

調波複合音の位相変化が音色に与える影響

The Influence on Timbre perception by phase variation of Harmonic Complex Tone

小林 幸夫・矢口 裕

Yukio KOBAYASHI and Yu YAGUCHI

1. 研究の背景及び目的

音色に関する研究の中で位相情報が扱われることは少ない。これは、Helmholtz や、Fletcher の研究結果により、位相変化が音色に与える影響はわずかであり、無視できるとされてきたためである[1]。

しかし、最近では、位相変化が音色に影響を与えるという研究結果[1]が少数だが報告されている。小島らもミッシングファundamental現象において、位相変化が音の高さと音色の知覚に影響を与えることを確認している[2]。このため、位相は無視できるといった定説が見直されてきている[3]。

しかしながら、位相変化と音色の関係を定量的に行った研究は少ない。そこで、本研究は位相変化が音色に与える影響を定量的に検討することを目的とする。

また、位相が重要視されていなかったことから、音響再生機器のメーカーの多くは位相特性（群遅延特性）にあまり関心を払ってこなかった。

そこで、本研究で得られた結果から、高忠実度再生のために必要な音響再生機器の位相特性の設計指針を見出すことを目標とする。

2. 確認実験及び追加実験

「位相変化は音色に影響を与える」とする研究報告の中から、Plomp の実験[1]に着目し、確認実験を行った。

Plomp の実験は、基本周波数が62.5Hz、125Hz、250Hzの10成分調波複合音において、位相のみを変化させた4種類((1)～(4)式)を用意し、それぞれの音色を被験者に比較させ、音色の違いが判別できるかどうかというものである。Fig.1に実験に使用した音源の波形を示す。

Plomp は、この実験によって、「位相の変化による調波複合音の音色の違いは基本周波数が低い方が影響が大きく、150Hzを超えると影響が小さく

なる」と、まとめている。

$$SS : \sin 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} \sin 2\pi 2f_0 t + \dots + \frac{1}{10} \sin 2\pi 10f_0 t \quad (1)$$

$$CC : \cos 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} \cos 2\pi 2f_0 t + \dots + \frac{1}{10} \cos 2\pi 10f_0 t \quad (2)$$

$$SC : \sin 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} \cos 2\pi 2f_0 t + \dots + \frac{1}{10} \cos 2\pi 10f_0 t \quad (3)$$

$$CS : \cos 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} \sin 2\pi 2f_0 t + \dots + \frac{1}{10} \sin 2\pi 10f_0 t \quad (4)$$

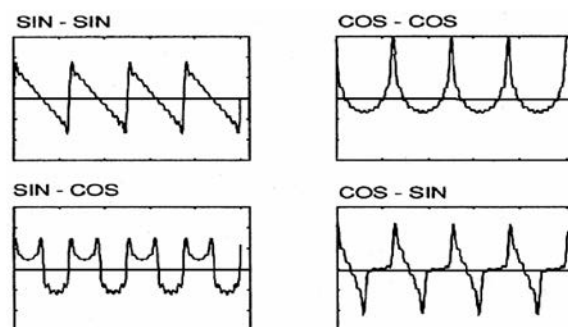


Fig.1 実験に使用した音源の波形

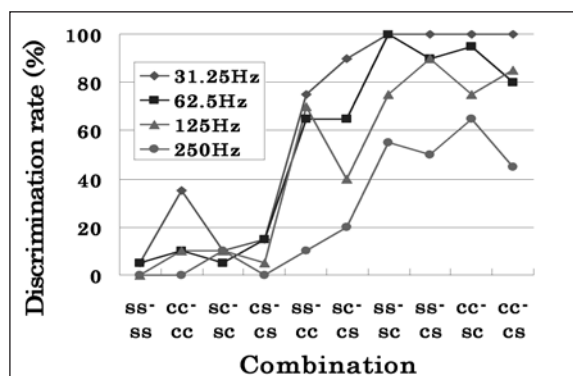


Fig.2 聴取実験の結果(ヘッドホン)

確認実験では、これと同様の実験を10名の被験者に対し、ヘッドホン (AKG:K271 STUDIO) を使用して無響室で行った。その結果、Plomp の結論と同様の傾向が実験データから確認できた。

本研究では、上記の実験に加えて、この確認実験に使用した音源よりさらに低い周波数、31.25Hz

の複合音についても実験をした。それらの結果を合わせたものをFig.2に示す。

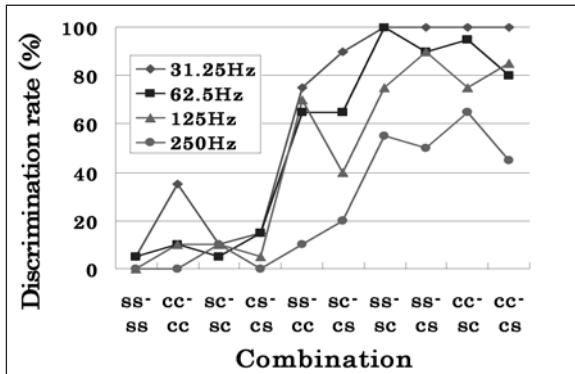


Fig.3 聴取実験の結果(スピーカ)

また、ヘッドホンだけでなく、スピーカ(10cmのフルレンジのユニットをバスレフタイプのキャビネットに取り付けたもの)を用いた場合についても無響室において実験した。そのときの結果をFig.3に示す。

どちらの結果も、基本周波数が低くなるほど、違いを感じた人の割合が増えている。そのため、位相変化が音色に与える影響は基本周波数が低いほど大きくなる傾向にあるといえる。

また、ヘッドホン、スピーカ、どちらを使用しても、明らかに位相による音色の違いを判別できている。そのため、位相に関する過去の研究で音色の変化を聞き取れなかったのは、当時、実験に使用した音響変換器の物理特性が良くなかったことが原因である可能性が考えられる。

3. 振幅変化実験

基本周波数の低い複合音のほうが位相変化による影響が大きいことが分かった。このような傾向が表れる要因について考える。

低い周波数の複合音の方がその周期は長い。これにより、位相を同じだけ変化させるにしても、低い周波数の複合音のほうが、波形が時間軸上で大きく変化していることになる。

そもそも位相変化によって波形は大幅に変形する(位相歪みが起こる)。音色の違いがこの位相歪みに起因するのであれば、位相歪みの大きさと音色の変化の大きさに何らかの関連性が現れるはずであり、また、そうであれば、基本周波数の低い複合音のほうが位相変化による影響が大きいこと

も説明できる。

位相歪みの大きさは、位相を変化させる成分音の振幅の大きさによっても変化する。振幅が大きい成分の位相が変化すれば、波形の変形は大きく、振幅が小さい成分の位相が変化すれば、波形の変形は小さい。よって、位相を変化させる成分音の振幅の大きさを变化させ、音色の知覚に影響があるか実験を行った。

3.1 実験方法

実験は以下のような方法で行った。まず、(5)、(6)式で表される二つの刺激を用意した。

$$S_1(t) = \sin 2\pi f_0 t + \frac{1}{2} \sin 2\pi 2f_0 t + \dots + \frac{1}{10} \sin 2\pi 10f_0 t \quad (5)$$

$$S_2(t) = \sin 2\pi f_0 t + \frac{1}{3} \sin 2\pi 3f_0 t + \dots + \frac{1}{19} \sin 2\pi 19f_0 t \quad (6)$$

実験の手順は以下のとおりである。

- ・ 被験者に $S_1(t)$ の基本音の位相を 90° ずらしたものと元の $S_1(t)$ の音を聞かせ、「同じ」か「違う」か、あるいは、聞いてすぐに分かるほど異なって聞こえれば「全く違う」の評価をしてもらう。 180° 、 270° ずらしたものも同様に行う。
- ・ 基本音の振幅を2倍にした場合、半分にした場合について行う。
- ・ $S_1(t)$ の第2倍音、第3倍音、 $S_2(t)$ の基本音、第3倍音、第5倍音について行う。

実験に使用した音源の周波数は62.5Hzである。被験者は健康な男女15名、実験は無響室にて、ヘッドホンを使用して行った。

3.2 実験結果

実験結果の一部を、Fig.4に示す。

Fig.4は $S_1(t)$ の基本音の位相を変化させたときの結果である。 $S_1(t)$ の第2倍音を変化させた場合を除けば、 $S_1(t)$ の他の結果、 $S_2(t)$ の結果も同様な傾向であった。

全ての結果において、振幅を小さくした成分の位相を変化させた場合は、「違う」、「全く違う」の割合が減少した。振幅を大きくした成分の位相を変化させても、それほど大きな変化は見られなかったが、波形の変形の大きさと音色の違いの大きさに少なからず関連性があることが分かった。

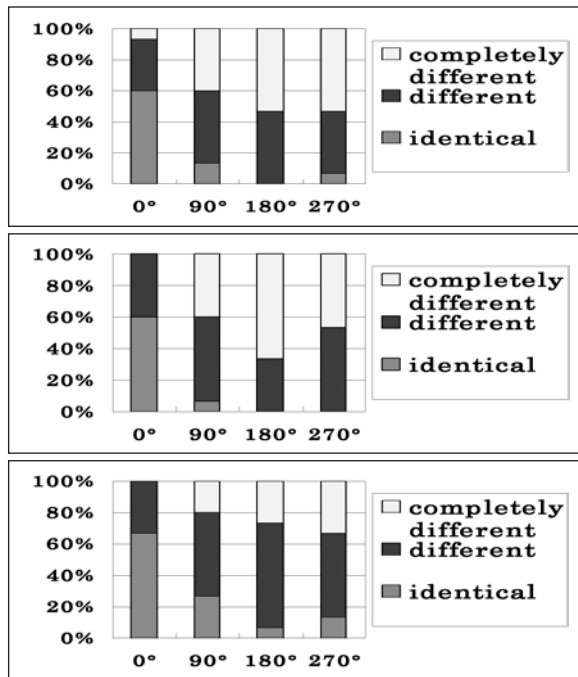


Fig.4 $S_1(t)$ の基本音の位相を変化させたときの実験結果
(上から、振幅が1倍、2倍、1/2倍のとき)

4. 細かい位相変化による実験

振幅変化実験によって、一つの成分の位相を変化させたときだけでなく、その成分の振幅が小さいときでさえ、音色の違いが判別できることが分かった。このことから、かなり細かい部分での音色の判別ができると考えられる。したがって、劇的な位相変化でなくとも、音色の違いを知覚できる可能性がある。

そこで、位相を0～90°の範囲で細かく変化させていった場合について実験を行った。実験の手順は、振幅変化実験のときと同様である。実験結果の一部を、Fig.5に示す。

Fig.5は、 $S_1(t)$ の基本音を0～90°の間で変化させたときの結果である。位相が変化するにつれて、音色の違いを判別できる人の割合が増えているの

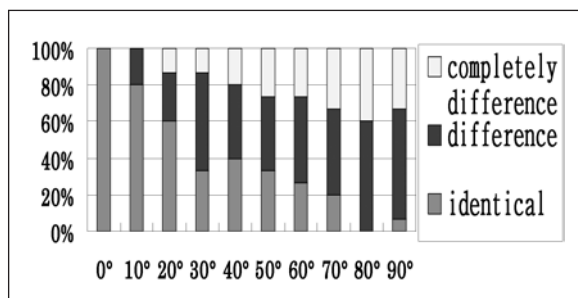


Fig.5 0～90°の間で位相を変化させた時の実験結果

が分かる。位相を徐々に変化させていくと、波形も徐々に変化していくことから、位相変化による波形の変形に関連して、音色の何らかの特徴が変化していると考えられる。

5. 伝送路における位相推移の影響

これまで、位相のみを変化させた調波複合音を作成し、それぞれを聴取し、比較することで、実験を行ってきた。しかしながら、それらの調波複合音は耳への伝送途中でさまざまな位相推移を受ける。そのため、比較する二つの調波複合音の間に与えた位相差が、耳に到達した時点でも保たれているかどうか定かでなかった。

この影響を検証するために、ダミーヘッド (NEUMAN:KU100) を用いて、実験で使用した音源を録音及びFFT解析を施し、二つの音源の間の位相差を求めた。確認実験で使用した音源SS、SC

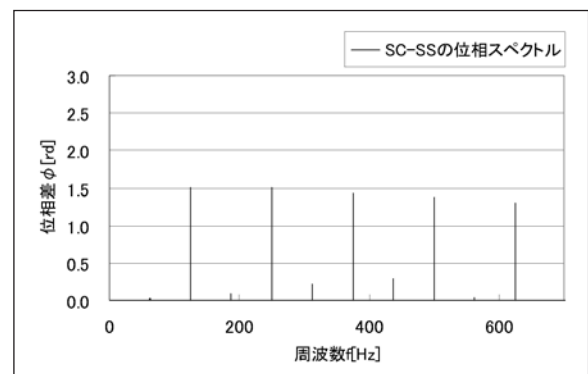


Fig.6 SSを基準としたときのSCとの位相差
(基本周波数:62.5Hz)

の間の位相差を Fig.6に示す。

ここで、SCは、SSの偶数次の倍音のみに余弦位相を与えた音源である。解析した結果、ほぼそれに近い位相差が現れた。これにより、完全ではないが、調波複合音に与えた位相差はほぼ保たれていることが分かった。

6. まとめ

- 1) 位相変化が音色に与える影響は、その音の基本周波数が低いほど大きい。
- 2) 現在の音響再生機器では、位相による音色の変化を聞き分けられる。
- 3) 位相変化する成分の振幅が小さければ、音色に与える影響も小さい。これにより、波形の

変形の大きさと音色の変化には関連があると考えられる。しかしながら、単純に波形の崩れ方が大きいほど音色の変化が大きくなるわけではない。

- 4) 細かく位相を変化させて実験を行うことで、位相の変化による波形の変化と音色の変化の関連性がより明確になった。波形の崩れ方が小さければ小さいほど音色の変化は小さいため、高忠実度再生を考える場合には、位相による歪みも小さい方がよい。
- 5) 音源に与えた意図的な位相情報は、外耳道入り口に到達した時点でも、ある程度保たれているが、完全に意図した通りではない。微小な位相変化を扱う聴取実験をするためには、音響変換器がもつ非線形性まで考慮したシビアな補償が必要である。

7. 今後の課題

単純に波形の崩れ方が大きいほど音色の変化が大きくなるわけではないことから、波形の変形の大きさ以外にも、音色の変化に寄与する要因が存在する可能性が示唆される。したがって、この要因を見出す必要がある。

また、これまでの実験はすべて「同じ」か「違う」の評価だけにとどまっていたが、位相変化が音色のどの特徴に影響を与えるかといったところまで探っていく必要がある。

そして、条件を変えた聴取実験によってデータを増やしていくとともに、実際の音響システムでスピーカのユニットの位置をずらしてどのような影響が出るかなどを実験し、得られた知見を元に群遅延特性の設計指針を検討する。

参考文献

- [1] 赤木正人.“位相と知覚－人間ははたして位相響か？－”日本音響学会講演論文集,平成9年9月
- [2] 小島直樹.“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～”小山高専専攻科特別研究論文,平成17年2月
- [3] Y Yaguchi , M Ishihara , Y Kobayashi : “The Influence on Timbre perception by phase variation of Harmonic Complex Tone” , AES Conference in Fukuoka 2006

PREPRINTS ,P04 . 2006 .July

小林 幸夫 : 電気情報工学科

(e-mail : ykoba@oyama-ct.ac.jp)

矢口 裕 :

平成18年度本学専攻科電子システム工学専攻修了
現在、北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科在学中