

博士学位論文審査要旨

2022年1月18日

論文題目 : Cortical mechanisms underlying the subjective perception of spectrally degraded speech

(周波数情報が劣化した音声の主観的な知覚を支える皮質メカニズム)

学位申請者: 村井 翔太

審査委員:

主査: 生命医科学研究科 教授 小林 耕太

副査: 生命医科学研究科 教授 飛龍 志津子

副査: 東京大学 大学院総合文化研究科 助教 橋 亮輔

要旨:

音声知覚は日常生活のコミュニケーションにおいて最も重要な側面の一つである。しかし、難聴の発現によって、聴覚中枢に伝達される音声信号は音響情報が欠損したものとなる。また、人工内耳をはじめとする聴覚補填器具の装用後も、聴覚入力は健聴者と比較して劣化しており、装用後にはリハビリテーションが必要となる。本論文では、このような音響情報の欠損を補い、音声の知覚を成立させるための神経基盤の解明を目指した。特に、聴取者個人内の知覚過程に焦点を当て、聴覚心理実験による行動計測に基づいて、functional magnetic resonance imaging (fMRI)による大脳皮質の機能的応答の評価を行った。

具体的には、音響的に劣化した音声に対する個人内の理解度の変化とそれに伴う大脳皮質の機能的応答の関係について実験的に検討した。健聴者を被験者として、人工内耳装用者の感覚入力を模擬した音声を提示し、音声の理解度に依存した皮質活動を推定した。側頭皮質に関して側性化指数を算出した結果、音声に含まれる単語が理解できない低理解度の場合は左半球優位であるのに対し、高理解度の場合には両側性を示すことが示された。さらに、音響的に劣化した音声に対する知覚学習を支える皮質神経回路の可塑性について検討した。音声の知覚能力は訓練により後天的に向上し長期間持続することが報告されているが、その神経メカニズムは明らかになっていなかった。fMRI 計測下で 7 日間の音声の聞き取り訓練を実施することで、左上側頭溝後部と腹側前運動皮質の神経表象が訓練の初期から後期にかけて変化することを示した。さらに、上側頭溝後部の変化は、訓練後も長期間維持することが示された。

本論文により、個人内の知覚過程に関連して理解度に依存した機能的な側性化度合いの変化や、学習に伴う長期的な脳活動パターンの変化過程が明らかになった。これは、難聴者のリハビリ過程や聴覚補填器具への適応度を神経活動レベルで定量化することを可能にするなどの応用へつながると共に、音声知覚を担う中枢神経機構の解明につながる成果である。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位を授与するにふさわしいものであると認められる。

総合試験結果の要旨

2022年1月18日

論文題目 : Cortical mechanisms underlying the subjective perception of spectrally degraded speech

(周波数情報が劣化した音声の主観的な知覚を支える皮質メカニズム)

学位申請者: 村井 翔太

主査: 生命医科学研究科 教授 小林 耕太

副査: 生命医科学研究科 教授 飛龍 志津子

副査: 東京大学 大学院総合文化研究科 助教 橋 亮輔

要旨:

本論文提出者は、本学大学院生命医科学研究科医工学・医情報学専攻医情報学コース後期課程の学生および、日本学術振興会の特別研究員(DC1)として、精力的な研究活動を展開してきた。また、本研究科修了に必要な所定の単位を修得するとともに、英語の語学試験にも合格し、学位取得について十分な能力があると認定されている。

本論文の主要部分は、Hearing Research誌に掲載済みであり、その他にも筆頭著者および共同著者として英語原著論文3報を報告している。これらの論文執筆や学会での発表などを通し、提出者の研究活動の質の高さは学会等から高く評価されており、発表のうちの1件は優秀賞(2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies、Excellent Paper Award for On-site Poster Presentation)を受賞している。2022年1月18日午前10時00分から約1時間にわたり提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明によりいずれも十分な理解が得られた。

さらに公聴会終了後、論文に関する諸問題について、審査委員による口頭試験を実施した結果、提出者の十分な学力を確認することができた。よって、総合試験の結果は合格であると認められる。

博士学位論文要旨

論文題目：Cortical mechanisms underlying the subjective perception of spectrally degraded speech

(周波数情報が劣化した音声の主観的な知覚を支える皮質メカニズム)

氏名：村井 翔太

要旨：

音声知覚は日常生活のコミュニケーションにおいて最も重要な側面の一つである。しかし、加齢、騒音、薬剤などによる後天的な要因や遺伝的な要因による難聴の発現などによって、聴覚中枢に伝達される音声信号は音響情報が欠損したものとなる。また、重度の難聴患者は人工内耳をはじめとする聴覚補填器具を装用することによって聴力を補うが、健聴者の聴覚入力と比較すると大きく劣化したものとなり、装用後にはリハビリテーションが必要となる。一方で、ヒトの音声知覚システムは音声の音響情報が部分的に欠損したとしても、音声を知覚できることが聴覚心理実験を通して示されており、さらにその神経メカニズムも脳機能計測実験により検討されてきた。

音響情報が欠損した音声の知覚には前頭側頭皮質領域の関与が報告されている。音声入力の主要な伝達経路として、蝸牛神経核、上オリーブ核、外側毛帯核、下丘、内側膝状体を介し、一次聴覚野や上側頭溝などの上側頭皮質上に到達し、そのあと上側頭皮質上の前方・後方から腹側・背側の2つの経路へそれぞれ分岐したのちに、前頭皮質の構音処理や言語処理に関わる領域に到達すると考えられている。音響的に明瞭な聞き取りやすい音声の知覚に、これらの前頭側頭皮質領域の関与が必要であるかは議論の余地があるが、音響情報の欠損した音声の知覚には重要であることが実験的に示されている。健聴な被験者に音響的情報を操作した音声刺激を提示することで、劣化した聴覚入力の知覚処理メカニズムを脳活動計測から検討することができる。複数のこのような研究から、両側の上側頭皮質領域は、音声の音響情報の欠損の程度が小さく了解度（刺激音声の理解しやすさ）が高い場合に活動量が上昇することが示されている。また、音声提示前のテキストによる手がかり刺激の提示や、音声として提示する文章の文脈の推測のしやすさの操作によって、外的に与えられた言語情報による音声の理解度の向上についても検討されている。音響情報が削減された音声の聴覚情報処理と外部からの手がかりに基づいた言語情報処理の間の相互作用には、Broca野を含む左前頭皮質や、上側頭溝後部といった前頭側頭皮質のより高次機能領域の関与が示唆されている。左前頭皮質が音響情報の削減された音声の知覚形成に貢献することは、非侵襲的な脳刺激法により因果的にも検証されている。このような音声の知覚を助ける言語情報は、実生活の場面でも音声以外の情報から手に入り得るものであり、頑健な音声知覚システムを補助する重要な処理過程であると考えられる。一方で、私たちが音声を耳にするとときは、必ずしも外部からの手がかりが存在するとは限らない。もし外部からの手がかりが存在しない場合は、内発的な音声言語処理が音響情報の欠損を補い、音声知覚を形成するために貢献すると考えられる。しかし、外的な刺激パラメータに関する処理過程の違いでなく個人内の音声知覚過程に焦点を当てた検討は少なく解明が進んでいない。このような検討は、頑健な音声知覚システムを実現する神経生物学的な仕組みの解明につながり、加えて聴取者の知覚状態を推定するためのバイオマーカーや、聴覚障害を克服するための知覚訓練方法の開発に寄与することが期待される。

そこで本論文では、音声知覚の個人内処理過程の重要な側面として、(1) 音響的に劣化した音声に対する個人内の理解度の変化と、(2) 音響的に劣化した音声の知覚学習による個人内の聞き

取り能力の変化に着目した。これら 2 つの知覚過程に関して、本論文では、人工内耳装用者の感覚入力を模擬した noise-vocoded speech sounds (NVSS) に焦点を当て、被験者の知覚過程の行動計測を基に、functional magnetic resonance imaging (fMRI) による脳機能計測を用いて、音響的に劣化した音声の知覚処理を支える神経基盤の解明を目指して検討を行った。

第 1 章では、音響的に劣化した音声の知覚処理に関して、聴覚心理実験や脳機能計測実験の先行研究から、これまで検討されてきたことを整理するとともに、研究の動機、目的について述べた。聴覚心理実験については、音声の音響特性とヒトの知覚特性の関係について示した。音声の周波数情報が大きく削減されても、振幅包絡情報を手掛かりとして音声情報を補填することで音声の知覚を実現している可能性について言及した。さらに音響的に劣化した音声の聞き取り能力向上のための知覚学習について取り上げた。脳機能計測実験については、音響情報の劣化に伴う音声の了解度と脳活動の関係について述べた。加えて、音声理解度の個人内の揺らぎと脳活動の関係性や、訓練による音響的に劣化した音声の知覚能力の向上を支える神経メカニズムについてのこれまでの先行研究を紹介し、本論文が取り組む課題をまとめた。

第 2 章では、周波数情報を削減した音声の理解度と大脳皮質の脳活動との関係性について検討した。健聴者を対象に、音声の聞き取りと音声の理解度の主観回答を試行毎に求めた。それと同時に脳活動の fMRI 計測を行い、被験者の試行ごとの音声の理解度に依存した皮質活動を推定した。実験刺激には、日本語の平易な文章を NVSS に変換したものを用いた。原音声から周波数情報と振幅包絡情報を適切に削減することで、音声理解度の個人内変動が観測可能となるような音響情報を調整した。また、コントロール条件として、音響的に明瞭な音声と周波数重みづけ雑音を提示した。聴覚刺激提示への MRI 撮像音の影響を回避するため、脳機能計測時の撮像を断続的に行い、撮像の合間に音声を提示した。NVSS 聽取時の脳活動量を理解度ごとに推定した結果、音声の理解度が高いほど右上側頭皮質の脳活動量が上昇することや、文中の一部の単語のみ認識したときは左下前頭回の脳活動量が上昇することが分かった。また、側頭皮質に関して側性化指数を算出した結果、明瞭な音声を聞いているときの脳活動に関しては左半球優位であった。一方で、NVSS を聞いているときの脳活動に関しては、文中のいずれの単語も理解できなかつた場合には左半球優位であるのに対し、文中の単語や文章全体を理解できた場合は側頭皮質の半球優位性が失われることが示された。伝統的な言語優位半球は Wernicke 野を含む左半球であり、音声の音響的な明瞭さに対しても左半球優位であることが示されていたが、今回の実験結果は音響情報が削減された音声の被験者の理解度が高いときは側頭皮質が両側性を示すという新たな示唆を与えるものであった。このことは、理解度が高いときに、右半球も左半球と同様の活動量を示したことを意味するが、周波数情報が大きく欠損しピッチが存在しないことで失われたアクセントやイントネーションのような超分節情報が、音声の理解度の上昇に伴い被験者内で補われ、その処理に右側頭皮質が関与する可能性を示している。

第 3 章では、長期的な音声の知覚学習過程を支える皮質神経回路の可塑性について検討した。周波数情報を削減した音声の知覚能力は訓練により後天的に向上し長期間持続することが報告されているが、その神経メカニズムは明らかになっていない。そこで、長期的な脳機能計測から音声の知覚学習過程の脳活動パターンの変化を計測することで、前頭側頭皮質領域の可塑性を検討した。NVSS の聞き取り訓練をしたことのない健聴者を対象に、fMRI 計測下で 7 日間の NVSS の聞き取り訓練を行い、さらにその訓練後にしばらく月日が経過した後（10 カ月以上）の訓練効果の持続性について調べた。各実験日には、防音室での聞き取りテストを行い、正しく聞き取れた割合をモーラ単位で詳細に評価した。行動実験の結果、被験者は 7 日間の実験日にわたって聞き取り能力を向上させ、その能力の上昇は訓練後に長期間経過した後でも維持された。また、得

られた fMRI データから、多ボクセルパターン解析法の 1 つである表象類似度解析を用いて、NVSS に特異的な脳活動パターンの変化を推定した。その結果、左上側頭溝後部と腹側前運動皮質の神経表象が、訓練の初期から後期にかけて NVSS に特異的に変化した。また、前頭皮質と側頭皮質の活動パターン同士の相関も、訓練初期より後期の方が強くなった。このことから、前頭側頭皮質の結合性の変化が知覚能力の向上や各皮質領域の活動変化に関与する可能性が示唆された。さらに、上側頭溝後部で観測された神経表象の変化は、訓練後も長期間維持されることが明らかとなった。これらの結果から、音響情報が削減された音声の知覚学習過程と学習成果の維持には、前頭側頭皮質領域の可塑的な変化が関与していることが示唆された。

第 4 章では、本論文の研究全体の総括と、今後の展望について示した。本論文の成果として、音声の理解度の個人内変動や、訓練による個人の知覚能力の変化が前頭側頭皮質の脳活動パターンに反映されることを示した。特に、個人内の処理過程に着目することで、理解度に依存した側頭皮質の機能的な側性化度合いの変化や、長期的な脳活動パターンの変化と維持の過程を示すことができた。これらの知見は、頑健な音声知覚システムの神経生物学的メカニズムの解明に結びつくと考えられる。今後の研究課題として、観測された皮質活動と音声知覚との因果関係について、非侵襲的脳刺激法などを用いて解明することが求められる。このような検討は、脳機能計測による個人ごとの知覚過程の観測や介入の実現へと繋がると考えられる。本研究のさらなる発展により、人工内耳をはじめとする様々な聴覚入力の劣化を克服する手法の開発に繋がることが期待できる。