

氏 名	播摩 敏雄
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 27 年 3 月 20 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第 4 条第 2 項
研 究 科 専 攻	秋田県立大学大学院システム科学技術研究科 博士後期課程総合システム科学専攻
学 位 論 文 題 目	2 音源により生じる音像と先行音効果の関係に関する研究
申 請 承 認 者	教 授 <u>佐藤 宗純</u>
論 文 審 査 委 員	主査 教 授 <u>佐藤 宗純</u>
	副査 教 授 <u>鈴木陽一(東北大学)</u> 教 授 <u>松本 真一</u>
	准教授 <u>高根 昭一</u> 准教授 <u> </u>

※本研究科以外に所属する場合はその所属を括弧書きすること

論文内容要旨 ※(20 ポイント)

人間は、耳に入った音から、その音がどこから発せられたのか、すなわち音源の位置を感じる事ができる。人間が音から感じる音源は、必ずしも実際に存在する音源と一致するとは限らず、視覚における映像になぞらえて音像と呼ばれ、音像を感じる能力は音像定位と呼ばれる。音源が一カ所のとき、周りに音を反射するものが何もなければ、その音がそれぞれの耳に届いたときの時間差やレベル差が音像定位の主な手がかりとなる。また、音源から両耳に届く音のもつ周波数特性上の特徴が手がかりとなり得る。このように、音源が一個の場合は、その方向や距離を感じるための物理的な手がかりは明確である。

これに対して、音源が2個以上となると、それらによって生じる音像は1音源の場合と比べ複雑となる。その中で最も単純な、聴取者から等距離にある2音源から同じ音が発せられたときでも、音源の位置、音源信号の種類および2音源間の時間差やレベル差などの条件により、物理的に音が放射されている2音源の位置から音が聴こえるようには感じるとは限らず、様々な位置から音が聴こえるように感じ得る。2音源のレベル差だけを変化させた場合、2音源の間に一つの音像が生じる。この現象は、2チャンネルのステレオにおいて、再生された各楽器の音などを2音源間の任意の場所から聴こえさせるために用いら

れる。一方、2音源の間に時間差が存在するとき、その値によって、レベル差がある場合と異なる知覚現象が生じる。2音源の間の時間差が極めて小さい(1ms 未満)場合、2音源によって生じる音像は、レベル差がある場合と同様に2音源の間となる。この現象は加法定位(Summing Localization)と呼ばれる。これに対して、時間差が十分に大きい(数十 ms 以上)とき、2音源からの音は、それぞれの音源の位置から、その時間差に応じて別々に聞こえる。これはエコー(Echo)と呼ばれる。加法定位とエコーの中間に相当する、1ms 程度から数十 ms の間の時間差が2音源間に存在するとき、生じる音像は、先行して音が放射された音源の方向に音像が生じ、後続して音が放射された音源から音が放射されたことはほとんど感じられない。この現象は先行音効果と呼ばれる。以上から、加法定位と先行音効果では、物理的な現象と聴取者の知覚が異なることになる。特に先行音効果は、後続して聴取者に到達する音がほとんど知覚されないことから、音像定位において特徴的な現象として扱われ、70年以上前に発見されて以来、様々な研究が行われてきた。特に、先行音効果からエコーへと知覚が変化する部分については、2音源間のレベル差や音源信号の種類などの影響が詳細に調べられてきた。これは、先行音効果とエコーの知覚は明確に異なること、すなわち音像が一つと感じられていたものが2つになるため、実験的に調べるのが比較的容易であったことが理由として挙げられる。

一方、加法定位と先行音効果との間の知覚の変化については、いずれも音像としては一つであることから、知覚上の明確な評価が困難であるといえる。先行音効果に関する初期の研究では、被験者の正面を境界として左右に分け、ある時間差を与えて2音源から発せられた音に対して左右どちらかを回答させて、その回答の割合が時間差に対してどのように変化するから、先行音効果を考察したものが多い。今日においても、聴取者が知覚する音像の変化を定量的に評価しているものが少ない。そのため、たとえば先行音効果を積極的に利用した拡声システムを設計するとき、室内で発せられた音と、そのレベルの不足を補うためにある時間差およびレベル差で拡声用音源から放射した音によって、聴取者の知覚する音像の方向を従来の研究から推定することは依然として困難である。2音源による音像が、その間の時間差によって、加法定位、先行音効果およびエコーと変化するときにどのように移動するのかを調べることによって、現状でも曖昧である加法定位～先行音効果への変化の時間差の境界を明確にし、その境界における音像の位置を調べることにより、加法定位および先行音効果の知覚を分ける音像方向の境界を導くことができる。

以上の背景をふまえ、本研究では、2音源によって生じる音像が、音源の位置、音源信号の種類およ

び2音源間の時間差やレベル差などの条件によってどのように変化するかを一貫して調べ、その先行音効果との関係を明らかにすることを目的とする。

2音源によって生じる音像に影響を与える要因として、2音源間の時間差、レベル差、音源信号の種類、視覚の影響を取り上げそれらが音像方向の知覚にどのように影響を与えるかを検討した。

本論文は5章で構成される。

第1章は、2音源によって生じる音像に関する研究を特に先行音効果に着目して概観しながら本研究の背景を述べ、従来の研究の問題点を指摘したうえで本研究の目的を述べる。

第2章は、2音源によって生じる音像の方向が、加法定位および先行音効果とどのような関係にあるかを調べるために、2種類の音源配置で短い継続時間のピンクノイズバースト音(10ms)および長い継続時間のピンクノイズ(600ms)を音源信号として、音像の方向を判断させる実験(絶対方向判断)と視認できる音源のどこに音像が最も近いかを判断させる実験(3肢強制選択)を共通の被験者で行って比較した。従来の研究では、先行音効果とエコーの変化が生じる境界については詳細に調べられているものの、加法定位と先行音効果の変化が生じる境界については、ほとんど調べられていなかったため、本章ではこの部分の境界を詳細に調べた。その際、先行音効果とエコーの知覚の変化を与える2音源間の時間差がエコー検知限(Echo Threshold, ET)と呼ばれることから、本論文では、加法定位から先行音効果に知覚が変化するときの2音源間の時間差を SLT(Summing Localization Threshold)として新たに定義した。実験を行った音源の配置は、被験者の正面を 0° として、 $\pm 30^{\circ}$ および 0° 、 60° の2種類、音源間のレベル差として、先行する音源のレベルを基準として後続する音源のレベルを0, +3, +6dB の3種類に設定した。その結果、2種類の音源配置および全てのレベル差の条件のもとで、時間差が0から大きくなるのに伴い知覚する音像は加法定位である両音源の中間から先行音方向に徐々に移動することが分かった。また、3肢強制選択の実験において、先行する音源の方向を有意に高い確率で回答したときの時間差の絶対値の最小値で先行音効果の生起の境界(時間的境界)を上述の SLT とみなして評価した。SLT の大きさは、レベル差が0dB のときは0.5ms 程度、+3dB では0.7ms 程度、+6dB では1.2ms 程度となることが分かった。これらの値は、従来の研究による値に比べ若干小さめであるものの、ほぼ同様の結果であるといえる。さらに、SLT における音像の方向、すなわち、先行音効果が生じたとみなせるときの音像方向を算出した結果、レベル差が+6dB の条件では被験者の回答する音像の方向のばらつきが大きく、境界を算出することが困難であったものの、レベル差が0のときは2種類の音源配置において 15° 程度中心寄りの

付近に境界のあることが明らかとなった。すなわち、2音源の方向の角度差に対して内側に1/4となるところにその境界があるといえる。ただし、この章で用いた刺激音は短い継続時間のピンクノイズバースト音(10ms)および長い継続時間のピンクノイズ(600ms)の2種類であり、刺激音の性質が音像定位にどのような影響を与えるのかは不明確であった。そのため、第3章において、刺激音が2音源により生じる音像に及ぼす影響を調べることにした。

第3章では、第2章における知見を基礎として、刺激音の種類とレベル差が音像の知覚に及ぼす影響について調べた。ただし、加法定位と先行音効果の知覚の変化だけではなく、エコーへの知覚の変化も含めた。天気概況の朗読音声(女声)、サキソフォンおよびギターのソロ演奏、ピンクノイズのバースト音の4種類の刺激音を用い、2音源間の時間差、レベル差を変化させたときの音像の変化を調べた。第2章の結果から、レベル差が0のとき、音像が2音源間の方向の角度差に対して1/4内側となったところが加法定位と先行音効果を分ける方向的境界であるとみなし、音像がその境界となるときの時間差、すなわち SLT を求めた。また、先行音効果からエコーに変化する時間差の境界、すなわち ET も求めた。その結果、ET については、音声では約10ms、ギターでは約11ms、サキソフォンでは約9ms、ピンクノイズバーストでは約6ms と若干変化することがわかった。これらは、従来の研究の知見を支持するものである。一方、SLT については、どの刺激音についても0.8ms 付近で大きく変化しないことが新たにわかった。レベル差の影響については、後続する音が先行するものより9dB 大きくなると、上記の SLT と ET の間の時間差でも先行する音源の方向に音像は生じず、後続する音源方向となることが分かった。また、レベル差が0dB から6dB と後続音側が高くなるにつれて、先行音効果の生じる時間差の範囲が徐々に狭くなる傾向がみられた。

第2、3章の実験を通じ、音源の配置および音源信号の性質が、2音源により生じる音像に与える影響を調べたが、拡声装置の利用などを考えると、音源となる話者や演奏者、拡声用のスピーカなどが視覚的に確認できることが多い。そのことを考えると、視覚から得られる情報が2音源によって生じる音像に与える影響を検討する必要性は高いといえる。そのため、第4章では視覚情報が2音源により生じる音像に与える影響について、実験的に検討する。

第4章では刺激音として第3章で使用した音声(女声)およびギターの演奏音に、音声(男声)、小太鼓を叩く音を加え、4種類の聴覚刺激を用いた。また、音声の発声時や楽器の演奏時の映像を同時に収録し、被験者の前方面面に設置したスクリーンにプロジェクターを用い等身大の大きさで投影した。聴覚刺激

のみを提示したときと聴覚刺激と視覚刺激を同時に提示したときの音像の知覚方向を、2音源間の時間差との関係として調べて比較を行った。また、第2章の結果を踏まえ、第3章において用いたものと同様の方法で SLT を決定した。その結果、どの刺激音、どの音源配置においても、視覚刺激を提示することで SLT が小さくなる傾向のあることがほとんどの被験者で明らかとなった。視覚刺激の提示方向は先行して音の放射される音源方向と同じであったため、視覚刺激の影響で先行音方向への音像の移動がより短い時間差で生じ、視覚刺激と音像の一致という意味では視聴覚相互作用として知られる腹話術効果が生じた可能性がある。ET については、ほとんどの被験者について視覚刺激の提示により大きくなる傾向のあることがわかった。個人差はあるものの、視覚刺激の提示により、SLT は小さく、ET は大きくなることから、先行音源と同方向に提示される視覚刺激は、先行音側への定位を促進する傾向にあるといえる。

第5章は結論である。第2章の検討により、2音源間の時間差に伴い音像は両音源の中間から先行して音を放射する音源の方向に徐々に移動すること、先行音効果が生じたとみなせるときの音像方向は2音源の方向の差に対して1/4程度内側となることが分かった。第3章では、2音源による音像の変化に与える刺激音の影響が特に ET で現れることが分かり、従来の研究の値に比べて小さなレベル差が先行音効果の生起に影響を与えることが示唆された。また、第4章の検討により、視覚刺激は、SLT を小さく、ET を大きくする傾向のあることがわかった。

これらの検討をまとめると、先行音効果の生起は音像の知覚方向として2音源間の開き角度の範囲で1/4に分割し先行音側に定位した音像を先行音効果とみなすと定義した。開き角度が60° の場合は15° 程度内側を基準にするべきこと、音源間のレベル差については、後続音を6dB 程度以上大きくすると先行音効果は生じ難くなる可能性があること、音源信号の性質は SLT にはほとんど影響を与えないこと、視覚の影響を考慮する必要があることが明らかとなった。これらは、2音源により生じる音像が先行音効果をはじめとした知覚現象と関係づけることで明らかとなったことであり、先行音効果を利用した、音像定位を制御できる新たな拡声システムの構築などにおける基礎的資料となることが期待される。

論文提出者氏名	播摩 敏雄
論文題目	2音源により生じる音像と先行音効果の関係に関する研究
申請承認者	佐藤 宗純
論文審査委員	主査 教授 <u>佐藤 宗純</u> 副査 教授 <u>鈴木 陽一(東北大学)</u> 教授 <u>松本 真一</u> 准教授 <u>高根 昭一</u> 准教授 _____ ※本研究科以外に所属する場合はその所属を括弧書きすること

論文審査結果要旨

位置の異なる2音源から1ms～数十ms程度の時間差で発せられる音は、聴取者に対して先に届いた音源の方向に音像が生じることが知られており、先行音効果と呼ばれる。2音源間の時間差が前述の範囲より小さくなると2音源の間に音像が生じる加法定位と呼ばれる現象が生じ、逆に時間差が十分に大きくなると2音源のそれぞれの位置に個別の音像が知覚されるエコーと呼ばれる現象が生じる。これらの現象は古くから研究されているが、先行音効果からエコーへと知覚が変化する時間差の境界、すなわちエコー検知限(Echo Threshold, ET)と呼ばれる部分の検討が多く、加法定位と先行音効果を分ける時間差の境界については明確に定義されていなかった。また、その時間差の近辺で音像がどのように変化するのかも明白ではなかった。そのため、本論文では、2音源間に設けた時間差によって知覚される音像がどのように変化するか、およびその変化が音の種類やレベル差などによってどのような影響を受けるかを、広い時間差の範囲にわたる心理物理実験に基づいた検討を通じて明らかにすることを目的とした。本論文は序論(第1章)と結論(第5章)を含めて全5章からなる。

第2章では、時間差を設けた2音源による音像が、加法定位から先行音効果に移行するときの時間差の境界を求め、その境界における音像の方向を明らかにするための検討を行った。この時間差の境界を、本論文ではSLT(Summing Localization Threshold)と呼び、聴取実験を通じて求めた。また、SLTにおける音像の方向を得た。その結果、2音源間の時間差が0から2msに増加するにしたがい音像が2音源の中間から先行音方向へ徐々に移動することが明らかとなった。また、音源間のレベル差がないとき、SLTにおける音像は2音源の方向差(開き角)に対してその1/4だけ内側となることがわかった。

第3章では、刺激音の種類や2音源間のレベル差といった2音源の発する音の性質によってSLTとETが受ける影響を検討した。その結果、ETは刺激音の種類やレベル差で大きく変化する一方で、SLTは刺激音の種類や2音源間の6dB程度のレベル差ではほとんど変化しないことが明らかとなった。

日常生活では音の聞こえる方向を知る際に聴覚とともに視覚もはたらかせることをふまえ、第4章では、聴覚刺激と同期した視覚刺激の有無が2音源による音像に及ぼす影響をSLT, ETの両面で検討した。その結果、視覚刺激の存在でSLTはより小さく、ETはより大きくなる傾向がそれぞれ明らかとなった。

これらのことから、本論文は先行音効果に関する聴覚心理の研究として学術的価値が高く、その得られた知見の有用性からみて、音像の方向を制御可能な拡声システムや音による避難誘導システムなどの先行音効果の工学的応用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。