

氏 名	小 澤 賢 司
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 2 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 63 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻 前期課程修了
学 位 論 文 題 目	聴覚系における音色知覚過程に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 曾根 敏夫 東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 中村 僊良 東北大学教授 加藤孝義(情報) 東北大学助教授 鈴木 陽一

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

今日まで明らかにされていない音の物理特性と音色との対応関係に関連して、本論文は、音色に対応する音のスペクトル表現を考察することにより、音色知覚過程の一端を明らかにすることを目的として行った研究の成果をまとめたものである。その成果は、音響機器の設計に直接応用できるだけでなく、音声認識装置に適用可能な信号処理法や、感音系難聴に有効な補聴方式の基礎となり得るものである。

本論文では、定常音の音色に直接に対応するのは、音の周波数スペクトルそのものではなく、それが聴覚系の特性により変形された主観スペクトルであるという基本仮説を設けた。主観スペクトルの形成には、等ラウドネス特性、マスキング（成分相互妨害）現象など、聴覚系の有する全ての特性が関与していると考えられる。本論文では、複合音を構成する成分音の間に生ずるマスキングが、主観スペクトルの形成に果たす役割が大きいと考え、そのマスキングにより減少した成分音のマスクラウドネスについての周波数特性を、マスクトスペクトルと定義し、主観スペクトルを近似するものと仮定した。この仮説の妥当性を検証するために、第 2 章、第 3 章ではマスクトスペクトルの形成過程を、第 4 章から第 6 章では音色とマスクトスペクトルとの対応を検討した。

第 2 章 純音による純音のマスキング特性

複合音を構成する成分音の間に生ずるマスキング特性を把握するために、純音にマスクされた純

音の最小可聴値に着目し、まず、そのマスキングを定量的に測定するための実験条件について考察した。その結果、マスキ（マスクされる音）の定常部の継続時間は200ms以上が必要であり、また、立上り・減衰時間は、200ms以下が適当であることが示された。その背景にある心理音響学的現象を考察した上で、これらの刺激音の時間包絡特性を、本論文における実験条件のガイドラインに設定した。

次に、マスカ（マスクする音）に対するマスキの相対位相が、その最小可聴値に及ぼす影響について検討した。ここでは、マスカの1.5倍および2.5倍の周波数におけるマスキの最小可聴値に位相依存性があることを明らかにした。その原因は、聴神経における成分音相互の発火パターンが位相により変化することによるものと考え、計算機シミュレーションを通じて説明した。

一方、マスキの周波数がマスカの周波数の整数倍である場合には、マスカの耳内倍音（聴覚系の非線形性により生じる耳内歪成分）がマスキと同一周波数になるために、その最小可聴値に位相依存性が生ずることが知られていた。本章では、その位相依存性から、耳内歪成分の振幅を推定する手法を検討した。

第3章 純音にマスクされた純音のラウドネス関数

前章で観察したマスキングが、複合音を構成する成分音のラウドネスに及ぼす影響を把握するために、純音により部分マスクされた純音のラウドネス関数（音の物理的強さと主観的大きさとの関係を記述する関数）について考察した。マスカ／マスキの周波数の組合せは、500／1000Hz、1000／1600Hz、および2000／4000Hzの3通りとした。それぞれの場合について、純音に部分マスクされた純音（マスキ）と、マスクされていない純音（比較音）との間でラウドネスマッチング実験を行った結果、マスキングによる最小可聴値の上昇に伴うラウドネスの減少、および補充現象が観測された。さらに、マスキのレベルが最小可聴値より40dB程度高い範囲では、マスキングを受けているにもかかわらず、マスキのラウドネスが増加する現象が見られた。このラウドネスの増加現象は、マスカを純音から狭帯域雑音に代えた場合、あるいは広帯域な背景雑音の存在下では消失したことから、マスカが純音である場合に特有の現象であることが示された。また、ここで得た測定結果は、過去に提案された、雑音に部分マスクされた純音のラウドネス関数では説明できず、マスカが純音である場合には関数の形が異なる可能性を示唆するものである。その原因を考察した上で、実験結果の特徴を表現できるように、過去に提案されたラウドネス関数を拡張した。

第4章 少数成分複合音の音色とマスクトスペクトルの関係

前章までに得た知見に基づき、純音間（成分音間）に生ずるマスキングが主観スペクトルの形成に支配的であると仮定し、マスクトスペクトルの概念を導入した。

次に、2成分音を対象として、音色とマスクトスペクトルの関係を考察した。まず、500／1000Hz、および2000／4000Hzの2成分音について、高周波数成分の位相の変化に伴う音色の変化に着目した。その位相が等間隔に異なる2成分刺激音は同等に音色が異なり、音色知覚空間における刺激音の布置は円状となることが過去に知られていた。しかし、ここでは、高周波数成分の音圧レベ

ルが最小可聴値に近い場合、あるいは成分周波数が高い場合には、音色知覚空間が一次元的になることを示した(図1)。これは、第2章で示した、耳内歪成分の存在による最小可聴値の変化に関するものと解釈される。また、その次元における音色の変化は、高周波数成分のマスキングラウドネスにより説明できることを示した。

次に、2成分音における成分音の振幅比と音色との関係に着目した。ここでは、刺激音の聴取レベルが異なる場合、成分音の物理的な振幅比が一定であることが、音色が類似するための条件ではないことを聴取実験により示した。そこで、第3章で得たラウドネス関数を用いて算出した成分音のマスキングラウドネスをパラメタとしたところ、音色知覚空間の布置をよく表現できた。

さらに、3および4成分複合音について、外来雑音の存在による音色の変化は、成分音のマスキングラウドネスの比を原音と等しくすることによって最も良く補償されることが示された。

以上の3種の実験結果から、少数成分複合音について、音色がマスキングスペクトルに対応するという仮説の妥当性が示された。

第5章 多成分複合音の音色とマスキングスペクトルの関係

前章で導入した概念の拡張として、成分音ごとのマスキングラウドネスを求めることにより、多成分複合音のマスキングスペクトルを算出する方法を提案した。そのために、蝸牛神経の応答を近似したフィルタ群により、純音のマスキング特性を模擬した。

次に、スペクトル包絡が異なる広帯域複合音について、音色知覚空間を導出した。その空間における刺激音間の距離と、上述の手法により算出した刺激音のマスキングスペクトルの距離との対応を検討した。その結果、成分音ごとのマスキングラウドネスの特性としてマスキングスペクトルを表現することは、妥当ではないことが明らかとなった。その原因として、複合音の成分音のうち、単独に聞き分けられる低次部分音と、分離聴取が不可能な高次部分音とを、同等に処理していたことが挙げられた。

そこで、複合音の低次および高次部分音が、音色に及ぼす寄与を検討した。その結果、低次部分音、すなわち各臨界帯域に1個の成分が含まれるような周波数領域では、成分音の音圧レベルの変化による音色の変化が顕著であること、また、高次部分音のみから構成される複合音についての音色弁別域の測定結果から、広帯域音の音色知覚過程においては、臨界帯域に代表される聴覚系のフィルタリング過程まで考慮する必要のあることが示された。

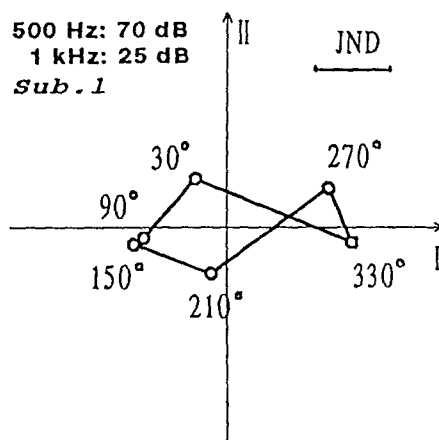


図1 成分音の相対位相だけが異なる2成分複合音の音色知覚空間。150°と330°の条件は、それぞれ1kHz成分の最小可聴値が最小および最大となる条件に対応する。図中のJNDはJust Noticeable Difference(丁度可知差異)を表す。

第6章 広帯域雑音の音色とマスクトスペクトルの関係

前章で課題として残された臨界帯域の概念を考慮して、広帯域雑音のマスクトスペクトルを算出する方法を提案した。そのために、ラウドネス評価の国際規格（ISO 532B）に採用されている図表を、近似的なマスクングパターンとして利用した。

次に、スペクトル包絡が異なる広帯域雑音について、三次元の音色知覚空間を導出し、その空間の軸が、主観的には「鋭さ」、「広がり」、「粗さ」という感覚に対応することを示した。さらに、その空間における刺激音の布置を、軸の持つ主観的意味に基づいて、マスクトスペクトルのパラメタにより表現すること

を試みた。そのために、マスクトスペクトルを、「主観的周波数軸上のマスクトラウドネスの分布」と考え、「鋭さ」には分布の重心を、「広がり」には第10Barkのまわりの2次モーメントを対応させた。また、「粗さ」には、マスクトスペクトルの包絡線の平滑度を対応させた。これにより、音色知覚空間の布置をよく説明することができた。以上より、マスクトスペクトルの形状が音色に密接に関係していることが明らかとなった。

最後に、本研究の基本概念の工学的応用として、広帯域音の聴取レベルの低減に伴う音色の変化を補償するため、オーディオ機器に内装されているラウドネス回路の特性設計を取り上げた。そのために、基準音と、聴取レベルおよび周波数特性をさまざまに変化させたテスト音を用いて比較聴取実験を行い、音色が基準音に最も近くなるための最適補償特性を求めた。その結果は、従来のラウドネス回路の特性とは大きく異なり、マスクトスペクトルの形状を保存する特性にほぼ一致するものであった（図2）。このことから、音色とマスクトスペクトルが密接に関係していることが明らかとなり、本論文の基本概念が工学的に有益であることが示された。

第7章 結論

本研究において得た知見をまとめ、研究の更なる発展への指針を提起した。

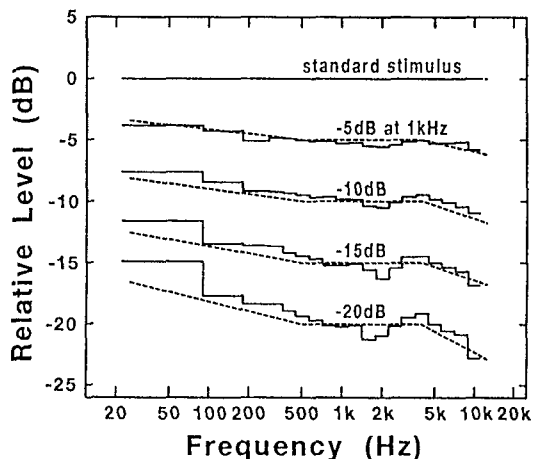


図2 基準音をピンクノイズとした場合のラウドネス回路の特性。実線は、基準音のマスクトスペクトルの形状を保存する減衰特性。破線は、聴取実験により導出した最適補償特性。

審 査 結 果 の 要 旨

音響伝送系の最適設計や、高度な補聴処理方式の開発のためには、人間における音色知覚過程を解明することが重要な課題であるが、これまでのところ、音の音色とその物理的特性との対応関係は明らかにされていない。本論文は、音色に直接対応するのは音の物理的スペクトルそのものではなく、それが聴覚系の特性により変形された主観スペクトルであるとの観点から、人間における音色知覚過程を考察した研究の成果をとりまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は序論である。第2章では、主観スペクトルの形成に重要と考えられる成分音相互のマスクング現象について考察し、ある実験条件の下では、マスク（マスクする音）とマスクキー（マスクされる音）の位相関係によりマスクング量が増加することを明らかにしている。

第3章では、マスクング現象が成分音のラウドネスに及ぼす影響を検討するために、純音によって部分的にマスクされた純音のラウドネス関数について考察している。本章における実験の結果、マスクが純音の場合のラウドネス関数は、広帯域雑音にマスクされた純音の場合と異なり、聴神経における飽和発火率を考慮に入れた関数で良く近似できることを示している。

第4章では、前章までの検討を踏まえて、成分音相互のマスクングにより減少した成分音のラウドネスの周波数特性をマスクトスペクトルと定義し、これを主観スペクトルを近似するものとして導入している。また、2～4成分からなる少数成分複合音の音色が、物理的スペクトルよりもマスクトスペクトルとよく対応することを、3種の聴取実験結果に基づき示している。これらは、本論文で設けた主観スペクトルの仮説が合理的であることを示すものであり、注目すべき知見である。

第5章では、前章の概念を拡張し、多成分広帯域複合音について、マスクトスペクトルを推定する手法を提案している。また、その推定過程には、聴覚系における帯域フィルタ処理を反映させる必要があることを明らかにしており、これは、臨界帯域に代表される帯域フィルタ処理機構が、音色知覚過程においても主要な役割を果たすことを明らかにしたものと、高く評価される。

第6章では、前章までの議論を受けて、臨界帯域の概念を採り入れた、より一般的な広帯域音のマスクトスペクトルの推定方法を提案し、その方法によって求めたマスクトスペクトルが、広帯域音の音色と良く対応することを示している。さらに、音の聴取音圧レベルの変化に対して、マスクトスペクトルの形状を保存するという条件に基づいて、オーディオ再生系用のラウドネスコントロール回路を設計・試作し、これを用いた再生音が、人間の感覚と非常に良く対応することを明らかにしている。これは、本論文の基本となる概念が工学的に有用であることを示しており、実用上重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は、音色が音の主観スペクトルに基づいて知覚されるという仮説に基づいて、人間における音色の知覚過程を考察し、それが妥当であることを実証すると共に、その概念が音響機器の特性設計に応用できることを示したもので、情報工学および音響工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。