

博士論文

論文題目 聴覚情報処理に及ぼす音楽訓練と他感覚入力の影響

氏名 上山 景子

目次

1. 要旨	1
2. 総合序論	3
3. 実験 1	13
3.1. 序論	13
3.2. 方法	16
3.3. 結果	21
3.4. 考察	25
4. 実験 2	30
4.1. 序論	30
4.2. 方法	32
4.3. 結果	39
4.4. 考察	45
5. 実験 3	50
5.1. 序論	50
5.2. 方法	55
5.3. 結果	62
5.4. 考察	69
6. 実験 4	73
6.1. 序論	73
6.2. 方法	77
6.3. 結果	83
6.4. 考察	85
7. 実験 5	90
7.1. 序論	90
7.2. 方法	91
7.3. 結果	93
7.4. 考察	95

8. 総合考察 96

謝辞 111

参考文献 112

1. 要旨

本研究では聴覚的な記憶や期待の形成に対して、視覚や運動の感覚といった聴覚以外の感覚からの入力、それぞれどのような影響を与えるのか、また聴覚と運動の感覚を繋ぐ脳内のネットワークの形成に関与するような特定の経験がどのような影響を与えるのかを、実験 1—5 を通じて検証した。実験 1, 2 では、聴覚的な系列記憶の形成に対して、その音系列を作り出す動作系列が果たす役割について脳波計測を用いた検証を行った。旋律様の音系列の学習時に、その系列をピアノで演奏しながら覚えると(打鍵あり条件)、単に系列を聴取するだけの時に比べて(打鍵なし条件)、その音系列の記憶形成が促進された。この事は、打鍵あり条件で学習した系列に対しては、その系列中で希に逸脱音が出現した際に誘発される無意識的なエラー検出反応(ミスマッチネガティビティ; MMN)が大きくなったという結果から支持される。実験 2 では、音系列の学習時に音に同期したタッピングを行った場合と(同期あり条件)行わない場合とで(同期なし条件)、学習時の動作が聴覚的な記憶の形成に与える影響を検討した。同期あり条件で学習した系列では、逸脱音に対する P300 反応が大きくなった一方で、MMN の振幅には条件間の有意な差が検出されなかった。これらの結果は、音系列学習時の動作が聴覚的な記憶形成を促す効果においては、動作と聴覚入力間に系列的な対応関係が成立している事、また演奏を獲得する過程で聴覚的な記憶が繰り返し呼び出されたり補正されたりする事が重要である事を示唆している。実験 3 では、聴覚以外の感覚からの入力が音に対して時間的に同期している事や、音と系列的な対応関係を持つ事が音系列の記憶形成に与える影響が、聴覚と運動の感覚との結びつきに依存するものなのかどうかを検証する事を目的とした。この問題に取り組むため、音系列の学習時に同時に視覚的な系列刺激を呈示し、聴覚と視覚の入力間に系列的な対応関係が成立するかどうか、聴覚的な記憶の形成に与える影響について検証した。音系列学習時に音高の推移に一致させて視覚刺激を上下に移動させた場合と(一致条件)、視覚刺激をランダムに上下させた場合(不一致条件)とでは、学習試行後に再び音系列を聴取したときに出現する陰性電位の反応が変化した。このような電位の変化は、一致条件において、学習時に視覚と聴覚の情報間に成立する対応関係を

認識するのに関わった視覚—聴覚間のネットワークが、その直後の音系列聴取の際にも、活性化していた事を示唆する。しかしながら、この電位の潜時や分布は、MMN とは大きく異なっていた。これらの事から、打鍵動作や同期タッピング動作が聴覚記憶形成に与える影響とは異なり、聴覚系列に対応した視覚系列を呈示しても、聴覚的な記憶の形成に貢献するような作用は得られなかったと結論づけられる。実験 4, 5 では、視覚情報と聴覚情報の対応関係がより複雑である場合に、情動認知に関わる視聴覚統合のプロセスを介して、視覚刺激が聴覚的な記憶や期待に影響するかどうかを検討した。この目的のために、表情画像の呈示が音刺激の情動的な意味に関する認知処理に与える影響について検証した。最後に、総合的な考察として、聴覚的な記憶や期待が形成される上で視覚や運動の感覚が果たす促進的または干渉的な役割と、聴覚と視覚、聴覚と運動の感覚の結びつきに影響するような音楽経験の果たす役割について検討した。

2. 総合序論

外界の環境の変化を素早く正確に察知する能力は、個体の生存に貢献するという意味で重要である。このような能力は、外界がどのような状態にあるかを予め把握しておく事によって可能になると考えられる。従って、外界で変化が生じれば、自らが把握している事柄から生じる期待と実際の感覚入力とで比較を行って変化を検出し、必要に応じて、外界に関する把握内容の更新を行わなければならないだろう。この一連のプロセスは、特に聴覚のモダリティにおいて、脳波のミスマッチネガティビティ (mismatch negativity; MMN) 成分 (Näätänen, Gaillard, & Mäntysalo, 1978; Näätänen, 1979) や P300 成分を指標とした研究で検証が為されてきた。本研究の目的は、こうしたエラー検出に関わる ERP 成分を指標として、音の情報がどのように認知され、どのように記憶に蓄えられるのかを検証する事にあった。

逸脱の検出に関わる事象関連電位

MMN は、ある一定の規則に従って連続的に刺激系列(標準刺激)を呈示する中で、その規則から外れた刺激(逸脱刺激)を希に呈示した時に、脳内でそのエラーを無意識に検出した事を反映して生じる事象関連電位(event-related potential; ERP)である。例えば、同じ高さの音が連続しているときに各音が誘発する ERP に比べると、希に他の音と異なる高さの音が呈示されたときに生じる ERP では、前頭—中心部の電極において陰性方向に波形が歪む、という現象が観察される(Näätänen, 1992; Chennu & Bekinschtein, 2012 参照)。また、この歪みのピークは音刺激呈示開始後 120—220 ミリ秒で最大となる(Näätänen, 1992; Chennu & Bekinschtein, 2012 参照)。MMN 反応は標準刺激に対する ERP 反応を基準とした場合の、逸脱音に対する ERP 反応における陰性方向への歪みとして定義されるため(Sams, Paavilainen, Alho, & Näätänen, 1985)、逸脱音に対する ERP 反応それ自体の極性が陰性になっていない場合でも MMN 反応として報告される事がある(McFadden & Rojas, 2013 参照)。MMN 反応が検出される典型的な課題として、オドボール課題が挙げられる。この課題では、一定の規則に則って標準音を呈示する中で、低頻

度にそこから逸脱する音を呈示する、といった手続きが実施される。標準刺激の頻度が増加すると、MMN の振幅が増加するという報告や(Baldeweg, Klugman, Gruzelier, & Hirsch, 2004; Haenschel, Vernon, Dwivedi, Gruzelier, & Baldeweg, 2005), 認知マスキング・パラダイム(recognition-masking paradigm)を用いた研究で、マスキング効果を除去する事により標準刺激の記憶痕跡を強めると、MMN の振幅が増加するという報告がある(Winkler, Reinikainen, Näätänen, 1993)。この知見から支持されるように、MMN 反応の大きさは標準音に対して形成される記憶の強さによって変化する。また、MMN 反応の大きさは、判別課題におけるパフォーマンスが訓練によって向上するのに伴って変化する事が知られている(Näätänen, Tervaniemi, Sussman, Paavilainen, & Winkler, 2001)。判別の訓練によっても(Kraus, McGee, Carrell, King, Tremblay, & Nicol, 1995), そして長期的な経験によっても、MMN の振幅は増加する(Chandrasekaran, Krishnan, & Gandour, 2007)。また MMN 反応は、聴覚刺激の高さや長さといった単純な音響特性だけでなく、音の並びの抽象的な規則からの逸脱によっても検出される事が知られている(Tervaniemi, Rytkönen, Schröger, Ilmoniemi, & Näätänen, 2001)。これらの研究成果を考慮すると、標準音の規則に関する記憶が、ある条件下での学習を通してどの程度強く形成されていたかを評価するための指標として、MMN を利用できると考えられる。

一方、逸脱刺激へ注意を払っているときに観察される、という特徴のある ERP 成分として、P300 が挙げられる(Duncan, Barry, Connolly, Fischer, Michie, Näätänen, Polich, Reinvang, & Petten, 2009)。P300 は、課題に関連した逸脱の開始から 300 ミリ秒後、またはそれ以降に陽性方向のピークを示し、意識的なエラー検出や評価の過程を反映していると考えられている(Duncan et al., 2009)。P300 の下位成分として P3a と P3b が挙げられるが、P3a は、課題に関係のない刺激に対しても生じ、前頭部から中心部にかけて(midline fronto-centoral)分布している。また、P3a の振幅がピークになるのは刺激呈示開始から 250—300 ミリ秒後とされている。この P3a と P300 の関係性については、十分に証明されていない(Polich, 2007)。もう一方の下位成分である P3b は、課題に関係のある逸脱刺激に対して生じ、中心—頭頂部(centro-parietal)

を中心に観察される。

P300 成分の振幅は、符号化の間に確立された記憶の強さやリハーサルの方法、更には想起、判別課題中での状況的文脈の更新プロセス、記憶負荷によって変化するとされている(Polich, 2007)。Polich (1987)は課題の難しさや逸脱刺激の出現頻度、刺激間間隔が P300(刺激呈示開始から 250—400 ミリ秒後の陽性成分として解析された)にどのように反映されるかを検証した。結果として、簡単な課題に比べて困難な課題では、P300 の振幅が小さくなり潜時が長くなる事が確認され、逸脱刺激の出現頻度とは独立して、課題の難しさが P300 の振幅と潜時に影響する事が明らかになった。P300 の振幅は、音楽的な系列からの逸脱によっても変化する事が報告されている。また同じ刺激を呈示しても、課題の内容によって、P300 成分が現れる場合と、現れない場合とがある。Paller, McCarthy, & Wood (1992) は実際の楽曲からフレーズを引用して、そのフレーズの最後の音が逸脱したときに N400 が変化するかどうかを検証した。彼らは N400 の潜時に P300 様の陽性成分(P340)が重複すると想定していたので、判別課題の有無によって、その陽性成分の出現を操作する事を試みた。EEG 計測中に判別課題を行った場合、標準音に比べて、逸脱音では 200—400 ミリ秒に現れた P300 の振幅がより大きくなった。これに対し判別課題を行わなかった場合、標準音と逸脱音が誘発する陽性成分の振幅の差が減少した。このように、課題を通して刺激に注意を向けさせるような操作を行えば P300 の振幅が大きくなり、逆に刺激を無視させれば P300 が観察され難くなる事が示唆される。

聴覚的な情報の処理に対する複数感覚統合過程の影響

現実的な要素を出来る限り取り入れた検討を行うならば、音の情報に対する聴覚的な処理について検討する際、聴覚的な入力とそこから生じる聴覚処理の関係性についてのみで検証を行う事は不十分であると考えられる。何故ならば、実際の生活の中で遭遇する音の情報は、聴覚から単独の入力ではなく、運動の感覚や視覚といった他の感覚入力も伴った状態である事が多いからである。従って、現実の世界で音の情報がどのように認識され、記憶されるかを知るためには、聴

覚と聴覚以外の感覚から複数の感覚入力があり、なおかつそれらの間に対応関係が成立している場合に、音に対する認知に与えられる影響を検証する事が必要であると考えられる。過去の研究から、音における特定の特性と視覚的な特性とが密接な対応関係を持ち得る事(Evans & Treisman, 2010; Lindström, Paavilainen, Kujala, & Tervaniemi, 2012; Mudd, 1963), 互いの情報が統合される自動的なプロセスが存在する事(Teder-Sälejärvi, Russo, McDonald, & Hillyard, 2005; Widmann, Kujala, Tervaniemi, Kujala & Schröger, 2004), そして音が視覚的な刺激と共に呈示されるときには、音の情報処理に対して視覚情報が介入し、情報の欠損を補ったり、錯覚を生み出したりする事が示されている(McGurk & MacDonald, 1976; Näätänen & Winkler, 1999)。また同様に、運動の情報と音の情報との間でも、音の高さが上昇したか下降したかが曖昧な場合などに、運動感覚の入力によって聴覚的な知覚が補完される事がある(Repp & Knoblich, 2007; 2009)。これらの事は、聴覚の入力から得られた情報が、聴覚以外の感覚から得られた情報と矛盾しているときには、それらの間にある対応関係に基づいて、知覚が歪められるという可能性を示唆している。それでは逆に、音の情報とその他のモダリティからの情報が、一定の規則に基づいて矛盾無く対応している場合、音の情報を正しく知覚する事に正の効果もたらされるだろうか。音の特性は多次的であり、その中のどれを優先的に処理するかは状況に依存すると推測される。そこで本研究では、どのような状況下で特定の音の特性に注意が向き、音情報の処理が促されたり“次に来るべき音”への期待を高めたりするかを検討する事とした。

複数感覚統合が聴覚処理に与える影響における、認知的能力や経験の差が及ぼす効果

更に、本研究では、このような複数感覚統合の過程が聴覚処理に与える影響において、個人の認知的な能力や経験の差が及ぼす効果についても検討した。発話音声や環境音に関する聴覚処理や感覚統合の過程においては、人間の知覚的な特性によって元々特徴付けられた部分と個々人の経験によって形成される部分とがあると考えられるが、それらを分離して検討する事は難しい。そこで、経験依存的な要因による影響が検討可能なものとして、音系列に対する記憶とそれを作

り出す演奏行為や聴取者の行動との関係性に注目した。

ここでは便宜上、演奏に関わる人間の立場として演奏者と聴き手の 2 つの立場を想定し、それぞれでどのような情報が音と対応付けられていて、その内のどの情報が音楽経験に影響されるのかを整理しておきたい。

まず演奏者の立場において音と対応づけられる情報の 1 つとして、体性感覚が挙げられる。演奏者は音を生成するために身体を動かし、聴覚や体性感覚のフィードバックにより動作を調整する。演奏の訓練をしている時には、音のフィードバックに従って動作は常にモニタリングされている。この事は、音と動作の間に齟齬が生じるとそれを反映して脳波の N210 成分が誘発される事からも明らかである(Katahira, Abla, Masuda, & Okanoya, 2008)。音と運動を司る脳の領域は、このような演奏の経験を積む事によって互いへのネットワークを強める(Lahav, Saltzman, & Schlaug, 2007)。Lahav et al. (2007)によれば、自ら演奏した事のある旋律であれば、その旋律を聴覚的に呈示されるだけで運動関連領域が活性化する。この事から、演奏の訓練を通して、特定の旋律の聴覚的処理が、その旋律を作り出す運動の感覚と密接に関わるようになった事が示唆される。

また、演奏者の立場では、空間的な位置情報も音に対応づけられる情報であると言えるだろう。楽譜を使って演奏する場合であれば、一連の動作や音は楽譜に基づいて生成される。近代的な西洋音楽で用いられる楽譜について言えば、音符は音の高さに従って垂直方向に配置されている。このような構造は、高い音ほど空間的に高い位置と結びつけるような(Lidji, Kollinsky, Lochy, & Morais, 2007 参照)、人間の直感的な知覚構造に合致していると言えるが、楽譜と特定の音高を結びつけて認知する能力に関しては、個人の音楽経験や音楽的能力に依存すると考えられる。松田・湯本・伊藤・宇野・加賀(2002)は脳磁図(Magnetoencephalograph ; MEG)の計測によって、音高の聴き分け能力の高い人ほど、楽譜が表す音と実際に聞こえてくる音の高さに違いがあったときのエラー検出反応が大きくなる事を示した。これらの事は、音の高さと視覚的なものの位置の関係性は、広く一般的に見られるものの(Evans & Treisman, 2010; Lindström

et al., 2012; Mudd, 1963), その精度の高さは経験に影響されるという見解とも一貫性があると言えるだろう(Rusconi, Kwan, Giordano, Umiltà, & Butterworth, 2006). また, 視覚的に音符を呈示されれば, 音楽家では音の長さに対する処理とは独立に特定の音高に関する処理が生じるが(Schön & Besson, 2002), これもまた, 音楽経験に依存した現象であろう.

他方, 音楽の聴き手でも, 音の情報とその他の感覚入力との相互作用は生じている. 例えば, 演奏者の動作によって, その音楽に対する印象が変化する事がある(Vines, Krumhansl, Wanderley, Dalca, & Levitin, 2005). また, 経験依存的な効果としては, 聴き手個人の音楽的な訓練経験, あるいはその経験を通して獲得された音楽的な知識に影響されて不協和音に対する主観的体験や生理反応が変化したり(Dellacherie, Roy, Hugueville, Peretz, & Samson, 2011), 自分が訓練してきた楽器の音色に対して敏感に反応したりする事が挙げられる(Margulis, Mlsna, Uppunda, Parrish, & Wong, 2007).

このように, 音楽の演奏者と聴き手には, それぞれの立場において複数の感覚からの情報入力と経験依存的な影響がある. だが更に, 聴き手の側には下位分類を用意すべきだろう. それは演奏者以外の人間が音楽に対して積極的に“参加”する場合を, 受け身的に音楽を聴く場合とは区別しなければならないからである. 音楽に同期して指や足, 頭などを動かしたり, 集団でダンスをしたりする場合, 演奏者でなくても音に身体運動が付随するという状況が生じる. 音に対して身体運動を調整する能力それ自体は普遍的で, ある程度生得的に備わっていると言える(Zentner & Eerola, 2010). だがその能力は発達と共に向上する中で, 個人が属する音楽文化による影響も受けている(Snyder, Hannon, Large, & Christiansen, 2006). 狭い文化圏内で見られないような複雑な拍構造に対して同期する能力は, やはりその文化圏内で発達した人で高い(Hannon & Trainor, 2008 参照).

実験1の目的と背景

上述の通り, 音楽に纏わる音が対応付けられる情報の種類は多様であり, その対応関係の抽象

性や複雑さの度合いもまた多岐に渡る。音の記憶形成に影響する要因について検証するにあたり、まずは音との対応関係が単純であり、かつ音楽経験による影響が考慮し易い、演奏動作から研究を始める事とする。聴覚皮質と運動関連領野のネットワークは、特定の旋律の演奏訓練を短期間行うだけでもその旋律に特化した変容を生じる(Lahav et al., 2007)。過去の研究から明らかになっている事として、非音楽家が特定の旋律の演奏を獲得するために数日間訓練を行うと、聴覚—運動ネットワークが強化される事(Lahav et al., 2007)、また聴覚領域の再組織化が促されて旋律中に生じるエラーの検出を促す事(Lappe, Herholz, Trainor, & Pantev, 2008)が挙げられる。また、Lappe et al. (2008) は、非音楽家から成る2つの群に対して、それぞれ異なる訓練を2週間にわたって実施した。感覚運動—聴覚群(sensorymotor—auditory (SA) group)では、参加者は音系列をピアノで演奏して学習した。もう一方の聴覚群(auditory (A) group)では、参加者はSA群による演奏を聴取した。結果から、A群に比べて、SA群ではより大きなMMNmが観察され、感覚—運動の訓練によって聴覚皮質に可塑的な再組織可が促された事が示唆された。MMNmはMEGで計測されるエラー検出反応で、脳波計測で観察されるMMNに相当する成分である。

本研究実験1では、そうした短期的な演奏訓練の結果生じる脳の構造的変化に起因する聴覚処理の促進的効果が、個人の長期的な音楽訓練や聴覚的な認知能力からどのような影響を受けるかを検討した。音楽的な訓練経験を持たない人たちに関する過去の研究から得られた知見と比較する事により、音楽経験者を対象とした実験1の結果は、演奏訓練が聴覚的な処理に与える促進的な効果に対して長期的な音楽訓練が与える影響に関して、新たな示唆を与えるものとなるだろう。

実験2の目的と背景

実験1で観察した系列的な打鍵動作には、指一本一本の動きを音に同期させるという要素や、それらの指の動きの系列を音系列に併せて構成するという要素など、複数の要素が含まれている。

この中で、身体の動きを音に同期させるという要素が聴覚的な記憶の形成に果たす役割について検討するため、実験 2 を実施して、特定の音系列に同期したタッピングがその音系列の聴覚的な記憶を促進するかどうかについて検証した。単一の指を用いた同期タッピングの場合には、複数の指による動作系列と音系列との対応関係が存在しない。だが、どちらも聴覚—運動ネットワークに基づいて制御されるべき行為であり、また双方の訓練が聴覚—運動ネットワークを強める働きをする事から(Haueisen & Knösche, 2001; Lahav et al., 2007)、制御に関わるメカニズムは部分的に共有されている事が想定される。実験 1 と 2 の結果を比較する事で、音に対して同期した動作を行う事と、そこから更に指の動きに音高と対応した系列的な要素を付加する事が、音系列の記憶形成に与える影響の違いを明らかにする事ができるだろう。

また、本研究で同期タッピングが聴覚的な記憶の形成に果たす役割について検討する事は、人間が音に身体の動きを同期させる能力を持つ事の意味について新たな示唆を与える事になると考えられる。身体の動きを外部からの感覚入力に同期させる能力は、人間や他の音声学習を行う動物(Hasegawa, Okanoya, Hasegawa, & Seki, 2010)に固有のものである。ヒトの場合には、5—24 ヶ月齢の幼児でさえ、リズムカルな音に対して身体の動きを調整するような振る舞いが観察される(Zentner & Eerola, 2010)。幼児で見られる調整能力は音に対する同期というよりは運動量の変化という形で現れるが、この観察結果からは、音に合わせて身体を動かす能力の一部は生得的なものである事が示唆された。成人では、音に対する同期の能力は、音楽を聴いたときの自発的な指や足によるタッピング、頷き等でリズムをとる行動として、しばしば観察される。このようなリズムカルな音に動作を合わせる傾向は、動作パターンを、意味のある社会的な音や環境への対応を容易にさせる役割を持つ(Zentner & Eerola, 2010)という見方があるものの、音に同期する働きの役割については未だ十分に知られていないのが現状である。

なお、実験 1 との対比を明確にするために、実験 2 の参加者は実験 1 と同様に音楽経験者とした。

実験 3 の目的と背景

実験 3 では、聴覚以外の感覚入力系列が系統的に聴覚的な入力と対応している事の重要性を更に検討するために、音系列内の音高の推移に系統的な対応関係をもつ視覚刺激系列の影響について検証した。演奏行為や同期タッピングが音の記憶形成に影響すると仮定すると、それは音楽経験依存的に発達する聴覚—運動ネットワークに支持されている可能性が高いが、音楽経験によって発達する別の構造や機能によって、それが支えられている可能性は否定できない。より概念的なレベルで、音の生起に同期した他の感覚入力や、音高の系統的な推移に対応した他の感覚入力による影響が生じるのであれば、音に付随する入力を視覚刺激に置き換えても同様の結果が生じるはずである。つまり音系列と時間的に同期して現れ、かつ音の高さに対応して空間的に上下するような視覚刺激の系列を呈示する事によっても、音系列の記憶を促すような効果が得られると推測される。

実験 3 では参加者を音楽経験者と非経験者の両方としたが、それには以下 2 点の理由があった。第一に、過去の研究(Lahav et al., 2007; Lappe et al., 2008)や本研究実験 1 から得られた知見を考慮すると、音系列の記憶形成に対して聴覚以外の感覚から得られる系統的な情報が与える影響は、音楽経験者でも非経験者でも得られる事が示唆されるためである。また第二に、音高の推移のパターンと視覚刺激の垂直方向の移動パターンの間の対応関係は音楽経験に関わらず、ある程度一般に共通の知覚上の特性として成立するためである(Mudd 1963; Lidji et al., 2007)。音高の判別に関わる能力によって、視覚的な情報と音高の情報間に成立する対応関係の強さが変動すると考えられることから(松田ら, 2002 参照)、実験 3 では、音高の変化を判別する能力の高さを評価するテストを行って個人の音楽的能力の高さの指標とし、この指標と視聴覚統合過程の働き易さとの関連性を検討することとした。

実験 4, 5 の目的と背景

実験 1—3 ではモダリティを跨いでの対応関係が比較的捉えやすい音の高さの知覚や記憶に関

して検討した。これに加えて実験 4 と実験 5 では、より日常的な場面で聴覚以外の感覚入力が聴覚的な処理に対して与える影響について検討する事を目的とし、音と他の感覚入力間の対応関係がより複雑な場合について考慮した検証を行った。

実験 4 では、音楽が情動的な意味を伝達する事ができる(Gabrielsson & Lindström, 2001; Gagnon & Peretz, 2003; Leaver & Halpern, 2004; Trainor & Corrigall, 2010)という事に着目し、音楽の断片が表す情動的な意味に対する認知過程に対して、視覚的な情報入力による影響があるかどうかを検証した。また、音楽が表現する基礎的情動は音楽経験に関わりなく伝達され得る事が知られているが(Fritz, Jentschke, Gosselin, Sammler, Peretz, Turner, Friederici, & Koelsch, 2009), それらの情動的な情報の認知に対して視覚的な情報が統合されていく過程にも音楽経験が影響しないのか、という問題についても検証した。

実験 4, 5 においても、実験 3 のように、何か特定の音楽的能力と、検討の対象となる視聴覚統合過程との関係性が想定されるのであれば、それを指標として用いるべきだと考えたが、実験 4, 5 ではそのような方法を採用する事が困難であった。これは、音楽によって表現される情動的な意味が、音高やテンポ、音色など、複数の音楽的な要素の組み合わせによって実現されているためである。従って、どれか特定の音楽的要素を判別する能力の高さを指標としようとする、複数のテストを行うことになり、参加者に必要以上の負担を掛けてしまうのに加え、個別の音楽的要素の判別能力を測定しても、実際にそれらが掛け合わされたときの振る舞いが説明できない可能性が高いと考えられる。以上の理由から、特定の音楽的認知能力の高さを評価するのではなく、そのような能力が全体的に高いと想定される音楽経験者群と非経験者群とを比較する事とした。

更に実験 5 においては、このような視聴覚統合処理が、音楽刺激に対する情動的意味の認知に対して実際にどのような変化をもたらすかについて検証する事を目的とした。このために、視覚情報と音楽情報との関係性によって、音楽の情動的な意味に対する評価がどのように変化するかを検討した。

意味の統合過程に関わる事象関連電位

視聴覚統合の過程を電気生理学的に検証するにあたって、事象関連電位の N400 成分を指標として用いた。N400 に関する古典的な研究としては、Kutas & Hillyard (1980)が行った、文章の最後に呈示される単語が誘発する ERP についての検討が挙げられる。彼らは、文脈的に適切でない単語が、単語の呈示開始から約 400 ミリ秒後に大きな N400 成分を誘発する事を発見した。この N400 成分は特に中心一頭頂部で顕著であり、頭皮上の広い領域に分布していた。また N400 は、特定の文脈の中で特定の単語が生じる可能性の高さ(cloze probability)に対して敏感で、その振幅は文章の最後の単語に対する期待がどのくらい強いかによって変化する事が報告されている(Kutas & Hillyard,1984)。更に Bentin, McCarthy, & Wood (1985)は、語彙の判断課題 (lexical decision task)の中では、続けて呈示される 2 つの単語の間に関係性があると、そうでない時に比べ、後のほうに呈示された単語がより早く正確に同定される、という事を示した。それに加え、このように関連性のある刺激に先行されると、それに続けて呈示される単語の開始から、約 400 ミリ秒後に誘発される陰性電位の振幅が大きくなった。このように、N400 成分は意味の処理に関わる ERP 成分とされ、当初は言語処理に関する研究分野で提唱されたものであったが、現在では非言語的文脈においても広く報告され、様々な種類の刺激が持つ意味の統合過程を検証するための指標として利用されるようになってきている。実験 4 では、この意味の一貫性に敏感な N400 の性質を利用して、音楽の断片と視覚的な情報に対する情動的な認知が統合される過程についての検討を行う事とした。

3. 実験 1

3.1. 序論

音系列を暗記する事は多くの演奏家から重要視されており、Macmillan (2004)によれば、音

楽家は楽譜を見ずに暗譜で演奏を行う事によって楽曲への理解を高め、演奏に集中できるようにして、演奏の質を高めているという。しかしながら、暗記によるそうした恩恵に与るには、まずは、彼らは楽曲を覚えるための努力をしなければならず、効率的に記憶する方略が不可欠な状態にある。例えば彼らは楽曲を繰り返し演奏したり聞き返したりして聴覚的な記憶形成を試みるが、どちらがより効率的であるのかは定かではない。

過去の研究においては、音楽経験の無い人たちを対象とした実験で、音系列を自ら作り出す動作が、その動作の正確さを維持する効果を持つ事が示されている。Lahav, Boulanger, Schlaug, & Saltzman (2005)は、音楽的な訓練経験のない人たちを対象にピアノ演奏の訓練を実施し、その訓練方法がピアノの演奏の正確さに与える影響について検証した。参加者はピアノを弾きながら旋律の演奏を学習した後、3つの群に分けられた。その後一週間、ピアノ聴取群は、学習した旋律の聴取を継続し、統制群は、自然の音(nature sound)を聴取した。そして練習群は、ピアノを弾いて演奏する訓練を継続した。それぞれの方法での訓練が終わった時点での演奏の正確さは練習群で最も高く、次いでピアノ聴取群で高かった。ピアノ聴取群の成績は統制群よりは高かった事から、演奏を獲得した楽曲の音を受身的に聴取するだけでも、演奏の運動的な技術を、ある程度維持する効果がある事が示唆された。しかしながら、その効果も、実際のピアノ演奏の練習を継続する事による効果には及ばなかった。これらの結果から、そして実際の演奏と受身的な聴取とでは楽曲に対する記憶の形成や演奏の正確さに異なる影響を与える事が示唆された。

こうした打鍵動作を伴う訓練は、音楽経験の無い人の聴覚皮質に再組織化を促したり、運動関連領域と聴覚皮質とのネットワークを強化したりする効果を持っている。Lahav et al. (2007)は音楽家でない参加者を対象としたfMRI計測実験を通して、特定の旋律をピアノで弾く訓練を5日間実施すると、その旋律を聴取するだけで前頭―頭頂領域の運動関連ネットワーク(fronto-parietal motor-related network)とブローカ野が活性化されるようになる事を示した。また、訓練の対象となった旋律を構成するのと同じ音要素で並び方が異なる旋律を聞かせているときには、運動関連ネットワークの活動は弱く、ブローカ野は活性化しなかった。これらの事から、

彼らは、音 1 つと鍵盤 1 つを弾く動作との間に結びつきが生まれ、それが運動関連領域の活性化に結びついたと主張する。また、彼らはブローカ野の活動はピアノ音の系列と打鍵の動作系列との結びつきが形成された事を反映しており、この領域は動作や音の無意識的なシミュレーションや予期に関わっていると主張した。また、Lappe et al. (2008)は非音楽経験者を対象とした MEG 計測を行い、特定の音系列を演奏する訓練を行うと、後にその音系列を聴取した際、系列中に逸脱音が生じた場合の MMNm 反応が増加する事を示した。彼らは MMNm の発生源が聴覚皮質である事から、打鍵動作を伴う演奏訓練には、聴覚皮質の再組織化を促す効果があったと主張した。

これらの研究結果から推察すると、打鍵動作を伴ったピアノの訓練と、受動的な聴取とはどちらも聴覚刺激だけを呈示されたときの認知過程を変化させるが、前者は特に脳の活動パターンに変化をもたらし、次に来るべき音への期待を高める効果を持つと考えられる。しかしながら、これらの訓練方法の違いが聴覚的な期待へ与える効果が、長期的な音楽経験によってどのような影響を受けるかは未だ明らかになっていない。この問題に取り組む為、本研究実験 1 では、音楽経験者を対象とした脳波(electroencephalogram; EEG)計測を行って、打鍵動作を伴った音系列学習が聴覚的な記憶を向上させるかどうかを検証した。

この検証のための指標として、実験 1 では脳波の MMN 成分(Näätänen et al., 1978; Näätänen, 1979)に着目した。特定の音系列の学習の際に系列的な打鍵動作を行う場合と行わない場合とで、その音系列に対する聴覚的な記憶の形成に異なる影響があるならば、その違いは、学習後に再び音系列を聴取したとき、そこで発生する MMN の振幅の違いとなって現れるはずである。もし、非音楽家と同様に打鍵動作が聴覚的な処理を促す要因となれば(Lappe et al., 2008)、本研究においても打鍵動作を伴う音系列の学習がその音系列の聴覚的な記憶の形成を促進させ、学習後の音系列聴取時に生じる逸脱音に対して無意識的なエラー検出活動(MMN)を増大させるだろう。

また、長期的または短期的な音楽的な訓練は、聴覚入力から情報を抽出する能力を高め、それ

が MMN 反応の増大に反映されるので(Kraus & Chandrasekaran, 2006 参照; Pantev, Lappe, Herholz, & Trainor, 2009), MMN 振幅の解析に当たっては, 参加者個人の聴覚的な認知能力の差を考慮する必要があると考えられる. 標準音と逸脱音の間により大きな距離を知覚する場合に MMN の振幅が大きくなる事から(Kraus & Chandrasekaran, 2006), 特に, 外部への参照無しに音の高さを特定できる音感の能力の違いには注意が必要であろう. 個人の音楽的能力として高い音感を持っている参加者では, 音感の低い参加者よりも明確に標準音と逸脱音の差を知覚する事が出来, MMN 反応が増大する可能性がある. そのため, 打鍵動作を伴う演奏訓練が音系列記憶の形成に与える効果が, こうした個人差に隠れて観察されなくなる事態を回避するために, 音感テスト (Zatorre, 2003)の成績に基づいたグループ分けを実施した上で, 訓練による影響の検討を行った.

3.2. 方法

3.2.1. 実験参加者

参加者は, 男性 6 名(範囲: 20–29 歳; 平均: 22.05 歳)と女性 14 名(20–29 歳; 平均: 22.33 歳)であった. すべての参加者には 3 年以上のピアノ訓練経験があった(表 3. 1.). 参加者全員の聴覚は正常であり, 神経疾患の既往歴は無かった. また, 1 名のみが左利き, 残り 19 名が右利きであった. なお, 実験の手続きについては事前に理化学研究所の倫理委員会から承認を得ており(課題番号: 和光第三 16—3), 参加者に対しては実験前に研究の趣旨を説明し, 被験者として実験に参加する事に同意を得てから実験を開始した.

表 3. 1. 音感群毎の、参加者の音楽経験. “開始年齢”は各個人がピアノの訓練を開始した年齢を, “継続年数”はその訓練の継続年数を表している. 開始年齢は低音感群よりも高音感群のほうが低かった.

	高音感群		低音感群	
	開始年齢	継続年数	開始年齢	継続年数
	1	28	3	17
	3	26	4	13
	3	24	5	12
	3	13	5	6
	4	8	6	5
	4	6	7	11
	5	24	22	9
	5	16	13	2
	5	15		
	5	10		
	5	7		
	6	12		
平均	4.08	15.75	6.75	9.38
SD	1.38	5.85	3.49	4.87

3. 2. 2. 刺激

2つの音系列刺激(音系列 A, 音系列 B)を作成し, 学習セッションと脳波記録セッションでそれらを交互に呈示した(図 3. 1.). C4 (261.1 Hz), D4 (293.7 Hz), E4 (329.6 Hz), F4 (349.6 Hz), G4 (392.0 Hz)の 5 つの高さのピアノ音を用い, 16 個の音要素のランダムな配列によって各系列を構成した. 各音要素の長さは 750 ミリ秒で, 各音系列の長さは 12 秒であった.

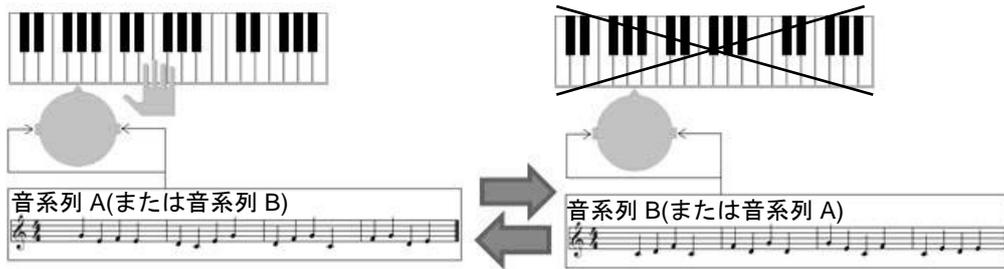


図 3. 1. 学習セッションでの手続き. 交互に呈示される音系列 A と B に対し, 参加者は一方の系列が聞こえている時だけその系列を鍵盤で演奏し(打鍵あり条件), もう一方の音系列が聞こえている時には単にそれを聴取した(打鍵なし条件).

3. 2. 3. 手続き

3. 2. 3. 1. 音感テスト

外部の参照なしに音の高さを同定する能力の高さを評価するため, 音感テストを実施した. 音感テストでは, 参加者に 3 オクターブの範囲内の音(36 個の純音)をランダムな順番で呈示し, その音がピアノの鍵盤上のどの音に対応するかを回答させた. 各音の長さは 300 ミリ秒であり, 1 つの音が終わってから 4500 ミリ秒間の無音区間を挟んで次の音を呈示した. 参加者は, この無音区間の間に, 実際のピアノの鍵盤(Roland, D-900)を 1 つ弾く事によって, 音の高さを回答した. このとき, 参加者が弾いた音の聴覚フィードバックは与えなかった. 1 回のセッションで 36 種類の高さの音を 1 回ずつ呈示し, 音感テスト全体では 3 セッションを実施した. 3 セッションを通しての平均正答率を参加者個人のスコアとした. このスコアの高さに従って, 参加者を高音感群と低音感群とに分類し, 後の EEG データの解析に使用した.

3. 2. 3. 2. 学習セッション

イヤホンを通して音系列 A と B を交互に呈示し, 参加者に対しては, そのうち一方が呈示されているときだけ, 右手でピアノ(Roland, D-900)を弾いて, 同じ系列を演奏するよう教示した(打鍵あり条件; 図 3. 1.). このとき楽譜は無く, 参加者は聴取している音系列を真似て演奏した. 正しく演奏できたかどうかのフィードバックは行わなかったが, 打鍵あり条件の間は参加者の演

奏をイヤホンを通して聴覚的にフィードバックしていた。参加者は、自らの演奏によって作り出した音系列と、音刺激として呈示されている系列とが同じになるように演奏の訓練を行った。また、もう一方の音系列を聴取しているときには、参加者は両手を膝の上に置き、指を動かさないよう求められた(打鍵なし条件)。打鍵なし条件ではピアノ演奏を行わせなかったが、打鍵あり条件と打鍵なし条件は交互に呈示したため、打鍵なし条件の音系列も打鍵あり条件の音系列と同じ回数だけ呈示された。系列 A と B のいずれを呈示している時でも、手元や鍵盤を見ずに、目の高さに設置した“+”の印を注視するよう求めた。

学習セッションは、参加者が打鍵あり条件で十分に演奏を獲得したら終了する事とした。そのため、1回のセッションでまず音系列 A と B を交互にそれぞれ 20 回ずつ呈示し、1セッションを終了する度に達成度の評価を行った。達成の基準を、正しい音を弾いた確率が 95%以上である事、そして、刺激呈示開始後 100 ミリ秒以内に対応する音を演奏している事とした。打鍵あり条件の試行を 5 試行ずつ 4 ブロックに分割し、この全てのブロックで学習達成の基準を満たしたら学習セッションを終了した。参加者のパフォーマンスが基準を満たさない場合には、再び学習セッションを繰り返した。結果として、この学習セッションは 2—5 回、繰り返し行った。半数の参加者では音系列 A が打鍵あり条件、残り半数の参加者では音系列 B が打鍵なし条件で呈示された。また、半数の参加者では音系列 A から、残り半数の参加者では音系列 B から音系列刺激の呈示が始まるよう設定した。

3.2.3.3.脳波計測セッション

学習のセッションに続けて、再び音系列 A と音系列 B を交互に呈示しながら脳波の計測を行った。1つのセッションの中で、音系列 A と B をそれぞれ 18 回ずつ交互に呈示した。このとき、10%の確率で音要素の高さが逸脱するよう操作した。逸脱音は、ハ長調の音階の中で、元の音の 1 つ分高いか、あるいは 1 つ分低い音とした。例えば、E の音の逸脱音は D 音または F 音とした。また、音系列内の各音の生起する周期に α 波が同期するのを防ぐため、各音要素の長さが 750—950 ミリ秒の間でランダムに揺らぐよう設定した。参加者に対しては、これらの音を単に

聴取するよう教示した。

参加者はシールドルーム内のリクライニングチェアに座り、リラックスした姿勢で音系列を聴取した。音刺激の呈示は、イヤホンを通して両耳から行った。64ch の Ag-Cl 電極(国際 10-20 法)から Scan 4.3 (SynAmps; NeuroScan, Inc)にデータを記録した。このときの帯域通過フィルタは 0.15–30 Hz, サンプル周波数は 500Hz とした。計測中の抵抗値を 5k Ω 以内に維持した。オンライン計測における参照電極を左耳に設置し、計測後にオフラインで参照電極を両耳朶に設定し直した。左眼の上下と両側のこめかみに装着した電極から眼電図(electrooculogram; EOG)を計測し、後の解析で眼球運動によるアーチファクトを除外するために用いた。

3.2.4. 解析

3.2.4.1. 音感テスト

音感テストで得られた回答から、3 セッション全体の正答率(%)を算出した。この正答率に従って参加者を高音感群と低音感群に分類し、後の ERP 解析で個人の音楽的能力と脳活動との相関関係を検証するのに用いた。また、音感テストのスコアと、質問紙で調査した個人の音楽経験との関係性について検討するため、相関解析を実施した。

3.2.4.2. 脳波データ

EEG データの解析には EDIT 4.3(NeuroScan, Inc.)を用いた。音の呈示開始を起点とする-100 ミリ秒から 0 ミリ秒までをベースラインとし、-100 ミリ秒から 600 ミリ秒までを加算平均して ERP の波形を算出した。眼球運動によって生じたアーチファクトを除外するため、振幅が 100 μ V を超えるデータをオフラインで消去した。更に、その他のアーチファクトを除去するため、目視にてノイズ過多のデータを除外した。残りのデータを刺激の種類ごとに平均し(打鍵あり条件標準音, 打鍵あり条件逸脱音, 打鍵なし条件標準音, 打鍵なし条件逸脱音), 更に参加者間の加算平均を算出した。ERP 成分の分布に関する解析のために、頭部の電極を 7 つの領域に分けた関心領域(region of interest: ROI)を設定した(Abla, Katahira, & Okanoya, 2008; Abla

&Okanoya, 2009). 7つの領域には、それぞれ3つの電極を含めた：前部中央(middle anterior; Fp1, Fz, Fp2), 中心部(middle central; FCz, Cz, CPz), 後部中央(middle posterior; P3, Pz, P4), 左側前部(left anterior; F3, FC3, F7), 右側前部 (right anterior; F4, FC4, F8), 左側後部(left posterior; CP3, TP7, P7), 右側後部(right posterior; CP4, TP8, P8). MMN 成分の評価を行うため、刺激呈示開始から170—210ミリ秒の平均振幅について、ANOVAによる解析を行った(α level = 0.05). ここでのMMNの時間窓は、標準音と逸脱音に対する反応の差が最も大きくなったときの潜時を基準として、前後20ミリ秒間を含む時間帯と定義した(Otten, Alain, & Picton, 2000). これらの平均振幅のデータを、刺激の種類(打鍵あり条件標準音, 打鍵あり条件逸脱音, 打鍵なし条件標準音, 打鍵なし条件逸脱音)と電極の位置(7つのROI)を被験者内要因, 音感群(高音感群, 低音感群)を被験者間要因とする, 繰り返しのあるANOVAを用いて検定した. 下位検定では, フィッシャーのLSD法を用いた.

3.3. 結果

3.3.1. 音感テスト

音感テストの正答率は, 平均42.54%($SD = 26.99$)であった. 参加者ごとの正答率に従って, 参加者を高音感群と低音感群の2つの群に分類した. 高音感群には, 音感テストで40%以上の正答率を記録した12名, 低音感群には正答率が20%以下(Fujisaki & Kashino, 2002)であった8名を割り振った(図3.2). 音感テストのスコアは高音感群では61.10% ($SD = 17.69$), 低音感群では14.70% ($SD = 1.90$)であり, 低音感群よりも高音感群の正答率のほうが有意に高かった($t(18) = 7.29, p < 0.0001$). また, 音感テストのスコアと, 参加者がピアノのレッスンを開始した年齢との間に負の相関関係が見られ($r = -0.53$), より年齢の低いときにピアノの訓練を開始した参加者でより高い音感が身につけている事が示された(図3.2). 更に, 低音感群と高音感群との間で比較すると, 高音感群のほうがより年齢の低いうちにピアノの訓練を開始している事が示された($t(18) = 2.40, p < 0.05$) (表3.1). また, 音楽的な訓練の継続年数に関しても, 高音感群

のほうが低音感群よりも長かったが、この傾向は、統計的には有意とはならなかった($t(18) = 2.04, p = 0.06$).

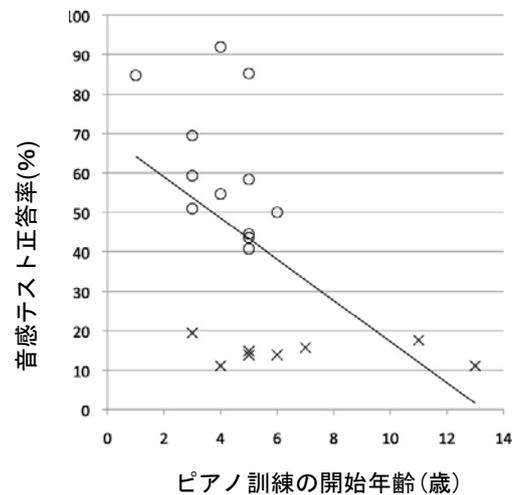


図 3. 2. 音感テストのスコアとピアノ訓練の開始年齢の関係性.

○は高音感群, ×は低音感群を表す.

3. 3. 2. 訓練

訓練セッションは平均して 2.35 回($SD = 0.75$)実施した。音感群別のセッション実施回数は、高音感群では平均 2 回($SD = 0$)、低音感群では 2.88 回($SD = 0.75$)であった。最後の訓練セッションでは、参加者全体で平均 98.97%($SD = 0.01$)の正反応が得られ、音刺激の呈示開始と打鍵のタイミングとのずれは平均 41.74 ミリ秒($SD = 7.83$)であった。音感群別では、高音感群では正反応率が 99.32%($SD = 0.01$)、タイミングのずれは 39.87 ミリ秒($SD = 8.57$)であり、低音感群では正反応率が 98.44%($SD = 0.01$)、タイミングのずれは 44.55 ミリ秒($SD = 6.00$)であった。正答率においてもタイミングのずれにおいても、群間で有意な差は見られなかった(正答率: $t(18) = 1.40, p = 0.18$; タイミングのずれ: $t(18) = 1.34, p = 0.20$).

3.3.3. ERP データ

音刺激開始から 170—210 ミリ秒の平均振幅を対象とした ANOVA から、音の種類の主効果 ($F(3, 54) = 11.94, p < 0.0001$) と位置の主効果 ($F(6, 108) = 100.87, p < 0.0001$) が有意である事が明らかになった。また、音の種類と位置の交互作用 ($F(18, 324) = 4.86, p < 0.0001$)、音の種類と位置、音感群の交互作用も有意であった ($F(18, 324) = 2.99, p < 0.0001$)。

各音感群における刺激の種類の影響を詳しく評価するために、FCz, Cz, CPz における 170—210 ミリ秒の平均振幅に関して下位検定を行った。更に、左側の ROI(左側前部と左側後部) と右側の ROI(右側前部と右側後部) の平均振幅を用いて左右差の検証を行った。

3.3.3.1. 高音感群

高音感群では、打鍵あり条件でも打鍵なし条件でも MMN 反応が誘発された(図 3.3.A)。打鍵あり条件では、MMN は中心部(middle central)から右半球(right hemisphere)にかけて特に顕著であった(図 3.4.A, B)。音刺激呈示開始から 170—210 ミリ秒の平均振幅を対象にした ANOVA から、打鍵あり条件でも打鍵なし条件でも、標準音が呈示されたときに比べ、逸脱音呈示されたときの方が、より大きな陰性電位が誘発される事が示された(打鍵あり条件： $F(1, 11) = 13.51, p < 0.005$ ；打鍵なし条件： $F(1, 11) = 8.02, p < 0.05$)。この事は、どちらの条件においても MMN 反応が見られた事を示している。標準音に対する ERP 反応には、条件間で有意差が無かったが ($F(1, 11) = 1.52, p = 0.24$)、逸脱音に対する反応は打鍵あり条件のほうが打鍵なし条件よりも大きかった ($F(1, 11) = 9.58, p < 0.05$)(図 3.3.A)。

MMN 反応の大きさの左右差に関する解析から、打鍵あり条件では、MMN の振幅は左側よりも右側の領域で、より大きくなった事が示された ($F(1, 11) = 5.30, p < 0.05$)。打鍵なし条件ではこのような左右差は有意ではなかった ($F(1, 11) = 0.27, p = 0.61$)。

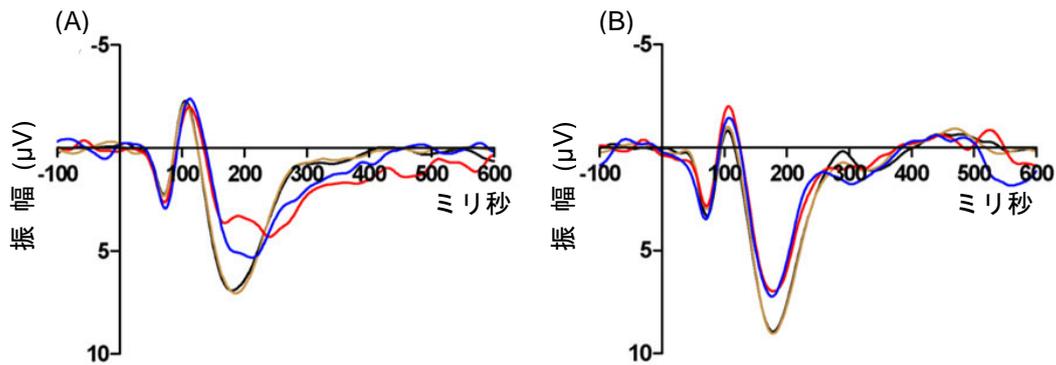


図 3. 3. FCz 電極における ERP の被験者間平均波形. (A) 高音感群 (n = 12) では, 逸脱音に対する MMN は, 打鍵なし条件よりも打鍵あり条件のほうが大きかった. (B) 低音感群 (n = 8) では, 逸脱音に対する陰性電位の大きさに条件間の差は観察されなかった. 茶色は打鍵あり条件の標準音, 赤色は打鍵あり条件の逸脱音, 黒色は打鍵なし条件の標準音, 青色は打鍵なし条件の逸脱音に対する ERP 反応を表している.

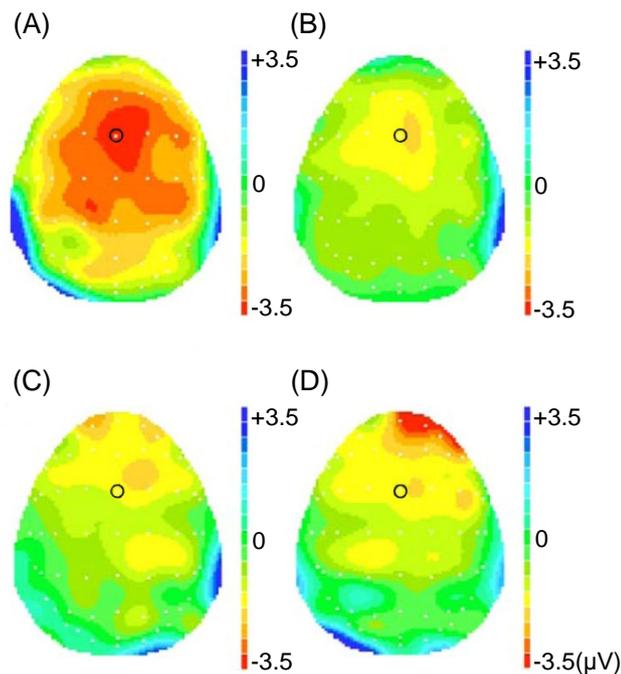


図 3. 4. 音刺激呈示開始から 188 ミリ秒後の, ERP 振幅 (逸脱音と標準音に対する反応の差分) の頭皮上分布. (A) 高音感群の打鍵あり条件, (B) 高音感群の打鍵なし条件, (C) 低音感群の打鍵あり条件, (D) 低音感条件の打鍵なし条件. 白色の点は各電極の位置, 黒色の丸で囲まれた白色の点は FCz 電極の位置を示している.

3.3.3.2. 低音感群

低音感群でもまた、打鍵あり条件でも打鍵なし条件でも MMN 効果が観察されたが、打鍵あり条件ではその効果は有意傾向に留まった(打鍵あり条件： $F(1, 7) = 4.41, p = 0.07$ ；打鍵なし条件： $F(1, 7) = 10.42, p < 0.05$)(**図 3.3.B**；**図 3.4.C, D**)。また、標準音に対する ERP 反応にも、逸脱音に対する陰性電位の大きさにも条件間で有意な差が見られなかった(標準音： $F(1, 7) = 0.16, p = 0.70$ ；逸脱音： $F(1, 7) = 0.01, p = 0.92$)。更に、どちらの条件でも、MMN の振幅に左右差は見られなかった($p > 0.05$)。

3.4. 考察

3.4.1. 打鍵を伴う訓練の効率性の高さが MMN 振幅の増大を導いた

実験 1 の高音感群では、ピアノを演奏しながら音系列を学習すると、演奏せずに単に聴取する事によって学習したときに比べて、その音系列中に生じた逸脱に対し、より大きな MMN 反応が観察された(**図 3.3.A**)。MMN 成分は無意識なエラー検出の過程を反映しており、その振幅は標準刺激に関する聴覚的な記憶痕跡の強さに関係している(Baldeweg et al., 2004; Haenschel et al., 2005; Winkler et al., 1993)。従って、打鍵なし条件の音系列に比べて打鍵あり条件の音系列を聴取している際に、より大きな MMN 振幅が得られたという事は、音系列の学習時に打鍵動作の訓練を行う事によって、標準刺激に対する聴覚的な記憶がより強く確立された事、そしてそれによって後のエラー検出過程が促進された事を示唆している。MMN 反応は打鍵なし条件でも誘発されたが、打鍵あり条件に比べれば、逸脱を検出したときの ERP 反応は小さかった(**図 3.3.A**；**図 3.4.A, B**)。これらの事は、ピアノを弾きながら学習するのに比べると、単に音系列を聴取するだけの学習は音系列を記憶する上で効率が低いという事を示唆している。

しかしながら、打鍵あり条件では単に打鍵なし条件の倍の聴覚入力があったために、音の記憶形成が促進されたという可能性も、完全には否定できない。打鍵あり条件では多くの場合、呈示した音と参加者が演奏した音のタイミングがわずかにずれていたため、純粋に聴覚的な側面だけ

に注目すると、打鍵なし条件の 2 倍の回数分だけ音系列を聴取した事になる。これが原因となって、より強固な聴覚的記憶が形成されたと捉える事も出来る。しかしこれと同時に、打鍵あり条件では演奏を獲得するまでに少なからずパフォーマンスにミスがあり、そのときには参加者は学習すべき音の系列と同時に、そこから逸脱した聴覚フィードバックを得ていた。この事が聴覚的な記憶形成に対して抑制的に働いた可能性もある。参加者が同期あり条件で受け取った聴覚的な情報の効果について確かめるには、もし打鍵あり条件で参加者が聴取したのと同様の音を、何ら動作を伴わない状況で聴取したとしても——つまり、見本の音系列と参加者が演奏した音系列とを、第三者が聴取しても——聴覚的な記憶形成が促進されるような効果が得られるかどうかについて、今後新たな実験を行って検討していく必要があるだろう。

3. 4. 2. 訓練による効果は、個人的音楽経験に依存している

高音感群では打鍵動作を伴った演奏訓練によって聴覚的な記憶形成が促進され、その後の無意識的なエラー検出が促進されるという効果が観察された一方で、(図 3. 3. (A))低音感群ではそのような傾向は見られなかった(図 3. 3. (B))。ただし、この群間の結果の違いが、高音感群と低音感群に分類された実験参加者の間に存在する、音の高さを同定する認知能力の差に起因すると結論付ける事はできないだろう。音感の高さが MMN の振幅に影響する可能性がある事を考慮して参加者を低音感群と高音感群とに分類したが、もし音感群間の音感の能力の差が MMN 反応に反映されるとすれば、低音感群よりも高音感群のほうで MMN 反応が大きくなるといった結果が、学習セッション時の条件に関わりなく観察されたはずである。だが実際には、高音感群では打鍵あり条件と打鍵なし条件の間に MMN 反応の差がある一方で、低音感群では条件間に有意差がみられないという、学習条件から受ける影響の違いとして現れた。また、実験 1 では音感の能力の高さと個人の音楽経験との間に相関関係があり、高音感群では低音感群に比べて、より若い頃からピアノの訓練を開始している傾向があった(表 3. 1. ; 図 3. 2.)。この音楽的訓練の経験の中で、音感以外の音楽的な能力が向上した可能性がある。例えば、脳の聴覚—運動ネット

ワークは音楽経験を通して形成されるので(Lahav et al., 2007), より年齢の低いうちから訓練を行っていた参加者ではそのネットワークがより強くなっていたと推測される. 特定の音系列を学習する際には, 聴覚と運動の感覚を改めて系列的に関係づけ直さなければならないが, 基礎的なネットワークが強固である方が, この関係づけのプロセスも促進されるものと考えられる.

参加者間に大きな個人差がある事が想定される聴覚—運動ネットワークと, 聴覚的記憶形成への効果に対して演奏を伴った訓練が与える影響との関係性について説明するため, ここで Warren, Wise, & Warren (2005)による発話のモデルを紹介する. このモデルによれば, 音と動作の対応関係は, テンプレートマッチングによって獲得される. より具体的には, 聴覚情報の処理に関わる上側頭平面後方部(posterior superior temporal plane ; posterior STP)と, 運動プログラムを司る前頭前野皮質, 前運動皮質, 運動皮質とが相互に情報をやりとりする事で, 音と動作の対応関係が獲得される. 聴覚的な信号の中で生じる一連の音響的变化は STP 後方部において, テンプレートマッチングを介し, 短い音ユニットの連なりから構成される系列として符号化される. 動作の系列についても聴覚的系列と同様に, 分節化された小さな動作ユニットの連なりとして表される. このような方法で符号化が為される事により, 聴覚と運動の系列を対応付ける際, それらのマッピングに要する負担を軽減する事ができる. Warren et al. (2005) はこれを発話学習に関するモデルとして提案したが, こうした聴覚—運動の双方向的なつながりを形成するメカニズムが楽器の演奏時にも働いている可能性についても示唆している. Peretz & Coltheart (2003) もまた, 発話や音楽を含む様々な聴覚刺激における音響的な解析モジュールの最初の段階で, 音を分割し個別の要素に切り分けるプロセスが生じる事を示唆している.

ピアノ演奏の状況を Warren et al. (2005)のモデルに当てはめると, 音のテンプレートの最小ユニットに相当するのは, 一続きの音の中で一定の周波数が持続する区間である. つまり, 楽譜上でいうところの, 1つの音である. 運動のテンプレートの最小ユニットに相当するのは, 指1本で1つの鍵盤を弾く動作という事になる. これらのユニット同士を組み合わせる事によって, 演奏の動作と音とを対応付け, それらを系列的に結びつける事ができる. これらのテンプレート

は経験に基づいて形成され(Warren et al., 2005), 更に聴覚と運動のネットワークもまた経験を通して形成される(Baumann, Koeneke, Schmidt, Meyer, Lutz, & Jancke, 2007). 本研究実験 1 の高音感群では, 音のユニットに関するテンプレートが確立されていた事が推測される上, 彼らの音楽経験の豊富さから考えて聴覚情報と運動情報の双方向的な情報の伝達についても, 低音感群よりも優れていたと推察される. 高音感群におけるこのような性質が, 指による 1 つの打鍵動作とそれによって作り出される 1 つの音の間の繋がりや, またそれらの系列的な繋がりを形成するのを促したのではないだろうか. もし参加者が獲得したのが単に運動のユニット 1 つと音のユニット 1 つのような, 1 対 1 の関係性だけだったのであれば, 打鍵あり条件と打鍵なし条件で, MMN 反応の大きさに違いは無かった筈である. なぜならば, 打鍵あり条件では各鍵盤を常に同じ指で弾いていたのに加え, 音系列中に使われていた音要素は条件間で共通していた事から, 打鍵あり条件で形成された運動のユニットと音のユニットとの 1 対 1 の結びつきは, 打鍵なし条件においても同様に利用されうる状態にあったからである. 従って, ピアノを弾きながら学習する事により学習対象の音系列に関する聴覚的な記憶の形成が促進される効果において重要であったのは, ピアノ演奏によって形成された動作と音の間の系列的な結びつきであったと結論づけられる.

Lahav et al. (2007) では非音楽家においてさえ, ピアノ演奏による訓練を通して特定の旋律の演奏における聴覚—運動ネットワークが形成されるに至ったが, 本研究実験 1 では, 低音感群において同様のネットワークが聴覚的な記憶の形成に関与したという形跡は見られなかった. この矛盾はしかし, 彼らの研究においては非音楽家を 5 日間に渡って訓練したが, 本研究では低音感群も平均 2.88 回のセッションだけでしか訓練されなかった, という差異によって説明可能であろう. 短期間の訓練でさえ, 音と動作の系列の結びつきや, 音の高さをカテゴリ的に特定する能力をある程度向上させる働きがある(Eldridge, Saltzman & Lahav, 2010). だが, 長期的な訓練によって既にネットワークが確立され, 音の高さを確実に特定する事ができる高音感群に比べれば, やはり効率の良さという点で劣っていたと言わざるを得ないだろう. 言語の場合には,

母語に対する音のテンプレートは幼いうちに形成される。他の言語の音テンプレートを獲得するのも可能ではあるが、感受期(sensitive period)を過ぎてしまえばこの獲得は困難になる。音楽に用いられる音の高さをカテゴリ的に知覚する能力を獲得するのにもまた、感受期は存在するだろうと言われている(Zatorre, 2003; Bahr, Christensen, & Bahr, 2005)。更に、生まれつきの資質がこの能力の獲得に関与するとも言われている(Zatorre, 2003; Bahr et al., 2005)。幼いうちからの経験や元来の資質により獲得される能力であるからこそ、低音感群が短期間の演奏訓練で高音感群と異なる結果を示したのは妥当であったと言える。以上の考察をまとめると、音楽経験を通じて演奏に特化した聴覚—運動ネットワークや演奏に使われる音のテンプレートが形成され、それらの要因が、演奏する事による旋律の学習が聴覚的記憶の形成を促す効果に貢献したと結論づけられる。

3.4.3. 今後の課題

実験1では音感テストの成績に従って参加者を分類し、ERPの解析を行った。しかしながら、音感の高さは個人の音楽経験と密接な関わりがあり、実験1の結果を解釈する上でも音感の高さというよりは、寧ろ聴覚—運動ネットワークの形成に関わる幼い頃からの音楽経験という要素のほうが重要であると推察された。ピアノの訓練の開始年齢や継続年数は参加者間で大きくばらつきがあったため、それらのどちらかを基準として結果を比較する事は出来なかったが、今後の研究では、音楽経験の要素をより考慮した解析、または、結果に関わるような特定の音楽的能力をよりの確に評価できるような指標の導入を検討したい。また実験1の音感テストでは音刺激として純音を使用したので、ピアノの音色に特化したような音感の高さについて測る事ができなかった(Pantev, Roberts, Schulz, Engelen, & Ross, 2001 参考; Bahr et al., 2005)。音と動作の系列的な結びつきは特定の楽器による特定の旋律の学習を通して変化するものであるため(Lahav et al., 2007)、音に対する認知能力を計測する際には研究対象となる特定の楽器の音色を用いる方がより妥当であると考えられる。

既に述べたように、ピアノ演奏が学習の対象である音系列の聴覚的な記憶形成を促進する効果において、動作と音の間に系列的な結びつきが形成される事が重要である、と考えられる。しかしながら、演奏の動作には複数の要素が含まれており、ここで観察された効果に関する各々の要素の役割については直接的に確かめられていない。そこで実験 2 では、演奏において各々の指の動きと音の生起のタイミングが同期しているという要素に着目し、音に同期した動作が音系列の記憶形成においてどのような役割を果たすかについて検証する。音に同期して身体を動かす行為は、演奏をする側だけでなく、聴き手の側にもしばしば生じる。そうした音系列に対して同調する行為自体は、聴覚的な記憶の形成に与える影響に関して、演奏行為とどのような相違点を示すだろうか。

4. 実験 2

4.1. 序論

過去の研究から、ピアノ演奏の訓練を行う事により、聴覚—運動ネットワークが活性化するようになる事(Lahav et al., 2007)、そして聴覚記憶的な処理に影響する事(Lappe et al., 2008)が、これまでに報告されてきた。また本研究実験 1 の結果に関しても、系列的な打鍵動作が聴覚的な記憶の形成を促すような効果が音楽経験者にも生じる事を示している。しかしながら、ピアノ演奏それ自体には複数の要素が含まれており、その個々の要素が聴覚的な記憶の形成に及ぼした影響は定かではない。意図した演奏に沿って指の動きを調整する働きもその要素の 1 つと考えられる。更に、演奏に際して指で鍵盤を叩く行動というのは、各指の上下運動と、それらの動きの系列的な組み合わせによって構成される。実際のピアノ演奏や、それに含まれる系列的な要素が音系列の聴覚情報の符号化を容易にする働きを持つという見解については、過去の研究(Lappe et al., 2008)や本研究実験 1 の結果から支持されているが、一方で、音楽の記憶という分野内において、個々の指によるタッピングの動作が果たす役割は、これまでほとんど注目されてこなか

った。実験 2 では、音系列の学習の際に音に同期したタッピングを行う事によって、聴覚的な記憶の形成にどのような影響が及ぶかを検討する事を目的とした。

また、実験 2 では、タッピングが音系列の聴覚的処理に与える効果において、個々人の音楽的経験や能力が及ぼす影響についても検討した。これは第一に、実験 1 で演奏が音系列の記憶を促進する働きが、絶対音感の能力の高低や音楽的経験の豊富さに影響された事を考慮しての事である。また第二に、同期タッピングの技術が、日常的に曝されている音楽文化(Snyder et al., 2006)や専門的な音楽的訓練によっても影響される事、つまりは同期タッピングに関わる聴覚—運動ネットワークが経験によって変化する可能性があるためである(Ericsson, Krampe, & Tesch-Römer, 1993; Repp & Doggett, 2007; Baer, Thibodeau, Gralnick, Li, & Penhune, 2013; Sloboda, 2000 参照)。実験 2 では同期タッピングの精度の高さも個人の音楽的能力の高さを表す指標の 1 つとして採用し、同期タッピングを制御する能力の高さが、同期タッピングが聴覚的処理に与える影響に対してどのように働くかを検討した。

特定の音系列に合わせて同期タッピングを行う事とその音系列に対する聴覚的な処理や記憶の形成との間の関係性について、また、個人の音楽経験や能力がその関係性に与える影響について検証するため、実験 2 では同期タッピングの動作を伴った状態での音系列の学習に続けて、その音系列を聴取している時の脳活動を、EEG を用いて計測した。もし系列的な打鍵動作を行う事と同様に(実験 1)、音に身体の動作を同期させる行動もまた聴覚的な記憶形成を促進させる効果を持っていたとしたら、同期タッピングを行わないで学習した音系列よりも、同期タッピングを行いながら学習した音系列に対して聴覚的なエラー検出に関わる脳活動(MMN 反応)が高まると予測される。また、実験 2 では MMN に反映されるのとは異なる認知プロセスも観察するために、EEG 計測中に課題を課し、系列内に間違った音が有ったかどうかを判定させた。このような手続きによって、音系列に対する参加者の注意を促し、注意や文脈の更新に関わる P300 成分(Polich & Kok, 1995)の誘発を促した。特定の音系列に対して同期タッピングを行う事により、その音系列を聴取したときの注意が促されたり、その音系列中に逸脱が生じたときに音系列

について把握している内容を更新する働きが促されたりする効果がある場合には、同期タッピングを行いながら学習した音系列を聴取している時に生じる逸脱音に対して、特に顕著な P300 反応が生じると予測される。

4.2. 方法

4.2.1. 実験参加者

日本人 20 名(うち、女性 11 名)が参加した。平均年齢は 22.70 歳(範囲：18—47 歳；*SD*：7.26)で、全員に少なくとも 3 年間ピアノを練習した経験があった(表 4.1.)。彼らは平均 4.85 歳(範囲：3—10 歳；*SD*：1.93)からピアノの訓練を開始し、その後、平均 9.75 年間(範囲：3—18 年間；*SD*：4.68)訓練を継続していた。参加者のうち 5 名は、歌や、ヴァイオリンやギター、フルートといったピアノ以外の楽器の経験があった。ピアノ以外の楽器経験も含めると、参加者の音楽経験は平均 10.16 年間であった(範囲：3—19 年間；*SD*：4.64)。参加者全員の聴覚は正常であり、神経疾患の既往歴は無かった。また、全員が右利きであった。なお、実験内容の手続きについては事前に東京大学の倫理審査委員会から承認を得ており(課題番号：230)、実験に先立って参加者に対して研究の趣旨を説明し、実験に被験者として協力する事に関して同意を得た。

表 4. 1. 音楽経験と、音感テストでの正答率(%), 学習セッションにおける同期誤差(SE).
 複数の楽器経験があった 5 名の参加者全員において、最初に訓練を開始した楽器がピアノ
 であったため、楽器の種類を特定しない場合の音楽訓練開始年齢は表中から省略した.

	ピアノ経験		音楽経験	音感テスト のスコア (%)	同期誤差の ばらつき (SD)
	開始年齢	継続年数	継続年数		
	(歳)	(年間)	(年間)		
	3	18	18	100	53.63
	3	15	19	98.15	98.41
	3	15	15	99.07	41.08
	3	15	15	71.30	80.25
	3	14	14	40.74	62.67
	3	10	10	93.52	32.78
	3	4	12	100.00	40.17
	4	10	10	39.81	35.63
	4	3	3	36.11	46.19
	5	15	15	98.15	38.86
	5	14	14	91.67	32.71
	5	10	10	74.07	28.32
	5	6	6	96.30	55.78
	5	5	5	97.22	51.47
	6	9	9	46.30	49.75
	6	6	6	56.48	41.92
	6	4	4	53.70	41.19
	7	6	6	37.04	34.84
	8	11	11	66.67	45.80
	10	5	10	35.19	34.20
平均	4.85	9.75	10.6	71.57	47.28
SD	1.93	4.68	4.64	26.05	17.09

4. 2. 2. 刺激と装置

4. 2. 2. 1. 学習セッション

学習セッションでは、2つの音系列(音系列 A と音系列 B; 図 4. 1.)を交互に呈示した。C4 (261.1 Hz), D4 (293.7 Hz), E4 (329.6 Hz), F4 (349.6 Hz), G4 (392.0 Hz)の 5 つの高さの音を使ってそれらを 16 個並べたものを 1 つの音系列とし、音系列 A と音系列 B とを異なる並びで構成した。各音は 750 ミリ秒間で、1 つの系列全体の長さは 12 秒間となった。これらの音刺激は、MIDI インターフェース(EDIROL SD-90, EDIROL)を経由して、イヤークューブから呈示した。同期タッピング課題では、レスポンスパッド(NeuroScan, Inc)を基に作成した反応計測用装置を用いて、参加者にタッピングを実施させた。改良の際には、参加者がわずかな力でキイを押せるよう留意した。また、この装置は後の EEG 記録セッションでも用いたためキイを 2 つ設置したが、学習セッションで同期タッピング使用されたのは、左側の 1 つのキイだけであった。タッピングを行ったタイミングは、音刺激を呈示したタイミングと共に、Scan4.3 (SynAmps; NeuroScan, Inc)を用いてテキストファイルとして記録した。学習セッションの間、参加者はシールドルーム内のリクライニングチェアに座り、手元を見ないようにアイマスク(Sleep eye mask; Concise, Inc)を装着した。



図 4. 1. 2 つの音系列刺激。(A)音系列 A, (B)音系列 B.

4. 2. 2. 2. 脳波計測

脳波の記録には、64ch の Ag-Cl 電極(国際 10-20 法)を用いた。脳波記録中に実施した行動テストでは、反応の記録のために、レスポンスパッド (NeuroScan, Inc)をもとに作成したキイを

用いた。行動テストにおける反応と脳波は、ともに Scan 4.3 acquisition system (SynAmps; NeuroScan, Inc)で記録した。

4.2.2.3. 音感テスト

西洋音楽の半音音階(平均律)に対応する C3 から H5 までの 3 オクターブ 36 個の音を wave 形式で作成した(Singer Song Writer, インターネット社製)。各音の長さは 200 ミリ秒であった。音刺激の呈示と反応の記録には、刺激呈示用に作成したオリジナルのソフトウェアを使用した。音刺激の呈示は、イヤークューブを通して両耳から行った。

4.2.3. 手続き

4.2.3.1. 訓練

参加者をシールドルーム内のリクライニングチェアに安静な状態で座らせ、膝の上に反応記録用の装置を置いた状態で、その装置のキィを右手人差し指で押せるように準備した。その後アイマスクとイヤークューブを装着させ、訓練を開始した。訓練では、2つの異なる音系列を交互に呈示した。参加者に対しては、一方の音系列が聞こえているときには系列の最初の音が鳴った時にボタンを押し、その系列が終わるまではボタンを押したままの状態を維持するよう求めた(同期なし条件)。また、もう一方の音系列が聞こえているときには、各音の開始に合わせてキィを押すよう求めた(同期あり条件)。訓練は約 8 分間のセッション 2 つに分けて行った。1 つのセッションにつき、20 回ずつ、交互に 2 つの音系列を呈示した。音系列 A と B を各々どちらの条件に割り振るかや、2 つの内どちらの音系列を先に呈示するかは、参加者毎に異なった。キィを押下する時に生じる装置自体の音と参加者の体性感覚以外、特に感覚フィードバックは与えなかった。また、参加者は両耳に装着したイヤークューブを介して音刺激を聴取していたため、キィから発せられる音はほとんど聞こえていなかった。

4.2.3.2. 脳波測定

訓練時に呈示した 2 つの音系列を再び呈示し、この時の脳波を測定した。手続き上、訓練の

ときと異なるのは、以下の4点であった。(1) 音系列に含まれる音を10%の割合で逸脱音に入れ替えた。逸脱させるときは、調性の中で音の高さを上か下に1音ずらしたので、例えばE4の音をD4またはF4の音に入れ替えて呈示した。どの音をどの方向に逸脱させるかは、刺激呈示用プログラムによってランダムに決定した。(2) 音系列に含まれる音の長さが750—950ミリ秒の間でランダムに揺らぐよう操作した。この手続きは、音刺激に対して α 波が同調するのを防ぐために導入したものであった。(3) 1セッションにつき各音系列を20回ずつ呈示し、実験全体では、セッション間に休憩を挟みながら3セッションを実施した。(4) 参加者は音系列の中に間違った高さの音があったかどうかを判断し、音系列が1つ終わる毎に、逸脱音の有無を回答した。回答には2つのキィを用い、参加者の半数には“逸脱音が無ければ右、有れば左のキィを押すように”、残り半数には“逸脱音が無ければ左、有れば右のキィを押すように”と教示した。

脳波記録の際、帯域通過フィルタは0.15—30Hz、サンプリング周波数は500Hzに設定した。左耳の後ろに装着させた電極を参照電極とし、後のオフラインの解析では、左右の耳朶に取り付けた電極を参照した。脳波計測時には、すべての電極のインピーダンスを同時に計測しており、それぞれの値が5k Ω 以下になるよう維持した。左眼の上下と両側のこめかみに装着した電極からEOGを計測し、後の解析で眼球運動によるアーチファクトを除外するために用いた。

4.2.3.3. 音感テスト

脳波記録終了後の音感テストでは、参加者に36種類の高さの音を呈示し、それらがどの高さに相当する音なのかを、モニタ上のピアノ鍵盤をクリックする事で回答させた。1つの音を呈示し、それに対する回答が得られると、1000ミリ秒の間隔を空けて次の音を呈示した。1つのセッション内では、36個の音をそれぞれ1回ずつ、ランダムな順番で呈示した。全体では3セッションを実施した。

4.2.3.4. 質問紙

質問紙で参加者個人のこれまでに経験した事のある楽器(または歌)の訓練開始年齢と累計継続年数を尋ねた。複数の楽器を経験した事がある場合には、楽器別に音楽経験を尋ねた。

4.2.4. 解析

4.2.4.1. 音感テスト

音高を同定する能力の高さを評価するため、音感テストの 3 セッションにわたる正答率 (%) を算出した。このとき、C4 を C#4 や H3 と回答する等の半音の間違いや、C4 を C3 や C5 といった 1 オクターブ異なる音として回答する等のオクターブの間違いを、エラーとしてカウントしない場合の正答率を算出した。これは、実験の性質上、狭い周波数範囲内での差やオクターブの差が判別できるかどうかよりは、比較的粗い精度での音感を基準としたほうが、脳波測定時の逸脱音を検出するのに必要な能力を測るのに適切と判断したためである。この、半音やオクターブの間違いをカウントしない正答率は、後の解析で個人の音楽的能力と脳活動との相関関係を検証するのに用いた。また、音感テストのスコアと、質問紙で調査した個人の音楽経験との関係性について検討するため、相関解析を実施した。

4.2.4.2. 同期タッピング

学習セッション中に参加者が行ったタッピングが音系列に同期していたかどうかを評価するため、タッピングと音の呈示のタイミングの差(同期誤差; synchronization error; SE)を算出した。SE は、刺激と行動の間の時間的な関係性を反映している。SE の値が正である事は、タッピングのタイミングが刺激の開始よりも時間的に遅れていた事を表している(Miyake, Onishi, & Pöppel, 2004)。各音系列の第 1 番目の音に対応するタッピングでは SE の値が他に比べて大きくなりすぎるため、第 2—16 番目の音に対応するタッピングの SE を解析の対象とし、条件毎に平均値を算出した。また、各参加者における SE の標準偏差を求め、タッピングのばらつきの指標とした。個人の音楽経験がタッピングのパフォーマンスに与える影響を評価するため、音楽経験と SE の標準偏差との相関を求めた。更にタッピングと音の同期の高さが後のエラー検出活動に与える影響について検討するため、SE の標準偏差と MMN や P300 といった ERP 成分の振幅との相関関係を調べた。

4.2.4.3. 脳波データ

脳波のデータは EDIT 4.3 (NeuroScan, Inc)を用いて解析した。音の呈示開始を起点とする -100 ミリ秒から 0 ミリ秒までをベースラインとし、-100 ミリ秒から 600 ミリ秒までを加算平均して ERP 波形を得た。眼球運動等によって生じたアーチファクトを除外するため、振幅が 100 μ V を超えるデータをオフラインで消去した。データの均質性を保つため、正答の得られた試行のデータのみを使用した。また、逸脱音が呈示された後の音 2 つ分に対するデータは解析から除外した。更に、訓練時には呈示されなかった高さの音(H4 あるいは A4)が出現する可能性のあった音(C4 と G4)に対する反応は解析から除外した。残りのデータを条件(同期有り, 無し)や音の種類(標準音, 逸脱音)で実験参加者ごと別々に平均し, 更に参加者間の加算平均を算出した。アーチファクト除外の結果, 加算平均に用いられたエポックの割合はそれぞれ, 同期有り条件の標準音で 42.47%, 同期有り条件の逸脱音で 42.71%, 同期無し条件の標準音で 35.63%, 同期無し条件の逸脱音で 38.25%であった。ERP 成分の分布を説明するため, 頭部の電極を 7 つの領域に分けた ROI を設定した(Abla et al., 2008; Abla & Okanoya, 2009)。7 つの領域には, それぞれ 3 つの電極を含めた: 前部中央(middle anterior; Fp1, Fz, Fp2); 中心部 (middle central; FCz, Cz, CPz); 後部中央(middle posterior; P3, Pz, P4); 左側前部(left anterior; F3, FC3, F7); 右側前部(right anterior; F4, FC4, F8); 左側後部(left posterior; CP3, TP7, P7); 右側後部(right posterior; CP4, TP8, P8)。

MMN と P300 成分の評価を行うため, MMN は刺激呈示開始から 170—210 ミリ秒, P300 は 300—450 ミリ秒の平均振幅について, ANOVA による解析を行った(α level = 0.05)。ここでの MMN の時間窓は, 標準音と逸脱音に対する反応の差が最も大きくなったときの潜時の前後 20 ミリ秒間を含む時間帯と定義した(Otten et al., 2000)。P300 については, 参加者間でピークの観察された潜時にばらつきが大きく, 適切なピーク潜時が特定出来なかったため, 被験者間平均後の ERP 波形から目視で時間窓を決定した。これらの平均振幅のデータを, 条件(同期あり/なし)と刺激のタイプ(標準刺激/逸脱刺激), 電極位置(7 つの ROI)を被験者内要因とする, 繰り

返しのある ANOVA を用いて検定した。下位検定では、 p 値の補正にボンフェローニ法 (Bonferroni correction) を用いた。

更なる解析のため、MMN は 170—210 ミリ秒、P300 については 300—450 ミリ秒の時間帯の振幅を FCz, Cz, CPz 電極間で平均する事により、各条件、各刺激種類における平均振幅を算出した。この中心部(middle central)での MMN と P300 の振幅を用いて、同期タッピングがエラー検出や評価のプロセスに与える影響を次の式で数値化した：(同期あり条件の逸脱音 - 同期あり条件の標準音) - (同期なし条件の逸脱音 - 同期なし条件の標準音)。学習セッションでタッピングのパフォーマンスによる効果を検証するため、SE の標準誤差と MMN, P300 振幅との関係性を相関解析で評価した。また、それらの振幅と音感テストの正答率との関係性についても検定した。

4.3. 結果

4.3.1. 音感テスト

音感テストのスコアは平均 71.57%であった(範囲：35.19—100% ; SD : 26.05 ; 表 4.1)。音感テストのスコアと、個人の音楽経験、特に、いつ音楽訓練を開始したのかや、その訓練をどのくらいの期間続けたのかといった項目との間の関係性を確かめるため、相関解析を実施した。結果から、より早く音楽訓練を開始していた参加者では、音感テストのスコアがより高くなっていた事が示された($r = 0.48, p < 0.05$)。また、より長い期間音楽訓練を続けていた参加者は、同様に音感テストでより高いスコアを記録した($r = 0.47, p < 0.05$)。しかしながら、楽器の種類を制限してピアノの訓練だけを考慮した場合、楽器の訓練経験年数と音感テストスコアの間には有意な関係性は検出されなかった($r = 0.41, p = 0.07$)。

4.3.2. タッピング

同期タッピングの正確さを評価するため、各音要素とそれに対応するタッピングとの間のタイ

ミングの差(SE)を算出した(表 4. 1). 平均 SE は-71.57 ミリ秒($SD = 36.76$)であった. SE の値が負であった事から, タッピングのタイミングが音刺激の開始より先行する傾向があった事が分かった. SE のばらつきは平均 47.28($SD = 17.09$)で, 音楽経験との有意な相関関係は検出されなかった(音楽訓練の開始年齢: $r = -0.39, p = 0.08$; ピアノ訓練の継続年数: $r = 0.37, p = 0.11$; 音楽訓練の継続年数: $r = 0.43, p = 0.06$).

4. 3. 3. 行動テスト

脳波記録中に実施した行動テストでは, 同期あり, 同期なし条件でともに正答率は 90%以上であった(表 4. 2). 同期あり, 同期なし条件間で正答率の高さに有意差はなかった(対応のある t 検定: $t(19) = 0.75, p = 0.46$). また両方の条件で, 参加者が誤って“間違いあり”と回答した割合と, 誤って“間違いなし”と回答した割合の間に有意差はなかった(対応のある t 検定. 同期あり条件: $t(19) = 1.34, p = 0.20$; 同期なし条件: $t(19) = 0.94, p = 0.36$).

表 4. 2. 脳波記録中の行動実験における反応率(%). 正答率:逸脱のある系列に“逸脱あり”, または逸脱のない系列に“逸脱なし”と正しく反応出来た割合; 誤答率—逸脱なし: 逸脱のない系列に誤って“逸脱あり”と回答した割合; 誤答率—逸脱あり: 逸脱のある系列に誤って“逸脱なし”と回答した割合; 反応なし: 音系列聴取後に反応を返さなかった割合.

	同期あり条件				同期なし条件			
	正答率	誤答率		反応なし	正答率	誤答率		反応なし
		逸脱なし	逸脱あり			逸脱なし	逸脱あり	
平均	93.25	1.67	4.42	0.33	94.00	2.25	3.58	0.25
SD	8.56	2.29	8.36	0.87	7.50	2.77	6.50	0.83

4. 3. 4. ERP

4. 3. 4. 1. MMN

MMN 成分は、同期あり条件でも同期なし条件でも現れ、FCz 電極を中心に広い領域に分布していた(図 4. 2.; 図 4. 3.). また、MMN の振幅は、条件間で大きな差が無い事が観察された。条件、刺激の種類、ROI を被験者内要因とする繰り返しのある ANOVA で、刺激呈示開始から 170—210 ミリ秒の平均振幅について検定を行った。この結果、刺激の種類の主効果が有意であった($F(1, 19) = 29.99, p < 0.001, power > 0.99$). また、ROI と刺激の種類の交互作用($F(6, 144) = 7.27, p < 0.001, power > 0.99$)が有意であった事から、下位検定において各電極位置における刺激の種類の影響を調べた。この検定から、すべての電極位置で、標準音と逸脱音の間で振幅に有意差があった事が明らかになった(前部中央: $F(1, 19) = 34.76, p < 0.001, power > 0.99$; 中心部: $F(1, 19) = 25.22, p < 0.001, power > 0.99$; 後部中央: $F(1, 19) = 19.27, p < 0.001, power = 0.99$; 左側前部: $F(1, 19) = 30.94, p < 0.001, power = 0.99$; 右側前部: $F(1, 19) = 26.40, p < 0.001, power > 0.99$; 左側後部: $F(1, 19) = 20.44, p < 0.001, power = 0.99$; 右側後部: $F(1, 19) = 18.28, p < 0.001, power = 0.98$). これらの結果から、条件に関わらず、学習した音系列中に出現した逸脱音が MMN 反応を誘発した事が明らかになった。この解釈は、条件の要因を含む交互作用がいずれも有意にならなかった事からも支持される(条件×刺激の種類: $F(1, 19) = 0.11, p = 0.74, power = 0.06$; 条件×刺激の種類×ROI: $F(6, 114) = 0.21, p = 0.97, power = 0.10$).

中心部(middle central)における MMN の振幅と音感テストのスコアや、タッピング課題でのパフォーマンスの関係性を調べるために相関解析を行った。音感テストのスコアと、タッピングの SE のばらつきは、いずれも MMN 振幅との間で有意な関係性を示さなかった(音感テスト: $r = 0.09, p = 0.71$; タッピングのばらつき: $r = -0.42, p = 0.07$; 図 4. 4. A, B).

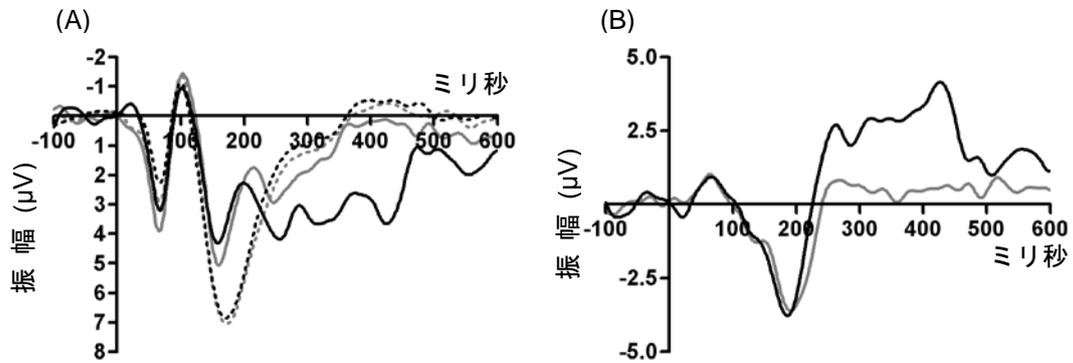


図 4. 2. (A) FCz 電極における参加者間平均 ERP 波形. 黒色破線が同期あり条件の標準音, 黒色実線が同期あり条件の逸脱音, 灰色破線が同期なし条件の標準音, 灰色実線が同期なし条件の逸脱音に対する ERP 反応を表している. 同期あり条件でも同期なし条件でも逸脱音開始から約 190 ミリ秒時点で陰性電位が誘発された. (B) FCz における, 逸脱音と標準音に対する ERP の差分波形. 黒色が同期あり条件, 灰色が同期なし条件を表している.

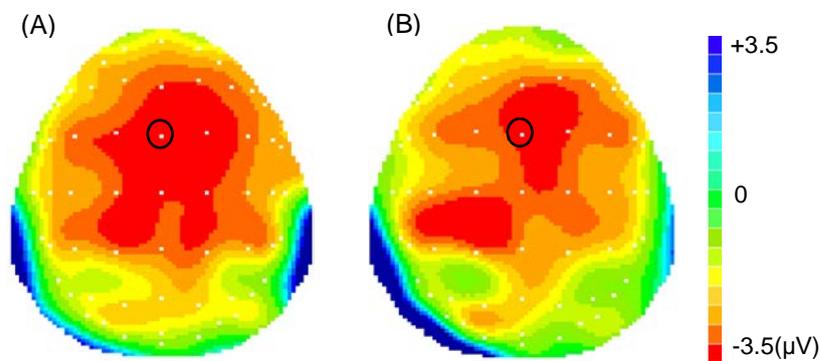


図 4. 3. 刺激呈示から 186 ミリ秒後の, 逸脱音と標準音に対する ERP 振幅の差分に関する, 頭皮上分布. 白色の点は各電極位置, 黒色の丸に囲まれた白色の点は FCz 電極を示す. (A) 同期あり条件, (B) 同期なし条件.

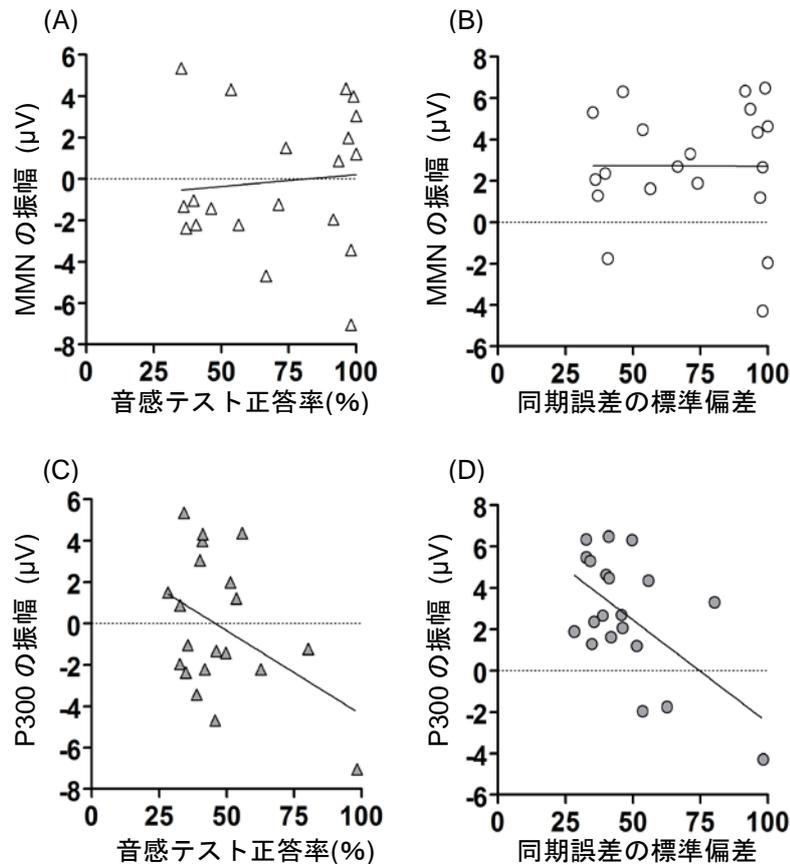


図 4. 4. (A) 音感テストのスコアと MMN 振幅の関係性, (B) 同期誤差のばらつきと MMN 振幅の関係性, (C) 音感テストのスコアと P300 振幅の関係性, (D) 同期誤差のばらつきと P300 振幅の関係性. MMN や P300 の振幅はいずれも, 同期あり条件における逸脱音と標準音に対する反応の差から, 同期なし条件における逸脱音と標準音に対する反応の差を引いた値として算出した. 実線は回帰直線を表す.

4. 3. 4. 2. P300

同期あり条件では音の逸脱によって P300 の振幅が大きくなったが, 同期なし条件ではそのような傾向は観察されなかった(図 4. 5. ; 図 4. 6.). 条件と刺激の種類, ROI を被験者内要因とする, 繰り返しのある ANOVA による検定から, 300—450 ミリ秒の平均振幅が刺激の種類によって有意に変化していた事が分かった($F(1,19) = 13.32, p < 0.01, power = 0.80$). この事は, 逸脱刺激が P300 効果を誘発したという観察と一致している. また, 条件と刺激の種類の交互作用が

有意であった事から($F(6, 144) = 6.98, p < 0.001, power > 0.99$), 各 ROI において追加の ANOVA 解析を実施した. この結果, 標準音に比べて逸脱音でより大きな陽性成分が検出された場所が, 中央—頭頂領域である事が示された(前部中央: $F(1, 19) = 0.24, p = 0.63, power = 0.08$; 中心部 $F(1, 19) = 24.18, p < 0.001, power > 0.99$; 後部中央: $F(1, 19) = 25.57, p < 0.001, power > 0.99$; 左側前部: $F(1, 19) = 5.09, p < 0.05, power = 0.57$; 右側前部: $F(1, 19) = 1.47, p = 0.24, power = 0.21$; 左側後部: $F(1, 19) = 17.60, p < 0.001, power = 0.98$; 右側後部: $F(1, 19) = 20.10, p < 0.001, power = 0.99$). 条件と刺激の種類 of 交互作用も有意であった事から, 各条件における刺激の種類の効果について下位検定を行った. この検定から, 同期あり条件では逸脱音によって P300 の振幅が大きくなった一方で($F(1,19) = 26.49, p < 0.001, power = 0.99$), 同期なし条件では標準音と逸脱音が誘発した陽性成分の振幅に有意差がなかった事が確かめられた($F(1,19) = 0.02, p = 0.89, power = 0.05$). 条件と刺激の種類, ROI の 3 項間の交互作用は有意ではなかった ($F(6,114) = 1.59, p = 0.16, power = 0.59$).

中心部(middle central; FCz, Cz, CPz)における P300 の振幅と, 音感テストやタッピング課題でのパフォーマンスとの関連性を明らかにするため, 相関解析を行った. SE のばらつきが大きさが P300 の振幅と負の相関を示し($r = -0.58, p < 0.01$), タッピングがより正確に音に同期していた場合, 学習セッションで同期タッピングを行う事が, 脳波計測時に発生する逸脱音の評価プロセスに与える促進効果をより強めた事が示唆された(図 4. 4. D). 一方, 音感テストのスコアは, P300 の振幅と有意な関係性を示さなかった($r = -0.01, p = 0.98$; 図 4. 4. C).

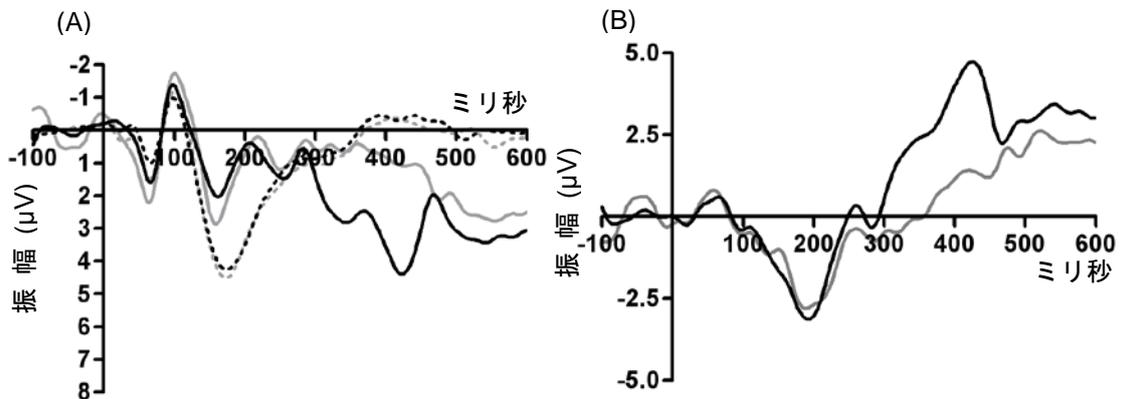


図 4. 5. (A) CPz 電極における参加者間平均 ERP 波形. 黒色破線が同期あり条件の標準音, 黒色実線が同期あり条件の逸脱音, 灰色破線が同期なし条件の標準音, 灰色実線が同期なし条件の逸脱音に対する ERP 反応を表している. 同期なし条件に比べ, 同期あり条件では逸脱音呈示開始後 300—450 ミリ秒後の陰性電位の振幅が大きかった. (B) CPz 電極における逸脱音と標準音に対する ERP の差分波形. 黒色が同期あり条件, 灰色が同期なし条件を表している.

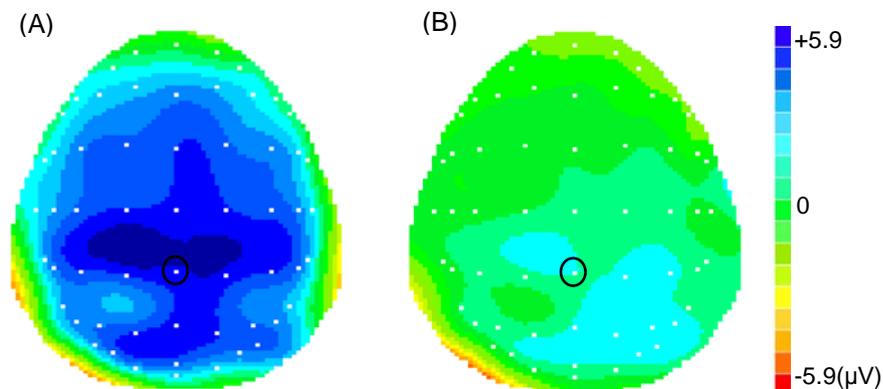


図 4. 6. 刺激呈示から 426 ミリ秒後の, 逸脱音と標準音に対する ERP 振幅の差分に関する, 頭皮上分布. 白色の点は各電極位置, 黒色の丸に囲まれた白色の点は CPz 電極を示す. (A) 同期あり条件, (B) 同期なし条件.

4. 4. 考察

音系列に同期したタッピングがその音入力を記憶するのにどのように影響するかを検証するため, 音楽訓練の経験者を対象として脳波を指標とした実験を実施した. 参加者は 2 つの音系

列を交互に聴取し、それらを同期タッピングありか、同期タッピングなしかのいずれかの条件で学習した。これらの学習セッションの後で、2つの音系列を再び聴取させているときの脳波を計測した。このとき、音系列中の音高を低頻度で逸脱させたので、それらの逸脱音に対して、エラー検出や評価のプロセスが働いた事を反映して MMN や P300 効果が誘発された。MMN は同期あり条件でも同期なし条件でも誘発されたが(図 4. 2. ; 図 4. 3.), P300 は同期あり条件でのみ現れた(図 4. 5. ; 4. 6.). これらの結果は、学習済みの音系列を聴取しているときの早期のエラー検出プロセスは同期タッピングの有無に影響されないが、一方で、同期タッピングが逸脱音に対する意識的な評価プロセスを促していた事を示唆する。また、P300 の振幅はタッピング課題における SE のばらつきと負の相関を示した(図 4. 4. D). この事から、同期タッピングの効果は長期の音楽訓練によって培われた聴覚—運動ネットワークによって支えられている事が示唆される。

4. 4. 1. タッピング課題の遂行状況について

同期タッピングがエラー検出処理に与えた影響について検証する前に、タッピング課題が正しく遂行されていたかどうかについて確かめた。タッピングのタイミングは、音の開始よりも平均 71.57 ミリ秒早かった。このようにタッピングが音刺激の開始に先行する現象は、”negative asynchrony”として知られており(Dunlap, 1910), 同期タッピングの遂行時にはしばしば観察されている。参加者毎にこの SE のばらつきを算出して個人のタッピングのパフォーマンスの指標とした。その値は参加者間で大きくばらついていた(範囲 : 28.32 – 98.41 ; 表 4. 1.). しかしながら、どの被験者でも 98.55(平均+3SD)の値を超えなかったため、外れ値無しとみなし、全ての参加者のデータを後の相関解析に使用した。

4. 4. 2. 単一の指による同期タッピングは、自動的なエラー検出処理に影響しない

予測通り、同期あり条件でも同期なし条件でも、系列内の逸脱によって、音刺激の呈示開始から 190 ミリ秒後付近の ERP 波形に陰性方向への歪みが生じた事から、どちらの条件でも MMN

反応が得られたと考えられる。しかしながらこの MMN 効果は、条件間で有意差が見られなかった(図 4. 2. ; 4. 3.). これらの結果は、同期タッピングは音系列の学習や、EEG 計測中の自動的なエラー検出に影響しなかったという可能性を支持している。本研究実験 1 では、ピアノ演奏を用いた感覚—運動学習によって、演奏された音系列に関する聴覚的な記憶の形成やエラー検出が促され、それを反映して MMN の振幅が増加した。また、Lahav et al. (2007)や Chen, Rae, & Watkins (2012)は特定の旋律をピアノで演奏する訓練を通して、その旋律を聴取するだけで聴覚—運動ネットワークの活動が高まるようになる事を示した。これらの研究結果と本研究実験 2 との乖離は、実際のピアノ演奏が音系列の自動的な処理を促すのに対して、単一の指による同期タッピングがそのような早期の処理に影響しない事を示唆している。また、この事から、ピアノ演奏訓練の効果について検証した過去の研究においては、指の動きの系列的なパターンが、音系列内の自動的なエラー検出を向上させる重要な役割を果たしていた事が示唆される。

4. 4. 3. 単一の指による同期タッピングと、P300 の振幅増加との関連性

同期あり条件では逸脱音に対する P300 の振幅が大きくなる効果があった一方で、同期なし条件ではこのような効果は観察されなかった(図 4. 5. ; 図 4. 6.). 同期あり条件で観察された P300 の潜時や分布は、P3b としては典型的なものであった(Duncan et al., 2009). P300 は学習時の符号化の過程や(Polich, 2012 参照)、課題遂行中の注意や文脈の更新、覚醒状態の揺らぎなど(Polich & Kok, 1995)を反映しており、困難な課題では振幅が小さくなる(Polich, 1987). 故に実験 2 の結果は、音系列の学習と並行して行われた同期タッピングが、音に注意を向けるのを促し、後にその音系列を聴取したときに、希に検出されるエラーに対する評価のプロセスが生じるのを容易にしたと考えられる。これらの解釈は、音系列学習中の同期タッピングの遂行は、早期のエラー検出過程には影響しなかったが、後の評価プロセスを促進する効果を持っていた事を意味している。

だが、もしこの意識的な処理が同期あり条件でだけ拡張されていたのだとしたら、この条件間

の差異は、脳波計測中の行動テストにおけるパフォーマンスにも反映されるはずであった。実際には、条件間で同等の行動成績が得られた(表 4. 2.)。この事の説明となりうる事項として、逸脱音のうちのいくつかは、参加者にとって特に分かりやすい性質をもっていた可能性が挙げられる。行動テストでは、参加者に対して、それぞれの音系列の中に少なくとも 1 つの間違ひがあったかどうか判断するよう求めたので、もし系列中に 1 つでも際だった逸脱音があれば参加者は容易に“間違ひ有り”と回答する事ができた。系列の構成音である C や G の音が逸脱したときに、H や A といった、学習のセッションのときには現れなかった音高になる場合があったので、これらが新規の音要素として働き、参加者にとって際だった逸脱音として認知されたと想定される。従って、同期あり条件の P300 は学習セッション内で使用された音要素のみを考慮した、純粋な系列的順序からの逸脱に対するエラー検出を反映していた一方で、行動テストの結果は新規の音要素を検出した過程を含む全てのエラー検出プロセスを反映していた、と言えるだろう。今後の課題として、系列的順序からの逸脱に対する反応を的確に捉える行動指標を導入する事が必要であろう。

4. 4. 4. 同期タッピングによる聴覚的認知への影響と音楽的能力との関係性

個人の音感の能力の高さが、同期タッピングが音系列の学習に及ぼす効果の大きさに影響しているという仮説を立てたが、実際には MMN や P300 の振幅は音感テストのスコアとは有意な関係性を示さなかった(図 4. 4. A, C)。可能性の 1 つとしては、実験 1 で使用した音系列内の逸脱を認知するのが非常に容易であり、タッピングの効果が小さすぎて検出されなかった、という事が考えられる。つまり、ここで使用した音刺激自体の問題で、聴覚的な記憶の形成過程に運動の感覚入力による影響が介入する余地が無かったという可能性がある。しかし、本研究実験 1 において使用した音系列刺激は、実験 2 と同様の規則に基づいて作成されたものだったが、ピアノでその系列を演奏する事により、音感の高い群のみで聴覚記憶痕跡が拡張されるという結果に至った。従って、実験 2 で使用した聴覚刺激そのものは、個人の音楽経験や能力による影響

の検証に用いる上で、十分な素質を持っていたと言えるだろう。

またもう 1 つの可能性として、音にラベル付けをする能力とは関係性の低い方法で、単一の指による同期タッピングが音系列の記憶形成を促進したと推測される。ERP 振幅とタッピングの正確さの関係性に関する解析から、音系列に対しより正確に同期したタッピングを行った参加者では、そのタッピングによって音の符号化が促進され、P300 成分の振幅を増加させた事が示された(図 4.4.D)。タッピングのように身体の動きを音に合わせる能力は、音感の能力とは異なり、ある程度は音楽的訓練から独立に獲得されるものである。5—24 ヶ月齢の幼児でさえ、未成熟ながらも、リズムカルな音入力に対して身体の動きを調整する能力を示す(Zentner & Eerola, 2010)。また成人では、音に身体の動きを合わせる行動は、音楽を聴いているときの自発的な足や指によるタッピングとして、しばしば観察される。タッピングの能力は、音楽的訓練からも影響を受けるが(Aoki, Furuya, & Kinoshita, 2005; Baer et al., 2013)、音感の能力獲得に比べれば、ある程度のレベルまでは特別な訓練なしに習得されるものである。このように同期タッピングが音系列の聴覚的な処理を促す効果の大きさは、個人の音感の高さではなく、寧ろ同期タッピングにおけるパフォーマンスの精度と深い関係性があった事が推察される。

今後の課題としては、個人の音楽経験による要因を更に詳しく検証していく事が挙げられる。実験 2 の結果からは、タッピング課題のパフォーマンスと音楽経験の間に有意な相関関係が見られなかった。しかし過去の研究では、非音楽家に比べて、音楽家はテンポの目安となるメトロノームの音刺激が無い状態でもより正確に同期タッピングを維持でき(Baer et al., 2013)、また同期タッピングのタイミングをより柔軟に調整できる事が報告されている(Repp & Doggett, 2007)。これらの発見は、長期的な音楽訓練が、外部からの音入力に対して同期する能力を向上させた事を明確に示している。更に、高度に熟練した音楽家群内でさえ、楽器の練習量は、指のタッピング能力を含む単純な演奏技術を測るテストのスコアと強い関係性を示した(Ericsson et al., 1993; Sloboda, 2000 参照)。彼らの発見は、タッピングのパフォーマンスが音楽訓練によって向上する事を示しているが、本研究では、そのような結果が再現されなかった。これに関して

は、実験 2 の参加者全員が 3 年以上のピアノの経験を有する音楽経験者であり参加者間の音楽経験のばらつきが十分に大きくなかった事、そして彼らの音楽訓練開始年齢を統制しなかった事等が、原因として挙げられる。本研究で観察された、音系列内の逸脱音に対する反応を増大させる効果に関わるような同期タッピングの能力の高さが、どのような音楽経験によって発達してきたのかを検討する事により、同期タッピングがもつ役割について更に検証していく事が望まれる。

4.4.5. まとめ

実験 2 では、同期タッピングが聴覚的な記憶の形成に与える効果について検証した。参加者に対し 2 つの音系列を学習させ、うち 1 つの系列の聴取時のみで、音に同期したタッピングを実施させた。続けて、それらの音系列中の音高が低頻度で逸脱するよう操作した上で、再び音系列を繰り返し呈示し、このときの脳波を計測した。参加者には逸脱した音を見つけさせる課題を課した。結果から、学習セッション時の同期タッピングの有無に関わらず MMN 反応が生じたため、無意識的エラー検出の過程はタッピングによる影響を受けない事が示唆された。一方で、検出されたエラーに対する評価のプロセスが同期タッピングによって促進される事が、P300 の振幅の増加から示唆された。また、P300 効果は学習セッションでのタッピング課題におけるパフォーマンスの正確さと相関関係があった事から、同期タッピングが音系列の記憶形成に与える効果は、タッピングのパフォーマンスの精度に関わる聴覚—運動ネットワークに支えられている事が示唆された。これらの発見は、外界からの音入力に身体の動きを合わせる能力がもつ機能について、新たな知見を示すものである。

5. 実験 3

5.1. 序論

実験 1, 2 の結果から、音系列に対する聴覚的な処理に関して、脳内の聴覚—運動ネットワー

クが影響している事が示された。これらの検討を通して、音に沿って身体の動きを調整する動作の中でも、同期タッピングのように単に音にタイミングを同期させる行為では、音系列に対する聴覚的な記憶の形成を促すような効果は得られない、という事が示唆された(実験 2)。一方で、系列的な打鍵動作によって音系列を作り出す行為は、その音系列の聴覚的な記憶の形成を促進させるという事が示唆された(実験 1)。これらの事から、音系列に沿った動作が聴覚的な記憶の形成に影響を示すときには、聴覚情報に対して動作が系列的な対応関係にある事が重要であると考えられる。実験 3 では、こうした聴覚以外の入力と聴覚入力との間に系列的な対応関係が成立する、という要素が、どのようなレベルで聴覚的な記憶形成に貢献しているのかについて検討する事を目的とした。もし運動の感覚ではなく視覚的な入力が聴覚的な系列刺激と対応関係を持つ事によっても聴覚的な記憶の形成を促進させる効果が得られるのであれば、聴覚と聴覚以外からの入力の間に成立する対応関係は、個々のモダリティの処理を跨いだ概念的なレベルで、聴覚的な記憶の形成に貢献していると考えられる事が出来るだろう。実験 3 ではこの問題に取り組むため、視覚的な手がかりが聴覚の記憶形成に与える影響について検討した。

聴覚—運動ネットワークの比較対象として聴覚と視覚のつながりを選択した理由は、視覚刺激を用いれば系列的なパターンを形成する事ができ、かつ知覚する側がそれらを直感的に音の系列と結びつける事ができると想定されるためである。過去多くの研究で、音の高さには視覚的な特性との間に知覚レベルの対応関係が存在する事が報告されてきた(スマーク効果 ; Evans & Treisman, 2010; Lidji et al., 2007; Mudd, 1963)。Evans & Treisman (2010)は、音の高さと 4 つの視覚的次元(位置、サイズ、空間周波数、コントラスト)との間にクロスモーダルな対応関係があるかどうかを検証する実験を行った。彼らは高い位置、小さいサイズ、高い空間周波数、高いコントラストが、高い音と組み合わせられるときは”一致”，低い音と組み合わせられるときは”不一致”の関係にあると想定した。対応関係が想定される視覚次元や音の高さに対する判断を要求する課題(直接課題(direct task))でも、それ以外の視覚、聴覚特性に関する判断を要求する課題(間接課題(indirect task))でも、コントラスト以外の視覚次元は、音の高さと一致の関係にあ

るとき、不一致の時よりも課題での反応を速める事が明らかになった。間接課題では、故意に聴覚情報と視覚情報が集約される事はないと想定されていたので、彼らは、聴覚と各視覚特性の間の対応関係は知覚レベルで生じる、本質的な関係性だと主張した。また、Mudd (1963)によれば、“高い周波数の音は右または上”，“低い周波数の音は左または下”のように、音の周波数は水平方向と垂直方向の両方の空間的ステレオタイプを持っているが、その対応関係は水平より垂直方向のほうがより密接である。この事は、2つの異なる高さの音を聞き、プラグを中央の穴(1つめの音に対応)から別の穴(2つめの音に対応)へと移動させる課題におけるパフォーマンスを通して明らかになった。水平より垂直方向のほうが聴覚—視覚の対応付けが直感的に成立し易いという事は、Lidji et al. (2007)の研究からも支持される。彼らの実験では、音の高さと反応位置の左右という水平方向の結びつきは、非音楽家では自動的には生じはなかった。音の高さを判断する課題を遂行しているときであれば、低い音に対する反応は左のキィ、高い音に対する反応は右のキィのほうが早くなった事から、水平方向の対応付けが成立していたと言える。一方、音の高さを無視して音色(楽器の種類)を判別する課題を遂行したときには、非音楽家では、そうした水平方向の結びつきが見られなかった。これらの事から、本研究においては、音系列内の周波数の推移に対応させて、視覚的な刺激の位置を垂直方向に変化させるという操作が有効であると考えられる。

しかしながら、一方で、音の高さと視覚的な位置の垂直方向の対応付けの精度が、音楽経験に影響されるという研究報告もある(Rusconi et al., 2006)。この事から、本研究では視覚的系列が聴覚の記憶形成に与える影響を検証するため、その基盤となる音の高さと空間的位置との対応関係が、各個人においてどの程度の精度で成り立ち得るのかを考慮する必要があると考えた。このような個人差をより確実に考慮するためには、音楽家のみを対象とした実験を行うよりも、さまざまな音楽経験の背景を持つ参加者を実験の対象者に含め、基礎的な音楽能力を測るテストを実施するのが適切であろう。本研究では、Montreal Battery for the Evaluation of Amusia (MBEA; Peretz, Champod, & Hyde, 2003) 内の課題を実施して、参加者の音楽的能力の指標とした。

Peretz et al. (2003) が提唱したこの MBEA というテストバッテリーには、旋律の中の調性、輪郭、音程、リズム、拍を聞き分ける能力や、旋律の記憶を保持しておく能力を測定するための 6 つのサブセットが含まれる。各サブセットには 30 問のテスト項目と 1 問の“参加者が音に注意を向けているかを確かめるための項目”が含まれ、それぞれの課題のテスト項目における正答数 22, 22, 21, 23, 20, 22 個を境界として、それより下のスコアを取った場合には失音楽症とみなされる。ただし、実験においては必要に応じて、6 つの内のいくつかの課題のみを実施する場合がある。Williamson & Stewart (2010)の研究では、失音楽症群に割り振るための基準を、MBEA 内の調性、輪郭、音程の課題の合計スコアが 65 以下の人、と定めた。調性、輪郭、音程のサブセットはいずれも、音高の聞き分けに関する課題である。本研究で実験 3 では参加者の負担軽減のために、これを更に 1 つに絞って音程サブセットのみを実施し、音程の逸脱に対する敏感さを評価した。調性に関するテストを除外したのは、実験に使用した音系列が全て調性内で推移し、調性からの逸脱が生じ無いような設定になっていたため、調性からの逸脱に対する敏感さは課題の遂行に影響しないと想定されたからである。また、輪郭の処理は、音程の処理よりも基礎的な能力であり (Trehub, Trainor, & Unyk, 1993; Bartlett & Dowling, 1980; Dowling, 1978; Cuddy & Cohen, 1976)、本研究においても聴覚的情報が曖昧になり易く視覚的入力の影響を受けやすいのが音程の処理のほうだと想定されるので、輪郭に関するテストも除外した。音程の項目で高いスコアを記録した参加者ほど、聴覚的な入力から抽出される情報の曖昧さが低くなり、空間的な高さや音のピッチの高さの対応付けの精度が高くなるのではないかと考えられる。

視聴覚統合について検討した過去の研究から、視覚刺激が聴覚刺激に先行する場合には、視覚と聴覚の間の相互作用は聴覚性の N2 に反映される事が明らかになっている (Lindström et al., 2012; Widmann et al., 2004)。N2 成分には MMN と、それに続く P2b 成分が含まれる。MMN は音刺激に対して注意を払っていないときでも逸脱の検出を反映して現れるが、聴覚刺激が課題で何らかの判断対象になっているときには、それに続けて、あるいは時間的に重複して、N2b 成分が現れる。Lindström et al. (2012) は、視覚刺激と音刺激の対応付けの複雑さや、それら

の呈示のタイミングの違いが、視覚刺激によって誘発される聴覚的期待に与える影響について検証した。視覚刺激と聴覚刺激の呈示のタイミングや対応付けの複雑さに関わらず、それらの刺激間の対応関係が成立しないときには N2 成分が誘発された。だが、視覚刺激と聴覚刺激が同時に呈示されたときには、視覚刺激によって聴覚的な期待が十分に形成されないために、聴覚刺激が視覚刺激に遅れて呈示されるときよりも N2 成分の振幅が小さくなり潜時が長くなる事を示した。また、Widmann et al. は、このように視覚刺激が聴覚的な期待を形成する働きが、視覚刺激系列と聴覚刺激系列との間にも生じる事を MMN 様の成分を指標として明らかにした。彼らは、音系列刺激系列を、F4(352Hz)か G#4(422.4Hz)か、いずれかの高さを持つ 4—6 個の音で構成し、音系列の直前に呈示する視覚刺激系列として、楽譜のように水平方向に位置の異なる視覚シンボルの系列を作成した。音と視覚刺激の系列には対応関係があり、先行する視覚刺激から期待されるのと異なった音が呈示されると、その音の呈示開始から約 100 ミリ秒後に陰性電位が誘発された。また、それに続いて N2b—P3a 複合成分のような波形が観察された。早期に誘発された陰性電位は、発生条件と分布を考慮すると、典型的なオドボール課題でも観察されるような MMN に近い性質を持つと考えられる。視覚刺激系列の呈示によって聴覚的記憶が形成された事により、次に呈示されるべき聴覚刺激系列への期待が高められ、実際の音系列における逸脱音へのエラー検出反応を増大させたのではないかと、彼らは主張している。

これらの発見は、視覚刺激の呈示によって聴覚的な期待が高まる事、その期待と実際の聴覚入力の不一致によって N2 成分が増大する事、更に、このような働きが単一の視覚—聴覚刺激間だけでなく視覚系列—聴覚系列刺激間でも観察されうる事を示している。以上の事から、本研究実験 3 においても、学習セッションで視覚系列と聴覚系列の間に対応関係が成立しているときには、それらが協調し合って聴覚的な記憶の形成を促し、次のテストセッションで来るべき音への期待を高める事によって、行動テストのパフォーマンスを向上させたり、MMN や N2b—P300 効果を増大させたりする事が予測される。また、実験 3 では、こうした効果に対して、空間的な高さと言音の高さとを対応付ける能力の高さや、音楽経験が与える影響についても検

討した。

5.2. 方法

5.2.1. 実験参加者

日本人大学生 22 名(うち女性 9 名)が参加した。平均年齢は 19.50 歳(範囲：18—21 歳；*SD*：0.74)であった。MBEA の catch 項目(参加者が注意を向けているか確かめる項目)が不正解であった男性 1 名と、行動テストの成績が外れ値となった男性 1 名のデータを解析から除外し、残りの 20 名分のデータでその後の解析を実施した。20 名の平均年齢は 19.45 歳(範囲：18—21 歳；*SD*：0.69)であった。20 名中 12 名に、何らかの楽器または歌の訓練経験があった(表 5.1.)。彼らは平均 7.42 歳(範囲：2—18 歳；*SD*：4.64)から音楽の訓練を開始し、その後平均 8.92 年間(範囲：0.5—16 年間；*SD*：5.12)訓練を継続していた。音楽経験者のうち 8 名にピアノの訓練経験があった。参加者全員の聴覚は正常であり、神経疾患の既往歴は無かった。また、全員が右利きであった。なお、実験の手続きについては事前に東京大学倫理審査委員会からの承諾を得ており(課題番号：230)、実験に先立って参加者に対して実験内容を説明し、同意書にて参加への同意を確認した。

表 5. 1. 参加者のピアノ訓練経験と、ピアノ以外の楽器を含む音楽経験, MBEA のスコア.

音楽経験		ピアノ経験		性別	MBEA
開始年齢	継続年数	開始年齢	継続年数		
2	14	-	0	女性	28
3	15	3	11	男性	25
5	16	5	7	男性	30
5	13	5	13	女性	27
5	7	5	7	女性	25
6	10	6	10	女性	24
6	4	6	2	男性	30
6	6.5	6	5	女性	21
8	12	8	12	女性	27
12	3	-	0	女性	25
13	6	-	0	男性	21
18	0.5	-	0	男性	24
-	0	-	0	男性	25
-	0	-	0	男性	23
-	0	-	0	男性	21
-	0	-	0	男性	20
-	0	-	0	男性	19
-	0	-	0	男性	18
-	0	-	0	女性	17
-	0	-	0	女性	14
平均	5.35		3.35		23.20
SD	5.94		4.79		4.30

5. 2. 2. 刺激と装置

5. 2. 2. 1. 聴覚刺激

西洋音楽の音階に基づき, B2 (123.5Hz), C3 (130.8 Hz), C#3(138.6 Hz), D3(146.8 Hz),

D#3 (155.6Hz), E3(1164.8 Hz), F3(174.6 Hz), F#3(185.0 Hz), G3(196.0 Hz), G#3(207.7 Hz), A3 (220.0 Hz), A#3 (233.1Hz), B3 (246.9Hz), C4 (261.1 Hz), C#4 (277.2 Hz), D4 (293.7 Hz), D#4 (311.1Hz), E4 (329.6 Hz), F4 (349.2Hz), F#4(370.0 Hz), G4 (392.0 Hz), G#4(415.3 Hz)の音高の音ファイルを作成した(SingerSongWriter ; インターネット社製 ; 表 5. 2.). それぞれの音の長さは 750 ミリ秒で, 音色はピアノであった. これらの音ファイルを用いて 8 つの音から成る音系列 144 個を作成し, 3 つの実験条件それぞれについて各 48 系列を使用した. 音系列内の配列や音系列の呈示順は参加者毎, 以下の手続きに則って疑似ランダムに生成した : (1)1 つの音系列を構成するのは, 特定の長調のスケールを構成する最初の 5 つの音とした(表 5. 2.). 各音の高さを 1 系列中に 1 回または 2 回使用して, それらを並べ替える事により 8 つの音から構成される系列を作成した. (2)一致条件の音刺激として, 1 つの調の音階を基に, 8 つの音系列を作成した. 全ての種類の長音階(12 個)についてこの操作を行ったので, 統制条件の音刺激としては計 96 個の音系列が用意された. 同様の手順で, 不一致条件と統制条件の音系列刺激を各 96 個用意した. (3)実験の前半と後半で, 呈示される各条件の数と, 各条件において呈示される各調性の回数, 更に各条件, 各調性内に生じる逸脱音の数を統制した. 前半と後半, それぞれの中では, 条件や調性の呈示順は完全にランダムに決定した.

学習試行後のテスト試行では更に, 1 つの音系列につき 0—2 個の音の高さを逸脱させる操作を行った. 逸脱音が挿入される箇所は, 以下の規則に従って実験参加者毎, 疑似ランダムに決定した : (1)各条件には同一の調性から成る音系列が 8 つずつ含まれている. そのうち 4 つを逸脱音が含まれない系列とした. 残り 4 つの音系列のうち 2 つについては, 系列を構成する 8 つの音のうち 1 つの音だけを逸脱させ, 残り 2 つの音系列では 8 つの音の内 2 つの音を逸脱させた. (2)音高を逸脱させるときは, 同一の調性を構成する音階の中で, 1 つ上または 1 つ下の音に置き換えた. (3)単一の音系列内で複数の逸脱音が呈示される場合, 1 つ目の逸脱音に続けて 2 つ以上の正しい音を呈示してから, 2 つ目の逸脱音が現れるように設定した. (4)各系列の最初の音は, 逸脱させなかった.

表 5. 2. 音刺激として使用した長調のスケールと、その構成音(括弧内の音は、テスト時の逸脱音としてのみ使用した。)

	1	2	3	4	5	6	7
C -major	(B2)	G3	D3	E3	F3	G3	(A3)
C#- major	(C3)	C#3	D#3	F3	F#3	G#3	(A#3)
D- major	(C#3)	D3	E3	F#3	G3	A3	(B3)
D#- major	(D3)	D#3	F3	G3	G#3	A#3	(C4)
E- major	(D#3)	E3	F#3	G#3	A3	B3	(C#4)
F- major	(E3)	F3	G3	A3	A#3	C4	(D4)
F#- major	(F3)	F#3	G#3	A#3	B3	C4#	(D#)
G- major	(F#3)	G3	A3	B3	C4	D4	(E4)
G#- major	(G3)	G#3	A#3	C4	C#4	D#4	(F4)
A- major	(G#3)	A3	B3	C4#	D4	E4	(F#4)
A#- major	(A3)	A#3	C4	D4	D#4	F4	(G4)
B- major	(A#3)	B3	C#4	D#4	E4	F#4	(G#4)

5. 2. 2. 2. 視覚刺激

条件 1—3 に共通して、黒色の背景に白色の丸を、1つ1つの音の開始と同時に呈示した。視覚刺激は 5 種類あり、それぞれ画面上での丸の位置が上下方向に異なっていた(図 5. 1.)。各視覚刺激の丸の中心は、画面中央を基準として、- 12.8 cm, - 6.4 cm, 0 cm, + 6.4 cm, + 12.8 cm の高さに位置していた。全ての丸の図形は、参加者から約 60cm 離れた位置に設置された 18.9 インチの画面上に視角 2.86° (垂直方向)×2.86° (水平方向)で呈示した。

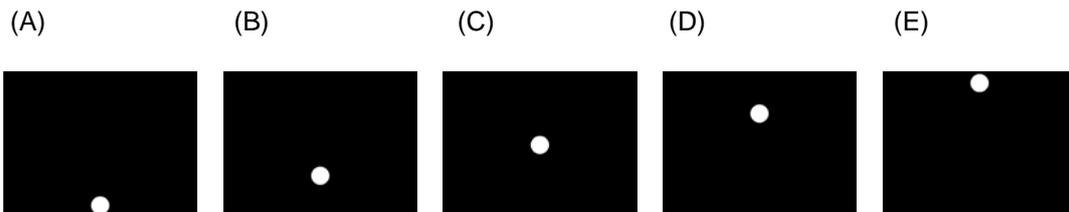


図 5. 1. (A) —(E) 5 種類の視覚刺激

5.2.3. 手続き

実験参加者はシールドルーム内のリクライニングチェアにリラックスした状態で座った。刺激呈示用ソフトウェアの Presentation(Neurobehavioral Systems 製)を用いて、視覚刺激は参加者の正面のモニタに呈示し、音刺激は参加者の両耳に装着させたイヤークューブを通して呈示した。1つのブロックは学習試行1回とテスト試行1回で構成された。

まず学習試行では画面中央に 2000 ミリ秒間 “learning” の文字を呈示した後、1000 ミリ秒間空けて、8つの音から成る音系列と、視覚刺激を同時に呈示した。音系列を構成する各音の呈示時間は 750 ミリ秒であり、1系列全体では 6000 ミリ秒であった。視覚刺激の呈示開始のタイミングは各音と同時で、各視覚刺激の呈示時間は 150 ミリ秒間であった。また、丸の呈示の仕方には 3つの条件を設けた。一致条件では視覚刺激の移動の仕方が音の高さの推移と対応するように設定し、例えば音の高さが音階上を 2つ上に上がるときには、丸の図形を呈示する高さも 2つ分上に移動させた。不一致条件では、丸の呈示位置は、音の高さの推移とは関係無くランダムに変化した。そして統制条件では、丸が画面中央に位置する視覚刺激(図 5.1.C)のみを用いた。実験参加者に対しては、丸の動きを目で追わず画面中央を見ているよう教示した。視線計測は行っておらず眼球運動を完全には統制していなかったが、一致条件でも不一致条件でも視覚刺激の位置の移動の仕方自体に違いは無かったので、眼球運動の要因が後の脳波計測でのデータに影響した可能性は低いと想定される。

学習試行1回が完了した後 1000 ミリ秒間空けて、2000 ミリ秒間 “test” という単語を呈示した後、1000 ミリ秒間空けて、学習試行の時に呈示したのと同じ音系列を呈示した。ただしこの時には、音系列中の 0—2 個の音の高さが逸脱するよう操作してあった。実験参加者には、学習の時と異なる音が聞こえたら、できるだけ素早くマウスを左クリックするよう教示した。テスト試行の音系列が修了すると、1000 ミリ秒後に次のブロックを開始した。

全 288 ブロックを実施するにあたり、その中で 3つの条件や、12 個の調性、単一の音系列内の 8 個の音をどのような順番で呈示するか、またテスト試行時に音系列内のどの音を逸脱音と

するかについては、実験参加者毎、疑似ランダムに決定した。288ブロックを12回のセッションに分割し、1セッション終わるごとに休憩を設けた。1セッションあたりの所要時間は約8分間であった。

これらの聴覚、視覚刺激が呈示されている間の脳波を計測した。脳波の記録には64chのAg—AgCl電極(国際10-20法)を用い、Scan 4.3 acquisition system (SynAmps; NeuroScan)によって記録を行った。帯域通過フィルタは0.15—30Hz、サンプリング周波数は500Hzに設定した。左耳の後ろに装着させた電極を参照電極とし、後のオフラインの解析では、左右の耳朶に取り付けた電極を参照した。脳波計測時には、すべての電極のインピーダンスを同時に計測しており、それぞれの値が5k Ω 以下になるよう維持した。左眼の上下と両側のこめかみに装着した電極からEOGを計測し、後の解析で眼球運動によるアーチファクトを除外するために用いた。

全ての学習、テスト試行を完了した後、MBEAの中の音程のサブセットを実施し、質問紙で参加者の音楽経験について尋ねた。

5.2.4. 解析

5.2.4.1. MBEA スコア

MBEAの音程のサブセットにおける正答数を参加者毎に記録した。音程サブセットの第28問目が不正解であった場合には、この後全ての解析からその参加者のデータを除外する事とした。第28問目は、他の問題に比べて非常に間違いが分かりやすく設定されており、参加者が注意深く課題に取り組んでいたかどうかを確かめるための問題として設けられていた。また、後に述べるように行動テストで外れ値を示した1名のデータを解析から除外したため、この後の解析は20名分のデータを用いて行う事とした。

MBEAの参加者間の平均を算出した後、MBEAのスコアが満点の30点を記録した参加者のデータを除いた上で、MBEAのスコアと音楽経験との関係性を調べるための相関解析を行った。また、MBEAのスコアが正しく測れていたかどうかを査定するため、参加者個人の音楽経験や、

音楽的能力の自己評価の高さとの相関関係についても検討した。自己評価は、1を“音楽的能力が非常に低い”，8を“音楽的能力が非常に高い”として，8段階で評価させた

5.2.4.2. 行動テスト

各参加者における一致条件のスコアを、 $(\text{一致条件でのヒット率})/(\text{統制条件でのヒット率}) - (\text{一致条件での誤警報率})/(\text{統制条件での誤警報率})$ として算出した。同様に，不一致条件のスコアは， $(\text{不一致条件でのヒット率})/(\text{統制条件でのヒット率}) - (\text{不一致条件での誤警報率})/(\text{統制条件での誤警報率})$ として算出した。これらの値について条件間の差があるかどうかを検証するため，対応のある t 検定を実施した。また，一致条件と不一致条件のスコアが MBEA の音程スコアと関係性を示すかを検証するため，相関解析を行った。

一致条件と不一致条件での反応時間を評価するため，まず一致条件の反応時間のスコアを $(\text{一致条件でのヒットのときの反応時間}) - (\text{統制条件でのヒットのときの反応時間})$ として算出した。また，不一致条件の反応時間のスコアを $(\text{不一致条件でのヒットのときの反応時間}) - (\text{統制条件でのヒットのときの反応時間})$ として求めた。条件間の差について査定するため，対応のある t 検定を実施した。更に MBEA の各音程サブセットの得点との相関を求めた。この相関解析においては，実験 3 の解析方法に倣い，MBEA のスコアが満点であった 2 名を除外し，残り 18 名分のデータを解析に用いた。

5.2.4.3. 脳波データ

脳波のデータは EDIT 4.3 (NeuroScan, Inc)を用いて解析した。音の呈示開始を起点とする -100 ミリ秒から 0 ミリ秒までをベースラインとし，-100 ミリ秒から 600 ミリ秒までを 1 つのエポックとして切り出した。眼球運動等によって生じたアーチファクトを除外するため，振幅が $100 \mu\text{V}$ を超えるデータをオフラインで消去し，更に，その他のアーチファクトを除外するために目視にてノイズの見られるデータの消去を行った。残りのデータを条件(統制条件，一致条件，不一致条件)や音の種類(標準音，逸脱音)で実験参加者ごと別々に平均し，更に参加者間の加算平均を算出した($n = 20$)。アーチファクト除外の結果，加算平均に用いられたエポックの割合はそ

れぞれ、統制条件の標準音 76.41% ($SD = 18.31$), 統制条件の逸脱音 74.20% ($SD = 20.52$), 一致条件の標準音 75.09% ($SD = 19.19$), 一致条件の逸脱音 74.17% ($SD = 20.80$), 不一致条件の標準音 74.42% ($SD = 19.14$), 不一致条件の逸脱音 78.18% ($SD = 18.01$)であった。ERP 成分の分布を説明するため、正中線付近に位置する頭部の電極を 4 つの領域に分けた ROI と、左右差を検証するための 2 つの ROI を設定した。これら 6 つの領域には、それぞれ 6 つの電極を含めた：前頭部 (Frontal; FP1, FPz, FP2, F1, Fz, F2), 前頭—中心部(middle fronto-central; FC1, FCz, FC2, C1, Cz, C2), 中心—頭頂部(middle centro-parietal; CP1, CPz, CP2, P1, Pz, P2), 頭頂—後頭部(middle parieto-occipital PO3, POz, PO4, O1, Oz, O2), 左側中心—頭頂部(left centro-parietal; C5, C3, CP5, CP3, P5, P3), 右側中心—頭頂部 (right centro-parietal; C4, C6, CP4, CP6, P4, P6)。

音刺激開始から 260 ミリ秒付近にピークをもつ陰性電位の評価を行うため、そのピークの潜在時の前後 10 ミリ秒の間の平均振幅を、条件や音の種類毎に算出した。この 250—270 ミリ秒の平均振幅について、音の種類(統制条件の標準音, 統制条件の逸脱音, 一致条件の標準音, 一致条件の逸脱音, 不一致条件の標準音, 不一致条件の逸脱音)と電極位置(6 つの ROI)を被験者内要因とする、繰り返しのある ANOVA を用いて解析を実施した。音の種類と位置の要因の間に交互作用が検出された場合、各 ROI において音の種類の効果について検定を行った。以上の解析において、 α レベルは全て 0.05 とし、下位検定では p 値の補正にボンフェローニ法を用いた。

ERP の反応と MBEA スコアとの相関を調べるため、逸脱音と標準音に対する ERP 反応に最も顕著な差の見られた右側中心—頭頂部における、逸脱音に対する ERP 振幅から標準音に対する ERP 振幅を減じた値を用いた。行動テストの解析と同様に、MBEA のスコアが満点であった 2 名のデータを除外した。残り 18 名のデータについて MBEA の輪郭のサブセットのスコアと、各条件における差分振幅との関係性を、相関解析を用いて検証した。

5.3. 結果

5.3.1. MBEA スコア

MBEA の音程サブセットの 28 問目で誤答であった 1 名を解析から除外した。また、脳波計測時の行動テストで外れ値を示した 1 名のデータをこの MBEA のスコアの解析からも除外した。MBEA の音程サブセットの平均正答数は 23.20 個 ($n = 20$; 範囲 : 14—30 問 ; $SD = 4.30$) であった(表 5. 1.)。Peretz et al. (2003) に従って 21 問をカットオフスコアと定義した場合、20 名中 8 名は失音楽症群に該当する事になる。

MBEA スコアの妥当性を検証するため、音楽経験との関連性や音楽的能力の自己評価との関連性について検証した。まず、MBEA のスコアと音楽経験年数について相関解析を行った(図 5. 2. A)。20 名の参加者全体では音楽経験年数が長いほど、音程の違いを聞き分ける能力が高くなる傾向があった($r = 0.67, p < 0.005$)。また、音楽訓練が 3 年以上ある参加者を音楽経験者 ($n = 11$)、音楽的な訓練の経験が全くない被験者を非経験者 ($n = 8$) とすると、音程の違いを判別する能力は音楽経験者(範囲 : 21—30 ; 平均 25.73 ; $SD = 3.07$) のほうが非経験者(範囲 : 14—25 ; 平均 19.63 ; $SD = 3.46$) よりも有意に高い事が確認された($t(17) = 4.06, p < 0.001$)。次に、音楽的能力に対する自己評価と MBEA スコアの関連性について検証した(図 5. 2. B)。参加者は 8 段階の評価の中で (1 は “音楽的能力が非常に低い”, 8 は “音楽的能力が非常に高い” を表す), 平均 3.75 (範囲 : 1—6 ; $SD = 1.62$) の評価を行った。この自己評価と MBEA のスコアの相関は正の相関を示し ($r = 0.66, p < 0.005$)、音楽能力に対する自己評価が高いほど高い音程スコアを獲得していた事が確かめられた。

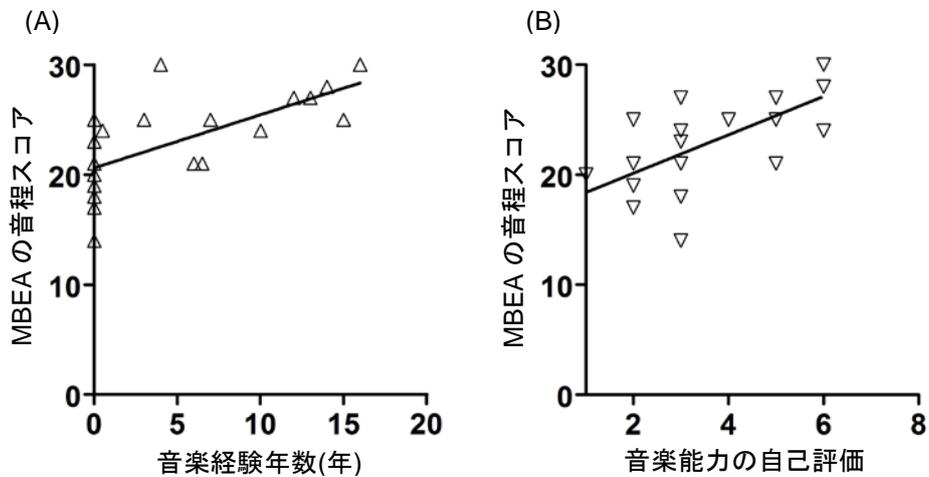


図 5. 2. (A) 音楽経験年数と MBEA スコアとの相関関係. (B) 音楽能力の自己評価と MBEA スコアとの相関関係. いずれも, 実線は回帰直線 ($n = 18$).

5. 3. 2. 行動テスト

反応の正確さは, 一致条件(平均: -0.14 ; $SD: 0.45$)と不一致条件(平均: -0.10 ; $SD: 0.47$)とで殆ど違いが見られなかった(図 5. 3. A). 対応のある t 検定からも, 条件間の有意差がみられない事が確かめられた($t(19) = 0.22, p = 0.82$). 反応時間は統制条件で 552.04 ミリ秒($SD = 48.17$), 一致条件で 558.29 ミリ秒($SD = 38.42$), 不一致条件で 557.67 ミリ秒($SD = 52.60$)であった. 統制条件に対して一致条件や不一致条件での反応時間がどの程度の長かったかを表した値(一致条件の反応時間/統制条件の反応時間, または不一致条件の反応時間/統制条件の反応時間)は, 一致条件で平均 1.01 ($SD = 0.07$), 不一致条件で平均 1.01 ($SD = 0.06$)であり, 条件間の差はほぼ見られなかった(図 5. 3. B). 対応のある t 検定から, 条件間で反応時間に有意差がみられない事が確かめられた($t(19) = 0.20, p = 0.84$). また, 反応の正確さのスコアや反応時間のスコアは, いずれの条件においても MBEA スコアの高さや(一致条件における反応の正確さ: $r = -0.23, p =$

0.35; 不一致条件における反応の正確さ: $r = 0.19, p = 0.43$; 一致条件における反応時間: $r = -0.31, p = 0.21$; 不一致条件における反応時間: $r = 0.17, p = 0.51$ (いずれも $n = 18$) や、音楽経験の長さ(一致条件における反応の正確さ: $r = -0.31, p = 0.21$; 不一致条件における反応の正確さ: $r = 0.45, p = 0.06$; 一致条件における反応時間: $r = 0.01, p = 0.98$; 不一致条件における反応時間: $r = 0.29, p = 0.24$ (いずれも $n = 18$))との相関関係は見られなかった

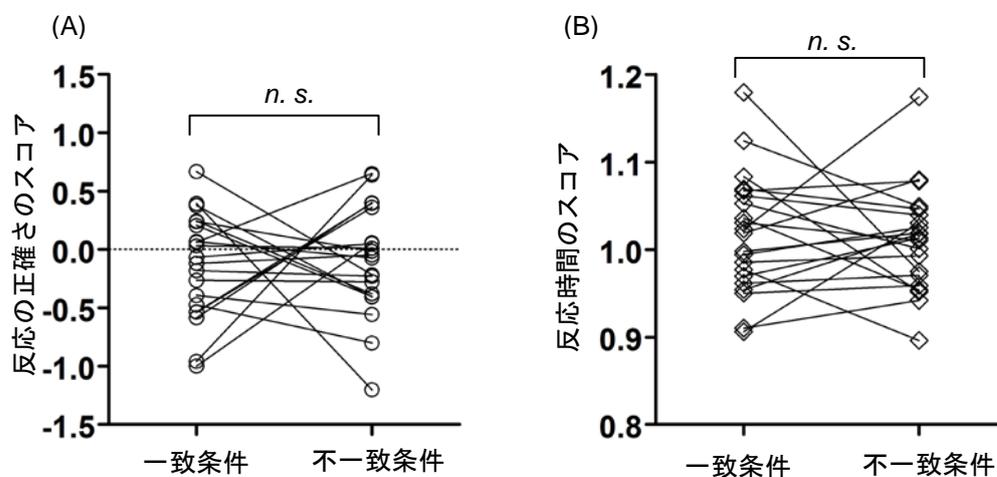


図 5. 3. 一致条件と不一致条件における、(A) 反応の正確さと (B) 反応時間.

5. 3. 3. ERP データ

音刺激の呈示開始から約 260 ミリ秒後をピークとして、標準音に比べ、逸脱音でより大きな陰性電位が観察された(図 5. 4.; 図 5. 5.). そのピーク前後 10 ミリ秒間の平均振幅を対象として、音の種類と電極位置を被験者内要因とする ANOVA を実施した. この解析から、音の種類の主効果と($F(5, 95) = 3.07, p < 0.05, power = 0.85$), 音の種類と電極位置の交互作用が有意である事が示された($F(24, 475), p < 0.05, power = 0.98$). 各 ROI で音の種類の効果を調べるため、追加で ANOVA を実施したところ、正中線上に位置する前頭部(音の種類の効果: $F(5, 95) = 0.52,$

$p = 0.76$, $power = 0.19$), 前頭—中心部(音の種類の効果 : $F(5, 95) = 2.84$, $p < 0.05$, $power = 0.82$; 統制条件での標準音と逸脱音の差 : $p > 0.99$; 一致統制条件での標準音と逸脱音の差 : $p = 0.14$; 不一致条件での標準音と逸脱音の差 : $p > 0.99$), 中心—頭頂部 (音の種類の効果 : $F(5, 95) = 3.82$, $p < 0.005$, $power = 0.93$; 統制条件での標準音と逸脱音の差 : $p > 0.99$; 一致統制条件での標準音と逸脱音の差 : $p = 0.09$; 不一致条件での標準音と逸脱音の差 : $p = 0.26$), 頭頂—後頭部 (音の種類の効果 : $F(5, 95) = 2.69$, $p < 0.05$, $power = 0.80$; 統制条件での標準音と逸脱音の差 : $p > 0.99$; 一致統制条件での標準音と逸脱音の差 : $p = 0.41$; 不一致条件での標準音と逸脱音の差 : $p = 0.34$)のいずれの ROI においても, 標準音と逸脱音で陰性電位の大きさに有意差が見られなかった. 一方で, 左右の中心—頭頂部に位置する ROI では, とともに音の種類効果が有意であった(左側 : $F(5, 95) = 4.82$, $p < 0.001$, $power = 0.97$; 右側 : $F(5, 95) = 3.73$, $p < 0.005$, $power = 0.92$). 更に, 標準音に比べて逸脱音がより大きな陰性電位を誘発する傾向が一致条件でのみ見られる事が, 左側の中心—頭頂部の ROI でも(統制条件 : $p > 0.99$; 一致条件 : $p < 0.05$; 不一致条件 : $p = 0.37$), 右側の中心—頭頂部の ROI でも(統制条件 : $p > 0.99$; 一致条件 : $p < 0.05$; 不一致条件 : $p = 0.32$)確かめられた(図 5. 5.).

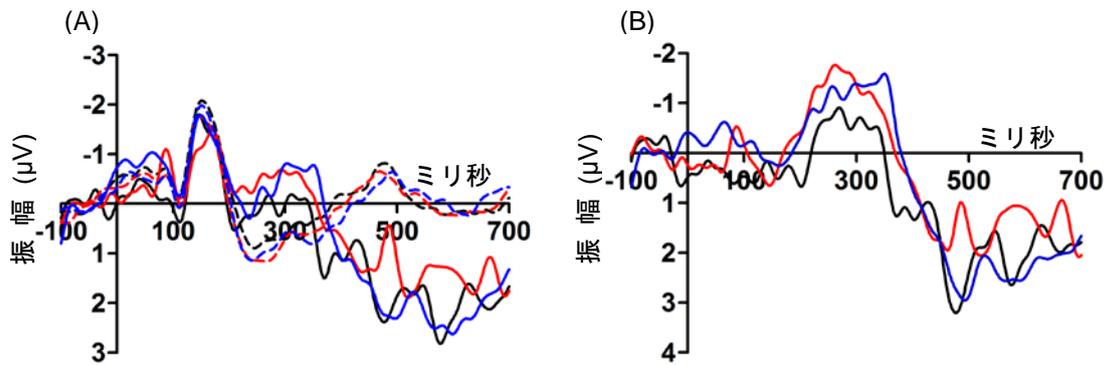


図 5.4. (A) CP4 電極における，各条件の標準音と逸脱音の ERP 波形．黒色点線が統制条件の標準音，黒色実線が統制条件の逸脱音，赤色点線が一致条件の標準音，赤色実線が一致条件の逸脱音，青色点線が不一致条件の標準音，青色実線が不一致条件の逸脱音に対する ERP 反応を表す．(B) CP4 電極における，各条件の差分 ERP 波形．逸脱音に対する反応から標準音に対する反応を減じた値で，黒色が統制条件，赤色が一致条件，青色が不一致条件を表す．

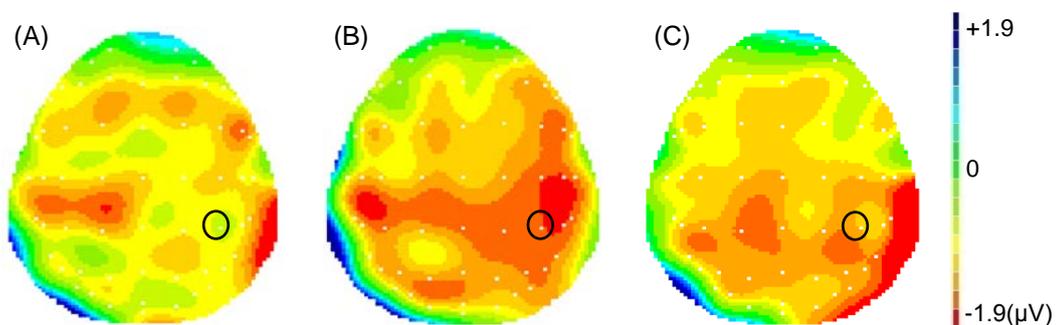


図 5.5. 逸脱音に対する ERP 反応から標準音に対する ERP 反応を減じた値の分布図．刺激呈示開始から 262 ミリ秒後．白い点が各電極位置，黒い丸に囲まれた白い点が CP4 電極を表し，上方が前頭部，下方が後頭部に対応している．(A) 条件 1，(B) 条件 2，(C) 条件 3．

一致条件における音の種類の効果の大きさに左右差が有るかどうかを検証するため，左右の中心—頭頂部においてそれぞれ逸脱音に対する ERP 反応の振幅から標準音に対するそれを減じた値を算出し(左側：平均 $-1.31 \mu\text{V}$ ， $SD=1.72$ ；右側：平均 $-1.65 \mu\text{V}$ ， $SD=1.83$)，それらに対応のある t 検定で比較した．左右の ROI の間で，音の種類による効果の大きさに有意差は見られなかった($t(19) = 1.45$ ， $p = 0.16$)．

標準音と逸脱音に対する ERP 反応の差が特に顕著であった左右の中心—頭頂部について、各条件における逸脱音と標準音の差の大きさと、音楽経験の長さや MBEA スコアの高さとの関係を検証するための相関解析を行った(表 5. 3)。どの条件においても、MBEA スコアの高さとは、音の種類の違いによる効果は有意な関係性を示さなかった(図 5. 6. A)。一方で、音楽経験の長いほど、不一致条件で左側中心—頭頂部における陰性電が、標準音より逸脱音に対してより大きくなる事が示された(図 5. 6. B)。統制条件や一致条件では、このような音楽経験の長さと ERP 振幅との関係性は見出されなかった。

表 5. 3. N260 効果の大きさ(刺激呈示開始から 250—270 ミリ秒において、逸脱音に対する ERP 反応から標準音に対する ERP 反応を減じた値)と、音楽経験の長さや MBEA との相関。

		音楽経験の長さとの相関		音程スコアとの相関	
		左側	右側	右側	右側
統制条件	r	0.11	0.08	0.12	0.05
	p	0.64	0.73	0.63	0.85
一致条件	r	-0.10	-0.30	-0.20	-0.26
	p	0.67	0.19	0.42	0.30
不一致条件	r	-0.48	-0.37	-0.29	-0.20
	p	<0.05	0.11	0.24	0.44

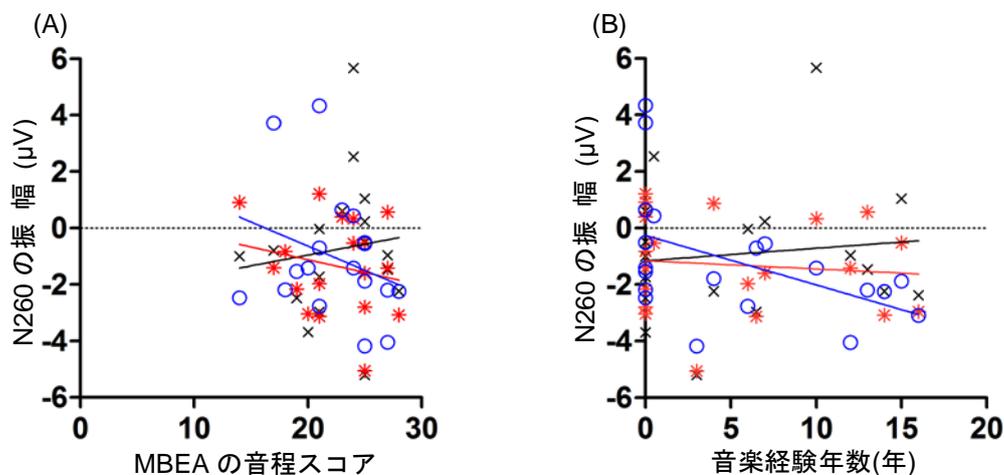


図 5. 6. 左側中心—頭頂領域における, (A) N260 効果の大きさ と MBEA スコア, (B) N260 効果の大きさ と 音楽経験の長さの関係性. 黒色は統制条件, 赤色が一致条件, 青色が不一致条件, 実線はそれぞれの回帰直線を表す.

5. 4. 考察

5. 4. 1. 視覚と聴覚の間の対応関係は, 反応の正確さや反応時間に影響しなかった

テスト試行中, 低頻度に生じる逸脱音を検出させる課題では, 参加者の反応の正確さ, 判断の早さはどちらも, 直前の学習試行で視覚刺激と聴覚刺激が対応関係にあった場合と(一致条件)なかった場合とで(不一致条件), 有意な差を示さなかった(図 5. 3). 予測としては, 不一致条件よりも一致条件のほうが, テスト試行で呈示される音系列中の逸脱を同定するのが容易であり, 判断が早く行われると考えていたが, 実際にはこのような条件間の差が観察されなかった. だが過去の研究から明らかなように, 視覚と聴覚の統合過程は行動テストの結果に反映されない場合もある(Stein, London, Wilkinson, & Price, 1996; Teder-Sälejärvi et al., 2005).

また, 条件間で有意差が検出されなかった他の理由として, 実験 3 に参加した人たちの MBEA の音程スコアが想定していた以上に低かったという事が挙げられる. MBEA の音程サブセットにおいて, 参加者のうち 8 名が失音楽症としての基準に該当していた. 彼らは音高の逸脱に対する敏感さが十分ではなく, 課題遂行中の逸脱音を見つけるのが困難であったり, 音の高さと視

覚刺激の位置を対応付けて知覚するのが困難であったりした可能性がある。8名という人数は元々想定されていたより多く、これが影響して条件間の差が検出され難くなったものと考えられる。Peretz et al. (2003)によれば、音楽能力が低いという自覚のある人たちであれば、MBEAの音程スコアは平均19点になるが、統制群の場合では平均26点であり、失音楽症と診断される割合(平均スコアを2SD分下回る場合)は1%ほどしかない。本研究では、参加者はランダムに集めたため、失音楽症の基準に該当する人の割合はPeretz et al.の報告にならって、1%ほどであろうと想定していた。しかしながら実際には、これと比べるとかなり高い割合で失音楽症の可能性のある人が実験に参加した事になる。MBEAを正しく実施出来ていない可能性についても検討したが、しかし、スコアが21点以下であった参加者は、一様に“自分は音痴である”と自己報告した事、参加者全体で、MBEAスコアと音楽能力に関する自己評価との間に正の相関が見られた事から(図5.2.)、MBEAは正常に実施されたと評価する事ができる。また、音程スコアは音楽訓練の経験の無い参加者よりも音楽家のほうが有意に高かった事から、音程スコアの高さには個人の音楽経験や能力が大きく貢献していると推測される。

5.4.2. 一致条件と不一致条件で、260ミリ秒付近の陰性電位の振幅が変化した

一致条件のテスト試行中に出現した逸脱音は、標準音に比べてより大きな陰性電位を誘発した(図5.4.)。この陰性電位のピークは各音刺激の呈示から約260ミリ秒後であり、左右の中心—頭頂領域で顕著に表れた(図5.5.)。本研究実験3で使用した音系列刺激は、同一の調性に属する音要素のランダムな並び替えで構成されていたという点で、実験1や2で使用した音系列刺激と共通していた。しかしながら、実験3の音系列中に生じた逸脱音に対する陰性電位は、実験1や2で観察されたそれと比べると潜時が遅く、両側の側頭寄りの位置に分布するなど、大きな違いが見られた。典型的なMMN反応では、刺激呈示開始から120—220後に、陰性方向の振幅が正中線上でピークとなるが(Näätänen, 1992; Sams et al., 1985; Chennu & Bekinschtein, 2012 参照)、実験3で観察された陰性電位はこの特徴にも当てはまらなかった。そのため、ここ

で観察された陰性電位は MMN とは異なる成分であると結論づけられる。可能性としては、MMN が現れる時間帯に他の成分が重なっているだけということも考えられた。だが、ピークが 120—220 ミリ秒に現れるという MMN の性質を考慮すると(Näätänen, 1992; Chennu & Bekinschtein, 2012 参照), その時間帯に現れていたのは MMN より寧ろ N1 である。更に、標準音と逸脱音に対する ERP の振幅は、同時帯において大きな違いが観察されなかった(図 5. 4.)。過去の研究からは、他の多感覚統合に関する先行研究からも、視覚刺激の呈示によって聴覚的な期待が形成されるとき、その期待が聴覚情報の処理に与える影響は MMN や N2b を含む N2 成分に反映される事が示唆されているが(Lindström et al., 2012; Widmann, et al., 2004; Ullsperger, Erdmann, Freude, & Dehoff, 2006), 以上のような理由から、実験 3 において視聴覚情報の一致、不一致を反映して活動が変化したプロセスは、聴覚記憶痕跡からの逸脱の検出を反映した MMN 等の ERP 成分とは異なる性質のものであったと言わざるを得ない。

それでは、実験 3 において出現した陰性電位は何を反映して、その振幅を変化させたのか。視聴覚統合に関する研究で観察された ERP 成分の中で、これに近い性質を示した成分として N260 が挙げられる。Teder-Sälejärvi et al. (2005) では、視覚刺激と聴覚刺激が同時に呈示される時、それらが空間的に同じ位置から呈示されると、異なる位置から呈示される時に比べて、N260 成分の振幅が大きくなった。本研究実験 4 において一致条件のテスト試行で逸脱音が N260 様の成分を拡張させたのは、学習試行時に活性化された視聴覚統合プロセスが、テスト試行時に聴覚刺激を聴取した際にも活性化されたのが原因であった、と推測される。実験を通して、学習試行中には視覚刺激系列と音系列の間に対応関係が成立し得るという事が認知され、実際に対応関係が確認された事から、一致条件では視聴覚統合に関わるプロセスが働いたのだと考えられる。一方、不一致条件では、実際に対応関係が成立していなかったために視聴覚情報を統合するに至らず、直後のテスト試行における聴覚処理でも同プロセスが関与する事が無かったのではないだろうか。ただし、不一致条件では、音楽経験が長い参加者ほど、N260 様の振幅が大きくなる傾向があった(図 5. 6.)。この事は、音楽経験が豊富な参加者では、視覚刺激系列と聴覚刺

激系列との間の潜在的な関係性を無意識的に検出あるいは探索していた可能性を示唆している。

実験 3 で MMN 効果が検出されなかったのは、学習試行の段階で音の記憶や次に来るべき音への期待が十分に形成されなかった事に原因があるかもしれない。Lindström et al. (2012) や Aoyama, Endo, Honda, & Takeda (2006) が主張するように、実際の聴覚的事象が生じる前に聴覚入力に対する期待が高まれば、その期待と実際の入力とを比較する聴覚処理が発生し、逸脱音の検出が可能になる。従って、もし実験 3 において学習試行時の刺激呈示条件が聴覚的な記憶や期待の形成に影響したのだとすれば、直後のテスト試行中の逸脱音に対する MMN の振幅が変化する筈であった。だが実際には、そのような効果が観察されなかったため、視覚情報と聴覚情報間の対応関係の有無という要因は、視聴覚統合プロセスを活性化させる事はあっても、聴覚的な記憶それ自体を変容させるような働きを持たない事が示唆された。今後の課題としては、中長期的な訓練の影響を検討する事、が挙げられる。すなわち、学習試行で聴覚系列を学習させる機会をより多く設け、その過程で聴覚系列と視覚系列の対応関係を十分に確立させた場合に、視聴覚統合プロセスが聴覚記憶自体へ影響が及ぶかもしれない、という可能性について検証する必要がある。

5.4.3. まとめ

実験 3 では、視—聴覚の統合プロセスが聴覚的な記憶の形成に影響するかどうかについて検証を行った。学習試行では音系列刺激と視覚刺激系列とを同時に呈示し、直後のテスト試行では音系列のみを呈示して、希に生じる逸脱音を検出させる課題を実施した。学習試行時に音高と視覚刺激の呈示位置との間に対応関係が成立しているときは(一致条件)、それが成り立たないとき(不一致条件)に比べて、テスト試行時の逸脱音が誘発する N260 成分の振幅が大きくなった。この事は、学習試行で活性化された視聴覚統合プロセスが、テスト試行時に聴覚刺激を聴取した際にも活性化した事を示唆している。一方で、一致条件と不一致条件間で MMN の振幅が変化する効果が見られなかった事から、本研究においては、視覚情報と聴覚情報間の対応関係の有無と

いう要因が、視聴覚統合プロセスを活性化させる事はあっても、聴覚的な処理それ自体に働きかけて聴覚的記憶の形成を促進させるような働きを持つに至らなかった事が示唆された。また、音楽経験が長い参加者ほど不一致条件での N260 反応が大きくなる傾向があった事から、音楽経験を通して得られた何らかの能力によって、視覚刺激系列と聴覚刺激系列との間の潜在的な関係性に対する無意識的な探索あるいは検出が促された、という可能性が示唆された。全体として、実験 3 の結果からは、視覚と聴覚のネットワークが聴覚的な記憶それ自体のプロセスに影響するという事は証明されなかった。更なる検証のため、今後の研究において、視聴覚情報の関連づけに関わる中長期的な訓練による影響について検討していく必要があるだろう。

6. 実験 4

6.1. 序論

実験 3 では、視覚的な入力、視覚刺激と同時に呈示される音系列刺激の聴覚的な記憶の形成に影響したり、次に来る音への聴覚的な期待を引き起こしたりする効果は示されなかった。一方で実験 1 や 2、また過去の聴覚—運動感覚の統合に関わる研究では、聴覚的な記憶形成に与える影響には、聴覚—運動ネットワークが音楽的訓練を通してどの程度確立されているのかという要因が重要である事が示唆されている。従って視聴覚感覚統合の過程においても、特定の視覚情報と聴覚情報を結びつけるような訓練を経た場合には、可能性として、視覚刺激の呈示が聴覚処理そのものに対する影響をもつようになるという事も考えられる。また、もう 1 つの可能性として、特別な訓練の必要性なしに対応付けられる視覚情報と聴覚情報が存在すれば、その関係性に基いて視聴覚統合の過程が働き、視覚情報が聴覚的な処理に対して影響する事も考えられる。ここから導き出される第一の疑問は、どのような対応関係が視聴覚刺激間に成立すれば、聴覚的な処理への影響が現れるかという事である。また、第二の疑問として、そのような影響が観察された場合に、それが特定の経験にもとづいて獲得された認知能力に依存して生じた影響なのか、

という事が挙げられる。

第一の疑問に関しては、人間の音声と表情に対する認知間の相互関係に関する研究が 1 つの答えを示している。人間の音声に対する認知と表情に対する認知の間では、双方向的な影響が成立するという見方が、行動研究や神経生理学的研究を通して確立されてきた(de Gelder, Böcker, Tuomainen, Hensen, & Vroomen, 1999; de Gelder & Vroomen, 2000; Grossmann, Striano, & Friederici, 2006; Pourtois, de Gelder, Vroomen, Rossion, & Crommelinck, 2000; Pourtois, Debatisse, Despland, & deGelder, 2002; Spreckelmeyer, Kutas, Urbach, Altenmüller, & Münte, 2006)。de Gelder & Vroomen (2000)によれば、声色に対する印象は、意識下で呈示された表情に影響される。これとは逆に、表情に対する印象もまた、声色から影響を受ける。この時、声色と表情の間にある対応関係は情動的な意味を基準に成立している。人と対話する場面で、声からもたらされる聴覚的な情報と同時に、表情から読み取られる視覚的な情報を利用する事は、相手の情動的な状態を理解するための手段として合理的と言えるだろう。このように、聴覚と視覚の統合過程は、音声と表情に対する情動的な意味の認知に関して、日常的に働き、人間同士のコミュニケーションの支えとなっている事が示唆される。

一方、情動的な意味を持ち得る聴覚刺激と視覚刺激とを認知するときに働く視聴覚統合の過程に対し、特定の経験がもたらす影響があるかという問題については、上記のような音声と表情に関する研究から推し量る事は難しい。そこで実験 4 においては、この問題に取り組む為に、情動的な意味を持ち得る聴覚刺激として非言語音を用い、その非言語音と表情の認知に対する視聴覚統合過程が存在するかどうかについて検証し、更にその過程に経験による影響が及ぼされるかどうかについて検討する事を目的とした。

非言語音の刺激としては、経験による影響が検討しやすいという理由で、音楽の断片を採用する事とした。情動的な意味をもつ聴覚刺激として音楽を用いるに当たり、「音楽の意味」という語の使用について、ここで整理しておく。音楽の意味は大きく分けて 3 つに分類される。音楽外(extramusical)の意味と音楽内(intramusical)の意味、そして音楽に誘発される(musicogenic)

意味である(Koelsch, 2011). 楽曲によって表現される情動的な状態は、音楽外のインデックス的な意味(indexical extramusical meaning)として分類される. 本研究実験 4 では、このインデックス的な音楽刺激の内容(indexical musical sign quality)に関する解釈から発生する意味、特に、音楽によって表現される楽しさや悲しさに関する知覚に焦点を当てた.

音楽から読み取られる楽しさや悲しさといった意味は、複数の音楽的要素によって決定され、また聴き手個人の音楽経験にも影響される. 音楽の情動表現にはテンポ、調性、大きさ、ピッチ、音程、旋律、リズム、音色、アーティキュレーション等々、様々な音楽的特性が影響している(Gabrielsson & Lindström, 2001). 例えば、長調や速いテンポは楽しさに、短調や遅いテンポは悲しさの表現と結びついている(Gagnon & Peretz, 2003). そして、ほぼ全ての楽曲において、これらの要素がどのように組み合わせられているかが、聴き手へ伝達される情動的な意味に影響している. Gagnon & Peretz (2003)は、これらの特徴が音楽的な情動に与える影響の程度は一樣ではなく、非音楽家が音楽によって表現された楽しい、悲しいという情動を判断する上で、テンポが調性よりも重要である事を示した. このように、人々がどのように音楽的な情動を認知するかという事については、少なくとも音楽によって表現された基礎的情動に対する認知の範囲内で、一般に共有されている部分がある(Trainor & Corrigan, 2010 参照). Leaver & Halpern (2004)によれば、非音楽家は、旋律を長調/短調というラベルに従って分類する事は出来なかったが、同じ旋律を感情のラベルに従って分類する事は可能であった. しかしながら、彼らは、音楽家に比べて非音楽家は、短調の和音をより悲しいと評価する傾向があったとも報告しており、音楽的要素に対する基礎的な情動の認知が、部分的には音楽経験による影響を受ける事が示されている.

実験 4 で検証したのは音楽と表情に対する情動的な意味の認知における統合処理の過程であり、また特に聴覚的な認知に対しての影響に注目した. 過去にも音楽と視覚刺激の間に生じる認知の相互作用に関する研究が多数行われてきたが、聴覚的な意味の認知に対して視覚情報が及ぼす影響より寧ろ、視覚的な刺激の情動認知に対して聴覚情報が与える影響が注目されてきた.

Baumgartner, Esslen, & Jäncke (2006)は、EEG の α パワー密度(α power density)やその他の

生理指標を用いて、写真によって引き起こされる情動体験が、音楽の呈示によって強められる事を示した。Baumgartner, Lutz, Schmidt, & Jäncke (2006)もまた、恐怖や悲しみを表現した写真を単独で、または音楽と組み合わせて呈示すると、それらの条件における情報処理には明確な機能的、構造的乖離が観察される事を示した。更に Logeswaran & Bhattacharya (2009)は、表情の画像呈示によって誘発される ERP は、他の表情画像(楽しい, 悲しい, または情動的に中性的な画像)との関係性や、表情画像に先立って呈示される音楽刺激(楽しいまたは悲しい音楽)との関係性によって、その振幅を変化させる事を示した。また、Tan, Spackman, & Bezdek (2007)は、映画の鑑賞者が映像の中の登場人物の情動を解釈するときには、その人物の登場前後に聞こえていた音楽の表現する情動と一貫するような方向へ、バイアスがかかる事を示した。Jolij & Meurs (2011)もまた、音楽の聴取が表情の認知に無意識的な影響を与える事を報告している。彼らの実験では、表情を表す画像の代わりにランダムなノイズ画像を呈示している時でさえ、楽しげな音楽が呈示される事で、参加者自身は楽しげな表情を見ていると認識してしまう事が示された。これらの発見を通して、音楽刺激に対する聴覚的な処理が、写真や物体、景色、人間の表情といった視覚刺激の情動的な処理や判断に統合される事が示されてきた。これと併せて本研究実験 4 で視覚的な入力聴覚的な処理へと統合されていく過程が示されれば、音楽と表情の間の情動認知における双方向的な影響を示す重要な証拠となると考えられる。

本研究実験 4 においては、表情に対する認知が音楽の情動的意味の処理に与える影響を明らかにする事を目的として、先行する対象についての認知が、それに続いて現れる対象についての認知に影響を与える場合、両者の関係性に基づいて、後者に対する認知的判断や脳活動が変化するという現象を実験に利用した。行動や脳活動に対する影響は、具体的には、刺激対の間の対応関係が成立する時よりも成立しない時のほうが、認知的な判断が遅くなったり、後から呈示されるほうの刺激を起点として誘発される事象関連電位の内、N400 成分の振幅が大きくなったりする、という形で現れる。このような現象は当初、単語や文章の刺激の間に生じる文脈の一致、不一致が、言語的な意味の統合過程に与える影響として報告された(Kutas & Hillyard, 1980;

1984; Bentin et al., 1985). だが後に、言語的な刺激のみから成る刺激対だけでなく、写真や香り、表情、音楽的な要素や抜粋といった非言語的の刺激を含む刺激対に対しても同様の現象が報告されるようになった(Koelsch, 2011). 更に、刺激対の間に成立する対応関係が言語的な意味に基づくものであっても(Koelsch, Kasper, Sammler, Schulze, Gunter, & Friederici, 2004; Daltrozzo & Schön, 2008), また、情動的な意味に基づくものであっても(Sollberger, Reber, & Eckstein, 2003; Steinbeis & Koelsch, 2008; Goerlich, Witteman, Aleman, & Martens, 2011), それらの意味の一致, 不一致によって、認知課題のパフォーマンスや、N400 成分を指標として観察される意味の統合過程が変化する事が示されてきた。本研究実験 4 では、これらの発見を利用して、表情に対する認知が音楽の刺激に対する情動処理の過程に統合されるかどうかについて検証した。先行する表情の刺激に対する認知が、それに続けて呈示される音楽刺激に対する情動認知の過程へと統合される、という仮説のもと、表情—音楽の刺激対の関係性が、刺激対に対する判別課題や、音楽刺激に誘発される N400 成分に与える影響について検討した。また、このような統合過程に対し、個人の音楽経験が与える影響についても検討を行った。

6.2. 方法

6.2.1. 実験参加者

正常な聴覚を持つ日本人 24 名(男性 12 名, 女性 12 名)が参加した。年齢の範囲は 18—49 歳。平均年齢は 30.25 歳($SD = 8.28$)であった。男性 5 名, 女性 7 名を含む 12 名がアマチュアの音楽家であり、彼らには平均 13.25 年(範囲: 4—30 年間; $SD = 7.84$)の音楽経験があった。残り 12 名の参加者には、個人的な音楽訓練の経験が無かった。なお、実験の実施に関しては事前に理化学研究所の倫理審査委員会から承諾を得ており(課題番号: 和光第三 16—3), 参加者には実験に先立って研究の趣旨を説明し、被験者として実験に参加する旨の同意を得た。

6.2.2. 刺激

聴覚刺激としては音楽の抜粋, 視覚刺激としては表情の静止画像を用いた。表情の画像刺激と
には, 国際電気通信基礎技術研究所(the Advanced Telecommunications Research Institute
International ; ATR)発行の表情画像のデータベースから, 8名(男性4名, 女性4名)の顔画像
を選択した。これらの画像には, 24枚の楽しい表情と24枚の悲しい表情が含まれた。また,
Peretz, Gagnon & Bouchard (1998)の研究に用いられた音楽刺激のリストに則って音刺激を作
成し, 予備実験を経て楽しい音楽の抜粋12個と悲しい音楽の抜粋12個を本実験で使用する刺
激として採用した(表 6. 1)。

表 6. 1. EEG 計測時に聴覚刺激として用いた楽曲のリスト. “評価” は, 予備実験において呈示時間が 500 ミリ秒のときに為された情動的意味の評価の平均値 (SD) を表す.

カテゴリ	作曲者	タイトル	評価
楽しい	Beethoven	Piano Concerto no. 4 (3 rd mvt.) 191–200(2)	7.29 (1.66)
楽しい	Beethoven	Piano Concerto no. 4 (3 rd mvt.) 439–452(2)	6.63 (1.64)
楽しい	Beethoven	Symphony no. 6 (3 rd mvt.) 9(3)–16(1)	6.08 (1.15)
楽しい	Mozart	Die Zauberflöte (Act 1 Sc. 2 Papageno's Aria) 18(2)–24(2)	6.51 (1.09)
楽しい	Mozart	Eine kleine nachtmusik (1 st mvt.) 5(3)–10(3)	7.25 (1.55)
楽しい	Mozart	Piano Concerto no. 23 (3 rd mvt.) 1–8	6.43 (1.58)
楽しい	Mozart	Piano Concerto no. 27 (3 rd mvt.) 1–8	5.69 (1.10)
楽しい	Ravel	Tombeau de Couperin (Rigaudon) measures 1–9(2)	6.82 (1.46)
楽しい	Saint-Saëns	Carnaval des Animaux (Finale) 10–26(4)	6.85 (1.79)
楽しい	Schumann	Kinderszenen (Op 15 no. 9) 1–9	6.67 (1.02)
楽しい	Verdi	La Traviatta (Brindisi) 1–15(1)	6.18 (1.22)
楽しい	Vivaldi	L'Autunno (1 st mvt.) 1(2)–4(3)	7.20 (1.65)
悲しい	Albinoni	Adagio 7–14(1)	3.11 (0.90)
悲しい	Bach	Passionsmusik nach dem evangelisten Matthäus 1–5(2)	3.94 (1.01)
悲しい	Brahms	Piano Concerto no. 1 (2 nd mvt.) 21(3)–24(1)	3.79 (1.23)
悲しい	Bruch	Kol Nidrei 9–11(1)	3.48 (1.42)
悲しい	Chopin	Nocturne Op 27 no. 1 2(2)–6(3)	3.41 (0.87)
悲しい	Chopin	Nocture Op 48 no. 1 1–4(1)	3.35 (0.96)
悲しい	Chopin	Nocturne Op 9 no. 1 0–4(1)	3.35 (1.30)
悲しい	Debussy	Prélude: Des pas sur la Neige 4–8(1)	3.95 (0.89)
悲しい	Grieg	Peer Gynt's Suite no. 2 (Solveigs lied) 13(4)–17(3)	3.16 (0.92)
悲しい	Mozart	Piano Concerto no. 23 (2 nd mvt.) 1–3	3.21 (0.81)
悲しい	Ravel	Piano Concerto in G (2 nd mvt.) 1–4(2)	3.41 (1.03)
悲しい	Schubert	String Quartet no. 14 (2 nd mvt.) 1–4	3.31 (0.81)

音刺激の選考に関する予備実験には, 21 名の日本人が参加した(男性 12 名, 女性 9 名; 平均年齢 24.57 歳; $SD = 2.52$). うち, 13 名には 3 年間以上の音楽的な訓練の経験があった(平均 8.62

年間; $SD = 5.03$). 彼らに対して, 24 個の和音(長和音 12 個, 短和音 12 個)と, Peretz et al. (1998) を基に作成した 32 個の音楽の抜粋(楽しげな音楽の抜粋 16 個と悲しげな音楽の抜粋 16 個)を, 4 つの異なる長さ(250, 500, 750, 1000 ミリ秒)で呈示した. 参加者には, それらの刺激が表現する情動的な意味を 9 段階(1 が“非常に悲しい”, 9 が“非常に楽しい”)で評価するよう求めた. その評価の値について, 刺激の種類(短和音と長和音, または楽しい音楽の抜粋と悲しい音楽の抜粋)と刺激の長さ(250, 500, 750, 1000 ミリ秒)を被験者内要因とする ANOVA を実施した. またそれに加えて, 音楽経験(音楽家 vs. 非音楽家)を被験者間要因とする ANOVA も実施した. 結果から, 和音は本 EEG 実験の聴覚刺激としては不適切である事が明らかになった. これは, 和音の情動的な意味に対する評価が個人の音楽経験に影響されていたのに加え(音楽経験×刺激の種類: $F(1, 19) = 4.69, p < 0.05$), 非音楽家は長和音を楽しい情動を表す刺激として分類する事が出来なかった為である(平均: 4.73; $SD = 1.50$; 95%信頼区間: 3.61–5.94). 32 個の音楽の抜粋についても, 音楽家と非音楽家とでは音楽の抜粋における情動的な意味に対する評価に差異があり(音楽経験×刺激の種類: $F(1, 19) < 3.24, p < 0.10$), 非音楽家は楽しげな音楽の抜粋を楽しいと分類出来ていなかった(95%信頼区間: 4.22–6.64). よって, そこから更に, より極端な評価が為された 24 個の抜粋(楽しげな音楽 12 個, 悲しげな音楽 12 個)を選出した(表 6.1. 参照). これら 24 個の抜粋を用いて, 同様の解析を実施したところ, 参加者は楽しげな音楽(平均: 6.57; $SD: 1.29$)と悲しげな音楽(平均: 3.42; $SD: 0.31$)とを正しく区別出来ていた事が確認された(刺激の種類の主効果: $F(1, 20) = 150.97, p < 0.001$). 更に, 刺激の呈示時間が抜粋に対する評価に与える影響に関して, 個人の音楽経験の有無による有意な違いが無い事が確認された($p > 0.05$). 抜粋に対する評価はその呈示時間に従って変化した($F(3, 60) = 21.10, p < 0.001$), 下位検定によって, 呈示時間が 500 ミリ以上であれば評価が安定する事が明らかになった. これらの結果を考慮して, ここで選出した楽しい音楽の抜粋 12 個と悲しい音楽の抜粋 12 個を, この後に続く ERP 研究における聴覚刺激として採用し, 呈示時間を 500 ミリ秒と定める事とした. 概して, 楽しい音楽の抜粋は悲しい音楽の抜粋に比べて, 音の数が多くテンポが速かった. ERP

計測中、これらの聴覚刺激は、両耳に装着させたイヤークューブを通して、参加者毎の快適な音量で呈示された。

各参加者に対して、表情と音楽の刺激ペア 192 組を呈示した。その半数はペアの中で情動的な意味が一致しており(楽しい表情と楽しい音楽、または悲しい表情と悲しい音楽)、残り半数ではペア同士の情動的な意味が一致していなかった(楽しい表情と悲しい音楽、または悲しい表情と楽しい音楽)。表情と音楽の刺激のペアは、以下の手続きを経て作成した。まず、刺激ペアのリスト 1 で使用するための、楽しい表情と悲しい表情を各 12 個、ランダムに選択した。次に、楽しい音楽刺激と悲しい音楽刺激各 12 個と、楽しい表情と悲しい表情各 12 個とを組み合わせ、24 個の一致ペア(楽しい表情と楽しい音楽のペア 12 組と、悲しい表情と悲しい音楽のペア 12 組)と、24 組の不一致ペア(楽しい表情と悲しい音楽のペア 12 組と、悲しい表情と楽しい音楽のペア 12 組)をランダムに作成した。刺激ペアのリスト 2 はリスト 1 とほぼ同じ方法で作成したが、表情の刺激はリスト 1 で使用しなかったものを用いた。表情と音楽の刺激の間の組み合わせが多様になるように、リスト 1, 2 を作成した手順を繰り返して、リスト 3—8 を作成した。

6. 2. 3. 手続き

参加者は、18.9 インチのモニタ(Eizo Nanao Corporation, Flex Scan L797)から約 60cm の位置で、リクライニングチェアに座った。EEG 計測中一貫して、モニタの中央に緑色の固視点を呈示した。各表情刺激を、モニタ上の視角 18.15° (垂直方向) \times 21.97° (水平方向)の範囲に呈示した。呈示時間は 500 ミリ秒であった。表情刺激の呈示に続けて、音楽刺激を 500 ミリ秒間呈示した。刺激間間隔(Inter stimulus interval ; ISI)は 50 ミリ秒であった。各聴覚刺激の呈示が終わると、3500 ミリ秒間空けて X の文字列(“XXXXX”)を、視覚的に 2000 ミリ秒間呈示した。この文字列は、参加者に対して瞬きを促す合図としての役割を持っていた。その後、固視点のみが呈示された状態で 1000 ミリ秒経過した後、次の試行を開始した。1 セッションが 48 試行で構成され、1 セッションあたりの所要時間は約 6 分間であった。実験全体では、各参加者につい

て4つのセッションを遂行した。参加者の半数に対しては、表情—音楽のペアのリスト1, 2, 3, 4を、残り半数に対してはリスト5, 6, 7, 8を各セッションで呈示した。各セッション内では、楽しい顔—楽しい音楽、悲しい顔—悲しい音楽、楽しい顔—悲しい音楽、悲しい顔—楽しい音楽の各ペアはランダムな順番で呈示された。刺激の呈示には、Stim software package (Neuroscan, Inc., USA)内のGentask toolkitを使用した。

EEG記録中、参加者に対しては表情と音楽の各ペアが情動的な意味が一貫しているかどうかを判断し、音楽刺激が呈示された後できるだけ素早く2つのうち1つのボタンを押して回答するよう求めた。半数の参加者には、“一致”の際に右手親指でボタンを押し、“不一致”の場合には左手親指でボタンを押すよう指示した。残り半数ではこれが逆になった。音刺激の呈示開始から4秒以内に回答が無ければ、その試行は回答が無かったものとみなした。

6.2.4. 脳波計測

Scan 4.3 acquisition system (SynAmps; NeuroScan)を用いて、64チャンネルのAg-Cl電極によるEEGの記録を実施した。帯域通過フィルタを0.5—30Hz、サンプリング周波数を500Hzとした。計測中は参照電極を左耳朶に置き、後の解析で両耳朶に置いた電極を参照電極と定め直した。計測中のインピーダンスを5k Ω 以下に維持した。眼球運動によって発生したアーチファクトを除外するのに用いる事を目的として、水平方向、垂直方向のEOGを同時に計測した。

6.2.5. データ解析

EEG記録中の行動テストにおけるパフォーマンスを評価するため、正反応率と、正しい反応を返したときの反応時間とを、各参加者、各条件で平均した。反応時間は、各音刺激の開始からそれに対応した回答としてボタンが押されるまでの時間として定義した。情動的な意味の不一致や個人の音楽系経験が反応の正確さや反応時間に与える影響について、繰り返しのあるANOVAを用いた検定を行った。被験者内要因として条件(一致 vs.不一致)を、被験者間要因として音楽

経験を設定した。

EEG データは EDIT 4.3 (NeuroScan, Inc.)を用いて解析した。音楽刺激呈示直前の 100 ミリ秒間をベースラインとして含めた、700 ミリ秒間の ERP 反応を切り出した。眼球運動によって生じたアーチファクトを除外するため、振幅が $\pm 100 \mu\text{V}$ を超えるスウィープはその後の解析から除外した。更に、正反応の得られなかった試行を解析から除外した。残ったデータ(楽しい表情—楽しい音楽, 悲しい表情—悲しい音楽, 悲しい表情—楽しい音楽, 楽しい表情—悲しい音楽)のペアで、刺激の呈示回数に対して、それぞれ 81.34%, 76.27%, 78.08%, 80.25%)を、各実験条件でまとめて加算平均した。統計解析において ERP の頭皮上分布を説明するため、6 つの ROI を設定した: 右側前部(right anterior; F4, F6, FC4, FC6, C4), 前部中央(middle anterior; Fz, FC1, FCz, FC2, Cz), 左側前部(left anterior; F3, F5, FC3, FC5, C3), 右側後部(right posterior; CP4, CP6, P4, P6, PO4), 後部中央(middle posterior; CPz, P1, Pz, P2, POz), 左側後部 (left posterior; CP3, CP5, P3, P5, PO3)。

N400 成分の評価のため、一致条件と不一致条件とでそれぞれ、被験者間で平均した ERP 波形を算出した。また、一致条件と不一致条件のそれぞれで、聴覚刺激の呈示開始から 250—450 ミリ秒後の範囲の間の平均振幅を算出し、それらを繰り返しのある ANOVA を用いた解析に使用した。被験者内要因としては条件(一致と不一致)と ROI(6 カ所)、被験者間要因としては音楽経験(音楽的に訓練されている群と音楽訓練を受けていない群)を設定した。必要に応じて、球面性の仮定からの逸脱に関してグリーンハウス・ガイザー補正(Greenhouse-Geisser correction)を行った; 結果のセクションでは、未補正の F 値, イプシロン(ϵ), 補正後の p 値を報告する。下位検定においては、p 値の補正にボンフェローニ法を用いた。

6.3. 結果

6.3.1. 行動データ

行動テストにおいては、一致条件と不一致条件の両方で、参加者は表情—音楽ペアが一致して

いるかどうかの判断に関して高い正確さを示した。正反応率は、一致条件で 91.54% ($SD = 8.96$), 不一致条件で 92.84% ($SD = 5.56$)であった。条件を被験者内要因, 音楽形経験を被験者間要因とした ANOVA からは, 有意な主効果は検出されなかった(条件: $F(1,22) = 0.44, p = 0.51$; 音楽経験: $F(1, 22) = 0.11, p = 0.75$). 更に, 条件と音楽経験の交互作用も有意では無かった($F(1, 22) = 0.64, p = 0.43$).

行動テストでの反応時間は一致条件で 1120.75 ミリ秒($SD = 275.35$), 不一致条件で 1160.85 ミリ秒($SD = 98.35$)であり, 一致条件のほうが短かった。条件を被験者内要因, 音楽形経験を被験者間要因とした ANOVA から, 条件の主効果が有意である事が示された($F(1, 22) = 4.80, p < 0.05$). 一方, 音楽経験の主効果や, 条件と音楽経験の交互作用は検出されなかった(音楽経験: $F(1,22) = 0.001, p < 1$; 条件×音楽経験: $F(1, 22) = 0.05, p = 0.84$). これらの結果は, 参加者が不一致条件よりも一致条件においてより素早く回答を行った事, 更にこの効果は個人の音楽経験に関係無く生じる事を示唆している。

6.3.2. ERP データ

図 6. 1. に, 一致条件と不一致条件における音楽刺激が誘発した ERP 反応を示す。音楽刺激呈示後 250 ミリ秒後から, 陰性電位の振幅が一致条件よりも不一致条件で大きくなった。この条件間の差異は約 200 ミリ秒間継続し, 特に頭頂—後頭領域で顕著であった(図 6. 2.). 条件間の差は, 音楽刺激呈示後約 350 ミリ秒で最大となった。

音楽刺激開始後 250—450 ミリ秒の範囲における平均振幅について, 条件(一致と不一致条件)と ROI を被験者内要因, 音楽経験を被験者間要因とした, 繰り返しのある ANOVA を実施した。この解析から, 条件の主効果が検出され($F(1, 22) = 12.25, p < 0.005$), N400 の振幅が一致条件よりも不一致条件で大きかった事が示された。条件の要因を含む交互作用は検出されなかった(条件×ROI: $F(5, 110) = 0.66, \epsilon = 0.36, p = 0.51$; 条件×音楽経験: $F(1, 22) = 0.99, p = 0.33$; 条件×ROI×音楽経験: $F(5, 110) = 0.67, p = 0.65$).

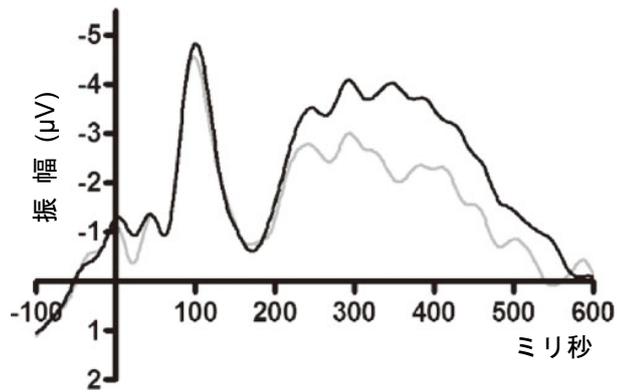


図 6. 1. 一致条件(灰色)と不一致条件(黒色)の音楽刺激に対する ERP 波形 (P0z 電極).

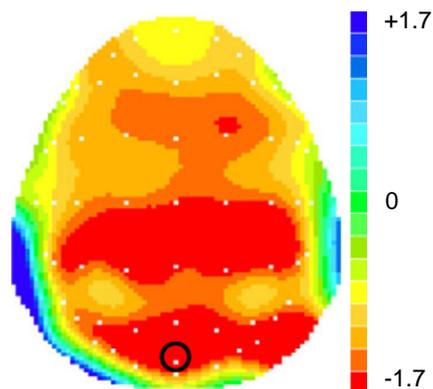


図 6. 2. 刺激呈示から 352 ミリ秒時点の N400 効果の頭皮上分布. N400 の振幅を不一致条件から一致条件を減じた値の分布として算出した. 白色の点は各電極の一, 黒色の丸で囲まれた白色の点は P0z 電極を表す.

6. 4. 考察

実験 4 では, 表情と音楽の情動的意味の認知に関する視聴覚統合過程についての検討を行った. 表情の画像刺激に続けて音楽刺激を呈示し, 参加者に対しては各表情—音楽ペアの情動が一致しているかどうかを回答するよう求めた. 音楽刺激が情動的に一致しない表情に続けて呈示さ

れる時より、先行する表情画像の情動が後に続く音楽刺激の表す情動と一致しているときの方が、判断がより早かった。しかしながら反応の正確さには、一致条件と不一致条件との間で有意差が無かった。EEG のデータからは、一致条件よりも不一致条件で音楽刺激がより大きな N400 成分を誘発した事が示された(図 6. 1. ; 図 6. 2.)これらの結果は音楽家でも、非音楽家でも同様に見られた。この事は、音楽の情動的な意味は——少なくとも楽しさや悲しさは——自動的に処理される事を示唆している。また更に、個人の音楽的知識に関わりなく、表情に対する情動的な知覚が、音楽の情動的な意味を判断するプロセスに影響する事を示唆している。

6. 4. 1. 表情—音楽ペアの不一致は、反応の正確さには影響せず、反応時間を長くさせた

行動テストにおける反応の正確さは、一致条件でも不一致条件でも 90%と高かった事から、表情—音楽の情動的な意味の一致、不一致は、一貫して正しく認知されていたと考えられる。反応の正確さはこれら 2 つの条件間で有意な差が見られなかったが、天井効果ゆえに差が現れなかった可能性もある。Goerlich et al. (2011) が述べているように、課題が簡単だと条件間の潜在的な差が結果として表出しない可能性がある。例えば、Painter & Koelsch (2011) は、刺激のペア同士(単語—単語、単語—音、音—単語、音—音)が、どの程度互いに一致しているかを判断するという課題を実施した。彼らの研究では、反応の正確さと反応時間の両方において、刺激ペアの意味が一致しているかどうかによる影響を観察する事が出来た。本研究実験 4 では二肢強制選択法(一致または不一致を選択)を用い、参加者に対しては表情や音楽の刺激がいずれも“楽しい”か“悲しい”のいずれかの情動カテゴリに属する事を伝えてあった。このような事前知識が、課題の難易度を低下させた要因となったかもしれない。

表情と音楽のペアの情動的な意味が一致しているかどうかの判断は、不一致条件より一致条件のほうが早かった。この事は、表情と音楽のペアの中で情動的な意味が一致している事によって、ペアになった項目同士の関係性に対する判断が容易になり、反対に意味が不一致の時には判断が阻害された事を示唆している。この結果は、情動的な意味の統合過程における、刺激ペアの意味

の一貫性による影響を検討した過去の行動研究とも一貫している。Goerlich et al. (2011) によると、情動カテゴリ化課題(affective categorization task)では、単語や和音の情動価は、意味の一致しない単語や和音に先行されるより、意味の一致した単語、和音に先行されたときの方が素早く判断された。更に、Spreckelmeyer et al. (2006)は、情動的な意味をもつ単語を、その意味とは一致した、または一致しないプロソディで読み上げた刺激を呈示して、参加者には単語の意味がポジティブなのかネガティブなのかを判断させるという課題を課した(実験 1)。また、彼らは実験 2 として、プロソディと単語自体の意味とが一致しているかどうかを判断させる課題を実施した。どちらの課題に置いても、単語とプロソディの情動が一致している時のほうが、一致していない時よりも反応時間が短い事が示された。本研究実験 4 で得られた結果は、これら過去の研究で示されているような、刺激対の意味の一致、不一致による認知的課題の遂行への影響が、音楽刺激が表情刺激に先行されているときにも現れた事を示唆している。

6.4.2. 表情と音楽のペアの一致、不一致によって N400 効果が発生した

EEG データから観察された N400 効果もまた、表情と音楽の情動認知の統合過程に対して視聴覚情報間の意味の一貫性が影響した、という見解を支持している。音楽刺激と表情刺激の情動的な意味が一致しているときに比べ、一致していない時のほうが、音楽刺激によって誘発される ERP の N400 成分の振幅が大きくなった(図 6. 1)。先行する表情刺激と情動的な意味が一致している場合と一致していない場合とで、音楽刺激が誘発した ERP 反応は 250 ミリ秒付近から分離し始めた。この差は音刺激呈示開始後約 350 ミリ秒にピークとなり、約 200 ミリ秒間継続した。ほぼ同じパターンが、情動的な意味の統合過程を観察した過去のいくつかの研究でも報告されている(Paintner & Koelsch, 2011; Steinbeis & Koelsch., 2008, 2011; Koelsch et al., 2004)。本研究ではまた、N400 効果は頭皮上の広い領域で観察された(図 6. 2)。このような N400 効果の分布は、Koelsch (2011)の結果と一貫している。N400 成分の波形や分布から考えて、本研究で観察された N400 効果は、情動的意味に対する認知の統合過程に関する過去の研究、特に音楽刺

激を用いた研究で報告されてきたものと同質であると言えるだろう。このように、表情と音楽における表現の一致、不一致によって N400 効果が誘発されたという事は、表情の情動的な意味が音楽の情動的意味の処理に統合された事を示唆している。更に、音楽刺激と表情刺激の間で、情動的な情報に共通点があり、視覚と聴覚のモダリティの境を超えてそれらの情報が行き来する事ができる、という事を示唆している。

一致条件と不一致条件の間の ERP の差異は、楽しい音楽と悲しい音楽が持つ音響的な特徴の違いによって説明できる可能性もある。なぜなら、それらの刺激は実際の西洋音楽の演奏から抜粋してきたものであり、それぞれの短い抜粋の中でも様々な音楽的特徴が時間経過に従って変化していたからだ。それに加えて、抜粋に含まれている音の数は曲ごとに大きな違いがあった。概して、悲しい音楽の抜粋に含まれる音の数は、楽しい音楽の抜粋に含まれるそれよりも少なかった。そうした音楽的特徴の変化や音要素の生起 1 つ 1 つが、何らかの ERP 成分を誘発し、N400 効果に影響する可能性があった。しかしながら本研究においては、すべての音楽刺激が一致ペアと不一致ペアの両方で呈示された。従って、条件間で観察された N400 成分の振幅の差異は、単に音刺激の音響的な特徴の違いを反映したというよりは寧ろ、表情と音楽刺激の情動的な意味の一致、不一致の検出を反映していたと解釈するのが妥当であろう。

6. 4. 3. 表情と音楽の情動的な意味の統合過程に、音楽経験による影響は見られなかった

一致条件に比べて不一致条件では、N400 の平均振幅はより大きく、反応時間は長くなった。この結果は、個人の音楽経験とは独立に生じた。本研究では当初、音楽非経験者に比べて音楽経験者では、表情刺激と音楽刺激の一致、不一致が N400 の振幅に対してより強い効果をもたらすと予測した。これは、音楽的な訓練を受けた経験のある人では、音楽から情動的な情報を抽出する能力が優れていると想定されたためである。それにも関わらず情動的意味に対する認知の統合過程への音楽経験による影響が観察されなかった事に関しては、2つの説明が可能である。第一に、本研究実験 4 に参加した、音楽家群と非音楽家群とで、音楽的能力に十分な差が無かった

可能性がある。音楽家群の参加者には、最低でも 4 年間の音楽訓練経験があったが、彼らはプロの演奏家ではなかった。もし演奏の専門家と音楽経験のない人たちとを比較したら、群間の差が表出する可能性もある。従って、音楽的訓練経験の度合いが本当に表情と音楽刺激に対する処理の統合過程に影響を与えないかを確かめるには、更なる検証が必要である。第二に、実験の中で表情と音楽刺激の統合に必要とされた認知過程が音楽的な能力を然程必要とせず、音楽家と非音楽家での差異が実質的に存在しなかった、とも推測される。非音楽家でさえ日常生活において西洋音楽に曝される機会は多く、彼らはその音楽様式について暗黙的な知識を持っているされ、更に、馴染みのない音楽様式であっても、聴き手は音楽が基礎的な情動を読み取る事ができるとされる(Fritz et al., 2009)。それに加えて、本研究で使用した音刺激は、音楽経験者でも非音楽経験者でも問題なく情動的な情報を読み取れるよう、予備実験を通して選定したものであったため、音楽刺激に対する情動的な意味の認知過程は音楽的訓練のある人とない人の間で最小限に抑えられていたと言えるだろう。従って、このように音楽から情動的な意味を抽出する能力に音楽経験がほとんど影響していない状況であったと考えられる。このような状況下において、実験 4 で視聴覚統合過程に音楽経験による影響が検出されなかったという事は、音楽経験者群と非経験者群との間で音楽から「楽しい」や「悲しい」といった意味を読み取る事の難しさに大きな差がなかった事に加え、表情と音楽の意味処理に関する統合過程にも群間で差がなかった事を示唆している。しかしながら、音楽と表情の認知やそれらの統合処理過程がどの程度音楽経験者と音楽非経験者で共通しているのかについては、今後の研究で更に検討していかなければならない問題である。例えば、音楽の楽しさまたは悲しさの程度や、表情と音楽のペア同士の情動的意味の一致の強さを操作したり、「楽しい」や「悲しい」という以外の情動的な意味を持つ表情と音楽のペアを用いたりする事によって、音楽経験による影響が変動するかどうかを検討するといった方法が有効であると考えられる。

6.4.4. まとめ

実験 4 では、視覚的な情報と聴覚的な情報に対する情動的意味の認知が統合される過程における、視聴覚情報間の意味の一貫性による影響について検討した。結果から、表情と音楽のペア内で情動的な意味が一致していると、一致していないときに比べて、表情と音楽の意味が一致しているかどうかに関する判断がより素早く行われる事が明らかになった。また、不一致ペアの音楽刺激は、一致ペアの音楽刺激に比べて、振幅のより大きな N400 成分を誘発した。この事は、音楽の意味を決定するプロセスにかかる負荷が、不一致ペアでより大きかった事を示唆している。これらの効果は、音楽家と同様に非音楽家でも観察された。まとめると、これらの結果は、表情に対する情動的認知は、自動的に音楽の抜粋に対するそれに統合される事を示唆している。また、個人の音楽経験は、この過程に影響を及ぼさない事を示唆している。本研究は、音楽刺激が表情の画像刺激に先行されたときに、それらの情動的な意味の統合過程を反映して N400 効果が誘発された事を示した最初の研究である。また、このような視聴覚統合処理が観察された事から、情動的な意味という点で、表情刺激と音楽刺激との間で対応関係が成立している事が確認された。

7. 実験 5

7.1. 序論

実験 3 では、丸の図形が呈示される位置と音の高さとの間に対応関係が成立するという事が正しく認知され、その視聴覚統合過程は N260 成分の振幅の変化に反映されたが、視覚刺激と聴覚刺激の間的一致、不一致は、聴覚的な処理そのものには影響を与えなかった。このように、視聴覚統合処理が働く事は、必ずしも聴覚処理や聴覚の記憶形成に影響する事を意味しない。そこで、実験 4 で確かめられた情動的な意味の認知に関する視聴覚統合プロセスが、聴覚的な処理自体に与える影響について、実験 5 で検討する事とした。実験 5 の目的は、実験 4 で観察された情動的意味の処理に関する視聴覚統合プロセスが、音楽の情動的な意味に関する認知に実際にはどのように影響していたのかを明らかにする事であった。実験 4 の行動テストでは、表情刺

激と音楽刺激との間で情動が一致しているかどうかだけを回答させた。視聴覚刺激のペア内で意味が一致していないと、一致している時に比べて音刺激が誘発する N400 効果が大きくなった事から、視覚と聴覚の感覚を跨いで、意味的な不一致が検出された事が明らかになった(Koelsch et al., 2004; Daltrozzo & Schön 2008; Koelsch, 2011)。このような視聴覚情報の統合過程が、もし音楽の情動的な意味の解釈に反映されているのだとしたら、直前に呈示された表情刺激の意味と音楽刺激の意味が一致しているかどうかによって、音楽刺激の情動的意味に対する評価が変化すると考えられる。この問題について検証するため、実験 4 と同じ刺激と手続きを用い、参加者に音楽刺激の情動的な意味を「非常に悲しい」から「非常に楽しい」までの 9 段階で評価させた。予測としては、楽しい音楽の直前に楽しい表情が呈示されれば、音楽刺激の楽しいという評価が極端になり、直前に呈示される表情が悲しい表情であれば、音楽刺激の楽しさは低下すると考えられる。同様に、悲しい音楽刺激の直前に呈示される悲しい表情は、音楽の悲しさの評価を極端にし、楽しい表情は、音楽の悲しさの評価を弱めると考えられる。また、判断にかかる時間は実験 4 と同様に、意味が一致していない場合よりも意味が一致している場合のほうが短くなると予測される。

7.2. 方法

7.2.1. 実験参加者

実験には 27 名の日本人大学生(範囲：18—23 歳；平均：19.59 歳；*SD*：1.50)が参加した。うち 16 名が 3 年以上の音楽経験者であり(範囲：18—23 歳；平均：19.94 歳；*SD*：1.77)、残り 11 名には音楽経験は無かった(範囲：18—20 歳；平均：19.09 歳；*SD*：0.83)。全員が右利きで、聴覚と視力はともに正常であり、神経疾患の既往歴は無かった。実験の実施に関しては事前に東京大学倫理審査委員会より承諾を得ており(課題番号：230)、参加者に実験趣旨を十分に説明し、実験に参加する事への同意を得てから実験を開始した。

7.2.2. 刺激と装置

行動テストの反応の記録にパソコンのキーボードを使用した以外は、刺激、装置ともに実験 4 と同じであった..

7.2.3. 手続き

脳波計測を行わず、行動テストのみを実施した。実験 4 の手続きとは、参加者に遂行させた課題の内容が異なり、それに伴って刺激呈示時間を一部変更した。視覚刺激と聴覚刺激の呈示には刺激呈示用ソフトウェアの Presentation(Neurobehavioral Systems 製)を用いた。最初に固視点を 500 ミリ秒間呈示した後、視覚刺激を 500 ミリ秒呈示した。視覚刺激の呈示が終わった時点から 50 ミリ秒の間隔を空けて、音楽刺激を 500 ミリ秒間呈示し、音楽刺激の呈示終了直後に“XXXXX”の文字列を視覚的に呈示した。参加者に対しては、この文字列が呈示されたら、出来るだけ早く正確に、音楽の情動的な意味を“非常に悲しい”から“非常に楽しい”までの 9 段階で評価するよう求めた。半数の参加者では 1 が“非常に悲しい”，9 が“非常に楽しい”を表す事とし、残り半数の参加者では、9 が“非常に悲しい”，1 が“非常に楽しい”を表す事とした。全ての試行で回答を得るために、反応を返すまでの時間には制限を設けなかった。反応が得られてから 2000 ミリ秒後に次の試行に移行して、再び固視点を呈示した。

7.2.4. 解析

全ての参加者の回答について 1 が“非常に悲しい”，9 が“非常に楽しい”に対応するように読み替えを行った。一致条件における楽しい音楽刺激，不一致条件における楽しい音楽刺激，一致条件における悲しい音楽刺激，不一致条件における悲しい音楽刺激に対する評価のスコアを、それぞれ平均した。更に、表情と音楽刺激の間の意味が一致しているかどうか楽しい音楽刺激や悲しい音楽刺激の評価に対して与える影響や、その影響における音楽経験の効果を調べるために、条件(一致／不一致条件)と音楽の種類(楽しい／悲しい)を被験者内要因、音楽経験を被験者

間要因として繰り返しのある ANOVA を実施した。また、反応時間についても同様に条件や音楽の種類ごとに平均値を算出し、更に条件と音楽の種類を被験者内要因、音楽経験を被験者間要因とする ANOVA を実施した。

7.3. 結果

音楽刺激に対する評価は、一致条件における楽しい音楽刺激で 7.16 ($SD = 0.47$)、不一致条件における楽しい音楽刺激で 6.74 ($SD = 0.71$)、一致条件における悲しい音楽刺激で 3.07 ($SD = 0.73$)、不一致条件における悲しい音楽刺激で 3.44 ($SD = 0.73$)であった(図 7.1)。音楽の種類効果が有意だった事から($F(1, 25) = 475.66, p < 0.001, power > 0.99$)、表情と音楽刺激の間で情動的意味が一致しているかどうかに関わらず、楽しい音楽は悲しい音楽よりも楽しいと評価されている事が確かめられた。また、条件と音楽の種類間に有意な交互作用が検出されたので($F(1,25) = 14.35, p < 0.005, power = 0.95$)、楽しい音楽と悲しい音楽とで別々に条件の効果を調べた。この結果、楽しい音楽は、不一致条件に比べ一致条件で、より楽しいと評価された事が確かめられた($t(26) = 3.51, p < 0.005$)。また、悲しい音楽についても、不一致条件に比べ一致条件で、より悲しいと評価されていた事が確かめられた($t(26) = -4.47, p < 0.001$)。音楽経験の主効果が検出されたが($F(1,25) = 3665.35, p < 0.001, power > 0.99$)、音楽経験の要因を含む交互作用が見られなかった事から(条件×音楽経験： $F(1,25) = 0.02, p = 0.88, power = 0.05$ ；音楽の種類×音楽経験： $F(1, 25) = 2.62, p = 0.12, power = 0.34$ ；条件×音楽の種類×音楽経験： $F(1,25) = 0.69, p = 0.42, power = 0.13$)、表情と音楽の不一致が音楽の情動的意味の処理に与える影響に対して、音楽経験による有意な差異はなかった事が示された。また、条件の主効果は有意ではなかった($F(1,25) = 0.51, p = 0.48, power = 0.11$)。

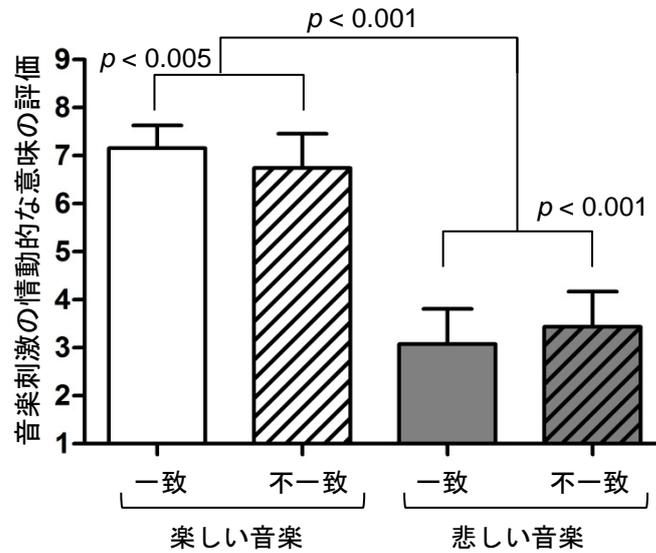


図 7. 1. 音楽刺激の情動的な意味に関する評価. 1 が“非常に悲しい”, 9 が“非常に楽しい”を表す.

音楽刺激に対する評価の反応時間は、一致条件における楽しい音楽刺激で 1191.47 ミリ秒 ($SD = 395.33$), 不一致条件における楽しい音楽刺激で 1271.68 ミリ秒 ($SD = 459.83$), 一致条件における悲しい音楽刺激で 1195.43 ミリ秒 ($SD = 391.47$), 不一致条件における悲しい音楽刺激で 1230.46 ミリ秒 ($SD = 385.92$)であった(図 7. 2). 反応時間は不一致条件より一致条件で短くなった事が観察され, この傾向が統計的にも有意である事が確かめられた($F(1,25) = 13.50, p < 0.005, power = 0.94$). 音楽の種類や音楽経験の要因を含む主効果, 交互作用はいずれも有意にはならなかった(音楽経験の主効果: ($F(1, 25) = 249.68, p < 0.001, power > 0.99$; 条件×音楽経験: $F(1,25) = 0.45, p = 0.51, power = 0.10$; 音楽の種類の主効果: $F(1, 25) = 0.92, p < 0.35, power = 0.15$; 音楽の種類×音楽経験: $F(1, 25) = 0.20, p = 0.66, power = 0.07$; 条件×音楽の種類: $F(1,25) = 3.69, p = 0.07, power = 0.46$; 条件×音楽の種類×音楽経験: $F(1,25) = 1.99, p = 0.17, power = 0.27$).

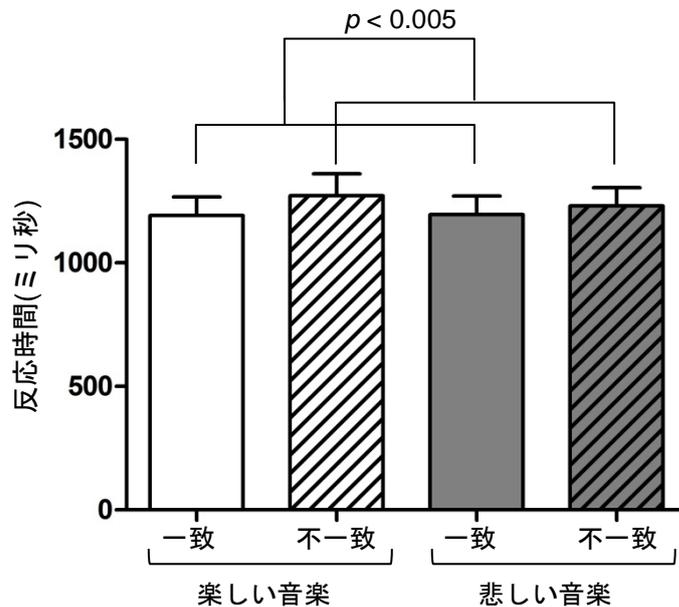


図 7. 2. 各条件における，楽しい音楽と悲しい音楽の情動的意味の判断における反応時間.

7. 4. 考察

実験 5 では，実験 4 の結果を補足するため，情動処理に関する視聴覚統合プロセスが，音楽の情動的意味の最終的な解釈に対して，どのように影響するかを検証した．ここで得られた結果は，表情と音楽が情動的に一致していないときに比べて，それらが一致している時には，音楽の情動的な意味に対する評価が極端になる事を示している(図 7. 1.)．また，この事から，音楽の直前に表情が呈示されると，音楽の情動的な意味に対する認知が，表情の表す意味に引きつけられるような効果が現れた事が示唆される．このような解釈は，人間の表情と声色に対する認知の間で生じる相互作用に関する de Gelder & Vroomen (2000)の発見とも一貫している．これまでの研究から，人間の音声と音楽に対する聴覚的な処理は一部共有されている事が示唆されているが(保前・多賀，2008)，実験 4，5 は更に，視覚的情報が自動的にそれらの情動的意味の処理に影響する，という共通点を新たに示した．

8. 総合考察

本研究の目的は、音の情報が記憶され、外界の変化に際してそれが更新されていく一連の過程において、聴覚以外の入力果たす役割と、それに対し個人の経験がもたらす影響について検討する事であった。この問題に取り組むため、音系列の聴覚的な認知に対し、それを作りだす演奏行為に纏わる諸要因が与える影響について注目し、5つの実験を行った。

8.1. 音に合わせて身体の動きを調整する行為の、聴覚的処理に対する促進効果(実験 1,2)

音に合わせて身体の動きを調整する行為が、聴覚的処理に与える影響について検討するため、系列的な打鍵動作や(実験 1)、同期タッピング(実験 2)を行いながら音系列を学習した後で、その音系列の聴覚的な処理を促進するかを、事象関連電位を指標として検証した。

打鍵動作と同期タッピングの違い、それらが聴覚処理に与える影響の違い

これら2つの実験の比較から示唆される事は、音系列の聴覚的な処理そのものに働きかけて、聴覚的な記憶の形成を促したのは、系列的な打鍵動作のほうだけであり、同期タッピングのほうでは聴覚的な記憶形成への影響が検出されなかったという事である。

打鍵動作と同期タッピングは、どちらも動作の制御に体性感覚と聴覚間での緊密な連絡が必要となる点で共通しているが、一方で大きな違いもある。系列的な打鍵動作の中には、身体の動きのタイミングを音系列に対して同期させるという要素と、複数の指で起こるタッピング動作を系列的に構成して一連の演奏行為にまとめるという要素の、少なくとも2つの動作要素が含まれていると考えられる。単一の指による同期タッピングでは、このうちの後者の要素が含まれていない。従って、これらの特徴と、実験 1,2 で得られた結果とを考慮すると、音に合わせて身体の動きを調整する行為が音系列の記憶形成を促す効果を持つには、前提として、聴覚と運動との間にこのような系列的な繋がりが形成されている事が必要であると考えられる。

また、打鍵動作と同期タッピングの間の 2 つ目の違いとして、動作の制御のために注意を向ける音情報の側面、が挙げられるだろう。同期タッピングには音入力タイミングの情報が、それに加えて打鍵動作では音高の推移の情報が必要となると考えられる。このような違いが、音系列の記憶形成への促進効果の有無に影響したのではないだろうか。

まず打鍵動作についての検討を行った実験 1 では、音系列の聴覚的な入力の中で、音高の推移に関する情報が動作の遂行に必要であったので、聴覚的な記憶の形成や更新が促進された可能性がある。実験 1 では、聴覚刺激を手本として打鍵動作を行わせ、彼らが弾いた音を聴覚フィードバックとして与えた。同一の音系列を演奏する機会を繰り返し設けたので、彼らはフィードバックに基づいて動作を補正し(Zatorre, Chen, & Penhune, 2007 参照)、演奏を獲得した。また、この演奏獲得における一連の過程の中で、音系列の聴覚的記憶もまた補正されたと推測される。演奏の獲得の過程では、常に手本となる音系列が呈示されている状態ではあったが、学習が進んでくると、手本の音を聞いてから指を動かすのではなく、手本と同時に、またはやや先んじて打鍵動作を行う様子が観察された。従って、打鍵動作の制御は、聴覚的な記憶等に基づくフィードフォワードと、フィードバックのシステムによって維持されたと考えられる(Zatorre et al., 2007 参照)。より正しい打鍵動作を作り出すには、その動作によって作り出される音系列への期待が形成される必要があり、その期待が形成されるには、音系列に関する正しい聴覚的記憶が必要である。打鍵の動作の結果として返ってきた聴覚フィードバックが、もし手本の音刺激と異なっていたならば、運動系の誤差を補正するか、あるいは既に保持されている音系列の聴覚的記憶を補正する事になっただろう。このような過程を繰り返す事で音系列に関する正しい聴覚的記憶が保持されるようになり、更に聴覚情報を何度も呼び出してリハーサルする事にもなるので、その情報が長期記憶として保持されやすくなったと推察される。

一方、同期タッピングについて検討した実験 2 では、音系列中の音高の推移に関する情報が動作の遂行にとって重要でなかったために、音系列の音高の推移に関する聴覚的な記憶形成に対して動作が与える影響が検出されなかったのだと考えられる。実験 2 では参加者に音刺激に合

わせてタッピングを行うように求めたが、特に聴覚フィードバックは与えなかった。従って、彼らは、彼ら自身のタッピング動作による体性感覚のフィードバックと、聴覚刺激のタイミングのずれに基づいて動作の補正を行っていた事になる。この場合、動作の制御に利用される聴覚情報の重要な側面は、時間の情報、つまりタイミングであり、音高の推移に関する情報は重要性が低い。このような理由から、同期タッピングにおいては聴覚的記憶における音高の推移の情報が比較的補正され難かったと推測される。また、動作の補正のために音高情報が繰り返し呼び出される必要性がなかったために、同期タッピングは打鍵動作のように、聴覚的記憶形成そのものを促進させる働きを示さなかったのだと考えられる。

しかしながら、実験 2 では、同期タッピングを行いながら学習した音系列で逸脱音が出現すると、その音に対する意識的なエラー検出や文脈の更新を反映した脳活動(P300)が顕著に表れた。同期タッピングに関しては、動作の最中は、音の記憶の形成に対して直接的な影響は及ばさないが、その特定の聴覚入力に対して注意を向けさせる効果を持つ事が示唆される。同期タッピングを行いながら音系列を学習した後で、その音系列中に逸脱音が生じれば文脈の更新を促進させる効果を持つので、同期タッピングは音系列の学習を将来的に補助する効果をもつ、と言う事もできるだろう。

音楽経験や能力との関わり

実験 1 と 2 で得られた、動作を伴って音系列を学習する事が音系列の聴覚的な処理に与える促進的な効果には、個人の音楽経験や音楽的な能力が影響するという事が示唆された。このような音楽経験や能力による影響は、行った動作の種類が打鍵動作であった場合にも(実験 1)、同期タッピングであった場合にも(実験 2)観察された。実験 1 で打鍵動作が聴覚記憶形成を促す効果は、音感テストのスコアが高い群のみで現れ、スコアの低い群では見られなかった。ただし、音感テストのスコアは個人の音楽経験とも関係性があり、打鍵動作が聴覚記憶形成を促す効果が、音感の能力の高さではなく、幼い頃に音楽訓練を始めた事によって獲得された何かしらの他の能

力によって影響された可能性が残されている。また、実験 2 では同期タッピングの動作が音系列への注意を引きつける効果が観察されたが、この効果はタッピングのパフォーマンスが優れている参加者においてより大きくなった一方で、音感テストのスコアとの有意な関係性は確認されなかった。これら相違点は、打鍵の動作と同期タッピングの動作が、いずれも聴覚—運動ネットワークの緊密な相互の情報のやりとりを基盤として成立する行為であるにも関わらず、それらが異なる経路を辿って聴覚処理に影響を及ぼしていた事を示唆している。

打鍵動作が聴覚的な記憶形成に影響したときに関与した音楽的な能力の候補として、特定の楽器演奏に関わる聴覚—運動ネットワーク(Baumann et al., 2007)が挙げられる。ピアノの練習を幼い内に始めた事によって、ピアノに特化した聴覚—運動感覚間のフィードバック、フィードフォワードによる動作制御システム(Zatorre et al., 2007 参照)が発達し、このシステムを介した聴覚的な記憶の形成が向上したのではないかと推察される。

一方で、同期タッピングが聴覚的な処理に与えた促進的な効果に関しては、正確な同期タッピングを遂行する能力の高さが関与している可能性が、実験 2 で示された。音に合わせて身体の動きを調整する能力は、特別な訓練を行わなくとも獲得される物であるとされる(Zentner & Eerola, 2010)。また、音楽経験に伴って指の動きを音入力に同期させる行為の精度や柔軟性は音楽経験によって向上するが、(Aoki et al., 2005; Baer et al., 2013; Ericsson et al., 1993; Repp & Doggett, 2007; Sloboda, 2000 参照)指の運動のタイミングを調整する能力は楽器全般に必要な能力であるので、ピアノに限らず様々な種類の楽器を用いた音楽経験等によって同期タッピングの能力は向上すると考えられる。同期タッピングの動作が音系列に対する聴覚的な処理を促進した事に関しては、このような、特定の楽器の訓練経験に依らないような、タッピングの遂行に強く関わるネットワークによる貢献が大きいのではないだろうか。

しかしながら本研究の限界として、タッピングをより正確に行う事の出来た参加者で、その身体動作の調性能力の高さか、あるいは音系列と正確に同期した体性感覚の入力があったという事実か、そのどちらが、同期タッピングが聴覚処理に与える影響の基盤として働いたのかは特定す

る事が出来ない。これを確かめるには、自ら同期タッピングを行った場合と、それと同じタイミングで外部から触覚の入力を与えた場合とを比較するような追加実験が必要であると考えられる。だが、同期タッピングの遂行に関わる脳構造の働きに着目すると、同期タッピングの遂行に関わる能力が聴覚的な処理を促進する効果の基盤となり得る、という立場を支持するような説明が成り立つかもしれない。次の項で、小脳と脳幹の働きについて検討した。

同期タッピングに関係する脳の構造が、音系列に対する注意を促す基盤となる可能性

小脳と皮質を繋ぐ回路は、感覚運動(sensory-motor synchronization)におけるタイミングの制御や、フィードバックに基づいた学習、時間的な予測などに関わっている(Repp, 2005 参照)。また小脳は運動の制御だけでなく、注意の制御への関わり(Akshoomoff & Courchesne, 1992; 1994; Allen, Buxton, Wong, Courchesne, 1997; Gottwald, Mihajlovic, Wilde, Mehdorn, 2003)を通して P300 の発生にも影響を与える事から、この脳部位は、実験 2 で得られた結果を説明する要素として重要な候補の 1 つと考えられる。特定の音系列の学習の際に同期タッピングを行う事は、小脳の活性化を促した。その活動の高まりに伴って、音系列に対してより注意が向けられるようになり、結果として、その音系列を同期タッピング無しに聴取しているときでも、その音、あるいはその音の変化に注意が向きやすくなった、という説明も可能であろう。また、音楽家と非音楽家とでは小脳の構造や機能がともに異なる事から(Münste, Altenmüller, & Jäncke, 2002)、小脳には可塑性があり、音楽的な訓練を通してその発達が促される事が示唆される。これらの事を考慮すると、実験 2 における、同期タッピングの能力の高さと、同期タッピングの動作が聴覚的な処理に与えた効果の大きさとの因果関係を解釈することが可能である。すなわち、同期タッピングの能力の高さが小脳の発達の度合いによって決まるとすると、音楽経験を通して小脳の働きが向上している人では、小脳のより優れたタイミング制御によって精度の高い同期タッピングを実現し、同時に、小脳の働きの一つである注意の制御をよりよく働かせて、同期する対象の音系列への注意が高めた、という仮説を立てる事が出来るだろう。

だがこの解釈は、Lahav et al. (2007)で得られた結果と照らし合わせると、部分的に矛盾が生じる。Lahav et al. (2007)の研究は非音楽家を対象とした実験で、打鍵を伴った音系列の学習を行うと、その音系列を聴取しただけで運動関連の脳領域が活性化するようになる事を示した。更に詳しく言えば、彼らは、打鍵動作を伴って学習した音系列(系列1とする)そのものを聞いているときの脳の活動と、学習した音系列と同じ音を使って、それらを並び替えた系列(系列2とする)を聞いているときの脳の活動、そして学習した音系列とは異なる音を使って、新たに作成した系列(系列3とする)を聞いているときの脳の活動を比較している。小脳の活動の違いに焦点を当てると、系列2に比べれば系列1を聴取しているときに小脳の活動が高まっているが、系列3と1を比較したとき、小脳の活動の違いは報告されていない。音楽経験者を検証対象とした本研究実験1で行った打鍵あり条件と打鍵なし条件との比較は、これらの内、系列1と2の比較を行った時と、設定が近い。従って、音楽経験者での小脳の振る舞いが非音楽家のそれに倣うとすれば、実験1で起こり得る学習条件間の差は、小脳の活動の変化に起因するものでない可能性が高い。更に系列的な打鍵動作の中に同期タッピングの要素が内包されているとすると、実験2の状況下においても、動作を音系列に同期させるかどうかによって、その後音系列を聴取したときの小脳の活動に変化があるとは考え難い。同期タッピングを行いながら学習した系列でも、動作を同期させずに学習した系列でも、音系列を単に聴取する際には、小脳の活動が関与する度合いには大きな差が無いと推測される。よって、音系列に対して動作を同期させる事が、その音系列に対する聴覚的な注意を高めるという効果に対して、小脳が関与しているという考え方には矛盾があるように思われる。

しかしこの点に関しても、小脳の構造や変化が経験によってもたらされる(Münte et al., 2002)という事を考慮すれば、完全な矛盾点とも言い切れない。打鍵動作や同期タッピングを伴った音系列の学習が音系列の聴覚的な処理に与える影響に対して、小脳が果たす役割が増大する可能性は、未だ残されたままだ。この問題を解消するためには、将来的にfMRI計測などを通して直に小脳の活動の変化を観察し、音系列に同期した動作が聴覚的な処理に与える効果との関係性を検

討する事が望まれる。

脳幹もまた注意の制御に基づく聴覚処理(Galbraith, Bhuta, Choate, Kitahara, & Thomas, 1998)に関わっている事から、これを、同期タッピングの遂行に関わる能力が聴覚的な処理を促進する効果の基盤の第二の候補として挙げる。脳幹の活動は、外部からの音入力があったとき、その中の無視されるべき情報よりも注意されるべき情報に対して、より良く同期する事から(Galbraith et al., 1998)、注目すべき音情報に対する後の聴覚的な処理を促進する働きを持っていると考えられる。また、近年、脳幹が音入力と同期するというこの性質が、音入力中の拍に合わせた同期タッピングを安定遂行する能力の高さと関係している事が明らかになった(Tierney & Kraus, 2013)。

これらの事から、実験 2 の中でも、同期タッピングで高いパフォーマンスを示した参加者では、脳幹が音入力に同期する働きが特に強く現れ(Tierney & Kraus, 2013 参照)、全体的な聴覚処理を促進していたと推測される。また、2 つ呈示した音系列の内の片方に対してのみ同期タッピングを行うという課題を遂行させたために、その対象となった音系列に対して「注目すべき対象」というラベル付けがなされた可能性がある。この過程には、脳幹の、注目されるべき情報と無視されるべき情報の振り分けに関与するような性質(Galbraith et al., 1998)が、関わっているかもしれない。この脳幹のレベルで、「注目されるべき」情報として分類された音系列に対して、特に同期タッピング能力の高い人では、その脳幹の活動が同期する働きが生じて、その後の聴覚処理を促進させたという説明が可能であろう。このような、同期タッピング能力の高さと相関のある脳幹の活動を通して、タッピングを同期させる対象となった音系列に対して注意が集まりやすくなるという効果がもたらされたのではないか。しかし、そうだとすると、脳幹における振り分けの処理の時点で、「注目されるべき」と分類させる方法が、必ずしも同期タッピングである必要性はないのかもしれない。この点は、同期タッピングの能力の高さと脳幹の音入力に対して同期する性質との間の因果関係の検証を通して、今後検証していきたい点である。

8.2. 聴覚と聴覚以外の入力 of 系列的対応という要素は運動一音でのみ記憶に貢献(実験 1, 3)

聴覚以外からの感覚入力が、音系列の聴覚的处理に与える影響の中で、聴覚入力と聴覚以外の感覚入力の間で成立する系列的なむすびつきが、どれ程の重要性を持ち得るのかについて検証するため、系列的な動作の実施(実験 1)と系列的な視覚刺激の呈示(実験 3)が音系列の聴覚的な記憶形成に与える影響の違いについて検討した。音系列の学習時、打鍵動作と視覚刺激はどちらも音系列と系列的な対応関係を形成していたが、聴覚的な記憶の形成に対する促進効果は打鍵動作のみ見られ、視覚刺激の呈示を行ったときには検出されなかった。

系列的な視覚刺激の提示が音の聴覚処理に与える影響は検出されなかった

先に述べたように、系列的な打鍵動作が聴覚的な記憶の形成に与える促進効果は、打鍵動作の獲得過程で起こる聴覚的な記憶の更新による作用であったと考えられる。一方で視覚刺激系列の呈示の仕方が音系列内の音高の推移と対応していたとしても、既に保持している聴覚的な記憶を補正する必然性はない。これらの事から、打鍵動作が聴覚的な記憶に影響するのと同じ経路で、視覚刺激系列が聴覚的な記憶形成に影響する事は、そもそも考え難い。

視覚刺激が聴覚的な記憶に作用するとすれば、それにはどのような原因があると考えられるか。その 1 つとして、聴覚的な入力の補完が挙げられる。聴覚的な情報に何らかの曖昧さがあるとき、その情報が視覚(McGurk & MacDonald, 1976; Naätänen & Winkler, 1999)や運動の感覚(Repp & Knoblich, 2007; 2009)で補完されたものが、聴覚的な体験として認識される事がある。よって、もし実験 3 でも視覚と聴覚の情報が上手く統合されていたとしたら、音系列の聴覚的な情報は、実際の聴覚入力よりも視覚的に受け取った情報に引き寄せられた内容として、最終的に記憶に留まるだろうと予測された。だが、観察された結果からは、視覚的な情報が音系列内の音高の推移に対応していたかどうかによって、聴覚的な記憶の形成に影響されない事が示唆された。

視覚刺激の呈示が聴覚的な記憶に影響する可能性について

系列的な視覚刺激の呈示が聴覚的な処理に与える影響が検出されなかった原因としては、視覚刺激と聴覚的な刺激の間の対応関係が十分に確立されていなかった可能性が挙げられる。この点を改善すれば、視聴覚情報間の対応関係に基づいて、視覚的な情報が与える内容に、聴覚的な認知が引き寄せられるような効果が得られるかもしれない。視覚的な入力と聴覚的な入力の間の系列的な対応関係を参加者個人の中に確立するための改善点の候補として、第一に学習期間、第二に視覚刺激の様式を挙げる。

まず、学習期間については、これを延長する必要があるだろう。打鍵動作を行いながら音系列を学習する事が、音系列聴取時の脳活動に与える効果について検討した過去の研究では、非音楽経験者を対象とした場合は、数日間の学習期間が設けられた(Lahav et al., 2007; Lappe et al., 2008)。また、音楽経験者を対象とした本研究実験 1 では、同様の影響について検討するために、数十分の学習時間を設けた。視覚と聴覚の間に対応関係が確立されるのに必要な訓練の量は、運動の感覚と聴覚のそれとは必ずしも同じではないが、上記の期間を参考に視聴覚刺激の結びつきを確立させていく期間を延長するのは、有効な手段であると考えられる。

次に視覚刺激の様式については、音系列との系列的な対応関係をより直感的に把握してできるもの、あるいは容易に獲得できるようなものに改良する必要があるだろう。この要件を満たす視覚刺激としては、例えば、楽譜が挙げられる。しかし、視覚刺激の入力がある事によって、聴覚的な入力に対する処理が歪められたり促進されたりする効果を検討するという当初の目的を達成するには、視覚刺激として楽譜そのものを使用するのを避けるべきだと考えられる。なぜならば、音楽経験者と非経験者、更に音楽家の中でも訓練してきた楽器の種類によって、楽譜が聴覚的な知覚に及ぼす影響には大きなばらつきがあるからだ。音楽家の場合、特に視覚情報である音符と聴覚情報である音の高さとを結びつける能力の高い人の場合では、楽譜を見たときに音高が強く想起される(松田ら, 2002)。従って、彼らの場合には、音系列と楽譜の間の対応関係を「系列的な」対応関係によって把握する必然性はないと推定され、寧ろ楽譜上の音 1 つを特定の音高に対応付ける事が可能であると考えられる。音系列と楽譜の間で齟齬があれば、それは、楽譜から

聴覚的にイメージされる音の高さと、実際の音入力との間の差異として知覚される可能性が高い。これは検討の対象として焦点を当てていた視聴覚統合過程とは別物であるので、やはり楽譜の使用は避けるのが妥当ではないだろうか。また、打鍵動作系列や同期タッピングと音系列との間に形成される結びつきに関して見てきたように、短期的な訓練と長期的な訓練の両方の影響の検討を行う事は、その結びつきに関わる神経的な基盤や心理学的な要因を検証する上でも重要だと言えるだろう。視覚刺激系列と音系列に関する検証もこれに倣うとすれば、実験室での短期的な訓練以前の段階で、その訓練に使用する視覚的な刺激から想起される聴覚的なイメージが、音楽的な訓練や能力による影響をできる限り受けにくいよう設定するのがより良い検証方法であろうと考えられる。

これらの事から、実験手続きの改良の過程で、視覚刺激を完全な楽譜にする必要性はないと考えられる。また、実験 3 では視聴覚感覚統合に関わるような脳波成分が現れた可能性がある事、またほぼ全ての参加者が、音高の推移と視覚刺激の位置の推移との系列的な対応関係に気づいていた事から、実験 3 で使用した視覚刺激には音系列との対応関係を確立する資質は一定以上あったと考えて良いだろう。視覚刺激の改善の際には、実験 3 で使用したものを基にし、視覚刺激の移動する幅、色、形、呈示時間などを調整して、音系列との対応関係の確立が音楽経験に関わらず促されるような刺激を作成する事が望まれる。

8.3. 情動的意味の視聴覚統合過程が、聴覚刺激に対する情動認知を変化させた(実験 4, 5)

実験 4, 5 では、表情の刺激に続けて短い音楽の抜粋を呈示して、表情に対する認知が音楽に対する情動的意味処理に与える影響について検討した。その結果、表情の認知が音楽の意味処理の過程に統合される事(実験 4)、この視聴覚統合の過程による影響が、音楽に対する情動的な意味の評価が、直前に呈示された表情の意味に引き寄せられるという、行動レベルでも観察される事(実験 5)が明らかになった。これらの事は、表情と音楽がペアとして呈示される時、視覚刺激が音刺激の情動的な意味の処理過程に影響している事を示唆している。また、これらの視聴覚

間の統合過程において、音楽経験の有無による差は検出されなかった。

経験による影響を更に検討するための今後の課題

実験 4 と 5 では、表情の画像刺激の呈示から音楽刺激に対する情動的な意味の認知が受ける影響は、参加者個人の音楽経験があるかどうかによって変化しない事が示唆された。しかしながら、本当に音楽経験による影響が存在しないかどうかについては、更なる検証が必要であると考えられる。表情と音楽の情動的な意味の結びつきは、生まれながらに備わっているというのでも無い限り、発達の何処かの時点で経験や環境による影響を受けていると考えるのが妥当であろう。本研究の結果だけから、この問題に結論を出すのは早計である。

音楽経験に伴って、情動的な意味に関する視聴覚統合の過程が変化するかどうかについて検証するための方法の 1 つとして、視聴覚統合に関わる上側頭回(Superior temporal gyrus; STG)を中心とした側頭部の脳活動に対する個人差を検証する事を、ここに提案する。行動の上では、表情の呈示によって音楽に対する情動認知が受けた影響と(本研究実験 5)、人間の音声に対する情動認知が受ける影響(de Gelder & Vroomen., 2000)とが類似しており、かつ、人間の表情と音声の視聴覚統合の過程には、両側の STG 後部(posterior STG; pSTG)や視床が関与しているとされるからだ(Kreifelts, Ethofer, Grodd, Erb, & Wildgruber, 2007)。もし、表情—音楽、表情—音声に関する視聴覚統合過程の両者が同じ神経基盤に依拠しているとする、表情と音楽の情動的な意味の統合過程に対しても STG が関与する可能性は高いと考えられる。

また、音楽経験による影響を検討するための指標として STG を候補とするのには、もう 1 つの理由が挙げられる。それは、視聴覚統合過程を反映した STG の活動が、経験を通して獲得された視覚刺激と聴覚刺激の間の対応関係の確かさと相関する事を示唆する結果が、過去に示されているためである。Paraskevopoulos, Kuchenbuch, Herholz, & Pantev (2012)は、非音楽家比べて音楽家では、視覚刺激の空間的な位置と聴覚刺激のピッチの高さとの知覚的な統合過程において、下前頭回、視覚皮質などに加えて右側 STG の活動がより高まる事を示した。このよう

に、STG の活動量は視聴覚統合の過程に対する音楽的な経験の影響と関連していると考えられ、この関係性を利用する事で、表情と音楽の情動的な意味の統合過程に関して音楽経験がどのような効果を持つ事が検討できると考えられる。STG の活動の相関関係が、音楽経験に影響されるのであれば、その複数感覚統合の働きが経験を通して獲得された物である事を示す事になるだろう。反対に音楽経験による影響が無いのであれば、表情と音楽の情動的な意味を統合する働きが元々備わっていたという立場か、或いは、表情と音声の間に生じるような、他の視聴覚統合過程を可能にするためのプロセスが、表情と音楽の間で生じる情動的な意味の統合過程に対しても働いたという立場を支持する事になるだろう。

また、表情と音楽の統合過程に対する音楽経験の影響を検討する上で STG の他にも、下側頭溝(superior temporal sulcus; STS)、中側頭回(middle temporal gyrus; MTG)といった、これまでの研究で視聴覚統合との関連が示されてきた側頭部の領域に注目するべきだと考えられる。例えば、Steinbeis & Koelsch (2008)は、和音(協和音と不協和音)と単語における快または不快という情動的な意味の統合過程を検討するために、音楽経験者を対象とした fMRI 計測と EEG 計測の両方を行った。彼らは、N400 成分に反映されるような視聴覚統合過程について、和音が単語に先行して呈示された場合には右側の MTG、反対に単語が和音に先行した場合には右側の後部 STS が関与していた事を示した。非音楽家を対象に非情動的な意味の統合過程について検証した Kelsch et al. (2004)の研究では、視覚刺激(単語)と聴覚的な刺激(音楽または文章)を対にして呈示し、それらの意味が一致するかどうかによって、脳波の N400 成分の振幅が変化する事を示した。更に彼らは、ダイポール解析を実施して、単語に先行した刺激が文章であった場合でも、音楽であった場合でも、N400 の信号源が MTG の後部であった事を示した。今後の研究において、表情と音楽の視聴覚統合過程にどの脳部位が特に関与するのかを検討する際には、これらの研究から得られた知見と照らし合わせる事により、表情—音楽間の統合過程が、どのような種類の視聴覚統合過程に、より近い神経基盤を基に成り立っているのかという問題を、新たに検討する事もできるだろう。また、音楽刺激と視覚刺激の意味に関する統合過程の検証で、個人の音楽

経験による影響が検討されてこなかった事を考慮すると(Steinbeis & Koelsch, 2008); Kelsch et al., 2004), 表情と音楽の情動的意味の統合過程に関する音楽経験の影響を検討する事は, 視聴覚統合の過程に個人の長期的な経験が与える影響について, 新たな示唆をもたらす事に繋がると考えられる.

視聴覚間の情動的な対応関係が, 聴覚的な記憶へ影響する可能性について

過去の研究から, 強い情動体験を引き起こすような刺激は, そうでない刺激に比べて, 扁桃体の働きを高めて, 記憶が固定化するのを促す事が明らかになっている(McGaugh, 2003). 実験 4, 5 で使用した表情と音楽の刺激ペアに関して言えば, ペア内で情動的意味が一致している時には, それらが一致していない時よりも, 聴き手に強い印象を与え, 更に, より強い情動体験を引き起すと推測される. 従って, 表情と音楽が情動的に一致している場合には, 聴覚的な記憶の形成が促され, それらが情動的に一致していない場合には相対的に聴覚的記憶の形成が妨げられるのではないだろうか. また, この推測は, 音楽の情動的な意味に対する認知に扁桃体が関わっているという報告とも一貫している(Gosselin, Peretz, Johnson, & Adolphs, 2007). Gosselin et al. (2007) によれば, 扁桃体を損傷した患者では, 恐怖(scary)や悲しみ(sad)といったネガティブな情動を表現した音楽に対する認知が阻害されていた一方で, 楽しさ(happy)を表した音楽に対する認知は正常であった. この発見に基づけば, 表情の情動的な意味が音楽の情動処理に影響し, 扁桃体の働きを通じて聴覚的な記憶を強めるような作用が, 楽しい音楽よりも悲しい音楽で顕著に表れる事が予測されるが, 今後の研究で詳細に検証が為される事が期待される. また, この問題に取り組む際には, 音楽の情動的な意味に対する認知と, 音楽によって聴き手に引き起こされる情動は必ずしも等しくないという事を考慮しなければならないだろう. 特に, 音楽家では, 短調や長調の特性を持った特定の旋律に関して, それらに対して知覚される情動(perceived emotion)よりも, それらによって引き起こされる情動(felt emotion)のほうが, 情動の強さが低下する(Kawakami, Furukawa, Katahira, Kamiyama, & Okanoya, 2013). 実験 4, 5 で使用し

た音楽刺激の選抜に当たっては、音楽経験が音楽の情動的な意味の評価に影響しないよう配慮したが、選抜された音楽刺激によって引き起こされる情動が音楽経験者と非経験者との間で異なっていたかどうかは検討しなかった。今後の課題として、情動的な意味の処理に関わる視聴覚統合の過程が、どのように聴覚的な記憶の形成に関わるのか、そしてその過程に音楽経験がどのような影響を与えるのか、聴覚的情報に対して知覚される情動とそれによって引き起こされる情動とがそれぞれどのような働きをするのか、といった諸問題について検証する事は、情動と聴覚的な記憶形成のプロセスの間の関係性をより深く理解する事に繋がるだろう。

8.4. まとめ

複数感覚統合の過程で、聴覚的な処理が聴覚以外の感覚入力からどのような影響を受けるのかを知る事は、人間が統一的に環境を把握するために、音の情報をどのように利用しているのかという問題を検討するための有効な手段となり得ると考えられる。本研究では視覚(実験 3—5)や運動の感覚(実験 1, 2)からの入力が、それぞれどのように聴覚入力に関する認知処理や記憶の形成に影響するのか、そしてそれらの影響に対して、音楽的経験がどのような効果をもたらすのかについて検証した。実験 1 では音系列を作り出す系列的な打鍵動作、実験 2 では音に同期したタッピング、実験 3 では音系列に対応した系列的な視覚刺激、実験 4 と 5 では音刺激と情動的な意味が対応した表情の画像が、それぞれ聴覚的な処理に与える影響について検討した。

実験 1—5 を通して、視覚的な刺激や運動の感覚は、いずれも聴覚入力との関係性がより強い場合に聴覚的な期待を生じさせる効果を持つ事が示された(図 8. 1.)。特に聴覚的な系列とそれを生成する動作の系列との間の対応関係は密接で、ピアノを弾くという行為は聴覚のフィードバックによる運動の制御を通して聴覚的な記憶を更新し、音系列に関する聴覚的な記憶の形成を促す事が示唆された(実験 1)。系列的な打鍵動作に含まれる動作の要素として、身体の動きのタイミングを音に合わせて調整する事(実験 2)と、系列的である事(実験 3)の 2 つの事柄が聴覚的な記憶の形成に与える影響について、更に検討した。実験 2 では、音系列に同期したタッピングを行

った後では、その音系列中に希に生じる逸脱音に対する意識的なエラー検出活動を促進されるなど、同期タッピングによって音系列に対して注意を促すような効果もたらされる事が示唆された。実験 3 では、系列的な視覚刺激を呈示する事による、聴覚的系列刺激の記憶形成に対する影響について検討したが、そのような影響は検出されなかった。しかし、これに関しては実験の刺激や手続きに改良の余地があり、将来的に再検討すべき課題として位置づけられる。実験 3 と同じく、実験 4 と 5 では視聴覚統合の過程が聴覚処理に与える影響について検討したが、実験 3 では音高に関わる聴覚処理の検討を行ったのに対し、実験 4, 5 では聴覚処理の過程で抽出される音入力の情動的な意味に関する検討を行った。結果からは、表情と音楽に対する情動的な意味の認知過程において、視聴覚の情報が統合される事、またその統合過程が、音楽に対する印象を表情の表す情動へと引き寄せるという効果となって表出する事が示唆された。実験 4, 5 で明らかになった視聴覚統合過程が聴覚的な記憶形成に与える影響については、今後の研究で検討していきたい。

また実験 1-5 を通して、複数感覚統合が聴覚的な処理へ与える影響に、音楽的な経験が貢献するものとそうでないものがある事が示唆された。打鍵動作や同期タッピングが聴覚処理に与える効果は、それぞれの動作を支える脳内の聴覚一運動ネットワークに支えられている事、そのネットワークの構築には個々人の特定の経験が大きな影響を及ぼす事が示唆された(実験 1, 2)。一方で、情動的な意味処理の過程で起こる視聴覚統合プロセスには音楽経験の影響が見られず(実験 4, 5)、聴覚以外からの感覚入力聴覚的な記憶や期待に及ぼす効果は、特定の音楽経験や音楽能力に依存したものと、音楽経験に関わらず日常の生活の中で形成される複数感覚統合処理に基づくものがあると解釈される。これらの事を利用すれば、複数感覚統合の過程が認知プロセスのどの段階で生じ、それらがどの程度経験に依存するものなのかという問題について、更に発展した研究が可能になるだろう。

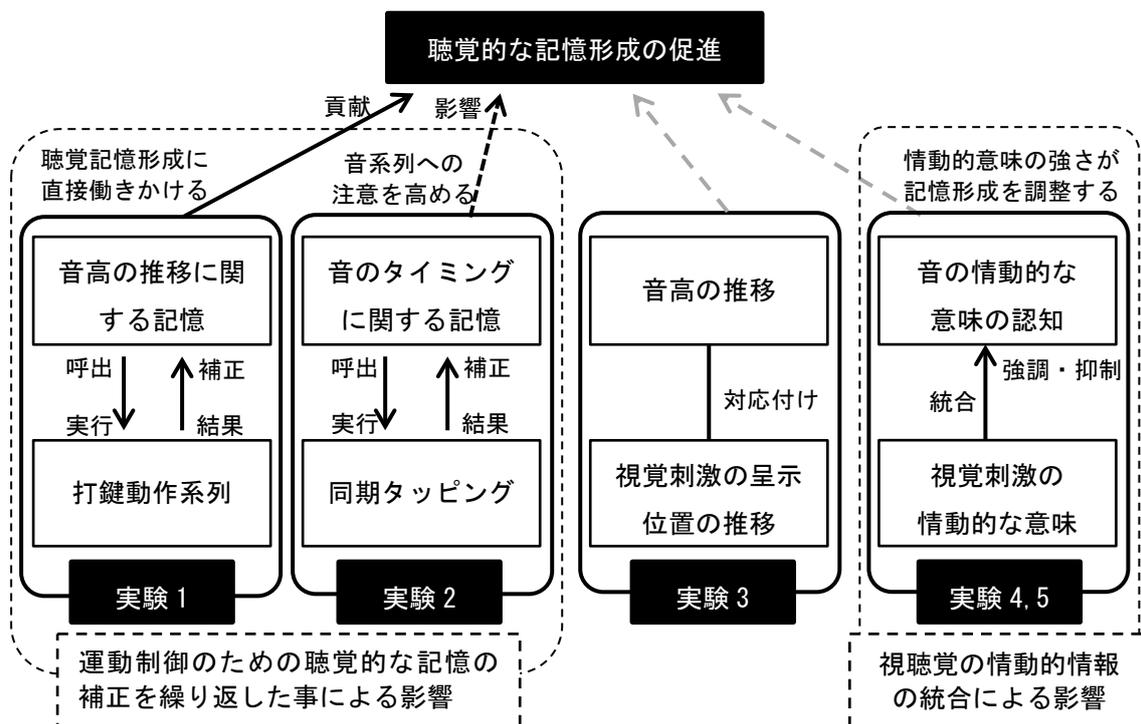


図 8. 1. 聴覚性系列記憶の形成促進に関わる要因

謝辞

本研究の実施にあたり、岡ノ谷一夫教授(東京大学大学院総合文化研究科)をはじめ、研究科の諸先生方、所属研究室の研究者や学生の方々から大変重要かつ貴重なご助言を賜りました事に、深く感謝の意を表します。また実験 1 では、立教大学の堀耕治教授(立教大学文学部(当時))をはじめ、研究室の学生、共著者の皆様から多くのご助言とご指導を賜りました。実験 4 では岩永光一教授(千葉大学工学研究科)をはじめ人間工学研究室の皆様から、工学的な視点からのアドバイスを頂戴し、研究を発展させる事ができました。実験 1 と 4 の実験には、理化学研究所 生物言語研究チームの機材を、実験 2, 3, 5 では東京大学 岡ノ谷研究室の機材を使用させていただきました。脳波計による研究の方法論について直接ご指導下さり、また実験 1 と 4 の共著者として多くのご助言を下されたアブラ・デリシャット氏に、重ねて感謝の意を表します。

参考文献

- Abla, D., Katahira, K. & Okanoya, K. (2008). On-line assessment of statistical learning by event-related potentials. *J Cogn Neurosci* 20, pp. 952–964. doi:10.1162/jocn.2008.20058.
- Abla, D. & Okanoya, K. (2009). Visual statistical learning of shape sequences: an ERP study. *Neurosci Res* 64, pp. 185–190. doi:10.1016/j.neures.2009.02.013.
- Akshoomoff, N. A. & Courchesne, E. (1992). A new role for the cerebellum in cognitive operations. *Behav Neurosci* 106(5), pp. 731-738. doi: 10.1037/0735-7044.106.5.731.
- Akshoomoff, N. A. & Courchesne, E. (1994). ERP evidence for a shifting attention deficit in patients with damage to the cerebellum. *J Cogn Neurosci* 6(4), pp. 388-399.
- Allen, G., Buxton, R. B., Wong, E. C., Courchesne, E. (1997). Attentional activation of the cerebellum independent of motor involvement. *Science* 275, pp. 1940-1943..
- Aoki, T., Furuya, S., & Kinoshita, H. (2005). Finger-tapping ability in male and female pianists and nonmusician controls. *Motor Control* 9, pp. 23-39.
- Aoyama, A., Endo, H., Honda, S., & Takeda, T. (2006). Modulation of early auditory processing by visually based sound prediction. *Brain Res* 1068, pp. 194–204. doi: 10.1016/j.brainres.2005.11.017.
- Baer, L. H., Thibodeau, J. L. N., Gralnick, T. M., Li, K. Z. H., & Penhune, V. B. (2013). The role of musical training in emergent and event-based timing. *Front Hum Neurosci* 7(191), pp. 1–10. doi: 10.3389/fnhum.2013.00191.
- Bahr, N., Christensen, C. A., & Bahr, M. (2005). Diversity of accuracy profiles for absolute pitch recognition. *Psychol Music* 33(1), pp. 58–93. doi: 10.1177/0305735605048014.
- Baldeweg, T., Klugman, A., Gruzelier, J., & Hirsch, S. R., (2004). Mismatch negativity potentials and cognitive impairment in schizophrenia. *Schizophr Res* 69, pp. 203–217. doi: 10.1016/j.schres.2003.09.009.
- Bartlett, J. C., & Dowling, W. J. (1980). Recognition of transposed melodies: A key-distance effect in developmental perspective. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 6, pp. 501–515.

doi: 10.1037/0096-1523.6.3.501.

Baumann, S., Koeneke, S., Schmidt, C.F., Meyer, M., Lutz, K., & Jancke, L. (2007). A network for audio–motor coordination in skilled pianists and non-musicians. *Brain Res* 1161, pp. 65–78. doi: 10.1016/j.brainres.2007.05.045.

Baumgartner, T., Esslen, M., & Jäncke, L. (2006). From emotion perception to emotion experience: emotions evoked by pictures and classical music. *Int J Psychophysiol* 60, 34–43. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2005.04.007.

Baumgartner, T., Lutz, K., Schmidt, C. F., & Jäncke, L. (2006). The emotional power of music: how music enhances the feeling of affective pictures. *Brain Res* 1075, pp. 151–164. doi: 10.1016/j.brainres.2005.12.065.

Bentin, S., McCarthy, G., & Wood, C. C. (1985). Event-related potentials, lexical decision and semantic priming. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 60(4), pp. 343–355. doi: 10.1016/0013-4694(85)90008-2.

Chandrasekaran, B., Krishnan, A., & Gandour, J. T. (2007). Experience-dependent neural plasticity is sensitive to shape of pitch contours. *Neuroreport* 18(18), pp. 1963–1967.

Chen, J. L., Rae, C., & Watkins, K. E. (2012). Learning to play a melody: an fMRI study examining the formation of auditory-motor associations. *Neuroimage* 59, pp. 1200–1208. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.08.012.

Chennu, S. & Bekinschtein, T. A. (2012). Arousal modulates auditory attention and awareness: insights from sleep, sedation, and disorders of consciousness. *Front Psychol* 3(65), pp. 1–9. doi: 10.3389/fpsyg.2012.00065

Cuddy, L. L., & Cohen, A. J. (1976). Recognition of transposed melodic sequences. *Q J Exp Psychol* 28, pp. 255–270. doi: 10.1080/14640747608400555.

Daltrozzo, J., & Schön, D. (2008). Conceptual processing in music as revealed by N400 effects on words and musical targets. *J Cogn Neurosci* 21(10), pp. 1882–1892. doi: 10.1162/jocn.2009.21113.

- de Gelder, B., Böcker, K. B. E., Tuomainen, J., Hensen, M., & Vroomen, J. (1999). The combined perception of emotion from voice and face: early interaction revealed by human electric brain responses. *Neurosci Lett* 260, pp. 133–136. doi: 10.1016/S0304-3940(98)00963-X.
- de Gelder, B., & Vroomen, J. (2000). The perception of emotion by ear and by eye. *Cogn Emot* 14(3), pp. 289–311. doi: 10.1080/026999300378824.
- Dellacherie, D., Roy, M., Hugueville, L., Peretz, I., & Samson, S. (2011). *Psychophysiol* 48(3), pp. 1–13. doi: 10.1111/j.1469-8986.2010.01075.x.
- Dowling, W. J. (1978). Scale and contour: Two components of a theory of memory for melodies. *Psychol Rev* 85, pp. 341–354. doi: 10.1037/0033-295X.85.4.341.
- Duncan, C. C., Barry, R. J., Connolly, J. F., Fischer, C., Michie, P. T., Näätänen, R., Polich, J., Reinvang, I., & Petten, C. V. (2009). Event-related potentials in clinical research: guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. *Clin Neurophysiol* 120, pp. 1883–1908. doi:10.1016/j.clinph.2009.07.045.
- Dunlap, K. (1910). Reactions on rhythmic stimuli, with attempt to synchronize. *Psychol Rev* 17, pp. 399–416. doi: 10.1037/h0074736.
- Eldridge, M., Saltzman, E., & Lahav, A. (2010). Seeing what you hear: Visual feedback improves pitch recognition. *Eur J Cogn Psychol* 00(00), pp. 1–14. doi: 10.1080/09541440903316136.
- Ericsson, K.A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychol Rev* 100(3), pp. 363–406. doi: 10.1037/0033-295X.100.3.363.
- Evans, K. K. & Treisman, A. (2010). Natural cross-modal mappings between visual and auditory features. *Journal of Vision* 10(1):6, pp. 1–12. doi: 10.1167/10.1.6.
- Fritz, T., Jentschke, S., Gosselin, N., Sammler, D., Peretz, I., Turner, R., Friederici, A. D., & Koelsch, S. (2009). Universal recognition of three basic emotions in music. *Curr Biol* 19, pp. 573–576. doi: 10.1016/j.cub.2009.02.058.

- Fujisaki, W. & Kashino, M. (2002). The basic hearing abilities of absolute pitch possessors. *Acoust Sci Technol* 23 (2), pp. 77–83. doi: 10.1250/ast.23.77.
- Gabrielsson, A., & Lindström, E. (2001). The influence of musical structure on emotional expression. In: P. N. Juslin, & J. A. Sloboda (Eds.), *Music and emotion: Theory and research* (pp. 223–248). New York: Oxford University Press.
- Gagnon, L., & Peretz, I. (2003). Mode and tempo relative contribution to “happy–sad” judgements in equitone melodies. *Cogn Emot* 17(1), pp. 25–40. doi: 10.1080/02699930302279.
- Galbraith G. C., Bhuta, S. M. Choate, A. K., Kitahara, J. M., & Thomas, A. M. (1998). Brain stem frequency-following response to dichotic vowels during attention. *Neuroreport* 9(8), pp. 1889–1893.
- Goerlich, K., Witteman, J., Aleman, A., & Martens, S. (2011). Hearing feelings: affective categorization of music and speech in alexithymia, an ERP study. *PLoS One* 6(5), e19501. doi: 10.1371/journal.pone.0019501.
- Gosselin, N., Peretz, I., Johnson, E., & Adolphs, R. (2007). Amygdala damage impairs emotion recognition from music. *Neuropsychologia* 45(2), pp. 236–244. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.07.
- Gottwald, B., Mihajlovic, Z., Wilde, B., Mehdorn, H. M. (2003). Does the cerebellum contribute to specific aspects of attention? *Neuropsychologia* 41, pp. 1452–1460. doi:10.1016/S0028-3932(03)00090-3.
- Grossmann, T., Striano, T., & Friederici, A. D. (2006). Crossmodal integration of emotional information from face and voice in the infant brain. *Dev Sci* 9(3), pp. 309–315. doi: 10.1111/j.1467-7687.2006.00494.x.
- Haenschel, C., Vernon, D.J., Dwivedi, P., Gruzelier, J. H., & Baldeweg, T., (2005). Event-related brain potential correlates of human auditory sensory memory-trace formation. *J Neurosci* 25, pp. 10494–10501. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1227-05.2005.

Hannon, E. & Trainor, L. J. (2008). Music acquisition: effects of enculturation and formal training on development. *Trends Cogn Sci* 11(11), pp. doi:10.1016/j.tics.2007.08.008.

Hasegawa, A., Okanoya, K., Hasegawa, T., & Seki, Y. (2010). Rhythmic synchronization tapping to an audio–visual metronome in budgerigars. *Sci Rep* 1(120), pp. 1–8. doi: 10.1038/srep00120.

Haueisen., J. & Knösche, T. R. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *J Cogn Neurosci* 13(6), pp. 786–792. doi: 10.1162/08989290152541449.

保前文高・多賀巖太郎(2008). 言葉と音楽を育む赤ちゃんの脳 小泉英明(編)恋う・癒す・極める 脳科学と芸術 工作舎 pp. 101–116

Jolij, J., & Meurs, M. (2011). Music alters visual perception. *PLoS One* 6(4), e18861. doi: 10.1371/journal.pone.0018861.

Katahira, K., Abla, D., Masuda, S., & Okanoya, K., (2008). Feedback-based error monitoring processes during musical performance: An ERP study. *Neurosci Res* 61, pp. 120–128. doi:10.1016/j.neures.2008.02.001.

Kawakami, A., Furukawa, K., Katahira, K., Kamiyama, K., & Okanoya, K. (2013). Relations between musical structures and perceived and felt emotions. *Music Percept* 30(4), pp. 407–418.

Koelsch, S. (2011). Towards a neural basis of processing musical semantics. *Phys Life Rev* 8, pp. 89–105. doi: 10.1016/j.plrev.2011.04.004.

Koelsch, S., Kasper, E., Sammler, D., Schulze, K., Gunter, T., & Friederici, A. D. (2004). Music, language and meaning: brain signatures of semantic processing. *Nat Neurosci* 7(3), pp. 302–307. doi: 10.1038/nn1197.

Kraus, N., & Chandrasekaran, B. (2006). Music training for the development of auditory skills. *Nature Rev Neurosci* 11, pp. 599–605. doi:10.1038/nrn2882.

Kraus, N., McGee, T., Carrell, T. D., King, C., Tremblay, K., & Nicol, T. (1995). Central auditory system plasticity associated with speech discrimination training. *J Cogn Neurosci*

7(1), pp. 25–32.

Kreifelts, B., Ethofer, T., Grodd, W., Erb, M., & Wildgruber, D. (2007). Audiovisual integration of emotional signals in voice and face: An event-related fMRI study. *NeuroImage* 37, pp. 1445–1456. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.06.020.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207(4427), pp. 203–205.

Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature* 307, pp. 161–163. doi: 10.1038/307161a0.

Lahav, A., Boulanger, A., Schlaug, G., & Saltzman, E. (2005). The power of listening: auditory–motor interactions in musical training. *Ann N Y Acad Sci* 1060, pp. 189–194. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4822-06.2007.

Lahav, A., Saltzman, E., & Schlaug, G. (2007). Action representation of sound: audiomotor recognition networks while listening to newly acquired actions. *J Neurosci* 27, pp. 308–314. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4822-06.2007.

Lappe, C, Herholz, S. C., Trainor, L. J., & Pantev, C. (2008). Cortical plasticity induced by short-term unimodal and multimodal musical training. *J Neurosci* 28(39), pp. 9632–9639. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2254-08.2008.

Leaver, A. M., & Halpern, A. R. (2004). Effects of training and melodic features on mode perception. *Music Percept* 22(1), pp. 117–143. doi: 10.1525/mp.2004.22.1.117.

Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., & Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 33(5), pp. 1189–1207. doi: 10.1037/0096-1523.33.5.1189.

Lindström, L, Paavilainen, P, Kujala, T, & Tervaniemi (2012). Processing of audiovisual associations in the human brain: dependency on expectations and rule complexity. *Front Psychol* 3(159), pp. 1–6. doi: 10.3389/fpsyg.2012.00159.

Logeswaran, N., & Bhattacharya, J. (2009). Crossmodal transfer of emotion by music.

Neurosci Lett 455, pp. 129–133. doi: 10.1016/j.neulet.2009.03.044.

Macmillan, J. (2004). Successful memorizing. *Piano Professional* (September), pp. 6–8.

Margulis, E. H., Mlsna, L. M., Uppunda, A. K., Parrish, T. B., Wong, P. C. M. (2009). Selective neurophysiologic responses to music in instrumentalists with different listening biographies. *Hum Brain Mapp* 30(1), pp. 267–275. doi: 10.1002/hbm.20503

松田眞樹・湯本真人・伊藤憲治・宇野 彰・加我君孝(2002). 楽譜と楽音の照合課題施行時の誘発脳磁場：音高に関する音楽専門家と非音楽家との比較から. *電子情報通信学会技術研究報告*. *TL, 思考と言語* 102(412), pp. 31–35.

McGaugh, J. L. (2003). Memory and emotion: The making of lasting memories. *Columbia Univ Press*. (マッガウ, J. L. 大石高生・久保田競(監訳)(2006). 記憶と情動の脳科学 講談社)

McGurk, H. & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature* 264, pp. 746–748. doi: 10.1038/264746a0.

Miyake, Y., Onishi, Y & Pöppel, E. (2004). Two types of anticipation in synchronization tapping. *Acta Neurobiol Exp* 64, pp. 415–426.

Mudd, S. A. (1963). Spatial stereotypes of four dimensions of pure tone. *J Exp Psychol* 66, pp. 347–352. doi: 10.1037/h0040045.

Münte T. F., Altenmüller, E., & Jäncke, L. (2002). The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nat Rev Neurosci* 3, pp. 473–478. doi:10.1038/nrn843.

Näätänen, R. (1979). Orienting and evoked potentials. In H. D. Kimmel, E. H. van Olst, & J. F. Orlebeke (Eds), *The orienting reflex in humans* (pp. 66–75). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Näätänen, R. (1988). Implications of ERP data for psychological theories of attention. *Biol Psychol* 26. pp. 117–163.

Näätänen, R. (1992). Attention and brain function. Hillsdale: L. Erlbaum Associates.

Näätänen R., Gaillard, A. W. K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychol* 42, pp. 313–29.

Näätänen, R., Tervaniemi, M., Sussman, E., Paavilainen, P., Winkler, I. (2001). 'Primitive intelligence' in the auditory cortex. *Trends Neuroscience* 24(5), pp. 283–288.

Näätänen, R. & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychol Bull* 125(6), pp. 826– 859. doi: 10.1037/0033-2909.125.6.826.

Otten, L. J., Alain, C., & Picton, T. W. (2000). Effects of visual attentional load on auditory processing. *Neuroreport* 11(4), pp. 875–880.

Painter, J. G., & Koelsch, S. (2011). Can out-of-context musical sounds convey meaning? An ERP study on the processing of meaning in music. *Psychophysiol* 48, pp. 645–655. doi: 0.1111/j.1469-8986.2010.01134.x.

Paller, K. A., McCarthy, G., & Wood, C. C. (1992). Event-related potentials elicited by deviant endings to melodies. *Psychophysiology* 29(2), pp. 202–206.

Pantev, C., Roberts, L. E., Schulz, M., Engelien, A., & Ross, B. (2001). Timbre-specific enhancement of auditory cortical representations in musicians. *Neuroreport* 12, pp. 169–174.

Pantev, C., Lappe, C., Herholz, S.C., & Trainor, L. (2009). Auditory-somatosensory integration and cortical plasticity in musical training. *Ann N Y Acad Sci* 1169, pp. 143–150. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04588.x.

Paraskevopoulos, E., Kuchenbuch, A., Herholz, S. C., & Pantev, C. (2012). Musical expertise induces audiovisual integration of abstract congruency rules. *J Neurosci* 32(50), pp. 18196 – 18203.

Peretz, I, Champod, A. S., & Hyde, K. (2003). Varieties of musical disorders the Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 999, pp. 58–75. doi: 10.1196/annals.1284.006.

Peretz, I. & Coltheart, M. (2003). Modularity of music processing. *Nat Neurosci* 6(7), pp.

688–691. doi: 10.1038/nm1083.

Peretz, I., Gagnon, L., & Bouchard, B. (1998). Music and emotion: perceptual determinants, immediacy, and isolation after brain damage. *Cognition* 68, pp. 111–141. doi: 10.1016/S0010-0277(98)00043-2.

Polich, J. (1987). Task difficulty, probability, and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 68, pp. 311–320.

Polich J. (2007). Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clin Neurophysiol* 118, pp. 2128–2148. doi:10.1016/j.clinph.2007.04.019.

Polich, J. (2012). Neuropsychology of P300. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds). Oxford handbook of event-related potential components. *New York: Oxford University Press*.

Polich, J. & Kok, A. (1995). Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review. *Biol Psychol* 41(2), pp. 103–146.

Pourtois, G., Debatisse, D., Despland, P. A., & de Gelder, B. (2002). Facial expressions modulate the time course of long latency auditory brain potentials. *Cogn Brain Res* 14, pp. 99–105. doi: 10.1016/S0926-6410(02)00064-2.

Pourtois, G., de Gelder, B., Vroomen, J., Rossion, B., & Crommelinck, M. (2000). The time-course of intermodal binding between seeing and hearing affective information. *Neuroreport* 11(6), pp. 1329–1333.

Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychon Bull Rev* 12 (6), pp. 969-992.

Repp, B. H. & Doggett, R. (2007). Tapping to a very slow beat: A comparison of musicians and nonmusicians. *Music Percept* 24(4), pp. 367–376. doi: 10.1525/MP.2007.24.4.367.

Repp, B. H. & Knoblich, G. (2007). Action can affect auditory perception. *Psychol Sci* 18(6), pp. 6–7. doi: 10.1111/j.1467-9280.2007.01839.x.

Repp, B. H. & Knoblich, G. (2009). Performed or observed keyboard actions affect pianists'

judgements of relative pitch. *Q J Exp Psychol* 62(11), pp. 2156–2170. doi: 10.1080/17470210902745009.

Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B. L., Umiltà, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: the SMARC effect. *Cognition* 99(2), pp. 113–129. doi: 10.1016/j.cognition.2005.01.004.

Sams, M., Paavilainen, P., Alho, K., & Näätänen, R. (1985). Auditory frequency discrimination and event-related potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 62, pp. 437–448.

Schön, B. & Besson, M. (2002). Processing pitch and duration in music reading: a RT–ERP study. *Neuropsychologia* 40, pp. 868–878. doi: 10.1016/S0028-3932(01)00170-1.

Sloboda, J. A. (2000). Individual differences in music performance. *Trends Cogn Sci* 4(10), pp. 397–403.

Snyder, J. S., Hannon, E. E., Large, E. W., & Christiansen, M. H. (2006). Synchronization and continuation tapping to complex meters. *Music Percept* 24(2), pp. 135–146. doi: MP.2006.24.2.135.

Sollberger, B., Reber, R., & Eckstein, D. (2003). Musical chords as affective priming context in a word-evaluation task. *Music Percept* 20(3), pp. 263–282. doi: 10.1525/mp.2003.20.3.263.

Spreckelmeyer, K. N., Kutas, M., Urbach, T. P., Altenmüller, E., & Münte, T. F. (2006). Combined perception of emotion in pictures and musical sounds. *Brain Res* 1070, pp. 160–170. doi: 10.1016/j.brainres.2005.11.075.

Stein, B. E., London, N., Wilkinson, L. K., & Price, D. D. (1996). Enhancement of perceived visual intensity by auditory stimuli: A psychophysical analysis. *J Cogn Neurosci* 1, pp. 12–24. doi: 10.1162/jocn.1996.8.6.497.

Steinbeis, N., & Koelsch, S. (2008). Comparing the processing of music and language meaning using EEG and fMRI provides evidence for similar and distinct neural representations. *PLoS One* 3(5), e2226. doi: 10.1371/journal.pone.0002226.

- Steinbeis, N., & Koelsch, S. (2011). Affective priming effects of musical sounds on the processing of word meaning. *J Cogn Neurosci* 23(3), pp. 604–621. doi: 10.1162/jocn.2009.21383.
- Tan, S. L., Spackman, M. P., & Bezdek, M. A. (2007). Viewers' interpretations of film characters' emotions: effects of presenting film music before or after a character is shown. *Music Percept* 25(2), pp. 135–152. doi: 10.1525/mp.2007.25.2.135.
- Teder-Sälejärvi, W. A., Russo, F. D., McDonald, J. J., & Hillyard, S. A., (2005). Effects of congruity on audio-visual multimodal integration. *J Cogn Neurosci* 17(9), pp. 1396–1409. doi: 10.1162/0898929054985383.
- Tervaniemi, M., Rytönen, M., Schröger, E., Ilmoniemi, R. J., & Näätänen, R. (2001). Superior formation of cortical memory traces for melodic patterns in musicians. *Learn Mem* 8(295), pp. 295–300. doi: 10.1101/lm.39501.
- Tierney, A. & Kraus, N. (2013). The ability to move to a beat is linked to the consistency of neural responses to sound. *J Neurosci* 33(38), pp. 14981–14988.
- Trainor, L. J., & Corrigall, K. A. (2010). Music acquisition and effects of musical experience. In: M. R. Jones, R. R. Fay, & A. N. Popper (Eds.), *Springer handbook of auditory research: Music perception* (pp. 89–128). Heidelberg, Germany: Springer.
- Trehub, S. E., Trainor, L. J., & Unyk, A. M. (1993). Music and speech perception in the first year of life. In H. W. Reese & L. P. Lipsitt (Eds.), *Advances in child development and behavior* (Vol. 24, pp. 1–35). New York: Academic Press.
- Ullsperger, P., Erdmann, U., Freude, G., & Dehoff, W (2006). When sound and picture do not fit: Mismatch negativity and sensory interaction. *Int J Psychophysiol* 59, pp. 3 – 7. doi:10.1016/j.ijpsycho.2005.06.007.
- Vines, B., Krumhansl, C. L, Wanderley, M., Dalca, I., & Levitin, D. J. (2005). Dimensions of emotion in expressive musical performance. *Ann N Y Acad Sci* 1060, pp. 1–5. doi: 10.1196/annals.1360.052.
- Warren, J. E., Wise, R. J., & Warren, J. D. (2005). Sounds do-able: auditory-motor

transformations and the posterior temporal plane. *Trends Neurosci* 28, pp. 636–643. doi: 10.1016/j.tins.2005.09.010.

Williamson, V. & Stewart, L. (2010). Memory for pitch in congenital amusia: Beyond a fine-grained pitch discrimination problem. *Memory* 18(6), pp. 657–669. doi: 10.1080/09658211.2010.501339.

Widmann, A., Kujala, T., Tervaniemi, M., Kujala, A., & Schröger, E. (2004). From symbols to sounds: Visual symbolic information activates sound representations. *Psychophysiol* 41, pp. 709–715. doi: 10.1111/j.1469-8986.2004.00208.x.

Winkler, I., Reinikainen, K., Näätänen, R. (1993). Event-related brain potentials reflect traces of echoic memory in humans. *Percept Psychophys* 53(4), pp. 443–449. doi: 10.3758/BF03206788.

Zatorre, R. J. (2003). Absolute pitch: a model for understanding the influence of genes and development on neural and cognitive function. *Nat Neurosci* 6, pp. 692–695. doi: 10.1038/nn1085.

Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nat Rev Neurosci* 8, pp. 547–558. doi: 10.1038/nrn2152.

Zentner, M & Eerola, T. (2010). Rhythmic engagement with music in infancy. *Proc Natl Acad Sci U S A* 107(3), pp. 5768–5773. doi: 10.1073/pnas.1000121107.

本研究，実験 1 と 4 の研究成果は，以下の通り出版されている：

1. 実験 1

Kamiyama, K., Katahira, K., Abla, D., Hori, K., & Okanoya, K. (2010). Music playing and memory trace: Evidence from event-related potentials. *Neurosci Res* 67, pp. 334–340. doi:10.1016/j.neures.2010.04.007.

2. 実験 4

Kamiyama, K., S., Abla, D., Iwanaga, K., & Okanoya, K. (2013). Interaction between musical emotion and facial expression as measures by event-related potentials. *Nuropsychologia* 51, pp. 500–505. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.031.