

人間の聴覚心理現象と位相の関係 ～MF現象における位相の影響～

The Relationship between Auditory Psychological Phenomenon and Phase of the Human
～The effect of the phase in the MF phenomenon～

小林 幸夫, 小島 直樹*
Yukio KOBAYASHI, Naoki OJIMA*

It is few that phase information is handled as a research on tone color. Because it has been thought that the phase is unrelated to the tone color. However, the result that the human can detect the phase difference is also reported, when the phase difference between each component sound of complex tone was changed. In one of the auditory sense psychological phenomenon, by the change of the harmonic composition the tone color changes, and it is not change sound pitch. This phenomenon is called "Phenomenon of the missing fundamental (MF)". As we paid attention to this phenomenon in this research, we confirmed the mechanism and examined the influence of the phase change between the component sounds to the perception of MF. As the result, it has been found that the changes of the pitch and the tone color take place in the perception by giving the phase difference. So, we concluded that not only each frequency component but also phase is largely related to a tone color.

Keywords: Auditory psychological phenomenon, Residue, Phase

1. はじめに

今日、音色に関する研究として位相情報が扱われる事は少ない。それは、ヘルムホルツがその著書 "Sensation of Tone" で「楽音の音色はその成分音の振幅によって決まり、それら成分音間の位相には関係が無い」と述べて以来、位相は音色と関係が無いと考えられてきたためである。これにより人間の聴覚は位相に鈍感である事が通説となった。しかしながら、複合音の各成分音間の位相差を変えたとき、その位相差を人間は検知できるという結果も報告されている⁽¹⁾。また、人間は位相の違いを音色の違いと

として知覚しているとも報告されており、人間の位相知覚に関しては、定まった見解を得るに至っていない⁽²⁾。

音の性質を決める要素は「音の高さ、大きさ、音色」の3つである。音の高さは周波数に、音の大きさは音圧の大きさの実効値に依存する。そして、音色は各周波数成分がどのように構成されているかに依存する。聴覚心理現象の一つに、倍音の構成を変化させる事で、音色は変化するが音の高さは変わらないと言う現象がある。この現象は「欠けている基本音の現象」(Phenomenon of the missing fundamental)⁽³⁾(以下MF現象とする)と呼ばれている。例えば、ある基本波とその倍音で構成された複合音があったとする。この複合音から基本波を除いても、

* 平成16年度専攻科電子システム工学修了
(現在 日本ビクター株式会社勤務)

音の高さは変わらず単に音色だけが変化して知覚されるのである。これがMF現象である。

では、倍音構成によって音色が変化するMF現象に位相変化を加えると、音の高さの知覚に変化は生じるのだろうか。

本研究では、MF現象のメカニズムを確認し、MF現象が知覚されやすい複合音の構成倍音を調べ、学習段階を踏まえることで知覚にどのような変化が現れるか確認する。そして、その複合音に位相変化を加えると、音の高さの知覚にどのような変化が生じるのか確認する。

2. 人間の複合音の知覚

人間は複合音を聴いたとき、脳の中で一つの音として認識する。MF現象のように低い音の成分が無くても、高次倍音群による複合音により基本音に近い低い音の高さを感じる。この低い音の高さはレジデュール(residue)と呼ばれている。レジデュールの高さを説明するモデルとして、大きく分けて「パターン認識モデル」と「時間モデル」二つが挙げられる。

パターン認識モデルは、複合音の個々の部分音に相当する神経信号に対して中枢処理器が働き、それによって高さが抽出されるだろうという考え方である。知覚には二つの段階を経る。まず、隣り合う部分音の周波数差がレジデュールの高さとしておおそ決定される。そして、各部分音を整数で除して、前段階で得た周波数に最も近い音がレジデュールの高さとして知覚されるというものである。

これに対し時間モデルは、基底膜上で隣り合う部分音が干渉を起こし神経発火間の時間間隔から複合音の高さが生じるであろうという考え方である。

3. MF現象実験

3-1 確認実験

時間モデルによれば、神経発火のタイミングを倍音の位相関係を変化させる事によりレジデュールが変化すると考えられる。このことを確認

する為、以下の確認実験を行った。ある基本波に対して、第2~5倍音で構成された複合音、第3~6倍音で構成された複合音、第2~6倍音で構成された複合音を作成し、これらの構成倍音のうち、どのパターンが最もレジデュールの高さが知覚されやすいか確認する実験を行なった。また、学習段階を踏まえる事により、結果にどのような違いが現れるか確認実験を行なった。学習段階では、基本波を含む複合音と、基本波を含まない複合音を被験者に比較させながら試聴実験を行なった。

3-2 実験方法

Visual Basicで作成した音源作成プログラムを用いて音源を作成し、CDに記録した。作成したCDと発振器を、増幅器(Technics製 SU-V10X)に接続し、セレクトスイッチで切り替えるようにセットした。試聴実験は無響室で行い、再生はヘッドフォン(AKG社製 K271)を使用した。被験者は発振器の周波数を10Hz単位で変化させ、CDより再生された複合音を聴き、知覚した音の高さに発振器の周波数を調節する。その際、発振器の数値を確認できない状態にした。また、音圧は被験者が自由に調整できるようにした。

被験者が知覚した周波数と基本波の周波数が合致すればMF現象が確認された事になる。学習段階でも同様の条件で実験を行った。

3-3 試聴結果

結果を表1に示す。第2~5倍音で構成される複合音では基本波が高くなるほど知覚され難くなっているが、誤差平均はどれも10Hz以下であり、全体的にレジデュールの高さが知覚されたと言える。これに対し、第3~6倍音で構成した複合音では平均誤差、偏差共に悪くなっている。これは、高い倍音はレジデュールの知覚に悪影響を及ぼしている可能性があると考えられる。第2~6倍音で構成した複合音では、平均誤差、偏差ともに小さくなっている。しかし、基本波の周波数が高いほど結果は悪くなっている。基本波が高いほど、高い倍音の影響が強いと考えら

れる。

これらの結果より、基本波は低く、構成倍音は第2～5倍音の複合音がレジデューの高さを知覚しやすいと言える。

また、学習段階を踏まえる事により平均誤差、標準偏差ともに個人差はあるものの、値が小さくなった。この事により、学習段階はレジデューの高さを知覚する上で有効である事がわかった。

表1 学習段階を踏まえた場合の聴取結果

構成倍音	第2～5倍音				第3～6倍音				第2～6倍音				
	基本波	300Hz	350Hz	400Hz	440Hz	300Hz	350Hz	400Hz	440Hz	300Hz	350Hz	400Hz	440Hz
学習前	誤差平均	21	22	28	20	3300	2000	3500	2200	1300	17.00	41.00	45.00
	標準偏差	34.21	35.50	44.94	31.62	48.27	28.64	68.34	33.17	19.75	27.39	55.59	69.79
学習後	誤差平均	10	60	10	100	500	800	600	1000	800	400	1000	900
	標準偏差	3.16	7.75	3.16	14.14	13.04	14.14	1000	20.49	12.65	10.00	12.65	12.25

表2 位相条件を変化させた場合の聴取結果 (10Hz刻み)

トラック	平均	標準偏差	感想のまとめ
			基本となる周波数だったので、特に感想は無かった。
1	400	6.32	
2	8.00	11.83	CDの音源の方が高く感じる。 しかし、比較的合わせ易かった。
3	5.00	10.49	何となくだが低く感じる。 合わせ易さはトラック1と変わらない。
4	6.00	13.42	明確なポイントを見つけられる人と見つけられない人に別れた。 音色の変化に戸惑っていた。低く感じる。
5	400	7.75	合わせ易さが人によって違った。 音ははっきりした感じだった。
6	9.00	17.61	音の高さははっきりしているが、音の質が違うように聞こえた。 少し高く感じた。
7	400	7.75	高い音が耳につく あやふやな感じに聞こえる。音がはっきりしない

3-4 位相を変化させた場合の聴取実験

確認実験よりレジデューの高さが最も知覚されやすい複合音は、基本波300Hzの第2～5倍音で構成された複合音だとわかった。そこで、各周波数成分の位相を変えた場合、レジデューの高さの知覚にどのような影響があるか実験を行なった。

音源は確認実験と同様に、Visual Basicで作成した音源作成プログラムを用いて音源を作成

しCDに記録した。音源は位相成分を変化させた時、波形が大きく変化するものと、変化の小さいものを3つずつ選んだ。比較の為に、位相を変えていない音源も含めた。実験方法も確認実験と同様に行なった。また、トラックごとに知覚に対する被験者の印象を調査した。

図1に、基本周波数300Hzで第2～5倍音で構成した複合音の波形を(左側)、右側に左側の波形の第2、第4倍音の位相を90°ずらした波形を示す。図1の左側の波形は二つの山が周

期的に現れる波形である。一つ目の山が来る周期は、300Hzの周期である。時間モデルに基づけば、300Hzのレジデューの高さが知覚されるであろうと予想できる。位相を変化した右側の波形では、時間モデルの考え方を適用すると、包絡の極大点付近ならば、どの部分でも神経発火の可能性があると考えられる。例えば間隔が一番狭い2点で神経発火が起これば、間隔は1.39msecなので約719Hzの音が知覚される可能性がある。また、内側二つの極大点で神経発火が起こるならば、間隔は約1.93msec離れているので約517Hzの音に、外側二つの極大点で神経発火が起こるのであれば、間隔は約4.732msec離れているので、約211Hzの音に知覚する可能性がある。つまり、300Hz以外のレジデューの高さを感じる可能性がある。

しかしながら、パターン認識モデルの考え方だと、位相は関係がないと考えられているので、どれも300Hzに感じてしまうことになる。これらの事を確認する為に聴取実験を行うことにした。

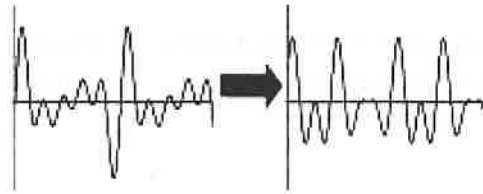


図1 位相を変化した場合の波形の変化

3-5 聴取結果

表2に結果を示す。位相を変えてないトラック1が最も標準偏差が小さい。それに、比べ位相を変えたトラックは標準偏差が大きくなっている。このことから、位相を変えないほうがレジデューの高さが知覚されやすいことがわかる。言い換えるならば、位相を変化させる事でレジデューの知覚に変化が現れていると言える。

また、各トラックのレジデューの高さの知覚には個人差が現れた。全てのトラックを300Hzの高さに知覚する人もいれば、トラック毎に違う周波数に知覚する人もいた。しかし、共通した認識として、音の明暗や大小といったトラック毎の音の印象の違いを知覚していた。

表3 位相条件を変化させた場合の聴取結果 (1Hz刻み)

トラック	平均	標準偏差	感想のまとめ
1	301.77	2.40	1Hzの変化に戸惑いながらも他曲と比べて合わせやすいと感じる。音をイメージし易く合わせやすい。
2	302.13	2.89	1より合わせ難いと感じる。300前後に合わせるが、300は合わない感じがする。
3	301.44	1.85	1より合わせ易いと感じる。しかし、300より上の周波数に合わせていた。
4	302.20	3.00	明確なポイントを見つけられない。300を低く感じるが、300~302でも合っている気がする。
5	300.67	1.15	低い方が解かりづらい。しかし、300付近を知覚。比較的わかり易い。
6	302.63	2.72	300は合わないと感じる。音を取りづらいと感じる。302~304がしっくりくる。
7	30.43	1.46	発振器とCDの音源が聞き比べているうちに急に聴こえてくる。しっくり来る所がない。あわせ難い。

3-6 追加実験

3-4の聴取実験の中で、10Hz刻みだと正確に合うと感じられる周波数が無いという感想を得た。この感想は標準偏差の小さい被験者に多かった。そこで、追加実験として標準偏差の小さい5名に1Hz刻みで同様の実験を行なった。

3-7 追加実験の聴取結果

表3に追加実験の聴取結果を示す。これらの結果からは、10Hz刻みの時と比べ大きな違いは現れなかった。5人が5人とも、300Hz前後に合わせていた。しかし、感想と照らし合わせてみるとトラック2やトラック4、トラック6のような、音を取りづらい、合わせ難いと感じる音の標準偏差の値は大きくなっている。そして、トラック3やトラック5のような、合わせ易いと感じる音の標準偏差は小さくなっていた。しかし、それとは逆にトラック7のように変に聴こえる、または合わせ難く感じていても標準偏差が小さい音もあった。

10Hz刻みの結果と比べると標準偏差が小さいトラックは、1Hz刻みの結果でも小さく、10Hz刻みの標準偏差が大きいトラックでは、1Hz刻みでも大きくなっていた。

4. まとめ

MF現象が確認しやすい周波数と構成倍音を見出す事ができた。また、学習段階を経る事で標準偏差が小さくなることから、学習段階の有効性を確認する事が出来た。そして、構成音間に位相差を与えると、MF現象が知覚されにくい、または知覚されたとしても基本波の周波数の変動が大きくなる事が確認された。このことから、位相差を与える事により、音の高さの知覚に変化が生じていると考えられる。また、位相を変化させる事で音色の知覚に変化が現れてきている事から、やはり音色は各周波数成分だけではなく、位相成分も大いに関係があるのではないかと考えられる。

参考文献

- (1)E.R.Madson,et al:
"Threshold of Phase Detection by Hearing"
Preprint for the 44th AES Convention,
1973)
- (2)赤木 正人：
位相と知覚—人間ははたして位相聾か？—
日本音響学会講演論文集：平成9年9月
- (3)B.C.Jムーア：大串健吾 監訳：
「聴覚心理学概論」、誠心書房

小山工業高等専門学校 電気情報工学科
E-mail: ykoba@oyama-ct.ac.jp

「受理年月日 2005年9月30日」

