

博士論文

短期記憶におけるモーツァルト効果の神経基盤の解明

東北大学大学院医学系研究科医科学専攻  
加齢脳科学研究部門脳機能開発研究分野

B1MD5126 宮崎 敦子

# 目次

1	要約	1
2	研究背景	3
2.1	研究の動機	3
2.2	音楽と認知課題に関する過去の研究	4
2.3	モーツァルト効果と短期記憶	5
2.4	テンポとメロディの要因	6
2.5	短期記憶課題における正答	7
2.6	モーツァルト効果の生起に関連する脳部位	8
2.7	MEG 測定を行なう理由	9
2.8	作業仮説と検証方法	10
3	研究目的	11
4	研究方法	12
4.1	被験者	12
4.2	音刺激	12
4.3	短期記憶課題	13
4.4	実験計画	14
4.5	心理指標	15
4.6	実験手続き	16

4.7. MEG、EEG、MRI の画像撮像と画像データの前処理 .....	17
4.8. MEG データと行動データの統計解析 .....	20
5. 研究結果.....	21
5.1. 行動実験データの結果 .....	21
5.2. MEG 実験データの結果.....	22
6 考察.....	23
6.1 結果のまとめ .....	23
6.2 MEG データが示した短期記憶におけるモーツァルト効果 .....	23
6.3 他領域で脳活動が認められなかったことについて .....	25
6.4 短期記憶課題について .....	26
6.5 行動実験データが示した短期記憶におけるモーツァルト効果 .....	28
6.6 テンポと音楽の定義.....	29
6.7 モーツァルト効果に関する先行研究と本研究方法の違い.....	29
6.8 本研究の意義 .....	31
7 結論 .....	32
8 謝辞.....	32
9 文献.....	34
10 図.....	49
10.1 図 1. 60BPM と 150BPM のテンポの速さ .....	49

10.2	図 2. 短期記憶課題 .....	50
10.3	図 3. 5 つの条件と実験課題図 .....	52
10.4	図 4. 被検者が行った課題内容 .....	53
10.5	図 5. 画像データ前処理のフローチャート .....	54
10.6	図 6. タイムウィンドウの位置 .....	57
10.7	図 7. MEG データ結果（全脳分析） .....	58
10.8	図 8. 時系列で見た IFG のガンマ帯域反応活動 .....	59
11	表 .....	60
11.1.	表 1 モーツァルト効果と短期記憶における先行研究のまとめ .....	60
11.2.	表 2. 短期記憶課題における回答の種類 .....	61
11.3.	表 3.音楽のテンポの速さの好みについて評価表 .....	62
11.4	表 4. 行動データにおける正答率と反応時間に関する結果 .....	63
11.5	表 5. 行動データにおける無音条件との差分に関する結果 .....	64
11.6	表 6. 全脳分析結果 .....	65
11.7	表 7. 時系列での IFG における GBR の平均値 .....	66

## 1 要約

音楽を聞いた後に行った認知タスクの成績が改善される現象は、モーツァルト効果として知られている。このような効果は世間で注目を集めていたにも拘わらず、日常生活の中で重要な認知機能の 1 つである短期記憶に関するモーツァルト効果は矛盾する結果が報告されている。先行研究では、音楽のテンポとメロディがモーツァルト効果に影響を与えることが示唆されているが、テンポが要因しているのかメロディが要因しているのかに関して調べた研究がない。本研究では、この問題を調査するために、テンポが速い/遅い音楽及びメロディがある/なし、音なしの 5 つの条件下の後に行われた短期記憶課題中の想起時の脳活動を脳磁図 (MEG; Magnetoencephalography) によって測定した。行動実験の結果は、メロディのあるなしに拘わらず、速いテンポの条件で、“前になかった” と正しく答える正棄却回答の反応時間が速くなることを確認した。MEG データの解析の結果、全脳分析により高次認知機能に関係するガンマ帯域活動で、速いテンポの条件において遅いテンポの条件よりも 300-400ms の時間枠で左下前頭回 (IFG; Inferior Frontal Gyrus) が低い水準の活動を示し、遅いテンポの条件で高い水準の活動を示すことが明らかになった。時系列で左下前頭回の 100ms ごとの時間枠での活動を調べたところ、ガンマ帯域反応 (GBR; gamma band response) の賦活のピークが、速いテンポの条件では 100-200ms で発生し、遅いテンポの条件が 300-400ms で賦活のピークに達することが示された。これらの結果は、メロディの有無に関係なく、速いテンポの音楽は、左下前頭回で早期の賦活を引き起

こし、左下前頭回活性化を必要とする短期記憶課題の成績を向上させたことを示唆している。

メロディに拘わらず速いテンポの音楽を聴くだけで下前頭回の活動のタイミングが早くなり、短期記憶の反応時間を改善するということを調査した本研究は、短期記憶システムの機能低下が起きている高齢者の生活向上にも応用できると考えられる。

## 2 研究背景

### 2.1 研究の動機

ヒトと音楽の関係は長い歴史を持つ。音楽は、心の充足感を得るためや、感情やコミュニケーションの表現に用いるなど、人間のもつ本質的なニーズとつながっている<sup>1)</sup>。現在、世界最古の楽器として確認されているものは 43000 年前の笛であり<sup>2)</sup>、当時からヒトは音楽を楽しんでいた可能性がある。音楽は生命や種を維持する上では特に必要のないものである。しかしながら音楽は、私たちの生活の一部となっていて、人間の生活の中で重要なものである。英国のオフィスワーカーは、勤務時間の 3 分の 1 に渡って音楽を聴いていることが報告されている<sup>3)</sup>。近年、クラウド技術による音楽ストリーミングサービスのスポティファイ (Spotify Ltd.) は、誰もが簡単にいつでも音楽を楽しむことを可能とした。彼らの 2014 年の調査でも、61% が職場で音楽を聴いていることが明らかになった<sup>4)</sup>。日本の中学生から大学生を対象とした調査は、約 50% の学生が勉強をする際に音楽を聴くと答えている<sup>5)</sup>。このように、半数以上の人が仕事や勉強などの際に音楽を聴くことから、音楽が私たちの日々の行動や仕事を支える認知活動を促進している可能性がある。しかしながら、音楽聴取が認知活動に及ぼす影響とその神経基盤を調べた研究はほとんどない。そこで本博士論文では、脳機能イメージング手法を用いて、音楽聴取が我々の認知活動の成績を向上させるかどうかの脳内機序を調べた。

## 2.2 音楽と認知課題に関する過去の研究

これまで、音楽聴取が様々な認知能力や行動を促進するのかどうかを検討した研究は2つの音楽聴取の時期の違いで数多く報告されている。1)音楽聴取後の認知機能への影響と2)音楽聴取中の認知機能の影響である。聴取中よりも聴取後の方が認知課題成績への影響が大きい報告があり<sup>6)</sup>、また聴取後では、子どもから高齢者まで認知能力を向上させた報告がある<sup>7)</sup>。このような音楽聴取後の認知機能促進に関する報告は、モーツァルト効果(Mozart effect)と呼ばれる<sup>8-11)</sup>。この音楽の効果は、認知課題の作業中に音楽を聴くのではなく、音楽を聴いた後に成績が促進される現象効果のことを指す。つまり、参加者は、認知課題中には音楽を聴取していない。また、モーツァルトの楽曲を使っていない場合でも、音楽聴取後に認知課題の成績が向上する現象のことを一括してモーツァルト効果と呼ぶ。

オリジナルの研究は、1993年のRauscherらの研究である<sup>8)</sup>。36人の学生を音楽か無音を聞く3つのグループに割り、空間認知テストを行なった。1つ目のグループは、「モーツァルト作曲「2台のピアノのためのソナタ ニ長調 KV.448」を聴取した。2つ目のグループは、「リラクゼーションテープ」と呼ばれた音楽で、遅いテンポの音楽を聴取した。3つ目のグループは、無音状態で待った。モーツァルトのソナタを聴いた群の空間認知テストの成績は、リラクゼーションテープを聴いた条件と無音条件と比較して、平均スコアが8.9点高かった。この結果は、認知的作業の前にモーツァルトの音楽を聴くと、認知的作業が促進されることを示した。この研究以降、こ



の現象は、多数の行動研究で確認されている<sup>7, 8, 12)</sup>。また、モーツァルト効果の神経基盤に関する研究も多く注目を集めており<sup>13-15)</sup>、空間認知課題に関する神経活動について研究されている<sup>16, 17)</sup>。

モーツァルト効果と交絡する要因に関する先行研究も多く存在する。被験者の音楽の好み、認知課題の性能に影響を与えることを調査している<sup>10, 18, 19)</sup>。モーツァルトの作品が好きな被験者がモーツァルトの作品を聴いた場合、認知課題の成績が向上し、物語が好きな被験者は物語を聴いた場合成績が良かった<sup>18)</sup>。性格傾向も影響している報告があり、認知課題において外向的な性格の被験者に音楽の影響はないが、内向的な性格を持つ被験者は、成績が悪くなることが知られている<sup>20-22)</sup>。音楽教育における効果では、学歴や知能、社会経済的背景の交絡について論議されている<sup>23, 24)</sup>が、モーツァルト効果では、音楽を聴くだけで高齢者や子どもからネズミまで成績が改善されるという報告がある<sup>8, 25)</sup>。音楽の練習もいらず、課題の前に音楽を聴くだけで成績向上効果があるならば、音楽そのものに認知課題成績を高める力があるということが確認できる可能性がある。

## 2.3 モーツァルト効果と短期記憶

我々の日常生活の中で、特に学習やオフィスワークにおいて主要な能力のひとつに短期記憶がある<sup>26)</sup>。短期記憶は、電話をかける際に覚えた電話番号についてその後は覚えていないというような短い期間、記憶を保持できる能力である。15秒以内に90%

を忘れてしまう<sup>27)</sup>が、この柔軟な能力は、情報を格納、操作する認知機能にとって非常に重要である<sup>26)</sup>。しかし、先行研究では、短期記憶に関してモーツァルト効果は一貫性のない結果を報告している（表 1）。モーツァルト効果が短期記憶課題では起こらなかったという報告がある<sup>7, 9, 28, 29)</sup>一方で、ヴィヴァルディ「四季より協奏曲第 1 番 ホ長調 RV269 春」によって、高齢者の短期記憶の改善が見られた<sup>30)</sup>。モーツァルト効果がモーツァルト作品ではなく、ヴィヴァルディ作品で発生したことからメロディは関係なく起きた可能性がある。またモーツァルト効果は、短期記憶課題に限らず様々な認知課題の結果でもこのような矛盾する結果を引き起こす報告があり<sup>7, 31, 32)</sup>、例えば、遅いテンポより速いテンポの音楽が計算の成績を向上<sup>33)</sup>させるなど、テンポの要因が指摘されている。次に、これらの要因について検討する。

## 2.4 テンポとメロディの要因

聴取音楽の主たる構成要素としてテンポとメロディがある。テンポとは、楽曲が持つ速度のことである。手で拍子をとった場合、そのペースがどれだけ速いか遅いかが判断できる。メロディとは、楽曲が持つ音符の上下を指す。特に、音の連続的な変化によって、印象的なフレーズのことを指す。そのため、単純な音の高低の変化のみで構成される音の変化は、メロディとは呼ばない（例えば、ドとレの音を交互に繰り返しただけのフレーズなど）。また、メロディは、楽曲の調によって印象が変わる。長調はドレミファソラシドの並びのもので明るい印象を与え、短調はラシドレミファソ

ラの並びのもので暗い印象を与える。

モーツァルト効果を調べた先行研究の中には、音楽が持つテンポの速い/遅い、メロディの調のタイプが認知能力に影響を与えたということを見出している<sup>11, 12)</sup>。例えば、モーツァルト作品 KV448 楽曲、もしくはアルビノーニのアダージョの音楽を聴取後、空間認知課題を遂行、その正答率を比較した。その結果、アルビノーニのアダージョは遅いテンポと短調の曲で、それを提示された群よりも速いテンポでモーツァルト作品 KV448 楽曲を提示された群において正答率が向上した<sup>11)</sup>。同じ楽曲内でテンポとメロディを操作した研究も報告されている。Husain ら(2002)は、モーツァルト作品 KV448 楽曲のテンポの速さとメロディの調を操作して変更した。この実験では、速いテンポと KV448 楽曲のオリジナルのメロディ群の空間認知の成績が他の群よりも良いことが示された。

このようにモーツァルト効果の生起にテンポとメロディの要因が影響している可能性がある。しかしながら、これまでモーツァルト効果によって短期記憶が、テンポの速さかあるいはメロディがあることか、もしくは両方の影響を受けているのかどうかについて直接調べている研究はない。

## 2.5 短期記憶課題における正答

再認テストを用いた短期記憶課題は、以前に見たことがあるか、全くの新規なものかを判断させる old/new 認識判断を使用して、被験者が「見た」または「見ていない」

の回答をするプロセスである。これらの回答の種類は、信号検出理論の枠組みにより 4 つの反応に分けることができる<sup>34)</sup> (表 2)。ヒット(Hit)は、”古い”刺激に対して正しく「見た」と答える反応で、ミス(Miss)は”古い”刺激に対して誤って「見ていない」と答える反応、正棄却(CR; Correct rejection)は、”新しい”刺激に対して正しく「見ていない」と答える反応で、誤警報(FA; False alarm)は “新しい”刺激に対して誤って「見た」と答える反応である。したがって、正答は Hit と CR の 2 種類の反応で構成されている。Hit が正しく古いアイテムを認識し、CR が正しく新しいアイテムを棄却していることから、これらのメカニズムは異なっていると言える。この考えを支持するように、近年の研究は記憶課題における想起時の神経応答において Hit と CR は新旧アイテムの違いを反映し、それらは old/new 効果と言われ<sup>35)</sup>、Hit と CR は異なる神経活動をベースとした認知過程であることが報告されている。例えば、Hit は記憶検索をして合致をすれば判断ができるが、CR は記憶に合致をしていないことを確認する過程が必要なため、CR の反応時間は Hit よりも時間が必要である<sup>35-39)</sup>。しかしながら、モーツァルト効果の研究では、正答として Hit と CR の区別なく実施していた<sup>7, 9, 28-30)</sup>。

## 2.6 モーツァルト効果の生起に関連する脳部位

モーツァルト効果に関する脳内機序として可能な説明は、モーツァルト作品 KV448 楽曲に代表されるような速いテンポの音楽や長調のメロディを持つ音楽を聴

くことで短期記憶のプロセスに必要な脳の領域が活性化し、その結果、短期記憶課題の成績が向上すると仮定することができる<sup>9, 18, 40, 41)</sup>。fMRI を用いた先行研究では、背外側前頭前野 (DLPFC; Dorsolateral Prefrontal Cortex)、下頭頂小葉 (IPL; Inferior Parietal Lobule)、中前頭回 (MFG; Middle Frontal Gyrus) 下前頭回 (IFG; Inferior Frontal Gyrus)、海馬の活動は、短期記憶過程と関連していることを報告している<sup>42-44)</sup>。また、速いテンポの音楽を聴いた場合は、fMRI 研究により IFG および MFG、左 DLPFC、海馬が活性化し<sup>45-48)</sup>、速いテンポのリズムを聴いた場合は、IFG、IPL と MFG で活性化することが知られている<sup>49, 50)</sup>。このように、DLPFC、IFG、MFG、IPL 及び海馬の賦活は、短期記憶過程と速いテンポの音楽を聴く、速いテンポのリズムを聴く場合の条件において見出されている。

## 2.7 MEG 測定を行なう理由

本研究では、短期記憶過程におけるモーツァルト効果を誘発する脳活動の変化を調べるために、fMRI ではなく脳磁図 (MEG; Magnetoencephalography) を用いた。fMRI は脳活動によって引き起こされる血中酸素濃度である BOLD 信号 (BOLD; blood oxygenation level dependent) を観測しており、空間解像度が高いという利点があるが、時間解像度が低く (数秒単位)、撮像中に大きな音になるため音楽聴取を用いた実験には不向きである<sup>51)</sup>。一方、MEG は、神経活動により発生する磁場を検出するため神経活動を直接測定可能で、時間解像度が高いという利点があり、撮像中に大きな

音はならず、音楽聴取を用いた実験に向いている<sup>52)</sup>。そのため、本研究では、音楽聴取の実験に向いている MEG を用いることとした。MEG では、複数の周波数帯域の神経活動を測定することができる(デルタ 2-4Hz、シータ 5-7Hz、アルファ 8-12Hz、ベータ 15-29Hz、低ガンマ 30-59Hz、高ガンマ 60-90Hz)。本研究は、その中でも想起時における低ガンマ周波数帯域 (30-59Hz) の活動に注目した。その理由は、神経活動におけるガンマ周波数帯域の振動はガンマ帯域活動 (GBA; gamma band activation) として高次認知過程を反映していると考えられている<sup>53-55)</sup>。ガンマ帯域反応(GBA)は、想起時の正しい応答の精度と反応時間の測定値と関連付けられ、短期記憶の正答の処理は、想起時のガンマ帯域応答 (GBR) に関連している<sup>38, 56)</sup>。想起時に発生する GBR は、メモリ内に入力されるオブジェクトに対して検索 (ボトムアップ) し、それに対して反応選択 (トップダウン) する過程において 35-45Hz 範囲内で発振を有していると解釈されている<sup>56)</sup>。この活動域は低ガンマ帯域 (30-59Hz) に含有されるため、今回の実験では、想起時における短期記憶課題に関してモーツァルト効果の時空間情報を MEG 計測により低ガンマ周波数帯域 (30-59Hz) を検出して注目した。尚、記憶の音楽の効果が短期記憶の記録や保持の段階で影響がある可能性があるが、今回は短期記憶の成績への効果を確認するのが目的であるため、想起時における脳活動に着目した。

## 2.8 作業仮説と検証方法

行動データにおいて、短期記憶課題を行なう前に音楽を聴取し、短期記憶の成績

改善されていた場合、短期記憶の認知プロセスが促進されている可能性がある。短期記憶課題遂行に重要な脳部位 DLPFC、IFG、MFG、IPL 及び海馬と、速いテンポの音楽やリズムを聴取した時に賦活する部位が一致する。したがって、速いテンポの音楽や速いテンポのリズムを聴くことによって、短期記憶に必要なこれらの脳領域にプライミング効果が発生するため、短期記憶課題の成績が向上させるモーツァルト効果が起こることが示唆される。

### 3 研究目的

日常生活や学習、あるいはオフィスワークにおいて重要な短期記憶課題におけるモーツァルト効果は未だ確固たる結論が出ていない<sup>7, 9, 28-30)</sup>。この原因として、先述したように 1)短期記憶課題の指標の違いや 2)使用する音楽のテンポやメロディの影響が考えられる。そこで、本研究は、上記の問題点を解決するために、以下のような方法論的工夫・改善を行った。まず、本研究では、再認課題を用いた短期記憶課題のすべての指標(Hit, Miss, CR, FA)を解析対象とした。さらに、テンポが速い/遅い音楽及びメロディがある/なし、音なしの 5 条件を準備し、テンポとメロディ要因がモーツァルト効果に及ぼす影響を調べることができるようにした。本研究の目的は、上記のような工夫をすることで、短期記憶課題におけるモーツァルト効果の神経基盤について MEG を用いて詳細に明らかにすることであった。

## 4. 研究方法

### 4.1. 被験者

本研究はヘルシンキ宣言に基づき、東北大学大学院医学系研究科倫理委員会の承認を得て行なった(2013-1-135)。また、承認された説明文書に基づいて、被験者に対して研究の目的、安全性について書面および口頭にて説明したのち、書面による同意書を得てから、被験者は実験に参加してもらった。20 歳以上の健康な右利き成人で、精神疾患及び聴覚障害の既往歴が無い 22 人が実験に参加した。先行研究の結果から、音楽暦の長さによって様々な認知課題の成績が異なることが報告され<sup>10, 57, 58)</sup>、特に短期作業記憶が楽器演奏能力と深く拘わっていて、音楽体験が認知課題の成績を向上させている<sup>59-62)</sup>。そのため、音楽暦が 15 年以上の参加者で且、参加者の中で上位 10% に当たる 2 人(音楽暦 18 年と 17 年)を解析対象から除外した。最終的に、20 人(年齢 20-26 歳、平均年齢 22.55 歳 (SD1.64)、男性 8 名、女性 12 名)に対して解析を行った。被験者の募集は大学の掲示板などを利用して公募した。被験者には実働時間に応じて大学規定の謝金を支払った。

### 4.2. 音刺激

速いテンポの音楽(速いテンポの音楽メロディあり)、遅いテンポの音楽(遅いテンポの音楽メロディあり)、速いテンポのリズム(速いテンポの音楽メロディーなし)と遅いテンポのリズム(遅いテンポの音楽メロディーなし)の 4 種類を 30 秒間の音



刺激として使用した。今回の実験では先行研究を参照し、1 分あたり 150 拍 (BPM; beat per minute) を速いテンポとして使用し、60BPM を遅いテンポとして使用した<sup>12, 20, 63-68</sup> (図 1)。今までの研究に基づき、メロディはモーツァルト作曲「2 台のピアノのためのソナタ ニ長調 KV448」を音楽刺激として使用した。この作品は、2 台のピアノのためのソナタであるため、奏者として 2 人の熟練したピアニストが演奏した。彼らは音楽大学のピアノ科を卒業し、現役の音楽家でありピアノ教師である。オリジナルのスコアに従い 120BPM で MIDI キーボードに演奏録音したものを、Steinberg Cubase 7 シーケンサーソフト<sup>69</sup>)を用いて音程を変えずに 150BPM と 60BPM に変更した。メロディなしの音楽としてメトロノームのみのリズム刺激も同様に 150BPM と 60BPM で作成した。

#### 4.3. 短期記憶課題

本研究では、再認テストを用いた短期記憶課題はスタンバーク課題を用いた(表 2)。被験者は、ターゲットとして表示される 8 個の数字を見て、それらを暗記した。その後、被験者は、提示された 1 個の数字が、ターゲットで表示された 8 個の数字に含まれていたかどうかを「はい」か「いいえ」で回答した。例えば、ターゲットで 8 個の数字が ”2 9 4 3 4 2 5 7” で、次に表示された 1 個の数字が「9」であり、提示された 数字がターゲットに含まれていた場合 (古い(old)刺激)、「はい」が正答 Hit となり「いいえ」は Miss という反応であった。例えば、質問が提示されるプローブが「0」

であり、提示された数字がターゲットに含まれていない場合（新しい(new)刺激）、「いいえ」が正しく棄却されて正答 CR となり「はい」は誤警報 FA であった。本研究では、古い(old)刺激と新しい(new)刺激を 50%ずつで構成し、それらの回答である Hit と CR の両方を正答として扱った。尚、難易度を上げるために、ターゲット 8 個の数字の中に、同じ数字が 2 個呈示される。ターゲットは 3 秒間提示し、その後 1 秒のクロスマークが続き、数字が提示されるプロンプト（質問）は 2 秒間提示され、被験者はその間に回答した。試行回数は 10 回であった（図 2）。

#### 4.4. 実験計画

実験課題は、各 5 条件が 2 回ずつ行われる 10 ブロックで構成されていた。1 ブロックは短期記憶課題 10 試行からなった。すなわち、各条件下で 100 試行の短期記憶課題を行なった。被験者は、音楽やリズムの音を聞いた後あるいは無音状態による 30 秒のインターバルの後に、各条件で 1 ブロック内の 10 試行の短期記憶課題を行った。各条件は 10 ブロック中をランダムに提示した。ブロック内の短期記憶課題の提示順序もランダムであった。30 秒のインターバルは、以下の 5 条件であった（図 3）。

1. 遅いテンポの音楽メロディありを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件

（遅いテンポの音楽）。

2. 速いテンポの音楽メロディありを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件

（速いテンポの音楽）。

3. 遅いテンポの音楽メロディなしを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件

(遅いテンポのリズム)。

4. 速いテンポの音楽メロディなしを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件

(速いテンポのリズム)。

5. 無音状態、短期記憶課題は無音状態後に行われた条件

実験は、実験の説明に 5 分、課題練習に 10 分、MEG、EEG 測定のための装着に 45 分、MEG・EEG 測定をしながらの本実験に 85 分かかった(1 ブロック 17 分の課題を 5 回、ブロック間で休憩の希望があった場合 5 分休憩をした)。その後、MEG・EEG 装置を外すために 15 分、質問紙回答に 15 分、MRI 撮像に 20 分かかった。そのため、実験全体で約 3 時間 40 分の実験であった (図 4)。

#### 4.5. 心理指標

被験者の性格を調べるために、NEO-FFI 人格検査<sup>70)</sup>の日本語版<sup>71)</sup>を用いた。NEO-FFI 人格検査は、神経症傾向 (N)、外向性 (E)、開放性 (O)、協調性 (A) と誠実性 (C) の 5 つの主要な次元を測定する計 60 質問を各 12 項目 (スコア範囲、0 ~48) に分けて構成されている。NEO-FFI 人格検査を使用した理由は、先行研究で内向的な性格を持つ被験者は、認知課題において音楽の影響を受けやすく成績が悪くなることが知られているからである<sup>20-22)</sup>。短期記憶課題では、高い開放性の性格を持つ被験者は成績がよい<sup>72)</sup>という報告があったことから、この実験では行動データの分

析において共変量に O スコアを使用した。NEO-FFI 人格検査の平均（標準偏差）得点は、N スコアが 26.85 (8.80)、E スコアが 29.45 (5.81)、O スコアが 31.55 (6.23)、A スコアが 30.85 (4.76)、C スコアが 28.95 (6.39)であった。また、先行研究で嫌いな音楽を用いた場合に、好みの音楽よりも認知課題の成績を向上した<sup>73)</sup>報告があるため、この実験では被験者は 9 段階のリッカート尺度により音楽のテンポの速さの好みについて評価した（「とても好き」で最高得点の 9 点）（表 3）。音楽のテンポ選好得点の平均（標準偏差）得点は、速いテンポに関するスコアが 6.65 (1.31)、遅いテンポに関する得点が 4.40 (1.64)であった。このスコアは、行動データの解析において共変量として使用した。

#### 4.6. 実験手続き

被験者は、東北大学加齢医学研究所にある横河電機の全頭型 MEG システムが装備された磁気シールドルームの中のベッドに横たわりながら、課題を行った。聴覚刺激は、空気圧管のカナル式ヘッドフォンを用いて送られ、まず音が聞こえていることを確認し、その後、各被験者の好みに合わせて音量を調節した。視覚刺激は、被験者の顔の約 0.5 メートル前に設置されたモニターに提示した。短期記憶課題では、被験者は「はい」の回答の場合には右手人差し指の応答ボタンを押し、「いいえ」の回答の場合には左手人差し指の応答ボタンを押した。実験中は、極力頭の位置を動かさないように被験者に指示した。被験者は必要に応じて 10 ブロック行われた試験間で休憩

を取った。

## 4.7. MEG、EEG、MRI の画像撮像と画像データの前処理

### 4.7.1. MEG 撮像

全ての MEG データは全頭型 200 チャンネル MEG システム (PQA160C) (横河電機株式会社) を用いて、100Hz のローパスフィルタ処理を行ない、サンプリング周波数を 1000Hz で記録した。計測前に頭部位置及びコイル位置の確認のために被験者の頭部形状を 3D デジタイザー (FastSCAN Cobra) (Polhemus Inc.) を用いて測定、デジタル化した。

### 4.7.2. EEG 撮像

眼球運動や心拍をノイズとして MEG データから除去するために、日本光電 Neurofax (EEG-1200) (日本光電工業株式会社) を用いて EEG データを MEG 撮像と同時に測定し、サンプリング周波数を 500Hz で記録した。眼球運動として Fp1、Fp2、C3-C4、F7、F8、EO1、EO2 チャンネルを収集し、心拍数として EKG + チャンネルを収集した。各被験者の Hit と CR 試行毎の MEG データから EEG で測定した眼球運動と心拍をイベントとして取り出し、ノイズ除去を行なった。

### 4.7.3. MRI 撮像

解剖学的部位の特定を行なうために MEG データを MRI 画像に重ね合わせる必要

がある。全ての MRI データの取得を、東北大学加齢医学研究所にある 3 テスラスキ  
ャナー (3-T Achieva; Philips Electronics N.V.) を使用して行った。高分解能 T1 強  
調画像 (T1WIs) を撮像マトリックス  $240 \times 240$ 、エコー時間(echo time; TE) 3ms、  
撮像面範囲(Field of view; FOV) 24 cm、スライス厚 1.0mm、スライス 162 スキャン、  
6.5ms の繰り返し時間(repetition time; TR)により、3D のグラジエントエコーシーク  
エンス(Magnetization-Prepared Rapid Gradient-Echo; MPRAGE) 法で撮像し、1  
つの全脳の撮像となった。同じ MRI 装置を用いた他実験等で撮像したデータがある  
被験者には、以前撮像した T1 強調画像の再利用について許可を得た上で使用した。

#### 4.7.4. 画像データの前処理

MEG、EEG、MRI 撮像データは解析ソフトウェア MEG laboratory (MEG160)  
(横河電機株式会社) を使用し、MRI による解剖学的な T1 強調画像データにコイル  
位置(RPA; Right Preauricular、LPA; Left PreAuricular、NASION)の座標を指定し、  
デジタイザーによるデータと座標及び頭部形状の位置合わせをした。脳の皮質レベル  
で解析を行なうため、被験者毎の T1 強調画像データは、Brainsuite 14<sup>74)</sup>を用いて皮  
質モデル(cortex model)を作成した。処理された T1 強調画像は、  
MEG/EEG/SEEG/ECOG データ解析ソフト Brainstorm <sup>75)</sup>へ 15000 バーテックス(V;  
vertex)で取り込み、前交連、後交連、大脳半球間裂、鼻根点、左右の耳介点の基準点  
を決定した。MEG、EEG データをチャンネルファイルとして Brainstorm に取り込

み、センサーの座標合わせを行なった。各試行で実験条件である 5 条件と Hit、CR 回答のイベント毎の時間をトリガーとして取り込み、それぞれイベントリストを作成した。次に EEG で測定した眼球運動と心拍をイベントとして取り出し、主成分分析によるノイズ除去を行なった。またノイズが多い LC11 チャンネルを除いた。次に、各条件における Hit と CR のイベントリストより、想起時のフェーズであるプローブ（質問）が提示された時間（トリガー）を 0 に設定し、タイムウィンドウをととしてベースラインをトリガー前 300ms、活動域としてトリガー後 400ms を選択した。被験者の条件ごとにタイムウィンドウの平均を求めた。信号源推定のために、Open MEEG<sup>76)</sup>を用いて、レイヤーごとに頭蓋骨を 4mm と設定し 1922 V でヘッドモデルを計算した。その際、重複球体モデルを採用し仮想球を作成した。次に、平均化されていない単体のタイムウィンドウを使ってノイズ共分散行列を計算した。電流源推定法として重み付き最少ノルム推定法 (wMNE; weighted Minimum Norm Estimation) を用いた。タイムウィンドウの平均で時間周波数解析(Morlet wavelets)を行ない、低ガンマ周波数帯域 35-45Hz の活動を抽出、事象関連摂動（事象関連同期/非同期 Event-Related Synchronization/ Event-Related Desynchronization; ERS/ ERD）によりベースライン（トリガーから前 300ms）と活動域(トリガーから後 400ms)を指定し標準化した。皮質モデルを 15000V で標準脳へ変換し、各タイムウィンドウのベースラインを切り取り、活動域の 400ms を 100ms 毎、時系列に 4 分割して書き出した。各個人条件ごとのタイムウィンドウの活動域を低ガンマ帯域活動(GBA)として算

出し、集団解析を Statistical Parametric Mapping 8 (SPM8; Welcome Department of Cognitive Neurology) と MATLAB R2008a (Mathworks, Natick) にて行った。全ての画像は、半値全幅 10 mm の等方性ガウシアンカーネルを用いて平滑化した。フローチャートは図 5 に示した。

#### 4.8. MEG データと行動データの統計解析

各条件に応じた特定の脳活動を同定するために、各条件と無音状態のデータの差分を次のように算出した。1) 遅いテンポの音楽 – 無音状態、2) 速いテンポの音楽 – 無音状態、3) 遅いテンポのリズム – 無音状態、4) 速いテンポのリズム – 無音状態。MEG データは、SPM8 上の 2 要因の被験者内反復測定分散分析を用いた。これらの条件における経時的な誘発活動を調査するために、質問が提示されたプローブから 400ms までのタイムウィンドウを 100ms 毎に 4 分割した (図 6)。全脳分析のために統計的閾値は、ボクセルレベルについてファミリーワイズエラー(FWE; Family wise error)<sup>77)</sup>による多重比較補正を採用して  $P < 0.05$  とした。上記の解析で有意になった領域を対象に、時系列にベースラインと比較したガンマ帯の振動的活動のパワーの事象関連摂動 (ERS/ ERD) の増減割合を求めるために、各タイムウィンドウで事象関連スペクトラム摂動 (Event-related spectrum perturbation: ERSP) を以下の計算式より算出した。

$$\text{ERSP} = (\text{ベースライン-タイムウィンドウ}) / \text{ベースライン} \times 100 (\%)$$



行動データは、予測分析ソフトウェア 22.0.0 版(PASW Statistics 18) (SPSS Inc, 2010)を用いて解析した。正答回答である Hit と CR の正答率と反応時間を指標として、各条件と無音状態との差分を求め、無音状態との差分を求めた Hit と CR の正答率と反応時間に対して被験者内 2 要因共分散分析(テンポ要因とメロディ要因)を実施した。共変量は、性別、NEO-FFI 人格検査の O スコア、音楽のテンポ選好得点を用いた。

## 5. 研究結果

### 5.1. 行動実験データの結果

各条件における正答率と反応時間の行動データは表 4 及び表 5 に示した。さらに Hit と CR の正答率と反応時間について、) 遅いテンポの音楽 – 無音状態、2) 速いテンポの音楽 – 無音状態、3) 遅いテンポのリズム – 無音状態、4) 速いテンポのリズム – 無音状態というように、各条件と無音状態の差分を求めて表 5 に示した。被験者内 2 要因共分散分析により、速いテンポ要因（テンポが速い音楽及びメロディがある/なし）と遅いテンポ要因（テンポが遅い音楽及びメロディがある/なし）で解析した結果、速いテンポ要因において CR の反応時間で有意差があった ( $F(1, 18) = 6.18$ ,  $p = 0.023$ )。Hit と CR の正答率と、Hit の反応時間に関しては有意差がなかった。今回の行動実験の結果から、メロディの有無に拘わらず、速いテンポの音楽を聴いた場合、モーツァルト効果が短期記憶課題における CR の反応時間で生起することが明ら

かになった。

## 5.2. MEG 実験データの結果

次に、行動実験よりこのモーツァルト効果が確認できた CR 時の MEG データを主たる解析対象とし、モーツァルト効果の神経基盤を調べた。4 つのタイムウィンドウ毎に CR 時の MEG データを用いてメロディ要因とテンポ要因を含む被験者内 2 要因の被験者内反復測定分散分析をした。全脳分析により、左下前頭回 (IFG) のボクセルレベルにおいて、300-400ms のタイムウィンドウでガンマ帯の振動的活動のパワーは 速いテンポ条件で、遅いテンポ条件よりも低い水準の活動を示した ( $P = 0.016$ , FWE corrected, MNI coordinates = -47, 30, -25)(図 7 および表 6)。この速いテンポ条件で有意となった脳活動は脱活性化であり、仮説では、脳活動の賦活を想定していたため、左 IFG における脳活動を時系列で調べた。各タイムウィンドウにおいて、ベースラインと比較したガンマ帯の振動的活動のパワーを見るために事象関連スペクトラム摂動 (ERSP) を算出し、左 IFG における脳活動の増減グラフを作成した (図 8 および表 7)。ガンマ帯域反応 (GBR) のピークが、速いテンポの条件では 100-200ms、遅いテンポの条件では 300-400ms で左 IFG の賦活がピークに到達した。全脳分析及び先行研究による仮説に基づいて、Pcikatlas ツールで作成した背外側前頭前野 (DLPFC)、下頭頂小葉 (IPL)、中前頭回 (MFG) 及び海馬の解剖学的なマスクを用いた関心領域を用いた解析を行ったが、有意な賦活は見られなかった。閾値を多重

比較補正を行わない  $p < 0.005$  にした場合であっても、有意な結果は得られなかった。

## 6 考察

### 6.1 結果のまとめ

本研究は、世界で初めて MEG（脳磁図）を用いて、短期記憶におけるモーツァルト効果の神経基盤を調べた。短期記憶に重要な役割を持っている左 IFG は、速い音楽を聞いた後に行った短期記憶課題の想起時において低ガンマ周波数帯域（30-59Hz）で解析したところガンマ帯域反応（GBR）が生じた。また、左 IFG でのガンマ帯域反応を 100ms の時間枠の時系列で見たところ、GBR のピークが、速いテンポの条件では 100-200ms、遅いテンポの条件では 300-400ms で脳活動の賦活のピークが起き、反応時間に影響を及ぼしていることを示唆していた。これらの結果は、短期記憶課題におけるモーツァルト効果の神経基盤として、左 IFG が重要な役割を担っていることを示し、さらに、メロディがあってもなくても速いテンポの音楽を聴取した条件で左 IFG において 100ms-200ms 時点での早期の賦活が起きていることがわかり、このタイミングの差が、短期記憶の反応時間の促進に寄与していることを世界で初めて明らかにした。

### 6.2 MEG データが示した短期記憶におけるモーツァルト効果

メロディの有無にかかわらず、速いテンポ条件の CR の脳活動において、左下前頭

回 (IFG) は、300 - 400ms のタイムウィンドウで有意 (速いテンポ<遅いテンポのコントラスト) であった (図 7 及び表 6)。本実験の仮説は、短期記憶課題遂行に重要な脳部位と、速いテンポの音楽やリズムを聴取により賦活する部位が一致することで、短期記憶の成績に影響を与えるということであった。IFG は、これらのどちらにも共通する脳部位であった。しかし、300ms-400ms で発生した振動は不活性な活動であった。仮説では、IFG で賦活が見られるとしていたため、時系列に IFG における脳活動の推移を調べた。その結果、速いテンポのリズム条件では、ガンマ帯域反応(GBR; gamma band response)のピークが速いテンポの条件では 100-200ms で発生した。遅いテンポの条件では 300-400ms で賦活のピークが発生し、脳活動の賦活のタイミングの違いによって速いテンポの条件と遅いテンポの条件間の脳活動の差が最も大きくなった 300-400ms で全脳分析において大きな有意差があったと考えられる (図 8 及び表 7)。このことから、左 IFG の賦活が、各条件で異なるタイムウィンドウにおいて発生していることを示していて、速いテンポの音楽を聴くことによって、続く短期記憶課題に必要な左 IFG を早く活性化させ、短期記憶のプロセスの成績が改善していることを示唆し、プライミング仮説が該当すると考えられる。

GBR のピークの速さと反応時間に関する先行研究では、被験者に単純に速く反応するよう求めた単純反応課題において、GBR のピークが早いタイミングであればあるほど反応時間が速くなった<sup>78)</sup>。このような現象は、単純反応課題だけでなく、認知課題試行でも発生し、短期記憶でタスク処理の成績と GBR が関連していると説明さ

れている<sup>38)</sup>また GBR は短期記憶課題の想起時にプローブ（質問）に提示された質問をボトムアップし、処理された情報を記憶情報と照合する過程を反映している<sup>79)</sup>。したがって、この過程が早いタイミングで行なわれることで、早く適切な適応行動が可能になり反応時間が短縮されている可能性がある。ゆえに本実験で速いテンポ条件において遅いテンポ条件よりも左 IFG の活動振幅が早いタイミングで発生したことが短期記憶課題の反応時間を速くしたと言える。

### 6.3 他領域で脳活動が認められなかったことについて

今回の実験では、短期記憶に重要な役割を持ち、且つ速いテンポの音楽やリズムを聴いた時に賦活する共有の領域である、背外側前頭前野(DLPFC)、下頭頂小葉(IPL)、中前頭回(MFG)及び海馬で有意な活性化あるいは不活性化が見られなかった。今回は高次認知課題の処理過程が反映されるガンマ帯域活動(GBA)を抽出し、短期記憶課題の想起時の正答と反応時間に関連があるガンマ帯域反応(GBR)に注目した。先行研究で、困難な課題の場合に GBR が強化するという報告がある<sup>80)</sup>。本実験では、簡単な問題であったことから天井効果が起きた。タスクが容易であったため、短期記憶に必要な脳領域における GBR の振幅が小さくなり、反映されなかった可能性がある。一方、old/new 効果における MFG 領域の脳活動で Hit と CR 特有の振幅があり<sup>81-83)</sup>、CR で右の MFG で大きな負の活動が見られる報告<sup>83)</sup>がある。本研究ではこのような CR 効果は見られなかった。速いテンポの条件は CR のための MFG での大きな不

活性化を抑制させるプライマー効果が起きたとも考えられる。速いテンポの音楽は、MFG をわずかな脳の活動で効率よく活動を改善したことが示唆される。

今後の課題として、短期記憶課題の難易度を上げる必要が考えられる。また、本実験で測定した GBR は他の周波数帯域と比較して振幅が非常に小さい上に、海馬は他の領域と比較して深部にあるため、特に振幅の測定が難しかったことが考えられる。ガンマ帯域と位相が揃っていて且つ大きな振幅であるシータ帯域（4-8Hz）<sup>84)</sup>を解析することで解決できた可能性がある。

#### 6.4 短期記憶課題について

先行研究で扱われた短期記憶課題の全てが、単語や数字の再生を対象としており Hit を正答とした課題であって<sup>7, 9, 28-30)</sup>（表 1）、1 研究のみ、Hit の正答率を向上させた<sup>30)</sup>。本研究では、Hit と CR の正答率（表 4）と、Hit の反応時間（表 5）に関しては有意差がなかった。まず、本研究で考えられる原因は、容易な課題であったため天井効果が発生し、改善効果が検出できなかったという可能性である。つまり、ベースライン(今回の実験の場合は、無音)での Hit の成績が約 8 割で CR の成績が約 9 割と高かったため、音楽聴取による課題の成績の向上の余地がなかったと考えられる。この可能性を検討するために、覚える桁数を増やし、再認する数字を 2 つ上にするなど工夫し、より難しい短期記憶課題を用いた実験を行う必要がある。

それでも CR の反応時間で有意差が起きたことは、Hit と CR の特性の違いによる

ものであると考えられる。Hit は「はい」と答えるため、Yes/No 判断の場合、Yes バイアスが発生し<sup>85)</sup>、CR より反応時間が速くなり、また CR は Hit と比べて、より多くの検索処理を必要とするため時間がかかる<sup>36, 37, 39, 86)</sup>。Hit はターゲットに提示された「見た」数字と合致していれば検索が終了する。しかし、CR は「見ていない」と判断するためには全ての記憶と合致して、なかったことを確認しなければ判断することができないため、検索に時間がかかる。したがって、CR の反応時間は Hit と比べて長いため、音楽聴取による向上の余地があったのではないかと考えられる。

Hit と CR の記憶処理のメカニズムでは、低ガンマ周波数帯域で計測し解析した研究が行なわれ、Hit と CR の正答率や反応時間について調査されている<sup>38, 87-90)</sup>。Hit と CR の活性領域は重複しているが、CR より Hit の条件で脳活動が大きいことから、メカニズムが異なるとされ、old/new 効果と言われている<sup>38, 88)</sup>。この違いは、Hit は正しい結果を報告するため CR よりも大きなモチベーションを持つためであるという報告がある<sup>37)</sup>。したがって、本実験の結果のように CR の成績を改善させることは、通常困難であると思われる。

また、短期記憶の成績の反応時間が速くなるという先行研究は、経頭蓋磁気刺激法 (TMS; Transcranial magnetic stimulation) を用いた研究で報告されている。TMS 刺激のタイミングが記銘の前の時に想起時の反応時間が速くなった<sup>91, 92)</sup>。TMS が脳内のニューロンを興奮させて反応時間を亢進させることと、本研究の短期記憶を行なう

前の速いテンポの音楽聴取効果と類似している可能性がある。よって、TMS 刺激後や音楽聴取後に遂行される短期記憶の記銘や保持のフェーズでもその影響が起き、想起まで継続している可能性が考えられる。

## 6.5 行動実験データが示した短期記憶におけるモーツァルト効果

行動実験データの結果は、メトロノームだけのリズム条件であってもテンポが速い場合に有意であることから、メロディがあってもなくても速いテンポの音楽条件は遅いテンポの音楽条件よりも CR の反応時間で速いことを示した。よって、速いテンポの音楽を聴いた後に行った短期記憶課題では、モーツァルト効果が生起したことを示す。メロディがモーツァルト効果に関係していなかったことについては、先行研究と一致している。例えば、メタ分析の研究によると、モーツァルト効果の生起は、モーツァルトの楽曲であっても他の楽曲でも同様であったことを報告している<sup>31)</sup>。同様に、短期記憶課題において、モーツァルト楽曲ではないヴィヴァルディ楽曲でモーツァルト効果ならぬヴィヴァルディ効果が起きて成績を向上させたという報告がある<sup>30)</sup>。一方で、テンポが速い場合にモーツァルト効果が生起したという結果は、先行研究と一致する。例えば、同じ楽曲であってもテンポが速い場合にモーツァルト効果が生起することが報告されている<sup>11, 12, 93)</sup>。上記の結果を踏まえると、モーツァルト効果の生起に重要な要素の一つとして、テンポのみが影響していると考えることができる。さらに、今までの研究に基づき、本研究で使用したモーツァルトの楽曲であるピアノソ



ナタ KV448 は、とメトロノーム音は、ともに 150BPM と標準的なピアノソナタ KV448 の速度(120BPM)よりも速い。そのため、テンポの効果は明瞭に出現しやすく、モーツァルト効果が生じたのではないかと考えられる。

## 6.6 テンポと音楽の定義

本研究の結果、テンポのみがモーツァルト効果の要因であると示唆された。音楽作品は多様な刺激の組み合わせであるが、音楽の構成要素で重要なことは、音楽的規則があり知覚的に予期できることである。中でも、リズムは継起する事象の秩序立った特性であり、心に感じられ知覚され、人間の活動に由来するものとされている<sup>94)</sup>。リズム構造の知覚的側面の1つがテンポであり、それは単位時間当たりに知覚された要素数に対応する<sup>94)</sup>。1分間に30から300回のビートは、音楽において速度を感じることができる範囲であり、我々が聞くほとんどの音楽が、1分間に60から150回の拍を持つ範囲に存在する<sup>95)</sup>。音楽の表現としても重要で、テンポの速さによって、はつらつとしたりゆったりとしたりと印象を変える。本実験で使用したテンポの速さは、遅いテンポは1分間に60回で速いテンポは1分間に150回であり、日常的な音楽構成の要素として適切なものであると考える。

## 6.7 モーツァルト効果に関する先行研究と本研究方法の違い

モーツァルト効果を検証した実験で使用された楽曲は、「モーツァルト作曲「2 台のピアノのためのソナタ ニ長調 KV.448」や他楽曲をフルレングスで使用し、KV448

の場合、被験者は 10 分間音楽を聴取した。本研究では、集団による時間周波数解析を行なうために各条件下で 100 試行の MEG 計測データを得る必要があり、且つ脳活動の信号源推定の精度を高く保つために MEG 計測を 1000Hz で測定する必要があり、精度を保つためには 1 ブロックを 2400 秒以内の実験に納めなければならなかった。

したがって、音楽やリズムの音を聞いた後あるいは無音状態によるインターバルを 30 秒に設定した。音楽聴取時間に関して、先行研究の手法とは提示時間が短くなったことは本実験の限界点である。ただし、本実験では、音楽を聴いたか聴かなかったかの条件による相違を知りたかったため、30 秒間の聴取は、被験者が音楽として認識したり楽しんだりするには十分な時間であると考ええる。

また、先行研究では 10 分間の音刺激の後、モーツァルト効果は 15 分間持続した<sup>96)</sup>。本実験では 30 秒間の音刺激を聴いた後、1 試行 7 秒の短期記憶課題を 10 試行行なった。音楽を聴いた後、課題が終了する 70 秒間、音楽の効果が継続する必要がある。

最初の課題から最後の課題と 63 秒の差が生じている。各条件の CR における反応時間で最初の 1 試行と以後の 9 試行の平均を求め、対応あるサンプルの T 検定を行なったところ、遅いテンポの音楽条件でのみ有意であった ( $t=-2.248$ ,  $df=19$ ,  $p<.037$ )。

よって、遅いテンポの音楽条件以外の条件では短期記憶課題 10 試行中の 70 秒間、モーツァルト効果は持続していると考ええる。遅いテンポの音楽条件でモーツァルト効果が持続できなかったのは、本来の音楽のテンポは 120BPM であり、60BPM の音楽は非常に遅かった。被験者が適切な音楽と認識しなかった可能性がある。遅いテンポの音

楽と無音条件でモーツァルト効果が起きなかった結果<sup>12)</sup>もあり、遅いテンポの音楽はモーツァルト効果のための音楽の効果が弱くなることが示唆され、脳活動でも同様であると考察する。

## 6.8 本研究の意義

本研究は、短期記憶に必要な左下前頭回（IFG）において、「モーツァルト作曲「2台のピアノのためのソナタ ニ長調 KV.448」のメロディの有無に影響されることなく、テンポが速さの条件の違いにより短期記憶に重要な左下前頭回の脳活動の賦活のタイミングが異なることがわかった。速いテンポの音楽を聴いた後に行った短期記憶課題において、脳活動の早期の賦活が起き、モーツァルト効果として反応時間に反映された可能性がある。よって短期記憶課題に限らず、左 IFG の活動が要求される課題の場合、この音楽効果が期待でき、成績を向上させることができると考えられる。

また、この効果は、「見たことがない」ものに対し、正しく判断する反応時間を短縮することがわかった。日常的に「見たことがある」判断と、「見たことがない」判断は共に日常生活で重要な役割を持つ。音楽効果により CR が改善する例として、近高齢者は短期記憶システムの機能低下<sup>97)</sup>によって初めて会った人かどうかを正しく判断できなくなり、来たことがない場所にいるか判断が難しくなる。速いテンポの音楽を聴くことによって、「知らない」人や場所であることに正しく迅速に判断ができる可能性がある。

通常、認知機能の改善は反復学習が基本であるが<sup>98, 99)</sup>、音楽を聴くだけでスキルが向上するということを調査した本研究は、リハビリテーションなど近接する学問領域にも応用できると考えられる。

## 7 結論

本研究では、日常生活において重要な短期記憶課題におけるモーツァルト効果があるのか、テンポやメロディがどのような影響を与えているのかについて調べるために、テンポが速い/遅い音楽及びメロディがある/なし、音なしの5条件を用いた実験を行った。

本研究の結果は、速いテンポ条件の短期記憶回答 CR 時の脳活動は、左 IFG におけるガンマ帯域反応(GBR)のピークが、速いテンポの条件で 100-200ms で発生し、遅いテンポの条件では 300-400ms で脳活動の賦活のピークが起きたことを示した(図 8 および表 6 を参照)。速いテンポの音楽を聴くことは、短期記憶の想起時のプロセスで、短期記憶に重要な左 IFG に早期の賦活を引き起こす。神経基盤での回答に必要な記憶との照合過程が早まることによって反応時間の改善につながり、速くなったことを示唆している。よって、メロディの有無に拘わらず速いテンポの音楽を聴くことによって短期記憶課題成績が向上することがわかった。

## 8 謝辞

本研究を行うにあたり、実験に参加下さいました被験者の皆様に感謝いたします。

また、本研究遂行および本論文の作成にあたり、終始丁寧で熱心なご指導・ご助言を賜りました指導教官である東北大学加齢医学研究所脳機能開発研究分野・野内類助教、野澤孝之助教、横山悟非常勤講師に厚くお礼申し上げます。並びに同分野所属の研究者の皆様より、様々なご指導・ご支援、また激励を賜りましたことを深く感謝致します。最後になりましたが、終始御懇篤なるご指導・ご支援を賜りました東北大学加齢医学研究所脳機能開発研究分野・川島隆太教授に深甚なる感謝の意を表します。

## 9 文献

1. 井出祐昭: 見えないデザイン : サウンド・スペース・コンポーザーの仕事: ヤマハミュージックメディア.2009;16, 269p.
2. Tuniz C, Bernardini F, Turk I, et al.: Did Neanderthals Play Music? X-Ray Computed Micro-Tomography of the Divje Babe 'Flute'. Archaeometry 2012; 54:581-590
3. Haake AB: Individual music listening in workplace settings: An exploratory survey of offices in the UK. Music Sci 2011; 15(1):107-129
4. Rocking 9 to 5. 2014; Available from: <https://news.spotify.com/us/2014/04/10/rocking-9-to-5/>.
5. 川西 孝 and 奥 忍: 「現代の若者と音楽」に関する調査. 岡山大学教育実践総合センター紀要 2004; 4(1):43-53
6. Shih YN, Huang RH, and Chiang HS: Correlation between work concentration level and background music: A pilot study. Work 2009; 33(3):329-333
7. Schellenberg EG, Nakata T, Hunter PG, et al.: Exposure to music and cognitive performance: tests of children and adults. Psychology of Music 2007; 35(1):5-19

8. Rauscher FH, Shaw GL, and Ky KN: Music and spatial task performance. Nature 1993; 365(6447):611
9. Rauscher FH, Shaw GL, and Ky KN: Listening to Mozart enhances spatial-temporal reasoning: towards a neurophysiological basis. Neuroscience letters 1995; 185(1):44-47
10. Schellenberg EG: Music lessons enhance IQ. Psychological science 2004; 15(8):511-514
11. Thompson WF, Schellenberg EG, and Husain G: Arousal, mood, and the Mozart effect. Psychological science 2001; 12(3):248-251
12. Husain G, Thompson WF, and Schellenberg EG: Effects of musical tempo and mode on arousal, mood, and spatial abilities. Music Percept 2002; 20(2):151-171
13. Janata P and Grafton ST: Swinging in the brain: shared neural substrates for behaviors related to sequencing and music. Nature neuroscience 2003; 6(7):682-687
14. Koelsch S: Brain correlates of music-evoked emotions. Nature reviews. Neuroscience 2014; 15(3):170-180
15. Patel AD: Language, music, syntax and the brain. Nature neuroscience 2003; 6(7):674-681

16. Jausovec N and Jausovec K: Working memory training: improving intelligence--changing brain activity. *Brain and cognition* 2012; 79(2):96-106
17. Jausovec N, Jausovec K, and Gerlic I: The influence of Mozart's music on brain activity in the process of learning. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 2006; 117(12):2703-2714
18. Nantais KM and Schellenberg EG: The Mozart effect: An artifact of preference. *Psychological science* 1999; 10(4):370-373
19. Twomey A and Esgate A: The Mozart effect may only be demonstrable in nonmusicians. *Perceptual and motor skills* 2002; 95(3 Pt 1):1013-1026
20. Furnham A and Allass K: The influence of musical distraction of varying complexity on the cognitive performance of extroverts and introverts. *Eur J Personality* 1999; 13(1):27-38
21. Furnham A and Bradley A: Music while you work: The differential distraction of background music on the cognitive test performance of introverts and extraverts. *Appl Cognitive Psych* 1997; 11(5):445-455
22. Furnham A and Strbac L: Music is as distracting as noise: the differential distraction of background music and noise on the cognitive test



- performance of introverts and extraverts. *Ergonomics* 2002; 45(3):203-217
23. Hetland L: Learning to make music enhances spatial reasoning. *Journal of Aesthetic Education* 2000:179-238
  24. Graziano AB, Peterson M, and Shaw GL: Enhanced learning of proportional math through music training and spatial-temporal training. *Neurological research* 1999; 21(2):139-152
  25. Rauscher FH, Robinson KD, and Jens JJ: Improved maze learning through early music exposure in rats. *Neurological research* 1998; 20(5):427-432
  26. Gathercole SE: Cognitive approaches to the development of short-term memory. *Trends in cognitive sciences* 1999; 3(11):410-419
  27. Peterson LR and Peterson MJ: Short-Term Retention of Individual Verbal Items. *J Exp Psychol* 1959; 58(3):193-198
  28. Steele KM, Ball TN, and Runk R: Listening to Mozart does not enhance backwards digit span performance. *Perceptual and motor skills* 1997; 84(3 Pt 2):1179-1184
  29. Hirokawa E: Effects of music listening and relaxation instructions on arousal changes and the working memory task in older adults. *Journal of music therapy* 2004; 41(2):107-127
  30. Mammarella N, Fairfield B, and Cornoldi C: Does music enhance cognitive

- performance in healthy older adults? The Vivaldi effect. *Aging clinical and experimental research* 2007; 19(5):394-399
31. Pietschnig J, Voracek M, and Formann AK: Mozart effect–Shmozart effect: A meta-analysis. *Intelligence* 2010; 38(3):314-323
  32. Jackson CS and Tlauka M: Route-learning and the Mozart effect. *Psychology of Music* 2004; 32(2):213-220
  33. Bridgett DJ and Cuevas J: Effects of listening to Mozart and Bach on the performance of a mathematical test. *Perceptual and motor skills* 2000; 90(3 Pt 2):1171-1175
  34. Lynn SK and Barrett LF: "Utilizing" signal detection theory. *Psychological science* 2014; 25(9):1663-1673
  35. Bittrich K, Schulze K, and Koelsch S: Electrophysiological correlates of verbal and tonal working memory. *Brain research* 2012; 1432:84-94
  36. Aminoff EM, Freeman S, Clewett D, et al.: Maintaining a cautious state of mind during a recognition test: A large-scale fMRI study. *Neuropsychologia* 2015; 67:132-147
  37. Han S, Huettel SA, Raposo A, et al.: Functional significance of striatal responses during episodic decisions: recovery or goal attainment? *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*

2010; 30(13):4767-4775

38. Rieder MK, Rahm B, Williams JD, et al.: Human gamma-band activity and behavior. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology* 2011; 79(1):39-48
39. Wagner AD, Shannon BJ, Kahn I, et al.: Parietal lobe contributions to episodic memory retrieval. *Trends in cognitive sciences* 2005; 9(9):445-453
40. Leng X, Shaw GL, and Wright EL: Coding of musical structure and the trion model of cortex. *Music Percept* 1990:49-62
41. Schon K, Quiroz YT, Hasselmo ME, et al.: Greater working memory load results in greater medial temporal activity at retrieval. *Cerebral cortex* 2009; 19(11):2561-2571
42. Jonides J, Nee DE, and Berman MG: What has functional neuroimaging told us about the mind? So many examples, so little space. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior* 2006; 42(3):414-417; discussion 422-417
43. Koch K, Wagner G, von Consbruch K, et al.: Temporal changes in neural activation during practice of information retrieval from short-term memory: an fMRI study. *Brain research* 2006; 1107(1):140-150
44. Rottschy C, Langner R, Dogan I, et al.: Modelling neural correlates of

- working memory: a coordinate-based meta-analysis. *NeuroImage* 2012; 60(1):830-846
45. Bodner M, Muftuler LT, Nalcioglu O, et al.: FMRI study relevant to the Mozart effect: brain areas involved in spatial-temporal reasoning. *Neurological research* 2001; 23(7):683-690
  46. Khalfa S, Schon D, Anton JL, et al.: Brain regions involved in the recognition of happiness and sadness in music. *Neuroreport* 2005; 16(18):1981-1984
  47. Menon V and Levitin DJ: The rewards of music listening: response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *NeuroImage* 2005; 28(1):175-184
  48. Koelsch S: Towards a neural basis of music-evoked emotions. *Trends in cognitive sciences* 2010; 14(3):131-137
  49. McAuley JD, Henry MJ, and Tkach J: Tempo mediates the involvement of motor areas in beat perception. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2012; 1252:77-84
  50. Trost W, Fruhholz S, Schon D, et al.: Getting the beat: entrainment of brain activity by musical rhythm and pleasantness. *NeuroImage* 2014; 103:55-64
  51. Arthurs OJ and Boniface S: How well do we understand the neural origins

- of the fMRI BOLD signal? Trends in neurosciences 2002; 25(1):27-31
52. Ariely D and Berns GS: Neuromarketing: the hope and hype of neuroimaging in business. Nature reviews. Neuroscience 2010; 11(4):284-292
  53. Jensen O, Kaiser J, and Lachaux JP: Human gamma-frequency oscillations associated with attention and memory. Trends in neurosciences 2007; 30(7):317-324
  54. Pulvermuller F, Lutzenberger W, Preissl H, et al.: Spectral responses in the gamma-band: physiological signs of higher cognitive processes? Neuroreport 1995; 6(15):2059-2064
  55. Tiitinen H, Sinkkonen J, Reinikainen K, et al.: Selective attention enhances the auditory 40-Hz transient response in humans. Nature 1993; 364(6432):59-60
  56. Herrmann CS, Munk MH, and Engel AK: Cognitive functions of gamma-band activity: memory match and utilization. Trends in cognitive sciences 2004; 8(8):347-355
  57. Sluming V, Brooks J, Howard M, et al.: Broca's area supports enhanced visuospatial cognition in orchestral musicians. The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 2007;

27(14):3799-3806

58. Groussard M, La Joie R, Rauchs G, et al.: When music and long-term memory interact: effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus. *PloS one* 2010; 5(10)
59. Huang Z, Zhang JX, Yang Z, et al.: Verbal memory retrieval engages visual cortex in musicians. *Neuroscience* 2010; 168(1):179-189
60. Pallesen KJ, Brattico E, Bailey CJ, et al.: Cognitive and emotional modulation of brain default operation. *Journal of cognitive neuroscience* 2009; 21(6):1065-1080
61. Schulze K and Koelsch S: Working memory for speech and music. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2012; 1252:229-236
62. Franklin MS, Moore KS, Yip CY, et al.: The effects of musical training on verbal memory. *Psychology of Music* 2008; 36(3):353-365
63. Doyle M and Furnham A: The distracting effects of music on the cognitive test performance of creative and non-creative individuals. *Think Skills Creat* 2012; 7(1):1-7
64. Kallinen K: Reading news from a pocket computer in a distracting environment: effects of the tempo of background music. *Comput Hum Behav* 2002; 18(5):537-551

65. McConnell MM and Shore DI: Upbeat and happy: arousal as an important factor in studying attention. *Cognition & emotion* 2011; 25(7):1184-1195
66. Milliman RE: The Influence of Background Music on the Behavior of Restaurant Patrons. *J Consum Res* 1986; 13(2):286-289
67. Perham N and Vizard J: Can Preference for Background Music Mediate the Irrelevant Sound Effect? *Appl Cognitive Psych* 2011; 25(4):625-631
68. Thompson WF, Schellenberg EG, and Letnic AK: Fast and loud background music disrupts reading comprehension. *Psychology of Music* 2012; 40(6):700-708
69. Nelson M and Thom B: A survey of real-time MIDI performance. in *Proceedings of the 2004 conference on New interfaces for musical expression*. 2004. National University of Singapore.
70. Costa PT and MacCrae RR: Revised NEO Personality Inventory (NEO PI-R) and NEO Five-Factor Inventory (NEO FFI): Professional Manual: Psychological Assessment Resources.1992.
71. Shimonaka Y and Nakazato K: Personality in old age: Longitudinal study of personality change, ego function, and survival. *Jpn J Educ Psychol* 1999; 47(3):293-304
72. DeYoung CG, Peterson JB, and Higgins DM: Sources of openness/intellect:

- cognitive and neuropsychological correlates of the fifth factor of personality.  
Journal of personality 2005; 73(4):825-858
73. Perham N and Sykora M: Disliked Music can be Better for Performance than Liked Music. Appl Cognitive Psych 2012; 26(4):550-555
  74. Shattuck DW and Leahy RM: BrainSuite: an automated cortical surface identification tool. Medical image analysis 2002; 6(2):129-142
  75. Tadel F, Baillet S, Mosher JC, et al.: Brainstorm: a user-friendly application for MEG/EEG analysis. Computational intelligence and neuroscience 2011; 2011:8
  76. Gramfort A, Papadopoulos T, Olivi E, et al.: OpenMEEG: opensource software for quasistatic bioelectromagnetics. Biomedical engineering online 2010; 9(1):45
  77. Friston KJ, Holmes A, Poline JB, et al.: Detecting activations in PET and fMRI: levels of inference and power. NeuroImage 1996; 4(3 Pt 1):223-235
  78. Fründ I, Busch NA, Schadow J, et al.: From perception to action: phase-locked gamma oscillations correlate with reaction times in a speeded response task. BMC neuroscience 2007; 8(1):27
  79. Herrmann CS, Frund I, and Lenz D: Human gamma-band activity: a review on cognitive and behavioral correlates and network models.



Neuroscience and biobehavioral reviews 2010; 34(7):981-992

80. Senkowski D and Herrmann CS: Effects of task difficulty on evoked gamma activity and ERPs in a visual discrimination task. *Clinical Neurophysiology* 2002; 113(11):1742-1753
81. Curran T and Dien J: Differentiating amodal familiarity from modality - specific memory processes: An ERP study. *Psychophysiology* 2003; 40(6):979-988
82. Konishi S, Wheeler ME, Donaldson DI, et al.: Neural correlates of episodic retrieval success. *NeuroImage* 2000; 12(3):276-286
83. Rugg MD and Curran T: Event-related potentials and recognition memory. *Trends in cognitive sciences* 2007; 11(6):251-257
84. Jensen O and Tesche CD: Frontal theta activity in humans increases with memory load in a working memory task. *The European journal of neuroscience* 2002; 15(8):1395-1399
85. Frost R, Repp BH, and Katz L: Can speech perception be influenced by simultaneous presentation of print? *Journal of Memory and Language* 1988; 27(6):741-755
86. Criss AH, Wheeler ME, and McClelland JL: A differentiation account of recognition memory: evidence from fMRI. *Journal of cognitive neuroscience*

2013; 25(3):421-435

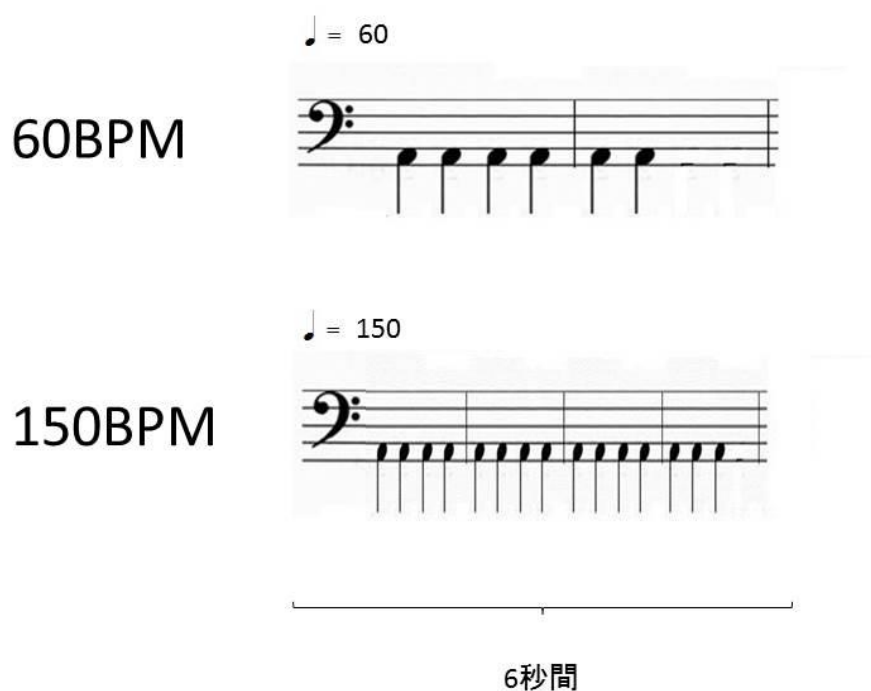
87. Aminoff E, Freeman S, Clewett D, et al.: Maintaining a cautious state of mind during a recognition test: A large-scale fMRI study. *Neuropsychologia* 2015; 67:132-147
88. Bittrich K, Schulze K, and Koelsch S: Electrophysiological correlates of verbal and tonal working memory. *Brain research* 2012; 1432:84-94
89. Han S, Huettel SA, Raposo A, et al.: Functional significance of striatal responses during episodic decisions: recovery or goal attainment? *The Journal of Neuroscience* 2010; 30(13):4767-4775
90. Wagner AD, Shannon BJ, Kahn I, et al.: Parietal lobe contributions to episodic memory retrieval. *Trends in cognitive sciences* 2005; 9(9):445-453
91. Evers S, BoËckermann I, and Nyhuis PW: The impact of transcranial magnetic stimulation on cognitive processing: an event-related potential study. *Neuroreport* 2001; 12(13):2915-2918
92. Sparing R, Mottaghy FM, Hungs M, et al.: Repetitive transcranial magnetic stimulation effects on language function depend on the stimulation parameters. *Journal of Clinical Neurophysiology* 2001; 18(4):326-330
93. Hunter PG, Schellenberg EG, and Schimmack U: Feelings and Perceptions

- of Happiness and Sadness Induced by Music: Similarities, Differences, and Mixed Emotions. *Psychol Aesthet Crea* 2010; 4(1):47-56
94. Fraisse P: Rhythm and tempo. *The psychology of music* 1982; 1:149-180
  95. Thaut MH: Rhythm, music, and the brain: Scientific foundations and clinical applications. Vol. 7. Routledge.2005.
  96. Hughes JR: The mozart effect. *Journal of the Royal Society of Medicine* 2001; 94(6):316-316
  97. Meguro Y, Fujii T, Yamadori A, et al.: The nature of age-related decline on the reading span task. *J Clin Exp Neuropsych* 2000; 22(3):391-398
  98. Wickelgren WA: Human Learning and Memory. *Annual review of psychology* 1981; 32:21-52
  99. James KH and Gauthier I: Letter processing automatically recruits a sensory-motor brain network. *Neuropsychologia* 2006; 44(14):2937-2949
  100. Cameron EL, Tai JC, Eckstein MP, et al.: Signal detection theory applied to three visual search tasks—identification, yes/no detection and localization. *Spatial Vision* 2004; 17(4):295-325
  101. Ratcliff R: Theoretical interpretations of the speed and accuracy of positive and negative responses. *Psychological review* 1985; 92(2):212
  102. Ratcliff R: Diffusion and random walk processes. Oxford Pergamon. 2001;

Vol. 6, pp. 3668-3673

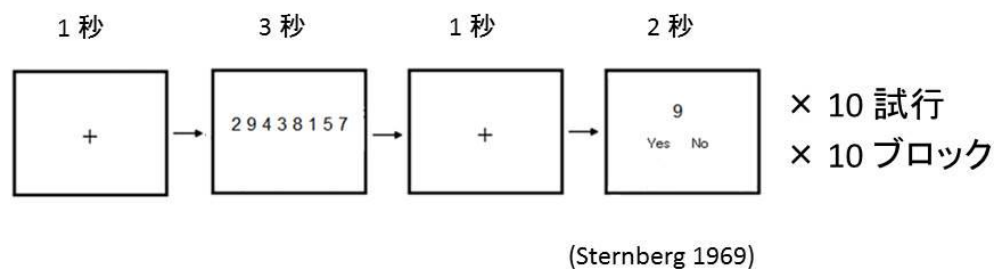
## 10 図

### 10.1 図 1. 60BPM と 150BPM のテンポの速さ



本研究では、音刺激の速さを 2 種類作成した。遅いテンポを 60BPM、速いテンポとして 150BPM として使用した<sup>12, 56-62)</sup> (図 1)。BPM とは Beat per minute の略で 1 分間に拍が何回あるかをカウントし、音楽のテンポの速さを表す。図 1 は拍が 6 秒間に何回あるかを図で表したものであり、60BPM は 6 拍、150BPM は 15 拍含まれる。

## 10.2 図 2. 短期記憶課題



今回の実験で使用した短期記憶課題は再認テストを用いたスタンバーク課題である。被験者は 8 個の数字を見て、それらを暗記した。その後、提示された 1 個の数字が、ターゲットで表示された 8 個の数字に含まれていたかどうか、全くの新規なものかを「はい」か「いいえ」で回答した。

ターゲットで 8 個の数字が "2 9 4 3 4 2 5 7" で、次に表示された 1 個の数字が「9」であり、提示された 数字がターゲットに含まれていた場合 (古い(old)刺激)、「はい」が正答 **Hit** となり「いいえ」は **Miss** という反応になる。質問が「0」であり、提示された数字がターゲットに含まれていない場合 (新しい(new)刺激)、「いいえ」が正しく棄却されて正答 **CR** となり「はい」は誤警報 **FA** となる。本研究では、古い(old)刺

激と新しい(new)刺激を 50%ずつで構成し、それらの回答である Hit と CR の両方を正答として扱った。

スタンバーグ課題は、信号検出理論における反応の分類により、短期記憶の成績は、弁別力として正答率が Hit 率 =  $\text{Hit} / (\text{Hit} + \text{miss})$  と CR 率 =  $\text{CR} / (\text{CR} + \text{FA})$ 、敏感さとして反応時間の 2 つの指標で求める<sup>100-102)</sup>。

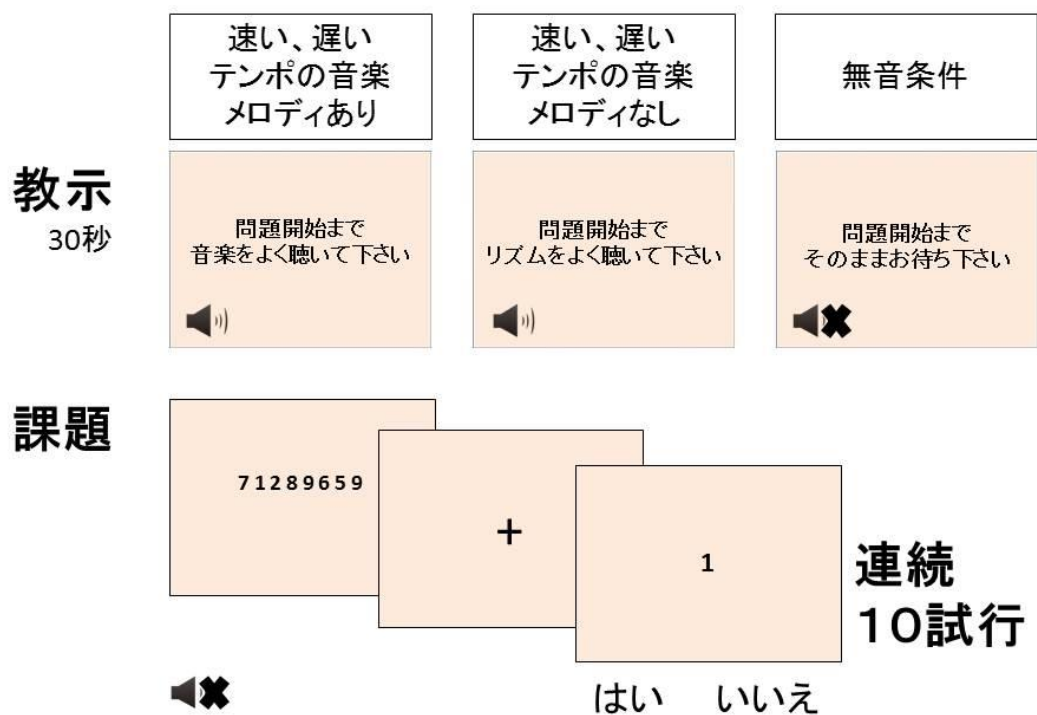
### 10.3 図 3. 5 つの条件と実験課題図



実験課題は、30 秒のインターバルの種類により 5 条件あった。被験者は、音楽やリズムの音を聞いた後あるいは無音状態による 30 秒のインターバルの後に続けて 10 試行の短期記憶課題を行なった。各条件は 10 ブロック中をランダムに提示した。ブロック内の短期記憶課題の提示順序もランダムであった。



#### 10.4 図 4. 被検者が行った課題内容



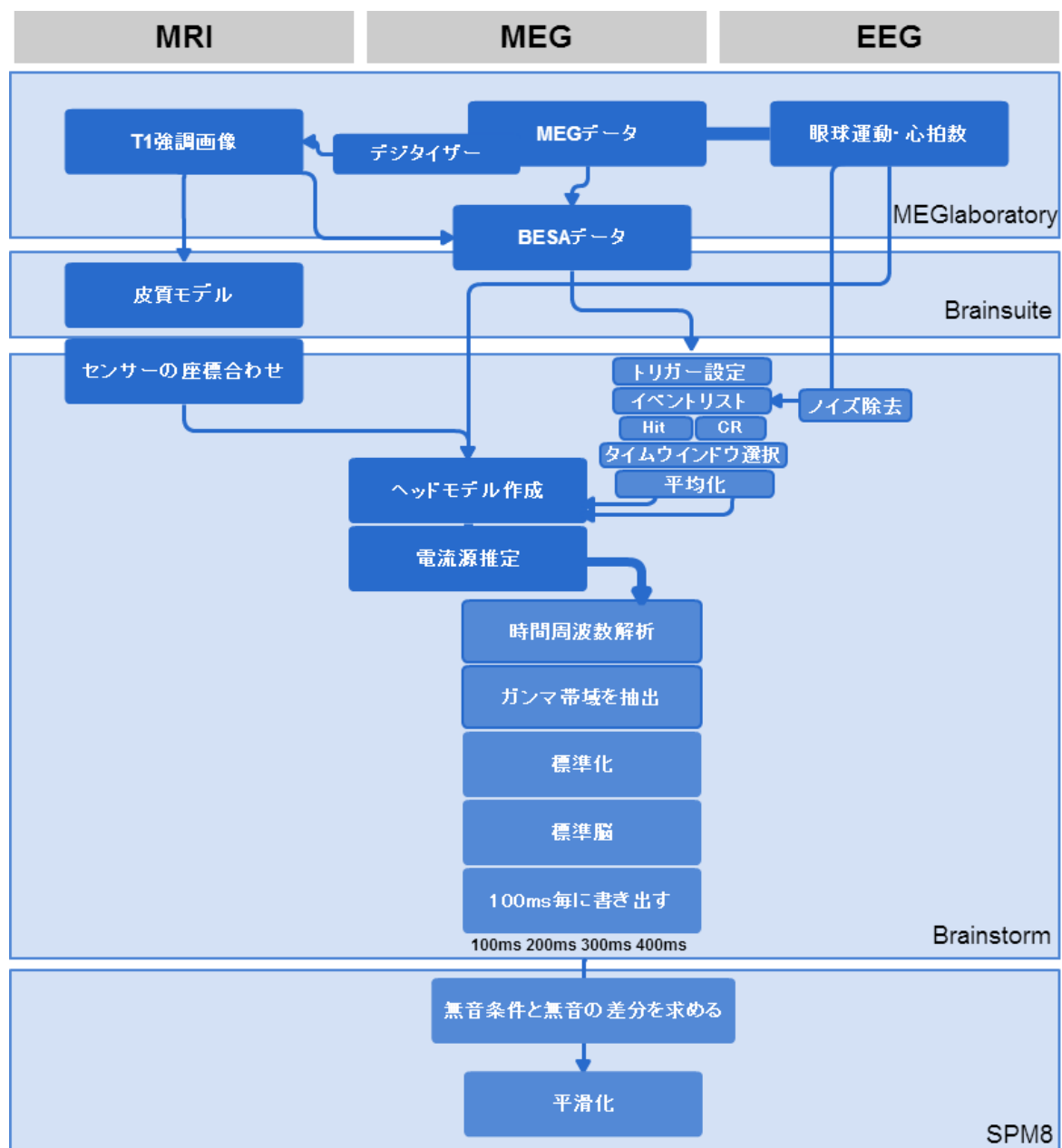
実際に被験者が行なった課題内容は、以下の 5 条件であった。

1. 遅いテンポの音楽メロディありを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件
2. 速いテンポの音楽メロディありを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件
3. 遅いテンポの音楽メロディなしを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件
4. 速いテンポの音楽メロディなしを聞いた後に短期記憶課題が行われた条件
5. 無音状態、短期記憶課題は無音状態後に行われた条件

各条件下で短期記憶課題 10 試行が提示される。10 ブロックで構成した。すなわち、

各条件下で 100 試行の短期記憶課題を行なった

10.5 図 5. 画像データ前処理のフローチャート

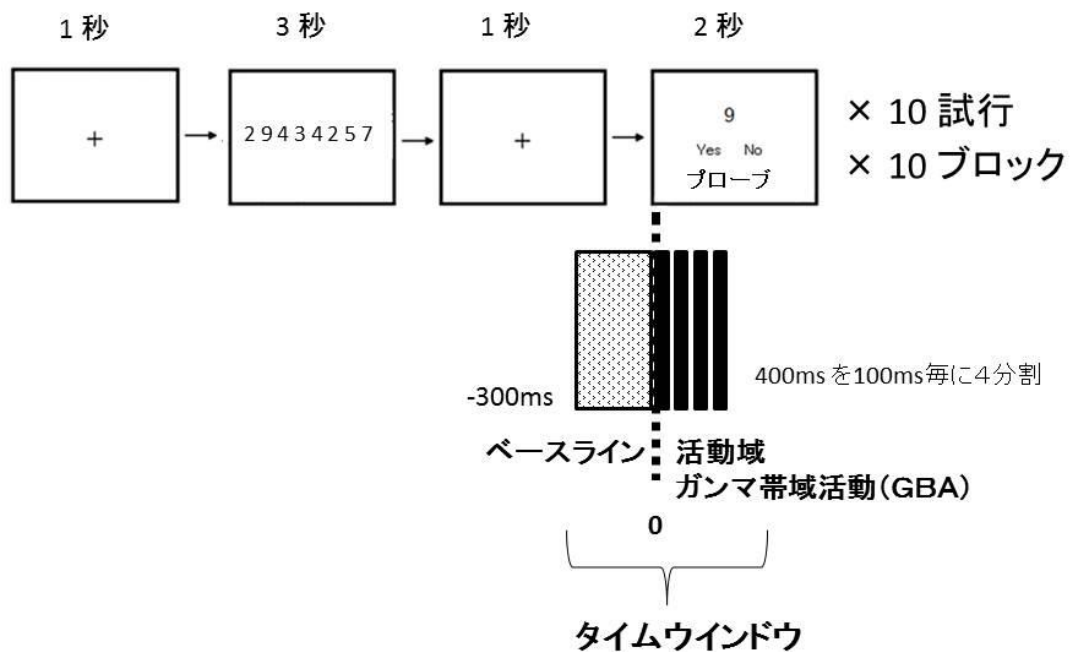


## ● 個人データ解析

- T1 強調画像にコイル位置座標指定 (MEG laboratory 横河電機製 MEG160) し、3D デジタイザーデータと座標及び頭部形状位置合わせをした。
- T1 強調画像で皮質モデル作成 (Brainsuite 14)をした。
- T1 強調画像を MEG/EEG/SEEG/ECOG データ解析ソフト Brainstorm へ 15000 バーテックス(V)で取り込みをした。
- MEG、EEG データをチャンネルファイルとして Brainstorm へ取り込みをした。
- 各条件の試行ごとに、Hit、CR の回答時間でイベントリスト作成をした。
- EEG データの除去、LC11 チャンネルの除去をした。
- タイムウィンドウ選択し被験者も試行毎に平均化した。
- 信号源推定のためのヘッドモデル作成 (Open MEEG)をした。
- 重み付き最少ノルム推定法で電流源推定した。
- 時間周波数解析 (Morlet wavelets)を行ない、低ガンマ周波数帯域 30-59Hz 活動抽出をした。
- ベースラインと活動域より象関連摂動 (事象関連同期/非同期 Event-Related Synchronization/ Event-Related Desynchronization; ERS/ ERD) で標準化した。

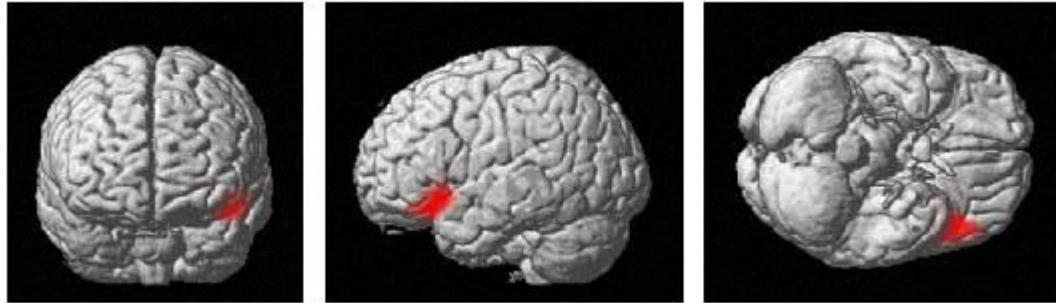
- ・ 皮質モデルを 15000V で標準脳へ変換し、活動域のみ取り出し 100ms 毎に 4 分割し書き出した。
- 集団データ解析の下準備
  - ・ SPM8 で各条件と無音状態のデータの差分を算出した。
  - ・ 半値全幅 10 mm 等方性ガウシアンカーネルを用いて平滑化した。

## 10.6 図 6. タイムウィンドウの位置



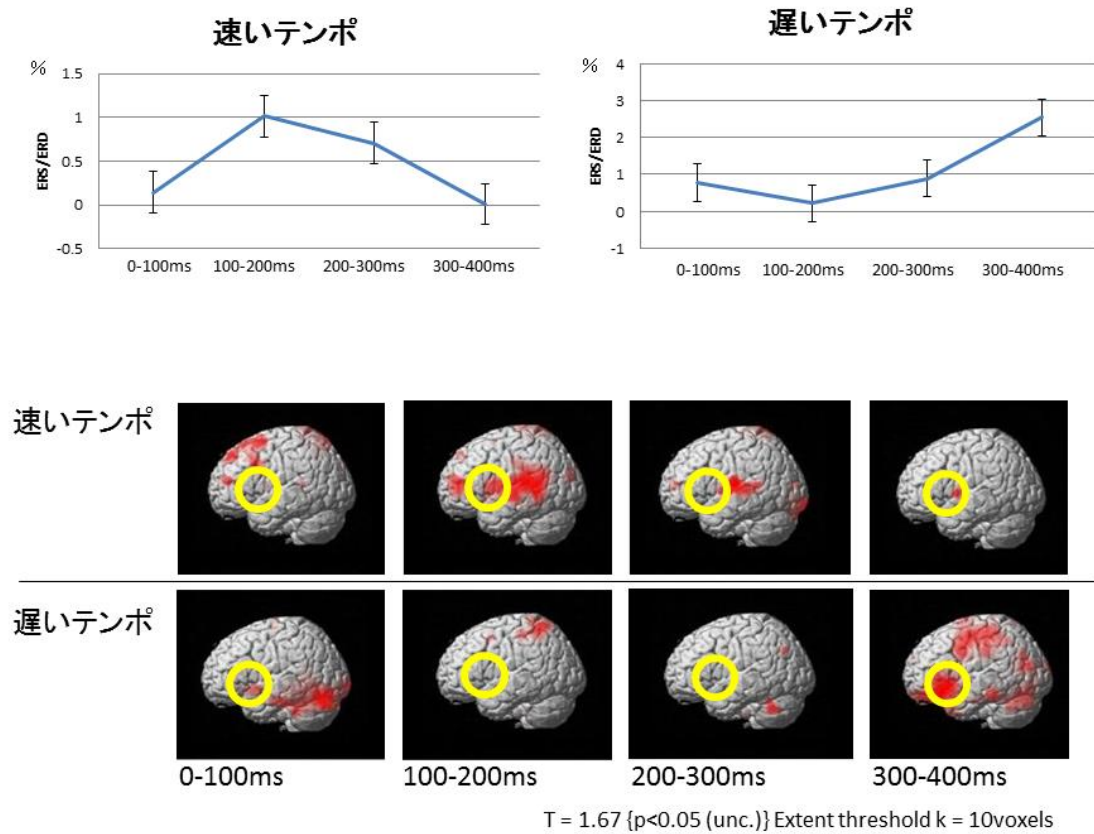
経時的な誘発活動を調査するために、質問が提示されたプローブ提示をオンセット (0 時) と、オンセットより 300ms をベースラインとし、それに対して活動域として、想起時間 400ms までのタイムウィンドウを 100ms 毎に 4 分割した。

## 10.7 図 7. MEG データ結果（全脳分析）



4つのタイムウィンドウ毎にCR時のMEGデータを用いてメロディ要因とテンポ要因を含む被験者内2要因の被験者内2要因のフレキシブル・ファクトリアル・デザイン解析をした。全脳分析により、左下前頭回（IFG）のボクセルレベルにおいて、300 - 400msのタイムウィンドウでガンマ帯の振動的活動のパワーは 速いテンポ条件で、遅いテンポ条件よりも低い水準の活動を示した( $P = 0.016$ , FWE corrected, MNI coordinates= -47, 30, -25)。

## 10.8 図 8. 時系列で見た IFG のガンマ帯域反応活動



各タイムウィンドウにおいて、ベースラインと比較したガンマ帯の振動的活動のパワーを見るために事象関連スペクトラム摂動（ERSP）を算出し、左 IFG における脳活動の増減グラフを作成した（上）。ガンマ帯域反応(GBR)の賦活のピークが、速いテンポの条件では 100-200ms で発生した。遅いテンポの条件へは 300-400ms でピークに到達した。テンポの速さの違いによって、脳活動の賦活のタイミングが異なり、速いテンポの音楽を聴いた場合、遅いテンポの音楽を聴いた場合よりも左 IFG で賦活が早く発生したことがわかった（下）。

## 11 表

11.1. 表 1 モーツァルト効果と短期記憶における先行研究のまとめ

	筆者（年）	対象者	使用音楽と聴取時間	短期記憶（作業記憶）
効果なし	Rausher et al. (1995)	26人 大学生	モーツァルト KV448vs無音 10分間	単語と記号混合8種類
	Steele et al. (1997)	36人 大学生	モーツァルト KV448vs雨音 モーツァルト KV448vs無音 10分間	8桁の数字復唱
	Schellenberg et al. (2007)	48人 18-23歳	モーツァルト KV448vs アルビノーニ 10分間	7桁の語音整列
	Hirokawa (2004)	15人 72.7歳	被験者の好きな音楽 vs瞑想vs無音 10分間	リーディングスパン
効果あり	Mammarella et al. (2007)	24人 81.0歳	ヴィヴァルディ 春vs ホワイトノイズvs無音 1分間	2桁の数字復唱



11.2. 表 2. 短期記憶課題における回答の種類

	旧刺激	新刺激
正	Hit	CR 正棄却
誤	Miss	FR 誤警報

### 11.3. 表 3.音楽のテンポの速さの好みについて評価表


30秒音楽を聞いてから課題を行なっていただきました。  
2種類の速さの音楽がありましたが、  
あなたはこれらの音楽に対して、どの程度好きですか。  
それぞれひとつに○を付けて下さい。

#### 遅い音楽

とても好き

どちらともいえない

とても嫌い




A horizontal scale with 11 tick marks. The leftmost tick mark is aligned with the text 'とても好き' (Very like). The 6th tick mark from the left is aligned with the text 'どちらともいえない' (Neither like nor dislike). The rightmost tick mark is aligned with the text 'とても嫌い' (Very dislike).

#### 速い音楽

とても好き

どちらともいえない

とても嫌い



A horizontal scale with 11 tick marks. The leftmost tick mark is aligned with the text 'とても好き' (Very like). The 6th tick mark from the left is aligned with the text 'どちらともいえない' (Neither like nor dislike). The rightmost tick mark is aligned with the text 'とても嫌い' (Very dislike).

11.4 表 4. 行動データにおける正答率と反応時間に関する結果

	遅いテンポの 音楽 (SD)	速いテンポ の音楽 (SD)	遅いテンポの リズム (SD)	速いテンポの リズム(SD)	無音状態 (SD)
正答率平均					
Hit	0.79 (0.11)	0.77 (0.11)	0.78 (0.09)	0.77 (0.11)	0.81 (0.10)
CR 正棄却	0.89 (0.65)	0.91 (0.05)	0.90 (0.07)	0.90 (0.07)	0.92 (0.05)
試行内の回答数平均					
Hit	41.45 (7.57)	40.25 (8.72)	41.65 (6.46)	42.60 (7.42)	44.15 (6.02)
Miss	9.65 (6.00)	10.35 (6.00)	10.20 (4.62)	10.90 (5.23)	9.15 (5.36)
CR 正棄却	43.45 (6.08)	44.25 (5.80)	42.90 (6.46)	41.50 (4.68)	42.45 (6.87)
FA 誤警報	4.45 (2.66)	4.15 (2.81)	4.20 (6.46)	4.00 (3.35)	3.25 (2.40)
反応時間平均 (ms)					
Hit	849.97 (130.81)	850.81 (135.70)	847.61 (138.49)	845.16 (135.59)	880.17 (140.86)
CR 正棄却	950.88 (164.90)	941.16 (169.46)	960.71 (179.29)	956.32 (186.94)	982.24 (198.44)
Hit の回答率 = Hit / (Hit + miss)					
CR の回答率 = CR 正棄却 / (CR 正棄却 + FA 誤警報)					

11.5 表 5. 行動データにおける無音条件との差分に関する結果

	遅いテンポの音 楽 (SD)	速いテンポの音 楽 (SD)	遅いテンポのリズ ム (SD)	速いテンポのリ ズム(SD)
正答率における無音条件との差分の平均				
Hit	-0.02 (0.08)	-0.03 (0.07)	-0.03 (0.05)	-0.05 (0.06)
CR 正棄却	-0.02 (0.06)	-0.01 (0.05)	-0.02 (0.06)	-0.02 (0.06)
反応時間における無音条件との差分の平均 (ms)				
	-34.42 (77.79)	-31.23 (68.16)	-36.08 (54.96)	-35.52 (70.51)
	-32.61 (92.40)	-43.74 (78.31)	-23.73 (83.07)	-29.25 (61.79)
CR 正棄却				

11.6 表 6. 全脳分析結果

		MNI 座標				Z 値	P 値
左下前頭回 (IFG; Inferior Frontal Gyrus)	左/ 右	BA	x	y	z		
速いテンポ要因 < 遅いテンポ要因							
IFG (whole brain) 300–400 ms	L		-47	30	-25	4.34	0.016
ボクセルレベルの FWE による多重比較の補正を行なった。							n=20

11.7 表 7. 時系列での IFG における GBR の平均値

	0–100 ms (SD)	100–200 ms (SD)	200–300 ms (SD)	300–400 ms (SD)
速いテンポ の音楽	-0.35 (4.75)	-0.36 (4.48)	0.66 (3.98)	0.29 (3.58)
速いテンポ のリズム	0.64 (3.31)	2.4 (6.41)	0.75 (3.42)	-0.27 (4.00)
遅いテンポ の音楽	-0.02 (3.36)	-0.19 (4.07)	-0.11(2.89)	2.10 (3.92)
遅いテンポ のリズム	1.57 (2.94)	0.63 (3.45)	1.88 (3.46)	2.97(4.86)