

低周波音のマスクングに及ぼすマスク音の帯域幅について

Study of auditory masking affected by bandwidth of masking sound at low frequencies

渡辺 敏夫

福島工業高等専門学校機械工学科

Toshio Watanabe

Fukushima National College of Technology, Department of Mechanical Engineering

(2011年9月9日受理)

Masking of low frequency sound was reported before. The frequency characteristic of masking was very different from that of audible frequency. The critical bandwidth is very important to consider the audible masking. There are no papers that reported the critical bandwidth at frequencies lower than 100Hz. This paper deals with the bandwidth of masking sound and mentioned the masking characteristic in low frequency area. The following conclusions were obtained.

- (1) The critical bandwidth was not observed at 20Hz.
- (2) The masking was affected by the total sound pressure level of masking tone, not the spectrum level.
- (3) Masking values versus bandwidth of masking tone are classified into four patterns. They are very different from each other.

Key words: auditory masking, bandwidth, masking tone, low frequency sound,

1. はじめに

これまで、20Hzの帯域幅が一定の帯域雑音による低周波音の同時マスクング特性について報告した¹⁾。それによると、低周波音のマスクング特性は、可聴音のマスクング特性と異なっていて、被験者のマスクング特性の特徴によって3つのグループに分かれる。各グループの特徴は、マスク音があると試験音の最小可聴値が大きくなり、マスクング量が正になるグループ、マスク音があっても最小可聴値がほとんど変わらないか小さくなり、時にはマスクング量が負になるグループ、それに、周波数20Hzを境にその特性が変わる各グループになることが明らかになった。この中で、マスクング量が負になるのは、マスク音と試験音とを分析的に聞くことができず、二つの音が合成された音となって聞こえるため、試験音のレベルが最小可聴値以下になっても、あたかも試験音が出ているように聞こえ、マスク音があるときの試験音の最小可聴値がマスク音がないときの最小可聴値より小さくなると考えられる。このように、低周波音のマスクング特性には、個人差が大きいことが明らかになった。では、低周波音のマスクング特性にはどうしてこのような特徴が

表れるのか、疑問が残るところである。

可聴域のマスクング特性で、臨界帯域は重要な要素である。人の聴覚は、聴覚フィルタと呼ばれる帯域が連続的に重なり合う帯域通過フィルタ群を含む機能を持っている。マスク音のスペクトル密度を一定にしながら帯域幅を広げたとき、マスクング量が一定になる時の帯域幅で、この帯域幅が臨界帯域と呼ばれるものである。これまでの研究では100Hzでの臨界帯域は40Hzとの報告がある^{2,3)}。一般には、100Hz以下でも同様の臨界帯域があるとの理解であるが、100Hz以下の低周波域での臨界帯域の測定結果の報告はまだない。本研究では50Hz以下の周波数範囲で、マスク音の帯域幅とマスクング量の関係を調べ、低周波音対策の一助となるように、低周波域における聴覚特性について検討を行った。

2. マスク音がないときと異なる帯域幅のマスク音がある時の最小可聴値の測定

2.1 実験装置および実験方法

低周波音の測定に使用した実験室は、幅915mm、奥行き1826mm、高さ1867mmの大きさで表面に口径430mmのスピーカを8個取り付けてある。スピーカ8

個の内4個から純音の試験音を, その他の4個からマスク音を出した。マスク音があるときとないときの最小可聴値の測定は, 試験音のレベルを連続的に上下させる極限法で行った。試験音は純音である。

マスク音がないときの最小可聴値は, 周波数が1/3オクターブ間隔の8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50Hzの9点で測定を行った。そして, 14種類の制限された帯域幅の帯域雑音を, マスク音として用いた時の最小可聴値を測定した。試験音は20Hzの純音である。マスク音があるときの最小可聴値の測定に際しては, 測定の開始から終了まで常にマスク音を発生させた。試験に用いたマスク音の帯域幅と下限, 上限の遮断周波数をTable1に示す。マスク音は, ホワイトノイズを上限, 下限の遮断周波数を持つ減衰特性24dB/oct. のバンドパスフィルターを通して得た。臨界帯域幅の測定には, マスク音のスペクトルレベルを一定にして, マスキング量を測定する方法を用いるが, これまでの研究で, マスク音のマスキングへの影響は, マスク音の全体の音量が影響することが予想されたので, マスク音のレベルは, 80dB一定として実験を行った。

測定を行った被験者は, 聴覚に異常のない18歳から22歳までの学生41名である。

Table1 Bandwidth of masking tone used for the measurement

No. of masking tone	bandwidth (Hz)	low cut-off frequency (Hz)	high cut-off frequency (Hz)
1	4.3	17.9	22.2
2	5.5	17.3	22.8
3	7.4	16.4	23.8
4	9.1	15.7	24.8
5	10.8	15	25.8
6	13.9	13.9	27.8
7	17.2	12.6	29.8
8	20.2	11.6	31.8
9	23	10.8	33.8
10	25.7	10.1	35.8
11	28.5	9.3	37.8
12	31	8.8	39.8
13	33.5	8.3	41.8
14	36	7.8	43.8

2.2 測定結果

2.2.1 マスク音がないときの最小可聴値

41名の被験者の最小可聴値の平均値と, 標準偏差をFig.1に示す。これらの値は, これまで報告されてきた最小可聴値の平均値とほぼ同じ傾向の値であり, 標準偏差も約5.0~5.6dBで, ほぼ同じである。実験に参加した被験者の最小可聴値は, ほぼ標準的な値であると言える。

2.2.2 帯域幅の異なる帯域雑音があるときの最小可聴値とマスキング量

マスク音の帯域幅を変えたときの最小可聴値は, マスク音の帯域幅によって変動し, マスク音がないときに比べてばらつきも大きくなっている。マスク

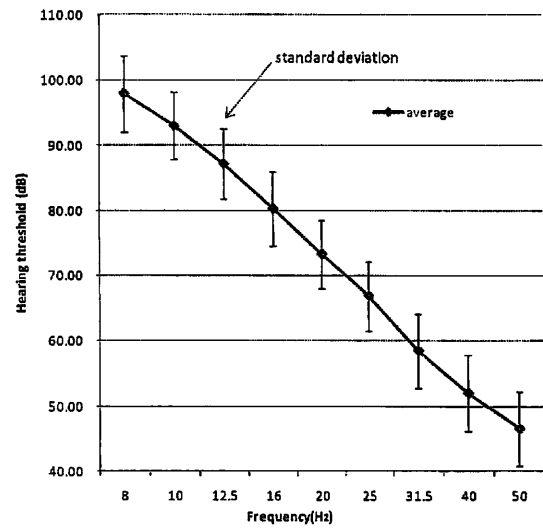


Fig.1 Hearing thresholds without masker of 41 subjects

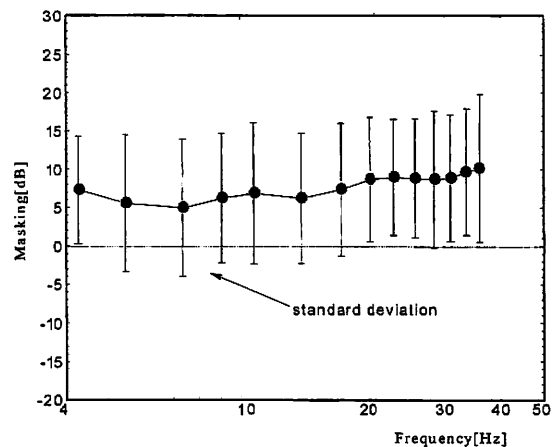


Fig.2 Mean values and standard deviations of masking data when the bandwidth of masking tones is changed

音があるときの最小可聴値から、20Hzの純音の最小可聴値を引いて、マスクング量を求める。Fig.2にマスクング量の測定結果の平均値と標準偏差を示す。この図に示すように、マスクング量の標準偏差は6.8~9.1dBで、マスク音がないときの最小可聴値の平均値に比べて大きい。また、帯域幅が広がるにつれて標準偏差は大きい傾向にある。このことは、マスク音があると人によって最小可聴値が大きく異なり、帯域幅が広がると最小可聴値の個人差が増加していることを示している。このことから、個人差の傾向に一定の違いがあるかを調べる必要がある。

3. マスクングデータの分析とマスクング特性の特徴

3.1 分析結果

マスク音の帯域幅を変えながら測定したマスクング量のデータを見てみると、マスクング特性が似ている被験者が見受けられ、その特性がいくつかのパターンに分かれることが予想された。したがって、データの類似度を調べるために、14種類の帯域幅を変量とし、41名の被験者のマスクング量をサンプルデータとしてクラスター分析を行った。クラスター間での類似度はウオード法を用い、また固体間の類似度ではユークリッド距離を用いて計算を行った。ク

ラスタ分析によって、帯域幅毎のマスクング量のパターンが似た被験者を4つのグループに分類することが出来、その結果が樹形図によって示される。クラスター分析結果の樹形図をFig.3に、各グループ毎のマスクング量の平均値をFig.4に示す。

3.2 各グループの特徴

以下に、各グループの特徴をまとめる。

グループ I は、被験者は13名で、マスクング特性は、マスク音である帯域雑音の帯域幅が約14Hzまではマスクング量がほぼ平坦で10dB程度である。14Hzから23Hzまではマスクング量がおおよそ4~5 dB/oct. の割合で増加し、23Hz以上の帯域幅では逆に6dB/oct. の割合で減少している。このグループのマスクング量の標準偏差は、多くの場合3~4dBの範囲にあり、他のグループに比べて小さく、ばらつきは小さい。帯域雑音の音圧レベルを80dB一定として実験を行っているので、スペクトル密度は帯域幅が倍になると3dB小さくなっている。それにもかかわらず、14Hzの帯域幅までマスクング量が一定なのは、マスク音のスペクトル密度が試験音の聴取に影響しているのではなく、マスク音全体が影響していると考えることができる。したがって、このグループは、14Hz帯域幅の上限遮断周波数である28Hz以下の周波数では、マスク音と試験音の識別が行われていないと思われる。

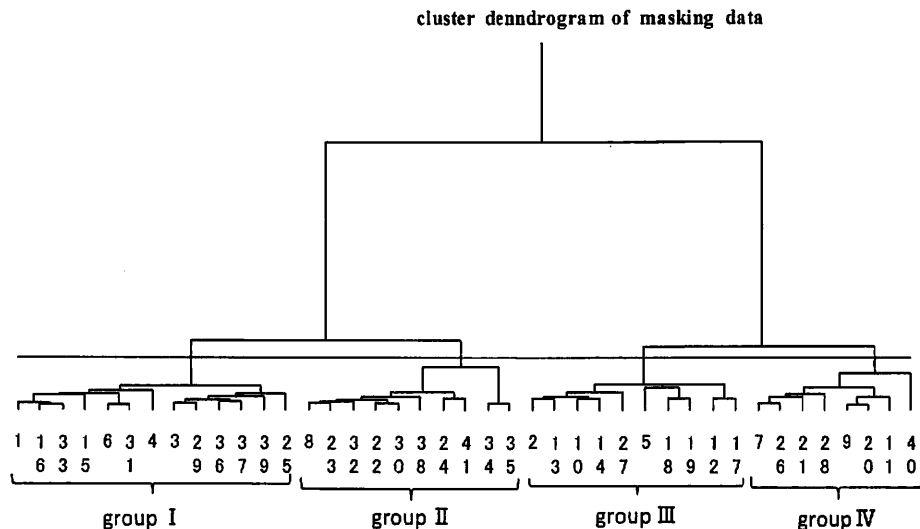


Fig.3 Cluster dendrogram by cluster analysis of masking data. The masking tone is band noise and the bandwidth of the tone is changed. I, II, III and IV are the name of group.

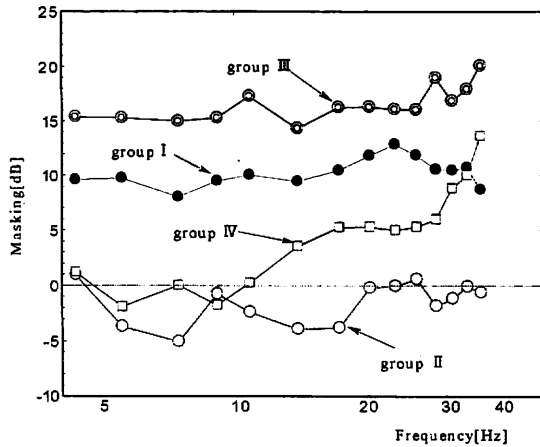


Fig.4 Masking values versus bandwidth of masking tone. Each group shows the group indicated by cluster analysis.

一方、14Hz以上23Hz以下の帯域幅では、マスキング量が増加しているの、マスク音のスペクトルが試験音の聴取に影響を及ぼしている。しかし、スペクトル密度が減少しているにもかかわらず、マスキング量が増加しているの、スペクトル密度が一定であれば、これ以上のマスキング量が予想される。

23Hz以上の帯域幅、上限遮断周波数は34Hz以上ではマスキング量が減少している。マスク音のスペクトル密度は、帯域幅が広がると小さくなっているの、マスキング量が減少しているのはスペクトル密度の影響によると説明してもよいが、マスキング量の減少はスペクトル密度の減少以上に減少している。したがって、この原因については現在のところ明確な説明が困難である。

グループIIは、被験者が10名で、帯域幅が増加してもマスキング量がほぼゼロか負で、増加の傾向が見られない。帯域幅が広がってゆくと、マスキング量は変動し変化が大きい。このグループの標準偏差が5~6dBの場合が多く、ばらつきは他のグループに比べて大きい。したがって、このグループは、測定した周波数帯域全域で試験音とマスク音とを区別して認識することが出来ないと思われる。

グループIIIは、被験者が10名で、帯域幅が26Hzまでは、マスキング量が一定で、26Hz以上の帯域幅ではマスキング量が約6dB/oct.の割合で増加している。このグループは、26Hzの帯域幅の上限遮断周

波数である36Hzまでは、マスク音と試験音が一体となって聞こえていると思われる。このグループの標準偏差は小さく3~5dBの場合が多い。

グループIVは、被験者が8名で、帯域幅が11Hzまではマスキング量がゼロ付近でほぼ平坦であるが、それ以上の帯域幅ではマスキング量が約7~10 dB/oct.の割合で増加している。帯域幅が11Hzの場合、上限遮断周波数が26Hzであるの、このグループでは、マスク音が26Hz以上の周波数成分を含むと20Hzの試験音の聴取に影響を及ぼし、マスキング量が生ずる。このグループは、帯域幅が狭いときは標準偏差が3~5dBでばらつきは小さいが、帯域幅が広がると標準偏差が8~9dBとばらつきが大きくなる。

このように、帯域幅を変えながらマスキング量を測定すると、被験者毎にかなり異なったマスキング特性を示している。20Hzの周波数では、可聴域の臨界帯域のような帯域幅は観測されなかった。しかし、全体の音圧レベルを一定にして、帯域幅を広げてゆくと、多くの被験者でマスキング量がある帯域幅まで一定で、それ以上の帯域幅ではマスキング量が増加する。増加する帯域幅は、被験者のグループで異なっている。

ある帯域幅を持つマスク音と純音の試験音の知覚状況を、模式的に表すとFig5のようになる。低周波音の閾値曲線は、20Hz付近ではおおよそ-20dB/oct.で急峻である。この閾値曲線に試験音のレベルか、マスク音の帯域幅の一部がかかると音を知覚すると言われる。図の実線の閾値曲線では、マスク音よりも試験音が先に知覚された場合で、破線の状況では試験音よりも先にマスク音が知覚された状況である。帯域幅を広げてゆくと、試験音を先に知覚するためには、試験音のレベルを上げないと知覚されない。したがって、マスキング量が増加する。しかし、この実験からわかったように、低周波音ではマスク音の帯域幅が増加しても、全体の音圧レベルが一定であれば試験音の知覚レベルはある帯域幅まで変わらない。つまり、マスキング量が一定である。その周波数は被験者により変わる。

3.3 帯域幅を一定にしたマスキング特性の特徴と帯域幅を変えたときのマスキング特性の特徴と各グループ相互の関係

既に報告したように、中心周波数20Hzの帯域幅

音の帯域幅を3.5Hz一定にして、8Hz～50Hzまでの試験音のマスクング量を、同じ被験者で測定して求めたマスクング特性は、グループ毎に特徴のあるマスクング特性を示し、3つのグループに別れることがわかった。そのクラスター分析結果をFig.6に、3つのグループのマスクング特性をFig.7に示す。グループAは、マスクング量が正で、周波数の増加に伴ってマスクング量も漸増している。

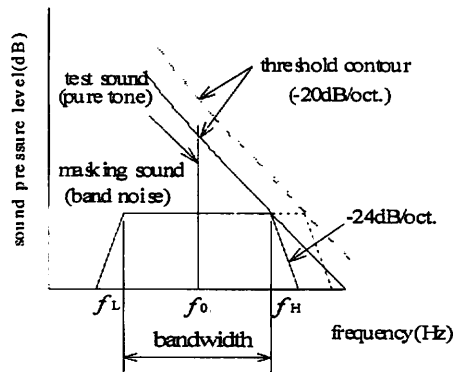


Fig.5 Sound perception of test sound and masking sound

グループBは、全周波数域でマスクング量が負である。グループCは、20Hz以上ではマスクング量が急に減少している。20Hzはマスク音の中心周波数である。グループ毎にこのような特徴のある周波数特性

を示している。同じ被験者が両方の実験に参加したので、各グループに属する被験者をまとめるとその特徴がわかる。Table2に2種類の実験によって分類された、各グループの被験者を示す。

グループAに属する被験者は、グループI～IVのいずれのグループにも属しているが、主にグループIとグループIIIに属している数が多い。グループAのマスクング特性は、正のマスクング量で試験音の周波数の増加につれてマスクング量も増加している。グループIとIIIのマスクング特性は、マスクング量は正で、マスク音の帯域幅を広げてゆくと約10Hzまではほぼ平坦である。

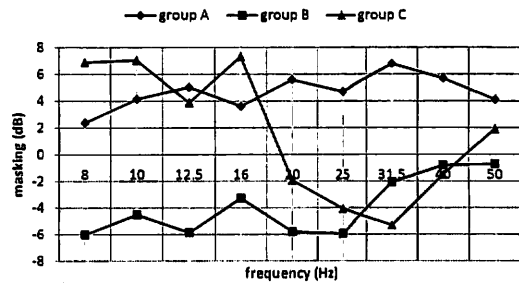


Fig.7 Masking audiogram of each group by band noise. The values are the average of masking of each group. Making stimulus is band noise through a band pass filter.

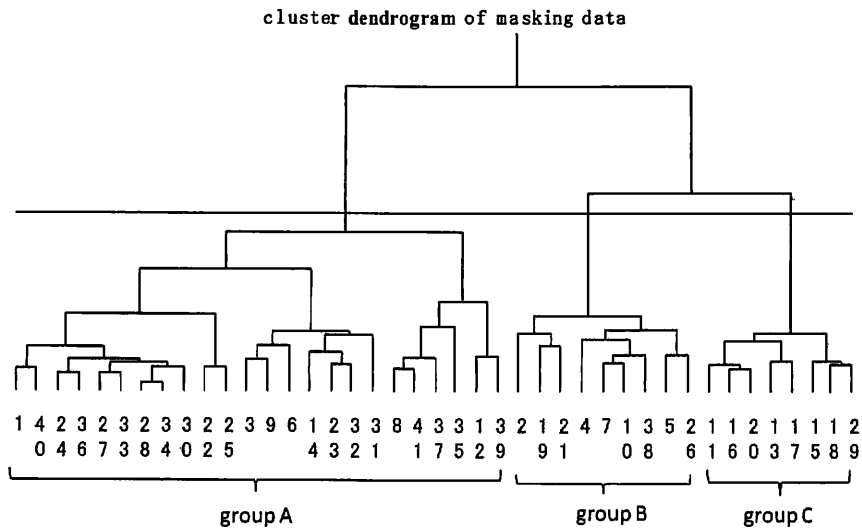


Fig.6 Cluster dendrogram by cluster analysis of masking data. The masking tone is band noise whose center frequency is 20Hz. Numerals in the bottom of the graph indicate subject numbers. A, B and C are the name of group.

グループBに属する被験者は、グループIIとIVに属している数が多い。グループBのマスキング特性は、全域の周波数でマスキング量が負になっている。グループIIとIVのマスキング特性も、帯域幅が9.1Hzまではほぼ負になっているので、このグループに属する被験者のマスキング特性は、実験方法が異なるが同じ特性を持っていると言える。しかし、グループIVに属する被験者は、帯域幅を13.9Hz以上に広げると急にマスキング量が増加する。これらの被験者は、マスク音の周波数によってはマスキング量が増加し、低周波音の聞こえ方に他の被験者とは明確な違いが表れている。

グループCに属する被験者は、グループI、II、IVに別れる。グループCのマスキング特性は、試験音の周波数が16Hz以下ではマスキング量が正で、20Hz以上ではマスキング量が負になる。このような特徴のグループに属する被験者も、帯域幅を変えた時のマスキング特性は、グループI、II、IVの特性を示す。しかし、グループIIIの特性を示す被験者はいない。

マスク音の帯域幅を変えながら求めたマスキング特性では、特徴のある四つのグループに分けることが出来たが、同じグループに属しても被験者によっては低周波音の聴覚特性は、同じではない。

Table2 Subject numbers which belong to the group by cluster analysis of two kinds of masking experiment.

		Groups by the cluster analysis (the masker is 20Hz band noise of 70dB and the frequency of test tone is changed)		
		A	B	C
Groups by the cluster analysis (the bandwidth of masker is changed)	I	1,3,6,25,31,33, 36,37,39	4	15,16,29
	II	12,14,27	2,5,10,19	13,17,18
	III	8,22,23,24,30, 32,34,35,41	38	
	IV	9,28,40	7,21,26	11,20

試験音の周波数を変えながら求めたマスキング特性では、同じグループに属する被験者でも、異

なった特性が見られる。しかし、2種類の実験による被験者の分類から得られた結果は、低周波音の被験者毎の聞こえ方の特徴が大まかに捉えられた。

低周波音に対する被害の訴えは、被験者毎にかなり異なっている。低周波音のマスキング実験からもその一端がうかがえた。

4 まとめ

マスク音の帯域幅を変えた時、20Hzの試験音の聴取実験結果から、次のようなことが明らかになった。

- (1) 20Hzの低周波域では臨界帯域のような帯域幅は見られない。
- (2) 試験音へのマスク音の影響は、マスク音のスペクトルレベルではなくマスク音全体の音圧レベルが影響する。
- (3) 帯域幅を変えたときのマスキング特性は、被験者により大きく異なり、その特性パターンの違いにより被験者を4つのグループに分類することができる。
- (4) 帯域幅を変えて得られた実験結果によるグループと、帯域幅を一定にし試験音の周波数を変えて得られたグループとは一定の関係はみられない。

文 献

- 1) 渡辺敏夫, 山田伸志: “低周波音のマスキング特性と心理反応の相互関係”, 騒音制御, Vol. 33, No. 3, pp. 245-256 (2009)
- 2) E. Zwicker: “Subdivision of the audible frequency range into critical bands”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 33, No. 2, p248 (1961)
- 3) Brian C. J. Moore, Brian R. Glasberg: “Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation pattern”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74, No. 3, pp. 750-753 (1983)