

音楽の構造的聴取に伴う聴覚性脳磁界活動の変調

学位論文内容の要旨

非侵襲脳機能計測法の飛躍的な発展に伴い、ヒトの高次機能の解明を目指した研究が世界規模で進展する中、近年、脳の局所的な機能マッピングに加え、大脳皮質部位間の相互的な情報処理機構に関する研究の重要性が認識されている。聴覚野は、聴覚系入力情報の音圧、周波数、輪郭、位相等の音響特性、即ち、外因性の要因に対する情報処理を行うが、その活動強度は臨界周波数帯域や順応といった聴覚野の神経活動の特性にも依存する。更に、聴者の覚醒、注意、記憶、期待等の内因性の要因による変調も受ける為、前頭葉、海馬、視床、感覚器官等との間に形成される高次の情報処理機構の一部としての体系的役割や、機能的な情報処理機構の解明が期待されている。本研究では、神経活動を起源とする電気・磁気信号の非侵襲計測手法である脳磁図(magnetoencephalogram: MEG)を用いて、聴覚系情報処理に関わる脳磁界活動を検出し、聴覚野の情報処理特性を調べる事を目的とした。神経活動を変調させる音刺激として音楽を利用した。音楽は調性や旋法(長調・短調)という文法や、和声学や対位法により体系化された構造と統語機能を持つ。音楽は言語よりも音韻的・機能的な操作や単純化が容易であり、更に、聴者の注意や期待を自発的且つ自然に誘起する効果を有するため、聴覚系の高次機能に関する実験の刺激として適している。

本研究では、まず、音圧と周波数という外因性の音響要因に対する聴覚野の基本的な神経活動の特性を調べる為、9種類の刺激音により誘発された、聴覚野を起源とする脳磁界反応 N1m の振幅について検討した。刺激音として、3種類の周波数を持つ単音、また、それらを重ね合わせた二和音、三和音を作成した。各音の音圧は、音波形上のピーク値、RMS 値、及び、周波数成分のスペクトルピーク値により定義した。更に、これらの音圧値に対するソフトウェア上での設定値、出力先のイヤホン先端における実測値、各被験者の聴覚閾値により計算した感覚値を夫々求めた。各刺激音により誘発された N1m モーメントは右半球において感覚値との相関が最も高く、設定値の中ではスペクトルピーク値に強く依存する事が分かった。この知見を基に、音圧依存性を補正した結果、左半球 N1m モーメントが周波数成分の増加に伴い有意に増大する事が明らかになった。本結果により、音圧と周波数という外因性の要因に対する左右半球聴覚野の明確な機能分化が示唆され、また、聴覚反応の振幅を指標とした研究における刺激音の音圧の設定法について、閾値による補正、またはスペクトルピーク値の調整が必須であるという知見が得られた。

次に、和音の知覚と聴覚反応 N1m の振幅について、先行音階による調性的・旋法的なプライミングの影響を調べた。Probe-tone method という心理実験の手法を参考に、2 オクターブの上昇長調/短調音階の後、主和音または関係調和音を提示した。その結果、長調音階にプライミングされた関係調和音は主和音よりも有意に大きい N1m 反応を誘発した。一方で、短調音階にプライミングされた場合には、主和音と関係調和音の間に差異がなかった。行動実験による指標では、両調において主和音は安定、関係調和音は不安定であると弁別されたが、短調における和音の安定度の知覚の差異は小さかった。この事から、長調における N1m 反応の差異は、より明確な安定度の弁別に関係がある事が示唆された。調性・旋法的プライミングにより主和音がテンプレートとなり、入力音はテンプレート音との相対関係において分析・処理されると仮定すると、和音の知覚的安定度の弁別は、注意を向ける対象を「テンプレート音以外」とした方が容易に遂行できる。N1m 反応に対する調性と旋法の相互作用は、テンプレート音である主和音に対する感覚器官のフィルタリングと、テンプレートから逸脱する関係調和音に対する視床における gating の重畳効果という、選択的注意に関連するトップダ

ウン機構に依存するものである事を示唆する。

更に、単一和音の連続聴取と、音楽的な進行の一部としての聴取という、異なる条件下において誘発された N1m の RMS 振幅を比較した。N1m 反応の振幅は、前者では和音の音響特性に依存して差異を示したが、後者では一定だった。和音が進行の一部として提示された場合の聴覚野の活動は、先行する和音によるプライミング効果や、注意や課題に関わる内因性の要因等により変調され、刺激音の音響特性による効果をマスクした可能性が示唆された。

最後に、より内因性の要因による変調を調べる為に、4 または 5 音進行の完全終止型和音列 (PC4/5)、途中で係留する半終止型和音列 (HC4/5)、曖昧に終止する偽終止型和音列 (MC4/5) を提示した後の無音期間における脳磁界活動に焦点を当て、異なる終止型が誘起する期待や音の想起の効果について検討した。各和音の提示後約 50 ms、100 ms、170 ms に P1m、N1m、P2m 反応が誘発された。更に、完全終止型以外の和音列の最終和音の提示 1 拍後の無音期間に明瞭な活動ピークが観察された。無音期間における最大の活動部位は空間フィルタに基づく Vector Beamformer 法により聴覚野付近に推定された。その結果、無音反応の活動部位と和音進行列の第 1 音目により誘発された N1m 反応の信号源の位置に統計的有意差はなかった。聴覚野における無音反応の活動強度の時間変化を fixed dipole 法により計算した結果、約 80 ms と約 150 または 200 ms に有意な活動ピークが観察され、第 2 成分の潜時は終止型により異なる事が分かった。音楽聴取では、連続や非連続、抑揚や終止等の内因性の感覚が生じる。これらの効果は、音の提示順列、即ち、音の周波数の序列的变化に伴う次音への期待に関連すると考えられている。音に対する期待や内的な想起に関する情報処理基盤として、前頭葉と聴覚野を含む神経回路モデルが提案されている。期待という認知活動には具体的な感覚情報の内的な想起が不可欠であり、このモデルの中で聴覚野は保持している入力音の音響特性に関する情報処理の記憶を提供するという中継的役割を果たすと考えられている。これらの事から、本実験において観察された聴覚野の活動は、和音列の進行を終止へと導く音の内的なイメージの生成に関わっており、特に半終止の後の無音反応は明確な周波数情報を伴う音の想起、また、偽終止の後の無音反応は 5 拍目の入力に対する時間情報のみを伴う音の想起を反映する事が示唆された。

以上、本研究によって、聴覚野におけるボトムアップ処理の特性として、刺激音の音圧や周波数といった外因性の要因に対する依存と、順応や臨界周波数帯域幅に関連する神経的特性の相互作用、更に、自発的な注意や期待に関わるトップダウン処理における振幅変調と時間特性が明らかになった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 真 也

副 査 教 授 河 原 剛 一

副 査 教 授 清 水 孝 一

学 位 論 文 題 名

音楽の構造的聴取に伴う聴覚性脳磁界活動の変調

本研究は、音楽という音情報の素材を利用して、ヒトの高次機能を支える注意や期待などの内的情報処理に関し、その一端としての大脳聴覚野・神経活動の時空間特性を捉える事を目指したものである。音情報は耳から入力され、聴覚系上向神経路を経て大脳皮質聴覚野に至る。聴覚野の活動は刺激音の音響特性に依存するだけではなく、視床のゲート機能や聴覚野から末梢器官へ投射される遠心経路に関連する注意効果などにより変調を受ける。本研究では、大脳皮質における第一の処理地点である聴覚野に焦点を当て、外的要因として楽音のもつ音響パラメータや、内的要因として音楽聴取によって誘起される注意や期待に依存する脳磁界反応の時系列変化を捉え、神経活動の特性を明らかにする事を目的としている。

まず、音圧と周波数多重という外因性の音響要因に対する聴覚野の基本的な神経活動の特性を調べるため、単一周波数音および協和音である二和音、三和音の音圧を変化させた各種の刺激音により、聴覚野に誘発される脳磁界 N1m 反応について検討している。各音の音圧は、時間領域及び周波数領域における特性値、すなわち 音波形上のピーク値、RMS 値、周波数成分のスペクトルピーク値により定義した。脳磁界計測と解析の結果、各刺激音により誘発された N1m 反応のモーメント強度は、右脳半球において RMS 値及びスペクトルピーク値に強い依存性を示した。また、左脳半球の N1m モーメントは周波数成分の増加に伴い有意に増高した。以上から、音圧の時間平均値であるスペクトルピークや RMS 値に対する感度は、右脳半球が音情報の処理において長い分析時間窓を持つことに起因すると推察された。一方で、左脳半球の周波数成分に対する高い感度は、左脳が固有の短い分析時間窓をもつため、周波数の差分成分が時間波形上に作る速い振幅変化を検出することによると推察された。即ち、本結果から、左右脳半球聴覚野における音情報の分析が、それぞれ周波数領域と時間領域に選択性を持つことが示唆された。

次に、和音の知覚と N1m 反応の振幅について、和音に先行する音階が与えられたときの

調性・旋法的なプライミングの影響を調べている。その結果、長調音階にプライミングされた短調和音は長調和音よりも有意に大きい N1m 反応を誘発する事が分った。一方で、短調音階にプライミングされた場合には、長調和音と短調和音の間に N1m 振幅の差異がなかった。この N1m 反応の差異は、長調音階において和音の安定度が明確に弁別されたことと関係している。調性・旋法的プライミングにより長調和音がテンプレートとなり、それとの相対関係において入力音が分析・処理されると仮定すると、和音の知覚的安定度の弁別は、注意を向ける対象とテンプレート音との比較で容易に遂行できる。即ち、観測された N1m 反応に対する調性と旋法の相互作用は、テンプレート音である長調和音の受容とテンプレートから逸脱する短調和音に対するゲート作用の重畳効果によると考えられた。このことは、選択的注意に関連するトップダウン機構を示唆している。

さらに、自発性の内的要因による聴覚野の変調を調べるために、4 音または 5 音進行の完全終止型和音列、途中で保留する半終止型和音列、曖昧に終止する偽終止型和音列を提示した時の脳磁界反応を計測している。その結果、完全終止型以外の和音列において、最終和音終了後の無音期間に、聴覚野を起源とする明瞭な活動ピークが約 80 ms と約 150 ms、ないし 200 ms に観察された。音楽聴取では、和音の進行にともない連続や非連続、抑揚や終止等の内的な感覚が生じる。これらの現象は、音の提示順列、すなわち周波数の序列的变化にともない順次生じる、次の音への予期や期待に関連している。ここで、音に対する期待や内的な音の想起に関する神経基盤として、前頭葉と聴覚野を含む神経回路モデルが提案されている。期待という認知活動には具体的な感覚情報の想起が不可欠である。このモデルの中で、聴覚野は保持された入力音の音響特性に関する情報パターンを提供するという中継的役割を果たすと考えられている。これらの事から、本実験において観察された無音期間の聴覚野の活動は、和音列の進行を終止へと導く音の内的なイメージの生成に関わっていることが示唆された。半終止のあとは明確な周波数情報をともなう音が想起され、他方、偽終止のあとは次音に対する時間情報のみの音が想起されることで、各々異なる時間特性の反応が誘起されたと考えられた。

以上を要するに、本研究はヒト聴覚野の神経活動における外因性、内因性の要因による変調の特性を明らかにし、聴覚系情報処理特性の解明に貢献したものであり、脳神経科学および神経情報科学に対する寄与は大きいと評価できる。よって著者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格があるものと認める。