

<学術論文>

旋律聴音とリズム聴音の課題遂行時の大脳皮質活動の比較

—光トポグラフィによる計測を通して—

齊藤忠彦 信州大学教育学部芸術教育講座

キーワード： 聴音, 大脳皮質活動, 光トポグラフィ

1. 目的

聴音とは、音楽を聴いてリズム、メロディ、ハーモニーなどを楽譜に書きとることで、音楽の基礎訓練の一つである(海老沢ほか, 2002)。音楽大学および教員養成大学音楽科の入学試験や教員採用試験(音楽科)において聴音試験が課せられている場合がある。また、音楽大学や教員養成大学音楽科には、「ソルフェージュ」という授業科目があり、そこで聴音課題を取り入れていることが多い。聴音課題は、一般的に旋律聴音、リズム聴音、和声聴音の3つに分けられるが、これらの課題の違いは、脳活動にどのような影響を与えているのだろうか。

このことに関連する最近の脳科学研究を見ると、たとえば、川島(2007)は、音のピッチ分析には、左半球の上側頭回(superior temporal gyrus)が中枢となっている可能性があることを指摘している。Hyde, K.L.ら(2008)は、音のピッチ分析は右半球の二次聴覚野(secondary auditory cortex)が大きな役割を果たしていることを指摘している。また、Grahn, J.A.ら(2007)やChen, J.L.ら(2009)は、リズムの知覚と聴覚皮質(auditory cortex)や運動前皮質(premotor cortex)に関わる研究を行っている。ただし、これらの研究は、何れも刺激音にはパラメータとしての純音¹⁾を用いるなど、非楽音の知覚に関わるものである。実際の聴音課題遂行時の脳活動に関わる研究は知る限りでは存在しない。

そこで本研究では、リズム聴音と旋律聴音の2つの聴音課題を取り上げ、課題遂行時における脳活動を計測し、リズム聴音と旋律聴音の課題遂行時の脳活動の特徴を明らかにすることを研究の目的とする。

2. 方法

前掲の先行研究は、何れも機能的磁気共鳴画像法(functional magnetic resonance imaging: 以下, fMRI)を用いて脳活動を計測している。fMRIは造影剤や放射性同位元素の投与を必要とせず、一般の臨床磁気共鳴装置で非侵襲的に脳機能局在を視覚化することができる。一回の撮影で複数の脳機能の賦活画像を作成することができることと、高い信頼性をもって脳機能の賦活局在と解剖学的位置の対応がとれることが特徴である(伊達, 2008)。しかしながら、計測時には体位に制約があり、頭部が完全に固定されるなど身体

的な拘束性があること、また計測時の機械音が大きいことなどの欠点もある。さらに装置が大型で設置されている機関が限られている。それに対して、近赤外線分光法 (near - infrared spectroscopy : 以下, NIRS) は、装置そのものを移動することができるため通常の教室環境で実験を行うことができる。また、身体的な拘束性が低く、近赤外光を照射するプローブが組み込まれているホルダーを頭にかぶるだけで脳活動を計測することができる。NIRS で使用されるレーザー光は 5~15mW 程度のもので曇天時の太陽光より微弱である。また、照射による皮膚温の上昇は照射直下においても最大 1℃程度であり、完全に非侵襲的である (福田, 2009)。そこで本研究では、NIRS を用いて脳活動を計測することとする。NIRS で使用されている近赤外光が頭皮上から届くのは 20mm 程度で (山本ほか, 2006)、ちょうど大脳皮質あたりとなる。大脳皮質は、厚さ数 mm の灰白質 (gray matter of brain) の層である。すべての感覚情報は脳皮質に送られ認知され記憶される。また、大脳皮質は思考の場でもあり、行動の計画や発動が行われる運動機能の最高中枢といわれている (A.R.クロスマンほか, 2008)。本研究では、NIRS を用いて大脳皮質の血流量の変化を計測するが、空間分解能は 20~30mm にとどまるため、活動に伴う大脳皮質の詳細な部位の特定は行わない。

なお、脳活動の計測による結果と、実験時の被験者の主観をクロスし考察することができるように、実験終了後に被験者を対象とした主観評価調査を行う。調査内容は、リズム聴音と旋律聴音を比較し、「どちらの方が出来が良いと思いますか」(以下、「出来の良さ」と「どちらの方がリラックスしてできましたか」(以下、「リラックス度」という 2 項目とする。また被験者の音楽訓練経験についての信頼性を確認するため、実験終了後に、実験で用いた課題と類似した課題を用いての聴音書き取り調査を行う。

3. 実験

3.1 被験者

被験者は音楽訓練経験者で、右利きの大学生 6 名 (女性 6 名、年齢 20.8 ± 0.7 歳) とした²⁾。事前に実験概要や計測装置およびその安全性について説明を行い、文書で同意を得た上で実験を行った。

3.2 測定

本研究で使用する NIRS は日立メディコの光トポグラフィ装置 (以下、光トポグラフィ)³⁾、ETG-4000 (図 1) である。最大 48 チャンネルで計測することができるが、脳全域を同時に計測するにはチャンネル数が足りない。大脳皮質は前頭葉 (frontal lobe)、側頭葉 (temporal lobe)、頭頂葉 (parietal lobe)、後頭葉 (occipital lobe) の 4 つからなるが、本研究では、高次機能を司る前頭前野 (prefrontal area) を含む前頭葉を中心とした前頭部と、



図 1 ETG4000

聴覚の情報処理を司る一次聴覚野 (primary auditory area) を含む側頭葉を中心とした側頭部に限定し、前頭部 22 チャンネル、右側頭部 12 チャンネル、左側頭部 12 チャンネルの計 46 チャンネルで計測することとした。

各チャンネルの配置を図 2 に示す。これは各チャンネルの配置を頭上から見たものである。中央上の三角の出っ張りは鼻、左右の出っ張りは耳を示す。数値はチャンネル番号を示している。

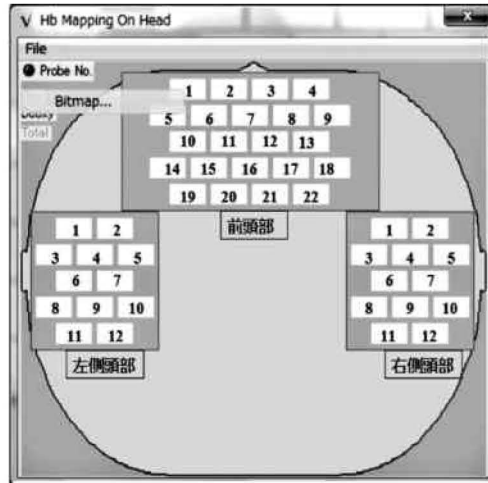


図 2 各チャンネルの配置図

ホルダーの装着は、下段のプロープが、国際 10 - 20 電極配置法の Fpz - T3(T4) - Oz の曲線と平行となるように装着した⁴⁾。

測定時の被験者の姿勢は椅子座位とした。体動によるノイズを低減するために、実験中は頭部をできるだけ動かさないように指示した。聴音課題は CD による音源再生とし、通常の教室環境を想定し、スピーカーを用いて再生した。アンプは A-6 (YAMAHA)、スピーカーは NS-1000M (YAMAHA) を用いた。被験者の前方約 2.0m の位置に被験者の耳の高さに合わせてスピーカーを配置した。音圧レベルは 65dB 程度とした。

3.3 実験の手順

実験は 2009 年 7~8 月に信州大学教育学部音響実験室にて実施した。聴音課題は、筆者が作成したオリジナルのリズム聴音課題 (4 小節) と旋律聴音課題 (4 小節) を用いた⁵⁾。音色は通常の聴音課題で用いられることが多いピアノの音を使用した。データの信頼性を高めるために、同じタスクを 2 回繰り返すようにし、計測ブロックは次のようにデザインした。

前レスト (20 秒) → タスク I (30 秒) → レスト (40 秒) → タスク II (30 秒) → レスト (40 秒) → タスク I (30 秒) → レスト (40 秒) → タスク II (30 秒) → レスト (40 秒)

被験者 6 名のうち 3 人はタスク I をリズム課題とし、3 人はタスク I を旋律課題とした。各タスクの 30 秒間の流れは次の通りである。ここではリズム聴音課題の例を示す。

リズム課題聴取 (8 秒) → 安静 (7 秒) → 同じリズム課題聴取 (8 秒) → 安静 (7 秒)

通常の聴音では、課題聴取直後に五線紙への書き取りを行うが、本実験において書き取りを行ってしまうと手の動作や視覚に関わる脳内の部位に影響を与えてしまうので、書き取りは行わなかった。ただし、実際の聴音の場面を想定させ、頭の中で書き取りを行うように指示をした。

3.4 解析

光トポグラフィでは、酸素化ヘモグロビン（以下、oxy-Hb）、還元ヘモグロビン（以下、deoxy-Hb）の2種類のヘモグロビン量を計測し、それらの総ヘモグロビン（以下、total-Hb）を表示させることができるが、タスクに伴う脳血流（動脈血流）の変化をより反映しているのはoxy-Hbといわれている（灰田，2008）。そこで、本研究では、oxy-Hbのデータを用いて解析することとする。計測データは、基準状態（レスト）からの相対的な変化に対応した量であり絶対値ではない。単位は、ヘモグロビン濃度（mM）に光路長（mm）を乗じたものでミリモラ・ミリメートル（以下、mM・mm）である。光トポグラフィ本体で計測されたデータを、パーソナルコンピュータに取り込み、ETG4000 V1.63Kを用いて解析を行った。解析の前処理としてノイズチャンネルのデータ除去⁶⁾ およびデータのベースライン補正⁷⁾を行った。

4. 結果

4.1 前頭部

ここでは前頭部について、リズム聴音、旋律聴音の2つのタスクの比較を行う。最初にチャンネル別に、2回のタスク（30秒間）の平均値⁸⁾を出し、それらの値をもとに前頭部の全22チャンネルの平均値を算出する。これらは被験者別に行う。続いて、6名の被験者の平均値のデータをもとに分散分析（一元配置反復）を行った。その結果、2群間に有意傾向が見られた（ $F(1,5) = 4.49$, $p < .10$ ）。リズム聴音と比較し、旋律聴音のoxy-Hbが高いという傾向である。

次に、リズム聴音、旋律聴音の各タスク（30秒）のoxy-Hbの変化の状況をグラフ化したものが図3である。縦軸はoxy-Hb（mM・mm）、横軸は時間（second）で、被験者6名の加算平均波計を示している。グラフの点線がリズム聴音で、実線が旋律聴音である。リズム聴音と比較し、旋律聴音のoxy-Hbが全体的に高いことがわかる。

各グラフには2つの山（ピーク）が見られるが、これは聴音課題を2回繰り返して聴取しているためである。各グラフのピークに、リズム聴音は○印を、旋律聴音は●印をつけた。旋律聴音のピークは、リズム聴音のピークより遅れて出現していることがわかる。旋律聴音の2回目のピークと比較し、1回目のoxy-Hbが高い傾向が見られる。それに対してリズム聴音では1回目も2回目もほぼ同じという特徴が見られる。

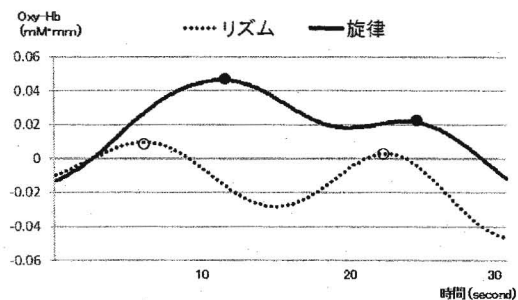


図3 前頭部の各タスク（30秒）のoxy-Hbの比較

リズム聴音と旋律聴音の群間に有意傾向が見られたことから、ここではリズム聴音と旋

律聴音の比較をチャンネル別に行う。図 4 は、前頭部のチャンネル別に被験者 6 名の oxy-Hb の加算平均波形を示したものである。縦軸は oxy-Hb (mM・mm), 横軸は時間 (second), グラフの点線はリズム聴音で、実線は旋律聴音である。

全体的にリズム聴音と比較し、旋律聴音の oxy-Hb が高い傾向が見られる。グラフの開きが大きい部分は、リズム聴音と旋律聴音の oxy-Hb の差が大きい箇所である。その差について t 検定⁹⁾を行ったところ、リズム聴音と旋律聴音の oxy-Hb に有意差が認められるチャンネルは計 14 箇所であった¹⁰⁾。図中に*をつけているチャンネルで (*: $p < .05$), 前頭部の下側 (図では上側) の列から、1 列目は 1ch, 2ch, 4ch (3 箇所), 2 列目は 5ch, 6ch, 7ch, 8ch, 9ch (5 箇所), 3 列目は 10ch, 11ch, 12ch, 13ch (4 箇所), 4 列目は 14ch, 17ch (2 箇所) となっており、特に中段の 2 列は、そのすべてのチャンネルにおいて有意差が見られた。

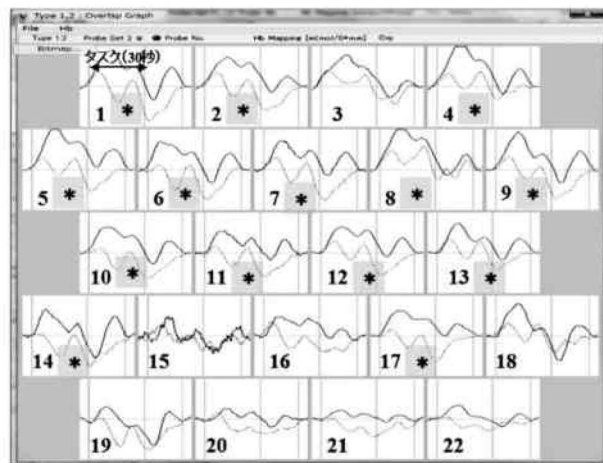
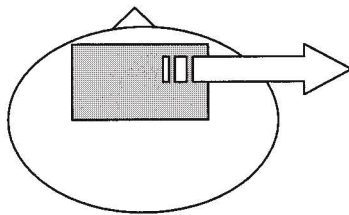


図 4 前頭部のチャンネル別の oxy-Hb の変化

これらのことから、前頭部の全チャンネルの oxy-Hb の平均値を見ると、リズム聴音と比較し、旋律聴音の oxy-Hb は高い傾向にあることが明らかとなった。また、前頭部のチャンネル別に見ると、リズム聴音と比較し、旋律聴音の oxy-Hb が有意に高いチャンネルが中段の 2 列に多いことが明らかとなった。

4.2 側頭部

各側頭部について、リズム聴音、旋律聴音の 2 つのタスクの比較を行う。最初にチャンネル別に 2 回のタスク (30 秒間) の平均値を出し、それらの値をもとに右側頭部の全 12 チャンネル、左側頭部の全 12 チャンネルの平均値を算出する。これらは被験者別に行う。続いて、6 名の被験者の平均値のデータをもとに分散分析 (一元配置反復) を行った。その結果、右側頭部の有意差は認められなかった ($F(1,5) = 1.86$, n.s.)。左側頭部についても有意差は認められなかった ($F(1,5) = 0.88$, n.s.)。

次に、右側頭部について、リズム聴音、旋律聴音の各タスク (30 秒) の oxy-Hb の変化の状況をグラフ化したものが図 5 である。縦軸は oxy-Hb (mM・mm), 横軸は時間 (second) で、被験者 6 名の加算平均波計を示している。リズム聴音と比較し、旋律聴音の oxy-Hb が全体的に高い傾向が見られる。

前頭部と同様に各グラフには2つのピークが見られ、特に旋律聴音の1回目のピークの高さが目立つ。それに対してリズム聴音については、1回目と2回目のピークの高さがほぼ同じである。また、旋律聴音のピークは、リズム聴音のピークより遅れて出現している。

左側頭部についても同様の方法でグラフ化したものが図6である。リズム聴音と旋律聴音の開きは右側頭部より小さい。各グラフには2つのピークが見られ、旋律聴音の1回目のピークの高さが目立つ。それに対してリズム聴音については、1回目と2回目のピークの高さがほぼ同じである。また、旋律聴音のピークは、リズム聴音のピークより遅れて出現している。

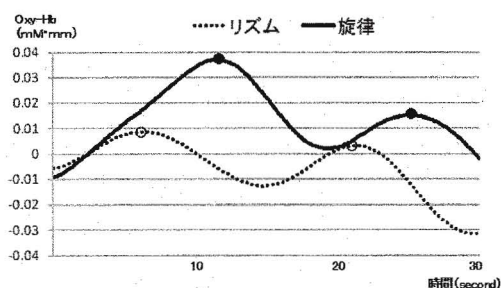


図5 右側頭部の各タスク (30秒) のoxy-Hbの比較

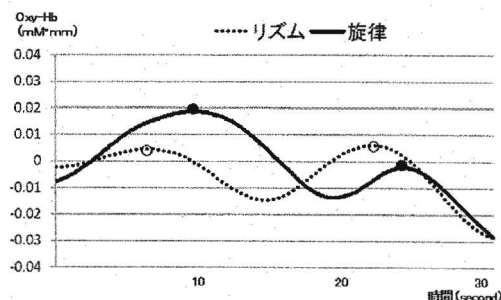


図6 左側頭部の各タスク (30秒) のoxy-Hbの比較

図5と図6を比較すると、それぞれの特徴がみられることから、ラテラリティ・インデックス (Laterality Index, 以下LI)¹¹⁾を算出することとした。その結果、リズム聴音0.115、旋律聴音-0.557という値となった。

これらのことから、側頭部別の全チャンネルのoxy-Hbの平均値を見ると、各側頭部ともに、リズム聴音、旋律聴音の2群間には有意でなかったが、LIを見ると、リズム聴音は左側頭部のインデックスがやや高いのに対し、旋律聴音では右側頭部のインデックスが高い結果となった。

4.3 実験後の主観評価調査および聴音課題の得点

実験終了後の被験者6名を対象とした主観評価調査の結果を表1に示す。数値は人数である。「出来の良さ」については、リズム聴音と旋律聴音を選択した被験者が同数であったが、「リラックス度」では旋律聴音を選択した被験者が多かった。

実験終了後に被験者を対象に、実験時に使用した聴音課題と類似した聴音書き取り調査を行った。リズム聴音20点満点、旋律聴音20点満点とした¹²⁾。注2)に記したように、総合点の7割に満たない被験者候補については解析対象から除外しているため、図7に示すように被験者の平均点はかなり高くなっている。リズム聴音19.5点(±0.84)、旋律聴音19.3点(±1.21)という結果であった。

表1 主観評価調査の結果

	リズム聴音	旋律聴音
出来の良さ	3	3
リラックス度	2	4

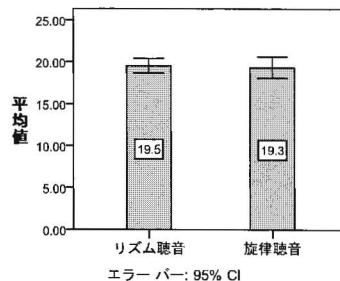


図7 聴音課題の得点の比較

5. 考察と今後の課題

以下、実験結果をもとに、リズム聴音と旋律聴音を比較しながら大脳皮質活動の特徴について考察を進めるが、リズム聴音と旋律聴音の特性の違いというよりも、リズム聴音と旋律聴音の難易度の違いが実験結果に影響を及ぼしているのではないかという可能性を否定できないわけではない。しかし、このことについては、実験終了後に実施した主観評価調査の結果において、「出来の良さ」については、リズム聴音と旋律聴音を選択した被験者が同数であったこと、そして、実験終了後に実施した類似課題による書き取り調査の結果、平均点がほぼ同じだったことから、難易度はほぼ同レベルであったと判断することができる。ここでは、リズム聴音と旋律聴音の特性の違いが実験結果に影響を及ぼしたものと解釈し考察を進めることとする。

リズム聴音と旋律聴音の課題遂行時の oxy-Hb に有意傾向が見られたのは前頭部であった。リズム聴音と比較し、旋律聴音の oxy-Hb が高い傾向にあることが明らかとなった。主観評価調査の結果において、「リラックス度」については、リズム聴音より旋律聴音を選択した被験者が多かったが、リラックス度が高い中で、前頭部の oxy-Hb が高い傾向をもつという結果となった。

前頭部のチャンネル別に見たとき、中段の2列は、そのすべてのチャンネルに有意差が見られた。前頭部の中段辺りは前頭前皮質 (prefrontal cortex) と呼ばれており、最も高次な脳機能に関わっている部位である。さらに、その中には覚醒しているときに強く活動している背外側前頭前皮質 (dorsolateral prefrontal cortex) という部位を含む。すべての認識活動に関与し、すべての種類の意識的な学習にとって必須な部位といわれ、統括監視システム (supervisory attentional system) と呼ばれることもある (M.J.T.フィッツジェラルドほか, 2008)。この辺りが旋律聴音では重要な役割を担っている可能性がある。

側頭部については、両側頭部ともにリズム聴音と旋律聴音の課題遂行時の oxy-Hb に有意差は認められなかったが、LI を見ると、旋律聴音では、右側頭部の方が高い結果となった。このことは、旋律聴音は右側頭部の脳活動を活性化するという可能性を示唆するものである。先行研究の Hyde, K.L.ら (2008) によるピッチの知覚は右半球の二次聴覚野が大きな役割を果たしているという結果との関連性を見出すことができそうだ。

図3, 5, 6に共通して見られる傾向として、前頭部、右側頭部、左側頭部ともに旋律聴音のピークはリズム聴音のピークより遅れて出現するという点と、旋律聴音の1回目のピークは2回目より oxy-Hb が高いという点をあげることができる。これらのことから、リズム聴音と比較し、旋律聴音はその知覚に時間を要する可能性があること、そして特に1回目に集中した聴取が行われている可能性があることを示唆することができた。

本研究では被験者6名のデータをもとに解析を進めてきたが、データ解釈の客観性を高めるためには、被験者の人数をさらに増やしていくことが不可欠である。また、今回はリズム聴音と旋律聴音のみを取り上げたが、今後はハーモニー聴音についても取り上げたい。

なお、本研究では音楽訓練経験者のみを対象とした聴音課題を取り上げたが、小・中学

校の音楽科授業においても、聴いたリズムを模倣して打ったり、歌唱曲の範唱を聴いて歌ったりする活動の中には、リズムや旋律を聴きとるという行為が含まれている。将来的に、脳科学の見地から、これらの学習構造を明らかにするきっかけをつかみたいと考えている。

注

- 1) 純音とは、基本周波数の倍音を含まない純粋な音で楽音とは異なる。波形は正弦波である。
- 2) 信州大学教育学部音楽教育専攻学生の中から、絶対音感がある程度もっていると自覚している学生 12 名を被験者候補とした。本研究では被験者の対象を音楽訓練経験者と限定したが、その信頼性を確認するために、実験終了後に、実験で用いた課題と類似した課題を用いての聴音書き取り調査を行った。その結果、総合点の 7 割に満たなかった学生については、音楽訓練経験の途上であると判断し、解析対象者から除外することとした。7 割未満の学生は 2 名であった。さらに計測の結果、ノイズチャネルが多かった学生 4 名についても解析から除外したため、結果的に計 6 名の被験者となった。
- 3) トポグラフィ (Topography) とは地形図の意味で、光トポグラフィは大腦皮質上の脳活動に伴う血液量変化の分布をグラフィック化し表示することができる。例えば、活性化している部位を赤色の濃さで、活性化していない部位を青色の濃さで表示することができる。
- 4) 頭部の形状やサイズにより、プローブホルダーの装着の位置には個人差がある。このことは結果分析に影響する可能性があるため、本研究では脳の詳細な部位を特定は行わない。
- 5) 実験で提示したリズム課題、旋律課題は以下のものである。



なお、実験終了後に、実験で用いた課題と類似した課題を使つての聴音書き取り調査を行った。そのときの課題は以下のものである。



- 6) 日立メディコ光トポグラフィユーザー会資料「計測データの確認のポイント～データ前処理～」(2010.6.26)に基づき、ノイズチャンネルの除去を行った。
- 7) 本研究では、タスク直前の Pre Time を 5 秒, Recovery Time を 20 秒, Post Time を 5 秒に設定した。Pre Time と Post Time の oxy-Hb の平均値を結ぶ直線を oxy-Hb のベースラインとする線形ベースライン補正は, Integral 解析の自動補正機能を利用した。
- 8) 例えば, タスク I がリズム聴音の場合, タスク I の 30 秒間の中で, 同じリズム課題を 2 回繰り返しているが, その全体の 30 秒間の平均値 A と, 2 度目のタスク I の 30 秒間の平均値 B を算出する。ここでいう平均値とは, 「(平均値 A+平均値 B) / 2」の値である。
- 9) 解析ソフト ETG4000 V1.63K の Multiple Data Analysis の平均波形間の検定処理機能 (t 検定) を利用した。
- 10) リズム聴音と旋律聴音の oxy-Hb の差が大きく, t 検定の結果, 有意な差が見られたチャンネルのうち ($p < .05$), 有意な差が持続している時間が, タスク全体の時間 (30 秒) の 10% 以上 (約 3 秒以上) のチャンネルを有意差が認められると判断し「*」をつけた。
- 11) LI は次の式で算出する。 $LI = (\text{左脳活動量} - \text{右脳活動量}) / (\text{左脳活動量} + \text{右脳活動量})$ 。
「左-右」となっているので, 「1」は完全に左のみの活動, 「0」で左右同等, 「-1」で完全に右のみの活動となる。
- 12) 1 小節を 5 点とし, 4 小節で 20 点満点とした。採点方法は小節単位の減点法とし, 一ヶ所のミスにつきマイナス 1 点として計算した。1 小節につき, 5 ヶ所以上のミスについてはそれ以上減点しないこととした。

引用文献

- 伊達勲 (2008) 『脳神経外科エキスパート前頭葉・側頭葉』中外医学社, p.25.
- 海老沢敏・上参郷祐康・西岡信雄・山口修 (2002) 「聴音」『新編 音楽中辞典』音楽之友社, p.414.
- 川島隆太 (2007) 『高次機能のブレインイメージング CD-ROM 付<神経心理学コレクション>』医学書院, p.6.
- 灰田宗孝 (2008) 「光トポグラフィを用いた学会発表・論文作成のポイント」『日立メディコユーザー会資料』, p.20.
- 福田正人 (2009) 『精神疾患と NIRS—光トポグラフィ装置による脳機能イメージング—』中山書店, p.224.
- 山本大誠・森川孝子・中前智通・松尾善美・奈良勲 (2006) 「近赤外分光法を用いた脳光イメージングの現状と可能性—文献的考察」『神戸学院総合リハビリテーション研究』第 1 巻第 1 号, p.84.
- A.R.クロスマン, D.ニアリー (2008) 『神経解剖カラーテキスト』野村巖・水野昇訳, 医学

書院, p.146, p.149.

M.J.T.フィッツジェラルド, ジーン・フォラン=カーラン (2008) 『カラー臨床神経解剖学 機能的アプローチ』 井出千束・杉本哲夫・草田正男訳, 西村書店, p.261.

Chen, J.L., Penhune, V.B., Zatorre, R.J.(2009) "The Role of Auditory and Premotor Cortex in Sensorimotor Transformations" *NEUROSCIENCES AND MUSIC III: DISORDERS AND PLASTICITY*, Vol.1169, pp15-34.

Grahn, J.A., Brett, M. (2007)"Rhythm and Beat Perception in Motor Areas of the Brain" *JOURNAL OF COGNITIVE NEUROSCIENCE*, Vol.19, No.5, pp.893-906.

Hyde, K.L., Peretz, I., Zatorre, R.J. (2008) "Evidence for the role of the right auditory cortex in fine pitch resolution" *Neuropsychologia*, Vol.46, No.2, pp.632-639.

(2010年10月19日 受付)

(2011年1月18日 受理)