Takasaka, T., Interaural pitch difference and frequency difference limen in normal hearing subjects, *Technical report of IEICE EA*, Vol.99, No.259(1999), pp.23-28.
- (2) Nishimura, G., Takahashi, K., Impact Sound of Steel Ball Collision, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.28, No.327(1962), pp.220-230.
- (3) Tanaka, K., Matsubara, K. and Sato, T., Study of Onomatopoeia Expressing Strange Sounds : Cases of Impulse Sounds and Beat Sounds, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.61, No.592(1995), pp.4730-4735.
- (4) Hiyane, K., Sawabe, N. and Iio, J., Study of Spectrum Structure of Short-time Sounds and its Onomatopoeia Expression, *IEICE technical report*, Vol.97, No.586(1998), pp.65-72.
- (5) Suzuki, Y., Takeshima, H., Recent topics on the thresholds of hearing and the equal-loudness contours, *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol.58, No.2(2002), pp.130-137.